

Adaptive Speed Sensor less Control of BDFIG With CW Flux-Based MRAS

بحث تكميلي لنيل درجة البكالوريوس مرتبة الشرف في الهندسة الكهربائية (تحكم)

إعداد الطلاب :

أحمد عاصم حمزة حسن
حسام الدين حسن محمد مرتضي
سعيد عبد العزيز سعيد عبد الرحمن

إشراف:

د/ الامين كمال عبد الحي ابراهيم

قسم الهندسة الكهربائية - تحكم
كلية الهندسة
جامعة الشيخ عبدالله البدري



مارس 2022م

الآية

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

قال تعالى :

(وَجَعَلْنَا اللَّيْلَ وَالنَّهَارَ آيَاتَيْنِ ۖ فَمَحَوْنَا آيَةَ اللَّيْلِ وَجَعَلْنَا آيَةَ النَّهَارِ مُبْصِرَةً لِّنَبِّئِغُوا
فَضلاً مِّن رَّبِّكُمْ وَلِتَعْلَمُوا عَدَدَ السِّنِينَ وَالْحِسَابَ وَكُلَّ شَيْءٍ فَصَّلْنَاهُ تَفْصِيلاً)

صدق الله العظيم

سورة الإسراء : (12)

الاهـداء

إلي كل من جرع الكاس فارغا ليسقيني قطرة حب إلي من كلت انامله ليقدم لنا لحظة السعادة
.....(والدي العزيز)

إلي كل من ارضعتني الحب والحنان إلي رمز الحب وبلسم الشفاء إلي القلب الناصع بالبياض
.....(والدتي الحبيبة)

إلي القلوب الطاهرة الرقيقة والنفوس البريئة إلي رياحين حياتي.....(اخوتي)

إلي من أنسني في دراستي وشاركني همومي

...(اصدقائي الاعزاء)

إلي الشموع التي اضاعت لنا الطريق وبذلوا ما بوسعهم في سبيل المعرفة

....(استاذتي الاعزاء)

شكر و عرفان

لا يسعنا في عملنا المتواضع هذا إلا أن نتقدم بجزيل الحمد والشكر لله عز وجل الذي وفقنا لأداء هذا العمل نسأله سبحانه وتعالى المعونة والتوفيق دائماً ومع نهاية هذا المشروع لا بد لنا من وقفة تأمل نستعرض فيها الأيام في السعي الحثيث طلباً للعلم.

ونخص بالشكر:

د. الأمين كمال عبد الحي ابراهيم

الذي تفضل بإشرافه علي هذا البحث ونشكره علي كل ما قدمه لنا من دعم وتوجيه و الذي لم يبخل علينا بوقته وتوجيهاته نفع الله به .

الشكر موصول لكل الاساتذة الاجلاء بقسم الهندسة الكهربائية وكذلك موصول الي جميع المهندسين الذين لم يخلوا علينا بشيء في توجيهنا ومساعدتنا

ونخص بالشكر :

الباشمهندس / احمد مسعود عطا

كذلك نشكر كل من قدم لنا المساعدة ومد يد العون وساهم في إتمام هذا العمل من مهندسين عبر وسائل التواصل الاجتماعي.

المستخلص

نتناول في هذا البحث التحليل والأداء للعديد من نماذج النظام التكيفي المرجعي (MRAS) للتحكم في ناقل الحركة الغير محسوس للآلات الحث ذات التغذية المزدوجة .

تسمح نماذج الإشارة الصغيرة بالتحليل الرسمي للمراقبين لديناميكية معينة.

وتم التحقق من النتائج التجريبية من صحة تنبؤات نماذج الإشارة الصغيرة توضح الأداء من الأساليب الغير محسوسة اثناء الحالة المستقرة والمتغيرة .

إن استخدام الآلة التحريضية ذات التغذية المضاعفة بدون استشعار يؤمن جميع الميزات الهامة التي تقدمها تقنية التغذية المضاعفة التقليدية بالإضافة الي ميزات جديدة كما يشكل البحث مساهمة في نمذجة ومحاكاة النظام والآلات الكهربائية الخاصة .

وتم التخلص من استخدام الفرش الكربونية وحلقات الانزلاق في الآلات التحريضية الكهربائية ذات التغذية المضاعفة التقليدية المستخدمة في تطبيقات طاقة الرياح التي تعمل علي سرعات متغيرة وتقليل قوي الضغط.

Abstract

In this paper, we discuss the analysis and performance of several models of the adaptive reference system (MRAS) to control the imperceptible transmission of dual-fed induction machines. Small signal models are surveyed by formal analysis of certain dynamic monitors. The experimental results were validated by the accuracy of the predictions of the small signal models showing the performance of the non-sensitized methods during the steady state and the variable state. The use of the induction machine with multiple feeding without sensor provides all the important advantages offered by the traditional multiple feeding technique in addition to new features. The research also constitutes a contribution to models and simulations of the system and special electrical machines. The use of carbon brushes and slip rings has been eliminated in the traditional double-feed electric induction machines used in wind energy applications that operate at variable speeds and reduce pressure forces.

فهرس المحتويات

رقم الصفحة	الموضوعات
I	الآية
II	الإهداء
III	الشكر والعرفان
IV	المستخلص
V	Abstract
VI	فهرس المحتويات
VIII	قائمة بالاختصارات
IX-X	فهرس الاشكال
XI	فهرس الجداول
الفصل الأول : الاطار العام للبحث	
1	المقدمة
2	مشكلة البحث
2	أهداف البحث
2	أهمية البحث
2	منهجية البحث
الفصل الثاني : الالة التحريضية ذات التغذية المضاعفة بدون فرش	
3	مقدمة
3	مقدمة نظرية عن الالة BDFM
4	الجزء الثابت Stator
5	الجزء الدائر Rotor
8	الدائرة المكافئة للالة BDFM
10	تصميم الدائر في الالة BDFM
13	مبدل الاستطاعة في الالة BDFM
14	توازن الاستطاعة في الالة BDFM
15	المولد

16	مراقب سرعة MRAS للآلة ذات التغذية المضاعفة بدون فرش
17	نظام التحكم الغير مستمر
الفصل الثالث : معادلات النظام الالية التحريضية وتصميم مراقب MRAS cw flux	
18	المقدمة
18	المعادلات الرياضية الالية التحريضية
20	التحكم الكهربائي بالمولدة الربحية
24	النموذج الرياضي للمولد التحريضي ذات المزدوجة بدون فرش
25	تصميم المراقب MRAS
27	المراقب MRAS
29	محددات النظام BDFIG
الفصل الرابع : النتائج والمناقشة	
30	المقدمة
30	النتائج
32	المناقشة
الفصل الخامس : الخلاصة والتوصيات	
33	الخلاصة
33	التوصيات
المراجع	
35-34	

قائمة بالاختصارات

BDFM	Brushless-Doubly Fed Machine
BDFIG	Brushless-Doubly Fed Induction Generator
CW	Control Winding
PW	Power Winding
MRAS	Model Reference Adaptive System

فهرس الأشكال

رقم الصفحة	الشكل
3	الشكل (1-2) : الالة التحريضية BDFM
5	الشكل(2-2) شكل توضيحي لملفي الثابت وملف الدائر مع المبد الالكتروني في الالة BDFM
7	الشكل (3-2) : نمط التشغيل التزامني للالة BDFM
8	الشكل (4-2) : يوضح الدائرة المكافئة لطور واحد من الالة التحريضية ذات الدائر الملفوف الدائرة المكافئة لالة التحريضية لطور واحد
9	الشكل (5-2) : الدارة المكافئة لطور واحد من الالة BDFM بعد اهمال المحارسات التسريية لملفي الثابت
10	الشكل(6-2): الدارة المكافئة المبسطة BDFM CORE MODEL
12	الشكل(7-2): الدائر ذو الحلقات العشية بثلاث مجموعات من الحلقات في كل عش
13	الشكل(8-2): مقطع عرضي في الدائر ذي الحلقات العشية يبين الحلقة العشية (END RING) والتيارات المارة في قضبان النواقل
13	الشكل(9-2): القيم الاسمية لاستطاعة كل من طرفي المبدل الالكتروني ثنائي الاتجاه المستخدم في الاله
17	الشكل (10-2) : الشكل يوضح ال MRAS
17	الشكل(11-2): نموذج اشاره صغير للمراقب MRAS
21	الشكل (1-3) فيض الدائر وتيار الثابت في الاحداثيات q, d
21	الشكل (2-3) فيض الدائر وتيار الثابت في الاحداثيات q, d بعد تثبيت قيمة الفيض
24	الشكل (3-3) : تركيب المولد التحريضي ذو التغذية المزدوجة بدون فرش (BDFIG)
26	الشكل (4-3):مخطط نظام لمراقب نظام التحكم في CW Flux
27	الشكل (5-3) يوضح المراقب MRAS
30	الشكل (1-2-4) : الشكل يوضح شارة التردد (HZ) Freq
30	الشكل (1- 2-2-4): الشكل يوضح اشارة السرعة Rotor Speed (rpm)
31	الشكل (1-1-2-2-4) : الشكل يوضح اشارة الجهد CW(V)
31	الشكل (2-1-2-2-4) : الشكل يوضح اشارة التيار CW(A)

31	الشكل (2-2-2-4): الشكل يوضح اشارة السرعة rpm
31	الشكل (1-2-2-2-4) : الشكل يوضح اشارة الجهد CW(V)
32	الشكل (2-2-2-2-4): الشكل يوضح اشارة التيار CW(A)

فهرس الجداول

رقم الصفحة	الجدول
6	الجدول (1-2) : القوة المحركة المغناطيسية في الثغرة الهوائية للآلة BDFM
29	الجدول (1-3) : قيم ثوابت النظام اللازم لتشغيل المحاكاة

الفصل الاول

الاطار العام للبحث

1-1 المقدمة :

في الأونة الاخيرة زاد الاهتمام في مسألة الموارد المتجددة للطاقة الكهربائية وذلك مع تزايد المشاكل المرتبطة باستخدام مصادر الطاقة التقليدية المحدودة كالكلفة العالية والتلوث المتزايد للبيئة.

من اجل استخدام الفرش والحلقات الانزلاقية نواجه عدة عيوب مثل الابعاد (DIFG) الكبيرة والحد الأدنى من الموثوقية والتكلفة الكبيرة المطلوبة للإصلاح وعلاوة على ذلك , فإن المولد التحريضي ذات التغذية المضاعفة بدون فرش (BDFIG) قد امتص الكثير من التركيز بسبب تصميمها عالي الدقة والحد الأدنى من تكلفة الصيانة .

يعتبر المولد التحريضي ذات التغذية المضاعفة بدون فرش (BDFIG) بديل محتمل للمولد التحريضي ذات التغذية المضاعفة التقليدية ويحافظ المولد التحريضي ذات التغذية المضاعفة بدون فرش (BDFIG) علي كل مزايا المولد التحريضي ذات التغذية المضاعفة التقليدية.

وفي الأونة الاخيرة كانت طرق التحكم للمولد التحريضي ذات التغذية المضاعفة بدون فرش مستقلة يتم معالجتها في الغالب مع مستشعرات السرعة والتي سوف تعمل على تقليل موثوقية النظام وزيادة التكلفة ويتم استخدام استراتيجيه التحكم للحصول على التحكم بدون اجهزة استشعار من انظمة المولد التحريضي ذات التغذية المضاعفة بدون فرش مستقلة والتي يمكن ان تحقق مباشرة التحكم في تردد واتساع الجهد بدون استخدام مستشعر السرعة الفيزيائي .

2-1 مشكلة البحث:

التخلص من استخدام الفرش و حلقات الانزلاق في الآلات التحريضية الكهربائية ذات التغذية المضاعفة التقليدية المستخدمة في تطبيقات طاقة الرياح التي تعمل علي سرعات متغيرة الرياح والتخلص من ماده الكربون من الفرشاة وتقليل قوي الضغط .

لتطبيق مستشعرات السرعة المادية تواجهنا الكثير من العيوب فيما يتعلق بالصلابة والتكلفة والإصلاح والكابلات لذلك يفضل التحكم في السرعة المادية بدون اجهزة استشعار .

3-1 أهداف البحث :

دراسة إمكانية استبدال التغذية المضاعفة التقليدية في الآلات التحريضية المستخدمة في النظم الريحية بالتغذية المضاعفة بدون فرش باستخدام آلة خاصة BDFM ليا تصميم خاص في الثابت والدائر بالاعتماد على النمذجة و المحاكاة الرقمية الحاسوبية مع ضمان المحافظة علي نفس الميزات الهامة التي تقدمها تقنية التغذية المضاعفة التقليدية بالإضافة إلى الحصول على ميزات جديدة من التقنية المدروسة وتم دراسة MRAS استنادا علي الفيض المغنطيسي الدائر علي المحاور.

1-4 أهمية البحث :

يحقق استخدام الآلة BDFM موثوقية النظام و استمرارية التغذية الكهربائية بسبب التخلص من الفرش وحلقات الانزلاق ، وبالتالي التخلص من مشاكل التآكل واهترائها وما تسببه من ضياعات و اجهادات حرارية واعطال توقف المولد وحاجته إلى الصيانة المتكررة ذات التكاليف العالية وارتفاع تكاليف التشغيل بالتالي يعتبر أكثر اقتصادية من آلية التغذية المضاعفة التقليدية؛ يشكل البحث مساهمة في نمذجة و محاكاة الآلة التحريضية ذات التغذية المضاعفة بدون فرش و الآلات الكهربائية الخاصة وتم تطوير الآلة الي نطاق تشغيلي واسع بالإضافة الي ضرورة السماح بالمرونة التحكم في تدفق الطاقة.

1-5 منهجية البحث :

تم تنفيذ هذا النموذج الرياضي في بيئة simulink عن طريق الماتلاب إجراء المحاكاة والحصول على النتائج ومقارنتها وتقييمها .

الفصل الثاني

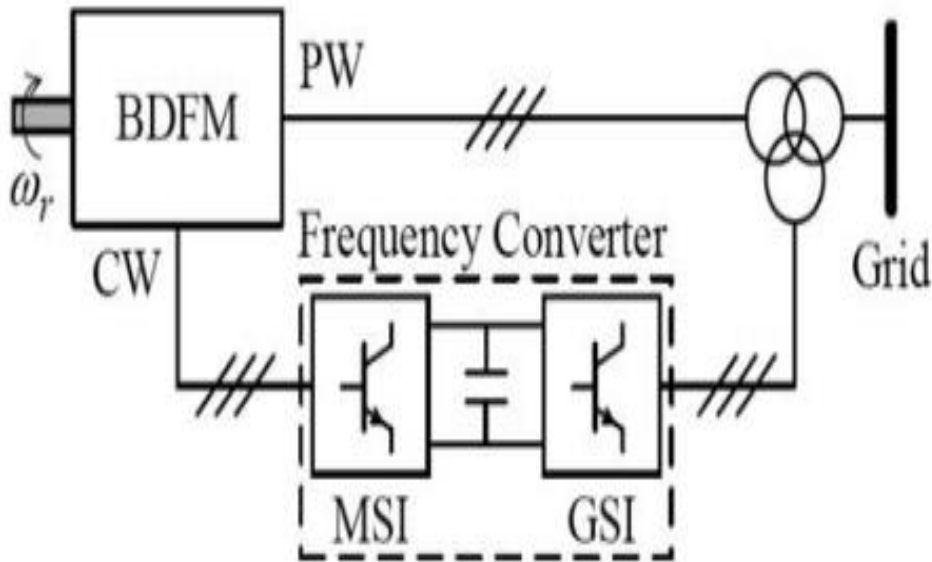
الآلة التحريضية ذات التغذية المضاعفة بدون فرش

1-2 المقدمة :

سيتم في هذا الفصل تقديم دراسة نظريه تفصيليه للآلة BDFM بدءا من مخطط توضيحي لمكونات الآلة ثم مبدأ العمل ، وعرض لجميع القوى المحركة المغناطيسية المتشكلة في الثغرة الهوائية للآلة ، والدارة المكافئة وتوضيح للتصميم الخاص لدائر الآلة ، ثم دراسة توازن الاستطاعة لها والمعادلات الرياضية المبينة لسريانات هذه الإستطاعات ، بعد ذلك سيتم عرض أهم التطبيقات العملية للآلة BDFM وتوضيح اهم مميزاتها وسلبياتها .

2-2 مقدمة نظرية عن الآلة BDFIM (مما تتألف - مبدأ العمل) :

الآلة التحريضية ذات التغذية المضاعفة بدون فرش Brushless Double Feed Induction Machine - واختصارا تسمى BDFIM هي عبارة عن آلة تيار متناوب يمكن أن تعمل كمحرك أو كمولد.



الشكل (1-2) : الآلة التحريضية BDFM

تتكون الآلة التحريضية ذات التغذية المضاعفة بدون فرش (والتي تسمى أيضاً الآلة التحريضية التعاقبية الذاتية) من :

2-1-2 الجزء الثابت Stator:

- يتكون من ملفين ثلاثي الأطوار (لذلك تدعى بالآلة ذات التغذية المضاعفة). هما:

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

- معظم الاستطاعة تتدفق بين الآلة والشبكة عبر هذا الملف.
- يربط هذا الملف مباشرة إلى الشبكة ، وبالتالي يعمل على تردد 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 استطاعة الكهروني ثنائي الاتجاه Bidirectional Power Converter. وكنتيجة لتدفق جزء صغير فقط من الاستطاعة الكلية للآلة عبر هذا المبدل ، بالتالي ستكون استطاعته الاسمية أقل بكثير من استطاعة المبدل المستخدم في الآلة ذات التغذية المضاعفة التقليدية.

- يتكون المبدل الترددي to-back-to-back voltage source inverter مما يلي: المقوم الموصل إلى ملف التحكم ، والذي يسمى (المقوم من جهة الآلة "MSI" يتحكم بسرعة الدائر وبالاستطاعة الردية للآلة BDFM . القالبة الموصلة من جهة الشبكة "GSI" تتحكم بتوتر الخط المستمر DC-Link ويمكن أن تساهم في التحكم بالجهود الطرفية للآلة BDFM من خلال تقديم أو امتصاص الاستطاعة الردية .

- يعمل هذا الملف كمجموعة مكافئة لعمل ملفات الدائر في الآلة DFIG .
- يسمح ملف التحكم بإمكانية التحكم بالسرعة فوق وتحت السرعة التزامنية للآلة. حيث أنه قادر على تعديل قيمة تيار الدائر المتعرض من ملف الاستطاعة (P.W) وذلك بفضل التصميم الخاص للآلة .

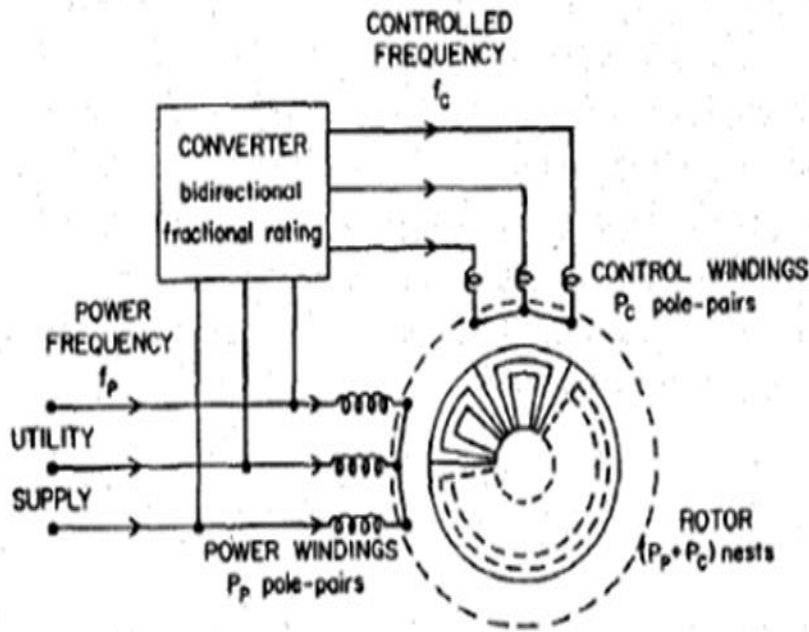
- يستخدم ملف التحكم أيضاً للتحكم بكل من الاستطاعة الرد فعلية Reactive Power "Q {VARs}" و الاستطاعة الفعلية "P {Watt} Active كل على حدى .

- هذان الملفان الموجودان في الثابت معزولان عن بعضهما كهربائياً .

- لكل منهما عدد أقطاب مختلف عن الآخر، ومازحين عن بعضهما البعض بزواوية انزياح مكانية ، لضمان عدم حدوث أي تداخل مباشر بين الحقول المغناطيسية المتولدة عنهما .
- يتم تغذية الملفين بترددين مختلفين .

2-2-2 الجزء الدائر Rotor :

يكون دائر الآلة BDFM من نوع القفص السنجابي لكن بتصميم خاص ، هذا التصميم يدعى Nested Loop الدائر ذو الحلقات العشبية المتداخلة ."



الشكل (2-2) شكل توضيحي لملفي الثابت وملف الدائر مع المبدل الإلكتروني في الآلة BDFM

بفضل التصميم الخاص للآلة BDFM ، يمكن لملفات التحكم أن تقوم بضبط وتعديل تيار الدائرة الذي يتولد من ملف الاستطاعة. يمكن تحقيق عملية الضبط والتحكم هذه من خلال تأثير التداخل الكهرومغناطيسي غير المباشر Indirect Electromagnetic Cross-Coupling Effect بين ملفي الثابت عبر الدائر .

كما ذكرنا سابقا ، فإن الآلة BDFM مؤلفة من ملفين ثلاثي الأطوار في الثابت. تم اختيار عدد الأقطاب المغناطيسية لهما بحيث يكونا مختلفين وذلك من أجل تجنب التداخل الكهرومغناطيسي المباشر.

$$P_p \neq P_c$$

P_p : عدد أزواج الأقطاب المغناطيسية لملف الاستطاعة في الثابت.

p_c : عدد أزواج الأقطاب المغناطيسية لملف التحكم في الثابت.

بالإضافة لذلك ، ومن أجل تخفيض القوة الكهرومغناطيسية الغير متناظرة في الدائر ، يجب ان يكون الفرق في عدد أزواج الأقطاب المغناطيسية أكبر من الواحد:

$$|P_p - P_c| > 1$$

ينتج ملف الاستطاعة في الثابت قوة محركه مغناطيسية (MMF) في الثغرة الهوائية، تدور بسرعة لها تردد الشبكة نفسه. بينما ينتج ملف التحكم قوة محركه مغناطيسية (MMF) في الثغرة الهوائية تدور بسرعة لها تردد القالبية من جهة الآلة (MSI).

من أجل تحقيق التداخل الكهرومغناطيسي الغير مباشر بينما في الثابت (الاستطاعة والتحكم) فإن ملف الدائر يجب أن ينتج قوى محركه مغناطيسية لكل من هذين الملفين الذين عدد أزواج أقطابهما P_p و P_c بالتجاوب مع كل من القوتين المحركتين المغناطيسيتين المنتجتين من ملفي الثابت (الاستطاعة $P.W P_p$) و (التحكم $C.W P_c$) من أجل تحقيق هذه العملية، يجب أن يكون عدد مجموعات دارت الدائر N_r ، مساوياً لمجموع عدد أزواج الأقطاب لملفي الثابت أي :

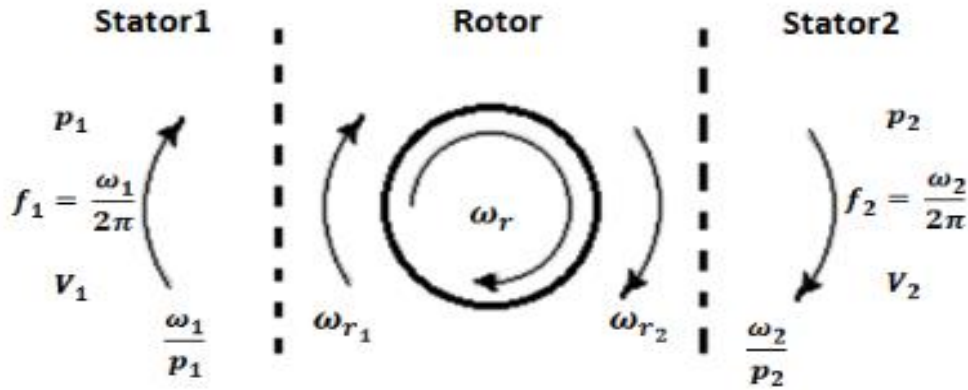
$$N_r = P_p + P_c$$

كل مجموعة من دارت الدائر يجب أن تتضمن حلقة أو أكثر من حلقات الدائر (الدائر ذي الحلقات العشوية المتداخلة). في هذه، فإن مكونات القوة المحركة المغناطيسية لملف الدائر الناتجة من ملفي الثابت (الاستطاعة $P.W. P_p$) و (التحكم $C.W. P_c$) ستدوران بسرعتين متطابقتين ولكن باتجاهين متعاكسين فيما يتعلق بالدائر. القوى المحركة المغناطيسية الناتجة من ملفي الثابت (الاستطاعة $P.W. P_p$) و (التحكم $C.W. P_c$) في الثغرة الهوائية مع دارت الدائر N_r موضحة في الجدول. تبعاً للتصميم الخاص لدائر الآلة، لا يمكن اعتبار ملفات هذا الدائر موزعة مكانياً بشكل جيبي متناظر تماماً، ولذلك فإنها تحتوي على توافقيات عالية. وعلى الرغم من ذلك، وبفرض اعتبار ملفي الثابت (الاستطاعة والتحكم) موزعين مكانياً بشكل جيبي، فإن التوافقيات الناتجة للفيض في الثغرة الهوائية لا يمكنها إنتاج قوة محركه كهربائية (EMF). وعلى أية حال، فإن المحتوى التوافقي الكبير للقوة المحركة المغناطيسية للدائر يؤدي إلى ازدياد المحارضة التسريبية للدائر.

الجدول (1-2) : القوة المحركة المغناطيسية في الثغرة الهوائية للآلة BDFM

السرعة الكهربائية المتعلقة بالثابت	السرعة الكهربائية المتعلقة بالدائر	عدد أزواج الأقطاب	منتجة من	القوة المحركة المقاطيسية
ω_1	$\omega_1 - p_p \cdot \omega_r$	p_p	P.W.	MMF ₁
ω_1	$\omega_1 - p_p \cdot \omega_r$	p_p	R.W. بالتجاوب مع MMF ₁	MMF _{r1-1}
$-\omega_1 + p_p \cdot \omega_r + p_c \cdot \omega_r = -\omega_1 + N_r \cdot \omega_r$	$-(\omega_1 - p_p \cdot \omega_r)$	p_c	R.W. بالتجاوب مع MMF ₁	MMF _{r1-2}
ω_2	$\omega_2 - p_c \cdot \omega_r$	p_c	C.W.	MMF ₂
$-\omega_2 + p_c \cdot \omega_r + p_p \cdot \omega_r = -\omega_2 + N_r \cdot \omega_r$	$-(\omega_2 - p_c \cdot \omega_r)$	p_p	R.W. بالتجاوب مع MMF ₂	MMF _{r2-1}
ω_2	$\omega_2 - p_c \cdot \omega_r$	p_c	R.W. بالتجاوب مع MMF ₂	MMF _{r2-1}

تكون ترددات القوى المحركة الكهربائية المتحرضة في الدائر والناجمة عن الارتباط بين الفيوض المغناطيسية ذات أزواج الأقطاب المغناطيسية لملفي الثابت P_1 و P_2 متساوية. لذلك فإن تردد القوى المحركة الكهربائية المتحرضة في ملف الاستطاعة بتأثير ملف التحكم يكون مساوياً لتردد منبع التغذية الذي يغذي ملف الاستطاعة والعكس صحيح. هذا الاتصال الكهرومغناطيسي يستوجب إنتاج فيضين مغناطيسيين في ملفي الثابت (الفيض المغناطيسي في ملف الاستطاعة يدور في الثغرة الهوائية بسرعة (ω_2/p_2) rad/sec) يدوران بنفس السرعة الكهربائية لكن باتجاهين متعاكسين بالنسبة للدائر كما يوضح الشكل التالي :



الشكل (2-3) : نمط التشغيل التزامني للآلة BDFM

عندما تعطى علاقة السرعة الميكانيكية لمحور الآلة في النمط التزامني بالشكل التالي :

$$\omega_1 - p_1 \cdot \omega_r = \pm (\omega_2 - p_2 \cdot \omega_r) \rightarrow \omega_r = \frac{\omega_1 \pm \omega_2}{p_1 + p_2} \quad (1-2)$$

نلاحظ من العلاقة السابقة أن التردد الزاوي لملف التحكم ω_1 يجب أن يتم تنظيمه وضبطه بحيث تبقى المعادلة السابقة محققة . وكما يبدو من العلاقة فإن هذا التردد يأخذ إشارة موافقة أو معاكسة لإشارة التردد الزاوي لملف الاستطاعة وذلك بحسب تتابع توصيل الأطوار في ملفي الثابت بالنسبة لبعضهما البعض (أي اتجاه السيادة المغناطيسية المتولدة في أحد الملفين بالنسبة للآخر). ونحصل على الإشارة السالبة للتردد الزاوي لملف التحكم (أي ω_2 في العلاقة السابقة) عن طريق عكس تتابع توصيل ملفات ملف التحكم من التتابع (abc) الى التتابع (acb) بالنسبة لتتابع توصيل ملفات ملف الاستطاعة (ABC) .

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

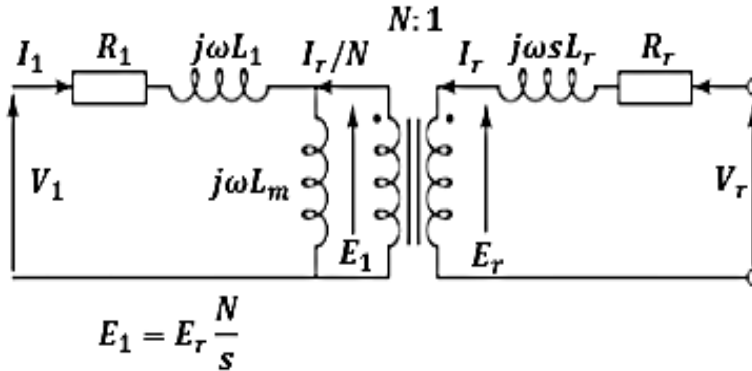
$\omega_2 +$: يكون موجبا عند العمل على سرعة اعلى من السرعة التزامنية - Super Synchronous Speed.

$\omega_2 -$ ✓ : يكون سالبا عند العمل على سرعة ادنى من السرعة التزامنية - Sup - synchronous Speed .

3-2 الدارة المكافئة للآلة BDFM :

يمكن الحصول على الدارة المكافئة للآلة التحريضية ذات التغذية المضاعفة بدون فرش انطلاقاً من اعتبارها مؤلفة من آلتين تحريضيتين مرتبطتين مع بعضهما البعض عبر دائر واحد وموضوعتين ضمن إطار واحد. وبالتالي من أجل استنتاج الدارة المكافئة للآلة BDFM سنقوم بتمثيلها على أنها عبارة عن آلتين تحريضيتين متصلتين مع بعضهما ، ومن ثم نقوم بتطوير هذه الدارة بالاعتماد على نموذج الطور الواحد للآلة .

يبين الشكل (4-2) الدارة المكافئة القياسية لمحرك تحريضي ذي دائر ملفوف ، حيث يمكن الوصول بسهولة الى ملفات هذا الدائر عبر حلقات الانزلاق ، وبإهمال الضياعات الحديدية .



الشكل (4-2): يوضح الدارة المكافئة لطور واحد من الآلة التحريضية ذات الدائر الملفوف

الدائرة المكافئة لآلة التحريضية لطور واحد

N : نسبة التحويل (نسبة عدد اللفات الفعالة) .

L_m : المحارضة المغناطيسية للتوافقية الأساسية للحقل المغناطيسي .

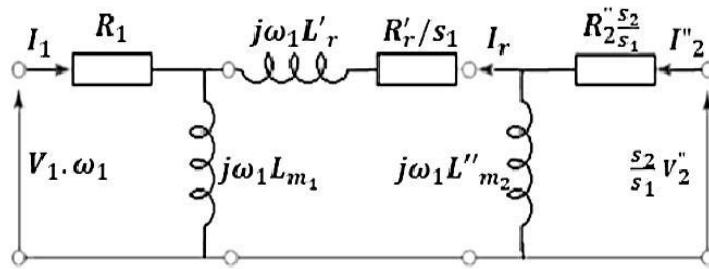
L_1 : الضياعات في الدارة المغناطيسية للثابت (المحارضة التسريبية للثابت) .

L_r : الضياعات في الدارة المغناطيسية للدائر (المحارضة التسريبية للدائر) .

وتجدر الإشارة إلى أنه عند وضع الدارة المكافئة للآلة التحريضية ، فإن الربط بين الدائر والثابت يتم ، تمثيله فقط من أجل مكون واحد من الحقل المغناطيسي ، والذي حددناه في الحالة التي ندرسها بالتوافقية ، الأساسية المعبر عنها بالرمز L_m على اية حال ، فإن دارتي الدائر والثابت يجب أن تتضمننا محارضات التسلسلية الإضافية تحسباً لظهور أي توافقيات أخرى في الثابت والدائر ، على التوالي . هذه المحارضات تظهر على التسلسل مع المحارضات التسريبيه ، مثل تلك التي تمثل الفيض المغناطيسي التسريبيه الذاتي بدون أن يعبر الثغرة الهوائية .

1-3-2 تبسيط الدارة المكافئة للآلة BDFM :

في الآلة BDFM ذات الدائر المعقد ، مثل الدائر من النوع Nested Loop (الدائر ذو الحلقات العشبية المتداخلة) فإن وجود المجموعات المتعددة للدارات المستقلة للدائر يعني أن بارامترات الدارة المكافئة الأكثر أهمية وذات التأثير الأكبر متعلقة بتغيرات الدائر مع تغيرات التردد ، لكن هذه التغيرات عادة ليس لها أهمية كبيرة . كما أن محارضة الدائر المنسوبة أكبر من المحارضات التسريبيه لملفي الثابت وبالتالي يمكن إهمال المحارضات التسريبيه لملفي الثابت ، وبذلك نحصل على الدارة المكافئة المبسطة بتقريب مقبول كما في الشكل التالي :

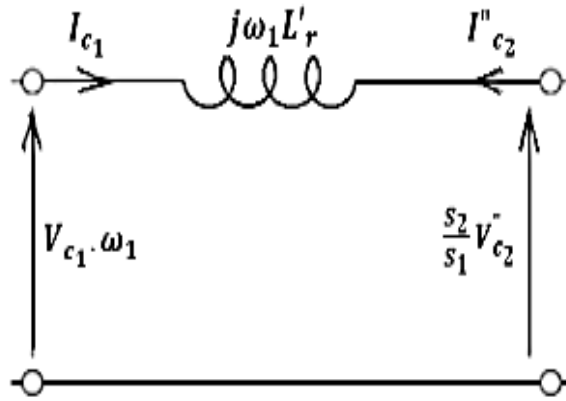


الشكل (5-2) : الدارة المكافئة لطور واحد من الآلة BDFM بعد إهمال المحارضات التسريبيه لملفي الثابت .

كما يمكن تبسيط الدارة المكافئة للآلة BDFM أكثر من ذلك ، من خلال إهمال المفاعلات المغناطيسية والمقاومات الأومية لملفي الثابت (الاستطاعة والتحكم) . حيث أن الدراسات التصميمية لدائر هذه الآلة أشارت إلى أن المفاعلة التسريبيه لهذا الدائر كبيرة نسبياً بالمقارنة مع مقاومته الأومية ($R_r \ll X_r$) ، وذلك بسبب وجود عدد من التوافقيات الناتجة عن التداخل الكهرومغناطيسي بين الحقلين المغناطيسيين الناتجين عن ملفي الثابت من خلال الدائر ، وبالتالي يمكن اعتبار ($Z_r = X_r$) .

عندها نحصل على الدارة المكافئة المبسطة المبينة في الشكل التالي والتي تسمى (BDFM Core

: Model



الشكل(2-6): الدارة المكافئة المبسطة BDFM CORE MODEL

نلاحظ أن الدارة المكافئة الأخيرة تشبه الدارة المكافئة للألة التزامنية (ذات الدائر الأسطوانية) بعد إهمال مقاومة الثابت. والاختلاف الرئيسي بينهما هو أن التهييج هنا في الآلة BDFM يتم عن طريق التوتر ($V_{c2}'' * \frac{s_2}{s_1}$) المتحرض ضمن الآلة من خلال ملف التحكم عبر الدائر بدلاً من الحصول عليه من منبع DC خارجي كما هي الحال في الآلة التزامنية.

4-2 تصميم الدائر في الآلة BDFM :

يعتبر تصميم الدائر في الآلة BDFM هو مفتاح تشغيلها بالشكل المطلوب ، نظراً لأن وظيفته هي ربط ، الحقلين المغناطيسيين لملفي الثابت من خلال التداخل الكهرومغناطيسي غير المباشر. فقد اقترح Lydall تصميماً مميزاً لدائر يحتوي على ملفين ، كما في الثابت (44) ، الملف الأول عدد أزواج أقطابه P_1 والملف الآخر عدد أزواج أقطابه P_2 وهما موصولان مع بعضهما بشكل مباشر . لكن مقاومة الدائر في هذا النموذج كانت كبيرة وبالتالي كانت الضياعات كبيرة أيضاً. ومن ثم أدرك Hunt بعد ذلك ان النواقل في الدائر كانت تحمل تيارات تنتج قوى محرقة مغناطيسية بإشارة معاكسة ، وتمكن من صنع ملف ذي مقاومة منخفضة بطريقة مبتكرة. وكنتيجة لذلك، فقد تمتعت الآلة التعاقبية الذاتية ببعض النجاحات التجارية ، لكن هذا الملف المقترح كان ذو تصميم خاص ومعقد وبالتالي اعتبرت كلفة تصنيعه باهظة الثمن ،وبعدها قام Broadway و Burbridge بإعادة اختبار تصميم الدائر هذا ، واقترحا نموذجين لتصميم دائر الآلة BDFM وهما الدائر ذو الحلقات العشية The Nested Loop Design والدائر ذو الحلقات المتطور Progressive Loop Design. وقد تم مؤخراً اعتماد تصميم الدائر ذي الحلقات العشية المتداخلة .

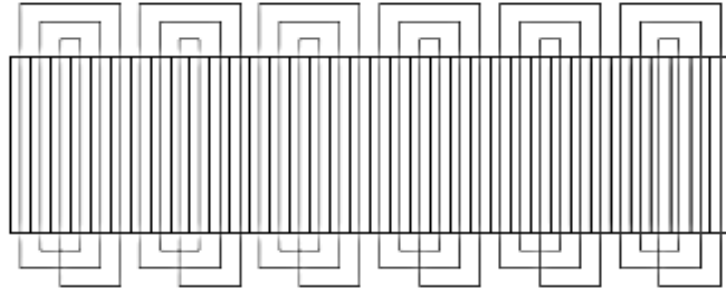
يعتبر الدائر في الآلة BDFM عنصراً حرجاً . تحمل ملفات الدائر القوة المحركة المغناطيسية المتحرضة من قبل ملفات الثابت ويتم ربط ملفات الثابت والدائر عبر الفيض المغناطيسي الدوار في

الثغرة الهوائية ضمن دارة مغناطيسية واحدة. تكون مهمة الدائر في الآلة BDFM ربط ملفي الثابت مغناطيسياً لكن يجب أن تكون في نفس الوقت مقاومته ومعارضته منخفضة نسبياً .

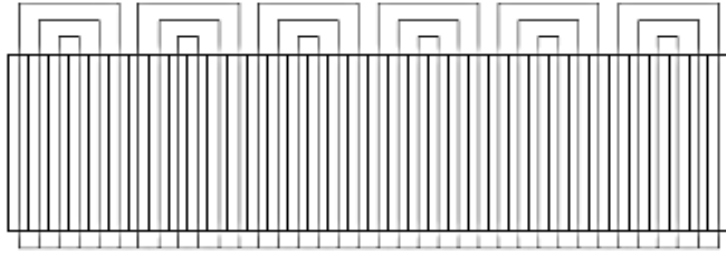
تم اقتراح هذا النوع من الدائر اعتماداً على تشابهه مع نوع الدائر ذي القفص السنجابي الموجود في المحركات التحريضية التقليدية ولكونه يمكن أن يقدم نفس المميزات من حيث سهولة التصنيع. وعمى أية حال ، كما تم ملاحظته من قبل ، Williamson et al. يجب أن تكون قضبان دائر الآلة BDFM معزولة عن بعضها البعض ، مما يجعل تلامسها مستحيلاً وعلى اية حال يجب أن تصنع الدوائر ذات القفص السنجابي للآلات التحريضية الكبيرة عادةً من النواقل المصنوعة من خلائط النحاس ، ولكن من اجل القيام بذلك في صنع ملفات الدائر ذي الحلقات العشبية (NLR) فقد وجد بأنه عملية مكلفة وتتطلب وقتاً طويلاً. كما أن الدائر ذي الحلقات العشبية يعاني أيضاً من التوزيع غير المتساوي للتيارات بين هذه الحلقات . قام بعدها Roberts et al بدراسة مزيد من الأشكال والنماذج لملفات الدائر . واطهر بان نموذج آخر من الدائر يتضمن حلقات تسلسلية كان قادراً على تحقيق التداخل الكهرومغناطيسي غير المباشر ، لكن التنفيذ لم يعط النتائج المرجوة . اذا كما ذكرنا سابقاً ، فإن كل هذا الجهد في التصميم الخاص لدائر الآلة BDFM لكي يتمكن هذا الدائر الخاص من القيام بعملية التداخل الكهرومغناطيسي غير المباشر بين الحقول الكهرومغناطيسية Indirect Cross Coupling المتولدة عن ملفي الثابت عبره فقط .

يتكون دائر الآلة BDFM ذو الحلقات العشبية Nested Loop Rotor من مجموعات من الدارات ، موزعة فارغياً بشكل منتظم ، كل مجموعة تسمى عش Nest ، ويحتوي كل عش على عدد N من الحلقات Loops ، مقصورة مع بعضها البعض بواسطة حلقة معدنية End Ring. بحيث يكون مجموع الأعشاش في الدائر P_r مساوياً الى مجموع ازواج اقطاب ملفي الثابت .

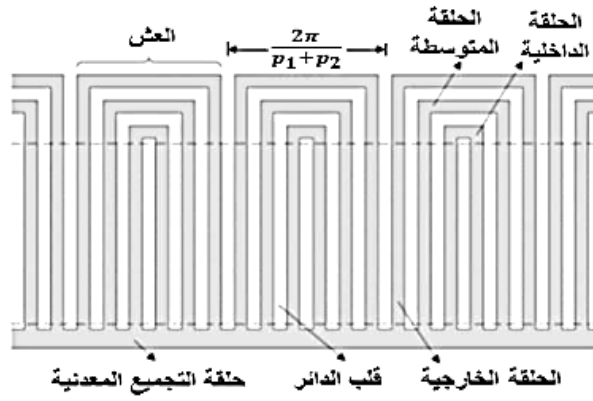
توضح الأشكال التالية التصميم الخاص للدائر ذي الحلقات العشبية. حيث يظهر الشكلان مقارنة لتوزيع الملفات بين الدائر الملفوف التقليدي والدائر ذي الحلقات العشبية الخاص .



الدائر المتوقف



الحلقات العشبية



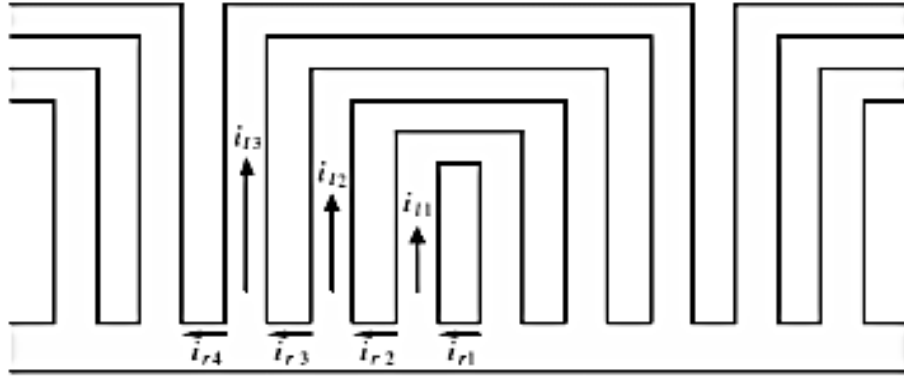
الشكل (7-2): الدائر ذو الحلقات العشبية بثلاث مجموعات من الحلقات في كل عش

ويوضح الشكل التالي التيارات المارة ضمن الحلقة المعدنية التي تقصر ملفات الدائر من الطرف الثاني فقط ، والتيارات المارة ضمن الحلقات المكونة للأعشاش في الدائر. حيث يمكن الحصول ببساطة على العلاقات بين هذه التيارات من هذا الشكل وهي :

$$i_{l1} = i_{r1} - i_{r2} \quad (2-2)$$

$$i_{l2} = i_{r2} - i_{r3} \quad (3-2)$$

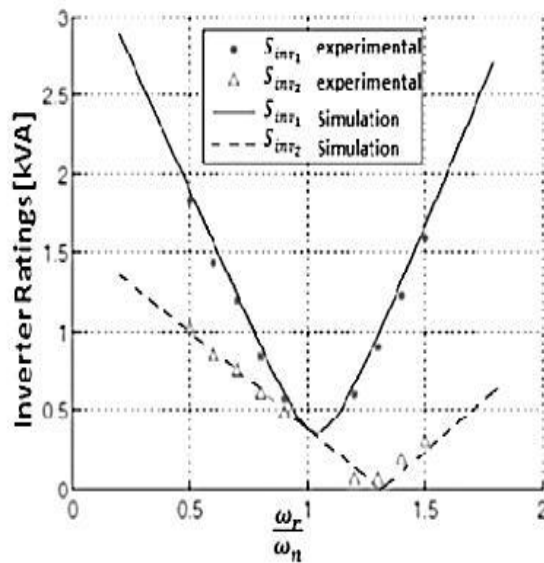
$$i_{l3} = i_{r3} - i_{r4} \quad (4-2)$$



الشكل (2-8): مقطع عرضي في الدائر ذي الحلقات العشبية يبين الحلقة العشبية (END RING) والتيارات المارة في قضبان النواقل

5-2 مبدل الاستطاعة الالكتروني المستخدم مع الآلة BDFM :

إن مجال التغيير في توتر ملف التحكم يحدد القيمة الاسمية لجهد مبدل الاستطاعة الالكتروني الموصول مع هذا الملف. كما أنه يحدد القيمة الاسمية لجهد ملف التحكم نفسه. وكما ذكرنا سابقا ، فإن ملف التحكم يربط إلى الشبكة عبر مبدل الكتروني ثنائي الاتجاه. حيث أن المبدل الالكتروني من جهة الآلة يقوم بالتحكم بالاستطاعة الفعلية والاستطاعة الرديئة ، وهذا المبدل يربط إلى ملف التحكم في الآلة. بالمقابل ، فإن المبدل الالكتروني من جهة الشبكة يقوم فقط بنقل الاستطاعة الفعلية ، ولذلك بالمبدأ يمكن أن تكون القيمة الاسمية لاستطاعته أقل. ويبين المنحني البياني الموضح بالشكل (3-17) القيم الاسمية لاستطاعة كل من طرفي المبدل الالكتروني كتابع لانحراف سرعة الدائر w_r عن السرعة الطبيعية w_n .



الشكل (2-9): القيم الاسمية لاستطاعة كل من طرفي المبدل الالكتروني ثنائي الاتجاه المستخدم في الآلة

S_{inv1} : استطاعة المبدل الالكتروني من جهة الآلة .

S_{inv2} : استطاعة المبدل الالكتروني من جهة الشبكة .

وتجدر الإشارة إلى أن الآلة تستجر الاستطاعة الردية اللازمة للتهييج (الفيض المغناطيسي في الثغرة الهوائية) من الشبكة عن طريق ملف الاستطاعة في الثابت ، كما يمكن ملاحظة أن القيمة الاسمية لاستطاعة المبدل الالكتروني من جهة الشبكة مساوية لقيمة الاستطاعة الفعلية التي تقدمها الآلة للشبكة.

أظهرت الدراسات التي أقيمت حول هذه المبدلات أن قيمة تصحيح عامل الاستطاعة (وهي قيمة الاستطاعة الردية (Vars) المستجرة من قبل ملف الاستطاعة في هذه الحالة) تشكل جزءاً هاماً من الاستطاعة الاسمية للمبدل الالكتروني من جهة الآلة ، وهذه الاستطاعة تزداد مع ازدياد انحراف سرعة الدائر عن السرعة الطبيعية. هناك طريقة اخرى وهي القيام بحقن بعض الـ(Vars) في الشبكة عن طريق المبدل من جهة الشبكة والسماح لملف الاستطاعة باستجرا الاستطاعة الردية المتأخرة. على الرغم من أن هذه الطريقة ستسبب زيادة القيمة الاسمية لاستطاعة المبدل الالكتروني من جهة الشبكة ، لكن في الوقت نفسه يمكن تقليل توتر ملف التحكم، مما يؤدي بالنتيجة إلى تقليل القيمة الاسمية لملف التحكم نفسه والمبدل من جهة الآلة أيضاً. تساهم طريقة استخدام كلا المبدلين في تزويد الاستطاعة الردية في تقليل القيمة الاسمية الإجمالية للمبدل الكلي. عملياً ، من المرجح أن يكون ملائماً أن نجعل كلا المبدلين لهما نفس الاستطاعة الاسمية وبالتالي أن يكون لهما نفس الحجم ، وبالتالي يمكن الوصول إلى الأمثلة من خلال تحقيق التوازن في الحملات أيضاً. هناك أيضاً إمكانية في أمثلة الاستطاعة الاسمية للمبدل المستخدم وفي حجم الآلة أيضاً نظراً لكون تزويد الاستطاعة الردية من جهة ملف الاستطاعة للآلة يقلل القيمة الاسمية لملف التحكم ، مما يسمح باستخدام آلة ذات حجم أصغر أو بالحصول على قيمة أكبر من استطاعة الخرج. إن القيام بأمثلة من هذا النوع يمكن أن تقود إلى تقليل تكاليف النظام ككل .

2-6 توازن الاستطاعة في الآلة BDFM :

نظراً لأهمية الآلة BDFM في الكثير من التطبيقات العملية ، فإنه من الضروري معرفة توزيع الاستطاعة بين ملفات الثابت ودائرة الدائر ، وذلك من أجل فهم مبدأ عمل الآلة بشكل أفضل.

في الآلات التحريضية التقليدية التي تتم تغذيتها من منبع تغذية وحيد ، والآلات التحريضية ذات الدائر الملفوف ، فإن سريان الاستطاعة بين الأجزاء الثابتة والدوارة يتم عبر الثغرة الهوائية فقط باتجاه واحد معطى لنمط تشغيل معين. أما في حالة الآلة BDFM ، فإن الاستطاعة التي تعبر الثغرة الهوائية

ناتجة عن منبعين منفصلين عن بعضهما البعض ، لذلك فإنه من الضروري القيام بتحميل إضافي للحصول على توزيع الاستطاعة بين ملفات الثابت والدائر في الآلة المدروسة.

ويعتبر تحميل توزيع الاستطاعة هذا مهماً جداً ليس فقط أثناء عملية تصميم الآلة ، إنما أيضاً في عملية تحديد الاستطاعة الاسمية للمبدلة الالكترونية اللازمة لتشغيل هذه الآلة من أجل تطبيق محدد ومجال سرعة محدد وعند حمولة معينة.

إن مفهوم التغذية المضاعفة كما هو واضح من الاسم يعني إمكانية تدفق الاستطاعة عبر ملفين منفصلين ، هذان الملفان المنفصلان في الآلة BDFM هما ملف الاستطاعة وملف التحكم.

يعتمد تدفق الاستطاعة في ملفات الآلة BDFM على عاملين اثنين هما :

- نمط تشغيل الآلة (تعمل كمحرك أو كمولد) .
- سرعة الآلة (السرعة التي تعمل عندها الآلة فوق أو تحت السرعة التزامنية أو الطبيعية (Natural Speed) .

7-2 المولد (Generator) :

معظم المولدات المستخدمة في المحطات الريحية هي إما مولدات تحريضية أو تزامنية. حيث تعمل هذه المولدات على سرعة دوارن ثابتة تقريباً وذلك عند وصلها مباشرة إلى الشبكة العامة. وفي الواقع فإن غالبية العنفات الريحية المركبة في المحطات الريحية الموصولة إلى الشبكات الكهربائية العامة تستخدم المولدات التحريضية. يعمل المولد التحريضي ضمن مجال محدود للسرعات التي تكون أعلى قليلاً من سرعته التزامنية (من أجل مولد تحريضي رباعي الأقطاب المغناطيسية بتردد 60 HZ تكون سرعته التزامنية 1800 rpm). وتعتبر الميزات الأهم التي تتمتع بها المولدات التحريضية هي أنها ذات بنية متينة ، ورخيصة الثمن ، ومن السهل توصيلها إلى الشبكة الكهربائية .

يعد استخدام العنفة الريحية ذات السرعة المتغيرة خياراً مهماً في محطات توليد الطاقة الكهربائية باستخدام طاقة الرياح. هناك العديد من الميزات المهمة التي يمكن الحصول عليها ، مثل زيادة الموثوقية وتقليل اهتلاك العنفة والحاجة إلى صيانتها ، بالإضافة إلى إمكانية تشغيل العنفة الريحية بالاستطاعة العظمى ضمن مجال واسع لسرعة الرياح ، وبالتالي زيادة الاستطاعة المستخلصة منها إلى أعظم ما يمكن. وعلى الرغم من وجود العديد من الصعوبات التي قد تظهر في تشغيل العنفات الريحية على سرعة متغيرة ، فإن استخدام عناصر الكترونيات القدرة ومبدلات الاستطاعة في حالات التشغيل هذه ساهم في التغلب على معظم الصعوبات. عند استخدام مبدلات الاستطاعة الالكترونية المناسبة ، يمكن تشغيل كل من المولدات التزامنية أو التحريضية على سرعة متغيرة .

2-7-1 الماكينة ذات التغذية المزدوجة بدون فرش :-

لقد جذبت الماكينة ذات التغذية المزدوجة التي لا تحتوي علي فرش الكثير من الاهتمام نظرا لتكلفة صيانتها المنخفضة وهيكلها الموثوق بها، يمكن للألة ذات التغذية المزدوجة التي لا تحتوي علي فرش ان تتجنب جميع عيوب الماكينة ذات التغذية المزدوجة لأنها لا تتطلب اي فرش وتم استخدام الماكينة المستقلة ذات التغذية المزدوجة بدون فرش كمولد للطاقة علي نطاق واسع في انظمة توليد التردد الثابت متغير السرعة (VSCF) ، وعلي سبيل المثال تطبيقات توليد الطاقة للرمح السفينة .

نجد ان الالة ذات التغذية المزدوجة بدون فرش هي نوع جديد من الآلات التيار المتردد مع مزايا كل من الالة الغير المتزامنة والمتزامنة، تكوين الة التغذية المزدوجة بدون فرش متنوع من الآلات التيار المتردد التقليدية وتوجد مجموعتان مختلفتان من الملفات الثلاثية الطور ، pw مع عدد ازواج القطب $1p1$ مع عدد ازواج القطب $2p2$ وفي قلب ثابت واحد.

يرتبط ملف الطاقة الجزء الثابت ارتباطا مباشرا بالشبكة او الحمل ويرتبط ملفات التحكم في الجزء الثابت بمحول ثنائي الاتجاه ولايوجد اقتران المجال المغناطيسي المباشر بين ملف التحكم وملف الطاقة ويتم التعرف علي تحويل الطاقة الكهروميكانيكية من خلال تعديل المجال المغناطيسي الدوار.

2-8 مراقب سرعة MRAS للالة ذات التغذية المضاعفة بدون فرش:-

يتم استخدام مراقب السرعة MRAS للتقدير دوران السرعة وموقع الدوار ل DFIM ويعتمد هذا المراقب علي نموذجان:

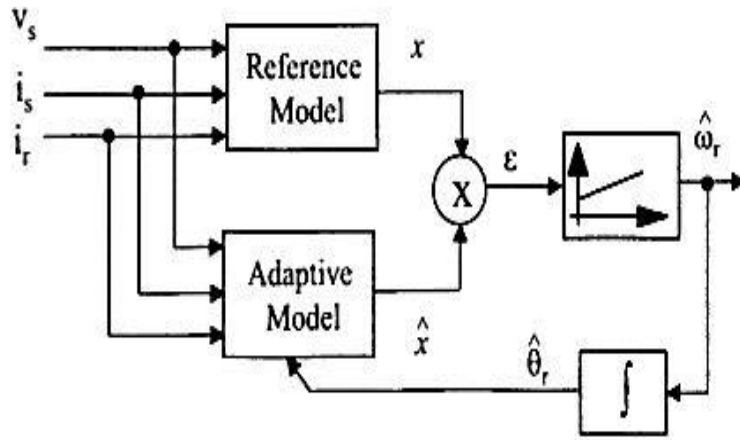
نموذج الجهد والنموذج الحالي في اطار ثابت ، ويتم استخدام نموذج الجهد للحصول علي تدفق الجزء الثابت ويكون انخفاض الجهد للجزء الثابت تكون صغيرة اقل من التصنيف العملية بحيث يكون تقدير التدفق البالغ غير حساس نسبيا .

نجد ان عملية اصطياد السرعة للمراقب MRAS من المرغوب فيه ان يكون ال DFIM المستقل الغير محسوس قادرا علي ذلك القبض علي سرعة الدوران لألة تدور بالفعل .

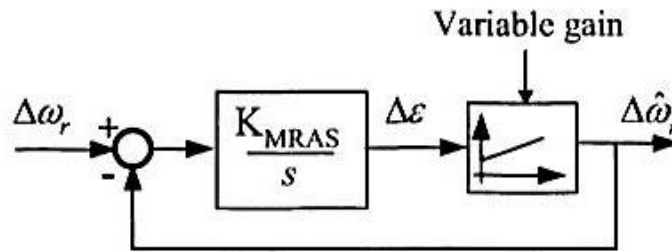
وبالنسبة للانظمة غير المستشعرة المقترحة ، نأخذ اجراء نقاط السرعة في الاعتبار تشغيل DFIM مع التحكم القياسي في حجم التيار الدوار وحمل الجزء الثابت المفصول .

والسرعة المقدره من المراقب MRAS اثناء اجراء النقاط السرعة يكون تردد الجزء الثابت لا يساوي السرعة المقدره لان السرعة المقدره تختلف عن السرعة الحقيقية لذلك الخطأ المطلق للتردد الجزء الثابت فيما يتعلق بالمرجع يمكن استخدام كعامل اشارة لتقارب MRAS .

بمجرد ان يقدر مراقب ال MRAS سرعة الدوران بشكل صحيح ، فإن التحكم في ناقل الحركة للتيارات الدوارة والتحكم في التيار الممغنط يتم تمكينه



الشكل (10-2): الشكل يوضح ال MRAS



الشكل(11-2): نموذج اشارته صغير للمراقب MRAS

9-2 نظام التحكم الغير مستشعر :

عادة هناك نموذجان ضروريان لتصميم ال MRAS المراقب :

النموذج المرجعي والنموذج التكيفي .

يستخدم النموذج السابق للتوفير المرجع للأقارب للمتغيرات بينما يتم ضبط الاخير بواسطة الدوران المقدر للسرعة وموقف الدوران من أجل دفع الخطأ الموضعي الي الصفر.

لذلك لا غنى عن النموذج الرياضي المناسب ، مما يؤثر علي دقة الملاحظة وبالتالي التأثير علي اداء التحكم في نظام BDFM .

الفصل الثالث

معادلات النظام الآله التحريضية وتصميم مراقب MRAS CW flux

1-3 مقدمة :

سنقدم في هذا الفصل النموذج الرياضي للألة التحريضية والذي سنستخدمه في وضع النموذج الرياضي للألة BDFM وكما سيتم في هذا الفصل شرح معادلات النموذج الرياضي للمولد الحثي ذات التغذية المضاعفة بدون فرش (BDFIG) وتصميم المراقب MRAS.

2-3 المعادلات الرياضية للألة التحريضية:

تعطي المعادلات الرياضيه التي تصف السلوك الديناميكي للألة التحريضية كما يلي:

1. معادلات الجهود في الثابت علي المحورين المتعامدين D,Q:

$$U_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{d}{dt} \Phi_{sd} - \omega_s \cdot \Phi_{sq} \quad (1-3)$$

$$U_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d}{dt} \Phi_{sq} + \omega_s \cdot \Phi_{sd} \quad (2-3)$$

2. معادلات الجهود في الدائر علي المحورين المتعامدين D,Q:

$$U_{rd} = 0 = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d}{dt} \Phi_{rd} - (\omega_s - \omega_r) \cdot \Phi_{rq} \quad (3-3)$$

$$U_{rq} = 0 = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d}{dt} \Phi_{rq} - (\omega_s - \omega_r) \cdot \Phi_{rd} \quad (4-3)$$

3. معادلات الفيوض في الثابت والدائر علي المحورين المتعامدين D,Q:

$$\Phi_{sd} = L_s \cdot i_{sd} + L_m \cdot i_{rd} \quad (5-3)$$

$$\Phi_{sq} = L_s \cdot i_{sq} + L_m \cdot i_{rq} \quad (6-3)$$

$$\Phi_{rd} = L_r \cdot i_{rd} + L_m \cdot i_{sd} \quad (7-3)$$

$$\Phi_{rq} = L_r \cdot i_{rq} + L_m \cdot i_{sq} \quad (8-3)$$

4. معادلة العزم الكهرومغناطيسي:

$$T_e = \frac{L_m}{L_r} \cdot p \cdot (\Phi_{rd} \cdot i_{sq} - \Phi_{rq} \cdot i_{sd}) \quad (9-3)$$

5. معادلة الاستطاعة الفعلية:

$$p_s = (u_{sd} \cdot i_{sd} - u_{sq} \cdot i_{sq}) \quad (10-3)$$

6. معادلة الحركة:

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - T_l \quad (11-3)$$

حيث :

- . u_{sd} : توتر الثابت على المحور d [V]
- . u_{sq} : توتر الثابت على المحور q [V]
- . u_{rd} : توتر الدائر على المحور d [V]
- . u_{rq} : توتر الدائر على المحور q [V]
- . i_{sd} : تيار الثابت على المحور d [A]
- . i_{sq} : تيار الثابت على المحور q [A]
- . i_{rd} : تيار الدائر على المحور d [A]
- . i_{rq} : تيار الدائر على المحور q [A]
- . ϕ_{sd} : الفيض المغناطيسي للثابت على المحور d
- . ϕ_{sq} : الفيض المغناطيسي للثابت على المحور q
- . ϕ_{rd} : الفيض المغناطيسي للدائر على المحور d
- . ϕ_{rq} : الفيض المغناطيسي للدائر على المحور q
- . R_s : مقاومة ملف الثابت [ohm]
- . R_r : مقاومة ملف الدائر [ohm]
- . L_s : المحارضة الذاتية لملف الثابت [H]
- . L_m : المحارضة التبادلية [H]
- . L_r : المحارضة الذاتية لملف الدائر [H]
- . P : عدد أزواج أقطاب الآلة .
- . ω_s : سرعة دوران الساحة المغناطيسية للثابت في الآلة [rad/sec]
- . ω_r : سرعة الدوار في الميكانيكية للآلة [rad/sec]
- . J : عزم عطالة الآلة [Kg.m²] " Moment of Inertia "
- . T_e : العزم الكهرومغناطيسي في الآلة [N.m] " Electromagnetic Torque "
- . T_l : عزم الحمولة [N.M] " Load Torque "

لانتقال من جملة الاحداثيات الثلاثية الأطوار a- b- c إلى جملة الاحداثيات الثنائية على المحورين d-q نستخدم تحويل بارك التالي :

$$V_d = \frac{\sqrt{2}}{3} * [V_a * \cos(\theta) + V_b * \cos(\theta - 2 \cdot \frac{\pi}{3}) + V_c * \cos(\theta + 2 \cdot \frac{\pi}{3})] \quad (12-3)$$

$$V_q = \frac{\sqrt{2}}{3} * [V_a * \sin(\theta) - V_b * \sin(\theta - 2 \cdot \frac{\pi}{3}) - V_c * \sin(\theta + 2 \cdot \frac{\pi}{3})] \quad (13-3)$$

V_a, V_b, V_c : مركبات الجهد في الاحداثيات a - b-c .

V_d, V_q : مركبات الجهد في الاحداثيات d-q .

θ : هي الزاوية بين الثابت والدائر ، والتي نحصل عليها من سرعة الدائر w_r :

$$w_r = \frac{d\theta}{dt} \quad (14-3)$$

3-3 التحكم الكهربائي بالمولدة الريحية :

يشمل التحكم بالمولدة الريحية ما يلي:

- التحكم بالعنفة الريحية: يشمل ضبط سرعة المولد التحريضي على القيمة المرجعية بهدف الحصول على الاستطاعة الأعظمية.

- ضبط زاوية ميل الشفرات: يشمل تثبيت استطاعة الخرج على قيمة قريبة من القيمة الاسمية.

يعتمد التحكم بسرعة الآلة التحريضية على أساس التحكم بالعزم الكهربائي المقاوم للعزم الميكانيكي الناتج من العنفة الريحية. تعتمد إحدى أشهر الطرق المستخدمة للتحكم بالعزم الكهربائي على توجيه الفيض المغناطيسي في الثابت أو الدائر للآلة التحريضية. يسهل هذا الإجراء التحكم بالآلة التحريضية بشكل مشابه لآلة التيار المستمر.

التحكم الشعاعي بتوجيه الفيض :

سنقوم في هذه الفقرة بشرح مبدأ التحكم الشعاعي بالعزم الكهربائي للآلة التحريضية .

يعطى العزم الكهربائي للآلة التحريضية بالعلاقة التالية:

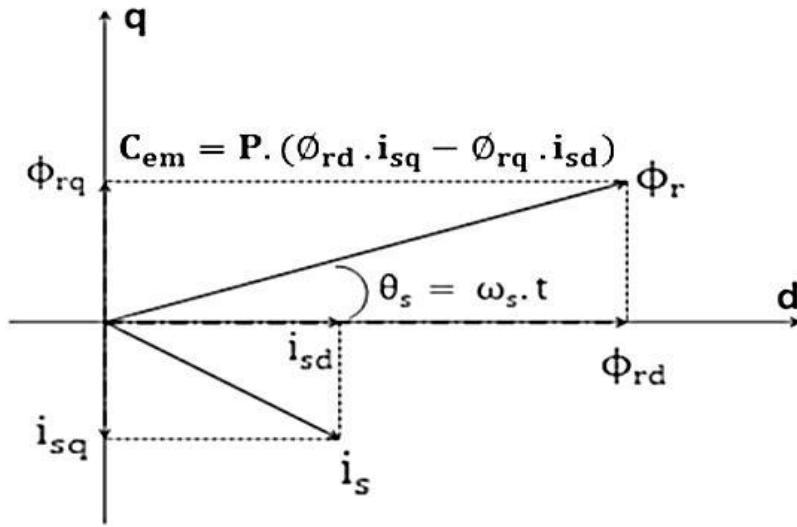
$$C_{em} = p \cdot (\Phi_{rd} \cdot i_{sq} - \Phi_{rq} \cdot i_{sd}) \quad (15-3)$$

إن الفكرة الأساسية للتحكم الشعاعي بتوجيه الفيض هي توجيه محاور الإحداثيات بحيث ينطبق

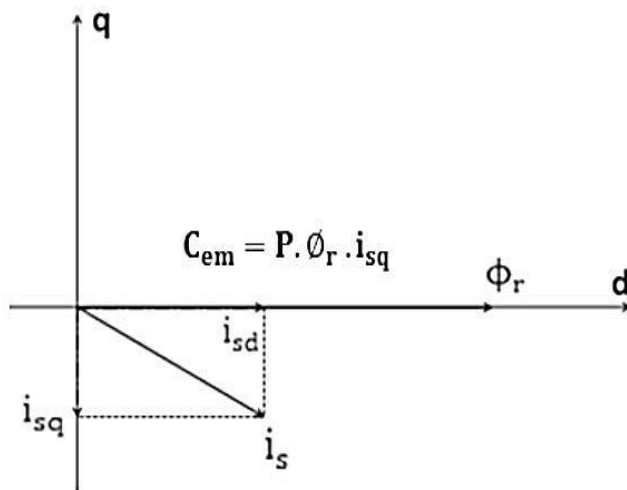
المحور d على شعاع الفيض للثابت أو للدائر. هكذا تنعدم إحدى مركبتي الفيض، أي يصبح لدينا $\Phi_{rd}=0$ وتبقى المركبة الأخرى $\Phi_{rd} = \Phi_r$. عندها تصبح معادلة العزم كما يلي:

$$C_{em} = P \cdot \Phi_r \cdot i_{sq} \quad (16-3)$$

يسمح تثبيت قيمة الفيض بالتحكم بالعزم الكهربائي باستخدام مركبة واحدة للتيار وهي i_{sq} ويصبح التحكم بالآلة التحريضية مشابها للتحكم بآلة ذات التيار المستمر. تدور الإحداثيات d, q التي نسقط عليها فيض الدائر والتيار الثابت بسرعة الحقل الدوار ولتكن هنا : $\theta_s = \omega_s \cdot t$ يؤخذ مركز الاحداثيات d, q بشكل عشوائي ، ويوجد عدد لا نهائي من الاوضاع للاحداثيات d, q بالنسبة لالة التحريضية والتي تدور بسرعة $\theta_s = \omega_s \cdot t$ والتي يسقط عليها تدفق الدائر والتيار الثابت كما يوضح الشكل :



الشكل (1-3) فيض الدائر والتيار الثابت في الاحداثيات d, q



الشكل (2-3) فيض الدائر والتيار الثابت في الاحداثيات d, q بعد تثبيت قيمة الفيض

للحصول على هذا التوجيه يجب حساب التردد ω_s الذي سنقوم بإيجاده لحساب الزاوية ϕ_s الضرورية في تحويلات الإحداثيات من ثنائية إلى ثلاثية وبالعكس. سننطلق من معادلات نموذج فراغ الحالة التالية. إن ما يهم الوصول إليه بالنسبة لنا هو نظام متعدد المتحولات ناتج عن معادلات الحالة. سنتناول خيارات متعددة متاحة بالنسبة لتحويلات الحالة من بينها مركبات تيار الثابت وفيض الدائر:

$$X = [I_{sd} \ I_{sq} \ \phi_{rd} \ \phi_{rq}]^T \quad (17-3)$$

إذا عدنا مركبة الفيض على المحور q نحصل على:

$$\phi_{eq} = 0 = \frac{L_m \cdot R_r}{L_r} \cdot I_{sq} - (\omega_s - \omega_r) \cdot \phi_r \Rightarrow \omega_s = \omega_r + \frac{L_m \cdot R_r}{L_r \cdot \phi_r} \cdot I_{sq} \quad (18-3)$$

تيار المغنطة بالعلاقة:

$$I_{mr} = \frac{\phi_r}{L_m} \quad (19-3)$$

يعبر عن مشتق الفيض في الدائر على المحور d انطلاقاً من معادلات نموذج فراغ الحالة السابقة كما يلي:

$$\phi_{rd} = \phi_r = R_r \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot I_{sd} - \frac{R_r}{L_r} \cdot \phi_r \Rightarrow i_{mr} \cdot \frac{L_r}{R_r} = I_{sd} - I_{mr} \quad (20-3)$$

يمكن ان نحصل على تيار المغنطة عن طريق تابع نقل من الدرجة الاولى:

$$I_{mr} = \frac{I_{sd}}{1 + T_r \cdot s} \quad (21-3)$$

بالتالي تكون العلاقة بين الفيض ومركبة تيار الثابت I_{sd} كما يلي:

$$\phi_r = L_m \cdot I_{mr} \quad (22-3)$$

$$\phi_r = L_m \cdot \frac{I_{sd}}{1 + T_r \cdot s} \quad (23-3)$$

بالتالي يمكن التحكم بالفيض عن طريق مركبة التيار I_{sd} كناتج من الدرجة الأولى. أما بالنسبة للتردد فيمكن ضبطه انطلاقاً من العلاقة التالية:

$$\omega_s = \omega_r + \frac{1}{T_r} \cdot \frac{I_{sd}}{I_{mr}} \quad (24-3)$$

حيث يتعلق التردد بمركبتي تيار الثابت المضبوطتين سلفا وبقياس السرعة الميكانيكية.

نرى مما سبق بأنه يمكن كتابة العزم كالتالي:

$$C_{em} = P \cdot L_m \cdot L_{mr} \cdot I_{sq} \quad (25-3)$$

وهكذا إذا تحكنا بشكل صحيح بتياري الثابت I_{sd} , I_{sq} نستطيع التحكم بعزم الآلة التحريضية .
سيسمح التيار I_{sd} بتحديد تدفق الدائر r, \emptyset ، كما سيقود التيار I_{sq} العزم الكهربائي وبالتالي السرعة الميكانيكية.

سنقوم الآن بتحديد المهام الضرورية لتشغيل التحكم الشعاعي:

- تمثيل المقادير الكهربائية للآلة التزامنية في الإحداثيات d, q .

- فصل مركبتي التيارين I_{sd} , I_{sq} .

- وضع حلقات تحكم متنوعة .

الفصل بين المحورين q , d :

إذا نظرنا إلى المعادلات (1-3) وحتى (8-3) يمكننا التأكيد بأن النظام مترابط في الواقع ونلاحظ

بأن مركبات التوتر U_{sq} , U_{sd} تؤثر بشكل متزامن على المقادير I_{sd} , I_{sq} .

ولحل هذه المشكلة سنقوم عن طريق علم الجبر بتحويل هذا النظام المتعدد المتحولات (مدخلين

ومخرجين) إلى نظامين أحادي المتحولات.

يخضع التحكم بالمقادير الكهربائية للآلة التحريضية إلى ديناميكية تيارات الثابت I_{sd} , I_{sq}

وبمساعدة توترات التحكم U_{sq} , U_{sd} .

ترتبط التوترات U_{sq} , U_{sd} بالتيارات I_{sd} , I_{sq} وكذلك بالتردد ω_s وللتخلص من الارتباط

الطبيعي بين المحورين q, d يجب إظهار أدوات الفصل التي ستحول هذا النظام المتعدد المتحولات إلى

نظامين أحادي المتحولات. وبحسب معادلتَي التيارين I_{sd} , I_{sq} بإمكاننا التأكيد على أن علاقة التيار I_{sd}

بالمقادير \emptyset_{rd} , ω_s , I_{sq} ، وأن التيار I_{sq} مرتبط بالمقادير \emptyset_{rd} , ω_s , I_{sd} .

من أجل فصل علاقة التيارات I_{sd} , I_{sq} يجب إيجاد دخلين جديدين هما:

U_{sq1} , U_{sd1} حيث تحتوي المعادلات المتعلقة بهما على التيارين I_{sd} , I_{sq} على التوالي.

توجد عدة طرق يمكن القيام بها لإنجاز الفصل بين المحورين q, d وسنستخدم هنا الطريقة التالية:

التشكيل باستخدام نموذج رباعي المحددات:

سنستخدم نموذجاً رباعي المحددات وذلك بإعادة محارضة التسرب L_f إلى الثابت.

سيكون لدينا في هذه الحالة:

$$L_f = L_m$$

$$L_f = L_s - L_r$$

وبالتالي :

$$U_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \left(L_s - \frac{Lm^2}{Lr} \right) \cdot \dot{i}_{sd} \cdot \omega_s \cdot \left(L_s - \frac{Lm^2}{Lr} \right) \cdot I_{sq} + - \frac{Lm}{Lr} \cdot \phi_{rd} \quad (26-3)$$

$$U_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \left(L_s - \frac{Lm^2}{Lr} \right) \cdot \dot{i}_{sq} \cdot \omega_s \cdot \left(L_s - \frac{Lm^2}{Lr} \right) \cdot I_{sd} + - \frac{Lm^2}{Lr} \cdot \phi_{rd} \quad (27-3)$$

بفرض :

$$U_{sd} = U_{sd1} - F_{emd} \quad (28-3)$$

$$U_{sq} = U_{sq1} - F_{emq} \quad (29-3)$$

حيث:-

$$F_{emd} = \omega_s \cdot L_f \cdot I_{sq} + R_r \cdot I_{mr} \quad (30-3)$$

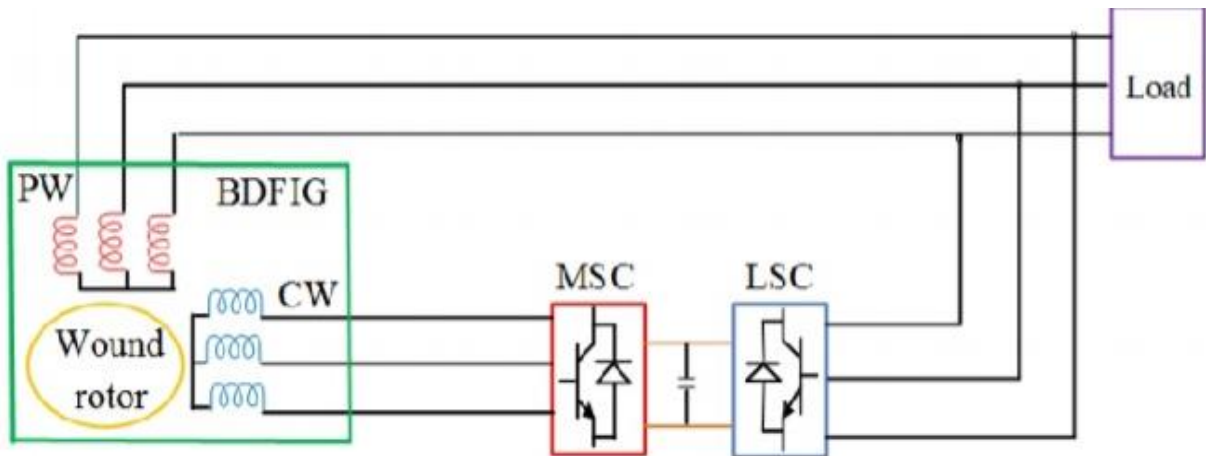
$$F_{emq} = -\omega_s \cdot L_f \cdot I_{sd} - \omega_s \cdot L_m \cdot I_{mr} + R_r \cdot I_{sq} \quad (31-3)$$

يمكن ان نعطي F_{emq} ايضا بالعلاقة التالية :

$$F_{emq} = -\omega_s \cdot L_f \cdot I_{sd} - \omega_r \cdot L_m \cdot I_{mr} \quad (32-3)$$

4-3 النموذج الرياضي للمولد التحريضي ذات التغذية المزدوجة بدون فرش :

في نظام المولد التحريضي ذات التغذية المزدوجة بدون فرش (BDFIG) ، يتم توصيل الجزء الثالث pw مباشرة باطراف التحميل ، ويتم توصيل cw بجانب التحميل عبر محول من ظهر الي ظهر كما هو موضح بالشكل :



الشكل (3-3) : تركيب المولد التحريضي ذو التغذية المزدوجة بدون فرش (BDFIG)

في الوضع المتزامن ، يمكن التعبير عن سرعة الدوار لـ BDFIG

$$\omega_r = \frac{\omega_1 + \omega_2}{p_1 + p_2} \quad (33-3)$$

يمكن اشتقاق الاطار المتزامن يمثل نموذج المتجه الرياضي لـ BDFIG في dq :

$$U_1 = R_1 i_1 + \frac{d \psi_1}{dt} + j \omega_1 \psi_1 \quad (34-3)$$

$$0 = R_r i_r + \frac{d \psi_r}{dt} + j (\omega_1 - p_1 \omega_r) \quad (35-3)$$

$$u_2 = R_2 i_2 + \frac{d \psi_2}{dt} + j (\omega_1 - (p_1 + p_2) \omega_r) \quad (36-3)$$

$$\psi_1 = L_1 i_1 + L_{1r} i_r \quad (37-3)$$

$$\psi_r = L_r i_r + L_{2r} i_2 + L_{1r} i_1 \quad (38-3)$$

$$\psi_2 = L_2 i_2 + L_{2r} i_r \quad (39-3)$$

3 - 5 تصميم المراقب MRAS :

مراقب MRAS المقترح، كما هو مبين في الشكل 2-6 له اثنان من النماذج هما : النموذج التكيفي والنموذج المرجعي تم الحصول على تدفق c w الثابت المقاس من الفولتية وتم مقارنة تيارات p w بالتدفق الناتج من التيارات الجزء الثابت p w و c w.

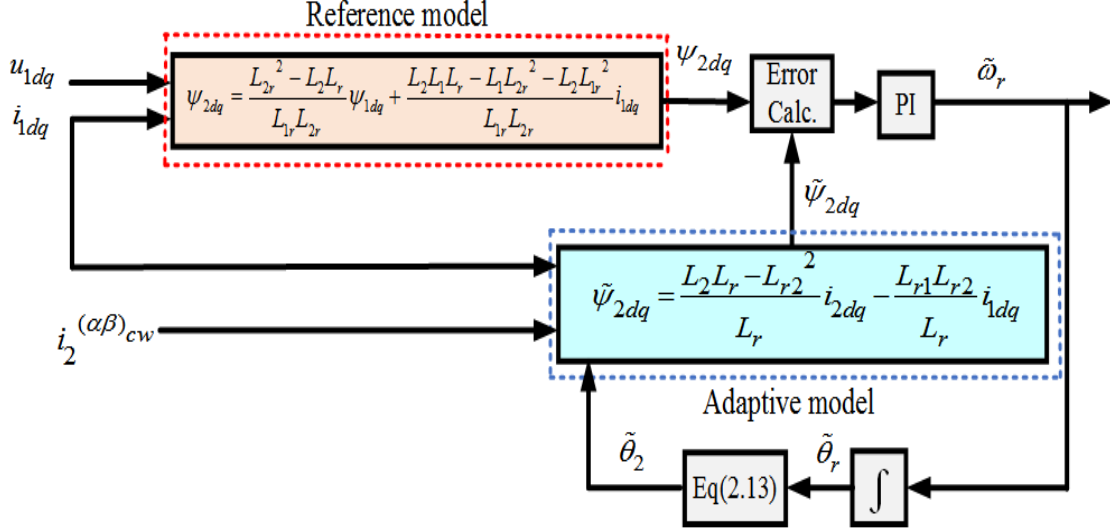
يتم التحكم في الخطأ ليكون متساويا الي الصفر باستخدام وحدة تحكم p I ويكون ناتج وحدة التحكم هذه تستخدم لتقدير سرعة الدوار وتم يقدر هذا ويتم تغذية السرعة مرة اخرى لضبط التكيف .

يمكن اشتقاق النموذج التكيفي من خلال الاجراء على النحو التالي ويتم باستبدال (38-3) في (35-3) ، يمكن الحصول على تيار الدوار ir بواسطة :

$$i_r = - \frac{[s + j(\omega_1 - p_1 \omega_r)](L_{2r} i_2 + L_{1r} i_1)}{R_r + [s + j(\omega_1 - p_1 \omega_r)]L_r} \quad (40-3)$$

=

$$\frac{\frac{L_{2r}}{L_2} \psi_2 + L_{1r} i_1}{\frac{R_r}{s + j(\omega_1 + p_1 \omega_r)} - L_r + \frac{l_{2r}^2}{l_2}}$$



الشكل (3-4): مخطط نظام لمراقب نظام التحكم في CW Flux

من اجل استخدام محول طاقة مقنن جزئيا الي قيادة نظام BDFIG المستقل ، عادة ما يقتصر التردد الزاوي w_2 $c w$ على 30% من تردد $p w$.
 وفقا للمعادلة (1) ، سيكون نطاق ω_r بين 70% و 130% من حيث BDFIG مع ازواج القطب النموذجية 1 و 3 لـ $p w$ و $c w$ ، ستكون قيمة $(\omega_1 - p_1 \omega_r)$ في النطاق (67.5 - 82.5%) ω_1 .
 وبشكل عام ، نجد تم قيمة ω_1 تساوي 100π او 120π rad/s ومن ثم ان قيمة $(\omega_1 - p_1 \omega_r)$ تكون اكبر بكثير من R_r ومن ثم يمكن استنتاج ان مصطلح $(\omega_1 - p_1 \omega_1) / [s+j R_r]$ يمكن تجاهله تقريبا :
 الدوار العضو تيار عن التعبير يمكن (:) المعادلة من ذلك وبعد المستقرة حالته في

$$i_r = \frac{L_{2r}\Psi_2 + L_2 L_{1r} i_1}{L_{2r}^2 - L_2 L_r} \quad (41-3)$$

ويتم استبدال المعادلة (41-3) في (39-3) للحصول على تدفق الجزء الثالث $c w$ كما يلي :

$$\Psi_2 = \frac{L_2 L_r - L_{2r}^2 i_2}{L_r} - \frac{L_{1r} L_{2r}}{L_r} i_1 \quad (42-3)$$

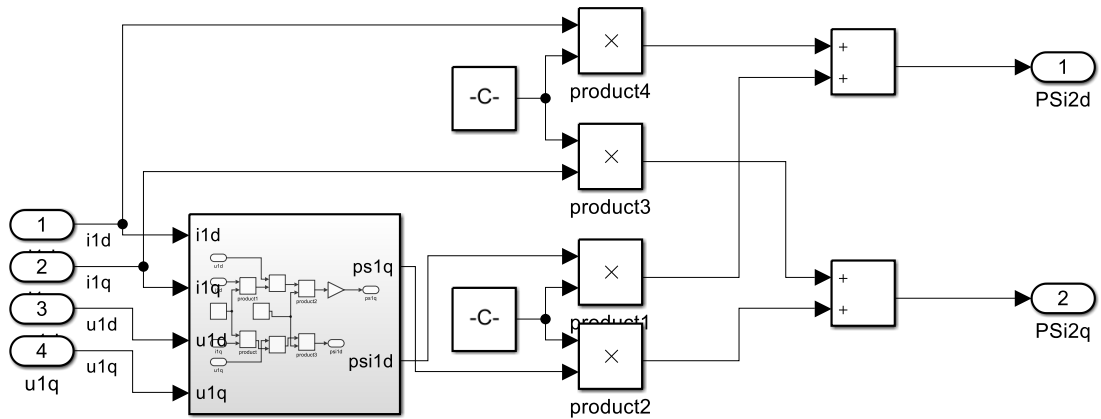
وبالتالي ، يمكن الحصول على النموذج التكيفي لتقدير تدفق الجزء الثابت :

$$\tilde{\Psi}_{2dq} = \frac{L_2 L_r - L_{2r}^2}{L_r} i_{2dq} - \frac{L_{1r} L_{2r}}{L_r} i_{1dq} \quad (43-3)$$

وفي حالة الاستقرار نجد ان $d \omega_r / dt = 0$ ، ثم من المعادلة (35-3) الجزء الدوار يمكن اشتقاق التدفق في حالته الثابته على النحو التالي :

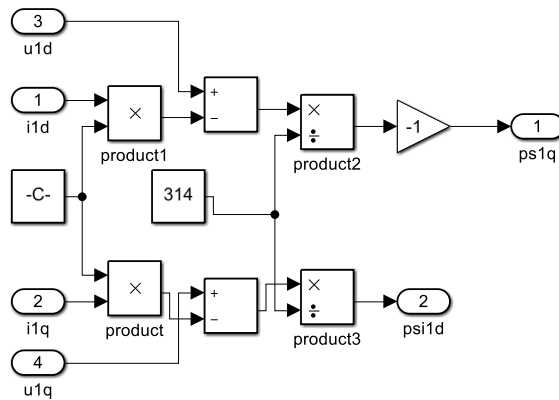
$$\Psi_r = \frac{-R_r i_r}{j(\omega_1 - p_1 \omega_r)} \quad (44-3)$$

1-6-3 Reference Model تصميم :



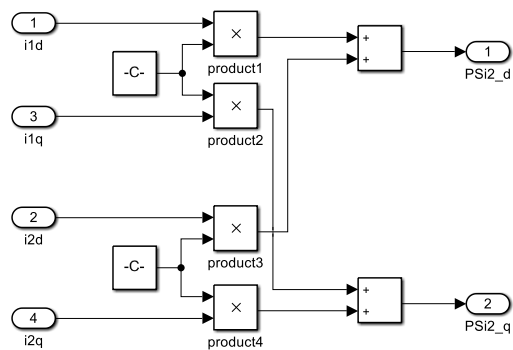
الشكل (1-5-3): الشكل يوضح ال Reference Model

1-1-6-3 PW Stator Flux dq reference تصميم :



الشكل (2-5-3): الشكل يوضح PW Stator Flux dq reference

2-6-3 Adaptive model تصميم ال :-



الشكل (3-5-3) : الشكل يوضح Adaptive model

7-3 محددات النظام BDFIG:

يتم ادخال قيم الثوابت للنظام اللازم لتشغيل المحاكاة في برنامج الماتلاب هذه القيم مبينة في الجدول التالي:-

الجدول (1-3) : قيم ثوابت النظام اللازم لتشغيل المحاكاة

Parameter	Value
Capacity	30 KVA
Range of speed	600 – 1200rpm
P1, P2	1,3
PW voltage and current	380 V,45A
CW voltage range	350 V~0
CW current range	A40~ 0
R1,R2,Rr	0.4034Ω,0.2680Ω,0.3339Ω
L1,L2,Lr	0.4749H,0.03216H,0.2252H
Lr1,Lr2	0.3069H,0.02584H

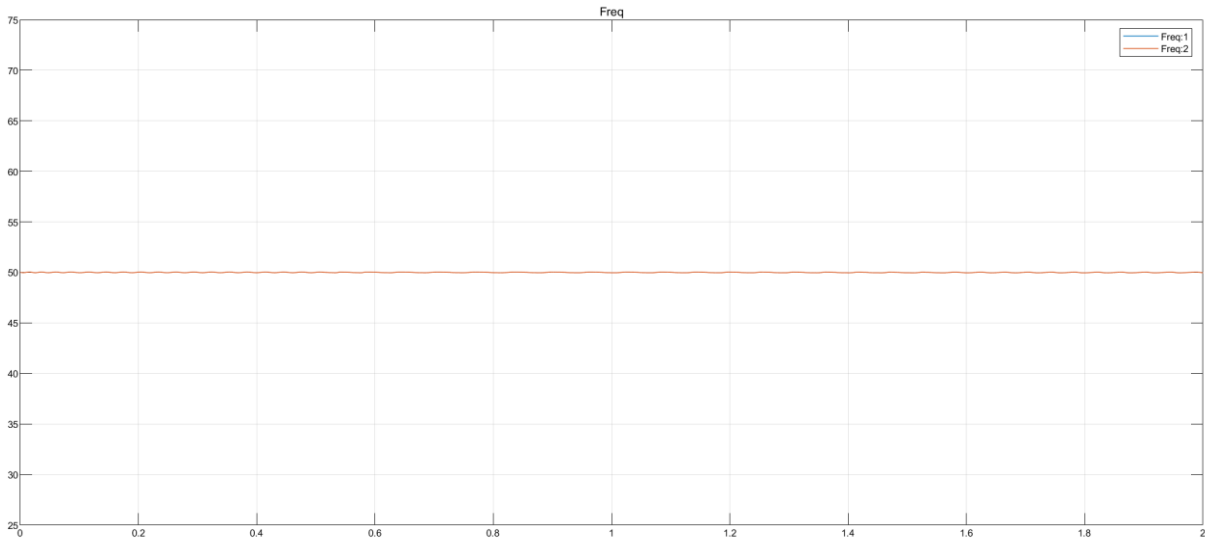
الفصل الرابع النتائج والمناقشة

1-4 مقدمة:

سنقوم في هذا الفصل بعد إجراء عملية المحاكاة الحصول علي نتائج النظام .

2-4 النتائج :

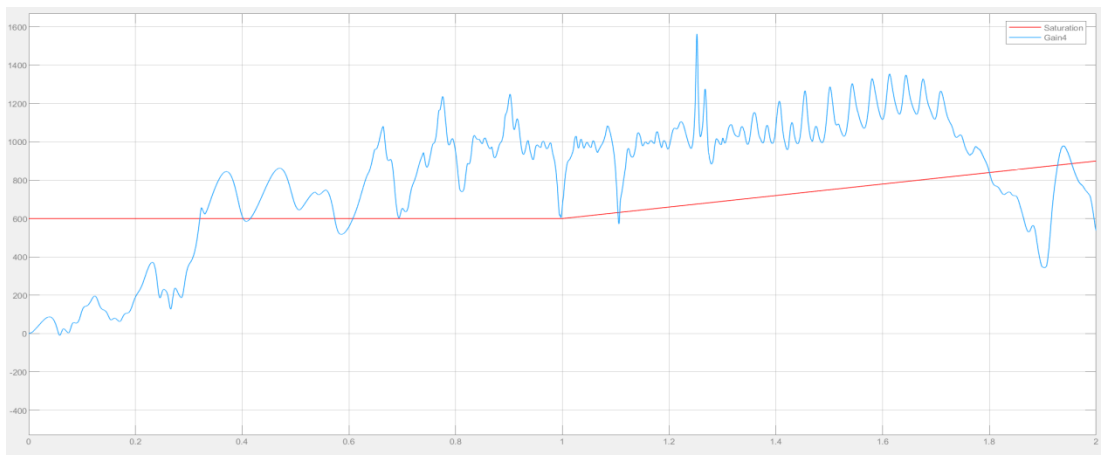
1-2-4 التردد :



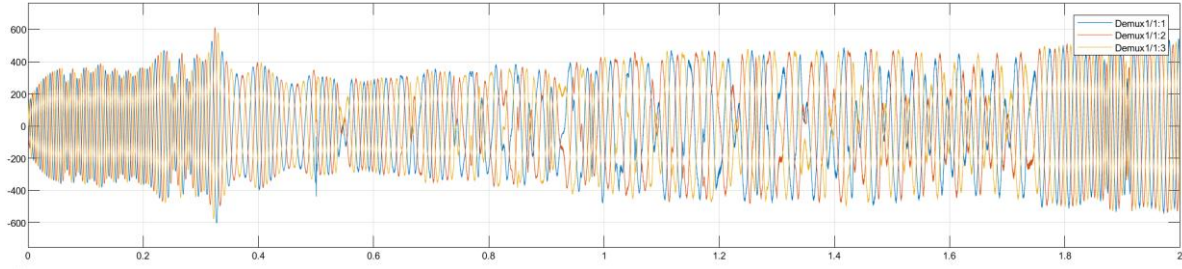
الشكل (1-2-4): الشكل يوضح إشارة التردد (HZ) Freq

2-2-4 السرعة Rotor Speed :

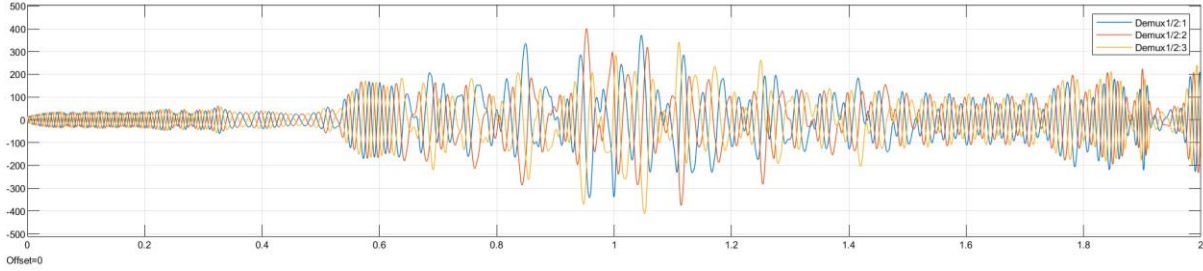
(1-2-2-4) عندما تكون السرعة متغيرة (600-900 rpm) والتغير عند زمن 1 ثانية



الشكل (1-2-2-4): الشكل يوضح إشارة السرعة (rpm) Rotor Speed

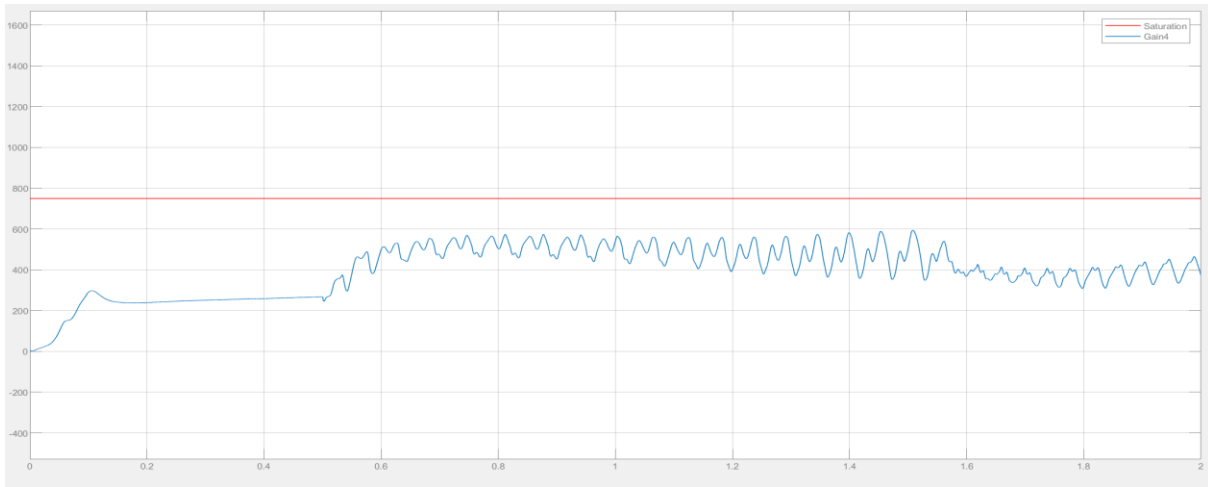


الشكل (1-1-2-2-4): الشكل يوضح إشارة الجهد CW(V)

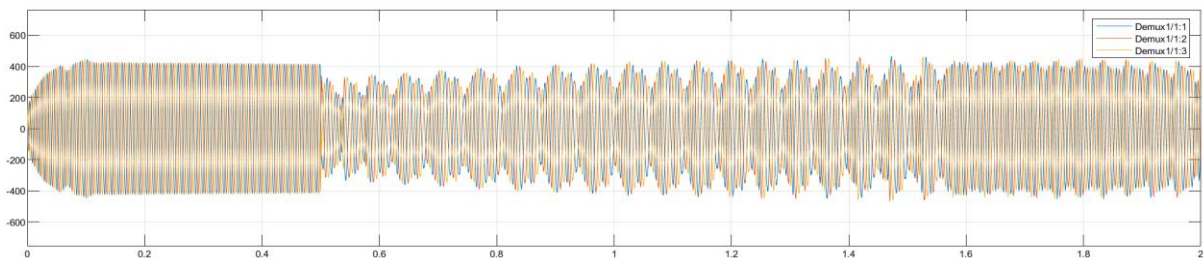


الشكل (2-1-2-2-4) : الشكل يوضح إشارة التيار CW(A)

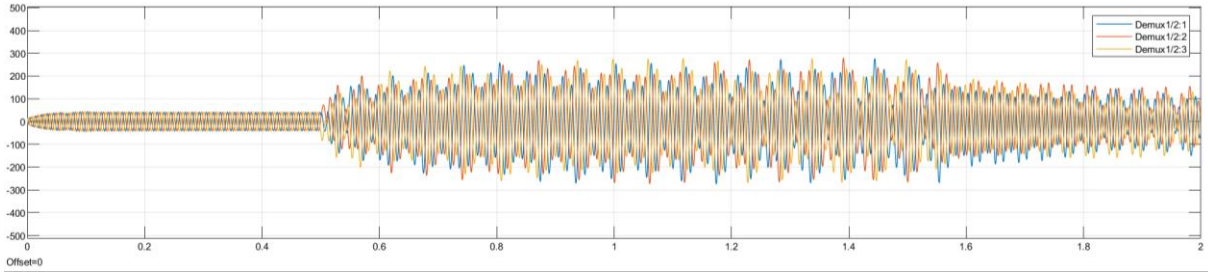
(2-2-2-4) عندما نعمل علي تثبيت السرعة علي (750 rpm)



الشكل (2-2-2-4): الشكل يوضح إشارة السرعة rpm



الشكل (1-2-2-2-4) : الشكل يوضح إشارة الجهد CW(V)



الشكل (2-2-2-4): الشكل يوضح اشارة التيار CW(A)

3-4 المناقشة :

توضح النتائج التي تم الحصول عليها عن طريق التحكم MRAS Senorlees بالاعتماد علي CW Flux تتبع لسعة الجهد CW التحكم في التيار والتردد تحت تغير منحدر السرعة الدائر وعند تثبيت السرعة .

الفصل الخامس

الخلاصة والتوصيات

1-5 الخلاصة :

تم في هذا البحث تقديم النمذجة والمحاكاة للنظام لمقدر ميكانيكي لسرعة الدوار للتحكم بدون مستشعر في الحث المستقل المذود بفرشاة مذدوجة التغذية .

المولدات (BDFIG) بإستخدام مقدر النظام التكميلي المرجعي المستند الي CW للنموذج القائم علي محور $\alpha\beta$ (MRAS) المقدر تم دمجها في طريقة التحكم للتحكم في قيمة التردد والجهد أثناء سيناريوهات العمل المختلفة وكفاءة تم إثبات تقنية المقدر والتحكم المقترحة من خلال أداء المحاكاة الكلي كما هو موضح دون إستخدام مستشعرات لسرعة الدوار ، يمكن إستراتيجية التحكم الغير مستشعر التي تتدمج مقدر السرعة المقترح ان تحافظ علي التردد والسعة بنجاح .

2-5 التوصيات :

يمكن الاخذ باعتبار التوصيات الاتية :

- يمكن إستكمال البحث حول النظام بنماذجها المختلفة التي تعتبر عديدة وواحدة في مجال الطاقات المتجددة .
- ونوصي الباحثين عند العمل علي هذا النظام يتم ضبط الخطأ للحصول علي إشارات التردد والسرعة والجهد والتيار للنظام والقيم المضبوطة .
- العمل علي مناقشة النتائج ومقارنتها واجراء الاختبارات.

- [1] Roberts, Paul C. (2005). (A Study of Brushless Doubly-Fed (Induction) Machines, Contributions In Machine Analysis, Design And Control). A [2]Dissertation Submitted For The Degree Of Doctor Of Philosophy. Emmanuel College, University of Cambridge: United Kingdom.
- [3] Li, Ruqi; Wallace, Alan; Spee, Rene (Jan. 1995). (Determination of Converter Control Algorithms for Brushless Doubly-Fed Induction Motor Drives Using Floquet and Lyapunov Techniques). IEEE Transactions on Power Electronics. VOL. 10, NO. 1, 78-85.
- [4] Li, Ruqi; Wallace, Alan; Spee, Rene (1991). (Determination of Converter Control Algorithms for Stable Brushless Doubly-Fed Drives Using Floquet and Lyapunov Techniques). Department of Electrical &Computer Engineering, Oregon State University: United States of America
- [5] Li, Ruqi; Wallace, Alan; Spee, Rene; Wang, Yixin (Sep. 1991). (Two-Axis Model Development of Cage-Rotor Brushless Doubly-Fed Machines). IEEE Transactions on Energy Conversion. VOL. 6, NO.3, 453-460.
- [6] Brassfield, W.R.; Spee, Rene; Habetler, T.G. (1992). (Direct Torque Control for Brushless Doubly-Fed Machines). Department of Electrical &Computer Engineering, Oregon State University: United States of America.
- [7] Brassfield, W.R.; Spee, Rene; Habetler, T.G. (Sep. 1996). (Direct Torque Control for Brushless Doubly-Fed Machines). IEEE Transactions on Industry Applications. VOL. 32, NO.5, 1098-1104.
- [8] Zhou, D.; Spee, R.; Wallace, A.K. (1993). (Model Reference Adaptive Speed Control for Doubly-Fed Machines). Department of Electrical &Computer Engineering, Oregon State University: United States of America.
- [9] Zhou, D.; Spee, R.; Wallace, A.K. (1993). (Laboratory Control Implementations for Doubly-Fed Machines). Department of Electrical &Computer Engineering, Oregon State University: United States of America.

[10] Zhou, D.; Spee, R. (1994). (Synchronous Frame Model and Decoupled Control Development for Doubly-Fed Machines). Department of Electrical & Computer Engineering, Oregon State University: United States of America.

[11] Gorti, B.V.; Alexander, G.C.; Spee, R.; Wallace, A.K. (1995). (Characteristics of a Brushless Doubly-Fed Machine in Current-Fed Mode of Operation). Department of Electrical & Computer Engineering, Oregon State University: United States of America.

[12] A. K. Ebraheem, W. Xu, Y. Liu, and M. G. Hussien, "Sensorless direct voltage control based on MRAS observer for the stand-alone brushless doubly-fed induction generator," in Proc. Int. Conf. Elec. Machines and Systems (ICEMS), Jeju, 2018, pp. 1606-1611.