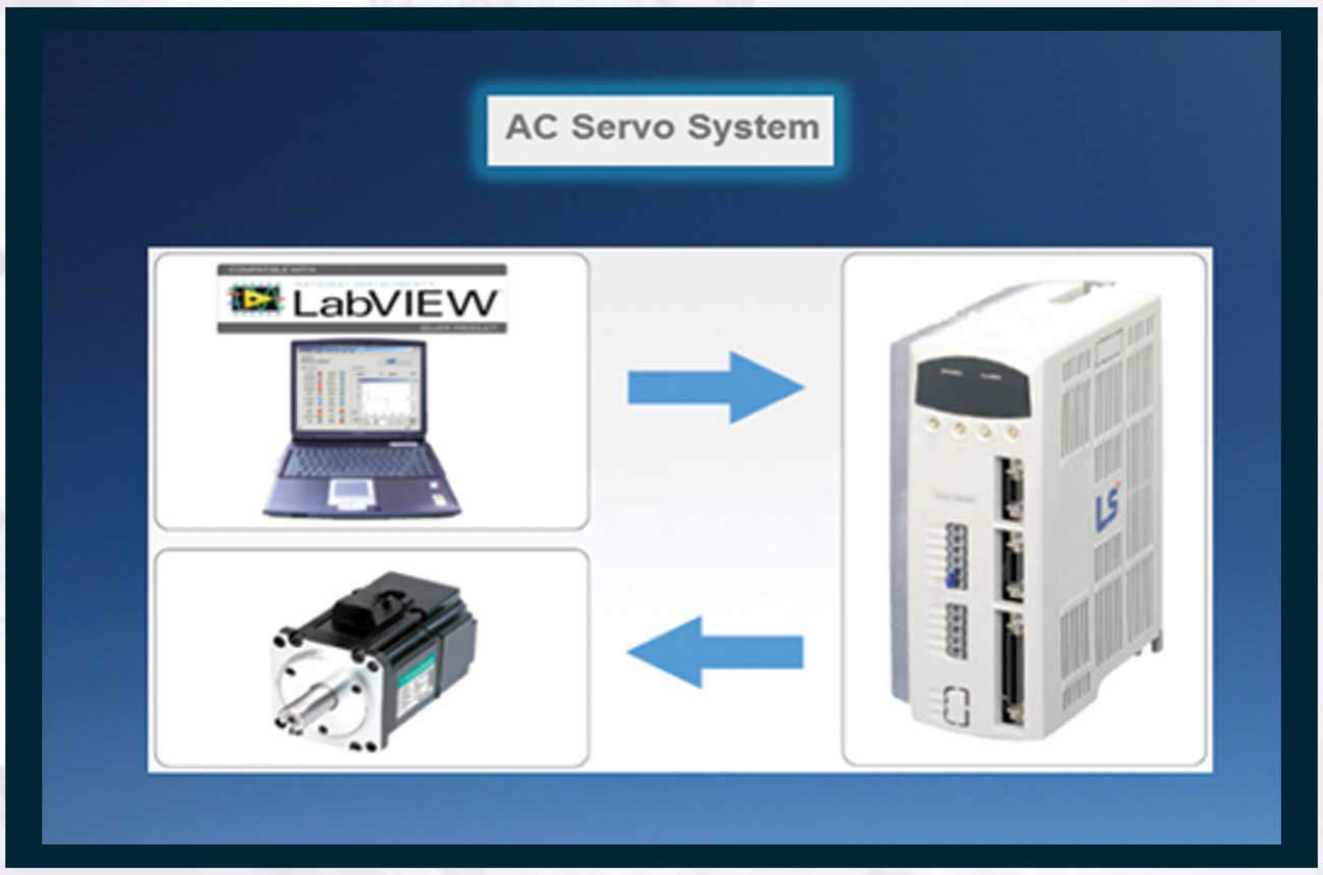
جامعة حلب
كلية الهندسة الكهربائية والالكترونية
قسم القيادة الكهربائية

مشروع أعد لنيل درجة الإجازة في الهندسة الكهربائية

القيادة الرقمية للمحرك المتواقت ذي المغانط الدائمة

Digital Drive of Permanent Magnet Synchronous Machine



بإشراف الدكتور المهندس
أحمد عمار نعساني
مشاركة
المهندس محمد ناصيف

إعداد وتنفيذ

أحمد ضباع
محمد زهير البدرة

٢٠١٤-٢٠١٣

جامعة حلب

كلية الهندسة الكهربائية والالكترونية

قسم القيادة الكهربائية

مشروع أعد لنيل درجة الإجازة في الهندسة الكهربائية

القيادة الرقمية للمحرك المتزامن ذي المغانط الدائمة

بإشراف الدكتور المهندس

أحمد عمار نعساني

مشاركة

المهندس محمد ناصيف

إعداد وتنفيذ

أحمد ضباع **محمد زهير البدرة**

العام الدراسي 2013-2014

بسم الله الرحمن الرحيم

(سبحانك لا علم لنا إلا ما علمتنا إنك أنت العليم)

صدق الله العظيم

الإهـداء

بسم الله أبتدي....

وبنور وجهه أهتدي...

غرفت غرفة من بحر علمه الكبير....

فعرفت من هو ومن أنا...

إهداء خاص

إلى المعلم الأول.....

إلى من أنقذ البشرية من مهاوي الضلال إلى معارج الرفعة والكمال.....

إلى حبيب الله وحبيبنا سيدنا

محمد رسول الله صلى الله عليه وسلم

إلى من علماني أنه بالإرادة يصنع الإنسان ما يشاء.....

إلى رموز التضحية والحب والفداء.....

أمي .....أبي

إلى نعم الأصدقاء وأوفى الأوفياء.....

إخوتي

إلى جميع الأصدقاء الذين أحببتهم وأحبوني.....

أصدقائي

أحمد

الإهداء

شكرا رباه لأنك بجانبي في كل مرحلة من مراحل حياتي حتى بلغت المنى....

...ربي زدني علما...

أنت رحمة الله المهداة لي في الحياة..أنت الفرح الذي يكمل نجاحي..يا شمعة حياتي ويا نبع الحنان..يا نهر الحب الذي لا ينضب..

أمي

كنت لي خير معين وسند..غرست في قلبي حب العلم منذ الصغر ودفعتني إلى طلبه..يا من علمني الإصرار والتحدي...يا من يرتعش قلبي لذكراه..

إلى الروح الطاهرة.....

أبي(رحمه الله)

إلى نجوم تضيئ في سمائي..إلى من قضيت معهم أجمل أيامي..إلى من هم بقلبي ودمي.. إلى قناديل أهتدي بها اليوم وفي الغد وإلى الأبد ..إلى الذين لم يفارقوا مخيلتي رغم المسافات...

إخوتي

إلى من برؤياهم يهدأ بالي..وبلقياهم تنجلي همومي..إلى من شاركوني فرحي وحزني..إلى من سأفتقدهم..وأتمنى أن يجمعني الله بهم من جديد..إلى أخوة لم تلدهم أمي...

أصدقائي

محمد زهير

كلمة شكر

نتوجه ببطاقة شكر و تقدير للكادر التدريسي في كلية الهندسة الكهربائية و الإلكترونية و لكل من ساهم في وصولنا إلى هذه المرحلة

و نتوجه بشكر خاص إلى الذين كانوا عوناً لنا في إنجاز هذا المشروع و لم يبخلوا علينا بمعلوماتهم و خبرتهم و نخص بالذكر

الدكتور المهندس

أحمد عمار نعساني

المهندس	المهندس	المهندس
محمد ناصيف	أحمد شريفة	حازم كيالي

أحمد ومحمد زهير

الفهرس

الفصل الأول : المحركات المتواقتة ذات المغانط الدائمة

1-1- مقدمة 2

1-2- بنية الآلات المتواقتة 2

1-3- المحركات المتواقتة 3

1-4- طرق إقلاع المحركات المتواقتة 4

1-5- المحركات المتواقتة ذات المغانط الدائمة 5

1-6- تصنيف المحركات المتواقتة ذات المغانط الدائمة 6

1-7- الخاتمة 8

الفصل الثاني : التمثيل الرياضي للمحركات المتواقتة ذات المغانط الدائمة

2-1- مقدمة 10

2-2- فرضيات هامة 10

2-3- تمثيل المحرك في نظام المحاور الثنائية q،d 10

2-4- استنتاج معادلات الجهد الثنائية للمحرك من أجل محاور ثنائية مرتبطة بالدوار 11

2-5- معادلات الجهود للمحرك 12

2-6- معادلات العزم الكهرومغناطيسي في جملة المحاور الدوارة d,q 14

2-7- معادلة السرعة الميكانيكية 15

2-8- الخاتمة 16

الفصل الثالث : أنظمة قيادة المحركات المتواقتة ذات المغانط الدائمة

3-1- مقدمة 18

3-2- المنظمات الالكترونية المستخدمة في أنظمة القيادة 18

3-3- نظرية التحكم V/f 20

3-4- المحاكاة والنتائج التمثيلية لخوارزمية V/f 22

3-5- التحكم الشعاعي Vector Control 27

3-6- نظام القيادة FOC (Fild Oriented Control) 27

3-7- تنظيم التيار Iq باستخدام منظم PI 32

3-8- تنظيم التيار Id باستخدام منظم PI 33

3-9- تنظيم التيار والسرعة معاً 34

3-10- تنظيم الموضع 41

3-11- الخاتمة 42

الفصل الرابع : التمثيل الرياضي لقالبة الجهد المسؤولة عن تغذية المحرك

4-1- مقدمة 44
4-2- المبدلة الستاتيكية 44
4-3- قالبة الجهد.....45
4-5- التحكم بقالبة الجهد.....49
5-5- الخاتمة..... 52

الفصل الخامس : التمثيل الرقمي للمحرك المتواقت ذي المغانط الدائمة وأنظمة قيادته

5-1- مقدمة.....54
5-2- معادلتي أويلر 54
5-3- التمثيل الرقمي لمعادلة نظام من المرتبة الأولى..... 54
5-4- التمثيل الرقمي لمعادلات المحرك المتواقت ذي المغانط الدائمة.....55
5-5- التمثيل الرقمي للمنظمات PID 56
5-6- الخاتمة.....59

الفصل السادس : التطبيق العملي

6-1- أنظمة قيادة المحركات المتواقتة ذي المغانط الدائمة.....61
6-2- جهاز الانفيرتر المستخدم في المشروع 62
6-3- أهم الميزات التي يتمتع بها هذا الانفيرتر..... 63
6-4- آلية تحويل الانفيرتر إلى منصة عمل.....65
6-5- طريقة البرمجة 69
6-6- خوارزميات عمل الانفيرتر 70
6-7- التجارب العملية 74
6-8- مبدأ عمل Encoder وكيفية حساب السرعة.....76
6-9- توليد نبضات التحكم بالموضع.....79
6-10- ربط الدرايف مع الحاسب.....88
***6-11-* الخاتمة.....101**

خلاصة البحث.....102
آفاق التطوير.....103
المراجع 104

المقدمة

في خضم السباق التكنولوجي لابتكار أنظمة متكاملة العمل والأداء، تم اللجوء لابتكار محركات ذات طبيعة خاصة تلاءم تطبيقات محددة لتشكل عنصراً في جملة متكاملة تقود لأداء عالٍ وموثوقية شديدة، من هنا بزغت فكرة المحركات الخاصة وهي في طريقها الواسع للتطور والتحسين المستمر.

حيث أن ارتفاع إنتاجية المعامل والمنشآت الصناعية يتعلق مباشرة بالتجهيزات الكهربائية والتقنيات الإلكترونية المستخدمة في قيادتها وتشغيلها.

في بحثنا هذا سنقوم بدراسة المحرك المتواقت ذي المغانط الدائمة باعتباره من المحركات الشائعة الاستخدام في التطبيقات الصناعية وذلك لما يتميز به من مميزات عديدة، حيث إن دوار المحرك له عزم عطالة صغير وحرارة الدوار قليلة وبالتالي مردود عالي وملائم للوظائف التي تتطلب تحكم بالوضعية وتبقى السيئة الوحيدة لديه في السعر المرتفع بسب غلاء المادة التي تصنع منها المغانط الدائمة وارتفاع قيمة تيار الإقلاع والذي تظهر أهميته عند عمل هذه المحركات مع القالبات ذات أنصاف النواقل.

ومع التطور العلمي الكبير في مجال الإلكترونيات الصناعية واستخدام الحاسب في مجال التحكم والقيادة أصبح بالإمكان قيادة المحرك المتواقت ذي المغانط الدائمة بسهولة وذلك من خلال إيجاد نموذج رياضي للمحرك وتمثيله على الحاسب وبالتالي دراسة أنظمة عمل المحرك وتحليل المعادلات الممثلة له ودراسة أنظمة القيادة المختلفة التي يمكن تطبيقها عليه.

وبعد دراسة أنظمة قيادة المحرك المتواقت ذي المغانط الدائمة لا بد من التعرف على أهم عنصر مستخدم في عملية القيادة وهو ما يسمى Servo-Drive والذي يمثل نظام القيادة المستخدم لقيادة المحرك بالإضافة لوجود قالبة الجهد من أجل عملية تحويل إشارة الجهد القادمة من نظام القيادة (جهود منخفضة) إلى إشارة جهد على خرج القالبة والتي تطبق على المحرك مباشرة وبالتالي إمكانية التحكم بمطال وتردد إشارة الخرج بما يناسب العملية الصناعية المطلوبة.

في هذا المشروع سنقوم بدراسة المحرك المتواقت ذي المغانط الدائمة وأنظمة القيادة المستخدمة، كما يلي :

الفصل الأول :

سنتكلم عن بنية الآلات المتواقتة بشكل عام ثم ننتقل إلى المحركات المتواقتة وطرق الإقلاع ومن ثم سنتحدث عن المحركات المتواقتة ذات المغانط الدائمة وتصنيفاتها.

الفصل الثاني :

سنقوم باستنتاج النموذج الرياضي للمحرك المتواقت ذي المغانط الدائمة في نظام محاور إحداثيات ثنائية متعامدة ودوارة بسرعة الدوار وتمثيل هذا النموذج الرياضي باستخدام بيئة Matlab/Simulink.

الفصل الثالث :

سنقوم بدراسة نظامين من أنظمة قيادة المحرك المتواقت ذي المغانط الدائمة الحديثة، نظام V/F=constant ، ونظام التحكم بشعاع الفيض الموجه FOC المستخدم في الإنفيرترات الموجودة بالأسواق، وتمثيلها أيضاً باستخدام بيئة Matlab/Simulink.

الفصل الرابع :

سنقوم بدراسة قالبة الجهد المسؤولة عن تغذية المحرك، وتمثيلها باستخدام بيئة Matlab/Simulink.

الفصل الخامس :

سنقوم بعملية التحويل الرقمي للمعادلات الرياضية الممثلة للمحرك ولأنظمة قيادة المحرك (PID)، وتمثيلها باستخدام بيئة Matlab/Simulink.

الفصل السادس :

سنقوم بالتعريف بأحد أنواع الانفيرترات المستخدمة لقيادة المحرك المتواقت ذي المغانط الدائمة وهو من إنتاج شركة (LS)، حيث قمنا بدراسة الكتالوك المرفق معه ومن ثم تجهيز منصة مخبرية التي يمكن أن يستفاد منها في إعداد بعض التجارب العملية لطلاب كلية الهندسة الكهربائية والإلكترونية، ثم أخذنا بعض النتائج العملية على راسم إشارة، وقمنا بعملية ربط بين الانفيرتر ودارة تحكم خارجية يستفاد منها في خوارزمية التحكم بالموضع وقمنا أيضاً بعملية ربط مع الحاسب عن طريق البرنامج المرفق مع الانفيرتر وأيضاً عن طريق بيئة LABVIEW.

الفصل الأول

المحركات المتواقتة ذات المغانط الدائمة

1-1- مقدمة

إن أكثر من 98% من الطاقة الكهربائية المنتجة في العالم يتم توليدها باستخدام الآلات المتواقتة فهي الأكثر استخداماً لغرض تحويل الطاقة الميكانيكية إلى كهربائية.

وكما تستخدم الآلات المتواقتة كمولدات متواقتة تستخدم أيضاً كمحركات متواقتة، وقد اكتسب هذا النوع من الآلات هذه التسمية (التواقت) بسبب التواقت بين سرعة دوران المجال المغناطيسي والعضو الدوار.

1-2- بنية الآلات المتواقتة

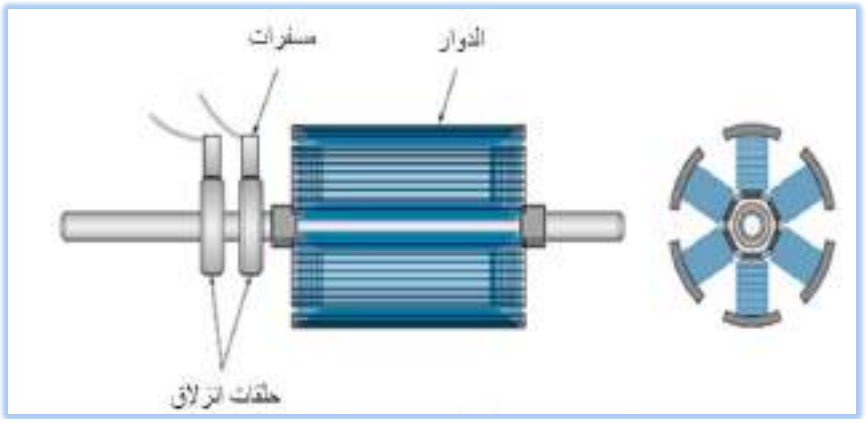
تتألف الآلات المتواقتة بشكل عام من جزأين أساسيين هما :

الجزء الثابت

يحمل ملفات إنتاج الطاقة الكهربائية ويدعى المتحرض، يخرج في النهاية ستة أطراف يمكن توصيلها بشكل نجمي أو مثلثي بحيث يكون مشابه تماماً للجزء الثابت في المحرك التحريضي من حيث التركيب واللف.

الجزء الدوار

يحمل ملفات المجال المغناطيسي ويغذى بتيار مستمر عن طريق حلقتي انزلاق لينشط المغانط الموجودة على محيطه وهذه المغانط تقوم بالتفاعل مع الساحة المغناطيسية الدوارة للثابت مما يجعل الدوار يدور بنفس سرعة دوران الساحة المغناطيسية أي بسرعة التواقت.

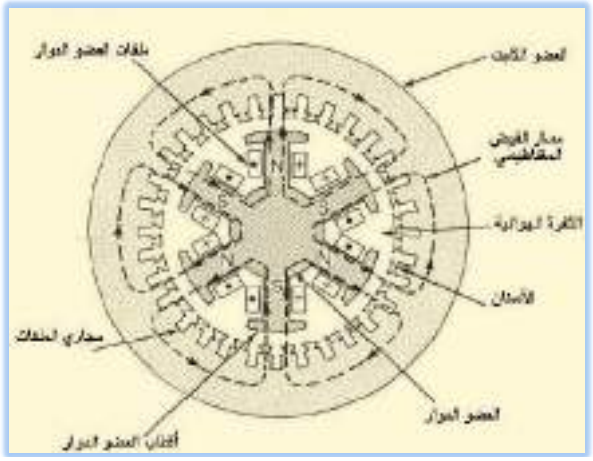


الشكل (1-1): شكل الدوار في الآلة المتواقتة

بشكل عام هناك نوعان من الجزء الدوار حسب البنية وذلك يعتمد على التطبيق المستخدم وهما :

1- دوار ذو أقطاب بارزة

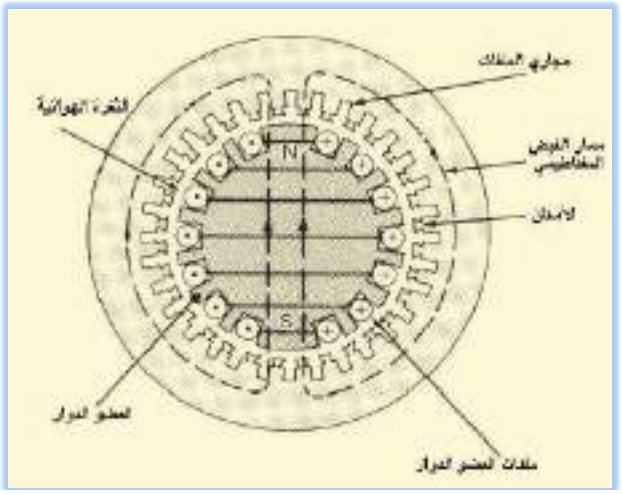
يستخدم في الآلات المتواقتة ذات السرعات المنخفضة (عادة تقل عن 1000 دورة بالدقيقة).



الشكل (1-2): آلة متواقتة بدوار ذي أقطاب بارزة

2- دوار اسطواني

يستخدم في الآلات المتواقتة ذات السرعات العالية حيث تكون السرعة إما 1500 أو 1800 أو 3000 أو 3600 دورة بالدقيقة وهذا يعتمد على التردد المطلوب وعدد الأقطاب، والجدير بالذكر أنه يجب أن يكون عدد أقطاب الجزء الدوار مساوياً لعدد الأقطاب في الجزء الثابت.



الشكل (1-3): آلة متواقتة ذات دوار أسطواني

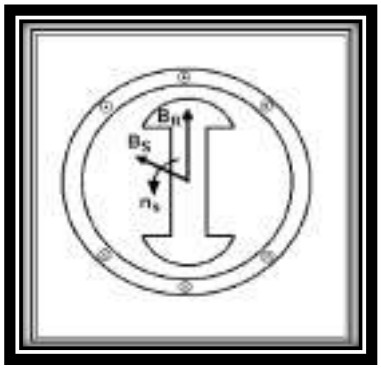
1-3- المحركات المتواقتة

يشبه المحرك المتواقت في عمله المحرك التحريضي ولكن بينهما اختلاف أساسي وهو أن الدوار في المحرك المتواقت يدور بسرعة دوران الحقل المغناطيسي نفسه المتولد عن الثابت.

في المحركات التحريضية الدوار يتلقى الاستطاعة من الثابت نتيجة لمبدأ التحريض وذلك يتطلب وجود إنزلاق بين سرعته وسرعة الحقل الدوار، أما في المحرك المتواقت يجب توفير تلك الاستطاعة من مصدر آخر وعادة يتم تغذية الدوار من منبع تيار مستمر عبر حلقات إنزلاق ومسفرات.

1-4- مبدأ العمل

إنّ مبدأ عمل المحركات المتواقتة بشكل عام هو : عندما تغذى ملفات الدوار بالتيار المستمر سيتولد مجالاً مغناطيسياً ثابتاً في الجزء الدوار، أما الجزء الثابت فعندما يوصل إلى مصدر جهد متناوب ثلاثي الطور سيمر فيه تيارات ثلاثية الطور التي بدورها ستولد مجالاً مغناطيسياً دواراً منتظماً وبالتالي سيتواجد داخل الآلة مجالين مغناطيسيين، مجال الجزء الدوار سيحاول أن يكون متعامداً مع مجال الجزء الثابت تماماً كما يحدث عندما يوضع قطعتان من المغناطيس قرب بعضهما البعض، وحيث أن مجال الجزء الثابت يدور فإن مجال الجزء الدوار سيحاول اللحاق به (ومعه الجزء الدوار نفسه) ولكن لن يتمكن من ذلك بسبب اتساع الزاوية بينهما وهكذا يعيد الكرّه في كل دوره من دون أن يتمكن من الإقلاع وبالتالي لا بد من إيجاد وسيلة لجعل حقل الجزء الدوار يحافظ على الزاوية بينه وبين مجال الجزء الثابت. لكي يتحقق ذلك يجب أن يدار الجزء الدوار بالسرعة التواقتية أو قريب منها قبل توصيل التيار المستمر في ملفاته وعند التوصيل ستكون الزاوية بين المجالين صغيرة وسيستمر مجال الجزء الدوار ومعه الجزء الدوار نفسه باللحاق بمجال الجزء الثابت وسيدور بسرعته نفسها(السرعة المتواقتة) التي لا تتغير مهما تغير حمل المحرك ما دام أنه ضمن الحمولة الاسمية له وفي حالة زيادة الحمل عن العزم الأعظمي فإن الجزء الدوار سيفقد التواقت ويبدأ بالتباطؤ التدريجي حتى التوقف.



الشكل (1-4): المجالات المغناطيسية في المحرك المتواقت

1-5- طرق إقلاع المحرك المتواقت

1) توفير إمكانية التحكم بالتردد حيث يكون عند الإقلاع ذو قيمة صغيرة ثم تزداد قيمته تدريجياً، وبذلك يستطيع الدوار أن يتحرك مع الساحة المغناطيسية التي ستكون سرعتها في البداية قليلة ثم تزداد تدريجياً. هذه الطريقة تتطلب دارات إضافية للتحكم بالتردد، ولكنها توفر لنا إمكانية التحكم بسرعة المحرك.
2) استخدام محرك آخر على محور المحرك المتواقت نفسه لإعطائه سرعة التواقت عند الإقلاع، ولكن لهذه الطريقة سيئة واضحة تتمثل في الحاجة إلى عتاد إضافي.
3) إدخال بعض قضبان القفص السنجابي إلى دوار المحرك المتواقت الأمر الذي يمكن المحرك المتواقت من الإقلاع كمحرك تحريضي.

1-6- المحركات المتواقتة ذات المغانط الدائمة

المحركات المتواقتة ذات المغانط الدائمة هي محركات تستخدم مغانط دائمة لإنتاج الحقل المغناطيسي في الثغرة الهوائية عوضاً عن المغناطيس الكهربائي، هذه المحركات تملك مميزات هامة جذبت اهتمام الباحثين والصناعيين لاستخدامها في تطبيقات عديدة.

1-7- المواد ذات المغنطة الدائمة

تؤثر خصائص المواد ذات المغنطة الدائمة بشكلٍ مباشر على أداء المحرك فالمعرفة الجيدة مطلوبة لاختيار هذه المواد ولفهم محركات المغانط الدائمة، حيث تصنع المواد التي تولد الحقل المغناطيسي من مزيج من المعادن النادرة التي تستخرج من الأرض تدعى بالمواد الفيرو مغناطيسية والتي تمتلك كثافة طاقية مغناطيسية عالية تولد معدلات معتبرة من القدرة والعزم.

ومن أهم أنواع هذه المغانط الدائمة:

1 . مغناطيس النيكو

يؤمن هذا المغناطيس كثافة فيض مرتفعة ولكن قوة قسرية صغيرة أي أنه يفقد المغناطيسية بسهولة.

2 . مغناطيس الفيرايت

يؤمن هذا المغناطيس كثافة فيض منخفضة ولكن قوة قسرية كبيرة أي أنه يفقد المغناطيسية بصعوبة.

3 . مغناطيس الأتربة النادرة

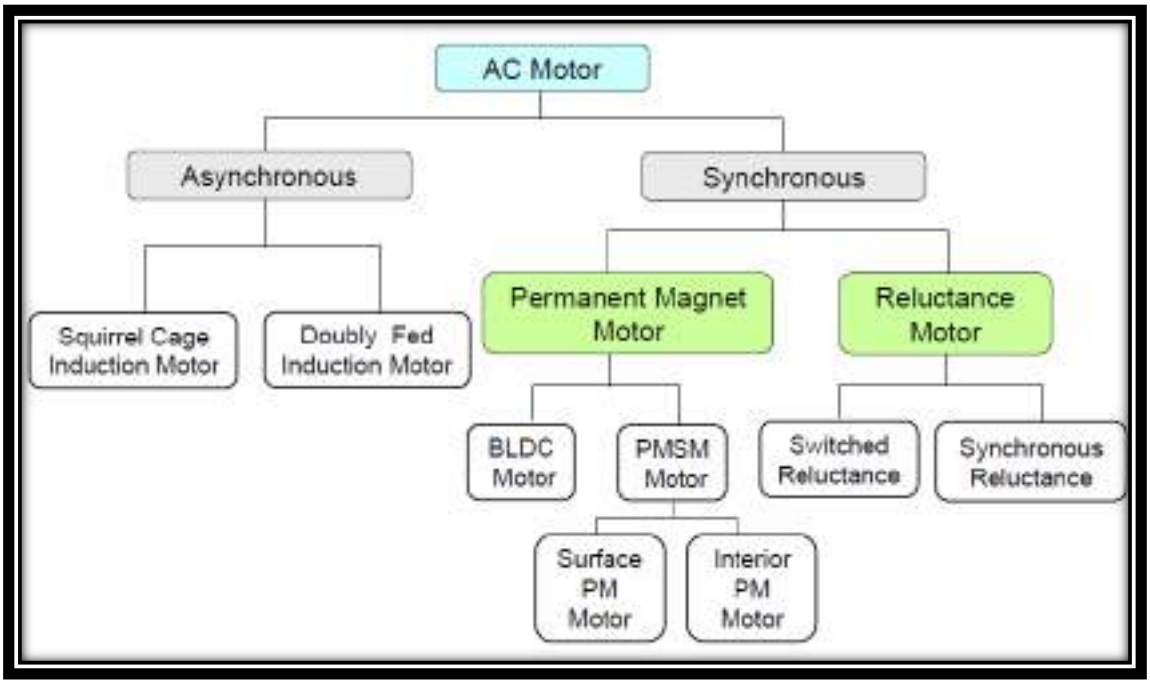
يؤمن هذا المغناطيس كثافة فيض مرتفعة وقوة قسرية كبيرة، وهذا النوع غالي الثمن بالمقارنة مع الأنواع السابقة ويتمتع بمميزات بالمقارنة مع الأنواع السابقة.

إن استخدام المغانط الدائمة في بناء المحركات الكهربائية أدى إلى الحصول على المميزات التالية :

1. ليس هناك ضياعات في ملف التهييج حيث قمنا باستبداله بمغانط دائمة وبالتالي زيادة في المردود.
2. التخلص من منبع التغذية المستمر الخارجي.
3. الحصول على عزم أكبر مما هو عليه في المحركات العادية.
4. أداء ديناميكي أفضل (للعزم والسرعة).
5. سهولة في البناء والصيانة.
6. ضجيج أقل.

1-8- تصنيف المحركات المتواقتة ذات المغانط الدائمة

الشكل (1-5) يوضح التصنيف العام للمحركات ذات التيار التناوب :



الشكل (1-5): التصنيف العام للمحركات ذات التيار التناوب

1) تصنيف المحركات وفقاً لتوزيع كثافة الفيض المغناطيسي

تصنف المحركات المتواقتة بشكل رئيسي وفقاً لتوزيع كثافة الفيض المغناطيسي وشكل تيار التهييج لنوعين :

1- المحركات المتواقتة ذات المغانط الدائمة PMSM

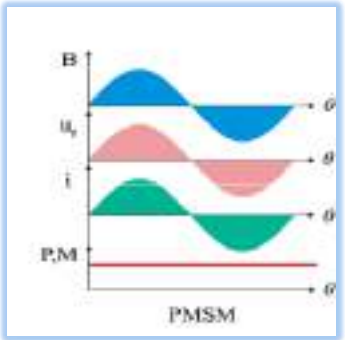
المحركات المتواقتة ذات المغانط الدائمة تملك توزيع جيبي للقوة المحركة الكهربائية العكسية.

ومصممة لتحسين الأمواج الجيبية للقوة المحركة الكهربائية العكسية ولها المميزات التالية :

1- توزيع جيبي للفيض المغناطيسي في الثغرة الهوائية.

2- شكل أمواج التيار جيبية.

3- توزيع جيبي لنواقل الثابت.



الشكل (1-6): شكل موجة الفيض والجهد والتيار للمحرك المتواقت PMSM

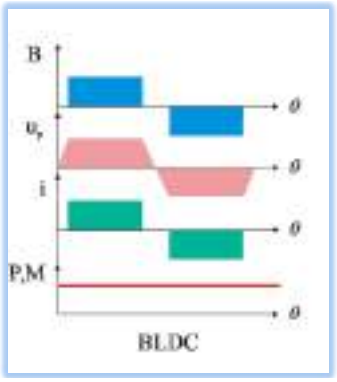
2- محركات التيار المستمر ذات المغانط الدائمة وبدون مسفرات BLDCM

المحركات ذات المغانط الدائمة وبدون مسفرات تملك توزيع غير جيبي للقوة المحركة الكهربائية العكسية، ومصممة لتحسين الأمواج غير الجيبية للقوة المحركة الكهربائية العكسية ولها المميزات التالية:

1- توزيع غير جيبي للفيض المغناطيسي في الثغرة الهوائية.

2- شكل أمواج التيار غير جيبية.

3- الملفات على الثابت قريبة من بعضها البعض.



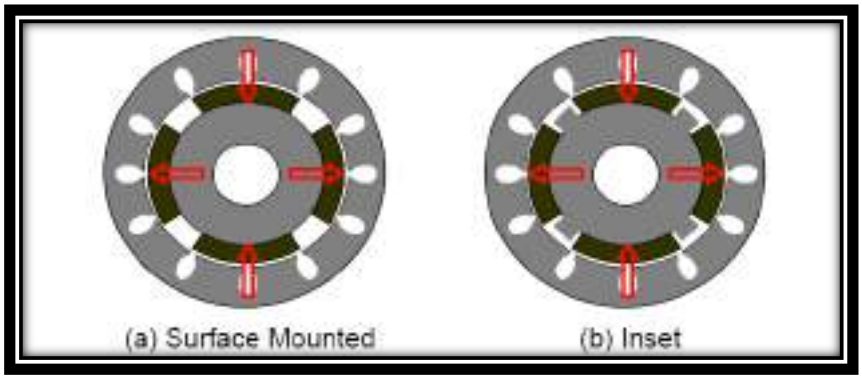
الشكل (1-7): شكل موجة الفيض والجهد والتيار للمحرك المتواقت BLDCM

2) تصنيف المحركات حسب توضع المغناطيس على الدوار

في المحركات ذات المغانط الدائمة يمكن أن يتوضع المغناطيس بأشكال مختلفة على الدوار، حيث يتوضع على السطح الخارجي للدوار ونحصل على محركات متواقته ذات مغانط دائمة سطحية أو يتوضع على السطح الداخلي للدوار ونحصل على محركات متواقتة ذات مغانط دائمة داخلية وبذلك نحصل على نوعين هما :

1- المحركات المتواقتة ذات المغانط الدائمة السطحية

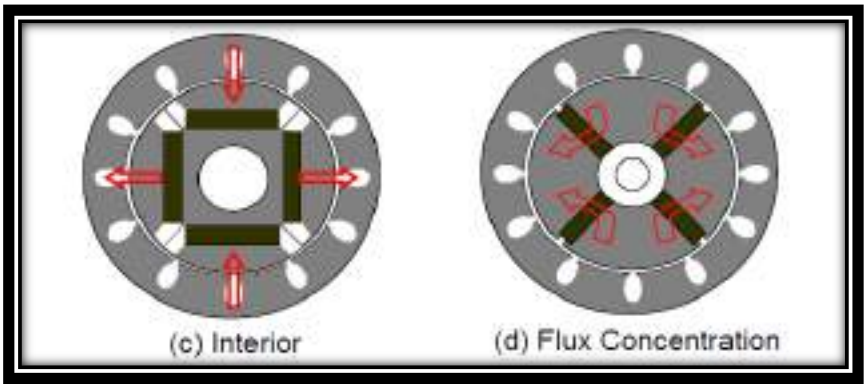
يتوضع المغناطيس على السطح الخارجي للدوار، ويستخدم هذا المحرك في التطبيقات ذات السرع المنخفضة، والنواة الحديدية هنا تكون مصمته أو تحوي ثقوب لسهولة التصنيع، المغانط الدائمة تركب على سطح النواة باستخدام مواد لاصقة.



الشكل (1-8): محركات متواقتة ذات مغانط دائمة سطحية

2- المحركات المتواقتة ذات المغانط الدائمة الداخلية :

هنا المغانط الدائمة تتوضع داخل الدوار وهذه المحركات غير شائعة على عكس المحركات المتواقتة ذات المغانط الدائمة السطحية وتستخدم من أجل التطبيقات التي تتطلب سرعة دوران عالية.



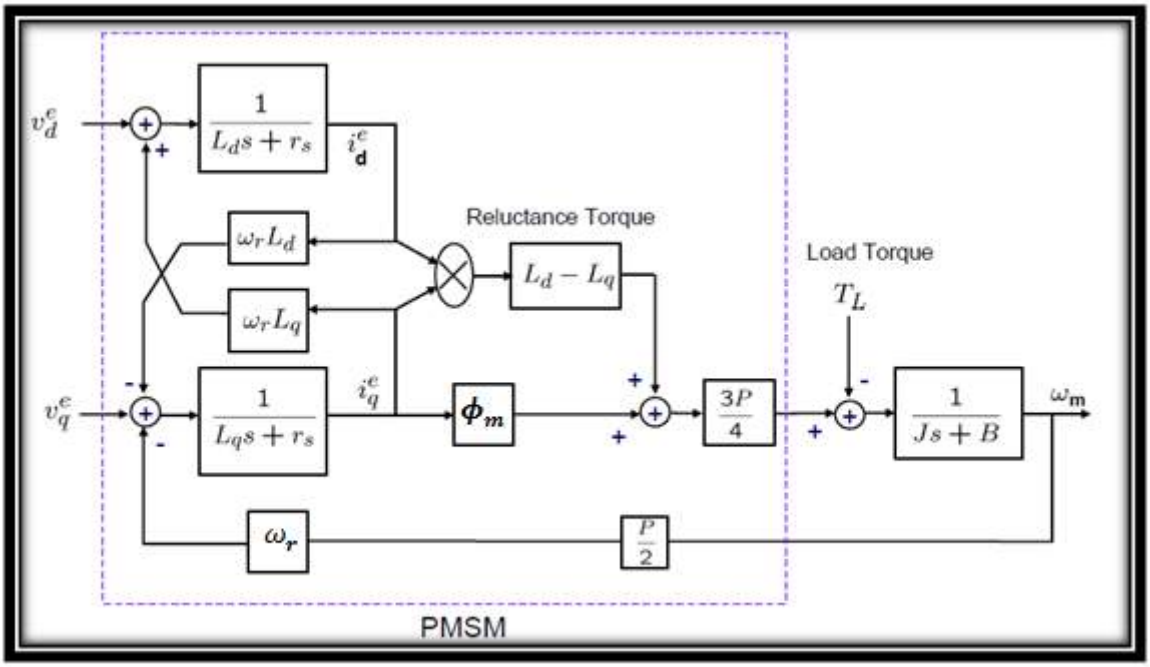
الشكل (1-9): محركات متواقتة ذات مغانط دائمة داخلية

1-9- الخاتمة

الفصل السابق كان عبارة عن دراسة نظرية للمحركات المتواقتة قمنا خلالها بالتحدث عن الآلات المتواقتة وبنيتها، وتعرفنا على طرق إقلاع المحركات المتواقتة ثم تحدثنا عن المغانط المستخدمة في صناعة الدوار للآلات الكهربائية وعن تصنيفات هذه الآلات ذات المغانط الدائمة.

الفصل الثاني

التمثيل الرياضي للمحركات المتواقتة ذات المغانط الدائمة



2-1- مقدمة

من أجل دراسة المحرك المتواقت ذي المغانط الدائمة وتحليل ومعرفة سير عمليات تحويل الطاقة فيه، ومن أجل تمثيله على الحاسب وبالتالي التمكن من دراسة أنظمة قيادته وذلك لمحاولة تجاوز الصعوبات الموجودة في قيادته، كان لا بدّ من الحصول على النموذج الرياضي العام له، حيث يمكننا هذا النموذج من معرفة المعادلات التي تصف عمل المحرك في الحالة المستقرة والحالة العابرة، وحل هذه المعادلات عن طريق الحاسب، وبالتالي الحصول على نموذج للمحرك نستطيع من خلاله دراسة أنظمة عمل المحرك ودراسة أنظمة القيادة المختلفة له لتنظيم السرعة أو العزم أو الموضع.

2-2- فرضيات هامة

عند دراستنا لاستنتاج النموذج الرياضي العام للمحرك المتواقت ذي المغانط الدائمة نأخذ بعين الاعتبار بعض الفرضيات بحيث يصبح من خلالها النموذج الرياضي مماثلاً تقريباً للمحرك الحقيقي وهي :

1- جهد التغذية جيبي ومتوازن (محصلة التيارات تساوي الصفر).

2- قيمة مقاومة وتحريضية الملفات على الثابت ثابتة ونفسها من أجل جميع الملفات.

3- التحريض المغناطيسي ثابت على طول الثغرة الهوائية.

4- تيار التمغنط خطي والضياعات الحديدية مهمل.

5- عدم وجود ملفات تهدئة، لأنه في السنوات الأخيرة لم تعد هذه الآلات تحوي على هذا النوع من الملفات.

2-3- تمثيل المحرك في نظام المحاور الثنائية q،d

إن عملية النمذجة تبدأ من دراسة المقادير الكهربائية لكل من الدوار والثابت أي دراسة الجهد والتيار والفيض للحصول على معادلة معبرة عن المحرك المتواقت ذي المغانط الدائمة، حيث نلجأ قبل القيام بالدراسة إلى إسقاط جملة المحاور الثلاثية لهذه المقادير على محاور إحداثيات ثنائية وذلك لأن عملية دراسة المقادير الكهربائية الثلاثية الطور بشكل شعاعي يجب أن تأخذ بعين الاعتبار التمثيل الكهربائي والفراغي للملفات، أي أننا نغذي الثابت بجهود ثلاثية الطور مزاحة عن بعضها بمقدار 120 درجة. كما أن ملفات الثابت تكون متوضعة توضعاً فراغياً بحيث تكون الزاوية بين كل ملفين متجاورين هي 120 درجة، وبالتالي فإن عملية التمثيل الحالية على محاور ثلاثية غير ممكنة إذ لا يمكن كتابة معادلات تمثل المحرك بشكل صحيح (أي لا يمكن الحصول على معادلات تمثل الإزاحة بين الملفات كهربائياً وفراغياً بالوقت نفسه). لذلك نلجأ إلى إسقاط المحاور الثلاثية على محاور إحداثيات ثنائية متعامدة ودوارة بسرعة عشوائية ω_k.

2-4- استنتاج معادلات الجهد الثنائية للمحرك من أجل محاور إحداثيات ثنائية مرتبطة بالدوار

عند تغذية المحرك بجهد ثلاثي الطور متوازن ذي تردد ثابت يمكن اعتبار أن هذا الجهد الثلاثي عبارة عن شعاع دائري دوار في الفضاء يدور بسرعة تساوي تردد الشبكة وبتطبيق هذا الشعاع على ثابت المحرك المدروس وباعتبار أن Rs تمثل مقاومة ملفات الثابت للمحرك و Ls تمثل تحريضية ملفات الثابت، عندها يمكن كتابة العلاقة التي تمثل الشعاع من أجل محاور إحداثيات ثنائية دوارة بسرعة عشوائية وفق التالي :

$$V_s e^{J\theta\kappa} = R_s i_s e^{J\theta\kappa} + \frac{d(\phi_s . e^{J\theta\kappa})}{dt} \qquad (2.1)$$

عند دراسة الشعاع من أجل جملة محاور إحداثيات ثنائية مرتبطة بالثابت ω_k =0 عندها تصبح العلاقة على الشكل التالي:

$$V_s = R_s i_s + \frac{d(\phi_s)}{dt} \qquad (2.2)$$

وعند دراسة الشعاع من أجل جملة محاور إحداثيات ثنائية مرتبطة بالدوار ω_k =ω عندها تصبح العلاقة على الشكل التالي:

$$V_s e^{J\theta} = R_s i_s e^{J\theta} + \frac{d(\phi_s e^{J\theta})}{dt}$$

$$V_s e^{J\theta} = R_s i_s e^{J\theta} + \frac{d(\phi_s)}{dt} e^{J\theta} + J\,\omega\,\phi_s\, e^{J\theta} \qquad (2.3)$$

حيث إن :

$$\phi_s = L_s\, i_s + \phi_m \qquad (2.4)$$

ϕ_m : الفيض الناتج عن المغانط الموجودة في الدوار والمترابط مع ملفات الثابت.

بتعويض قيمة فيض الثابت المعطى بالعلاقة (2.4) في العلاقة (2.3) نحصل على العلاقة التالية :

$$V_s e^{J\theta} = R_s i_s e^{J\theta} + \frac{d(L_s\, i_s + \phi_m)}{dt} e^{J\theta} + J\,\omega\,(L_s\, i_s + \phi_m)\, e^{J\theta}$$

$$V_s e^{J\theta} = R_s i_s e^{J\theta} + L_s \frac{d(i_s)}{dt} e^{J\theta} + J\,\omega\, L_s\, i_s\, e^{J\theta} + J\,\omega\phi_m\, e^{J\theta} \qquad (2.5)$$

نقسم طرفي العلاقة(2.5) على قيمة $e^{J\theta}$ فنحصل على العلاقة التالية :

$$V_s = R_s i_s + L_s \frac{d(i_s)}{dt} + J\,\omega\, L_s\, i_s + J\,\omega\phi_m \qquad (2.6)$$

بتعويض قيمة شعاعي التيار والجهد بمركباتها الثنائية تصبح العلاقة :

$$V_d + JV_q = R_s(i_d + Ji_q) + L_s \frac{d(i_d+Ji_q)}{dt} + J\,\omega\, L_s\,(i_d + Ji_q) + J\,\omega\phi_m \qquad (2.7)$$

بفصل الجزء التخيلي عن الحقيقي نحصل على معادلتي الجهد للمحرك من أجل محاور إحداثيات ثنائية مرتبطة بالدوار :

$$V_{sq} = R_s\, i_{sq} + L_{sq}\frac{di_{sq}}{dt} + \omega\, L_{sd}\, i_{sd} + \omega\phi_m$$

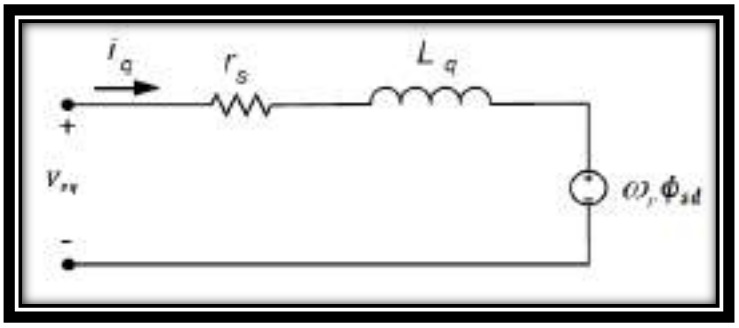
$$V_{sq} = R_s\, i_{sq} + L_{sq}\frac{di_{sq}}{dt} + \omega\phi_{sd} \qquad (2.8)$$

$$V_{sd} = R_s\, i_{sd} + L_{sd}\frac{di_{sd}}{dt} - \omega\, L_{sq}\, i_{sq}$$

$$V_{sd} = R_s\, i_{sd} + L_{sd}\frac{di_{sd}}{dt} - \omega\phi_{sq} \qquad (2.9)$$

2-5- معادلات الجهود للمحرك

من العلاقة (2.8) نرسم الدارة المكافئة للطور q لمحرك متواقت ذي مغانط دائمة :



الشكل (2-1): الدارة المكافئة للطور q

$$V_{sq} = R_s\, i_{sq} + L_{sq}\frac{di_{sq}}{dt} + \omega\, L_{sd}\, i_{sd} + \omega\phi_m$$

$$V_{sq} - (L_{sd}\, i_{sd} + \phi_m).\omega = R_s\, i_{sq} + L_{sq}\frac{di_{sq}}{dt} \qquad (2.10)$$

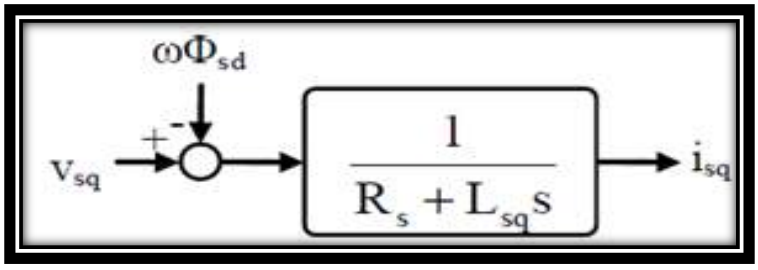
بإجراء تحويل لابلاس على العلاقة (2.10) نحصل على العلاقة التالية :

$$\frac{i_{sq}}{(V_{sq} - e_{sq})} = \frac{1}{L_{sq}s + R_s} \qquad (2.11)$$

حيث إن e_{sq} تمثل القوة المحركة الكهربائية (الاضطراب الداخلي) على المحور q .

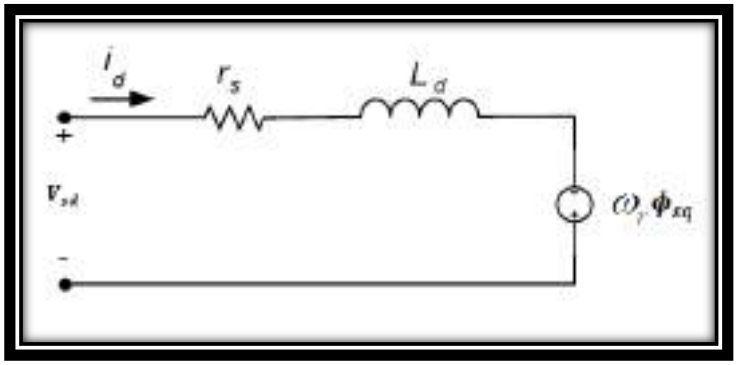
$$e_{sq} = \omega.(L_{sd}\, i_{sd} + \phi_m) \qquad (2.12)$$

بالتالي حصلنا على تابع نقل من المرتبة الأولى دخله الجهد V_{sq} مطروح منه الإضطراب الداخلي وخرجه هو التيار i_{sq} والشكل التالي يبين ذلك :



الشكل (2-2): المخطط الصندوقي المكافئ للطور q

من العلاقة (2.9) نرسم الدارة المكافئة للطور d لمحرك متواقت ذي مغانط دائمة :



الشكل (2-3): الدارة المكافئة للطور d

$$V_{sd} = R_s\, i_{sd} + L_{sd}\frac{di_{sd}}{dt} - \omega\, L_{sq}\, i_{sq}$$

$$V_{sd} + \omega\, L_{sq}\, i_{sq} = R_s\, i_{sd} + L_{sd}\frac{di_{sd}}{dt} \qquad (2.13)$$

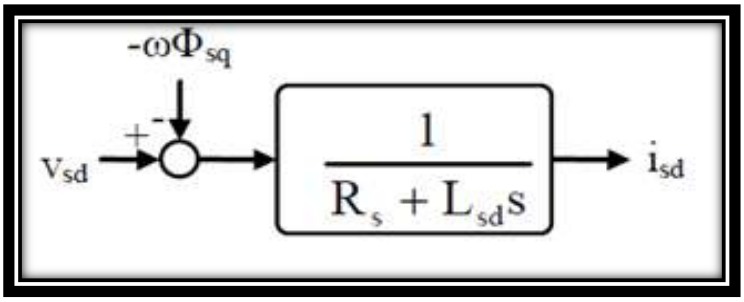
بإجراء تحويل لابلاس على العلاقة (2.13) نحصل على العلاقة التالية :

$$\frac{i_{sd}}{(V_{sd} + e_{sd})} = \frac{1}{L_{sd}s + R_s} \qquad (2.14)$$

حيث إن e_{sd} تمثل القوة المحركة الكهربائية (الاضطراب الداخلي) على المحور **d** .

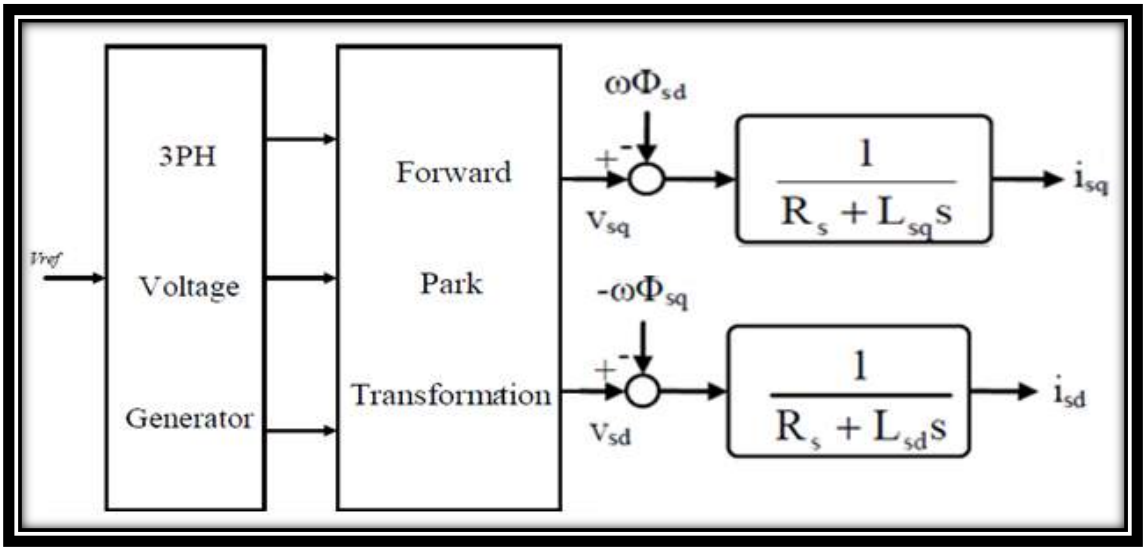
$$e_{sd} = \omega\, L_{sq}\, i_{sq} \qquad (2.15)$$

بالتالي حصلنا على تابع نقل من المرتبة الأولى دخله الجهد V_{sd} مضاف إليه الإضطراب الداخلي والخرج هو التيار i_{sd} والشكل التالي يبين ذلك :



الشكل (2-4): المخطط الصندوقي المكافئ للطور (d)

بالتالي نحصل على علاقة التيارات الثنائية i_{sq} و i_{sd} انطلاقاً من علاقة الجهود V_{sq} و V_{sd} التي حصلنا عليها من الجهود الثلاثية عبر تحويل بارك الأمامي والجهود الثلاثية التي حصلنا عليها من قيمة V_{ref} المرجعي كما نلاحظ في الشكل (2-5) :



الشكل (2-5): المخطط الصندوقي للتيارات Id,Iq

2-6- معادلات العزم الكهرومغناطيسي في جملة محاور إحداثيات دوارة d,q

انطلاقاً من الجهود الثلاثية فإن علاقة الاستطاعة تعطى وفق المعادلة التالية:

$$P_e = V_{sa}\, i_{sa} + V_{sb}\, i_{sb} + V_{sc}\, i_{sc} \qquad (2.16)$$

أما في جملة محاور الإحداثيات الثنائية ستصبح العلاقة :

$$P_e = \frac{3}{2}\left(V_{sd}\, i_{sd} + V_{sq}\, i_{sq}\right) \qquad (2.17)$$

إذا استبدلنا V_{sd} و V_{sq} في هذه العلاقة بعلاقتهم (2.8) و (2.9) نجد ما يلي :

$$P_e = \frac{3}{2}\left(R_s\left(i^2_{sd} + i^2_{sq}\right)\right) + \frac{3}{2}\frac{d}{dt}\left(i_{sd}\phi_{sd} + i_{sq}\phi_{sq}\right) + \frac{3}{2}.\omega\left(i_{sq}\phi_{sd} - i_{sd}\phi_{sq}\right) \qquad (2.18)$$

من العلاقة السابقة نلاحظ وجود ثلاثة حدود :

الحد الأول يمثل الاستطاعة الضائعة في الملفات والحد الثاني يمثل الطاقة المختزنة في الحقل المغناطيسي للدوار في الثغرة الهوائية والحد الثالث يمثل الاستطاعة المتحولة من الشكل الكهربائي إلى الشكل الميكانيكي والذي يمثل الطاقة الميكانيكية على المحرك ومن هذا الحد يتم استنتاج العزم الكهرومغناطيسي كما يلي :

$$P_{em} = \frac{3}{2}\,\omega\left(i_{sq}\phi_{sd} - i_{sd}\phi_{sq}\right) \qquad (2.19)$$

وتعطى علاقة الطاقة الميكانيكية للدوار بالشكل :

$$P_{em} = \omega_m . T_{em} \qquad (2.20)$$

بمساواة العلاقتين (2.19) و (2.20) نحصل على :

$$\omega_m . T_{em} = \frac{3}{2}\,\omega\left(i_{sq}\phi_{sd} - i_{sd}\phi_{sq}\right) \qquad (2.21)$$

إن العلاقة التي تربط بين السرعة الميكانيكية والكهربائية للدوار تعطى بالعلاقة :

$$\omega_r = \frac{p}{2}\,.\,\omega_m \qquad (2.22)$$

P : عدد الأقطاب

بتعويض العلاقة (2.22) في العلاقة (2.21) نجد :

$$\omega_m . T_{em} = \frac{3}{2}\frac{p}{2} . \omega_m (i_{sq}\phi_{sd} - i_{sd}\phi_{sq})$$

$$T_{em} = \frac{3}{2}\frac{p}{2} (i_{sq}\phi_{sd} - i_{sd}\phi_{sq})$$

بالتالي نحصل على علاقة العزم الكهرومغناطيسي للمحرك :

$$T_{em} = \frac{3}{2}\frac{p}{2}(\phi_m i_{sq} + (L_{sd} - L_{sq}) i_{sd} i_{sq})$$

إن العزم الكهرومغناطيسي المولد من المحرك يقسم إلى مركبتان :

1- مركبة التهييج : والتي تتلائم مع المغناطيس الدائم في الدوار وتمثل المركبة الأساسية للعزم بالنسبة للتفاعل بين الفيوض المتولدة من الثابت والدوار.

2- المركبة الردية : والتي تكون سالبة عندما $(L_{sd} < L_{sq})$ وهذه المركبة بسبب أن المغانط مطمورة.

بفرض أن $(L_{sd} = L_{sq})$ أي مغانط سطحية نجد :

$$T_{em} = \frac{3}{2}\frac{p}{2}\phi_m i_{sq} \qquad (2.23)$$

2-7- معادلة السرعة الميكانيكية

تعطى علاقة السرعة الميكانيكية بالعلاقة التالية :

$$J . \frac{d}{dt}\omega_r = \frac{p}{2}(T_{em} - T_L)$$

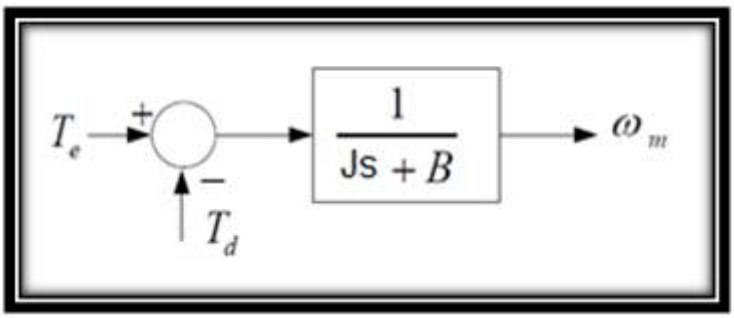
$$J . \frac{d}{dt}\omega_m = (T_{em} - T_d - B\omega_m) \qquad (2.24)$$

حيث إن : $T_L = T_d + B\omega_m$

بعد التعويض وإجراء تحويل لابلاس على هذه العلاقة :

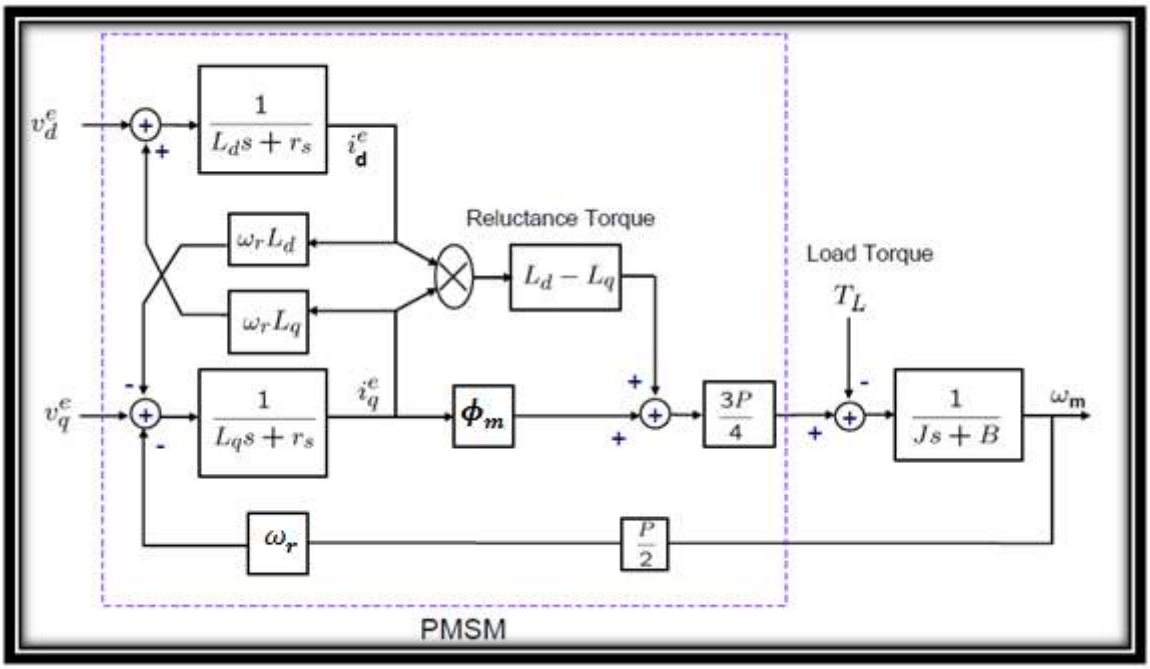
$$\frac{\omega_m}{T_{em} - T_L} = \frac{1}{Js + B} \qquad (2.25)$$

بالتالي حصلنا على تابع نقل من المرتبة الأولى دخله العزم الكهرومغناطيسي T_{em} مطروح منه عزم الحمل T_L والخرج هو السرعة الميكانيكية.



الشكل (2-6): المخطط الصندوقي للجزء الميكانيكي

بالتالي حصلنا على النموذج الرياضي الكامل للمحرك المتواقت ذي المغانط الدائمة والذي سوف نعبر عنه بالشكل (2-7):



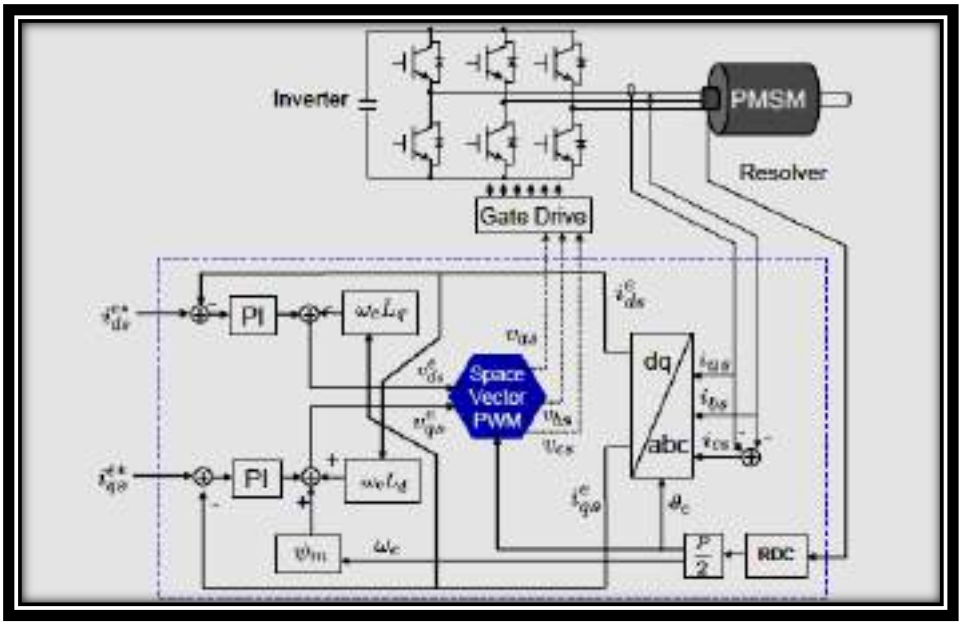
الشكل (2-7): نموذج المحرك المتواقت ذي المغانط الدائمة PMSM

2-8- الخاتمة

في هذا الفصل قمنا بدراسة الموديل الرياضي للمحرك المتواقت ذي المغانط الدائمة وذلك انطلاقاً من معادلة الجهود الثلاثية الطور، حيث قمنا بتحويلها إلى جهود ثنائية دوارة مرتبطة بالدوار عن طريق تحويل بارك الأمامي ثم أوجدنا معادلات التيار انطلاقاً من معادلات الجهود الثنائية ثم أوجدنا معادلات العزم وأوجدنا علاقة السرعة وفي النهاية أوجدنا نموذج المحرك المتواقت ذي المغانط الدائمة PMSM، وبالتالي أصبح بإمكاننا تطبيق هذا النظام على برنامج الماتلاب وتطبيق أنظمة القيادة المختلفة.

الفصل الثالث

أنظمة قيادة المحركات المتواقتة ذات المغانط الدائمة



3-1- مقدمة

تحول المحركات الكهربائية الطاقة الكهربائية إلى حركة ميكانيكية. وفي عصرنا الحالي بات استخدام المحركات الكهربائية أمراً حتمياً مع ظهورها في عدد غير محدود من التطبيقات بدءاً بالتطبيقات المنزلية (الثلاجات، الغسالات، المراوح...) والتجارية (التدفئة، التهوية، التكييف ...) وصولاً إلى التطبيقات الصناعية (المشغلات، خطوط الإنتاج ...).

يدرك القليل من الناس فقط العدد الحقيقي للمحركات الكهربائية الموجودة في العالم، ومدى تأثيرها على البيئة. في الحقيقة، أكثر من عشرين مليون محرك يتم تصنيعها يومياً في أنحاء العالم ! أي ما يعادل سبعة مليارات محرك جديد سنوياً ! لسوء الحظ، فإنَّ الغالبية العظمى من هذه المحركات تكون صغيرة لا تتجاوز استطاعتها بضعة كيلووات، وهذه المحركات تكون عادة ضعيفة المردود إذ يصل مردودها إلى 50% فقط، وهذا يعني أن نصف الاستطاعة المستهلكة في المحرك تتحول إلى عمل مفيد. وهذا يمثل تهديداً للبيئة وزيادة كبيرة في التكاليف، خاصةً إذا علمنا أن نصف الطاقة المستهلكة في العالم تبتلعها المحركات الكهربائية. ومن هنا كان من الضروري تطوير نظريات جديدة للتحكم بالمحركات الكهربائية، فظهرت نظريات التحكم الشعاعي VectorControl التي تتيح تشغيل المحرك بأداءٍ عالٍ عند السرعات والعزوم المختلفة وبأقل قدر ممكن من الطاقة.

في هذا الفصل سوف ندرس نظامي قيادة :

- نظام V/F=constant.
- نظام التحكم بالحقل الموجه FOC.

وسوف نقوم بتمثيل النظامين في بيئة ماتلاب وتطبيقهما على نموذج المحرك المتواقت ذي المغانط الدائمة ومناقشة النتائج التي سيتم الحصول عليها بعد تنفيذ الخوارزميات في البيئة البرمجية المستخدمة.

3-2- المنظمات الإلكترونية المستخدمة في أنظمة القيادة

انتشرت المنظمات الإلكترونية بكثرة ودخلت مع نظم التحكم المتقدمة نظراً لحيوية الدور الذي تلعبه ضمن نظام التحكم ، وأهم هذه المنظمات هو المنظم التناسبي_التكاملي_التفاضلي (PID).

تلعب المنظمات في نظم التحكم الصناعية دوراً أساسياً في أداء النظام وفعاليته، على الرغم من أن معظم المنظمات تعرف على أنها منظمات PID، إلا أن المنظم الأكثر استخداماً في نظم التحكم الصناعية هو المنظم PI.

قديماً، بنيت المنظمات اعتماداً على الدارات الإلكترونية والعناصر التشابهية (كمضخم العمليات) وتطورت مع تطورها، ولكن في الوقت الحالي وبعد ثورة المعالجات التي وفرت قدرات معالجة كبيرة، وبأسعار زهيدة مقارنة مع الدارات الإلكترونية، صار من الممكن بناء المنظم بشكل برمجي ضمن نظام التحكم من دون الحاجة إلى بناءه فيزيائياً، وهذا ما نراه في نظم التحكم الحديثة وخصوصاً نظم التحكم الشعاعي.

يتألف المنظم PID من ثلاثة أقسام :

P: المنظم التناسبي.

I: المنظم التكاملي.

D: المنظم التفاضلي.

ويقوم المنظم بالمهام التالية :

- مقارنة القيمة المقاسة للكميات المنظمة مع القيمة المطلوبة.
- توليد إشارة خرج تتعلق قيمتها بقيمة خطأ الدخل وزمن حدوثه وسرعة تغيره.
- تأمين شكل واستطاعة إشارة الخرج اللازمة لتحريك عنصر التنفيذ.

وبالتالي يؤثر تطبيق المنظم على استجابة النظام الزمنية والتي تتضمن زمن الصعود وزمن الاستقرار وكذلك نسبة تجاوز الهدف ودقة استجابة هذا النظام وسنشرح فيما يلي تأثير بعض الأنواع من المتحكمات على النظام المطبق عليه.

1- المنظم التناسبي

يعبر المنظم التناسبي عن ربح إشارة الخطأ (إشارة الدخل – إشارة الخرج) أي يمكن التحكم بهذا الربح عن طريق إضافة هذا المنظم، وبالتالي فالمنظم التناسبي يؤثر على سرعة النظام (سرعة وصول النظام إلى القيمة المطلوبة).

$$U(t) = k_p\, e(t)$$

حيث:

$\boldsymbol{e = r - y}$: إشارة الخطأ بين إشارة الخرج y والإشارة المرجعية r.

$\boldsymbol{k_p}$: ثابت التناسب (الربح) وهو ثابت المنظم التناسبي.

2- المنظم التكاملي

ينتج هذا المنظم في النظام بإضافة مكامل ويستخدم لإعطاء الدقة اللازمة لنظام التحكم حيث يكون تابع المنظم على الشكل التالي:

$$U(t) = k_i \int_0^t e(t)\ dt$$

حيث:

$\boldsymbol{k_i}$: ثابت المنظم التكاملي.

3- المنظم التناسبي التكاملي

يعطى تابع هذا المنظم بالشكل :

$$U(t) = k(e(t) + \frac{1}{T_i}\int_0^t e(t)\ dt)$$

هذا النظام يؤمن تحقيق سرعة للنظام عن طريق المنظم التناسبي ويؤمن دقة في تصحيح الخطأ عن طريق المنظم التكاملي وبالتالي هو الأكثر استخداماً في أنظمة القيادة.

محاسن ومساوئ استعمال المنظمات في نظام معين

	ايجابيات	سلبيات
المنظم التناسبي	✓ زيادة سرعة النظام أي بمعنى آخر تقليل زمن الصعود. ✓ ينقص مقدار الخطأ بزيادة ثابت التناسب في الحالة المستقرة.	☒ لا يلغي الخطأ في الحالة المستقرة. ☒ يزداد اهتزاز النظام بزيادة ثابت التناسب (انخفاض درجة الاستقرار).
المنظم التكاملي	✓ يؤدي إلى إلغاء الخطأ في الحالة المستقرة من أجل إشارة الخطوة.	☒ يزيد من اهتزاز النظام (انخفاض درجة الاستقرار).

3-3- التحكم وفق مبدأ V/f ثابت

نظرية التحكم V/f

تعتبر طريقة التحكم V/f من الطرق الأولى للتحكم بالسرعة في نظام الحلقة المفتوحة.

يمكن استنتاج القانون الأساسي لنظام V/F انطلاقاً من معادلات جهود المحرك المتواقت المعبر عنها في نظام محاور الإحداثيات الثنائية المتعامدة المرتبطة بالثابت ، حيث تعطى علاقة شعاع جهد الثابت في نظام المحاور المرتبطة بالثابت وفقاً لما يلي :

$$V_s = R_s i_s + \frac{d(\phi_s)}{dt} \qquad (3.1)$$

بإهمال هبوط الجهد على مقاومة الثابت ، وباعتبار أن شكل موجة جهد التغذية للثابت جيبية، يمكن كتابة شعاع جهد الثابت كما يلي :

$$V_s = \frac{d(\phi_s)}{dt} = J\,\omega_s \phi_s \qquad (3.2)$$

حيث إن V_s هو شعاع جهد الثابت في نظام محاور إحداثيات ثنائية متعامدة منسوبة للثابت. من العلاقة السابقة يمكن كتابة علاقة شعاع جهد الثابت بدلالة مطال شعاع فيض الثابت في الحالة المستقرة على الشكل التالي :

$$V_s = \omega_s\, \phi_s \qquad (3.3)$$

وبالتالي نجد :

$$\frac{V_{s\alpha\beta}}{2\pi f_s} = \phi_{s\alpha\beta} = \frac{V_{sabc}}{2\pi f_s} = \phi_{sabc} \qquad (3.4)$$

V_{sabc}، $V_{s\alpha\beta}$ مطال شعاع جهد الثابت في نظام المحاور الثلاثية والثنائية على التوالي.

$\boldsymbol{\phi_{sabc}}$ ، $\boldsymbol{\phi_{sa\beta}}$ مطال شعاع فيض الثابت في نظام المحاور الثلاثية والثنائية على التوالي.

تعبر العلاقة (3.4) عن القانون الأساسي لنظام V/F، وتنص على أن نسبة مطال شعاع جهد الثابت على تردد المقادير الكهربائية في الثابت مساوية لمطال شعاع فيض الثابت.

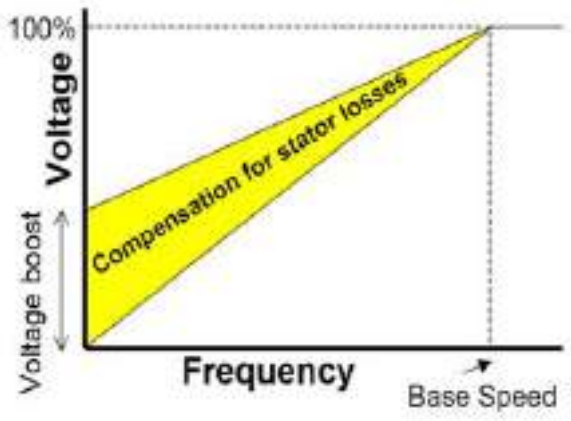
حيث يتم في هذا النظام المحافظة على تدفق مغناطيسي ثابت في المحرك أي المحافظة على إمكانية توليد عزم كهرومغناطيسي ثابت للمحرك من خلال تأمين نسبة ثابتة بين الجهد وتردد الثابت، حيث إنه من خلال تغيير قيمة تردد الثابت يمكن التحكم بسرعة المحرك لكن التغيير في قيمة التردد سوف يغير قيمة الفيض المغناطيسي في الثغرة الهوائية وبالتالي تغيير العزم.

وللمحافظة على قيمة ثابتة لهذا الفيض وبالتالي قيمة ثابتة للعزم يجب المحافظة على نسبة ثابتة بين قيمة جهد وتردد التغذية للجزء الثابت باعتبار أن هبوط الجهد على ممانعات الجزء الثابت مهملة.

إذاً، أي تغير في تردد المقادير الكهربائية في الثابت (وبالتالي تغير في سرعة المحرك) يجب أن يرافقه تغيير مماثل في مطال جهد الثابت، بحيث تبقى النسبة $\boldsymbol{V_s/\omega_s}$ ثابتة.

إن هذه الطريقة تصبح غير مجدية في حال العمل عند ترددات منخفضةٍ (سرعةٍ منخفضةٍ) مع وجود عزم حمولة كبير، والسبب يعود إلى أن هبوط الجهد الناتج عن مرور التيار في ممانعة الثابت يصبح غير مهمل، وبالتالي تصبح المعادلة الأخيرة غير صحيحة، وعند السرعة صفر فإن جهد التغذية كلياً مستهلك بمقاومة الثابت وبالتالي يمكن التغلب على هذه الظاهرة بتعويض هبوط الجهد على ممانعة الثابت، وهذا التعويض يحافظ على الفيض المغناطيسي ثابتاً بحيث أن الجهد الذي ستتم إضافته يعتمد بشكل أساسي على تيارات الثابت التي تتناسب مع العزم الكهرومغناطيسي.

إن هذا الجهد يدعى بجهد التعزيز (Voltge−Boosting) والذي يتم ضبطه من أجل كل قيمةٍ للسرعة مع مراعاة أن العلاقة هي علاقةٌ غير خطية، والشكل التالي يبين منحني توليد جهد التعزيز.



الشكل (3−1) : منحني توليد جهد التعزيز

محاسن و مساوئ طريقة التحكم V/f

المحاسن

a. إمكانية ضبط السرعة بدون حساسات.

b. بسيطةٌ وذات كلفةٍ منخفضة.

c. قويةٌ في حالة غياب التغذية العكسية (في حالة عدم تنظيم السرعة).

المساوئ

a. استجابةٌ بطيئةٌ (الحالة العابرة تستغرق وقت طويل نسبياً).

b. أداءٌ ضعيف.

c. لا يوجد تحكمٌ بالتدفق .

d. لا يوجد تحكمٌ بالسرعة (بل ضبط) أي أن السرعة تضبط ولا يتحكم بها.

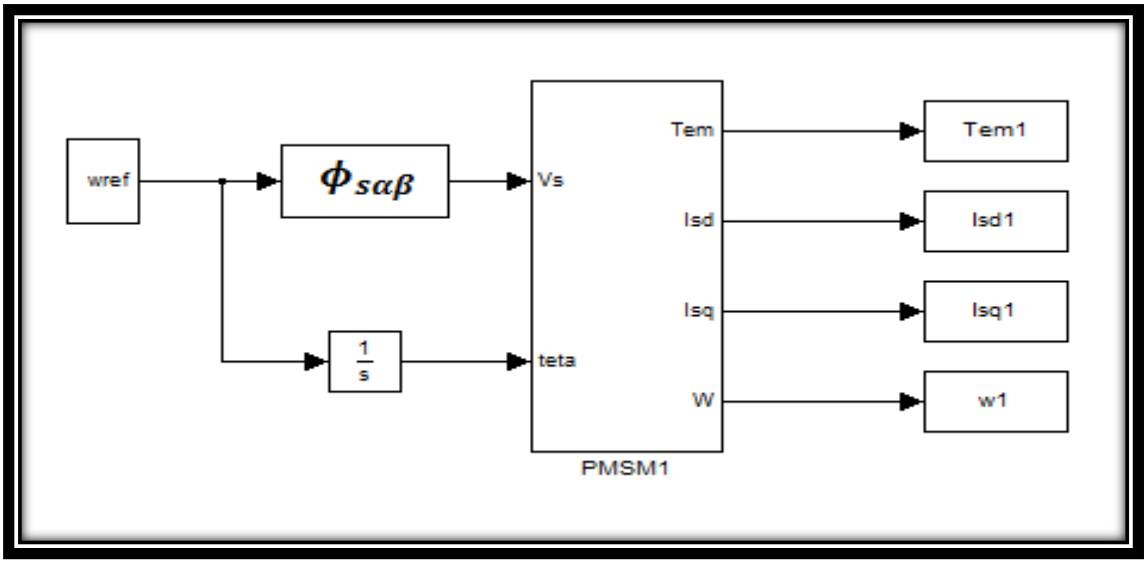
3-4- المحاكاة والنتائج التمثيلية

باستخدام نموذج المحرك المتواقت ذي المغانط الدائمة الذي تم تمثيله باستخدام بيئة ماتلاب سنقوم بضبط سرعة هذا المحرك باستخدام نظام القيادة V/f ثابت، وستتم الدراسة على ثلاث خطوات هي:

1) ضبط سرعة المحرك بدون إضافة جهد داعم.
2) ضبط سرعة المحرك مع إضافة جهد داعم.
3) تنظيم سرعة المحرك باستخدام منظم PI.

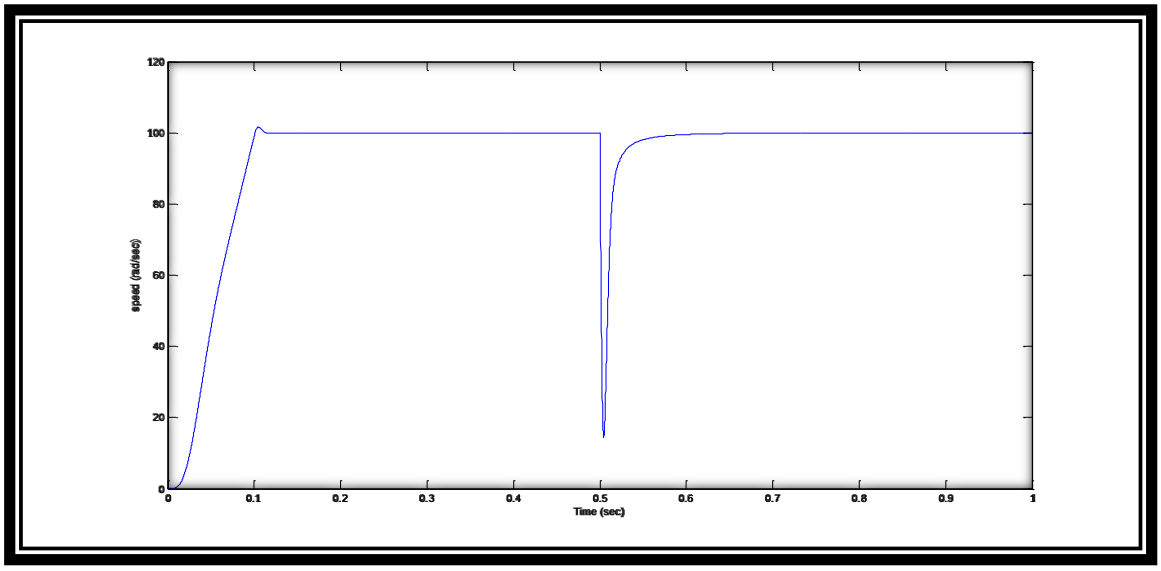
نظام القيادة V/F=constant في الحلقة المفتوحة بدون إضافة جهد داعم

يبين الشكل التالي المخطط الصندوقي لاستخدام نظام القيادة V/F=constant مع محرك PMSM، حيث قمنا بتأمين نسبة ثابتة بين الجهد والتردد من أجل قيمة مرجعية للسرعة.



الشكل (3-2) : تطبيق الجهد والتردد على المحرك في نظام V/F=constant

يتم التحكم بالسرعة مع المحافظة على قيمة ثابتة للفيض المغناطيسي للثابت والتي هي القيمة الاسمية نقوم بإدخال سرعة المحرك بشكل متدرج حتى تصل إلى (rad/sec) 100، ويتم تطبيق الحمل الاسمي على المحرك في اللحظة (sec)0.5.

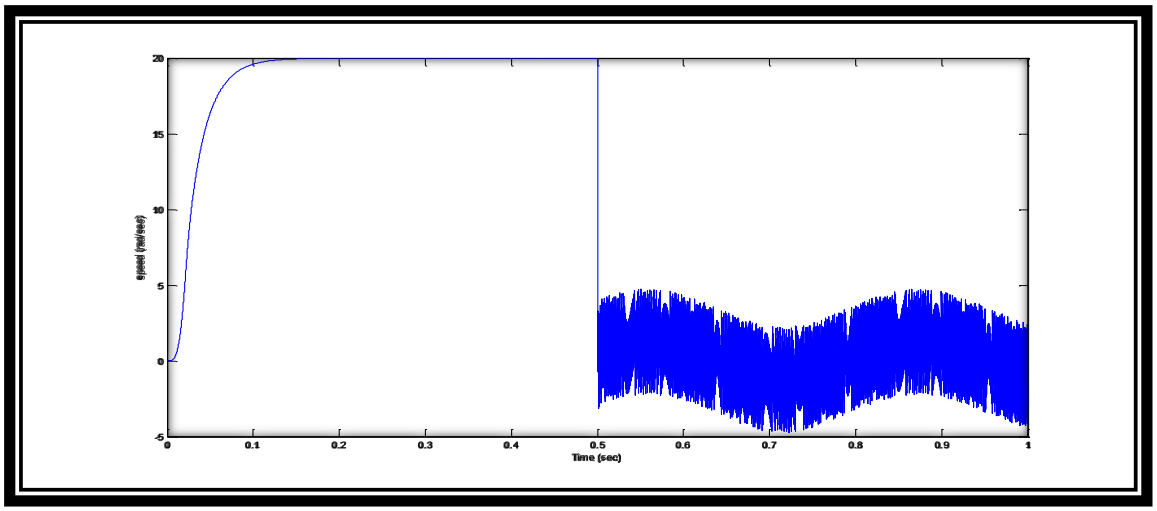


الشكل (3-3) : منحني السرعة

من الشكل نلاحظ أن السرعة عند التحميل عادت على قيمتها المرجعية وذلك كون المحرك المدروس من النوع المتواقت، ونلاحظ أن السرعة انخفضت بشكل كبير لحظة التحميل بسبب عدم تنظيم الفيض في الثابت.

في حال العمل في نظام الحلقة المفتوحة الزاوية تفرض على النظام من القيمة المرجعية للسرعة أما في حالة نظام الحلقة المغلقة فالزاوية تأتي من اشتقاق سرعة المحرك المقاسة وبالتالي لا تسبب الانخفاض الظاهر.

كما مر معنا سابقاً فإنه عند تطبيق سرعات منخفضة فإن تأثير إهمال هبوط الجهد على مقاومات الثابت سوف يكون واضحاً، انظر إلى الشكل (3-4) حيث كانت القيمة المطلوبة لضبط السرعة هي 20(rad/sec) .

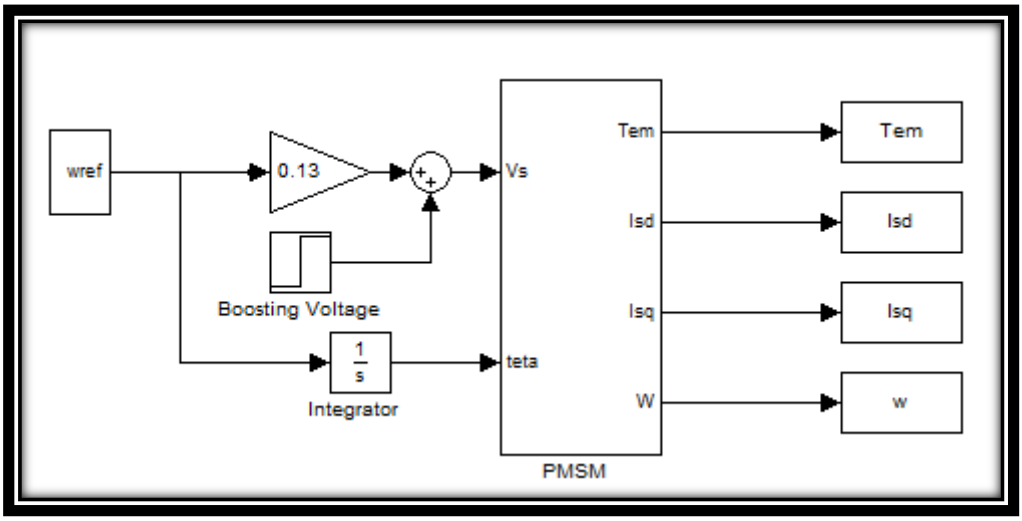


الشكل (3-4) : منحني السرعة عند تطبيق سرعة منخفضة

نلاحظ من الشكل ظهور تأثير هبوط الجهد على سرعة وأداء المحرك عند التحميل وبالتالي لا بد من تعويض هبوط الجهد هذا بإضافة جهد داعم.

نظام القيادة V/F=constantفي الحلقة المفتوحة مع إضافة جهد داعم

يبين الشكل(3-5) المخطط الصندوقي لعملية ضبط سرعة المحرك المتواقت في نظام V/F=constant وذلك مع إضافة جهد داعم لحل مشكلة تأثير هبوط الجهد على مقاومات الثابت عند تطبيق سرعات منخفضة.



الشكل (3-5) : المخطط الصندوقي لضبط سرعة المحرك في نظام V/F=constant مع إضافة جهد داعم

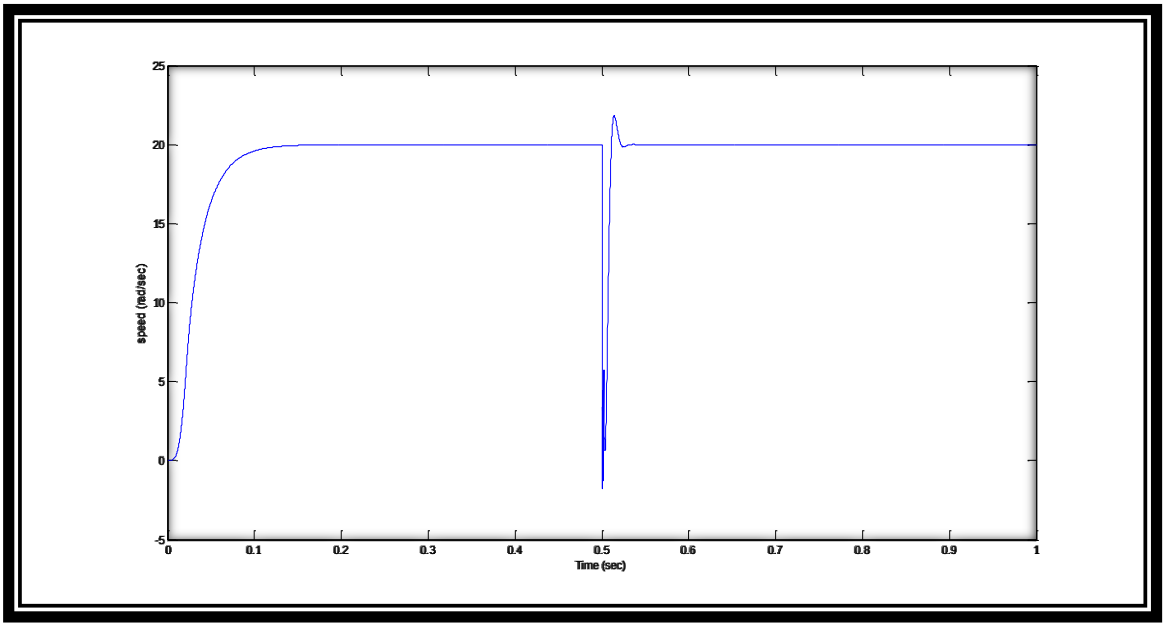
إن إضافة الجهد الداعم لتعويض هبوط الجهد الناتج عن مقاومة الثابت سيكون له تأثير سلبي عند العمل على فراغ (الدخول في الإشباع المغناطيسي) وبالتالي فإن إضافة الجهد الداعم كقيمة ثابتة مهما كانت سرعة دوران المحرك (منخفضة أو مرتفعة) ستسبب لنا المشاكل التالية :

1- عند سرعات دوران منخفضة سيدخل المحرك في الاشباع المغناطيسي بصورة كبيرة عند العمل على حمولات صغيرة.

2- عند سرعات قريبة من السرعة الاسمية سيتم تطبيق جهود أعلى من الجهد الاسمي وسيكون هناك اشباع مغناطيسي ولكن أقل مما هو عليه عند السرعات المنخفضة.

والحل هو أن يتم إدخال قيمة الجهد الداعم بشكل يتعلق مع سرعة الدوران ومع الحمولة، أي كلما أردنا تجاوز مشكلة سنضطر إلى زيادة تعقيد الخوارزمية.

برسم منحني السرعة عند ضبط سرعة المحرك على القيمة 20(rad/sec) نحصل على المنحني التالي :



الشكل (3-6) : منحني السرعة عند تطبيق سرعة منخفضة

يجب أن ننتبه أن هناك حدود معينة لقيمة السرعة المنخفضة التي يمكن تطبيقها على المحرك، لأنه عند قيم منخفضة للسرعة سيكون للجهد أيضاً قيمة منخفضة يمكن عندها أن لا يكون المحرك قادراً على العمل.

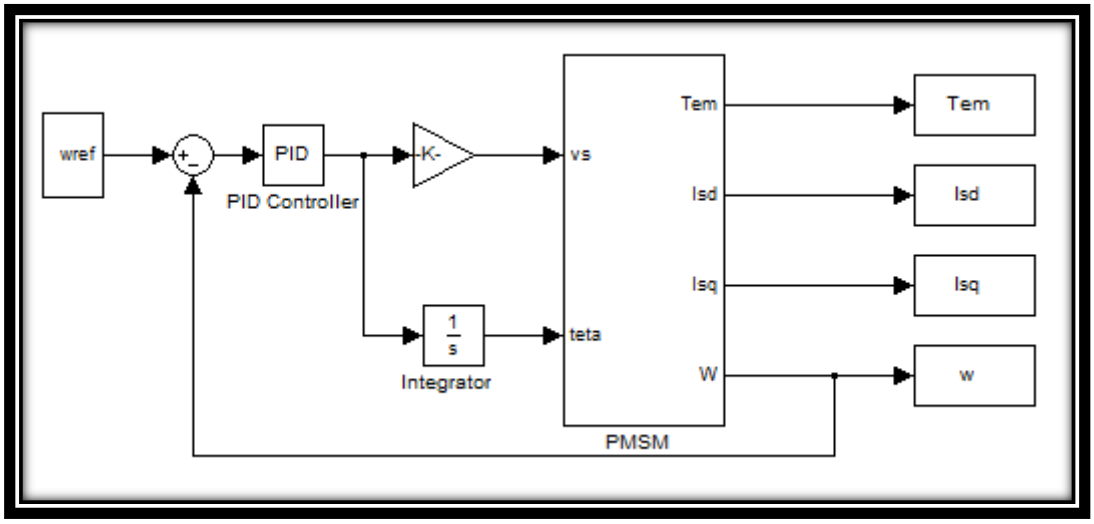
نظام القيادة V/F=constant في الحلقة المغلقة

يمكن استخدام نظام V/F=constant في الحلقة المغلقة وذلك للحصول على سرعة أكبر في تصحيح الخطأ الستاتيكي وذلك باستخدام منظم من نوع تناسبي تكاملي.

ثابت المنظم التناسبي يؤثر على سرعة الاستجابة وعلى الاهتزاز في الحالة المستقرة، وقيمة ثابت المنظم التكاملي تؤثر على قيمة القفزة في الحالة العابرة كما تؤثر عند تطبيق الحمل.

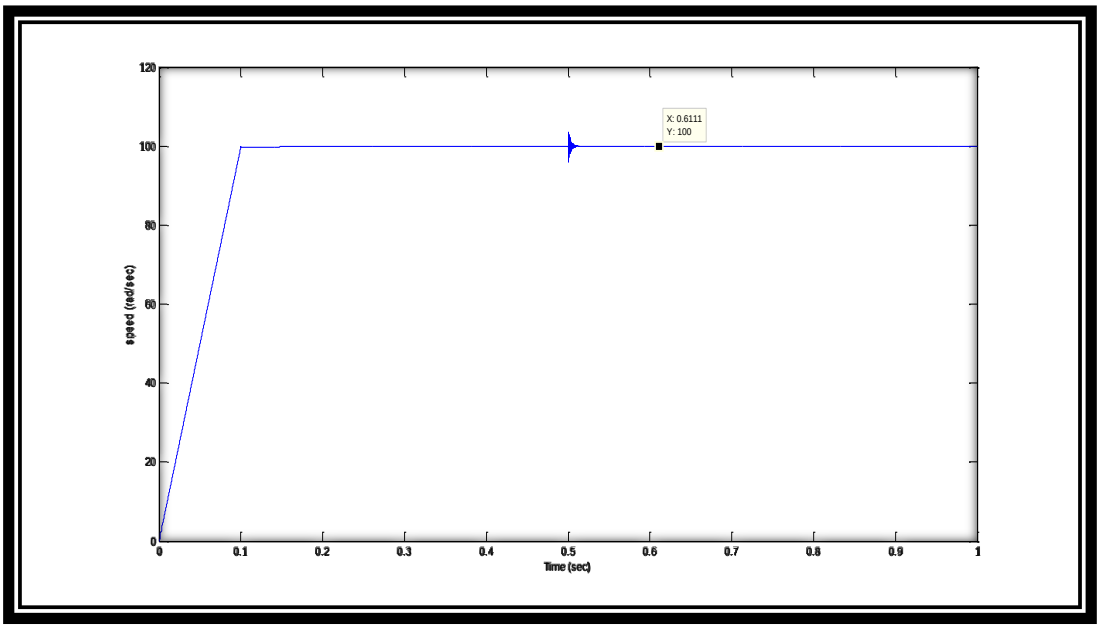
يتم اختيار ثوابت المنظم PI تجريبياً لأننا لم نتمكن من إيجاد تابع الانتقال للنظام، حيث نبدأ في البداية بزيادة قيمة الثابت Kp مع وضع قيمة Ki على قيمة الصفر حتى الحصول على استجابة السرعة بدون تجاوز للقيمة المرجعية ومن ثم نبدأ بزيادة الثابت Ki تدريجياً حتى الحصول على الاستجابة المرغوبة للسرعة.

يبين الشكل (3-7) المخطط الصندوقي لاستخدام نظام القيادة V/F=constant في الحلقة المغلقة باستخدام منظم من نوع PI.



الشكل (3-7) : المخطط الصندوقي لتنظيم سرعة المحرك في نظام V/F=constant باستخدام منظم PI

برسم منحني السرعة عند ضبط سرعة المحرك على القيمة (rad/sec) 100 نحصل على المنحني الموجود في الشكل (3-8).



الشكل (3-8) : منحني سرعة المحرك عند تنظيم السرعة باستخدام منظم PI

التحكم الشعاعي Vector Control

3-5- مقدمة

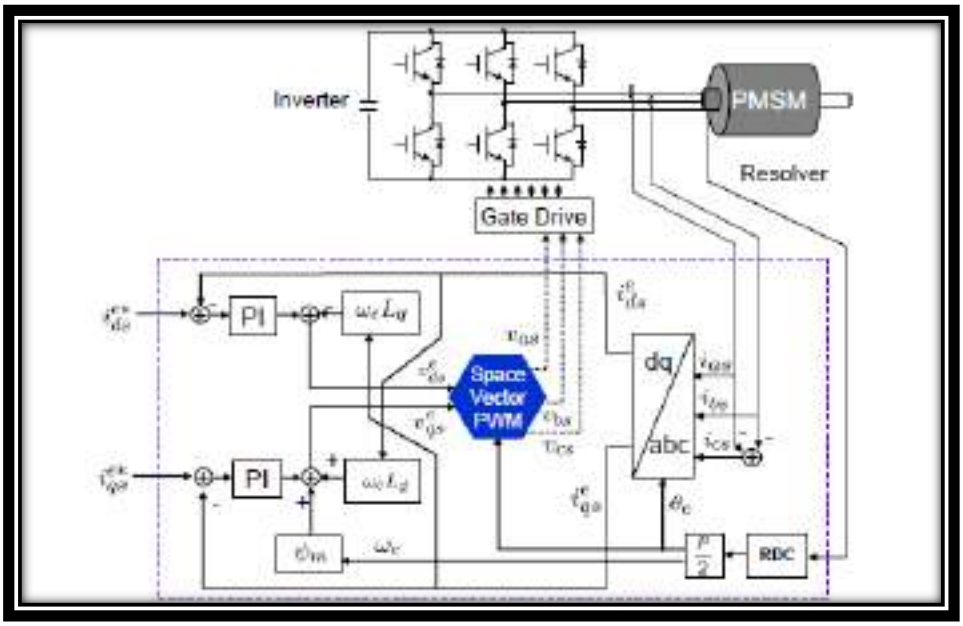
لفهم مبدأ العمل في التحكم بالحقل الموجه سنلقي نظرة سريعة على محرك التيار المستمر ذي التهييج المستقل.

يتم في هذا المحرك التحكم بتغذية الثابت والدوار بشكلٍ مستقل، وتظهر الدراسة الكهربائية للمحرك أنه يمكن التحكم بالعزم وبالفيض بشكلٍ منفصل، حيث إن شدة الحقل المغناطيسي (بكلام آخر: قيمة تيار التهييج) تحدد قيمة الفيض، بينما يحدد التيار المار في ملفات الدوار قيمة العزم المتولد على محور المحرك. والنقطة المهمة هنا أنه يتم التحكم بالتدفق عبر ملفات الثابت (من خلال تيار التهييج) ليبقى الفيض الناتج عن ملفات الدوار متعامداً مع الحقل المغناطيسي للثابت.

وبعكس محرك التيار المستمر فإنه في المحركات المتواقتة يعتمد الفيض والعزم بشكل أساسي على بعضهما البعض.

والهدف من التحكم بالحقل الموجه في المحركات المتواقتة والمحركات التحريضية هو توفير إمكانية فصل التحكم بالعزم المتولد عن التحكم بالفيض المغناطيسي. أي الهدف هو تقليد مبدأ التحكم في محرك التيار المستمر.

وسنستعرض فيما يلي شكلاً يوضح البنية الأساسية لنظام تحكم بتوجيه الحقل.

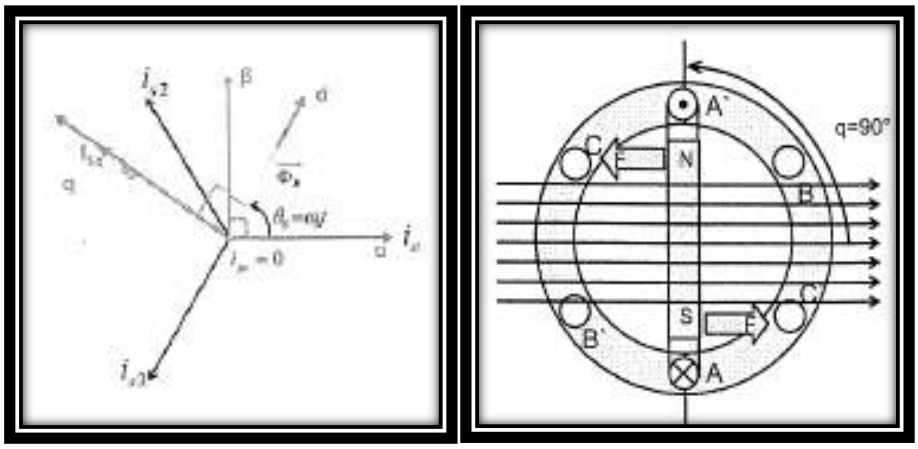


الشكل (3-9) : مخطط لنظام تحكم FOC بشكله الأساسي

3-6- نظام القيادة FOC (Fild Oriented Control)

إن طريقة التحكم بالفيض الموجه هي أفضل اختيار من أجل تطبيقات الجهد المنخفض والسرعات المنخفضة، حيث إنه في هذه الطريقة يمكننا التحكم بالعزم في السرعات المنخفضة ضمن مجال واسع. إن هذا النظام هو نظام تحكم

مغلق مشابه لنظام قيادة محركات التيار المستمر، حيث من خلاله يمكن التحكم بالموضع والسرعة والعزم . في هذا النظام يتم قيادة المحرك عن طريق التحكم بالتيارات في الثابت حيث إن أساس هذه الطريقة هي توجيه تيار الثابت بحيث يولد فيض مغناطيسي يتعامد مع الفيض المغناطيسي المتولد في الدوار وبالتالي الحصول على عزم أعظمي للمحرك أي بمعنى آخر يتم توجيه فيض الثابت وفق المحور q .



الشكل (3-10) : الشكل يبين توجيه فيض الثابت وفق المحور q

التحكم الشعاعي للمحرك المتواقت ذي المغانط الدائمة مشتق من النموذج الديناميكي لهذا المحرك .

تعطى معادلة العزم الكهرومغناطيسي في المحرك المتواقت ذي المغانط الدائمة :

$$T_{em} = \frac{3}{2}\frac{p}{2}\left(M_{df} i_f i_{sq} + \left(L_{sd} - L_{sq}\right) i_{sd} i_{sq}\right) \qquad (3.5)$$

حيث إن الفيض المتشابك بين الدوار والثابت يعطى بالعلاقة :

$$\phi_m = \phi_f = M_{df} i_f \qquad (3.6)$$

يعتبر الفيض في الدوار ثابتاً ما عدا عند تأثير الحرارة. حساسية المغانط للحرارة تقلل كثافة الفيض المتبقي وبالتالي يزداد الفيض مع إرتفاع درجة الحرارة.

وللحصول على عزم أعظمي لدينا الحالات التالية:

1) إذا كانت المغانط سطحية $(L_{sd} = L_{sq})$: فإن الحد الثاني من معادلة العزم لن يكون له أي تأثير على قيمة العزم وبالتالي في هذه الحالة يجب جعل i_{sd} مساوياً للصفر أو بمعنى آخر توجيه شعاع التيار i_s باتجاه المحور q. وبالتالي يصبح Tem أعظمي وتصبح علاقة العزم :

$$T_{em\ \max} = \frac{3}{2}\frac{p}{2}\phi_m i_{sq} \qquad (3.7)$$

2) إذا كانت المغانط مطمورة $(L_{sd} < L_{sq})$: ففي هذه الحالة يجب جعل قيمة التيار i_{sd} سالبة بحيث يصبح للجداء $(i_{sd} i_{sq})$ قيمة سالبة.

3) إذا كان الدوار ملفوف أقطاب بارزة $(L_{sd} > L_{sq})$: فإن العزم الناتج عن اختلاف المحارضات على المحورين الطولاني والعرضاني لن يكون معدوم إنما سيكون له قيمة ففي هذه الحالة يجب جعل قيمة التيار i_{sd} أكبر من الصفر بحيث يصبح للجداء $(i_{sd} i_{sq})$ قيمة موجبة أعظمية.

بما أن المحرك المدروس هو محرك متواقت ذو مغانط دائمة سطحية غير بارزة وهذا ما يوافق الحالة الأولى من حالات الخوارزمية وكما نعلم أن العزم الذي يولده المحرك يتناسب مع التيارات المستجرة، وبالعودة إلى المعادلة (3.5) نلاحظ أن التيار $\boldsymbol{i_{sd}}$ لن يؤثر على قيمة العزم النهائية مهما كانت قيمته وكمردود نهائي للمحرك نلاحظ أن قيمة التيار $\boldsymbol{i_{sd}}$ لن يستفاد منها بل ستزيد من ضياعات جول على المحور العرضاني لذلك ولزيادة مردود المحرك سنقوم بتنظيم التيار $\boldsymbol{i_{sd}}$ إلى الصفر أو بمعنى آخر توجيه شعاع تيار الثابت باتجاه المحور الطولاني ليعطي بذلك المحرك عزماً أعظمياً.

باعتبار أن المداخل هي تيارات ، فإن التيارات الثلاثية هي :

$$\begin{aligned} \boldsymbol{i_{sa}} &= \boldsymbol{i_s\, sin(\omega t + \gamma)} \\ \boldsymbol{i_{sb}} &= \boldsymbol{i_s\, sin(\omega t + \gamma - \frac{2\pi}{3})} \\ \boldsymbol{i_{sc}} &= \boldsymbol{i_s\, sin(\omega t + \gamma + \frac{2\pi}{3})} \end{aligned} \qquad (\mathbf{3.8})$$

حيث $(\boldsymbol{\omega})$ هي السرعة الكهربائية للدوار.

$(\boldsymbol{\gamma})$ هي الزاوية بين الحقل الدوار (المحور d) وشعاع تيار الثابت وتعرف بزاوية العزم .

باستخدام تحويل بارك ، تعطى المركبات q,d لشعاع تيار الثابت في الجملة المرجعية للدوار بالعلاقات:

$$\boldsymbol{i_{sd}} = \boldsymbol{i_s\, cos(\gamma)} \qquad (\mathbf{3.9})$$

$$\boldsymbol{i_{sq}} = \boldsymbol{i_s\, sin(\gamma)} \qquad (\mathbf{3.10})$$

تيارات المحاور q,d هي ثابتة في الجملة المرجعية الدوارة طالما أن $(\boldsymbol{\gamma})$ هي ثابته بالنسبة لعزم الحمل المعطى.

مركبات شعاع جهد الثابت في النموذج q,d هي :

$$\boldsymbol{V_{sd} = R_s\, i_{sd} + L_{sd}\, \frac{di_{sd}}{dt} - \omega\, L_{sq}\, i_{sq}} \qquad (\mathbf{3.11})$$

$$\boldsymbol{V_{sq} = R_s\, i_{sq} + L_{sq}\, \frac{di_{sq}}{dt} + \omega\, L_{sd}\, i_{sd} + \omega \phi_f} \qquad (\mathbf{3.12})$$

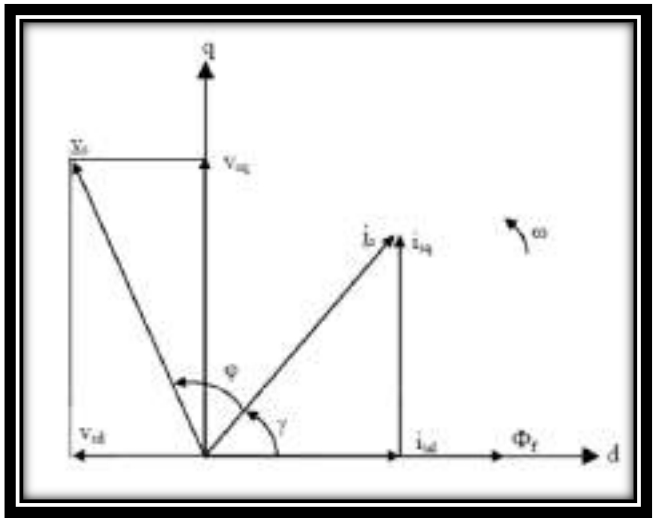
مركبات شعاع جهد الثابت في الحالة المستقرة يعطى بالعلاقة :

$$\boldsymbol{V_{sd} = R_s\, i_{sd} - \omega\, L_{sq}\, i_{sq}} \qquad (\mathbf{3.13})$$

$$\boldsymbol{V_{sq} = R_s\, i_{sq} + \omega\, L_{sd}\, i_{sd} + \omega \phi_f} \qquad (\mathbf{3.14})$$

شعاع جهد الثابت في الحالة المستقرة يعطى بالعلاقة :

$$\boldsymbol{V_s = (R_s - j\omega L_{sq})\, i_s + j\omega (L_{sd} - L_{sq})\, i_d + j\omega\, M_{df} i_f} \qquad (\mathbf{3.15})$$



الشكل (3-11) : الشكل يبين شعاع جهد الثابت

بما أن هذه ثوابت، فهي مشابهة تماماً للمتحرض وتيارات الحقل في المحرك DC ذي التهييج المستقل.

بتعويض تيارات المحاور q,d في معادلة العزم الكهرومغناطيسي نجد :

$$T_{em} = \frac{3}{2}\frac{p}{2}(\phi_f i_s sin(\gamma) + \frac{1}{2}(L_{sd} - L_{sq})i^2{}_s\, sin(2\gamma)) \qquad (3.16)$$

إذا كانت $\gamma = \frac{\pi}{2}$ فيصبح العزم الكهرومغناطيسي :

$$T_{em} = \frac{3}{2}\frac{p}{2}\phi_f i_s \qquad (3.17)$$

هذه المعادلة مشابهة لمعادلة العزم المتولد في المحرك DC والمحرك التحريضي المتحكم به شعاعياً

إذا حافظت زاوية العزم على القيمة $\frac{\pi}{2}$ والفيض بقي ثابتاً فإنه يتم التحكم بالعزم عن طريق مطال تيار الثابت وبالتالي سوف نحصل على أكبر قيمة للعزم عند أصغر قيمة للتيار.

لاحظ أن تدفق الفيض المشترك هو نتيجة لفيض الدوار وفيض الثابت وبالتالي يعطى بالعلاقة :

$$\phi = \sqrt{\phi^2{}_{sd} + \phi^2{}_{sq}} = \sqrt{(L_{sd} i_{sd} + \phi_f)^2 + (L_{sq} i_{sq})^2} \qquad (3.18)$$

إذا كانت $\gamma > \frac{\pi}{2}$ فإن i_{sd} سيصبح سالباً، وبالتالي فإن الفيض المشترك الناتج ينقص، وتعرف بطريقة تضعيف الفيض في أنظمة قيادة المحركات ذات المغانط الدائمة.

تنظيم زاوية العزم يؤمن مجال واسع من الخيارات في نظام قيادة المحرك المتواقت ذي المغانط الدائمة، نذكر بعض طرق التنظيم :

1- التنظيم عند زاوية العزم ثابتة أو (التنظيم عند تيار المحور d صفري).

2- التنظيم عند عامل الاستطاعة الواحدي.

3- التحكم بطريقة العزم المثالي.

4- التحكم في منطقة تضعيف الحقل (تستعمل في السرعات الأعلى من السرعة القاعدية).

ملاحظة: نستطيع تطبيق إحدى هذه الطرق فقط في خوارزمية القيادة بمعنى آخر لايمكن تطبيق أكثر من طريقة في الخوارزمية نفسها.

سوف نقوم بدراسة التنظيم عند زاوية العزم ثابتة.

التنظيم عند زاوية العزم ثابتة (i_{sd}=0 , $\gamma = const$)

إذا كانت $\gamma = \frac{\pi}{2}$ فإن معادلة العزم الكهرومغناطيسي تعطى بالعلاقة :

$$T_{em} = \frac{3}{2}\frac{p}{2}\phi_f i_s$$

يحدد عامل الاستطاعة من المخطط الشعاعي المبين في الشكل (3-11) ومحور الجهود :

$$cos(\varphi) = \frac{V_{sq}}{V_s} = \frac{V_{sq}}{\sqrt{V^2{}_{sd} + V^2{}_{sq}}} \qquad (3.19)$$

جهود المحاور q,d في الحالة المستقرة هي :

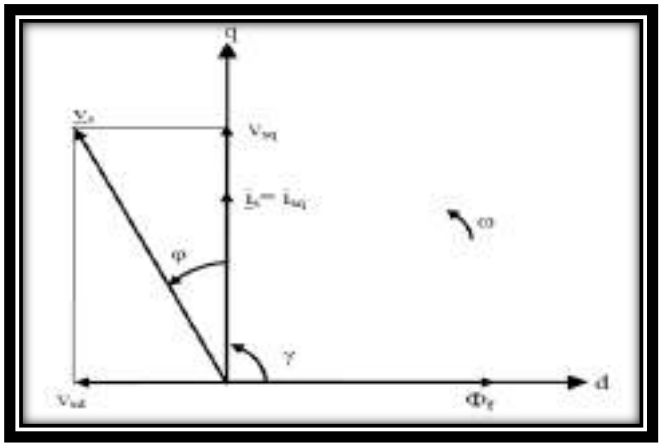
$$V_{sd} = -\omega L_{sq} i_{sq} = -\omega L_{sq} i_s$$

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + \omega\phi_f = R_s i_s + \omega\phi_f$$

$$cos(\varphi) = \frac{R_s i_s + \omega\phi_f}{\sqrt{(-\omega L_{sq} i_s)^2 + (R_s i_s + \omega\phi_f)^2}}$$

$$cos(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{\frac{(-\omega L_{sq} i_s)^2}{(R_s i_s + \omega\phi_f)^2} + 1}} \qquad (3.20)$$

هذه المعادلة توحي بأن عامل الاستطاعة سينخفض بزيادة سرعة الدوار وزيادة تيار الثابت وبالتالي المحرك يستجر استطاعة ردية.



الشكل (3-11) : الشكل يبين توجيه شعاع تيار الثابت باتجاه المحور الطولاني

محاسن هذه الطريقة	مساوئ هذه الطريقة
1 -استجابة جيدة للتحكم بالعزم	1 -تكلفة مرتفعة ونظام قيادة معقد بالمقارنة بنظام V/F
2 -إمكانية التحكم بالسرعة ضمن مجال واسع	2 -الحاجة إلى حساسات لوجود تغذية عكسية في النظام
3 -التحكم بالعزم في كامل مجال السرعة	

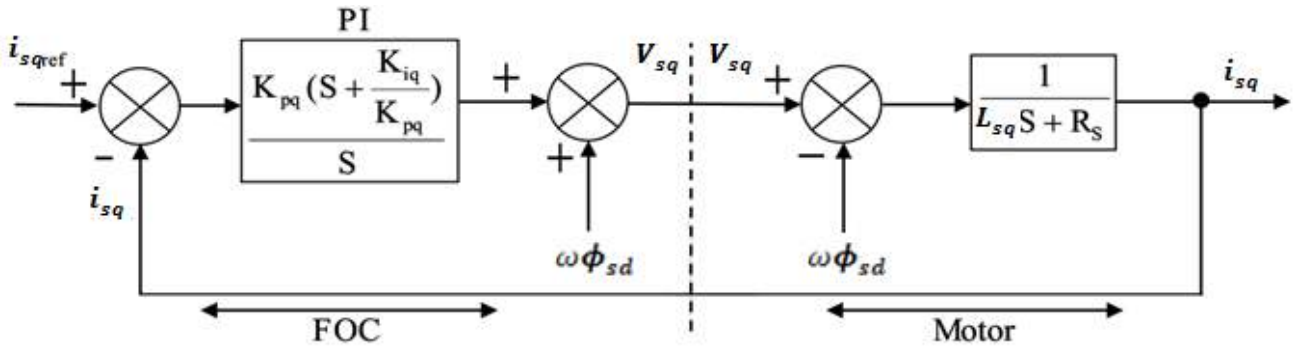
تنظيم السرعة والتيار والموضع في FOC باستخدام منظمات P-PI

3-7- أولاً : تنظيم التيار i_{sq} باستخدام منظم PI

في الشكل (3-12) نقوم بتنظيم التيار i_{sq} وذلك باستخدام المنظم التناسبي التكاملي (Proportiona &Integrator Regolalor) والذي يعطى تابع إنتقاله بالعلاقة التالية :

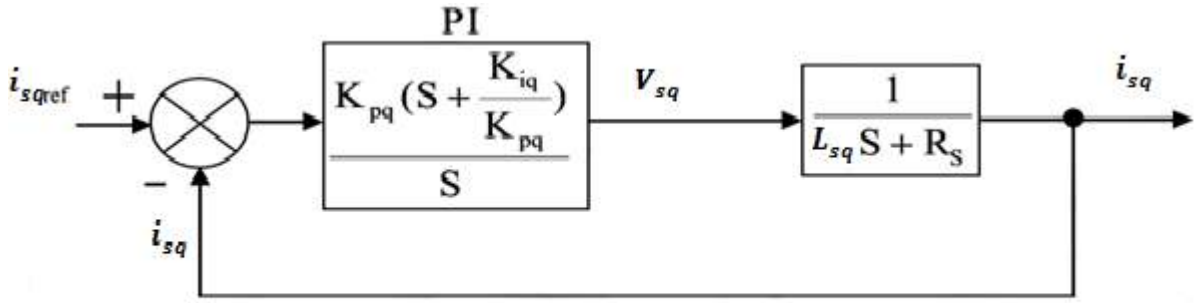
$$\frac{K_{pq}(S+\frac{k_{iq}}{K_{pq}})}{S} \qquad (3.21)$$

وسنقوم بإهمال الاضطراب الداخلي ($\omega\phi_{sd}$)عند إجراء الحسابات ولكن ذلك سيكون على حساب إضافته لخرج المنظم كما في الشكل (3-12) :



الشكل (3-12) : تنظيم التيار i_{sq} في المحرك PMSM بطريقة FOC عن طريق منظم PI

لإيجاد ثوابت المنظم نقوم بإيجاد تابع النقل المكافئ للنظام والمنظم والمبين في الشكل (3-13) لكل من النظام والمنظم معاً وبعد إجراء الحسابات سنجد أن تابع النقل المكافئ للنظام والمنظم معاً كما هو في العلاقة (3-23) :



الشكل (3-13) : تابع النقل المكافئ في حلقة التيار i_{sq} في المحرك PMSM

ويتم الحصول على تابع النقل المكافئ بايجاد تابع نقل الحلقة المغلقة للمخطط الصندوقي المبين بالشكل (3-13):

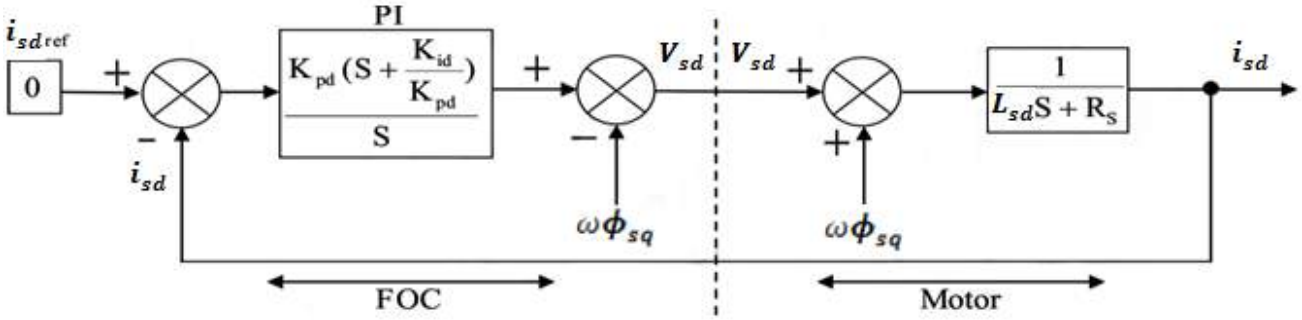
$$\frac{i_{sq}}{i_{sq_ref}} = \frac{\dfrac{K_{pq}.(S+\dfrac{K_{iq}}{K_{pq}})}{S}.\dfrac{\dfrac{1}{L_{sq}}}{S+\dfrac{R_s}{L_{sq}}}}{1+\dfrac{K_{pq}.(S+\dfrac{K_{iq}}{K_{pq}})}{S}.\dfrac{\dfrac{1}{L_{sq}}}{S+\dfrac{R_s}{L_{sq}}}} = \frac{\dfrac{K_{pq}}{S}.\dfrac{1}{L_{sq}}}{1+\dfrac{K_{pq}}{S}.\dfrac{1}{L_{sq}}} = \frac{\dfrac{K_{pq}}{L_{sq}.S}}{1+\dfrac{K_{pq}}{L_{sq}.S}} \qquad (3.22)$$

حيث سنفترض أن $\frac{K_{iq}}{K_{pq}} = \frac{R_S}{L_S}$ وذلك من أجل حذف قطب (جذر المقام) مع صفر(جذر البسط)، نقوم الآن بتوحيد المقامات ونختزل المقام المشترك فنحصل على تابع النقل النهائي كما يلي :

$$\frac{i_{sq}}{i_{sq_ref}} = \frac{\dfrac{K_{pq}}{L_{sq}.S}}{\dfrac{L_{sq}.S+K_{pq}}{L_{sq}.S}} = \frac{K_{pq}}{L_{sq}.S+K_{pq}} \qquad (3.23)$$

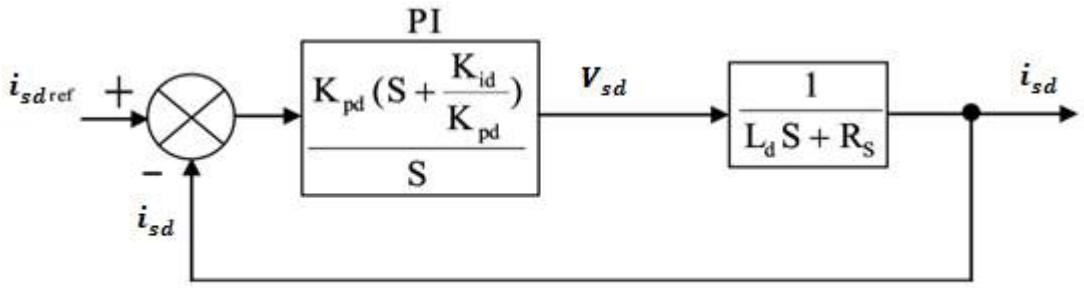
نفرض أيضاً $K_{pq}=30$ وهو الثابت التناسبي للمنظم (وهو يفرض فرض) وبعد ذلك يتم حساب قيمة K_{iq}.

3-8- ثانياً : تنظيم التيار i_{sd} باستخدام منظم PI



الشكل (3-14): تنظيم التيار i_d في المحرك PMSM بطريقة FOC عن طريق منظم PI

بالأسلوب نفسه تماماً سنقوم بتنظيم التيار i_{sd} باستخدام المنظم التناسبي التكاملي (Proportional&Integrator Regolalor) وسنقوم بإهمال الاضطراب الداخلي ($\omega\phi_{sq}$)عند إجراء الحسابات ولكن ذلك سيكون على حساب إضافته لخرج المنظم كما في الشكل (3-14). لإيجاد ثوابت المنظم نقوم بإيجاد تابع النقل المكافئ لكل من النظام والمنظم معاً وبعد إجراء الحسابات سنجد أن تابع النقل المكافئ كما هو في العلاقة (3.24) :



الشكل (3 -15) : تابع النقل المكافئ في حلقة التيار i_{sd} في المحرك PMSM

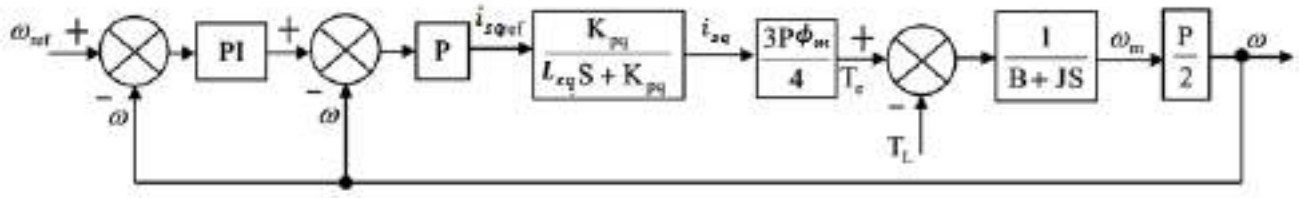
$$\frac{i_{sd}}{i_{sd_ref}} = \frac{\frac{K_{pd}.(S+\frac{K_{id}}{K_{pd}})}{S}.\frac{1}{L_{sd}}}{1+\frac{K_{pd}.(S+\frac{K_{id}}{K_{pd}})}{S}.\frac{1}{S+\frac{R_s}{L_{sd}}}} = \frac{\frac{K_{pd}}{S}.\frac{1}{L_{sd}}}{1+\frac{K_{pd}}{S}.\frac{1}{L_{sd}}} = \frac{\frac{K_{pd}}{L_{sd}.S}}{1+\frac{K_{pd}}{L_{sd}.S}} = \frac{K_{pd}}{L_{sd}.S+K_{pd}} \qquad (3.24)$$

حيث سنعتبر أيضاً مايلي :

1. سنفترض أن $\frac{K_{id}}{K_{pd}} = \frac{R_s}{L_s}$ وذلك من أجل حذف قطب مع صفر.
2. نفرض أيضاً K_{pd}=30 وهو الثابت التناسبي للمنظم وبعد ذلك يتم حساب قيمة K_{iq}.

3-9- ثالثاً : تنظيم التيار والسرعة معاً

حلقة تنظيم التيار هي الحلقة الداخلية أما حلقة تنظيم السرعة فهي الحلقة الخارجية كما في الشكل (3-16)، وبعد حساب ثوابت المنظم التناسبي التكاملي لحلقة تنظيم التيار، سنقوم باستنتاج تابع النقل لحلقة تنظيم السرعة وحساب ثوابت المنظمات المستخدمة (المنظم في هذه الحالة من النوع (P-PI) كما سنجد لاحقاً) .



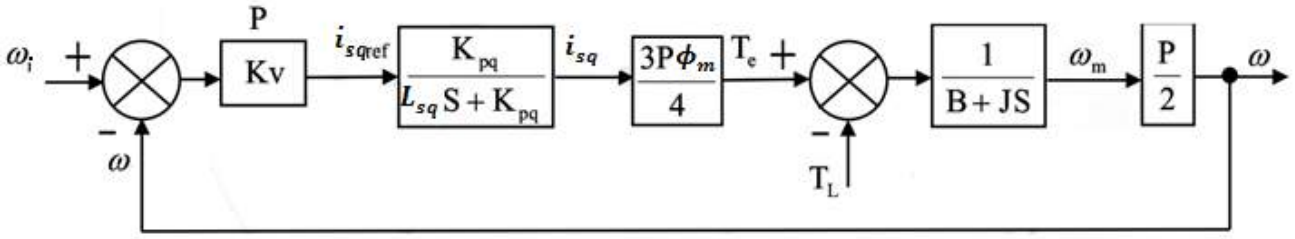
الشكل (3 -16): تنظيم التيار والسرعة معا في المحرك PMSM بطريقة FOC عن طريق منظم P-PI

من الشكل نجد أن تابع النقل الذي ينتج يكون من المرتبة الثانية أي أنه يملك قطبان أحدهما سريع والآخر بطيء وعند استخدام منظم تناسبي تكاملي يجب أن نضمن أن يكون قيمة معامل التخامد(ζ) للنظام أكبر أو يساوي الواحد لذلك نقوم بإضافة منظم تناسبي (P) وذلك للحصول على قطبين متماثلين (عندما $\zeta = 1$) ثم نختار منظم تناسبي – تكاملي الذي يضمن لنا الحصول على خطأ ستاتيكي مساوٍ للصفر والمحافظة على مرتبة النظام .

ملاحظة :الشكل القياسي لتابع النقل من المرتبة الثانية $\frac{G.\omega_n^2}{S^2+2.\zeta.\omega_n.S+\omega_n^2}$ حيث G ربح النظام بالحالة المستقرة

$\omega_n = \frac{1}{\tau_n}$ التردد الزاوي الطبيعي .

1. تنظيم السرعة باستخدام المنظم (P)



الشكل (3 -172): تنظيم التيار والسرعة معا في المحرك PMSM بطريقة FOC عن طريق منظم P-PI

في البداية سنقوم بتنظيم السرعة باستخدام منظم تناسبي فقط وذلك لتقريب أقطاب النظام من بعضها وضمان أن قيمة معامل التخامد للنظام الأكبر أو تساوي الواحد . بعد إجراء الحسابات المناسبة سنصل لتابع النقل التالي :

$$\frac{\omega}{\omega_i}=\frac{K_v\times\frac{K_{pq}}{L_{sq}.S+K_{pq}}\times\frac{3.P.\phi_m}{4}\times\frac{1}{B+J.S}}{1+K_v\times\frac{K_{pq}}{L_{sq}.S+K_{pq}}\times\frac{3.P.\psi_m}{4}\times\frac{1}{B+J.S}} \qquad (3.25)$$

ببساطة نقوم الآن بتوحيد المقامات ونختزل المقام المشترك فنحصل على ما يلي :

$$\frac{\omega}{\omega_i}=\frac{K_v.K_{pq}.3.P^2.\phi_m}{(L_{sq}.S+K_{pq})\times4\times(B+J.S)\times2+K_v.K_{pq}.3.P^2.\phi_m} \qquad (3.26)$$

نقوم بفك الأقواس في المقام و نقسم البسط والمقام على ($8.L_q.J$) فنحصل على العلاقة :

$$\frac{\omega}{\omega_i}=\frac{\frac{K_v.K_{pq}.3.P^2.\phi_m}{8.L_{sq}.J}}{S2+\frac{(L_{sq}.B+K_{pq}.J)}{L_{sq}.J}.S+\frac{K_{pq}.B}{L_{sq}.J}+\frac{K_v.K_{pq}.3.P^2.\phi_m}{8.L_{sq}.J}} \qquad (3.27)$$

وبالتالي يمكننا بسهولة الوصول لتابع النقل النهائي كما في العلاقة :

$$\frac{\omega}{\omega_i}=\frac{\frac{K_v.K_{pq}.3.P^2.\phi_m}{8.L_{sq}.J}}{S^2+\frac{L_{sq}.B+K_{pq}.J}{L_{sq}.J}.S+\frac{8.K_{pq}.B+K_v.K_{pq}.3.p^2.\phi_m}{8.L_{sq}.J}} \qquad (3.28)$$

و نحسب قيمة ω_{n1} (وهي مقدار كهربائي)عندما $\zeta_1 = 1$:

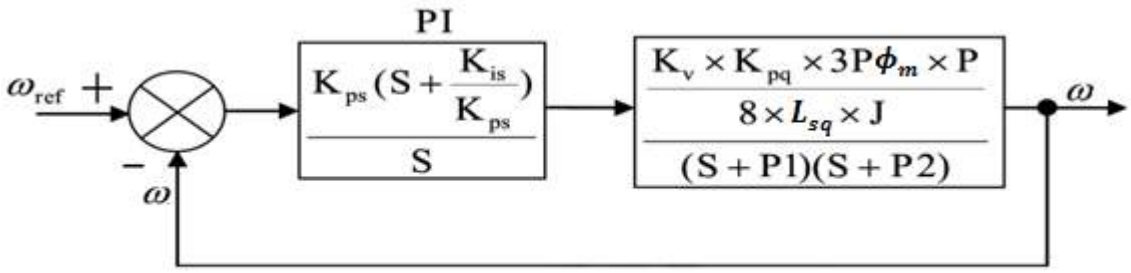
$$2.\zeta 1.\omega_{n1}=\frac{L_{sq}.B+K_{pq}.J}{L_{sq}.J}\Rightarrow \omega_{n1}=0.5\times(\frac{B}{J}+\frac{K_{pq}}{L_{sq}}) \qquad (3.29)$$

ومن ثم نحسب قيمة K_v كما يلي :

$$K_v=\frac{8.L_{sq}.J.{\omega_{n1}}^2-8.K_{pq}.B}{K_{pq}.3.P^2.\phi_m} \qquad (3.30)$$

2. تنظيم السرعة باستخدام المنظم P-PI

بعد تنظيم السرعة باستخدام منظم تناسبي نقوم باضافة منظم تناسبي تكاملي ونقوم بإيجاد تابع النقل للنظام الكلي والمعبر عن عملية تنظيم التيار والسرعة والمخطط الصندوقي في الشكل (3-18) يبين عملية إضافة منظم تناسبي تكاملي إلى النظام السابق والمُنظم بمنظم تناسبي فقط :



الشكل (3 -18) : تابع النقل المكافئ لحلقة تنظيم التيار الداخلية في المحرك PMSM

$$\frac{\omega}{\omega_{ref}}=\frac{\dfrac{K_{ps}(S+\dfrac{K_{is}}{K_{ps}})}{S}\cdot\dfrac{\dfrac{K_v.K_{pq}.3.P^2.\phi_m}{8.L_{sq}.J}}{(S+p_1).(S+p_2)}}{1+\dfrac{K_{ps}(S+\dfrac{K_{is}}{K_{ps}})}{S}\cdot\dfrac{\dfrac{K_v.K_{pq}.3.P^2.\phi_m}{8.L_{sq}.J}}{(S+p_1).(S+p_2)}} \qquad (3.31)$$

نفرض أيضاً $\frac{K_{is}}{K_{ps}}=P_1$ وذلك من أجل حذف صفر مع قطب كما رأينا سابقاً وبالتالي نكتب :

$$\frac{\omega}{\omega_{ref}}=\frac{\dfrac{K_{ps}}{S}\cdot\dfrac{\dfrac{K_v.K_{pq}.3.P^2.\phi_m}{8.L_{sq}.J}}{(S+p_2)}}{1+\dfrac{K_{ps}}{S}\cdot\dfrac{\dfrac{K_v.K_{pq}.3.P^2.\phi_m}{8.L_{sq}.J}}{(S+p_2)}}=\frac{\dfrac{K_{ps}.K_v.K_{pq}.3.P^2.\phi_m}{8.L_{sq}.J}}{S.(S+p_2)+\dfrac{K_{ps}.K_v.K_{pq}.3.P^2.\phi_m}{8.L_{sq}.J}} \qquad (3.32)$$

بسهولة يمكن الحصول على تابع النقل المكافئ للحلقة كما يلي :

$$\frac{\omega}{\omega_{ref}}=\frac{\dfrac{K_{ps}.K_v.K_{pq}.3.P^2.\phi_m}{8.L_{sq}.J}}{S^2+P_2.S+\dfrac{K_{ps}K_v.K_{pq}.3.P^2.\phi_m}{8.L_{sq}.J}} \qquad (3.33)$$

وذلك على اعتبار قيمة $P_2=\omega_{n1}$ ومنه سنستنتج ثوابت المنظم ولكن يجب حساب قيمة ω_{n2} من أجل $\zeta_2=\frac{1}{\sqrt{2}}$:

$$2.\zeta_2.\omega_{n2}=P_2\Rightarrow\omega_{n2}=\frac{\omega_{n1}}{\sqrt{2}}$$

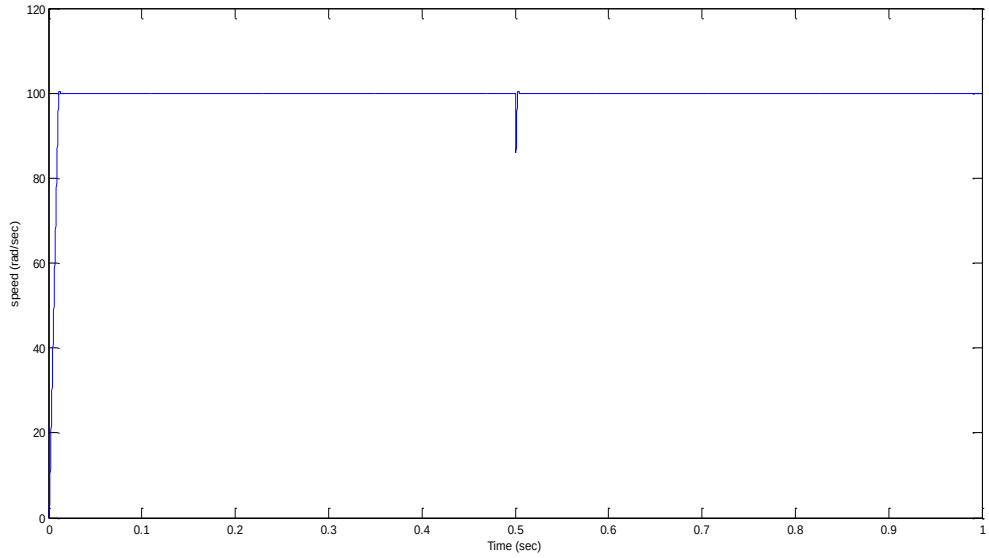
أما قيمة الثابت التناسبي K_{ps} فتستنتج وتعطى كما يلي :

$$K_{ps}=\frac{8.L_{sq}.J.{\omega_{n2}}^2}{K_v.K_{pq}.3.P^2.\phi_m} \qquad (3.34)$$

أما قيمة الثابت التكاملي K_{is} تستنتج ببساطة من العلاقة التالية : $K_{is} = \omega_{n1}.K_{ps}$ حيث تمّ فرض النسبة $\frac{K_{is}}{K_{ps}} = P_2 = \omega_{n1}$ وذلك من أجل حذف صفر مع قطب.

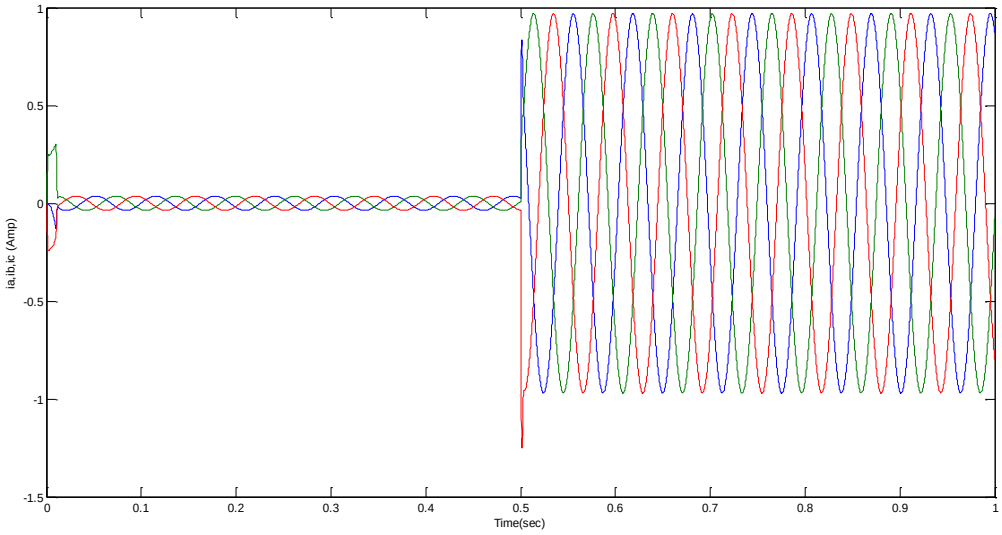
النتائج العملية لتنظيم السرعة والتيار معاً

تنظيم السرعة مع تنظيم التيار :



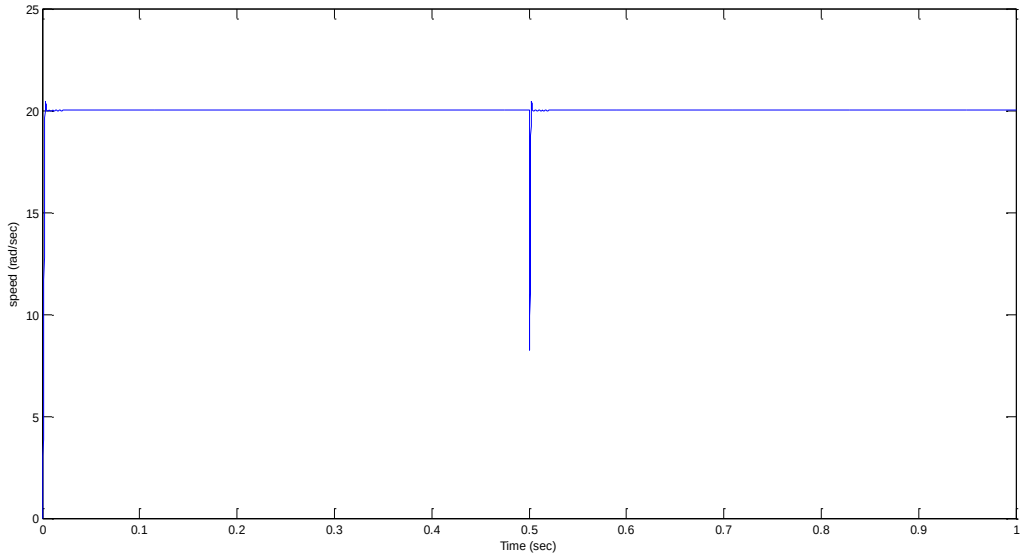
الشكل (3-19) : منحني السرعة للمحرك PMSM في الماتلاب

نلاحظ أن أداء المحرك أصبح أفضل باستخدام خوارزمية FOC عند تنظيم السرعة مع تنظيم التيار، لقد قمنا بوضع مدرج سرعة من أجل التخلص من تيارات الإقلاع العالية.

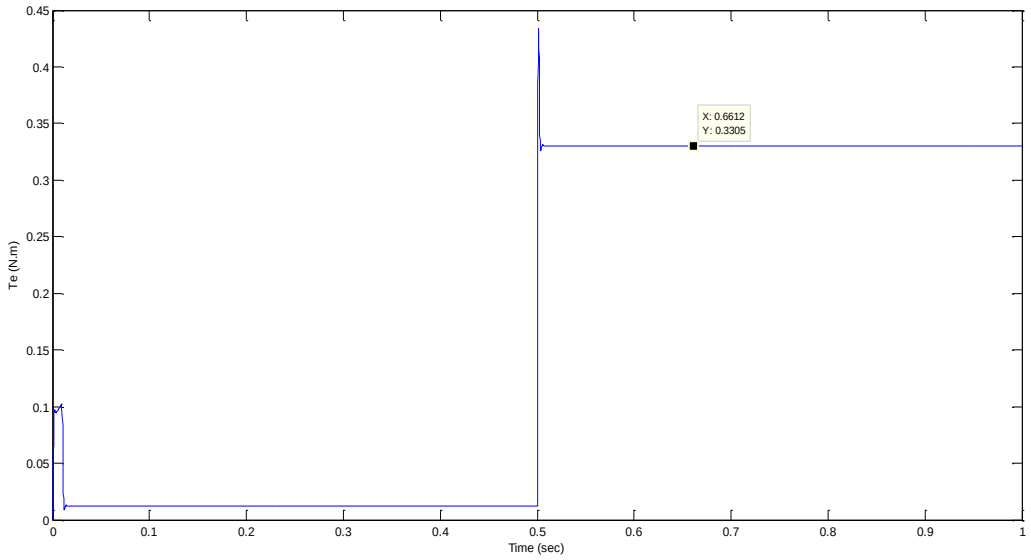


الشكل (3-20) : مميزة التيارات الثلاثية للمحرك PMSM في الماتلاب

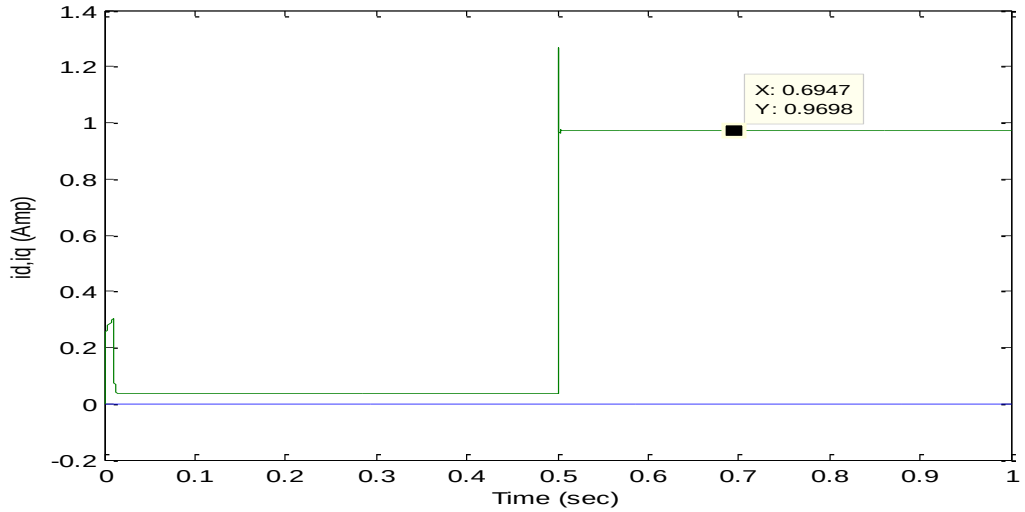
عند العمل على سرعات منخفضة وبالمقارنة بين خوارزمية FOC وخوارزمية V/F نجد أن السرعة عادت إلى التواقت بسرعة كبيرة دون أن ينهار المحرك، حيث أننا لا نحتاج إلى جهد داعم عند العمل على سرعات منخفضة جداً باستخدام طريقة FOC.



الشكل (3-21) : منحني السرعة للمحرك PMSM في الماتلاب وذلك عند سرعات منخفضة باستخدام طريقة FOC

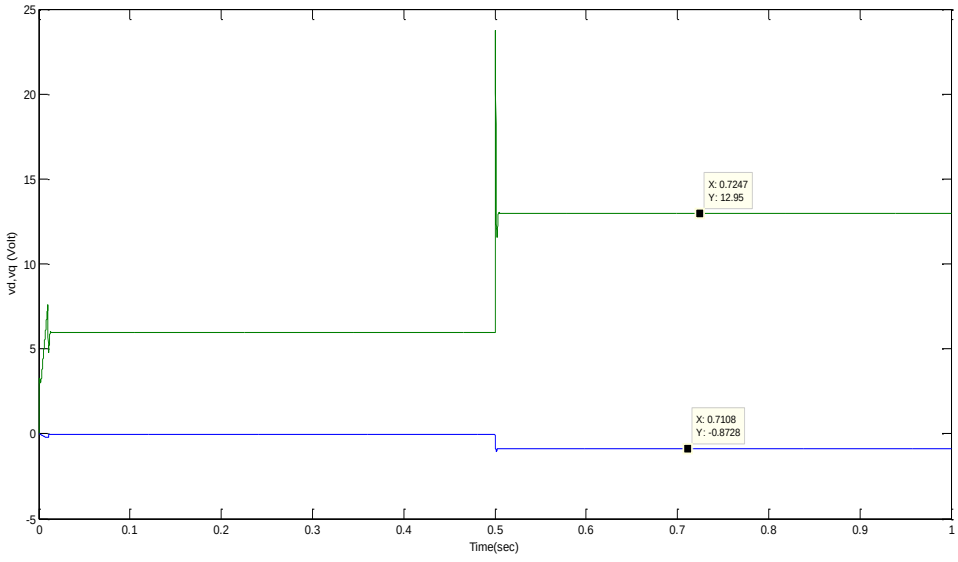


الشكل (3-22) : منحني العزم للمحرك PMSM في الماتلاب



الشكل (3-23) : مميزة التيارات i_{sq}-i_{sq} للمحرك PMSM في الماتلاب

إن التيار Iq يجب أن لا يتجاوز التيار الاسمي للمحرك، ولضمان عدم تجاوز التيار للتيار الاسمي قمنا بوضع Saturation لحلقة تنظيم التيار i_{sq}، حيث أن قيم التيارات محكومة بالسرعة المرجعية المطلوبة.

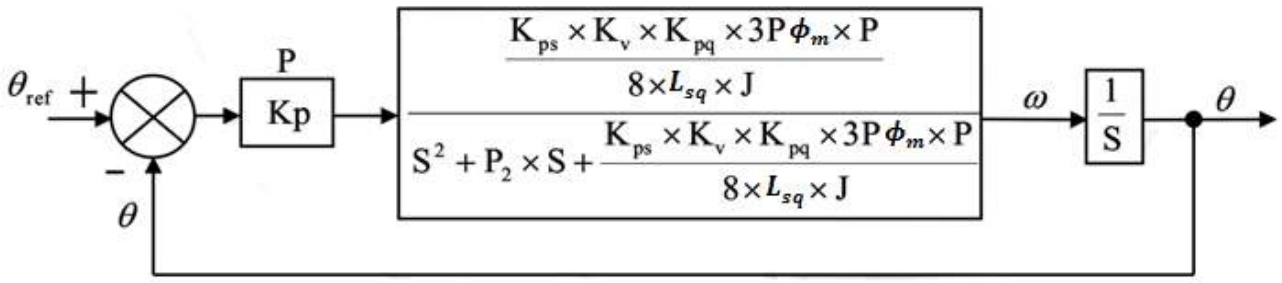


الشكل (3-24) : مميزة الجهدين V_{sq}-V_{sq} للمحرك PMSM في الماتلاب

إن قيمة الجهد الواجب تطبيقه على المحرك يجب أن تكون ضمن الحدود الاسمية للمحرك وأن تكون القالبة (Inverter) قادرة على إعطاء هذا الجهد على الخرج.

3-10- رابعاً : تنظيم الموضع

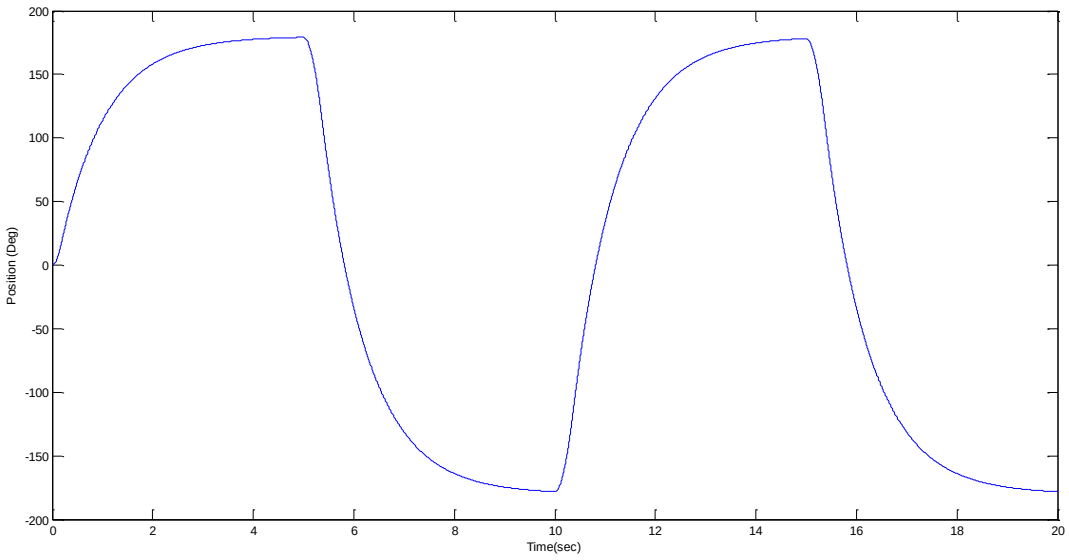
عند تنظيم الموضع سنعتبر حلقة تنظيم السرعة حلقة داخلية بالنسبة لحلقة تنظيم الموضع ولتنظيم الموضع نستخدم منظم تناسبي ونقوم بحساب قيمة الثابت لهذا المنظم تجريبياً والشكل (3-25) يبين المخطط الصندوقي لحلقة تنظيم الموضع :



الشكل (3-25) : حلقة تنظيم الموضع في المحرك PMSM

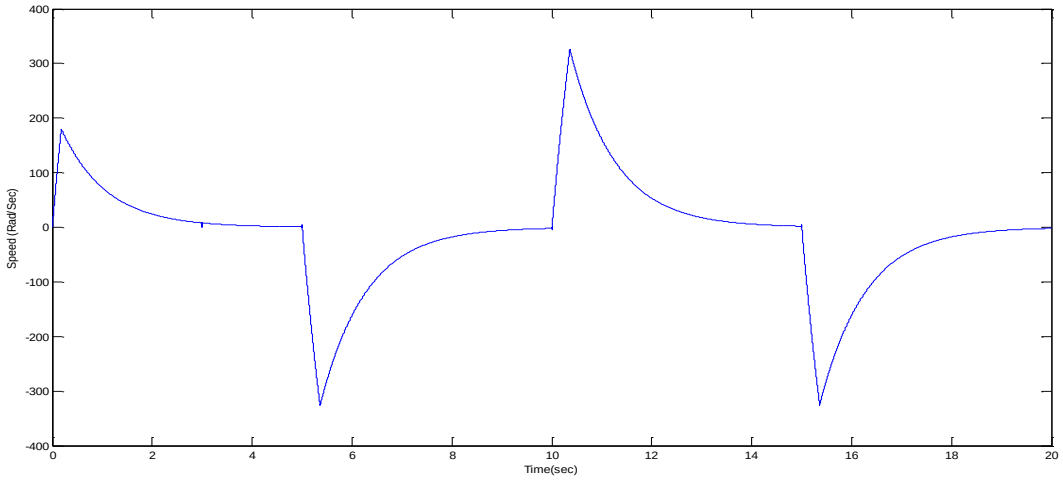
نتائج تنظيم الموضع

من أجل قيمة مرجعية للموضع يتم إدخالها عن طريق مدرج تتراوح قيمته بين (180-→+180) وذلك من أجل قيمة Kp=1 نلاحظ عملية تنظيم الموضع :



الشكل (3-26) : تنظيم الموضع

والشكل (3-27) يوضح سرعة استجابة المحرك لتحقيق الموضع المطلوب :



الشكل **(3-27) : منحني السرعة عند تنظيم الموضع**

الخلاصة : تم في الفقرات السابقة تنظيم كل من التيار ثمّ التيار والسرعة ثم الموضع والتيار والسرعة .

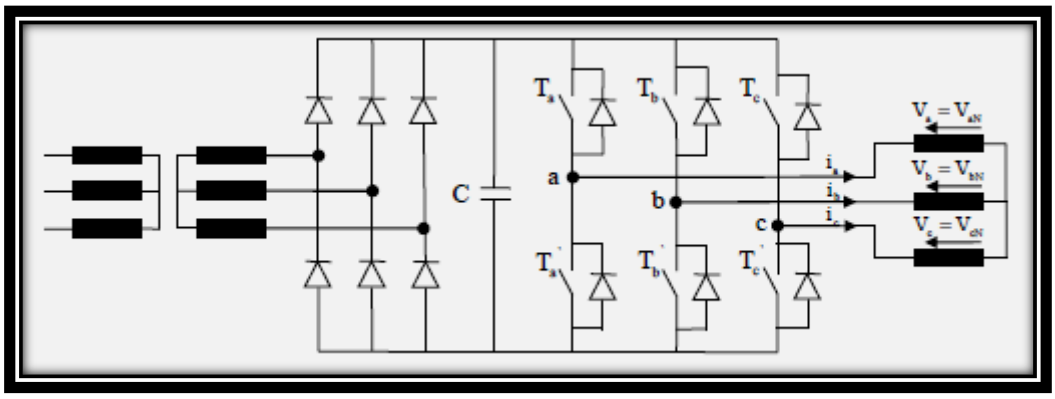
3-11- الخاتمة

وجدنا أن طريقة V/F=constant تعطي معلومة عن الجهد كطويلة ولا تعطي معلومة عن مكان الدوار (زاوية الدوار) لذلك لا تستخدم هذه الطريقة في أنظمة القيادة الحديثة(Inverter) للمحرك المتواقت ذي المغانط الدائمة.

أما طريقة التحكم بالفيض الموجه فتعطي معلومة عن شعاع الجهد المطبق على المحرك كطويلة وزاوية حيث قمنا بتوجيه تيار الثابت وفق المحور q (والمحور d المنطبق على القطب الشمالي للمغانط الدائمة تم توجيهه نحو الصفر) وبالتالي فإنه بمعرفة الزاوية نستطيع توليد العزم الأعظمي المطلوب من المحرك المتواقت، والجدير بالذكر أنه في هذه الخوارزمية يتم الاعتماد بشكل كبير على بارامترات المحرك والتي هي عرضة للتغيير على طول فترة العمل مما يجعل هذا النظام ذو حساسية عالية لتغير بارامترات المحرك بالإضافة إلى أن هذه الخوارزمية تتصف بالصعوبة وأنها تحتاج إلى حساس سرعة دقيق، حيث إن أي خطأ في حساب السرعة سنحصل على زاوية توجيه خاطئة.

الفصل الرابع

التمثيل الرياضي لقالبة الجهد المسؤولة عن تغذية المحرك



4-1- مقدمة

إن أغلب خوارزميات التحكم والقيادة تعتمد على إيجاد إشارة مستمرة مع الزمن للجهد الواجب تطبيقه على المحرك. إن إشارة الجهد هذه لا يمكن تطبيقها على المحرك مباشرة في أي حال من الأحوال لذا لا بد من المرور بمرحلة وسيطة للحصول على هذا الجهد. المرحلة الوسيطة تتكون من عنصرين أساسيين هما قالبة الجهد وخوارزمية تعديل عرض النبضة التي تمكن من الحصول على النبضات الواجب تطبيقها على ترانزستورات القالبة للحصول على صورة الجهد المطلوب من خوارزمية التحكم والقيادة.

إن الجهود الناتجة من خرج منظمات PID لا يمكن تطبيقها مباشرة على المحرك لأن هذه الجهود ذات قيم منخفضة وهي عبارة عن صورة عن الجهود الحقيقية المطلوب تطبيقها لتغذية المحرك، لذلك لا بد من وجود مرحلة وسيطة بين المنظمات والمحرك يتم فيها تغيير مطال هذه الجهود ، ومبدلة الجهد تحقق هذه الغاية حيث نحصل في خرج المبدلة على جهد ذو تردد ومطال متغيرين يمكن التحكم بهما من خلال التحكم بالنبضات المطبقة على المفاتيح الإلكترونية في المبدلة.

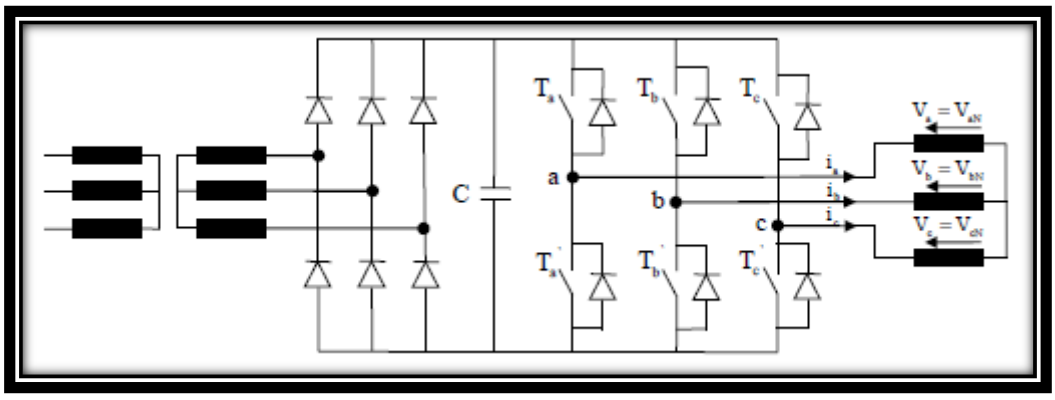
4-2- المبدلة الستاتيكية

تتكون المبدلة بشكل عام من :

1- مقوم جسري ديودي أحادي أو ثلاثي الطور وذلك حسب استطاعة المحرك المراد تغذيته (حيث أن المقوم الجسري الثلاثي الطور يعطي على خرجه جهد أكبر من الجهد على خرج المقوم أحادي الطور) هذا المقوم يحول الجهد المتناوب المطبق على دخله إلى جهد مستمر.

2- قالبة جهد مؤلفة من ستة ترانزستورات (وفي أغلب المبدلات الصناعية تكون الترانزستورات هي من النوع IGBT).

يبين الشكل (4-1) المخطط العام لمبدلة ستاتيكية تغذي محرك تحريضي ثلاثي الطور.

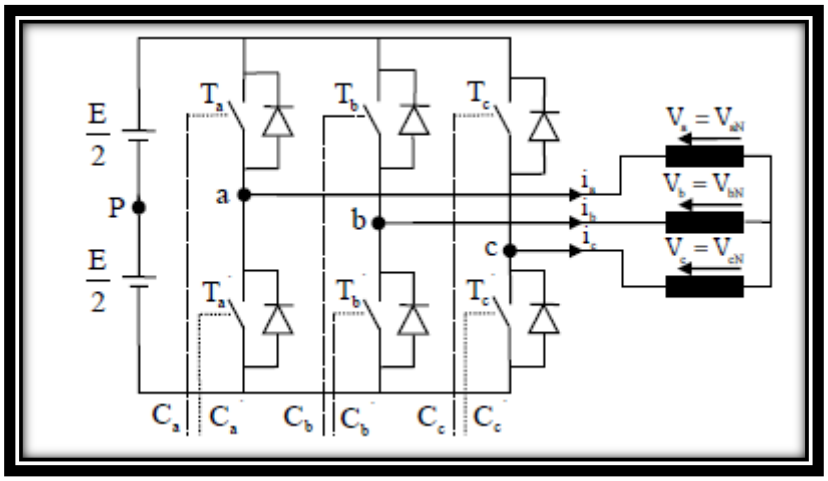


الشكل (4-1): المخطط العام للمبدلة الستاتيكية

4-3- قالبة الجهد

تعمل قالبة الجهد على تحويل الجهد المستمر المقدم من خرج المقوم الجسري إلى جهد متناوب متقطع يستخدم لتغذية المحرك التحريضي، لأن تحليل فورييه لإشارة الجهد المتقطع يبين أن المركبة الأساسية للجهد الناتج عن القالبة هي مركبة جيبية وكما نعلم أن الجهد الذي يطبق على المحرك يفضل أن يكون جيبياً.

يبين الشكل التالي مخطط قالبة الجهد والتي تتكون من ثلاثة أعمدة كل منها يحتوي على ترانزستورين موصول معهما على التفرع والتضاد ديودين مسار حر.



الشكل (4-2): قالبة الجهد ثلاثية الطور

نعتبر أن تبديل القواطع يتم بشكل لحظي بإهمال الزمن الميت، حيث إن الزمن الميت الفعلي يأخذ قيمة ضمن المجال μs [2→ 5] وهي قيمة صغيرة جداً مقارنة مع دور التقطيع الأعظمي للقالبة ولذلك يمكن إهمالها.

في الشكل (4-2) :

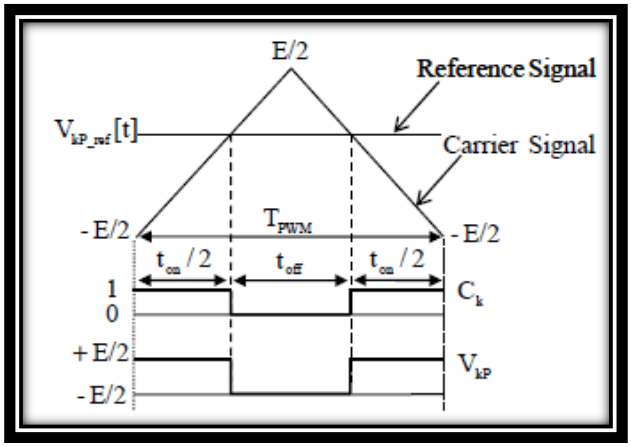
- تشير E إلى الجهد المستمر المطبق على دخل القالبة وقد تم تقسيم المنبع إلى قسمين باستخدام النقطة الوهمية P وذلك لتسهيل الدراسة حيث سيتم اعتبار P نقطة مرجعية.
- $C_k; k = a,b,c$ عبارة عن تابع ثنائي يمثل حالة الترانزستورات في العمود k.
- لتجنب حدوث دارة قصيرة في قالبة الجهد يجب أن يكون أحد الترانزستورين الموجودين في العمود الواحد في حالة وصل الترانزستور الآخر في حالة فصل وبالتالي فإن:

$C_k = \bar{C}_k$ أي $\bar{C}_k$ هو متمم C_k ، حيث يعرف التابع C_k كما يلي :

إذا كان الترانزستور العلوي في حالة وصل (تمرير) $C_k = 1$.

إذا كان الترانزستور العلوي في حالة فصل (عدم تمرير) $C_k = 0$.

يتم تحديد لحظة التبديل وبالتالي الحصول على النبضات الواجب تطبيقها على ترانزستورات القالبة باستخدام طريقة تعديل عرض النبضة، التي تعتمد على مقارنة إشارة مرجعية (Signal Reference) مع إشارة حاملة (Carrier-Signal) والشكل (4-3) يبين مبدأ عمل طريقة تعديل عرض النبضة.



الشكل (4-3): مبدأ عمل طريقة تعديل النبضة

من الشكل (4-3) نجد أنه تم مقارنة إشارة الجهد المرجعي مع إشارة مثلثية وكان الناتج هو C_k النبضات الواجب تطبيقها على الترنزستورات، ومنه تم الحصول على قيمة الجهد على خرج القالبة، وذلك كما يلي:

تعطى علاقة جهود الطور V_{kp} على خرج القالبة بالنسبة للنقطة المرجعية P بالشكل التالي :

$$V_{kp} = C_k E - \frac{E}{2} \qquad ; k = a, b, c \qquad (4.1)$$

والقيمة الوسطية لجهود الطور V_{kp} في اللحظة (t) للنقطة المرجعية P خلال دور تعديل عرض النبضة T_{pwm} تعطى إعتماداً على الشكل (4-3) بالعلاقة التالية :

$$V_{kp-av}[t] = \frac{1}{T_{pwm}} \frac{E}{2} \left(t_{on} - \left(T_{pwm} - t_{on} \right) \right) = E\alpha_k[t] - \frac{E}{2} \qquad (4.2)$$

حيث $\alpha_k[t] = \frac{t_{on}}{T_{pwm}}$ نسبة تمرير الترانزستور العلوي في العمود K وتأخذ القيم التالية :

$$0 \le \alpha_k[t] \le 1$$

من العلاقة (4-2) نجد أن :

$$\alpha_k[t] = \frac{V_{kp-av}[t]}{E} + \frac{1}{2} \qquad (4.3)$$

لإيجاد جهود الطور المطبقة على المحرك والمأخوذة بالنسبة للنقطة المرجعية N نقوم بما يلي :

باعتبار أن الحمل متوازن ، فإن :

$$V_{aN} + V_{bN} + V_{cN} = 0$$

باستخدام جهود الخط نجد :

$$V_{aN} = -(V_{bN} + V_{cN})$$
$$V_{aN} = -(V_{ba} + V_{aN} + V_{ca} + V_{aN})$$

$$V_{aN} = -(V_{ba} - V_{Na} + V_{ca} - V_{Na}) = V_{ba} - V_{ca} - 2V_{aN}$$
$$V_{aN} = \frac{1}{3}(V_{ab} - V_{ca})$$

بكتابة العلاقة السابقة بالنسبة للنقطة المرجعية الوهمية P نجد :

$$V_{aN} = \frac{1}{3}(V_{ap} - V_{bp} - V_{cp} + V_{ap})$$

$$V_{aN} = \frac{1}{3}(2V_{ap} - V_{bp} - V_{cp}) \qquad (4.4)$$

وبطريقة مشابهة نوجد V_{bN}، V_{cN} :

$$V_{bN} = \frac{1}{3}(2V_{bc} - V_{ab}) = \frac{1}{3}(2V_{bp} - V_{cp} - V_{ap}) \qquad (4.5)$$

$$V_{cN} = \frac{1}{3}(2V_{ca} - V_{bc}) = \frac{1}{3}(2V_{cp} - V_{ap} - V_{bp}) \qquad (4.6)$$

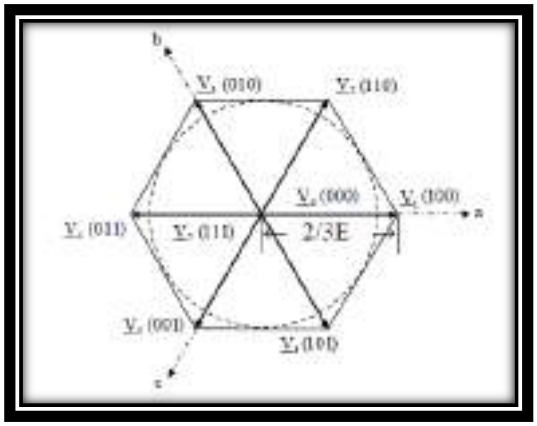
بتعويض العلاقة (4.1) في العلاقة (4.6),(4.5),(4.4) نجد :

$$V_{aN} = \frac{1}{3}E(2C_a - C_b - C_c) \qquad (4.7)$$

$$V_{bN} = \frac{1}{3}E(2C_b - C_a - C_c) \qquad (4.8)$$

$$V_{cN} = \frac{1}{3}E(2C_c - C_b - C_a) \qquad (4.9)$$

بحسب قيم التوابع C_k المعبرة عن حالة الترانزستورات في القالبة فإن العلاقة (4.7) تعطي ثمانية أشعة جهد من بينهما شعاعيين صفريين وستة أشعة تمتلك المطال نفسه وتكون مزاحة عن بعضها بزاوية 60 درجة كما في الشكل التالي :



الشكل (4-4): أشعة الجهد المتولدة على خرج القالبة تبعاً لحالة ترانزستورات القالبة

والجدول التالي يبين أشعة الجهد المتولدة على خرج القالبة تبعاً لحالة المفاتيح الإلكترونية في القالبة :

V_k	C_a	C_b	C_c	V_{aN}	V_{bN}	V_{cN}	V_{aP}	V_{bP}	V_{cP}	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}
V_0	0	0	0	0	0	0	$-E/2$	$-E/2$	$-E/2$	0	0	0
V_1	1	0	0	$2E/3$	$-E/3$	$-E/3$	$E/2$	$-E/2$	$-E/2$	E	0	$-E$
V_2	1	1	0	$E/3$	$E/3$	$-2E/3$	$E/2$	$E/2$	$-E/2$	0	E	$-E$
V_3	0	1	0	$-E/3$	$2E/3$	$-E/3$	$E/2$	$E/2$	$-E/2$	$-E$	E	0
V_4	0	1	1	$-2E/3$	$E/3$	$E/3$	$-E/2$	$E/2$	$E/2$	$-E$	0	E
V_5	0	0	1	$-E/3$	$-E/3$	$2E/3$	$-E/2$	$-E/2$	$E/2$	0	$-E$	E
V_6	1	0	1	$E/3$	$-2E/3$	$E/3$	$E/2$	$-E/2$	$E/2$	E	$-E$	0
V_7	1	1	1	0	0	0	$E/2$	$E/2$	$E/2$	0	0	0

الشكل (4-5): حالات ترانزستورات القالبة وجهود خرج القالبة الناتجة عن تطبيق تلك الحالات

وتعطى القيمة الوسطية في اللحظة t لجهود الطور على خرج القالبة بالنسبة للنقطة المرجعية N خلال دور تعديل عرض النبضة T_{pwm} كما يلي :

$$V_{aN_av}[t] = \frac{1}{3}E(2\alpha_a[t] - \alpha_b[t] - \alpha_c[t]) \qquad (4.10)$$

$$V_{bN_av}[t] = \frac{1}{3}E(2\alpha_a[t] - \alpha_b[t] - \alpha_c[t]) \qquad (4.11)$$

$$V_{cN_av}[t] = \frac{1}{3}E(2\alpha_a[t] - \alpha_b[t] - \alpha_c[t]) \qquad (4.12)$$

من العلاقة (4.2) يمكن أن نكتب :

$$\alpha_k[t] = \frac{1}{E}V_{kP_av}[t] + \frac{1}{2} \qquad (4.13)$$

حسب كيرشوف لدينا :

$$V_{kP_av}[t] = V_{kN-av}[t] + V_{NP}[t]$$

يمكن إذاً كتابة العلاقة (4.13) كما يلي :

$$\alpha_k[t] = \frac{1}{E}(V_{kN_av}[t] + V_{NP}[t]) + \frac{1}{2} \qquad (4.14)$$

من العلاقة نجد أنه عند اعتبار $V_{NP}[t] = 0$ ، تكون القيمة العظمى لجهود الطور التي يمكن توليدها على خرج القالبة نسبة للنقطة N تساوي $E/2$.

4-4- التحكم بقالبة الجهد

إن الطرق الحديثة لقيادة المحرك المتواقت (التحكم بالفيض الموجه ، التحكم المباشر بالعزم ،....) تقود إلى استراتيجيتين مختلفتين للتحكم بقالبة الجهد وهما :

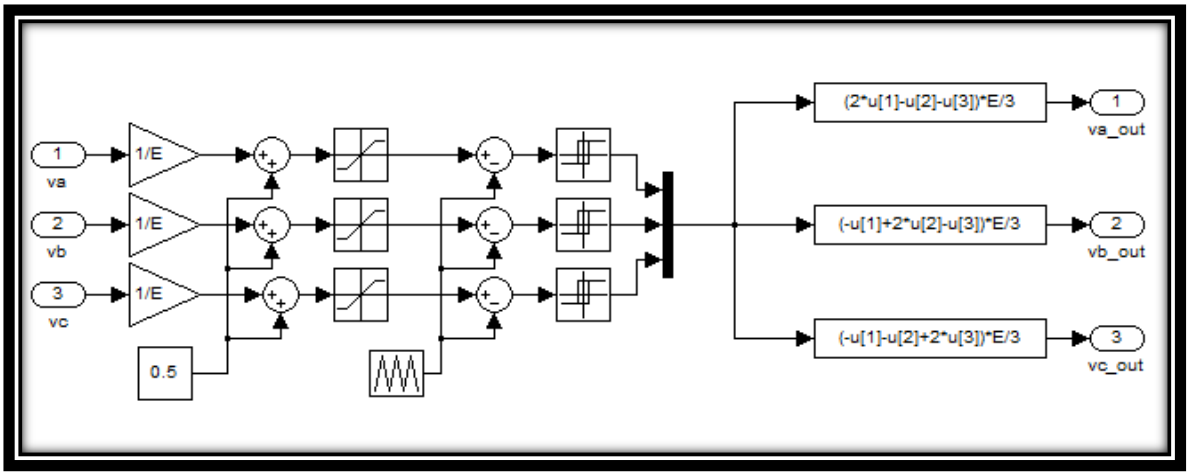
1- القيادة غير المباشرة لقالبة الجهد.

2- القيادة المباشرة لقالبة الجهد.

القيادة غير المباشرة لقالبة الجهد

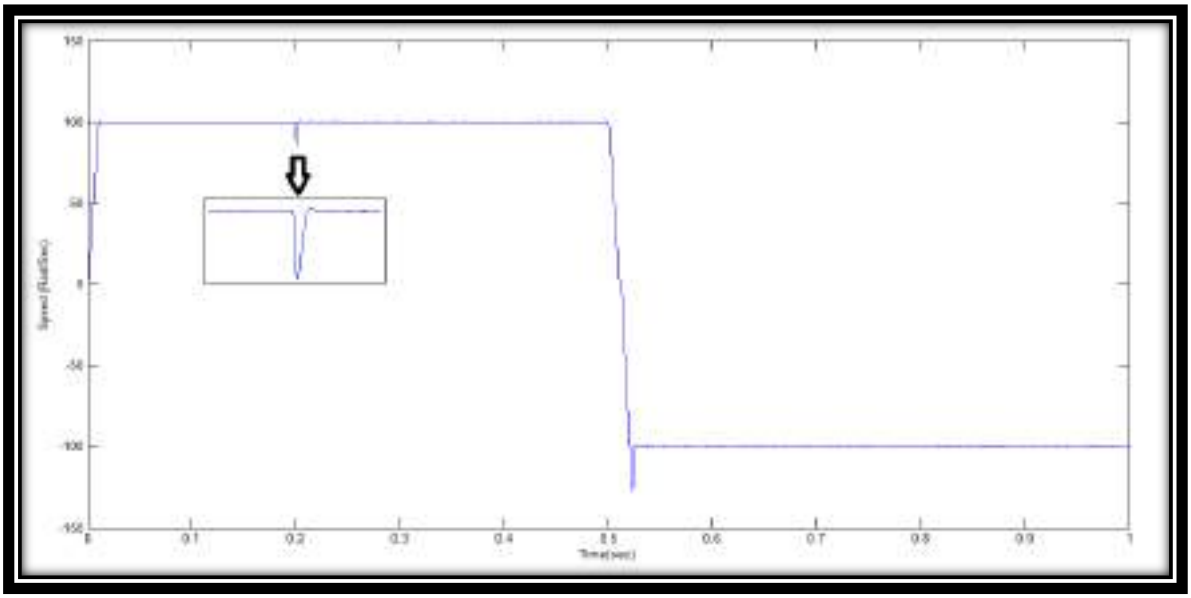
إن هذه الطريقة تستخدم منظمات *PID* والتي تعطي على خرجها الجهود المرجعية التي تتم مقارنتها بإشارة مثلثية أو سن منشار من أجل توليد نبضات القدح للمفاتيح الإلكترونية في القالبة، حيث تدعى هذه الطريقة لتوليد النبضات بطريقة تعديل عرض النبضة *PWM*.

يبين الشكل (4-6) مخطط تمثيل هذه الطريقة :



الشكل (4-6): المخطط الصندوقي للقيادة غير المباشرة لقالبة الجهد

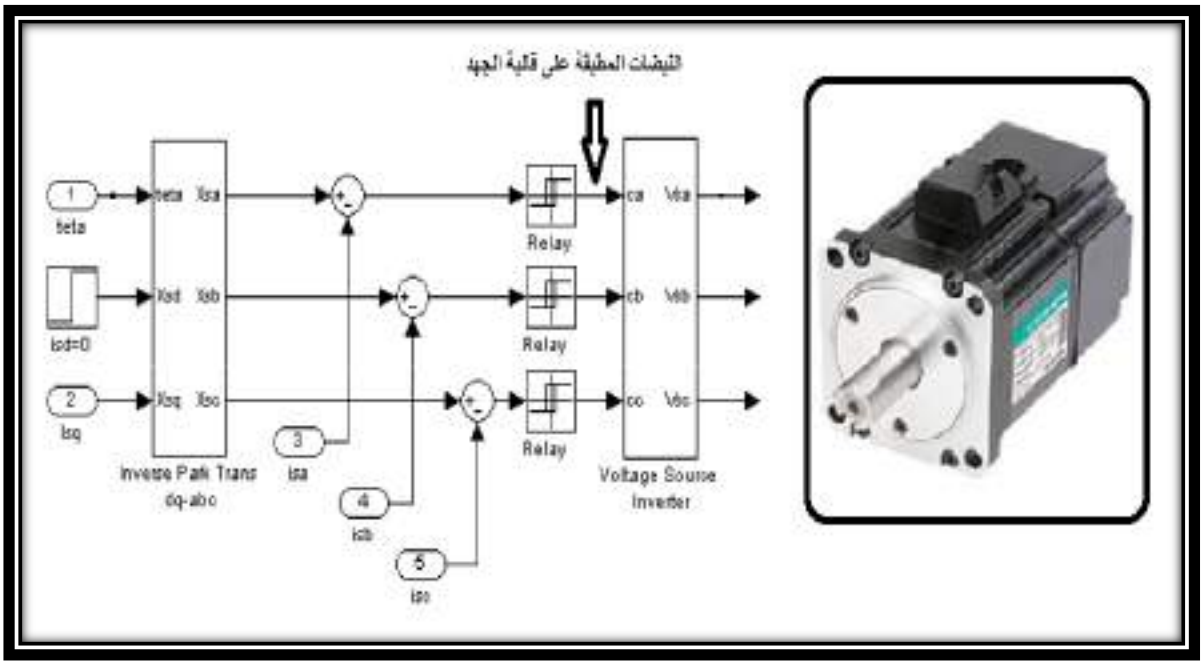
نتائج تنظيم السرعة مع تنظيم التيار في نظام FOC :



الشكل (4-7): إشارة السرعة باستخدام القيادة غير المباشرة لقالبة الجهد

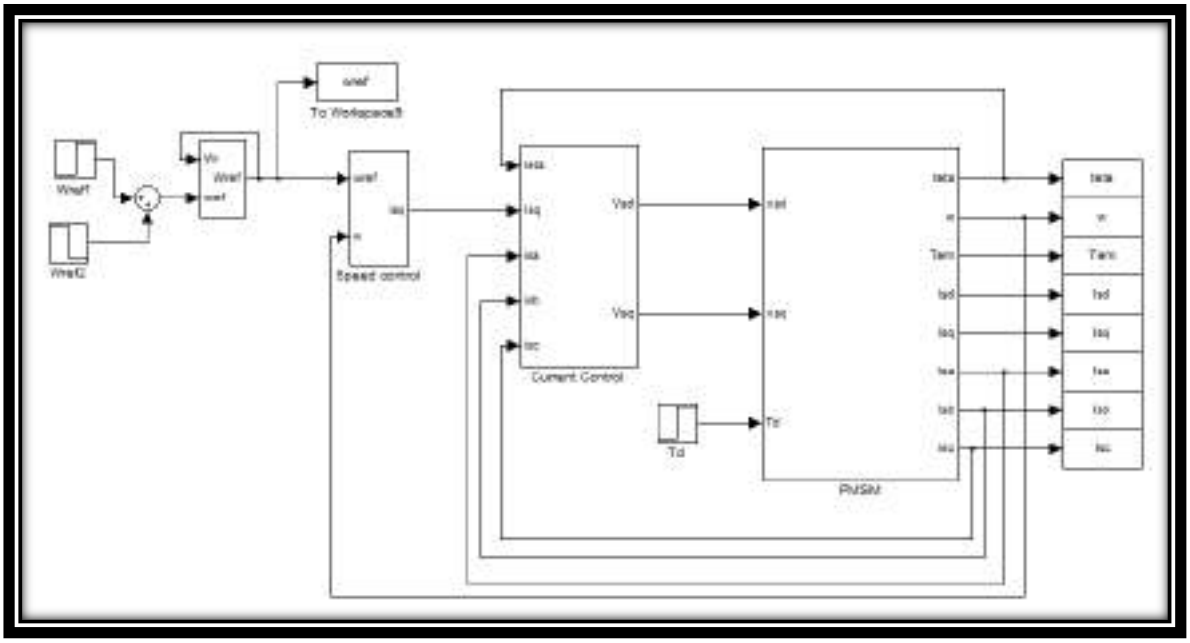
القيادة المباشرة لقالبة الجهد

تستخدم هذه الطريقة منظمات ذات عروة بطاء بمستويين والتي تشكل نظام التحكم بالتيارات ثلاثية الطور، يبين الشكل التالي التمثيل الصندوقي لهذه الطريقة حيث تكون مخارج هذه المنظمات عبارة عن أوامر التبديل لقالبة الجهد.



الشكل (4-8): المخطط الصندوقي للقيادة المباشرة لقالبة الجهد

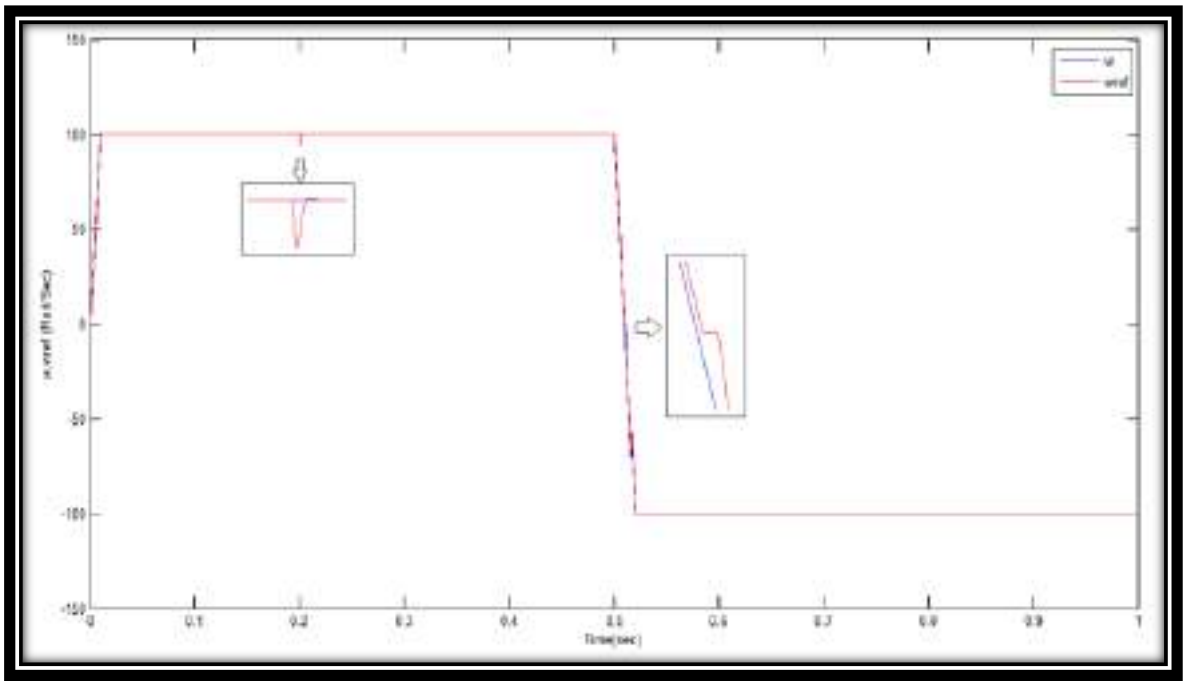
سنقوم الآن بتنظيم السرعة باستخدام منظم *P-PI* وتنظيم التيار باستخدام المنظمات البطائية وذلك في المحرك المتواقت ذي المغانط الدائمة في نظام المحاور *d,q* (حيث إن المحور *d* متوضع على القطب الشمالي للمغانط الدائمة للمحرك المتواقت) وبوجود قالبة الجهد (*Voltage source Inverter*)



الشكل (4-9): المخطط الصندوقي لتنظيم السرعة باستخدام منظم P-PI وتنظيم التيار باستخدام المنظم البطائي

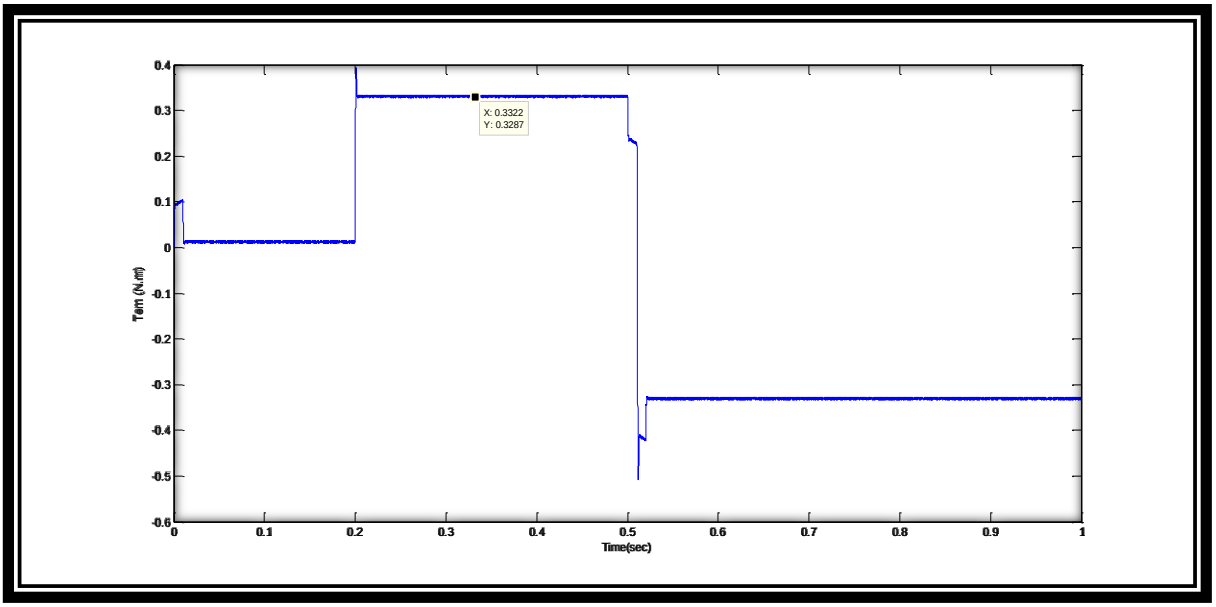
نتائج تنظيم السرعة مع تنظيم التيار

الشكل التالي يبين الفرق بين السرعة المرجعية والسرعة الحقيقية ، حيث قمنا بعكس جهة الدوران عند اللحظة (0.5sec).

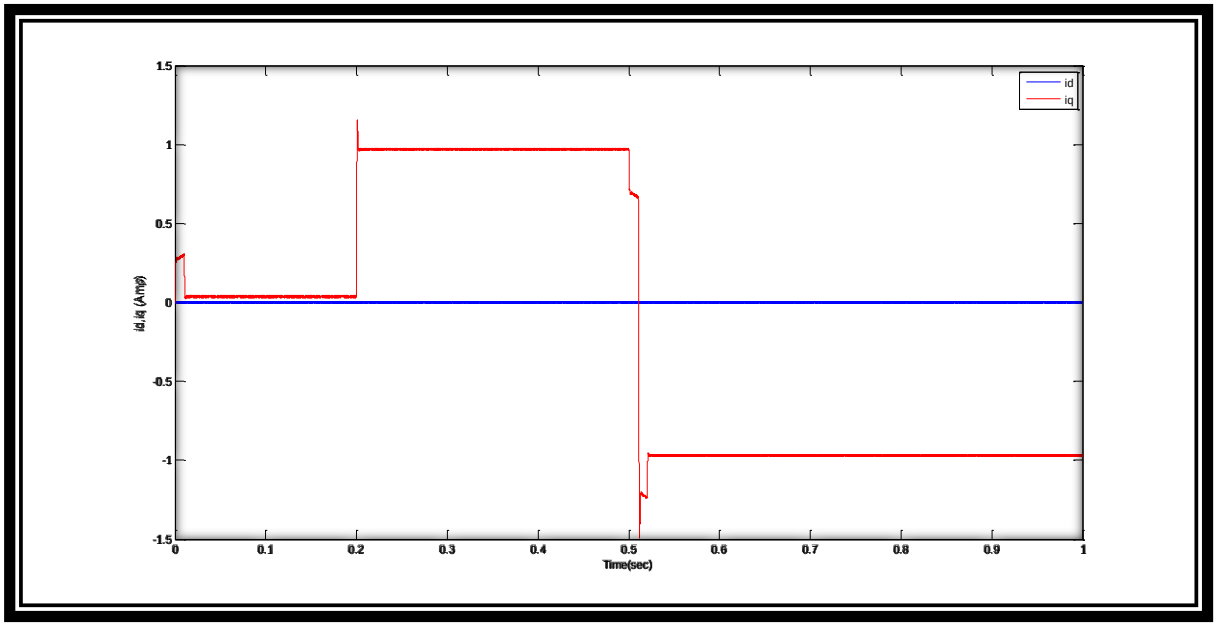


الشكل (4-10): إشارة السرعة الحقيقية واشارة السرعة المرجعية المطلوبة

نلاحظ أنه لا يوجد اختلاف كبير بين السرعتين وأن الأداء الديناميكي عالي جداً من حيث الوصول إلى السرعة الاسمية بزمن قياسي وزمن الانتقال من السرعة الموجبة إلى السرعة السالبة وذلك كون المحرك المتواقت ذي المغانط الدائمة يتمتع بعزم عطالة صغير.



الشكل (4-11): إشارة العزم للمحرك المتواقت ذي المغانط الدائمة



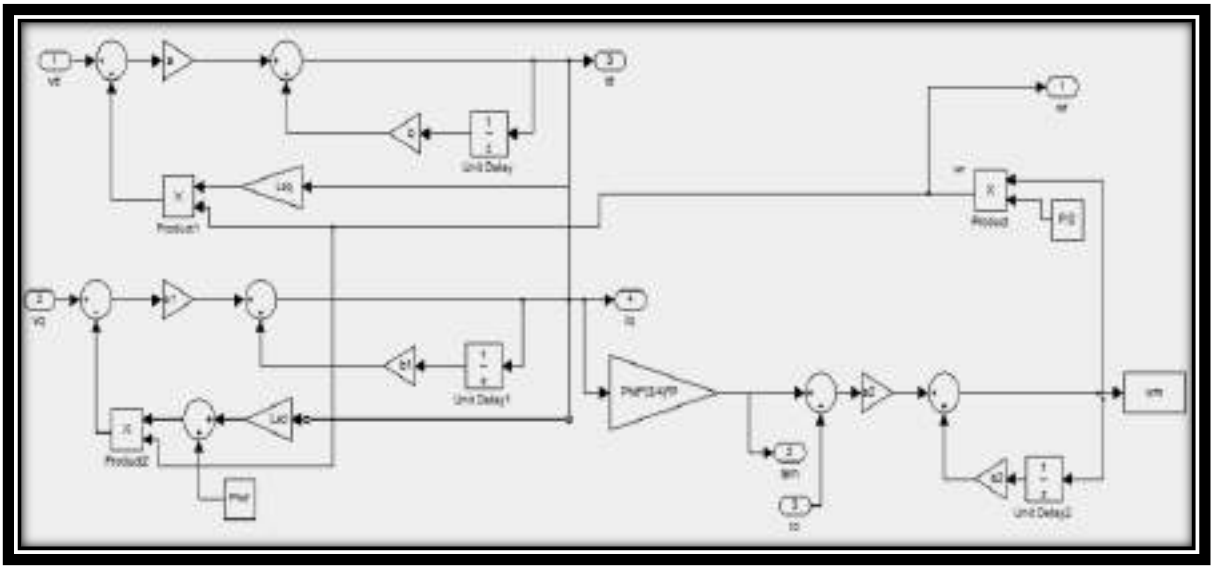
الشكل (4-12): إشارات التيارات id , iq

4-5- الخاتمة

في هذا الفصل قمنا بدراسة المعادلات الرياضية للقالبة التي استخدمت لتغذية المحرك المدروس، والتعرف على طرق التحكم الحديثة لقيادة المحرك المتواقت ذي المغانط الدائمة حيث قمنا بنمذجة نظام القيادة بشكل كامل ضمن بيئة Matlab بوجود القالبة وقمنا بتنظيم السرعة والتيار ولاحظنا أنه لا يوجد اختلاف كبير بين خرج المنظمات وخرج القالبة.

الفصل الخامس

التمثيل الرقمي للمحرك المتواقت ذي المغانط الدائمة وأنظمة قيادته



5-1- مقدمة

إن استخدام المعالجات المصغرة أو جهاز الحاسب أو أي متحكم قابل للبرمجة في عمليات التحكم الآلي يتطلب تمثيل نظام القيادة ضمن المعالج، وكما نعلم فإن المعالجات تتعامل مع إشارات رقمية، والإشارة الرقمية عبارة عن إشارة تتغير بين حالتين فقط أي تأخذ قيمة الصفر المنطقي أو قيمة الواحد المنطقي، وبالتالي لتمثيل نظام ما ضمن المعالج يجب تمثيل هذا النظام بشكل رقمي بحيث يمكن كتابته بأي لغة برمجية وبالتالي يمكن تمثيله ضمن المعالج.

يمكن فهم التمثيل الرقمي لنظام ما إذا افترضنا أنه لدينا تابع ما نريد رسمه، وكما نعلم أنه بإيجاد تكامل هذا التابع وبالتالي حساب مساحته فإنه يمكن رسم منحني هذا التابع. أيضاً يمكن رسم هذا التابع من خلال معرفة النقاط الممثلة لهذا التابع عند كل لحظة زمنية، أي وكأننا قمنا بتقطيع المنحني إلى مجموعة من النقاط. كلما زاد عدد النقاط الممثلة للتابع زادت الدقة في رسم المنحني وذلك لأن زيادة عدد النقاط ضمن مجال زمني محدد يعني أن الفاصل الزمني بين كل نقطتين أصبح أصغر، وبالتالي كلما زاد تردد التقطيع نحصل على دقة أكبر في تمثيل التابع، وبالتالي التمثيل الرقمي لنظام ما يعني تقطيع هذا النظام أي تحويل المعادلة الرياضية الممثلة لهذا النظام من المجال الزمني المستمر إلى المجال الزمني المتقطع، وللانتقال بأي معادلة من المجال الزمني المستمر إلى المجال الزمني المتقطع فإنه يمكن استخدام إحدى معادلتي أويلر التفاضليتين.

5-2- معادلتي أويلر

للانتقال بأي معادلة من المجال الزمني المستمر إلى المجال الزمني المتقطع فإنه يمكن استخدام إحدى معادلتي أويلر التفاضليتين التاليتين :

$$\frac{d_y}{dt} = \frac{y[k] - y[k-1]}{T} \qquad (5.1)$$

$$\frac{d_y}{dt} = \frac{y[k+1] - y[k]}{T} \qquad (5.2)$$

تسمى المعادلة (5.2) معادلة أويلر الأمامية، والمعادلة (5.1) معادلة أويلر العكسية.

حيث إن :

T : دور التقطيع .

K تعبر عن حالة النظام :

K الحالة الحالية ، k+1 الحالة التالية، k+1 الحالة السابقة.

5-3- التمثيل الرقمي لمعادلة نظام من المرتبة الأولى

ليكن لدينا نظام معادلته الرياضية من المرتبة الأولى تعطى كما يلي :

$$y(t) = \frac{G}{T_s S + 1} . x(t)$$

لتحويل هذه المعادلة إلى المجال الزمني المتقطع نقوم بما يلي :

$$T_s \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = G \,.\, x(t) \qquad (5.3)$$

بتعويض المعادلة (5.1) في المعادلة (5.3) نجد ما يلي :

$$T_s \frac{y[k] - y[k-1]}{T} + y[k] = G \,.\, x[k]$$

وبفرض $a = \frac{T_s}{T}$ نجد :

$$y[k]\left(1 + \frac{T_s}{T}\right) = G \,.\, x[k] + \frac{T_s}{T} y[k-1]$$

$$y[k] = \frac{G}{1+a} \,.\, x[k] + \frac{a}{1+a} y[k-1] \qquad (5.4)$$

والمعادلة السابقة تمثل تابع الانتقال السابق بالشكل الرقمي باستخدام أويلر العكسية.

ومن أجل التمثيل الرقمي للمعادلات الرياضية الممثلة للمحرك المتواقت ذي المغانط الدائمة في برنامج الماتلاب فإننا سوف نستخدم معادلة أويلر العكسية.

5-4- التمثيل الرقمي لمعادلات المحرك المتواقت ذي المغانط الدائمة

لدينا معادلة الجهد للطور d :

$$V_{sd}(t) = R_s \, I_{sd}(t) + L_{sd} \frac{dI_{sd}(t)}{dt} - \omega \, L_{sq} \, I_{sq}(t)$$

ولتحويلها إلى الشكل الرقمي سوف نعتمد طريقة أويلر العكسية :

$$V_{sd}[k] = R_s \, I_{sd}[k] + L_{sd} \frac{I_{sd}[k] - I_{sd}[k-1]}{T} - \omega \, L_{sq} \, I_{sq}[k]$$

$$V_{sd}[k] + \omega \, L_{sq} \, I_{sq}[k] = I_{sd}[k]\left(Rs + \frac{L_{sd}}{T}\right) - \frac{L_{sd}}{T} I_{sd}[k-1]$$

$$I_{sd}[k] = \frac{1}{\left(Rs + \frac{L_{sd}}{T}\right)}\left(V_{sd}[k] + \omega \, L_{sq} \, I_{sq}[k]\right) + \frac{\frac{L_{sd}}{T}}{\left(Rs + \frac{L_{sd}}{T}\right)} I_{sd}[k-1]$$

$$I_{sd}[k] = a\left(V_{sd}[k] + \omega \, L_{sq} \, I_{sq}[k]\right) + b \, I_{sd}[k-1] \qquad (5-5)$$

لدينا معادلة الجهد للطور q :

$$V_{sq}(t) = R_s \, I_{sq}(t) + L_{sq} \frac{dI_{sq}(t)}{dt} + \omega \, L_{sd} \, I_{sd}(t) + \omega \phi_m(t)$$

ولتحويلها إلى الشكل الرقمي سوف نعتمد طريقة أويلر العكسية :

$$V_{sq}[k] = R_s \, I_{sq}[k] + L_{sq} \frac{I_{sq}[k] - I_{sq}[k-1]}{T} + \omega \, L_{sd} \, I_{sd}[k] + \omega \phi_m[k]$$

$$V_{sq}[k] - \omega(\, L_{sd} \, I_{sd}[k] + \phi_m[k]) = I_{sq}[k]\left(Rs + \frac{L_{sq}}{T}\right) - \frac{L_{sq}}{T} I_{sq}[k-1]$$

$$I_{sq}[k] = \frac{1}{\left(Rs + \frac{L_{sq}}{T}\right)}\left(V_{sq}[k] - \omega(\, L_{sd} \, I_{sd}[k] + \phi_m[k])\right) + \frac{\frac{L_{sq}}{T}}{\left(Rs + \frac{L_{sq}}{T}\right)} I_{sq}[k-1]$$

$$I_{sq}[k] = a1\left(V_{sq}[k] - \omega(L_{sd}\, I_{sd}[k] + \phi_m[k])\right) + b1\, I_{sq}[k-1] \qquad (5-6)$$

تعطى معادلة السرعة الميكانيكية :

$$J.\frac{d}{dt}\omega_m = (T_{em} - T_d - B\omega_m)$$

بالانتقال إلى الزمن المتقطع حسب أويلر العكسية :

$$J.\frac{\omega_m[k] - \omega_m[k-1]}{T} = T_{em}\,[k] - T_d\,[k] - B\omega_m[k]$$

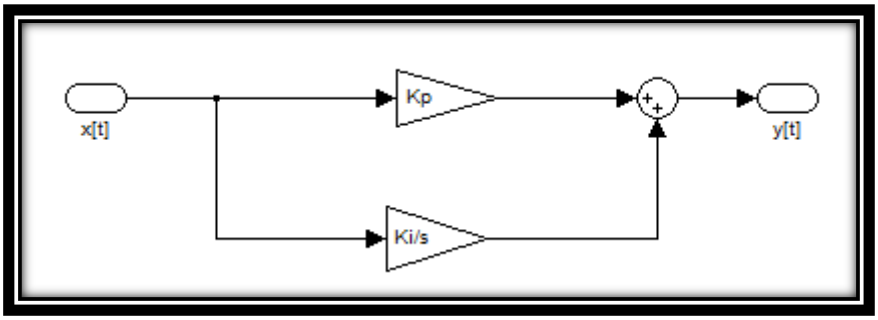
$$\omega_m[k]\left(B + \frac{J}{T}\right) = T_{em}\,[k] - T_d\,[k] + \frac{J}{T}\omega_m[k-1]$$

$$\omega_m[k] = \frac{1}{\left(B + \frac{J}{T}\right)}(T_{em}\,[k] - T_d\,[k]) + \frac{\frac{J}{T}}{\left(B + \frac{J}{T}\right)}\omega_m[k-1]$$

$$\omega_m[k] = a2\,(T_{em}\,[k] - T_d\,[k]) + b2\,\omega_m[k-1]$$

5-5- التمثيل الرقمي للمنظمات PID

إن الشكل العام لمنظمات PI يعطى بالشكل التالي :



الشكل (5-1): المخطط الصندوقي للمنظم PI

حيث يتألف من جزأين الأول هو الجزء التناسبي والثاني هو الجزء التكاملي

يعبر عن المخطط الصندوقي السابق رياضياً بالمعادلة (5.7) :

$$y(t) = K_p.x(t) + \frac{K_i}{S}.x(t) \qquad (5.7)$$

ولتحويلها إلى الشكل الرقمي نقوم بتجزئة المعادلة السابقة إلى جزأين وثم نقوم بتحويل كل جزء على حدة إلى الشكل الرقمي باستخدام أويلر العكسية .

$$y(t) = y_1(t) + y_2(t) \qquad (5.8)$$

الجزء الأول :

$$y_1(t) = K_p.x(t)$$

وبالتحويل إلى الشكل الرقمي نحصل على المعادلة التالية :

$$y_1(k) = K_p.x(k) \qquad (5.9)$$

الجزء الثاني :

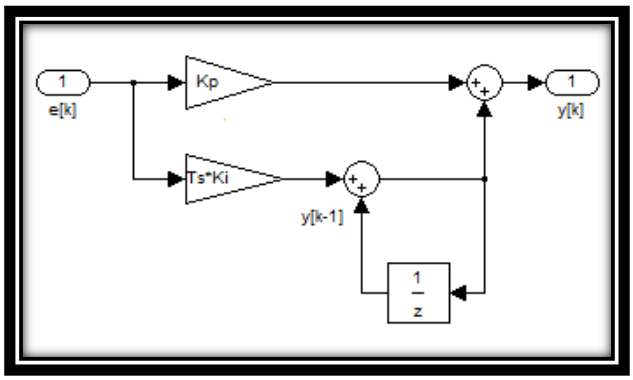
$$y_2(t) = \frac{K_i}{S}.x(t)$$
$$S.y_2(t) = K_i.x(t)$$
$$\frac{d_{y_2}(t)}{dt} = K_i.x(t)$$

وبتعويض المعادلة (5.1) في المعادلة السابقة :

$$\frac{y_2[k] - y_2[k-1]}{T} = K_i.x(t)$$
$$y_2[k] = T.K_i.x(t) + y_2[k-1] \qquad (5.10)$$

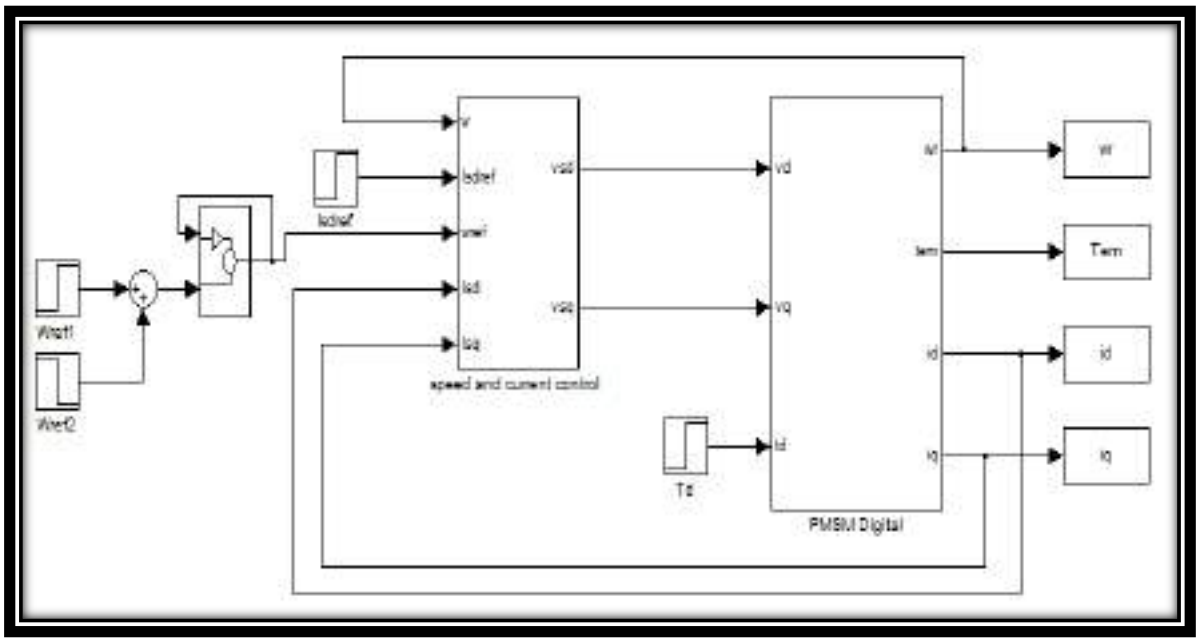
وبتعويض العلاقات (5.9) و(5.10) في المعادلة (5.8) بعد تحويلها إلى المجال الرقمي نجد :

$$y(k) = K_p.x(k) + T.K_i.x(t) + y_2[k-1] \qquad (5.11)$$



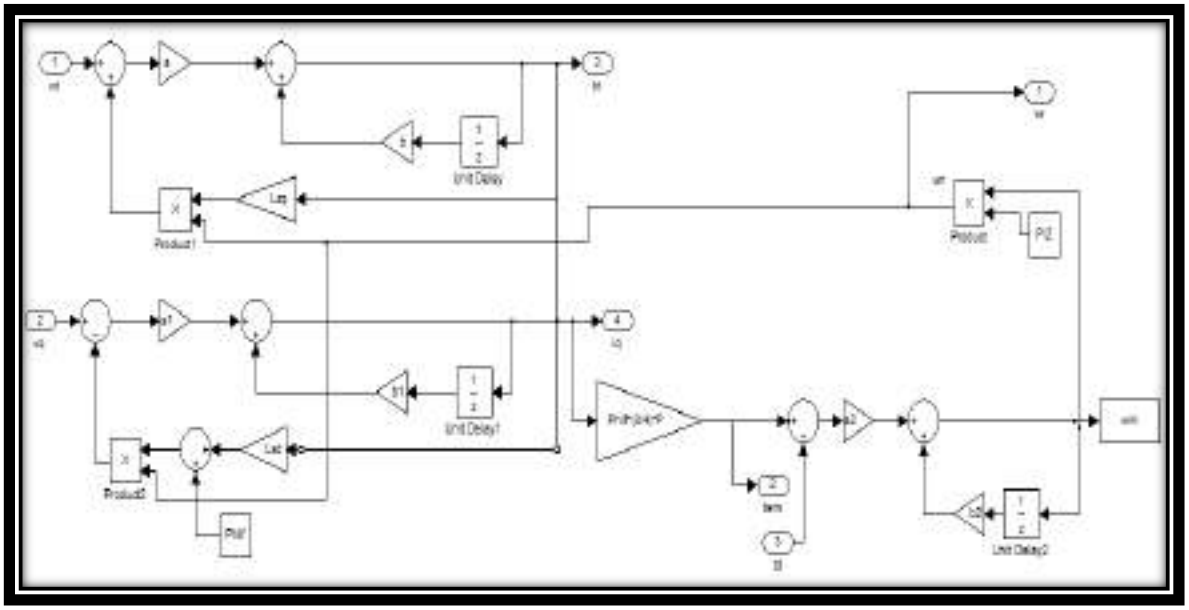
الشكل (5-2): المخطط الصندوقي للمنظم PID الرقمي

باستخدام المعادلات الرقمية السابقة نقوم بتمثيل المحرك ونظام التحكم بشعاع الفيض الموجه فنحصل على الشكل التالي :



الشكل (5-3): تنظيم السرعة والتيار للمحرك المتواقت بالشكل الرقمي

الصندوق PMSM Digital يحتوي على :

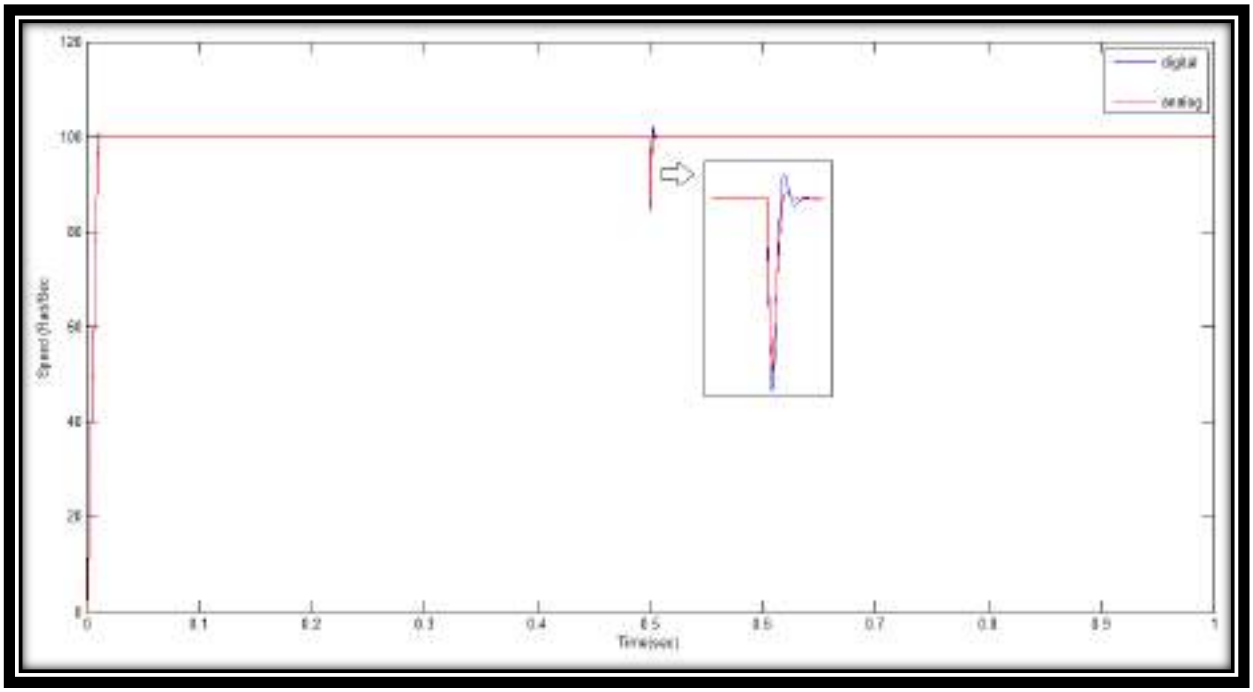


الشكل (5-4): المخطط الصندوقي للمحرك المتواقت بالشكل الرقمي

النتائج التمثيلية

بتنفيذ الخوارزمية في بيئة Simulink ومقارنة النتائج التشابهية مع النتائج الرقمية نجد مايلي :

منحني السرعة



الشكل (5-5): منحني السرعة (التشابهي والرقمي) بعد تنظيمه باستخدام طريقة التحكم بشعاع الفيض الموجه

نلاحظ أن المنحنيين منطبقان بشكل كامل ويوجد انزياح بين المنحنيين (عند الحالات العابرة) ولكن بقيمة صغيرة جداً لأن الماتلاب يستخدم طريقة أويلر الأمامية.

5-6- الخاتمة

تم في هذا الفصل التعرف على النظام الرقمي وأهميته عند الانتقال من الدراسة النظرية إلى التطبيق العملي على الشرائح الرقمية المختلفة ومن ثم قمنا بدراسة التمثيل الرقمي لتابع النقل من المرتبة الأولى باستخدام طريقة أويلر العكسية ثم قمنا بتمثيل معادلات المحرك المتواقت ذي المغانط الدائمة بالشكل الرقمي والتمثيل الرقمي للمنظم PID المستخدم في نظام القيادة بشكل واسع وأخيراً قمنا بتنظيم السرعة والتيار للمحرك المتواقت بالشكل الرقمي.

الفصل السادس
التطبيق العملي

6-1- المقدمة:

أحد الأساليب الحديثة المتبعة لإقلاع المحركات المتواقتة هي استخدام الانفيرتر الصناعي (مجموعة مقوم – قالبة) والذي يقوم بتحويل الطاقة الكهربائية المقدمة من الشبكة العامة ذات التردد والمطال الثابت إلى طاقة كهربائية ذات تردد ومطال متغيرين بهدف التحكم بسرعة المحرك ضمن مجال واسع.

يؤدي استخدام الانفيرتر إلى :

1) التخلص من تيار الإقلاع العالي.
2) إقلاع المحرك بشكل تدريجي متحكم به والتخلص من الصدمة الميكانيكية الناتجة عن الإقلاع.
3) التحكم بسرعة دوران المحرك على كامل مجال السرعة.
4) توفير في الاستطاعة الردية وبالتالي رفع قيمة عامل الاستطاعة.

لقد تم التركيز في هذا الفصل على عمل الانفيرتر من نوع (APD-VS04NA4) والشركة المصنعة (LS).

حيث إن الهدف من هذا القسم بشكل أساسي مايلي:

1) شرح كيفية استثمار الانفيرتر بشكل مبسط.
2) بناء لوحة مخبرية تتضمن كل الطرفيات الواجب ربطها بالانفيرتر والمتاحة من قبل الشركة المصنعة.
3) تجهيز عدد من التجارب العملية على الانفيرتر.
4) بيان كيفية الربط مع جهاز خارجي من أجل عمليات الربط والتحكم.

طبعا النظام المدروس في هذا الفصل هو(AC-SERVO-MOTOR) ولكن ما هو السيرفو موتور؟

هو أحد أنواع المحركات الخاصة وهو يستخدم في التحكم الموضعي ومن أمثلة تطبيقات هذا المحرك تحريك أجهزة الرادار وأطباق استقبال الأقمار الصناعية ويستخدم أيضا في تحريك أجنحة الطائرات وبعض أنواع أجهزة الطباعة.

يتمتع محرك السيرفو بالخصائص التالية:

1-الاستجابة الفائقة للسرعة المطلوبة.

2-يقبل عمليات الفصل والتوصيل مهما تعددت.

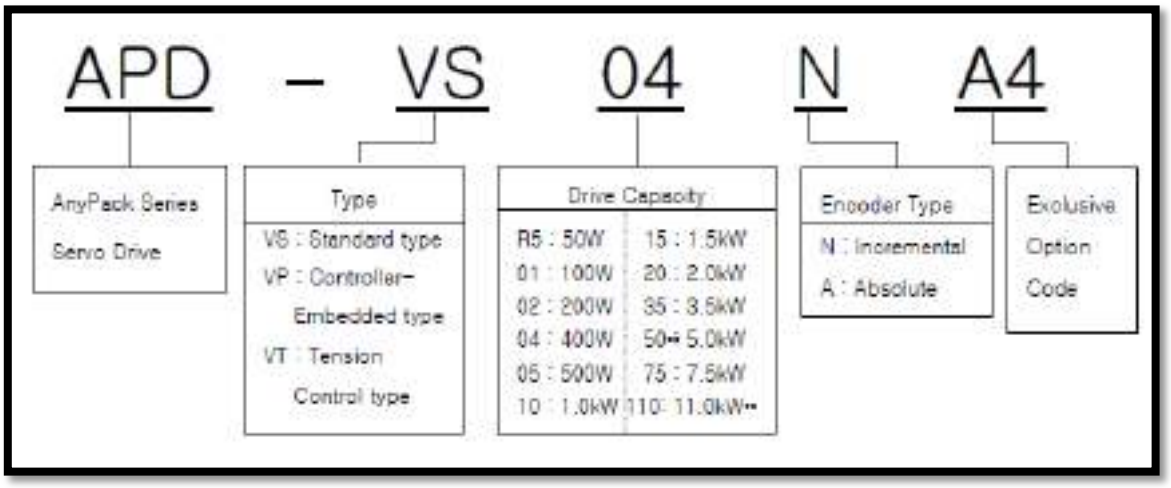
3-توقف المحرك فور فصل المنبع عن المحرك.

الشكل(6-1): محرك السيرفو المستخدم

وهو يحتاج إلى كبل Power وكبل Encoder.

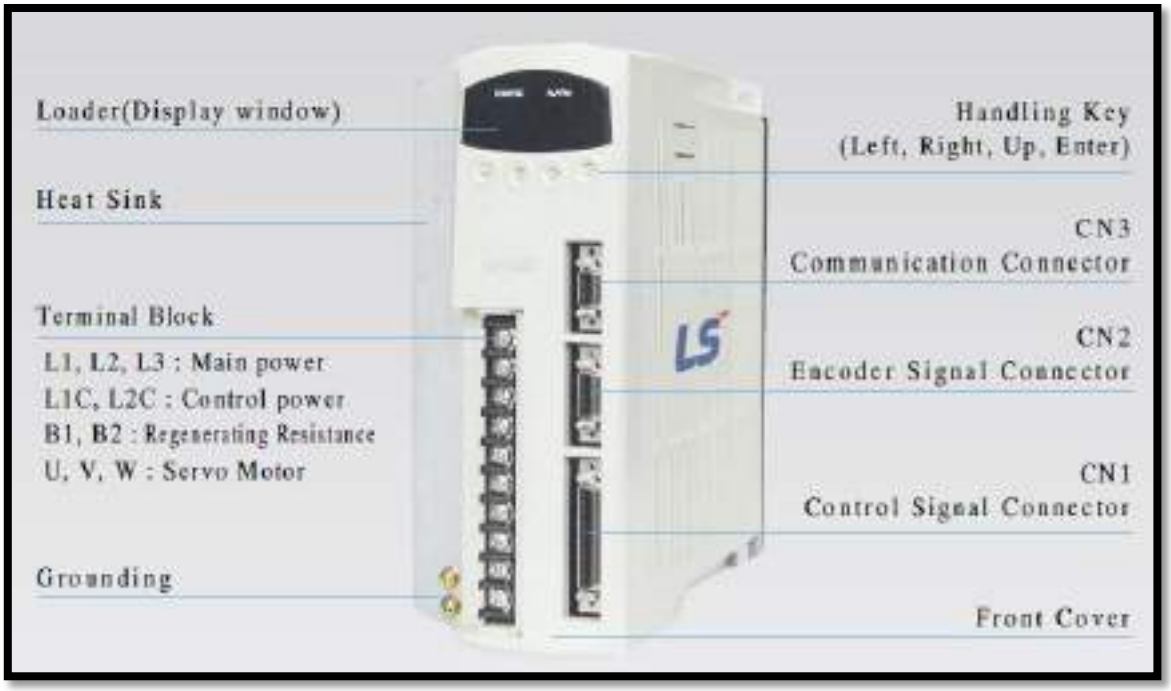
6-2- جهاز الانفيرتر المستخدم في المشروع

الانفيرتر المستخدم في المشروع من نوع (APD-VS04NA4) والشركة المصنعة (LS).



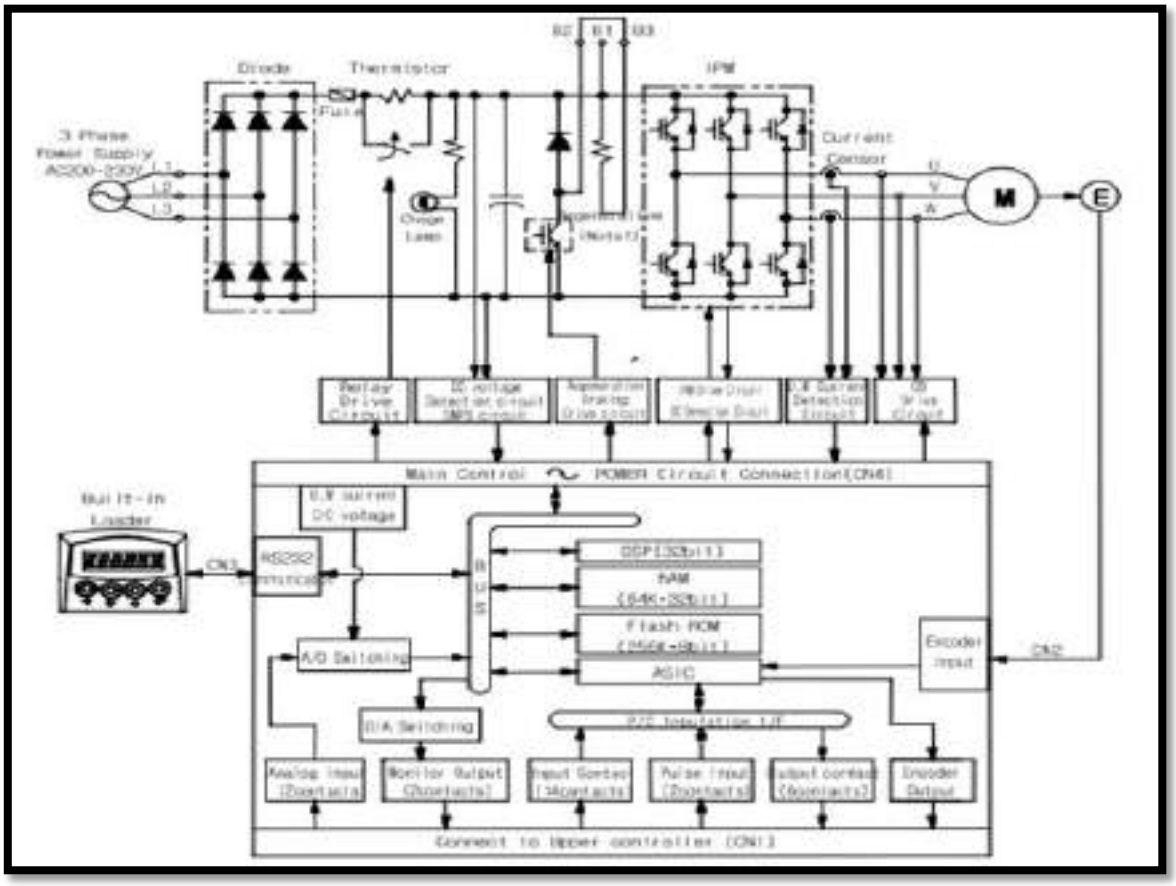
الشكل(6–2): نوع الانفيرتر المستخدم

والشكل(**6–3**) يبين الشكل الخارجي للانفيرتر المستخدم :



الشكل(6–3): الشكل الخارجي للانفيرتر المستخدم

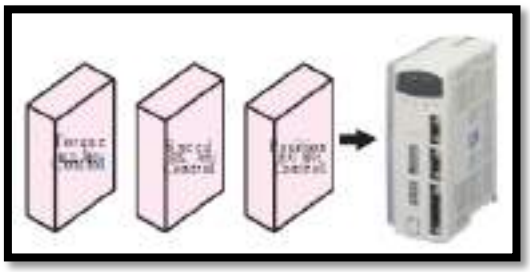
البنية الداخلية للانفيرتر :



الشكل(6-4): البنية الداخلية للانفيرتر

6-3- أهم الميزات التي يتمتع بها هذا الانفيرتر

1) إمكانية التحكم بالموضع/السرعة/العزم.



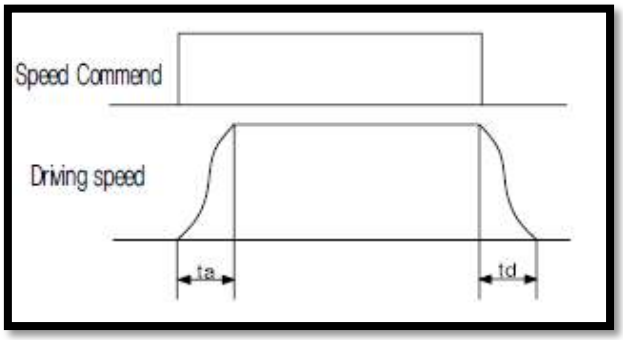
الشكل(6-5): خوارزميات عمل الانفيرتر

2) يحتوي على ثلاثة مداخل رقمية من أجل التحكم بالسرعة.

	SPD3	SPD2	SPD1
AnalogSpeed	off	off	off
Internal Speed 1	off	off	on
Internal Speed 2	off	on	off
Internal Speed 3	off	on	on
Internal Speed 4	on	off	off
Internal Speed 5	on	off	on
Internal Speed 6	on	on	off
Internal Speed 7	on	on	on

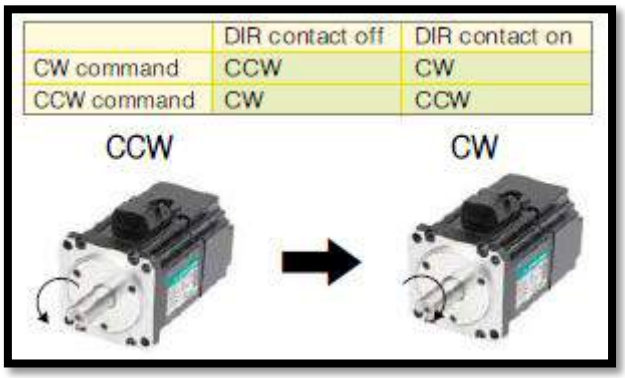
الشكل(6-6): ناخب اختيار سرعة المحرك

3) يحتوي على مدخل إشارة تشابهي من أجل التحكم بالسرعة.
4) تحديد مجال الخطأ الحاصل في تغير الجهد عند استخدام المدخل التشابهي من أجل التحكم بالسرعة.
5) إمكانية التحكم بزمن التسارع والتباطؤ وشكل منحني التسارع والتباطؤ.



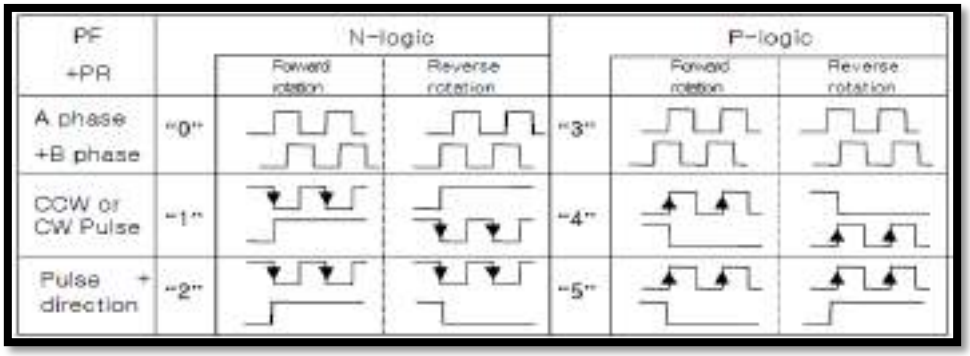
الشكل(6-7): منحني التسارع والتباطؤ

6) يحتوي على مدخل إشارة تشابهي من أجل التحكم بالعزم المطبق على المحرك.
7) يحتوي على مدخلين رقميين من أجل التحكم باتجاه الدوران.



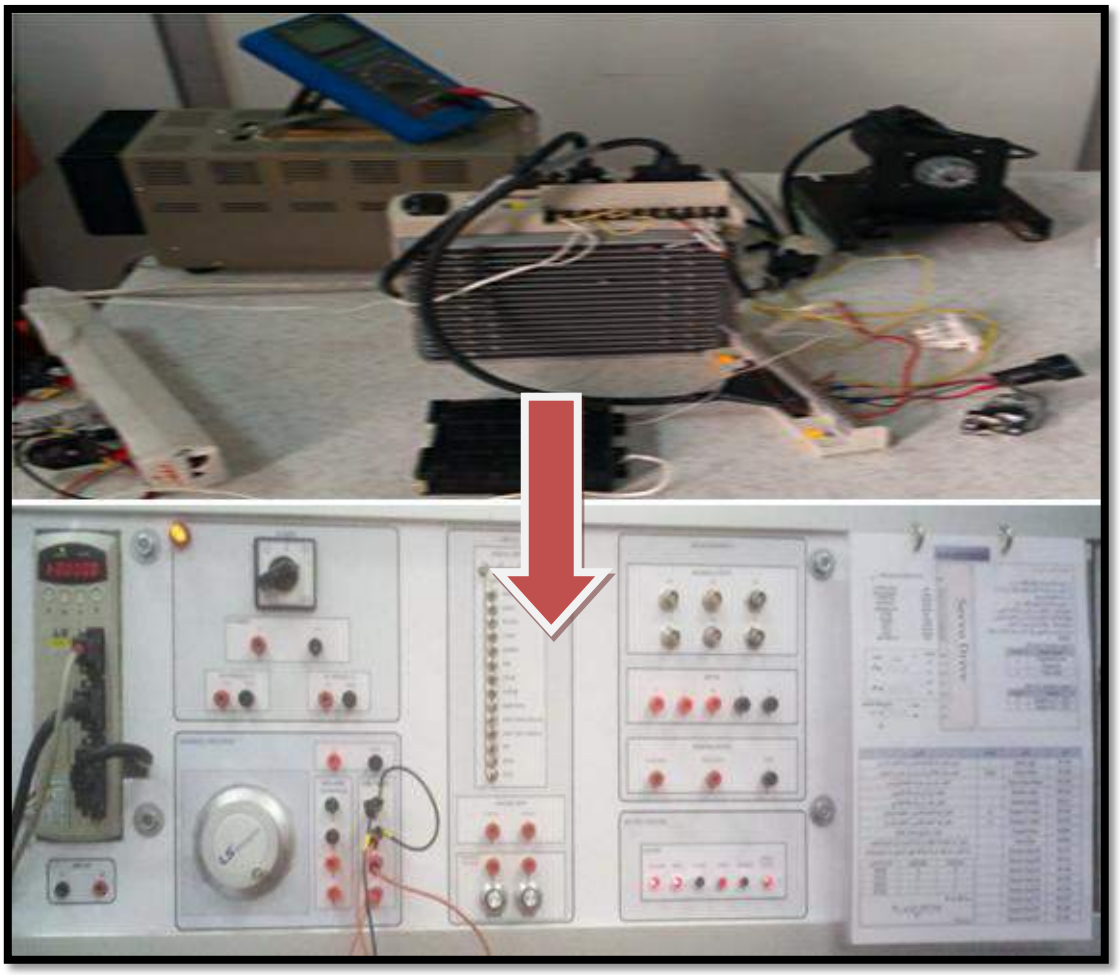
الشكل(6-8): التحكم باتجاه الدوران

8) يحتوي على منظمات من النوع P-PI من أجل تنظيم السرعة والموضع.
9) مقاوم للاهتزاز أثناء العمل.
10) مقاوم للاهتزاز أثناء التوقف.
11) يحتوي على مقاومة كبح داخلية.
12) إمكانية استخدام نبضات تحكم مختلفة من أجل التحكم بالموضع.



الشكل(6-9): نبضات التحكم المستخدمة للتحكم بالموضع

6-4- آلية تحويل الانفيرتر إلى منصة يعتمد عليها في تجارب عملية لطلاب كلية الهندسة الكهربائية والإلكترونية



الشكل(6-10):آلية تحويل الانفيرتر إلى منصة عمل

تم الاعتماد في ذلك على دراسة الكتالوك المرفق مع التجهيز حيث تم خلال ذلك تحديد :

1-المداخل والمخارج الرقمية.

2-المداخل والمخارج التشابهية.

3-تحديد مخارج المراقبة والإشارة.

4- تحديد التغذية المطلوبة.

6-4-1- المداخل الرقمية:

المداخل الرقمية هي مداخل بجهد مستمر قيمته 24V وهي مداخل مشتركة في جميع خوارزميات العمل مع اختلاف وظيفة بعضها حسب نمط العمل المستخدم.

من هذه المداخل:

CWLIM يقوم بمنع عملية الدوران في الاتجاه العكسي عند التفعيل.

CCWLIM يقوم بمنع عملية الدوران في الاتجاه الأمامي عند التفعيل.

ALMRST يفعل لإعطاء تحذير خلال العمل.

وحسب الدراسة تبين أننا بحاجة إلى جهد تشابهي متغير +10/-10 ومن أجل ذلك تم إدخال هذه الجهود بعد توليدها إلى مقاومة متغيرة من أجل التحكم بمطالها.

الشكل(6-13): الجهد التشابهي المتغير المتوضع على اللوحة المخبرية

6-4-3- مخارج الإشارة:

وهي ستة مخارج رقمية تعطي إشارة جهد مستمرة مطالها 24V قد تم الإتفاق على وضع ليدات تعطي إشارة ضوئية دلالة على حدث معين.

Pin No.	Name	Function and Use
38 /39	ALARM+/-	ALARM state output ON : normal state OFF : ALARM state
40 /41	RDY+/-	ON at Complete operating ready state
42	TLOUT	Torque limit
43	ZSPD	Output at servo stop (speed is zero)
44	BRAKE	Brake operating signal output (ON at servo dirving)
45	INSPD	Output complete signal of target speed reaching
	INPOS	Output complete signal of target position reaching

الشكل(6-14): دلائل المؤشر الضوئي