



الآلات والقيادة الكهربائية



منشورات جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

الآلات والقيادة الكهربائية

الدكتور

محمد عيد المصري

مدرس في قسم هندسة الطاقة

الدكتور

أبي سلمان

أستاذ مساعد في قسم هندسة الطاقة

١٤٣٧ - ١٤٣٨ هـ
٢٠١٦ - ٢٠١٧ م

جامعة دمشق

الفهرس

الموضوع	رقم الصفحة
مقدمة	١٥
الفصل الأول : مفاهيم عامة	١٧
١-١ - أهمية الآلات الكهربائية	١٩
٢-١ - تصنيف الآلات الكهربائية	١٩
٣-١ - المعطيات الاسمية للآلات الكهربائية	٢١
٤-١ - تعريف نظام القيادة الكهربائية	٢٢
٥-١ - المبادئ المغناطيسية للآلات الكهربائية	٢٤
١-٥-١ - العلاقة بين التيار الكهربائي والساحة المغناطيسية	٢٤
٢-٥-١ - قانون أوم في الدارات المغناطيسية	٢٧
٣-٥-١ - منحنيات الخواص المغناطيسية (المغطة)	٢٨
٤-٥-١ - تحديد اتجاه السيلة المغناطيسية في دائرة مغناطيسية	٣٠
٥-٥-١ - الظواهر الكهروضوئية في الآلات الكهربائية	٣١
١-٦-١ - مفهوم الاستطاعة في التيار المتردد: الاستطاعة اللحظية ، الحقيقية ، التخيلية ، الظاهرية	٣٣
الفصل الثاني : خواص نظام القيادة الكهربائية	٤١
١-٢ خواص المحركات الكهربائية	٤٢
١-١-٢ خواص الساتيكية	٤٢
٢-١-٢ خواص الديناميكية	٤٣
٢-٢ خواص الميكانيكية للآليات الصناعية	٤٤
١-٢-٢ الآليات ذات المميزات غير المتعلقة بالسرعة	٤٥
٢-٢-٢ الآليات ذات المميزات الخطية الصاعدة	٤٥
٣-٢-٢ الآليات ذات المميزات غير الخطية الصاعدة	٤٦

٤٧	٢-٢-٤ الآليات ذات المميزات غير الخطية الهابطة
٤٧	٢-٣ المميزات الميكانيكية للمحركات الكهربائية
٤٨	٢-٣-١ الخواص الميكانيكية القاسية مطلقاً
٤٨	٢-٣-٢ الخواص الميكانيكية القاسية
٤٩	٢-٣-٣ الخواص الميكانيكية اللينة
٤٩	٢-٤ الخواص الميكانيكية لمجموعة المحركات والآليات
٥٠	٢-٥ أهمية الخاصية الميكانيكية
٥١	٢-٦ حساب الجزء الميكانيكي لنظام القيادة
٥٦	مسألة محلولة
٦١	الفصل الثالث آلات التيار المستمر
٦٣	٣-١-١ وظيفة آلات التيار المستمر:
٦٣	٣-٢-٢ أجزاء آلة التيار المستمر
٦٥	٣-٣-٣ مبدأ عمل آلة التيار المستمر
٧١	٣-٤-٤ معادلة القوة المحركة الكهربائية
٧٣	٣-٥-٥ عزم آلة التيار المستمر
٧٤	٣-٦-٦ مخطط الاستطاعة
٧٦	٣-٧-٧ معادلة توازن العزم
٧٧	٣-٨-٨ تصنيف آلات التيار المستمر
٧٩	٣-٩-٩ أمثلة محلولة
٨٦	٣-١٠-١ المميزات الكهروميكانيكية والميكانيكية لمحركات التيار المستمر
٨٦	٣-١٠-١ المميزات الطبيعية الكهروميكانيكية والميكانيكية للمحركات ذات التهيج المستقل أو التفرعية

٨٩	٣-١٠-٢- إنشاء المميزات الكهروميكانيكية و الميكانيكية للمحركات ذات التهيج المستقل (الفرعية)
٩٤	٣-١٠-٣- المميزات الكهروميكانيكية و الميكانيكية لمحركات التيار المستمر ذات التهيج التسلسلي والمختلط
٩٨	٣-١١-١- مبادئ تنظيم سرعة محركات التيار المستمر
٩٨	٣-١١-١- تنظيم السرعة عن طريق ربط مقاومة متغيرة على التسلسل مع دائرة المتحرض
١٠٠	٣-١١-٢- تنظيم السرعة عن طريق تغيير قيمة السليالة المغناطيسية
١٠٣	٣-١١-٣- تنظيم سرعة الدوران بتغيير التوتر المطبق على مرابط المتحرض
١٠٩	٣-١٢-١- إقلاع محركات التيار المستمر
١٠٧٩	٣-١٢-١- الإقلاع المباشر
١١٠	٣-١٢-٢- الإقلاع بواسطة المقاومة المتغيرة (مقاومة الإقلاع وتدرجاتها)
١١٢	٣-١٢-٣- الإقلاع عن طريق تغيير توتر التغذية
١١٢	٣-١٢-٤- الدارة التحكيمية المبسطة لإقلاع محركات التيار المستمر ذات التهيج المستقل والفرعية بإضافة مقاومة الإقلاع
١١٤	٣-١٣-١- تشغيل محركات التيار المستمر كعناصر مفرمة (أنظمة الكبح)
١١٤	٣-١٣-١- الكبح باسترجاع الطاقة
١١٥	٣-١٣-٢- طريقة الكبح الديناميكي
١١٧	٣-١٣-٣- طريقة الكبح على التضاد
١٢٦	٣-١٤- الطرائق الحديثة للتحكم بمحركات التيار المستمر

١٢٦	٣-١٤-١ التحكم باستخدام القاطع الفاصل- الواصل والمقاومة المتغيرة
١٢٧	٣-١٤-٢ التحكم باستخدام نظام العمل مولد-محرك
١٢٩	٣-١٤-٣ التحكم باستخدام نظام مقوم موجه- محرك
١٣١	٣-١٤-٤ التحكم النبضي
١٣٧	الفصل الرابع: المحولات الكهربائية
١٣٩	٤-١ تعريف المحول
١٣٩	٤-٢ استخدام المحولات وأهميتها
١٤٠	٤-٣ - بنية المحولات
١٤١	٤-٤ - تصنيف المحولات
١٤٢	٤ - ٥ - نظرية عمل المحول
١٤٢	٤-٥-١- المحول المثالي
١٤٦	٤-٥-٢-المحول الحقيقي
١٤٧	٤-٥-٣- المعادلات العقدية للمحول الحقيقي
١٤٩	٤-٥-٤- نسب القيم الكهربائية من أحد طرفي المحول إلى الطرف الآخر
١٥٢	٤-٥-٥- الدارة الكهربائية المكافئة للمحول
١٥٥	٤-٥-٦- المخطط الشعاعي للمحول
١٥٨	٤-٦- مردود المحول
١٦٠	٤-٧- اختبارات المحول أحادي الطور
١٦٠	٤-٧-١- اختبار المحول أحادي الطور في حالة العمل على فراغ (اللاحمل)
١٦٣	٤-٧-٢- اختبار القصر للمحول أحادي الطور
١٦٥	٤-٧-٣- اختبار التحميل

١٧٤	مسائل عامة غير محلولة
١٧٦	٨-٤ جمل التحويل ثلاثية الطور (المحول ثلاثي الطور)
١٧٨	٩-٤ المحول الذاتي
١٧٩	١-٩-٤ مبدأ العمل
١٨٣	أمثلة محلولة
١٨٥	الفصل الخامس : آلات التيار المتناوب والمميزات الميكانيكية والكهروميكانيكية لمحركات التيار المتناوب
١٨٧	١-٥ مقدمة
١٨٨	٢-٥ الآلات التحريضية
١٨٨	٣-٥ أقسام الآلة التحريضية
١٩٠	٤-٥ مبدأ عمل الآلة التحريضية
١٩١	١-٤-٥ مبدأ عمل المحرك التحريضي
١٩٣	٢-٤-٥ مبدأ عمل المولدة التحريضية
١٩٤	٥-٥ القيم الاسمية للآلات التحريضية..
١٩٥	٦-٥ معادلات المحرك التحريضي و الدارة المكافئة
١٩٥	١-٦-٥ معادلات المحرك التحريضي عند وقوف الدائر
١٩٨	٢-٦-٥ معادلات المحرك التحريضي عند دوران الدائر
٢٠٠	٧-٥ مخطط الاستطاعة للمحرك التحريضي
٢٠٢	٨-٥ عزم المحرك التحريضي
٢٠٣	٩-٥ المميزات الميكانيكية للمحركات التحريضية
٢٠٣	١-٩-٥ المميزات الطبيعية
٢٠٥	٢-٩-٥ إنشاء المميزات الطبيعية
٢٠٧	٣-٩-٥ المميزات الاصطناعية للمحركات التحريضية
٢١١	١٠-٥ إقلاع المحركات التحريضية

٢١١	١-١٠-٥ إقلاع المحركات التحريضية ذات الدائر الملفوف
٢١٢	٢-١٠-٥ إقلاع المحركات التحريضية ذات القفص السنجابي
٢١٣	١-٢-١٠-٥ الإقلاع المباشر للمحركات التحريضية ذات القفص المقصور (السنجابي)
٢١٣	٢-٢-١٠-٥ الإقلاع باستخدام ملفات خانقة
٢١٤	٣-٢-١٠-٥ الإقلاع باستخدام المحولة الذاتية
٢١٥	٤-٢-١٠-٥ الإقلاع باستخدام المفتاح نجمي-مثلي
٢١٧	١١-٥ كبح المحركات التحريضية
٢١٧	١-١١-٥ الكبح بإعادة التوليد
٢١٨	٢-١١-٥ الكبح الديناميكي
٢٢٠	٣-١١-٥ الكبح بالتضاد (تطبيقات)
٢٣٣	الفصل السادس التحكم في تنظيم سرعة دوران المحركات التحريضية
٢٣٥	١-٦ مقدمة
٢٣٦	٢-٦ أنواع الدارات الإلكترونية المستخدمة في تنظيم سرعة دوران المحركات التحريضية
٢٣٩	٣-٦ الطرق المستخدمة في تنظيم سرعة المحركات التحريضية
٢٣٩	١-٣-٦ تغيير عدد الأقطاب في كل من الثابت و الدوار
٢٤١	٢-٣-٦ التحكم بجهد الثابت.
٢٤٣	٣-٣-٦ التحكم بجهد الدوار
٢٤٤	٤-٣-٦ التحكم بالتردد
٢٤٦	٥-٣-٦ التحكم بالجهد و التردد

٢٤٨	٦-٣-٦ تنظيم سرعة المحركات التحريضية عن طريق التحكم بالتيار
٢٥١	٦-٣-٧ التحكم بالجهد ، التيار و التردد
٢٥٥	الفصل السابع : المحركات الخاصة المستخدمة في أنظمة القيادة الكهربائية
٢٥٥	٧-١-١ المحركات التحريضية أحادية الطور
٢٥٦	٧-١-١-١ مبدأ عمل المحركات التحريضية أحادية الطور
٢٥٩	٧-١-٢ الدارة المكافئة للمحرك التحريضي أحادي الطور
٢٦١	٧-١-٣ إقلاع المحرك أحادي الطور
٢٦٤	٧-٢ المحرك الميكروي أحادي الطور ذو الأقطاب المظلمة
٢٦٧	مسألة محلولة
٢٦٩	٧-٣ محركات السيرفو (أو المحركات المنفذة) وأهم أنواعها وطرائق التحكم بالمحركات المنفذة
٢٧١	٧-٤ مولد التآكو اللازامي
٢٧٦	٧-٥ السيلسينات أو جملة الارتباط التزامني
٢٧٦	٧-٥-١ مقدمة
٢٧٧	٧-٥-٢ مبدأ عمل جملة الارتباط التزامنية وبنية السيلسينات
٢٧٩	٧-٥-٣ عمل السيلسين أحادي الطور في نظام التحويل
٢٨٠	٧-٥-٤ تشغيل السيلسينات أحادية الطور في نظام الكشف
٢٨١	٧-٦ المحركات الخطوية
٢٨١	٧-٦-١ مبدأ عمل المحرك الخطوي
٢٨٣	٧-٦-٢ تصنيف المحركات الخطوية
٢٨٣	٧-٦-٢-١ المحرك ذو الممانعة المغناطيسية المتغيرة VR
٢٨٨	٧-٦-٢-٢ المحرك الخطوي ذو المغناطيس الدائم PM

٢٩١	٧-٦-٢-٣ المحركات الخطوبة الهجينة
٢٩٣	الفصل الثامن: اختيار استطاعة المحركات الكهربائية
٢٩٥	٨-١ الشروط العامة لاختيار استطاعة المحركات الكهربائية
٢٩٧	٥-٢ مخططات الحمل
٢٩٧	٨-٢-١ الحمل المستمرة.
٢٩٨	٨-٢-٢ الحمل قصيرة الزمن
٢٩٨	٨-٢-٣ الحمل المنقطعة الدورية
٢٩٩	٨-٣ أنواع المواد العازلة.
٣٠٢	٨-٤ تسخين و تبريد المحركات الكهربائية في حالة الحمل المستمرة
٣٠٦	٨-٥ اختيار استطاعة المحرك من أجل الحمل المستمرة
٣٠٦	٨-٥-١ الحمل المستمرة المنتظمة
٣٠٨	٨-٥-٢ الحمل المستمرة المتغيرة
٣٠٩	٨-٥-٢-١ طريقة الضياعات الوسطية
٣١١	٨-٥-٢-٢ الطرق المكافئة للتيار و العزم و الاستطاعة
٣١٧	٨-٦ تسخين و تبريد المحركات الكهربائية في حالة الحمل قصيرة الزمن
٣٢٠	٨-٧ تسخين و تبريد المحركات في حالة الحمل المنقطعة الدورية
٣٢٢	٨-٨ اختيار استطاعة المحركات الكهربائية من أجل الحمل قصيرة الزمن
٣٢٥	٨-٩ اختيار استطاعة المحركات الكهربائية من أجل الحمل الدورية المنقطعة
٣٣١	الفصل التاسع : الحاكومات الستاتيكية

٣٣٣	مقدمة :
٣٣٣	١-٩ الدارات المنطقية
٣٤٤	٢-٩ الحاكام المنطقية المبرمجة
٣٤٦	١-٢-٩ مكونات الحاكم المنطقي المبرمج
٣٤٩	٢-٢-٩ لغات برمجة الحاكام المنطقية المبرمجة
٣٥١	أمثلة عامة
٣٥٧	ملحق
٣٦١	المصطلحات العلمية
٣٧٠	جدول الرموز المستخدمة
٣٧٥	المراجع

مقدمة

إن الآلات الكهربائية هي محولات كهروميكانيكية ، أي تقوم بتحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية أو العكس .

فالمحرك الكهربائي يحول الطاقة الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية على خرجها تظهر على شكل حركة محوره، وهذه الحركة تنقل إلى الآلة الميكانيكية.

إذا معرفتنا بالمحرك الكهربائي، وبالتالي التحكم به (الإقلاع، تنظيم سرعة، كبح) يمكننا من التحكم بالآلة الميكانيكية المربوطة على محور والمنتجة للعمل المطلوب.

لقد وجدت نظم القيادة الكهربائية استخداماً واسعاً في مجالات الحياة المختلفة، حيث أنها تستهلك أكثر من نصف القدرة الكهربائية المنتجة. فهي تستخدم في التجهيزات المنزلية وفي الآليات الصناعية مثل : آلات نقل البضائع والركاب، وآليات التهوية، وضغط الغازات، وضخ السوائل، وآليات الإنتاج في المصانع ، والأذرع الآلية، والروبوت ، والأفران الكهربائية .

واكبت نظم القيادة الكهربائية التطور الذي حصل على وسائل التحكم، فبدأت باستخدام الوسائل الميكانيكية ثم الكهربائية والالكترونية حتى أصبحت تستخدم وبشكل واسع وسائل التحكم الرقمية مثل المعالج الدقيق والحاكمات المنطقية المبرمجة والحاسوب .

لقد تم إعداد هذا الكتاب لطلاب قسم الميكانيك العام في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية وفق مفردات المنهاج المعتمدة لهذا المقرر .

يتألف هذا الكتاب من تسعة فصول ، تم فيها استعراض بعض المفاهيم المغناطيسية المستخدمة في الآلات الكهربائية، ومبدأ عمل آلات التيار المستمر والمتناوب ومعادلاتها وداراتها المكافئة ، وبالنسبة للآلات الدوارة كيفية التحكم بسرعتها ، إقلاعها وكبحها ، وطرق اختيار محرك لقيادة آلة ميكانيكية .

كما خصص فصل للآلات الخاصة، حيث شرحت مبادئ عمل بعض الآلات الخاصة وداراتها كالمحرك الخطوي ، ومولد السرعة اللائزمني والسيلسينالخ

وفي الفصل الأخير تم شرح الحاكمتات الستاتيكية باستخدام الدارات المنطقية والحاكمات المنطقية المبرمجة ، وتوضيح كيفية استخدامها للتحكم في عمليات تشغيل وكبح وعكس اتجاه دوران المحركات الكهربائية .
نهدي هذا العمل إلى طلابنا الأعزاء ونشكر كل من أسهم في إخراج هذا العمل مع شكر خاص للأستاذ الدكتور كمال ناجي لإسهامه في إغناء وإخراج هذا العمل .

المؤلفان





الفصل الأول مفاهيم عامة

٢-١- أهمية الآلات الكهربائية :

إن استخدام الآلات الكهربائية مازال آخذاً بالاتساع في مختلف فروع الصناعة ومناحي الحياة العملية المختلفة، ابتداءً من زيادة الطلب على الطاقة الكهربائية، وظهور مجالات متعددة جديدة لاستهلاك هذه الطاقة.

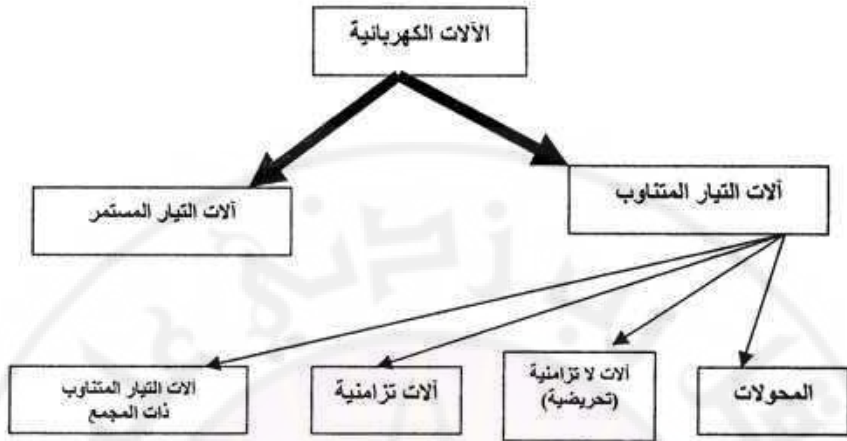
ويأتي هذا التوسع الكبير باستخدام الآلات الكهربائية في الصناعة والاحتياجات المنزلية والطبية نتيجة للخصائص الإيجابية التي تمتلكها هذه الآلات وهي :
المردود العالي، سهولة التركيب والاستثمار، سهولة الصيانة، قلة تلوثها للبيئة، صغر كتلتها وأبعادها الحجمية، الوثوقية.

ويتميز العصر الحالي بالتطور الكبير لصناعة الآلات الكهربائية ويتزايد باطراد عدد الآلات المنتجة، كما يتنامى حجم الآلة الواحدة واستطاعتها وفي الوقت ذاته يجري باستمرار تحسين تصميم الآلة الكهربائية، ورفع وثوقيتها، وخفض كتلتها النوعية .
ومن جهة أخرى تتوسع الآن صناعة الآلات الكهربائية الميكروية المخصصة لتجهيزات الأتمتة والتحكم المختلفة والأجهزة الكهربائية المنزلية والطبية.

٢-١- تصنيف الآلات الكهربائية :

يمكن تصنيف الآلات الكهربائية حسب مجالات الاستخدام، نوع التيار ، مبدأ العمل،
الاستطاعة وسرعة الدوران الخ...

سندرس تصنيف الآلات الكهربائية حسب نوع التيار ومبدأ العمل . حيث تصنف الآلات الكهربائية حسب نوع التيار إلى آلات التيار المتناوب، وآلات التيار المستمر .
وتقسم آلات التيار المتناوب على أساس مبدأ عملها وخصائصها الكهرومغناطيسية إلى محولات، آلات لاتزامنية (تحريرية)، آلات تزامنية وآلات التيار المتناوب ذات المجمع .



الشكل (1-1)

١-٢-١- آلات التيار المستمر D.C:

تستخدم آلات التيار المستمر بصورة رئيسية كمحركات كهربائية في جمل القيادة والتحكم التي تتطلب تنظيم سرعة دوران في حدود واسعة، كما تستخدم هذه المحركات عندما تكون منابع التغذية هي المدخرات الكهربائية (محركات الغواصات، والمركبات الفضائية... الخ) أما المولدات فغالباً ما تستخدم لتغذية تجهيزات الاتصالات ولشحن المدخرات، كما تستخدم كمنابع تغذية أساسية في وسائط النقل.

١-٢-٢- المحولات الكهربائية :

تستخدم على نطاق واسع من أجل تغيير التوتر والتيار في نظم الطاقة الكهربائية وتوزيعها وأجهزة التقويم وفي تجهيزات الاتصال والأتمتة والحواسيب وتقنيات القياس.

١-٢-٣- الآلات اللازامنية (التحريضية) :

تستخدم الآلات اللازامنية بشكل رئيسي كمحركات كهربائية ثلاثية الطور. ويمكن بفضل بساطة تركيب هذه الآلات ووثوقيتها العالية استعمالها في مختلف مجالات

الصناعة لتدوير آلات التشغيل المختلفة وآلات الرفع والحفر والضواغط والمراوح. أما في جمل التنظيم الآلية فتستخدم على نطاق واسع المحركات التحريضية أحادية الطور أو ثنائية الأطوار بالإضافة إلى مولدات التاكو اللاتزامنية.

١-٢-٤ - الآلات التزامنية :

تستخدم بصورة أساسية كمولدات تيار متناوب (منوبات) ذات تردد نظامي في المحطات الكهربائية، مولدات ذات تردد عال في منابع التغذية المستقلة (في البواخر والطائرات...الخ). كما تستعمل أيضاً في جمل القيادة ذات الاستطاعة الكبيرة كمحركات تزامنية.

١-٢-٥ - آلات التيار المتناوب ذات المجمع :

وهي ذات استخدامات نادرة نسبياً لأنها تتميز ببنية معقدة، وتحتاج إلى صيانة مستمرة. تستخدم هذه الآلات بصورة أساسية كمحركات كهربائية.

١-٣ - المعطيات الاسمية للآلات الكهربائية :

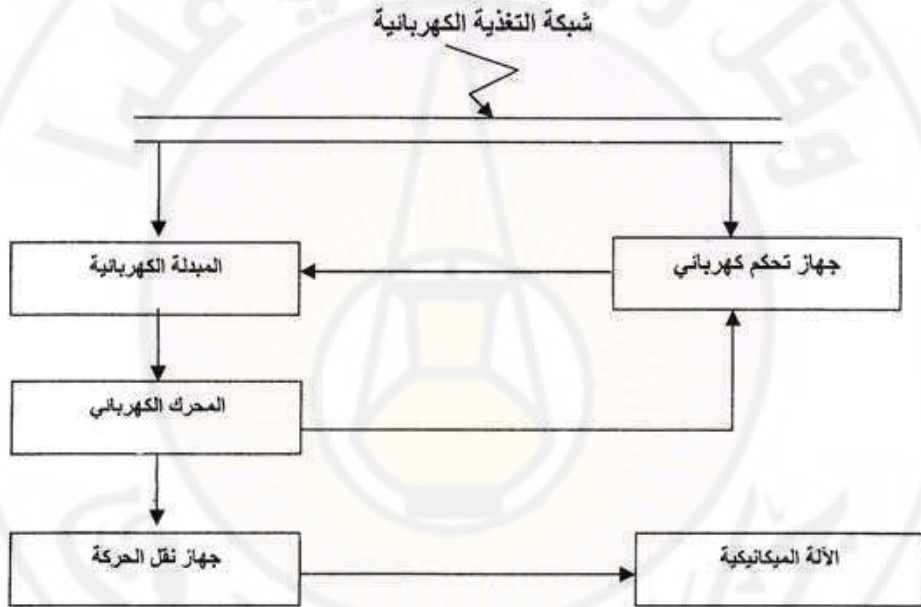
تزود كل آلة كهربائية بلوحة اسمية معدنية مثبتة على هيكلها الخارجي . يشار في هذه اللوحة عادة إلى طراز الآلة ومعطياتها الاسمية التي تؤخذ كأساس لتحديد شروط عمل الآلة الكهربائية ومواصفاتها أثناء التصميم.

المعطيات الاسمية : تشمل هذه المعطيات الاستطاعة، التوتّر، التيار، سرعة الدوران، التردد، المردود، عدد الأطوار، معامل الاستطاعة ونظام العمل (دائماً، متقطعاً...الخ)

كما يشار في اللوحة الاسمية إلى الجهة الصانعة، وتاريخ إنتاج الآلة ، ودرجة العازلية وبعض المعطيات الإضافية التي تتوفر الحاجة لها عند التركيب والاستثمار (الوزن، طريقة توصيل الملفات...الخ) ويمكن استخدام مصطلح Nominal للتعبير عن مقادير أخرى غير مذكورة في جدول المواصفات الفنية لكنها تميز حالة العمل الاسمية كعزم الدوران الاسمي Nominal torque والانزلاق الاسمي Nominal Slip الخ.

١-٤- تعريف نظام القيادة الكهربائية Electric drive :

يعرّف نظام القيادة الكهربائية كمايلي : هو جهاز آلي يحول الطاقة الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية ، ويتحكم كهربائياً بقيمة الطاقة الميكانيكية المحولة. ويبين الشكل (2-1) المخطط الصندوقي لنظام القيادة الكهربائية بشكله المبسط والذي يتألف من :



الشكل (2-1) المخطط الصندوقي لنظام القيادة الكهربائية [10]

- شبكة التغذية الكهربائية Power Supply :

وتكون إما من النوع المتناوب أو المستمر ، فإذا كانت من النوع المتناوب فإنها تكون عادة ذات التوتر المنخفض المعمول به (٢٢٠/٣٨٠ فولت) مثلاً . وأحياناً يكون توترها أعلى أو أخفض من توتر شبكة التغذية العامة وتقوم هذه الشبكة بتغذية المحرك الكهربائي من خلال ما يسمى المبدلة الكهربائية .

- المبدلة الكهربائية Electrical converter :

وتعمل على تغيير جهد الشبكة المغذية للمحرك أو ترددها أو تغيير كل من الجهد والتردد، وبالتالي نستطيع التحكم وتنظيم سرعة المحرك وذلك بالنسبة للمحركات الكهربائية التي تعمل على التيار المتناوب، أما المحركات التي تعمل على التيار المستمر، فتقوم المبدلة بدور تقويم التيار بالإضافة إلى التحكم بالجهد، وبالتالي التحكم وتنظيم سرعة هذه المحركات.

- المحرك الكهربائي Electrical motor :

إن المحركات الكهربائية المستخدمة في أنظمة القيادة الكهربائية متنوعة، ولكنها بشكل عام تعمل على التيار المتناوب الثلاثي، أو أحادي الطور، أو أنها تعمل على التيار المستمر.

- جهاز نقل الحركة Transmissior system :

وتسمى أيضاً المبدلة الميكانيكية، وتتلخص وظيفتها في تغيير وتعديل السرعة المقدمة على دائر المحرك، وكذلك ربط هذا الدائر بالآلة الميكانيكية.

- الآلة الميكانيكية (عضو الإنتاج) Working Nmember :

ويقصد بالآلة الميكانيكية أي جهاز ميكانيكي يؤدي حركة ما بسيطة أو معقدة نسبياً.

- جهاز التحكم الكهربائي :

يعمل هذا الجهاز على قيادة المبدلة الكهربائية بحيث تستطيع تغيير قيم جهد الخرج، أو تردد الخرج، وقد يكون مؤلفاً من دائرة مقاومات (R, L, C) ، أو من دائرة الكترونية تعمل على الترانزستور أو الدارات التكاملية (IC) ، أو المغناطيسية. وفي حال كون وظيفة القيادة الآلية تكمن في تنظيم سرعة المحرك الكهربائي مهما تغيرت الحمولة على الآلة التي يديرها في مجال العمل النظامي، بحيث تبقى السرعة ثابتة، فإن جهاز التحكم يستطيع إعطاء الإشارات اللازمة للمبدلة بحيث تغير من قيم الجهد أو التردد على الخرج للمحافظة على سرعة المحرك ثابتة. ويتم ذلك من خلال إيصال المعلومات المستمدة عن سرعة المحرك، أو القوة المحركة الكهربائية المتحرضة، أو

تيار الحملولة المار بدارة المتحرض، وتحويل هذه القيم إلى إشارات مستمرة أو متقطعة مناسبة لجهاز التحكم بحيث يعمل هذا الجهاز على مقارنة هذه الإشارات مع الإشارة المرجعية المطلوبة ويعطي حاصل فرقها زيادة أو نقصاناً إلى المبدلة من خلال ما يسمى بالتغذية الخلفية. [10]

١-٥-١- المبادئ المغناطيسية للآلات الكهربائية :

سوف نتعرف في هذا الفصل على أهم المبادئ المغناطيسية الأساسية وعلاقاتها التي تستخدم في الدارات المغناطيسية، وخاصة ما شابه منها الدارة المغناطيسية لآلة كهربائية دوارة، ونظراً للاعتماد الأساسي في جميع الآلات الكهربائية في توليد السيالة المغناطيسية اللازمة على الأثر المغناطيسي للتيار الكهربائي، فإننا نقتصر في هذه الدراسة على هذا النوع من الدارات المغناطيسية، كما أن الارتباط القائم بين القوة المحركة الكهربائية وتغيرات السيالة المغناطيسية قيمة واتجاهاً من خلال قوانين التحريض الكهرطيسي يستدرجنا إلى التعرف على كيفية إيجاد هذه التغيرات في حيز معين.

١-٥-١- العلاقة بين التيار الكهربائي والساحة المغناطيسية :

تعرف العلاقة التي تربط بين مجموعة من التيارات الكهربائية المارة في ناقل أو عدة نواقل وبين شدة الساحة المغناطيسية الناتجة عنها بعلاقة أمبير، وتعطى هذه العلاقة بالصيغة الرياضية التالية :

$$\int H dL = \sum_1^N I$$

حيث :

H- شدة الحقل المغناطيسي على مسار ما مغلق وتقدر بالأمبير/المتر . $\left[\frac{A}{m} \right]$

dL- عنصر الطول من هذا المسار ويقدر بالمتر [m].

$\sum_1^N I$ - المجموع الجبري للتيارات التي تخترق هذا المسار ويقدر بالأمبير [A].

أي يتم حساب شدة الساحة المغناطيسية الناتجة عن تيار أو مجموعة تيارات كهربائية بإيجاد التكامل الخطي لشدة الساحة هذه على أحد مساراتها المغلقة، وتعتبر هذه العلاقة أساس حساب الدارات المغناطيسية .

تطبيق :

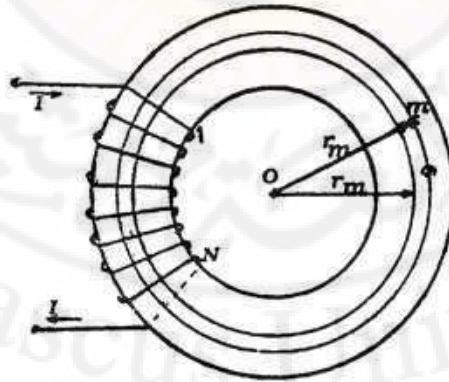
لدينا وشيعة مصنوعة من ناقل نحاسي عدد لفاتها N ملفوفة على حلقة حديدية يمر فيها التيار I .

المطلوب: حساب شدة الحقل المغناطيسي ضمن الناقل المغناطيسي (الحلقة الحديدية) .

الحل :

يعتبر الحديد من أنفذ المواد لخطوط الساحة المغناطيسية، فعندما نلف وشيعة ما على حلقة حديدية فإن جميع خطوط الساحة الناتجة من نواقل هذه الوشيعة تتمركز (تتعرض) وتمر ضمن هذه الحلقة، وتشكل مسارات مغلقة ضمنها، ونادراً ما تخرج هذه الخطوط لاستكمال دائرة خارج الحلقة.

أي نستطيع أن نقول إن الحلقات الحديدية المغلقة يمكن عدها دارات مغناطيسية مثالية. يمكن حساب شدة الساحة في الحلقات سواء أكانت الوشيعة ملفوفة على كامل الحلقة أو جزء منها.



الشكل (3-1) [4]

يبين الشكل (3-1) دائرة مغناطيسية عبارة عن حلقة حديدية ملفوف على جزء منها وشيعة عدد لفاتها N لفة يمر فيها تيار I .

لحساب شدة الساحة في نقطة m من هذه الحلقة نأخذ مساراً دائرياً يمر من m .

$$\int H dL = H_m \int dL_m = N.I \quad \dots\dots\dots(1-2)$$

$$H_m = \frac{N.I}{2\pi r m} \quad \dots\dots\dots(1-3)$$

وهي نفس العلاقة التي نحصل عليها فيما لو كانت الوشيعة ملفوفة على كامل الحلقة وهذه العلاقة تعطي شدة الساحة النقطية ضمن الحلقة.

إن المقدار $2\pi r m$ يمثل طول مسار خط السيالة الوسطي المار من m ولنسميه L_m أي :

$$H_m = \frac{N.I}{L_m}$$

كما نسمي كثافة السيالة B_m ومقدر بـ $\frac{Wb}{m^2}$ ويبر مترمربع أو تسلا [Ts].

$$B_m = \mu_m . H_m$$

μ_m - عامل النفاذية المغناطيسية ويقدر بـ $\frac{H}{m}$ هنري/متر والهنري هو

فولت ثانية/أمبير. إن شدة الساحة في مركز الحلقة حيث L طول هذه الحلقة هي أيضاً:

$$H = \frac{N.I}{L} \quad \dots\dots\dots(1-4)$$

نعتبر هذه القيمة الأخيرة بمثابة شدة الساحة الوسطية ضمن الحلقة وفي حسابات الدارات المغناطيسية، ومهما كان شكل الدارة الحديدية دائرياً أو مربعاً أو مستطيلاً أو أي شكل آخر فالطول L في تلك الدارات يمثل طول المسار الرئيسي لخطوط السيالة والذي يؤخذ دوماً منطبقاً على الخط المتوسط في تلك الدارات.

١-٥-٢- قانون أوم في الدارات المغناطيسية :

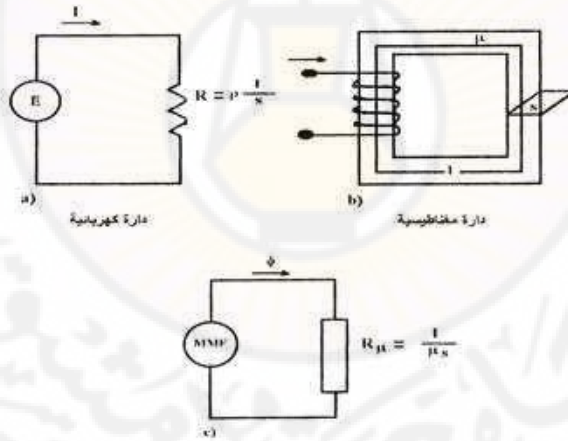
تعرّف علاقة أوم في الدارات الكهربائية بأنها العلاقة التي تربط بين القوة المحركة الكهربائية ذات قيمة E ، المطبقة على دائرة كهربائية ذات مقاومة قيمتها R ، وبين التيار I المار في تلك الدارة بقانون أوم بالدارات الكهربائية ويكتب بالشكل :

$$E = I \cdot R \dots\dots\dots (1-5)$$

$$I = \frac{E}{R}$$

وإذا استبدلت R بقيمتها بدلالة طول السلك L المشكلة منه ، ومقطعه ، والمقاومة النوعية له ρ فإننا نكتب :

$$I = \frac{E}{\frac{L}{\rho}}$$



الشكل (4-1)

وبالعودة إلى علاقة كثافة السليالة المغناطيسية

$$B = \mu \cdot H = \frac{\phi}{S} \left[\frac{Wb}{m^2} \right]$$

حيث :

ϕ : الفيض المغناطيسي وواحدة قياسه الوبير [Wb]

$$\phi = B.S = \mu.H.S = \mu \frac{N.I}{L}.S$$

$$= \frac{N.I}{\frac{L}{\mu.S}} = \frac{N.I}{R_{\mu}} \dots\dots\dots(1-6)$$

R_{μ} - المقاومة المغناطيسية.

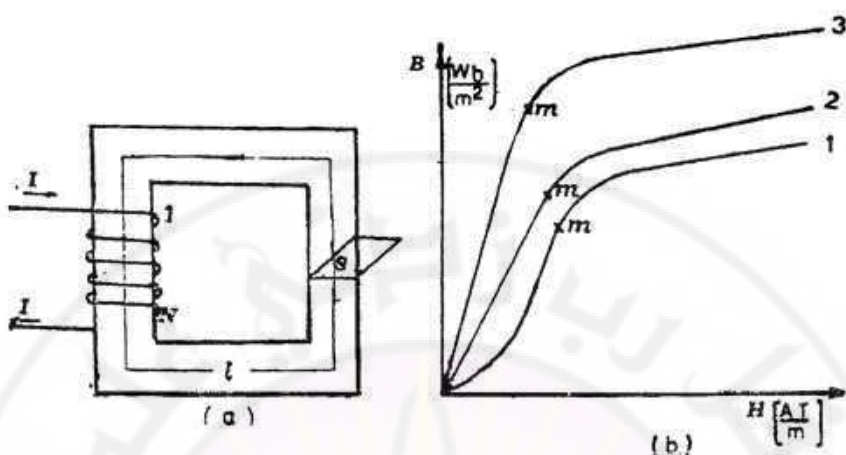
$$N.I = R_{\mu} . \phi \dots\dots\dots(1-7)$$

إن الفيض (السيالة) المغناطيسي الذي يمر في الدارة المغناطيسية يشبه التيار I المار في الدارة شكل (4-1-a-b) كما أن المقدار $\frac{L}{\mu.S} = R_{\mu}$ يشبه المقدار $R = \rho \frac{L}{S}$ حيث كلاهما يتعلق بنوع المادة وأبعادها، لذلك في الدارات المغناطيسية نسمي المقدار $N.I$ بالقوة المحركة المغناطيسية F، كما سمينا القوة المحركة الكهربائية E. إذاً نسمي المقدار $\frac{L}{\mu.S} = R_{\mu}$ المقاومة المغناطيسية.

تؤول الدارة المغناطيسية بعد كتابة المعادلة التي تربط بين السيالة المغناطيسية (أو الفيض) وبين القوة المحركة المغناطيسية وبين المقاومة المغناطيسية وفق المعادلات السابقة إلى دارة شبيهة بالدارة الكهربائية على الشكل (4-1-c) ومن الجدير بالذكر إن جميع قوانين الدارات الكهربائية ونظرياتها يمكن تطبيقها على الدارات المغناطيسية.

١-٥-٣- منحنيات الخواص المغناطيسية (المغنطة):

تعرف العلاقة بين شدة الحقل H وقيمة كثافة السيالة B في المواد المغناطيسية بالخواص المغناطيسية للمادة، حيث في هذه المواد قيمة معامل النفاذية μ ليست ثابتة، إنما تتعلق بقيمة شدة الساحة المطبقة على تلك المادة، وبعد الحديد وخصائصه من أهم المواد المغناطيسية، وتعرف المواد المغناطيسية باسم المواد الفيرومغناطيسية.



الشكل (5-1)

يمكن إيجاد الخواص المغناطيسية لمادة ما بأن نصنع دائرة مغلقة من هذه المادة، ثم نلف وشيعة على هذه الدائرة، كما في الشكل (5-1-a)، ونغذي هذه الوشيعة من منبع تيار مستمر عن طريق مجزء للتوتر بحيث يمكننا زيادة التيار على مراحل وبقياس قيمة السيالة عند مختلف قيم التيار وحساب كل من H و B وفق العلاقات :

$$H = \frac{I \cdot N}{L}$$

$$B = \frac{\phi}{S}$$

ومنه نحصل على الخاصية المغناطيسية للمادة، وبالنسبة للمواد الحديدية نحصل على منحنيات هذه الخاصية بأشكال مشابهة للمنحنيات المبينة بالشكل (5-1-b). وفي منحنيات جميع المواد يعرف الجزء من المنحني بين o, m بالمنطقة الخطية (أو غير المشبعة)، وفيه تقريباً تزداد كثافة السيالة مع زيادة الساحة المغناطيسية بشكل خطي أي μ ثابتة، أما الجزء الباقي فيسمى في هذه الخواص المنطقة اللاخطية أو المشبعة، حيث يقل عندها عامل النفاذية، أي لا تزداد كثافة السيالة بشكل مفيد مع زيادة الساحة المغناطيسية.

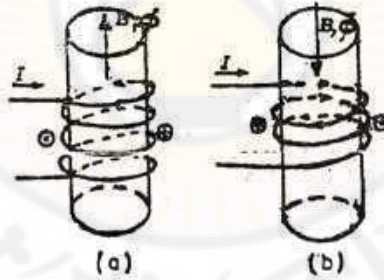
١-٥-٤- تحديد اتجاه السيالة المغناطيسية في دائرة مغناطيسية :

إن المقادير B و H هي مقادير شعاعية نستطيع أن نقول بشيء من التقريب أن B و H هي ذات اتجاه واحد تقريباً ، ويمكن تحديد اتجاه هذه الكميات بالاعتماد على اتجاه دوران التيار في الملف المولد للقوة المحركة المغناطيسية بأحد القواعد المعروفة وهي:

١- قاعدة اتجاه عقارب الساعة :

في هذه القاعدة ننظر إلى اتجاه دوران التيار في الملف، فإذا كان دوران التيار عكس عقارب الساعة فإن اتجاه خطوط السيالة تنطلق من الملف باتجاهنا، أي إن الوجه المقابل لنا من الملف هو قطب شمالي، وعندما يكون اتجاه دوران التيار في الملف باتجاه عقارب الساعة فإن خطوط السيالة تخترق وجه الملف مبتعدة عنا، أي كان الوجه

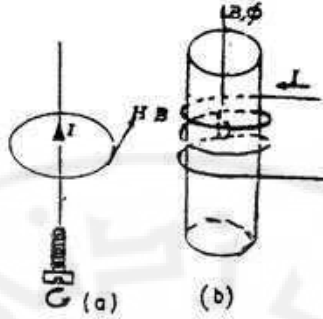
المقابل لنا يمثل قطباً جنوبي الشكل (6-1-a-b).



الشكل (6-1)

٢- قاعدة البزال :

في هذه الحالة يعطى اتجاه دوران البزال من اليسار إلى اليمين هو اتجاه خطوط الساحة المغناطيسية ويكون اتجاه التيار هو باتجاه تقدم البزال .



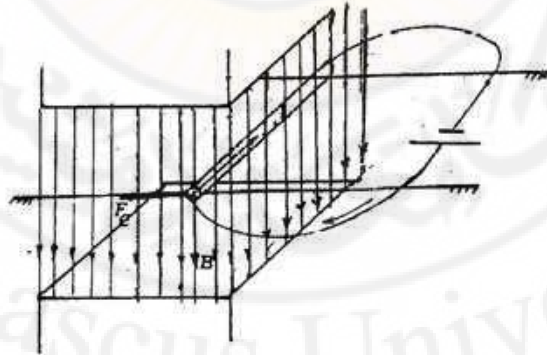
الشكل (7-1)

١-٥-٥- الظواهر الكهروضوئية في الآلات الكهربائية :

يعتمد مبدأ عمل الآلات الكهربائية على ظاهرتي التحريض الكهروضوئي وهما :

الظاهرة الأولى :

ظاهرة التحريض الكهروضوئي التي اكتشفها فاراداي ، وهي تولد قوة محرّكة كهربائية في ناقل كهربائي موجود ضمن ساحة مغناطيسية عندما تحدث تغيرات نسبية بينهما. فمثلاً عند تحريك ناقل طوله L ضمن ساحة مغناطيسية تحريضها B وبسرعة خطية مقدارها V فإنه أثناء حركة الناقل تولد قوة محرّكة كهربائية تعطى قيمتها بالعلاقة :

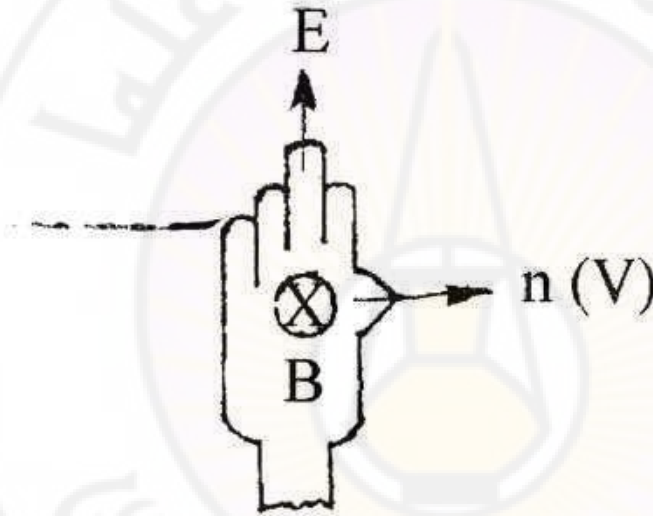
$$E = B \cdot L \cdot V \dots\dots\dots(1-8)$$


الشكل (8-1)

يقصد بتحديد اتجاه القوة المحركة لمنبع كهربائي ما هو تمييز أي من طرفيه هو الطرف أو القطب الموجب وأيهما هو الطرف أو القطب السالب.

يمكن تحديد اتجاه القوة المحركة الكهربائية المتولدة في ناقل في لحظة ما أثناء حركته باستخدام طريقة اليد اليمنى:

في هذه الطريقة نتخيل أن الفيض يدخل إلى راحة اليد، وهي تمر من القطب الشمالي إلى الجنوبي، ونوجه الإبهام باتجاه الحركة، فإن اتجاه أصابع الكف هو اتجاه القوة المحركة، أي أن الطرف الموجب للناقل هو الموافق لرؤوس الأصابع والطرف السالب هو الموافق لمؤخرة اليد الشكل (9-1).



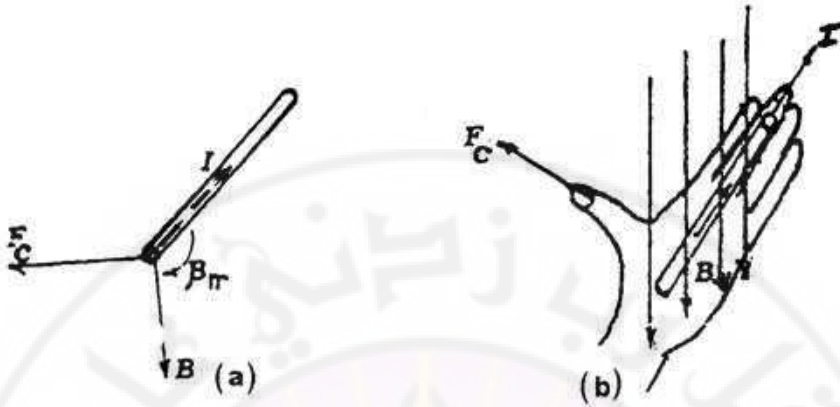
الشكل (9-1)

٢- الظاهرة الثانية تأثير الساحة المغناطيسية على ناقل يمر فيه تيار:

عندما يمر تيار كهربائي في ناقل ذي طول L واقع ضمن ساحة مغناطيسية كثافة السبالة فيها B ، تؤثر على هذا الناقل قوة كهرومغناطيسية تدفعه في اتجاه محدد، وتعطى قيمة هذه القوة الكهرومغناطيسية (الميكانيكية) بالعلاقة التالية:

$$F = B.L.I \dots\dots\dots (1-9)$$

يمكن تحديد اتجاه هذه القوة بطريقة اليد اليسرى الشكل (10-1-a).



الشكل (10-1)

حيث نتخيل في هذه الطبقة أن الناقل مدد على راحة اليد اليسرى، والتيار يمر فيه باتجاه الأصابع، وأن خطوط السيالة تسقط على وجه راحة اليد، فإن اتجاه الإبهام يحدد اتجاه القوة الكهروميسية F .

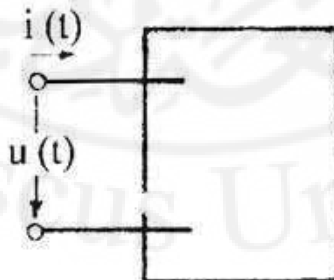
١-٦-١ - مفهوم الاستطاعة في التيار المتناوب:

نغذي ثنائي الأقطاب غير الفعال المبين في الشكل (11-1) بالتيار i

$$i(t) = \hat{I} \cos(\omega t + \varphi_i) \dots \dots \dots (1-10)$$

فيهبط على طرفيه الجهد:

$$u(t) = \hat{U} \cos(\omega t + \varphi_u) \dots \dots \dots (1-11)$$



الشكل (11-1)

نميز في التيار المتناوب جيبي الشكل أربعة تعاريف للاستطاعة التي يقدمها المولد إلى ثنائي الأقطاب غير الفعال وهي:

- ١- الاستطاعة اللحظية، ٢- الاستطاعة الحقيقية، ٣- الاستطاعة التخيلية، ٤- الاستطاعة الظاهرية.

- الاستطاعة اللحظية أو القيمة اللحظية للاستطاعة:

وهي حاصل ضرب علاقتي التوتر والتيار الجيبين التابعين للزمن.

$$P(t) = u(t) \times i(t) \dots\dots\dots (1-12)$$

ومنه فإن الاستطاعة اللحظية للاستطاعة $P(t)$ تابع للزمن.

- الاستطاعة الحقيقية:

وتساوي القيمة المتوسطة للاستطاعة التي يأخذها ثنائي أقطاب غير فعال خلال دورة واحدة:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u \cdot i \, dt \dots\dots\dots (1-13)$$

وتسمى القيمة المتوسطة للاستطاعة " الاستطاعة الحقيقية " نظراً لأنها تبقى في ثنائي الأقطاب، ولا تعاد إلى المولد بل تحول إلى شكل آخر من أشكال القدرة ونرمز لها P .

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) \, dt = UI \cdot \cos(\varphi_u - \varphi_i) \dots\dots\dots (1-14)$$

تحدد المعادلة (1-14) الاستطاعة الحقيقية التي يأخذها ثنائي الأقطاب غير الفعال من المولد عندما يكون للجهد والتيار التردد نفسه، وعندما يكون بين الجهد والتيار فرق في زاوية الطور مقداره $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$

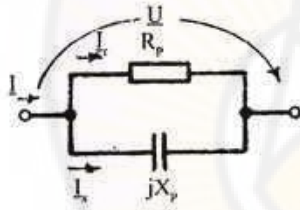
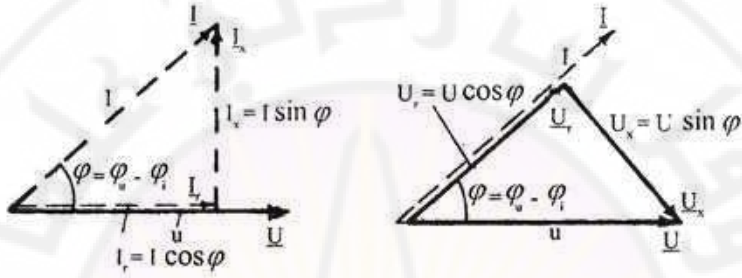
وبالتالي يمكن أن نعرف الاستطاعة الحقيقية بأنها القدرة المستهلكة في ثنائي الأقطاب غير الفعال في وحدة الزمن، كأن تشع مثلاً على شكل حرارة أو موجات صوتية أو كهرومغناطيسية.

ومنه يمكن أن تكافئ الاستطاعة الحقيقة وصل عنصري توصيل على التفرع حيث :

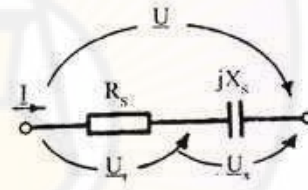
$$|X| = \frac{U}{I_x}, \quad R = \frac{U}{I_r}$$

ونتوصل للنتيجة نفسها إذا حللنا شعاع الجهد إلى مركبتين $\underline{U}_r, \underline{U}_x$ الأولى متفقة مع التيار في زاوية الطور، والثانية منزاحة بمقدار 90° وتكافئ هذه الحالة وصل عنصرين على التسلسل حيث $R = \frac{U}{I}$, $|X| = \frac{U}{I}$ شكل (12-1) ، أو دائرة تفرعية

الشكل (13-1)



الشكل (13-1)



الشكل (12-1)

$$U_r = IR_s \quad U_x = I|X_s|$$

$$I_r = \frac{U}{R_p} \quad , \quad I_x = \frac{U}{|X_p|}$$

حيث :

U_r جهد حقيقي، U_x جهد تخيلي، I_r تيار حقيقي، I_x تيار تخيلي

$$I \cos \varphi = I_r$$

$$U = U_r = I_r \cdot R_p$$

$$P = U I_r$$

$$P = I_r^2 R_p = \frac{U^2}{R_p}$$

$$U \cos \varphi = U_r$$

$$I = I_r = \frac{U_r}{R_s}$$

$$P = I U_r$$

$$P = I^2 R_s = \frac{U_r^2}{R_s}$$

وفي كلتا الحالتين:

$$P = U \cdot I \cos \varphi \dots\dots\dots(1-15)$$

- الاستطاعة التخيلية:

يرمز للاستطاعة التخيلية بـ Q وواحدة قياسها الفولت أمبير ردي (V.A.R)، و الاستطاعة التخيلية هي القدرة الكهربائية التي اختزانها في ثنائي الأقطاب غير الفعال في وحدة الزمن، ثم يعاد توريدها إلى المولد مرة أخرى، ويجب أن يكون ثنائي الأقطاب في هذه الحالة مكوناً من سعات وتحريضات، أي من مقاومات تخيلية (مفاعلات).

من الشكلين السابقين (12-1) و (13-1).

$$U = U_x = I_x |X_p|$$

$$Q = U I_x = I_x^2 |X_p| = \frac{U^2}{|X_p|},$$

$$U \sin \varphi = U_x$$

$$Q = I U_x = I^2 |X_s| = \frac{U_x^2}{|X_s|}$$

وفي كلتا الحالتين

$$Q = U I \sin \varphi \dots\dots\dots(1-16)$$

إذا احتوت ممانعة مدخل ثنائي الأقطاب مركبة تخيلية سعوية يكون الفرق الزاوي بين طور الجهد والتيار سالباً ($\varphi_n - \varphi_i = -\varphi$) ونتحدث عند ذلك عن الاستطاعة التخيلية السالبة. أما إذا كانت المركبة التخيلية تحريضية يكون ($\varphi_n - \varphi_i = +\varphi$) ونتحدث عند ذلك عن الاستطاعة التخيلية الموجبة. وإذا احتوى ثنائي الأقطاب سعة وملف بأن واحد عندها تزيل الاستطاعتان التخليطان السالبة والموجبة بعضهما، أي تتأرجح الاستطاعة التخيلية بين السعة والتحريض ولا يلاحظ المولد تأرجح القدرة ضمن ثنائي الأقطاب.

في تقنية التيار العالي تسمى هذه العملية تحسين عامل الاستطاعة، وفي تقنية التيار الضعيف تسمى ظاهرة الطنين.

- الاستطاعة الظاهرية:

يرمز للاستطاعة الظاهرية بـ S وتقاس بالفولت أمبير [V.A] والاستطاعة الظاهرية قيمة حسابية لا تحتوي معنىً فيزيائياً (كما هي الحال بالنسبة للاستطاعة التخيلية). وتحسب الاستطاعة الظاهرية بموجب العلاقة التالية:

$$S = U \cdot I \dots\dots\dots(1-17)$$

وتساوي حاصل جداء القيمة الفعالة للجهد والقيمة الفعالة للتيار عند مأخذي ثنائي الأقطاب غير الفعال.

دائرة تفرعية

الشكل (13-1)

القيمة الفعالة للجهد

$$v = \sqrt{U_r^2 + U_x^2}$$

$$S = I \sqrt{U_r^2 + U_x^2}$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \dots\dots\dots(1-18)$$

دائرة تسلسلية

الشكل (12-1)

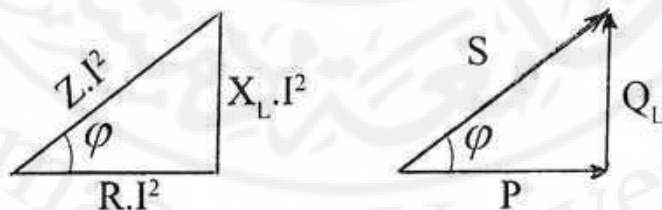
القيمة الفعالة للتيار

$$I = \sqrt{I_r^2 + I_x^2}$$

$$S = v \sqrt{I_r^2 + I_x^2}$$

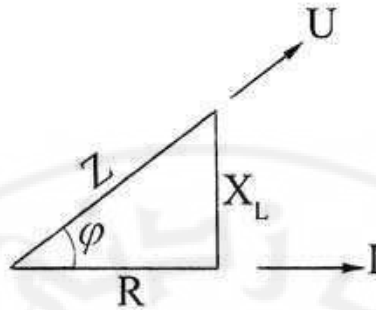
وفي كلتا الحالتين:

أي يمكن التعبير عن هذه العلاقة بمثلث الاستطاعات كمايلي:



الشكل (14-1)

أي أن مثلث الممانعات هو مثلث مشابه لمثلث الاستطاعة ومنه:



الشكل (15-1)

حيث X_L الممانعة التحريضية، أي الممانعة الكلية لهذه الدارة مؤلفة من مقاومة أومية بحتة وممانعة تحريضية، وعندما تكون الدارة مؤلفة من مقاومة أومية بحتة وممانعة سعوية تصبح الزاوية الحاصلة بين Z , R أي بين التيار والتوتر قيمتها سالبة. [9]
تعريف عامة:

- الاستطاعة الحقيقية (الفعالة) الكهربائية تقاس بالواط حيث:

$$1 \text{ Watt} = 1 \text{ Joules/sec}$$

ومن مضاعفاته الكيلوات، والميغاوات.

- الطاقة أو القدرة: وتقاس بالجول وهي حاصل ضرب الاستطاعة الفعالة بالزمن ومن واحداتها الأخرى أيضاً :

$$1 \text{ Wh} = 3600 \text{ Joules}, 1 \text{ kWh} = 36 \times 10^5 \text{ Joules}$$

$$= \frac{36 \times 10^5}{4186} = 860 \text{ K cal}$$

كيلو كالوري.

- الحصان (HP): واحدة استطاعة حيث:

$$746 \text{ Watt} = \text{كل ١ حصان (بريطاني)}$$

$$735,5 \text{ Watt} = \text{كل ١ حصان (مترى)}$$

- الجول (Joule) J: وهو العمل الناتج عند انتقال قوة مقدارها نيوتن واحد (newton) N مسافة متر واحد باتجاه القوة.

الوحدة الأخرى للعمل هي كغ . متر وتعرف على أنها العمل الناتج عن انتقال قوة مقدارها كغ مسافة متر واحد باتجاه القوة:
أي:

$$1 \text{ kgm} = 9,81 \text{ Joules}$$

تطبيق:

يسري عند تطبيق جهد جيبي الشكل قيمته الفعالة 220 [v] وتردده 50 [Hz] على مأخذي ثنائي أقطاب غير فعال، في المأخذين تيار جيبي الشكل قيمته الفعالة (10 A) ويتقدم التيار على الجهد بزاوية فرق الصفحة مقدارها 30° والمطلوب :
احسب الاستطاعة الحقيقية والاستطاعة التخيلية والاستطاعة الظاهرية.

الحل:

الاستطاعة الحقيقية:

$$P = U \times I \cos \varphi = 220 \times 10 \times \cos 30^\circ = 1.905 \text{ [KW]}$$

الاستطاعة التخيلية:

$$Q = U \times I \sin \varphi = 220 \times 10 \times \sin 30^\circ = 1.1 \text{ [k VAR]}$$

الاستطاعة الظاهرية:

$$S = U \times I = 220 \times 10 = 2.2 \text{ [kVA]}$$

كما يمكن حساب الاستطاعة الظاهرية من مثلث الاستطاعات:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{1.905^2 + 1.1^2} = 2.2 \text{ KVA}$$

الفصل الثاني

خواص نظام القيادة الكهربائية

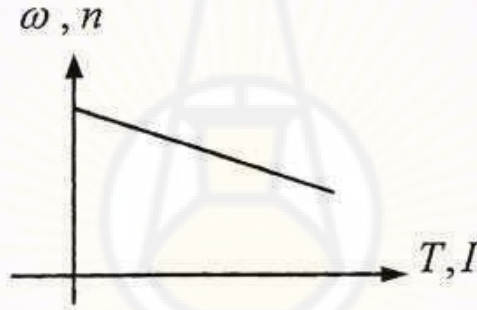
١-٢ خواص (مميزات) المحركات الكهربائية : Motor Characteristics

١-١-٢ الخواص الستاتيكية Static Characteristics

تعتبر هذه المميزات عن طبيعة عمل نظام القيادة في الحالات الستاتيكية (الحالات المستقرة) ونقسم إلى :

الخواص الطبيعية : Natural Characteristics

وهي عبارة عن علاقة بين السرعة الدورانية أو الزاوية وتيار أو عزم المحرك الشكل (1-2) ، وذلك عند القيم المقررة لمعطيات المحرك وبدون إضافة مقاومات مادية في دارات المحرك وتكون على نوعين :



الشكل (1-2) الخواص الستاتيكية لمحرك ذي تهيج مستقل

أ- المميزات الكهروميكانيكية : وهي تعبر عن علاقة السرعة الدورانية أو الزاوية مع التيار

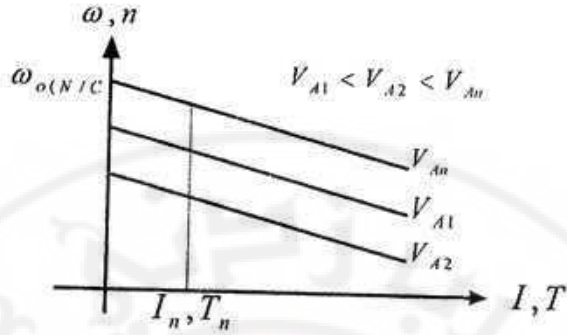
$$n = f(I) \text{ أو } \omega = f(I)$$

ب- المميزات الميكانيكية : وهي عبارة عن العلاقة بين السرعة الدورانية أو الزاوية مع العزم .

$$n = f(T) \text{ أو } \omega = f(T)$$

الخواص التنظيمية :

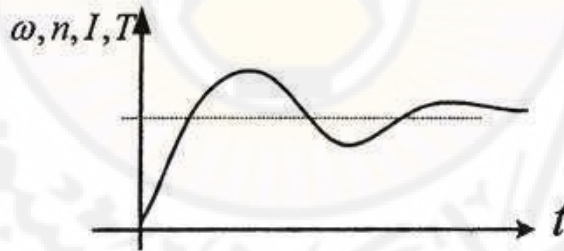
وهي عبارة عن علاقة تغير السرعة الزاوية أو الدورانية مع التيار أو العزم مع التغير المعتمد لإحدى معطيات المحرك ، الشكل (2-2) .



الشكل (2-2) المميزات التنظيمية عند توتر أو جهد المتحرض أو مقاومات مادية

٢-١-٢- الخواص الديناميكية : dynamic characteristics

وهي تعبر عن عمل نظام القيادة في الحالات الديناميكية (الحالات العابرة) وهي حالات التشغيل (بدء الحركة) والتوقف، أو عكس اتجاه الدوران، أو حالة تغير أي محدد من محددات النظام. مثلاً تغير التوتر أو تغير الحمل، وهي عبارة عن علاقة متغيرة مع الزمن الشكل (3-2).



الشكل (3-2) الخواص الديناميكية لنظام القيادة الكهربائية

حيث يعبر عن هذه الميزة بـ

- السرعة كدالة مع الزمن .
- العزم كدالة مع الزمن
- التيار كدالة مع الزمن

ويتم دراسة الحالة العابرة باستخدام معادلات الحركة

$$T_d = T - T_L = J_{eq} \frac{dw}{dt} \dots\dots\dots(2-1)$$

حيث :

J_{eq} : عزم العطالة المكافئ .

T_L : عزم الحمل .

T : عزم المحرك .

عندما :

$T_L = T$: أي عزم المحرك يساوي عزم الحمل ، فهذا يعني من المعادلة السابقة أن

$\frac{d\omega}{dt} = 0$ أي إن النظام يعمل بحالة ستاتيكية (مستقرة) وبسرعة ثابتة ، $\omega = const$.

وإذا كانت ، $T_L \neq T$ فإن $\frac{d\omega}{dt} \neq 0$ أي إن السرعة تتغير مع الزمن والنظام يعمل بحالة ديناميكية (غير مستقرة).

٢-٢ - الخواص الميكانيكية للآليات الصناعية :

إن الخواص الميكانيكية للآليات الصناعية هي علاقة السرعة الزاوية أو الدورانية والعزم $\omega = f(T)$ أو $n = f(T)$.

إن الأنواع المختلفة من الآليات الصناعية يبدي اختلافاً في المميزات الميكانيكية ، إلا أننا نستطيع استخلاص بعض النتائج العامة والمختلفة إذا استعنا بالعلاقة التجريبية ، وهي علاقة السرعة والعزم لبعض الآليات الصناعية ، في الحالات المستقرة .

ويسمى أيضاً العزم الساكن (Static Torque) T_s وهي :

$$T_s = T_o + (T_{sn} - T_n) \left[\frac{w}{w_n} \right]^x \dots\dots\dots(2-2)$$

حيث أن :

T_s - العزم الستاتيكي (الساكن) .

T_o - العزم الابتدائي للاحتكاك في الآلة وهو ثابت القيمة .

T_{sn} - القيمة الاسمية للعزم الساكن .

ω - السرعة الزاوية (المقررة) للآلية .

ω_n - السرعة الزاوية الاسمية للآلية .

X - معامل يحدد العلاقة بين تغير العزم وتغير السرعة حسب نوع الآلية.

$$\beta_r = \frac{\Delta T}{\Delta \omega} \quad \text{- معامل قساوة الميكانيكية}$$

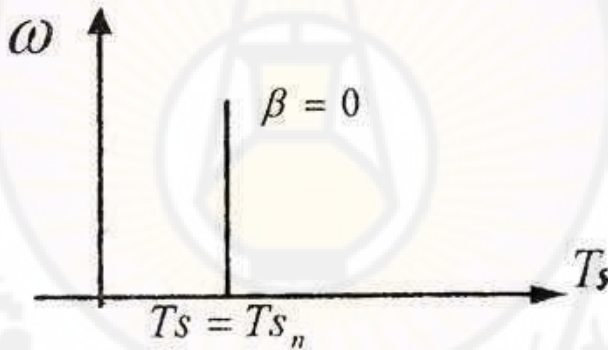
تقسم الآليات والتجهيزات الصناعية إلى أنواع تبعاً لقيمة المتغير X.

٢-٢-١ - الآليات ذات المميزات غير المتعلقة بالسرعة:

عندما تكون $x = 0$ وبافتراض أن $T_0 = 0$ فإن العزم الساكن للآلية يساوي القيمة

الاسمية $T_s = T_{sn}$. ومن صفاته أن له قيمة ثابتة ولا يعتمد على اتجاه السرعة . ومن

الأمثلة على ذلك عزم آليات النقل ، الشكل (4-2) ويسمى هذا العزم بالعزم الفعال .



الشكل (4-2) مميزة العزم الفعال

٢-٢-٢ - الآليات ذات المميزات الخطية الصاعدة :

في هذه الحالة:

وبفرض أن $T_0 = 0$, $X = 1$

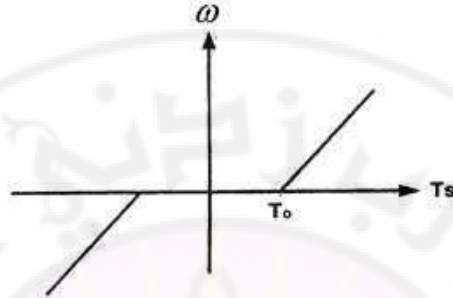
$$T_0 = 0 , X = 1$$

أي أن :

$$T_s = T_{sn} \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right) \quad \dots\dots\dots (2-3)$$

نلاحظ أن العزم الساكن يتناسب طردياً مع السرعة ويزداد بصورة خطية .

وتعتبر ذات عزم غير فعال الشكل (5-2)، حيث أنه يغير من قيمته ومن اتجاهه واتجاه السرعة ، ومن الأمثلة عليه عزم الاحتكاك حيث في الشكل (5-2) اعتبر $T_0 \neq 0$.



الشكل (5-2) العزم غير الفعال

٢-٢-٣- الآليات ذات المميزات غير الخطية الصاعدة .

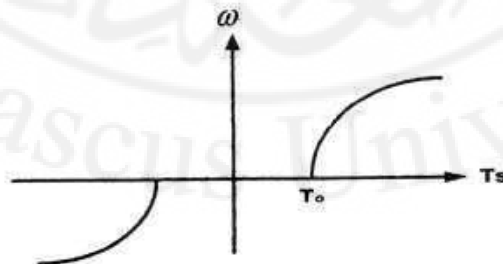
إذا كانت :

$$T_0 \neq 0 \quad X = 2$$

فإن :

$$T_s = T_0 + (T_{sn} - T_0) \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \dots\dots\dots (2-4)$$

وتسمى هذه الميزة بالخاصية المروحية كالمضخات الطاردة عن المركز والمراوح والضواغط ، وهو النوع الثاني من العزم غير الفعال حيث أنه يغير من قيمته واتجاهه مع تغير قيمة واتجاه السرعة ، الشكل (6-2).



الشكل (2-6)الخاصة المروحية

٢-٢-٤ - الآليات ذات المميزات غير الخطية الهابطة :

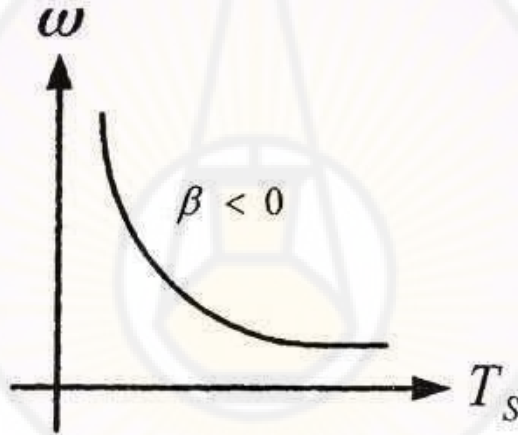
عندما تكون :

$$X=-1, T_0=0$$

فإن :

$$T_s = T_{su} \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^{-1} = T_{su} \left(\frac{\omega_n}{\omega} \right) \dots \dots \dots (2-5)$$

أي أن عزم الآلية يتناسب عكساً مع سرعة الدوران ، ومثال على ذلك المقاشط والمخارط والمطاحن (لأنه يحتاج إلى عزم عالٍ وسرعات قليلة) .



الشكل (7-2) المميزات الهابطة

٢-٣ المميزات الميكانيكية للمحركات الكهربائية :

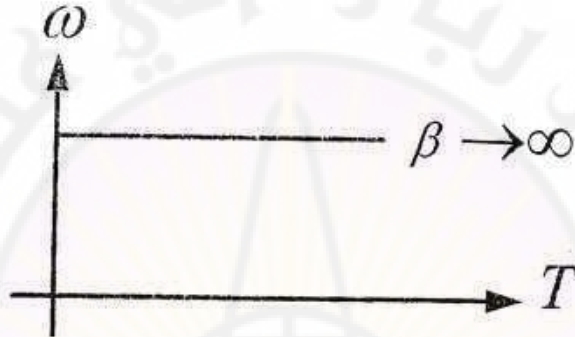
تمتلك المحركات الكهربائية بالمقارنة مع الآليات الصناعية ميزات هابطة بحيث تتناقص سرعتها مع ازدياد عزمها (عزم دوران المحرك) ، حيث أن الاستطاعة تساوي $p=T\omega$ ، غير أن نسبة تغير السرعة مع تغير العزم تختلف من نوع إلى آخر ، وتحدد فيما يسمى بالقساوة ، وتعبّر القساوة عن علاقة تغير العزم مع تغير السرعة

$$\beta = \frac{\Delta T}{\Delta \omega} \dots \dots \dots (2-6)$$

تقسم الخواص الميكانيكية للمحركات الكهربائية حسب القساوة إلى ثلاثة أنواع :

٢-٣-١ - الخواص الميكانيكية القاسية مطلقاً :

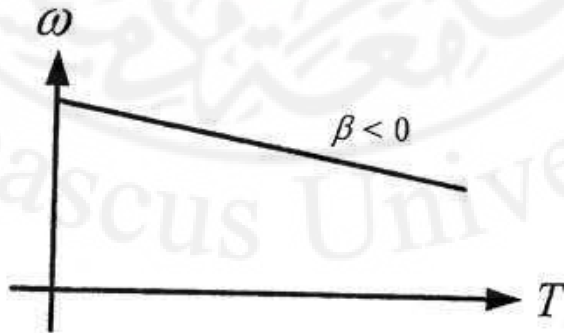
وهي التي تبقى بسرعة ثابتة مهما ازداد العزم ، ومثال عليها خاصية المحركات التوافقية ، الشكل (2-8).



الشكل (2-8) الخاصية ذات القساوة المطلقة

٢-٣-٢ - الخواص الميكانيكية القاسية .

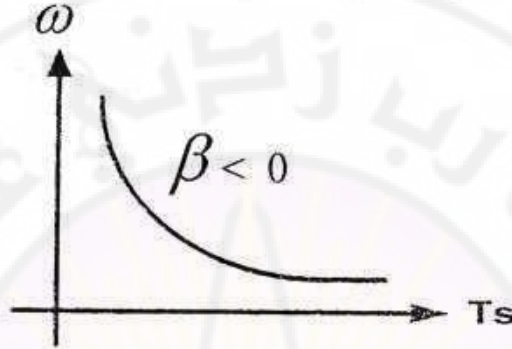
محركات التيار ذات التهيج المستقل تمتلك مثل هذه الخواص، وكذلك المحركات التحريضية في مجال عملها النظامي تتناقص فيها السرعة بصورة ضئيلة مع ازدياد العزم ، الشكل (2-9).



الشكل (2-9) المميّزة الميكانيكية القاسية

٢-٣- الخواص الميكانيكية اللينة :

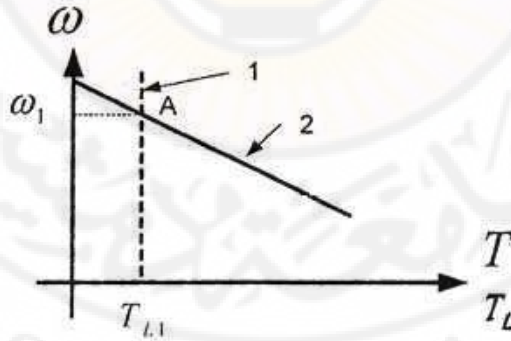
تتناقص فيها السرعة بصورة كبيرة مع ازدياد العزم وتمتلك هذه المميزات محركات التيار المستمر ذات التهيج التسلسلي أو التهيج المركب ، الشكل (10-2)



الشكل (10-2) الخاصية الميكانيكية اللينة

٢-٤- الخواص الميكانيكية لمجموعة المحركات والآليات :

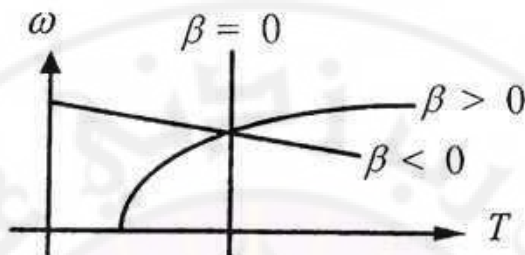
وهي المميزات الميكانيكية للآلية والمحرك . وتمثل العلاقة بين السرعة والعزم ، الشكل (11-2) حيث أن :



الشكل (11-2) الخواص الميكانيكية للمحرك والآلية .

- ١- المميّزة الميكانيكية للآلية .
- ٢- المميّزة الميكانيكية لمحرك تيار مستمر ذي تهيج مستقل .

النظام يعمل بشكل مستقر عند تقاطع الخواص الميكانيكية للآلية والمحرك ، النقطة A .
 ويبين الشكل (12-2) خواص ميكانيكية ذات قساوات مختلفة .



الشكل (12-2) خواص ميكانيكية ذات قساوات مختلفة

٣-٥ أهمية الخاصية الميكانيكية :

١- تحديد نظام عمل المحرك الذي يعتمد على موقع التقاطع بين الخاصية الميكانيكية للآلية والخاصية الميكانيكية للمحرك .

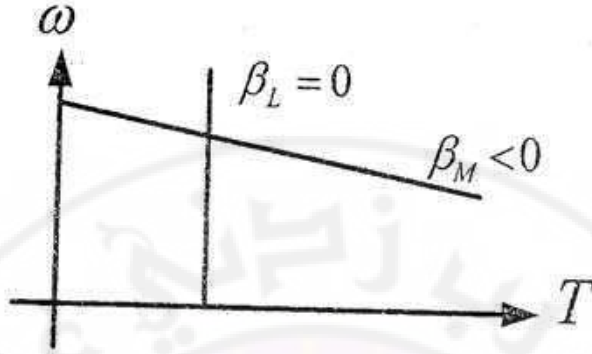
٢- دراسة الخواص الديناميكية للمحرك .

٣- تحديد قيمة قساوة الخاصية الميكانيكية والتي تعبر عن هبوط السرعة حيث تساوي:

$$\beta = \frac{\Delta T}{\Delta \omega}$$

٤- الحكم على استقرارية النظام من خلال مقارنة قساوة الخاصية الميكانيكية للمحرك وقساوة الخاصية الميكانيكية للحمل ، وحتى يكون النظام مستقراً يجب أن تكون قساوة الخاصية الميكانيكية أقل من قساوة الخاصية الميكانيكية للحمل (الآلية) .

$$\beta_M < \beta_L$$



الشكل (2-13) يمثل نظام قيادة يعمل بشكل مستقر ويحقق شروط الاستقرار .

٣-٦ حساب الجزء الميكانيكي لنظام القيادة :

إن نظام القيادة هو نظام كهروميكانيكي يتألف من جزأين كهربائي وميكانيكي ، ولحساب الجزء الميكانيكي يتم حساب عزم الحمل المنسوب لعمود محوره المحرك ، وعزم العطالة المكافئ المنسوب لعمود المحرك مع الأخذ بعين الاعتبار نوع الحركة ، هل هي خطية أو دورانية ؟ .

من الواضح أن ضياع القدرة الميكانيكية يغطيه منبع القدرة سواء كان ذلك من قبل المحرك في التدفق الإضافي للاستطاعة أو من عضو التشغيل في التدفق العكسي للاستطاعة ، ويحدد العمل (القدرة) الذي يقوم به المحرك أو من عضو التشغيل كما يلي:

من أجل الحركة الدورانية :

$$A = \int_0^t \omega.T.dt \dots\dots\dots(2-7)$$

ومن أجل الحركة المستقيمة :

$$A = \int_0^t F.V.dt \dots\dots\dots(2-8)$$

أما الاستطاعة فتساوي من أجل الحركة الدورانية :

$$P = \frac{dA}{dt} = \omega.T \dots\dots\dots(2-9)$$

ومن أجل الحركة المستقيمة :

$$P = \frac{dA}{dt} = F.V \dots\dots\dots(2-10)$$

حيث:

T - العزم وتقدر بنيوتن. متر (N.m) .

F - القوة وتقدر بالنيوتن (N) .

ω - السرعة الزاوية وتقدر براديان / ثانية .

V - السرعة الخطية وتقدر بمتر / ثانية (m / sec) .

ويمكن حساب الطاقة الكامنة في الأجزاء الدوارة لنظام القيادة الكهربائية بالعلاقة :

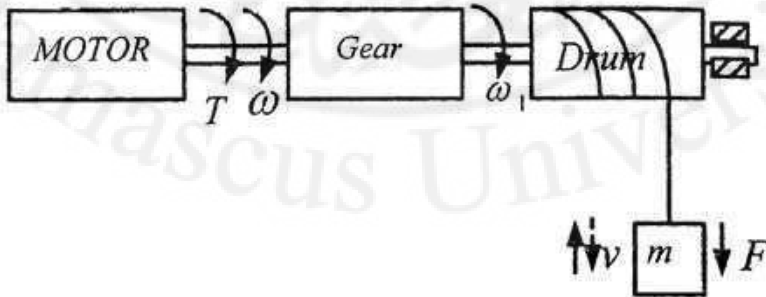
$$A_K = \frac{J\omega^2}{2} \dots\dots\dots(2-11)$$

حيث:

1- عزم العطالة لمجموع الكتل الدوارة بالنسبة للسرعة الزاوية المنسوبة إلى محور المحرك .

ω - السرعة الزاوية لمحور المحرك الكهربائي .

حساب الجزء الميكانيكي لنظام القيادة في حالة الحركة الخطية للحمل مبين على الشكل (14-2) .



الشكل (14-2) الأجزاء الميكانيكية لنظام القيادة في حالة الحركة الخطية للحمل

مكونات النظام الميكانيكي :

١- المحرك (الجزء الدوار) ومعطياته :

- J_M عزم العطالة للمحرك .

- η_m : مردود المحرك .

- ω سرعة المحرك .

- T عزم المحرك .

٢- ناقل الحركة (Gear) ومعطياته :

- J_1 : عزم العطالة لناقل الحركة .

- $i = \frac{\omega_{out}}{\omega_m}$: معامل ناقل الحركة.

- ω_1 : سرعة مخرج ناقل الحركة .

- η_1 : المردود لناقل الحركة .

٣- الاسطوانة (Drum) ومعطياتها :

- J_2 : عزم العطالة للاسطوانة.

- η_2 : المردود للاسطوانة .

- R : نصف قطر الاسطوانة . [2]

٤- الحمل (Load) ويتم إنزاله ورفع بواسطة حمل مثبت على الاسطوانة.

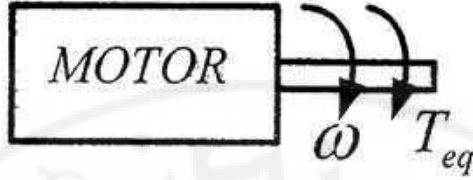
معطيات الحمل :

الكتلة m بالكيلوغرام .

السرعة الخطية V m / sec .

القوة بالنيوتن .

يتم تمثيل النظام الميكانيكي الفعلي بنظام مكافئ كما في الشكل (2-15) .



الشكل (15-2)

معطيات النظام المكافئ :

- عزم الحمل المنسوب لعمود المحرك T_{eq} .
- عزم العطالة (المكافئ) المنسوب لعمود المحرك J_{eq} .
- η_2 : المردود الكلي .

يتم حساب عزم الحمل المنسوب لعمود المحرك (T_{eq}) بالاعتماد على قانون حفظ (مصونية القدرة) القدرة الميكانيكية ، أي أن القدرة الميكانيكية في النظام المكافئ تساوي القدرة الميكانيكية في النظام الفعلي .
قانون حفظ القدرة في حالة رفع الحمل :

$$T_{eq} \omega = \frac{FV}{\eta_{\Sigma}} \dots\dots\dots(2-12)$$

قانون حفظ القدرة في حالة إنزال الحمل :

$$T_{eq} \omega = F.V \eta_{\Sigma} \dots\dots\dots(2-13)$$

نجد أن (T_{eq}) في الحالتين :
في حالة رفع الحمل :

$$T_{eq} = \frac{FV}{\eta_{\Sigma} \omega} = F \frac{W_1 R}{\eta_{\Sigma} \omega} = \frac{F.R}{i \eta_{\Sigma}} \dots\dots\dots(2-14)$$

في حالة إنزال الحمل

$$T_{eq} = F \frac{R}{i} \eta_{\Sigma} \dots\dots\dots(2-15)$$

حساب المردود الكلي

$$\eta_{\Sigma} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \dots (2-16)$$

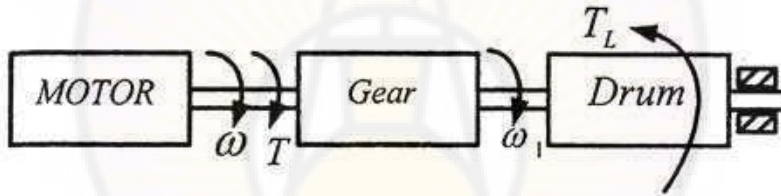
يتم حساب عزم العطالة المكافئ J_{eq} بالاعتماد على قانون حفظ الطاقة الحركية ، إن نظام الطاقة الحركية في النظام المكافئ تساوي الطاقة الحركية في النظام الفعلي ، ولا تعتمد الطاقة الحركية على اتجاه الدوران قانون حفظ الطاقة الحركية

$$J_{eq} \cdot \frac{\omega^2}{2} = J_M \frac{\omega^2}{2} + J_1 \frac{\omega^2}{2} + J_2 \frac{\omega_1^2}{2} + m \frac{V^2}{2}$$

بالتبسيط نجد :

$$J_{eq} = J_M + J_1 + \frac{J_2}{i^2} + m \frac{R^2}{i^2} \dots (2-17)$$

ب - حساب الجزء الميكانيكي لنظام القيادة في حالة الحركة الدورانية للحمل :
يبين الشكل (16-2) الأجزاء الميكانيكية لنظام القيادة في حالة الحركة الدورانية للحمل .



الشكل (16-2) الأجزاء الميكانيكية لنظام القيادة في حالة الحركة الدورانية للحمل .

معطيات المحرك وناقل الحركة والاسطوانة هي نفسها كما في حالة الحركة الخطية أما معطيات الحمل فهي :

T_L : عزم الحمل.

ω_1 : سرعة الحمل .

النظام المكافئ في هذه الحالة هو نفس النظام المكافئ في حالة الحركة الخطية وبـنفس المعطيات .

يتم حساب عزم الحمل المنسوب بنفس الطريقة السابقة ، ولكن عزم الحمل يبقى في حالة الحركة الدورانية باتجاه عقارب الساعة ، أو في حالة الحركة الدورانية بعكس عقارب الساعة بنفس القيمة ، أي أن قيمته لا تتغير مع تغير اتجاه الدوران

قانون حفظ الطاقة :

$$T_{eq} = \frac{T_1 \cdot \omega_1}{\eta_{\Sigma}} \dots\dots\dots(2-17)$$

$$T_{eq} = \frac{T_1 \cdot \omega_1}{\omega \cdot \eta_{\Sigma}} = \frac{T_1}{i} \cdot \frac{1}{\eta_{\Sigma}} \dots\dots\dots(2-18)$$

يتم حساب عزم العطالة المكافئ J_{eq} بنفس الطريقة السابقة .

قانون حفظ الطاقة الحركية :

$$J_{eq} \frac{\omega^2}{2} = J_m \frac{\omega^2}{2} + J_1 \frac{\omega^2}{2} + J_2 \frac{\omega_1^2}{2} \dots\dots\dots(2-19)$$

وبالتبسيط نجد :

$$J_{eq} = J_m + J_1 + \frac{J_2}{i^2} \dots\dots\dots(2-20)$$

مع العلم أن :

$$J_{eq} = \frac{GD_{eq}^2}{4 \cdot g} \dots\dots\dots(2-21)$$

حيث :

g تسارع الجاذبية الأرضية وتساوي $9.8/m^2/sec$.

تطبيق :

لدينا رافعة مقادة بواسطة محرك تحريضي ثلاثي الطور ، موصل بشكل نجمي /
نجمي يملك المواصفات الاسمية التالية :

$$U_n = 380V , I_n = 50A , n_n = 990r.p.m , \cos \varphi_n = 0.79$$

$$\eta_n \% = 84.6\% , f = 50Hz$$

ومواصفات الرافعة والمبدلة الميكانيكية كالتالي :

عدد الأسنان :

$$Z_1 = 10 , Z_2 = 50 , Z_3 = 10 , Z_4 = 50$$

مردود جملة المسننات الأولى والثانية :

$$\eta_1 = \eta_2 = 0.95$$

مردود الملفات والحبال :

$$\eta_3 = 0.95$$

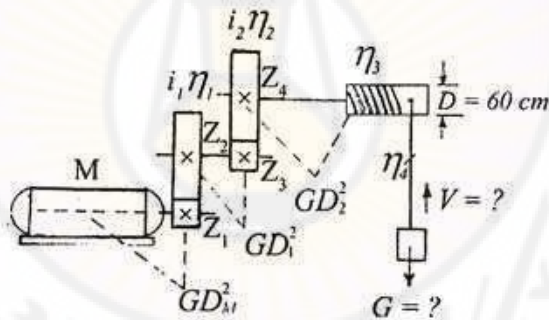
مردود مجموعة الحبال :

$$\eta_4 = 0.95$$

احسب ما يلي :

- ١- النقل الأعظمي الذي يمكن أن ترفعه الرافعة (G) .
 - ٢- السرعة الخطية للحمولة (V)
 - ٣- عزم الكتل الدوارة المنسوبة إلى محور المحرك (GD_{eq}^2) .
 - ٤- عزم العطالة المكافئ للحملة (J_{eq}) [12] .
- بافتراض أن :

$$GD_M^2 = 1.5[N.m^2], \quad GD_1^2 = 2[N.m^2], \quad GD_2^2 = 20[N.m^2]$$



الشكل (17-2) نسبة نقل جملة المسننات الثانية [10]

الحل :

نسبة نقل جملة المسننات الأولى :

$$i_1 = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{50}{10} = 5$$

نسبة نقل جملة المسننات الثانية :

$$i_2 = \frac{Z_4}{Z_3} = \frac{50}{10} = 5$$

استطاعة الدخل الاسمية للمحرك :

$$P_{in} = 3 \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}} \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n \cdot 10^{-3} =$$

$$= \sqrt{3} \times 380 \times 50 \times 0.79 \times 10^{-3} = 26 [KW]$$

استطاعة خرج المحرك الاسمية :

$$P_n = P_{in} \cdot \eta_n = 26 \times 0.846 = 22 [KW]$$

-عزم المحرك الاسمي :

$$T_n = 9.55 \frac{P_n \cdot 10^3}{n_n} [N.m]$$

$$= 9.55 \frac{22 \cdot 10^3}{990} = 212.22 [N.m]$$

ومن جهة ثانية فإن العزم الاسمي للمحرك يساوي :

$$T_n = \frac{G \cdot (D/2)}{i_1 \cdot i_2 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4}$$

ومنه

$$G = \frac{2T_n \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4}{D}$$

١- النقل الأعظمي الذي يمكن أن ترفعه الرافعة :

$$G = \frac{2 \times 212.22 \times (5)^2 \times (0.95)^4}{0.6} = 14404.54 [N]$$

سرعة الملفاف الدورانية :

$$n_D = \frac{n_M}{i_1 \cdot i_2} = \frac{990}{25} = 39.6 (r.p.m)$$

٢- السرعة الخطية للحمولة :

$$V_D = \frac{\pi \cdot D \cdot n_D}{60} = \frac{\pi \times 0.6 \times 39.6}{60} = 1.24 (m/sec)$$

عزم العطالة المكافئ يعطى بالعلاقة :

$$J_{eq} = J_M + J_1 + \frac{J_2}{i^2} m \frac{R^2}{i^2}$$

وبما أن :

$$J_{eq} = \frac{GD_{eq}^2}{4.g}$$

حيث :

تسارع الجاذبية الأرضية ، يساوي $9.81 \text{ m}^2/\text{sec}$. فإذا ضربنا طرفي العلاقة الأولى لـ (J_{eq}) بالعامل $(4.g)$ نحصل على :

$$\begin{aligned} GD_{eq}^2 &= GD_M^2 + \frac{GD_1^2}{i_1^2 \eta_1} + \frac{GD_2^2}{i_1^2 i_2^2 \eta_1 \eta_2} + \frac{4GV^2}{W_n^2 \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4} \\ &= 1.5 + \frac{2}{25 \times 0.95} + \frac{20}{25 \times 25 \times (0.95)^2} + \frac{4 \times 1440454 \times (1.24)^2}{(2\pi \times 990/60)^2 \times (0.95)^4} \\ &= 11.74 [N.m^2] \end{aligned}$$

ومنه نحسب :

٤- عزم العطالة المكافئ .

$$J_{eq} = \frac{GD_{eq}^2}{4g} = \frac{11.74}{4 \times 9.81} = 0.3 [kg.m^2]$$

The background of the page features a large, faint watermark of the Damascus University logo. The logo is circular, with the Arabic text "وقل رب زدني علما" (O Lord, increase my knowledge) at the top and "جامعة دمشق" (Damascus University) at the bottom. In the center of the logo is a stylized sun or star symbol.

الفصل الثالث
آلات التيار المستمر
D.C. Machines

٣- آلات التيار المستمر

تستخدم آلات التيار المستمر كمحركات كهربائية وكمولدات، وتتميز المحركات الكهربائية التي تعمل بطاقة التيار المستمر بمميزات تنظيم جيدة وقدرة كبيرة على زيادة التحميل، وتسمح بالحصول على مميزات ميكانيكية قاسية ولينة.

٣-١- وظيفة آلات التيار المستمر:

تستخدم محركات التيار المستمر على نطاق واسع من أجل إدارة الآلات المختلفة المستخدمة في صناعة التعدين (آلات السحب والطرق والسيور المتحركة... الخ)، وفي وسائط النقل (عربات الجر الكهربائية والقطارات والسفن والسيارات الكهربائية)، وفي آلات الرفع والحفر (الروافع، عربات النقل المستخدمة في المناجم، سيور النقل المتحركة)، وفي صناعة معالجة المعادن والصناعات الورقية والنسجية ووسائل الطباعة وغيرها، وتستخدم المحركات صغيرة الاستطاعة في الكثير من جمل التحكم. تنتج في الوقت الحاضر محركات التيار المستمر بأنواع مختلفة وباستطاعة تتراوح ما بين $0.25W \div 750$ كيلوواط. وتستخدم هذه المحركات للعمل في جمل القيادة الآلية القابلة للتنظيم. [10]

٣-٢- أجزاء آلة التيار المستمر:

١- المحرض أو الثابت Stator:

وهو الجزء الثابت (Stator) من الآلة، ويتألف من أقطاب كهرومغناطيسية تحوي ملفات مركزية وظيفتها توليد الفيض المغناطيسي الرئيسي، وتسمى هذه الملفات بملفات التهيج، وتصنع هذه الأقطاب من صفائح فولاذية، ويشمل المحرض أيضاً أسطوانة من الحديد الصلب (حديد فيرومغناطيسي) تشكل تتمة الدارة المغناطيسية. أما ملفات التهيج فتصنع من نواقل نحاسية (دائرية أو مربعة الشكل) [10].

ويمكن أن يصنع المحرض من أقطاب مغناطيسية دائمة لا تحتاج إلى تغذية خارجية وتصمم آلات كهذه للاستطاعات الصغيرة فقط.

٢- المتحرض أو الدائر Rotor:

وهو الجزء الدوار (Rotor) في الآلة ،ويتألف من نواة مغناطيسية مصنوعة من صفائح حديدية كهرومغناطيسية رقيقة معزولة حاوية على مجاري لكي تتوضع فيها ملفات المتحرض، وتُلف ملفات المتحرض في المجاري على شكل طبقتين، حيث يوضع في كل مجرى طرفا وشيعتين مختلفتين.

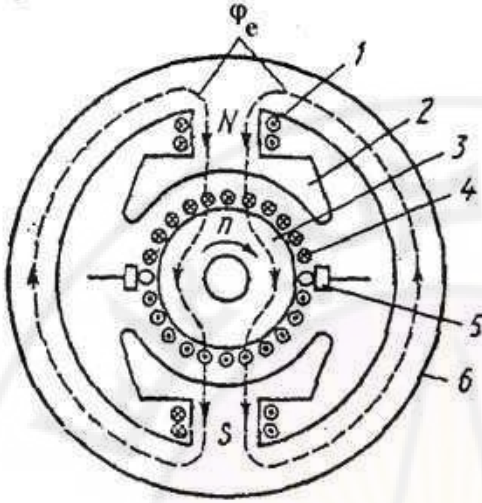
٣- المجمع (المبدلة) Collector:

ويصنع على شكل اسطوانة مكونة من مجموعة من الصفائح النحاسية ذات الناقلية الكهربائية الجيدة والمعزولة عن بعضها وعن محور الآلة ، وتوصل نهايات وشائع المتحرض بهذه الصفائح ، ويؤخذ التيار الكهربائي من ملف المتحرض بواسطة المجمع وعبر مسفرتين تمان وتضغطان على صفائح المجمع. ونلاحظ أن عدد صفائح المجمع يساوي عدد نهايات الوشائع.

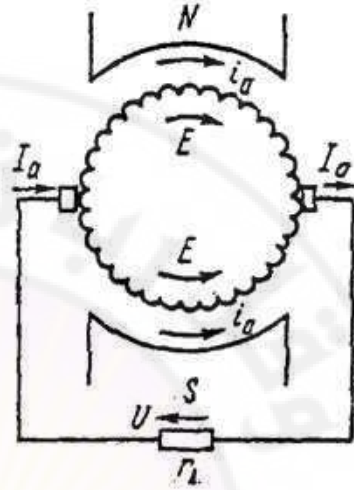
٤- المسفرات Brushes:

ووظيفتها نقل التيار الكهربائي المقدم عبر المجمع إلى الحمل الكهربائي . وهي تماس صفائح المجمع، وتكون مركبة على حوامل نحاسية خاصة بها مثبتة على جسم الآلة ومعزولة عن موضع تركيبها، ويؤمن التماس الدائم للمسفرة مع المجمع نابض خلفي مثبت بالحامل من جهة ،ويضغط على مؤخرة المسفرة من جهة أخرى، ويتم عملياً ضغط النابض حسب قساوة المسفرات أو تآكلها وتبعاً لعامل احتكاك المسفرة مع المجمع، وعلى حامل المسفرة أن يحفظها بوضع ثابت دون اهتزاز أمام المجمع [10].

a)



b)

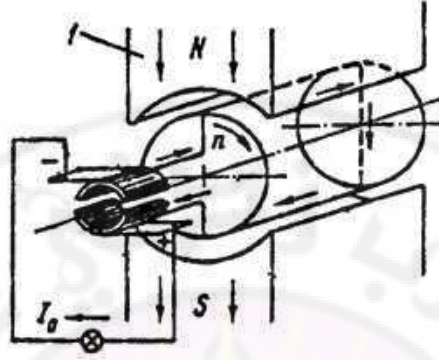


الشكل (1-3-أ-ب) المخطط الكهرومغناطيسي لآلة التيار المستمر ثنائية الأقطاب.
 ١- ملف التهيج، ٢- الأقطاب الرئيسية، ٣- ملف التحريض، ٤- المجمع، ٥- المسفرت،
 ٦- الهيكل (الغلاف الخارجي)

٣-٣- مبدأ عمل آلة التيار المستمر:

من أجل دراسة مبدأ عمل آلة التيار المستمر، سوف نستعين بآلة التيار المستمر البسيطة، المبينة في الشكل (2-3).

حيث تتألف من قطبين مغناطيسين يحيطان بلفة مستطيلة ذات ضلعين علوي وسفلي متصلين بحلقتين لحاسبتين معزولتين عن بعضهما وعن محور الدوران الحامل لهما. وتنزلق على هاتين الحلقتين مسفرتان فحمتان.



الشكل (2-3)

٣-٣-١- ندرس أولاً عمل الآلة كمولدة للتيار المستمر:

لنفرض أن المتحرض يدور باتجاه عقارب الساعة، فإنه تتولد نتيجة لذلك قوة محرّكة كهربائية في سلكي وشيعة المتحرض، يتعين اتجاهها حسب قاعدة اليد اليمنى. وتعطى قيمة القوة المحركة الكهربائية هذه حسب قانون التحريض الكهرطيسي لفارداي بالعلاقة:

$$E = B.\ell.V$$

حيث:

B : التحريض المغناطيسي في الثغرة الهوائية بين الأقطاب والمتحرض.

ℓ : الطول الفعال لسلك الوشيعة الموجودة في الساحة المغناطيسية.

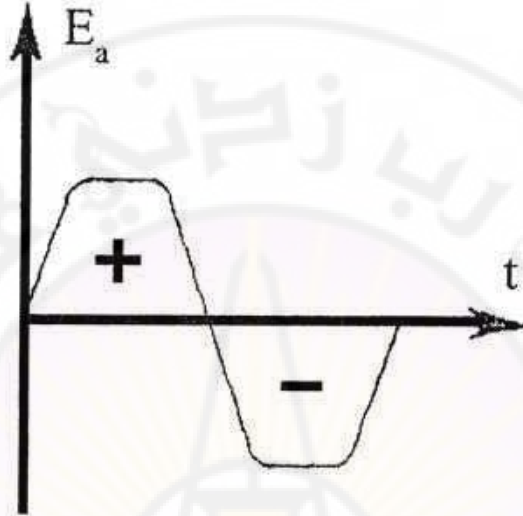
V : السرعة الخطية لحركة المتحرض.

تتولد في سلكي الوشيعة نظراً لتناظرهما قوتان محرّكتان كهربائيتان متساويتان ومتعاكستان يساوي مجموعهما في طرفي الوشيعة:

$$E_o = 2E = 2B.\ell.V \dots\dots\dots(3-1)$$

عندما يتحرك سلكا الوشيعة تحت كل قطب من القطبين الشمالي والجنوبي على التوالي، فإنه تتولد داخل الوشيعة قوة محرّكة كهربائية متناوبة يتغير اتجاهها كل نصف

دورة. وتأخذ علاقتها مع الزمن شكلاً مشابهاً لمنحني توزيع الفيض المغناطيسي التحريضي على مدار الثغرة الهوائية، كما هو مبين في الشكل .



الشكل (3-3) [10]

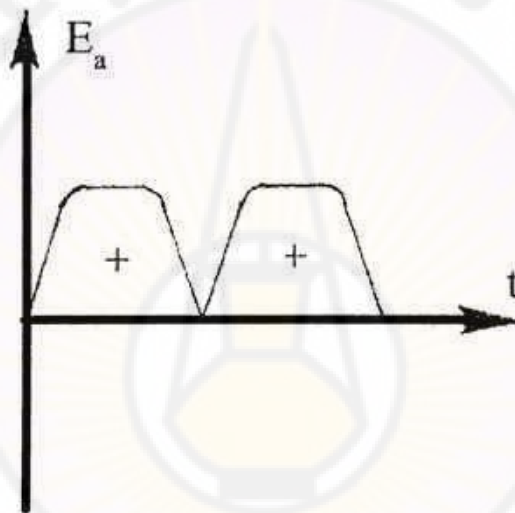
من الشكل (3-3) يمكن القول أن تردد القوة المحركة الكهربائية : $f = \frac{n}{60}$

حيث (n) سرعة دوران المتحرض وتقاس بعدد الدورات في الدقيقة، وفي الحالة العامة عندما يكون عدد أزواج الآلة يساوي (P) فإن التردد يساوي:

$$f = \frac{p \cdot n}{60} \dots \dots \dots (3-2)$$

وتتبدل القوة المحركة الكهربائية المتناوبة خارج الوشيعه، أي بعد المسفرتين الفحميتين، وتصبح مستمرة بفضل المجمع (المقوم الميكانيكي) الذي يقوم بوظيفة التقويم، وعندما يدور المتحرض وبالتالي المجمع بمقدار (90°) فإن القوة المحركة تكون قد غيرت اتجاهها، وتتغير بالوقت نفسه وضعية صفائح المجمع النحاسية بالنسبة للمسفرتين، بحيث أن المسفرة العليا ، الشكل (2-3) ، تبقى متصلة دوماً مع صفيحة السلك الواقع تحت القطب الشمالي، والمسفرة السفلى مع صفيحة السلك الواقع تحت القطب الجنوبي. وبذلك تظل قطبية المسفرتين واحدة لا تتغير.

يسمى المجمع أحياناً المقوم الميكانيكي للتيار الكهربائي، حيث يقوم التيار المتناوب المتولد داخل الوشيعية إلى تيار مستمر خارجها، إلا أن شكل القوة المحركة الكهربائية المقومة (شكل (3-4)) يحوي نبضات موجبة تتخللها انخفاضات دورية مشوهة. ومن أجل الحصول على شكل عملي للقوة المحركة الكهربائية، أي بدون هذه الانخفاضات، فإنه يتم لف المتحرض بعدة لفات تشكل عدة مجموعات تسمى الوشائع حيث توصل نهاياتها بصفائح المجمع. ويسمى الملف الكلي الناتج بملف المتحرض [10].



الشكل (3-4)

نستنتج مما تقدم أن ملف المتحرض هو عدة وشائع توصل مع بعضها بعضاً على التسلسل أو على التفرع بحيث أن هذا الملف يولد، أو يتحمل التوتر والتيار المطلوبين. وكما أن لكل ملف متعدد اللفات مقاومة داخلية، كذلك الحال بالنسبة لملف المتحرض حيث أنه يملك مقاومة داخلية محسوسة لا يمكن إهمالها ويرمز لها بالرمز (R_a) . وبأخذ تأثير هذه المقاومة بعين الاعتبار، فإن توتر المولدة الناتج على مربطها يصبح ذا قيمة أصغر من قيمة قوتها المحركة الكهربائية وذلك بمقدار هبوط التوتر الحاصل على هذه المقاومة الداخلية بسبب مرور تيار المتحرض (I_a) أي:

$$U = E_a - I_a R_a \dots \dots \dots (3-3)$$

٣-٣-٢ - عمل الآلة كمحرك:

بفرض تمت تغذية ملف المتحرض من منبع خارجي بتيار مستمر، مع الإبقاء على ملف التهييج تحت التغذية الكهربائية، أي أن ملف التهييج ينتج الساحة المغناطيسية، ومنه حسب الظاهرة الثانية تتولد في سلك المتحرض الذي يمر فيه التيار I_a قوة محرّكة مغناطيسية قدرها:

$$F = B \cdot \ell \cdot I_a$$

يتم تعيين اتجاهها حسب قاعدة اليد اليسرى كما ذكر سابقاً.

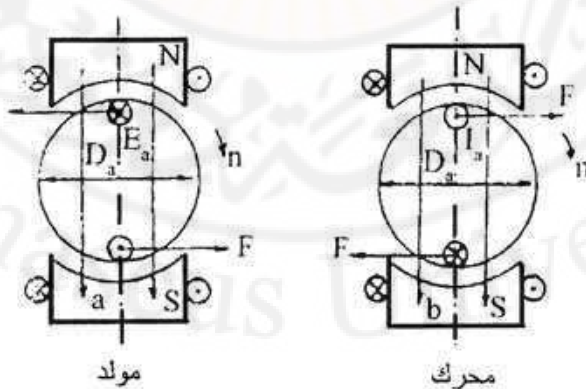
حاصل ضرب هذه القوة بالذراع ينتج عزمًا ميكانيكيًا دواراً نسميه العزم الكهرومغناطيسي وقدره:

$$T = F \cdot r_a = B \cdot \ell \cdot I_a \cdot r_a \dots \dots \dots (3-4)$$

حيث:

r_a - نصف قطر المتحرض.

يبدأ المتحرض تحت تأثير هذا العزم بالدوران، حيث يكون العزم في هذه الحالة محرّكاً، ويؤثر في اتجاه الدوران (بينما يكون العزم المتولد في المولد تحت تأثير القوة الناتجة عن مرور التيار في الناقل مضاداً لحركة الدوران ويسمى بالعزم العكسي). وبوضح ذلك الشكل (5-3) :



الشكل (5-3) | 10 |

يقوم المجمع في هذه الحالة بتغيير التيار المستمر الخارجي إلى تيار متناوب داخل المتحرض. تتولد في أسلاك ملف المتحرض نتيجة دورانها ضمن ساحة مغناطيسية قوى محرك كهربائية تعطى بالعلاقة :

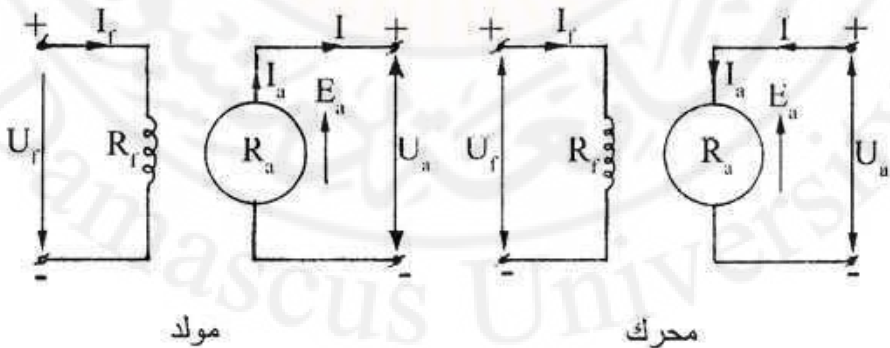
$$E = B \cdot \ell \cdot V$$

ولكنها تكون بعكس اتجاه التيار والتوتر المطبقين على طرفي المتحرض. لذلك تسمى القوة المحركة الكهربائية للمحرك القوة المحركة الكهربائية العكسية. ويكون التوتر على مربطي المحرك أكبر من القوة المحركة الكهربائية المتولدة بمقدار هبوط التوتر على المقاومة الداخلية لملف المتحرض أي :

$$U = E_a + R_a \cdot I_a \dots\dots\dots (3-5)$$

ومنه نستنتج في المولدات تتحقق المتراجعة $U < E_a$ بينما في المحرك فتتحقق المتراجعة $U > E$.

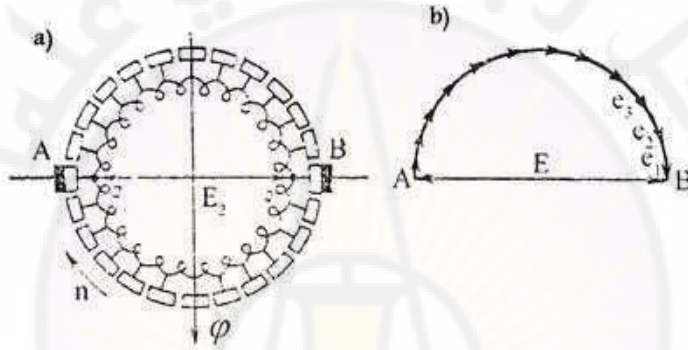
أي أن آلة التيار المستمر هي محول كهروميكانيكي يقوم بتحويل الطاقة من شكل إلى آخر، ففي حالة المولد تقوم الآلة بتحويل الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية فهو مُعطي للتيار الكهربائي، بينما في حالة المحرك تقوم الآلة بتحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية تظهر على محور الآلة وتكون الآلة آخذة للتيار (مستهلكة) كما هو واضح على الشكل (6-3)[10].



الشكل (6-3)

٣-٤ - معادلة القوة المحركة الكهربائية:

تنتشر وشائع ملف المتحرض على محيط المتحرض، حيث تتوضع ضمن مجاري موجودة على محيط المتحرض، وتتصل هذه الشائع مع المسفرات عبر صفائح المجمع، ويكون عدد المسفرات اثنتين على الأقل. تمس المسفرتان المجمع في نقطتين على المحيط، وتقسمان ملف المتحرض إلى دارتين فرعيتين متناظرتين كما في الشكل :



الشكل (7-3)

فإذا رمزنا لعدد أزواج الدارات التفرعية لملف المتحرض بـ (a)، فإن أقل عدد لهذه الدارات التفرعية في آلات التيار المستمر هو $(2a=2)$ ويوافق الحالة التي تتصل فيها الشائع المكونة لملف المتحرض مشكلة لفاً تسلسلياً (تموجياً). أما عندما تتصل هذه الشائع مع بعضها مشكلة لفاً تفرعياً (تطابقياً) فإن عدد الدارات التفرعية يساوي عدد أقطاب الآلة نفسها أي $2a - 2p$.

تتولد في نواقل ملف المتحرض قوة محركة كهربائية تضاف إلى بعضها بعضاً، وتشكل ما يسمى القوة المحركة الكهربائية الكلية لملف المتحرض الشكل (2-7-b). فإذا فرضنا أن عدد النواقل الفعالة التي تشارك في توليد القوة المحركة الكهربائية يساوي Z، وإن عدد الدارات التفرعية يساوي $(2a)$ ، فيصبح عدد النواقل المشاركة في توليد هذه القوة المحركة الكهربائية الكلية يساوي $(Z/2a)$. وإذا افترضنا أن التحريض

المغناطيسي في الثغرة الهوائية تحت كل قطب يساوي (B) فتكون القوة المحركة الكهربائية لملف المتحرض مساوية:

$$E_a = \frac{Z}{2a} \cdot B \cdot \ell \cdot V \dots\dots\dots(3-6)$$

وإذا بدلنا قيم التحريض المغناطيسي (B)، والسرعة الخطية (V) ما يساويهما من العلاقاتين التاليتين:

$$B = \frac{\phi}{\tau \cdot \ell}$$

$$V = \omega \cdot r_a = \omega \cdot \frac{Da}{2} = \frac{2\pi \cdot n}{60} \cdot \frac{2P\tau}{2\pi} = 2P\tau \frac{n}{60} \dots\dots\dots(3-7)$$

حيث:

τ : الخطوة القطبية (وهي طول القوس من محيط المتحرض الذي يشغله قطب واحد وتعطى بالعلاقة:

$$\tau = \frac{\pi \cdot Da}{2P} \dots\dots\dots(3-8)$$

حيث:

D_a : قطر المتحرض

وعندها تصبح القوة المحركة الكهربائية لملف المتحرض مساوية:

$$E_a = \frac{P \cdot Z}{60 \cdot a} \cdot \phi \cdot n$$

أو:

$$E_a = \frac{P \cdot Z}{2\pi \cdot a} \cdot \phi \cdot \omega \dots\dots\dots(3-9)$$

حيث:

n : سرعة دوران المتحرض وتقاس بعدد الدورات/دقيقة [r.p.m].

$\omega = \frac{2\pi n}{60}$: السرعة الزاوية الميكانيكية لدوران المتحرض (راديان/ثانية [rad/sec])

ϕ : الفيض المغناطيسي تحت القطب الواحد.

ويمكن كتابة معادلتى القوة المحركة بالشكل التالي:

$$E_o = C_e \cdot \phi \cdot n \dots\dots\dots(3-11)$$

أو

$$E_o = C_m \cdot \phi \cdot \omega \dots\dots\dots(3-12)$$

حيث:

$$C_e = \frac{PZ}{60.a} \text{ ثابت الآلة الكهربائي.}$$

$$C_m = \frac{P.Z}{2\pi.a} \text{ ثابت الآلة الميكانيكي [10].}$$

٢-٥- عزم آلة التيار المستمر:

يعطى عزم الآلة الكلي بحاصل جداء العزم الناتج عن ناقل واحد $T = F_c \cdot r_o$ B بعدد النواقل (Z) بافتراض أن التيار المار في كل ناقل يساوي:

$$I_c = \frac{I_a}{2a}$$

القوة المؤثرة في أي ناقل:

$$F_c = B \cdot \ell \cdot I_c$$

والعزم الناشئ عن هذه القوة:

$$T_c = F_c \times r_o = B \cdot \ell \cdot I_c \cdot r_o \dots\dots\dots(3-13)$$

والعزم الكلي الناشئ من النواقل Z:

$$T = Z \cdot F_c \cdot r_o = ZB \cdot \ell \cdot I_c \cdot r_o \dots\dots\dots(3-13)$$

وإذا بدلنا بنصف قطر المتحرض من العلاقة:

$$r_o = \frac{D_o}{2} = \frac{P \cdot \tau}{\pi}$$

والتحريض المغناطيسي من العلاقة:

$$B = \frac{\phi}{\tau \cdot \ell}$$

والتيار المار في الناقل نحصل على علاقة العزم الكلي:

$$T = \frac{P.Z}{2\pi.a} \phi . I_a \dots\dots\dots(3-14)$$

حيث يمكن كتابة العلاقة (3-14) بالشكل المختصر التالي :

$$T = C_m . \phi . I_a \dots\dots\dots(3-15)$$

وعندما نقدر ϕ بالويبر I_a , [Wb] بالأمبير [A]، فإن العزم يعطى بالنيوتن متر $[N.m]$.

إن العزم الذي تعطيه العلاقة أكبر بقليل من العزم الذي ينتج من الآلة، وذلك بسبب الضياعات الحديدية وضياعات الاحتكاك الميكانيكية. ويعرف الفرق بين عزم المتحرض وعزم محور المحرك بالعزم الضائع. وإذا بدلنا $C_m . \phi$ بما يساويها في علاقة القوة المحركة الكهربائية نجد :

$$T = \frac{E_a . I_a}{\omega} = \frac{P_a}{\omega} \dots\dots\dots(3-16)$$

وتعطينا هذه العلاقة التناسب المعروف بين العزم المتولد واستطاعة الآلة، حيث يمثل كل من المقدارين $T.\omega$, P_a الاستطاعة الكهربائية المتحولة إلى استطاعة ميكانيكية أو بالعكس، ولنرمز لها بـ P_{em} .

يمكن كتابة المعادلة الأخيرة بالشكل الآتي بعد أن نبذل (ω) بـ $(\frac{2\pi n}{60})$.

$$T[N.m] = \frac{P_{em}.60}{2\pi.n} = 9.55 \frac{P_{em}}{n} \frac{[W]}{[r.p.m]}$$

أو :

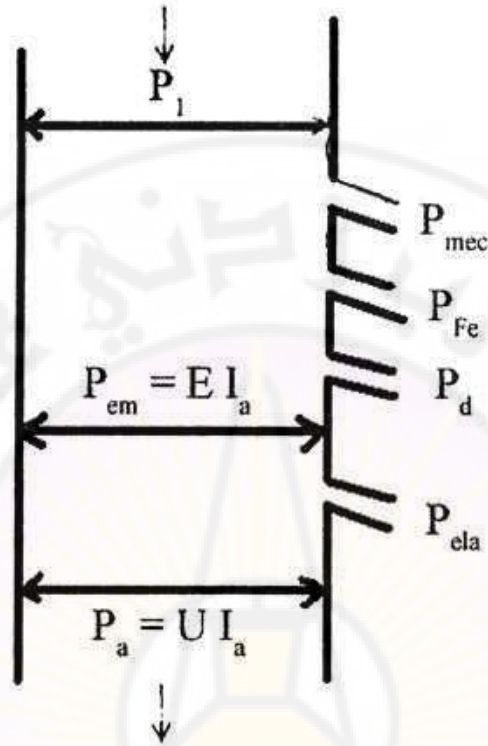
$$T[kg.m] = \frac{9.55}{9.81} \cdot \frac{P_{em}}{n} = 0.975 \frac{P_{em}}{n} \frac{[W]}{[r.p.m]}$$

حيث نقدر P_{em} بالواط.

وتستخدم العلاقتان الأخيرتان كثيراً في التطبيقات [10].

٣-٦ - مخطط الاستطاعة:

يبين الشكل (3-8) المخطط الكهربائي لمحرك تفرعي حيث نفترض أن المحرك يعمل في حالة مستقرة أي عندما $n=const$.



الشكل (8-3)

حيث :

P_1 : تمثل الاستطاعة الكهربائية التي يستجها المحرك من شبكة ذات توتر U ونيار I_1 :

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 \dots \dots \dots (3-17)$$

يغطي جزء من هذه الاستطاعة الضياعات النحاسية في دائرة التحريض:

$$P_f = U_f \cdot I_f \dots \dots \dots (3-18)$$

وفي دائرة المتحرض تكون الضياعات النحاسية:

$$P_{cla} = R_a \cdot I_a^2 \dots \dots \dots (3-19)$$

والجزء المتبقي يمثل الاستطاعة الكهرومغناطيسية للمتحرض المبينة بالعلاقة:

$$P_{em} = E_a \cdot I_a = P_1 - P_f - P_{cla} = U \cdot I - U_f \cdot I_f - R_a \cdot I_a^2 \dots \dots \dots (3-20)$$

وهذه الاستطاعة الكهرومغناطيسية تتحول إلى استطاعة ميكانيكية كلية، بينما الاستطاعة الميكانيكية على محور المحرك تقل عن الاستطاعة الكهرومغناطيسية بمقدار الضياعات الحديدية والإضافية والميكانيكية أي أن:

$$P_2 = P_{em} - (P_{fe} + P_d + P_{mec}) \dots\dots\dots(3-21)$$

حيث:

P_{fe} : الضياعات الحديدية.

P_d : ضياعات الاحتكاك.

P_{mec} : ضياعات ميكانيكية إضافية.

يمكن أن نحصل على نفس المخطط من أجل الأنواع الأخرى من المحركات ويكون المردود:

$$\eta = \frac{P_2}{P} = \frac{\text{الخرج استطاعة}}{\text{الدخل استطاعة}} \dots\dots\dots(3-22)$$

٣-٧- معادلة توازن العزوم:

العزم الكهرومغناطيسي للمحرك:

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\omega} \dots\dots\dots(3-23)$$

هو عزم دوراني يدير المحرك في اتجاهه المحدد ويتوازن مع العزوم المضادة التالية:

١- العزم T_0 الموافق للضياعات الحديدية والإضافية والميكانيكية.

٢- عزم الحمل T_c المطبق على محور المحرك من قبل الآلة الميكانيكية (عضو التشغيل).

٣- العزم الديناميكي T_d .

أي أن:

$$T_{em} = T_0 + T_c + T_d \dots\dots\dots(3-24)$$

أو:

$$T_{em} = T_{st} + T_d$$

حيث: $T_{st} = T_o + T_c$ يمثل العزم الستاتيكي المقاوم للحركة.

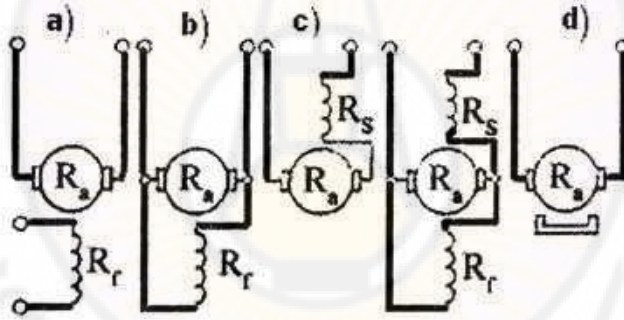
في الحالة المستقرة لعمل المحرك عندما $n=const$ وبالتالي $T_o=0$ يكون :

$$T_{em} = T_{st} \dots \dots \dots (3-25)$$

وهو العزم الدوراني النافع الموجود على محور المحرك الذي يتوازن مع عزم الحمل المطبق على محوره.

٣-٨- تصنيف آلات التيار المستمر :

تعمل آلات التيار المستمر فقط عند وجود حقل مغناطيسي. لذلك في أغلبية آلات التيار المستمر يوجد ملف التهبيج الذي يغذى من منبع تيار مستمر. ومن طريقة توصيل هذا الملف يمكن تصنيف أنواع آلات التيار المستمر كما يلي:



الشكل (9-3)

١- الآلات ذات التهبيج المستقل (المستقلة): يغذى ملف التهبيج من منبع تيار مستمر مستقل عن منبع المتحرض، ولا يتصل كهربائياً منبع تغذية ملف التهبيج مع منبع ملف تغذية ملف المتحرض الشكل (9-3-a) .

٢- الآلات ذات ملف التهبيج الفرعي (الفرعية): في هذا النوع ملف التهبيج وملف المتحرض يغذيان من منبع واحد على التفرع الشكل (9-3-b) .

٣- الآلات ذات ملف التهبيج التسلسلي (التسلسلية): يتصل ملف التهبيج على التسلسل مع ملف المتحرض الشكل (9-3-c)

- ٤- الآلات ذات ملف التهيج المركب (المختلطة): هذه الآلات تحتوي ملفي تهيج، الأول على التفرع والثاني على التسلسل مع ملف المتحرض الشكل (9-3-d)
- ٥- الآلات ذات التهيج الناتج عن مغناطيس دائم الشكل (9-3-e)



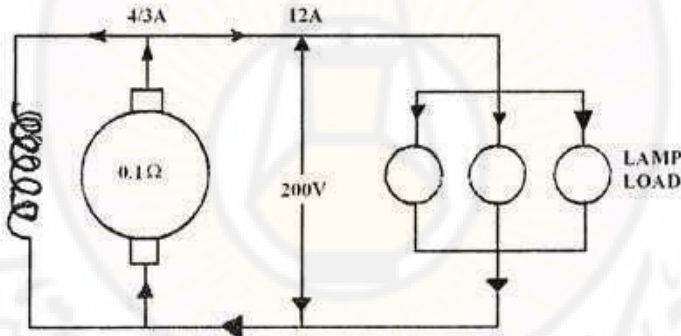
٣-٩- أمثلة محلولة:

مثال (١):

مولد تيار مستمر تفرعي تطابقي رباعي الأقطاب فيه مقاومة المتحرض 0.1Ω ومقاومة الملف التفرعي 150Ω يغذي /60/ مصباحاً، توتر المصباح $200V$ واستطاعته $40W$. احسب تيار المتحرض لكل فرع من دائرة التوازن في المتحرض وقيمة القوة المحركة الكهربائية المتولدة على اعتبار أن هبوط الجهد بسبب التلامس 1/فولت لكل مسفرة.

الحل :

بالعودة لدائرة المولد، كما في الشكل نجد أن :



استطاعة الحمولة

$$P = 40 \times 60 = 2400[W]$$

$$I_L = \frac{2400}{200} = 12[A]$$

$$I_f = \frac{200}{150} = \frac{4}{3}[A]$$

تيار الحمولة

$$I_o = 12 + 4/3 = 13.33 [A]$$

وبما أن نوع اللف هو تطابقي فإن عدد دارات التوازي يساوي عدد الأقطاب أي :

$$2a = 2p = 4$$

ويكون التيار في كل فرع من فروع المتحرض

$$I = \frac{I_a}{4} = \frac{13,33}{4} = 3.33A$$

$$R_a \cdot I_a = 3.33 \times 0.1 = 1.333V \text{ هبوط التوازن مقاومة المتحرض}$$

$$\text{هبوط التوازن بسبب تلامس الفحمات } 2 \times 1 = 2V$$

ومنه :

$$E = 200 + 1.33 + 2 = 203.33V$$

مثال (٢)

مولد تيار تفرعي رباعي الأقطاب تموجي يحتوي المتحرض فيه على (41) مجرى، وفي كل مجرى يوجد (12) ناقلًا . فإذا كانت مقاومة المتحرض $[\Omega] 0.5$ ومقاومة ملف التهيج التفرعي 200Ω وكان الفيض في كل قطب $[mW_h] 25$. احسب التورن المطبق على حمل مقداره $[\Omega] 10$ عندما يدور المولد بسرعة $[r.p.m] 1000$.

الحل :

$$P = 2$$

$$2a = 2$$

$$E = C_e \cdot \phi \cdot n$$

عدد النواقل

$$Z = 41 \times 12 = 492$$

$$E = \frac{Z \cdot P \cdot \phi \cdot n}{60 \cdot a} = \frac{492 \times 0.025 \times 1000 \times 2}{60 \times 1} = 410V$$

كما هو واضح فإن مقاومة الحمل على التفرع مع مقاومة ملف التهيج أي أن مقاومتها هي

$$R_{eq} = \frac{10 \times 200}{200 + 10} = \frac{200}{21} [\Omega]$$

المقاومة الكلية في الدارة

$$R_{eq} = \frac{200}{21} + 0.5 = 10.24 \text{ } [\Omega]$$

$$I_a = \frac{E}{R_{eq}} = \frac{410}{10.24} = 40.9 A$$

ومنه :

$$U = E - I_a R_a = 410 - 40.9 \times 0.5 = 389.55 V$$

مثال (٣):

مولد تيار مستمر لشحن بطارية توترها 12,8V. يستمد المولد حركته من محرك سيارة عبر وسيط حركي رافع للسرعة، نسبة تحويله (i=8)، وقد تم أخذ المعلومات التالية من النشرة الفنية الخاصة بالمولد:

عدد الأقطاب /4، عدد المجاري تساوي 18، نوع اللف تموجي بسيط والمطلوب:

١- حساب ثابت المولد الكهربائي بافتراض أن عدد النواقل في المجرى الواحد=2

٢- حساب الخطوة القطبية τ ، بافتراض أن قطر الدائر $D_a = 8 [cm]$

٣- حساب الفيض المغناطيسي تحت القطب الواحد، علماً بأن طول الدائر

الفعال $\ell_a = 12 [cm]$ ، وأن التحريض المغناطيسي تحت الفرجة الهوائية

$$B = 1.6 [W_b / m^2]$$

٤- احسب مجال سرعة المحرك لشحن البطارية.

٥- سرعة المحرك لكي يكون تيار الشحن للبطارية مساوياً 10A مع العلم أن مقاومة

$$R_a = 0.15 \Omega \text{ المتحرض}$$

٦- عزم المولدة المعاكس المنسوب إلى محور المحرك [10] .

الحل:

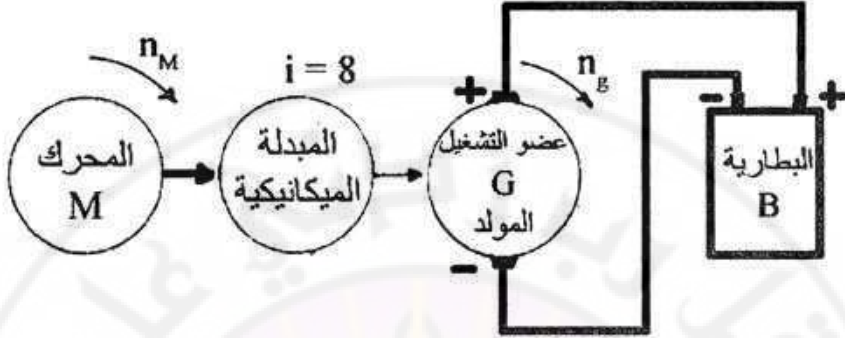
بما أن نوع اللف تموجي بسيط، إذا فعدد الدارائن، الفرعية يساوي:

$$2a = 2$$

وبما أن عدد النواقل في كل مجرى يساوي ٢، إذا فعدد النواقل الكلية للمتعرض

يساوي:

$$Z = 2 \times 18 = 36$$



١- حساب ثابت المولد الكهربائي:

$$C_e = \frac{P.Z}{60.a} = \frac{2 \times 36}{60 \times 1} = 1.2$$

٢- الخطوة القطبية:

$$\tau = \frac{\pi.D_a}{2p} = \frac{\pi.0.08}{4} = 0.063 \quad [m]$$

٣- حساب الفيض المغناطيسي:

$$B = \frac{\phi}{\tau.L_a}$$

ومنه :

$$\phi = B.\tau.L_a$$

$$= 1.6 \times 0.063 \times 0.12 = 0.012 \quad [Wb]$$

٤- حساب مجال سرعة المحرك لشحن البطارية:

لدينا في حالة المولدات الكهربائية العلاقة التالية:

$$E_a > U_a$$

وبما أن :

$$E_a = C_e . \phi . n_g$$

إذاً مجال سرعة المولد يساوي:

$$ng > \frac{U_a}{C_e \phi} = \frac{12,8}{1,2 \times 0,012} = 888,89 [r.p.m]$$

ومنه نحسب مجال سرعة المحرك:

$$n_m = \frac{ng}{i} = \frac{888,89}{8} > 111,11 [r.p.m]$$

٥- حساب سرعة المحرك من أجل تيار الشحن مساو 10[A] :

- القوة المحركة الكهربائية المتحرضة في هذه الحالة:

$$E_a = U_a + I_a R_a \\ = 12,8 + 10 \times 0,15 = 14,3 [V]$$

ومن جهة ثانية فإن E_a تساوي:

$$E_a = C_e \phi ng$$

ومنه سرعة المولد:

$$ng = \frac{E_a}{C_e \phi} = \frac{14,3}{1,2 \times 0,012} = 993 [r.p.m]$$

أما سرعة المحرك فتساوي:

$$n_m = \frac{ng}{i} = \frac{993}{8} = 124 [r.p.m]$$

٦- حساب عزم المولد المعاكس والمنسوب إلى محور المحرك:

$$T_a = C_e \phi I_a = \\ = \frac{P.Z}{2\pi a} \cdot \phi I_a = \frac{2 \times 36}{2\pi \cdot 1} \times 0,012 \times 10 = 1,38 [N.m]$$

أما عزم المولد المعاكس والمنسوب إلى محور المحرك :

$$T_m = T_a \cdot i = 1,38 \times 8 = 11,04 [N.m]$$

مثال (٤):

مولد تفرعي استطاعته 100KW يدور بسرعة 800r.p.m موصول إلى قضبان تجميع بوترها 500V ومقاومة المتحرض فيه 0.1Ω ومقاومة ملف التهييج 100Ω. احسب سرعة دوران الآلة كمحرك إذا وصل إلى القضبان ذاتها مستهلكاً 100KW

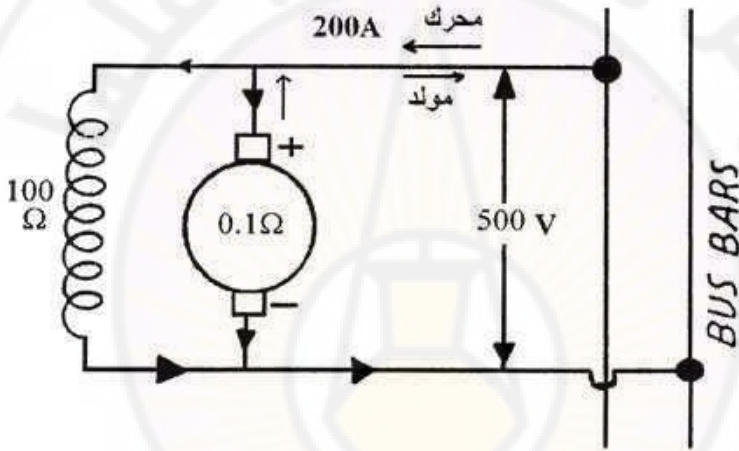
الحل:

عند عمل الآلة كمولد حسب الشكل:

$$I_f = \frac{U_f}{R_f} = \frac{500}{100} = 5 [A]$$

$$T_l = \frac{P}{U} = \frac{100 \times 10^3}{500} = 200 [A]$$

$$I_a = I_l + I_f = 200 + 5 = 205 [A]$$



هبوط الجهد على المتحرض:

$$I_a R_a = 20.5 [V]$$

القوة المحركة الكهربائية المتولدة:

$$E = U + R_a I_a$$

$$E = 500 + 20.5 = 520.5 [V]$$

إذا دار الآن المولد كمحرك بسرعة 800r.p.m فإنه سيعطي قوة محركية عكسية قيمتها

$$E_{b1} = 520.5 [V] \text{ وسيدور بسرعة } 800 \text{ r.p.m.}$$

ومن الشكل في حالة المحرك نجد أن:

$$I_a = I_l - I_f = 200 - 5 = 195 A$$

$$E_{b2} = U - R_a I_a = 500 - 0.1 \times 195 = 480.5 V$$

ولدينا:

$$E_{b1} = C_e \cdot \phi_1 \cdot n_1$$

$$E_{b2} = C_e \cdot \phi_2 \cdot n_2$$

ولدينا تيار التهيج نفسه $\Leftarrow \phi_1 = \phi_2$ حيث $I_{f1} = I_{f2}$ ومنه:

$$\frac{Eb_2}{Eb_1} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow n_2 = \frac{Eb_2}{Eb_1} \cdot n_1 = \frac{480.5}{520.5} \times 800 = 738.5 [r.p.m]$$

٣-١٠- المميزات الكهروميكانيكية والميكانيكية لمحركات التيار المستمر:

يقصد بالمميزات الكهروميكانيكية بأنها العلاقة بين سرعة دوران المحرك والتيار المار فيه، أي:

$$n = f(I) , \omega = f(I)$$

بينما العلاقة بين السرعة والعزم المتولد في المحرك، أي:

$$n = f(T) , \omega = f(T)$$

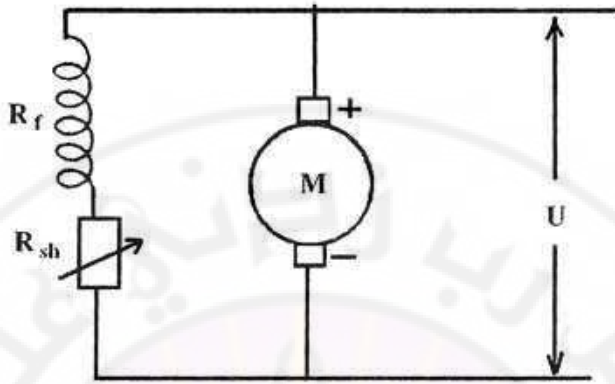
فتسمى المميزات الميكانيكية، وتختلف هذه المميزات من حيث شكلها وخصائصها ودرجة قساوتها من محرك إلى آخر.

وبما أن المحركات التفرعية تعد حالة خاصة بالنسبة لمحركات التهيج المستقل حيث أنه في كلا النوعين يكون الفيض المغناطيسي ثابتاً وغير متعلق بتيار الحمل، فإن مميزات المحركات ذات التهيج المستقل لا تختلف عن مميزات المحركات التفرعية، لذا سنتم دراستها سوياً [10,6].

٣-١٠-١- المميزات الطبيعية الكهروميكانيكية والميكانيكية للمحركات ذات التهيج المستقل أو التفرعية:

يبين الشكل (10-3) الدارة الكهربائية لمحرك تفرعي، حيث يوصل ملف التهيج على التفرع مع المتحرض عبر مقاومة R_{st} تستعمل للتنظيم وتشكل مع ملف التهيج دائرة التهيج.

واستناداً إلى قانون كيرشوف الثاني، يمكننا استنتاج معادلة التوازن في دائرة المتحرض والتي تسمى بالدائرة الرئيسية:



الشكل (10-3)

$$U = E_a + I_a \cdot R_a \dots \dots \dots (3-26)$$

حيث:

U - جهد شبكة التغذية الكهربائية.

E_a - القوة المحركة الكهربائية العكسية المتولدة على طرفي ملف المتحرض.

I_a - التيار المار في ملف المتحرض.

R_a - المقاومة الأومية الكلية في المتحرض.

وتساوي القوة المحركة الكهربائية العكسية المتولدة على طرفي المتحرض:

$$E_a = C_m \cdot \phi \cdot \omega = C_e \cdot \phi \cdot n \dots \dots \dots (3-27)$$

حيث أن:

ϕ : الفيض المغناطيسي المتولد في ملف التهييج.

ω : السرعة الزاوية لمحور المتحرض.

n : عدد الدوران في الدقيقة.

C_m : ثابت التصميم الميكانيكي في المحرك.

C_e : ثابت التصميم الكهربائي في المحرك.

نستنتج من العلاقات (3-26) و (3-27) مايلي:

$$U = C_m \cdot \phi \cdot \omega + I_a \cdot R_a$$

ومنه:

$$w = \frac{U}{C_m \cdot \phi} - \frac{I_a \cdot R_a}{C_m \cdot \phi} \dots\dots\dots(3-28)$$

وتعد العلاقة الأخيرة المميزة الكهروميكانيكية لمحركات التيار المستمر ذات التهيج المستقل أو التفرعية، وبما أن (ϕ) يكون في هذا النوع من المحركات ثابتاً فيمكننا عد $(C_m \cdot \phi)$ ثابتاً ويساوي: $C_m \cdot \phi = C$ [10,6] .

وبالتالي تصبح العلاقة (3-28) مساوية:

$$w = \frac{U}{C} - \frac{I_a R_a}{C} \dots\dots\dots(3-29)$$

وتسمى المميزة الكهروميكانيكية الطبيعية للمحركات ذات التهيج المستقل أو التفرعية والتي تتعلق بخصائص المحرك التصميمية. أما المميزات الميكانيكية الطبيعية لهذه المحركات فيتم الحصول عليها استناداً إلى العلاقة بين العزم الدوراني والتيار المار في المتحرض وهي:

$$T = C_m \cdot \phi \cdot I$$

أو :

$$T = C \cdot I \dots\dots\dots(3-30)$$

ومن العلاقتين (3-29) و (3-30) نستنتج :

$$w = \frac{U}{C} - \frac{TR}{C^2} \dots\dots\dots(3-31)$$

وهي معادلة المميزات الميكانيكية (العلاقة بين السرعة والعزم) للمحركات المستقلة والتفرعية.

نلاحظ من العلاقات (3-31) و (3-29) أنها علاقات خطية بين السرعة والتيار، وبين السرعة والعزم أي تمثل بخط مستقيم هابط مع ازدياد التيار أو العزم، حيث تساوي السرعة عندما يكون التيار أو العزم مساوياً للصفر إلى قيمة ثابتة تسمى سرعة اللاحمل المثالي:

$$\omega_o = \frac{U}{C^2} \dots\dots\dots(3-32)$$

أما الحد الثاني من الطرف الأيمن في المعادلتين (3-31)، (3-29) فيسمى هبوط السرعة للمميزات الطبيعية ويساوي بالنسبة للمميزات الكهروميكانيكية:

$$\Delta\omega = I_a \frac{R_a}{C}$$

وبالنسبة للمميزات الميكانيكية:

$$\Delta\omega = T \frac{R_a}{C^2}$$

تصبح قيمة هبوط السرعة أكبر عند إضافة مقاومة خارجية (ريوستاتية) على التسلسل مع مقاومة المتحرض:

$$\Delta\omega = T_a \frac{R_a + R_r}{C} \dots\dots\dots(3-32)$$

أو:

$$\Delta\omega = T \frac{R_a + R_r}{C^2}$$

ومنه نستنتج أن هبوط الخط المستقيم للميزة أصبح أكبر ،أي درجة ميلان الخط المستقيم ازدادت [6].

٣-١٠-٢- إنشاء المميزات الكهروميكانيكية و الميكانيكية للمحركات ذات التهيج المستقل (التفرعية):

بما أن العلاقتين (3-31)، (3-29) تمثل كل منهما خطأ مستقيماً فيكفي لإنشائهما بياناً أن توجد إحداثيات نقطتين فقط على هذا الخط. ويمكن إيجاد النقطة الأولى بسهولة من معطيات اللوحة الاسمية للمحرك (وهي صفيحة معدنية مثبتة على الهيكل الخارجي للآلة مسجل عليها القيم الاسمية للآلة) والتي تتحدد عادة بالاستطاعة الاسمية (P_n) وجهد التغذية (U_n) والسرعة الاسمية (n_n) وتيار الحمل الاسمي (I_n) ويضاف إلى هذه المعطيات أحياناً قيمة المردود من أجل الحمل الاسمي (η_n). أما العزم الاسمي (T_n) فيمكن حسابه بدلالة (P_n) و (n_n) بواسطة :

$$T_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{P_n}{\frac{2\pi m_n}{60}} = 9.55 \frac{P_n}{n_n} \quad [N.m]$$

من المعطيات أو المواصفات الاسمية للمحرك يمكننا استنتاج النقطة ذات الإحداثيات (n_n, I_n) أو (w_n, I_n) على المميرة الكهروميكانيكية الطبيعية [12,10].
وتكون إحداثيات هذه النقطة بالنسبة للميزات الميكانيكية الطبيعية مساوية (n_n, T_n) حيث يتم حساب عزم الحمولة الاسمية من العلاقة :

$$T_n = C \cdot I_n$$

أما النقطة الثانية فيمكن أن تكون النقطة المقابلة لسرعة اللاحمل (ω_0) والتي يكون فيها: $(I=0)$ أو $(T=0)$ ويمكننا حساب قيمة (ω_0) من العلاقة:

$$\omega_0 = \frac{U}{C^2}$$

ولأن:

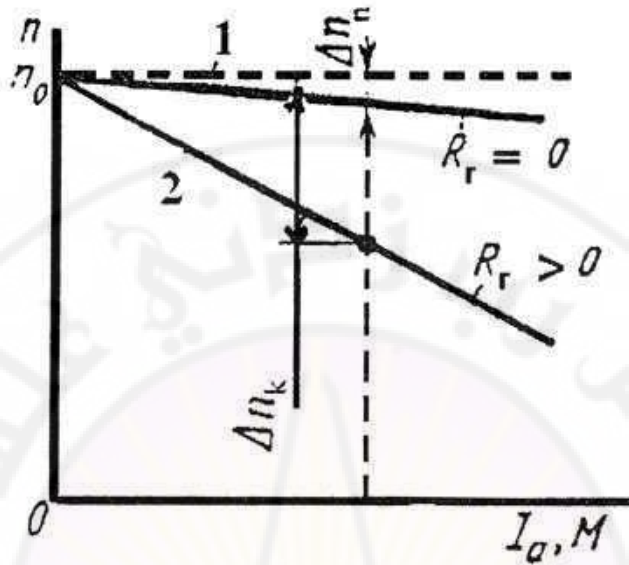
$$E_a = C \cdot \omega_n = U_n - I_a \cdot R_a$$

$$C = \frac{U_n - I_n \cdot R_a}{\omega_n} \dots \dots \dots (3-34)$$

ومنه نستنتج:

$$w_a = \frac{U_n}{U_n - I_n R_a} \cdot w_n \dots \dots \dots (3-35)$$

ومنه يمكن إنشاء هذه المميرة التي يكون شكلها العام:



الشكل (11-3)

يمكن حساب السرعة الاسمية للمحرك من العلاقة (2-34) فينتج:

$$\omega_n = \omega_o \left(\frac{U_n - I_n R_o}{U_n} \right) \dots \dots \dots (3-36)$$

أما عند إضافة مقاومة R_r ريوستاتية على التسلسل مع R_o فتصبح العلاقة (3-34) كمايلي:

$$\omega_{nr} = \omega_n \left[1 - \frac{I_n (R_o + R_r)}{U_n} \right] \dots \dots \dots (3-37)$$

تطبيق:

لدينا مروحة كهربائية صناعية تقاد بواسطة محرك تيار مستمر ذي التهيج المستقل، ويملك المواصفات الاسمية التالية:

$$P_n = 65 [KW], U_n = 440 [V], \\ I_n = 168 [A], n_n = 1480 [r.p.m], \\ R_o = 0.158 [\Omega]$$

معادلة المميزات الميكانيكية للمروحة فتساوي:

$$T_f = 49 + 343 \left(\frac{\omega}{\omega_{nf}} \right)^2 \quad [N.m]$$

حيث أن السرعة الاسمية للمروحة تساوي:

$$n_{nf} = 1500 [r.p.m]$$

المطلوب:

١- احسب مردود المحرك.

٢- تعيين السرعة التي تدور عليها المروحة على المميزات الطبيعية للمحرك، والسرعة التي تدور عليها إذا أضفنا إلى دارة المتحرض مقاومة خارجية تساوي بالقيمة $R_r = 0.6 [\Omega]$.

الحل:

ننشئ أولاً المميزات الميكانيكية الطبيعية والريوسنانية الاصطناعية للمحرك:

- المردود الاسمي:

$$\eta_n = \frac{p_n}{U_n \cdot I_n} = \frac{65 \times 10^3}{440 \times 168} = 0.877$$

- السرعة الزاوية الاسمية:

$$\omega_n = \frac{2\pi \cdot n_n}{60} = \frac{2\pi \cdot 1480}{60} = 155 [rad/sec]$$

- سرعة اللاحمل الزاوية:

$$\omega_a = \omega_n \frac{U_n}{U_n - I_n \cdot R_a}$$

$$= 155 \frac{440}{440 - 168 \times 0.158} = 165 rad/sec$$

- العزم الاسمي:

$$T_n = \frac{p_n}{\omega_n} = \frac{65 \times 10^3}{155} = 419.4 [N.m]$$

وهكذا نكون قد حددنا نقطتين من نقاط الميزة الطبيعية ذات الإحداثيات $(\omega_0, 0)$ و

(W_n, T_n) وبوساطتهما ننشئ الميزة الطبيعية للمحرك .

المميزة الريوستاتية للمحرك:

$$\omega_{nr} = \omega_o \left[1 - \frac{I_n (R_a + R_r)}{U_n} \right]$$

$$= 165 \left[1 - \frac{168(0.158 + 0.6)}{440} \right] = 117 \quad [rad/sec]$$

وهكذا يمكننا إنشاء المميزة الريوستاتية الاصطناعية للمحرك بعد أن حددنا إحداثيات النقطة (ω_{nr}, T_n) إضافة إلى النقطة $(\omega_o, 0)$ [12].
المميزات الميكانيكية للمروحة:
لدينا معادلة المميزات الميكانيكية للمروحة والتي تساوي:

$$T_f = 49 + 343 \left(\frac{\omega}{\omega_{nf}} \right)^2$$

حيث:

$$\omega_{nf} = \frac{2\pi \times n_{nf}}{60} = \frac{2\pi \times 1500}{60} = 157 \quad [rad/sec]$$

وبالتعويض نجد: $T_f = 49 + 0.139 \omega^2$

نحسب العلاقة $T_f = \rho(\omega)$ من أجل عدة نقاط ونرتب النتائج في الجدول التالي:

ω rad/sec	0	78	117	155	165
T_f N.m	49	130	236	379	423

ننشئ على المخطط البياني المميزات الميكانيكية للمروحة في الربع الثاني، ونرسم المميزات المناظرة لها في الربع الأول، ونحدد نقطتي تقاطع هذه المميزات مع المميزات الطبيعية والاصطناعية للمحرك والتي تبين السرعة التي تدور عليها المروحة في كلتا الحالتين، كما هو مبين في الشكل التالي :

يتولد فيض مغناطيسي يتناسب طردياً مع قيمة التيار في مجال معين يتحدد بالإشباع المغناطيسي (تيار حمل أو تهيج يجب أن لا يتجاوز قيمته حدود المنطقة الخطية من منحنى الممغنطة).

من الدارة الكهربائية للمحرك التسلسلي نكتب معادلة التوترات حسب القانون الثاني لكيرشوف:

$$U = E_a + I \cdot R_m \dots\dots\dots(3-38)$$

حيث:

$$R_m = R_a + R_p$$

حيث أن :

R_a - المقاومة الفعالة لملف المتحرض.

R_p - المقاومة الفعالة لملف التهيج.

E_a - القوة المحركة الكهربائية المتولدة على طرفي المتحرض والتي تساوي:

$$E_a = C_m \cdot \phi \cdot \omega$$

ومنه نستنتج:

$$\omega = \frac{U}{C_m \cdot \phi} - \frac{I R_m}{C_m \cdot \phi} \dots\dots\dots(3-39)$$

وهي معادلة المميزات الكهروميكانيكية للمحرك التسلسلي، والتي بتغيير الفيض المغناطيسي (ϕ) تتغير قيمة السرعة (ω) بشكل عكسي، إذن فهي معادلة لاختية.

أما معادلة المميزات الميكانيكية فنستنتجها من معادلات التوازن الكهربائي للمحرك مع الأخذ بعين الاعتبار أن العزم في هذا المحرك يساوي:

$$T = C_m \cdot \phi \cdot I$$

وبما أن الفيض المغناطيسي يتناسب مع التيار، ولأن العلاقة خطية في مجال العمل النظامي للمحرك، فيمكننا أن نكتب:

$$T \approx \alpha \cdot C_m \cdot I^2 \dots\dots\dots(3-40)$$

حيث:

$$\phi \approx \alpha . I$$

من العلاقات (3-39) و (3-40) نستنتج:

$$\omega = \frac{U}{\alpha . C_m . \sqrt{\frac{T}{\alpha . C_m}}} - \frac{R_m}{\alpha . C_m} \dots \dots \dots (3-41)$$

وهي معادلة المميزات الميكانيكية الطبيعية للمحرك التسلسلي. ولأن العناصر: R_m, α, C_m, U هي ذات قيم ثابتة، فيمكننا عد المعادلة (3-41) مساوية:

$$\omega = \frac{A}{\sqrt{T}} - B \dots \dots \dots (3-42)$$

حيث B, A ثوابت [12].

نستنتج من المعادلة (3-42) أن معادلة المميزات الميكانيكية هي معادلة قطع زائد، حيث تكون السرعة فيها كبيرة عند الحمولات الصغيرة، وكما هو مبين في الشكل (13-3) فإن محاور الإحداثيات تمثل خطوط المقاربة لمنحني هذه المميزات.



الشكل (13-3)

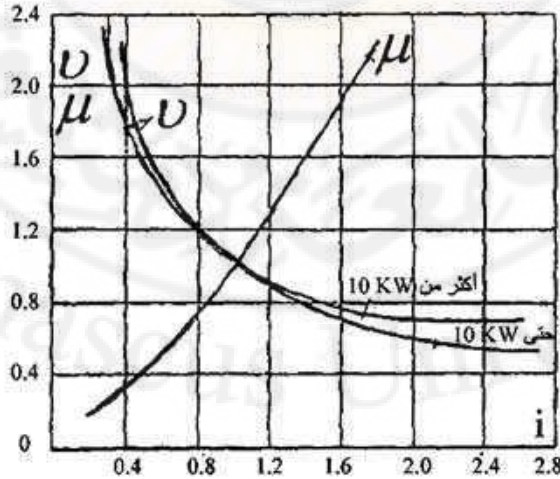
يبين الشكل (13-3) أن المميزات الميكانيكية وكذلك الكهروميكانيكية تتحدر بشدة كلما ازدادت قيمة عزم الحمولة، وتزداد سرعة المحرك كلما قلت الحمولة حيث تكون قيمتها كبيرة عند الحمولات الصغيرة، ولا يسمح بأن يعمل المحرك التسلسلي في حالة

اللاحمل حيث يؤدي ذلك إلى خروج المحرك عن مجال عمله الطبيعي (زيادة سرعته)، وبالتالي إلى إتلافه.

وتجدر الإشارة إلى أن منحنى المميزات الذي تم استنتاجه على أساس المعادلة (2-42) لا يمكن استخدامه لغاية حسابية لأن المميزات الحقيقية لهذا المحرك تختلف عن هذا المنحنى بشكل ملحوظ نتيجة للإشباع المغناطيسي. لذلك نلجأ عادة لطريقة التحليل البياني لإنشاء هذه المميزات، والتي تستند إلى معطيات محددة بالعلاقة $\omega = f(I)$ ، أو $n = f(I)$ ، والعلاقة $T = f(I)$ والمبينة على مخططات بيانية أو على شكل جداول في النشرات الفنية الخاصة بهذه المحركات تبعاً لتصميمها واستطاعتها. حيث يستحصل على هذه المخططات البيانية أو الجداول من قبل الشركات الصانعة لهذه المحركات بواسطة التجارب المجراة على هذه المحركات، وذلك بعد الانتهاء من تصنيعها، ومن ثم تدون النتائج التجريبية في النشرة الخاصة بها على شكل أرقام وقيم نسبية (منسوبة للقيم الاسمية) للمحرك. وكمثال على ذلك يبين الشكل (3-14) المخطط البياني لهذه المميزات من أجل تصميم محدد للمحركات الكهربائية التسلسلية وذلك بالقيم الواحدة :

$$v = f(i)$$

$$\mu = f(i)$$



الشكل (3-14)

$v = \frac{\omega}{\omega_n}$: السرعة النسبية، بالقيم الواحدة.

$\mu = \frac{T}{T_n}$: العزم النسبي، بالقيم الواحدة.

$i = \frac{I}{I_n}$: التيار النسبي، بالقيم الواحدة.

٣-١١ - مبادئ تنظيم سرعة محركات التيار المستمر:

تُحسب سرعة دوران محرك التيار المستمر بالعلاقة:

$$\omega = [U - I_a (R_a + R_r)] / C_m \cdot \phi \dots\dots\dots(3-43)$$

تدل هذه العلاقة على إمكانية تغيير سرعة الدوران باستخدام إحدى الطرائق التالية:

١- ربط المقاومة المتغيرة R_r إلى دائرة ملف المتحرض على التسلسل .

٢- بتغيير قيمة السليالة المغناطيسية ϕ .

٣- بتغيير قيمة توتر التغذية U .

ونسنعرض فيمايلي الخصائص الأساسية لطرائق التنظيم المذكورة على محرك التيار المستمر ذي التهيج الفرعي.

٣-١١-١ - تنظيم السرعة عن طريق ربط مقاومة متغيرة على التسلسل مع دائرة المتحرض:

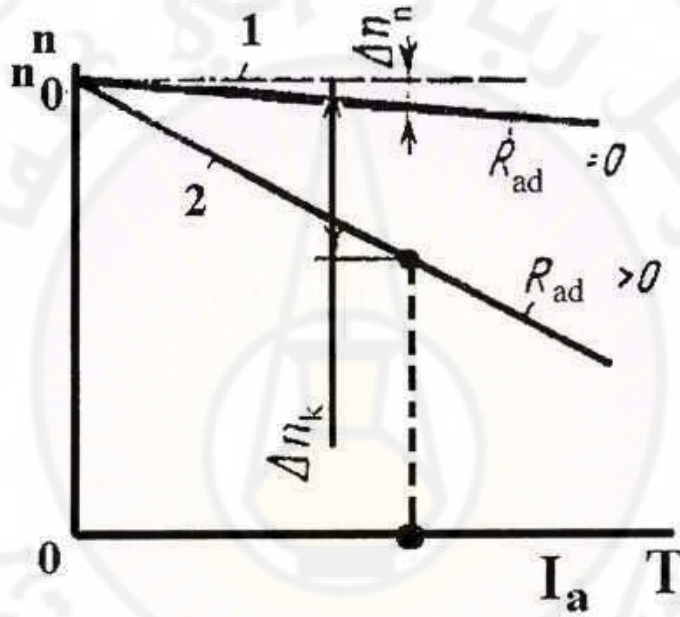
عند ربط مقاومة متغيرة مع دائرة المتحرض يصبح تتناقص سرعة دوران المحرك مع تزايد الحمل أكثر حدة مما في حالة عمل المحرك دون هذه المقاومة أي:

$$n = \frac{U - I_a (R_a + R_r)}{C_e \phi} = \frac{U}{C_e \phi} - \frac{I_a (R_a + R_r)}{C_e \phi} = n_n - \Delta n \dots\dots\dots(3-44)$$

وتتضح هذه الخاصة من خلال الشكل (3-15) الذي يحتوي على مميزات السرعة والمميزات الميكانيكية للمحرك ذي التهيج الفرعي، حيث يمثل المنحني (١) في هذا الشكل مميزة تنظيم السرعة الطبيعية عند ($R_r = 0$) ويمثل المنحني (٢) مميزة التنظيم باستخدام المقاومة ($R_r > 0$) .

وتكون سرعة دوران المحرك في حالة اللاحمل n_0 من أجل كلتا المميزتين واحدة، أما قيم Δn (تغير سرعة الدوران تحت تأثير الحمل) فتكون مختلفة. ومن أجل قيمة تيار المترحّض I_a نفسها يكون لدينا:

$$\Delta n = \frac{I_a (R_a + R_r)}{C_e \phi}$$



الشكل (15-3)

وكلما كانت قيمة المقاومة الإضافية المتغيرة R_r كبيرة يصبح هبوط سرعة الدوران مع ازدياد الحمل أكثر حدة.

يمكن الحصول على المميزات الميكانيكية للمحرك ذي التهيج التفرعي $n = f(T)$ بالاعتماد على مميزات السرعة $n = f(I_a)$ بدّل تغير المقياس المستخدم في المحور الأفقي، لأن هذا النوع من محركات التيار المستمر يحقق العلاقة:

$$T = C_m \cdot \phi \cdot I_a = C \cdot I_a$$

أي العزم يتناسب طردياً مع تيار المترحّض.

تتمثل الميزة السيئة الأساسية لطريقة التنظيم هذه بظهور ضياعات كبيرة للطاقة في المقاومة المتغيرة ،وبخاصة عند سرعة الدوران الصغيرة، حيث يبدو ذلك واضحاً من خلال العلاقة:

$$\Delta n / n_o = I_a (R_a + R_r) / U = I_a^2 (R_a + R_r) / U I_a = \Delta P_e / p_1 \dots\dots\dots(3-45)$$

ΔP_e : ضياعات الاستطاعة الكهربائية في دارة المتحرض.

p_1 : الاستطاعة المقدمة للمتحرض.

بحل المعادلة (3-45) بالنسبة للمتحول ΔP_e نحصل على العلاقة التالية:

$$\Delta P_e = P_1 . \Delta n / n_o = p_1 (n_o - n) / n_o$$

أي أن الضياعات تزايد بصورة طردية مع تناقص سرعة المتحرض. من البديهي أن هذه الطريقة لا تسمح إلا بخفض سرعة الدوران (بالمقارنة مع السرعة، المأخوذة على الميزة الطبيعية) فقط.

إلا أنه في بعض الأحيان ينبغي الأخذ بالحسبان أن وصل مقاومة أومية كبيرة على التسلسل مع ملف المتحرض يجعل الميزة الميكانيكية للمحرك ذات ميل أكبر (أكثر ليونة) نتيجة لذلك تصبح التغيرات الطفيفة في عزم الحمل كافية لإحداث تغيرات كبيرة في سرعة الدوران.

٣-١-٢ - تنظيم السرعة عن طريق تغيير قيمة السيادة المغناطيسية :

من أجل تغيير قيمة السيادة المغناطيسية في المحرك لابد من تنظيم تيار التهييج و تحسب سرعة دوران المحرك عند قيم السيادة المغناطيسية المختلفة ϕ_1, ϕ_2 بالعلاقات التالية:

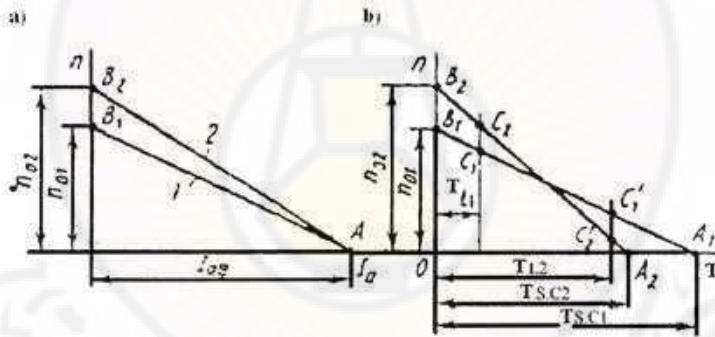
$$n_1 = \frac{U - I_a R_a}{C_e \phi_1} = n_{o1} - \Delta n_1 \dots\dots\dots(3-46)$$

$$n_2 = \frac{U - I_a R_a}{C_e \phi_2} = n_{o2} - \Delta n_2$$

في محرك التيار المستمر ذي التهيج التفرعي يكون تغير سرعة الدوران في حالة اللاحمل وهبوط السرعة في حالات التحميل المختلفة متناسباً عكساً مع تغير السيالة المغناطيسية أي:

$$no_2 / no_1 = \frac{\phi_1}{\phi_2} = \frac{\Delta n_2}{\Delta n_1} \dots \dots \dots (3-47)$$

على هذا الأساس فإن مميزتي سرعة المحرك ١ و ٢ الموافقتين للسيالات ϕ_1, ϕ_2 غير متوازيتين (16-3-a)، حيث تتقاطع هاتان المميزتان في النقطة A عند سرعة الدوران المساوية للصفر، لأن التيار $I_{as} = U / R_a$ في هذه الحالة لا يتعلق بقيمة السيالة ويتحدد بقيم توتر دائرة المتحرض ومقاومته وتدعى القيمة التي يأخذها التيار I_{as} عند $n=0$ بتيار القصر.



الشكل (16-3)

الشكل (16-3) المميزات الكهروميكانيكية (a) والمميزات الميكانيكية (b) الخاصة بالمحرك ذي التهيج التفرعي عند تنظيم سرعة الدوران بطريقة تغيير قيمة السيالة المغناطيسية.

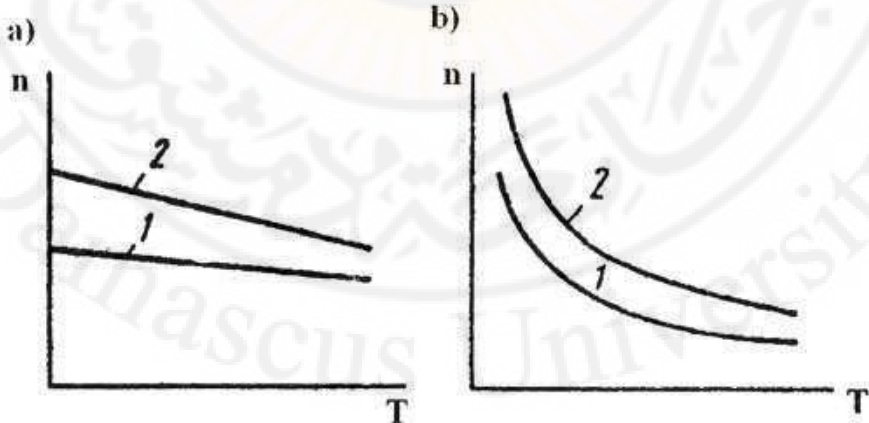
يتم إنشاء المميزات الميكانيكية الخاصة بالمحرك ذي التهيج التفرعي بناء على الأسس التالية:

يمكن اعتبار كل مميزة من المميزات الميكانيكية عملياً تابعاً خطياً ، وبالتالي يمكن إنشاؤها بتحديد نقطتين من نقاطها إحداها توافق اللاحمل ويكون عندها العزم معدوماً،

والأخرى تمثل حالة القصر ويكون العزم أعظمياً وبمقارنة العزوم التي تنشأ في المحرك أثناء حالة القصر عند القيم المختلفة للسيالة نجد أن:

$$T_{s.c1} / T_{s.c2} = C_m \phi_1 I_{us} / (C_m \phi_2 I_{us}) = \phi_1 / \phi_2 \quad (3-48)$$

وهكذا فإن تناقص قيمة السيالة يؤدي إلى زيادة بقيمة سرعة المحرك في حالة اللاحمل وإنقاص قيمة العزم المتولد فيه في حالة القصر، وبالتالي فإن المميزات الميكانيكية التي يتم إنشاؤها من أجل القيم المختلفة للسيالة المغناطيسية تتقاطع عند قيمة حدية معينة للعزم T_{cr} موافقة لسرعة دوران أصغر من السرعة التي يدور فيها المحرك عند حالة اللاحمل، لكنها أكبر من الصفر الشكل (16-3-a). وبالعودة إلى المميزات الميكانيكية للمحرك يتضح أن تناقص قيمة السيالة عند قيم عزم الحمل التي تقل عن العزم T_{cr} يقود إلى ازدياد قيمة سرعة الدوران (انظر النقاط C_2, C_1 الموافقة لعزم الحمل T_{l1}). وعندما يصبح عزم الحمل أكبر من T_{cr} فإن تناقص قيمة السيالة يؤدي إلى خفض سرعة الدوران (انظر النقاط C'_2, C'_1 الموافقة لعزم الحمل T_{l2}). تستخدم طريقة تغيير قيمة السيالة المغناطيسية في المحركات ذات التهيج التفرعي لرفع سرعة الدوران الشكل (17-3-b) أما في المحركات الميكروية فتستخدم هذه الطريقة من أجل خفض سرعة الدوران.



الشكل (17-3) المميزات الميكانيكية لمحركات التيار المستمر عند:

- ١- نظام التهيج الطبيعي
- ٢- خفض قيمة السيالة المغناطيسية

تتوضع المميزات الميكانيكية للمحركات ذات التهيج التسلسلي بصورة مماثلة للحالة السابقة أيضاً. فمع انخفاض قيمة السيلية المغناطيسية في المحركات متوسطة وكبيرة الاستطاعة تأخذ سرعة الدوران بالتزايد الشكل (17-3-b).

إن طريقة التنظيم هذه تتميز بالبساطة الفائقة والكلفة المنخفضة لذلك تستخدم في الحياة العملية على نطاق واسع. ولكن سينتج أن هذه الطريقة لا تسمح بتنظيم سرعة الدوران إلا ضمن حدود صغيرة نسبياً (تكون عادة $n_{\max} / n_{\min} = 2 \div 5$). تتحدد القيمة الصغرى $n_{\min}$ بدرجة تشبع الدارة المغناطيسية للآلة التي تسمح برفع قيمة السيلية المغناطيسية إلى حدود عالية. أما القيمة العظمى $n_{\max}$ فتتحدد بشروط الحفاظ على الاستقرار (عند خفض قيمة السيلية المغناطيسية Φ بحدّة تأخذ سرعة الدوران بالتزايد المتواصل دون توقف)، بالإضافة إلى أن الإضعاف الشديد للتهيج يقود إلى زيادة حادة للأثر السلبي لرد فعل المتحرض الذي يترافق بازدياد قيمة القوة المحركة الكهربائية الرديئة، مما يزيد من خطورة الشرر على المجمع وحدوث الحلقات النارية حوله. لذلك يجب تزويد المحركات المخصصة للعمل في حالات التهيج الضعيف بملفات تعويض، و تصمم هذه المحركات بحيث تكون القوة المحركة الكهربائية الرديئة عند حالة التحميل الاسمية منخفضة.

٣-١١-٣ - تنظيم سرعة الدوران بتغيير التوتر المطبق على مرابط المتحرض:

عند تغيير توتر التغذية من U_1 حتى U_2 تتغير سرعة الدوران وفق العلاقات:

$$\begin{aligned} n_1 &= (U_1 - I_a R_a) / C_e \cdot \phi = n_{a1} - \Delta n_1 \\ n_2 &= (U_2 - I_a R_a) / C_e \cdot \phi = n_{a2} - \Delta n_2 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (3-49)$$

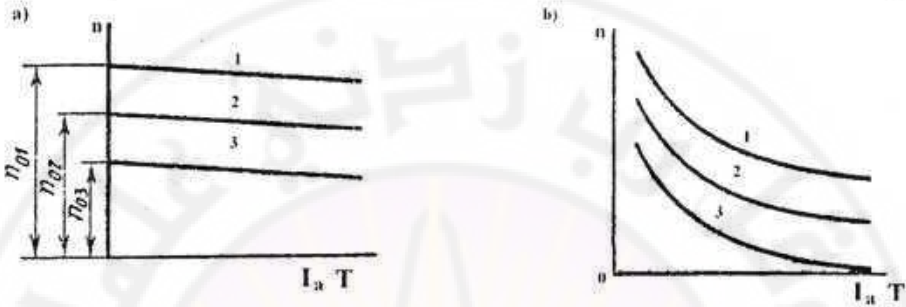
تتغير سرعة دوران المحرك ذي التهيج التفرعي في حالة اللاحمل بشكل يتناسب طردياً مع تغير التوتر، أي أن:

$$n_{a2} / n_{a1} = U_2 / U_1 \quad \dots\dots\dots (3-50)$$

لذلك يبقى هبوط السرعة الناتج عن تأثير الحمل عند $T_l = \text{const}$ ثابتاً:

$\Delta n_1 = \Delta n_2 = \text{const}$. على هذا الأساس نجد أن المميزات الكهروميكانيكية للمحرك التفرعي عبارة عن مجموعة من المستقيمات المتوازية 1،2،3 الشكل (18-3-a)، ويتم

الحصول على المميزات الميكانيكية $n = f(T)$ بالاعتماد على المميزات الكهروميكانيكية بتغيير المقياس المأخوذ في المحور الأفقي، لأن العزم يتناسب طردياً مع تيار المتحرض.



الشكل (18-3) المميزات الكهروميكانيكية والميكانيكية لمحركات التيار المستمر عند تنظيم سرعة الدوران بتغيير التوتر المطبق على المتحرض.

يتم تنظيم سرعة دوران محرك التيار المستمر بطريقة تغيير التوتر المطبق على المتحرض عادة باتجاه خفض السرعة، أي يجري خفض قيمة التوتر لخفض سرعة الدوران بالنسبة لقيمتها الاسمية. بيد أنه عند الخفض الشديد لسرعة دوران الآلات ذات التبريد الهوائي الذاتي تصبح فعالية المبردة منخفضة مما يستوجب الحد من قيمة الاستطاعة المستجدة من الآلة.

عكس اتجاه الدوران لعكس اتجاه دوران محرك التيار المستمر يجب عكس جهة تأثير العزم الكهرومغناطيسي T المطبق على المتحرض حيث $T = C_m \cdot \phi \cdot I_a$ و يمكن تحقيق ذلك بطريقتين : عن طريق عكس جهة سريان التيار في ملف المتحرض، أو عكس اتجاه شعاع السيالة المغناطيسية Φ ، أي تغيير اتجاه سريان تيار التهيج. ولهذا الغرض يتم تبديل مواضع النهايات التي تقوم بإيصال التيار إلى ملف المتحرض أو ملف التهيج.

أمثلة محلولة:

مثال (١)

- محرك تفرعي يدور بسرعة 600r.p.m مستهلكاً تياراً شدته 32A من منبع توتره 240V مقاومة ملف التهيج $R_f = 120 \Omega$ ومقاومة المتحرض 0.5Ω أحسب :

١- قيمة المقاومة اللازم وصلها على التسلسل مع المتحرض لتصبح سرعة المحرك 400r.p.m وذلك دون أي تغيير في قيمة تيار المتحرض أو تيار التهيج .

٢- النسبة المئوية لتناقص استطاعة المحرك.

٣- إلى أي قيمة يجب إنقاص الحمل بعد وضع المقاومة لتعود سرعة المحرك إلى قيمتها الأولية.

الحل:

$$1) I_f = \frac{U_n}{R_f} = \frac{240}{120} = 2 \text{ A}$$

وبما أن تيار التهيج بقي ثابتاً فإن:

$$\phi_1 = \phi_2 = \text{const}$$

$$I_{a1} = I_{a2} = I_L - I_f = \\ = 32 - 2 = 30 \text{ A}$$

$$E_{a1} = U - I_{a1} R_a = 240 - 30 \times 0.5 = 225 \text{ V}$$

$$E_{a2} = U - I_{a2} \cdot R_e$$

حيث:

$$R_t = R_a + R_f$$

ومنه :

$$E_{a2} = 240 - 30 \cdot R_e \\ \frac{E_{a1}}{E_{a2}} = \frac{C_e \cdot \phi_1 \cdot n_1}{C_e \cdot \phi_2 \cdot n_2} \Leftrightarrow \frac{n_1}{n_2} = \frac{225}{240 - 30 R_t}$$

ومنه:

$$R_t = 3 \Omega$$

$$R_r = R_e - R_a = 3 - 0,5 = 2,5 \Omega$$

$$2) P = \omega.T = \frac{2\pi n}{60}.T$$

وبما أن العزم ثابت لأن:

$$T = C_e . \phi . I_a = const$$

نستنتج أن:

الاستطاعة تتناسب طردياً مع سرعة الدوران أي: $p \sim n$

ومنه:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{400}{600} = \frac{2}{3}$$

أي أن الاستطاعة تنقص بنسبة 66,6% عن قيمتها الأولية .

٣) المحرك يدور بسرعة قدرها 400r.p.m ومقاومة المتحريض الكلية 3Ω وهذه السرعة يجب أن تصبح 600r.p.m.

$$Ea_1 = 240 - 30 \times 3 = 150V$$

$$Ea_2 = 240 - 3 I_{a2}$$

$$\frac{Ea_2}{Ea_1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{240 - 3 I_{a2}}{150} = \frac{600}{400}$$

ومنه:

$$I_{a2} = 5 A$$

ولدينا:

$$\phi = const$$

$$T = C_e . \phi . I_a \Rightarrow T = I_a$$

$$T_1 \sim I_{a1} = 30$$

$$T_2 \sim I_{a2} = 5$$

$$\frac{T_2}{T_1} \sim \frac{5}{30} = \frac{1}{6}$$

أي أن حمل المحرك يجب أن ينقص إلى سدس قيمته.

مثال (٢)

محرك تفرعي $U_n = 600V$ ، $R_a = 1.5\Omega$ ، $R_f = 600\Omega$ يدور بسرعة $n = 1000 \text{ r.p.m}$ مستهلكاً تياراً قدره $3A$. احسب سرعة دوران المحرك عندما يكون تيار حمله الكامل $I_a = 30A$.

أوجد سرعة دوران المحرك عند هذا الحمل للحالات التالية:

- ١- إذا وصلت مقاومة قدرها 3Ω على التسلسل مع المتحرض.
- ٢- إذا نقص تيار التهيج بمقدار 10% عن قيمته الأولية وبوجود المقاومة الإضافية مع المتحرض.

الحل:

$$I_f = \frac{600}{600} = 1 \text{ A}$$

$$I_{a1} = I_t - I_f = 3 - 1 = 2 \text{ A}$$

$$I_{a2} = 30 - 1 = 29 \text{ A}$$

$$E_{a1} = 600 - 2 \times 1.5 = 597V$$

$$E_{a2} = 600 - 29 \times 1.5 = 556.5V$$

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{E_2}{E_1} = \frac{556.5}{597} = \frac{n_2}{1000}$$

ومنه:

$$n_2 = 932 \text{ r.p.m}$$

الحالة الأولى عند إضافة مقاومة فقط $R_r = 3\Omega$

$$E'_a = 600 - 4.5 \times 29 = 469.5V$$

$$n'_2 = 1000 \frac{469.5}{597} = 786.4 \text{ r.p.m}$$

الحالة الثانية: عند نفس تيار الحمولة $30A$ ومع وجود المقاومة المضافة على التسلسل مع المتحرض تم إنقاص تيار التهيج بمقدار 10% فإن:

$$\phi_2 = 0.9\phi_1$$

ومنه:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{C_e \cdot \phi_1 \cdot n_1}{C_e \cdot 0.9 \phi_1 \cdot n_2}$$

$$= \frac{1}{0.9} \cdot \frac{n_1}{n_2}$$

أي:

$$n_2 = \frac{n_1}{0.9} \cdot \frac{E_2}{E_1} = \frac{1000}{0.9} \cdot \frac{469.5}{597}$$

$$= 873.8 \text{ r.p.m}$$

٣-١٢ - إقلاع محركات التيار المستمر:

لإقلاع محركات التيار المستمر تستخدم طرائق الإقلاع التالية:

- ١- الإقلاع المباشر، الذي يتم عنده وصل ملف المتحرض مباشرة إلى الشبكة المغذية.
- ٢- الإقلاع بمساعدة مقاومة متغيرة، الذي يتم خلاله وصل مقاومة إقلاع إلى دائرة المتحرض للحد من قيمة تيار الإقلاع.
- ٣- الإقلاع بطريقة الزيادة التدريجية للتوتر المطبق على ملف المتحرض.

٣-١٢-١ - الإقلاع المباشر:

يصل هبوط التوتر $I_a R_a$ عادة على المقاومة الداخلية لدائرة المتحرض في محركات التيار المستمر إلى $U_n \% (5 \div 10)$ ، لذلك تبلغ قيمة تيار المتحرض عند الإقلاع المباشر $I_{st} = U_n / R_a = (10 \div 20) I_n$ ، مما يشكل خطورة حقيقية على عوازل الآلة، ويسبب حدوث الشرر تحت المسفرات. لذلك يستخدم الإقلاع المباشر بصورة أساسية في المحركات صغيرة الاستطاعة (التي لا تتجاوز استطاعتها بضع مئات من الواط)، التي تكون فيها المقاومة R_a كبيرة نسبياً.

كما تستخدم هذه الطريقة في بعض الحالات النادرة في المحركات ذات التهيج التسلسلي التي تبلغ استطاعتها بضعة كيلوواط. عند إقلاع هذه المحركات بشكل مباشر يكون تيار إقلاعها $I_{st} = (4 \div 6) I_n$ وذلك لكون المقاومة الكلية في هذا النوع من المحركات كبيرة نسبياً (مجموع مقاومة ملف المتحرض مع مقاومة ملف التهيج).

٣-١٢-٢ - الإقلاع باستخدام مقاومة متغيرة: تتمثل هذه الطريقة في استخدام مقاومة متغيرة تتغير سرعتها الدوران n وتيار المتحرض I_a خلال عملية الإقلاع، بحمل المحرك وثابت الزمن الكهروميكانيكي t_m . ويؤخذ زمن الحالة العابرة أثناء الإقلاع مساوياً $t_m (3 \div 4)$. خلال هذا الزمن تصل سرعة الدوران n إلى حوالي $0.96 \div 0.98$ من قيمتها المستقرة n_n ، كما يقترب تيار المتحرض من قيمته المستقرة.

٣-١٢-٢- الإقلاع بواسطة المقاومة المتغيرة (مقاومة الإقلاع وتدرجاتها):

لاقت هذه الطريقة انتشاراً واسعاً بفضل جملة الخصائص الإيجابية المميزة لها. ففي

$$\text{اللحظة الابتدائية للإقلاع عند } n=0 \text{ أي } E=0 \text{ ومنه: } I_M = \frac{U}{R_a}$$

لكن عند وجود مقاومة الإقلاع الكلية $R_{M\Sigma}$

حيث $R_{M\Sigma} = R_{M1} + R_{M2} + R_{M3} + \dots$ حسب عدد مراحل الإقلاع.

$$I_M = \frac{U}{R_a + R_{M\Sigma}} \dots\dots\dots (3-51)$$

ويتم اختيار القيمة الكلية لمقاومة الإقلاع $R_{M\Sigma}$ بحيث يمكن خفض تيار الإقلاع في

الآلات كبيرة الاستطاعة ومتوسطها حتى $I_M = (1.4 \div 1.8) I_n$ وفي الآلات صغيرة

الاستطاعة حتى $I_M = (2 \div 2.5) I_n$.

سنقوم فيمايلي بشرح عملية الإقلاع، باستخدام المقاومة المتغيرة، على مثال المحرك ذي التهيج التفرعي.

في المرحلة الأولى تنفذ عملية الإقلاع وفق الميزة (٦) شكل (a-3-19) الموافقة لقيمة

مقاومة الإقلاع الكلية $R_{M\Sigma}$ في دائرة المتحرض. أثناء ذلك يولد المحرك عزم إقلاع

أعظمي $T_{M \max}$. وتغير تدرجات (أجزاء) مقاومة الإقلاع بحيث يمكن الحصول على

أكبر قيمة لتيار التهيج I_f والسيالة المغناطيسية ϕ . مع ازدياد سرعة الدوران يأخذ

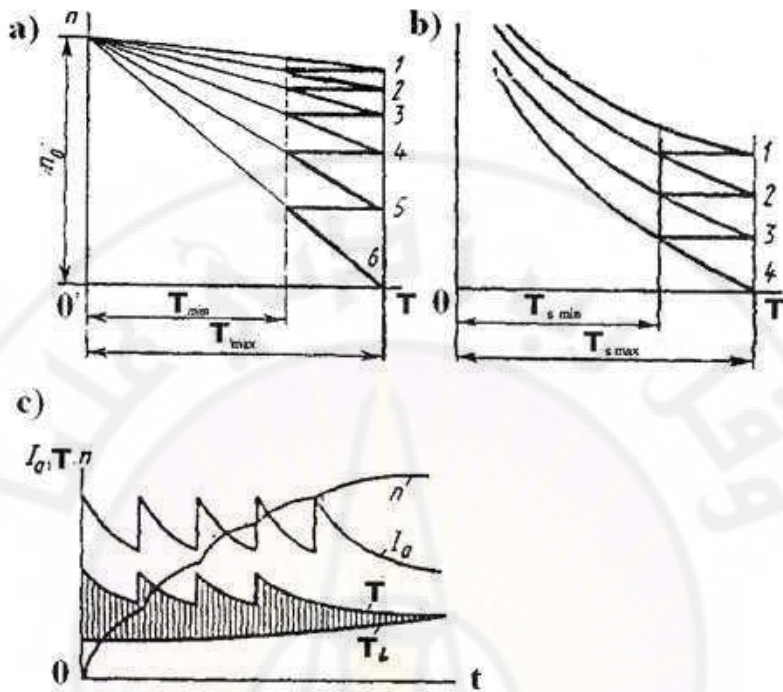
عزم المحرك بالتناقص لأن ازدياد سرعة الدوران يترافق بازدياد في قيمة القوة

المحركة الكهربائية E وانخفاض تيار المتحرض $I_a = (U - E_a) / R_a + R_M$ عند

الوصول إلى قيمة دنيا معينة للعزم $T_{M \min}$ يتم إخراج جزء من مقاومة الإقلاع، مما

يؤدي إلى ازدياد قيمة العزم مرة أخرى حتى $T_{M \max}$. عند ذلك ينتقل المحرك للعمل

وفق مميزة الإقلاع (٥) ويزيد سرعته حتى يعود العزم إلى $T_{M \min}$.



الشكل (19-3) منحنيات تغير سرعة الدوران والعزم والتيار المتحرض أثناء إقلاع المحركات التفرعية والتسلسلية بواسطة مقاومة الإقلاع.

وهكذا يتم عن طريق خفض التدرجي لمقاومة الإقلاع (بإخراج تدرجات مقاومة الإقلاع من دائرة المتحرض) رفع سرعة دوران المحرك وفق المراحل الجزئية لمميزات الإقلاع 2,3,4,5,6 شكل (19-3-a) إلى أن ينتقل إلى مميزة العمل الطبيعية (1). وتبقى القيمة المتوسطة لعزم الدوران خلال فترة الإقلاع ثابتة

$$T_{av} = 0.5(T_{st max} + T_{st min}) = const$$

مما يجعل عملية تزايد سرعة دوران المحرك تجري عند تسارع ثابت.

يتم بهذه الطريقة نفسها إقلاع المحرك ذي التهييج التسلسلي (19-3-b) ويتعلق عدد مراحل مقاومة الإقلاع (تدرجاتها) بدرجة قساوة المميزة الميكانيكية الطبيعية والشروط المطلوب التقيد بها من حيث نعومة عملية الإقلاع (الفرق المسموح بين العزمين

$T_{st \max}$ و $T_{st \min}$) وتصميم مقاومات الإقلاع المتغيرة على أساس نظام عمل مؤقت تحت التيار ولفترة الإقلاع فقط. [7]

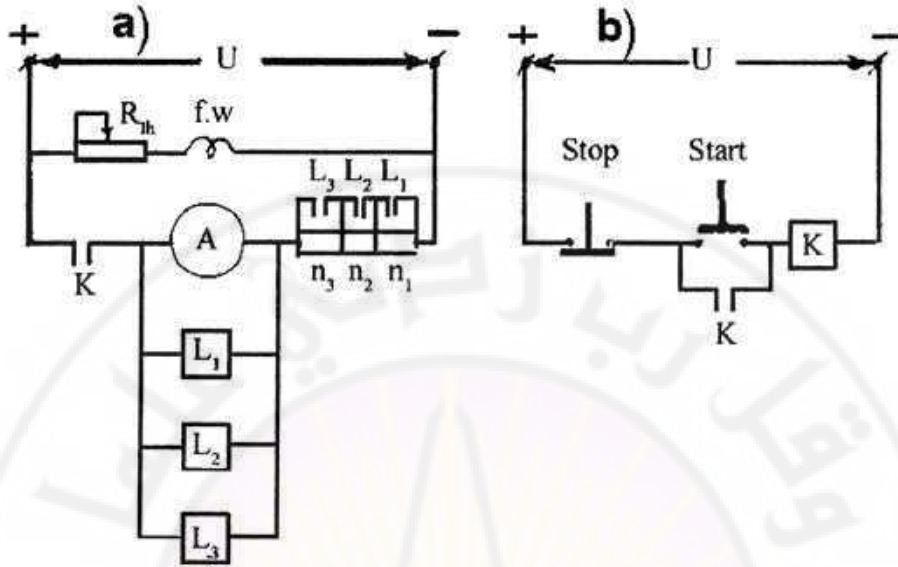
عند إخراج أجزاء مقاومة الإقلاع تدريجياً من دائرة المحرك ترتفع قيمة تيار المتحرض I_a لتصل إلى قيمة أعظمية معينة شكل (19-3-b) ثم يتناقص حتى قيمته الدنيا. ويتوافق تغير التيار هذا بتغيير في قيمة العزم الكهرومغناطيسي T . وتمثل المساحة المهيشرة على الشكل (19-3-c) قيم العزم الديناميكي $T_d = T - T_L$ ، الذي يؤمن تزايد سرعة دوران المحرك حتى قيمتها المستقرة.

٣-١٢-٣ - الإقلاع عن طريق تغيير توتر التغذية:

تترافق طريقة الإقلاع باستخدام مقاومة الإقلاع وتدرجاتها بضياعات كبيرة للطاقة الكهربائية داخل هذه المقاومة، ويمكن التخلص من هذا الأثر عن طريق إقلاع المحرك باستخدام توتر مخفض في البدء ثم رفع قيمة هذا التوتر تدريجياً مع تزايد سرعة الدوران. بيد أن هذه الطريقة تتطلب وجود منبع مستقل للتيار المستمر ذي توتر متغير (مولد أو مقوم خاضع للتحكم). ويستخدم مثل هذا المنبع أيضاً من أجل تنظيم سرعة دوران المحرك.

٣-١٢-٤ - الدارة التحكيمية المبسطة لإقلاع محركات التيار المستمر ذات التهيج المستقل والتفرعية بإضافة مقاومة الإقلاع:

يبين الشكل (20-3) إحدى دارات التحكم الآلي لإقلاع محرك تيار مستمر تفرعي على ثلاث مراحل، ومن الجدير بالذكر أن المقاومات R_1, R_2, R_3 قد تم حسابها لكي يتم الإقلاع وفق المميزات المبينة في الشكل (20-3-a). وبالتالي يتم اختيار الحواكم L_1, L_2, L_3 وتعيينها، بحيث تعمل عند قيم محددة لسرعة المحرك تتوافق ومراحل الإقلاع، لذا تسمى الدارة التحكيمية المبينة في الشكل (20-3) دائرة التحكم الآلي لإقلاع محركات التيار المستمر ذي التهيج المستقل أو التفرعية بتابع السرعة. عندما تبلغ سرعة المحرك القيمة التي توافق نهاية المرحلة الأولى للإقلاع، تصبح قيمة القوة المحركة الكهربائية المتولدة على طرفي المتحرض مساوية $E_1 = C \cdot \omega_1$.



الشكل (20-3)

وعندما تعمل الحاكمة (L_1) التي تجذب تلامسها (L_1) في الدارة الرئيسية حيث نقصر المقاومة (R_1)، وبالتالي يتم الانتقال إلى المرحلة الثانية للإقلاع نأليها المرحلة الثالثة، وهكذا.

أما الدارة المساعدة فيتم بواسطتها وصل المتحرض إلى شبكة التغذية عن طريق ضغطنا على زر الإقلاع (START) حيث يمر التيار الكهربائي عبر القاطع (K) وبالتالي يعمل تلامسه (K) في الدارة الرئيسية على وصل المتحرض إلى شبكة التغذية الكهربائية.

ويعمل التلامس الآخر (K) في الدارة المساعدة على قصر زر الإقلاع، حيث لا تتأثر دارة القاطع (K) عند إزالة ضغطنا على هذا الزر. ولإيقاف المحرك يكفي أن نضغط على زر الإيقاف (STOP)، وبالتالي يتم فصل دارة القاطع (K)، ويفتح تلامسه (K) في الدارة الرئيسية التي تفصل المتحرض عن شبكة التغذية. ونلاحظ هنا أن ملف التهيج يبقى دائماً متصلاً مع شبكة التغذية [6].

٣-١٣- تشغيل محركات التيار المستمر كعناصر مفرمة (أنظمة الكبح):

لا تقتصر وظيفة المحركات الكهربائية على إدارة الآلات المختلفة، وإنما تشمل كبح هذه الآلات أيضاً. فعملية الكبح الكهربائي تسمح بالإيقاف السريع للآلات المدارة أو خفض سرعة دورانها دون اللجوء إلى استخدام مكابح ميكانيكية خاصة.

تنفذ عملية الكبح (الفرملة) الكهربائية وفق ثلاث طرائق هي :

١- الفرملة باسترجاع الطاقة الكهربائية وذلك بالانتقال إلى نظام التوليد وإعادة الطاقة الكهربائية إلى الشبكة.

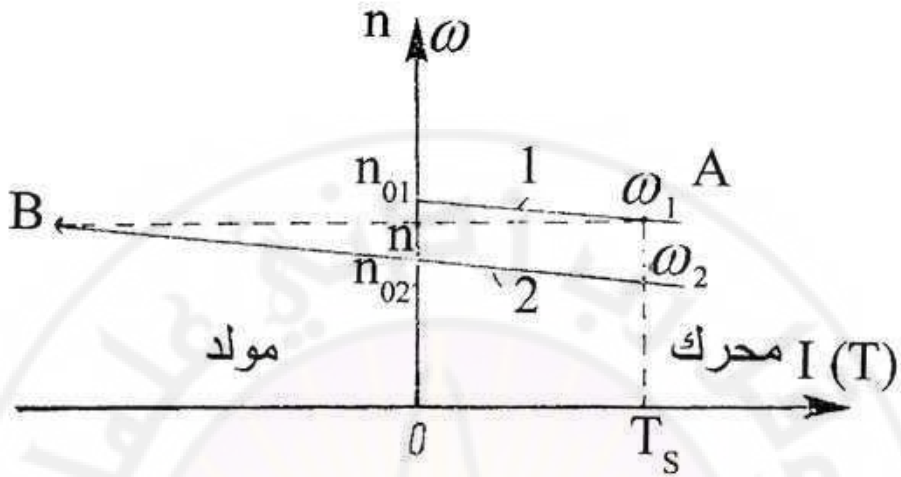
٢- الفرملة الديناميكية وتتم بالانتقال إلى حالة العمل كمولد مع وصل مقاومة متغيرة إلى دائرة المتحرض من أجل استهلاك الطاقة المخزنة داخل الآلة في هذه المقاومة.

٣- الكبح على التضاد.

٣-١٣-١- الكبح باسترجاع الطاقة:

ينتقل محرك التيار المستمر ذي التهييج النفرعي إلى حالة الفرملة باسترجاع الطاقة عندما تصبح سرعة دورانه n أكبر من $n_0 = U / C_e \phi$.

عندئذ تصبح القوة المحركة الكهربائية المتولدة في الآلة أكبر من توتر الشبكة، مما يؤدي إلى عكس اتجاه تيار المتحرض، أي أن المحرك ينتقل إلى حالة العمل كمولد. في هذه الحالة يكون العزم المتولد في الآلة عزماً مفرماً، أما الطاقة الكهربائية المنتجة في الآلة فتعاد إلى الشبكة المغذية، حيث يمكن الاستفادة منها كطاقة مغذية. تعتبر المميزات الميكانيكية للآلة ذات التهييج النفرعي شكل (3-21)، التي تعمل كمولد، امتداداً لمميزاتها الميكانيكية الموافقة لحالة عملها كمحرك في منطقة العزوم السالبة. لذلك يمكن لعملية انتقال الآلة إلى نظام العمل التوليد أن تتم إذا كان تأثير العزم الخارجي كافياً لجعل المتحرض يدور بسرعة $n > n_0$.



الشكل (21-3)

كما يمكن نقل الآلة إلى نظام التوليد من حيث المبدأ إذا تم تحويلها من المميّزة (١) الشكل (21-3) لتأخذ بالعمل وفق المميّزة (٢)، وذلك بخفض قيمة n_0 عن طريق زيادة قيمة السّيالة المغناطيسية (تيار التهيج) أو بخفض قيمة التوتر المغذي للمحرك، عندئذ تصبح سرعة الدوران n ، التي توافّق على المميّزة (١) حالة العمل كمحرك (النقطة A)، كافية لجعل المحرك يعمل في نظام الفرملة باسترجاع الطاقة كمولد لدى انتقاله إلى المميّزة (٢) النقطة (B).

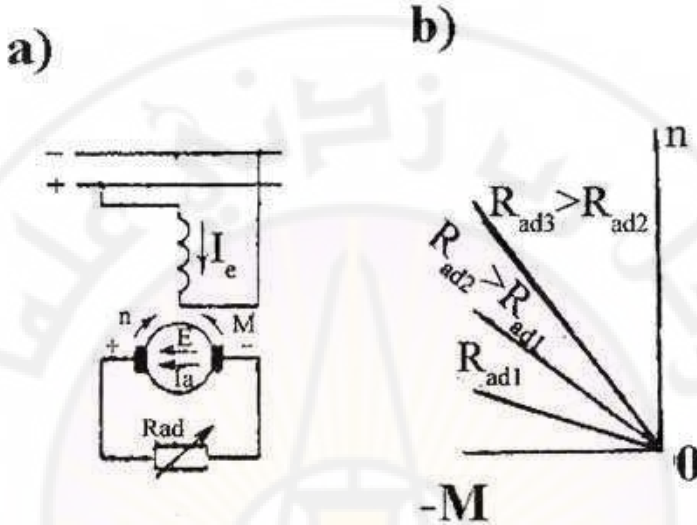
لا تستطيع المحركات ذات التهيج التسلسلي الانتقال إلى حالة الكبح مع إعادة الطاقة إلى الشبكة.

تستطيع المحركات ذات التهيج المركب الانتقال إلى نظام التوليد تلقائياً، مما يشجع على استخدام هذه المحركات في حافلات النقل والقطار وعربات الجر الكهربائيّة وغيرها من الآلات التي تتكرر فيها حالات التوقف، حيث ينبغي على المحرك عندها أن يتمتع بميّزة ميكانيكية لينة.

٣-١٣-٢ - طريقة الكبح الديناميكي:

لدى استخدام هذه الطريقة في محرك التيار المستمر ذي التهيج التفرعي يتم فصل ملف المتحرض عن الشبكة ومن ثم يربط إلى مقاومة إضافية R_h بينما يبقى ملف

التهيج موصولاً على الشبكة، الشكل (22-3-a) وفي هذه الحالة تنتقل الآلة للعمل كمولد ذي تهيج مستقل، إذ أنها تولد عزمًا مفرماً.



الشكل (22-3) مخطط توصيل المحرك التفرعي (a)

ومميزاته الميكانيكية الموافقة لحالة الفرملة الديناميكية (b)

إن الطاقة الكهربائية المتولدة في الآلة تصرف دون فائدة في المقاومة R_d معادلة التواترات في دائرة المتحرض للمحرك تساوي:

$$U = E_a + I (R_a + R_d) \quad \dots\dots\dots(3-52)$$

$$I = \frac{U - E_a}{R_a + R_d}$$

وبعد فصل المتحرض عن الشبكة وقصره على المقاومة (R_d) تصبح معادلة التواترات مساوية:

$$0 = E_a + I_a (R_a + R_d)$$

ويساوي التيار المار في المتحرض في هذه الحالة (تيار الكبح الديناميكي I_d).

$$I = I_d = -\frac{E_a}{R_a + R_d} \quad \dots\dots\dots(3-53)$$

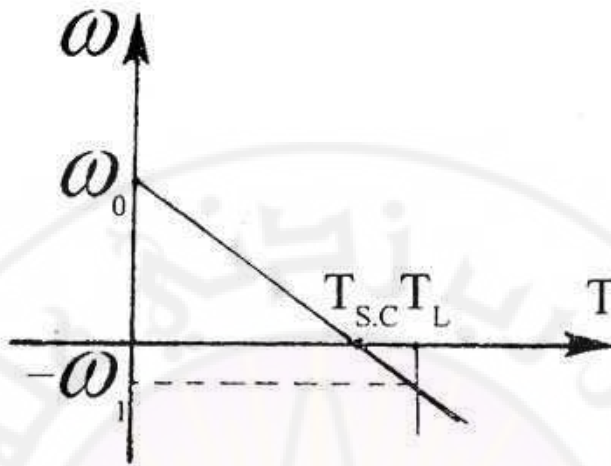
يتم تنظيم قيمة التيار في العلاقة (3-53)، أي قيمة عزم الكبح T ، عن طريق تغيير قيمة المقاومة الإضافية R_d المربوطة إلى ملف المتحرض، أو عن طريق تغيير قيمة القوة المحركة الكهربائية E_a (بتغيير قيمة تيار التهيج). عندما $n=0$ يكون عزم الكبح T مساوياً للصفر، وبالتالي لا يمكن إدخال الآلة إلى نظام الكبح عندما تكون متوقفة عن الدوران.

يمكن للمحرك ذي التهيج التسلسلي العمل في نظام الفرملة الديناميكية وذلك عند تحويله إلى محرك ذي تهيج مستقل أو تهيج ذاتي. فعند التهيج المستقل يتم فصل ملف التهيج عن ملف المتحرض، ويوصل إلى الشبكة المغذية على التسلسل مع مقاومة إضافية تحدد قيمتها، بحيث لا تزيد قيمة تيار التهيج على الحد الاسمي. عند ذلك تصبح المميزات الميكانيكية للمحرك هي نفس المميزات للمحرك التفرعي.

وعند التهيج الذاتي، الذي يتم بانتقال الآلة إلى نظام التوليد، يتوجب تغيير طريقة ربط الأطراف التي تقوم بإيصال التيار إلى ملف التهيج.

٣-١٣-٣ - طريقة الكبح على التضاد:

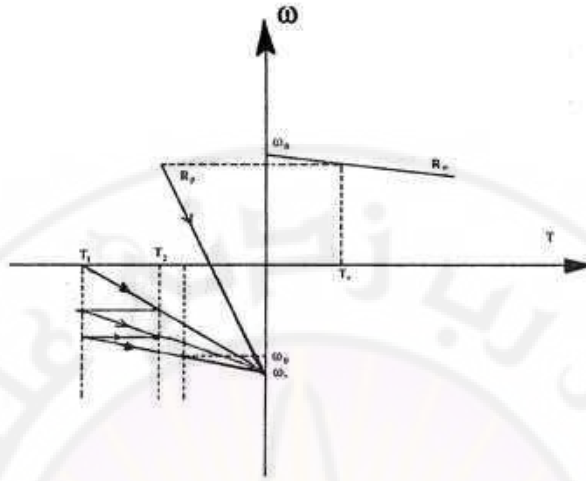
عند انتقال المحرك الكهربائي للعمل في نظام الكبح على التضاد، فإنه يصبح كمولد كهربائي متصل على التسلسل مع شبكة التغذية الكهربائية. ويتحقق حالة الكبح على التضاد عندما يدور المحرك بسرعة تعاكس اتجاه عزمه الدوراني، وذلك تحت تأثير عزم الحمولة أو بسبب القدرة الحركية الكامنة فيه. ويتحقق ذلك عندما يصبح عزم دائرة القصر (T_{sc}) فيه أثناء عمله على مميزاته في الربع الأول أقل من عزم الحمولة (T_L) على محوره. شكل (3-23) ويمكن تنفيذ هذه الحالة عملياً. مثلاً عندما يعمل المحرك على إنزال حمولات كبيرة بسرعات منخفضة، حيث تستقر سرعة المحرك على امتداد هذه المميزات.



الشكل (23-3)

ففي هذه الحالة يسعى المحرك لرفع الحمل المطبق على محور المحرك، بينما ينزل الحمل تحت تأثير عزم الحمولة بسرعة معاكسة لسرعة الدوران التي يسعى المحرك لتوليدها.

كذلك يمكن تحقيق حالة الكبح على التضاد عندما يقود المحرك الكهربائي آلة ميكانيكية ويديرها بسرعة معينة، وتقوم فجأة بتغيير إشارة جهد شبكة التغذية، ففي هذه الحالة تصبح إشارة (U) سالبة وينتقل المحرك للعمل على مميزاته كمحرك أيضاً ولكن في الربع الثالث كما هو مبين في الشكل (24-3).



الشكل (3-24) [12]

ولكن عطالة المحرك والآلة، والقدرة الحركية الكامنة فيهما لا تسمح بالانتقال المفاجئ إلى العمل في الربع الثالث وإنما ينتقل المحرك إلى العمل على امتداد هذه المميزات في الربع الثاني. ثم تتناقص سرعته بشكل سريع حتى تنتهي إلى قيمة قريبة من الصفر حيث تقوم كوابح ميكانيكية خاصة بتثبيت المحرك في حالة الوقوف، فيما إذا رغبتنا بذلك، وإلا فإن المحرك سيغير اتجاه دورانه حتى تستقر سرعته في الاتجاه المعاكس عند نقطة تقاطع عزم الحمولة مع المميزات الميكانيكية للمحرك في الربع الثالث. ومن معادلة التواترات الكهربائية يصبح التيار مساوياً :

$$I = \frac{-U - E_a}{R_a} = -\frac{U + E_a}{R_a} \dots\dots\dots(3-54)$$

من هذه المعادلة نلاحظ أن قيمة التيار تقفز فجأة وتصبح كبيرة. بحيث تخالف الشروط الحرارية المطلوبة للمحرك، لذلك لا بد من إدخال مقاومة خارجية إلى دائرة المتحريض خلال الكبح على التضاد، وتسمى مقاومة الكبح على التضاد (R_p)، ويصبح التيار عندئذ مساوياً:

$$I_p = -\frac{U + E_a}{R_a + R_p} \dots\dots\dots(3-55)$$

ومن العلاقة الأخيرة نلاحظ أن التيار يغير اتجاهه وتصبح معادلة المميزات الكهروميكانيكية مساوية:

$$\omega = -\frac{U}{C} + \frac{I(R_o + R_p)}{C} \dots\dots\dots(3-56)$$

أما معادلة المميزات الميكانيكية فتساوي:

$$\omega = -\frac{U}{C} + \frac{T(R_a + R_p)}{C^2} \dots\dots\dots(3-57)$$

أمثلة محلولة :

مثال 1:

احسب مقاومة الإقلاع ودرجاتها لمحرك تيار مستمر تفرعي، إذا كان محملاً بحمولته الاسمية على أن لا يزيد تيار الإقلاع عن القيمة الأعظمية $I_1 = 2I_n$ المواصفات الاسمية للمحرك:

$$P_n = 15 \text{ KW}, U_n = 220 \text{ V}, I_n = 83 \text{ A}, n_n = 770 \text{ r.p.m}$$

$$R_a = 0.328 \Omega$$

الحل:

القيمة العظمى لتيار الإقلاع:

$$I_1 = 2I_n = 166 \text{ A}$$

$$R_{st} = \frac{U}{I_1} - R_a = \frac{220}{166} - 0.328 = 1 \Omega$$

مقاومة الإقلاع:

نختار عدد درجات مقاومة الإقلاع ($m=3$) ونحسب التيار الأصغري للإقلاع حسب القانون التالي:

$$I_2 = I_1 \sqrt{\frac{R_a}{R_a + R_{st}}} = 166 \sqrt{\frac{0.328}{1.328}} = 104 \text{ A}$$

$$\frac{I_2}{I_n} = \frac{104}{83} = 1.25$$

نحسب النسبة:

حيث يقع التيار الأصغري للإقلاع ضمن المجال المحدد له. الآن وبعد معرفة قيمة

المقاومة (R_{st}) نحسب بيانياً درجاتها باتباع الخطوات التالية: [12]

(١) - نحسب سرعة المحرك على فراغ:

$$n_o = n_n \frac{U}{U - I_a \cdot R_a} = 770 \frac{220}{220 - 83 \times 0.328}$$

$$= 878 \quad [r.p.m]$$

نرسم المنحني للميزة الطبيعية للمحرك بمعرفة إحداثيات نقطتين:

$$I_a = 0, n = n_o = 878 \text{ [r.p.m]}$$

$$I_a = I_n = 83 \text{ A}, n_n = 770 \text{ [r.p.m]}$$

(٢) - نرسم المنحني الاصطناعي الحدي الذي يمر من النقطتين:

$$I_a = 0, n = n_o = 878 \text{ [r.p.m]}$$

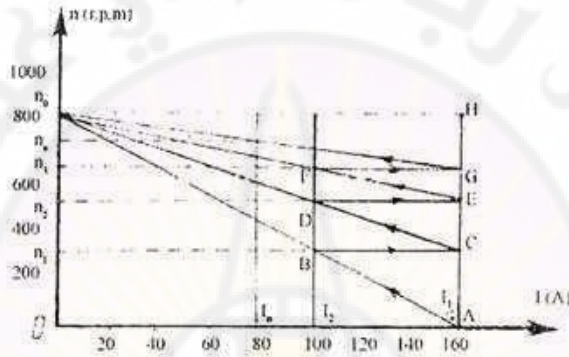
$$I_a = I_1 = 166 \text{ A}, n = 0$$

(٣) - نحدد الخططين :

$$I_a = I_2 = \text{const} = 104 \text{ A}$$

$$I_a = I_1 = \text{const} = 166 \text{ A}$$

ونرسم بقية المنحنيات الاصطناعية كما هو مبين في الشكل:



الشكل (25-3) [12]

(٤) - من الشكل (25-3) نقيس و نحسب درجات مقاومات الإقلاع كونها متناسبة مع قيم السرعة أو الأطوال الموافقة للخط ($I_1 = \text{const}$) .

$$R_1 = (R_a + R_{st}) \frac{\overline{AC}}{\overline{AH}} = 1.328 \times 0.375 = 0.496 \Omega$$

$$R_2 = (R_a + R_{st}) \frac{\overline{CE}}{\overline{AH}} = 1.328 \times 0.236 = 0.313 \Omega$$

$$R_3 = (R_a + R_{st}) \frac{\overline{EG}}{\overline{AH}} = R_{st} - (R_1 + R_2) = 0.191 \Omega$$

هذا ويمكن حساب قيمة الدرجة الأولى لمقاومة الإقلاع تحليلاً حسب مايلي:

نفترض دوماً، أنه للانتقال من منحن إلى آخر نظل السرعة ثابتة ، وبالتالي تظل القوة المحركة الكهربائية للمحرك واحدة أيضاً. بما أن السرعة عند النقطتين (B) و (C) هي نفسها فيمكننا أن نكتب:

$$E_B = E_C$$

$$U - I_2 (R_a + R_{st}) = U - I_2 (R_a + R_{st} - R_1)$$

ومنه نجد:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{R_a + R_{st} - R_1}{R_a + R_{st}}$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{R_a + R_{st} - R_1 - R_2}{R_a + R_{st} - R_1}$$

وبالطريقة نفسها نجد، أيضاً:

وهكذا حتى نصل أخيراً إلى العلاقة بعد (m) مرة.

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{R_a}{R_a + R_{st} - R_1 - R_2 - \dots - R_{m-1}}$$

وهكذا يمكن حساب قيمة الدرجة الأولى والثانية والثالثة لمقاومة الإقلاع تحليلياً من العلاقات السابقة فنجد أن:

$$R_1 = R_a + R_{st} - \frac{I_2}{I_1} (R_a + R_{st})$$

$$= 1.328 - \frac{104}{166} (1.328) = 0.498 \Omega$$

$$R_2 = R_a + R_{st} - \frac{I_2}{I_1} (R_a + R_{st} - R_1)$$

والدرجة الثانية من الإقلاع:

$$= 1.328 - 0.498 - \frac{104}{166} (1.328 - 0.498) = 0.314 \Omega$$

وهكذا.....

مثال 2:

لدينا محرك تيار مستمر ذي تهيج مستقل يملك المواصفات الاسمية التالية:

$$P_n = 32 [KW], U_n = 200 [V],$$

$$I_n = 172 [A], n_n = 1000 [r.p.m], R_a = 0.062 [\Omega]$$

المطلوب:

١- إنشاء المميزات الكهروميكانيكية الطبيعية.

٢- حساب قيمة المقاومة (R_d) التي يعمل عليها المحرك في حالة الكبح الديناميكي،
 علماً أن مميزاته الكهروميكانيكية تمر من النقطة الموافقة لتيار الكبح الديناميكي ($I_d=I_n$)
 والسرعة ($w_1=0.5 w_n$) مع إنشاء المميزات الموافقة لهذه الحالة.

٣- حساب قيمة المقاومة (I_p) التي تضاف إلى دائرة المتحرض في حالة الكبح على
 التضاد، حيث يدور المحرك على سرعة تساوي $n=600$ r.p.m عند تيار حمولة يساوي
 $I_p=110[A]$ مع إنشاء المميزات الموافقة لهذه الحالة [6] :

الحل:

(١) ننشئ أولاً الميزة الكهروميكانيكية الطبيعية للمحرك وذلك باتباع مايلي:

- نحسب قيمة السرعة الزاوية الاسمية:

$$\omega_n = \frac{2\pi.n}{60} = \frac{2\pi \times 1000}{60} = 105 \text{ [rad/sec]}$$

$$\omega_o = \omega_n \frac{U_n}{U_n - I_n \cdot R_a} = \frac{220}{220 - 172 \times 0.062} = 110 \text{ rad/sec}$$

- نحسب قيمة المقاومة (R_d) :

من معادلة التيار في حالة الكبح الديناميكي:

$$I_D = -I_n = -\frac{E_o}{R_a + R_d}$$

نستنتج:

$$R_d = \frac{E_1}{I_n} - R_a$$

حيث E_1 فتساوي:

$$E_1 = C \cdot \omega_1$$

$$C = \frac{U_n}{\omega_0} = \frac{220}{110} = 2$$

$$E_1 = 0.5 \times 105 \times 2 = 105 [V]$$

$$R_d = \frac{105}{172} - 0.062 = 0.55 [\Omega]$$

ثم ننشئ المميزّة الكهروميكانيكية كما هو مبين في الشكل (26-3)، حيث تمر من نقطتين: الأولى نقطة الصفر، والثانية ذات الإحداثيات:

$$\omega_1 = 0.5 \times 105 = 52.5 [\text{rad/sec}], I_d = -172 [A]$$

(٣) - تحسب قيمة المقاومة (R_p):

- من معادلة التيار الموافقة لحالة الكبح على التضاد:

$$I_p = \frac{U + E}{R_a + R_p}$$

$$110 = \frac{220 + E_2}{0.062 + R_p}$$

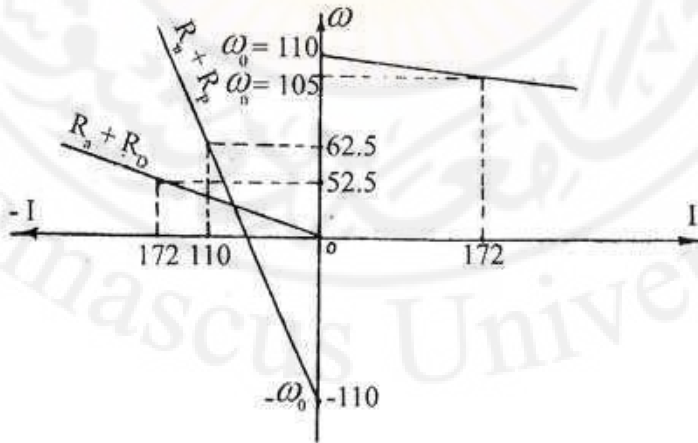
$$E_2 = C \cdot \omega_2$$

$$\omega_2 = \frac{2\pi 600}{60} = 62.8 [\text{rad/sec}]$$

$$E_2 = 2 \times 62.8 = 125.6 [V]$$

$$R_p = \frac{220 + 125.6}{110} - 0.062 = 3.08 \Omega$$

ننشئ المميزات في حالة الكبح على التضاد والتي تمر من النقطة الموافقة لـ ω_0 والنقطة الموافقة لـ ($I = -110 A$)، ($\omega_2 = 62.8 \text{ rad/sec}$).



الشكل (26-3) [10,6]

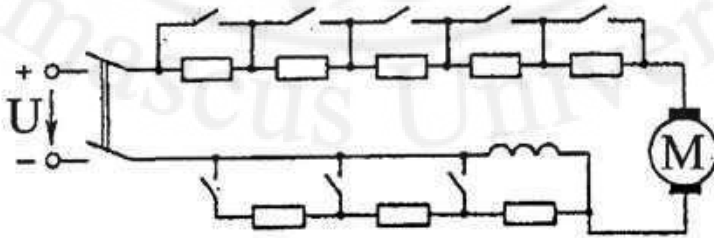
٣-١٤- الطرائق الحديثة للتحكم بمحركات التيار المستمر:

يمكن تطبيق مبادئ تنظيم سرعة دوران آلات التيار المستمر التي تم استعراضها في حالات العمل كمحرك والفرملة وتجسيدها عملياً باستخدام إحدى طرائق التحكم الأربع التالية: التحكم باستخدام قاطع فاصل - واصل والمقاومة المتغيرة، التحكم باستخدام نظام العمل مولد-محرك، التحكم على أساس العمل في نظام مقوم موجة-محرك، التحكم النبضي (باستخدام تقنية تعديل عرض النبضة PWM)

٣-١٤-١- التحكم باستخدام القاطع الفاصل - الواصل والمقاومة المتغيرة:

تستخدم هذه الطريقة في الوقت الحاضر على نطاق واسع جداً من أجل تنظيم سرعة دوران المحركات ذات الاستطاعة الصغيرة والمتوسطة، كما يمكن أن تستخدم في بعض الأحيان لتنظيم سرعة دوران المحركات كبيرة الاستطاعة (في القطارات الكهربائية).

يتم تنظيم السرعة وفق هذه الطريقة إما بوصل مقاومة تنظيم متغيرة إلى دائرة المتحرض عندما تكون سرعة الدوران أقل من السرعة الاسمية، أو عن طريق التحكم بتيار التهييج عند سرعة الدوران العالية. تزود الآلات صغيرة الاستطاعة عند غياب عناصر التحكم الآلي بمقاومتين تنظيم قابلتين للتغيير يدوياً، حيث توصل إحداها مع دائرة المتحرض والأخرى مع ملف التهييج. وعندما تصبح استطاعة المحرك كبيرة يصبح من الضروري إجراء عملية التنظيم بصورة آلية، أي تغيير قيمة المقاومات الإضافية آلياً وبصورة متدرجة الشكل (27-3)، بمساعدة قواطع فاصلة-واصله آلية (كنتكتورات).



الشكل (27-3)

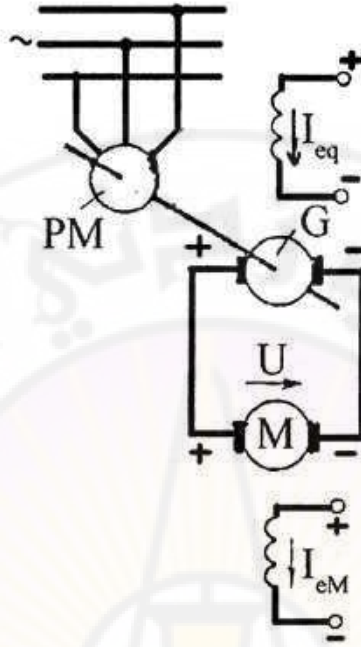
وعندما يتوجب إجراء عملية التنظيم بدقة فائقة لا بد من زيادة عدد القواطع إلى حد كبير، مما يجعل جملة التحكم كبيرة الحجم ومعقدة وزائدة الكلفة وذات درجة وثوقية منخفضة نسبياً.

تسمح طريقة التحكم التي تعتمد على استخدام القواطع الفاصلة - الواسلة والمقاومات المتغيرة بإجراء عملية كبح المحركات ذات التهيج الفرعي بطريقة استرجاع الطاقة في مجال سرعة الدوران العالية بزيادة قيمة تيار التهيج. أما في مجال سرعة الدوران المنخفضة فنستخدم الفرملة الديناميكية، حيث يتم تنظيم شدة تأثير عملية الفرملة بمساعدة العناصر نفسها المكونة من القواطع الفاصلة-الواسلة والمقاومات المتغيرة المستخدمة لإجراء عملية تنظيم سرعة الدوران عند عمل الآلة كمحرك (بعد إجراء عملية التبديل اللازمة في دارة التحكم).

بالنظر إلى صعوبة أتمة عملية التحكم المذكورة والنفقات الكبيرة اللازمة لصيانتها واستثمارها، فقد أخذ استخدامها يتراجع تدريجياً أمام غيرها من طرائق التحكم الحديثة.

٣-١٤-٢ - التحكم باستخدام نظام العمل مولد-محرك:

في هذه الحالة يحصل المحرك على تغذيته من وحدة تبديل مكونة من مولد ذي تهيج مستقل شكل (3-28) يدار بوساطة آلة محركة كمحرك الديزل أو غيره. ويتم تنظيم سرعة الدوران بتغيير قيمة التورنر المطبق على ملف المتحرض (عن طريق تنظيم تيار التهيج المولد)



الشكل (28-3) دائرة التحكم بمحرك التيار المستمر

ذي التهييج المستقل عند تغذيته من مولد [17]

أو بتغيير قيمة السيالة المغناطيسية (عن طريق تنظيم تيار تهيج المحرك). يتم إقلاع المحرك والحصول على سرعة الدوران المنخفضة بتمرير تيار تهيج أعظمي في المحرك عند تيار تهيج منخفض أي عند توتر منخفض. وبعد الاستفادة التامة من إمكانية رفع التوتر يجري الانتقال إلى تنظيم تيار التهيج، حيث تعمل هذه الوسيلة على خفض السيالة المغناطيسية في المحرك. ويتم عكس جهة دوران المحرك عن طريق تغيير قطبية التوتر المطبق على المنحرض، حيث يجري من أجل ذلك عكس اتجاه سريان التيار في ملف تهيج المولد.

يتم خفض سرعة الدوران في هذه الحالة باستخدام طريقة الفرملة باسترجاع الطاقة، فمن خلال رفع قيمة تيار تهيج المحرك، ومن ثم بالخفض التدريجي لتيار تهيج المولد

يمكن نقل المحرك إلى نظام التوليد وكبح الآلة المدارة بسرعة، عند ذلك يتم استرجاع الطاقة الحركية المخزنة في المتحرض والآلة المدارة إلى الشبكة الكهربائية. إن التحكم باستخدام طريقة مولد- محرك عملية مربحة، وتتميز بأنها لا تتطلب استخدام قواطع فاصلة- واصلة كبيرة الاستطاعة أو مقاومات متغيرة... الخ. وبما أن التحكم يتم عن طريق تنظيم تيارات تهيج صغيرة القيمة نسبياً، لذلك يمكن تحقيق أتمتة هذه العملية بسهولة. تستخدم طريقة التحكم المذكورة على نطاق واسع في المجالات الصناعية المختلفة ووسائط النقل التي تتطلب تنظيم سرعة الدوران في حدود واسعة. يدار المولد المستخدم في وسائط النقل بوساطة محركات الديزل، أما في المجالات الصناعية الأخرى فتستخدم لأجل هذا الغرض عادة المحركات التزامنية أو اللاتزامنية ثلاثية الطور.

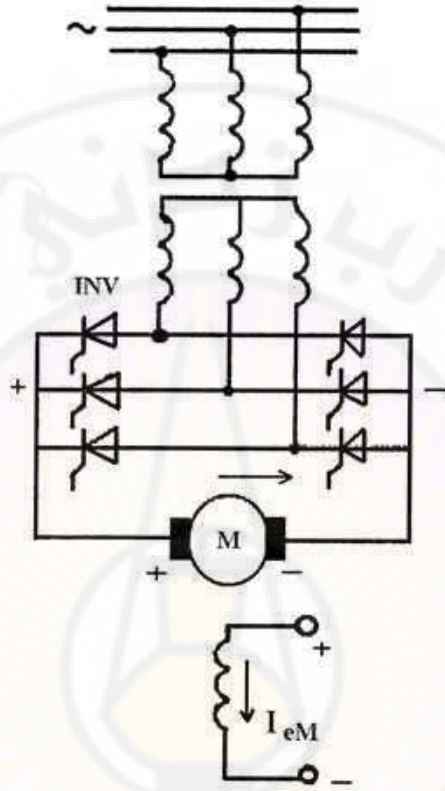
نتلخص عيوب هذه الطريقة بمايلي:

- ١- الحجم الكبير والوزن الثقيل والكلفة الزائدة لمجموعة التبديل.
- ٢- المردود المنخفض نسبياً $(0.6 \div 0.7)$ لأن هذه العملية تقتضي تحويل الطاقة ما بين ثلاثة أشكال لها.

٣-١٤-٣ التحكم باستخدام نظام مقوم موجه- محرك:

إن تطور صناعة المواد نصف الناقل قد مكن من استخدام المقومات الثايسنورية الموجهة من أجل تنظيم سرعة دوران المحركات الكهربائية. فبالإضافة إلى عملية التقويم يقوم هذا النوع من المقومات في الوقت ذاته بتنظيم قيمة التوتر المقوم الشكل (29-3). إن استخدام هذه الطريقة يسمح برفع قيمة المردود وخفض حجم جملة التحكم وكتلتها.

إن كانت العملية التكنولوجية تتطلب تحقيق عملية التوقف السريع للآلات المدارة، ومن ثم عكس جهة دورانها يتم اللجوء إلى عملية الفرملة باسترجاع الطاقة عن طريق ربط معرج (عاكس) على التوازي مع المقوم، حيث يقوم هذا العاكس بإرجاع الطاقة الكهربائية المتولدة في المحرك أثناء عملية الفرملة من دائرة التيار المستمر إلى شبكة التيار المتناوب.



الشكل (29-3)

يعود عيب هذه الطريقة إلى كونها تؤدي لإنخفاض معامل الاستطاعة عندما يكون توتر الخرج منخفضاً. كما تؤدي هذه الطريقة إلى خفض جودة عملية التبديل في المحرك بسبب تموج منحنى تيار المتحرض، الذي يزداد بخاصة عند تغذية المقوم من شبكة التيار أحادية الطور.

تلاقي طريقة التحكم باستخدام نظام (مقوم موجه- محرك) في الوقت الحاضر انتشاراً واسعاً.

٣-١٤-٤ - التحكم النبضي باستخدام تقنية تعديل عرض النبضة PWM:
تستخدم هذه الطريقة في الوقت الحاضر لتنظيم سرعة دوران محركات التيار المستمر على نطاق واسع، فوفق هذه الطريقة تطبق على المحرك توترات نبضية ذات تردد معين يتم اختياره بمساعدة منظم نبضي المكون من عناصر إلكترونية (الثايرستورات ، ترانزستورات C.I.... الخ).

مسائل غير محلولة :

مسألة (١):

مولد تفرعي رباعي الأقطاب ذو ملفات تطابقية فيه الفيض المفيد تحت كل قطب 0.07Wb ملفات المتحرض تتألف من 220 لفة مقاومة كل منها 0.004Ω . احسب فرق الكمون بين قطبي المولد عندما يدور بسرعة $900[\text{r.p.m}]$ علماً أن شدة تيار المتحرض $50[\text{A}]$.

الجواب : $U=459,25\text{ v}$

مسألة (٢) :

مولد تيار مستمر ذو ثمانية أقطاب، متطابق يتألف متحرضه من 120 مجرى في كل منها 4 نواقل إذا كان الناقل يتحمل $250[\text{A}]$ ، وكان الفيض في القطب 0.05Wb . احسب سرعة دوران المولد ليعطي قوة محرركة كهربائية مقدارها $240[\text{V}]$.

الجواب : $n=600 [\text{r.p.m}]$

مسألة (٣):

مولد تفرعي حملته الكاملة 6kw ، بتوتر 200v ، مقاومة المتحرض فيه 0.5Ω ومقاومة ملف التهييج 50Ω . إذا كانت الضياعات الحديدية والميكانيكية 500W أوجد الاستطاعة المقدمة للمولد (بالحصان) والمردود عند الحمل الكامل.

الجواب: $\eta = 76.2\%$, $P_m = 10.7[\text{H.p.}]$,

مسألة (٤):

مولد تفرعي استطاعته $20[\text{kw}]$ ، يدور بسرعة $1000[\text{r.p.m}]$ فرق الكمون بين قطبيه 500v . مقاومة المتحرض 0.1Ω هبوط الكمون بسبب تلامس المسفرات 1v لكل مسفرة ومقاومة ملف التهييج 500Ω .

احسب سرعة دوران المولد كمحرك مستهلكاً 20kw من منبع توتره 500v .

الجواب : $n=976 \text{ r.p.m}$

مسألة (٥):

محرك تفرعي تموجي توتره 23V واستطاعته 25H.p، مقاومة متحرضه 0.136Ω ومقاومة ملف التهييج 76.6Ω ، تيار المحرك عند الحمل الكامل 94.3A أوجد:

١- الضياع النحاسي في كل من المتحرض وملف التهييج.

٢- الاستطاعة في المسفرات.

٣- القوة المحركة الكهربائية العكسية.

٤- الضياعات الميكانيكية والحديدية (الثابتة).

٥- مردود المحرك.

علماً أن هبوط التوتر بسبب المسفرات هو واحد فولت لكل مسفرة.

الأجوبة:

$$P_{c1} = 1133W, P_{c2} = 690W$$

$$P_B = 182.6W, E_b = 215.8V$$

$$P_s = 1050W, \eta = 85.96\%$$

مسألة (٦):

محرك تيار مستمر تفرعي ملفوف تموجي رباعي الأقطاب توتره 250V، واستطاعته 10 حصان بريطاني. يحتوي متحرضه على 382 ناقل، مقاومة ملف التهييج 125Ω ، ومقاومة المتحرض 1Ω ، عندما يدور المحرك على فراغ يستهلك تياراً شدته 4A، وتكون قيمة الفيض المغناطيسي في القطب 20Wb، والمطلوب:

١- احسب سرعة الدوران على فراغ. ماهي سرعة دوران المحرك في حالة الحمل الكامل علماً أن مردود المحرك عند الحمل الكامل 85%

$$n_0 = 937.8 r.p.m, n = 851.1 r.p.m$$

الجواب:

مسألة (٧):

محرك تفرعي توتره 440V فولت يستهلك عند دورانه بدون حمل تياراً شدته 2.5A، مقاومة ملف التهييج 550Ω ، ومقاومة المتحرض 1.2Ω ، تيار المحرك عند الحمولة الكاملة 3A. أوجد الاستطاعة الناتجة عن المحرك والمردود عند الحمل الكامل.

الجواب: $\eta = 83.9\%$, $P = 15.83 \text{ H.p}$

مسألة (٨):

محرك تسلسلي مقاومة متحرضه 0.04Ω ، ومقاومة ملف التهييج 0.06Ω يستهلك تياراً شدته 40A من منبع مستمر توتره 220V . وذلك عندما يدور بسرعة 900r.p.m . أوجد سرعة دوران المحرك إذا أصبح تيار المحرك 75A وازداد التهييج بنسبة 15% عن قيمته الأولى.

الجواب: $n=769.6 \text{ r.p.m}$

مسألة (٩):

محرك تسلسلي توتره 220V يدور بسرعة 500 r.p.m مستهلكاً تياراً شدته 50A ، احسب قيمة المقاومة التي يجب إضافتها على التسلسل لإنقاص السرعة إلى 300r.p.m . علماً أن العزم ينقص إلى نصف قيمته الأولى ، وأن مقاومة المحرك 0.1Ω على افتراض أن الفيض المغناطيسي متناسب مع التيار .

الجواب: $R_r = 3.54\Omega$

مسألة (١٠):

محرك تسلسلي توتره 500V . مقاومته الكلية 0.5Ω ، وعزم المحرك متناسب مع مربع سرعة دوران المحرك . عندما يدور المحرك بسرعة 600r.p.m يستهلك تياراً 30A . إذا نقصت سرعة الدوران إلى 400 r.p.m ، أوجد قيمة المقاومة اللازم إضافتها لدارة المحرك بافتراض أن الدارة المغناطيسية غير مشبعة.

الجواب: $R_r = 13.7\Omega$

مسألة (١١):

محرك تفرعي توتره 500V ، سرعة دورانه الطبيعية 250r.p.m ، وتيار متحرضه 200A ، مقاومة المتحرض 0.12Ω . احسب السرعة عند إضافة مقاومة إلى دارة التهييج بحيث ينخفض تيار التهييج إلى 80% من قيمته الأولى . علماً أن تيار المتحرض شدته 100A .

الجواب: 320 r.p.m

مسألة (١٢):

محرك تسلسلي توتره 200V يدور بسرعة 500r.p.m مستهلكاً تياراً شدته 25A، مقاومة المتحرض 0.3Ω ، ومقاومة ملف التهييج 0.5Ω . إذا بقي التيار ثابتاً. احسب المقاومة اللازمة لإنقاص السرعة إلى 350r.p.m.

الجواب: 2.16Ω



الفصل الرابع
المحولات الكهربائية

١-٤ تعريف المحول:

هو آلة كهربائية ساكنة تضم زوجاً أو أكثر من الملفات المرتبطة فيما بينها مغناطيسياً والمستخدم من أجل تغيير قيم التوتر والتيار المتناوب، التردد، عدد الأطوار.

٢-٤ استخدام المحولات وأهميتها :

تستخدم المحولات على نطاق واسع للأغراض التالية:

١- في نظم نقل الطاقة وتوزيعها : تنتج مولدات التيار المتناوب الطاقة الكهربائية في محطات التوليد بتوترات تتراوح عادة ما بين $6 \div 24 \text{ Kv}$ ، أما عملية نقل القدرة الكهربائية إلى مسافات بعيدة فلا تكون اقتصادية إلا إذا تمت بتوترات عالية لذلك لابد من استخدام محولات رفع التوتر في كل محطة توليد كهربائية .

تتقل الطاقة الكهربائية إلى المنشآت الصناعية والمراكز السكنية بواسطة خطوط نقل، وهذا يقضي استخدام محولات خفض التوتر في جميع عقد شبكات التوزيع، عدا ذلك يتوجب تركيب محولات خفض التوتر في مراكز استهلاك الطاقة الكهربائية .

٢- تستخدم في المنشآت الصناعية المختلفة لأغراض تكنولوجية عامة كاللحام الكهربائي (محولات اللحام)، وتغذية تجهيزات التسخين الكهربائية (محولات الأفران الكهربائية)..... الخ .

٣- تستخدم المحولات في تجهيزات الاتصالات والأتمتة وأنظمة التحكم عن بعد والأجهزة الكهربائية المنزلية وتغذية دارات الأجهزة التلفزيونية والراديو..... الخ .

تتميز المحولات المستخدمة في مثل هذه التجهيزات عادة بصغر استطاعتها (تتراوح ما بين عدة فولتات أمبير وحتى بضعة كيلو فولت - أمبير) وتوترها المنخفض.

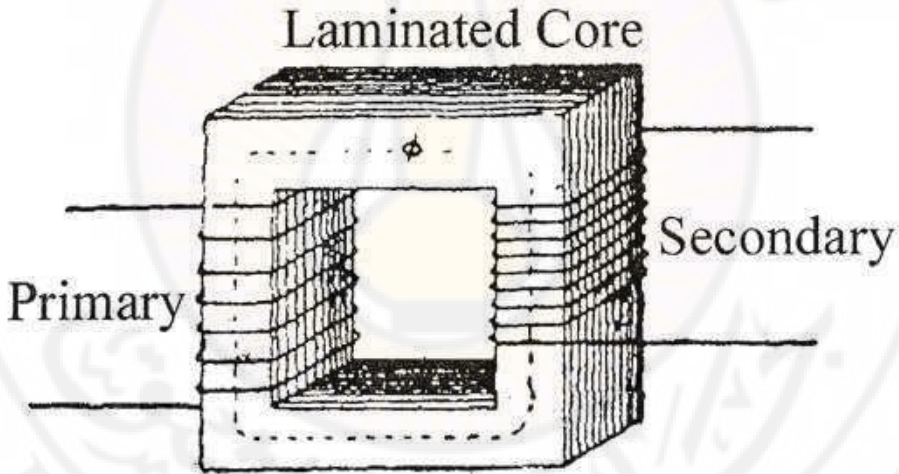
٤- تدخل المحولات في تجهيزات القياس الكهربائية من أجل وصل أجهزة القياس إلى الدارات الكهربائية ذات التوتر العالي، أو إلى الدارات التي تسري بينها تيارات كبيرة، وذلك بهدف توسيع مجالات القياس وتأمين شروط السلامة الكهربائية، تسمى المحولات المستخدمة لهذه الغاية محولات القياس.

٤-٣ - بنية المحولات:

يتكون المحول من الأجزاء الفعالة الأساسية و الأجزاء الإنشائية الثانوية.

- الأجزاء الفعالة الأساسية:

وهي الأجزاء المخصصة لتحقيق عملية تحويل الطاقة وتشمل النواة (القلب المغناطيسي) المصنوعة من صفائح من الحديد الفيرومغناطيسي المعزولة من الطرفين والتي لها أشكال مختلفة، والملفات النحاسية، الشكل (1-4) الذي يعبر عن محول أحادي الطور أي المحول المكون من دارتين كهربائيتين ، ودائرة مغناطيسية إحدى هاتين الدارتين هي ملف التوتر المرتفع أو الملف الأولي، والأخرى هي ملف التوتر المنخفض أو الملف الثانوي أما الدائرة المغناطيسية فهي عبارة عن النواة الحديدية.



الشكل (1-4) [1]

- الأجزاء الإنشائية للمحول:

تتعلق بالبنية الإنشائية للمحول: عوازل الملفات، عوازل العبور، خزان الزيت للمحول وملحقاته.

٤-٤- تصنيف المحولات :

تصنف المحولات وفق اعتبارات متعددة إلى أنواع متباينة فيما بينها:

(a) حسب الارتباط الكائن بين ملفات الأولى والثانوي:

١- محولات عادية وتسمى عادة بالمحولات فقط ، وترتبط الملفات فيها مع بعضها البعض ارتباطاً مغناطيسياً فقط .

٢- محولات ذاتية وفيها يرتبط الملفان ارتباطاً كهربائياً ومغناطيسياً ، حيث يتكون ملفا الطرفين من ملف واحد ، جزء منه يغذى من جهة ، ويطبق على الجزء الآخر الحمل .

٣ - محولات ثلاثية الملفات، حيث تتكون الدارة الأولية من ملف واحد بينما الدارة الثانوية من ملفين مستقلين.

(b) حسب مجال استخدامها :

١- محولات الاستطاعة والتوزيع: وتم شرح ذلك في الفقرة (٣ - ٢)

٢- محولات القياس: وتستخدم في القياسات الكهربائية ولوحات التوزيع والتغذية، وهي تحول إما التيار وتسمى محولات التيار، أو التوتر وتسمى محولات التوتر .

٣- محولات الاختبار: وهي محولات ذات توتر عال جداً ، تصمم بغية اختبار التجهيزات الكهربائية وخاصة العوازل على توترات عالية.

٤- محولات لتغيير عدد أطوار التيار الكهربائي المتناوب:

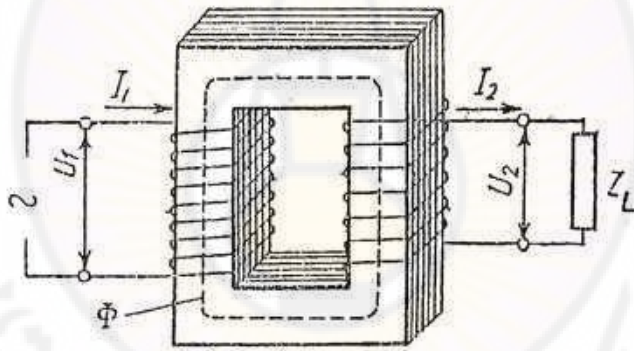
٥ - محولات لتغيير تردد التيار المتناوب وتحويله إلى نبضات ، ولا تزيد استطاعة هذه المحولات عن بضعة فولتات- أمبير .

٦- محولات التنظيم والتعبير وتستخدم للحصول على قيم مختلفة للتوتر في المخابر ومراكز الأبحاث والتحكم الآلي.

٤ - ٥ - نظرية عمل المحول

٤ - ٥ - ١ المحول المثالي:

تعد المحولة تطبيقاً مباشراً لقانون فاراداي في التحريض الكهروطيسي. لندرس مبدأ عمل محولة أحادية الطور عادية حسب الشكل (2-4) مؤلفة من نواة مغناطيسية حديدية يلف عليها ملفان عدد لفاتهما N_1, N_2 ، ولفهم نظرية عمل المحولة، ووضع التمثيل الرياضي لها نبدأ أولاً بدراسة عمل المحولة المثالية. نقصد بالمحولة المثالية، المحولة التي تكون فيها الضياعات الحديدية والنحاسية مهملة، ويتشابه الفيض المغناطيسي المتولد كلياً مع الملفين، وينعدم الفيض التسريبي، أي يكون عامل الترابط المغناطيسي بين الملفين مساوياً للواحد.



الشكل (2-4)

إذا وصلت أحد ملفي هذه المحولة الذي عدد لفاته N_1 ، وعامل تحريضه الذاتي الكلي L_1 مع منبع تيار متناوب ذي توتر u_1 ، وتردد f_1 ، فإنه سيمر في هذا الملف تيار كهربائي i_1 الذي بدوره سيولد فيضاً مغناطيسياً ϕ متناوباً يمر جميع خطوطه عبر النواة المغناطيسية، ويتشابه مع ملفي المحولة على السواء، أي أنه ستولد في ملفي المحولة سيالتان مغناطيسيتان قدرهما:

$$\psi_1 = N_1 \cdot \phi$$

$$\psi_2 = N_2 \cdot \phi \dots \dots \dots (4-1)$$

حيث ψ_1 و ψ_2 الفيضان المغناطيسيان المتشابهان مع الملف الأولي والثانوي.

إذا كان التوتر المطبق على المحول والتيار المار في الملف الأولي جيبيين يكون الفيض المغناطيسي المتولد ϕ جيبياً أيضاً ويعطى بالعلاقة الآتية:

$$\phi = \phi_m \sin \omega t \dots\dots\dots(4-2)$$

حيث :

ϕ : القيمة اللحظية للفيض المغناطيسي.

ϕ_m : القيمة العظمى للفيض المغناطيسي .

ω : السرعة الزاوية للتيار المتناوب ذي التردد

يحرص هذا الفيض بدوره في كل من الملف الأولي والثانوي قوتين محركتين كهربائيتين مختلفتين بالقيمة، ومتعلقتين بعدد لفات كل منهما، وتعطيان حسب قانون فاراداي في التحريض المغناطيسي بالعلاقات الآتية:

$$e_1 = -\frac{d\psi_1}{dt} = -N_1 \frac{d\phi}{dt} = -N_1 \cdot \omega \cdot \phi_m \cos \omega t \dots\dots\dots(4-3)$$

$$e_2 = -\frac{d\psi_2}{dt} = -N_2 \frac{d\phi}{dt} = -N_2 \cdot \omega \cdot \phi_m \cos \omega t \dots\dots\dots(4-4)$$

وبالعودة إلى نظرية الدارات المغناطيسية نستطيع أن نكتب:

$$\psi_1 = N_1 \cdot \phi = L_1 \cdot i_1 \dots\dots\dots(4-5)$$

$$\psi_2 = N_2 \cdot \phi = M \cdot i_2 \dots\dots\dots(4-6)$$

حيث:

M : عامل التحريض المتبادل بين الملفين.

وباستخدام العلاقاتين (4-5) و (4-6) يمكننا كتابة علاقتي القوى المحركة الكهربائية وبالشكل الآتي:

$$e_1 = -\frac{d\psi_1}{dt} = -L_1 \frac{di_1}{dt} \dots\dots\dots(4-7)$$

$$e_2 = -\frac{d\psi_2}{dt} = -M \frac{di_1}{dt} \dots\dots\dots(4-8)$$

بلاحظ من العلاقات السابقة أن القوى المحركة الكهربائية المتحسسة تتأخر عن الفيض المغناطيسي بفارق صفحة قدرها 90° درجة.

إن القيمة العظمى للقوة المحركة الكهربائية في كلا الملفين تساوي:

$$E_{1m} = N_1 \cdot \omega \cdot \phi_m = 2\pi \cdot f \cdot N_1 \cdot \phi_m \dots\dots\dots(4-9)$$

$$E_{2m} = N_2 \cdot \omega \cdot \phi_m = 2\pi \cdot f \cdot N_2 \cdot \phi_m \dots\dots\dots(4-10)$$

والقيمة الفعالة لهما:

$$E_1 = E_{1m} / \sqrt{2} = \sqrt{2} \pi \cdot f \cdot N_1 \cdot \phi_m = 4.44 f \cdot N_1 \phi_m \dots\dots\dots(4-11)$$

$$E_2 = E_{2m} / \sqrt{2} = 4.44 f \cdot N_2 \phi_m \dots\dots\dots(4-12)$$

نسمي نسبة عدد لفات كل من الملف الأولي والثاني بنسبة تحويل المحول، ونرمز لها بالحرف a ، حيث تساوي إلى نسبة القوتين المحركتين الكهربائيتين في الملف الأولي والثانوي أي:

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} \dots\dots\dots(4-13)$$

تكون نسبة التحويل في المحول أكبر من الواحد في المحولات الخافضة للتوتر وأصغر من الواحد في المحولات الرافعة للتوتر ، ومساوية الواحد في محولات العزل الخاصة .

تعد الدارة الأولية للمحول مستهلكاً للقدرة الكهربائية، لذا كان اتجاه شعاع القوة المحركة الكهربائية المتولدة من الفيض المغناطيسي معاكساً لاتجاه شعاع المركبة الفعالة للتيار في الدارة الأولية. أما الدارة الثانوية فتعد مولداً للتيار، لذا كان اتجاه شعاع القوة المحركة الكهربائية متفقاً مع اتجاه شعاع المركبة الفعالة للتيار الثانوي. فإذا كان اتجاه لف الملفين واحداً، كانت القوتان المحركتان الكهربائيتان E_1 و E_2 متفقتين في الاتجاه ، والمركبتان الفعالتان للتيارين في الأولي والثانوي متعاكستين في الاتجاه.

إذا وصلنا الآن الملف الثانوي لهذه المحولة بحمولة ممانعتها $Z_L = R_L + jX_L$ ، فإن تياراً كهربائياً i_2 سوف يمر في هذا الحمل، وسيظهر على مربطيه توتر ثانوي قدره u_2 يساوي القوة المحركة الكهربائية (لأن المحول مثالي) . وبسبب مرور هذا التيار الثانوي، يتولد فيض آخر يعاكس الفيض المسبب له ، وذلك حسب قانون لنز الذي

ينص على أن اتجاه القوة المحركة الكهربائية في لحظة ما بالنسبة لأي ملف يحدد على أساس أن التيار الناتج عنها يعاكس السبب الذي أدى إلى حدوثه، أي أن القوة المحركة المغناطيسية $i_2.N_2$ تعاكس القوة المحركة المغناطيسية $i_1.N_1$ الناتجة من التيار الأولي، وتحاول محوها من الدارة المغناطيسية مما يترتب على ذلك انخفاض في قيمة القوة المحركة الكهربائية e_1 مما يؤدي إلى تداخل التوازن بينها وبين التوتر المطبق، وزيادة الفرق بين توتر المنبع u_1 والقوة المحركة الكهربائية e_1 ، مما يؤدي إلى زيادة سحب التيار i_1 من المنبع حتى يعوض الخسارة التي طرأت على قيمة الفيض في النواة المغناطيسية نتيجة وضع الحمل، ومن ثم لتعود القوة المحركة الكهربائية إلى قيمتها الأصلية المساوية والمعاكسة لتوتر المنبع، وتبقى السيادة المغناطيسية المارة في الدارة المغناطيسية محافظة تقريباً على قيمتها قبل وضع الحمل. أي أن الفيض المغناطيسي الكلي في النواة المغناطيسية للمحول يبقى ثابتاً طالما بقي توتر المنبع ثابتاً، ومحصلة القوتين المحركتين المغناطيسيتين $i_1.N_1$ و $i_2.N_2$ تساوي نفس القوى المحركة المغناطيسية $i_0.N_1$ قبل وضع الحمل، حيث i_0 التيار الذي يستجره الملف الأولي للمحول من المنبع قبل وضع الحمل، أي عندما تكون دارة الملف الثانوي مفتوحة، أي أننا نستطيع أن نكتب:

$$i_1 N_1 + i_2 N_2 = i_0 N_2 \dots\dots\dots(4-14)$$

بهذا يمكننا القول إن أي سحب للتيار من جهة الملف الثانوي يصحبه سحب التيار من المنبع في الدارة الأولية، وبظل الفيض الكلي في النواة ثابتاً طالما بقي التوتر ثابتاً.

لقد افترضنا أن المحولة مثالية، أي من دون ضياع ومن دون هبوط توتر في المقاومات الأومية الداخلية للملفين الأولي والثانوي، لذلك يمكننا أن نكتب قانون كيرشوف الثاني بالنسبة لدارة الملف الأولي والثانوي كمايلي:

$$U_1 = / E_1 / \text{ , } U_2 = / E_2 / \dots\dots\dots(4-15)$$

وإن الاستطاعة التي يستجرها المحول من الشبكة تساوي إلى الاستطاعة التي يقدمها إلى المحولة أي:

$$U_1 I_1 = U_2 . I_2$$

ينتج من هاتين المعادلتين أن:

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \dots\dots\dots(4-16)$$

أي إن نسبة التحويل في المحولة المثالية تساوي إلى نسبة التوتر في الملف الأولي والملف الثانوي وعكساً نسبة التيارين فيهما.

وهكذا يقوم المحول بتحويل قيمة كل من التوتر والتيار في الطرف الأولي إلى قيم أخرى في الطرف الثانوي مع المحافظة على قيمة ثابتة لاستطاعة المحول.

٤-٥-٢ المحول الحقيقي:

وهو المحول الذي يحتوي على ملفين أولي وثانوي عدد لفاتهما N_2, N_1 ، ولكل منهما مقاومة أومية داخلية قدرها R_2, R_1 ، وتحريض ذاتي كلي L_2, L_1 وتحريض تبادلي M وتحريض متبادل L_{12}, L_{21} .

تيار المحول في حالة اللاحمل: ذكرنا آنفاً أن النواة المغناطيسية للمحول تصنع من رقائق فولاذي معزولة بعضها عن بعض من أجل التقليل من أثر التيارات الإعصارية وضياعات الاستطاعة داخل المحول. وبما أن هذه التيارات والضياعات صغيرة القيمة نسبياً لذا يمكن إهمالها. على هذا الأساس يمكن القول: إن السيلية المغناطيسية الأساسية ϕ التي تسري في نواة المحول تتولد في حالة اللاحمل تحت تأثير القوة المحركة المغناطيسية $F_o = i_o \cdot N_1 = \phi H \cdot dl$ ، المستنتجة في الملف الابتدائي، فكلما كانت قيمة ϕ المطلوبة كبيرة يتوجب زيادة F_o ، أي زيادة تيار اللاحمل في الملف الابتدائي عن طريق زيادة قيمة توتر التغذية U_1 . بيد أن العلاقة بين السيلية المغناطيسية ϕ وتيار اللاحمل i_o غير خطية، بل تتعلق بالخواص المغناطيسية لنواة المحول.

يعتبر تيار اللاحمل I_o مؤلفاً من مركبتين ردية وفعلية أي:

$$I_o = \sqrt{I_{o\sigma}^2 + I_{or}^2} \dots\dots\dots(4-18)$$

حيث :

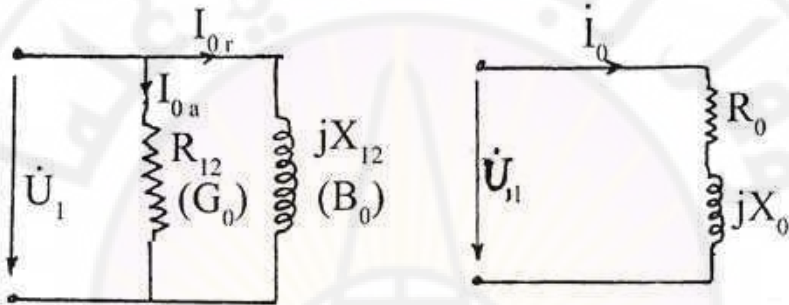
I_{or} : تيار اللاحمل الردي الذي يولد الفيض المغناطيسي.

I_{0a} : تيار اللاحمل الفعلي الذي ينقل إلى الملف الابتدائي للمحول الاستطاعة اللازمة لتغطية الضياعات المغناطيسية.

يمكن في هذه الحالة (اللاحمل) إهمال الضياعات الكهربائية في المقاومة الأومية لملف الابتدائي لصغر تيار اللاحمل. أي يمكن أن نكتب:

$$I_{0r} = B_0 E_1$$

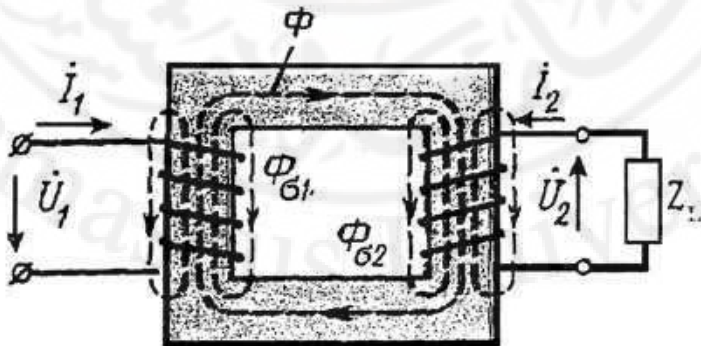
$$I_{0a} = G_0 E_1$$



الشكل (3-4)

٤-٥-٣- المعادلات العقدية للمحول الحقيقي:

يحتوي المحول الحقيقي بالإضافة إلى السيلالة المغناطيسية ϕ التي تسري عبر النواة الحديدية ، وتتشارك مع ملفي المحول بأن واحد على السيلالات التسريبية ϕ_{σ_1} والتي تتشارك مع N_1 و ϕ_{σ_2} التي تتشارك مع N_2 الشكل (4-4).



الشكل (4-4)

ولا تشارك هذه السيلالات التسريبية بعملية نقل الطاقة بل تنتج بالتحريض الذاتي في الملفات التي تتشابه معها قوى محرك كهربائية.

$$E_{\sigma_1} = 4,44 f . N_1 . \phi_{\sigma_1 \max}$$

$$E_{\sigma_2} = 4,44 f . N_2 . \phi_{\sigma_2 \max}$$

يمكن وضع المعادلات العقدية لملفي المحول الابتدائي والثانوي، بعد أن نأخذ بالاعتبار القوى المحركة الكهربائية الناشئة فيها بفعل التحريض الذاتي، وهبوطات التوتر على المقاومات الأومية لهذه الملفات.

وعند تطبيق قانون كيرشوف الثاني في الحلقات الكهربائية على الملف الابتدائي والثانوي ينتج :

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{\sigma_1} &= \dot{I}_1 R_1 \\ E_2 + \dot{E}_{\sigma_2} &= \dot{I}_2 R_2 + \dot{I}_2 . Z_l \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (4-19)$$

من المعادلة (4-14)

$$\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = F_o$$

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_o . N_1$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_o + [-\dot{I}_2 (N_2 / N_1)]$$

أو:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_o + \dot{I}_2' \dots\dots\dots (4-20)$$

بما أن السيلالات التسريبية تمر عبر الهواء بصورة جزئية أو بالكامل، لذلك تتناسب هذه السيلالات مع القوى المحركة المغناطيسية أو التيارات المؤثرة في الملفات الموافقة:

$$E_{\sigma_1} = I_1 X_1 \quad , E_{\sigma_2} = I_2 X_2$$

حيث:

X_1 : الممانعة التسريبية للملف الأولي.

X_2 : الممانعة التسريبية للملف الثانوي.

بما أن القوى المحركة الكهربائية E_{σ_1} ، E_{σ_2} تتأخر بالصفحة عن السيلالات والتيارات المنتجة لها بمقدار 90° ، لذا يمكن أن نكتب:

$$E_{\sigma_1} = -j \dot{I}_1 X_1, \quad \dot{E}_{\sigma_2} = -j \dot{I}_2 X_2$$

عند ذلك تأخذ المعادلات العقدية للمحول الشكل التالي:

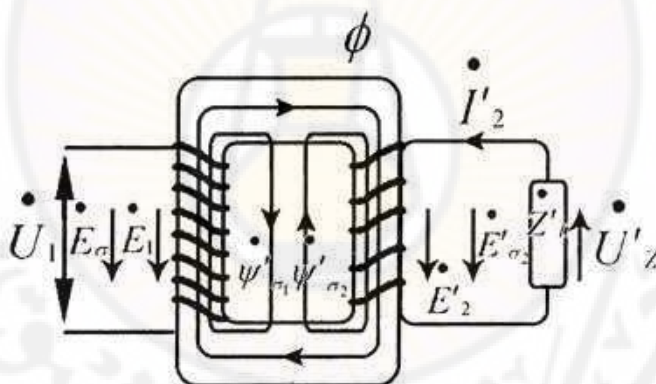
$$\dot{U} + \dot{E}_1 = \dot{I}_1 R_1 + j \dot{I}_1 x_1 = \dot{I}_1 \cdot Z_1$$

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 \cdot R_2 + j \dot{I}_2 x_2 + \dot{I}_2 \cdot Z_{l_2} = \dot{I}_2 Z_2 + \dot{I}_2 Z_{l_2}$$

$$\dot{I}_1 = I_0 + \dot{I}'_2 \dots \dots \dots (4-21)$$

٤-٥-٤ - نسب القيم الكهربية من أحد طرفي المحول إلى الطرف الآخر:

إن استخدام المخطط الكهرومغناطيسي شكل (5-4) الذي تم وضعه على أساس القيم الأصلية لدائرتي المحول الابتدائية والثانوية، لا يسمح بدراسة حالات عمل المحول بالقدر المطلوب من السرعة والسهولة، لذلك فإن استخداماته في الحسابات العملية نادرة وتقتصر على بعض الدراسات الخاصة.



الشكل (5-4) [1]

من أجل تسهيل دراسة الظواهر الكهرومغناطيسية التي تجري في المحول يتم غالباً نسب القيم الخاصة بأحد ملفيه (الملف الثانوي على الأغلب) إلى الملف الآخر. ويقصد بالنسب جملة العمليات الحسابية اللازمة لاستبداله بالمحول الحقيقي الذي يملك في الحالة العامة عدد لفات في جهة الابتدائي N_1 ، مختلفاً عن عدد اللفات في جهة الثانوي N_2 ، محولاً مكافئاً يملك عدداً متساوياً من اللفات في طرفيه الابتدائي الأصلي N_1 ، والثانوي المنسوب (المكافئ) $N'_2 = N_1$.

ففي المحول المنسوب إلى الطرف الابتدائي مثلاً تبقى جميع القيم الكهربائية الخاصة بالملف الابتدائي (التيار، التوتر والقوى المحركة الكهربائية والمقاومات) على حالها دون تغيير، في حين تصبح قيم الملف الثانوي المنسوبة مختلفة عن تلك القيم الحقيقية الأصلية.

تتمثل الميزة الأساسية لعملية النسب بأنها تمكن من استبدال المحول الحقيقي بمحول مكافئ ذي نسبة تحويل تساوي الواحد، وهذا يعني أنه يغدو بالإمكان استبدال معادلة القوى المحركة المغناطيسية في المحول المنسوب بمعادلة تربط بين التيارات مباشرة، لأنه يصبح بالإمكان تقسيم علاقة القوى المحركة المغناطيسية على عدد اللفات المتساوي في جميع حدودها والحصول على معادلة تربط بين التيارات مباشرة.

إن الحصول على مثل هذه المعادلة يمكن استبدال الدارة الكهرومغناطيسية المعقدة بدارة كهربائية أبسط بكثير تربط مباشرة بين طرفي المحول. عند إجراء عملية النسب يجب التقيد بالحفاظ على استطاعة المحول بمركبتها الفعلية P والردية Q في جهتي الابتدائي والثانوي دون تغيير، كما يتوجب الحفاظ على ثبات قيمة السيادة المغناطيسية المشتركة ϕ .

انطلاقاً من الشروط المذكورة يمكن الحصول على القيم المنسوبة للمحول المكافئ كمايلي:

أ- تحدد قيمة تيار الثانوي I'_2 المنسوب إلى الملف الابتدائي على أساس ثبات قيمة السيادة المغناطيسية المشتركة ϕ في المحول الأصلي والمنسوب. فتحقيق هذا الشرط يتطلب بقاء القوة المحركة المغناطيسية في الملف الثانوي على حالها قبل النسب وبعده أي:

$$F'_2 = F_2 \Rightarrow I'_2 N'_2 = I_2 N_2$$

وبالتالي:

$$I'_2 = I_2 \frac{N_2}{N'_2} = I_2 \frac{N_2}{N_1} \dots\dots\dots (4-22)$$

أي أنه من أجل الحصول على قيمة تيار الثانوي I'_2 المنسوبة إلى الملف الابتدائي يتوجب قسمة قيمته الأصلية على نسبة التحويل، وهذا يعني أن القيمة المنسوبة لتيار الملف الثانوي (ملف التوتر المنخفض) تتناسب عكساً مع نسبة التحويل، أي أنها أصغر من القيمة الأصلية بمقدار النسبة a .

ب- بما أن عدد اللفات في الملف الثانوي (المنسوب إلى الابتدائي هو $N'_2 = N_1$ لذلك تصبح القوة المحركة الكهربائية للملف الثانوي المنسوبة إلى الابتدائي متناسبة مع $N'_2 = N_1$ وبما أن السليالة المغناطيسية المشتركة تبقى ثابتة، لذلك يمكن الربط بين القيمة الأصلية للقوة المحركة E_2 وقيمتها المنسوبة E'_2 من خلال النسبة:

$$\frac{E_2}{N_2} = \frac{E'_2}{N'_2} = \frac{E'_2}{N_1} \Rightarrow E'_2 = E_2 \frac{N_1}{N_2} = E_2 . a \dots\dots\dots (4-23)$$

وبما أن:

$$a \approx \frac{E_1}{E_2}$$

يمكننا أن نكتب:

$$E'_2 = E_1$$

وبالطريقة نفسها نستطيع إثبات أن :

$$U'_2 = U_2 . a \approx U_1$$

وهذا يعني أن قيمة التوتر الثانوي U'_2 المنسوب إلى الابتدائي تزيد على قيمته الأصلية بمقدار نسبة التحويل a وتكون قريبة من القيمة الأصلية لتوتر الملف الابتدائي.

ج- عند نسب الملف الثانوي إلى الابتدائي ينبغي، كما ذكرنا، الحفاظ على بقاء الاستطاعة الفعلية ΔP_2 والردية ΔQ_2 المستهلكة (الضائعة) في هذا الملف ثابتة قبل النسب وبعده . على هذا الأساس يمكن حساب قيم المقاومة الأومية للملف الثانوي المنسوبة إلى الابتدائي R'_2 والمفاعلة التحريضية المنسوبة X'_2 كمايلي:

$$\Delta P_2 = \Delta P'_2 \Rightarrow I_2^2 R_2 = I_2'^2 R'_2$$

$$R'_2 = R_2 (I_2 / I_2')^2$$

وبالعودة إلى العلاقة (4-22) نجد أن:

$$I_2 / I'_2 = N_1 / N_2$$

وبالتالي:

$$R'_2 = R_2 (N_1 / N_2)^2 = R_2 . a^2 \dots\dots\dots(4-24)$$

وبالطريقة نفسها نجد على أساس ثبات الاستطاعة الردية $\Delta Q'_2 = \Delta Q_2$ قبل النسب وبعده أن:

$$I_2^2 X_2 = I'^2_2 X'_2 \Rightarrow X'_2 = X_2 (I_2 / I'_2)^2$$

$$X'_2 = X_2 (N_1 / N_2)^2 = X_2 . a^2 \dots\dots\dots(4-25)$$

وإذا كان الملف الثانوي مربوطاً مع حمل ذي ممانعة $Z_L = R_L + j X_L$ يمكن أيضاً نسب هذه الممانعة إلى الملف الابتدائي على أساس العلاقات السابقة أي:

$$R'_L = R_L (N_1 / N_2)^2 = R_L . a^2$$

$$X'_L = X_L (N_1 / N_2)^2 = X_L . a^2$$

وبالتالي:

$$Z'_L = R'_L + j X'_L$$

إذا كانت ثوابت فرع المغنطة (الثوابت الحديدية) R_o, X_o محسوبة باستخدام القيم الثانوية فنسب هذه الثوابت إلى جهة الملف الابتدائي عند الحاجة باستخدام العلاقات نفسها التي استخدمناها لنسب الثوابت النحاسية أي:

$$R'_o = R_o . a^2 , X'_o = X_o . a^2$$

$$Z'_o = R'_o + j X'_o$$

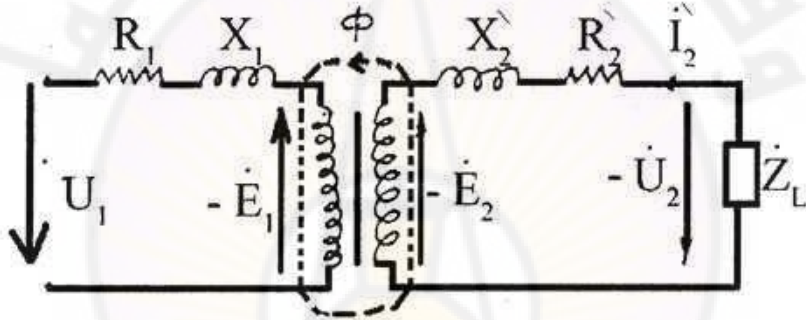
وفي بعض الأحيان تظهر الحاجة لنسب القيم الكهربائية من جهة الملف الابتدائي إلى الملف الثانوي، حيث يمكن تحقيق ذلك بالاعتماد على الأسس السابقة نفسها.

٤-٥-٥- الدارة الكهربائية المكافئة للمحول:

وجدنا فيما سبق أن المحول أحادي الطور ثنائي الملف يتكون من دارتين كهربائيتين مستقلتين ترتبطان فيما بينهما برابطة مغناطيسية مشتركة ϕ . لذلك يمكن تمثيل المحول

الحقيقي بالدائرة الكهرومغناطيسية المكافئة للمحول المكافئ المنسوب المبينة في الشكل (6-4).

والتي يدرس فيها كل طرف من طرفي المحول بصورة مستقلة نظراً لغياب الرابطة الكهربائية المباشرة بين هاتين الدارتين. بيد أن استخدام هذه الدائرة لدراسة حالات عمل المحولات يعقد هذا الأمر إلى حد كبير ويتطلب إجراء حسابات مطولة بما في ذلك حساب الدائرة المغناطيسية. لذلك فإن هذه الدائرة نادرة الاستخدام في الحسابات العملية وتستبدل بدائرة كهربائية أبسط تسهل دراسة المحول إلى حد كبير.



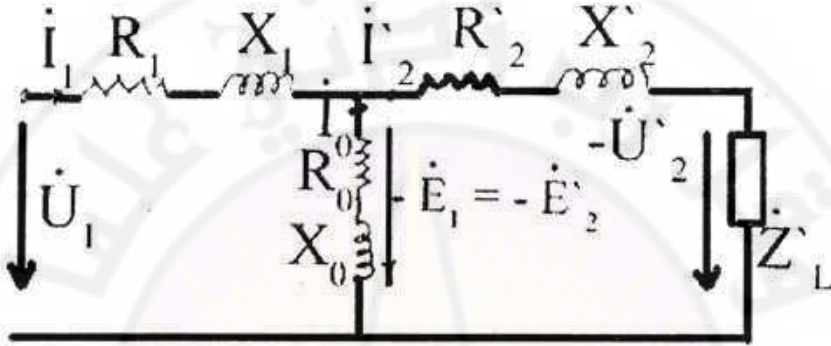
الشكل (6-4)

ولدينا معادلات التوازن الكهربائي للمحول الحقيقي التي يمكن أن نكتبها للمحول المكافئ المنسوب كمايلي:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + (R_1 + jX_1) \dot{I}_1 \\ \dot{E}_2 &= (R'_2 + jX'_2) \times \dot{I}'_2 + Z'_L \cdot \dot{I}'_2 \dots\dots\dots (4-26) \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_n + \dot{I}'_2 \end{aligned}$$

من معادلات التوازن يمكن رسم الدائرة المكافئة للمحول المنسوب فيه الطرف الثانوي إلى الابتدائي على أساس أن معادلة التوازن هي عقدة كيرشوف والمعادلة الأولى والثانية هي شكل من قانون كيرشوف الثاني.

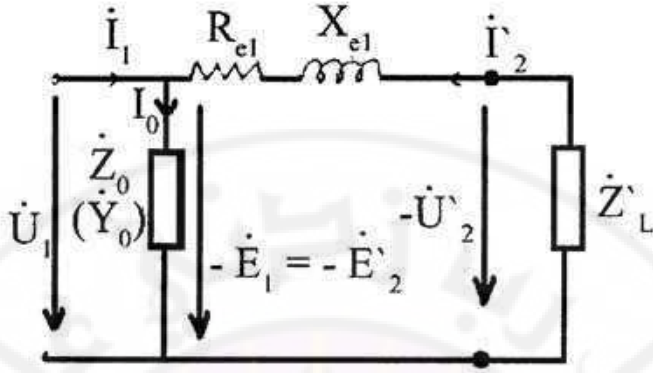
وبالاستفادة من الدارة الكهربائية المكافئة لفرع المغنطة المستنتجة سابقاً، وبالربط بين هذه الحلقات (كيرشوف الثاني) والعقد ينتج لدينا الدارة الكهربائية المكافئة للمحول على الشكل التالي:



الشكل (7-4)

حيث الشكل (7-4) هو الدارة المكافئة الكهربائية الدقيقة للمحول أحادي الطور ثنائي الملف (الدارة ذات الشكل T) المكونة من ثلاثة فروع هي:

- ١- فرع الملف الابتدائي الممثل بممانعة هذا الملف $\dot{Z}_1 = R_1 + jX_1$.
 - ٢- فرع دائرة التهييج (المغنطة) الممثل بالممانعة $\dot{Z}_0 = R_0 + jX_0$.
 - ٣- الفرع المكون من الملف الثانوي والحمل المنسوبين إلى جهة الابتدائي والممثلين بالممانعة $\dot{Z}_2 + \dot{Z}'_L = R_2 + R'_L + j(X_2 + X'_L)$.
- يمكن تبسيط الدارة المكافئة الدقيقة دون الوقوع بخطأ ملموس بنقل فرع المغنطة الممثل بالممانعة $\dot{Z}_0 = R_0 + jX_0$ ، أو السماحية $Y_0 = G_0 - jB_0$ من مكانه الحقيقي إلى بداية (دخل) الدارة فنحصل على الدارة المكافئة التقريبية أو الدارة ذات الشكل L حسب الشكل (8-4).



الشكل (8-4)

حيث:

$$R_{e1} = R_1 + R'_2,$$

$$X_{e1} = X_1 + X'_2 \dots\dots\dots(4-27)$$

$$Z_{e1} = R_{e1} + jX_{e1}$$

٤-٥-٦- المخطط الشعاعي للمحول:

يعرف المخطط الشعاعي للمحول بأنه المخطط الذي يجمع بين أشعة التوتر والتيار لملفي المحول الأولي والثانوي بما فيها القوة المحركة الكهربائية المشتركة وهبوطات التوتر على العناصر الداخلية والأخذ بعين الاعتبار فروقات الصفحة وعلاقات الأشعة بعضها مع بعض.

يرسم المخطط الشعاعي للمحول حسب دارته الكهربائية المكافئة ومعادلات التوازن الكهربائي له، والتي تتلخص بمعادلتَي التوتر للملف الأولي والثانوي، ومعادلة التيار، والمعادلة المميزة لفرع التهيج، وذلك بعد معرفة جميع عناصرها من مقاومة أومية للملف الأولي والثانوي R_1, R_2 ، ومفاعلة تحريضية تسريبية لكلا الملفين X_1, X_2 ، ومحددات فرع المغنطة، ونسبة التحويل. وبعد ذلك نقوم بنسب جميع القيم الكهربائية والعناصر الكهربائية التابعة للملف الثانوي إلى الملف الأولي، وذلك بضرب توتر

الثانوي وقوته المحركة الكهربائية بـ a وتياره بـ $\frac{1}{a}$ وعناصره الأومية والتحريضية بـ a^2 .

ويرسم المخطط الشعاعي عادة بطريقتين:

١- انطلاقاً من معطيات الحمل، أي بعد معرفة التوتر الثانوي U_2 والتيار الثانوي I_2 وفرق الصفحة بينهما ϕ_2 ، يمكننا رسم المخطط الشعاعي للمحولة، واستنتاج قيم التوتر والتيار في الطرف الأولي.

٢- انطلاقاً من معطيات الشبكة، أي بعد معرفة التوتر المطبق U_1 والتيار المستجر I_1 وفرق الصفحة بينهما ϕ_1 ، يمكننا رسم المخطط الشعاعي للمحولة، واستنتاج التوتر والتيار في الملف الثانوي.

عادة يرسم المخطط الشعاعي للمحول وفق الطريقة الأولى، وذلك حسب الخطوات التالية:

١- ننسب جميع قيم الملف الثانوي وعناصره إلى الأولي بعد معرفة نسبة التحويل a .

٢- نرسم المخطط الشعاعي للمحولة المعطاة بعد معرفة توترها وتيارها الثانويين المنسوبين إلى الأولي وفرق الصفحة بينهما ϕ_2 ، أي بعد معرفة عامل الاستطاعة للمحولة $\cos \phi_2$.

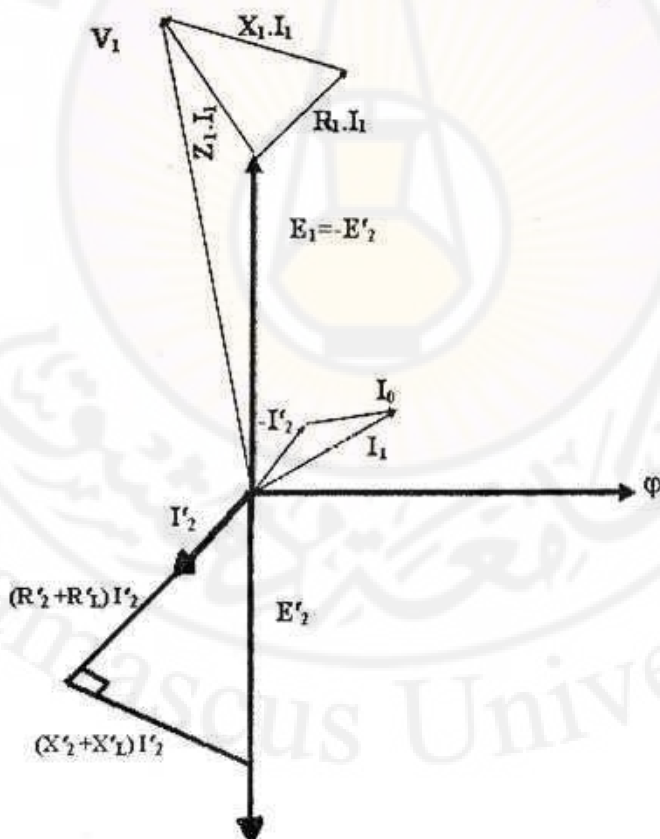
٣- نستخرج شعاع القوة المحركة الكهربائية وفق العلاقة $\vec{E}_2 = \vec{U}_2' + (R_2' + jX_2')\vec{I}_2'$ ، ونضعه في المخطط، بعد معرفة عناصر الملف الثانوي المنسوبة وذلك بجمع شعاع هبوط التوتر على المفاعلة التحريضية التسريبية $X_2'.I_2'$ (الذي يتعامد مع شعاع التيار الثانوي ويسبقه بمقدار 90° درجة، مع شعاع التوتر الثانوي U_2' ، فنحصل على شعاع القوة المحركة الكهربائية للملف الثانوي المنسوب E_2').

٤- نحدد شعاع تيار التهيج I_0 وذلك بجمع الشعاع E_1U_0 المسائر E_1 (مقلوب الشعاع E_1) مع الشعاع E_1B_0 المتعامد مع الشعاع E_1 والمسائر لشعاع الفيض ϕ .

٥- نستخرج شعاع التوتر الأولي U_1 و فرق الصفحة ϕ_1 بعد معرفة عناصر الملف الأولي X_1, R_1 و جمع شعاع هبوط التوتر على المقاومة الداخلية $R_1 I_1$ الذي يساير شعاع التيار الأولي I_1 وشعاع هبوط التوتر على المفاعلة التحريضية التسريبية $jX_1 I_1$ الذي يتعامد مع شعاع التيار الأولي I_1 ، ويسبقه بمقدار 90° درجة ، وشعاع مقلوب القوة المحركة الكهربائية E_1 ، فنحصل على الشعاع U_1 ، و فرق الصفحة ϕ_1 بين I_1, U_1 وعلى عامل الاستطاعة $\cos \phi_1$ للأولي.

نرسم المخططات الشعاعية حسب حمولات مختلفة مربوطة مع الملف الثانوي للمحول.

يبين الشكل (9-4) رسم معين.



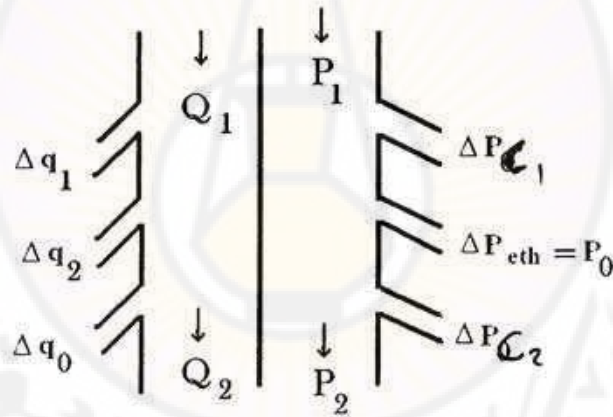
الشكل (9-4)

٣-٦- مردود المحول:

تؤثر الضياعات تأثيراً مهماً في تحديد مردود المحول، وتنقسم هذه الضياعات إلى قسمين:

١- ضياعات تتشكل في ملفي المحول ، وتسمى بالضياعات النحاسية أو الكهربائية وتتغير مع تغير تيار الحمولة، لذلك تسمى بالضياعات المتغيرة.

٢- ضياعات حديدية لاتتعلق بالحمولة بل بتوتر التغذية ، وتسمى الضياعات الثابتة. وقد تحدث نتيجة هذه الضياعات التي تبدها المحولة أن تقل استطاعة خرجها عن استطاعة دخلها ، وذلك حسب مخطط تحويل (جريان) الاستطاعة الفعلية المبين في الشكل (10-4)



الشكل (10-4)

حيث:

P_1 : استطاعة الدخل الفعلية وتساوي: $P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1$.

P_2 : استطاعة الخرج الفعلية وتساوي: $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 = U_2' I_2' \cos \varphi_2$.

ΔP_{c1} : الضياعات النحاسية في الملف الأولي وتساوي:

$$\Delta P_{c1} = R_1 I_1^2$$

ΔP_{c2} : الضياعات النحاسية في الملف الثانوي وتساوي:

$$\Delta P_{c_2} = R_2 I_2^2 = R_2' I_2'^2$$

$\Delta P_{e_{th}}$: ضياعات الحديدية وتساوي تقريباً الضياعات في حالة اللاحمل:
أي:

$$P_o = G_o E_1^2 \approx G_o U_1^2 = R_o I_o^2$$

أما $P_{em} = P_{12}$ فنسميها الاستطاعة الكهرومغناطيسية المنقولة من الملف الأولي إلى الملف الثانوي عبر السليالة المغناطيسية المشتركة في النواة المغناطيسية وتساوي:

$$P_{12} = P_{em} = P_1 - \Delta P_{c1} - P_o = E_1 I_2' \cos \varphi_2 = E_2' I_2' \cos \varphi_2$$

كما يبين الشكل (10-4) مخطط جريان الاستطاعة الردفعلية في المحول حيث:
 Q_1 - الاستطاعة الردفعلية المستهلكة من الشبكة وتساوي:

$$Q_1 = U_1 I_1 \sin \varphi_1$$

Δq_1 : الاستطاعة الردفعلية المصروفة لتغطية الفيض المغناطيسي التسريبي في الملف الأولي وتساوي:

$$\Delta q_1 = X_1 \cdot I_1^2$$

Δq_2 - الاستطاعة الردفعلية المصروفة لتعويض الفيض المغناطيسي التسريبي في الملف الثانوي وتساوي:

$$\Delta q_2 = X_2 I_2^2 = X_2' \cdot I_2'^2$$

Δq_o : الاستطاعة الردفعلية المصروفة لتشكيل الفيض المغناطيسي المشترك φ وتساوي:

$$\Delta q_o = B_o E_1^2 \approx B_o U_1^2 \approx X_o I_o^2$$

أما Q_2 : فهي الاستطاعة الردفعلية التي تنتقل إلى الحمل المربوطة بالمحول وتساوي:

$$Q_2 = U_2 I_2 \sin \varphi_2 = U_2' I_2' \sin \varphi_2$$

نعرف مردود المحول على أنه النسبة بين استطاعة الخرج الفعلية P_2 واستطاعة الدخل الفعلية P_1 فإذا رمزنا بـ η لمردود المحول نجد أن:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P c_1 + \Delta P c_2 + \Delta P_{eth}} \dots\dots\dots(4-28)$$

إن مردود المحولات عادة كبير جداً بالمقارنة مع غيرها من الآلات الكهربائية ويتراوح بين (99 ÷ 95) % .

٤-٧- اختبارات المحول أحادي الطور:

الغاية من اختبار المحول هي إيجاد عناصر الدارة الكهربائية المكافئة (ثوابت أو محدّدات المحول) ، ورسم المنحنيات المميزة لخصائص تشغيل هذه المحولات في حالات العمل المختلفة (اللاحمل، القصر، والتحميل) ، بالإضافة إلى إمكانية تحديد مردود المحول وتنظيم التوتر فيه .

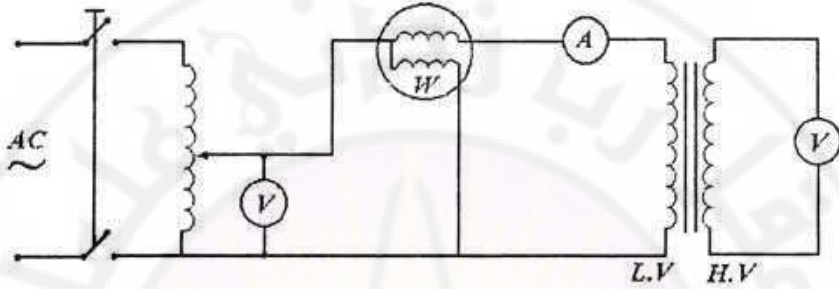
٤-٧-١- اختبار المحول أحادي الطور في حالة العمل على فراغ (اللاحمل):

إن الغاية من هذا الاختبار هو قياس الضياعات الحديدية الاسمية في المحولة والنتيجة عن الإبطاء المغناطيسي، والتيارات الإعصارية وفصلهما عن بعضهما ، وإيجاد عناصر سمحية التهيج ϕ وقياس نسبة التحويل، وتحديد تيار اللاحمل المقابل للتوتر الاسمي، وتحليله إلى مركبتيه الفعلية ورد الفعلية ، ورسم منحنيات المحول على فراغ وهي:

$$I_n = f(U_{10}) , P_n = f(U_{10}) , \cos \phi_n = f(U_{10})$$

يجري اختبار اللاحمل بتطبيق توتر المنبع على أحد ملفي المحولة ، وترك الملف الآخر مفتوحاً . نلاحظ من الدارة الكهربائية المكافئة الدقيقة للمحول أنه إذا كانت دائرة الثانوي مفتوحة فإن أثر التوتر المطبق U_1 يصبح محصوراً في دائرة تتألف من Z_1 مربوطة على التسلسل مع y_n (وهي سمحية التهيج أو Z_0 ممانعة فرع التهيج) . إن Z_1 صغيرة جداً إذا ما قورنت بـ Z_0 . عند ذلك من الطبيعي أن نهمل Z_1 مقارنة بـ Z_0 حيث لا يبقى في الدارة سوى Z_0 ، وعندها يكون التيار المار في هذه الدارة وهو تيار التهيج اللازم لتشكيل الفيض المغناطيسي الرئيسي ϕ في المحول وتعويض الضياعات الحديدية P_{eth} الذي لا يتجاوز ما يعادل (8 ÷ 5) % من التيار الاسمي للمحول .

يبين الشكل (11-4) دائرة التوصيل في هذا الاختبار حيث نحتاج إلى مقياس أمبير ومقياس فولت ومقياس واط، وأحياناً إلى محولة تيار عند ما نحتاج إلى تكبير أو تصغير قيم التيار لتكون موافقة لأجهزة القياس المستخدمة.



الشكل (11-4)

يجري الاختبار برفع قيمة التوتر تدريجياً من الصفر حتى قيمة أعلى بقليل من التوتر الاسمي حوالي 20%.

فإذا كانت قراءات هذه المقاييس هي:

U_{10} : التوتر المطبق على الملف الأولي.

U_{12} : التوتر المستنتج بين مربطي الملف الثانوي المفتوح.

I_0 : تيار اللاحمل.

P_0 : استطاعة اللاحمل.

ومنه :

$$Z_0 = \frac{U_{10}}{I_0} (\Omega) \dots\dots\dots(4-29)$$

$$Z_0 = \frac{P_0}{I_0^2} (\Omega) \dots\dots\dots(4-30)$$

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} \dots\dots\dots(4-31)$$

وننوه إلى أن الحسابات تؤخذ لقيم موافقة للتوتر الاسمي تماماً:

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{10}}{U_{20}} = \frac{U_{1n}}{U_{2n}} \dots\dots\dots(4-32)$$

حيث أن:

$$U_{20}=U_{2n}$$

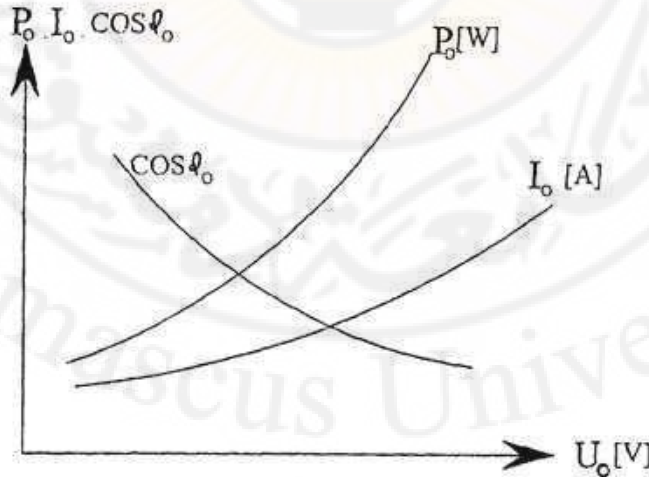
أي إن التوترات الاسمية للمحول هي التوترات الموافقة لحالة التشغيل على فراغ. يجري تحديد قيمة تيار اللاحمل المقابل للتوتر الاسمي والذي تتراوح قيمته بين % (5 ÷ 8) من التيار الاسمي للمحول. يتم تحليل هذا التيار إلى مركبتيه الفعلية I_{or} ورد فعلية I_{or} بعد حساب عامل الاستطاعة على فراغ $\cos \varphi_o$ من العلاقة:

$$\cos \varphi_o = \frac{P_o}{U_o \cdot I_o} \dots\dots\dots(4-33)$$

$$I_{or} = I_{e+h} = I_o \cos \varphi_o \dots\dots\dots(4-34)$$

$$I_{or} = L_{\varphi} = I_o \sin \varphi_o$$

تتراوح قيمة عامل الاستطاعة على فراغ مابين (0.1 ÷ 0.2) أما الضياعات الحديدية الاسمية $P_{e+h(n)}$ فتساوي P_o الموافقة للتوتر الاسمي. بعد ذلك نقوم بتمثيل I_o , P_o , $\cos \varphi_o$ كتابع للتوتر U_{10} كما في الشكل (12-4).



الشكل (12-4)

٤-٧-٢- اختبار القصر للمحول أحادي الطور:

إن الغاية من هذا الاختبار هو إيجاد عناصر ممانعة التسرب المكافئة Z_c ، والضياعات النحاسية الاسمية (الموافقة لتيار المحول الاسمي) ، وتحديد توتر دارة القصر النسبي المئوي ، ورسم منحنيات القصر .

$$I_{sc} = f(U_{sc}), P_{sc} = f(U_{sc}), \cos \varphi_{sc} = f(U_{sc})$$

يجري اختبار القصر بقصر أحد ملفي المحولة وتطبيق توتر مخفض كاف لتمرير التيار الاسمي في الملف الآخر. تجري عادة التغذية من جهة ملف التوتر المرتفع وذلك لتسهيل قياس تيار هذا الملف. إلا أنه يمكن إجراء التغذية من جهة الملف المنخفض أيضاً. ونلاحظ كما في الاختبار السابق أن الثوابت المحسوبة تكون منسوبة إلى الطرف الذي يجري فيه القياس.

إن قيمة التوتر المطبق على الملف الأولي ، وبالتالي القوة المحركة الكهربائية المستنتجة في ملف التهيج في حالة القصر، ومرور التيار الاسمي تبلغ حوالي $(5 \div 15)\%$ من التوتر الاسمي. وبما أن التيار المار في فرع التهيج I_0 عند تطبيق التوتر الاسمي يساوي إلى $(5 \div 8)\%$ من التيار الاسمي. فإن هذا التيار، وفي اختبار القصر ينخفض إلى قيمة صغيرة جداً حتى أنه يمكن إهماله ، ومن ثم إهمال فرع التهيج. عندها الاستطاعة الفعلية المستجرة من الشبكة تستهلك في المقاومات الأومية للملف الأولي والثانوي أي تذهب لتعويض الضياعات النحاسية للمحول.

يبين الشكل (4-13) دارة توصيل المحول في اختبار القصر، حيث يجري الاختبار برفع قيمة التيار تدريجياً من الصفر وحتى قيمة تعادل 120% من التيار الاسمي.

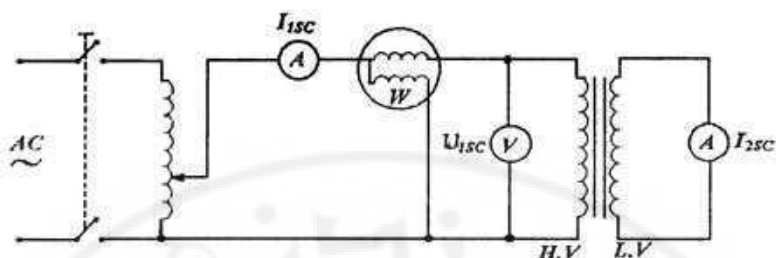
فإذا كانت قراءات هذه المقاييس هي:

U_{sc} : التوتر المطبق على الملف الأولي.

I_{sc} : التيار المار في الملف الأولي.

P_{sc} : الاستطاعة الفعلية المستجرة من الشبكة.

فإننا نجد:



الشكل (13-4)

$$Z_e = \frac{U_{sc}}{I_{sc}} (\Omega)$$

$$P_e = \frac{P_{sc}}{I_{sc}} (\Omega) \dots\dots\dots(4-35)$$

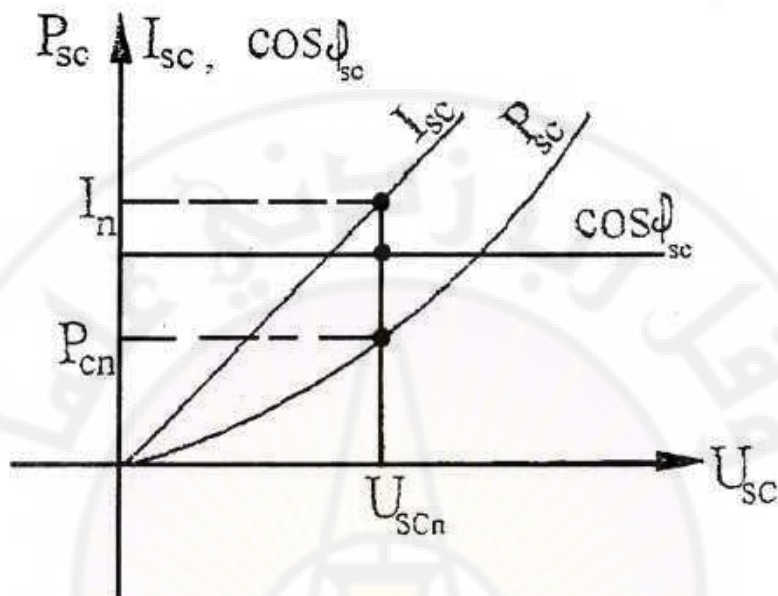
$$X_e = \sqrt{Z_e^2 - R_e^2} (\Omega)$$

وننوه إلى أن الحسابات تجري عند قيم موافقة للتيار الاسمي.

يجري تحديد قيمة توتر الدارة القصوى الموافق للتيار الاسمي، ثم يتم حساب عامل استطاعة القصر $\cos \varphi_{sc}$ من العلاقة:

$$\cos \varphi_{sc} = \frac{P_{sc}}{U_{sc} \cdot I_{sc}} \dots\dots\dots(4-36)$$

حيث تتراوح قيمة $\cos \varphi_{sc}$ عادة بين (0.05 ÷ 0.65) ويجري بعدها تمثيل P_{sc} , $\cos \varphi_{sc}$, I_{sc} بيانياً كتتابع للتوتر U_{sc} حسب الشكل (14-4).

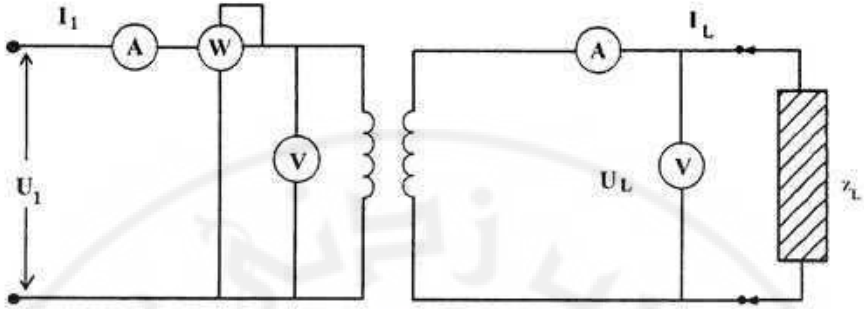


الشكل (14-4)

٤-٧-٣- اختبار التحميل:

إن الغاية من هذا الاختبار هي دراسة تأثير الحمولات المختلفة (أومية، تحريضية، سعوية) على المحول أثناء تشغيله تحت هذه الحمولات، وبالتالي رسم منحنيات الخصائص الخارجية التي تربط بين التوتر المطبق على الحموله و تيار الحموله ، وذلك لحمولات تتغير من الصفر وحتى 120% من الحموله الاسمية، ولها عوامل استطاعة $\cos \phi_2$ ثابتة.

يبين الشكل (15-4) دارة التوصيل اللازمة لإجراء هذا الاختبار.



الشكل (15-4)

يُثبت دوماً التوتر الأولي على قيمته الاسمية، ثم تزداد الحمولة تدريجياً حتى الوصول إلى القيمة الاسمية أو إلى قيمة أعلى منها بحيث لا تتجاوز 120% منها. يجري الاختبار من أجل حمولات مختلفة لها عوامل استطاعة ثابتة كالتالي:

- ١- حمولة أومية صرفية.
- ٢- حمولة تحريضية صرفية.
- ٣- حمولة سعوية صرفية.
- ٤- حمولة تحريضية وأومية.
- ٥- حمولة سعوية وأومية.

تقرأ قيم التوتر U_2 المطبق على الحمولة والتيار I_1 (أو I_2) المار في الحمولة، ثم ترسم المنحنيات البيانية التي تمثل علاقة التوتر U_2 مع هذا التيار والتي تسمى بالمنحنيات الخارجية.

أمثلة محلولة:

مثال (١):

محولة أحادية الطور استطاعتها الاسمية 50KVA وتوتراتها الاسمية 20000/400V عدد لفات الملف الأولي $N_1=4000$ T وسطح مقطع النواة $S=150\text{cm}^2$ والطول الوسطي للمسار المغناطيسي $L_{av}=1.6\text{m}$ وتردد تيار الشبكة $f=50\text{Hz}$. فإذا كانت تستجر من الشبكة في حالة اللاحمل تياراً قدره 0.5A. المطلوب: حساب القيم المغناطيسية B, H, μ, R_m في نواة المحولة عند التوتر الاسمي، وكذلك حساب N_2 .

الحل:

لدينا العلاقات الآتية التي تربط بين القيم المغناطيسية:

$$B = \mu H, B = \frac{\phi}{S}, \phi = \frac{E_1}{4.44 \times N_1 \cdot f}$$

وبالتعويض نجد:

$$\phi = \frac{20000}{4.44 \times 4000 \times 50} = 0.023 \text{ (Wb)}$$

$$B = \frac{\phi}{S} = \frac{0.023}{150 \times 10^{-4}} = 1.53 \text{ (Wb / m}^2\text{)}$$

$$H = \frac{N_1 I_o}{\ell_{av}} = \frac{4000 \times 50}{1.6} = 1250 \text{ (A / m)}$$

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{1.53}{1250} = 1.224 \times 10^{-3} \text{ (H / m)}$$

$$R_m = \frac{1}{\mu} \frac{\ell_{av}}{S} = \frac{1}{1.224 \times 10^{-3}} \cdot \frac{1.6}{150 \times 10^{-4}} = 8.7 \times 10^{-4} \text{ (}\Omega\text{)}$$

لحساب N_2 :

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{1n}}{U_{2n}} = \frac{20000}{400} = 50$$

$$N_2 = \frac{N_1}{50} = \frac{4000}{50} = 80 \text{ (T)}$$

مثال (٢):

محول أحادي الطول استطاعته الاسمية $S_n=250$ (KVA) وتوتراته الاسمية $U_1/U_2=2400/240$ (v)، عدد لفات الملف الابتدائي $N_1=590$ (T) والطول المتوسط لللفة الواحدة في كل من الملفين الابتدائي والثانوي $\ell_{mv} = 50$ cm وكثافة التيار في هذين الملفين عند الحمل الاسمي هو $J=4$ [A/mm²]. عند تشغيل المحول في حالة اللاحمل يستهلك استطاعة فعلية قدرها $P_o=1.5$ (kw) ويستجر تياراً يساوي $I_o=8.33$ (A) فإذا علمنا أن:

$$X_2 = 0,02 (\Omega) , X_1 = 2 (\Omega)$$

المطلوب :

- ١- حساب بقية ثوابت الدارة المكافئة التقريبية للمحول.
- ٢- في حال ربط ثلاث مضخات كهربائية باستطاعة (KVA) $40+j30$. احسب مردود المحول عند هذه الحمولة.

الحل:

نحسب بقية ثوابت الدارة المكافئة للمحول التي تشمل المقاومات الأومية لملفيه R_2, R_1 وثوابت فرع المغنطة:

- مقاومة الملف الابتدائي:

$$R_1 = \rho \frac{\ell_{mv} \cdot N_1}{A_1}$$

- نحدد سطح مقطع نواقل الملف الابتدائي بالعلاقة:

$$A_1 = \frac{I_{1n}}{J}$$

- لذلك نحسب التيار الاسمي لهذا الملف:

$$I_{1n} = \frac{S_n}{U_{1n}} = \frac{250 \times 10^3}{2400} = 104,2 \text{ (A)}$$

$$A_1 = \frac{104,2}{4} = 26 \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$R_1 = \frac{1}{57} \times \frac{50 \times 10^{-2} \times 590}{26} = 0.2 \quad (\Omega)$$

مقاومة الملف الثانوي:

$$R_2 = \rho \frac{\ell_{av} \cdot N_2}{A_2}$$

- نحدد سطح مقطع نواقل الملف الثانوي بعد حساب تياره الاسمي:

$$I_{2n} = \frac{S_n}{U_{2n}} = \frac{250 \times 10^3}{240} = 1042 \quad (A)$$

وبالتالي فسطح المقطع A_2 يساوي:

$$A_2 = \frac{1042}{4} = 260 \text{ mm}^2$$

عدد لفات الملف الثانوي:

$$N_2 = N_1 \frac{U_2}{U_1} = 59 \quad (T)$$

وبالتالي فإن المقاومة الأومية للملف الثانوي:

$$R_2 = \frac{1}{57} \times \frac{50 \times 10^{-2} \times 59}{260} = 0.002 \quad (\Omega)$$

- ثوابت فرع المغنطة:

بفرض أن الدارة مؤلفة من فرع واحد (تسلسل) ومنه:

$$Z_0 = \frac{U_{1n}}{I_0}, R_0 = \frac{P_0}{I_0^2}, X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}$$

$$Z_0 = \frac{2400}{8.33} = 288.1 \quad (\Omega)$$

$$R_0 = \frac{1.5 \times 10^3}{(8.33)^2} = 21.6 \quad (\Omega)$$

$$X_0 = 287.3 \quad (\Omega)$$

باستخدام دارة مكافئة تقريبية منسوبة إلى الطرف الابتدائي يكون لدينا:

$$a = \frac{U_1}{U_2} = \frac{2400}{240} = 10$$

$$R'_2 = R_2 . a^2 = 0.002(10)^2 = 0.2 \quad (\Omega)$$

$$X'_2 = X_2 . a^2 = 0.02(10)^2 = 2 \quad (\Omega)$$

$$Z_{e1} = R_{e1} + j X_{e1} = (R_1 + R'_2) + j(X_1 + X'_2) = 0.4 + j4 \quad (\Omega)$$

نقوم بحساب الممانعة المكافئة للحمل ثم ننسبها إلى الطرف الابتدائي، وهي الممانعة الكلية المكافئة لجملة المضخات الثلاث المربوطة على التفرع :

$$S_L = 3(40 + j30) KVA$$

$$Z_L = \frac{U_2^2}{S_L} = \frac{(240)^2}{3 \times 50 \times 10^3} = 0.384$$

$$\varphi_L = \tan^{-1} \frac{30}{40} = 36.6^\circ$$

ومنه فإن عامل الاستطاعة للحمولة هو :

$$\cos \varphi_L = 0.8$$

وبالتالي :

$$Z_L = 0.384(\cos \varphi_L + j \sin \varphi_L) = 0.384(0.8 + j 0.6) \\ = 0.31 + j 0.23 \quad (\Omega)$$

$$R'_L = R_L . a^2 = 0.31 \times 10^2 = 31 \quad (\Omega)$$

$$X'_L = X_L . a^2 = 0.23 \times 10^2 = 23 \quad (\Omega)$$

$$Z'_L = R'_L + j X'_L = 31 + j 23 = 38.4 \angle 36.6 \quad (\Omega)$$

$$I'_2 = \frac{U_{ln}}{Z_e + Z'_L} = \frac{2400}{31.4 + j 27} = 58 \angle 40.7$$

$$I_1 = I_o + I'_2$$

$$P_2 = R'_L . I_2'^2 = 31(58)^2 = 104284 \quad (W)$$

$$\Delta P_{ce} = R_e . I_2'^2 = 0.4(58)^2 = 1345.6 \quad (W)$$

$$P_1 = P_2 + \Delta P_{ce} + P_o =$$

$$= 104284 + 1345.6 + 1500 = 107129.6 \quad (W)$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{104284}{107129.6} = 0.973$$

مثال (٣):

محول أحادية الطور استطاعتها الظاهرية الاسمية 20(KVA) وتوتراتها الاسمية 1000/200 (v) عند إجراء اختباري اللاحمل والقصر كانت النتائج الآتية:

$$U_o = 1000 (v) , I_o = 1.2 (A) , P_o = 200 (W)$$

$$U_{sc} = 50 (v) , I_{sc} = 20 (A) , P_{sc} = 192 (W)$$

احسب :

١- الضياعات الحديدية والنحاسية الاسمية.

٢- تيار اللاحمل النسبي المئوي.

٣- توتر الدارة القصرى النسبي المئوي.

٤- عناصر الدارة المكافئة.

٥- تيار القصر عند تطبيق التوتر الاسمي.

الحل:

نحسب التيارات النسبية للمحول:

$$I_{nH} = \frac{20000}{1000} = 20 (A)$$

$$I_{nL} = \frac{20000}{200} = 100 (A)$$

- إن الضياعات الحديدية الاسمية لهذا المحول تساوي 200(W) لأنها توافق التوتر الاسمي 1000(V). كما أن الضياعات النحاسية الاسمية تساوي 192(W) لأنها توافق التيار الاسمي 20(A).

- تيار اللاحمل النسبي المئوي يساوي:

$$i_o = \frac{I_o}{I_n} = \frac{1.2}{20} = 0.06 \text{ p.u} = 6 \%$$

- التوتر النسبي المئوي لدارة القصر :

$$u_{sc} = \frac{U_{sc}}{U_n} = \frac{50}{1000} = 0.05 \text{ p.u} = 5 \%$$

- عناصر الدارة المكافئة:

يلاحظ أن الاختبارين قد أجريا من طرف ملف التوتر المرتفع، لذلك ستكون العناصر المحسوبة منسوبة إلى هذا الطرف.

آ- حساب عناصر الدارة المكافئة بالقيم المئوية:

من اختبار اللاحمل:

$$Y_o = \frac{I_o}{U_o} = \frac{1,2}{1000} = 0.0012 \text{ (s)}$$

$$G_o = \frac{P_o}{U_o^2} = \frac{200}{1000^2} = 0.0002 \text{ (s)}$$

$$B_o = \sqrt{Y_o^2 - G_o^2} = 0.00118 \text{ (s)}$$

من اختبار القصر:

$$Z_e = \frac{U_{sc}}{U_o} = \frac{50}{20} = 2.5 \text{ (}\Omega / ph\text{)}$$

$$R_e = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2} = \frac{192}{20^2} = 0.48 \text{ (}\Omega / ph\text{)}$$

$$X_e = \sqrt{Z_e^2 - R_e^2} = 2.45 \text{ (}\Omega / ph\text{)}$$

ب- حسب عناصر الدارة المكافئة بالقيم الواحدية:

$$y_o = i_o = \frac{I_o}{I_n} = \frac{1,2}{20} = 0.06 \text{ (p.u)}$$

$$g_o = \frac{P_o}{S_n} = \frac{200}{20000} = 0.01 \text{ (p.u)}$$

$$b_o = 0.05916 \text{ (p.u)}$$

$$Z_e = \frac{U_{sc}}{U_o} = \frac{50}{1000} = 0.05 \text{ (p.u)}$$

$$r_e = \frac{P_{sc}}{S_n} = \frac{192}{10000} = 0.0192 \text{ (p.u)}$$

$$X_o = 0.0462 \text{ (p.u)}$$

- تيار القصر عند تطبيق التوتر الاسمي:

$$I_{sc} = \frac{U_n}{Z_c} = \frac{1000}{2.5} = 400 \quad (A)$$

وهو أكبر من التيار الاسمي بـ $20 = \frac{400}{20}$ مرة.



مسائل عامة:

مسألة ١ :

محول أحادي الطور استطاعته 1000(KVA) وتوتراتها الاسمية 6600/380(V) أجري عليه اختبار اللاحمل والقصر فكانت النتائج الآتية:

$$U_n = 6600(V) , I_n = 1.1 (A) , P_n = 1 (KW)$$

$$U_{sc} = 344.5(V) , I_{sc} = 15.15 (A) , P_{sc} = 1.5 (KW)$$

نربط مع ملف التوتّر المنخفض حمولة ممانعتها $Z_L = 1.1553 + j0.8664 (\Omega)$ ويغذى المحول من منبع بحيث نحصل على توتر 380(V) في طرف الحمولة.
المطلوب:

١- حساب التوتّر والتيار وعامل الاستطاعة في طرف ملف التوتّر المرتفع.

٢- مردود المحول.

مسألة ٢ :

محول أحادي الطور توتراته الاسمية 3300/660 (V) وله الثوابت التالية:

$$R_1 = 0.8(\Omega) , X_1 = 4 (\Omega)$$

$$R_2 = 0.3(\Omega) , X_2 = 0.2 (\Omega)$$

نربط ثانوي المحول مع حمل ممانعته $Z_L = 4.8 + j3.6(\Omega)$ ، كما يغذي ملفه الابتدائي من منبع توتره $U_1=3350(V)$ احسب:

تيار الحمل وتوتره والاستطاعة الفعلية والرديّة التي يستهلكها.

ملاحظة:

يهمل في هذه المسألة فرع المغنطة.

مسألة ٣ :

محول أحادي الطور استطاعته الاسمية $S_n=10500(KVA)$ ، وتوتراته الاسمية 110/6.3(KV)، نجري اختبار القصر عليه بقصر الملف الثانوي على نفسه وتمريّر التيار الاسمي في الملف الابتدائي، فنكون قيمة التوتّر اللازم تطبيقه على الملف

الابتدائي هو $U_{sc}=11.5(KV)$ والاستطاعة الفعلية التي يستهلكها المحول تساوي:
 $P_{sc}=81.5 (KV)$

احسب المقاومات الأومية والمفاعلات التحريضية لملفي المحول معتمداً أن:
 $X_1 = X_2' , R_1 = R_2'$

مسألة ٤ :

محول أحادي استطاعته $10 (KVA)$ وتردده $50(Hz)$ وتوتراتها $11000/230 (V)$ أعطى
النتائج الآتية:

أ- في اختبار الدارة المفتوحة وعندما التوتر الأولي $11000V$ كانت الاستطاعة
المستهلكة $120(W)$.

ب- في اختبار دائرة القصر وعند تيار الحمولة الكاملة في الثانوي كانت الاستطاعة
المستهلكة $140(W)$. احسب مردود المحولة عند نصف الحمولة الكاملة بعامل استطاعة
 0.8 متأخر.

مسألة ٥ :

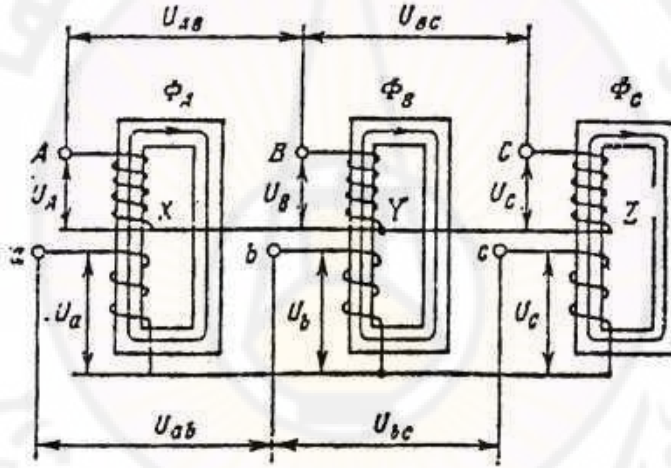
محول أحادي الطور توتراته $50000/500 (V)$ وتردده $50(Hz)$ استطاعته
الاسمية $50(KVA)$ مقاومة ملفات التوتر العالي $8(\Omega)$ ، ومقاومة ملفات التوتر
المنخفض $0.06(\Omega)$. الضياعات في المحول على فراغ $1000(W)$.

أ- احسب مردود المحول عند حمله الكامل بعامل استطاعة 0.8 ، ما هو مردود
المحول، إذا هبط الحمل إلى 80% من قيمته الاسمية؟ علماً أن عامل الاستطاعة لم
تتغير قيمته.

٤-٨- جمل التحويل ثلاثية الطور المتوازنة (المحول ثلاثي الطور):

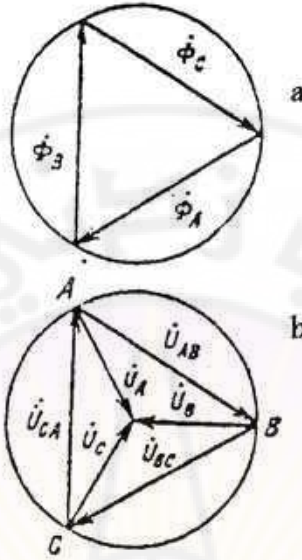
يمكن القيام بتحويل التوترات والتيارات في الجمل الكهربائي ثلاثية الطور، إما بمساعدة ثلاثة محولات أحادية الطور أو باستخدام محول ثلاثي الطور مكافئ بالاستطاعة.

عند استخدام المحولات أحادية الطور الشكل (4-16)، وتطبيق جملة توترات ثلاثية الطور متناظرة على ملفاتها الابتدائية الشكل (4-17-a)، تتولد في كل محول من هذه المحولات سيالة مغناطيسية مزاحة بالصفحة عن سيالة الطور الآخر بمقدار 120° .



الشكل (4-16)

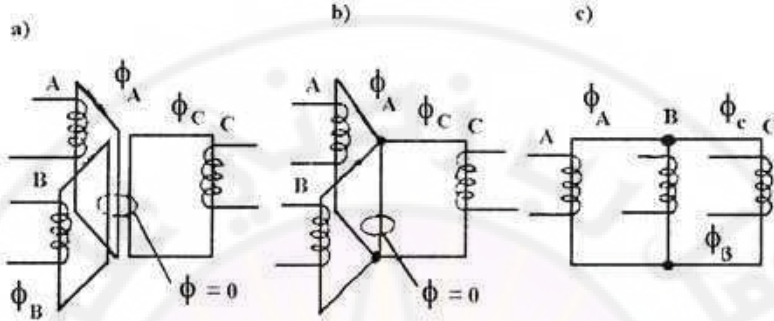
وتشكل سيالات المحولات الثلاثة بدورها جملة مغناطيسية ثلاثية الطور متوازنة الشكل (4-17-a).



الشكل (17-4)

إذا وحدنا القوى المغناطيسية للمحولات أحادية الطور الثلاثة ضمن نواة مشتركة عن طريق دمج الجذوع الخالية من الملفات نحصل على المحول ثلاثي الطور، كما في الشكل (18-4-a)، وبما أن الجذع الموحد في المحول الفراغي يشكل مساراً مشتركاً لجميع السيالات المتولدة في الأطوار الثلاثة ϕ_A, ϕ_B, ϕ_C فإن محصلة هذه السيالات تكون معدومة في هذا الجذع عند حالات العمل المتناظرة، أي أن الجذع المشترك خال دوماً من أية سيالة مغناطيسية، وبالتالي فإن إلغاءه لا يغير تقريباً في الحالة المغناطيسية للجملة الكهربائية ثلاثية الطور، وهكذا بإلغاء هذا الجذع نحصل على المحول ثلاثي الطور الفراغي المبين في الشكل (18-4-b). بيد أن هذا المحول لم يلاق انتشاراً واسعاً بسبب الحجم الكبير الذي تشغله النواة الحديدية الفراغية داخل الهيكل الخارجي للمحول، مما أدى للانتقال من التصميم الفراغي إلى التصميم المستوي للمحول، حيث تم لاحقاً إلغاء الأجزاء الأفقية من نواة الطور الأوسط B، وتم قتل النواتين C.A

لتصبحا واقعيتين في مستوي واحد وبذلك تم الحصول على المحول المستوي ثلاثي الطور المعروف الشكل (18-4-c).



الشكل (18-4)

يعد المحول ثلاثي الطور المستوي أوسع المحولات انتشاراً في الوقت الحاضر بفضل بساطة بنيته وكلفته المنخفضة. إن قيمة السيلية المغناطيسية في جميع فروع المحول المستوي ذي النوى متساوية لذلك تصنع هذه الفروع بسطوح مقاطع متساوية. نستنتج مما سبق: بما أن الفروع الثلاثة للمحول الثلاثي متماثلة تماماً، ومنه يمكن دراسة دائرة طور واحد فقط، وتعمم النتيجة على بقية الأطوار مع ملاحظة فرق الصفحة، أي يمكن رسم دائرة كهربائية مكافئة لطور واحد، وإجراء كافة الدراسات على هذه الدائرة وتعميم النتائج على الأطوار الثلاثة طالما الأطوار متماثلة والحملات متناظرة أيضاً.

ومن الجدير بالذكر هنا أنه يمكن توصيل ملفات الابتدائي أو الثانوي إما بطريقة نجمية أو مثلثية فيكون لدينا طرق مختلفة للتوصيل هي:

$$\Delta/\Delta, Y/Y, T/\Delta, \Delta/Y, \dots$$

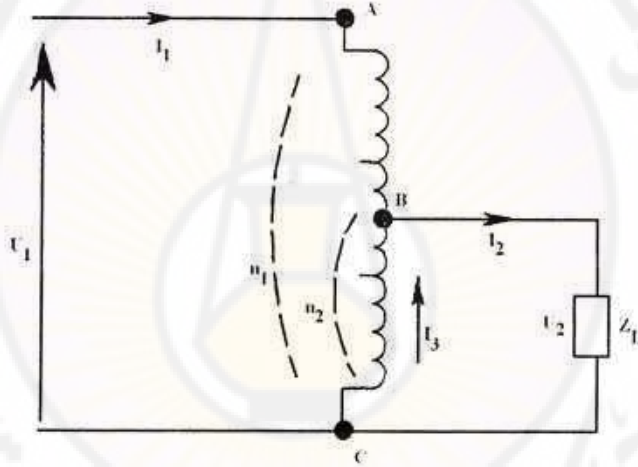
٩-٤- المحول الذاتي :

المحول الذاتي هو ذلك النوع من المحولات الذي تكون فيه بين ملف التوتر المنخفض وملف التوتر العالي صلة كهربائية مباشرة، بالإضافة إلى الرابطة المغناطيسية القائمة بين ملفات المحول العادي. يمكن للمحول الذاتي على غرار المحولات العادية أن يكون

أحادي الطور أو ثلاثي الطور ويستطيع القيام بوظيفة خفض التوتر أو رفعه على حد سواء.

٤-٩-١- مبدأ العمل:

يمثل الشكل (19-4) المحول الخافض للتوتر، حيث يطبق التوتر الابتدائي U_1 على الطرفين C,A اللذين يمثلان بداية الملف الابتدائي ونهايته. أما الملف الثانوي في المحول الذاتي فهو جزء من الملف الابتدائي (الجزء المحصور بين النقطتين C,B)، وتربط نهايتا الملفين في النقطة C.



الشكل (19-4)

عند تطبيق التوتر U_1 على الملف الابتدائي يتولد في كل لفة من لفاته في حالة اللاحمل القوى المحركة الكهربائية نفسها $E = 4.44.f.\phi_{max}$ ، وتكون القوة المحركة الكهربائية الاجمالية المتولدة فيه مساوية التوتر U_1 ومتناسبة مع عدد لفات الملف الابتدائي N_1 ، أي:

$$E_1 = U_1 = N_1 \cdot 4.44 \cdot f \cdot \phi_{max} \dots \dots \dots (4-37)$$

لذلك فإن التوتر الثاني U_2 المستنتج بين النقطتين C,B سيكون متناسباً في حالة اللاحمل مع U_1 ويتحدد بعدد لفات الملف الثانوي N_2 المحصورة بين النقطتين C,B لذا نستطيع أن نكتب:

$$U_2 = 4.44 \cdot f \cdot \phi_{\max} \cdot N_2 \dots\dots\dots(4-38)$$

بتقسيم U_1 على U_2 نجد:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{4.44 \times N_1 \times f \times \phi_{\max}}{4.44 \times N_2 \times f \times \phi_{\max}} = \frac{N_1}{N_2} = a = \frac{E_1}{E_2} \dots\dots\dots(4-38)$$

وهكذا نجد أن توترات المحول الذاتي تتناسب كما في المحول العادي مع عدد اللفات. لذا يمكن تحديد التوتر الثانوي انطلاقاً من التوتر الابتدائي ونسبة التحويل a .

من أجل إيجاد العلاقة بين التيارين الابتدائي I_1 والثانوي I_2 في المحول الذاتي نعود إلى المخطط المبدي الشكل (4-19) فنجد بتطبيق قانون كيرشوف الأول في العقدة B أن:

$$I_2 = I_1 + I_3 \dots\dots\dots(4-39)$$

حيث:

I_3 : التيار المار في الملف الثانوي BC وهو يختلف عن التيار I_2 الذي يغذي في الحمل Z_L .

بما أن التيارين I_1, I_3 يسريان في جزئي الملف الابتدائي $(N_1 - N_2)$ و N_2 باتجاهين متعاكسين، فإن محصلة القوى المحركة المغناطيسية الناتجة عن التأثير المشترك لهما ستكون معدومة أي:

$$I_1 (N_1 - N_2) - I_3 N_2 = 0$$

بتبديل قيمة I_3 من العلاقة (4-39) في العلاقة الأخيرة ينتج لدينا:

$$I_1 (N_1 - N_2) - (I_2 - I_1) N_2 = 0$$

بحل هذه المعادلة نجد:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \dots\dots\dots(4-40)$$

وهكذا نلاحظ أن العلاقة بين التيارين الابتدائي والحمولة في المحول الذاتي تبقى على الصورة نفسها القائمة في المحول العادي، أي أن هذه التيارات تتناسب عكساً مع نسبة التحويل a .

يتميز المحول الذاتي بقيمتين للاستطاعة. فالقيمة الأولى تدعى باستطاعة العبور S وهي الاستطاعة الظاهرة الكلية التي يستجرها المحول من الشبكة ويرسلها إلى الحمل. أما القيمة الأخرى فتسمى الاستطاعة الحسابية أو النموذجية S_i وهي جزء من استطاعة العبور التي تنتقل إلى الدارة الثانوية بالتحريض، أي بوساطة السيالة المغناطيسية المشتركة كما في المحول العادي. أما الجزء المتبقي من استطاعة العبور فينتقل إلى الدارة الثانوية بطريق كهربائي مباشر S_e .

تحدد الاستطاعة النموذجية S_i المقدمة للدارة الثانوية مغناطيسياً، الأبعاد الرئيسية للمحول الذاتي وكتلته. فإذا أهملنا تأثير الضياعات يمكن عد استطاعة العبور (الاستطاعة الظاهرة الكلية) مساوية:

$$S = E_1 \cdot I_1 = E_2 \cdot I_2 \dots \dots \dots (4-41)$$

والاستطاعة الحسابية النموذجية :

$$S_i = E_2 \cdot I_3$$

حيث I_3 - هو التيار الذي يسري في جزء الملف المشترك.

والاستطاعة الكلية (استطاعة العبور) هي:

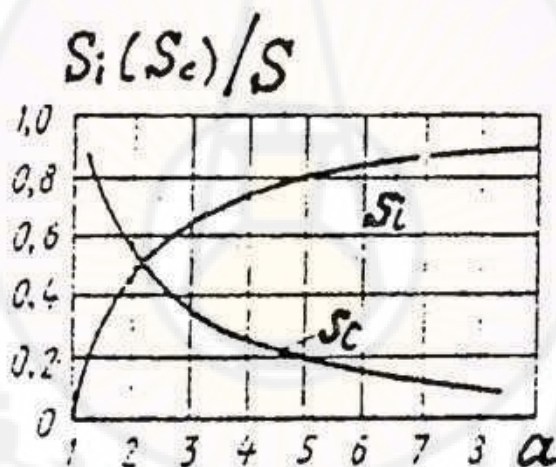
$$S = E_2 \cdot I_2 = E_2 (I_3 + I_1) = E_2 \cdot I_3 + E_2 \cdot I_1 = S_i + S_e \dots \dots \dots (4-42)$$

والعلاقة بين الاستطاعة المغناطيسية S_i والاستطاعة S_e في المحول الذاتي مع تغير نسبة التحويل تعطى في الشكل (4-20).

إن الغاية من استخدام المحول الذاتي بدلاً من المحول العادي هي تحقيق وفر اقتصادي حيث يتم تحقيق وفر في كميات النحاس والحديد والفيرومغناطيسي المستخدمة في تصنيع هذا المحول. وهذا يتحقق حسب الشكل (4-20) الذي يعطي العلاقة البيانية بين استطاعتي المحول S_i و S_e المنسوبتين إلى استطاعة العبور S من جهة، وبين نسبة التحويل a من جهة أخرى، حيث نلاحظ أنه كلما كانت نسبة التحويل أقرب إلى الواحد

تقل الاستطاعة الحسابية للمحول الذاتي على حساب ازدياد قيمة الاستطاعة S_c ، وبالتالي تزداد الفائدة الاقتصادية الناجمة عن استخدامه لانخفاض كتلته وأبعاده وضيعات الاستطاعة فيه.

فعلى سبيل المثال، تنخفض الاستطاعة الحسابية للمحول الذاتي عند $\alpha = 1.1$ بعشرة أضعاف بالمقارنة مع استطاعة المحول ثنائي الملف المكافئ، أما عند $\alpha = 10$ فتصبح هذه الاستطاعات متساوية، أي تنعدم عند ذلك تقريباً الفائدة من استخدام المحول الذاتي. ويمكن للسبب نفسه أن تكون الضياعات الكهربائية في ملفات المحول الذاتي ونواته الحديدية أقل بكثير مما هي في المحول ثنائي الملف العادي.



الشكل (20-4) منحنى تغير الاستطاعة المغناطيسية S_i والاستطاعة الكهربائية S_c في المحول الذاتي مع تغير نسبة التحويل

أمثلة محلولة:

مثال (١):

محول ذاتي أحادي الطور خافض للتوتر عدد لفات ملفه الابتدائي $N_1=330(T)$ ونسبة توتراته $U_1/U_2=380/220V$. نربط إلى ملفه الثانوي حملاً فيسّجر تياراً قيمته $I_2=5A$. احسب عدد لفات الملف الثانوي N_2 وتيار المحول I_1, I_3 ثم احسب نسبة الاستطاعة التي تنتقل إلى الحمل بطريق كهرومغناطيسي.

الحل:

نحسب عدد اللفات في الملف الثانوي بالعلاقة:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \Rightarrow N_2 = N_1 \frac{U_2}{U_1} = 330 \frac{220}{380} = 191 (T)$$

نحسب التيار الابتدائي:

$$I_1 = I'_2 = I_2 \frac{N_2}{N_1} = 5 \frac{191}{330} = 2.9 (A)$$

ونحسب التيار I_3 :

$$I_3 = I'_2 - I_1 = I_2 \left[1 - \frac{N_2}{N_1} \right] = 2.13 (A)$$

الاستطاعة المنقولة إلى الحمل بطريق مغناطيسي:

$$S_t = U_2 \cdot I_3 = 220 \times 2.13 = 468.6 (V.A)$$

نسبة هذه الاستطاعة إلى الاستطاعة الكلية:

$$\frac{S_t}{S} = \frac{U_2 \cdot I_3}{U_2 \cdot I_2} = \frac{I_3}{I_2} = \frac{2.13}{5}$$

مثال (٢):

يستخدم محول ذاتي خافض للتوتر من 400V إلى 140V . إذا كان عدد لفات الأولي 160 لفة أوجد عدد لفات الثانوي ومكان توضع الثانوي.

يستخدم هذا المحول لتغذية حمولة باستطاعة قدرها 20KW بعامل استطاعة 0.8 متأخر. بإهمال الضياعات، أوجد تيارَي الأولي والثانوي، كذلك أوجد التيارات في كل جزء من الملف.

الحل:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

$$a = \frac{400}{140} = \frac{40}{14}$$

الاستطاعة الناتجة عن الثانوي:

$$20000 = 140 \times 0.8 \times I_2$$

ومنه :

$$I_2 = 178.5 \text{ A}$$

$$I_1 = \frac{I_2}{a} = \frac{178.5}{40/14} =$$

ومنه :

$$= 178.5 \times \frac{7}{20} = 62.5 \text{ (A)}$$

التيار في الجزء المشترك من الملف:

$$I_3 = I_2 - I_1 = 178.5 - 62.5 = 116 \text{ A}$$

ومنه :

$$N_2 = N_1 \frac{U_1}{U_2} =$$

$$= 160 \frac{140}{400} = 160 \frac{7}{20} = 56 \text{ (T)}$$

ويكون موضع طرف الثانوي في النقطة B حيث:

عدد لفات القسم AB

$$160 - 56 = 104 \text{ (T)}$$

لأن عدد اللفات في القسم BC هو 56 لفة حسب الشكل (4-19).

The background of the page features a large, faint watermark of the Damascus University logo. The logo is circular, with the university's name in Arabic 'جامعة دمشق' at the top and 'Damascus University' at the bottom. In the center of the logo is a stylized sun or star symbol.

الفصل الخامس
آلات التيار المتناوب
و المميزات الميكانيكية و الكهروميكانيكية
لمحركات التيار المتناوب

٥-١ مقدمة:

يعتمد المبدأ العام لآلات التيار المتناوب الثلاثية الطور أو المتعددة الأطوار على مبدأ الساحة المغناطيسية الدوارة المشكلة من الثابت حيث تقوم هذه الساحة المغناطيسية الدوارة بتوفير الدوار بسرعة تتناسب مع عدد أطوار الثابت. هناك عدة أنواع من الآلات كما يلي:

- آلات ثلاثية الطور.

- آلات ثنائية الطور.

- آلات أحادية الطور ولها استعمالات محدودة.

- آلات سداسية الطور وتستخدم لأغراض خاصة.

كما تقسم آلات التيار المتناوب الثلاثية الطور إلى ثلاثة أنواع رئيسية:

١- توافقية (تزامنية) Synchronous.

٢- لا توافقية Non synchronous أو التحريضية.

٣- ذات مجمعات with commutator.

في الآلات التوافقية (التزامنية) يدور الجزء الدوار بنفس سرعة دوران الساحة المغناطيسية و بنفس اتجاهها، أي أن سرعة الجزء الدوار تقع في توافق مع سرعة دوران الساحة المغناطيسية و من هنا أتت التسمية بالتوافقية.

تستخدم الآلات التوافقية بشكل واسع كمولدات و هناك بعض الحالات الخاصة التي يمكن استعمالها كمحركات.

في الآلات اللاتوافقية يدور الجزء الدوار بسرعة لا تساوي سرعة دوران الساحة المغناطيسية الدوارة و تستخدم هذه الآلات بشكل عام كمحركات و يمكن استعمالها كمولدات أيضاً.

أما الآلات ذات المجمعات فتكون أيضاً سرعة دوران الجزء الدوار فيها لا تساوي سرعة دوران الساحة المغناطيسية و لذلك تعتبر هي أيضاً من الآلات اللاتوافقية و نظراً لوجود المجمعات فيها فإنها تعتبر شكلاً خاصاً من آلات التيار المتناوب و تستخدم على شكل محركات.

٥-٢ الآلات التحريضية (اللاتوافقية) Induction machines

لاقت الآلات التحريضية استعمالاً واسعاً في جميع مجالات التصنيع و الإنتاج و الخدمات العامة، ويعود ذلك لبساطة تركيبها و رخص ثمنها و أمانتها العالية في العمل. لذا أصبح إنتاجها آلياً و بكميات هائلة و لاستطاعات مختلفة ابتداء من أجزاء الـواط حتى آلاف الكيلو واط، و لتوترات مختلفة من (110 V) حتى (10000 V).

لكل آلة تحريضية سرعتها الخاصة بها. تبلغ سرعة المحركات التحريضية العادية (480 rpm) أو (730 rpm) أو حتى (2990 rpm)، بينما تبلغ سرعة المحركات التحريضية الخاصة (10 rpm) أو حتى (10000 rpm).

تقسم الآلات التحريضية حسب نوعية التيار المتناوب الذي تعمل عليه إلى:

١- الآلات التحريضية أحادية الطور.

٢- الآلات التحريضية ثلاثية الطور.

تحتوي الآلة التحريضية على ملفين:

- ملف الثابت يتغذى من الشبكة الكهربائية.

- ملف الدائر الذي يكون غالباً مقصوراً.

تقسم الآلات التحريضية حسب نوعية ملف الدائر إلى نموذجين:

١- الآلة التحريضية ذات القفص السنجابي (Squirrel-cage)

٢- الآلة التحريضية ذات الدائر الملفوف (Slip-Ring rotor).

٥-٣ أقسام الآلة التحريضية:

تتألف الآلة التحريضية من ثابت (stator) و دائر (rotor) و ثغرة هوائية تفصل بينهما (air-gap). يصنع الثابت و الدائر من صفائح الحديد الكهربومغناطيسي سماكة (0.35÷0.5) معزولة عن بعضها للإقلال من الضياع الحديدي بفعل التيارات الإعصارية فيها.

٥-٣-١ الجزء الثابت:

يتألف الثابت من جسم الثابت الحديدي و من قلب الثابت المؤلف من صفائح حديدية كهرومغناطيسية ذي السماحية المغناطيسية العالية، و هذه الصفائح تدهن قبل جمعها من طرفيها بمواد عازلة لتقليل الضياعات الحديدية الناتجة عن البطء المغناطيسي و التيارات الاعصارية. و يحتوي الجزء الداخلي للجسم الثابت الاسطواني الشكل على مجاري تملأ بنواقل نحاسية معزولة تشكل ملفات الجزء الأولي ، و هذه الملفات تشكل دائرة ثلاثية الطور متوازنة موصولة إما بشكل نجمي أو مثلثي.

٥-٣-٢ الجزء الدوار

يتكون الدوار من صفائح رقيقة من الحديد الكهرومغناطيسي تجمع مع بعضها مشكلة جسماً اسطوانياً، و يثبت هذا الجزء على محور. يوجد على السطح الخارجي لهذا الجزء مجار حيث تملأ بنواقل الملفات (نحاس، المنيوم أو خلائطهما). يمكن أن تشكل ملفات الجزء الدوار أيضاً دائرة ثلاثية الطور كالجزء الثابت أو دائرة متعددة الأطوار. توصل نهايات أطوار ملفات الجزء الدوار بشكل نجمي ،و يقسم الجزء الدوار من حيث نوع ملفاته إلى نوعين:

أ- الدوار ذو القفص السنجابي:

في هذا النوع يوجد في كل مجرى قضيب من النحاس أو الألمنيوم غير معزول تقصر نهاياتها بواسطة حلقتين مصنوعتين من نفس مادة القضيب، و يشبه الشكل المكون من النواقل و الحلقتين قفصاً سنجابياً مفتوحاً عند نهايتيه. يمثل القفص السنجابي ملفاً متعدد الأطوار موصولاً بشكل نجمي ،و عدد أطوار ملفاته يساوي عدد المجاري.

ب- الدوار ذو الدائر الملفوف:

في هذا النوع توضع في المجاري نواقل نحاسية معزولة عن بعضها البعض و موصولة على التسلسل في مجموعات ثلاثية الطور لتكون دائرة متوازنة، و توصل نهايات الملفات الثلاثة مع بعضها بشكل نجمي، بحيث تثبت النقطة النجمية (النقطة الحيدادية) بجسم الجزء الدوار أو بمحور الدوران. أما بدايات الملفات فتوصل مع حلقات

انزلاق نحاسية معزولة و مركبة على محور الجزء الدوار ،و تقصر مع بعضها عبر مقاومات خارجية تستعمل للإقلاع و التنظيم.

٥-٣-٣ الفجوة الهوائية:

يفصل بين الثابت و الدوار فجوة هوائية ،و تصمم هذه الفجوة بحيث تكون صغيرة بقدر المستطاع ،و تكبر كلما كبرت استطاعة الآلة. ففي الآلات ذات الاستطاعة الصغيرة يتراوح طول الفجوة الهوائية بين (0.4÷0.5mm) ،و في الآلات ذات الاستطاعة الكبيرة تكون عدة ميليمترات. و تحدد الفجوة الهوائية بهذا البعد الصغير لتخفيض قيمة السليالة المغناطيسية الهاربة و تيار اللاحمل مما يؤدي إلى تحسين عامل الاستطاعة و المردود.

٥-٤ مبدأ عمل الآلة التحريضية:

تنشأ في الثغرة الهوائية ساحة مغناطيسية دوارة إثر تغذية ملفات الثابت بتيار متناوب ثنائي أو ثلاثي الطور. تسمى بالسرعة التوافقية إذا توافقت السرعة الزاوية الدورانية للساحة المغناطيسية مع السرعة الزاوية للتيار المتناوب. تعطى سرعة دوران الساحة المغناطيسية التوافقية بالعلاقة:

$$n_s = 60 f \quad (5-1)$$

فإذا كان تردد التيار المتناوب مساوياً إلى ($f = 50 \text{ Hz}$) أصبحت سرعة الدوران التوافقية مساوية إلى (3000rpm). لإنقاص هذه السرعة التوافقية نكرر توزيع ملفات الثابت (p) مرة. تصبح السرعة الزاوية للساحة الدوارة أصغر من السرعة الزاوية للتيار المتناوب بـ (p) مرة، يمكننا أن نكتب العلاقة العامة لسرعة الدوران التوافقية:

$$n_s = \frac{60 f}{p} \quad (5-2)$$

باعتبار أن:

p : عدد أزواج الأقطاب الوهمية.

من العلاقة (5-2) نحصل على السرع التوافقية التالية

(500, 600, 750, 1000, 1500, 3000)

تعرض الساحة الدوارة في ملف الثابت قوة محرّكة كهربائية يتناسب تـرددها مع سرعة دوران الساحة المغناطيسية حسب العلاقة التالية:

$$f_1 = \frac{p n_s}{60} = f \quad (5-3)$$

يساوي هذا التردد تردد التيار المتناوب المغذي.

تعرض أيضاً في ملف الدائر قوة محرّكة كهربائية ترددها (f_2) إذا كان الدائر واقفاً. يصبح ترددها (f_2) مساوياً إلى تردد القوة المحركة الكهربائية في الثابت أي:

$$f_2 = f_1 = f$$

تمرر هذه القوة المحركة الكهربائية في قضبان الدائر المقصورة تياراً كبيراً، يؤثر على القضبان الموجودة في الساحة المغناطيسية بقوة مماسية.

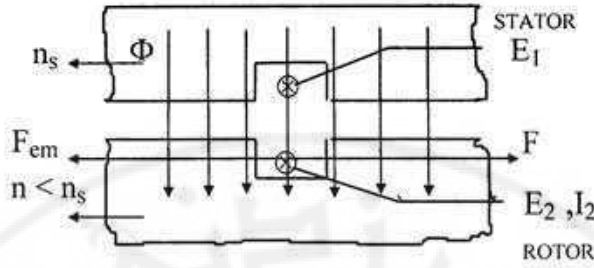
يبدأ الدائر بالدوران بفعل هذه القوة المماسية و تستقر سرعته على قيمة ثابتة قدرها (n) . يتبع تردد القوة المحركة الكهربائية المتحركة في القضبان الدائرة السرعة النسبية بينه وبين الساحة الدوارة، و يصبح مساوياً إلى:

$$f_2 = \frac{p(n_s - n)}{60} \quad (5-4)$$

تستقر سرعة الدائر على هذا الحد، عندما تتوازن القوة الكهرومغناطيسية المتولدة مع القوة الميكانيكية المؤثرة على محور الدائر و الموجهة ضد اتجاه الدوران.

٥-٤-١ مبدأ عمل المحرك التحريضي:

ندرس مبدأ عمل المحرك التحريضي على قسم من الآلة التحريضية مؤلف من سلك في الثابت و آخر في الدائر. لنفترض أولاً أن الدائر واقف، و أن خطوط السيلة المغناطيسية المتجهة من الأعلى إلى الأسفل، تتحرك من اليمين إلى اليسار بسرعة توافقية (n_s) - كما في الشكل (1-5).



الشكل (1-5)

لتحديد اتجاه القوتين المحركتين الكهربائيتين المتحرضتين في سلكي الثابت و الدائر، نفترض أن الساحة واقفة و أن السلكين يتحركان بالاتجاه المعاكس.

يمكننا الحصول على الاتجاه المبين في الشكل رقم (1-5) بعد تطبيق قاعدة اليد اليمنى على القوتين المحركتين الكهربائيتين: إن اتجاه المركبة الفعالة للتيار المار في سلك الدائر المقصور ينطبق على اتجاه قوته المحركة الكهربائية.

نحدد اتجاه القوة الكهرومغناطيسية المتولدة (F_{em}) بعد معرفة اتجاه التيار الكهربائي في سلك الدائر. و بعد تطبيق قاعدة اليد اليسرى. تسعى هذه القوة الكهرومغناطيسية لتحريك الدائر باتجاه الساحة متغلبة على القوة الميكانيكية المطبقة على محور الدائر (F). يبدأ الدائر بالدوران، و تبدأ معه القوة المحركة الكهربائية و التيار و القوة الكهرومغناطيسية في الدائر بالتناقص حتى تثبت سرعة الدائر على قيمة معينة (n) تتوازن فيها القوة الكهرومغناطيسية مع القوة الميكانيكية.

طالما تقع سرعة الدائر في المجال ($n = 0 \div n_s$)، تظل اتجاه القوى المحركة الكهربائية و التيارات و القوة المحركة المغناطيسية واحدة نقول عندئذ إن الآلة تعمل كمحرك تحريضي.

إن سرعة الدائر في المحرك التحريضي تظل أصغر من السرعة التوافقية بقليل، فإذا دار بالسرعة التوافقية يصبح و كأنه واقفاً تجاه الساحة المغناطيسية الدوارة، لا يتعرض فيه أي تيار يذكر يشارك في توليد العزم.

إن سرعة الدائر في المحرك التحريضي، حتى و لو كان يعمل على فراغ (أي بدون حمولة)، لا تصل إلى السرعة التوافقية بل تصغرها بقليل جداً نظراً لوجود عزم مقاوم

على محور الدائر، بفعل الضياع الميكانيكي (احتكاك و مقاومة هواء الخ) و الضياع الإضافي. فإذا افترضنا نظرياً أن سرعة الدائر بلغت سرعة الساحة المغناطيسية الدوارة فإن القوة الكهرومغناطيسية (F_{em}) و العزم (T) تكونان مساويتين للصفر.

إن الفرق الصغير النسبي بين السرعة التوافقية للساحة المغناطيسية (n_s) و سرعة الدائر (n) يدعى بالانزلاق (s) ، نسبة للسرعة التوافقية يساوي إلى:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = 1 - \frac{n}{n_s} \geq 0 \quad (5-5)$$

و تصبح سرعة دوران الدائر بدلالة الانزلاق مساوية إلى:

$$n = (1 - s) n_s \quad (5-6)$$

و يصبح تردد القوة المحركة الكهربائية المتحرضة في قضبان الدائر مساوية إلى:

$$f_2 = s f \quad (5-7)$$

تبلغ قيمة الانزلاق في المحركات التحريضية من (0.2%) إلى (5%) فقط، لذا كانت سرعة دوران المحركات التحريضية قريبة في السرعة التوافقية التالية :
(500, 600, 750, 1000, 1500, 3000) و أقل منها بقليل.

٥-٤-٢ مبدأ عمل المولدة التحريضية:

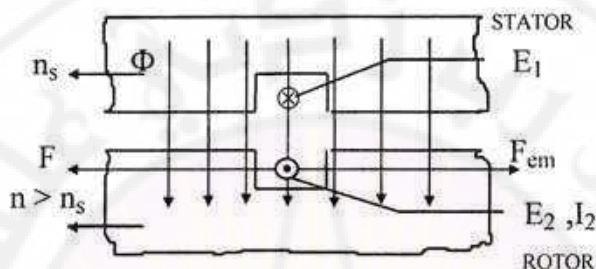
تعمل الآلة التحريضية كمولدة عندما يدور الدائر بفعل تأثير القوة الميكانيكية الخارجية (F) باتجاه دوران الساحة المغناطيسية التوافقية و بسرعة أكبر منها أي ($n > n_s$) .
يكون الانزلاق في هذه الحالة سالباً، و اتجاه القوة المحركة الكهربائية المتحرضة في الدائر منعكساً، و أيضاً اتجاه المركبة الفعالة للتيار فيه، بذلك يصبح اتجاه القوة الكهرومغناطيسية معاكساً كما في الشكل (2-5).

نحصل على الاتجاهات المرسومة في الشكل (2-٢١) بافتراض أن الساحة المغناطيسية واقفة و أن السلكين يتحركان:

سلك الثابت يتحرك من اليسار إلى اليمين بسرعة (n_s) و سلك الدائر يتحرك من اليمين إلى اليسار بسرعة قدرها ($n - n_s$) .

يظل اتجاه القوة المحركة الكهربائية في سلك الثابت كما هو عليه، أما تيار الثابت فينعكس باتجاه الشبكة. نقول إن الآلة التحريضية تعمل كمولدة للتيار و معطية له، و يكون الانزلاق سالباً أي:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (5-8)$$



الشكل (2-5)

٥-٥ القيم الاسمية للآلات التحريضية:

إن عمل الآلة التحريضية يتحدد بالقوى الخارجية المطبقة عليها، أي بالتوتر الكهربائي المطبق على ملفات الثابت، و بالقوى الميكانيكية الخارجية المطبقة على محور الدائر. كما أن عمل الآلة التحريضية النظامي الاسمي هو عملها طويل الأمد تحت شروط نظامية دون ارتفاع في سخونها الداخلية عن الحد المسموح به عند التصميم.

تتحدد شروط العمل النظامي بقيمة التوتر الخطي الاسمي المطبق على ملفات الثابت (V_n) و التردد الاسمي (f)، و بقيمة العزم الميكانيكي الاسمي المطبق على محور الدائر (T_n) المقابل للاستطاعة الاسمية المأخوذة من الدائر (P_n)، و لسرعة دوران الدائر الاسمية (n_n).

تدون على اللوحة الاسمية للآلات التحريضية ذات الدائر المقصور كل من القيم الاسمية التالية:

١- نوع الآلة التحريضية و رقم الصنع .

٢- عدد الأطوار و التوتر الخطي الاسمي للطور الواحد و تردده .

$$V_n = 3 \times 380 \text{ V} / 50 \text{ Hz}$$

٣- طرق توصيل ملفات الأطوار - نجمي . Y

٤- الاستطاعة الاسمية المنتجة . $P_n = 10 \text{ [kw]}$

٥- سرعة دوران الدائر الاسمية . $n_n = 1460 \text{ [rpm]}$

٦- التيار الخطي الاسمي . $I_n = 23 \text{ [A]}$

٧- المردود الاسمي . $\eta_n = 82.5 \%$

٨- عامل الاستطاعة الاسمي . $\cos \varphi = 0.8$

٩- شروط العمل الخاصة التي تتحدد بنوعية الحموله و زمن تطبيقها.

أما في الآلات التحريضية ذات الدائر الملفوف فتدون عدا القيم السابقة الذكر:

١٠- التيار الاسمي لطور واحد من أطوار الدائر $I_{2n} = 38 \text{ [A]}$

١١- القوة المحركة الكهربائية الخطية الاسمية للدائر عندما يكون واقفاً

$E_2 = 220 \text{ [V]}$

٥-٦ معادلات المحرك التحريضي و الدارة المكافئة:

تعطى معادلات المحرك التحريضي بالعلاقات بين توترات الملفات المختلفة و التيارات المارة فيها و القوى المحركة الكهربائية المتولدة فيها بدلالة عناصرها الأومية و التحريضية.

تحدد هذه المعادلات المميزات العامة العملية للمحرك التحريضي، و التي نقيدها في دراسة خصائصها و عملها.

للحصول على المعادلات التي تبين عمل المحرك التحريضي نبدأ أولاً من الحالة الخاصة عندما يكون الجزء الدوار واقفاً.

٥-٦-١ معادلات المحرك التحريضي عند وقوف الدائر ($s = 1$)

لنفترض أن ملف الدائر المتعدد الأطوار موصول بشكل نجمي و مقصور. من دراسة مبدأ عمل المحرك التحريضي لاحظنا أن الساحة المغناطيسية المتولدة من ملف الثابت و الدائر، تدور في التفرجة الهوائية بسرعة توافقية تتعلق بتردد الشبكة (f) و بعدد أزواج الأقطاب المغناطيسية الوهمية (p)، حسب العلاقة (2-5):

$$n_s = \frac{60 f}{p}$$

عندما يكون الجزء الدوار واقفاً، فإن هذه الساحة تحرض في ملفات الثابت و الدائر قوة محرّكة كهربائية لها نفس التردد و يساوي تردد الشبكة، تتحدد القيم الفعالة لهاتين القوتين بالعلاقات التالية:

$$E_1 = 4.44 N_1 f \Phi \quad (5-9)$$

$$E_2 = 4.44 N_2 f \Phi \quad (5-10)$$

باعتبار أن الرقمين (1) و (2) يدلان على قيم ملف الثابت و الدائر على التوالي. إن النسبة بين E_1 و E_2 تحدد ما يسمى بعامل تحويل القوى المحركة الكهربائية كما في المحولات و الذي يساوي إلى:

$$k_e = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (5-11)$$

ندرج مفهوم القوة المحركة الكهربائية المنسوبة إلى الثابت الذي نعتبره بمثابة الملف الأولي:

$$E'_1 = k_e E_2 = E_1 \quad (5-12)$$

يتألف المحرك التحريضي كالمحولة من ملفين فقط، ملف الثابت يغذى من الشبكة و ملف الدائر المقصور، فإذا كان الدائر واقفاً، فإن عمل المحرك التحريضي يشبه تماماً عمل المحولة على قصر.

إذا فرضنا أن المقاومة الداخلية لملف طور واحد من الثابت (R_1) و ممانعته التحريضية التسريبية (X_1)، و أن المقاومة الداخلية لملف طور واحد من الدائر (R_2) و ممانعته التحريضية التسريبية (X_2) نحصل على معادلتين للتوتر لكل طور على حدة:

$$V_1 = -E_1 + Z_1 I_1 \quad (5-13)$$

$$0 = -E_2 + Z_2 I_2 \quad (5-14)$$

باعتبار أن:

Z_1 : الممانعة الكلية التسريبية لملف طور واحد من الثابت تساوي:

$$Z_1 = R_1 + jX_1 \quad (5-15)$$

و أن:

Z_2 : الممانعة الكلية التسريبية لملف طور واحد من الدائر الواقف تساوي:

$$Z_2 = R_2 + jX_2 \quad (5-16)$$

إن التحريض المغناطيسي الكلي في التفرجة الهوائية ناتج عن تأثير القوة المحركة المغناطيسية الكلية المتولدة من تيارى الثابت والدائر على السواء، هذا يؤدي إلى:

$$I_0 = I_1 + \frac{I_2}{k_i} = I_1 + I_2' \quad (5-17)$$

باعتبار أن :

I_0 : تيار التمنظ، يمر هذا التيار في ملف الثابت.

k_i : عامل تحويل التيار.

يختلف عامل تحويل التيار هذا عن عامل تحويل القوة المحركة الكهربائية إذا اختلف عدد الأطوار في ملف الثابت عنه في ملف الدائر، و يتساويا عند تساوي عدد الأطوار فيهما.

بنسب معادلات ملف الدائر في المحرك التحريضي إلى ملف الثابت نحصل على معادلات المحرك التحريضي المنسوبة عندما يكون الدائر واقفاً:

$$V_1 = -E_1 + Z_1 I_1 \quad (5-18)$$

$$0 = -E_2' + Z_2' I_2' \quad (5-19)$$

$$I_0 = I_1 + I_2' \quad (5-20)$$

$$E_1 = E_2' = -Z_0 I_0 \quad (5-21)$$

باعتبار أن: E_2' القوة المحركة الكهربائية لملف طور واحد من الدائر الواقف المنسوبة إلى الثابت:

$$E_2' = k_e E_2 \quad (5-22)$$

و أن:

Z_2' : الممانعة التسريبية الكلية لملف طور واحد من الدائر الواقف المنسوبة إلى الثابت:

$$Z_2' = k_e k_i Z_2 = k_z Z_2 \quad (5-23)$$

و أن:

I_2' : تيار ملف طور واحد من الدائر المنسوب إلى الثابت.

Z_0 : الممانعة الكلية للتمغنت و تساوي إلى:

$$Z_0 = R_0 + jX_0 \quad (5-24)$$

$-R_0$ المقاومة الفعالة التسلسلية الممثلة للضياع الحديدي في النواتين المغناطيسيتين.

$-X_0$ الممانعة التحريضية المتبادلة.

$-k_z$ عامل تحويل الممانعات و يساوي إلى:

$$k_z = k_e k_i \quad (5-25)$$

٥-٦-٢ معادلات المحرك التحريضي عند دوران الدائر ($1 > s > 0$)

نفترض أن الدائر يدور باتجاه الساحة المغناطيسية بسرعة قدرها (n) ، يصبح تردد القوة المحركة الكهربائية و التيار في الدائر مساوياً إلى $(f_2 = sf)$ ، أي أصغر من تردد الساحة المغناطيسية الدوارة بمقدار الانزلاق (s) .

و تصبح قيمة القوة المحركة الكهربائية عندئذ مساوية إلى:

$$E_{2s} = 4.44 N_2 f_2 \Phi s = s E_2 \quad (5-26)$$

باعتبار أن :

E_2 - القوة المحركة الكهربائية الفعالة في ملف الدائر الواقف.

E_{2s} - القوة المحركة الكهربائية الفعالة في ملف الدائر المتحرك.

بما أن ممانعة ملف الدائر التسريبية تتناسب مع التردد (f_2) لذا تصبح مساوية إلى:

$$X_{2s} = s X_2 \quad (5-27)$$

باعتبار أن:

X_2 - الممانعة التحريضية التسريبية لملف الدائر الواقف.

X_{2s} - الممانعة التحريضية التسريبية لملف الدائر المتحرك.

تصبح معادلة توتر الدائر المنسوب مساوية إلى:

$$0 = -sE_2' + (R_2' + jsX_2')I_2' \quad (5-28)$$

بتقسيم المعادلة (5-28) على (s) نحصل على:

$$0 = -E_2' + \left(\frac{R_2'}{s} + jX_2'\right)I_2' \quad (5-29)$$

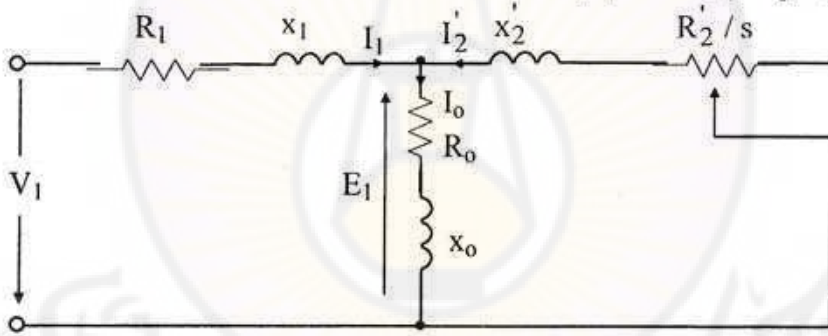
بالتالي نحصل على جملة المعادلات:

$$V_1 = -E_1 + R_1 I_1 + jX_1 I_1$$

$$0 = -E'_2 + \frac{R'_2}{s} I'_2 + jX'_2 I'_2 \quad (5-30)$$

$$I_0 = I_1 + I'_2$$

توافق جملة المعادلات السابقة الدارة المكافئة المبينة في الشكل (3-5)، حيث أنه بعد نسب قيم الدائر و عناصره إلى الثابت، تأخذ الدارة المكافئة شكل حرف (T)، و تتألف من ضلعين، ضلع أفقي يحتوي على مقاومة ملف الثابت الداخلية و ممانعته التسريبية و على مقاومة ملف الدائر الداخلية المنسوبة أيضاً، و ضلع شاقولي يحتوي على الممانعة التحريضية المتبادلة، التي يمر فيها تيار تمغنط الآلة، و مقاومة فعالة تمثل الضياع الحديدي في النوى المغناطيسية.

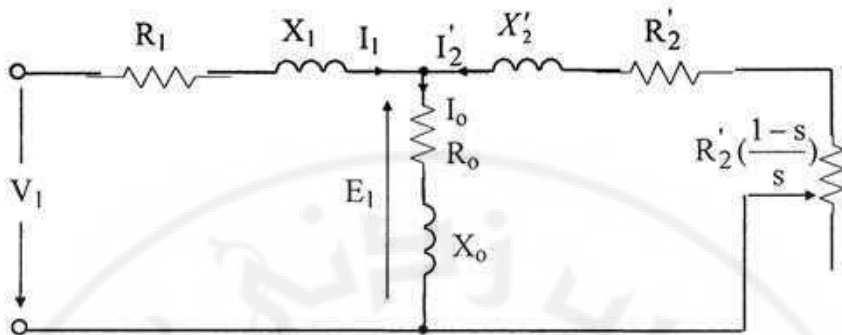


الشكل (3-5) الدارة المكافئة

بتحليل العنصر $\frac{R'_2}{s}$ إلى مركبتين:

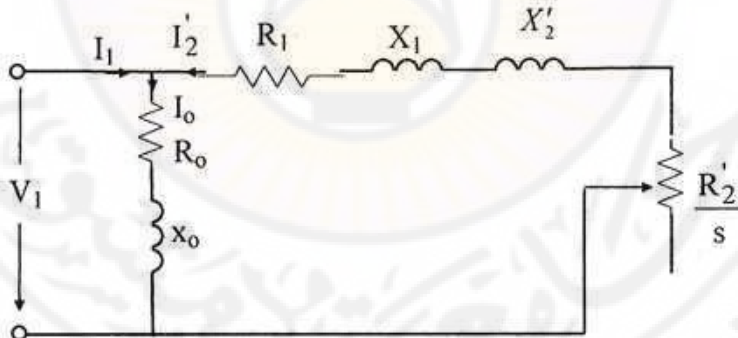
$$\frac{R'_2}{s} = R'_2 + R'_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) \quad (5-31)$$

أي تكون الدارة المكافئة محملة بحمولة فعالة وهمية متغيرة قدرها $\left(R'_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) \right)$ ، تتعلق بالانزلاق أي بسرعة دوران الدائر. و تصبح الدارة المكافئة كما في الشكل (4-5).



الشكل (4-5)

و للحد من ضياعات جول في المحركات التحريضية تصمم (R_1) بحيث تكون صغيرة، أي أن هبوط التوتر على (R_1) يكون صغيراً، وبالتالي يكون التوتر المطبق على الممانعة الممغنطة (Z_0) قريباً من التوتر (V_1). وبهذا نستطيع استنتاج الدارة المكافئة الكهربائية التقريبية كما في الشكل (5-5) إن الدارة المكافئة التي حصلنا عليها تعكس جميع الظواهر و الحالات التي تحدث داخل المحرك التحريضي .



الشكل (5-5)

٥-٧ مخطط الاستطاعة للمحرك التحريضي:

الاستطاعة التي يستجدها المحرك التحريضي الثلاثي الطور من الشبكة الكهربائية:

$$P_1 = 3 V_1 I_1 \cos \phi_1 \quad (5-32)$$

حيث أن:

V_1 - التوتر الطوري للشبكة.

I_1 - التيار المار في ملفات الجزء الثابت.

φ_1 - زاوية الطور بين شعاع التوتر و التيار.

إن قسماً من هذه الضياعات يضيع على شكل ضياعات نحاسية في المقاومة الحقيقية لملف الثابت:

$$P_{cu1} = 3 R_1 I_1^2 \quad (5-33)$$

و جزءاً آخر يضيع على شكل ضياعات حديدية في حديد الجزء الثابت:

$$P_{fe1} = 3 R_o I_o^2 \quad (5-34)$$

و الجزء الباقي من الاستطاعة يدعى بالاستطاعة الكهرومغناطيسية و تساوي :

$$P_{em} = P_1 - P_{cu1} - P_{fe1} \quad (5-35)$$

تنتقل الاستطاعة الكهرومغناطيسية إلى الجزء الدوار عبر الفجوة الهوائية بواسطة الساحة المغناطيسية الدوارة. و كما يظهر من الدارة المكافئة فإن هذه الاستطاعة توافق الاستطاعة المصروفة في المقاومة الوهمية :

$$P_{em} = 3 \frac{R_2}{s} I_2'^2 = 3 \frac{R_2'}{s} I_2'^2 \quad (5-36)$$

جزء من هذه الاستطاعة يضيع على شكل ضياعات نحاسية في المقاومة الحقيقية لملف الدوار :

$$P_{cu2} = 3 R_2' I_2'^2 = 3 R_2 I_2^2 \quad (5-37)$$

و جزء آخر يذهب على شكل ضياعات حديدية في الجزء الدوار P_{fe2} ، و يتحول القسم الباقي إلى استطاعة ميكانيكية (P_2') التي تؤثر على محور الدوار :

$$P_2' = P_{em} - P_{cu2} - P_{fe2} \quad (5-38)$$

يذهب قسم من الاستطاعة الميكانيكية لتغطية الضياع الميكانيكي (P_{me})، والضياع الإضافي (P_d) و التي تتمثل بالاحتكاك و ضياعات أخرى .

يمكن تمثيل الاستطاعة الميكانيكية بالاستطاعة التي تمتصها المقاومة $R_2'(\frac{1-s}{s})$ و التي تشكل حمولة الدارة المكافئة:

$$P_{me} = 3 R_2' \left(\frac{1-s}{s} \right) I_2'^2 \quad (5-39)$$

و تكون الاستطاعة النافعة الموجودة على محور المحرك:

$$P_2 = P_2' - P_{me} - P_d \quad (5-40)$$

تؤخذ هذه الاستطاعة من محور الدائر بشكل عزم ميكانيكي (T):

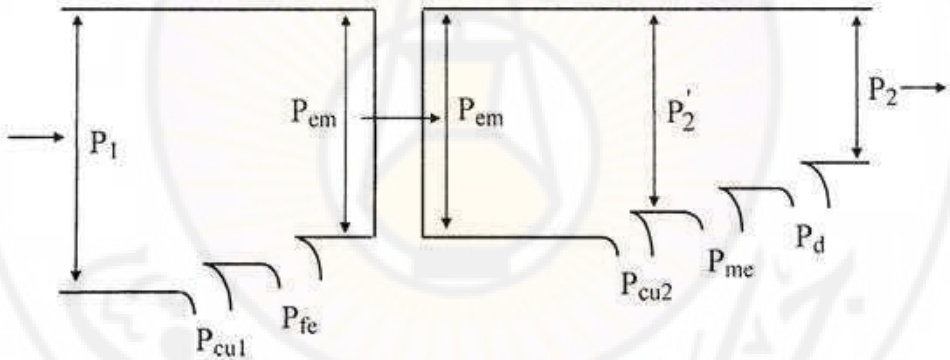
$$\left. \begin{aligned} P_2 &= P_1 - \Delta P \\ \Delta P &= P_{cu1} + P_{fe1} + P_{cu2} + P_{fe2} + P_{me} + P_d \end{aligned} \right\} \quad (5-41)$$

و يكون مخطط الاستطاعة للمحرك التحريضي كما في الشكل (6-5).

و بالتالي يكون مردود المحرك:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} \quad (5-42)$$

يتراوح مردود المحركات التحريضية ذات الاستطاعة من (1÷1000 kw) عند تحميلها بالحمولة الاسمية بين (0.45÷0.72) ويزداد هذا المردود بزيادة استطاعة المحركات.



الشكل (6-5)

٨-٥ عزم المحرك التحريضي:

يعطى العزم الكهرومغناطيسي (T_{em}) الكلي للمحرك التحريض بنسبة الاستطاعة الكهرومغناطيسية المنقولة (P_{em}) على السرعة الزاوية للساحة المغناطيسية الدوارة (ω_1):

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_1} = \frac{3R_2 I_2^2}{s\omega_1}; \omega_1 = \frac{2\pi n}{60} \quad (5-43)$$

الآن إذا نسبنا قيم عناصر الدائر إلى الثابت نحصل على علاقة العزم الكلي:

$$T = \frac{3R_2' I_2'^2}{s\omega_1} \quad (5-44)$$

من الدارة المكافئة التقريبية و أخذ القيمة المطلقة نحصل على معادلة التيار (I_2'):

$$I_2' = \frac{V_1}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad (5-45)$$

بتعويض قيمة (I_2') في علاقة العزم (5-44) نحصل على:

$$T = \frac{3}{s\omega_1} \frac{R_2' V_1^2}{(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + (X_1 + X_2')^2} \quad (5-46)$$

من الواضح أن العزم يتناسب طردياً مع مربع التوتر و عكساً مع قيم (R_1) و المفاعلات التحريضية التسريبية.

٩-٥ المميزات الميكانيكية للمحركات التحريضية:

و هي العلاقة بين انزلاق هذه المحركات (s)، أو سرعة دورانها (n)، أو (ω) مع العزم الدوراني المتولد على محورها أي:

$$s = f(T), \quad n = f(T), \quad \omega = f(T) \quad (5-47)$$

١-٩-٥ المميزات الطبيعية:

تمثل المعادلة (5-46) معادلة المنحني الميكانيكي الطبيعي $s=f(T)$ للمحركات التحريضية. يتبين من هذه المعادلة أن للعزم قيمتين أعظميتين، الأولى في مجال عمل الآلة كمحرك و الثانية في مجال عمل الآلة كمولدة، و ذلك خلال تغير الانزلاق في المجال ($\pm\infty$). تحدد هاتان القيمتان بأخذ مشتق العزم من العلاقة (5-46) بدلالة الانزلاق و مساواته للصفر:

$$\frac{dT}{ds} = 0 \quad (5-48)$$

نحصل على قيمتين للانزلاق يكون فيها العزم أعظمية، تسميان بالانزلاق الحرج (s_{cr}):

$$s_{cr} = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (x_1 + x_2')^2}} \quad (5-49)$$

بتعويض قيمة الانزلاق الحرج في المعادلة (5-46) نحصل على معادلة العزم الأعظمي:

$$T_{cr} = \frac{3V_1^2}{2\omega_1 [R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}]} \quad (5-50)$$

تقابل الإشارة (+) في مخرج المعادلة مجال عمل الآلة كمحرك ،و تعطينا قيمة العزم الأعظمي الموافقة لهذه الحالة، أما الإشارة (-) فتقابل العمل كمولدة ،و تعطينا قيمة العزم الأعظمي الموافقة لها.

بنقسم المعادلة (3-46) على المعادلة (3-50) مع الأخذ بعين الاعتبار المعادلة (5-49) نستنتج:

$$T = \frac{2 T_{cr} (1 - a s_{cr})}{\frac{s}{s_{cr}} + \frac{s_{cr}}{s} + 2 a s_{cr}} \quad (5-51)$$

حيث: $a = R_1 / R'_2$

في كثير من الأحيان يمكننا إهمال المقاومة (R_1) باعتبار قيمتها صغيرة، بالمقارنة مع ($X_1 + X'_2$) خاصة في المحركات ذات الاستطاعة المتوسطة و الكبيرة ،وبالتالي يمكن إهمال قيمة ($a s_{cr}$) ،و استناداً إلى ذلك تصبح المعادلة (5-51) مساوية إلى:

$$T = \frac{2 T_{cr}}{\frac{s}{s_{cr}} + \frac{s_{cr}}{s}} \quad (5-52)$$

و تصبح المعادلة (5-49) مساوية إلى:

$$s_{cr} = \pm \frac{R'_2}{(X_1 + X'_2)} \quad (5-53)$$

و المعادلة (5-50) تصبح مساوية إلى:

$$T_{cr} = \pm \frac{3V_1^2}{2\omega_1 (X_1 + X'_2)} \quad (5-54)$$

نلاحظ أن العزم الحرج لا يتعلق بالمقاومة الفعالة لملف الدائر R'_2 ، و لكن هذه المقاومة تحدد قيمة الانزلاق الأعظمية. نلاحظ أن العزم يتناسب مع مربع توتر الشبكة، أي أن المحرك التحريضي حساس جداً لتغيرات التوتر المطبق على ملفاته.

اعتماداً على العلاقات الثلاثة الأخيرة يمكننا إجراء الحسابات اللازمة بسهولة، مع الأخذ بعين الاعتبار المواصفات الاسمية للمحرك المسجلة على اللوحة الاسمية، وهي قيم جهد الشبكة الاسمي، و الاستطاعة الاسمية، و السرعة الاسمية إضافة إلى عامل الاستطاعة و معامل زيادة التحميل (λ) و الذي يساوي إلى:

$$\lambda = \frac{T_{cr}}{T_n} \quad (5-55)$$

حيث أن:

T_n : قيمة العزم الدوراني الاسمي للمحرك.

تتراوح قيمة عامل التحميل بين (1.8 ÷ 2.5)، وفي بعض الأحيان يصل حتى (3) للمحركات ذات الاستطاعة الكبيرة.

بحسب العزم الاسمي (T_n) للمحرك التحريضي من الاستطاعة الاسمية (P_n) المعطاة بالـ (W) حسب العلاقة:

$$T_n = 9.55 \frac{P_n}{n_n} \text{ [Nm]} \quad (5-56)$$

أو:

$$T_n = 0.973 \frac{P_n}{n_n} \text{ [kgm]} \quad (5-57)$$

الانزلاق الاسمي (s_n) يوافق العزم الاسمي (T_n)، أما الانزلاق الحرج يحسب من العلاقة التالية بعد معرفة عامل التحميل:

$$s_{cr} = s_n (\lambda \pm \sqrt{\lambda^2 - 1}) \quad (5-58)$$

٥-٩-٢ إنشاء المميزات الطبيعية:

يمكننا تحليل المعادلة (5-52) حسب تغيرات الانزلاق (s) و ذلك في المجالات التالية:

١- في مجال تغير الانزلاق من $s = 0 \div 0.3 s_{cr}$ يمكننا إهمال القسم الأول من المخرج و عدّه مساوياً للصفر أي:

$$\frac{s}{s_{cr}} \approx 0 \quad (5-59)$$

حيث تساوي قيمة الانزلاق الحرج طبقاً للمعطيات الفنية للمحركات التحريضية إلى:
 $(s_{cr} \approx 0.1 \div 0.3)$

بينما تقع (s_n) عادةً ضمن المجال المشار إليه أعلاه لتغير الانزلاق أي أن:
 $s_n < 0.3 \quad s_{cr}$

استناداً إلى العلاقة (5-59) تصبح العلاقة (5-52) مساوية إلى:

$$T = \frac{2 T_{cr} s}{s_{cr}} \quad (5-60)$$

باعتبار أن $\frac{2 T_{cr}}{s_{cr}} = \text{const}$ تصبح المعادلة (5-60) مساوية إلى:

$$T = A s \quad (5-61)$$

و هي معادلة خط مستقيم.

٢- في مجال تغير الانزلاق من $s \geq s_{cr} \div 1$ يمكننا إهمال القسم الثاني من المخرج في المعادلة (5-52) و عدّه مساوياً للصفر أي:

$$\frac{s_{cr}}{s} = 0 \quad (5-62)$$

و بالتالي تصبح المعادلة (5-52) مساوية إلى:

$$T = \frac{2 T_{cr} s_{cr}}{s} = \frac{B}{s} \quad (5-63)$$

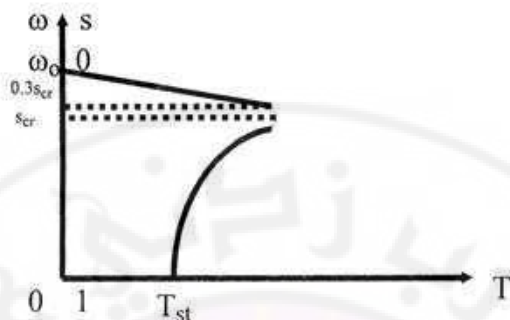
و هي معادلة قطع زائد.

يبين الشكل (7-5) كيفية إنشاء المميزات الميكانيكية الطبيعية بالاستناد إلى المعادلتين (5-61) و (5-63) مع الأخذ بعين الاعتبار النقاط التالية:

- ١- عندما يكون $s=0$ فإن $T=0$ و عندها يدور المحرك بالسرعة التوافقية.
- ٢- عندما يكون $s=s_n$ فإن $T=T_n$ و هذا يوافق الحالة الاسمية للمحرك.
- ٣- عندما يكون $s=s_{cr}$ فإن $T=T_{cr}$ و هذا يوافق العزم الأعظمي للمحرك.
- ٤- عندما يكون $s=1$ فإن $T=T_{st}$ و هذا يوافق العزم (الابتدائي) الإقلاع للمحرك.

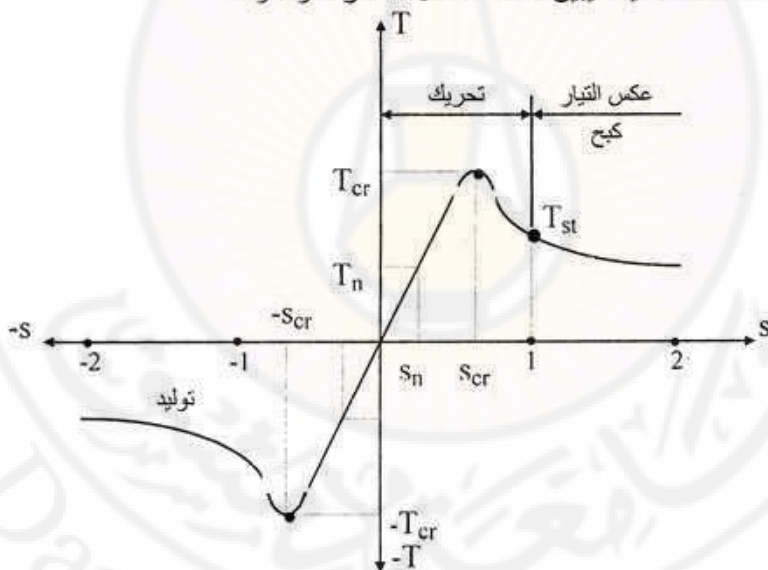
$$T_{st} = \frac{s R_2' V_1^2}{\omega_1 [(R_1 + R_2')^2 + (x_1 + X_2')^2]} \quad (5-64)$$

يتم وصل الجزء المتبقي من المميزات في مجال تغير الانزلاق $s = 0.3s_{cr} \div s_{cr}$.



الشكل (7-5)

و يبين الشكل (8-5) الشكل الأكثر دقة للمميزات الميكانيكية الطبيعية في مجال تغير الانزلاق $-2 \leq s \leq +2$ حيث يبين حالة العمل كمحرك وكمولد.



الشكل (8-5)

٥-٩-٣ المميزات الاصطناعية للمحركات التحريضية:

نسمي المنحني الميكانيكي للمحرك التحريضي دون إدخال أية عناصر خارجية إلى دارته بالمنحني الميكانيكي الطبيعي، وعند إدخال عنصر خارجي نسميه بالمنحني الميكانيكي الاصطناعي.

لرسم المنحني الميكانيكي الاصطناعي لابد من معرفة المقاومة الداخلية لملف الدائر
إضافةً إلى القيم الاسمية و عامل التحميل (ينطبق ذلك على المحركات ذات الدائر
الملفوف فقط).

يزداد الانزلاق الحرج بإضافة مقاومة خارجية لملف الدائر، و يبقى العزم ثابتاً. تصبح
المنحنيات الميكانيكية الاصطناعية أكثر ليونةً و أكبر عزم إقلاع فيها. تسمى هذه
المقاومة الخارجية بمقاومة الإقلاع و التنظيم، لأنها تقوم بوظيفتين أساسيتين و هما
التحكم بسرعة الدوران ، و زيادة عزم الإقلاع مع تخفيف الصدمة الكهربائية عند
الإقلاع.

تُحسب المقاومة الداخلية لملف الدائر (R_2) من القوة المحركة الكهربائية المتحرضة فيه
عندما يكون واقفاً، و من التيار المار فيه عند عمل المحرك تحت الحمولة الاسمية.
نقاس القوة المحركة الكهربائية بين نهائي طورين من أطوار الدائر عند إيقافه، بعد
تغذية ملفات الثابت بالتوتر النظامي.

توصل ملفات الدائر ثلاثية الطور بشكل نجمي، و تقصر عند عمل المحرك العادي، لذا
كانت معادلة القوة المحركة الكهربائية لطور واحد مساوية إلى:

$$\frac{E_2}{\sqrt{3}} = \left(\frac{R_2}{s_n} + jX_2 \right) I_{2n} \quad (5-65)$$

بما أن المقاومة الداخلية لملف طور واحد من أطوار الدائر مقسومة على الانزلاق
الاسمي ($\frac{R_2}{s_n}$) أكبر بكثير من ممانعته التحريضية التسريبية (X_2)، يمكننا كتابة :

$$\frac{E_2}{\sqrt{3}} = \frac{R_2}{s_n} I_{2n} \quad (5-66)$$

و منها ينتج أن المقاومة الداخلية لملف طور واحد مساوية على وجه التقريب إلى:

$$R_2 = \frac{E_2}{\sqrt{3}} \frac{s_n}{I_{2n}} \quad (5-67)$$

باعتبار أن:

E_2 : القوة المحركة الكهربائية الخطية لملف الدائر المفتوح.

I_{2n} : تيار ملف الطور الواحد من الدائر المقصور و المحمل بحمولة اسمية.
إذا أضفنا إلى ملف الدائر في المحركات التحريضية ذات الدائر الملفوف مقاومة خارجية (R) فإن قيمة الانزلاق الحرج (s_{cr}) سوف تتغير بعد إضافة المقاومة و تصبح مساوية إلى:

$$s_{cr}^* = \frac{R_2' + R'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad (5-68)$$

حيث أن:

$$R_{2eq}' = R_2' + R' \quad (5-69)$$

استناداً على العلاقة (5-53) يمكن كتابة المعادلة (5-68) بشكل تقريبي و تصبح على الشكل التالي:

$$s_{cr}^* = \frac{R_2' + R'}{X_1 + X_2'} \quad (5-70)$$

و بنسب المعادلتين (5-70) و (5-53) نحصل على:

$$\frac{s_{cr}^*}{s_{cr}} = \frac{R_2' + R'}{R_2'} = \frac{R_2 + R}{R_2} \quad (5-71)$$

التي بموجبها يمكننا حساب الانزلاق الحرج الاصطناعي بعد إضافة مقاومة خارجية (R).

إذا بدلنا قيمة الانزلاق الحرج الاصطناعي (s_{cr}^*) في المعادلة (5-52) نحصل على المنحني الميكانيكي الاصطناعي:

$$T = \frac{2 T_{cr}}{\frac{s}{s_{cr}^*} + \frac{s_{cr}^*}{s}} \quad (5-72)$$

يمكننا من العلاقة (5-71) حساب المقاومة الخارجية المضافة لملف الدائر لكي يصبح عزم الإقلاع أعظمياً أي يساوي العزم الحرج، وذلك بجعل الانزلاق الحرج الاصطناعي مساوياً للواحد أي:

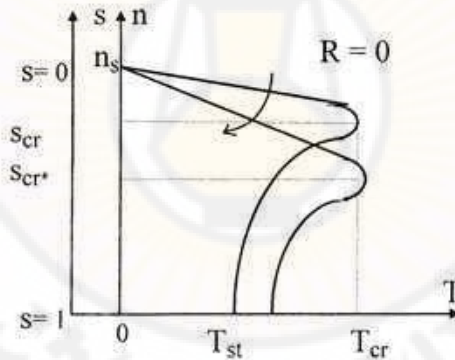
$$R = \frac{R_2}{s_{cr}} - R_2 \quad (5-73)$$

باعتبار أن: s_{cr} - الانزلاق الحرج للمنحني الطبيعي.

يبين الشكل (5-9) المميزات الميكانيكية الاصطناعية بإضافة قيم مختلفة للمقاومة الخارجية، حيث نلاحظ أن قيمة العزم الأعظمي تبقى ثابتة بينما يمكن التحكم بقيم (s_{cr}^*) ، حيث نستطيع استخدام المقاومات الخارجية لإقلاع المحرك التحريضي بعزم أعظمي و على عدة مراحل. من الشكل (5-9) نلاحظ ما يلي:

- إن عزم إقلاع المحرك التحريضي يزداد بإضافة مقاومة خارجية إلى ملف الدائر، حتى يصبح مساوياً للعزم الحرج، ثم يبدأ بالتناقص ثانية.

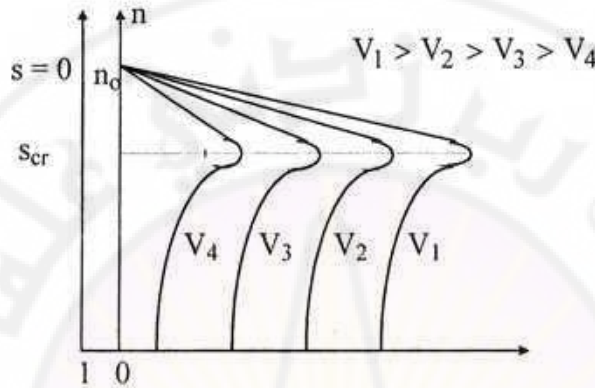
- يدعى القسم الخطي من المنحني بالقسم المتزن، الذي يحدد المجال العملي للمحرك التحريضي، يكون الانزلاق في هذا القسم المتزن أصغر من الانزلاق الحرج $(s < s_{cr})$.



الشكل (5-9) المميزات الميكانيكية الاصطناعية بتغير المقاومة الخارجية

وجدنا من علاقة العزم أن العزم الحرج يتناسب طردياً مع مربع توتر الشبكة (V_1^2) ، لذلك إذا غيرنا من قيمة جهد شبكة التغذية فإننا نلاحظ أن قيمة العزم الأعظمي تتغير بشكل كبير، و يبين الشكل (5-10) مجموعة مميزات اصطناعية وفقاً لتغير جهد الشبكة، حيث نلاحظ أن قيمة الانزلاق الحرج تبقى ثابتة.

إن نَعلق قيمة العزم الأعظمي بمربع توتر الشبكة يعبر من أهم سيئات المحركات التحريضية، فعلى سبيل المثال عندما تتغير قيمة توتر الشبكة في حدود $(10 \div 15)\% \pm$ فإن قيمة العزم الأعظمي تتغير في المجال $(19 \div 28)\% \pm$.



الشكل (5-10) المميزات الميكانيكية للمحرك التحريضي بتغيير جهد الشبكة

١٠-٥ إقلاع المحركات التحريضية:

١٠-١٠-٥ إقلاع المحركات التحريضية ذات الدائر الملفوف:

يتم إقلاع المحركات التحريضية الثلاثية الطور من هذا النوع بربط مقاومة الإقلاع الثلاثية الطور مع ملفات الدائر عبر المسفرات وحلقات الانزلاق، و ذلك لتخفيف الصدمة الكهربائية، و لزيادة عزم الإقلاع. كما هو مبين في الشكل (5-11).

يمكننا من خلال إضافة مقاومة فعالة إلى دائرة الدائر جعل عزم الإقلاع أعظمياً و مساوياً إلى العزم الحرج، أي عندما يكون الانزلاق الحرج مساوياً إلى الواحد.

$$s_{cr} = 1 = \frac{R'_2 + R'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}} \quad (5-74)$$

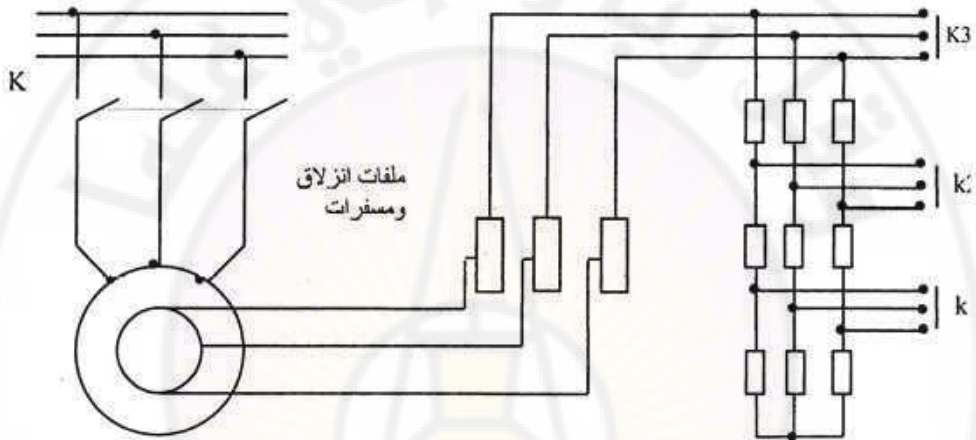
تتألف مقاومة الإقلاع المستعملة في المحركات التحريضية المتوسطة و الكبيرة من ثلاث مقاومات موصولة بشكل نجمي، و لها عدة درجات، تقصر تدريجياً أثناء مرحلة الإقلاع، ثم تقصر كلياً بعد الانتهاء منه.

تحسب مقاومات الإقلاع و درجاتها بحيث يتحقق الشرطان التاليان:

١- يجب أن لا يزيد تيار الإقلاع خلال فترة الإقلاع عن قيمة عظمى محددة مسموح بها.

٢- يجب أن لا ينخفض عزم المحرك في فترة الإقلاع عن قيمة حدية دنيا، تُحدد من عزم الحمولة.

تتم عملية قصر درجات مقاومة الإقلاع إما يدوياً أو آلياً.



الشكل (11-5)

٥-١-٢ إقلاع المحركات التحريضية ذات القفص السنجابي (المقصور):

إن تكوين المحركات التحريضية ذات القفص المقصور لا يسمح بإدخال مقاومة خارجية إلى دائرة الدائر لتخفيف تيار الإقلاع و الصدمة الكهربائية الكبيرة التي يخلفها عند وصله مع الشبكة. لذا نضطر إلى إقلاعها مباشرة أو إدخال بعض مخمدات الإقلاع إلى دائرة الثابت. وهناك عدة طرق لإقلاع المحركات ذات القفص السنجابي:

١- الإقلاع المباشر بوصل المحرك مباشرة إلى الشبكة.

٢- الإقلاع بتخفيض توتر الشبكة و ذلك عبر:

آ- ملف خانق

ب- محولة ذاتية

ج- مفتاح مثلي - نجمي.

٥-١٠-٢-١ الإقلاع المباشر للمحركات التحريضية ذات القفص السنجابي :

يعد الوصل المباشر للمحرك التحريضي ذي القفص المقصور مع توتر الشبكة من أبسط طرق الإقلاع و أخصها، أخذت هذه الطريقة بالانتشار السريع نظراً لتطور استطاعة الشبكات الكهربائية التي تسمح بالإقلاع المباشر دون حدوث أي اهتزاز أو تأرجح في توتر الشبكة.

يتم إقلاع أغلب المحركات التحريضية الصغيرة ، التي لا تحدث صدمة كهربائية كبيرة في الشبكة، مباشرة عبر قاطع واصل بسيط، ويسمح بالإقلاع المباشر للمحركات المتوسطة إذا كانت صدمتها لا تؤثر كثيراً على استقرار الشبكة العامة.

للإقلاع المباشر سينات عدة ،خاصةً للمحركات التحريضية متوسطة وكبيرة الاستطاعة:

- ١- تولد تيارات الإقلاع العابرة قوى كهرومغناطيسية كبيرة، تؤثر على ملفات المحرك و تسبب إزاحتها و تغير شكلها.

- ٢- يؤدي تكرار الإقلاع المباشر إلى ارتفاع حرارة ملفات الدائر و الثابت و زيادة سخونتها.

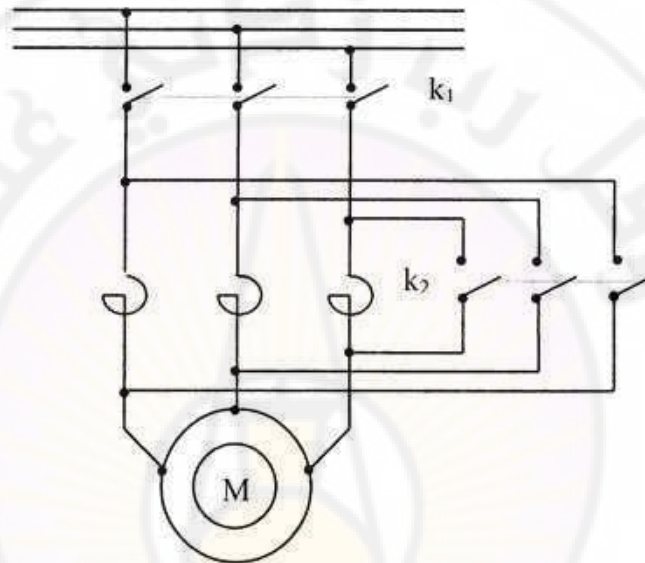
- ٣- يولد عدم انتظام توزيع التوتر على ملفات المحرك لحظة الإقلاع نبضات عالية التوتر بين اللغات، تؤدي عازليتها.

- ٤- يسبب تيار الإقلاع العالي انخفاضاً في توتر الشبكة، قصير الزمن يؤثر على المستهلك المربوط على الشبكة.

لتحاشي الصدمة الكهربائية و التيار المستجر الكبير عند إقلاع المحركات التحريضية المتوسطة و الكبيرة، لا بد من عمل ترتيبات مجدية للتحكم في تيار المحرك وعزله عند الإقلاع، لذا تستعمل طرق تخفيض التوتر لإقلاع هذه المحركات.

٥-١٠-٢-٢ الإقلاع باستخدام ملف خائق: (Reactor)

يتم إقلاع المحركات التحريضية التي تعمل بالوصل النجمي فقط، باستعمال ملفات خانقة توصل على التسلسل مع ملفات الثابت تخفض التوتر المطبق على المحرك لحظة الإقلاع، و بالتالي تخفض تيار الإقلاع. كما في الشكل (12-5).



الشكل (12-5)

يغلق القاطع (k_1) عند بدء الإقلاع، ثم القاطع (k_2) بعد انتهاء فترة الإقلاع. تكون القوة المحركة الكهربائية المعاكسة المتولدة في الخانق كبيرة لحظة الإقلاع، بهذا ينصرف قسم كبير من توتر الشبكة لتغطية هذه القوة المحركة الكهربائية، و يبقى القسم القليل مطبقاً على ملفات المحرك. بعد انقضاء فترة الإقلاع يستقر على قيمة ثابتة، فيقل بذلك تأثير الخانق الذي يقصر في نهاية الإقلاع. تستعمل هذه الطريقة لإقلاع المحركات التحريضية على فراغ أو المحملة بحمولات خفيفة.

٥-١-٢-٣ الإقلاع باستخدام المحولة الذاتية:

يتم خفض توتر الثابت و تخفيف تيار الإقلاع باستعمال المحولة الذاتية التي تعمل كمحولة و كخانق تربط على التسلسل مع دائرة المحرك. كما هو مبين في الشكل (13-5).

تتم طريقة إقلاع المحرك التحريضي عبر المحولة الذاتية بالشكل التالي:

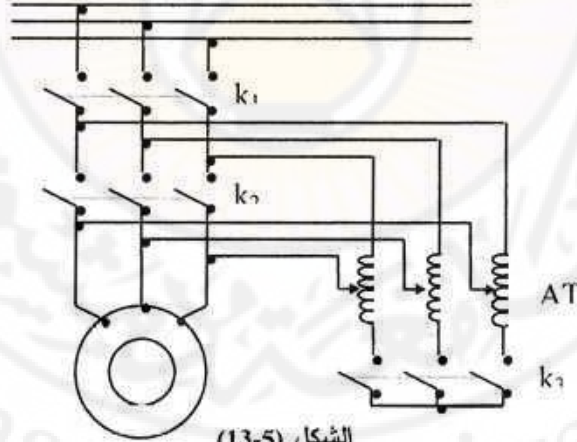
١- قبل البدء بالإقلاع يكون القاطع الثلاثي (k_3) مغلقاً و القاطعان (k_1) و (k_2) مفتوحين.

٢- عند بدء الإقلاع يغلق القاطع الثلاثي (k_1)، و يبدأ المحرك بالدوران تحت توتر مخفض عبر المحولة الذاتية بنسبة $(0.6 \div 0.75)$.

٣- بعد فترة وجيزة و بعد استقرار سرعة دوران المحرك يفتح القاطع الثلاثي (k_3)، تزداد سرعة دوران المحرك ليعمل عبر خائق مكون من القسم العلوي من المحولة الذاتية (AT).

٤- أخيراً يغلق القاطع الثلاثي (k_2) لتقتصر الخائق و المحولة الذاتية، و تصبح ملفات الثابت موصولة مع الشبكة مباشرة.

إن عزم إقلاع المحرك عبر المحولة الذاتية أكبر منه عبر الخائق، بهذا تكون شروط الإقلاع عبر المحولة الذاتية أفضل من الشروط عبر الخائق، إلا أن تعقيد دائرة الإقلاع و كلفتها العالية حدثت من استعمال المحولة الذاتية رغم شروطها الملائمة.



الشكل (5-13)

٥-١-٢-٤ الإقلاع باستخدام المفتاح نجمي-مثلثي:

تستعمل هذه الطريقة لإقلاع المحركات التحريضية التي تعمل نظامياً في حالة الوصل المثلثي، أي أن ملفاتنا تتحمل التوتر الخطي للشبكة و التي تكون محملة بحمولات خفيفة يكفي عزم الربط النجمي لإقلاعها.

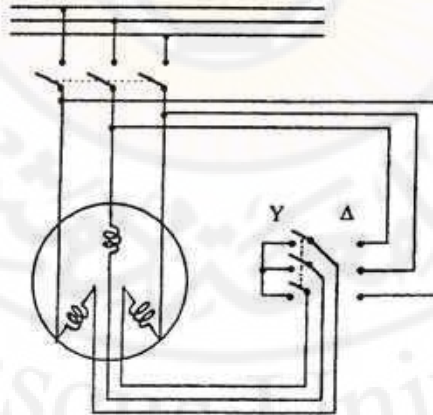
يتم تخفيف تيار الإقلاع بواسطة ملفات الثابت بشكل نجمي بواسطة مفتاح خاص قلاب كما هو مبين في الشكل (14-5). يبدأ المحرك بالدوران على هذا الوصل حتى تستقر سرعته على قيمة معينة، ثم يقلب وضع المفتاح إلى الوصل المثلثي. تخفف الصدمة الكهربائية بهذه الطريقة إلى الثلث على حساب عزم الإقلاع الذي ينخفض أيضاً إلى الثلث:

$$\frac{I_Y}{I_{\Delta}} = \frac{1}{3} \quad (5-75)$$

تيار الإقلاع للوصل النجمي ينخفض إلى ثلث تيار الإقلاع المباشر للوصل المثلثي. نسبة عزم الإقلاع للوصل النجمي إلى عزم الإقلاع للوصل المثلثي تساوي:

$$\frac{T_Y}{T_{\Delta}} = \frac{1}{3} \quad (5-76)$$

يتم إقلاع المحركات التحريضية ذات القفص المقصور عن طريق مفتاح نجمي مثلثي إما يدوياً أو آلياً بواسطة قواطع آلية مقادة، بالإضافة إلى زاجلة زمنية تحدد فترة الانتقال من الربط النجمي إلى الربط المثلثي، تتم عملية الانتقال بسرعة كبيرة و بزمان أقل من (0.3 sec.) لئلا تنقص سرعة الدوران أثناء الانتقال.



الشكل (14-5)

٥-١١ كبح المحركات التحريضية:

عند فصل المحرك التحريضي عن الشبكة تتناقص سرعته ببطء، و تطول فترة إيقافه بسبب وجود كتل متحركة كبيرة تزيد من عزم عطالته. تستطيع المحركات التحريضية العمل في ثلاث حالات للكبح و هي:

١- الكبح بإعادة التوليد (Regenerative-Braking)

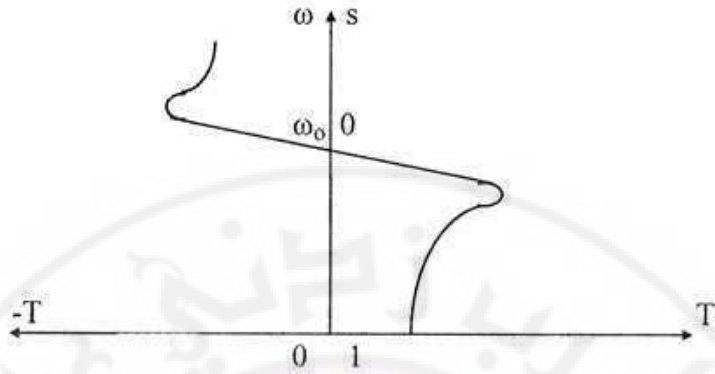
٢- الكبح الديناميكي (Dynamic-Braking)

٣- الكبح بالتضاد - بعكس التيار (Counter-Current Braking)

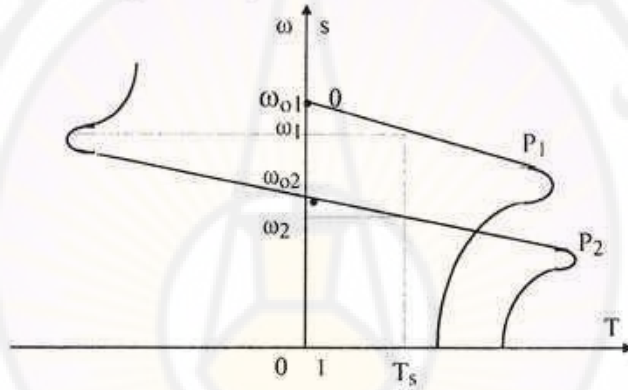
٥-١١-١ الكبح بإعادة التوليد:

تتحقق هذه الحالة عند تدوير محور المحرك التحريضي بواسطة قوى خارجية بسرعة تفوق سرعته التزامنية، حيث يبقى المحرك موصولاً إلى الشبكة، و بالتالي يعمل المحرك بانزلاق سالب ($s < 0$)، و يصبح في حالة العمل كمولد تحريضي يقوم بتحويل الطاقة الميكانيكية المقدمة إلى محوره عن طريق القوى الخارجية إلى طاقة كهربائية، و يعيدها إلى شبكة التغذية التي تقوم بدورها بتغطية المفاقد الردية في ثابت المحرك استناداً إلى مبدأ عمل المولدات التحريضية. و كما هو مبين في الشكل (5-15) فإن المحرك ينتقل للعمل على امتداد مميزاته في الربع الثاني استناداً إلى معادلة المميزات الميكانيكية للمحرك التحريضي في حالة العمل كمولد.

وعملياً تتحقق هذه الحالة عند إنزال حمل يعطي تحت تأثير ثقله سرعة دورانية أكبر من سرعته التزامنية، و لكن الحالة الأكثر تطبيقاً هي حالة التخفيض المفاجئ لسرعة المحرك بواسطة تغيير عدد الأقطاب مثلاً، كما في المحركات التي تدير آلات الرفع و آلات قطع المعادن، حيث يتم تخفيض سرعتها بزيادة عدد أزواج الأقطاب و عندها نلاحظ أن المحرك انتقل مباشرة للعمل على امتداد المميزات الجديدة له في الربع الثاني، و تبدأ سرعته بالانخفاض حتى تستقر عند نقطة تلاقي المميزات الجديدة مع مميزات عزم الحموله في الربع الأول. و كما هو مبين في الشكل (5-16) فإنه خلال فترة عمل المحرك في الربع الثاني يكون في حالة الكبح بإعادة التوليد.



الشكل (15-5) المميزات الميكانيكية في حالة الكبح بإعادة التوليد

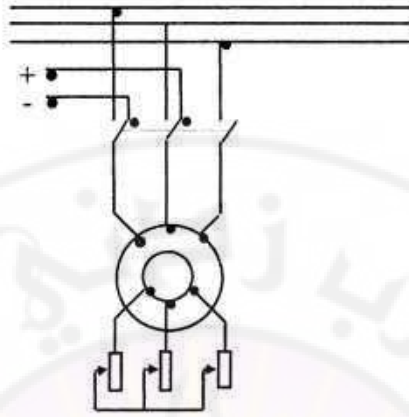


الشكل (16-5)

إذن يتم الانتقال إلى السرعة الجديدة خلال الحالة العابرة بالسرعة المطلوبة دون مفاقيد حرارية مع الاستفادة من الطاقة الكهربائية حيث تعاد إلى شبكة التغذية ، و بالتالي يعد هذا النوع من الكبح أكثر الأنواع اقتصادية .

٢-١١-٥ الكبح الديناميكي:

يتم الكبح الديناميكي بقطع التغذية عن المحرك التحريضي، و تغذية ملفات الثابت بتيار مستمر من منبع خارجي ، و وصل ملفات الدائر بمقاومات خارجية كبيرة. كما هو مبين في الشكل (17-5) .



الشكل (17-5)

يعود السبب في ضرورة الوصل إلى منبع التيار المستمر إلى ما يلي:
عند فصل ملف الثابت تماماً عن الشبكة الكهربائية أثناء دوران المحرك، ووصله إلى منبع التيار المستمر، فإن التيار المستمر المار في ملف الثابت يولد سيالة مغناطيسية ثابتة، وليست دورانية، وبما أن المحرك يكون في حالة الدوران، فإن هذه السيالة تعرض في ملف الدائر قوة محرّكة كهربائية تنشئ بدورها تياراً ينتج عن تأثيره المتبادل مع السيالة المغناطيسية الثابتة عزم كايح، حيث يصبح المحرك في حالة العمل كمولد أقطاب غير بارزة و ذا تردد متغير. أما حمل هذا المولد فيكون عبارة عن مقاومات خارجية موصولة مع ملف الدائر إذا كان ذا الدائر الملفوف أو مقاومة الدائر فقط إذا كان ذا القفص السنجابي حيث تحول الطاقة الكهربائية المنولدة إلى طاقة حرارية.

بما أنه في حالة الكبح الديناميكي يتم وصل ملف الثابت إلى منبع تيار مستمر، فيكفي أن يكون جهد هذا المنبع صغيراً لنشوء تيار كاف لتوليد السيالة المغناطيسية اللازمة وذلك نظراً لصغر قيمة المقاومة الأومية في ملف الثابت.

إذا يتطلب الكبح الديناميكي منبعاً للتيار المستمر، يمكن الحصول عليه من تقويم التيار المتناوب عبر مقوم جسري من أنصاف النواقل متصل مع شبكة التيار المتناوب عبر محولة خافضة للجهد. كما يمكن تحقيق ذلك بالاستعاضة عن هذا المنبع باستعمال

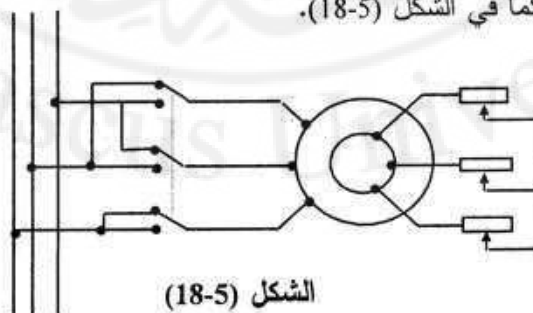
مكتثفات توصل بشكل مثثلي مع ملفات الثابت، بالتالي يتعلق عزم الكبج بسعات هذه المكتثفات، ويتم الفصل و الوصل مع المكتثفات آلياً.

٥-١١-٣ الكبج بالتضاد (بعكس التيار):

تستعمل حالة الكبج على التضاد بصورة واسعة في المناجم ،و ذلك لإنزال حمولات تصل إلى عدة أطنان ،حيث تستخدم محركات تحريضية ثلاثية الطور تتصل مع شبكة التغذية بحيث يدور الحقل الكهرومغناطيسي في الثغرة الهوائية بعكس اتجاه دوران الدائر الذي يتم بواسطة الحمولة نفسها ،أي بواسطة القوى الخارجية.

و تجدر الإشارة إلى أن قيمة التيار في ملف الدائر تساوي من (5-6) أضعاف التيار الاسمي ،و ذلك عندما يكون الانزلاق مساوياً للواحد، و تزداد هذه القيمة كلما ازدادت قيمة الانزلاق، بينما تقل قيمة العزم مع ازدياد الانزلاق عن الواحد، و بالتالي لا يستطيع المحرك العمل على حمولات كبيرة نسبياً .أضف إلى ذلك أن المحرك في هذه الحالة يعمل على الجزء اللاخطي من المميزات، و هو الجزء الذي يعتبر غير مستقر . لذلك من أجل انقاص قيمة التيار في هذه الحالة، و تحقيق إمكانية العمل على القسم الخطي من المميزات تضاف إلى ملف الدائر مقاومة أومية تسمى بمقاومة الكبج على التضاد.

تستخدم أيضاً حالة الكبج على التضاد لإيقاف المحرك ،و ذلك بواسطة تغيير وصل طورين من أطوار ملف الثابت الثلاث مع الشبكة ،حيث يتم إنشاء حقل كهرومغناطيسي يدور في عكس اتجاه دورانه السابق، وتضاف أيضاً في هذه الحالة مقاومة الكبج على التضاد إلى ملف الدائر كما في الشكل (5-18).



الشكل (5-18)

تطبيق (5-1):

محرك تحريضي ثلاثي الطور ذو القفص السنجابي له المواصفات الاسمية التالية:

$$P_n = 60 \text{ [KW]} \quad n_n = 577 \text{ [rpm]} \quad V_n = 380 \text{ [V]}$$

نسبة التحويل $k_z = 1.43$ نوع التوصيل نجمي - نجمي ومن النشرة الفنية الخاصة لهذا المحرك نجد:

$$\begin{aligned} R_1 &= 0.0549 \text{ } [\Omega] & R_2 &= 0.0332 \text{ } [\Omega] \\ X_1 &= 0.16 \text{ } [\Omega] & X_2 &= 0.0704 \text{ } [\Omega] \end{aligned}$$

و المطلوب إنشاء المميمة الميكانيكية الطبيعية لهذا المحرك.

الحل:

نحسب قيم المقاومات و المفاعلات منسوبة إلى الطرف الأولي:

$$R'_2 = k_z^2 R_2 = 0.0332 \times 1.43^2 = 0.0677 [\Omega]$$

$$X'_2 = k_z^2 X_2 = 0.0704 \times 1.43^2 = 0.1437 [\Omega]$$

السرعة الزاوية الاسمية لدوران الساحة:

$$\omega_1 = \frac{2\pi n_s}{60} = \frac{2\pi \times 600}{60} = 62.8 \text{ [rad / sec.]}$$

لنحدد النقاط المميمة لهذا المنحني:

$$T = 0, s = 0 \quad -1$$

$$T_{\max}, s_{cr} \quad -2$$

$$s_{cr} = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}} = \frac{0.0677}{\sqrt{(0.0549)^2 + (0.16 + 0.1437)^2}} = 0.22$$

$$T_{cr} = \frac{3V_1^2}{2\omega_1 [R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}]}$$

$$T_{cr} = \frac{3(380/\sqrt{3})^2}{2 \times 62.8 \times [0.0549 + \sqrt{(0.0549)^2 + (0.16 + 0.1437)^2}]}$$

$$T_{cr} = 3180 \text{ [N.m]}$$

$$T_n, s_n \quad -٣$$

$$s_n = \frac{\omega_l - \omega}{\omega_l} = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{600 - 577}{600} = 0.038$$

$$T_n = \frac{3}{\omega_l s_n} \frac{V_1^2 R_2'}{[(R_1 + \frac{R_2'}{s_n})^2 + (X_1 + X_2')^2]}$$

$$T_n = \frac{3}{62.8 \times 0.038} \times \frac{(\frac{380}{\sqrt{3}})^2 \times 0.0677}{[(0.0549 + \frac{0.0677}{0.038})^2 + (0.16 + 0.1437)^2]}$$

$$T_n = 1255 [N.m]$$

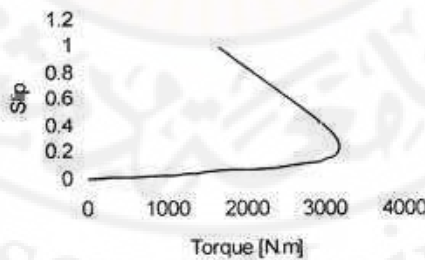
$$T = T_{sl}, s = 1 \quad -٤$$

$$T_{sl} = \frac{3}{\omega_l \times 1} \frac{V_1^2 R_2'}{[(R_1 + \frac{R_2'}{1})^2 + (x_1 + X_2')^2]}$$

$$T_{sl} = \frac{3}{62.8 \times 1} \times \frac{(\frac{380}{\sqrt{3}})^2 \times 0.0677}{[(0.0549 + 0.0677)^2 + (0.16 + 0.1437)^2]}$$

$$T_{sl} = 1655 [N.m]$$

و يبين الشكل (19-5) المميّزة الميكانيكية لهذا المحرك.



الشكل (19-5)

تطبيق (5-2) :

محرك تحريضي ثلاثي الطور ذو الدائر الملفوف، معطياته الفنية الاسمية:

$$\begin{array}{ll}
 P_n = 40 & [\text{KW}] \\
 V_{in} = 3 \times 380 & [\text{V}], \quad f = 50 \quad [\text{Hz}] \\
 n_n = 955 & [\text{rpm}]
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{ll}
 E_2 = 390 & [\text{V}] \\
 I_{2n} = 60 & [\text{A}] \\
 \lambda = 2.2 &
 \end{array}$$

المطلوب:

- ١- ارسم المنحني المميز الميكانيكي الطبيعي الكامل.
- ٢- احسب قيمة المقاومة الخارجية اللازم إضافتها إلى دائرة الدائر لتصبح سرعة دوران المحرك (n=350 rpm) تحت الحمولة المساوية (T=0.75 T_n). ارسم في هذه الحالة المنحني الميكانيكي الاصطناعي.

الحل:

- ١- لرسم المنحني المميز الطبيعي، يلزمنا معرفة أربع نقاط مختلفة على الأقل، تقابل النقطة الأولى عمل المحرك على فراغ، أي عند (T=0, n=n_s, s=0)، و تقابل النقطة الثانية عمل المحرك الاسمي، أي عند (T=T_n, n=n_n, s=s_n) حيث أن الانزلاق الاسمي يساوي إلى:

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s} = \frac{1000 - 955}{1000} = 0.046$$

و العزم الاسمي:

$$T_n = 0.973 \frac{P_n}{n_n} = 0.973 \frac{40 \times 10^3}{955} = 40.7 [\text{kgm}]$$

- تقابل النقطة الثالثة عمل المحرك الحرج، أي عند (T=T_{cr}, n=n_{cr}, s=s_{cr})، باعتبار أن العزم الحرج يساوي إلى:

$$T_{cr} = \lambda T_n = 2.2 \times 40.7 = 89.54 [\text{kgm}]$$

و الانزلاق الحرج:

$$s_{cr} = s_n (\lambda \pm \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 0.198$$

يقابل هذا الانزلاق الحرج السرعة الحرجة :

$$n_{cr} = n_s (1 - s_{cr}) = 1000 (1 - 0.198) = 802 [\text{rpm}]$$

و تقابل النقطة الرابعة عمل المحرك عند الإقلاع، أي $(T=T_{st}, n=0, s=1)$ ، باعتبار أن عزم الإقلاع يساوي:

$$T_{st} = \frac{2 T_{cr}}{\frac{1}{s_{cr}} + \frac{s_{cr}}{1}} = \frac{2 \times 89.54}{\frac{1}{0.198} + \frac{0.198}{1}} = 34.5 \text{ [kgm]}$$

يمكننا بواسطة هذه النقاط الأربعة رسم المنحني الميكانيكي الطبيعي كما في الشكل (5-20).

٢- لحساب المقاومة الخارجية اللازم إضافتها إلى ملف الدائر نحسب أولاً معادلة المنحني الميكانيكي الاصطناعي الموافق لهذه الحالة، المار من النقطة التي إحداثيها $(T=0.75 T_n, n=350)$

الانزلاق في هذه النقطة:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1000 - 350}{1000} = 0.65$$

و العزم في هذه النقطة:

$$T = 0.75 T_n = 0.75 \times 40.7 = 30.5 \text{ [kgm]}$$

بعد تبديل هذه القيم في معادلة المنحني الاصطناعي نحصل على:

$$30.5 = \frac{2 \times 89.54}{\frac{0.65}{s_{cr}^*} + \frac{s_{cr}^*}{0.65}}$$

نستنتج من هذه المعادلة الانزلاق الحرج الاصطناعي:

$$s_{cr}^* = 3.68$$

نحسب الآن مقاومة ملف الدائر الداخلية:

$$R_2 = \frac{E_2 s_n}{\sqrt{3} I_{2n}} = \frac{390 \times 0.046}{\sqrt{3} \times 60} = 0.156 [\Omega]$$

نحسب المقاومة الخارجية اللازم إضافتها:

$$\frac{s_{cr}^*}{s_{cr}} = \frac{R_2 + R}{R_2}$$

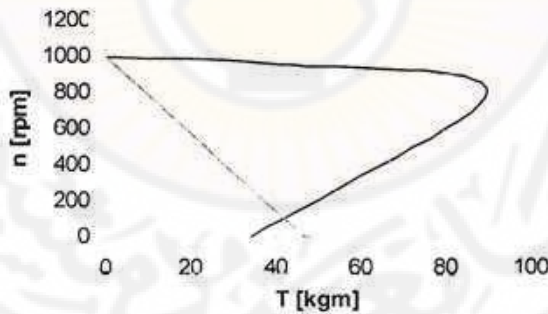
$$\frac{3.68}{0.198} = \frac{0.156 + R}{0.156}$$

و منها ينتج : $R = 2.74 [\Omega]$

لرسم هذا المنحني الاصطناعي تكفي ثلاث نقاط فقط، لأن النقطة المقابلة للعزم الحرج تقع خارج الربع الأول من محاور الإحداثيات. النقطة الأولى تقابل عمل المحرك على فراغ، و النقطة الثانية معطاة $(T=0.75T_n, n=350 \text{ rpm})$ ، و الثالثة تقابل عمل إقلاع المحرك $(T=T_{st}, n=0, s=1)$ ، باعتبار أن عزم الإقلاع للمنحني الاصطناعي يساوي:

$$T_{st} = \frac{2 T_{cr}}{\frac{1}{s_{cr}^*} + \frac{s_{cr}^*}{1}} = \frac{2 \times 89.54}{\frac{1}{3.68} + \frac{3.68}{1}} = 47 [\text{kgm}]$$

هذه النقاط الثلاث تعين المنحني الميكانيكي الاصطناعي كما هو مبين في الشكل (20-5).



الشكل (20-5)

تطبيق (5-3) :

محرك تحريضي ثلاثي الطور ذو الدائر الملفوف، معطياته الفنية الاسمية:

$P_n = 86$	[kw]	$E_2 = 253$	[V]
$V_{ln} = 220/380$	[V]	$I_{2n} = 200$	[A]
$n_n = 577$	[rpm]	$x_1 = 0.16$	[Ω]
$f = 50$	[Hz]	$x_2 = 0.0702$	[Ω]

- ١- ارسم المنحني المميز الطبيعي للمحرك إذا علمت أن توصيل ملفات الثابت نجمي.
- ٢- احسب قيمة المقاومة اللازم إضافتها إلى دائرة الدائر لكي يصبح عزم الإقلاع أعظمياً.

الحل:

نلاحظ من معطيات المحرك الاسمية أن التوتر الخطي (220) فولت يقابل ربط ملفات الثابت بشكل مثلثي و (380) فولت بشكل نجمي.

يمكننا حساب الانزلاق الحرج من معطيات المسألة أي من عناصر المحرك ، نحسب أولاً الانزلاق الاسمي، بعد تحديد السرعة التوافقية القريبة من السرعة الاسمية:

$$s_n = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{600 - 577}{600} = 0.038$$

مقاومة ملف الدائر الداخلية:

$$R_2 = \frac{E_2 s_n}{\sqrt{3} I_{2n}} = \frac{253 \times 0.038}{\sqrt{3} \times 200} = 0.0277 [\Omega]$$

عامل تحويل القوة المحركة الكهربائية بين الثابت و الدائر يساوي إلى عامل تحويل التيار لتساوي عدد الأطوار في الثابت و الدائر الملفوف ينتج أن:

$$k_e = k_i = \frac{V_{ln}}{E_2} = \frac{380}{253} = 1.5$$

تنسب قيم عناصر الدائر إلى ملف الثابت:

$$X'_2 = k_e k_i x_2 = (1.5)^2 \times 0.0702 = 0.162 [\Omega]$$

$$R'_2 = k_e k_i R_2 = (1.5)^2 \times 0.0277 = 0.0623 [\Omega]$$

نحسب الانزلاق الحرج:

$$s_{cr} = \frac{R'_2}{X_1 + X'_2} = \frac{0.0623}{0.16 + 0.162} = 0.1935$$

و يكون العزم الحرج:

$$T_{cr} = \frac{3V_1^2}{2\omega_1 (X_1 + X'_2)} = \frac{3 \times \left(\frac{380}{\sqrt{3}}\right)^2}{2 \times 2\pi \times \frac{600}{60} \times (0.16 + 0.162)}$$

$$T_{cr} = 3570 \text{ [Nm]}$$

$$T_{cr} = 364 \text{ [kgm]}$$

العزم الاسمي للمحرك:

$$T_n = 0.973 \frac{P_n}{n_n} = 0.973 \frac{86 \times 10^3}{577} = 145 \text{ [kgm]}$$

السرعة الحرجة:

$$n_{cr} = n_s (1 - s_{cr}) = 600 \times (1 - 0.1935) = 484 \text{ [rpm]}$$

و يكون عزم الإقلاع:

$$T_{st} = \frac{2 T_{cr}}{\frac{s_{cr}}{1} + \frac{1}{s_{cr}}} = \frac{2 \times 364}{\frac{0.1935}{1} + \frac{1}{0.1935}} = 135.8 \text{ [kgm]}$$

و بهذا تكون النقاط الأربعة محددة بالقيم التالية:

$$1) \quad s = 0$$

$$n_s = 600 \text{ [rpm]}$$

$$T = 0$$

$$2) \quad s = 0.038$$

$$n_n = 577 \text{ [rpm]}$$

$$T_n = 145 \text{ [kgm]}$$

$$3) \quad s = 0.1935$$

$$n_{cr} = 484 \text{ [rpm]}$$

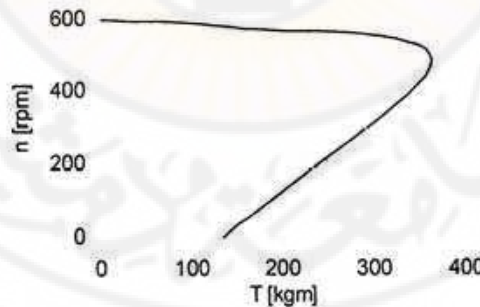
$$T_{cr} = 364 \text{ [kgm]}$$

$$4) \quad s = 1$$

$$n = 0$$

$$T_{st} = 135.8 \text{ [kgm]}$$

و الشكل (21-5) يوضح المنحني الميكانيكي الطبيعي.



الشكل (21-5)

٢- نحسب المقاومة الخارجية اللازم إضافتها إلى دائرة الدائر ليصبح عزم الإقلاع أعظمياً:

$$R = \frac{R_2}{s_{cr}} - R_2 = \frac{0.0277}{0.1935} - 0.0277 = 0.115 [\Omega]$$

تطبيق (5-4)

محرك تحريضي ثلاثي الطور ذو الدائر الملفوف معطياته الاسمية:

$$P_n = 1.7 \text{ [kw]}$$

$$E_2 = 57 \text{ [V]}$$

$$\lambda = 2$$

$$n_n = 950 \text{ [rpm]}$$

$$I_{2n} = 20.2 \text{ [A]}$$

احسب قيمة المقاومة الخارجية اللازم ربطها مع ملف الدائر لكي يصبح عزم الإقلاع مساوياً إلى $(T_{st} = 3 \text{ kgm})$.

الحل:

نحسب أولاً الانزلاق الاسمي للمحرك:

$$s_n = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1000 - 950}{1000} = 0.05$$

مقاومة ملف الدائر الداخلية:

$$R_2 = \frac{E_2 s_n}{\sqrt{3} I_{2n}} = \frac{57 \times 0.05}{\sqrt{3} \times 20.2} = 0.0815 [\Omega]$$

الانزلاق الحرج:

$$s_{cr} = 0.05 (2 + \sqrt{4 - 1}) = 0.1866$$

عزم المحرك الاسمي:

$$T_n = 0.973 \frac{1.7 \times 10^3}{950} = 1.74 \text{ [kgm]}$$

عزم المحرك الحرج:

$$T_{cr} = 2 \times 1.74 = 3.48 \text{ [kgm]}$$

تصبح معادلة المنحنى الاصطناعي الموافق لعزم الإقلاع $(T_{st} = 3 \text{ kgm})$:

$$3 = \frac{2 \times 3.48}{\frac{1}{s_{cr}^*} + \frac{s_{cr}}{1}}$$

نستنتج من ذلك الانزلاق الحرج الجديد:

$$s_{cr}^* = 0.57$$

حساب المقاومة الخارجية المضافة للدوائر:

$$\frac{0.57}{0.1866} = \frac{0.0815 + R}{0.0815}$$

ينتج من ذلك:

$$R = 0.167 [\Omega]$$

تطبيق (5-5):

محرك تحريضي ثلاثي الطور ذو الدائر الملفوف مواصفاته الفنية الاسمية:

$P_n = 2.8 \text{ [kw]}$	$\cos \varphi_n = 0.74$
$V_{ln} = 220/380 \text{ [V]} / 50 \text{ [Hz]}$	$E_2 = 89 \text{ [V]}$
$I_{ln} = 13/ 7.9 \text{ [A]}, \Delta/Y$	$I_{2n} = 22 \text{ [A]}$
$n_n = 920 \text{ [rpm]}$	$\lambda = 1.8$

المطلوب:

- ١- مردود المحرك الاسمي و الضياعات الاسمية.
- ٢- عزم و انزلاق المحرك الاسمي.
- ٣- معادلة المنحني الميكانيكي الطبيعي.
- ٤- عزم الإقلاع للمنحني الطبيعي.
- ٥- المقاومة الخارجية اللازم إضافتها لملف الدائر ليصبح عزم الإقلاع أعظمياً.
- ٦- ارسم المنحني الميكانيكي الطبيعي و الاصطناعي بعد إضافة المقاومة المحسوبة في الفقرة (٥).

الحل:

١- يعطى مردود المحرك الاسمي بالعلاقة العامة:

$$\eta_n = \frac{P_n}{P_{ln}} = \frac{2.8 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 220 \times 13 \times 0.74} = 0.78$$

تعطى الضياعات الاسمية بالعلاقة:

$$\Delta P = P_{ln} - P_n = \sqrt{3} \times 380 \times 7.9 \times 0.74 - 2.8 \times 10^3 = 850 \text{ [w]}$$

٢- عزم المحرك الاسمي:

$$T_n = 0.973 \frac{P_n}{n_n} = 0.973 \frac{2.8 \times 10^3}{920} = 2.96 \text{ [kgm]}$$

انزلاق المحرك الاسمي:

$$s_n = \frac{1000 - 920}{1000} = 0.08$$

٣- لحساب معادلة المنحني الميكانيكي الطبيعي، يكفي حساب الانزلاق و العزم الحرجين:

الانزلاق الحرج:

$$s_{cr} = 0.08 (1.8 + \sqrt{(1.8)^2 - 1}) = 0.264$$

العزم الحرج:

$$T_{cr} = \lambda T_n = 1.8 \times 2.96 = 5.23 \text{ [kgm]}$$

تصبح معادلة المنحني الميكانيكي الطبيعي:

$$T = \frac{10.66}{\frac{s}{0.264} + \frac{0.264}{s}}$$

٤- عزم الإقلاع للمنحني الطبيعي:

$$T_{st} = \frac{10.66}{\frac{1}{0.264} + \frac{0.264}{1}} = 2.63 \text{ [kgm]}$$

٥- حساب المقاومة الخارجية اللازم إضافتها لجعل عزم الإقلاع أعظمياً:

$$R = \frac{R_2}{s_{cr}} - R_2$$

نحسب أولاً مقاومة ملف الدائر الداخلية:

$$R_2 = \frac{89 \times 0.08}{\sqrt{3} \times 22} = 0.187 \text{ } [\Omega]$$

و منها نجد:

$$R = \frac{0.187}{0.264} - 0.187 = 0.522 \text{ } [\Omega]$$

٦- نترك للطالب رسم المنحني الطبيعي و الاصطناعي حسب المعطيات السابقة.

الفصل السادس
التحكم في تنظيم سرعة دوران المحركات
التحريضية

**SPEED CONTROL OF
INDUCTION MOTORS**

٦-١ مقدمة:

لا تقتصر وظيفة المحرك التحريضي على تحريك الآليات الميكانيكية المربوطة معها، بل يطلب منها في أغلب الأحيان تنظيم سرعتها لتحقيق إنتاج اقتصادي جيد و شروط تكنولوجية ملائمة لا غنى عنها. على سبيل المثال: تحدد نعومة و جودة خراطة المعادن بسرعتها، و لكل مادة و نوع سرعتها الخاصة.

يتم تغيير سرعة الدوران بعدة طرق ميكانيكية، إلا أن طريقة تنظيم سرعة المحرك القائد نفسه هي من أنجع الطرق. لذا ينبغي عند تقييم خصائص المحركات التحريضية العملية الأخذ بعين الاعتبار مميزات التنظيم و هي:

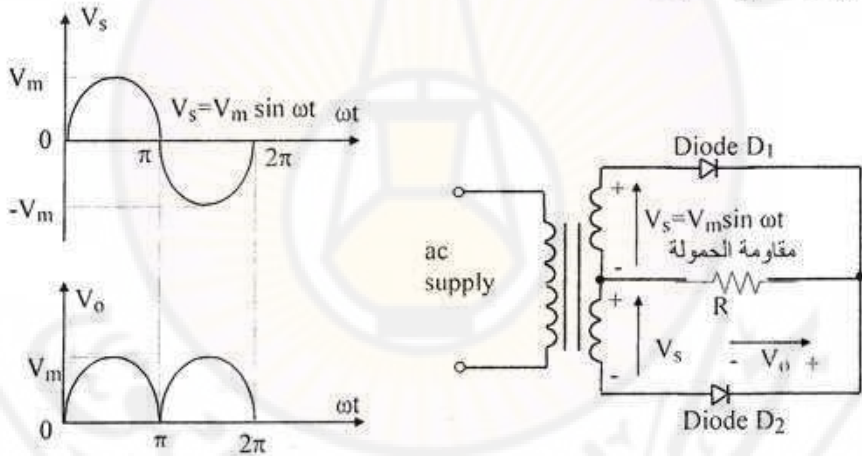
- ١- إمكانية تنظيم سرعة الدوران .
 - ٢- مجال تنظيم سرعة الدوران .
 - ٣- نعومة التنظيم .
 - ٤- اقتصادية التنظيم و بساطته .
 - ٥- أمانة و استقرار تنظيم سرعة الدوران.
- إن السرعة و العزم للمحركات التحريضية يمكن تنظيمها باتباع إحدى الوسائل التالية:
- ١- التحكم بجهد الثابت .
 - ٢- التحكم بجهد الدوار .
 - ٣- التحكم بالتردد .
 - ٤- التحكم بجهد الثابت و التردد .
 - ٥- التحكم بتيار الثابت .
 - ٦- التحكم بالجهد و التيار و التردد.

٢-٦ أنواع الدارات الإلكترونية المستخدمة في تنظيم سرعة دوران المحركات التحريضية:

إن عملية تحويل الطاقة الكهربائية من شكل إلى آخر ضروري جداً، إن مبدلات القدرة الساكنة تسمح بالقيام بعمليات التحويل هذه. و فيما يلي نورد بعض الدارات الإلكترونية المستخدمة لهذا الغرض:

١- دائرة التقويم (Diode rectifiers) :

تقوم دائرة التقويم المكونة من الديود بتحويل الجهد المتناوب إلى جهد مستمر و ثابت، كما هو موضح في الشكل (1-6) ، إن الجهد الداخل إلى دائرة التقويم يمكن أن يكون أحادي أو ثلاثي الطور



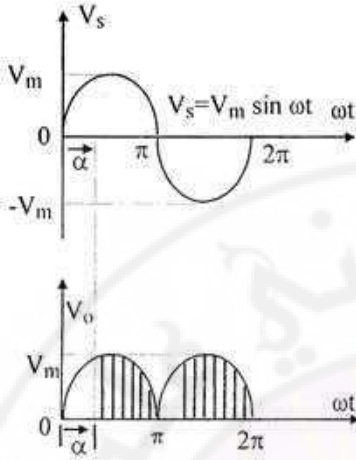
(ب) شكل موجة الجهد

(أ) مخطط الدارة

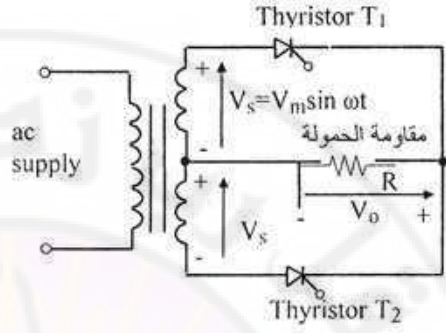
الشكل (1-6) دائرة تقويم أحادية الطور غير مقادة

٢- دائرة تقويم مقادة الجهد: (Controlled Rectifiers)

و هي عبارة عن مبدلة أحادية الطور تحوي على ثايرستورين موصلين ، كما في الشكل (2-6) . يمكن التحكم في معدل جهد الخرج عن طريق زمن التوصيل للثايرستورات أو تغيير تأخير زاوية القدح (α) ، و يمكن أن يكون الدخل أحادي أو ثلاثي الطور .



ب (شكل موجة الجهد

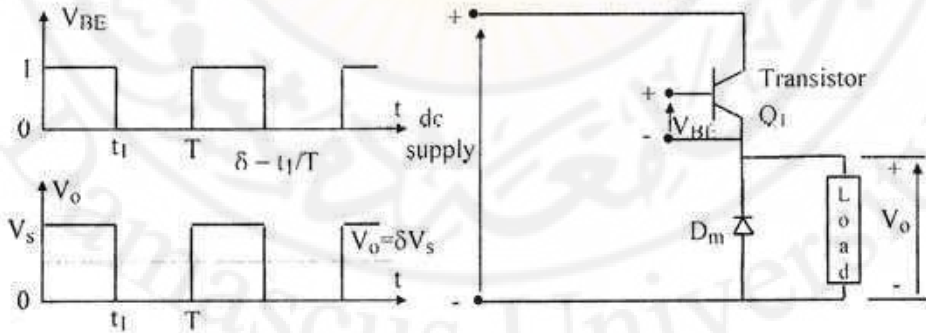


(أ) مخطط الدارة

الشكل (2-6) مبدلة تحويل التيار المتناوب إلى تيار مستمر أحادية الطور مقادة

٣- مبدلة De-Dc :

أو مقطع التيار المستمر (chopper Cuck)، أو مفتاح تنظيم (Switching regulator)، كما هو موضح في الشكل (6-3). يمكن التحكم بمعدل جهد الخرج عن طريق تغيير زمن التوصيل (t) للترانزيستور (\$Q_1\$)، إذا كان T يمثل فترة التقطيع، فإن \$t_1 = \delta T\$ وتسمى بـ دورة الحمولة للمقطع.



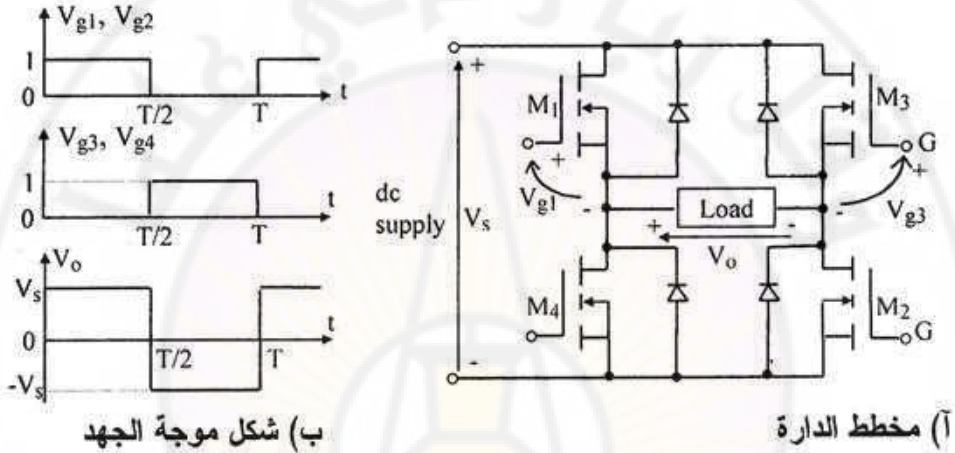
(أ) مخطط الدارة

ب (شكل موجة الجهد

الشكل (3-6) مبدلة De-dc

٤- المعرج أو مبدلة DC-AC :

و تقوم بتحويل التيار المستمر إلى تيار متناوب، كما هو موضح في الشكل (4-6)، قالبية أحادية الطور. إذا تم توصيل الترانزيستورات M_1 و M_2 لفترة نصف موجة و الترانزيستورات M_3 و M_4 من أجل النصف الآخر يكون جهد الخرج متناوباً.



الشكل (4-6) مبدلة dc-ac أحادية الطور

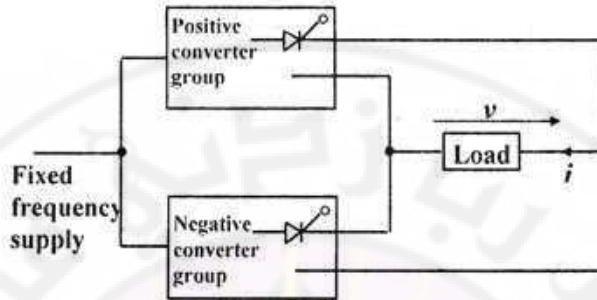
٥- المبدلات الترددية (Cycloconverters)

إن منظمات الجهد المتناوب يمكن أن تعطي قيمة متغيرة لجهد الخرج، و لكن تردد جهد الخرج ثابت القيمة بالإضافة إلى القيم العالية للتوافقيات فيه و بشكل خاص عندما يكون تردد جهد الخرج منخفض.

يمكن الحصول على جهد خرج متغير عند قيم متغيرة للتردد، و ذلك من خلال عملية تحويل ثنائية المراحل. و ذلك أولاً من خلال تغيير قيمة ثابتة لـ ac إلى قيمة متغيرة من dc (على سبيل المثال المقوم مضبوط الجهد)، و من ثم dc متغير إلى ac متغير عند تردد متغير (قالبية).

المبدلة الترددية تعتبر مبدلة مباشرة للتردد و التي تقوم بتحويل استطاعة التيار المتناوب عند تردد واحد إلى قدرة متناوبة عند قيم أخرى للتردد. يمكن عذ المبدلة الترددية

مكونة من مبدلتين ثايرستوريّتين موصولتين بشكل متخالف (back to back)، كما هو مبين في الشكل (5-6) .



الشكل (5-6) الشكل العام للمبدلة الترددية

٦-٣ الطرق المستخدمة في تنظيم سرعة المحركات التحريضية:

٦-٣-١ تغيير عدد الأقطاب في كل من الثابت و الدوار:

Change in number of poles of stator and rotor

هذه الطريقة قديمة، و تعود إلى أواخر القرن الماضي، و تعتمد على أن عدد أقطاب ملفات الثابت لمحرك تحريضي يمكن تغييرها بسهولة بنسبة 2 إلى 1 بتغييرات بسيطة فقط في توصيلات الوشيعه، و من الممكن تصميم ملفات الثابت لأي محرك تحريضي، بحيث أن عدد الأقطاب يمكن تغييرها بواسطة قواطع يدوية أو آلية. إن عدد الأقطاب في ملفات دوار المحرك ذي القفص السنجابي يساوي نفس عدد الأقطاب في ملفات الثابت بسبب مبدأ التحريض.

و لذلك فإن تغيير عدد أقطاب ملفات الثابت في محرك تحريضي ذي القفص السنجابي بواسطة طرق بسيطة مناسبة، سيغير بشكل آلي أقطاب الدوار ذي القفص السنجابي. بتغيير عدد الأقطاب ينتج تشغيل جيد نسبياً لأن عدد الأقطاب قد تغير في كل من الثابت و الدوار، و المحركات التي تصمم بحيث يمكن تغيير عدد أقطابها بتغيير التوصيلات

الخارجية تسمى محركات متعددة السرعات، و المحركات متعددة السرعات تصنع ثلاثية الطور و أحادية الطور. وتكون بسرعتين أو بأربع سرعات.

بتغيير الأقطاب، و بسبب التعقيدات في تصميم الثابت و في التوصيلات فقد حدد انتاج المحركات ذات القفص السنجابي إلى أربع سرعات على الأكثر.

أما حالة المحركات ذات الدوار الملفوف أو المحركات المتوائمة، فإن التحكم بالسرعة بواسطة تغيير عدد الأقطاب لاتعد طريقة عملية، حيث أن عدد الأقطاب للثابت و الدوار في هذه الآلات تلف بشكل مستقل عن بعضها. في حالة المحرك المتوائمة، إذا أريد تغيير عدد الأقطاب في كل من الثابت و الدوار بنفس الوقت، فإن ذلك يتطلب حلقات انزلاق إضافية و ملفات تهيج معقدة. و في حالة المحرك التحريضي ذي الدوار الملفوف، فإن عدد الأقطاب في ملف الدوار يعتمد على تصميم معين يستخدم في ملف الدوار، و يكون تغيير عدد الأقطاب في الثابت بواسطة طرق توصيل تتضمن توصيلاً متكافئاً لملفات الدوار لتغيير عدد الأقطاب في كل من الثابت و الدوار بنفس الوقت.

لذلك فإن استخدام طريقة تغيير عدد الأقطاب للتحكم بالسرعة يقتصر فقط على المحركات التحريضية ذات القفص السنجابي، و كطريقة للتحكم بالسرعة يمكن فقط أن تستخدم لإنتاج سرعات ثابتة نسبياً من أجل محركات تحريضية تتغير سرعتها بشكل صغير فقط من العمل على فراغ حتى الحموله الاسمية.

إن طريقة تغيير عدد الأقطاب للتحكم بالسرعة تملك المزايا التالية:

- ١- مردود عال عند أي سرعة محددة.
- ٢- تنظيم جيد للسرعة عند أي سرعة محددة.
- ٣- بساطة التحكم في الحصول على سرعة معينة بتوصيلات يدوية أو آلية.
- ٤- حاكمات للسرعة إضافية غير مكلفة نسبياً.

تستخدم طريقة تغيير عدد الأقطاب بشكل أساسي عندما يكون مطلوب سرعتين أو أربع سرعات ثابتة نسبياً، و تستخدم مثلاً في محركات المثاقب لتتقيب مواد مختلفة السماكات و القساوة و مساوئها الأساسية:

- ١- تتطلب محركاً ذا تصميم خاص، بحيث أن الملفات الضرورية و المرباط تسحب إلى خارج الثابت لتغيير توصيلها وبالتالي تغيير عدد الأقطاب.
- ٢- لا يمكن الحصول على تحكم بالسرعة متدرج و مستمر.

٦-٣-٢ التحكم بجهد الثابت:

تُعطي معادلة العزم في المحرك التحريضي بالعلاقة التالية:

$$T = \frac{3V_1^2 R_2'}{s\omega_1 [(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + (X_1 + X_2')^2]} \quad (6-1)$$

نستنتج من معادلة العزم أنّ العزم يتناسب طردياً مع مربع التوتر المغذى إلى الثابت، و هذا يؤدي إلى أنّ أي تخفيض في جهد الثابت سوف يؤدي إلى تخفيض سرعة المحرك التحريضي.

إذا تم تخفيض الجهد بنسبة (bV_1) فإن معادلة العزم تصبح على النحو التالي:

$$T = \frac{3R_2' (bV_1)^2}{s\omega_1 [(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + (X_1 + X_2')^2]} \quad (6-2)$$

حيث أن:

$$b \leq 1$$

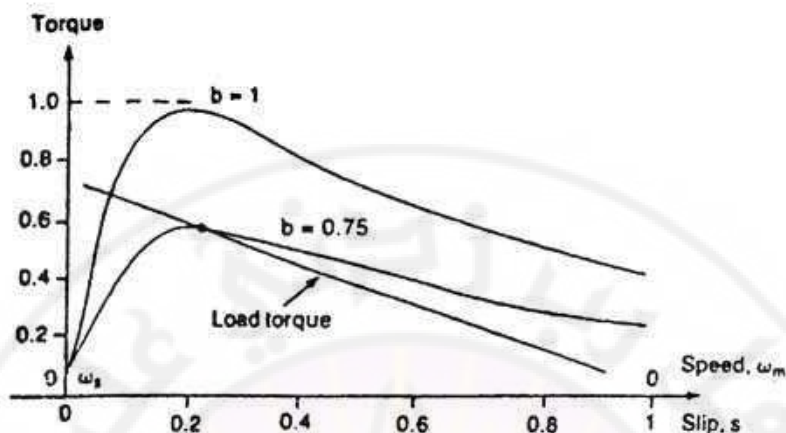
تأخذ منحنيات عزم المحرك بدلالة الانزلاق و لقيم متغيرة من b ، كما هو مبين في الشكل (6-6) . نقاط تقاطع المنحنيات مع خط الحمولة تحدد نقاط التشغيل المستقر .

في أية دائرة مغناطيسية، يكون الجهد المتحرض تابعاً إلى الفيض المغناطيسي و التردد، يمكن التعبير عن الفيض في الفجوة الهوائية بالعلاقة:

$$V_a = bV_1 = k_m \omega \Phi$$

أو:

$$\Phi = \frac{V_a}{k_m \omega} = \frac{bV_1}{k_m \omega} \quad (6-3)$$



الشكل (6-6) مميزات العزم - السرعة مع تغير جهد الثابت

حيث أن:

k_m : ثابت يعتمد على عدد اللفات في ملف الثابت.

نلاحظ من المعادلة (6-3) أن الفيض في الفجوة الهوائية سوف ينخفض وفقاً لأي انخفاض في جهد الثابت. إن مجال تنظيم السرعة يعتمد على الانزلاق الموافق للعزم الأعظمي (s_{cr}) فمن أجل محرك ذو انزلاق منخفض، يكون مجال السرعة ضيقاً جداً. يعتبر هذا النوع من التحكم بالجهد غير مناسب من أجل عزم الحمل الثابت، و لكن هذا النوع يستخدم من أجل الاستخدام الذي يتطلب عزم إقلاع منخفض و مجال ضيق للسرعة عند انزلاق منخفض نسبياً.

يمكننا تغيير الجهد المطبق على ملفات الثابت من خلال ثلاثة طرق:

- ١- منظمات الجهد المتناوب . ac voltage controllers.
- ٢- قالبة مغذية للجهد المستمر المتغير . Voltage-fed variable dc link. Inverters.
- ٣ - قالبات PWM . (Pulse width modulation).

و لكن نظراً لمتطلبات السرعة ذات القيم المحدودة، تستخدم عادةً منظمات الجهد المتناوب لتنظيم الجهد. تعد منظمات الجهد هذه بسيطة جداً، و لكنها تحتوي على توافقيات عالية و عامل استطاعتها منخفض. تستخدم عادة بشكل رئيسي في المجالات

التي تتطلب استطاعات منخفضة ، و حيث أن عزم الإقلاع منخفض، مثل المرواح، النفاخات و مضخات الطرد المركزي.

نلاحظ من الشكل (6-6) أنه عند ثبات العزم المطبق على محور الدائر يتغير الانزلاق بتغير التوتّر، أي يزداد بتناقص التوتّر، وتجدر الإشارة هنا إلى أن هبوط التوتّر يؤثر على عزم المحرك الكلي، و ينقصه بالتالي، و يؤدي إلى الإساءة بخصائصه العملية. لاستخراج علاقة الانزلاق (s) بدلالة التوتّر (V_1) نستعين بالعلاقة التقريبية للعزم:

$$T \approx \frac{2T_{cr}}{s_{cr}} s$$

التي منها نستنتج علاقة الانزلاق بالعزم الحرج:

$$s \approx \frac{T}{T_{cr}} \frac{s_{cr}}{2} \quad (6-4)$$

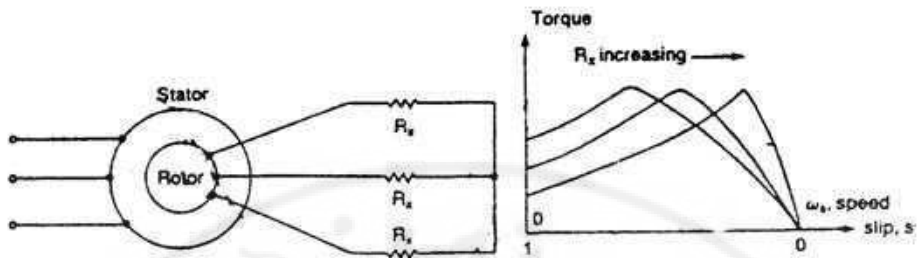
عند ثبات العزم المطبق على محور المحرك، و عند تغير توتّر الثابت (V_1)، يتناسب الانزلاق عكساً مع العزم الحرج، لأن الانزلاق الحرج لا يتعلق بالتوتّر و يظل ثابتاً. و بما أن العزم الحرج يتناسب طردياً مع مربع التوتّر (V_1^2)، يصبح الانزلاق متناسباً مع:

$$s \sim \frac{1}{V_1^2} \quad (6-5)$$

٦-٣-٣ التحكم بجهد الدوار Rotor voltage control

في المحركات التحريضية ذات الدائر الملفوف، و المجهزة بحلقات انزلاق يمكن وصل مقاومة ثلاثية إلى حلقات الانزلاق، كما هو مبين في الشكل (7-6-a). يمكن تغيير العزم من خلال تغيير المقاومة (R_x)، و الشكل (7-6-b) يبين مميزات السرعة-العزم الموافقة للتغيرات في مقاومة الدائر. إن هذه الطريقة تزيد من عزم الإقلاع، غير أنها تحد من تيار الإقلاع. لكن هذه الطريقة غير فعالة، حيب أنه يحدث عدم توازن في التيارات و الجهود إذا كانت المقاومات في دارة الدائر غير متساوية.

تصمم المحركات التحريضية ذات الدائر الملفوف بمقاومة منخفضة للدائر، و بالتالي يكون المردود عالياً ، و يكون الانزلاق عند الحمولة الكاملة منخفضاً.



a- توصيل مقاومة الدائر

b- زيادة قيمة R_s

الشكل (7-6) التحكم بالسرعة من خلال مقاومات المحرك

نلاحظ من الشكل (7-6-b) أن الزيادة في مقاومات الدائر لا تؤثر على قيمة العزم الأعظمي، و لكن تزيد من قيمة الانزلاق الحرج. تستعمل المحركات التحريضية ذات الدائر الملفوف بشكل واسع في الاستخدامات التي تتطلب عزم إقلاع كبير (مرفاع، ونش). بسبب سماحية ملفات الدائر لتغيير مقاومة الدائر فإن الدائر الملفوف يوفر مرونة أكبر للتنظيم، و لكن هذا يزيد الكلفة و الحاجة إلى الصيانة، و ذلك بسبب وجود حلقات الانزلاق و المسفرت.

٦-٣-٤ التحكم بالتردد Frequency Control

يمكن التحكم بالسرعة و العزم للمحرك التحريضي عن طريق تغيير تردد المنبع المغذي. نلاحظ من المعادلة (6-3) أنه عند القيمة الاسمية للجهد و القيمة الاسمية للتردد سيكون الفيض عند القيمة الاسمية. إذا حافظنا على القيمة الاسمية للجهد و خفضنا التردد تحت القيمة الاسمية فإن الفيض المغناطيسي سوف يزداد. وهذا سيؤدي إلى إشباع الفيض في الفجوة الهوائية، و بالتالي ستكون ثوابت المحرك غير صحيحة لتحديد مميزات العزم - السرعة. وعندما ينخفض التردد ستتناقص المفاعلة و يصبح تيار المحرك عالياً جداً. وهذا النوع من التحكم لا يستخدم عادةً.

إذا ازداد التردد فوق القيمة الاسمية سوف تتناقص قيمة الفيض و العزم. إذا سمينا السرعة التوافقية و الموافقة للقيمة الاسمية للتردد بسرعة الأساس ω_b تكون السرعة التوافقية عند أي قيمة أخرى للتردد:

$$\omega_s = \beta \omega_b$$

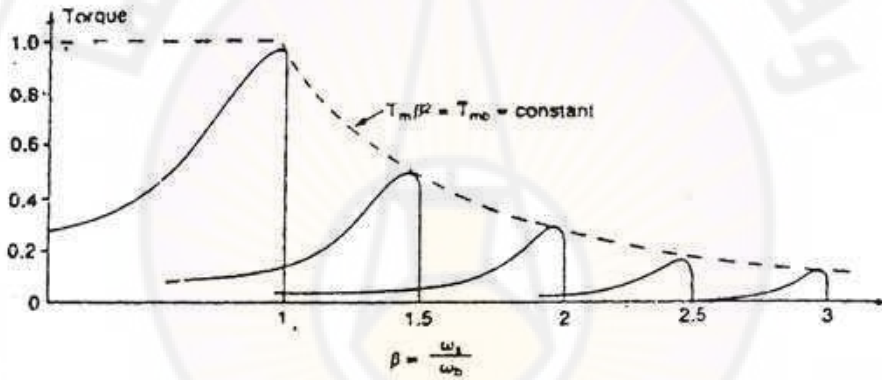
و بالتالي:

$$s = \frac{\beta \omega_b - \omega_m}{\beta \omega_b} = 1 - \frac{\omega_m}{\beta \omega_b} \quad (6-6)$$

و يصبح عزم المحرك

$$T = \frac{3R'_2 V_a^2}{s \beta \omega_b [(R_1 + \frac{R'_2}{s})^2 + (\beta X_1 + \beta X'_2)^2]} \quad (6-7)$$

مميزات العزم-السرعة من أجل قيم متغيرة من β مبينة في الشكل (8-6).



الشكل (8-6) مميزات العزم مع التحكم بالتردد

يمكننا تغيير التردد عند قيمة ثابتة للجهد باستخدام قالبة ثلاثية الطور.

إذا كانت R_1 مهمة فإن العزم الأعظمي عند سرعة الأساس يعطى بالعلاقة:

$$T_{crh} = \frac{3V_a^2}{2\omega_b (X_1 + X'_2)} \quad (6-8)$$

و يكون العزم الأعظمي عند أي تردد آخر

$$T_{cr} = \frac{3}{2\omega_b (x_1 + x'_2)} \left(\frac{V_a}{\beta} \right)^2 \quad (6-9)$$

و الانزلاق الموافق للعزم الأعظمي

$$s_{cr} = \frac{R'_2}{\beta (X_1 + X'_2)} \quad (6-10)$$

بنسبة المعادلة (6-19) إلى المعادلة (6-18) ينتج

$$\frac{T_{cr}}{T_{crb}} = \frac{1}{\beta^2} \quad (6-11)$$

$$T_{cr}\beta^2 = T_{crb} \quad (6-12)$$

من المعادلتين (6-11) و (6-12) يمكن أن نستخلص أن العزم الأعظمي يتناسب عكسياً مع مربع التردد. و أن القيمة $(T_{cr}\beta^2)$ تبقى ثابتة. في هذا النوع من التحكم يمكننا القول إن المحرك يعمل في الحقل الضعيف.

- إذا كانت $\beta > 1$ فإن المحرك يعمل عند جهد طرفي ثابت و بالتالي ينخفض الفيض، و تصبح إمكانية تغيير العزم محدودة.

- إذا كانت $1 < \beta < 1.5$ فإن العلاقة بين β و T_{cr} خطية بشكل تقريبي.

- إذا كانت $\beta < 1$ فإن المحرك يعمل عند فيض ثابت بتخفيض الجهد الطرفي على التوازي مع التردد.

٦-٣-٥ التحكم بالجهد و التردد Voltage and Frequency Control

إذا بقيت نسبة الجهد إلى التردد ثابتة، فإن الفيض المعطى في المعادلة (6-3) يبقى ثابتاً. تشير المعادلة (6-19) إلى أنه يمكن الحفاظ على العزم الأعظمي ثابتاً بشكل تقريبي. عند تردد منخفض فإن الفيض في الفجوة الهوائية ينخفض وفقاً لانخفاض ممانعة الثابت، و بالتالي يزداد الجهد ليحافظ على مستوى العزم. هذا النوع من التحكم يعرف عادةً التحكم بـ فولت/هرتز.

إذا كانت $\omega_s = \beta \omega_b$ ، و نسبة الجهد إلى التردد ثابتة فإن:

$$\frac{V_a}{\omega_s} = d \quad (6-13)$$

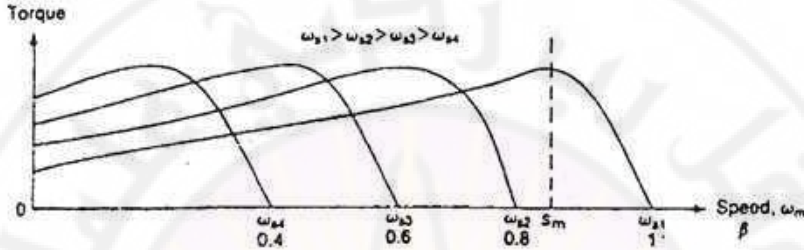
إن النسبة d و التي تحدد من القيمة الاسمية للجهد الطرفي V_l و سرعة الأساس ω_b تعطى بـ:

$$d = \frac{V_l}{\omega_b} \quad (6-14)$$

و يصبح الانزلاق الأعظمي:

$$s_{cr} = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + \beta^2 (X_1 + X'_2)^2}} \quad (6-15)$$

مميزات العزم - السرعة موضحة في الشكل (6-11).



الشكل (6-9) مميزات العزم - السرعة للتحكم بـ الفولت/هرتز

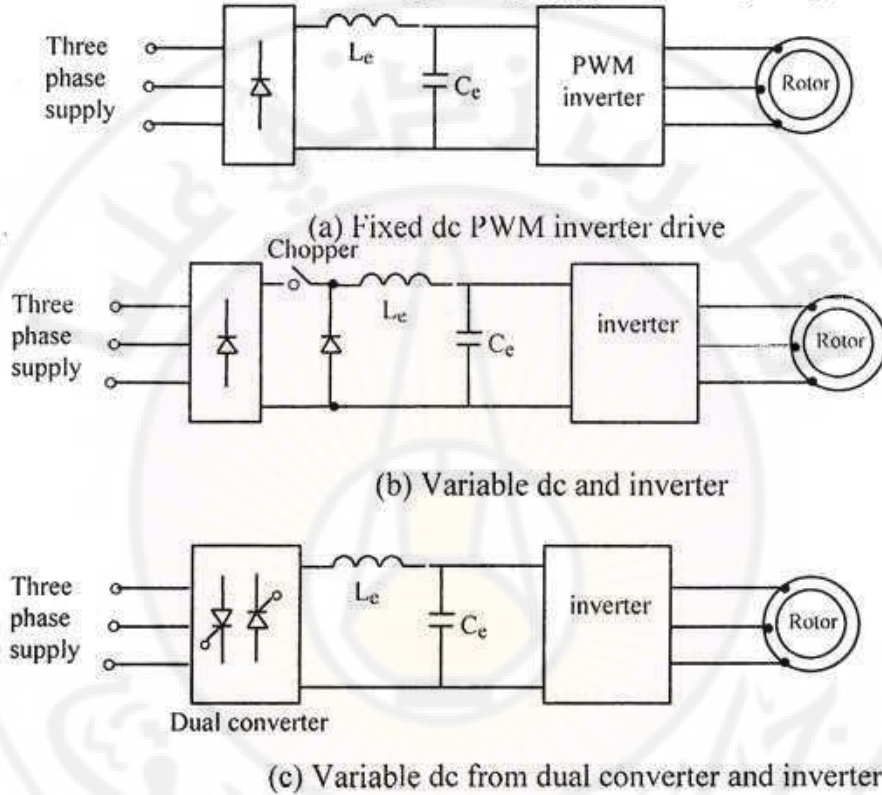
عندما ينخفض التردد فإن β تتناقص و الانزلاق الأعظمي يزداد. من أجل عزم معطى فإن السرعة يمكن تنظيمها بتغيير التردد وفقاً للمعادلة (6-14). لذلك فإنه يمكن التحكم بالسرعة و العزم، و ذلك من خلال تغيير كل من الجهد و التردد. عادة يتم الحفاظ على قيمة ثابتة للعزم و يتم تغيير السرعة.

يمكن الحصول على تغيرات في الجهد مع تغيير التردد من خلال قالبة ثلاثية الطور أو مبدلة ترددية (Cycloconverter)، تستخدم المبدلات الترددية في المجالات التي تتطلب استطاعات كبيرة، على سبيل المثال (في القاطرات، طواحين الاسمنت).

هناك ثلاث طرق ممكنة للحصول على جهد و تردد متغيرين كما هو مبين في الشكل (6-10). في الشكل (6-10-a) يبقى الجهد المستمر ثابتاً و تستخدم القالبة PWM لتغيير كل من الجهد و التردد. خلال القالبة و نتيجة لدارة التقويم فإن العمل في مجال إعادة التوليد غير ممكن، كما أن القالبة سوف تولد توافقيات إلى المنبع المغذي المتناوب.

في الشكل (6-10-b) مقطع التيار المستمر يقوم بتغيير الجهد المستمر الداخل إلى القالبة و القالبة تتحكم بالتردد. نتيجة للمقطع سوف نقل التوافقيات الداخلة إلى المنبع المغذي المتناوب.

في الشكل (10-6-c) يتغير الجهد المستمر من خلال مبدلة ثنائية و يتم التحكم بالتردد من خلال القالبية هذه الطريقة تسمح بإعادة التوليد و لكن عامل استجابة الدخل للمبدلة يكون منخفضاً و خصوصاً عندما تكون زاوية التأخير عالية.



الشكل (10-6) منبع الجهد المغذي لدارة قيادة المحركات التحريضية

٦-٣-٦ تنظيم سرعة المحركات التحريضية عن طريق التحكم بالتيار
 يمكن التحكم بعزم المحركات التحريضية عن طريق تغيير تيار الدوار. يمكن تغيير تيار الدخل- الممكن الحصول عليه بسهولة من تيار الدوار.
 من أجل قيمة ثابتة لتيار الدخل، فإن تيار الدوار يعتمد على قيم التمرغط و ممانعة دارة الدائر. من الدارة المكافئة التقريبية و بإهمال مقاومة التمرغط نوجد تيار الدائر من العلاقة:

$$I_2' = \frac{jX_o I_1}{R_1 + \frac{R_2'}{s} + j(X_o + x_1 + X_2')} = I_2' \angle \theta_1 \quad (6-16)$$

و بالتالي يكون العزم مساوياً إلى

$$T = \frac{3R_2'(X_o I_1)^2}{s\omega_s \left[(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + (x_o + X_1 + X_2')^2 \right]} \quad (6-17)$$

و عزم الإقلاع عندما $s = 1$

$$T_s = \frac{3R_2'(X_o I_1)^2}{\omega_s \left[(R_1 + R_2')^2 + (X_o + X_1 + X_2')^2 \right]} \quad (6-18)$$

و يكون الانزلاق الموافق للعزم الأعظمي

$$s_{cr} = \pm \frac{R_2'}{\left[R_1^2 + (X_o + X_1 + X_2')^2 \right]^{1/2}} \quad (6-19)$$

في الحالة الحقيقية للدائرة المكافئة تيار الثابت خلال المقاومة R_1 و المفاعلة X_1 يكون ثابتاً عند القيمة I_1 ، و بشكل عام X_o أكبر بكثير من X_1 و R_1 و التي يمكن إهمالها في معظم الاستخدامات.

بإهمال قيمة كل من X_1 و R_1 تصبح المعادلة (6-19) على النحو التالي:

$$s_{cr} = \pm \frac{R_2'}{X_o + X_2'} \quad (6-20)$$

و عند الانزلاق الحرج تصبح معادلة العزم

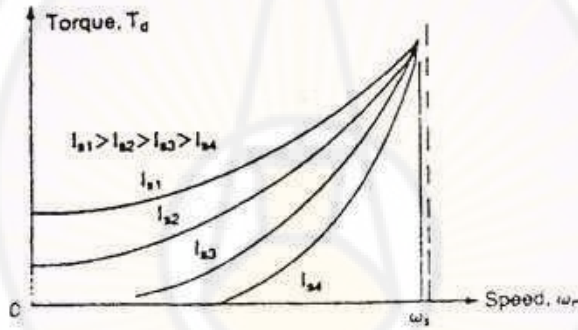
$$T_{cr} = \frac{3X_o^2}{2\omega_s (X_o + X_2')} I_1^2 = \frac{3L_o^2}{2(L_o + L_2)} I_1^2 \quad (6-21)$$

يمكن أن نلاحظ من المعادلة (6-21) أن العزم الأعظمي تابع لمربع التيار، و بشكل تقريبي مستقل عن التردد. مميزات السرعة-العزم مبينة في الشكل (6-11).

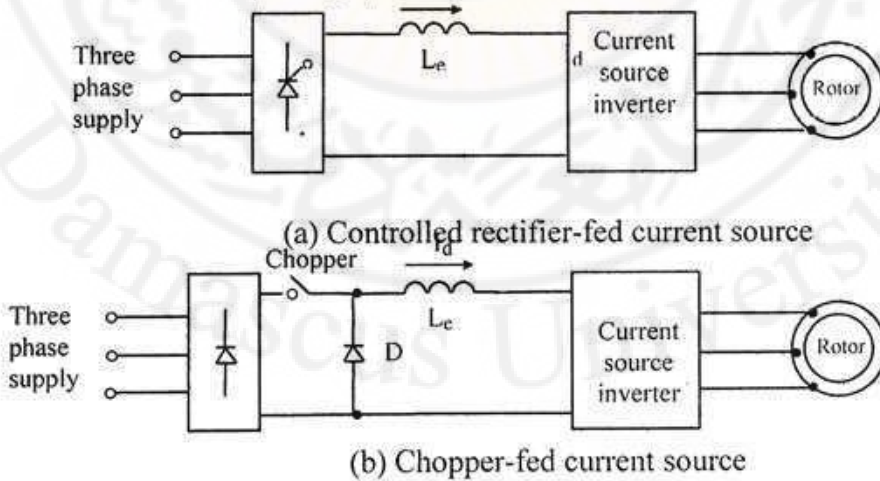
حيث أن X_o كبيرة بالمقارنة مع X_1 و X_2 فإن عزم الإقلاع منخفض. مع زيادة السرعة (أو تناقص الانزلاق) فإن جهد الثابت يرتفع و العزم يزداد.

إن تيار الإقلاع منخفض نتيجة إلى القيم المنخفضة للفيض (I_o منخفض و X_o مرتفعة)، و تيار الدائر بالمقارنة مع القيم الاسمية. يزداد العزم مع السرعة نتيجة لزيادة الفيض، زيادة أكثر باتجاه الميل الموجب للمميزات يزداد الجهد على أطراف المحرك فوق القيمة الاسمية. أيضاً يزداد الفيض و تيار التمعنط و بذلك يصل الفيض إلى الإشباع.

يمكن التحكم بالعزم من خلال التحكم بتيار الثابت و الانزلاق. و للحفاظ على الفيض في الفجوة الهوائية ثابتاً و لتجنب الإشباع نتيجة لارتفاع الجهد، يتم تشغيل المحرك عادةً باتجاه الميل السالب لمميزات السرعة- العزم المكافئة مع التحكم بالجهد. منطقة الميل السالب غير مستقرة و يجب أن يعمل المحرك باستخدام حلقة تحكم مغلقة.



الشكل (11-6) مميزات السرعة-العزم مع التحكم بالتيار



الشكل (12-6) دائرة قيادة المحرك التبريضي بالتحكم بالتيار

يمكن الحصول على القيمة الثابتة للتيار من قالبة تيار ثلاثية الطور. إن القالبة المغذية للتيار لها المنافع التالية و هي: التحكم بتيار الخطأ، كما أن التيار أقل حساسية لتغيرات ثوابت المحرك، و لكنها تولد توافقيات تؤدي إلى تأرجح العزم. هناك طريقتان للقيادة باستخدام المبدلات المغذية للتيار كما في الشكل (12-6-a).

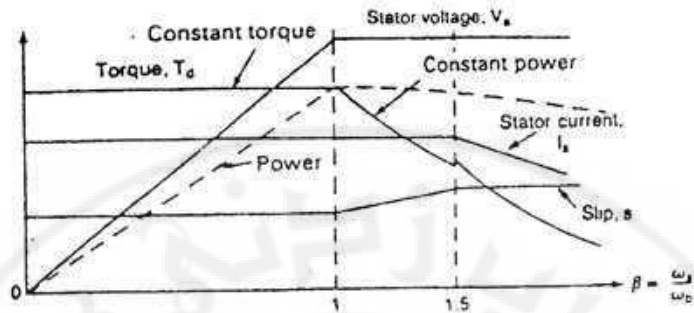
في الشكل (6-12-a) تؤثر المحاثنة كمنبع للتيار و المقوم المضبوط الجهد يتحكم بتيار المنبع. عامل استطاعة الدخل لهذه الطريقة منخفض جداً. في الشكل (12-6-b) مقطع التيار المستمر يتحكم بتيار المنبع ، وعامل استطاعة الدخل عالٍ.

٧-٣-٦ التحكم بالجهد، التيار و التردد

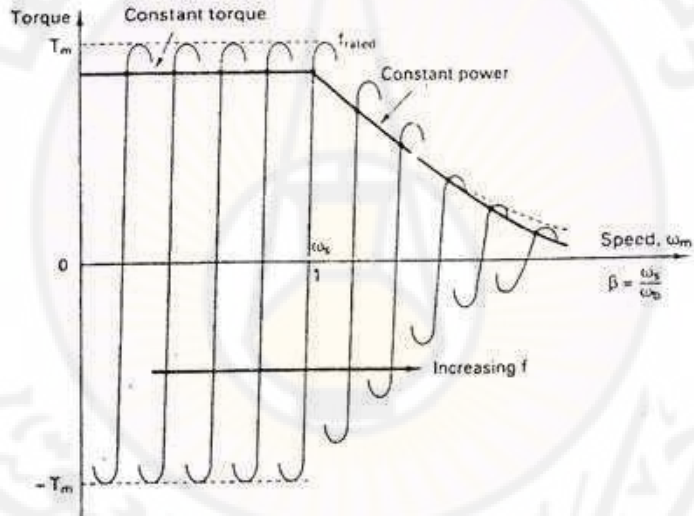
Voltage, Current, and Frequency Control

إن مميزات السرعة-العزم للمحركات التحريضية تعتمد على نوع التحكم المستخدم. قد يكون من الضروري تغيير الجهد، التردد، و التيار لتلبي متطلبات العزم-السرعة، كما هو مبين في الشكل (6-13)، حيث توجد ثلاث مناطق. في المنطقة الأولى، يمكن للسرعة أن تتغير بالتحكم بالجهد (أو التيار) عند عزم ثابت. في المنطقة الثانية، المحرك يعمل عند تيار ثابت و انزلاق متغير. في المنطقة الثالثة، يتم التحكم بالسرعة عن طريق التردد عند تخفيض تيار الثابت.

تغيرات العزم و الاستطاعة من أجل قيمة محددة لتيار الثابت و الترددات تحت التردد الاسمي ممثلة بالخط المنقط المبينة في الشكل (6-14). من أجل $\beta < 1$ يعمل المحرك بالتحكم بالتردد عند جهد ثابت. لذلك يتناقص الفيض بعكس نسبة التردد الواحد، و المحرك يعمل بالحقل الضعيف.



الشكل (13-6) متحولات التحكم مقابل التردد



الشكل (14-6) مميزات السرعة-العزم من أجل تغير التردد

The background of the page features a large, faint watermark of the Damascus University logo. It is a circular emblem with a central five-pointed star (pentagram) from which rays emanate. The top arc of the circle contains the Arabic text 'وقل رب زدني علما' (Qul Rabbi Zidni 'Alima) and the bottom arc contains 'جامعة دمشق' (University of Damascus).

الفصل السابع
المحركات الخاصة المستخدمة في
أنظمة القيادة الكهربائية

المحركات الخاصة المستخدمة في أنظمة القيادة الكهربائية

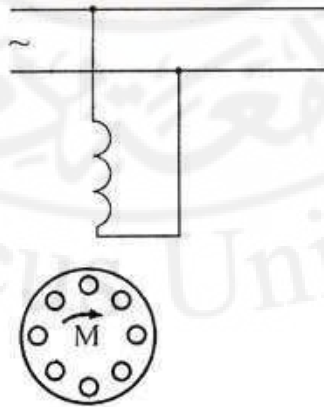
تقسم المحركات الكهربائية إلى أنواع مختلفة منها المحركات أحادية الطور ، المحركات الخطوية ، ومولدات السرعة اللائزمانية، ومحركات السيرفو ، المحركات الخطية ، الخ. ولكن سنخص بالذكر في هذا الفصل المحركات التحريضية أحادية الطور، وثنائية الطور، والمحركات الخطوية، ومولدات السرعة اللائزمانية، والسيليسينات ، وسندرسها بشكل من التفصيل لما لها من استخدامات كثيرة ، في الأجهزة الكهربائية الصناعية .

٧-١ - المحركات التحريضية أحادية الطور :

Single phase Induction Motors .

يمكن القول مجازاً أن سائر محركات التيار المتناوب صغيرة الاستطاعة نسبياً هي محركات أحادية الطور بصفة عامة ، تتغذى هذه المحركات من شبكات التغذية الكهربائية أحادية الطور ، لذا يكثر استخدامها في الأدوات المنزلية كالغسالات والبرادات والمراوح ، وفي الأجهزة الصناعية .

يتألف ملف الثابت في هذه المحركات من وشيعة واحدة توصل إلى شبكة التغذية بينما يكون الملف الدائر على شكل القفص السنجابي، كما في المحركات ثلاثية الطور، ويوضح الشكل (1-7) الدائرة الكهربائية المبدئية للمحرك التحريضي أحادي الطور [6].

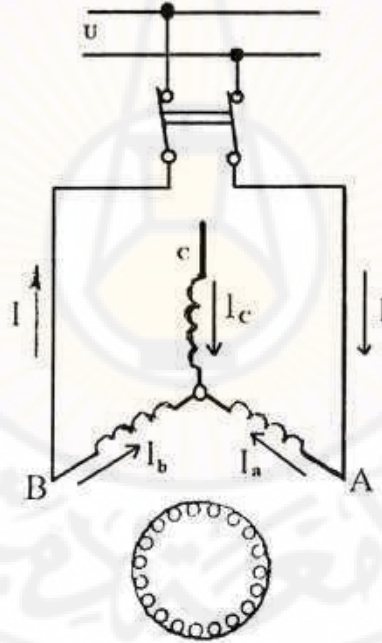


الشكل (1-7)

٧-١-١- مبدأ عمل المحركات التحريضية أحادية الطور :

يمكننا من حيث المبدأ الحصول على المحرك التحريضي أحادي الطور من محرك ثلاثي الطور، فيما إذا وصلنا إلى شبكة التغذية وشيئين فقط من ملف الثابت، كما هو مبين على الشكل (2-7)، وبانعدام التيار المار في الوشعة الثالثة فإن الحقل المغناطيسي المتولد في الشجرة الهوائية يفقد صفته الدورانية، ويصبح حقلاً إهليلجياً متراوحاً أو نبضياً.

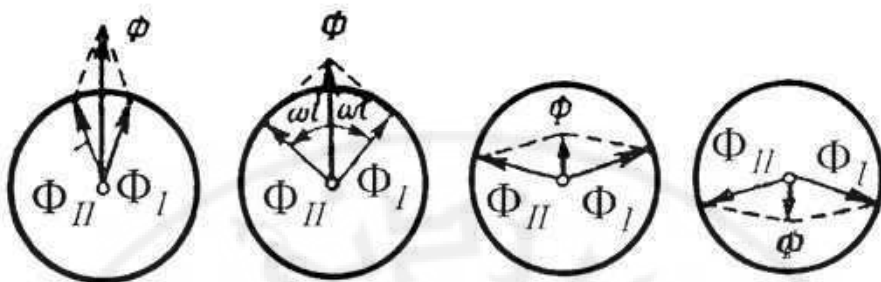
ويمكننا عدّ هذا الحقل ناتجاً عن حقلين مغناطيسيين دورانيين أحدهما أمامي والآخر خلفي ويدور هذان الحقلان باتجاهين متضادين بسرعة مقدارها W .



الشكل (2-7)

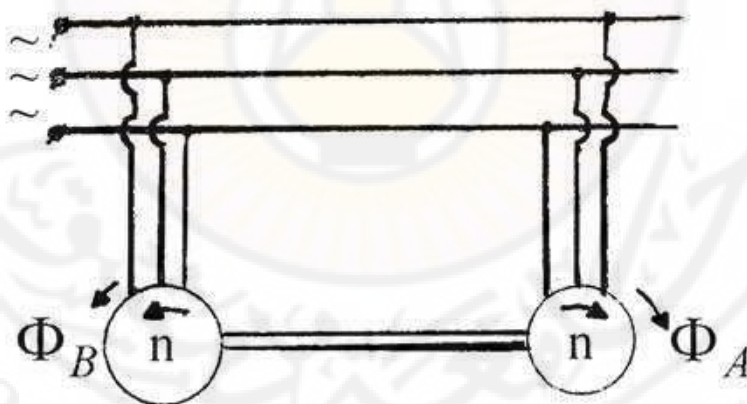
كما هو مبين على الشكل (3-7) ومطال كل منهما يساوي نصف مطال الحقل المغناطيسي المتراوح أي

$$\phi_{lm \max} = \phi_{// \max} = \frac{\phi_{\max}}{2} \dots \dots \dots (7-1)$$



الشكل (3-7)

ويمكن تمثيل ذلك فيزيائياً برابط محركين تحريضيين ثلاثي الطور متماثلين تماماً فيما بينهما ربطاً ميكانيكياً ، بحيث يسعى المحرك الأول (A) إلى الدوران باتجاه ما ، ويسعى المحرك الثاني (B) إلى الدوران في الاتجاه المعاكس. مع العلم ان المحركين يمكنان استطاعة متساوية تساوي نصف استطاعة المحرك أحادي الطور (المحركان متماثلان تماماً) . الشكل (3-7).



الشكل (4-7) [6]

وبالتالي تكون محصلة عزيمتهما :

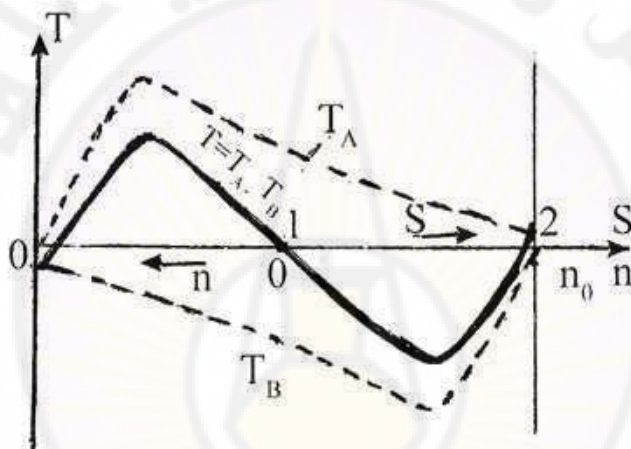
$$T = T_A - T_B = T_d$$

ونلاحظ هنا أن في مجموعة المحركين لا يتحركان عند وصولهما إلى شبكة التغذية الكهربائية ، بل يبقيان في حالة الوقوف ، ويكفي أن نقدم إلى محورهما دفعة باتجاه ما

حتى تبدأ بالإقلاع في الاتجاه نفسه ، ويمكن استيضاح ذلك من المخطط البياني لمميزات العزم في كل من المحركين و مجموعهما الذي يمثل المحرك التحريضي أحادي الطور كما في الشكل (5-7)

نرمز عادة لتردد ملف الدائر (f_2) وتردد ملف الثابت بـ (f_1) و بالتالي فإن:

$$f_{2A} = \frac{P(n_1 - n)}{60} \dots\dots\dots(7-2)$$



الشكل (5-7)

حيث :

f_{2A} : تردد ملف الدائر للمحرك (A) .

P : عدد أزواج الأقطاب

n_1 : سرعة المحرك في حالة اللاحمل

n : سرعة المحرك بوجود المحرك

ولأن الانزلاق مساوياً:

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

وبما أن

$$f_1 = \frac{P.n_1}{60}$$

نستنتج أن:

$$f_{2A} = S.f_1 \dots\dots\dots(7-3)$$

وأما التردد المتولد في المحرك (B) فيساوي:

$$f_{2B} = \frac{P}{60}[n_1 - (-n)] = f_1(2 - S) \dots\dots\dots(7-4)$$

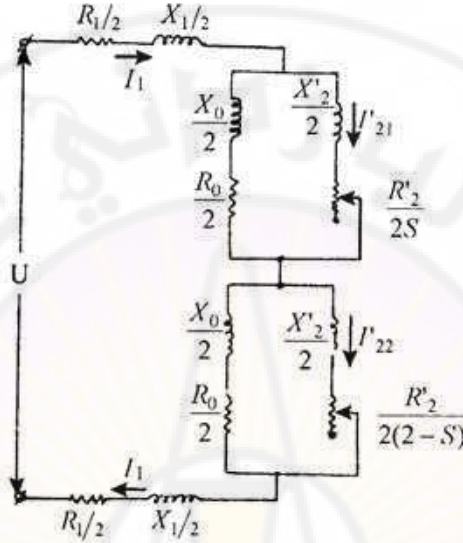
نستنتج من العلاقتين (7-3) و(7-4) أن انزلاق المحرك (A) يساوي انزلاق المحرك التحريضي أحادي الطور (S) نفسه، بينما يكون انزلاق المحرك (B) مساوياً (2-S) . ونلاحظ من المخطط البياني في الشكل (7-5) أنه عندما يكون انزلاق المحرك التحريضي أحادي الطور مساوياً الواحد ، فإن انزلاق المحرك (A) يساوي (S=1) وأيضاً انزلاق المحرك (B) يساوي (2-S) = 1، وبالتالي فإن العزم يساوي الصفر [12]. (T=0)

٧-٢-١- الدارة المكافئة للمحرك التحريضي أحادي الطور :

لقد أوضحنا سابقاً أن المجال المغناطيسي المتردد الذي يولده تيار المنبع أحادي الطور المار في ملف الثابت (الرئيسي) يمكن تحليله إلى مجالين يدور كل منهما في اتجاه معاكس لدوران الآخر، بالسرعة التزامنية (n_0) نفسها ، ويكون مطال موجة القوة المحركة المغناطيسية في كل من المجالين مساوياً نصف مطال موجة القوة المحركة المغناطيسية للمجال المتردد . ويقوم كل من المجالين بإنشاء تيارات تحريضية خاصة به في ملفات الدائر وتوليد عزم دوران تحريضي على أساس نظرية المحرك التحريضي ثلاثي الطور .

وعلى هذا النحو يمكن القيام بتحليل كمي للمحرك التحريضي أحادي الطور على نمط التحليل الذي سبق استخدامه في المحركات التحريضية ثلاثية الطور .

ومنهُ نستطيع عد الدارة المكافئة للمحرك التحريضي أحادي الطور مساوية مجموع الدارتين المكافئتين للمحركين (A) و (B) كما هو مبين في الشكل (6-7) .



الشكل (6-7)

نلاحظ من الدارة أن :

R_1 : المقاومة الفعالة لملف الثابت.

X_1 : الممانعة التحريضية لملف الثابت.

I_1 : تيار ملف الثابت.

$R_0/2$: المقاومة الأومية البحتة لفرع المغنطة لمحرك واحد.

$X_0/2$: الممانعة التحريضية لفرع المغنطة لمحرك واحد.

I'_{21} : تيار ملف الدائر منسوباً إلى الثابت للمحرك الأول (A) .

I'_{22} : تيار ملف الدائر منسوباً إلى الثابت للمحرك الثاني (B) .

$-X'_2/2$ - الممانعة التحريضية في ملف الدائر منسوبة إلى الثابت لمحرك واحد.

$-R'_2/2$ - المقاومة الفعالة في ملف الدائر منسوباً إلى الثابت لمحرك واحد.

ومن الدائرة المكافئة يمكننا استنتاج قيمة العزم الدوراني للمحرك التحريضي أحادي الطور، حيث نرمز للمحرك (A) بـ (1) وللمحرك (B) بـ (2) :

$$\begin{aligned} T &= T_1 - T_2 \\ &= \frac{\Delta PC_{21}}{\omega_1 S} - \frac{\Delta PC_{22}}{\omega_1 (2 - S)} \dots\dots\dots (7-5) \\ &= \frac{1}{\omega_1} \left[3 \left(\frac{I'_{21}}{\sqrt{3}} \right) \cdot \frac{R'_2}{2S} - 3 \left(\frac{I'_{22}}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot \frac{R'_2}{2(2 - S)} \right] \end{aligned}$$

أو :

$$T = \frac{1}{\omega_1} \left[I'^2_{21} \frac{R'_2}{2S} - I'^2_{22} \frac{R'_2}{2(2 - S)} \right] \dots\dots\dots (7-6)$$

حيث :

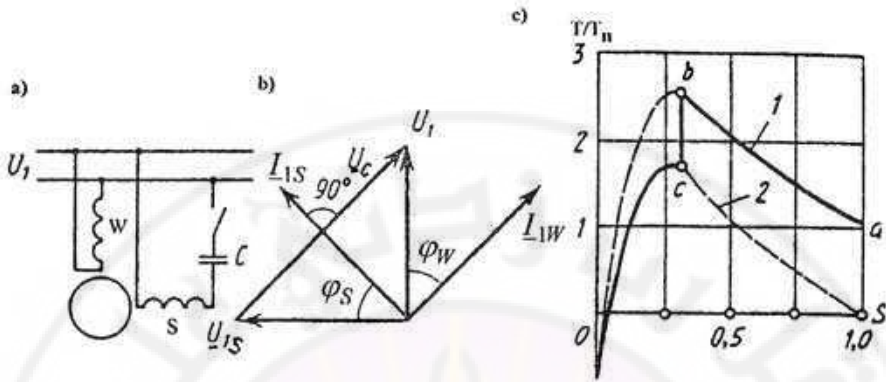
ω_1 : السرعة الزاوية للحقل المغناطيسي .

٧-١-٣ - إقلاع المحرك أحادي الطور :

من أجل الحصول على عزم إقلاع يضاف إلى الملف الرئيسي في المحركات أحادية الطور ملف إقلاع (مساعد) مزاح عند ملف التشغيل الأساسي بمقدار 90° درجة كهربائية ، يوصل خلال فترة إقلاع المحرك ملف الإقلاع إلى الشبكة عبر عناصر إزاحة الصفحة المتمثلة بمكثف أو بمقاومة أومية ، وبعد بلوغ المحرك سرعة الدوران الاسمية وانتهاء عملية الإقلاع يتم فصل ملف الإقلاع ، ليتابع المحرك عمله بعد ذلك بحالة أحادية الطور .

وبالنظر إلى أن وظيفة ملف الإقلاع تقتصر على تغذية المحرك خلال فترة الإقلاع القصيرة ، لذلك يصمم بنواقل ذات سطوح مقاطع أقل من ملف التشغيل ، ويوزع على عدد أقل من المجاري .

وسنستعرض بالتفصيل طريقة الإقلاع التي تتم باستخدام مكثف C كعنصر إزاحة للصفحة ، شكل (7-7-a).



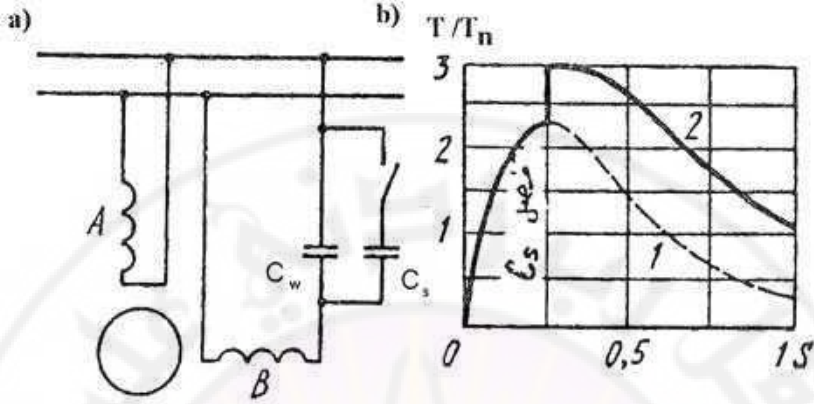
الشكل (7-7)

تكون قيمة التوتر المطبق على ملف الإقلاع S هي:

$$\underline{U}_{1S} = \underline{U}_1 = \underline{U}_c = \underline{U}_1 + j \underline{I}_{1S} X_c \dots \dots \dots (7-7)$$

أي أنه مزاح بالصفحة عن توتر الشبكة ، المطبق على ملف التشغيل w . وبالتالي تكون أشعة التيارات في ملف التشغيل I_w وملف الإقلاع I_{1S} مزاحاً بالصفحة بعضها عن بعض بزاوية معينة ، وباختيار قيمة محددة لسعة مكثف إزاحة الطور يمكن الحصول على نظام عمل عند الإقلاع قريب من حالة التناظر (شكل (7-7-b))، أي الحصول على حقل مغناطيسي دوار . يبين الشكل ((7-7-c)) منحنيات $T=f(s)$ في المحرك عند وصل ملف الإقلاع المنحني (1) وفصله (المنحني 2) يتم إقلاع المحرك وفق الجزء ab من المميزة 1 . وفي النقطة b يتم فصل ملف الإقلاع فينتقل المحرك بعد ذلك للعمل على الجزء oc من المميزة 2 .

بما أن وصل الملف الثاني يحسن بشكل ملموس مميزة المحرك الميكانيكية ، لذلك تستخدم في بعض الأحيان المحركات أحادية الطور التي تبقى فيها الملفات الرئيسية والإقلاع موصولة طوال وقت العمل ، الشكل (8-7-a) يسمى المحرك في هذه الحالة المحرك ذا المكثفين أو المحرك ذا المكثف الدائم [7] .



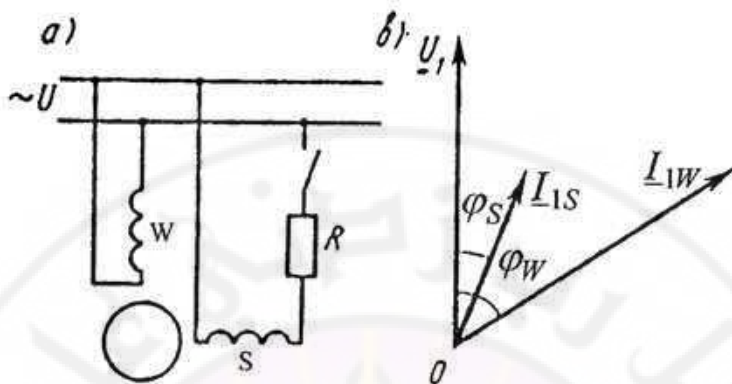
الشكل (8-7)

المحرك ذو المكثف الدائم يفضل وجود سعة كبيرة $C_w + C_s$ من أجل زيادة عزم الإقلاع ، ومن انتهاء عملية الإقلاع التي تتم وفق الممیزة 2 شكل (8-7-b). وانخفاض قيمة التيار يتم فصل جزء من المكثفات C_s بهدف زيادة قيمة المفاعلة السعوية في حالة العمل الاسمية (بعد أن يصبح تيار المحرك أصغر من تيار الإقلاع) ، وضمان عمل المحرك في ظروف قريبة من العمل عند الحقل الدوراني ، الشكل الدائري عند ذلك يعمل المحرك وفق الممیزة (1) .

يتميز المحرك السعوي بمعامل استطاعة مرتفع ، أما سيئاته فتعود إلى كتلة المكثف الكبيرة نسبياً ، بالإضافة إلى ظهور التيارات غير الجيبية عند تشوه توتر التغذية ، الذي يؤثر في بعض الحالات بشكل ضار في خطوط الاتصالات .

عند ظروف الإقلاع السهلة (عند تأثير عزوم تحميل صغيرة أثناء الإقلاع) تستخدم المحركات المزودة بمقاومة إقلاع أومية R الشكل (9-7-a).

إن وجود المقاومة الأومية في دائرة ملف الإقلاع يؤمن إزاحة بالصفحة p_s بين التوتر المار في هذا الملف ، الشكل (9-7-b) أقل من فرق الصفحة p_w القائم في ملف التشغيل.



الشكل (9-7)

لذلك يحدث انزياح للتيارات المارة في ملفي الإقلاع والتشغيل بعضها عن بعض بزاوية مقدارها $\varphi_W - \varphi_S$ ، مما يؤدي إلى نشوء حقل مغناطيسي أهليلجي يساعد على توليد عزم الإقلاع .

تركب مقاومة الإقلاع داخل هيكل المحرك وتبرد بالهواء نفسه المستخدم لتبريد المحرك.

إذاً عند استخدام المكثف نحصل على عزم إقلاع أكبر بالمقارنة مع عزم الإقلاع الذي نحصل عليه في حال وصل مقاومة أومية مع ملف الإقلاع .

٧-٢- المحرك الميكروي أحادي الطور ذو الأقطاب المظلمة

Shaded Pole Motor.

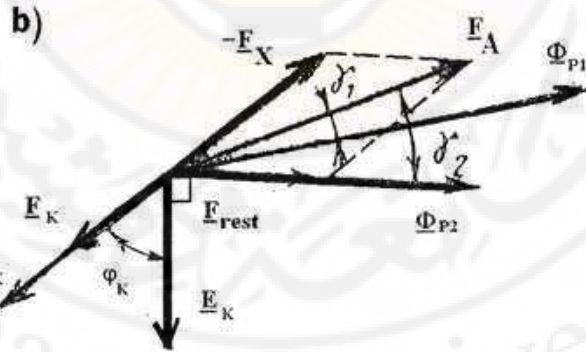
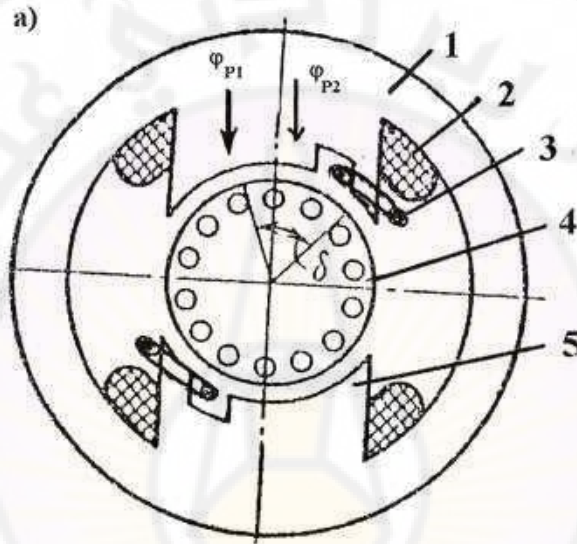
يتم في هذه المحركات عادة تصميم ملف الثابت الذي يربط إلى الشبكة المغذية ، على شكل ملف متمركز ويثبت مع صفائح الثابت بآن واحد .

وفي كل قطب يحاط أحد جانبي القطب بملف مساعد Shaded Coil مكون من حلقة أو مجموعة حلقات مقصورة تشكل درعاً لمنطقة تشغل ما بين نصف قوس أو خمسه. ويكون دوار هذا المحرك من النوع المقصور العادي .

يمكن كتابة السيالة المغناطيسية المتولدة في ملف الثابت (سيالة القطب) على شكل
مجموع مركبتين الشكل (10-7-a)

$$\phi_p = \phi_{p1} + \phi_{p2} \dots \dots \dots (7-8)$$

السيالة المارة عبر جزء القطب المظلل (المحاط بالملفات المقصورة) .



الشكل (10-7-a-b) المخطط التصميمي للمحرك أحادي الطور ذي الأقطاب

المظلة ومخططة الشعاعي b

- ١- الثابت ، ٢- ملف الثابت ، ٣- الحلقة المقصورة ، ٤- الجزء المتحرك ، ٥- القطب

تمر السيلالات ϕ_{p_1} و ϕ_{p_2} عبر الأجزاء المختلفة لنهايات القطب لذلك تكون مزاحة فراغياً بعضها عن بعض بزاوية مقدارها β . عدا ذلك تكون هذه السيلالة مزاحة بالنسبة للقوة المحركة المغناطيسية F_p المتولدة في ملف الثابت بزوايا مختلفة ϕ_1 و ϕ_2 .

ويفسر ذلك بأن كل قطب من أقطاب المحرك المذكور يكافئ تقريباً محولاً يلعب دور الملف الابتدائي فيه ملف الثابت ودور الملف الثانوي الحلقة المقصورة .
تعرض سيلالة ملف الثابت، في الحلقة المقصورة قوة محرركة كهربائية E_K ، مما يؤدي إلى ظهور تيار I_K وقوة محرركة مغناطيسية F_K ، تضاف إلى القوة المحركة المغناطيسية F_N المتولدة في ملف الثابت . وتعمل المركبة الردية للتيار I_K على خفض قيمة السيلالة ϕ_{p_2} ، أما مركبته الفعالة فتزيحها بالصفحة عن القوة المحركة المغناطيسية F_p . وبما أن السيلالة ϕ_{p_1} لا تحيط بالحلقة المقصورة ، لذلك تأخذ الزاوية ϕ_1 قيمة صغيرة نسبياً (4÷9) درجات وتكون مساوية تقريباً لزاوية فرق الطور بين سيلالة المحول والقوة المحركة المغناطيسية المؤثرة في ملفه الابتدائي في حالة اللاحمل .
أما الزاوية ϕ_2 فتكون أكبر بكثير نحو 45° درجة ، أي كما في المحول ذي الملف الثانوي المقصور (كمحول التيار مثلاً) .

ويعود ذلك إلى كون ضياعات الاستطاعة التي تحدد قيمة الزاوية ϕ_2 لا تتعلق بضياعات الاستطاعة المغناطيسية في الحديد وحسب، بل وبالضياعات الكهربائية في الحلقة المقصورة أيضاً .

تشكل السيلالات ϕ_{p_1} و ϕ_{p_2} ، المزاحة فراغياً بعضها عن بعض بزاوية β والمنحرفة بالصفحة والزمن بزاوية مقدارها $\phi = \phi_1 - \phi_2$ ، حقلاً مغناطيسياً دواراً أهليلجياً يولد عزم دوران يؤثر في محور المحرك بالاتجاه المنطلق من نهاية القطب الجانبية غير المحاطة بالحلقة المقصورة إلى النهاية المقابلة (وفق تتابع دورات السيلالات أو الصفحات) .

مسألة محلولة:

أخذت القراءات التالية من لوحة محرك أحادي الطور رباعي الأقطاب:

$$V_n = 230V, I_n = 2.9(A), f_1 = 50Hz, \cos \varphi = 0.71$$

$$P_n = 0.5(Hp), n_n = 1410(r.p.m)$$

والمطلوب حساب :

- ١- مردود المحرك .
- ٢- انزلاق المحرك عند حمولته الاسمية .
- ٣- التيار الجديد الداخل للمحرك عند الحمولة الاسمية .
- ٤- عامل الاسطاعة الجديد [12,10] .

الحل :

خرج المحرك :

$$P_n = 0.5.746 = 373(W)$$

دخل المحرك :

$$P_m = V_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n \\ = 230 \times 2.9 \times 0.71 = 474W$$

١- مردود المحرك :

$$\eta\% = \frac{P_n}{P_m} \times 100 = \frac{373}{474} \times 100 = 78.7$$

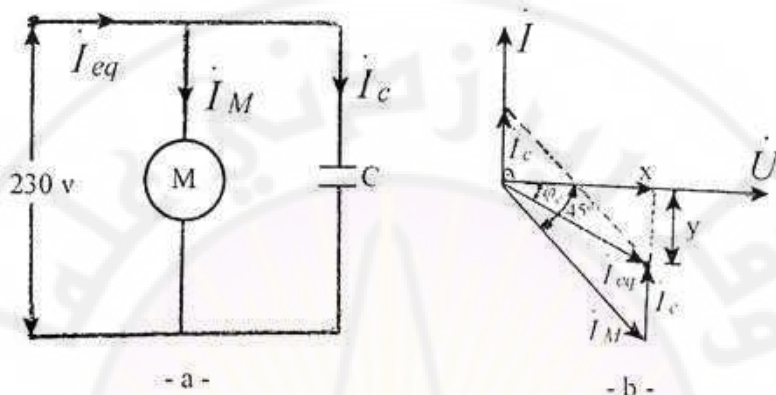
٢- انزلاق المحرك :

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

$$n_1 = \frac{60f_1}{P} = 1500r.p.m$$

$$S = \frac{1500 - 1410}{1500} = 0.06$$

٣- نلاحظ من الشكل (11-7) الذي يبين الدارة الكهربائية للمحرك بعد وصل المكثف على التوازي معه ، فإن :



الشكل (11-7)

$$X_c = \frac{1}{\omega \times C} = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 15.9 \times 10^{-3}} = 200$$

وبالتالي ، فإن تيار المكثف يساوي :

$$I_c = \frac{V_n}{X_c} = \frac{230}{200} = 1.15 [A]$$

وهذا التيار سيتقدم على التوتر المطبق بزاوية مقدارها 90 درجة بينما يتأخر تيار المحرك I_M عن التوتر المطبق بزاوية مقدارها :

$$\varphi_n = \cos^{-1}(0.71) = 45^\circ$$

وبأخذ محصلة هذين التيارين ، نجد :

المركبة الأفقية :

$$X = I_M \cdot \cos \varphi_n = 2.9 \times 0.71 = 2.06 (A)$$

المركبة الشاقولية :

$$Y = I_c - I_M \sin 45 = 1.15 - 2.06 = 0.91$$

وبالتالي فإن التيار الجديد يساوي :

$$I_{eq} = \sqrt{(2.04)^2 + (-0.91)^2} = 2.25 A$$

٤- عامل الاستطاعة الجديد:

$$\cos \varphi_c = \frac{X}{I_{eq}} = \frac{2.06}{2.25} = 0.916$$

ومنه :

$$\varphi_c = \cos^{-1}(0.916) = 23.65^\circ$$

٧-٣- محركات السيرفو (أو المحركات المنفذة) وأهم أنواعها :

١- محركات التيار المستمر .

٢- محركات السيرفو ذات التيار المتناوب (اللاتزامنية أحادية الطور) .

ومحركات التيار المستمر السيرفو يمكن تصنيفها إلى :

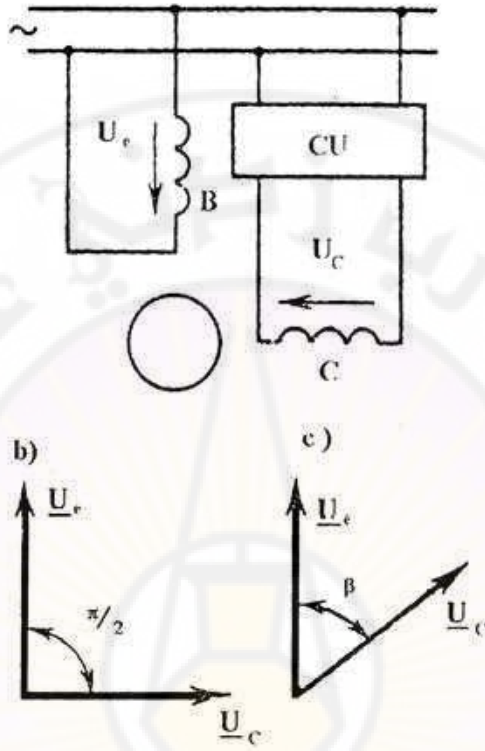
- محركات تيار مستمر ذات التهيج المستقل .
- محركات تيار مستمر المتحكم بحقله (تفرعي) .
- محركات تيار مستمر المتحكم بتحريضه .

وقد درست هذه المحركات في الفصول السابقة .

أما بالنسبة للمحرك التحريضي أحادي الطور أيضاً فقد درس في فصل سابق ، لكننا نضيف هنا أن المحركات اللاتزامنية تستخدم في تجهيزات الأتمتة من أجل تحويل الإشارة الكهربائية (المطبقة على دخلها) إلى حركة ميكانيكية لمحور الدوران. وعند قيمة معطاة لعزم الحمل المفرمل يجب أن تتوافق سرعة دوران المحرك بدقة مع قيمة التوتر المطبق وأن تكون قابلة للتغيير ضمن مجال واسع بدءاً من الصفر حتى القيمة العظمى عند تغيير هذا التوتر أو صفحته .

طرائق التحكم بالمحركات المنفذة (السيرفو) :

تكون محركات التيار المتناوب المنفذة بشكل أساسي محركات تحريضية (لا تزامنية) أحادية الطور ذات دوار مقصور (قفص سنجابي) الشكل (7-12) .



الشكل (12-7)

ويدعى ملف الثابت الأول B ، المربوط إلى شبكة التيار المتناوب ذات القيمة الفعالة الثابتة للتوتر U_c ، بملف التهييج . ويطبق على الملف الثاني C ، الذي يدعى بملف التحكم ، توتر التحكم U_c ، المأخوذ من وحدة التحكم Cv .
وتستخدم ثلاث طرائق للتحكم بسرعة دوران المحركات المنفذة وهي :
التحكم بالمطال ، التحكم بالصفحة ، التحكم بالمطال والصفحة معاً .
التحكم بالمطال :

ويتميز بتغيير مطال توتر التحكم U_c فقط أو تغيير القيمة الفعالة لهذا التوتر متناسبة معه . وتشكل أشعة توترات التحكم والتهييج عند جميع قيم التوتر U_c زاوية مقدارها 90° درجة الشكل (12-7-b) .

التحكم بالصفحة :

وتتميز بأن توتر التحكم U_c يبقى ثابتاً بالقيمة، أما تنظيم السرعة فيتم عن طريق تغيير زاوية فرق الصفحة β بين أشعة توتر التهييج U_c والتحكم U_c ، الشكل (12-7-c) .

التحكم بالمطال والصفحة :

يتغير في هذه الحالة مطال توتر التحكم وزاوية فرق الصفحة بين أشعة التوتر المطبق على ملفات الثابت . ومن أجل تنفيذ هذه الطريقة يمكن استخدام دارتي تحكم مختلفتين .

٧-٤ مولد التاكو اللاتزامني :

تستخدم مولدات التاكو في تجهيزات الأتمتة من أجل تحويل قدرة الدوران الميكانيكية إلى إشارة كهربائية . وفي الحالة المثالية يجب أن يعطي التاكو توتر خرج يتناسب طرذاً مع سرعة دورانه أي :

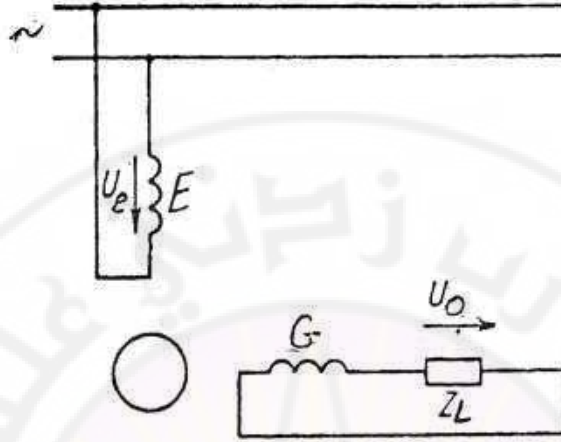
$$U = K_c \theta / dt \quad \text{أو} \quad U = K_c n$$

حيث سرعة الدوران تقاس بـ $\theta[r.p.m]$. زاوية فتل محور الآلة المرتبطة مع مولد التاكو . حيث تدعى هذه العلاقة الأساسية بمميزة خرج مولد التاكو .

تستخدم مولدات التاكو في مجالات متعددة كقياس سرعة الدوران ، وتوليد الإشارات المسرعة أو المبثثة ، وتنفيذ عمليات التفاضل والتكامل في جمل الحساب والبرمجة .

مبدأ العمل:

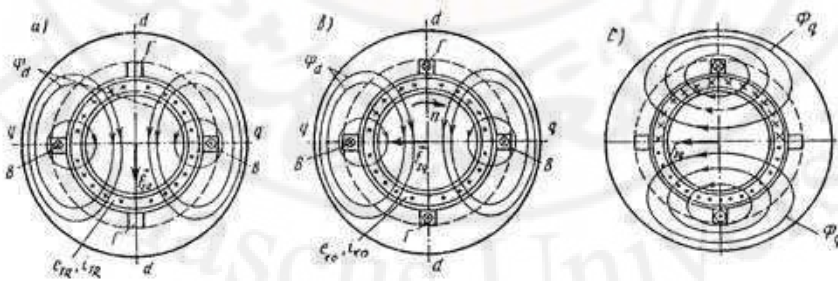
يتوضع في مجاري ثابت هذا المولد ملفان مزاحان فراغياً بعضهما عن بعض بمقدار 90° درجة ، يوصل أحد الملفين (ملف التهييج E_c) مع الشبكة الكهربائية ، والشكل (13-7) يبين المخطط الكهربائي لمولد التاكو اللاتزامني ، حيث يربط ملف التهييج إلى الشبكة المتناوبة بشكل دائم ويرتبط الملف الآخر (ملف التوليد G_c) إلى الحمل Z_1 أي يستخدم كدائرة خرج .



الشكل (13-7) المخطط الكهربائي لمولد التاكو اللازماني

يمر عبر ملف التهييج تيار متناوب ، كما يؤدي إلى توليد سيالة مغناطيسية نبضية ϕ_{II} لها تردد مساو لتردد الشبكة f_1 ، وتتوزع هذه السيالة في الفراغ عملياً بشكل جيبي، حيث ينطبق محورها مع محور ملف التهييج المسمى المحور الطولي d-d، كما تسمى السيالة المتولدة في ملف التهييج السيالة الطولية .

ويسمى المحور q-q العمودي على محور التهييج المحور العرضي (المتعامد) حسب الشكل التالي:



الشكل (14-7) طبيعة توزيع القوى المحركة الكهربائية والتيارات المتولدة في

الجزء المتحرك تحت تأثير السيالة النبضية ϕ_{II} ودوران الجزء المتحرك

وسنستعرض فيما يلي : ما هي القوى المحركة الكهربائية والتيارات التي تنشأ عند التأثير المتبادل للسيالة ϕ_d مع الدوار وملفات الثابت عندما يكون الجزء المتحرك ساكناً. عندما يكون الدوار في حالة السكون تخترق السيالة ϕ_d ملف التهيج فتولد فيه قوة محركه كهربائية

$$E_e = 4.44 \cdot f_1 \cdot N_e \cdot \phi_{d_{\max}} \cdot K_{H_e} \dots \dots \dots (7-9)$$

حيث :

$K_{H_e} N_e$: عدد لفات ومعامل لف ملف التهيج .

وبإهمال المقاومة الأومية لملف التهيج ، والمفاعلة التحريضية الناشئة عن السيالة التسريعية في ملف التهيج نحصل على العلاقة :

$$U_e + E_e = 0$$

في الحالة المثالية لا تولد السيالة ϕ_d في ملف التوليد قوة محركه كهربائية لأنه مزاح عن ملف التهيج بمقدار 90° درجة . وبالتالي يكون التوتر المطبق على الحمل معدوماً. بيد أنه يستحيل الحصول على تناظر مغناطيسي تام لمحاور هذه الملفات ، لذلك يكون جزء من السيالة ϕ_d مرتبطاً مع ملف التوليد ارتباطاً مغناطيسياً ، وبالتالي يولد فيه قوة محركه كهربائية تدعى بالقوة المحركة الكهربائية المتبقية .

يمكن تمثيل الجزء المتحرك الأجوف بمجموعة من النواقل المستقلة حيث تولد السيالة النبضية في كل ناقل قوة محركه كهربائية e_r تسمى الق.م.ك المنتجة بالتحريض على مبدأ المحولات. وبما أن المقاومة الأومية للدوائر الأجوف أكبر بكثير من المفاعلة التحريضية فإن الق.م.ك المستنتجة بالتحويل e_r تنطبق عملياً بالصفحة مع التيار i_r الذي أدى إلى توليدها في ناقل الدوار . عند ذلك تكون جهة تأثير الق.م.ك F_{2d} الناشئة عن التيار i_r منطبقة مع المحور الطولي للآلة ، أكان الجزء المتحرك في حالة الدوران أم السكون .

يبين الشكل السابق اتجاه الق.م.ك e_r والتيار i_r والقوة المحركة المغناطيسية F_{2d} في اللحظة التي تأخذ فيها السيالة ϕ_d بالتناقص . وبما أن الشرط $U_e + E_e = 0$ محقق

دائماً بالنسبة لملف، التهيج ، لذلك يظهر في هذا الملف ، عند نشوء الق.م.م. الطولية F_{2d} في الدوار ، تيار توازن (على غرار ما يحدث في المحول) يقوم بتوليد ق.م.م. F_{2d} .

عند قتل الجزء المتحرك بآلة ميكانيكية ما ، تظهر في نواقله العنصرية ، بالإضافة إلى أ.ق.م.ك. المستنتجة بالتحويل e_i ق.م.ك. دورانية تساوي $e_{i0} = B_x \cdot \ell_2 \cdot v_2$ حيث:

B_x : كثافة السيلة المغناطيسية في النقطة المحددة من الشجرة الهوائية في اللحظة المعطاة ، ℓ_2 طول الجزء المتحرك الواقع ضمن تأثير الحقل المغناطيسي v_2 السرعة المحيطة للدوار .

بما أن السيلة ϕ_i تتغير دورياً بشكل نبضي بالتردد f_i ، فإن الق.م.ك. الناشئة عنها تتغير أيضاً نبضياً بالتردد نفسه وعند التوزيع الجيبي لكثافة السيلة B_x على طول محيط الجزء المتحرك، فإن القيمة العظمى للقوة المحركة الكهربائية e_{i0} ستؤثر في كل لحظة من الزمن في عناصر الناقل الذي ينطبق مع المحور الطولي للآلة .

يبين الشكل السابق (14-7-b) الاتجاه اللحظي للقوة المحركة الكهربائية الدورانية e_{i0} والتيار i_{i0} الناشئ عنها في نواقل الدوار الأجوف ، ومهما تكن قيمة سرعة الدوران تبقى اتجاهات هذه الق.م.ك. في نواقل الدوار ، المتوضعة على جانبي المحور العرضي ، متعاكسة وإذا أهملنا المفاعلة التحريضية للدوار الأجوف يمكن عد اتجاه التيار i_{i0} في كل ناقل بسيط منطبقاً مع اتجاه الق.م.ك. الموقفة e_{i0} في هذه الحالة تولد تيارات الدوار i_{i0} ق.م.م. F_{2d0} وسيلة مغناطيسية نبضية ϕ_q مع ملف التهيج بشكل مباشر ، لكنها تولد في ملف الخرج ق.م.ك. تحسب بالعلاقة التالية :

$$E_q = 4.44 \cdot f_1 \cdot N_g \cdot K_{wg} \cdot \phi_{q \max} \dots\dots\dots (7-10)$$

حيث :

N_g و K_{wg} : عدد لفات ومعامل اللف لملف الخرج (التوليد).

من البديهي أن تردد الـ ق.م.ك. المؤثرة في ملف الخرج لا يتعلق بسرعة دوران الجزء المتحرك، ويساوي دوماً تردد الـ ق.م.ك. الدورانية e_{r0} في الجزء المتحرك، أي f_1 المغذية لملف التهيج، ويعتبر عدم تغيير تردد الخرج خاصية هامة من خواص مولد التاكو اللاتزامني .

وسنستعرض كيفية ارتباط الـ م.م.ك. E_g المؤثرة في ملف الخرج بسرعة دوران الجزء المتحرك، فإن هذه القوة تتناسب مع السيالة العرضية :

$$\phi_{q \max} = F_{2q} / R_{\Delta q}$$

حيث :

F_{2q} : القيمة العظمى للقوة المحركة المغناطيسية المؤثرة في الدوار وفق المحور العرضي .

$R_{\Delta q}$: المقاومة المغناطيسية للآلة في المحور العرضي ، ويصل طول الثغرة الهوائية المكافئ للآلة اللاتزامنية ذات الدوار الأجوف إلى قيمة كبيرة .

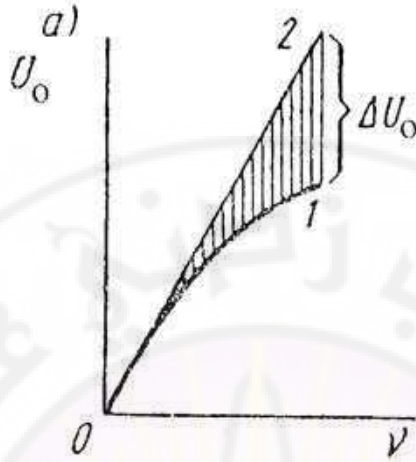
لذلك تعتبر المقاومة المغناطيسية لهذه الآلات ثابتة (يمكن إهمال المقاومة المغناطيسية للجزء الحديدي لضآلتها) .

وبالتالي تتناسب قيمة السيالة المغناطيسية العرضية مع القوة المحركة المغناطيسية F_{2q} التي تتناسب بدورها مع التيار i_{r0} والقوة المحركة الكهربائية الدورانية e_{r0} للجزء المتحرك بيد أن e_{r0} متناسبة طردياً مع السيالة ϕ_{d1} وسرعة دوران الجزء المتحرك n .

$$U_0 \approx E_g = C_1 f_1 \phi_{q \max} = C_2 \cdot f_2 F_{2q} = C_3 f_1 \phi_{d \max} = C_4 \cdot n \dots \dots \dots (7-11)$$

حيث :

C_1, C_2, C_3, C_4 : ثوابت .



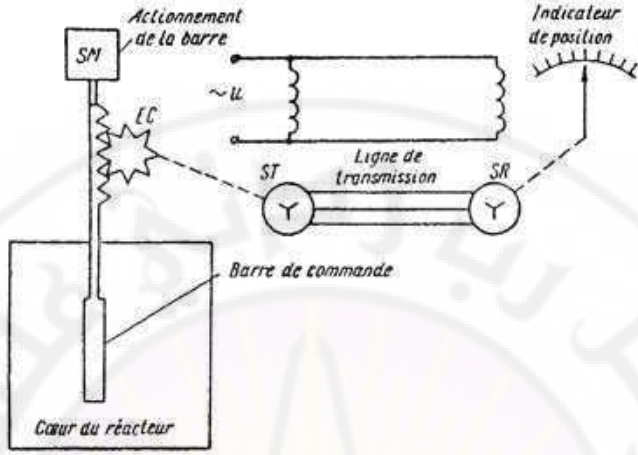
الشكل (7-15) مميزات خرج مولدات التاكو اللائزمانية

وهكذا فإن القوة المحركة الكهربائية في ملف مولد التاكو المثالي تتناسب طردياً مع سرعة دوران الجزء المتحرك. بمعنى آخر و يمكن القول إن مميزة خرج هذا المولد المحددة بالتابع $U_0 = f(v)$ ، لها شكل مستقيم وفي شروط العمل الحقيقية تنحرف مميزة خرج هذا المولد عن الشكل الخطي أي يظهر خطأ في المطال مقداره ΔU_0 .

٧-٥-٥ السيلسينات أو جملة الارتباط التزامني :

٧-٥-٥-١ مقدمة :

تستخدم السيلسينات في مجال التحكم عن بعد ، والقياس عن بعد في شتى مجالات الصناعة والأتمتة ، حيث تقوم بعملية النقل المتزامن للزاوية إلى مسافات لا تتجاوز عدة أمتار، وقد تصل إلى عشرات الكيلومترات، وكمثال يوضح الشكل (7-16) مخطط السيلسين الكاشف (التأشير) لنقل الوضعية الملتقطة من مجس القيادة في المفاعل النووي ، حيث يربط هذا المجس ميكانيكياً مع دائرة المرسل التوافقي، وذلك بوساطة مسنن يقوم بتحويل الانزياح الخطي إلى انزياح زاوي .



الشكل (16-7) استخدام السيلسين التأشير في التحكم بمفاعل نووي [6]

ويتواجد السيلسين المستقبل SR على لوحة القيادة للمفاعل ويكون محور دائرة محملاً بإبرة تأشير إلى مجس التحكم في المفاعل النووي . وتتصل ملفات الدائر لكل من المرسل والمستقبل كهربائياً فيما بينهما بواسطة خطوط النقل الكهربائية . وبالاختيار المناسب يمكن الحصول على دقة عالية في الدلالة على وضعية المجس . كذلك تستخدم السيلسينات في التحكم بتحديد اتجاه السفن وذلك عن طريق تغيير وضعية دفة القيادة .

٧-٥-٢ مبدأ عمل جملة الارتباط التزامنية وبنية السيلسينات :

تستخدم آلات الارتباط التزامني من أجل الفتل أو التدوير التزامني لمحركين أو عدة محاور غير مرتبطة فيما بينها ميكانيكياً . ويتم الحصول على أبسط شكل لجملة الارتباط التزامني عن طريق استخدام آلتين تحريضيتين متماثلتين مرتبطتين فيما بينهما كهربائياً تدعى بالمزامنات الذاتية أو السيلسينات تربط إحدى هاتين الآلتين مع محور

القيادة وتدعى بالموجه ، أما الآلة الأخرى فتتصل بالمحور المقاد ارتباطاً مباشراً أو بمساعدة محرك منفذ (سيرفو) مساعد وتدعى بالمستقبل .

يتلخص مبدأ عمل جملة الارتباط التزامني بأنه عند فشل متحرك السيلسين الموجه لاتساوي الزاوية θ_r فإن دوار السيلسين المستقبل يدور بزاوية θ_r بزاوية ما مقدارها ، وبالتالي فإن الجملة تسعى دوماً لإزالة عدم التوافق بين وضعيات الجزئين θ_r المتحركين للسيلسين الموجه والسيلسين المستقبل ، الذي يعبر عنه بزاوية عدم التوافق $\theta = \theta_r - \theta_r$.

في الحالة المثالية تنتهي قيمة θ في جملة الارتباط التزامني إلى الصفر .
نقسم جملة الارتباط التزامني إلى مجموعتين رئيسيتين جملة الفتل التزامني (نقل الزاوية) وجملة الدوران التزامني (المحور الكهربائي) .

حالات التشغيل :

يتم تشغيل السيلسينات في نظامي عمل أساسيين هما نظام الكشف ونظام التحويل عند استخدام السيلسين كالكاشف ، يتم ربط محور المستقبل مع محور المقود ربطاً مباشراً . ويستخدم هذا النظام عند قيم صغيرة لعزم الكبح المؤثر في المحور المقود ، حيث يكون ذلك عادة في الحالات التي يثبت عندها المحور مؤشر كاشف متوازن بشكل جيد (من هنا أتت تسميته الكاشف) .

ترسل في نظام التحويل الإشارة الناتجة عن عدم التوافق بين وضعية متحرك المستقبل ومتحرك الموجه عبر مضخم الإشارة إلى محرك المنفذ ، الذي يقوم بتدوير المحور المقود ودوار السيلسين المستقبل ويزيل بذلك عدم التوافق . في هذه الحالة تكون إشارة خرج المستقبل متناسبة مع جيب زاوية عدم التوافق . لذلك سمي نظام عمل السيلسين هذا بنظام التحويل ، ويستخدم نظام التحويل في تلك الحالات، عندما يؤثر في المحور المقود عزم كبح كبير (عزم مقاوم)، أي عندما يتوجب تدوير آلة ميكانيكية كبيرة .

بنية السيلسينات :

تملك المزامنات الذاتية (السيلسينات) ملفين : الملف الأول أو ملف التهيج ، والملف الثانوي أو ملف المزامنة، وتقسّم السيلسينات حسب عدد أطوار ملف التهيج إلى السيلسينات أحادية الطور السيلسينات ثلاثية الطور .

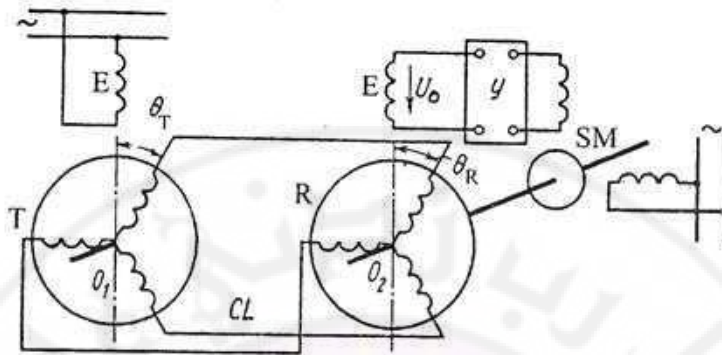
٧-٥-٣ عمل السيلسين أحادي الطور في نظام التحويل :

سنستعرض فيما يلي نظرية السيلسين أحادي الطور على نمط السيلسينات ذات حلقات الانزلاق وملف التهيج المتوضع على الثابت، كما أن جميع الجوانب الأساسية لهذه النظرية يمكن تعميمها أيضاً على السيلسين ذي التماسات المنزلقة الذي يتوضع ملف التهيج فيه على المتحرك، وعلى السيلسينات عديمة الحلقات .

مبدأ العمل :

عند تشغيل السيلسينات في نظام التحويل يكون ملف التهيج E للسيلسين الموجه T الشكل (7-17) المرتبط ميكانيكياً مع محور القيادة O_1 موصلاً إلى شبكة التغذية أحادية الطور ، أما ملف التهيج E في السيلسين المستقبل R فيوصل إلى المضخم y الذي يقوم بإيصال التغذية إلى ملف التحكم في المحرك المنفذ S_M ، ويوصل ملف المزامنة في كلا السيلسينين فيما بينهما بواسطة خط الاتصال CL .

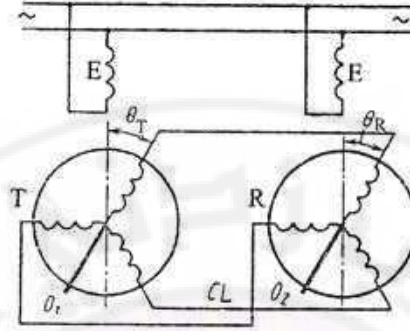
يولد التيار المتناوب المار في ملف التهيج السيلسين الموجه سيالة مغناطيسية نبضية تؤدي إلى نشوء قوة محرّكة كهربائية في الأطوار الثلاثة لملف المزامنة . بما أن ملفي المزامنة في الموجه والمستقبل مرتبطاً فيما بينهما عبر خط الاتصال لذلك يسري تيار يؤدي إلى توليد سيالة مغناطيسية نبضية في السيلسين المستقبل . وعند ظهور عدم التوافق بين وضعيّة متحرّكي الموجه والمستقبل تحرض هذه السيالة في ملف التهيج قوة محرّكة كهربائية محددة ، وبالتالي يظهر توتر ما في خرج هذا الملف يرسل هذا التوتر عبر المضخم إلى ملف التحكم بالمحرك المنفذ ، فيقوم هذا الأخير بنقل المحور المقود O_2 ومتحرك السيلسين المستقبل بأن واحد. وعند زوال عدم التوافق يصبح توتر الخرج معدوماً ويتوقف المحور عن الدوران.



الشكل (17-7) مخطط توصيل السيلسينات عند تشغيلها في نظام التحويل [6]

٧-٥-٥ تشغيل السيلسينات أحادية الطور في نظام الكشف :

عند تشغيل جملة الارتباط التزامني كالكاشف تكون قيمة العزم الميكانيكي المؤثر على محور السيلسين المستقبل صغيرة ، لذلك يتطلب ، من أجل قتل متحرك المستقبل أثر دوران متحرك المرسل ، وجود عزم دوران صغير يمكن الحصول عليه من المستقبل دون استخدام عناصر تضخيم إضافية . عند عمل السيلسين في هذا النظام تكون ملفات التهيج E للموجه T والمستقبل R موصلة إلى شبكة التيار المتناوب المشتركة ، الشكل (18-7) أما ملفات المزامنة فتوصل بعضها مع بعض عبر خط الاتصال CL . تعمل السيلالات المغناطيسية النبضية الناشئة في ملفات تهيج الموجه والمستقبل على تحريض قوى محرركة كهربائية في الأطوار الثلاثة لملفات المزامنة والتي تتبادل التأثير مع سيالة التهيج فتعرض في الموجه والمستقبل عزوماً مزامنة متعاكسة بالتأثير تحاول جعل زاوية عدم التوافق معدومة . يكون دوار الموجه عادةً مكبوحاً (مفرملاً) لذلك ينتقل عزمه التزامني إلى الآلة الميكانيكية التي تقوم بتدوير محور القيادة O_1 . أما العزم التزامني للمستقبل فيعمل على قتل جزئه المتحرك بالجهة نفسها ، وبالزاوية نفسها التي فيها متحرك المرسل .



الشكل (18-7) مخطط توصيل السيلسينات

٧-٦- المحركات الخطوية : Stepping Motors

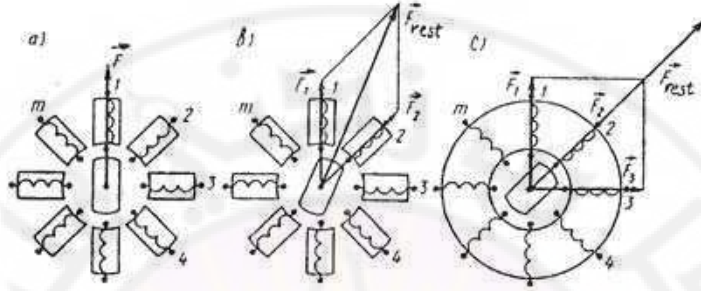
٧-٦-١ مبدأ العمل للمحرك الخطوي :

يدور الجزء المتحرك لهذا المحرك تحت تأثير كل نبضة بحركة زاوية تدعى بالخطوة، ويعمل المبدل (كالمبدل الإلكتروني مثلاً المغذي لأطوار ملف المتحرض) على تحويل التتابع المعطى لنبضات التحكم إلى جملة مكونة من m طوراً لنبضات تغذية بإحدى الحالتين وحيدة القطبية Unipolar وثنائية القطبية bipolar .

ويبين الشكل (19-7) مخطط المحرك المكون من m طوراً الذي لا يملك ملفاً للتهيج على الجزء المتحرك إذا تمت تغذية الأطوار $1, 2, 3, \dots, m$ لملف متحرض المحرك الخطوي بصورة متتابعة بنبضات توتر وحيدة القطبية، فإن الجزء المتحرك سيدور بشكل قفزي Steps نحو الوضعيات التي يكون عندها محوره منطبقاً مع محاور الأطوار $1, 2, 3, \dots, m$ الخ .

وبالتالي يأخذ الجزء المتحرك m وضعية مستقرة تتوافق مع اتجاه شعاع القوة المحركة المغناطيسية F_1 ، شكل (19-7-a) ، المؤثرة في ملف المتحرض في اللحظة الزمنية المعطاة، عند ذلك تكون خطوة الجزء المتحرك مساوية $2\pi/m$. من أجل زيادة محصلة القوة المحركة المغناطيسية الناشئة في المتحرض ، وبالتالي زيادة قيمة السيالة

المغناطيسية وعزم التوازن يطبق توتر التغذية عادة على عدد من الأطوار يزيد على الاثنين أو الثلاثة في آن واحد .



الشكل (19-7) مخططات تشغيل المحرك الخطوي

عند تغذية الأطوار المختلفة لملف المتحرض (c-a)

فمثلاً إذا تمت تغذية زوج من الأطوار بأن واحد فإن شعاع محصلة القوة المحركة المغناطيسية الناشئة في المتحرض F_{rest} ، ومحور الجزء المتحرك يصبحان منطبقين مع المستقيم المار من منتصف المسافة الفاصلة ما بين الطورين المتجاورين ، شكل (19-7-b)، وعند تغذية ثلاثة أطوار متجاورة بأن واحد، فإن الجزء الدوار يتحرك ليشغل وضعية تنطبق مع محور الطور الأوسط، شكل (19-7-c)، وإذا أُجري توصيل التغذية بصورة متناوبة إلى عدد مزدوج من الأطوار [زوج ثم إلى عدد فردي (واحد ، ثلاثة)] يصبح لدوار المحرك $2m$ وضعية مستقرة، وتصبح خطوته مساوية $\frac{\pi}{m}$ وتدعى عملية التحكم بالمحرك، التي يتم عندها توصيل أطوار ملف المتحرض على التناوب بمجموعات متساوية مكونة من طورين أو ثلاثة الخ ... ، بالتحكم المتناظر. أما بالتوصيل المتناوب لمجموعات الأطوار غير المتساوية فيدعى بالتحكم اللامتناظر وتكون المحركات الخطوية عادة محركات تزامنية لا تملك ملفاً للتهييج على الجزء المتحرك، ويمكن أن تكون مغناطيسيات دائمة أو ردية أو تحريضية [7].

ومن أجل الحصول على الخصائص الستاتيكية (الساكنة) والديناميكية (الحركية) المطلوبة تصنع هذه المحركات دون ملف إقلاع ، ويشكل فيها الجزء المتحرك بقطر أصغري وتصمم بتحميل كهرومغناطيسي كبير .

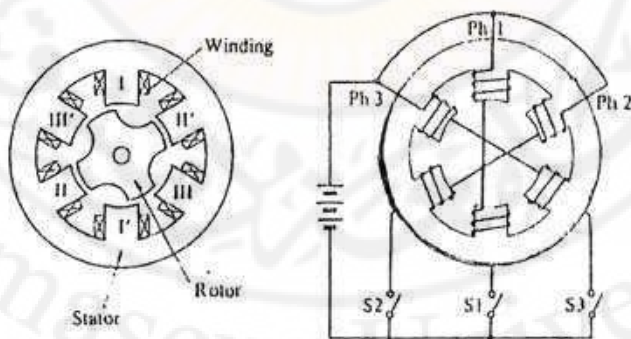
من الملائم استخدام المحرك الخطوي من أجل قيادة الآلات التي تعمل بصورة منقطعة، أو الآلات التي تعمل بشكل مستمر ، وذلك إذا كانت إشارة التحكم معطاة على شكل نبضات متتابعة (آلات قيادة السيور المتحركة المستخدمة لإدخال وإخراج المعلومات والعدادات وآلات تحريك ذات التحكم المبرمج .. الخ) .

٢-٦-٧ تصنيف المحركات الخطوية

تستخدم أنواع مختلفة من المحركات الكهربائية، لذلك يمكن تصنيف المحركات الخطوية إلى عدة أنواع وفقاً لبنية ومبدأ عمل المحرك .

١-٢-٦-٧ المحرك ذو الممانعة المغناطيسية المتغيرة VR Motor

إن المحرك ذو الممانعة المتغيرة (Variable - reluctance) ، أو اختصاراً المحرك VR هو المحرك الأساسي الأكثر انتشاراً للمحركات الخطوية الشكل (20-7) .



الشكل (20-7)

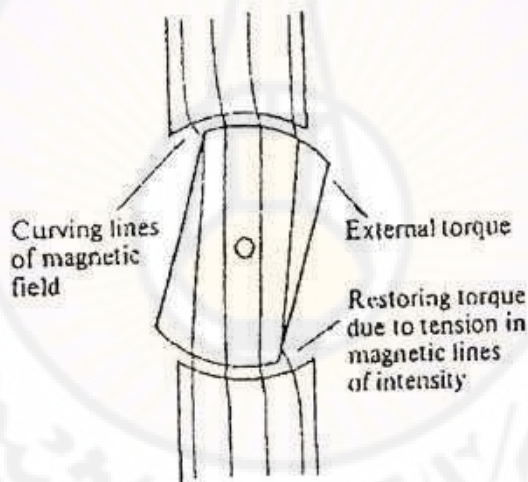
يظهر مقطع عرضي لمحرك بسيط من هذا النوع ، وذلك لتبسيط شرح المبادئ الأساسية لهذا المحرك والذي هو عبارة عن محرك ثلاثي الطور بستة أسنان ثابتة ينتمي كل سنين متقابلين للثابت ، الزاوية بينهما 180° درجة إلى نفس الطور ، وهذا يعني أن الملفات على كل سن تكون موصولة على التسلسل أو التفرع مع ملفات السن الآخر ، (وفي الشكل لدينا التوصيل تسلسلي) في حين أن للدوار أربعة أسنان . يصنع الثابت ونواه الدوار من صفائح الفولاذ السيليكوني الصلب، حيث يجب أن يكون لمادة النواتين المغناطيسيتين للدوار والثابت نفوذية عالية . يجب معرفة فيما إذا كانت لسني الثابت اللذين ينتميان لطور واحد نفس القطبية المغناطيسية، أو أن لهما قطبية مختلفة. وبما أن هذا الأمر يؤثر على المسائل الأخرى، لذلك سنفترض في هذا المثال أن للسنيين قطبية متعاكسة . وهكذا فإن الأسنان I و II و III ستشكل قطباً شمالياً عندما تهيج في حين أن الأسنان المقابلة I' و II' و III' تشكل قطباً جنوبياً إذا هيجت ، كما هو موضح في الشكل (21-7) .



الشكل (21-7)

إن التحكم بتيار كل طور فتح / إغلاق (Off / ON) يكون من خلال المفتاح الخاص بهذا الطور ، فإذا مر التيار في وشيعتي الطور الأول PhI ، وبعبارة أخرى عندما يتم

تهييج Ph_1 ، فإن الفيض المغناطيسي يظهر كما في الشكل (7-21)، ومن ثم فإن الدوار سوف يدور ليصل إلى وضعية يتقابل فيها سنّا الثابت I و II مع أي من سني الدوار . وهكذا فعندما يتوجه سن الثابت وسن الدوار فإن الممانعة المغناطيسية تصبح أصغر، وهذه الحالة تعطي وضعية توازن أو راحة . وإذا تحرك الدوار تاركاً وضعية التوازن بسبب تطبيق عزم خارجي على محوره سوف يتولد عزم إرجاع، كما في الشكل (7-22)، ففي الشكل يظهر أن العزم الخارجي مطبق لتدوير الدوار باتجاه عقارب الساعة CW، وأن الدوار مزاح بنفس الاتجاه. وهذا سوف يؤدي إلى انحناء خطوط الفيض المغناطيسي عند حواف أسنان كل من الثابت والدوار .



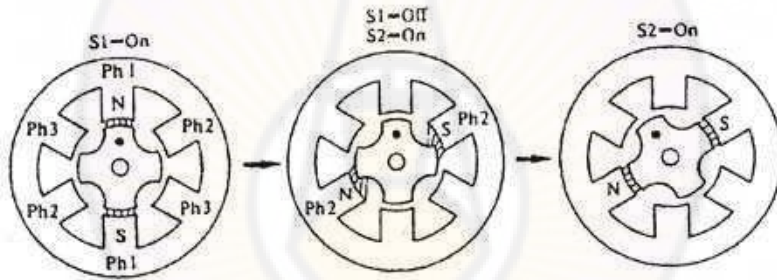
الشكل (7-22)

وحسب إجهادات ماكسويل فإن خطوط الكثافة المغناطيسية تولد قوة شد كبيرة، أو بعبارة أخرى فإن الخطوط المغناطيسية تحاول أن تكون قصيرة ومستقيمة قدر الإمكان (مثل السلك المرن) .

وهذا التأثير يلاحظ عند حواف الأسنان ، ويولد عزمًا باتجاه عكس عقارب الساعة CCW لإرجاع الدوار حتى يتقابل مع أسنان الثابت .

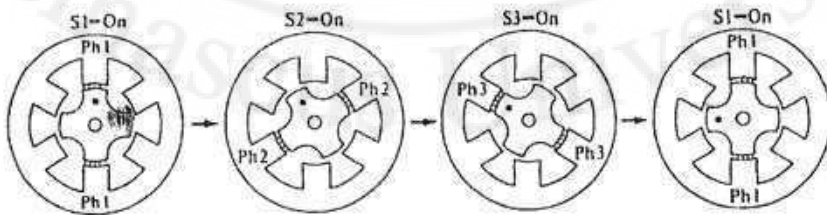
وكما يظهر في نفس الشكل السابق ، عندما تتراح أسنان كل من الثابت والدوار للطور المهيج ، فإن الممانعة المغناطيسية تكون كبيرة والمحرك VR يعمل (يتحرك) بحيث تصبح الممانعة المغناطيسية أصغر .

ولكن ماذا سيحدث عندما يفقد P_{11} تهيجه ، ويتم تهيج P_{12} . في هذه الحالة سوف تزداد ممانعة المحرك الناتجة عن منبع التغذية المستمر بشكل مفاجئ تماماً بعد أن تأخذ المفاتيح حالاتها الجيدة ، وكما هو واضح من الشكل (23-7) فإن الدوار سوف يدور بعد ذلك بزاوية خطوية 30° درجة باتجاه عكس عقارب الساعة (CCW) لجعل الممانعة أصغر ما يمكن . يطلق على مثل هذه الحركة التي تدور بزاوية خطوية لكل تغيير في حالة التهيج اسم الخطوة (Step) .



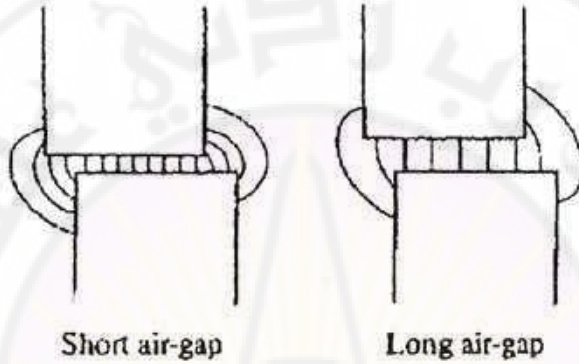
الشكل (23-7)

بعد إتمام الدوران بخطوة سنّية للدوار على ثلاث مراحل ، فإن الدوار سيعود بشكل طبيعي إلى وضعيته الأولى التي انطلق منها (وضعية التوازن) ، وهذه العملية مبيّنة على الشكل (24-7) . ويمكن الآن الإشارة إلى بعض المميزات الأساسية لبنية محركات VR وهي :



الشكل (24-7)

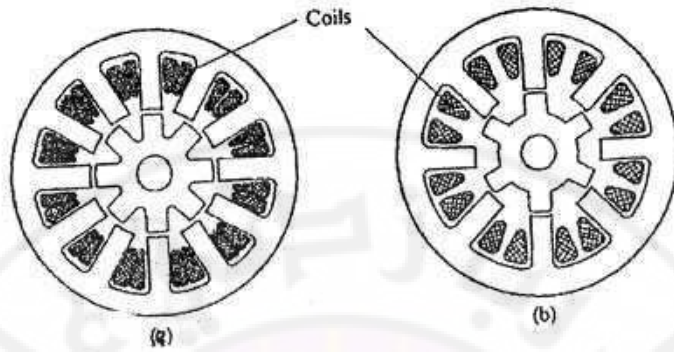
أ- يجب أن تكون الفجوة الهوائية أصغر ما يمكن: يجب أن تكون الفجوة بين أسنان الثابت وأسنان الدوار في المحركات الخطوية أصغر ما يمكن لتوليد عزم كبير من دوار صغير الحجم، وكذلك للحصول على دقة عالية في الوضعية. والشكل (25-7) يبين مقارنة بين فجوة هوائية طويلة وأخرى قصيرة .



الشكل (25-7)

ويظهر من هذا الشكل أنه عند نفس المستوى من القوة المحركة المغناطيسية فإن الفجوة القصيرة ستعطي أيضاً مغناطيسياً أكثر والذي يولد عزمًا أكبر. ومن الواضح أيضاً أنه عند تطبيق عزم خارجي على محور الدوران فإن مقدار الإزاحة عن وضعية التوازن يتناقص كلما صغرت الفجوة الهوائية ، عاماً أن طول الفجوة في المحركات الحديثة يتراوح بين $30\mu m$ إلى $100\mu m$.

ب- زوايا الخطوة الصغيرة : إحدى الميزات الخاصة للمحرك الخطوي هي إمكانية الحصول على زوايا خطوية صغيرة، فالزاوية الخطوية 30° درجة المحققة بواسطة البنية الموضحة في الشكل (24-7) ليست زوايا صغيرة، و يبين الشكل (26-7-a) محركاً ثلاثي الطور له 12 سنّاً للثابت و 8 أسنان للدور، وهذا يعني أن هذين العددين هما ضعف العددين المتعلقين بالبنية الموضحة في الشكل (24-7) ، أما الشكل (26-7-b) فيمثل محركاً رباعي الطور له 8 أسنان في الثابت، و 6 أسنان للدور، و الزاوية الخطوية لهذين المحركين هي 15° درجة .



الشكل (26-7)

إن العلاقة بين الزاوية الخطوية θ_s ، وعدد الأطوار m ، وعدد أسنان الدوار N_r ، وأخيراً عدد الخطوات S هي كالتالي:

$$S = 360 / \theta_s = m \cdot N_r$$

ومن هذه المعادلة تبين أنه لتصغير الزاوية الخطوية يجب زيادة أسنان الدور .

مثال :

عدد الأسنان للدوار $N_r=8$ وعدد الأطوار 3 لذلك يكون عدد الخطوات

$$S = 3 \times 8 = 24 \text{ خطوة}$$

وبالتالي فإن الزاوية لهذا المحرك هي :

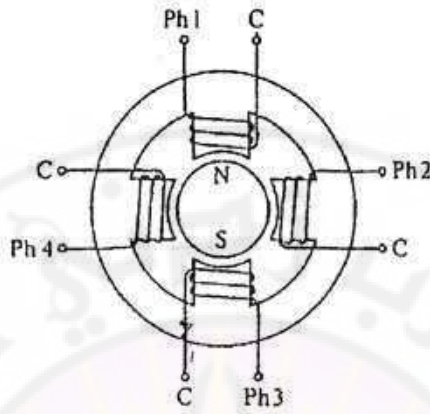
$$\theta_s = 360 / S = 15^\circ$$

وهذا المثال يبين أن عدد أسنان الثابت لا يشكل عاملاً مباشراً في تحديد الزاوية الخطوية .

٢-٢-٦-٧ المحرك الخطوي ذو المغناطيس الدائم : PM

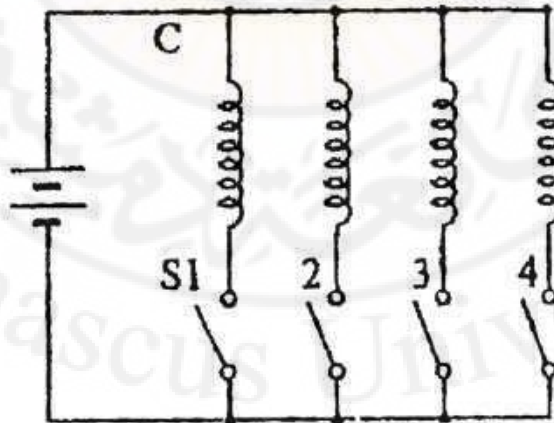
Permanent magnet stepping motor

المحرك الخطوي الذي يملك جزءاً دواراً مؤلفاً من مغناطيس دائم يسمى المحرك الخطوي ذو المغناطيس الدائم، وفي الشكل (27-7) يمثل محركاً نموذجياً رباعي الطور له مغناطيس دائم .



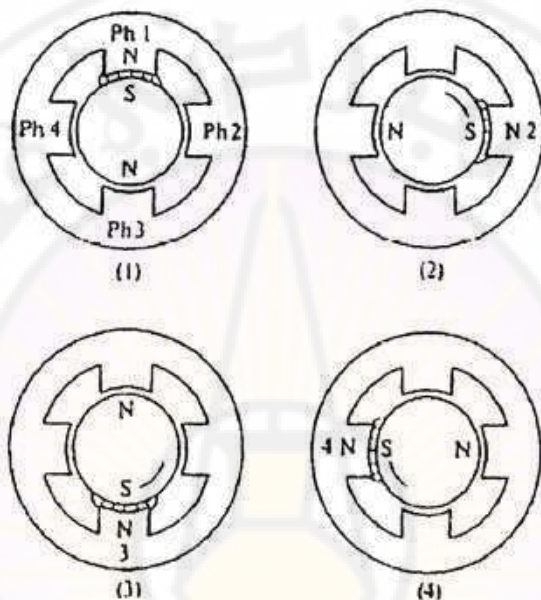
الشكل (27-7)

يستخدم المغناطيس الدائم الأسطواناني في هذه الحالة كدوار بدون أسنان، ويكون للثابت أربع أسنان تلف حولها الملفات. أما دائرة القيادة الأساسية لهذا المحرك فهي، كما في الشكل (28-7)، أن الطرف C من كل طور يوصل مع القطب الموجب لمنبع التغذية، فإذا هيجت الأطوار بالتعاقب التالي Ph-1-2-3 . . . فإن الدوار سوف يدور باتجاه عقارب الساعة CW كما هو مبين في الشكل (29-7) .



الشكل (28-7)

من الواضح أن الزاوية الخطوية لهذا المحرك هي 90° درجة، فإذا تضاعف عدد أسنان الثابت، وعدد الأقطاب المغناطيسية للدوار، فسوف نحصل على محرك رباعي الطور بزاوية خطوية 45° درجة كما في الشكل (29-7).



الشكل (29-7)

لتصغير الزاوية الخطوية أيضاً في محرك PM يجب زيادة عدد الأقطاب المغناطيسية، وعدد أسنان الثابت، ولكن هناك حدود لكل من عدد الأسنان، وعدد الأقطاب المغناطيسية، وكان البديل لذلك هو الاعتماد على البنية الهجينة.

إن ميزة المحرك PM يكمن في دواره الذي يستقر عند وضعية ثابتة حتى ولو انقطع التهييج.

وتدعى هذه التقنية بتقانة المسك، وتسمى وضعياتها المحددة بشكل مسبق بوضعيات الإعاقة، وبشكل عام تنطبق وضعيات الإعاقة على وضعيات الراحة المهيبة (أو وضعيات التوازن) طالما أن الأطوار فقط خاضعة للتهييج. وهناك سينيّتان في استخدام المغناطيس الدائم هما :

١- ارتفاع ثمن المغناطيس

٢- إن كثافة الفيض الأعظمية محددة بمستوى المغناطيسية المتبقية للمغناطيس

٧-٦-٢-٣- المحركات الخطوية الهجينة hybrid stepping motors

هناك نوع آخر من المحركات الخطوية التي تحوي مغناطيساً دائماً في دوارها وهو المحرك الخطوي الهجين ، وقد جاءت كلمة هجين من طبيعة عمل المحرك المبنية على دمج مبدأي المحرك VR والمحرك PM .

الفصل الثامن
اختيار استطاعة المحركات الكهربائية
SELECTION OF ELECTRIC MOTOR
POWER RATINGS

٨-١ الشروط العامة لاختيار استطاعة المحركات الكهربائية

إن الاختيار الصحيح لاستطاعة المحركات الكهربائية هي قضية ذات مضمون اقتصادي في أي دراسة كهربائية أو أي مصنع، و غالباً ما يكون لهذا الاختيار تأثير كبير على رأس المال، و تكاليف التشغيل للقيادة الكهربائية المتعددة. فإذا كان المحرك ذا استطاعة منخفضة و أقل من الاستطاعة المطلوبة للآلة فإنه يؤدي إلى ما يلي:

- ١- تشويه عمل نظام القيادة الكهربائية.
 - ٢- إنقاص إنتاجية العمل و الجودة.
 - ٣- إمكانية تعطل المحرك و خروجه عن العمل قبل الوقت المحدد له.
- أما في حالة اختيار استطاعة محرك أكبر من الاستطاعة المطلوبة للآلة التي يديرها فإنه يؤدي إلى ما يلي:

- ١- ارتفاع كلفة نظام القيادة الكهربائية.
 - ٢- زيادة قيمة الضياعات.
 - ٣- إنقاص قيمة المردود في المحرك.
 - ٤- تخفيض قيمة عامل الاستطاعة إذا كان المحرك يعمل على التيار المتناوب.
- جميع هذه العوامل تؤثر تأثيراً كبيراً على اقتصادية العمل، و من هنا تتبع أهمية الاختيار الصحيح لاستطاعة المحركات الكهربائية، و خاصة إذا أخذنا بعين الاعتبار الكمية الكبيرة من المحركات التي تعمل في شتى المجالات الصناعية.
- يتم اختيار استطاعة المحرك على أساس الشروط الحرارية أولاً /ثم يتم التحقق من شروط زيادة التحميل و عزم الإقلاع اللازم.

بصورة عامة يتم اختيار استطاعة المحرك الكهربائي على أساس تأمين العمل المطلوب مع الحفاظ على الشروط الحرارية، لذلك يجب علينا حساب الحمولة ليس فقط خلال الحالة المستقرة، و إنما خلال الحالة العابرة أيضاً، و التي تتحدد بما يسمى مخططات الحمولة، و هي مخططات تابعة للزمن و تمثل:

$$T = f(t)$$

$$P = f(t)$$

$$I = f(t)$$

عزم المحرك الدوراني مع الزمن

استطاعة المحرك مع الزمن

تيار الحمولة مع الزمن

و استناداً إلى هذه المخططات يشترط في اختيار استطاعة المحرك أن يكون محملاً بكامل حمولته مع الحفاظ على الشروط الحرارية للمواد العازلة الداخلة في المحرك، و كذلك شرط امتلاك المحرك لعزم إقلاع مناسب لتأمين العمل المطلوب على الحمولات التي يعمل عليها.

إن الحرارة المتولدة في المحرك تظهر على حساب الضياعات الناشئة فيه أثناء عملية تحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية.

و تتألف هذه الضياعات من الضياعات في النحاس و الحديد و الضياعات الميكانيكية في المحرك، و التي تؤدي إلى تسخين الأجزاء المختلفة فيه، حيث يتم تسخين المحرك بالكامل، و يمكننا حساب الضياعات حسب المعادلة التالية:

$$P = P_1 - P_2 = P_1 (1 - \eta) = k + q_n x^2 \quad (8-1)$$

حيث:

P_1 - الاستطاعة المقدمة إلى المحرك

P_2 - الاستطاعة المنتجة على محور المحرك

η - مردود المحرك

k - الضياعات الثابتة (الحديدية، الميكانيكية و ضياعات التهوية).

q_n - الضياعات المتغيرة (النحاسية) عند الحمل الاسمي.

$$x = \frac{P_2}{P_n} \text{ نسبة تحميل المحرك.}$$

و يمكننا كتابة المعادلة (8-1) على الشكل التالي:

$$\Delta P = q_n (a + x^2) \quad (8-2)$$

حيث:

$$a = \frac{k}{q_n} \text{ : عامل الضياعات الثابتة.}$$

و تستمر حرارة المحرك في الارتفاع حتى تبلغ قيمة عالية إذا لم يكن قادراً على تبديد هذه الحرارة إلى الوسط الخارجي، و لكن تصمم المحركات الكهربائية، بحيث يزداد فيها معدل انتقال الحرارة من سطحها الخارجي إلى الوسط المحيط مع ارتفاع درجة الحرارة، بحيث تصبح كمية الحرارة المنتشرة في الوسط المحيط في واحدة الزمن مساوية إلى كمية الحرارة المتولدة في المحرك في واحدة الزمن، و هذا ما ندعوه بحالة التوازن الحراري.

غير أن حالة التوازن الحراري لا تتحقق إلا عندما يعمل المحرك على حملته الاسمية و لمدة طويلة.

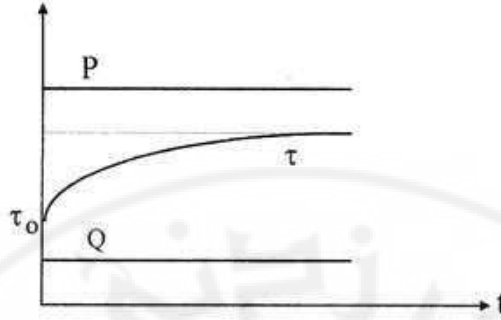
٨-٢ مخططات الحمولة

تقسم مخططات الحمولة إلى ثلاثة أنواع رئيسية و هي:

- الحمولة المستمرة
- الحمولة قصيرة الزمن
- الحمولة المنقطعة الدورية.

٨-٢-١ الحمولة المستمرة Continuous Load

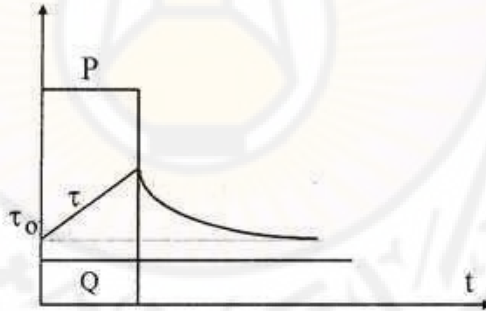
هذه الحمولة توافق عمل المحرك لفترة زمنية طويلة نسبياً قد تستمر ساعات عدة أو بضعة أيام دون انقطاع، و كمثال على هذه الآلات المراوح الصناعية و المضخات و بعض آلات قطع المعادن و آلات الدرفلة و غيرها، و يبين الشكل (٨-١) مخطط الحمولة الموافق لهذه الحالة و هو عبارة عن علاقة استطاعة المحرك بالزمن و الضياعات بالزمن، و كذلك منحنى ارتفاع حرارة المحرك حيث تستقر عند قيمة ثابتة تعادل درجة التوازن الحراري.



الشكل (1-8) مخطط الحمولة المستمرة المنتظمة

٢-٢-٨ الحمولة قصيرة الزمن Short-time Load

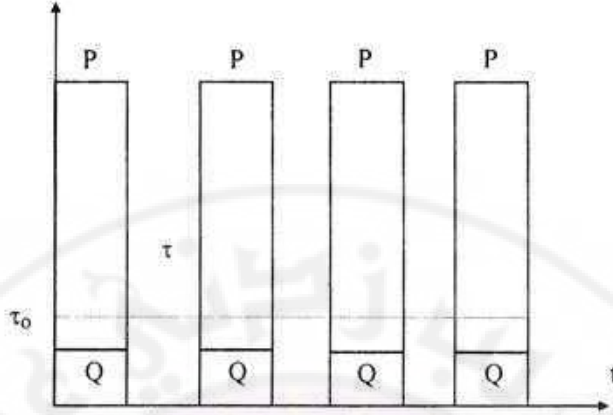
و توافق حالة عمل المحرك لفترة قصيرة ،كما في الشكل (2-8) ،حيث لا تصل حرارة المحرك إلى درجة التوازن الحراري ،و تعود إلى الهبوط حتى تصل إلى درجة حرارة الهواء المحيط به خلال فترة توقفه عن العمل. و كمثال على الآلات التي تعمل لفترات قصيرة الجسور المتحركة و البوابات المختلفة.



الشكل (2-8) مخطط الحمولة قصيرة الزمن

٣-٢-٨ الحمولة المتقطعة الدورية Intermittent Periodic Load

و توافق حالة عمل المحرك لفترات قصيرة متكررة قد تكون متساوية أو متغيرة ،و ترتفع حرارة المحرك خلال فترة العمل، ثم لا تلبث أن تهبط خلال فترة الراحة، و لكنها عادة لا تعود إلى درجة حرارة الهواء المحيط به. و كمثال على الآلات التي تعمل بصورة متقطعة دورية الروافع و المصاعد الكهربائية و بعض آلات قطع المعادن. و يبين الشكل (3-8) مخطط الحمولة لهذه الحالة.



الشكل (8-3) مخطط الحمولة المتقطعة الدورية

إن الارتفاع في درجة الحرارة الذي يمكن أن تتحمله المحركات يحدده الاستقرار الحراري للمواد العازلة المستخدمة فيها، و باستخدام مواد ذات استقرار حراري أعلى يمكن استثمار المحركات بشكل أفضل.

٣-٨ أنواع المواد العازلة المستخدمة

Types of Insulations Employed

يجب أن تملك المواد العازلة المواصفات التالية:

- أن يكون جهد انهيارها عال .
- أن تكون ذات متانة ميكانيكية عالية.
- أن تكون مقاومة للاهتزاز .
- أن تكون الضياعات فيها منخفضة.

إن هذه الصفات تتناقص مع مرور الزمن، و ذلك تبعاً لدرجات الحرارة التي تتعرض لها و مدة استمرارها. و يمكن تصنيف المواد العازلة المستخدمة في الآلات الكهربائية إلى الأنواع التالية:

يتركب من خيوط قطنية و أقمشة، وورق و مواد سيللوزية ليفية (عضوية) أو حرير، غير مشربة و غير مغموسة في سائل عازل، و الدرجة المئوية لتحملها الحراري هي 90°C .

٢- عازل من النوع A:

و يتكون من نفس المواد كما في العازل من النوع Y، و لكنها مشربة أو مغموسة في سائل عازل، و الدرجة المئوية لتحملها الحراري هي 105°C .

٣- عازل من النوع E:

و هو مكون من رقائق عضوية تركيبية و مواد أخرى لها نفس الاستقرار الحراري، و الدرجة المئوية لتحملها الحراري هي 120°C .

٤- عازل من النوع B:

و هو مكون من مواد ذات أساس من الميكا و الأمينط، أو ذات أساس من الزجاج، أو النسيج الليفي، و ذات عنصر تماسك عضوي، و الدرجة المئوية لتحملها الحراري هي 130°C .

٥- عازل من النوع F:

و هو مكون من مواد ذات أساس من الميكا و الأمينط، أو ذات أساس من الزجاج، أو النسيج الليفي متماسكة مع مواد صناعية و مشربة بمواد عضوية، و الدرجة المئوية لتحملها الحراري هي 155°C .

٦- عازل من النوع H:

و هو مكون من مواد ذات أساس من الميكا و الأمينط، أو ذات أساس من الزجاج أو النسيج الليفي مع مواد تماسك سيلكونية و مشربة بمواد عضوية، و الدرجة المئوية لتحملها الحراري هي 180°C .

٧- عازل من النوع C:

مكون من الميكا أو مواد السيراميك أو زجاج أو كوارتز، و الدرجة المئوية لتحملها الحراري هي 180°C .

و لتبسيط الحسابات تعتمد عادةً درجة حرارة الوسط المحيط مساوية إلى $(+ 40^{\circ}C)$ ، فإذا كانت حرارة الهواء المحيط أقل من هذه القيمة، فيمكننا زيادة تحميل المحرك بالمقارنة مع الحمولة المسموح بها حسابياً، و إذا كانت الحرارة أكبر من القيمة المعتمدة فيجب الإنقاص من حمولته المسموح بها حسابياً.

أما الشرط المطلوب تحقيقه للزيادة الآتية المسموح بها في تحميل المحرك بالمقارنة مع الحمولة المسموح بها حسابياً، و التي يحتاج لها المحرك أثناء الإقلاع عادةً يعبر عنه بما يسمى بمعامل زيادة التحميل.

و عادةً تصمم المحركات الكهربائية بحيث تسمح بتحقيق هذا الشرط، و في حدود معينة، تبعاً لنوع المحرك الكهربائي و كيفية تصميمه، و يبين الجدول (1-8) قيم معامل زيادة التحميل الموافق لأنواع المحركات الكهربائية.

نوع المحرك	معامل زيادة التحميل
محركات التيار المتناوب ذو الدوائر الملفوف	2 حتى 2.5
محركات التيار المتناوب ذو القفص السنجابي	1.7 حتى 2.5
المحركات التوافقية	2 حتى 2.5 و في بعض التصميمات الخاصة حتى 4
محركات التيار المتناوب ذات المجمع	2 حتى 3
محركات التيار المستمر	2 و في بعض التصميمات الخاصة حتى 4

الجدول (1-8)

٨-٤ تسخين و تبريد المحركات الكهربائية في حالة الحمل المستمرة

إن دراسة عملية التحول الحراري للضخعات الميكانيكية والكهربائية في المحرك، و التي تؤدي إلى تسخين أجزاء المحرك، و بالتالي ارتفاع درجة حرارته بالمقارنة مع حرارة الوسط المحيط به تعتبر عملية معقدة جداً نظراً لعدم تجانس كتلة المحرك الذي يتألف من أجزاء ميكانيكية و من ملفات.

لذلك لتبسيط عملية الدراسة، نفترض أن المحرك عبارة عن كتلة متجانسة لها نفس درجة الحرارة، كذلك نفترض أن كمية الحرارة المعطاة إلى الوسط المبرد تتناسب طردياً مع فرق درجة الحرارة بين المحرك و الوسط المحيط. تعطى معادلة التوازن الحراري للمحرك تحت الحمل الثابت بالعلاقة التالية:

$$Q dt = A \tau dt + C dt \quad [J] \quad (8-3)$$

حيث:

Q [J/sec]: كمية الحرارة الناتجة في المحرك خلال واحدة الزمن.

A [J/sec.C°]: عامل الانتقال الحراري و هو كمية الحرارة المعطاة من المحرك إلى الوسط الخارجي خلال واحدة الزمن، عندما ترتفع حرارة المحرك درجة مئوية واحدة.
 C [J/C°]: السعة الحرارية للمحرك و هي كمية الحرارة اللازمة لتسخين المحرك درجة مئوية واحدة.

τ [C°]: ارتفاع درجة حرارة المحرك فوق حرارة الوسط المحيط.

و يمكن تمثيل سخونة المحرك بمقدار ارتفاع درجة الحرارة فوق درجة حرارة الوسط المحيط كتابع للزمن أي:

$$\tau = f(t)$$

من المعادلة (3) نستنتج أن:

$$(Q - A \tau) dt = C d\tau \quad (8-4)$$

و منه ينتج أن:

$$dt = \frac{C d\tau}{Q - A\tau} \quad (8-5)$$

و بإجراء التكامل نجد:

$$t = -\frac{C}{A} \ln(Q - A\tau) + k \quad (8-6)$$

حيث:

k - ثابت التكامل و الذي يعين من الشروط الابتدائية أي عندما :

في اللحظة $t = 0$ $\tau = \tau_0$ و بالتالي:

$$k = \frac{C}{A} \ln(Q - A\tau_0) \quad (8-7)$$

من المعادلة (8-6) نحصل على:

$$\begin{aligned} t &= -\frac{C}{A} \ln(Q - A\tau) - \ln(Q - A\tau_0) \\ &= -\frac{C}{A} \ln \frac{Q - A\tau}{Q - A\tau_0} \end{aligned} \quad (8-8)$$

و بحل المعادلة (8-8) بالنسبة لـ τ نجد:

$$-\frac{A}{C} t = \ln \frac{Q - A\tau}{Q - A\tau_0} \quad (8-9)$$

و بتحويل هذه العلاقة إلى الشكل الأسّي نجد:

$$e^{-(A/C)t} = \frac{Q - A\tau}{Q - A\tau_0} \quad (8-10)$$

و منه نحصل على ارتفاع درجة الحرارة:

$$\tau = \frac{Q}{A} (1 - e^{-(\frac{A}{C})t}) + \tau_0 e^{-(\frac{A}{C})t} \quad (8-11)$$

و باعتبار أن :

$$\frac{C}{A} = T_H \quad (8-12)$$

$$\frac{Q}{A} = \tau_{ss} \quad (8-13)$$

حيث:

τ_{ss} : زيادة الحرارة المستقرة للمحرك فوق حرارة الوسط المحيط.

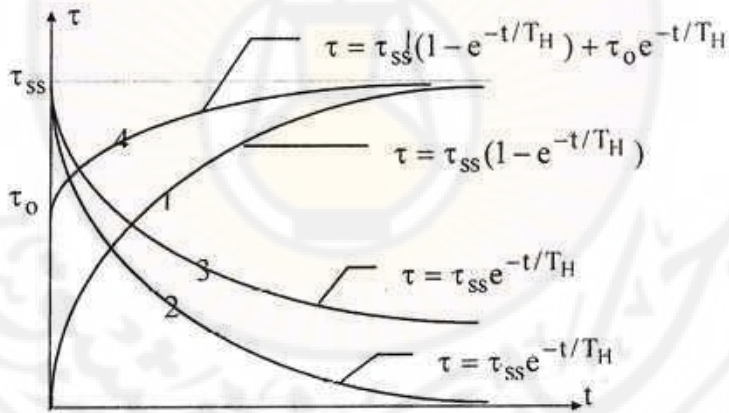
T_H : ثابت الزمن الحراري للمحرك، و الذي يمثل معدل التسخين، أي المدى الزمني الذي يسخن خلاله المحرك حتى يصل إلى الحرارة المستقرة τ_{ss} بفرض عدم تبديد أية حرارة إلى الوسط المحيط.

بإعادة كتابة المعادلة (8-11) بالشكل النهائي نحصل على ارتفاع درجة حرارة المحرك كتابع للزمن:

$$\tau = \tau_{ss} (1 - e^{-t/T_H}) + \tau_0 e^{-t/T_H} \quad (8-14)$$

و الشكل (4-8) يبين تخطيطياً شكل منحنى ارتفاع درجة الحرارة. و يمكن تفسير الكميتين T_H و τ_{ss} فيزيائياً من تحليل المعادلتين (8-11) و (8-14) عندما $t = \infty$ فإن المعادلة (8-11) تصبح:

$$\tau = \frac{Q}{A} = \tau_{ss} \quad (8-15)$$



الشكل (4-8) منحنيات سخونة و تبريد محرك كهربائي

في الواقع عندما $A = 0$ يمكن كتابة معادلة التوازن الحراري للمحرك بالشكل التالي:

$$Q dt = C d\tau \quad (8-16)$$

بافتراض أن المحرك يبدأ من درجة حرارة المحيط و $\tau_0 = 0$ و بتكامل المعادلة (8-16) نحصل على:

$$t = \frac{C}{Q} \tau \quad (8-17)$$

و بتعويض قيمة ارتفاع درجة الحرارة $\tau = \tau_{ss} = \frac{Q}{A}$ في المعادلة (8-17) نحصل على

الزمن الذي ترتفع فيه درجة حرارة المحرك حتى تصل إلى قيمة الحالة المستقرة:

$$\tau_{ss} = \frac{C}{Q} \tau_{ss} = \frac{C}{A} = T_H \quad (8-18)$$

و في شروط العمل الطبيعية و خلال الفترة التي يقدم فيها المحرك إلى الوسط المحيط جزءاً من الحرارة الناتجة فيه فإن ارتفاع درجة حرارته مع انقضاء الزمن T_H يصل إلى القيمة $(0.632\tau_{ss})$ و هذا ينتج من المعادلة التالية :

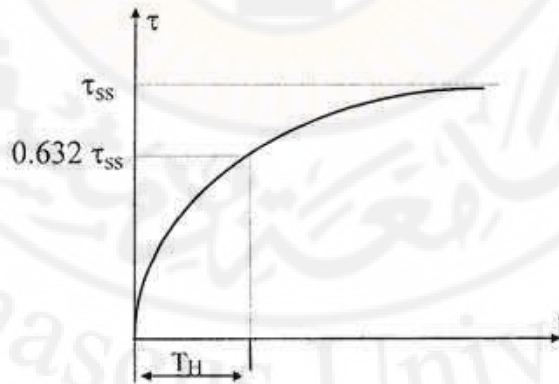
$$\tau = \tau_{ss}(1 - e^{-t/T_H}) \quad (8-19)$$

و التي حصلنا عليها من المعادلة (8-14) بعد عدّ الحرارة الابتدائية $(\tau_0 = 0)$.

إذا و بعد جعل $t = T_H$ في المعادلة السابقة ينتج لدينا:

$$\tau = \tau_{ss}(1 - e^{-1}) = 0.632\tau_{ss} \quad (8-20)$$

و استناداً إلى العلاقة (8-20) يمكننا تحديد قيمة ثابت الزمن الحراري بعد إنشائنا منحنى زيادة حرارة المحرك بموجب العلاقة (8-19) حيث ننشئ خطاً أفقياً من النقطة المقابلة للقيمة $(0.632\tau_{ss})$ يقطع المنحنى $\tau = f(t)$ المبين في الشكل (5-8) في نقطة ننزل منها عموداً يتقاطع مع محور الزمن عند قيمة الثابت الزمني.



الشكل (5-8)

تعيين الثابت الزمني للتسخين في النقطة $(0.632\tau_{ss})$

إن منحني تبريد المحرك يشبه منحني سخونة المحرك، و تبين دراسة المعادلات السابقة أن منحني التبريد من أجل نفس الثابت الزمني للتسخين سيكون الخيال المتناظر لمنحني السخونة، و قد يأخذ الثابت الزمني للتسخين و الثابت الزمني للتبريد نفس القيمة، حيث تبقى ظروف التبريد بدون تغيير عندما يعمل المحرك أو عند توقفه عن العمل بسبب التهوية المستقلة، و في المحركات ذاتية التبريد يكون الثابت الزمني للتبريد أكبر بحوالي مرتين أو ثلاث مرات من الثابت الزمني للتسخين بسبب تردي شروط نقل الحرارة.

٨-٥ اختيار استطاعة المحرك من أجل الحمولة المستمرة:

٨-٥-١ الحمولة المستمرة المنتظمة:

بالنسبة للآلات التي تعمل بصورة مستمرة و على حمل ثابت يكفي لاختيار استطاعة المحرك المطلوب لقيادتها معرفة استطاعة الآلة و المردود الكلي لنظام القيادة الكهربائية، حيث تساوي استطاعة المحرك في هذه الحالة إلى :

$$P = \frac{P_{mach}}{\eta} \quad (8-21)$$

حيث:

P [kw] - استطاعة المحرك

P_{mach} [kw] - استطاعة الآلة.

η - المردود الكلي.

و يتم اختيار المحرك الذي يملك استطاعة اسمية (P) من النشرات الفنية للمحركات بعد معرفة نوعها استناداً إلى شروط عمل الآلة، و إذا لم يتوفر المحرك الذي يملك استطاعة اسمية تساوي تماماً إلى (P) فيتم اختيار المحرك الذي يملك استطاعة أكبر بقليل من (P) حسب ما هو متوفر في جداول النشرة الفنية (Catalogue):

$$P_n \geq P \quad (8-22)$$

و يتم حساب استطاعة الآلة استناداً إلى معطياتها الفنية و شروط عملها، فمثلاً من أجل اختيار استطاعة محرك يدبر مضخة نابذة أو مكبسية تعمل لضخ الماء أو سوائل أخرى يجب معرفة استطاعة المضخة (P_p) و التي تساوي إلى :

$$P_p = P_{mach} = V \cdot \gamma \cdot H \cdot 10^{-3} [kw] \quad (8-23)$$

حيث:

$V [m^3/sec]$ - تدفق المضخة.

$\gamma [N / m^3]$ - كثافة سائل الضخ.

$H [m]$ - الارتفاع الحسابي للضخ.

أما استطاعة المحرك تساوي إلى :

$$P = \frac{P_p}{\eta_p \cdot \eta_t} \quad (8-24)$$

حيث:

η_p - مردود المضخة.

η_t - مردود النقل بين المحرك و المضخة.

و فيما يلي بعض قيم المردود لأنواع مختلفة من المضخات:

- مردود المضخات المكبسية (0.8 - 0.9)

- مردود المضخات النابذة ذات الضغط العالي (0.5-0.8)

- مردود المضخات النابذة ذات الضغط المنخفض (0.3-0.6).

و من أجل تعيين استطاعة محرك يدبر مروحة نحسب استطاعة المروحة و التي تساوي إلى :

$$P_f = P_{mach} = V \cdot h \cdot 10^{-3} [kw] \quad (8-25)$$

حيث:

$V [m^3/sec]$ - تدفق المروحة.

$h [N/m^2]$ - قوة الدفع للمروحة. و تقاس عملياً بمقياس ملم عمود ماء.

$$WaterGuage = W.G \rightarrow (1m.m.W.G = 9.81 N / m^2)$$

و تصل قوة الدفع في المراوح الأفقية $h = 4 \rightarrow 10$ m.m.W.G، و في المراوح النابذة طبقاً لقوة الضغط الذي تصمم عليه حسب ما يلي:

$h < 100$ m.m.W.G.

المراوح ذات الضغط المنخفض

$h = 100 - 400$ m.m.W.G.

المراوح ذات الضغط المتوسط

$h > 400$ m.m.W.G.

المراوح ذات الضغط العالي

أما استطاعة المحرك المطلوب تساوي إلى :

$$P = \frac{P_f}{\eta_f \cdot \eta_t} \quad (8-26)$$

حيث:

η_f - مردود المروحة.

و يساوي المردود في المراوح ذات الاستطاعات الكبيرة إلى (0.5-0.8)

و في المراوح النابذة ذات الاستطاعة المتوسطة إلى (0.3-0.5)

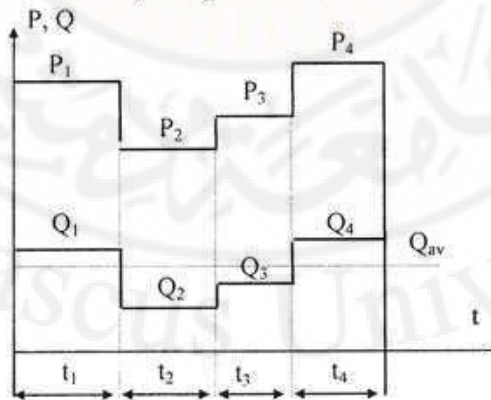
و في المراوح الدفعية ذات الاستطاعة الصغيرة (0.2-0.35).

٨-٥-٢ الحمولة المستمرة المتغيرة:

كثير من الآلات التي تعمل بصورة مستمرة يكون حملها متغيراً، كما هو مبين في

الشكل (6-8)، حيث نلاحظ مخطط الاستطاعة و الضياعات أثناء الحمولة المتغيرة مع

الزمن.



الشكل (6-8) مخطط مبسط لاستطاعة الحمولة،

و مخطط الضياعات عند الحمولة المستمرة المتغيرة
و هناك عدة طرق لاختيار استطاعة المحرك الموافقة لهذا النوع من الحمولات و هي:

- طريقة الضياعات الوسطية.

- طرق التيار المكافئ و العزم المكافئ و الاستطاعة المكافئة.

٨-٥-٢-١ طريقة الضياعات الوسطية:

تعتمد هذه الطريقة على إيجاد الضياعات الوسطية للمحرك (Q_{av}) على أساس مخططات الحمولة، و مقارنة هذه القيمة مع الضياعات الاسمية للمحرك الواجب اختياره، و ذلك على ضوء معطيات النشرات الفنية المعروفة للمحركات الكهربائية، بحيث تتساوى هذه الضياعات فيما بينها.

$$Q_{av} = Q_n \quad (8-27)$$

و هذا يعني أن المحرك سيعمل حتى القيمة المسموحة لدرجة تسخينه (τ_{per}) حيث:

$$\tau_{per} = \frac{Q_{av}}{A} = \frac{Q_n}{A} \quad (8-28)$$

طريقة الحساب:

نختار استطاعة المحرك بصورة تقريبية على أساس الاستطاعة الوسطى التي نستنتجها من مخطط الحمولة و التي تساوي:

$$P_{av} = \frac{P_1 t_1 + P_2 t_2 + \dots + P_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} \quad (8-29)$$

حيث تساوي استطاعة المحرك التي نختارها إلى :

$$P = P_{av} \cdot k \quad (8-30)$$

حيث:

k - معامل الأمان و يساوي عادة إلى:

$$k = 1.1 \rightarrow 1.3 \quad (8-31)$$

و بواسطة منحنى المردود لهذا المحرك نحدد قيم الضياعات لكل جزء من أجزاء مخطط الحمولة ، و منه نحصل على قيمة الضياعات الوسطية (Q_{av}) حسب المعادلة التالية:

$$Q_{av} = \frac{Q_1 \cdot t_1 + Q_2 \cdot t_2 + \dots + Q_n \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} \quad (8-32)$$

إذا لم يكن منحنى المردود $\eta = f(P)$ معروفاً لدينا ، يمكن حسابه إذا عرفنا قيمة المردود الاسمي للمحرك (η_n) حيث يتم حساب قيم المردود من أجل كل جزء من أجزاء الاستطاعة للمحرك على ضوء مخطط الحمولة ، و ذلك حسب المعادلة التالية:

$$\eta_x = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\eta_n} - 1 \right) \frac{x + \frac{a}{x}}{1 + a}} \quad (8-33)$$

حيث:

$-a = \frac{q_{const}}{q_{var n}}$ و هي نسبة الضياعات الثابتة للمحرك إلى الضياعات المتغيرة عند

الحمولة الاسمية، و يكون:

$$Q_n = q_{const} + q_{var n}$$

مع اعتبار:

$$x = \frac{I_2}{I_n} - \text{نسبة تيار المحرك عند حمولة جزئية معطاة بالتجريب على التيار الاسمي.}$$

و اعتماداً على السرعة و على تصميم المحرك تأخذ a القيم بالمجال (0.4-1.1). و بعد معرفة الضياعات الوسطية تقارن مع الضياعات الاسمية للمحرك المختار، فإذا كانت $Q_{av} \leq Q_n$ ، فإن اختيارنا لاستطاعة المحرك صحيح بالنسبة لسخونته. و نجري اختباراً لمعرفة استطاعة المحرك في التحميل الزائد، و اختباراً لمعرفة عزم الإقلاع ، و عندها يتم الاختيار النهائي. أما إذا لم تتحقق العلاقة السابقة فيجب اختيار محرك آخر، و يعاد الحساب .

٨-٥-٢-٢ الطرق المكافئة للتيار و العزم و الاستطاعة:

تعتمد هذه الطريقة على أساس أن التيار الفعلي المار في المحرك خلال عمله على حمولة متغيرة يمكن استبداله بتيار مكافئ (I_{eq}) يعطي نفس الضياعات التي تنشأ عن التيار الفعلي. حيث يمكننا حساب قيمة التيار المكافئ من المعادلة التالية:

$$Q_{av} = k + I_{eq}^2 \cdot R \quad (8-34)$$

من المعادلتين (8-31) و (8-34) نحصل على:

$$k + I_{eq}^2 \cdot R = \frac{(k + I_1^2 \cdot R)t_1 + (k + I_2^2 \cdot R)t_2 + \dots + \dots + (k + I_n^2 \cdot R)t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} \quad (8-35)$$

و بما أن الضياعات الثابتة لا تتعلق بالحمولة فيمكننا أن نكتب المعادلة السابقة على الشكل التالي:

$$k + I_{eq}^2 \cdot R = \frac{k(t_1 + t_2 + \dots + t_n)}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} + \frac{R(I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n)}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} \quad (8-36)$$

و بالتالي يصبح لدينا:

$$I_{eq}^2 = \frac{I_1^2 \cdot t_1 + I_2^2 \cdot t_2 + \dots + I_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} \quad (8-37)$$

و يساوي التيار المكافئ إلى :

$$I_{eq} = \sqrt{\frac{I_1^2 \cdot t_1 + I_2^2 \cdot t_2 + \dots + I_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \quad (8-38)$$

بعد حساب قيمة التيار المكافئ I_{eq} نختار من الجداول محركاً تياره الاسمي I_n بحيث يتحقق:

$$I_{eq} \leq I_n \quad (8-39)$$

$$I_{eq} \leq I_n \quad (8-39)$$

مع ضرورة التحقق من شرط زيادة الحمولة ، بحيث لا تتجاوز قيمة معامل زيادة الحمولة أي:

$$\frac{I_{max}}{I_n} \leq \lambda \quad (8-40)$$

حيث:

I_{max} - القيمة العظمى للتيار على مخطط الحمولة.

في الحالة العملية يتم اختيار الاستطاعة على أساس مخطط العزم أو مخطط الاستطاعة. لذلك نعلم ما يسمى طريقة العزم المكافئ الذي نستطيع استنتاج قيمته على أساس أن العلاقة بين العزم و التيار متناسبة طردياً في حال ثبات قيمة الفيض في المحرك:

$$T_{eq} = \sqrt{\frac{T_1^2 \cdot t_1 + T_2^2 \cdot t_2 + \dots + T_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \quad (8-41)$$

تستخدم هذه الطريقة في المحركات التي يكون فيها الفيض المغناطيسي ثابتاً ، حيث لا تكون مقبولة في المحركات التسلسلية ، و محركات التيار المتناوب ذات الدائر المقصور ، و كذلك في حالات الإفلاع و الكبح.

لذا نستخدم بصورة واسعة طريقة الاستطاعة المكافئة ، و التي يمكننا استنتاجها من العزم المكافئ إذا أخذنا بعين الاعتبار التناسب الطردي بين الاستطاعة و العزم في حال ثبات السرعة أي:

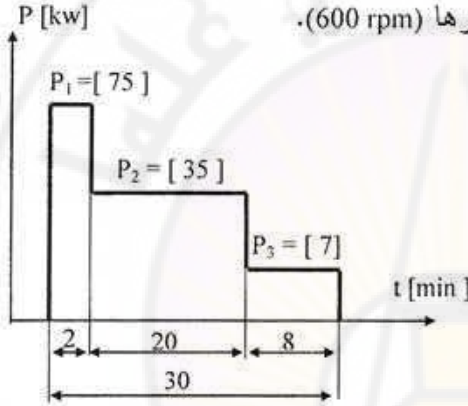
$$P_{eq} = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + \dots + P_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \quad (8-42)$$

لا تستخدم طريقة الاستطاعة المكافئة في حالة تغيير سرعة المحرك مع تغيير استطاعته، ففي هذه الحالة نستخدم طريقة التيار المكافئ ، و التي تعتبر الطريقة الأكثر دقة بينما تعتبر طريقة الاستطاعة المكافئة الأكثر استخداماً نظراً لكون معظم مخططات الحمولة مبنية على أساس الاستطاعة.

تطبيق (8-1)

لدينا آلة ميكانيكية تعمل على حمولة مستمرة متغيرة، كما هو مبين من مخطط الاستطاعة في الشكل (7-8).

والمطلوب اختبار استطاعة المحرك الكهربائي الذي يديرها، علماً أنه محرك تيار مستمر ذي التهيج التسلسلي يعمل على جهد شبكة التغذية المساوي إلى (220V) و يدور بسرعة ثابتة في الحالة المستقرة و قدرها (600 rpm).



الشكل (7-8) مخطط الحمولة التي تعمل عليها الآلة [6]

الحل:

بما أن طريقة الاستطاعة المكافئة لا توافق محركات التيار المستمر ذات التهيج التسلسلي، لذلك من الأفضل في هذه الحالة استخدام طريقة الضياعات الوسطية. نحسب الاستطاعة بموجب مخطط الحمولة:

$$P = P_{av} \cdot k = \frac{(P_1 t_1 + P_2 t_2 + P_3 t_3)}{t_1 + t_2 + t_3} \cdot k$$

و نختار معامل الأمان مساوياً إلى :

$$k=1.15$$

و بالتالي نجد:

$$P = \frac{(75 \times 2 + 35 \times 20 + 7 \times 8) \times 1.15}{2 + 20 + 8} = 34.7 [kw]$$

من النشرة الفنية نوجد أقرب محرك يملك استطاعة قريبة من القيمة المحسوبة ، حيث نختار المحرك ذ المواصفات الاسمية التالية:

$$\begin{aligned} P_n &= 35 \quad [kw] \\ V_n &= 220 \quad [V] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_n &= 185 \text{ [A]} \\ n_n &= 575 \text{ [rpm]} \\ r_a &= 0.059 \text{ [}\Omega\text{]} \\ r_f &= 0.026 \text{ [}\Omega\text{]} \end{aligned}$$

- نحسب الاستطاعة المقدمة من شبكة التغذية:

$$P_1 = V_n \cdot I_n = 220 \times 185 = 40.7 \text{ [kw]}$$

- وتساوي قيمة الضياعات الكلية عند الحمل الاسمي:

$$\Delta P = P_1 - P_n = 40.7 - 35.0 = 5.7 \text{ [kw]}$$

- و تساوي قيمة الضياعات المتغيرة في المقاومة الفعالة لدارة المحرك عند الحمل الاسمي:

$$q_n = I_n^2 (r_a + r_f) = 185^2 (0.059 + 0.026) = 2.91 \text{ [kw]}$$

- أما الضياعات فتساوي إلى :

$$k = P - q_n = 5.7 - 2.91 = 2.79 \text{ [kw]}$$

- تحسب الضياعات في كل جزء من أجزاء مخطط الحمولة استناداً إلى العلاقة التالية:

$$q_x = q_n \frac{P_x^2}{P_n^2}$$

$$q_1 = 2.91 \frac{75^2}{35^2} = 13.36 \text{ [kw]}$$

$$q_2 = 2.91 \frac{35^2}{35^2} = 2.91 \text{ [kw]}$$

$$q_3 = 2.91 \frac{7^2}{35^2} = 0.117 \text{ [kw]}$$

- تحسب الطاقة التي تصرف على الضياعات الثابتة خلال دورة العمل:

$$\begin{aligned} A_1 &= k \cdot (t_1 + t_2 + t_3) = 2.79 (2 + 20 + 8) \\ &= 84 \text{ kw.min} \end{aligned}$$

- ثم نحسب الطاقة التي تصرف على الضياعات النحاسية لملفي التحريض و التهيج خلال دورة العمل.

$$\begin{aligned} A_2 &= q_1 t_1 + q_2 t_2 + q_3 t_3 = 13.36 \times 2 + 2.91 \times 20 + 0.117 \times 8 \\ &= 86 \text{ kw.min} \end{aligned}$$

- أما الضياعات الكلية خلال دورة العمل فتساوي إلى :

$$A_1 + A_2 = 84 + 86 = 170 \text{ kw.min}$$

حيث تساوي:

$$A_1 + A_2 = Q_1 \cdot t_1 + Q_2 \cdot t_2 + Q_3 \cdot t_3 = 170 \text{ kw.min}$$

- أما الضياعات الوسطية فتساوي إلى :

$$Q_{av} = \frac{Q_1 t_1 + Q_2 t_2 + Q_3 t_3}{t_1 + t_2 + t_3} = \frac{170}{30} = 5.67 \text{ [kw]}$$

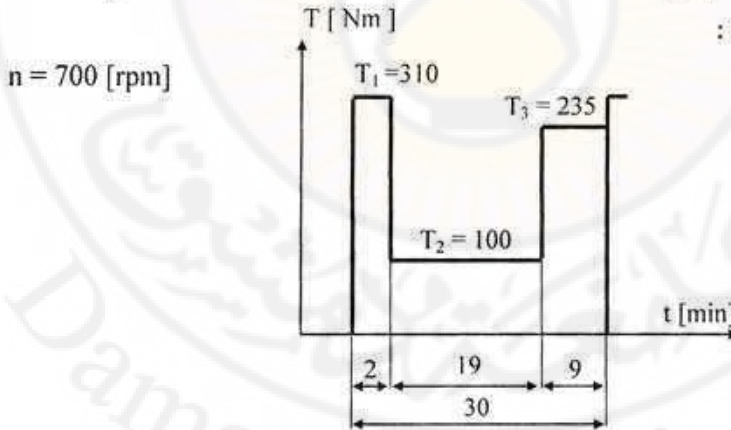
- و بالمقارنة مع الضياعات الكلية للمحرك المختار عند الحمل الاسمي و التي تساوي $P = 5.7 \text{ [kw]}$ نجد:

$$Q_{av} \approx \Delta P$$

و منه نستنتج أن اختيارنا لاستطاعة المحرك المطلوب صحيح.

تطبيق (8-2):

لدينا محرك تحريضي ثلاثي الطور يقود آلة تعمل بحمولة مستمرة متغيرة ، كما هو مبين من مخطط العزم في الشكل (8-8) ، حيث يدور على سرعة ثابتة في الحالة المستقرة تساوي إلى :



الشكل (8-8) مخطط الحمولة التي يديرها المحرك التحريضي

و يملك المحرك المواصفات الاسمية التالية:

$$\begin{aligned}
 P_n &= 14 \text{ [kw]} \\
 U_n &= 220 \text{ [V]} \\
 I_n &= 57 \text{ [A]} \\
 n_n &= 700 \text{ [rpm]} \\
 \eta_n &= 0.84
 \end{aligned}$$

أما معامل زيادة التحميل فيساوي إلى :

$$\lambda = \frac{T_{\max}}{T_n} = 1.9$$

المطلوب التحقق من صلاحية هذا المحرك لقيادة الآلة المذكورة أعلاه.

الحل:

- نحسب قيمة العزم المكافئ استناداً إلى مخطط الحمولة:

$$\begin{aligned}
 T_{eq} &= \sqrt{\frac{T_1^2 \cdot t_1 + T_2^2 \cdot t_2 + T_3^2 \cdot t_3}{t_1 + t_2 + t_3}} \\
 T_{eq} &= \sqrt{\frac{310^2 \times 2 + 100^2 \times 19 + 235^2 \times 9}{2 + 19 + 9}} = 172 \text{ [N.m]}
 \end{aligned}$$

- أما الاستطاعة المكافئة فتساوي إلى :

$$P_{eq} = T_{eq} \frac{n_n}{9550} = \frac{172 \times 700}{9550} = 12.6 \text{ [kw]}$$

و منه نستنتج أن:

$$P_{eq} < P_n$$

أي أن اختيارنا لاستطاعة زيادة التحميل صحيح.

- ثم نتحقق من شرط زيادة التحميل:

- نحسب العزم الاسمي للمحرك:

$$T_n = 9550 \frac{P_n}{n_n} = \frac{14 \times 10^3}{700} = 191 \text{ [N.m]}$$

و من مخطط الحمولة نلاحظ أن القيمة العظمى لعزم الحمولة تساوي:

$$T_{\max} = 310 \text{ [N.m]}$$

حيث نستنتج :

$$\frac{T_{\max}}{T_n} = \frac{310}{191} = 1.62 < 1.9$$

أي أن المحرك المختار يحقق شرط زيادة التحميل و يصلح للعمل على الآلة المذكورة.

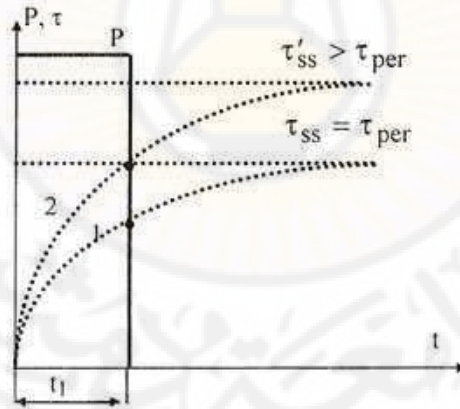
٦-٨ تسخين و تبريد المحركات الكهربائية في حالة الحمولة قصيرة الزمن

Motor Heating and Cooling on Short-time Duty

يمكننا إنشاء منحنى ارتفاع درجة حرارة المحرك بموجب العلاقة التي تم استنتاجها من أجل الحمولة المستمرة و التي تساوي:

$$\tau = \tau_{ss}(1 - e^{-t/T_H}) \quad (8-43)$$

إذا اخترنا محركاً على أساس الحمولة المستمرة فإنه خلال فترة العمل قصيرة الزمن يسخن بحيث تصل حرارته إلى درجة أقل من درجة الحرارة في الحالة المستقرة (τ_{ss})، كما هو موضح من المنحنى (1) من الشكل (9-8).



الشكل (9-8) منحنيات تسخين المحرك في حالة الحمولة قصيرة الزمن

لذلك من وجهة نظر الشروط الحرارية لا يستخدم بصورة كاملة. ففي هذه الحالة نستطيع استخدام محرك باستطاعة أقل من استطاعة الآلة التي يديرها، بحيث تكون حمولته خلال فترة التشغيل قصيرة الزمن (t_1) كافية لتسخينه حتى درجة الحرارة المسموح بها

(τ_{per}) و التي تساوي إلى درجة حرارته المستقرة (τ_{ss})، الموافقة لحالة عمله على حمولة مستقرة، كما هو مبين من المنحني (2) في الشكل (8-9).
إن نسبة الضياعات في حالة الحمولة قصيرة الزمن إلى الضياعات الاسمية ، و في درجة حرارة واحدة للمحرك تسمى بمعامل التحميل الحراري ، و يرمز له بـ (P_h).

$$P_h = \frac{Q_s}{Q_n} \quad (8-44)$$

حيث:

Q_s - الضياعات في حالة الحمولة قصيرة الزمن.

Q_n - الضياعات الاسمية.

و بما أن درجة الحرارة المستقرة (τ_{ss}) متناسبة طردياً مع الضياعات الحرارية ، فيمكننا التعبير عن معامل زيادة التحميل الحراري من خلال درجات الحرارة الموافقة لهذه الضياعات.

$$P_h = \frac{\tau'_{ss}}{\tau_{ss}} \quad (8-45)$$

و باعتبار $\tau_{ss} = \tau_{per}$ تصبح العلاقة السابقة مساوية إلى :

$$P_h = \frac{\tau'_{ss}}{\tau_{per}} \quad (8-46)$$

و (τ_{per}) استناداً إلى العلاقة (5-43) تساوي إلى :

$$\tau_{per} = \tau'_{ss} (1 - e^{-t_L / T_H}) \quad (8-47)$$

و من العلاقتين (8-46) و (8-47) نحصل على:

$$P_h = \frac{1}{1 - e^{-t_L / T_H}} \quad (5-48)$$

حيث يبين الشكل (8-10) المخطط البياني لمنحني العلاقة $P_h = f(t_L / T_H)$ بالقيم الواحدية و ذلك استناداً إلى العلاقة (8-48).

و في حالة معرفتنا المسبقة لمعامل زيادة التحميل الحراري ، فيمكننا استناداً إلى المعادلة (8 48) حساب زمن الحمولة قصيرة الزمن المسموح به و الذي يساوي:

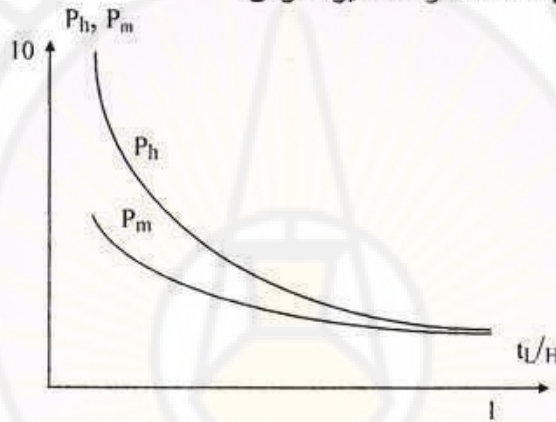
$$t_L = T_H \cdot L_n \frac{P_H}{P_h - 1} \quad (8-49)$$

بعد معرفة معامل زيادة التحميل الحراري يمكننا تحديد ما يسمى بمعامل زيادة التحميل الميكانيكي و الذي يساوي إلى :

$$P_m = \frac{P_s}{P_n} \quad (8-50)$$

حيث:

P_s - الاستطاعة في حالة الحمولة قصيرة الزمن.



الشكل (10-8)

منحنيات معاملات الحمل الزائد الحرارية الميكانيكية خلال زمن التشغيل

إذا اعتبرنا أن الضياعات الحرارية للمحرك تتناسب مع مربع التيار، بينما الاستطاعة تتناسب مع التيار فالعلاقة بين P_m و P_h يمكننا كتابتها على الشكل التالي:

$$P_m = \sqrt{P_h} \quad (8-51)$$

أما العلاقة الأكثر دقة لـ (P_m) نستنتجها من العلاقة المحددة لـ (P_h) مع الأخذ بعين الاعتبار العلاقة الحقيقية بين الضياعات الثابتة و المتغيرة في المحرك:

$$P_h = \frac{k + q_n \left(\frac{P_s}{P_n} \right)^2}{k + q_n} = \frac{a + P_m^2}{a + 1} \quad (8-52)$$

حيث:

$$a = \frac{k}{q_n}$$

و من العلاقة (8-53) نستنتج:

$$P_m = \sqrt{(a+1)P_h} - a \quad (8-53)$$

إذا أهملنا الضياعات الثابتة تصبح ($a = 0$)، و بالتالي نستنتج أن العلاقة (8-53) تصبح مساوية للعلاقة (8-51).

و بتعويض قيمة (P_h) من العلاقة (8-48) في العلاقة (8-53) نستنتج:

$$P_m = \sqrt{\frac{a+1}{1 - e^{-t_L/T_H}}} - a \quad (8-54)$$

و يبين الشكل (10-8) المخطط البياني لمنحني العلاقة بين معامل زيادة التحميل الميكانيكي و العلاقة (t_L / T_H) استناداً إلى المعادلة (8-54)، و ذلك من أجل معامل الضياعات $a = 1$ ، حيث نستطيع اختيار استطاعة المحرك اعتماداً على قيم (P_m) و ذلك تبعاً لنسبة زمن الحمولة (t_L) إلى ثابت زمن ارتفاع الحرارة (T_H).

٧-٨ تسخين و تبريد المحركات الكهربائية في حالة الحمولة المتقطعة الدورية:

Motor Heating and Cooling on Intermittent Periodic Duty

ما يميز هذه الحالة من الحمولة ما يسمى معامل استمرار الحمولة (ε) و الذي يساوي:

$$\varepsilon = \frac{t_L}{t_L + t_r} = \frac{t_L}{t_c} \quad (8-55)$$

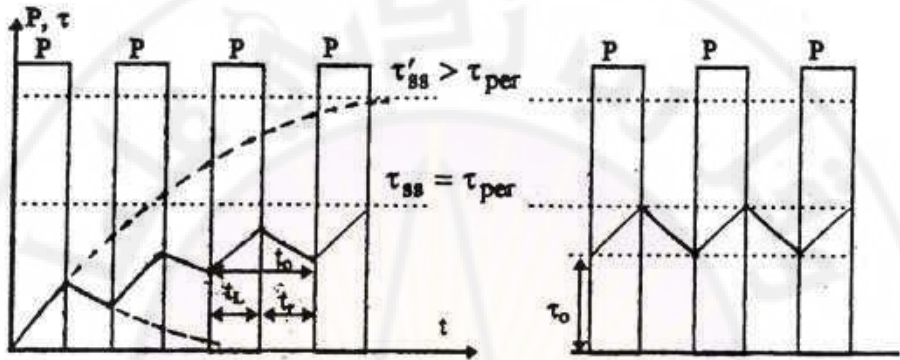
حيث:

t_L - زمن فترة التشغيل تحت الحمل.

t_r - زمن الراحة - التوقف عن العمل.

t_c - زمن دورة الحمولة.

و يبين الشكل (11-8) منحنيات ارتفاع درجة الحرارة لهذا النوع من العمل، حيث أن مخطط الحمولة يبين أنه يحتوي على فترات منتظمة مكررة لحمل ثابت P له فترة ثابتة كما في حالة الحمولة قصيرة الزمن. ومن الخطأ أن نختار محرك باستطاعة اسمية P لأنه قد يملك سعة تسخين زائدة.



الشكل (11-8)

منحني ارتفاع درجة حرارة المحرك في حالة الحمولة الدورية المنقطعة

عند الاختيار الصحيح لاستطاعة المحرك فإن ارتفاع درجة الحرارة العظمى لا يصل لقيمة τ'_{ss} (أكبر من المسموحة). و لكن نحاول أن تقترب من القيمة $\tau_{ss} = \tau_{per}$ بعد عدد كبير من الدورات.

إن معامل زيادة التحميل الحراري الموافق لهذا العمل يحدد على أساس أنه بعد عدد معتبر من الدورات فإن ارتفاع درجة الحرارة سوف يتأرجح بين الحدود τ_{ss} و τ_0 . باستخدام المعادلة (8-14)، فإن درجة الحرارة من أجل زمن التشغيل t_L يمكن التعبير عنه بالعلاقة:

$$\tau_s = \tau'_{ss} \left(1 - e^{-t_L / T_H}\right) + \tau_0 e^{-t_L / T_H} \quad (8-56)$$

و يفرض أن ثابت التسخين الزمني مساوي إلى ثابت التبريد الزمني نحصل على معادلة منحني انخفاض حرارة المحرك خلال زمن الراحة:

$$\tau_0 = \tau_{ss} e^{-t_r / T_H} \quad (8-57)$$

و بتعويض المعادلة (8-57) في المعادلة (8-56)، تأخذ معادلة ارتفاع درجة الحرارة الشكل التالي:

$$\tau_{ss} = \tau'_{ss} \left(1 - e^{-t_L/T_H} \right) + \tau_{ss} e^{-\frac{t_L+t_r}{T_H}} \quad (8-58)$$

و بقسم طرفي المعادلة السابقة على (τ_{ss}) و اعتبار أن: $\frac{\tau'_{ss}}{\tau_{ss}} = P_h$ نستطيع أن نكتب:

$$1 = P_h \left(1 - e^{-t_L/T_H} \right) + e^{-\frac{t_L+t_r}{T_H}} \quad (8-59)$$

و منه نحصل على معادلة التخميل الحراري الموافق لهذه الحالة:

$$P_h = \frac{1 - e^{-\frac{t_L+t_r}{T_H}}}{1 - e^{-\frac{t_L}{T_H}}} = \frac{1 - e^{-\frac{t_L}{T_H} \epsilon}}{1 - e^{-\frac{t_L}{T_H}}} \quad (8-60)$$

إذا كانت $t_r = \infty$ و التي تكافئ زمن راحة كبيرة جداً. و عندها نحصل من المعادلة السابقة على:

$$P_h = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_L}{T_H}}}$$

و هي نفس المعادلة (6-48) الموافقة لحالة الحمولة قصيرة الزمن.

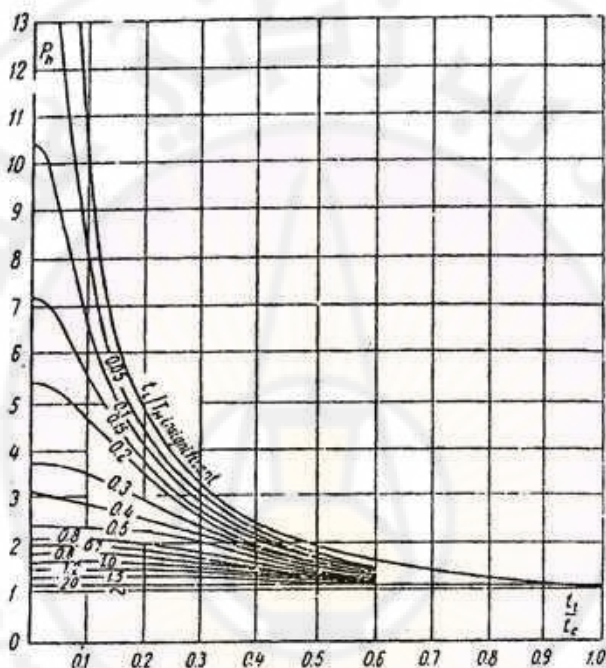
و يبين الشكل (8-12) المخطط البياني لمنحنيات العلاقة $P_h = f(\epsilon)$ ، و ذلك من أجل قيم عدة لـ (t_L / t_H) .

من تحليل المخطط البياني المبين في الشكل (8-12):

- إن النقاط الموجودة على محور العيّنات تعادل حالة الحمولة قصيرة الزمن، حيث $(t_L / t_H = 0)$ أي أن $t_r = \infty$.

- إن النقطة ذات الإحداثيات $P_h = 1 \text{ و } \epsilon = 1$ تلقي عندها جميع المنحنيات مهما تغيرت القيمة t_L / T_H ، حيث توافق هذه النقطة حالة الحمولة المستمرة.

- عندما يصبح معامل استمرار الحمولة $\varepsilon > 0.6$ نلاحظ أن P_h يصبح قريباً من الواحد، وبالتالي يصبح P_m أكثر قرباً من الواحد، حيث $P_m \approx \sqrt{P_h}$. وهذا يعني أنه من أجل $\varepsilon \geq 0.6$ يمكن عد الحمولة مستمرة و يجب اختيار استطاعة المحرك على هذا الأساس.



الشكل (12-8) منحنيات العلاقة $P_h = f(\varepsilon)$ من أجل قيم عدة لـ (t_L / T_H)

٨-٨ اختيار استطاعة المحركات الكهربائية من أجل الحمولة قصيرة الزمن

Selection of Motor Capacity for short-time Duty

يتم حساب قيم معامل التحميل الحراري (P_i) و معامل التحميل الميكانيكي (P_m) من المعادلات الموافقة لها.

ثم تحسب الاستطاعة المطلوبة للمحرك من العلاقة التالية:

$$P = \frac{P_{mach}}{P_m \cdot \eta} \quad (8-61)$$

حيث:

P - استطاعة المحرك.

P_{mach} - استطاعة الآلة التي يديرها المحرك.

P_m - معامل زيادة التحميل الميكانيكي.

تطبيق (8-3)

لدينا محرك تحريض ثلاثي الطور يعمل على حمولة قصيرة الزمن.
و المطلوب: حساب ثابت الزمن الحراري للمحرك استناداً إلى معطياته فيما يلي و التي تم الحصول عليها من النشرة الفنية الخاصة به.
أ- من أجل العمل المستمر:

$$P_n = 7 \text{ [kw]}$$

$$\eta_n = 77.5 \%$$

ب- من أجل العمل الساعي ($t_L = 60 \text{ min}$):

$$P = 13 \text{ [kw]}$$

$$\eta = 82.5 \%$$

الحل:

نحسب الضياعات الاسمية للاستطاعة من أجل الحمولة المستمرة:

$$Q_n = \frac{P_n}{\eta_n} - P_n = \frac{7}{0.775} - 7 = 2.05 \text{ [kW]}$$

ثم نحسب ضياعات الاستطاعة من أجل الحمولة قصيرة الزمن الساعية:

$$Q = \frac{P}{\eta} - P = \frac{13}{0.825} - 13 = 2.75 \text{ [kW]}$$

و منه نستنتج معامل زيادة التحميل الحراري:

$$P_h = \frac{Q}{Q_n} = \frac{2.75}{2.05} = 1.34$$

و يساوي ثابت الزمن الحراري إلى :

$$T_H = \frac{t_L}{\ln \frac{P}{P-1}} = \frac{60}{\ln \frac{1.34}{0.34}} = 37.5 \text{ [min]}$$

٨-٩ اختيار استطاعة المحركات الكهربائية من أجل الحمولة الدورية المتقطعة

Selection of Motor Capacity for Intermittent Periodic Duty

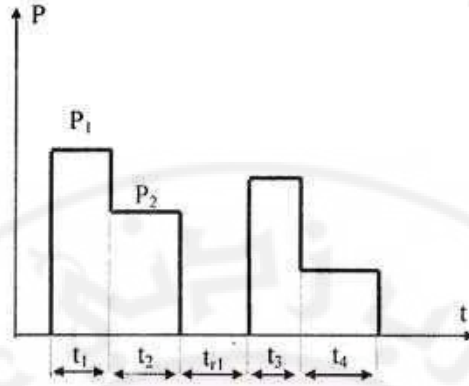
نظراً لتكرار إقلاع و كبح المحركات التي تعمل على حمولة متقطعة دورية ، لذلك يجب أن تمتلك هذه المحركات عزم إقلاع كبير و أن تتحلى بخصائص ميكانيكية تتحمل الإقلاع والكبح المتكرر. لذا تصمم عادة محركات خاصة لتعمل على الحمولات المتقطعة الدورية سواء بالنسبة لمحركات التيار المستمر أو محركات التيار المتناوب، و يشار إلى استطاعتها تبعاً لقيم معامل استمرار الحمولة (ε) والتي تساوي عادة إلى قيم نموذجية:

$$\varepsilon_{st} = 15, 25, 40, 60 \%$$

يتم اختيار استطاعة المحرك في حالة الحمولة المتقطعة الدورية على أساس طريقة اختياره من النشرة الفنية استناداً إلى قيمة معامل استمرار الحمولة (ε_{st}) مع ضرورة التحقق من عزم الإقلاع المناسب لهذا المحرك، و الذي يجب أن يفوق عزم الحمولة. من الناحية العملية يجب أن لا يزيد زمن دورة العمل في حالة الحمولة المتقطعة الدورية عن (10 min). فإذا زاد عن ذلك فيمكن عد الحمولة مستمرة، و يتم اختبار الاستطاعة على هذا الأساس.

إذا أهملنا الضياعات الثابتة و اعتبرنا ضياعات الحمولة متناسبة مع الاستطاعة المقدمة من شبكة التغذية. فمن الشكل (8-13) و الذي يبين مخطط حمولة متقطعة دورية متغيرة نحسب قيمة الاستطاعة المكافئة.

$$P_{eq} = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + P_3^2 \cdot t_3 + P_4^2 \cdot t_4}{t_1 + t_2 + t_{r1} + t_3 + t_4}} \quad (8-62)$$



الشكل (8-13) مخطط حمولة متقطعة دورية متغيرة [6]

نضرب الصورة و المخرج في المعادلة السابقة بزمان التشغيل و الذي يساوي في هذه الحالة $(t_1 + t_2 + t_3 + t_4)$ فنحصل على :

$$P_{eq} = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + P_3^2 \cdot t_3 + P_4^2 \cdot t_4}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}} \varepsilon \quad (8-63)$$

أو :

$$P_{eq} = P' \sqrt{\varepsilon} \quad (8-64)$$

حيث :

P' - استطاعة المحرك المحسوبة على أساس مخطط الحمولة دون الأخذ بعين الاعتبار زمن الراحة، و تسمى بالاستطاعة المكافئة الثابتة لدورة العمل.

بعد حساب (ε) نقارنها مع أقرب القيم المعطاة في النشرات الفنية للمحركات الكهربائية المصممة للعمل على حمولة متقطعة دورية، و نعلم أقرب قيمة في النشرة، حيث نرسم لمعامل استمرار الحمولة الذي تم حسابه بـ (ε_1) ، و معامل استمرار الحمولة النموذجي الذي تم اعتماده من النشرة الفنية بـ (ε_{st}) ، و

بالتالي يصبح لدينا :

$$P_{eq} = P'_1 \sqrt{\varepsilon_1} \quad (8-65)$$

$$P_{eq} = P'_2 \sqrt{\varepsilon_{st}} \quad (8-66)$$

حيث نحصل على :

$$P'_1 \sqrt{\varepsilon_1} = P'_2 \sqrt{\varepsilon_{st}}$$

و منه:

$$P'_2 = P'_1 \sqrt{\varepsilon_1 / \varepsilon_{st}} \quad (8-67)$$

حيث:

P'_1 - القيمة الحسابية للاستطاعة المكافئة الثابتة.

P'_2 - القيمة المطلوبة للاستطاعة المكافئة الثابتة للمحرك.

و يتم حساب استطاعة المحرك بطريقتين و حسب التسلسل التالي:

أ- دون حساب زمن الراحة بالنسبة للاستطاعة المكافئة.

١- نحدد قيمة الاستطاعة المكافئة الثابتة بموجب مخطط الحمولة للمحرك:

$$P'_1 = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + P_3^2 \cdot t_3 + P_4^2 \cdot t_4}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}} \quad (8-68)$$

٢- نحسب القيمة الحقيقية لمعامل استمرار الحمولة بموجب مخطط الحمولة:

$$\varepsilon_1 \% = \frac{\sum t_L \cdot 100}{\sum t_L + \sum t_r} \% \quad (8-69)$$

٣- نعيد حساب الاستطاعة على أساس أقرب قيمة نموذجية لمعامل استمرار الحمولة

(ε_{st}) في النشرة الفنية إلى معامل استمرار الحمولة (ε_1).

$$P'_2 = P'_1 \sqrt{\varepsilon_1 / \varepsilon_{st}} \quad (8-70)$$

٤- ثم نحدد من النشرة الفنية للمحركات المخصصة للعمل على حمولة منقطعة دورية

قيمة الاستطاعة الاسمية المقابلة لـ (ε_{st}) بحيث تكون قريبة من القيمة (P'_2)، أي:

$$P_n \geq P'_2 \quad (8-71)$$

ب- مع حساب زمن الراحة بالنسبة للاستطاعة المكافئة:

١- نحسب قيمة الاستطاعة المكافئة (P_{eq}) استناداً إلى مخطط الحمولة للمحرك:

$$P_{eq} = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + P_3^2 \cdot t_3 + P_4^2 \cdot t_4}{t_1 + t_2 + t_{r1} + t_3 + t_4}} \quad (8-72)$$

٢- نحسب القيمة الحقيقية لمعامل استمرار الحمولة بموجب مخطط الحمولة:

$$\varepsilon_l = \frac{\sum t_L \cdot 100}{\sum t_L + \sum t_r} \% \quad (8-73)$$

٣- نحدد أقرب قيمة لمعامل استمرار الحمولة النموذجي (ε_{st}) بالنسبة لمعامل استمرار الحمولة (ε_l) وذلك من النشرة الفنية المخصصة.

٤- ثم نحسب قيمة الاستطاعة المكافئة الثابتة للمحرك:

$$P' = \frac{P_{eq}}{\sqrt{\varepsilon_{st}}} \quad (8-74)$$

٥- ثم نحدد من النشرة الفنية للمحركات المخصصة للعمل على حمولة متقطعة دورية قيمة الاستطاعة الاسمية، بحيث تكون قريبة من القيمة (P_2')، أي:

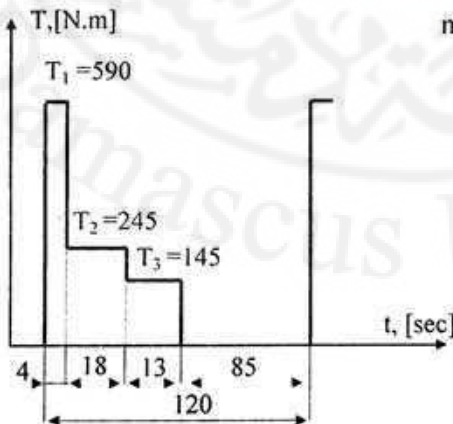
$$P_n \geq P_2' \quad (8-75)$$

و تجدر الإشارة إلى أن اختيار استطاعة المحرك من أجل الحمولات المتقطعة الدورية يتم على أساس قيمة $\varepsilon_{st} < 60\%$. وإذا أصبحت $\varepsilon_{st} > 60\%$ فيجب اختيار الاستطاعة على أساس الحمولة المستمرة.

و إذا أصبحت $\varepsilon_{st} < 10\%$ يمكن عد الحمولة قصيرة الزمن، و يتم اختيار استطاعة المحرك على هذا الأساس.

تطبيق (8-4)

حدد استطاعة المحرك التحريضي ثلاثي الطور الذي يعمل على جهد شبكة التغذية $V_n = 220V$ ، علماً أن مخطط عزم الحمولة الساكنة مبين في الشكل (8-14)، حيث تساوي سرعة دوران محوره إلى $n_n = 730 \text{ rpm}$



الشكل (8-14) مخطط الحمولة لعزم المحرك التحريضي

الحل:

نجري الحساب بالطريقتين المبينتين أعلاه للمقارنة:

أ- مع حساب زمن الراحة:

١- العزم المكافئ:

$$T_{eq} = \sqrt{\frac{T_1^2 t_1 + T_2^2 t_2 + T_3^2 t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + t_r}}$$
$$= \sqrt{\frac{590^2 \times 4 + 245^2 \times 18 + 145^2 \times 13}{4 + 18 + 13 + 85}} = 155 \text{ [N.m]}$$

٢- معامل استمرار الحمولة:

$$\varepsilon_l \% = \frac{t_L \cdot 100}{t_c} \% = \frac{(4 + 18 + 13) 100 \%}{(4 + 18 + 13 + 85)} \%$$
$$= \frac{35 \times 100}{120} \% \approx 29 \%$$

٣- الاستطاعة المكافئة للمحرك:

$$P_{eq} = \frac{T_{eq} \cdot n_n}{9550} = \frac{155 \times 750}{9550} = 12.25 \text{ [kW]}$$

٤- الاستطاعة المكافئة الثابتة للمحرك عند أقرب قيمة نموذجية لمعامل استمرار

الحمولة ($\varepsilon_{st} = 25\%$):

$$P' = \frac{P_{eq}}{\sqrt{\varepsilon_{st}}} = \frac{12.25}{\sqrt{0.25}} = 24.5 \text{ [kW]}$$

ب- دون حساب زمن الراحة:

١- العزم المكافئ الثابت:

$$T'_l = \sqrt{\frac{T_1^2 t_1 + T_2^2 t_2 + T_3^2 t_3}{t_1 + t_2 + t_3}}$$
$$= \sqrt{\frac{590^2 \times 4 + 245^2 \times 18 + 145^2 \times 13}{4 + 18 + 13}} = 286 \text{ [N.m]}$$

٢- نحسب الاستطاعة المكافئة الثابتة من أجل $\varepsilon_l = 29\%$:

$$P'_1 = \frac{T'_1 n_n}{9550} = \frac{286 \times 730}{9550} = 22.5[kW]$$

٣- الاستطاعة المطلوبة من أجل القيمة النموذجية لمعامل استمرار الحمولة
 $\epsilon_{st} = 25\%$

$$P'_2 = P'_1 \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_{st}}} = 22.5 \times \sqrt{\frac{0.29}{0.25}} = 24[kW]$$

و استناداً إلى نتائج إحدى الطريقتين نستطيع اختيار الاستطاعة الاسمية للمحرك، و التي يجب أن تساوي أو تزيد عن قيمة الاستطاعة المطلوبة للمحرك.

من النشرة الفنية للمحركات المخصصة للعمل على حمولة متقطعة دورية، و استناداً إلى نتائج الحسابات، و من أجل $\epsilon_{st} = 25\%$ نختار محركاً استطاعته:

$$P_n = 30[kW]$$

و سرعته الاسمية:

$$n_n = 725 \text{ [rpm]}$$

الفصل التاسع

Static Controllers الحاكّمات الستاتيكية

الحاكمات الستاتيكية Static Controllers

مقدمة :

تستخدم الحاكمات الستاتيكية الدارات المنطقية (Logic Circuits) ، أي أنها تستخدم عناصر المنطق بأنواعها (RTL , TTL , DTL) وقد تكون عناصر منطقية تشابهية (Analoge Logic Elements) أو عناصر منطقية رقمية (Digital Logic Elements) . وتمتاز الحاكمات الستاتيكية بصغر حجمها وقلة كلفتها وسهولة الصيانة ، وتتألف من العناصر الأساسية التالية :

١- العناصر المنطقية (Logic Elements) وهي المكونات الأساسية للحاكمات الستاتيكية.

٢- العناصر الوظيفية (Functional Elements) وهي عناصر مساعدة مثل الكباسات (Push Buttons) ، وسائل الحماية والإنذار ، والمجسات ، والنواقل وغيرها .

٣- عناصر التوقيت (Timers) وتستخدم لتحديد الفترات الزمنية لعمل النظام .

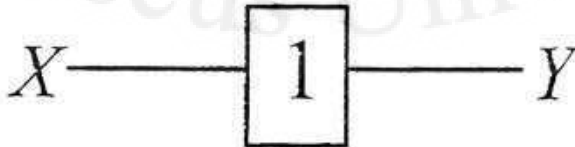
٤- المكبرات (Amplifiers) وتستخدم لرفع مستوى الإشارة إلى المستوى المطلوب .

٩-١ الدارات المنطقية :

سندرس أنواع العناصر المنطقية المستخدمة مع دارات التحكم المنطقية ، من حيث الرمز والعلاقة المنطقية وجدول الحقيقة وما يقابله من دارات تحكم باستخدام العناصر الكهروميكانيكية من مرحلات ريايات وملامسات .

١- عنصر تكرار Voltage Follower .

- الرمز :

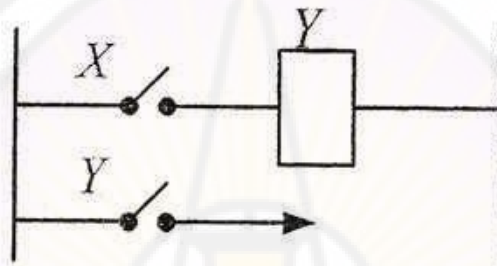


- العلاقة المنطقية : $Y=X$

- جدول الحقيقة :

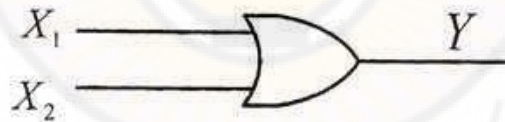
X_{input}	Y_{output}
0	0
1	1

- دائرة التحكم :



٢- عنصر أو (OR) .

- الرمز :



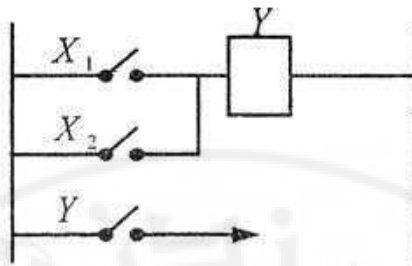
- العلاقة المنطقية :

$$Y = X_1 + X_2$$

- جدول الحقيقة :

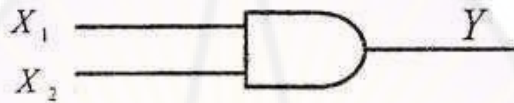
$X_1(input)$	$X_2(input)$	$Y(output)$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

- دائرة التحكم :



٣- عنصر (و) (AND) .

- الرمز :



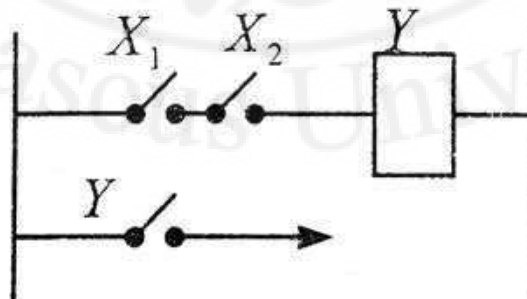
- العلاقة المنطقية :

$$Y = X_1 \cdot X_2$$

- جدول الحقيقة :

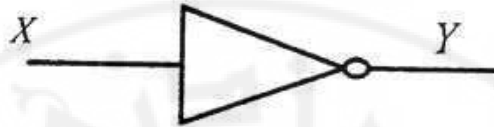
$X_1(input)$	$X_2(input)$	$Y(output)$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

- دائرة التحكم :



٤- عنصر النفي (NOT) .

-الرمز :



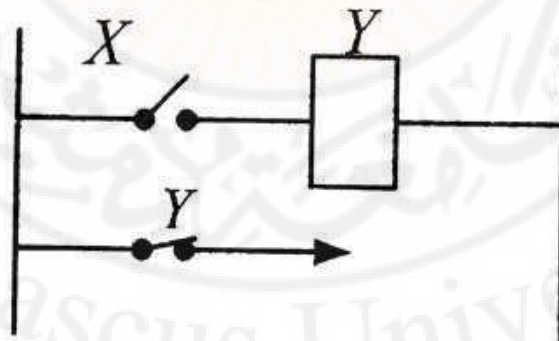
- العلاقة المنطقية :

$$Y = \overline{X}$$

- جدول الحقيقة :

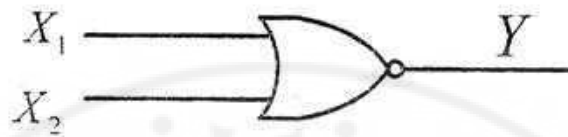
X_{input}	Y_{output}
0	1
1	0

- دائرة التحكم :-



٥- عنصر (لا أو) (NOR) .

- الرمز :



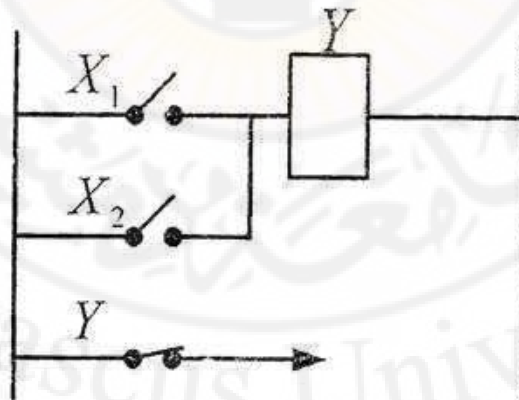
- العلاقة المنطقية :

$$Y = \overline{X_1 + X_2} = \overline{X_1} \cdot \overline{X_2}$$

- جدول الحقيقة :

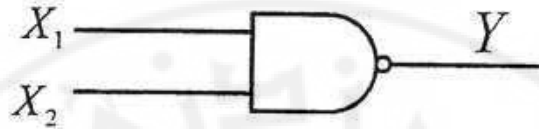
$X_1(\text{input})$	$X_2(\text{input})$	$Y(\text{output})$
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

- دائرة التحكم :



٦- عنصر (لا و) (NAND) .

-الرمز:



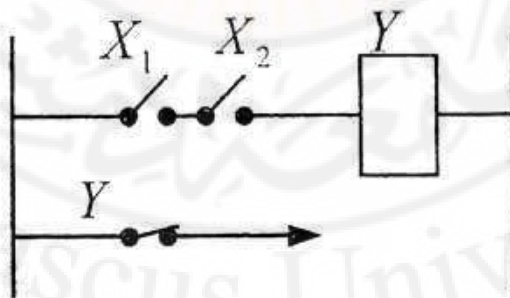
- العلاقة المنطقية :

$$Y = \overline{X_1 \cdot X_2} = \overline{X_1} + \overline{X_2}$$

- جدول الحقيقة :

$X_1(input)$	$X_2(input)$	$Y(output)$
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

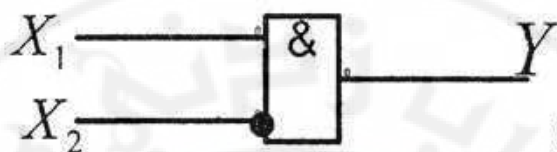
- دائرة التحكم :



٧- عنصر الحماية (Inter Locking Element) (Blocking)

ويسمى (AND Shaped Gate)

- الرمز :



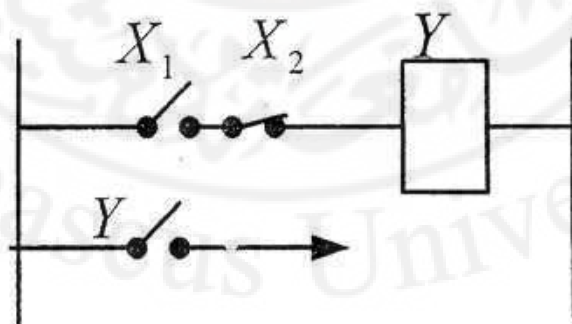
- العلاقة المنطقية :

$$Y = X_1 \cdot \overline{X_2}$$

- جدول الحقيقة :

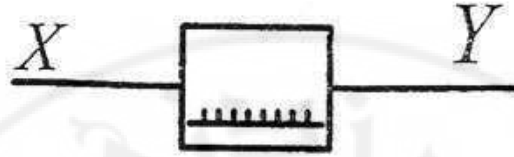
$X_1(input)$	$X_2(input)$	$Y(output)$
0	0	0
0	1	0
1	0	1
1	1	0

- دائرة التحكم :



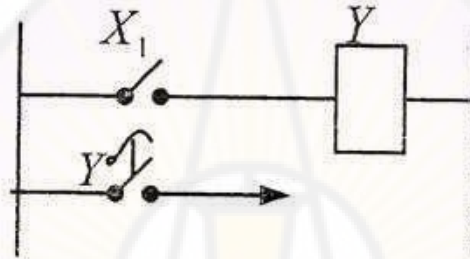
٨- عنصر التأخير الزمني (Time Delay) .

- الرمز :



يعمل المخرج بعد فترة زمنية من تفعيل المدخل .

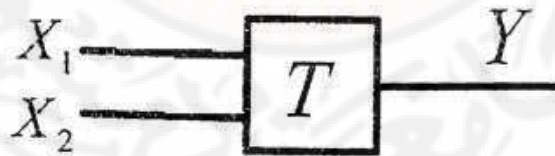
- دائرة التحكم :



٩- عنصر الذاكرة (Latching) Self holding Element .

ويسمى (Trigger) .

- الرمز :



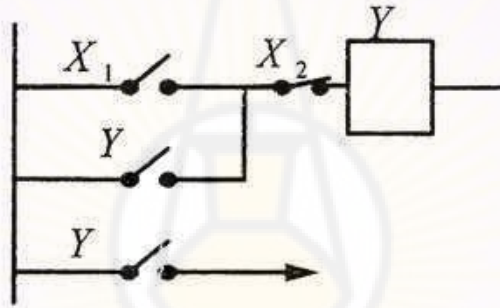
- العلاقة المنطقية :

$$Y = (X_1 + Y).X_2$$

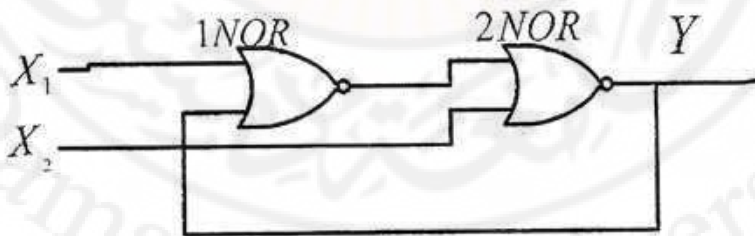
- جدول الحقيقة :

$X_1(input)$	$X_2(input)$	$Y(output)$
0	0	0
0	1	0
1	0	1
0	0	1 memory
0	1	0

- دائرة التحكم :



ويمكن تمثيل عنصر الذاكرة بالدائرة المنطقية التالية كما يبين الشكل (1-9) :
تستخدم الدائرة عنصري (NOR) .



الشكل (1-9)

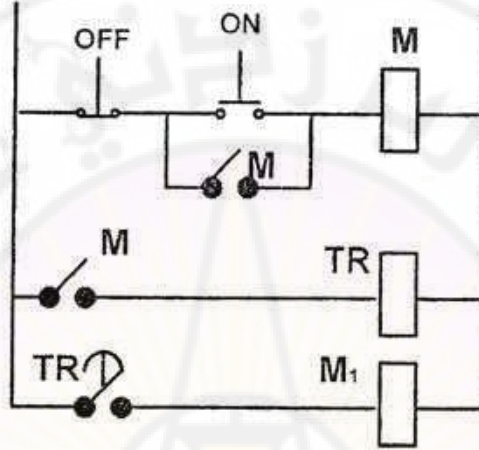
نكتب العلاقة المنطقية :

$$(\overline{X_1 + Y}) + X_2 = (X_1 + Y) \cdot \overline{X_2}$$

وهذه نفس العلاقة المنطقية لعنصر الذاكرة .

مثال :

المطلوب تمثيل دارة التحكم - تشغيل مرحلة واحدة حسب مبدأ الزمن ، الشكل (2-9)
بدارة تحكم منطقية .



الشكل (2-9) دارة التحكم [13]

الخطوات :

- ١- تحليل دارة التحكم لتحديد عناصر الدارة (Circuit Element) ، من حيث الرمز (Symbol) المستخدم في دارة التحكم وحالة العنصر (Status) ، هل هو مفتوح (NO) (Normally Open) أو مغلق (NC) (Normally Closed) ، في الحالة الطبيعية للدارة ، أي عندما تكون الدارة مفصولة عن المصدر . وكذلك تحديد نوع العنصر من حيث هل هو عنصر إدخال (Input) أو عنصر إخراج (Output) . وإعطائه رقماً تسلسلياً ، ثم تعبئة هذه المعلومات في جدول كما يلي :

Element العنصر	Symbol الرمز	Status الحالة	I/ O عنصر إدخال وإخراج	Number الرقم
Push Button Off	OFF	NC	I	I_0
Push Button on	ON	NO	I	I_1
Coil Contactor (m)	M	Normally Off	O	O_0
Time Relay (TR)	TR	Normally off	Internal element	
Coil Contractor (m1)	M1	Normally off	O	O_1

٢- كتابة العلاقات المنطقية التي تمثل دائرة التحكم باستخدام رموز عناصر الإدخال والإخراج وأرقام تسلسلها .

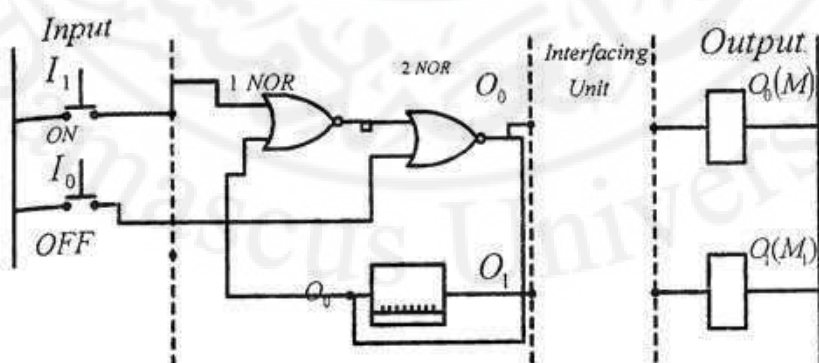
وتتكون دائرة التحكم من ثلاثة صفوف (RUNG) لكل صف نكتب علاقة منطقية .

$$O_0 = (I_1 + O_0)I_0 \dots\dots\dots(9-1)$$

$$TR = O_0 \dots\dots\dots(9-2)$$

$$O_1 = TR \dots\dots\dots(9-3)$$

٣- نرسم دائرة التحكم المنطقية الشكل (9-3) حسب العلاقات المنطقية الثلاثة .



الشكل (3-9) دائرة التحكم المنطقية

إشارة الخرج من العنصر المنطقي (Oo) ذات قدرة صغيرة، ولا تكفي لتشغيل ملف الكونتاكتور (M) ، ولذلك يجب استخدام وسيلة لتكبير الإشارة وعزل دائرة القدرة الصغيرة عن دائرة القدرة الكبيرة . وتسمى هذه الوسيلة بالبينية (Interfacing Unit) ثم يتم وصل عنصر (Oo(M) .

العلاقة (2) تمثل العنصر الداخلي (Timer) مدخلها إشارة منطقية (Oo) ومخرجها إشارة منطقية (OI) . يتم إدخال الإشارة المنطقية (OI) على البينية (المكبر) ثم وصل عنصر الإخراج (OI) (MI) .

وبذلك نلاحظ أن دائرة التحكم المنطقية مقسمة إلى أربعة أقسام :

١- عناصر الإدخال (Input) : ويتم خلالها وصل عناصر الإدخال مع مصدر التغذية الخارجي ، ثم نقل الإشارة لعناصر المنطق .

٢- العناصر المنطقية (Logic elements) : يتم خلالها توصيل دائرة المنطق حسب العلاقات المنطقية التي تمثل دائرة التحكم وتخرج إشارة ذات قدرة قليلة .

٣- البينية (Interface) : وتستخدم لعزل دائرة القدرات القليلة (الدائرة المنطقية) عن دائرة القدرة الكبيرة (دائرة الخرج) . وكذلك تكبير الإشارة المنطقية لتغذية عنصر الإخراج .

٤- عناصر الإخراج : ويتم خلالها توصيل عناصر الإخراج مع مصدر التغذية الخارجي .

٩-٢- الحاكمت المنطقية المبرمجة :

Programmable Logic Controllers (PLC)

إن التطور الكبير في مجال الإنتاج والصناعة في السنوات الأخيرة أدى إلى الطلب على المواد الصناعية والاستهلاكية . وقد كان لهذه الزيادة على الطلب دور كبير في إنشاء مصانع جديدة أو خطوط إنتاج ذات قدرات إنتاجية عالية ، وقد تطلب إنشاء مثل هذه الخطوط زيادة في حجم المعدات الميكانيكية والكهربائية ، حيث أصبحت عملية

المحافظة على سلامة هذه الأجهزة عملية رئيسية لارتفاع سعر هذه الأجهزة كون كلفة صيانتها عالية .

أصبح الاعتماد على الأساليب القديمة الكلاسيكية في المراقبة والتشغيل أمراً صعباً أو حتى غير ممكن عملياً ، وكان لا بد من اللجوء إلى الأساليب الحديثة ، حيث أصبحت معظم خطط الإنتاج تدار من قبل غرف التحكم المركزية ، والتي تحتوي على جميع التسهيلات اللازمة ، ثم اللجوء إلى أنظمة الأتمتة الحديثة .

وعند الحديث عن الأنظمة المؤتمتة الحديثة فهذا يعني توفير العناصر الرئيسية التالية :

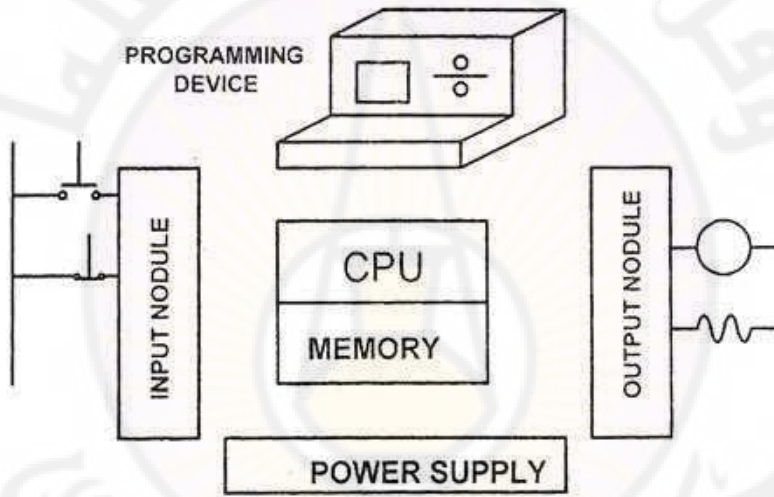
١. نظام قياس وأجهزة دقيقة ذات كفاءة عالية .
٢. نظام تحكم حديث .
٣. مركز تحكم وتشغيل يحتوي على كافة التسهيلات اللازمة .
- لقد وجدت أنظمة التحكم المبنية على أساس الحاكومات المنطقية المبرمجة (PLC) استخداماً واسعاً في العمليات الصناعية للأسباب التالية :
١. الحاجة إلى استخدام وحدة تحكم تتمتع بمرونة جهاز الحاسوب ، وأن تكون في نفس الوقت قادرة على تحمل ظروف البيئة الصناعية .
٢. الحاجة إلى مواكبة التطورات المتتالية في منطق التحكم .
٣. سهولة تشغيل جهاز الحاكم المبرمج وتجهيزه للعمل .
٤. تقليل الكلفة الاقتصادية التي تحتاجها أنظمة التحكم التقليدية .
٥. تسهيل عمليات الاتصال مع الأجهزة الخارجية .
٦. توفير الحيز بسبب صغر حجم الحاكم المنطقي المبرمج مقارنة مع غيره .
٧. التخفيف من التلوث الضوضائي الناتج عن الأجهزة التقليدية .
٨. توفير الطاقة الكهربائية المستهلكة.

٩-٢-١ مكونات الحاكم المنطقي المبرمج :

تُعرف الحاكمة المنطقية المبرمجة بأنها :

جهاز إلكتروني يعمل رقمياً ويستخدم ذاكرة قابلة للبرمجة كمخزن داخلي للتعليمات ، ويقوم بتنفيذ وظائف معينة مثل تنالي منطقي ، توقيت ، عد وحساب لقيادة أنواع مختلفة من الآلات والعمليات من خلال وحدات إدخال / إخراج رقمية وتشابيهية .

ويبين الشكل (4-9) مكونات الحاكم المنطقي المبرمج .



الشكل (4-9) مكونات الحاكم المنطقي المبرمج .

يتكون الحاكم المبرمج من :

١. وحدة المعالجة المركزية : (CPU) Central Processing Unit

وتعتبر دماغ النظام (المعالج الدقيق) ، ويقوم باستقبال المعلومات ومعالجتها وإصدار إشارات التحكم، ويتم المعالجة على أساس التتابع، وتحتوي على :

أ - وحدة التحكم (Control Unit) والتي تقوم بما يلي :

- استقبال المعلومات الداخلة وتنظيم تسلسل معالجتها .

- إرسال المعطيات إلى وحدة الحساب والمنطق (ALU) Arithmetic and Logic Unit مع تعليمات كيفية التعامل معها وتخزينها ، يتم القيام بهذه الوظيفة حسب تعليمات مخزنة في الذاكرة ROM .

ب - وحدة الحساب والمنطق (ALU) .

هذه الوحدة تقوم بتنفيذ العمليات الحسابية كالجمع والطرح والضرب والعمليات المنطقية NOR , AND , OR , NAND , NOT حسب النظام الثنائي (0,1) .

إن وحدة التحكم ووحدة الحساب والمنطق تقوم بوظائفها باستخدام المسجلات (Registers) والمسجل : هو عبارة عن ذاكرة صغيرة تقوم باستقبال المعلومات وحفظها وتحويلها على شكل خانات ثنائية (bits) ، حيث أن 1 byte = 8 bits ، وتعرف قدرة المعالج من خلال سرعة المعالجة وحجم الخلية الثنائية .

٢. الذاكرة (Memory) .

هناك ما يسمى بالبرنامج السيد (Master Program) ، وهو برنامج ثابت يخزن في ذاكرة (ROM) لإدارة عمليات المعالج ، وكذلك برنامج التحكم وبرنامج المستفيد (User Program) والبيانات الخاصة به .

أنواع الذاكرة :

أ- ذاكرة القراءة فقط read - only memory ، وفيها يحفظ البرنامج السيد ، البرنامج المنفذ ، وهذا النوع يبرمج مرة واحدة من المصنع وهي ذاكرة غير متغيرة .

ب- ذاكرة القراءة القابلة للبرمجة PROM , Programmable ROM ، وهي ذاكرة سهلة البرمجة ، وتستخدم للحفاظ على أنواع معينة من المعلومات ، وعندما يتم برمجتها لا يمكن مسحها .

ج - ذاكرة EPROM (Erasable Programmable ROM) ذاكرة تحتوي على برنامج السيد ويمكن مسح البرنامج ، وذلك بتعريض الفتحة العلوية النافذة في (Ship) إلى الأشعة فوق البنفسجية لمدة ثلاثين ثانية . بعد ذلك تصبح جميع خلايا الذاكرة في حالة

REST . ومن سينتاه الوقت الضائع في إعادة برمجتها، وكذلك عند تعرضها للأشعة فوق البنفسجية فإنه يتم مسح جميع المعلومات التي فيها .

د- ذاكرة (EEPROM) (Electrically EPROM) وهي شبيهة بذاكرة EPROM إلا أنها تسمح محتوياتها كهربائياً ، وهي ذاكرة غير متطايرة ، ويخزن فيها البرامج الثابتة (البرنامج السيد) . وميزة هذه الذاكرة السهولة والسرعة التي يتم فيها عملية REST (ومسح القطعة) ،ويمكن أن تكون بديلة عن ذاكرة RAM .

حيث تعدّ اليوم أنها الذاكرة المختارة للتخزين والاسترجاع (Backing up) أو عملية الترحيل (Transfer) .

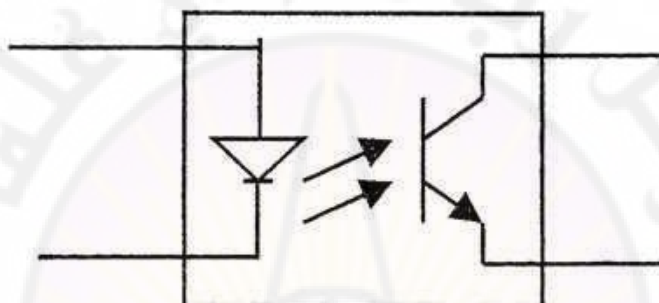
هـ - ذاكرة الوصول العشوائي RAM (Random Access Memory) ، وتعتبر ذاكرة تجميعية من EEPROM و RAM ، حيث أنه عندما تتم عملية فصل التيار الكهربائي عن وحدة CPU فإن محتويات الذاكرة RAM يتم تخزينها بسرعة في EEPROM ، وعند إعادة وصل التيار الكهربائي فإن هذه البيانات المخزنة يتم قراءتها ونقلها ثانية إلى ذاكرة RAM . ويكتب فيها برنامج المستفيد وهي للكتابة والقراءة وتنفذ محتوياتها عند إطفاء الجهاز أو انقطاع مصدر التغذية.

٣- وحدات الإدخال والإخراج Input / Output Units :

معظم المتحكمات المنطقية المبرمجة تعمل ما بين V (5-15) ، بينما الكثير من العمليات التي يتم تشغيلها من قبل المحكمات المبرمجة تتراوح جهود تغذيتها ما بين $24Vdc - 24Vac$ ، لذلك تستخدم وحدات بينية (Interfacing Unit) للربط بين " العملية المراد تشغيلها " والحاكم المبرمج .

وفي الأنواع الحديثة من الحاكمت المبرمجة ، فإنه يمكن اختيار نوع المدخل والمخرج حسب التوتر الذي تعمل عليه Vac (24-240) ، Vdc (15-24) ، وكذلك المخرج فإنه يمكن اختيارها حسب التوترات التي يعمل عليها المحرك أو الصمام أو غيرها من المرحلات وحسب تيار التحميل ، حيث أنه من المهم ذكره أن تيار وتوتر وحدات الإدخال والإخراج يجب أن تطابق تيار وتوتر الجهاز المراد تشغيله .

ويتم العزل بين إشارة الحاكمت المنطقية المبرمجة والتي تتراوح ما بين V_{dc} (5-15)
 وتلك المستخدمة في العملية الصناعية ، حيث يستخدم ما يسمى بالعازل الضوئي
 (Opto Coupler) ، حيث يتكون هذا العزل من ديود باعث للضوء يستقبل الإشارة من
 المعالج الدقيق (MP) التابع للحاكمات المبرمجة . ثم يستقبل الترانزيستور الضوئي تلك
 الإشارة لتخرج بإشارة مناسبة للعملية المراد تشغيلها ، كما في الشكل (5-9).



الشكل (5-9) العازل الضوئي

٩-٢-٢- لغات برمجة الحاكمت المنطقية المبرمجة

PLC Programming Languages

من أجل تعريف عمل الأنظمة المؤتمتة يجب كتابة برنامج التعليمات ، والبرنامج عبارة
 عن تتابع المعلومات الآلية والتي تصف العملية التي يجب على الحاكم القيام بها .
 ويجب أن يكتب البرنامج بلغة مفهومة للحاكم المبرمج ، وهناك ثلاثة أنواع من لغات
 البرمجة :

١. لغة المخطط السلمي Ladder diagram

٢. لغة لائحة التعليمات Instruction List

٣. لغة المخطط التتابعي Flow Chart diagram

أكثر اللغات انتشاراً واستخداماً اللغتان الأولى والثانية وتحديد الأولى لسهولة فهمها .

١- لغة المخطط السلمي Ladder diagram

يعرض البرنامج على شاشة ويبين عليه جميع عناصره مثل الملامسات المفتوحة والمغلقة والمؤقتات والعدادات والمرحلات الداخلية والخارجية بشكل صوري (رسم) .
إن الحالة المنطقية لانتقال التيار هي من اليسار إلى اليمين هذا المرور يعرف بالمرور السلمي .

بعض القواعد التي تؤخذ بعين الاعتبار عن عملية رسم المخطط السلمي :

- ١- سريان القدرة من اليسار إلى اليمين .
- ٢- لا يجوز ربط المخرج Output مباشرة مع الطرف الأيسر .
- ٣- لا يجوز وضع ملامسات إلى اليمين من المخرج .
- ٤- كل خط سلمي (Rung) يجب أن يحتوي على مخرج واحد أو أكثر .
- ٥- كل مخرج يحدد مرة واحدة فقط في البرنامج .

٢- لغة لائحة التعليمات Instruction List

لغة البرمجة هذه تستخدم اختصارات لعمليات الجبر البولي المنطقي , AND , OR :
LOAD

- أ- تعليمة LOAD (LD) : تحميل قيمة التلامس وتكون بداية كل سطر .
- ب- تعليمة AND (A) : تربط بين قيمة تلامس مع تلامس يليه وتكون النتيجة تساوي 1 أو صحيحة True . إذا كانت قيمة كل من التلامسين تساوي (1) .
- ج - تعليمة OR (O) : تربط بين قيمة التلامس مع تلامس يليه وتكون النتيجة تساوي 1 إذا كانت قيمة واحد من التلامسين أو كليهما تساوي 1 .
- د - تعليمة (=) OUTPUT : - تعمل على نسخ COPY نتيجة أي عملية إلى المخرج المحدد .

وللتعامل مع الحاكم المبرمج في أنظمة القيادة الكهربائية سوف نقوم هنا بتحويل بعض دارات التحكم في نظم القيادة الكهربائية من دارات تحكم تقليدية إلى دارات تحكم تستخدم الحاكم المبرمج باتباع الخطوات التالية :

١- تحليل دائرة التحكم لتحديد عناصر الدارة (Circuit Element) ، من حيث الرمز Symbol المستخدم في دائرة التحكم وحالة العنصر Status ، هل هو مفتوح (NO) أو مغلق (NC) في الحالة الطبيعية للدارة . وكذلك نوع العنصر من حيث هل هو عنصر إدخال (Input) أو عنصر إخراج (Output) وإعطائه رقماً تسلسلياً ثم تعبئة هذه المعلومات في جدول كما يلي :

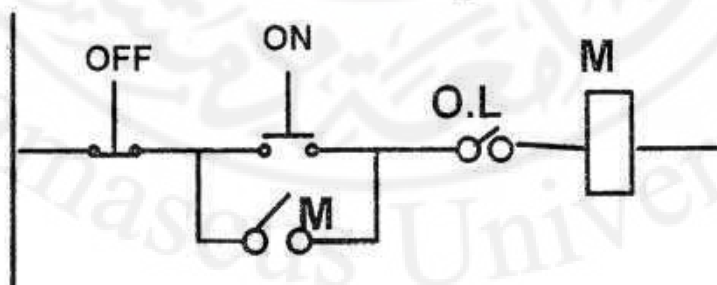
ELEMENT	SYMBOL	STATUS	I / O	NUMBER
العنصر	الرمز	الحالة	عنصر إدخال إخراج	الرقم

٢- كتابة العلاقات المنطقية التي تمثل دائرة التحكم باستخدام رموز عناصر الإدخال والإخراج وأرقام تسلسلها .

٣- كتابة البرنامج حسب لغة برمجة الحاكم المنطقي المبرمج .
أمثلة عامة :

مثال ١ :

دائرة تشغيل مباشر لمحرك كهربائي ، كما يبين الشكل (9-6-a) .



الشكل (6-9-a) . دائرة تشغيل مباشر لمحرك كهربائي

المطلوب : تحويل دائرة التحكم في الشكل (9-6-a) إلى دائرة تحكم باستخدام لغات
الحاكنات المبرمجة .

الخطوات :

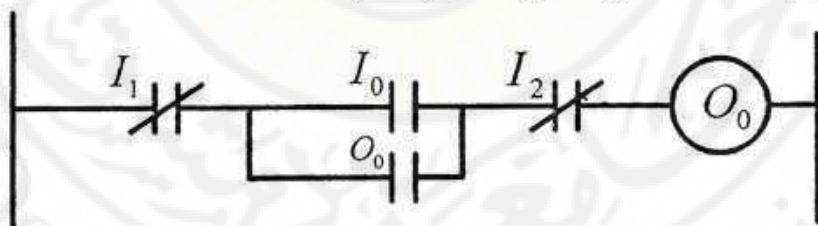
١- تحليل الدارة وتعبئة النتيجة في الجدول :

Element العنصر	Symbol الرمز	Status الحالة	I / O عنصر الإدخال والإخراج	Number الرقم
Push button off	OFF	NC	I	I_0
Push Button on	ON	NO	I	I_1
Safety Element	O.L	N.C	I	I_2
Coil Contactor (M)	M	Normally off	O	O_0

٢- كتابة العلاقة المنطقية لدائرة التحكم (وتكون من صفر واحد) .

$$O_0 = (I_1 + O_0) I_0 I_2$$

٣- رسم المخطط السلمي كما في الشكل (6-9-b) :



الشكل (6-9-b) المخطط السلمي

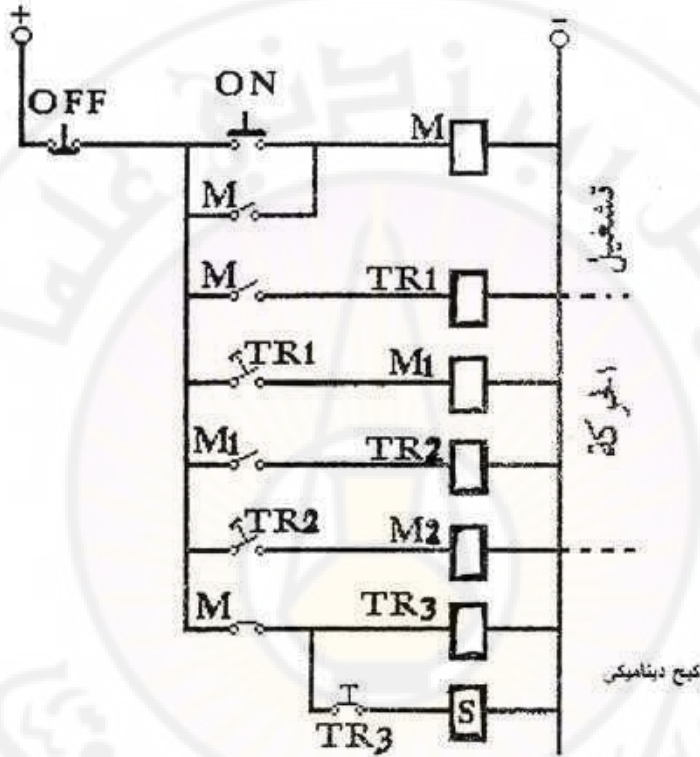
١- لغة قائمة التعليمات (وتعتمد على نوع الحاكم المبرمج) .

ORGR

LOD T	I1
ORL T	O0
AND T	I0
AND T	I2
OUT T	O0

مثال ٢ :

دارة تشغيل مرحلتين وكبح ديناميكي حسب مبدأ الزمن ، الشكل (7-9-a) .



الشكل (7-9-a) دارة تشغيل مرحلتين وكبح ديناميكي حسب مبدأ الزمن

المطلوب :

١- رسم المخطط السلمي المكافئ

٢- كتابة لغة قائمة التعليمات .

الخطوات :

١- تحليل دارة التحكم وتعبئة النتيجة في الجدول التالي :

Element العنصر	Symbo الرمز	Status الحالة	I / O عنصر الإدخال والإخراج	Number الرقم
Push button off	OFF	NC	I	I ₀
Push Button on	ON	NO	I	I ₁
Coil Contactor (M)	M	Normall y off	O	O ₀
Time Relay (TR1)	TR1	Normall y off	-	T ₁ K=50 (5 sec)
Coil	M1	Normall y	O	O ₁
Contractor (M)		off		
Time Relay (TR2)	TR2	Normall y off	-	T ₂ K = 70 (7 sec)
Coil Contactor (M2)	M2	Normall y off	O	O ₂
TIME RELAY (TR3)	TR3	Normall y off	-	T ₃ K=20(2sec)
Coil stopping Contractor (s)	M1	Normall y off	O	O ₃

٢- كتابة العلاقة المنطقية التي تمثل كل صف (RUNG) في دائرة التحكم .

$$O_0 = (I_1 + O_0)I_0.$$

$$T_1 = O_0$$

$$O_1 = T_1$$

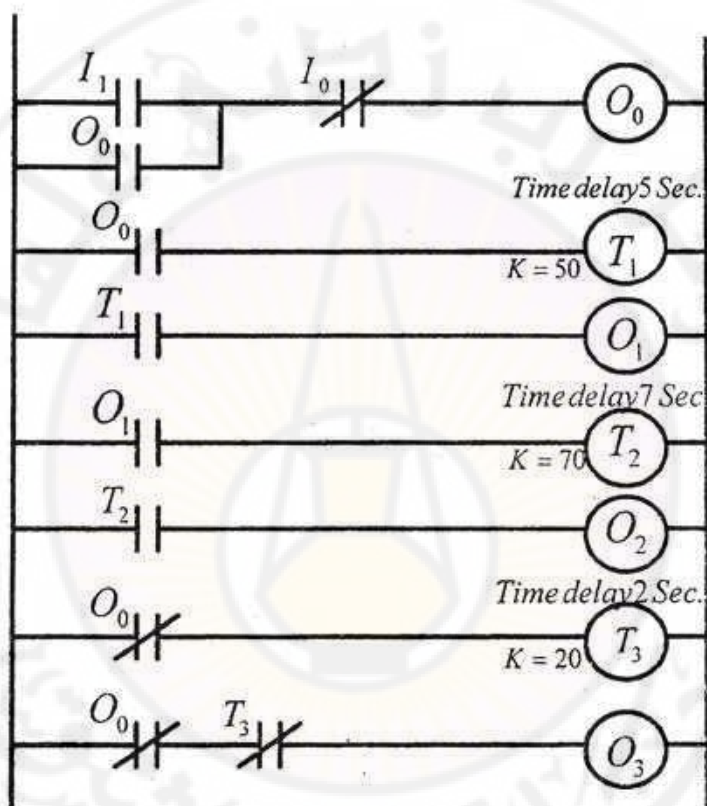
$$T_2 = O_1$$

$$O_2 = T_2$$

$$T_3 = \overline{O_0}$$

$$O_3 = \overline{T_3} \cdot \overline{O_0}$$

٣- نرسم المخطط السلمي بالاعتماد على دائرة التحكم أو العلاقات المنطقية ، كما في الشكل (7-9-b).



الشكل (7-9-b) المخطط السلمي المكافئ لتشغيل

مرحلتين وكبح ديناميكي حسب مبدأ الزمن

٤- لغة قائمة التعليمات (وتعتمد على نوع الحاكم المبرمج) .

ORGR	
LOD T	I1
ORL T	O0
AND T	I0
OUT T	O0
ORGR	

LOD T O0
 OUT M T1 K 50
 ORGR
 LOD T T1
 OUT T O1
 ORGR
 LOD T O1
 OUT M T2 K 70
 ORGR
 LOD T T2
 OUT T O2
 ORGR
 LOD F O0
 OUT M T3 K 20
 ORGR
 LOD F O0
 AND F T3
 OUT T O3



الملحق /١/

تحديد عزم العطالة الميكانيكي للآلات الكهربائية

هناك عدة طرق لتحديد عزم العطالة مخبرياً ، وأسهل الطرق هي طريقة إيقاف المحرك. تنطلق هذه الطريقة من أنه عند قطع التغذية عن المحرك فإنه سيستمر بالدوران بفعل القدرة الحركية المكتسبة نتيجة عطالته ، ثم تتناقص السرعة تدريجياً للصفر تحت تأثير قوى الكبح الذاتية . هذه القوى تشمل ضياعات الاحتكاك وقوى كبح ناشئة عن مغناطيسية متبقية .

لذلك يجب تحديد الضياعات الميكانيكية والحديدية للتمكن من حساب القدرة المستهلكة للتغلب على قوى الكبح الذاتية . ويمكن حساب هذه الضياعات من تجربة اللاحمل . إن الضياع الكلي في المحرك :

$$\Delta P_0 = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{Cu} + \Delta P$$

من تجربة اللاحمل ΔP_{Cu} , ΔP يهملان لصغر التيار .

$$\Delta P_0 = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} = V * I_0 * \cos \varphi$$

سنقوم الآن بمرحلتين لحساب عزم العطالة (J) وهما :

(أ) المرحلة الأولى :

نقوم بتغيير التوتر المطبق تدريجياً ، ونقيس سرعة دوران المحرك المقابلة ، ونحسب الاستطاعة المستهلكة المقابلة أيضاً . وهكذا حتى نستطيع رسم العلاقة $P_0 = f(n)$ والتي ستكون متزايدة .

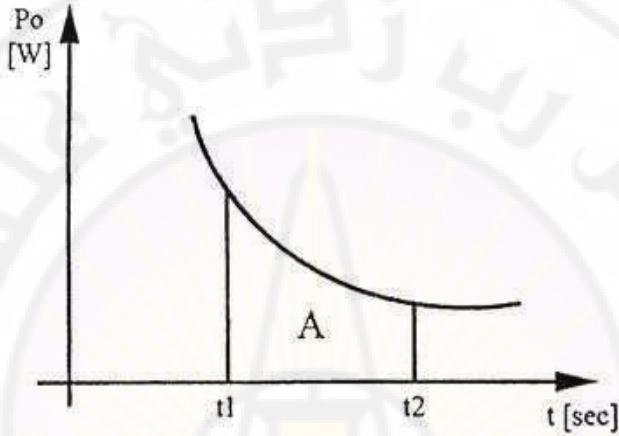
(ب) المرحلة الثانية :

ندور المحرك حتى سرعته الاسمية، ثم نقطع التغذية عنه ونتركه ليدور بشكل حر على الفراغ، ونقيس خلال فواصل زمنية محددة سرعة هذا المحرك .

من خلال المنحنيين الناتجين في المرحلة الأولى والثانية نستطيع رسم العلاقة $P_0 = f(t)$ ، وهنا نأخذ زمنين مختلفين t_1, t_2 ، ونحسب المساحة المحصورة بين منحنى الضياع والمحاور الإحداثية ، والتي تساوي القوة المبذولة للتغلب على قوى الكبح الذاتية.

وعندها نطبق العلاقة التالية لحساب عزم العطالة :

$$J[Kg.m^2] = \frac{2 * A}{W_2^2 - W_1^2} = \frac{2 * A}{\left(\frac{2\pi}{60}\right)^2 (n_2^2 - n_1^2)} = \frac{180}{n_2^2 - n_1^2}$$



المصطلحات العلمية

A

AC motors	محركات التيار المتناوب
Acceleration	تسارع
Acceleration constant of machine	ثابت تسارع الآلة
Adjustable speed	محرك ذو سرعة متغيرة
Air-gap	فجوة هوائية
Alternator	منوبة
Amplifier	مضخمات
Apparatus	جهاز
Armature	متحرض
Artificial	اصطناعي
Asynchronous machine	آلة لاتزامنية
Asynchronous motor	محرك لاتزامني
Automatic control	تحكم آلي
Automatic Regulation system	نظام تنظيم آلي
Automatic starters	مقلعات آلية

B

Back-to-Back method	طريقة التضاد
Block diagram	مخطط صندوقي
Braking	فرملة-كبح
Braking Torque	عزم الكبح
Brush-Holder	حاملة المسفرات
Brush shift	ازاحة المسفرات
Brushless dc motors	محرك تيار مستمر بدون مسفرات

C

Capacitor	مكثف
Characteristics	مميزات
Chopper	مقطع
Circuit	دائرة
Circuit Breaker	قاطع دائرة
Closed-Loop	حلقة مغلقة
Compensation	تعويض
Comutation	تبديل
Comutator	مبدل (مجمع)
Conductors	نواقل
Contact	تماس
Contactors	واصلات
Control Characteristics	مميزات التحكم
Control Circuit	دائرة تحكم
Controlled Rectifier	مقوم مضبوط الجهد
Controllers	حاكما-منظمات
Converter	مبدلة
Cooling	تبريد
Cooling Cycle	دورة تبريد
Cooling Time Constant	ثابت زمن التبريد
Counter	معاكس-تضاد
Counter-Current Braking	الكبح بعكس التيار
Critical	حرج
Current	تيار

Cycloconverter مبدلة ترددية

D

Damper Winding ملفات التخماد

Damping تخامد

DC Drives قيادات التيار المستمر

DC Motors محركات التيار المستمر

Delay Circuit دائرة تأخير

Double Cage Rotor دوار بققص مزدوج

Drive قيادة

Duty عمل-تحميل

Dynamic ديناميكي

Dynamic Braking كبح ديناميكي

Dynamo مولد

E

Eddy Current Losses الضياعات بسبب تيارات فوكو

Efficiency مردود

Electric Drive قيادة كهربائية

Electrical Braking فرملة كهربائية

Electronic Control تحكم إلكتروني

Equivalent circuit الدارة المكافئة

Equivalent Current التيار المكافئ

Equivalent Power الاستطاعة المكافئة

Equivalent Torque العزم المكافئ

Error Detector كاشف خطأ

Excitation تهيج

Exciter	مُهَيِّج
Flux	سَيْالَة
Flux Disting	كثافة السَيْالَة المغناطيسية
Frequency	تردد
Feedback	تغذية عكسية
Feedback Loop	حلقة التغذية العكسية
Friction Losses	ضباغات الاحتكاك
Frequency Converter	مبدلة ترددية
Field Winding	ملف التهييج
Feedback Control Systems	نظام تحكم ذو تغذية عكسية
Gain	ربح
Group	مجموعة
Generator	مولد
Graf	رسم بياني
Hysteresis	البطاء المغناطيسي
Heating	تسخين
Housepower	وحدة الاستطاعة بالحصان
Harmonics	مدروجات، توافقيات
Hydraulic	هيدروليكي
Hysteresis	تعويق - إبطاء
Industrial	صناعي
Inertia Moment	عزم عطالة

Induced Torque	عزم متحرض
Inertia	عطالة
Inverter	قالبية
Induction Motors	محركات تحريضية
L	
Leakage	تسرب
Load	حمولة
Linear	خطي
Laminations	صفائح معزولة
Losses	ضباغات
Lag	متأخر
Lead	متقدم
Load Diagram	مخطط الحمولة
Leakage Impedance	ممانعة تسريبية
M	
Machine	آلة
Magnetic	مغناطيسي
Magnetic Amplifier	مضخم مغناطيسي
Magnetic Flux	سيالة مغناطيسية
Maximum Power	استطاعة أعظمية
Mechanical Rectifier	مقوم ميكانيكي
Motor	محرك
N	
Nominal	اسمي
Nonlinear	لاخطي
Norm	نظام

O

Output	الخرج
Overload	حمولة زائدة
Overload Protection	الحماية من التحميل الزائد

P

Phase	طور
Phase Control	التحكم الطوري
Phase Shifting	ازاحة طورية
Pitch	خطوة
Plugging	فرملة بعكس التوصيلات
Pole	قطب
Pole Changing	تغيير عدد الأقطاب
Pole Pitch	خطوة قطبية
Polyphase	متعدد الأطوار
Power	استطاعة
Power Amplification	مضخمات القدرة
Power Factor	معامل الاستطاعة

R

Range	مجال
Rated	اسمي
Rating	اسمي
Rating Power	استطاعة اسمية
Rating Speed	سرعة اسمية
Ratio	نسبة
Reaction	رد فعل

Reactive Power	استطاعة ردية
Reactor	مفاعلة
Rectifier	مقوم
Regeneration	إعادة التوليد
Regulation	تنظيم
Regulator	منظم
Reluctance	معاوقة
Resistance	مقاومة
Revers	عكس
Reversing Current	عكس اتجاه التيار
Rheostat	ريوستات-مقاومة متغيرة
Rotation per Minute (r.p.m)	دورة في الدقيقة (د/د)
Rotor	دائر
Saturation	إشباع
Selection	اختيار
Selection Of Motor Power Rating	اختيار الاستطاعة الاسمية للمحرك
Sensors	حساسات
Series	تسلسلي
Series Motor	محرك تسلسلي
Short Circuit Current	تيار الدارة القصيرة
Short Time Duty	حمولة قصيرة الزمن
Short Time Rating	تحميل قصير الزمن
Shunt	تفرعي
Shunt Motor	محرك تفرعي

Single Phase	أحادي الطور
Slip	انزلاق
Slip Power	الاستطاعة المنزلقة
Source	منبع - مصدر
Speed	سرعة
Speed Control	التحكم بالسرعة
Squirrel Cage	قفص سنجابي
Standard	نظامي
Starters	مقلعات
Starting Rheostat	مقاومة إقلاع
Starting Time	زمن الإقلاع
Starting Torque	عزم إقلاع
Stator	ثابت
Switches	قواطع
Synchronous	توافقي
Synchronous Machine	آلة متوافقة
Synchronous Motor	محرك متوافق
Synchronous Speed	السرعة التوافقية
System	نظام
T	
Tachometer	مقياس السرعة
Three Phase	ثلاثي الطور
Thyristor	ثايرستور
Thyristor Converter	مبدلة ثايرستورية
Time Constant	ثابت زمني

Time Relay	حاكمة زمنية
Torque	عزم
raction Motor	محركات الجر
Transfer Function	تابع النقل
Transformer	محوّلة
Transient	عابر
Transient Condition	الحالة العابرة
Turn	لفة
Variable	متغير
Vertilation	تهوية
Vibration	اهتزاز
Voltage	الجهد
Voltage Control	التحكم بالجهد
Voltage Ratings	القيم الاسمية للجهد
Voltage regulation	تنظيم التوتر
Wave	موجة
Winding	ملف
Winding Factor	معامل اللف
Wound Rotor	الدائر الملفوف
Wye-Connection	توصيل نجمي
Wye-Delta Starting	إقلاع نجمي/مثلثي

جدول الرموز المستخدمة

A	آمبير
A	الطور A
B	الطور B
C	الطور C
C	ملف القاطع الرئيسي
d	المحور الطولي
E	القيمة الفعالة للقوة المحركة الكهربائية
E_A	القوة المحركة الكهربائية المتحرضة في الطور A في حالة اللاحمل
E_d	المركبة الطولية للقوة المحركة الكهربائية الناتجة عن رد فعل المتحرض
E_q	المركبة العرضية للقوة المحركة الكهربائية الناتجة عن رد فعل المتحرض
F	القوة المحركة المغناطيسية
f	التردد
Hz	هرتز
I	القيمة الفعالة لتيار الطور
I_A	تيار الطور A
I_c	تيار المكثف
I_d	المركبة الطولية للتيار I_A
I_{D-C}	تيار مستمر
I_F	تيار التهييج
I_{Fe}	الجزء الحقيقي لتيار اللاحمل I_0

I_L	تيار الخط
I_n	التيار الاسمي
I_0	تيار اللاحمل
I_q	المركبة العرضية للتيار I_A
I_{sc}	تيار القصر
I_{st}	تيار الإقلاع
I_{μ}	الجزء الردي لتيار اللاحمل I_0
K_u	عامل اللف
KT	المؤقت الزمني
L	عامل التحريض الذاتي
T	العزم
T_s	عزم الحمل
T_n	العزم الاسمي
T_{max}	العزم الأعظمي
T_{st}	عزم الإقلاع
T_d	عزم ديناميكي
n	سرعة دوران الآلة
n_1	سرعة دوران الساحة المغناطيسية (السرعة التزامنية)
N	عدد لفات الطور الواحد
P	عدد أزواج الأقطاب
P	الاستطاعة الفعالة
P_1	استطاعة دخل المحرك
P_{2a}	استطاعة خرج المحرك الصافية
P_{mech}	الاستطاعة الميكانيكية

P_0	استطاعة اللاحمل
P_{sc}	استطاعة القصر
P_w	استطاعة الثغرة الهوائية
Q	الاستطاعة الردية
q	المحور العرضي
R	المقاومة الأومية
R_{Fe}	المقاومة الحديدية في الآلة
S	كباسة
S	الاستطاعة الظاهرية
S	الإنزلاق
U	القيمة الفعالة للتوتر
$U_{D.C}$	التوتر المستمر
U_F	توتر التهيج
U_L	توتر الخط
U_n	التوتر الاسمي
U_{sc}	توتر القصر
V	فولط
X	الممانعة التحريضية
X_A	الممانعة التحريضية لمفات الطور A
x_d	المركبة الطولية لرد فعل التحريض X
X_{eq}	الممانعة التحريضية المكافئة
X_p	المركبة الطولية لمفاعلة الآلة
X_q	المركبة العرضية لمفاعلة الآلة
x_q	المركبة العرضية لرد فعل المتحريض X

X_s	المفاعلة التزامنية
X_p	المفاعلة الردية للألة
W	واط
Z	عدد المجاري أو عدد النواقل الفعالة
Z	الممانعة
Z_{eq}	الممانعة المكافئة
Z_o	ممانعة اللاحمل
τ	الخطوة القطبية
ω	التردد الزاوي
Ω	أوم، السرعة الزاوية الميكانيكية
Φ_μ	القيمة العظمى للفيض المغناطيسي
ϕ	زاوية عامل الاستطاعة
η	المردود
Θ	زاوية الحمل (زاوية عزم الدوران)
v_i	نسبة تحويل التيار
v_m, q	نسبة تحويل التوتر
v_Ω	نسبة تحويل الممانعة
ΔP_{cu}	الضياعات النحاسية
ΔU	هبوط التوتر
ΔP_f	ضياعات الاحتكاك
ΔP_{Fe}	الضياعات الحديدية (تعويض وتيارات إعصارية)
ϕ	الفيض المغناطيسي للفة واحدة
Ψ	الفيض المغناطيسي الكلي
H	شدة الحقل المغناطيسي
B	كثافة السيلة المغناطيسية
R_μ	المقاومة المغناطيسية
μ	معامل النفاذية المغناطيسية
I_a	تيار المتحرض في آلات التيار المستمر
ℓ	الطول الفعال للألة (أو الناقل)
v	السرعة الخطية

::: المراجع العلمية :::

أ. المراجع العربية:

١. المحولات الكهربائية: د. هاشم ورقوزق د. هاكوب بوغوص، منشورات جامعة دمشق ٢٠٠٤.
٢. نظم القيادة الكهربائية د. راتب العيسى ، م. زيد الحجازين مكتبة المجتمع العربي للنشر عمان ٢٠٠٤ .
٣. التوصيلات الكهربائية (الأتمتة وتوزيع الطاقة)، شركة مولر، ٢٠٠١.
٤. الآلات الكهربائية وآلات التيار المستمر: د. محي الدين الدسوقي ود. هاكوب بوغوص، منشورات جامعة دمشق ٢٠٠١.
٥. الآلات الكهربائية (٤)، د. إلياس جبور، منشورات جامعة دمشق، ١٩٩٩.
٦. القيادة الكهربائية الآلية (١) د كمال ناجي ، د محمد عمر ورد منشورات جامعة دمشق ١٩٩٥.
٧. الآلات الكهربائية والميكروية: د. عبد المطلب أبو سيف، المركز العربي للتأليف والترجمة والنشر ١٩٩٥.
٨. التحكم الكهربائي الصناعي والآلي، م. محمد صبحي المصري، ١٩٩٤.
٩. الدارات الكهربائية /١: د. عبد الوهاب ترجمان، منشورات جامعة دمشق ١٩٩٣.
١٠. الآلات والقيادة الكهربائية د : محمد عمر ورد منشورات جامعة دمشق ١٩٩١.
١١. الآلات الكهربائية ٣٧٥ ج. عيد ١٩٨٥.
١٢. الآلات الكهربائية (١) د نبيل عبيد ١٩٨٣.
١٣. الآلات الكهربائية (٣)، د. إلياس جبور، منشورات جامعة دمشق، ١٩٨١.
١٤. القيادة الكهربائية - الجزء الأول م . تشيلفكين ترجمة د إلياس طوشان ، د حسان ريشة ١٩٨٠ .

ب. المراجع الأجنبية:

1. Electric Machinery Fundamentals; Stephen J. Chapman, Fourth Edition, MC Graw Hil. 2005.
2. Muhammad H. Rashid, " **POWER ELECTRONICS : Circuits, devices, and Applications** ", Prentice-Hall, 1993.
3. Cyril W. Lander " **POWER ELECTRONICS** " McGraw- Hill Book Company, 1993.
4. A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Stephen D. Umans, " **ELECTRIC MACHINERY** " McGraw- Hill Book Company , 1990.
5. B.F. Tokaref Electrical Machines Moscow 1990
6. Mohan, N., T. M. Undeland and W.P. Robbins, " **POWER ELECTRONICS: Converters, Applications and Design** ", Wiley, New York, 1989
7. Voldek A.I. Electrical, Energy, Leningrad 1988.
8. M.M. Katman Electrical Machines and Automatic Electric Drive Moscow. 1987
- 9- Ivanov – Smolenski A.V. Electrical Machines, Energy Moscow. 1980

اللجنة العلمية :

- د. إلياس جبور
- د. كمال ناجي
- د. عبد المطلب أبو سيف

المدقق اللغوي :

- د. سامر زيود

حقوق الطبع والترجمة والنشر محفوظة لمديرية الكتب والمطبوعات