

## تطوير نظام قيادة شعاعي لمحرك تحريضي ثلاثي الطور لسلك رافعة وفق مبدأ ملاحقة الفيض المغناطيسي للدائر

الدكتور محسن الخطيب\*

الدكتور بسام عطية\*\*

محمد فؤاد السماك\*\*\*

تاريخ الإيداع 10 / 5 / 2016. قُبل للنشر في 26 / 9 / 2016

### □ ملخص □

تم في ورقة البحث هذه تطوير نظام قيادة شعاعي لمحرك سلك رافعة وفق مبدأ ملاحقة فيض الدائر. تتطلب عمليات التشغيل للروافع، حالات تشغيل مختلفة بسرعات وعزوم متغيرة مع الزمن، مما يشكل حالات كهرو ديناميكية وكهرو مغناطيسية عابرة، قد تؤثر على أداء عمليات التشغيل، لذلك وبناء عليه تم بناء نظام قيادة يحقق عمليات التشغيل لمحركات السلك في الروافع يحقق: أداء ومردود عالي  
بناء نظام التحكم المطلوب وفق مبدأ التعديل النبضي العرضاني (PWM) ونظام التغذية الرئيس اخذين بعين الاعتبار الحد من تغيرات جهد حلقة التيار المستمر وتحقيق فيض اعظمي قبل اقلاع المحرك.  
الحد من الجهود الزائدة التي قد تظهر على حلقة التيار المستمر، باستخدام مقطع فرملة ترانزستوري مع مقاومة تفريغ.  
في نهاية البحث تم استعراض النتائج والتي تدل على الأداء المتميز للنظام المقترح مع إمكانية استخدام نفس النظام لعمليات التشغيل المؤتمتة المختلفة.

الكلمات المفتاحية: أنظمة ضبط السرعة، تعديل عرض النبضة، ترانزستورات IGBT، عامل التشوه الكلي THD، الروافع.

\* أستاذ مساعد - قسم الأتمتة الصناعية - كلية الهندسة التقنية - جامعة تشرين - طرطوس - سورية.

\*\* أستاذ مساعد - قسم الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

\*\*\* طالب ماجستير - قسم الأتمتة الصناعية - كلية الهندسة التقنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

## Development electrical drive Vector control system for three phase induction motor Crane Wire, according to the principle indirect rotor field orientation

Dr. Mohssen Khatib<sup>\*</sup>  
Dr. Bassam Ateiah<sup>\*\*</sup>  
Mohammad Fouad Alsammak<sup>\*\*\*</sup>

(Received 10 / 5 / 2016. Accepted 26 / 9 / 2016)

### □ ABSTRACT □

In this paper, the development of the drive system of the motor Wire port Crane according to the principle of the indirect field orientation.

Require the operation of the port Crane operations, different operation situations of variable speed and Torque with time, which is a case dynamic electro and electro-magnetic transient, may affect the performance of operations, so therefore been building motor Wire port Crane operations system corps in winches achieve:

- High performance and Efficiency.

- Build the desired control system according to the principle of the Pulse Width Modulation (PWM) and the main power system, taking into account the reduction of changes DC-Link voltage and achieve maximum flux before starting the motor.

- Reduction of excess Voltage that may appear on a DC-Link, using the brake Transistor with Brake resistors.

At the end of the research has been reviewed and the search results that indicate the outstanding performance of the proposed system with the ability to use the same system to run automated processes different.

**Key words:** Adjustable speed drives, pulse width modulation, voltage source inverter, IGBTs Transistors, total harmonic distortion THD, Port Crane.

---

<sup>\*</sup> Associate Professor , Industrial Automation Engineering Faculty, Tishreen University, Tartous, Syria.

<sup>\*\*</sup> Associate Professor , Electromechanical Engineering Faculty, Tishreen University, Lattakia, Syria.

<sup>\*\*\*</sup> Postgraduate Student , Industrial Automation Engineering Faculty, Tishreen University, Tartous, Syria.

## مقدمة:

شهدت أنظمة القيادة الحديثة لمحركات التيار المتناوب تتطورا ملحوظا من ناحية الاداء والمردود، وخاصة بعد الإنجازات العلمية في مجال الالكترونيات الصناعية والمعالجات الدقيقة ومعالجات الإشارة الرقمية[1]. تعتبر أنظمة القيادة الشعاعية "للحقل الموجه" في المحركات التحريضية من الأنظمة الحديثة الأكثر فاعلية والمستخدمة بشكل واسع في مجالات الأتمتة الصناعية، وذلك لتميزها عن الأنظمة التقليدية ( التحكم السلمي - التحكم بالجهد والتردد - .....)[2].

تعتمد نظرية التحكم الشعاعي على النقاط الرئيسية التالية:

▪ الاشعة الفراغية لمتغيرات الالة (تيار - جهد - فيض)[3].

▪ تحويلات النظام الثلاثي الاطوار الى المستويات الثنائية  $(DQ - \alpha\beta)$  [4].

▪ مبدأ التعديل النبضي العرضاني (Pulse Width Modulation(PWM).

ويفضل هذه النقاط الرئيسة، يمكننا بناء أنظمة قيادة مشابهة لأنظمة قيادة محركات التيار المستمر، متجاوزين كل المشاكل الناتجة عن التأثير المتبادل بين فيوض الجزء الدوار والجزء الثابت للمحركات التحريضية ذات الدائر المقصور والملفوف، وبالتالي تجاوز جميع الحالات الكهرو ميكانيكية والكهرومغناطيسية العابرة التي يمكن ان تظهر خلال عمليات التشغيل الصناعية، والحصول على أنظمة قيادة بمردود وأداء عالي.

## أهمية البحث وأهدافه:

لتأمين تشغيل ديناميكي مميز لأنظمة قيادة الروافع والمساعد والسيور المتحركة، كان لا بد من وضع خوارزميات رياضية متطورة لبرمجة المتحكمات الصغيرة والمعالجات الميكروية، لتشكل أساساً في تصميم وتصنيع هذه الأنظمة محلياً وتخفيض تكاليف الاستثمار في أعمال التطوير.

## هدف البحث:

يهدف البحث لوضع نموذج لنظام قيادة باستخدام برنامج MATLAB R2013b، يساهم في تصميم نظام قيادة رافعة في المرافئ يعمل بأداء ومردود عاليين.

سوف نقترح بناء نظام قيادة يعتمد على مبدأ التحكم الشعاعي بملاحقة الحقل المغناطيسي للدائر، كما سنعتمد على تقييم أداء ومردود النظام بناء على: تخفيض تيارات الإقلاع والكبح -عوامل تشويبه إشارات الجهود والتيارات والعزوم -الاجهادات الكهرو ميكانيكية الديناميكية في الحالات العابرة.

يجب ان يتمتع النظام المقترح بإمكانية تحقيق عملية التشغيل المطلوبة بمرونة عالية، لذلك يجب ان يراعى

اثناء التصميم ضرورة تحقيق المتطلبات الرئيسية التالية:

تحقيق شروط التشغيل المطلوبة لأنظمة قيادة الروافع والمساعد والسيور المتحركة (التحكم بالسرعة والدقة في التوقف وعكس اتجاه الدوران).

تشغيل مضبوط لحالات الإقلاع والكبح من اجل الحصول على أنظمة بكفاءات عالية (تأمين راحة المسافرين وجودة المنتج).

تحقيق إمكانية تنظيم استطاعة الدخل للأحمال التي يتناسب فيها العزم طردا مع مربع السرعة (الحالات

الخاصة لعمل المساعد والروافع والسيور المتحركة).

تحقيق عامل تشوه منخفض لإشارات تيارات المحرك من اجل تخفيف آثار العزوم النبضية المتشكلة على محاور المحركات، والتي قد تؤدي لالتواء المحاور وتخفيض عمر الكراسي الحاملة.  
تحقيق حالات تشغيل بمرود عالي.  
تحقيق حماية كافية للنظام من اجل تفادي حدوث قفزات عالية في إشارات الجهد والتيار والعزم.

### طرائق البحث ومواده:

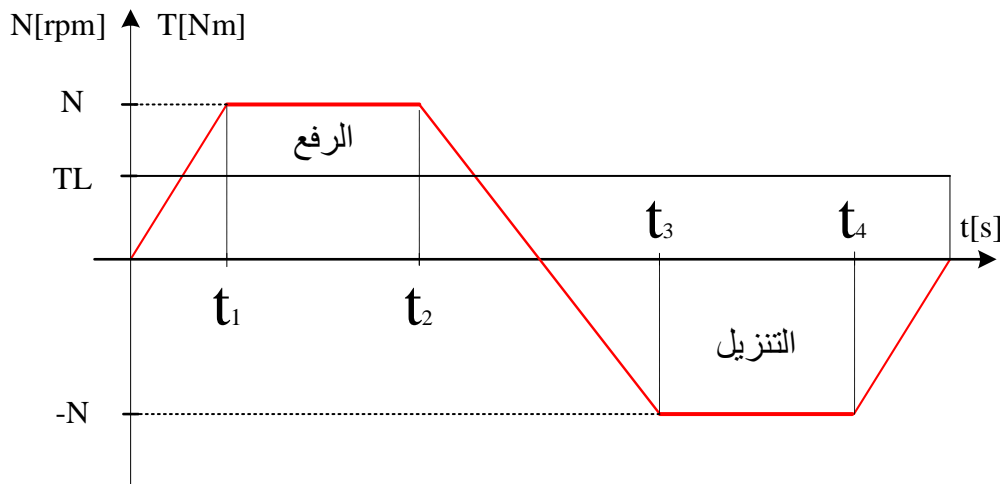
الهدف من البحث هو الحصول على نظام قيادة بأداء ومرود عاليين لعزم وسرعة المحرك التحريضي ، يخفف قدر الإمكان من الحالات العابرة الكهرو ميكانيكية (عزوم-سرعات-تيارات-جهود-...) وذلك عند العمل في ظروف تشغيل قاسية (روافع - المحركات المستخدمة في معامل التعدين-المضخات-المراوح-خطوط الإنتاج- وغيرها ...).

(a) عملية التشغيل المقترحة.

سوف نقوم باقتراح نظام قيادة لعملية تشغيل رافعة بحمولة اسمية 6 طن.

يتطلب النظام العمل على تحقيق حالات اقلاع وفرملة وعكس سرعة متعددة بعزوم متغيرة (تناسب مع وزن الاحمال).

وبناء عليه سوف نفترض على سبيل المثال خصائص تغيرات عزم-سرعة الحمولة مع الزمن للعملية الإنتاجية المقترحة وفق الشكل التالي:



الشكل (1) شروط سرعة الدوران لنظام القيادة المقترح عند العمل بعزم حمولة ثابت.

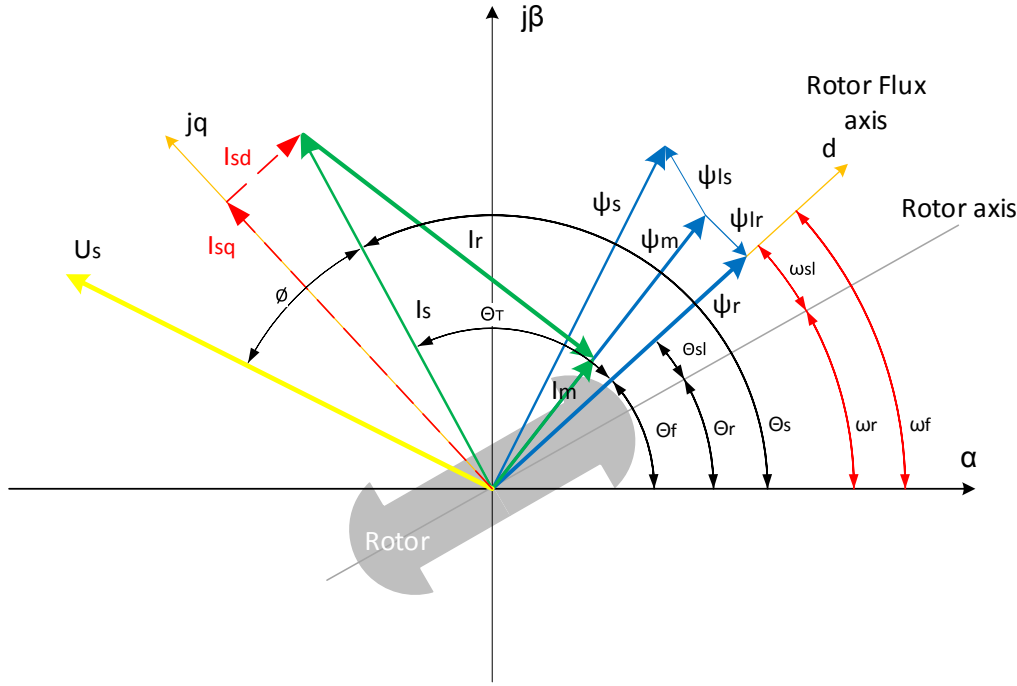
(b) أسس صياغة نظام القيادة:

1. أسس وضع النموذج الديناميكي للمحرك التحريضي.

لذلك لا بد من استعراض النموذج الديناميكي للمحرك التحريضي والذي يعتبر العنصر الأساسي في نظام القيادة.

تعرض المراجع الخاصة بهذا البحث في هذا المجال [5] عدة طرق لتمثيل المحرك التحريضي في الحالة الديناميكية. تختلف هذه الطرق عن بعضها البعض باعتماد مستوى الأساس في حساب بارامترات اطوار المحرك  $(U, I, \Psi)$ .

يبين الشكل التالي المستويات الثلاث لتمثيل المحرك التحريضي في الحالات الديناميكية.



الشكل (2) المخطط الشعاعي للمحرك التحريضي.

المستوي  $abc$ : يمثل النظام الثلاثي الطور بثلاث اشعة دوارة بسرعة زاوية تعادل التردد الزاوي لجهد التغذية على ثلاث محاور رئيسية ثابتة. ويعتبر النظام التقليدي لدراسة المحرك.

المستوي  $\alpha\beta$ : يمثل النظام الثلاثي الطور بنظام ثنائي الطور مكافئ ثابت.

المستوي  $dq$ : يمثل النظام الثلاثي الطور بنظام ثنائي الطور مكافئ دوّار بالسرعة الزاوية للفيض المغناطيسي المتغير للدائر.

ان اعتماد النظام الأخير يعتبر الأفضل عند تصميم نظام قيادة يعتمد على ملاحقة فيض الدائر، حيث يتم في هذا النظام اعتماد المحور  $d$  منطبق على اتجاه فيض الدائر، والذي يشكل معادلات كهرو ميكانيكية اقل تعقيداً مقارنة بالأنظمة السابقة، والنتيجة عن الفروقات بين تغيرات السرعة الزاوية لمنابع التغذية والسرعة الزاوية لدوران المحرك.

نتيجة ان هذه الأنظمة مكافئة، فانه يمكننا الانتقال من مستوي الى اخر وذلك اعتمادا على النظرية الفراغية الشعاعية، والتي تعتمد بشكل أساس على تشكيل شعاع فراغ ( $\vec{i}_s$ ) وحيد للنظام يكافئ الاطوار الثلاث يدور بسرعة مساوية للتردد الزاوي للتيارات الطورية، والتي تعرف بتحويلات بارك-كلارك [6].

على سبيل المثال، بفرض ان  $i_a, i_b, i_c$  تشكل التيارات اللحظية لأطوار الثابت، عندها يمكن كتابة شعاع فراغ تيار الثابت بالشكل العقدي كما يلي:

$$\vec{i}_s = i_a + a \cdot i_b + a^2 \cdot i_c \quad (1)$$

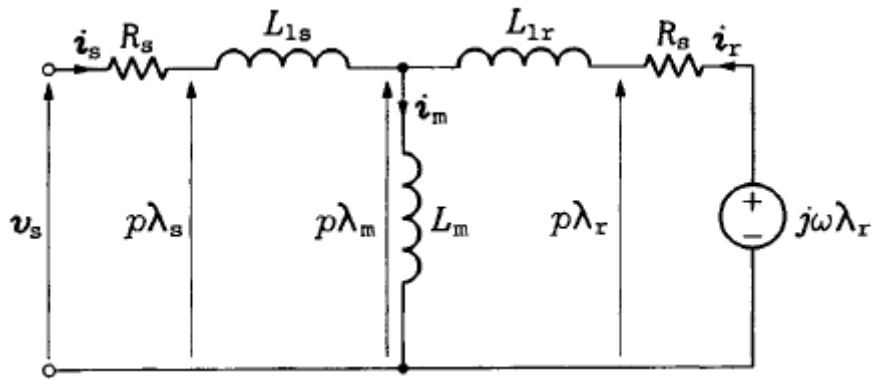
حيث أن  $a$  هو المعامل الطوري الذي يميز بين الأطوار الثلاثة ويعطى كما يلي:  $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$

وبناء على  $\vec{i}_s$  يمكن الانتقال الى  $\alpha\beta$  و  $dq$  وفق المعادلات التالية:

تحويلات من المستوي $\alpha\beta$ الى المستوي $dq$	تحويلات من المستوي $abc$ الى المستوي $\alpha\beta$
$i_{sd} = i_{s\alpha} \cos \theta_{Field} + i_{s\beta} \sin \theta_{Field}$ $i_{sq} = -i_{s\alpha} \sin \theta_{Field} + i_{s\beta} \cos \theta_{Field}$	$i_{s\alpha} = \frac{2}{3} \left( i_{sa} - \frac{1}{2} i_{sb} - \frac{1}{2} i_{sc} \right)$ $i_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{sb} - i_{sc})$

### التمثيل الديناميكي للمحرك التحريضي

يبين الشكل التالي الدارة المكافئة للنموذج  $T$  الديناميكي للمحرك التحريضي [7]:



الشكل (3) النموذج الديناميكي للمحرك التحريضي من الشكل  $T$ .

حيث:  $L_{ls} = X_{ls}/\omega$ ,  $L_{lr} = X_{rs}/\omega$ ,  $L_m = X_m/\omega$

تكتب معادلة علاقة الجهد-التيار في النموذج الديناميكي للمحرك التحريضي باستخدام طريقة شعاع الفراغ:

$$\frac{di}{dt} = Av + Bi \quad (2)$$

حيث:

$$i = [i_{ds} i_{qs} i_{dr} i_{qr}]^T$$

منقول مصفوفة مركبات تيارات الدائر

والثابت [8].

$$v = [v_{ds} v_{qs} v_{dr} v_{qr}]^T$$

منقول مصفوفة مركبات جهود الدائر والثابت.

$$A = \frac{1}{L_\sigma^2} \begin{bmatrix} L_r & 0 & -L_m & 0 \\ 0 & L_r & 0 & -l \\ -L_m & 0 & L_s & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & L \end{bmatrix}$$

مصفوفة الجهد التناسبية [9]

$$B = B(\omega_0) = \frac{1}{L_\sigma^2} \begin{bmatrix} -R_s L_r & \omega_0 L_m^2 & R_r L_m & \omega_0 L_r L_m \\ -\omega_0 L_m^2 & -R_s L_r & -\omega_0 L_r L_m & R_r L_m \\ R_s L_m & -\omega_0 L_s L_m & -R_r L_s & -\omega_0 L_s L_r \\ \omega_0 L_s L_m & R_s L_m & \omega_0 L_s L_r & -R_r L_s \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$L_\sigma^2 = L_s L_r - L_m^2 \quad (4)$$

كما تكتب المعادلة المصفوفة للتدفق المغناطيسي للثابت والدوار بدلالة تيار الثابت والدوائر بالعلاقة التالية:

$$\begin{bmatrix} \lambda_s \\ \lambda_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad (5)$$

حيث التدفق الناتج عن الثابت يمكن أن يتم استنتاجه بدلالة الجهد المطبق على الثابت والتيار المار في الثابت بالعلاقة:

$$\frac{d\lambda_s}{dt} = v_s - R_s i_s \quad (6)$$

والذي يمكن كتابته بالشكل:

$$\lambda_s = \int_0^t (v_s - R_s i_s) dt + \lambda_s(0) \quad (7)$$

في حين يعطى تغير التدفق في الدوار وذلك في محركات القفص السنجابي بالعلاقة:

$$\frac{d\lambda_r}{dt} = j\omega_0 \lambda_r - R_r i_r \quad (8)$$

أخيراً يمكن التعبير عن علاقة العزم الديناميكي للمحرك على محور الدائر بعدة طرق وفق المعادلات التالية:

$$T_M = \frac{2}{3} P_P \text{Im}\{i_s \lambda_s^*\} = \frac{2}{3} P_P (i_{qs} \lambda_{ds} - i_{ds} \lambda_{qs}) \quad (9)$$

$$T_M = \frac{2}{3} P_P \frac{L_m}{L_r} \text{Im}\{i_s \lambda_r^*\} = \frac{2}{3} P_P \frac{L_m}{L_r} (i_{qs} \lambda_{dr} - i_{ds} \lambda_{qr}) \quad (10)$$

أو بالشكل:

$$T_M = \frac{2}{3} P_P L_m \text{Im}\{i_s i_r^*\} = \frac{2}{3} P_P L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (11)$$

حيث:  $P_P$ : عدد أزواج الأقطاب.

وتشير \* على مرافق الشعاع.

حيث يشير المصطلح  $\text{Im}(i_s \lambda_s^*)$  في المعادلة (9) والمصطلح المماثل في المعادلة (10) و (11) إلى الجداء

الشعاعي في الفراغ الشعاعي، على سبيل المثال:

$$\text{Im}(i_s \lambda_s^*) = i_s \lambda_s^* \sin[\angle(i_s, \lambda_s)] \quad (12)$$

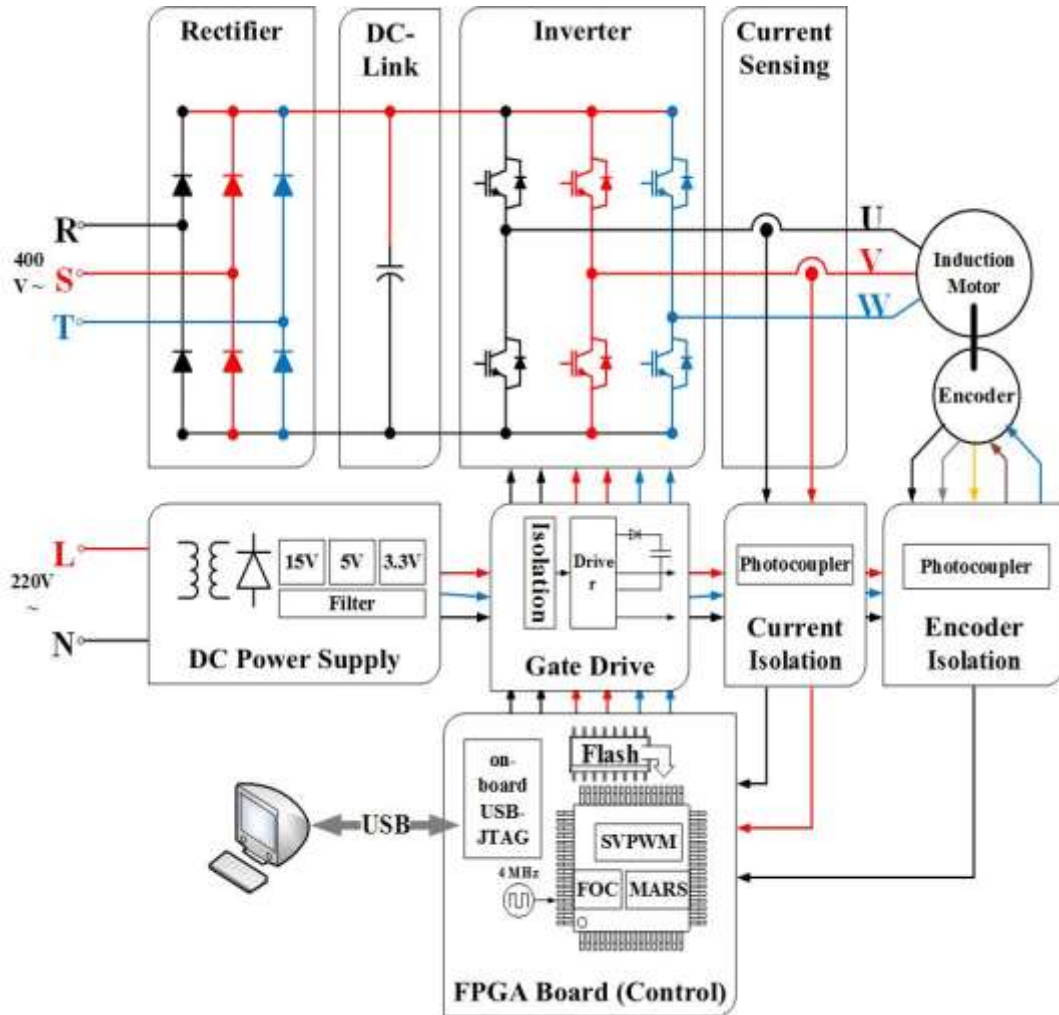
تمثل المعادلة (12) علاقة العزم المنشكل على محور المحرك التحريضي بدلالة جداء مطالات الفراغ الشعاعي

لمتحولين من متحولات المحرك (تيارين، فيضين مغناطيسيين، أو تيار وفيض مغناطيسي) وجيب الزاوية بين الشعاعين.

يمكننا ملاحظة أن جميع معادلات العزم غير خطية (تفاضلية)، كما تتضمن كل واحدة منهم على فرق جداء لمتحولين من متحولات المحرك. المعادلة (3) ليست خطية أيضاً لأن المتحول  $\omega_0$  يظهر في المصفوفة  $B$ .

## نظام القيادة (التغذية والتحكم) المقترح

سوف نعتمد في بناء نظام القيادة على استخدام قالبة ( inverter ) ثلاثية نصف جسرية ثلاثية الطور، مكونه من ستة ترانزستورات من نوع IGBT مع ديودات عكسية. يتم ربط مداخل القالبة على طرف حلقة التيار المستمر مع الشبكة العامة عن طريق دائرة تقويم ثلاثية جسرية مع مكثفات ترشيح. يبين الشكل (4) المخطط العام لنظام التغذية والتحكم المقترح.



الشكل (4) المخطط العام لنظام التغذية والتحكم المقترح.

يتكون نظام التحكم من المراحل التالية:

حساسات تيارات اطوار المحرك: (يمكن استخدام حساسين فقط للحصول على قيم التيارات اللحظية لثابت

المحرك) مع نظام لملائمة الإشارة لدخل وحدة التحكم الرئيسية.

وحدة التحكم الرئيسية: تقوم هذه الوحدة بتأمين إشارات القيادة للمفاتيح الستة (الترانزستورات) للقالبة من اجل

العمل على تحقيق العزوم والسرع المطلوبة لمحور المحرك لتحقيق العملية الإنتاجية المقترحة والمبينة على الشكل (4).



لا تتم عملية ربط مباشرة ما بين مخارج وحدة التحكم المركزية وبوابات مفاتيح القالبية، وإنما عن طريق دارات ربط مخصصة لتحقيق حالات العزل وتأمين مستوى الإشارات المناسبة لعمليات تبديل مفاتيح القالبية [10].

### تصميم دائرة حلقة التيار المستمرة DC-Link

يؤمن نظام التغذية المقترح جهداً مستمراً على دخل القالبية يعطى بالعلاقة:

$$V_{dc} = \frac{3 \cdot \sqrt{2} \cdot V_{LL}}{\pi} = \frac{3 \cdot \sqrt{2} \cdot 400}{\pi} = 540.18 \text{ V} \quad \begin{array}{l} \text{القيمة المتوسطة لجهد حلقة} \\ \text{التيار المستمر} \end{array} \quad (13)$$

$$V_{peak} = V_{LL} \cdot \sqrt{2} = 537.4 \text{ V} \quad \begin{array}{l} \text{الجهد الاعظمي لحلقة التيار} \\ \text{المستمر} \end{array} \quad (14)$$

$$V_{min} = \sqrt{2} \cdot V_{LL} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 465.4 \text{ V} \quad \begin{array}{l} \text{الجهد الاصغري لحلقة التيار} \\ \text{المستمر} \end{array} \quad (15)$$

بناء على ما سبق، تكون تغيرات جهد حلقة التيار المستمر:

$$\Delta V = V_{peak} - V_{min} = 537.4 - 465.4 = 72 \text{ V} \quad (16)$$

مما يشكل نسبة تعادل 13.3% من قيمة جهد حلقة التيار المستمر DC-Link ( $V_{dc}$ )، مما يشكل عاملاً إضافياً من عوامل تشغيل النظام بمرود وأداء منخفضين.

للتخلص من هذه المشكلة، تم إضافة مكثف ترشيح لتحديد تغيرات جهد حلقة التيار المستمر ضمن مجال مقبول وفق العلاقة:

$$C = \frac{P_{motor}}{12 \cdot f \cdot \Delta V_{DCmax} \cdot V_{DC}} \quad (17)$$

حيث:

$P_{motor}$ : الاستطاعة الاسمية للمحرك (W).

$f$ : تردد التغذية (50Hz).

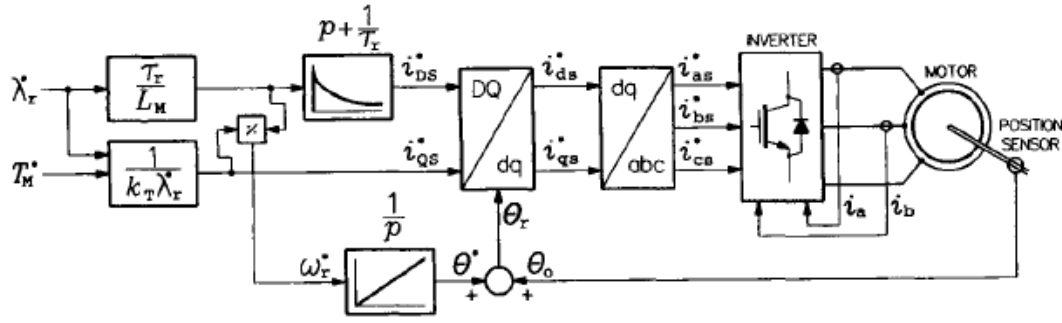
$C$ : سعة المكثف المطلوبة (F).

$\Delta V_{DCmax}$ : الحد الاعظمي لتغيرات جهد حلقة التيار المستمر المسموح بها (V).

### تصميم المتحكم

خوارزمية المتحكم الشعاعي باستخدام مبدأ الملاحقة الغير مباشرة لفيض الدائر

تعتمد هذه الخوارزمية على تحديد زاوية فيض الدائر اعتماداً على القيم المرجعية لكل من الفيض والعزم. يبين الشكل (5) المخطط الصندوقي لخوارزمية المتحكم الشعاعي المدروس.



الشكل(5)المخطط الصندوقي لنظام ASD مع توجيه غير مباشر لفيض جزء الدوار.

تتم عملية تحديد التيارات المرجعية لثابت المحرك  $i_a^*, i_b^*, i_c^*$  وفق المراحل التالية:

1 - تحديد القيم المرجعية لمركبات شعاع تيار الثابت في الاحداثيات DQ وفق العلاقات التالية:

$$i_{DS}^* = \frac{\lambda_r^*}{L_m} \quad (18)$$

$$i_{QS}^* = \frac{1}{K_T} \cdot \frac{T_M^*}{\lambda_r^*} \quad (19)$$

حيث:

$\lambda_r^* [Wb]$ : الفيض المرجعي و الذي يتم تحديده على مدخل المتحكم من قبل المستثمر، وعادة يكون مساويا

للفيض الاسمي.

$T_M^* [Nm]$ : العزم المرجعي و الذي يتم تحديده على مدخل المتحكم من قبل المستثمر.

$L_m [h]$ : المحارضة التبادلية لدارة المكافئة للمحرك.

$K_T$ : ثابت معامل العزم  $K_T = \frac{2 \cdot P_p \cdot L_m}{3 \cdot L_r}$  (  $P_p$ : عدد ازواج الأقطاب - محارضة الدائر

$$L_r = L_{lr} + L_m$$

2 - تحدد التردد المرجعي.

$$\omega_r^* = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{i_{QS}^*}{i_{DS}^*} \quad (20)$$

3 - تحديد الزاوية المرجعية: يتم ذلك باستخدام مكامل لإشارة خرج حساس السرعة.

$$\theta^* = \int_0^t \omega_r^* dt \quad (21)$$

4 - تحديد الموقع الزاوي الابتدائي للدوار  $\theta_o = P_p \cdot \theta_m \cdot 2\pi$

5 - تحديد الزاوية الكهربائية لفيض الدوار  $\theta_r [rad]$ :

$$\theta_r = \theta^* + \theta_o \quad (22)$$

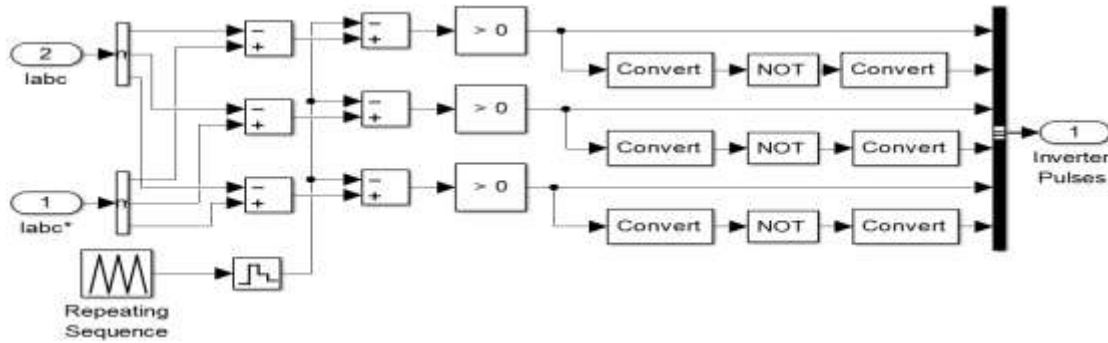
6 - تحديد التيارات المرجعية بالمستوي abc:

$$\begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & 0 \\ -\frac{1}{3} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{3} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & -\sin(\theta_r) \\ \sin(\theta_r) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{DS} \\ i_{QS} \end{bmatrix} \quad (23)$$

### بنية المتحكم في بيئة ماتلاب

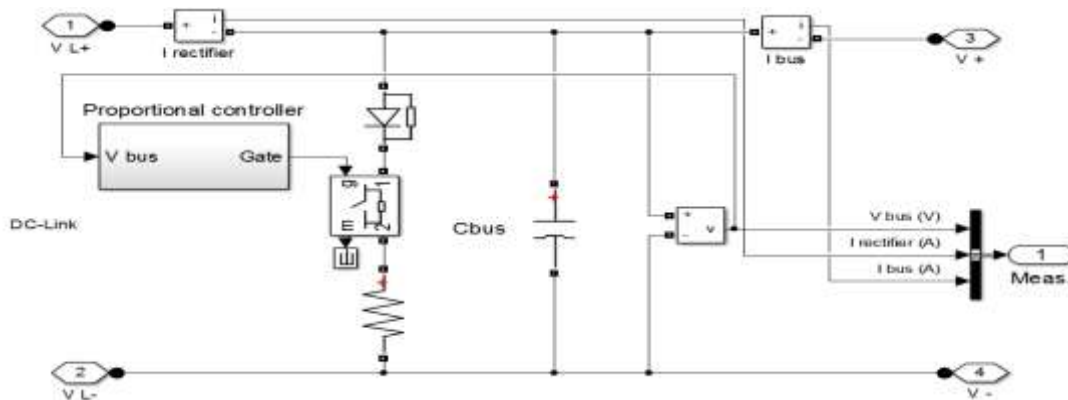
لقد قام بتصميم متحكم في بيئة الماتلاب وفق الخوارزمية الرياضية المذكورة سابقا يتصف بما يلي:

- 1 - إضافة حلقة تشكيل الفيض الاسمي للمحرك قبل عمليات التشغيل.
- 2 - تم استخدام مبدأ التعديل النبضي العرضاني الجيبي (SPWM) لعمل القالبه نظرا لما يتميز به هذا المبدأ عن مبدأ التعديل التثبيعي [11] Hysteresis PWM Current Control.



الشكل (6) متحكم يعمل على مبدأ التعديل النبضي العرضاني الجيبي (SPWM).

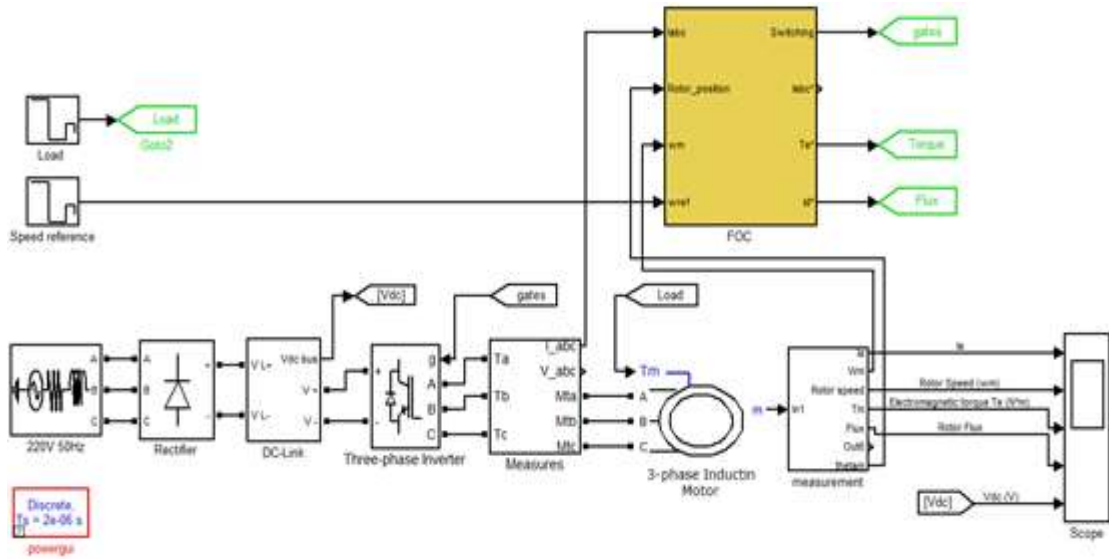
- 3 - إضافة حلقة مقطع فرملة (Braking chopper).



الشكل (7) دائرة مقطع الفرملة.

- 4 - إضافة متحكم (state machine) لأتمته عمليات التشغيل (سرعة-عزم بدلالة الزمن).

يبين الشكل (8) بنية نظام القيادة الكامل مع المتحكم.



الشكل (8) بنية نظام القيادة الكامل مع المتحكم.

## النتائج والمناقشة:

سوف نقوم باختبار نظام القيادة المقترح على محرك السلك للرافعة في مرفأ اللاذقية والتي تعمل على حمولات بوزن اعظمي 6 طن.

### معطيات النظام:

- 1 - معطيات شبكة التغذية الرئيسية ثلاثية الطور 400V- 50Hz.
- 2 - معطيات المحرك التحريضي (Motor data plate):

في البداية يتم تحديد استطاعة المحرك بناء على الحمولة العظمى للرافعة والتي تعادل 6 طن، وقد كانت معطيات اللوحة الاسمية للمحرك كما يلي:

$$U_{LL} = 400V; f = 50Hz; P_n = 110 kW; \cos \varphi_n = 0.8$$

ومحددات الدارة المكافئة للمحرك كما يلي:

مقاومة ملفات الثابت والدائر (Stator & Rotor Resistance)

$$R_1 = 0.022557 ; R_2 = 0.022557 \Omega.$$

للمحارضة التسريبيه لملفات الثابت والدائر والمحارضة التبادلية على الترتيب:

$$L_{s1} = 0.000309H ; L_{s2} = 0.000309H ; L_m = 0.005985H$$

عدد أزواج الأقطاب  $P_p = 2$  . عزم عطالة الأجزاء الدوارة  $J = 3.1 \text{ kg.m}^2$

- 3 - معطيات القالبه المقترحة (Inverter specification):

تم اختيار قالبه بمفاتيح ترانزستوريه من نوع IGBT بتيار اسمي يعادل ضعف التيار الاسمي للمحرك المقترح.

$$I_T \geq 2 \cdot I_n = 2 \cdot \frac{110 \cdot 10^3}{400 \cdot \sqrt{3} \cdot 0.8} = 400 [A] \quad (24)$$

وقد تم اختيار ترانزستور IGBT بالرمز MG500Q1US1 من صناعة شركة Toshiba و الجدول (1) يبين مواصفاته:

الجدول (1) مواصفات ترانزستور MG500Q1US1

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Ta = 25°C)						
CHARACTERISTIC	SYMBOL	TEST CONDITION	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Gate Leakage Current	IGES	VGE = ±20V, VCE = 0	—	—	±500	nA
Collector Cut-off Current	ICES	VCE = 1200V, VGE = 0	—	—	4.0	mA
Gate-Emmitter Cut-off Voltage	VGE (OFF)	IC = 500mA, VCE = 5V	3.0	—	6.0	V
Collector-Emmitter Saturation Voltage	VCE (sat)	IC = 500A, VGE = 15V	—	3.0	4.0	V
Input Capacitance	Cies	VCE = 10V, VGE = 0, f = 1MHz	—	80000	—	pF
Switching Time	Rise Time	t <sub>r</sub>		—	0.3	0.6
	Turn-on Time	t <sub>on</sub>		—	0.4	0.8
	Fall Time	t <sub>f</sub>		—	0.2	0.5
	Turn-off Time	t <sub>off</sub>		—	0.8	1.5
Forward Voltage	V <sub>F</sub>	I <sub>F</sub> = 500A, V <sub>GE</sub> = 0	—	—	3.0	V
Reverse Recovery Time	t <sub>rr</sub>	I <sub>F</sub> = 500A, V <sub>GE</sub> = -10V di/dt = 300A/μs	—	0.25	0.5	μs
Thermal Resistance	R <sub>th(j-c)</sub>	Transistor	—	—	0.042	°C/W
		Diode	—	—	0.20	

#### 4 - تحديد سعة مكثف حلقة التيار المستمر (DC Bus Capacitance).

تم اثناء بناء النظام تحديد سعة المكثفات الواجب ربطها بشكل دقيق على حلقة التيار المستمر، من اجل تحديد التغيرات الاعظمية على جهد حلقة التيار المستمر، بحيث لا تتجاوز  $\Delta U_{DC;max} \% = 6\%$ ، وكانت سعة المكثف الواجب ربطه تعادل:

$$C_{bus} = \frac{P_{motor}}{12 \cdot f \cdot \Delta V \cdot V_{DC}} = \frac{110Kw}{12 \cdot 50 \cdot 36 \cdot 513} = 10000 \mu F \quad (25)$$

#### 5 - حساب مقاومة مقطع الفرملة (Braking chopper Resistance).

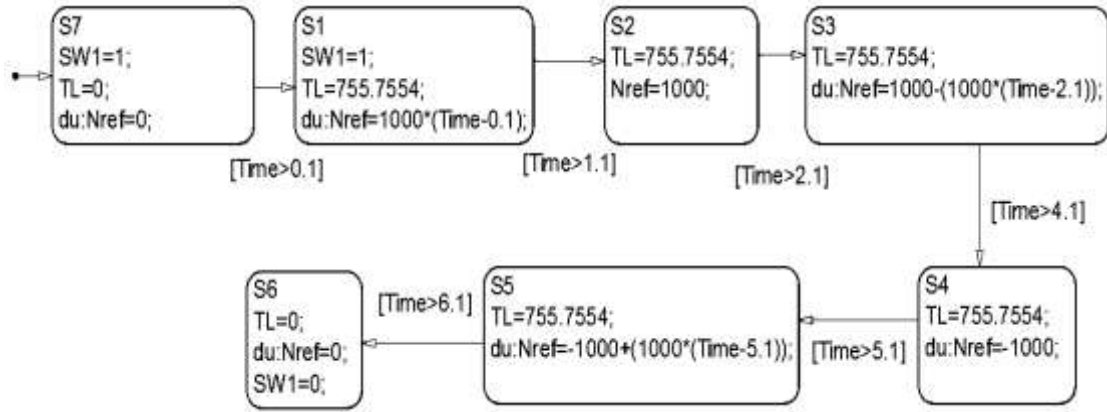
يتم تحديد قيمة مقاومة مقطع الفرملة بناء على الجهد الاعظمي المسموح به لحلقة التيار المستمر و الذي اعتمد وفق  $V_{act} = 600V$  العلاقة التالية:

$$R = \frac{V_{act}^2}{P_{motor}} = \frac{600^2}{110kw} = 3.3 \Omega \quad (26)$$

#### 6 - بناء المتحكم (state machine) لأتمته عمليات التشغيل (سرعة-عزم بدلالة الزمن).

سوف نقوم بدراسة خصائص أداء ومردود نظام قيادة مقترح، بناءً على رفع وتنزيل حمولة ميكانيكية محددة (TL=755.7Nm) مربوطة على محور المحرك بتسارع مضبوط (1000 rpm/sec).

يبين الشكل (9) مكونات المتحكم (state machine) للنظام المقترح والموافق للشكل (1).

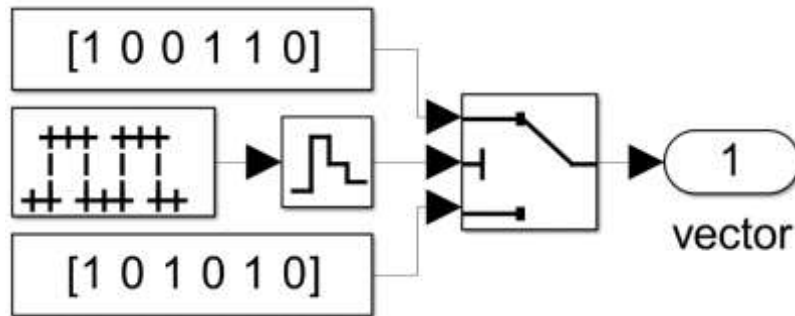


الشكل (9) مخطط الحالة لعملية التشغيل المقترحة.

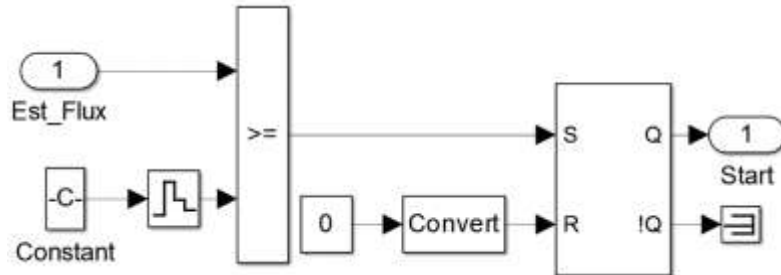
### الاستنتاجات والتوصيات:

تم تطوير نظام قيادة لمحرك سلك رافعة وفق مبدأ التحكم الشعاعي لملاحقة فيض الدائر وباستخدام مبدأ التعديل النبضي العرضاني الجيبي (SPWM) في بيئة الماتلاب يتميز بما يلي:

- 1 تم تحديد سعة مكثف حلقة التيار المستمر بناء على بحيث لا تتجاوز  $\Delta U_{DC;max} \% = 6\%$ .
- 2 تم الاخذ بعين الاعتبار اثناء بناء النظام عملية حساب مقاومة مقطع الفرملة ( Braking chopper ) (Resistance) وفق جهد اعظمي لحلقة التيار المستمر يعادل  $V_{act} = 600V$  وكانت تعادل  $3.3 \Omega$ .
- 3 إضافة حلقة تشكيل الفيض الاسمي للمحرك قبل عمليات التشغيل.



الشكل (10) صندوق تشكيل الفيض المغناطيسي.



الشكل (11) صندوق تأكيد وصول الفيض المغناطيسي الى القيمة الأعظمية.

- 4 تم استخدام مبدأ التعديل النبضي العرضاني الجيبي (SPWM) لعمل القالبه نظرا لما يتميز به هذا المبدأ عن مبدأ التعديل التشبعي Hysteresis PWM Current Control [11].
- 5 إضافة حلقة مقطع فرملة (Braking chopper).

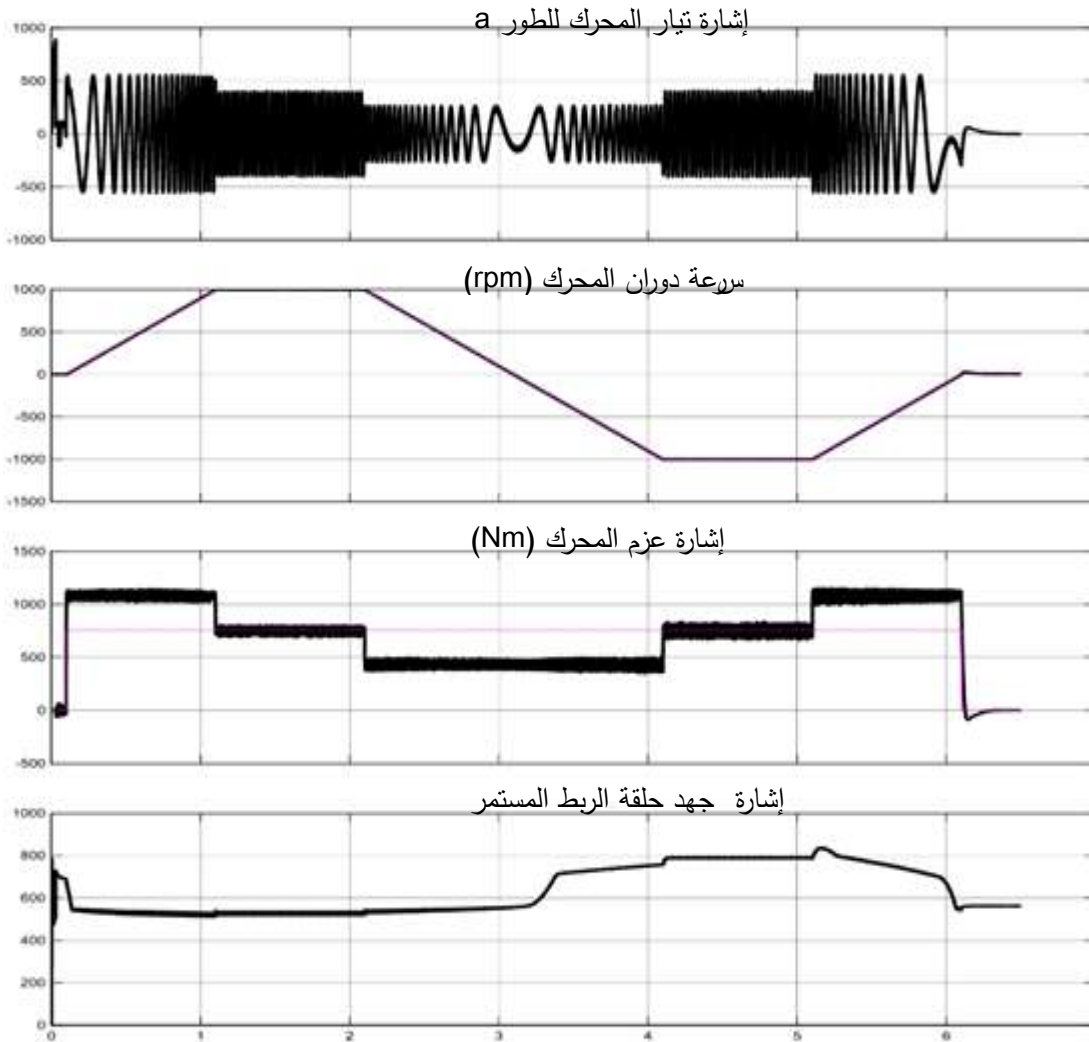
6 إضافة متحكم (state machine) لأتمته عمليات التشغيل (سرعة-عزم بدلالة الزمن).

7 تبين الاشكال(12-13) نتائج نظام القيادة المقترح وذلك بعد تصحيح كل من:

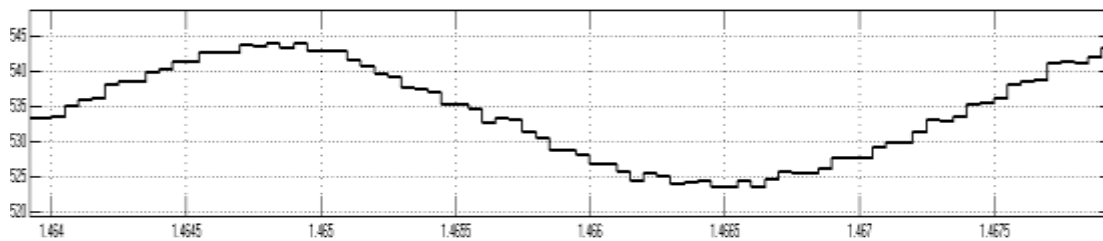
-ثوابت المتحكم التناسبي التكاملية ليتوافق مع النظام المقترح  $K_i = 0 ; K_p = 200$

تصميم نظام لتأمين فيض مغناطيسي اعظمي قبل عملية الإقلاع.

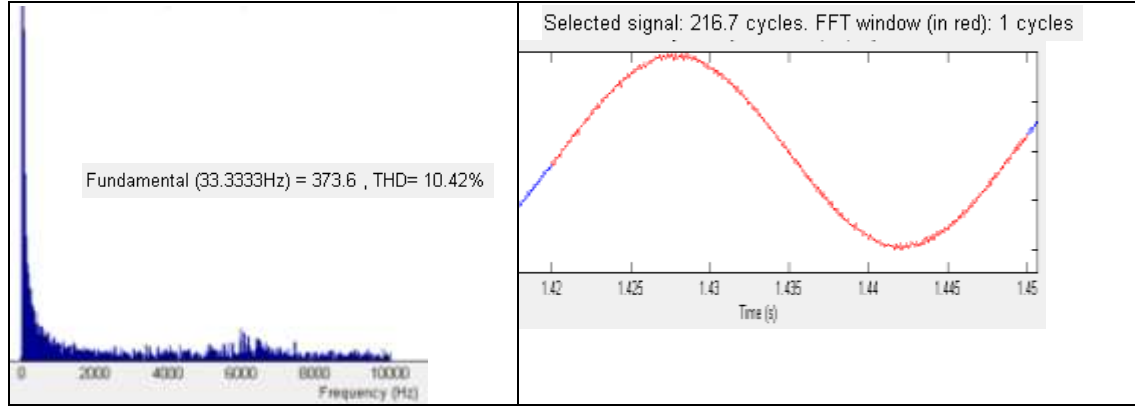
والتي تدل على تطابق بيانات عملية التشغيل المقترحة مع القيم الحقيقية:



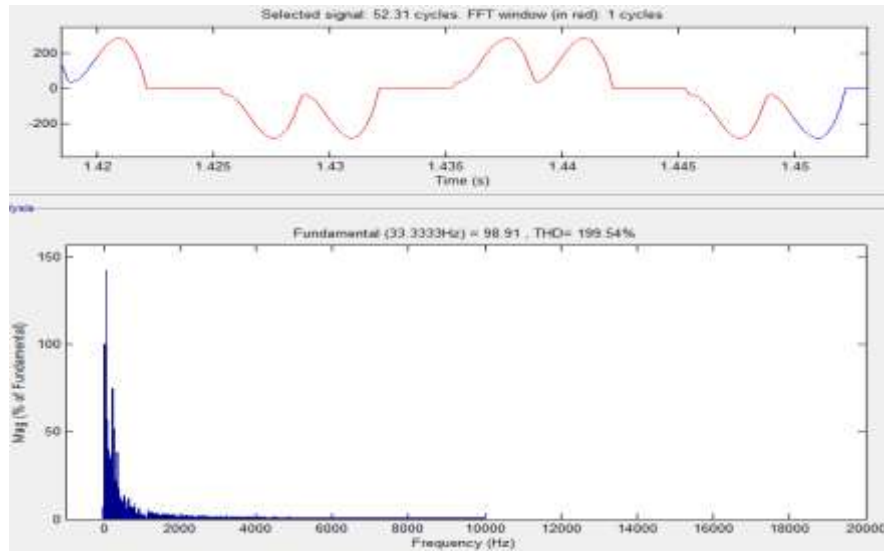
الشكل(12) نتائج نظام القيادة المقترح.



الشكل(13) جهد حلقة التيار المستمر.



الشكل (14) تيار المحرك.



الشكل (15) تيارات الشبكة التغذية الرئيسية

بمناقشة النتائج السابقة تبين ان:

- 8 - الخطأ الاعظمي بالسرعة  $\Delta N_{max} \% = 10$  وبالعزم  $\Delta T_{max} \% = 15$ .
- 8 - النظام المقترح يحقق إمكانية أتمته عملية التشغيل حسب طلب المستثمر (نظام قيادة لرافعة - مصعد - مروحة - الات تشكيل المعادن....).
- 9 - يحقق النظام المقترح تيارات محرك بتشوه كلي لا يتجاوز  $THD_{i,mmax} \% = 8\%$  مما يدل على أداء ومردود عاليين للنظام المقترح.
- 10 - يحقق النظام المقترح أداء ومردود عالي مقارنة ببقية الأنظمة التقليدية.
- 11 - لوحظ ان تشوه إشارة تيار الشبكة العامة قد وصل الى القيمة  $THD_{i,s} \% = 199.45 \%$  وهذا يستدعي عدم ربط احمال لا خطية على النفرع او استخدام مرشحات فعالة لتحسين تيار الشبكة و الحد من تأثير النظام على بقية الاحمال.
- 12 - إشارة تيار المحرك المبينة على الشكل (15) تمثل تابع دوري قريب جداً من الجيبي بتشوه كلي لا يتجاوز  $THD=10.42\%$ .



## المراجع:

- [1] PARK, C. W, KWON, W. H. *Simple and robust sensorless vector control of induction motor using stator current based MRAC*, Electric Power Systems Research 2004, 257-266.
- [2] BARAMBONES, O, GARRIDO, A. J. *A sensorless variable structure control of induction motor drives*, Electric Power Systems Research, 2004, 21-32.
- [3] Matsuse, K, Kouno, Y, Kawai, H, Oikawa, J. *Characteristics of speed sensor-less vector controlled dual induction motor drive connected in parallel fed by a single Inverter*, IEEE Trans .Industrial Applications, 2004, 153-161.
- [4] Chikhi, A, Djarallah, M, Chikhi, K. *A Comparative Study of Field-oriented Control and Direct-torque Control of Induction Motors using an Adaptive Flux Observer*, Serbian Journal of Electrical Engineering, 2010, 41-55.
- [5] VAS, P. *Vector Control of AC Machines*. Oxford Science Publications, 1994.
- [6] Meroufel, A, Massoum, A, Wira, P. *A Fuzzy Sliding Mode Controller for a Vector Controlled Induction Motor*, IEEE International Symposium on Publication, 2008, 1873-1878.
- [7] Kim, G. S. *Control of induction motors for both high dynamic performance and high power efficiency*, IEEE Trans, 1992, 323-333.
- [8] Zenginobuz, G. *Performance optimization of induction motors during voltage – controlled soft starting*, IEEE Trans, 2004, 278-288.
- [9] Vulosavic, S. N. E. *Robust DSP-Based efficiency optimization of a variable speed induction motor drive*, IEEE Trans, 2003, 560-570.
- [10] Ghazzi, S, Jelassi, K, Roboam, X. *Energy optimization of induction motor drives*, IEEE Conf. Industrial Technology (ICIT), 2004, 602-610.
- [11] Rathnakannan, K, Ranjan, V. *The Modeling and the Analysis of Control Logic for a Digital PWM Controller based on a Nano Electronic Single Electronic Transistor*, Serbian Journal of Electrical Engineering, 2008, 285-304.