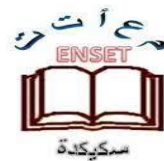




الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
المدرسة العليا لمساعدة التعليم التكنولوجي
- سكيكدة -



التخصص: هندسة كهربائية

قسم التكنولوجيا

مذكرة التخرج لنيل شهادة أستاذ التعليم الثانوي

ب عنوان

نمذجة ومحاكاة الآلة الآتزامية ثنائية التغذية دون مسفرات BDFIM

من إعداد:

الحكايشي ملاك

لمعيسى مروة

تحت إشراف الأستاذ:

رحاب عبد الرزاق

لجنة المناقشة:

م.ع.أ.ب.م.سكيكدة	رئيسا	أستاذ محاضر - ب -	سناني فوزي
م.ع.أ.ب.م.سكيكدة	مشرقا	أستاذ محاضر - ب -	رحاب عبد الرزاق
م.ع.أ.ب.م.سكيكدة	مناقشا	أستاذ محاضر - ب -	حجامي مروان

السنة الجامعية 2024/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

شكر وعرنان

الحمد لله رب العالمين، تبارك وتعالى له الكمال وحده.

والصلاة والسلام على سيدنا محمد نبيه ورسوله الأمين

وعلى سائر الأنبياء والمرسلين

وانطلاقاً من باب من لم يشكر الناس لم يشكر الله، نقدم بالشكر الحار إلى كل من أصبحنا بفضلهم نكتب ونقرأ إلى كل من علمنا علماً به ننتفع وأدب به نرتفع، بدءاً من معلمي الابتدائي وصولاً إلى أساتذتنا الكرام بالمدرسة العليا للأساتذة -سكيدة-

ونخص بالذكر الأستاذ المشرف الذي لم يبخل علينا بتوجيهاته ونصائحه القيمة التي كانت عوناً لنا طيلة فترة إعدادنا لمذكرة التخرج

الدكتور "رحاب عبد الرزاق"

كما نتوجه بالشكر والعطاء إلى أعضاء لجنة المناقشة لإثراء هذا العمل بملاحظاتهم القيمة وتوجيهاتهم السديدة الدكتور "سناني فوزي" رئيساً والدكتور "حجامي مروان" مناقشاً

دون أن ننسى كل من مد لنا يد العون وساهم معنا في انجاز هذه المذكرة من قريب أو من بعيد ولو بكلمة طيبة

من قال أنا لها نالها

وأنا لها وإن أبت رغما عنها أتيت بها نلتها وعانقت اليوم مجدا عظيما لم يكن اللحم قريبا ولا الطريق سهلا ولكن وصلت.

الحمد لله حبا وشكرا وامتنانا، الحمد لله الذى بفضلہ أدركت أسمى الغايات.

أهدي بكل حب مذكرة تخرجي إلى

إلى نفسى الطموحة التي تحملت كل العثرات وأكملت رغم الصعوبات

إلى من كلله الله بالهبة والوقار...إلى من كان لي عوناً في مشواري الدراسي إلى من أحمل اسمه بكل

افتخار...أرجو من الله أن يمد بعمرِكَ لتَرى ثمارا ربما حان قطعُها بعد طول انتظار إلى أبي الغالي

إلى من كانت سندي ورفيقة دربي...إلى من قدمت لي الحب والدعم بلا حدود...إلى أمي الحبيبة...أنت

النور الذي اضاء لي طريق النجاح

إلى من زرع في نفسي كل معاني الكرم والوفاء وأورثني دوافع التضحية والعطاء...جدي العزيز رحمه الله

واسکنه فسیح جناته

إلى من وهبني الله نعمة وجوده في حياتي...إلى من علمني أن ارتقي سلم الحياة بحكمة وصبر... خالي

عبد المالك وجودك في حياتي ثروة لا تقدر بثمن

إلى من كانتتي ونحن نشق الطريق معا نحو النجاح في مسيرتنا العلمية...إلى رفيقة دربي

مروة لهمايسي

إلى من دامت لي أيادهم وقت ضعفي...إلى ضلعي الثابت وأمان قلبي والنجوم التي تنير طريقي

دوما...إخوتي (هبة، بدر الدين، حسام الدين، هلال، فرحة)

إلى كل من مد لي يد العون والمساعدة من قريب أو بعيد

إليكم جميعا أهدى هذا العمل

وهراء

من قال أنا لها نالها وإن أبت رغما عنها
لم تكن الرحلة قصيرة ولا ينبغي لها أن تكون،
لم يكن الحلم قريبا ولا الطريق كان محفوا بالتسهيلات لكنني فعلتها، فالحمد لله على لذة الإنجاز
والحمد لله عند البدء وعند الختام.
أهدي هذا العمل الى نفسي الطموحة أولا، ابتدأت بطموح وانتهت بنجاح، ثم الى كل من سعى معي
لإتمام مسيرتي الجامعية.
الى ملاكي الطاهر، وقوتي بعد الله، داعمتي الأولى والابدية " أمي "
اهديك هذا الإنجاز الذي لولا تضحياتك لما كان له وجود.
الى من لا ينفصل اسمي عن اسمه ذلك الرجل العظيم، الى من علمني أن الدنيا كفاح وسلاحها العلم
والمعرفة " والدي العزيز "
الى من قيل فيهم {سنشد عضدك بأخيك}
الى من مدو يدهم دون كلل ولا ملل أوقات ضعفي اخوتي، اطال الله أعمارهم ورزقهم الصحة والعافية
" اخوتي "
الى ملائكة رزقني الله بهن لأعرف من خلالهن طعم الحياة " اخواتي "
الى صديقتي رفيقة دربي شريكتي في هذا العمل " العكايشي ملاك "
الى من أنبت الحب في قلبي وحلت البركة بوجودهم في حياتي {رماس، مريم، رزان، محمد}
الى البعيدين عن العين القريبين للقلب
الى هؤلاء أهدي عملي المتواضع.

الأستاذة لهمايسي مروة

ملخص

إن الاستعمال المتزايد لتطبيقات الصناعية ذات السرعات المتغيرة، أدى الى ظهور مشاكل في استعمال الآلات اللاتزامنية ثنائية التغذية من بينها الصيانة الدورية بسبب تلف المسفرات، مما دفع الباحثين البحث عن الحل البديل من أجل التخلص من هذه المشاكل التي تؤثر على كفاءة الآلات.

تتناول هذه المذكرة دراسة عامة للآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية دون مسفرات حيث تملك هذه الأخيرة بنية خاصة لها. تم وضع النموذج الرياضي للآلة BDFIM من خلال الربط الميكانيكي لآلتين لامتزامنيتين. حيث يحقق استخدام هذه الآلة موثوقية عالية واستمرارية في التغذية الكهربائية وذلك بسبب التخلص من المسفرات وحلقات الانزلاق وبالتالي التخلص من اهترائها وما تسببه من ضياعات واجهادات وأعطال وكذلك حاجتها للصيانة المتكررة ذات التكاليف العالية. إن استخدام الآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية دون مسفرات يؤمن جميع الميزات الهامة التي تقدمها الآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية إضافة الى ميزات جديدة. كما قمنا بجمع معلومات على النموذج الرياضي للآلة BDFIM من خلال الحصول على المعادلات الرياضية التي تصف الآلة ومن ثم الحصول على جميع القيم والمعاملات المطلوبة لتشغيل هذا النموذج. كما تم في الأخير محاكاة هذا النموذج باستعمال برنامج MATLAB، حيث تم الحصول على نتائج جد مرضية وتبين لنا مدى أهمية هذه الآلة في التطبيقات الصناعية ذات سرعات متغيرة.

الكلمات المفتاحية: التطبيقات الصناعية ذات سرعات متغيرة، الآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية دون مسفرات (BDFIM)، الآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية.

Abstract

The increasing use of variable speed industrial applications the increased usage has led to the emergence of issues in operation. Traditional synchronous machines, including regular maintenance, have been affected by the damage to the brushes. This led researchers to seek alternative solutions to overcome these issues that affect the efficiency of the machines. This memorandum provides a comprehensive study of the dual-fed induction machine without brushes, which possesses its own unique structure. The mathematical model of the BDFIM machine was developed by mechanically coupling two asynchronous machines. The use of this machine achieves high reliability and continuity in power supply, as it eliminates the need for brushes and slip rings. Consequently, it eliminates their wear and tear, losses, stresses, and malfunctions. Additionally, it reduces the need for frequent and costly maintenance. Using an asynchronous machine with dual feeding without saliencies provides all the important features offered by an asynchronous machine with dual feeding, in addition to new features. We have gathered information on the mathematical model of the BDFIM machine by obtaining the mathematical equations that describe the machine. Consequently, we have obtained all the required values and parameters to operate this model. In addition, this model was simulated using the MATLAB program. Results were obtained, which were very satisfactory, and it demonstrated to us the importance of this machine in variable speed industrial applications .

Keywords: Variable speed industrial applications, Dual-feed asynchronous machine without saliencies (BDFIM), Dual-feed asynchronous machine

الفهرس

1	مقدمة عامة
	الفصل الأول: دراسة نظرية عامة حول الآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية دون مسفرات
3	مقدمة
3	1.1 مختلف أنواع تراكيب الآلات اللاتزامنية ثنائية التغذية دون مسفرات
3	1.1.1 الآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية دون مسفرات التتابعية CDFIM
5	2.1.1 الآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية دون مسفرات SF-CDFIM
5	3.1.1 الآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية دون مسفرات بممانعة متغيرة BDFRM
6	2.1 الآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية دون مسفرات
7	3.1 تركيب ومبدأ عمل الآلة BDFIM
7	1.3.1 الثابت
8	2.3.1 الدوار
9	4.1 أنماط تشغيل الآلة BDFIM
10	1.4.1 الوضع الغير متزامن
13	2.4.1 الوضع المتزامن
13	5.1 استراتيجيات التحكم في الـ BDFIM
14	1.5.1 التحكم السلمي
14	2.5.1 التحكم الشعاعي للـ BDFIM
14	3.5.1 التحكم المباشر في عزم الدوران للـ BDFIM
15	4.5.1 التحكم المباشر في الاستطاعة للـ BDFIM
15	6.1 مقارنة بين مختلف استراتيجيات التحكم
16	7.1 التطبيقات العملية للـ BDFIM

16.....	8.1 ميزات وعيوب ال BDFIM
17.....	خاتمة
الفصل الثاني: نمذجة ومحاكاة الآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية دون مسفرات	
18.....	مقدمة
18.....	1.2 نمط التشغيل المتزامن
21	1.1.2 نمذجة ال BDFIM في النظام الدائم
22	2.1.2 النموذج المبسط لل BDFIM
26.....	2.2 النموذج المبسط لل BDFIM في النظام الديناميكي
26	1.2.2 النموذج الكلي
27	2.2.2 النموذج المبسط للآلة BDFIM
28	3.2.2 نموذج ال BDFIM في النظام الثنائي
30.....	4.2.2 نموذج ال BDFIM بناء على الآلة التتابعية
30	1.4.2.2 وصف الآلة BDFIM بناء على الآلة التتابعية
33	2.4.2.2 محاكاة نموذج الآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية دون مسفرات BDFIM
42.....	خاتمة
الفصل الثالث: نمذجة ومحاكاة المجموعة (محول/BDFIM)	
44.....	مقدمة
45.....	1.3 نمذجة المقوم
45	1.1.3 مبدأ العمل
47.....	2.3 نمذجة المرشح
48.....	3.3 نمذجة المموج بتحكم PWM
52	1.3.3 تقنية عرض النبضة PWM

54.....	4.3 محاكاة المجموعة (محول الكتروني/BDFIM)
55	1.4.3 نتائج محاكاة المحول الالكتروني
58	2.4.3 نتائج محاكاة المجموعة (محول الكتروني/BDFIM)
61.....	خاتمة
62.....	خاتمة عامة
63.....	المراجع
67.....	الملاحق

فهرس الأشكال

03	التركيبات الأساسية للآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية	الشكل (1.1)
04	مبدأ عمل CBDFIM	الشكل (2.1)
05	مبدأ عمل SF-CDFIM	الشكل (3.1)
06	الآلة BDFIM	الشكل (4.1)
07	الآلة BDFIM مربوطة مع الشبكة	الشكل (5.1)
09	دوار الآلة BDFIM	الشكل (6.1)
11	ربط الآلة في حالة وضع التشغيل اللامتزامن (ساكن التحكم دارة مفتوحة)	الشكل (7.1)
12	ربط الآلة في حالة وضع التشغيل اللامتزامن (ساكن التحكم دارة قصيرة)	الشكل (8.1)
13	ربط الآلة في وضعية التشغيل المزدوجة	الشكل (9.1)
19	الحقول المغناطيسية للتوقيتين الرئيسيتين بدلالة وضع الدوار	الشكل (1.2)
20	الرسم التخطيطي للاقتزان المغناطيسي في الآلة BDFIM	الشكل (2.2)
21	اتجاهات دوران الحقول الناتجة في الآلة BDFIM	الشكل (3.2)
22	الدائرة المكافئة للآلة BDFIM	الشكل (4.2)
24	نموذج المبسط للدائرة المكافئة للآلة BDFIM	الشكل (5.2)
30	نموذج الآلة BDFIM على أساس الآلة DFIM	الشكل (6.2)
34	المخطط العام للمحاكاة	الشكل (7.2)
35	اوضاع التشغيل للآلة BDFIM (M1)	الشكل (8.2)
36	نتائج محاكاة الآلة BDFIM (M1)	الشكل (9.2)
39	نتائج محاكاة الآلة (M2)	الشكل (10.2)
40	اوضاع تشغيل الآلة (M3)	الشكل (11.2)
41	نتائج محاكاة الآلة (M3)	الشكل (12.2)

44	المخطط العام لتغذية الـ BDFIM	الشكل (1.3)
46	التركيب الكهربائي للمقوم ثلاثي الطور	الشكل (2.3)
47	نموذج المرشح RLC	الشكل (3.3)
49	التصميم الكهربائي للمموج ثلاثي الطور	الشكل (4.3)
49	الرسم المكافئ للمموج ثلاثي الطور	الشكل (5.3)
53	نموذج مقارنة إشارة جيبية ثلاثية الطور مع إشارة مثلثية	الشكل (6.3)
53	منحنى تقاطع الإشارة المرجعية ثلاثية الطور والإشارة المثلثية	الشكل (7.3)
54	نبضات التحكم في المفاتيح الإلكترونية للمموج	الشكل (8.3)
55	المخطط العام للآلة في حالة العمل كمحرك أو مولدة	الشكل (9.3)
56	شكل التوتر في مدخل المقوم	الشكل (10.3)
57	توتر مخرج المقوم قبل الترشيح	الشكل (11.3)
57	توتر مخرج المقوم بعد الترشيح	الشكل (12.3)
58	التوتر البسيط لمخرج المموج	الشكل (13.3)
58	اشكال تيار ساكن التحكم (a) وساكن الاستطاعة (b)	الشكل (14.3)
59	سرعة دوران الآلة في الوضعين المتزامن والغير متزامن	الشكل (15.3)
59	العزم الكهرومغناطيسي للآلة	الشكل (16.3)
60	الاستطاعة في ساكن الاستطاعة	الشكل (17.3)

فهرس الجداول

10	أنماط التشغيل	الجدول (1.1)
15	مقارنة بين استراتيجيات التحكم	الجدول (2.1)
24	نسب مقاومة الدوار والمفاعلة في الـ BDFIM مختلفة	الجدول (1.2)
25	المعاملات المتشابهة للـ (DFIM) و (BDFIM) في الوضع المتزامن	الجدول (2.2)
28	المعاملات المكافئة للنماذج الديناميكية للـ DFIM و BDFIM	الجدول (3.2)
34	شروط المحاكاة للآلات (M1, M2)	الجدول (4.2)
40	شروط محاكاة الآلة M3	الجدول (5.2)
46	تتابع الأطوار خلال فترات توصيل كل الثنائيات	الجدول (1.3)

جدول الرموز

الرمز	اسم الرمز
BDFRM	الآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية دون مسفرات بممانعة متغيرة
SF-CDFIM	الآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية دون مسفرات التتابعية في قفص واحد
CDFIM	الآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية دون مسفرات التتابعية
DFIM	الآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية
Bp	ساكن الاستطاعة
Bc	ساكن التحكم
BDFIM	الآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية دون مسفرات
Pp	عدد أزواج أقطاب ساكن الاستطاعة
Pc	عدد أزواج أقطاب ساكن التحكم
f _{rp}	تردد الحقل الدوار الناتج عن ساكن الاستطاعة
f _{rc}	تردد الحقل الدوار الناتج عن ساكن التحكم
CS	التحكم السلمي
FOC	التحكم الشعاعي
DTC	التحكم في عزم الدوران المباشر
DPC	التحكم المباشر في الاستطاعة
PWM	التحكم بعرض النبضة
b _p	الحقل المغناطيسي الناتج عن ساكن الاستطاعة
b _c	الحقل المغناطيسي الناتج عن ساكن التحكم
B _p	القيمة العظمى للحقل المغناطيسي الناتج عن ساكن الاستطاعة
B _c	القيمة العظمى للحقل المغناطيسي الناتج عن ساكن التحكم
φ_p	زاوية فرق الصفحة للحقل المغناطيسي الناتج عن ساكن الاستطاعة
φ_c	زاوية فرق الصفحة للحقل المغناطيسي الناتج عن ساكن التحكم
ω_p	نبض تغذية ساكن الاستطاعة
ω_c	نبض تغذية ساكن التحكم
ω_m	السرعة الميكانيكية

جدول الرموز

نبض التيار الدوار الناتج عن مجال ساكن الاستطاعة	ω_{rp}
نبض التيار الدوار الناتج عن مجال ساكن التحكم	ω_{rc}
السرعة الطبيعية	ω_n
انزلاق ساكن الاستطاعة	S_p
انزلاق ساكن التحكم	S_c
انزلاق الآلة BDFIM	S
الاستطاعة الميكانيكية	P_m
الاستطاعة الفعالة لساكن الاستطاعة	P_{Bp}
الاستطاعة الفعالة لساكن التحكم	P_{Bc}
الاستطاعة الضائعة	P_{cu}
توتر تغذية ساكن التحكم	V_C
تيار ساكن التحكم	I_C
مقاومة ساكن التحكم	R_C
مقاومة الدوار	R_r
تيار الدوار	I_r
مفاعلة ساكن الاستطاعة	X_p
مفاعلة ساكن التحكم	X_c
مفاعلة الدوار	X_r
العزم الكهرومغناطيسي	C_{em}
توتر تغذية ساكن الاستطاعة	V_p
توتر الدوار	V_r
تدفق ساكن الاستطاعة	Ψ_p
تدفق ساكن التحكم	Ψ_c
تدفق الدوار	Ψ_r
معامل التسرب	σ
الحث المتبادل لساكني التحكم والاستطاعة	M_{pc}
محاثّة الدوار	L_r
محاثّة ساكن التحكم	L_c
محاثّة ساكن الاستطاعة	L_p

جدول الرموز

معامل التسرب لساكن الاستطاعة	σ_p
معامل التسرب لساكن التحكم	σ_c
توتر ساكن الاستطاعة في النظام بارك	V_{dsp}
توتر ساكن الاستطاعة في النظام بارك	V_{qsp}
توتر ساكن التحكم في النظام بارك	V_{dsc}
توتر ساكن التحكم في النظام بارك	V_{qsc}
الاستطاعة الردية لساكن الاستطاعة	Q_{Bp}
الاستطاعة الردية لساكن التحكم	Q_{Bc}
العزم الكهرومغناطيسي للآلة DFIM1	C_{em1}
العزم الكهرومغناطيسي للآلة DFIM2	C_{em2}
العزم المقاوم	C_r
معامل احتكاك الآلة DFIM1	C_{vis1}
معامل احتكاك الآلة DFIM2	C_{vis2}
عزم عطالة الآلة DFIM1	J_1
عزم عطالة الآلة DFIM2	J_2
توترات الشبكة ثلاثية الطور	V_1, V_2, V_3
توتر الخط	V_L
توتر الطور	V_{ph}
القيمة المتوسطة لمخرج المقوم	V_{dc}
القيمة العظمى لتوتر الشبكة	V_m
توتر مخرج المرشح	U_f
توتر مخرج المقوم	V_d
التوترات البسيطة لمخرج المموج	V_{an}, V_{bn}, V_{cn}
توترات مدخل المموج	V_{ao}, V_{bo}, V_{co}
توتر الإشارة الحاملة	V_{port}
تواتر الإشارة الحاملة	f_{potr}
مطال الإشارة الحاملة	A_{port}
توتر الإشارة المرجعية	V_{ref}
مطال الإشارة المرجعية	A_{ref}

جدول الرموز

تواتر الإشارة المرجعية	f_{ref}
معامل التبديل	M
معامل التعديل	R
القيمة الفعالة للتوافقية الأساسية لمخرج العاكس	V_{eff}

مقدمة عامة

مقدمة عامة

منذ بداية استخدام التيار المتناوب (AC) بدلا من التيار المستمر (DC) كمصدر أساسي للتغذية وتوزيع الطاقة الكهربائية، ازداد استخدام الآلات التحريضية بشكل كبير في العديد من المجالات الصناعية. حيث تتميز الآلات التحريضية ببساطة هيكلها وموثوقيتها العالية، مما جعل الطلب عليها يزداد يوما بعد يوم. ومع التطور المستمر توجهت الاحتياجات الصناعية نحو العمل على سرعات متغيرة، أدى ذلك إلى ظهور مشكلة كبيرة حيث يعتمد التشغيل الأساسي للآلة التحريضية على سرعة وتردد ثابتين من أجل العمل بكفاءة محدودة. ثم لجأوا إلى الآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية حيث ظهر مشكل الصيانة الدورية بسبب تلف المسفرات. تعود الفكرة الرئيسية للآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية دون مسفرات BDFIM إلى براءة الاختراع التي حصل عليها The Siemens Brothers and Mr. F. Lydall خلال سنة 1902 حول الآلة اللاتزامنية ذات التابع الذاتي Self-Cascaded Machine وأثناء عمل Lydall على هذه الآلة، كانت هناك جهود أخرى لاختراع آلة ذات التابع الذاتي ولكن جهودهم تركز على تأكيد وجود مسافات ملائمة بين ملفات الساكن لضمان عدم تشابك الحقول المغناطيسية التي تنشأ من هذه الملفات، حيث رأوا أن هذه الطريقة أكثر فعالية من استخدام الحقول المغناطيسية الناتجة عن الاختلاف في عدد الأقطاب. وفي سنة 1907 قام Hunt بتطوير النموذج الذي اقترحه Lydall واكتشف Hunt أنه لا داعي استخدام حلقات الانزلاق التي استخدمها Lydall في نموذجهِ وتظل إمكانية الوصول إلى السرعات المتغيرة متاحة وأثبت أنه من خلال اعتماد تصميم ملائم لملفات الساكن والدوار يمكن تقليل الضياعات النحاسية، تابع Hunt تطوير هذا التصميم إلى غاية 1914. وفي سنة 1967 توصل Smith لإدارة مكافئة لهذه الآلة لكنها لم تكن BDFIM حقيقية، بل كانت تتألف من آلتين منفصلتين مغناطيسيا ولكن ضمن إطار واحد، وقدم مقال يشرح فيه هذه الدارة المكافئة ويحلل ادائها في نمط التشغيل المتزامن عن طريق التغذية المضاعفة لملفي الساكن. وفي عام 1970 توصل كل من Broadway و Burbidge إلى تصميم دوار خاص ذو قفص سنجابي مكون من حلقات العشية المتداخلة وإثبات أن عدد القضبان في هذا الدائر يجب أن يساوي مجموع عدد الأقطاب المغناطيسية لملفي الساكن. وبعد عام 1990 قدم باحثون من جامعة ولاية Oregon في الولايات المتحدة الأمريكية بدراسة معمقة للـ BDFIM وقامت هذه الدراسة على اقتراح النموذج الديناميكي للآلة على المحورين (d-q) مع تقديم نتائج أدائها ثم استخلاص النموذج الرياضي لها بحيث تمكنوا من نمذجتها بالحاسوب ومقارنة النتائج مع النتائج التجريبية، كما ركزوا أيضا على طرق التحكم وتطبيقات الآلة. وتوالت الأبحاث والدراسات حول نمذجة الآلة BDFIM وذلك في جامعة Cambridge البريطانية من قبل Williamson et.al حيث قدم دراسة عامة حول آلية عمل الآلة ووضعيات تشغيلها ودراسة للتوافقيات التي قد تظهر في الآلة.

استخدام الآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية دون مسفرات BDFIM يضمن موثوقية واستمرارية التغذية الكهربائية بفضل الاستغناء عن المسفرات وحلقات الانزلاق، مما يقلل من مشاكل الاهتراء والضياعات والخسائر الحرارية والاعطال والتقليل من الصيانة المتكررة ذات التكلفة العالية، كما توفر التحكم بالسرعة والاستطاعة الفعلية والردية بشكل ممتاز. وموضوع هذه المذكرة يتمثل في نمذجة ومحاكاة هذه الآلة حيث قسمت الى ثلاث فصول كالتالي:

الفصل الأول: مخصص لدراسة نظرية عامة للآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية دون مسفرات، حيث قمنا بتقديم مختلف التركيبات الأساسية للـ BDFIM وبنيتها كما تعرفنا على أوضاع تشغيلها وطرق التحكم مع ذكر بعض إيجابياتها وسلبياتها.

الفصل الثاني: نمذجة ومحاكاة الآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية دون مسفرات، حيث تطرقنا إلى دراسة النموذج الرياضي للآلة في النظامين الثنائي والثلاثي مع محاكاته باستخدام برنامج MATLAB وعرض النتائج وتحليلها.

الفصل الثالث: نمذجة ومحاكاة النظام (محول إلكتروني / BDFIM)، قمنا بتقديم النماذج الرياضية لكل عنصر من عناصر النظام مع تغذية الآلة بمحول إلكتروني بدلا من التغذية المتناوبة، وقمنا بالمحاكاة وعرض النتائج وتحليلها.

الفصل الأول

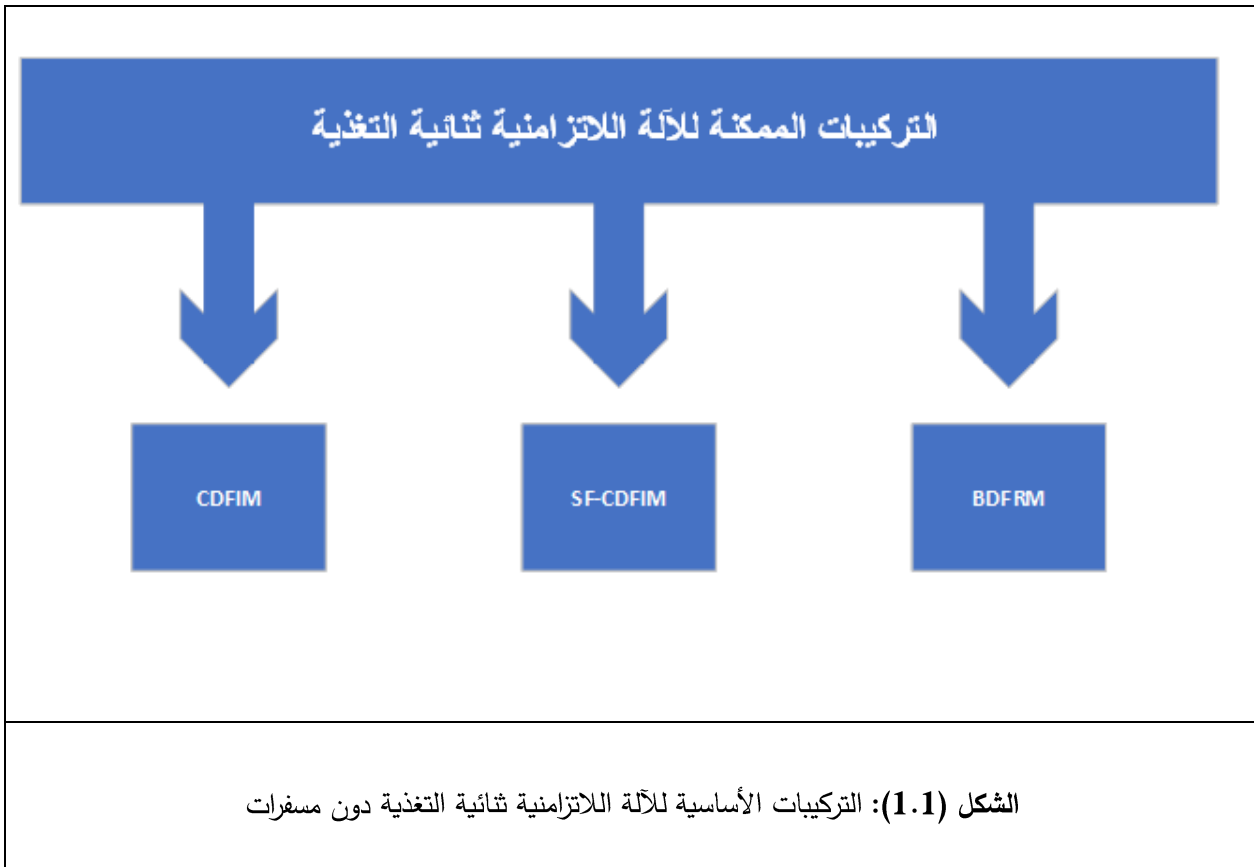
دراسة نظرية عامة حول الآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية دون
مسفرات

مقدمة

سيتم في هذا الفصل تقديم دراسة نظرية عامة للآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية دون مسفرات، بداية من مخطط توضيحي لمختلف تركيبات الآلة ومبدأ عملها، وشرح مختلف أنماط تشغيل الآلة المدروسة. كما يتم عرض أهم التطبيقات العملية للآلة. وذكر البعض من إيجابيات وسلبيات هذه الآلة.

1.1 مختلف أنواع تراكيب الآلات اللاتزامنية ثنائية التغذية دون مسفرات

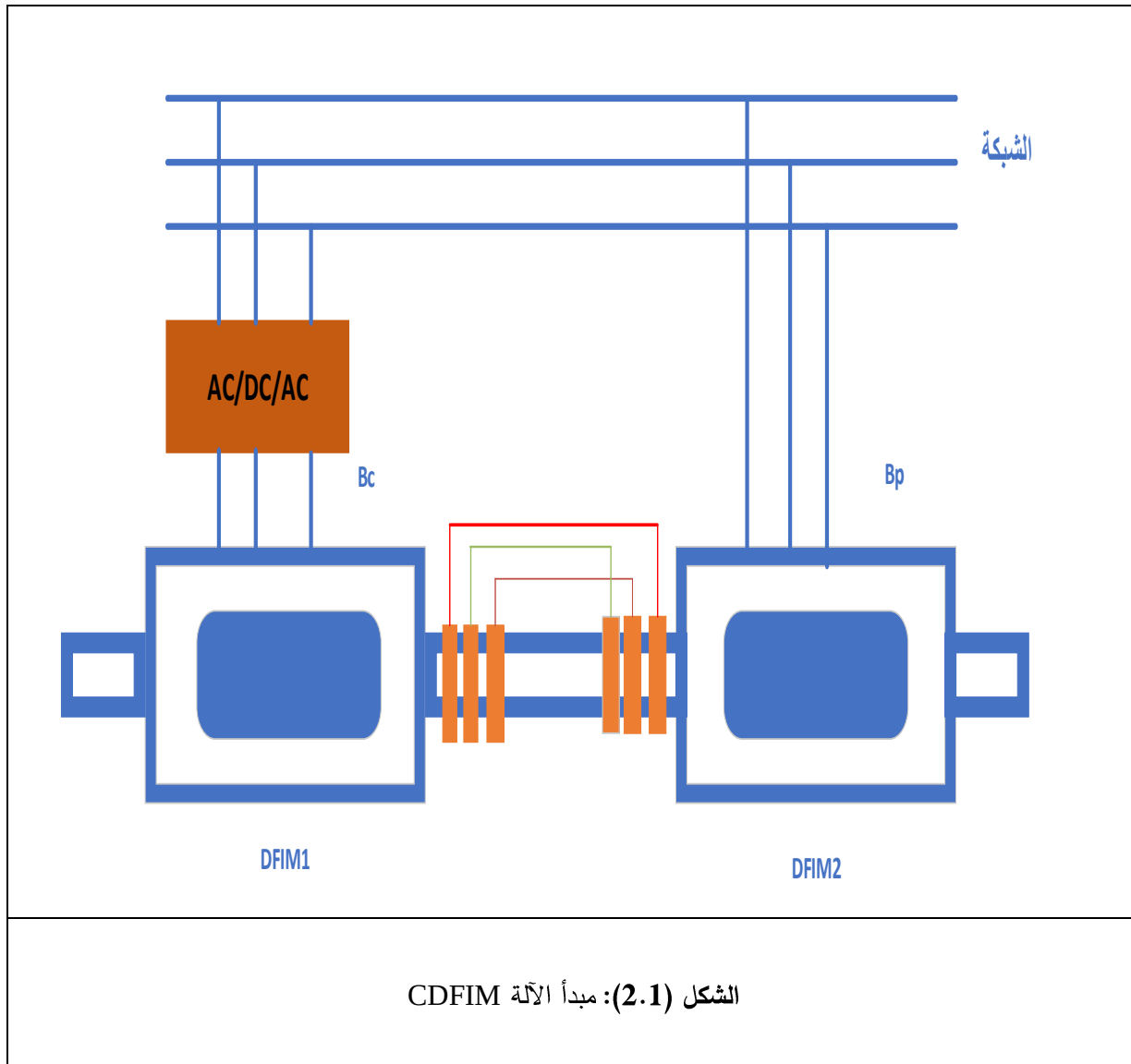
توجد ثلاث تركيبات رئيسية للآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية دون مسفرات، حيث يمكن تلخيصها بالمخطط المبين في الشكل (1.1).



1.1.1 الآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية دون مسفرات التتابعية CDFIM

هي النوع الأساسي للآلة ثنائية التغذية دون مسفرات [1]. تعود فكرة هذا الابتكار الى أكثر من قرن. يتم الحصول على آلة (CDFIM) من خلال الجمع بين آلتين من نوع آلة ثنائية التغذية بدوار ملفوف (DFIM) حيث يكون دوارَي الآلتين موصولان معا ميكانيكيا وكهربائيا، وبهذا لم تعد المسفرات ضرورية للاتصال المباشر بحلقات

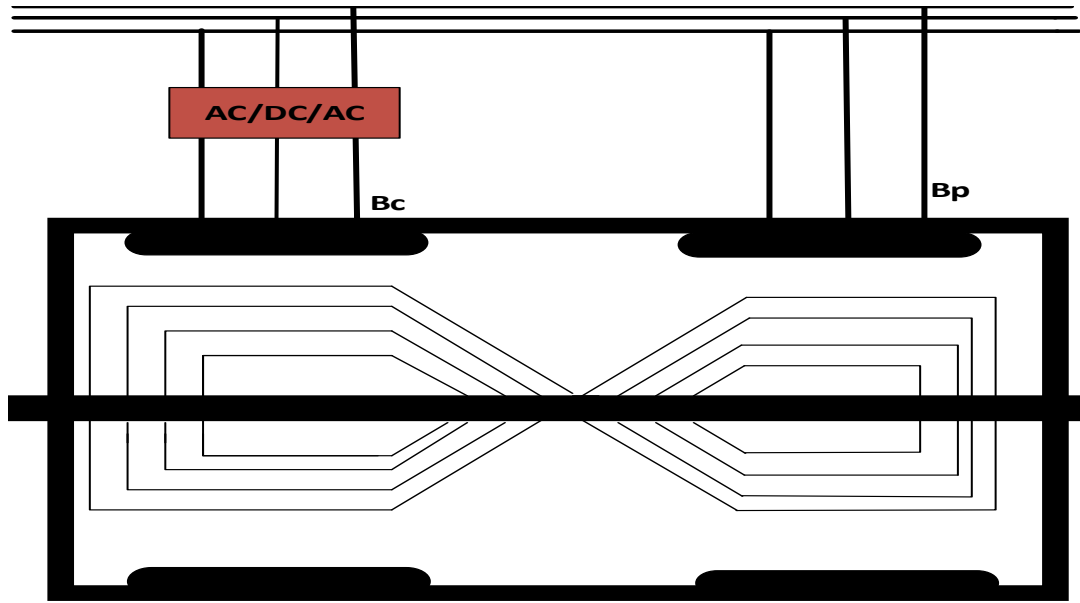
الانزلاق، التوتر في دوازي الآلتين المدمجتين متساوي، كما يمكن التحكم في احدى الآلتين باستخدام الجزء الثابت للآلة الأخرى[2].



لكي تكون كفاءة الآلة الـ (CDFIM) مرضية نوعا يجب اتباع تشكيلة التوصيل العكسي وتجنب التوصيل المباشر [3]، نلاحظ أن الـ (CDFIM) هي الهيكل الأساسي للآلة ثنائية التغذية دون مسفرات. وعلى الرغم من هذا هي غير قابلة للتطبيق العملي [4]. اضافة الى ذلك وزن وحجم هذه الآلة كبير جدا وهذا يعد ضروريا لإنتاج نفس العزم الذي تنتجه الآلة التقليدية [4]، نظرا للكمية الكبيرة من الفائف فإن الخسائر أعلى من خسائر الآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية [5]، وللتخلص من هذه العيوب والحصول على آلة أكثر كفاءة ذات هيكل أكثر تطور ندرس فيما يلي أشهر الطوبولوجيا المعترف بها.

2.1.1 الآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية دون مسفرات SF-CDFIM

هذه الآلة تأخذ الفكرة الأساسية للـ (CDFIM) وتطورها بشكل أعمق وهذا من خلال دمج الآلتين في هيكل مشترك. الآلة (SF-CDFIM) هي أكثر قوة ميكانيكياً، يتم توجيه لفات الجزء الثابت محورياً ثم إنشاء تركيبة للدوار القفصي كبديل للدوار الملفوف الذي يتكون من قضبان متصلة بشكل متوازي ومرتبطة في شكل قفص. إلى أن تدفق الاستطاعة واستراتيجيات التحكم وسلوك التردد هي نفسها في (CDFIM) [6].

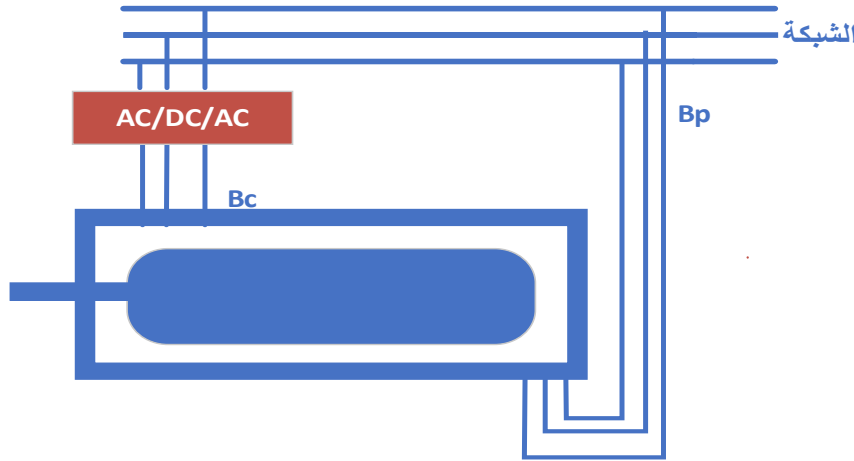


الشكل (3.1): مبدأ الآلة SF-CDFIM

3.1.1 الآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية دون مسفرات بممانعة متغيرة BDFRM

تم تقديم النسخة البديلة (BDFRM) بواسطة العالم Broadway [7] وتم تطويرها في وقت لاحق من قبل العالم [9][8] (LongyaXu). وتم إجراء التحليل النظري لاستراتيجيات التحكم المختلفة بواسطة Betz et Jovanovic [10][11][12].

الجزء الثابت لهذه الآلة هو ساكن مزدوج مطابق للآلة (BDFIM) التي هي موضوع دراستنا، يتم استخدام الدوار ذو ممانعة متغيرة بدلاً من الدوار القفصي. يتميز الجزء الدوار بقدرة عالية على إنتاج قوة الجذب المغناطيسي وقابل للتصنيع بسهولة وتكلفته معقولة، إذن تكون كفاءة هذه الآلة مرضية [13]. تم اقتراح حل بديل للـ (CDFIM) هو الـ (BDFIM)، حيث تم جمع بين آلتين لا تزامنيتين في آلة واحدة ويكون الثابت فيهما مزدوج. تم اقتراحها لأول مرة من قبل العالم Hint سنة 1907 [14]. في البداية باستخدام دوار قفص سنجاب خاص ثم هيكلة دوار قفصي يتميز بالكثير من البساطة، ثم تطورت مرة أخرى من قبل Broadway في 1970 باستبدال الدوار بدوار الملفوف [15].

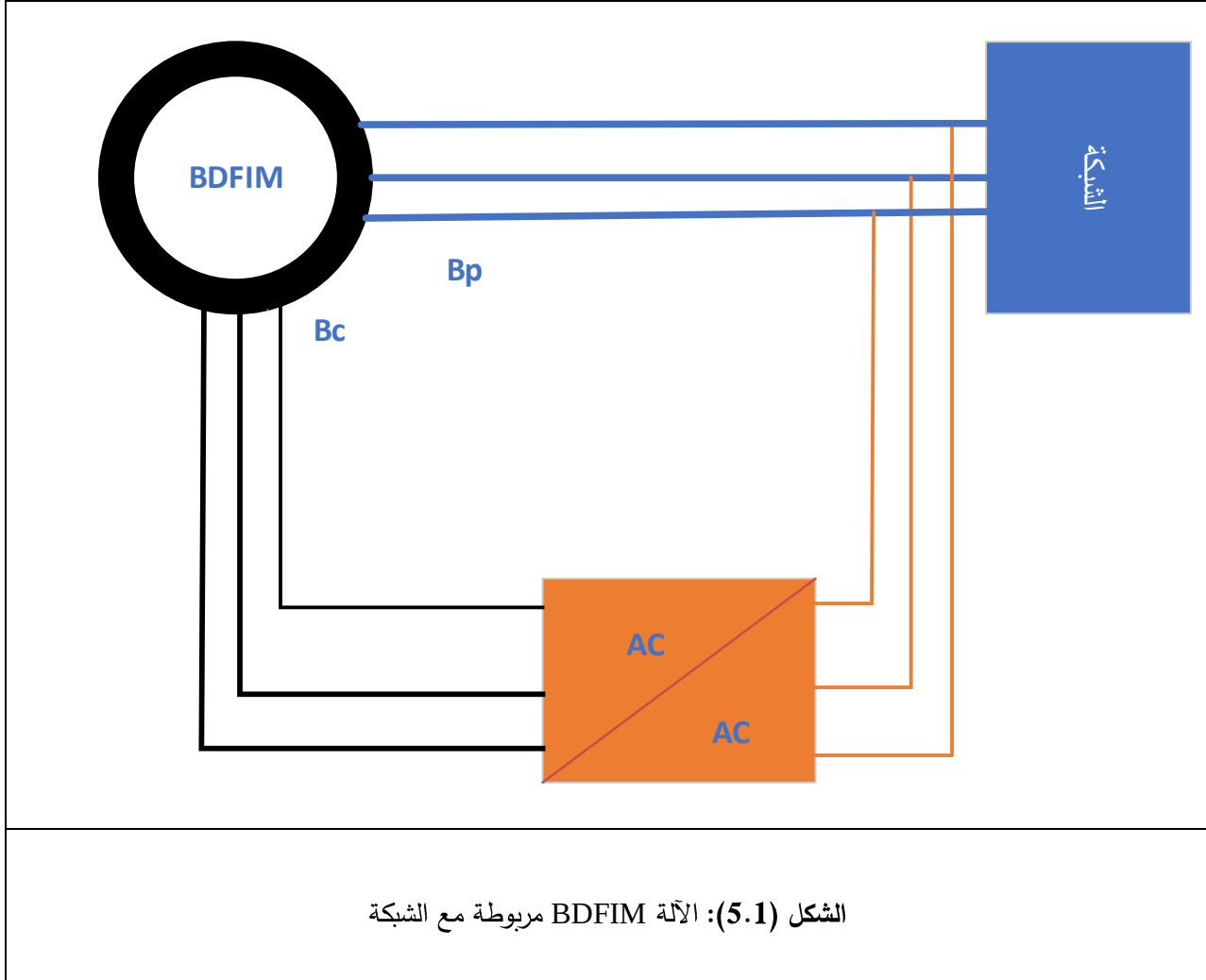


الشكل (4.1): الآلة BDFIM

2.1 الآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية دون مسفرات

الآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية دون مسفرات Brushless Doubly Fed Induction Machine واختصارها (BDFIM) وهي عبارة عن آلة تيار متناوب يمكن أن تعمل كمولدة أو محرك [16]. المفهوم الأساسي للآلة (BDFIM) هو دمج آلتين تحريضيتين كل منهما تنتج حقل كهرومغناطيسي، كل من هذين الحقلين ناتج عن

ساكن بعدد أقطاب مغناطيسية مختلف عن الآخر. ويمكن ربطها مع الشبكة بواسطة محول الكتروني كما في الشكل (5.1).



3.1 تركيب ومبدأ عمل الآلة BDFIM

هي آلة لا متزامنة تتكون من ساكن مزدوج أي يحتوي على ساكنين بعدد أقطاب مختلفة ودوار ليس له اتصال خارجي في [16].

1.3.1 الثابت

يتكون من ساكنين ثلاثي الطور هما: ساكن الاستطاعة (Bp) وساككن التحكم (Bc) .

• ساكن الاستطاعة (Bp)

يربط هذا الساكن مباشرة بالشبكة وبالتالي يعمل على تردد الشبكة [17]، تتدفق عبره معظم الاستطاعة بين الآلة والشبكة وله عدد أزواج أقطاب P_p .

• ساكن التحكم (Bc)

موصول مع الشبكة مباشرة أو عن طريق محول إلكتروني ثابت صغير الحجم، يتدفق عبر هذا الساكن حوالي 30% من الاستطاعة الكلية للآلة، وله عدد أزواج أقطاب P_c . من خلال هذا الساكن نستطيع التحكم في السرعة فوق وتحت التزامن، كما يمكننا التحكم في قيمة التيار المتولد في ملف الاستطاعة [17].

لتنجب حدوث تداخل مباشر بين الحقول المتولدة في الساكنين يجب ان يكون هذين الآخرين معزولين عن بعضهما البعض كهربائيا ولكل واحد منهما عدد أقطاب مختلف عن الآخر [16].

يتم تغذية الملفين بترددتين مختلفتين [17] [18] [19].

يجب أن يكون عدد أقطاب ملف الاستطاعة أصغر من عدد أقطاب ملف التحكم وهذا لضمان سريان أمثل للاستطاعة الكهربائية من الآلة الى الشبكة.

2.3.1 الدوار

دوار الآلة (BDFIM) من نوع قفص سنجاب ولكن له تصميم خاص به يدعى الدوار ذو الحلقات العشية المتداخلة الشكل (6.1) وهو مجموعة من الدارات موزعة فراغيا بشكل منتظم كل مجموعة تسمى عش وكل عش يحتوي على عدد معين من الحلقات N مقصورة مع بعضها البعض بواسطة حلقة معدنية ومجموع الأعشاش في الدوار P_r مساوي لمجموع أزواج أقطاب ملفي الساكن $P_r = P_p + P_c$ [16].

يجب أن يكون الفرق في عدد أزواج الأقطاب المغناطيسية أكبر من الواحد وهذا للتقليل من القوة الكهرومغناطيسية في الدوار [16].

يمكن استخدام الـ (BDFIM) كمولدة بعدد أزواج أقطاب P_c أو P_p يتحقق هذا من خلال توصيل ساكن التحكم (Bc) أو ساكن الاستطاعة (Bp) بمصدر التغذية وترك اللفة الأخرى مفتوحة. إذا تم التوصيل بهذه الطريقة فإن خصائص أداء الآلة يكون مشابه للآلة التقليدية.

الاهتمام الرئيسي في الـ (BDFIM) هو التشغيل في الوضع المتزامن والسمة الأساسية لهذا التشغيل هو الاقتران الكهرومغناطيسي بين لفي الساكن.

بما أن ملفات الجزء الساكن موزعة بشكل جيبي بعدد أزواج أقطاب مختلفة، إذن لا يوجد اقتران مباشر بينهما. وهذا الأمر مقصود لأنه يمنع التيارات من التدفق بين الملفات.



الشكل (6.1): دوار الآلة BDFIM

4.1 أنماط تشغيل الآلة BDFIM

تتيح لنا الآلة (BDFIM) أوضاع مختلفة للتشغيل، سواء في الوضع المتزامن أو الوضع الغير متزامن [20]. يعد التشغيل المتزامن أكثر اثاره للاهتمام في تطبيقات توليد الطاقة ذات السرعات المتغيرة، ويعتمد ذلك على طريقة تغذية ساكن التحكم بينما ساكن الاستطاعة يكون مربوط مباشرة مع الشبكة. يمكن تلخيص مختلف أنماط التشغيل الممكنة في الجدول (1.1).

الجدول (1.1): أنماط التشغيل

الشكل	الوضع	ساكن الاستطاعة	ساكن التحكم
(7.1)	غير متزامن	تردد الشبكة	دائرة مفتوحة
(8.1)	غير متزامن	تردد الشبكة	دائرة قصيرة
(9.1)	غير متزامن	تردد الشبكة	تردد متغير
(9.1)	متزامن	تردد الشبكة	تردد متغير

1.4.1 الوضع الغير متزامن

الحالة 01: BC دائرة مفتوحة

ملف التحكم (BC) يكون عبارة عن دائرة مفتوحة، بينما الملف الآخر مربوط مع التغذية. يسمى هذا النمط بنمط التغذية الوحيدة كون التغذية هنا تكون من ملف واحد فقط في الساكن.

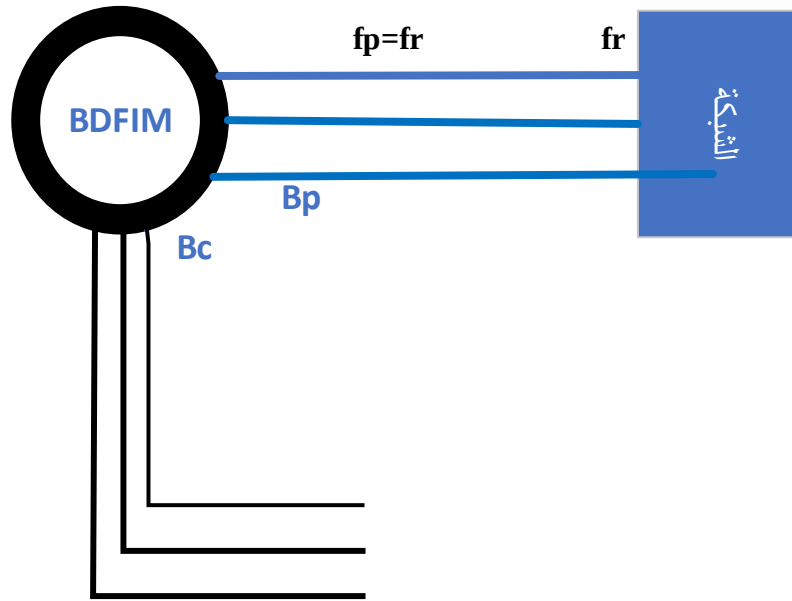
ملف الاستطاعة (Bp) ينتج مجالا مغناطيسيا دوار سرعته تعطى بالعلاقة التالية:

$$W_p = \frac{2\pi f_p}{P_p} \quad (1.1)$$

مع: P_p هو عدد أزواج أقطاب ساكن الاستطاعة

f_p هو تواتر ساكن الاستطاعة (تواتر الشبكة)

في هذه الحالة سرعة الدواران تكون مختلفة عن السرعة الطبيعية. إن التيار المستحث بواسطة ساكن الاستطاعة في الجزء المتحرك يخلق جهدا في ساكن التحكم ومع ذلك فإن هذا الأخير عبارة عن دائرة مفتوحة لا يمر التيار أي أن الآلة تعمل كمحرك غير متزامن (تحريضي) مع مصدر طاقة واحد [21].



الشكل (7.1): ربط الآلة في حالة وضع التشغيل اللامتزامن (ساكن التحكم دائرة مفتوحة)

الحالة 02: دائرة قصيرة BC

داره التحكم عبارة عن دائرة قصيرة، والمصدر الوحيد للجهد المتولد في ساكن التحكم من خلال التداخل المتبادل بين ساكن الاستطاعة Bp وساككن التحكم BC والذي تردده يعطى بالعلاقة.

$$\omega_c = -(\omega_p - (P_p + P_c)\omega_r) \quad (2.1)$$

أي أن الآلة تعمل كآلة غير متزامنة بعدد أزواج أقطاب $(P_p + P_c)$. تعتمد سرعة الدواران في هذه الحالة على تردد ساكن التحكم ويختلف هذا الأخير حسب الحمل.

الحالة 03: وضعية التغذية المزدوجة

ينشأ ملفي ساكن الاستطاعة (Bp) وساككن التحكم (Bc) حقلين متمايزين يدوران بسرعتين مختلفتين

$$w_c = \frac{2\pi f_c}{P_c} \quad \text{و} \quad w_p = \frac{2\pi f_p}{P_p}$$

حيث:

w_c : سرعة دوران الحقل الناتج في ملف التحكم.

w_p : سرعة دوران الحقل الناتج في ملف الاستطاعة.

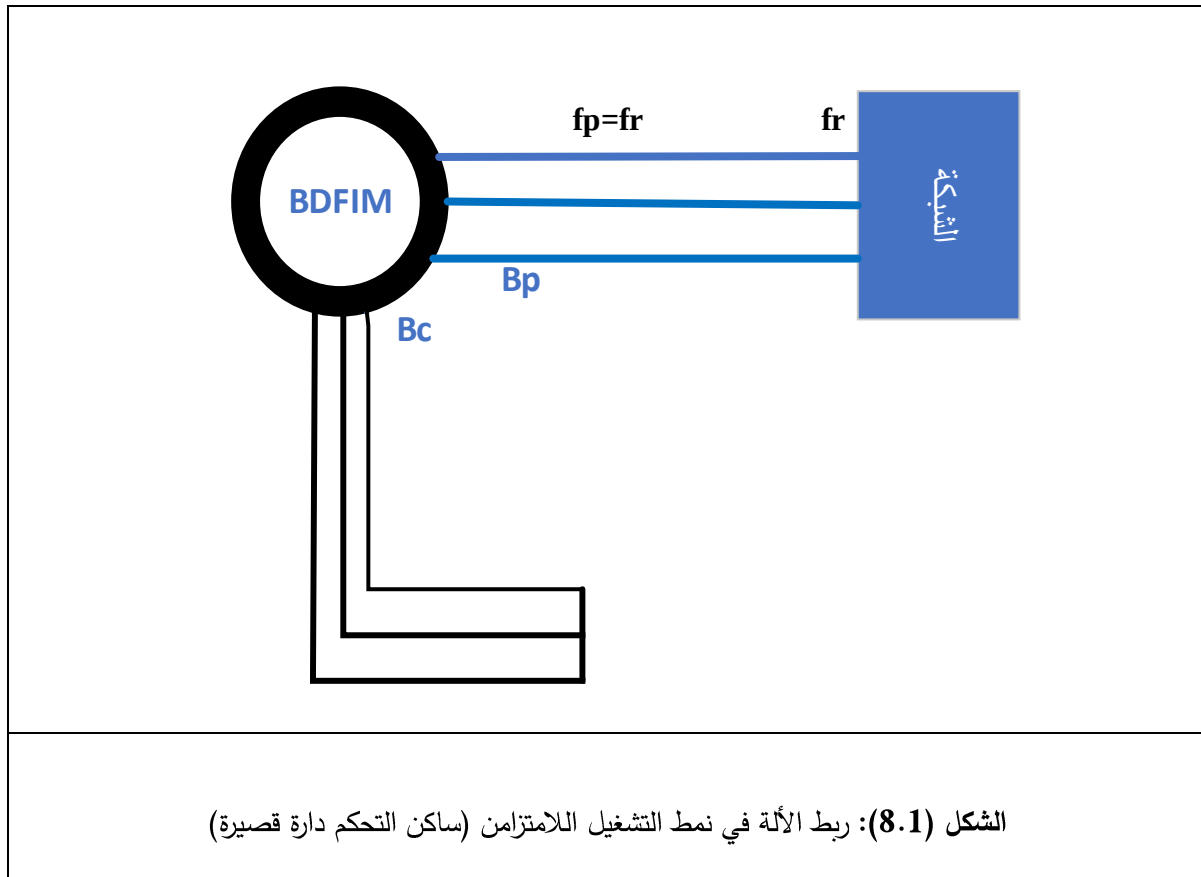
f_p : تردد ساكن الاستطاعة.

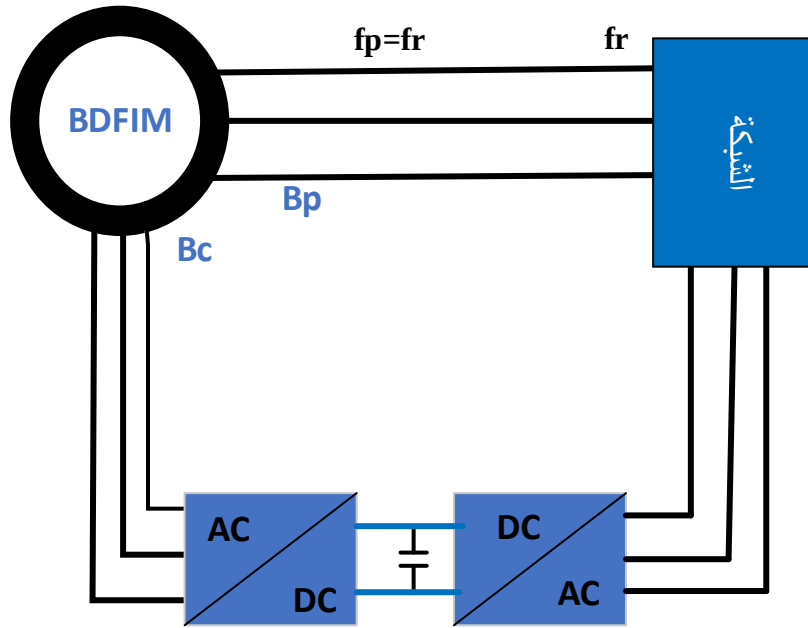
f_c : تردد ساكن التحكم.

P_p : عدد أزواج أقطاب ساكن الاستطاعة.

P_c : عدد أزواج أقطاب ساكن التحكم.

كل حقل يولد نظاما من القوى المحركة في الدوار بترددات f_{rc} و f_{rp} على التوالي، ويتم تدفق تيارات الدوار بتردد f_{rc} و f_{rp} في النظامين معا. تولد هذه التيارات بدورها نظاما من القوى الكهرو محركة في الساكن بتردد مختلف عن تردد التغذية الرئيسية مما يؤدي الى توليد تيارات تحريضية متعددة التردد. وضع التشغيل هذا يعتبر غير كافي في حالة النظام الدائم يكون مقبولا فقط في الوضع العابر (المزامنة العابرة).





الشكل (9.1): ربط الآلة في وضعية التشغيل المزدوجة

جميع الحالات التي ذكرناها سالفاً هي أوضاع التشغيل اللاتزامن حيث تكون السرعة الآلة مرتبطة بالحمل، ومع ذلك في الوضع مزدوج التغذية فإن الآلة (BDFIM) لها وضع متزامن خاص يسمح بتصميمها بسهولة [21].

2.4.1 الوضع المتزامن

نمط التشغيل التزامني هو النمط الذي يميز الآلة (BDFIM). حيث تم تصميمها لتعمل عنده وفيه يتم تغذية ملفي الثابت معاً [16]. تعمل الآلة (BDFIM) في الوضع المتزامن عندما يتم إنشاء الحقول بواسطة ملفي الجزء الساكن إلى الدوار الذي يدور بنفس سرعته، في ظل هذه الظروف التيارات الدوارة المستحثة لها نفس التردد $f_{rp} = f_{rc}$ في هذه الحالة التياران الدوران ينشآن حقلاً واحداً في الدوار [22].

5.1 استراتيجيات التحكم في الآلة BDFIM

بناءً على إنشاء النموذج الرياضي الأساسي، فإنه إضافة إلى طرق التحكم القديمة تم البحث عن استراتيجيات وطرق السيطرة والتحكم في (BDFIM) حيث بدأت سنوات 1990 [23]. تتضمن طرق التحكم النموذجية بشكل

أساسي على التحكم السلمي CS، التحكم الشعاعي FOC، التحكم في عزم الدوران المباشر DTC، التحكم المباشر في الاستطاعة DPC [24].

1.5.1 التحكم السلمي

تحتاج استراتيجية التحكم السلمي الى ضبط سعة وتردد معاملات التحكم فقط. وبالتالي فإن متطلبات وحدة التحكم ليست عالية ومع ذلك يأخذ الوضع الانتقالي بعين الاعتبار، ويتم تجاهل العديد من العوامل وبالتالي الأداء الديناميكي للتحكم العددي ليس جيد والنتائج تكون مختلفة عن القيمة الفعلية [24].

في المرجع [25] تم تقديم استراتيجية التحكم السلمي في الحلقة المفتوحة. للتحكم في سرعة الـ (BDFIM) يتم استخدام خوارزمية لحساب تردد جهد ساكن التحكم بناءا على قيمة السرعة المعطاة، ثم يتم ضبط جهد ساكن التحكم، يشير المرجع [26] الى تحليل استقرار الـ (BDFIM) تحت التحكم السلمي في التيار في الحلقة المغلقة.

2.5.1 التحكم الشعاعي للـ BDFIM

مقارنة بالتحكم السلمي (CS) فإن التحكم الشعاعي (FOC) واحد من أكثر تقنيات التحكم في الأداء. يعتمد تصميم خوارزمية التحكم الشعاعي على النموذج الرياضي للآلة، واعتمادا على هذا الأخير ينقسم التحكم الشعاعي الى نوعين إحدهما مبني على نموذج المرجع المزدوج المتزامن لـ Zhou [27] والآخر مبني على أساس النموذج المرجعي الموحد لـ Poza [28]. في المرجع [29] تم اقتراح نظام تحكم شعاعي عام للـ (BFDIM) بدوار بحلقات متداخلة.

3.5.1 التحكم المباشر في عزم الدوران للـ BDFIM

يقوم التحكم المباشر في العزم (DTC) بحساب قيمة التدفق والعزم مباشرة على احداثيات الجزء الساكن وينفذ الإخراج بتقنية (PWM) لمحول الطاقة عن طريق متابعة التغيرات في التدفق والعزم. في المرجع [30] تم اقتراح طريقة تتبع الطاقة القصوى (MPPT) عن طريق التحكم في عزم الدوران وعامل الطاقة لمولد طاقة الرياح مزدوج التغذية دون مسفرات لتنظيم الطاقة النشطة، بناءا على (DTC) تم تصميم مراقب السرعة من خلال تقدير سرعة دوران التدفق المتزامن للدوار وسرعة الانزلاق. في المرجع [31] تم تطوير نظام التحكم المباشر في العزم للـ (BDFIM) بمستشعر سرعة من خلال تطبيق قيمة مراقب التدفق للجزء الثابت الى خوارزمية التحكم المباشر في عزم الدوران.

4.5.1 التحكم المباشر في الاستطاعة لـ BDFIM

تم اقتراح التحكم المباشر في الاستطاعة (DPC) بناءً على فكرة (DTC) [24]، تم دراسة الـ (DPC) للـ (BDFIM) من طرف Jin. تم اقتراح طريقة (DPC) لتنفيذ متابعة مراقبة الطاقة للـ (BDFIM) في المرجع [32].

6.1 مقارنة بين مختلف استراتيجيات التحكم

الجدول أدناه يوضح مقارنة بين مختلف طرق التحكم في الآلة (BDFIM) [24].

الجدول (2.1): مقارنة بين استراتيجيات التحكم

طرق التحكم	إيجابيات	سلبيات
التحكم السلمي CS	الخوارزمية بسيطة وسهلة التنفيذ	الأداء الديناميكي ضعيف
التحكم الشعاعي FOC	الأداء الديناميكي جيد	حساب كبير سهولة التأثر بالإعدادات
التحكم المباشر في العزم DTC	تنفيذ بسيط استجابة سريعة	عزم الدوران عالي مشاكل تردد التبديل المتغير
التحكم المباشر في الاستطاعة DPC	تنفيذ بسيط حساب بسيط استجابة سريعة	ارتفاع تكلفة النظام مشاكل تردد التبديل المتغير

7.1 التطبيقات العملية للـ BDFIM

- ✓ تستخدم في الأنظمة ذات سرعات متغيرة قابلة للضبط والتعديل مثل المضخات ويعود ذلك الى حاجتها لعزم اقلاع منخفض [16].
- ✓ تستخدم في أنظمة توليد الطاقة الكهربائية من طاقة الرياح.
- ✓ كما ذكرنا سابقا الآلة تعمل دون مسفرات وحلقات انزلاق، مما يضمن عملها على سرعات متغيرة وبمعامل استطاعة مرتفع.

8.1 مميزات وعيوب الـ BDFIM

❖ المميزات

- ✓ التخلص من المسفرات وحلقات الانزلاق، وبالتالي نقص الحاجة للصيانة الدورية وبمعنى اخر زيادة الموثوقية.
- ✓ آلة قوية ولها القدرة على الحمل الزائد.
- ✓ انخفاض تكلفة بناء النظام بسبب انخفاض تكلفة المحول.
- ✓ العمل عند سرعات متغيرة.
- ✓ إمكانية تشغيل الآلة كآلة تحريضية تقليدية ويتم ذلك باستخدام ساكن الاستطاعة فقط في حال فشل المحول الالكتروني.
- ✓ سهولة وإمكانية تثبيتها في البيئات القاسية.
- ✓ إمكانية التحكم بمعامل الاستطاعة والاستطاعة الفعلية للـ (BDFIM) بشكل مستقل عن الاستطاعة الرد فعلية وهذا من خلال ساكن التحكم [18] [17].

❖ العيوب

- ✓ صعوبة وتعقيد تصميم الدوار.
- ✓ ارتفاع تكاليف الدوار.
- ✓ ازدياد حجم الآلة مقارنة بالآلة التحريضية التقليدية [19].

خاتمة

في هذا الفصل قمنا بدراسة الآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية دون مسفرات من عدة جوانب. يحقق استخدام هذه الآلة موثوقية واستمرارية التغذية الكهربائية بسبب التخلص من المسفرات. وبالتالي التخلص من الضياعات إذا يمكن اعتبارها أكثر اقتصادية من الآلات التقليدية.

الفصل الثاني

نمذجة ومحاكاة الآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية دون مسفرات

لقد ذكرنا في الفصل السابق الآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية دون مسفرات، التي تصدرت اهتماما كبيرا في السنوات الأخيرة ولها جملة من المميزات. وفي هذا الفصل سنتطرق الى نمذجة الآلة في النظامين الدائم والانتقالي في المعلم الثلاثي والثنائي وكذلك الدارة المكافئة، وفي الأخير نقوم بالمحاكاة عند التغذية بمصدر جهد جيبي باستخدام برنامج MATLAB وتحليل هذه النتائج.

1.2 نمط التشغيل المتزامن

كما ذكرنا في الفصل السابق الآلة (BDFIM) صممت خصيصا للعمل في هذا النظام. مبدأ عمل هذه الآلة يتركز على تداخل الحقول المغناطيسية الدوارة التي تنتج في لفتي الساكن، عندما يتم تشغيل الآلة بواسطة توترات ثلاثية الطور متوازنة تنتج لفتي الساكن حقل مغناطيسي دوار، وتعطى العبارة الرياضية للحقول المغناطيسية الدوارة الناتجة من طرف لفتي ساكن التحكم (Bc) وساكن الاستطاعة (Bp) بالعلاقات التالية [33]:

$$b_p(\theta, t) = B_p \cos(\omega_p t - p_p \theta + \phi_p) \quad (1.2)$$

$$b_c(\theta, t) = B_c \cos(\omega_c t - p_c \theta + \phi_c) \quad (2.2)$$

b_p و b_c هي التدفقات الناتجة عن ساكن الاستطاعة (Bp) و ساكن التحكم (Bc) على التوالي مع أزواج أقطاب P_p و P_c .

ترددات التغذية الزاوية للساكن تعرف بالرموز (ω_p) ، (ω_c) و (ϕ_c, ϕ_p) تمثل زاوية فرق الصفحة للتدفق المغناطيسي b_p و b_c على التوالي.

المعادلتين (1.2) و (2.2) يمكن التعبير عنهما في المرجع المنسوب الدوار الذي يدور بسرعة (ω_m) حيث :

$$\theta = (\theta + \omega_m t)$$

$$b_p(\theta, t) = B_p \cos((\omega_p - p_p \omega_m)t + p_p \theta + \phi) \quad (3.2)$$

$$b_c(\theta, t) = B_c \cos((\omega_c + p_c \omega_m)t + p_c \theta + \phi) \quad (4.2)$$

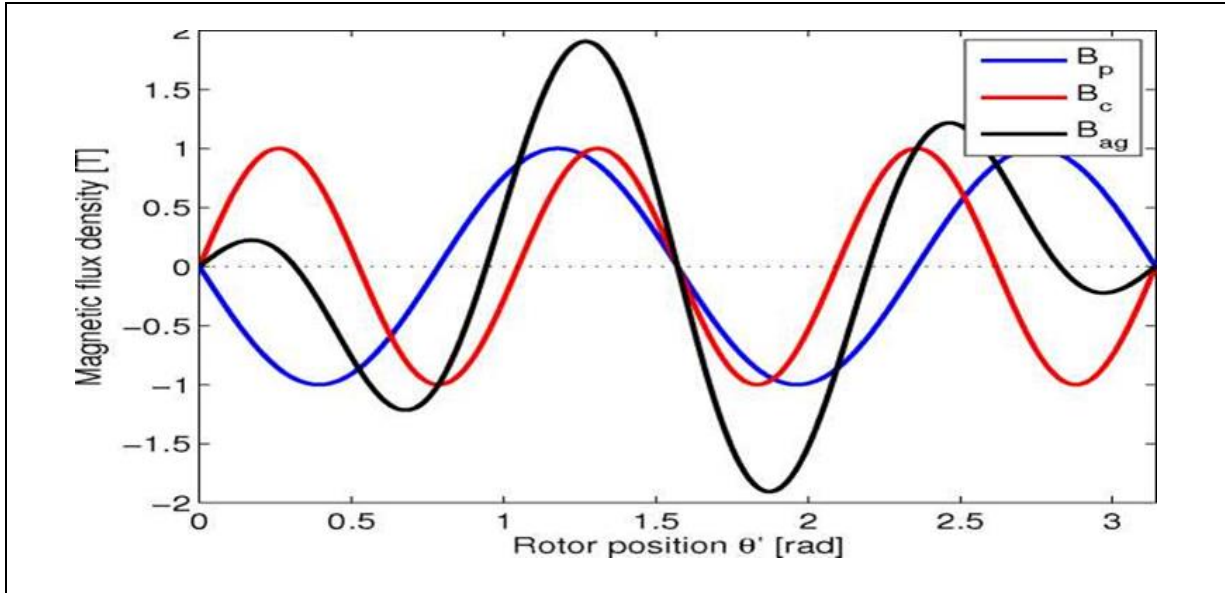
مثال على المجال المغناطيسي في الفجوة (Bag) والذي ينتج عن تداخل المجالات المغناطيسية b_p و b_c الذي يمكن تمثيله في الرسم الموضح في الشكل (1.2)، حيث نلاحظ من خلال الشكل أن الحد الأقصى للحث الناتج يتزامن مع تقاطع حثي ساكني الاستطاعة والتحكم [24].

الشرط الأساسي لعمل الـ (BDFIM) بشكل متزامن هو أن تترابط لفات الجزء الساكن مغناطيسيا من خلال الجزء المتحرك. يمكن تحقيق ذلك من خلال ضبط التردد المطبق على الملفات في الجزء الساكن. يمكن القيام بذلك من خلال استخدام محول إلكتروني، لكي تعمل الآلة بشكل متزامن يجب أن تكون سرعة الدوران للملفات وسرعة دوران الحقل المغناطيسي لهما نفس التردد. عندما يحدث هذا يكون لدينا تيارات الدوار المستحثة من المجالين المغناطيسيين لها نفس التردد $(\omega_{rp} = \omega_{rc})$.

$$\omega_{rc} = (\omega_c - p_c \omega_m) \quad \text{و} \quad \omega_{rp} = (\omega_p - p_p \omega_m) \quad \text{أي}$$

نعلم أن: $\cos(A) = \cos(-A)$ ومنه نحصل على العبارات التالية:

$$(\omega_p - p_p \omega_m) = \pm (\omega_c + p_c \omega_m) \quad (5.2)$$



الشكل (1.2): الحقول المغناطيسية للتوفيقتين الرئيسيتين بدلالة وضع الدوار [24]

$$P_p=4, P_c=6, f_p=50\text{Hz}, f_c=10\text{Hz}$$

تعطى السرعة الميكانيكية للدوار في وضع التشغيل المتزامن بـ:

$$\omega_m = \frac{\omega_p \pm \omega_c}{p_p + p_c} \quad (6.2)$$

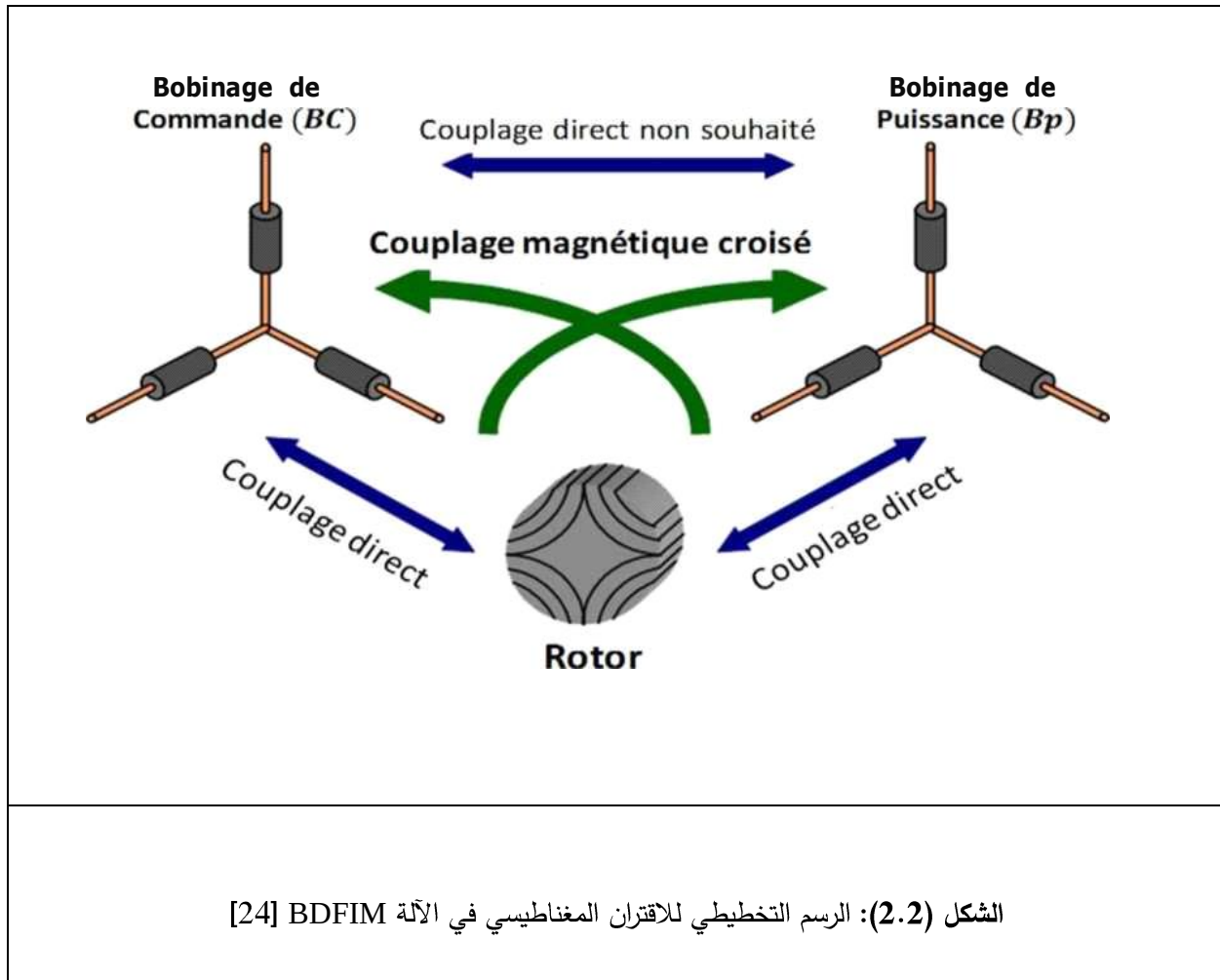
العلاقة (6.2) تعطي سرعة الدوار الميكانيكية حيث يكون الاتصال بين لفات الساكن عبر الدوار فعالا [34] يمكن ملاحظة أن سرعة الدوار الميكانيكية لا تعتمد على عزم الحمل في حالة التشغيل المتزامن بل تعتمد على

ترددات تغذية الساكن وعدد أزواج الأقطاب فيه. نعلم أن ساكن الاستطاعة B_p متصل مباشرة بالشبكة التي لها تردد ثابت، ويتم تعديل سرعة الدوار الميكانيكية عن طريق تغيير تردد تغذية B_c وفي حالة تغذية ساكن التحكم بتوتر مستمر، العلاقة (6.2) تصبح كالتالي:

$$\omega_n = \frac{\omega_p}{p_p + p_c} \quad (7.2)$$

هذا الشرط عندما يكون تردد ملف التحكم ($\omega_c = 0$) وتدعى السرعة الطبيعية [34].

العلاقة (6.2) تبين لنا الشرط الأساسي اللازم للحصول على تشغيل متزامن للـ (BDFIM). في هذه الحالة تشبه الآلة المتزامنة [35].

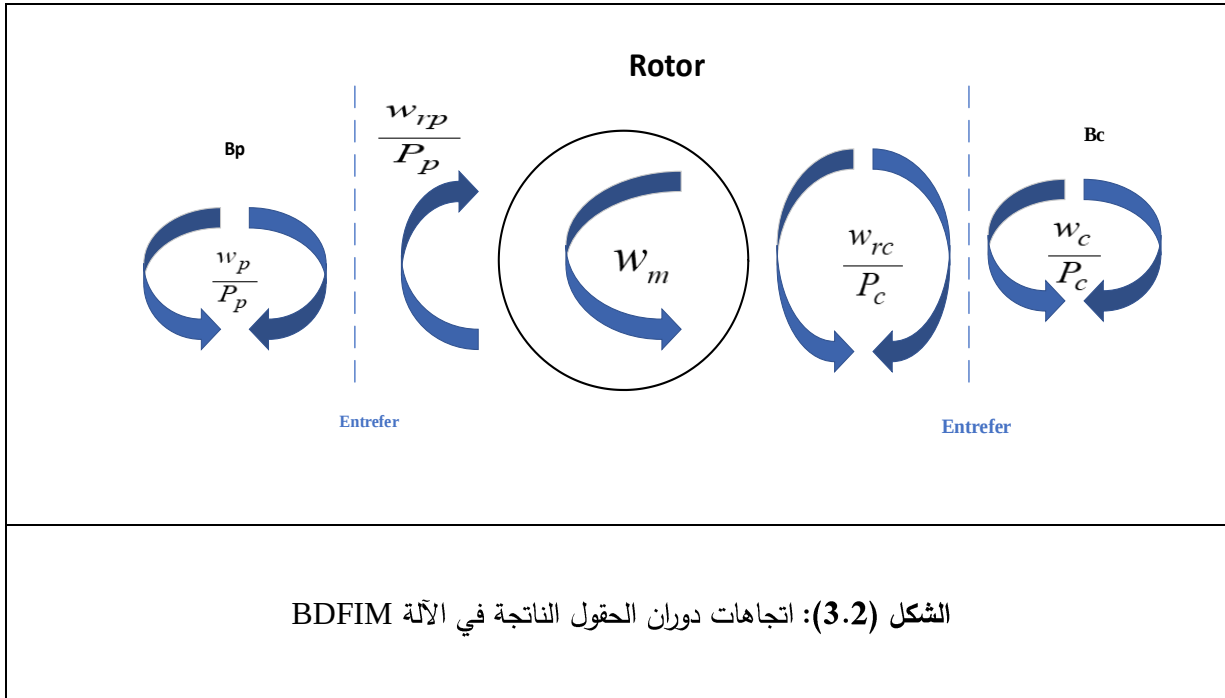


من المهم أن نلاحظ أن المعادلة (6.2) تشير إلى أن اختيار أعداد أزواج الأقطاب يتم عشوائياً، لكن في الواقع ليس كذلك. يتم اختيار أزواج الأقطاب B_p و B_c بحيث لا يكون هناك اقتران مباشر بين التوافقات الأساسية

للفتين [37]، وكذلك نوع لفات الساكن وبنية الدوار سيأثر على اختيار عدد أزواج أقطاب الساكن [15]. الشكل (2.2) يوضح اقتران المجال المغناطيسي في الآلة BDFIM أثناء التشغيل المتزامن.

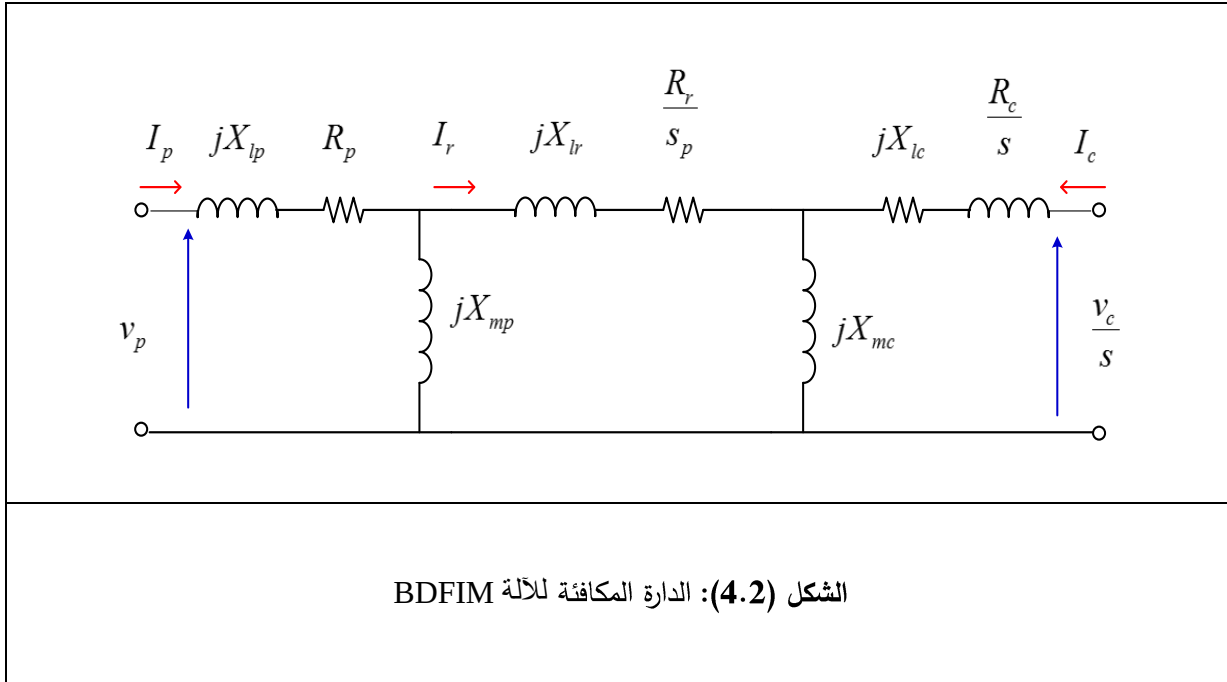
من أجل تردد سالب في المعادلة (6.2) المجال المغناطيسي في ساكن التحكم Bc يدور في اتجاه معاكس للمجال المغناطيسي في ساكن الاستطاعة Bp يسمى وضع التشغيل هذا بوضع التشغيل تحت التزامن. عندما يكون تردد ساكن التحكم (Bc) موجب فإن الحقل المغناطيسي الأساسي يدور في نفس اتجاه دوران الحقل المغناطيسي الأساسي لـ Bp يطلق على هذا الوضع بوضع التشغيل فوق التزامن.

يتم توضيح اتجاهات دوران الحقل المغناطيسي لساكني الاستطاعة (Bp) والتحكم (Bc) بالإضافة الى اتجاه دوران الدوار في الشكل (3.2) [38]. أثناء التشغيل تحت التزامن يكون المجال الأساسي لساكن التحكم في اتجاه معاكس لدوران المجال الأساسي لساكن الاستطاعة. أما وضع فوق التزامن تدور المجالات الأساسية في نفس الاتجاه.



1.1.2 نمذجة الـ BDFIM في النظام الدائم

سنقوم فيمايلي بإنشاء نموذج للـ (BDFIM) عندما يتم تغذية الآلة بنظام جيبي متوازن. نموذج الدارة المكافئة يمكن من خلالها وصف أداء الـ (BDFIM) بسهولة في النظام الدائم [39]. كما يوفر وسيلة بسيطة لحساب معاملات الآلة مثل الكفاءة، معامل الاستطاعة وقياسات أخرى بدقة مقبولة.



الشكل المكافئ يعد أمراً مهماً لفهم عمل الآلة، ويمكن الاستنتاج من الشكل أعلاه أن الشكل المكافئ للـ (BDFIM) يشبه إلى حد كبير الآلة اللاتزامنية ذات تغذية مزدوجة، الاختلاف الوحيد هو الحلقة الإضافية التي تمثل التشابك المغناطيسي بين اللفات (B_p – rotor- B_c) [40]. ولكنها لا تؤثر على الوظائف المتطابقة مع هذا الشكل بدلاً من تغذية لفات الدوار، سنقوم بتغذية لفات ساكن التحكم [40].

2.1.2 النموذج المبسط للـ BDFIM

توجد سرعتي انزلاق مختلفتي

$$S_p = \frac{\omega_p - P_p \omega_r}{\omega_p} = \frac{\omega_{rp}}{\omega_p} \quad (8.2)$$

$$S_c = \frac{\omega_c - P_c \omega_r}{\omega_c} = \frac{\omega_{rc}}{\omega_c} \quad (9.2)$$

لدينا انزلاق الـ (BDFIM):

$$S = \frac{S_p}{S_c} = -\frac{\omega_c}{\omega_p} = \frac{\omega_p - (P_p + P_c)\omega_r}{\omega_p} \quad (10.2)$$

الانزلاق S يمكن اعتباره انزلاق الآلة ثنائية التغذية التقليدية بعدد أزواج أقطاب (P_p+P_c). تكون الدارة المكافئة في النظام الدائم للـ BDFIM في الوضع المتزامن منسوبة إلى ملف ساكن الاستطاعة B_p [41].

من خلال الدارة المكافئة الاستطاعة الميكانيكية لـ BDFIM تعطى بـ

$$P_m = P_{Bp} + P_{Bc} - P_{cu} = 3 \left[\left(\frac{1-s_p}{s_p} \right) R_r I_r^2 + \left(\frac{1-s}{s} \right) R_c I_c^2 - \left(\frac{1-s}{s} \right) \text{Re}(V_c I_c^*) \right] \quad (11.2)$$

حيث:

P_m : الاستطاعة الميكانيكية.

P_{Bp} : استطاعة ملف ساكن الاستطاعة.

P_{Bc} : استطاعة ملف ساكن التحكم.

V_c : توتر الطور لساكن التحكم.

I_c : تيار الطور لساكن التحكم.

الطرفين الآخرين من المعادلة (11.2) مشابهيين للاستطاعة الميكانيكية للآلة ثنائية التغذية (DFIM) بعدد أزواج أقطاب $(P_p + P_c)$. الطرف الأول مساوي لعزم الآلة الحثية بعدد أزواج أقطاب P_p .

سرعة الدوار BDFIM تتغير في المجال $\pm 30\%$ من السرعة الطبيعية (w_n) ، عند العمل كمولدة في السرعات المتغيرة [42]. وكذلك يكون كل من الانزلاقين s_p و s_c في الحدود التالية:

$$\frac{P_c - 0.3P_p}{P_p + P_c} < s_p < \frac{P_c + 0.3P_p}{P_p + P_c} \quad (12.2)$$

$$s_c > \frac{P_c - 0.3P_p}{0.3(P_p + P_c)} \quad s_c < -\frac{P_c - 0.3P_p}{0.3(P_p + P_c)} \quad (13.2)$$

في معظم آلات الـ BDFIM تكون $P_c > P_p$ [43].

مثال ذلك:

النموذج الأول BDFIM D180. تكون الانزلاقي s_p و s_c في الحدود التالية:

$$0.57 < s_p < 0.77 \quad (14.2)$$

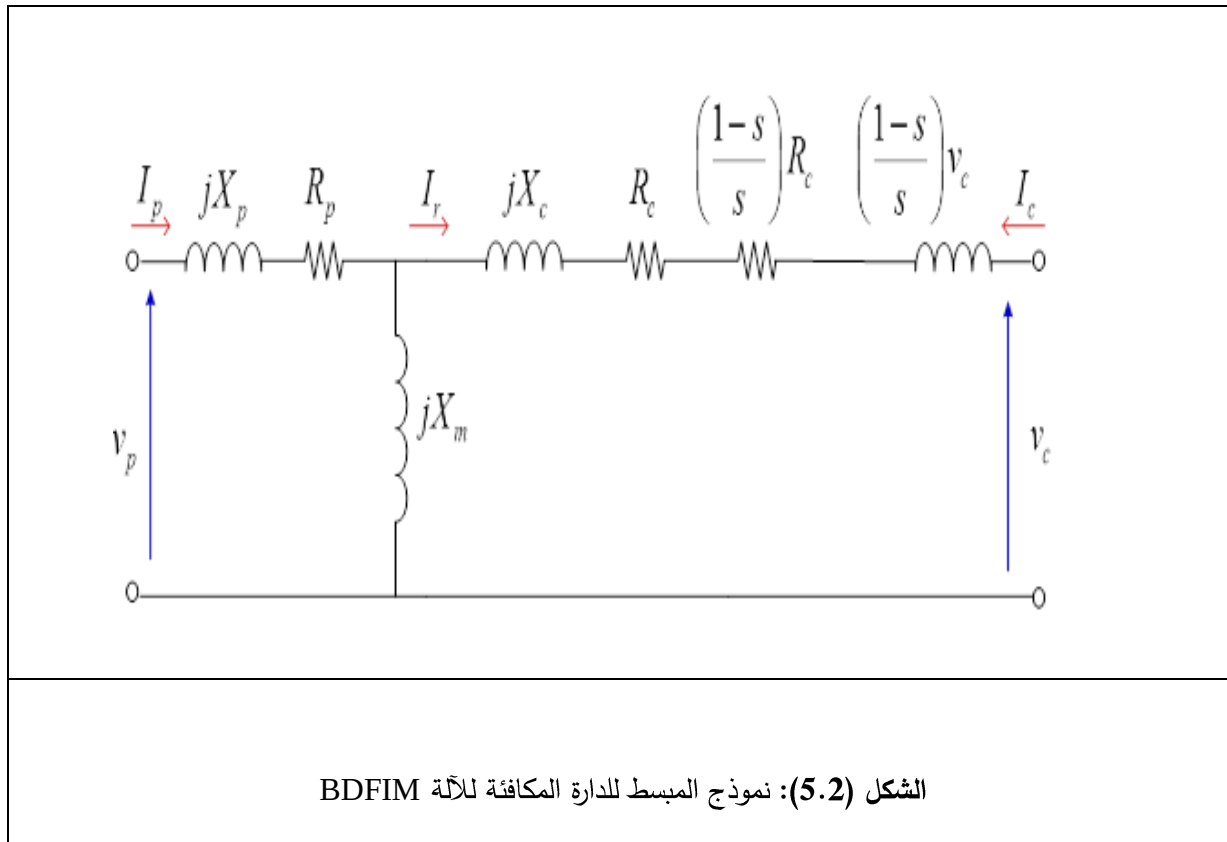
$$s_c > 1.89 \quad \text{أو} \quad s_c < -1.89 \quad (2.15)$$

الجدول (1.2): نسب مقاومة الدوار والمفاعلة في الـ BDFIM مختلفة

المرجع	[46]	[52]	[53]
R_r / X_{lr}	0.011	0.009	0.052

الجدول (1.2) يبين النسبة (R_r / X_{lr}) لآلات مختلفة ذكرت في عدة مراجع. حيث نلاحظ المقاومة أصغر بكثير من المفاعلة.

المقاومة (R_r) في الدارة المكافئة في الشكل (4.2) يمكن إهمالها. أهمية هذا التبسيط هو أن الحساب لن يحتاج إلى قياس تيار الدوار، الذي لا يمكن الوصول إليه مباشرة [44]. ومع ذلك تمت دراسة تأثير هذا التبسيط على نتائج المحاكاة في المرجع [45]، حيث تم الحصول على الدارة المكافئة المبسطة للـ (BDFIM) في وضع التشغيل المتزامن كما هو مبين في الشكل (5.2). قمنا بتمثيل الدارة في الشكل (4.2) من النموذج π إلى النموذج T المكافئ الممثلة في الشكل (5.2).



المفاعلات المبينة في الشكل (5.2) تعطى عباراتها بالعلاقات التالية:

$$\begin{aligned}
 X_p &= X_{pp} + \frac{X_{mp} X_{pr}}{X_{mp} + X_{mc} + X_{pr}} \\
 X_c &= X_{pc} + \frac{X_{mc} X_{pr}}{X_{mp} + X_{mc} + X_{pr}} \\
 X_r &= \frac{X_{mp} X_{mc}}{X_{mp} + X_{mc} + X_{pr}}
 \end{aligned}
 \tag{16.2}$$

نتيجة لذلك تصبح الدارة المكافئة للـ (BDFIM) تشبه الدارة المكافئة للآلة المتزامنة ثنائية التغذية. يتم تقديم التكافؤ بين معاملات الآلتين (BDFIM) و (DFIM) في الجدول أدناه.

الجدول (2.2): المعاملات المتشابهة للـ (DFIM) والـ (BDFIM) في الوضع المتزامن

المفاعلات			المقاومات		عدد أزواج الأقطاب	اللفائف		الآلة
X_m	X_r	X_s	R_r	R_s	P	الدوار	الساكن	DFIM
X_m	X_c	X_p	R_c	R_p	$(P_p + P_c)$	B_c	B_p	BDFIM

عند تجاهل مقاومة الدوار في المعادلة (11.2) فإن الطرف الذي يمثل القدرة الميكانيكية للآلات الحثية يختفي.

الاستطاعة الفعالة لساكني الاستطاعة والتحكم B_p و B_c تعطى بالعلاقة:

$$\begin{aligned}
 P_{Bp} &= 3 \left[R_p I_c^2 + \operatorname{Re} \left(j X_m I_c I_p^* \right) \right] \\
 P_{Bc} &= 3 \left[R_c I_c^2 + \operatorname{Re} \left(j s X_m I_p I_c^* \right) \right]
 \end{aligned}
 \tag{17.2}$$

بتعويض المعادلة (17.2) في (11.2) نجد:

$$P_m = 3(1-s) X_m \operatorname{Im} \left(I_p I_c^* \right)
 \tag{18.2}$$

العزم الكهرومغناطيسي يعطى بالعلاقة:

$$C_{em} = 3 \frac{(P_p + P_c)}{\omega_p} X_m \operatorname{Im} \left(I_p I_c^* \right)
 \tag{19.2}$$

عند المقارنة بين العلاقتين (17.2) و (19.2) مع إهمال الضياعات النحاسية في ساكن الاستطاعة نجد:

$$P_{Bp} = \frac{\omega_p}{(P_p + P_c)} C_{em}
 \tag{2.20}$$

عند اهمال الضياعات النحاسية في العلاقة (17.2) نجد:

$$P_{Bc} = sP_{Bp} \quad (2.21)$$

في العلاقتين (20.2) و (21.2) نلاحظ أن الاستطاعة الفعالة لـ B_p تعتمد على عزم الدوران الكهرومغناطيسي فقط، في حين استطاعة الساكن B_c تتناسب مع كل من عزم الدوران المغناطيسي وانزلاق الدوار.

2.2 النموذج المبسط للـ BDFIM في النظام الديناميكي

1.2.2 النموذج الكلي

بنفس المبدأ طور POZA نظام مرجعي عام وشامل للـ BDFIM، سوف نقدم الآن النموذج الشعاعي للـ (BDFIM) في إطار مرجعي مشترك (ω_a) [46].

$$\begin{aligned} v_p &= R_p i_p + j\omega_a \psi_p + \frac{d\psi_p}{dt} \\ v_c &= R_c i_c + j(\omega_a - (P_p + P_c)\omega_r)\psi_c + \frac{d\psi_c}{dt} \\ v_r &= R_r i_r + j(\omega_a - P_p\omega_r)\psi_r + \frac{d\psi_r}{dt} = 0 \end{aligned} \quad (22.2)$$

علاقات التدفق تعطى كالتالي:

$$\begin{aligned} \psi_p &= L_p i_p + M_{pr} i_r \\ \psi_c &= L_c i_c + M_{cr} i_r \\ \psi_r &= L_r i_r + M_{pr} i_p + M_{cr} i_c \end{aligned} \quad (23.2)$$

النموذج الشعاعي للـ (BDFIM) في الإطار المرجعي مرتبط بتدفق ساكن الاستطاعة B_p كما موضح في العلاقة (24.2). تم التحقق من هذا النموذج تجريبيا في المرجع [46].

يتميز هذا المرجع بـ $(\omega_a = \omega_p)$.

$$\begin{aligned} v_p &= R_p i_p + j\omega_p \psi_p + \frac{d\psi_p}{dt} \\ v_c &= R_c i_c + j(\omega_p - (P_p + P_c)\omega_r)\psi_c + \frac{d\psi_c}{dt} \\ v_r &= R_r i_r + j(\omega_p - P_p\omega_r)\psi_r + \frac{d\psi_r}{dt} = 0 \end{aligned} \quad (24.2)$$

تدفقات ساكن الاستطاعة والتحكم تعطى:

$$\psi_p = L_p i_p + M_{pr} i_r \quad (25.2)$$

$$\psi_c = L_c i_c + M_{cr} i_r$$

$$\psi_r = L_r i_r + M_{pr} i_p + M_{cr} i_c$$

العزم الكهرومغناطيسي يساوي:

$$C_{em} = \frac{3}{2} P_p \operatorname{Im}[\psi_p^* i_p] + \frac{3}{2} P_c \operatorname{Im}[\psi_c^* i_c] \quad (26.2)$$

إذا قمنا باستخراج تيارات الـ B_p و B_c من المعادلة (25.2) وتعويضها في المعادلة (26.2) يصبح العزم الكهرومغناطيسي يصبح كالتالي:

$$C_{em} = C_{IM1} + C_{IM2} + C_{DFIM}$$

$$C_{IM1} = \frac{M_{pr}}{L_p L_r \sigma} P_p \operatorname{Im}[\psi_p \psi_r^*]$$

$$C_{IM2} = \frac{M_{cr}}{L_c L_r \sigma} P_c \operatorname{Im}[\psi_r \psi_c^*] \quad (27.2)$$

$$C_{DFIM} = \frac{M_{pc}}{L_p L_c \sigma} (P_p + P_c) \operatorname{Im}[\psi_p \psi_c^*]$$

حيث :

(σ) : إجمالي معامل التسرب

(M_{pc}) : الحث المتبادل لساكني التحكم والاستطاعة B_p و B_c

$$\sigma = 1 - \frac{M_{pr}^2}{L_p L_r} - \frac{M_{cr}^2}{L_c L_r} \quad (28.2)$$

$$M_{pc} = - \frac{M_{pr} M_{cr}}{L_r}$$

2.2.2 النموذج المبسط للآلة BDFIM

كما تم شرحه سابقا إذا تغيرت سرعة دوران دوار الآلة (BDFIM) في نطاق $\pm 30\%$ بالنسبة للسرعة الطبيعية. الآلات التي تتكون من (Bc-rotor) و (Bp-rotor) عادة ما تكون لديها انزلاق كبير ومقاومة دوار ضعيفة. وبناءا على ذلك تكون معاملات العزم صغيرة نسبيا [44] [45].

بتجاهل انخفاض قيمة الجهد في مقاومة الدوار في المعادلة (24.2) وتعويض النتيجة في المعادلة (25.2)، نحصل على علاقات التدفق في الساكنين Bc و Bp كما يلي:

$$\begin{aligned}\psi_p &= \sigma_p L_p i_p + M_{pc} i_c \\ \psi_c &= \sigma_c L_c i_c + M_{pc} i_p\end{aligned}\quad (29.2)$$

حيث σ_p و σ_c معاملات تسرب لساكن الاستطاعة Bp وساكن التحكم Bc على التوالي تساوي:

$$\begin{aligned}\sigma_p &= 1 - \frac{M_{pr}^2}{L_p L_r} \\ \sigma_c &= 1 - \frac{M_{cr}^2}{L_c L_r}\end{aligned}\quad (30.2)$$

ترتيب النموذج الديناميكي للـ (BDFIM) تم اختصاره بسبب إزالة المعادلة الثالثة من (24.2)، مع مراعاة المعادلة (29.2). يمكن تلخيص المعاملات المكافئة للنماذج الديناميكية للـ (DFIM) و (BDFIM) في الجدول (3.2). وهكذا تصبح قيم (C_{IM1} و C_{IM2}) معدومة، وهذا لا يؤدي الى وجود خطأ كبير في الحسابات، وبالتالي العزم الكهرومغناطيسي للآلة BDFIM يعطى تقريبا:

$$C_{em} = \frac{M_{pc}}{L_p L_c \sigma} (P_p + P_c) \text{Im}[\psi_p \psi_c^*] \quad (31.2)$$

يمكننا أن نشب أن المعادلتين المتحصل عليهما للعزم الكهرومغناطيسي (2. 19) و (2. 31) في الحقيقة تقريبا متساويين

الجدول (3.2): المعاملات المكافئة للنماذج الديناميكية للـ DFIM و BDFIM

الآلة	المقاومات		الوشائع		
DIFIM	R_s	R_r	L_s	L_r	M_{sr}
BDFIM	R_p	R_c	$\sigma_p L_p$	$\sigma_c L_c$	M_{pc}

3.2.2 نموذج الـ BDFIM في النظام الثنائي

من أجل إنشاء نظام تحكم للآلة (BDFIM)، سوف نذكر نمذجتها في معلم بارك. النموذج الرياضي للـ (BDFIM) في المرجع (d,q) المرتبط بتدفق ساكن الاستطاعة يعطي كالتالي [40].

المعادلات الكهربائية:

$$\begin{cases} v_{dsp} = R_{sp} i_{dsp} + \frac{d\psi_{dsp}}{dt} - \omega_p \psi_{qsp} \\ v_{qsp} = R_{sp} i_{qsp} + \frac{d\psi_{qsp}}{dt} + \omega_p \psi_{dsp} \\ v_{dsc} = R_{sc} i_{dsc} + \frac{d\psi_{dsc}}{dt} - (\omega_c - (p_p + p_c) \omega_r) \psi_{qsc} \\ v_{qsc} = R_{sc} i_{qsc} + \frac{d\psi_{qsc}}{dt} + (\omega_p - (p_p + p_c) \omega_r) \psi_{dsc} \\ 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega_p - p_p \omega_r) \psi_{qr} \\ 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega_p - p_p \omega_r) \psi_{dr} \end{cases} \quad (32.2)$$

معادلات التدفق:

$$\begin{cases} \psi_{dsp} = L_{sp} i_{dsp} + M_{spr} i_{dr} \\ \psi_{qsp} = L_{sp} i_{qsp} + M_{spr} i_{qr} \\ \psi_{dsc} = L_{sc} i_{dsc} + M_{scr} i_{dr} \\ \psi_{qsc} = L_{sc} i_{qsc} + L_{scr} i_{qr} \\ \psi_{dr} = L_r i_{dr} + M_{scr} i_{dsc} + L_{spr} i_{dsp} \\ \psi_{qr} = L_r i_{qr} + M_{scr} i_{qsc} + L_{spr} i_{qsp} \end{cases} \quad (33.3)$$

M : الحث المتبادل الدوري بين الجزء الساكن B_p والساكن B_c و الدوار .

المعادلة الميكانيكية:

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - K_f \Omega \quad (34.2)$$

الاستطاعة الفعلية والرد فعلية:

$$\begin{aligned} P_{Bp} &= v_{dsp} i_{dsp} + v_{qsp} i_{qsp} \\ Q_{Bp} &= v_{qsp} i_{dsp} - v_{dsp} i_{qsp} \\ P_{Bc} &= v_{dsc} i_{dsc} + v_{qsc} i_{qsc} \\ Q_{Bc} &= v_{qsc} i_{dsc} - v_{dsc} i_{qsc} \end{aligned} \quad (35.2)$$

الاستطاعة الكلية للـ (BDFIM):

$$P_T = P_{Bp} + P_{Bc} \quad (36.2)$$

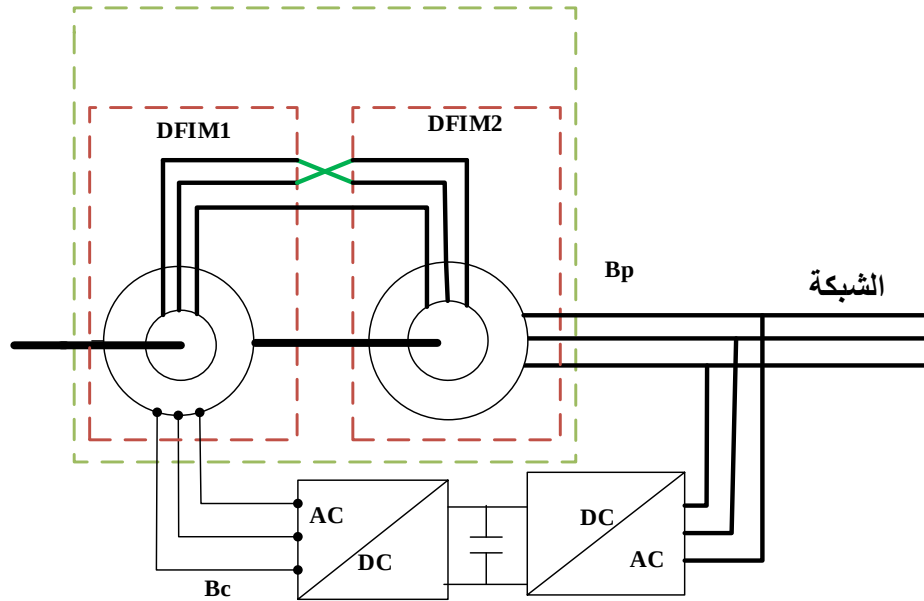
4.2.2 نموذج الـ BDFIM بناء على الآلة التتابعية

1.4.2.2 وصف الآلة BDFIM بناء على الآلة التتابعية

هذا التكوين يعتبر أول تنفيذ عملي للآلة مزدوجة التغذية دون مسفرت [47] [51].

ساكن الاستطاعة متصل مباشرة بالشبكة في حين ساكن التحكم يتم تغذيته عن طريق محول الكتروني (مقوم/مموج) الشكل (6.2).

الاستطاعة في الجملة (محول الكتروني/DIFM) تتناسب مع انزلاق الدوار [24].



الشكل (6.2): نموذج الآلة BDFIM على أساس الآلة DFIM

فيمايلي سنقوم بنمذجة هذه الآلة من خلال استغلال النموذج الذي تم تطويره في المرجع [48]. حيث نقوم بربط اثنين من آلة الـ (DIFM) كهربائيا وميكانيكيا على مستوى الدوار تتم نمذجة هذا النوع من الربط بافتراض عدم وجود خلل مثل انقطاع التيار الكهربائي وكذلك عدم وجود أي فقدان أو تخزين للطاقة في التوصيلات [49]. نموذج الآلة اللامتزامنة مزدوجة التغذية في النظام الثنائي المرتبط بالحقل الدوار كالتالي:

بالنسبة للآلة (DIFM1)

$$\begin{cases} v_{ds1} = R_{s1}i_{ds1} + \frac{d\psi_{ds1}}{dt} - \omega_{s1}\psi_{qs1} \\ v_{qs1} = R_{s1}i_{qs1} + \frac{d\psi_{qs1}}{dt} + \omega_{s1}\psi_{ds1} \\ v_{dr1} = R_{r1}i_{dr1} + \frac{d\psi_{dr1}}{dt} - \omega_{r1}\psi_{qr1} \\ v_{qr1} = R_{r1}i_{qr1} + \frac{d\psi_{qr1}}{dt} + \omega_{r1}\psi_{dr1} \end{cases} \quad (37.2)$$

$$\begin{cases} \psi_{ds1} = L_{s1}i_{ds1} + L_{m1}i_{dr} \\ \psi_{qs1} = L_{s1}i_{qs1} + L_{m1}i_{qr1} \\ \psi_{dr1} = L_{r1}i_{dr1} + L_{m1}i_{ds1} \\ \psi_{qr1} = L_{r1}i_{qr1} + L_{m1}i_{qs1} \end{cases} \quad (38.2)$$

بالنسبة للآلة (DIFM2)

$$\begin{cases} v_{ds2} = R_{s2}i_{ds2} + \frac{d\psi_{ds2}}{dt} - \omega_{s2}\psi_{qs2} \\ v_{qs2} = R_{s2}i_{qs2} + \frac{d\psi_{qs2}}{dt} + \omega_{s2}\psi_{ds2} \\ v_{dr2} = R_{r2}i_{dr2} + \frac{d\psi_{dr2}}{dt} - \omega_{r2}\psi_{qr2} \\ v_{qr2} = R_{r2}i_{qr2} + \frac{d\psi_{qr2}}{dt} + \omega_{r2}\psi_{dr2} \end{cases} \quad (39.2)$$

$$\begin{cases} \psi_{ds2} = L_{s2}i_{ds2} + L_{m2}i_{dr2} \\ \psi_{qs2} = L_{s2}i_{qs2} + L_{m2}i_{qr2} \\ \psi_{dr2} = L_{r2}i_{dr2} + L_{m2}i_{ds2} \\ \psi_{qr2} = L_{r2}i_{qr2} + L_{m2}i_{qs2} \end{cases} \quad (40.2)$$

$$C_{em,DIFM1} = p_1(\psi_{ds1}i_{qs1} - \psi_{qs1}i_{ds1}) = L_{m1}p_1(i_{dr1}i_{qs1} - i_{qr1}i_{ds1}) = p_1(\psi_{dr1}i_{qr1} - \psi_{qr1}i_{dr1}) \quad (41.2)$$

$$J \frac{d}{dt} \Omega = C_r - C_{em,DIFM} - C_{vis} \quad (42.2)$$

الاستطاعة الفعلية والرد فعلية للثابت والدوار بالعلاقات التالية:

$$\begin{aligned}
 P_{s,DFIM1} &= v_{ds1} i_{ds1} + v_{qs1} i_{qs1} & P_{s,DFIM2} &= v_{ds2} i_{ds2} + v_{qs2} i_{qs2} \\
 Q_{s,DFIM1} &= v_{qs1} i_{ds1} - v_{ds1} i_{qs1} & Q_{s,DFIM2} &= v_{qs2} i_{ds2} - v_{ds2} i_{qs2} \\
 P_{r,DFIM1} &= v_{dr1} i_{dr1} + v_{qr1} i_{qr1} & P_{r,DFIM2} &= v_{dr2} i_{dr2} + v_{qr2} i_{qr2} \\
 Q_{r,DFIM1} &= v_{qr1} i_{dr1} - v_{dr1} i_{qr1} & Q_{r,DFIM2} &= v_{qr2} i_{dr2} - v_{dr2} i_{qr2}
 \end{aligned} \tag{43.2}$$

تمثيل ونمذجة الربط الكهربائي بين الدوارين [48] [50]

$$\begin{cases} v_{dr1} = v_{dr2} = v_{dr} & i_{dr1} = -i_{dr2} = i_{dr} \\ v_{qr1} = v_{qr2} = v_{qr} & i_{qr1} = -i_{qr2} = i_{qr} \end{cases} \tag{44.2}$$

النموذج الرياضي للآلة التتابعية في المعلم المرجعي الثنائي (d,q) المرتبط بالحقل الدوار يعطى بـ [48] [51]:

علاقات التوتر

$$\begin{cases} v_{ds1} = R_{s1} i_{ds1} + \frac{d\psi_{ds1}}{dt} - \omega_1 \psi_{qs1} \\ v_{qs1} = R_{s1} i_{qs1} + \frac{d\psi_{qs1}}{dt} + \omega_1 \psi_{ds1} \\ v_{ds2} = R_{s2} i_{ds2} + \frac{d\psi_{ds2}}{dt} - (\omega_1 - (p_1 + p_2) \omega_r) \psi_{qs2} \\ v_{qs2} = R_{s2} i_{qs2} + \frac{d\psi_{qs2}}{dt} + (\omega_1 - (p_1 + p_2) \omega_r) \psi_{ds2} \\ 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega_1 - p_1 \omega_r) \psi_{qr} \\ 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega_1 - p_1 \omega_r) \psi_{dr} \end{cases} \tag{45.2}$$

علاقات التدفق

$$\begin{cases} \psi_{ds1} = L_{s1} i_{ds1} + M_{s1r} i_{dr} \\ \psi_{qs1} = L_{s1} i_{qs1} + M_{s1r} i_{qr} \\ \psi_{ds2} = L_{s2} i_{ds2} - M_{s2r} i_{dr} \\ \psi_{qs2} = L_{s2} i_{qs2} - M_{s2r} i_{qr} \\ \psi_{dr} = L_r i_{dr} + M_{s2r} i_{ds2} - L_{s1r} i_{ds1} \\ \psi_{qr} = L_r i_{qr} + M_{s2r} i_{qs2} - L_{s1r} i_{qs1} \end{cases} \tag{46.2}$$

$$R_r = R_{r1} + R_{r2} \quad \text{مع}$$

$$L_r = L_{r1} + L_{r2}$$

المعادلات الميكانيكية

العزم الكهرومغناطيسي يعطى بالصيغة التالية:

$$C_{em,cas} = C_{em1} + C_{em2} = p_1 (\psi_{qs1} i_{qs1} - \psi_{qs1} i_{ds1}) + p_2 (\psi_{ds2} i_{qs2} - \psi_{qs2} i_{ds2}) \quad (47.2)$$

المعادلة الميكانيكية:

$$(J_1 + J_2) \frac{d}{dt} \Omega = (C_r) - (C_{em1} + C_{em2}) - (C_{vis1} + C_{vis2}) \quad (48.2)$$

حيث:

J_1 : عزم عطالة DFIM1

J_2 : عزم عطالة DFIM2

C_r : عزم الحمل

C_{em1} : العزم الكهرومغناطيسي لـ DFIM1

C_{em2} : العزم الكهرومغناطيسي لـ DFIM2

C_{vis1} : معامل الاحتكاك لـ DFIM1

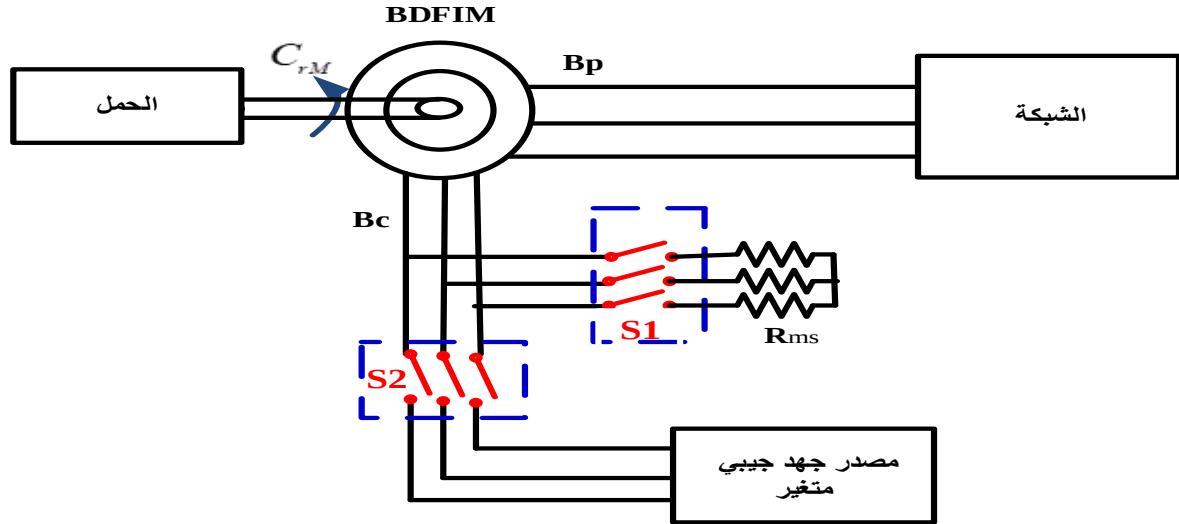
C_{vis2} : معامل الاحتكاك لـ DFIM2

يمكن كتابة الاستطاعة الفعلية والرد فعلية على النحو التالي

$$\begin{cases} P_{s1} = \frac{3}{2} (v_{ds1} i_{ds1} + v_{qs1} i_{qs1}) \\ Q_{s1} = \frac{3}{2} (v_{qs1} i_{ds1} - v_{ds1} i_{qs1}) \\ P_{s2} = \frac{3}{2} (v_{ds2} i_{ds2} + v_{qs2} i_{qs2}) \\ Q_{s2} = \frac{3}{2} (v_{qs2} i_{ds2} - v_{ds2} i_{qs2}) \end{cases} \quad (49.2)$$

2.4.2.2 محاكاة نموذج الآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية دون مسفرات BDFIM

انطلاقاً من المعادلات المعروضة سابقاً قمنا بالمحاكاة باستخدام برنامج MATLAB، سنعرض فيما يلي نتائج محاكاة ثلاث نماذج للآلة BDFIM وذلك في وضعي التشغيل المتزامن والغير المتزامن والأخذ بعين الاعتبار حالة التشغيل كمحرك وحالة التشغيل كمولدة. ولتحقق من صحة هذا النموذج نقترح محاكاة الوضعين المتزامن والغير متزامن وذلك بشروط كما موضح في الجدول (4.2).



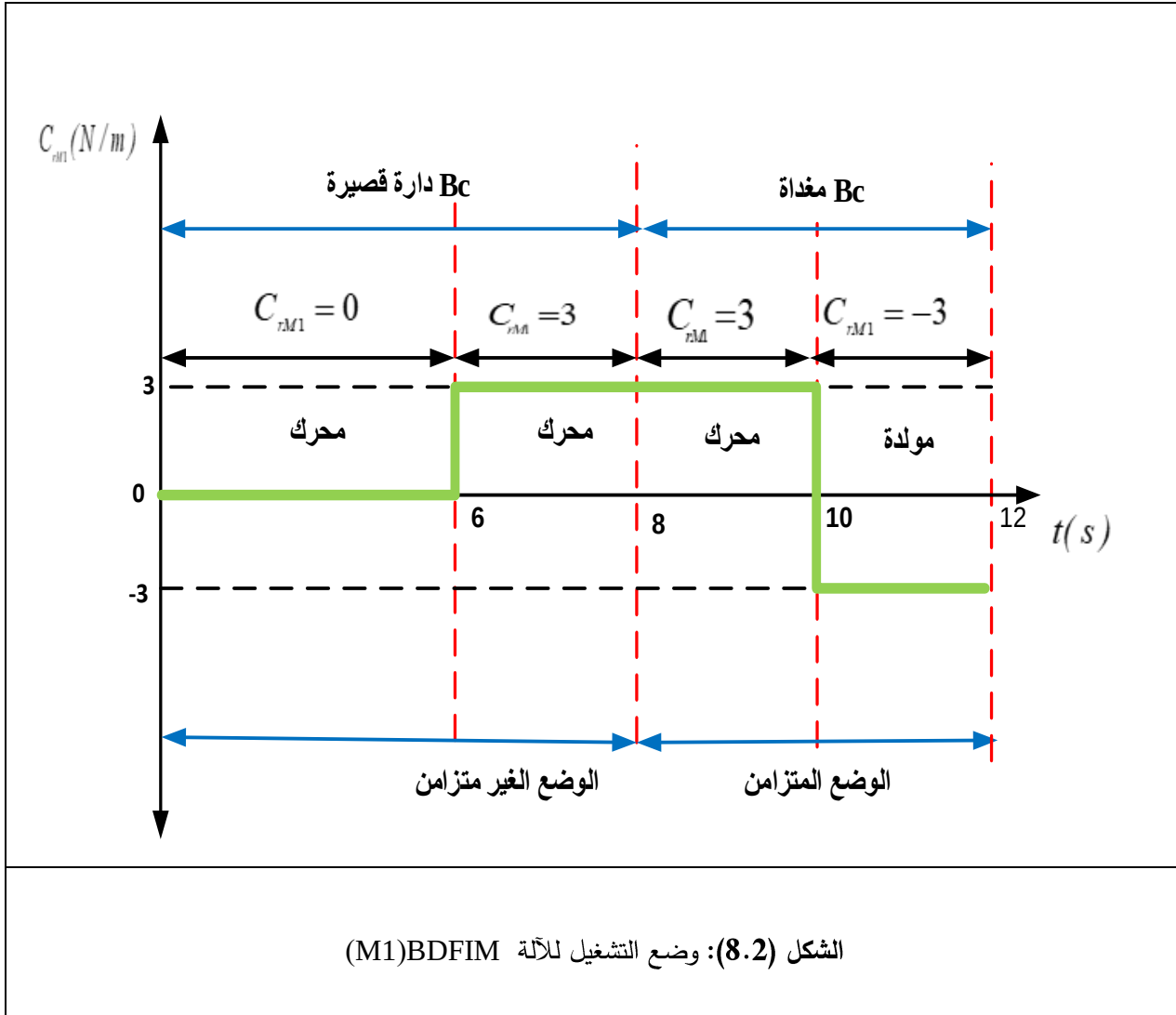
الشكل (7.2): المخطط العام للمحاكاة

الجدول (4.2): شروط المحاكاة للآلات (M1, M2)

الحالة	نمط التشغيل	عزم الحمل	الزمن
1	غير متزامن	$C_{rM1} = 0$ $C_{rM2} = 0$	[0-6] s
	غير متزامن	$C_{rM1} = 3$ $C_{rM2} = 15$	[6-8] s
2	متزامن	$C_{rM1} = 3$ $C_{rM2} = 15$	[8-10] s
	متزامن	$C_{rM1} = -3$ $C_{rM2} = -15$	[10-12] s

المعاملات الكهربائية للآلات المستعملة في المحاكات معروضة في الملحق B.

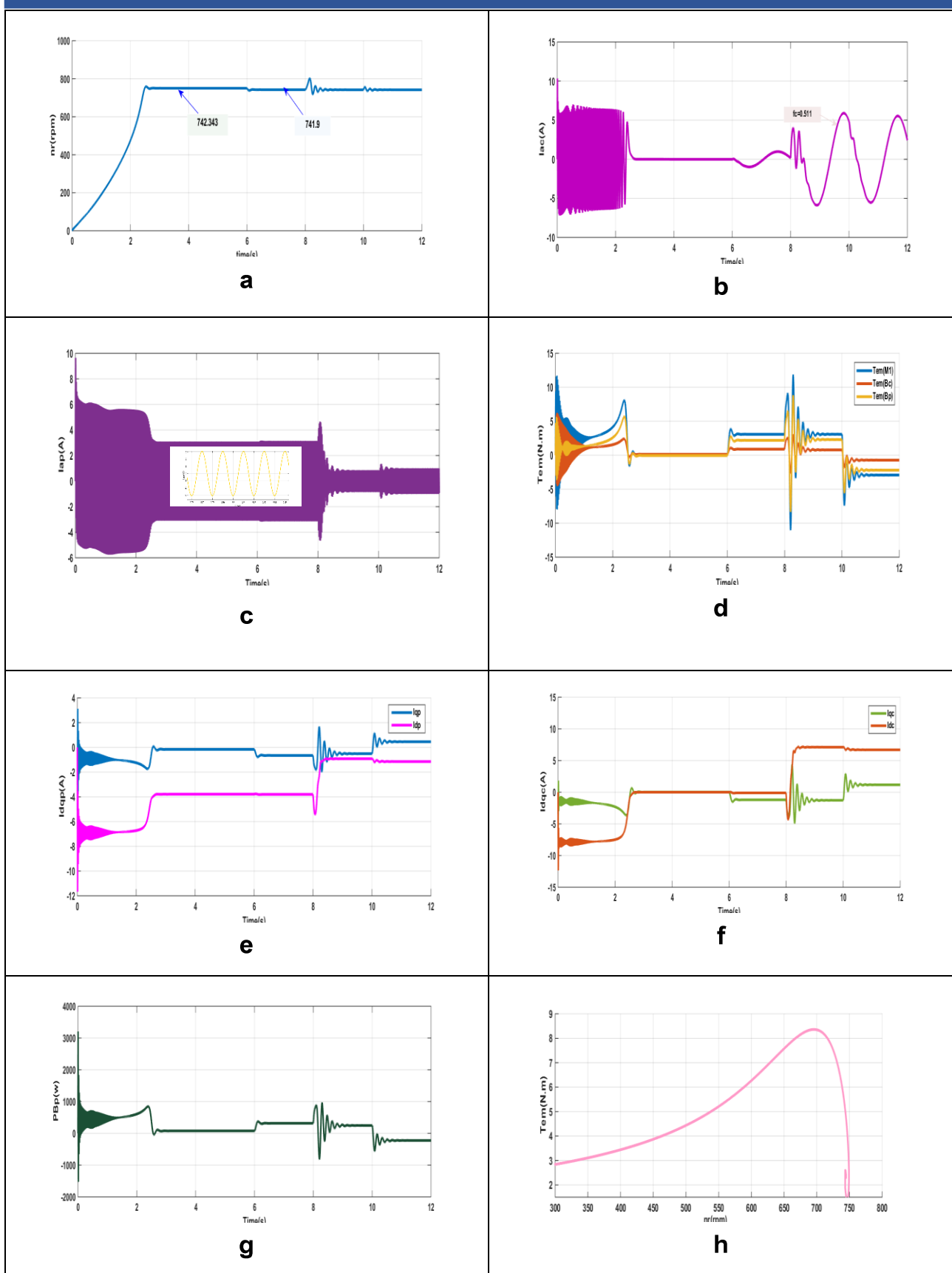
يمكننا تلخيص مختلف أجزاء المحاكاة بالشكل (8.2)، مع توضيح شروط وأوضاع تشغيل الآلة في كل حالة.



• نتائج محاكاة الآلة M1

من خلال محاكاتها للآلة قيد الدراسة بواسطة برنامج MATLAB وذلك عند تغذية ساكن التحكم بمصدر جهد جيبي في وضعي التشغيل المتزامن واللامتزامن مع الأخذ بعين الاعتبار حالة العمل كمحرك ومولدة ، ميزنا حالتين: ساكن التحكم دارة قصيرة، ساكن التحكم مغذى.

نتائج المحاكاة مبينة في الأشكال (9.2).



الشكل(9.2): نتائج محاكاة الآلة (M1)BDFIM

• تحليل نتائج المحاكاة الآلة (M1)

▪ الوضع اللامتزامن

من بين التشغيل اللامتزامن للآلة BDFIM هو تغذية ساكن واحد عند بدأ عمل الآلة (S1 مغلوقة و S2 مفتوحة) الشكل (7.2). في هذا الوضع يكون ساكن الاستطاعة مربوط مباشرة مع الشبكة في حين ساكن التحكم يكون دائرة قصيرة، في هذه الحالة تعمل الآلة كمحرك في الفراغ وذلك عند تطبيق عزم مقاوم معدوم أو كمحرك بحمولة وذلك عند تطبيق عزم مقاوم موجب الشكل (8.2).

خلال الفترة $s[0-6]$ يكون العزم الكهرومغناطيسي معدوم مما يؤدي الى ارتفاع سرعة الدوران والوصول الى سرعة تقوّل الى السرعة الطبيعية (750rpm) يتبن ذلك في النظام الدائم الشكل (9.2)(a). نلاحظ أن كل من الساكنين يخلق فيه عزم كهرومغناطيسي، حيث العزم في ساكن التحكم يكون ضعيف مقارنة بالعزم الكهرومغناطيسي في ساكن الاستطاعة الشكل (9.2)(d) لأنه يوجد ضياع في الاستطاعة في ساكن التحكم. العزم الكهرومغناطيسي الكلي في BDFIM هو محصلة هذين العزمين ويساوي عزم الاحتكاك. في الشكل (9.2)(b)(c) نلاحظ أن تيار البدء يكون كبير جدا ثم يتناقص ويستقر عند الزمن $s \ 3.3$. تيار ساكن الاستطاعة يأخذ الشكل الجيبي بتردد مساوي لتردد الشبكة 50 Hz، أما تيار ساكن التحكم يكون تردده قريب من الصفر. التيارات في الاحداثيات الثنائية لساكن التحكم معدومة أما في الساكن الاستطاعة لها قيمة كما مبين في الشكل (9.2)(e)(f)، استطاعة ساكن الاستطاعة تكون قريبة جدا من الصفر كون المحرك يعمل في الفراغ.

خلال الفترة $s[6-8]$ يتم تطبيق عزم مقاوم موجب $C_{rM1} = 3$ مع الحفاظ على القصر في ساكن التحكم. في هذا الوضع تعمل الآلة كمحرك لا متزامن بحمولة. سرعة تتناقص وتثبت عند قيمة أقل من السرعة في الحالة السابقة (حالة العمل دون حمولة) (وضع تحت التزامن) 735.56rpm الشكل (9.2)(a). العزم الكهرومغناطيسي في ساكن الاستطاعة أكبر من العزم في ساكن التحكم أما العزم الكهرومغناطيسي للآلة في هذه الحالة تكون له قيمة موجبة (9.2)(d). تيار ساكن التحكم في هذه الفترة كذلك تردده قريب من الصفر ويحسب حسب علاقة التزامن. أما التيار في ساكن الاستطاعة يأخذ الشكل الجيبي الشكل (9.2)(b)(c). قيمة الاستطاعة تزداد مقارنة بالحالة السابقة وتأخذ قيمة موجبة دلالة على أن الآلة تعمل كمحرك.

▪ الوضع المتزامن

من أجل التشغيل المتزامن للآلة BDFIM يجب تغذية كل من ساكن الاستطاعة وساكن التحكم حيث يتم توصيل

ساكن التحكم بمصدر جهد متحكم في قيمته وتردده وساكن الاستطاعة بالشبكة (S1مفتوحة وS2مغلقة) الشكل(8.2).

خلال الفترة [8-10]s قمنا بتطبيق عزم مقاوم موجب $C_{rM1}=3$ مع تغذية ساكن التحكم بتواتر 0.54Hz قمنا بحسابه انطلاقاً من سرعة الدوران في الحالة السابقة وتواتر الشبكة حسب العلاقة: $fc = fp - (P_p + P_c) \frac{nr}{60}$ وذلك للحفاظ على تزامن الآلة، في هذه الحالة تعمل الآلة كمحرك. سرعة الدوران تكون نفسها السرعة في حالة السابقة بعد تحقيق علاقة التزامن ووضع تردد ساكن التحكم يساوي 0.54Hz. كما يحافظ كل من العزم الكهرومغناطيسي والاستطاعة في ساكن الاستطاعة على قيمتهما. أما بالنسبة لتيار ساكن الاستطاعة تنقص قيمته بسبب وجود تغذية في ساكن التحكم كما موضح في الشكل(9.2)(b).

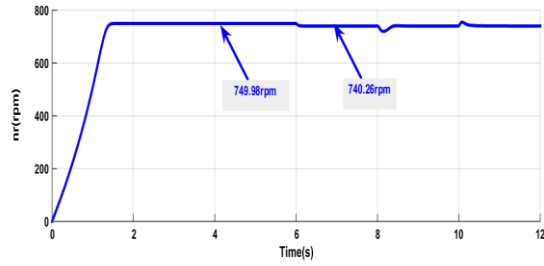
خلال الفترة [10-12]s قمنا بتطبيق عزم مقاوم سالب $C_{rM1}=-3$ في هذه الحالة تعمل الآلة كمولدة في الوضع المزامن تكون سرعة الدوران نفسها في الحالات السابقة، في حين كل من العزم الكهرومغناطيسي والاستطاعة في ساكن الاستطاعة يكون سالب وهذا ما يفسر عمل الآلة كمولدة.

المنحنى في الشكل(9.2)(h) بين العلاقة بين سرعة الدوران والعزم الكهرومغناطيسي حيث نقطة تقاطع المنحنى مع محور السرعة يبين لنا قيمة السرعة الطبيعية للآلة أما نقطة التقاطع مع محور العزم يبين عزم البدء.

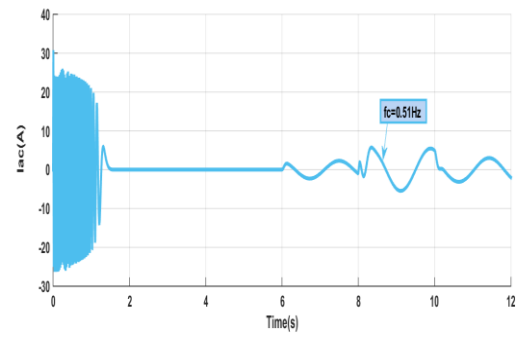
• نتائج محاكاة الآلة M2

قمنا بمحاكاة الآلة M2 في نفس شروط محاكاة الآلة M1. حيث تحصلنا على نفس المنحنيات والنتائج رغم اختلاف معاملات الآلة وهذا ما يبين صحة النموذج المقدم.

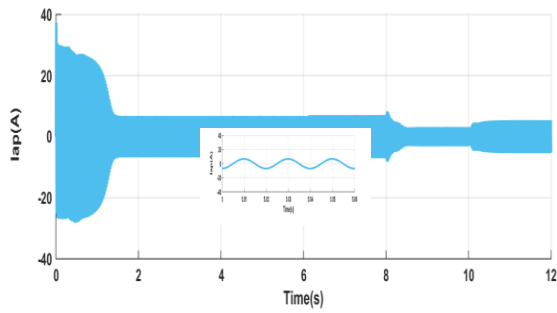
نتائج المحاكاة مبينة في الشكل(10.2).



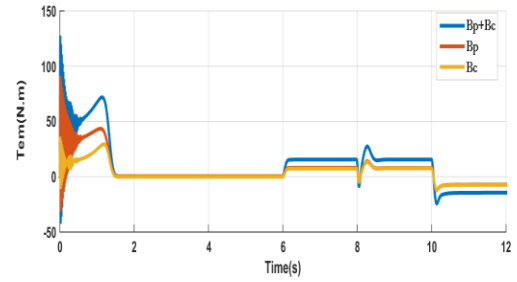
A



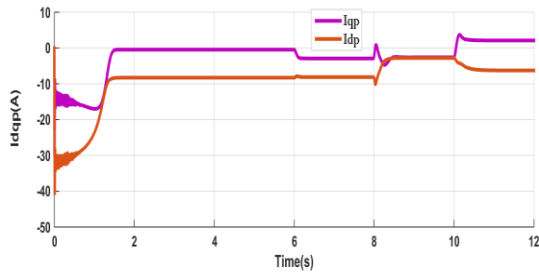
B



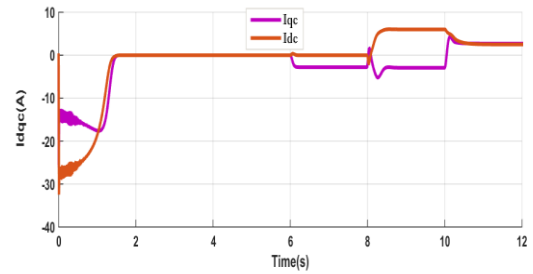
C



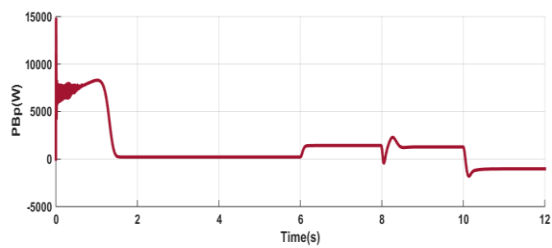
d



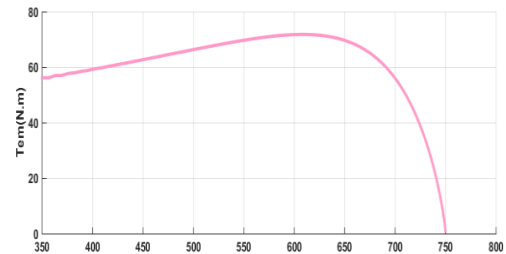
e



f



g



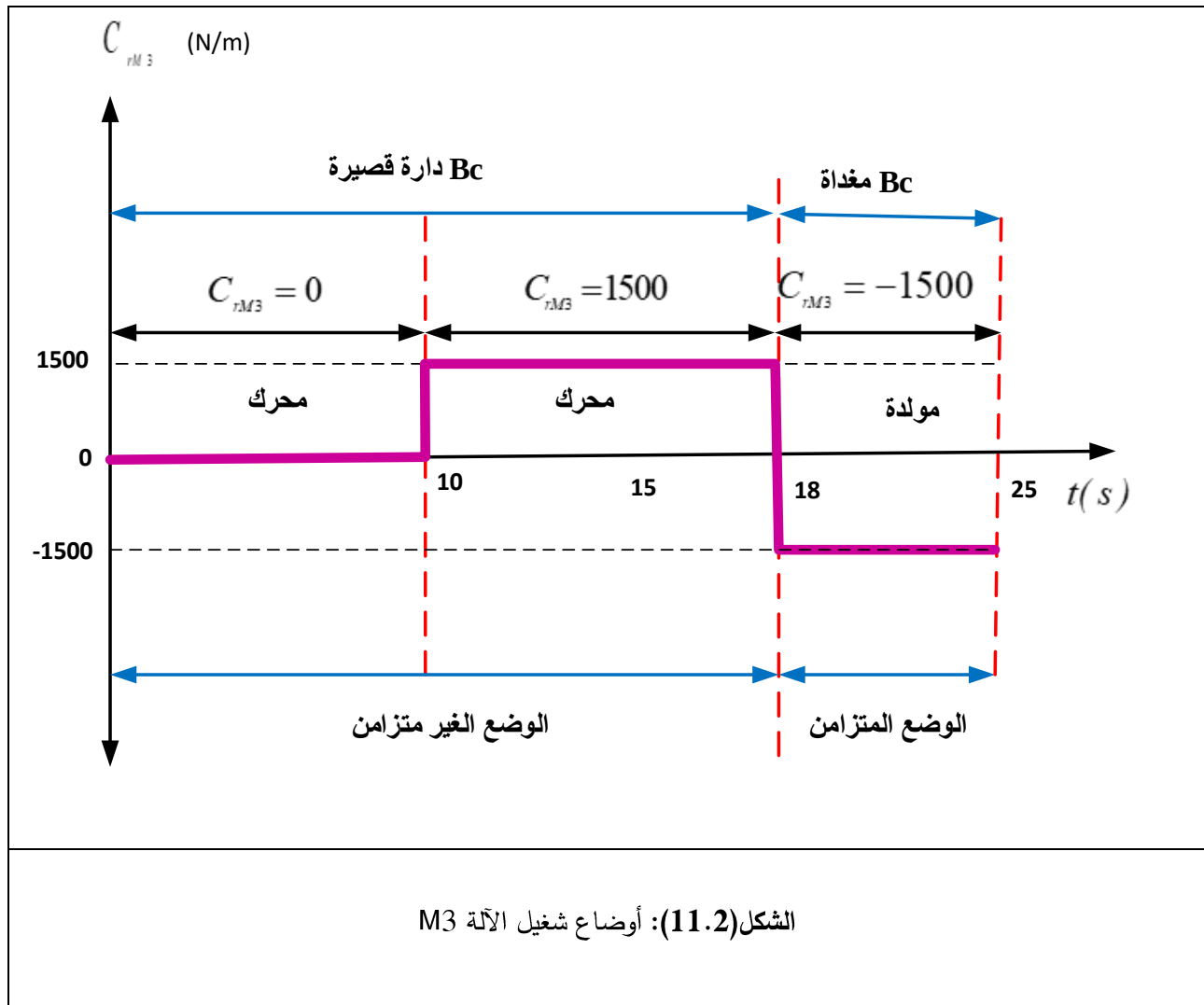
h

الشكل (10.2): نتائج محاكاة الآلة (M2)

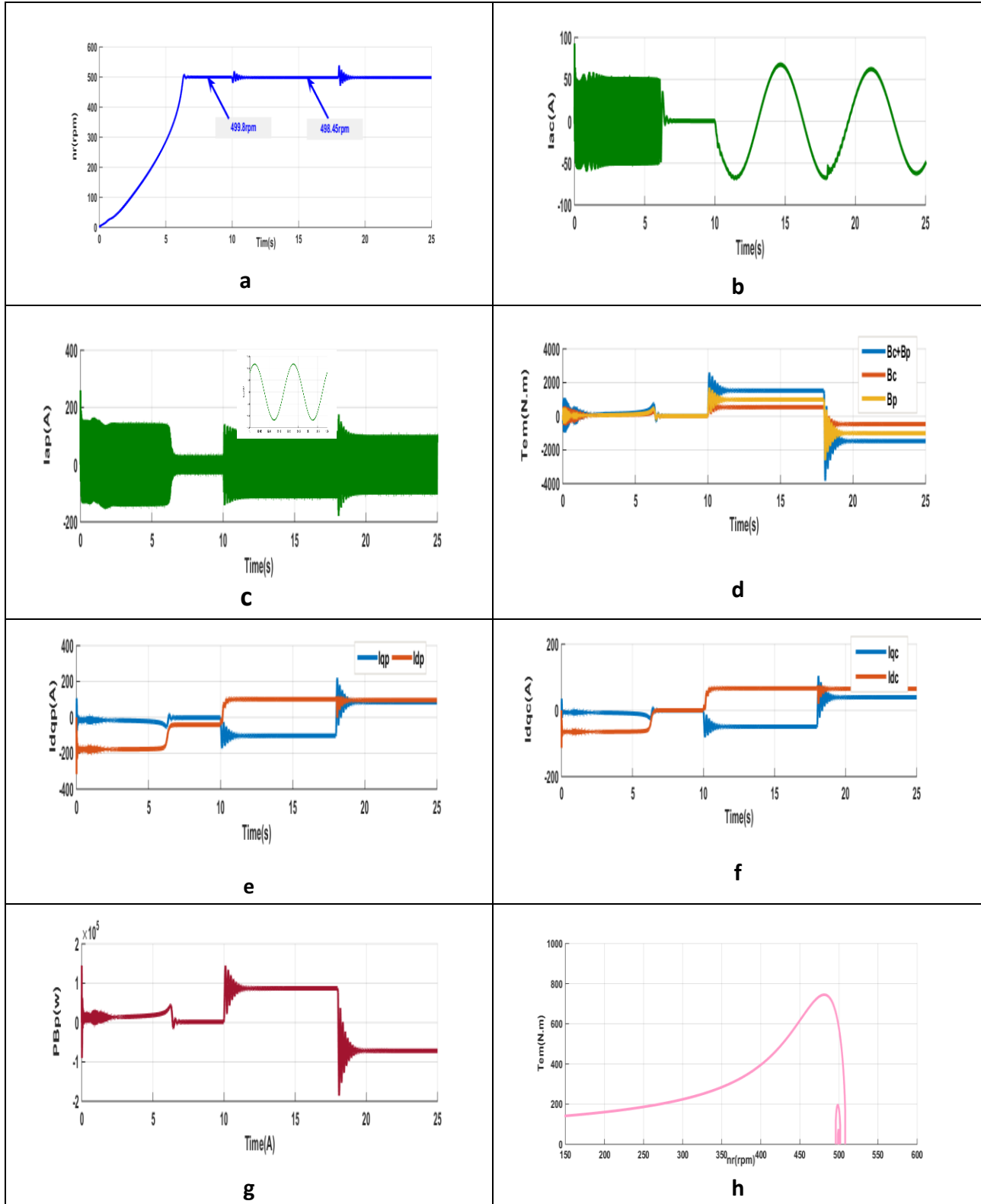
من أجل البرهان أكثر على صحة النموذج المقدم للآلة BDFIM قمنا بمحاكاة آلة أخرى ذات استطاعة كبيرة (250KW) مقارنة بالآلتين السابقتين. يمثل الشكل (10.2) وضع تشغيل هذه الآلة خلال فترات معينة وفقا للشروط الموضحة في الجدول (5.2).

الجدول (5.2): شروط محاكاة الآلة M3

الحالة	نمط التشغيل	عزم الحمل	الزمن
1	غير متزامن	$Cr_3 = 0$	[0-10] s
		$Cr_3 = 1500$	[10-18] s
2	متزامن	$Cr_3 = -1500$	[20-18] s



الشكل (12.2) يبين لنا مختلف أوضاع تشغيل الآلة M3 وشروط المحاكاة التي قمنا بها في هذا الجزء. نتائج هذه المحاكاة موضحة في الشكل (11.2).



الشكل (12.2): نتائج محاكاة الآلة M3

خاتمة

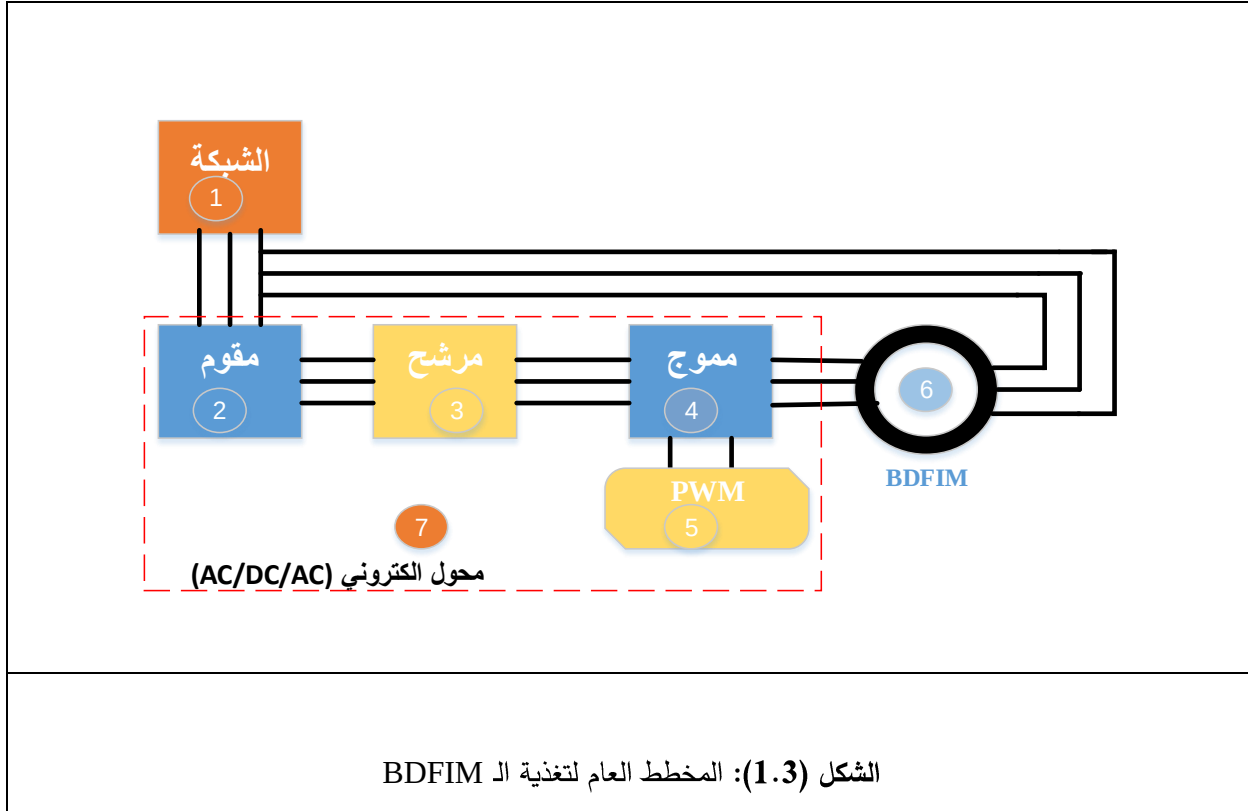
تناول هذا الفصل نمذجة الآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية دون مسفرات، حيث قمنا أولاً بشرح التشغيل المتزامن للآلة وآليات الاقتران المغناطيسي فيها. بما أن اهتمامنا الوحيد في هذا الفصل نمذجة الآلة فقمنا بتقديم نمذجة رياضية لمختلفة نماذج الـ BDFIM (الكلاسيكية، التتابعية، المبسطة). تم الحصول على نتائج المحاكاة باستخدام برنامج MATLAB للتحقق من صحة النماذج المقدمة، حيث في الأخير كان النتائج جد مرضية خلال الوضعين المتزامن والغير متزامن وفي حالة العمل كمحرك أو مولدة.

الفصل الثالث

نمذجة ومحاكاة المجموعة (محول/BDFIM)

مقدمة

تطرقنا في الفصل السابق الى نمذجة ومحاكاة الآلة BDFIM من خلال تغذية ساكن التحكم بمصدر جهد متناوب. في هذا الفصل سنقوم بتعويض هذا الأخير بمحول الكهروني كما مبين في التصميم الصندوقي الممثل في الشكل (1.3). نتطرق في هذا الفصل الى دراسة نمذجة ومحاكاة المجموعة (محول الكهروني / BDFIM).



المخطط أعلاه يبين المخطط العام لتغذية الآلة (BDFIM) الذي يتكون من سبعة عناصر والممثلة في:

- (1) شبكة التغذية ذات تردد ثابت.
- (2) مقوم غير محكوم ثلاثي الطور (محول الكهروني AC/DC).
- (3) مرشح.
- (4) مموج (محول الكهروني DC/AC).
- (5) تقنية التحكم بعرض النبضة.
- (6) الآلة BDFIM.
- (7) محول الكهروني (AC/DC/AC).

المحول الالكتروني يضمن التحويل (متناوب-مستمر-متناوب) أي يسمح بتغذية الآلة بنظام جهد متناوب متحكم في توتره وتردده، التيار يقوم عن طريق المقوم ثلاثي الطور، إشارات التيار في مخرج هذا الأخير تحتوي على تموجات ذات ترددات عالية، وللتخلص من هذه التموجات نقوم باستعمال مرشح وهذا من أجل الحصول على قيمة ثابتة للتيار. بعد ذلك نقوم للمرة الثانية بتحويل التوتر المستمر الناتج الى توتر متناوب عن طريق المموج.

1.3 نمذجة المقوم

من الناحية الكهربائية يمكن تميز نوعين من المقومات.

- مقومات محكومة.

- مقومات غير محكومة.

المقومات الغير محكومة تحول التوتر المتناوب في المدخل الى توتر مستمر في المخرج ذو قيمة متوسطة ثابتة، بالإضافة الى ذلك فهي غير قابلة للعكس، وهذا يعني أن الطاقة تتدفق فقط من الجانب المتناوب الى المستمر أي يعمل في اتجاه واحد.

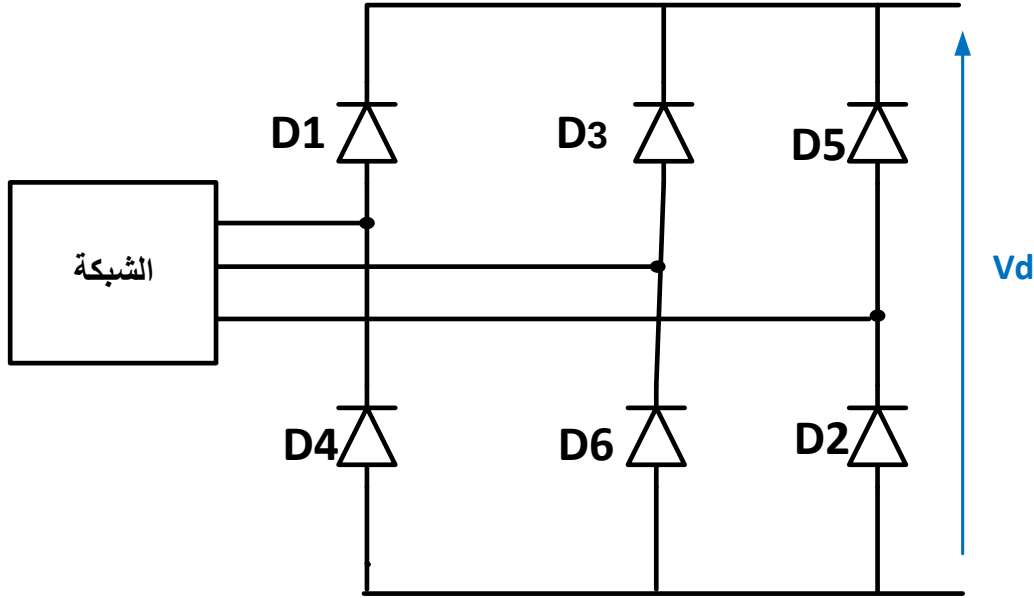
1.1.3 مبدأ العمل

دائرة المقوم ثلاثي الطور لها ثلاث أطوار كل طور مربوط الى أحد توترات الشبكة (V_1, V_2, V_3) ، يمكننا اعتبار أن هذا المقوم عبارة عن دارتين لمقوم ثلاثي الطور نصف موجة حيث الجزء العلوي هو مقوم ثلاثي الطور كاتود مشترك يتكون من الثنائيات (D_1, D_3, D_5) . الجزء السفلي يمثل مقوم ثلاثي الطور انود مشترك مكون من الثنائيات (D_2, D_4, D_6) [54].

عبارات التوترات ثلاثية الطور تعطى كما يلي:

$$\begin{cases} V_1 = V_m \sin(\theta) \\ V_2 = V_m \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ V_3 = V_m \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (1.3)$$

يمكن توضيح بنية المقوم ثلاثي الطور في الشكل (2.3)



الشكل (2.3): التركيب الكهربائي للمقوم ثلاثي الطور

يكون تتابع التوصيل للثنائيات حسب الترتيب التالي $(D_1D_2, D_2D_3, D_3D_4, D_4D_5, D_4D_5, D_6D_1)$ ، حيث توصل الثنائيتين اللتان يكون الجهد المطبق عليهما (جهد الخط) أكبر من الجهود الأخرى سواء كان ذلك في النصف الموجب أو السالب للموجة [54]. حيث فترة توصيل كل ثنائي 120° ويمكن تلخيصها في الجدول التالي:

الجدول (1.3): تتابع الأطوار خلال فترات توصيل كل الثنائيات

الفترة	الجهد الأكثر سلبية	الجهد الأكثر ايجابية	الثنائيات الموصلة
$0^\circ - 60^\circ$	V_2	V_3	D_5, D_6
$60^\circ - 120^\circ$	V_2	V_1	D_1, D_6
$120^\circ - 180^\circ$	V_3	V_1	D_1, D_2
$180^\circ - 240^\circ$	V_3	V_2	D_3, D_2
$240^\circ - 300^\circ$	V_1	V_2	D_3, D_4
$300^\circ - 360^\circ$	V_1	V_3	D_5, D_4

العلاقات الرياضية الخاصة بدارة التقويم الغير محكوم ثلاثي الطور موجة كاملة:

$$V_L = \sqrt{3}V_{ph} \quad (2.3)$$

V_L : جهد الخط

V_{ph} : جهد الطور

$$V_{dc} = \frac{3}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} V_m \cos \theta d\theta = \frac{3V_m}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \quad (3.3)$$

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m$$

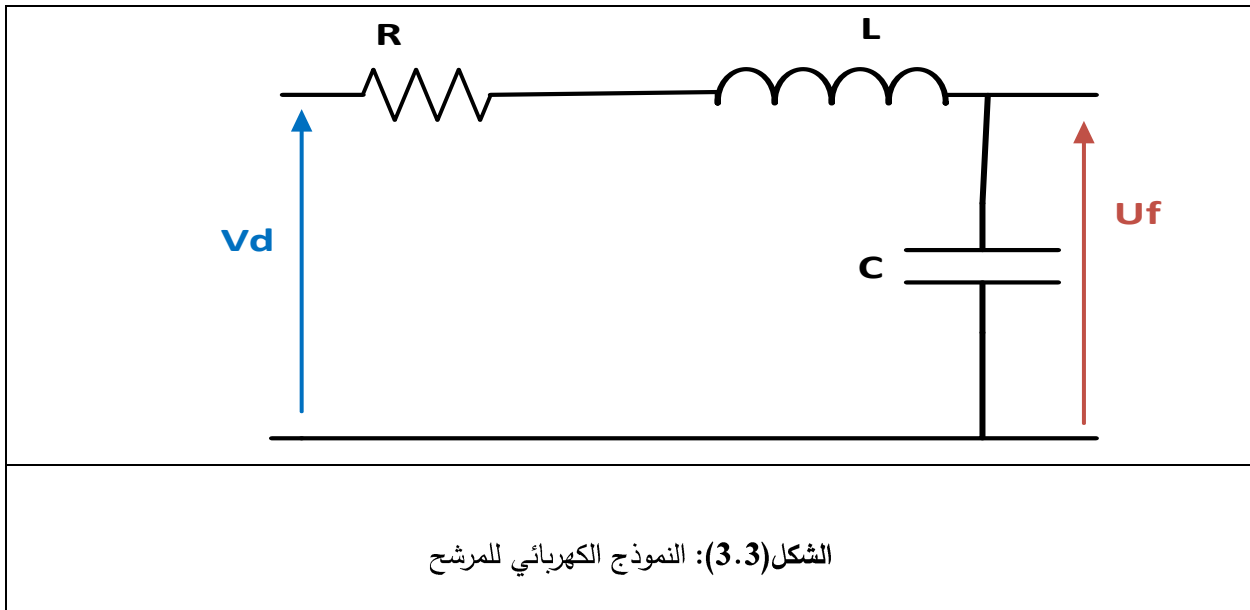
V_{dc} : القيمة المتوسطة لتوتر مخرج المقوم

V_m : القيمة العظمى لتوتر الدخول

القيمة المتوسطة لمخرج المقوم V_{dc} لها علاقة مباشرة مع القيمة الأعظمية لتوتر الشبكة V_m .

2.3 نمذجة المرشح

المقوم المدروس سابقا يقوم تيار وتوتر، ولكن هذين الأخيرين يكون فيهما تذبذبات غير مقبولة من طرف الحمولة ولهذا يجب وضع مرشح بين المقوم والمموج [55].



على العموم المرشح يتميز بمقاومة داخلية صغيرة جدا يمكن اهمالها.

باستعمال قانون كيرشوف للعروات نجد:

$$\begin{cases} V_d = L \frac{di(t)}{dt} + U_f(t) \\ \frac{dU_f(t)}{dt} = \frac{1}{C} i(t) \end{cases} \quad (4.3)$$

حيث: $i(t) = i_d - i_f$

بإدخال تحويل لابلاس نجد دالة التحويل كما يلي:

$$H(p) = \frac{U_f(p)}{V_d(p)} \quad (5.3)$$

بتطبيق قاسم التوتر نجد:

$$U_f = V_d \frac{\frac{1}{jCw}}{jLw + \frac{1}{jCw}} \quad (6.3)$$

نضع: $P = jw$ ومنه:

$$H(p) = \frac{1}{1 + (P\sqrt{LC})^2} \quad (7.3)$$

إذن هذا المرشح من الدرجة الثانية تواتر تجاوبه f_c :

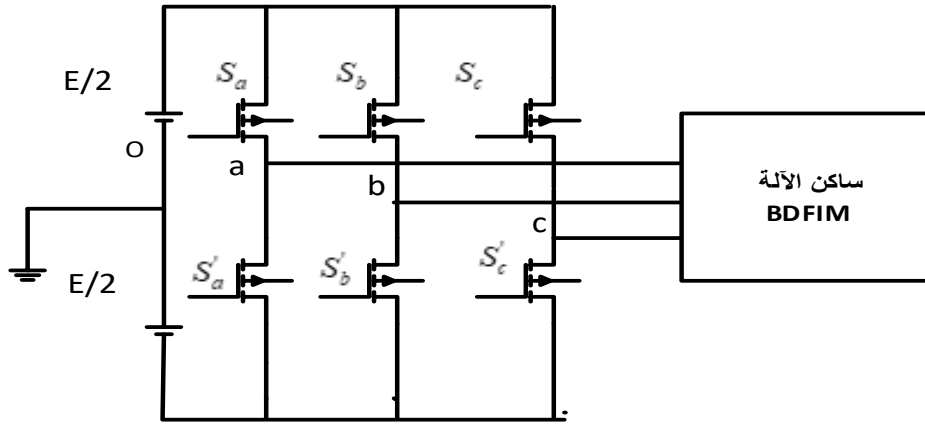
$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (8.3)$$

من أجل الغاء التوافقية الثانية نضع: $f_c = 2f$

بالتعويض في (8.3) نجد: $LC > 2.77 \times 10^{-6}$.

3.3 نمذجة المموج بتحكم PWM

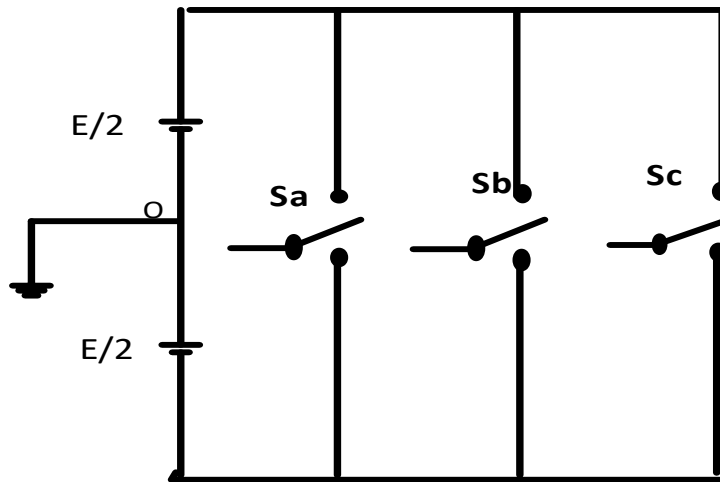
المموج هو محول الكتروني، آلية عمل هذا الأخير تقوم على أساس تحويل الجهد المستمر الى متناوب بقيمة معينة وتردد معين. القيمة الفعالة لجهد المخرج يمكن أن تكون ثابتة أو متغيرة بتردد ثابت أو متغير.



الشكل (4.3): التصميم الكهربائي للموج ثلاثي الطور

الموج ثلاثي الطور يتكون من ستة عناصر الكترونيك القدرة من نوع (IGBT أو MOSFET)، نفرض أنها مثالية حيث كل عمود نستطيع أن نمثله بقاطعة مزدوجة متحكم فيها، ومنه يمكننا اعتبار الرسم المكافئ لتشغيل الموج كما مبين في الشكل (5.3).

لتجنب دائرة القصر يجب أن يكون تشغيل القاطعتين في نفس العمود متكامل.



الشكل (5.3):الرسم المكافئ للموج ثلاثي الطور

حتى نقوم بإنشاء النموذج الرياضي للموج يجب الأخذ بعين الاعتبار الفرضيات التالية [56]:

- نعتبر القواطع الالكترونية مثالية.
- الحمل ثلاثي الطور متوازن موصول بشكل نجمي.
- القواطع الالكترونية تكون ثنائية الاتجاه للتيار يمكن نمذجتها كمايلي:

$$S_i=1 \text{ (قاطعة مغلقة)}$$

$$S_i=0 \text{ (قاطعة مفتوحة)}$$

$$\text{حيث } i=(a,b,c)$$

للتعبير عن توترات المخرج للمحول الالكتروني بناءا على توتر المدخل المستمر وحالة المفاتيح نميز الحالات التالية :

- الحالة 1:

$$S_a = 1, S'_a = 0$$

$$S_a = 0, S'_a = 1$$

- الحالة 2:

$$S_b = 1, S'_b = 0$$

$$S_b = 0, S'_b = 1$$

- الحالة 3:

$$S_c = 1, S'_c = 0$$

$$S_c = 0, S'_c = 1$$

تعطى التوترات المراد الحصول عليها في مخرج الموج كمايلي:

$$\begin{cases} V_a = V_m \sin(\theta) \\ V_b = V_m \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ V_c = V_m \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (9.3)$$

بما أن النظام متوازن فإن:

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (10.3)$$

ومنه حسب علاقة شال يمكننا كتابة

$$\begin{cases} V_{an} = V_{ao} + V_{on} \\ V_{bn} = V_{bo} + V_{on} \\ V_{cn} = V_{co} + V_{on} \end{cases} \quad (11.3)$$

بجمع عبارات المعادلة (11.3)

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = V_{ao} + V_{bo} + V_{co} + 3V_{on} = 0 \quad (12.3)$$

$$V_{ao} + V_{bo} + V_{co} = -3V_{on}$$

اذن

$$V_{on} = -\frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (13.3)$$

باستبدال المعادلة (12.3) في المعادلة (11.3) نجد:

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co} \end{cases} \quad (14.3)$$

يمكننا تمثيل موج الجهد بواسطة مصفوفة والتي تضمن تحويل التيار من المستمر الى المتناوب ونرمز لها بـ $[T]$

$$[V_{AC}] = [T][V_{DC}]$$

$$\begin{pmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{pmatrix} = \frac{V_d}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{pmatrix} \quad (15.3)$$

$$[T] = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \quad (16.3)$$

1.3.3 تقنية عرض النبضة PWM

تعتبر تقنية عرض النبضة من أشهر الطرق المستخدمة في التحكم في فتح وغلق القواطع الالكترونية في وقتنا الحالي ويرمز لها بـ PWM. ويتم في هذا النوع من التحكم تخفيض معامل التشويش والتوافقيات. تهدف هذه التقنية الى الحصول على إشارة رقمية ذات تردد متغير يتناسب مع تغير الجهد وتردد الإشارة المراد توليدها.

يتم في هذا النوع من التحكم مقارنة موجة مرجعية جيبية ثلاثية الطور مع موجة حاملة مثلثية الشكل، تتميز هاتين الموجتين بـ:

f_{ref} : التردد المرجعي.

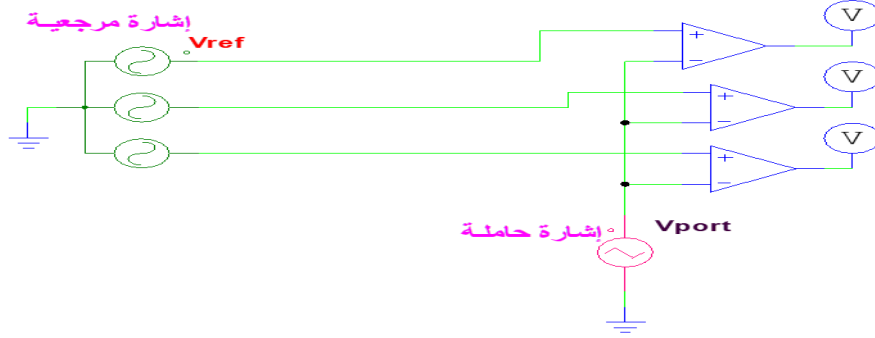
A_{ref} : مطال الموجة المرجعية.

f_{port} : تردد الموجة الحاملة.

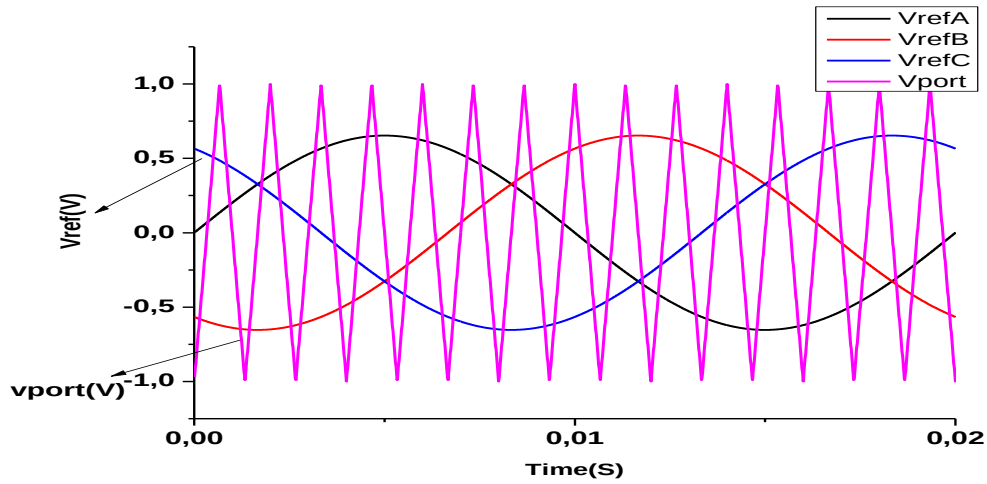
A_{port} : مطال الموجة الحاملة.

فواصل نقاط تقاطع الموجتين تحدد لنا لحظات اغلاق أو فتح القواطع الالكترونية ويتم ذلك باستخدام ثلاث مقارنات. مخارج هذه المقارنات تمثل اشارت منطقية (1,0) التي تطبق على بوابات القواطع الالكترونية. الشكل (6.3) يمثل النموذج الكهربائي لعملية المقارنة.

عند مقارنة الإشارة المرجعية والإشارة الحاملة بواسطة المقارن كما موضح في الشكل (6.3) تكون إشارات مخرج هذا الأخير كما مبينة في الشكل (9.3).



الشكل (6.3): نموذج مقارنة إشارة جيبية ثلاثية الطور مع إشارة مثلثية



الشكل (7.3): منحني تقاطع الإشارة المرجعية ثلاثية الطور والإشارة المثلثية

تتركز هذه التقنية على معاملين أساسيين من خلالهما نستطيع التحكم في توتر وتردد الخرج للموج هما:

❖ معامل التبديل m : يمثل النسبة بين تردد الموجة الحاملة (الموجة المثلثية) وتردد الموجة المرجعية (الجيبية) ويعطى بالعلاقة التالي:

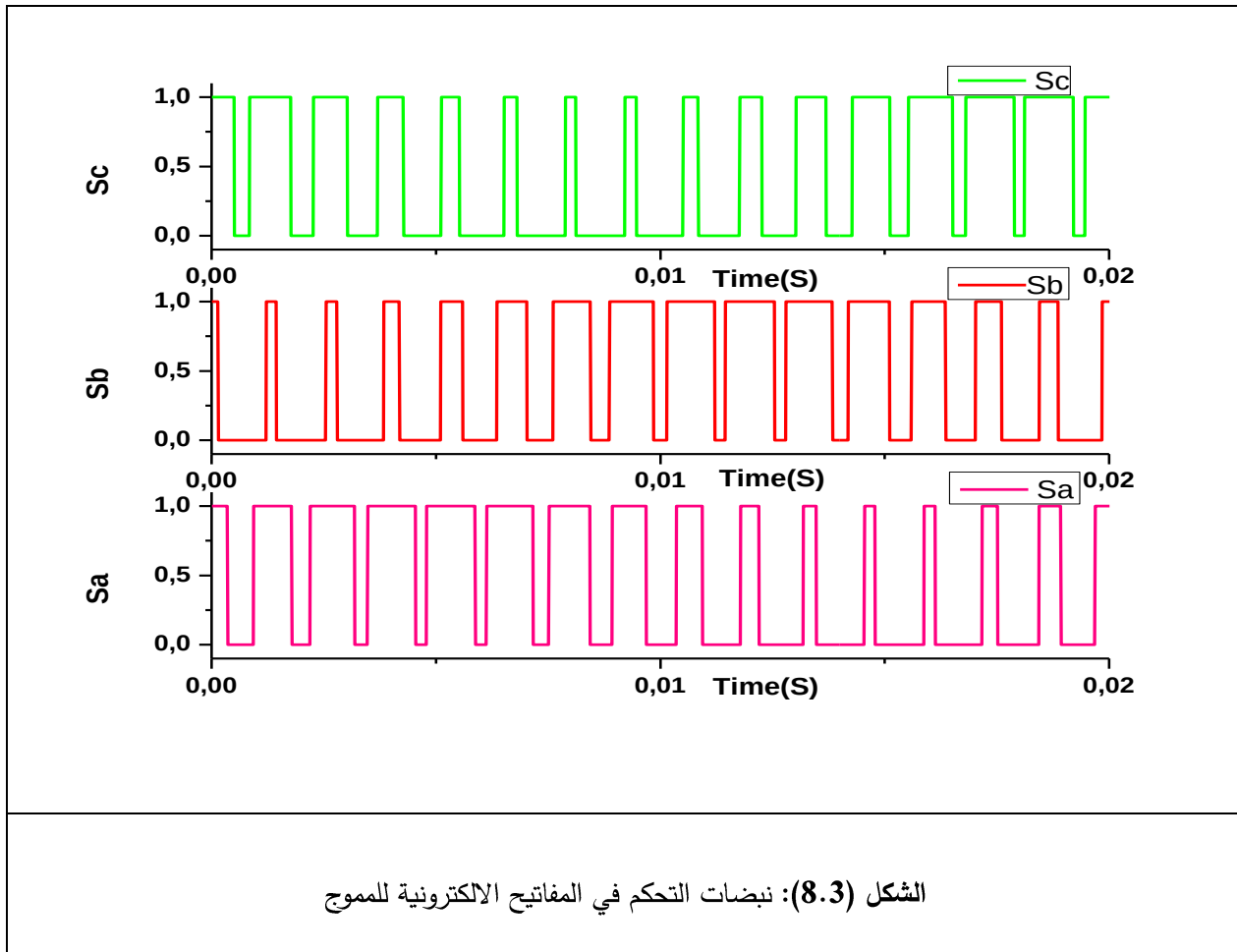
$$m = \frac{f_{port}}{f_{ref}} \quad (17.3)$$

❖ معامل التعديل r : يمثل النسبة بين مطال الموجة المرجعية ومطال الموجة الحاملة من خلاله يمكننا تغيير التوتر الأساسي للمخرج ويعطى بالعلاقة التالي:

$$r = \frac{V_{ref}}{V_{port}} \quad (18.3)$$

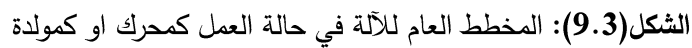
انطلاقاً من هذين المعاملين تعطى لقيمة العظمى لتوتر التوافقية الأساسية لمخرج المموج بالعلاقة التالية:

$$V = r \frac{V_{dc}}{2} \quad (19.3)$$



4.3 محاكاة المجموعة (محول الكتروني/BDFIM)

قمنا بمحاكاة المجموعة (محول الكتروني/BDFIM) باستعمال برنامج MATLAB حيث قمنا بمحاكاة المحول الالكتروني على حدة من أجل التحقق من المعادلات المميزة له، ثم محاكاة النظام الكلي. الشكل (9.3) يوضح لنا المخطط العام لعمل.



يتكون المحول الإلكتروني المستعمل في هذا التركيب من مقوم ثلاثي الطور غير محكوم والذي يقوم بتحويل توتر الشبكة المتناوب الي توتر مستمر وفق المعادلة (3.3) يكون شكل التوتر كما مبين في الشكل(11.3) ، حيث أن هذا الأخير يحتوي على تذبذبات مما يتطلب علينا استعمال مرشح لكي يصبح تيار المخرج مستمر الشكل (12.3). مموج ثلاثي الطور بتحكم MLI من أجل الحصول على توتر متناوب يمكننا التحكم في قيمته المتوسطة وتردده الشكل(13.3) وذلك انطلاقا من المعادلات الرياضية المذكورة سابقا.

$$r = \frac{A_{ref}}{A_{port}} \quad \text{نعلم أن}$$

$r = 0.8$

من أجل الحصول على قيمة جهد في مخرج المموج تساوي (8 V)

حسب العلاقة (19.3) نجد القيمة المتوسطة لمخرج المقوم كمايلي:

$$V = r \frac{V_{dc}}{2}$$

$$V_{dc} = \frac{2V}{r}$$

ومنه

$$V_{dc} = 20V$$

حسب العلاقة (3.3) يمكننا حساب جهد تغذية المقوم

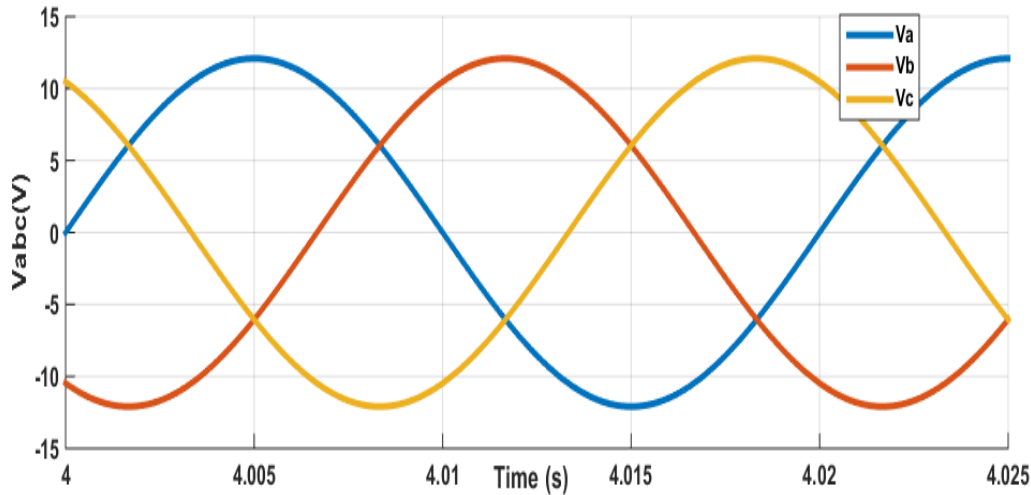
$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m$$

$$V_m = \frac{V_{dc} \cdot \pi}{3\sqrt{3}}$$

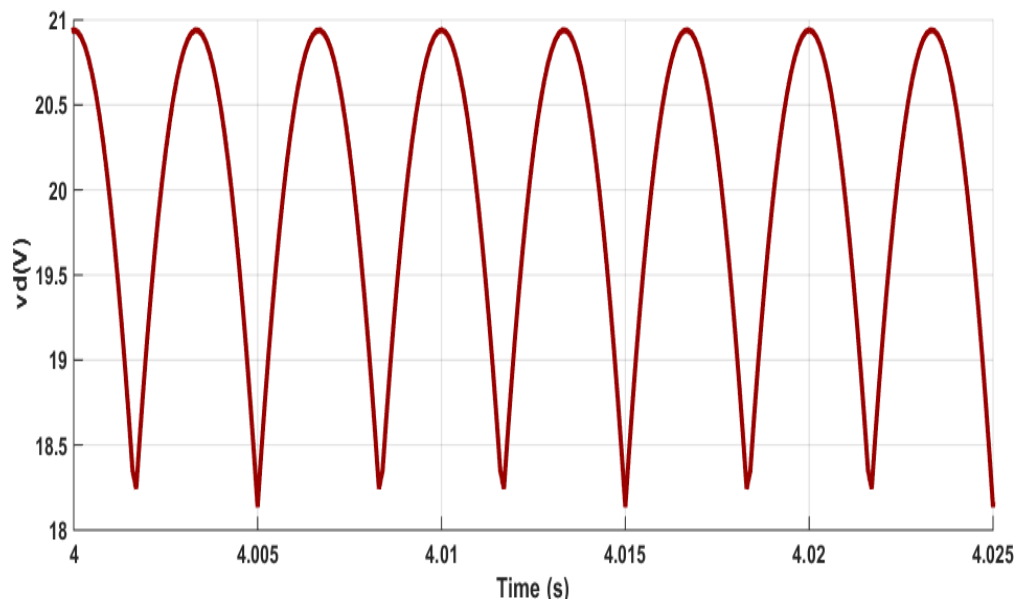
$$V_m = 12.09V$$

اذن من أجل الحصول على التشغيل الجيد للآلة وبنفس القيم النظرية يجب تغذية المقوم بمصدر جهد متناوب

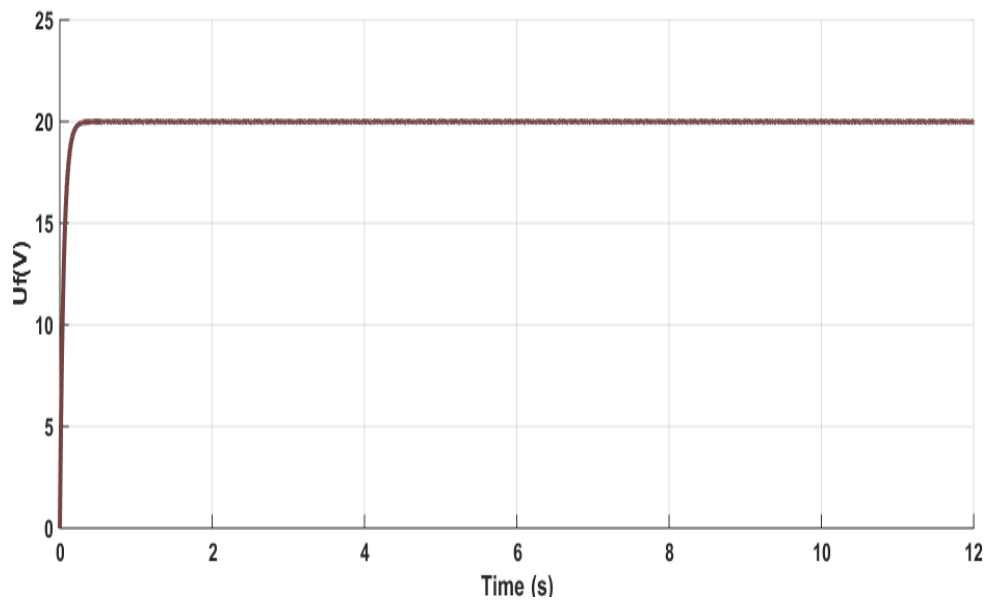
قيمه 12.09 V



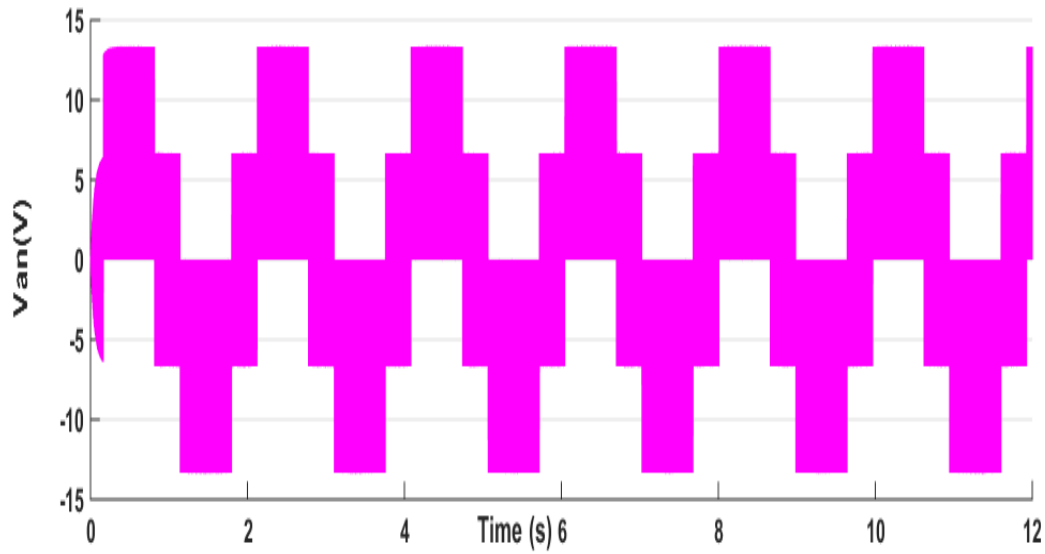
الشكل (10.3): شكل التوتر في مدخل المقوم



الشكل (11.3): توتر مخرج المقوم قبل الترشيح



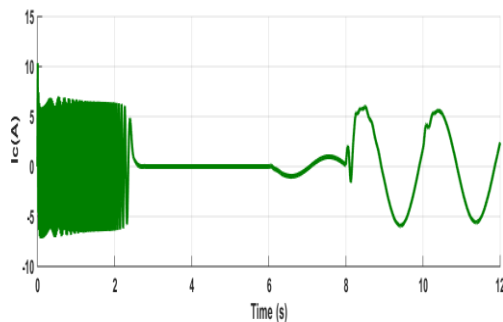
الشكل (12.3): توتر مخرج المقوم بعد الترشيح



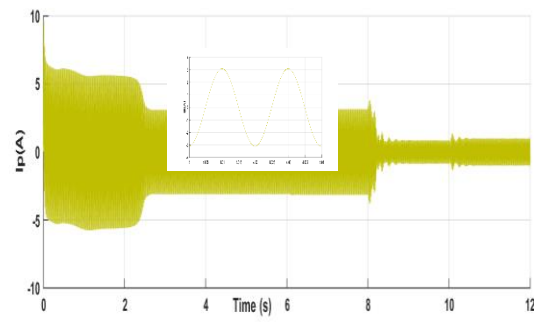
الشكل(13.3): التوتر البسيط لمخرج المموج

2.4.3 نتائج محاكاة المجموعة (محول الكتروني/BDFIM)

بعد محاكاة المحول الكتروني والآلة BDFIM كل على حدا. الآن قمنا بدمجهما ومحاكاة النظام الكلي المتكون من (محول الكتروني/BDFIM) وهذا من أجل البرهان أكثر على صحة النموذج المقدم ومدى كفاءة هذه الآلة. استعملنا في هذه المحاكاة الآلة M1، معاملات هذه الآلة مذكورة في الملحق B.

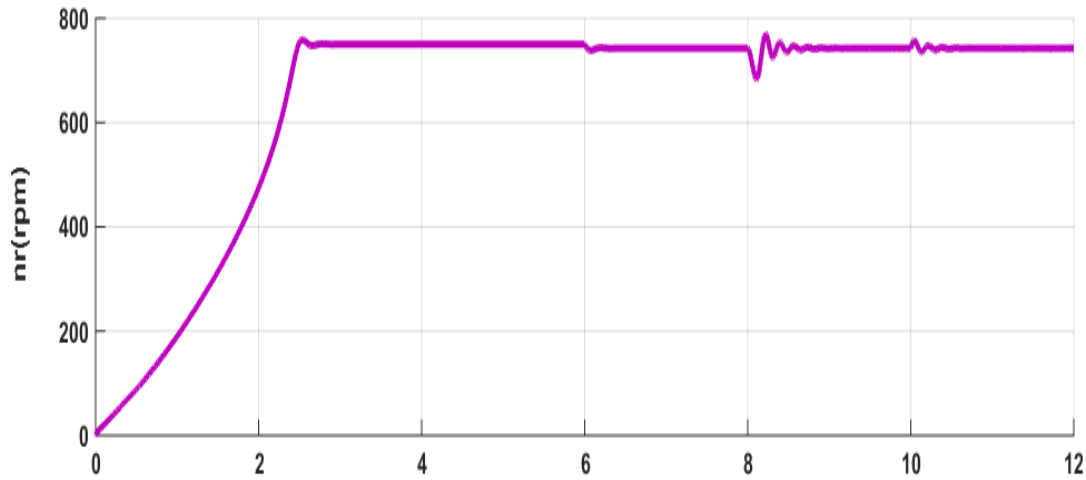


a

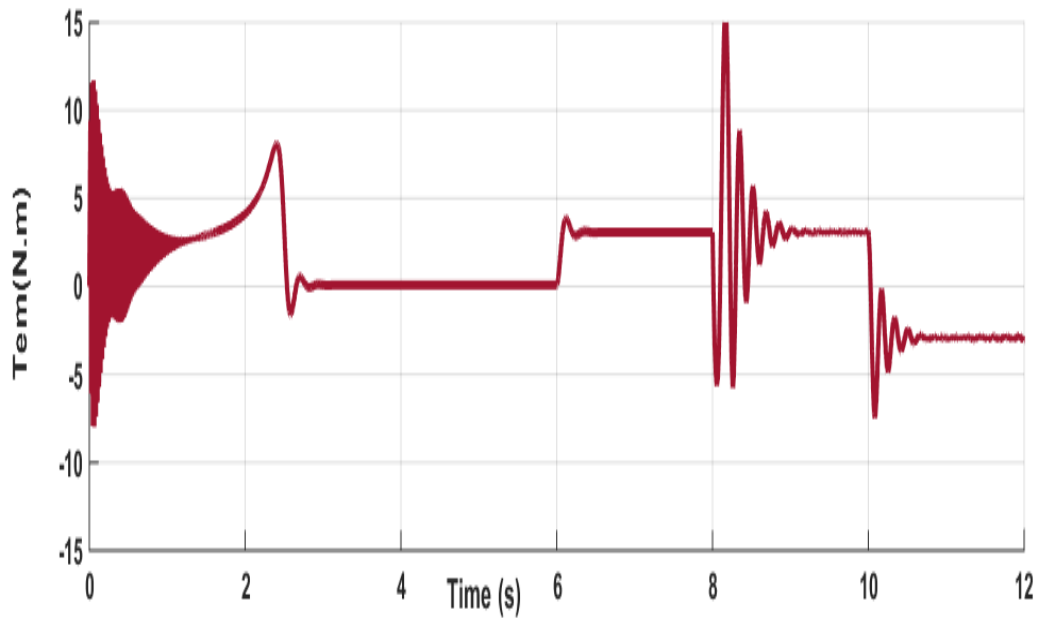


b

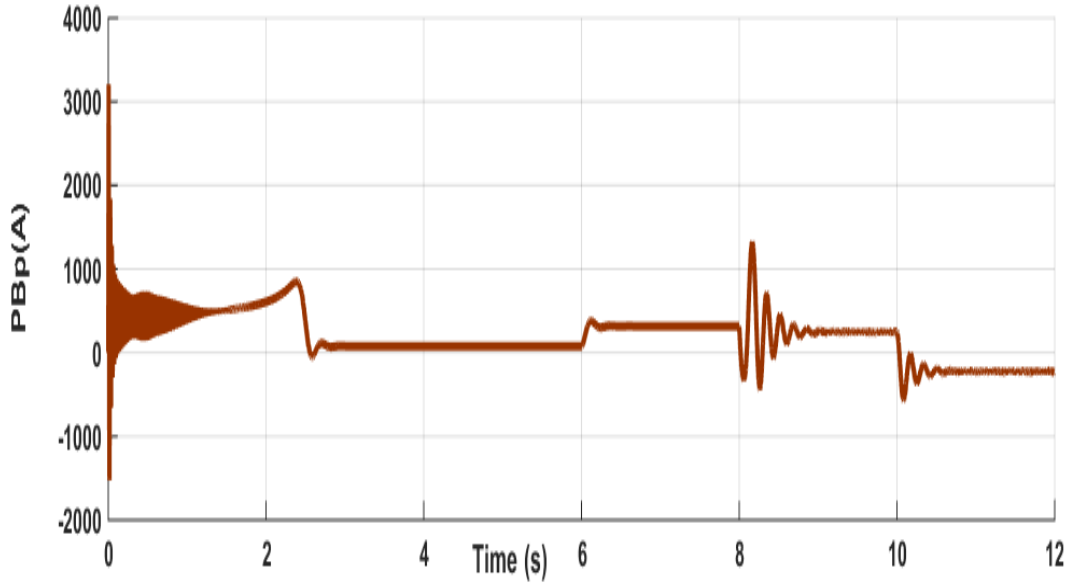
الشكل(14.3): اشكال تيارتي ساكن التحكم (a) وساكن الاستطاعة (b)



الشكل (15.3): سرعة دوران الآلة في الوضعين المتزامن والغير متزامن



الشكل (16.3): العزم الكهرومغناطيسي للآلة



الشكل (17.3): الاستطاعة في ساكن الاستطاعة

• تحليل النتائج

نتائج محاكاة تغذية الآلة BDFIM بالمموج موضحة في الأشكال السابقة، التحكم في هذه الحالة يكون بتقنية تعديل عرض النبضة MLI . حيث استعملنا الآلة M1 مع الحفاظ على نفس شروط المحاكاة الجدول (4.2) وأوضاع التشغيل الشكل (8.2) .

من خلال ملاحظتنا لهذه النتائج نجد أن هناك تشابه كبير مع نتائج المحاكاة عند تغذية BDFIM بتوتر جيبي، وذلك من ناحية السرعة، العزم الكهرومغناطيسي والاستطاعة. لكن الاختلاف الوحيد يكمن بظهور بعض التوافقيات كون المموج يعطي توتر ذو إشارة غير جيبية.

• الوضع الغير متزامن

خلال الفترة [0-6] قمنا بتطبيق عزم مقاوم معدوم مما سبب ارتفاع سرعة دوران الآلة حيث وصلت الى قيمة مساوية تقريبا الى السرعة الطبيعية الشكل (15.3)، في هذه الحالة تعمل الآلة كمحرك دون حمولة. تيار ساكن التحكم يؤول الى الصفر الشكل (14.3)(a) في حين تيار ساكن الاستطاعة يكون ذو قيمة كبيرة مقارنة بتيار

ساكن التحكم الشكل (14.3)(b). العزم الكهرومغناطيسي للآلة يكون قريب جدا من الصفر أي يساوي عزم الاحتكاك الشكل (16.3). الاستطاعة تكون قريبة من الصفر لعدم وجود حمولة الشكل (17.3).

في الفترة [6-8] طبقنا عزم مقاوم موجب قيمته $C_{rM1} = 3N.m$ في هذه الحالة تعمل الآلة كمحرك بحمولة في الوضع اللامتزامن. السرعة تتناقص عن الحالة السابقة وتثبت عند القيمة 742.38 rpm الشكل (15.3). التيار في ساكن الاستطاعة يكون جيبى وتزداد قيمته مقارنة بالفترة السابقة الشكل (14.3)(b)، أما تيار ساكن التحكم يكون صغير جدا. كل من الاستطاعة في ساكن الاستطاعة والعزم الكهرومغناطيسي للآلة تزداد قيمتها وتكون موجبة وهذا بين عمل الآلة كمحرك الشكل (16.3).

في الفترة [8-10] قمنا بتطبيق عزم مقاوم موجب القيمة مع تغذية ساكن التحكم بتوتر تردده 0.54Hz قمنا بحسابة انطلاقا من علاقة التزامن $f_c = f_p - (P_p + P_c) \frac{nr}{60}$. الآلة تعمل كمحرك بحمولة في الوضع المتزامن. التيار في ساكن الاستطاعة تتناقص قيمته بالنسبة للحالة السابقة الشكل، في حين تيار ساكن التحكم تزداد قيمته الشكل (14.3).

خلال الفترة [10-12] قمنا بتطبيق عزم مقاوم سالب في هذه الحالة تعمل الآلة كمولدة في الوضع المتزامن تكون سرعة الدوران نفسها في الحالات السابقة، في حين كل من العزم الكهرومغناطيسي والاستطاعة في ساكن الاستطاعة يكون سالب وهذا ما يفسر عمل الآلة كمولدة.

خاتمة

في هذا الفصل قمنا بدراسة وصفية للمجموعة (محول الكتروني/BDFIM) حيث ساكن الاستطاعة مربوط مع الشبكة مباشرة في حين ربط ساكن التحكم مع محول الكتروني (مقوم-مرشح-مموج) المتحكم فيه بتقنية عرض النبضة بدل من استعمال مصدر جهد جيبى. بعد النمذجة قمنا بمحاكاة النظام الكلي عند عمل الآلة كمحرك وكمولد تحت التزامن. النتائج المتحصل عليها مشابهة لنتائج الفصل السابق وكذلك للنتائج النظرية وهذا ما بين لنا فعالية المحول الإلكتروني ذو تحكم MLI الذي مكنا من الوصول الى إشارة جهد متحكم في ترددها وقيمتها وتقريبا خالية من التشوهات.

خاتمة عامة

خاتمة عامة

إن الهدف الأول من هذه المذكرة هو نمذجة ومحاكاة الآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية دون مسفرات BDFIM. باختصار تم تناول العديد من الجوانب المهمة المتعلقة بهذه الآلة.

حيث قمنا في أول الأمر بإعطاء نظرة شاملة على مختلف التراكيب الممكنة للـ BDFIM ومبدأ عملها الذي يتركز على تداخل الحقول المغناطيسية الدوارة التي تنتج في لفتي الساكن، إضافة إلى تحليل جميع أوضاع التشغيل المختلفة والمقارنة بينها، كما أنها صممت خصيصاً للعمل في النظام المتزامن، مع تسليط الضوء على سلبياتها وإيجابياتها، توصلنا إلى أنه يمكن اعتبارها أكثر اقتصادية من الآلات التقليدية.

كما قمنا أيضاً بنمذجة رياضية لهذه الآلة انطلاقاً من تركيب آلتين DFIM، وبعد استخلاص القيم المكافئة والنموذج الرياضي العام قمنا بإجراء اختبار على هذا النموذج وذلك باستعمال برنامج المحاكاة MATLAB وتحليل النتائج التي تم الحصول عليها، تم استخدام هذه النتائج لفهم أداء الآلة في النظام الديناميكي والنظام الدائم وتقييم تأثيرها على نظام الطاقة.

وفي النهاية قمنا بمحاكاة الآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية دون مسفرات مع محول الكتروني في حالتين حالة مولدة لا تزامنية وحالة محرك بحمولة، نتائج المحاكاة المتحصل عليها ببرنامج MATLAB تقترب من نتائج الدراسة النظرية. هذا ما تمت دراسته لتقييم أداء الآلة.

من خلال هذه الدراسة الشاملة والتحليل المعمق للآلة اللاتزامنية ثنائية التغذية دون مسفرات، يمكن القول بثقة أن هذه الآلة تمثل تقدماً هاماً في مجال الهندسة الكهربائية. وتساهم في تحسين أداء أنظمة الطاقة الكهربائية وتحقيق كفاءة عالية في نقل الطاقة وتقليل فقدائها.

نأمل أن تكون هذه المذكرة قد أضافت قيمة معرفية جديدة ومساهمة في تطوير المجال. ونتطلع إلى المزيد من البحوث والتطوير في هذا المجال المثير.

المراجع

- [1]: T.H. Ortmeyer and W.U. Borger, Control of Cascaded Doubly Fed Machines for Generator Applications. Power Apparatus and System, IEEE Transactions on, PAS 103(9) :2564-2571, Sept 1984.
- [2]: J.A. Weimer. The role of electric machines and drives in the more electric aircraft. In Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03. IEEE International, volume 1, pages 11-15 vol.1, June 2003.
- [3]: Kostyantyn Protsenko and Dewei Xu Modeling and Control of Brushless Doubly-Fed Induction Generator in Wind Energy Applications', In IEEE Transactions on Power Electronics, vol.23, no.3, pp.1191–1197, MAY 2008
- [4]: R.A. McMahon, P.C. Roberts, X. Wang, and P J Tavner. Performance of BDFM as generator and motor. Electric Power Applications, IEE Proceedings, 153(2) :289-299, March 2006
- [5]: B. Hopfensperger and G.J. Atkinson Doubly-fed a.c. machines : classification and comparison. In EPE Conf. Proceedings, Gratz, Austria, 2001
- [6]: A.R.W Broadway Cageless induction machine. Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of, 118(11) :1593-1600, November 1971.
- [7]: L. Xu, F. Liang, and T. A. Lipo. Transient model of a doubly excited reluctance motor. IEEE Transactions on Energy Conversion, 6(1) :126-133, Mar 1991
- [8]: L. Xu, Y. Tang, and L. Ye Comparison study of rotor structures of doubly excited brushless reluctance machine by finite element analysis. IEEE Transactions on Energy Conversion, 9(1) :165-172, Mar 1994.
- [9]: R.E. Betz and M.G. Jovanovic Theoretical analysis of control properties for the brushless doubly fed reluctance machine. IEEE Transactions on Energy Conversion, 17(3) :332-339, Sep 2002.
- [10]: M. G. Jovanovic and R. E. Betz Power factor control using brushless doubly fed reluctance machines. In Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE, Vol. 1, pp. 523-530, 2000
- [11]: M.G. Jovanovic, R.E. Betz, and J. Yu The use of doubly fed reluctance machines for large pumps and wind turbines. IEEE Transactions on Industry Applications, 38(6) :1508-1516, Nov 2002.
- [12]: R.E. Betz and M.G. Jovanovic. Theoretical analysis of control properties for the brushless doubly fed reluctance machine. IEEE Transactions on Energy Conversion, 17(3):332-339, Sep 2002.
- [13]: A.M. Knight, R.E. Betz, W.K. Song, and D G. Dorrell. Brushless doubly fed reluctance machine rotor design. In Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012 IEEE, pages 2308-2315, Sept 2012.
- [14]: Hunt, A new type of induction motor. Electrical Engineers, Journal of the Institution of, 39(186) :648-667, September 1907
- [15]: A.R.W Broadway and L. Burbridge Self-cascaded machine : a low-speed motor or high frequency brushless alternator. Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of, 117(7) :1277-1290, July 1970.

[16]: م. ربيع جميل محفوض، قيادة مولدة ريحية تحريضية بتغذية مضاعفة دون مسفترات. رسالة أعدت لنيل شهادة الماجستير اختصاص هندسة نظم القدرة الكهربائية قسم هندسة الطاقة الكهربائية كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية.

[17]: Tohidi, S.; Zolghadri, M.R.; Oraee, H.; Tavner, P.; Abdi, E.; Logan, T. (Performance of The Brushless Doubly-Fed Machine Under Normal and Fault Conditions). IET Electr. Power Appl., VOL. 6, NO. 9, 621-627. Available online at www.ietdl.org.

[18] : Roberts, P.C. ; McMahon, R.A. ; Tavner, P.J. ; Maciejowski, J.M. ; Flack, T.J. (Equivalent Circuit for The Brushless Doubly-Fed Machine (BDFM) Including Parameter Estimation and Experimental Verification). IEE Proc. -Electr. Power Appl., VOL. 152, NO. 4, 933-942) Jul. 2005).

[19] : Williamson, S. ; Ferreira, A.C. ; Wallace, A.K. (Mar. 1997). (Generalised Theory of The Brushless Doubly-Fed Machine. Part1 : Analysis). IEE Proc. - Electr. Power Appl., VOL. 144, NO.2, 111-122.

[20] : TIR ZOUIHIR, Contribution à l'étude d'une machine asynchrone a double alimentation sans balais en vue de son application dans le domaine de l'énergie éolienne/doctorat en électrotechnique.

[21] : ATALLAH Salim. Modélisation et commande d'une BDFM Magister en électrotechnique.

[22] : I. SARASOLA ALTUNA. Control robusto de una maquina de induccion doblemente alimentada por el estator en aplicaciones de generacion de energia a velocidad variable/tesis doctoral en el programa de doctorado en automatica y electronica.

[23] : D. Zhou, R. Spee, and A. K. Wallace Laboratory control implementations for doubly fed machines, in Proc. International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation

[24] : D. RAHAB Abderrazak, STRATÉGIES DE COMMANDE DES CONVERTISSEURS STATIQUES DÉDIÉS À UNE PRODUCTION DÉCENTRALISÉE DE TYPE ÉOLIEN /DOCTORAT EN SCIENCES EN ELECTROTECHNIQUE.

[25] : J. Poza, E. Oarvide, D. Roye, and I. Sarasola Stability analysis of a BDFM under open loop voltage control, in European Conference on Power Electronics and Applications

[26] : I. Sarasola, J. Poza, E. Oyarvide, and M. A. Rodriguez Stability analysis of a brushless doubly-fed machine Under closed loop scalar current control, in Proc. Of IEEE 32nd Annual Conference on Industrial

[27] : D. Zhou, and R. Spee Synchronous frame model and decoupled control development for doubly-fed machines," in Proc. Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference

[28] : R.E. Betz and M. G Theoretical analysis of control properties for the brushless doubly fed reluctance machine. IEEE Transactions on Energy Conversion.

[29] : F. Barati, R. McMahon, S. Y. Shao, E. Abdi, and H. Oraee, Generalized vector control for brushless doubly fed machines with nested-loop rotor, IEEE Transactions on Industrial Electronics

[30] : F. G. Zhang, S. Jin, W. Zhang Direct torque control for brushless doubly-fed wind power generator based on speed sensor less Transactions of China Electrotechnical Society.

- [31] : J. H. Yang, H. Z. Lv, J. Wu, and J. M. Yang Direct torque control strategy for brushless doubly-fed machines based on Popov hyper stability theory, Proceedings of the CSEE.
- [32] : S. Jin, Z. Z. Wang, D. R. Wand, L. C. Zhu Direct power control for open-winding brushless doubly-fed generator based on power error comparison. Transactions of China Electro technical Society.
- [33]: E. Wiedenbrug, M. Boger, A. Wallace, and D. Patterson Electromagnetic mechanism of synchronous operation of the brushless doubly-fed machine, in IAS '95. Conference Record of the 1995 IEEE Industry Applications Conference Thirtieth IAS Annual Meeting, vol. 1, pp. 774-780, IEEE, 1995.
- [34]: S. Williamson, A. Ferreira, and A. Wallace, Generalised theory of the brushless doubly-fed machine. Part 1: Analysis," IEE Proceedings - Electric Power Applications, vol. 144, no. 2, p. 111, 1997
- [35]: R. McMahon, P. Roberts, X. Wang, and P. Tavner Performance of BDFM as generator and motor," IEE Proceedings - Electric Power Applications, vol. 153, no. 2, p. 289, 2006.
- [36] : I. Sarasola, Control robusto de una maquina de induccion doblemente alimentada por el estator en aplicaciones de generacion de energia a velocidad variable » Tesis Doctoral en el programa de Doctorado en AUTOMATICA Y ELECTRONICA
- [37]: P. Roberts, R. McMahon, P. Tavner, J. Maciejowski, and T. Flack, "Equivalent circuit for the brushless doubly fed machine (BDFM) including parameter estimation and experimental verification," IEE Proceedings - Electric Power Applications, vol. 152, no. 4, p. 933, 2005.
- [38]: R. Spee, A. Wallace, and G. Alexander "Synchronous drive performance of brushless doubly-fed motors," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 30, no. 4, pp. 963-970, 1994.
- [39]: Roberts, P.C., McMahon, R.A., Tavner, P.J., Maciejowski, J.M. and Flack, T.J.: 'Equivalent circuit for the brushless doublyfed machine (BDFM) including parameter estimation and experimentalverification', IET ProceedingsElectrical Power Applications, 2005, 152, (4), pp. 933-942.
- [40] : F. J. POZA LOBO « Modélisation, conception et commande d'une machine asynchrone sans balais doublement alimentée pour la génération a vitesse variable » Thèse de Doctorant. INSNat Poly Grenoble 2003
- [41]: Tohidi, S., Zolghadri, M.R., 'Performance of the brushless doubly-fed machine under normal and fault conditions', IET Electr. Power Appl., 2012, 6, (9), pp. 621-627.
- [42]: Long, T., Shao, S., Abdi, E. 'Asymmetrical low-voltage ride through of brushless doubly fed induction generators for the wind power generation', IEEE Trans. Energy Convers., 2013, 28, (3), pp. 502-511.
- [43]: Roberts, P.C.A study of brushless doubly fed (induction) machines', Ph.D. dissertation, Emanuel College, University of Cambridge, Cambridge, 2004

- [44]: Roberts, P.C., Jalebi, E.A., McMahon, R.A., et al.: 'Real-time rotor bar current measurements using Bluetooth technology for a brushless doubly fed machine (BDFM)'. Second Int. Conf. on Power Electronics, Machines and Drives, 2004 (PEMD 2004), 2004, vol. 1, pp. 120-125.
- [45]: SajjadTohidi 'Analysis and simplified modelling of brushless doubly-fed induction machine in synchronous mode of operation' 'IET Electric Power Applications, February 2016, the Institution of Engineering and Technology.
- [46] : Poza, J., Oyarbide, E., Roye, D., et al. 'Unified reference frame dq model of the brushless doubly fed machine' 'IEE Proc., Electr. Power Appl., 2006, 153, (5), pp. 726734.
- [47]: RamtinSadeghi, Seyed M, Madani, Mohammad Ataei 'a new smooth synchronisation of brushless doubly fed induction generator by applying a proposed machine model', iee transactions on sustainable energy, vol.9, no 1, January 2018.
- [48]: K. Protsenko "Modeling and Control of Brushless Doubly-Fed Induction Generators in Wind Energy Applications," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 23, pp. 1191–1197, May 2008.
- [49]: N. PATIN, E. MONMASSON, J.-P. Louis "Modeling and Control of a Cascaded Doubly-Fed Induction Generator based on Dynamical Equivalent Circuits," Mathematics and Computers in Simulation (2008) 'doi: 10.1016/j.matcom.2010.04.016.
- [50]: B. Hopfensperger, D.J. Atkinson and R.A. Lakin Combined magnetising flux-oriented control of the cascaded doubly fed induction machine "", in IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 148, No. 4, July 2001.
- [51]: GrzegorzIwanski Gonzalo Abad'Modeling and laboratory research on brushless DFIG''The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering (2011), Vol. 31Iss 1 pp. 248 – 260
- [52]: Tohidi, S., Tavner, P., McMahon, R., et al 'Low voltage ride-through of DFIG and brushless DFIG: Similarities and differences', Electr. Power Syst. Res., 2014, 110, pp. 64-72.
- [53]: Tohidi, S., Oraee, H., Zolghadri, M.R., 'Analysis and enhancement of low-voltage ride-through capability of brushless doubly fed induction generator', IEEE Trans. Ind. Electron., 2013, 60, (3), pp. 1146-1155.
- [54]: Professor Mohammed T. Lazim " power electronics and drives" philadelphia university. Jordan/2019.
- [55] : kasmouri Alham."Étude par simulation de la commande MLI d un redresseur de courant" university Mohamed Khaider de Biskra. Samedi 6 juillet 2019.
- [56] : "Étude et simulation d un filtre actif série"dirige par Dr. Mahni Tidjani. University El-oued.2021.

الملاحق

• الملحق A

1. تحويلة بارك المباشرة

تهدف الى تحويل النموذج الرياضي للآلة من النظام الثلاثي الى النظام الثنائي وذلك لتسهيل الدراسة.

تعطى مصفوفة بارك المباشر بالعبارة التالية:

$$P[\theta] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

الزاوية θ تمثل زاوية دوران الشعاع في النظام الثنائي.

$$P[\theta_c] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \theta_c & \cos\left(\theta_c - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_c + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta_c & -\sin\left(\theta_c - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_c + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

$$\theta_c = \int \omega_c = \int 2\pi f_c dt$$

حيث:

$$P[\theta_p] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \theta_p & \cos\left(\theta_p - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_p + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta_p & -\sin\left(\theta_p - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_p + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

$$\theta_p = \int \omega_p = \int 2\pi f_p dt$$

حيث:

$$P[\theta_r] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \theta_r & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta_r & -\sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

$$\theta_r = \int \omega_r = \int 2\pi f_r dt$$

حيث:

2. تحويلة بارك العكسية

تسمح لنا تحويلة بارك العكسية بالرجوع من النظام الثنائي الي النظام الثلاثي، حيث تعطى مصفوفة بارك

العكسية بالعبارة التالية:

$$P^{-1}[\theta] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

معاملات الآلة M1

القيمة	المعامل
2.5 KW	الاستطاعة الاسمية
220/380V	توتر التغذية
750 rpm	سرعة التزامن الاسمية
50 Hz	التواتر (f)
3/1	عدد أزواج الأقطاب (P_c / P_p)
$(1.732/1.079) \Omega$	مقاومة الساكن (R_{SP} / R_{SC})
0.473Ω	مقاومة الدوار (R_r)
$(714.8/121.7) \text{ mH}$	الحث الدوري للساكن (L_{SP} / L_{SC})
132.6 mH	الحث الدوري للدوار (L_r)
$(242.1/59.8) \text{ mH}$	الحث المتبادل لساكن التحكم والاستطاعة
0.3 Kg.m^2	عزم العطالة (J)
0.0036 N.ms/rd	معامل الاحتكاك (K_f)

معاملات الآلة M2

القيمة	المعامل
3.5 KW	الاستطاعة الاسمية
230/400V	توتر التغذية
1500 rpm	سرعة التزامن الاسمية
50 Hz	التواتر (f)
2	عدد أزواج الأقطاب (P)
1.273Ω	مقاومة الساكن (R_s)
0.86Ω	مقاومة الدوار (R_r)
0.0096 H	الحث الدوري للساكن (L_s)
0.0047 H	الحث الدوري للدوار (L_r)
0.225 H	الحث المتبادل لساكن التحكم والاستطاعة
0.56 Kg.m^2	عزم العطالة (J)
0.0078 N.ms/rd	معامل الاحتكاك (K_f)

معاملات الآلة M3

القيمة	المعامل
250 KW	الاستطاعة الاسمية
400/690V	توتر التغذية
500 tr/m	سرعة التزامن الاسمية
50 Hz	التواتر (f)
4/2	عدد أزواج الأقطاب (P_c / P_p)
$(0.079/0.621) \Omega$	مقاومة الساكن (R_{SP} / R_{SC})
$(0.0007706) \Omega$	مقاومة الدوار (R_r)
$(0.105/0.392) H$	الحث الدوري للساكن (L_{SP} / L_{SC})
0.0002602 H	الحث الدوري للدوار (L_r)
$(0.004/0.392) H$	الحث المتبادل لساكن التحكم والاستطاعة
20 Kg.m ²	عزم العطالة (J)
0.5 N.ms/rd	معامل الاحتكاك (K_f)