الجمهورية العربية السورية
جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
قسم الطاقة الكهربائية

دراسة في كهرباء القاطرات (ديزل – كهرباء)

أطروحة أعدت لنيل درجة الماجستير في هندسة نظم القدرة

إعداد
المهندس علي أحمد غانم

المشرف العلمي
الاستاذ الدكتور: أبي سلمان

المشرف المشارك
الدكتور: ياسر دياب

العام الدراسي
2012-2013

Syrian Arab Republic

Damascus University

Faculty of Mechanical and Electrical Engineering

Electrical Energy Department



Study in Locomotives Electricity (Diesel - Electric)

Thesis Submitted for the Degree of MSc in Electrical Power Systems Engineering

Prepared by

Eng. Ali Ahmad Ghanem

Main Supervisor

Prof. Dr. Oubai Salman

Assistance Supervisor

Dr. Yasser Diab

Academic Year
2012 – 2013

الإهداء

إلى ....

من تغلغل حبّه في دمي وسكن قلبي وروحي...، من أدمى يديه ليجعل لي النجاح سبيلاً... من علمني حب الوطن والمضي في الطريق الصحيح... ، من تحدى الحياة ليصنع لي الأفق طريقاً...، من ذاق مرارة الحياة ليسقينا حلوها...، للذي مهما كتبت له تبقى الكلمات عاجزةً عن وصفه .

والدي الغالي

إلى ....

أوّل كلمة نطقت بها شفاهي...، للجذر الذي أنماني...، كانت ولا تزال منهلاً من الحب لا ينضب...، للقلب الدافئ المفعم بالحنان والحب...، للملحمة التي لحنتها الأعصر والأيام وحفظتها النفوس والوجدان...، لحب عمري الذي لا يزول... .

أمي الحبيبة

إلى ....

الأيدي التي حملت لي الزنابق عندما جرحتني الأيام...، النجوم الساطعة في سمائي...، من أتمنى أن أرى إشراقة وجوههم في كل صباح...، من أعطوا الأخوة معناها الكبير...، من شاركوني أفراحي وأحزاني وبددوا همومي...، من أتمنى أن تعطيهم الحياة أبهى وأروع ما لديها... .

إخوتي الأعزاء

إلى رفاق الدرب الذين جعلوا للحياة معنى آخر ...، من مشينا سوياً وتعثرنا سوياً..، من قطعنا معاً دروباً شائكة ومع ذلك كنّا نشتم فيها رائحة الورد...، الذين وقفوا معي وقت الضيق والعناء... .

جميع أصدقائي

إلى كل من سهر معي ليلة ... أو مسح من عيني دمعة ...
و كل من رسم على وجهي ابتسامة ...

إلى كل من تفضل مشكوراً و ساهم بإنجاز هذا البحث

وإليكم جميعاً

أقدم بحثي المتواضع

كلمة شكر

وأنا أضع اللمسات الأخيرة على هذا البحث لابد أن أتوجه بجزيل الشكر والامتنان الى كل من وضع بصمته وساعدني في انجاز هذا البحث وأخص بالشكر أساتذتي المشرفين

أ. د. أبي سلمان & **د. ياسر دياب**

على ما بذلوه من جهد مضني في سبيل انجاح البحث، وعلى رعايتهم لي ولما قدموه من المتابعة اللازمة لإخراج هذا البحث على هذه الصورة .....

كما أتوجه بالشكر إلى عمادة كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية ، وأتقدم بالشكر والامتنان الكبير إلى أساتذتي في قسم هندسة الطاقة الكهربائية على الجهد المبذول لإتمام البحث.

وأشكر كل من ساعدني ومد لي يد العون للوصول إلى هذه المرحلة الدراسية المتقدمة.

الباحث

الفهرس

مقدمة ١

الفصل الأول – الدراسة المرجعية..... ٢

الفصل الثاني – دراسة في القطارات..... ٦

- أهم ما تم انجازه في موضوع نظم الجر الهجينة في القاطرات(ديزل _ كهرباء)..... ٧
- استعادة القدرة الكهربائية عن طريق الكبح..... ١٠
- نظم تخزين الطاقة عند إجراء الكبح..... ١٤

الفصل الثالث– دراسة نظرية في نظام الجر.....١٦

- تحليل عمل الآلات الكهربائية المستخدمة في نظام الجر..... ١٩
- المبدلات الالكترونية المستخدمة في نظم الجر الهجينة ٣٠
- نظام استعادة القدرة الكهربائية بالكبح..... ٥٨

الفصل الرابع – نمذجة نظام عمل القاطرة..... ٦٨

- نمذجة النظام الكهربائي في القاطرة الكهربائية..... ٧٣
- نمذجة محرك الجر التحريضي ثلاثي الطور..... ٧٤
- نمذجة دارة المعرج..... ٧٧
- الاستنتاجات..... ١٠٧

التوصيات..... ١٠٩

المراجع..... ١١٠

قائمة الأشكال

الشكل	الصفحة
الشكل(1-1) بنية نظام الدفع	٣
الشكل(1-2) منحني الارتفاع والاستطاعة بالنسبة للزمن	٥
الشكل(2-1) القاطرات التقليدية	٧
الشكل(2-2) نظام الدفع الهجين التسلسلي	٨
الشكل(2-3) نظام الدفع الهجين التفرعي	٩
الشكل(2-4) الكبح الديناميكي	١٠
الشكل(2-5) جريان الطاقة في نظم الجر الهجينة ذات نظام الكبح الديناميكي	١١
الشكل(2-6) الكبح باستخدام نظم تخزين الطاقة الكهربائية	١٢
الشكل(2-7) الكبح باستعادة القدرة الكهربائية في القطارات الكهربائية ذات الخطوط الهوائية	١٣
الشكل(2-8) الكبح باستعادة القدرة الكهربائية في القطارات الكهربائية	١٤
الشكل(2-9) حالات شحن وتفريغ نظام التخزين	١٥
الشكل(3-1) : مخطط صندوقي لنظام الجر الهجين	١٨
الشكل(3-2) محركات الجر	٢٠
الشكل(3-3) أجزاء المحرك التحريضي	٢٢
الشكل(3-4) القفص السنجابي في الجزء الدائر	٢٣
الشكل(3-5)الدائر الملفوف	٢٤
الشكل(3-6) مقطع عرضي في المحرك التحريضي	٢٤
الشكل(3-7) الدارة المكافئة للمحرك التحريضي منسوبة إلى الثابت	٢٥
الشكل(3-8) الدارة التقريبية المكافئة لطور واحد من الآلة	٢٦
الشكل(3-9) مميزة العزم- سرعة لمحرك تحريضي	٢٨
الشكل(3-10) مبدلات نظام الجر الالكترونية	٣٠
الشكل(3-11) مقوم نصف موجة أحادي الطور	٣١
الشكل(3-12) موجة تيار وتوتر الحمل وتوتر الديود	٣٢
الشكل(3-13) المقوم الجسري	٣٣
الشكل(3-14) توترات وتيارات جسر التقويم	٣٤
الشكل(3-15) جسر تقويم ثلاثي الطور	٣٥
الشكل(3-16) توترات وتيارات جسر التقويم الثلاثي الطور	٣٦
الشكل(3-17) معرج أحادي الطور ترانزستوري	٣٧
الشكل(3-18) آلية عمل المعرج الجسري أحادي الطور	٣٨
الشكل(3-19) تردد موجة خرج المعرج	٣٨
الشكل(3-20) معرج جسري ثلاثي الطور	٣٨
الشكل(3-21) تتابع نبضات القدح وتوترات خرج المعرج	٣٩

الشكل(3-22) معرج جسري ثلاثي الطور ترانزستوري	٤٠
الشكل(3-23) مبدأ توليد النبضات للقواطع حسب نظام P.W.M	٤٢
الشكل(3-24) قيادة محرك جر تحريضي باستخدام معرج الكتروني	٤٥
الشكل(3-25) المميزات الميكانيكية لمحرك تحريضي عند توتر ثابت وتردد متغير	٤٦
الشكل(3-26) المميزات الميكانيكية لمحرك تحريضي عند تغذيته وفق نسبة V/f ثابتة	٤٩
الشكل(3-27) المميزات الميكانيكية وأنظمة عمل محرك تحريضي يعمل بمبدأ .V/F=const	٥٠
الشكل(3-28) آلية عمل المقطع	٥١
الشكل(3-29) توتر خرج المقطع	٥٢
الشكل(3-30) المقطع الخافض للتوتر	٥٣
الشكل(3-31) توترات وتيارات المقطع الخافض للتوتر	٥٤
الشكل(3-32) المقطع الرافع للتوتر	٥٥
الشكل(3-33) توترات وتيارات المقطع الرافع للتوتر	٥٦
الشكل(3-34) مبدأ عمل نظام الكبح الديناميكي	٥٩
الشكل(3-35) شبكة مقاومات مستخدمة في الكبح الديناميكي	٥٩
الشكل(3-36) الطاقة الناتجة عن الكبح على طريق مستوية	٦٠
الشكل(3-37) الطاقة الناتجة عن الكبح على طريق منحدرة	٦٠
الشكل(3-38) نظام الكبح باستعادة القدرة الكهربائية وتخزينها	٦٢
الشكل(3-39) نظام الكبح في قاطرة هجينة	٦٣
الشكل(3-40) اتجاه السرعة والعزم في حالة الكبح	٦٤
الشكل(3-41) آلية الكبح الديناميكي في المحرك التحريضي	٦٥
الشكل(4-1) مكونات نظام الجر المدروس	٧١
الشكل(4-2) مخطط رمزي لتشغيل القاطرة	٧٣
الشكل(4-3) مخطط عام للتحكم بمحرك الجر خلال مراحل التشغيل المختلفة	٧٤
الشكل(4-4) واجهة بارامترات المحرك التحريضي	٧٦
الشكل(4-5) مخطط دارة المعرج	٧٨
الشكل(4-6) دارة قيادة محرك تحريضي وفق مبدأ الحلقة المفتوحة	٧٩
الشكل(4-7) منحني سرعة المحرك	٨٠
الشكل(4-8) منحني عزم المحرك	٨٠
الشكل(4-9) منحني توتر وتيار المحرك	٨١
الشكل(4-10) موجة توتر القيادة	٨١
الشكل(4-11) مخطط دارة التحكم وفق .V/F=const	٨٤
الشكل(4-12) خصائص المحرك الميكانيكية خلال فترة الاقلاع	٨٧
الشكل(4-13) منحني توتر وتيار المحرك خلال فترة الاقلاع	٨٧
الشكل(4-14) منحني توتر وتيار المحرك خلال فترة الاستقرار	٨٨

الشكل(4-15) منحني السرعة خلال مرحلة الكبح الجزئي	٨٩
الشكل(4-16) منحني العزم خلال مرحلة الكبح الجزئي	٩٠
الشكل(4-17) الخصائص الميكانيكية للمحرك	٩٠
الشكل(4-18) تيار المحرك خلال فترة الانتقال لمرحلة الكبح	٩١
الشكل(4-19) منحني توتر وتيار المحرك خلال مرحلة الكبح	٩١
الشكل(4-20) منحني توتر وتردد القيادة والنسبة بينهما بالنسبة للزمن	٩٣
الشكل(4-21) الية الكبح عن طريق تخفيض تردد التغذية	٩٥
الشكل(4-22) دارة القيادة	٩٥
الشكل(4-23) واجهة نموذج عنصر ال DATAPAIRS	٩٦
الشكل(4-24) منحني سرعة المحرك خلال فترة الكبح بدون نظام تخزين	٩٧
الشكل(4-25) منحني العزم خلال فترة الكبح	٩٨
الشكل(4-26) منحني توتر الباسبار بدون وجود نظام تخزين	٩٨
الشكل(4-27) منحني تيار الباسبار بدون وجود نظام تخزين	٩٩
الشكل(4-28) منحني استطاعة الباسبار بدون وجود نظام تخزين	٩٩
الشكل(4-29) مخطط نظام التخزين	١٠١
الشكل(4-30) منحني سرعة المحرك خلال فترة الكبح بوجود نظام التخزين	١٠٢
الشكل(4-31) منحني توتر الباسبار بوجود نظام تخزين	١٠٢
الشكل(4-32) منحني استطاعة الباسبار بوجود نظام تخزين	١٠٣
الشكل(4-33) منحني تيار شحن نظام التخزين خلال الكبح	١٠٤
الشكل(4-34) منحني توتر نظام التخزين خلال الكبح	١٠٤
الشكل(4-35) دارة قيادة المقطع	١٠٦
الشكل(4-36) منحني توتر الباسبار ونظام التفريغ خلال فترة التفريغ	١٠٦

قائمة الجداول

الجدول	الصفحة
الجدول(3-1) مقارنة بين محركات الجر	٢١
الجدول(3-2) حساب استطاعة محور المحرك والكبح	٦١
الجدول(4-1) نتائج قيادة المحرك بطريقة الحلقة المفتوحة	٨٢
الجدول(4-2) نتائج مرحلتي الاقلاع والاستقرار	٨٨
الجدول(4-3) نتائج مرحلة الكبح	٩٢
الجدول(4-4) نتائج قيادة المحرك بطريقة التحكم بالتردد بدون نظام تخزين	١٠٠
الجدول(4-5) نتائج مرحلة الكبح باستعادة القدرة الكهربائية بوجود نظام تخزين	١٠٥

المصطلحات

المصطلح	معناه
acceleration	تسارع
air-gap	الفجوة الهوائية
axis	محاور
boost Converter	المقطع الرافع للتوتر
buck Converter	المقطع الخافض للتوتر
capacitors	المكثفات
carrier signal	الموجة الحاملة
deceleration	تباطؤ
electric battery	المدخرة الكهربائية
frequency	التردد
gear-box	علبة السرعة
hybrid	هجين
induction motors	المحركات التحريضية
Inverters	معرجات
kinetic energy	الطاقة الحركية
mass	الكتلة
pole	الاقطاب
pulse-width modulation	تعديل عرض النبضة
rectifiers	مقومات
reference signals	الإشارة المرجعية
regenerative brake	كبح باستعادة القدرة
scalar control	التحكم السلمي
slip	الانزلاق
supercapacitors	المكثفات فائقة السعة
traction	الجر

الملخص

قمنا في هذا البحث باستخدام أنظمة تخزين حديثة من مكثفات فائقة السعة لاستعادة القدرة الكهربائية خلال مرحلة الكبح في القطارات الهجينة (hybrid) (ديزل – كهرباء).

حيث تم نمذجة محرك الجر ودارات القيادة المرافقة وتم التركيز على فترات الإقلاع وتنظيم السرعة، ودرسنا فترة الكبح واستخدمنا قيادة خاصة لها لتمكننا من استعادة القدرة الحركية للمحرك والحمولة بشكل فعال وإعادة تخزينها في أنظمة المكثفات فائقة السعة ليصار لاحقاً لاستخدامها في المحرك (فترة الإقلاع، التسارع، .....الخ).

- مقدمة

ان التوجه الحالي نحو استخدام وسائط نقل صديقة للبيئة للتخفيف من التلوث الناجم عن وسائط النقل التقليدية، ونتيجة لتطور المحركات الكهربائية وطرق قيادتها تمثل القطارات الهجينة أحد الخيارات لهذا الاتجاه ولما تمثله من حل لمشاكل التحكم بنظم الجر التقليدية، بالإضافة الى أنها تتميز بالمردود العالي، سهولة التحكم، اقل ضررا بالبيئة، سهولة الصيانة، الكلفة الإنشائية للبنية التحتية الخاصة بها منخفضة نظرا لعدم حاجتها لمحطات تحويل كهربائية خاصة بها.

تعتمد القطارات الهجينة على محركات الجر الكهربائية في نظام الجر الخاص بها، لذا يمكن الاستفادة من الطاقة الكهربائية الناتجة عن عملية الكبح الكهربائي وتخزينها في نظم تخزين كهربائية للاستفادة منها لاحقا.

يوجد العديد من نظم تخزين القدرة الكهربائية وأهمها المكثفات فائقة السعة supercapacitor، لما لها من خصائص كهربائية جيدة تميزها عن باقي نظم التخزين الكهربائية، لهذا يتم التطلع لاستخدامها في امتصاص القدرة الكهربائية الناتجة عن عملية الكبح.

هذه الأطروحة مؤلفة من أربعة فصول رئيسة:

في **الفصل الأول** تمت دراسة مرجعية لأخر الأبحاث والدراسات المتعلقة بموضوع البحث.

في **الفصل الثاني** تم عرض أنواع القاطرات الهجينة، بالإضافة الى نظم الكبح المستخدمة في نظم الجر ومزاياها.

في **الفصل الثالث** قمنا بدراسة الآلات الكهربائية المستخدمة في القطارات الهجينة، وتركزت الدراسة على المحرك التحريضي. بالإضافة لدراسة نظرية للمبدلات الالكترونية اللازمة لتحويل الطاقة الكهربائية (المقومات – المعرجات – المقطعات)، ونظم الكبح الكهربائية بالإضافة لنظم تخزين القدرة الكهربائية.

في **الفصل الرابع** تمت نمذجة نظام قيادة المحرك التحريضي المستخدم في نظام الجر في حالات الاقلاع والكبح كما تمت نمذجة نظام تخزين القدرة الكهربائية واستخلاص النتائج.

الفصل الأول

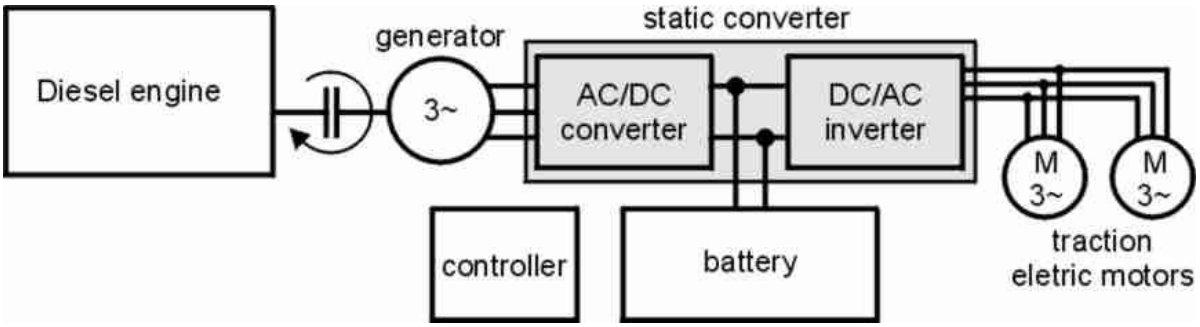
الدراسة المرجعية

[1] J. Zavada and T. Pleša, " hybrid propulsion of railway vehicles ", faculty of transport and traffic sciences, Republic of Croatia.

تم الاستفادة من هذه المقالة في التعرف على بنية وأنواع القاطرات الهجينة، وخصائص ومزايا كل نوع. كما قام الباحثون بإجراء تجارب على قاطرة هجينة من النوع التسلسلي من انتاج شركة East Japan Railway Company (JR EAST) وشركة Hitachi Ltd، و وضحو فيها أهمية استخدام هذا النوع من القاطرات في التخفيض من استهلاك الوقود وتقليل كمية الغازات الضارة الناتجة عن عملية الاحتراق.

يتكون نظام دفع الفاطرة المدروسة كما هو موضح في الشكل (1-1) من:

- محرك ديزل باستطاعة 330 kW.
- مولدة تحريضية ثلاثية الطور باستطاعة 230kW.
- جسر تقويم. AC/DC converter
- جسر تعريج. DC/AC inverter
- محرك جر ثلاثي الطور باستطاعة 95 kW (عدد 2).
- نظام التخزين مدخرات نوع lithium-ion بسعة 10k Wh وباستطاعة 250 kW.



الشكل (1-1) بنية نظام الدفع

في هذه الدراسة كانت نسبة التخفيض في استهلاك الوقود بمقدار ٢٠٪ مقارنة بنظم الجر التقليدية، وكانت نسبة تخفيض انبعاث الغازات الضارة الناتجة عن احتراق الوقود

(NO$_x$, HC, CO and particulate matter) تصل إلى ٥٠٪.

[2] M. Amiri and B. Asaei, (2007), "high efficient intelligent motor control for a hybrid shunting locomotive ", IEEE, Tehran, Iran.

في هذا البحث تم دراسة قاطرة كهربائية هجينة. وتمت الاستفادة من هذا البحث في الحصول على خصائص القاطرة بالإضافة الى بعض البارمترات كمواصفات محرك الجر.

[3] P. Barrade and B. Destraz and A. Rufer, " hybrid vehicle in railways applications ", Switzerland.

تم في هذا المرجع التطرق لأنواع نظم الكبح المستخدمة في نظم الجر، والمقارنة بين هذه الأنواع، وقام الباحثون بإجراء تجارب على قاطرة هجينة من النوع التسلسلي تملك المواصفات التالية:

-Total weight (w/o load): 67 t.
-Total weight (fully loaded): 84 t.
-Diesel engine power: 2 x 380 kW.
-Max. power at the wheels: 620 kW.
-Max. speed: 140 km/h.

إن السكة الحديدية التي يسير عليها القطار تمر عبر منطقة جبلية ويوضح الشكل (A-2-1) منحني الارتفاع لخط سير الرحلة والشكل (B-2-1) الاستطاعة بالنسبة للزمن.

في مرحلة الصعود يحتاج القطار إلى استطاعة، بينما في طور النزول فانه يعطي استطاعة عن طريق الكبح.

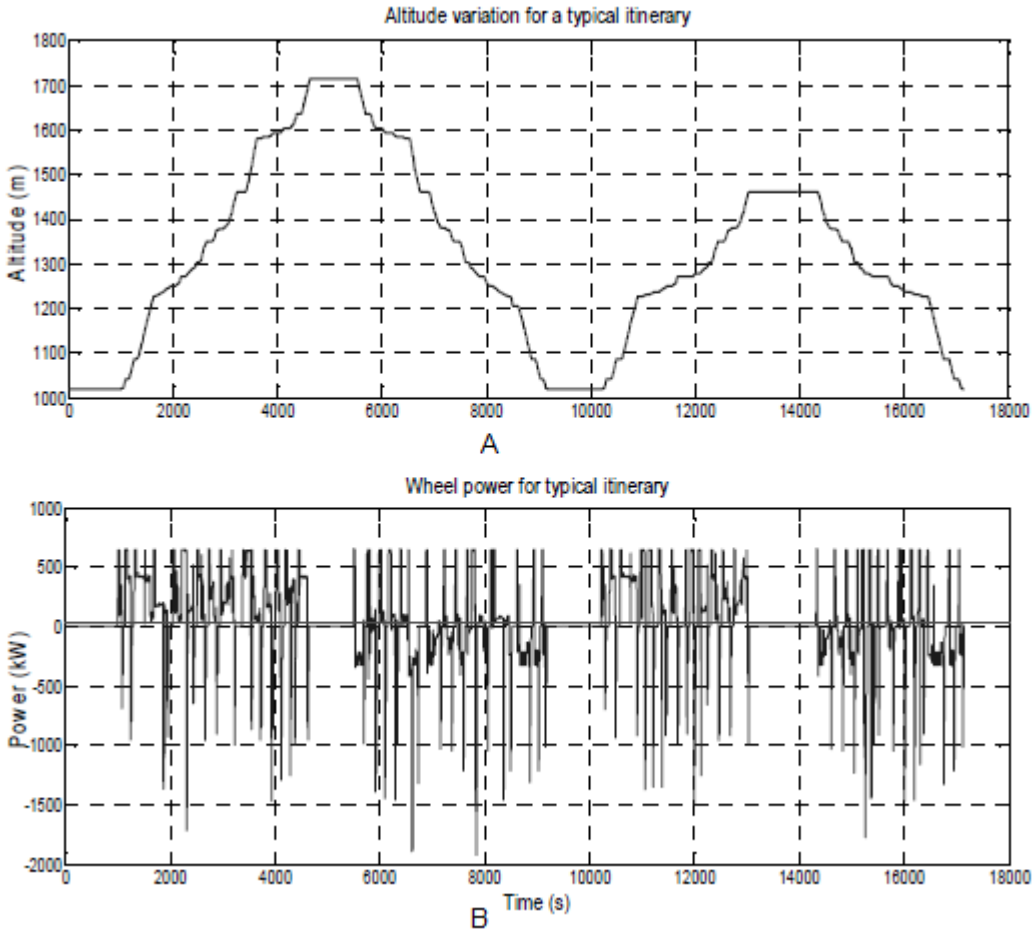
ومن النتائج الهامة لهذه الدراسة أنه تم تخفيض استهلاك الوقود بمقدار ٢٥٪ .

[4] L. Lingaitis and i. Liudvinavičius, (2010), "new locomotive energy management systems".

كان محور البحث دراسة المحركات التحريضية ثلاثية الطور المستخدمة في القاطرات الكهربائية. بالإضافة الى توضيح الية عمل نظم الكبح باستعادة القدرة الكهربائية في القاطرات الكهربائية والقاطرات الهجينية وكيفية الاستفادة منها.

[5] M. Zeraoulia M. Benbouzid and D. Diallo, (2006), " electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: a comparative Study" IEEE transactions on vehicular technology, vol. 55, no. 6.

تطرقت هذه المقالة الى أنواع المحركات الكهربائية المستخدمة في نظم الجر، بالإضافة الى اجراء مقارنة بين أنواع محركات الجر الكهربائية.



الشكل(1-2) منحني الارتفاع والاستطاعة بالنسبة للزمن

الفصل الثاني

دراسة في القطارات

- **مقدمة**

يعرض هذا الفصل أنواع القاطرات الهجينة (Hybrid)، وآلية الكبح باستعادة القدرة الكهربائية ونظم تخزين القدرة الكهربائية المستخدمة في هذا النوع من القاطرات.

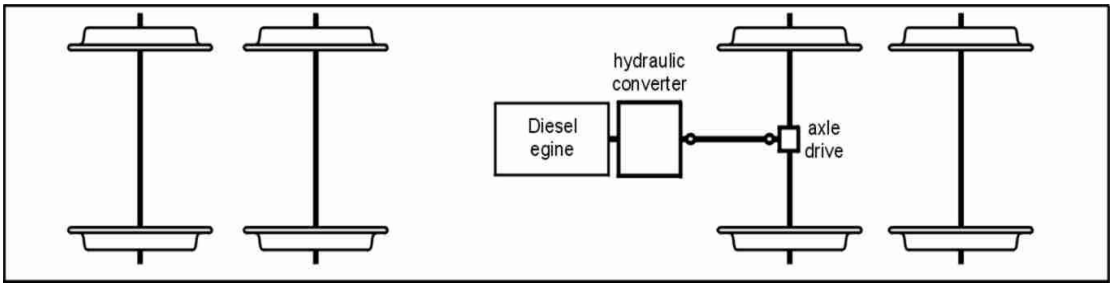
٢-١- أهم ما تم انجازه في موضوع نظم الجر الهجينة في القاطرات(ديزل _ كهرباء)

تشكل نظم الجر الهجينة تقنية متطورة في تطبيقات السكك الحديدية، نظراً للدور المهم الذي تلعبه هذه النظم في التخفيض من استهلاك الوقود، والإقلال من الغازات الضارة بالبيئة.

٢-١-١- القاطرات التقليدية Conventional Railway Vehicles

تحتوي قاطرات الجر التقليدية بشكل أساسي على محرك الاحتراق الداخلي بالإضافة إلى آلية نقل الحركة، تتم عملية الكبح في هذا النوع ميكانيكيا فتتحول الطاقة الحركية إلى حرارية مبددة دون الاستفادة منها.

يوضح الشكل (2-1) هذا النوع من القاطرات وآلية نقل الحركة الميكانيكية من محرك الاحتراق الداخلي إلى العجلات.



الشكل(2-1) القاطرات التقليدية [1]

٢-١-٢- القاطرات الهجينة Hybrid Railway Vehicles

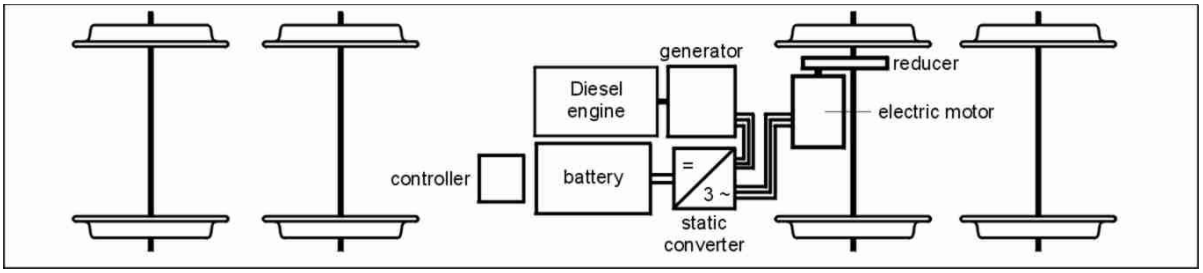
يقصد بالقاطرات الهجينة القاطرات التي تعتمد في نظام الجر الخاص بها على محرك جر كهربائي بالإضافة لمحرك الاحتراق الداخلي، حيث تم الاتجاه في الآونة الأخيرة إلى هذا النوع من القاطرات لما له من دور في تحسين المردود العام لنظام الجر عن طريق الاستفادة من القدرة الكهربائية المسترجعة خلال عملية الكبح.

في قاطرات الجر الهجينة يوجد طرق مختلفة لربط محرك الاحتراق الداخلي والمولد الكهربائي مع كل من محركات الجر الكهربائية ونظام تخزين القدرة. هذه الطرق قد تكون تسلسلية أو تفرعية أو تسلسلية – تفرعية، إن طرق الربط التفرعية والتسلسلية – تفرعية تمثل أكثر طرق الربط تعقيداً مقارنة

بالتسلسلية، **بالإضافة إلى أن الطرق الثلاثة لها نفس النتائج تقريباً. إن الأسباب السابقة أدت إلى الانتشار الواسع** لطرق الربط التسلسلية في التطبيقات العملية.[2]

أ- نظام الدفع الهجين التسلسلي Series hybrid propulsion system

في هذا النوع من النظم تقوم المولدة بتحويل الطاقة الميكانيكية المقدمة من محرك الديزل إلى طاقة كهربائية. ومن ثم تحول من الشكل المتناوب الى الشكل المستمر عبر جسر تقويم AC-DC converter يغذي باسبار تيار مستمر Dc bus، المتصل بجسر تعريج DC-AC converter يعمل على تغذية وقيادة محرك الجر كما هو موضح بالشكل (2-2).



الشكل(2-2) نظام الدفع الهجين التسلسلي [1]

أ-١- مزايا طريقة الربط التسلسلي Advantages of Series Architecture

١- تحسين أداء محرك الاحتراق الداخلي.

٢- تقليل حجم محرك الاحتراق الداخلي.

٣- زيادة في سرعة المحرك.

٤- إمكانية ربط المحرك الكهربائي مباشرة إلى العجلات، دون الحاجة لمكونات نقل الحركة والربط الميكانيكية.

٥- بساطة آلية التحكم والقيادة.

أ-٢- مساوئ طريقة الربط التسلسلي Disadvantages of Series Architecture

١- تحويل الطاقة من الشكل المتناوب إلى المستمر ومن ثم إعادتها إلى المتناوب.

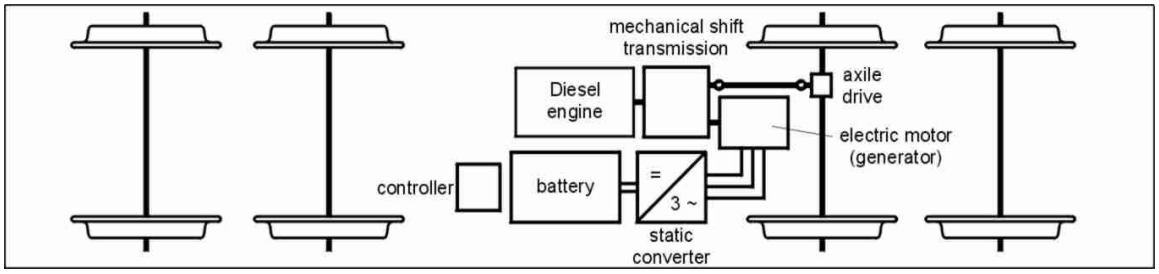
٢- زيادة الوزن بالإضافة إلى زيادة التكاليف، نتيجة زيادة المكونات.[2]

ب- نظام الدفع الهجين التفرعي **parallel hybrid propulsion system**

في نظام الدفع التفرعي يربط محرك الديزل ميكانيكيًا مع العجلات مقدمًا الطاقة الميكانيكية اللازمة للحركة، وتكون مهمة المحرك الكهربائي هي مساعدة محرك الديزل أثناء تسارع النظام بالإضافة إلى عمله كمولد خلال عملية الكبح وشحن نظام التخزين بالقدرة الكهربائية، حيث يتم شحن نظام التخزين بالقدرة الكهربائية الناتجة خلال فترة الكبح فقط بينما في النظام التسلسلي فبالإضافة لذلك يتم شحن نظام التخزين من المولدة الكهربائية.

ومما سبق نلاحظ أن المحرك الكهربائي يعمل في حالات محددة على عكس ما هو عليه في نظام الدفع التسلسلي.

والشكل(2-3) يوضح آلية عمل نظام الدفع الهجين التفرعي.



الشكل(2-3) نظام الدفع الهجين التفرعي [1]

ب-١- مزايا طريقة الربط التفرعي **Advantages of Parallel Architecture**

١- مشاركة المحرك الكهربائي لمحرك الوقود في تسارع العربة.

٢- نظام مرن يعمل على تقليل انبعاث الغازات وخفض كمية الوقود المستهلكة.

٣- التقليل من حجم محرك الوقود.

ب-٢- مساوئ طريقة الربط التفرعي **Disadvantage of Parallel Architecture**

١- طريقة التحكم معقدة.

٢- صعوبة في آلية نقل الحركة الميكانيكية.[2]

٢-٢- استعادة القدرة الكهربائية عن طريق الكبح Regenerative brake

اعتمدت نظم الجر في البداية على نظم الكبح الميكانيكية التي تعمل بواسطة ضغط الهواء أو الزيت. أدى استخدام هذا النوع من نظم الكبح إلى ظهور مشاكل كثيرة منها الإهتراء والتآكل الناتج عن الاحتكاك الميكانيكي، وهي ذات وثوقية منخفضة وخصوصاً في القطارات السريعة بالإضافة إلى ضياع الطاقة الناتجة عن الكبح دون الاستفادة منها.

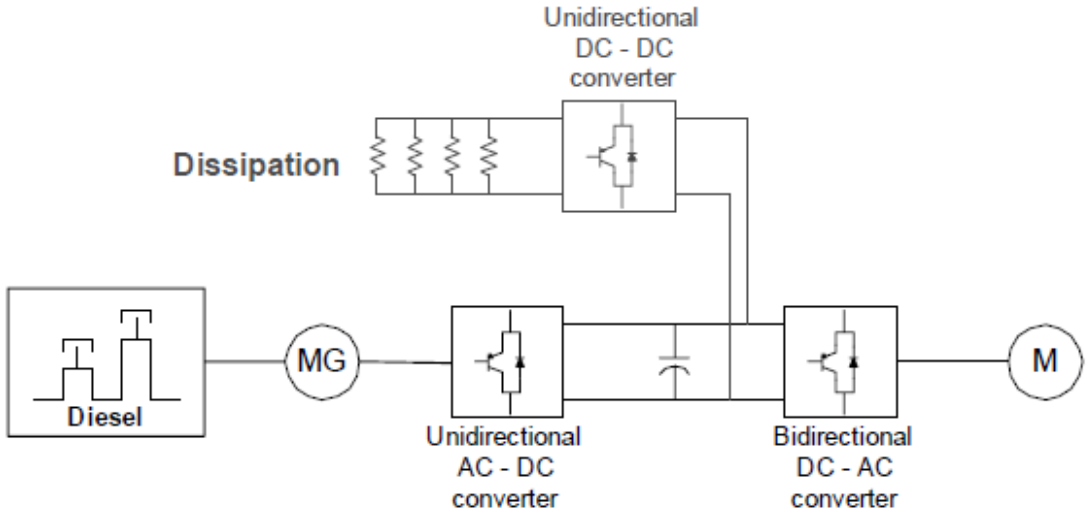
ونتيجة للتطور الكبير في مجال محركات الجر الكهربائية وطرق قيادتها تم تصميم نظم كبح كهربائية تقوم بتحويل الطاقة الحركية إلى كهربائية يتم استرجاعها والاستفادة منها وذلك عن طريق عمل المحرك كمولد.

٢-٢-١- في القاطرات (ديزل - كهرباء)

عند استخدام نظام الكبح باستعادة القدرة الكهربائية في هذا النوع من القاطرات يتم استهلاك الطاقة حراريا أو حقنها في نظم تخزين كهربائية.

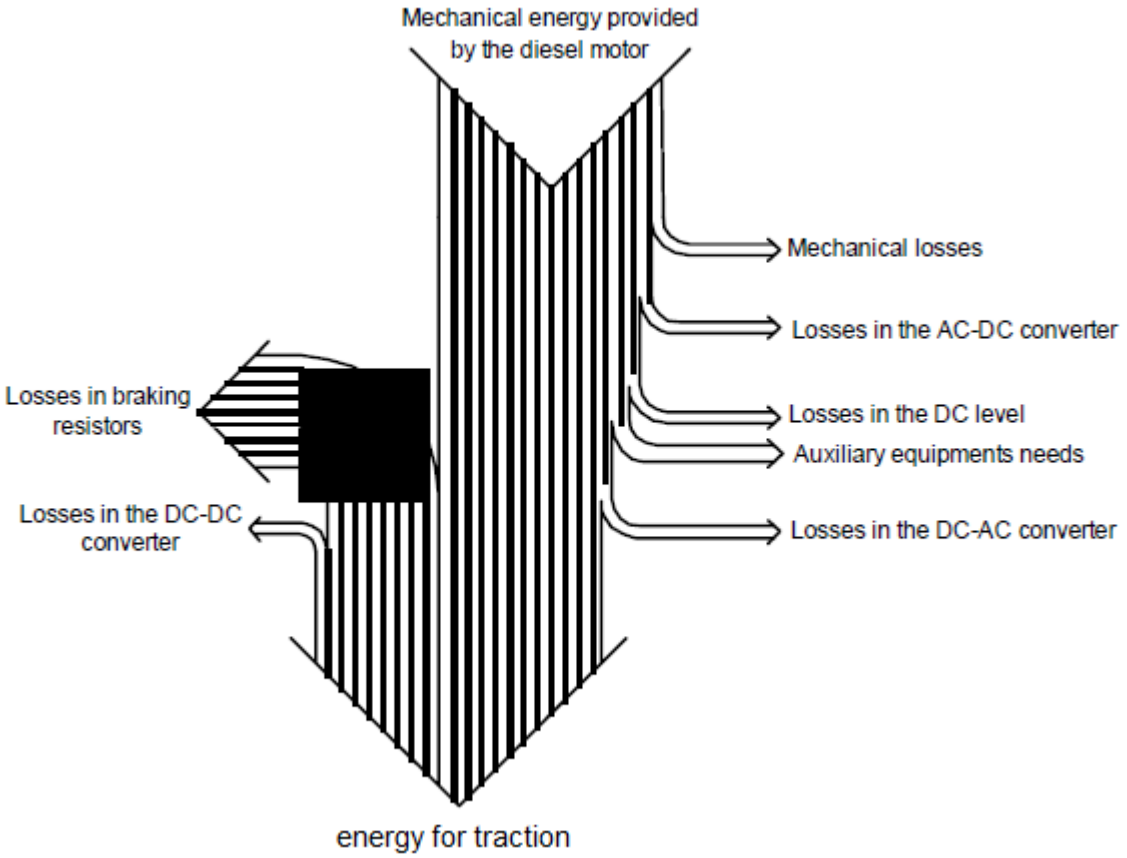
أ- الكبح الديناميكي dynamic brake

في هذا النوع من الكبح تبدد الطاقة الكهربائية التي يتم استعادتها من المحرك الكهربائي خلال



الشكل (2-4) الكبح الديناميكي [3]

عملية الكبح حراريا بفعل جول عبر مقاومات الكبح دون الاستفادة من هذه الطاقة الكهربائية والتي تشكل نسبة كبيرة من الضياعات والتي يمكن الاستفادة منها كما هو موضح في الشكل(2-5).



الشكل(2-5) جريان الطاقة في نظم الجر الهجينة ذات نظام الكبح الديناميكي

ضياعات الطاقة الأساسية في هذه النظم تعود بشكل أساسي إلى عنصرين:

- الأول هو محرك الاحتراق الداخلي الذي يقوم بتحويل الطاقة الكيميائية إلى طاقة ميكانيكية. وما ينتج عنه من ضياعات.

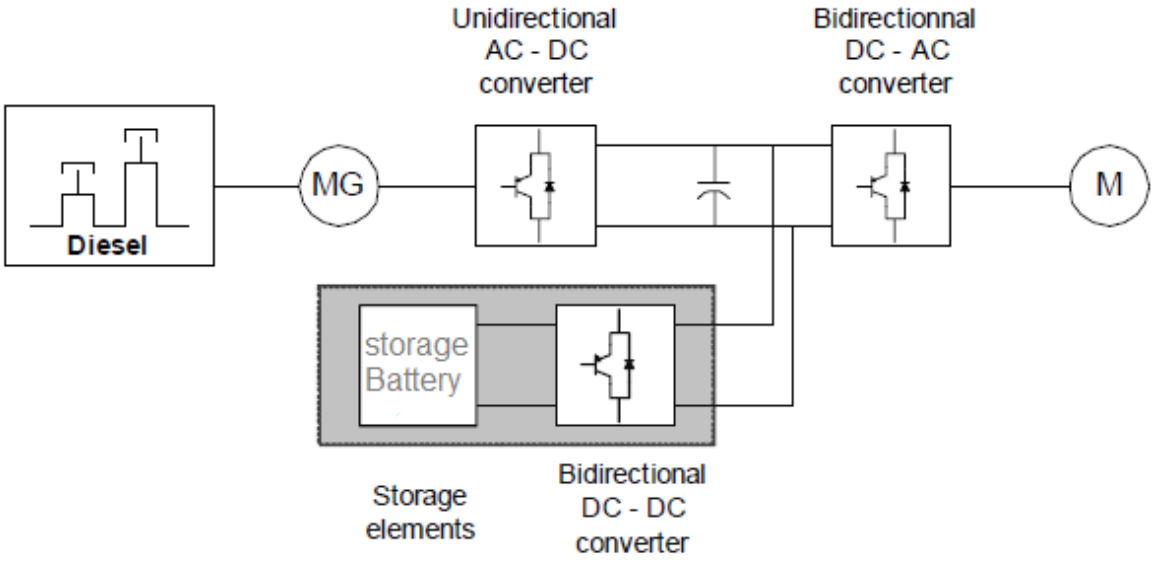
بالإضافة إلى ضياعات بسبب عناصر سلسلة تحويل الطاقة التي لا يمكن إهمالها (ضياعات ميكانيكية، ضياعات المبدلات الالكترونية).

- الثاني هو ضياعات الطاقة المولدة خلال عملية الكبح والتي تبدد عن طريق مقاومات الكبح، وللتخلص من هذه الضياعات وزيادة مردود قطارات الديزل – كهرباء يستعاض عن مقاومات الكبح بنظام لتخزين الطاقة الكهربائية.[3]

ب- الكبح باستخدام نظم التخزين **brake with energy storage**

في هذا النوع من الكبح يتم تخزين القدرة الكهربائية التي يتم استردادها في نظم تخزين كهربائية ومن ثم إعادة استخدامها لتغذية نظام الجر أو الاستخدامات المحلية في القطار، كما يتم استبدال المبدلة الالكترونية DC-DC converter المستخدمة في نظم الجر التقليدية والتي تحقن الطاقة

بمقاومات الكبح وباتجاه واحد فقط بمبدلة تعمل بالاتجاهين كي تكون قادرة على استرجاع الطاقة من نظام التخزين وتزويد نظام الجر بها.



الشكل (2-6) الكبح باستخدام نظم تخزين الطاقة الكهربائية [3]

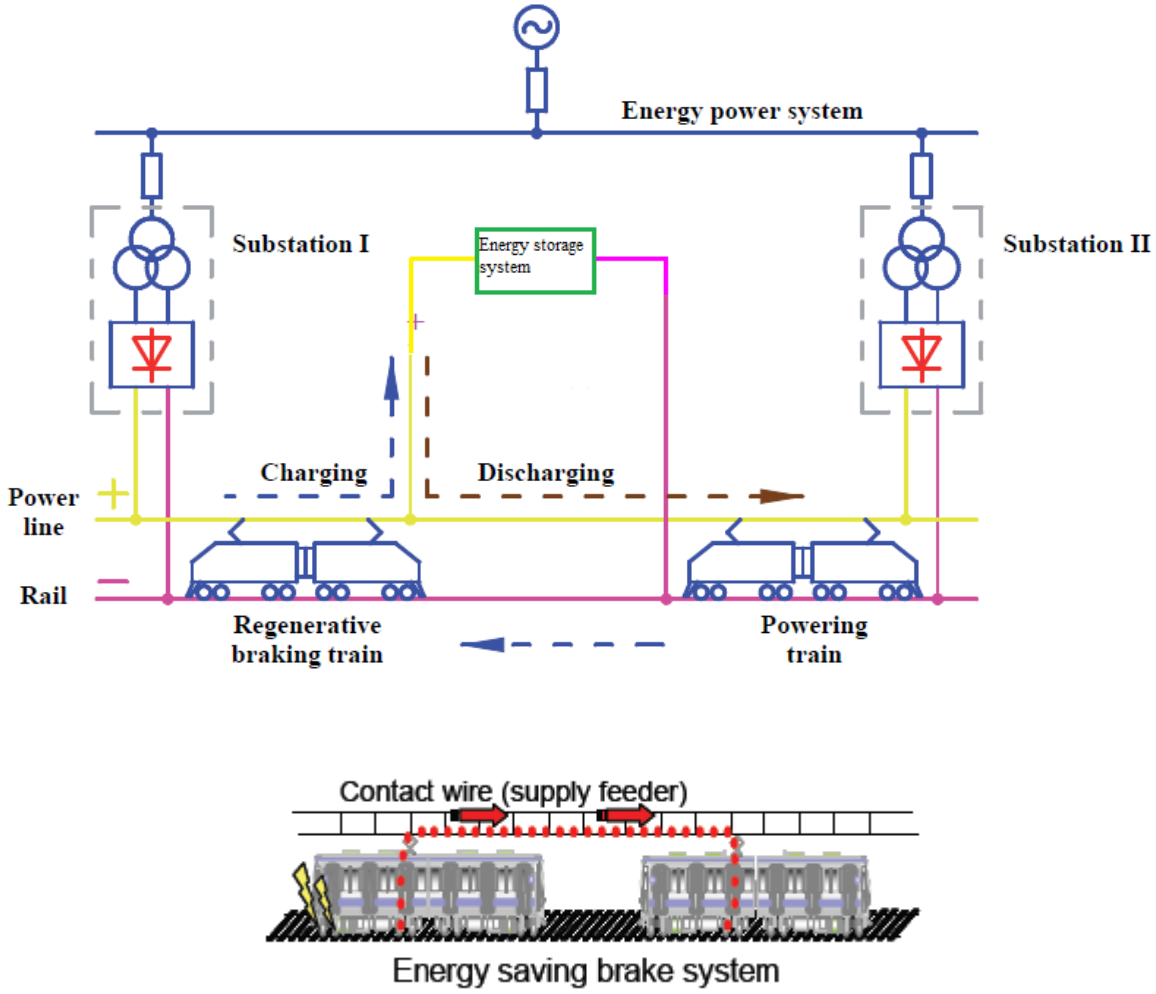
٢-٢-٢- في القاطرات الكهربائية in electric locomotives

إن آلية الكبح في جميع أنواع القاطرات التي تعتمد على محركات الجر الكهربائية واحدة من حيث تحول محرك الجر إلى مولد يقوم بتحويل الطاقة الحركية إلى كهربائية ولكنها تختلف في آلية استخدام هذه القدرة.

تحتاج القاطرات الكهربائية لمحطات تحويل كهربائية خاصة ليتم تزويدها بالقدرة الكهربائية عبر الخطوط الهوائية أو خطوط السكة الحديدية، حيث يمكن الاستغناء عن هذه المحطات والخطوط في القاطرات الهجينة والاعتماد على مجموعة توليد (ديزل – كهرباء) متوضعة على متن القطار نفسه.

أثناء عملية الكبح لأحد القطارات الكهربائية العاملة على أحد الخطوط يتم استرجاع الطاقة الكهربائية وحقنها في الخطوط الكهربائية المغذية للقاطرة حيث يتم الاستفادة منها في تغذية أحد القطارات العاملة على نفس الخط في حال وجود قطار بحاجة لهذه الطاقة، وفي حال عدم الحاجة لهذه الطاقة إما يتم استخدام المكابح الميكانيكية عوضاً عن الكبح باستعادة القدرة الكهربائية، أو

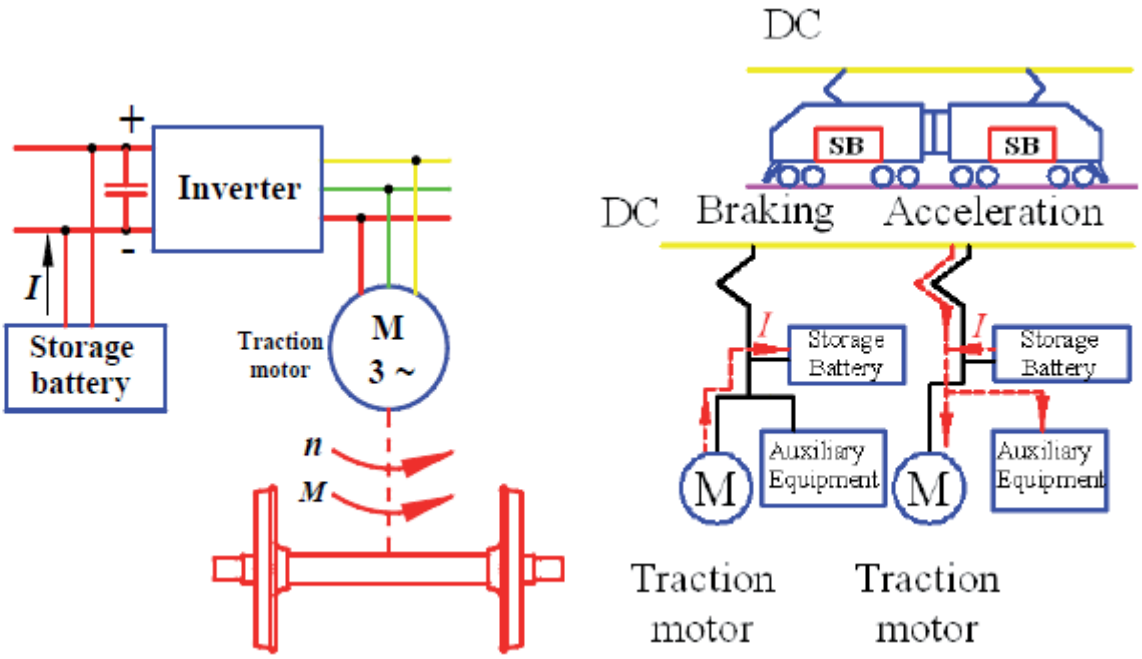
يتم تخزين هذه الطاقة في نظم تخزين كهربائية مركزية، والتي يتم شحنها بالقدرة الكهربائية الناتجة عن الكبح فقط ، أو يتم الاستفادة منها في تغذية التجهيزات الكهربائية الخاصة بمحطات القطار.



الشكل(2-7) الكبح باستعادة القدرة الكهربائية في القطارات الكهربائية ذات الخطوط الهوائية

قد تكون نظم التخزين مرتبطة بالخط الهوائي، ويتم شحنها عن طريق كبح القطارات العاملة على هذا الخط كما يمكن استخدام القدرة المخزنة من قبل أي قطار كما هو واضح في الشكل(2-7).

أو تتوضع نظم التخزين على القطار حيث تشحن بالقدرة الكهربائية الناتجة عن كبح القطار نفسه كما هو واضح في الشكل (2-8).[4]



الشكل(2-8) الكبح باستعادة القدرة الكهربائية في القطارات الكهربائية [4]

يتم تزويد نظام الجر في القاطرات الكهربائية بنظام الكبح الديناميكي، حيث يتم تحويل الطاقة الكهربائية الناتجة عن عملية استرجاع القدرة والفائضة عن حاجة نظام التخزين إلى طاقة حرارية تبدد في الوسط الخارجي.

٢-٢-٣- في السيارات in car

لا تختلف آلية الكبح باسترداد القدرة الكهربائية في السيارات عنها في القاطرات الهجينة من حيث مبدأ استعادة القدرة الكهربائية من المحرك الكهربائي وحقنها في نظام تخزين القدرة الكهربائية ومن ثم الاستفادة من هذه الطاقة في تغذية محرك الجر عند الحاجة.

٢-٣- نظم تخزين الطاقة عند إجراء الكبح energy storage system upon braking

مفهوم نظام تخزين القدرة الكهربائية يختلف عن مفهوم توليد القدرة الكهربائية، فهو ليس مصدر توليد وإنما هو عنصر أو مجموعة عناصر يمكن أن تختزن القدرة الكهربائية بشكل مباشر أو غير مباشر واسترجاعها عند الحاجة.

لقد دخلت هذه النظم جميع المجالات وخاصة وسائط النقل والشبكة الكهربائية.

٢-٣-١- أنواع نظم تخزين القدرة الكهربائية المستخدمة في الكبح energy storage system types

يوجد نوعين:

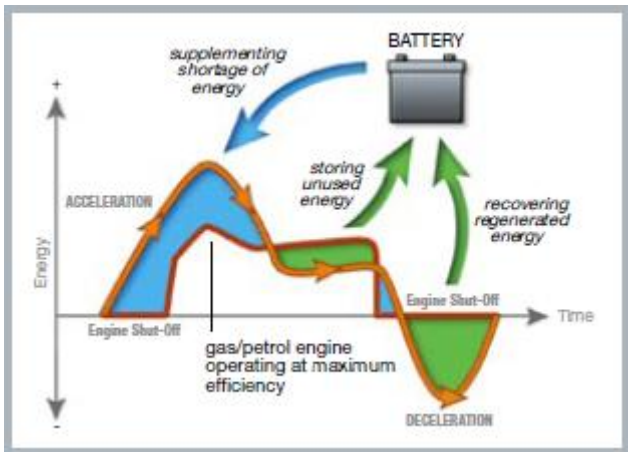
١. مدخرات كهربائية.

٢. مكثفات فائقة السعة.

يشكل نظام التخزين المكون الأساسي لنظام الجر الهجين لما له من دور في امتصاص الطاقة الكهربائية في حالتين:

الأولى: عند توليد طاقة كهربائية زائدة عن حاجة نظام الجر.

الثانية: حالة الكبح واستعادة القدرة الكهربائية.[5]



الشكل(2-9) حالات شحن وتفريغ نظام التخزين [6]

الفصل الثالث

دراسة نظرية في نظام الجر

مقدمة:

أدى التطور الكبير في أنظمة القيادة التي تعتمد على عناصر الكترونيات القدرة الكهربائية إلى إمكانية استخدام المحركات الكهربائية بأنواعها المختلفة في العديد من التطبيقات الصناعية والمنزلية وفي عمليات الجر الكهربائي (القاطرات الكهربائية بأنواعها السريعة والسريعة جداً والهجينة – وفي السيارات الكهربائية – وفي السيارات الكهربائية الهجينة – وفي أنظمة الروبوت الجوال – وفي أنظمة الملاحة والملاحقة.

*مكونات نظام الجر في القاطرات الهجينة :

يتكون نظام الجر في القاطرات الهجينة من مجموعة من المكونات الميكانيكية والكهربائية.

أ- **المكونات الميكانيكية:** وتشمل عربة القاطرة التي تشكل أساساً الحمل في نظام الجر، علبة السرعة، المحاور الدوارة لنقل الحركة الميكانيكية، والعجلات وملحقاتها.

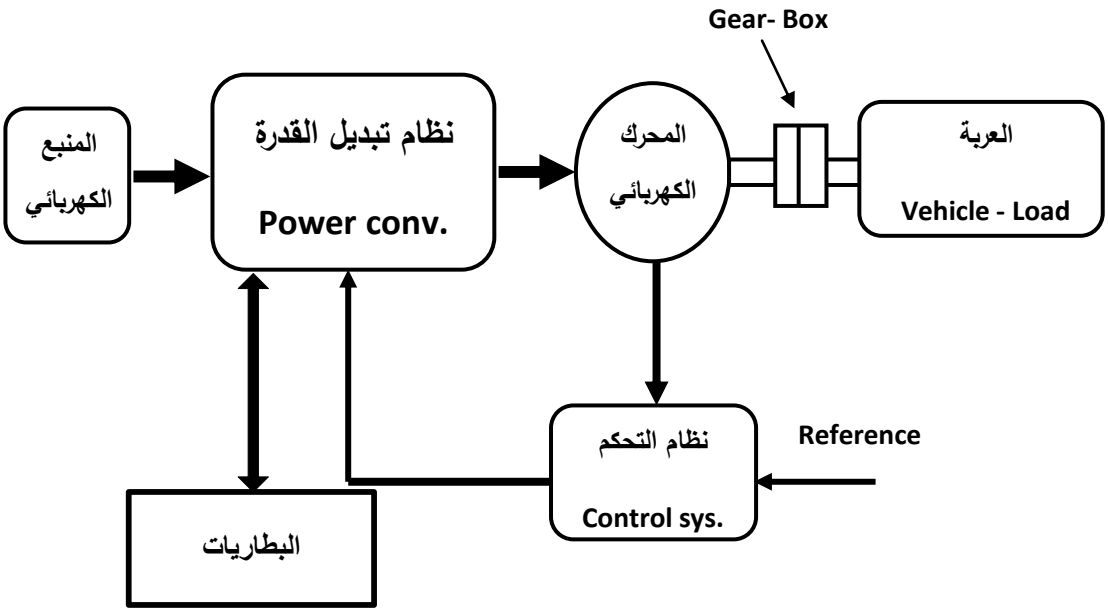
١- تمثل العربة (القاطرة) في أنظمة الجر الكهربائي بأنها جزء من الحمل الدائم المطبق على المحرك يضاف له الحمل المتغير (الأشخاص والحمولات المراد نقلها) .

٢- علبة السرعة (gear-box) :

الغاية من علبة السرعة هي توصيل عزم المحرك إلى عجلات القاطرة من خلال مجموعة من المحاور (axis) ، وتُمثل علبة السرعة بواسطة نسبة التحويل لها ، مردود النقل، وعزم عطالتها.

ب-**المكونات الكهربائية :** وتشمل المحركات الكهربائية، منابع التغذية، نظم التخزين (المدخرات)، نظم تبديل القدرة وعناصر التحكم والقيادة الكهروميكانيكية والإلكترونية (عناصر التحكم الإلكتروني).

حيث يمثل الشكل (3-1) مخططاً صندوقياً عاماً لنظام جر كهربائي هجين ويبين الأجزاء الرئيسة لنظام الجر ونشير الى أننا سنركز على المكونات الكهربائية في هذه الدراسة.



الشكل(3−1) : مخطط صندوقي لنظام الجر الهجين

٣-١- تحليل عمل الآلات الكهربائية المستخدمة في نظام الجر

- مقدمة:

إن اختيار المحركات الكهربائية الخاصة بأنظمة الجر الهجينة خطوة مهمة ويحتاج إلى الكثير من الدقة والانتباه، حيث تعمل شركات الجر جاهدة للحصول على الأداء الأفضل لأنظمة الجر الهجينة.

٣-١-١- محركات الجر الكهربائي electric traction motors

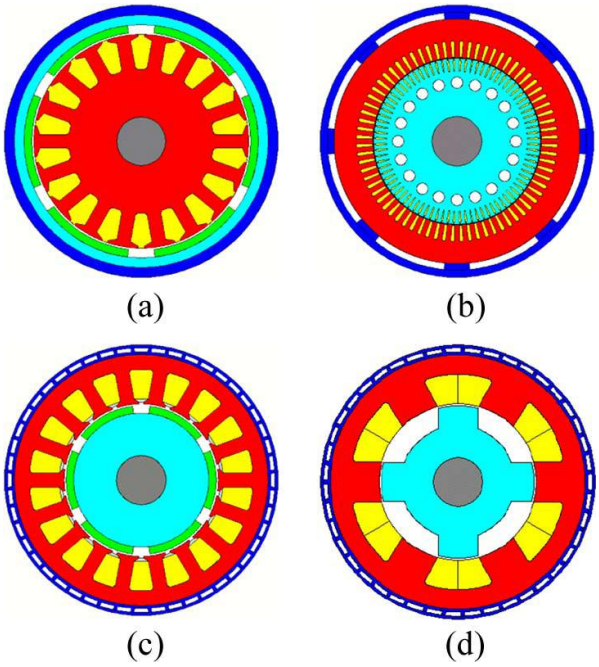
الخصائص الأساسية المطلوبة لمحركات نظام الجر الهجين:

١- عزم إقلاع كبيرة.
٢- عزم كبير عند السرعات البطيئة في مرحلة الإقلاع وصعود المرتفعات.
٣- التحكم بالسرعة ضمن مجال واسع، متضمن مرحلة عزم ثابت ومرحلة استطاعة ثابتة.
٤- أن تكون استجابة العزم سريعة.
٥- الكفاءة العالية في الأداء.
٦- أن يكون قادر على العمل كمولد خلال فترة الكبح.
٧- الوثوقية العالية.
٨- الاقتصادية.

تختلف محركات الجر عن بعضها من حيث البنية وبالتالي هناك اختلاف بين هذه المحركات من حيث الخصائص الميكانيكية والكهربائية ، وبالتالي عند اختيار أي نوع من هذه المحركات لاستخدامه ضمن تطبيق ما لابد من النظر إلى هذه الخصائص إضافة لطريقة التغذية المناسبة لهذا التطبيق . وهنا لابد من استعراض لبعض المحركات المستخدمة في مجال الجر الكهربائي سواءً في القاطرات الهجينة أو السيارات الكهربائية:[7]

١- محركات التيار المستمر (dc motor).
٢- المحركات التحريضية (IM) .
٣- المحركات المغانط الدائمة (PM).
٤- المحركات ذات المغناطيسية المتغيرة (SRM).

يوضح الشكل(3-2) أهم أنواع المحركات الكهربائية المستخدمة في نظم الجر.



الشكل (3-2) محركات الجر [7]

(a) DC motor. (b) IM. (c) PM brushless motor. (d) SRM

اتجهت الأنظار في الآونة الأخيرة إلى آلات التيار المتناوب وبشكل خاص المحركات التحريضية كبديل عن محركات التيار المستمر، وذلك لعدة أسباب أهمها:

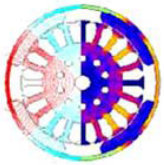
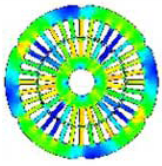
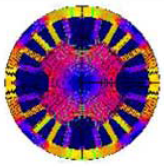
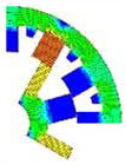
١- ارتفاع ثمن محركات التيار المستمر بالمقارنة مع المحركات التحريضية.
٢- المحركات التحريضية لا تحوي على مبدل (مجمع) ولا مسفرات وخاصة المحركات التحريضية ذات الدائر المقصور، بالتالي أعطالها تكون أقل وموثوقيتها أكبر.
٣- المحركات التحريضية أكثر متانة وتعمل بشكل أفضل في الأوساط ذات الظروف المناوئة.
٤- تملك المحركات التحريضية عزوماً مرتفعة وإمكانية للتحكم بالسرعة ضمن مجال واسع.
٥- تستطيع المحركات التحريضية أن تعمل على توترات تصل إلى (25KV)، بينما محركات التيار المستمر بحدود (6 KV).
٦- تصنع المحركات التحريضية بحجم أقل واستطاعة أكبر حتى(30 MW)، بينما محركات التيار المستمر محدودة بحوالي(2 MW).
٧- يمكن أن تعمل المحركات التحريضية بسرعات عالية، في حين محركات التيار المستمر الضخمة لا تزيد سرعتها عن(2000 r.p.m).

قامت إحدى الدراسات باجراء مقارنة بين محركات الجر من حيث الخصائص الأساسية المطلوبة لنظام الجر الهجين كالمردود، الوثوقية، إمكانية التحكم وقيادة المحرك، التطور، كثافة الاستطاعة.

ويبين الجدول (3-1) عملية المقارنة بين هذه المحركات حيث تمت المقارنة بإعطاء درجة من(1) إلى(5) حيث تمثل الدرجة (5) أفضل أداء للمحرك من حيث الخاصية التي يتم المقارنة بها.

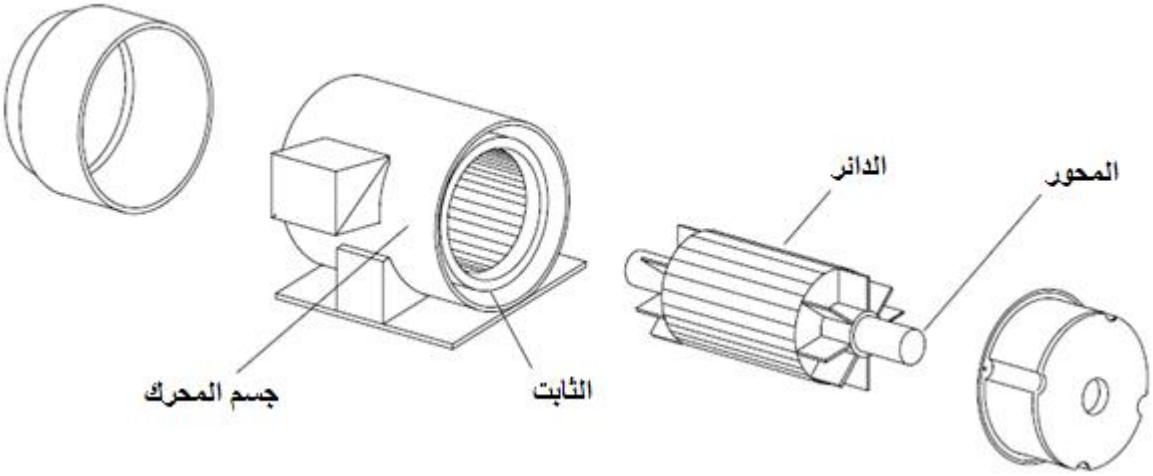
تشير المقارنة إلى أن محركات الجر التحريضية (IM) الأفضل بالنسبة لنظم الجر رغم المنافسة القوية من قبل المحركات دائمة المغنطة (PM).

الجدول(3-1) مقارنة بين محركات الجر[7]

Propulsion Systems / *Characteristics*	 DC	 IM	 PM	 SRM
Power Density	2.5	3.5	5	3.5
Efficiency	2.5	3.5	5	3.5
Controllability	5	5	4	3
Reliability	3	5	4	5
Technological maturity	5	5	4	4
	4	5	3	4
∑ Total	 **22**	 **27**	 **25**	 **23**

٣-١-٢- المحركات التحريضية Induction motors

٣-١-٢-١- بنية المحرك التحريضي ثلاثي الطور
structure of three phase induction motors



الشكل (3-3) أجزاء المحرك التحريضي

١- الجزء الثابت (STATOR):

يتشكل الجزء الثابت من صفائح رقيقة بسماكة mm (0.5 - 0.35) من الحديد الفيرومغناطيسي ذي السماحية المغناطيسية العالية تعزل هذه الصفائح عن بعضها لتقليل الضياعات المغناطيسية الناتجة عن البطاء المغناطيسي والتيارات الإعصارية. يحتوي الجزء الداخلي للجسم الثابت الأسطواني الشكل على مجاري تملأ بنواقل نحاسية معزولة تشكل ملفات الجزء الثابت وهذه الملفات تشكل دارة ثلاثية الطور متوازنة متصلة إما بشكل نجمي أو مثلثي.

٢- الجزء الدائر (ROTOR):

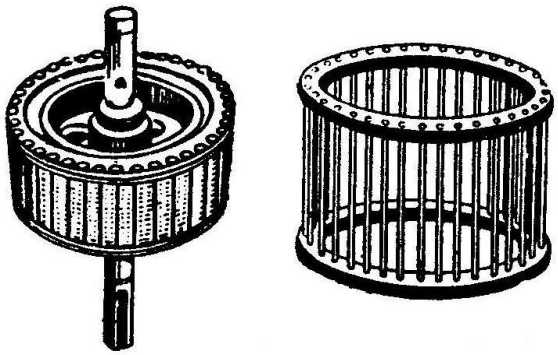
يتشكل هذا الجزء أيضاً من صفائح رقيقة من الحديد الفيرومغناطيسي تجمع مع بعضها مشكلة جسما اسطوانياً. توجد على السطح الخارجي لهذا الجزء مجاري تملأ بنواقل الملفات (نحاس- ألمنيوم أو خلائطهما).

يمكن أن نميز بين نوعين من أنواع الجزء الدائر وذلك حسب طبيعة تكوين ملفاته:

أ- الجزء الدائر ذو القفص السنجابي **Squirrel cage Rotor**

في هذه الحالة يوجد في كل مجرى قضيب من النحاس أو الألمنيوم غير معزول تقصر نهايتاها بواسطة حلقتين مصنوعتين من نفس مادة القضبان ويشبه الشكل المكون من النواقل والحلقتين قفصاً سنجابياً مفتوحاً عند نهايتيه كما هو مبين في الشكل (3-4).

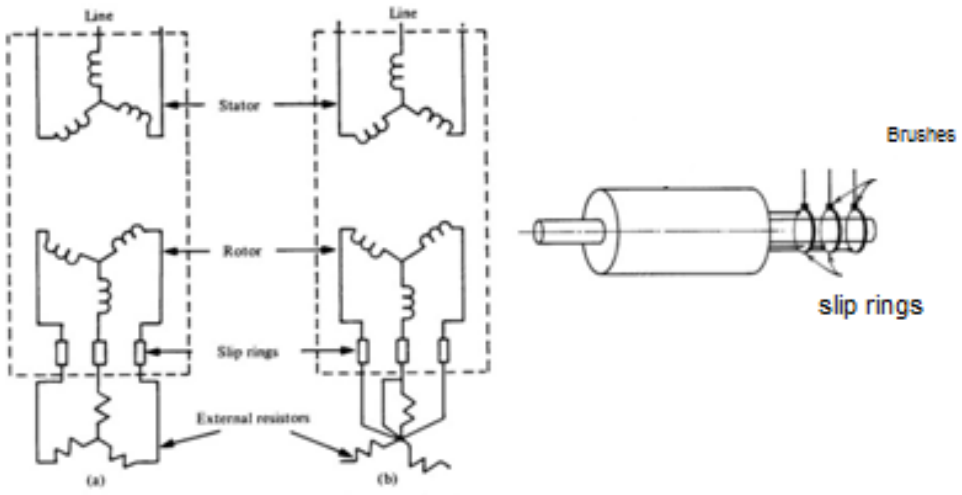
يصمم القسم الأكبر من المحركات التحريضية وخاصة ذات الاستطاعة الصغيرة والمتوسطة بهذا الشكل. يمثل القفص السنجابي ملفاً متعدد الأطوار موصلاً بشكل نجمي وعدد أطوار لفاته يساوي عدد المجاري.



الشكل (3-4) القفص السنجابي في الجزء الدائر[8]

ب- الجزء الدائر الملفوف **Slip Ring Rotor**

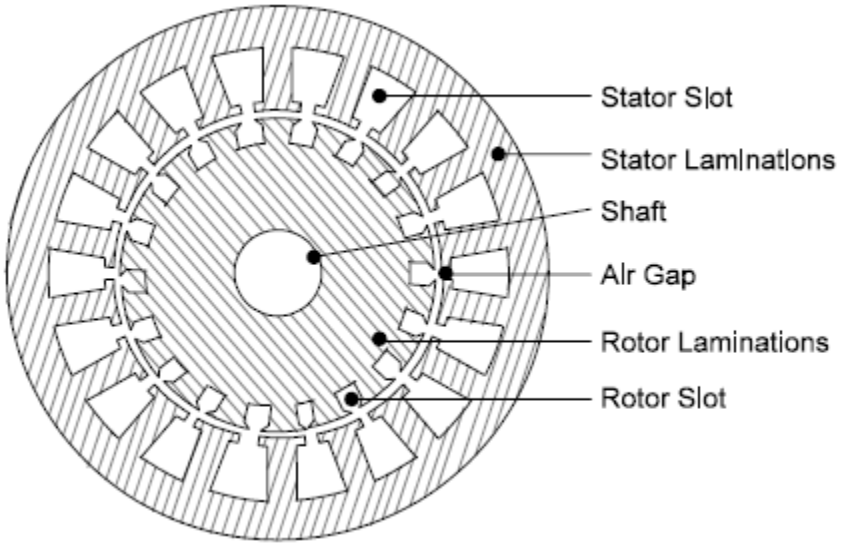
تملأ المجاري في هذا النوع بنواقل نحاسية معزولة عن بعضها البعض وموصلة على التسلسل في مجموعات ثلاثية الطور لتكون دارة متوازنة وتتصل نهايات الملف عادة بشكل نجمي بحيث تثبت نقطة النجمة بجسم الدائر أو بمحور الدوران، أما بدايات الملفات فتثبت مع حلقات انزلاق نحاسية معزولة ومركبة على محور الجزء الدائر وتقصر مع بعضها عبر مقاومات خارجية (تسمى مقاومات الإقلاع) الشكل (3-5).



الشكل (3-5)الدائر الملفوف [8]

٣- الفجوة الهوائية air-gap

تفصل بين الجزء الثابت والجزء الدائر فجوة هوائية وتصمم هذه الفجوة بحيث تكون صغيرة قدر المستطاع وتكبر كلما كبرت استطاعة الآلة. في الآلات ذات الاستطاعة الصغيرة يتراوح عرض الفجوة الهوائية بين 0.5)mm – 0.4)، وفي الآلات ذات الاستطاعة الكبيرة تكون عدة مليمترات (3) mm. وتحدد الفجوة الهوائية بهذا البعد الصغير لتخفيض قيمة السيّالة المغناطيسية المتسربة وتيار اللاحمل مما يؤدي إلى تحسين عامل الاستطاعة ومردود المحرك.



الشكل(3-6) مقطع عرضي في المحرك التحريضي

يـدور الجـزء الـدائر لهـذا النـوع مـن المحركـات بسـرعة دوران (N_r) أقـل مـن سـرعة التـزامن (N_e) بمقدار يساوي إلى الانزلاق:

$$S = \frac{N_e - N_r}{N_e} = \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_e} = \frac{\omega_{sl}}{\omega_e} \qquad (1-3)$$

حيث ω_e – السرعة الزاوية التزامنية للساحة المغناطيسية $[r/s]$،

ω_r – السرعة الزاوية الكهربائية للدائر (rotor electrical speed) $[r/s]$،

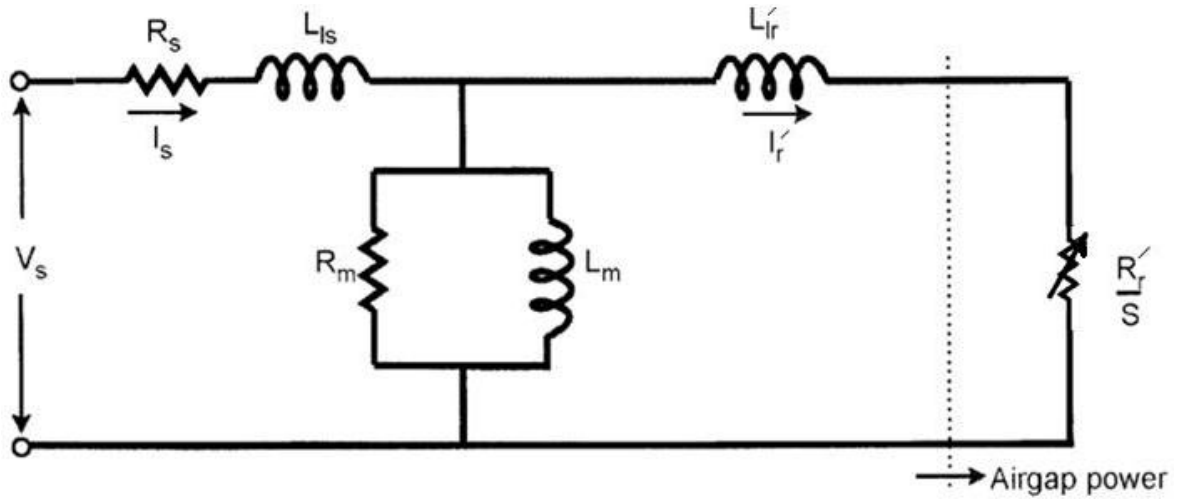
ω_{sl} – السرعة الزاوية منسوبة للدائر (تردد الانزلاق) $[r/s]$.

N_e – سرعة دوران الساحة المغناطيسية $[rpm]$.

N_r – سرعة دوران الجزء الدائر $[rpm]$.

٣-١-٢-٢- الدارة الكهربائية المكافئة Electric Equivalent Circuit

لكي نستطيع تحليل ودراسة سلوك المحرك التحريضي بالحالة المستقرة (steady state) لا بد من تمثيل كل طور من أطوار المحرك بدارة كهربائية مكافئة منسوبة إلى الثابت، كالدارة المبينة على الشكل (3-7).



الشكل (3-7) الدارة المكافئة للمحرك التحريضي منسوبة إلى الثابت

يعطى تيار الدائر (I_r) في الحالة المستقرة بالعلاقة الآتية:

$$I_r = kI'_r = \frac{k^2 S V_m}{R'_r + J\omega_{sl} L'_{lr}} = \frac{V_m}{\left(\frac{R_r}{S}\right) + J\omega_e L_{lr}} \qquad (2\text{-}3)$$

حيث، $(R_r = R'_r/k^2)$ مقاومة ملف الدائر، $(L_{lr} = L'_{lr}/k^2)$ المفاعلة التسربية للدائر، (R'_r)المقاومة الأومية للدائر منسوبة للثابت، (L'_{lr}) المفاعلة التسربية للدائر منسوبة للثابت، (k) نسبة عدد لفات الدائر إلى عدد لفات الثابت، (V_m) القوة المحركة الكهربائية العكسية، (S) الانزلاق.

يعطى العزم بالعلاقة:

$$T_e = \frac{P_o}{\omega_m} = \frac{3}{\omega_m} I_r{}^2 R_r \frac{1-S}{S} = 3P I_r{}^2 \frac{R_r}{S\omega_e} \qquad (3\text{-}3)$$

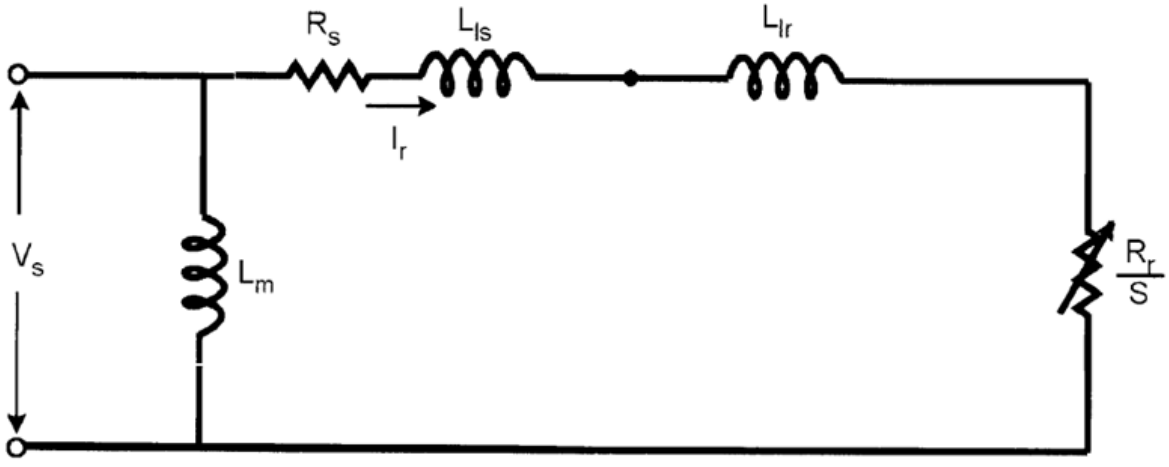
حيث، (P_o) الاستطاعة الميكانيكية على محور المحرك، وتعطى:

$$P_o = P_{em} - P_{el2} = 3 I_r{}^2 R_r \frac{1-S}{S} \qquad (4\text{-}3)$$

ω_m – السرعة الزاوية الميكانيكية للدائر $[r/s]$ (rotor mechanical speed)، وتعطى بدلالة السرعة الزاوية الكهربائية للدائر (ω_r) كما يلي:

$$\omega_m = \omega_r/P = (1/P)(1-S)\omega_e \qquad (5\text{-}3)$$

حيث، (P) عدد أزواج الأقطاب في الآلة.



الشكل (3–8) الدارة التقريبية المكافئة لطور واحد من الآلة

يمكن تبسيط الدارة المكافئة في الشكل (3-7) إلى الدارة المبينة بالشكل(3-8)، حيث أهملنا مقاومة الضياعات الناتجة عن النواة الحديدية ($\mathbf{R_m}$) لأن مفاعلة التمغنط للآلة ($\mathbf{X_m}$) كبيرة جداً مقارنة مع ($\mathbf{R_m}$) وبالتالي يمكن إهمال المقاومة الأومية لدارة التمغنط ($\mathbf{R_m}$)، كما قمنا بإزاحة مفاعلة التمغنط ($\mathbf{L_m}$) إلى الدخل، ويكون هذا التقريب ممكناً عندما يكون

$[|(\mathbf{R_s} + \mathbf{j\omega_e L_{ls}})| \ll \mathbf{\omega_e L_m}]$. لا يتجاوز الاختلاف بين الدارتين 5%.

يعطى تيار الدائر والعزم بالعلاقتين الآتيتين:

$$I_r = \frac{V_S}{\sqrt{(R_s+R'_r/S)^2+\omega_e{}^2(L_{ls}+L'_{lr})^2}} \qquad (6\text{-}3)$$

$$T_e = 3P\frac{R'_r}{S\omega_e}\frac{V_S{}^2}{[(R_s+R'_r/S)^2+\omega_e{}^2(L_{ls}+L'_{lr})^2]} \qquad (7\text{-}3)$$

توضح المعادلة (3-7) علاقة العزم كتابع للانزلاق (S) وذلك عند تردد ثابت وجهد ثابت.

٣-١-٢-٣- المميزة الميكانيكية Torque – Speed Curve

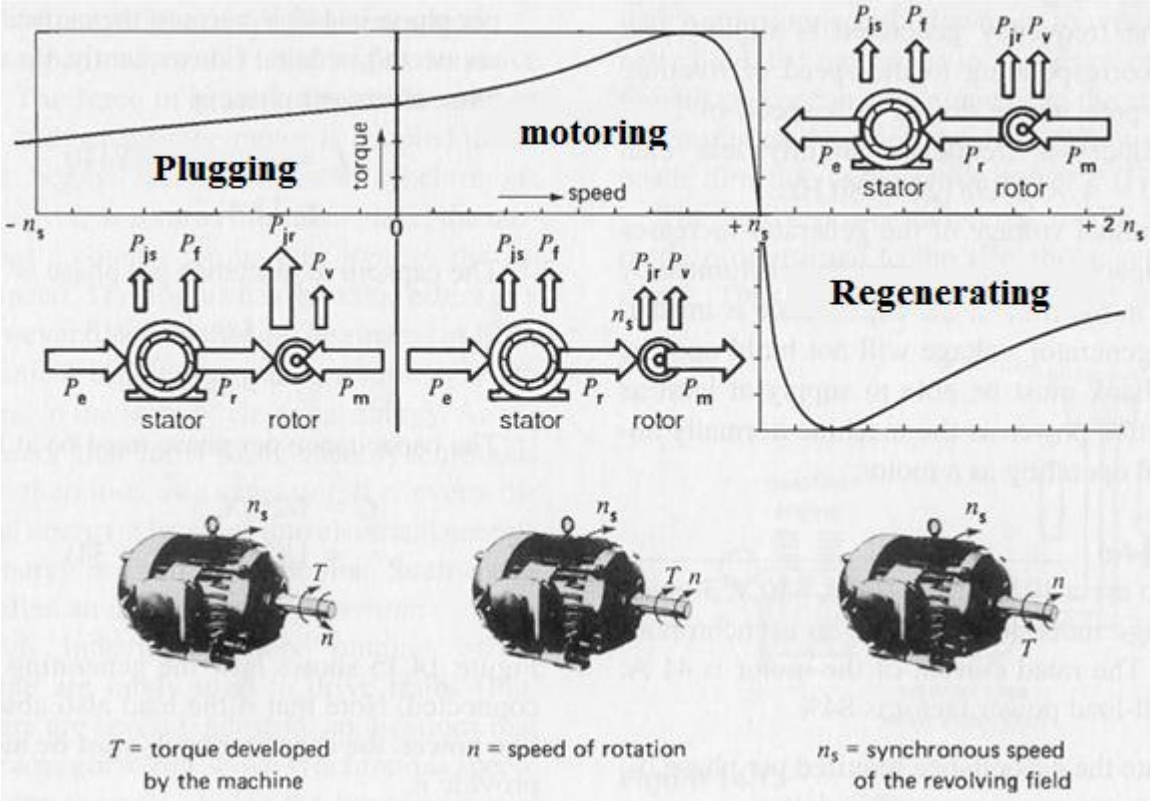
يمكننا إيجاد العزم (T_e) كتابع للانزلاق (S) من المعادلة (3-7). يبين الشكل (3-9) المميزة الميكانيكية للآلة التحريضية في مختلف أنظمة العمل.

١- منطقة العمل كمحرك (motoring mode) $[0 < S < 1]$: يدور الدائر في هذه المنطقة باتجاه دوران الفيض في الثغرة الهوائية. في أثناء عمل الآلة بالحالة الطبيعية كمحرك فإن المقاومة المكافئة (R_r/s) تكون موجبة أي تكون مستهلكة للطاقة. يكون الانزلاق في أثناء الإقلاع ($S = 1$)، ويعبر عن عزم الإقلاع للآلة (T_{st}) بالعلاقة الآتية:

$$T_{st} = 3P\frac{R'_r}{\omega_e}\frac{V_S{}^2}{[(R_s+R'_r)^2+\omega_e{}^2(L_{ls}+L'_{lr})^2]} \qquad (8\text{-}3)$$

٢- منطقة العمل بنظام الكبح (Plugging or breaking mode) $[1 < S < 2]$:

يدور الدائر في هذه المنطقة بعكس اتجاه دوران الفيض في الثغرة الهوائية، يكون بالتالي الانزلاق موجباً ($S > 0$). يمكننا العمل في هذه المنطقة بعكس تتابع أطوار منبع تغذية الثابت أثناء دوران الدائر (عكس القطبية). بما أن الاستطاعة المسببة لنشوء عزم الكبح هي استطاعة ضائعة (dissipated energy) في الآلة، بالتالي فإنها تسبب تسخين زائد للآلة.



الشكل (3–9) مميزة العزم– سرعة لمحرك تحريضي

٣– منطقة العمل بنظام الكبح بإعادة القدرة (Regenerating mode) [$S < 0$]:

تسلك الآلة في هذه المنطقة سلوك المولّد، حيث يدور الدائر بنفس اتجاه دوران الفيض المغناطيسي في الثغرة الهوائية بسرعة تفوق السرعة التزامنية أي يكون ($\omega_r > \omega_e$)، ويصبح الانزلاق سالباً ($S < 0$)، مؤدياً لنشوء عزم سالب (regenerating torque) .

يعطى الانزلاق عند العزم الأعظمي (S_m) بالعلاقة:

$$S_m = \pm \frac{R'_r}{\sqrt{{R_s}^2 + {\omega_e}^2 ({L_{ls}} + {L'_{lr}})^2}} \qquad (9\text{-}3)$$

ويعطى العزم الأعظمي ($T_{e.m}$ (breakdown torque عند العمل كمحرك بالعلاقة:

$$T_{e.m} = \frac{3}{2}\frac{P}{\omega_e} \frac{{V_S}^2}{[R_S + \sqrt{{R_S}^2 + {\omega_e}^2 ({L_{ls}} + {L'_{lr}})^2}]} \qquad (10\text{-}3)$$

ويعطى العزم الأعظمي عند العمل في منطقة الكبح بإعادة القدرة $(T_{e.g})$ بالعلاقة:

$$T_{e.g} = \frac{3}{2}\frac{P}{\omega_e} \frac{{V_S}^2}{[-R_s+\sqrt{{R_s}^2+{\omega_e}^2(L_{ls}+L'_{lr})^2}]} \quad (11\text{-}3)$$

وإذا أهملنا مقاومة الثابت (R_s) فإن $|T_{e.g}| = |T_{e.m}|$.

ومن الناحية العملية، إذا كانت السرعة فوق الـ ١٠ % عندها يعطى العزم بالعلاقة التقريبية الآتية:

$$T_{e.m} = 3P\left(\frac{V_S}{\omega_e}\right)^2 \frac{\omega_{sl}R'_r}{{R'_r}^2+{\omega_{sl}}^2{L'_{lr}}^2} \quad (12\text{-}3)$$

بإهمال كل من (R_s) و(L_{ls})، وباعتبار أن الفيض في الثغرة الهوائية يعطى بالعلاقة الآتية:

$$\emptyset = V_s\,\omega_e \quad (13\text{-}3)$$

وبفرض أن الآلة تعمل بمنطقة العمل ذات الانزلاق المنخفض (low-slip region)، وباعتبار أن $\left[R'_r \gg {\omega_{sl}}^2{L'_{lr}}^2\right]$ فإنه يمكننا تقريب علاقة العزم السابقة كما يلي:

$$T_e = 3P\frac{1}{R'_r}{\Psi_m}^2\omega_{sl} \quad (14\text{-}3)$$

نستنتج من العلاقة الأخيرة أنه عند ثبات الفيض $(\emptyset)$ فإن العزم (T_e) يتناسب طرداً مع (ω_{sl})، وعند ثبات (ω_{sl}) يتناسب العزم طرداً مع $(\emptyset^2)$.[9]

وفي دراستنا هذه يهمنا عمل المحرك التحريضي في منطقة العمل كمحرك بالإضافة إلى منطقة العمل بنظام الكبح باستعادة القدرة الكهربائية.

٣-٢- المبدلات الالكترونية المستخدمة في نظم الجر الهجينة

٣-٢-١- مقدمة

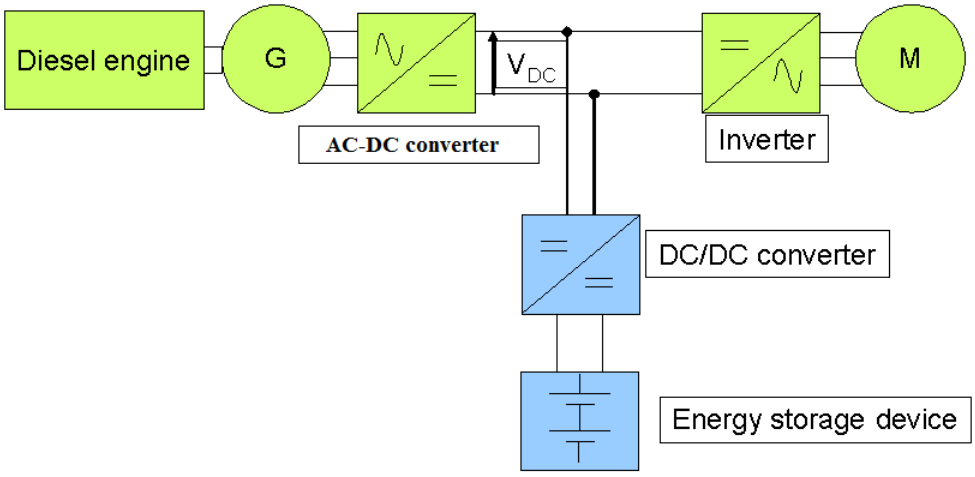
تشكل المبدلات الالكترونية في نظم الجر الهجينة المكون الأساسي لما لها من دور كبير في تحويل القدرة الكهربائية من شكل لآخر حسب حاجة النظام.

يتكون نظام الجر الهجين وكما هو مبين في الشكل (3-10) من المبدلات الالكترونية التالية:

١- المقومات **(AC-DC converters):** وهي جسور أو مبدلات تغذي أحمالًا ذات تيار مستمر بدءًا من منابع ذات تيار متناوب.

٢- المعرجات **(Inverters):** جسور الكترونية تعمل على تغذية الأحمال ذات التيار المتناوب بدءًا من منابع ذات تيار مستمر.

٣- المقطعات **(DC-DC converter):** مبدلات الكترونية تغذي أحمالًا ذات تيار مستمر بدءًا من منابع تيار مستمر ذات توترات مخالفة.[10]



الشكل (3-10) مبدلات نظام الجر الالكترونية

٣-٢-٢- المقومات converters

للحصول على توتر مستمر انطلاقًا من التوتر المتناوب، يجب المرور بمرحلة التقويم، والتقويم إما يكون ميكانيكيًا، كما في حالة المجمع الدوار والمسافر الثابتة (مولد التيار المستمر) أو بوساطة (مجموعات التقويم) والتي تقوم بهذه العملية اعتمادًا على عناصر ثابتة ستاتيكية كالديود، الثيرستور أو الترانزستور.

تعمل مجموعات التقويم التي تستخدم الديود كعناصر تقويم بما يسمى مجموعات التقويم غير المقادة، بينما المجموعات التي تستخدم الثيرستور كعناصر تقويم تعمل بما يسمى مجموعات التقويم ذات التأخير في الطور أو المقادة.

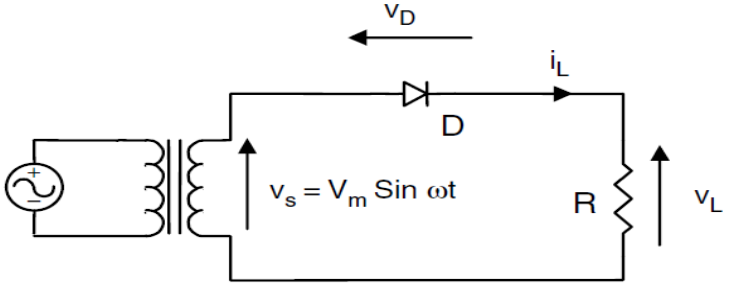
ستتركز دراستنا على مجموعات التقويم الغير مقادة، لعدم حاجة القاطرات الهجينة لاستعادة القدرة باتجاه المنبع.

٣-٢-٢-١- المقوم أحادي الطور الديودي Single-Phase Diode Rectifiers

يوجد نوعان لهذا النوع من المقومات التي تحول التوتر المتناوب للمنبع أحادي الطور إلى توتر مستمر:

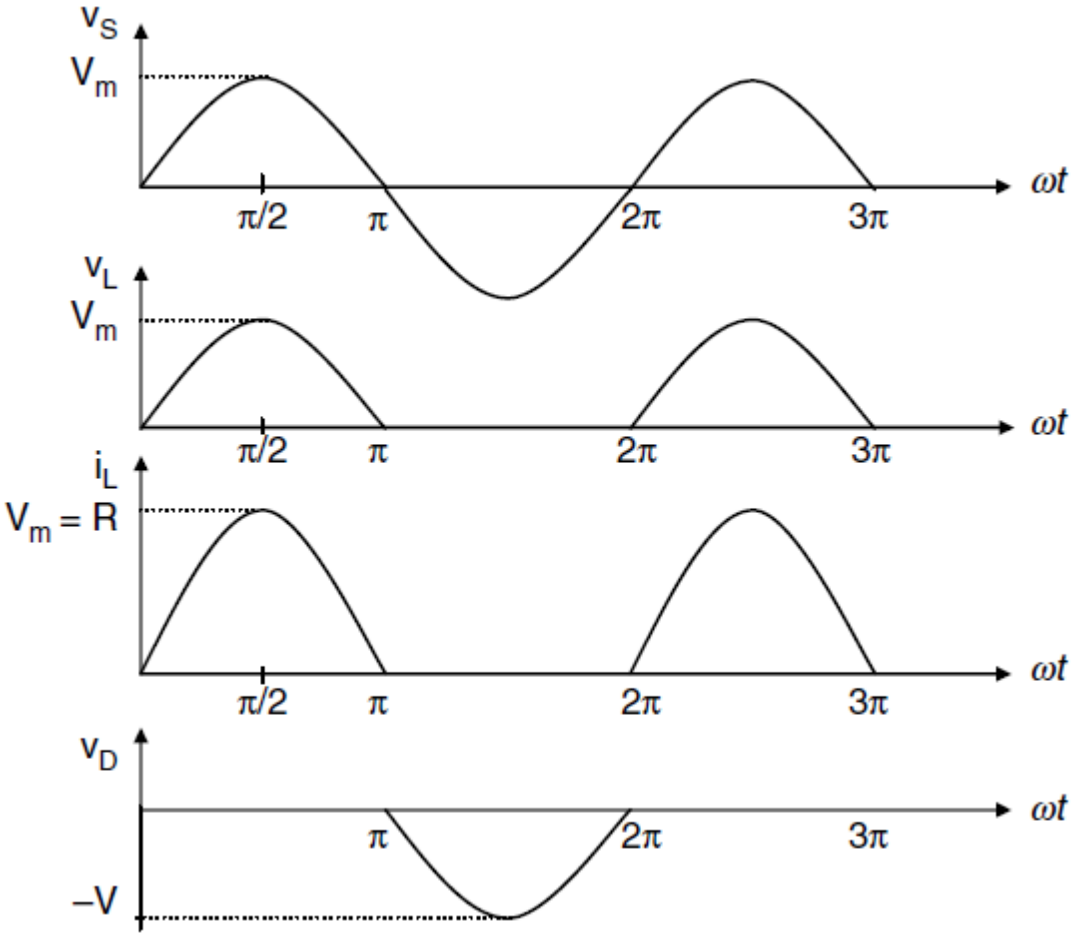
١- مقومات نصف موجة single phase half-wave Rectifiers

يوضح الشكل (3-11) مقوم نصف موجة أحادي الطور مع حمل أومي. تتكون دارة المقوم من ديود مغذى من ثانوي محول. خلال نصف الموجة الموجب لتوتر ثانوي المحول، يوصل الديود **D**، وأثناء النصف السالب للموجة ينتقل الديود لحالة الحجز.



الشكل (3-11) مقوم نصف موجة أحادي الطور[11]

يوضح الشكل (3-12) شكل موجة تيار وتوتر الحمل **R** بالإضافة لتوتر الديود.



الشكل (3–12) موجة تيار وتوتر الحمل وتوتر الديود

تعطى القيمة الوسطية لتوتر الحمل $\mathbf{V_L}$، $\mathbf{V_{dc}}$ بالعلاقة:

$$V_{dc} = \frac{1}{T}\int_0^T V_L(t)dt \qquad (15-3)$$

لأجل نصف الموجة السالب لثانوي المحولة $V_L(t) = 0$.

وبالتعويض بـ $W = 2\pi = T$ بالمعادلة (3–15)

$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi} V_m \sin wt \; d(wt) \qquad (16-3)$$

$$V_{dc} = \frac{V_m}{\pi} = 0.318V_m \qquad (17-3)$$

القيمة الفعالة لتوتر الحمل تعطى بالمعادلة (3–18)

$$V_L = \left[\frac{1}{T}\int_0^T V_L^2(t)\,dt\right]^{1/2} \qquad (18-3)$$

وبالتعويض تنتج معادلة القيمة الفعالة للتوتر

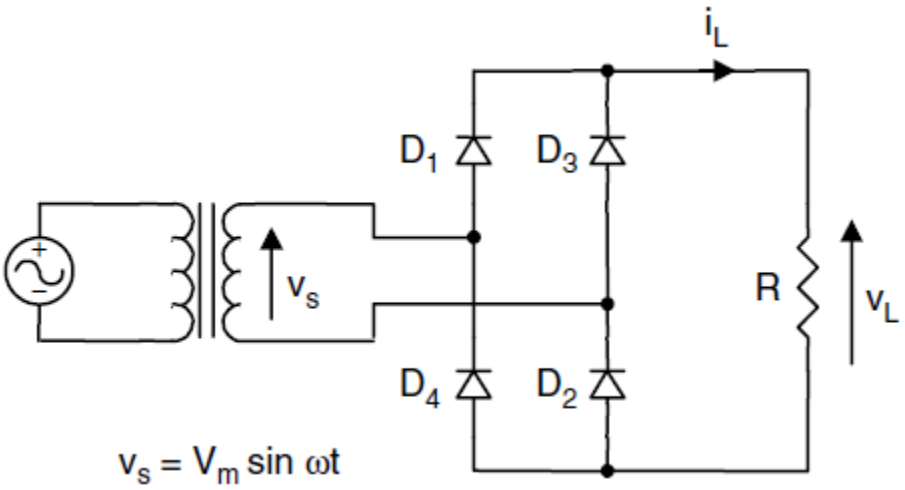
$$V_L = \frac{V_m}{2} = 0.5V_m \qquad (19-3)$$

٢- مقومات موجة كاملة single phase full-wave Rectifiers

يوجد نوعين للمقومات الموجة الكاملة أحادية الطور:

- مقومات موجة كاملة بمحول ذو نقطة وسط.
- المقوم الجسري أحادي الطور.

يتكون المقوم الجسري الأحادي الطور الديودي من أربع ديودات موصلة مع بعضها كما هو موضح في الشكل (3-13).[11]



الشكل (3-13) المقوم الجسري

خلال النصف الموجب لموجة توتر ثانوي المحول، يمر التيار إلى الحمل عبر الديودات **D_1** و **D_2**. وخلال النصف السالب للموجة يمر تيار الحمل عبر **D_3** و **D_4**.[11]

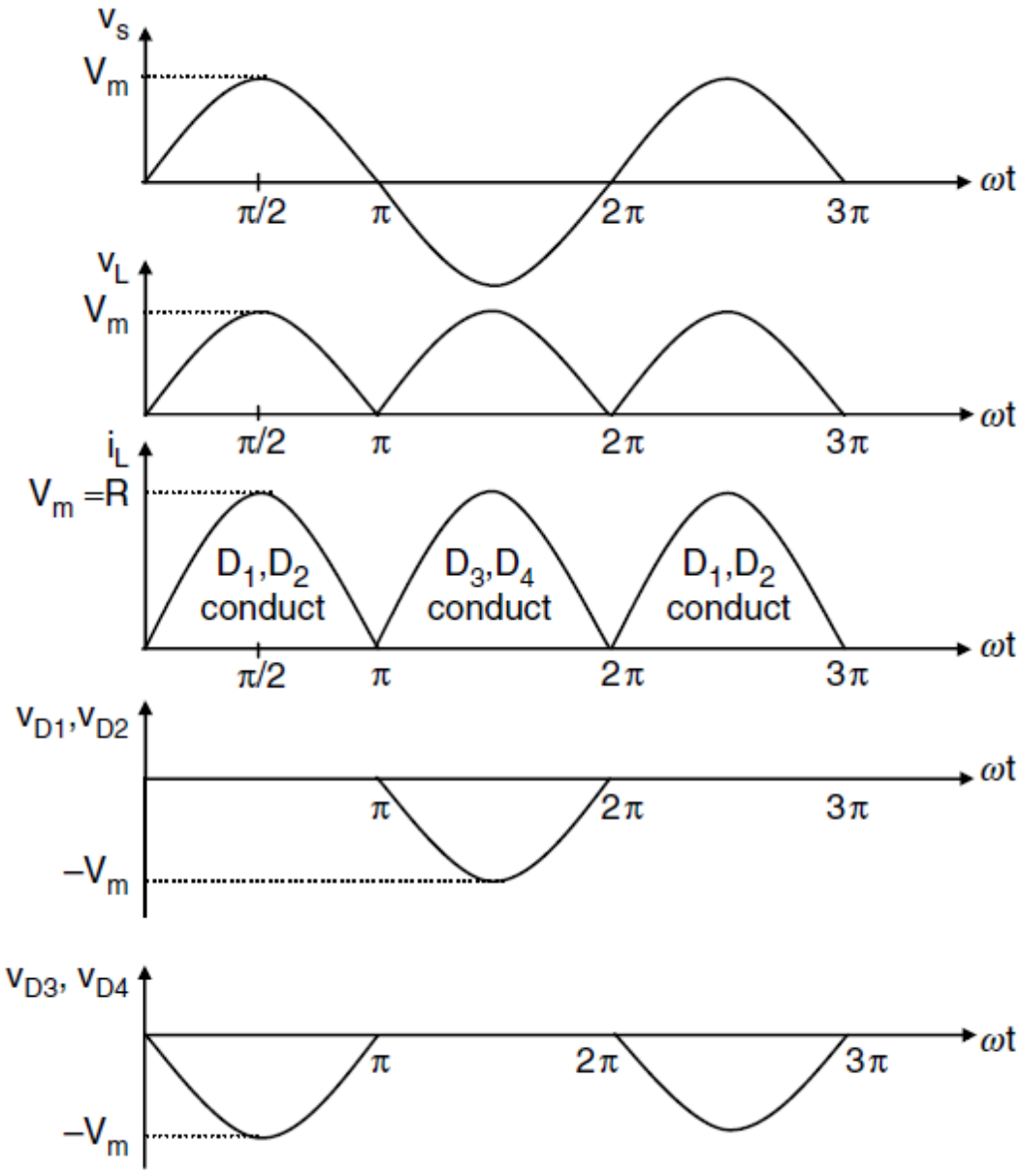
يبين الشكل (3-14) شكل موجات توتر وتيار جسر التقويم.

تعطى علاقة التوتر الوسطي للحمل في هذا النوع من المقومات :

$$V_{dc} = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} Vm \sin wt \, d(wt) \qquad (20-3)$$

تأخذ المعادلة الشكل التالي

$$V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi} = 0.636V_m \qquad (21-3)$$



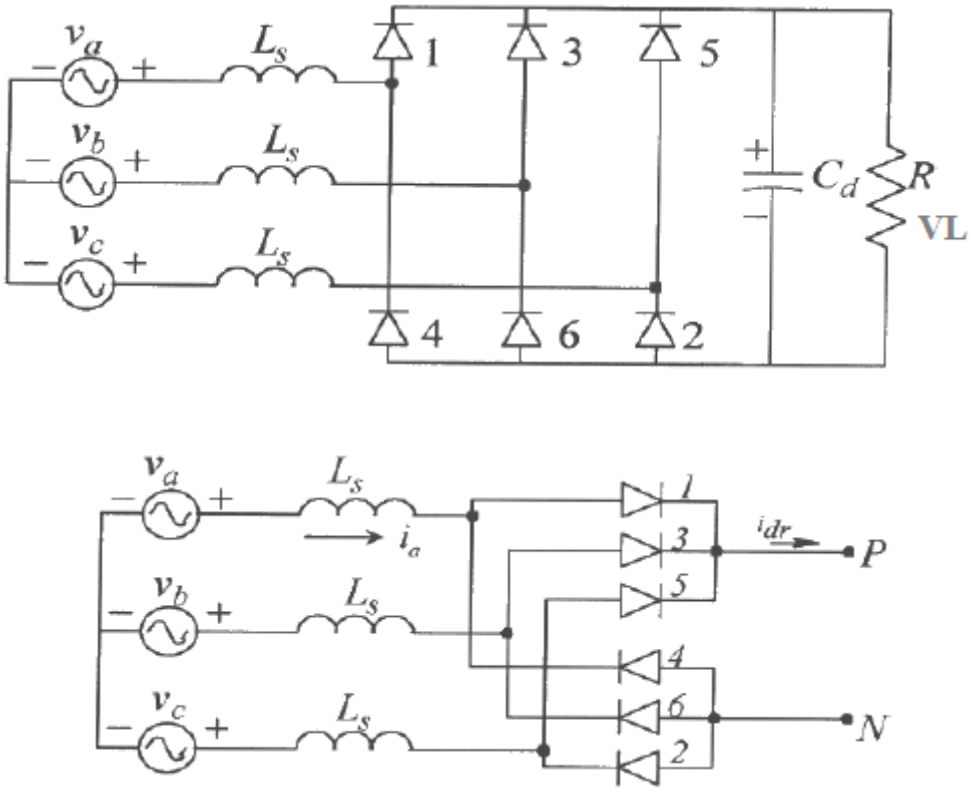
الشكل(3-14) توترات وتيارات جسر التقويم[11]

تحسب القيمة الفعالة لتوتر الحمل من المعادلة التالية

$$V_L = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = 0.707V_m \qquad (22-3)$$

٣-٢-٢-٢- جسور التقويم ثلاثية الطور Three-phase Bridge Rectifiers

تستخدم جسور التقويم ثلاثية الطور في التطبيقات ذات الاستطاعات الكبيرة. يبين الشكل (3-15) دارة جسر التقويم، المكونة من مجموعتين من الديودات، عليا توصل مهابطها إلى نقطة واحدة، لذلك فهي مسؤولة عن تمرير الجزء الموجب من الموجة. أما المجموعة السفلى توصل مصاعدها إلى نفس النقطة، لذا فهي مسؤولة عن تمرير الجزء السالب من الموجة كما هو موضح في الشكل(3-16-a).



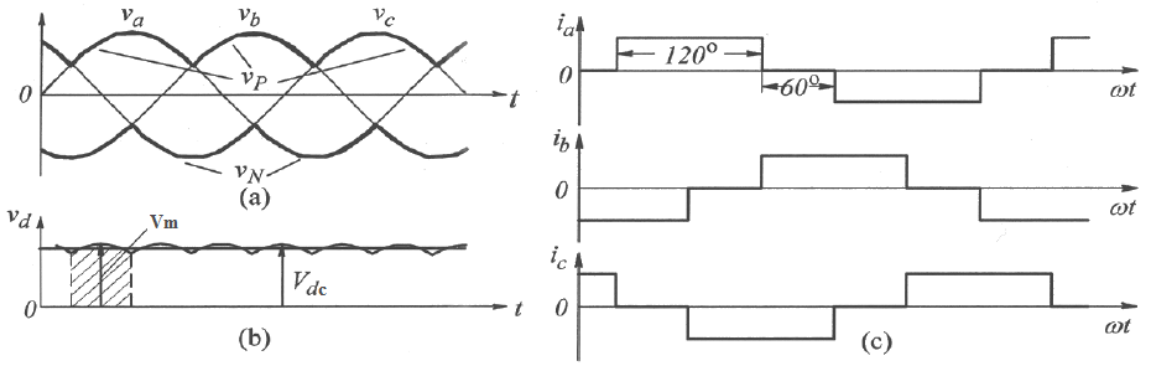
الشكل (3–15) جسر تقويم ثلاثي الطور

يؤخذ التوتر المتوسط المقوم بين المأخذين **N,P**. يمثل المأخذ **P** القطب الموجب لمجموعة التقويم، ويمثل المأخذ N القطب السالب. فرق الكمون الناتج بينهما يساوي القيمة المتوسطة للتوتر المقوم الناتج الشكل (3-16-b).[10][12]

$$V_{dc} = V_P - V_N$$

ويعطى التوتر المتوسط المقوم بالعلاقة

$$V_{dc} = \frac{1}{\pi/3}\int_{-\pi/6}^{\pi/6} Vm \sin wt \, d(wt) = \frac{3}{\pi} V_m \qquad (23-3)$$



الشكل (3–16) توترات وتيارات جسر التقويم الثلاثي الطور[12]

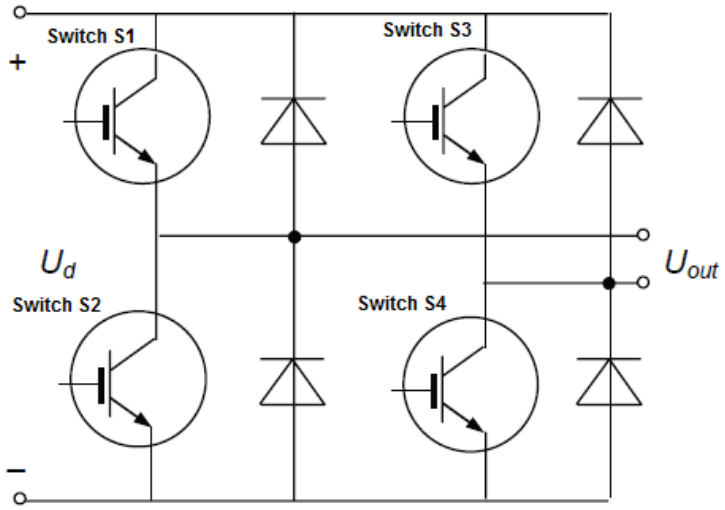
٣-٢-٣- المعرجات Inverters

مبدلات الكترونية تستخدم لتحويل التوتر المستمر إلى توتر متناوب ذو تردد معين. تعتمد المعرجات في عملها على أنصاف النواقل كالثيرستورات والترانزستورات.

توتر دخل المعرج المستمر يمكن أن يكون خرج مقوم، أو يمكن أن يغذى بالتوتر المستمر من منبع مستقل (كمنبع توتر مستمر أو مدخرة).

٣-٢-٣-١- المعرج الجسري أحادي الطور single phase bridge inverter

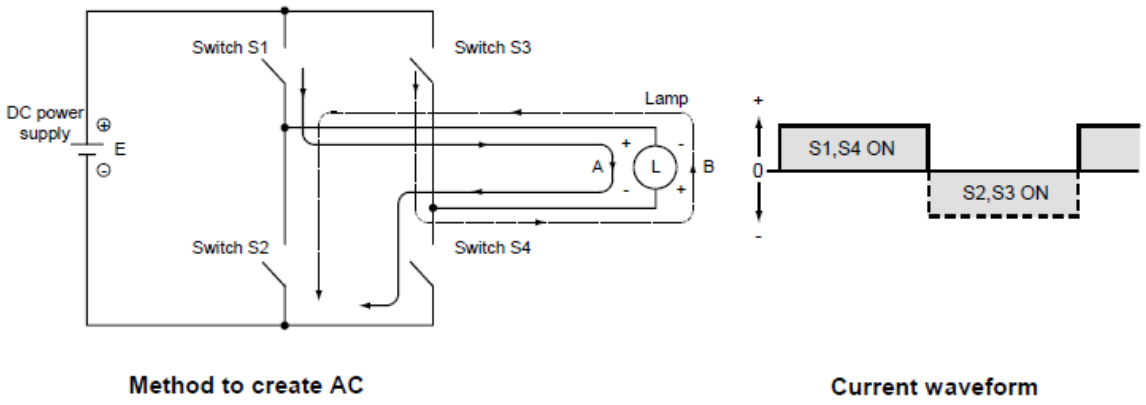
الشكل (3-17) يمثل معرج جسري أحادي الطور، بقواطع ترانزستورية $(s_1,s_4 - s_2,s_3)$ يتم نقلها للتوصيل والحجز طالما لا توجد على بواباتها نبضة قدح.



الشكل (3-17) معرج أحادي الطور ترانزستوري

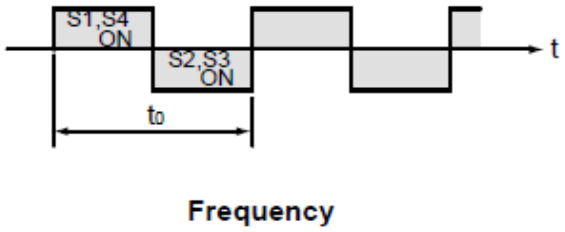
عند توصيل (s_1,s_4)، يمر التيار إلى الحمل كما هو موضح في الشكل (3-18) حيث يمثل الخط **A** مسار التيار خلال هذه المرحلة. وعند توصيل (s_2,s_3) يمر التيار في الحمل باتجاه معاكس كما هو مبين بالخط **B**، وبتكرار عملية الفصل والوصل لمجموعات القواطع الترانزستورية تتشكل موجة جيبية للتيار والتوتر في خرج المعرج.[10]

تردد خرج المعرج يمكن أن يتم تعديله عن طريق التحكم بنبضات قدح بوابات العناصر الالكترونية، أي التحكم بزمن الفصل والوصل لهذه العناصر. فإذا تم توصيل القواطع (s_1,s_4) لمدة **0.5 second** والقواطع (s_2,s_3) لمدة **0.5 second** وتكرار هذه العملية نحصل على موجة جيبية بتردد **(1)[Hz].**



الشكل (3–18) آلية عمل المعرج الجسري أحادي الطور

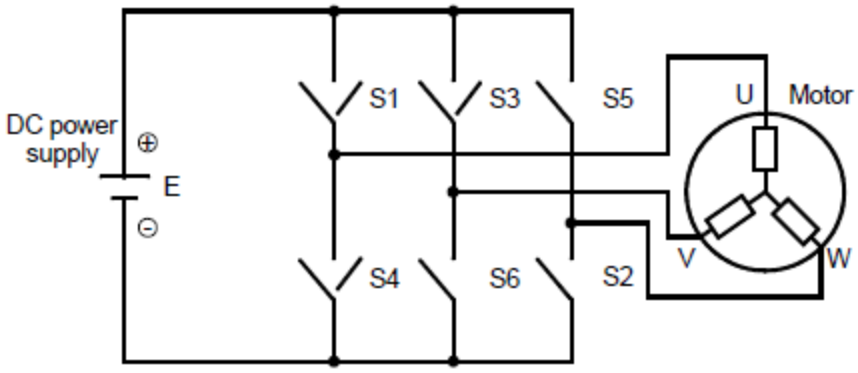
بافتراض أن دور الموجة الجيبية هو t_0 فيكون التردد $f = \frac{1}{t_0}$ [HZ] الشكل (3-19).



الشكل (3–19) تردد موجة خرج المعرج

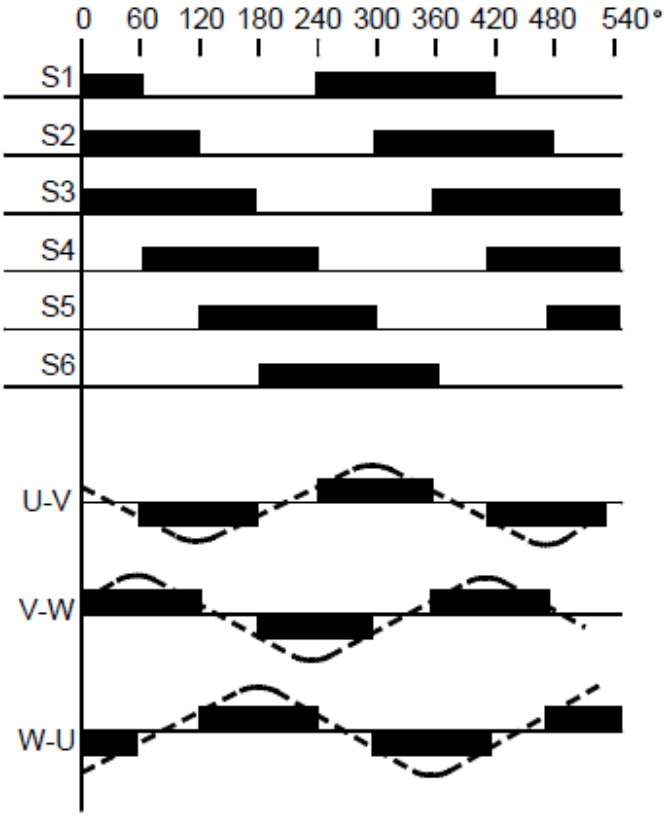
٣-٢-٣-٢- المعرج الجسري ثلاثي الطور Three phase bridge inverter

يمكن تشكيل المعرجات الجسرية ثلاثية الطور مباشرة من ستة قواطع الكترونية كما في الشكل (3-20). في هذه الحالة يمكن توصيل كل قاطع الكتروني (ترانزستور) لفترة 180° من الدور.



الشكل (3–20) معرج جسري ثلاثي الطور

حيث يتواجد ثلاثة قواطع موصلة بآن واحد. عند توصيل s_1، الطرف U يربط إلى الطرف الموجب من المنبع وعند توصيل s_4، الطرف U يفصل من الطرف الموجب ويربط بالطرف السالب من المنبع. هنالك ستة أدوار أو مراحل من التوصيل خلال الدور كل منها بعرض $60°$. في كل مرحلة من هذه المراحل تعمل العناصر التالية $(s_1s_2s_3, s_2s_3s_4, s_3s_4s_5, s_4s_5s_6, s_5s_6s_1, s_6s_1s_2)$. نبضات القدح مزاحة عن بعضها بـ $60°$للحصول على توترات ثلاثية الطور، يمكن توصيل الحمل بشكل نجمي أو مثلثي. يبين الشكل (3-21) فترات عمل القواطع الالكترونية وتوترات خرج المعرج.[10]

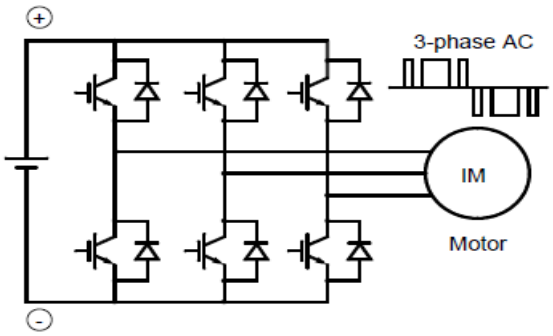


الشكل(3−21) تتابع نبضات القدح وتوترات خرج المعرج

يمكن أن تكون القواطع الالكترونية عناصر من الثيرستور أو عناصر ترانزستورية ، حيث يتم الاختيار ما بينها حسب المجال المراد استثمارها فيه.

تستخدم في أنظمة قيادة المحركات ثلاثة أنواع من الترانزستورات هي:

- الترانزستورات ثنائية القطبية BJT_s.



الشكل(3-22) معرج جسري ثلاثي الطور ترانزستوري

- ترانزستورات تأثير المجال الحلقي ذات البوابة المعزولة **$MOSFET_S$**.
- الترانزستورات ثنائية القطبية ذات البوابة المعزولة **$IGBT_S$**.

وتعتبر الترانزستورات أفضل من الثيرستورات أو الترياك، التي لا يمكن إيقافها من البوابة، ويتوقف اختيار العنصر الأفضل من بين هذه الترانزستورات على استطاعة المحرك وتردد **PWM**.[13]

٣-٢-٣-٣- مبدأ نظام تعديل عرض نبضة PWM principle

يقوم مبدأ نظام تعديل عرض النبضة على التحكم بفترات توصيل القواطع الإلكترونية المستخدمة في الجسور، بحيث أن هذه القواطع لن تعمل لفترات متساوية خلال الدور أو نصف الدور، وبالتالي قيادة المعرجات باتجاه إمكانية تغيير توتر خرج المعرج عن طريق إشارات القيادة والتحكم، بالإضافة إلى إمكانية تغيير التردد أيضاً عن طريق تغيير تردد الإشارة المرجعية.

الهدف من هذا النظام هو تغيير وتحديد عدة متطلبات منها:

١- التحكم بالقيمة الفعالة لتوتر خرج المعرج.
٢- التحكم برتبة التوافقيات في موجة توتر الخرج.
٣- التحكم بتردد توتر الخرج للمعرج.

ولتحقيق هذه الغاية في دوائر القيادة والتحكم يتم استخدام إشارتين، إشارة مرجعية (أساس) غالباً ما تكون جيبية ذات تردد **(f)** من رتبة تردد التوتر المتناوب المراد الحصول عليه وذي مطال **A_r**.

الإشارة الثانية عبارة عن موجة غالباً ما تكون مثلثية الشكل ذات تردد f́ أكبر بكثير من التردد **f** وذات مطال A_c.

النسبة بين مطال هاتين الإشارتين r يطلق عليه متحول التحكم أو عامل التعديل أو عامل تنظيم التوتر.

$$r = \frac{A_r}{A_c} \qquad (24-3)$$

إذا كانت **r = 1** نحصل على كامل توتر الخرج وكلما صغرت **r** كلما انخفضت القيمة الفعالة لتوتر الخرج للمعرج.

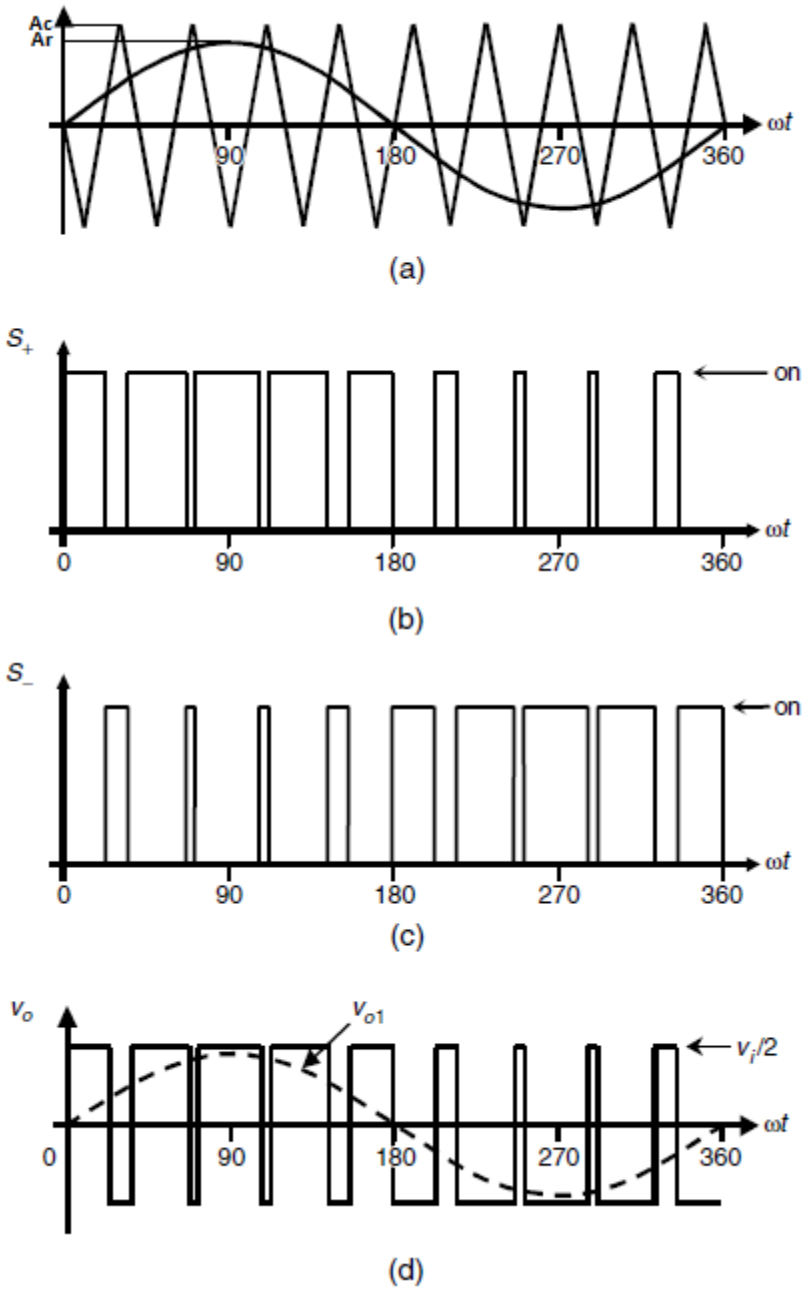
- النسبة بين تردد الإشارتين يحدد عدد النبضات في كل نصف دور من موجة الخرج ونطلق عليه p (معدل تعديل التردد) حيث:

$$p = \frac{f́}{2f} = m_f/2 \qquad (25-3)$$

يبين الشكل (a-23-3) موجة المرجع الأساس A_r ذات التردد f ، والموجة المثلثية الحاملة للتردد العالي بتردد f́.

نتيجة مقارنة هاتين الموجتين يمكن أن نأخذ موجة لقدح القاطع الموجب في الجسر الأحادي الطور ذي نقطة الوسط خلال الفترة التي تكون فيها موجة المرجع أكبر من الموجة الحاملة، ونحصل على نبضة لقدح القاطع الموجب S_+ الشكل (b-23-3). وخلال الفترة التي تكون فيها الموجة الحاملة أكبر من موجة المرجع نحصل على نبضة لقدح القاطع السالب S_- الشكل (c-23-3).

وكما نلاحظ أن $A_r < A_c$ وكلما صغر مطال الموجة المرجعية كلما صغر عرض النبضة S_+ وزاد عرض النبضة S_-.[10][11]



الشكل (3-23) مبدأ توليد النبضات للقواطع حسب نظام P.W.M

(a)موجة المرجع والموجة الحاملة للتردد العالي -(b) نبضات قدح القاطع s_+ - (c) نبضات قدح القاطع s_-

(d) التوتر الجيبي لخرج المعرج.[11]

كما ذكرنا سابقاً من أهم استخدامات المعرجات الإلكترونية قيادة المحركات الكهربائية وخصوصاً المحركات التحريضية المستخدمة في نظم الجر الهجينة.

٣-٢-٤- قيادة المحركات التحريضية Induction motors drive

يستخدم المحرك التحريضي بشكل واسع في العديد من تطبيقات التحكم المتغيرة السرعة أو العزم. إلا أن التحكم بسرعة أو عزم المحرك التحريضي هو أمر معقد بالمقارنة مع محركات التيار المستمر. لأن قيادة المحرك التحريضي لا تتطلب فقط توليد ثلاث أطوار جيبية، بل لابد من التحكم بمطال وتردد هذه الموجات.

ونتيجة لتطور المبدلات الإلكترونية أصبحت عملية التحكم بالمحركات التحريضية أكثر فعالية مما كانت عليه. وخصوصاً تطور المعرجات التي تؤمن موجات جيبية بمطالات وترددات متحكم بها لتغذية المحرك.

٣-٢-٤-١- تنظيم سرعة المحركات التحريضية

Speed control of induction motor

إن سرعة المحرك التحريضي الثلاثي الطور محدد بعدد أزواج أقطاب المحرك **(p)** ، والتردد الأساسي **(F1)** والانزلاق **(S)**. الإمكانيات المختلفة للتحكم بسرعة المحرك التحريضي الثلاثي الطور تظهر من العلاقة:

$$n_e = \frac{60f_1}{p}$$

$$n_r = n_e(1 - s)$$

$$n_r = \frac{60f_1}{p}(1 - s) \qquad (26 - 3)$$

فيلاحظ منها إمكانية تنظيم سرعة هذه المحركات بالطرق التالية:

١- بتغيير عدد أقطاب المحرك **2P**.

٢- بتغيير الانزلاق عند سرعة تزامنية ثابتة $n_1 = \text{const}$.

٣- بتغيير تردد المنبع المغذي للمحرك f_1.

٣-٢-٤-١-١- تنظيم السرعة بتغيير عدد الأقطاب Speed control by pole changing

إن تغيير عدد أزواج الأقطاب لا يسمح بالتحكم الكامل بالسرعة . فمثلا بتغيير عدد أزواج أقطاب الثابت من زوج واحد إلى زوجين عند التردد الأساسي **(f=50Hz)** فتكون السرعة التزامنية لهذا المحرك عندئذ:[14]

$$\mathbf{p = 1 \ldots . . n_0 = 3000\ rpm}$$

$$\mathbf{p = 2 \ldots . . n_0 = 1500\ rpm}$$

٣-٢-٤-١-٢- تنظيم السرعة بتغيير الانزلاق Speed control by Slip changing

يعطى عزم المحرك التحريضي بالعلاقة التالية :

$$T_e = 3P\frac{R'_r}{S\omega_e}\frac{{V_S}^2}{[(R_s + R'_r/S)^2 + {\omega_e}^2(L_{ls} + L'_{lr})^2]} \qquad (27-3)$$

وبما أن كلاً من التردد $\boldsymbol{\omega_e}$ وعدد أزواج الأقطاب **p** ثابتان فإن:

$$s = f(T_e, V_S, R_s, R'_r, L_{ls}, L'_{lr}) \qquad (28-3)$$

أي أنه عندما تكون قيمة كلاً من تردد التغذية وعدد أزواج الأقطاب ثابتة، يمكن تغيير الانزلاق وبالتالي تنظيم سرعة المحرك بتغيير التوتر المطبق على المحرك أو بتغيير مقاومة دارة الجزء الثابت أو الدائر.[8]

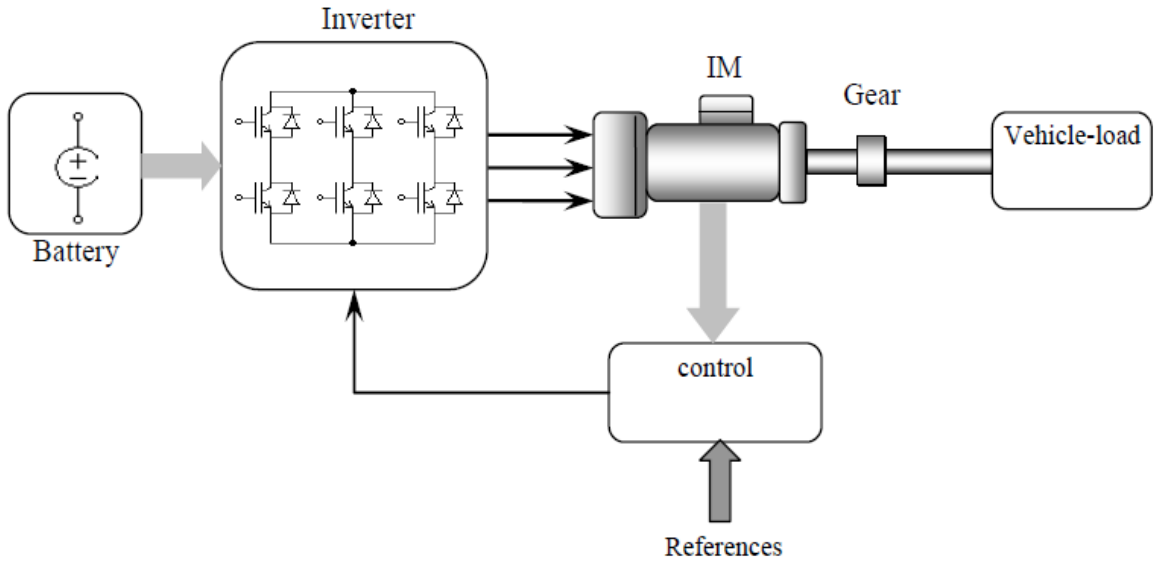
٣-٢-٤-١-٣- تنظيم السرعة بتغيير التردد

Speed control by changing the frequency

إن معظم الطرق الحديثة للتحكم بسرعة المحرك التحريضي ثلاثي الطور تعتمد على التحكم بالتردد (f_1). فهو يضمن مجال واسع للتحكم بالسرعة، والاستجابة العالية، والتحكم الدقيق، وتخفيض الضياعات. بما أن جهد التغذية ثابت عند قيمته الاسمية، فانه يمكن تنظيم سرعة المحرك فوق السرعة الاسمية عبر زيادة التردد بقيم أعلى من قيمته الاسمية، وهذا بدوره يؤدي إلى انخفاض العزم.

ومن أهم مزايا تنظيم السرعة بتغيير التردد وخصوصاً في نظم الجر الكهربائي هي إمكانية التحكم بتسارع وتباطؤ المحرك عن طريق تغيير تابع التردد مع الزمن.

لا نستطيع استخدام هذا النوع من التنظيم عند ربط المحرك بشكل مباشر إلى الشبكة العامة، وذلك بسبب تردد الشبكة الثابت الذي لا يمكن تغييره. لذلك لابد من اللجوء إلى استخدام المبدلات الإلكترونية، والتي تمتاز كما ذكرنا سابقاً بقدرتها على المساعدة للحصول على ترددات أصغر أو أكبر من تردد المنبع (أحادي أو ثلاثي الطور) أو توليد موجات جيبية انطلاقاً من بطارية أو منبع توتر مستمر الشكل (3-24)، أي أن تنظيم سرعة المحرك يكون بالاتجاهين، كما أنها تحافظ على أداء جيد للمحرك، حيث يبقى مردوده عالياً، بالإضافة إلى إمكانية تطبيقها على المحركات ذات القفص السنجابي التي تمتاز بمردود عالي ووثوقية أكبر مقارنة بالمحركات التحريضية ذات الدائر الملفوف.



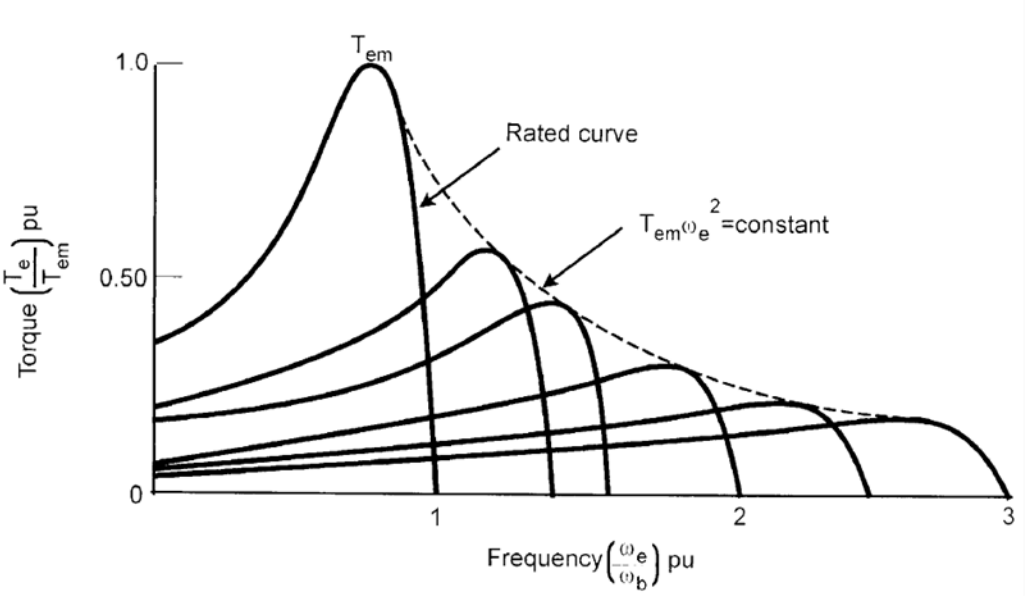
الشكل (3–24) قيادة محرك جر تحريضي باستخدام معرج الكتروني

من العلاقة التالية:

$$\emptyset \propto \frac{V}{f} \qquad (29-3)$$

نلاحظ أن الفيض المغناطيسي يتناسب عكساً مع التردد أي أنه بزيادة التردد ينقص الفيض المغناطيسي المتولد وبالتالي ينخفض العزم وترتفع سرعة المحرك.

يوضح الشكل (3-25) المميزات الميكانيكية لمحرك تحريضي مغذى من منبع جهد ثابت القيمة متغير التردد بقيم أكبر من قيمته الاسمية. ينخفض الفيض المغناطيسي وكذلك تيار الدائر، وينخفض العزم الكهرومغناطيسي للمحرك بزيادة التردد وفق المعادلة (3–27).[8]



الشكل (3−25) المميزات الميكانيكية لمحرك تحريضي عند توتر ثابت وتردد متغير

٣−٢−٤−١−٤− تنظيم السرعة وفق النسبة V/F=constant

Speed control with V/F=constant

عند تطبيق توتر على أطراف المحرك التحريضي، تتولد قوة محركة كهربائية **e.m.f**. هذه القوة المحركة الكهربائية المتولدة في الثابت تتناسب مع الفيض المغناطيسي المتشكل في الثغرة الهوائية وتردد العمل، يعطى تيار المغنطة الذي يحدد الفيض المغناطيسي بالعلاقة:

$$I_m = \frac{E}{X_m}$$

$$I_m = \frac{E}{w_e \acute{L}_m} \qquad (30-3)$$

يجب أن تبقى قيمة هذا التيار ثابتة، وللحفاظ على قيمته ثابتة لابد من الحفاظ على النسبة $\mathbf{E/w}$ ثابتة لهذا السبب للحفاظ على قيمة ثابتة للفيض المغناطيسي لكافة ترددات العمل ولتجنب الوصول لقيمة الإشباع المغناطيسي، لابد من تطبيق قيم متغيرة للتوتر وفق النسبة الثابتة:

$$. \ V/f = \text{constant}$$

كما نعلم أن عزم المحرك الأعظمي يعطى بالعلاقة (3−10) و بإهمال قيمة $\mathbf{R_s}$ تصبح المعادلة:

$$T_{e.m} = \frac{3PV_S{}^2}{2\omega_e{}^2(L_{ls} + L'_{lr})}$$

$$T_{e.m} = \frac{3PV_S{}^2}{8\pi^2 f^2(L_{ls} + L'_{lr})} = c.\frac{U^2}{f^2} \qquad (31-3)$$

نلاحظ من المعادلة (31−3) أنه عندما يتغير التردد، يتغير أيضاً العزم الأعظمي $\mathbf{T_{e.m}}$، أي تتغير قدرة تحميل المحرك (نسبة العزم الأعظمي $\mathbf{T_{e.m}}$ إلى عزم الحمولة $\mathbf{T_L}$).

ولكي يؤمن عمل مستقر للمحرك التحريضي يجب أن تؤمن له قدرة تحميل كافية أي:

$$\frac{T_{e.m}}{T_L} \geq 1.7 \div 2$$

وبالتالي عند تغيير التردد يجب أن يتحقق الشرط التالي:

$$\frac{T_{e.m}}{T_L} = \frac{T'_{e.m}}{T'_L} = \text{constant} \qquad (32-3)$$

بتعويض العلاقة (31−3) في العلاقة (32−3) نجد:

$$\frac{T_{e.m}}{T'_{e.m}} = \frac{T_L}{T'_L} = \frac{c.\frac{U^2}{f^2}}{c.\frac{U'^2}{f'^2}} = \frac{U^2}{U'^2} \cdot \frac{f'^2}{f^2} \qquad (33-3)$$

حيث:

U و $\mathbf{T_{e.m}}$ و $\mathbf{T_L}$ يمثل الجهد والعزوم الموافقة للتردد **f**.

U' و $\mathbf{T'_{e.m}}$ و $\mathbf{T'_L}$ يمثل الجهد والعزوم الموافقة للتردد **f'**.

وبالتالي نحصل على العلاقة الأساسية التي تربط بين تردد وتوتر المنبع وحمولة المحرك والتي يجب أن تتحقق أثناء تنظيم سرعة المحرك بتغيير التردد حتى تبقى قدرة تحميل المحرك ثابتة، أي:

$$\frac{U}{U'} = \frac{f}{f'}\sqrt{\frac{T_L}{T'_L}} \qquad (34-3)$$

وعند التحميل بحمولة ذات عزم ثابت: T_L = **constant** تأخذ المعادلة (3−34) الشكل التالي:

$$\frac{U}{U'} = \frac{f}{f'}$$

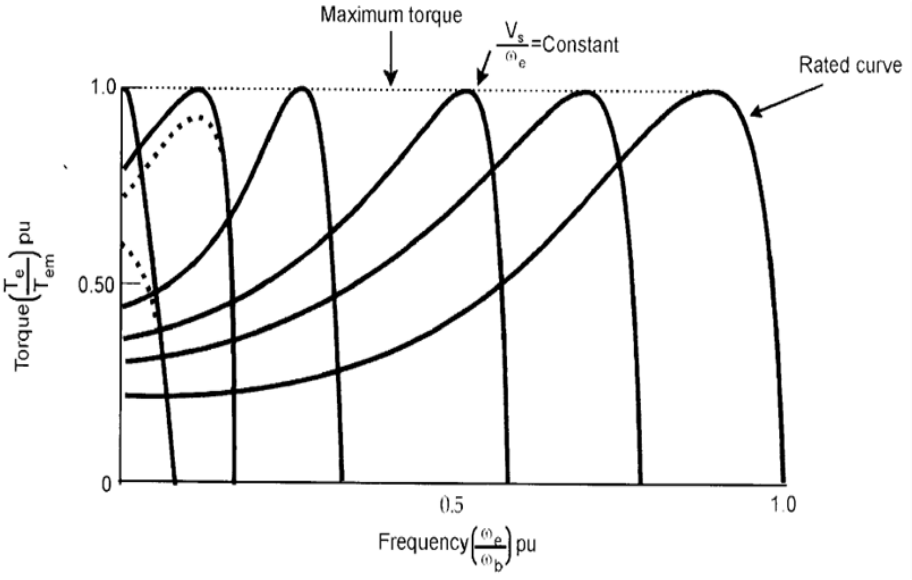
$$\frac{U}{f} = \frac{U'}{f'}$$

أي أنه يجب تغيير توتر المنبع بحيث يتناسب طرداً مع تردده وذلك ضمن حدود معينة.[8]

أ- **عند تنظيم السرعة وفق النسبة V/F=constant يجب أن تكون هذه النسبة ضمن حدود معينة:**

- تؤدي النسبة المنخفضة لـ $V/f = \text{constant}$ إلى انخفاض الفيض المغناطيسي في الثغرة الهوائية، وبالتالي انخفاض عزم المحرك مؤدياً لحدوث مشاكل في عمل المحرك وخاصة في أثناء الإقلاع وفي أثناء التشغيل عند سرعات منخفضة، كما يؤدي انخفاض هذه النسبة إلى انخفاض استجابة المحرك لتغيرات الحمولة (نقصان قدرة تحميل المحرك). يؤدي انخفاض الجهد إلى مرور تيارات أعلى من التيارات الاسمية في المحرك مؤدياً لارتفاع درجة حرارة المحرك.
- تؤدي النسبة العالية لـ $V/f = \text{constant}$ إلى الإشباع الزائد **(over saturation)** مؤدياً إلى زيادة التيار الردي دون أن يزداد العزم، وهذا بدوره يؤدي إلى تسخين زائد للمحرك.

يوضح الشكل (3-26) المميزات الميكانيكية للمحرك التحريضي عند تغذيته بنسبة جهد إلى تردد ثابتة. إن العزم الأعظمي يحافظ على قيمته تقريباً باستثناء منطقة الترددات المنخفضة، حيث ينخفض فيض الثغرة الهوائية في هذه المنطقة بسبب هبوط الجهد على الثابت. للحفاظ على ثبات العزم عند الترددات المنخفضة نحتاج إلى زيادة جهد الثابت قليلاً (تكبير النسبة ضمن هذا المجال) كما هو موضح بالشكل (3-27) الخط المنقط.



الشكل (3-26) المميزات الميكانيكية لمحرك تحريضي عند تغذيته وفق نسبة $^{V}/_{f}$ ثابتة

يتميز المحرك المغذى بهذا المبدأ بمايلي:

- انزلاق منخفض عند سرعات مختلفة، وبالتالي ضياعات منخفضة.
- كفاءة عالية.
- على الرغم من انخفاض عزم الإقلاع عند التردد الأساس، إلا أن المحرك بإمكانه أن يقلع بعزم عالٍ عند الترددات المنخفضة.
- عدم وجود تيار إقلاع عالٍ يحمي المحرك من الصدمات الكهربائية، ويطيل من عمره الافتراضي.[9]

ب- مجالات العمل عند التحكم وفق مبدأ .V/F=const

Drive Operating Regions with V/F=const.

أولاً- مجال العزم الثابت:

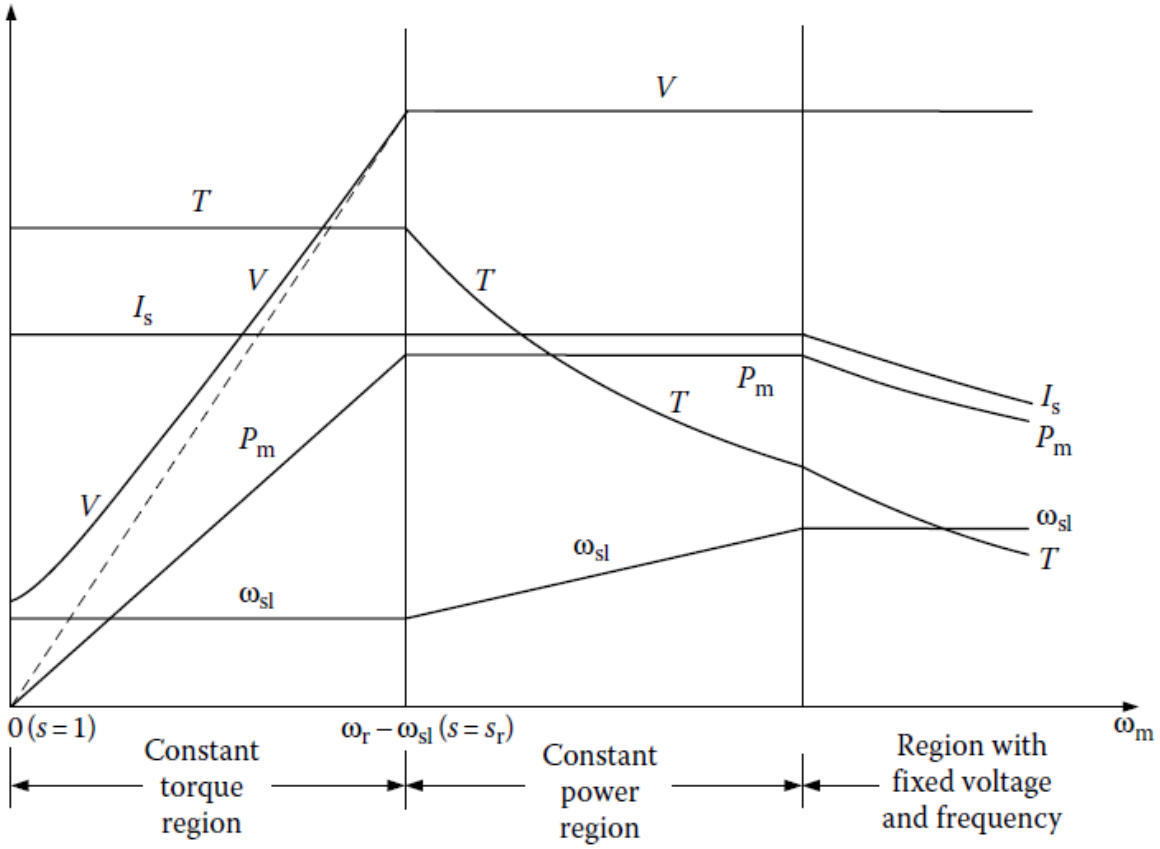
خلال هذه المرحلة يزداد كل من التردد والتوتر حتى الوصول إلى القيم الاسمية لهما، مع الحفاظ على النسبة **V/F** ثابتة وهذا يؤدي إلى ثبات كل من العزم والانزلاق والفيض المغناطيسي .$\Phi=v/\omega e$ = const.

ثانياً– مجال الاستطاعة الثابتة:

عند ترددات وجهود عالية لا يمكن المحافظة على العمل بنسبة ثابتة نتيجة ظهور حالات التشبع لذلك نعمل على استطاعة ثابتة (تيار وجهد محرك ثابتين) وعزم محرك متغير (متناقص) كما نلاحظ في هذه المرحلة ازدياد الانزلاق.

ثالثاً– مجال الانزلاق الثابت:

تتميز هذه المرحلة ببقاء التوتر ثابت ويستمر العزم بالتناقص، كذلك الأمر بالنسبة للاستطاعة التي تتناقص نظراً لتناقص العزم بشكل أكبر من تزايد التردد والذي يؤدي إلى تناقص في تيار الثابت كون الجهد ثابت.[8][9]



الشكل (3–27) المميزات الميكانيكية وأنظمة عمل محرك تحريضي يعمل بمبدأ .V/F=const

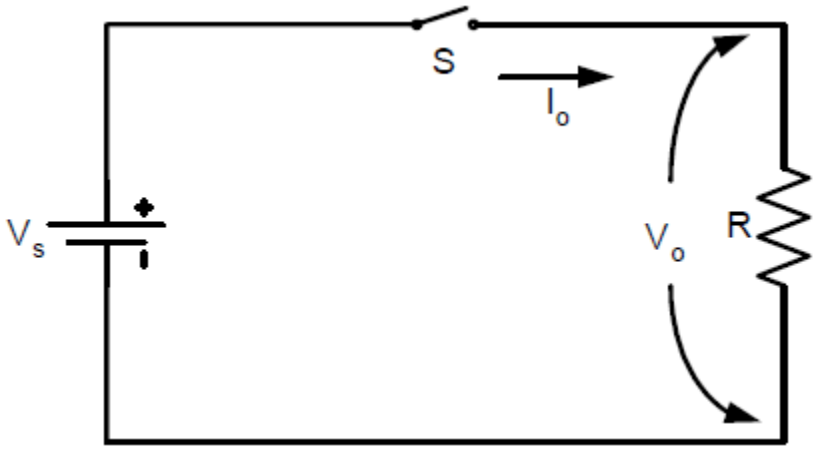
منحنيات العزم، وتيار الثابت، والانزلاق والفيض لنفس المحرك

٣-٢-٥- المقطعات DC-DC converter

تستخدم مقطعات التيار المستمر للتحويل من تيار مستمر ذي جهد ثابت القيمة إلى تيار مستمر ذي جهد متغير القيمة، وتستخدم مقطعات التيار المستمر على نطاق واسع في التطبيقات الصناعية مثل القاطرات الهجينة والكهربائية والسيارات والرافعات والمصاعد ....الخ، وتلعب مقطعات التيار المستمر دوراً مهماً في نظم الكبح بإعادة القدرة ويؤدي استخدامها إلى توفير كبير في الطاقة في نظم النقل.

٣-٢-٥-١- مبدأ عمل المقطعات principle of Dc chopper operation

توضح الدارة المبينة في الشكل (3-28) آلية عمل المقطع، تتكون الدارة من حمل (عبارة عن مقاومة) وقاطع ومنبع توتر مستمر.



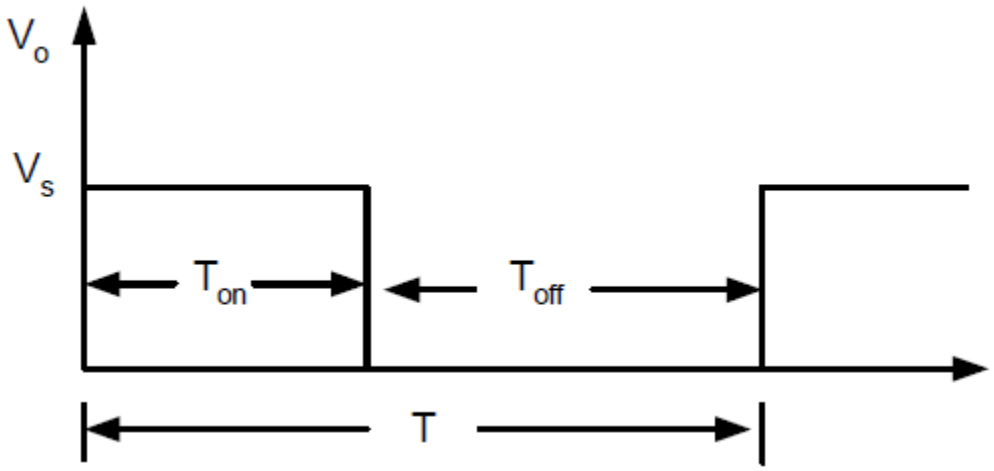
الشكل(3-28) آلية عمل المقطع

عند توصيل القاطع لفترة زمنية مقدارها T_{on} فان توتر المصدر سيطبق على الحمل، وإذا تم فصل القاطع لمدة زمنية T_{off} فان التوتر على طرفي الحمل سيكون مساوياً للصفر، وبذلك تكون موجات التوتر موضحة بالشكل (3-29) ويكون التوتر المتوسط $\mathbf{V_0}$ المطبق على الحمل موضح بالعلاقة:

$$V_0 = \frac{T_{on}}{T} V_s = DV_s \qquad (35-3)$$

حيث : الدور (الزمن الكلي) $T = T_{on} + T_{off}$

V_s: توتر المنبع.



الشكل (3–29) توتر خرج المقطع

نلاحظ من المعادلة السابقة أنه يمكن التحكم في التوتر عن طريق التحكم في فترة توصيل القاطع **DT**

يجب الأخذ بعين الاعتبار أن يكون تردد المقطع $\mathbf{F = \frac{1}{T}}$ عالياً لذا يجب أن يكون القاطع المستخدم أحد عناصر الكترونيات القدرة الكهربائية :

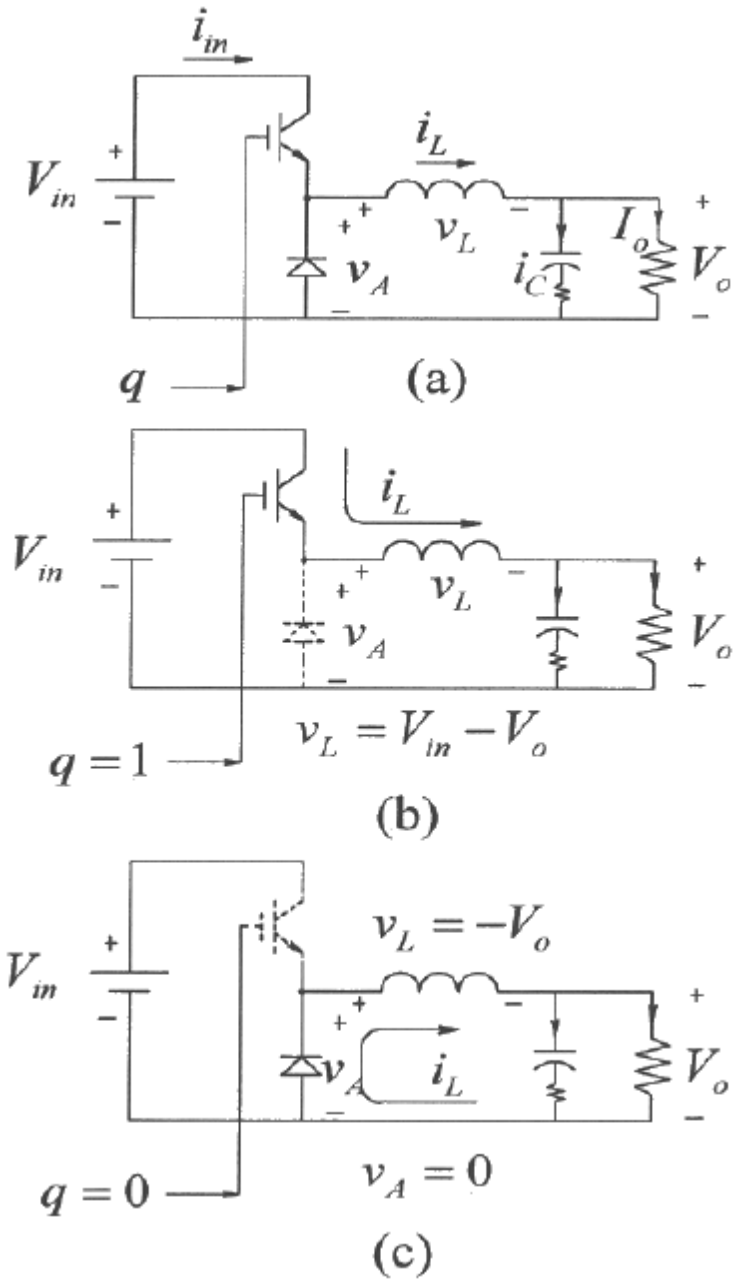
١– المقطعات الثيرستورية: ويستخدم فيها الثيرستور كقاطع وتتميز بالقدرات العالية ولكنها تحتاج إلى دارات حجز قسرية.

٢– المقطعات الترانزستورية: ويستخدم فيها ترانزستور القدرة **(IGBT)** أو **(MOSFET)** كقاطع وتمتاز بعدم حاجتها إلى دارات حجز قسرية، حيث يعمل في حال وجود نبضة قدح على بوابته ويحجز عند غياب نبضة القدح.

يمكن تقسيم المقطعات من حيث استخدامها إلى نوعين رئيسيين هما المقطعات الخافضة للتوتر والمقطعات الرافعة للتوتر.

٣–٢–٥–٢– المقطع الخافض للتوتر Buck Converter

في هذا النوع من المقطعات تكون القيمة المتوسطة للجهد على أطراف الحمل أقل من جهد المنبع، يبين الشكل (3-30-a) مقطع خافض للتوتر مكون من منبع تيار مستمر، ترانزستور، ديود موصل على التفرع مع الحمل، بالإضافة إلى الحمل وملف ومكثف الترشيح.

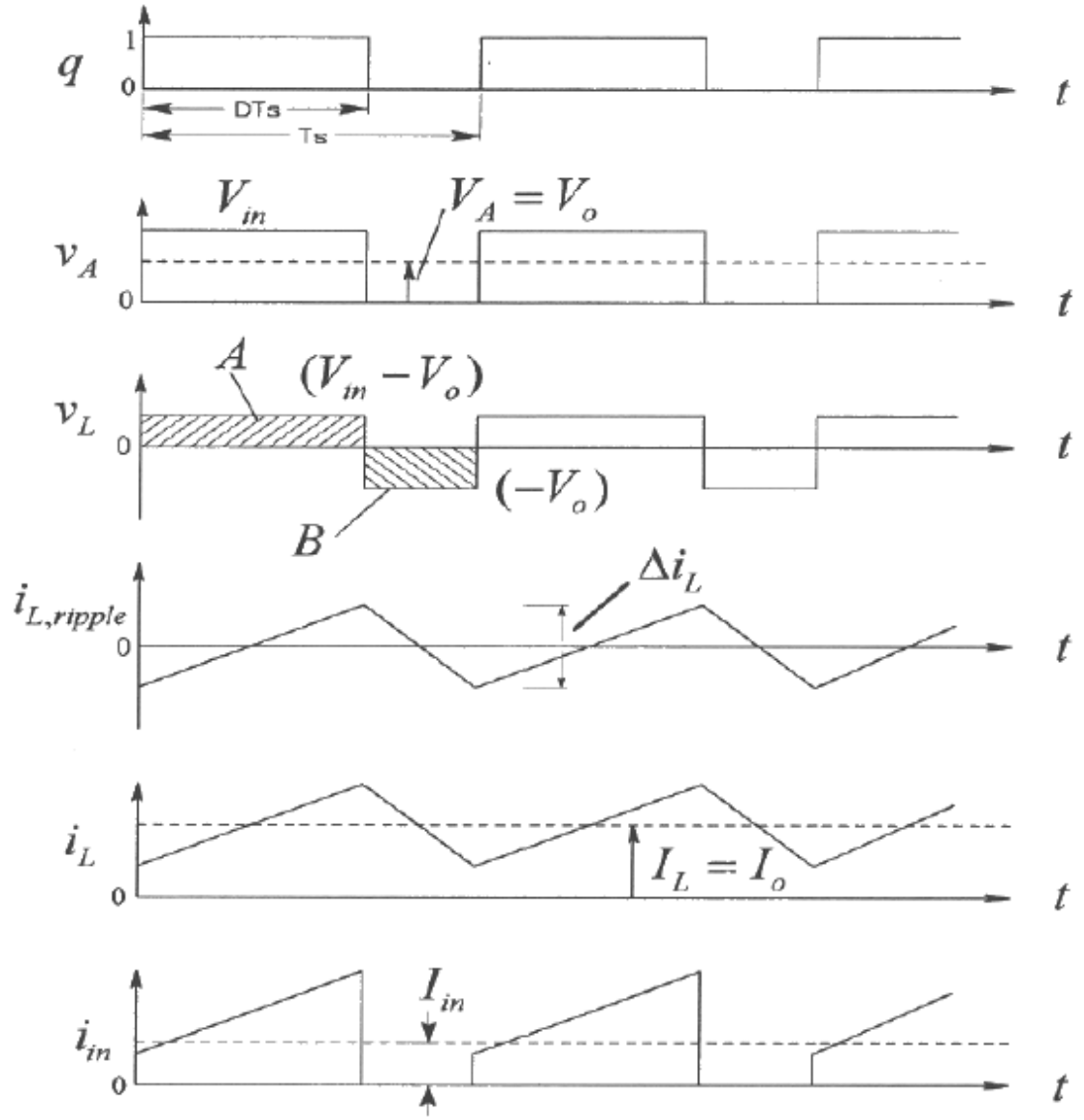


الشكل (3–30) المقطع الخافض للتوتر

عند توصيل الترانزستور يمر تيار في الملف فيختزن قدرة الشكل (3-30-b)، وعند فصل الترانزستور يتابع التيار مروره في الملف مكملاً دارته عبر الديود والحمل كما هو مبين في الشكل(3-30-c).

يبين الشكل (3-31) فترات توصيل وفصل الترانزستور بالإضافة إلى توترات كلاً من الملف والحمل وتيارات المنبع والملف.

تتراوح قيمة توتر الملف بين القيمتين ($v_{in}-v_0$) و ($-v_0$). إن معدل توتر الملف سيكون مساوياً للصفر، كما هو مبين في الشكل (3-31) فان توتر الملف خلال فترة فصل الترانزستور سيكون مساوياً بالمطال لتوتره خلال توصيل الترانزستور لكن بقيمة سالبة.



الشكل (3-31) توترات وتيارات المقطع الخافض للتوتر

يعطى تيار الملف بالعلاقة:

$$i_L(t) = I_L + i_{L,ripple}(t) \qquad (36-3)$$

القيمة الوسطية للتيار $\mathbf{I_L}$ يفرضها نوع الحمل، بينما قيمة التيار $\mathbf{i_{L,ripple}}$ يحددها توتر الملف $\mathbf{V_L}$ حيث ترتفع موجة التيار عندما تكون قيمة التوتر $\mathbf{V_L}$ موجبة وينخفض عند القيمة السالبة لـ $\mathbf{V_L}$.

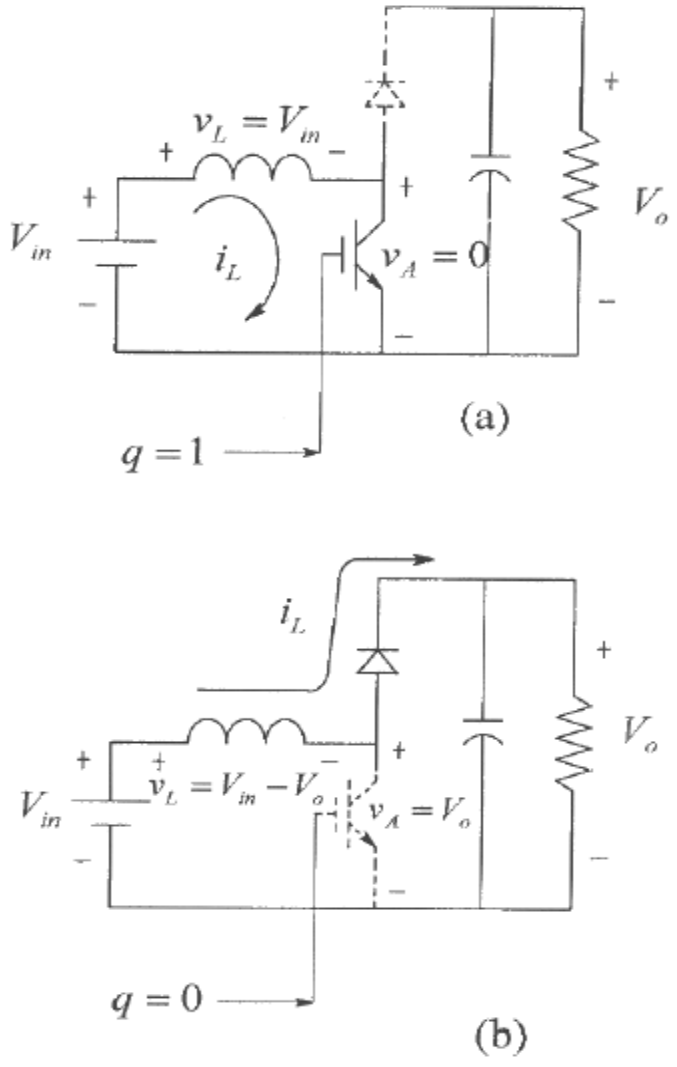
العلاقة بين توتر المنبع وتوتر الخرج:

$$\mathbf{V_0 = V_A = DV_{in}}$$

من المعادلة السابقة وبما أن قيمة $\mathbf{0} < D < 1$ فان التوتر المطبق على الحمل سيكون أقل من توتر المنبع.

٣-٢-٥-٣- المقطع الرافع للتوتر Boost Converter

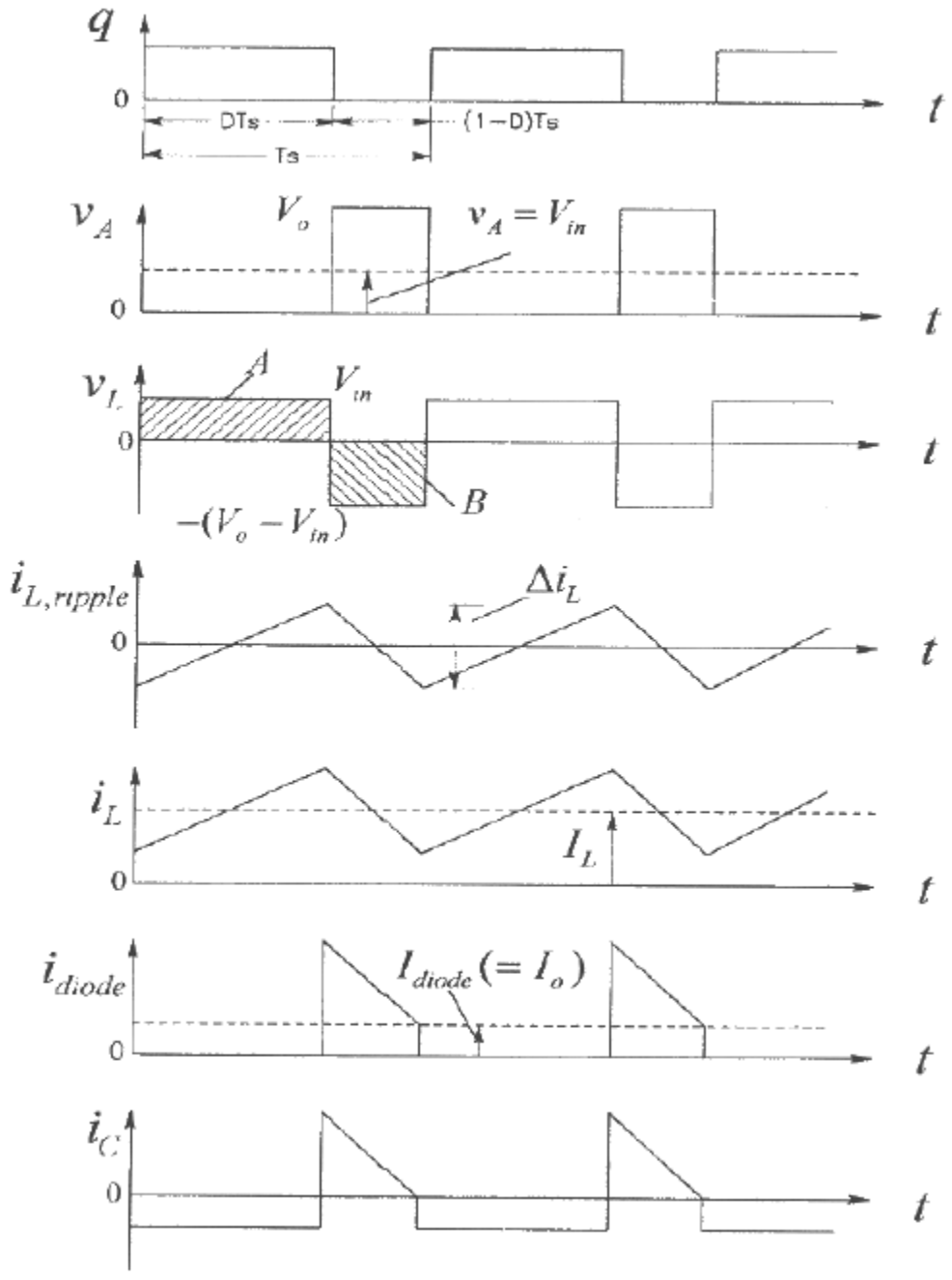
في هذه الحالة تكون القيمة المتوسطة للتوتر على أطراف الحمل أكبر من توتر المنبع، تتكون دارة المقطع الرافع للتوتر كما هو مبين في الشكل (3-32) من منبع تيار مستمر وديود وترانزستور بالإضافة إلى الحمل.



الشكل (3-32) المقطع الرافع للتوتر

عند توصيل الترانزستور يطبق توتر المنبع v_{in} على الملف الشكل (3-32-a) مؤدياً إلى ارتفاع تيار الملف خطياً وزيادة القدرة المختزنة في الملف، وعند فصل الترانزستور يمر التيار عبر الديود والحمل الشكل (3-32-b) وفي هذه المرحلة يفرغ الملف القدرة المختزنة فيه عبر الحمل.

كما يوضح الشكل (3-33) فترات عمل الترانزستور، وتوترات وتيارات الملف، حيث يلاحظ أن توتر الملف V_L يتراوح بين القيمتين V_{in} و $(V_0 - V_{in})$ - .



الشكل (3–33) توترات وتيارات المقطع الرافع للتوتر

إن النسبة مابين توتر الخرج إلى توتر الدخل يمكن حسابها من العلاقة التالية:

$$V_{\mathrm{in}}(\mathrm{DT_s}) = (\mathrm{V_0} - \mathrm{V_{in}})(1 - \mathrm{D})\mathrm{T_s} \qquad (37-3)$$

ومنه:

$$\frac{V_0}{\mathrm{V_{in}}} = \frac{1}{1 - \mathrm{D}} \qquad (38-3)$$

من المعادلة (3−38) نلاحظ أن توتر الحمل أكبر من توتر المنبع **($\mathbf{V_0 > V_{in}}$)** وبذلك يكون المقطع قد أدى الدور المطلوب منه.[12]

٣-٣- نظام استعادة القدرة الكهربائية بالكبح

regeneration energy brake system

- **مقدمة:**

تستخدم القاطرات الهجينة والكهربائية بالإضافة إلى السيارات الكهربائية محركات الجر الكهربائية في أنظمة الجر الخاصة بها، تمتلك هذه المحركات خاصية الكبح وتحويل الطاقة الحركية إلى طاقة كهربائية (القانون الأساسي في الفيزياء الطاقة لا تفنى ولا تخلق من العدم إنما تتحول من شكل إلى آخر).

خلال مرحلة الجر، تعمل المحركات الكهربائية بواسطة الطاقة الكهربائية المقدمة لها من نظام التخزين الكهربائي محولة هذه الطاقة إلى طاقة حركية تساهم في تحريك العجلات، وعند الانتقال إلى مرحلة الكبح فان الطاقة الحركية للقاطرة تعمل على تدوير المحرك لينتقل بدوره إلى العمل كمولد يقدم الطاقة الكهربائية بدلاً من استهلاكها، والتي يتم حقنها بواسطة المبدلات الالكترونية في نظام التخزين.

يحتاج نظام الكبح باستعادة القدرة الكهربائية إلى زمن لإيقاف القاطرة بالإضافة إلى عدم قدرته على إيقافها بشكل كامل لذلك لابد من استخدام نظام كبح ميكانيكي يضمن الوقوف التام.

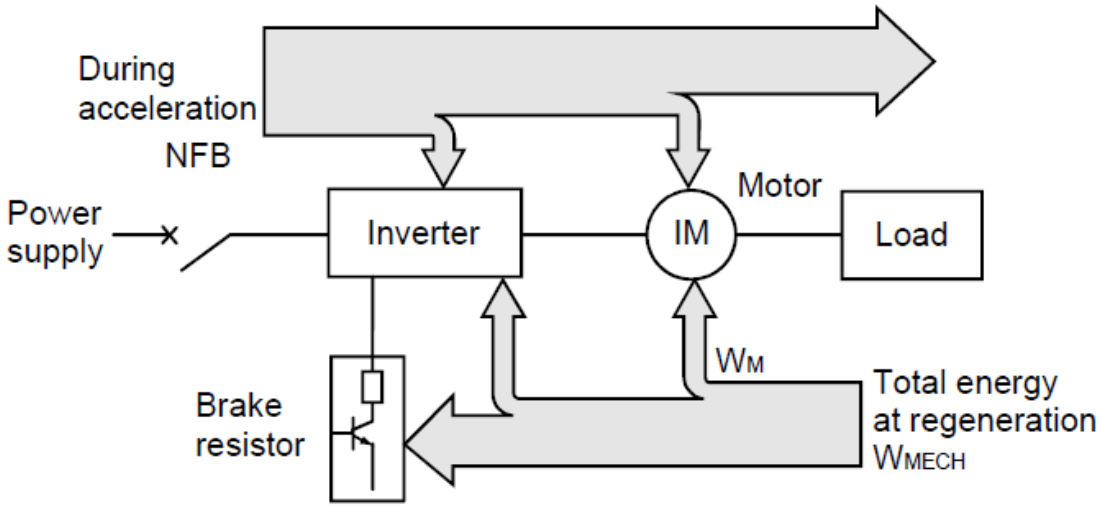
من أنواع نظم الكبح الكهربائي المستخدمة في نظم الجر الهجينة والكهربائية:

- الكبح الديناميكي
- الكبح باستعادة القدرة الكهربائية وتخزينها

٣-٣-١- الكبح الديناميكي Dynamic Brake

يستعمل هذا النوع من نظم الكبح في المركبات الهجينة، الآلات الصناعية، وفي المصاعد **elevators**. تعتمد القاطرات الهجينة في نظام الجر الخاص بها على المحركات الكهربائية القادرة على العمل كمولد خلال فترة الكبح وإعادة الطاقة الكهربائية والتي تبدد في الوسط الخارجي كطاقة حرارية من خلال نظام الكبح الديناميكي كما هو مبين بالشكل (3-34).

مما سبق نجد أن الكبح الديناميكي يبدد الطاقة الكهربائية المسترجعة حرارياً عبر شبكة من المقاومات عادة ما تتوضع على السطح الخارجي للقطار كي تبدد هذه الطاقة في الوسط الخارجي.



الشكل (3–34) مبدأ عمل نظام الكبح الديناميكي

كما يمكن الاستفادة من الطاقة الحرارية في ظروف الطقس الباردة عبر استخدامها في مكيفات القطار في فصل الشتاء. في الكبح الديناميكي يتم استخدام المقاومات المتغيرة كي يتم تنظيم التيار المار عبرها عن طريق تغيير قيمة هذه المقاومات الشكل (3-35)، وبالتالي التخفيض من الطاقة الحركية للقطار مسببة إنقاص سرعته حسب العلاقة التالية:

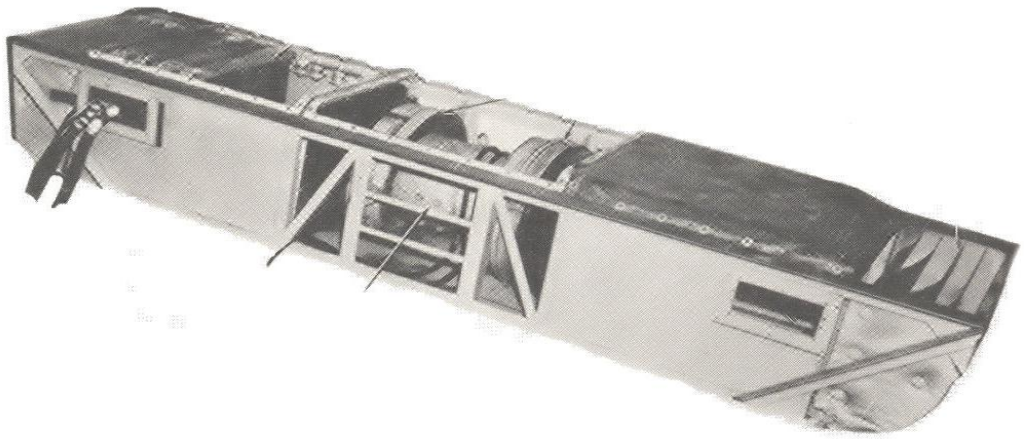
$$KE = {}^{1}/_{2}\, mV^2 \qquad (39-3)$$

حيث:

KE: الطاقة الحركية **kinetic energy.**

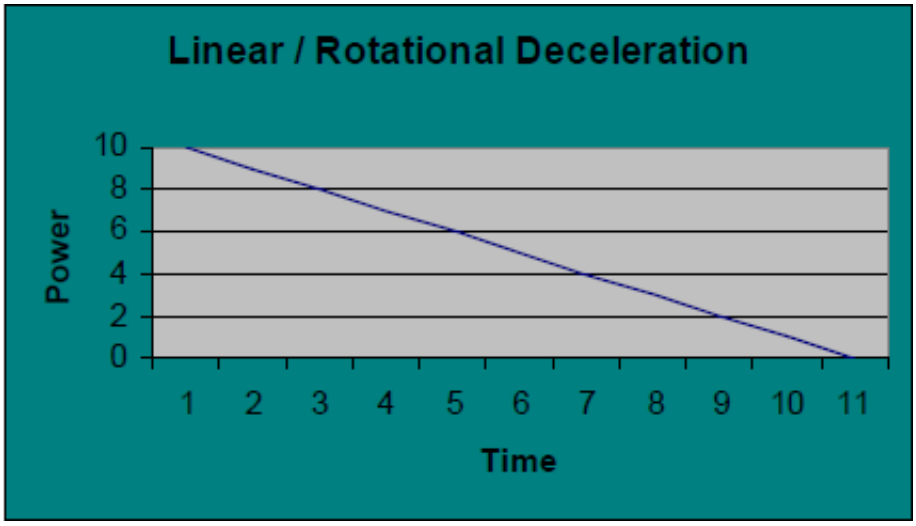
m: الكتلة **mass.**

V: السرعة **velocity.**



الشكل (3–35) شبكة مقاومات مستخدمة في الكبح الديناميكي [15]

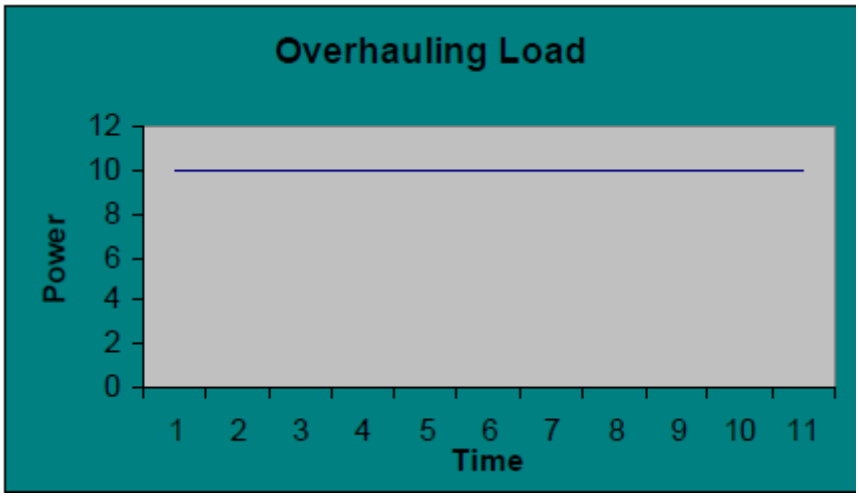
أثناء فترة تباطؤ القطار حتى التوقف فستكون الطاقة الناتجة عن عملية الكبح متخامدة كما هو واضح في الشكل (3-36).



الشكل (3-36) الطاقة الناتجة عن الكبح على طريق مستوية [16]

أما في حال كبح القطار أثناء سيره على طريق منحدر بهدف الحفاظ على سرعته ثابتة فان الطاقة المسترجعة والناتجة عن عملية الكبح تكون ثابتة غير متخامدة كما هو موضح في الشكل (3-37).

إن الطاقة الناتجة عن كبح القاطرات تكون كبيرة القيمة، فمن أجل قطار كتلته **5000 ton** لتخفيض سرعته من **30 mph** إلى **25 mph** يجب تبديد طاقة قدرها **124,640 kJ (34.6 kWh)** عبر نظام الكبح الديناميكي.[15]



الشكل (3-37) الطاقة الناتجة عن الكبح على طريق منحدرة [16]

يبين الجدول (3-2) قوانين حساب كلا من استطاعة محور المحرك الميكانيكية بالإضافة إلى قانون حساب استطاعة الكبح وهذه الطريقة خاصة بالكبح الديناميكي كونها تعتمد في الحساب على شبكة المقاومات.

الجدول (3-2) حساب استطاعة محور المحرك والكبح [17]

Equation	Symbol	Measurement method
$P_{shaft} = T_L \Omega$	P_{shaft} – output power of shaft, W T_L – motor torque, Nm Ω – angular speed, rad/sec	Ω angular speed measured and T motor torque estimated by motor control algorithm
$P_{brake} = i_{brake}^2 R_{brake}$	P_{brake} – output energy from brake resistor, W i_{brake} – brake current, A R_{brake} – resistance brake resistor, Ω	i_{brake} brake current measured by probes and Power analyser R_{brake} resistance brake resistor measured by a multimeter.

٣-٣-١-١- مزايا الكبح الديناميكي Dynamic Brake Advantages

١- الفائدة الأساسية لنظم الكبح الديناميكية هي عدم اعتمادها على الاحتكاك الميكانيكي، وبالتالي لا تسبب تآكل عجلات القطار.

٢- إمكانية التحكم الواسع بخصائص الكبح، كالفترة الزمنية الواجب تطبيق الكبح خلالها، والتحكم بقوة الكبح اللازمة.

٣- في الكبح الديناميكي لا يحدث انزلاق للعجلات نتيجة قوة الكبح المطبقة كما هو الحال في الكبح الميكانيكي، ولا يؤدي إلى حدوث أضرار في قضبان السكة الحديدية.

٣-٣-١-٢- مساوئ الكبح الديناميكي Dynamic Brake Disadvantages

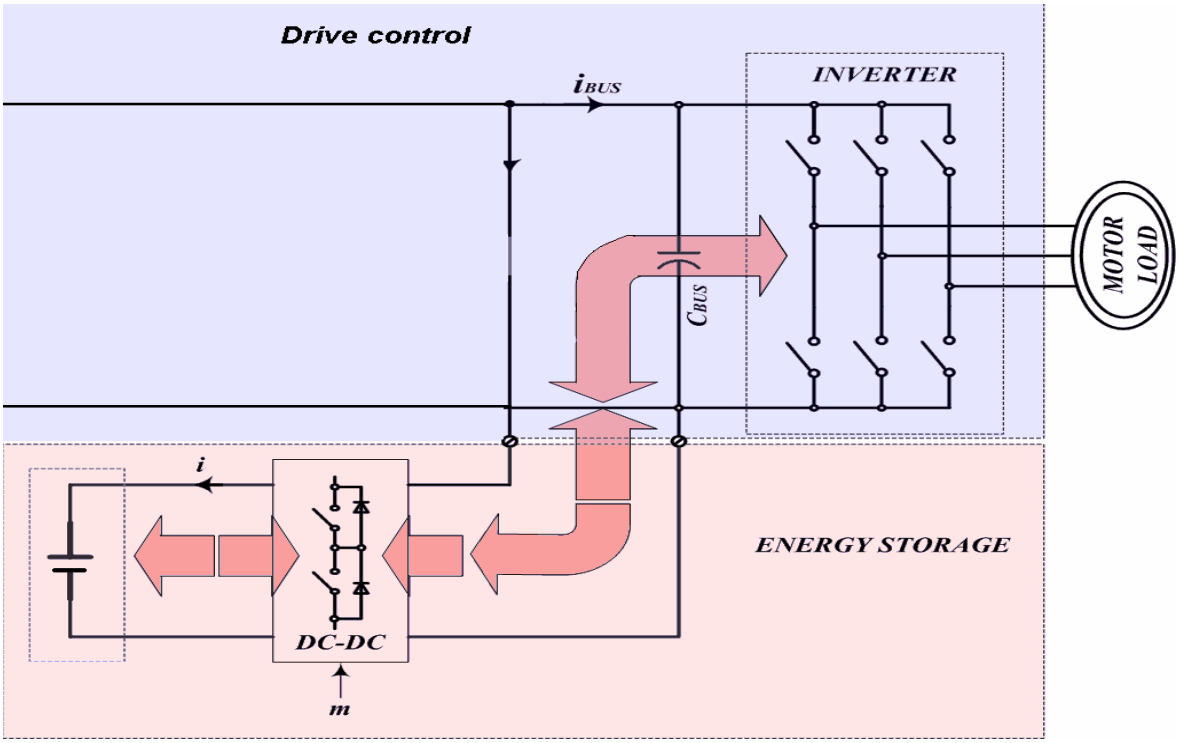
تتلخص مساوئ هذا النوع من نظم الكبح في ضياع الطاقة الكهربائية المسترجعة وتبديدها حرارياً دون الاستفادة منها وبالتالي لا تساهم في الإقلال من استهلاك الوقود وانبعاث الغازات الناجم عن احتراق الوقود.

٣-٣-٢- الكبح باستعادة القدرة الكهربائية وتخزينها

regeneration energy brake with storage system

يشابه هذا النوع من الكبح إلى حد كبير الكبح الديناميكي من حيث قدرته على استرجاع الطاقة الكهربائية، ولكنه يمتاز عنه بتخزين هذه الطاقة في نظم تخزين كهربائية والاستفادة منها لاحقاً.

عند كبح القطار وكما ذكرنا سابقاً، ينتقل المحرك للعمل كمولد يحول الطاقة الحركية للقطار إلى طاقة كهربائية، ليتم تحويلها عبر المعرج إلى الشكل المستمر لتحقن في باسبار التيار المستمر، وتخزن هذه الطاقة في نظام التخزين المرتبط بالباسبار الشكل(3-38)، ويتم الاستفادة من هذه الطاقة لاحقاً في تغذية محركات الجر أو الأجهزة الأساسية في القطار.



الشكل(3-38) نظام الكبح باستعادة القدرة الكهربائية وتخزينها

مما سبق نجد أن الكبح باستعادة الطاقة الكهربائية يمتاز عن الكبح الديناميكي بقدرته على الاستفادة من الطاقة الكهربائية المسترجعة بدلاً من تبديدها في الوسط الخارجي وهذا بدوره يؤدي إلى:

١- انخفاض استهلاك الوقود من قبل محرك الاحتراق الداخلي (الديزل)

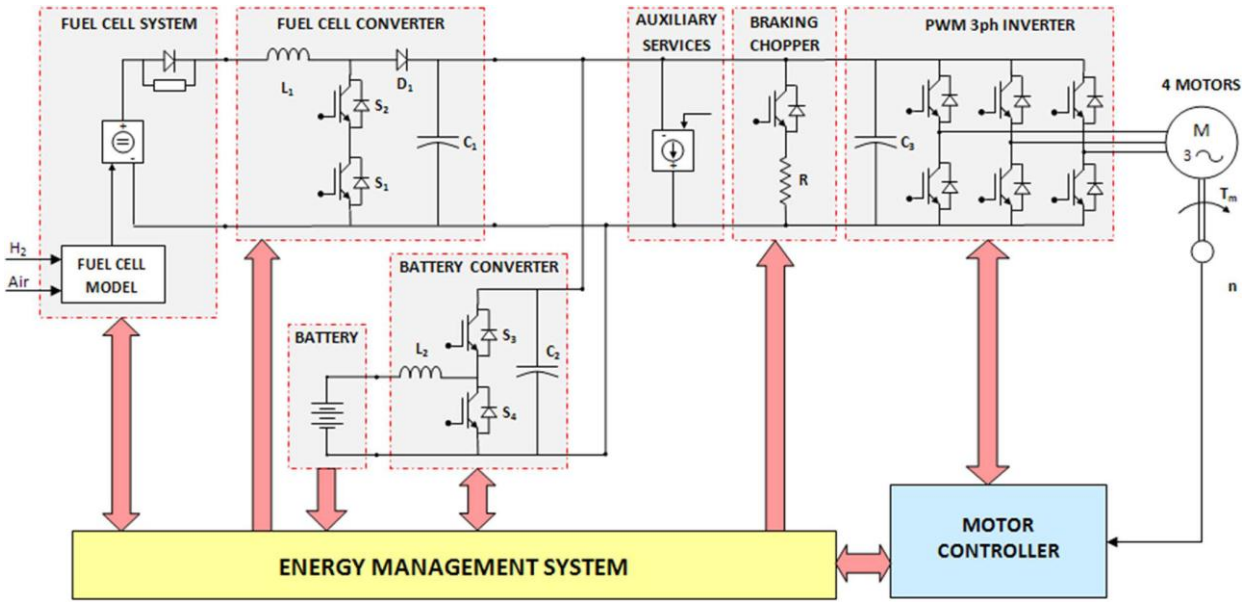
٢- انخفاض كمية الغازات الناتجة عن احتراق الوقود.

٣- ارتفاع مردود نظام الجر الهجين.

بالإضافة للميزات التي ذكرناها سابقاً في نظام الكبح الديناميكي.

لا يمكن الاستغناء عن نظام الكبح الديناميكي في نظام الجر الذي يعتمد على نظام الكبح باستعادة القدرة الكهربائية، وذلك للسبب التالي:

خلال مرحلة الكبح باستخدام نظام الكبح باستعادة القدرة الكهربائية يتم شحن نظام التخزين الكهربائي، وعند شحن النظام بشكل كامل يتم تفعيل نظام الكبح الديناميكي ليتم تبديد الطاقة الكهربائية الفائضة حرارياً الشكل(3-39).



الشكل(3–39) نظام الكبح في قاطرة هجينة [18]

٣-٣-٣- كبح المحركات التحريضية Braking of Induction Motors

يتم كبح أو فرملة المحركات التحريضية بتدوير الجزء الدائر باتجاه يعاكس اتجاه دوران الساحة المغناطيسية المتولدة في ملفات الجزء الثابت ، حيث تصبح عندها $N_r<0$ (نعتبر اتجاه N_e هو الاتجاه الموجب) ، ويتم ذلك بوصل الآلة بآلة أخرى تدور بعكس اتجاه دوران المحرك التحريضي حيث يصبح عندها الانزلاق:

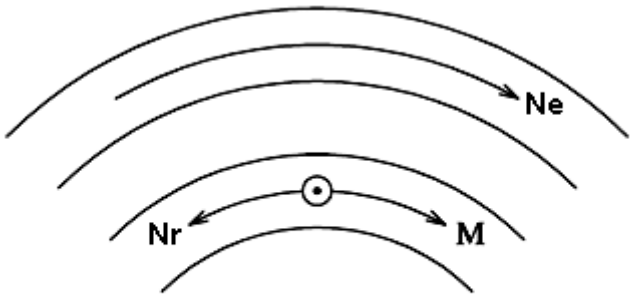
$$S = \frac{N_e - (-N_r)}{N_e} = \frac{N_e + N_r}{N_e} > 1 \qquad (40-3)$$

كما يمكن تحقيق ذلك بعكس اتجاه دوران الساحة المغناطيسية وذلك بتبديل موضعي طورين من أطوار الجزء الثابت الموصل مع المنبع الكهربائي، بحيث تبقى سرعة دوران المحرك كما في السابق، عندها يكون الانزلاق:

$$S = \frac{-N_e - N_r}{-N_e} = \frac{N_e + N_r}{N_e} > 1 \qquad (41-3)$$

وتصبح استطاعة الخرج $\mathbf{P_2 = R_r' \frac{1-S}{S} I_r'^2}$ سالبة.

على الرغم من أن الحركة النسبية بين الفيض المغناطيسي ونواقل الجزء الدائر تكون مشابهة لحالة التشغيل كمحرك ، إلا أن العزم المتولد في حالة الكبح يعاكس الحركة وذلك كما هو مبين في الشكل(3-40).

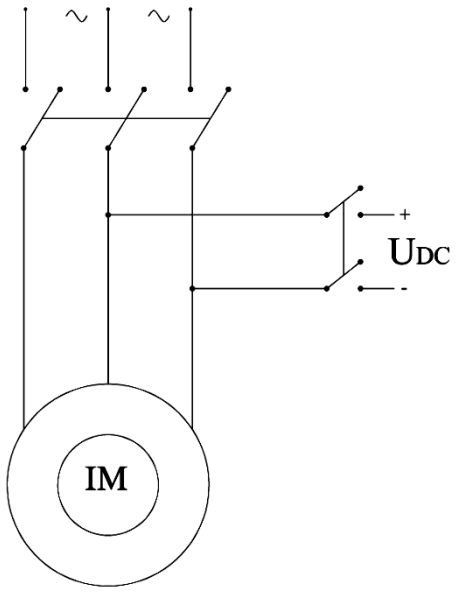


الشكل(3-40) اتجاه السرعة والعزم في حالة الكبح

في هذه الطريقة من الكبح الذي يتم بعكس التيار أو بعكس التوصيل(Plugging) ، فإن كل الطاقة الكهربائية والميكانيكية تتبدد داخل المحرك على شكل ضياعات حرارية تماماً كما يحدث في محركات التيار المستمر وتكون الدارة المكافئة مشابهة للدارة المكافئة للمحرك التحريضي ولكن بقيم انزلاق أكبر من الواحد . يلاحظ أيضاً أنه بزيادة تردد تيار الجزء الدائر $\mathbf{f_2 = S.f_1}$ الذي يكون أعلى من تردد الشبكة $\mathbf{f_1}$ تنشأ ضياعات إضافية في دارة الجزء الدائر .

إن هذه الطريقة من الكبح تكون مفيدة جداً عندما يلزم إيقاف سريع للمحرك التحريضي ، أما أهم سيئاتها فهي نشوء ضياعات كبيرة في ملف الجزء الدائر وكذلك ظهور تيارات عالية أثناء تبديل الطورين .

نظرياً يحدد عمل الآلة التحريضية على المنحني الدائري ككابح في المجال $1 < S < \infty$ وعملياً في المجال $1 < S < 2$.أما في الحالات التي تتطلب أن يكون الكبح سريعاً ودقيقاً ، أو عندما نريد منع حادث طارئ في الآلة أو مع العاملين بها ولتجنب حدوث عطل يؤثر مباشرةً في إنتاجية الآلة، يستعمل الكبح الديناميكي الذي يتم تحقيقه بفصل ملفات الجزء الثابت للمحرك من الشبكة ووصل طورين منها مباشرةً إلى مصدر تيار مستمر مع ترك ملفات الجزء الدائر مقصورة (في حالة الدائر الملفوف تقصر ملفاته على مقاومات خارجية) وذلك حسب الشكل المبين.



الشكل(3-41) آلية الكبح الديناميكي في المحرك التحريضي

كما يمكن كبح المحركات التحريضية عن طريق التحكم بتردد التغذية المطبقة على المحرك، عند دوران الآلة التحريضية بسرعة أقل من السرعة المحددة بالتردد المطبق تتحول إلى محرك يحول الطاقة الكهربائية إلى ميكانيكية. وبدورانها بسرعة أكبر من سرعتها التزامنية المتعلقة بالتردد المطبق تتحول إلى مولد يحول الطاقة الميكانيكية على محوره إلى طاقة كهربائية، قد تؤدي هذه العملية إلى إيقاف دوران الآلة. يؤدي التخفيض في قيمة السرعة المرجعية إلى دوران محور المحرك بسرعة أعلى من السرعة التزامنية وبالتالي انتقال الآلة للعمل كمولد.

٣-٣-٤- نظم تخزين الطاقة الكهربائية

electric energy storage systems

٣-٣-٤-١- المدخرة الكهربائية electric battery

تخزن القدرة الكهربائية بشكل كيميائي بواسطة الوسيط تفاعلات كهروكيميائية (أكسدة -إرجاع) ويطلق عليها اختصارا **redox** ولكن حالياً يستخدم هذا الاختصار للإشارة إلى النوع الجديد من المدخرات **redox flux batteries** لذلك يجب الانتباه إلى الفرق من حيث المبدأ، جميع المدخرات تعتمد هذا المبدأ ولكن لا يظهر في اسمها.

تعتمد المدخرة على مبدأ تحول الطاقة الكيميائية إلى طاقة كهربائية وبالعكس. فهي تتألف من عدد من الخلايا الفولطية، كل خلية فولطية تتكون من نصفي خلية متصلة على التوالي من قبل موصل اليكتروليتى يحتوي على الايونات السالبة الشحنة (الأنيونات) والايونات الموجبة الشحنة (الكاتيونات). نصف خلية يضم أليكتروليت والقطب الذي تهاجر الأنيونات (الأيونات المشحونة سلباً) إليه، أي المصعد الكهربائي أو القطب الموجب، والنصف الآخر خلية تضم اليكتروليت والقطب الذي تهاجر الكاتيونات (الأيونات المشحونة إيجابيا) إليه، أي الكاثود أو القطب السالب.

٣-٣-٤-٢- المكثفات capacitors

يعتمد مبدأ تخزين القدرة الكهربائية في المكثفات التقليدية على نوع المادة العازلة الموجودة بين اللبوسين والتي يتم التعبير عنها بثابت العازلية والمسافة الفاصلة بين اللبوسين ومساحة اللبوس حسب العلاقة التالية:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{D}$$

من العلاقة السابقة نرى أنه لابد من زيادة النسبة $\frac{S}{D}$ حيث أن المبدأ الأساسي للمكثفات ذات الطبقة الكهربائية المزدوجة هو زيادة النسبة السابقة. حيث **S** المساحة الفعالة و **D** ثخانة العازل بين اللبوسين. الشحنات الكهربائية في المكثفات ذات الطبقة الكهربائية المزدوجة (السالبة والموجبة) تتوضع على مساحة واسعة حيث أن اللبوسان هما من نوع اللبوسات المسامية وعلى مسافة منخفضة جداً من رتبة النانومتر وهذا ما يسمى بالطبقة الكهربائية المزدوجة.

٣-٣-٤-٣- المكثفات فائقة السعة Supercapacitors

وتسمى أيضاً بالمكثفات ذات الطبقة المزدوجة أو المكثفات الكهروكيميائية، كما يطلق عليها أسماء كثيرة منها: **Ultracapacitor , Electrochemical Double Layer Capacitor** و **Supercapacitor**

٣-٣-٤-٣-١- بنية و مبدأ عمل المكثفات ذات الطبقة المزدوجة

build and work principle of Supercapacitors

إن وجود الكترود صلب موجب مع سائل كهرليتي يخلق طبقتين ناقلتين أحدهما مكونة من شحنات موجبة داخل الالكترود والأخرى سالبة داخل الكهرليت، وعلى الجهة الأخرى من المكثف أي على الالكترود السالب نجد مقابله الشحنات الموجبة.

و بتوفر مساحة سطح كبيرة للالكترود، ومسافة صغيرة جداً بين طبقتين للشحنات (الشوارد من السائل الكهرليتي و الشحنات الكهربائية في الالكترود الصلب) فإنَّنا نحصل على سعة كبيرة جداً، و يمكن تحقيق ذلك باستخدام الكترودات ذات خاصية مسامية، مثل الكربون الذي يتميز بهذه الخاصية المسامية و بمساحة سطح قد تصل إلى [m^2] 2000 ومسافة بين الطبقات أقل من [nm] 1 .

الفصل الرابع

نمذجة نظام عمل القاطرة

٤- نمذجة نظام عمل القاطرة

Modeling of locomotive operation system

٤-١- مقدمة introduction

صُممت العديد من البرامج الحاسوبية من قبل باحثين وشركات إنتاج برمجيات، وزودت هذه البرامج بإمكانية المحاكاة للنظم الكهربائية (الشبكات – المولدات – المحركات – أنظمة التحكم بأشكالها – أنظمة القيادة المختلفة ....الخ) ، ولكن هذه الأنظمة تتنوع حسب الغاية منها أو حسب صلاحيتها، بحيث منها ما يصلح لمحاكاة الأنظمة في الحالة المستقرة Steady State فقط ، وبعضها الآخر يمكن استخدامه في محاكاة الأنظمة الكهربائية في كلتا الحالتين المستقرة والديناميكية، فعلى سبيل المثال تُعدّ دراسة السلوك العابر في نظم الشبكات، القيادة الكهربائية، ونظم التحكم من المسائل المهمة. إن المعادلات (الرياضية والتفاضلية) لمعظم الأنظمة اليوم باتت معروفة وتكتب بأشكال مختلفة (نماذج رياضية مختلفة)، ولكن هذه المعادلات الرياضية أحياناً قد تكون غير كافية ويلزم وجود الخبرة مع حل المعادلات التفاضلية والتحليل الفيزيائي لمعرفة مدى دقة النتائج وصلاحيتها.

وفي هذا السياق سنحاول نمذجة النظام المدروس.

٤-١-١- تعريف النمذجة والمحاكاة:

تعرف النمذجة (Modeling) بأنها كل ما يتعلق بالمعادلات الرياضية العادية والتفاضلية لأي نظام، بينما المحاكاة فهي تطويع هذه المعادلات لوضعها ضمن مخطط صندوقي يتكون من مجموعة من العناصر بحيث يقوم كل عنصر بأداء مهمة مطلوبة منه.

١- الحالات التي لا تتوفر فيها نماذج فيزيائية، بحيث يتم من خلالها تحري سلوك هذه الأنظمة ومن ثم مناقشة هذه النتائج ولابُدّ هنا من دخول الخبرة في إمكانية قبول النتائج أو رفضها.

٢- إجراء نمذجة ومحاكاة لنماذج فيزيائية موجودة ومختبرة عملياً، ثم مقارنة نتائج المحاكاة مع النتائج العملية أو المخبرية لهذه النظم من قبل باحثين آخرين.

٣- في حالة توفر النماذج الفيزيائية يقوم بعض الباحثين بإجراء الاختبارات العملية على هذه النماذج ، وبناء نماذج لمحاكاة لهذه الأنظمة بهدف الكشف عن مدى دقة النموذج الرياضي وقدرة النموذج والبرنامج اللذين تم اختيارهما لإعطاء نتائج تكون قادرة على إعطاء نتائج محاكاة متطابقة قدر الإمكان من الواقع العملي وتستخدم مثل هذه الحالة في المخابر الجامعية لتمكين المتعلمين من التعامل مع الحالة الفيزيائية وحالة المحاكاة ومعرفة أسباب الاختلاف في النتائج إن وجدت .

عند استخدام المحاكاة تستخدم العديد من العناصر المتاحة في البيئات البرمجية الجاهزة ، وهذه العناصر تم بنائها اعتماداً على النماذج الرياضية للأنظمة، لذلك يتم عادة استخدام هذه العناصر كصندوق مغلق (Black Box) له مجموعة من المداخل والمخارج دون التدخل في إجراء أي تعديل على هذه العناصر، أما إذا كان الهدف هو تحري تأثر بعض الخصائص بسبب حالات تشغيل غير مستقرة أو حالات تغذية غير نظامية فيجب العودة للنموذج الرياضي وتعديله بما يتناسب مع إمكانية إظهار أثر تلك الحالات ، وبالتالي يجب بناء عنصر يتناسب مع النموذج الرياضي المقترح (الجديد).

استخدامنا في دارستنا لقيادة المحرك التحريضي برنامج (Simplorer)، لما يتمتع به من مزايا أهمها:

١- برنامج اختصاصي في مجال الطاقة الكهربائية.
٢- يضم جميع المكاتب التي نحتاجها في بحثنا.
٣- سهولة التعامل مع عناصر البرنامج.
٤- البساطة في محاكاة النموذج العملي.

ومن السلبيات التي يعاني منها البرنامج:

١- يحتاج الى حجم كبير من ذاكرة الحاسب.
٢- يحتاج الى وقت طويل للحصول على النتائج.

يتكون حل أي وظيفة محاكاة باستخدام برنامج (Simplorer) بشكل أساسي من أربع خطوات كما يلي:

١-إنشاء المشروع حيث أن ملف المشروع هو ملف يحوي ملفات وظيفة محاكاة معينة.
٢-إنشاء النموذج الذي يعتبر عنصر أساسي في أي وظيفة محاكاة. حيث يمكن إنشاء النموذج عبر المحرر النصي للبرنامج (Text Editor) أو باستخدام أداة الإدخال الرسومية لمخططات النماذج (Schematic).
٣-المحاكاة: حيث تجري المحاكاة جميع الحسابات على النموذج وترسل النتائج إلى العرض.
٤- التقييم: حيث يمكن تقييم نتائج المحاكاة وتحليلها باستخدام برنامج تحليل المعطيات ما بعد المعالجة (DAY Post Processor).

٤-١-٢- مكونات نظام جر القاطرة Locomotive components

وهي كما هو موضح بالشكل (4-1)

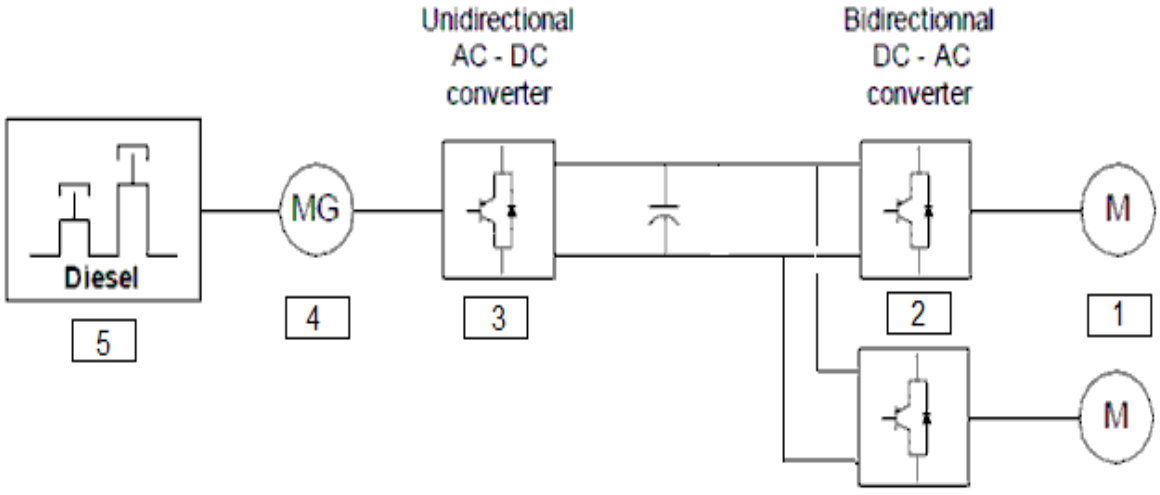
١- محركات الجر التحريضية عدد(2).

٢- المعرجات عدد(2).

٣- جسر تقويم.

٤- مولدة كهربائية.

٥- محرك الاحتراق الداخلي(ديزل).



الشكل(4-1) مكونات نظام الجر المدروس

٤-١-٣- مواصفات القاطرة [19]

- السرعة القصوى(Maximum Speed): 60 km/h.
- الحمل الأعظمي (Maximum Pay Load): 480 Tons at zero slope.
- التوتر المستمر (DC Voltage): 480 V.

لتسهيل عملية نمذجة نظام الجر في القاطرات الكهربائية الهجينة والمكون من عدة محركات جر اقتصرنا على نمذجة محرك واحد.

- بارامترات محرك الجر (Motor parameter): 380 V، 90 KW، 4Pole، 50 Hz.
  $J=2[Kgm^2]$، $X_r'=X_s=0.0162$ [ohm]، $R_r'=0.0207$ [ohm]، $R_s=0.0162$ [ohm].
- سرعة المحرك (Motor Base Speed): 1500 rpm.

- حساب الانزلاق:

يتم حساب قيمة الانزلاق من العلاقة التالية

$$p_2 = m_s v_s^2 \frac{R_r' \frac{1-s}{s}}{(Rs + \frac{R_r'}{s})^2 + (x_s + x_r')^2}$$

m_s : عدد أطوار الثابت.

وبالتعويض ينتج لدينا أن قيمة الانزلاق مساوية لـ S = 0.013.

- حساب سرعة دوران المحرك:

بتعويض قيم كلا من السرعة التزامنية والانزلاق بالعلاقة (3-1) والتي يمكن ان تصاغ بالشكل التالي

$$N_r = N_e(1-S) = 1480[RPM]$$

- حساب التيار المكافئ للجزء الدائر:

$$I_r' = \frac{V_s}{\sqrt{\left(R_s + \frac{R_r'}{S}\right)^2 + (X_s + X_r')^2}}$$

بالتعويض نجد أن قيمة التيار المكافئ مساوية لـ $I_r' = 83{,}16[A]$.

- حساب تيار الثابت:

يمكن حساب قيمة التيار المار في ملفات الثابت من خلال علاقة الاستطاعة

$$P = 3V_s I_s \cos\varphi$$

$I_s = 137$ [A].

- حساب عزم المحرك التحريضي:

ويحسب العزم من العلاقة

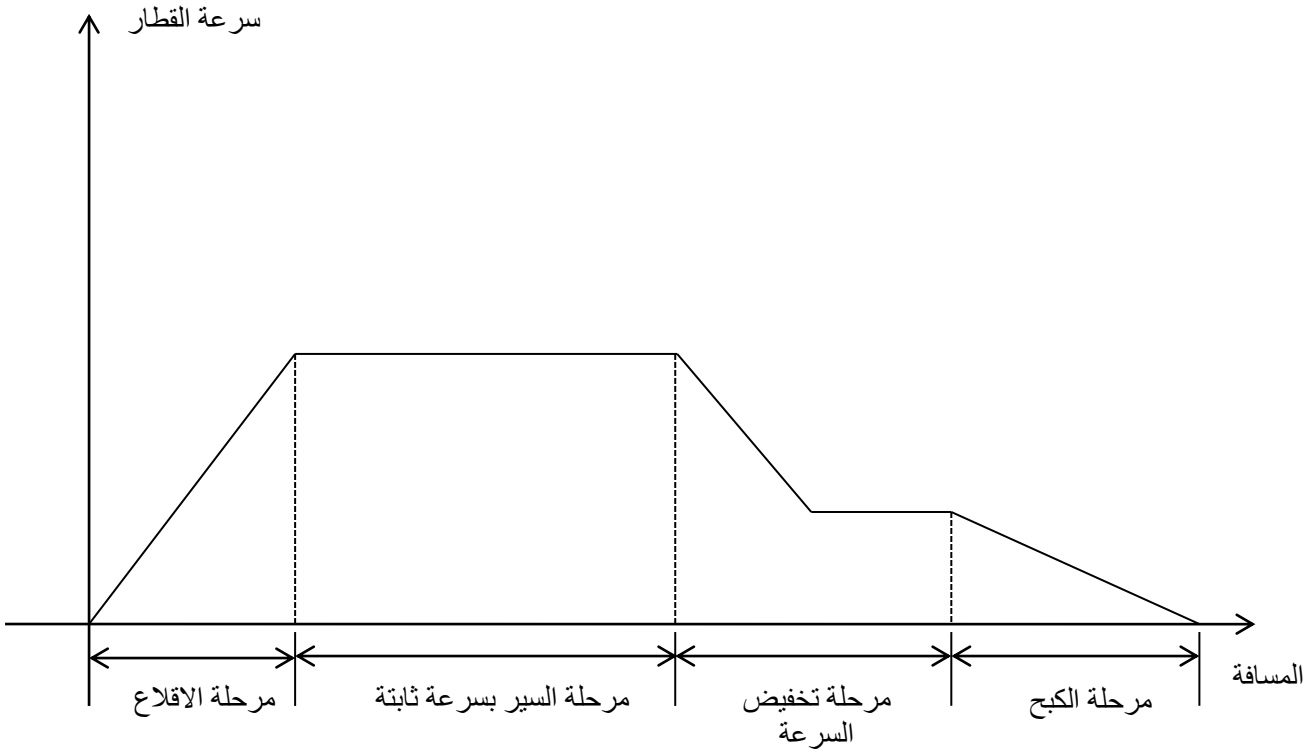
$$T_e = \frac{P_2 * 60}{2 * \pi * N_1}$$

$T_e = 577.9$ [NM]

٤-٢-نمذجة النظام الكهربائي في القاطرة الكهربائية

Modeling of electric locomotive

ستقتصر دراستنا العملية في هذا البحث على الجزء الكهربائي من القاطرة المدروسة، حيث سنقوم بنمذجة كلا من محرك الجر الكهربائي، المعرج الالكتروني، بالإضافة الى نظام القيادة، وذلك خلال مراحل اقلاع القاطرة والسير بسرعة معينة وخلال فترة الكبح أو تخفيض سرعتها كما هو مبين بالشكل (2-4).



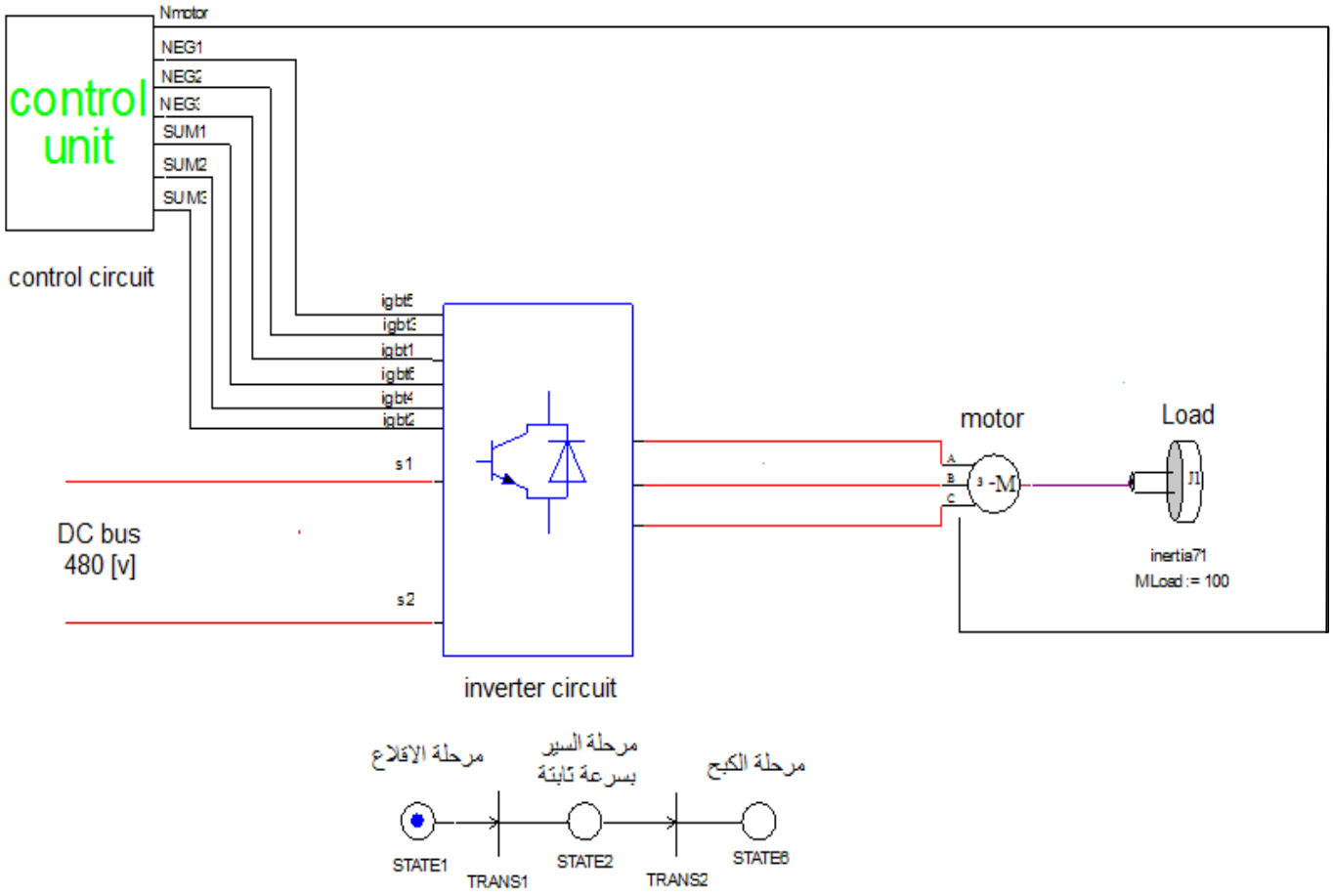
الشكل(4-2) مخطط رمزي لتشغيل القاطرة

ويوضح الشكل (4-3) مخطط عام لنموذج أحد محركات جر القاطرة الكهربائية والذي يتكون من:

١- مراحل تشغيل المحرك (حالات التشغيل).
٢- محرك كهربائي.
٣- دارة المعرج.
٤- وحدة التحكم.

يتم التنقل بين حالات التشغيل المختلفة لمحرك الجر عبر *عناصر الحالة (شبكة بتري)، والتي تمكننا من تحديد قيم السرعة المطلوبة في كل مرحلة بالإضافة *للعناصر الشرطية المسؤولة عن تحديد شروط الانتقال من مرحلة الى أخرى:

- مرحلة الاقلاع وتتمثل بإقلاع المحرك من السكون وحتى الوصول الى السرعة المطلوبة.
- مرحلة تشغيل المحرك عند سرعة ثابتة أو عزم ثابت، حيث يمكن تغيير قيمة السرعة.
- مرحلة الكبح أو تخفيض السرعة.



الشكل(4-3) مخطط عام للتحكم بمحرك الجر خلال مراحل التشغيل المختلفة

٤-٢-١- نمذجة محرك الجر التحريضي ثلاثي الطور

هناك العديد من النماذج الرياضية التي يُمثل بها المحرك التحريضي الثلاثي الطور فيمكن أن يُمثل باستخدام المحاور الحقيقية للأطوار (A,B,C) أو باستخدام محاور بارك (d , q , o) ، أو محاور كلارك (α , β ,o) أو في محاور اختيارية (v , u) تدور بسرعة ما حيث:

١- نظام المحاور (α) و (β) ثابتة مثبتة على الثابت.

٢- نظام المحاور (d) و (q) مثبتة على الدائر وتتحرك معه بسرعة دوران الدائر.

٣- نظام المحاور (u) و (v) مثبتة على محاور اختيارية وتدور بسرعة اختيارية.

يفضل استخدام النظام (α) و(β) لحل معادلات تحويل الطاقة في المحركات التحريضية لأن معادلات التوتر للجزء الثابت تحوي أقل عدد من الحدود.

وفيما يلي المعادلات التي اعتمد عليها في بناء نموذج المحرك المدروس وفق المحاور (α) و(β).

- معادلات التوتر.

$$V_{s\alpha}(t) = i_{s\alpha}(t).R_s + \frac{d_{\psi s\alpha}(t)}{dt}$$

$$V_{s\beta}(t) = i_{s\beta}(t).R_s + \frac{d_{\psi s\beta}(t)}{dt}$$

$$0 = i_{r\alpha}(t).R_r + \frac{d_{\psi r\alpha}(t)}{dt} + \omega_r(t).\psi_{r\beta}(t)$$

$$0 = i_{r\beta}(t).R_r + \frac{d_{\psi r\beta}(t)}{dt} - \omega_r(t).\psi_{r\alpha}(t)$$

- معادلات التشابك المغناطيسي:

$$\psi_{s\alpha}(t) = i_{s\alpha}(t).L_s + i_{r\alpha}(t).L_m$$
$$\psi_{s\beta}(t) = i_{s\beta}(t).L_s + i_{r\beta}(t).L_m$$
$$\psi_{r\alpha}(t) = i_{s\alpha}(t).L_m + i_{r\alpha}(t).L_r$$
$$\psi_{r\beta}(t) = i_{s\beta}(t).L_m + i_{r\beta}(t).L_r$$

- معادلة العزم الكهرومغناطيسي:

$$T_e = \frac{3}{2}p.(\psi_{s\alpha}(t).i_{s\beta}(t) - \psi_{s\beta}(t).i_{s\alpha}(t))$$

$$\frac{d_{\omega r}(t)}{dt} = \frac{p}{j}(T_e - T_m)$$

حيث:

$V_{s\beta}$, $V_{s\alpha}$: توترات الثابت على المحاور α , β .

$i_{s\beta}$, $i_{s\alpha}$: تيارات الثابت على المحاور α , β.

$i_{r\beta}$, $i_{r\alpha}$: تيارات الدائرعلى المحاور α , β .

L_s : عامل التحريض الذاتي لملفات الثابت.

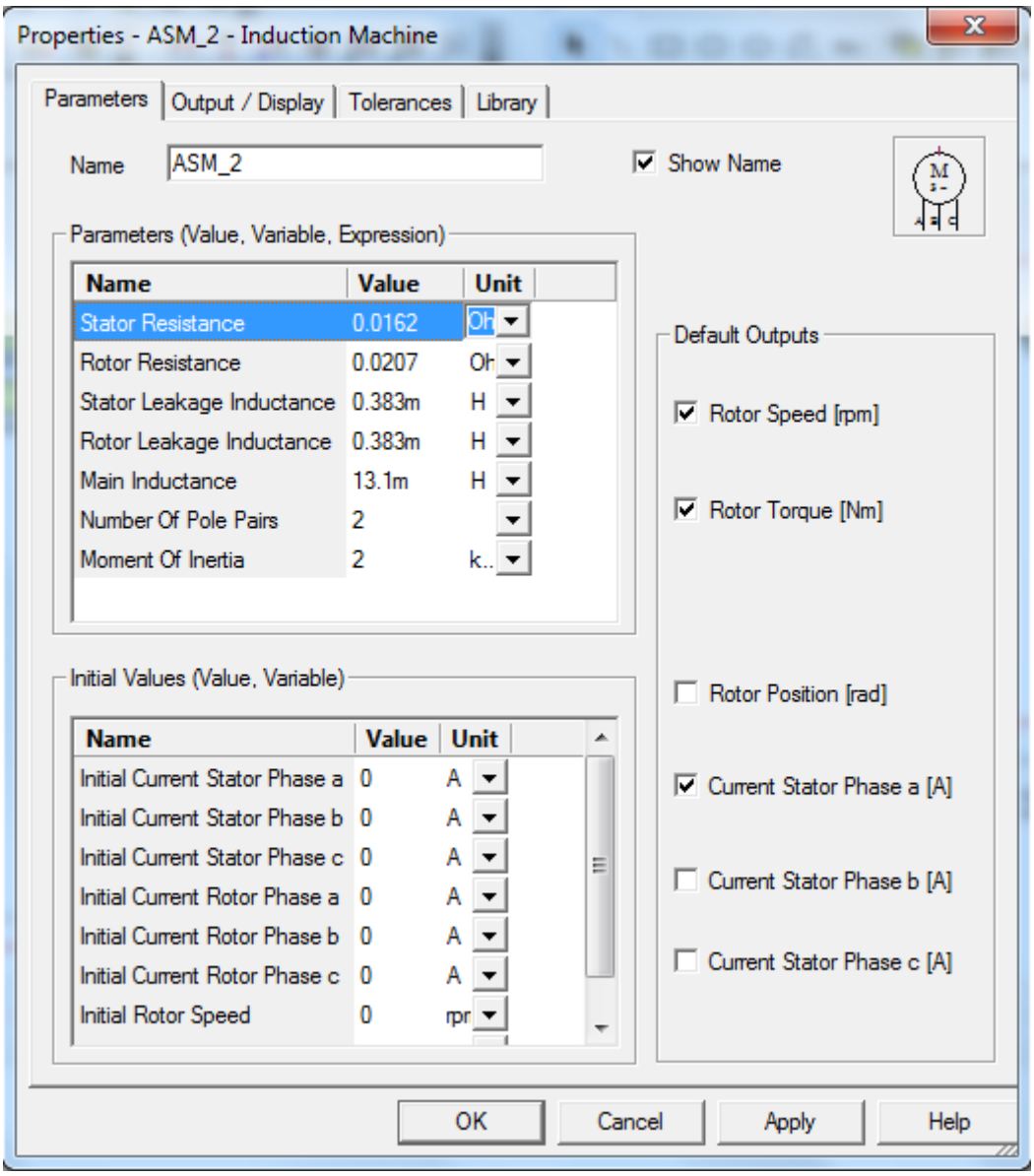
L_r : عامل التحريض الذاتي لملفات الثابت.

L_m : عامل التحريض المتبادل.

Ψ_{ij} : سيالة الارتباط حيث i يساوي إما s أو r و j إما α أو β.

R_r , R_s : مقاومة الثابت والدائر.
w_r : السرعة الزاوية الكهربائية للدائر.
T_e : العزم الكهرومغناطيسي.
T_m : عزم الحمولة.
P : عدد أزواج أقطاب المحرك.
J : عزم عطالة الجزء الدائر.

ويبين الشكل(4-4) واجهة ادخال المعطيات لنموذج المحرك التحريضي في بيئة برنامج الـ simplorer حيث تم ادخال بارامترات الدارة الكهربائية المكافئة للمحرك التحريضي ثلاثي الطور $(R_s , R_r' , L_s , L_r' , L_m , p , J)$



الشكل(4-4) واجهة بارامترات المحرك التحريضي

٤-٢-٢- نمذجة دارة المعرج Inverter circuit simulation

يعدُّ المعرج الجزء الأهم في نظام قيادة المحرك بشكل عام، حيث يتم التحكم بعمل المعرج الثلاثي الطور عن طريق دارة التحكم. ولأن دارة المعرج هي التي تمرر التيار الذي يستجره المحرك، لذلك تصمم حسب استطاعة المحرك المراد قيادته. ونظراً لكون دارة المعرج أغلى ثمناً من المحرك، لهذا تتم حماية وتصميم نظام القيادة وفق التيار الأعظمي للمعرج.

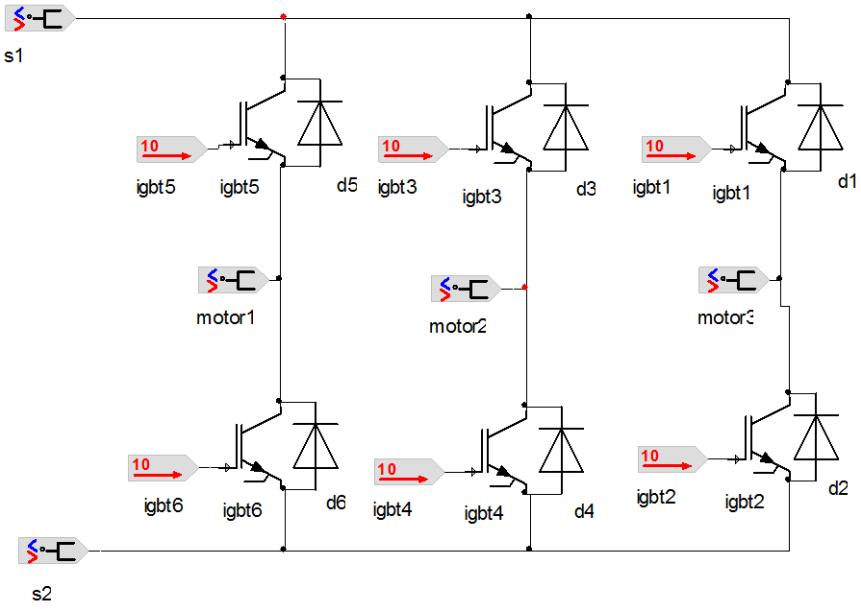
ان العناصر الداخلة في دارة المعرج (الترانزستور IGBT والديود D) هي عناصر تم اختيارها على أنها عناصر مثالية تهمل فيها جميع أشكال الضياعات فلا يوجد فيها ضياعات سواء كانت ضياعات جول أو ضياعات هابطة على توتر العتبة (V_{TH}).

تقوم دارة المعرج بتشكيل جهد متناوب ثلاثي الطور بتردد وجهد متغيرين انطلاقا من الجهد المستمر. وبسبب طبيعة بنية دارة المعرج، فإن المحرك التحريضي ثلاثي الطور يمكن أن يتلاءم بسهولة للعمل مع منبع جهد متناوب أحادي الطور، أو ثلاثي الطور، أو منبع جهد مستمر. فعلى سبيل المثال، في الأمكنة التي يتوفر فيها فقط منبع أحادي الطور يمكن استخدام محركات ثلاثية الطور أكبر وذات مردود أعلى عن طريق تقويم منبع الجهد الأحادي الطور ومن ثم تشكيل منبع جهد ثلاثي الطور باستخدام المعرج الالكتروني.

تتألف دارة المعرج من العناصر التالية :

١) ستة ترانزستورات استطاعية من نوع (IGBT).
٢) ست ديودات FWD (Free-Wheeling diodes).

ويوضح الشكل(4-5) مخطط دارة المعرج.



الشكل(4-5) مخطط دارة المعرج

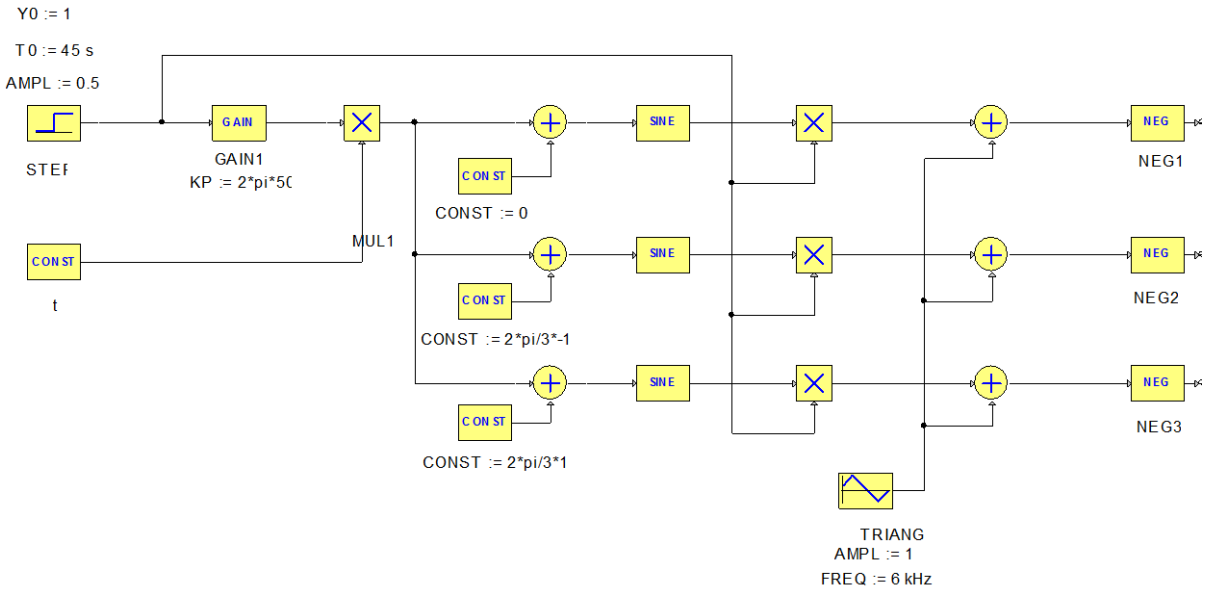
٤-٢-٣- نمذجة دارة قيادة المحرك التحريضي

٤-٢-٣-١- قيادة المحرك التحريضي بطريقة الحلقة المفتوحة

IM Drive System Using open-loop speed control

في هذا النوع من القيادة يتم التحكم بالتوتر المغذي لثابت المحرك التحريضي عن طريق توليد موجة توتر ثلاثية الطور بواسطة دارة القيادة الموضحة بالشكل(4-6). لا تعتمد هذه الطريقة على مقارنة سرعة المحرك مع سرعة مرجعية وانما يتم تحديد قيمة السرعة المطلوبة عن طريق العنصر step، حيث يتم اختيار القيمة المرجعية بين الصفر والواحد، فقيمة الصفر تقابل حالة توقف المحرك وقيمة الواحد تقابل حالة دوران المحرك بسرعته الاسمية .

لتوليد موجة التوتر الثلاثية الطور يتم توليد إشارة الزاوية الطورية اللحظية بواسطة العنصر gain ذو الثابت Kp= 2*Pi*f ومن ثم جداؤه بالزمن للحصول على الزاوية الطورية ويتم توليد ثلاث جهود جيبية مزاحة عن بعضها بزاوية (120^{O}) كل على حدا، وتشكيل موجات التوتر الثلاثية يكون عن طريق العنصر sin الذي يقوم بتحديد التوابع الجيبية التي تمثل معادلات الجهود الطورية التي يتألف منها نظام التوليد الثلاثي الطور.



الشكل (4–6) دارة قيادة محرك تحريضي وفق مبدأ الحلقة المفتوحة open-loop speed control

وفي المرحلة التالية تتم مقارنة الإشارات الجيبية الثلاث التي تمثل الإشارات المرجعية مع تابع الإشارة المثلثية (TRIANG1) أو الموجة الحاملة (carrier signal) ويوضح ذلك الشكل(4-6).نقوم بعد ذلك بتطبيق الإشارات الناتجة على قواعد الترانزستورات.

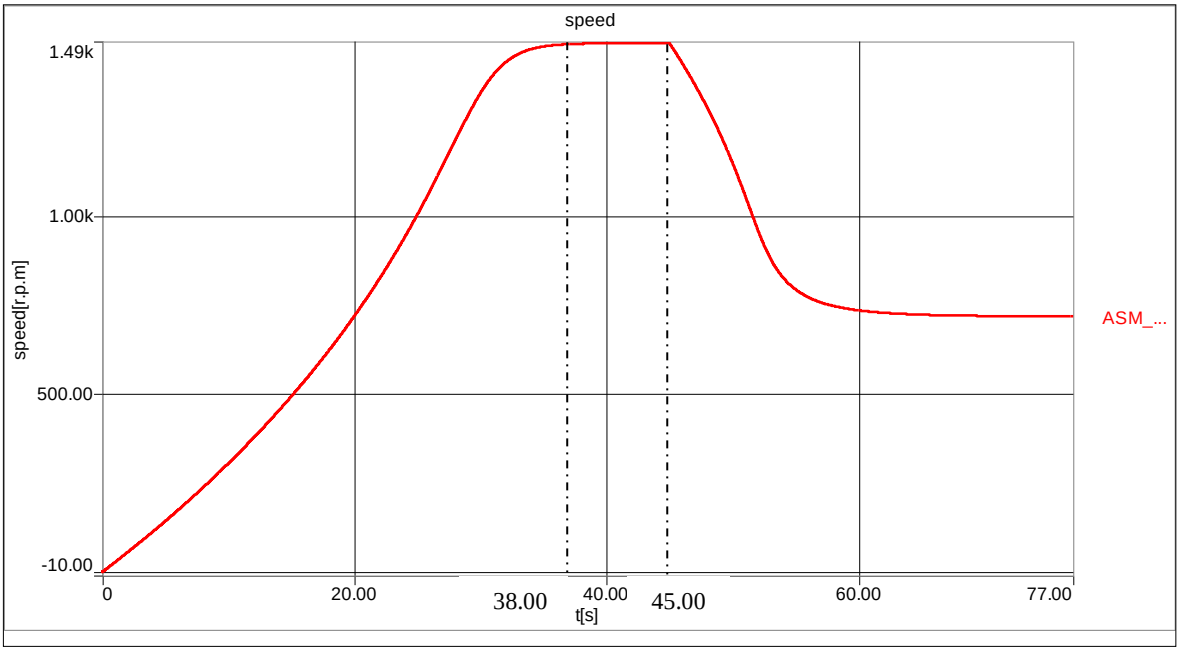
تمت نمذجة دارة القيادة بواسطة برنامج ال simplorer، واستخدمناها في قيادة المبدلة الالكترونية المغذية للمحرك التحريضي المدروس.

- **نتائج النمذجة**

يمر المحرك هنا بعدة مراحل هي مرحلة اقلاع المحرك وعمله بسرعة ثابتة ومرحلة كبح المحرك بعزم حمولة قدره $T_L = 100[NM]$ ، عزم عطالة الحمل $J_L = 100\ [kgm^2]$.

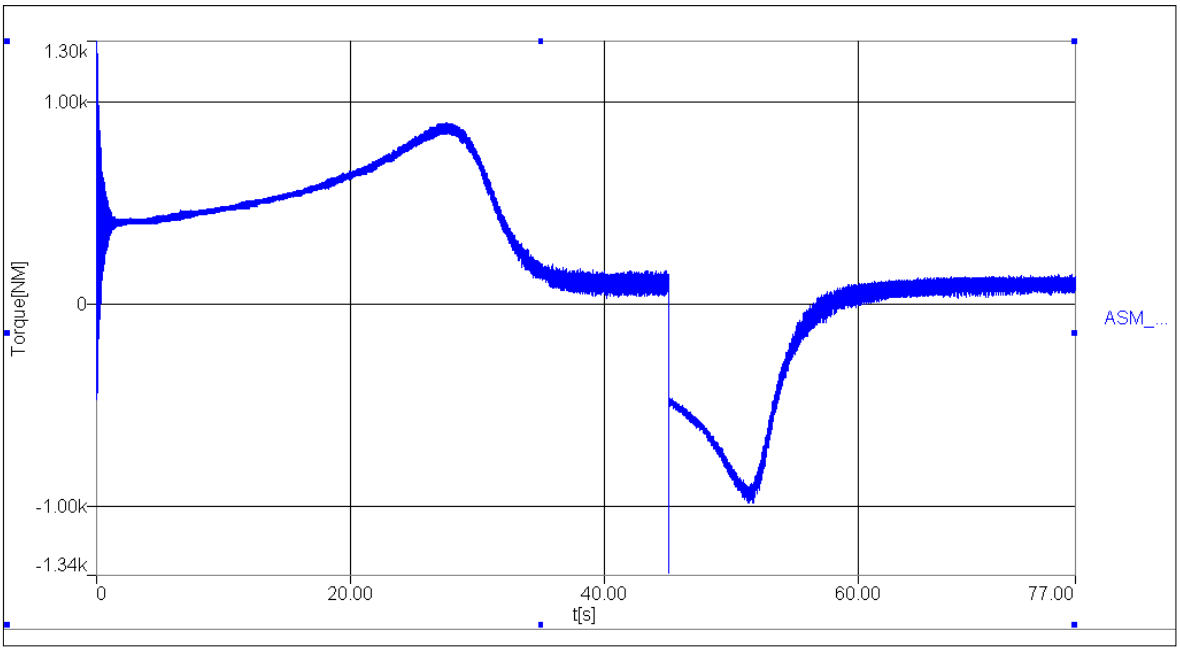
يتم اقلاع المحرك عن طريق اعطاء قيمة واحد لعنصر ال step ليبدأ المحرك بالدوران انطلاقا من السكون ليصل الى سرعته الاسمية خلال زمن قدره 38 second كما هو موضح في الشكل(4-7). لتستقر السرعة فترة زمنية قبل ان ينتقل المحرك لمرحلة الكبح وتخفيض سرعته الى نصف قيمتها الاسمية، عن طريق انتقال العنصر step الى القيمة 0.5 عند اللحظة t=45[s] لتنخفض سرعته تدريجيا حتى بلوغ 740[rpm] في اللحظة t=70[s]، يمكن تسمية هذا النوع من الكبح بالكبح الجزئي.

يستغرق المحرك زمنا طويل خلال مرحلتي الاقلاع والكبح نظرا للقيمة الكبيرة لعزم العطالة والمتمثلة بكتلة القطار والاجزاء المتحركة.



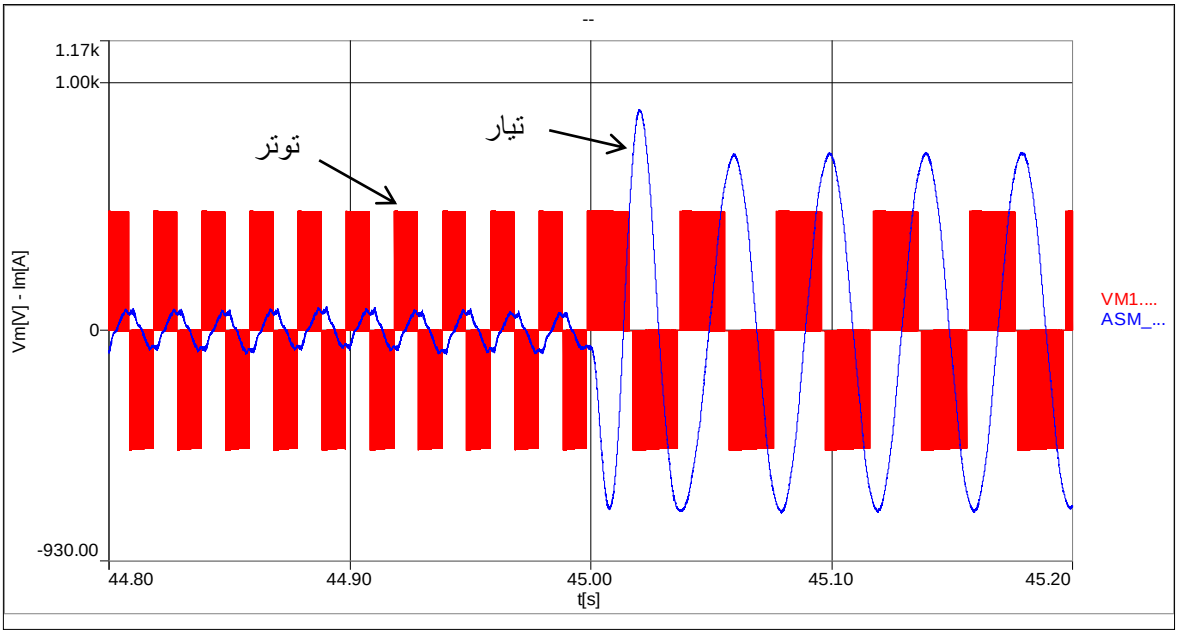
الشكل(4-7) منحني سرعة المحرك

يوضح الشكل (4-8) منحني العزم، ففي مرحلة الاقلاع نلاحظ قيمة العزم الكبيرة [NM]640، لتثبت على قيمة عزم الحمولة [NM]100، وخلال فترة انخفاض السرعة يأخذ العزم قيم سالبة (عزم توليد) حتى استقرار السرعة على القيمة المطلوبة [rpm]740 يعود العزم ليستقر عند قيمة عزم الحمولة [NM]100.



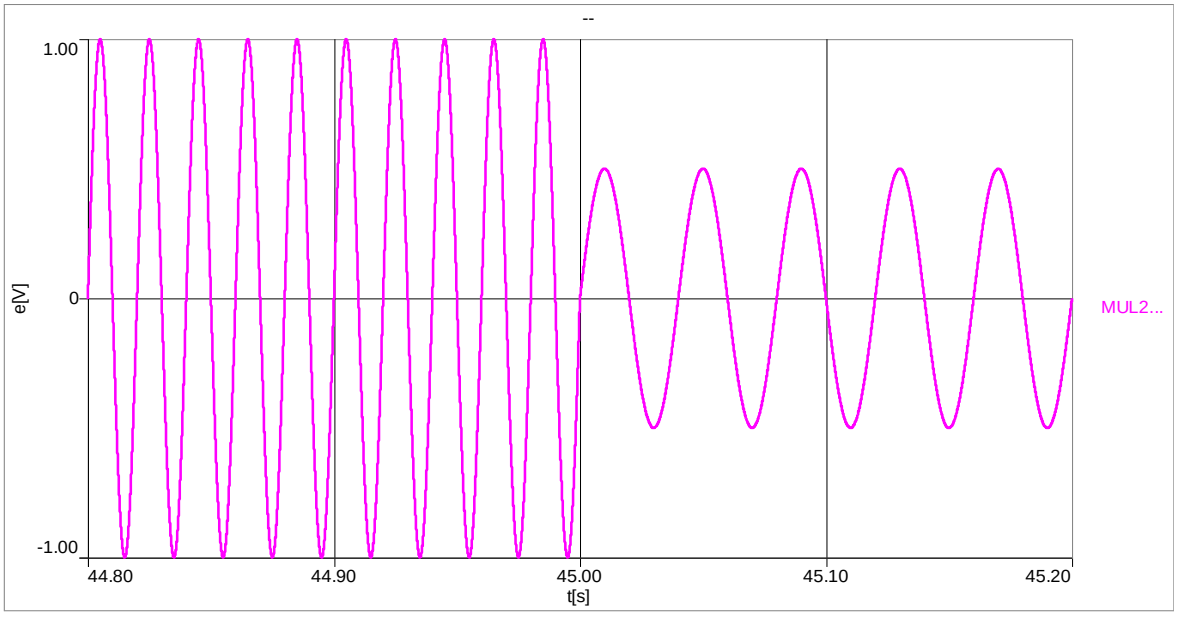
الشكل(4-8) منحني عزم المحرك

في لحظة انتقال المحرك t=45[s] من مرحلة عمله كمحرك الى مرحلة الكبح وتخفيض سرعته، يقوم التيار بتغيير طوره لينتقل المحرك للعمل كمولد الشكل(4-9)، وكانت قيمة التيار في هذه المرحلة كبيرة لتنخفض تدريجيا لتستقر لاحقا. كما يبين الشكل منحني توتر دخل المحرك.



الشكل(4-9) منحني توتر وتيار المحرك

كما ذكرنا سابقا يعتمد هذا النوع من القيادة على تحديد السرعة المطلوبة وتشكيل موجة توتر ثلاثية الطور لقيادة المبدلة الالكترونية، ويوضح الشكل (4-10) منحني التوتر قبل وبعد مرحلة الكبح ففي



الشكل(4-10) موجة توتر القيادة

اللحظة t=45[s] نلاحظ تغير قيمة كل من تردد ومطال موجة التوتر.

تم تلخيص نتائج قيادة المحرك بطريقة الحلقة المفتوحة في الجدول (4-1). في مرحلة الاقلاع نلاحظ استجرار المحرك استطاعة كبيرة عبر المبدلة الالكترونية، وفي مرحلة الكبح وتخفيض السرعة يقوم المحرك بحقن الاستطاعة بالمبدلة الالكترونية للاستفادة منها، كما هو واضح من الجدول حيث تأخذ الاستطاعة قيمة سالبة.

الجدول (4–1) نتائج قيادة المحرك بطريقة الحلقة المفتوحة

البارامترات / المراحل	الزمن T[s]	السرعة N[r.p.m]	العزم Te[NM]	توتر المحرك Vm_{rms} [V]	التردد F[HZ]	تيار المحرك Im[A]	الاستطاعة P[w]
مرحلة الإقلاع	20	721.02	640.5	339.4	50	595.3	172735
	30	1348.7	669.6	337.2	50	287.7	128900
مرحلة استقرار السرعة عند ال 1480	40	1480	101.8	335.8	50	50.3	15814.4
مرحلة تخفيض السرعة لـ 740	50	1144.4	-690.5	340.3	25	487.6	-16688.9
	70	738.6	95.7	336.9	25	62.2	7310.91

٤-٢-٣-٢- قيادة المحرك التحريضي بطريقة (V/F=const.)

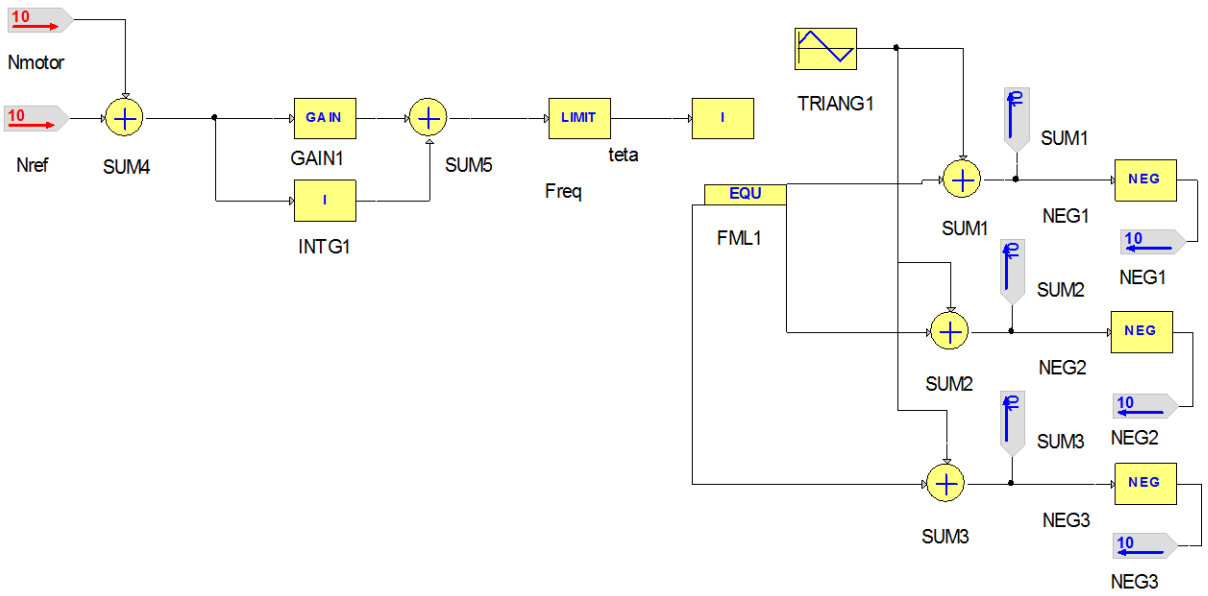
IM Drive System Using V/F=const.

تعتمد قيادة المحرك التحريضي على توليد توترات ذات تردد وتوتر متغيرين بحيث تبقى نسبة (V/F) ثابتة. على الرغم من وجود أنواع مختلفة من أنظمة قيادة المحرك التحريضي، إلا أن الطريقة الأكثر شيوعاً هي الطريقة التي تستخدم في تركيبها المعرج الالكتروني (inverter). يشكل المعرج العنصر الأساس في قيادة المحرك، حيث يقوم بتشكيل جهد متناوب ثلاثي الطور بتردد ومطال متغيرين من الجهد المستمر.

تقوم دارة التحكم بتنفيذ خوارزمية التحكم، وتطبيق الخيارات المطلوبة، وإصدار إشارات التحكم إلى دارة الاستطاعة (Power Stage) أي إلى المعرج ومنها إلى المحرك. لقد سهلت تقانات التحكم الرقمي المُستخدمة للمتحكمات (microcontrollers) تنفيذ خوارزميات التحكم وصنع خوارزميات أكثر تعقيداً وبكلفة متوسطة. بالإضافة إلى أنها مهدت الطريق لتعديل خوارزمية التحكم برمجياً دون اللجوء إلى إعادة تصميم الدارات من جديد.

تقوم دارة التحكم لدينا، من أجل الحفاظ على سرعة دوران ثابتة للمحرك، باستخدام حساس لقياس سرعة المحرك الحقيقية (N) بشكل لحظي. من ثم تتم مقارنة سرعة المحرك الحقيقية مع السرعة المرجعية المطلوبة (N_{ref})، التي تتغير حسب طبيعة نظام عمل المحرك في كل مرحلة من المراحل، وتتم عملية المقارنة بين إشارتي السرعة بواسطة عنصر المقارنة (SUM_4)، الذي يعطي إشارة الخطأ (التصحيح) في سرعة الدوران (ΔN)، ويبين الشكل (4-11) مخطط دارة التحكم.

يتم برمجة المتحكم بحيث يتخذ القرار المناسب لعمل هذا المحرك، أي يقوم بمعالجة إشارة الخطأ في السرعة عن طريق استخدام منظم تناسبي- تكاملي (PI controller). يعمل المنظم التناسبي- التكاملي وفق برنامج معين، حيث يقوم بتشكيل إشارة الخرج الأولى (P) عن طريق عنصر ربح تناسبي GAIN1 (Proportional Gain) بعامل ربح تناسبي (KP). تتناسب إشارة الخرج الأولى (P) طرداً مع الفرق بين السرعة المطلوبة (N_{ref}) وسرعة المحرك الفعلية (N) (أي إشارة الخطأ). تتولد إشارة الخرج الثانية (I) عن طريق عنصر ربح تكاملي INTG1 (Integral Gain) بعامل ربح تكاملي (KI)، حيث ترتفع أو تنخفض إشارة الخرج الثانية وفقاً لقيمة إشارة الخطأ.



الشكل(4−11) مخطط دارة التحكم وفق .V/F=const

في حال التزايد في انخفاض السرعة، فإن إشارة الخطأ سوف تزداد لتؤمن التعويض المناسب. وتحت شروط العمل الطبيعية والتحميل الثابت فإن العنصر التكاملي (KI) سيعطي قيمة خطأ قريبة من الصفر بسبب تناقص قيمة الخطأ خلال الزمن.

لقد تم اختيار عوامل الربح بما يتناسب مع استقرار نظام التحكم بحيث تعطي استجابة سريعة مع أقل قدر ممكن من عدم الاستقرار. لكن في الواقع يتطلب تحديد هذه الثوابت رياضياً مجهوداً عالياً نظراً لارتباطها بالمتغيرات المتعددة لنظام القيادة والتحكم ومنها حمل المحرك، وعطالته وعزمه، في تطبيقنا ثبتنا القيم عند (K_P=3 ، K_I=0.1).

بعد ذلك إشارة خرج المنظم التناسبي− التكاملي الناتجة تدخل إلى عنصر محدد (limiter) حدوده (± 50) بما يتوافق مع تردد العمل الأعظمي المسموح به لهذا المحرك، لنحصل في الخرج على إشارة (F_{req}) تمثل التردد المطلوب الذي يتغير حسب طبيعة نظام عمل المحرك كما هو واضح في الشكل (11-4).

بعد ذلك نقوم بمكاملة إشارة التردد المطلوب (F_{req}) عن طريق إدخال إشارة التردد (F_{req}) إلى عنصر تكاملي (teta) بعامل ربح تكاملي (KI=2*π) لتوليد إشارة الزاوية الطورية اللحظية (θ_e^*) التي يتم حسابها وفق المعادلة (4−1).

$$\left(\theta_e^* = \text{teta} = 2 * \pi \int \text{Freq} \,.\, \text{dt} = \int \omega \text{dt}\right) \qquad (1-4)$$

- **دارة توليد النبضات** **Pulses Generation Circuit**

تعدُّ تقانات تعديل عرض النبضة PWM (pulse-width modulation) نموذجية لتشكيل الموجة المتناوبة. حيث أن كل طور من أطوار المحرك يتطلب تطبيق إشارتي (PWM) الأولى على قاعدة الترانزستور العلوي (IGBT5) والأخرى على قاعدة الترانزستور السفلي (IGBT6)، وكلا الإشارتين تُؤخذان من نفس قطب (PWM) بزمن ميت (dead time) بينهما. إن فترة الزمن الميت هامة جداً لأنها تضمن عدم عمل كلا المفتاحين (الترانزستورين) معاً بآن واحد، وبالمقابل إن وجود هذا الزمن يشوه شكل موجة جهد الخرج، مما يؤدي إلى حدوث تأرجح بالعزم. يتطلب التحكم بالمحرك التحريضي تحديث دائم لإشارة PWM، لتشكيل موجات متناوبة على أطوار المحرك، أما الطريقة التي يتم فيها إعادة تحديث إشارة PWM فتدعى بتقانة التعديل.

تتألف دارة توليد النبضات المبينة في الشكل (4-11) من:

- تابع إشارة مثلثية (TRIANG1).
- عنصر معادلات (Equations).
- ثلاث عناصر مقارنة (Comparator).
- ثلاث عواكس (عنصر قالب للاشارة) (NEG).

بعد أن قمنا عن طريق دارة التحكم بتحديد قيمة التردد المطلوب (F_{req}) المتغيرة حسب طبيعة نظام عمل المحرك، وكذلك تحديد إشارة الزاوية الطورية اللحظية $(\theta_e{}^*)$ (التردد الزاوي teta) التي تتغير مع تغير إشارة التردد (F_{req})، نقوم بتوليد ثلاث جهود جيبية مزاحة عن بعضها بزاوية (120^O) باستخدام عنصر المعادلات (Equations) الذي يقوم بتحديد التوابع الجيبية التي تمثل معادلات الجهود الطورية التي يتألف منها نظام التوليد الثلاثي الطور. هذه التوابع هي كالآتي:

القيمة العظمى للجهد:

$$e = 9 * Freq/50 \qquad (2-4)$$

$$e_1 = e * \sin(teta) = 9 * Freq/50 \sin(teta) \qquad (3-4)$$

$$e_2 = e * \sin(teta - 2 * PI/3)$$

$$e_2 = 9 * Freq/50 \sin(teta - 2 * PI/3) \qquad (4-4)$$

$$e_3 = e * \sin(teta - 4 * PI/3)$$

$$= 9 * Freq/50 \sin(teta - 4 * PI/3) \qquad (5-4)$$

حيث: $teta = \theta_e^*$.

وفي المرحلة التالية تتم مقارنة الإشارات الجيبية الثلاثة (e_1, e_2, e_3) التي تمثل الإشارات المرجعية (reference signals) مع تابع الإشارة المثلثية (TRIANG1) أو الموجة الحاملة (carrier signal) كما يوضح الشكل(4-11). نلاحظ هنا أنه بتغيير مطال وتردد الإشارة المرجعية الجيبية يتغير عرض نبضة التحكم المطبقة على قواعد الترانزستورات. وهكذا يتم تشكيل نبضات التحكم على ترانزستورات القالبة باستخدام تقنية (Sinusoidal PWM)، حيث تكون الإشارة المطبقة على قواعد الترانزستورات مكونة من عدد من النبضات (several pulses).

نقوم بعد ذلك بتطبيق الإشارات الناتجة على قواعد الترانزستورات العلوية حتى تصبح هذه الترانزستورات بحالة تمرير. مع العلم أن تطبيق النبضات على قواعد الترانزستورات العلوية يتم بشكل متتالي وبتأخير (120) درجة. قبل تطبيق نبضات التحكم على قواعد الترانزستورات السفلية، نقوم بإدخال هذه الإشارات إلى عواكس (NEG) لأن الترانزستورات السفلية تعمل بفرق صفحة مقداره (180^o) درجة عن الترانزستورات العلوية. أي تظهر نبضة التحكم على قاعدة الترانزستور (IGBT2) بعد ظهور نبضة التحكم على قاعدة الترانزستور العلوي (IGBT1) بمقدار (180) درجة، بينما تظهر نبضة التحكم على قاعدة الترانزستور السفلي (IGBT4) بتأخير (120) درجة عن نبضة التحكم للترانزستور السفلي (IGBT2).

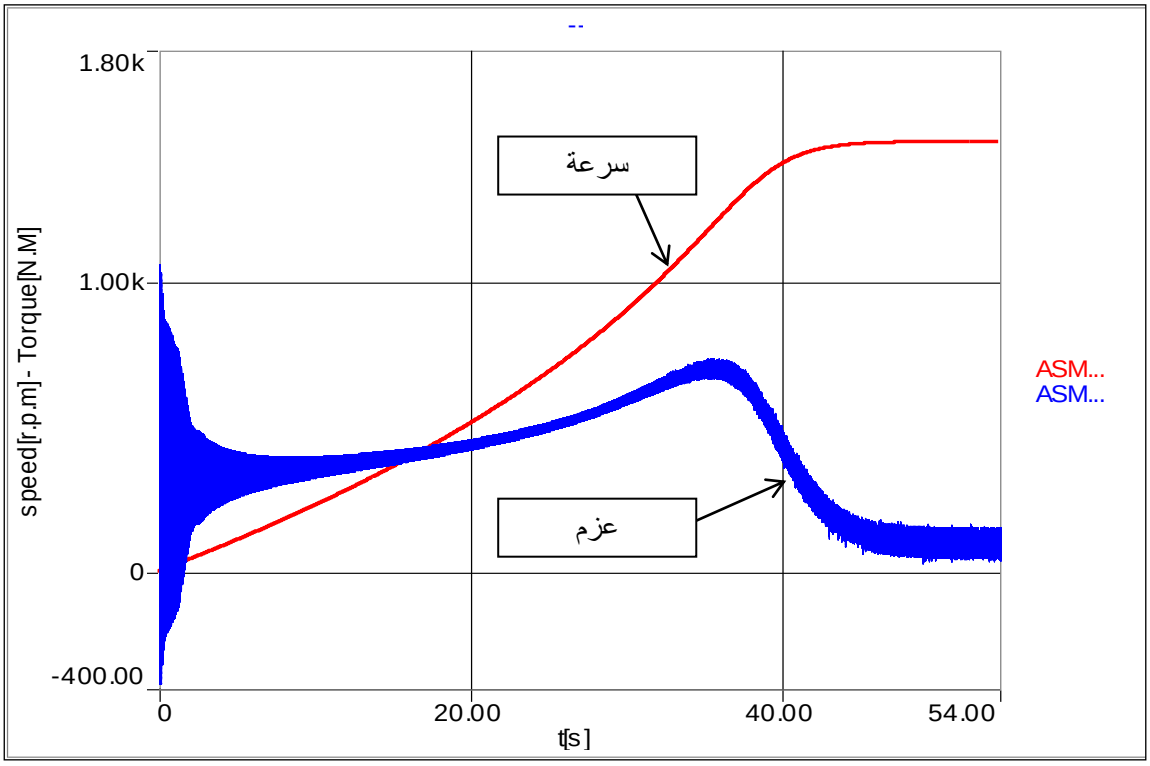
٤-٢-٣-٢-١- نتائج النمذجة

سوف نناقش نتائج حالات النمذجة لأنظمة العمل المختلفة للمحرك والمتمثلة بمراحل الاقلاع والدوران بسرعة ثابتة والكبح للمحرك، عزم الحمولة $T_L = 100$[NM] ، عزم عطالة الحمل $J_L = 100$ [kgm^2].

١- مرحلتي الاقلاع والسرعة الثابتة

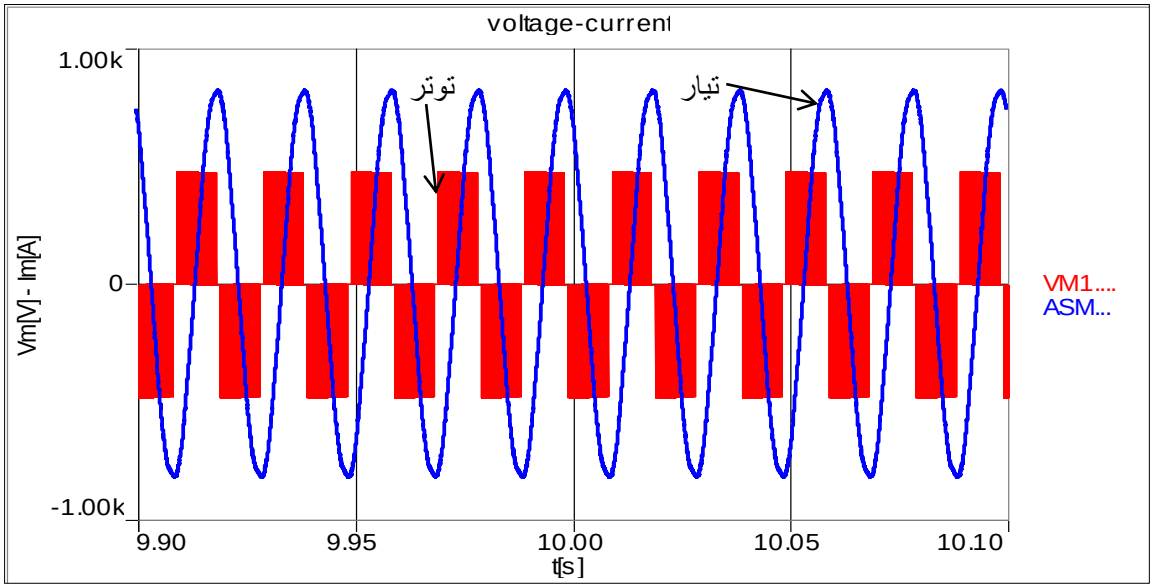
عند استخدام الدارة الالكترونية المشروحة سابقا في اقلاع المحرك وفق طريقة القيادة (V/F=const.) تم اقلاع المحرك من حال السكون حتى السرعة الاسمية كما هو موضح في الشكل (4-12) واستغرقت هذه المرحلة (48) ثانية. كما يوضح الشكل منحني العزم الكهربائي للمحرك اذ نلاحظ في البداية

اهتزازه حول قيمة وسطية ليستقر بعد ذلك عند قيمة عزم الحمولة والبالغ T_L=100[NM] وذلك عند دوران المحرك بسرعته الاسمية.



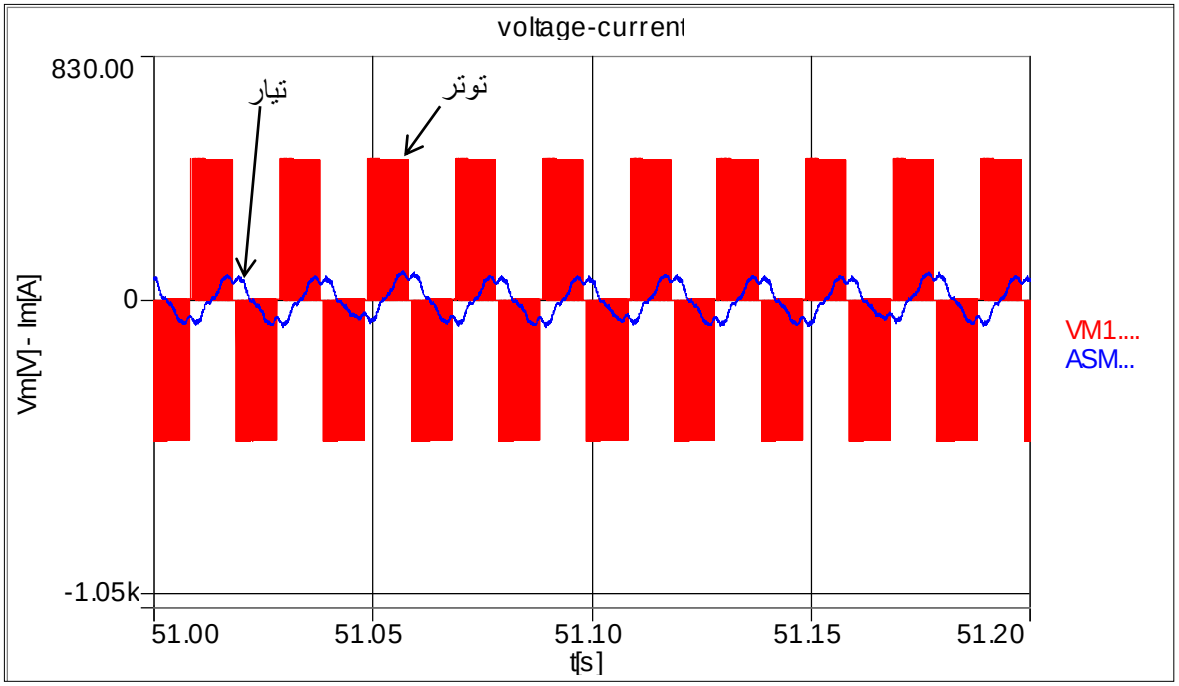
الشكل (4-12) خصائص المحرك الميكانيكية خلال فترة الاقلاع

خلال مرحلة الاقلاع تتزايد قيمة التيار المستجرة من قبل المحرك لتشكيل عزم كهربائي يوافق عزم الحمولة المربوطة مع محور المحرك كما يوضح الشكل (4-13) والذي يبين توترات خرج المعرج حيث تكون مقطعة، والتيارات الجيبية المارة في المحرك خلال فترة الاقلاع.



الشكل (4-13) منحني توتر وتيار المحرك خلال فترة الاقلاع

ويبين الشكل(4-14) التيار المار في ثابت المحرك عند استقرار المحرك ودورانه بسرعة **N=1480 [r.p.m]** حيث نلاحظ انخفاض قيمة التيار المستجر مقارنة مع قيمته خلال مرحلة الاقلاع **Im=50.9[A].** فخلال مرحلة الاقلاع تم استجرار تيار بقيمة أكبر من قيمته في مرحلة الاستقرار.



الشكل (4-14) منحني توتر وتيار المحرك خلال فترة الاستقرار

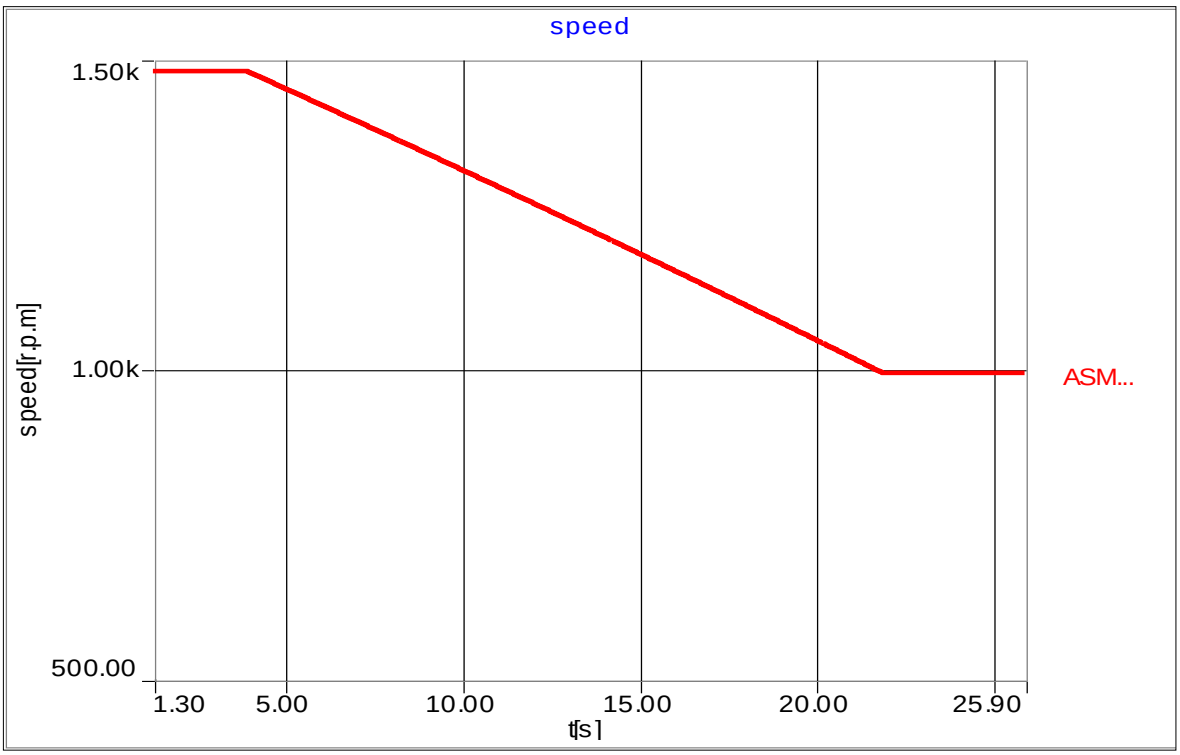
تم تلخيص نتائج مرحلتي الاقلاع والاستقرار في الجدول(4-2) خلال أزمنة مختلفة، حيث يبين قيمة عزم المحرك العالية خلال فترة الاقلاع مقارنة بقيمته خلال فترة الاستقرار، كما يبين قيم كل من السرعة وتوتر خرج المعرج والتيار المار في المحرك والاستطاعة المستجرة وفق هذه الازمنة.

الجدول(4-2) نتائج مرحلتي الاقلاع والاستقرار

البارامترات / المراحل	الزمن T[s]	السرعة N[r.p.m]	العزم Te[NM]	توتر المحرك Vm_{rms} [V]	تيار المحرك Im[A]	الاستطاعة P[w]
مرحلة الإقلاع	**20**	**507.6**	**450**	**335**	**553.3**	**135078**
	40	**1400.8**	**500.4**	**339.4**	**187.1**	**75905.5**
مرحلة استقرار السرعة عند ال 1480	**52**	**1480**	**102.6**	**337.8**	**50.9**	**15058.1**

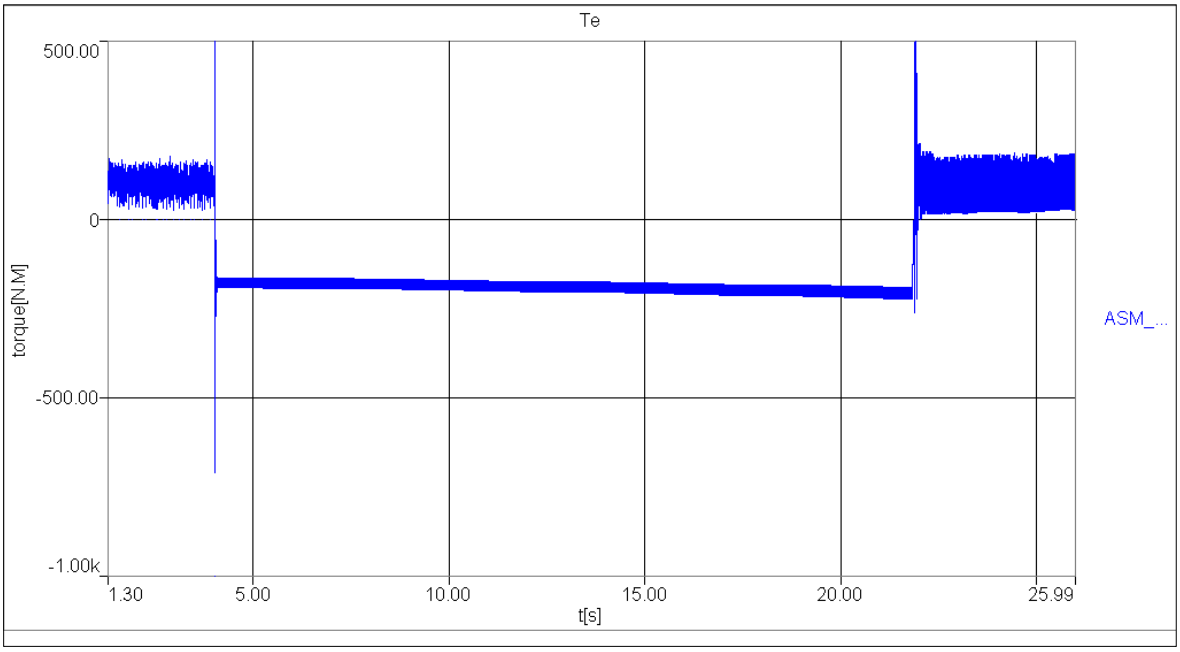
٢- مرحلة الكبح الكهربائي

باعتبار أنه تم اقلاع وتدوير المحرك وفق ما سبق حيث ثبت على السرعة [rpm] 1480 ومن ثم قمنا بعملية كبح جزئي للمحرك عند الزمن (4) ثانية وتخفيض سرعته حتى السرعة [r.p.m] N=1000 وذلك عن طريق قيمة السرعة المرجعية، وباعتبار هذه اللحظة هي لحظة مرحلة الكبح (تعتبر الزمن المرجعي بالنسبة لنا حيث سيتم اظهار كافة النتائج السابقة اعتبارا من هذه اللحظة)، ويبين الشكل (4-15) منحني السرعة خلال مرحلة الكبح الجزئي حيث احتاج النظام ل(18) ثانية لكبح المحرك وتخفيض سرعته من السرعة (1480) إلى (1000) دورة في الدقيقة. تم اختيار الكبح الجزئي لان تخفيض السرعة الى نصف القيمة يؤدي الى استعادة ثلاث أرباع القدرة الحركية للمحرك بالإضافة الى تبسيط عملية النمذجة.



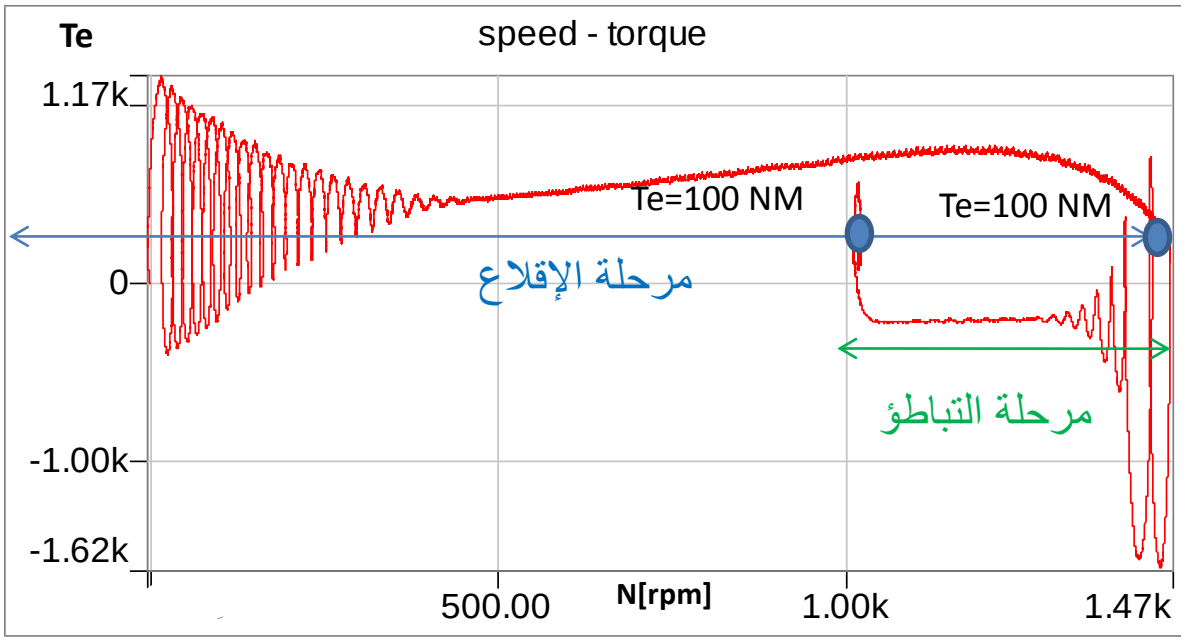
الشكل (4-15) منحني السرعة خلال مرحلة الكبح الجزئي

خلال فترة الكبح باستعادة القدرة الكهربائية نلاحظ انتقال المحرك للعمل في الربع الرابع لمحاور المميزة الميكانيكية للمحرك التحريضي حيث حافظت السرعة على قيمتها الموجبة بينما ينتقل العزم الى قيمته السالبة كما هو مبين في الشكل (4-16).



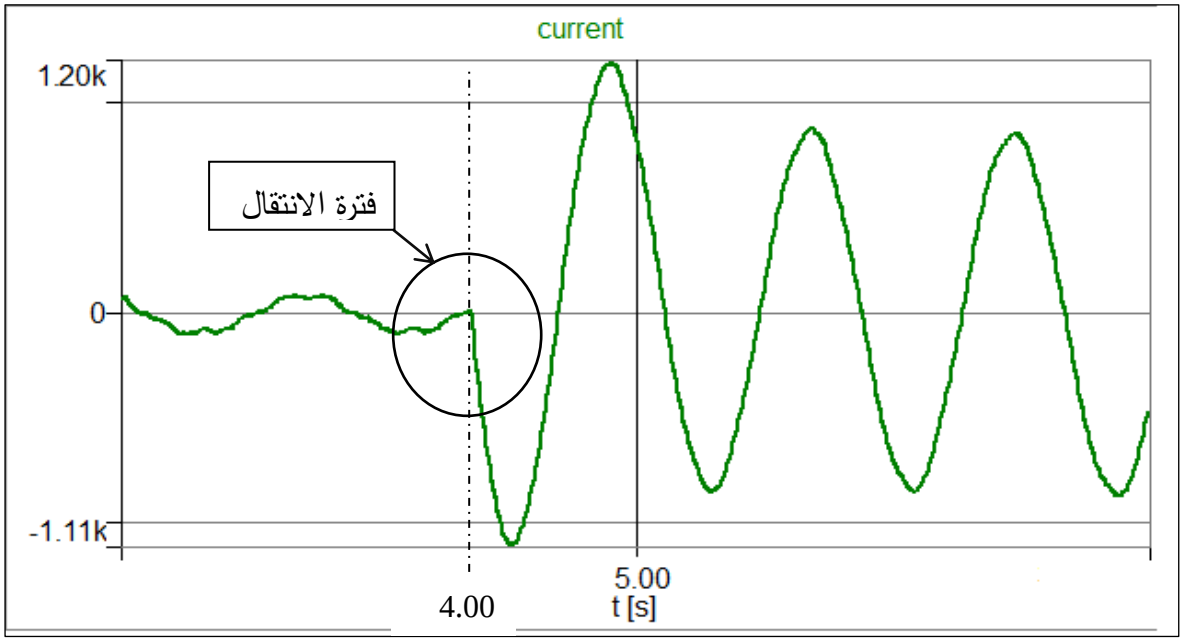
الشكل (4–16) منحني العزم خلال مرحلة الكبح الجزئي

يبين الشكل (4-17) انتقال نقطة عمل المحرك الى الربع الرابع في نظامي الإحداثيات (T_e, N)، وكما هو واضح فإن المحرك يتنقل بين الربعين الأول والرابع، ليعمل ككابح. حيث تكون سرعة الدوران موجبة وعزم المحرك سالباً خلال هذه المرحلة.



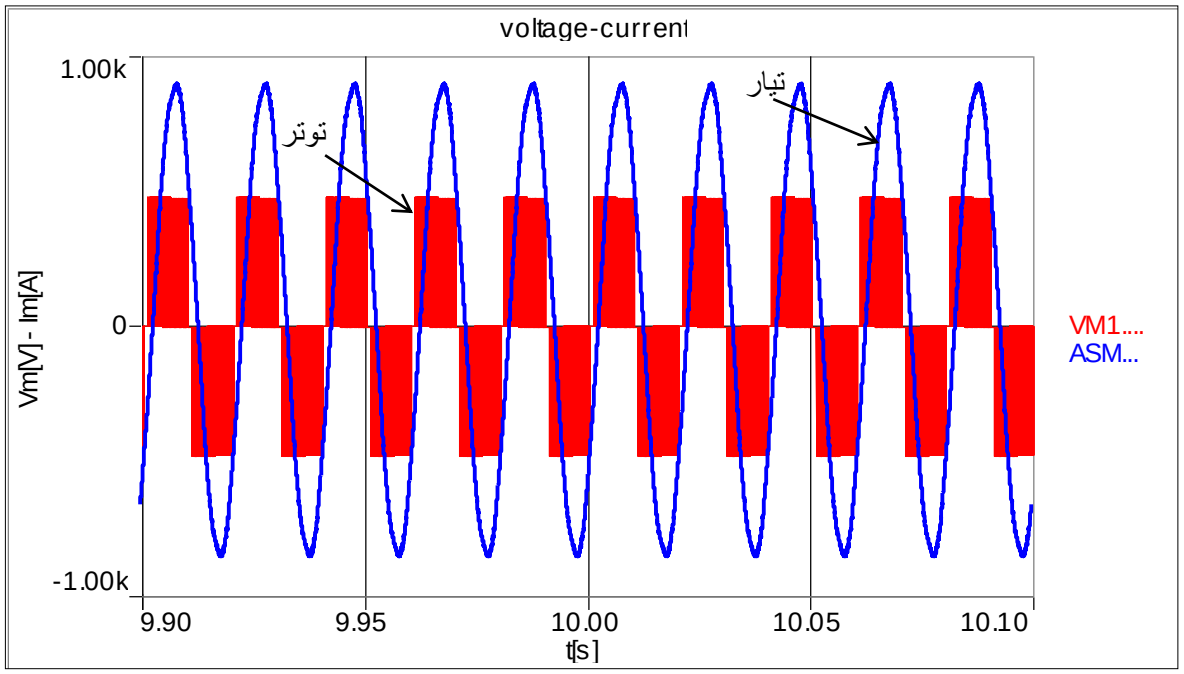
الشكل (4–17) الخصائص الميكانيكية للمحرك

وخلال هذه المرحلة يغير التيار اتجاهه في ملفات الثابت وتزداد قيمة التيار عن قيمته في المرحلة المستقرة لعمل المحرك كما هو مبين في الشكل (4-18)،



الشكل (4–18) تيار المحرك خلال فترة الانتقال لمرحلة الكبح

كما يبين الشكل (4-19) مميزات المحرك الكهربائية خلال مرحلة الكبح حيث يظهر كلا من توتر وتيار المحرك خلال هذه المرحلة، يبين توتر المحرك المقطع والمقاد من قبل نظام التحكم بطريقة V/F=const



الشكل (4–19) منحني توتر وتيار المحرك خلال مرحلة الكبح

الا أن هذا النوع من نظم القيادة لا يساعد خلال فترة الكبح باستعادة القدرة الحركية، لا يمكن استرجاع القدرة الكهربائية من المحرك لذلك تصرف حراريا عبر ملفات الثابت.

تم تلخيص نتائج مرحلة الكبح في الجدول(4−3).

الجدول(4−3) نتائج مرحلة الكبح

تيار المحرك **Im[A]**	توتر المحرك **Vm_{rms} [V]**	العزم **Te[NM]**	السرعة **N[r.p.m]**	الزمن **T[s]**
470.9	**337.2**	**185.7**	**1322.07**	**10**
510	**338**	**-183.26**	**1185.8**	**15**
91.9	**320**	**103.4**	**996**	**22**

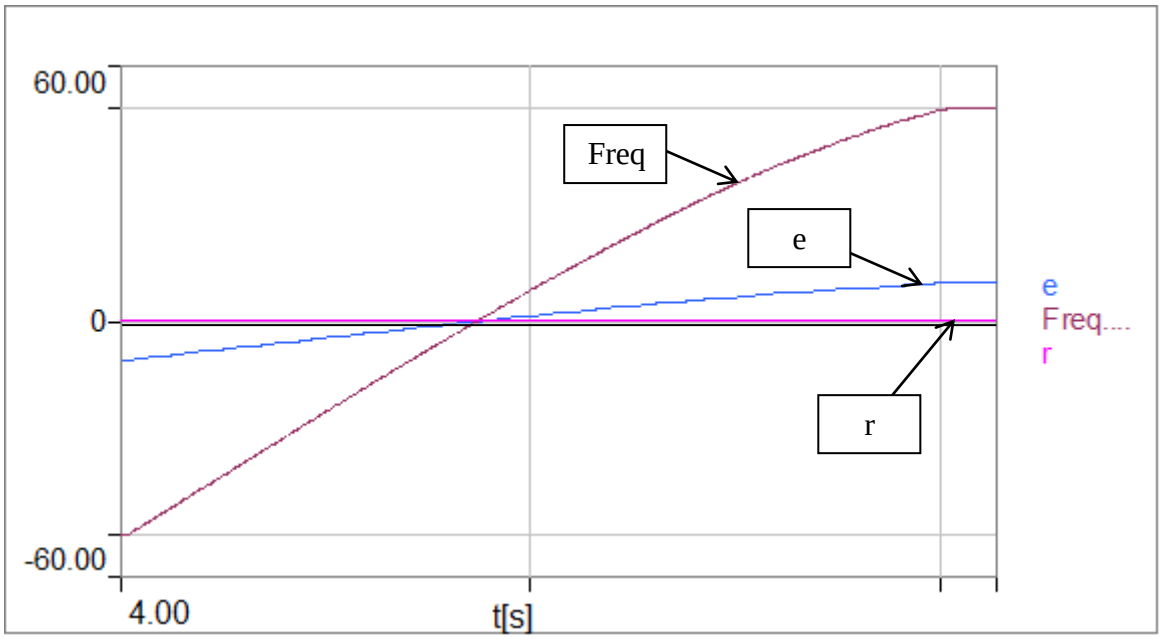
وجدنا أن أهم ميزات هذا النظام تتلخص في التغيرات الخطية لسرعة الدوران عند عمل المحرك في حالات الفرملة التي تتطلبها معظم أنظمة القيادة وخاصة آلات الجر والرفع.

تم الحصول بواسطة النمذجة على الخواص والمحددات التالية :

- تحديد الخواص الميكانيكية (T_e, N) الديناميكية والستاتيكية للمحرك التحريضي المقاد.
- تحديد الخواص الكهربائية للمحرك المدروس.
- دراسة الظواهر المرافقة لحالة الانتقال من حالة عمل الآلة كمحرك لحالة عملها كمولد خلال فترة الكبح.

وللتأكد من عمل نظام القيادة خلال مرحلة الكبح بشكل سليم قمنا بمراقبة منحني تردد Freq وتوتر القيادة e والنسبة بين قيم كل منهما، يبين الشكل(4-20) جزء من هذا المنحني، حيث نلاحظ ان منحني النسبة بينهما r يبقى محافظا على قيمة ثابتة خلال هذه المرحلة مما يدل على عمل نموذج القيادة بشكل صحيح.

في هذه الطريقة جزء من الطاقة يضيع في ملفات الثابت والمقاومات ويبقى التوتر ثابت ولا يسمح هذا بإعادة حقن القدرة في الباسبار.



الشكل(4–20) منحني توتر وتردد القيادة والنسبة بينهما بالنسبة للزمن

٤-٢-٣-٣- قيادة المحرك التحريضي بالتحكم بالتردد

IM Drive System Using frequency control

من المعلوم أن سرعة دوران المحرك التحريضي تتناسب طرداً مع تردد التغذية ومع عدد الأقطاب في المحرك، ولكون عدد الأقطاب ثابت أساساً عند التصميم فإنه لتغير سرعة المحرك التحريضي نقوم بتعديل تردد تغذيته، وتعد هذه الطريقة مثلى لتنظيم سرعة دوران المحرك. تتمتع نظم القيادة بتغيير التردد VFD فضلاً عن إمكانية تنظيم السرعة بإيجابيات كثيرة نذكر منها:

١- الاستجابة العالية والتحكم الدقيق.

٢- سهولة النمذجة.

٣- الوثوقية العالية.

٤- تخفيض عدد مكونات الجهاز وبالتالي إمكانية تصميم جهاز مدمج أصغر، وهذا يؤدي إلى صغر حجم النظام.

٥- المرونة في إضافة ميزات جديدة وبزيادة طفيفة في تكلفة المعدات، وبالتالي انخفاض تكاليف الاستثمار في أعمال التطوير.

٦- تحسين عامل الاستطاعة.

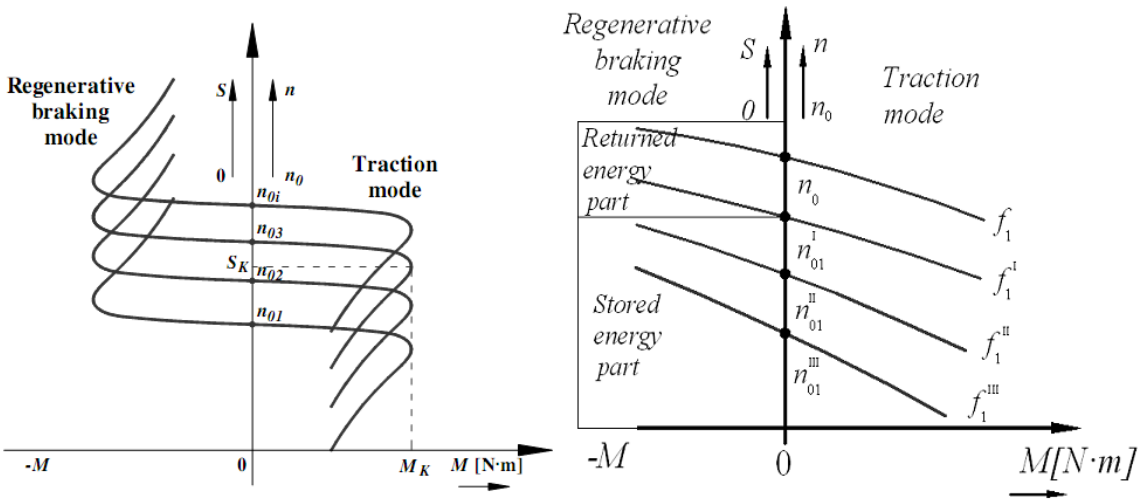
٧- عزم إقلاع منخفض ضمن الحدود المسموحة.

٨- تخفض معدلات استهلاك الطاقة للنظام ككل. يمكن التشغيل في الأرباع الأربعة.

٩- يمكن تنظيم سرعة المحرك فوق السرعة الاسمية عبر الاستمرار بزيادة التردد فوق القيمة الاسمية مع الحفاظ على جهد التغذية عند قيمته الاسمية، وهذا يؤدي إلى انخفاض العزم.

١٠- يمكن التحكم بتسارع (acceleration) وتباطؤ (deceleration) المحرك عن طريق تغيير تابع التردد مع الزمن، وتعتبر هذه الميزة الأهم وخاصة في مجال بحثنا، نظرا لإمكانية كبح المحرك واستعادة القدرة الكهربائية الناتجة عن الكبح وتخزينها عن طريق التحكم بالتردد.

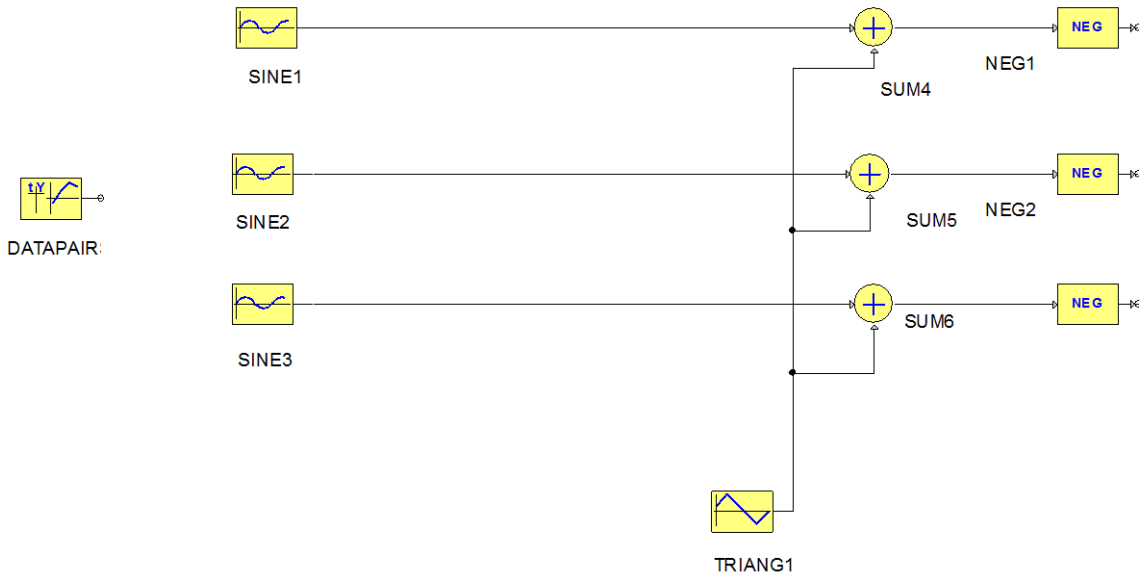
في هذا البحث سنقوم بإجراء كبح للمحرك وبالتالي لنظام الجر عن طريق التحكم بالتردد المطبق على ثابت المحرك، ففي مرحلة الكبح نقوم بالتخفيض التدريجي للتردد، لتصبح سرعة المحرك أكبر من السرعة التزامنية n_0 الموافقة للتردد المطبق لحظتها بفعل عزم عطالة الحمل، ويأخذ الانزلاق قيما سالبة، لتنتقل الالة للعمل كمولد تحريضي يحول الطاقة الميكانيكية للكتلة المتحركة الى طاقة كهربائية تحفن بجسر التعريج الذي ينتقل للعمل كمقوم يحقن التيار بشكله المستمر في نظام التخزين كما هو مبين بالشكل(4-21).



الشكل(4-21) الية الكبح عن طريق تخفيض تردد التغذية

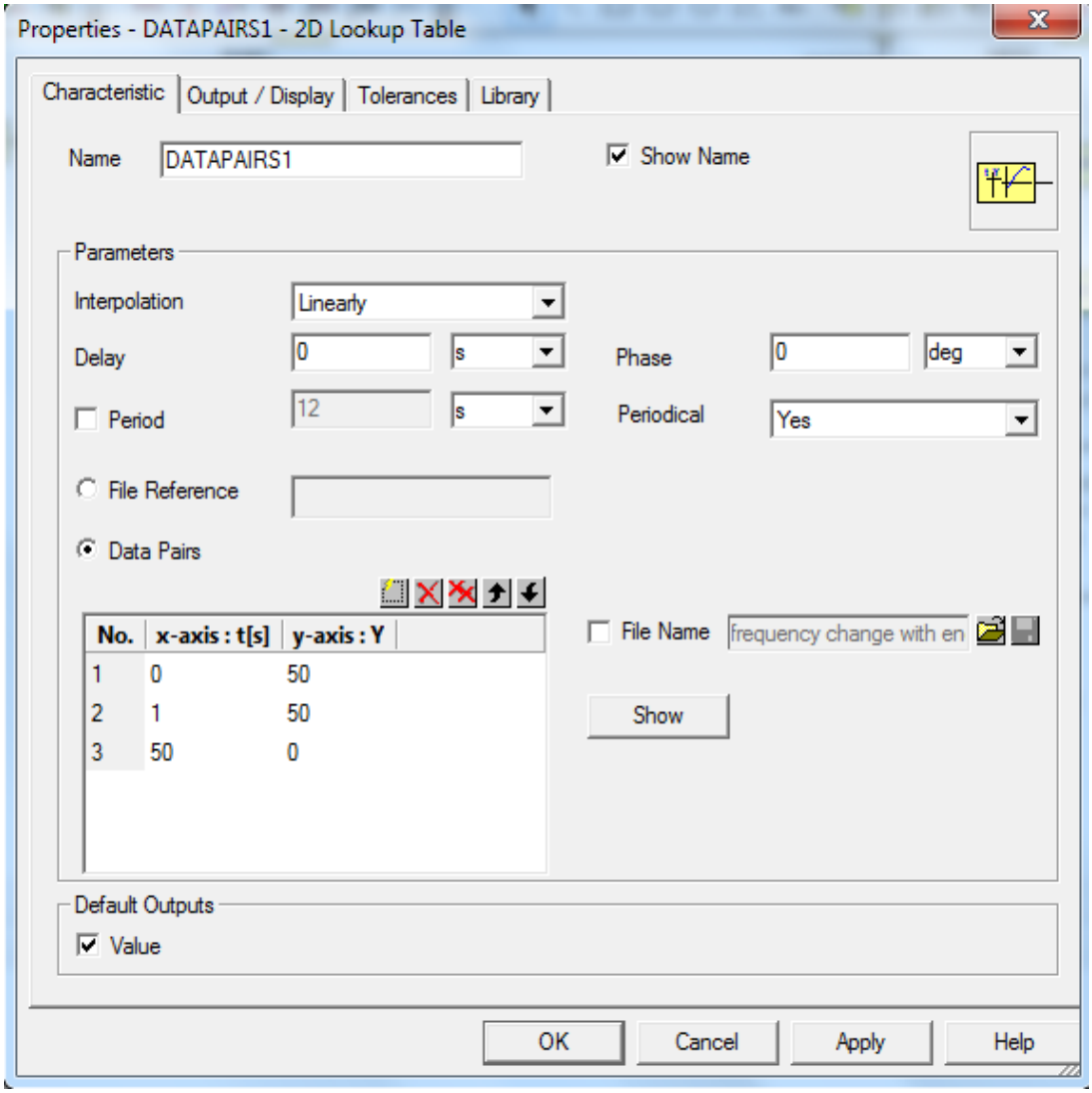
٤-٢-٣-٣-١- دارة القيادة circuit control

نقوم بتشكيل موجة توتر ثلاثية الطور عن طريق العنصر SINE، ونتحكم بتردد هذه الموجة عن طريق العنصر DATAPAIRS، الذي يعمل على تخفيض التردد خلال الفترة الزمنية المطلوبة (مرحلة الكبح باستعادة القدرة الكهربائية). تتم مقارنة الإشارات الجيبية الثلاثة التي تمثل الإشارات المرجعية مع تابع الإشارة المثلثية (TRIANG1) كما هو مبين بالشكل(4-22)، لتتشكل اشارات التحكم والتي تطبق بدورها على بوابات الترانزستورات.



الشكل(4-22) دارة القيادة

يبين الشكل(4–23) واجهة نموذج العنصر DATAPAIRS وكما هو واضح فقد ثبتنا قيمة التردد على قيمة 50[HZ] حتى لحظة بدء الكبح 1[s] وبعدها قمنا بتخفيض قيم التردد المطبق بشكل خطي.



الشكل(4–23) واجهة نموذج عنصر ال DATAPAIRS

٤-٢-٣-٣-٢- نتائج النمذجة

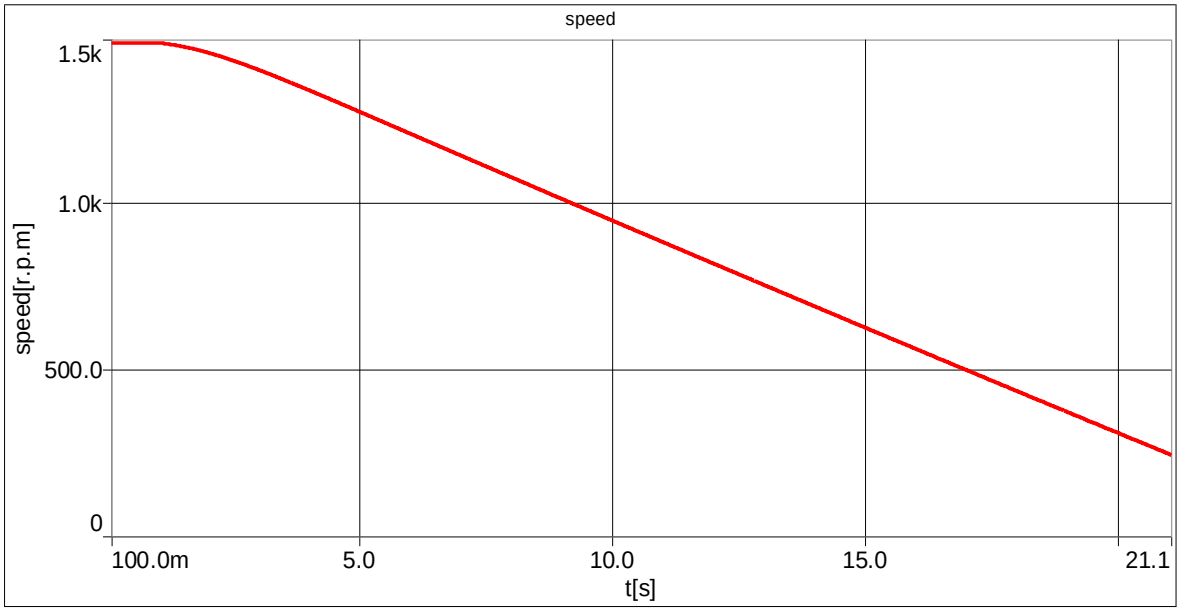
قمنا في هذه المرحلة بإقلاع المحرك بالاعتماد على دارة القيادة وفق مبدأ التحكم السلمي المشروحة سابقا، وعند الانتقال الى مرحلة الكبح اعتمدنا على دارة القيادة وفق مبدأ التحكم بالتردد.

عزم الحمولة $T_L = 100[NM]$ ، عزم عطالة الحمل $J_L = 100\ [kgm^2]$.

١- مرحلة الكبح باستعادة القدرة الكهربائية بدون نظام تخزين

يقوم نظام القيادة باستعادة القدرة الكهربائية وحقنها بالباسبار مما يؤدي الى ارتفاع توتر الباسبار.

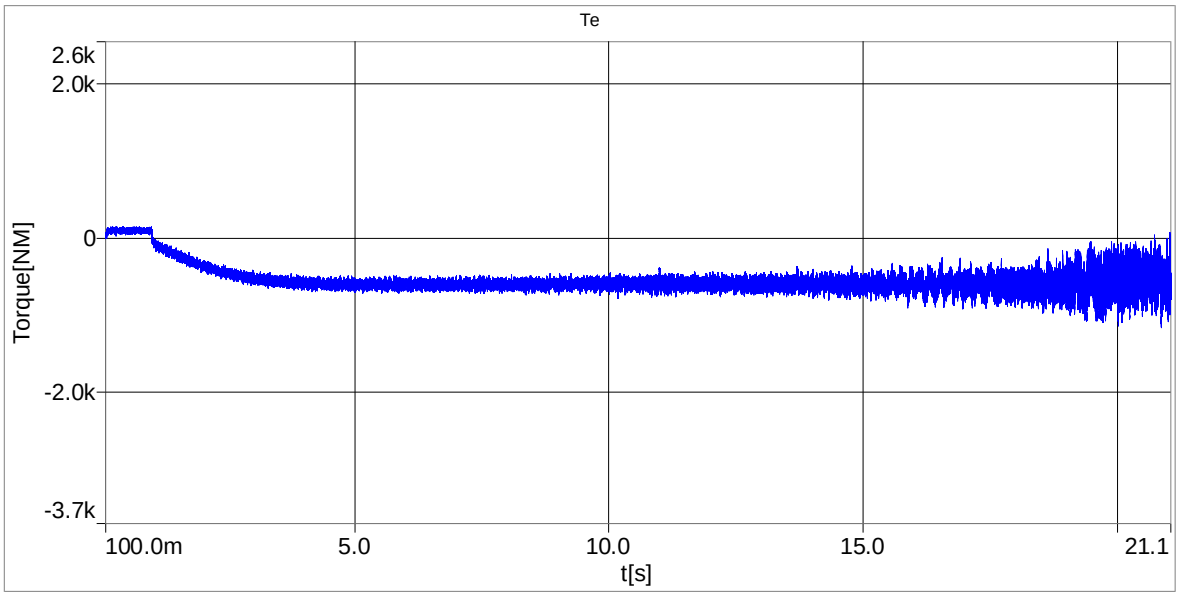
بدأت عملية الكبح عند اللحظة t=1[s] حيث بدأت عملية تخفيض التردد بواسطة العنصر DATAPAIRS ويبين الشكل(4-24) منحني السرعة خلال فترة الكبح والتي تستغرق زمن قدره t=20[s].



الشكل(4-24) منحني سرعة المحرك خلال فترة الكبح بدون نظام تخزين

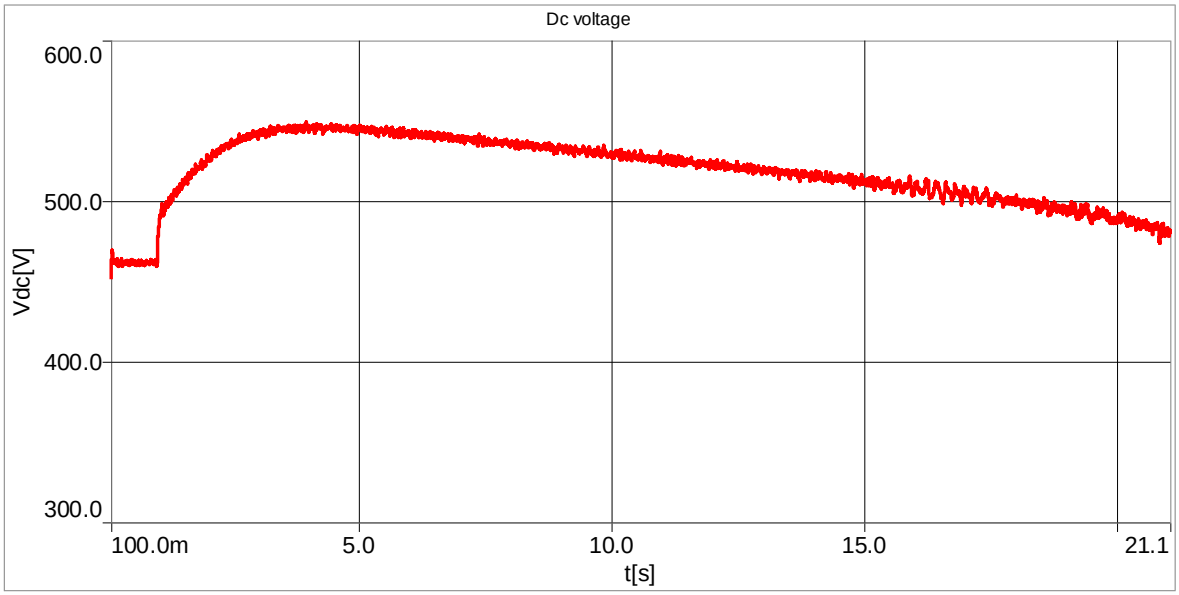
حيث تم كبح المحرك وتخفيض سرعته تدريجيا من القيمة 1480[rpm] حتى سرعة قريبة من الصفر.

ينتقل منحني العزم كما هو واضح من الشكل(4-25) خلال فترة الكبح من الجزء الموجب الى الجزء السالب لينتقل المحرك بدوره للعمل كمولد تحريضي في الربع الرابع لخصائصه الميكانيكية (عزم _ سرعة) وعند السرعات القريبة من الصفر نلاحظ اهتزاز المنحني نتيجة عدم الاستقرار.



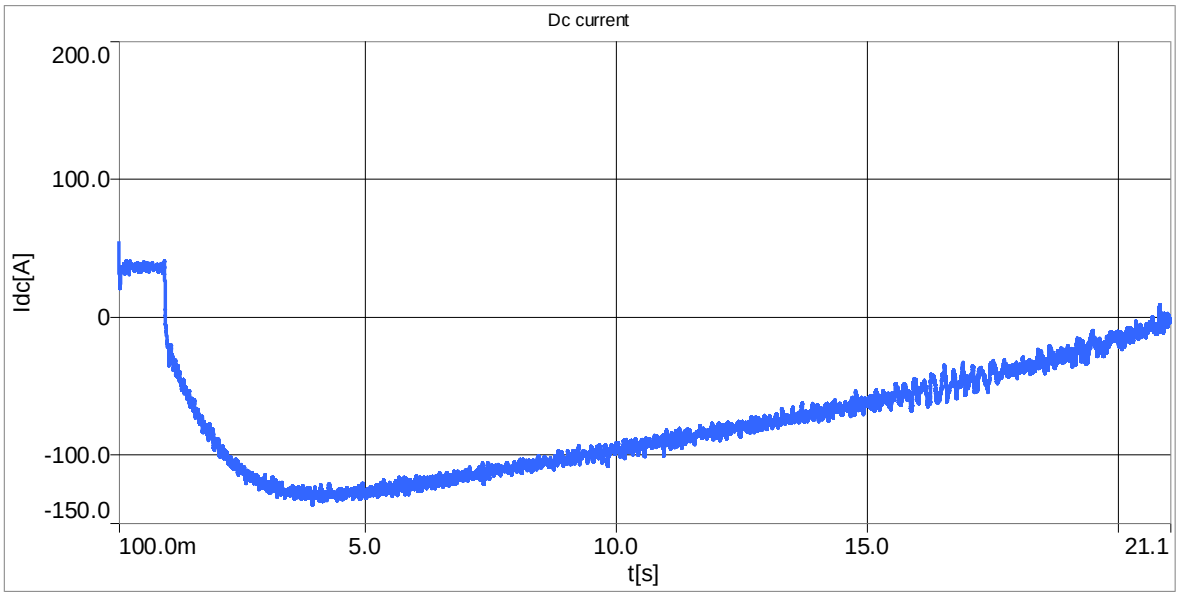
الشكل(4-25) منحني العزم خلال فترة الكبح

نتيجة لعدم وجود نظام تخزين للقدرة الكهربائية المسترجعة والمحقونة بالباسبار سيؤدي الى ارتفاع في قيمة التوتر المستمر، نلاحظ من منحني التوتر المستمر الشكل(4-26) استقراره على توتر الباسبار النظامي v_{dc}=480[v] خلال فترة استقرار السرعة وعمل الآلة كمحرك قبل لحظة بدء الكبح، وعند



الشكل(4-26) منحني توتر الباسبار بدون وجود نظام تخزين

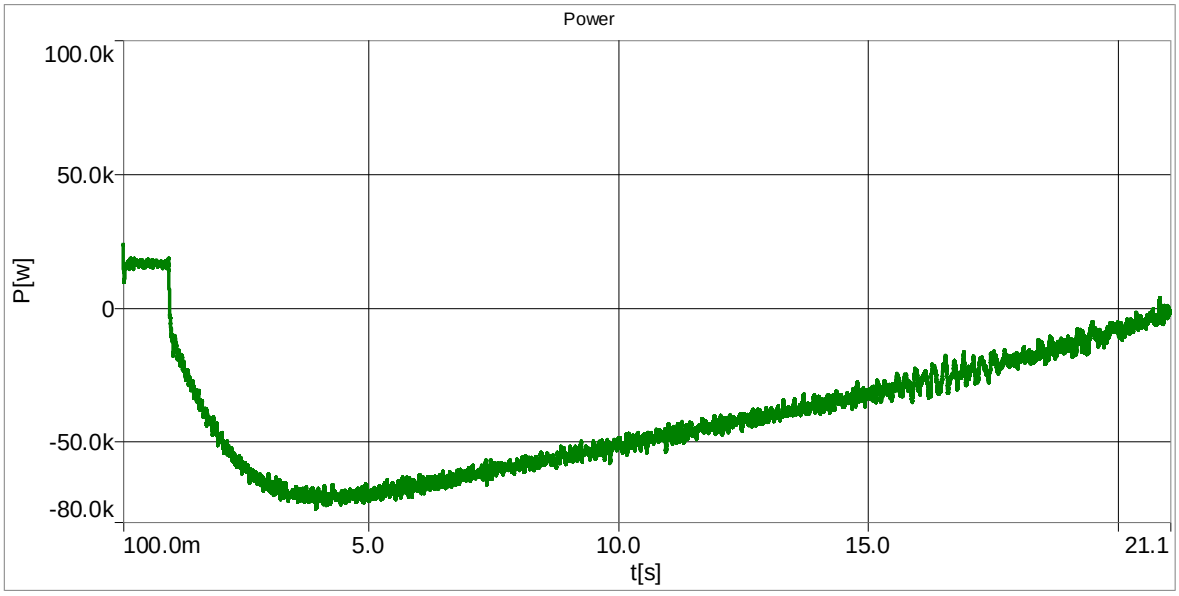
الانتقال لمرحلة الكبح نلاحظ ارتفاع في قيمة التوتر لتصل لقيمة v_{dc}=550[v] في لحظات الكبح الأولى نتيجة القدرة الكهربائية المسترجعة وتبديدها حراريًا، وهنا يجب استخدام حمايات لارتفاع التوتر. كما يلاحظ انتقال منحني تيار الباسبار الشكل(4-27) الى الجزء السالب وانعكاس جهة التيار المار في الباسبار نتيجة لعملية الكبح.



الشكل(4-27) منحني تيار الباسبار بدون وجود نظام تخزين

نلاحظ أنه من أجل السرعات المنخفضة عدم فعالية نظام الكبح باستعادة القدرة الكهربائية فعند السرعة N=250[rpm] تقريبا انعدم التيار المقدم من محرك الجر، ولذلك يتم استخدام المكابح الميكانيكية عند السرعات المنخضة للقاطرات.

يوضح الشكل(4-28) منحني استطاعة الباسبار فيلاحظ في مرحلة الكبح انعدام الاستطاعة المستجرة من المنبع، ليقوم المولد بحقن الاستطاعة الناتجة عن الكبح في الباسبار، ففي لحظة بدء عملية الكبح تكون قيمة الاستطاعة الناتجة عنها ([kw] 76-).



الشكل(4-28) منحني استطاعة الباسبار بدون وجود نظام تخزين

يلخص الجدول(4-4) نتائج مرحلة الكبح باستعادة القدرة الكهربائية في حال عدم وجود نظام تخزين

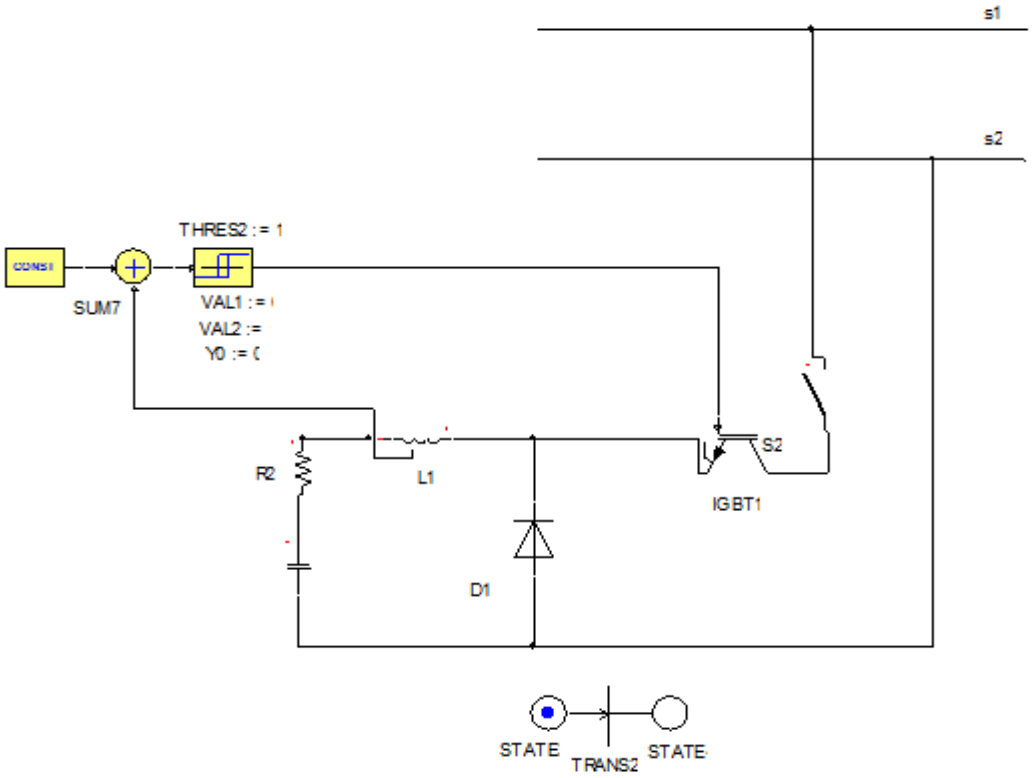
الجدول (4–4) نتائج قيادة المحرك بطريقة التحكم بالتردد بدون نظام تخزين

البارامترات / المراحل	الزمن T[s]	السرعة N[r.p.m]	العزم Te[NM]	توتر الباسبار Vdc[V]	تيار الباسبار Idc[A]	الاستطاعة P[w]
دوران المحرك بسرعة ثابتة	0.2	1480	97.99	470	41.9	16809.4
	0.9	1479.94	105.965	468	37	16318.2
مرحلة كبح المحرك	2	1450	-381.93	530	-95.7	-48870.9
	6	1205	-540.46	540	-124.25	-65125.6
	10	947	-659.9	527	-92.5	-50653.9
	14	688	-652.97	513	-65.45	-33715.2
	18	437	-505.14	499	-36.4	-21991.5
	21	245	-50	478	-5.2	-2566.25

٢- مرحلة الكبح باستعادة القدرة الكهربائية بوجود نظام تخزين

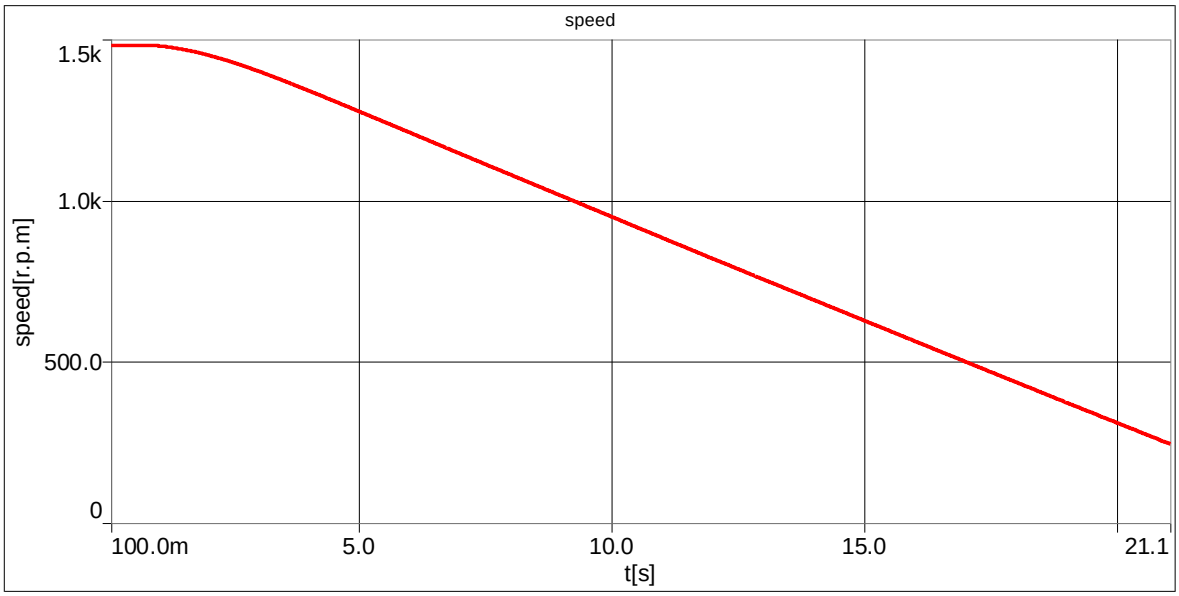
سيتم في هذه المرحلة اضافة نظام تخزين مع مقطع عكوس بالتيار كما هو مبين بالشكل(4-29) حيث سيتم قيادة المقطع عن طريق العنصر TPH (Two-point Element with Hysteresis) للتحكم بالتيار المار بالملف للحصول على اكبر قدر ممكن من القدرة المسترجعة وحقنها في نظام التخزين الكهربائي. يتصل المقطع بالباسبار من جهة وبنظام التخزين من الجهة المقابلة والذي يتكون من المكثفات فائقة السعة supercapacitor.

ينتقل القاطع S_2 للتوصيل عند الانتقال لمرحلة الكبح بواسطة العناصر المرحلية state والشرطية trans ليمرر القدرة الكهربائية المسترجعة الى المقطع والذي يقوم بحقنها في نظام التخزين الكهربائي.



الشكل(4-29) مخطط نظام التخزين

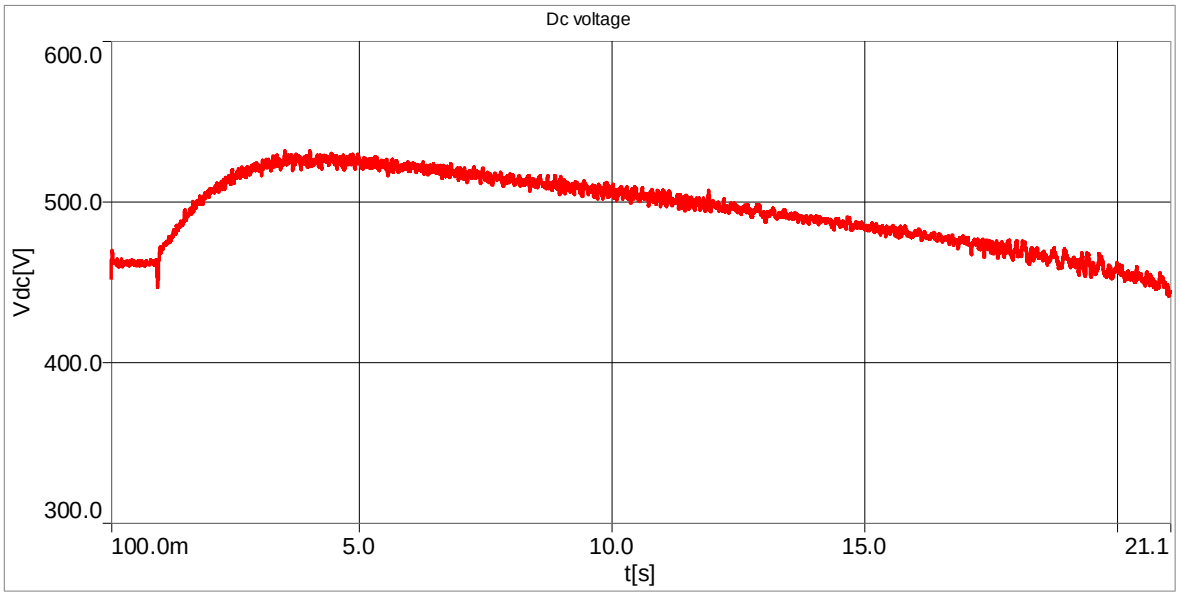
نظرا لربط نظام التخزين مع نظام القيادة سيتم تطبيق الكبح لأكبر فترة زمنية يتم خلالها شحن نظام التخزين بالقدرة الكهربائية المسترجعة وبعدها سوف يتم تطبيق نظام كبح ميكانيكي يضمن توقف القطار، وفي نموذجنا يستمر تطبيق الكبح باستعادة القدرة الكهربائية حتى اللحظة t=21[s] ، حيث كانت سرعة المحرك التحريضي 245[rpm] الشكل(4-30)، طبق نظام الكبح في اللحظة t=1[s].



الشكل(4-30) منحني سرعة المحرك خلال فترة الكبح بوجود نظام التخزين

وبشكل مشابه لحالة الكبح باستعادة القدرة الكهربائية بدون نظام تخزين فان منحني العزم ينتقل للجزء السالب الشكل(4-25).

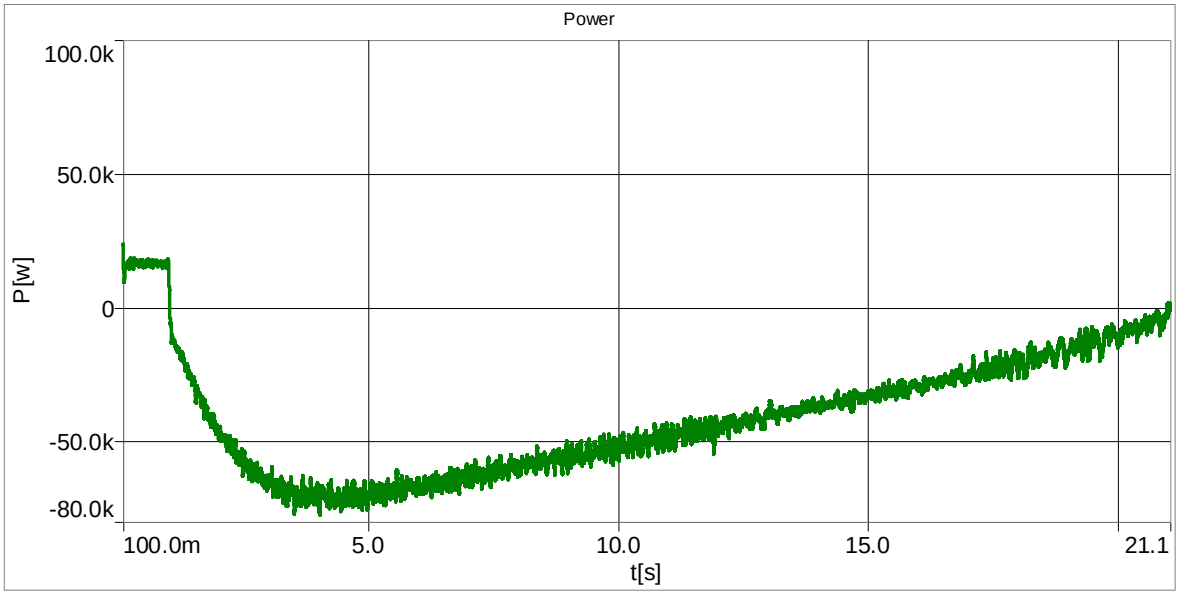
ان عملية اضافة نظام تخزين قدرة كهربائية لنظام القيادة سيخفض من قيمة التوتر الزائد على الباسبار خلال فترة الكبح، حيث يوضح الشكل(4-31) منحني توتر الباسبار في حال حقن القدرة المسترجعة



الشكل(4-31) منحني توتر الباسبار بوجود نظام تخزين

في نظام التخزين، وبمقارنته مع منحني التوتر في حال عدم وجود نظام التخزين الشكل(4-26) فيلاحظ انخفاض التوتر نتيجة حقن الطاقة الكهربائية في نظام التخزين.

يوضح الشكل(4-32) منحني الاستطاعة المحقونة في الباسبار، وتأخذ هذه الاستطاعة قيم كبيرة خلال فترة الكبح، تنعدم الاستطاعة المحقونة في الباسبار قبل اقتراب سرعة المحرك من الصفر، لذلك لابد من استخدام نظم كبح بديلة عند انعدام القدرة المسترجعة لضمان توقف المحرك وبالتالي القطار.



الشكل(4-32) منحني استطاعة الباسبار بوجود نظام تخزين

قمنا بتثبيت تيار المرجع لنظام قيادة المقطع عند القيمة 100[A] لضمان استجرار أكبر قدر ممكن من التيار خلال فترة الكبح، ان قيمة الطاقة الكهربائية المسترجعة في حال كان عزم عطالة الكتلة للقطار $100[kgm^2]$ مساوية ل W=300[wh] ، يحسب عدد عناصر نظام التخزين من المكثفات فائقة السعة من العلاقة(4-6).

$$W = \frac{1}{2} * C_{eq} * \Delta U^2 \qquad (6-4)$$

$$W = \frac{1}{2} * C_{eq} * (U_{max}^2 - U_{min}^2)$$

U_{max}=400 [v] ، U_{min}=200 [v] ، سعة نظام التخزين C_{eq}=18[F].

- عدد العناصر التسلسلية

$$n_s = \frac{U_{max}}{U_n}$$

- عدد العناصر التفرعية

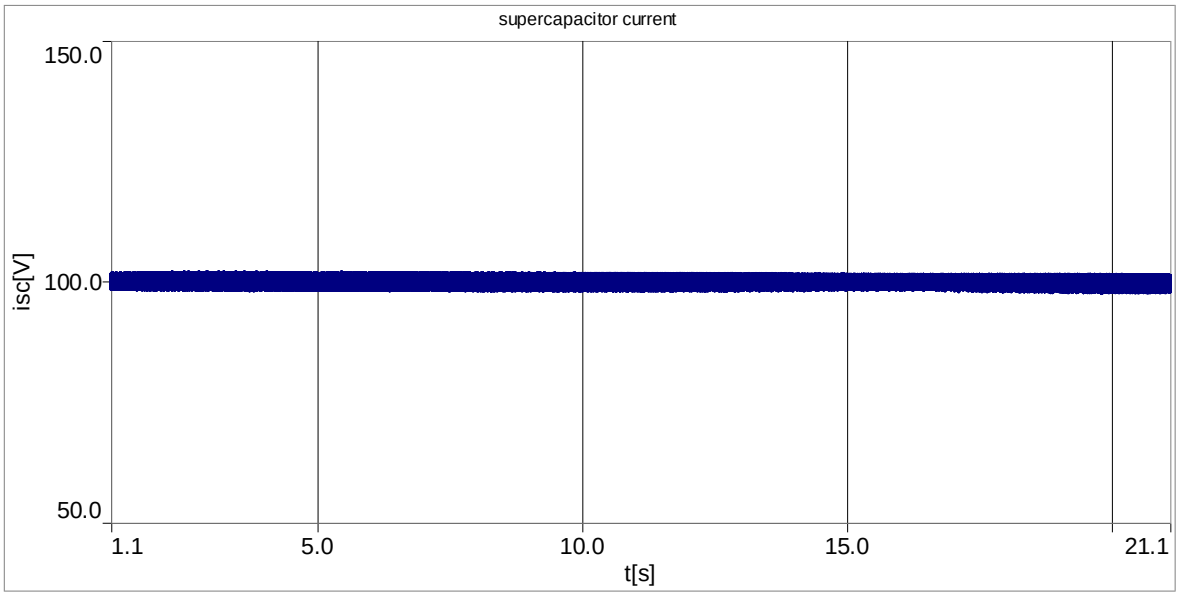
$$n_p = \frac{c_{eq} * n_s}{c_n}$$

- القيم الاسمية لعناصر التخزين 2600[F] ، 2.7[V]

n_p=1 ، n_s=150

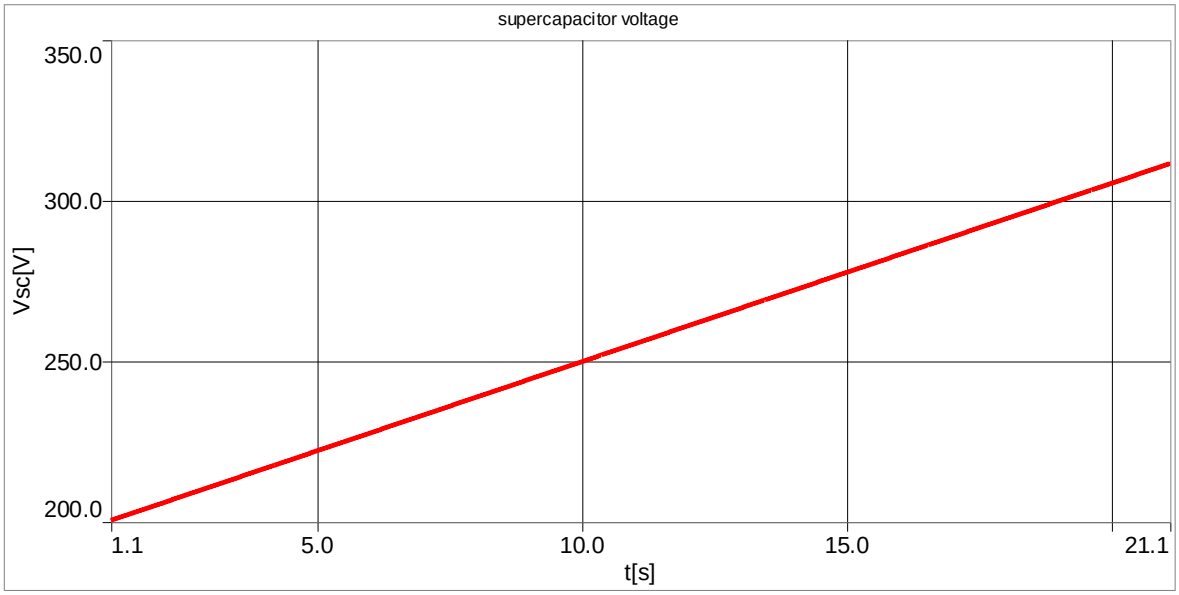
ومنه نحن بحاجة لنظام تخزين مكون من كدس واحد ذو 150 عنصر تخزين تسلسلي.

يبين الشكل (4-33) منحني التيار المار في نظام التخزين خلال فترة الشحن حيث نلاحظ اهتزاز المنحني حول قيمة التيار المرجعية 100[A].



الشكل(4-33) منحني تيار شحن نظام التخزين خلال الكبح

نتيجة لمرور التيار في نظام التخزين سيؤدي الى شحن المكثفات فائقة السعة وارتفاع توتر نظام التخزين الشكل (4-34) فخلال فترة الكبح ارتفع توتر نظام التخزين من 200[v] وحتى 310[v]. وخلال عمليات التوقف المتكررة يمكن شحن نظام التخزين بالكامل.



الشكل(4-34) منحني توتر نظام التخزين خلال الكبح

تم تلخيص نتائج مرحلة الكبح باستعادة القدرة الكهربائية بوجود نظام تخزين بالجدول (4-5)

الجدول(4-5) نتائج مرحلة الكبح باستعادة القدرة الكهربائية بوجود نظام تخزين

الزمن T[s]	السرعة N[r.p.m]	العزم Te[NM]	توتر الباسبار Vdc[V]	تيار الباسبار Idc[A]	الاستطاعة P[w]	تيار نظام التخزين Isc[A]	توتر نظام التخزين Vsc[V]
2	1450.8	-381.5	505.8	-89.9	-44868.9	99.2	205.5
6	1207	-659	521.5	-129.2	-68969.5	99.7	227.8
10	950	-631.2	508.9	-103.2	-52858.3	101.2	249.9
14	689	-625.8	488	-73.6	-37455	100.2	272.2
18	436	-510.5	473.4	-39.3	-24019.1	100.3	294.6
21	247	-387.02	465	-5.6	-2339.3	99.8	311.4

باستعراض النتائج المبينة بالجدول (4-5) نلاحظ:

١- الانتقال الخطي للسرعة وبشكل تدريجي من قيمتها الاسمية والبالغة [rpm]1480 وحتى 247[rpm] .

٢- يأخذ العزم قيما سالبة، وهذا يوافق انتقال المحرك للعمل كمولد.

٣- ارتفاع توتر الباسبار وخاصة في مراحل الكبح الأولى والناتج عن حقن الطاقة المسترجعة في الباسبار، ولكن قيمة التوتر أقل مما هي عليه في حالة الكبح بدون نظام تخزين، مما يدل على فعالية عملية شحن نظام التخزين.

٤- انعكاس اتجاه تيار واستطاعة الباسبار، ففي مرحلة الكبح ينعدم كلا من التيار والاستطاعة المستجرين من المنبع، ليعمل المحرك كمولد يزود الباسبار بالتيار والاستطاعة.

٥- ارتفاع تيار ثابت المحرك خلال فترة الكبح.

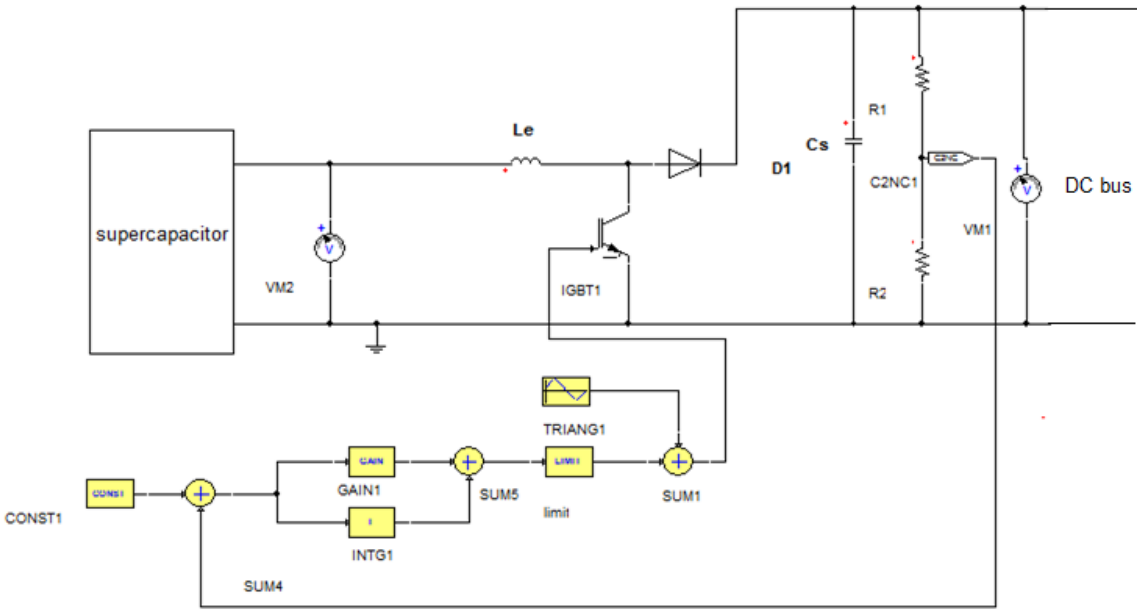
٦- القيمة الوسطية للتيار المار في نظام التخزين خلال فترة الكبح Isc=100[A] وهي مساوية لقيمة التيار المرجعية في نظام التحكم بالمقطع، وهذا يدل على عمل نموذج المقطع بشكل سليم وفعال.

٧- ارتفاع توتر نظام التخزين بما يقارب [V]111 نتيجة شحن هذا النظام بالقدرة المسترجعة.

٤-٢-٤- تفريغ القدرة المختزنة باستخدام المقطع التفرعي المقاد

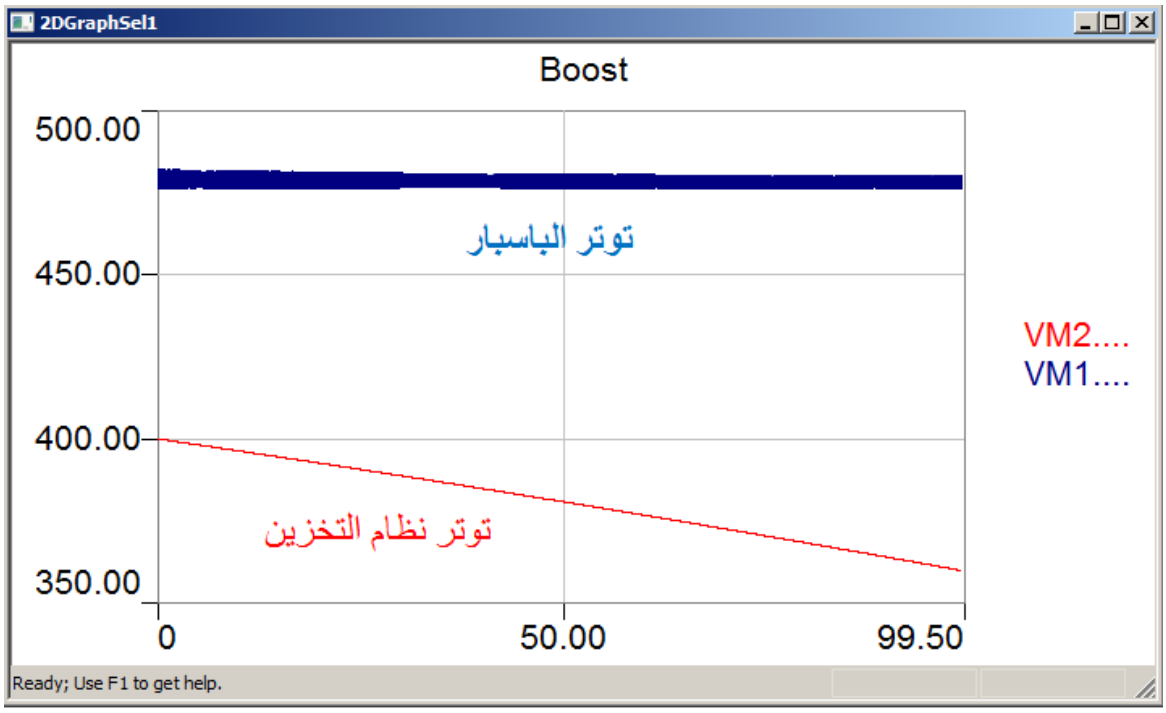
يتم الاستفادة من القدرة الناتجة عن عملية الكبح الكهربائي والمخزنة في نظام التخزين الكهربائي في تغذية نظام الجر الكهربائي أو في تغذية الأجهزة الكهربائية المتوضعة على متن القاطرة، قمنا بتفريغ نظام التخزين باستخدام مقطع تفرعي مقاد رافع للتوتر يعمل على تفريغ نظام التخزين والاستفادة من

الطاقة المختزنة فيه عن طريق رفع توتر خرج نظام التخزين بما يتناسب مع توتر الباسبار بواسطة التحكم بتوتر خرج المقطع باستخدام المتحكم PI controller كما هو مبين بالشكل (4-35)



الشكل(4-35) دارة قيادة المقطع

ويبين الشكل(4-36) منحني توتر الباسبار بالإضافة الى منحني توتر نظام التخزين خلال فترة تفريغ نظام التخزين الكهربائي، حيث يبقى التوتر على الباسبار ثابت خلال كامل عملية التفريغ بينما ينخفض توتر نظام التخزين تدريجيا مما يدل على حقن القدرة الكهربائية في الباسبار.



الشكل(4-36) منحني توتر الباسبار ونظام التفريغ خلال فترة التفريغ

الاستنتاجات

قمنا في الدراسة العملية بنمذجة عمل القاطرة، وقمنا بقيادة محرك الجر التحريضي بعدة طرق في حالات تشغيله المختلفة (اقلاع – كبح).

من النتائج التي حصلنا عليها لاحظنا:

- إن نظام التحكم والقيادة وفق .V/F=const يمتاز باستجابة سريعة لتغيرات النظام ودقة عالية.

✓ امكانية التحكم بزمن اقلاع وكبح المحرك.

✓ من أهم ميزات هذا النظام تتلخص في التغيرات الخطية لسرعة الدوران عند عمل المحرك في حالات الفرملة والإقلاع التي تتطلبها معظم أنظمة القيادة وخاصة آلات الجر والرفع.

✓ يحقق نظام التحكم المقترح دقة عالية في تنظيم سرعة الدوران وخاصة خلال فترات الاقلاع والكبح.

- عند الكبح الكهربائي لاحظنا ارتفاع التوتر على الباسبار الداخلي للقطار (باسبار التيار المستمر للمحرك)، مما يساعد على استعادة القدرة الناتجة عن كبح المحرك.
- اعتمدنا نظام قيادة محرك الجر التحريضي وفق مبدأ التحكم بالتردد في دراسة الكبح باستعادة القدرة الكهربائية بوجود نظام تخزين وفي حال عدم وجوده وبالمقارنة لاحظنا

✓ انخفاض توتر الباسبار خلال فترة الكبح في حال وجود نظام التخزين عما هو عليه في حال عدم وجود نظام التخزين وبالتالي لا داعي لاستخدام عناصر حماية من ارتفاع التوتر.

✓ الاستفادة من القدرة الكهربائية المسترجعة خلال فترة الكبح وتخزينها بدلا من تبديدها حراريا واعادة هذه القدرة للاستخدام بأشكال مختلفة منها تغذية التجهيزات المساعدة (التكييف مثلا).

✓ استخدمنا المكثفات فائقة السعة كعناصر لتخزين الطاقة الكهربائية المسترجعة ولاحظنا فعاليتها نتيجة شحنها في زمن بسيط وهذا جيد في نظم الجر كون فترة الكبح قصيرة.

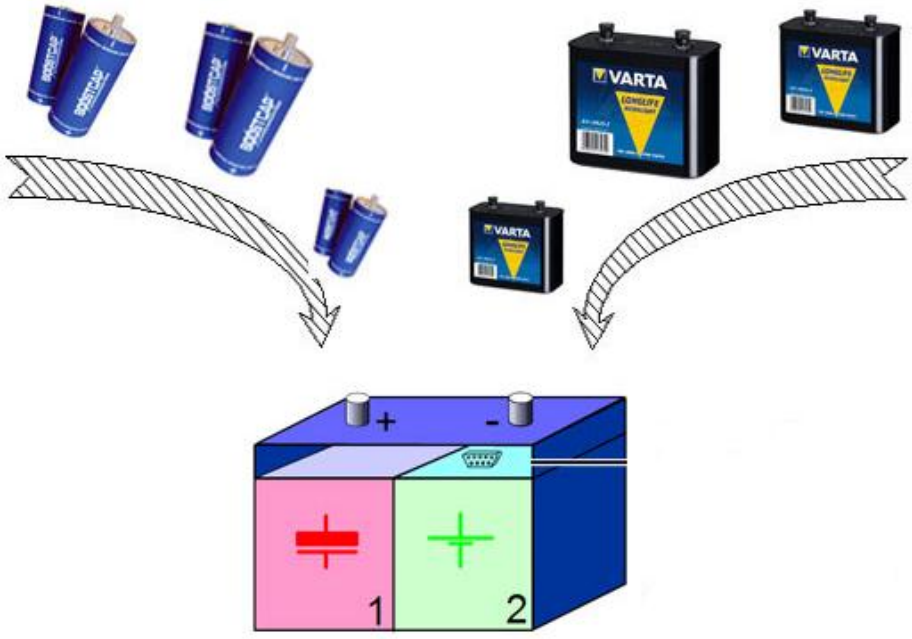
✓ قد نحتاج لعدة توقفات حتى يتم شحن نظام التخزين بالكامل.

✓ عند السرعات المنخفضة تنعدم القدرة المسترجعة لذلك يتم اللجوء الى طرق الكبح التقليدية.

- ان استخدام نظم تخزين حديثة ذات كفاءة عالية خلال فترة الكبح يحسن من أداء القاطرة والنظام الكهربائي. القدرة المختزنة في نظم التخزين تساعد على تخفيض استجرار القدرة من المولد الكهربائي وبالتالي استهلاك وقود أقل.
- من خلال المقارنة بين طرق القيادة والتحكم بالمحرك خلال فترة الكبح، نجد أن طريقة التحكم بالتردد هي الطريقة الأنسب والأفضل وتساعد على استعادة أكبر قدر من الطاقة.

التوصيات

- التوجه إلى استخدام نظام الجر المركب في السيارات واعتماده وذلك بسبب استخدام المكابح بكثرة وخصوصا ضمن المدن.
- دراسة طرق حديثة لقيادة المحركات المستخدمة في نظم الجر الكهربائية والهجينة.
- التوجه الى استخدام المكثفات فائقة السعة supercapacitors كنظم تخزين بديلة للبطاريات batteries، نظرا لما تتمتع به من خصائص جيدة بالنسبة لنظام الجر الهجين.
- دراسة الجدوى الاقتصادية لاستخدام المكثفات فائقة السعة كنظم تخزين كهربائية بديلة لنظم التخزين التقليدية في القاطرات الهجينة.
- دراسة الجدوى الاقتصادية لتحديد مقدار الوفر في الطاقة الكهربائية من خلال عدد مرات الكبح خلال مسار معين.
- التوجه الى استخدام نظم التخزين الهجينة (مدخرات – مكثفات فائقة السعة) لما تتميز به من خصائص جيدة من حيث كثافة الاستطاعة وكثافة الطاقة وغيرها من الخصائص.



المراجع

Reference

[1] J. Zavada and T. Pleša, " hybrid propulsion of railway vehicles ", faculty of transport and traffic sciences,Republic of Croatia.

[2] C. Mi, " emerging technology of hybrid electric vehicles", department of electrical and computer engineering, university of michigan – dearborn, USA.

[3] P. Barrade and B. Destraz and A. Rufer, " hybrid vehicle in railways applications ", Switzerland.

[4] L. Lingaitis and i. Liudvinavičius, (2010), "new locomotive energy management systems".

[5] هاشم أبو الخير و ياسر دياب، (2010)،"محاضرات في نظم تخزين القدرة الكهربائية"، جامعة دمشق.

[6] Http://www.toyota.co.jp/en, (2007), "hybrid synergy drive".

[7] M. Zeraoulia M. Benbouzid and D. Diallo, (2006), " electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: a comparative Study" IEEE transactions on vehicular technology, vol. 55, no. 6.

[8]هاكوب بوغوص و علي الجازي، (2007)،"الآلات (اللاتزامنية) التحريضية"،كتاب، جامعة دمشق.

[9] نوال علي اسماعيل وبسام عطية و مصطفى دليلة، " قيادة المحركات التحريضية باستخدام المتحكم الصغري وفق مبدأ التحكم السلمي"، رسالة ماجستير، جامعة تشرين.

هاشم ورقوزق، " الكترونيات القدرة الكهربائية (١)"، كتاب، جامعة دمشق. [10]

[11] M. Rashid, (2007), "power electronics handbook" Florida.

[12] N. Mohan, (2003), "power electronics and drives", printed in USA.

عمار الكردي، كتاب، "الإلكترونيات الاستطاعية والمتحكمات". [13]

[14] L. Liudvinavicius and L.P. Lingaitis, (2009), "locomotive energy savings possibilities", Volume 4, Issue 3, Part 1.

[15] T. Painter, (2006), "recovering railroad diesel -electric locomotive dynamic brake energy", Thesis for the degree of master, University of Illinois at Urbana-Champaign.

[16] Braking / Regeneration Manual.

[17] T. Minav, (2011), " electic-drive-based control and electric energy regeneration in a hydraulic system", Thesis for the degree of Doctor.

[18] P. Garcia, L. Fernandez, C. Garcia, and F. Jurado, (2010), " energy management system of fuel-cell-battery hybrid tramway ", IEEE transactions on industrial electronics, vol. 57, no. 12.

[19] M. Amiri and B. Asaei, (2007), "high efficient intelligent motor control for a hybrid shunting locomotive ", IEEE, Tehran, Iran.

[20] simplorer ™ simulation system, version 7.0.1, Ansoft corporation.

Abstract

In this work we use modern energy storage system by supercapacitor for recovering the electrical energy during braking in hybrid locomotives (diesel – electric).

The modeling of electric motor and control circuits is simulated in environmental simplorer software. We investigate on the period of startup and and speed control.

We focus on braking period and we use special control to recovery the kinetic energy stored in (motor and load).

We use the electrical storage energy in supercapacitor systems to (startup, acceleration) the motor.