جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
قسم الطاقة الكهربائية

أطروحة أعدت لنيل درجة الماجستير في هندسة الطاقات المتجددة

بعنوان

# " دراسة أداء المولدات ذات التغذية المزدوجة بدون مسفرات (BDFM) في المزارع الريحية ".

إعداد

المهندس محمد ماهر الطباخ

المشرف العلمي
الأستاذ الدكتور عاكوب بوغوص

المشرف المشارك
الأستاذ الدكتور علي الجازي

العام الدراسي
2012-2013

جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
قسم الطاقة الكهربائية

# أطروحة أعدت لنيل درجة الماجستير في هندسة الطاقات المتجددة

## بعنوان

" دراسة أداء المولدات ذات التغذية المزدوجة بدون مسفرات (BDFM) في المزارع الريحية ".

**“ Performance Study Of Brushless Doubly-Fed Machine (BDFM) in Wind Farms “.**

إعداد

المهندس محمد ماهر الطباخ

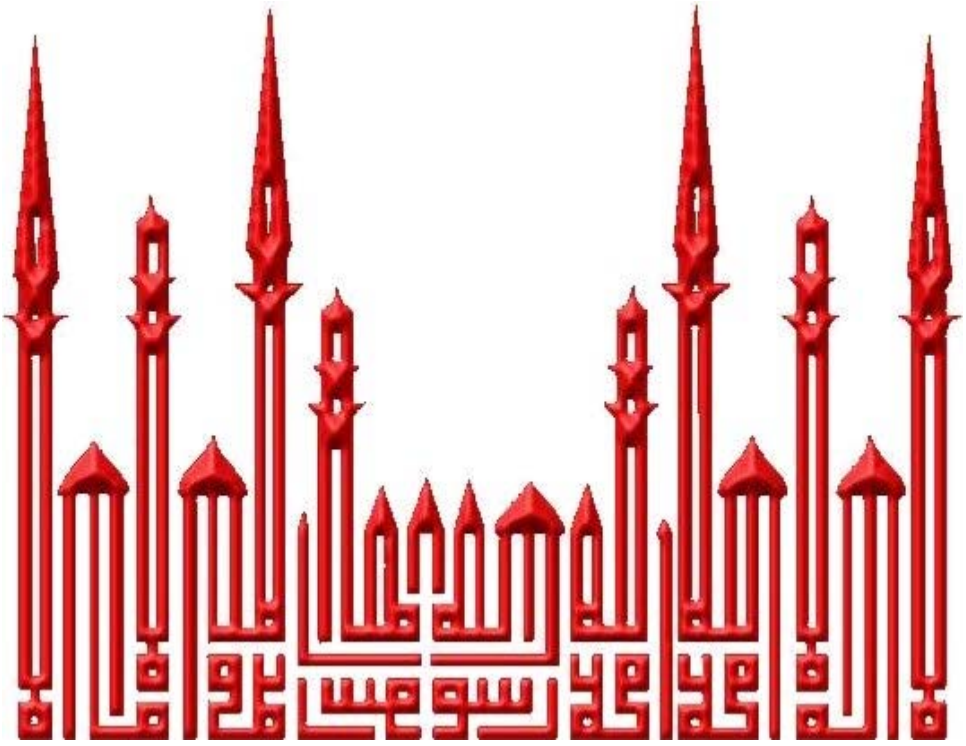
المشرف العلمي
الأستاذ الدكتور هاكوب بوغوص

المشرف المشارك
الأستاذ الدكتور علي الجازي

لجنة الحكم

أ.د.هاشم ورقوزق  أ.د.هاكوب بوغوص  أ.م.د.عبد الله سامين

العام الدراسي
2012-2013



# كلمة في حدود اللانهاية

قال رسول الله صلى الله عليه و آله و صحبه و سلم : "من لم يشكر الناس لم يشكر الله".

**عندما ترسو السفينة في أحضان الميناء بعد رحلة طويلة، تكون ابتسامة الوصول كافية لنسيان المتاعب، ولا يبقى في الذاكرة إلا أولئك الذين جاهدوا لإيصال الرحلة إلى بر الأمان.....**

**إلى العقول التي أعطت بلا حدود فاستحقت منا خالص الحب والتقدير.....**

**إلى هؤلاء أتوجه بالشكر الجزيل.....**

**أتقدم بجزيل الشكر وعميق الامتنان للذين أناروا لي سبيل العلم وعبدوا أمامي طريق المعرفة وسهروا معي على إتمام هذا العمل المتواضع.**

**وأخص بالشكر والامتنان من ساندني وأرشدني وقدم لي كل مساعدة في مشروعي هذا، و أحاطني بالرعاية والاهتمام وذلل لي المصاعب والعقبات وكان مرشداً حكيماً وموجهاً نافذ البصيرة، عسى أن أرد قسطاً صغيراً من عطائه لي. إلى :**

الأستاذ الدكتور هاكوار بوعوض

الأستاذ الدكتور علي الجازي

# الإهداء

**الحمد لله الذي لا يبلغ مدحه القائلون، ولا يحصي نعمائه العادّون ولا يؤدي حقه المجتهدون، وبعد:**

**أسأل الباري عز وجل أن يوفقني لطرح المعرفة والفائدة بأسلوب يخدم الطلاب، وأن يبقى هذا العمل علماً يُنتفع به وكتيباً يُستأنس به.**

**إلى مصدر فخري واعتزازي ... إلى من تفانى بعطائه دون مقابل ... إلى من يرقبني بصمت، ويوجهني بإيحاء، ويزرع الأمل ويدفعني إلى الأمام، من أستمد قوتي من قوته، وأرفع جبيني في ظله ...**

**والدي الحبيب**

**إلى من تتضاءل ينابيع الأرض أمام نبع حنانها ... وتنحني الدنيا أمام عظمة صبرها ... ويسكن دفء الشمس في حنايا قلبها ... وينطفئ نور القمر أمام نور وجهها ...**

**إلى من أشرقت حياتي بنور ابتسامتها..... و أُطربت أُذني بنغمات دعائها.....**

**إلى من تسبق دمعتها دمعتي وتتلو بسمتها بسمتي... إلى نبض عروقي ... إلى ملاكي ...**

**أمي الحنونة**

**إلى من ضمني بأحضانه وترعرعت تحت سمائه إلى من تعلقت روحي بذرَّات ترابه ونسمات هوائه وحبات مطره، إلى من ترخص الروح لأجله وأهب حياتي لبنائه....**

**وطني الغالي**

**إلى الباحث عن غذاء العقل .....**

**إلى الناظر للمستقبل المشرق .....**

**إلى الساعي لرفعة الأمة .....**

**إلى كل متعلم ومتعلمة**

**إلى كل من رسم البسمة على شفتي**

**إليكم جميعاً**

**إلى كل هؤلاء أهدي وبكل تواضع هذا العمل.**

**م. محمد ماهر الطَّبَّاخ**




**أتوجه بالشكر العميق لكل من ساعدني وساهم معي في إتمام مشروعي أو قدّم لي ملاحظةً صغيرةً كانت أم كبيرةً، عامةً كانت أم خاصةً، أستاذاً كان أم طالباً، صديقاً كان أم أخاً، ولكلّ من تحمل ما بدر مني من أسئلة.**

**عسى أن يوفقني الله يوماً إلى رد جميلهم هذا وأخص بالشكر:**

- **الدكتور المهندس زياد السقا.**
- **Eng.Siva Malla - avanthi engineering college - India.**
- **Eng. Behzad jandaghi – Researcher from Iran**

Dr. Said Mahmoud M. Allam
Assistant Professor
Electrical Power and Machines Engineering Department
Faulty of Engineering - Tanta University
Tanta - Egypt
Tel: 002-01003898126
E-mail: sm_allam@hotmail.com sm_allam@f-eng.tanta.edu.eg

Dr. Ahmed Mohamed Refaat Azmy
Faculty of Engineering - Tanta University
Department of Electrical Power and Machines Engineering
Director of the automated library project in Tanta University
Director of the quality assurance unit
Executive director of the continuous improvement and qualification for accreditation program CIQAP
Tel: +20-48-2581188 Mobile: +20-12-9715040
E-Mail: azmy.ahmed@hotmail.com azmy@uni-duisburg.de

# فهرس المحتويات

# Index


فهرس المحتويات..... I
قائمة الأشكال..... V
قائمة الجداول..... X
جدول الرموز..... XI
الملخص..... XIII
المقدمة..... XV
الدراسات المرجعية..... XVII


## أولاً : الجزء النظري

### الفصل الأول: معلومات عامة عن العنفات الريحية (تطورها – بنيتها – مبدأ عملها)


المقدمة..... ( ٢ )
١-١: مقدمة عن واقع الطاقة والتأثير البيئي..... ( ٢ )
١-٢: الطاقات المتجددة..... ( ٢ )
١-٣: الطاقة الريحية المتوفرة والمتوقع الاستفادة منها..... ( ٣ )
١-٤: التصاميم الحديثة للعنفات الريحية..... ( ٤ )
١-٤-١: العنفات الريحية ذات المحور العمودي..... ( ٤ )
١-٤-٢:العنفات الريحية ذات المحور الأفقي..... ( ٥ )
١-٥: القوى الآيروديناميكية المؤثرة على شفرة العنفة الريحية..... ( ٩ )
١-٦: آلية تحويل الطاقة الحركية للرياح إلى طاقة كهربائية..... ( ١٠ )
١-٧:الاستطاعة المستخلصة من الرياح في العنفات الريحية..... ( ١١ )
١-٧-١: حساب الاستطاعة الكهربائية المستخلصة من الرياح في العنفات الريحية..... ( ١٢ )
١-٧-١-١: علاقة الاستطاعة الكهربائية المنتجة بسرعة الرياح..... ( ١٢ )
١-٧-١-٢: الطاقة الفعلية المولدة من الرياح..... ( ١٣ )
١-٧-١-٣: نظرية بيتز..... ( ١٤ )
١-٨:العوامل المؤثرة على الاستطاعة المستخلصة من الرياح في العنفات الريحية..... ( ١٥ )
١-٩: أنواع الأنظمة الريحية..... ( ١٩ )
١-٩-١:الأنظمة الريحية التي تعمل عند سرعة ثابتة..... ( ١٩ )
١-٩-٢: الأنظمة الريحية التي تعمل عند سرعات متغيرة..... ( ٢٤ )
الخاتمة..... ( ٣٣ )

## الفصل الثاني: دراسة نظرية في المولدات التحريضية التقليدية (عملها – طرق التحكم بسرعتها – أنواعها)


المقدمة..... ( ٣٥ )

٢-١: مبدأ عمل المحرك التحريضي ثلاثي الطور..... ( ٣٥ )

٢-٢:الدارة المغناطيسية للمحرك التحريضي ومعادلات التوتر..... ( ٣٧ )

٢-٣: المولدة التحريضية..... ( ٤٠ )

٢-٣-١: مبدأ عمل المولد التحريضي..... ( ٤١ )

٢-٣-٢: الدارة المكافئة للمولد التحريضي..... ( ٤٣ )

٢-٣-٣: الاستطاعات والضياعات في المولدة التحريضية..... ( ٤٥ )

٢-٤: تنظيم سرعة الآلات التحريضية بطريقة الوصل التتابعي..... ( ٤٧ )

٢-٥:بعض أنواع المولدات التحريضية المستخدمة مع الأنظمة الريحية التي تعمل عند سرعات متغيرة..... ( ٥١ )

٢-٥-١: المولدات التحريضيةالتقليدية (I.G)..... ( ٥١ )

٢-٥-٢: المولد التحريضي ذو التغذية المزدوجة (دائر ملفوف) (DFIG)..... ( ٥٢ )

٢-٥-٢-١: وصف المولد التحريضي ذو التغذية المزدوجة (دائر ملفوف) (DFIG)..... ( ٥٢ )

٢-٥-٢-٢: مبدأ عمل المولد التحريضي ذو التغذية المزدوجة (DFIG)..... ( ٥٣ )

٢-٥-٢-٣: بنية وعمل المبدل الالكتروني جانب الدائر في المولد (DFIG)..... ( ٥٤ )

٢-٥-٢-٤: عمل المبدل الالكتروني جانب الشبكة في المولد (DFIG)..... ( ٥٤ )

٢-٥-٢-٥: ميزات المولد التحريضي ذو التغذية المزدوجة (DFIG)..... ( ٥٥ )

٢-٥-٢-٦: مساوئ المولد التحريضي ذو التغذية المزدوجة (DFIG)..... ( ٥٥ )

الخاتمة..... ( ٥٦ )


## الفصل الثالث: دراسة نظرية في الآلة التحريضية ذات التغذية المزدوجة بدون مسفرات *(BDFM)*.


مقدمة..... ( ٥٨ )

٣-١: التطور التاريخي للآلة التحريضية ذات التغذية المزدوجة بدون مسفرات (BDFM) ..... ( ٥٩ )

٣-٢: مقدمة نظرية عن الآلة (مم تتألف – مبدأ العمل)..... ( ٦١ )

٣-٣: أنماط تشغيل الآلة..... ( ٦٣ )

٣-٤:الدارة المكافئة للآلة (BDFM)..... ( ٦٤ )

٣-٤-١: تبسيط الدارة المكافئة للآلة (BDFM)..... ( ٦٩ )

٣-٤-٢: استنتاج علاقة العزم للآلة (BDFM)..... ( ٧٢ )

٣-٥: تصميم الدائر في الآلة (BDFM)..... ( ٧٣ )

٣-٦: المبدل الالكتروني الاستطاعي المستخدم مع الآلة (BDFM)..... ( ٧٤ )

٣-٧: توازن الاستطاعات في الآلة (BDFM)..... ( ٧٥ )

٣-٧-١: معادلات توازن الاستطاعة في الآلة (BDFM)..... ( ٧٧ )
٣-٧-٢: العلاقة بين تدفق الاستطاعات في ملفي الثابت وبين انحراف سرعة دوران المحور عن السرعة الطبيعية في الآلة (BDFM).... ( ٨٠ )
٣-٨: أكثر التطبيقات انتشارا للآلة (BDFM)..... ( ٨١ )
٣-٩: ميزات ومساوئ الآلة (BDFM)..... ( ٨٢ )

# ثانياً : الجزء العملي

## الفصل الرابع : نمذجة ومحاكاة العنفة الريحية باستخدام بيئة الـ *Matlab/Simulink* .

مقدمة..... ( ٨٦ )
٤-١: الخصائص الميكانيكية للعنفة الريحية..... ( ٨٦ )
٤-٢:النموذج الرياضي للعنفة الريحية..... ( ٨٧ )
٤-٣:مواصفات العنفة الريحية التي ستتم نمذجتها..... ( ٨٨ )
٤-٤:المخطط الصندوقي للعنفة الريحية في بيئة الـ Matlab/Simulink..... ( ٨٨ )
٤-٥:دراسات و نتائج مستخلصة من نمذجة العنفة الريحية..... ( ٩١ )
٤-٥-١: دراسة تأثير تغير زاوية ميلان الشفرات $\boldsymbol{\beta}$ على منحنيات $\boldsymbol{C_p - \lambda}$..... ( ٩١ )
٤-٥-٢: دراسة تأثير تغير زاوية ميلان الريش على منحنيات الخصائص الميكانيكية للعنفة الريحية ..... ( ٩٢ )
٤-٥-٣: دراسة تأثير تغير سرعة الرياح على منحنيات الخصائص الميكانيكية للعنفة الريحية ..... ( ٩٤ )
٤-٥-٤: منحني نقاط الاستطاعة العظمى المستخلصة من الرياح..... ( ٩٥ )

## الفصل الخامس: نمذجة المولد التحريضي التقليدي وربطه مع عنفة ريحية باستخدام بيئة بيئة الـ *Matlab/Simulink* .

٥-١: وضع النموذج الرياضي للمولد التحريضي التقليدي عند الربط مع الشبكة ودراسة الحالات العابرة فيه في الحالة العامة... ( ٩٩ )
٥-٢:النظرية العامة للآلات الكهربائية..... ( ١٠٠ )
٥-٢-١: المعادلات العامة في الآلة المثالية عند الربط مع الشبكة..... ( ١٠٣ )
٥-٢-٢: معادلات التوتر..... ( ١٠٤ )
٥-٢-٣: المعادلة العامة للعزوم والسرعة والاستطاعات..... ( ١٠٦ )
٥-٣:دراسة خصائص المولد التحريضي في الحالات العابرة..... ( ١٠٨ )
٥-٤:التجارب العملية..... ( ١٠٩ )
٥-٤-١: التجربة الأولى: إقلاع المولد التحريضي التقليدي عند ربطه مع حمولة ميكانيكية ذات عزم ثابت..... ( ١٠٩ )
٥-٤-٢: التجربة الثانية: إقلاع المولد التحريضي التقليدي عند ربطه مع حمولة ميكانيكية ذات مع عزم مروحي..... ( ١١٤ )
٥-٤-٣: التجربة الثالثة: دراسة تأثير تغير زاوية ميلان الريش (β)..... ( ١١٩ )
٥-٤-٤: التجربة الرابعة: دراسة تأثير تغير سرعة الرياح..... ( ١٢٣ )
٥-٤-٥: التجربة الخامسة: دراسة التغيرات عند الانتقال من حالة العمل كمحرك، إلى حالة العمل كمولد..... ( ١٢٦ )
٥-٤-٦: التجربة السادسة: ربط المولدة التحريضية إلى الشبكة بعد وصولها إلى السرعة التزامنية..... ( ١٢٨ )

الفصل السادس: نمذجة المولد التحريضي ذو التغذية المزدوجة بدون مسفرات وربطه مع عنفة ريحية باستخدام بيئة الـ Matlab/Simulink
مقدمة..... ( ١٣٢ )
٦-١: وضع النموذج الرياضي للآلة (BDFM)..... ( ١٣٢ )
٦-٢: آلية التحكم بتوتر وتردد التغذية لملف التحكم في النموذج الحاسوبي للآلة (BDFM)..... ( ١٣٨ )
٦-٣: مواصفات الآلة (BDFM) التي تمت نمذجتها..... ( ١٣٩ )
٦-٤: نمذجة المولد (BDFM) باستخدام بيئة الـ Matlab/Simulink..... ( ١٣٩ )
٦-٥:التجارب العملية..... ( ١٤١ )
٦-٥-١: التجربة الأولى: دراسة التغيرات عند الانتقال من العمل في النمط الأحادي إلى العمل في النمط المزدوج..... ( ١٤١ )
٦-٥-٢: التجربة الثانية: دراسة إمكانية التوليد عند عمل الآلة (BDFM) تحت سرعتها التزامنية الاسمية..... ( ١٤٤ )
٦-٥-٣: التجربة الثالثة: دراسة تأثير تغير توتر ملف التحكم على أداء الآلة (BDFM)..... ( ١٤٧ )
٦-٥-٤: التجربة الرابعة: دراسة تأثير تغير تردد ملف التحكم على أداء الآلة (BDFM)..... ( ١٥٠ )
٦-٥-٥: التجربة الخامسة: ملاحقة نقاط الاستطاعة العظمى مع تغير سرعة الرياح..... ( ١٥٣ )
٦-٥-٦: التجربة السادسة: ملاحقة نقاط الاستطاعة العظمى مع تغير زوايا ميلان الريش..... ( ١٥٧ )
النتائج العلمية للبحث..... ( ١٦٢ )
المقترحات..... ( ١٦٥ )
المراجع..... ( ١٦٦ )

# قائمة الأشكال

# List of Figures


الشكل (١-١): مزرعة ريحية بعيدة عن الشاطئ (Off-shore)، ومزرعة ريحية على اليابسة (On-shore)..... ( ٣ )
الشكل (١-٢): الزيادة في الاستطاعة المتوقع الحصول عليها من طاقة الرياح حتى عام 2010 في أوروبا..... ( ٤ )
الشكل (١-٣): العنفات ذات المحور العمودي..... ( ٤ )
الشكل (١-٤): العنفات الريحية ذات المحور الأفقي..... ( ٥ )
الشكل (١-٥): مكونات العنفة الريحية ذات المحور الأفقي..... ( ٦ )
الشكل (١-٦): شكل توضيحي للصرة..... ( ٦ )
الشكل (١-٧): غطاء الصرة..... ( ٦ )
الشكل (١-٨): استطاعة خرج عنفة ريحية مقابل سرعة الرياح باستخدام طرق تحكم مختلفة..... ( ٩ )
الشكل (١-٩): القوى المؤثرة على الشفرة..... ( ١٠ )
الشكل (١-١٠): آلية تحويل الطاقة الحركية للرياح إلى طاقة كهربائية..... ( ١٠ )
الشكل (١-١١): تغير السرعة مع تغير ارتفاع البرج..... ( ١١ )
الشكل (١-١٢): تأثير وجود الأشجار والمنازل على سرعة الرياح..... ( ١١ )
الشكل (١-١٣): سرعة الرياح الواردة عند مدخل شفرات الدائر $V$ ، الناتجة خلف شفرات الدائر $\mathbf{v_0}$..... ( ١٣ )
الشكل (١-١٤): مردود الدوار (الشفرات+الصرة hub ) كتابع للنسبة $\frac{v_0}{v}$..... ( ١٤ )
الشكل (١-١٥): تغير كثافة طاقة الرياح مع تغير سرعة الرياح..... ( ١٥ )
الشكل (١-١٦): العلاقة بين قطر الدوار والاستطاعة المنتجة..... ( ١٦ )
الشكل (١-١٧): منحني يظهر العلاقة بين Cp و $\boldsymbol{\lambda}$ (السرعة النسبية لطرف الريشة) ..... ( ١٧ )
الشكل (١-١٨) تغير مردود العنفة Cp مع تغير السرعة النسبية لطرف الجناح لعدة أنواع من العنفات..... ( ١٧ )
الشكل (١-١٩): تغير قيمة (Cp) لتصميمات مختلفة من الدوار..... ( ١٨ )
الشكل (١-٢٠): منحنيات $\boldsymbol{C_p - \lambda}$ لعنفة ريحية عند زاويا ميلان $\boldsymbol{\beta}$ مختلفة..... ( ١٨ )
الشكل (١-٢١):الأنظمة الريحية التي تعمل عند سرعة ثابتة (مولد تزامني ذو دائر ملفوف) & (مولد تحريضي)..... ( ١٩ )
الشكل (١-٢٢): مقلع ناعم مستخدم في العنفات الريحية مع المولدات التحريضية..... ( ٢١ )
الشكل (١-٢٣): عامل الاستطاعة مقابل الاستطاعة المنتجة..... ( ٢١ )
الشكل (١-٢٤): منحني الاستطاعة الميكانيكية المنقولة إلى صرة العنفة عند سرعات رياح مختلفة..... ( ٢٣ )
الشكل (١-٢٥-a): نظام يستخدم مولد تحريضي ذو قفص سنجابي (IG) مع مبدل الكتروني..... ( ٢٥ )
الشكل (١-٢٥-b): نظام يستخدم مولد تحريضي ذو دائر ملفوف مع إمكانية التحكم بمقاومة الدائر..... ( ٢٦ )
الشكل (١-٣١-C): نظام يستخدم مولد تحريضي ذو تغذية مزدوجة (دائر ملفوف)(DFIG) ..... ( ٢٦ )
الشكل (١-٢٥-d): نظام يستخدم مولد تحريضي ذو تغذية مزدوجة (قفص سنجابي) (BDFM) ..... ( ٢٧ )
الشكل (١-٢٥-e): نظام يستخدم مولد تزامني ذو تهييج مستقل (SG) ..... ( ٢٧ )
الشكل (١-٢٦): المبدل الالكتروني المستخدم مع المولد التزامني ذو التهييج المستقل (SG) ..... ( ٢٨ )
الشكل (١-٢٥-f): نظام يستخدم مولد تزامني ذو مغانط دائمة (PMSG) ..... ( ٢٨ )

الشكل (١-٢٧): المبدل الالكتروني المستخدم مع المولد التزامني ذو المغانط الدائمة(P.M.S.G) ..... ( ٢٩ )
الشكل (١-٢٨): المولدات الموصولة على التتابع( Cascaded Generator )..... ( ٣١ )
الشكل (٢-١): الدارة المغناطيسية للمحرك التحريضي..... ( ٣٧ )
الشكل (٢-٢): الدارة الكهرومغناطيسية للمحرك التحريضي..... ( ٤٠ )
الشكل (٢-٣): الدارة الكهربائية المكافئة للمحرك التحريضي..... ( ٤١ )
الشكل (٢-٤): المخطط الشعاعي لتيار وتوتر المحرك والمولد التحريضي..... ( ٤٢ )
الشكل (٢-٥): الدارة المكافئة الكهربائية للمولد التحريضي..... ( ٤٤ )
الشكل (٢-٦): مخطط الاستطاعة في المولد التحريضي..... ( ٤٥ )
الشكل (٢-٧): الخصائص الميكانيكية للآلة التحريضية ..... ( ٤٦ )
الشكل (٢-٨): مقارنة بين المخطط الشعاعي للمولد التحريضي و المخطط الشعاعي للمحرك التحريضي..... ( ٤٦ )
الشكل ( ٢-٩-أ ): توصيل محركين تحريضيين عند تنظيم السرعة بطريقة الوصل التتابعي (طريقة أولى)..... ( ٤٧ )
الشكل ( ٢-٩-ب ): توصيل محركين تحريضيين عند تنظيم السرعة بطريقة الوصل التتابعي (طريقة ثانية)..... ( ٤٨ )
الشكل (٢-١٠): نظام ريحي يعمل عند سرعات متغيرة باستخدام مولد تحريضي تقليدي ذو قفص سنجابي..... ( ٥١ )
الشكل (٢-١١): المولد التحريضي ذو التغذية المزدوجة (DFIG) (دائر ملفوف) ..... ( ٥٢ )
الشكل (٢-١٢): المبدل الالكتروني المستخدم مع المولد التحريضي ذو التغذية المزدوجة (DFIG) ..... ( ٥٣ )
الشكل (٢-١٣): عمل الآلة (DFIM) كمولد أو محرك عند مجال تغير للسرعة ($\pm\Delta\omega_r^{max}$) حول السرعة التزامنية..... ( ٥٤ )
الشكل (٢-١٤): حلقة التيار المستمر في دارة المبدل الالكتروني المستخدم في المولد (DFIG)..... ( ٥٤ )
الشكل (٣-١): آلتين تحريضيتين موصولتين مع بعضهما بشكل تتابعي..... ( ٦١ )
الشكل (٣-٢): الآلة التحريضية (BDFM)..... ( ٦١ )
الشكل (٣-٣): شكل توضيحي لملفي الثابت وملف الدائر مع المبدل الالكتروني في الآلة (BDFM)..... ( ٦٢ )
الشكل (٣-٤): نمط التشغيل التزامني للآلة (BDFM)..... ( ٦٤ )
الشكل (٣-٥): الدارة المكافئة لطور واحد من الآلة التحريضية التقليدية (دائر ملفوف)..... ( ٦٥ )
الشكل (٣-٦): الدارة المكافئة لطور واحد من الآلة BDFM..... ( ٦٧ )
الشكل (٣-٧): الدارة المكافئة لطور واحد من الآلة BDFM منسوبة إلى ملف الاستطاعة في الثابت..... ( ٦٨ )
الشكل (٣-٨): الدارة المكافئة لطور واحد من الآلة BDFM بعد إهمال المحارضات التسربية لملفي الثابت..... ( ٦٩ )
الشكل (٣-٩): BDFM Core Model..... ( ٧٠ )
الشكل (٣-١٠): المخطط الشعاعي لتوترات طور واحد للآلة (BDFM)..... ( ٧٠ )
الشكل (٣-١١): الدارة المكافئة المثالية للآلة BDFM..... ( ٧١ )
الشكل (٣-١٢-أ): دائر الآلة (BDFM) ذو التصميم (Nested Loop)، (الأعشاش – الحلقات)..... ( ٧٤ )
الشكل (٣-١٢- ب): دائر الآلة (BDFM) ذو التصميم (Nested Loop)، (الحلقة المعدنية)..... ( ٧٤ )
الشكل (٣-١٣): مقطع عرضي في دائر الآلة (BDFM) ذو التصميم (Nested Loop) ..... ( ٧٤ )
الشكل (٣-١٤): استطاعة كلا طرفي المبدل الالكتروني الاستطاعي المربوط مع ملف التحكم للآلة (BDFM)..... ( ٧٥ )
الشكل (٣-١٥): تدفق الاستطاعة في الآلة (BDFM) حالة العمل كمولد..... ( ٧٦ )

الشكل (٣-١٦): مخطط تدفق استطاعة المولد (BDFM) عند سرعة أعلى من سرعته التزامنية..... ( ٧٩ )
الشكل (٣-١٧): مخطط تدفق استطاعة المحرك (BDFM) عند سرعة أدنى من سرعته التزامنية..... ( ٧٩ )
الشكل (٤-١): الخصائص الميكانيكية المثالية لعنفة ريحية عند سرعات رياح مختلفة وزاوية انحراف ($\beta =0^o$)..... ( ٨٦ )
الشكل (٤-٢): منحنيات (العزم – السرعة) لعنفة ريحية عند سرعات رياح مختلفة..... ( ٨٧ )
الشكل (٤-٣): المخطط الصندوقي للعنفة الريحية تعمل عند سرعة رياح معينة وزاوية ميلان محددة..... ( ٨٩ )
الشكل (٤-٤): ملف الـ (M-file) المستخدم في النمذجة، وتم فيه إدخال مواصفات العنفة الريحية المنمذجة..... ( ٨٩ )
الشكل (٤-٥):منحني ($C_p - \lambda$)، عند ($\beta=0^o$) ، ([Wind Speed =12 [m/sec)..... ( ٩٠ )
الشكل (٤-٦):منحني ($P_{mechanicl} - \omega_r$) ،عند ($\beta=0^o$) ، ([Wind Speed =12 [m/sec)..... ( ٩٠ )
الشكل (٤-٧):منحني ($T_{mechanicl} - \omega_r$) ،عند ($\beta=0^o$) ، ([Wind Speed =12 [m/sec)..... ( ٩٠ )
الشكل (٤-٨): المخطط الصندوقي لمنحنيات $C_p - \lambda$ عند زاويا ميلان $\beta$ مختلفة للريش وسرعة رياح ثابتة..... ( ٩١ )
الشكل (٤-٩): منحنيات $C_p - \lambda$ عند زاويا ميلان $\beta$ مختلفة للريش وسرعة رياح ثابتة..... ( ٩٢ )
الشكل (٤-١٠): المخطط الصندوقي للحصول على الخصائص الميكانيكية عند زاويا ميلان مختلفة وسرعة رياح ثابتة..... ( ٩٣ )
الشكل (٤-١١): منحنيات ($P_{mechanicl} - \omega_r$) عند زاويا ميلان $\beta$ مختلفة للريش وسرعة رياح ثابتة..... ( ٩٣ )
الشكل (٤-١٢): المخطط الصندوقي للحصول على الخصائص الميكانيكية عند زاوية ميلان ثابتة وسرعات رياح مختلفة..... ( ٩٤ )
الشكل (٤-١٣): منحنيات ($P_{mechanicl} - \omega_r$) عند زاوية ميلان $\beta$ ثابتة للريش وسرعات رياح مختلفة..... ( ٩٥ )
الشكل (٤-١٤): ملف الـ (M-file) المستخدم للحصول على منحني نقاط الاستطاعة العظمى..... ( ٩٦ )
الشكل (٤-١٥): المخطط الصندوقي المستخدم للحصول على منحني نقاط الاستطاعة العظمى "MPP" ..... ( ٩٦ )
الشكل (٤-١٦): منحني نقاط الاستطاعة العظمى "MPP" عند زاوية ميلان $\beta$ ثابتة للريش وسرعات رياح مختلفة.... ( ٩٧ )
الشكل (٥-١): تغير وضعية ملفات الثابت والدائر حسب الزاوية $\theta$..... ( ١٠٠ )
الشكل (٥-٢): دارة الآلة المثالية..... ( ١٠١ )

التجربة الأولى: إقلاع المولد التحريضي التقليدي عند ربطه مع حمولة ميكانيكية ذات عزم ثابت ([TL=1600[N.m])

الشكل (٥-٣): المخطط الصندوقي للمولد التحريضي التقليدي المربوط إلى الشبكة مع عزم ميكانيكي ثابت..... ( ١١٠ )
الشكل (٥-٤): ملف الـ (M-file) المستخدم في إدخال معطيات المولد التحريضي المدروس..... ( ١١١ )
الشكل (٥-٥): مخطط ( سرعة الدائر – زمن) في المولد التحريضي المربوط مع عزم ميكانيكي ثابت..... ( ١١١ )
الشكل (٥-٦): العزم الكهرومغناطيسي في المولد التحريضي المربوط مع عزم ميكانيكي ثابت..... ( ١١٢ )
الشكل (٥-٧): الاستطاعة الفعلية والردية للمولد التحريضي المربوط مع عزم ميكانيكي ثابت..... ( ١١٢ )
الشكل (٥-٨): عامل الاستطاعة (Cos φ) للمولد التحريضي المربوط مع عزم ميكانيكي ثابت..... ( ١١٣ )
الشكل (٥-٩): التوتر ثلاثي الطور على مخارج المولد التحريضي المربوط إلى الشبكة..... ( ١١٣ )
الشكل (٥-١٠): تيارات أطوار الثابت ثلاثية الطور في المولد التحريضي المربوط مع عزم ميكانيكي ثابت..... ( ١١٤ )

التجربة الثانية: إقلاع المولد التحريضي التقليدي عند ربطه مع حمولة ميكانيكية ذات مع عزم مروحي (عنفة ريحية) .

الشكل (٥-١١): طريقة ربط العنفة الريحية مع المولدة التحريضية..... ( ١١٤ )
الشكل (٥-١٢): المخطط الصندوقي للمولد التحريضي المربوط مع عنفة ريحية (T-500)..... ( ١١٥ )
الشكل (٥-١٣): مخطط ( سرعة الدائر – زمن) في المولد التحريضي المربوط مع عنفة ريحية..... ( ١١٧ )
الشكل (٥-١٤): العزم الكهرومغناطيسي في المولد التحريضي المربوط مع عنفة ريحية..... ( ١١٧ )

الشكل (٥-١٥): الاستطاعة الفعلية والردية للمولد التحريضي المربوط مع عنفة ريحية..... ( ١١٨ )
الشكل (٥-١٦): عامل الاستطاعة (Cos φ) للمولد التحريضي المربوط مع عنفة ريحية..... ( ١١٨ )
الشكل (٥-١٧): تيارات أطوار الثابت ثلاثية الطور في المولد التحريضي المربوط مع عنفة ريحية..... ( ١١٩ )
التجربة الثالثة: دراسة تأثير تغير زاوية ميلان الريش (β) على المولد التحريضي التقليدي الموصول مع عنفة ريحية
الشكل (٥-١٨): مخطط الخصائص الميكانيكية للعنفة الريحية مع تغير زاوية ميلان الشفرات..... ( ١٢٠ )
الشكل (٥-١٩): مخطط ( سرعة الدائر – زمن) في المولد التحريضي المربوط مع عنفة ريحية..... ( ١٢٠ )
الشكل (٥-٢٠): (العزم الكهرومغناطيسي – زمن) في المولد التحريضي المربوط مع عنفة ريحية..... ( ١٢١ )
الشكل (٥-٢١): الاستطاعة الفعلية والردية في المولد التحريضي المربوط مع عنفة ريحية..... ( ١٢١ )
الشكل (٥-٢٢): عامل الاستطاعة (Cos φ) للمولد التحريضي المربوط مع عنفة ريحية..... ( ١٢٢ )
الشكل (٥-٢٣): تيارات أطوار الثابت ثلاثية الطور، في المولد التحريضي المربوط مع عنفة ريحية..... ( ١٢٢ )
التجربة الرابعة: دراسة تأثير تغير سرعة الرياح، مع ثبات زاوية الميلان (β)، على المولد التحريضي التقليدي الموصول مع عنفة ريحية
الشكل (٥-٢٤): مخطط الخصائص الميكانيكية للعنفة الريحية مع تغير سرعة الرياح..... ( ١٢٣ )
الشكل (٥-٢٥): مخطط ( سرعة الدائر – زمن) في المولد التحريضي عند تغير سرعة الرياح..... ( ١٢٤ )
الشكل (٥-٢٦): (العزم الكهرومغناطيسي – زمن) في المولد التحريضي عند تغير سرعة الرياح..... ( ١٢٤ )
الشكل (٥-٢٧): الاستطاعة الفعلية والردية في المولد التحريضي المربوط مع تغير سرعة الرياح..... ( ١٢٥ )
الشكل (٥-٢٨): عامل استطاعة (Cos φ) المولد التحريضي عند تغير سرعة الرياح، وثبات زاوية ميلان الشفرات.... ( ١٢٥ )
الشكل (٥-٢٩): تيارات أطوار الثابت ثلاثية الطور، عند تغير سرعة الرياح، وثبات زاوية ميلان الشفرات..... ( ١٢٦ )
التجربة الخامسة: دراسة التغيرات الحاصلة عند الانتقال من العمل كمحرك، إلى العمل كمولد تحريضي تقليدي، موصول مع عنفة ريحية
الشكل (٥-٣٠): مخطط ( سرعة الدائر – زمن) عند الانتقال من حالة العمل كمحرك إلى حالة العمل كمولد..... ( ١٢٧ )
الشكل (٥-٣١): (العزم الكهرومغناطيسي – زمن) عند الانتقال من حالة العمل كمحرك إلى حالة العمل كمولد..... ( ١٢٧ )
الشكل (٥-٣٢): الاستطاعة الفعلية والردية عند الانتقال من حالة العمل كمحرك إلى حالة العمل كمولد..... ( ١٢٨ )
التجربة السادسة: ربط المولدة التحريضية التقليدية إلى الشبكة بعد وصولها إلى السرعة الزامنية، بمساعدة العنفة الريحية المربوطة إلى محورها
الشكل (٥-٣٣): التوتر ثلاثي الطور على مخارج المولد التحريضي عند ربطه إلى الشبكة في اللحظة ([sec] 1 = t)..... ( ١٢٩ )
الشكل (٥-٣٤): مخطط ( سرعة الدائر – زمن) للمولد التحريضي عند ربط إلى الشبكة في اللحظة ([sec] 1 = t)..... ( ١٢٩ )
الشكل (٥-٣٥): تيارات أطوار الثابت ثلاثية الطور، للمولد التحريضي عند ربط إلى الشبكة في اللحظة ([sec] 1 = t)..... ( ١٣٠ )
الشكل (٥-٣٦): الاستطاعة الفعلية والردية للمولد التحريضي عند ربط إلى الشبكة في اللحظة ([sec] 1 = t)..... ( ١٣٠ )
الشكل (٦-١): شكل توضيحي لتوضع ملفات الأطوار الثلاثة للآلة (BDFM)، والملفات المكافئة لها على المحورين (d-q)..... ( ١٣٣ )
الشكل (٦-٢): الشكل العام للحلقة المغلقة للتحكم بالمبدل الالكتروني الاستطاعي المربوط مع ملف التحكم في الآلة (BDFM)..... ( ١٣٨ )
الشكل (٦-٣): المخطط الصندوقي للمولد (BDFM) المربوط مع عنفة ريحية..... ( ١٤٠ )
التجربة الأولى: دراسة التغيرات الحاصلة عند الانتقال من حالة عمل الآلة (BDFM) في النمط الأحادي إلى العمل في النمط المزدوج.
الشكل (٦-٤): منحنيات التوتر الثلاثي الطور المغذي لملف التحكم Vabc ([Hz] 4.11 = Fc , [V] 53 = Vc)..... ( ١٤١ )
الشكل (٦-٥): منحني (سرعة الدائر – زمن) ([Hz] 4.11 = Fc , [V] 53 = Vc)..... ( ١٤٢ )
الشكل (٦-٦): منحنيات تدفق الاستطاعات الفعلية في الآلة (BDFM) في النمطين التحريضي والتزامني..... ( ١٤٢ )
الشكل (٦-٧): منحنيات تدفق الاستطاعات الردية في الآلة (BDFM) في النمطين التحريضي والتزامني..... ( ١٤٣ )

الشكل (٦-٨): عامل الاستطاعة الكلي للآلة (BDFM) في النمطين التحريضي والتزامني..... ( ١٤٣ )
التجربة الثانية: دراسة أداء وتدفق الاستطاعات في الآلة (BDFM) عند عملها تحت سرعتها التزامنية الاسمية.
الشكل (٦-٩): منحنيات التوتر الثلاثي الطور المغذي لملف التحكم Vabc ([Vc = 12.5[V] , Fc = (Opp) 4 [Hz])..... ( ١٤٤ )
الشكل (٦-١٠): منحني (سرعة الدائر – زمن) ([Vc = 12.5[V] , Fc = (Opp) 4 [Hz])..... ( ١٤٥ )
الشكل (٦-١١): منحنيات تدفق الاستطاعات الفعلية في الآلة (BDFM) في النمطين التحريضي والتزامني..... ( ١٤٥ )
الشكل (٦-١٢): منحنيات تدفق الاستطاعات الردية في الآلة (BDFM) في النمطين التحريضي والتزامني..... ( ١٤٦ )
الشكل (٦-١٣): عامل الاستطاعة الكلي للآلة (BDFM) في النمطين التحريضي والتزامني..... ( ١٤٦ )
التجربة الثالثة: دراسة تأثير تغير توتر ملف التحكم على أداء الآلة (BDFM) وهي موصولة مع عنفة ريحية.
الشكل (٦-١٤): منحنيات التوتر الثلاثي الطور المغذي لملف التحكم عند تغير التوتر..... ( ١٤٧ )
الشكل (٦-١٥): منحني (سرعة الدائر – زمن)..... ( ١٤٨ )
الشكل (٦-١٦): منحنيات تدفق الاستطاعات الفعلية في الآلة (BDFM) في النمطين التحريضي والتزامني..... ( ١٤٨ )
الشكل (٦-١٧): منحنيات تدفق الاستطاعات الردية في الآلة (BDFM) في النمطين التحريضي والتزامني..... ( ١٤٩ )
الشكل (٦-١٨): عامل الاستطاعة الكلي للآلة (BDFM) في النمطين التحريضي والتزامني..... ( ١٤٩ )
التجربة الرابعة: دراسة تأثير تغير تردد ملف التحكم على أداء الآلة (BDFM) وهي موصولة مع عنفة ريحية.
الشكل (٦-١٩): منحنيات التوتر الثلاثي الطور المغذي لملف التحكم عند تغير التردد..... ( ١٥٠ )
الشكل (٦-٢٠): منحني (سرعة الدائر – زمن)..... ( ١٥١ )
الشكل (٦-٢١): منحنيات تدفق الاستطاعات الفعلية في الآلة (BDFM) في النمطين التحريضي والتزامني..... ( ١٥١ )
الشكل (٦-٢٢): منحنيات تدفق الاستطاعات الردية في الآلة (BDFM) في النمطين التحريضي والتزامني..... ( ١٥٢ )
الشكل (٦-٢٣): عامل الاستطاعة الكلي للآلة (BDFM) في النمطين التحريضي والتزامني..... ( ١٥٢ )
التجربة الخامسة: تشغيل الآلة (BDFM) في نظام ريحي يعمل عند سرعتي رياح مختلفتين، وملاحقة نقاط الاستطاعة العظمى.
الشكل (٦-٢٤): منحنيات الخصائص الميكانيكية للعنفة الريحية عند سرعتي رياح ([Vwind = 12 & 8 [m/sec])..... ( ١٥٣ )
الشكل (٦-٢٥): منحنيات التوتر الثلاثي الطور المغذي لملف التحكم..... ( ١٥٤ )
الشكل (٦-٢٦): منحني (سرعة الدائر – زمن)..... ( ١٥٥ )
الشكل (٦-٢٧): منحنيات تدفق الاستطاعات الفعلية في الآلة (BDFM) في النمطين التحريضي والتزامني..... ( ١٥٥ )
الشكل (٦-٢٨): منحنيات تدفق الاستطاعات الردية في الآلة (BDFM) في النمطين التحريضي والتزامني..... ( ١٥٦ )
الشكل (٦-٢٩): عامل الاستطاعة الكلي للآلة (BDFM) في النمطين التحريضي والتزامني..... ( ١٥٦ )
التجربة السادسة: تشغيل الآلة (BDFM) في نظام ريحي يعمل عند زوايا ميلان مختلفة للريش، وملاحقة نقاط الاستطاعة العظمى.
الشكل (٦-٣٠): منحنيات الخصائص الميكانيكية للعنفة الريحية عند وزاويتي ميلان للريش ([β= 5 & 10 [deg])... ( ١٥٧ )
الشكل (٦-٣١): منحنيات التوتر الثلاثي الطور المغذي لملف التحكم ..... ( ١٥٨ )
الشكل (٦-٣٢): منحني (سرعة الدائر – زمن)..... ( ١٥٩ )
الشكل (٦-٣٣): منحنيات تدفق الاستطاعات الفعلية في الآلة (BDFM) في النمطين التحريضي والتزامني..... ( ١٥٩ )
الشكل (٦-٣٤): منحنيات تدفق الاستطاعات الردية في الآلة (BDFM) في النمطين التحريضي والتزامني..... ( ١٦٠ )
الشكل (٦-٣٥): عامل الاستطاعة الكلي للآلة (BDFM) في النمطين التحريضي والتزامني..... ( ١٦٠ )

# قائمة الجداول

## List of Tables

الجدول (١-١): ميزات ومساوئ كل من المولد التحريضي(I.G) والمولد التزامني (S.G)..... ( ٢٢ )

الجدول(١-٢): مقارنة بين عدة أنواع من المولدات الريحية مع مقارنة ميزات ومساوئ كل نوع من الأنواع المستخدمة... ( ٣٢ )

الجدول (٣-١): تدفق الاستطاعة في الآلة (BDFM) حالة العمل كمولد..... ( ٧٦ )

الجدول(٥-١): مواصفات العنفة الريحية (T-500)..... ( ١١٦ )

# جدول الرموز

## Table Of Symbols

| | |
|---|---|
| $\Omega$ | السرعة الزاوية الميكانيكية الدورانية لمحور المولدة [rad/sec]. |
| $P_{c2}$ | الضياعات النحاسية في دارة ملفات الجزء الدائر للمولد التحريضي التقليدي. |
| $P_{21}$ | الاستطاعة المغناطيسية المنتقلة من الجزء الدائر للمولد التحريضي التقليدي إلى الجزء الثابت. |
| $P_{e+h}$ | ضياعات البطاء المعناطيسي والتيارات الإعصارية في المولد التحريضي التقليدي. |
| $P_{c1}$ | الضياعات النحاسية في دارة ملفات الجزء الثابت للمولد التحريضي التقليدي. |
| $(P_1)$ OR $(P_P)$ | عدد أزواج أقطاب ملف الاستطاعة في ثابت الآلة (BDFM). |
| $(W_1)$ OR $(W_P)$ | تردد تغذية ملف الاستطاعة في ثابت الآلة (BDFM). |
| $(P_2)$ OR $(P_c)$ | عدد أزواج أقطاب ملف التحكم في ثابت الآلة (BDFM). |
| $(W_2)$ OR $(W_c)$ | تردد تغذية ملف التحكم في ثابت الآلة (BDFM). |
| $\omega_r$ | السرعة الميكانيكية للآلة (BDFM) في النمط التزامني. |
| $\omega_{Syn}$ (OR) $\omega_{Natural}$ | السرعة التزامنية الاسمية للآلة BDFM، ويطلق عليها اصطلاحاً " السرعة الطبيعية " |
| $S_1$ | انزلاق ملف الاستطاعة في ثابت الآلة (BDFM). |
| $S_2$ | انزلاق ملف التحكم في ثابت الآلة (BDFM). |
| $\omega_{r_1}$ | التردد الكهربائي للحقل المغناطيسي والتيارات في الدائر الناتجة عن ملف الاستطاعة في الثابت |
| $\omega_{r_2}$ | التردد الكهربائي للحقل المغناطيسي والتيارات في الدائر الناتجة عن ملف التحكم في الثابت |
| $L_{1_l}$ | المحارضة الذاتية المسببة للفيض المغناطيسي التسربي في ملف الاستطاعة في الثابت. |
| $L_{1_h}$ | المحارضة الذاتية الناتجة عن التوافقيات في ملف الاستطاعة في الثابت. |
| $J.\omega_1.L_1$ | المفاعلة التحريضية لملف الاستطاعة في الثابت. |
| $L_{2_l}$ | المحارضة الذاتية المسببة للفيض المغناطيسي التسربي في ملف التحكم في الثابت. |
| $L_{2_h}$ | المحارضة الذاتية الناتجة عن التوافقيات في ملف التحكم في الثابت. |
| $J.\omega_2.L_2$ | المفاعلة التحريضية لملف التحكم في الثابت. |
| $L_{r_l}$ | المحارضة الذاتية المسببة للفيض المغناطيسي التسربي في دائر الآلة (BDFM). |
| $L_{r_h}$ | المحارضة الذاتية الناتجة عن التوافقيات في دائر الآلة (BDFM). |
| $R_{sp}$ OR $R_1$ | المقاومة الأومية لملف الاستطاعة في الثابت. |
| $R_{sc}$ OR $R_2$ | المقاومة الأومية لملف التحكم في الثابت. |
| $R_r$ | المقاومة الأومية للدائر. |
| $L_{sp}$ OR $L_1$ | المحارضة الذاتية لملف الاستطاعة في الثابت. |
| $L_{sc}$ OR $L_2$ | المحارضة الذاتية لملف التحكم في الثابت. |
| $L_r$ | المحارضة الذاتية لملف الدائر. |
| $M_{pr}$ | المحارضة المتبادلة بين ملف الاستطاعة في الثابت، وبين دائر الآلة (BDFM). |

| | |
|---|---|
| $M_{cr}$ | المحارضة المتبادلة بين ملف التحكم في الثابت، وبين دائر الآلة (BDFM). |
| $V_{r_1}$ ،$V_{r_2}$ | التوترات على طرفي المحارضات المغناطيسية لكلا ملفي فرعي التهييج لملفي الثابت. |
| $P_{r_1}, P_{r_2}$ | الاستطاعة المُسلَّمة إلى مرابط الدائر من ملفي الثابت في الآلة. |
| $P_r$ | مجموع الأعشاش في دائر الآلة (BDFM) ذو التصميم (Nested Loop). |
| $S_{inv1}$ | استطاعة المبدل الالكتروني من طرف الآلة. |
| $S_{inv2}$ | استطاعة المبدل الالكتروني من طرف خط النقل. |
| $P_p$ | الاستطاعة الكهربائية لملف الاستطاعة. |
| $P_{pl}$ | الضياعات النحاسية في ملف الاستطاعة. |
| $P_{p_{(ag)}}$ | استطاعة الثغرة الهوائية الناتجة عن ملف الاستطاعة. |
| $P_C$ | الاستطاعة الكهربائية لملف التحكم. |
| $P_{cl}$ | الضياعات النحاسية في ملف التحكم. |
| $P_{c_{(ag)}}$ | استطاعة الثغرة الهوائية الناتجة عن ملف التحكم. |
| $P_{rl}$ | الضياعات النحاسية في ملف الدائر. |
| $S_p$ | الانزلاق نسبة إلى حقل ملف الاستطاعة. |
| $S_C$ | الانزلاق نسبة إلى حقل ملف التحكم. |
| $S$ | الانزلاق الكلي في الآلة. |
| $P_g$ | استطاعة الثغرة الهوائية |
| $v_{dp}$ | توتر ملف الاستطاعة في الثابت على المحور (d) للآلة (BDFM). |
| $v_{qp}$ | توتر ملف الاستطاعة في الثابت على المحور (q) للآلة (BDFM). |
| $v_{dc}$ | توتر ملف التحكم في الثابت على المحور (d) للآلة (BDFM). |
| $v_{qc}$ | $v_{qc}$: توتر ملف التحكم في الثابت على المحور (q) للآلة (BDFM). |
| $v_{dr}$ | توتر ملف الدائر على المحور (d) للآلة (BDFM). |
| $v_{qr}$ | توتر ملف الدائر على المحور (q) للآلة (BDFM). |
| $i_{dp}$ | تيار ملف الاستطاعة في الثابت على المحور (d) للآلة (BDFM). |
| $i_{qp}$ | $i_{qp}$: تيار ملف الاستطاعة في الثابت على المحور (q) للآلة (BDFM). |
| $i_{dc}$ | تيار ملف التحكم في الثابت على المحور (d) للآلة (BDFM). |
| $i_{qc}$ | تيار ملف التحكم في الثابت على المحور (q) للآلة (BDFM). |
| $i_{dr}$ | تيار الدائر على المحور (d) للآلة (BDFM). |
| $i_{qr}$ | تيار الدائر على المحور (q) للآلة (BDFM). |
| $J$ | عزم عطالة الآلة (BDFM) [Kg.m2] " Moment of inertia ". |
| $T_e$ | العزم الكهرومغناطيسي في الآلة (BDFM) [N.m] "Electromagnetic Torque". |
| $T_l$ | عزم التحميل [N.m] "Load Torque". |

## الملخص:

يهدف هذا البحث إلى تحليل عمل ونمذجة المولدة التحريضية ذات التغذية المزدوجة بدون مسفرات (Brushless Doubly-Fed Machine (BDFM)) التي تعمل مع عنفة ريحية وذلك لإنتاج الطاقة الكهربائية. حيث يعتبر المولد التحريضي ذو التغذية المزدوجة عديم المسفرات (BDFM) من المولدات الحديثة التي لا تزال في طور الاختبار.

تتألف هذه المولدة من جزء ثابت يحتوي على ملفين ثلاثيي الطور، معزولين عن بعضهما كهربائياً، لكل منهما عدد أقطاب مختلف عن الآخر، يتم تغذية الملفين من منبعين بترددين مختلفين. بينما يكون الجزء الدائر للآلة (BDFM) من نوع القفص السنجابي بتصميم خاص يدعى (Nested _ Loop). الملفان الموجودان في الثابت هما: ملف الاستطاعة (P.W "Power Winding")، وتتدفق عبره معظم استطاعة الآلة، حيث يربط هذا الملف مباشرة إلى الشبكة. وملف التحكم (C.W "Control Winding")، والذي يتدفق جزء صغير من الاستطاعة عبره تعادل حوالي (30%) فقط من الاستطاعة الكلية للآلة، ويربط هذا الملف إلى الشبكة عبر مبدل الكتروني استطاعي ثنائي الاتجاه (Inverter - Converter). يؤدي هذا إلى وفر كبير في حجم جملة المبدل الالكتروني الاستطاعي (Inverter - Converter) وكلفتها، كما يؤدي إلى إمكانية استجابة المولدة لتغيرات سرعة الرياح، بالإضافة إلى الحصول على أكبر قدر من الاستطاعة الكهربائية مع بتردد وتوتر ثابتين.

من أجل بلوغ هدف البحث تم وضع نموذج رياضي وحاسوبي يسمح بنمذجة ودراسة عمل هذه المولدة التحريضية (BDFM) وذلك باستخدام بيئة الـ Matlab/Simulink.

بيَّنت نتائج النمذجة أهم ميزات هذه المولدة، حيث تبيَّن أنها تستطيع العمل في حالات تشغيل أدنى وأعلى من السرعة التزامنية، وذلك لوجود ملف التحكم في الثابت الموصول مع الشبكة الكهربائية بواسطة المبدل الالكتروني الاستطاعي، كما أنها تسمح بتحديد قيم الاستطاعة التي يمكن أن تقدمها المولدة إلى الشبكة من خلال الملفين الموجودين في الثابت، وبالتالي السرعات الموافقة لها، كما تمتاز بإمكانية التحكم بعامل استطاعة الجملة عند ظروف تشغيل ورياح مختلفة.

# Abstract:

The objectives of this research are to analysis and modelling of a grid connected Brushless Doubly-Fed Machine (BDFM) driven by wind turbine. As the researchers say, the (BDFM) is considered to be a modern generators that are still in the process of testing.

This generator consists of a stator contains two three phase windings, electrically isolated from each other, each winding has different numbers of pole pairs, and these two winding are being fed from two different frequency sources. While the Rotor of the BDFM is cage rotor with a special design called (Nested _ Loop). The two winding in the stator are: Power Winding, which most of the machine power flows through and it is connected directly to the main grid. The another winding is the control winding, which a fraction of the machine power flows through, equal to about (30%) of total power rating of the machine, this winding is connected to the main grid through dual converter ( Inverter – Converter ). Such a design reduces the total cost and the volume of the system, and allows us to track the MPP curve of the wind turbine characteristics when the wind speed is change, and obtain a fixed frequency and voltage on the output.

In order to achieve the goals of this research a mathematical and a computerized model was made which allows to Model and simulating the performance of the (BDFM) generator using Matlab/Simulink environment.

The simulation results of the Brushless Doubly-Fed generator connected to the main grid and driven by the wind turbine show that the machine can generate in a condition above or under the synchronous speed by using the control winding. Also, the results show that we can control the power factor of the entire system which mean controlling of the Reactive power.

## مقدمة:

يزداد الاهتمام في الآونة الأخيرة بمسألة الموارد المتجددة للطاقة الكهربائية، وذلك مع تزايد المشاكل المرتبطة باستخدام مصادر الطاقة التقليدية المحدودة كالكلفة العالية والتلوث المتزايد للبيئة. ومن أكثر مصادر الطاقات المتجددة renewable energy التي يعول عليها في المستقبل تأتي طاقة الرياح wind energy. وتدل المؤشرات المناخية المتعلقة بسرعة الرياح وأماكن توزعها في سورية على أن هناك طاقة كهربائية كبيرة متاحة يمكن توليدها باستخدام العنفات الريحية wind turbines يمكن أن تسد جزءاً كبيراً من حاجة القطر للطاقة الكهربائية في المستقبل.

وبالنظر لكون الاستطاعة الكهربائية التي يمكن استخلاصها من العنفات الريحية تتأثر بسرعة الرياح بشكل حاد، فإن هناك صعوبة في استخلاص الحد الأقصى الممكن من طاقة الرياح وتحويلها إلى طاقة كهربائية في آلات التوليد الكهربائية التقليدية. وتوفر المولدات التحريضية ذات التغذية المزدوجة عديمة المسفرات إمكانية جيدة لبلوغ هذا الهدف كونها تسمح باستغلال طاقة الرياح وملاحقة منحني نقاط الاستطاعة العظمى مع تغير منحني الخصائص الميكانيكية للعنفة الريحية، حيث تجمع هذه الآلة بين الميزات الإيجابية للآلة التزامنية والتحريضية، إضافة إلى ميزات إضافية جعلت منها آلة مناسبة للعمل مع العنفات الريحية التي تعمل عند سرعات رياح متغيرة، وخاصة منها البعيدة عن الشاطئ (Off shore).

بناءً على ما تقدم فإن الهدف من هذا البحث هو دراسة أداء المولد التحريضي ذو التغذية المزدوجة بدون مسفرات (BDFM) عند ربطه مع عنفة ريحية للتعرف إلى آلية عمله وسلوكه عند ربطه مع عنفة ريحية من خلال دراسة بنية هذه الآلة بطريقة النمذجة الرياضية وتحليل أدائها في حالات التشغيل المختلفة. قمنا في هذا البحث بدراسة أداء المولد التحريضي في حالة الربط مع الشبكة وهو موصول مع عنفة ريحية من خلال نمذجته باستخدام بيئة الـ Matlab/Simulink.

تتكون الدراسة من ستة فصول أساسية، مقسمة إلى جزأين رئيسيين كما يلي:

### أولاً. الجزء النظري:

وهو مؤلف من ثلاثة فصول هي:

١- **الفصل الأول: العنفات الريحية ( أنواعها – مكوناتها – المولدات المستخدمة معها).**

تم في هذا الفصل الدراسة المرجعية للعنفات الريحية واستنتاج علاقة الاستطاعة الكهربائية المستخلصة من الرياح في العنفات الريحية. ومن ثم التحدث عن أنواع الأنظمة الريحية والمولدات المستخدمة مع كل نوع من هذه الأنواع.

٢- **الفصل الثاني: دراسة نظرية في المولدات التحريضية التقليدية ( عملها - طرق التحكم بسرعتها - أنواعها).**

اشتمل الفصل الثاني على دراسة مرجعية حول مبدأ عمل الآلة التحريضية التقليدية كمولد، وكذلك على دراسة عملية تنظيم السرعة في الآلة التحريضية بطريقة الوصل التتابعي لها.

٣- **الفصل الثالث: دراسة نظرية في الآلة التحريضية ذات التغذية المزدوجة بدون مسفرات *(BDFM)*.**

تم في هذا الفصل تقديم دراسة نظرية مرجعية للمولد التحريضي ذو التغذية المزدوجة عديم المسفرات (BDFM) والتي اشتملت على وصف مفصل للآلة (BDFM) وتوضيح مبدأ عملها، والتعرف إلى أنماط التشغيل المختلفة لها، إضافة إلى استنتاج الدارة المكافئة لها، والتعرف إلى التصميم الخاص لدائرها، كما تم التعرض إلى مخطط تدفق الاستطاعات فيها، وذكر إيجابيات وسلبيات هذه الآلة.

## ثانياً: الجزء العملي:

وهو مؤلف من ثلاثة فصول هي:

٤- **الفصل الرابع: نمذجة العنفة الريحية باستخدام بيئة الـ *Matlab/Simulink*.**

تم في هذا الفصل وضع النموذج الرياضي للعنفة الريحية. ومن ثم نمذجة العنفة الريحية باستخدام بيئة الـ Matlab/Simulink، والحصول على المنحنيات المميزة للعنفة. والقيام باختبارات لدراسة تأثير كل من زاوية ميلان الشفرات $\beta$ وسرعة الرياح على هذه المنحنيات. وأخيراً الحصول على منحني نقاط القيمة العظمى للاستطاعة الكهربائية المستخلصة من الرياح (MPP).

٥- **الفصل الخامس: نمذجة المولد التحريضي التقليدي وربطه مع عنفة ريحية باستخدام بيئة الـ *Matlab/Simulink*.**

تم في هذا الفصل وضع النموذج الرياضي للمولد التحريضي التقليدي. ومن ثم نمذجته باستخدام بيئة الـ Matlab/Simulink. ودراسة تأثير تغير سرعة الرياح أو زاوية ميلان الشفرات على أداءه، كما تم رصد التغيرات الحاصلة عند انتقال الآلة التحريضية التقليدية من حالة العمل كمحرك إلى حالة العمل كمولد.

٦- **الفصل السادس: نمذجة المولد التحريضي ذو التغذية المزدوجة بدون مسفرات وربطه مع عنفة ريحية باستخدام بيئة الـ *Matlab/Simulink*.**

تم في هذا الفصل وضع النموذج الرياضي للمولد (BDFM)، ودراسة أداء هذا المولد عند انتقاله من حالة العمل في النمط أحادي التغذية، إلى حالة العمل في نمط التغذية المزدوجة، بالإضافة إلى تشغيل المولد عند سرعة أدنى من سرعته التزامنية الاسمية. كما تمت دراسة تأثير تغير التوتر والتردد المغذي لملف التحكم على أداء الآلة، لنتمكن في النهاية من تشغيل الآلة (BDFM) في نظام ريحي يعمل عند سرعات رياح وزوايا ميلان مختلفة، وملاحقة نقاط الاستطاعة العظمى لمنحنيات الخصائص الميكانيكية للعنفة الريحية.

## دراسات مرجعية:

# Reference Studies:

1. [9] Paul C. Roberts **(A Study of Brushless Doubly-Fed (Induction) Machines)** A DISSERTATION SUBMITTED FOR THE DEGREE OF **DOCTOR OF PHILOSOPHY**-University of **Cambridge**-September **2004**.

هذا المرجع عبارة عن رسالة دكتوراه، مؤلفة من(8) فصول. وقد تم الاستفادة من هذه الرسالة كمرجع أساسي في البحث. حيث تم فيه وصف للآلة (BDFM) وآلية عملها، بالإضافة إلى دراسة أداء الآلة (BDFM) في النمط التزامني، ودراسة أنواع التصاميم الممكنة لدائر الآلة (BDFM). وقد تمت الاستفادة من هذه الرسالة خاصة في الدراسة المرجعية النظرية للآلة (BDFM) في الفصل الثالث من هذا البحث، بالإضافة إلى مجموعة من المعلومات التي ساهمت في استكمال وتطوير البحث.

2. [10] B.V.Gorti,(**Power Balance Considerations For Brushless Doubly-Fed Machines**) - Oregon State University- **IEEE** Transactions on Energy conversion, Vo1. 11, NO.4, **December 1996**.

تم في هذه المقالة شرح مخطط تدفق الاستطاعات في الآلة (BDFM) في حالة العمل كمحرك أو كمولد، ووضع معادلات تدفق الاستطاعات في ملفي الثابت للآلة (BDFM) وملف الدائر. وقد تمت الاستفادة من هذه المقالة في الدراسة المرجعية النظرية للآلة (BDFM) من هذا البحث.

3. [11] P.C. Roberts**,(Equivalent circuit for the brushless doubly fed machine (BDFM) including parameter estimation and experimental verification)** - University of Cambridge - **IEE** Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 152, No. **4, July 2005**

تم في هذه المقالة وضع الدارة المكافئة لطور واحد من الآلة (BDFM)، بالإضافة إلى شرح كيفية الحصول على بارامترات الآلة (BDFM). وقد تمت الاستفادة من هذه المقالة في الدراسة المرجعية النظرية للآلة (BDFM) من هذا البحث.

4. [12] R.A. McMahon**, (Performance Of BDFM As Generator AND Motor)** - University of Cambridge - **IEE** Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 153, No. **2, March 2006.**

تم في هذه المقالة تحليل أداء الآلة (BDFM) عند عملها كمحرك أو كمولد وذلك بالاعتماد على الدارة المكافئة لطور واحد للآلة. كما تم فيها دراسة تأثير انحراف سرعة دوران محور الآلة (BDFM) عن السرعة التزامنية على الاستطاعات الردية فيها. وقد تمت الاستفادة من هذه المقالة في الدراسة المرجعية النظرية للآلة (BDFM) من هذا البحث.

5. [13] F.Jallali **, (Investigation of the Transient Behavior of Brushless Cascaded Doubly Fed Machines)** - University of Sfax, Tunisia - Copyright © **2009** MC2D & MITI.

تم في هذه المقالة دراسة أداء الآلة والحصول على نتائج تجريبية لسرعة الدائر، والعزوم للآلة (BDFM) في النمطين التحريضي والتزامني. وقد تمت الاستفادة من هذه المقالة في الدراسة العملية للآلة (BDFM) حيث تم تمثيلها بنموذج حاسوبي في بيئة الـ Matlab/Simulink، وتمت مقارنة النتائج التي حصلنا عليها مع النتائج التي تم الحصول عليها في هذه المقالة.

6. [14] J.Poza , E.Oyarbide , and M.Rodiguez , **(Unified Reference Frame d-q Model Of The Brushless Doubly Fed Machine)** - University of Mondragon , Loramendi 4 – Spain - Copyright © **2006** IEE.

تم في هذه المقالة وضع النموذج الرياضي للآلة (BDFM) على المحورين (d-q). وقد تمت الاستفادة من هذه المقالة في الدراسة العملية للآلة (BDFM) حيث تم الاستعانة بهذه المقالة وبغيرها من الأبحاث والمقالات لاشتقاق معادلات النموذج الرياضي لدراسة أداء الآلة (BDFM) في الحالات العابرة والساكنة على المحورين (d-q) من خلال نمذجة ومحاكاة النموذج الرياضي للآلة (BDFM) على الحاسب بواسطة بيئة الـ Matlab/Simulink. بالإضافة إلى مجموعة من المعلومات التي ساهمت في استكمال وتطوير البحث.

# أولاً : الجزء النظري

# Firstly
# Theoretical section

# الفصل الأول

# First Chapter

# العنفات الريحية

أنواعها – مكوناتها – المولدات المستخدمة معها.

## Wind Turbines

**Types – Components – Generators Used With Them.**

## المقدمة:

## *Introduction:*

سيتم في هذا الفصل بيان أنواع الطاقات المتجددة المتوفرة. والتعرف إلى آلية تشكل الرياح. ومن ثم التعرف إلى مراحل تطور العنفات الريحية وأنواعها، ومعرفة مكونات العنفة الريحية ذات المحور الأفقي. كما سيتم التطرق إلى القوى الآيروديناميكية المؤثرة على شفرة العنفة الريحية. ومن ثم استنتاج علاقة الاستطاعة الكهربائية المستخلصة من الرياح في العنفات الريحية، و التعرف إلى العوامل المؤثرة على الاستطاعة المستخلصة من الرياح في العنفات الريحية. ومن ثم سيتم التحدث عن أنواع الأنظمة الريحية والمولدات المستخدمة مع كل نوع من هذه الأنواع.

## ١ ـ: مقدمة عن واقع الطاقة والتأثير البيئي:

## *Environmental Influence And Reality Of Energy:*

تسعى جميع البلدان بشكل دؤوب للبحث عن مصادر الطاقة، خصوصاً مع الطموح إلى الارتقاء إلى مستوى أعلى من الحضارة بما يتناسب مع النمو السكاني المتزايد فعلى الرغم من إدراك التغيرات البيئية التي تهدد البيئة نتيجة الاستهلاك المتزايد لمصادر الطاقة التقليدية ، فإن الطلب العالمي على استخدامها يتجاهل كل المخاطر التي تسببها، حيث إن بعض الدول الصناعية الكبرى باستهلاكها الحالي للطاقة التقليدية تطرح سنوياً أكثر من 20 مليار طن من ثاني أكسيد الكربون في الجو، الأمر الذي أدى إلى ظهور نتائج بالغة الخطورة على مستقبل البشرية جمعاء[3].

## ١ ـ٢: الطاقات المتجددة:

## *Renewable Energies:*

الطاقة المتجددة هي الطاقة المتولدة بصورة طبيعية ومستدامة أي أنها تتجدد باستمرار حيث تنطلق تيارات الطاقة المستخدمة على وجه الأرض بشكل أساسي من ثلاثة مصادر مختلفة للطاقة الأولية، هي:

الطاقة الشمسية * طاقة حرارة باطن الأرض * طاقة المد والجزر.

تشكل الطاقة المنبعثة من الشمس بجدارة المصدر الأكبر للطاقات المتجددة وبالتالي فهي متوفرة ما دامت الشمس موجودة. تتبعها طاقة باطن الأرض التي تعتبر بالمقارنة مع طاقة الشمس ذات كثافة طاقة قليلة بالنسبة إلى المساحة، ثم تأتي بعد ذلك طاقة المد والجزر الأقل أهمية [6].

## ١ ٣: الطاقة الريحية المتوفرة والمتوقع الاستفادة منها:

## *The Availability Of Wind Energy:*

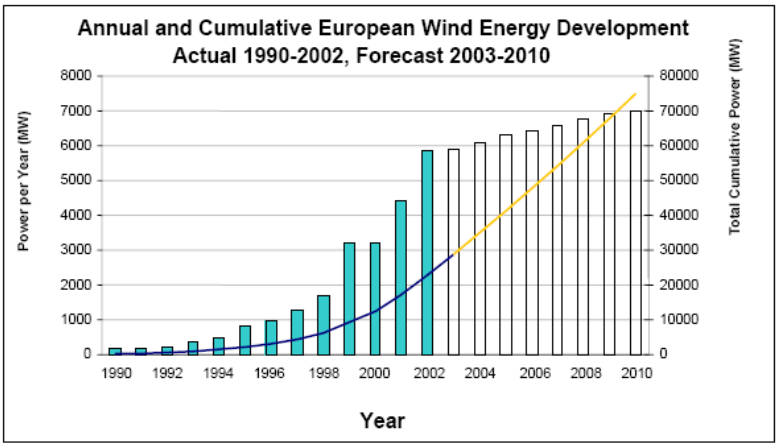
بعد مسح المساحة الكلية على سطح الكرة الأرضية للمناطق المناسبة لنصب عنفات الرياح، قام الباحث Van Weijek وآخرون في عام 1991 بتقدير الإمكانيات النظرية المتاحة في العالم في هذه المناطق، فقدرت بـ 20,000 تيراواط – ساعي (Twh/year) في السنة ، "1 تيراواط = 1012 واط"، وه ي تعادل أكثر من ضعف الاستهلاك العالمي للطاقة الكهربائية في عام 1987 والذي كان 9000 تيراواط – ساعي. وبعد الأخذ بالحسبان المحددات المختلفة التي تواجه نصْبَ مثل هذه المنظومات، توصل هذا الفريق من علماء الطاقة إلى أنه يمكن نصب عَنفات رياح بسعة 450,000 ميغاواط بنهاية عام 2020، وهذه العنفات يمكنها توليد ما يقارب 900 تيراواط – ساعي في السنة وهو ما يعادل 10% من الاستهلاك العالمي للطاقة الحالي أو 3.5% من الاستهلاك المتوقع عام 2020، طبقاً لتقدير مجلس الطاقة العالمي. وهذه الكمية المولدة ستمنع انبعاث حوالي 800 مليون طن من ثاني أكسيد الكربون فيما لو تم توليد الطاقة الكهربائية في المحطات التي تستخدم الفحم الحجري [3].

لذلك فإن الطاقة الكهربائية المولدة عن طريق العنفات الريحية هي الأسرع تطوراً في مصادر الطاقات المتجددة، وخاصة العنفات البعيدة عن الشاطئ (Off-shore) والتي تعطي مردوداً أكبر بسبب الشروط الأفضل فيها [6].



**الشكل (1-1): مزرعة ريحية بعيدة عن الشاطئ (Off-shore) ومزرعة ريحية على اليابسة (On-shore)**

يوضح الشكل التالي مقدار الزيادة في الاستطاعة المتوقع الحصول عليها من طاقة الرياح حتى عام 2010 في أوروبا [3].




**الشكل (1–2): الزيادة في الاستطاعة المتوقع الحصول عليها من طاقة الرياح حتى عام 2010 في أوروبا.**

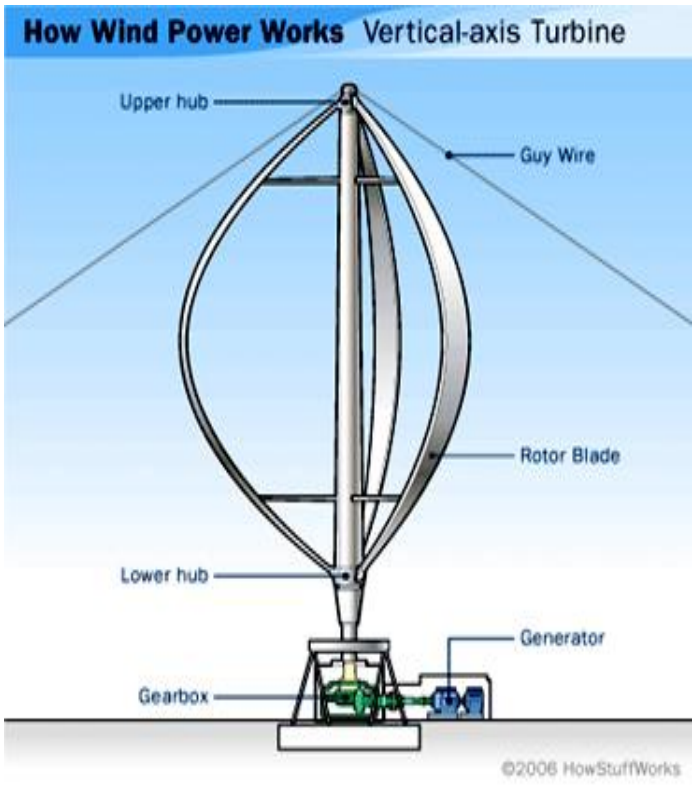
## ١ ـ ٤: التصاميم الحديثة للعنفات الريحية:

## *Modern Designs Of Wind Turbines:*

### ١ ـ ٤ ـ ١: العنفات الريحية ذات المحور العمودي:

### *Vertical-Axis Wind Turbines:*

هذه العنفات نادرة جداً والوحيدة منها حالياً في الإنتاج التجاري هي عنفات داريوس وعنفات سافينوس وعنفات H، وهي ما تزال مستخدمة حتى الآن ولكن على نطاق خاص [6].




**الشكل (1–3): العنفات ذات المحور العمودي.**

### ١ ـ ٢ ـ ١: ميزات العنفات الريحية ذات المحور العمودي:

### *Advantages Of Vertical-Axis Wind Turbines:*

تتميز هذه العنفات بمحور عمودي دائماً على الأرض وهي تصطف باتجاه الريح دوماً "بعكس نظرائها ذات المحور الأفقي "، لذا ليس هناك ضرورة لتعديل وضعيتها عندما يتغير اتجاه الرياح. إضافة إلى سهولة عمليات التركيب والصيانة لوجود كافة الأجهزة على مستوى الأرض [6].

### ١ ـ ٢ ـ ٢: سلبيات العنفات الريحية ذات المحور العمودي:

### *Disadvantages Of Vertical-Axis Wind Turbines:*

- تحتاج مساحة واسعة من الأرض بسبب وجود كافة الأجهزة على مستوى الأرض.
- يستعمل هذا النوع من العنفات أسلاك تثبيت للارتفاع بدلاً من البرج ، وبالتالي يكون ارتفاع الدوار منخفضاً مما يعني انخفاض سرعة الرياح عند مستوى الشفرات.

وبذلك تكون هذه العنفات أقل كفاءة من العنفات ذات المحور الأفقي [6].

## ١ ـ ٢: العنفات الريحية ذات المحور الأفقي:

## *Horizontal-Axis Wind Turbines:*



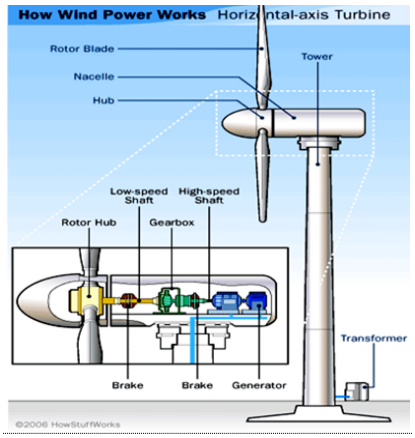
**الشكل (1-4): العنفات الريحية ذات المحور الأفقي.**

يكون محور هذه العنفات أفقياً بشكل مواز للأرض. وبالتالي فإن هذه العنفات تحتاج لتعديل وضعيتها دوماً لتكون باتجاه الرياح. يشتمل نظام تعديل الانحراف على المحركات الكهربائية وصناديق التروس التي تحرك الدوار إلى اليمين أو إلى اليسار. تضم هذه العنفة أيضاً البرج الذي يحمل كافة مكونات العنفة عند الارتفاع الأقصى لسرعة الرياح لذا فإن هذه العنفات تحتل مكاناً صغيراً نسبياً على الأرض بالمقارنة مع العنفات الريحية ذات المحور العمودي [3].

## ١ ٤ ٢ ٠: مكونات العنفات الريحية ذات المحور الأفقي:

## *Components Of Horizontal-Axis Wind Turbines:*

تتكون العنفات الريحية الموضحة بالشكل التالي ذات المحور الأفقي من العناصر الرئيسية التالية:



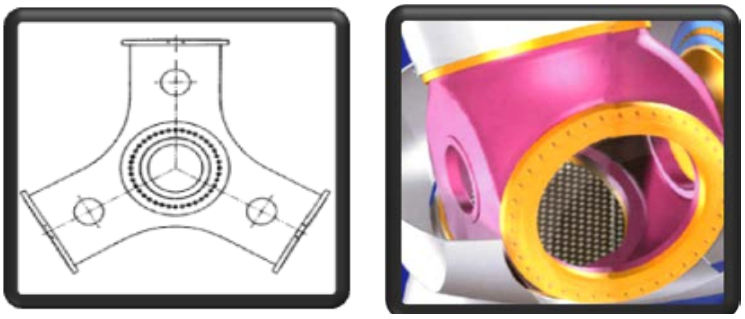



**الشكل (1–5): مكونات العنفة الريحية ذات المحور الأفقي.**

١: **الجزء الدوار(Rotor)**: ويتكون من الأجزاء التالية:

١ ٠: **شفرات الدوار (Blades)**: وظيفتها استخلاص الطاقة الحركية الانسيابية م ن الرياح وتحويلها إلى طاقة حركية دورانية تدير محور العنفة.

١ ٢: **الصرة (Hub)**: الغرض منها نقل القوى والعزم من الأجنحة (الريش) إلى محور الدوران الرئيسي، كما هو موضح في الشكل التالي:



**الشكل (1–6): شكل توضيحي للصرة.**

١ ٣: **غطاء الصرة (Spinner)**: يستخدم لتغطية الصرة حيث يساعد على انسياب الهواء وحماية الأجزاء الموجودة داخل الصرة من الأتربة والأمطار، كما في الشكل التالي [3].



**الشكل (1–7): غطاء الصرة.**

٢: **حاوية الأجزاء الدوارة (Nacelle):** وهي تحتوي على الأجزاء التالية:

( المولد – علبة السرعة – محور الدوران الرئيسي – المكابح الميكانيكية – قاعدة حاوية الأجزاء الدوارة – الوصلة المرنة – نظام التوجيه).

٢ ١:**المولد(Generator):** يحول الطاقة الدورانية (الميكانيكية) على محور العنفة إلى طاقة كهربائية.

٢ ٢:**علبة السرعة (Gear Box):** وظيفتها تعديل سرعة المحور البطيئة إلى سرعة عالية لتتوافق مع سرعة تشغيل المولد الكهربائي.

٢ ٣:**محور الدوران الرئيسي (Rotor Shaft):** يقوم بربط صرة العنفة مع دائر المولد الكهربائي.

٢ ٤:**المكابح الميكانيكية(الفرامل) (Mechanical Brake):** تعمل المكابح إما بنظام كهربائي أو نظام هيدروليكي.وهي تستخدم لإيقاف دوران محور العنفة في حالة زيادة أو انخفاض سرعة الرياح عن الحدود المطلوبة ولدى حدوث الأعطال في النظام.

٢ ٥:**قاعدة حاوية الأجزاء الدوارة (القمرة) (Nacelle Base):** تحوي وتحمي كلا من المولد وعلبة السرعة. ويتم تصميمها بحيث تنقل جميع القوى الديناميكية والإجهادات من الدوار إلى البرج.

٢ ٦:**الوصلات المرنة (Flexible Couplings):** تستخدم هذه الوصلات للتوصيل بين بعض أجزاء العنفة، والغرض منها حماية هذه الأجزاء لقدرتها على امتصاص الأحمال المفاجئة.

٢ ٧:**نظام التوجيه (Yaw System)** ( نظام انحراف المحور الشاقولي ) يسمح هذا النظام بدوران القمرة أثناء عملية توجيه الشفرات بلتجاه الرياح أو خارج مواجهة الرياح [3][6].

٣: **نظام التحكم (Control system):** يشتمل على نظام المراقبة ، ووحدة إيقاف العنفة في حالة الأعطال وقد يحتوي على وحدة التحكم بنظام تعديل زاوية ميل الشفرات (Pitch Control).

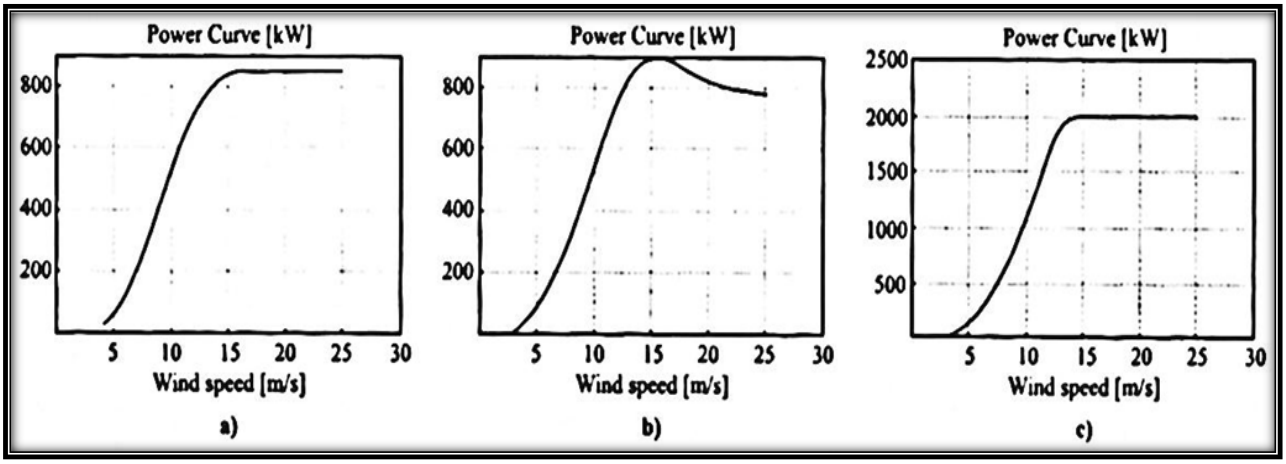
تصمم أغلب العنفات الريحية بحيث تقدم استطاعتها العظمى عند سرعة ريا ح (15 m/sec)، كما أن أغلب العنفات تتوقف عن العمل عند سرعة رياح أكبر من(20 m/sec) لأسباب تتعلق بالمتانة الميكانيكية وهذا يجعل من الضروري إضاعة جزء من استطاعة الرياح الزائدة لتجنب إلحاق الضرر بالعنفة. لذلك تم تصميم العنفات الريحية مع آلية تحكم بالاستطاعة المستخلصة من الرياح ويتم ذلك بعدة طرق منها:

٣ ١: **التحكم بزاوية ميلان الريشة Pitch Control:** وفيها يتم تدوير شفرات دوار العنفة حول محورها الطولي ، فعندما تتحسس الحساسات بأن استطاعة خرج العنفة أصبحت كبيرة فإنها تقوم مباشرة وبصورة ناعمة بتحريك العنفة وإنقاص استطاعة الخرج إلى الحد المقبول [1].

**٣ ٢: التحكم باستطاعة العنفة عن طريق الكبح غير الفعال (Passive Stall Control).**

**٣-٣: التحكم باستطاعة العنفة عن طريق الكبح الفعال (Active Stall Control).**

والشكل التالي يبين مقارنة بين استطاعة خرج العنفة الريحية باستخدام طرق التحكم الثلاث [1].




**الشكل (1-8): استطاعة خرج عنفة ريحية مقابل سرعة الرياح باستخدام طرق تحكم مختلفة.**
**(a) Pitch Control. (b) Passive Stall Control. (c) Active Stall Control**

٤: **البرج (Tower):** يقوم البرج برفع الدوار والقمرة وباقي العناصر الداخلية إلى مكان أعلى بحيث يمكن للشفرات أن تدور بشكل آمن عند الارتفاع الموافق لسرعات الرياح المتاحة [6].

٥: **قاعدة البرج (Wind Turbine Base):** تصمم هذه القاعدة من الخرسانة المسلحة، ويوضع بداخلها الجزء الخاص بتثبيت برج ال عنفة، ويؤخذ بالاعتبار عند تصميمها الأحمال الديناميكية للعنفة، وتعمل أيضا على نقل الأحمال والعزم من البرج إلى الأرض [3][6].

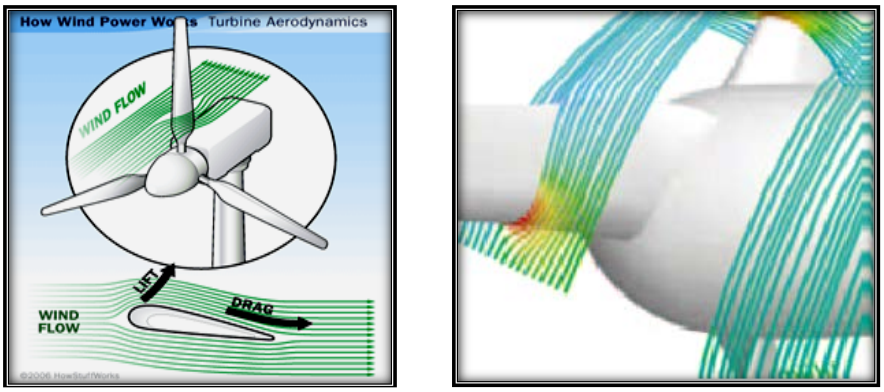
## ١-٥: القوى الآيروديناميكية المؤثرة على شفرة العنفة الريحية:

## *Aerodynamics Forces Effect On Wind Turbine Blade:*

إن القوتين الديناميكيتين الهوائيتين الأساسيتين المؤثرتين على شفرات العنفة الريحية هما:

أ- **قوة الرفع (" L " Lift force ):** وهي قوة عمودية على اتجاه تدفق الرياح، وهي المركبة الفعالة، وتنشأ بنتيجة فرق الضغط بين سطح حافة الريشة الأمامي المعرَّض للرياح وبين سطحها الخلفي.

ب- **قوة الإعاقة ( "D" Drag force ):** وهي قوة موازية لاتجاه تدفق الرياح وتعمل هذه القوة على إعاقة حركة الريشة، لذلك يوجد في بعض العنفات الريحية أجزاء من الريشة تتحرك لتستخدم هذه القوة كمكابح هوائية "Tip break"، وكلما كانت قوة الإعاقة أصغر كلما كانت الريشة أفضل حيث أن هذه القوة تتعلق بفرق الضغط أمام وخلف الريشة وباحتكاك الهواء بسطح الريشة ، وبالتالي كلما كان سطح الريشة أنعم كلما كانت قوة الإعاقة أصغر. والشكل التالي يبين هاتين القوتين.




**الشكل (1–9): القوى المؤثرة على الشفرة.**

وتعطى محصلة القوى المؤثرة على الريشة بالعلاقة:

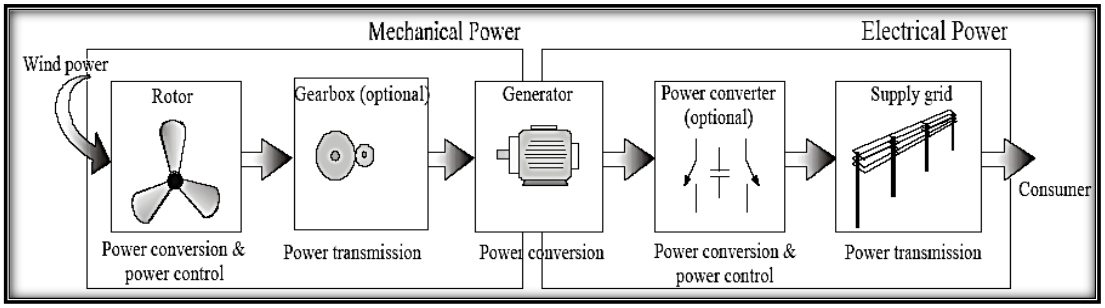
$$R = \sqrt{L^2 + D^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1-1)$$

تشبه شفرات العنفة بشكل كبير أجنحة الطائرة إذ تصمم بشكل انسيابي حيث يكون أحد وجوه الشفرة مصمم بشكل منحني قليلاً أما الوجه الأخر فيكون مستوي نسبياً.

## ١-٦: آلية تحويل الطاقة الحركية للرياح إلى طاقة كهربائية:

## *Converting kinetic Energy of Wind to Electrical Energy:*

تقوم العنفات الريحية بالاستفادة من الطاقة الحركية للرياح عن طريق محورها الحامل للشفرات ، حيث تعتبر الشفرات الجزء المسؤول عن استخلاص الطاقة الحركية من الرياح (وفق قوانين الآيروديناميك) لتتحول الطاقة الحركية هذه إلى طاقة كهربائية عبر المولد الكهربائي ثم يتم تكييفها مع الشبكة العامة لتصب فيها في النهاية ومنها إلى المستهلك النهائي كما في الشكل التالي [3].



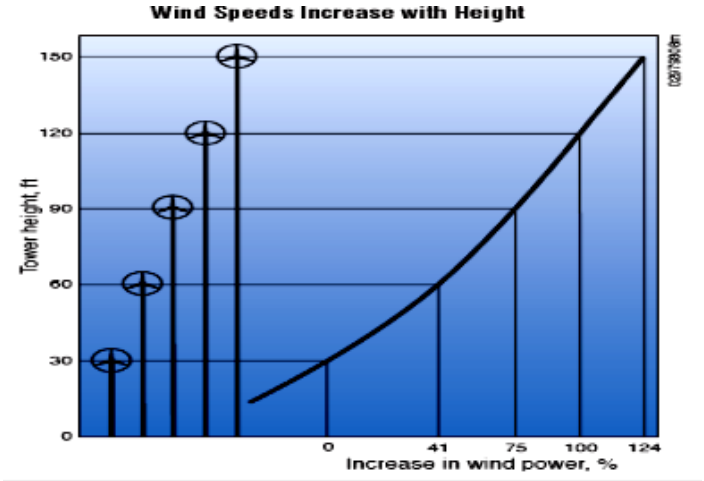

**الشكل (1–10): آلية تحويل الطاقة الحركية للرياح إلى طاقة كهربائية.**

## ١-٧: الاستطاعة المستخلصة من الرياح في العنفات الريحية:

## *Captured Energy From Wind By Wind Turbines:*

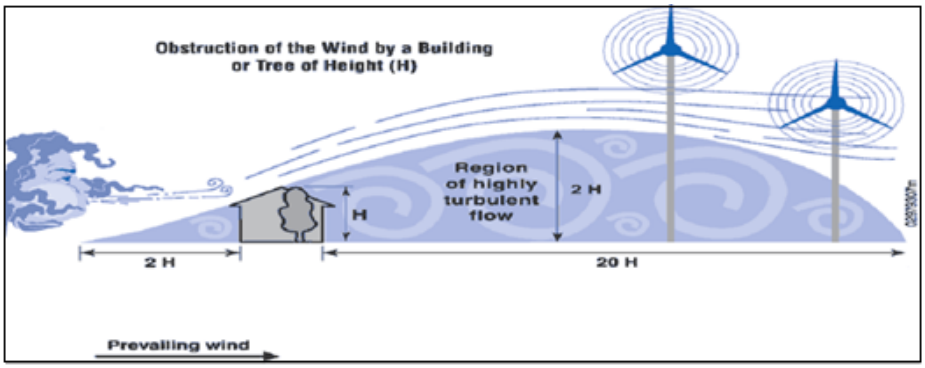
تعتبر سرعة الرياح العامل الأساسي المؤثر على الاستطاعة المستخلصة من الرياح في العنفة الريحية لكنها ليست العامل الوحيد، إذ يتوجب أخذ أمور أخرى بالاعتبار ك حجم وطول شفرات العنفة وبالتالي قطر الدوار ، وارتفاع البرج ،وخشونة الأرض ، وذلك كي تستطيع العنفة أن تستخلص الطاقة

القصوى من الرياح لتوليد الكهرباء. حيث أن ارتفاع البرج يؤثر بشكل كبير في تحديد الطاقة الإنتاجية للعنفة الريحية، وذلك بسبب ازدياد سرعة الرياح مع زيادة الارتفاع كما في الشكل التالي [3].




**الشكل (1-11): تغير السرعة مع تغير ارتفاع البرج.**

كما أن خشونة الأرض والأجسام الموجودة على سطح الأرض تؤثر أيضاً على سرعة الرياح حيث أن سرعة الرياح في المناطق التي تحتوي على أبنية وأشجار تكون أدنى من السرعة في المناطق التي لا تحتوي عليها كما هو موضح بالشكل التالي.[3]




**الشكل (1-12): تأثير وجود الأشجار والمنازل على سرعة الرياح.**

## ١ ٣ ٢: حساب الاستطاعة الكهربائية المستخلصة من الرياح في العنفات الريحية:

## *Calculating the Captured Energy From Wind By Wind Turbines:*

من أجل حساب الاستطاعة المتوقع توليدها من الرياح يجب معرفة:

- سرعة الرياح في الموقع المختار.
- المواصفات الفنية للعنفة المستخدمة.

عند سرعات ثابتة للرياح فإن قطر الدوار هو الذي يحدد مقدار الاستطاعة التي يمكن توليدها ، علماً أنه مع زيادة قطر الدوار يزداد ارتفاع البرج وبالتالي يتم الوصول إلى سرعات رياح أعلى.[6]

### ١ ٢ ٢ ٢: علاقة الاستطاعة الكهربائية المنتجة بسرعة الرياح:

### *The Relationship Between Wind Speed and Produced Electrical Energy:*

تعطى الطاقة الحركية للرياح بالعلاقة:

$$K = \frac{1}{2}.m.v^2 \qquad [J] \quad \ldots\ldots\ldots \quad (2-1)$$

حيث: K: الطاقة الحركية مقدرة بـ [Joule].

m: كتلة الرياح التي تتحرك بالسرعة [m/sec] $v$.

أما الاستطاعة فهي نسبة تدفق الطاقة الحركية في الثانية:

$$P = \frac{1}{2}(mass\ flow\ per\ sec).\ v^2 \quad [W] \quad \ldots\ldots\ldots \quad (3-1)$$

و باعتبار أنَّ: P: الاستطاعة الميكانيكية للهواء المتحرك [W]. $\rho$: كثافة الهواء [$Kg/m^3$].

A: المساحة التي تغطيها الشفرات [ $m^2$ ]. V: سرعة الرياح [m/sec].

فإن نسبة التدفق الحجمي للهواء هي (A.V).[$m^3$/sec].

وتكون نسبة تدفق كتلة الهواء بالثانية هي: $(\rho.A.v)$ [Kg/sec].

وبالتالي فإن الاستطاعة الميكانيكية هي:

$$P = \frac{1}{2}(\rho.A.v).v^2 = \frac{1}{2}.\rho.A.v^3 \qquad [W] \quad \ldots\ldots\ldots \quad (4-1)$$

وبتقسيم العلاقة السابقة على المساحة التي تغطيها الشفرات A فإننا نحصل على:

$$\text{Specific power of the site} = \frac{1}{2}.\rho.v^3 \quad [W/m^2] \quad \ldots\ldots\ldots \quad (5-1)$$

تبين العلاقة (1-5) أن الاستطاعة الكهربائية التي يمكن توليدها من طاقة الرياح تتناسب طرداً مع سرعة الرياح بعلاقة تكعيبية وكذلك مع كثافة الهواء في مكان تركيب العنفة [3].

### ١ ٢ ٢ ٢: الطاقة الفعلية المولدة من الرياح:

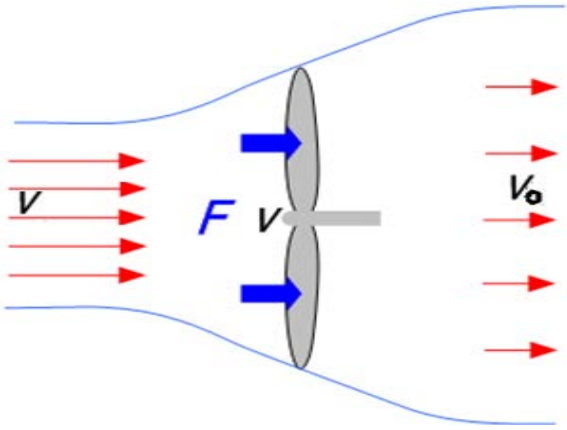
### *Real Energy Generated From Wind*:

إن الطاقة الفعلية المستخلصة من الرياح عن طريق شفرات الدائر تتعلق بالفرق بين سرعة الرياح الواردة إلى العنفة والخارجة منها. وبالاستفادة من علاقة الاستطاعة (1-3)، فإن الاستطاعة الناتجة عن الدائر (استطاعة خرج الدائر) Po تعطى بالعلاقة:

$$P_0 = \frac{1}{2}(mass\ flow\ per\ sec).(v^2 - v_0^2) \quad [W] \quad \ldots\ldots\ldots \quad (6-1)$$

حيث: $V$ : سرعة الرياح الواردة عند مدخل شفرات الدائر (Up wind).

$v_0$ : سرعة الرياح الخارجة عند مخرج شفرات الدائر (Dawn wind).




**الشكل (1-13): سرعة الرياح الواردة عند مدخل شفرات الدائر $V$ ، الناتجة خلف شفرات الدائر $v_0$.**

وباعتبار أن سرعة الرياح تتغير من $V$ إلى $v_0$ ، فإن السرعة الوسطية تصبح:

$$[\frac{1}{2}.(v+v_0)] \quad [m/sec] \quad \ldots\ldots\ldots \quad (7-1)$$

وبالتالي فإن نسبة تدفق كتلة الهواء:

$$mass\ flow\ rate = \rho\ .A\ .\frac{v+v_0}{2} \quad [Kg/sec] \quad \ldots\ldots\ldots \quad (8-1)$$

عندئذ تصبح $Po$:

$$P_0 = \frac{1}{2}\left[\rho\ .A\ .\frac{v+v_0}{2}\right].(v^2 - v_0^2) \quad [W] \quad \ldots\ldots\ldots \quad (9-1)$$

ومنه:

$$P_0 = \frac{1}{2}.\rho.A.v^3.\frac{\left(1+\frac{v_0}{v}\right).[1-(\frac{v_0}{v})^2]}{2} \quad [W] \quad \ldots\ldots\ldots \quad (10-1)$$

فإذا كان:

$$C_p = \frac{\left(1+\frac{v_0}{v}\right).[1-(\frac{v_0}{v})^2]}{2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (11-1)$$

ويدعى **Cp** بمعامل أداء العنفة "Power Coefficient (or) Rotor Efficiency".

وهكذا فإن استطاعة خرج الدوار بدلالة سرعة الرياح الواردة هي:

$$P_0 = \frac{1}{2}.\rho.A.v^3.C_p \quad [W] \quad \ldots\ldots\ldots \quad (12-1)$$

وبمقارنة العلاقة (1-12) مع العلاقة (1-4) يمكن القول أن **Cp هو عامل استطاعة الرياح الواردة التي تتحول عن طريق شفرات العنفة إلى استطاعة ميكانيكية مقدمة للمولد الكهربائي** [3][6].

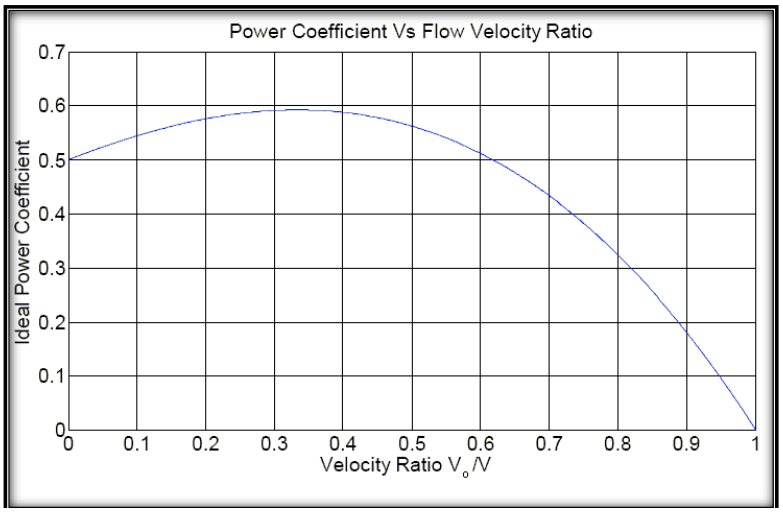
## ١ ٢ ٣: نظرية بيتز:

## *Betz theory:*

صيغت نظرية بيتز بواسطة الفيزيائي الألماني ألبرت بيتز عام 1919، حيث أعطى حساباً جديداً في معرفة طاقة الرياح.

وتنص النظرية على ما يلي :((تحتوي 59% من طاقة الرياح المتحركة على التوربينات الريحية ذات المحاور الأفقية)).

ذلك لأنه لكي نتمكن من الاستفادة من الطاقة الحركية الكلية الموجودة في الرياح يجب أن تكون سرعة الرياح بعد العنفة تساوي الصفر ، وبالتالي فإنَّ الحصول على كامل هذه الاستطاعة مستحيل فعلياً حيث يتم الحصول فقط على (59% ) منها كحد أعظمي (وهي القيمة العظمى النظرية لها). ولكنها عملياً ذات قيمة أقل. يبين الشكل التالي مردود الدوار كتابع للنسبة Vo/V.




**الشكل (1−14): مردود الدوار (الشفرات+الصرةhub) كتابع للنسبة $\frac{v_0}{v}$.**

نلاحظ من الشكل الأخير أن المنحني يأخذ قيمة عظمى تبلغ ($C_p$ =0.59) عند ( $\frac{v_o}{v} = \frac{1}{3}$ ) أي عندما تكون السرعة بعد العنفة الريحية $v_0$ هي ثلث السرعة قبل العنفة الريحية $v$، عندها نستخلص أعظم قدرة ممكنة من الرياح.

و بتعويض القيمة الأ عظمية النظرية للمعامل Cp في العلاقة ( 1−12) والتي تساوي ($C_p$ =0.59)، تصبح علاقة الاستطاعة الأعظمية المستخلصة من الرياح نظرياً هي:

$$P_{o_{max}} = \frac{1}{2} \cdot 0.59 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad [W] \quad \ldots\ldots\ldots \quad (13-1)$$

ويمكن عملياً اعتبار $C_{p_{max}} = 0.5$ وبالتالي [3]:

$$\frac{P_{max}}{A} = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot v^3 \quad [W/m^2] \quad \ldots\ldots\ldots \quad (14-1)$$

## ١ ✯: العوامل المؤثرة على الاستطاعة المستخلصة من الرياح في العنفات الريحية:

## *Factors Effect On Captured Energy from Wind:*

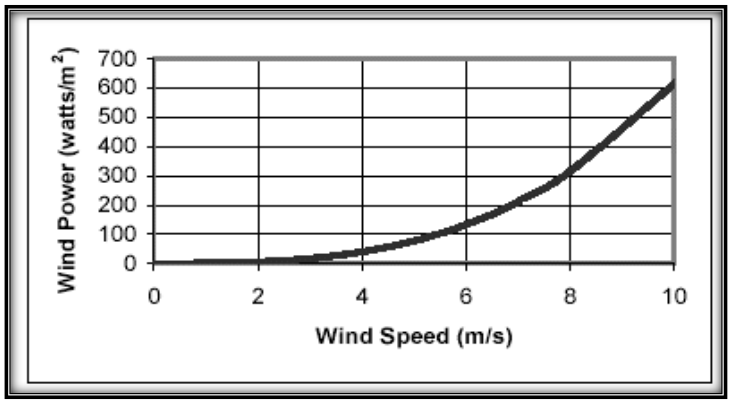
وجدنا أن الاستطاعة $P_o$ التي يمكن توليدها في العنفة الريحية تعطى بالعلاقة:

$$Po = \frac{1}{2} \cdot Cp\,(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad [W] \quad \ldots\ldots\ldots \quad (15-1)$$

### ١ ✯ ✯: سرعة الرياح $(v\ [\frac{m}{s}])$:

### *Wind speed* $\left(v\ \left[\frac{m}{s}\right]\right)$:

تعتبر سرعة الرياح أهم عامل في المعادلة ( 1-15)، حيث تتناسب الطاقة المنتجة طرداً مع مكعب سرعة الرياح مما يؤثر على تكلفة إنتاجها ، ويبيِّن الشكل التالي تغير كثافة طاقة الرياح مع تغيرات سرعة الرياح [3].




**الشكل (1-15): تغير كثافة طاقة الرياح مع تغير سرعة الرياح**

### ١ ✯ ✯: المساحة التي تغطيها شفرات الدوار(A [$m^2$]):

### *Area Of The Rotor Turbine(A [$m^2$]):*

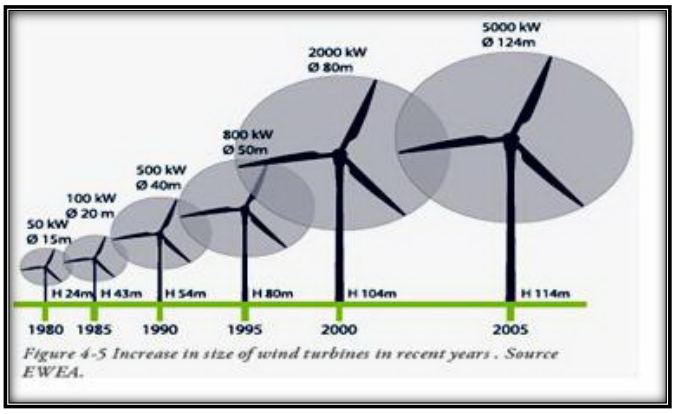
نلاحظ من العلاقة ( 1-15) أن الاستطاعة $Po$ تتناسب طرد اً مع A ( المساحة التي تغطيها شفرات الدوار ). فمن أجل العنفات ذات المحور الأفقي:

$$A = \frac{\pi}{4} . D^2 \quad [m^2] \quad \ldots\ldots\ldots \quad (16-1)$$

حيث: D قطر الدوار[m].

ومن خلال العلاقتين (1-15)، (1-16) نلاحظ أن مضاعفة قطر الدوار تؤدي إلى زيادة في الطاقة المستخلصة أربعة أضعاف لأن مقدار الطاقة التي يمكن الحصول عليها من العنفة الريحية تتناسب طرداً مع المساحة (A) التي بدورها تتناسب مع مربع القطرD.

والشكل التالي يبيِّن الزيادة الحاصلة في الاستطاعة المنتجة بنتيجة زيادة قطر الدوار [3].




**الشكل (1−16): العلاقة بين قطر الدوار والاستطاعة المنتجة.**

### ١ ٨ ٣: الكتلة الحجميّة للهواء (كثافة الهواء) ρ ($kg/m^3$):

### *Volume Mass Of Air(Air Density) ρ ($kg/m^3$):*

تتناسب الاستطاعة طرداً مع كثافة الهواء $\rho$ (وهي كتلة الهواء الموجودة في واحدة الحجم عند ضغط ودرجة حرارة معيَّنين)، حيث أن الطاقة الحركية في أي جسم تعتمد على وزنه وكذلك الحال بالنسبة للطاقة الحركية للرياح والتي تعتمد على كثافة الهواء، وبعبارة أخرى فإنّه كلما كان الهواء أثقل (كثافة عالية) كانت الطاقة المولدة أكبر والعكس صحيح.

تعطى كثافة الهواء المعيارية عند سطح البحر بضغط جوي(1 atm) ودرجة حرارة 15 C° والثابت العام للغازات يساوي $R = 287.05 \frac{Jol}{Kg.K}$ بالقيمة ( $\rho$=1.225[kg/m3]) ويمكن استخدام هذه القيمة كقيمة مرجعية [3].

### ١ ٨ ٤: مردود العنفة الريحية ( معامل أداء العنفة الريحية) (Cp):

### *Rotor Efficiency (or) Power Coefficient:*

إن معامل الأداء Cp للعنفة الريحية يمكن وصفه بأنه جزء الاستطاعة الميكانيكية المستخلصة من الاستطاعة الكلية المتوفرة في الرياح وهو وحيد لأجل كل عنفة. ويعتمد هذا المعامل على زاوية ميلان الشفرات (Pitch Angle) β وكذلك على السرعة النسبية لطرف الريشة (Tip Ratio) λ [1][3].

### ١ ٨ ٤ ٢: العوامل المؤثرة في معامل أداء العنفة الريحية(Cp):

### *Factors Effect On Cp:*

#### ١ ٨ ٤ ٢ ١: السرعة النسبية لطرف الريشة (λ) (*Tip Ratio*):

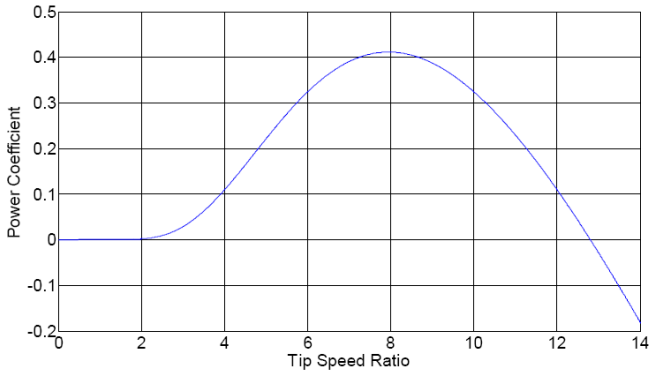
وهي النسبة بين السرعة الخطية لطرف الريشة $v_1$ إلى سرعة دخول الرياح $v_{wind}$ ، وتعطى بالعلاقة:

$$\lambda = \frac{\omega_r . R_r}{v_{wind}} = \frac{\text{السرعة الخطية لطرف الريشة}}{\text{سرعة الرياح}} = \frac{v_1}{v_{wind}} \quad (17-1)$$

حيث:

λ: السرعة النسبية لطرف الريشة. $\omega_r$: السرعة الزاوية لطرف الريشة. $R_r$: نصف قطر دوار العنفة.

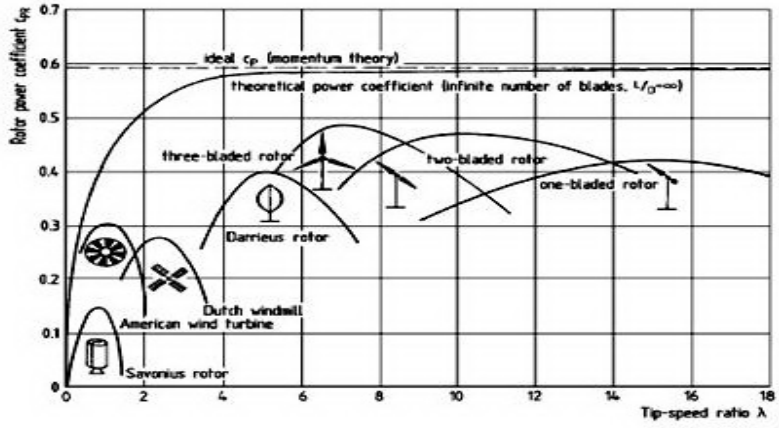
ويظهر الشكل التالي العلاقة بين معامل أداء العنفة وبين الـ Tip speed ratio (λ) [3].




**الشكل (1-17): منحني يظهر العلاقة بين Cp و λ (السرعة النسبية لطرف الريشة).**

والذي يجب ملاحظته من الشكل الأخير أن هناك قيمة محددة لـ ( λ) تجعل ($C_p$) أعظم ما يمكن، لذلك نستنتج أنه عند سرعة رياح ثابتة هناك سرعة دوران معينة لدوار العنفة تسمح بانتزاع أكبر قدر ممكن من الاستطاعة الميكانيكية للرياح.

ويوضح الشكل التالي مقدار تغير مردود العنفة *Cp* مع تغير السرعة النسبية لطرف الريشة لأنواع مختلفة من العنفات الريحية [1].

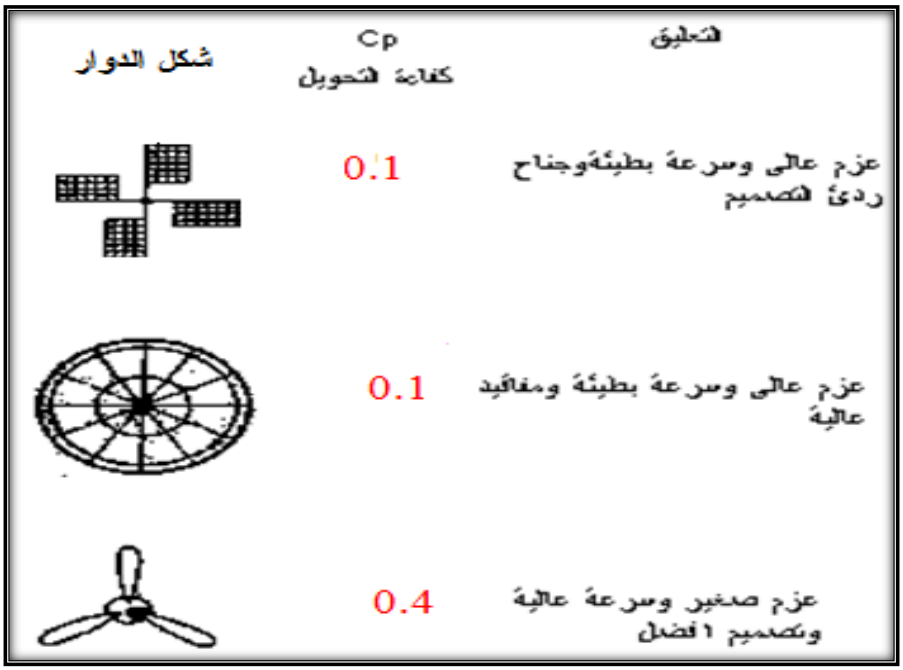



**الشكل (1-18): تغير مردود العنفة *Cp* مع تغير السرعة النسبية لطرف الجناح لعدة أنواع من العنفات.**

**١ ٨ ٤ ٢ ٦ ٣: كفاءة تصميم الريشة:**

***Efficient Design Of Blade:***

تعتمد قيمة معامل أداء العنفة الريحية (*Cp*) على تصميم الجناح. ويتضح ذلك من الشكل التالي والذي يظهر نماذج لتصميمات مختلفة للدوار وتغير قيمة (*Cp*) تبعاً لذلك [3].

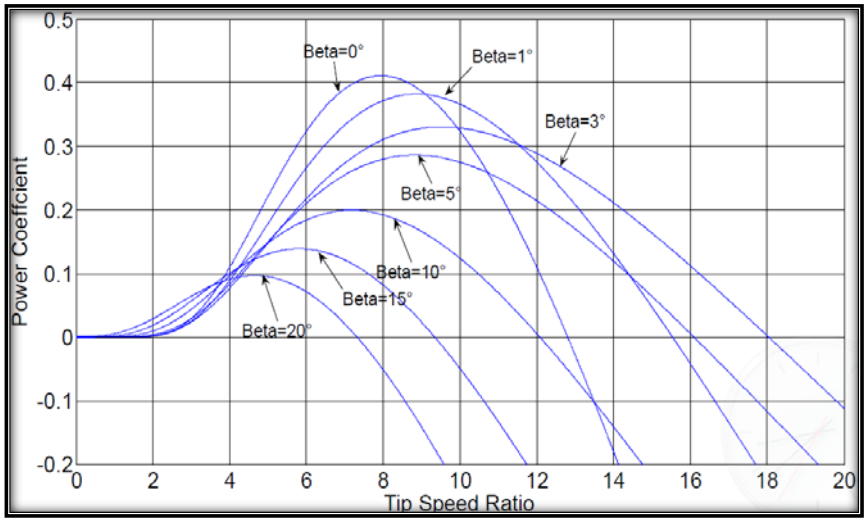



**الشكل (1–19): تغير قيمة ($Cp$) لتصميمات مختلفة من الدوار.**

**١ ٨ ٤ ٢ ٣: زاوية ميل الشفرات ($\beta$):**

***Blade pitch angle ($\beta$):***

نلاحظ من الشكل التالي أنه كلما زادت قيمة زاوية ميل الشفرة تنقص قيمة $C_P$ [1].




**الشكل (1–20): منحنيات $C_p - \lambda$ لعنفة ريحية عند زاويا ميلان $\beta$ مختلفة.**

## ١ ـ ٢: أنواع الأنظمة الريحية:

## *Wind Systems Types:*

- يمكن تصنيف الأنظمة الريحية من حيث علاقتها بالشبكة العامة إلى:
  - ☒ عنفات ريحية مستقلة عن الشبكة (Stand Alone Wind Turbines).
  - ☒ عنفات ريحية مربوطة مع الشبكة(Grid Connected Wind Turbines).
- كما يمكن تصنيف الأنظمة الريحية من حيث السرعة التي تعمل عندها إلى:
  - ☒ الأنظمة الريحية التي تعمل عند سرعة ثابتة (Fixed-Speed Wind Turbines).
  - ☒ الأنظمة الريحية التي تعمل عند سرعات متغيرة (Variable Speed Wind Turbines).

## ١ ـ ٣: الأنظمة الريحية التي تعمل عند سرعة ثابتة:

## *Fixed-Speed Wind Turbines:*

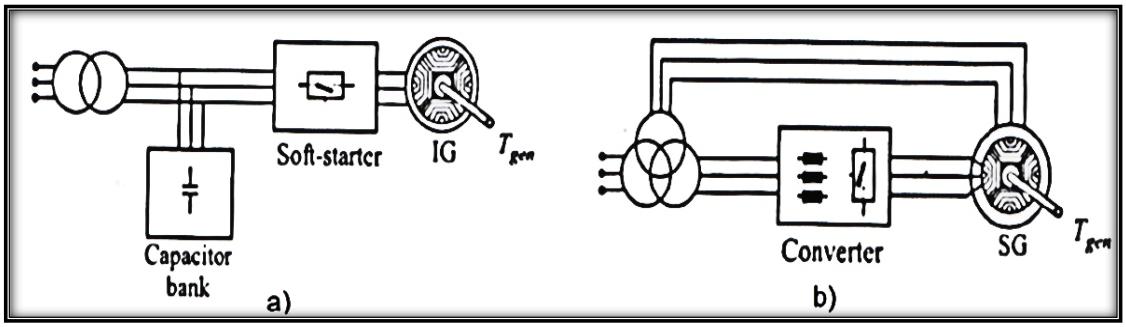
في هذا النظام يتم إهمال تغيرات سرعة الرياح ، حيث تصمم العنفة لتعمل عند سرعة ثابتة تتحد د من خلال نسبة تحويل علبة السرعة (Gear box) ونظام عمل المولد وتردد الشبكة المربوطة مع العنفة.

تتميز أنظمة ا لسرعة الثابتة ببساطة تصميم وتركيب الجزء الكهربائي ووثوقيته ، لكن الأجزاء الميكانيكية فيها تخضع لإجهادات كبيرة وعوامل أمان إضافية تؤخذ بعين الاعتبار. كما أن العنفات التي تعمل عند سرعة ثابتة لها تأثيرات معينة على الشبكة العامة، وخصوصاً في المناطق التي تكون فيها الشبكة الكهربائية ضعيفة وطاقة الرياح فيها كبيرة [1].

### ١ ـ ٣ ـ ١: دراسة الخصائص الهندسية:

### *Topology Overview:*

تستخدم المولدات التحريضية ( IG) والمولدات التزامنية ذات الدائر الملفوف ( SG) في الأنظمة الريحية التي تعمل عند سرعة ثابتة، كما هو موضح في الشكل التالي:




**الشكل (1-21): الأنظمة الريحية التي تعمل عند سرعة ثابتة:**

**a): مولد تحريضي (IG) b): مولد تزامني ذو دائر ملفوف (SG)**

يبين الشكل (1-21- a) مولد تحريضي ذو قفص سنجابي مستخدم في عنفة ريحية تعمل عند سرعة ثابتة، ولتعويض الاستطاعة الردية التي يستهلكها المولد نقوم بربط مجموعة مكثفات على التفرع م عه لتحسين عامل الاستطاعة، بالإضافة إلى ذلك يتم وضع مقلع لين ( soft starter) لتخفيف الاجهادات الميكانيكية وردود الأفعال المتبادلة بين الشبكة والعنفة خلال عملية إقلاع العنفة وربطها مع الشبكة.

ويبين الشكل (1-21- b) مولد تزامني ذو دائر ملفوف، وقد تم ربط المبدل الالكتروني (المقوِّم) إلى ملفات الدائر فيه لتزويد المولد بتيار التهييج المستمر [1].

### ١ ٩ ٠ ٢: المولد التحريضي ذو القفص السنجابي:

### *Squirrel-Cage Induction Generator:*

يعتبر المولد التحريضي ذو القفص السنجابي هو الخيار السائد في العنفات الريحية ذات السرع ة الثابتة وذلك لما يتمتع به من بساطة التصميم والمردود العالي وانخفاض متطلبات الصيانة.

مع ملاحظة أنه في حال ربط المولد التحريضي بشكل مباشر مع الشبكة فإن ذلك سيؤثر بشكل كبير على الشبكة، ويتمثل هذا التأثير بشكل عام بتيار التهييج الذي يستجره المولد التحريضي من الشبكة لكي يعمل ، إضافة إلى ذلك، فإنه وبسبب مميزة (العزم – السرعة) الحاد ة للمولد التحريضي فإن التقلبات في طاقة الرياح سوف تن قل "إلى حد ما " مباشرة إلى الشبكة وهذه الحالات العابرة تصبح حرجة خصوصاً خلال عملية ربط العنفة الريحية مع الشبكة.[1]

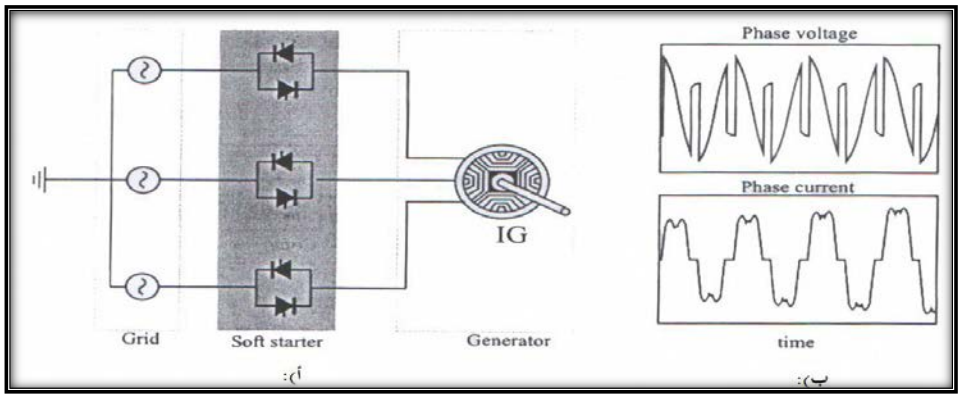
للتخلص من هاتين المشكلتين عادة يزود المولد التحريضي ذو القفص السنجابي المستخدم في العنفات الريحية بمقلع ناعم (Soft–starter) ومعوضات للاستطاعة الردية [1].

### ١ ٩ ٠ ٢ ٠: المقلع الناعم:

### *Soft–Starter:*

إن وصل العنفة الريحية التي تستخدم المولد التحريضي ذو القفص السنجابي مباشرة إلى الشبكة العامة سوف يسبب نفس الحالة العابرة التي تحدث عند ربط محرك تحريضي تقليدي إلى شبكة التغذية، ولإنقاص تأثيرات حالة الإقلاع هذه تزود العنفات الريحية التي تعمل عند سرعة ثابتة بآلية إقلاع ناعمة.

يوضح الشكل التالي مكونات مقلع ناعم فعال متحكَّم به، حيث توصل فيه أزواج الثايرستورات بشكل (back-to-back )، كما ويظهر فيه أشكال موجات التوتر والتيار الناتجة عند الإقلاع.




**الشكل (1–22): مقلع ناعم مستخدم في العنفات الريحية مع المولدات التحريضية.**

**ب): أشكال موجات التوتر والتيار الناتجة عند الإقلاع. أ): مكونات المقلع الناعم الفعال المتحكم به.**

بعد الإقلاع تقصر الثايرستورات وتخرج من الدارة وذلك للتخلص من ضياعات الاستطاعة في الثايرستورات بسبب هبوطات الجهد عليها.

تصبح مشكلة استجرار تيار كبير عند الإقلاع أكثر حرجاً عندما نأخذ بالحسبان كامل المزرعة الريحية، وغالباً يتم توصيل العنفات الريحية على شكل مجموعات صغيرة للتقليل من تيار الإقلاع [1].

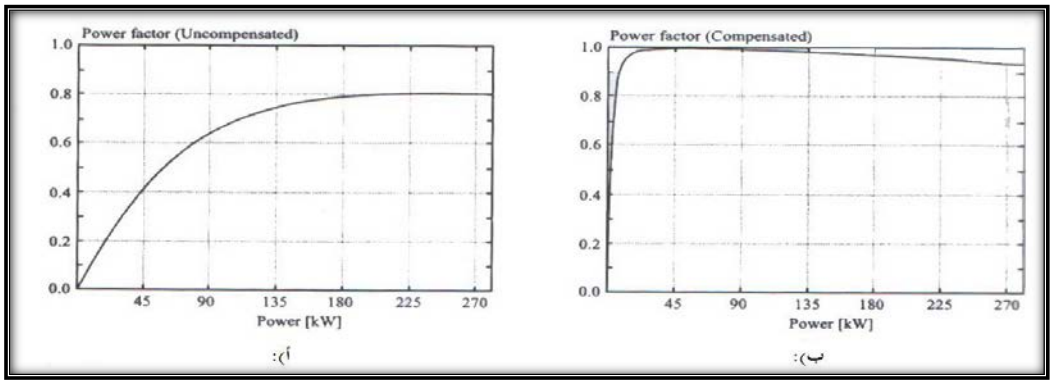
**١ ٩ ٨ ٢ ٢: معوضات الاستطاعة الردية:**

***Reactive Power Consumption:***

عند ربط المولد التحريضي مع الشبكة العامة فإن المولد يستجر الاستطاعة الردية من الشبكة مما يؤدي إلى انخفاض عامل الاستطاعة ($\cos\varphi$) للعنفة الريحية.

يظهر الشكل (1–23–أ) عامل الاستطاعة مقابل الحمل لمولد استطاعته [Kw]225 مستخدم في عنفة ريحية عند عدم وجود معوضات للاستطاعة الردية، ويعتبر عامل الاستطاعة هذا غير مقبول من وجهة نظر مشغلي شبكات التغذية الكهربائية لأن استهلاك الاستطاعة الردية سيؤدي إلى وجود ضياعات في الشبكة الكهربائية. للتقليل من الاستطاعة الردية المستجرة من الشبكة نقوم بربط مجموعة من مكثفات التعويض على التفرع مع المولد (مجموعة مكثفات مع كل عنفة على حدا).

بينما يظهر الشكل (1–23– ب) عامل الاستطاعة مع وجود معوضات للاستطاعة الردية.




**الشكل (1–23): عامل الاستطاعة مقابل الاستطاعة المنتجة.**

**ب): مع وجود مكثفات لتعويض الاستطاعة الردية. أ): عند عدم وجود معوضات للاستطاعة الردية.**

### ١ ٩ ٣: مولد تزامني ذو دائر ملفوف:

### *Wound Rotor Synchronous Generator:*

يعتبر استخدام المولد التزامني ذو الدائر الملفوف في العنفات الريحية ذات السرع ة الثابتة نادر جداً. وفيه يتم ربط ملفات الثابت مباشرة إلى الشبكة وبالتالي فإن السرعة الدورانية فيه يجب أن تكون مضبوطة بشكل تام، وذلك لأنها تمثل تردد التوتر المحقون في الشبكة فهو لا يحتاج إلى مبدل الكتروني كما هو موضح في الشكل السابق (1-21-b)، بينما يربط ملف الدائر فيه (وهو الملف المولد للحقل المغناطيسي) إلى منبع تغذية (DC).

أحد المشكلات التي تظهر عند استخدام ال مولد التزامني هي أنه في حالات التحميل المختلفة والحالات العابرة يصعب المحافظة على التزامن مع تردد الشبكة نفسه.

تقدم المولدات التزامنية العديد من الميزات الإيجابية مقارنة مع المولدات التحريضية عند استخدامها في الأنظمة الريحية ذات السرعة الثابتة. حيث أنه عند تصميم المولد التزامني بعدد مناسب من الأقطاب فإنه يمكننا ربط ه مباشرة مع العنفة دون الحاجة إلى علبة سرعة، إضافة إلى ذلك فإن المولد التزامني ليس بحاجة إلى نظام تعويض للاستطاعة الردية.[1]

### ١ ٩ ٤: المشاكل المتعلقة بالأنظمة الريحية التي تعمل عند سرعة ثابتة:

### *Problems Related to Constant – speed Operation:*

من أهم أسباب استخدام العنفات الريحية في الأنظمة التي تعمل عند ال سرع ة الثابتة هو وثوقية وبساطة تركيب المولدات المستخدمة فيها، ويعتبر ذلك الحافز الأكبر لاستخدام ا لعنفات الريحية الصغيرة في هذا النظام بسبب انخفاض تكلفة الكيلوواط الساعي المنتج منها. بينما في العنفات الريحية الكبيرة وخاصة المزارع الريحية تصبح مشاكل أنظمة السرعة الثابتة أكثر وضوحاً وتأثيراً.

يمكن التخلص من هذه المشاكل بالطرق الوقائية السابقة الذكر لكن ذلك يخفض من وثوقية ومنافسة هذه النظم.[1]

**من أهم مشاكل الأنظمة الريحية التي تعمل عند السرعة الثابتة:**

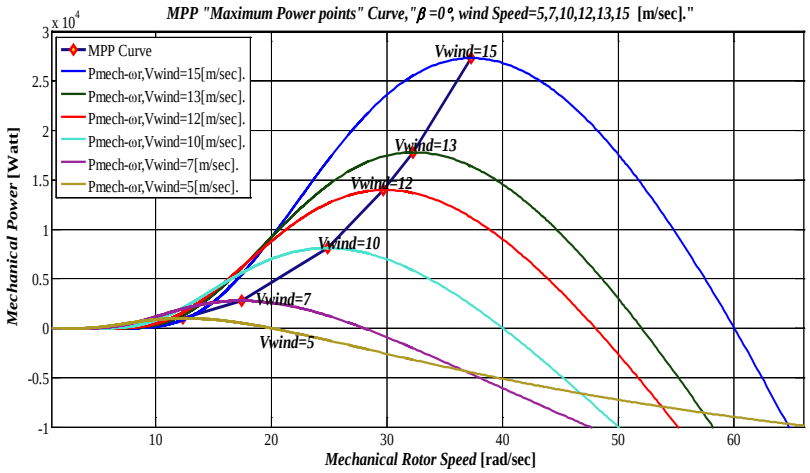
### ١ ٩ ٤ ١: الطاقة المستخلصة من الرياح:

### *Captured Energy:*

إحدى أهم المشاكل التي تعترض تصميم العنفات الريحية التي تعمل عند سرعة ثابتة ه ي القيمة التصميمية لسرعة الرياح الاسمية والتي عندها ستنتج هذه العنفة استطاعتها الاسمية ، وتنبثق هذه

المشكلة من كون الطاقة المستخلصة من الرياح ، والموضحة بالعلاقة (1-15)، تابع لا خطي يعتمد على سرعة الرياح والسرعة النسبية لطرف الريشة(λ).

يوضح الشكل التالي مشكلة الطاقة المستخلصة من الرياح في أنظمة السرعة الثابتة.




**الشكل (1-24): منحني الاستطاعة الميكانيكية المنقولة إلى صرة العنفة عند سرعات رياح مختلفة.**

حيث يظهر من الشكل (1-24) أنه عندسرعة رياح أعلى أو أدنى من السرعة الاسمية للرياح، فإن الطاقة المستخلصة لاتصل إلى قيمتها العظمى . وهذا هو السبب الرئيسي للانتقال إلى استخدام الأنظمة الريحية التي تعمل عند السرعات المتغيرة.[1]

**١ ٩ ٨ ٤ ٢: جودة الاستطاعة المولدة:**

**Power Quality:**

إن الاستطاعة المتولدة من العنفات الريحية ذات السرعة الثابتة حساسة لتغيرات سرعة الري اح، حيث أن أي تغير في سرعة الرياح سوف ينتقل عبر الجملة الميكانيكية والكهربائية للعنفة إلى الشبكة العامة . وإن ذلك سوف يؤثر على كفاءة الاستطاعة في الشبكة، و لتحسين جودة الاستطاعة يمكن الاستعانة بال( Pitch Control ) والذي يقوم بتعويض بسيط للتغيرات القليلة في سرعة الرياح بواسطة تغيير زاوية ميلان شفرات دائر العنفة وبالتالي تغيير قيمة معامل أداء الاستطاعة ($C_p$) [1].

## ١ ٩ ٨ ٢: الأنظمة الريحية التي تعمل عند سرعات متغيرة:

## *Variable Speed Wind Turbines:*

مع تزايد حجم واستخدام العنفات الريحية ووجود العديد من المشاكل في الأنظمة الريحية التي تعمل عند سرعة ثابتة وخصوصاً في المناطق ذات شبكة التغذية الضعيفة، تم التوجه نحو الأنظمة الريحية التي تعمل عند سرعات متغيرة، والتي من أهم ميزاتها:

- ❖ إمكانية استخدام أنواع متعددة من المولدات الكهربائية في هذه الأنظمة.
- ❖ سمحت بهامش حرية أكبر للمبدلات الالكترونية المستخدمة فيها.
- ❖ مقدرتها على تزويد الاستطاعة للشبكة عند تردد وتوتر ثابتين مهما تغيرت سرعة الرياح أو سرعة الدائر.
- ❖ إمكانية التحكم بالاستطاعة الفعلية أو الردية.
- ❖ الاستفادة من مجال أوسع لتغيرات سرعة الرياح لاستخلاص أكبر قدر ممكن من الطاقة الحركية للرياح، **وهذا هو أهم سبب** لاستخدام الأنظمة الريحية التي تعمل عند سرع ات متغيرة، حيث أنه وبالاعتماد على منحني الخصائص الميكانيكية للعنفة الريحية ومنحني معامل الاستطاعة (Cp-λ)، وكذلك منحني نقاط الاستطاعة العظم ى (Maximum power point "MPP" curve) ( والذي يمثل نقاط الاستطاعة العظمى التي يمكن الحصول عليها من الرياح عند سرعات رياح مختلفة)، الموضحة بالشكل( 1−24) السابق، فإننا نلاحظ أنه عند كل سرعة رياح هناك سرعة دوران معينة لدائر العنفة تجعل الاستطاعة المنتزعة من الرياح أعظم ما يمكن، لذلك كان لابد من تكييف سرعة دوران الدائر مع تغير سرعة الرياح للحصول على أعظم استطاعة ممكنة (أي الحصول على قيمة (λ) التي تكون قيمة Cp عندها أعظم ما يمكن)، ويتم ذلك باستخدام الأنظمة الريحية التي تعمل عند سرعات متغيرة، حيث يتم التحكم بسرعة دوران الدائر (ضمن مجال تغير السرعة ) للحفاظ على قيمة أمثلية للسرعة النسبية لطرف الريشة (λ)، وبالتالي المحافظة على $C_p$ عند قيمته العظمى طالما أن الاستطاعة أو سرعة الدائر أخفض من القيم الاسمية. وكما ذكرنا سابقاً فإن زاوية ميلان الشفرات يتم التحكم بها خاصة عند سرعات الرياح العالية للحد من استطاعة دخل العنفة الريحية (حفاظاً عليها من التحطم ) وذلك عندما تصل العنفة إلى استطاعتها الاسمية [1].

## ١ ٩ ٢ ٠: أنواع المولدات المستخدمة مع الأنظمة الريحية التي تعمل عند سرعات متغيرة:

## *Variable Speed Generators (VSG)*:

يمكن تلخيص أنواع المولدات المستخدمة في الأنظمة الريحية التي تعمل عند سرعات متغيرة بما يلي:

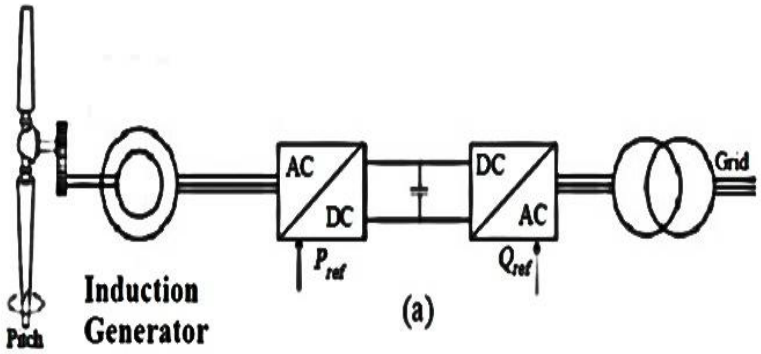
- ❖ المولدات التحريضية التقليدية (Conventional Induction Generators).
- ❖ المولدات التحريضية ذات التغذية المزدوجة (Doubly Fed Induction Generators).
- ❖ المولدات التحريضية ذات التغذية المزدوجة عديم ة المسفرات (BDFM) (Brushless Doubly-Fed Machine).

- ❖ المولدات التزامنيةالتقليدية (conventional Synchronous Generators).
- ❖ المولد التزامني ذو المغانط الدائمة ( Permanent Magnet Synchronous Generator).

### ١ ٩ ٢ ٠ ٢: المولدات التحريضيةالتقليدية (*I.G*):

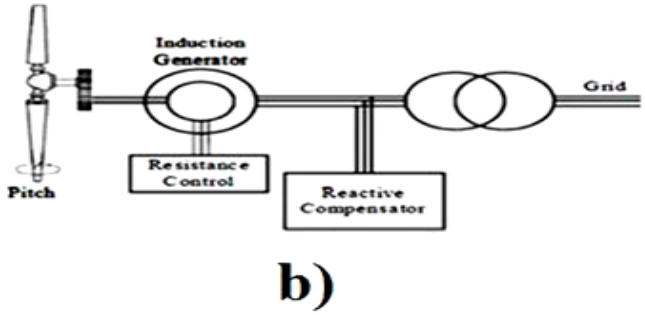
### *Conventional Induction Generators:*

يظهر الشكل( 1–25–a) نظام يستخدم مولد تحريضي ذو قفص سنجابي (IG) مع مبدل الكتروني باستطاعة اسمية مساوية لاستطاعة المولد الاسمية، وبالتالي زيادة التكاليف والضياعات.[1]




**الشكل (1–25–a): نظام يستخدم مولد تحريضي ذو قفص سنجابي (IG) مع مبدل الكتروني.**

ويبين الشكل( 1–25–b) نظام يستخدم مولد تحريضي ذو دائر ملفوف مع إمكانية التحكم بمقاومة الدائر. وهذا النظام يحتاج إلى نظام إقلاع soft starter واستخدام معوضات استطاعة رديئ.[1]

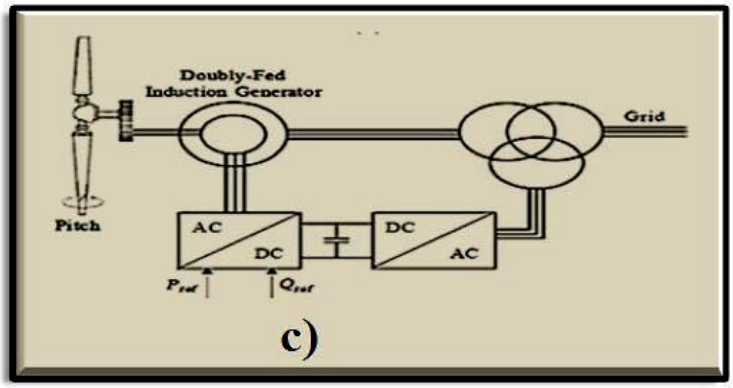



**الشكل(1–25–b): نظام يستخدم مولد تحريضي ذو دائر ملفوف مع إمكانية التحكم بمقاومة الدائر.**

### ١ ٩ ٢ ٠ ٣: المولد التحريضي ذو التغذية المزدوجة (دائر ملفوف):

### *Doubly–Fed Induction Generator (DFIG):*

يظهر في الشكل (1–25–C) نظام يستخدم مولد تحريضي ذو تغذية مزدوجة (دائر ملفوف) (DFIG) مع مبدل الكتروني Converter – Inverter متصل مع الدائر بواسطة حلقات انزلاق للتحكم بتيار الدائر. وفي هذا النظام يمكن الاستفادة من تغيرات السرعة باستخدام نظام الكترونيات قدرة استطاعته فقط 30% من الاستطاعة الاسمية للمولد [3].

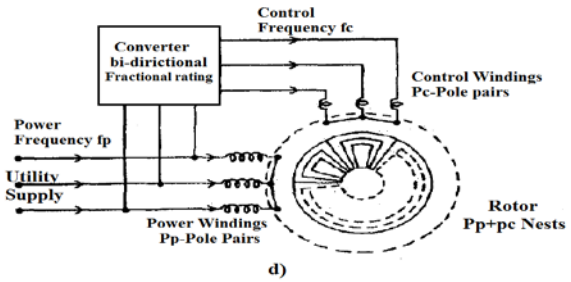



**الشكل (1–25–C): نظام يستخدم مولد تحريضي ذو تغذية مزدوجة (دائر ملفوف)(DFIG).**

### ١ ٩ ٢ ٠ ٣: المولد التحريضي ذو التغذية المزدوجة عديم المسفرات (قفص سنجابي):

### *Brushless Doubly Fed Machine (BDFM):*

الشكل (1–25–d) يبين نظام يستخدم مولد تحريضي ذو تغذية مزدوجة عديم المسفرات ( قفص سنجابي) (BDFM) (Brushless Doubly Fed Machine) مع مبدل الكتروني ثنائي الاتجاه Inverter–Converter مربوط مع ملف التحكم الموجود في الثابت . وفي هذا النظام يمكن الاستفادة من تغيرات سرعة الرياح باستخدام نظام الكترونيات قدرة استطاعته فقط 30% من الاستطاعة الاسمية للمولد [1][3].

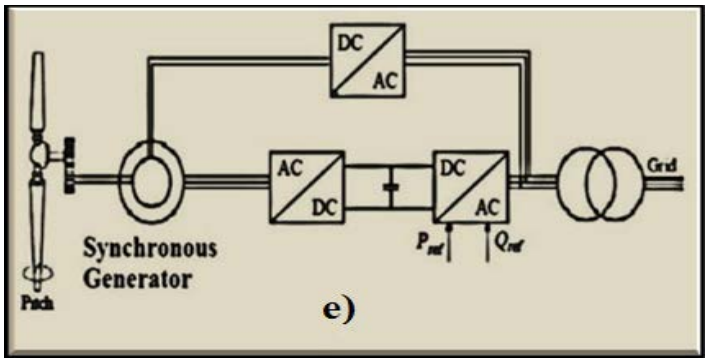



**الشكل (1–25–d): نظام يستخدم مولد تحريضي ذو تغذية مزدوجة (قفص سنجابي)(BDFM).**

### ١ ٩ ٢ ٠ ٤: المولد التزامني ذو الدائر الملفوف متعدد الأقطاب:

### *Multi-Pole Wound Rotor Synchronous Generator:*

يوضح الشكل (1–25–e) نظام يستخدم مولد تزامني ذو تهييج مستقل (SG).




**الشكل (1–25–e): نظام يستخدم مولد تزامني ذو تهييج مستقل (SG).**

ويعتبر استخدام المولد التزامني ذو الدائر الملفوف متعدد الأقطاب الأكثر شيوعاً للتخلص من المشاكل المتعلقة بعلبة السرعة لرفع السرعة بين العنفة والمولد مما يزيد في الوثوقية، ويقلل من الضجيج. وهذا ما يميز هذا النظام عن الأنظمة التي تستخدم المولد التحريضي ذو الدائر الملفوف أو المولد التحريضي ذو القفص السنجابي.

وفيه يستخدم المبدل الالكتروني لربط المولد مع الشبكة العامة حيث يتم استخدام مقوم (غالباً ثايرستوري) للتخلص من مشكلة تغيرات التردد ومن ثم يعاد تحويل التيار المستمر إلى تيار متناوب عن طريق معرج Inverter (غالباً ترانزستوري IGBT ) يتم التحكم به باستخدام نظام تعديل عرض النبضة PWM، ويكون مجال عمل هذا النظام بحدود [1.2 ÷ 0.5] من السرعة الاسمية.[1]

**١ ٩ ٢ ٠ ٤ ٠: ميزات المولد التزامني ذو الدائر الملفوف متعدد الأقطاب:**

***Advantages Of Multi-Pole Wound Rotor Synchronous Generator:***

- ☒ يتميز هذا النظام بإمكانية التحكم بالاستطاعة الفعلية والردية المولدة.
- ☒ لا يحتاج هذا النظام إلى علبة سرعة رافعة للسرعة.

**١ ٩ ٢ ٠ ٤ ٢: مساوئ المولد التزامني ذو الدائر الملفوف متعدد الأقطاب:**

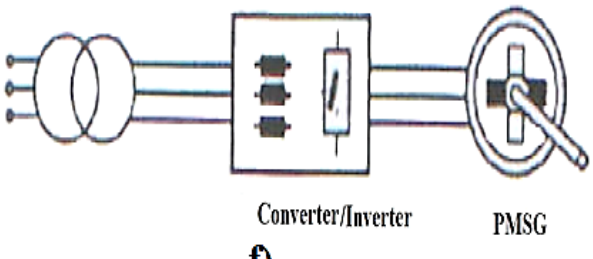
***Disadvantages Of Multi-Pole Wound Rotor Synchronous Generator:***

- ☒ يعمل هذا المولد عند سرعة منخفضة وبالتالي يكون ذو تصميم ضخم وتركيب كبير.
- ☒ المبدل الالكتروني المستخدم في هذا النظام لربط المولد مع الشبكة العامة *AC/DC/AC* يجب أن يكون باستطاعة مساوية لاستطاعة الآلة مما يزيد في الضياعات والتكاليف.
- ☒ يحتاج المولد في هذا النظام إلى حلقات انزلاق لتغذية الدائر بالتوتر المستمر.
- ☒ تتم تغذية المولد بالتوتر المستمر عن طريق مبدل الكتروني موصول إلى الشبكة ، ويكون هذا المبدل ذو استطاعة صغيرة [3][1].

**١ ٩ ٢ ٠ ٥: المولد التزامني ذو المغانط الدائمة:**

***Permanent –Magnet Synchronous Generator (PMSG):***

يبين الشكل ( 1-25-f) نظام يستخدم مولد تزامني ذو مغانط دائم ة (PMSG). وهو تصميم آخر للمولدات التزامنية المناسبة للعمل مع الأنظمة الريحية التي تعمل عند سرعات متغيرة.




f)

**الشكل (1-25-f): نظام يستخدم مولد تزامني ذو مغانط دائمة (PMSG).**

وهو عبارة عن مولد تزامني متعدد الأقطاب، تستخدم فيه المغانط الدائمة لتوليد الساحة المنغناطيسية اللازمة بدلاً من ملفات التهييج التي تستخدم التيار المستمر، وقد تم فيه التخلص من مشكلة المسفرات التي كانت موجودة في المولد التزامني ذو الدائر الملفوف. والشكل التالي يبين المبدل الالكتروني المستخدم مع المولد التزامني ذو المغانط الدائمة(P.M.S.G) [1].

**١ ٩ ٢ ٠ ٥: ميزات المولد التزامني ذو المغانط الدائمة:**

***Advantages Of Permanent–Magnet Synchronous Generator (PMSG):***

- ☒ يمتلك هذا المولد ميزات المولدات التزامنية (من حيث إمكانية التحكم بالاستطاعتين الفعلية والردية المولدة، كما أنه لا يحتاج إلى علبة سرعة رافعة للسرعة).
- ☒ لا يحتاج المولد في هذا النظام إلى حلقات انزلاق في الدائر ولا إلى مقوم الكتروني ذو استطاعة صغيرة للحصول على التوتر المستمر للتهييج.

**١ ٩ ٢ ٠ ٢: مساوئ المولد التزامني ذو المغانط الدائمة:**

***Disadvantages Of Permanent–Magnet Synchronous Generator (PMSG):***

- ☒ يعمل هذا المولد عند سرعة منخفضة وبالتالي يكون ذو تصميم ضخم وتركيب كبير.
- ☒ المبدل الالكتروني المستخدم في هذا النظام لربط المولد مع الشبكة العامة *AC/DC/AC* يجب أن يكون باستطاعة مساوية لاستطاعة الآلة مما يزيد في الضياعات والتكاليف.
- ☒ التكلفة المرتفعة للمولد بسبب تكلفة المغانط الدائمة [3][1].

**١ ٩ ٢ ٠ ٦: حلول أخرى:**

## *Other solutions:*

إن المولدات السابقة هي الأنظمة المستخدمة في العنفات الريحية هذه الأيام، لكن هناك بدائل وحلول أخرى:

**١ ٩ ٢ ٠ ٦: المولدات ذات الممانعة المغناطيسية المتغيرة:**

***Switched Reluctance Generators:***

تم تبني فكرة استخدام المولدات ذات الممانعة المغناطيسية المتغيرة في تطبيقات العنفات الريحية وبخاصة ذات الاستطاعات الصغيرة منها (لتغذية المنازل مثلاً) **<u>لأنها تمتلك العديد من الميزات و أهمها:</u>** المردود المرتفع، والتكاليف المنخفضة، والتركيب البسيط للمولد، بالإضافة إلى إمكانية التخلص من علبة السرعة، وصغر قطر الآلة بالمقارنة مع المولد التزامني المقاد مباشرة (بدون علبة سرعة)، وبساطة المبدل الالكتروني المستخدم، وصغر حجم الآلة بالنسبة إلى استطاعتها (ارتفاع نسبة الاستطاعة إلى الوزن).

**لكن من أبرز سلبيات هذا النوع من المولدات:**

الاستطاعة المرتفعة للمبدل الالكتروني المستخدم والذي يكون من رتبة استطاعة الآلة، وكذلك ارتفاع الضياعات في المبدل بسبب ارتفاع طاقة الحقل الواجب تغذيته وإزالته في كل شوط، ولكن يمكن التخفيف من سيئة ارتفاع الاستطاعة الظاهرية للمبدل باستخدام مغانط دائمة لكن هذا سيؤدي إلى ارتفاع التكاليف وزيادة التعقيد في تصميم الآلة بشكل واضح.

**٠ ٨ ٠ ٠ ٥ ٠ ٠: المولدات التتابعية:**

***Cascaded Generators:***

في أنظمة التوليد التي تم الحديث عنها في الأنظمة الريحية التي تعمل عند سرعات متغيرة استخدمنا مبدل الالكتروني بلستطاعة مساوية لاستطاعة النظام (عدا حالة المولد (*DFIG*) والمولد (*BDFM*))، وللحصول على نظام متكامل في أدائه من حيث تخفيض استطاعة المبدل الالكتروني اللازم والتخلص من المسفرات للتقليل من عمليات الصيانة والشرر تم ا ستخدام المولد ات الموصولة على التتابع(*Cascaded Generator*). ومن أبرز أمثلتها:

المولد ذو الممانعة المغناطيسية ذو التغذية المزدوجة عديم المسفرات (*Brushless Doubly Fed Reluctance Generator(BDFRG)*)، والمولد التحريضي ذو التغذية المزدوجة التتابعي (*Cascaded Doubly Fed Induction Generator (CDFIG)*)، حيث أن جميعها تمتلك هذه الميزات إضافة إلى إمكانية التحكم الكامل بالاستطاعتين الفعلية والردية. والشكل التالي يبين هذين النوعين:




**الشكل (1-26): المولدات الموصولة على التتابع( Cascaded Generator ).**
**(a): المولد ذو الممانعة المغناطيسية ذو التغذية المزدوجة عديم المسفرات (BDFRG).**
**(c): المولد التحريضي ذو التغذية المزدوجة التتابعي (CDFIG).**

**١ ٩ ٢ ٠ ٢ ٦ ٠ ٢: المولد ذو الممانعة المغناطيسية ذو التغذية المزدوجة عديم المسفرات:**

***Brushless Doubly Fed Reluctance Generator(BDFRG)*:**

بالنسبة للمولدات ( *BDFRG*) الموضحة بالشكل ( 1-26- *a*) فإن أهم ما يميزها مردودها المرتفع بالمقارنة مع المولدات (*BDFIG*) بسبب عدم وجود ضياعات نحاسية في دارة الدائر فيها، وسبب ذلك هو

عدم وجود ملفات أو مسفرات في الدائر، وبالتالي زيادة في الوثوقية وانخفاض في التكاليف.

لكن المشكلة في هذا النوع من المولدات هو التصميم المعقد للدائر وبالتالي صعوبة تصنيعه.

**١ ٩ ٢ ٠ ٢ ٦ ٢ ٢: المولد التحريضي ذو التغذية المزدوجة التتابعي:**

***Cascaded Doubly Fed Induction Generator (CDFIG):***

المولدات الموصولة على التتابع ذات التغذية المزدوجة ( CDFIG) والموضحة بالشكل ( 1-26-C) تتألف من مولدين تحريضيين من نوع الدائر الملفوف، ويكون فيهما ملفا الدائر متصلان معاً كهربائياً وميكانيكياً (وبالتالي عدم الحاجة إلى استخدام المسفرات). لكن في هذا النوع من المولدات تكون استطاعة المبدل الالكتروني المستخدم حوالي 50% من استطاعة النظام، بالإضافة إلى مشكلة زيادة طول المحور الميكانيكي المستخدم فيها.

يبين الجدول( 1-2) مقارنة بين عدة أنواع من المولدات الريحية حيث يتم فيه تحديد ميزات ومساوئ كل نوع من الأنواع المستخدمة:

| Type | ميزات | مساوئ |
|---|---|---|
| Induction Generator | ✓ Full speed range.<br>✓ No brushes on the generator.<br>✓ Complete control of reactive and active power.<br>✓ Proven technology. | ☒ Full scale power converter.<br>☒ Need for gear. |
| Synchronous Generator | ✓ Full speed range.<br>✓ Possible to avoid gear.<br>✓ Complete control of reactive and active power. | ☒ Small converter for field.<br>☒ Full scale power converter. |
| Permanent magnet Synchronous Generator | ✓ Full speed range.<br>✓ Possible to avoid gear.<br>✓ Complete control of reactive and active power.<br>✓ Brushless (low maintenance).<br>✓ No power converter for field. | ☒ Full scale power converter.<br>☒ Multi-pole generator (big and heavy).<br>☒ Permanent magnet needed. |
| Doubly-fed Induction Generator | ✓ Limited speed range -30% to +30% around Synchronous speed.<br>✓ Inexpensive small capacity.PWM inverter.<br>✓ Complete control of reactive and active power. | ☒ Need slip rings.<br>☒ Need for gear. |

**الجدول (1-1): مقارنة بين عدة أنواع من المولدات الريحية مع مقارنة ميزات ومساوئ كل نوع من الأنواع المستخدمة.**

# الفصل الثاني

# Second Chapter

## دراسة نظرية في المولدات التحريضية التقليدية

## عملها - طرق التحكم بسرعتها - أنواعها

## Theoretical Study Of Conventional Induction Generators

### Operational – Speed Control - Types

## المقدمة:

## *Introduction:*

تعتبر الآلات التحريضية والتي تعمل على التيار المتناوب من أكثر الآلات شيوعاً واستخداماً في مجالات مختلفة نظراً لبساطة تصميمها ورخص ثمنها ووثوقيتها العالية. وتعتبر الآلة التحريضية آلة عكوسة، حيث يمكن تشغيلها كمحرك أو كمولد.

تعتمد الآلة التحريضية في مبدأ عملها على نشوء ساحة مغناطيسية دوارة في ملفات جزئها الثابت تدور بسرعة تزامنية تؤدي بدورها إلى توليد تيارات تحريضية في ملفات جزئها الدائر وبالتالي قوى وعزوم دورانية (كهرومغناطيسية) تقوم بتدوير الآلة بسرعة أقل من السرعة التزامنية أو بانزلاق يعادل الفرق بين هاتين السرعتين، لذلك سميت هذه الآلات بالآلات اللاتزامنية، وسميت أيضاً بالآلات التحريضية لأن التيار المار في ملفات جزئها الدائر لا يأتي من مصدر خارجي، إنما ينشأ بالتحريض [10].

## ٢ ـ: مبدأ عمل المحرك التحريضي ثلاثي الطور:

## *The Principle Operation Of The Three Phase Induction Machine:*

عندما تتصل ملفات الجزء الثابت بشبكة ثلاثية الطور متوازنة، فإنه عند مرور التيار في ملفاته تتشكل ساحة مغناطيسية دوارة تدور بسرعة تناظر تردد المنبع الكهربائي المربوط مع ملفات الجزء الثابت. فإذا كانت هذه الساحة المغناطيسية الدوارة تشكل على سطح الجزء الثابت قطبين مغناطيسيين N,S (أي زوج واحد من الأقطاب) ففي هذه الحالة البسيطة فإن دوران محور الأقطاب 360 درجة ورجوعه إلى وضعه الأول يوافق دوراً واحداً من التيار المتناوب. إذا رمزنا لعدد دورات الساحة في الدقيقة بـ $n_1$، فإن:

$$f_1 = \frac{P.n_1}{60} \quad [Hz] \quad \Rightarrow n_1 = \frac{60.f_1}{P} \quad [r.p.m] \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1-2)$$

تقطع هذه الساحة المغناطيسية الدوارة ملفات الثابت والدائر وتحرض فيهما قوة محركة كهربائية $E_1$، $E_2$. وبما أن ملفات الجزء الدائر مقصورة على بعضها بحيث تشكل دارة مغلقة فيمر في ملفاته تيار كهربائي $I_2$، وبنتيجة التأثير المتبادل بين التيار $I_2$ والساحة المغناطيسية تتشكل قوى ميكانيكية

(**F=B.I.L**) وعزوم كهرومغناطيسية تدير المحرك بسرعة $n$ دورة في الدقيقة وبنفس اتجاه دوران الساحة المغناطيسية الناتجة عن مرور التيار الكهربائي في ملفات الجزء الثابت.

إن قيمة سرعة دوران الدائر $n$ هي أقل من سرعة دوران الساحة المغناطيسية الدوارة (السرعة التزامنية) $n_1$ وذلك بسبب ضياع جزء من استطاعة الساحة المغناطيسية الدوارة للتغلب على الضياعات الحديدية المختلفة وضياعات الاحتكاك الناتجة عن الدوران وغيرها.

يسمى الفرق النسبي بين السرعة التزامنية $n_1$ وسرعة دوران الجزء الدائر $n$ بالانزلاق ويرمز له بـ S ويعبر عنه عادة بالنسبة المئوية:

$$S\% = \frac{n_1 - n}{n_1} \times 100\% = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} \times 100\% = \frac{\Omega_1 - \Omega}{\Omega_1} \times 100\% \quad ..... \quad (2-2)$$

وتعطى قيمة تردد القوة المحركة الكهربائية $E_2$ والتيار $I_2$ بالعلاقة:

$$f_2 = S.f_1 \quad [Hz] \quad ..... \quad (3-2)$$

إن قيمة القوة المحركة الكهربائية المتحرضة في ملفات الثابت والدائر تعطى بالعلاقات الآتية:

$$\begin{aligned} E_1 &= 4{,}44.f_1.W_{ph1}.\phi.K_{W1} \quad [V] \\ E_{2S} &= 4{,}44.f_2.W_{ph2}.\phi.K_{W2} \quad [V] \end{aligned} \quad ..... \quad (4-2)$$

حيث أنَّ $E_{2S}$ هي القوة المحركة الكهربائية المتحرضة في ملفات الدائر عند دورانه بانزلاق $S$ وتساوي:

$$E_{2S} = 4{,}44.f_2.W_{ph2}.\phi.K_{W2} = 4{,}44.S.f_1.W_{ph2}.\phi.K_{W2} = S.E_2 \quad [V] \quad ..... \quad (5-2)$$

إن قيمة الانزلاق $S$ تتحدد بمقدار الحمل الميكانيكي المطبق على محور الدوران، فهو يزداد (أي تنخفض سرعة دوران المحرك) مع ازدياد الحمولة.

إذا دار المحرك بسرعة مساوية للسرعة التزامنية، أي كان: $n=n_1$ وبنفس اتجاهها أي: $S = 0$ ، ففي هذه الحالة لا تتحرض في الدائر أي قوة محركة كهربائية لانعدام الحركة النسبية بين ملفات الدائر والساحة المغناطيسية الدوارة فلا يمر في ملفات الدائر أي تيار وبالتالي لا تنشأ قوى ميكانيكية ولا عزوم دورانية.

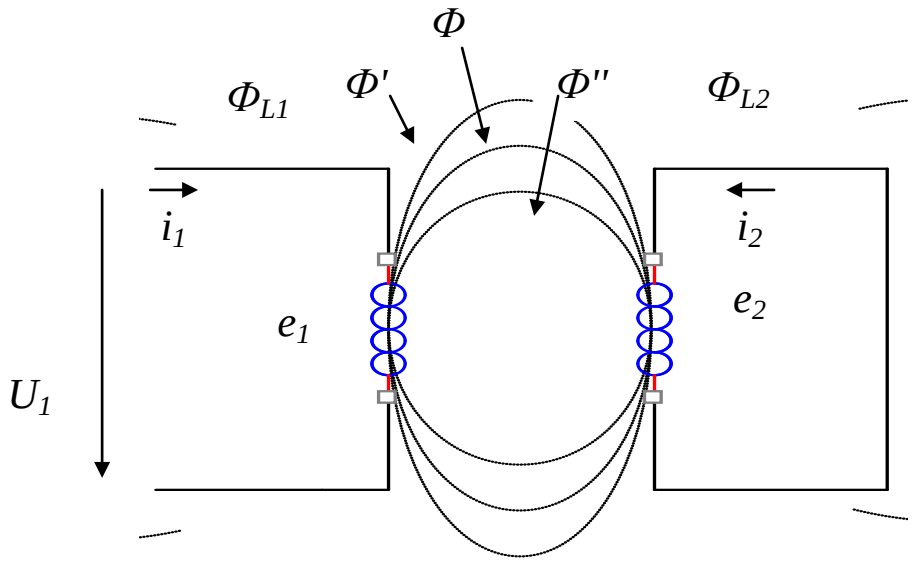
أي أن المحرك التحريضي عند عمله كمحرك يجب أن يدور بسرعة أقل من السرعة التزامنية، أي أن مجال عمله هو: [10]

$$0 < n < n_1 \quad \text{أي} \quad 0 < S < 1 \quad (6-2)$$

## ٢ ـ ٢: الدارة المغناطيسية للمحرك التحريضي ومعادلات التوتر:

## *The Magnetic Circuit Of The Induction Motor And Voltage Equations:*

يمثل الشكل التالي الدارة المغناطيسية للمحرك التحريضي وهي عبارة عن ملف الجزء الثابت و ملف الجزء الدائر المقصور وهما مستقلان كهربائياً ومترابطان مغناطيسياً:




**الشكل (2−1): الدارة المغناطيسية للمحرك التحريضي.**

وتعطى معادلات الفيوض المغناطيسية كالتالي :

$$\Phi_1 = \Phi + \Phi_{L1}$$

$$N_1 \Phi_1 = N_1 \Phi + N_1 \Phi_{L1}$$

$$\Psi_1 = \Psi_{11} + \Psi_{L1}$$

$$\Phi_2 = \Phi + \Phi_{L2}$$

$$N_2\Phi_2 = N_2 \Phi + N_2\Phi_{L2}$$

$$\Psi_2 = \Psi_{22} + \Psi_{L2} \qquad \text{.....} \qquad (7-2)$$

$$\Phi = \Phi' - \Phi''$$

$$\Psi_{11} = L_{11}\, i_1 + M\, i_2$$

$$\Psi_{L1} = L_{L1}\, i_1$$

$$\Psi_{22} = L_{22}\, i_2 + M\, i_1$$

$$\Psi_{L2} = L_{L2}\, i_2$$

حيث أنَّ:

$\Phi_1$ : الفيض المغناطيسي الكلي الناتج عن ملف الثابت.

$\Phi'$ : الفيض المغناطيسي الناتج عن ملف الثابت و المتشابك مع ملف الجزء الدائر.

$\Phi_{L1}$ : الفيض التسربي الناتج عن ملف الجزء الثابت.

$\Phi_2$ : الفيض المغناطيسي الكلي الناتج عن ملف الجزء الدائر.

$\Phi''$ : الفيض المغناطيسي الناتج عن ملف الدائر والمتشابك مع الثابت.

$\Phi_{L2}$ : الفيض التسربي الناتج عن ملف الجزء الدائر.

$\Phi$ : الفيض الرئيسي للمحرك وهو محصلة $\Phi'$ ، $\Phi''$.

$\Psi_1$ : السيالة المغناطيسية الكلية الناتجة في ملف الجزء الثابت.

$\Psi_{11}$ : السيالة المغناطيسية المتشابكة بين ملف الثابت والدائر.

$\Psi_{L1}$ : السيالة المغناطيسية التسربية في ملف الجزء الثابت.

$\Psi_2$ : السيالة المغناطيسية الكلية الناتجة في ملف الجزء الدائر.

$\Psi_{22}$ : السيالة المغناطيسية المتشابكة بين ملف الدائر والثابت.

$\Psi_{L2}$ : السيالة المغناطيسية التسربية في ملف الجزء الدائر.

$M$ : التحريض المغناطيسي المتبادل بين ملفات الثابت والدائر.

$L_{11}$ : التحريض الذاتي المشكل للفيض الرئيسي لملف الجزء الثابت.

$L_{L1}$ : التحريض الذاتي المشكل للفيض التسربي لملف الجزء الثابت.

$L_{22}$ : التحريض الذاتي المشكل للفيض الرئيسي لملف الجزء الدائر.

$L_{L2}$ : التحريض الذاتي المشكل للفيض التسربي لملف الجزء الدائر.

وتكون القوة المحركة الكهربائية الناتجة عن هذه الفيوض المغناطيسية تساوي:

☒ في الجزء الثابت :

$$e_1 = -\frac{d\Psi_{11}}{dt} = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \qquad \text{.....} \qquad (8-2)$$

$$e_{L1} = -\frac{d\Psi_{L1}}{dt} = -N_1 \frac{d\Phi_{L1}}{dt}$$

☒ وفي الجزء الدائر :

$$e_2 = -\frac{d\Psi_{22}}{dt} = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (9-2)$$
$$e_{L2} = -\frac{d\Psi_{L2}}{dt} = -N_2 \frac{d\Phi_{L2}}{dt}$$

نعوض عن قيم $\Psi_{11}$، $\Psi_{L1}$ ، $\Psi_{22}$ ، $\Psi_{L2}$ فنجد:

$$e_1 = -(L_{11}\frac{di_1}{dt} + M\frac{di_2}{dt}) \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (10-2)$$
$$e_{L1} = -L_{L1}\frac{di_1}{dt}$$

$$e_2 = -(L_{22}\frac{di_2}{dt} + M\frac{di_1}{dt}) \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (11-2)$$
$$e_{L2} = -L_{L2}\frac{di_2}{dt}$$

ومنه تأخذ معادلات التوازن الكهربائية الشكل الآتي:

☒ بالنسبة للجزء الثابت:

$$u_1 = -e_1 - e_{L1} + R_1 i_1$$
$$u_1 = L_{11}\frac{di_1}{dt} + M\frac{di_2}{dt} + L_{L1}\frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (12-2)$$
$$u_1 = R_1 i_1 + L_1\frac{di_1}{dt} + M\frac{di_2}{dt}$$

إن إشارة الناقص قبل $e_1$ ، $e_{L1}$ هي بسبب أنها تعاكس توتر التغذية.

☒ بالنسبة للجزء الدائر (حيث أن ملفات الدائر مقصورة على بعضها "$U_2=0$"):

$$e_2 + e_{L2} = R_2 i_2 = -(L_{22}\frac{di_2}{dt} + M\frac{di_1}{dt}) - L_{L2}\frac{di_2}{dt}$$
$$0 = R_2 i_2 + L_{L2}\frac{di_2}{dt} + L_{22}\frac{di_2}{dt} + M\frac{di_1}{dt} \qquad \ldots\ldots\ldots \quad (13-2)$$
$$0 = R_2 i_2 + L_2\frac{di_2}{dt} + M\frac{di_1}{dt}$$

وتكتب العلاقات السابقة بالشكل العقدي كما يلي:

☒ في الثابت:

$$U_1 = R_1 I_1 + j\omega_1 L_{L1}.I_1 + j\omega_1 L_{11}.I_1 + j\omega_1 M.I_2$$
$$U_1 = -E_1 + R_1.I_1 + jX_{L1}.I_1$$
$$U_1 = -E_1 + (R_1 + jX_1).I_1 \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (14-2)$$
$$U_1 = -E_1 + Z_1.I_1$$

☒ وفي الدائر:

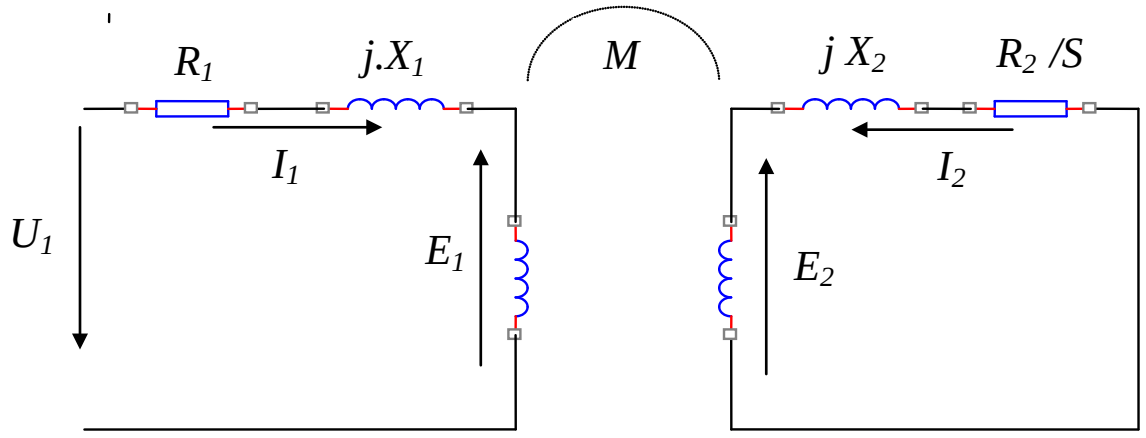
$$0 = R_2.I_2 + j\omega_2 L_{L2}.I_2 + j\omega_2 L_{22}.I_2 + j\omega_1.M.I_1$$
$$E_{2S} = R_2.I_2 + jX_{L2S}.I_2$$
$$E_{2S} = S.E_2 = (R_2 + jX_{2S}).I_2 = (R_2 + jS.X_2).I_2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (15-2)$$
$$E_2 = (\frac{R_2}{S} + jX_2).I_2 = Z_{2S}.I_2$$

حيث استبدلت كل من المفاعلة $X_{L1}$ بالمفاعلة $X_1$ و $X_{L2}$ بالمفاعلة $X_2$.

كما أن المفاعلة التسربية لملفات الدائر عند دورانه تساوي:

$$X_{2S} = S.X_2$$

وعليه تأخذ الدارة الكهرومغناطيسية للمحرك التحريضي الشكل الآتي [10]:




**الشكل (2-2): الدارة الكهرومغناطيسية للمحرك التحريضي.**

## ٢ ٣: المولدة التحريضية *The Induction Generator*

تعتبر الآلة التحريضية آلة عكوسة كأي آلة كهربائية، أي أنها يمكن أن تعمل كمولد أو كمحرك على حد سواء. تستخدم في الوقت الحاضر المولدات االتحريضية بشكل متزايد كمصادر للطاقة الكهربائية، لأنها تمتاز ببساطة تصميمها ووثوقيتها العالية و صغر حجمها و سهولة ربطها مع الشبكة الكهربائية والحماية الذاتية من دارات القصر.

## ٢ ٣ ٠: مبدأ عمل المولد التحريضي:

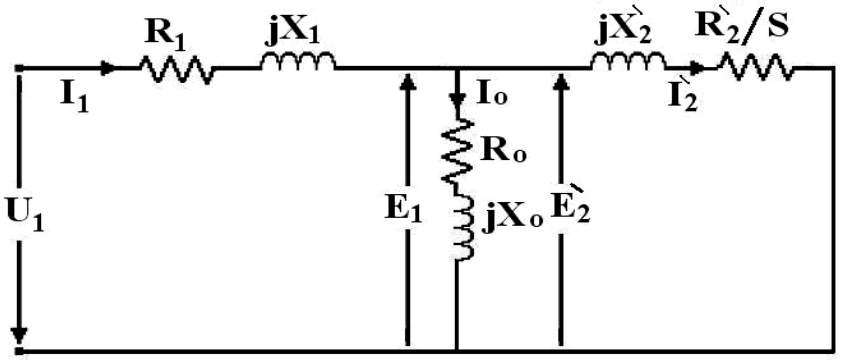
## *The Principle Operation Of The Induction Generator:*

من أجل تشغيل الآلة التحريضية كمولد يطبق على ملفات الثابت الثلاثية الطور توترها الاسمي ثم تدار بواسطة مصدر خارجي باتجاه دوران الساحة المغناطيسية وبسرعة $n$ أعلى من السرعة التزامنية $n_1$ (سرعة دوران الساحة المغناطيسية)، عندها يصبح الانزلاق $s = \frac{n_1 - n}{n_1} < 0$ سالباً. هذا يعني أن الساحة المغناطيسية الدوارة قد أصبحت تدور باتجاه معاكس لاتجاه دورانها السابق (عندما كانت الآلة تعمل كمحرك)، مما يؤدي إلى عكس إشارة القوة المحركة الكهربائية المستنتجة في أطوار الجزء الدائر وبالتالي عكس إشارة التيار المار فيها. وهذا يعني عكس اتجاه سريان القدرة الكهربائية بالنسبة للشبكة، فبعد أن كانت هذه القدرة مستجرة من الشبكة أصبحت محقونة فيها.

من الدارة المكافئة الكهربائية الدقيقة للمحرك التحريضي الشكل(2−3) نجد أن:

$$\overline{I_2^{'}} = \frac{\overline{E_{2s}^{'}}}{R_2^{'} + jsX_2^{'}} = \frac{s.\overline{E_2^{'}}}{R_2^{'} + js.X_2^{'}} \cdot \frac{R_2^{'} - jsX_2^{'}}{R_2^{'} - jsX_2^{'}} =$$

$$= \overline{E_2^{'}} \left[ \frac{s.R_2^{'}}{R_2^{'2} + s^2 X_2^{'2}} - j \frac{s^2 X_2^{'2}}{R_2^{'2} + s^2 X_2^{'2}} \right] = I_{2a}^{'} - jI_{2r}^{'} \qquad [A] \quad \ldots\ldots \quad (16-2)$$




**الشكل (2−3): الدارة الكهربائية المكافئة للمحرك التحريضي.**

عند تشغيل الآلة التحريضية كمحرك يكون الانزلاق موجباً أي $s > 0$، فنجد بحسب العلاقة ( 2−16) أن مركبتي التيار( $I_2^{'}$ ) الحقيقية ( $I_{2a}^{'}$ ) والرديّة ( $I_{2r}^{'}$ ) موجبتان، وتتأخر المركبة $I_{2r}^{'}$ عن $I_{2a}^{'}$ بمقدار 90 درجة. يتم الحصول على شعاع تيار الجزء الثابت $I_1$ بإضافة شعاع تيار اللاحمل $I_o$ إلى شعاع التيار $I_2^{'}$ فتكون مركبتا شعاع التيار $I_1$ موجبتين (في حالة العمل كمحرك)، أي:

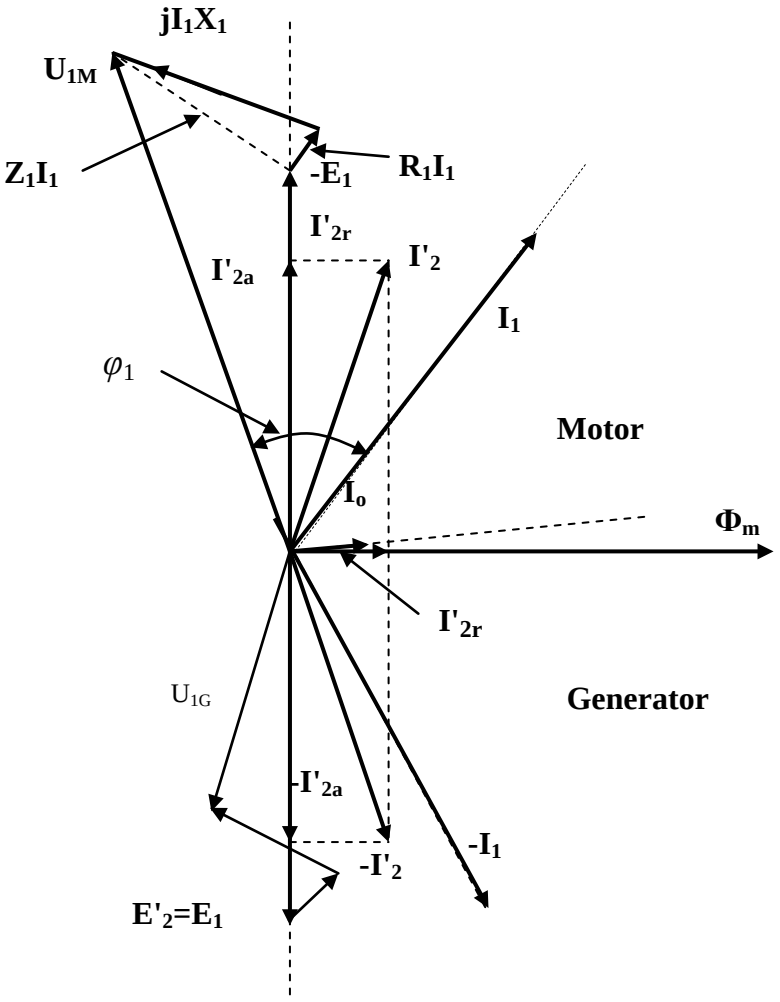
$$I_{1r} = I_1 Sin\varphi_1 > 0 \quad \text{و} \quad I_{1a} = I_1 Cos\varphi_1 > 0 \quad [A] \quad \ldots\ldots \quad (17-2)$$

ومنه:

$$Q_1 = m_1 U_1 I_1 Sin\varphi_1 > 0 \quad \text{و} \quad P_1 = m_1 U_1 I_1 Cos\varphi_1 > 0 \quad \ldots\ldots \quad (18-2)$$

أي أن الآلة تستجر من الشبكة كلاً من الاستطاعة الفعلية والردية.

أما عندما يكون الانزلاق سالباً أي $s < 0$ و الآلة تعمل كمولد، فإن المركبة الرديّة للتيار ( $I'_{2r}$ ) تبقى موجبة بينما تغير المركبة الحقيقية للتيار ( $I'_{2a}$ ) إشارتها وتصبح سالبة أي تتغير صفحتها 180 درجة، كما تتغير إشارة $E'_{2s}$ ، أي أن الساحة المغناطيسية أصبحت تدور بالنسبة للجزء الدائر في اتجاه يعاكس اتجاه دورانه (عندما كانت الآلة تعمل كمحرك)، وشعاع التيار $I_1$ أيضاً يدور تقريباً بمقدار 180 درجة، عندها تصبح $\varphi_1 > 90^o$ وذلك كما هو مبين في الشكل (2-4).




**الشكل (2-4): المخطط الشعاعي لتيار وتوتر المحرك والمولد التحريضي.**

وبالتالي:

$$I_{1a} = I_1 Cos\varphi_1 < 0 \quad , \quad P_1 = m_1 U_1 I_1 Cos\varphi_1 < 0 \quad \ldots\ldots \quad (19-2)$$

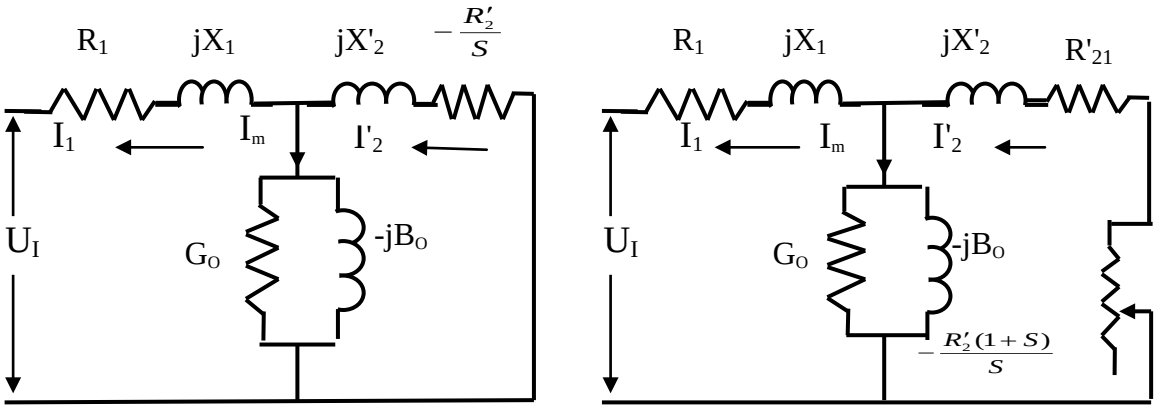
أي أن المركبة الحقيقية للتيار $I_1$ وكذلك الاستطاعة الفعلية $P_1$ تغيران إشارتاهما وبالتالي لم تعد الآلة تستجر من الشبكة استطاعة حقيقية، وإنما تقدم إلى الشبكة استطاعة فعلية، أي أصبحت الآلة تعمل كمولد وتحول الاستطاعة الميكانيكية المقدمة إليها إلى استطاعة كهربائية.

نلاحظ أيضاً من العلاقة (2-16) أن المركبة $I'_{2r}$ تبقى موجبة أثناء القيم السالبة للانزلاق $S$ (أي عند عمل الآلة كمولد)، وبالتالي تحافظ القيم ( $I_{1r} = I_1 Sin\varphi_1$ ) و ( $Q_1 = m_1 U_1 I_1 Sin\varphi_1$ ) على إشارتها (الموجبة). هذا يعني أن الآلة التحريضية أثناء عملها كمولدة مربوطة مع الشبكة تستجر من الشبكة استطاعة رديّة، وذلك لتأمين تيار المغنطة اللازم لتشكيل السيّالة المغناطيسية فيها. حيث يشكل هذا التيار، كما في المحرك التحريضي، حوالي $(40 \div 20)\%$ من التيار الاسمي بالنسبة للمولدات ذات الاستطاعة المتوسطة والكبيرة ويصل إلى 70% من أجل المولدات ذات الاستطاعة الصغيرة. أما إذا كانت حمولات المولد التحريضي تحتوي على مركبات تحريضية فهي تحتاج إلى استطاعة ردية إضافية للتعويض عن الاستطاعة الردية لمثل هذه الحمولات. لذلك، وعند توتر ثابت للشبكة، تقدر الاستطاعة اللازمة للتهييج الواجب استجرارها من الشبكة بحوالي $(40 \div 20)\%$ من الاستطاعة الاسمية مما يجعل مردود هذه المولدات منخفض نسبياً بالمقارنة مع المولدات التزامنية التي تعادل استطاعة التهييج فيها $(3 \div 0.5)\%$ من استطاعة الخرج. لذلك يعتبر الاستهلاك الكبير للمولد التحريضي من الاستطاعة الردية من أهم سيئاتها [10].

## ٢ ٣ ٢: الدارة المكافئة للمولد التحريضي:

## *The Equivalent Circuit Of The Induction Generator*

تشبه الدارة الكهربائية المكافئة للمولد التحريضي دارة المحرك التحريضي مع استبدال ( $S$ ) بالمقدار ( $-S$ ) وبالتالي استبدال المقاومة $(\frac{R'_2}{s})$ بـ $(-\frac{R'_2}{s})$ والمقاومة التي تمثل الحمولة الميكانيكية $(R'_2 \frac{1-s}{s})$ بـ $(-R'_2 \frac{1+s}{s})$ كما هو مبين في الشكل (2-5).




**الشكل (2–5): الدارة المكافئة الكهربائية للمولد التحريضي.**

بالرغم أن النواقل الكهربائية تملك مقاومات كهربائية موجبة فقط، إلا أن التطرق إلى المقاومات السالبة ضروري أيضاً. فإذا كانت المقاومات الموجبة تعتبر كمستهلكات للطاقة الكهربائية ($R.I^2$)، فإن المقاومات السالبة يجب النظر إليها كمصادر أو كمولدات للطاقة الكهربائية. عندها واستناداً إلى الدارة المكافئة للمولد التحريضي تكون الاستطاعة الكهرومغناطيسية المنتقلة من الجزء الدائر إلى الجزء الثابت $P_{21} = -m_1 \frac{R'_2}{s} I'^2_2$ سالبة أيضاً. وكذلك الأمر بالنسبة للاستطاعة الميكانيكية المقدمة لهذه المولدة والتي تساوي:

$$P_1 = P_{21} + P_{c2} = -m_1 R'_2 \frac{1+s}{s} I'^2_2 \quad [\text{W}] \quad ..... \quad (20\text{–}2)$$

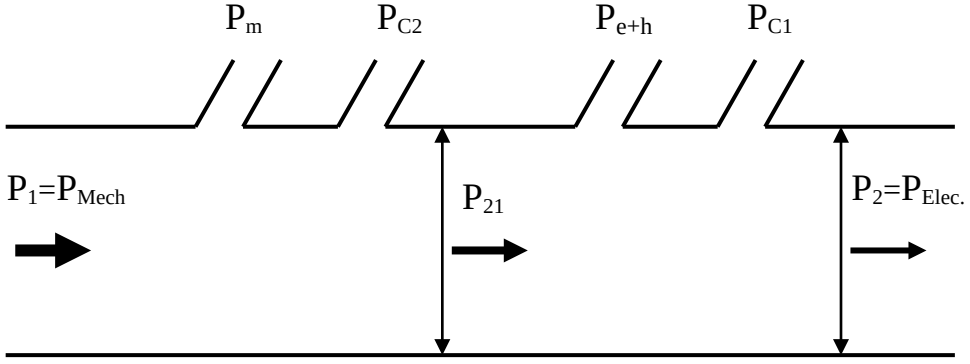
أما العزم الدوراني المتولد في المولد يساوي $T = \frac{P_{21}}{\Omega_1} = \frac{P_2}{\Omega}$ وهو سالب أيضاً أي أنه عزم كابح يعاكس العزم الميكانيكي المقدم إليها عن طريق المحرك الخارجي ( Prime-mover) المربوط مع محورها. أخيراً يتم حساب الانزلاق كما في حالة المحرك من العلاقة التالية [10]:

$$s = \frac{P_{c2}}{P_{21}} = \frac{m_1 R'_2 I'^2_2}{-m_1 \frac{R'_2}{s} I'^2_2} \quad ..... \quad (21\text{–}2)$$

## ٢ ٣ ٣: الاستطاعات والضياعات في المولدة التحريضية:

## *The Power And The Losses In The Induction Generator:*

يبين الشكل التالي مخطط جريان الاستطاعة في المولدة التحريضية:




**الشكل (2–6): مخطط الاستطاعة في المولد التحريضي.**

**حيث:**

m1 – عدد أطوار الثابت.

Ω1 – السرعة الزاوية الميكانيكية للساحة المغناطيسية [rad/sec].

Ω – السرعة الزاوية الميكانيكية الدورانية لمحور المولدة [rad/sec].

$P_1$ – استطاعة الدخل الميكانيكية المقدمة للمولد التحريضي.

$P_m$ – الضياعات الميكانيكية الناتجة عن دوران محور المولد.

$P_{c2}$ – الضياعات النحاسية في دارة ملفات الجزء الدائر للمولد.

$P_{21}$ – الاستطاعة المغناطيسية المنتقلة من الجزء الدائر للمولد إلى الجزء الثابت.

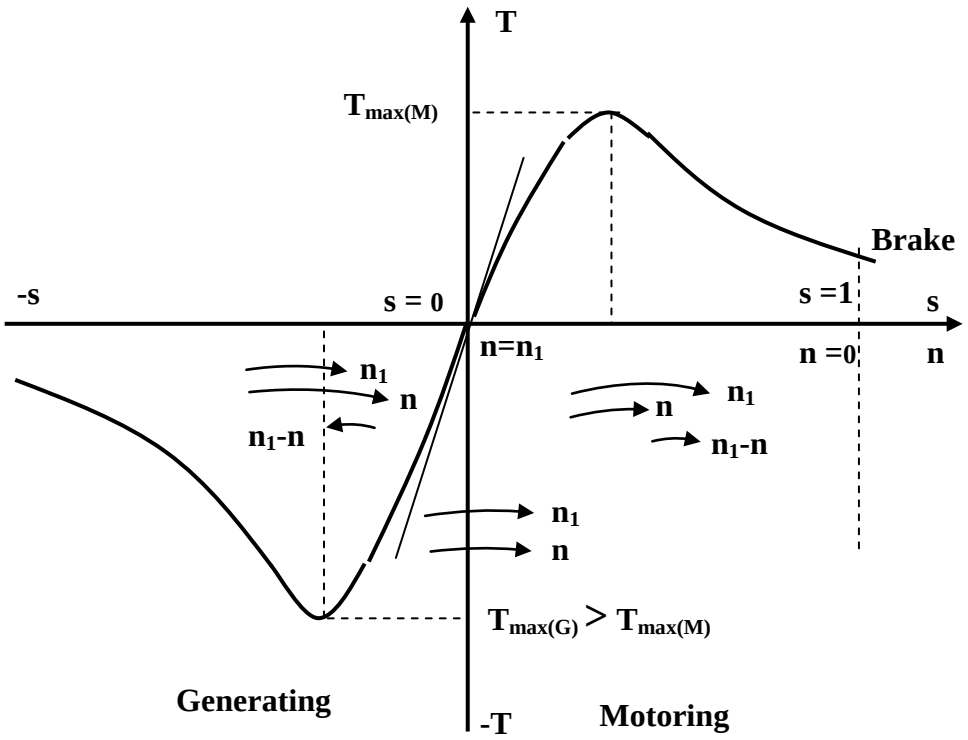
$P_{e+h}$ – ضياعات الاستطاعة المغناطيسية في النواة المغناطيسية للجزء الثابت (ضياعات البطاء المغناطيسي والتيارات الاعصارية (Eddy Currents & Hysteresis Losses)).

$P_{c1}$ – الضياعات النحاسية في دارة ملفات الجزء الثابت.

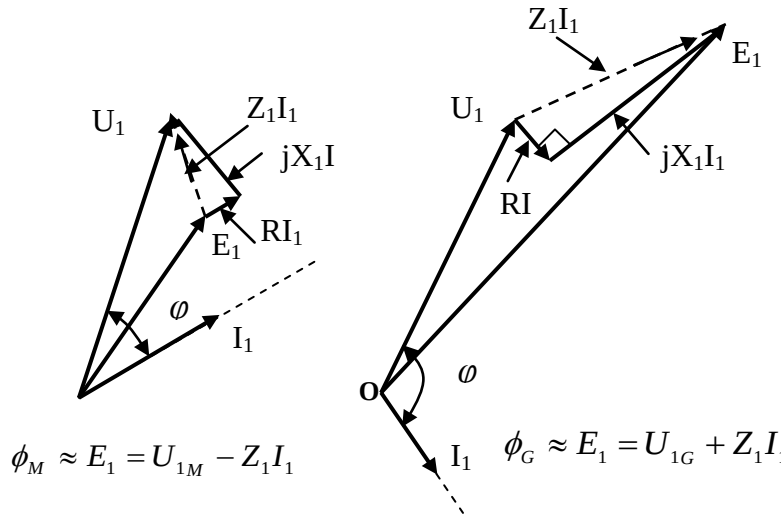
$P_2$ – الاستطاعة الكهربائية التي يقدمها المولد إلى الشبكة الكهربائية.

إن الخصائص الميكانيكية للمولد التحريضي تشبه الخصائص الميكانيكية للمحرك وذلك كما هو مبين في الشكل (2–7)، حيث نرى أن العزم الدوراني يزداد في البداية مع ازدياد الانزلاق ( $-s$ ) من القيمة $s = o$ (أي: $n = n_1$) ويصل إلى قيمته العظمى عند $s = -s_{max}$ ثم يبدأ بالتناقص. يلاحظ هنا أن

العزم الأعظمي $T_{\max(G)}$ في حالة المولد أكبر منه في حالة المحرك $T_{\max(M)}$ بمقدار $\%(50 \div 30)$ وذلك لأنه عند نفس القيمة للانزلاق في المولد والمحرك تكون القوة المحركة الكهربائية $E_1$ في حالة تشغيل الآلة التحريضية كمولدة أكبر من التوتر $U_1$ ، وبالتالي عند توتر ثابت للشبكة تكون قيم الفيض المغناطيسي والعزم الأعظمي أكبر في حالة المولدة وذلك كما هو مبين في الشكل(2-7) [10].




**الشكل (2-7): الخصائص الميكانيكية للآلة التحريضية.**




**الشكل (2-8): مقارنة بين المخطط الشعاعي للمولد التحريضي و المخطط الشعاعي للمحرك التحريضي.**

## ٢ ـ٤: تنظيم سرعة الآلات التحريضية بطريقة الوصل التتابعي:

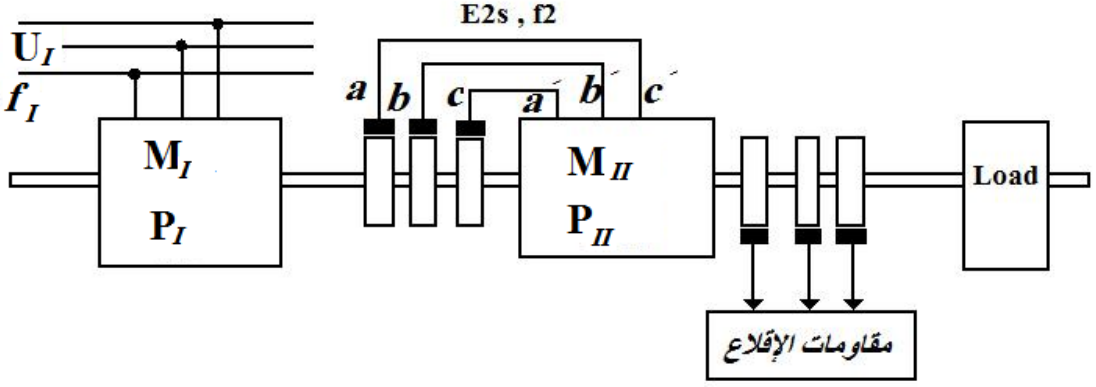
## *Speed Control Of Induction Machines by Cascade Connection:*

يقصد بتنظيم السرعة إمكانية عمل الآلة التحريضية حسب الطلب على سرعات دوران مختلفة.

في هذه الطريقة يلزم وجود محركين تحريضيين محوريهما متصلين مع بعضهما إما مباشرة أو عن طريق محول عزم.

يعمل الوصل التتابعي على مبدأ تنظيم السرعة بحقن التوتر. في هذه الطريقة من تنظيم السرعة يلزم وجود محركين تحريضيين محوريهما متصلين مع بعضهما إما مباشرة أو عن طريق محول عزم.

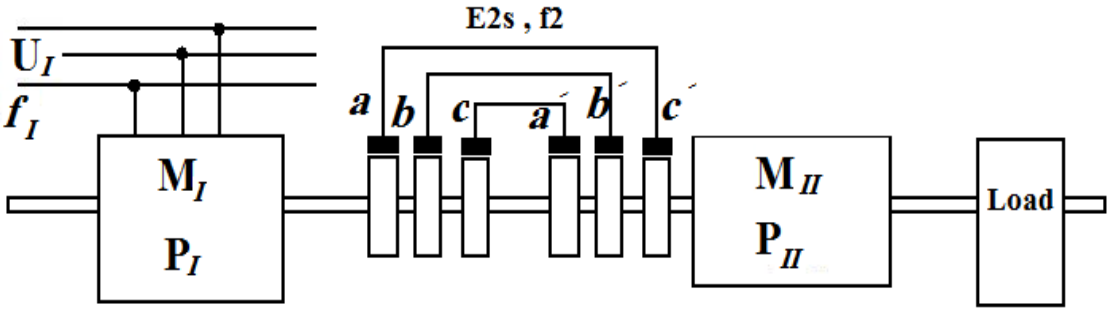
في الشكل ( 2-9-أ ) تتغذى ملفات الجزء الثابت للمحرك الأول $M_1$ من منبع كهربائي توتره $U_1$ وتردده $f_1$، بينما توصل ملفات جزئه الدائر $(a,b,c)$ عبر حلقات انزلاقه مع ملفات الجزء الثابت لمحرك تحريضي آخر $M_{11}$ الذي يمكن أن يكون من نوع الدائر الملفوف أو القفص السنجابي.




**الشكل ( 2-9-أ ): توصيل محركين تحريضيين عند تنظيم السرعة بطريقة الوصل التتابعي.**

في الشكل ( 2-9-ب ) توصل ملفات الجزء الدائر للمحرك الأول $M_1$ مع ملفات الجزء الدائر للمحرك الثاني $M_{11}$ الذي يجب أن يكون حتماً من نوع الدائر الملفوف، وهذا ما يمتاز به عن سابقه المبين في الشكل ( 2-9-أ ) من حيث الاستغناء عن المسفرات على حلقات الانزلاق في المحركين، ليكون التوصيل الكهربائي مباشراً بينهما لأنها مركبة على نفس المحور وتدور بنفس السرعة مما يخفض من ضياعات الاحتكاك وضياعات التلامس الكهربائية الناشئة عن وجود هذه المسفرات.

في كلتا الحالتين تستخدم المقاومة المتغيرة في دارة الجزء الدائر للمحرك $M_{11}$ للإقلاع ومن ثم تقصر حلقات الانزلاق على نفسها بعد وصول سرعة دوران المجموعة إلى السرعة المستقرة.




**الشكل ( 2-9-ب ): توصيل محركين تحريضيين عند تنظيم السرعة بطريقة الوصل التتابعي.**

لإيجاد السرعة $n$ التي ستدور بها هذه المجموعة، نفرض أنَّ:

$2p_1$ و $2p_{11}$: عدد أقطاب المحرك الأول $(M_1)$ والثاني $(M_{11})$ على التوالي.

$f_1$: تردد المنبع الكهربائي المطبق على المحرك الأول $(M_1)$.

$f_2$: تردد التيار في ملفات الجزء الدائر للمحرك الأول $(M_1)$.

$n_{1_I}$ و $n_{1_{II}}$: السرعة التزامنية للمحرك الأول $(M_1)$ والثاني $(M_{11})$ على التوالي.

$S_1$ و $S_2$: انزلاق المحرك الأول $(M_1)$ والثاني $(M_{11})$ على التوالي.

فيكون :

السرعة التزامنية للمحرك الأول $M_1$:

$$n_{1_I} = \frac{60 \cdot f_1}{p_I} \quad \ldots\ldots \quad (22-2)$$

والسرعة التزامنية للمحرك الثاني $M_{II}$:

$$n_{1_{II}} = \frac{60 \cdot f_2}{p_{II}} \quad \ldots\ldots \quad (23-2)$$

السرعة الفعلية$(n)$ للمحرك الأول $M_1$:

$$n = n_{1_I}(1 - s_1) = \frac{60 \cdot f_1}{p_I} * (1 - s_1) \quad \ldots\ldots \quad (24-2)$$

والسرعة الفعلية ( $n$ ) للمحرك الثاني $M_{II}$ (المحركان يدوران بنفس السرعة لأنهما مركبان على نفس المحور):

$$n = n_{1_{II}}(1 - s_2) = \frac{60 \cdot f_2}{p_{II}} * (1 - s_2) \quad \ldots\ldots \quad (25-2)$$

وحيث أن: $f_2 = S_1 * f_1$. والمحركان يدوران بنفس السرعة نجد:

$$\frac{60\,.f_1}{p_I} * (1 - s_1) = \frac{60\,.f_2}{p_{II}} * (1 - s_2) \quad \ldots\ldots \quad (26-2)$$

$$\frac{(1-s_1)}{p_I} = S_1 * \frac{(1-s_2)}{p_{II}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (27-2)$$

ومنه:

$$S_1 = \frac{p_{II}}{p_I + p_{II} - s_2 . p_I} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (28-2)$$

عندما تكون مقاومات الإقلاع مقصورة في دارة الجزء الدائر للمحرك الثاني $M_{11}$، فإن هذا المحرك يمكن أن يعمل بشكل مستقر كمحرك عند سرعات دوران قريبة من سرعة دوران ساحته المغناطيسية، أي: $n \approx n_{1_{II}}$ وبالتالي $S_2 \approx 0$. ومنه:

$$\lim s_1 \to \frac{p_{II}}{p_I + p_{II}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (29-2)$$

وتصبح سرعة دوران المجموعة:

$$n = n_{1_I}(1 - s_1) = n_{1_I}\left(1 - \frac{p_{II}}{p_I + p_{II}}\right) = \frac{p_I}{p_I + p_{II}} * n_{1_I} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (30-2)$$

$$\Rightarrow n = \frac{60\,.f_1}{p_I + p_{II}}$$

تبين هذه العلاقة أن السرعة التزامنية للمجموعة تساوي إلى السرعة التزامنية لمحرك تحريضي تتغذى ملفات جزءه الثابت من منبع كهربائي تردده $f_1$، وعدد أزواج أقطابه $(p_I + p_{II})$.

فإذا كان ( $p_I = p_{II}$) فإن سرعة المجموعة تساوي نصف سرعة أحد المحركين حين دورانه لوحده، وعندما $(p_I \neq p_{II})$ فإن المجموعة يمكن أن تعمل على ثلاث سرعات مختلفة:

$$n_{1_I} = \frac{60\,.f_1}{p_I}\,,\; n_{1_{II}} = \frac{60\,.f_1}{p_{II}}\,,\; n_{1_{III}} = \frac{60\,.f_1}{p_I + p_{II}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (31-2)$$

حيث: $n_{1_I}$ : تمثل السرعة التي توافق عمل المحرك الأول $(M_1)$ لوحده.

$n_{1_{II}}$ : تمثل السرعة التي توافق عمل المحرك الثاني $(M_{11})$ لوحده.

$n_{1_{III}}$ : تمثل السرعة التي توافق عمل المحركين $(M_{11}\ \&M_1)$ بشكل تتابعي

إن هذه الحالة توافق دوران الساحتين المغناطيسيتين في المحركين باتجاه واحد، حيث تكون الاستطاعة المقدمة وبالتالي العزم الناتج من المجموعة مساوياً إلى مجموع العزمين الناتجين عن المحركين. يطلق على الوصل بهذه الطريقة بالوصل التتابعي التكاملي.

أما إذا طبق على أطراف المحرك الثاني التوتر المستنتج من الجزء الدائر للمحرك الأول بحيث كان دوران الساحتين المغناطيسيتين في المحركين باتجاهين متعاكسين. فإن سرعة دوران المجموعة تصبح:

$$n' = n_{1_I}.\frac{p_I}{p_I - p_{II}} = \frac{60\ .f_1}{p_I - p_{II}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ (32-2)$$

بينما تكون الاستطاعة المقدمة وبالتالي العزم الناتج من المجموعة عندها يساوي إلى الفرق بين العزمين الناتجين عن المحركين. لذا يطلق على هذا النوع من الوصل بالوصل التتابعي التفاضلي. أي أن المجموعة تكافئ محركاً تحريضياً عدد أزواج أقطابه $(p_I - p_{II})$.

يلاحظ أنه إذا كان $(p_I = p_{II})$ في الوصل التتابعي التفاضلي. فإن هذا يؤدي إلى سرعة دوران عالية جداً ينتج عنها تطاير أجزاء المجموعة، لذلك يجب أن يكون دائماً عدد أقطاب المحركين الموصلين بشكل تتابعي مختلفين. أما نسبة السرعتين في حالة التوصيل التتابعي التفاضلي والتكاملي فتساوي:

$$\frac{n'}{n} = \frac{n_{max}}{n_{min}} = \frac{p_I + p_{II}}{p_I - p_{II}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ (33-2)$$

وتكون استطاعة الخرج للمحرك الأول $(M_1)$ أكبر من استطاعة الخرج للمحرك الثاني $(M_{11})$، وهذا ناتج عن طبيعة التوصيل التتابعي حيث يتغذى المحرك الثاني من الاستطاعة المتولدة في دارة الجزء الدائر للمحرك الأول.

عند التوصيل التتابعي، الاستطاعة الرد فعلية المستجرَّة من الشبكة بواسطة المحرك الأول تذهب لتشكيل الساحة المغناطيسية في المحركين، لذلك يكون تيار اللاحمل للمجموعة أكبر منه في حالة عمل كل محرك لوحده. كذلك تكون ممانعة الدارة القصرى الناتجة عن وصل المحركين على التسلسل أكبر وبالتالي يكون تيار القصر أقل منه في حالة عمل كل محرك لوحده، وهذا يؤدي إلى انخفاض عامل الاستطاعة و العزم الأعظمي للمجموعة.

مما سبق نستنتج أن تنظيم السرعة بطريقة الوصل التتابعي لمحركين تحريضيين يمكن عده مثل تنظيم السرعة عن طريق تغيير عدد الأقطاب أو حقن قوة محركة كهربائية أو إضافة مقاومات إلى دارة الجزء الدائر [10].

## ٢ ـ٥: بعض أنواع المولدات التحريضية المستخدمة مع الأنظمة الريحية التي تعمل عند سرعات متغيرة:

## *Some Types Of Induction Generators Used In Variable Speed Wind Turbines:*

### ٢ ـ٥ ـ١: المولدات التحريضيةالتقليدية (*I.G*):

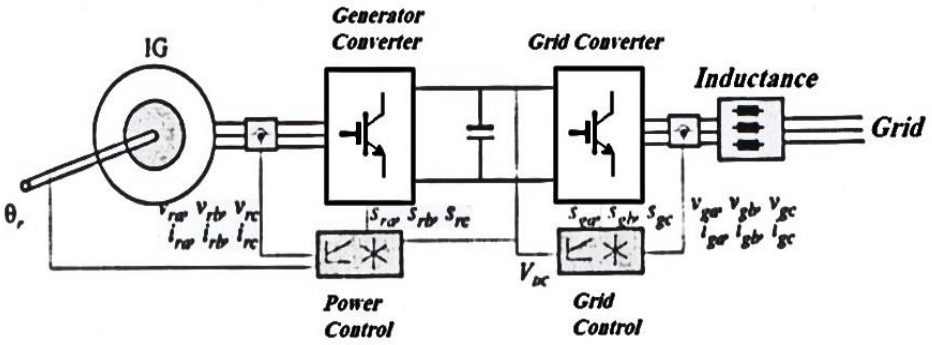
### *Conventional Induction Generators:*

إن استخدام المولدات التحريضية في العنفات الريحية يزداد يوماً بعد يوم بسبب الميزات التي تمتلكها بالمقارنة مع المولدات التزامنية والتي تتلخص في:

١) بنيتها القوية.
٢) تكاليفها المنخفضة.
٣) بساطة الصيانة والتشغيل.
٤) يربط مباشرة مع الشبكة، وعند أي تردد.
٥) لا يحتاج إلى سرعة ثابتة مع آلته المحركة (Prime Mover).

لكن السيئة الأساسية للمولد التحريضي هو القيمة الكبيرة للاستطاعة الردية المطلوبة (مردوده منخفض) لذا أحياناً يتم تعويضها بواسطة معوضات الاستطاعة الردية.

من أبسط الطرق للحصول على نظام ريحي يعمل عند سرعات متغيرة استخدام مبدل الكتروني ثنائي الاتجاه (Converter-Inverter) موصول بطريقة ( back –to-back ) مع مولد تحريضي تقليدي ذو قفص سنجابي. والشكل (2–10) يبين عنفة ريحية تستخدم هذا النظام.




**الشكل (2–10): نظام ريحي يعمل عند سرعات متغيرة باستخدام مولد تحريضي تقليدي ذو قفص سنجابي مع مبدل الكتروني ثنائي الاتجاه (*Converter-Inverter*).**

في هذا النظام يتم توليد الكهرباء في الآلة بتردد وتوتر متغيرين (حسب سرعة الرياح)، ومن ثم يتم تحويلها بواسطة المبدل الالكتروني إلى تردد وتوتر الشبكة المطلوب الربط عليها.

من مساوئ استخدام المولد التحريضي (I.G) في نظام ريحي ذو سرعة متغيرة أنه يحتاج إلى علبة سرعة لرفع السرعة إلى ما فوق السرعة التزامنية، بالإضافة إلى حاجته إلى مبدل استطاعي باستطاعة مساوية لاستطاعة المولد الاسمية [1].

## ٢ ٥ ٢: المولد التحريضي ذو التغذية المزدوجة (دائر ملفوف):

## *Doubly–Fed Induction Generator (DFIG):*

### ٢ ٥ ٢ ٢: وصف المولد التحريضي ذو التغذية المزدوجة (دائر ملفوف):

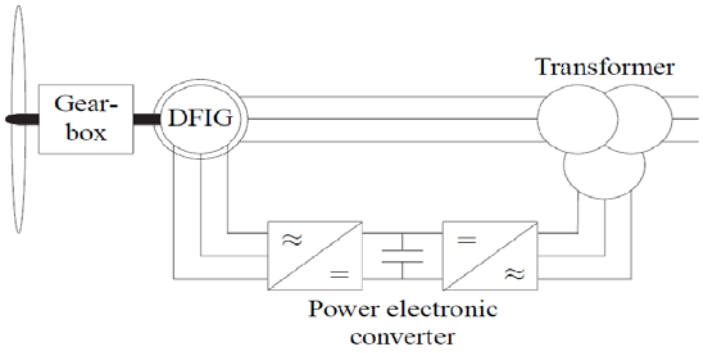
### *Description of the DFIG:*

هو عبارة عن مولد تحريضي ذو دائر ملفوف *((Wound Rotor Induction Generator))*، يربط فيه ملف الثابت إلى الشبكة العامة بشكل مباشر، بينما يتم ربط ملفات دائره عبر حلقات انزلاق إلى مبدل الكتروني ثنائي الاتجاه، ومنه يربط إلى الشبكة العامة. وبالتالي يمكن القول بأنه من بين المنافذ الثلاث لجريان الاستطاعة في الآلة والتي هي:

1- أطراف ملف الثابت. 2- أطراف ملف الدائر. 3- محور الدوران.

فإن أطراف الدائر هي التي تعمل كمنفذ منظِّم لجريان الاستطاعة في الآلة.

وبالمقارنة مع المولد التحريضي ذو القفص السنجابي، فإن الفرق الرئيسي هو أن ال مولد التحريضي ذو التغذية المزدوجة (*DFIG*) يسمح بالوصول إلى ملفات دائرهوبالتالي إمكانية تغيير توتر الدائر وتردده، مما يعني أ ن الاستطاعة يمكن أن تؤخذ من دارة الدائر أو تحقن فيها، أي أنه يمكن مغنط ة (تهييج) الهولد (*DFIG*) من الثابت أو الدائر ، ولذلك سمي هذا النوع بالمولد ذو التغذية المزدوجة لإمكانية تدفق الاستطاعة من كل من ملفي الثابت والدائر فيه.




**الشكل (2-11): المولد التحريضي ذو التغذية المزدوجة (DFIG) (دائر ملفوف).**

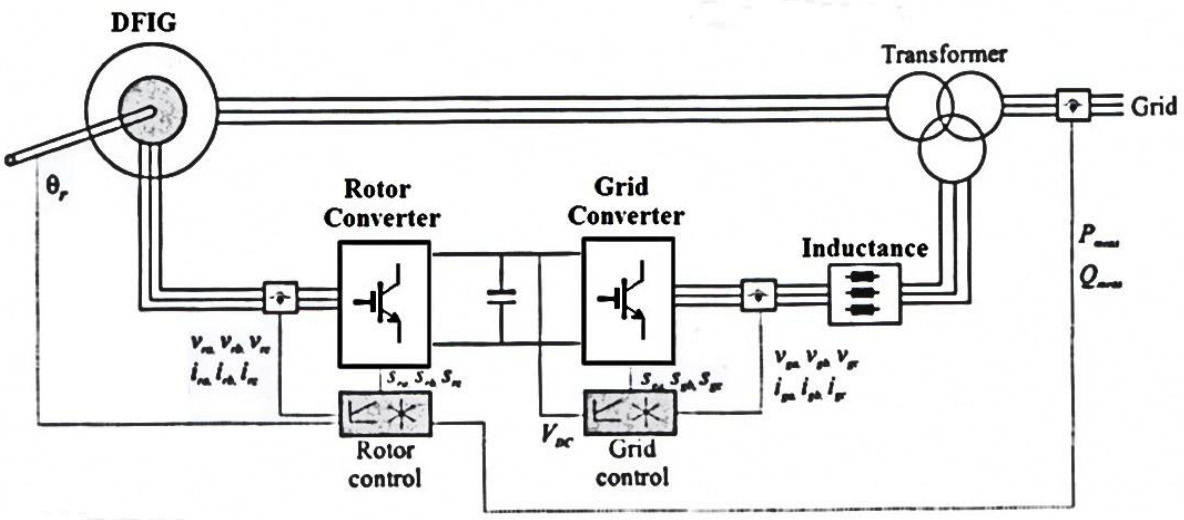
وقد أظهر استخدام نظام التغذية المزدوجة *Doubly Fed* للمولدات التحريضية كفاءة عالية بسبب انخفاض استطاعة نظام التبديل الالكتروني والذي انعكس بدوره على التكاليف، بالإضافة إلى اتساع مجال التحكم وإمكانية التوليد عند سرعات رياح مختلفة، وكذلك فإن هذه المولدات تتمتع بميزات المولدات التحريضية إضافة إلى أنها تعمل في النمط التزامني.

## ٢ ٠ ٢ ٢: مبدأ عمل المولد التحريضي ذو التغذية المزدوجة (*DFIG*):

## *Principle Operation Of (DFIG):*

عند سرعة الرياح الاسمية فإن المولد سيدور بسرعة أعلى من السرعة التزامنية (Super-Synchronous Speed)، وبالتالي يتم حقن الاستطاعة في الشبكة من خلال كل من الثابت والدائر معاً. أما عند سرعة الرياح المنخفضة فإن المولد سيدور بسرعة أدنى من السرعة التزامنية (Sub-Synchronous Speed)، وبالتالي يقوم الدائر بامتصاص الاستطاعة من الشبكة وكذلك جزء من استطاعة الثابت تدخل إلى دارة الدائر [2].

يوضح الشكل التالي نظام التبديل المستخدم في المولد التحريضي ذو التغذية المزدوجة (DFIG)، حيث نلاحظ وجود جسرين الأول من جهة الدائر ( Rotor Converter) والذي يعمل كمقوم ( Ac-Dc) وهو مقاد، والثاني من جهة الشبكة ( Grid Converter) والذي يعمل كمعرج ( Dc-Ac) وهو مقاد أيضاً بحيث يعطينا توتر متناوب متغير التردد.




**الشكل (2-12): المبدل الالكتروني المستخدم مع المولد التحريضي ذو التغذية المزدوجة (DFIG)(دائر ملفوف).**

### ٢ ـ ٤ ـ ٣: بنية وعمل المبدل الالكتروني جانب الدائر:

***Rotor Converter control Scheme for (DFIG):***

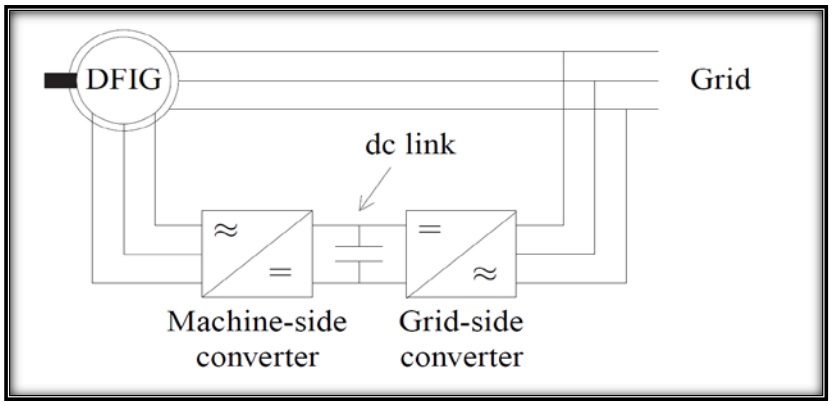
الهدف الأساسي للمبدل الالكتروني جانب الدائر هو التحكم بسرعة المولد (*DFIG*). وهناك طرق كثيرة للتحكم بهذا المبدل.

يمكن للآلة (*DFIM*) أن تعمل كمولد أو محرك عند مجال تغير للسرعة مقداره ($\pm\Delta\omega_r^{max}$) حول السرعة التزامنية [9].

### ٢ ـ ٤ ـ ٤: عمل المبدل الالكتروني جانب الشبكة:

***Grid Converter control Scheme for (DFIG):***

الهدف الأساسي للمبدل الالكتروني جانب الشبكة هو الحفاظ على توتر وتردد ثابتين على جانب الشبكة (عند عمل المولد عند سرعة أعلى من سرعته التزامنية، أي عندما يقوم الدائر بحقن استطاعة إلى الشبكة)، وبمعنى آخر الحفاظ على قيمة ثابتة للتوتر في حلقة التيار المستمر "*Dc Link*" الموضحة بالشكل التالي ( 2−13). بالإضافة إلى تأمين مسار لتمرير الاستطاعة من الدائر باتجاه الشبكة وبالعكس من الشبكة باتجاه الدائر [1].




**الشكل (2−13):حلقة التيار المستمر "*Dc Link*" في دارة المبدل الالكتروني المستخدم في المولد (DFIG).**

### ٢ ـ ٤ ـ ٥: ميزات المولد التحريضي ذو التغذية المزدوجة:

***Advantages Of Doubly-Fed Induction Generator (DFIG):***

١ ـ يجمع المولد التحريضي ذو التغذية المزدوجة *(DFIG)* المتحكم به ميزات التشغيل لكلٍ من الآلتين التزامنية واللاتزامنية.

٢ ـ إمكانية تشغيل الآلة *(DFIG)* كمولد عند مجال واسع من تغيرات سرعة الرياح، أي عند سرعة أعلى أو أدنى من السرعة التزامنية، وذلك ضمن مجال [0.8 ÷ 1.2] من السرعة الاسمية ،

ويعتمد مجال تغير السرعة الذي يمكن للمولد أن يعمل ضمنه على استطاعة المبدل الالكتروني المستخدم، مما يعني زيادة القدرة المنتجة من العنفة الريحية والتي تتناسب طرداً مع مكعب سرعة الرياح.

٣- بما أن ثلث الاستطاعة الاسمية للمولد تقريباً تتدفق عبر دارة دائره وعبر المبدل الالكتروني (حيث أن المحرك التحريضي حتى ينتقل ليصبح مولداً تحريضياً يحتاج لاستطاعة ردية تقدر بحوالي *25-30%* من استطاعته الاسمية لتوليد السيالة المغناطيسية في الثغرة الهوائية وتأمين تيار التهييج المطلوب)، وبالتالي فإن استطاعة المبدل الالكتروني المستخدم تعادل فقط حوالي *25-30%* من الاستطاعة الكلية للآلة، مما يعني خفض التكاليف والضياعات في المعرج وبالتالي ازدياد مردود النظام ككل.

٤- يتميز المولد التحريضي ذو التغذية المزدوجة *(DFIG)* بالقدرة على التحكم الكامل بكل من الاستطاعة الردية والفعلية بشكل منفصل.

٥- باستخدام طريقة تحكم مناسبة فإنه يمكن الحصول على عامل استطاعة مرتفع للنظام.*[3]*

## ٢-٥-٢: مساوئ المولد التحريضي ذو التغذية المزدوجة:

***Disadvantages Of Doubly-Fed Induction Generator (DFIG):***

١- يعاني المولد التحريضي ذو التغذية المزدوجة *(DFIG)* من مشكلة وجود حلقات الانزلاق والمسفرات التي لابد منها في الدائر ، مما يجعل النظام بحاجة إلى صيانة مستمرة ودورية، وبالتالي انخفاض الوثوقية.

٢- زيادة التكاليف بسبب التعقيد في نظام التحكم المستخدم.*[11] [3]*

# الفصل الثالث

# Third Chapter

# دراسة نظرية في الآلة التحريضية ذات التغذية المزدوجة بدون مسفرات.

# **Theoretical Study For The Brushless Doubly Fed Machine (BDFM).**

## المقدمة:

## *Introduction:*

يزداد الاهتمام في الآونة الأخيرة بمسألة الطاقات المتجددة، وذلك مع تزايد المشاكل المرتبطة باستخدام مصادر الطاقة التقليدية المحدودة التي تعتمد على الوقود المستحاثي الذي ينضب يوماً بعد يوم، إضافة إلى الكلفة العالية والتلوث المتزايد للبيئة. ومن أهم مصادر الطاقات المتجددة Renewable Energy التي يعوَّل عليها في المستقبل طاقة الرياح Wind Energy.

وبالنظر لكون الاستطاعة الكهربائية التي يمكن استجرارها من العنفات الريحية تتأثر بسرعة الرياح بشكل حاد، فإن هناك صعوبة في استخلاص الحد الأقصى الممكن من طاقة الرياح و تحويلها إلى طاقة كهربائية في آلات التوليد الكهربائية التقليدية.

لذلك تم التوجه نحو آلة تجمع بين الميزات الإيجابية الموجودة في الآلة التزامنية والتحريضية، إضافة إلى ميزات إضافية جعلت منها آلة مناسبة جداً للعمل مع العنفات الريحية التي تعمل عند سرعات متغيرة، وخاصة منها البعيدة عن الشاطئ ( Off shore)، حيث أنها توفر وثوقية عالية بسبب الميزة الإيجابية التي تميز هذه الآلة عن غيرها وهو غياب المسفرات. هذه الآلة هي الآلة التحريضية ذات التغذية المزدوجة بدون مسفرات ((Brushless Doubly-Fed Machine (BDFM)).

تتميز هذه الآلة بإمكانية الحصول على توتر وتردد ثابتين على خرجها مهما اختلفت سرعة دوران محور الدائر، وذلك باستخدام مبدل الكتروني استطاعي ذو استطاعة منخفضة نسبياً تعادل حوالي (30%) فقط من الاستطاعة الكلية للآلة .ومن هنا تأتي أهمية استخدام هذه الآلة كمولد في أنظمة العنفات الريحية التي تعمل عند سرعات متغيرة والتي تكون ذات كفاءة ومردود عالي، حيث يمكن لهذا المولد العمل عند مجال تغيرات لسرعة الرياح [1.3 ÷ 0.8] من السرعة الاسمية للآلة.

كما أن التوافقيات الناتجة عن هذه الآلة أقل من تلك الناتجة عن الآلة التحريضية التقليدية لأن معظم الاستطاعة المولدة في الآلة (BDFM) تحقن في الشبكة مباشرة دون المرور عبر المبدل الالكتروني.

وقد تم تطوير هذه التقنية في الآلات التحريضية بنوعيها، الآلات التحريضية ذات الدائر الملفوف، وأطلق عليها اسم ( DFIG "Doubly-Fed Induction Generators")، والآلات التحريضية ذات القفص السنجابي، وأطلق عليها اسم (BDFMs "Brushless Doubly-Fed Machines").

إضافة إلى أن مردود الآلة BDFM مع مبدلها الالكتروني أفضل من مردود المولد التحريضي التقليدي مع مبدله الكتروني.

## ٣ ـ٣: التطور التاريخي للآلة التحريضية ذات التغذية المزدوجة بدون مسفرات (BDFM):

## *Evolution Of The BDFM:*

بسبب المواصفات المتميزة التي تتمتع بها الآلة التحريضية من متانة التركيب وبساطته أدى إلى الرغبة باستخدامها في المجالات المختلفة، إلا أن المشكلة الرئيسية التي حدَّت من استخدامها هي سرعتها الثابتة المرتبطة بتردد المنبع، حيث أن معظم التطبيقات تعمل عند سرعات مختلفة، لذلك دعت الحاجة إلى تصميم آلة يمكنها العمل عند سرعات مختلفة (وذلك بدون استخدام مقاومات متغيرة (Rheostats) والتي تتسبب بالضياعات النحاسية). فكانت الفكرة تنطلق من تطوير آلية الوصل التتابعي للآلات التحريضية والذي يمكن من خلاله الحصول على ثلاث سرعات مختلفة.

تعود الفكرة الأساسية للآلة التحريضية ذات التغذية المزدوجة بدون مسفرات ( BDFM) إلى براءة الاختراع التي حصل عليها Siemens Brothers and Mr. F. Lydall عام (1902) للآلة التحريضية ذات التتابع الذاتي ( Self – Cascaded Machine). حيث ناقش Lydall في بحثه فكرة التداخل بين الحقول المغناطيسية الناتجة عن ملفات ذات عدد أقطاب مختلف لآلتين تحريضيتين **ضمن إطار معدني واحد** ، وكانت الآلة التي اقترحها Lydall تمتلك ملفين في الثابت وملفين في الدائر، يربط كل ملف منهما إلى حلقات انزلاق، وبذلك يمكن الحصول على ثلاث سرعات مختلفة هي:

- السرعة التزامنية للملف الأول ($W/p_1$)، والذي عدد أزواج أقطابه المغناطيسية " $p_1$ ".
- السرعة التزامنية للملف الثاني ($W/p_2$). والذي عدد أزواج أقطابه المغناطيسية " $p_2$ ".
- السرعة التزامنية التتابعية ($W/(p_1+p_2)$).

وبذلك يمكن القول بأن عمل Lydall يتجسد بإيجاد آلة تحريضية لها نفس التأثير الناتج عن الوصل التتابعي الذاتي للآلات التحريضية لكن ضمن إطار واحد.

في عام في عام ( 1907) قام (Hunt) بتطوير النموذج الذي اقترحه Lydall، حيث أدرك (Hunt) أنه لا حاجة لاستخدام حلقات الانزلاق التي استخدمها Lydall في نموذجه وذلك إذا تم وصل ملفي الدائر إلى بعضهما بدلاً من وصل ملف الدائر إلى الثابت، وتبقى إمكانية الحصول على السرعات الثلاث قائمة. واستمر Hunt في تطوير هذا التصميم من عام (1907) حتى عام (1914).

وفي عام ( 1920) أدخل ( Creedy) تحسينات أكثر على تصميم كل من الدائر والثابت، وقد اعتمد (Creedy) على بعض النتائج التي توصل إليها (Hunt).

وبعد البحث الذي قدمه (Creedy) لم يظهر أي بحث جديد في هذا المجال إلى أن قام (Smith) عام (1966) بنشر بحث عن تلك الآلة، حيث بيَّن آلية إضافية للتأكد من عدم حدوث التداخل بين

الحقول المغناطيسية للملفات الموضوعة ضمن إطار واحد وذلك من خلال الفصل المكاني (الفراغي) للملفات في الثابت بالإضافة إلى اختلاف عدد الأقطاب بينهما. وقام ( Smith) ولأول مرة بوضع نموذج لتشغيل الآلة في الحالة المستقرة. واستمر (Smith) بتطوير نموذجه المقترح حتى استطاع نشر مقالة عن أداء الآلة في النمط التزامني. وكان هذا تطوراً مذهلاً حيث أنه لأول مرة يتم معرفة آلية تشغيل الآلة بنمط تزامني كامل. إلا أن آلة ( Smith) لم تكن آلة BDFM حقيقية، لكنها كانت عبارة عن آلتين منفصلتين مغناطيسياً ضمن إطار واحد.

وفي عام ( 1967) قام ( Smith) بوضع الدارة المكافئة لآلته وتحليل أدائها في نمط التشغيل التزامني. وبذلك مُنح (Smith) الأسبقية في معرفة آلية تشغيل الآلة بالنمط التزامني عن طريق التغذية المزدوجة لملفيها.

في عام 1970قام (Burbridge) و (Broadway) بنشر مقالة كانت لها الأفضلية في صياغة الآلة BDFM بشكلها الحالي (فيزيائياً). وقد عادا في تصميمها إلى الآلة التي اقترحها (Hunt) متغافلَيْن التطوير الذي أدخله ( Smith) عليها. وقاما بتعديل مثير وملحوظ في تصميم الدائر فيها وذلك بعد أن تبيَّن لهما أن تصميم الدائر الذي قدمه كل من (Hunt) و(Creedy) وهو من نوع الدائر الملفوف سيؤدي لزيادة الضياعات وانخفاض الاستقرار، ولذلك قاما بالعمل على تصميم دائر خاص ذو قفص سنجابي يقوم بنفس الأداء، وهو مكوَّن من حلقات متداخلة "الحلقات العُشيَّة"( Nested Loop) ، وقد كان لهما الأسبقية في توضيح فكرة أن عدد القضبان ( bars) في هذا الدائر السنجابي يجب أن يساوي إلى مجموع الأقطاب المغناطيسية في ملفي الثابت. وبالتالي كانت مساهمتهما الأساسية هي اقتراح تصميم خاص للدائر من نوع القفص السنجابي، لتتالى بعدهما الأبحاث لتطوير تصميم الدائر الذي اقترحاه.

في منتصف الثمانينات قام ( Wallace, Spée, Li) من جامعة ولاية ( Oregon) في الولايات المتحدة الأمريكية بدراسة معمقة للآلة BDFM. وفي الحقيقة فإن الاسم ( Brushless doubly-Fed Machine) تم اقتراحه في هذه الدراسة. حيث أن هذه الدراسة اعتمدت بشكل أساسي على الدراسة التي قدمها (Broadway / Burbridge) فاستحق هذا العمل على براءة اختراع لـ (Lauw) عام(1993).

وبعد ذلك قام (.Li et. al) باقتراح النموذج الديناميكي للآلة BDFM على المحورين d-q، ليتمكن وباستخدام هذا النموذج من وضع النموذج الرياضي للآلة بحيث يمكن نمذجتها باستخدام الحاسب، فاستطاع بذلك من تقديم دراسة عن الأداء الديناميكي للآلة وتقديم نتائج نمذجة الآلة على الحاسب، ومن ثم مقارنة تلك النتائج مع النتائج التجريبية في أبحاث لاحقة.

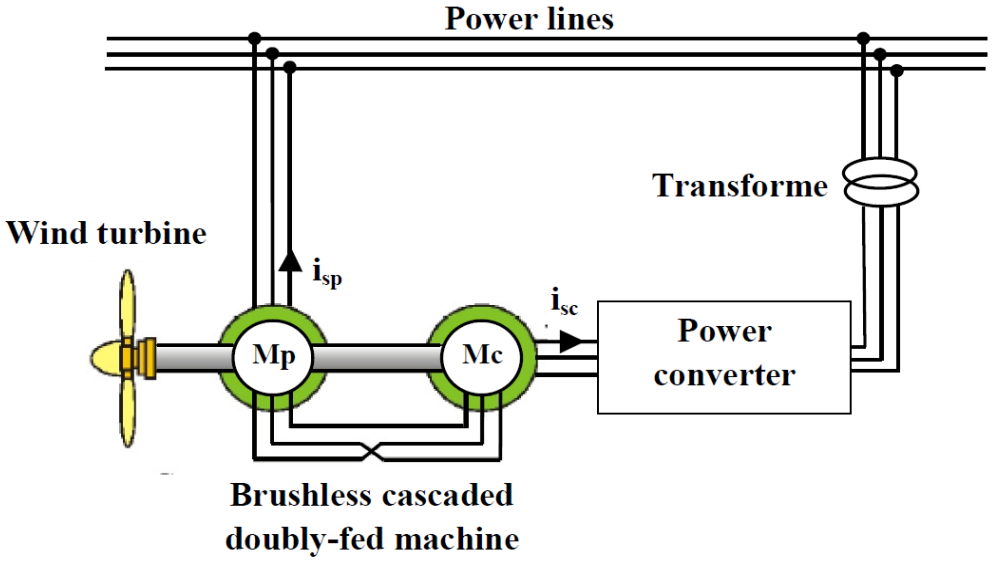
إن الدراسات السابقة بحثت في آلية عمل الآلة وتطوير تصميم الثابت والدائر فيها، لكن دراسة استقرار الآلة ظهر فقط في دراسة وحيدة عام ( 1991) قام بها ( .Li et. al) بحث فيها آلية استقرار الآلة في حلقة تحكم مفتوحة (أي بدون تغذية خلفية).[9].

## ٣ ـ ٢: مقدمة نظرية عن الآلة (مم تتألف – مبدأ العمل):

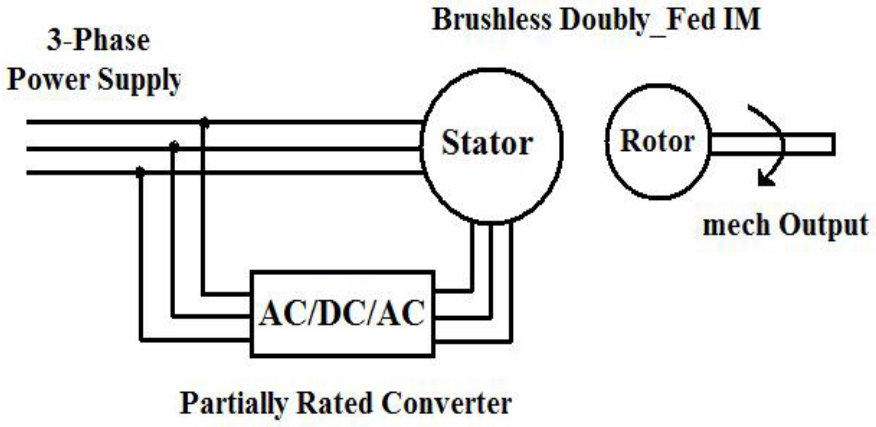
## *Basic System Configuration*

الآلة التحريضية ذات التغذية المزدوجة بدون مسفرات ( Brushless doubly-Fed Machine) واختصاراً (BDFM) هي عبارة عن آلة تيار متناوب يمكن أن تعمل كمحرك أو مولد.

إنَّ المفهوم الأساسي للآلة BDFM هو دمج آلتين تحريضيتين ذات عدد أقطاب مختلف، بحقل كهرطيسي واحد في الثغرة الهوائية ضمن إطار واحد ، وبمعنى آخر تحويل جملة الآلتين ( Mp) و (Mc) مع مبدلهما الالكتروني الذي يظهر في الشكل (3–1) إلى آلة واحدة يبيِّنها الشكل (3–2).




**الشكل (3–1): آلتين تحريضيتين موصولتين مع بعضهما بشكل تتابعي.**




**الشكل (3–2): الآلة التحريضية (BDFM).**

❖ يتكون هذا المولد من:

✓ **جزء ثابت (Stator):**

- يحتوي على ملفين ثلاثيي الطور (لذلك تدعى بالآلة ذات التغذية المزدوجة).
- معزولين عن بعضهما كهربائياً.
- لكل منهما عدد أقطاب مختلف عن الآخر، ومزاحين عن بعضهما بزاوية انزياح مكانية، لضمان عدم حدوث أي تداخل مباشر بين الحقول المغناطيسية المتولدة عنهما.
- يتم تغذية الملفين بترددين مختلفين.

✓ **جزء دائر (Rotor):**

دائر الآلة (BDFM) هو دائر من نوع ال قفص السنجابي بتصميم خاص يدعى (Nested _ Loop) " الدائر ذو الحلقات العشية المتداخلة ".

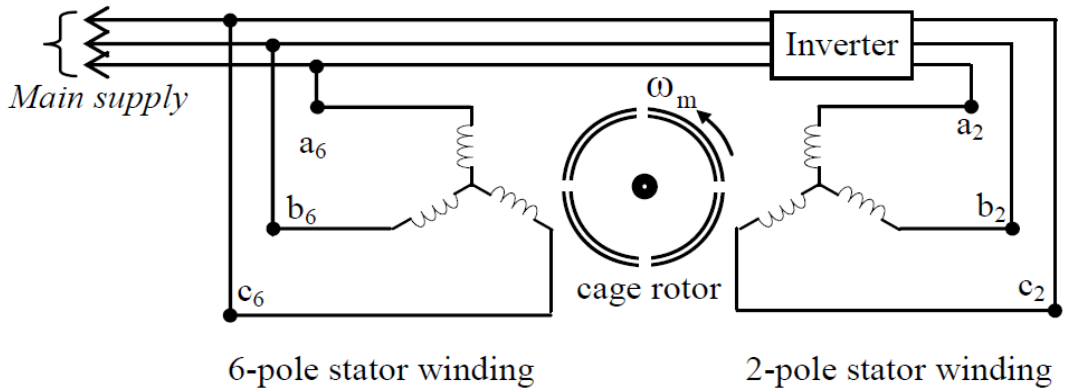
❖ الملفان الموجودان في الثابت هما:

✓ ملف الاستطاعة (P.W "Power Winding"):

- تتدفق عبره معظم استطاعة الآلة.
- يربط هذا الملف مباشرة إلى الشبكة.

✓ ملف التحكم (C.W "Control Winding"):

- يتدفق جزء صغير من الاستطاعة عبر ملف التحكم تعادل حوالي ( 30%) فقط من الاستطاعة الكلية للآلة.
- يربط هذا الملف إلى الشبكة عبر مبدل الكتروني استطاعي ثنائي الاتجاه (Inverter - Converter).
- يعمل هذا الملف كمجموعة مكافئة لعمل ملفات الدائر في الآلة (DFIG).




**الشكل (3-3): شكل توضيحي لملفي الثابت وملف الدائر مع المبدل الالكتروني في الآلة (BDFM).**

مهمة ملف التحكم:

- يسمح ملف التحكم بإمكانية التحكم بالسرعة فوق وتحت السرعة التزامنية للآلة. حيث أنه قادر على تعديل قيمة تيار الدائر المتحرض بواسطة ملف الاستطاعة (P.W) و ذلك من خلال التصميم الخاص لهذه الآلة.
- إضافة إلى استخدامه للتحكم بكل من الاستطاعة الردية ( Reactive Power) "Q [VARs]" والاستطاعة الفعلية ("Active Power "P [Watt]) كل على حدا.[9]

## ٣ ٣: أنماط تشغيل الآلة (BDFM):

# Operation Modes Of The (BDFM) Mahcine:

يمكن تشغيل الآلة (BDFM) في ثلاثة أنماط تشغيل مختلفة، ويعتمد ذلك على طريقة تغذية ملف التحكم، بينما يكون ملف الاستطاعة في كافة الأنماط مربوط مع الشبكة، وهذه الأنماط هي:

- **نمط التشغيل التحريضي (Induction Mode):**

وفيه يشكل ملف التحكم دارة مفتوحة. ويكون نمط التغذية هنا هو (Singly Fed Mode).

- **نمط التشغيل التتابعي (Cascade Mode):**

وذلك عندما يتم قصر طرفي ملف التحكم معاً. ويكون نمط التغذية هنا هو (Singly Fed Mode).

ونمطا التشغيل السابقين هما نمطا تشغيل تحريضي للآلة (BDFM).

- **نمط التشغيل التزامني (Synchronous Mode):**

وهو نمط التشغيل الذي تم تصميم الآلة (BDFM) لتعمل عنده. وفيه يتم تغذية ملفي الثابت في الآلة (BDFM) معاً. حيث يربط ملف الاستطاعة بشكل مباشر إلى الشبكة ( تردد وتوتر ثابت )، بينما يربط ملف التحكم إلى الشبكة عبر مبدل الكتروني استطاعي ثنائي الاتجاه ( Inverter - Converter). ويقوم ملف التحكم في هذا النمط مقام ملف التهييج في الآلة التزامنية.

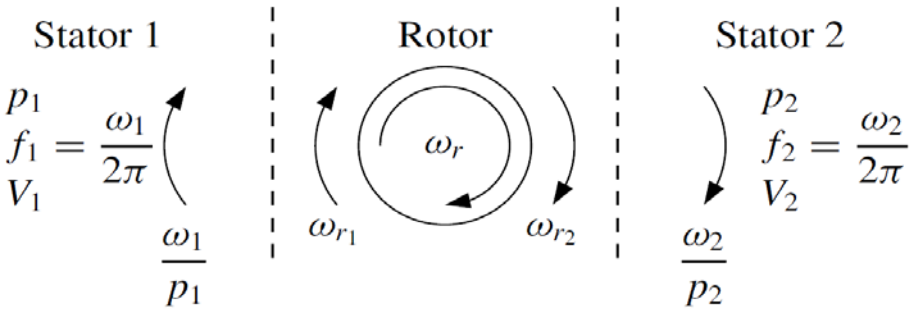
ونمط التغذية هنا هو (Doubly Fed Mode).

وسمي نمط التشغيل هذا بنمط التشغيل التزامني لأن سرعة دوران محور الآلة فيه تعتمد فقط على:

- تردد تغذية ملف الاستطاعة ($W_p$).
- تردد تغذية ملف التحكم ($W_c$).

أي تكون سرعة دوران المحور مستقلة عن الحمولة " ما لم يكن التغير في الحمولة كبيراً ومفاجئاً"

فإذا كان ملف الاستطاعة في الثابت مؤلف من عدد أزواج أقطاب ( $P_1$)، وتتم تغذيته من منبع ذي تردد [rad/sec]($W_1$)، فإن الفيض المغناطيسي المتولد عن هذا الملف سيدور في الثغرة الهوائية بسرعة [rad/sec] ($W_1/P_1$)، وإذا كان ملف التحكم في الثابت مؤلف من عدد أزواج أقطاب ( $P_2$)، وتتم تغذيته من منبع ذي تردد [rad/sec]($W_2$)، فإن الفيض المغناطيسي المتولد عن هذا الملف سيدور في الثغرة الهوائية بسرعة [rad/sec] ($W_2/P_2$)، كما يوضح الشكل التالي:




**الشكل (3-4): نمط التشغيل التزامني للآلة (BDFM).**

وعندها تعطى علاقة السرعة الميكانيكية لمحور الآلة (BDFM) في النمط التزامني بالشكل:

$$\omega_r = \frac{\omega_1 \pm \omega_2}{P_1 + P_2}. \quad \ldots\ldots \quad (1-3)$$

نلاحظ من المعادلة السابقة أن التردد الزاوي لملف التحكم ( $\omega_2$ ) يأخذ إشارة موافقة أو معاكسة لإشارة التردد الزاوي لملف الاستطاعة وذلك بحسب تتابع توصيل الأطوار في ملفي الثابت بالنسبة لبعضهما البعض (أي: اتجاه السيالة المغناطيسية المتولدة في أحد الملفين بالنسبة للآخر). ونحصل على ($W_2$"Opp") عن طريق عكس تتابع توصيل ملفات ملف التحكم من التتابع ( abc) إلى التتابع (acb) بالنسبة لتتابع توصيل ملفات ملف الاستطاعة (ABC).

عادة يأخذ التردد الزاوي لملف الاستطاعة الموصول مباشرة إلى الشبكة قيمة موجبة ، بينما يكون التردد الزاوي لملف التحكم بإحدى حالتين:

$W_2$: يكون موجباً عند العمل عند سرعة أعلى من السرعة التزامنية (Super_Synchronous Speed).

$W_2$: يكون (Opp) عند العمل عند سرعة أدنى من السرعة التزامنية (Sub_Synchronous Speed).

تُعرَّف السرعة التزامنية الاسمية للآلة BDFM ( $\omega_{Syn}$) بأنها السرعة التي نحصل عليها عند تغذية ملف التحكم من منبع توتر مستمر DC، ($F_2$=0)، مع الحفاظ على تغذية ملف الاستطاعة من منبع ذو تردد ثابت ($F_1$)، ويطلق عليها اصطلاحاً " السرعة الطبيعية " ( $\omega_{Natural}$). و تعطى بالعلاقة التالية:[14]

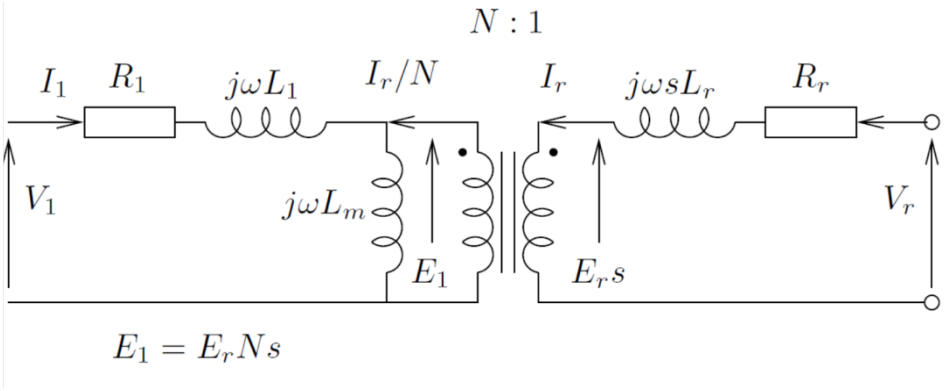
$$\omega_{Syn} = \omega_n = \frac{\omega_1}{P_1 + P_2}. \quad \ldots\ldots \quad (2-3)$$

## ٣ ـ٤: الدارة المكافئة للآلة (BDFM):

## *Equivalent Circuit of the (BDFM):*

يمكن الحصول على الدارة المكافئة للآلة BDFM انطلاقاً من اعتبارها آلتين تحريضيتين مرتبطتين مع بعضهما عبر دائر واحد. وبالتالي لاستنتاج الدارة المكافئة للآلة BDFM سنقوم بتمثيلها على أنها آلتين تحريضيتين متصلتين مع بعضهما، ومن ثم نطور الدارة المكافئة بالاعتماد على نموذج الطور الواحد للآلة.

يبين الشكل التالي الدارة المكافئة النموذجية لمحرك تحريضي ذو الدائر الملفوف، والذي يمكن الوصول إلى ملفات الدائر فيه عبر حلقات الانزلاق:




**الشكل (3-5): الدارة المكافئة لطور واحد من الآلة التحريضية التقليدية (دائر ملفوف).**

باعتبار أن:

N: نسبة التحويل (نسبة عدد اللفات).

$L_m$ : المحارضة المغناطيسية للتوافقية الأساسية للحقل المغناطيسي.

$L_1$ : يعبر عن الضياعات في الدارة المغناطيسية للثابت.

$L_r$ : يعبر عن الضياعات في الدارة المغناطيسية للدائر.

إذا كان لدينا آلتين تحريضيتين لكل منهما عدد مختلف من الأقطاب المغناطيسية، (لضمان عدم حدوث تداخل مباشر بين الحقول المغناطيسية الناتجة عنهما)، عندها سيكون لدينا دارتين مكافئتين لهذين المحركين التحريضيين، و يمكن لهذين المحركين التحريضيين أن يتشاركا نفس الإطار الخارجي، كما يمكن أن يكون لهما دارة مغناطيسية واحدة، بينما يكون لكل محرك عدد مختلف من الأقطاب المغناطيسية، وتكون الدارة المكافئة لكل آلة مماثلة للشكل السابق على افتراض أن الدائر في كل منهما من نوع الدائر الملفوف. وسيكون لكل آلة من الآلتين انزلاقها الخاص بها، وليكن:

$S_1$ :انزلاق الآلة الأولى.

$S_2$ :انزلاق الآلة الثانية.

واللذان يعرَّفا بالعلاقتين:

$$S_1 \triangleq \frac{\omega_1 - p_1.\omega_r}{\omega_1} = \frac{\omega_{r1}}{\omega_1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (3-3)$$

$$S_2 \triangleq \frac{\omega_2 - p_2.\omega_r}{\omega_2} = \frac{\omega_{r2}}{\omega_2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (4-3)$$

عند تشغيل الآلة BDFM في النمط التزامني ( Synchronous Mode) أو النمط التتابعي (Cascaded Mode)، فإن ترددات تيارات الدائر الناتجة عن ملف الاستطاعة وملف التحكم في الثابت تكون متساوية، حيث تعطى السرعة الميكانيكية لمحور الدوران في الآلة بالعلاقة التالية:

$$\omega_r = \frac{\omega_1+\omega_2}{p_1+p_2} \Rightarrow \omega_r.p_1+\omega_r.p_2 = \omega_1+\omega_2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (5-3)$$

وبإعادة ترتيب العلاقة الأخيرة نجد أن:

$$\Rightarrow \omega_1 - p_1.\omega_r = -(\omega_2 - p_2.\omega_r) \Leftrightarrow \omega_{r_1} = -\omega_{r_2} = \omega_S \quad \ldots\ldots\ldots \quad (6-3)$$

ولدينا:

$$S_1 \triangleq \frac{\omega_1 - p_1.\omega_r}{\omega_1} = \frac{\omega_{r1}}{\omega_1} \Rightarrow \omega_{r_1} = \omega_1 - p_1.\omega_r = S_1.\omega_1 \quad \ldots\ldots\ldots \quad (7-3)$$

$$S_2 \triangleq \frac{\omega_2 - p_2.\omega_r}{\omega_2} = \frac{\omega_{r2}}{\omega_2} \Rightarrow \omega_{r_2} = \omega_2 - p_2.\omega_r = S_2.\omega_2 \quad \ldots\ldots\ldots \quad (8-3)$$

وبالتالي فإنه وحسب العلاقات (3-6)، (3-7)، (3-8) نجد أن:

$$S_1.\omega_1 = -S_2.\omega_2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (9-3)$$

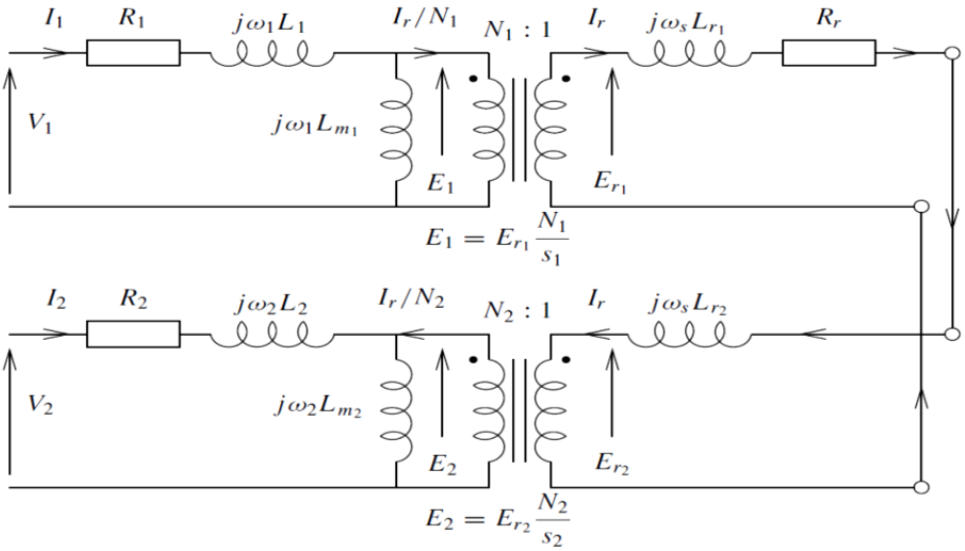
حيث أن:

$\omega_{r_1}$ : التردد الكهربائي للحقل المغناطيسي والتيارات في الدائر الناتجة عن ملف الاستطاعة.

$\omega_{r_2}$ : التردد الكهربائي للحقل المغناطيسي والتيارات في الدائر الناتجة عن ملف التحكم.

$\omega_S$ : التردد الكهربائي للحقل المغناطيسي والتيارات في الدائر الناتجة عن ملف الاستطاعة أو ملف التحكم، باعتبار أن $(\omega_{r_1} = -\omega_{r_2})$ [11].

وباعتبار أن الآلة BDFM هي عبارة عن آلتين تحريضيتين موجودتين ضمن إطار واحد (ولهما دائر واحد مشترك)، فإننا سنقوم بوصل الدارتين المكافئتين للآلتين التحريضيتين معاً، فنحصل على الشكل التالي:




**الشكل (3−6): الدارة المكافئة لطور واحد من الآلة BDFM.**

حيث أن:

$$L_1 = \left(L_{1_l} + L_{1_h}\right).$$
$$L_2 = \left(L_{2_l} + L_{2_h}\right). \quad \ldots\ldots \quad (10-3)$$
$$L_r = L_{r_1} + L_{r_2}.$$

$L_1$ : المحارضة الذاتية الكلية لملف الاستطاعة في الثابت.

$L_{1_l}$ : المحارضة الذاتية المسببة للفيض المغناطيسي التسربي في ملف الاستطاعة في الثابت.

$L_{1_h}$ : المحارضة الذاتية الناتجة عن التوافقيات في ملف الاستطاعة في الثابت.

$L_{m_1}$ : المحارضة الذاتية لفرع التهييج الناتج عن ملف الاستطاعة في الثابت ( المشكل للفيض المغناطيسي الرئيسي (التشابكي) الناتج عن ملف الاستطاعة).

$J.\omega_1.L_1$ : المفاعلة التحريضية لملف الاستطاعة في الثابت.

$L_2$ : المحارضة الذاتية الكلية لملف التحكم في الثابت.

$L_{2_l}$ : المحارضة الذاتية المسببة للفيض المغناطيسي التسربي في ملف التحكم في الثابت.

$L_{2_h}$ : المحارضة الذاتية الناتجة عن التوافقيات في ملف التحكم في الثابت.

$L_{m_2}$ : المحارضة الذاتية لفرع التهييج الناتج عن ملف التحكم في الثابت ( المشكل للفيض المغناطيسي الرئيسي (التشابكي) الناتج عن ملف التحكم ).

$J.\omega_2.L_2$ : المفاعلة التحريضية لملف التحكم في الثابت.

$L_r$ : المحارضة الذاتية الكلية لدائر الآلة (BDFM).

$L_{r_l}$ : المحارضة الذاتية المسببة للفيض المغناطيسي التسربي في دائر الآلة (BDFM).

$L_{r_h}$ : المحارضة الذاتية الناتجة عن التوافقيات في دائر الآلة (BDFM).

$L_{r_1}$ : المحارضة الذاتية للدائر المشكلة للفيض المغناطيسي الرئيسي المتشابك مع الفيض المغناطيسي الناتج عن ملف الاستطاعة في الثابت ($P_1$ ).

$L_{r_2}$ : المحارضة الذاتية للدائر المشكلة للفيض المغناطيسي الرئيسي المتشابك مع الفيض المغناطيسي الناتج عن ملف التحكم في الثابت ($P_2$ ).

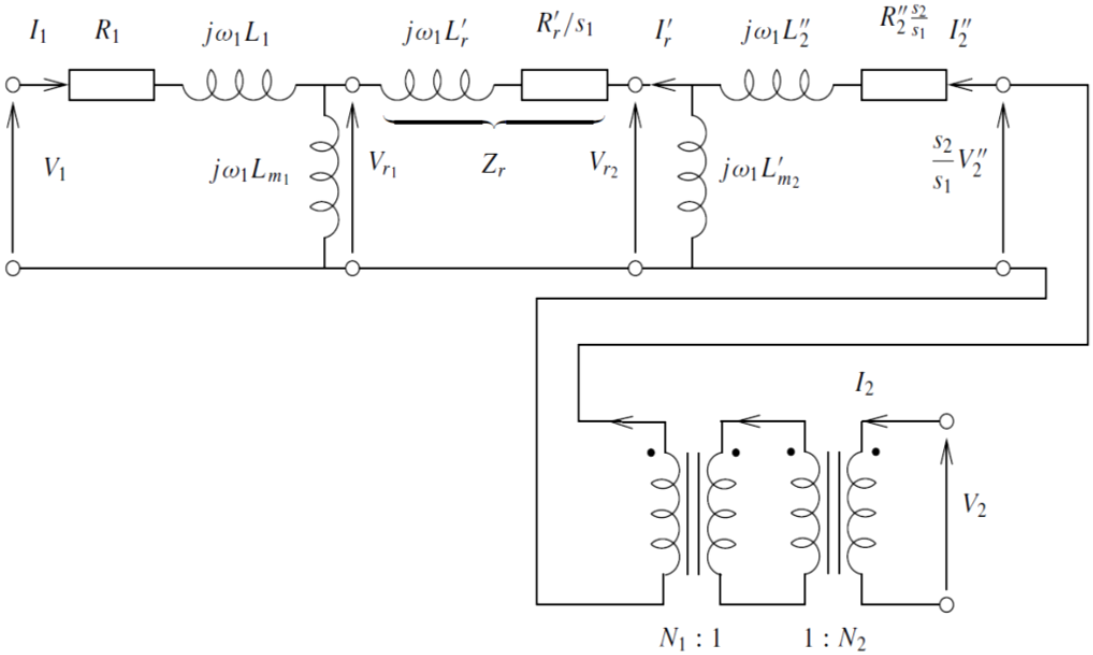
$R_1$ : المقاومة الأومية لملف الاستطاعة في الثابت.

$R_2$ : المقاومة الأومية لملف التحكم في الثابت.

$R_r$ : المقاومة الأومية للدائر.

ونلاحظ من الشكل السابق أن الترابط المغناطيسي بين ملف الاستطاعة والدائر يتم بواسطة المحولة التي نسبة تحويلها ($N_1 : 1$)، بينما يتم الترابط المغناطيسي بين ملف التحكم والدائر بواسطة المحولة التي نسبة تحويلها ($N_2 : 1$). كما نلاحظ أن التوترات الثانوية للمحولات متناسبة مع كل من الانزلاق ($S_1$) و الانزلاق($S_2$)، لكل من ملفي الاستطاعة والتحكم على الترتيب.

وكما هي العادة في الآلات التحريضية التقليدية فإننا ننسب كافة محددات الآلة إلى ملف الثابت، وبشكل مماثل فإننا سنقوم هنا بنسب كافة محددات الآلة إلى ملف الاستطاعة في الثابت (مع إهمال الضياعات الحديدية)، فنحصل على الشكل التالي:[9].




**الشكل (3-7): الدارة المكافئة لطور واحد من الآلة BDFM منسوبة إلى ملف الاستطاعة في الثابت.**

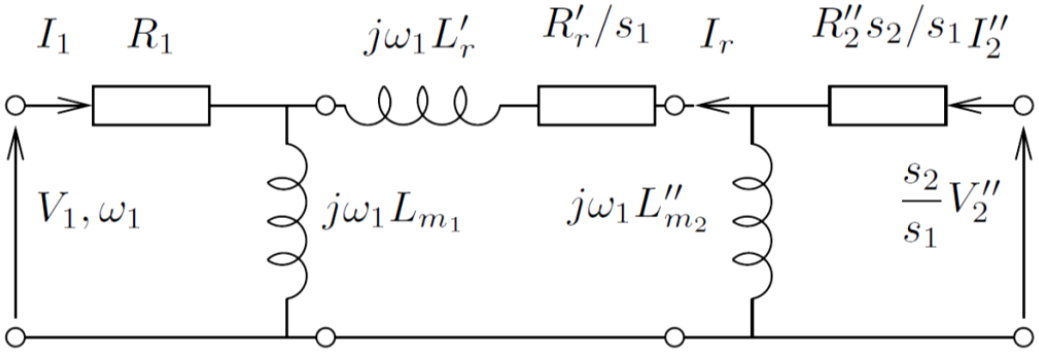
حيث أن:

$$L_r' = (L_{r_l} + L_{r_h}).N_1^2.$$
$$L_2'' = (L_{2_l} + L_{2_h}).\frac{N_1^2}{N_2^2}.$$
$$L_{m_2}'' = L_{m_2}.\frac{N_1^2}{N_2^2}.$$
$$R_r' = R_2.N_1^2. \qquad \ldots\ldots \quad (11-3)$$
$$R_2'' = R_2.\frac{N_1^2}{N_2^2}.$$
$$V_2'' = V_2.\frac{N_1}{N_2}$$
$$I_2'' = I_2.\frac{N_2}{N_1}.$$

## ٣ ٤ ٠: تبسيط الدارة المكافئة للآلة *(BDFM)*:

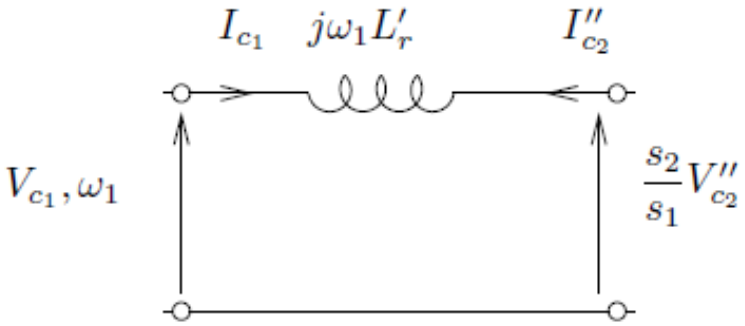
## eht deifilpmiS*Equivalent Circuit of the (BDFM):*

في الآلة BDFM ذات الدائر من النوع ( Nested Loop) ( "الدائر ذو الحلقات المتداخلة" ) تكون محارضة الدائر المنسوبة أكبر من المحارضات التسربية لملفي الثابت، وبالتالي يمكن إهمال المحارضات التسربية لملفي الثابت، وبذلك نحصل على الدارة المكافئة المبسطة (بتقريب مقبول) كما في الشكل التالي:[17]




**الشكل (3-8): الدارة المكافئة لطور واحد من الآلة BDFM بعد إهمال المحارضات التسربية لملفي الثابت.**

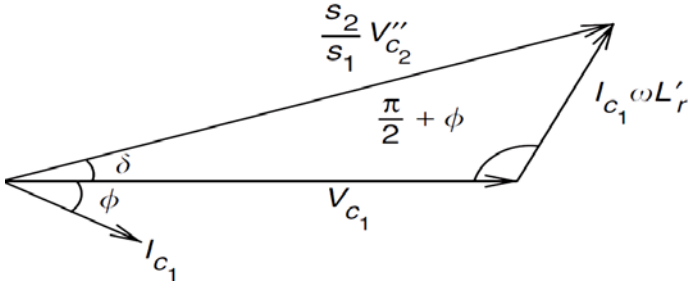
كما ويمكن تبسيط الدارة المكافئة للآلة BDFM أكثر من ذلك. حيث أن الدراسات التصميمة لدائر الآلة (BDFM) أشارت إلى أن مقاومة الدائر أصغر بكثير من مفاعلته التحريضية ( $R_r \ll X_r$)، وذلك بسبب وجود عدد من التوافقيات الناتجة عن التداخل للحقلين المغناطيسيين الناتجين عن ملفي الثابت من خلال الدائر، وبالتالي يمكن اعتبار ( $Z_r \approx X_r$)، وبإهمال المفاعلات المغناطيسية والمقاومات الأومية لملف الاستطاعة وملف التحكم فإننا نحصل على الدارة المكافئة المبسطة الموضحة في الشكل التالي والتي تسمى (BDFM Core Model) [11]:




**الشكل (3-9): BDFM Core Model.**

ونلاحظ أن الدارة المكافئة الأخيرة تشبه الدارة المكافئة للآلة التزامنية (ذات الدائر الأسطواني) بعد إهمال مقاومة الثابت. والاختلاف الرئيسي بينهما هو أن التهييج هنا في الآلة BDFM يتم عن طريق التوتر ( $V''_{C_2}.\frac{S_2}{S_1}$ ) المتحرض ضمن الآلة من خلال ملف التحكم عبر الدائر بدلاً من الحصول عليه من منبع DC خارجي كما هي الحال في الآلة التزامنية.

وبرسم المخطط الشعاعي للآلة BDFM بالاعتماد على الدارة المكافئة الأخيرة نحصل على الشكل التالي:




**الشكل (3-10): المخطط الشعاعي لتوترات طور واحد للآلة (BDFM).**

حيث تم اعتبار توتر ملف الاستطاعة $V_{c_1}$ كمرجع، وبالتالي نلاحظ أنه من خلال التحكم بتوتر ملف التحكم ( $V''_{C_2}.\frac{S_2}{S_1}$ ) يمكن التحكم بزاوية التحميل (δ) (Load angle) [12].

أي أن التحكم بتوتر ملف التحكم ( $V''_{C_2}.\frac{S_2}{S_1}$ ) له نفس التأثيرات الناتجة عن التحكم بملف التهييج في الآلة التزامنية التقليدية، وبالتالي إمكانية التحكم بتدفق الاستطاعة الردية (VArs) في الآلة (BDFM).

ولبيان مدى تأثير تغيير توتر ملف التحكم على انحراف السرعة عن السرعة الطبيعية سنقوم بالاستنتاج التالي انطلاقاً من المخطط الشعاعي للآلة (BDFM) الموضح بالشكل (3-10)، حيث نلاحظ أنَّ:

$$|V''_{c_2}| = \left| V_{c_1} \frac{s_1}{s_2} \right| \frac{\cos\phi}{\cos(\phi + \delta)} \quad \ldots\ldots \quad (12\text{-}3)$$

حيث:

$V''_{c_2}$ : قيمة توتر ملف التحكم منسوبة إلى ملف الاستطاعة.

فتكون القيمة الحقيقية لتوتر ملف التحكم هي:

$$|V_{c_2}| = \frac{n_2}{n_1}\left|V_{c_1}\frac{s_1}{s_2}\right|\frac{\cos\phi}{\cos(\phi+\delta)} \quad \ldots\ldots \quad (13\text{-}3)$$

ولدينا من العلاقة (3-9) أنَّ: $\frac{\omega_2}{\omega_1} = -\frac{S_1}{S_2}$

كما أنه من تعريف كل من السرعة الطبيعية ( $\omega_n$ ) للآلة (BDFM)، وسرعة دوران المحور للآلة (BDFM) في نمط التغذية المزدوجة ( $\omega_r$ )، نجد أنَّ:

$$\left.\begin{matrix}\omega_r = \frac{\omega_1+\omega_2}{p_1+p_2}\\ \omega_n = \frac{\omega_1}{P_1+P_2}\end{matrix}\right\} \Rightarrow \frac{\omega_r}{\omega_n} = 1+\frac{\omega_2}{\omega_1} \Rightarrow \frac{\omega_r}{\omega_n} = 1-\frac{S_1}{S_2} \Rightarrow \frac{S_1}{S_2} = (1-\frac{\omega_r}{\omega_n}) \quad \ldots\ldots \quad (14\text{-}3)$$

وبالتالي يمكن كتابة العلاقة (3-13) كتابع لنسبة انحراف سرعة الدوران عن السرعة الطبيعية بالشكل:

$$|V_{c_2}| = \frac{n_2}{n_1}|V_{c_1}|\left|1-\frac{\omega_r}{\omega_n}\right|\frac{\cos\phi}{\cos(\phi+\delta)} \quad \ldots\ldots \quad (15\text{-}3)$$

بالتدقيق في العلاقة الأخيرة نلاحظ مدى تأثير تغيير قيمة توتر ملف التحكم $(V_{C_2})$ على:

١- انحراف سرعة دوران المحور $(\omega_r)$ للآلة (BDFM) عن السرعة الطبيعية $(\omega_n)$.

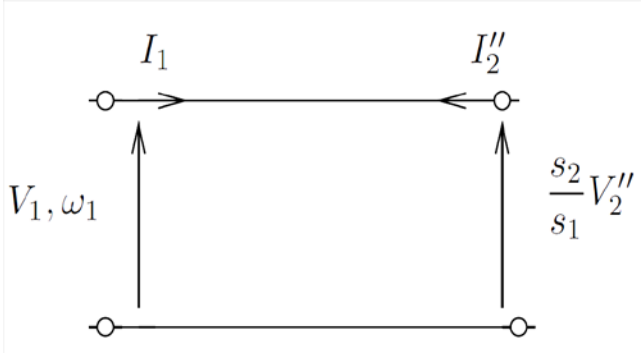
٢- تظهر هذه العلاقة كيفية التحكم بالتوتر $(V_{C_2})$ للحصول على زاوية التحميل $(\delta)$ المطلوبة.

٣- تأثير التوتر $(V_{C_2})$ على عامل استطاعة ملف الاستطاعة $(\cos\emptyset)$.

يمكن الحصول من الشكل ( 3-9) على معادلة المركبة التزامنية لعزم الآلة BDFM، والتي تعطى بالعلاقة:

$$T = \frac{3|V_1 V_2'' s_2|}{\omega_n|\omega_1 L_r' s_1|}\sin\delta \quad \ldots\ldots \quad (16\text{-}3)$$

ويظهر الشكل التالي الدارة المكافئة المثالية للآلة BDFM أي ( Ideal BDFM)، والتي تكون ممانعة الدائر فيها$(Z_r \approx 0)$.[12]




**الشكل (3-11): الدارة المكافئة المثالية للآلة BDFM.**

## ٣ ٤ ٢: استنتاج علاقة العزم للآلة (BDFM):

## Torque Equation for the (BDFM):

يمكننا الآن استنتاج علاقة العزم للآلة BDFM بالاعتماد على آلية تحول الطاقة الميكانيكية إلى كهربائية (على اعتبار عمل الآلة BDFM كمحرك). نعرِّف من الدارة المكافئة الموضحة بالشكل رقم (3-7) ما يلي:

$V_{r1}$، $V_{r2}$ : التوترات على طرفي المحارضات المغناطيسية لكلا ملفي فرعي التهييج لملفي الثابت.

وبتطبيق مبدأ توازن الاستطاعات نجد:

$$3\Re\{V_1 I_1^*\} + 3\frac{s_2}{s_1}\Re\{V_2'' I_2''^*\} = 3|I_1^2|R_1 + 3|I_r'^2|\frac{R_r'}{s_1} + 3|I_2''^2|R_2''\frac{s_2}{s_1} \quad (17-3)$$

$$3\Re\{V_1 I_1^*\} + 3\Re\{V_2'' I_2''^*\} = 3|I_1^2|R_1 + 3|I_r'^2|R_r' + 3|I_2''^2|R_2'' + \omega_r T \quad (18-3)$$

حيث أن:

T: العزم الدوراني الميكانيكي المقدم بواسطة الآلة، حيث يكون للعزم قيمة موجبة حالة العمل كمحرك.

من العلاقة (3-18) يمكن أن نعرِّف:

$P_{r_1}$ , $P_{r_2}$ : الاستطاعة المُسلَّمة إلى مرابط الدائر من ملفي الثابت في الآلة.

$$P_{r_1} \triangleq 3\Re\{V_{r_1} I_1^*\} = 3\Re\{V_1 I_1^*\} - 3|I_1^2|R_1 \quad (19-3)$$

$$P_{r_2} \triangleq 3\frac{s_1}{s_2}\Re\{V_{r_2} I_2''^*\} = 3\Re\{V_2'' I_2''^*\} - 3|I_2''^2|R_2'' \quad (20-3)$$

بطرح العلاقة (3-17) من (3-18)، نحصل على جزء الاستطاعة الذي لم يتبدد في مقاومات الدائر والثابت، وبمعنى آخر، الاستطاعة الكهرومغناطيسية التي تحولت إلى استطاعة ميكانيكية.

$$3\Re\{V_2'' I_2''^*\}\left(1-\frac{s_2}{s_1}\right) = 3|I_r'^2|R_r'\left(1-\frac{1}{s_1}\right) + 3|I_2''^2|R_2'\left(1-\frac{s_2}{s_1}\right) + \omega_r T \quad (21-3)$$

وبإعادة ترتيب العلاقة الأخيرة، وتعويض قيمة $P_{r_2}$ فيها نحصل على العلاقة التالية:

$$T = \frac{P_{r_2}}{\omega_r}\left(1-\frac{s_2}{s_1}\right) - \frac{3}{\omega_r}|I_r'^2|R_r'\left(1-\frac{1}{s_1}\right) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (22-3)$$

وبالرجوع إلى تعريف السرعة التزامنية للآلة BDFM حسب العلاقات السابقة وتعريف الانزلاق لكلا الملفين، يمكن ملاحظة أن سرعة الدائر ( $\omega_r$) يمكن كتابتها انطلاقاً من تعريف السرعة الطبيعية ($\omega_n$) بالشكل:

$$\omega_r = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right).\omega_n \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (23-3)$$

بتعويض العلاقة الأخيرة، وعلاقة $S_1$، وعلاقة $P_{r_2}$ في معادلة العزم، نجد أن:[9].

$$T = -\frac{3\Re\{V_{r_2} I_2''^*\}}{\omega_n} + 3|I_r'^2|R_r'\frac{p_1}{\omega_1 s_1} \quad \ldots. \quad (24-3)$$

## ٣ ـ٥: تصميم الدائر في الآلة (BDFM):

## Rotor Design For The (BDFM):

إن تصميم الجزء الدائر في الآلة (BDFM) هو الحلقة الأساسية في تشغيل الآلة BDFM بالشكل المطلوب.

فقد اقترح Lydell دوّار متميز يحتوي على ملفين، كما في الثابت، لكن هذا النموذج كان ذو مقاومة كبيرة وبالتالي ضياعات عالية. ومن ثم قام Hunt ببيان كيفية صنع ملف ذو مقاومة منخفضة بطريقة مبتكرة، لكن هذا الملف المقترح كان ذو تصميم خاص ومعقد وبالتالي باهظ الثمن لذلك لم يلقَ الإقبال التجاري المرجو. وبعدها قام Broadway و Burbridge باقتراح نموذجين لتصميم دائر الآلة (BDFM) وهما الدائر ذو الحلقات العُشيِّة (Nested Loop Design)، والدائر ذو الحلقة المتطور (Progressive Loop Design). وقد تم في الآونة الأخيرة تبني تصميم الدائر ذو الحلقات العُشيِّة (Nested Loop Design).

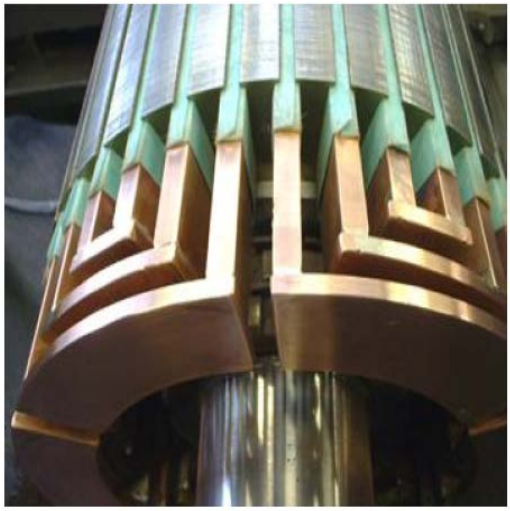
كل هذا الجهد في التصميم الخاص لدائر الآلة (BDFM) لكي يتمكن هذا الدائر الخاص من القيام بعملية التداخل غير المباشرة (Indirect Cross Coupling) بين الحقول الكهرومغناطيسية المتولدة عن ملفي الثابت عبره فقط.

يتكون دائر الآلة (BDFM) ذو التصميم (Nested Loop) من أعشاش (Nests)، ويحتوي كل عش على حلقات (Loops) مقصورة مع بعضها البعض بواسطة حلقة معدنية (End Ring). بحيث يكون مجموع الأعشاش في الدائر $P_r$ مساوياً إلى مجموع أزواج أقطاب ملفي الثابت.[18]

$$P_r = P_P + P_c. \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (25-3)$$

وتوضح الأشكال التالية التصميم الخاص لدائر الآلة (BDFM) و المسمى (Nested Loop)، حيث يظهر الشكل (3-12-أ) شكل الأعشاش (Nests) وكذلك الحلقات الموجودة في كل (Nest)، حيث نلاحظ وجود (Two Nests) في الدائر، وكل (Nest) مكون من ثلاث حلقات. بينما يوضح الشكل

(3-12- ب) شكل الحلقة المعدنية ( End Ring) التي يتم بواسطتها قصر الطرف الثاني للدائر الخاص للآلة (BDFM).

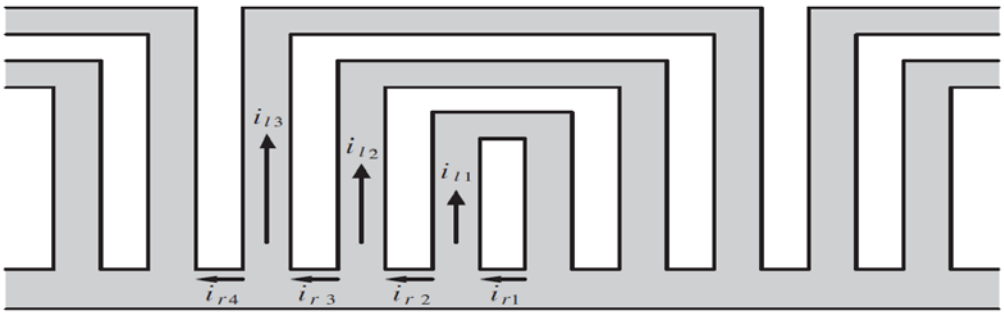


**الشكل (3-12-أ): دائر الآلة (BDFM) ذو التصميم (Nested Loop)، (الأعشاش – الحلقات).**



**الشكل (3-12- ب): دائر الآلة (BDFM) ذو التصميم (Nested Loop)، (الحلقة المعدنية).**

وبأخذ مقطع عرضي في الدائر يوضح كيفية جريان التيارات عبر أعشاش و حلقات الدائر (Nested Loop)، ومن ثم اجتماعها في الحلقة المعدنية للنهاية الثانية للدائر.

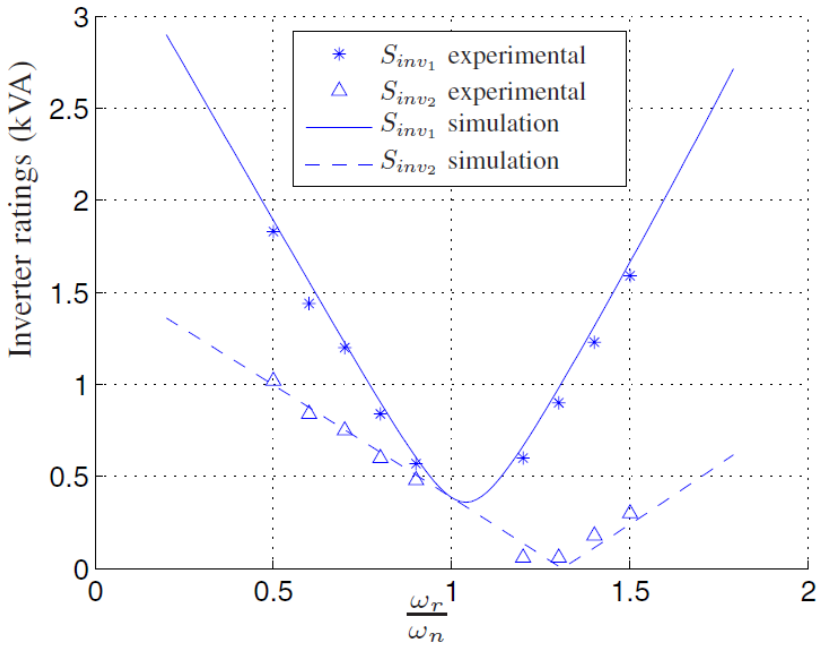



**الشكل (3-13): مقطع عرضي في دائر الآلة (BDFM) ذو التصميم (Nested Loop).**

## ٣-٦: المبدل الالكتروني الاستطاعي المستخدم مع الآلة (BDFM):

## Power Converter Issues:

إن مجال التغيير في توتر ملف التحكم يؤثر على القيمة الاسمية للمبدل الالكتروني الاستطاعي المربوط معه، كما ويؤثر على القيم الاسمية لملف التحكم نفسه. وكما ذكرنا فإن ملف التحكم يربط إلى الشبكة عبر مبدل الكتروني استطاعي ثنائي الاتجاه، حيث أن طرف المبدل الالكتروني من جهة الآلة يربط إلى ملف التحكم في الآلة. ويبيِّن المنحني البياني الموضح بالشكل ( 3-14) التالي استطاعة كلاً من طرفي المبدل الالكتروني كتابع لانحراف سرعة الدائر ($\omega_r$) عن السرعة الطبيعية ($\omega_n$) [17].




**الشكل (3-14): استطاعة كلا طرفي المبدل الالكتروني الاستطاعي المربوط مع ملف التحكم للآلة (BDFM).**

**$S_{inv1}$: استطاعة المبدل الالكتروني من طرف الآلة.**

**$S_{inv2}$: استطاعة المبدل الالكتروني من طرف خط النقل.**

## ٣ ٧: توازن الاستطاعات في الآلة (BDFM):

## Power Balancing in the (BDFM):

من الضروري معرفة مخطط تدفق الاستطاعة بين ملفات الثابت ودارة الدائر في الآلة BDFM وذلك لتحقيق فهم أفضل لعمل الآلة أثناء استخدامها عند سرعات مختلفة وأحمال متنوعة.[10]

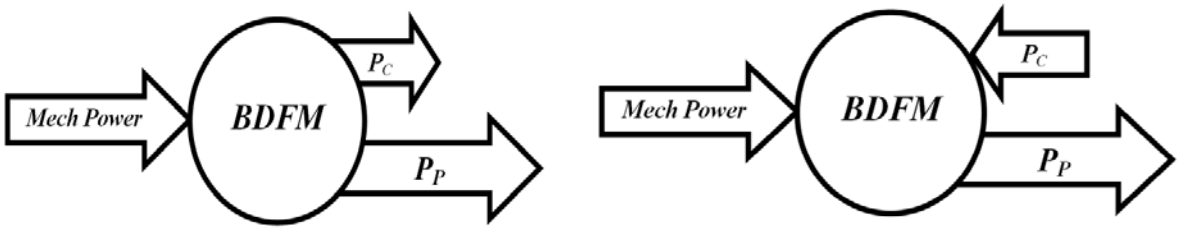
في الآلات التحريضية التقليدية والتي تتم تغذيتها من منبع تغذية وحيد، فإن تدفق الاستطاعة يكون بين الأجزاء الثابتة والدائرة عبر الثغرة الهوائية باتجاه واحد معطى لنمط تشغيل معين (محرك – مولد). "شكل مخطط تدفق الاستطاعة للآلة التحريضية التقليدية تم شرحه في الفصل ( 2)". أما في حالة الآلة BDFM فإن الاستطاعة التي تعبر الثغرة الهوائية ناتجة عن منبعين منفصلين عن بعضهما البعض، لذلك فإنه من الضروري القيام بتحليل إضافي لمعرفة مخطط تدفق الاستطاعة في الآلة BDFM بين الثابت والدائر. وتعتبر معرفة تدفق الاستطاعة هذه ذات قيمة عالية لأنها تفيد في عملية تصميم الآلة، بالإضافة إلى تحديد استطاعة المبدل الالكتروني اللازم استخدامه لتشغيل الآلة BDFM عند حمولة محددة، ومجال تغير سرعة معين.[10]

إنَّ مفهوم التغذية المزدوجة (كما هو واضح من كلمة التغذية المزدوجة) يعني إمكانية تدفق الاستطاعة عبر ملفين منفصلين، هذين الملفين المنفصلين في الآلة (BDFM) هما ملف الاستطاعة وملف التحكم.

يعتمد تدفق الاستطاعات في الآلة (BDFM) على عاملين اثنين هما:

- نمط تشغيل الآلة (محرك – مولد).
- السرعة التي تعمل عندها الآلة بالنسبة إلى السرعة التزامنية (Natural Speed).

في هذه الدراسة يتم التركيز على عمل الآلة (BDFM) كمولد لاستخدامها مع العنفات الريحية. يوضح الشكل (3-15) التالي تدفق الاستطاعة في الآلة (BDFM) حالة العمل كمولد، حيث يوضح أن الاستطاعة المقدمة للآلة (BDFM) هي استطاعة الميكانيكية ($P_{mech}$)، وتكون الاستطاعة الفعلية المولدة من الآلة والمحقونة في الشبكة هي حاصل جمع استطاعتي ملفي الثابت، وهما استطاعة ملف الاستطاعة $(\boldsymbol{P_p})$ واستطاعة ملف التحكم $(\boldsymbol{P_c})$ [12].




$\omega_r > \omega_n$ $\omega_r < \omega_n$

**الشكل (3-15): تدفق الاستطاعة في الآلة (BDFM) حالة العمل كمولد.**

كما هو موضح في الجدول التالي:

| الاستطاعة الكهربائية المتدفقة في الآلة (BDFM) (بإهمال الضياعات) | السرعة | | | |
|---|---|---|---|---|
| | تحت السرعة التزامنية | | فوق السرعة التزامنية | |
| | ملف الاستطاعة | ملف التحكم | ملف الاستطاعة | ملف التحكم |
| الآلة (BDFM) تعمل كمولد Generating | **OUT** | IN | **OUT** | OUT |

**الجدول (3-1): تدفق الاستطاعة في الآلة (BDFM) حالة العمل كمولد.**

## ٣ ٧ ٠: معادلات توازن الاستطاعة في الآلة (BDFM):

## Power Balance Equations:

تعطى معادلات الحالة الساكنة للآلة (BDFM) بالشكل التالي:

$$V_p = (r_p + j.\omega_p.L_p).I_p + j.\omega_p.M_{pr}.I_r \quad \ldots\ldots\ldots (26-3)$$

$$V_c^* = (r_c + j.\omega_c.L_c).I_c^* + j.\omega_c.M_{cr}.I_r \quad \ldots\ldots\ldots (27-3)$$

$$0 = j.\omega_S.M_{pr}.I_p + j.\omega_S.M_{cr}.I_c^* + (r_r + j.\omega_s.L_r).I_r. \quad \ldots\ldots\ldots (28-3)$$

$$T_{em} = Re[P_p.M_{pr}.j(I_p^*.I_r)] - Re[P_c.M_{cr}.j(.I_c.I_r)] \quad \ldots\ldots\ldots (29-3)$$

انطلاقاً من معادلات الحالة الساكنة، وبافتراض ما يلي:

- مجال السرعة المنخفضة: هو مجال السرعة الأدنى من السرعة التزامنية الاسمية للآلة BDFM.
- مجال السرعة العابرة: هو مجال السرعة الأعلى من السرعة التزامنية الاسمية للآلة BDFM، والأدنى من السرعة التزامنية لحقل ملف الاستطاعة.
- مجال السرعة المرتفعة: هو مجال السرعة الأعلى من السرعة التزامنية لحقل ملف الاستطاعة.
- إهمال كافة الضياعات عدا الضياعات النحاسية في الآلة.

بضرب العلاقة (3−26) بـ $(I_p^*)$، وضرب العلاقة (3−27) بـ $(I_c)$، وضرب العلاقة (3−28) بـ $(I_r^*)$، وضرب العلاقة (3−29) بـ $(\omega_r)$. نحصل على مجموعة المعادلات التالية:

$$Re(V_p.I_p^*) = r_p.i_p^2 + Re(j.\omega_p.M_{pr}.I_p^*.I_r) \quad \ldots\ldots\ldots (30-3)$$

$$Re(V_c^*.I_c) = r_c.i_c^2 + Re(j.\omega_c.M_{cr}.I_c.I_r) \quad \ldots\ldots\ldots (31-3)$$

$$0 = Re(j.\omega_p.M_{pr}.I_p.I_r^*) + \frac{1}{S}.Re(j.\omega_c.M_{cr}.I_c^*.I_r^*) + \frac{r_r}{S_p}.i_r^2 \quad \ldots\ldots\ldots (32-3)$$

$$P_{mech} = Re(j.P_p.M_{pr}.\omega_p.\omega_r I_p^*.I_r) - Re(j.P_c.M_{cr}.\omega_c.\omega_r.I_c.I_r). \quad \ldots\ldots\ldots (33-3)$$

باستخدام مفهوم استطاعة الدخل، الضياعات النحاسية، استطاعة الثغرة الهوائية، واستطاعة الانزلاق، نحصل على معادلات توازن الاستطاعة عند السرعات المختلفة، والتي يعبر عنها بالشكل التالي:

Low-Speed Range:

$$\begin{aligned} P_p &= P_{pl} + P_{p_{(ag)}}. \\ P_c &= P_{cl} + P_{c_{(ag)}}. \\ P_{rl} &= |S_p|.P_{p_{(ag)}} - S_c.P_{c_{(ag)}}. \\ P_{mech} &= (1-|S_p|).P_{p_{(ag)}} - (1-S_c).P_{c_{(ag)}}. \end{aligned} \quad \ldots\ldots\ldots (34-3)$$

Transition-Speed Range:

$$\begin{aligned} P_p &= P_{pl} + P_{p_{(ag)}}. \\ P_c &= P_{cl} + P_{c_{(ag)}}. \\ P_{rl} &= |S_p|.P_{p_{(ag)}} - S_c.P_{c_{(ag)}}. \\ P_{mech} &= (1-|S_p|).P_{p_{(ag)}} + (1+S_c).P_{c_{(ag)}}. \end{aligned} \quad \ldots\ldots\ldots (35-3)$$

High-Speed Range:

$$\begin{aligned} P_p &= P_{pl} + P_{p_{(ag)}}. \\ P_c &= P_{cl} + P_{c_{(ag)}}. \\ P_{rl} &= -|S_p|.P_{p_{(ag)}} + S_c.P_{c_{(ag)}}. \\ P_{mech} &= (1+|S_p|).P_{p_{(ag)}} + (1-S_c).P_{c_{(ag)}}. \end{aligned} \quad \ldots\ldots\ldots (36-3)$$

حيث أن:

$P_p = Re\{V_p.I_p^*\}$: الاستطاعة الكهربائية لملف الاستطاعة.

$P_{pl} = r_p.i_p^2$: الضياعات النحاسية في ملف الاستطاعة.

$P_{p_{(ag)}} = Re\,(j.\omega_p.M_{pr}.I_p^*.I_r)$: استطاعة الثغرة الهوائية الناتجة عن ملف الاستطاعة.

$P_C = Re\,\{V_c.I_c^*\} = Re\,\{V_c^*.I_c\}$: الاستطاعة الكهربائية لملف التحكم.

$P_{cl} = r_c.i_c^2$: الضياعات النحاسية في ملف التحكم.

$P_{c_{(ag)}} = Re\,(j.\omega_c.M_{cr}.I_c.I_r)$: استطاعة الثغرة الهوائية الناتجة عن ملف التحكم.

$P_{rl} = r_r.i_r^2$: الضياعات النحاسية في ملف الدائر.

$S_p = \frac{\omega_s}{\omega_p}$ : الانزلاق نسبة إلى حقل ملف الاستطاعة.

$S_C = \frac{|\omega_s|}{\omega_C}$ : الانزلاق نسبة إلى حقل ملف التحكم.

$S = \frac{S_P}{S_C} = \frac{\omega_c}{\omega_P}$ : الانزلاق الكلي في الآلة.

وبوضع جملة المعادلات (LOW) و (HIGH) التي حصلنا عليها ضمن مجموعة واحدة، نحصل على مجموعة من المعادلات التي تمثل توازن الاستطاعة في الآلة (BDFM)، في حالة تشغيل الآلة (BDFM) كمولد أو كمحرك، عند سرعة أعلى أو أدنى من السرعة التزامنية. وتعطى بالشكل التالي:

$$\begin{aligned} &P_p = P_{pl} + P_{p_{(ag)}}. \\ &P_c = P_{cl} + P_{c_{(ag)}}. \\ &P_{rl} = S_p.P_{p_{(ag)}} \mp S_c.P_{c_{(ag)}}. \\ &P_{mec\,h} = (1-S_p).P_{p_{(ag)}} \mp (1-S_c).P_{c_{(ag)}}. \end{aligned} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (37-3)$$

تمثل الإشارة السالبة حالة تشغيل الآلة عند سرعة أدنى من السرعة التزامنية الاسمية (السرعة الطبيعية) للآلة، بينما تمثل الإشارة الموجبة حالة تشغيل الآلة عند سرعة أعلى من السرعة التزامنية الاسمية (السرعة الطبيعية) للآلة.

وكما نعلم فإن معادلة توازن الاستطاعة في الآلة التحريضية التقليدية، بإهمال الضياعات، تعطى بالشكل:

$$\begin{aligned} &P_{sl} = S_{induction}\,.P_g. \\ &P_{mec\,h} = (1-S_{induction}).P_g. \end{aligned} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (38-3)$$

حيث أن:

$P_{sl}$: استطاعة الانزلاق في الآ لة (وهي الضياعات النحاسية في الدائر وتسمى باستطاعة الانزلاق لأنها تتناسب مع الانزلاق).

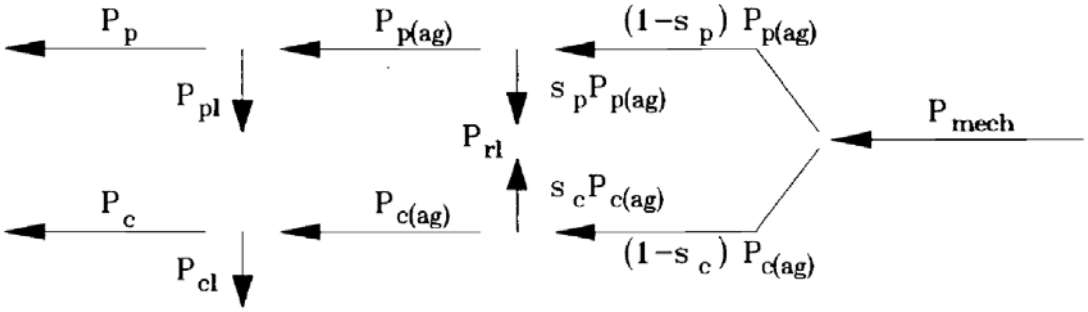
$P_g$ : استطاعة الثغرة الهوائية (الاستطاعة الكهرومغناطيسية المنتقلة بين الثابت والدائر في الآ لة عبر الثغرة الهوائية).

$P_{mec\,h}$ :استطاعة خرج الآلة التحريضية.

$S_{induction}$ : الانزلاق في الآلة التحريضية التقليدية.

وبمقارنة معادلات توازن الاستطاعة للآلة (BDFM) المعطاة بالعلاقات (3−37) وبين معادلات توازن الاستطاعة للآلة التحريضية التقليدية المعطاة بالعلاقات ( 3−38)، نجد أن الاستطاعة في الآلة (BDFM) تتدفق إلى الثغرة الهوائية عبر ملفي الثابت ( ملف الاستطاعة وملف التحكم )، بينما تكون ذات مصدر وحيد في الآلة التحريضية التقليدية.

وتوضح الأشكال التالية مخطط تدفق الاستطاعة في الآلة (BDFM) في حالة العمل كمولد عند مجال سرعة أعلى من السرعة التزامنية [10].




**الشكل (3−16): مخطط تدفق الاستطاعة في الآلة (BDFM) في حالة العمل كمولد عند مجال سرعة أعلى من السرعة التزامنية.**

## ٣ ٧ ٢: العلاقة بين تدفق الاستطاعات في ملفي الثابت وبين انحراف سرعة دوران المحور عن السرعة الطبيعية في الآلة (BDFM):

إنَّ الاستطاعة المتدفقة عبر ملف التحكم ( $P_c$) ترتبط باستطاعة ملف الاستطاعة ( $P_p$) وفق نسبة انحراف سرعة الدوران عن السرعة الطبيعية كما توضح العلاقات التالية:

$$P_p = 3.\mathrm{Re}\{V_1.I_1^*\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (39-3)$$

$$P_c = 3.\mathrm{Re}\{V_2''.I_2''^*\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (40-3)$$

ولدينا من الدارة المكافئة الشكل (3−9):

$$\frac{S_2}{S_1}.V_2'' = V_1 - J.\omega_1.L_r'.I_1 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (41-3)$$

$$\Rightarrow V_2'' = \frac{S_1}{S_2}.(V_1 - J.\omega_1.L_r'.I_1) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (42-3)$$

وبضرب طرفي العلاقة الأخيرة بـ ($3.I_2''^*$)، وأخذ القسم الحقيقي نجد:

$$P_c = -3.\frac{S_1}{S_2}.\mathrm{Re}\{V_1.I_1^* - J.\omega_1.L_r'.I_1.I_1^*\} \quad \ldots\ldots \quad (43-3)$$

حيث أنَّ: ($I_1^* = -I_2''^*$)، و ($\mathrm{Re}\{J.\omega_1.L_r'.I_1.I_1^*\} = 0$)، وبالتالي نجد:

$$\Rightarrow P_c = -3.\frac{S_1}{S_2}.\mathrm{Re}\{V_1.I_1^*\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (44-3)$$

$$\Rightarrow P_c = -\frac{S_1}{S_2}.P_p \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (45-3)$$

ولدينا من العلاقة (3−9) أنَّ: $\frac{\omega_1}{\omega_2} = -\frac{S_2}{S_1}$

وبالتالي يمكن كتابة العلاقة (3−45) بالشكل:

$$P_c = \frac{\omega_2}{\omega_1}. P_p \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (46-3)$$

كما أنه من تعريف كل من السرعة الطبيعية ( $\omega_n$) للآلة (BDFM)، وسرعة دوران المحور للآلة (BDFM) في نمط التغذية المزدوجة ( $\omega_r$)، نجد أنَّ:

$$\left.\begin{matrix}\omega_r = \frac{\omega_1+\omega_2}{p_1+p_2} \\ \omega_n = \frac{\omega_1}{P_1+P_2}\end{matrix}\right\} \Rightarrow \frac{\omega_r}{\omega_n} = 1 + \frac{\omega_2}{\omega_1} \Rightarrow \frac{\omega_2}{\omega_1} = (\frac{\omega_r}{\omega_n} - 1) \quad \ldots \quad (47-3)$$

وبالتالي يمكن كتابة الاستطاعة المتدفقة عبر ملف التحكم ( $P_c$) بدلالة استطاعة ملف الاستطاعة ($P_p$) كنسبة لانحراف سرعة الدوران عن السرعة الطبيعية وفق أحد الأشكال التالية:

$$\Rightarrow P_c = -\frac{S_1}{S_2}. P_p = \frac{\omega_2}{\omega_1}. P_p = (\frac{\omega_r}{\omega_n} - 1). P_p \quad \cdots \quad (48-3)$$

وبالتالي كلما ازداد انحراف سرعة دوران المحور عن السرعة التزامنية للآلة (BDFM) كلما ازدادت الاستطاعة المتدفقة عبر ملف التحكم ($P_c$)، مما يعني ازدياد استطاعة المبدل الالكتروني المربوط مع ملف التحكم ، وهذا هو معنى أن استطاعة المبدل الالكتروني مرتبطة بمجال تغير السرعة المطلوب.[12]

## ٣ ـ٨: أكثر التطبيقات انتشارا للآلة (BDFM):

## Potential Applications For The BDFM:

تستخدم الآلة (BDFM) بشكل خاص في ال تطبيقات التي تحتاج إلى العمل عند سرعات متغيرة (variable speed drive)، وذلك في حالتي العمل كمولد أو كمحرك:

- في حالة العمل كمولد: تستخدم الآلة (BDFM) كمولد بشكل خاص في الأنظمة الريحية التي تعمل عند سرعات متغيرة ((variable speed generation (VSG)، وذلك بسبب إمكانية التوليد عند مجال سرعات أعلى أو أدنى من السرعة التزامنية للآلة، وكذلك بسبب الاستطاعة الجزئية للمبدل الالكتروني المستخدم معه، إضافة إلى عامل استطاع ته المرتفع، وعدم حاج ته إلى المسفرات (صيانة منخفضة)، وتستخدم الآلة (BDFM) بشكل خاص في العنفات الريحية المتوضعة في البحر ( Off-shore Wind Turbine )، حيث تكون تكاليف الصيانة مرتفعة.

❖ في حالة العمل كمحرك: استخدامه في الـ Pump Drives، والذي يشجع على ذلك هو عزم الإقلاع المنخفض للأحمال السائلة ، إضافة إلى ا نخفاض استطاعة المبدل اللازم بسبب المجال الصغير لتغير السرعة، حيث أن استطاعة المبدل الالكتروني المطلوب كما ذكرنا تعتمد على مجال تغير السرعة المطلوب [9].

## ٣ ٩: ميزات ومساوئ الآلة (BDFM):

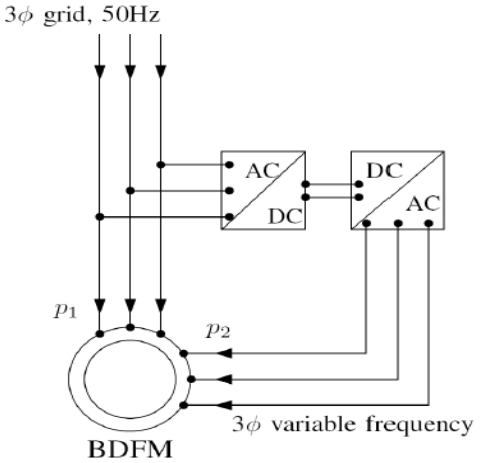
## Advantages And Disadvantages Of The BDFM:

### ٣ ٩ ١: ميزات الآلة (BDFM):

### Advantages Of The BDFM:

١ -انخفاض استطاعة المبدل الالكتروني الاستطاعي ثنائي الاتجاه ( Inverter - Converter) المستخدم إلى حوالي (30%) فقط من الاستطاعة الكلية للآلة. وبالتالي:

- انخفاض الكلفة التأسيسية للنظام بسبب انخفاض تكلفة المبدل الالكتروني.
- انخفاض الضياعات في المبدل الالكتروني المستخدم مع الآلة ( BDFM) مقارنة مع الضياعات الناتجة عن مبدل الكتروني استطاعته من رتبة الاستطاعة الكلية للآلة.
- انخفاض تلوث التوافقيات الناتجة عن المبدل الالكتروني بسبب انخفاض استطاعته ، وكذلك انخفاض تكلفة المرشح ( Filter) المستخدم للتخلص من التوافقيات بسبب انخفاض استطاعة المرشح المربوط مع هذا المبدل الالكتروني الاستطاعي.[20],[2]




٢ -التخلص من المسفرات في دائر الآلة ( BDFM) والذي يكون من نوع الدائر ذو القفص السنجابي بتصميمه الخاص (Nested _ Loop)، وبالتالي:

- انخفاض الحاجة لعمليات الصيانة الدورية، مما ينعكس على انخفاض تكاليف الصيانة الدورية، والتي عادة ما تكون مرتفعة وخاصة إذا كانت العنفات الريحية مركبة في عرض البحر (Off – Shore).
- استثمار أفضل للعنفة الريحية، حيث تزداد فترة تشغيل العنفة الريحية بسبب انخفاض أزمنة التعطل والصيانة لعدم وجود المسفرات، وبالتالي مردود أعلى.

٣ –إمكانية التوليد عند مجال سرعات أعلى أو أدنى من السرعة التزامنية للآلة، وذلك من خلال التحكم بملف التحكم في الآلة.

٤ –إمكانية التحكم بعامل استطاعة الآلة (BDFM) " الاستطاعة الردية المستهلكة في الآلة "، وذلك عن طريق التحكم بملف التحكم في الآلة.

٥ –عند تشغيل الآلة في النمط التزامني، فإنها تمتلك مواصفات الآلة التزامنية، من حيث:

- إمكانية التحكم بالاستطاعتين الردية والفعلية.
- عدم تأثر سرعة دوران الآلة بالعزم الميكانيكي المطبق على محور الآلة.

٦ –تتميز الآلة (BDFM) ذات الدائر من نوع القفص السنجابي بمتانتها العالية، ووثوقيتها المرتفعة، بالإضافة إلى تحملها لدرجات حرارة أعلى مقارنة مع الآلة ذات الدائر الملفوف المستخدم في الآلة (DFIG) الحساس لارتفاع درجات الحرارة.

٧ –إمكانية تشغيل الآلة (BDFM) كآلة تحريضية تقليدية، ويتم ذلك باستخدام ملف الاستطاعة فقط، في حال فشل عمل نظام المبدل الالكتروني الاستطاعي [20].

## ٣ ٩ ٢: مساوئ الآلة (BDFM):

## Disadvantages of the BDFM:

١ –صعوبة وتعقيد تصميم الجزء الدائر ذو القفص السنجابي بتصميمه الخاص (Nested_Loop) وبالتالي ارتفاع تكاليفه [35].

٢ –ازدياد حجم الآلة BDFM مقارنة مع آلة تحريضية تقليدية لها نفس الاستطاعة [15].

# ثانياً : الجزء العملي

# Secondly
# Practical section

# الفصل الرابع

# Forth Chapter

## نمذجة ومحاكاة العنفة الريحية باستخدام بيئة الـ Matlab/Simulink.

**Modulation And Simulation Of Wind Turbine By Using Matlab/Simulink Environment.**

## المقدمة:

## *Introduction:*

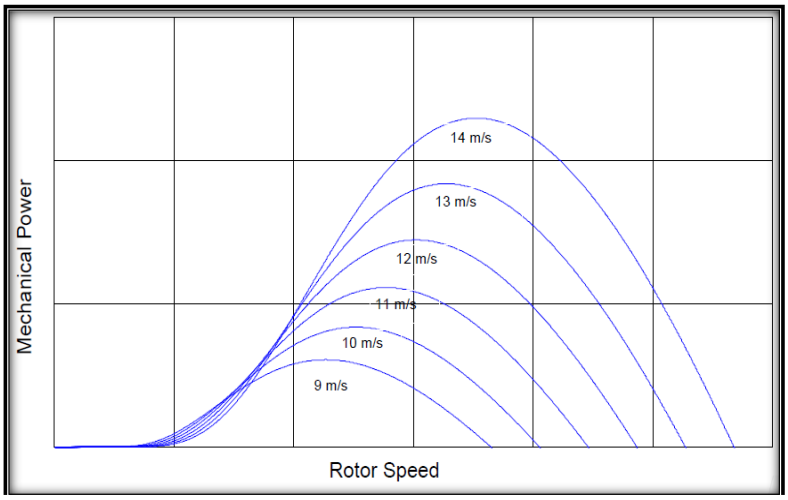
سيتم في هذ الفصل التعرف إلى الخصائص الميكانيكية للعنفة الريحية، ووضع النموذج الرياضي لها. وبعدها ستتم نمذجة العنفة الريحية ووضع المخطط الصندوقي لها باستخدام بيئة الـ *Matlab/Simulink*، والحصول على المنحنيات المميزة لهذه العنفة. ومن ثم سيتم إجراء اختبارات لدراسة تأثير كل من زاوية ميلان الشفرات $\beta$ وسرعة الرياح على هذه المنحنيات. وأخيراً الحصول على منحني نقاط القيمة العظمى للاستطاعة الكهربائية المستخلصة من الرياح (منحني نقاط الاستطاعة العظمى) (*Maximum Power Point "MPP" Curve*) من خلال النمذجة في برنامج الماتلاب.

## ٤ ـ ٢: الخصائص الميكانيكية للعنفة الريحية:

## Mechanical Characteristics of Wind Turbine:

وهي المنحنيات التي تصف عمل العنفة الريحية وتعطي استطاعة خرج العنفة أو عزمها الدوراني كتابع لسرعة دورانها من أجل سرعات رياح مختلفة.

يبين الشكل (4-1) الخصائص الميكانيكية لعنفة ريحية مثالية، حيث يظهر الشكل الاستطاعة الميكانيكية المقدمة على محور العنفة $P_{mech}$ كتابع لسرعة دورانها عند سرعات رياح مختلفة وزاوية انحراف ثابتة ($\beta=0$).[6]




**الشكل (4-1): الخصائص الميكانيكية المثالية لعنفة ريحية عند سرعات رياح مختلفة وزاوية انحراف ثابتة *($\beta=0$)*.**

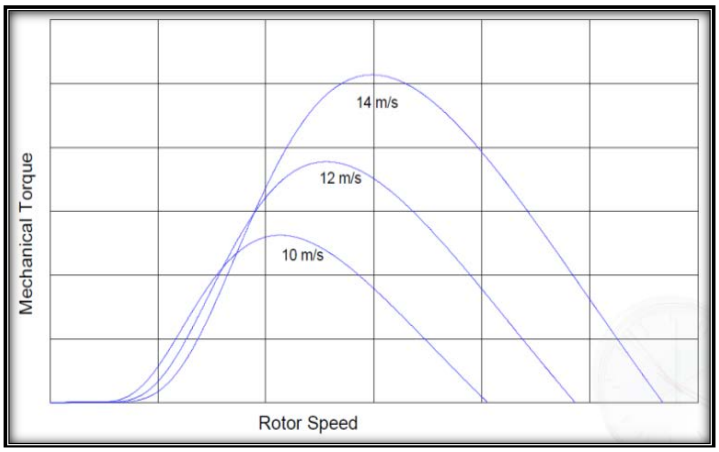
ويمكن الحصول على منحنيات العزم الدوراني المبينة بالشكل ( 4-2) كتابع لسرعة دوران دائر العنفة الريحية من أجل سرعات رياح مختلفة، وذلك بالاعتماد على العلاقة التالية [6]:

$$T_{mec\,h} = \frac{P_R}{\omega_R}. \qquad (1-4)$$

حيث أن: $T_{mec\,h}$: العزم الميكانيكي لدائرالعنفة.

$\omega_R$: السرعة الزاوية لدائرالعنفة.

$P_R$: الاستطاعة الميكانيكية لدائر العنفة.




**الشكل (4-2):منحنيات (العزم – السرعة) لعنفة ريحية عند سرعات رياح مختلفة.**

## ٤ ٢: النموذج الرياضي للعنفة الريحية:

# Mathematics Model Of Wind Turbine:

إن المعادلة الرياضية الأساسية التي تصف حركة العنفة الريحية هي معادلة الحركة الدورانية:

$$J_T \cdot \frac{d\omega_T}{dt} = T_T - T_{mec\,h} \qquad (2-4)$$

لكن استنتاج نموذج رياضي دقيق يصف العنفة الريحية بالاعتماد على العلاقة المستنتجة من نظرية عنصر الريشة ( *Blade Element Theory*) عمل صعب ومعقد للغاية نظراً لارتباط العزم المحرك بعوامل آيروديناميكية كثيرة وبعلاقات معقدة لذلك سنقوم ببناء نموذج رياضي يصف عزم العنفة بدلالة الاستطاعة التي تمتصها من الرياح والتي تعطى كما وجدنا بالعلاقة التالية:

$$P_{mec\,h} = \frac{1}{2}.\rho.C_p.A_{rotor}.V_{wind}^3$$

بالنسبة لمعامل الأداء $Cp$ يمكن وصفه بمجموعة التوابع الرياضية التالية التي تم وضعها تجريبياً:

$$C_p = C_1.\left(C_2.\frac{1}{\lambda_i} - C_3.\beta - C_4.\beta^{\chi} - C_5\right).e^{\frac{C_6}{\lambda_i}}. \qquad (3-4)$$

وتعطى $(\frac{1}{\lambda_i})$ بالعلاقة التالية:

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda+0.08*\beta} - \frac{0.035}{1+\beta^3} \qquad (4-4)$$

حيث أن: $\beta$: زاوية ميل الريش عن مستوى الدوران.

$\lambda$: السرعة النسبية لطرف الريشة.

وتعطى $\lambda$ كما وجدنا بالعلاقة التالية:

$$\lambda = \frac{R_{rotor} \cdot W_r}{V_{wind}}$$

## ٤ ٣: مواصفات العنفة الريحية التي ستتم نمذجتها:

## Features Of The Simulated Wind Turbine:

إن العلاقة (4−3) هي علاقة عامة تصف كافة العنفات الريحية، فهي تعطي قيمة معامل الأداء عند قيم مختلفة لـ λ ومن أجل جميع زوايا ميلان الريش β عن مستوي الدوران.

لوصف عنفة ريحية محددة يجب إعطاء ثوابت العلاقة ( 4−3) القيم الخاصة بتلك العنفة حيث تتعلق هذه الثوابت بالتصميم الآيروديناميكي لريش العنفة.

وباختيار قيم هذه الثوابت على الشكل التالي بحيث تمثل العنفة التي سأقوم بنمذجتها [5]:

$c_1$=0,5. $c_3$=0,4. $c_5$=5.
$c_2$=116. $c_4$=0. $c_6$=21.

تصبح العلاقة (4−3) بالشكل:

$$C_p = 0.5 * \left(116 * \frac{1}{\lambda_i} - 0.4 * \beta - 0 * \beta^{\chi} - 5\right) . e^{\frac{21}{\lambda_i}}. \qquad (5-4)$$

وبالتالي يمكن الحصول على منحنيات $Cp - \lambda$ عند سرعة رياح معينة وزاوية ميلان للريش $\beta$ محددة.

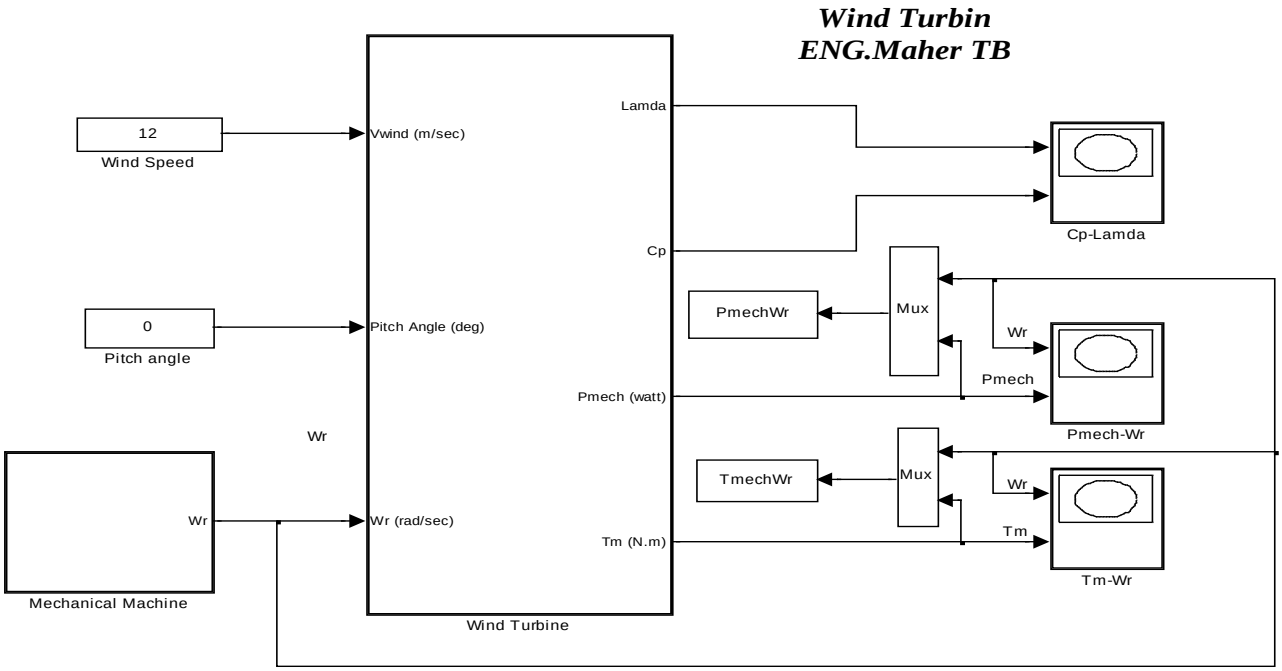
وفيما يلي مواصفات العنفة الريحية التي ستتم نمذجتها [5]:

| Wind Turbine data: | |
|---|---|
| الكتلة الحجميّة للهواء (كثافة الهواء): | $\rho$.= 1.225;[kg/m$^3$]. |
| طول الشفرة (نصف قطر دوار العنفة الريحية): | Rr_turine=23.5;[m]. |

## ٤ ٤: المخطط الصندوقي للعنفة الريحية في بيئة الـ Matlab/Simulink:

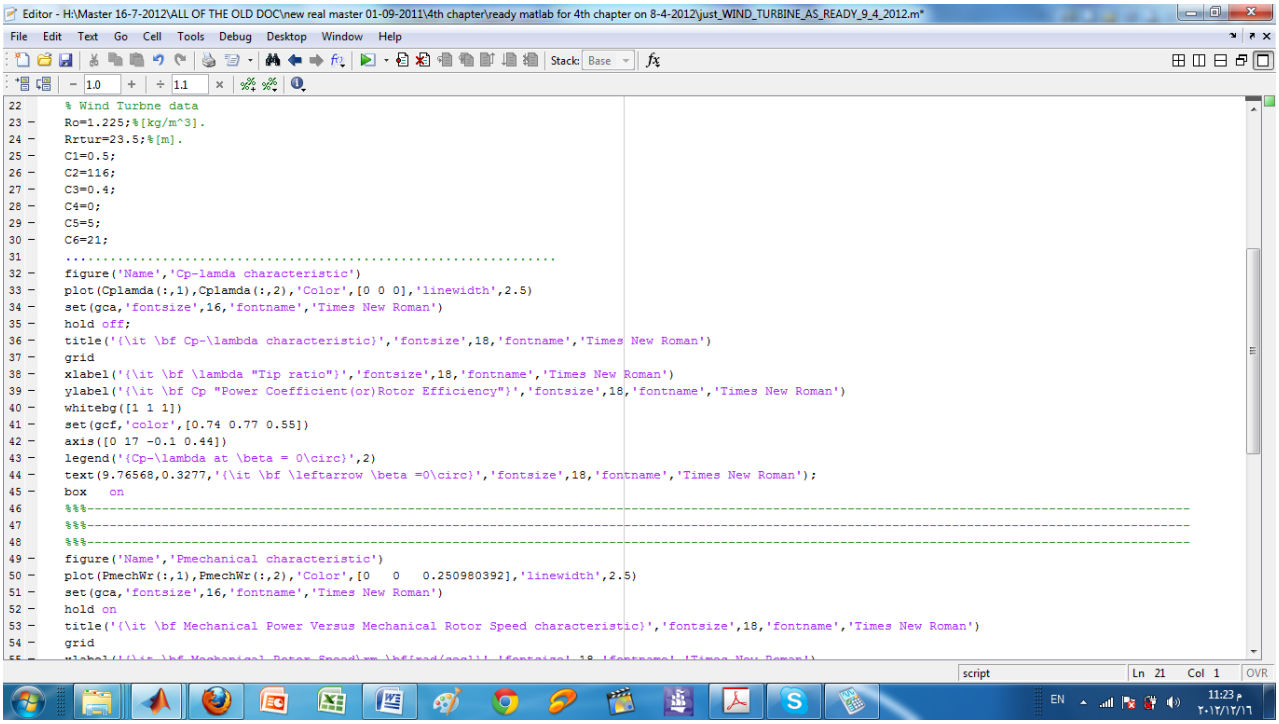
## Block Diagrame For Wind Turbine In Matlab/Simulink Environment:

بعد وضع النموذج الرياضي للعنفة الريحية، أصبح الآن بالإمكان نمذجتها باستخدام بيئة الـ *Matlab/Simulink*، وذلك بالاعتماد على العلاقات ( 1−15) ، ( 1−18) ، ( 4−1) ، ( 4−4) ، (4−5) السابقة. فنحصل على المخطط الصندوقي التالي:




**الشكل (4-3): المخطط الصندوقي للعنفة الريحية تعمل عند سرعة رياح معينة وزاوية ميلان محددة**

والشكل التالي يظهر ملف المعطيات المستخدم في النمذجة والمسمى بـ ( M-file)، حيث تم فيه إدخال مواصفات العنفة الريحية المستخدمة:

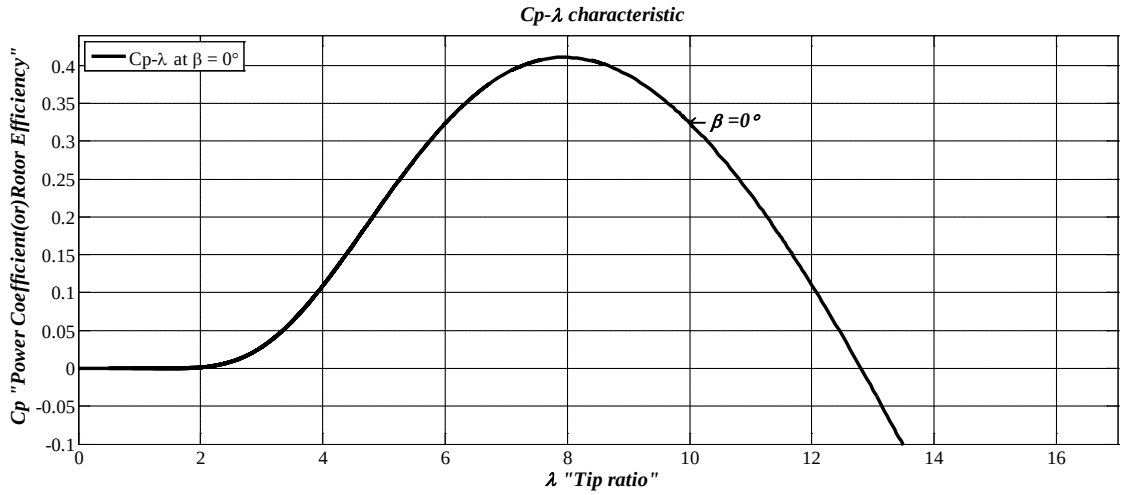


```
% Wind Turbne data
Ro=1.225;%[kg/m^3].
Rrtur=23.5;%[m].
C1=0.5;
C2=116;
C3=0.4;
C4=0;
C5=5;
C6=21;
.....
figure('Name','Cp-lamda characteristic')
plot(Cplamda(:,1),Cplamda(:,2),'Color',[0 0 0],'linewidth',2.5)
set(gca,'fontsize',16,'fontname','Times New Roman')
hold off;
title('{\it \bf Cp-\lambda characteristic}','fontsize',18,'fontname','Times New Roman')
grid
xlabel('{\it \bf \lambda "Tip ratio"}','fontsize',18,'fontname','Times New Roman')
ylabel('{\it \bf Cp "Power Coefficient(or)Rotor Efficiency"}','fontsize',18,'fontname','Times New Roman')
whitebg([1 1 1])
set(gcf,'color',[0.74 0.77 0.55])
axis([0 17 -0.1 0.44])
legend('{Cp-\lambda at \beta = 0\circ}',2)
text(9.76568,0.3277,'{\it \bf \leftarrow \beta =0\circ}','fontsize',18,'fontname','Times New Roman');
box   on
%%%----------
%%%----------
%%%----------
figure('Name','Pmechanical characteristic')
plot(PmechWr(:,1),PmechWr(:,2),'Color',[0   0   0.250980392],'linewidth',2.5)
set(gca,'fontsize',16,'fontname','Times New Roman')
hold on
title('{\it \bf Mechanical Power Versus Mechanical Rotor Speed characteristic}','fontsize',18,'fontname','Times New Roman')
grid
```

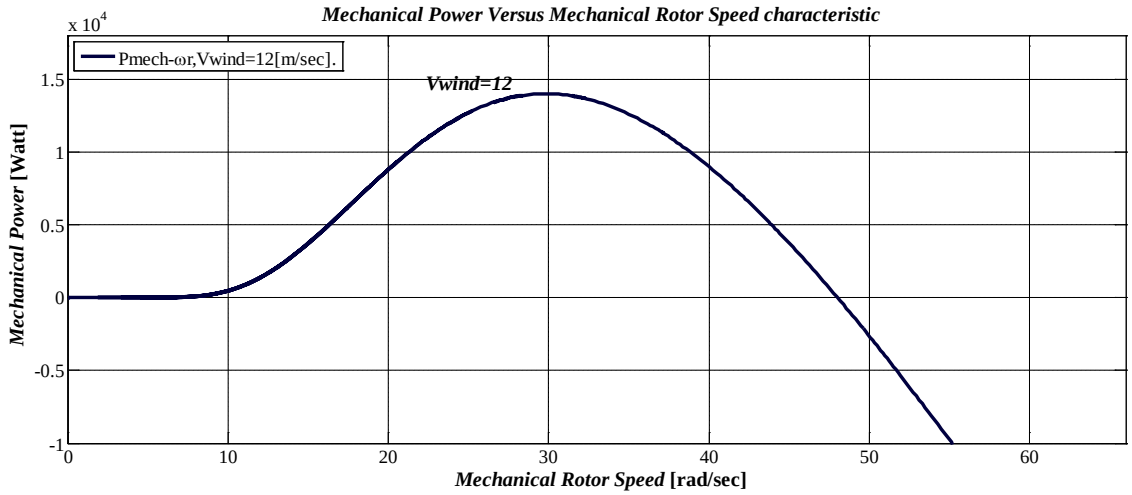
**الشكل (4-4): ملف الـ (M-file) المستخدم في النمذجة، وتم فيه إدخال مواصفات العنفة الريحية المنمذجة.**

و تظهر الأشكال التالية نتائج النمذجة للعنفة الريحية والمتمثلة بمنحنيات $C_p - \lambda$، منحنيات الخصائص الميكانيكية للعنفة ( $P_{mechanicl} - \omega_r$) أو ($T_{mechanicl} - \omega_r$)، وذلك عند زاوية ميلان $\beta$

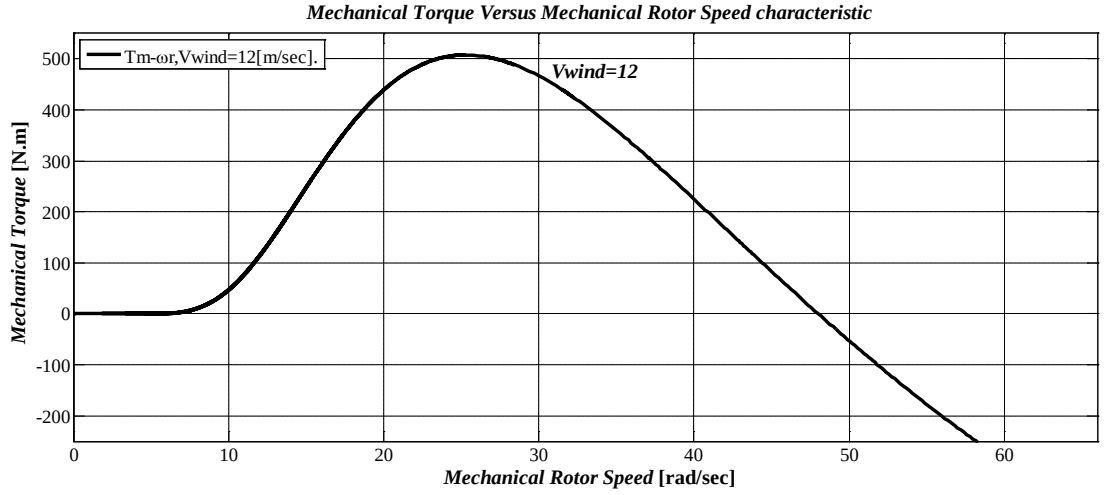
معطاة للريش ولتكن ($\beta=0^o$) وسرعة رياح معطاة ولتكن (Wind Speed =12 [m/sec]).




**الشكل (4-5): منحني ($C_p - \lambda$)، عند ($\beta=0^o$) ، (*Wind Speed =12 [m/sec]*).**




**الشكل (4-6): منحني ($P_{mechanicl} - \omega_r$) ،عند ($\beta=0^o$) ، (Wind Speed =12 [m/sec]).**




**الشكل (4-7): منحني ($T_{mechanicl} - \omega_r$) ،عند ($\beta=0^o$) ، (Wind Speed =12 [m/sec]).**

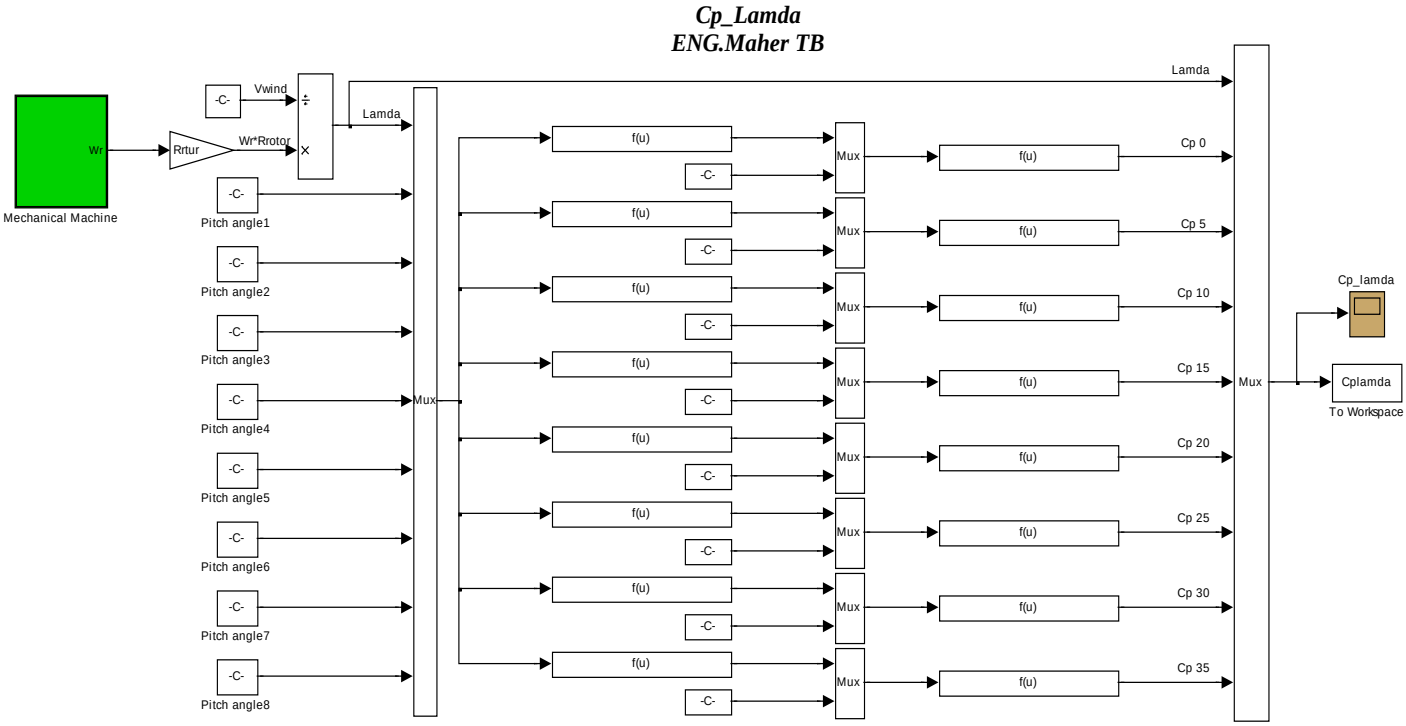
# ٤ ـ: دراسات و نتائج مستخلصة من نمذجة العنفة الريحية:

# Studies And Conclusions From The Simulation Of The Wind Turbine:

## ٤ ـ ٢: دراسة تأثير تغير زاوية ميلان الشفرات $\beta$ على منحنيات $Cp - \lambda$:

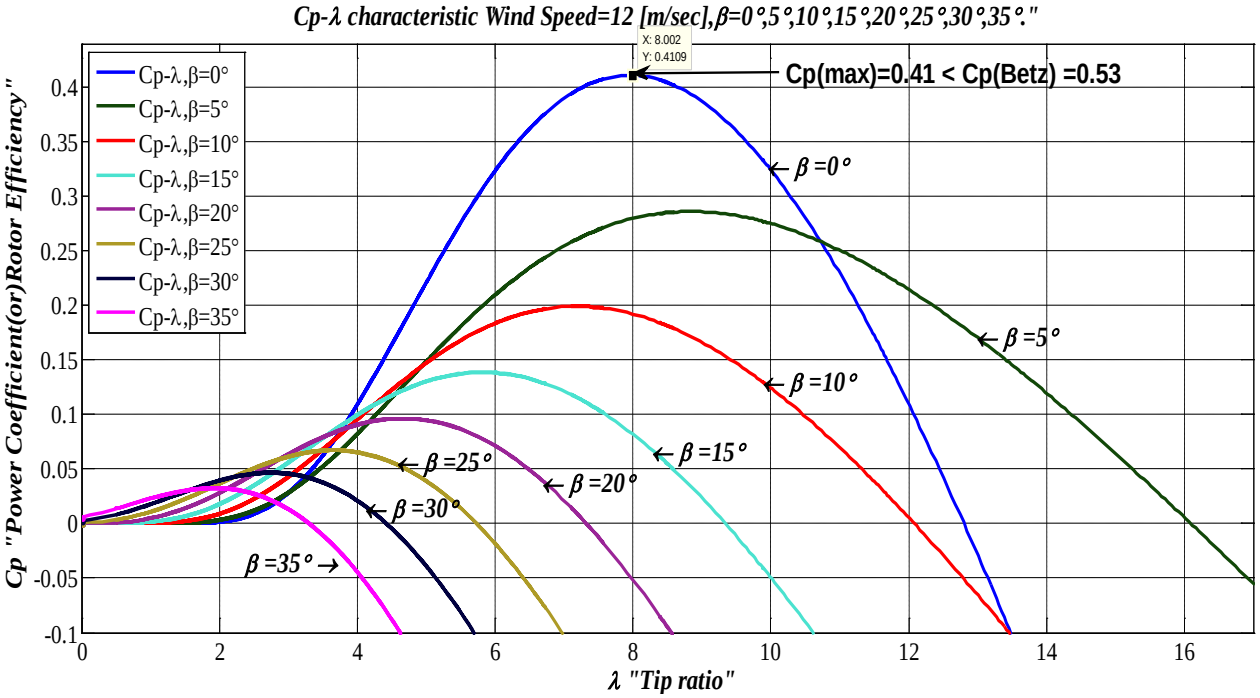
## Affects Of Pitch Angle Change On $C_p - \lambda$ Curves:

بنمذجة العلاقة (4−5) باستخدام بيئة الـ Matlab/Simulink نحصل على منحنيات $C_p - \lambda$ عند زاويا ميلان $\beta$ مختلفة للريش ($\beta$= 0°,5 °,10 °,15 °,20 °,25 °,30 °,35 °) وسرعة رياح ثابتة (Wind Speed =12 [m/sec])، والشكل التالي يوضح المخطط الصندوقي المستخدم في بيئة الـ Matlab/Simulink للحصول على منحنيات $C_p - \lambda$ عند زاويا ميلان $\beta$ مختلفة للريش وسرعة رياح ثابتة:




**الشكل (4−8): المخطط الصندوقي للعلاقة (4−5) للحصول على منحنيات $C_p - \lambda$ عند زاويا ميلان $\beta$ مختلفة للريش وسرعة رياح ثابتة**

والشكل التالي يظهر نتائج النمذجة والمتمثلة بمنحنيات $C_p - \lambda$ عند زاويا ميلان $\beta$ مختلفة للريش ($\beta$= 0°,5 °,10 °,15 °,20 °,25 °,30 °,35 °) وسرعة رياح ثابتة (Wind Speed =12 [m/sec]):



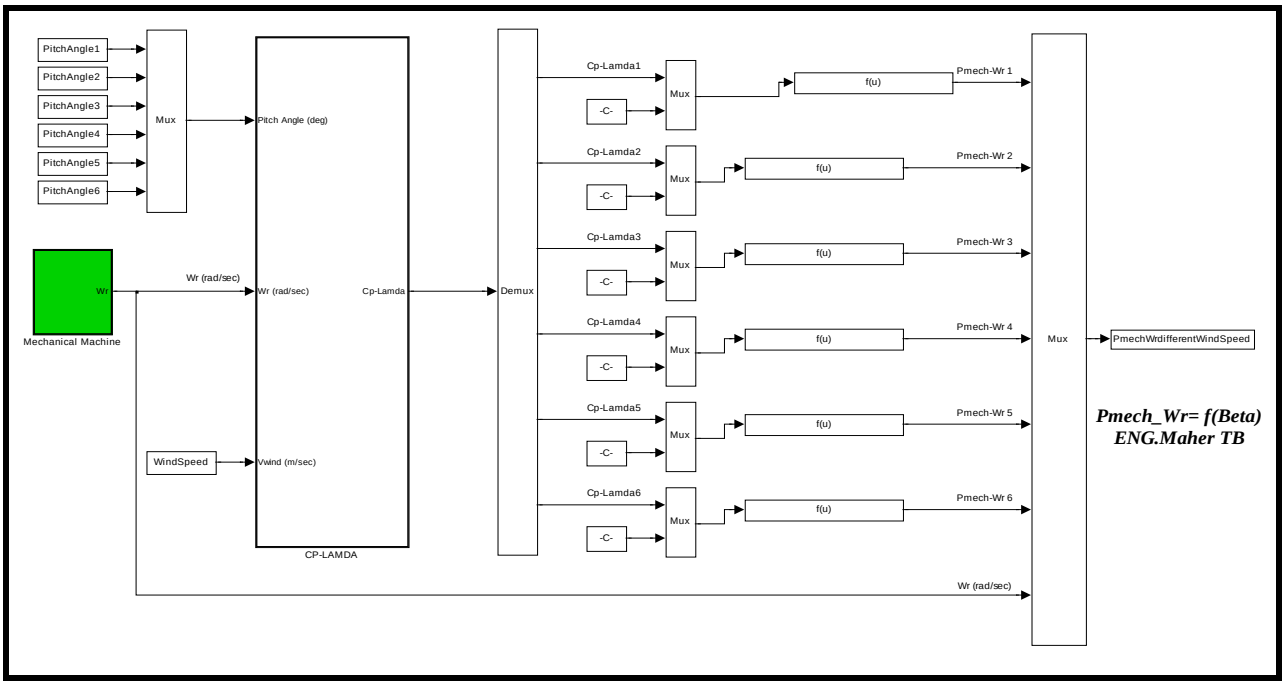

**الشكل (4–9): منحنيات $\lambda - Cp$ عند زاويا ميلان $\beta$ مختلفة للريش وسرعة رياح ثابتة.**

حيث نلاحظ من الشكل (4–9) أنه كلما صغرت قيمة زاوية ميلان الشفرات $\beta$ كلما كبرت قيمة معامل أداء العنفة الريحية $C_p$، وبالتالي ازدادت الاستفادة من استطاعة الرياح الواردة التي تتحول عن طريق شفرات العنفة إلى استطاعة ميكانيكية مقدمة للمولد الكهربائي . كما نلاحظ من الشكل الأخير أن أعلى قيمة عملية لـ $C_p$ هي $(C_p = 0.41)$ عند $(\beta = 0^o)$، فهي لا تصل إلى قيمة بيتز النظرية $(C_p = 0.59)$.

## ٤ ٠ ٢: دراسة تأثير تغير زاوية ميلان الريش على منحنيات الخصائص الميكانيكية للعنفة الريحية $(P_{mechanicl} - \omega_r)$:

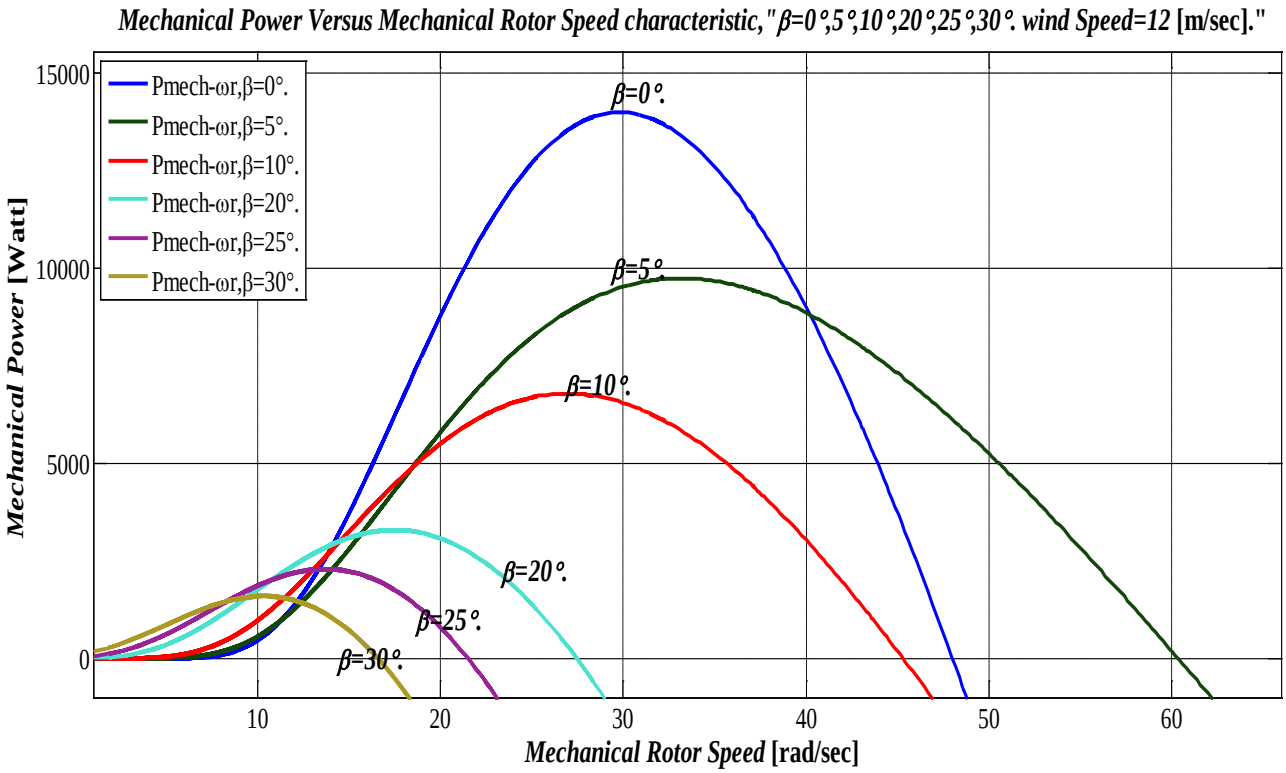
## Affects Of Pitch Angle Change On $(P_{mechanicl} - \omega_r)$ Curves:

وجدنا في الفقرة السابقة ( 4–5–2) أن تغير زاوية ميلان الشفرات $\beta$ يؤثر على قيمة معامل الأداء وبالتالي على قيمة الاستطاعة المستخلصة من الرياح (حسب العلاقة (1–15))، والشكل التالي يظهر المخطط الصندوقي المستخدم في بيئة الـ Matlab/Simulink للحصول على منحنيات $(P_{mechanicl} - \omega_r)$ عند زاويا ميلان $\beta$ مختلفة للريش وسرعة رياح ثابتة:




**الشكل (4-10): المخطط الصندوقي المستخدم للحصول على منحنيات ($P_{mechanicl} - \omega_r$) عند زاويا ميلان $\beta$ مختلفة للريش وسرعة رياح ثابتة**

والشكل التالي يظهر منحنيات ($P_{mechanicl} - \omega_r$) عند زاويا ميلان $\beta$ مختلفة للريش ($\beta = 0^o, 5^o, 10^o, 20^o, 25^o, 30^o$) وسرعة رياح ثابتة (Wind Speed =12 [m/sec]):




**الشكل (4-11): منحنيات ($P_{mechanicl} - \omega_r$) عند زاويا ميلان $\beta$ مختلفة للريش وسرعة رياح ثابتة**

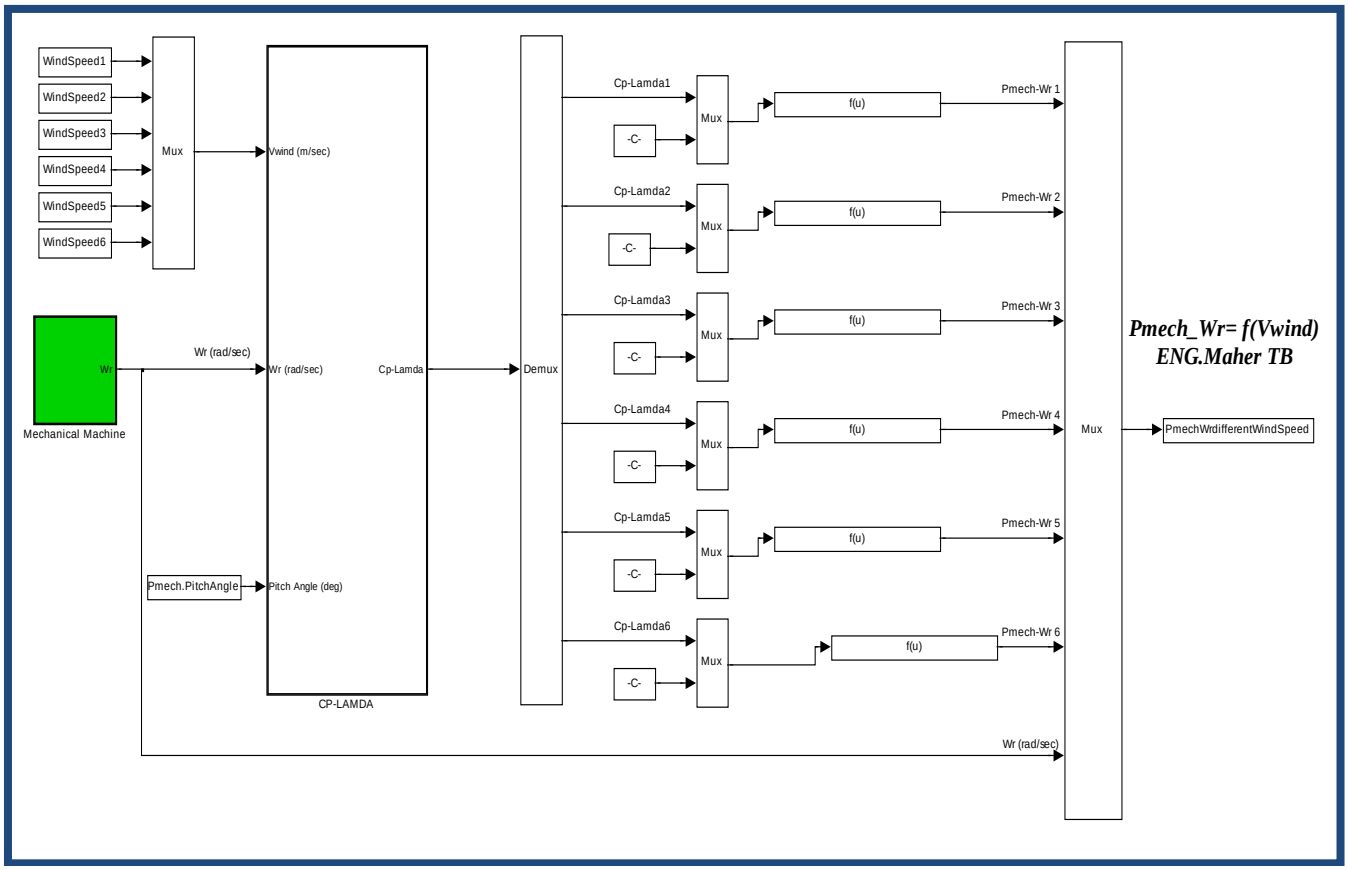
كما وجدنا من الشكل ( 4-9) أنه كلما صغرت قيمة زاوية ميلان الشفرات β كلما كبرت قيمة معامل أداء العنفة الريحية $C_p$، وبالتالي ازدادت الاستطاعة الميكانيكية المستفادة من الطاقة الحركية للرياح. وهذا ما يظهره الشكل ( 4-11)، حيث أنَّ أكبر استطاعة ميكانيكية نحصل عليها مع ثبات سرعة الرياح وتغير زاوية ميلان الشفرات β هي عند ($\beta= 0^o$).

## ٤ ـ ٣: دراسة تأثير تغير سرعة الرياح على منحنيات الخصائص الميكانيكية للعنفة الريحية ($P_{mechanicl} - \omega_r$):

## Affects Of Wind Speed Change on ($P_{mechanicl} - \omega_r$) Curves:

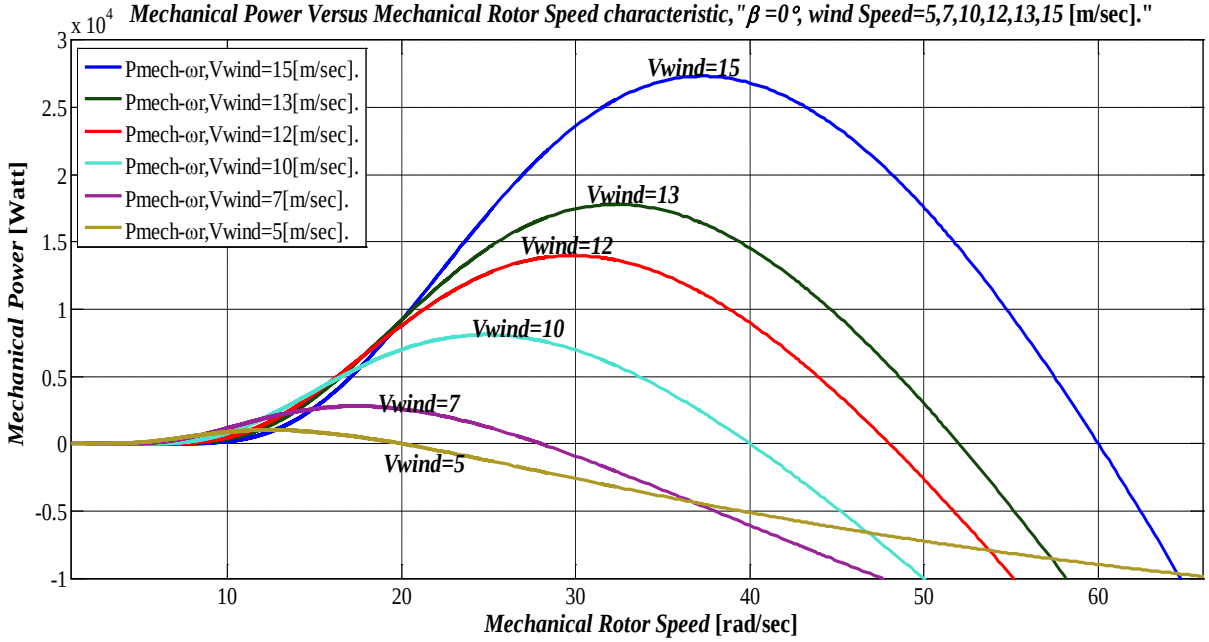
بالاعتماد على النموذج الرياضي للعنفة الريحية وعلاقة الاستطاعة الميكانيكية المعطاة بالعلاقة رقم ( 1-15) يمكن دراسة تأثير تغير سرعة الرياح على منحنيات الخصائص الميكانيكية للعنفة الريحية ($P_{mechanicl} - \omega_r$).

الشكل التالي يظهر المخطط الصندوقي المستخدم في بيئة الـ Matlab/Simulink للحصول على منحنيات $P_{mechanicl} - \omega_r$ عند زاوية ميلان β ثابتة للريش وسرعات رياح مختلفة:




**الشكل (4-12): المخطط الصندوقي المستخدم للحصول على منحنيات ($P_{mechanicl} - \omega_r$) عند زاوية ميلان $\beta$ ثابتة للريش وسرعات رياح مختلفة.**

يظهر الشكل التالي منحنيات ( $P_{mechanicl} - \omega_r$ ) عند زاوية ميلان β محددة للريش "($\beta=0^o$)"، وسرعات رياح مختلفة ( Wind Speed = 5,7,10,12,13,15 [m/sec]):




**الشكل (4-13): منحنيات ($P_{mechanicl} - \omega_r$) عند زاوية ميلان $\beta$ ثابتة للريش وسرعات رياح مختلفة.**

حيث نلاحظ من الشكل ( 4-13) أنَّ زيادة بسيطة في سرعة الرياح تؤدي إلى زيادة كبيرة في الاستطاعة الميكانيكية المنتزعة من الرياح، وهذا بسبب الطردية بين مكعب سرعة الرياح وبين الاستطاعة الميكانيكية المستخلصة منها، كما يظهر من العلاقة (1-15).

## ٤ ٥ ٤: منحني نقاط الاستطاعة العظمى المستخلصة من الرياح:

## Maximum power point "MPP" curve:

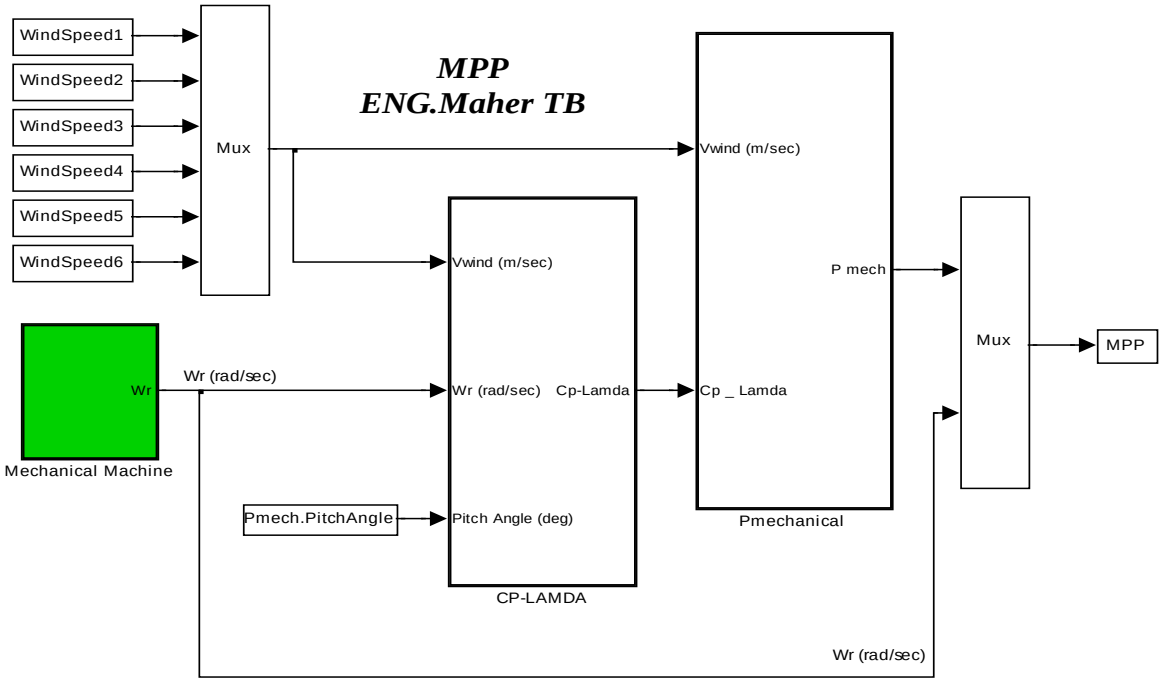
يسعى الباحثون بشكل دؤوب لاستخلاص أكبر قدر ممكن من الطاقة الحركية للرياح باستخدام الأنظمة الريحية التي تعمل عند سرعات متغيرة، وذلك عن طريق أنظمة تحكم مناسبة قادرة على تتبع نقاط الاستطاعة العظمى (Maximum power point "MPP") ( والتي تمثل أعظم قيمة للاستطاعة الميكانيكية التي يمكن استخلاصها من الرياح عند سرعة رياح معينة).

الشكل التالي يظهر ملف الـ ( M-file) المستخدم لإدخال معطيات العنفة الريحية، وللحصول على منحني نقاط الاستطاعة العظمى (Maximum power point "MPP" curve):

```
%%%-------------------------------------------------------------------------
%%%-------------------------------------------------------------------------
%%%-------------------------------------------------------------------------
figure('Name','MPP Curve')
a=sortrows(PmechWrdifferentWindSpeed,-1);
b=sortrows(PmechWrdifferentWindSpeed,-2);
c=sortrows(PmechWrdifferentWindSpeed,-3);
d=sortrows(PmechWrdifferentWindSpeed,-4);
e=sortrows(PmechWrdifferentWindSpeed,-5);
f1=sortrows(PmechWrdifferentWindSpeed,-6);
PmechMax=[a(2,1);b(2,2);c(2,3);d(2,4);e(2,5);f1(2,6)];
WrFORPmechMax=[a(2,7);b(2,7);c(2,7);d(2,7);e(2,7);f1(2,7)];
plot(WrFORPmechMax,PmechMax,'-d','color',[0.082352941   0.050980392 0.501960784],'markersize',8,'markeredgecolor',[1 0 0 ],'markerfacecolor',[1 1 0
hold on
plot(PmechWrdifferentWindSpeed(:,7),PmechWrdifferentWindSpeed(:,6),'-b','linewidth',2.225)
set(gca,'fontsize',16,'fontname','Times New Roman')
plot(PmechWrdifferentWindSpeed(:,7),PmechWrdifferentWindSpeed(:,5),'Color',[0.0705,0.282,0.0352],'linewidth',2.225)
plot(PmechWrdifferentWindSpeed(:,7),PmechWrdifferentWindSpeed(:,4),'Color',[1 0 0],'linewidth',2.225)
plot(PmechWrdifferentWindSpeed(:,7),PmechWrdifferentWindSpeed(:,3),'Color',[0.294117647,0.88627451,0.811764706],'linewidth',2.225)
plot(PmechWrdifferentWindSpeed(:,7),PmechWrdifferentWindSpeed(:,2),'Color',[0.607843137 0.145098039 0.596078431],'linewidth',2.225)
plot(PmechWrdifferentWindSpeed(:,7),PmechWrdifferentWindSpeed(:,1),'Color',[0.682352941 0.603921569 0.149019608],'linewidth',2.225)
axis([1 66 -10000 30000])
text(33.8,1.0e+004 * 2.8,'{\it \bfVwind=15}','fontsize',18,'fontname','Times New Roman');
text(30.3054,1.0e+004 * 1.85,'{\it \bfVwind=13}','fontsize',18,'fontname','Times New Roman');
text(26.5131,1.0e+004 * 1.475,'{\it \bfVwind=12}','fontsize',18,'fontname','Times New Roman');
text(23.7,1.0e+004 * 0.8644,'{\it \bfVwind=10}','fontsize',18,'fontname','Times New Roman');
text(18.3276,1.0e+004 *0.30,'{\it \bfVwind=7}','fontsize',18,'fontname','Times New Roman');
text(18.6724,1.0e+004 * -0.14081,'{\it \bfVwind=5}','fontsize',18,'fontname','Times New Roman');
hold off
%>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>>
title('{\it \bf MPP "Maximum Power points" Curve,"\beta =0\circ, \itwind Speed=5,7,10,12,13,15 \rm \bf[m/sec]."}','fontsize',18,'fontname','Times
grid
xlabel('{\it \bf Mechanical Rotor Speed\rm \bf[rad/sec]}','fontsize',18,'fontname','Times New Roman')
ylabel('{\it \bf Mechanical Power\rm \bf[Watt]}','fontsize',18,'fontname','Times New Roman')
```

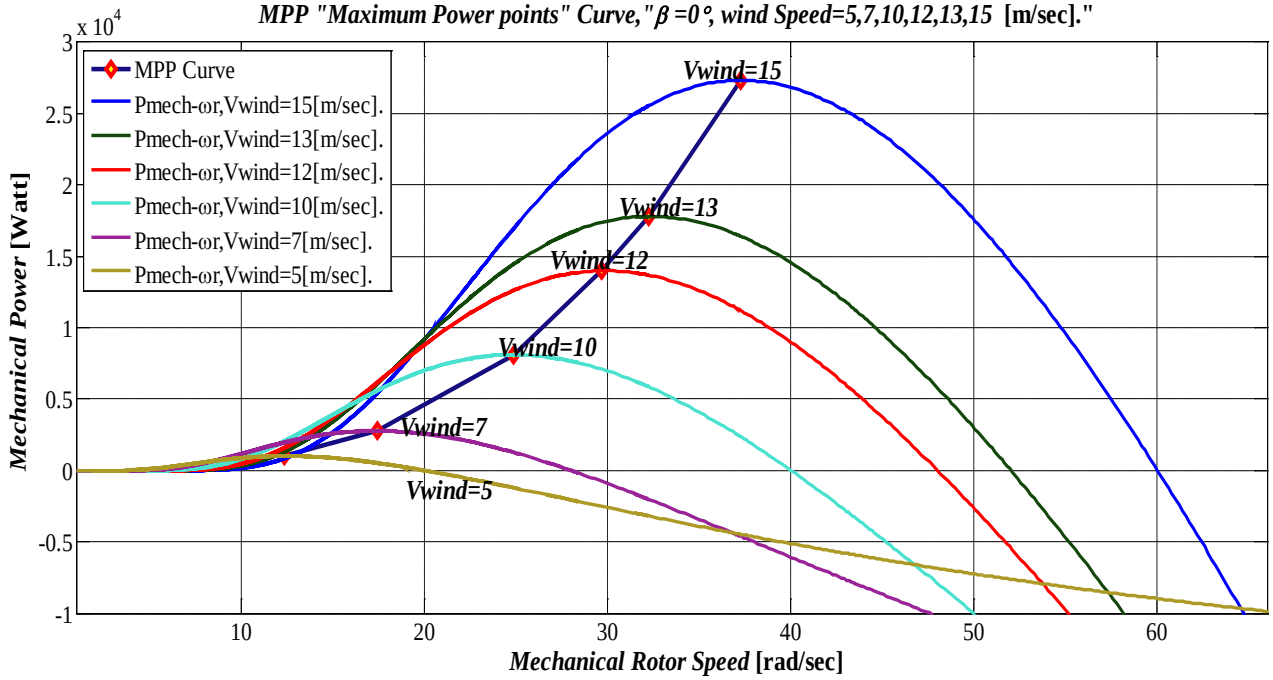
**الشكل (4-14): ملف الـ (M-file) المستخدم للحصول على منحني نقاط الاستطاعة العظمى.**

يظهر الشكل التالي المخطط الصندوقي المستخدم في بيئة الـ Matlab/Simulink للحصول على منحنيات $P_{mechanicl} - \omega_r$ عند زاوية ميلان $\beta$ ثابتة للريش وسرعات رياح مختلفة، وعليها منحني نقاط الاستطاعة العظمى (Maximum power point "MPP" curve).




**الشكل (4-15): المخطط الصندوقي المستخدم للحصول على منحني نقاط الاستطاعة العظمى "MPP" .**

يوضح الشكل التالي منحني الخصائص الميكانيكية لعنفة ريحية عند سرعات رياح مختلفة (Vwind= 5,7,10,12,13,15 [m/sec]) وزاوية ميلان ثابتة لشفرات العنفة ($\beta=0^o$)، وكذلك منحني نقاط الاستطاعة العظمى "MPP".




**الشكل (4-16): منحني نقاط الاستطاعة العظمى "MPP" عند زاوية ميلان $\beta$ ثابتة للريش وسرعات رياح مختلفة.**

نلاحظ من خلال منحيات ($P_{mechanicl} - \omega_r$) " والتي تتغير كما وجدنا مع تغير سرعة الرياح"، أنه عند كل سرعة رياح معينة (مثلاً Vwind=12 [m/sec]) هناك سرعة دوران موافقة لدائر العنفة الريحية ($\omega_{12}$) تجعل الاستطاعة المنتزعة من الرياح أعظم ما يمكن، لذلك كان لابد من تكييف سرعة دوران الدائر مع تغير سرعة الرياح للحصول على أعظم استطاعة ممكنة (أي للحصول على قيمة ($\lambda$) التي تكون قيمة Cp عندها أعظم ما يمكن)، ويتم ذلك باستخدام الأنظمة الريحية التي تعمل عند سرعات متغيرة، حيث يتم التحكم بسرعة دوران الدائر (ضمن مجال تغير السرعة ) للحفاظ على قيمة أمثلية للسرعة النسبية لطرف الريشة ( $\lambda$)، وبالتالي المحافظة على Cp عند قيمته العظمى طالما أن الاستطاعة أو سرعة الدائر أخفض من القيم الاسمية.

# الفصل الخامس

# Fifth Chapter

## نمذجة المولد التحريضي التقليدي وربطه مع عنفة ريحية باستخدام بيئة الـ Matlab/Simulink.

**Simulation Of The Conventional Induction Generator And Connect It With Wind Turbine By Using Matlab/Simulink Environment.**

## ٥ -٢: وضع النموذج الرياضي للمولد التحريضي التقليدي عند الربط مع الشبكة ودراسة الحالات العابرة فيه في الحالة العامة:

## *Analysis of Transients in Induction Generators in General Case*

تعطى معادلات التوازن الكهربائية المميزة للحالات العابرة الكهرومغناطيسية التي تحدث في الجزء الثابت من المحرك التحريضي ثلاثي الطور بشكل عام والتي تدعى معادلات بارك بالشكل الآتي:

في الثابت:

$$u_{1A} = R_{1A} i_1 + \frac{d\psi_{1A}}{dt}$$
$$u_{1B} = R_{1B} i_1 + \frac{d\psi_{1B}}{dt} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1-5)$$
$$u_{1C} = R_{1C} i_1 + \frac{d\psi_{1C}}{dt}$$

حيث: $u_{1A}, u_{1B}, u_{1C}$ : التوترات على الأطوار الثلاثة للثابت.

$R_{1A}, R_{1B}, R_{1C}$ : مقاومات الأطوار الثلاثة للثابت.

$\psi_{1A}, \psi_{1B}, \psi_{1C}$ : السيالات المغناطيسية للأطوار الثلاثة في الثابت.

في الدائر:

$$-u_{2a} = R_{2a} i_2 + \frac{d\psi_{2a}}{dt}$$
$$-u_{2b} = R_{2b} i_2 + \frac{d\psi_{2b}}{dt} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2-5)$$
$$-u_{2c} = R_{2c} i_2 + \frac{d\psi_{2c}}{dt}$$

ولكن دراسة الحالات العابرة في الآلات التحريضية في الحالة العامة معقد جداً للأسباب التالية:

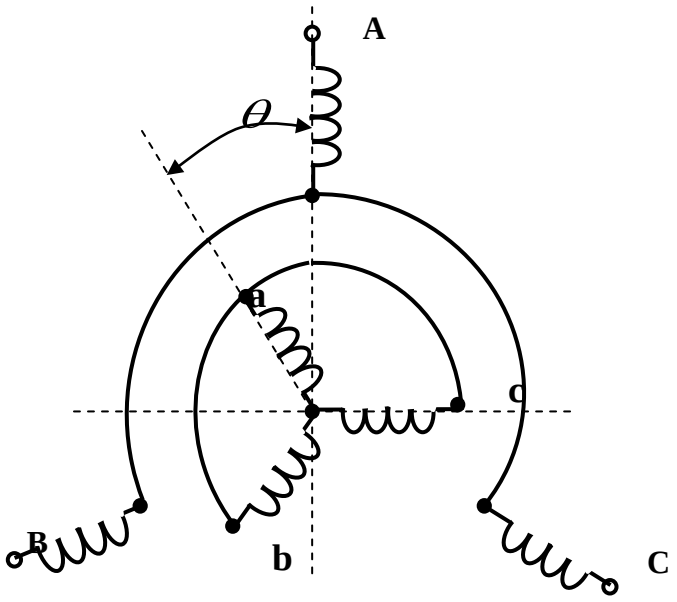
- وجود ( 6) دارات مترابطة مغناطيسياً مع بعضها. حيث تعطى معادلات السيالات المغناطيسية المتشابكة مع أطوار ملفات الجزء الثابت والدائر بالعلاقات:

$$\psi_{1A} = L_A i_{1A} + L_{mAB} i_{1B} + L_{mAC} i_{1C} + L_{mAa} i_{2a} + L_{mAb} i_{2b} + L_{mAc} i_{2c}$$
$$\psi_{1B} = L_B i_{1B} + L_{mBA} i_{1A} + L_{mBC} i_{1C} + L_{mBa} i_{2a} + L_{mBb} i_{2b} + L_{mBc} i_{2c} \quad \ldots. \quad (3-5)$$
$$\psi_{1c} = L_C i_{1C} + L_{mCA} i_{1A} + L_{mCB} i_{1B} + L_{mCc} i_{2C} + L_{mCa} i_{2a} + L_{mCb} i_{2b}$$

حيث: $L_m$ المحارضة المتبادلة بين الملفات Mutual Inductance.

$L_A, L_B, L_C$ هي المحارضات الذاتية لملفات الثابت.

- دوران الدائر يسبب الإزاحة الدورية بين ملفات الثابت والدائر وبالتالي التغير الدوري لقيم التحريض المتبادل بين تلك الملفات، والتي تصبح توابع دورية لزاوية الدوران ( $\theta$). يبيِّن الشكل ( 5-1) تغير وضعية ملفات الثابت والدائر حسب الزاوية ($\theta$).




**الشكل (5-1) تغير وضعية ملفات الثابت والدائر حسب الزاوية $\theta$**

- ظاهرة التشبع المغناطيسي في الآلة، الأمر الذي يؤدي إلى عدم خطية هذه المعادلات حيث تصبح المحارضات الذاتية و المتبادلة تابعة لقيم التيارات في الملفات.

بالإضافة إلى أسباب أخرى كعدم التوزع الجيبي لمنحني القوة المحركة المغناطيسية على محيط الآلة وعدم خطية منحني المغنطة وعدم خطية عناصر الآلة الكهربائية وعلاقتها بقيم التيارات المارة في الملفات. لذلك كان لابد لنا من إجراء بعض التسهيلات والافتراضات للتوصل إلى نموذج مبسط يمكن التعامل معه. لبناء هذا النموذج من يتم الاعتماد على استخدام النظرية العامة للآلات الكهربائية[7].

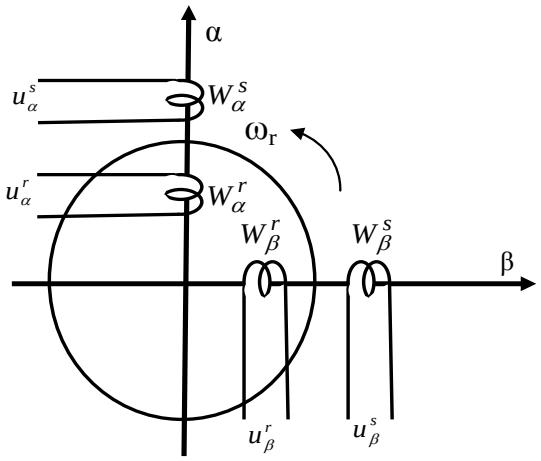
## ٥ ٢: النظرية العامة للآلات الكهربائية:

## *The General Theory of Electrical Machines*

مما سبق يلاحظ أن دراسة الحالات العابرة في الآلة الحقيقية معقد جداً. ولتسهيل دراسة هذه الحالات وتمثيل الآلة الحقيقية والظواهر المعقدة التي تحدث فيها أثناء الحالة العابرة يتم اللجوء إلى النظرية العامة للآلات الكهربائية التي تقوم بتمثيل الآلة الحقيقية بآلة أخرى نموذجية (مثالية) مكافئة بحيث تكون الظواهر الفيزيائية في هذه الآلة النموذجية مشابهة لتلك التي تحدث في الآلة الحقيقية.

تكون هذه الآلة المثالية ثنائية الأقطاب ثنائية الطور متناظرة، لها زوجان من الملفات المتماثلة على محورين متعامدين في كل من الثابت والدائر وتغذَيان بتيارين متناوبين مزاحين عن بعضهما 90 درجة حسب الزمن كما هو مبين في الشكل ( 5-2). وتعتبر ذات قطبين فقط لأن توزيع الفيض المغناطيسي يتكرر بعد كل قطبين ولا علاقة له بعدد الأقطاب الموجودة في الآلة الحقيقية.

إن جميع الظواهر الفيزيائية التي تحدث في الآلة الحقيقية والآلة المثالية ذات القطبين والملفين تكون متشابهة بالإضافة إلى أن المحاور الكهربائية للآلة ثنائية الأقطاب والملفات تنطبق على المحاور الهندسية وهذا يسهل تحديد موضع الدائر بالنسبة للثابت في مختلف الفترات الزمنية عند دراسة الحالات العابرة[7].




**الشكل (5-2): دارة الآلة المثالية**

إن الظواهر الفيزيائية المرافقة للحالات العابرة في الآلات الكهربائية معقدة بحيث أن الدراسة الرياضية للآلة بدون فرضيات وتبسيطات تكاد تكون مستحيلة وغير ممكنة، بأخذ الصعوبات السابقة الذكر بالحسبان، تؤدي الدراسة الرياضية إلى الحصول على معادلات غير خطية من غير الممكن دراستها تحليلياً. لذلك وعند دراسة الآلات الكهربائية رياضياً، تؤخذ العوامل الأساسية بشيء من التقريب وتهمل العوامل الثانوية وبالتالي يتم الحصول على آلة كهربائية مثالية عامة وتجرى الدراسة عليها.

تتميز هذه الآلة المثالية بالمواصفات الآتية:

- الفجوة الهوائية منتظمة، أي لا وجود للمجاري على الثابت والدائر.
- تكون الملفات موزعة على محيط الثابت والدائر بحيث تكفل توزيعاً منتظماً للتيار وتوزيعاً جيبياً للقوة المحركة الكهربائية.
- الدارة المغناطيسية غير مشبعة، لذلك فإنه عند تغذية الملفات بجهد جيبي ستوزع الساحة المغناطيسية في الملفات بشكل جيبي أيضاً وستكون هذه الساحة دائرية دوارة في الفجوة الهوائية.
- التناظر التام لملفات الثابت والدائر.
- عدم علاقة الفيض التسربي لملفات الآلة بوضعية الجزء الدائر.

مما سبق نستنتج أن الآلة الكهربائية العامة المثالية هي النموذج الرياضي الذي يسمح بدراسة الآلة وتحليل مختلف الظواهر التي تحدث داخل الآلة الحقيقية.

يمكن تمثيل جميع الآلات الكهربائية بالآلة المثالية التي تتألف من زوج من الملفات تتحرك بالنسبة لبعضها. عند التحليل النظري لا يوجد فرق في اعتبار أي من أجزاء الآلة تدور وأي لا تدور، لأن عمل الآلة مرتبط فقط بحركتيهما النسبية، أي انه يمكننا الحصول على كافة أنواع الآلات الكهربائية من الآلة المثالية.

إذا طبقنا على ملفات الجزء الثابت( $W_\alpha^s, W_\beta^s$ ) للآلة المثالية المبينة في الشكل ( 5-2) توترات متناوبة مزاحة عن بعضها حسب الزمن 90 درجة، ستظهر في الفجوة الهوائية لهذه الآلة ساحة مغناطيسية دوارة دائرية. وبقصر دارة ملفات الجزء الدائر نحصل على الآلة التحريضية التي يكون فيها تردد تيار الجزء الدائر $f_2 = s.f_1$ وسرعة دوران الدائر $n \neq n_1$ . كما أننا نستطيع أن لا نقصر ملفات الجزء الدائر بل نغذيها من منبع تردده $f_2$ . عخ هـ ة ز لـ و هـ ن ئ ك ب ك ب ئ ة ت غ ي ب ة ل ر خ ج ب ّ ح ي ت ي ش ا ج ا ئ ل أ ل ق ـ م ت غ ي ذ ز ن ع ب خ ه ـ ـ ئ ة ت غ ي ذ ة ن خ ح ي ذ ن ك ج ر ك خ ج ذ ة ل ـ غ ى ك ك ب ك خ ـ ـ ئ ة ك ك ف ي ح ي ب ( Doubly Fed). إلا أنه في جميع الحالات تبقى السرعة الزاوية للساحة المغناطيسية المتشكلة بواسطة تيارات الثابت مساوية للسرعة الزاوية للساحة المغناطيسية للجزء الدائر، لأن سرعة دوران الساحة المغناطيسية للجزء الدائر تساوي سرعة دوران الجزء الدائر $n$ مضافاً لها سرعة دوران الساحة المتشكلة في الدائر بالنسبة للدائر $n_2$، أي تساوي:

$$n + n_2 = n + n_1 - n = n_1 .$$

في جميع الآلات الكهربائية تكون الساحة المغناطيسية في كل من الثابت والدائر ساكنة بالنسبة لبعضها ويعتبر هذا شرطا أساسياً لا تتم بدونه عملية تحويل الطاقة. كما أنه يمكن الحصول على جميع أنواع الآلات الكهربائية من الآلة المثالية.

إن المعادلات الرياضية التي تصف الظواهر التي تحدث في الآلات الكهربائية هي:

- معادلات توازن التوترات في الملفات.
- معادلة توازن العزوم على محور الآلة.
- معادلة الحركة.

ولكي تكتب المعادلات التفاضلية الرياضية التي تصف الظواهر السابقة التي تجري في الآلة بشكل صحيح وبطريقة موحدة من الضروري الأخذ بعين الاعتبار ما يلي:

١: الاتجاه الموجب للتيار المار في الملفات هو الاتجاه الذي يمر فيه التيار من نهاية الملف إلى بدايته.

٢: الاتجاه الموجب للقوة المحركة الكهربائية هو الاتجاه الموجب للتيار.

٣: الاتجاه الموجب للسيالة المغناطيسية هو اتجاه السيالة التي تخرج من الجزء الدائر للآلة.

٤: الاتجاه الموجب لمحور الملف والقوة المحركة المغناطيسية هو نفسه الاتجاه الموجب للتيار والقوة المحركة الكهربائية.

٥: الاتجاه الموجب لدوران الآلة والاتجاه الموجب للقوة المحركة الكهربائية هو بعكس عقارب الساعة وهو نفسه الاتجاه الموجب لحساب الزوايا.

لدراسة النموذج الرياضي نختار جملة محاور إحداثية متعامدة، حيث نميز ثلاث حالات مستخدمة بشكل واسع عند دراسة النظرية العامة في الآلات الكهربائية:

1- نظام محاور $\alpha$ و $\beta$ ثابتة متوضعة على الثابت.

2- نظام محاور $d$ و $q$ متوضعة على الدائر وتتحرك معه بسرعة دوران الدائر.

3- نظام محاور $u$ و $v$ مثبتة على محاور اختيارية وتدور بسرعة اختيارية.

يفضل استخدام النظام $\alpha$ و $\beta$ لحل معادلات تحويل الطاقة في المولدات التحريضية لأن معادلات التوتر للجزء الثابت تحوي أقل عدد من الحدود، أما نظام المحاور $d$ و $q$ فيستخدم لحل معادلات المولدات التزامنية وبخاصة المولدات التزامنية ذات الأقطاب البارزة عندما تكون المحاور $d$ و $q$ موجهة باتجاه المحاور الطولانية والعرضانية للمولدة [7].

## ٥ ٢ ٤: المعادلات العامة في الآلة المثالية عند الربط مع الشبكة:

## *General Equations*

إن المعادلات العامة للآلة المثالية هي المعادلات التي تمثل بجملة معادلات تفاضلية مؤلفة من معادلات التوتر والتيار والعزم والحركة والاستطاعة وتكتب بعد الفرضيات الآتية:

- الآلة متناظرة، أي أن للملفات المزاحة فراغياً 90 درجة نفس عدد اللفات، والفجوة الهوائية ثابتة.
- الآلة غير مشبعة وطاقة الساحة المغناطيسية مركزة في الفجوة الهوائية.

يتحرك الملفان في الآلة الحقيقية بالنسبة لبعضهما، وترددات التيارات في كل من الثابت والدائر مختلفة، أما في الآلة المثالية، فالملفان ثابتان بالنسبة لبعضهما وترددات التيارات المارة فيهما متساوية.

بما أن الفجوة الهوائية منتظمة والدارة المغناطيسية غير مشبعة فعند تغذية الملفات بجهد جيبي تتولد في الفجوة الهوائية ساحة مغناطيسية دوارة.

إن تحويل الطاقة تتم في الفجوة الهوائية للآلة. فالمحرك يستجر استطاعة من الشبكة عبر الفجوة الهوائية، والمولد يقدم استطاعة إلى الشبكة عن طريق الفجوة الهوائية أيضاً. فإذا نظرنا إلى عملية تحويل الطاقة من جهة الفجوة الهوائية فليس مهماً إذا كانت الملفات تتحرك أم لا، بل المهم هو أن الساحة المغناطيسية في الثابت ثابتة بالنسبة للساحة المغناطيسية في الدائر [7].

كما وجدنا في الفصل الثاني فإن الشكل العام لمعادلات التوتر في كل من الثابت والدائر يعطى بالشكل:

$$u_1 = R_1 i_1 + \frac{d\psi_1}{dt} \qquad \ldots. \ (4-5)$$

$$u_2 = R_2 i_2 + \frac{d\psi_2}{dt} \qquad \ldots. (5-5)$$

حيث:

$$\psi_1 = L_1 i_1 + L_m . i_2 \qquad \ldots. (6-5)$$

$$\psi_2 = L_2 i_2 + L_m \; i_1 \qquad \ldots. (7-5)$$

ومنه:

$$u_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + L_m \frac{di_2}{dt} \qquad \ldots. (8-5)$$

$$u_2 = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + L_m \; \frac{di_1}{dt} \qquad \ldots. (9-5)$$

هاتان المعادلتان صالحتان في حال وجود دارتين كهربائيتين متجاورتين ساكنتين، حيث يقسم التوتر إلى قسمين: القسم الأول هو الحد الذي يمثل هبوط التوتر في الأولي والحد الثاني والثالث يمثل التوتر الناتج عن التحويل. تطبق هذه المعادلات في حالة المحولات. لكن لو كان أحد الملفين يدور بسرعة زاوية قدرها $\omega_r$ عندها يؤخذ بالحسبان حد ثالث إضافي في معادلة التوتر للملف الذي يدور ويمثل هذا الحد الإضافي التوتر الناتج عن الدوران وتأخذ عندئذ معادلتا التوتر الشكل الآتي:

$$u_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + L_m \; \frac{di_2}{dt} \qquad \ldots. (10-5)$$

$$u_2 = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + L_m \frac{di_1}{dt} - j\omega(L_2 i_2 + L_m . i_1) \qquad \ldots. (11-5)$$

ولو كان ملف الدائر مقصوراً كما هو الحال في المحركات التحريضية، يكون عندها $u_2 = 0$ وتأخذ معادلتا التوتر في المحرك الحقيقي الشكل الآتي:

$$u_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + L_m \; \frac{di_2}{dt} \qquad \ldots. (12-5)$$

$$0 = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + L_m \frac{di_1}{dt} - j\omega(L_2 i_2 + L_m i_1) \qquad \ldots. (13-5)$$

## ٥ ٢ ٢:معادلات التوتر: Voltage Equations

يمكن الحصول على معادلات التوتر للمحرك التحريضي من المعادلات ( 5-10) و (5-11)، حيث يستعاض عن المولد الحقيقي بمولد مثالي مكافئ ثنائي الأقطاب له زوج من الملفات $W_\alpha^s$ و $W_\beta^s$ موزعة على محورين متعامدين $\alpha$ و $\beta$كما في الشكل (5-2)، حيث يدور الجزء الدائر فيه بسرعة زاوية $\omega_r$ بينما

تدور الساحة المغناطيسية الدوارة بسرعة $\omega_1$ نتيجة مرور التيارات المتناوبة في ملفات الثابت المزاحة عن بعضها فراغيا 90 درجة، أي عندما تمر موجة السيالة على المحور $\alpha$ بنقطة الصفر تمر موجة السيالة على المحور $\beta$ بقيمتها العظمى والعكس صحيح.

فتأخذ معادلات التوتر الشكل الآتي:

$$u_\alpha^s = R_\alpha^s i_\alpha^s + \frac{d\psi_\alpha^s}{dt} \quad \ldots. \quad (14-5)$$

$$u_\beta^s = R_\beta^s i_\beta^s + \frac{d\psi_\beta^s}{dt} \quad \cdots. \quad (15-5)$$

$$u_\alpha^r = R_\alpha^r i_\alpha^r + \frac{d\psi_\alpha^r}{dt} + \omega_r \psi_\beta^r \quad \cdots. \quad (16-5)$$

$$u_\beta^r = R_\beta^r i_\beta^r + \frac{d\psi_\beta^r}{dt} - \omega_r \psi_\alpha^r \quad \cdots. \quad (17-5)$$

حيث:

$$\psi_\alpha^s = L_\alpha^s i_\alpha^s + L_m i_\alpha^r \quad \ldots. \quad (18-5)$$

$$\psi_\beta^s = L_\beta^s i_\beta^s + L_m i_\beta^r \quad \cdots. \quad (19-5)$$

$$\psi_\alpha^r = L_\alpha^r i_\alpha^r + L_m i_\alpha^s \quad \cdots. \quad (20-5)$$

$$\psi_\beta^r = L_\beta^r i_\beta^r + L_m i_\beta^s \quad \cdots. \quad (21-5)$$

ومنه:

$$u_\alpha^s = R_\alpha^s i_\alpha^s + L_\alpha^s \frac{di_\alpha^s}{dt} + L_m \frac{di_\alpha^r}{dt} \quad \ldots. \quad (22-5)$$

$$u_\beta^s = R_\beta^s i_\beta^s + L_\beta^s \frac{di_\beta^s}{dt} + L_m \frac{di_\beta^r}{dt} \quad \cdots. \quad (23-5)$$

$$u_\alpha^r = R_\alpha^r i_\alpha^r + L_\alpha^s \frac{di_\alpha^r}{dt} + L_m \frac{di_\alpha^s}{dt} + \omega(L_\alpha^r i_\beta^r + L_m i_\beta^s) \quad \cdots. \quad (24-5)$$

$$u_\beta^r = R_\beta^r i_\beta^r + L_\beta^s \frac{di_\alpha^r}{dt} + L_m \frac{di_\beta^s}{dt} - \omega(L_\beta^r i_\alpha^r + L_m i_\alpha^s) \quad \cdots. \quad (25-5)$$

في المولد التحريضي عندما يكون الدائر مقصور يكون:

$$u_\alpha^r = u_\beta^r = 0$$

$$u_\alpha^s = u_{\max} Sin\omega t \quad \ldots. \quad (26-5)$$

$$u_\beta^s = u_{\max} Cos\omega t$$

وبما أن الآلة متناظرة تكون المقاومات الأومية والمفاعلات التحريضية لملفي الثابت والدائر على المحورين $\alpha$ و $\beta$ متساوية، أي: $R_\alpha^s = R_\beta^s = R^s$ و $R_\alpha^r = R_\beta^r = R^r$ و $L_\alpha^s = L_\beta^s = L^s$ و $L_\alpha^r = L_\beta^r = L^r$ و Lm عامل التحريض المتبادل بين الملفات تكون نفسها.

فتأخذ المعادلات الشكل الآتي:

$$u_\alpha^s = R^s i_\alpha^s + L^s \frac{di_\alpha^s}{dt} + L_m \frac{di_\alpha^r}{dt} \quad \dots. \ (27-5)$$

$$u_\beta^s = R^s i_\beta^s + L^s \frac{di_\beta^s}{dt} + L_m \frac{di_\beta^r}{dt} \quad \dots. \ (28-5)$$

$$0 = R^r i_\alpha^r + L^s \frac{di_\alpha^r}{dt} + L_m \frac{di_\alpha^s}{dt} + \omega(L^r i_\beta^r + L_m i_\beta^s) \quad \dots. \ (29-5)$$

$$0 = R^r i_\beta^r + L^s \frac{di_\alpha^r}{dt} + L_m \frac{di_\beta^s}{dt} - \omega(L^r i_\alpha^r + L_m i_\alpha^s) \quad \dots. \ (30-5)$$

يمكن كتابة معادلات التوتر على شكل معادلة مصفوفية كما يلي:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha^s \\ u_\beta^s \\ u_\alpha^r \\ u_\beta^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + \frac{d}{dt}L_s & \frac{d}{dt}M & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{d}{dt}M & R_s + \frac{d}{dt}L_s \\ \frac{d}{dt}M & R_r + \frac{d}{dt}L_r & L_r.W_r & M.W_r \\ -M.W_r & -L_r.W_r & R_r + \frac{d}{dt}L_r & \frac{d}{dt}M \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha^s \\ i_\beta^s \\ i_\alpha^r \\ i_\beta^r \end{bmatrix} \quad (31-5)$$

تدخل في هذه المعادلات هبوطات التوتر على المقاومات الأومية وهبوطات التوتر على المفاعلات التحريضية والقوى المحركة الكهربائية الناتجة عن التحويل وكذلك الحدود التي تدخل فيها سرعة دوران المحرك والتي تمثل القوى المحركة الكهربائية الناتجة عن الدوران.[7]

## ٥ ٢ ٣: المعادلة العامة للعزوم والسرعة والاستطاعات:

## *Torque , Power and Speed Equations:*

إن القيمة اللحظية للعزوم المتشكلة على محور المحرك التحريضي تتحدد بالتيارات المارة في ملفاتها، حيث أن مرور التيار الكهربائي في أي ناقل موجود ضمن ساحة مغناطيسية يؤدي إلى تشكيل قوة كهرومغناطيسية في هذا الناقل. فإذا كان للناقل إمكانية الحركة الدورانية حول محور ما فإن هذه القوة تشكل عزماً يؤدي إلى دوران هذا الناقل حول محور الدوران بجهة و سرعة معينة [7].

يتم استنتاج المعادلة العامة للعزوم الكهرمغناطيسية من معادلات التوتر للآلة وقيم الاستطاعة اللحظية الكهربائية التي تصرف في ملفات الآلة حيث يضيع جزء منها داخلها بفعل جول و الجزء الآخر يمثل

سرعة تغير القدرة المغناطيسية المختزنة في الآلة والجزء الباقي يتحول إلى استطاعة ميكانيكية تظهر على محور الآلة وتؤدي إلى تولد العزوم الكهرمغناطيسية على محورها. أي أن العزم الذي يتشكل على محور الآلة ينشأ عن الاستطاعة الميكانيكية التي تتولد على محور الآلة والتي تنشأ عن التأثير المتبادل بين الفيض المغناطيسي و التيار المار في نواقل هذه الآلة وهو يعطى في نظام المحاور الإحداثية $\alpha$ و $\beta$ بالعلاقة الآتية:

$$T_{em} = \frac{3}{2} P.M.(i_\beta^s i_\alpha^r - i_\alpha^s i_\beta^r) \qquad .... \quad (32-5)$$

وهذا العزم يساوي العزم المقاوم( $T_{em} = T_m$ ) إذا كانت الآلة تعمل بالحالة المستقرة، ولكن الآلة تمر بمرحلة عابرة أثناء الإقلاع، بالإضافة إلى أن الحمل قد يتغير لسبب ما وكل هذا يؤدي إلى تغير القدرة الحركية للآلة مما ينجم عنها توليد عزم ديناميكي ( $T_d$ ) الذي يتم حسابه بالاعتماد على القدرة الحركية للآلة، أي:

$$T_d = \frac{P_d}{\Omega_r} = \frac{1}{\Omega_r} \frac{dA}{dt} \qquad .... \quad (33-5)$$

حيث: $A$ القدرة الحركية للجزء الدائر و تعطى بالعلاقة الآتية:

$$A = J.\frac{\Omega^2{}_r}{2} \qquad .... \quad (34-5)$$

أما عزم العطالة فيساوي:

$$J = \frac{G.D^2}{4} \qquad ..... \quad (35-5)$$

وبالتعويض في العلاقة (5-33) نجد:

$$T_d = \frac{1}{\Omega_r} \frac{dA}{dt} = \frac{1}{\Omega_r} J\Omega_r \frac{d\Omega_r}{dt} \qquad .... \quad (36-5)$$

$$T_d = J \frac{d\Omega_r}{dt} = J \frac{d\frac{\omega_r}{P}}{dt} = \frac{J}{P} \frac{d\omega_r}{dt} \qquad .... \quad (37-5)$$

وهكذا تصبح معادلة التوازن للعزوم :

$$T_{em} = T_m + T_d \qquad ..... \quad (38-5)$$

$$\begin{aligned} T_d &= T_{em} + T_m \quad \text{As a Generator} \\ T_d &= T_{em} - T_m \quad \text{As a Motor} \end{aligned} \qquad .... \quad (39-5)$$

$$\frac{J}{P} \frac{d\omega_r}{dt} = T_{em} - T_m \qquad ..... \quad (40-5)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{P}{J}(T_{em} - T_m) \qquad ..... \quad (41-5)$$

من المهم أيضاً حساب القيم اللحظية لكل من الاستطاعة الفعلية والردية التي يستجرها المحرك المثالي من الشبكة خلال الفترة العابرة ويتم ذلك بأخذ بعض جداءات التيارات والتوترات كما يلي:

- الاستطاعة الفعلية التي يستجرها المحرك خلال المرحلة العابرة تعطى بالعلاقة الآتية:

$$p^s = p_\alpha^s + p_\beta^s = u_\alpha^s i_\alpha^s + u_\beta^s i_\beta^s \quad .... \quad (42-5)$$

- أما الاستطاعة الردية التي يستجرها المحرك والتي تذهب لتشكيل الفيوض المغناطيسية فتساوي:

$$q^s = q_\alpha^s + q_\beta^s = u_\beta^s i_\alpha^s - u_\alpha^s i_\beta^s \quad .... \quad (43-5)$$

- فتكون الاستطاعة الظاهرية (الإجمالية) تساوي:

$$s = \sqrt{p^{s2} + q^{s2}} \quad .... \quad (44-5)$$

وبالتالي تكون قيم كل من المردود وعامل الاستطاعة:

$$\eta = \frac{p_2}{p_1} \quad ..... \quad (45-5)$$

$$Cos\varphi_1 = \frac{p_1}{S} = Cos(\tan^{-1}\frac{q^s}{P^s}) \quad ..... \quad (46-5)$$

حيث:

$$p_2 = T_{em}.\Omega_r = T_{em}.\frac{\omega_r}{P} \quad .... \quad (47-5)$$

## ٥ ٣: دراسة خصائص المولد التحريضي في الحالات العابرة:

## *Induction Generator Characteristics in Transient States*

تتم دراسة الخصائص المختلفة للمولد التحريضي في الحالات العابرة كالتيارات والعزوم والسرعة والاستطاعة الفعلية والردية والمردود وعامل الاستطاعة بالاعتماد على المعادلات السابقة [10]. لتحقيق ذلك و تسهيلاً لنمذجة المولد التحريضي، توضع هذه المعادلات بالشكل الآتي:

$$\frac{di_\alpha^s}{dt} = \frac{1}{L^s}u_\alpha^s - \frac{R^s}{L^s}i_\alpha^s - \frac{L_m}{L^s}\frac{di_\alpha^r}{dt} \quad ..... \quad (48-5)$$

$$\frac{di_\beta^s}{dt} = \frac{1}{L^s}u_\beta^s - \frac{R^s}{L^s}i_\beta^s - \frac{L_m}{L^s}\frac{di_\beta^r}{dt} \quad ..... \quad (49-5)$$

$$\frac{di_\alpha^r}{dt} = \frac{R^r}{L^r}i_\alpha^r - \frac{L_m}{L^r}\frac{di_\alpha^s}{dt} - \omega_r i_\beta^r - \omega_r \frac{L_m}{L^r}i_\beta^s \quad ..... \quad (50-5)$$

$$\frac{di_\beta^r}{dt} = \frac{R^r}{L^r}i_\beta^r - \frac{L_m}{L^r}\frac{di_\beta^s}{dt} + \omega_r i_\alpha^r + \omega_r \frac{L_m}{L^r}i_\alpha^s \quad ..... \quad (51-5)$$

$$T_{em} = \frac{3}{2}P.L_m(i_\beta^s i_\alpha^r - i_\alpha^s i_\beta^r) \quad ..... \quad (52-5)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{P}{J}(T_m - T_{em}) \quad \text{As A Generator} \quad .... \quad (53-5)$$

$$p^s = p^s_\alpha + p^s_\beta = u^s_\alpha i^s_\alpha + u^s_\beta i^s_\beta \quad .... \quad (54-5)$$

$$q^s = q^s_\alpha + q^s_\beta = u^s_\beta i^s_\alpha - u^s_\alpha i^s_\beta \quad .... \quad (55-5)$$

$$s = \sqrt{p^{s2} + q^{s2}} \quad .... \quad (56-5)$$

$$\eta = \frac{p_2}{p_1} \quad .... \quad (57-5)$$

$$Cos\varphi_1 = \frac{p_1}{S} \quad ..... \quad (58-5)$$

$$p_2 = T_{em}.\Omega_r = T_{em}.\frac{\omega_r}{P} \quad ..... \quad (59-5)$$

أما التيارات المارة في الأطوار الثلاثة للمولد التحريضي الحقيقي فتعطى بالعلاقات الآتية:

$$\begin{aligned} i^s_A &= i^s_\alpha \\ i^s_B &= \frac{1}{2} i^s_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} i^s_\beta \\ i^s_C &= -\frac{1}{2} i^s_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} i^s_\beta \end{aligned} \quad ..... \quad (60-5)$$

## ٥ ٤: التجارب الحاسوبية:

## Experimental Tests For The Convenient Induction Generator:

### ٥ ٤ ١: التجربة الأولى:

إقلاع المولد التحريضي التقليدي عند ربطه مع حمولة ميكانيكية ذات عزم ثابت ((TL=1600[N.m]))

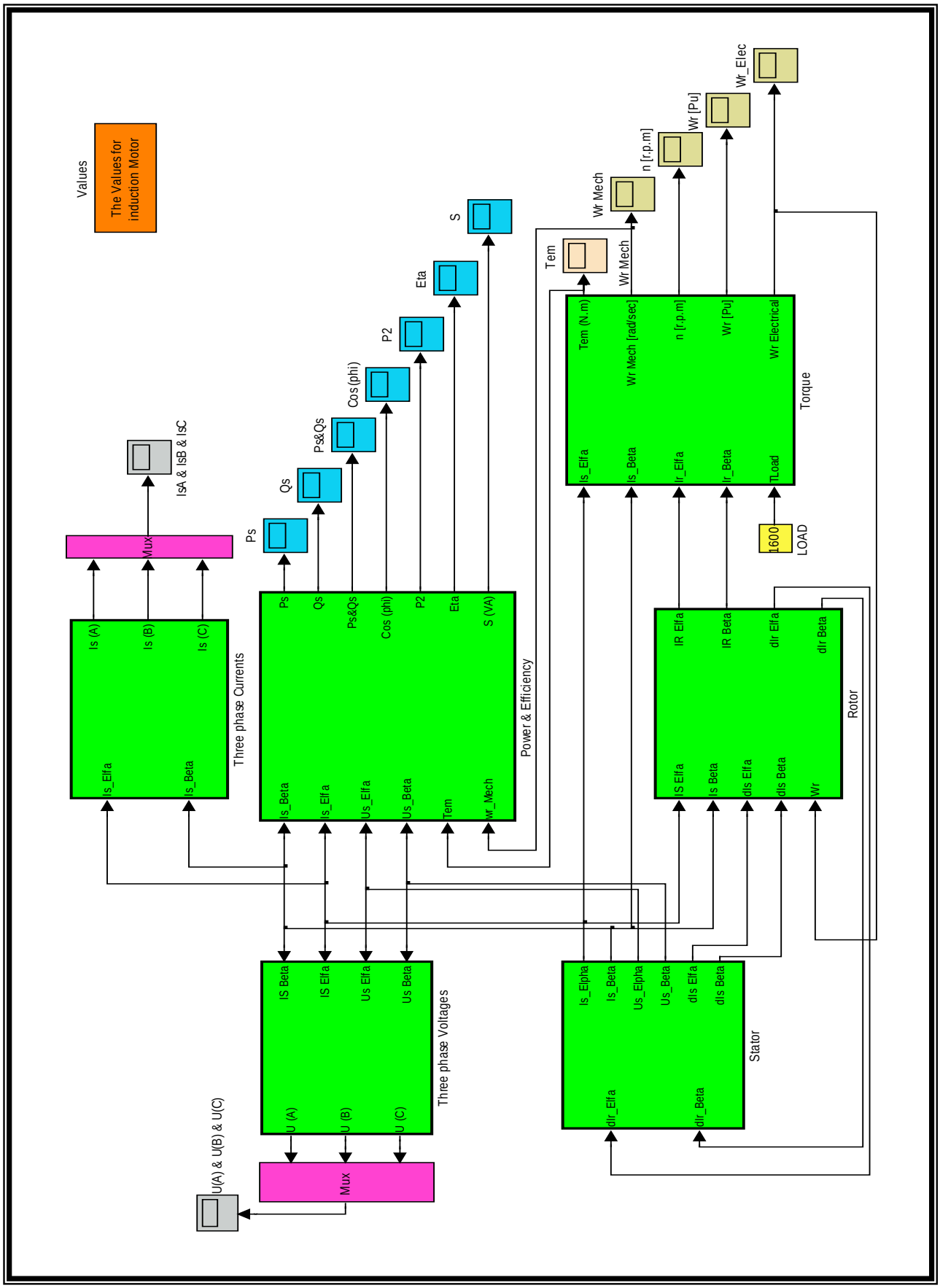
يبين الشكل (5-3) المخطط الصندوقي لنموذج المولد التحريضي المستخدم حيث تم تمثيله باستخدام برنامج الـ MATLAB/SIMULINK من خلال المعادلات الرياضية السابقة من المعادلة( 5-48) وحتى المعادلة (5-60) في حالة الربط مع الشبكة، وبواسطة هذا النموذج ستتم دراسة الحالات العابرة التي تحدث في المولد التحريضي. وسيتم تحديد مختلف دلائل ومميزات المولد في هذه الحالة كالعزم والسرعة والتيارات والاستطاعة وعامل الاستطاعة.

مواصفات المولد التحريضي الذي تمت نمذجته [5]:

$P_n = 500Kw$ $R_s = 0.0065[\Omega/ph]$ $R_r = 0.0197[\Omega/ph]$ $J = 8.0[Kg.m^2]$

$2P = 4[Poles]$ $L_s = 0.01079[H]$ $L_r = 0.01069[H]$ $T_n = 1600[N.m]$

$U_n = 380[V]$ $M = 0.01054[H]$ $\cos\varphi = 0.924$




**الشكل (5-3): المخطط الصندوقي للمولد التحريضي المربوط إلى الشبكة مع عزم ميكانيكي ثابت ($T_{Load}$ = 1600 [N.m]).**

معطيات الدخل للمولد التحريضي تمت من خلال ملف الدخل التالي:

Editor - D:\Master preperation\the fifth chapter\matlab for fifth chapter\Ready\IG_WITH_Constant_Load_28_10_2011_SAKO_I...

File Edit Text Go Cell Tools Debug Desktop Window Help

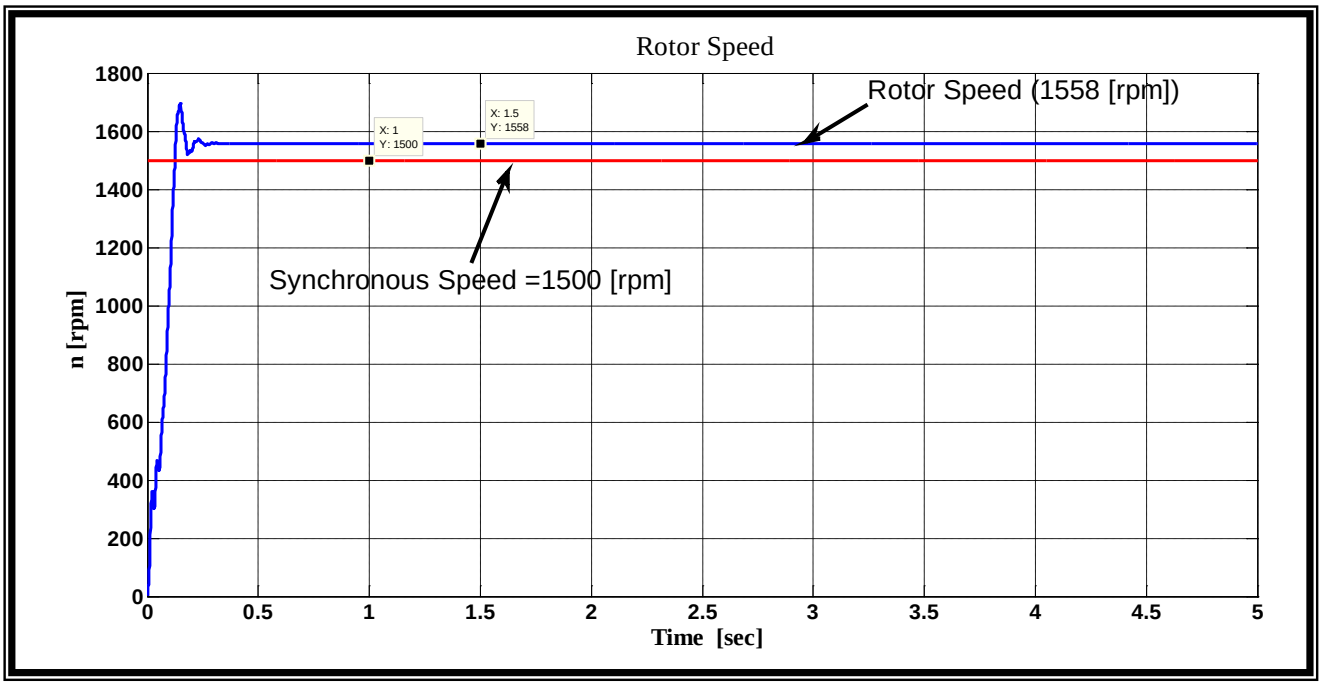
```
1   %Induction Machine data
2   %500KW
3   Rs=0.0065;          %[Ohm]
4   Rr=0.0197;          %[Ohm]
5   Ls=0.01079;         %[H]
6   Lr=0.01069;         %[H]
7   M=0.01054;          %[H]
8   P=2;                %[Pole pairs]
9   J=8;                %[Kg.m^2]
10  wrb=314;            %[rad/sec]
11  Tb=1600;            %[N.m]
12  Ib=850;             %[A]
13  Vm=220;             %Unline=380[v].
14  f=50;               %[Hz]
15  %.....
```

Test_3_Changing_nr_Wit... | Test_1_Changing_nr_Wit... | IG_WITH_Constant_Load... | IG_WITH_Constant_Load... | IG_WITH_Variable

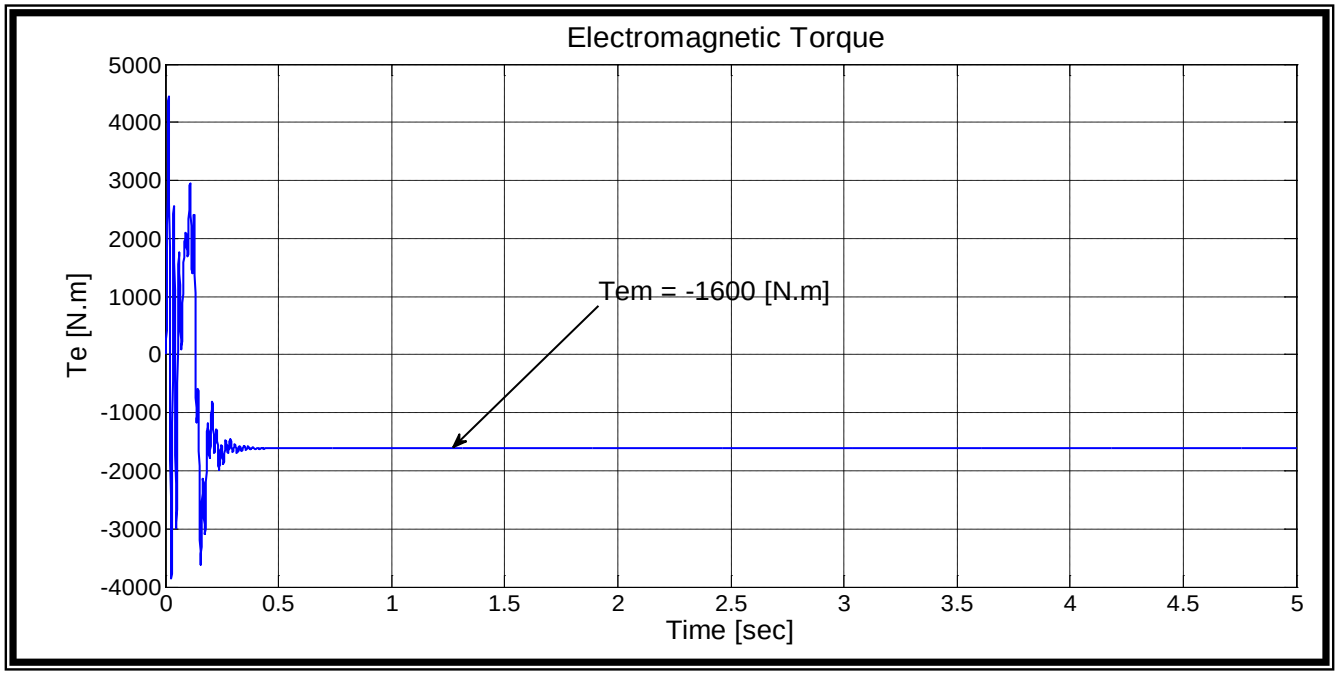
script Ln 14 Col 26 OVR

**الشكل (5-4): ملف الـ (M-file) المستخدم في إدخال معطيات المولد التحريضي المدروس.**

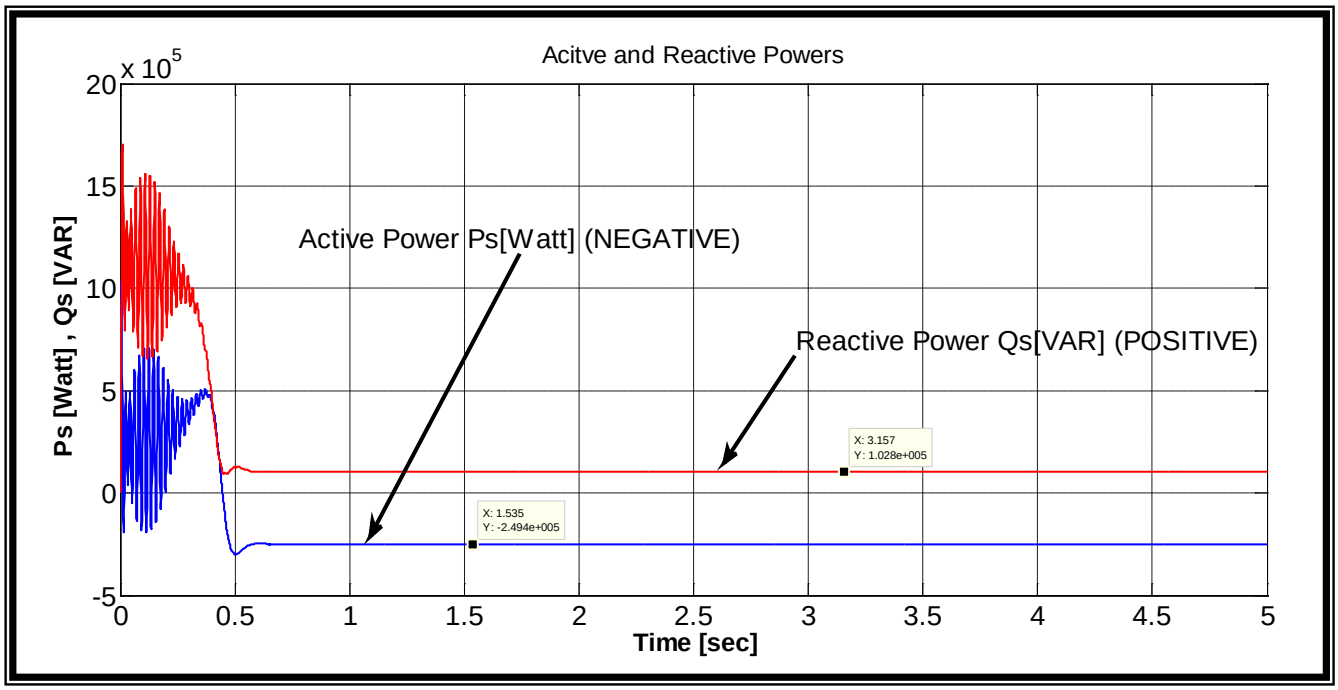
والأشكال التالية توضح نتائج محاكاة المولد التحريضي المدروس المربوط إلى الشبكة مع عزم ميكانيكي ثابت ($T_{Load}$ = 1600 [N.m]):




**الشكل (5-5): مخطط ( سرعة الدائر – زمن) في المولد التحريضي المربوط مع عزم ميكانيكي ثابت (TLoad = 1600 [N.m]) أثناء الإقلاع، ومن ثم الاستقرار.**

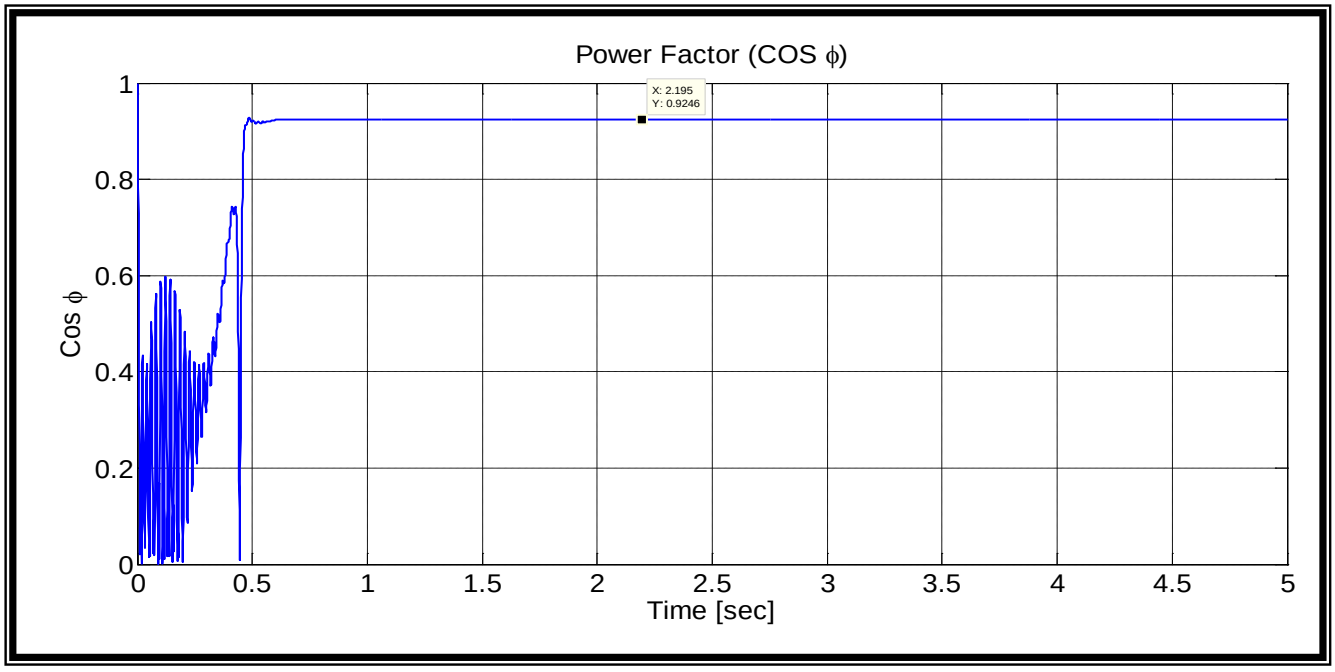



**الشكل (5-6): العزم الكهرومغناطيسي في المولد التحريضي المربوط مع عزم ميكانيكي ثابت (TLoad = 1600 [N.m]) أثناء الإقلاع، ومن ثم الاستقرار.**



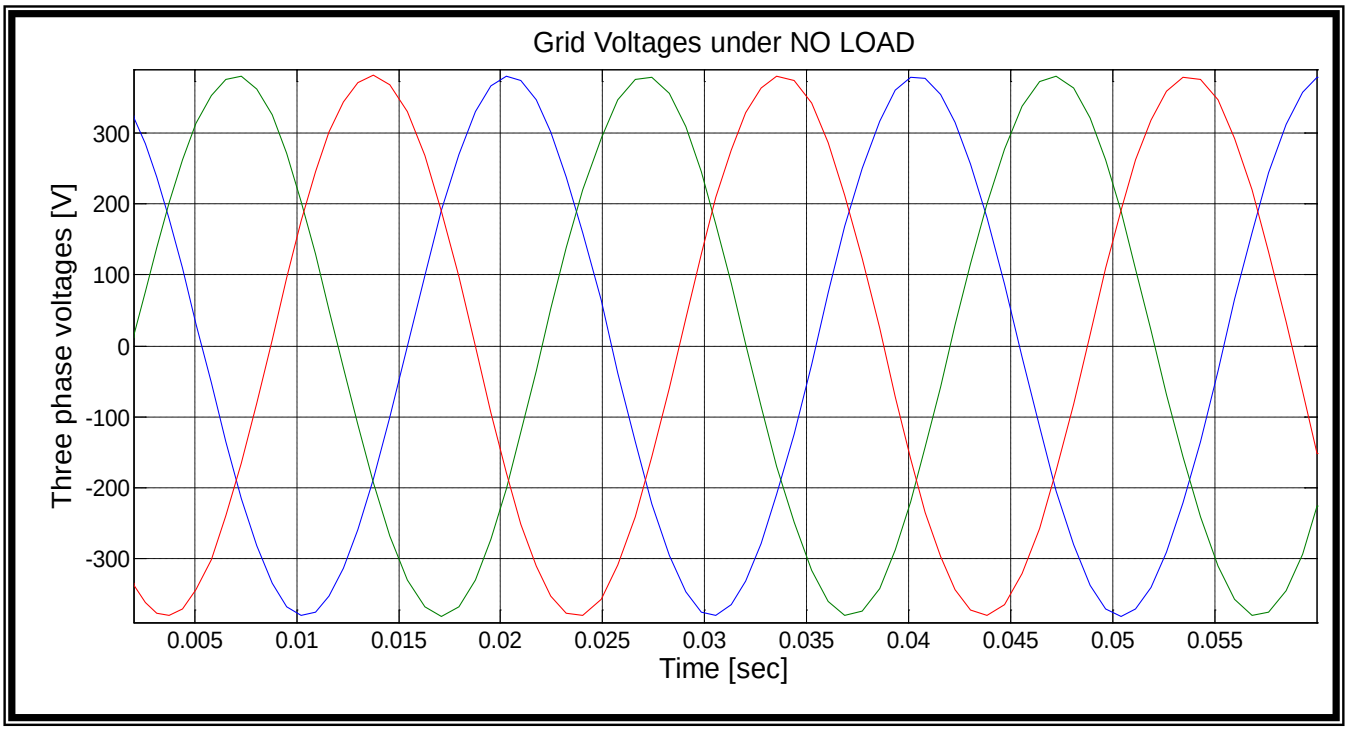

**الشكل (5-7): الاستطاعة الفعلية والردية للمولد التحريضي المربوط مع عزم ميكانيكي ثابت (TLoad = 1600 [N.m]) أثناء الإقلاع، ومن ثم الاستقرار.**

ونلاحظ أن الاستطاعة الردية موجبة أي أنها تُسجر من الشبكة، وهذا ما تم تقريره في المبدأ النظري للمولد التحريضي، وهو أن المولد التحريضي يستجر الاستطاعة الردية من الشبكة لتأمين تيار المغنطة اللازم له. بينما نلاحظ أن الاستطاعة الفعلية ذات إشارة سالبة، أي أنها تحقن في الشبكة.

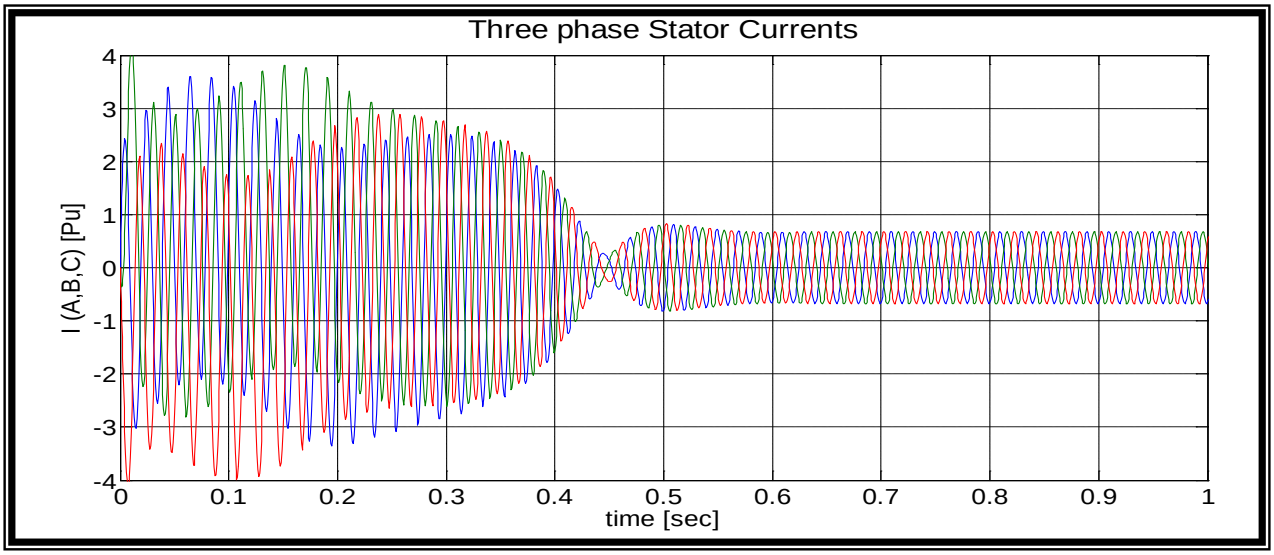



**الشكل (5-8): عامل الاستطاعة (Cos φ) للمولد التحريضي المربوط مع عزم ميكانيكي ثابت (TLoad = 1600 [N.m]) أثناء الإقلاع، ومن ثم الاستقرار.**

ونلاحظ أن عامل الاستطاعة للمولد التحريضي ذو قيمة منخفضة نسبياً، ويعود ذلك إلى القيمة الكبيرة (نسبياً) للاستطاعة الردية المستهلكة في المولدات التحريضية.




**الشكل (5-9): التوتر ثلاثي الطور على مخارج المولد التحريضي المربوط إلى الشبكة.**

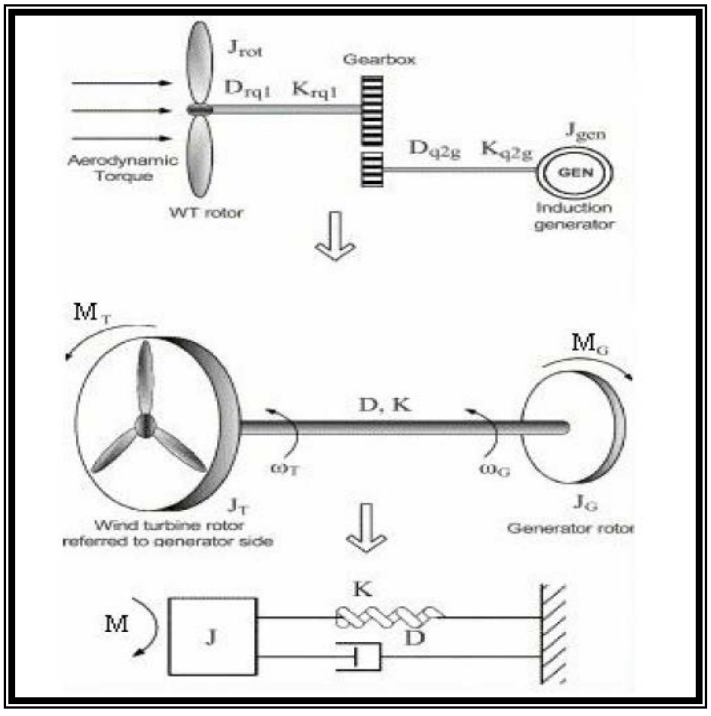



**الشكل (5-10): تيارات أطوار الثابت ثلاثية الطور في المولد التحريضي المربوط مع عزم ميكانيكي ثابت ( 1600 [N.m] = TLoad) أثناء الإقلاع، ومن ثم الاستقرار.**

## ٥ ٤ ٢:التجربة الثانية:

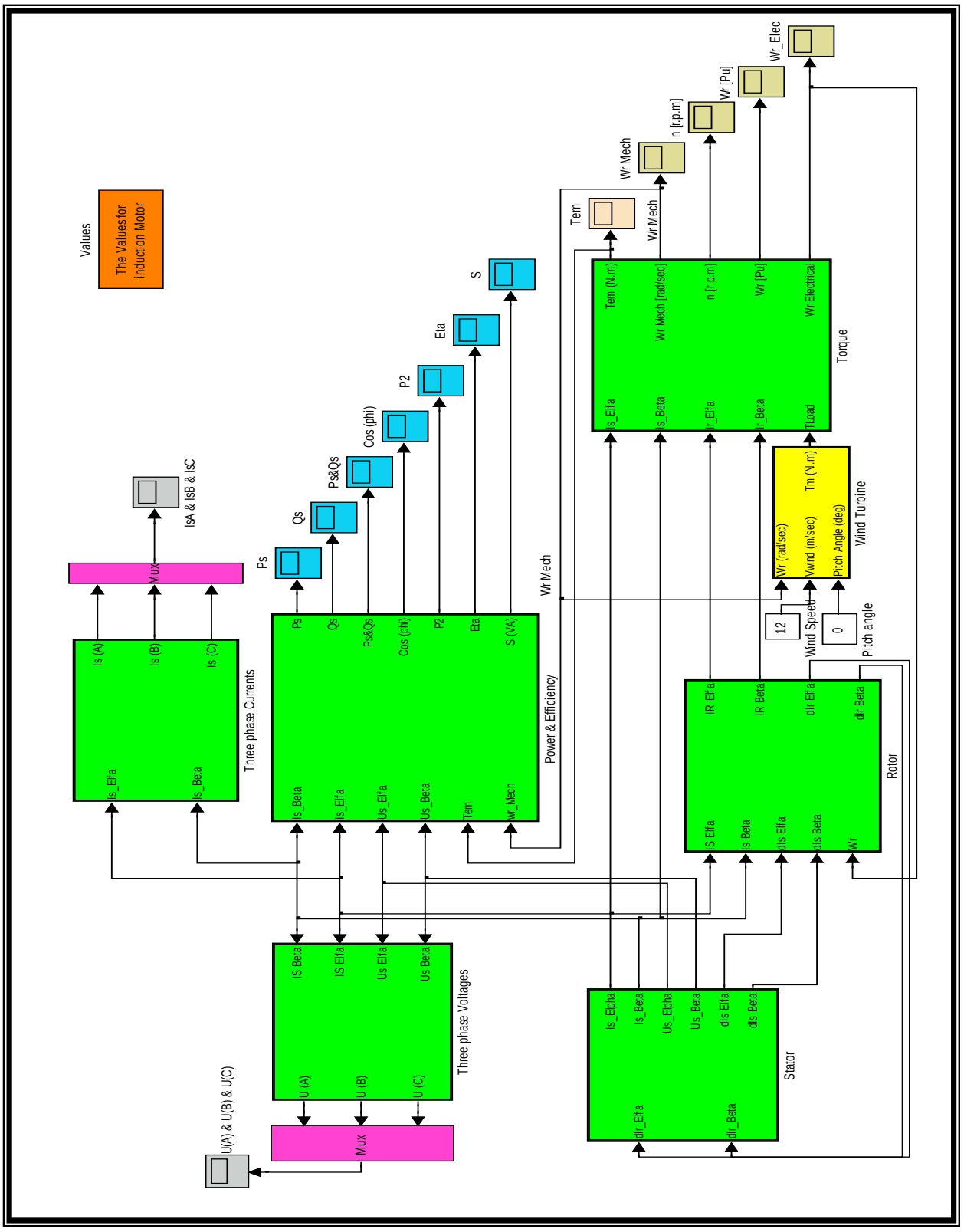
إقلاع المولد التحريضي التقليدي عند ربطه مع حمولة ميكانيكية ذات عزم مروحي ( عنفة ريحية ):

يتم ربط العنفة الريحية مع المولدة التحريضية عن طريق علبة سرعة ومحاور نقل الحركة. والغاية من علبة نقل السرعة هو رفع السرعة الدورانية لمحور الدوران إلى القيمة الملائمة للمولد التحريضي، حيث أن سرعة العنفات الريحية تكون أقل بكثير من السرعة الدورانية للمولدة التحريضية. يبين الشكل التالي نظام الربط الميكانيكي بين العنفة والمولدة.



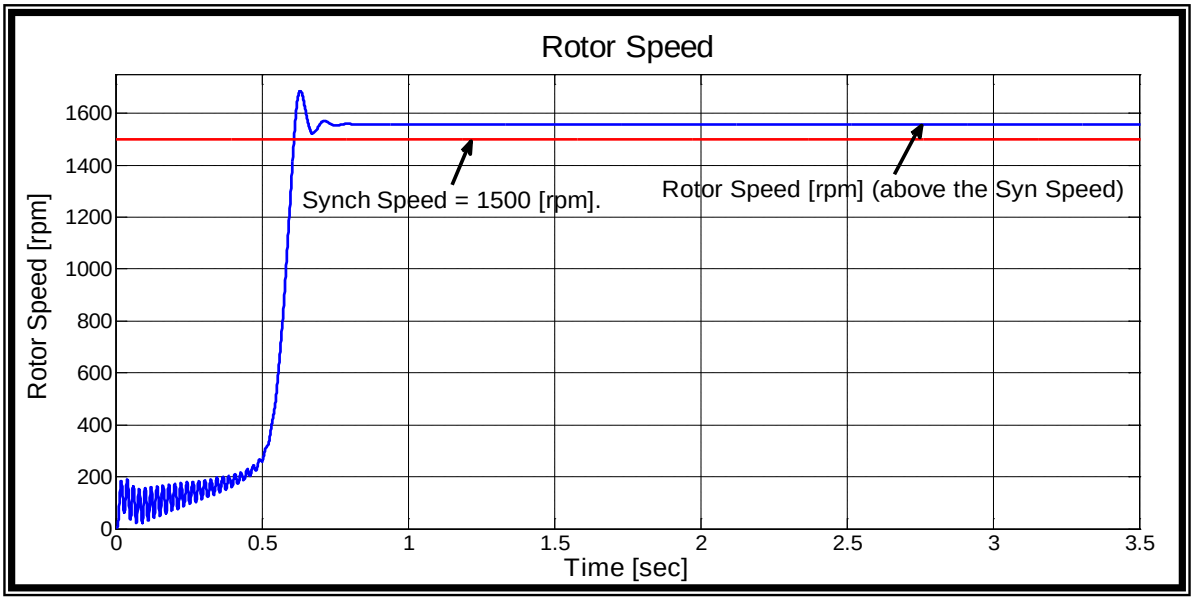

**الشكل (5-11): طريقة ربط العنفة الريحية مع المولدة التحريضية.**

يبين الشكل (5-12) المخطط الصندوقي لنموذج المولد التحريضي المربوط مع عنفة ريحية، والذي تم تمثيله باستخدام برنامج الـ MATLAB/SIMULINK في حالة الربط مع الشبكة.



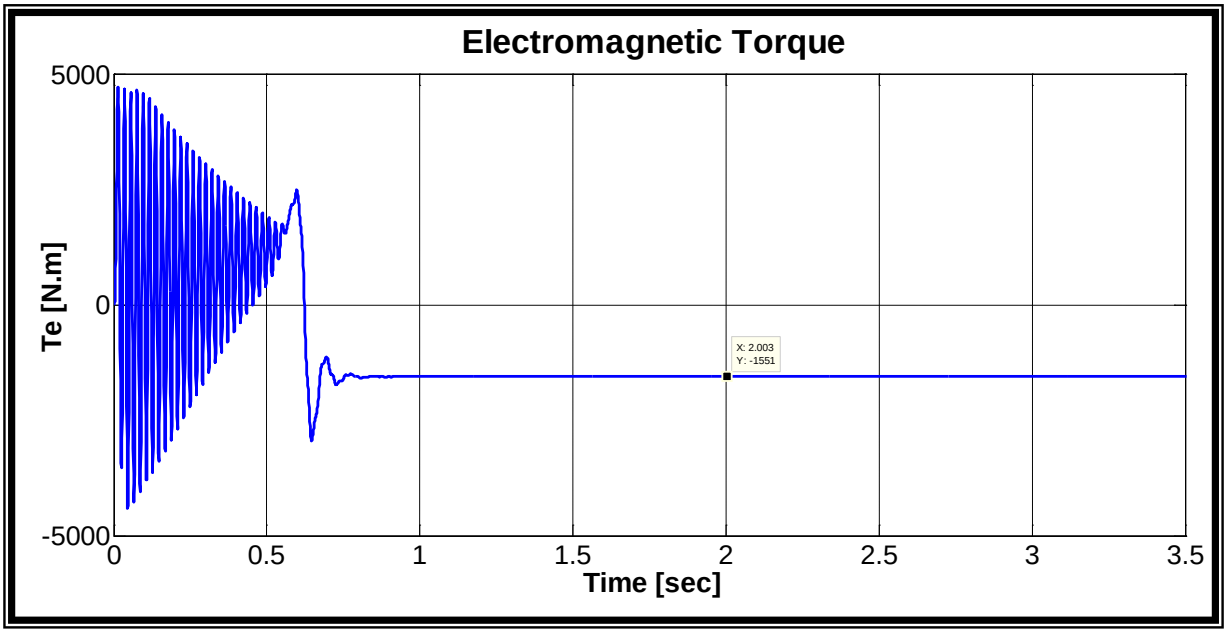

**الشكل (5-12): المخطط الصندوقي للمولد التحريضي المربوط مع عنفة ريحية(T-500).**

الأشكال التالية توضح نتائج محاكاة المولد التحريضي المدروس المربوط إلى العنفة الريحية ( T-500)، والموصول إلى الشبكة، وقد أخذت النتائج التالية عند سرعة رياح محددة ( $V_{wind}$ = 12 [m/sec])، وكذلك زاوية ميلان محددة لشفرات الدوار ($\beta = 0^o$):

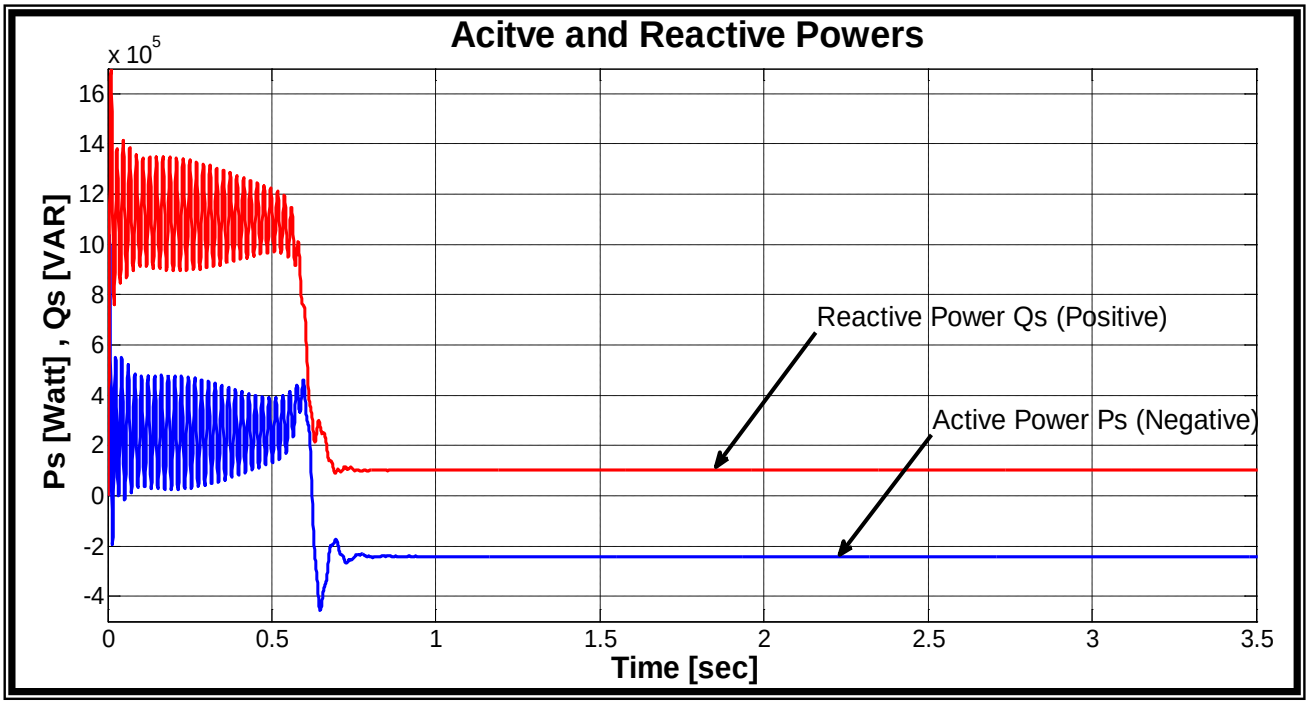



**الشكل (5-13): مخطط ( سرعة الدائر – زمن) في المولد التحريضي المربوط مع عنفة ريحية، أثناء الإقلاع، ومن ثم الاستقرار.**

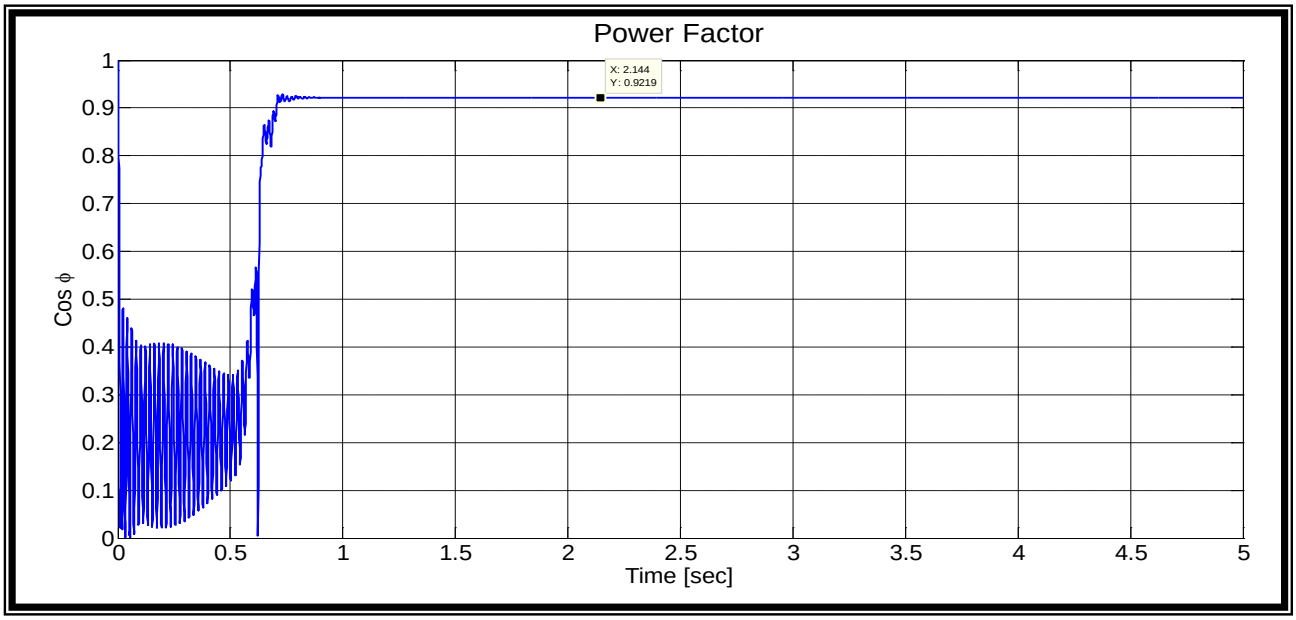
نلاحظ من الشكل السابق أن الزمن اللازم للوصول إلى مرحلة الاستقرار صغير نسبياً (حوالي الـ 0.5 [sec])، مما يعني ارتفاع كبير في عزم الإقلاع، وهذا واضح من خلال الشكل التالي " الشكل (5-14) "، وهذا غير مستخدم في التطبيقات العملية، حيث يتم إقلاع المولدات التحريضية دوماً بواسطة مقلع ناعم، ولا يتم إقلاعها بشكل مباشر لأن هذا قد يؤدي إلى احتراق الملفات بسبب تيارات وعزوم الإقلاع الكبيرة الناتجة حينئذٍ.



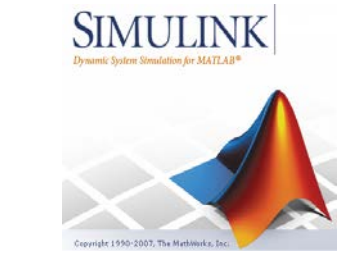

**الشكل (5-14): العزم الكهرومغناطيسي في المولد التحريضي المربوط مع عنفة ريحية، أثناء الإقلاع، ومن ثم الاستقرار.**

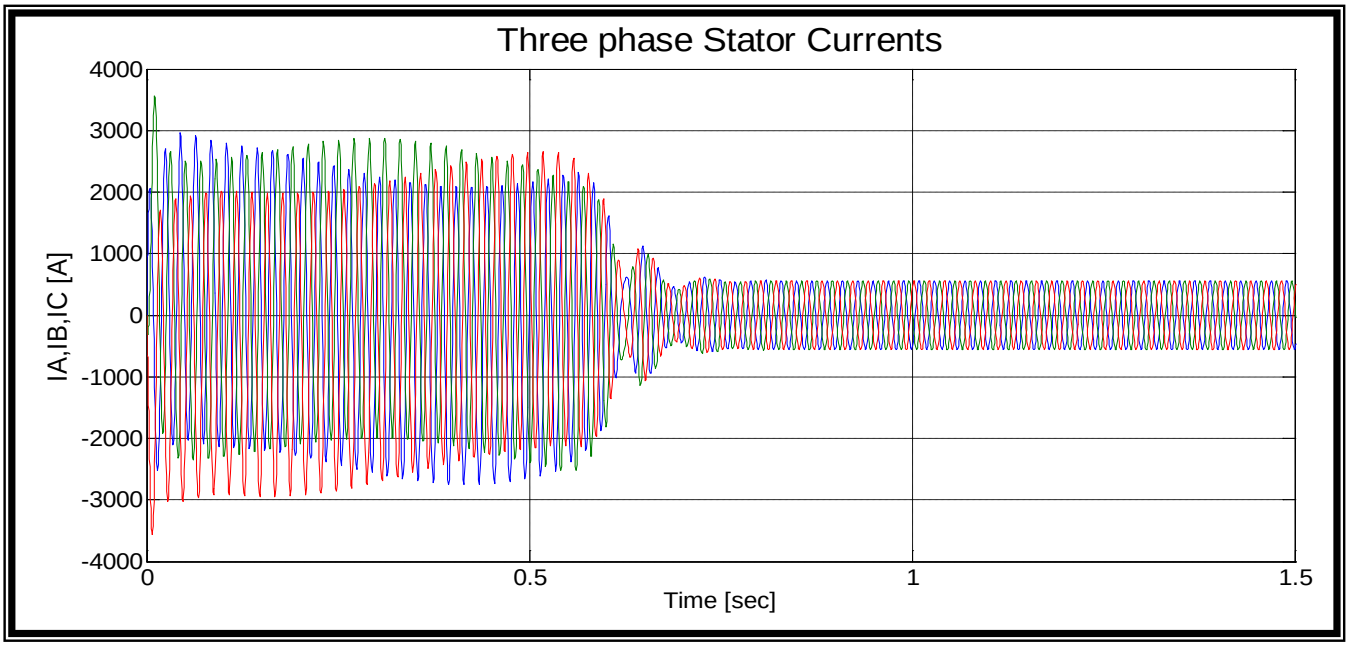



الشكل (5-15): الاستطاعة الفعلية والردية للمولد التحريضي المربوط مع عنفة ريحية، أثناء الإقلاع، ومن ثم الاستقرار.




الشكل (5-16): عامل الاستطاعة (Cos φ) للمولد التحريضي المربوط مع عنفة ريحية، أثناء الإقلاع، ومن ثم الاستقرار.



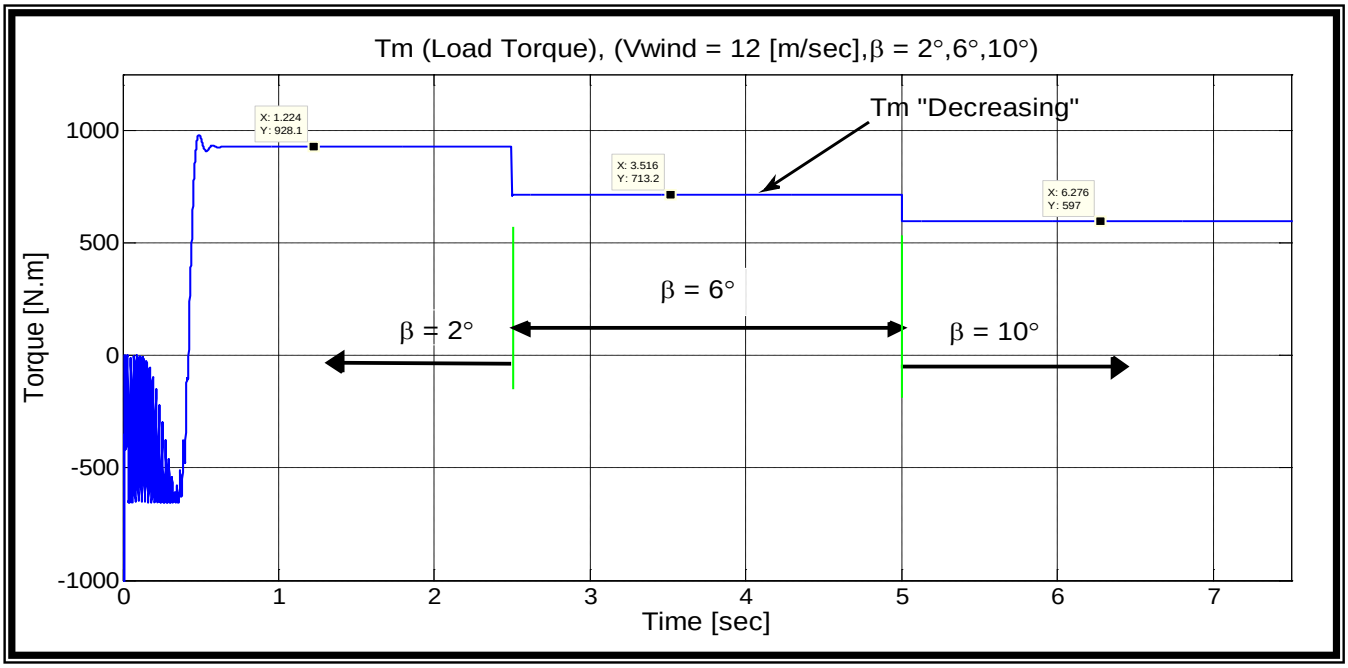

**الشكل (5-17): تيارات أطوار الثابت ثلاثية الطور في المولد التحريضي المربوط مع عنفة ريحية، أثناء الإقلاع، ومن ثم الاستقرار.**

## ٥ ٤ ٣: التجربة الثالثة:

دراسة تأثير تغير زاوية ميلان الريش ( β)، مع ثبات سرعة الرياح على المولد التحريضي التقليدي الموصول مع عنفة ريحية، والمربوط إلى الشبكة:

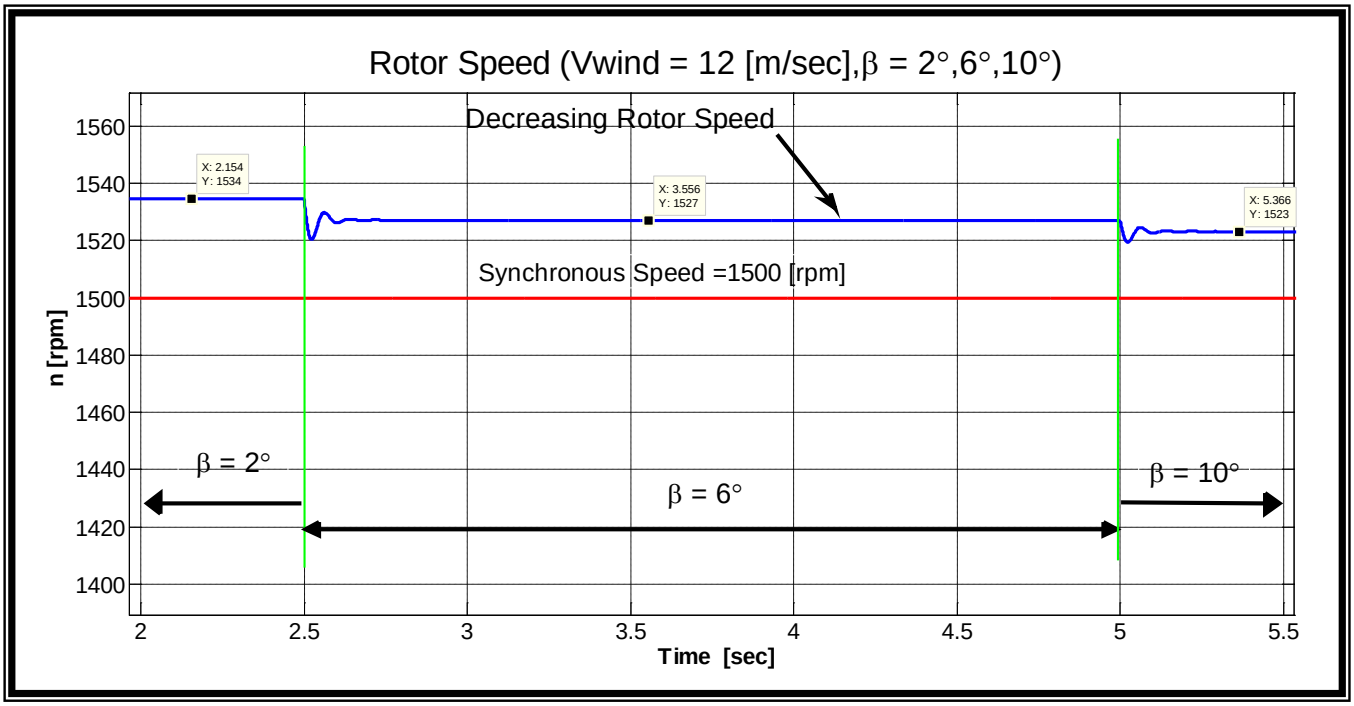
تبين الأشكال التالية نتائج محاكاة المولد التحريضي المدروس المربوط إلى العنفة الريحية ( T-500)، والموصول إلى الشبكة، وقد أخذت النتائج التالية عند سرعة رياح محددة ( $V_{wind}$ = 12 [m/sec] )، وزوايا ميلان مختلفة لشفرات الدوار هي:

| زاوية ميلان شفرات الدوار ($\beta^o$) | الزمن (t [sec]) |
|---|---|
| $\beta = 2^o$ | From (t= 0 [sec]) to (t= 2.5 [sec]) |
| $\beta = 6^o$ | From (t= 2.5 [sec]) to (t= 5 [sec]) |
| $\beta = 10^o$ | From (t= 5 [sec]) to (t= 7.5 [sec]) |



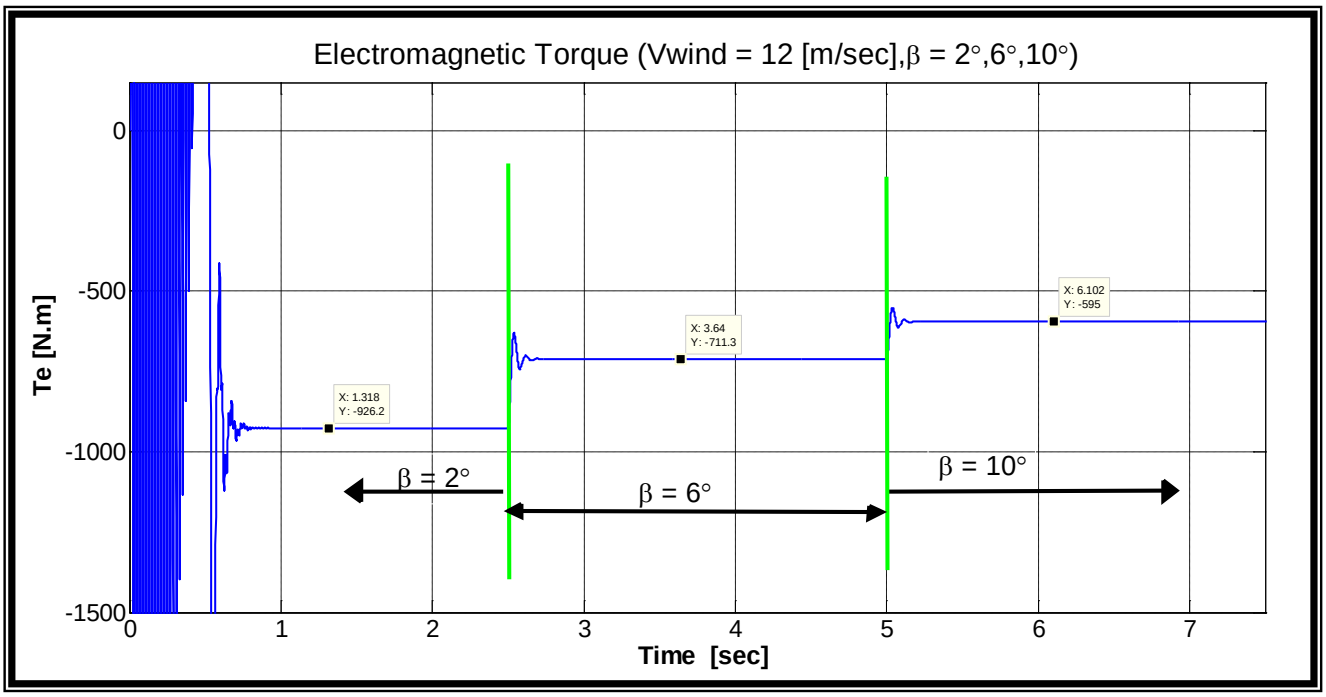

**الشكل (5-18): مخطط (العزم الميكانيكي للعنفة الريحية – زمن) المقدم إلى محور المولد التحريضي المربوط مع عنفة ريحية، عند تغير زاوية ميلان الشفرات، وثبات سرعة الرياح.**

نلاحظ من الشكل السابق تناقص العزم الميكانيكي المقدم من العنفة إلى محور المولد مع زيادة زاوية ميلان الشفرات.

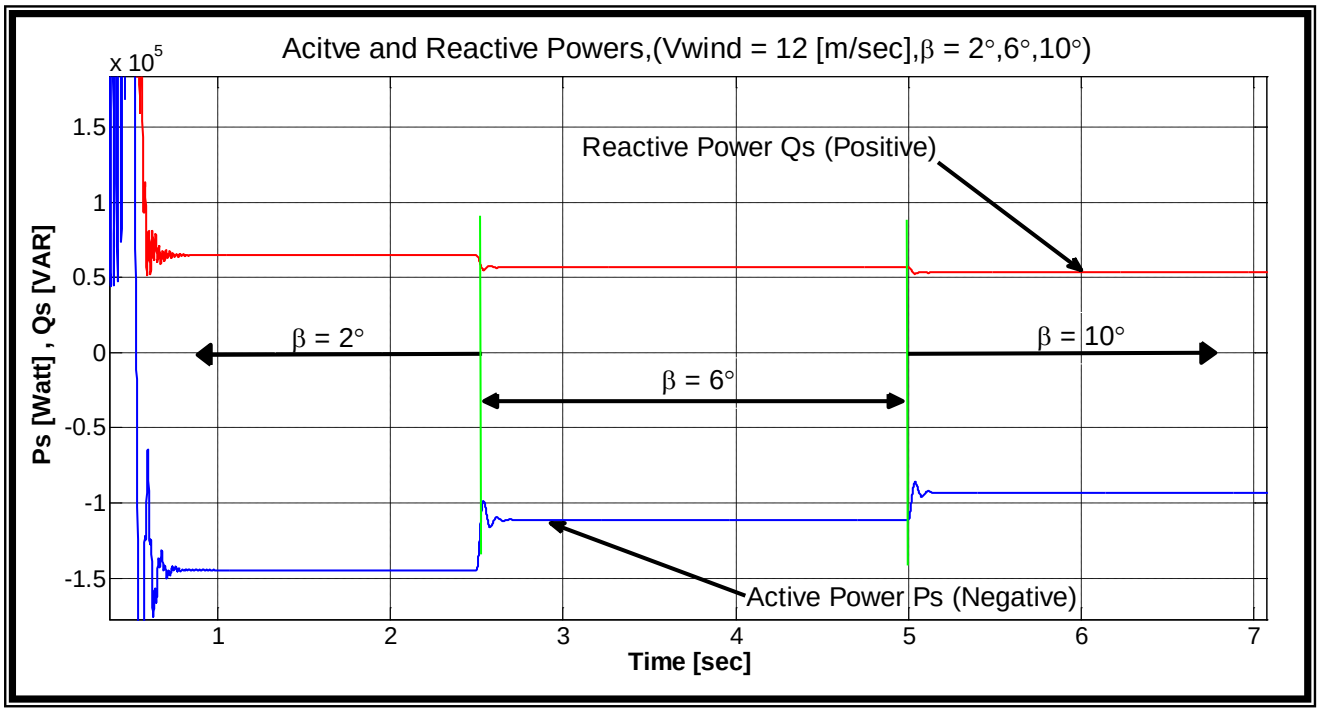



**الشكل (5-19): مخطط ( سرعة الدائر – زمن) في المولد التحريضي المربوط مع عنفة ريحية، عند تغير زاوية ميلان الشفرات، وثبات سرعة الرياح.**

نلاحظ من الشكل السابق تناقص سرعة دوران الدائر مع ازدياد زاوية ميلان الشفرات، وذلك بسبب انخفاض العزم الميكانيكي المقدم من العنفة إلى محور المولد.

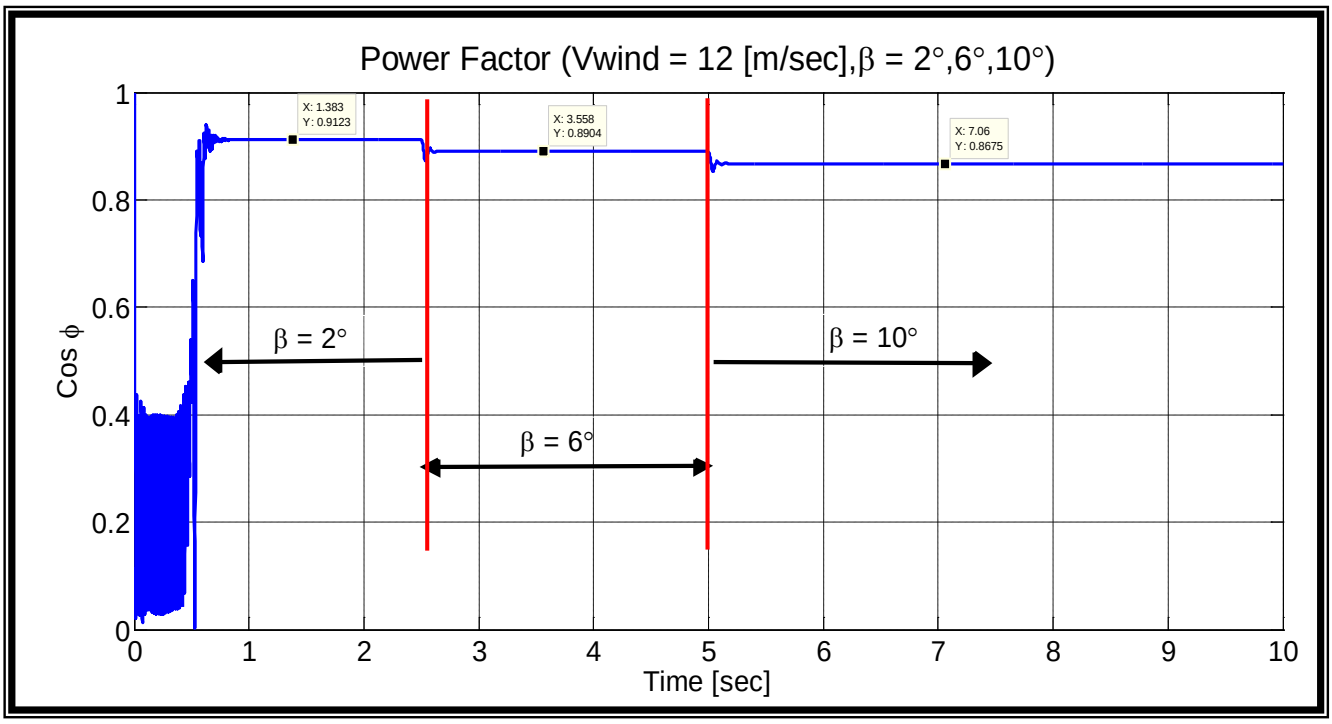



**الشكل (5-20): (العزم الكهرومغناطيسي – زمن) في المولد التحريضي المربوط مع عنفة ريحية، عند تغير زاوية ميلان الشفرات، وثبات سرعة الرياح.**

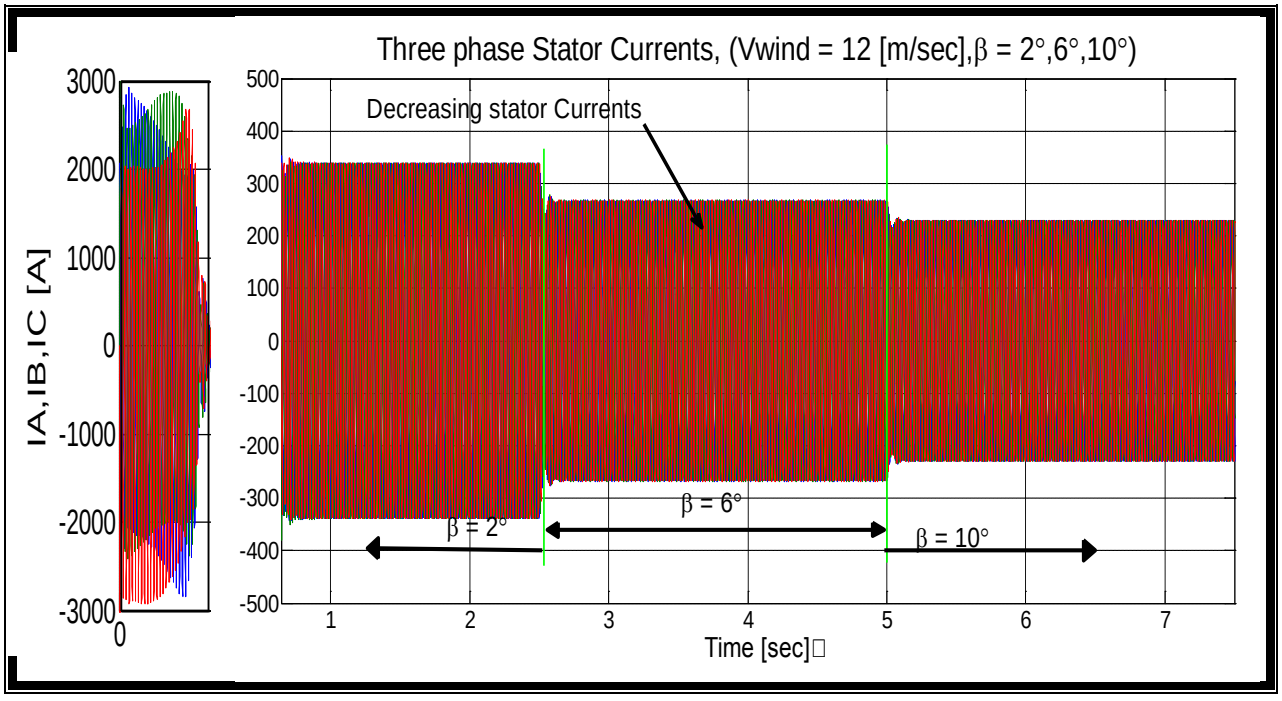



**الشكل (5-21): الاستطاعة الفعلية والردية في المولد التحريضي المربوط مع عنفة ريحية، عند تغير زاوية ميلان الشفرات، وثبات سرعة الرياح.**

ونلاحظ من الشكل السابق تناقص قيمة الاستطاعتين الردية والفعلية مع زيادة قيمة زاوية ميلان الشفرات للعنفة الريحية.




**الشكل (5-22): عامل الاستطاعة (Cos φ) للمولد التحريضي المربوط مع عنفة ريحية، عند تغير زاوية ميلان الشفرات، وثبات سرعة الرياح.**



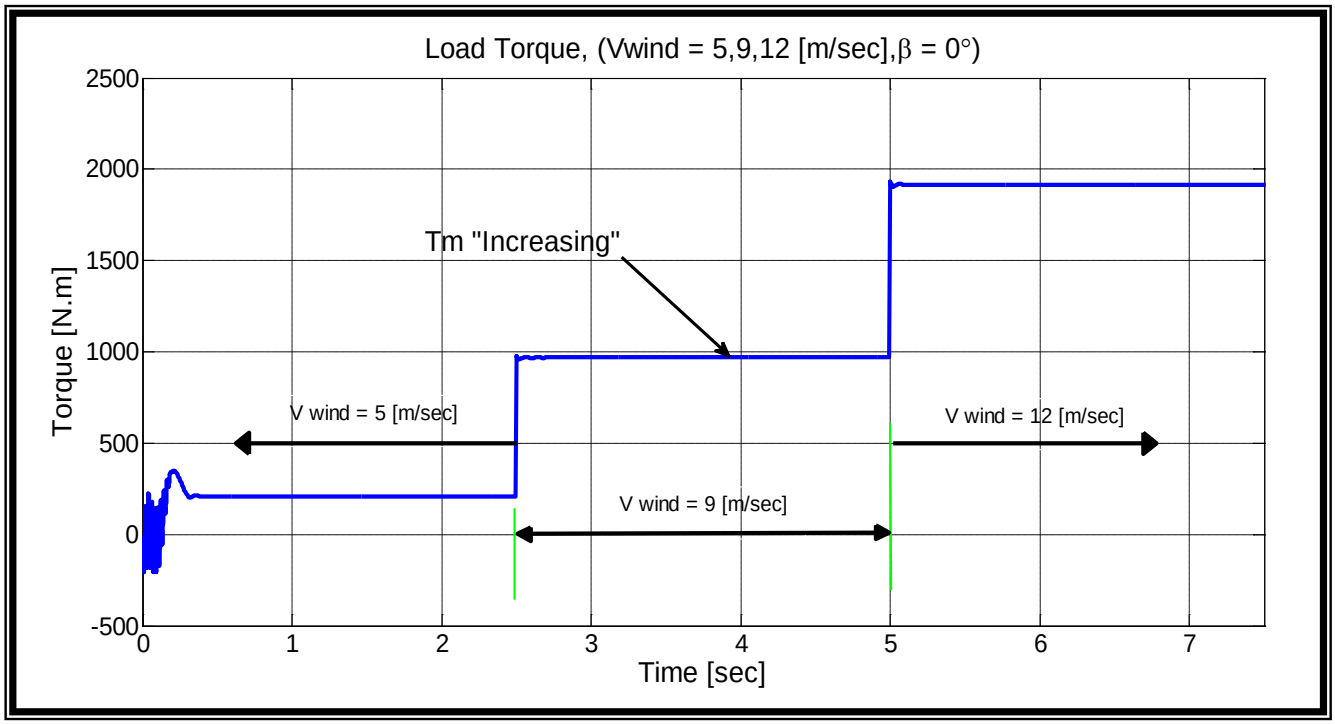

**الشكل (5-23): تيارات أطوار الثابت ثلاثية الطور، في المولد التحريضي المربوط مع عنفة ريحية، عند تغير زاوية ميلان الشفرات، وثبات سرعة الرياح.**

### ٥ ٤ ٤: التجربة الرابعة:

دراسة تأثير تغير سرعة الرياح، مع ثبات زاوية ميلان الريش ( β)، على المولد التحريضي التقليدي الموصول مع عنفة ريحية، والمربوط إلى الشبكة:

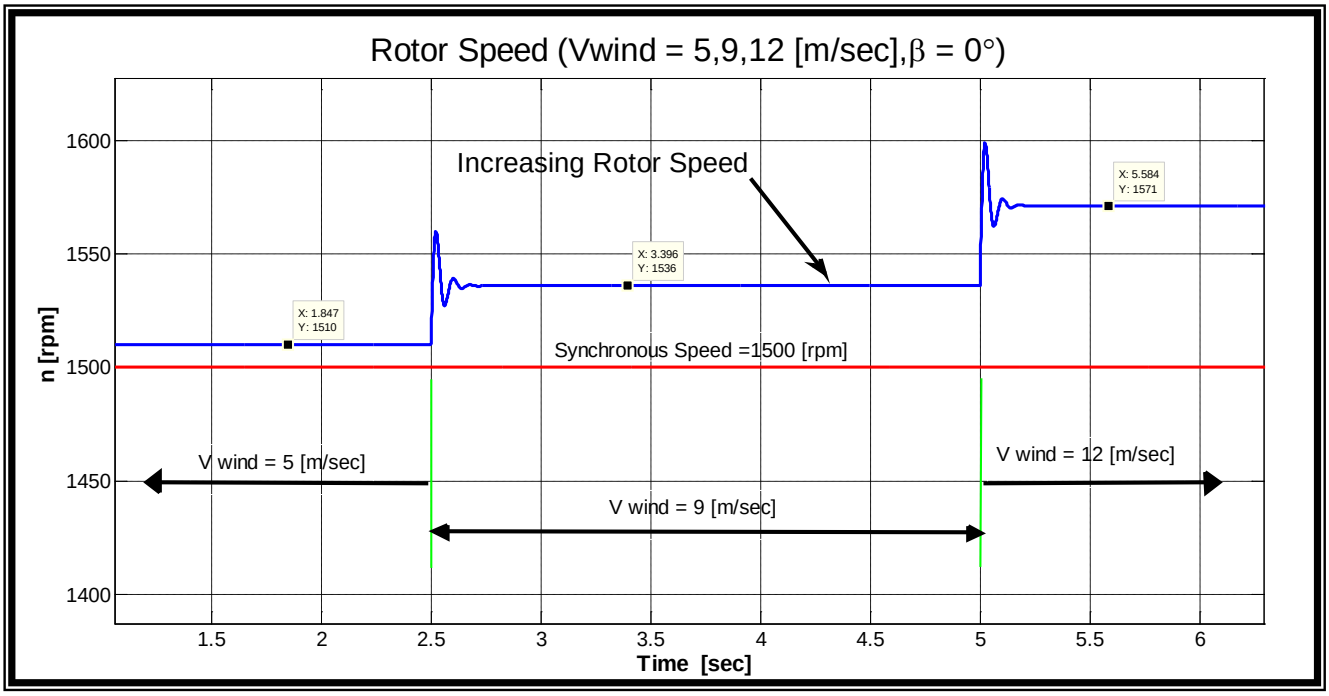
تبين الأشكال التالية نتائج محاكاة المولد التحريضي المدروس المربوط إلى العنفة الريحية ( T-500)، والموصول إلى الشبكة، وقد أخذت النتائج التالية عند زاوية ميلان ثابتة للريش ( $\beta = 0^o$)، وسرعات رياح مختلفة يبينها الجدول التالي:

| الزمن (t [sec]) | سرعة الرياح ($V_{wind}$ [m/sec]) |
|---|---|
| From (t= 0 [sec]) to (t= 2.5 [sec]) | $V_{wind}$ = 5 [m/sec] |
| From (t= 2.5 [sec]) to (t= 5 [sec]) | $V_{wind}$ = 9 [m/sec] |
| From (t= 5 [sec]) to (t= 7.5 [sec]) | $V_{wind}$ = 12 [m/sec] |



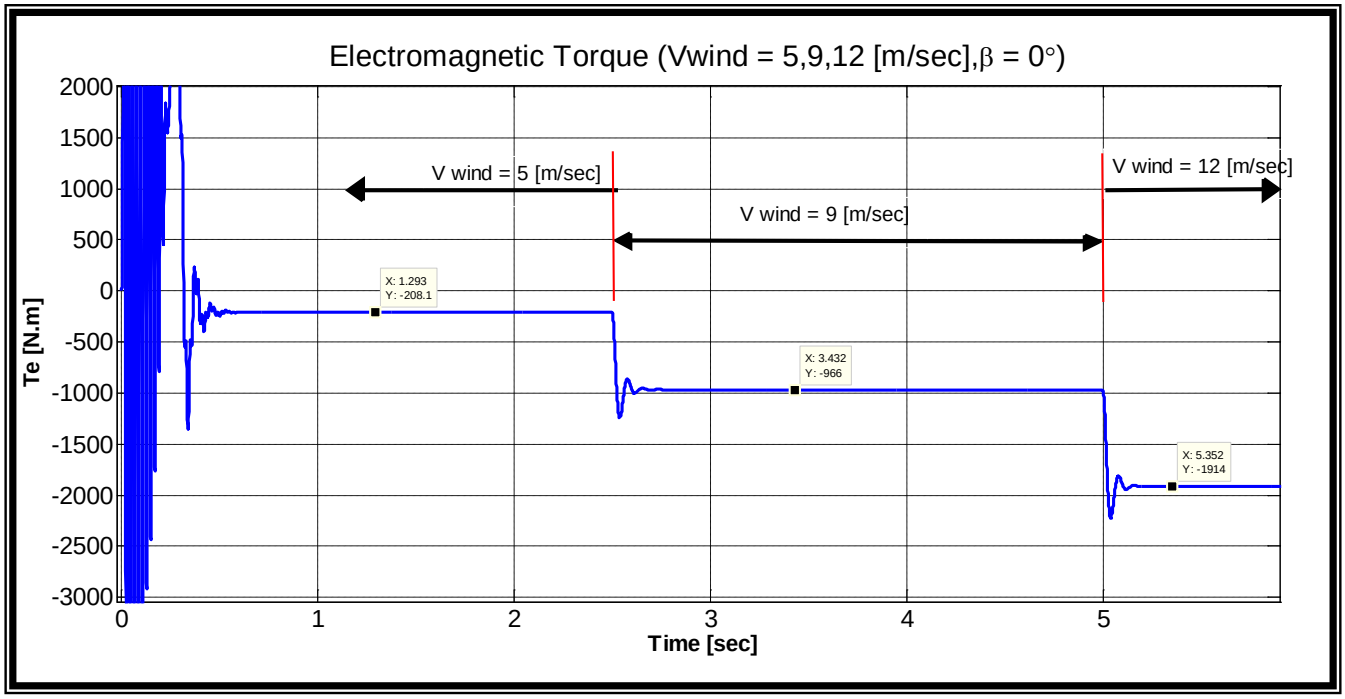

**الشكل (5-24): مخطط (العزم الميكانيكي للعنفة الريحية – زمن) المقدم إلى محور المولد التحريضي المربوط مع عنفة ريحية، عند تغير سرعة الرياح، وثبات زاوية ميلان الشفرات.**

نلاحظ من الشكل السابق ازدياد العزم الميكانيكي المقدم من العنفة إلى محور المولد مع زيادة سرعة الرياح.

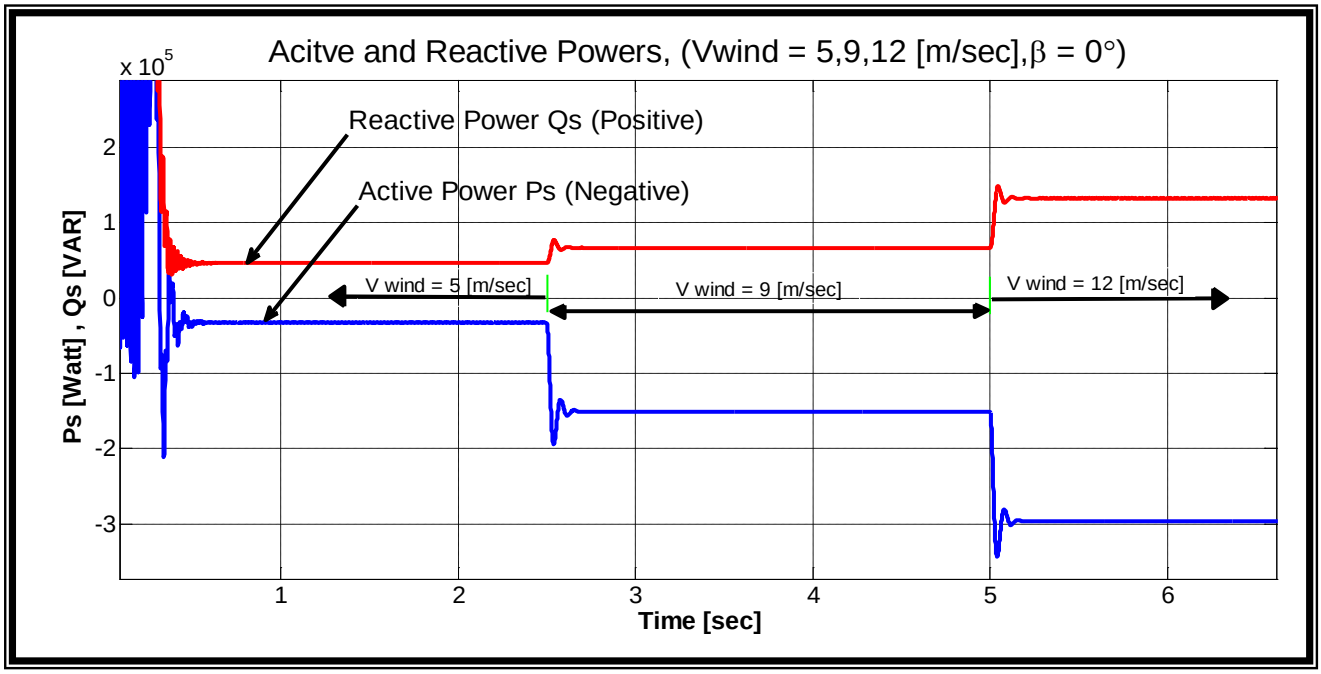



**الشكل (5-25): مخطط ( سرعة الدائر – زمن) في المولد التحريضي المربوط مع عنفة ريحية، عند تغير سرعة الرياح، وثبات زاوية ميلان الشفرات.**

نلاحظ من الشكل السابق ازدياد سرعة دوران الدائر مع زيادة سرعة الرياح، وذلك بسبب ازدياد العزم الميكانيكي المقدم من العنفة إلى محور المولد.

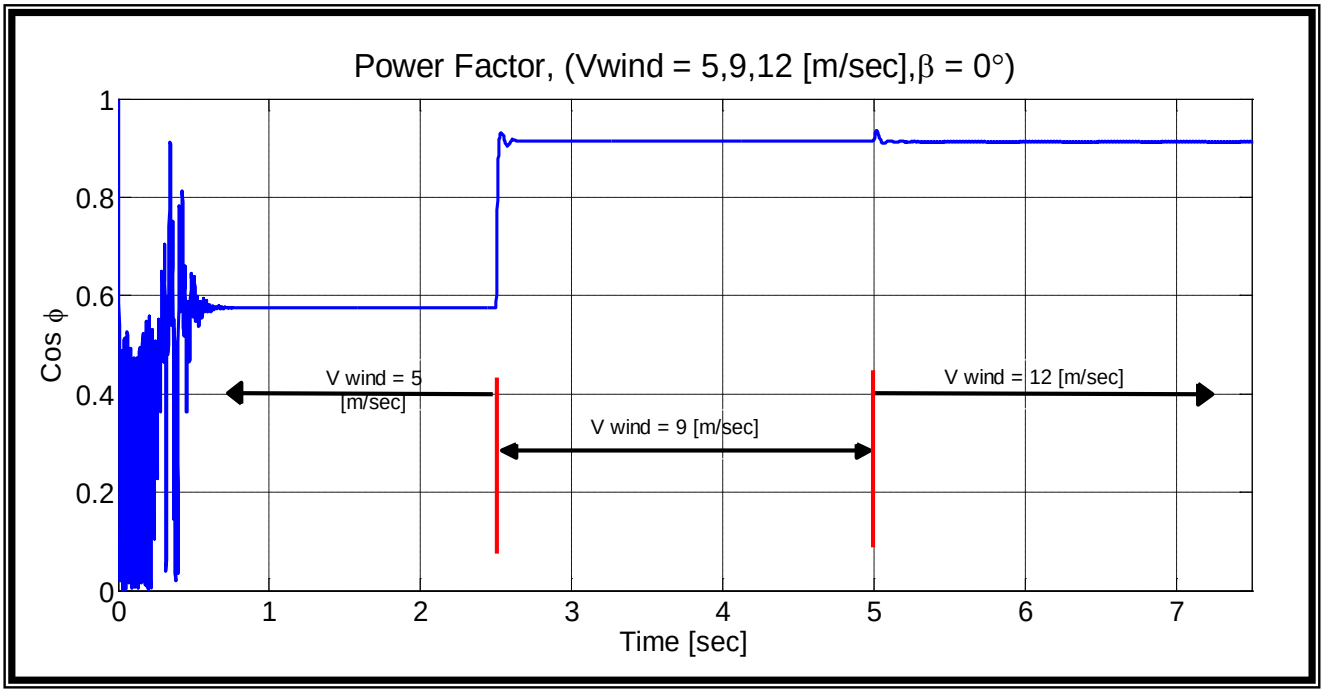



**الشكل (5-26): (العزم الكهرومغناطيسي – زمن) في المولد التحريضي المربوط مع عنفة ريحية، عند تغير سرعة الرياح، وثبات زاوية ميلان الشفرات.**

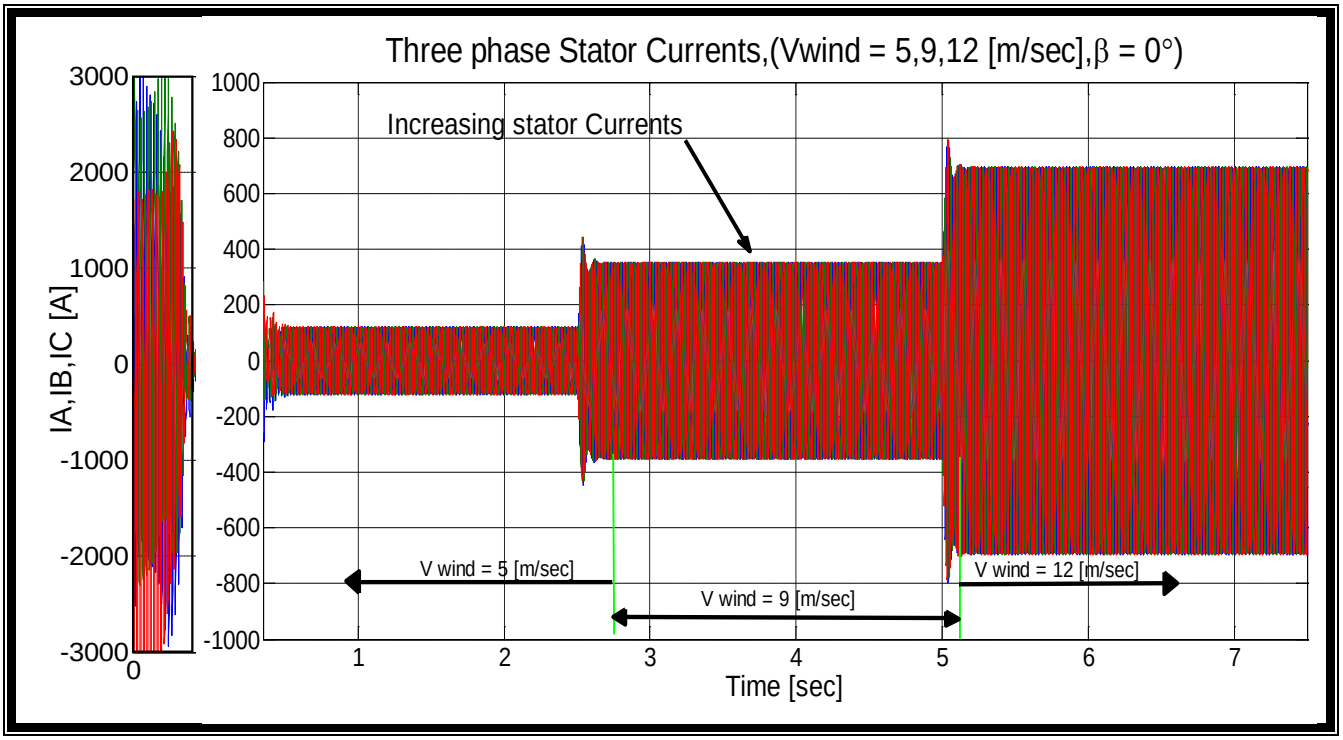



**الشكل (5-27): الاستطاعة الفعلية والردية في المولد التحريضي المربوط مع عنفة ريحية، عند تغير سرعة الرياح، وثبات زاوية ميلان الشفرات.**

ونلاحظ من الشكل السابق ازدياد قيمة الاستطاعتين الردية والفعلية مع زيادة سرعة الرياح.




**الشكل (5-28): عامل الاستطاعة (Cos φ) للمولد التحريضي المربوط مع عنفة ريحية، عند تغير سرعة الرياح، وثبات زاوية ميلان الشفرات.**



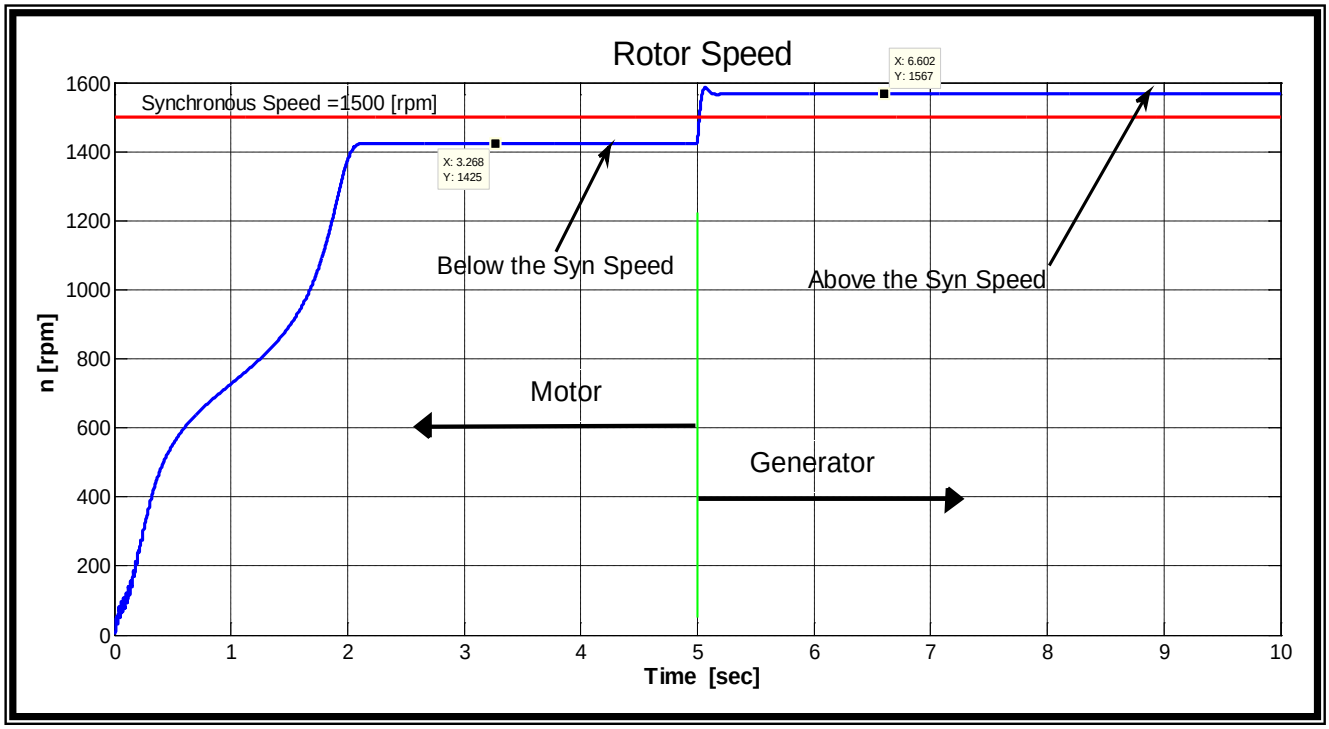

**الشكل (5-29): تيارات أطوار الثابت ثلاثية الطور، في المولد التحريضي المربوط مع عنفة ريحية، عند تغير سرعة الرياح، وثبات زاوية ميلان الشفرات.**

## ٥ ٤ ٥: التجربة الخامسة:

دراسة التغيرات الحاصلة في المنحنيات عند الانتقال من حالة العمل كمحرك تحريضي تقليدي، إلى حالة العمل كمولد تحريضي تقليدي، موصول إلى عنفة ريحية، في حالة الربط مع الشبكة:

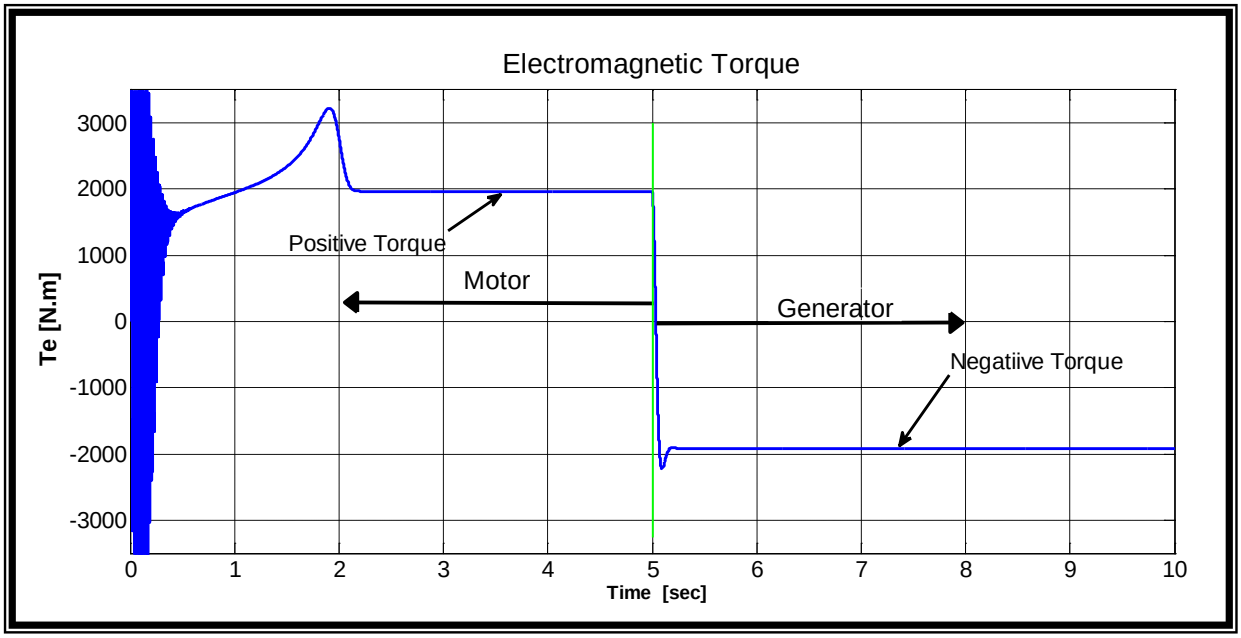
بعد إجراء بعض التعديلات على النموذج السابق تم رصد حالة الانتقال من عمل الآلة كمحرك تحريضي مربوط إلى العنفة الريحية، حيث تقوم الآلة التحريضية المربوطة إلى الشبكة في هذه المرحلة بتقديم الاستطاعة الميكانيكة إلى الحمل الميكانيكي المربوط على محورها (العنفة الريحية)، ومن ثم وفي اللحظة ($t = 5$ [sec])، تنتقل الآلة للعمل كمولد تحريضي يستمد استطاعته الميكانيكية من العنفة الريحية المربوطة إلى محوره.

تبين الأشكال التالية نتائج المحاكاة للتجربة الخامسة، وقد أخذت النتائج التالية عند زاوية ميلان ثابتة للريش ($\beta = 0^o$)، وسرعة رياح ثابتة ($V_{wind} = 12$ [m/sec]):



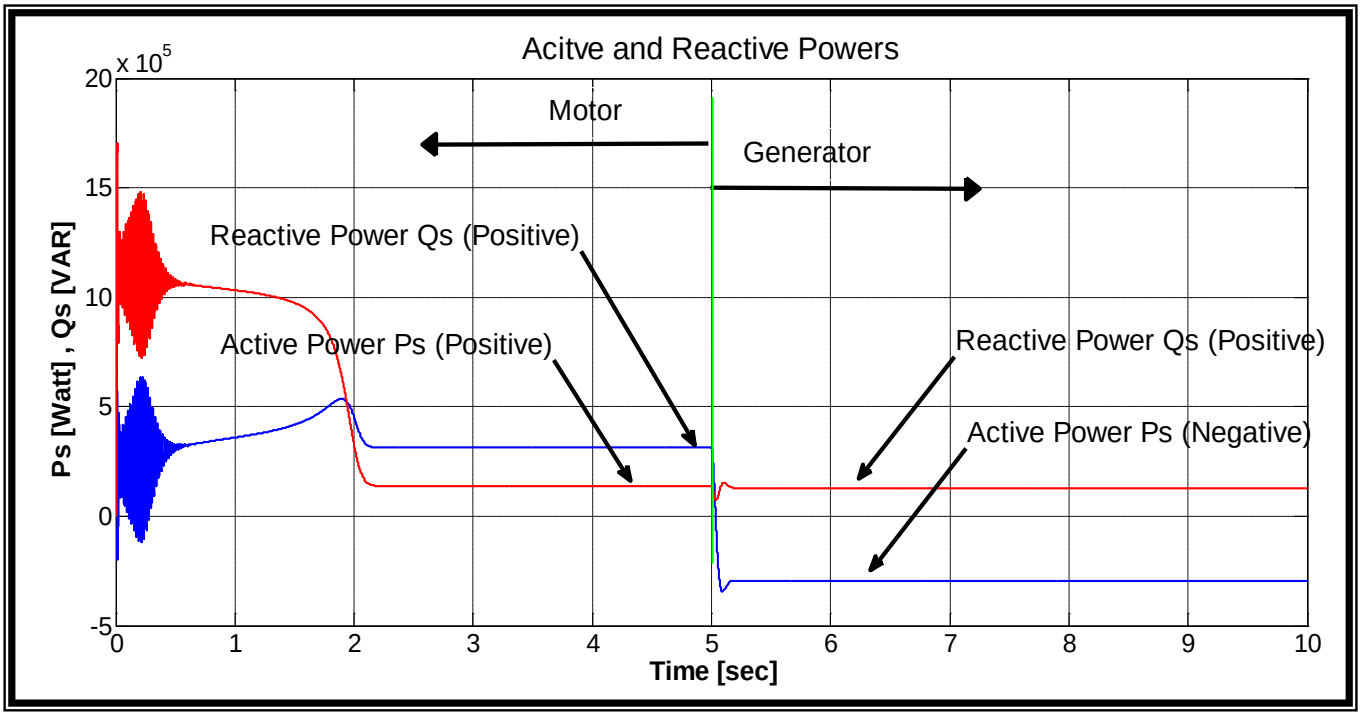

**الشكل (5-30): مخطط ( سرعة الدائر – زمن) عند الانتقال من حالة العمل كمحرك إلى حالة العمل كمولد.**

نلاحظ من الشكل السابق أن الآلة التحريضية عندما تعمل كمحرك فإن الدائر فيها يدور بسرعة أقل من السرعة التزامنية، ولكن عند انتقالها للعمل كمولد فإن الدائر ينتقل للعمل عند سرعة أعلى من السرعة التزامنية.




**الشكل (5-31): (العزم الكهرومغناطيسي – زمن) عند الانتقال من حالة العمل كمحرك إلى حالة العمل كمولد.**

نلاحظ من الشكل السابق أن الآلة التحريضية عندما تعمل كمحرك فإن العزم الكهرومغناطيسي فيها يكون موجباً، ولكن عند انتقالها للعمل كمولد فإن العزم الكهرومغناطيسي فيها يصبح سالباً.




**الشكل (5-32): الاستطاعة الفعلية والردية عند الانتقال من حالة العمل كمحرك إلى حالة العمل كمولد.**

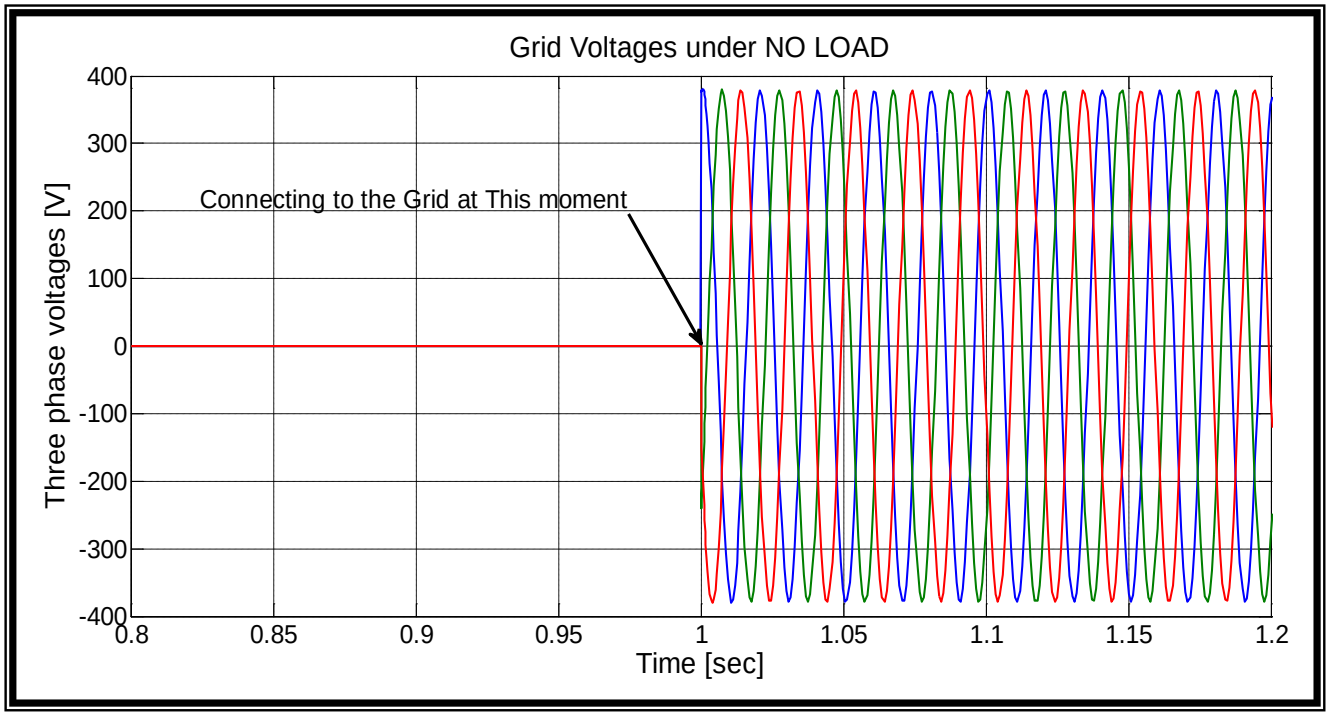
ونلاحظ من الشكل السابق أنه في حالة عمل الآلة التحريضية كمحرك فإن كلا الاستطاعتين الردية والفعلية تكونان مستجرتين من الشبكة (إشارتاهما موجبة)، ولكن عند انتقال الآلة للعمل كمولد فإنها تقوم بحقن الاستطاعة الفعلية إلى الشبكة (إشارة الاستطاعة الفعلية سالبة)، بينما تبقى مستجرة للاستطاعة الردية من الشبكة (إشارة الاستطاعة الفعلية موجبة).

## ٥ ٤ ٦: التجربة السادسة:

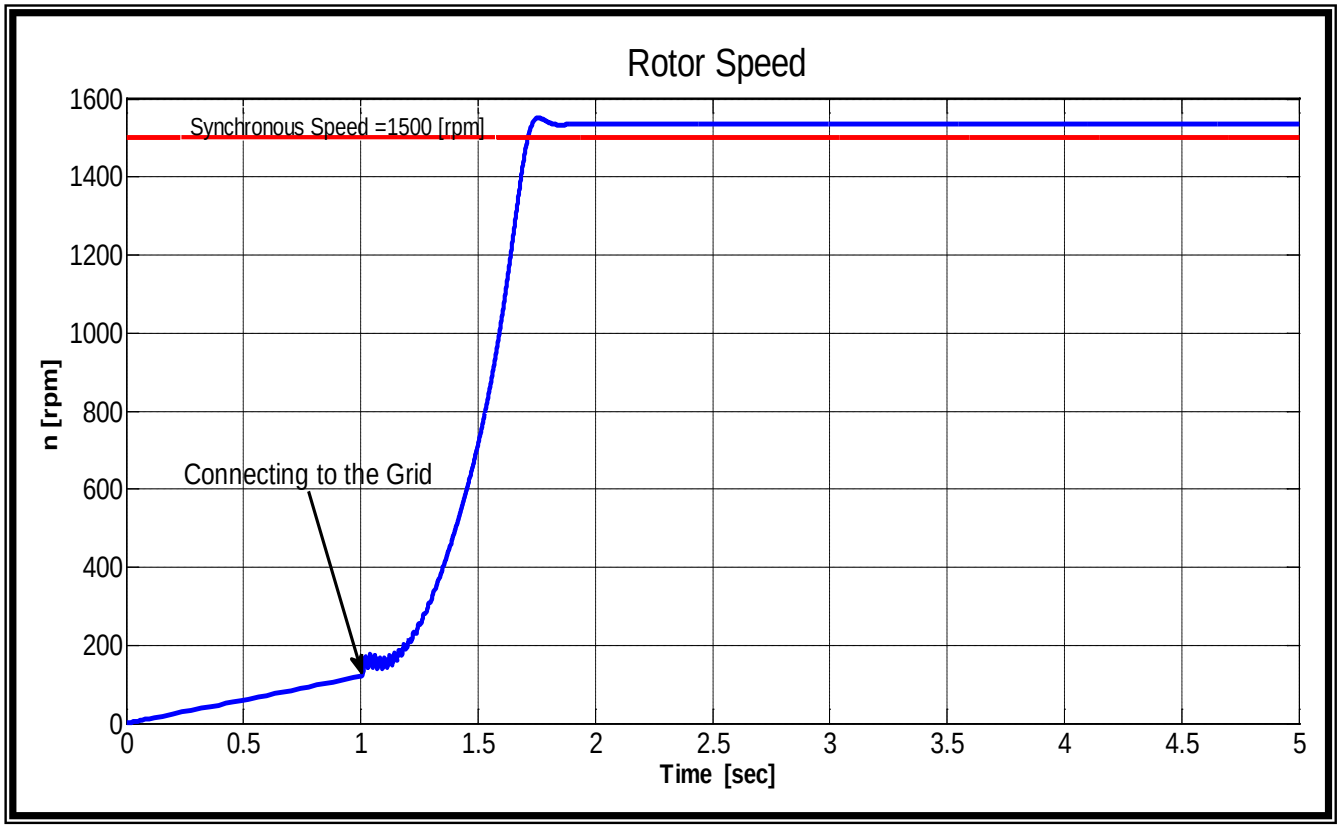
ربط المولدة التحريضية التقليدية إلى الشبكة بعد وصولها إلى السرعة التزامنية، بمساعدة العنفة الريحية المربوطة إلى محورها:

بعد إجراء بعض التعديلات على النموذج السابق تم رصد تيار الصدمة الناتج عن ربط المولدة التحريضية إلى الشبكة عند اللحظة ( t = 1 [sec])، بعد وصولها إلى السرعة التزامنية، بمساعدة العنفة الريحية المربوطة إلى محورها.

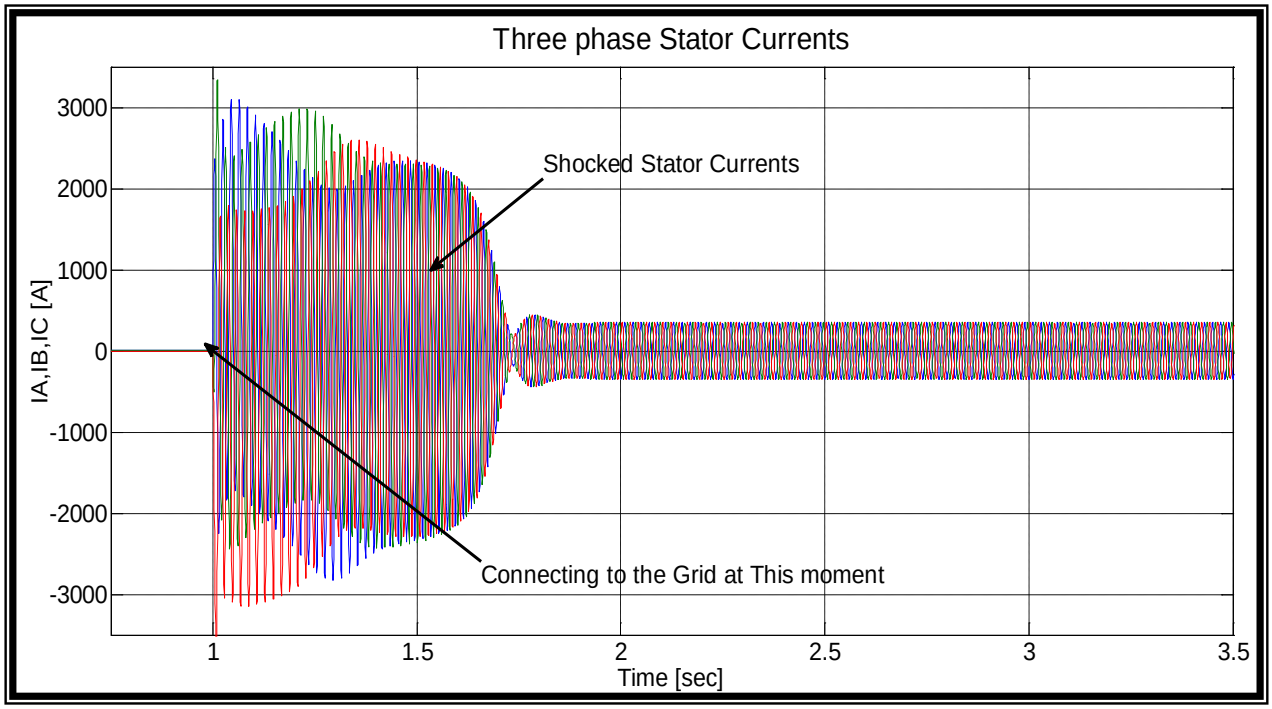
تبين الأشكال التالية نتائج المحاكاة للتجربة السادسة، وقد أخذت هذه النتائج التالية عند زاوية ميلان ثابتة للريش ($\beta = 0^o$)، وسرعة رياح ثابتة (Vwind = 12 [m/sec]):



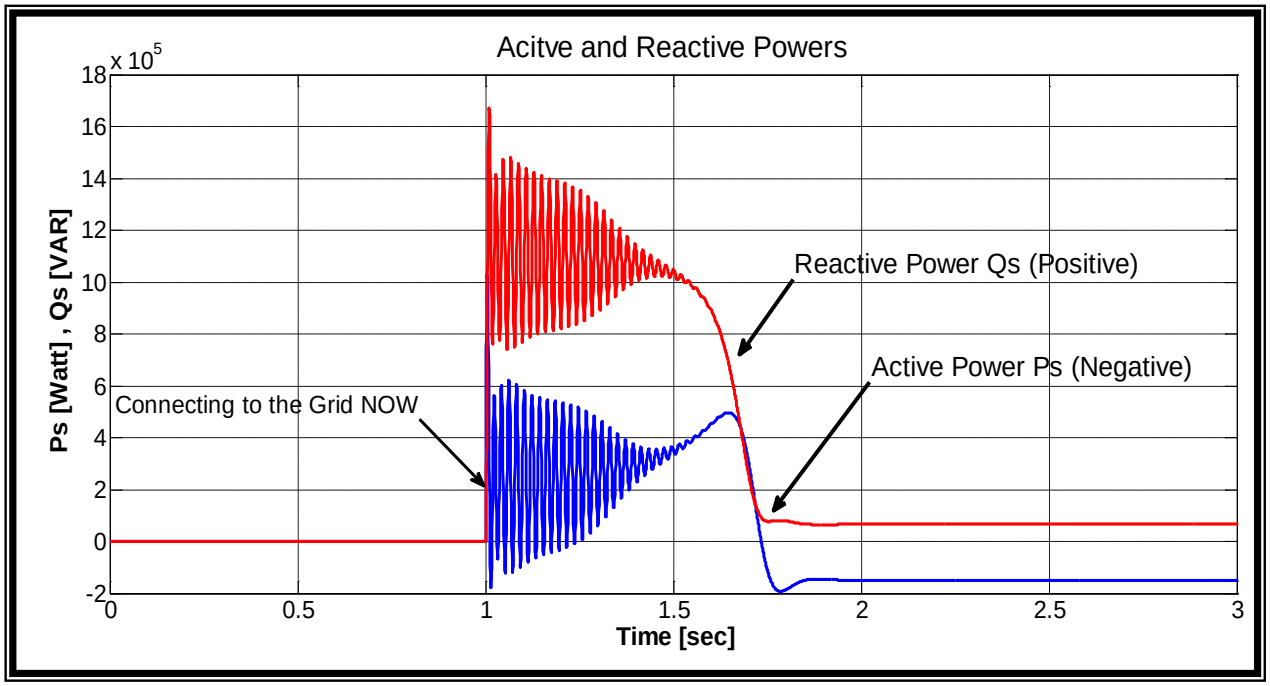

**الشكل (5-33): التوتر ثلاثي الطور على مخارج المولد التحريضي عند ربطه إلى الشبكة في اللحظة (t = 1 [sec])**




**الشكل (5-34): مخطط ( سرعة الدائر – زمن) للمولد التحريضي عند ربط إلى الشبكة في اللحظة (t = 1 [sec]).**




**الشكل (5-35): تيارات أطوار الثابت ثلاثية الطور، للمولد التحريضي عند ربط إلى الشبكة في اللحظة ([t = 1 [sec]).**




**الشكل (5-36): الاستطاعة الفعلية والردية للمولد التحريضي عند ربط إلى الشبكة في اللحظة ([t = 1 [sec]).**

نلاحظ من الأشكال السابقة تيار الصدمة الناتج عن ربط المولد الحريضي، المدار بواسطة العنفة الريحية، مع الشبكة العامة عن اللحظة ([t = 1 [sec])، حيث يظهر من الشكل (5-37)، والذي يمثل تيارات أطوار الثابت ثلاثية الطور للمولد التحريضي لحظة ربطه مع الشبكة، أن قيمة تيار الصدمة تصل إلى ثلاثة أمثال التيار الاسمي للمولد.

# الفصل السادس

# Sixth Chapter

## نمذجة المولد التحريضي ذو التغذية المزدوجة بدزن مسفرات وربطه مع عنفة ريحية باستخدام بيئة الـ Matlab/Simulink.

**Simulation Of The Brushless Doubly Fed Machine (BDFM) And Connect It With Wind Turbine By Using Matlab/Simulink Environment.**

## المقدمة:

## *Introduction:*

من الصعب جداً اشتقاق معادلات الآلة (BDFM) دون اللجوء إلى تبسيطات لتسهيل عملية اشتقاق المعادلات المعبرة عن أداء الآلة في الحالة الساكنة والديناميكية، كما هي الحال في الآلة التحريضية التقليدية، وذلك بالاعتماد على النظرية العامة للآلات.

وقد تم في هذا الفصل اختبار أداء المولد (BDFM) عند انتقاله من حالة العمل في النمط أحادي التغذية (Singly Fed)، إلى العمل في نمط التغذية المزدوجة (Doubly Fed)، بالإضافة إلى التحقق من إمكانية التوليد عند عمل الآلة تحت سرعتها التزامنية الاسمية، والتعرف إلى تدفق الاستطاعات فيها في هذه الحالة، كما تمت دراسة تأثير تغير التوتر المغذي لملف التحكم على أداء الآلة، ودراسة تأثير تغير التردد المغذي لملف التحكم على أدائها أيضاً، لنتمكن في النهاية من تشغيل الآلة (BDFM) في نظام ريحي يعمل عند سرعتي رياح مختلفتين، وملاحقة نقاط الاستطاعة العظمى لمنحنيي الخصائص الميكانيكية للعنفة الريحية، مع ثبات زاوية ميلان الريش، وكذلك تشغيل الآلة في نظام ريحي يعمل عند زوايا ميلان مختلفة للريش، وملاحقة نقاط الاستطاعة العظمى لمنحنيي الخصائص الميكانيكية للعنفة الريحية، مع ثبات سرعة الرياح.

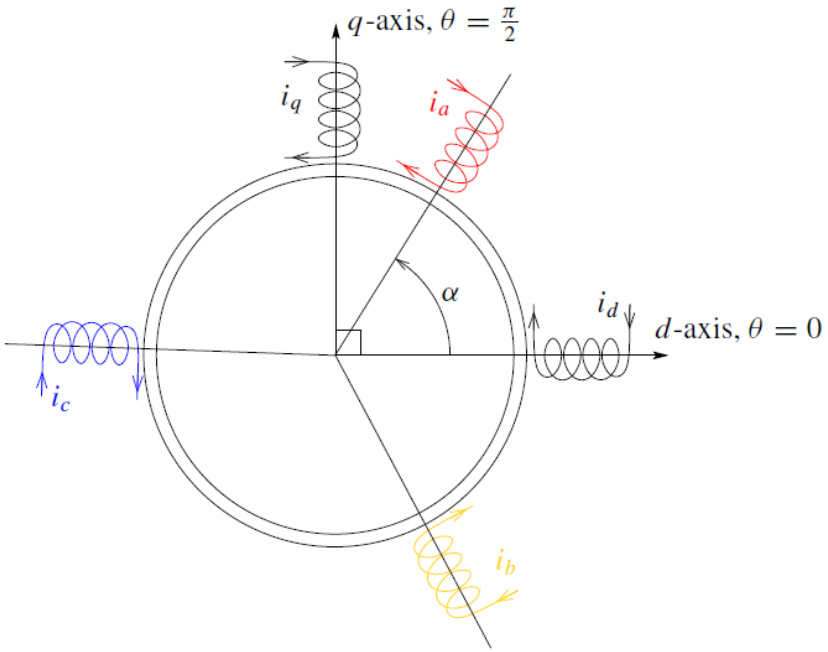
## ٦ ـ٢: وضع النموذج الرياضي للآلة (BDFM):

## *Mathematical Model for the BDFM:*

تم اشتقاق معادلات الآلة (BDFM) ضمن الإطار المرجعي للدائر (Rotor Reference Frame)، وذلك بالاعتماد على التحويل (direct-quadrature transformation)، ويسمى اختصاراً (d-q). حيث أن المحورين (d-q) مرتبطين مع الدائر وبالتالي فهما يدوران بسرعة متزامنة مع سرعة دوران الدائر.

وقد تم اللجوء إلى المحورين (d-q) المرتبطين مع الإطار المرجعي للدائر عند اشتقاق معادلات الآلة (BDFM) للتخلص من تغير محارضات ملفات الآلة مع الزمن في معادلات التوتر.

يبيِّن الشكل التالي الأطوار الثلاث لملفات الثابت في الآلة (BDFM)، والتي يمر فيها تيارات الأطوار الثلاثة ($i_a$ ,$i_b$, $i_c$)، وهي مزاحة عن بعضها البعض بزاوية قدرها ($120^o$)، كما يظهر في هذا الشكل ملفين آخرين، وهما عبارة عن ملفين وهميين متوضعين على المحورين (d) ، (q)، حيث أننا سوف نكافئ ملفات الأطوار الثلاث للثابت بهذين الملفين الوهميين على المحورين (d-q).[9]




**الشكل (6-1): شكل توضيحي لتوضع ملفات الأطوار الثلاثة للآلة (BDFM)، والملفات المكافئة لها على المحورين (d-q).**

حيث أنَّ:

α: هي الزاوية بين المحور (d)، وبين الطور (a) من الأطوار الثلاث للآلة.

تعطى معادلات التوتر للآلة (BDFM) على المحورين (d-q) بالشكل التالي:

$$v_{dp} = \left(R_{sp}.i_{dp} + L_{sp}.\frac{di_{dp}}{dt}\right) + M_{pr}.\frac{di_{dr}}{dt} - W_r.P_p.\left(L_{sp}.i_{qp} + M_{pr}.i_{qr}\right) \quad \ldots\ldots \quad (1-6)$$

$$v_{qp} = \left(R_{sp}.i_{qp} + L_{sp}.\frac{di_{qp}}{dt}\right) + M_{pr}.\frac{di_{qr}}{dt} + W_r.P_p.\left(L_{sp}.i_{dp} + M_{pr}.i_{dr}\right). \quad \ldots\ldots \quad (2-6)$$

$$v_{dc} = \left(R_{sc}.i_{dc} + L_{sc}.\frac{di_{dc}}{dt}\right) - M_{cr}.\frac{di_{dr}}{dt} - W_r.P_c.\left(L_{sc}.i_{qc} + M_{cr}.i_{qr}\right). \quad \ldots\ldots \quad (3-6)$$

$$v_{qc} = \left(R_{sc}.i_{qc} + L_{sc}.\frac{di_{qc}}{dt}\right) + M_{cr}.\frac{di_{qr}}{dt} + W_r.P_c.\left(L_{sc}.i_{dc} - M_{cr}.i_{dr}\right). \quad \ldots\ldots \quad (4-6)$$

$$v_{dr} = \left(R_r.i_{dr} + L_r.\frac{di_{dr}}{dt}\right) + M_{pr}.\frac{di_{dp}}{dt} - M_{cr}.\frac{di_{dc}}{dt}. \quad \ldots\ldots \quad (5-6)$$

$$v_{qr} = \left(R_r.i_{qr} + L_r.\frac{di_{qr}}{dt}\right) + M_{pr}.\frac{di_{qp}}{dt} + M_{cr}.\frac{di_{qc}}{dt}. \quad \ldots\ldots \quad (6-6)$$

بينما تعطى معادلات الحركة للآلة (BDFM) على المحورين (d-q) بالشكل التالي:

$$T_e = P_p.M_{pr}.\left(i_{qp}.i_{dr} - i_{dp}.i_{qr}\right) - P_c.M_{cr}.\left(i_{qc}.i_{dr} + i_{dc}.i_{qr}\right) \quad \ldots\ldots \quad (7-6)$$

$$J.\frac{d\omega_r}{dt} = (T_e \mp T_l). \quad \ldots\ldots \quad (8-6)$$

حيث أنَّ:

$v_{dp}$: توتر ملف الاستطاعة في الثابت على المحور (d).

$v_{qp}$: توتر ملف الاستطاعة في الثابت على المحور (q).

$v_{dc}$: توتر ملف التحكم في الثابت على المحور (d).

$v_{qc}$: توتر ملف التحكم في الثابت على المحور (q).

$v_{dr}$: توتر ملف الدائر على المحور (d).

$v_{qr}$: توتر ملف الدائر على المحور (q).

$i_{dp}$: تيار ملف الاستطاعة في الثابت على المحور (d).

$i_{qp}$: تيار ملف الاستطاعة في الثابت على المحور (q).

$i_{dc}$: تيار ملف التحكم في الثابت على المحور (d).

$i_{qc}$: تيار ملف التحكم في الثابت على المحور (q).

$i_{dr}$: تيار الدائر على المحور (d).

$i_{qr}$: تيار الدائر على المحور (q).

$R_{sp}$: مقاومة ملف الاستطاعة في الثابت.

$R_{sc}$: مقاومة ملف التحكم في الثابت.

$R_r$: مقاومة ملف الدائر.

$L_{sp}$: المحارضة الذاتية لملف الاستطاعة في الثابت.

$L_{sc}$: المحارضة الذاتية لملف التحكم في الثابت.

$L_r$: المحارضة الذاتية لملف الدائر.

$M_{pr}$: المحارضة المتبادلة بين ملف الاستطاعة في الثابت، وبين دائر الآلة (BDFM).

$M_{cr}$: المحارضة المتبادلة بين ملف التحكم في الثابت، وبين دائر الآلة (BDFM).

$P_p$: عدد أزواج أقطاب ملف الاستطاعة في ثابت الآلة (BDFM).

$P_c$: عدد أزواج أقطاب ملف التحكم في ثابت الآلة (BDFM).

$W_r$: سرعة الدوران الميكانيكية لدائر الآلة (BDFM) [rad/sec].

$J$: عزم عطالة الآلة (BDFM) [Kg.m$^2$] " Moment of inertia ".

$T_e$: العزم الكهرومغناطيسي في الآلة (BDFM) [N.m] "Electromagnetic Torque".

$T_l$ : عزم التحميل [N.m] "Load Torque".

وبما أنَّ الدائر من نوع القفص السنجابي المقصور عند نهايته، فتكون التوترات على طرفيه مساوية للصفر، أي أنَّ $(v_{dr} = v_{qr} = 0)$:

$$v_{dr} = 0 = \left(R_r.i_{dr} + L_r.\frac{di_{dr}}{dt}\right) + M_{pr}.\frac{di_{dp}}{dt} - M_{cr}.\frac{di_{dc}}{dt}. \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (9\text{-}6)$$

$$v_{qr} = 0 = \left(R_r.i_{qr} + L_r.\frac{di_{qr}}{dt}\right) + M_{pr}.\frac{di_{qp}}{dt} + M_{cr}.\frac{di_{qc}}{dt}. \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (10\text{-}6)$$

ومنه نجد أنَّ التيارات تعطى بالعلاقات التالية:

$$i_{dp} = \frac{1}{L_{sp}}.\int\left[v_{dp} - R_{sp}.i_{dp} - M_{pr}.\frac{di_{dr}}{dt} + W_r.P_p.\left(L_{sp}.i_{qp} + M_{pr}.i_{qr}\right)\right].dt \quad \ldots. \quad (11\text{-}6)$$

$$i_{qp} = \frac{1}{L_{sp}}.\int\left[v_{qp} - R_{sp}.i_{qp} - M_{pr}.\frac{di_{qr}}{dt} - W_r.P_p.\left(L_{sp}.i_{dp} + M_{pr}.i_{dr}\right)\right].dt. \quad \ldots. \quad (12\text{-}6)$$

$$i_{dc} = \frac{1}{L_{sc}}.\int\left[v_{dc} - R_{sc}.i_{dc} + M_{cr}.\frac{di_{dr}}{dt} + W_r.P_c.\left(L_{sc}.i_{qc} + M_{cr}.i_{qr}\right)\right].dt \quad \ldots. \quad (13\text{-}6)$$

$$i_{qc} = \frac{1}{L_{sc}}.\int\left[v_{qc} - R_{sc}.i_{qc} - M_{cr}.\frac{di_{qr}}{dt} - W_r.P_c.(L_{sc}.i_{dc} - M_{cr}.i_{dr})\right].dt. \quad \ldots. \quad (14\text{-}6)$$

$$i_{dr} = \frac{1}{L_r}.\int\left[0 - R_r.i_{dr} - M_{pr}.\frac{di_{dp}}{dt} - M_{cr}.\frac{di_{dc}}{dt}\right].dt \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (15\text{-}6)$$

$$i_{qr} = \frac{1}{L_r}.\int\left[0 - R_r.i_{qr} - M_{pr}.\frac{di_{qp}}{dt} - M_{cr}.\frac{di_{qc}}{dt}\right].dt. \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (16\text{-}6)$$

وتعطى معادلات الحركة للآلة (BDFM) على المحورين (d-q) بالشكل التالي:

$$T_e = P_p.M_{pr}.\left(i_{qp}.i_{dr} - i_{dp}.i_{qr}\right) - P_c.M_{cr}.\left(i_{qc}.i_{dr} + i_{dc}.i_{qr}\right) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (17\text{-}6)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J}.(T_e + T_l) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad for\ Generator \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (18\text{-}6)$$

ويمكن كتابة معادلات التوتر السابقة على شكل مصفوفة كما يلي:[20]

$$\begin{bmatrix} v_{dp} \\ v_{qp} \\ v_{dc} \\ v_{qc} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{sp} + L_{sp}P & -W_r.P_p.L_{sp} & 0 & 0 & M_{pr}P & -W_r.P_p.M_{pr} \\ W_r.P_p.L_{sp} & R_{sp}.+L_{sp}P & 0 & 0 & W_r.P_p.M_{pr} & M_{pr}P \\ 0 & 0 & R_{sc}.+L_{sc}P & -W_r.P_c.L_{sc} & -M_{cr}P & -W_r.P_c.M_{cr} \\ 0 & 0 & W_r.P_c.L_{sc} & R_{sc}.+L_{sc}P & -W_r.P_c.M_{cr} & M_{cr}P \\ M_{pr}P & 0 & -M_{cr}P & 0 & R_r.+L_rP & 0 \\ 0 & M_{pr}P & 0 & M_{cr}P & 0 & R_r.+L_rP \end{bmatrix}.\begin{bmatrix} i_{dp} \\ i_{qp} \\ i_{dc} \\ i_{qc} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (19\text{-}6)$$

حيث أنَّ:

$$P = \frac{d}{dt}$$

ولحل المعادلة السابقة والحصول منها على التيارات المارة في الآلة (BDFM)، نقوم بكتابة المصفوفة السابقة على شكل جداء مصفوفات، كما يلي:

$$[B] = [A].[dI] + [C].[I]. \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (20-6)$$

حيث أنَّ:

$[B]$: مصفوفة التوترات.

$[A]$: مصفوفة المحارضات الذاتية والمتبادلة مع الدائر والمتعلقة بالزمن $\left(\frac{d}{dt}\right)$.

$[C]$: مصفوفة الثوابت المستقلة عن الزمن.

$[I]$: مصفوفة التيارات المارة عبر ملفات الآلة (BDFM).

$$B = \begin{bmatrix} v_{dp} \\ v_{qp} \\ v_{dc} \\ v_{qc} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} \quad [dI] = \begin{bmatrix} di_{dp} \\ di_{qp} \\ di_{dc} \\ di_{qc} \\ di_{dr} \\ di_{qr} \end{bmatrix} \quad [I] = \begin{bmatrix} i_{dp} \\ i_{qp} \\ i_{dc} \\ i_{qc} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (21\text{-}6)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} L_{sp} & 0 & 0 & 0 & M_{pr} & 0 \\ 0 & L_{sp} & 0 & 0 & 0 & M_{pr} \\ 0 & 0 & L_{sc} & 0 & -M_{cr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_{sc} & 0 & M_{cr} \\ M_{pr} & 0 & -M_{cr} & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M_{pr} & 0 & M_{cr} & 0 & L_r \end{bmatrix} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (22-6)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} R_{sp} & -W_r.P_p.L_{sp} & 0 & 0 & 0 & -W_r.P_p.M_{pr} \\ W_r.P_p.L_{sp} & R_{sp}. & 0 & 0 & W_r.P_p.M_{pr} & 0 \\ 0 & 0 & R_{sc}. & -W_r.P_c.L_{sc} & 0 & -W_r.P_c.M_{cr} \\ 0 & 0 & W_r.P_c.L_{sc} & R_{sc} & -W_r.P_c.M_{cr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (23-6)$$

ومنه نحصل على معادلات التيارات المارة في الآلة (BDFM) على المحورين ( d-q) لكل من ملف الاستطاعة وملف التحكم في الثابت، وملف الدائر كما يلي:

$$[dI] = inv[A].([B] - [C].[I]). \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (24-6)$$

$$\begin{bmatrix} di_{dp} \\ di_{qp} \\ di_{dc} \\ di_{qc} \\ di_{dr} \\ di_{qr} \end{bmatrix} = inv \begin{bmatrix} L_{sp} & 0 & 0 & 0 & M_{pr} & 0 \\ 0 & L_{sp} & 0 & 0 & 0 & M_{pr} \\ 0 & 0 & L_{sc} & 0 & -M_{cr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_{sc} & 0 & M_{cr} \\ M_{pr} & 0 & -M_{cr} & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M_{pr} & 0 & M_{cr} & 0 & L_r \end{bmatrix} *$$

$$\left( \begin{bmatrix} v_{dp} \\ v_{qp} \\ v_{dc} \\ v_{qc} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_{sp} & -W_r.P_p.L_{sp} & 0 & 0 & 0 & -W_r.P_p.M_{pr} \\ W_r.P_p.L_{sp} & R_{sp}. & 0 & 0 & W_r.P_p.M_{pr} & 0 \\ 0 & 0 & R_{sc}. & -W_r.P_c.L_{sc} & 0 & -W_r.P_c.M_{cr} \\ 0 & 0 & W_r.P_c.L_{sc} & R_{sc} & -W_r.P_c.M_{cr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} i_{dp} \\ i_{qp} \\ i_{dc} \\ i_{qc} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \right) \quad (25-6)$$

وتعطى معادلات الحركة وفق المعادلتين (6-17) و (6-18) السابقتين.

أما معادلات كل من الاستطاعة الفعلية والاستطاعة الردية، لكل من ملف الاستطاعة وملف التحكم في الثابت على المحورين (d-q)، فهي تعطى وفق العلاقات التالية:

| ملف الاستطاعة | ملف التحكم | |
|---|---|---|
| $P_{power} = \frac{3}{2} * (V_{dp}.i_{dp} + V_{qp}.i_{qp})$ | $P_{Control} = \frac{3}{2} * (V_{dc}.i_{dc} + V_{qc}.i_{qc})$ | (26-6) |
| $Q_{power} = \frac{3}{2} * (V_{qp}.i_{dp} - V_{dp}.i_{qp})$ | $Q_{Control} = \frac{3}{2} * (V_{qc}.i_{dc} - V_{dc}.i_{qc})$ | |

فتكون الاستطاعة الفعلية الكلية، والاستطاعة الردية الكلية للآلة (BDFM) هي:

| الاستطاعة الفعلية الكلية للآلة (BDFM) | الاستطاعة الردية الكلية للآلة (BDFM) | |
|---|---|---|
| $P_{Tot} = P_{Power} + P_{Control}.$ | $Q_{Tot} = Q_{Power} + Q_{Control}.$ | (27-6) |

أما عامل الاستطاعة لكل من ملف الاستطاعة وملف التحكم في الآلة (BDFM)، فيعطى بالعلاقة:

$Cos\,\varphi_{PW} = Cos\,(tan^{-1}\frac{Q_{PW}}{P_{PW}})$ (28-6) عامل الاستطاعة لملف الاستطاعة في الآلة (BDFM)

$Cos\,\varphi_{CW} = Cos\,(tan^{-1}\frac{Q_{CW}}{P_{CW}})$ (29-6) عامل الاستطاعة لملف الاستطاعة في الآلة (BDFM)

وبالتالي فإن عامل الاستطاعة الكلي للآلة (BDFM) يعطى بالعلاقة:

$Cos\,\varphi_{Tot} = Cos\,(tan^{-1}\frac{Q_{Tot}}{P_{Tot}})$ ..... (30-6) عامل الاستطاعة الكلي للآلة (BDFM)

للانتقال من المستوي الزمني الحقيقي للتوترات المغذية لملفي الاستطاعة والتحكم في الثابت على الأطوار الثلاث ($V_a$ - $V_b$ - $V_c$) إلى مستوي بارك للحصول على التوترات المغذية لملفي الاستطاعة والتحكم في الثابت على المحورين ($V_d$ - $V_q$)، نستخدم التحويلات التالية:

$V_d = 2/3*[\ V_a *\sin(w.t) + V_b *\sin(w.t-2pi/3) + V_c *\sin(w.t+2pi/3)]$ ..... (31-6)

$V_q = 2/3*[\ V_a *\cos(w.t) + V_b *\cos(w.t-2pi/3) + V_c *\cos(w.t+2pi/3)]$ ..... (32-6)

$V_0 = 1/3*[\ V_a + V_b + V_c]$ ..... (33-6)

where : W= rotation speed [rad/sec] of the rotating frame.

وللعودة من مستوي بارك (مستوي الإحداثيات على المحورين ( d-q))، إلى المستوي الزمني الحقيقي للحصول على الأطوار الثلاث ($V_a$ - $V_b$ - $V_c$)، نستخدم التحويلات التالية:

$V_a = [V_d *\sin(w.t) + V_q *\cos(w.t) + V_0]$ ..... (34-6)

$V_b = [V_d *\sin(w.t-2pi/3) + V_q *\cos(w.t-2pi/3) + V_0)$ ..... (35-6)

$V_c = [V_d *\sin(w.t+2pi/3) + V_q *\cos(w.t+2pi/3) + V_0)$ ..... (36-6)

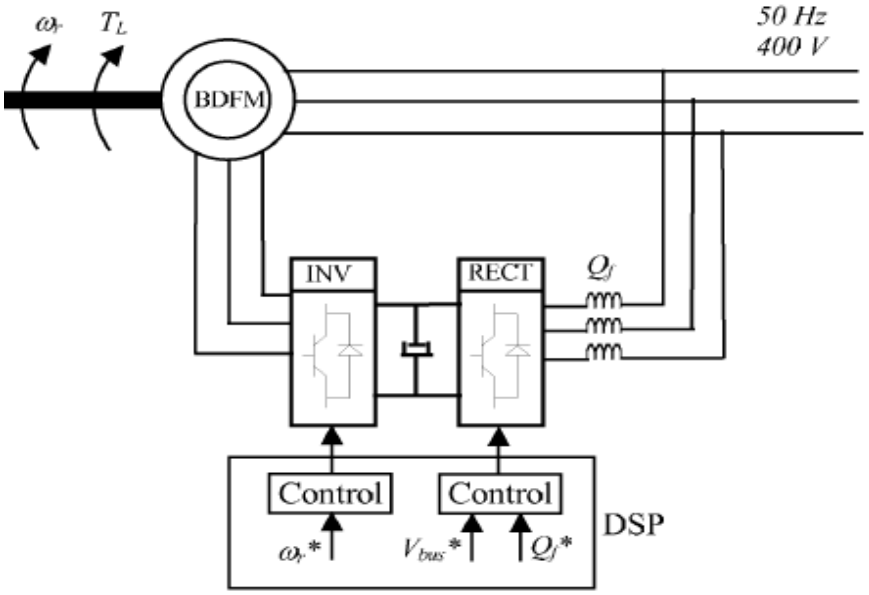
where : W= rotation speed [rad/sec] of the rotating frame.

## ٦ ـ٢: آلية التحكم بتوتر وتردد التغذية لملف التحكم في النموذج الحاسوبي للآلة (BDFM):

## *Method of changing the Voltage and the Frequency of the feeding for the Control Winding:*

إنَّ ثابت الآلة (BDFM) مكون من ملفين ثلاثيي الطور ، معزولين عن بعضهما كهربائياً ، لكل منهما عدد أقطاب مختلف عن الآخر، هما ملف الاستطاعة والذي تتدفق عبره معظم استطاعة الآلة، وهو يربط مباشرة إلى الشبكة. وملف التحكم الذي يتدفق جزء صغير من الاستطاعة عبرهتعادل حوالي (30%) فقط من الاستطاعة الكلية للآلة، وهو يربط إلى الشبكة عبر مبدل الكتروني استطاعي ثنائي الاتجاه (Inverter - Converter).

حيث أننا نحصل في خرج المبدل الالكتروني الاستطاعي على تغذية ذات توتر وتردد متغيرين، ويتم التحكم بخرج هذا المبدل الالكتروني بواسطة دارة تحكمية خاصة تعتمد على القيم المرجعية لكل من توتر خرج الآلة واستطاعتها الردية المطلوبة وكذلك السرعة المرجعية.




**الشكل (6-2): الشكل العام للحلقة المغلقة للتحكم بالمبدل الالكتروني الاستطاعي المربوط مع ملف التحكم في الآلة (BDFM).**

ولكن نظراً لصعوبة تنفيذ هذه الدارة وبرمجتها على الحاسب بسبب تعقيدها فقد تم مكافئة المبدل الالكتروني الاستطاعي المربوط مع ملف التحكم بخرجه فقط، بمعنى أننا قمنا بإدخال قيمة واحدة للتردد والتوتر المغذي لملف التحكم عند كل تجربة، دون اللجوء إلى تغيير قيمة هذا التردد والتوتر بشكل آلي بواسطة الحلقة التحكمية المغلقة.

## ٦ ـ ٣: مواصفات الآلة (BDFM) التي تمت نمذجتها:

## *Parameters of the Simulated BDFM:*

إنَّ الآلة (BDFM) التي تمت نمذجتها واختبارها في بيئة الـ Matlab/Simulink هي آلة اختبارية (prototype)، ذات استطاعة صغيرة، وهي الآلة التي تمكنّا من الحصول على بارامتراتها، عن طريق مراسلة أحد الباحثين في جامعة ( Avanthi Engineering College – India )، لكن النموذج الحاسوبي الذي تم بناؤه في بيئة الـ Matlab/Simulink يصلح لاختبار أي آلة (BDFM) مهما كانت استطاعتها، ويتم ذلك عن طريق تغيير بارامترات الآلة المدخلة إلى البرنامج عن طريق ملف معطيات الدخل (m file) التالي:

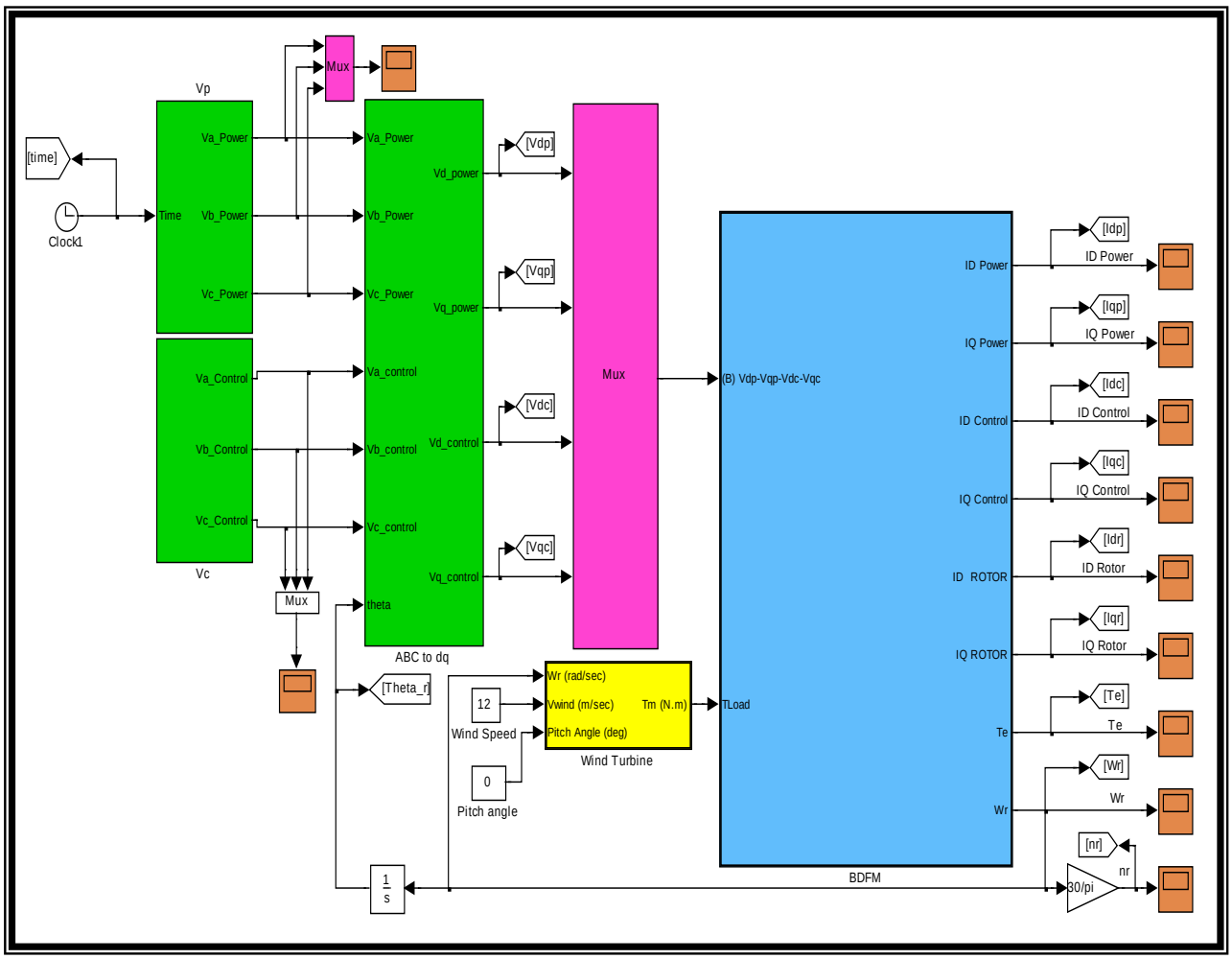
```
% BDFM Prototype Parameters.
% Rated Power IS 745 [Watt] (1 Horse Power)
% Rated Power For Power Winding IS 560 [Watt]
% Rated Power For Control Winding IS 185 [Watt]
Pp=3;     ....  %Power Winding has 6 Magnetic poles (3) pair poles;
Pc=1;     ....  %Control Winding has 2 Magnetic poles (1) pair poles;
Lsp=0.7148;     %Power Winding Self Inductance is 714.8 [mH];
Lsc=0.1217;     %Control Winding Self Inductance is 121.7 [mH];
Lr=0.1326;      %Cage Rotor Self Inductance is 132.6 [mH];
Mpr=0.2421;     %Power Winding Mutual Inductance is 242.1 [mH];
Mcr=0.0598;     %Control Winding Mutual Inductance is 59.8 [mH];
Rsp=1.732;      %Power Winding Resistance is 1.732 [Ohm];
Rsc=1.079;      %Control Winding Resistance is 1.079 [Ohm];
Rr=0.473;       %Cage Rotor Resistance is 0.473 [Ohm];
```

## ٦ ـ ٤: نمذجة المولد *(BDFM)* باستخدام بيئة الـ *Matlab/Simulink*:

## *Simulation of the (BDFM) Generator using Matlab/Simulink environment:*

تم بناء النموذج الحاسوبي للآلة (BDFM) بواسطة بيئة الـ Matlab/Simulink، وذلك بالاعتماد على النموذج الرياضي الموضح في الفقرة ( 6–2) وذلك من خلال جملة معادلات التيارات المعطاة بالعلاقة ( 6–25)، ومعادلات الحركة المعطاة بالعلاقتين ( 6–17) و (6–18)، ومعادلات الاستطاعات الفعلية والردية المعطاة بالعلاقات ( 6–26) و (6–27)، ومعادلات عامل الاستطاعة لكل من ملف الاستطاعة وملف التحكم وعامل الاستطاعة الكلي للآلة (BDFM) والمعطاة بالعلاقات (6–28) و (6–29) و (6–30)، بالإضافة إلى معادلات التحويل لتوترات التغذية من المستوي الزمني إلى مستوي المحورين ( d-q) والمعطاة بالعلاقات ( 6–31) و (6–32) و (6–33)، وكذلك معادلات التحويل من مستوي المحورين ( d-q) إلى المستوي الزمني والمعطاة بالعلاقات ( 6–34) و (6–35) و (6–36).

يبين الشكل ( 6-3) المخطط الصندوقي لنموذج المولد التحريضي ذو التغذية المزدوجة بدون مسفرات (Brushless Doubly Fed Machine (BDFM)) باستخدام بيئة الـ MATLAB/SIMULINK، في حالة الربط مع الشبكة، وبواسطة هذا النموذج ستتم دراسة تغيرات مختلف محددات المولد (BDFM) عند ربطه مع عنفة ريحية، مثل السرعة والعزم والاستطاعات الردية والفعلية، وعوامل الاستطاعة.




**الشكل (6-3): المخطط الصندوقي للمولد (BDFM) المربوط مع عنفة ريحية، عند زاوية ميلان للشفرات (β=0)، وسرعة رياح (V wind =12 [m/sec]).**

ونلاحظ أن المخطط الصندوقي الموضح بالشكل ( 6-3) السابق يحتوي على عدة أنظمة فرعية (Sub-Systems).

## ٦ ـ ٥: التجارب الحاسوبية:

## *Experimental Tests For The (BDFM):*

### ٦ ـ ٥ ـ ١: التجربة الأولى:

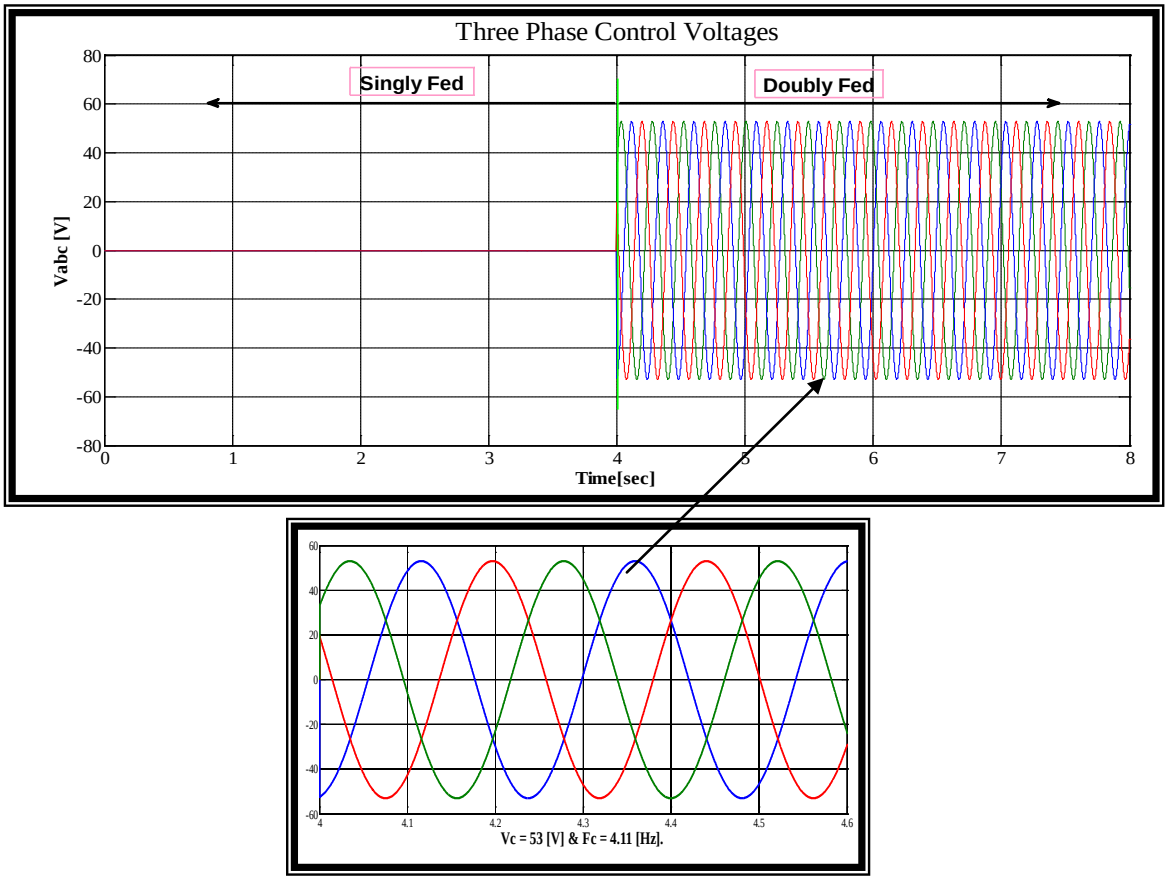
دراسة التغيرات الحاصلة عند الانتقال من حالة عمل الآلة (BDFM) من العمل في النمط أحادي التغذية (Singly Fed)، إلى العمل في نمط التغذية المزدوجة (Doubly Fed)، وهي مربوطة مع عنفة ريحية عند زاوية ميلان للشفرات (β= 0 [deg])، وسرعة رياح (V wind =12 [m/sec]).

**ملخص التجربة الأولى:**

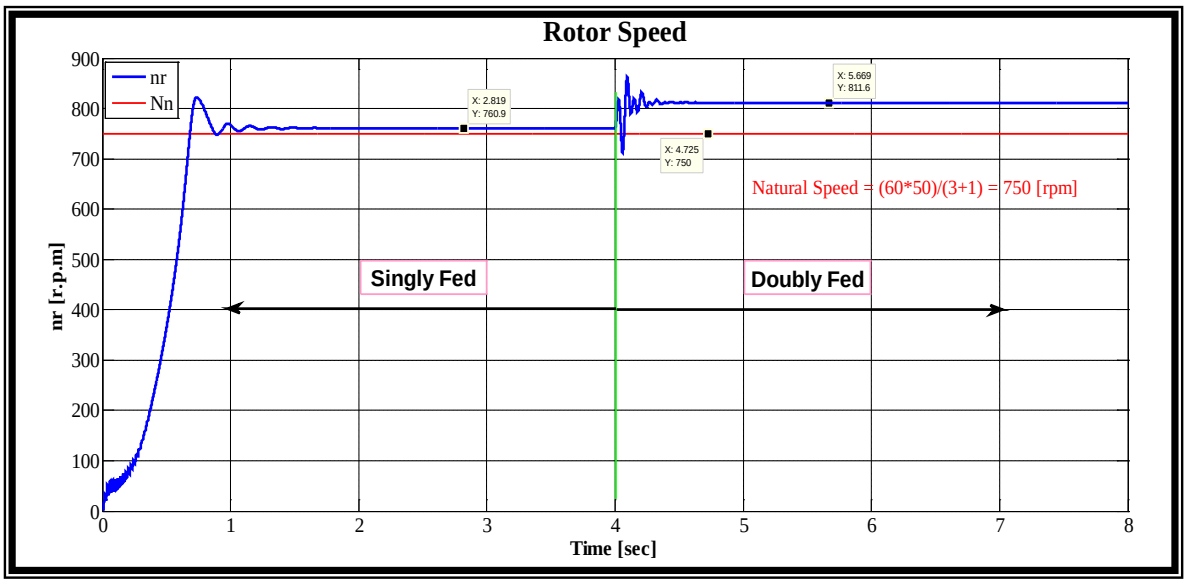
تم تشغيل نموذج الآلة (BDFM) الموضح في الشكل (6-3)، كما يبيِّن الجدول التالي:

| Time | Fed Mode | Vc [V] & Fc [Hz] |
|---|---|---|
| From (t= 0 to t= 4 [sec]) | Singly Fed Mode | Vc=0 &Fc=0 |
| From (t= 8 to t= 12 [sec]) | Doubly Fed Mode | Vc =53 & Fc = 4.11 |

وتم رسم منحنيات توتر التغذية لملف التحكم ( Vc)، ومنحني السرعة ( nr)، ومنحني العزم الكهرومغناطيسي (Te) بالإضافة إلى رسم منحنيات الاستطاعة الفعلية والردية وعامل الاستطاعة.



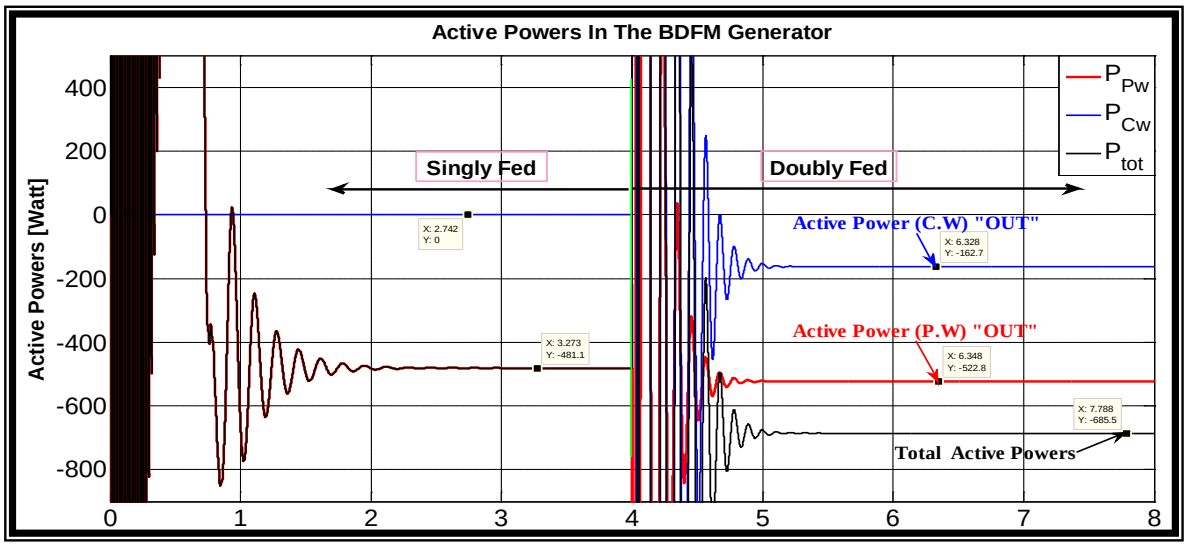

**الشكل (6-4): منحنيات التوتر الثلاثي الطور المغذي لملف التحكم Vabc (Vc = 53[V] , Fc = 4.11[Hz])**




**الشكل (6-5): منحني (سرعة الدائر – زمن) (Vc = 53[V] , Fc = 4.11 [Hz])**

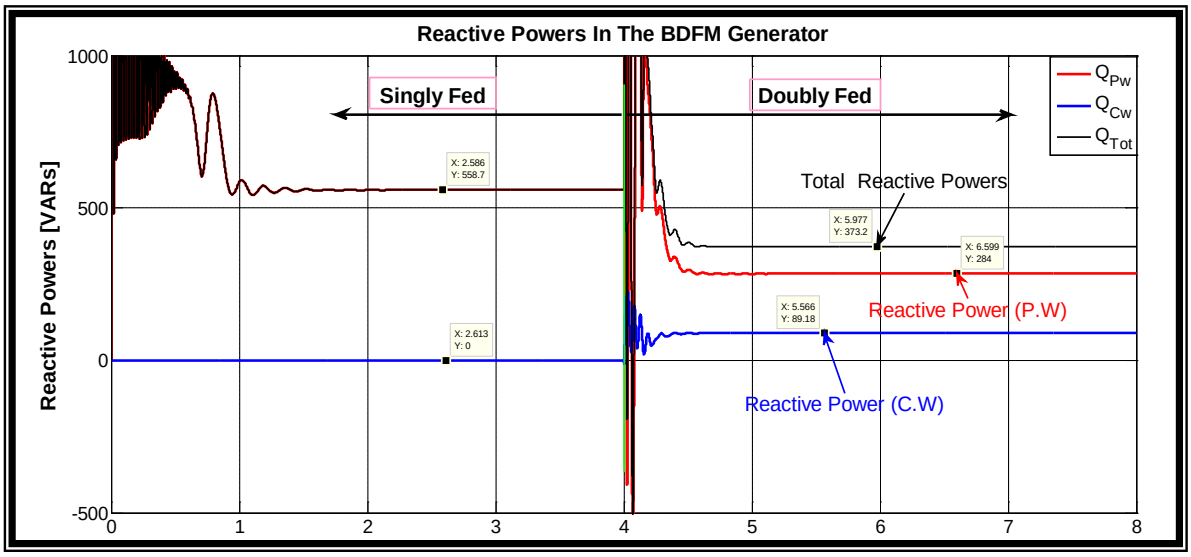
**ملاحظة:**

تم اعتماد الإشارة السالبة للاستطاعات عندما تكون مولدة من الآلة ومحقونة في الشبكة، بينما تكون إشارة الاستطاعات موجبة عندما تكون مستجرة من الشبكة.




**الشكل (6-6): منحنيات تدفق الاستطاعات الفعلية في الآلة (BDFM) في النمطين التحريضي والتزامني.**

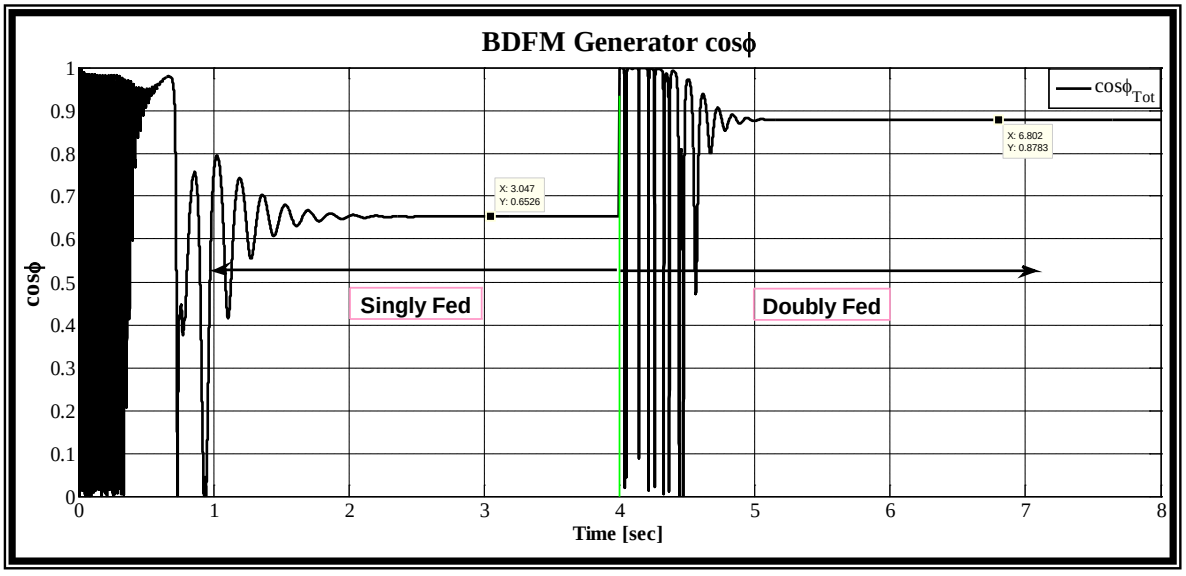
| Mode | Singly Fed Mode | Doubly Fed Mode |
|---|---|---|
| Vc & Fc | Vc=0 &Fc=0 | Vc=53[V] &Fc=4.11 [Hz] |
| P "P.W" [W] | -481 | -522.8 |
| P "C.W" [W] | 0 | -162.7 |
| P Total [W] | -481 | -685.5 |




**الشكل (6-7): منحنيات تدفق الاستطاعات الردية في الآلة (BDFM) في النمطين التحريضي والتزامني.**

| Mode | Singly Fed Mode | Doubly Fed Mode |
|---|---|---|
| Vc & Fc | Vc=0 &Fc=0 | Vc=53[V] &Fc=4.11 [Hz] |
| Q "P.W" [VAR] | 558.7 | 284 |
| Q "C.W" [VAR] | 0 | 89.18 |
| Q Total [VAR] | 558.7 | 373.2 |

نلاحظ انخفاض قيمة الاستطاعة الردية المستجرة من الشبكة في حالة العمل بنمط التغذية المزدوجة مقارنة مع حالة العمل في نمط التغذية الأحادية، ويعزى ذلك إلى التهييج الإضافي الذي حصلنا عليه من ملف التحكم.




**الشكل (6-8): عامل الاستطاعة الكلي للآلة (BDFM) في النمطين التحريضي والتزامني**

| Mode | Singly Fed Mode | Doubly Fed Mode |
|---|---|---|
| Vc & Fc | Vc=0 &Fc=0 | Vc=53[V] &Fc=4.11 [Hz] |
| Cos $\varphi_{Tot}$ | 0.65 | 0.87 |

## ٦ ـ ٢: التجربة الثانية:

دراسة أداء وتدفق الاستطاعات في الآلة (BDFM)، وإمكانية التوليد عند عملها تحت سرعتها التزامنية الاسمية والآلة موصولة مع عنفة ريحية (Vwind = 8 [m/sec] , Beta = 0 [deg]).

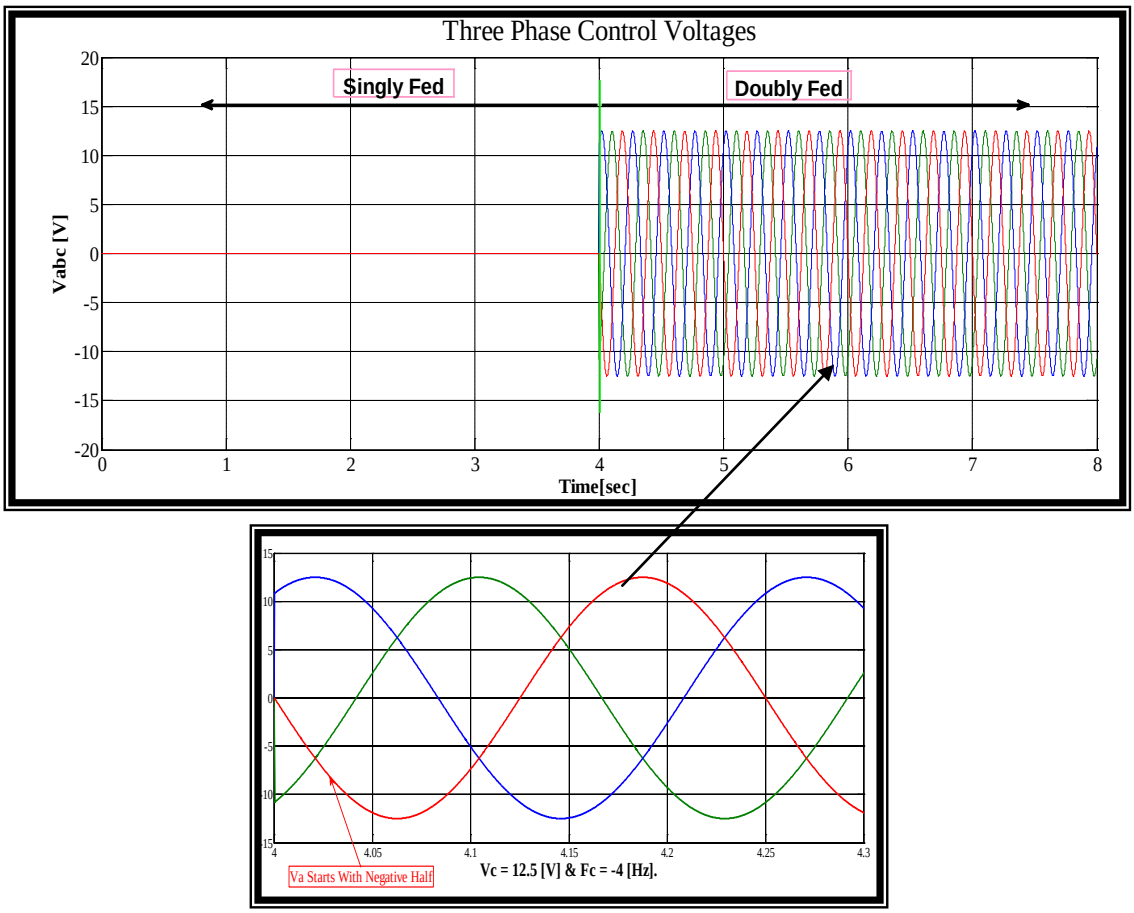
### ملخص التجربة الثانية:

تم تشغيل نموذج الآلة (BDFM) الموضح في الشكل (6-3)، مع تغيير سرعة الرياح إلى ($V_{wind}$ = 8 [m/sec])، في نمط التغذية الأحادية خلال الفترة (t = 0 to t=4 [sec])، بينما تم تشغيلها في نمط التغذية المزدوجة لتعمل عند سرعة دورانية أخفض من سرعتها التزامنية خلال الفترة (t = 4 to t=8 [sec])، عند توتر وتردد تغذية لملف التحكم:

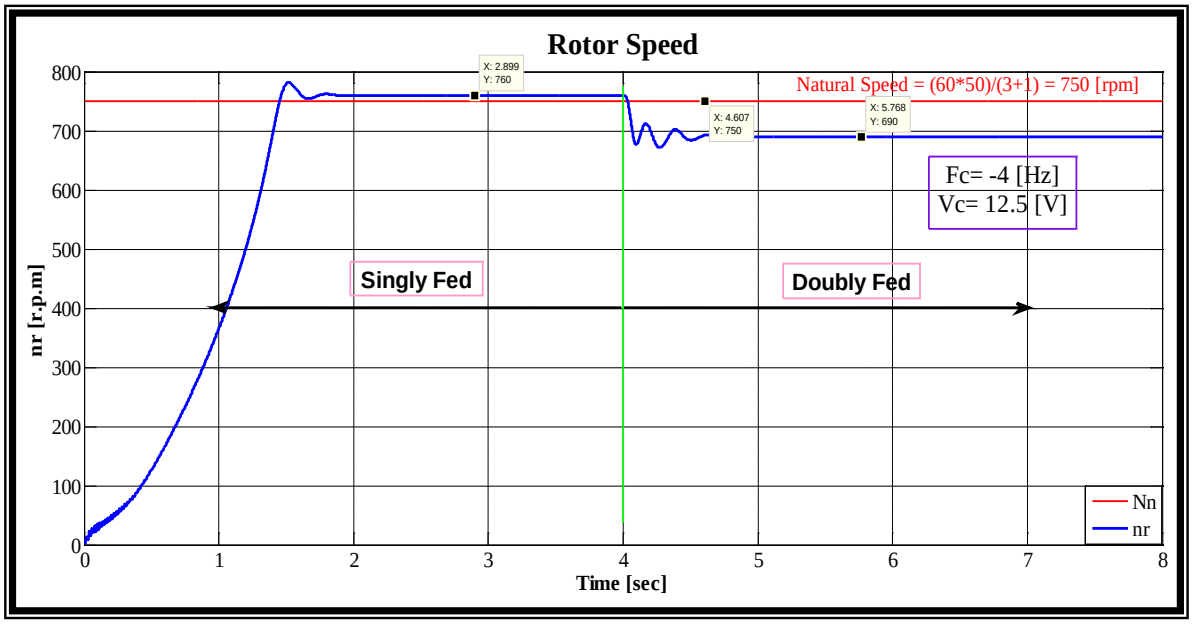
$V_c$=12.5 [V];

$F_c$= (Opp) 4 [Hz];

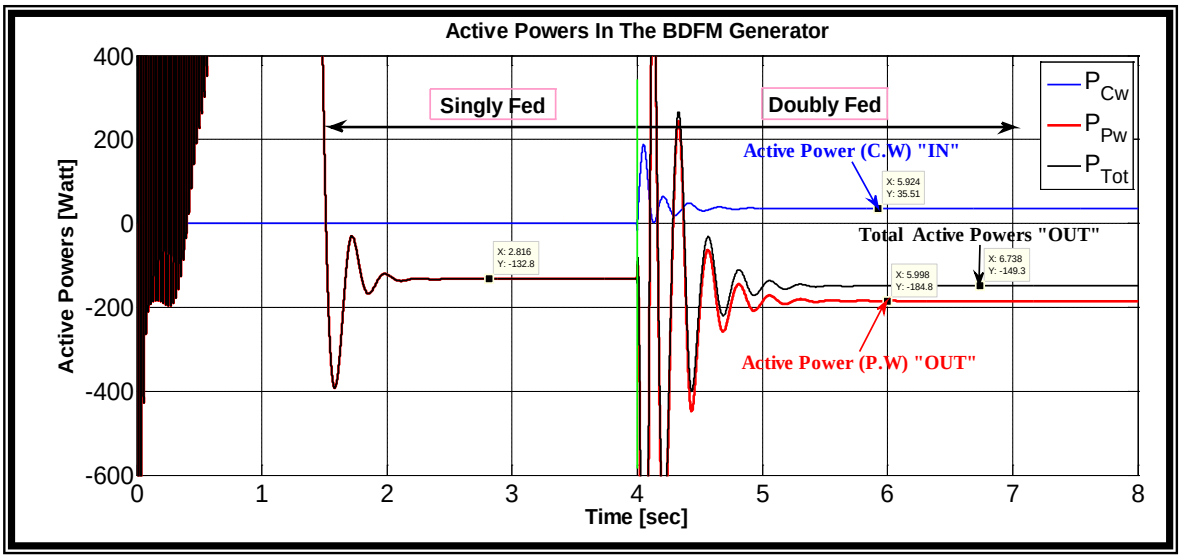
وتم رسم منحنيات توتر التغذية لملف التحكم (Vc)، ومنحني السرعة (nr)، بالإضافة إلى رسم منحنيات الاستطاعة الفعلية والردية وعامل الاستطاعة.




**الشكل (6-9): منحنيات التوتر الثلاثي الطور المغذي لملف التحكم Vabc ( Vc = 12.5[V] , Fc = (Opp) 4 [Hz])**

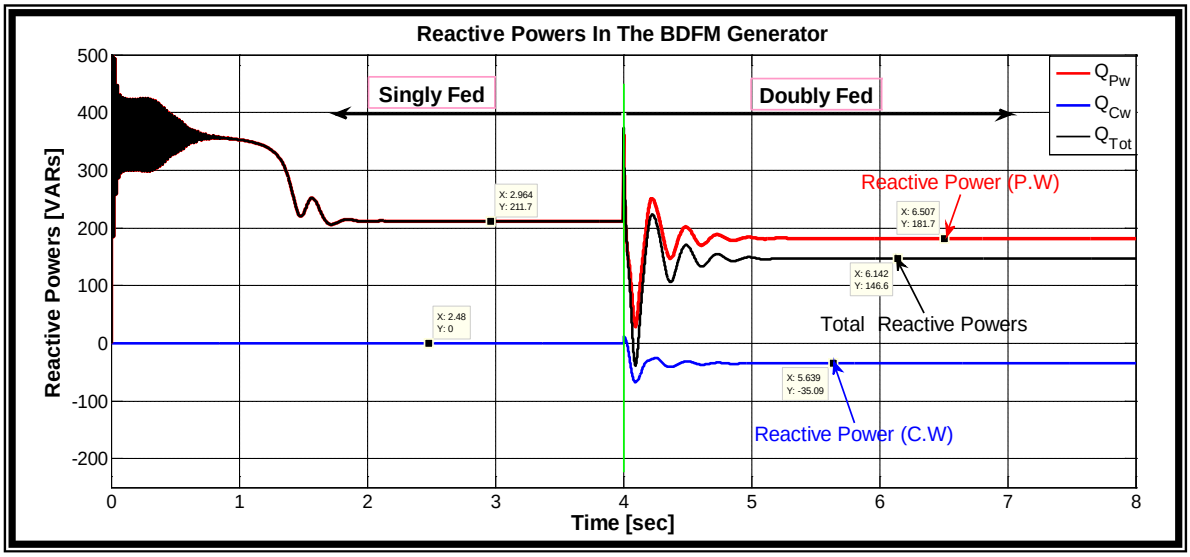



الشكل (6-10): منحني (سرعة الدائر – زمن) (Vc = 12.5[V] , Fc = (Opp) 4 [Hz])



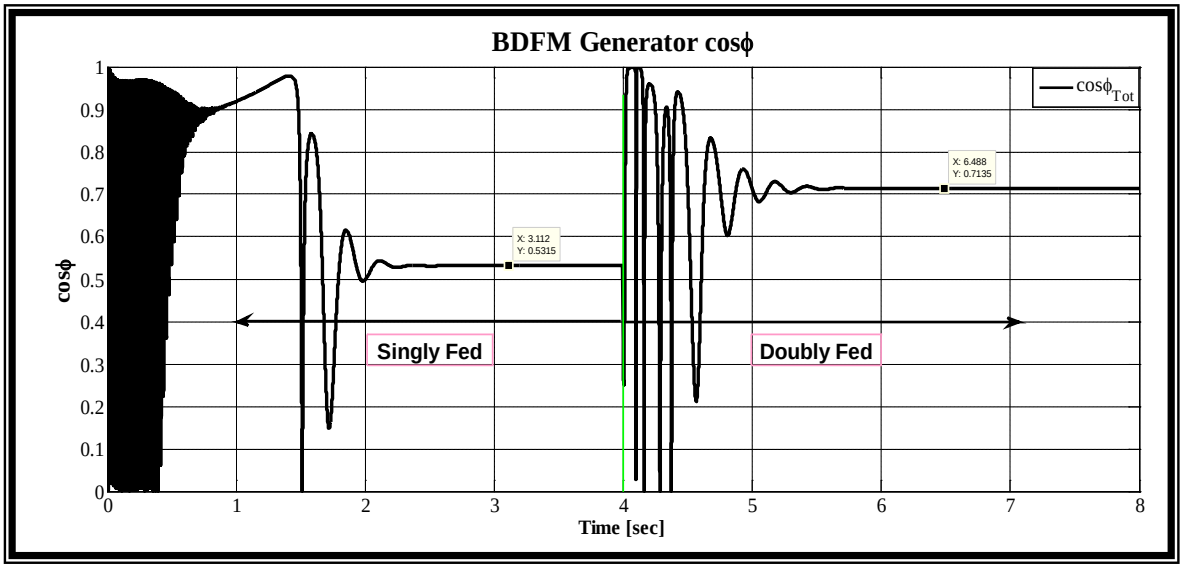

الشكل (6-11): منحنيات تدفق الاستطاعات الفعلية في الآلة (BDFM) في النمطين التحريضي والتزامني.

| Mode | Singly Fed Mode | Doubly Fed Mode |
|---|---|---|
| Vc & Fc | Vc=0 &Fc=0 | Vc= 12.5 [V] &Fc= (Opp) 4 [Hz] |
| P "P.W" [W] | -132 | -184.8 |
| P "C.W" [W] | 0 | 35.5 |
| P Total [W] | -132 | -149.3 |




**الشكل (6-12): منحنيات تدفق الاستطاعات الردية في الآلة (BDFM) في النمطين التحريضي والتزامني.**

| Mode | Singly Fed Mode | Doubly Fed Mode |
|---|---|---|
| Vc & Fc | Vc=0 &Fc=0 | Vc= 12.5 [V] &Fc= (Opp) 4 [Hz] |
| Q "P.W" [VAR] | 211.7 | 181.7 |
| Q "C.W" [VAR] | 0 | -35 |
| Q Total [VAR] | 211.7 | 146.6 |




**الشكل (6-13): عامل الاستطاعة الكلي للآلة (BDFM) في النمطين التحريضي والتزامني**

| Mode | Singly Fed Mode | Doubly Fed Mode |
|---|---|---|
| Vc & Fc | Vc=0 &Fc=0 | Vc= 12.5 [V] &Fc= (Opp) 4 [Hz] |
| Cos $\varphi_{Tot}$ | 0.53 | 0.71 |

## ٦ ـ ٣: التجربة الثالثة:

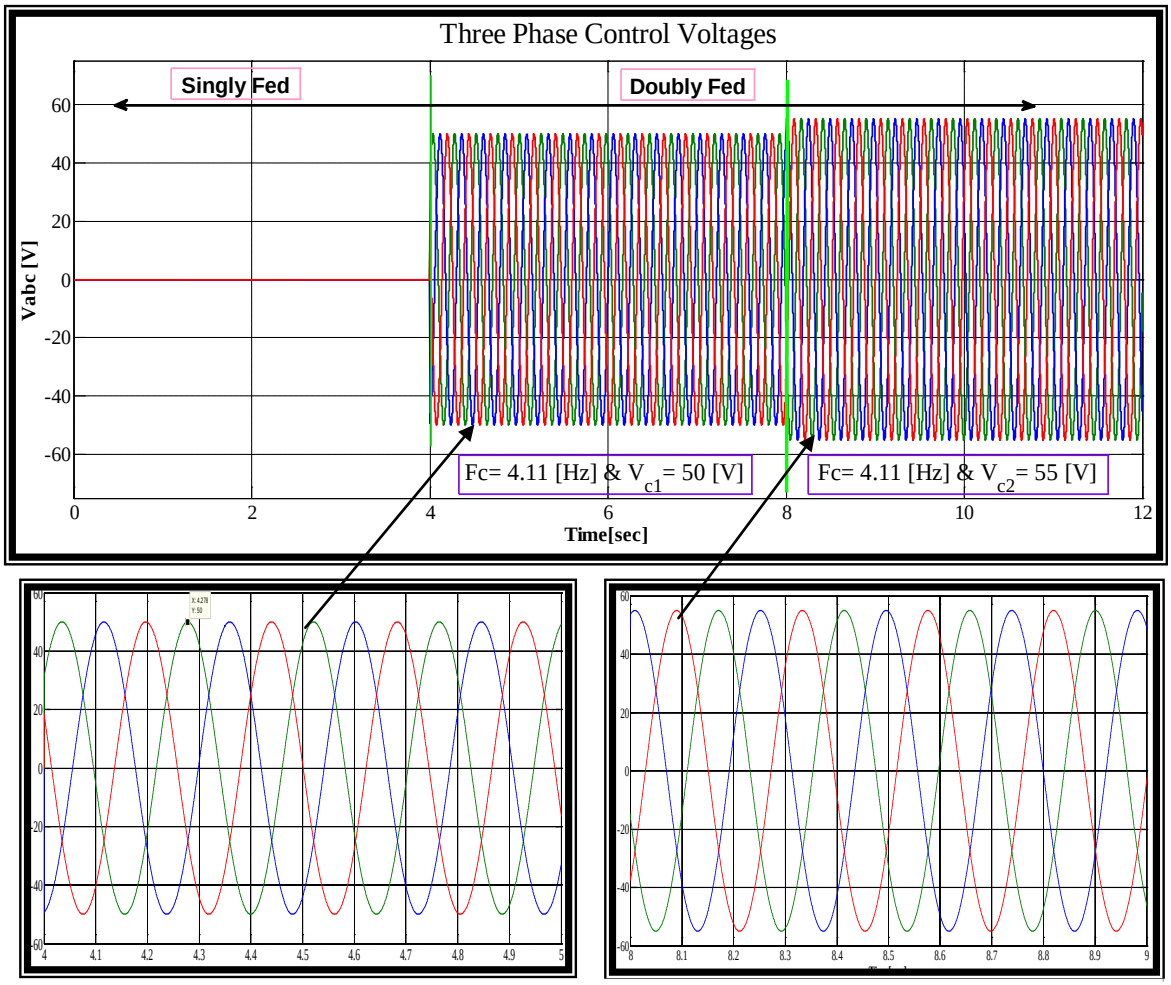
دراسة تأثير تغير توتر ملف التحكم على أداء الآلة (BDFM) وهي موصولة مع عنفة ريحية (Vwind = 12 [m/sec] , Beta = 0 [deg]).

**ملخص التجربة الثالثة:**

تم تشغيل نموذج الآلة (BDFM) الموضح في الشكل ( 6-3)، مع التحكم بالتوتر المغذي لملف التحكم في الآلة (BDFM)، حيث تم تشغيل الآلة (BDFM) كما يبِّن الجدول التالي:

| Time | Fed Mode | Vc [V] & Fc [Hz] |
|---|---|---|
| From (t= 0 to t= 4 [sec]) | Singly Fed Mode | Vc=0 &Fc=0 |
| From (t= 4 to t= 8 [sec]) | Doubly Fed Mode | $Vc_1$ =50 & Fc = 4.11 |
| From (t= 8 to t= 12 [sec]) | | $Vc_1$ =55 & Fc = 4.11 |

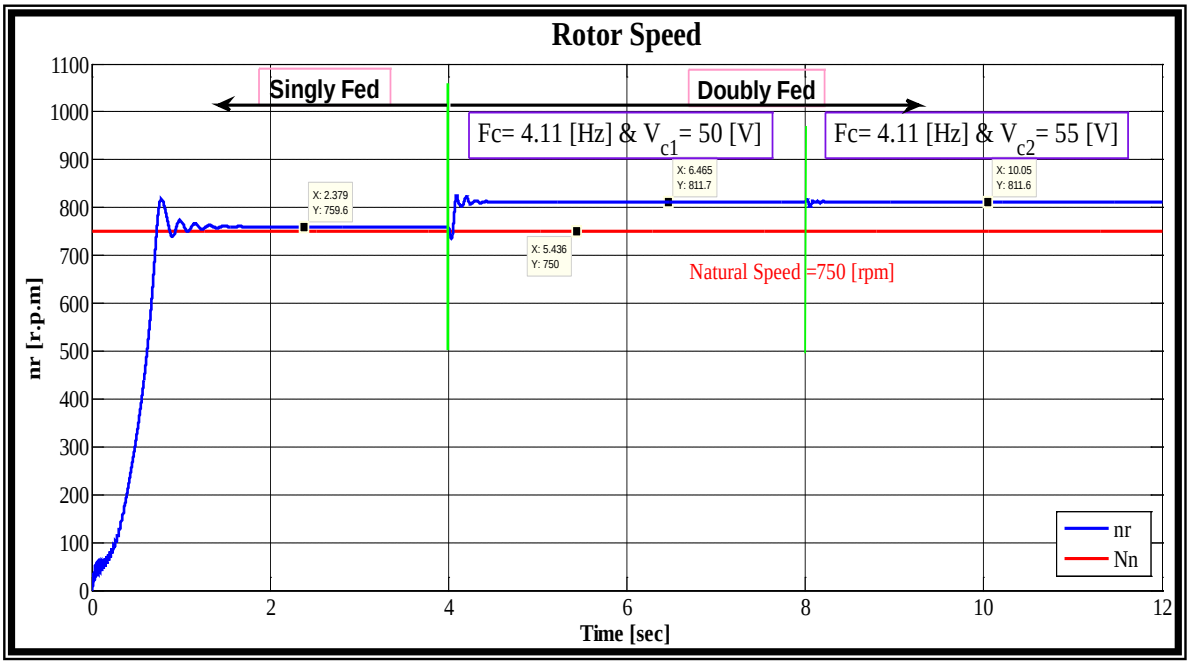
وتم رسم منحنيات توتر التغذية لملف التحكم ( Vc)، ومنحني السرعة ( nr)، بالإضافة إلى رسم منحنيات الاستطاعة الفعلية والردية وعامل الاستطاعة.



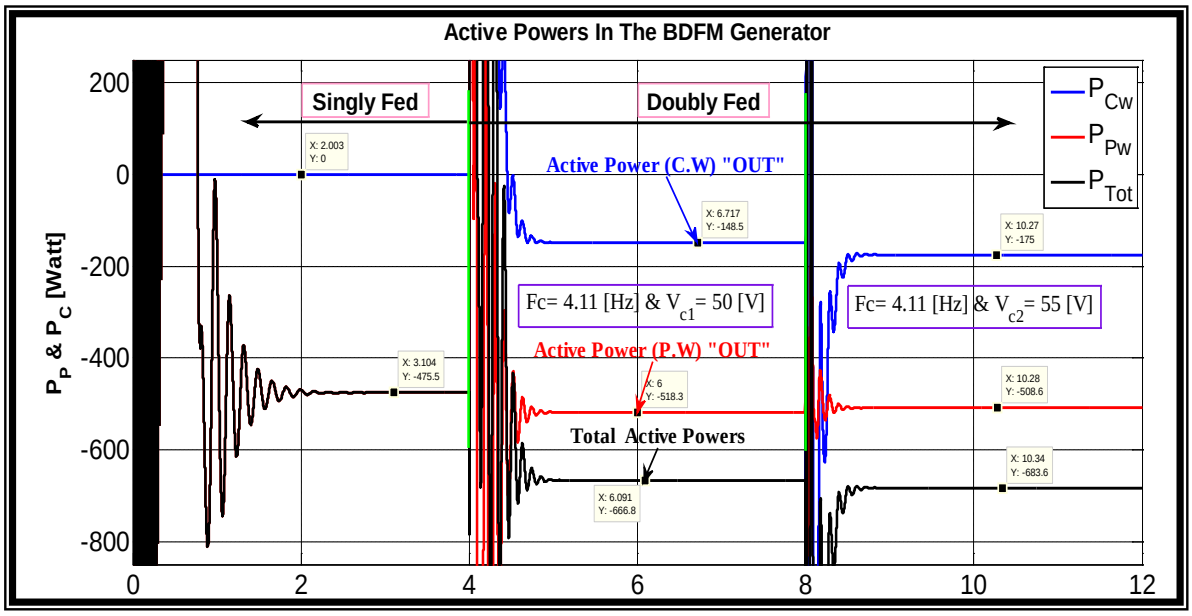

**الشكل (6-14): منحنيات التوتر الثلاثي الطور المغذي لملف التحكم Vabc**

**($Vc_1$ = 50 [V] , Fc = 4.11 [Hz])**

**($Vc_2$ = 55 [V] , Fc = 4.11 [Hz])**

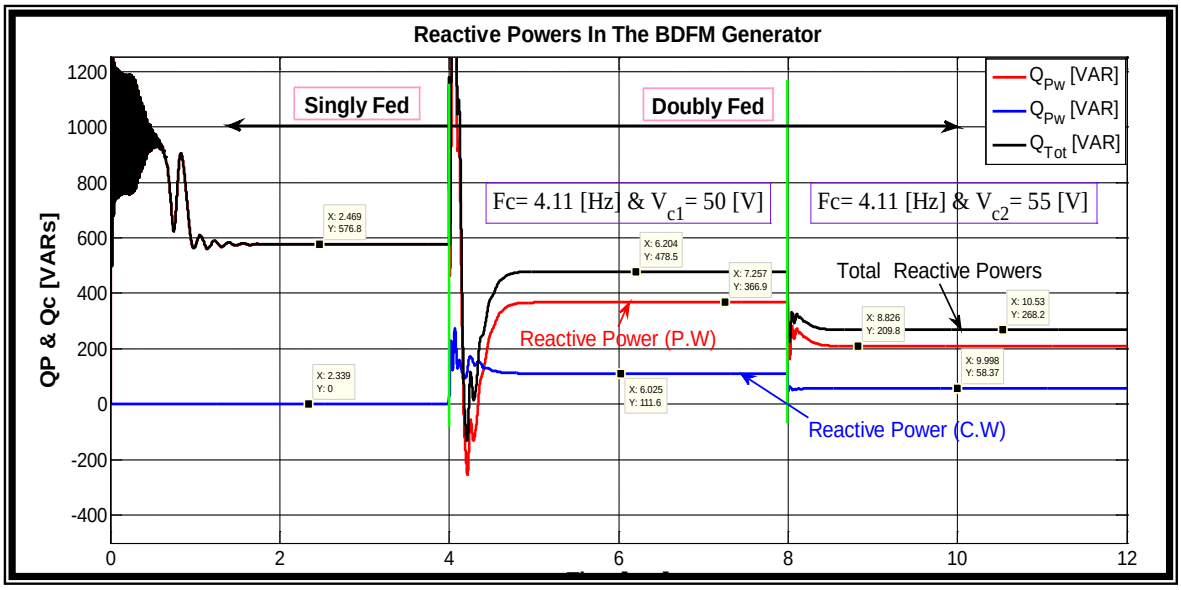



الشكل (6-15): منحني (سرعة الدائر – زمن).



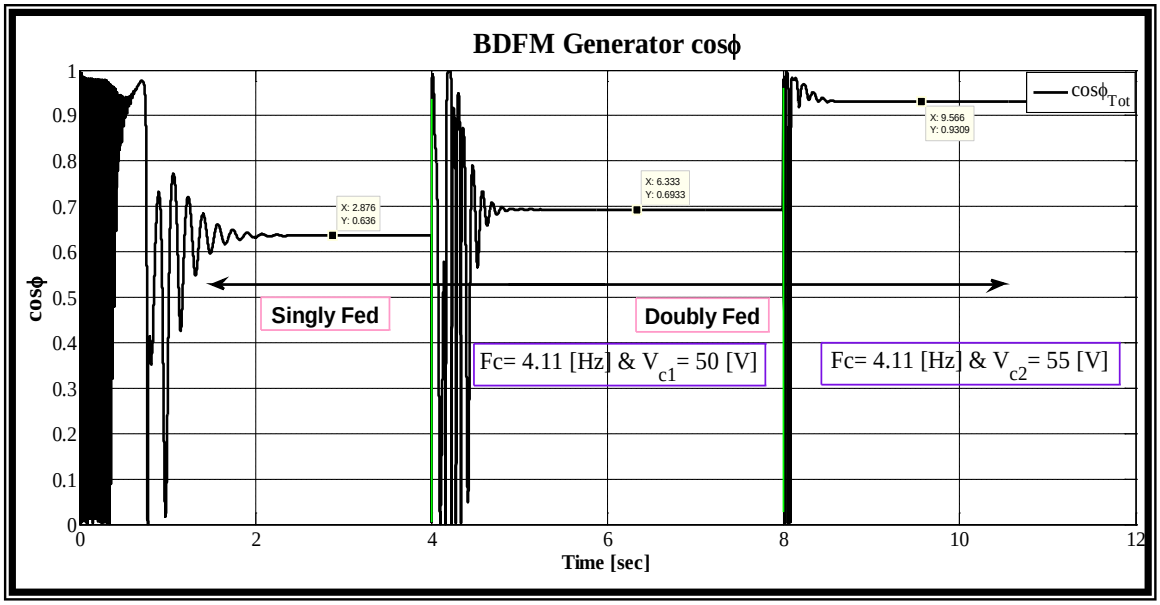

الشكل (6-16): منحنيات تدفق الاستطاعات الفعلية في الآلة (BDFM) في النمطين التحريضي والتزامني.

| Mode | Singly Fed Mode | Doubly Fed Mode | |
|---|---|---|---|
| Vc & Fc | Vc=0 &Fc=0 | $Vc_1$=50[V] & Fc=4.11[Hz] | $Vc_2$=55[V] & Fc=4.11[Hz] |
| P "P.W" [W] | -475.5 | -518.3 | -508.6 |
| P "C.W" [W] | 0 | -148.5 | -175 |
| P Total [w] | -475.5 | -666.8 | -683.6 |




**الشكل (6-17): منحنيات تدفق الاستطاعات الردية في الآلة (BDFM) في النمطين التحريضي والتزامني.**

| Mode | Singly Fed Mode | Doubly Fed Mode | |
|---|---|---|---|
| Vc & Fc | Vc=0 &Fc=0 | $Vc_1$=50[V] & Fc=4.11[Hz] | $Vc_2$=55[V] & Fc=4.11[Hz] |
| Q "P.W" [VAR] | 576.8 | 366.9 | 209.8 |
| Q "C.W" [VAR] | 0 | 111.6 | 58.3 |
| Q Total [VAR] | 576.8 | 478.5 | 268.2 |




**الشكل (6-18): عامل الاستطاعة الكلي للآلة (BDFM) في النمطين التحريضي والتزامني**

| Mode | Singly Fed Mode | Doubly Fed Mode | |
|---|---|---|---|
| Vc & Fc | Vc=0 &Fc=0 | $Vc_1$=50[V] & Fc=4.11[Hz] | $Vc_2$=55[V] & Fc=4.11[Hz] |
| Cos $\varphi_{Tot}$ | 0.63 | 0.69 | 0.93 |

## ٦ ـ ٤ ـ ٥: التجربة الرابعة:

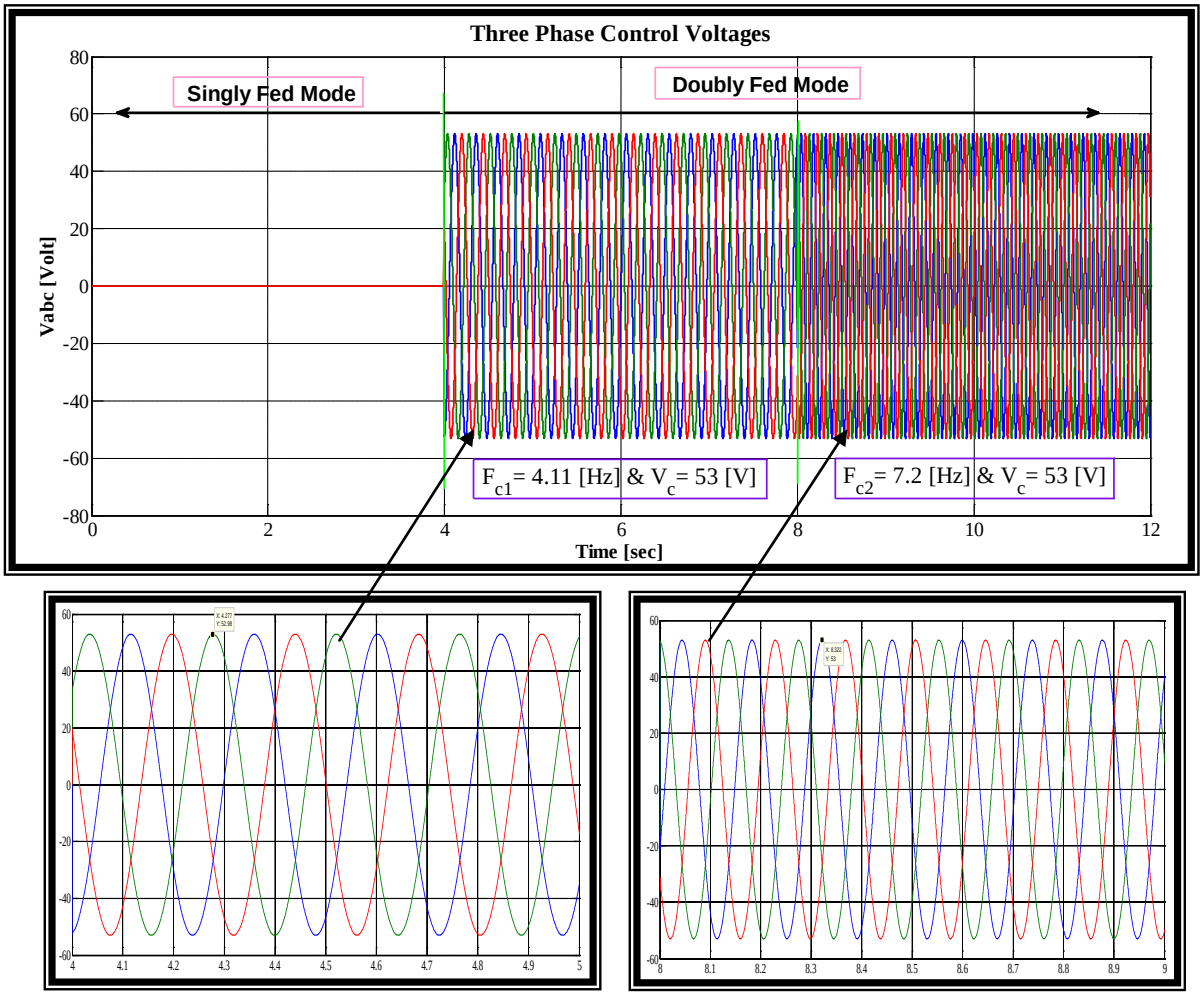
دراسة تأثير تغير تردد ملف التحكم على أداء الآلة (BDFM) وهي موصولة مع عنفة ريحية (Vwind = 12 [m/sec] , Beta = 0 [deg]).

**ملخص التجربة الرابعة:**

تم تشغيل نموذج الآلة (BDFM) الموضح في الشكل ( 6-3)، مع التحكم بالتردد المغذي لملف التحكم في الآلة (BDFM)، حيث تم تشغيل الآلة (BDFM) كما يبيِّن الجدول التالي:

| Time | Fed Mode | Vc [V] & Fc [Hz] |
|---|---|---|
| From (t= 0 to t= 4 [sec]) | Singly Fed Mode | Vc=0 &Fc=0 |
| From (t= 4 to t= 8 [sec]) | Doubly Fed Mode | Vc =53 & $Fc_1$= 4.11 |
| From (t= 8 to t= 12 [sec]) | | Vc =53 & $Fc_2$= 7.2 |

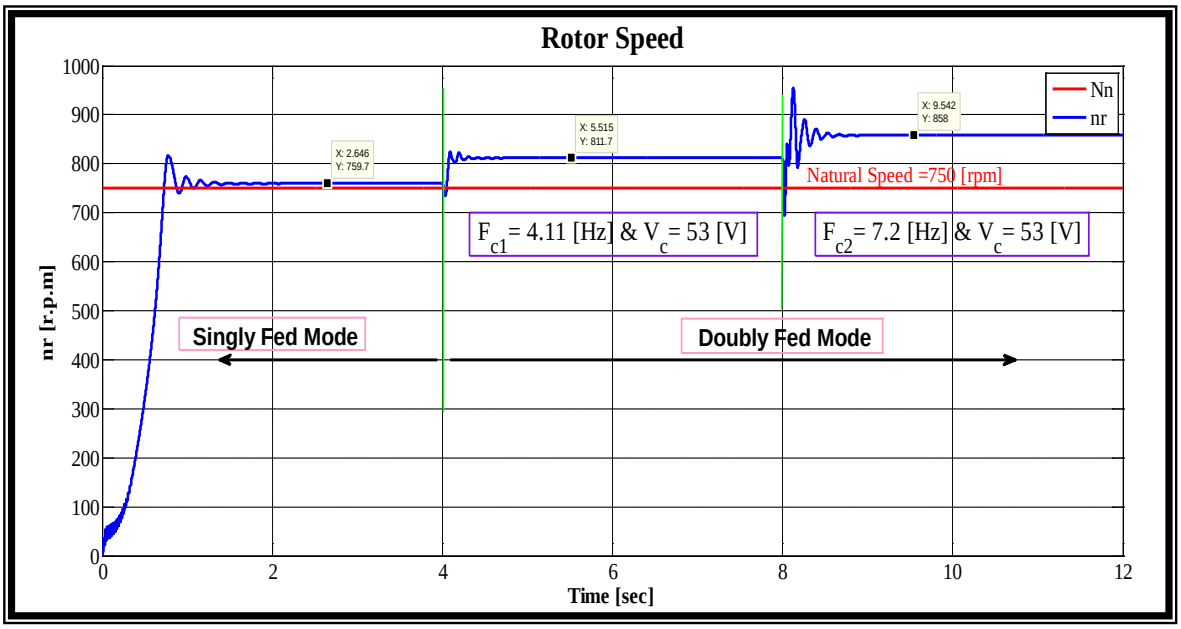
وتم رسم منحنيات توتر التغذية لملف التحكم ( Vc)، ومنحني السرعة ( nr)، بالإضافة إلى رسم منحنيات الاستطاعة الفعلية والردية وعامل الاستطاعة.



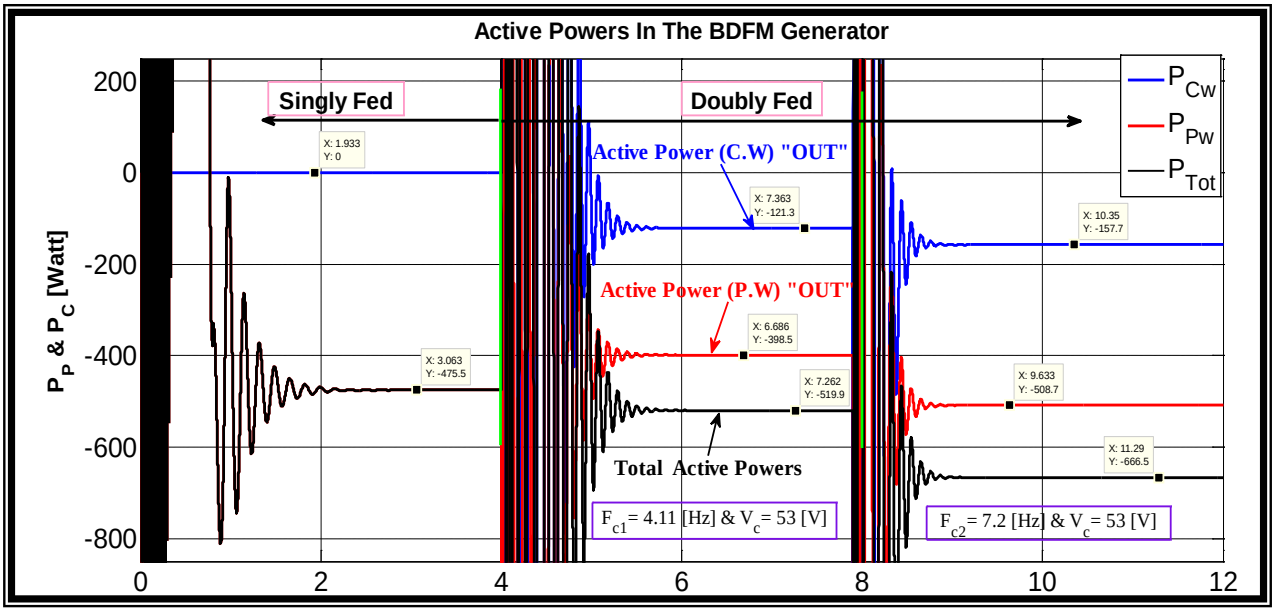

**الشكل (6-19): منحنيات التوتر الثلاثي الطور المغذي لملف التحكم Vabc**

**(Vc = 53 [V] , $Fc_1$ = 4.11 [Hz])**

**(Vc = 53 [V] , $Fc_2$ = 7.2 [Hz])**

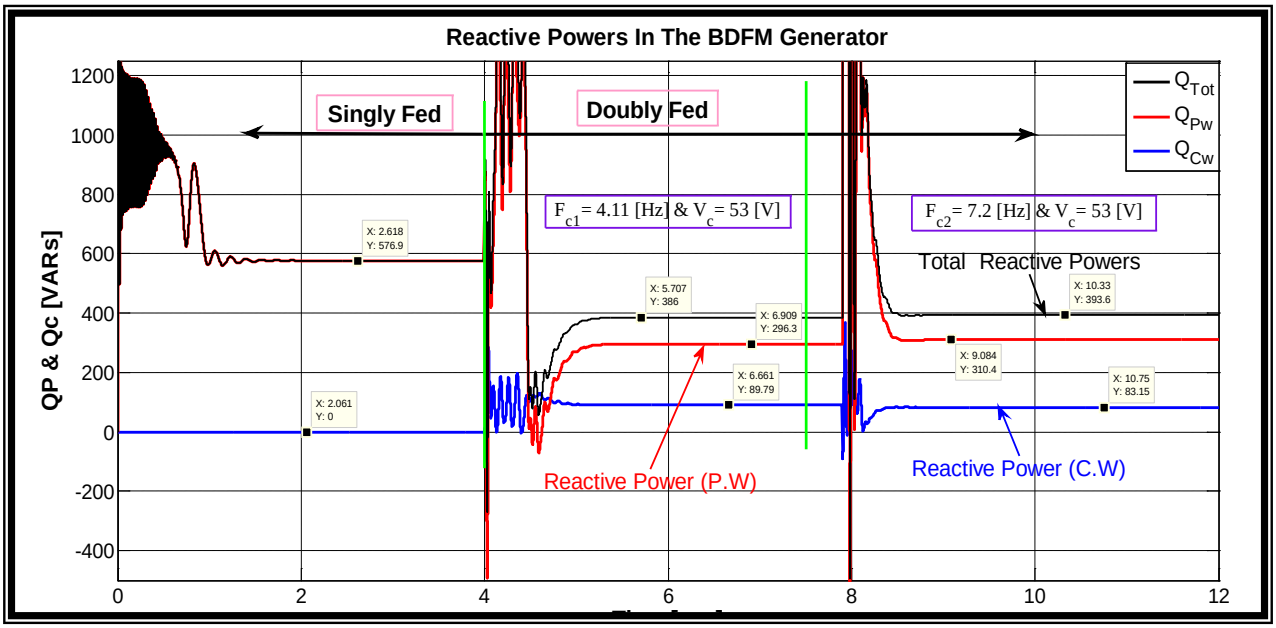



الشكل (6-20): منحني (سرعة الدائر – زمن).



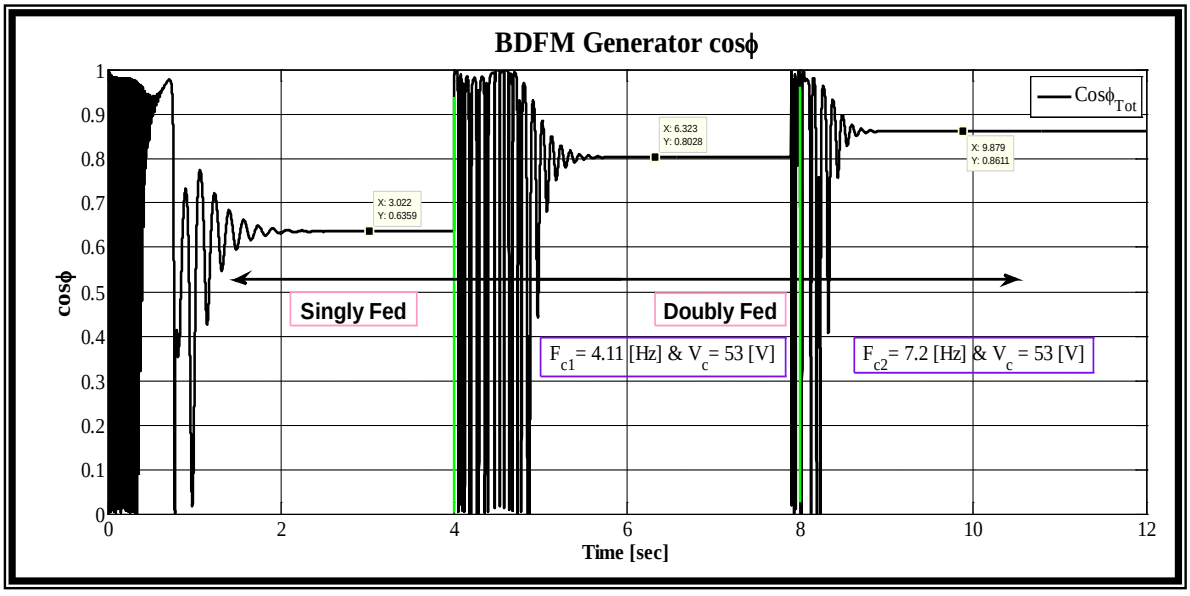

الشكل (6-21): منحنيات تدفق الاستطاعات الفعلية في الآلة (BDFM) في النمطين التحريضي والتزامني.

| Mode | Singly Fed Mode | Doubly Fed Mode | |
|---|---|---|---|
| Vc & Fc | Vc=0 &Fc=0 | Vc=53[V] & $Fc_1$ =4.11[Hz] | Vc=53[V] & $Fc_2$ =7.2[Hz] |
| P "P.W" [W] | -475.5 | -398.5 | -508.7 |
| P "C.W" [W] | 0 | -121.3 | -157.7 |
| P Total [w] | -475.5 | -519.9 | -666.5 |




الشكل (6-22): منحنيات تدفق الاستطاعات الردية في الآلة (BDFM) في النمطين التحريضي والتزامني.

| Mode | Singly Fed Mode | Doubly Fed Mode | |
|---|---|---|---|
| Vc & Fc | Vc=0 &Fc=0 | Vc=53[V] & $Fc_1$ =4.11[Hz] | Vc=53[V] & $Fc_2$ =7.2[Hz] |
| Q "P.W" [VAR] | 576.9 | 296.3 | 310.4 |
| Q "C.W" [VAR] | 0 | 89.7 | 83.1 |
| Q Total [VAR] | 576.9 | 386 | 393.6 |




الشكل (6-23): عامل الاستطاعة الكلي للآلة (BDFM) في النمطين التحريضي والتزامني

| Mode | Singly Fed Mode | Doubly Fed Mode | |
|---|---|---|---|
| Vc & Fc | Vc=0 &Fc=0 | Vc=53[V] & $Fc_1$ =4.11[Hz] | Vc=53[V] & $Fc_2$ =7.2[Hz] |
| Cos $\varphi_{Tot}$ | 0.63 | 0.8 | 0.86 |

## ٦ ـ ٥ ـ ٥: التجربة الخامسة:

تشغيل الآلة (BDFM) في نظام ريحي يعمل عند سرعتي رياح مختلفتين، وملاحقة نقاط الاستطاعة العظمى لمنحنيي الخصائص الميكانيكية للعنفة الريحية، مع ثبات زاوية ميلان الريش (β=0[deg])، ودراسة تغير منحنيات أداء الآلة (BDFM) مع تغير سرعة الرياح من (Vwind = 12 [m/sec]) إلى (Vwind = 8 [m/sec]).

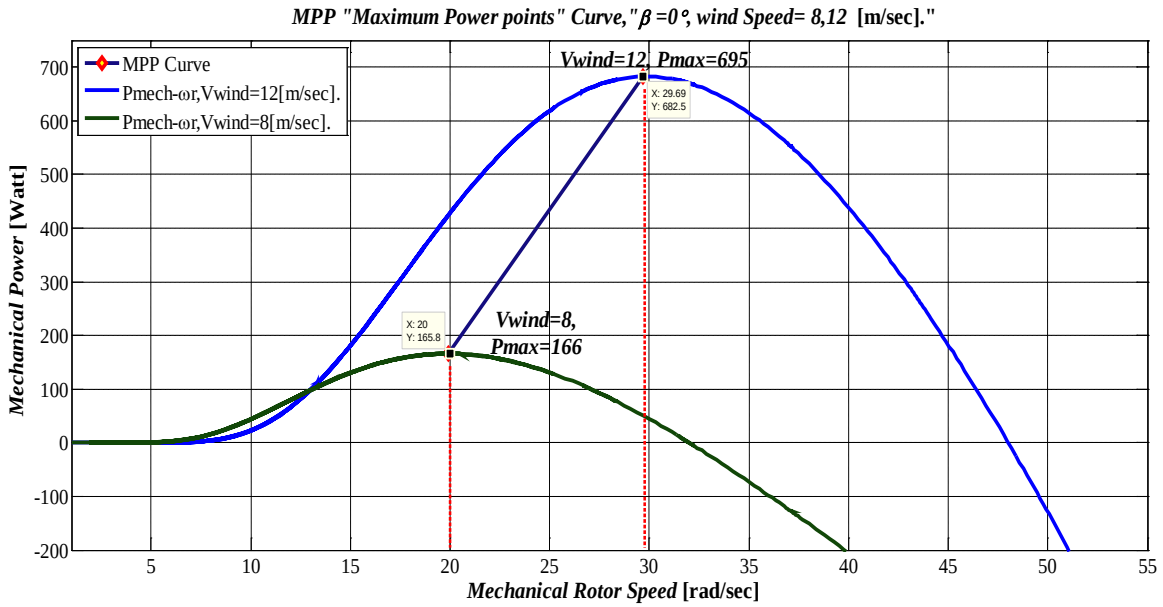
**ملخص التجربة الخامسة:**

تم تشغيل نموذج الآلة (BDFM) الموضح في الشكل (6-3)، مع تغيير سرعة الرياح من (Vwind = 12 [m/sec]) إلى (Vwind = 8 [m/sec])، وكذلك التحكم بالتردد والتوتر المغذي لملف التحكم في الآلة (BDFM)، حيث تم تشغيل الآلة (BDFM) كما يبين الجدول التالي:

| Time | Wind Speed | Fed Mode | Vc [V] & Fc [Hz] |
|---|---|---|---|
| From (t= 0 to t= 4 [sec]) | $V_{wind}$ = 12 [m/sec] | Singly Fed Mode | Vc=0 &Fc=0 |
| From (t= 4 to t= 8 [sec]) | $V_{wind}$ = 12 [m/sec] | Doubly Fed Mode | $Vc_1$ =53 & $Fc_1$ =4.11 |
| From (t= 8 to t= 12 [sec]) | $V_{wind}$ = 8 [m/sec] | | $Vc_1$ =12.5 & $Fc_1$ = (Opp) 4 |
| From (t= 12 to t= 16 [sec]) | $V_{wind}$ = 12 [m/sec] | | $Vc_1$ =53 & $Fc_1$ =4.11 |

وتم رسم منحنيات توتر التغذية لملف التحكم ( Vc)، ومنحني السرعة ( nr)، بالإضافة إلى رسم منحنيات الاستطاعة الفعلية والردية وعامل الاستطاعة.

كما تم الحصول على منحنيات الخصائص الميكانيكية للعنفة الريحية عند سرعتي الرياح ($V_{wind}$ = 12 & 8 [m/sec])، وزاوية ميلان ثابتة للريش (β=0[deg])، بالإضافة إلى منحني الـ(MPP)، كما يوضح الشكل التالي:




**الشكل (6-24): منحنيات الخصائص الميكانيكية للعنفة الريحية المربوطة مع الآلة (BDFM) عند سرعتي رياح (Vwind = 12 & 8 [m/sec])، وزاوية ميلان ثابتة للريش (β=0[deg]).**

نلاحظ من الشكل السابق أنَّ هناك سرعة معينة لدائر المولد تجعل الاستطاعة المستخلصة من الرياح أعظمية، ولكي نجعل الآلة (BDFM) تعمل عند هذه السرعة نقوم بالتحكم بالتردد المغذي لملف التحكم بواسطة المبدل الالكتروني الاستطاعي المربوط معه.

ويتم حساب قيمة التردد المطلوب لتغذية ملف التحكم انطلاقاً من العلاقة (3−1) السابقة كما يلي:

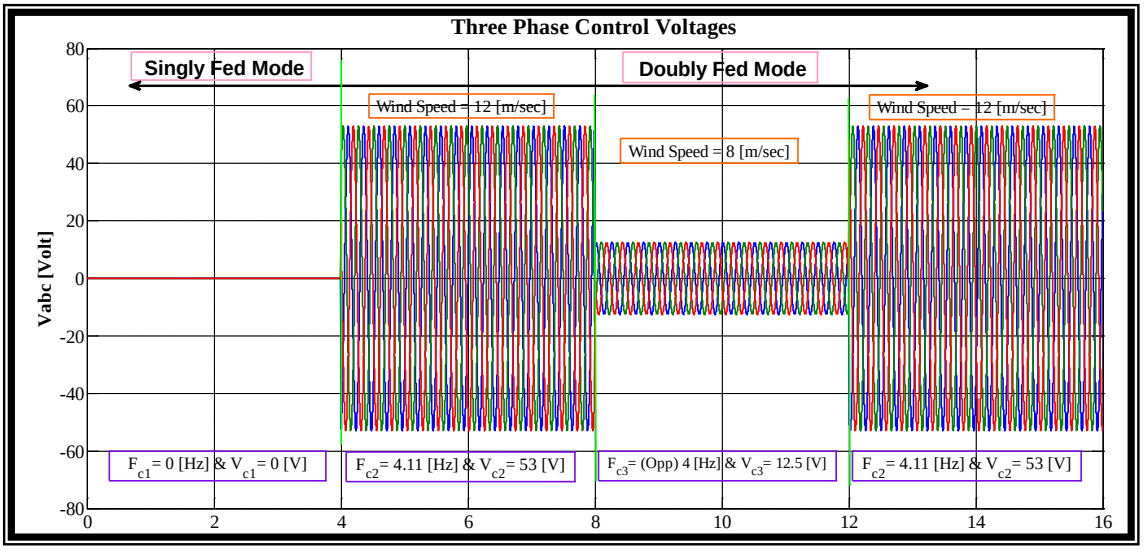
$$n_r = 60 * \frac{f_1+f_2}{P_1+P_2} . \Rightarrow f_2 = [\frac{n_r}{60} * (P_1 + P_2)] - f_1. \quad \ldots\ldots \quad (37-6)$$

وبالحساب نجد أن ترددي التغذية اللازمين لتغذية ملف التحكم من أجل تحقيق دوران لدائر الآلة (BDFM) موافق مع استخلاص الاستطاعة العظمى من الرياح في هذه التجربة هما:

| Wind Speed | Fc [Hz] |
|---|---|
| $V_{wind}$ = 12 [m/sec] | $Fc_1$ =4.11 |
| $V_{wind}$ = 8 [m/sec] | $Fc_2$ = (Opp) 4 |

مع ملاحظة أنَّ سرعة دوران محور الآلة (BDFM) الموافقة للاستطاعة العظمى عند سرعة رياح $(V_{wind} = 12\ [m/sec])$ هي $(n_r = 811\ [r.p.m])$ وهي أعلى من السرعة التزامنية للآلة المختبرة $(N_n = 750\ [r.p.m])$، مما يعني أن كلاً من ملف الاستطاعة وملف التحكم يحققان الاستطاعة الفعلية في الشبكة، بينما نلاحظ أنَّ سرعة دوران محور الآلة (BDFM) الموافقة للاستطاعة العظمى عند سرعة رياح $(V_{wind} = 8\ [m/sec])$ هي $(n_r = 690\ [r.p.m])$ وهي أدنى من السرعة التزامنية للآلة، مما يعني أن ملف الاستطاعة يحقن الاستطاعة الفعلية في الشبكة، بينما يستجر ملف التحكم الاستطاعة من الشبكة لكي تتمكن الآلة (BDFM) من التوليد عند سرعة أدنى من سرعتها التزامنية.

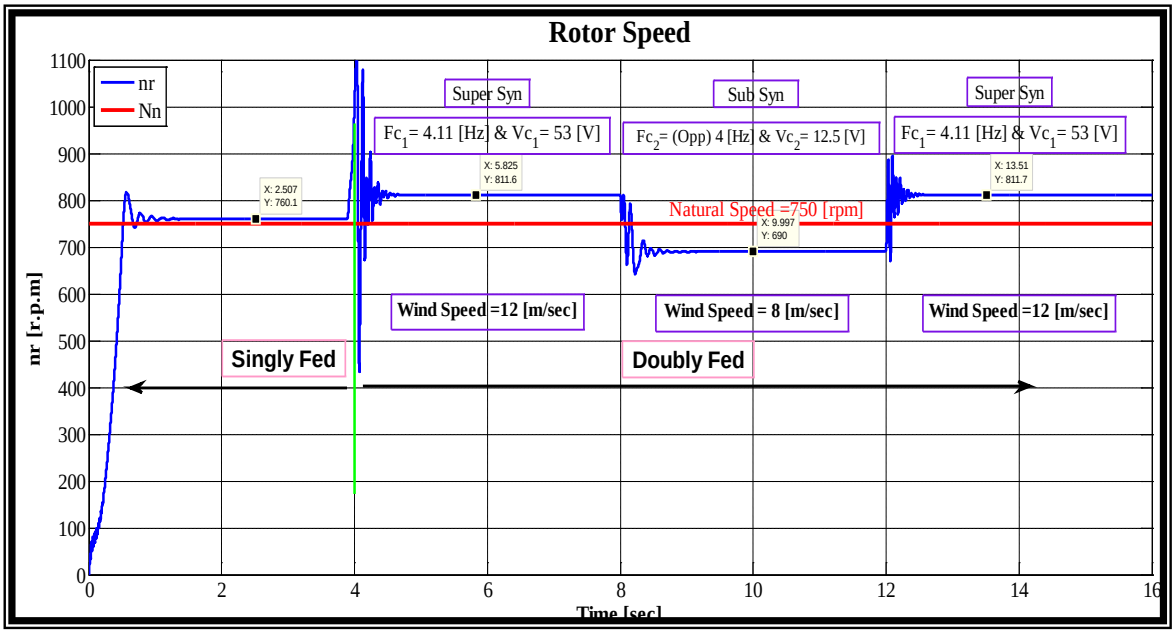
وتوضح الأشكال التالية توترات التغذية لملف التحكم وسرعة الدائر وتدفقات الاستطاعات الفعلية والردية وعامل الاستطاعة في الآلة (BDFM).



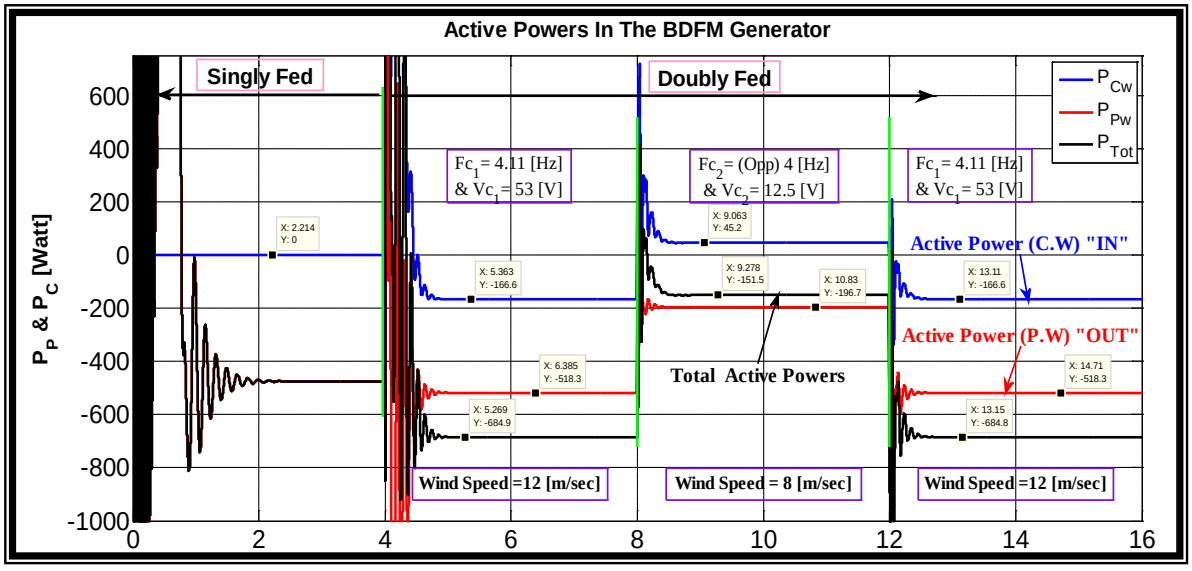

**الشكل (6−25): منحنيات التوتر الثلاثي الطور المغذي لملف التحكم Vabc**

**($Vc_1$= 53 [V] , $Fc_1$ = 4.11 [Hz])**

**($Vc_2$= 12.5 [V] , $Fc_2$ = (Opp) 4 [Hz])**

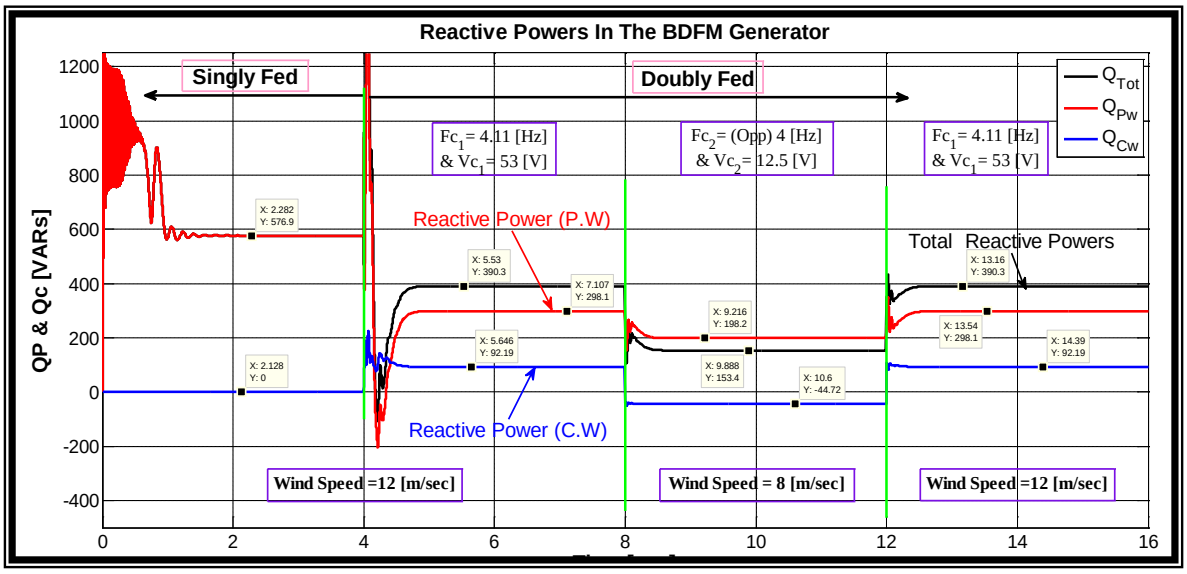



الشكل (6-26): منحني (سرعة الدائر – زمن).



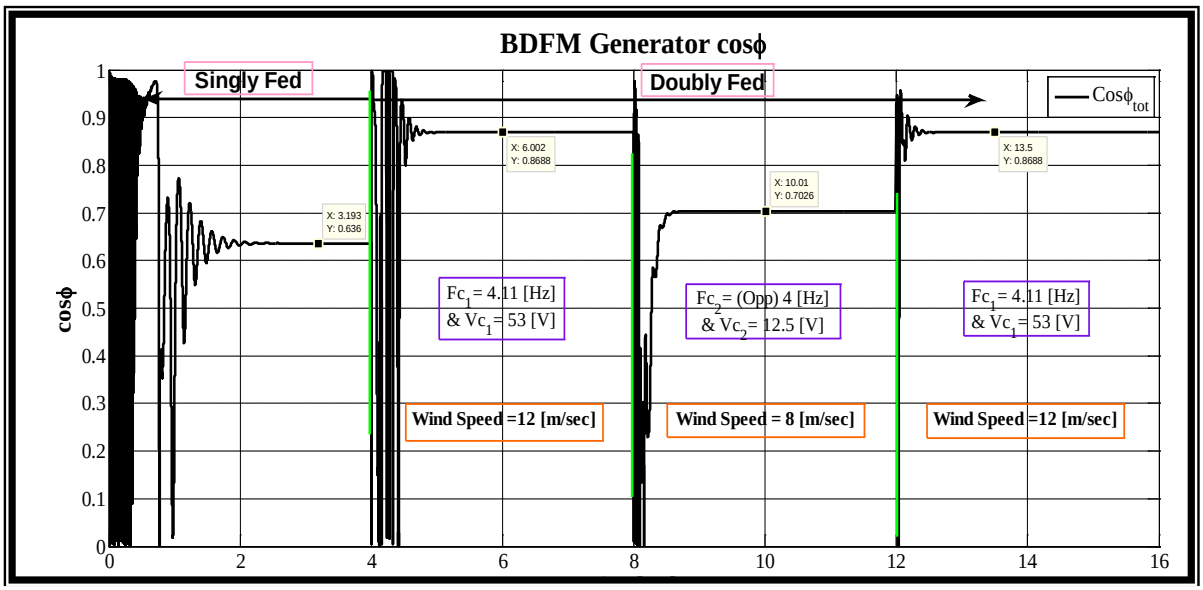

الشكل (6-27): منحنيات تدفق الاستطاعات الفعلية في الآلة (BDFM) في النمطين التحريضي والتزامني.

| Wind Speed | $V_{wind}$ = 12 [m/sec] | | $V_{wind}$ = 8 [m/sec] |
|---|---|---|---|
| Mode | Singly Fed Mode | Doubly Fed Mode | |
| Vc [V] & Fc [Hz] | Vc=0 &Fc=0 | $Vc_1$= 53 , $Fc_1$ = 4.11 | $Vc_2$= 12.5 , $Fc_2$ = (Opp) 4 |
| P "P.W" [W] | -475.4 | -518.3 | -196.7 |
| P "C.W" [W] | 0 | -166.6 | +45.2 |
| P Total [w] | -475.4 | -684.9 | -151.5 |




**الشكل (6-28): منحنيات تدفق الاستطاعات الردية في الآلة (BDFM) في النمطين التحريضي والتزامني.**

| Wind Speed | $V_{wind}$ = 12 [m/sec] | | $V_{wind}$ = 8 [m/sec] |
|---|---|---|---|
| Mode | Singly Fed Mode | Doubly Fed Mode | |
| Vc [V] & Fc [Hz] | Vc=0 &Fc=0 | $Vc_1$= 53 , $Fc_1$ = 4.11 | $Vc_2$= 12.5 , $Fc_2$ = (Opp) 4 |
| Q "P.W" [VAR] | 576.9 | 298.1 | 198.2 |
| Q "C.W" [VAR] | 0 | 92.1 | -44.7 |
| Q Total [VAR] | 576.9 | 390.3 | 153.4 |




**الشكل (6-29): عامل الاستطاعة الكلي للآلة (BDFM) في النمطين التحريضي والتزامني**

| Wind Speed | $V_{wind}$ = 12 [m/sec] | | $V_{wind}$ = 8 [m/sec] |
|---|---|---|---|
| Mode | Singly Fed Mode | Doubly Fed Mode | |
| Vc [V] & Fc [Hz] | Vc=0 &Fc=0 | $Vc_1$= 53 , $Fc_1$ = 4.11 | $Vc_2$= 12.5 , $Fc_2$ = (Opp) 4 |
| Cos $\varphi_{Tot}$ | 0.63 | 0.86 | 0.70 |

## ٦ ـ ٦: التجربة السادسة:

تشغيل الآلة (BDFM) في نظام ريحي يعمل عند زوايا ميلان مختلفة للريش، وملاحقة نقاط الاستطاعة العظمى لمنحنيي الخصائص الميكانيكية للعنفة الريحية، مع ثبات سرعة الرياح (Vwind = 12 [m/sec])، ودراسة تغير منحنيات أداء الآلة (BDFM) مع تغير زاوية ميلان الريش من (β = 5 [deg]) إلى (β = 10 [deg]).

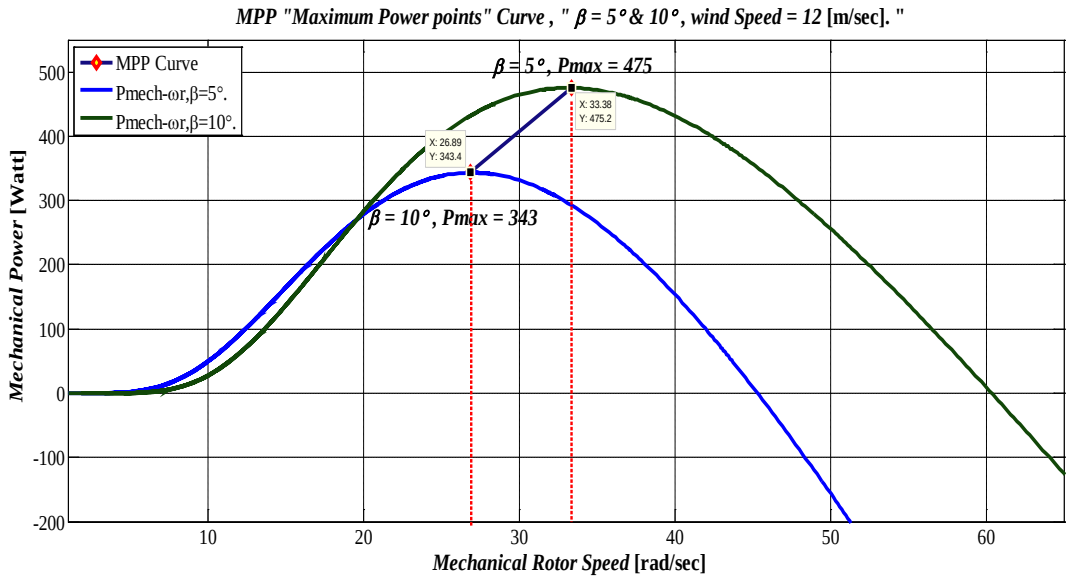
**ملخص التجربة السادسة:**

تم تشغيل نموذج الآلة (BDFM) الموضح في الشكل (6-3)، مع تغيير زاوية ميلان الريش من (β = 5 [deg]) إلى (β = 10 [deg])، وكذلك التحكم بالتردد والتوتر المغذي لملف التحكم في الآلة (BDFM)، حيث تم تشغيل الآلة (BDFM) كما يبين الجدول التالي:

| Time | Pitch angle | Fed Mode | Vc [V] & Fc [Hz] |
|---|---|---|---|
| From (t= 0 to t= 4 [sec]) | β = 5 [deg] | Singly Fed Mode | Vc=0 &Fc=0 |
| From (t= 4 to t= 8 [sec]) | β = 5 [deg] | Doubly Fed Mode | $Vc_1$ =53 & $Fc_1$ =4.11 |
| From (t= 8 to t= 12 [sec]) | β = 10 [deg] | | $Vc_1$ =12.5 & $Fc_1$ = (Opp) 4 |
| From (t= 12 to t= 16 [sec]) | β = 5 [deg] | | $Vc_1$ =53 & $Fc_1$ =4.11 |

وتم رسم منحنيات توتر التغذية لملف التحكم ( Vc)، ومنحني السرعة ( nr)، بالإضافة إلى رسم منحنيات الاستطاعة الفعلية والردية وعامل الاستطاعة.

كما تم الحصول على منحنيات الخصائص الميكانيكية للعنفة الريحية عند زاويتي ميلان للريش هما (β = 5 & 10 [deg])، وسرعة رياح ثابتة ( $V_{wind}$ = 12 [m/sec])، بالإضافة إلى منحني الـ( MPP)، كما يوضح الشكل التالي:




**الشكل (6-30): منحنيات الخصائص الميكانيكية للعنفة الريحية المربوطة مع الآلة (BDFM) عند سرعة رياح (Vwind = 12 [m/sec])، وزاويتي ميلان للريش (β= 5 & 10 [deg]).**

نلاحظ من الشكل السابق أنَّ هناك سرعة معينة لدائر المولد تجعل الاستطاعة المستخلصة من الرياح أعظمية، ولكي نجعل الآلة (BDFM) تعمل عند هذه السرعة نقوم بالتحكم بالتردد المغذي لملف التحكم بواسطة المبدل الالكتروني الاستطاعي المربوط معه.

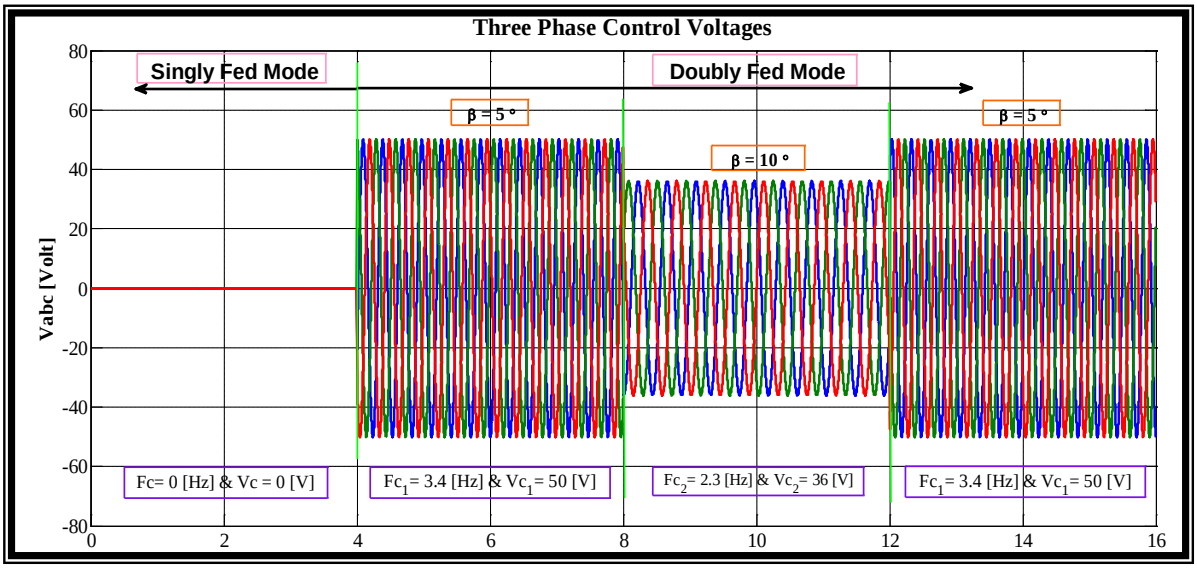
ويتم حساب قيمة التردد المطلوب لتغذية ملف التحكم من العلاقة (6-37) السابقة.

وبالحساب نجد أن ترددي التغذية اللازمين لتغذية ملف التحكم من أجل تحقيق دوران لدائر الآلة (BDFM) موافق مع استخلاص الاستطاعة العظمى من الرياح في هذه التجربة هما:

| Pitch angle | Fc [Hz] |
|---|---|
| $\beta = 5$ [deg] | $Fc_1 = 3.4$ [Hz] |
| $\beta = 10$ [deg] | $Fc_2 = 2.3$ [Hz] |

مع ملاحظة أنَّ سرعة دوران محور الآلة (BDFM) الموافقة للاستطاعة العظمى عند زاوية ميلان للريش ($\beta = 5$ [deg]) هي ($n_r = 801$ [r.p.m]) وهي أعلى من السرعة التزامنية للآلة المختبرة ($N_n = 750$ [r.p.m])، كما أنَّ سرعة دوران محور الآلة (BDFM) الموافقة للاستطاعة العظمى عند زاوية ميلان للريش ($\beta = 10$ [deg]) هي ($n_r = 784.5$ [r.p.m]) وهي أيضاً أعلى من السرعة التزامنية للآلة المختبرة ($N_n = 750$ [r.p.m])، مما يعني أن كلاً من ملف الاستطاعة وملف التحكم سيحقنان الاستطاعة الفعلية في الشبكة.

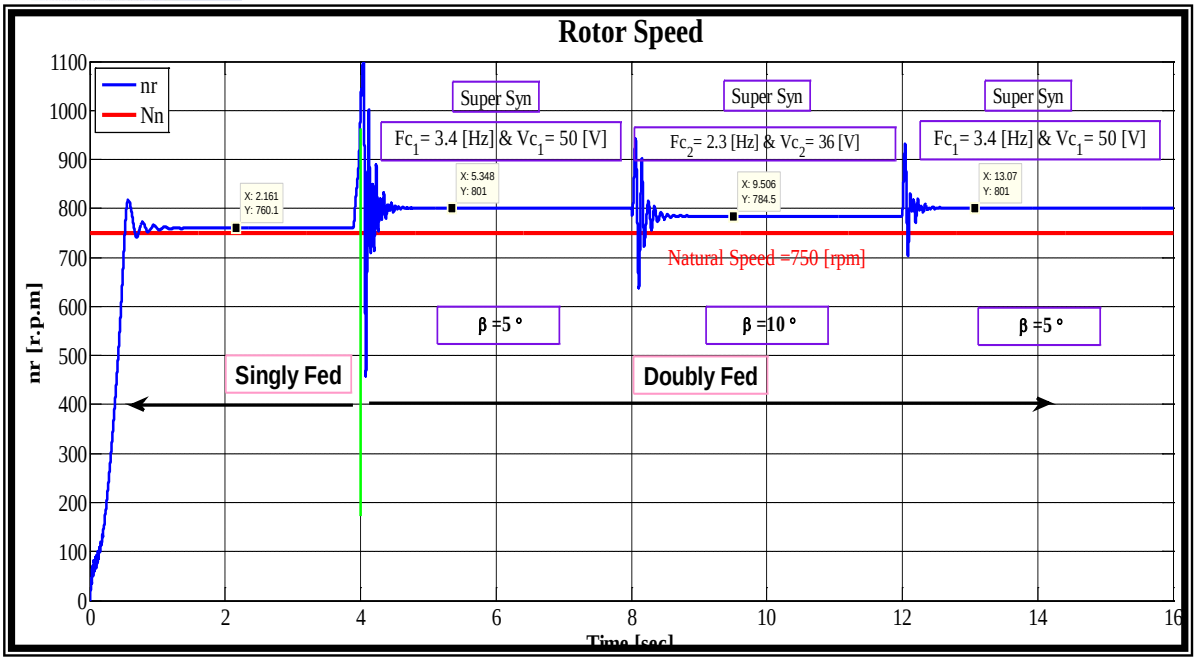
وتوضح الأشكال التالية توترات التغذية لملف التحكم وسرعة الدائر وتدفقات الاستطاعات الفعلية والردية وعامل الاستطاعة في الآلة (BDFM).



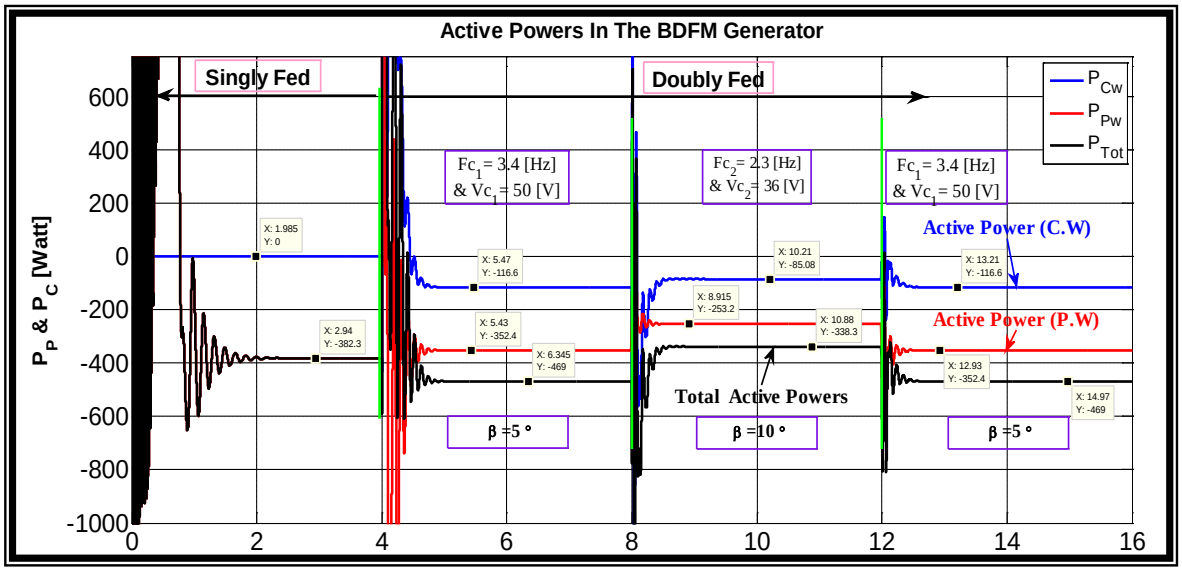

**الشكل (6-31): منحنيات التوتر الثلاثي الطور المغذي لملف التحكم Vabc**

**($Vc_1$= 50 [V] , $Fc_1$ = 3.4 [Hz])**

**($Vc_2$= 36 [V] , $Fc_2$ = 2.3 [Hz])**

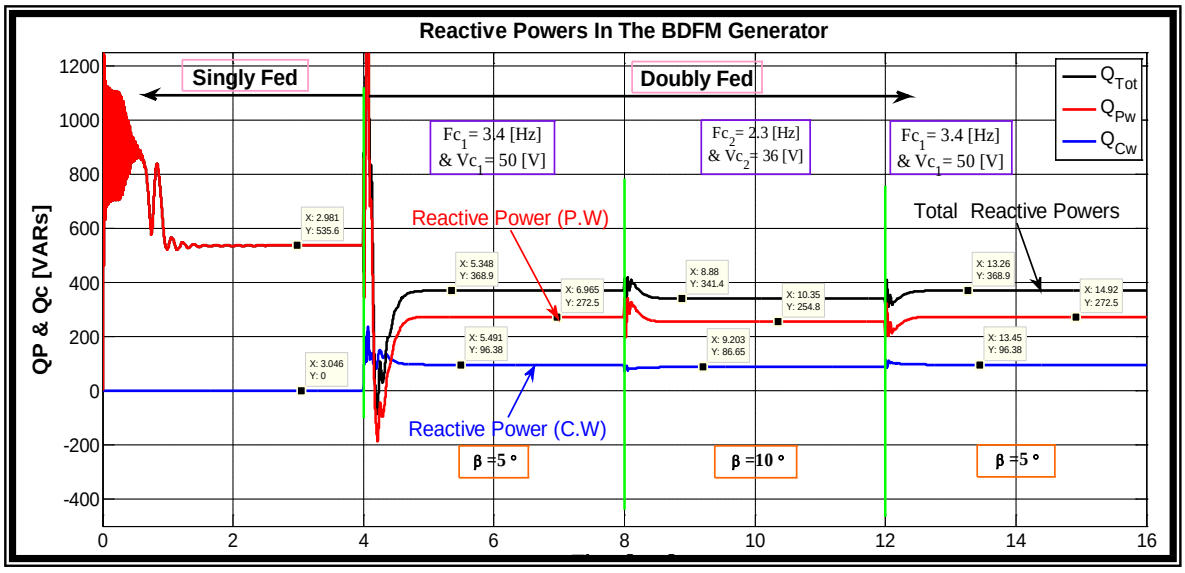



الشكل (6-32): منحني (سرعة الدائر – زمن).



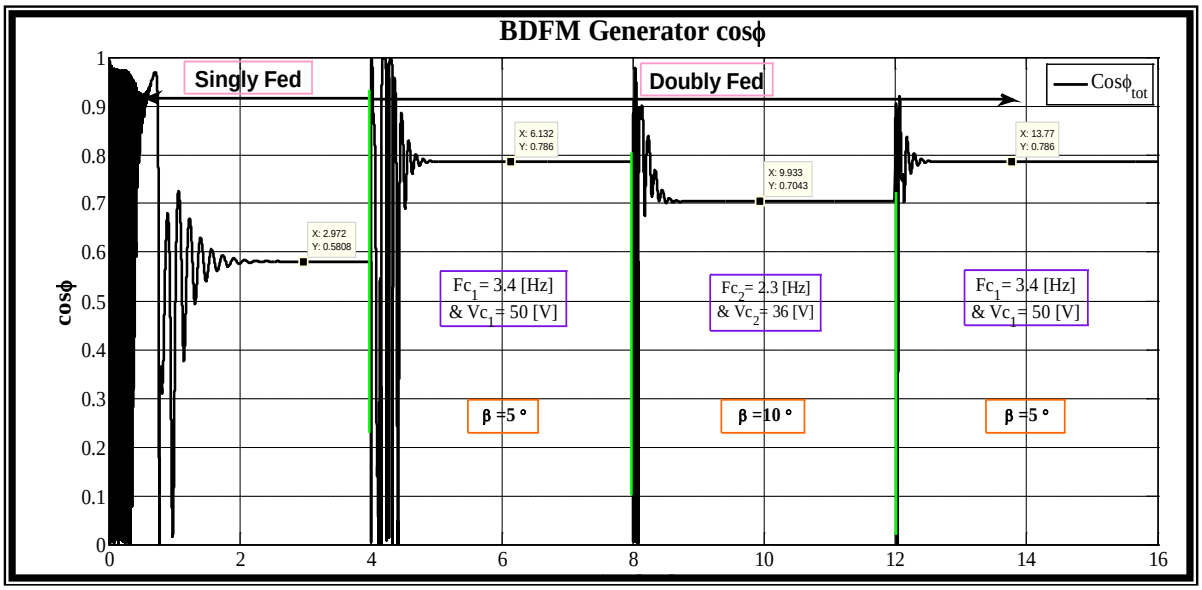

الشكل (6-33): منحنيات تدفق الاستطاعات الفعلية في الآلة (BDFM) في النمطين التحريضي والتزامني.

| Pitch angle | β = 5 [deg] | | β = 10 [deg] |
|---|---|---|---|
| Mode | Singly Fed Mode | Doubly Fed Mode | |
| Vc [V] & Fc [Hz] | Vc=0 &Fc=0 | $Vc_1$= 50 , $Fc_1$ = 3.4 | $Vc_2$= 36 , $Fc_2$ = 2.3 |
| P "P.W" [W] | -382.3 | -352.4 | -253.2 |
| P "C.W" [W] | 0 | -116.6 | -85 |
| P Total [w] | -382.3 | -496 | -338.3 |




**الشكل (6-34): منحنيات تدفق الاستطاعات الردية في الآلة (BDFM) في النمطين التحريضي والتزامني.**

| Pitch angle | β = 5 [deg] | | β = 10 [deg] |
|---|---|---|---|
| Mode | Singly Fed Mode | Doubly Fed Mode | |
| Vc [V] & Fc [Hz] | Vc=0 &Fc=0 | $Vc_1$= 50 , $Fc_1$ = 3.4 | $Vc_2$= 36 , $Fc_2$ = 2.3 |
| Q "P.W" [VAR] | 535.6 | 272.5 | 254.8 |
| Q "C.W" [VAR] | 0 | 96.3 | 86.6 |
| Q Total [VAR] | 535.6 | 368.9 | 341.4 |




**الشكل (6-35): عامل الاستطاعة الكلي للآلة (BDFM) في النمطين التحريضي والتزامني**

| Pitch angle | β = 5 [deg] | | β = 10 [deg] |
|---|---|---|---|
| Mode | Singly Fed Mode | Doubly Fed Mode | |
| Vc [V] & Fc [Hz] | Vc=0 &Fc=0 | $Vc_1$= 50 , $Fc_1$ = 3.4 | $Vc_2$= 36 , $Fc_2$ = 2.3 |
| Cos $\varphi_{Tot}$ | 0.58 | 0.78 | 0.70 |

# النتائج العلمية للبحث

# Scientific Results of the Research

## النتائج العلمية للبحث:

## Scientific Results of the Research:

تبيَّن من خلال التجارب العملية التي تمت خلال هذا البحث بواسطة بيئة الـ Matlab/Simulink، مجموعة من النتائج العلمية التي سنوردها فيما يلي:

a) التجارب العلمية على العنفة الريحية:

١ –تبيَّن من خلال دراسة تأثير تغير زاوية ميلان الشفرات $\beta$ على منحنيات $Cp - \lambda$، أنَّه كلما نقصت قيمة زاوية ميلان الشفرات $\beta$ كلما ازدادت قيمة معامل الأداء $C_p$، وبالتالي ازدادت الاستطاعة المستخلصة من الرياح كما بيَّنت منحنيات $(P_{mechanicl} - \omega_r)$.

٢ –بيَّنت دراسة تأثير تغير سرعة الرياح على منحنيات ( $P_{mechanicl} - \omega_r$)، أنَّ ازدياد سرعة الرياح بشكل بسيط، تؤدي إلى زيادة الاستطاعة المنتزعة من الرياح بشكل كبير، وذلك بسبب التناسب الطردي بين مكعب سرعة الرياح وبين الاستطاعة المستخلصة منها.

٣ –أوضح منحني نقاط الاستطاعة العظمى ( "MPP" Curve )، بأنه عند سرعة رياح محددة هناك سرعة دوران موافقة لدائر العنفة الريحية تجعل الاستطاعة المنتزعة من الرياح أعظم ما يمكن، لذلك كان لابد من تكييف سرعة دوران الدائر مع تغير سرعة الرياح لاستخلاص أعظم استطاعة ممكنة، حيث تكون الاستطاعة المستخلصة من الرياح عظمى عندما يكون ( Cp) أعظمياً. وهذه القيمة العظمى لـ ( Cp) تنتج عند قيمة محددة لـ ( $\lambda$). وبالتالي فإنه عند سرعة رياح معينة هناك سرعة دوران مثالية لدوار العنفة نحصل عندها على أعظم قيمة للاستطاعة الميكانيكية المستخلصة من الرياح.

b) التجارب العلمية على المولد التحريضي التقليدي المربوط مع عنفة ريحية: تم التوصل إلى ما يلي من هذه التجارب:

١ –استجرار الآلة تيارات كبيرة عند الإقلاع، وازدياد زمن الإقلاع بشكل ملحوظ عند ربطها إلى العنفة الريحية بسبب العطالة الكبيرة للعنفة، وهذا له سلبيات كبيرة على الشبكة وخاصة في حال إقلاع عدد كبير من العنفات الريحية معاً.

٢ -استهلاك المولدة التحريضية للاستطاعة الردية والذي له تأثيرات سيئة على الشبكة المربوطة معها.

٣ -شرط دوران المولدة التحريضية بسرعة أعلى من سرعتها التزامنية لتتمكن من التوليد، يحدد من إمكانية التوليد ضمن مجال صغير من سرعات الرياح.

٤ -إن زيادة زاوية ميلان شفرات العنفة الريحية تؤدي إلى تناقص العزم الميكانيكي المقدم من العنفة إلى محور المولدة المربوطة معها، وبالتالي تناقص الاستطاعة الكهربائية المتولدة عنها. ويعتبر هذا أحد أنواع التحكم بالعنفة عند زيادة سرعة الرياح حفاظاً على سلامة الآلة.

٥ -تؤدي زيادة سرعة الرياح إلى زيادة العزم الميكانيكي المقدم من العنفة إلى محور المولدة المربوطة معها، وبالتالي زيادة الاستطاعة الكهربائية المتولدة عنها.

c) التجارب العلمية على المولد التحريضي ذو التغذية المزدوجة بدون مسفرات المربوط مع عنفة ريحية: تم التوصل إلى ما يلي من خلال هذه التجارب:

١ -عند تشغيل الآلة (BDFM) عند سرعة أعلى من سرعتها التزامنية، فإن كلاً من ملف الاستطاعة وملف التحكم في الثابت يحقنان الاستطاعة الفعلية في الشبكة.

٢ -انخفاض الاستطاعة الردية المستهلكة من الشبكة عند تشغيل الآلة (BDFM) في نمط التغذية المزدوجة مقارنة مع الاستطاعة الردية التي تستجرها الآلة في نمط التغذية الأحادية. وبالتالي تحسين عامل الاستطاعة عند استخدام ملف التحكم.

٣ -إمكانية التوليد في الآلة (BDFM) عند دوران محورها عند سرعة أدنى من سرعتها التزامنية، ويكون تدفق الاستطاعات الفعلية في الآلة (BDFM) عند ذلك:

- ملف الاستطاعة في الثابت يقوم بحقن الاستطاعة الفعلية في الشبكة.
- ملف التحكم في الثابت يستجر الاستطاعة الفعلية من الشبكة.

٤ -إن تغيير التوتر المغذي لملف التحكم في الثابت له نفس تأثير تغيير توتر التهييج في الآلة التزامنية التقليدية، حيث أنه يؤثر فقط على الاستطاعة الردية في الآلة.

٥ -إن تغيير التردد المغذي لملف التحكم في الثابت له نفس تأثير تغيير سرعة دوران العنفة التي تقوم بتدوير المولد التزامني التقليدي، حيث أنه يؤثر فقط على الاستطاعة الفعلية في الآلة.

٦ –تمكنًا من خلال استخدام المولد (BDFM) وبواسطة آلية تحكمية مناسبة للتحكم بتردد وتوتر ملف التحكم (دارة مفتوحة) من ملاحقة تغيرات منحني نقاط الاستطاعة العظمى أثناء تغيرات سرعة الرياح.

٧ مع ازدياد سرعة الرياح يتم استخدام آلية التحكم بزاوية ميلان الريشة وهو ما يسمى الـ Pitch Control، والذي يسمح بإنقاص استطاعة خرج العنفة الريحية إلى الحد المقبول ، والعكس صحيح، فعند انخفاض استطاعة خرج العنفة الريحية تعود الشفرات إلى مواجهة الرياح لزيادة استطاعة الخرج. وقد استطعنا من خلال استخدام المولد ( BDFM) وباستخدام آلية تحكمية مناسبة للتحكم بتردد وتوتر ملف التحكم من ملاحقة تغيرات منحني نقاط الاستطاعة العظمى أثناء تغير زاوية ميلان الشفرات (β).

**النتيجة : تكييف سرعة دوران دائر الآلة (BDFM) لتوافق الاستطاعة العظمى مع تغير سرعة الرياح، وتغير زاوية ميلان الريش.**

## المقترحات:

# The Recommendations:

١ - ينصح باستخدام المولد التحريضي ذو التغذية المزدوجة عديم المسفرات (BDFM) في العنفات الريحية التي تعمل عند سرعات رياح متغيرة لما في ذلك من ميزات إيجابية من الناحيتين الفنية والاقتصادية.

٢ - ينصح باستخدام نظام تحكم قادر على تتبع نقاط منحني الاستطاعة العظمى بشكل آلي أثناء تغيرات سرعة الرياح في العنفات الريحية التي تعمل عند سرعات رياح متغيرة والتي تستخدم المولد التحريضي ذو التغذية المزدوجة عديم المسفرات (BDFM)، حيث تعتبر هذه الأنظمة من أفضل الأنظمة التحكمية لما في ذلك من زيادة كبيرة في مردود العنفة والاستفادة منها.

٣ - تعتبر الآلة (BDFM) من الآلات الحديثة والتي لا تزال طور البحث والتطوير، لذلك يمكن القول بأن هناك الكثير من العمل يمكن إنجازه في هذا المجال، مثل:

– دراسة مجالات العمل المستقرة للآلة (BDFM).

– دراسة الأنظمة التحكمية المغلقة المستخدمة مع الآلة (BDFM) للحفاظ على العمل ضمن المجال المستقر لها مع تغيرات سرعة الرياح.

## المراجع العلمية العربية

# Arabic References


[7]. د.هاكوب بوغوص – د.علي الجازي، (2007)، كتاب الآلات اللاتزامنية (التحريضية)، منشورات جامعة دمشق.

[8]. د.إلياس جبُّور، (1999)، كتاب الآلات التزامنية ثلاثية الطور، منشورات جامعة دمشق.

[3]. د.عبد المطلب أبو سيف، رسالة ماجستير، (2010).

[5]. د.هاكوب بوغوص، مشروع تخرج، (2007).


## المراجع العلمية الأجنبية

# English References


**[1]. Lars Helle and Frede Blaabjerg, ( Wind Turbine Systems ), Institute of Energy Technology, Aalborg University, Aalborg, Denmark, (2003).**

**[2]. Hagob Boghos, (Analysis, Modelling, and Control of the Doubly Fed Induction Generators for Wind Turbines), Loughborough University, Department of Electrical and Electronic Engineering, December (2005).**

**[4]. S. Heier, ( Grid Integration Of Wind Energy Conversion Systems ), Second Edition, Kassel University, Germany. (2006).**

**[6]. Hugo Eduardo Mena Lopez (Maximum Power Tracking Control Scheme For Wind Generator Systems), A Dissertation Submitted For The Degree Of Master Of Science , Texas A&M University , December (2007).**

**[9]. Paul C. Roberts (A Study of Brushless Doubly-Fed (Induction) Machines) A DISSERTATION SUBMITTED FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY-University of Cambridge-September (2004).**

**[10]. B. V. Gorti, (Power Balance Considerations For Brushless Doubly-Fed Machines) , Oregon State University- IEEE Transactions on Energy conversion, Vo1. 11, NO.4, December (1996).**

[11]. P. C. Roberts, (Equivalent circuit for the brushless doubly fed machine (BDFM) including parameter estimation and experimental verification) - University of Cambridge - IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 152, No. 4, July (2005).

[12]. R. A. McMahon, (Performance Of BDFM As Generator And Motor) - University of Cambridge - IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 153, No. 2, March (2006).

[13]. F. Jallali , (Investigation of the Transient Behavior of Brushless Cascaded Doubly Fed Machines) - University of Sfax, Tunisia - Copyright © (2009).

[14]. J. Poza , E. Oyarbide , and M. Rodiguez , (Unified Reference Frame d-q Model Of The Brushless Doubly Fed Machine) - University of Mondragon , Loramendi 4 – Spain - Copyright © IEE, (2006).

[15]. S. Williamson, A. C. Ferreira, A. K. Wallace, ( Generalized Theory Of The Brushless Doubly Fed Machine. Part 1: Analysis ), IEE, March (2007).

[16]. S. M. Allam, A. M. Azmy, and M. A. El-Khazendar, ( A General Model For Describing The Performance Of Brushless Doubly Fed Induction Machines ), ICCCP , February (2009).

[17]. R. A. McMahon, X. Wang and E. Abdi-Jalebi (The BDFM as a Generator in Wind Turbines), Cambridge University.

[18]. Richard McMahon, Peter Tavner, Ehsan Abdi, Paul Malliband and Darren Barker, (Characterising Rotors for Brushless Doubly-Fed Machines (BDFM)), Copyright © IEEE, (2010).

[19]. Fengxiang Wang, Yue Zhang, Guanggui Sun and Jian Pan, (Performance Analysis of Doubly Fed Brushless Machine with Cage Rotor), School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology , China , Copyright © IEEE, (2009).

[20]. Ruqi Li, Alan Wallace, Rene Spee, (DYNAMIC SIMULATION OF BRUSHLESS DOUBLY-FED MACHINES), Department of Electrical and Computer Engineering, Oregon State University, Copyright © IEEE, September (1991).

**Damascus University**
**Faculty of Mechanical and Electrical Engineering**
**Electrical energy Department**

# "Performance Study Of Brushless Doubly-Fed Machine (BDFM) in Wind Farms".

Thesis Submitted For The Degree Of M.SC. In Power Electrical Energy Engineering.

**Prepared by**
Eng. M.Maher Al-Tabbahk

**Main Supervisor**
Prof. Dr. Eng. Hagop Boghos

**Assistant Supervisor**
Prof. Dr. Eng. Ali Al-Jazi

**Academic Year**
**2012-2013**