



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
المدرسة العليا لأساتذة التعليم التكنولوجي - سكيكدة -

قسم التكنولوجيا

التخصص: هندسة كهربائية

مذكرة التخرج لنيل شهادة أستاذ التعليم الثانوي

التحكم المباشر بالعزم DTC في المحركات اللاتزامنية ثلاثية
الطور

من إعداد :

بوسعدة شهيناز

معوش رهام

لجنة المناقشة :

م.ع.أ.ت.ت.سكيكدة

رئيسا

أستاذ محاضر صنف - ب -

حجامي مروان

م.ع.أ.ت.ت.سكيكدة

مؤظرا

أستاذ محاضر صنف - ب -

رحاب عبد الرزاق

م.ع.أ.ت.ت.سكيكدة

ممتحنا

أستاذ محاضر صنف - ب -

سناني فوزي

السنة الجامعية : 2024/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

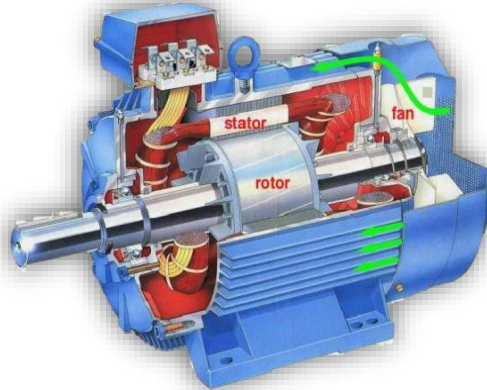
شكر و عرفان

لقول النبي ﷺ: "من لا يشكر الناس لا يشكره الله "

إلى الله قبل كل شيء نحمدك ربنا حمدا و شكرا يليق بجلال وجهك و عظيم سلطانك أن وقفنا
وألهمنا الصبر على المشاق التي واجهتنا لإنجاز هذا العمل المتواضع.

نتوجه بجزيل الشكر و الامتنان للأستاذ الدكتور " **رحاب عبد الرزاق** " على توجيهاته المستمرة
و كل المعلومات و النصائح القيمة التي ساهمت في إثراء موضوعنا و إتمام هذه المذكرة.
ولا يفوتنا أن نشكر الطاقم الإداري و التعليمي بالمدرسة العليا للأساتذة -سكيكدة- و بالأخص
أساتذة قسم التكنولوجيا كل التقدير.

وفي الأخير لا يسعنا إلا أن ندعو الله عز وجل أن يرزقنا السداد والإرشاد، وأن يكون بحثنا خالصا
لوجه الله وأن يثبتنا على ما وقفنا إليه.





الحمد لله الذي ما تم جهد ولا ختم سعي إلا بفضله و ما تخطى العبد من عقبات و صعوبات إلا بتوفيقه الحمد لله على لذة الإنجاز و الحمد لله عند البدء و الختام

بعد و مشقة دامت خمس سنوات في سبيل الحلم و العلم حملت في طياتها أمنيات الليالي ، أصبح عنائي اليوم للعين قرة . ها أنا اليوم أقف على عتبة تخرجي أقطف ثمار تعبني و ارفع قبعتي بكل فخر فالحمد لله الذي هيا لي البداية و يسر لي الطريق و طيب لي المنتهى

وبكل حب أهدي ثمرة نجاحي و تخرجي

إلى من زين اسمي بأجمل الألقاب، إلى من دعمني بلا حدود و أعطاني بلا مقابل، إلى من علمني أن الدنيا ساحة كفاح و سلاحها العلم و المعرفة ، إلى من أضاء دروبي و ساندني في كل خطوة أخطوها

فخري و اعتزازي "أبي العزيز "

إلى من هي في الحياة حياة ، إلى من جعل الله الجنة تحت أقدامها و احتضنتني قلبها قبل يديها ، إلى نبراسي الذي أنار لي عتمة الليالي ، إلى من كان دعائها سر نجاحي و حنانها بسلم جراجي

ملاذي الآمن " أمي الحبيبة "

إلى من أعز الله لهم مكانة في قلبي، إلى إخوتي الأحباء (ملاكي الصغير منار – أيمن)

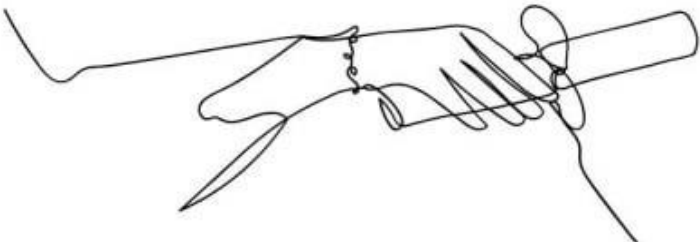
إلى من عشت معها جميع اللحظات، إلى من عرفت فيها الود و الوفاء، إلى من لطفها و طيبتها ذللت لي الصعوبات ، إلى رفيقة الروح

صديقتي و أختي الجميلة "بوسعدة شهيناز "

إلى رفاق الخطوة الأولى و الأخيرة ، إلى من كانوا خلال السنين العجاف سحابا ممطرا ، إلى من أنستني طيبتهم و أسعدتني رفقتهم ، أنا ممتنة لحبكم .شلة صديقاتي :

(منال-هديل-راضية ونام- بثينة-بسمة – أمينة-أشواق-ميسون-لينا رحاب- حسناء-بديعة-هاجر- صبرين)

وانتهت مسيرة أعوام أنا بطلتها



أمعوش رهام



و آخر دعواهم أن الحمد لله رب العالمين

الحمد لله حبا وشكرا و امتنانا، ما كنت لأفعل هذا لولا فضل الله فالحمد لله على البدء و الختام

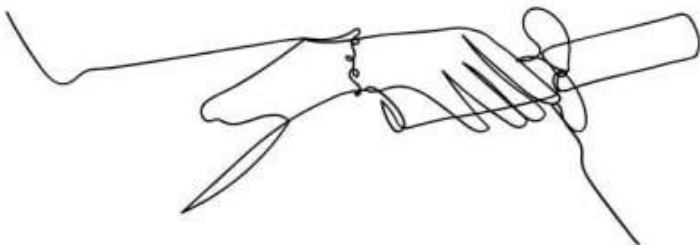
أهدي ثمرة نجاحي هذه إلى
إلى أغلى من سكن قلبي ،قدوتي، إلى من رحل قبل أن يشاركني فرحتي و نجاحي ،
إلى الرجل الذي أفخر أنني ابنته "أبي" رحمة الله عليه .
إلى جنتي في هذه الدنيا و قوتي من بعد الله ،إلى معنى الحب و الحنان و التفاني
داعمتي الأولى و الأبدية، إلى غاليتي دائما و أبدا "أمي".
إلى من كانتا خير سند لي و أجمل عطايا الرحمان في حياتي أختاي العزيزتان
"وصال" و "راضية"

إلى جدتي تلك المرأة الطيبة التي ظلت دعواتها ترافقني و تنقذني دائما.
إلى رفيقة دربي و توأم روحي ،إلى من هونت رفقتها تعب هذه الطريق
إلى صديقتي "معوش ريهام"

إلى خير ناصحة لي ،إلى سندي في هذه الرحلة إلى صديقتي "جندي وئام"
إلى من مدت أياديهم في أوقات الضعف ،أصدقاء الطرق جميعا الصعبة و السهلة
إلى جميع صديقاتي بالأخص "هديل" و "ملاك"

إلى كل من أشعل شمعة في دروب علمي و جعلوني ما أنا عليه الآن
إلى جميع أساتذتي الأفاضل

إلى جميع من مر في حياتي و ترك أثرا
شكرا



بوسعدره شهيناز

Boussada Chahinez

ملخص:

إن التقدم الذي تم إحرازه مؤخرًا في مجالات إلكترونيك القدرة سمح بتصميم دوائر إلكترونية تمكن من الحصول على منبع قدرة بمواصفات خاصة للجهد و التردد بالتالي القدرة على التحكم في سرعة المحركات و خصوصا محركات التيار المتردد. من خلال هذه المذكرة سيتم مناقشة تقنية التحكم في العزم المباشر تعتبر طريقة تحكم متقدمة للمحركات التحريضية لتكون بديلا لتقنية التحكم الشعاعي بتوجيه الفيض ، فهي تقدم العديد من المزايا التي تشمل استجابة سريعة، كفاءة عالية، تنفيذ بسيط ، ومتطلبات أجهزة محدودة و هو ما سنتأكد منه من خلال نتائج محاكاة كل من تقنية DTC و FOC باستعمال برنامج MATLAB/SIMULINK.

الكلمات المفتاحية :

المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور، العاكس ، التحكم المباشر بالعزم ، التحكم بتوجيه الفيض.

Abstract

Recent advances in power electronics have allowed the design of electronic circuits enabling a power source with special specifications for voltage and frequency, thus the ability to control the speed of motors and especially alternating current motors AC motors.

Through this note, direct torque control technology which is an advanced control method for induction motors, will be discussed as an alternative to flood-guided radio motor technology They offer many advantages that include a quick torque response, high efficiency, simple execution, and limited hardware requirements. Which we will ensure of through the results of simulating both DTC and FOC technology using MATLAB/SIMULINK software.

Key words

Three-phase asynchronous motor , inverter, direct torque control, field oriented control.

رقم الصفحة	العنوان
01	مقدمة
الفصل الأول : عموميات حول المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور	
04	1.1 مقدمة
04	2.1 تكوين المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور
05	1.2.1 العضو الثابت (Stator)
05	2.2.1 العضو الدوار (Rotor)
05	1.2.2.1 العضو الدوار الملفوف (ذو حلقات الإنزلاق)
06	2.2.2.1 العضو الدوار ذو قفص السنجاب
07	3.1 الدارة المكافئة للمحرك اللاتزامني
07	4.1 مبدأ عمل المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور
08	1.4.1 أهم علاقات المحرك اللاتزامني
08	1.1.4.1 سرعة التزامن
08	2.1.4.1 الإنزلاق
08	3.1.4.1 سرعة الدوران
09	2.4.1 علاقات القدرة
11	5.1 طرق التحكم في سرعة المحركات اللاتزامنية ثلاثية الطور
11	1.5.1 التحكم السلمي Control scalar
12	2.5.1 التحكم بالتدفق الموجه FOC
12	2.2.5.1 التحكم بالعزم المباشر DTC
12	6.1 مميزات وعيوب المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور
13	6.1 خاتمة
الفصل الثاني : نمذجة المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور ومحاكاة تقنية التحكم الشعاعي	
15	1.2 مقدمة

15	2.2 تمثيل المحرك التحريضي في نظام المحاور الثلاثية (a,b,c)
17	1.2.2 معادلات الجهود
18	2.2.2 معادلات الفيوض
18	3.2.2 المعادلات الميكانيكية
18	3.2 التحويل من نظام المحاور الثلاثية إلى نظام المحاور الثنائية (Park)
21	1.3.2 حالة خاصة في تحويلة PARK
22	2.3.2 النمذجة الرياضية للمحرك التحريضي في معلم PARK
22	1.2.3.2 المعادلات الكهربائية والمغناطيسية
23	2.2.3.2 اختيار الجملة المرجعية للنمذجة
23	1.2.2.3.2 الجملة المرجعية المرتبطة بالجزء الثابت ($\alpha \beta$)
24	1.2.2.3.2 الجملة المرجعية المرتبطة بالحقل الدوار
26	4.2 العاكس ثلاثي الطور
29	1.4.2 طرق التحكم في العاكس ثلاثي الطور
29	1.1.4.2 التحكم البطائي
30	1.1.4.2 تقنية تعديل عرض النبضة الجيبية المثلي PWM
31	5.2 التحكم بتوجيه التدفق FOC
33	6.2 محاكاة تقنية التحكم بتوجيه الفيض FOC
34	نتائج المحاكاة
38	تحليل النتائج
39	7.2 خاتمة
الفصل الثالث: نمذجة و محاكاة تقنية التحكم المباشر بالعزم DTC في محرك لا تزامني ثلاثي الطور	
41	1.3 مقدمة
42	2.3 المبدأ العام لتشغيل خوارزمية التحكم بالعزم المباشر DTC
43	3.3 تقنية التحكم المباشر بالعزم اعتمادا على منظم السرعة

45	4.3 تقدير فيض الثابت Stator Flux Estimation
48	5.3 تقدير العزم الكهرومغناطيسي
48	6.3 التحكم بفيض الجزء الثابت و عزم المحرك الكهرومغناطيسي باستعمال المتحكمات البطائية
49	7.3 تحديد القطاع الذي ينتمي إليه شعاع فيض الثابت
50	8.3 اختيار حالات التبديل المناسبة
52	9.3 محاكاة تقنية DTC باستعمال MATLAB/SUMILINK
53	1.9.3 من أجل سرعة ثابتة و عزم متغير
56	2.9.3 من أجل عزم ثابت و سرعة متغيرة
59	3.9.3 نتائج المحاكاة لتجربة متانة الآلة
69	10.3 المقارنة بين إيجابيات و سلبيات تقنية FOC و تقنية DTC
70	11.3 خاتمة
72	خاتمة عامة

فهرس الأشكال

الصفحة	عنوان الشكل	رقم الشكل
أشكال الفصل الأول		
04	مقطع في المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور	1
05	العضو الثابت	2
06	الدوار الملفوف (ذو حلقات الإنزلاق)	3
06	الدوار ذو قفص السنجاب	4
07	الدارة المكافئة للمحرك اللاتزامني ثلاثي الطور منسوبة للثابت	5
08	مخطط يبين مبدأ عمل المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور	6
10	مخطط يوضح مختلف الإستطاعات للمحرك اللاتزامني ثلاثي الطور	7
11	المخطط الصندوقي لطريقة التحكم السلمي ب V/f	8
أشكال الفصل الثاني		
16	تمثيل تخطيطي لملفات المحرك التحريضي في الفضاء الكهربائي	1
19	المخطط الفيزيائي المكافئ لتحويل Park	2
19	التحديد الزاوي لأنظمة المحاور في الفضاء الكهربائي	3
27	البنية العامة للعاكس ثلاثي الطور	4
27	نموذج بسيط للعاكس بقاطعة مزدوجة	5
29	تمثيل مضلع التبديل لأشعة الجهد	6
30	مخطط مبدأ تقنية التحكم البطائي	7
30	مخطط مبدأ تقنية تعديل عرض النبضة الجيبي المثلي	8
32	مبدأ تقنية التحكم بتوجيه التدفق	9
33	مخطط التحكم بتوجيه التدفق	10
34	نتائج المحاكاة من أجل حمل ثابت ($T_r = 10N.m$) و سرعة متغيرة	11
36	نتائج المحاكاة من أجل سرعة ثابتة ($n=1400rpm$) و حمل متغير	12
38	نتائج المحاكاة من أجل سرعة ثابتة $n=1400rpm$ و عزم متغير	13

أشكال الفصل الثالث		
42	المخطط الصندوقي لتقنية التحكم المباشر بالعزم التقليدية	1
44	المخطط الصندوقي لتقنية التحكم المباشر بالعزم التقليدية بتنظيم السرعة	2
44	المخطط العملي لعملية تنظيم السرعة	3
46	تأثير أشعة جهود العاكس ثلاثي الطور على أشعة الفيض المغناطيسي للثابت خلال أزمنة محددة	4
47	أشعة الجهود التي تؤدي إلى زيادة أو إنقاص الفيض المغناطيسي	5
52	مسار شعاع فيض الثابت في القطاعات الستة باستخدام جدول اختيار Takahashi	6
53	نتائج المحاكاة من أجل سرعة ثابتة $n=1400\text{rpm}$ و عزم متغير	7
56	نتائج المحاكاة من أجل عزم ثابت ($T_r = 3\text{N.m}$) و سرعة متغيرة	8
59	تجربة متانة الآلة	9
59	من أجل 100% من قيمة R_s	
62	من أجل 150 % من قيمة R_s	10
64	من أجل 200% من قيمة R_s	11
66	عكس اتجاه الدوران	12

فهرس الجداول

فهرس الجداول

الصفحة	عنوان الجدول	رقم الجدول
جداول الفصل الثاني		
28	الجهود في حالات الثمانية لعمل القواطع	01
جداول الفصل الثالث		
49	مخططات التحكم لكلا المتحكمين البطائين (العزم و الفيض) وحالات المخارج و مبدأ العمل	01
50	زيادة أو إنقاص العزم و الفيض بناء على موضع القطاع في الاتجاه المباشر	02
51	زيادة أو إنقاص العزم و الفيض بناء على موضع القطاع في الاتجاه العكسي	03
51	جدول اختيار شعاع الإبدال المثالي لتقنية DTC التقليدية	04
69	المقارنة بين إيجابيات و سلبيات تقنية التحكم FOC و DTC	05

قائمة الرموز

قائمة الرموز

الرمز	الإسم
I_1	تيار الجزء الثابت
I_2'	تيار الجزء الدوار منسوب للجزء الثابت
I_{10}	التيار الابتدائي عند اللاحمل
I_m	تيار التمغنط (الغير فعال)
I_c	التيار الفعال
R_1	مقاومة ملفات الثابت
R_2'	مقاومة ملفات الدوار منسوب للثابت
R_c	مقاومة القلب الحديدي
X_1	ممانعة الثابت
X_2'	ممانعة الدوار منسوبة للثابت
V_{as}, V_{bs}, V_{cs}	جهود التغذية للجزء الثابت
i_{as}, i_{bs}, i_{cs}	تيارات الثابت
I_r	تيارات الدوار
f_s	تردد الجزء الثابت
n_s	سرعة التزامن
n_r	سرعة الدوران
g	الانزلاق
P_a	الاستطاعة الممتصة
P_{js}	الضوايعات بمفعول جول في الثابت
P_{fs}	ضوايعات الحديد في الثابت
P_{tr}	الاستطاعة المنقولة إلى الدوار
P_{em}	الاستطاعة الكهرومغناطيسية

قائمة الرموز

الضياعات الميكانيكية	P_{mec}
العزم الكهرومغناطيسي	T_{tr}
العزم الميكانيكي	T_{em}
الاستطاعة المفيدة	P_u
المردود	η
Field oriented control	FOC
Pulse width modulation	PWM
Direct Torque Control	DTC
تشير إلى الثابت و الدوار	s,r
تشير إلى الأطوار الثلاثة	a,b,c
معاملات تشير إلى محوري المعلم الثنائي الدوار ($\alpha\beta$)	α,β
يشير إلى المحور المباشر	d
يشير إلى المحور العمودي	q
الزاوية الكهربائية	θ
الزاوية الميكانيكية	θ_m
فرق الطور الزاوي للمعلم المباشر بالنسبة لأطوار الثابت و الدوار	θ_s, θ_r
مصفوفة المحارضاات الذاتية و المتبادلة بين أطوار الثابت	$[L_s]$
مصفوفة المحارضاات الذاتية و المتبادلة بين أطوار الدوار	$[L_{rabc}]$
المحارضة المتبادلة بين طورين في الثابت و الدوار	$[M_{sr}]$
المحارضة الذاتية لطور في الثابت	l_s
المحارضة المتبادلة بين أطوار الثابت	m_s
المحارضة المتبادلة بين أطوار الدوار	m_r
المحارضة المتبادلة العظمى بين طورين في الثابت و الدوار	M
المحارضة الدورية الذاتية في الثابت	L_s

قائمة الرموز

المحارضة الدورية الذاتية في الدوار	L_r
معامل التوزيع	σ
العزم الكهرومغناطيسي	T_{em}
العزم المقاوم	T_r
معامل الاحتكاك	B
عزم عطالة الدوار	J
معامل اشتقاق تحويلة لابلاس	p
تمثل المركبات المباشرة والعمودية لجهود الطور في الثابت	V_{qs}, V_{ds}
تمثل المركبة الصفرية في حالة كان النظام متوازن	V_{0s}
مصفوفة تحويلة Park	$[P(\theta_s)]$
تمثل السرعة الزاوية في احداثيات معلم d, q بالنسبة لمعلم الثابت a_s, b_s, c_s	Ω_s
تمثل السرعة الزاوية في احداثيات معلم d, q بالنسبة لمعلم الدوار a_r, b_r, c_r	Ω_r
تمثل السرعة الزاوية في احداثيات معلم الدوار بالنسبة لاحداثيات معلم الثابت	Ω_m
نبض الإنزلاق	ω_{gl}
مقاومة الثابت	R_s
شعاع فيض الثابت	$\overline{\phi}_s$
التغير في شعاع فيض الثابت	$\Delta \overline{\phi}_s$
قيمة الفيض المرجعية المقاسة	ϕ_s^*
قيمة العزم المرجعية المقاسة	T_{em}^*
زاوية فيض الثابت	$\theta_{\phi s}$
تشير إلى رقم القطاع	K
خطأ الفيض	$\Delta \phi$

قائمة الرموز

خطا العزم

ΔT



مقدمة عامة



المحركات اللاتزامنية (التحريضية) ثلاثية الطور هي نوع من المحركات الكهربائية التي تستخدم على نطاق واسع في مختلف التطبيقات الصناعية والتجارية. وتتميز المحركات التي تعمل بنظام تغذية عبر عاكس جهد ثلاثي الطور بعدة مزايا: المتانة الميكانيكية ، صغر الحجم ، التكلفة المنخفضة كما توفر أداء سلس و فعال عند التعامل مع مختلف الأحمال. لكن على الجانب الآخر فإن التحكم بها أكثر تعقيدا مما هو عليه في محركات التيار المستمر حيث تحتاج إلى التحكم في أكثر من عامل كما تكمن سلبية هذا المحرك في أن العلاقة التي تربط بين العزم والتدفق المغناطيسي هي علاقة غير خطية.

ولكن مع التقدم الملحوظ في صناعة عناصر إلكترونيك القدرة و دوائر التحكم الرقمية شهدت أنظمة التحكم في المحركات اللاتزامنية ثلاثية الطور تطورا كبيرا على مر السنوات أدى إلى تحسين أداءها و زيادة قدرتها على تلبية حاجيات مختلف الميادين الصناعية حتى أصبحت بديلا لمحركات التيار المستمر.

من أجل الاستفادة من مزايا هذه المحركات تم ابتكار تقنيات تحكم تستخدم لتنظيم السرعة والعزم واتجاه دوران المحرك. الطريقة المعروفة و الأكثر انتشارا هي تقنية توجيه الفيض Field Oriented Control لكفاءتها العالية و دقتها عند السرعات المنخفضة و المتوسطة إلا أنها تتأثر بمتغيرات الآلة ، و من هذا المنطلق ركزت الأبحاث في السنوات السابقة على تطوير تقنية تحكم جديدة تهدف إلى تحقيق الدقة و الاستجابة الديناميكية العالية و تتمتع بحساسية منخفضة لتغيرات المعاملات كما تقلل من درجة التعقيد قدر الإمكان.

لقد كانت ثمرة هذه الأبحاث تقنية التحكم المباشر بالعزم Direct Torque Control التي تعد تقنية متقدمة تتيح حساب كميات التحكم الدقيقة وهي تدفق الجزء الثابت وعزم الدوران الكهرومغناطيسي باستخدام الكميات المرتبطة بالجزء الثابت فقط مع أو بدون تدخل جهاز استشعار ميكانيكي.

في هذه المذكرة سنتناول دراسة عامة عن المحركات التحريضية و نقوم باستخلاص نموذجها الرياضي الذي يعتبر ضروريا من أجل انشاء المحاكاة لطريقي التحكم الأكثر شهرة و هما التحكم بتوجيه الفيض (FOC) والتحكم المباشر بالعزم (DTC) و استنتاج مميزات و عيوب كل منهما عند التحكم في المحرك اللاتزامني.

إن الهدف الرئيسي لهذه المذكرة هو التعرف على تقنية التحكم المباشر بالعزم (DTC) من خلال تطبيقها على المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور عن طريق المحاكاة باستعمال بيئة MATLAB/SIMULINK ومقارنة نتائجها مع نتائج محاكاة تقنية التحكم بتوجيه التدفق (FOC).

وإبلوغ غايتنا المرجوة اخترنا تقسيم عملنا على ثلاثة فصول نوضحها كما يلي :

• الفصل الأول : خلاله سنقوم بتقديم عموميات عن المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور و التي تشمل :

- ✓ تكوين المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور و دارته المكافئة.
- ✓ مبدأ عمل المحرك اللاتزامني و العلاقات الخاصة به .
- ✓ مختلف طرق التحكم في المحرك اللاتزامني.

• الفصل الثاني: خلال هذا الفصل سنتناول النقاط التالية :

- ✓ النموذج الرياضي للمحرك التحريضي .
- ✓ شرح التحويلات الرياضية اللازمة (Park,Clarke,Concordia).
- ✓ العاكس ثلاثي الطور و حالات تبديله و طرق التحكم به .
- ✓ تقنية التحكم بتوجيه الفيض (FOC) و محاكاتها و تحليل النتائج .

• الفصل الثالث: خلال هذا الفصل سنوضح تقنية(DTC) التقليدية من خلال :

- ✓ المبدأ العام لتشغيل خوارزمية التحكم المباشر بالعزم.
- ✓ تقنية التحكم المباشر بالعزم اعتمادا على منظم السرعة.
- ✓ تقدير فيض الثابت و العزم الكهرومغناطيسي.
- ✓ التحكم بفيض الثابت والعزم باستعمال المتحكمات البطائية.
- ✓ تحديد القطاع الي ينتمي إلى شعاع فيض الثابت واختيار حالات التبديل المناسبة.
- ✓ محاكاة التقنية باستعمال MATLAB/SIMULINK و تحليل النتائج.
- ✓ المقارنة بين نتائج محاكاة تقنية FOC و DTC .



الفصل الأول

عموميات حول المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور



1.1 مقدمة

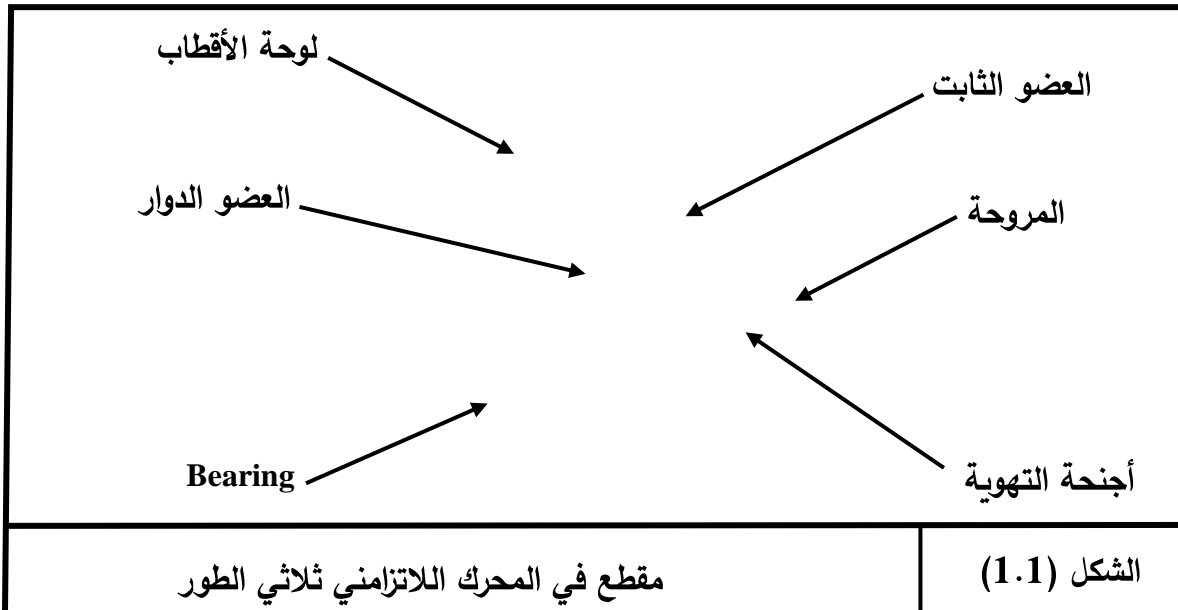
تحتل المحركات اللاتزامنية ثلاثية الطور أو ما يطلق عليها بالمحركات الحثية (التحريضية) مكانة متميزة في مجال التطبيقات الصناعية و ذلك نظرا لتوافق عدد الأطوار مع منابع القدرة حيث توصل ملفات الثابت إلى التغذية بينما تقصر ملفات الدوار في حالة المحرك ذو قفص السنجاب أو تقصر عبر مقاومات خارجية في حالة المحرك ذو الدوار الملفوف إضافة إلى بعض الخصائص الهامة التي تتمتع بها : بساطة التصنيع ، ذاتية التغذية، سهولة الصيانة ، التكلفة غير المرتفعة و المردود الجيد. غير أنه تكمن سيئة هذا المحرك في أن العلاقة بين العزم و التدفق الكهرومغناطيسي هي علاقة غير خطية. ومن هذا المنطلق أصبحت طرق التحكم في سرعة هذه المحركات قضية صناعية ركزت عليها الأبحاث في الآونة الأخيرة للقدرة على تقادي مشكلة اللاخطية [1] أين تم تطوير العديد من التقنيات الحديثة الي تهدف إلى تحسين الأداء وتوسيع نطاق الاستخدامات.

سنقوم في هذا الفصل بدراسة المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور من حيث :

- تكوين المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور.
- مبدأ العمل واستخلاص الدارة المكافئة.
- علاقات القدرة للمحرك.
- طرق التحكم في سرعة المحركات اللاتزامنية ثلاثية الطور .

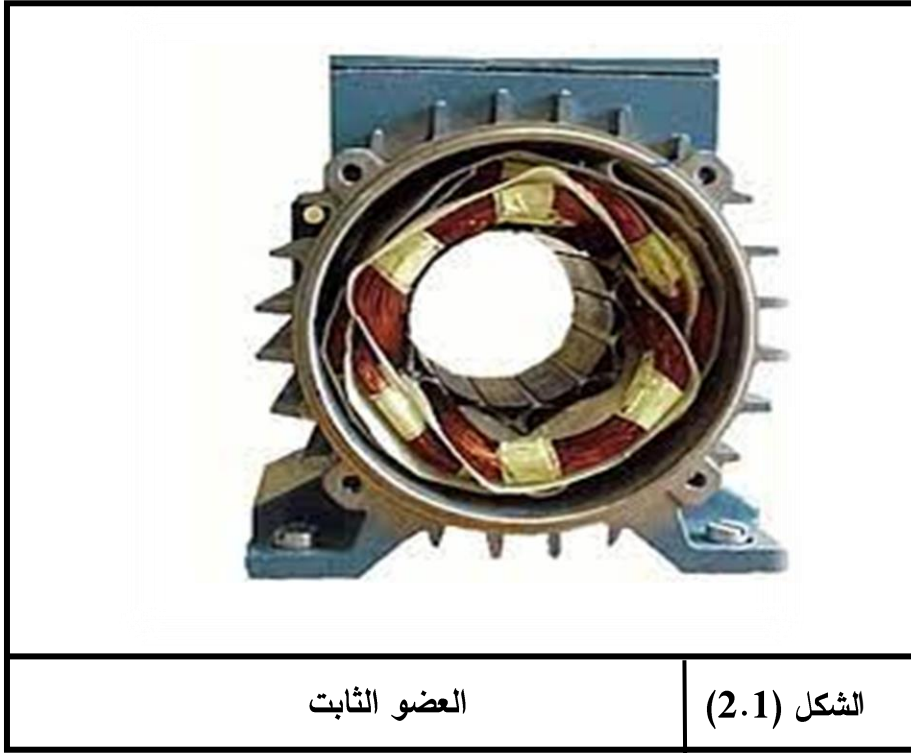
2.1 تكوين المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور

يتكون المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور بشكل عام من جزئين أساسيين وهما العضو الثابت (Stator) والعضو الدوار (Rotor).



1.2.1 العضو الثابت (Stator)

يتألف من صفائح متراسة من الحديد المغناطيسي موضوعة على شكل شرائح تتراوح سماكتها من 30 مم إلى 60 مم معزولة عن بعضها بعازل كهربائي مشكلة جسما اسطوانيا محفورا بداخله عدد من المجاري لإحتواء الملفات الثلاثة وذلك لغرض التقليل من حرارة الحديد الناتجة عن التيارات الدوامية التي نشأت نتيجة تعرض الحديد لتغير الحقل المغناطيسي المتدفق داخل المحرك. بعد اكتمال التصنيع يتم تقسيمه الى العدد المحدد من الأقطاب وتقسّم المجاري في كل قطب على الأطوار الثلاثة بعدها يتم تركيب الملفات بحيث تفصل بين كل ملف و آخر زاوية مقدارها 120 درجة كهربائية ليخرج منها 6 أسلاك تمثل بداية ونهاية كل طور من الأطوار الثلاثة تتم من خلالها تغذية العضو الثابت بتوصيلها إما على الشكل النجمي أو المثلي.



2.2.1 العضو الدوار (Rotor)

ويسمى المحرك عادة باسم عضوه الدوار ولهذا يوجد نوعان مختلفان من حيث التركيب ومتقاربان من حيث الخواص الكهربائية وهما العضو الدوار الملفوف أو ذو حلقات الإنزلاق والعضو الدوار ذو قفص السنجاب (وسنركز في دراستنا على الدوار ذو قفص السنجاب).

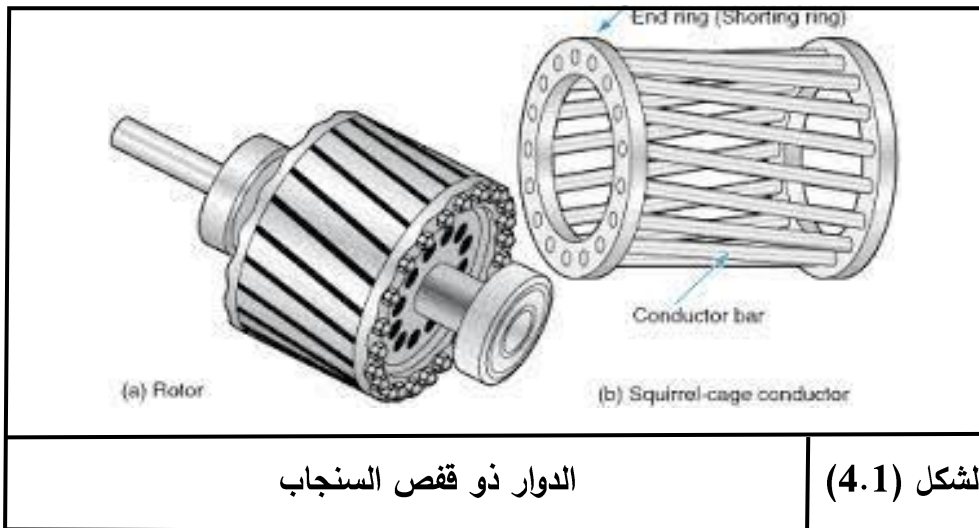
1.2.2.1 العضو الدوار الملفوف (ذو حلقات الإنزلاق)

يتكون من مجموعة شرائح مترابطة من الصلب السليكوني المعزولة عن بعضها تثبت على عمود الدوران يشق على سطحها الخارجي عدد من المجاري الطولية لتركيب الملفات ويقسم هذا النوع إلى عدد من الأقطاب يكون مساويا لأقطاب العضو الثابت الذي سيركب فيه وتقسّم المجاري في كل قطب إلى ثلاثة أقسام كل قسم توضع به ملفات أحد الأطوار الثلاثة التي تفصل بينهم 120° درجة كهربائية [2].



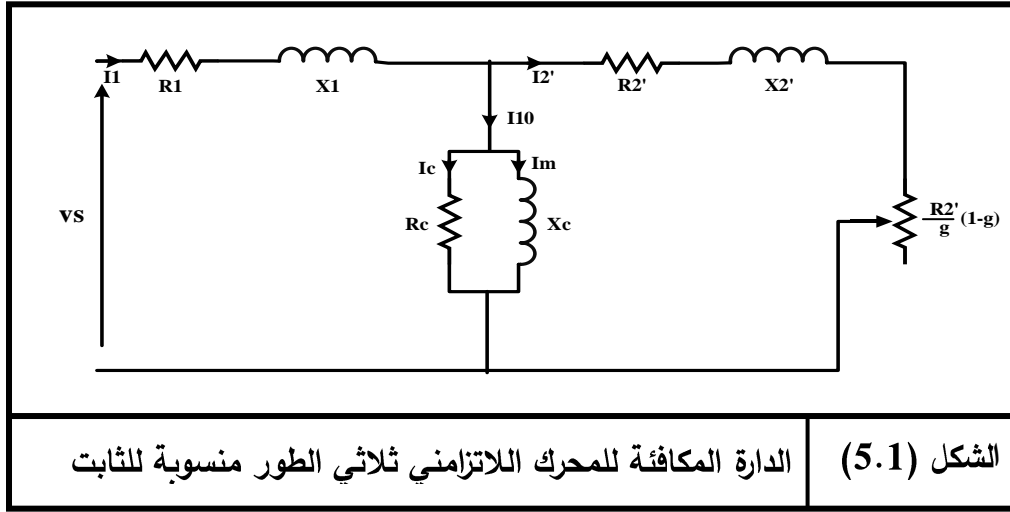
2.2.2.1 العضو الدوار ذو قفص السنجاب

العضو الدوار ذو قفص السنجاب (squire cage) مشابه تماما للعضو الدوار ذو حلقات الإنزلاق من ناحية التركيب الميكانيكي ولكن بدلا من وضع ملفات يتم تركيب قضبان من النحاس أو الألمنيوم تكون مقصورة أطرافها بواسطة حلقتين مقلتين مصنوعة من نفس مادة القضبان و هذا النوع لا يحتاج إلى عدد معين من الأقطاب وإنما يتكيف تلقائيا مع عدد أقطاب و أطوار العضو الثابت الذي سيركب فيه [2] [3].



3.1 الدارة المكافئة للمحرك اللاتزامني

تساعد الدارة المكافئة على فهم خصائص المحرك وتمثل كما يلي:



الشكل (5.1) الدارة المكافئة للمحرك اللاتزامني ثلاثي الطور منسوبة للثابت

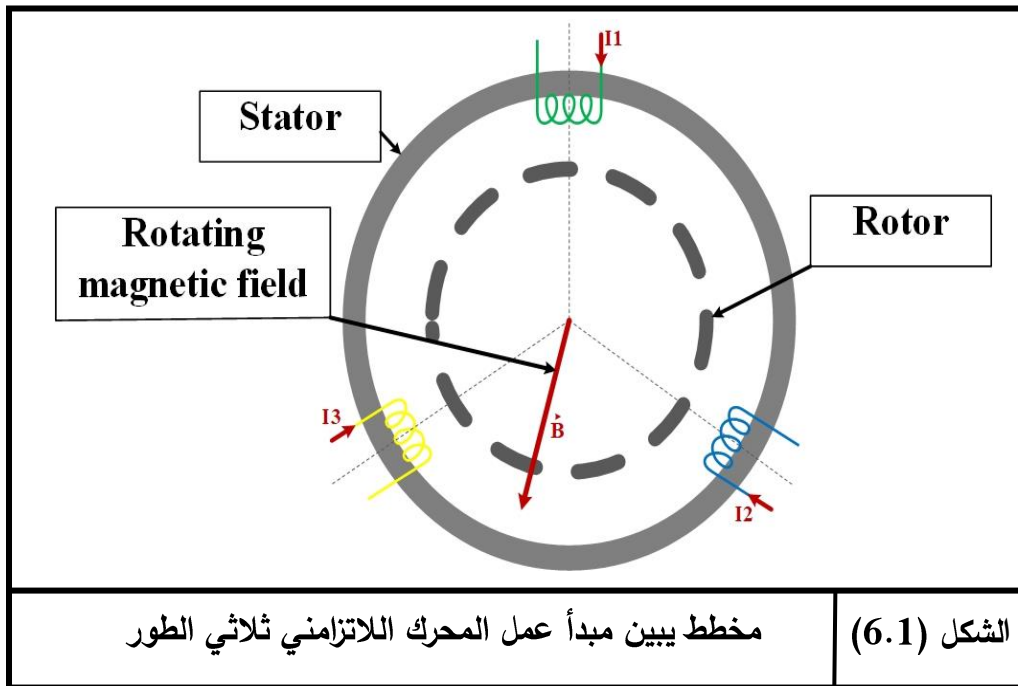
حيث:

- | | |
|---|---|
| X_2' : ممانعة الدوار منسوبة للثابت | I_1 : تيار الجزء الثابت |
| R_c : مقاومة القلب الحديدي | I_2' : تيار الجزء الدوار منسوب للجزء الثابت |
| I_{10} : التيار الابتدائي عند اللاحمل | R_1 : مقاومة ملفات الثابت |
| I_m : تيار التمغنط (غير فعال) | R_2' : مقاومة ملفات الدوار منسوب للثابت |
| I_c : التيار الفعال | X_1 : ممانعة الثابت |
| | g : الإنزلاق |

4.1 مبدأ عمل المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور

دور المحركات الكهربائية هو تحويل الطاقة الكهربائية المأخوذة من مصدر التغذية إلى طاقة ميكانيكية. عند ربط الجزء الثابت للمحرك بمصدر جهد جيبى ثلاثي الطور المتناوب (v_{as}, v_{bs}, v_{cs}) ذو تردد f_s تنشأ في ملفاته تيارات جيبية (i_{as}, i_{bs}, i_{cs}) لها نفس التردد حيث تولد هذه التيارات حقل مغناطيسي دوار بسرعة Ω_s والذي بدوره ينتقل عبر الثغرة الهوائية حيث تولد من خلاله قوة محرّكة كهربائية في كل ناقل من نواقل الدوار قانون

فاراداي [1]، و عندما تقصر هذه النواقل تنشأ تيارات في ملفات الدوار I_r و قبل أن يبدأ المحرك بالدوران حسب قانون لابلاس تكون للقوة المحركة الكهربائية و التيارات الناتجة عنها نفس التردد f_s وبالتالي ينشأ حقل مغناطيسي دوار بسرعة Ω_s وفي اتجاه الحقل المغناطيسي الدوار للثابت، ونتيجة للتأثير المتبادل بين التيارات و الحقل المغناطيسي المتولد في الدوار تنشأ قوى ميكانيكية تؤثر على ملفاته والتي بدورها تولد عزم كهرومغناطيسي وهو المسؤول عن تدوير الجزء الدوار في نفس اتجاه الحقل المتولد في الثابت بسرعة دوران n_r أقل من سرعة التزامن n_s و بناء على هذا سمي بالمحرك اللاتزامني.



1.4.1 أهم علاقات المحرك اللاتزامني

1.1.4.1 سرعة التزامن n_s : تكون متعلقة بعدد أقطاب الثابت و كذلك تردد المنبع و تمثل بالعلاقة:

$$n_s = 60 \frac{f}{p} \quad \{1.1\}$$

2.1.4.1 الإنزلاق g : يمثل الفرق بين سرعة التزامن و سرعة الدوران و تكتب بالعلاقة:

$$g = \frac{n_s - n}{n_s} \quad \{2.1\}$$

3.1.4.1 سرعة الدوار n_r : تحسب من علاقة الإنزلاق:

$$n_r = (1 - g) n_s \quad \{3.1\}$$

2.4.1 علاقات القدرة

- الإستطاعة الممتصة P_a : يستقبل المحرك الإستطاعة مهما كان نوع الربط (نجمي أو مثلثي)

$$P_a = \sqrt{3}UI \cos \varphi \quad \{4.1\}$$

حيث جزء من هذه الاستطاعة يفقد على شكلين بمفعول جول و ضياعات في الحديد.

- الضياعات بمفعول جول في الثابت P_{js} : جزء من الإستطاعة الممتصة يضيع في ملفات الثابت و يتحول إلى طاقة حرارية و بما أن الملفات تربط على شكل نجمي أو مثلثي فإن حساب هذه الضياعات تحسب بطريقتين:

- في حالة الربط النجمي

$$P_{js} = 3rI^2 \quad \{5.1\}$$

- في حالة الربط المثلثي

$$P_{js} = rI^2 \quad \{6.1\}$$

و يمكننا حسابها عبر العلاقة التالية مهما كان نوع الربط :

$$P_{js} = \frac{3}{2} rI^2 \quad \{7.1\}$$

- ضياعات الحديد في الثابت P_{fs} : تعتبر ضياعات ذات قيمة ثابتة.

و تسمى الضياعات P_{fs} و P_{js} بضياعات العضو الثابت.

- القدرة المنقولة إلى الدوار P_{tr} : هي القدرة التي تنتقل من الثابت إلى الدوار تعرف بالعلاقة:

$$P_{tr} = P_a - P_{js} - P_{fs} \quad \{8.1\}$$

وهذه القدرة بدورها تنشئ عزم كهرومغناطيسي

$$T_{tr} = \frac{P_{tr}}{\Omega_s} \quad \{9.1\}$$

- الضياعات بمفعول جول في الدوار P_{jr} : تفقد القدرة المنقولة إلى الدوار جزءا منها في ملفات الدوار تعطى بالعلاقة :

$$P_{jr} = g \cdot P_{tr} \quad \{10.1\}$$

إن القدرة المتبقية بعد الضياع السابق هي المسؤولة عن دوران العضو الدوار و تمثل ب:

$$P_{em} = P_{tr} - P_{jr} = (1 - g) P_{tr} \quad \{11.1\}$$

وهذه القدرة تنشئ عزم معادلته:

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_s} \quad \{12.1\}$$

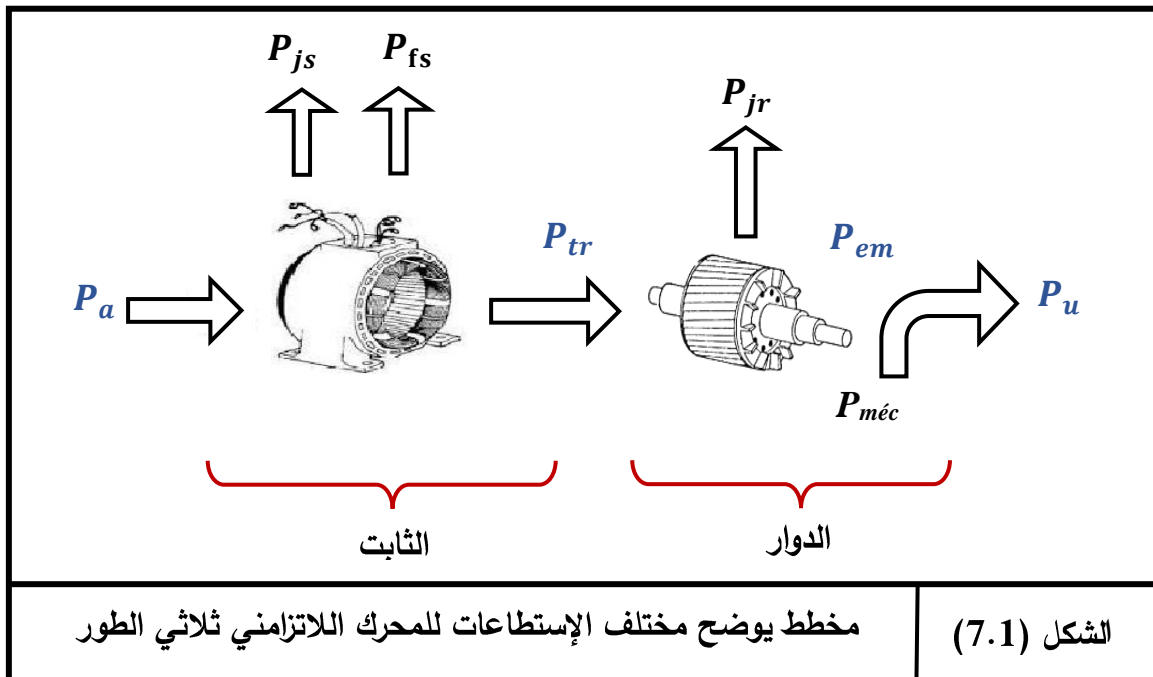
• القدرة المستعملة P_u : تكتب بالعلاقة:

$$P_u = P_{em} - P_{mec} \quad \{13.1\}$$

حيث P_{mec} تمثل الضياعات الميكانيكية

• المردود η : و هو النسبة بين القدرة الممتصة من المصدر و القدرة المستعمل و تكتب على الشكل:

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \quad \{14.1\}$$



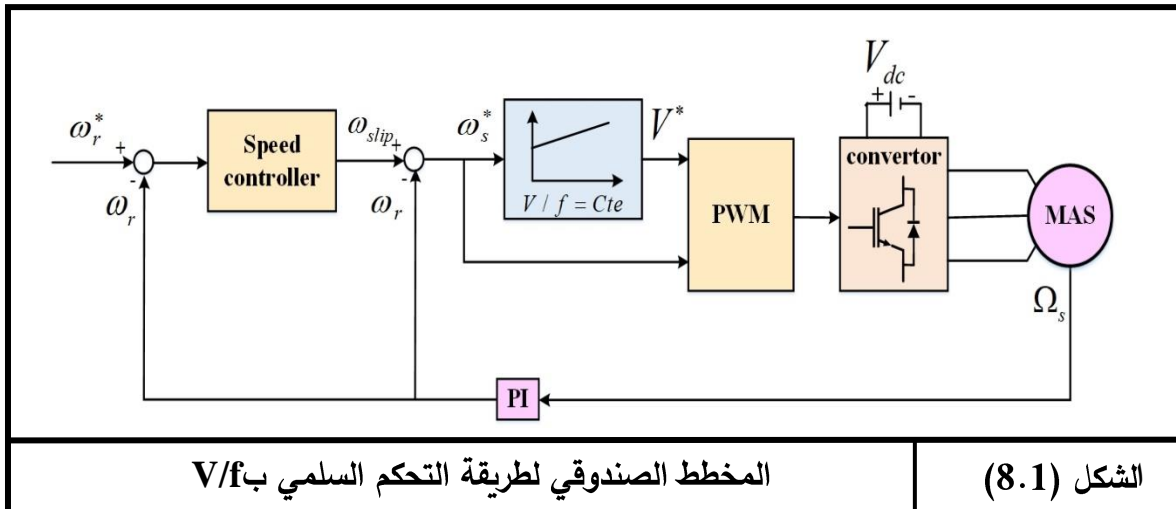
5.1 طرق التحكم في سرعة المحركات اللازمانية ثلاثية الطور

نظراً للانتشار الواسع في استخدام المحركات الحثية ثلاثية الأطوار في التطبيقات الصناعية ولصعوبة السيطرة عليها من ناحية السرعة والعزم بالشكل المطلوب فقد تم استخدام تقنيات تسعى إلى تحقيق التواءم بينهما حسب احتياجات التطبيقات الصناعية المختلفة لزيادة الانتاجية والكفاءة [2] وتوجد عدة طرق شائعة تجسد هذه الأهداف نذكر ثلاث طرق منها :

1.5.1 التحكم السلمي (Control scalar)

عادة ما كان التحكم في سرعة المحركات الحثية يقوم على تغيير جهد التغذية المطبق على أطوار العضو الثابت أو عن طريق التغيير في التردد تدريجياً فتزداد أو تنقص السرعة خلال ذلك و كما نعلم أن العزم المتولد غير مستقل كما هو الحال في محركات التيار المستمر فإن الزيادة المستمرة في السرعة تؤدي إلى تناقص العزم وينتج عنه ذلك توقف المحرك عن العمل، ولتحقيق أداء محسن للمحركات الحثية نستخدم طريقة التحكم السلمي أين يجب أن يتغير جهد المصدر مع التردد معاً لكي يحافظ على كثافة الفيض ثابتة تقريباً وعند تحقق هذه الشروط فإن القيمة الأعظمية للعزم المتولد T_{max} تبقى ثابتة على طول مدى النظام الدائم، والحل الأمثل لتغيير التردد هو جهاز العاكس (Inverter) ، فعند زيادة التردد سيقبل تيار المجال ويقل تبعاً له الفيض وبالتالي نتجنب التسخين الزائد للمحرك وباعتبار هذا الأخير حمل حثي كبير فإن أي تغيير في التردد يؤثر على معاوقته الكلية وبالتالي على الفيض المتولد في الثغرة الهوائية بداخله بصفة عكسية فزيادة التردد تزداد قيمة معاوقته وعضوه الثابت وتبعاً لذلك تقل قيمة الفيض ولتعويض هذا النقص يلزم زيادة الجهد قليلاً بالتناسب مع السرعة وبالتالي يجب ان تكون النسبة بين الجهد والتردد ثابتة [4] أي :

$$\text{Volt / Frequency} = \text{Constant}$$



المخطط الصندوقي لطريقة التحكم السلمي ب V/f

الشكل (8.1)

2.5.1 التحكم بالتدفق الموجه FOC

ظهرت تقنية التحكم بتوجيه التدفق في بداية السبعينيات في أعمال Blashke، الهدف من هذه التقنية هو التحكم الدقيق في أداء المحركات التحريضية من خلال تقليد ماهية التحكم في محرك التيار المستمر. تعتمد على عدد من التحويلات الرياضية (Clarke، Park، Concordia) وكذلك المصححات PI وتقنية PWM للتحكم بعرض النبضة، تعتبر تقنية التحكم FOC ذات كفاءة عالية إلا أنها معقدة بدرجة كبيرة و قد تحدث فيها أخطاء بمجرد ارتفاع درجة حرارة المحرك و تغير إعداداته مما دفع لتطوير تقنيات أكثر كفاءة .

3.5.1 التحكم بالعزم المباشر DTC:

تعتبر تقنية التحكم بالعزم المباشر من أكثر الطرق التحكم شيوعا في أنظمة القيادة الكهربائية لأنها أثبتت فعالية عالية في أنظمة التحكم في المحرك الكهربائي ثلاثي الطور كما احتلت أهمية قصوى في مجال الصناعة نظرا لمزاياها على العملية الإنتاجية من حيث الديناميكية العالية في النظام الدائم. يتلخص مبدأها الأساسي بالتحكم بشكل مستقل في كل من فيض الثابت و العزم الكهرومغناطيسي اعتمادا على نظام حلقة مغلقة خالية من الحلقات الوسيطة لتعديل للتيار [1]، وسنتطرق على شرح متكامل لخوارزمية DTC في الفصل الثالث.

6.1 مميزات وعيوب المحرك اللازماني ثلاثي الطور

مثل باقي المحركات الكهربائية فإن للمحرك التحريضي بعض المزايا والعيوب التي تتعلق ببنية التكوينية، طرق التحكم به و مجالات تطبيقاته [5]:

✓ المميزات

- بساطة التكوين و التكلفة المنخفضة.
- ندرة الحاجة إلى الصيانة الدورية.
- ذاتية الإقلاع.

✓ العيوب

- صعوبة التحكم في السرعة.
- تيار الإقلاع عالي جدا (5 أو 8 أضعاف التيار الاسمي).
- لا يمكن تحقيق عزم بدء عال.

7.1 خاتمة

في هذا الفصل قدمنا عموميات حول المحرك اللاتزامني (التحريضي) ثلاثي الطور من مختلف جوانب تكوينه، مبدأ عمله وطرق التحكم به التي ستمهد للتعرف على النموذج الرياضي للمحرك و التطرق إلى طريقة من طرق التحكم بشكل أوسع وهذا هو ما سيكون مضمون الفصل الثاني.



الفصل الثاني

نمذجة المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور

ومحاكاة تقنية التحكم الشعاعي



الفصل الثاني نمذجة المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور ومحاكاة تقنية التحكم FOC

1.2 مقدمة

تستخدم النماذج الرياضية بهدف دراسة و تحليل المحركات التحريضية(اللاتزامنية) و معرفة سير عمليات تحويل الطاقة فيها، مما تمكننا من معرفة المعادلات الكهربائية والميكانيكية التي تصف كيفية عمل المحرك في الحالة المستقرة و الحالة العابرة وبالتالي الحصول على نموذج للمحرك نستطيع من خلاله تحديد معاملات الأداء مثل القدرة والكفاءة ودراسة أنظمة التحكم فيه وذلك لتنظيم السرعة وعزم الدوران و توزيعات التيارات والجهود في الأطوار. سنتناول في هذا الفصل نمذجة المحرك اللاتزامني في كلا الجملتين الثلاثية (a,b,c) والثنائية (Park,Clark,ConCordia) مع توضيح الفروق المختلفة وآليات التحويل بينهما ، ويمكن ملاحظة أن التصميم الدقيق للمحرك الحثي قد يكون معقدا بسبب عدم خطية بعض خصائصه المغناطيسية مما يتطلب محاكاته باستخدام برنامج MATLAB/SIMULINK ، كما نشير إلى أن المحرك المراد تحليله لا بد من أن يخضع لفرضيات محددة تتيح بأن يكون النموذج الرياضي المطبق مماثل تقريبا للمحرك الحقيقي أين يحقق نظام متوازن متناظر كهربائيا و فراغيا و مغناطيسيا و تتمثل في [1] ، [6]:

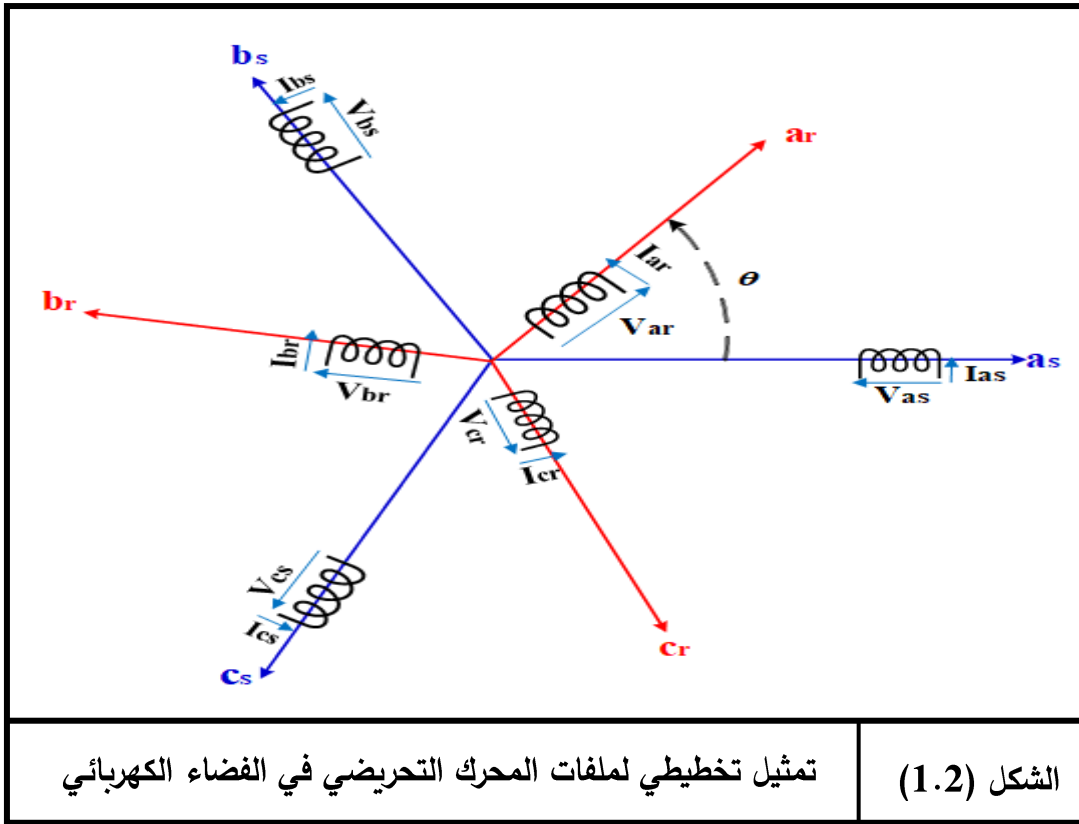
- الفجوة الهوائية منتظمة أي ذات عرض ثابت.
- التوزيع المكاني الجيبي للقوى المغناطيسية على طول الفجوة الهوائية.
- المحرك يعمل في النظام الخطي أي نهمل تشبع الدارة المغناطيسية (تكون لديها نفاذية ثابتة)، إهمال الضياعات الحديدية.
- التناظر التام لملفات الثابت والدوار أي أن مقاومات ومحارضات الملفات متساوية وبالتالي العناصر الكهربائية متماثلة.
- حيادي المحرك غير موصول وبالتالي المركبة الصفرية معدومة.

كذلك بناء على ما ورد في الفصل الأول عن طرق التحكم في المحركات التحريضية سنتناول في هذا الفصل تقنية التحكم بتوجيه الفيض (FOC) التي تعتمد بشكل أساسي على العاكس ثلاثي الطور الذي سنقوم بدراسة حالات تبديله و طرق التحكم به .

2.2 تمثيل المحرك التحريضي في نظام المحاور الثلاثية (a,b,c)

الفصل الثاني نمذجة المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور ومحاكاة تقنية التحكم FOC

من خلال تعرفنا على تكوين المحرك التحريضي في الفصل السابق وجدنا أن كلا من الثابت والدوار يحتوي على ثلاثة ملفات مزاحة عن بعضها فراغيا بزواوية $\frac{2\pi}{3}$ راديان أو ما يعادل 120° درجة كهربائية وبما أننا نطبق على ملفات العضو الثابت مصدر جهد ثلاثي الطور متزن فبالتالي التيارات المارة في الثابت والدوار وكذلك الفيوض المغناطيسية المتولدة تكون هي أيضا عبارة عن جمل ثلاثية الطور متزنة ، بناءا على ذلك يمكننا تمثيل المحرك تخطيطيا في الفضاء الكهربائي بواسطة ستة ملفات حيث تكون المقادير (الجهود ، التيارات ، الفيوض) مبينة بأشعة بحيث تكون أطوار الثابت والدوار مزاحة عن بعضها بزاوية θ كما يوضحه الشكل (2.1).



بحيث تكون الزاوية θ المحصورة بين أطوار الثابت والدوار متغيرة مع الزمن وتشير إلى الموضع الزاوي للدوار حيث [6]:

$$\theta = \theta_0 + \int_0^t \Omega_R \cdot dt \quad \{1.2\}$$

تمثل القيمة الابتدائية θ_0 قيمة إختيارية نحدد من خلالها سرعة الدوار بالنسبة لملفات الثابت عند اللحظة $t = 0$. سرعة الدوار تعطى بالعلاقة :

الفصل الثاني نمذجة المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور ومحاكاة تقنية التحكم FOC

$$\Omega_R = \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \quad \{2.2\}$$

1.2.2 معادلات الجهود

بتطبيق قانون فاراداي على الست ملفات لكل من الثابت والدوار يمكن كتابة جملة معادلات توازن الجهود وبافتراض تساوي مقاومات الأطوار كما يلي [7]:

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{as} = R_s i_{as} + \frac{d\phi_{as}}{dt} \\ \mathbf{V}_{bs} = R_s i_{bs} + \frac{d\phi_{bs}}{dt} \\ \mathbf{V}_{cs} = R_s i_{cs} + \frac{d\phi_{cs}}{dt} \end{cases} \quad \begin{array}{l} \diamond \text{ بالنسبة للثابت:} \\ \{3.2\} \end{array}$$

ويمكن كتابتها على الشكل المصفوفي:

$$[\mathbf{V}_{sabc}] = [R_s] \cdot [i_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{sabc}] \quad \{4.2\}$$

◇ بالنسبة للدوار (باعتبار أن الدوار مقصور):

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{ar} = R_s i_{ar} + \frac{d\phi_{ar}}{dt} = 0 \\ \mathbf{V}_{br} = R_s i_{br} + \frac{d\phi_{br}}{dt} = 0 \\ \mathbf{V}_{cr} = R_s i_{cr} + \frac{d\phi_{cr}}{dt} = 0 \end{cases} \quad \{5.2\}$$

ويمكن كتابتها بالشكل المصفوفي:

$$[\mathbf{V}_{rabc}] = [R_r] \cdot [i_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{rabc}] = 0 \quad \{6.2\}$$

تعرف المقادير $[\phi_{(sr)abc}]$, $[i_{(sr)abc}]$, $[v_{(sr)abc}]$ على النحو التالي:

$$[\mathbf{v}_{(sr)abc}] = \begin{bmatrix} v_{(sr)a} \\ v_{(sr)b} \\ v_{(sr)c} \end{bmatrix}, [\mathbf{i}_{(sr)abc}] = \begin{bmatrix} i_{(sr)a} \\ i_{(sr)b} \\ i_{(sr)c} \end{bmatrix}, [\phi_{(sr)abc}] = \begin{bmatrix} \phi_{(sr)a} \\ \phi_{(sr)b} \\ \phi_{(sr)c} \end{bmatrix} \quad \{7.2\}$$

الفصل الثاني نمذجة المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور ومحاكاة تقنية التحكم FOC

تكتب مصفوفة مقاومة الثابت و الدوار بالصيغة الموالية:

$$\begin{bmatrix} R_{(sr)} & 0 & 0 \\ 0 & R_{(sr)} & 0 \\ 0 & 0 & R_{(sr)} \end{bmatrix} \quad \{8.2\}$$

2.2.2 معادلات الفيوض

فيوض الأطوار لمفاتي الثابت و ملفات الدوار لها علاقة بالتيارات [7] :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \phi_{sabc} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sabc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{sr} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{rabc} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \phi_{rabc} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} L_{rabc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{rabc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{rs} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{rabc} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad \{9.2\}$$

حيث :

$$\begin{bmatrix} M_{sr} \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \theta - \frac{2\pi}{3} & \cos \theta + \frac{2\pi}{3} \\ \cos \theta + \frac{2\pi}{3} & \cos \theta & \cos \theta - \frac{2\pi}{3} \\ \cos \theta - \frac{2\pi}{3} & \cos \theta + \frac{2\pi}{3} & \cos \theta \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} M_{rs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{sr} \end{bmatrix}^t \quad \{10.2\}$$

3.2.2 المعادلة الميكانيكية

إن دراسة خصائص المحرك التحريضي في نظام المحاور a,b,c لا تعتمد فقط على التغير في المقادير الكهربائية (الجهود، التيارات ، الفيوض) فقط ولكن تعتمد كذلك على التغير في المقادير الميكانيكية (العزم، السرعة) [8].

❖ تعطى المعادلة الميكانيكية لحركة المحرك بالعلاقة التالية :

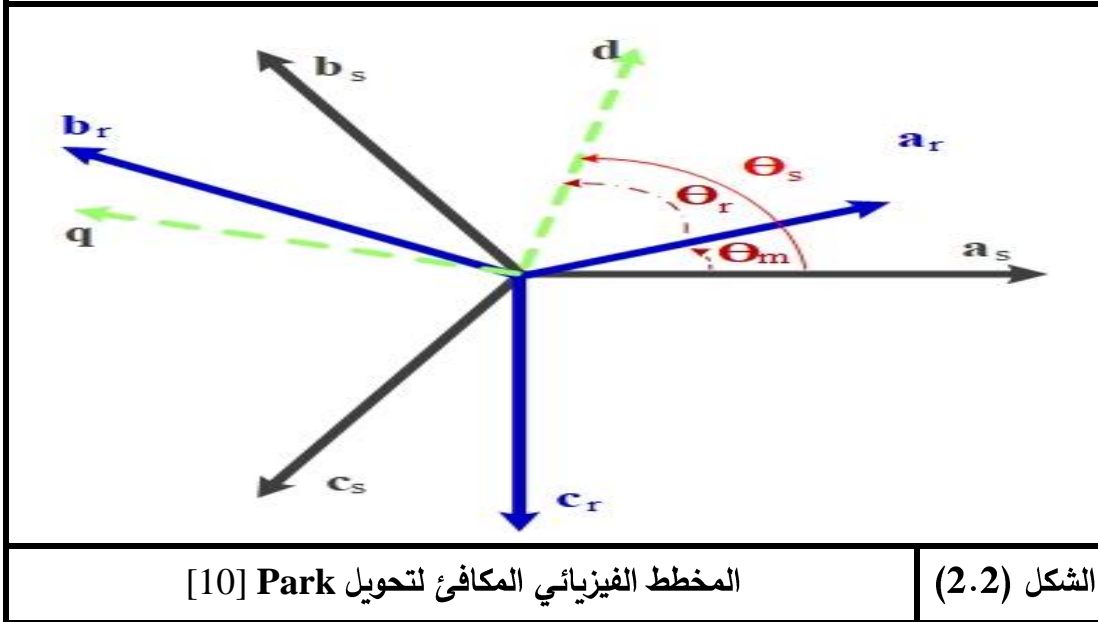
$$T_{em} = J \frac{d\Omega}{dt} + T_r + B\Omega \quad \{11.2\}$$

3.2 التحويل من نظام المحاور الثلاثية إلى نظام المحاور الثنائية (Park)

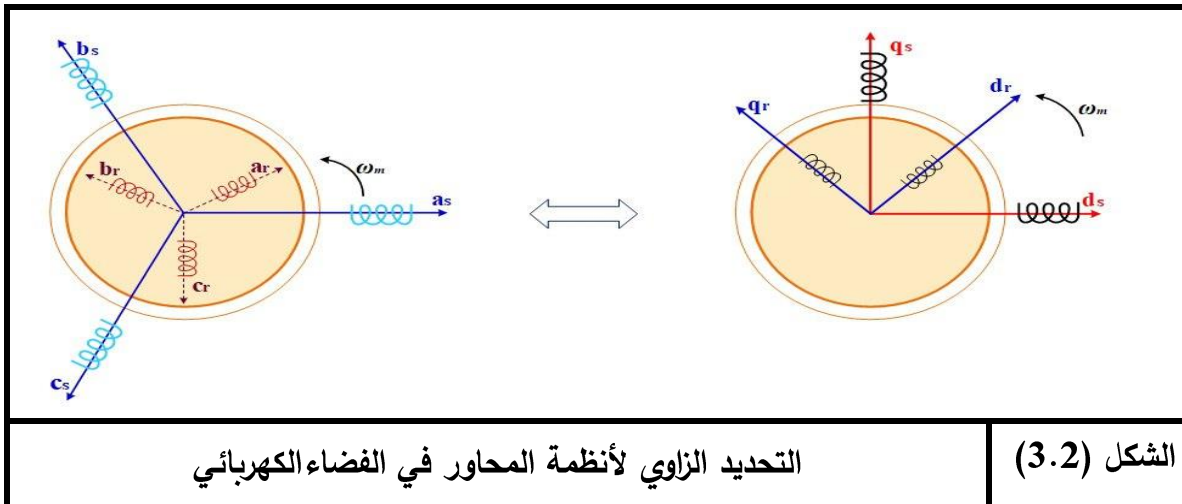
كما ذكرنا سابقا أن النمذجة في نظام a,b,c تكون أكثر تعقيدا نظرا لوجود العديد من القيم المتغيرة كونها تتعلق

الفصل الثاني نمذجة المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور ومحاكاة تقنية التحكم FOC

بالزاوية θ وبالتالي فإنها متغيرة بالنسبة للزمن. ومن هذا المنطلق نلجأ إلى التحويل من نظام ثلاثي المحاور a, b, c إلى نظام ثنائي المحاور d, q اعتماداً على تحويلة Park (1929) من أجل التحصل على قيم ثابتة وذلك بهدف تسهيل الحسابات.



❖ في تحويلة PARK ، ملفات الثابت a_s, b_s, c_s وملفات الدوار a_r, b_r, c_r يتم تحويلها على التوالي إلى ملفين في الثابت d_s, q_s وملفين في الدوار d_r, q_r كما يوضحه الشكل (3.2).



العلاقة بين الزوايا ($\theta_r, \theta_s, \theta_m$) تعطى بالمعادلة:

$$\theta_m = \theta_s - \theta_r \quad \{12.2\}$$

الفصل الثاني نمذجة المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور ومحاكاة تقنية التحكم FOC

أين:

$$\Omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \quad \{13.2\}$$

❖ تتمذج تحويلة **Park** بالمعادلة الموالية [9]، [10]:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} = [P(\theta_s)] \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad \{14.2\}$$

❖ نعرف مصفوفة **Park** بالشكل التالي:

$$[P(\theta_s)] = C \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta_s & \cos(\theta_s - 2\pi/3) & \cos(\theta_s - 4\pi/3) \\ -\sin \theta_s & -\sin(\theta_s - 2\pi/3) & -\sin(\theta_s - 4\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad \{15.2\}$$

ومصفوفتها العكسية تعطى ب:

$$[P(\theta_s)]^{-1} = \frac{2/3}{C} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta_s & -\sin \theta_s & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta_s - 2\pi/3) & -\sin(\theta_s - 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta_s - 4\pi/3) & -\sin(\theta_s - 4\pi/3) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad \{16.2\}$$

C يمثل ثابت بقيمتين مختلفتين حيث يأخذ:

2/3 عند التحويل بدون الحفاظ على الإستطاعة، $\sqrt{2}/3$ عند التحويل مع الحفاظ على الإستطاعة.

❖ تطبق تحويلة **Park** المباشرة و العكسية على الجهود في الأطوار و تمثل بالمعادلتين التاليتين [11]:

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{0s} \end{bmatrix} = [P(\theta_s)] \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad \{17.2\}$$

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = [P(\theta_s)]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{0s} \end{bmatrix} \quad \{18.2\}$$

أما لإيجاد مصفوفة التحويل المطبقة على الدوار ما علينا إلا استبدال الزاوية θ_s بالزاوية θ_r .

❖ كما يمكننا تطبيق المعادلة {14.2} على المقادير الفيزيائية الأخرى مثل التيار والتدفق:

الفصل الثاني نمذجة المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور ومحاكاة تقنية التحكم FOC

$$\begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{0s} \end{bmatrix} = [P(\theta_s)] \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \phi_{ds} \\ \phi_{qs} \\ \phi_{0s} \end{bmatrix} = [P(\theta_s)] \cdot \begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} \quad \{19.2\}$$

1.3.2 حالة خاصة في تحويله PARK

تتحقق هذه الحالة لما تكون $\theta_s = 0$ فتصبح تحويله Park تؤول إلى تحويل Clarke عند اعتماد عدم إنحفاظ الاستطاعة ($C=2/3$) وتؤول إلى تحويل Concordia في حالة الحفاظ على الإستطاعة ($C=\sqrt{2}/3$) [6].

تحويل Clarke

هو عبارة عن تحويل جملة المحاور الثلاثية a,b,c إلى جملة محاور ثنائية متعامدة ($\alpha \beta$). يعرف بالمعادلة [11]:

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad \{20.2\}$$

وتعطى مصفوفته العكسية ب:

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad \{21.2\}$$

تحويل Concordia

يمثل تحويل من جملة المحاور الثلاثية a,b,c إلى جملة محاور ثنائية متعامدة دوارة (d^k, q^k). يعرف كالتالي:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad \{22.2\}$$

وتعطى مصفوفته العكسية:

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} \quad \{23.2\}$$

الفصل الثاني نمذجة المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور ومحاكاة تقنية التحكم FOC

2.3.2 النمذجة الرياضية للمحرك التحريضي في معلم PARK

إن تطبيق مصفوفة تحويلة PARK على المعادلتين {3.2} و {4.2} مع الأخذ بعين الاعتبار أن النظام متوازن. يمكننا من الحصول على المعادلات الرياضية التالية [11] ، [12].

1.2.3.2 المعادلات الكهربائية والمغناطيسية

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \phi_{ds} \\ 0 = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \phi_{qr} \\ 0 = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \phi_{dr} \end{cases} \quad \{24.2\}$$

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{dr} \\ \phi_{dr} = L_s \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_s \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} \end{cases} \quad \{25.2\}$$

حيث: $M = \frac{3}{2} m_{sr}, L_r = l_r - m_r, L_s = l_s - m_s$ تمثل على الترتيب المحارضات الدورية الذاتية والتبادلية لكل من الثابت و الدوار.

و من المعادلة {25.2} يمكننا استنتاج معادلات التيارات في الثابت بدلالة التدفق:

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{1}{\sigma L_s} \phi_{ds} - \frac{M}{\sigma L_s L_r} \phi_{dr} \\ i_{qs} = \frac{1}{\sigma L_s} \phi_{qs} - \frac{M}{\sigma L_s L_r} \phi_{qr} \\ i_{dr} = -\frac{M}{\sigma L_s L_r} \phi_{ds} + \frac{1}{\sigma L_r} \phi_{dr} \\ i_{qr} = -\frac{M}{\sigma L_s L_r} \phi_{qs} + \frac{1}{\sigma L_r} \phi_{qr} \end{cases} \quad \{26.2\}$$

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$$

يمثل معامل التوزيع.

الفصل الثاني نمذجة المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور ومحاكاة تقنية التحكم FOC

2.2.3.2 اختيار الجملة المرجعية للنمذجة

فيما سبق تطرقنا إلى جميع المعادلات والمقادير المتعلقة بالمحرك اللاتزامني ثلاثي الطور في المعلم الثنائي (d,q) وعلى ضوء هذا توجد ثلاث جمل مرجعية في معلم PARK من أجل تحليل سلوك المحرك في كلا حالتيه العابرة والمستقرة حيث كل منها يستعمل حسب هدف التطبيق المطلوب.

- الجملة المرجعية المرتبطة بالجزء الثابت ($\theta_s = 0$).
- الجملة المرجعية المرتبطة بسرعة الدوار $\theta_s = \theta_r + \theta_m$.
- المحاور المرتبطة بالحقل الدوار ($\theta_s = \theta_r + \theta_m$).

❖ نعرف كل من:

$$\Omega_s = d\theta_s / dt \quad \text{تمثل السرعة الزاوية في احداثيات معلم d,q بالنسبة لمعلم الثابت } a_s, b_s, c_s.$$

$$\Omega_r = d\theta_r / dt \quad \text{تمثل السرعة الزاوية في احداثيات معلم d,q بالنسبة لمعلم الدوار } a_r, b_r, c_r.$$

$$\Omega_m = d\theta_m / dt \quad \text{تمثل السرعة الزاوية في احداثيات معلم الدوار بالنسبة لاحداثيات معلم الثابت.}$$

إنطلاقاً من المعادلة {12.2} نجد:

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \Omega_s - \Omega_m = \Omega_{gl} \quad \{27.2\}$$

1.2.2.3.2 الجملة المرجعية المرتبطة بالجزء الثابت ($\alpha \beta$)

يسمح هذا المرجع بتبسيط تحويلة Park إلى تحويل Clarke في حالة عدم الحفاظ على الإستطاعة وإلى تحويل ConCordia في حالة الحفاظ على الإستطاعة ويتم استخدامه لدراسة نظام الإقلاع والفرملة لدى محركات التيار المتناوب وفي دراسة مبادئ التحكم المباشر في العزم وذلك كونه يحتوي على قيم جهود

وتيارات حقيقية. تتم الإشارة لهذا المرجع ($\alpha \beta$) ويعتمد على الشرطين $\frac{d\theta_s}{dt} = 0$ و $\frac{d\theta_r}{dt} = -\omega_m$ [14].

✚ المعادلات الكهربائية والمغناطيسية

$$\begin{cases} v_{\alpha s} = R_s \cdot i_{\alpha s} + \left(\frac{d\phi_{\alpha s}}{dt} \right) \\ v_{\beta s} = R_s \cdot i_{\beta s} + \left(\frac{d\phi_{\beta s}}{dt} \right) \\ 0 = R_r \cdot i_{\alpha r} + \left(\frac{d\phi_{\alpha r}}{dt} \right) + \omega_m \cdot \phi_{\alpha r} \\ 0 = R_r \cdot i_{\beta r} + \left(\frac{d\phi_{\beta r}}{dt} \right) + \omega_m \cdot \phi_{\beta r} \end{cases} \quad \{28.2\}$$

الفصل الثاني نمذجة المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور ومحاكاة تقنية التحكم FOC

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{s\alpha} = L_s i_{s\alpha} + M i_{r\alpha} \\ \phi_{s\beta} = L_s i_{s\beta} + M i_{r\beta} \\ \phi_{r\alpha} = L_r i_{r\alpha} + M i_{s\alpha} \\ \phi_{r\beta} = L_r i_{r\beta} + M i_{s\beta} \end{array} \right. \quad \text{و:} \quad \{29.2\}$$

المعادلة الميكانيكية

تعطى معادلة العزم الكهرومغناطيسي بالصيغة الموالية :

$$T_{em} = 3p \frac{M}{\sigma L_r L_s} (\phi_{\alpha r} \phi_{\beta s} - \phi_{\alpha s} \phi_{\beta r}) \quad \{30.2\}$$

معادلة الحالة للمحرك

بتعويض عبارة التيارات من المعادلة {2.26} في المعادلة {2.28} نتحصل على معادلة الحالة للمحرك التحريضي في المرجع المرتبط بالجزء الثابت :

$$\frac{dX}{dt} = AX + BU \quad \{31.2\}$$

حيث:

$$X = \begin{bmatrix} \phi_{\alpha s} \\ \phi_{\beta s} \\ \phi_{\alpha r} \\ \phi_{\beta r} \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{\sigma L_s} & 0 & \frac{MR_s}{\sigma L_r L_s} & 0 \\ 0 & -\frac{R_s}{\sigma L_s} & 0 & \frac{MR_s}{\sigma L_r L_s} \\ \frac{MR_s}{\sigma L_r L_s} & 0 & -\frac{R_r}{\sigma L_r} & -\omega_m \\ 0 & \frac{MR_s}{\sigma L_r L_s} & \omega_m & -\frac{R_r}{\sigma L_r} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ و } U = \begin{bmatrix} v_{\alpha s} \\ v_{\beta s} \end{bmatrix}$$

2.2.2.3.2 الجملة المرجعية المرتبطة بالحقل الدوار

من أهم مميزات استخدام هذا المرجع هي الحصول على مقادير بكميات ثابتة في النظام الدائم مما يسهل عملية التغيير فيها، ويسمح هذا الاختيار بالحصول على نبض انزلاق يتماشى ويتكيف مع مبادئ التحكم الشعاعي اعتمادا على اتجاه التدفق في الدوار. تتم الإشارة لهذا المرجع (d, q) ويعتمد على الشرطين $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s$

$$[14] \quad \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_{gl}$$

الفصل الثاني نمذجة المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور ومحاكاة تقنية التحكم FOC

✚ المعادلات الكهربائية

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \left(\frac{d\phi_{ds}}{dt} \right) - \omega_s \cdot \phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \left(\frac{d\phi_{qs}}{dt} \right) + \omega_s \cdot \phi_{ds} \\ 0 = R_r \cdot i_{dr} + \left(\frac{d\phi_{dr}}{dt} \right) - \omega_{gl} \cdot \phi_{qr} \\ 0 = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + \omega_{gl} \cdot \phi_{dr} \end{cases} \quad \{32.2\}$$

✚ معادلة الحالة للمحرك

بتعويض المعادلتين {2.25} و {2.26} في المعادلة {32.2} نتحصل على مصفوفة المعادلات الكهربائية في المرجع المرتبط بالحقل الدوار:

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s \frac{d}{dt} & -L_s \omega_s & M \frac{d}{dt} & -M \omega_s \\ L_s \omega_s & R_s + L_s \frac{d}{dt} & M \omega_s & M \frac{d}{dt} \\ M \frac{d}{dt} & -M \omega_{gl} & R_r + L_r \frac{d}{dt} & -L_r \omega_{gl} \\ M \omega_{gl} & M \frac{d}{dt} & L_r \omega_{gl} & R_r + L_r \frac{d}{dt} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad \{33.2\}$$

المعادلة {33.2} هي معادلة تفاضلية مصفوفية من الشكل $EX + F\dot{X} = G$ حيث:

$$X = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} R_s & -L_s \omega_s & 0 & -M \omega_s \\ L_s \omega_s & R_s & M \omega_s & 0 \\ 0 & -M \omega_{gl} & R_r & -L_r \omega_{gl} \\ M \omega_{gl} & 0 & L_r \omega_{gl} & R_r \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

بالإمكان تحويل هذه المعادلة إلى معادلة الحالة للمحرك اللاتزامني من الشكل $\dot{X} = AX + BU$ حيث

$A = -F^{-1}E$ أما المصفوفة B تتكون من العمودين الأولين للمصفوفة F^{-1} أين:

$$F^{-1} = \frac{1}{\sigma L_s} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{M}{L_r} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -\frac{M}{L_r} \\ -\frac{M}{L_r} & 0 & \frac{L_s}{L_r} & 0 \\ 0 & -\frac{M}{L_r} & 0 & \frac{L_s}{L_r} \end{bmatrix} \text{ و } U = \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix}$$

الفصل الثاني نمذجة المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور ومحاكاة تقنية التحكم FOC

بعد الحسابات، يمكن كتابة معادلة الحالة للمحرك اللاتزامني ثلاثي الطور في المرجع المرتبط بالحقل الدوار بالشكل التالي:

$$\frac{dX}{dt} = AX + BU \quad \{34.2\}$$

حيث :

$$X = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sigma T_s} & \omega_s + \frac{1-\sigma}{\sigma} \omega_m & \frac{M}{\sigma L_s T_r} & \frac{M}{\sigma L_s} \omega_m \\ -\left(\omega_s + \frac{1-\sigma}{\sigma} \omega_m\right) & -\frac{1}{\sigma T_s} & \frac{-M}{\sigma L_s} \omega_m & \frac{M}{\sigma L_s T_r} \\ \frac{M}{\sigma L_r T_s} & -\frac{M}{\sigma L_r} \omega_m & \frac{-M}{\sigma L_s} \omega_m & \frac{M}{\sigma L_s T_r} \\ \frac{M}{\sigma L_r} \omega_m & \frac{M}{\sigma L_s T_r} & -\omega_s + \frac{1}{\sigma} \omega_m & -\frac{1}{\sigma T_r} \end{bmatrix}$$

$$B = \frac{1}{\sigma L_s} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -\frac{M}{L_r} & 0 \\ 0 & -\frac{M}{L_r} \end{bmatrix} \quad \text{و} \quad U = \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix}$$

$T_r = \frac{L_r}{R_r}$ ثابت الزمن في الجزء الدوار و $T_s = \frac{L_s}{R_s}$ ثابت الزمن في الجزء الثابت.

المعادلة الميكانيكية

تعطى معادلة العزم الكهرومغناطيسي بدلالة التيارات المتولدة في الجزء الثابت والجزء الدوار بالشكل التالي:

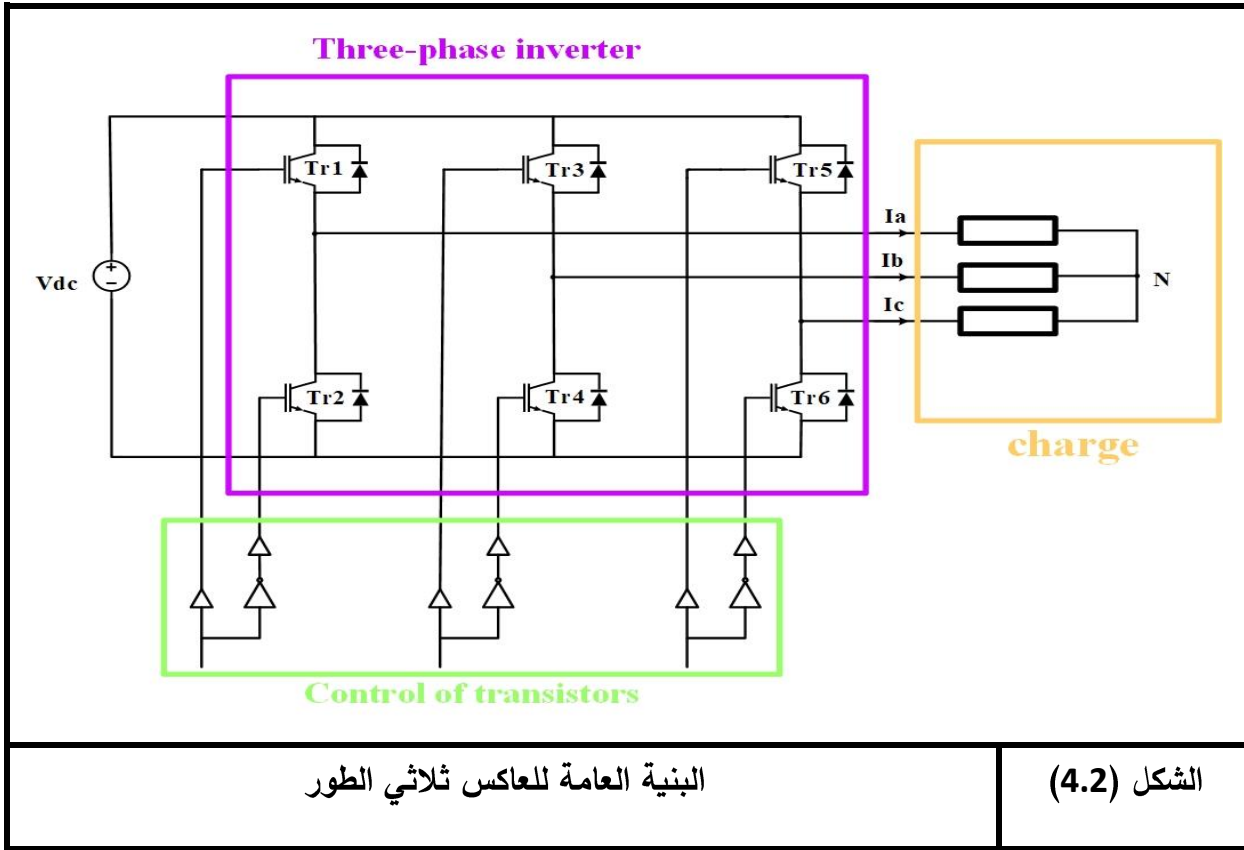
$$T_{em} = 3pM (i_{dr} \cdot i_{qs} - i_{ds} \cdot i_{qr}) \quad \{35.2\}$$

4.2 العاكس ثلاثي الطور

العاكس عبارة عن محول الكتروني قادر على تحويل جهد المدخل المستمر إلى جهد متناوب ، يتكون بشكل عام من مجموعة من ترونزستورات (IGBT أو mosfet) التي تعمل كقواطع متحكم فيها يتم اختيارها اعتمادا على نسبة التردد أو القدرة المراد الحصول عليها . يتكون من ثلاث أذرع لكل منهما قاطعتان تعمل بترتيب معين

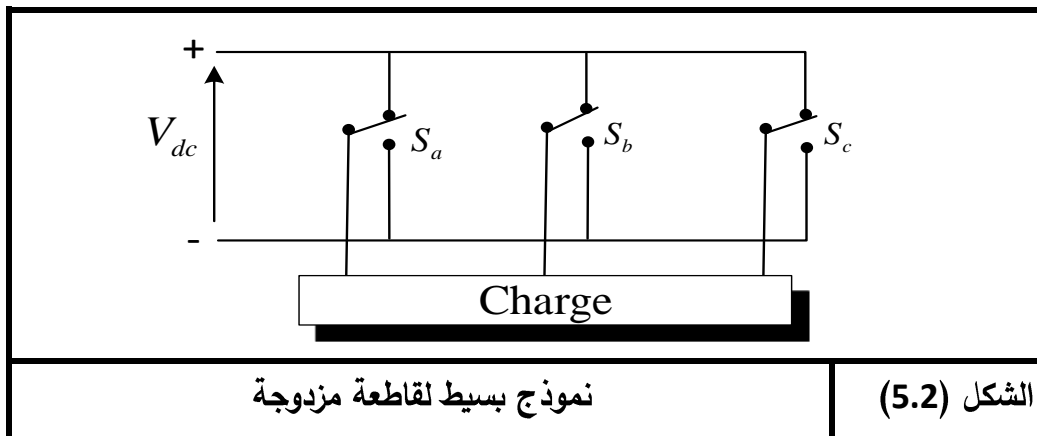
الفصل الثاني نمذجة المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور ومحاكاة تقنية التحكم FOC

كما يتم التحكم في القواطع (T1، T2)، (T3، T4) و(T5، T6) بطريقة تكاملية لتجنب حدوث قصر في دارة المصدر [15] [16].



لتبسيط الدراسة نمثل كل مفتاح الكتروني بقاطعة مثالية ، هناك ستة حالات لعمل هذه الدارة خلال الدورة الكاملة و فترة التوصيل لكل حالة هي 60° ، كل قاطعة توصل لفترة زمنية تساوي 180° و فترة التوصيل لكل ترانزستور مزاحة بزاوية مقدارها 60° من أجل الحصول على جهد ثلاثي الطور متزن .

نستطيع تبسيط نموذج العاكس بتعويض كل ذراع للعاكس بقاطعة بوضعيتين كما هو مبين في الشكل (5.2).



الفصل الثاني نمذجة المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور ومحاكاة تقنية التحكم FOC

اعتمادا على الشكل (5.2) نتحصل على النموذج الرياضي للعاكس ثلاثي الطور الموضح في المعادلة {36.2}.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad \{36.2\}$$

من أجل الحصول على أشعة جهود المخرج للعاكس نقوم بتحويل جهود أطوار العاكس ثلاثية الطور من جملة المحاور الثلاثية (a,b,c) إلى جملة المحاور الثنائية ال (α β) باستخدام مصفوفة تحويل **ConCordia**.

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad \{37.2\}$$

كما يمكن كتابة المعادلة السابقة بدلالة حالة القواطع S_a, S_b, S_c و التوتر V_{dc} كما يلي [17]:

$$\begin{cases} V_{s\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot V_{dc} \cdot \left[S_a - \frac{1}{2}(S_b + S_c) \right] \\ V_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot V_{dc} \cdot [S_b - S_c] \end{cases} \quad \{38.2\}$$

اعتمادا على المعادلات {36.2}، {37.2} و {38.2} نستطيع تلخيص حالات عمل القواطع و جهود الخط و الطور و الجهد المرجعي \bar{V}_s في الجدول (1-2).

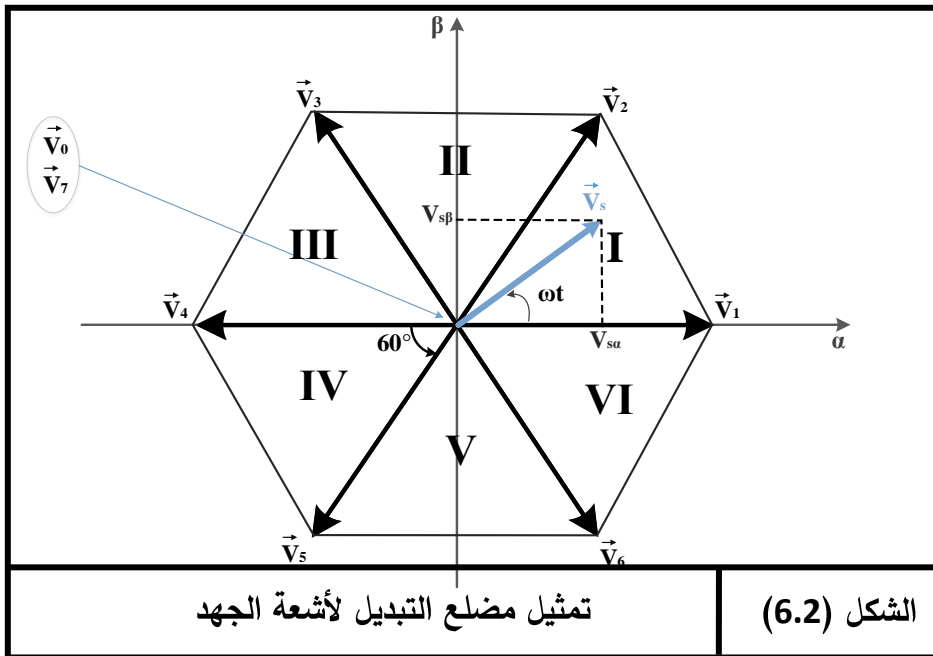
الجدول (1-2): الجهود في الحالات الثمانية لعمل القواطع [12]

حالة القواطع العلوية			جهد الطور			جهد الخط			الجهود في المعلم الثنائي β, α		شعاع الجهد
S_a	S_b	S_c	V_a	V_b	V_c	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}	V_α	V_β	\bar{V}_s
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	\bar{V}_0
1	0	0	$\frac{2V_{dc}}{3}$	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$-\frac{V_{dc}}{3}$	V_{dc}	0	$-V_{dc}$	$\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} V_{dc}$	0	\bar{V}_1
1	1	0	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$-\frac{2V_{dc}}{3}$	0	V_{dc}	$-V_{dc}$	$\frac{V_{dc}}{\sqrt{6}}$	$\frac{V_{dc}}{\sqrt{2}}$	\bar{V}_2
0	1	0	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{2V_{dc}}{3}$	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$-V_{dc}$	V_{dc}	0	$-\frac{V_{dc}}{\sqrt{6}}$	$\frac{V_{dc}}{\sqrt{2}}$	\bar{V}_3

الفصل الثاني نمذجة المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور ومحاكاة تقنية التحكم FOC

0	1	1	$\frac{-2V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$-V_{dc}$	0	V_{dc}	$-\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}V_{dc}$	0	\vec{V}_4
0	0	1	$\frac{-V_{dc}}{3}$	$\frac{-V_{dc}}{3}$	$\frac{2V_{dc}}{3}$	0	$-V_{dc}$	V_{dc}	$-\frac{V_{dc}}{\sqrt{6}}$	$-\frac{V_{dc}}{\sqrt{2}}$	\vec{V}_5
1	0	1	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{-2V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	V_{dc}	$-V_{dc}$	0	$\frac{V_{dc}}{\sqrt{6}}$	$-\frac{V_{dc}}{\sqrt{2}}$	\vec{V}_6
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	\vec{V}_7

من الجدول نلاحظ أن هناك 8 حالات لعمل قواطع العاكس التي تشكل بدورها ثمانية أشعة للجهد. الملاحظ أن الشعاعين \vec{V}_1 و \vec{V}_7 أشعة صفرية، بينما أشعة الجهد الستة المتبقية تشكل سداسي منتظم و بين كل شعاعين زاوية تقدر ب 60° مما يشكل لنا ستة قطاعات سنستعملها لاحقا في تقنية التحكم في العزم المباشر DTC.

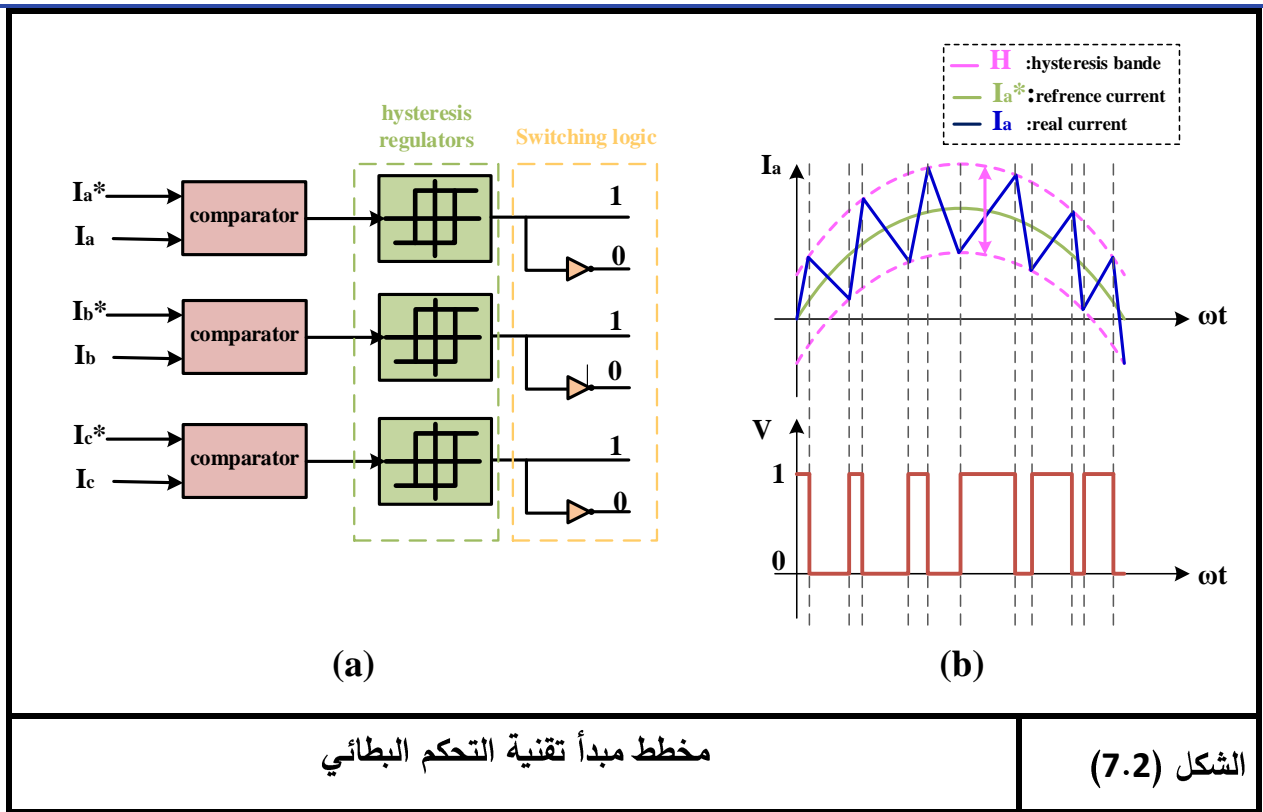


1.4.2 طرق التحكم في العاكس ثلاثي الطور

1.1.4.2 التحكم البطائي

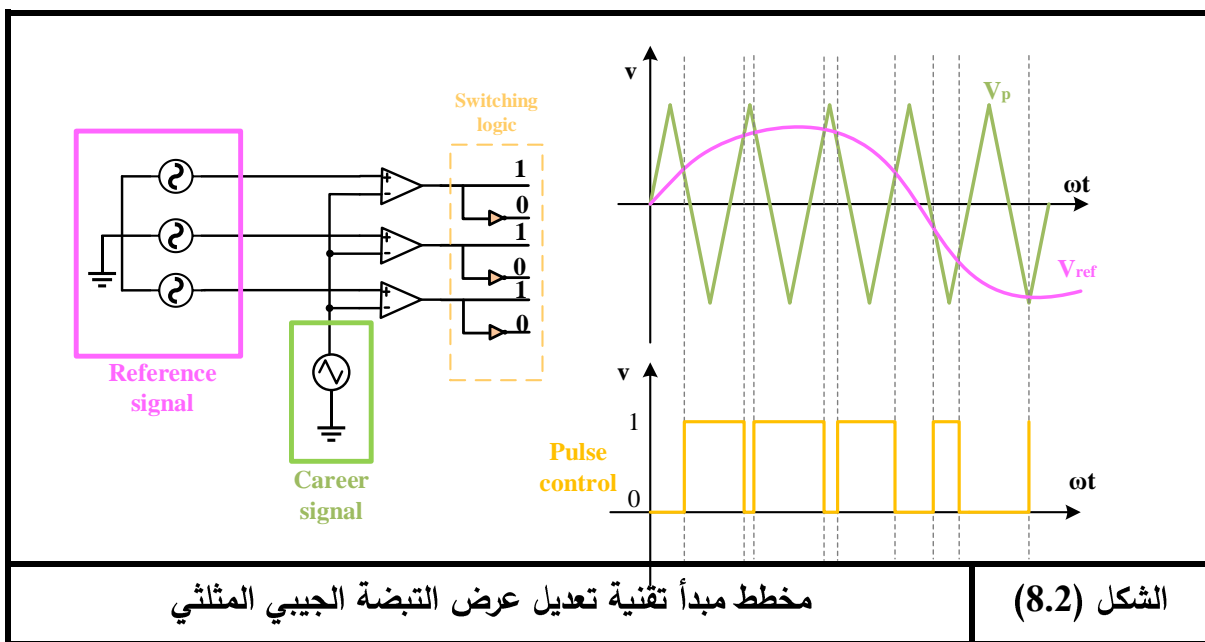
التحكم البطائي هو تقنية تستخدم في مختلف أنظمة التحكم لتوفير الاستقرار والدقة في التحكم في سلوك النظام. في هذا النوع من التحكم ، يتم تحديد نطاق التباطؤ حول القيمة المرجعية المطلوبة - الشكل (a.7.2). يتم قياس قيمة التيار الحقيقية فبمجرد أن تتجاوز إشارة المدخل الحد العلوي أو الحد السفلي للنطاق، يتم التبديل إلى حالة أو قيمة جديدة للمخارج ويبقى في تلك الحالة حتى يعبر إشارة المدخل الحد الآخر، نستعمل لهذه العملية منظمات التباطؤ التي تمثل مخارجها إشارات التحكم في فتح و غلق قواطع العاكس - الشكل (b.7.2) [18].

الفصل الثاني نمذجة المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور ومحاكاة تقنية التحكم FOC



2.1.4.2 تقنية تعديل عرض النبضة الجيبي المثلي PWM

تعتبر من أشهر الطرق المستخدمة لفتح و غلق القواطع الالكترونية ، الهدف منها هو الحصول على إشارة رقمية ذات تواتر متغير بما يتناسب مع تغير تردد و توتر الإشارة المراد توليدها على مخرج العاكس .تعتمد هذه التقنية على المقارنة بين إشارة مرجعية جيبيية ثلاثية الطور و إشارة حاملة مثلثية حيث يتم تحديد أوقات التبديل من خلال نقاط التقاطع بين الإشارة الحاملة و المرجعية [19]. الشكل (2.8) يمثل مبدأ عمل تقنية PWM.



الفصل الثاني نمذجة المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور ومحاكاة تقنية التحكم FOC

إن أغلب طرق التحكم في الآلات تعتمد على هذه التقنية و من أشهرها تقنية التحكم بتوجيه التدفق.وتقوم تقنية PWM على مقدارين هما:

- معامل التضمين m : يمثل النسبة بين تردد الإشارة الحاملة f_p و الإشارة المرجعية f_{ref} و يعطى بالعلاقة:

$$m = \frac{f_p}{f_{ref}} \quad \{39.2\}$$

- معامل التعديل r : يمثل النسبة بين سعة الإشارة الحاملة A_p و سعة الإشارة المرجعية A_{ref} و تعطى بالعلاقة:

$$r = \frac{A_{ref}}{A_p} \quad \{40.2\}$$

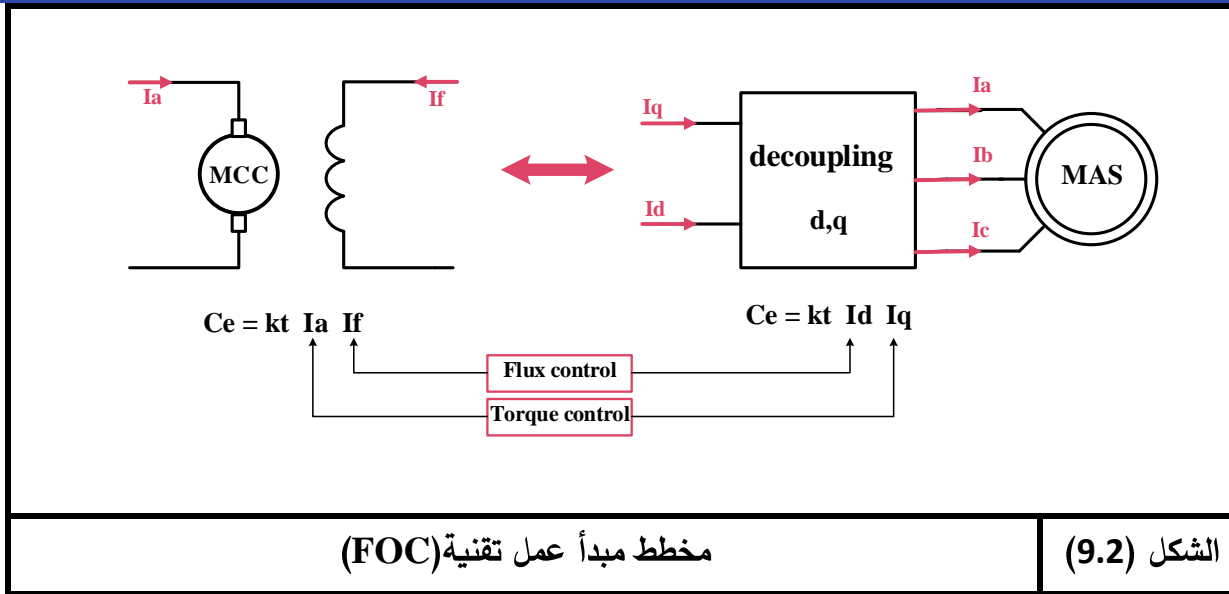
معامل التعديل يكون محصورا بين الصفر و الواحد $0 < r < 1$.

5.2 التحكم بتوجيه الفيض FOC

يعتبر نظام التحكم بتوجيه الفيض (FOC) في المحركات الكهربائية من الأنظمة الحديثة حيث كان أول ظهور له في أعمال Balachke في سبعينيات القرن الماضي . تستخدم هذه التقنية بشكل واسع في المجالات الصناعية و ذلك لتميزها عن الأنظمة التقليدية الأخرى فهو يوفر استجابة ديناميكية عالية، ونطاق سرعة واسع للتشغيل، وكفاءة جيدة. كما يسمح أيضا بالتحكم السلس والدقيق عند السرعات المنخفضة، مما يجعله مناسباً للتطبيقات التي تتطلب التحكم الدقيق مثل المركبات الكهربائية والروبوتات والأتمتة الصناعية [20].

الفكرة الرئيسية وراء التحكم بتوجيه الفيض هي فصل التحكم في العزم والفيض حيث يتيح هذا الفصل التحكم الدقيق في أداء المحرك، بما في ذلك السرعة وعزم الدوران والكفاءة. فنحصل على نموذج بسيط يصبح فيه سلوك المحركات التحريضية مشابهة لمحركات التيار المستمر ذو الاثارة منفصلة (من حيث التحكم) [21].

الفصل الثاني نمذجة المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور ومحاكاة تقنية التحكم FOC



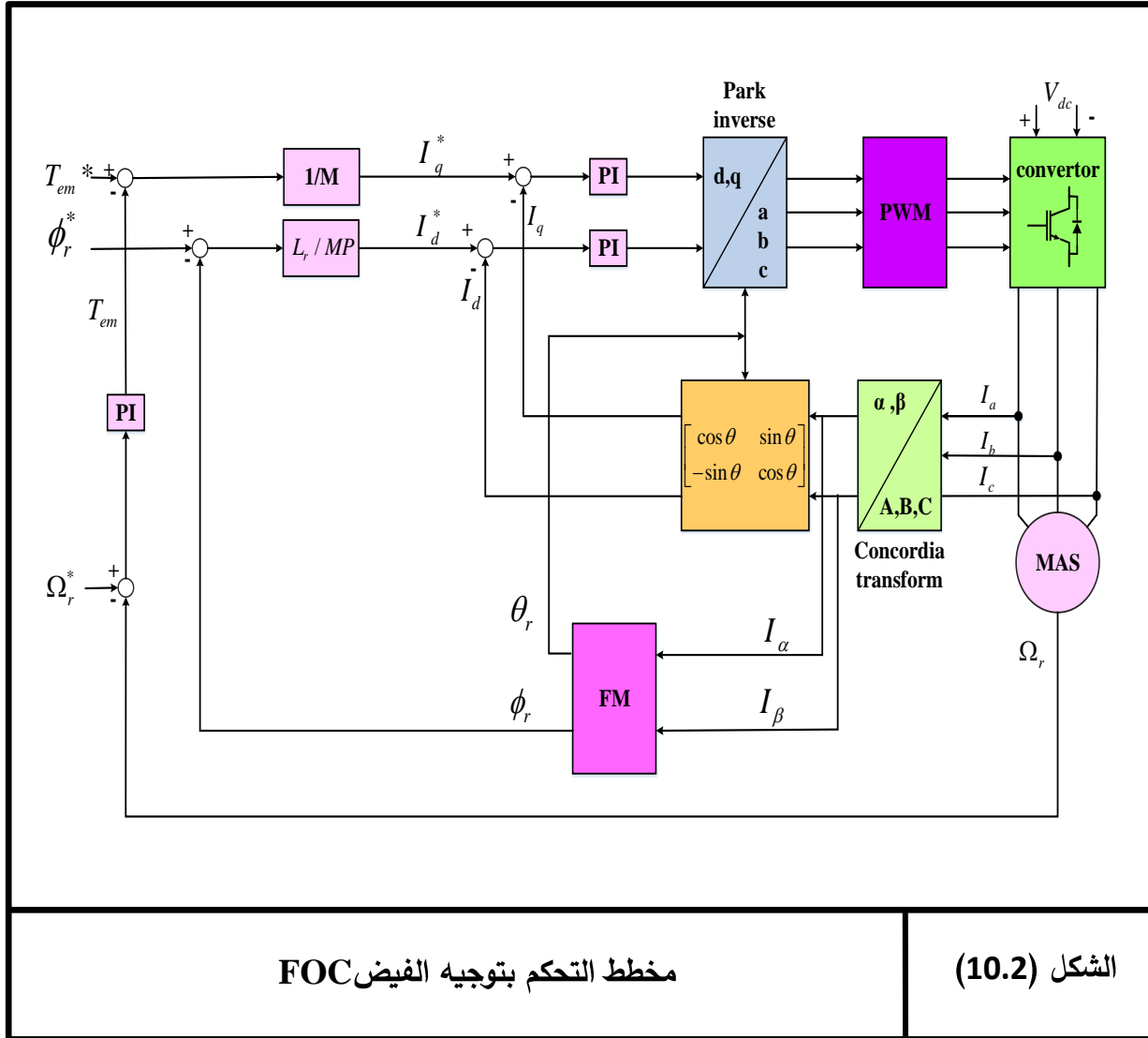
الشكل (9.2)

تعتمد تقنية التحكم (FOC) على النقاط الرئيسية التالية :

- الأشعة الفراغية لمتغيرات الآلة: التيار، الجهد و التدفق.
- تحويلات النظام الثلاثي الطور إلى النظام ثنائي الطور (Concordia·Clarke·Park) و كذلك التحويلات العكسية لها - الشكل (b.10.2).
- تقنية تعديل عرض النبضة الجببي المثلي و الذي تم التطرق إليه سابقا الممثل في الشكلين (8.2) و (a.10.2).
- المصححات (PI) منتشرة على نطاق واسع في مجال التحكم في الآلات الكهربائية و الهدف منها هو حساب الخطأ بين الإشارة المرجعية و المقاسة (الحقيقية) و تعديلها حتى تتوافق مع القيم المطلوبة- الشكل (c.10.2).
- الطابق (FM) و دوره حساب طولية الفيض ϕ_r و الزاوية θ_r - الشكل (d.10.2).

بفضل النقاط سابقة الذكر يمكن توجيه التدفق حسب المحور المباشر dq. هذه العملية تنتج فك ارتباط كهرومغناطيسي بين التدفق و العزم مما يجعلها مكافئة لمحرك تيار مستمر و بالتالي يمكن تجاوز كل المشاكل الناتجة عن التأثير المتبادل بين تدفقات الجزء الدوار و الجزء الثابت للمحركات التحريضية و هو ما يمنحنا أداء و مردود عاليين .

الفصل الثاني نمذجة المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور ومحاكاة تقنية التحكم FOC



الشكل (10.2)

هذه الطريقة تستوجب تحديد شعاع التدفق في الدوار بشكل دقيق إلا أن قيم عناصر الدوار حساسة جدا للحرارة لهذا أي تغير فيها ينتج أخطاء في حساب موضع شعاع الفيض و منه فإن هذه الطريقة لا تضمن لنا الحفاظ التام على جودة التحكم في السرعة.

6.2 محاكاة تقنية التحكم بتوجيه الفيض FOC

بعد الدراسة النظرية لطريقة التحكم بالفيض الموجه قمنا بمحاكاة هذه التقنية في بيئة MATLAB/SIMULINK

نسبة للمرجع المرتبط بالحقل الدوار للمحرك اللاتزامني ثلاثي الطور ذو استطاعة 3kw خلال زمن محاكاة

t=3s والذي يحمل الخصائص المرفقة في الملحق A.

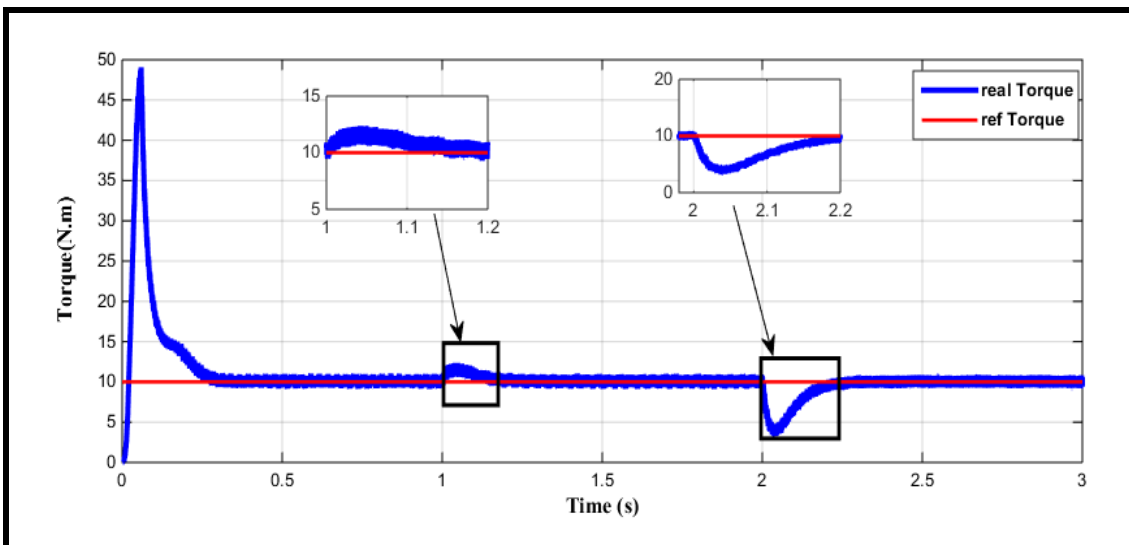
الفصل الثاني نمذجة المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور ومحاكاة تقنية التحكم FOC

قمنا بالمحاكاة من أجل الحالات التالية مبينة بالأشكال (11.2)، (12.2)، (13.2) على التوالي :

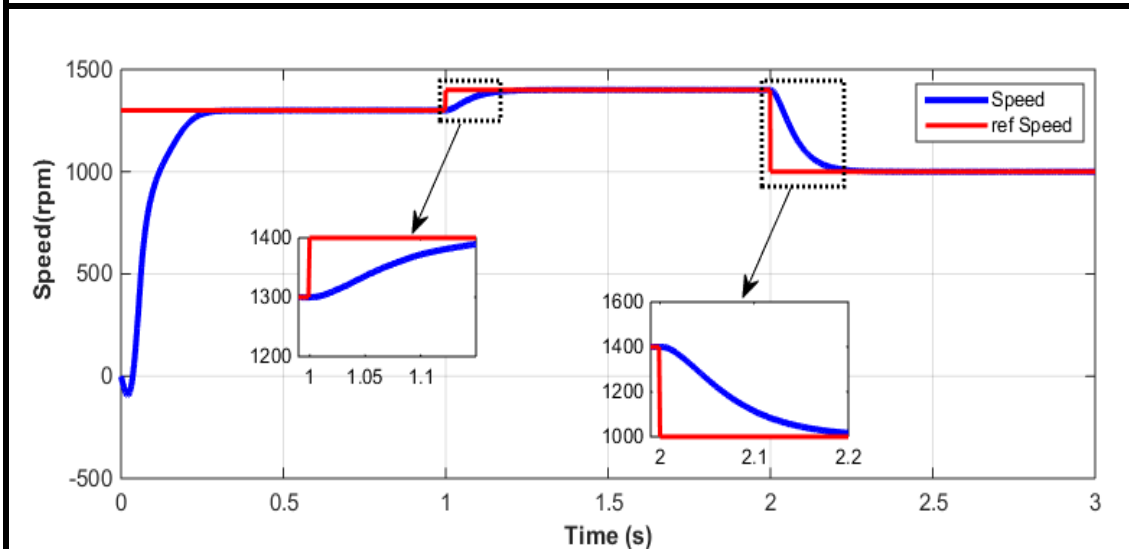
- الحالة 01 : من أجل حمل ثابت ($T_r = 10N.m$) و سرعة متغيرة.
- الحالة 02 : من أجل سرعة ثابتة ($n=1400rpm$) و حمل متغير.
- الحالة 03 : تجربة متانة الآلة بتغيير مقاومة الدوار R_r .

1.6.2 نتائج المحاكاة من أجل حمل ثابت ($T_r = 10N.m$) و سرعة متغيرة

$$\phi^* = 1wb, m = 60, T_r = 10N.m$$

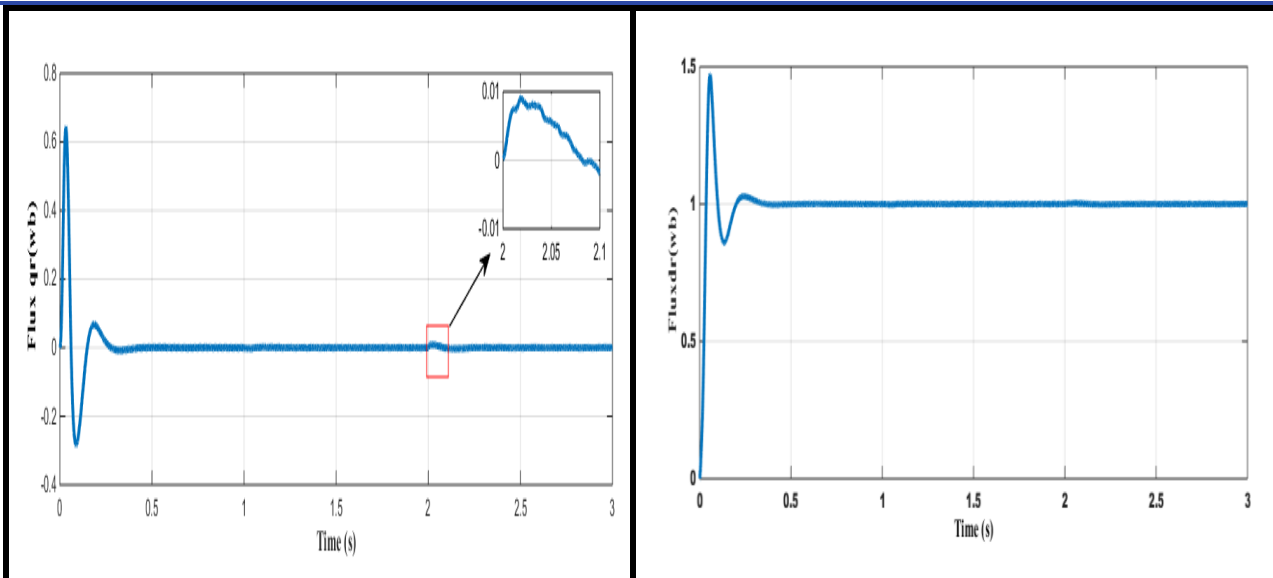


منحنى العزم الكهرومغناطيسي بدلالة الزمن



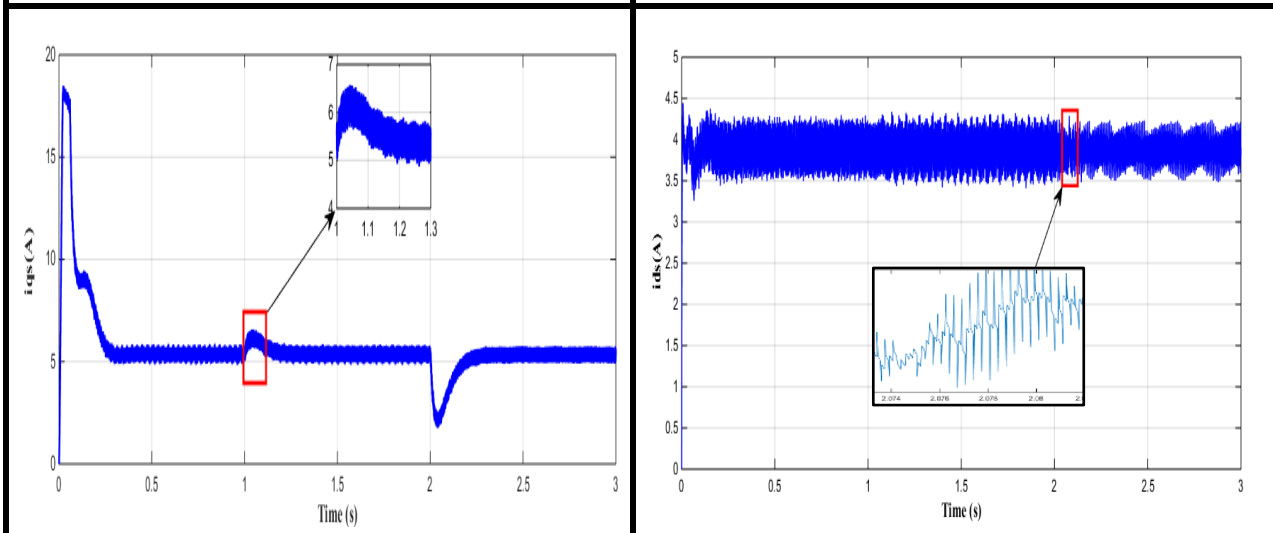
منحنى السرعة بدلالة الزمن

الفصل الثاني نمذجة المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور ومحاكاة تقنية التحكم FOC



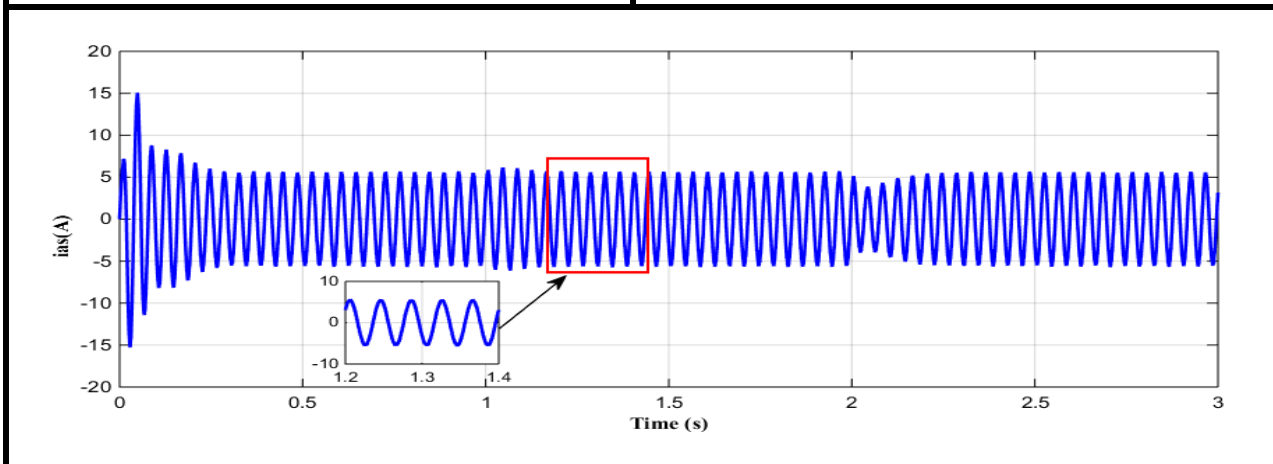
منحنى التدفق Φ_{qr} بدلالة الزمن

منحنى التدفق Φ_{dr} بدلالة الزمن



منحنى التيار i_{qs} بدلالة الزمن

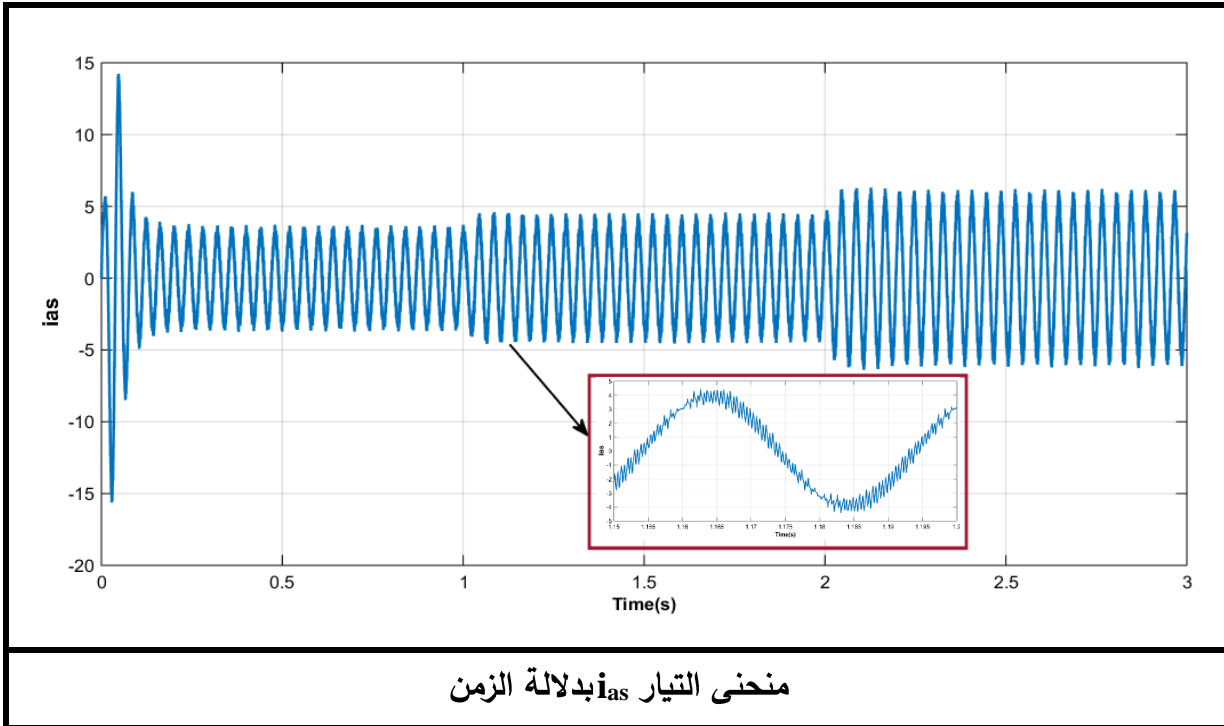
منحنى التيار i_{ds} بدلالة الزمن



منحنى التيار i_{as} بدلالة الزمن

الفصل الثاني نمذجة المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور ومحاكاة تقنية التحكم FOC

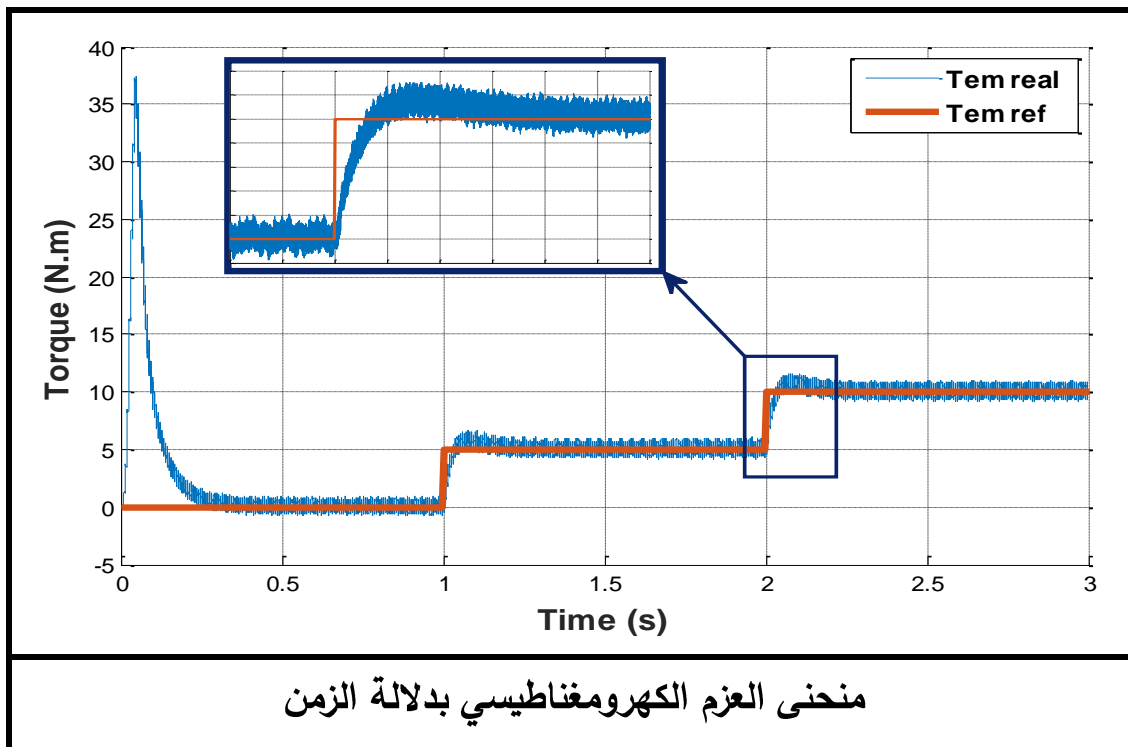
❖ من أجل : نسبة التضمين $m=21$



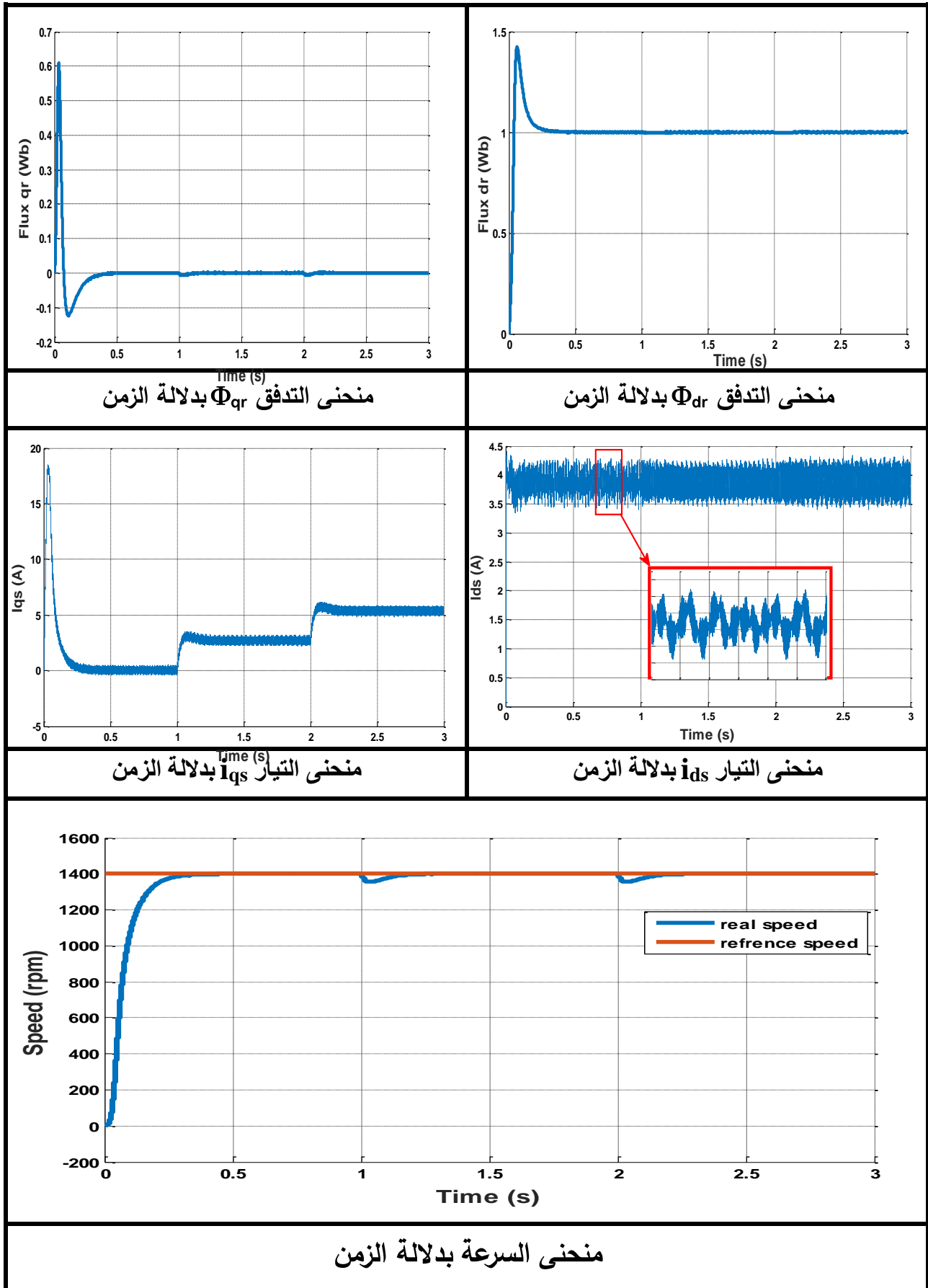
الشكل (11.2)

2.6.2 نتائج المحاكاة من أجل سرعة ثابتة ($n=1400rpm$) و حمل متغير

$$\phi^* = 1wb, m = 60, n = 1400rpm$$



الفصل الثاني نمذجة المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور ومحاكاة تقنية التحكم FOC



منحنى التدفق Φ_{qr} بدلالة الزمن

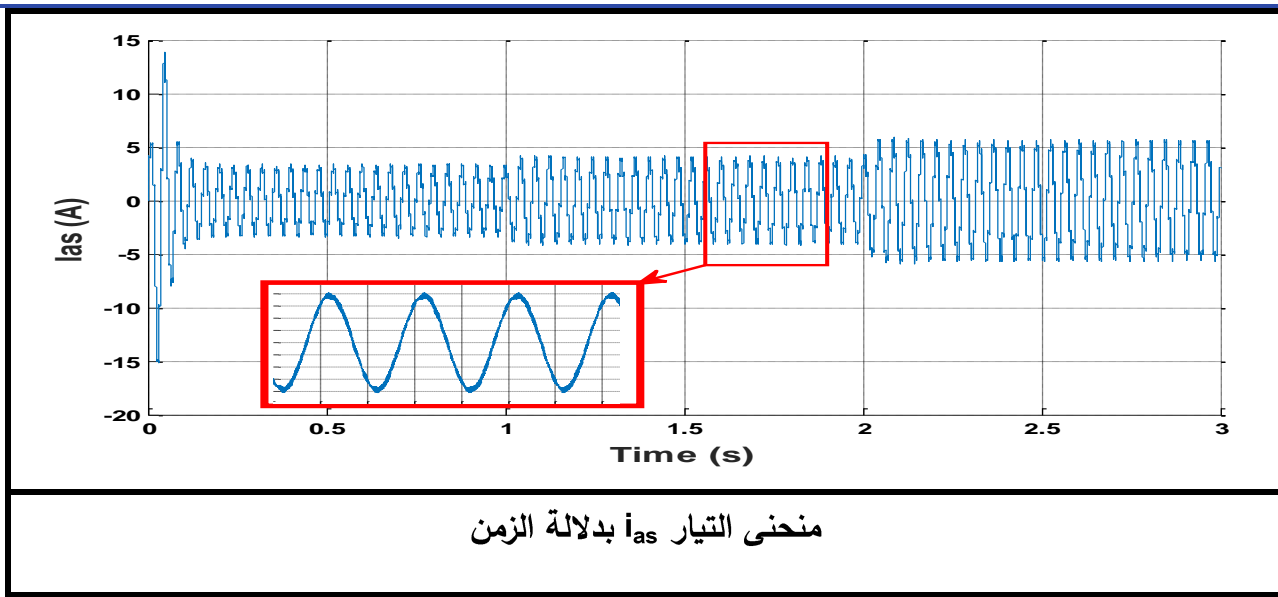
منحنى التدفق Φ_{dr} بدلالة الزمن

منحنى التيار I_{qs} بدلالة الزمن

منحنى التيار I_{ds} بدلالة الزمن

منحنى السرعة بدلالة الزمن

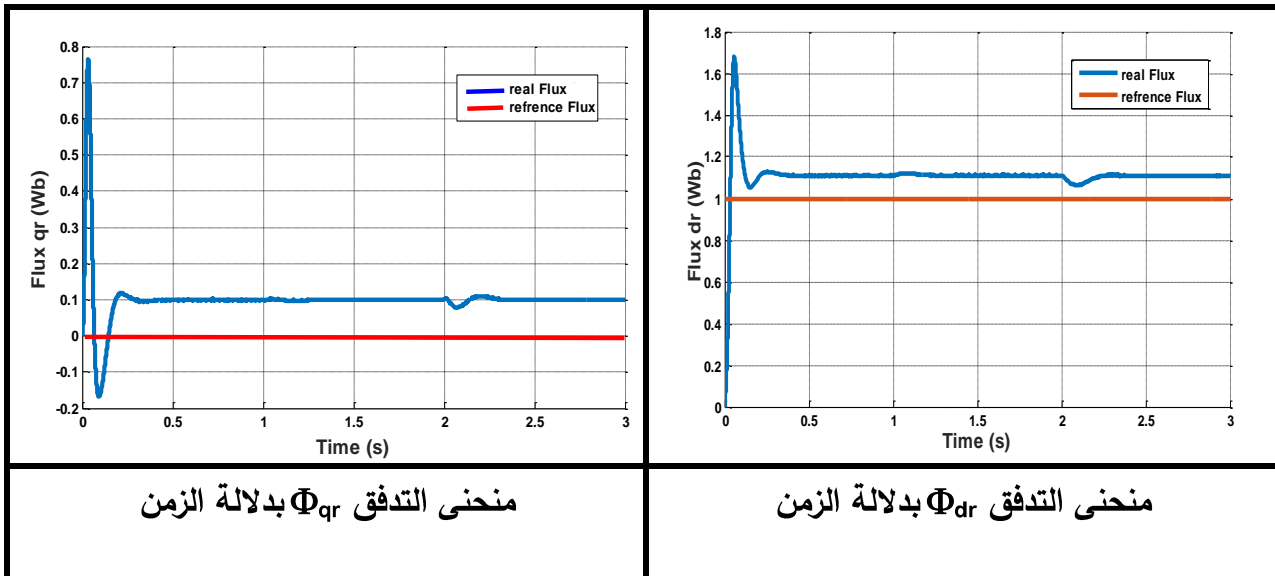
الفصل الثاني نمذجة المحرك اللاتزامني ثلاثي الطور ومحاكاة تقنية التحكم FOC



الشكل (12.2)

3.6.2 تجربة امتانة الآلة بتغيير مقاومة الدوار R_r

$$\phi^* = 1 \text{wb}, m = 60, R_r' = 20\% R_r$$



الشكل (13.2)

4.6.2 تحليل النتائج

انطلاقاً من نتائج محاكاة تقنية التحكم بتوجيه الفيض للمحرك اللاتزامني ثلاثي الطور توصلنا إلى

مجموعة من الملاحظات الموضحة في النقاط التالية :

الفصل الثاني نمذجة المحرك اللازامي ثلاثي الطور ومحاكاة تقنية التحكم FOC

- من خلال منحنيات الفيوض في الحالة 01 و الحالة 02 نلاحظ أنه في النظام الدائم منحى الفيض Φ_{dr} يتبع القيمة المرجعية للفيض المحددة في المحاكاة ، أما منحى Φ_{qr} تتعدم قيمته و هذا ما يدل على توجيه الفيض حسب المحور d و الذي يعتبر أساس هذه التقنية .
- التحكم بالعاكس ثلاثي الطور بتقنية PWM له تأثير على هذه التقنية من خلال معامل التضمين m الذي يرتبط مباشرة بتردد الإشارة الحاملة f_p و الذي يؤثر بطريقة عكسية على مستوى التذبذبات فبتخفيض نسبة هذا المعامل تزيد التذبذبات و العكس صحيح كما هو موضح في منحى التيار i_{as} .
- بالنسبة لمقداري العزم و السرعة فيوجد اختلاف حسب كل حالة :

نلاحظ في النظام الدائم منحى العزم الكهرومغناطيسي في الحالة 01 و منحى السرعة في الحالة 02 يتبع قيمة المقدار المرجعية إلا أنه عند لحظات التغيير سواء في السرعة أو العزم عند ($t=1s$, $t=2s$) يحدث تغير طفيف وهذا ما يبين أن الفصل الكهرومغناطيسي لم يتم بصورة كلية كما هو مطلوب في هذه التقنية، كما توضح تغيرات منحى السرعة أن استجابة النظام لها تستغرق زمن صغير نسبيا وهذا ما يدل على أن الاستجابة الديناميكية لهذه التقنية جيدة وهذا ينطبق على العزم الكهرومغناطيسي كذلك .

- من خلال تجربة متانة الآلة للمحرك لاحظنا أن التغيير في قيمة مقاومة الدوار R_r نتج عنه إنزياح في منحى الفيض Φ_{dr} و Φ_{qr} عن قيمتهما المطلوبة. و منه نستنتج أن تقنية التحكم بتوجيه الفيض تعتمد بشكل كبير على متغيرات الآلة حيث أن أي تغير فيها يؤدي إلى اختلال كلي لاستراتيجية هذا النوع من التحكم.

7.2 خاتمة

- من خلال هذا الفصل تعرفنا على نمذجة المحرك الرياضية و التي تعتبر أساسية عند التحكم في المحركات و خصوصا عند استعمال تقنية التحكم بتوجيه الحقل التي تستخدم على نطاق واسع بسبب قدرتها على توفير التحكم الدقيق في المحركات التحريضية . لكن رغم مميزاتها إلا أنها تمتلك مجموعة من نقاط الضعف من أهمها:
- تتطلب هذه التقنية معرفة شاملة بخصائص الآلة و إعداداتها و هذا ما يجعل النظام حساسا لتغيرات معاملات الآلة مما يؤدي إلى أخطاء في الحسابات في حالة تغير أحد عناصرها بفعل ارتفاع الحرارة مثلا .
 - تعتبر هذه التقنية معقدة جدا من حيث الحسابات الرياضية و التحويلات لتحقيق التحكم المطلوب مما يتطلب ميكرومراقب قوي من أجل القيام بهذه العملية . بسبب كل ما سبق تصبح تكلفة تنفيذ هذه التقنية مرتفعة جدا ، و هذا ما دفع الباحثين لتطوير تقنيات تحكم أكثر بساطة وأقل تكلفة.



الفصل الثالث

**نمذجة و محاكاة تقنية التحكم المباشر بالعزم DTC
في محرك لاتزامني ثلاثي الطور**



إن أكثر الطرق انتشارا للتحكم في المحرك التحريضي ثلاثي الطور هي طريقة التحكم بتوجيه الحقل (FOC) التي تم اقتراحها من قبل الباحث Blachke حيث اشتهر استخدامها في أنظمة القيادة الشعاعية عالية المستوى للمحركات اللاتزامنية (التحريضية) إلا أنها تتأثر بشكل كبير بتغير بارامترات الآلة ، ومن هذا المنطلق دأبت الأبحاث في السنوات الماضية لإيجاد حلول مختلفة لأنظمة التحكم بالمحركات بحيث تعتمد على الدقة والاستجابة الديناميكية العالية و تقلل من درجات التعقيد، في بداية عام 1980م تم اقتراح تقنية التحكم المباشر بالعزم (DTC) من قبل الباحثين Takahashi و Noguchi من أجل استخدامها في تطبيقات الاستطاعة المنخفضة و المتوسطة ، كما قام الباحث Depenbrock بتطويرها للعمل بها في تطبيقات ذات الاستطاعة العالية [1]. ومع تطور عالم الصناعة تلت هذه الخوارزمية اهتماما كبيرا من طرف الشركات المتخصصة و ذلك نظرا لانعكاساتها الناجمة والمرضية على العملية الإنتاجية ، وبلغت تقنية التحكم المباشر بالعزم هذه المكانة بناء على جوانب إيجابية أهمها [22] :

- تأمين استجابة ديناميكية عالية السرعة بحيث يستطيع المحرك خلالها أن يستعيد نقطة تشغيله و استقراره في زمن قصير جدا و ذلك عند تغير الحمل المفاجئ.
- خطية العزم التي تعد ميزة مهمة جدا في التطبيقات التي تستلزم الدقة كآلات صناعة الورق و الثقب.
- إمكانية التحكم بالعزم الكهرومغناطيسي عند الترددات المنخفضة و خاصة في التطبيقات التي تحتاج إلى عملية إقلاع أو توقف المحركات من دون اضطرابات كالمصاعد و الرافعات .
- غياب عملية فك الارتباط بالنسبة للجهود الناتجة على التحكم بعرض النبضة PWM.
- غياب استخدام حساسات السرعة.
- الحفاظ على متانة جيدة للآلة في حال التأثير على متغيرات الجزء الدوار.

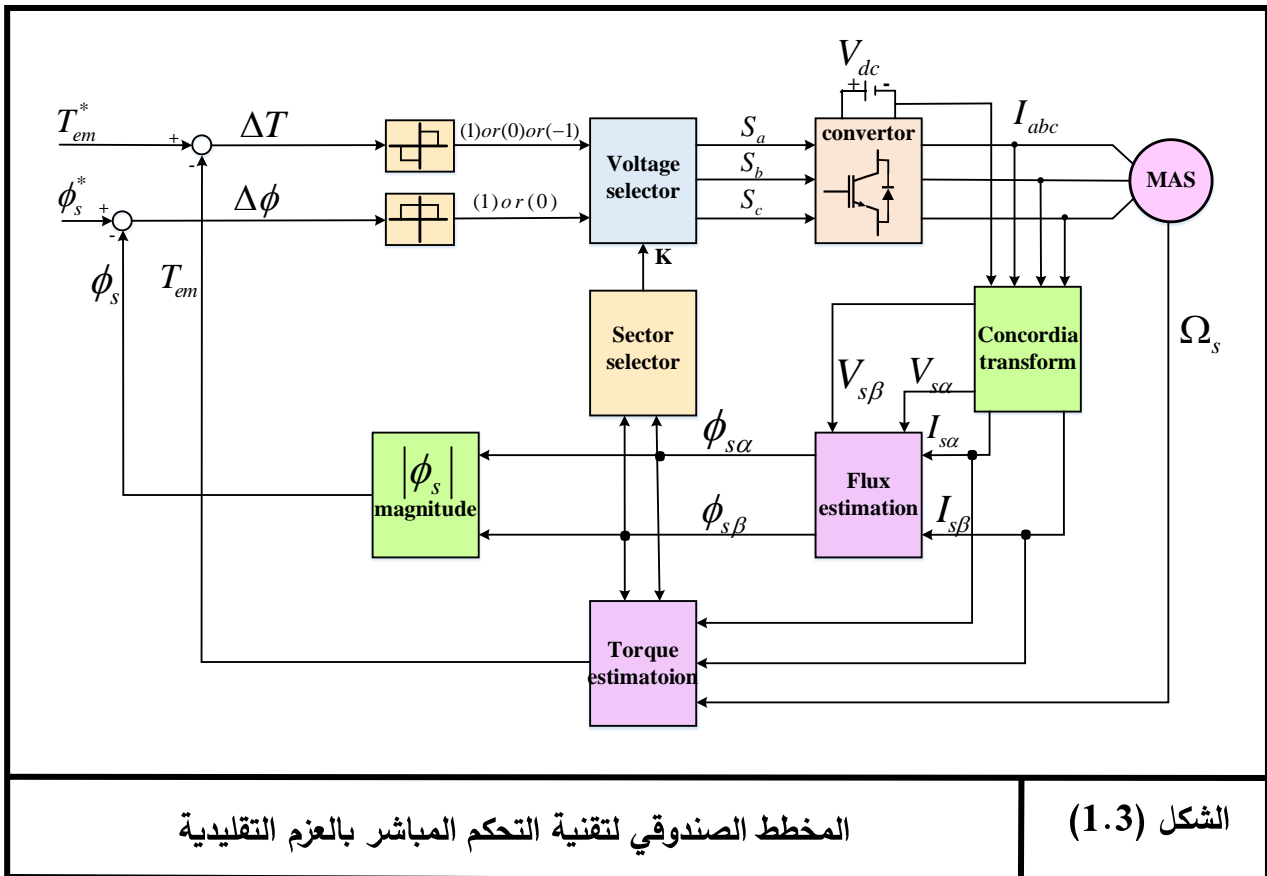
سنقوم في هذا الفصل بالتعرف على تقنية التحكم المباشر بالعزم DTC بناء على الخطوات التالية:

- المبدأ العام لتشغيل خوارزمية (DTC).
- تقنية التحكم المباشر بالعزم اعتمادا على تنظيم السرعة.
- تقدير فيض الثابت Stator Flux Estimation .
- تقدير العزم الكهرومغناطيسي.

- التحكم بفيض الثابت والعزم الكهرومغناطيسي باستعمال المتحكمات البطائية Hysteresis Controllers
- تحديد القطاعات التي ينتمي إليها شعاع فيض الثابت.
- اختيار حالات الإبدال المناسبة.
- محاكاة الخوارزمية باستخدام بيئة MATLAB/SIMULINK وعرض الإشارات الأساسية لها.

2.3 المبدأ العام لتشغيل خوارزمية التحكم المباشر بالعزم DTC

يرتكز المبدأ الأساسي لخوارزمية التحكم المباشر بالعزم على التحكم اللحظي وبشكل مستقل لكل من فيض الثابت و العزم الكهرومغناطيسي المتولد بالمحرك حيث يتم التحكم بكل منهما باستخدام نظام حلقة مغلقة خالية من الحلقات الوسطية المصححة للتيار كما هو الحال في نظام القيادة بالحقل الموجه. وتقوم تقنية DTC على تطبيق أحد أشعة الجهود التي تم دراستها في الفصل السابق على مخرج العاكس ثلاثي الطور بحيث يتم تحديد الشعاع المطلوب تبعاً لقيمة الخطأ بين القيمة المرجعية والقيم التقديرية لمطال تدفق الثابت من جهة وللعزم الكهرومغناطيسي من جهة أخرى ويتم الحصول عليهما باستخدام متحكمات بطائية (Hystérésis Controllers). بالنتيجة يقوم شعاع الجهد المطبق بجعل هذه القيمة التقديرية للمقدار المتحكم به مساوية إلى حد كبير للقيمة المرجعية له.



المخطط الصندوقي لتقنية التحكم المباشر بالعزم التقليدية

الشكل (1.3)

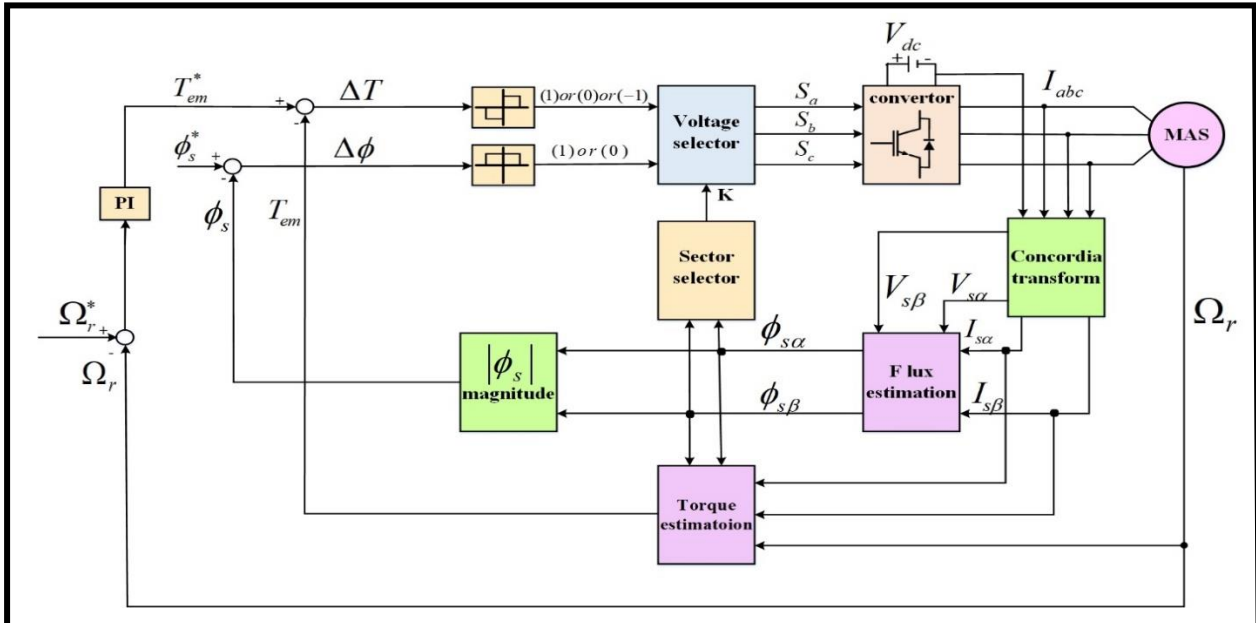
يبين الشكل (1.3) المخطط الصندوقي لتقنية التحكم المباشر بالعزم التقليدية حيث يتكون من زوج من المتحكمات البطائية ، مقدر لفيض الثابت ومقدر للعزم ، طابق اختيار شعاع الجهد المناسب و طابق العاكس ثلاثي الطور. كما نلاحظ بأن هذه الخوارزمية تحتوي على حلقتين مستقلين الأولى للتحكم بطويلة شعاع فيض الثابت و الثانية للتحكم بالعزم الكهرومغناطيسي ويتم المقارنة بين القيمة التقديرية للإشارة المقاسة التي تمثل إشارة التغذية العكسية و بين الإشارة المرجعية (نرّمز لكل من فيض الثابت والعزم الكهرومغناطيسي على التوالي (T_{ref}, Φ_{ref}) . نستنتج من خلالها إشارة الخطأ لكل من الفيض (Flux error) والعزم الكهرومغناطيسي (Torque error) التي سيتم إدخالهما إلى منظمين بطائيين مستقلين، أما بالنسبة لإشارتي التغذية العكسية المقدره يتم الحصول عليها باستخدام طابقي التقدير (Torque estimator) و (Flux estimator) التي تتطلب بدورها قياس تيارات الثابت بشكل مباشر عن طريق استخدام حساسات للتيار، أما جهود الثابت فيتم الحصول عليها من خلال قياس جهد المصدر المستمر و وضعية مفاتيح العاكس . و من خلال مقدر فيض الثابت نحدد زاوية موضع شعاع الفيض المغناطيسي التي بدورها تمكننا من تقسيم شعاع فيض الثابت إلى عدد من القطاعات Sectors (بناء على تموضع شعاع جهد العاكس) .بالاعتماد على مخرج كل من المنظمين البطائيين و موضع شعاع فيض الثابت المعبر عنه برقم القطاع يتم تشكيل جدول التحكم الذي يمثل جوهر خوارزمية DTC بحيث في كل عينة من الزمن T_s يختار شعاع جهد واحد من جدول التبديل الذي يضمن تحقيق الزيادة أو النقصان المحدد لكل من فيض الثابت والعزم الكهرومغناطيسي أين يتم الحفاظ على كل منهما ضمن عروة المنظمات البطائية الموضحة مسبقا [1]. من أجل التعمق أكثر في فهم خوارزمية DTC لا بد من نمذجتها بالشكل الرياضي الذي يمكننا من استنتاج المعادلات الرياضية التي تصف لنا سلوك التقنية للتحكم في المحرك التحريضي ثلاثي الطور.

3.3 تقنية التحكم المباشر بالعزم اعتمادا على منظم السرعة

توجد العديد من تقنيات التنظيم التي يمكن تطبيقها في مختلف المجالات الصناعية، حيث تعد تقنية تنظيم السرعة عن طريق المنظم PI الأكثر بساطة من بين التقنيات الموجودة والتي تسمح بتحديد قيمة العزم الكهرومغناطيسي المرجعي اللازم في عملية التقدير لدى خوارزمية DTC.

تعرف دالة تحويل منظم السرعة PI بالمعادلة التالية:

$$F_R (p) = K_P + \frac{K_i}{p} \quad \{1.3\}$$



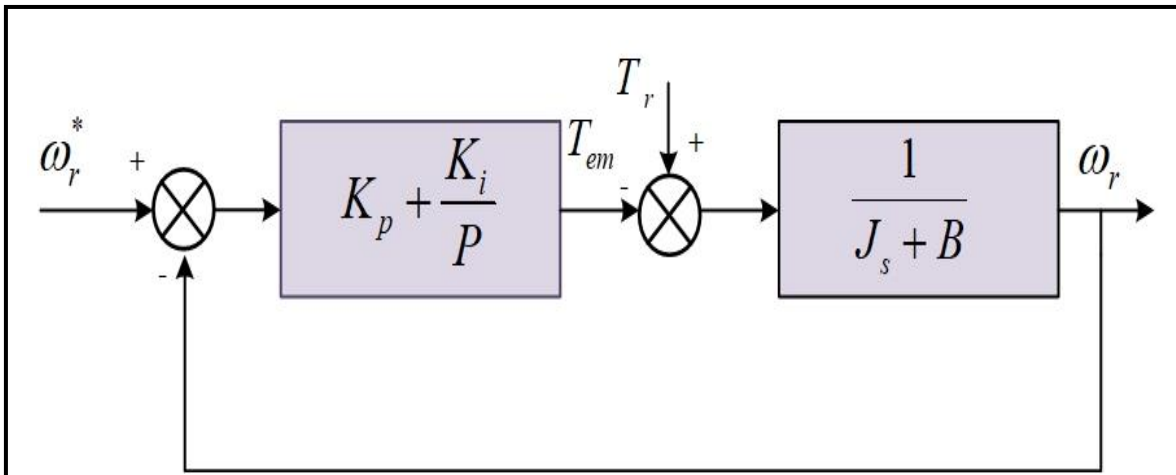
المخطط الصندوقي لتقنية التحكم المباشر بالعزم التقليدية بتنظيم السرعة

الشكل (2.3)

إن عملية تنظيم السرعة تعتمد على المعادلة الميكانيكية التالية :

$$\Omega_r = \frac{1}{J + B} (T_{em} - T_r) \quad \{2.3\}$$

من المعادلتين {1.3} و {2.3} يمكننا استنتاج المخطط العملي لتقنية تنظيم السرعة الشكل (3.3)، الذي نستطيع من خلاله حساب المعاملين \$K_p\$ و \$K_i\$.



المخطط العملي لعملية تنظيم السرعة

الشكل (3.3)

4.3 تقدير فيض الثابت Stator Flux Estimation

الفصل الثالث نمذجة ومحاكاة تقنية DTC للتحكم في محرك لاتزامني ثلاثي الطور

توجد طريقتين تستخدمان من أجل تقدير صحيح لفيض الثابت [23]:

- ◆ الطريقة الأولى: هي الطريقة التي تعتمد على جهود الثابت بدون أن تحتاج لمعرفة سرعة الجزء الدوار و إنما تتطلب فقط معرفة قيمة مقاومة الثابت R_s غير أن عيبها الوحيد هو ضجيج أجهزة القياس و عنصر المكامل التي تتسبب في إحداث أخطاء عملية خاصة في تطبيقات السرعات المنخفضة. (هي الطريقة المراد دراستها في تقدير الفيض).
- ◆ الطريقة الثانية: وهي الطريقة التي تعتمد على تيارات الثابت و تقوم بدورها بحل مشكلة تطبيقات السرعات المنخفضة غير أنها تحتاج إلى معرفة سرعة الدوار و بالتالي يتوجب إضافة حساس السرعة.

التقدير بالاعتماد على جهود الثابت Stator Voltage Model

تعتبر الطريقة الأبسط لتحقيق تقدير لفيض الثابت حيث تعطى معادلة شعاعه بجملة من الإحداثيات الثنائية المتعامدة المرتبطة بالجزء الثابت (α^s, β^s) بالعلاقة [4]:

$$\overline{\phi}_s = \int_0^t (\overline{V}_s - R_s \overline{i}_s) dt \quad \{3.3\}$$

شعاع فيض الثابت : $\overline{\phi}_s [wb]$

شعاع جهد الثابت : $\overline{V}_s [v]$

شعاع تيار الثابت : $\overline{i}_s [A]$

نلاحظ من خلال المعادلة {3.3} أن التقدير معتمد على تكامل الحلقة المفتوحة للقوة المحركة الكهربائية الكهربائية العكسية التي تتعلق فقط بقيمة مقاومة الثابت و كذا جهد و تيار الثابت بحيث تقوم بإعطاء تقدير صحيح لفيض الثابت وذلك عند السرعات العالية أما عند السرعات المنخفضة يصبح هبوط الجهد على مقاومة الثابت جد ملحوظ مقارنة مع جهد الثابت و بالتالي يسبب انخفاض الأداء الميكانيكي نوعا ما لهذه التقنية.

◆ حسب طريقة Euler الرقمية ، يمكننا استخراج عبارة مشتق شعاع فيض الثابت بالعبارة التالية :

$$\frac{d\overline{\phi}_s}{dt} = \frac{\overline{\phi}_s(k+1) - \overline{\phi}_s(k)}{T_s} = \frac{\Delta\overline{\phi}_s}{T_s} \quad \{4.3\}$$

وكون دقة طريقة Euler تعتمد على قيمة دور التقطيع T_s فإنه كلما كانت قيمته صغيرة كلما كانت الدقة أكبر

و بالتالي يمكن كتابة العلاقة {5.3} اعتمادا على العلاقة {4.3} كما يلي :

$$\Delta\overline{\phi}_s = \overline{V}_s T_s - R_s \overline{i}_s T_s \quad \{5.3\}$$

الفصل الثالث

نمذجة ومحاكاة تقنية DTC للتحكم في محرك لاتزامني ثلاثي الطور

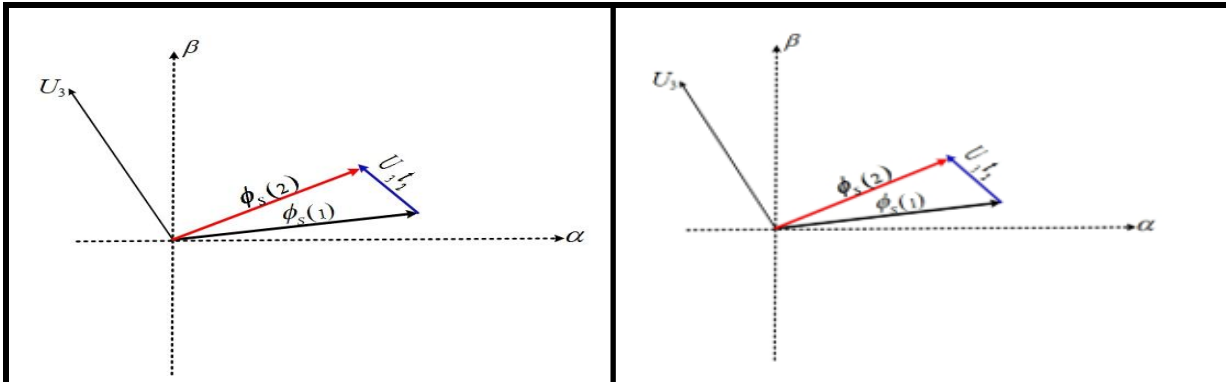
نستنتج من خلال العلاقة {5.3} أن تغيير شعاع فيض الثابت متعلق بحددين، الأول عبارة عن شعاع الجهد المطبق خلال دور التقطيع T_s و الثاني هو هبوط الجهد على مقاومة الثابت R_s غير أنه يهمل مقارنة مع الحد الأول أي $R_s i_s \ll V_s$ وخاصة في تطبيقات السرعات المتوسطة و العالية، وبالتالي يمكننا اختصار العلاقة السابقة إلى الشكل التالي :

$$\overline{\Delta\phi_s} = \phi_s - \phi_s(0) = \overline{V_s T_s} \quad \{6.3\}$$

❖ ومن العلاقة الأخيرة يمكننا تدوين بعض الخصائص [1] :

- إن اتجاه شعاع فيض الثابت يتحرك وفق اتجاه شعاع الجهد المطبق خلال دور التقطيع T_s .
- يتم تطبيق شعاع جهد واحد فقط خلال دور التقطيع T_s .
- يتوقف تحرك شعاع تدفق الثابت عند تطبيق شعاع جهد صفري.

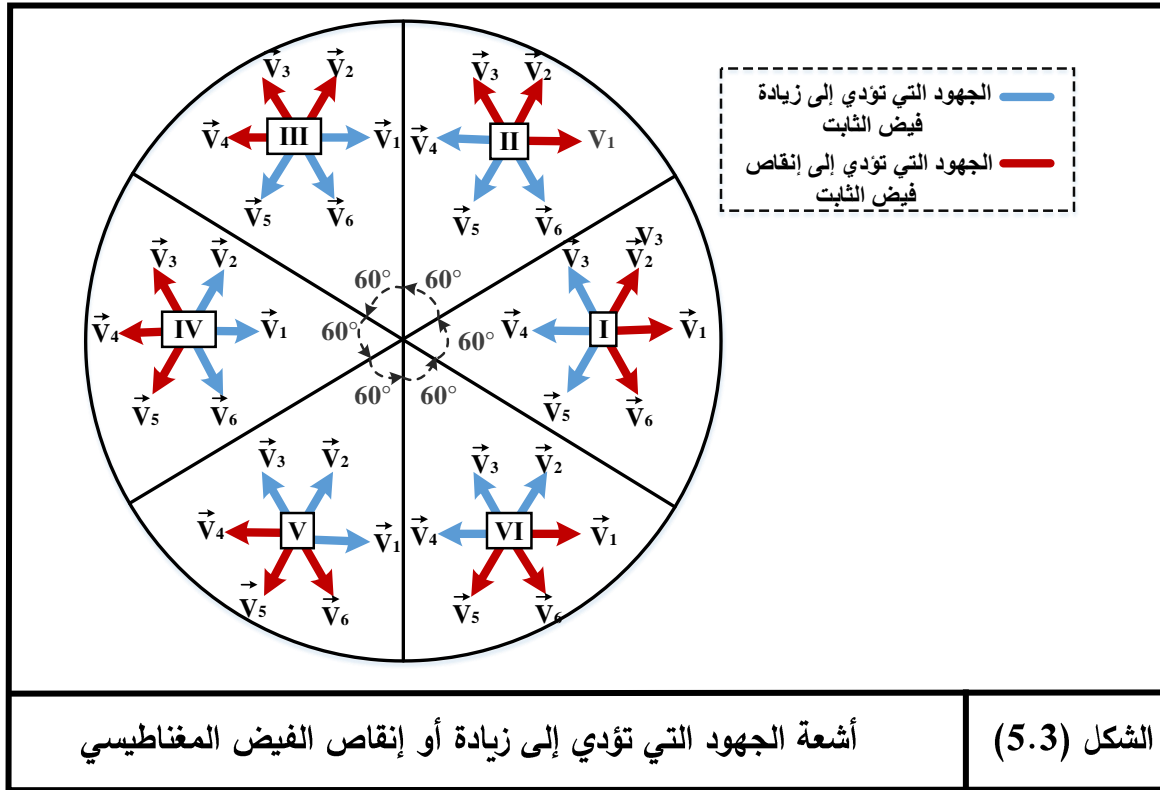
بالتالي نستنتج أن التطبيق المتتالي لأشعة الجهود والمحدد بفترات زمنية معينة هو المسؤول عن تحريك شعاع فيض الثابت وفق اتجاه معين (مع أو عكس عقارب الساعة) و بديناميكية عالية كما يوضحه الشكل (4.3)، حيث نلاحظ من خلاله عند تطبيق شعاع الجهد $\overline{V_2}$ خلال زمن t_1 يؤدي إلى تحريك شعاع الفيض $\phi_{s(0)}$ وفق اتجاه شعاع الجهد المطبق وتصبح طولية $\phi_{s(1)}$ أكبر من طولية $\phi_{s(0)}$ ، غير أنه عند تطبيق شعاع الجهد $\overline{V_3}$ خلال زمن t_2 يتحرك شعاع الفيض $\phi_{s(1)}$ في نفس الاتجاه و تصبح طولية $\phi_{s(2)}$ أصغر من طولية $\phi_{s(1)}$.



الشكل (4.3) تأثير أشعة جهود العاكس ثلاثي الطور على أشعة الفيض المغناطيسي للثابت خلال أزمنة محددة

❖ من أجل التحكم المباشر بفيض الثابت و اختيار شعاع الجهد المناسب يستلزم معرفة طولية واتجاه شعاع فيض الثابت لذلك يتم تقسيم مستوي فيض الثابت إلى ستة قطاعات (بناء على أشعة جهود العاكس يعتبر اتجاه

تغير شعاع الفيض من اتجاه شعاع الجهد المطبق) ، وبين الشكل (5.3) أشعة الجهود التي تؤدي إلى زيادة أو إنقاص الفيض المغناطيسي في كل قطاع من القطاعات.



❖ ولحساب طولية الفيض الثابت نقوم بتطبيق تحويلة ConCordia على العلاقة {3.1} للحصول على مركبتي شعاع الفيض المغناطيسي في جملة الإحداثيات الثنائية المتعامدة المرتبطة بالجزء الثابت (α^s, β^s) والموضحة بالعلاقتين الموالتين [24]:

$$\begin{cases} \phi_{s\alpha} = \int (V_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}) dt \\ \phi_{s\beta} = \int (V_{s\beta} - R_s i_{s\beta}) dt \end{cases} \quad \{7.3\}$$

واعتمادا على تيارات الثابت المقاسة (I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}) يمكننا حساب المركبات $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$:

$$\begin{cases} i_{s\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{sa} \\ i_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} (I_{sb} - I_{sc}) \end{cases} \quad \{8.3\}$$

وانطلاقا من جهد المصدر المستمر وحالات القواطع (S_a, S_b, S_c) يمكننا حساب المركبات $V_{sa}, V_{s\beta}$:

$$\begin{cases} V_{sa} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_o \left(S_a - \frac{1}{2} (S_b + S_c) \right) \\ V_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_o (S_b - S_c) \end{cases} \quad \{9.3\}$$

وبالتالي يمكننا حساب طويلة و عمدة الفيض بالعلاقة :

$$\begin{aligned} |\overline{\phi}_s| &= \sqrt{\phi_{s\alpha}^2 + \phi_{s\beta}^2} \\ \theta_{\phi_s} &= \arctang \left(\frac{\phi_{s\beta}}{\phi_{s\alpha}} \right) \end{aligned} \quad \{10.3\}$$

5.3 تقدير العزم الكهرومغناطيسي

إن العزم الكهرومغناطيسي بإمكاننا تقديره اعتماداً على تقدير فيض الثابت و التيارات المقاسة ، وتكون معادلته كالتالي [1] ، [24] :

$$T_{em} = p \left(\phi_{s\alpha} i_{s\beta} - \phi_{s\beta} i_{s\alpha} \right) \quad \{11.3\}$$

6.3 التحكم بفيض الجزء الثابت و عزم المحرك الكهرومغناطيسي باستعمال المتحكمات البطائية

في تقنية التحكم المباشر بالعزم DTC، تعتبر المتحكمات البطائية عنصراً أساسياً يستخدم لتحقيق التحكم الدقيق في عزم الدوران والتدفق للمحرك حيث يعمل عن طريق مقارنة القيم الفعلية لعزم الدوران والتدفق مع القيم المرجعية المطلوبة. يتم تحديد نطاق حول القيم المرجعية يسمى نطاق التباطؤ. عندما تتجاوز القيم الفعلية هذه الحدود، يتخذ المتحكم البطائي إجراء لتصحيح الخطأ و ذلك للحفاظ على عزم الدوران والتدفق ضمن النطاقات المطلوبة حيث يراقب باستمرار أخطاء عزم الدوران والتدفق ويعدل إشارات التحكم وفقاً لذلك. في تقنية الـ DTC نستعمل متحكمين بطائيين واحد للتدفق و الآخر للعزم [1]، [25].

الجدول (3-1) : مخططات التحكم لكلا المتحكمين البطائيين (العزم و الفيض) وحالات المخارج و مبدأ

العمل

المتحكم البطائي للفيض	المتحكم البطائي للعزم	المتحكم البطائي
		مخطط التحكم
$\begin{cases} \Delta\phi = \phi_s^* - \phi_s < 0 \Rightarrow 0 \\ \Delta\phi = \phi_s^* - \phi_s > 0 \Rightarrow 1 \end{cases}$	$\begin{cases} \Delta T = T_{em}^* - T_{em} < 0 \Rightarrow -1 \\ \Delta T = T_{em}^* - T_{em} = 0 \Rightarrow 0 \\ \Delta T = T_{em}^* - T_{em} > 0 \Rightarrow 1 \end{cases}$	حالات مخرج المتحكم
<p>مخرج المتحكم يكون ذو مستويين:</p> <ul style="list-style-type: none"> • عندما يلامس شعاع الفيض المقدر الحد السفلي للنطاق البطائي يأخذ مخرج المتحكم القيمة 1 أي يجب زيادة الفيض باختيار شعاع الجهد المناسب. • عندما يلامس شعاع الفيض المقدر الحد العلوي للنطاق البطائي يأخذ مخرج المتحكم القيمة (0) أي يجب انقاص الفيض باختيار شعاع الجهد المناسب [1]. 	<p>مخرج المتحكم يكون له ثلاث مستويات :</p> <ul style="list-style-type: none"> • عندما يصل العزم إلى الحد العلوي من النطاق البطائي يكون مخرج المتحكم البطائي مساويا ل (-1) فيتم اختيار شعاع الجهد الذي يخفض قيمة العزم. • عندما يصل إلى الحد الأدنى للنطاق حالة المخرج تكون (1) أي تعطي أمر لاختيار شعاع الجهد المناسب لرفع قيمة العزم. • أما إذا كانت قيمة العزم داخل النطاق البطائي فالمخرج يكون في الحالة (0) [7]. 	مبدأ العمل

جميع هذه الحالات ستستخدم لاحقا من أجل تحديد شعاع الجهد المناسب للتحكم.

7.3 تحديد القطاع الذي ينتمي إليه شعاع فيض الثابت

أشعة فيوض الثابت تشكل ستة قطاعات كل قطاع يشغل زاوية قدرها 60° تماما مثل أشعة الجهد للعاكس الشكل (الفصل 2) و باعتبار أن شعاع الفيض يتبع بشكل مباشر شعاع الجهد للعاكس نستطيع توضيح أماكن تموضع القطاعات بالنسبة لخوارزمية DTC من خلال جملة المعادلات التالية [1]:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_1 : -30^\circ < \theta_{\phi S} < 30^\circ \\ S_2 : 30^\circ < \theta_{\phi S} < 90^\circ \\ S_3 : 90^\circ < \theta_{\phi S} < 150^\circ \\ S_4 : 150^\circ < \theta_{\phi S} / \theta_{\phi S} < -150^\circ \\ S_5 : -150^\circ < \theta_{\phi S} < -90^\circ \\ S_6 : -90^\circ < \theta_{\phi S} < -30^\circ \end{array} \right. \quad \{12.3\}$$

يتم تحديد القطاع الذي ينتمي له شعاع فيض الثابت من خلال معرفة المجال الذي تنتمي إليه زاوية شعاع فيض الثابت $\theta_{\phi S}$ فإذا كانت $-30^\circ < \theta_{\phi S} < 30^\circ$ فإن شعاع فيض الثابت ينتمي إلى القطاع 1، و في حال كانت $30^\circ < \theta_{\phi S} < 90^\circ$ فإن شعاع فيض الثابت ينتمي إلى القطاع 2 و هكذا. قمنا بإنشاء طابق تحديد القطاع الذي ينتمي إليه شعاع الفيض باستعمال MATLAB/SUMILINK (النموذج موجود في الملحق B).

8.3 اختيار حالات التبديل المناسبة

كما تم الذكر سابقا أن مستوي تموضع شعاع الفيض يقسم إلى 6 قطاعات، لاختيار حالات الإبدال المناسبة لشعاع الجهد من أجل تحقيق عملية زيادة أو إنقاص العزم و الفيض و تقريبها للقيمة المرجعية نعتمد على الجداول (2-3) و (2-4) الذي تم تطويرهما من قبل العالم Takahashi حيث K يمثل رقم القطاع لذي ينتمي إليه شعاع الفيض.

الجدول (2-3): زيادة أو إنقاص العزم و الفيض بناء على موضع القطاع في الاتجاه المباشر [25]

شعاع الجهد	زيادة	إنقاص
فيض الثابت	V_{K+1}, V_{K-1}, V_K	$V_{K+3}, V_{K+2}, V_{K-2}$
عزم المحرك	V_{K+2}, V_{K+1}	V_{K-2}, V_{K-1}

من خلال الجدول السابق نستطيع استخلاص حالات العمل الممكنة في حالة الدوران المباشر الآتية:

- لزيادة عزم المحرك و إنقاص فيض الثابت نختار شعاع الجهد V_{K+2} .
- لإنقاص كل من عزم المحرك و فيض الثابت نختار شعاع الجهد V_{K-2} .
- لزيادة عزم المحرك و فيض الثابت نختار شعاع الجهد V_{K+1} .
- لإنقاص عزم المحرك و زيادة فيض الثابت نختار شعاع الجهد V_{K-1} .

الفصل الثالث نمذجة ومحاكاة تقنية DTC للتحكم في محرك لاتزامني ثلاثي الطور

الجدول (3-3): زيادة أو إنقاص العزم و الفيض بناء على موضع القطاع في الاتجاه العكسي

شعاع الجهد	زيادة	إنقاص
فيض الثابت	V_{K+1}, V_{K-1}, V_K	$V_{K+3}, V_{K+2}, V_{K-2}$
عزم المحرك	V_{K-2}, V_{K-1}	V_{K+2}, V_{K+1}

من خلال الجدول (3-3) نستطيع استخلاص حالات العمل الممكنة في حالة الدوران العكسي الآتية:

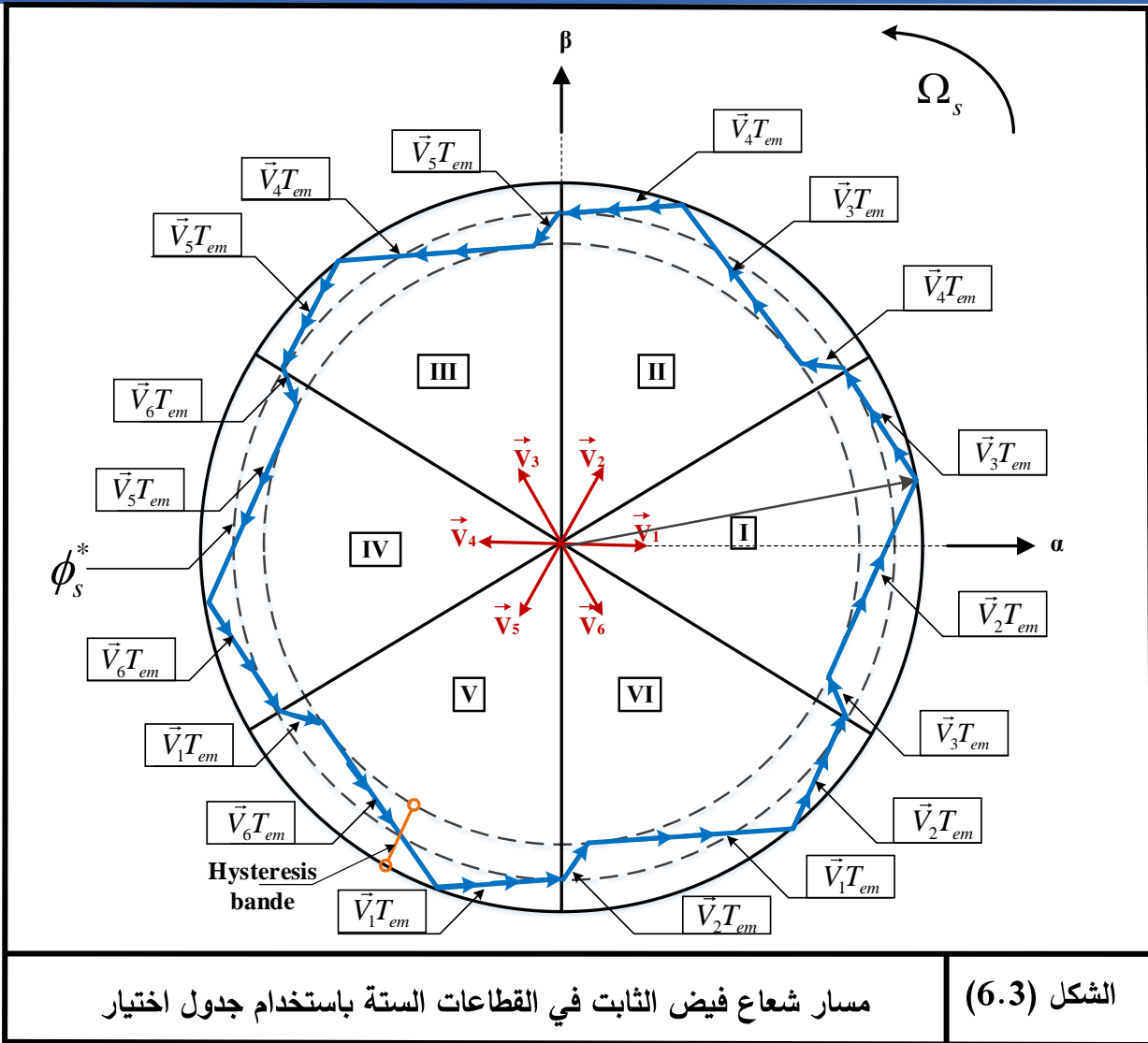
- لزيادة عزم المحرك و إنقاص فيض الثابت نختار شعاع الجهد V_{K-2} .
- لإنقاص كل من عزم المحرك و فيض الثابت نختار شعاع الجهد V_{K+2} .
- لزيادة عزم المحرك و فيض الثابت نختار شعاع الجهد V_{K-1} .
- لإنقاص عزم المحرك و زيادة فيض الثابت نختار شعاع الجهد V_{K+1} .

حالات التبديل تعتمد على متغيرات مخارج المتحكمات البطائية للعزم و الفيض و القطاعات K (من 1 إلى 6) و التي تحدد عن طريق زاوية فيض الثابت θ_{ϕ_s} . اعتمادا على الجدول (3-2) يمكن تحديد كيفية اختيار جهود الإبدال المثالية المناسبة في كافة قطاعات مستوي فيض الثابت و ترتيبها ضمن الجدول (3-4) الذي يمثل جدول اختيار شعاع الإبدال المثالي .

الجدول (3-4) : جدول اختيار شعاع الإبدال المثالي لتقنية DTC التقليدية.

ϕ_s	T_e	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
1	1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1
	0	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7
	-1	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
0	1	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2
	0	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0
	-1	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4

بالنسبة للأشعة الصفرية V_7 و V_0 فهي تستخدم لإنقاص العزم ببطئ و تجميد الفيض عند تواجد خطأ العزم داخل النطاق البطائي. الشكل (4.3) يمثل مسار شعاع فيض الثابت في الوضع الدائم باستعمال جدول اختيار أشعة الجهد المقترح من قبل Takahashi [11].



8.3 محاكاة تقنية التحكم بالعزم المباشر باستخدام MATLAB/SIMULINK

بعد الدراسة النظرية لطريقة التحكم المباشر بالعزم قمنا بمحاكاة هذه التقنية في بيئة MATLAB/SIMULINK نسبة للمرجع المرتبط بالجزء الثابت للمحرك اللاتزامني ثلاثي الطور ذو استطاعة 4kw والذي يحمل الخصائص المرفقة في الملحق B.

المحاكاة تمت على جزئين وتحت الشروط التالية :

- عرض النطاق البطائي لمتحكم العزم ثابت عند 0.1 .
- عرض النطاق البطائي لمتحكم الفيض ثابت عند ± 0.001 .
- القيمة المرجعية لفيض الثابت $\phi_s^* = 0.9wb$.

• زمن التقطيع : $h=1e-5$

❖ محاكاة تقنية DTC مع تنظيم السرعة .

✓ الحالة 01: من أجل سرعة ثابتة $n=1400\text{rpm}$ و عزم متغير.

✓ الحالة 02: من أجل عزم ثابت ($T_r = 4\text{N.m}$) و سرعة متغيرة.

✓ الحالة 03 : تجربة متانة الآلة.

(زمن محاكاة $t=1\text{s}$ ، عزم ثابت $T_r = 3\text{N.m}$ ، تدفق ثابت)

1. تغيير قيمة مقاومة الثابت R_s .

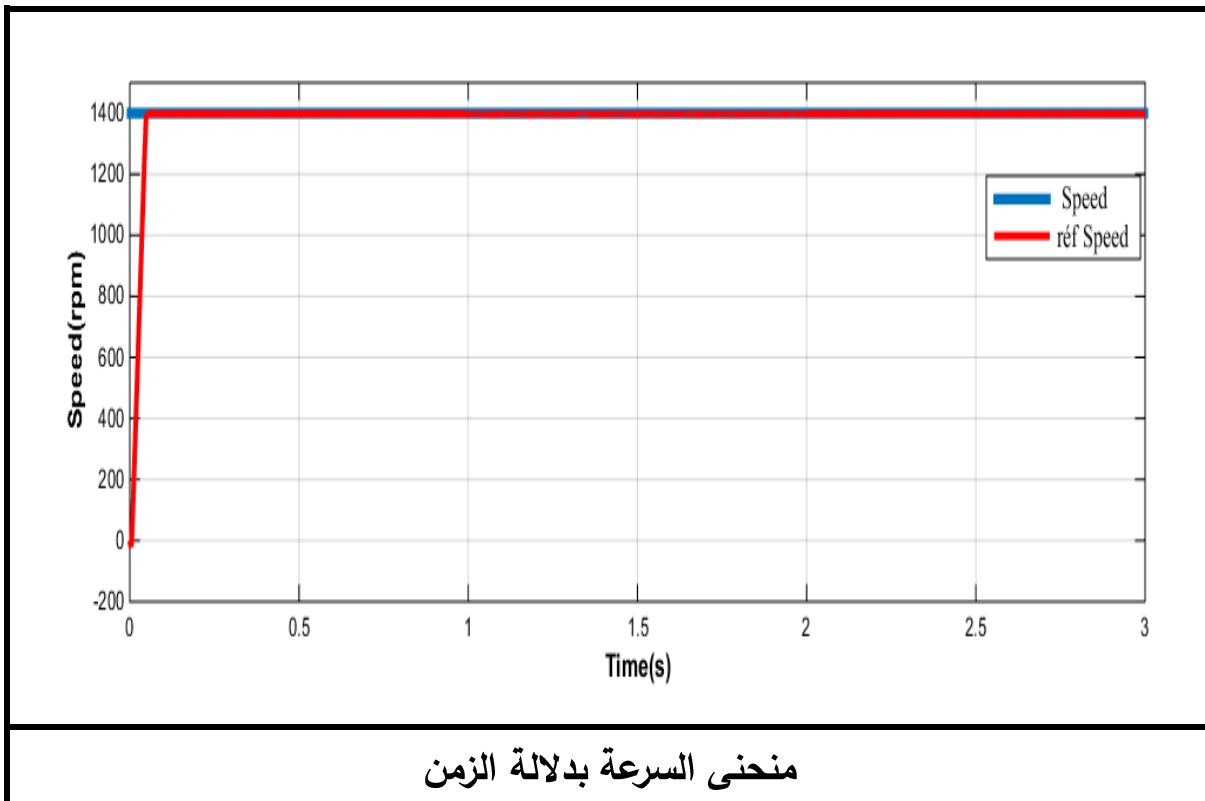
- من أجل 100% من قيمة R_s .

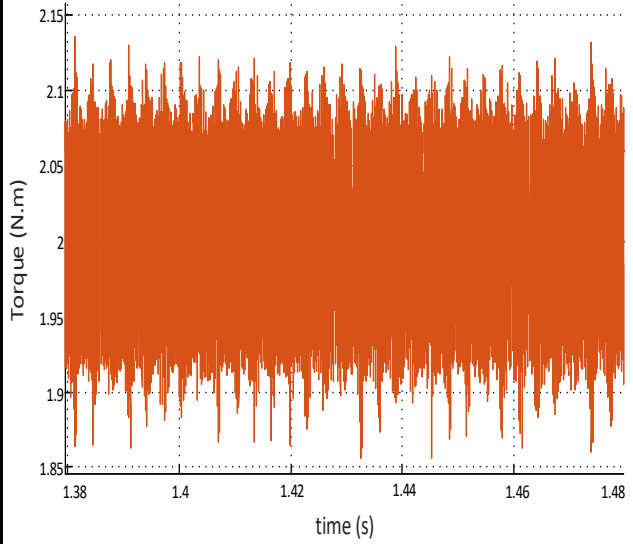
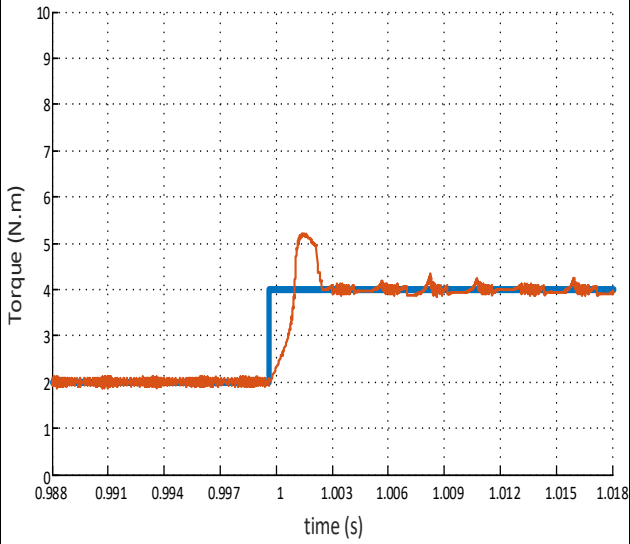
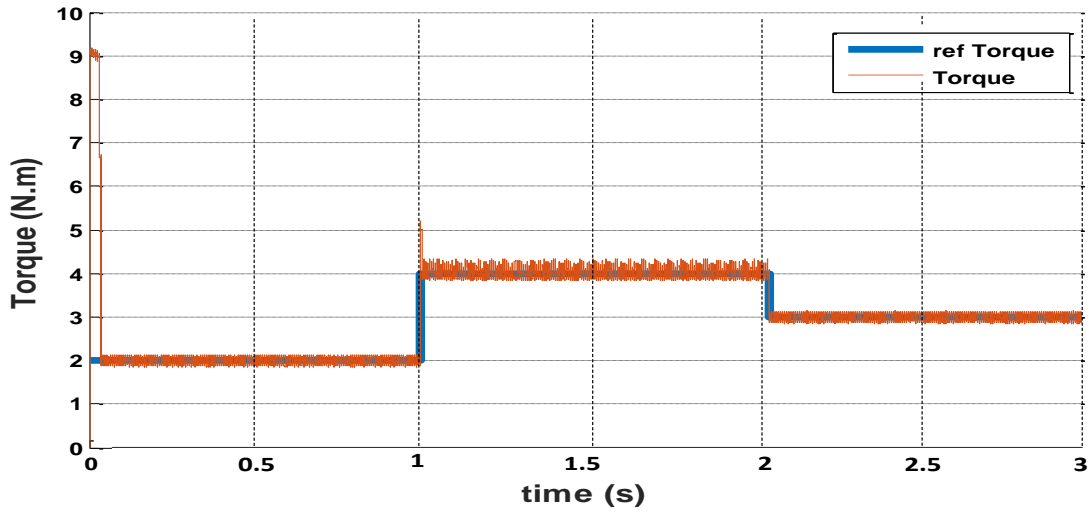
- من أجل 150 % من قيمة R_s .

- من أجل 200% من قيمة R_s .

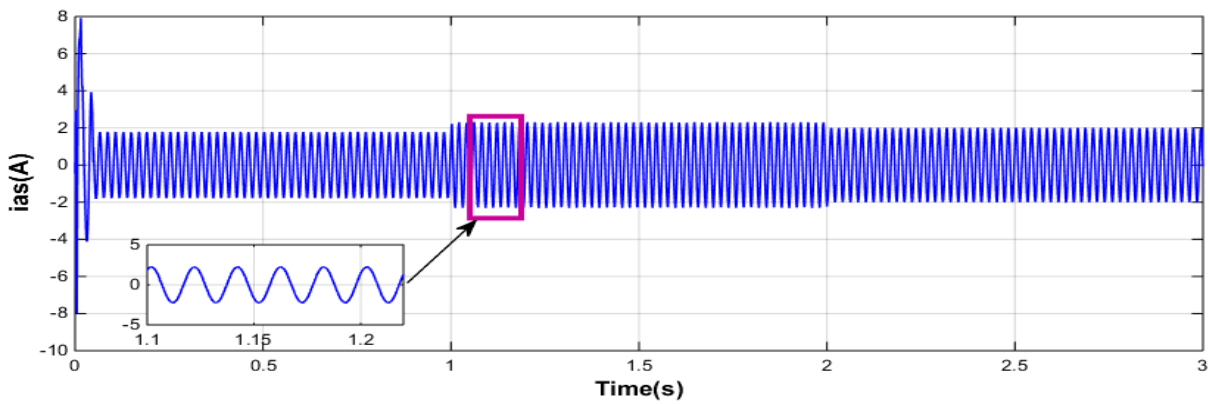
2. عكس اتجاه الدوران .

1.8.3 نتائج المحاكاة من أجل سرعة ثابتة $n=1400\text{rpm}$ و عزم متغير.

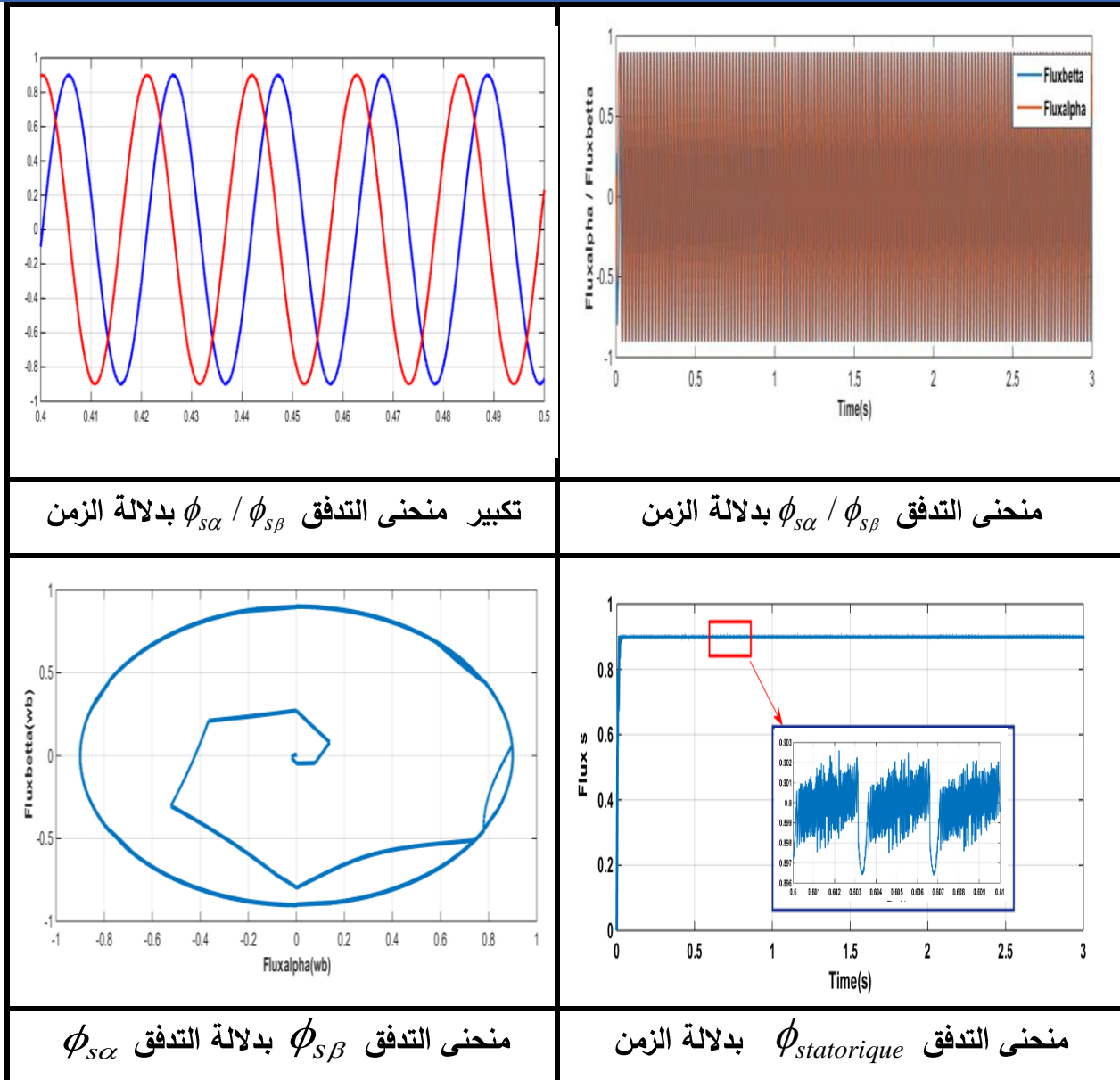




منحنى العزم الكهرومغناطيسي بدلالة الزمن



منحنى التيار i_{as} بدلالة الزمن



الشكل (7.3)

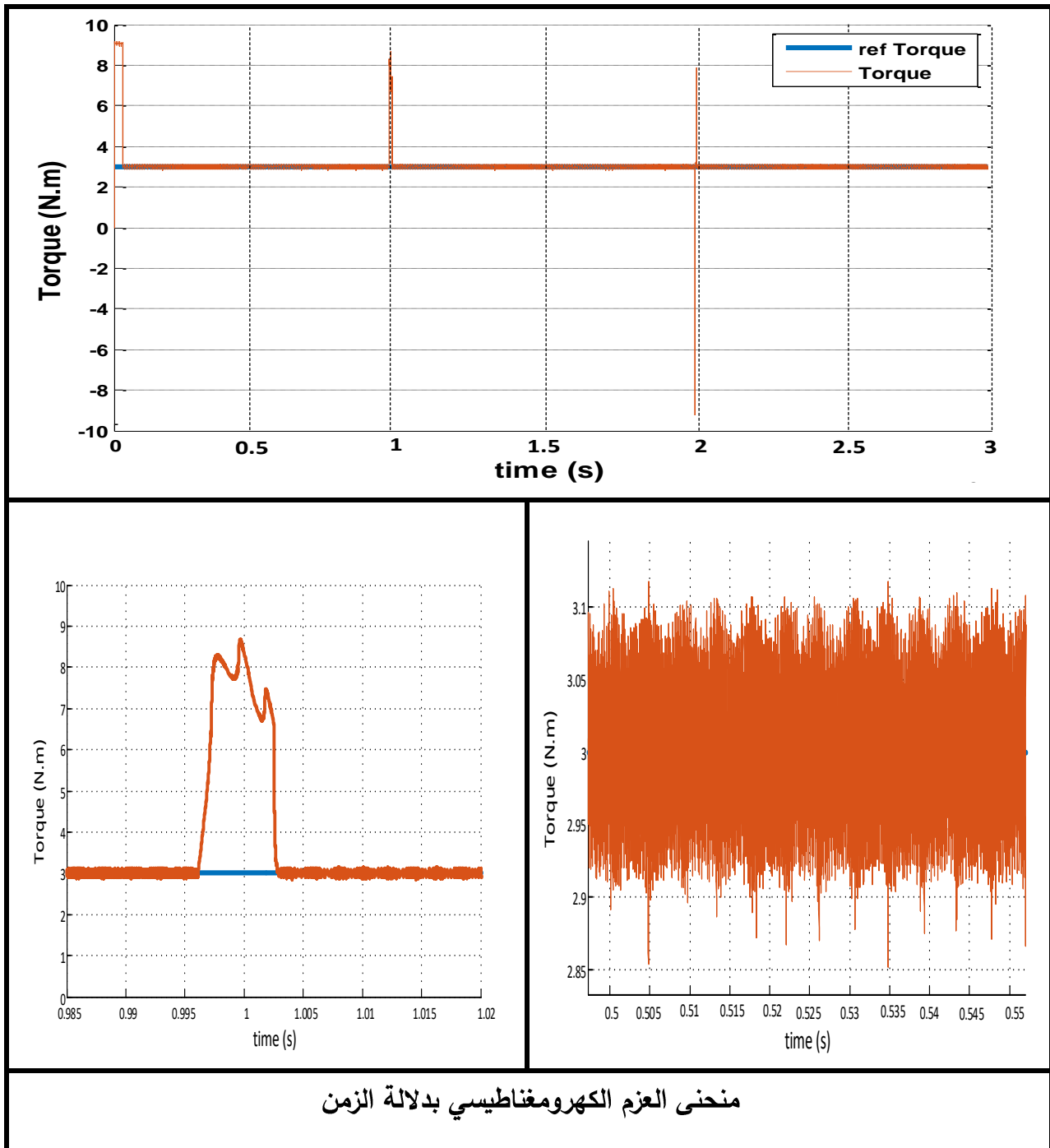
تحليل النتائج :

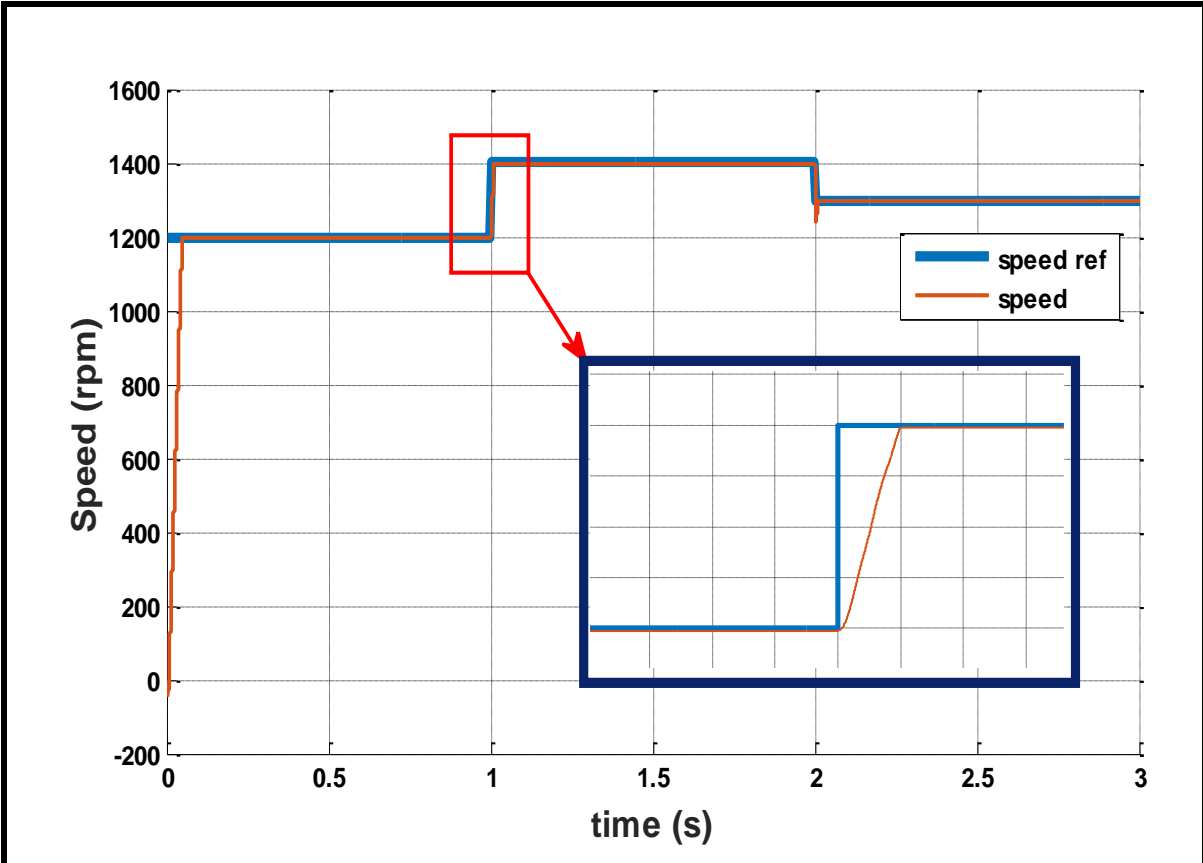
من خلال نتائج المحاكاة في الشكل (7.3) وجدنا أن منحنى العزم الكهرومغناطيسي يلاحق منحنى تغيرات العزم المرجعي في النظام الدائم و هذا ما يثبت دقة التحكم بهذه التقنية إلا أننا نلاحظ ارتفاع كبير في العزم عند لحظة تغيير قيم العزم المرجعي ($t=1s$, $t=2s$) و يرجع ذلك إلى أن تغيير القيم غير ممكن في الواقع في نفس اللحظة. كما نلاحظ أن تغيرات منحنى تيار الثابت مرتبطة بتغيرات العزم.

- منحنى سرعة الدوران قدم أداء جيد من ناحية الاستجابة الديناميكية حيث تم الانتقال إلى النظام الدائم في زمن صغير جدا $t < 0.05s$ ، كما اتبع منحنى السرعة المرجعية بدون أي تجاوزات.

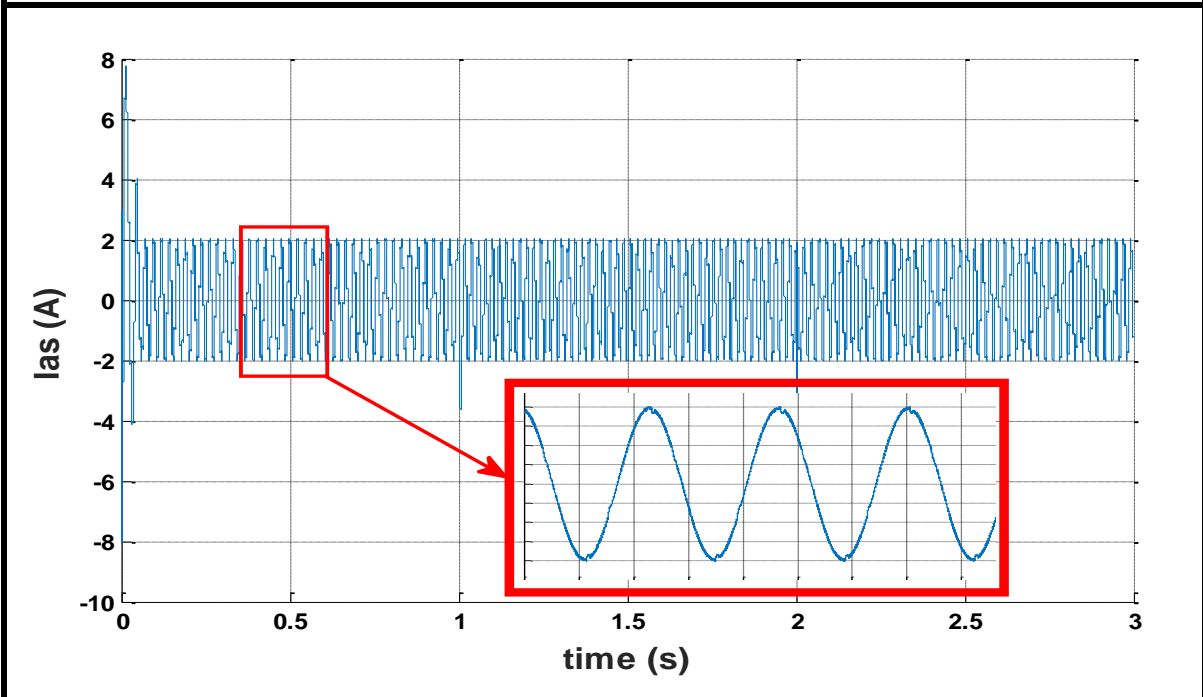
نلاحظ ان منحنى فيض الثابت استقر عند قيمته المرجعية المحددة ، كما أن استجابات مركبتي شعاع فيض الثابت في جملة الاحداثيات الثنائية المتعامدة تأخذ شكل جيبي و مزاحة عن بعضها بزاوية $\frac{\pi}{2}$. بالإضافة أن نهايات أشعة فيض الثابت في المعلم (α, β) في النظام الدائم كونت شكل دائري حول القيمة المرجعية له وكانت ذات سمك صغير وذلك راجع أن التشوهات شبه منعدمة.

2.8.3 نتائج المحاكاة من أجل عزم ثابت ($T_r = 3\text{N.m}$) و سرعة متغيرة

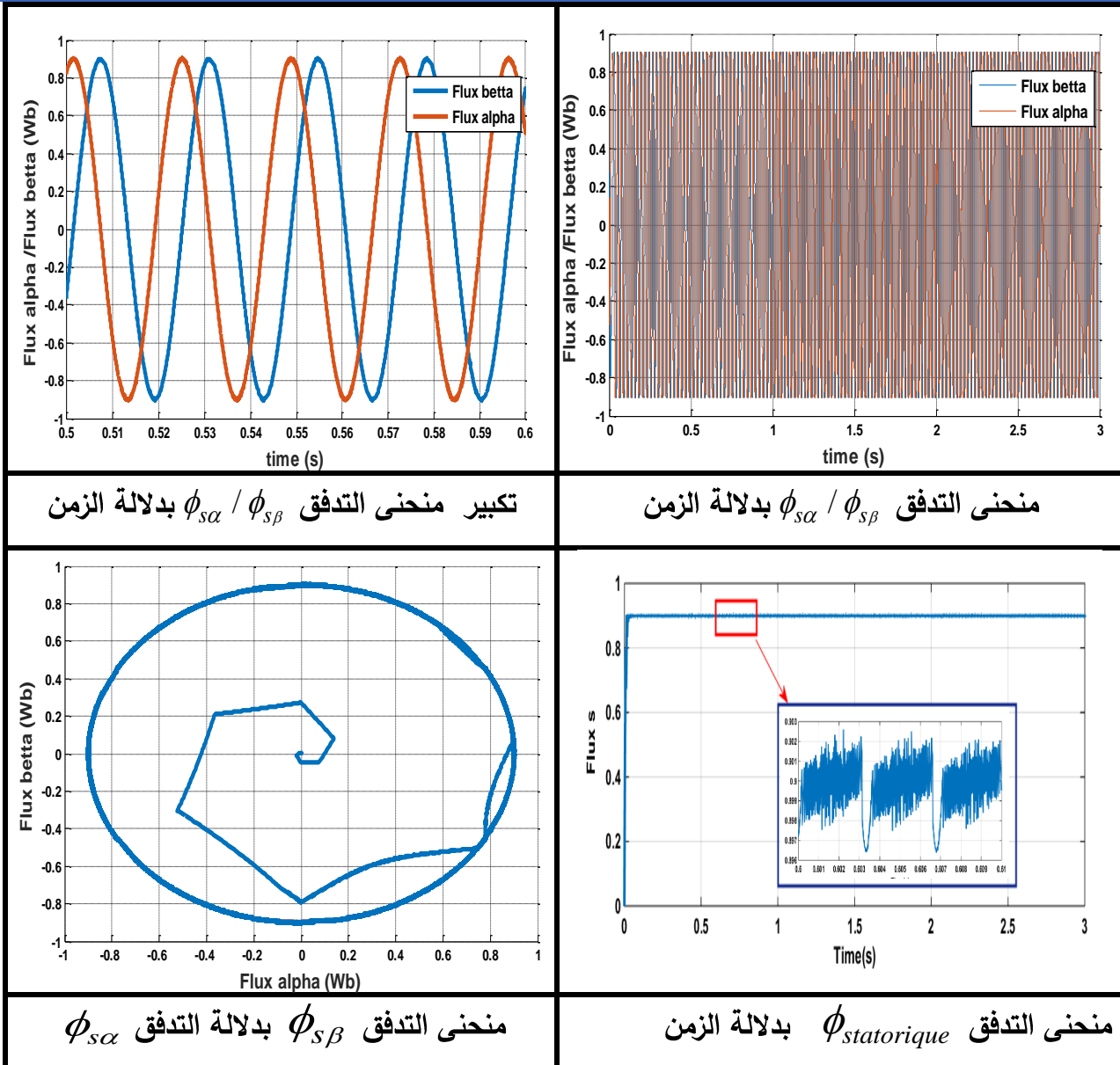




منحنى السرعة بدلالة الزمن



منحنى التيار i_{as} بدلالة الزمن



الشكل (8.3)

✚ تحليل النتائج :

- عند تغيير السرعة من قيمة $n=1200\text{rpm}$ إلى $n=1400\text{rpm}$ عند اللحظة $t=1\text{s}$ ومن قيمة $n=1400\text{rpm}$ إلى $n=1300\text{rpm}$ عند اللحظة $t=2\text{s}$ و تثبيت قيمة العزم لاحظنا ما يلي:
- أثبت منحنى السرعة دقة هذه التقنية رغم التغيرات وكما ذكرنا سابقا أنها لا تتم في نفس اللحظة بل تستغرق زمن ($t=0.01\text{s}$) الذي يعتبر صغير جدا مما يدل على جودة الأداء الديناميكي.
- منحنى العزم ثابت عند القيمة المرجعية في النظام الدائم إلا أنه يوجد ارتفاع كبير في قيمته عند لحظات

الفصل الثالث نمذجة ومحاكاة تقنية DTC للتحكم في محرك لاتزامني ثلاثي الطور

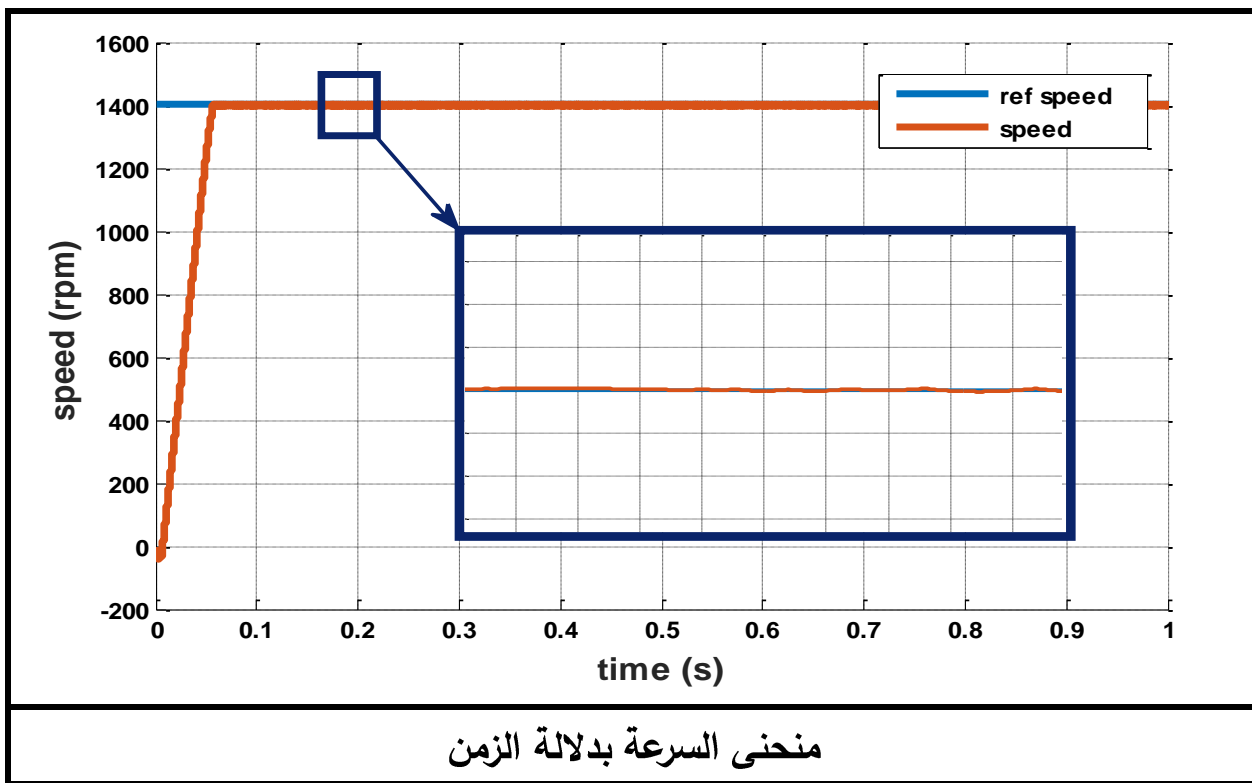
تغيير السرعة ($t=1s$, $t=2s$) و يرجع ذلك إلى أن تغيير القيم غير ممكن في الواقع في نفس اللحظة. كما نلاحظ أن منحنى تيار الثابت مرتبط بمنحنى العزم.

- منحنى فيض الثابت استقر عند قيمته المرجعية المحددة ، كما ان استجابات مركبتي شعاع فيض الثابت في جملة الاحداثيات الثنائية المتعامدة تأخذ شكل جيبي و مزاحة عن بعضها بزاوية $\frac{\pi}{2}$. بالإضافة أن نهايات أشعة فيض الثابت في المعلم (α, β) في النظام الدائم كونت شكل دائري حول القيمة المرجعية له (مثل الحالة 01).

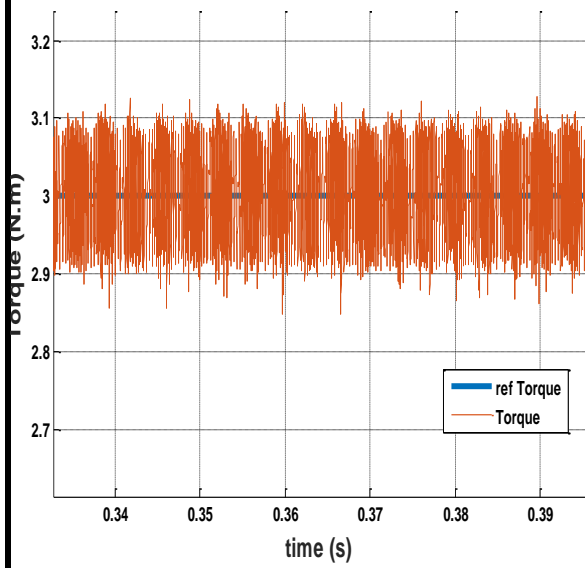
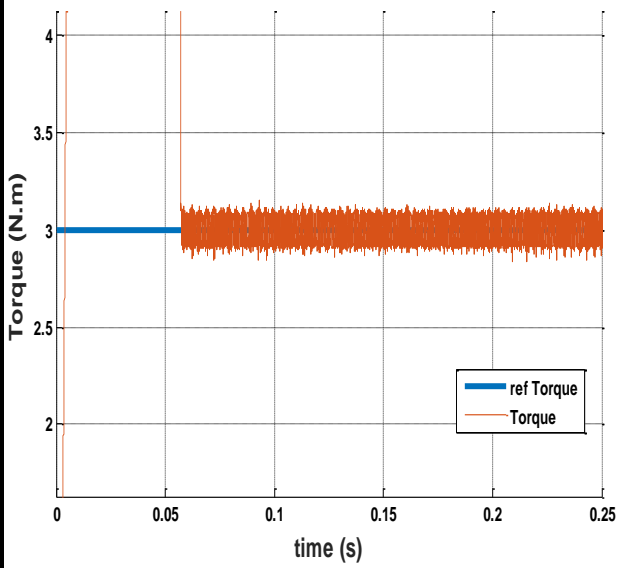
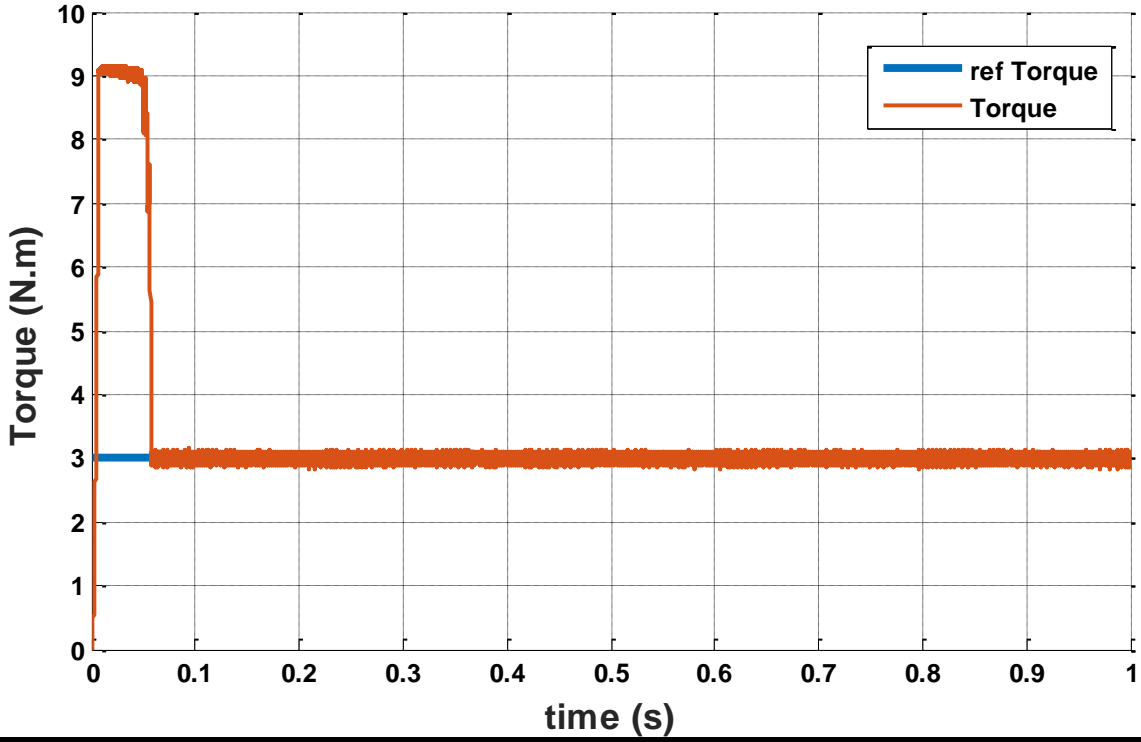
3.8.3 نتائج المحاكاة لتجربة متانة الآلة

1. تغيير قيمة مقاومة الثابت R_s

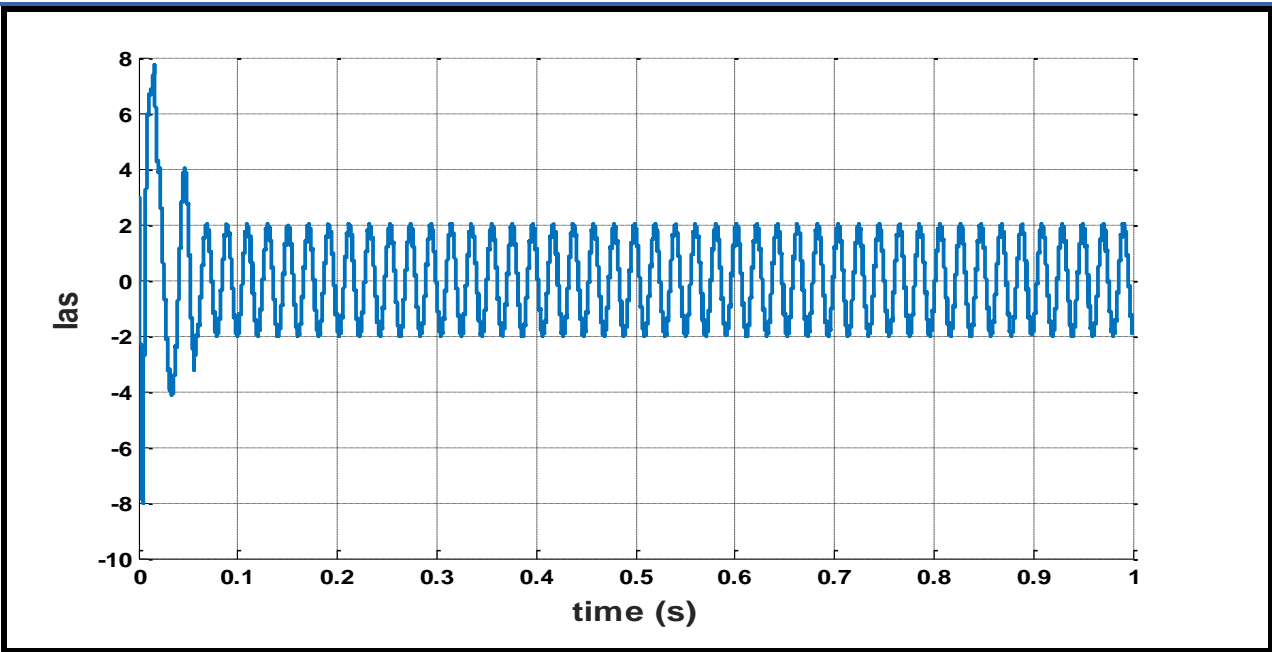
■ من أجل 100% من قيمة R_s



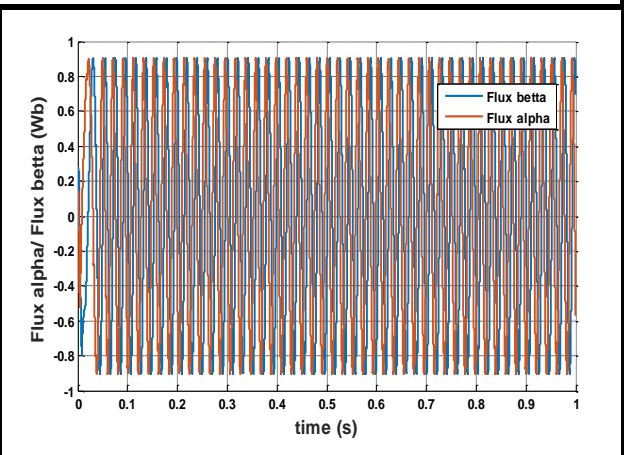
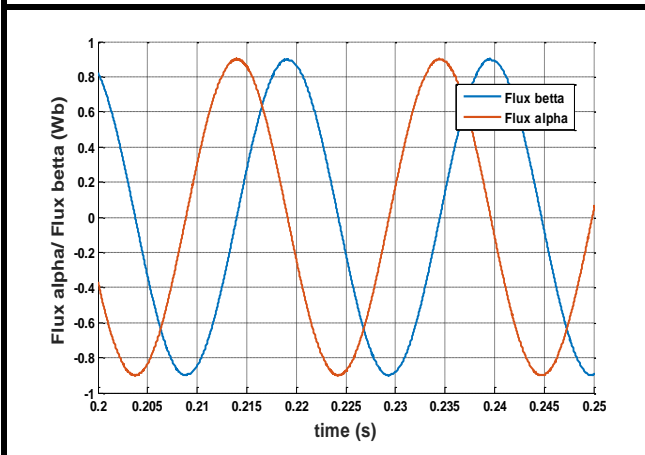
الشكل (9.3)



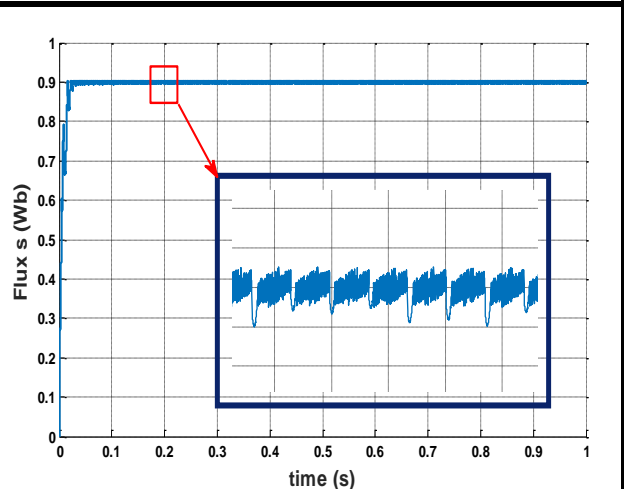
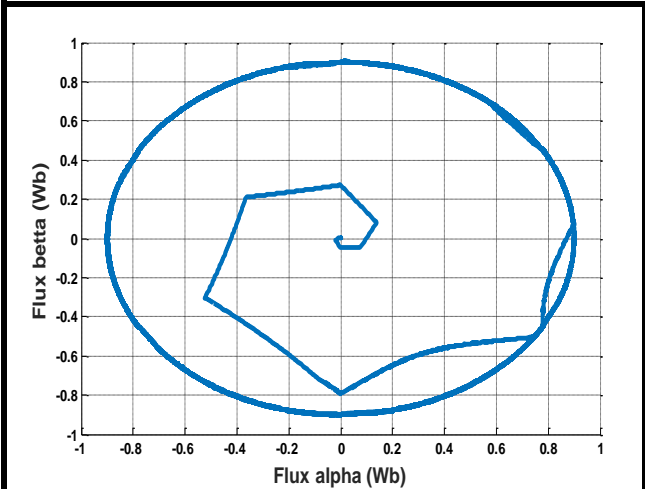
منحنى العزم الكهرومغناطيسي بدلالة الزمن



منحنى التيار i_{as} بدلالة الزمن



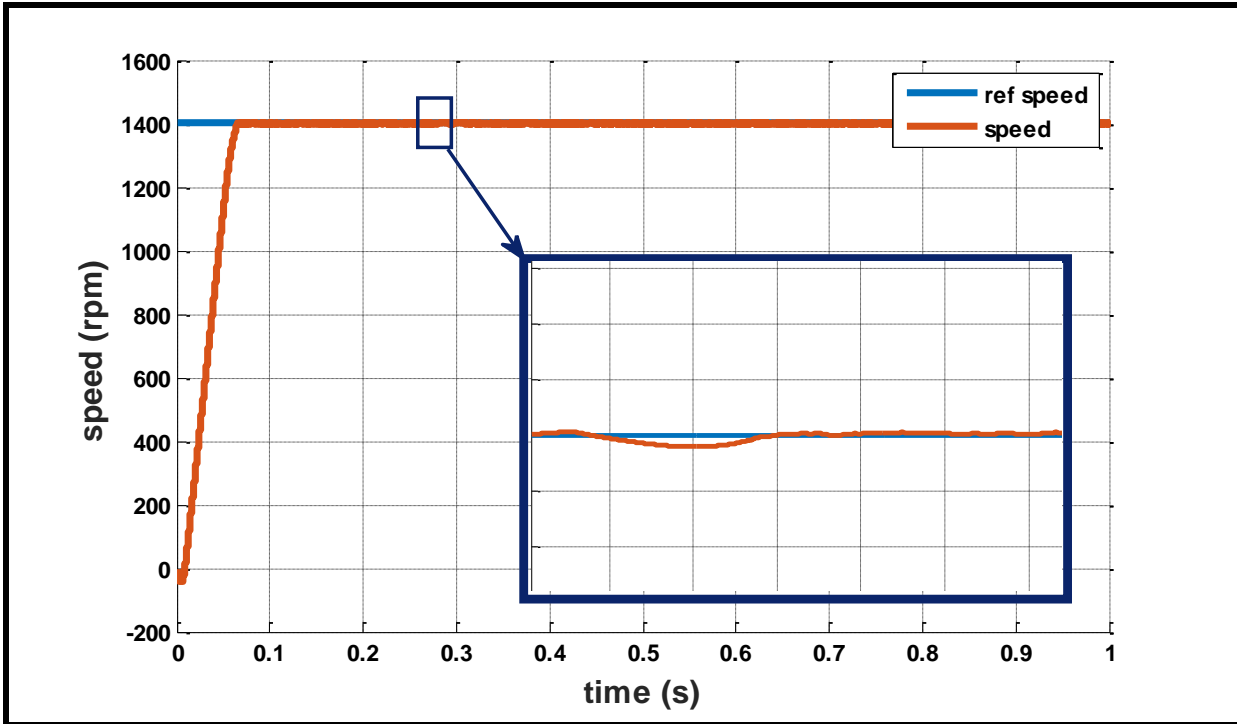
منحنى التدفق $\phi_{s\alpha} / \phi_{s\beta}$ بدلالة الزمن



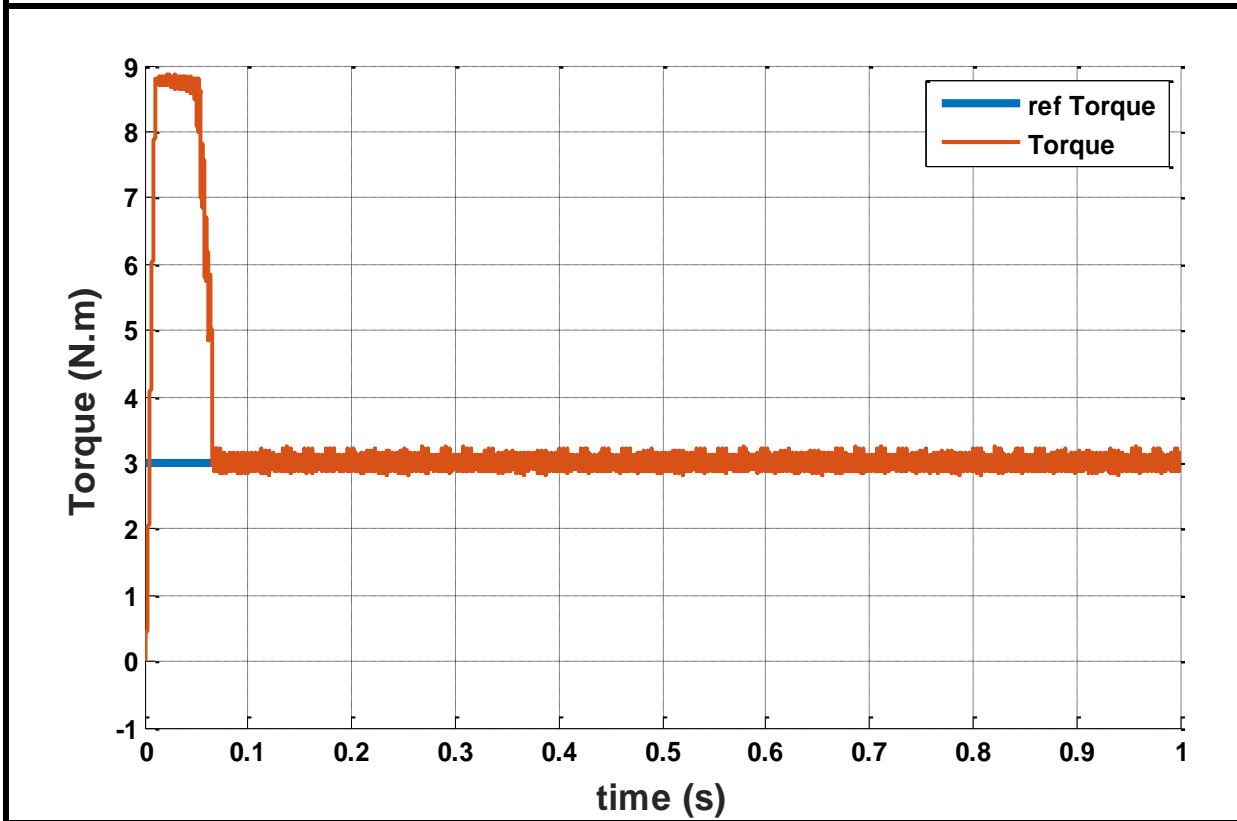
منحنى التدفق $\phi_{s\beta}$ بدلالة التدفق $\phi_{s\alpha}$

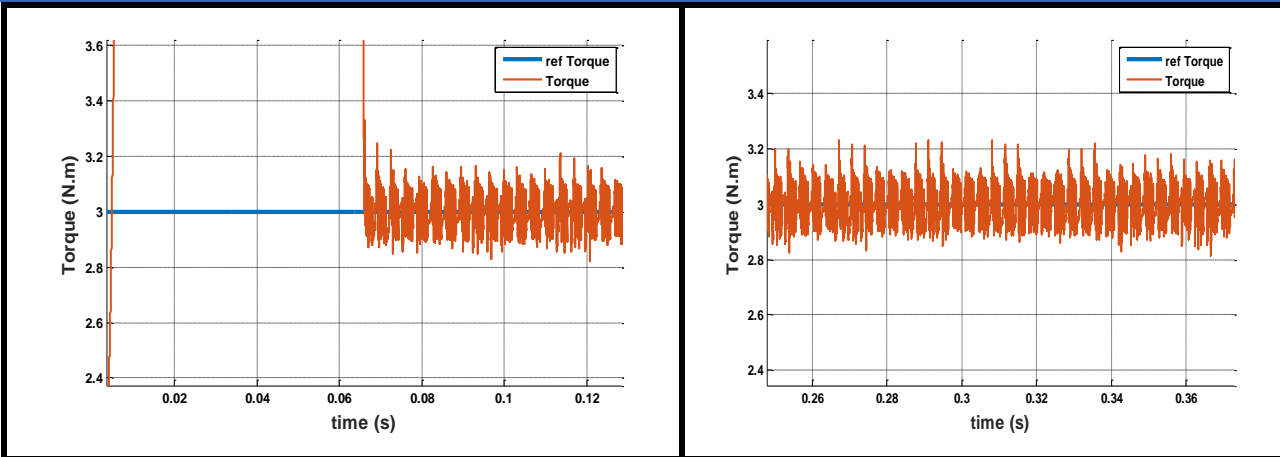
منحنى التدفق $\phi_{statorique}$ بدلالة الزمن

من أجل 150% من قيمة R_s

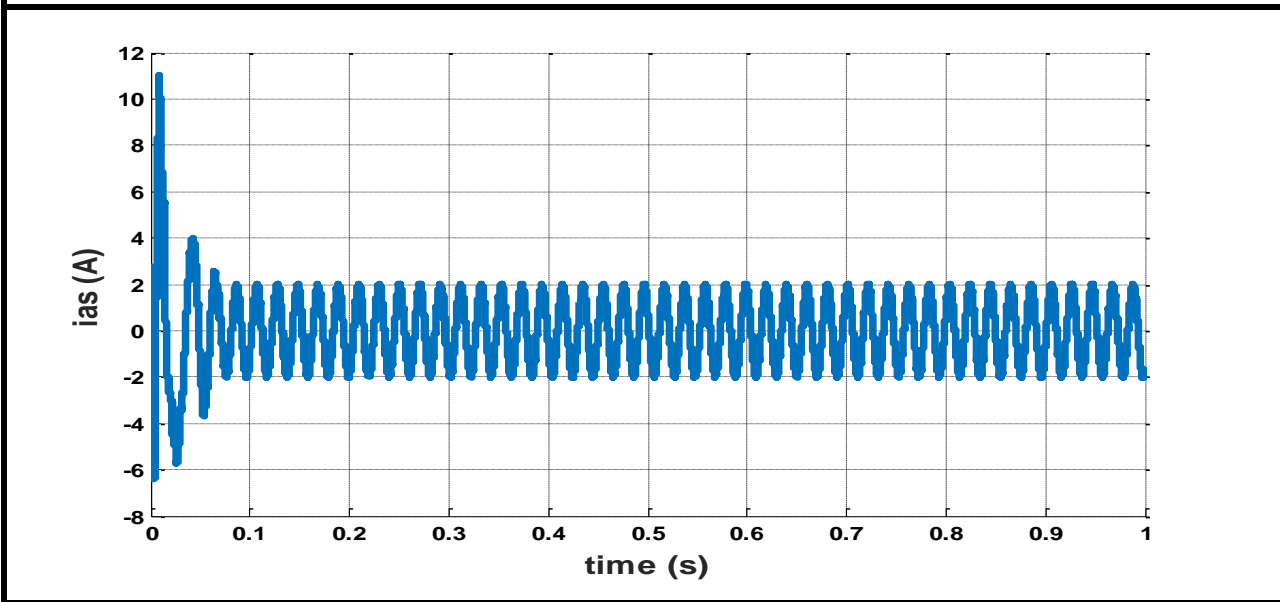


منحنى السرعة بدلالة الزمن

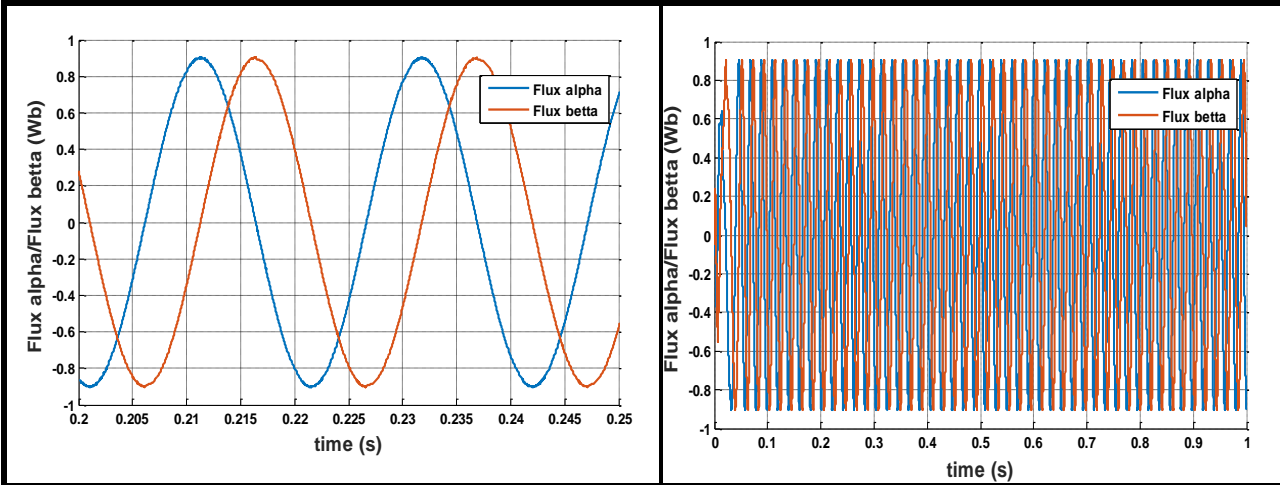




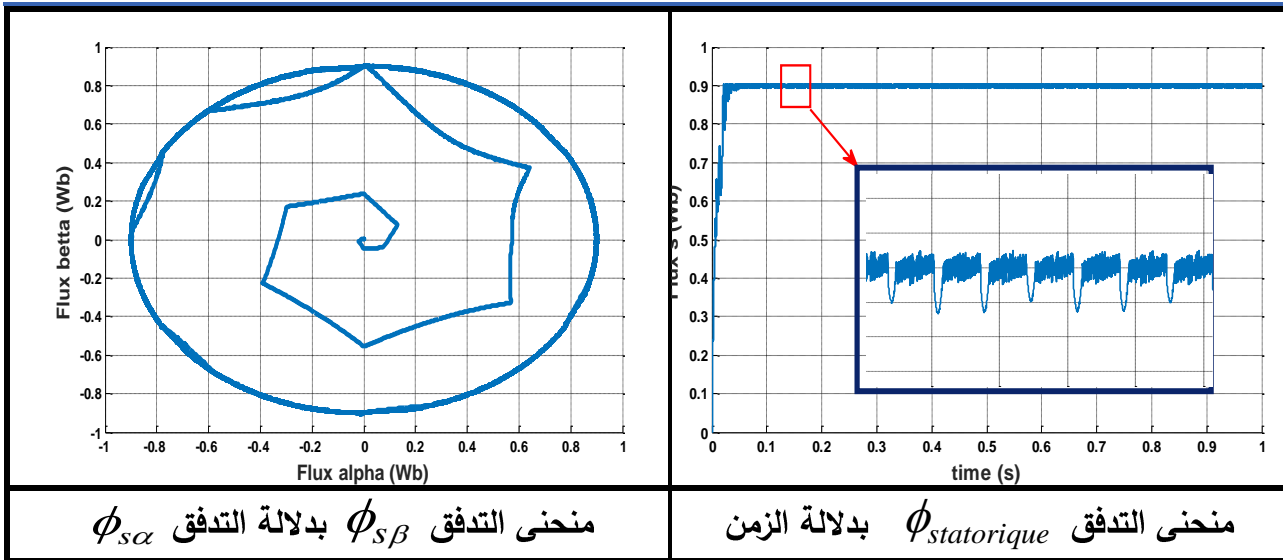
منحنى العزم الكهرومغناطيسي بدلالة الزمن



منحنى التيار i_{as} بدلالة الزمن

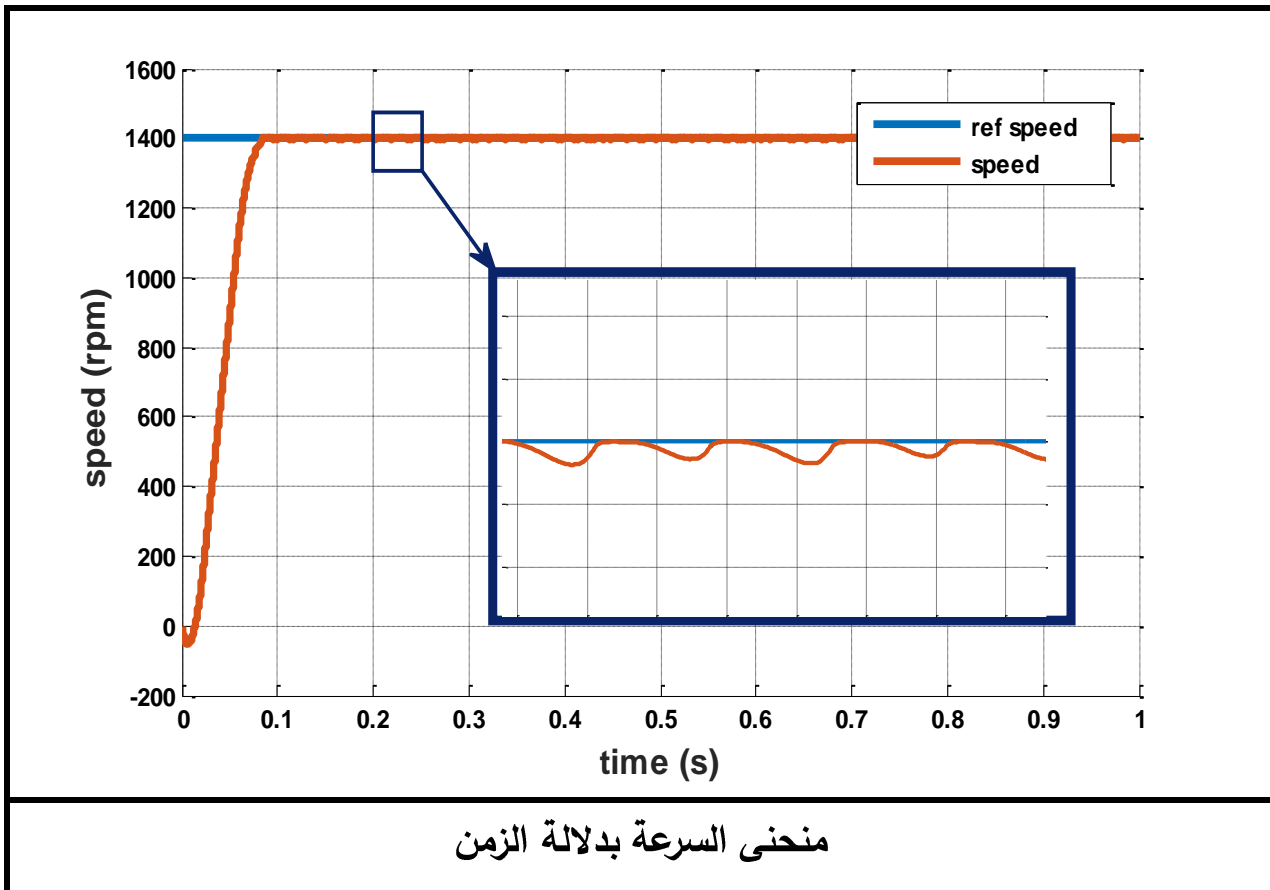


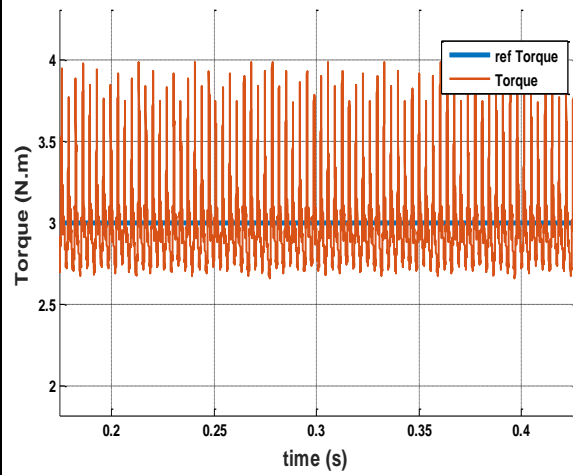
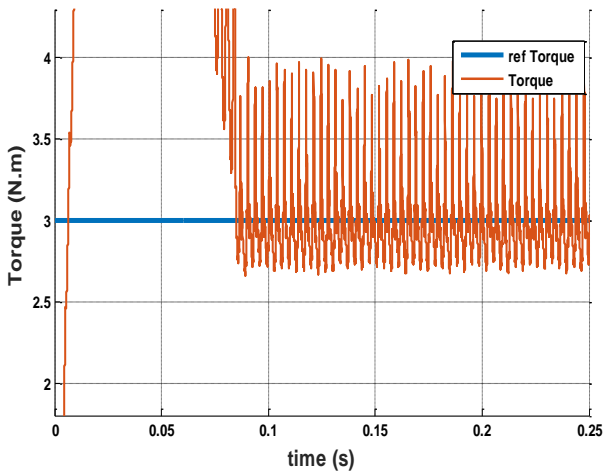
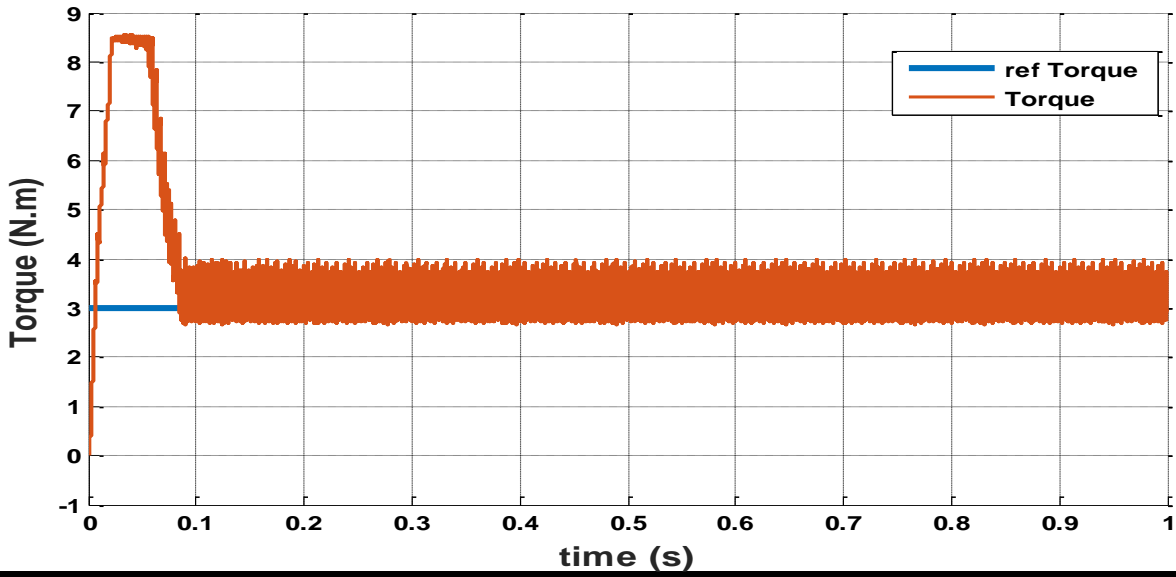
منحنى التدفق $\phi_{s\alpha} / \phi_{s\beta}$ بدلالة الزمن



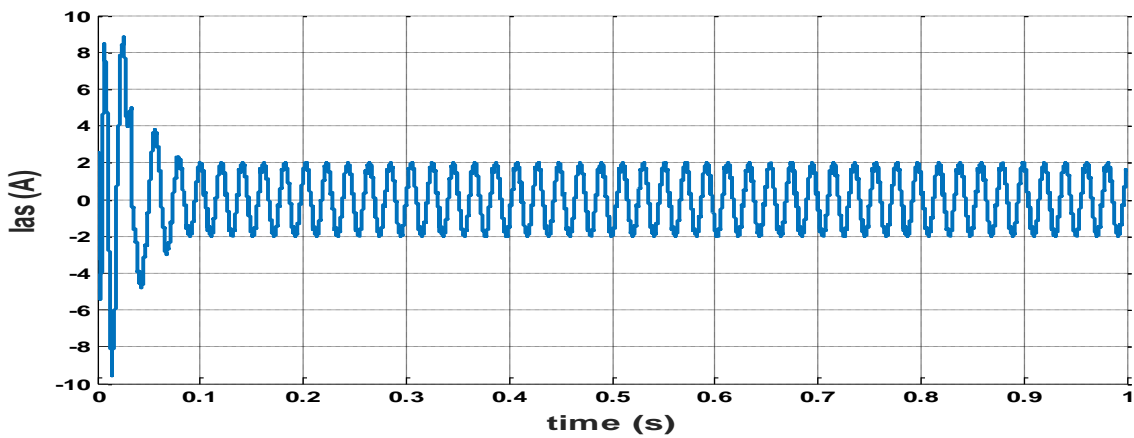
الشكل (10.3)

من أجل 200% من قيمة R_s ■

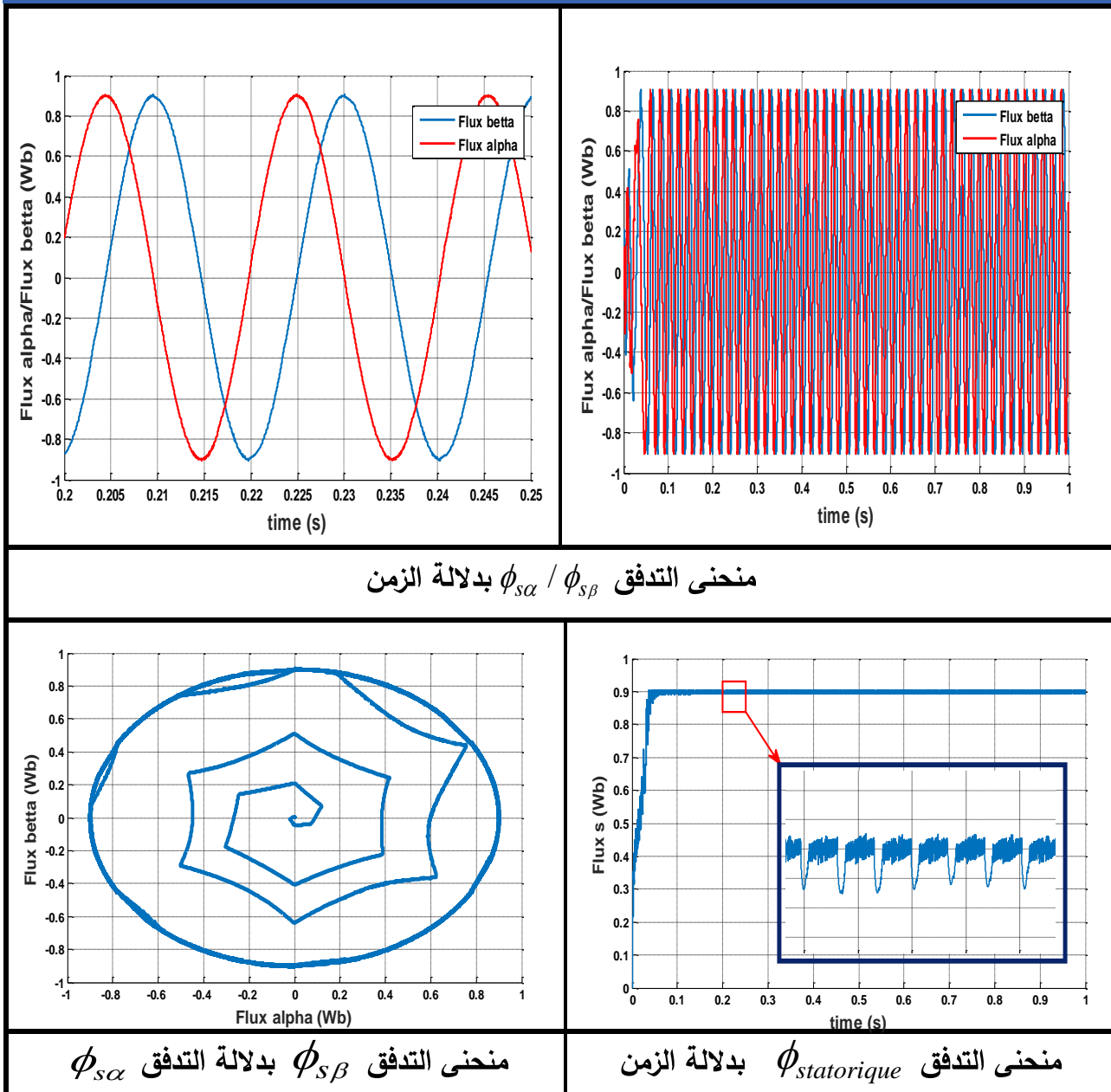




منحنى العزم الكهرومغناطيسي بدلالة الزمن



منحنى التيار i_{as} بدلالة الزمن



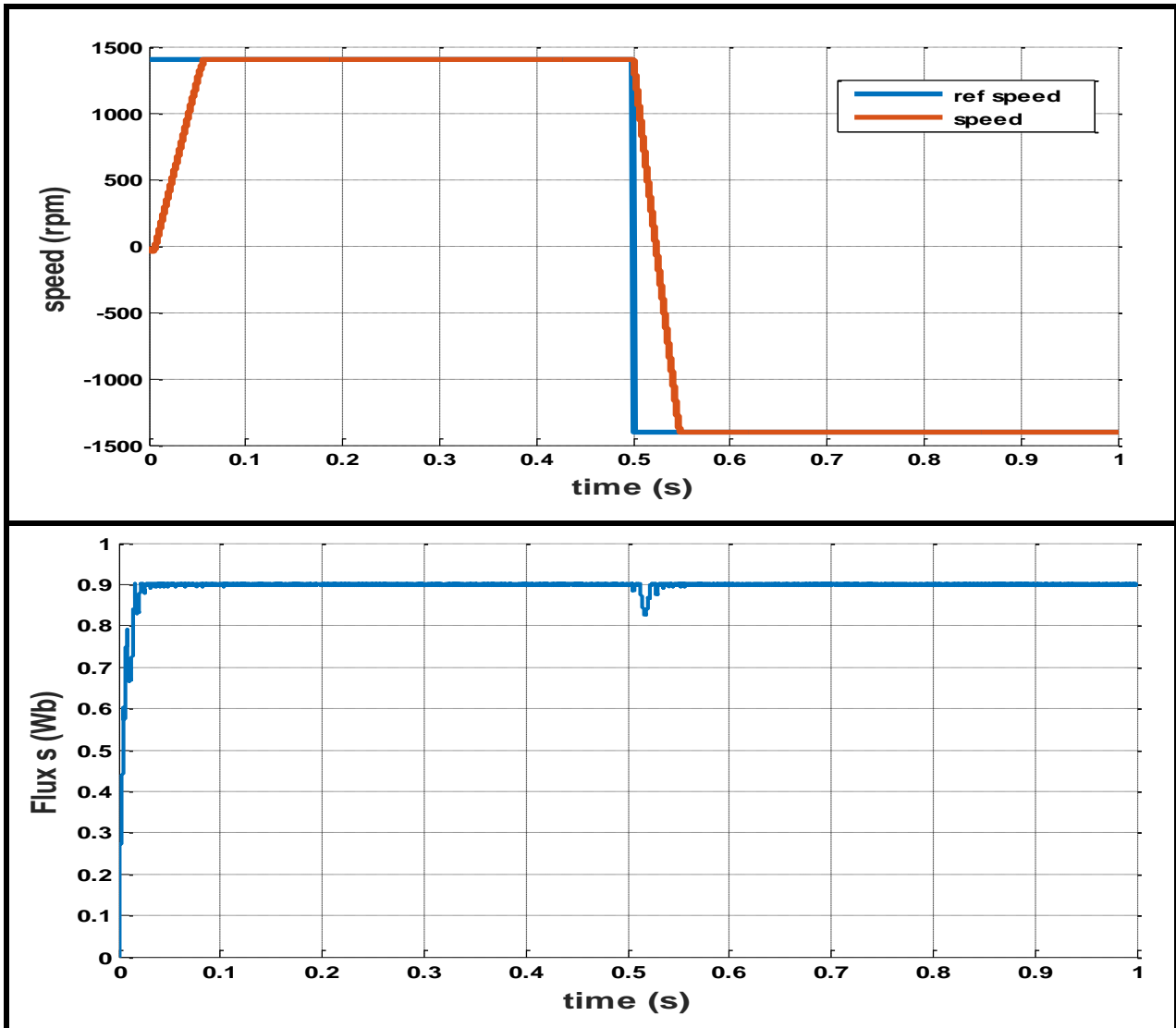
الشكل (11.3)

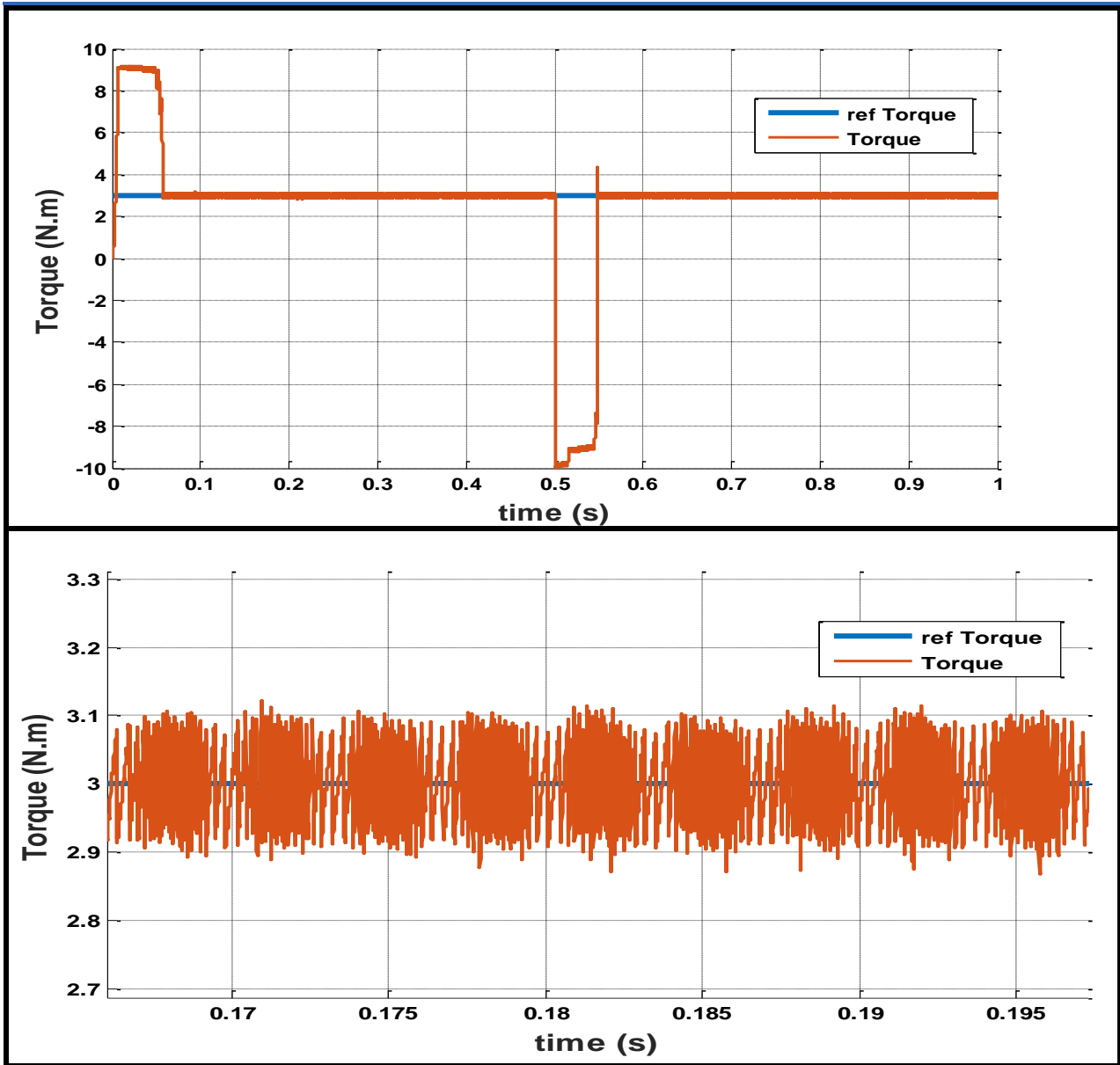
تحليل النتائج

- دراسة تأثير مقاومة جزء الثابت على سلوك الآلة قمنا بمحاكاة النظام في ثلاث حالات عند زيادة قيمة مقاومة الثابت R_s عن قيمتها الاسمية. نلاحظ ما يلي :
- من خلال منحنيات السرعة نجد أنه كلما زادت قيمة مقاومة الثابت زاد زمن استجابة النظام عند الانتقال إلى النظام الدائم مع حدوث تجاوزات في منحنى السرعة عن قيمتها المرجعية.

- بزيادة قيمة R_s تزداد سعة التذبذبات في منحنيات العزم بالإضافة إلى زيادة طفيفة في زمن الاستجابة ($t=0.005s - t=0.01s$). كما أثر كذلك بالزيادة في زمن انتقال التيار i_{as} إلى النظام الدائم.
- بالنسبة لمنحنى الفيض فإنه يثبت عند قيمته المرجعية رغم الزيادة في قيمة R_s لكن تزيد سعة التذبذبات غير أنها صغيرة جدا وبالتالي فهي لا تؤثر على سيرورة النظام.

2. عكس اتجاه الدوران





الشكل (12.3)

تحليل النتائج

قمنا بالمحاكاة تقنية التحكم المباشر بالعزم من أجل تغيير اتجاه دوران المحرك و ذلك بتغيير قيمة السرعة من 1400rpm إلى -1400rpm بدءا من اللحظة $t=0.5s$ ، نلاحظ أن سعة التذبذبات لكل من فيض الثابت والعزم عادية لكن نلاحظ انخفاض كبير فيها لحظة عكس اتجاه دوران المحرك.

هذه التجربة تبين المتانة الميكانيكية لتقنية DTC و أكدت أداءها الجيد في حالة وجود اضطرابات خارجية للعزم المقاوم.

9.3 المقارنة بين إيجابيات و سلبيات تقنية FOC و تقنية DTC

الجدول (3-5) : المقارنة بين إيجابيات و سلبيات تقنية FOC و تقنية DTC

تقنية DTC	تقنية FOC	
<ul style="list-style-type: none"> • إستجابة ديناميكية عالية لكل من العزم الكهرومغناطيسي و السرعة. • غياب استعمال حساسات السرعة و حلقات التعديل. • تحكم مباشر من المتحكمات البطائية دون الحاجة إلى تحويلات المعالم. • غياب عملية فك الارتباط بالنسبة للجهود الناتجة على التحكم بعرض النبضة PWM. • الحفاظ على متانة جيدة للآلة في حال التأثير على متغيراتها. 	<ul style="list-style-type: none"> • تحكم جيد في الحركة و العزم خاصة في تطبيقات السرعات المنخفضة . • تحقيق دقة عالية حيث تقلل من الاهتزازات و التشوهات. • استجابة سريعة عند تغيرات الحمل. • تقدم أداء و كفاءة عملية جيدة. • تردد التقطيع يكون ثابت و ذلك راجع لاعتماد تقنية PWM. 	الإيجابيات
<ul style="list-style-type: none"> • تردد التقطيع يكون مرتفع ومتغير. • الاعتماد بشكل كبير على مقاومة الثابت و عرض نطاق التباطؤ. • وجود تموجات كبيرة في إشارتي التيار و العزم. • أداء ديناميكي ضعيف عند السرعات المنخفضة بسبب الهبوط في الجهد على مقاومة الثابت. • ضجيج مسموع في المحرك. 	<ul style="list-style-type: none"> • تتطلب معالجة رياضية معقدة من ناحية التنفيذ. • تتأثر بشكل كبير بتغير قيم عناصر الدوار. • ضرورة وجود حساس السرعة و حلقات التعديل. • أكثر حساسية للتشوهات خاصة عند تغير الحمل. • ضرورة تحديد موقع شعاع الفيض اعتمادا على الزاوية θ_s بشكل دقيق. 	السلبيات

9.3 خاتمة

في هذا الفصل تم تقديم دراسة تحليلية مفصلة لخوارزمية تقنية التحكم المباشر بالعزم (DTC) وذلك انطلاقاً من المبدأ العام لتشغيلها إلى استنباط حالات التبديل المناسبة من خلال الدراسة المنجزة. ومن ثم تم بناء مخطط خوارزمية هذه التقنية الذي قمنا بمحاكاته على برنامج Matlab/Simulink، ومن خلال نتائج هذه الأخيرة أثبتت مزايا تقنية DTC من حيث ناحية توفيرها لاستجابة ديناميكية عالية ودقة الأداء في السرعات العالية و كذا التكيف السريع في حالة تغيير السرعة و العزم كما تم إثبات قوتها و متانتها عند تغيير اتجاه دوران المحرك ، لكن من الجانب الآخر و عند تغيير مقاومة الجزء الثابت نتيجة لارتفاع درجة الحرارة عند الأحمال العالية تحدث تشوهات معتبرة في إشارات العزم و التدفق و هذا يعتبر من أبرز مساوئ هذه التقنية ، وذلك ما دفع إلى تطوير تقنيات جديدة تعمل على تحسينها و جعلها أقل تأثراً بإعدادات المحرك.



خاتمة عامة



نصل لختام هذا البحث الذي قمنا من خلاله بدراسة تحليلية و محاكاة لتقنية التحكم المباشر بالعزم للمحرك اللاتزامني ثلاثي الطور ،حيث تعتبر هذه التقنية بلا شك حلاً واعداً جداً لمشاكل المتانة والديناميكية التي تواجهها تقنية التحكم بتوجيه الفيض. الهدف الرئيسي من هذا البحث هو تطبيق التحكم المباشر في عزم الدوران (DTC) للمحرك اللاتزامني ، ومن أجل تحقيقه قمنا بإنجاز هذه المذكرة التي تتضمن ثلاث فصول موضحة كالتالي:

أولاً ، بدأنا بتقديم عموميات حول المحرك اللاتزامني التي تشمل التكوين ، مبدأ العمل ، أهم العلاقات الخاصة به و نبذة عن طرق التحكم فيه .

ثانياً ، عرضنا نمذجة المحرك التحريضي ثلاثي الطور. وباستخدام الفرضيات المبسطة، حصلنا على نموذج ثلاثي الطور تم تخفيضه إلى نموذج ثنائي الطور يكون أسهل في الدراسة بعد تطبيق التحويلات الرياضية (Concordia،Clarke،Park). كان اختيار حالات الجملة المرجعية يعتمد على احتياجات التطبيقات الصناعية العمل المطلوبة. ثم عرضنا مبدأ تقنية التحكم بتوجيه الفيض، و قمنا بمحاكاته و استخلاص النتائج المتعلقة بتغيير السرعة و العزم و اختلال النظام بمجرد تغيير بسيط في مقاومة الدوار .

في الفصل الأخير قمنا بدراسة تحليلية لتقنية التحكم المباشر في عزم الدوران. في الواقع، تعتمد هذه الإستراتيجية على التحديد المباشر لتسلسل التحكم المطبق على العاكس عن طريق استخدام منظمات التباطؤ وجدول حالات التبديل الملائمة الذي تم تطويره من قبل Takahashi الذي تتمثل وظيفته في اختيار شعاع الجهد المناسب الذي بدوره يحدد حالات فتح و غلق القواطع الالكترونية للعاكس ثلاثي الطور و الذي يتحكم في المحرك. و انطلاقاً من هذا قمنا ببناء مخطط باستعمال بيئة MATLAB/SIMULINK و عرضنا نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها من خلال تطبيق التحكم المباشر في عزم الدوران (DTC) على المحرك اللاتزامني من خلالها استنتجنا كفاءة أدائها و استجاباتها السريعة ، بالإضافة الى ارتباط هذا التحكم بمقاومة الجزء الثابت مما ينتج عنه زيادة التموجات الذي يعتبر أبرز عيوب هذا التحكم لذا وجب تطوير تقنيات أقل تعلقاً بإعدادات الآلة و في الأخيرة أنشأنا جدول للمقارنة بين مميزات و عيوب كل من التقنيتين .

في الختام يمكننا القول أن تقنية التحكم المباشر بالعزم أحدثت تطوراً هائلاً في مجال التحكم بالمحركات التحريضية حيث حافظت على مميزات تقنية التحكم بتوجيه الفيض من استجابة ديناميكية عالية و الكفاءة والمردود العاليين كما حلت مشكلة الحسابات الرياضية المعقدة و ارتفاع تكلفة الإنتاج ،لكنها لم تخلو من نقاط ضعف لهذا كان من الضروري تطوير تقنيات تعمل على تحسينها و حل المشكلات المتعلقة بها.

المراجع العربية

رقم المرجع	عنوان المرجع
[1]	المهندسة هبة خرمة، "التحكم المباشر بعزم المحرك التحريضي باستخدام تقنية النمط الانزلاقي اعتماداً على شرائح معالج الإشارة الرقمية"، رسالة ماجستير جامعة حلب سوريا (2015).
[2]	المهندس أحمد ماهر حورية، "Three phase inductive motors المحركات الحثية ثلاثية الطور"
[3]	المهندس محمد عقيل فني، "المختصر في المحركات اللاتزامنية ثلاثية الطور" الصفحات (27_29).
[4]	صالح أبو أليفة، " التحكم في الجهد والتردد لقيادة المحركات الحثية ثلاثية الأطوار International conference on Technical sciences باستخدام الأوردينو". (2020).
[15]	ن.ر.ن. إدريس و و.أ.ح.م. يتيم، "تموج عزم الدوران المنخفض والتبديل المستمر لعزم الدوران -استراتيجية التردد للتحكم المباشر في عزم الدوران لآلة الحث". إلكترونيات الطاقة التطبيقية. مؤتمر و معرض IEEE2000.
[25]	أحمد حمود العريفي، رائد الشرع، د.م. سلام محمود "تطوير منهجية التحكم المباشر بالعزم باستخدام المنطق العائم لقيادة محرك تحريضي في عربة كهربائية". مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية المجلد السابع والثلاثون العدد الثاني 2021.

المراجع الأجنبية

رقم المرجع	عنوان المرجع
[5]	BOUDJTAT WALID, HIMOURA ABEDELKADER, « étude et simulation d'une machine asynchrone alimente par un onduleur de tension à commande MLI»mémoire. de Magister université de Annaba,2017.
[6]	N-J.P.Hautier, J.P.caron « Modélisation et commande de la machine asynchrone ».
[7]	H. Yantour, J. Saadi , A. Khoumsi, « Modélisation et Simulation d'une Commande directe du couple appliquée à la Machine Asynchrone » 6ème Conférence Francophone de Modélisation et Simulation MOSIM06, Avril 2006.
[8]	Riad TOUFOUTI, « Contribution à la Commande Directe du Couple de la machine Asynchrone» ,Thèse de doctorat L'université de Mentouri de Constantine, 02/06/2008.
[9]	F. HAQUES, S. DJOUAMA, « Estimation de la résistance rotorique d'une machine à induction par le filtre de Kalman».mémoire d'ingénieur université de Biskra (2005).
[10]	Gares.j , « Parameter Adaptation for the Speed-Controlled Static AC Drivewith a Squirrel-Cage Induction Motor». Marsh/April 1980 , pages 173-177.
[11]	Mr.Nour Mohammed , «Commande floue directe du couple electromagnetique d'une machine asynchrone ».mémoire de Magister (2004).
[12]	Jean Chatelain , « Machines électriques, Traité d'électricité ». Vol X, Presse Polytechniques romandes, édition Georgi, 1983.
[14]	G. Grellet , G.Clerc , «“Actionneurs Electriques (Principes – Modèles)» Edition Eyrolles (1997).
[16]	Khelifi mustapha. Sekour ahmed , « Etude de la Dspace1104 ».
[17]	REGHIOUI, Hassen , « Amélioration des performances de la commande DTC appliquée à une machine asynchrone triphasée ».Mémoire de magister université de Biskra 2017.

J.bonal, G.seguier , «Entrainement Electrique à Vitesse Variable, Rappels d'Electrotechnique de Puissance et d'Automatisme les Variateurs Electroniques de Vitesse».Paris 1998.	[18]
H.tamrabet , « Robustesse d'un contrôle vectoriel de structure minimal ».Mémoire Magister université de Batna 02 (2008).	[19]
B.K.Bose, Modern Power electronics and AC Drives».	[20]
BRUNET, PATRICK , « Introduction à la commande vectorielle des machines asynchrones ».	[21]
M.Dpenbrock «Direct Self Control (DSC) of Inverter Fed Induction ».1988	[22]
T.LING , « Implementation Of Direct Torque Control Of Induction Machines utilizing digital (DSP) ».2005	[23]
Soufien GDAIM , « Commande directe de couple d'un moteur asynchrone à base de techniques intelligentes ».Thèse de doctorat présentée par Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir(EN1).2012/2013	[24]



□ ملاحق

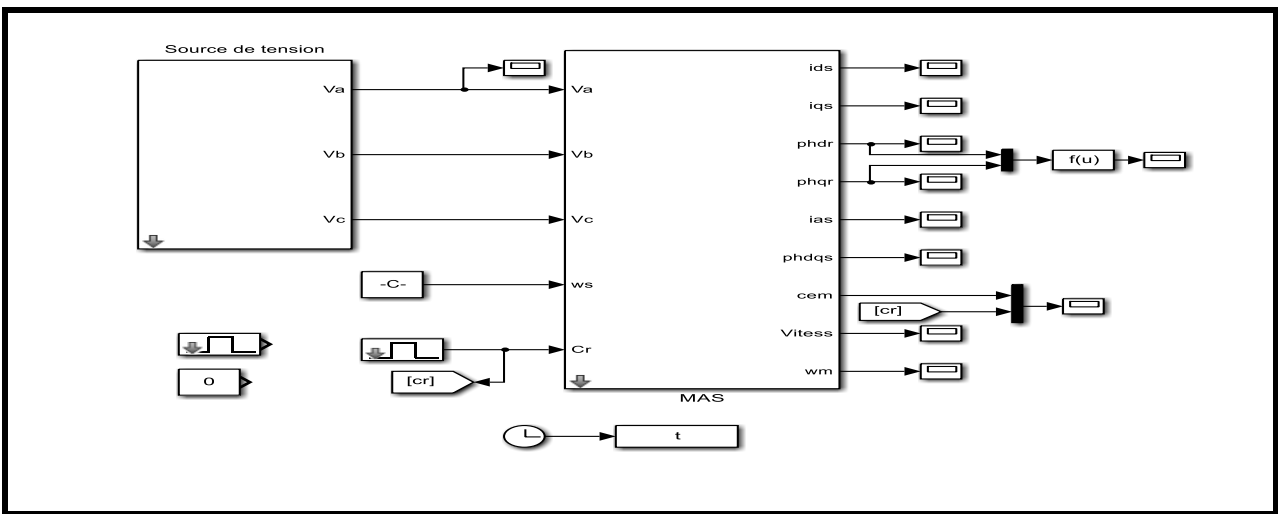


الملحق A

- خصائص المحرك المستعمل في محاكاة تقنية التحكم بتوجيه الفيض FOC

القيم الاسمية	
$P_n = 4kw$	الاستطاعة الاسمية
$2P = 4 pole$	عدد الأقطاب
220/ 380v	القيمة الفعالة للتوتر الاسمي
50Hz	التردد الاسمي
1410rpm	سرعة الدوران الاسمية
المقادير الكهربائية	
$R_s = 4.85\Omega$	مقاومة ملفات الثابت
$R_r = 3.805\Omega$	مقاومة ملفات الدوار
$L_s = 0.579H$	محاوضة ملفات الثابت
$L_r = 0.274H$	محاوضة ملفات الدوار
$L_m = 0.258H$	المحاوضة المتبادلة
المقادير الميكانيكية	
$J = 0.031Kg.m^2$	عزم العطالة
$B = 0.001136(N.m) / (rad/ sec)$	معامل الاحتكاك

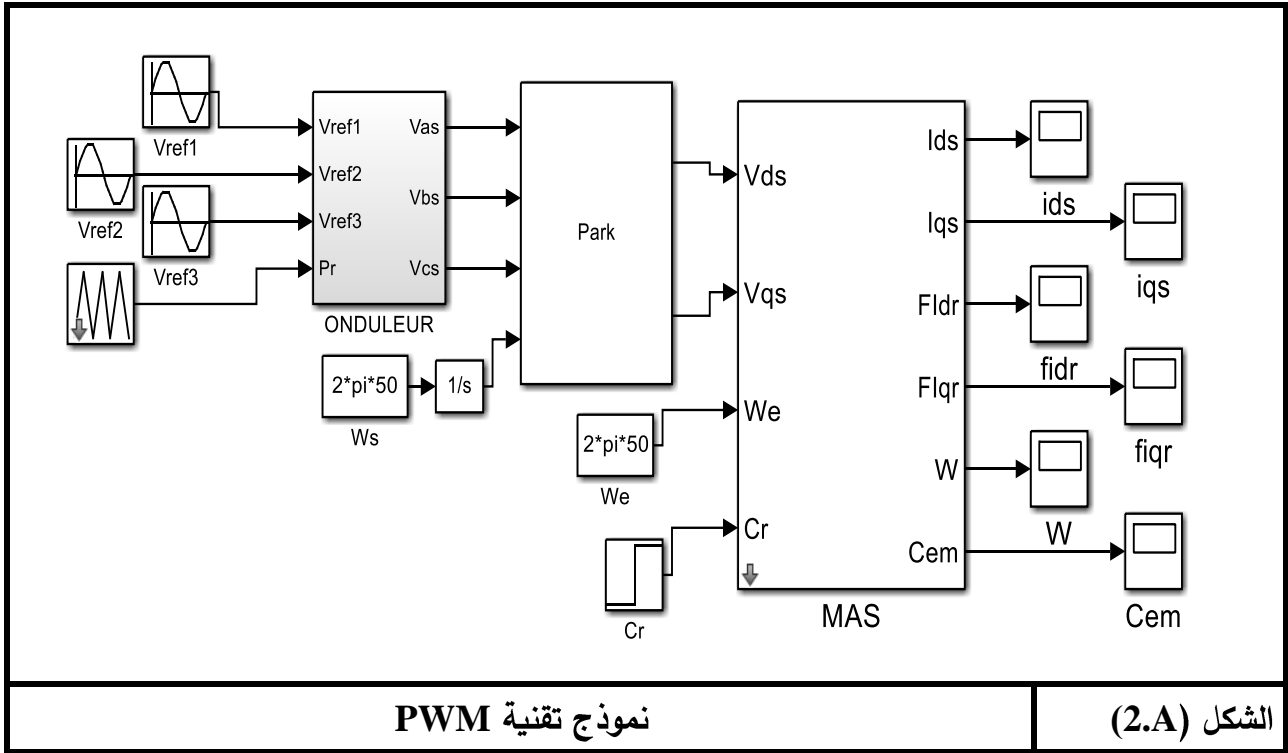
- نموذج المحرك اللاتزامني باستعمال برنامج المحاكاة MATLAB/SUMILINK



نموذج المحرك اللاتزامني باستعمال MATLAB/SIMULINK

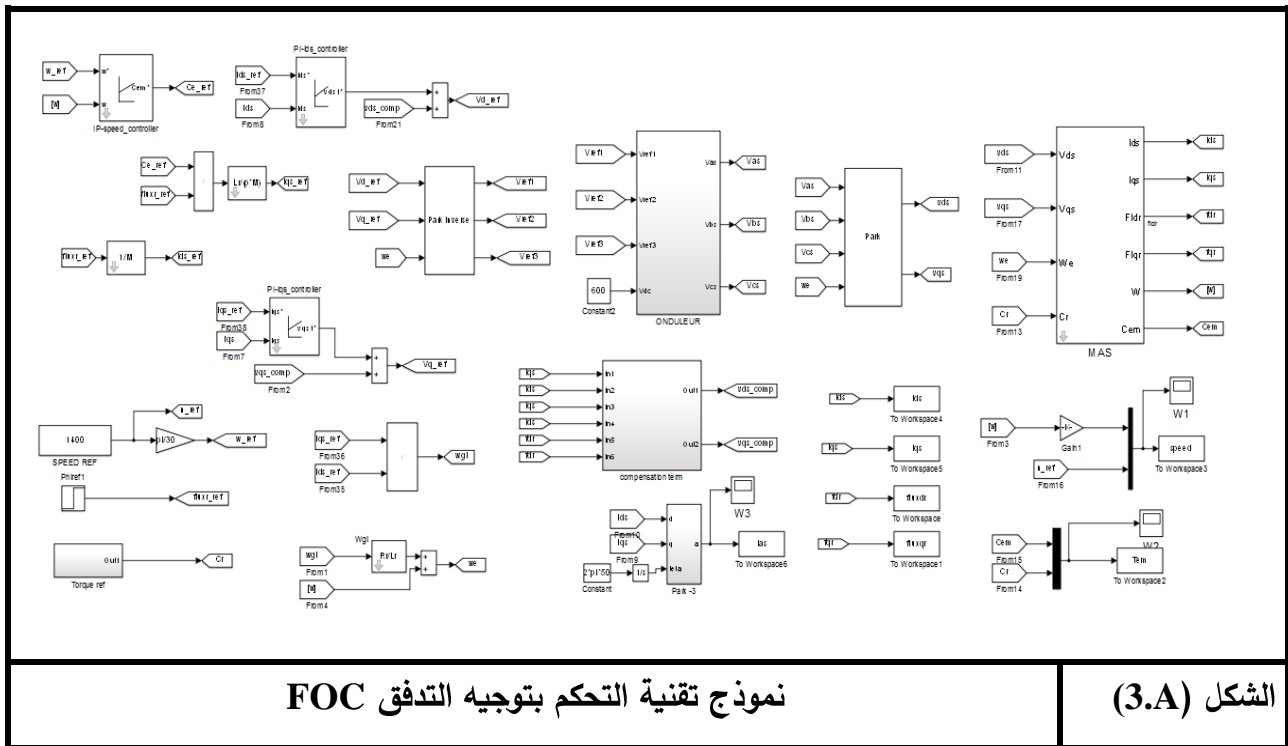
الشكل (1.A)

• نمذجة تقنية ال PWM باستعمال برنامج MATLAB/SUMILINK



الشكل (2.A)

• مخطط تقنية التحكم بتوجيه التدفق FOC باستعمال برنامج MATLAB/SUMILINK

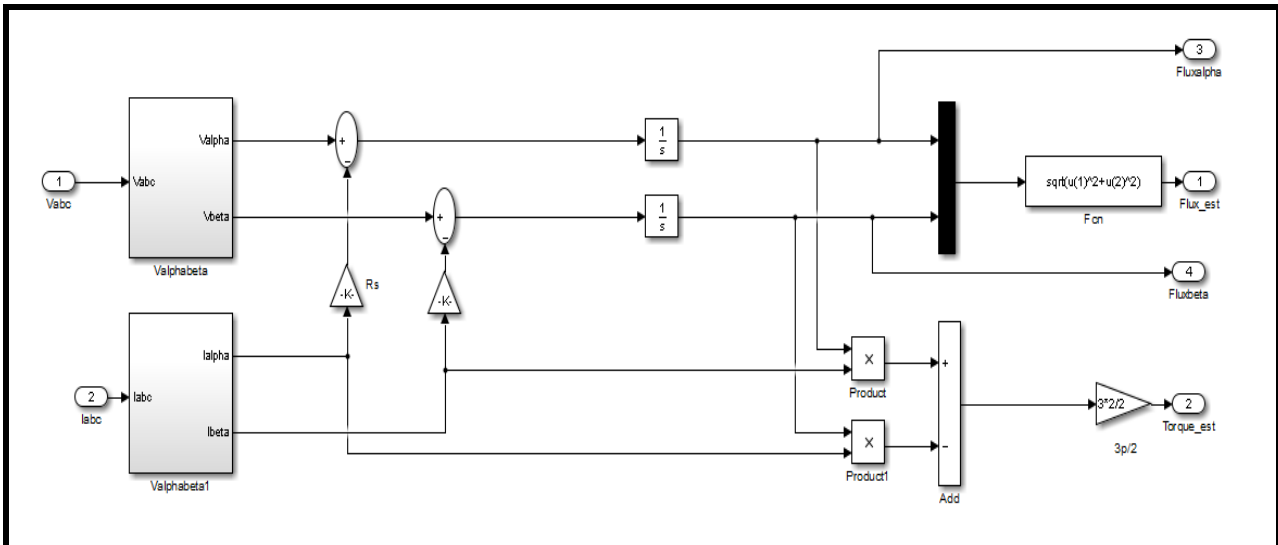


الشكل (3.A)

B الملحق

- خصائص المحرك المستعمل في محاكاة تقنية التحكم المباشر بالعزم DTC

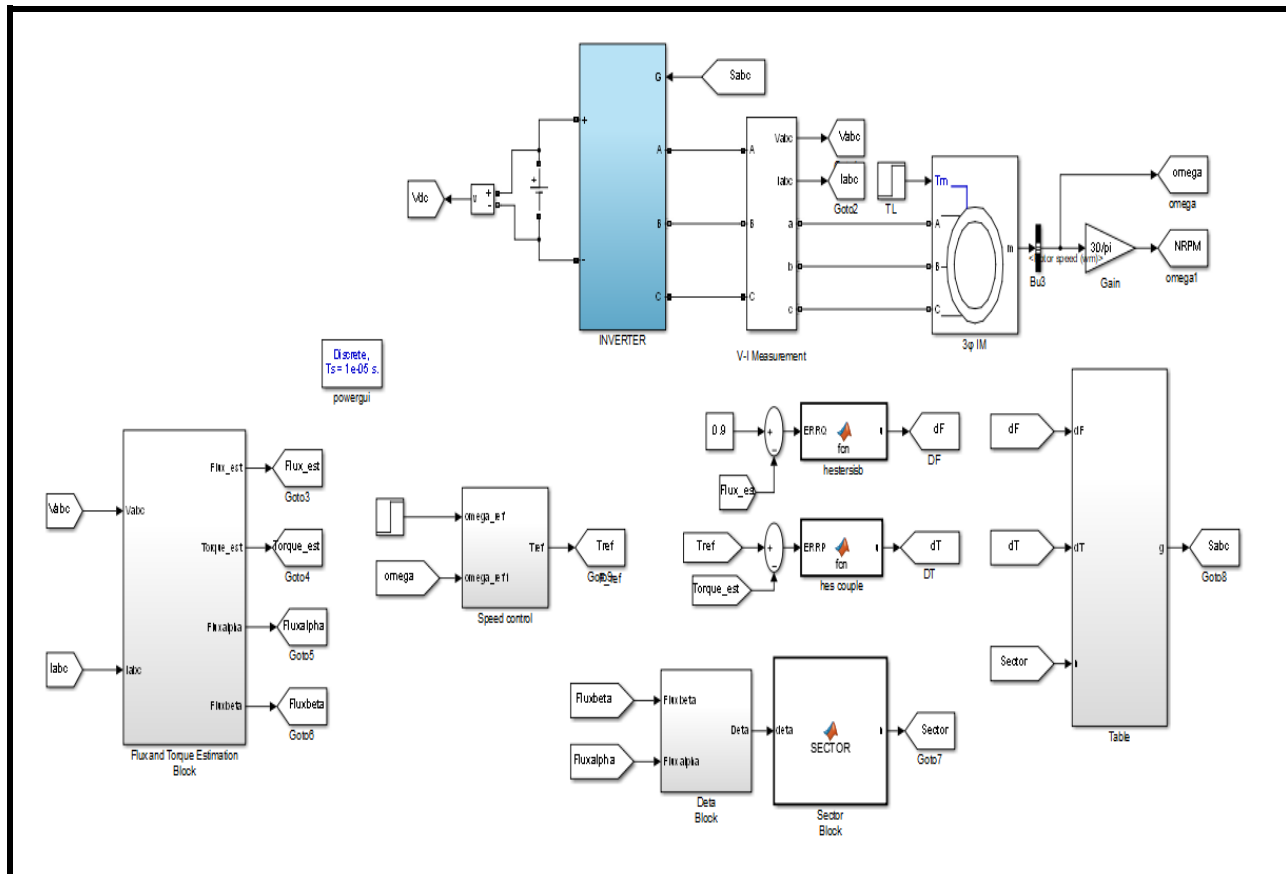
القيم الاسمية	
$P_n = 3kw$	الاستطاعة الاسمية
$2P = 4 pole$	عدد الأقطاب
220/380v	القيمة الفعالة للتوتر الاسمي
50Hz	التردد الاسمي
1410rpm	سرعة الدوران الاسمية
المقادير الكهربائية	
$R_s = 11.6\Omega$	مقاومة ملفات الثابت
$R_r = 10.4\Omega$	مقاومة ملفات الدوار
$L_s = 0.579H$	محاوضة ملفات الثابت
$L_r = 0.579H$	محاوضة ملفات الدوار
$L_m = 0.557H$	المحاوضة المتبادلة
المقادير الميكانيكية	
$J = 0.002Kg.m^2$	عزم العطالة



طابق تقدير فيض الثابت و العزم الكهرومغناطيسي

الشكل (2.B)

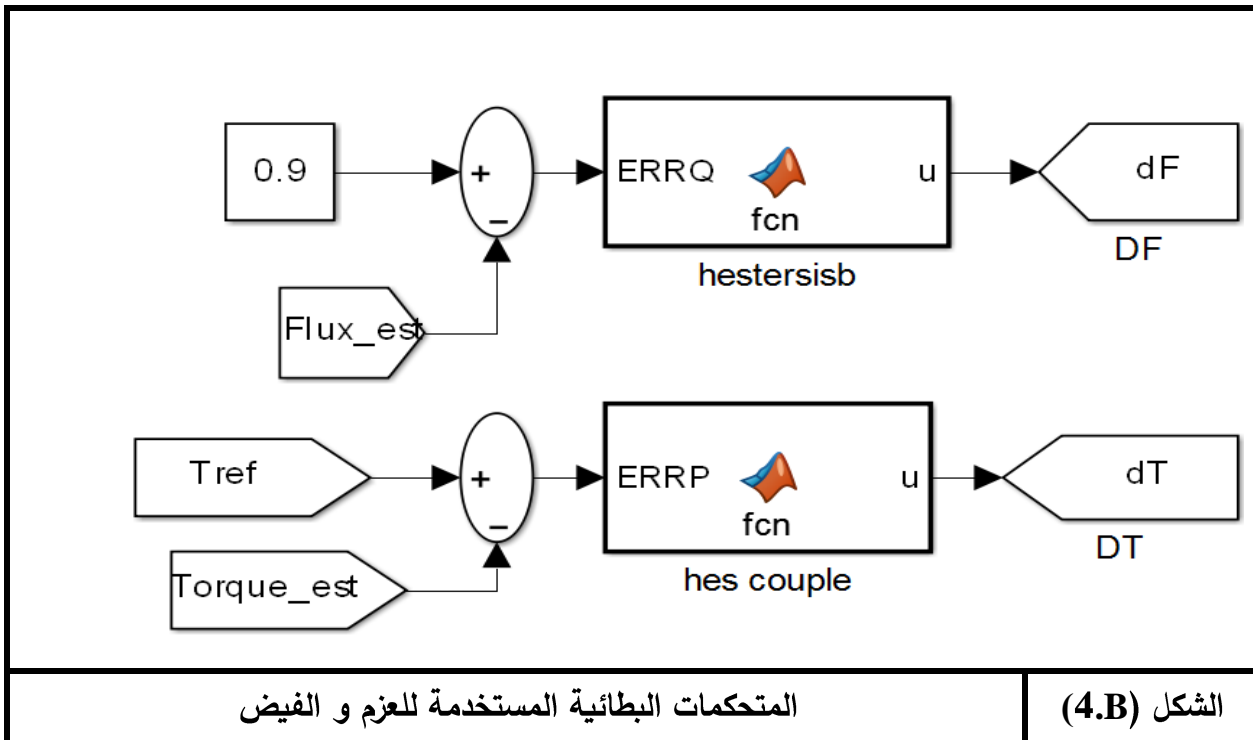
• تقنية التحكم المباشر بالعزم DTC بتنظيم السرعة



نموذج تقنية التحكم المباشر بالعزم التقليدية DTC

الشكل (1.B)

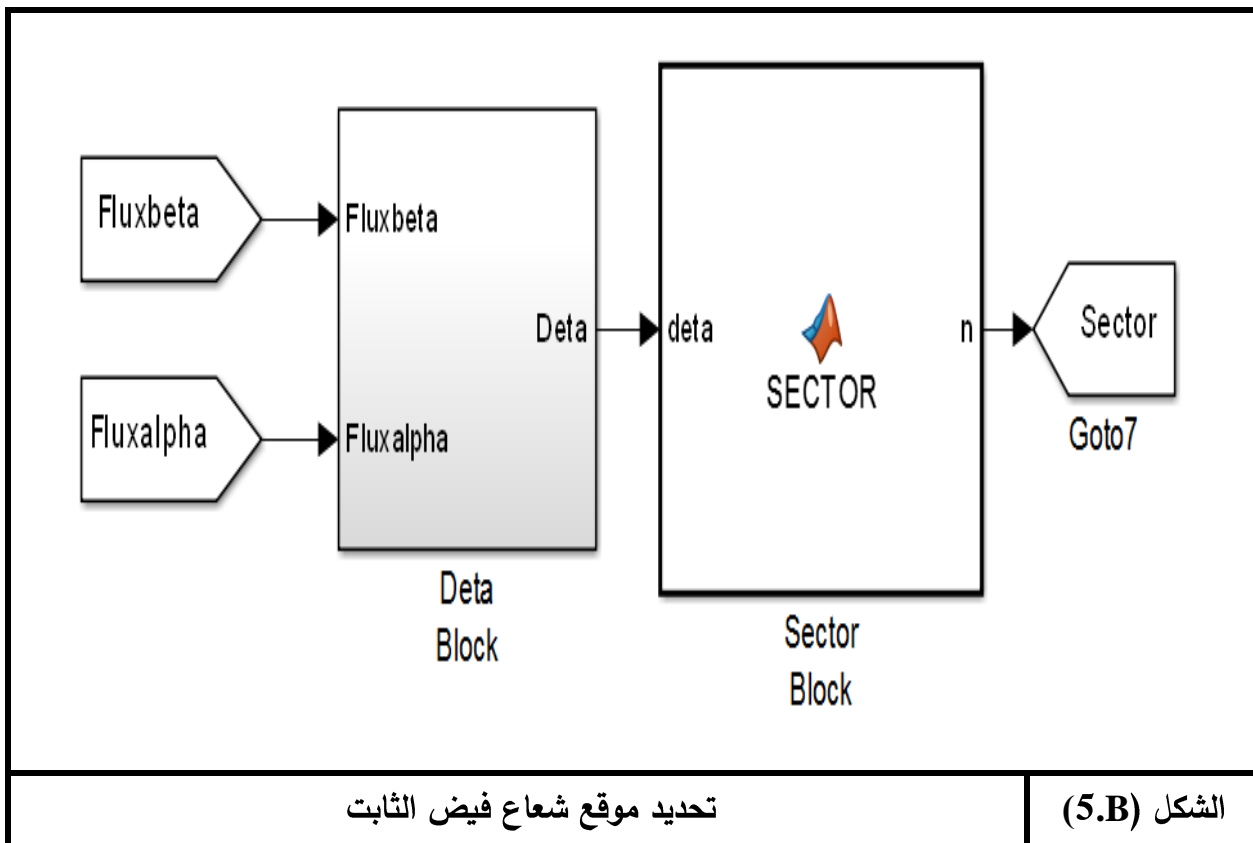
• المتحكمات البطائية المستعملة للعزم و الفيض



المتحكمات البطائية المستخدمة للعزم و الفيض

الشكل (4.B)

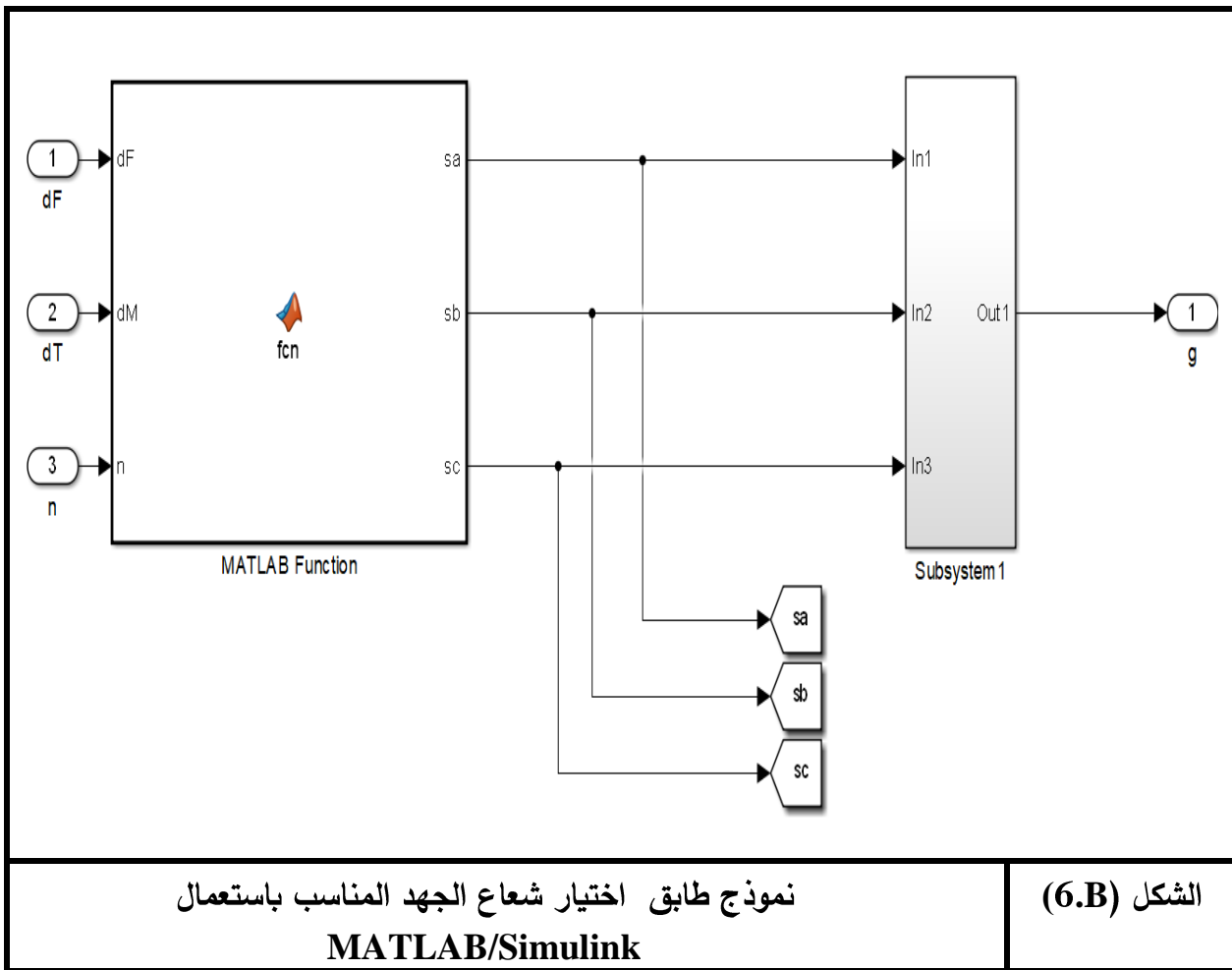
• تحديد موقع شعاع فيض الثابت



تحديد موقع شعاع فيض الثابت

الشكل (5.B)

• نموذج طابق اختيار شعاع الجهد المناسب باستخدام MATLAB/Simulink



ملحق C

- خوارزمية استخدام المتحركات البطائية للمعزم و فيض الثابت

```
• function u = fcn(ERRQ)
• HQ=0.005
• u=0;
• if (ERRQ<-HQ)
•     u=0;
• end
• if (ERRQ>HQ)
•     u=1;
• end
```

```
• function u = fcn(ERRP)
• u=0;
• HP=1
• if (ERRP<-HP)
•     u=-1;
• end
• if (ERRP>HP)
•     u=1;
• end
• if (ERRP==0)
•     u=0;
• end
• end
```

• خوارزمية تحديد شعاع فيض الثابت

```
• function n = SECTOR(deta)
• n=0;

• %%%% secteur 1 %%%%
• if (deta>-30) & (deta<=30);
•     n=1;
• end
• %%%% secteur 2 %%%%
• if (deta>30) & (deta<=90);
•     n=2
• end
• %%%% secteur 3 %%%%
• if (deta>90) & (deta<=150);
•     n=3
• end
• %%%% secteur 4 %%%%
• if (deta>150) & (deta<=180);
•     n=4;
• end
•
• %%%% secteur 4 %%%%
• if (deta>-180) & (deta<=-150);
•     n=4;
• end
• %%%% secteur 5
• if (deta>-150) & (deta<=-90);
•     n=5
• end
• %%%% secteur 6 %%%%
•
•     if (deta>-90) & (deta<=-30);
•         n=6;
•     end
• end
```

• خوارزمية تحديد شعاع الجهد المناسب

```
• function [sa, sb, sc] = fcn(dF, dM, n)
• sa=0;
• sb=0;
• sc=0;
• %%%%% SECTEUR 1 %%%%%%%%%%
• %%%%%%%%%%
• if (dF==1) & (dM==1) & (n==1) ;
•     % u=2
•     sa=1;
•     sb=1;
•     sc=0;
• end
• if (dF==1) & (dM==0) & (n==1) ;
•     % u=7;
•     sa=1;
•     sb=1;
•     sc=1;
• end
• if (dF==1) & (dM== -1) & (n==1) ;
•     % u=6;
•     sa=1;
•     sb=0;
•     sc=1;
• end
• %%
• if (dF==0) & (dM==1) & (n==1) ;
•     % u=3;
•     sa=0;
•     sb=1;
•     sc=0;
• end
• if (dF==0) & (dM==0) & (n==1) ;
•     % u=0;
•     sa=0;
•     sb=0;
•     sc=0;
• End
if (dF==0) & (dM== -1) & (n==1) ;
% u=5;
sa=0;
sb=0;
sc=1;
end
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%% secteur 2%%%%%%%%

if (dF==1) & (dM==1) & (n==2);
    % u=3;
    sa=0;
    sb=1;
    sc=0;
end
if (dF==1) & (dM==0) & (n==2);
    % u=0;
    sa=0;
    sb=0;
    sc=0;
end
if (dF==1) & (dM==-1) & (n==2);
    % u=1;
    sa=1;
    sb=0;
    sc=0;
end
%%
if (dF==0) & (dM==1) & (n==2);
    % u=4;
    sa=0;
    sb=1;
    sc=1;
end
if (dF==0) & (dM==0) & (n==2);
    % u=7;
    sa=1;
    sb=1;
    sc=1;
end
if (dF==0) & (dM==-1) & (n==2);
    % u=6;
    sa=1;
    sb=0;
    sc=1;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%% secteur 3 %%%%%%%%%
if (dF==1) & (dM==1) & (n==3);
    % u=4;
    sa=0;
    sb=1;
    sc=1;
end
if (dF==1) & (dM==0) & (n==3);
    % u=7;
    sa=1;
    sb=1;
    sc=1;
end
if (dF==1) & (dM==-1) & (n==3);
    % u=2;
    sa=1;

```

```

        sb=1;
        sc=0;
    end
    %%
    if (dF==0) & (dM==1) & (n==3);
        % u=5;
        sa=0;
        sb=0;
        sc=1;
    end
    if (dF==0) & (dM==0) & (n==3);
        % u=0;
        sa=0;
        sb=0;
        sc=0;
    end
    if (dF==0) & (dM==-1) & (n==3);
        % u=1;
        sa=1;
        sb=0;
        sc=0;
    end
    if (dF==1) & (dM==-1) & (n==4);
        %u=3;
        sa=0;
        sb=1;
        sc=0;
    end
    %%
    if (dF==0) & (dM==1) & (n==4);
        % u=6;
        sa=1;
        sb=0;
        sc=1;
    end
    if (dF==0) & (dM==0) & (n==4);
        %u=7;
        sa=1;
        sb=1;
        sc=1;
    end
    if (dF==0) & (dM==-1) & (n==4);
        %u=2;
        sa=1;
        sb=1;
        sc=0;
    end
    %%
    %%secteur 5 %%
    if (dF==1) & (dM==1) & (n==5);
        %u=6;
        sa=1;
        sb=0;
        sc=1;
    end
    if (dF==1) & (dM==0) & (n==5);
        %u=7;
        sa=1;

```

```
sb=1;
sc=1;
end
%%
% u=1;
sa=1;
sb=0;
sc=0;
end
if (dF==0) & (dM==0) & (n==5);
% u=0;
sa=0;
sb=0;
sc=0;
end
if (dF==0) & (dM==-1) & (n==5);
%u=3;
sa=0;
sb=1;
sc=0;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
secteur 6 %%%%%%%%%%%
if (dF==1) & (dM==1) & (n==6);
%u=1;
sa=1;
sb=0;
sc=0;
end
if (dF==1) & (dM==0) & (n==6);
%u=0;
sa=0;
sb=0;
sc=0;
end
if (dF==1) & (dM==-1) & (n==6);
% u=5;
sa=0;
sb=0;
sc=1;
if (dF==0) & (dM==1) & (n==6);
% u=2;
sa=1;
sb=1;
sc=0;
end
if (dF==0) & (dM==0) & (n==6);
%u=7;
sa=1;
sb=1;
sc=1;
end
if (dF==0) & (dM==-1) & (n==6);
%u=4;
sa=0;
sb=1;
sc=1
end
```