

تطبيق مفهوم النمط المنزلق للحد من تأثير تغير مقاومة الدوار

على أداء المحرك التحريضي

م. حسين معراوي * د. كريمة سكر **

*طالب دراسات عليا (ماجستير)، في قسم هندسة نظم القدرة الكهربائية، كلية الهندسة الكهربائية والالكترونية،

جامعة حلب

**أستاذة مساعدة في قسم هندسة نظم القدرة الكهربائية، كلية الهندسة الكهربائية والالكترونية، جامعة حلب

الملخص

تقوم فكرة هذا البحث على تصميم نظام تحكم شعاعي بالاعتماد على مفهوم النمط المنزلق بهدف تنظيم سرعة المحرك التحريضي بالاعتماد على توجيه شعاع الفيض المغناطيسي للدوار على المحور d، حيث يركز البحث على حل مشكلة تطبيق جهود عالية عند تغير مقاومة الدوار، والذي يسبب حدوث إشباع مغناطيسي في الثغرة الهوائية، ويخفض من الأداء الديناميكي للمحرك.

تم كتابة النموذج الرياضي للمحرك في جملة محاور إحداثيات ثنائية متعامدة (α, β) ، وذلك بدلالة تيارات الثابت $I_{s\alpha}, I_{s\beta}$ وفيوض الدوار $\Phi_{r\alpha}, \Phi_{r\beta}$ ، إضافة للمعادلة الميكانيكية.

تم تصميم نظام القيادة المقترح في جملة محاور ثنائية متعامدة (d, q) دواراً بسرعة الحقل الدوار وهو يقدم ثلاثة إشارات تحكم، وهي مركبتي شعاع جهد الثابت V_{sd}, V_{sq} وتردد المقادير الكهربائية في الثابت ω_s ، وذلك بخلاف نظام القيادة التقليدي الذي ينتج إشارتي تحكم فقط (V_{sd}, V_{sq}) .

تظهر نتائج المحاكاة في بيئة Matlab\Simulink فعالية المنهجية المقترحة مقارنة مع المتحكمات التقليدية (PI)، فهي تؤمن استجابة سريعة، وكفاءة أكبر في التغلب على الاضطراب الخارجي، وتحقيق إمكانية العمل عند سرعات أعلى عند وجود تغيرات بقيمة مقاومة الدوار.

كلمات مفتاحية: متحكمات الخطوة الخلفية، المحرك التحريضي، التحكم الشعاعي.

ورد البحث للمجلة بتاريخ 2021 / /

قبل للنشر بتاريخ 2021 / /

Applying sliding mode concept to reduce the effect of changing rotor resistance on induction motor performance

Husein Maarrawi *, Karima suker **

*Post graduate student (Msc) Dept. of Electrical Power Systems, Faculty of Electrical and Electronic Engineering, University of Aleppo, Aleppo, Syria.

** Dept. of Electrical Power Systems, Faculty of Electrical and Electronic Engineering, University of Aleppo, Aleppo, Syria.

Abstract

The idea of this research is to design a vector control system based on the sliding mode concept in order to regulate the speed of the induction motor based on the direction of the magnetic flux vector of the rotor on the d axis. The research focuses on solving the problem of applying high voltages when changing the rotor resistance, which causes magnetic saturation in the air gap, and reduces the dynamic performance of the motor.

The mathematical model of the motor is written in frame (α, β) , where the state variables are $I_{s\alpha}, I_{s\beta}, \Phi_{r\alpha}, \Phi_{r\beta}$ and ω .

The proposed drive system is designed in synchronously rotating frame (d,q), and provides three control signals, which are the two components of the stator voltage vector V_{sd}, V_{sq} , and the angular speed of the rotor flux-oriented reference frame (ω_s), unlike the traditional driving system, which produces only two control signals V_{sd}, V_{sq} .

Simulation results in Matlab\Simulink show the effectiveness of the proposed methodology compared to traditional PI controllers, as it provides fast response, higher effective in overcoming external disturbance, and possibility of speeding at high values compared to traditional PI controllers when there is change in the value of the rotor resistance.

Key word: sliding mode control, induction motor, magnetic saturation

Received / /2021

Accepted / /2021

1- مقدمة:

تمتاز المحركات التحريضية بموثوقيتها العالية ونكاليها المنخفضة ومثانتها العالية، ويمكن اعتبارها الأكثر استخداماً في تشغيل المنشآت الصناعية وإدارتها [1] [2]. تتعلق سرعة المحرك التحريضي بمطال وتردد الجهد المطبق، وبعدد الأقطاب المغناطيسية، وقد كان من الصعب التحكم بمثل هذه المحركات [3].

تم إيجاد خوارزميات عدة ومنهجيات مختلفة من أجل بناء نظم قيادة للمحرك التحريضي، تتنوع هذه النظم وتتفاوت في بساطتها وقوتها. يعتبر التحكم الشعاعي أحد المنهجيات الشائعة لتنظيم سرعة وفيض المحرك التحريضي، حيث يمكن تشبيه أداء عمل المحرك التحريضي في هذه الحالة بأداء عمل محرك التيار المستمر، وذلك لأن هذه المنهجية تتيح إمكانية فصل التحكم بالعزم عن التحكم بالسرعة، [4]. من أجل تصميم وحدة التحكم الشعاعي يمكن استخدام طرق ومنهجيات تحكم عديدة، منها يعتمد على التحكم الأمثل [3] أو المنطق العائم [5] أو متحكم الخطوة الخلفية [6].

في هذا البحث تم تصميم نظام قيادة شعاعي للمحرك التحريضي (FOC) بالاعتماد على المتحكمات التقليدية (PI) لتنظيم السرعة ومركبة الفيض المغناطيسي على المحور d في الحلقة الخارجية وتنظيم التيارات في الحلقة الداخلية، في الخطوة التالية تم استبدال متحكم نمط منزلق بالمتحكمات التقليدية (PI) الموجودة في الحلقة الداخلية لتنظيم التيارات، كما تم إضافة محور ثالث لتنظيم مركبة الفيض المغناطيسي على المحور q، حيث ساهم ذلك بتحسين أداء المحرك التحريضي كما توضح ذلك نتائج المحاكاة في بيئة Matlab/Simulink.

2- أهمية البحث:

تبرز أهمية البحث في تقديم نظام قيادة متقدم، يتم فيه تنظيم شعاع فيض الدوار بشكل مباشر، حيث يساهم ذلك في الحد من تأثير تغيير قيمة مقاومة الدوار، والذي يسبب حصول الإشباع المغناطيسي، في نظام القيادة المقترح يتم توليد إشارة المقادير الكهربائية في الثابت كإشارة تحكم بدلاً من الحصول عليها كعلاقة جبرية عند استخدام المتحكمات التقليدية (PI) [2] [3].

3- طريقة البحث وخطواته:

تم في البداية نمذجة المحرك التحريضي في جملة محاور إحداثيات ثنائية متعامدة ثابتة لتكون الإشارات أقرب للواقع العملي، لكن من أجل نظام القيادة فقد تم الاعتماد على نموذج المحرك التحريضي في جملة محاور إحداثيات ثنائية متعامدة دوارة بسرعة الساحة المغناطيسية لتكون الإشارات ثابتة مع الزمن ونتمكن من تطبيق منهجية التحكم الشعاعي [6] [3].

يُعرض في بداية البحث دراسة لخوارزمية القيادة الشعاعية للمحرك التحريضي، حيث يتم استخدام متحكمات PI لتنظيم التيارات في الحلقة الداخلية، وكذلك متحكمات PI لتنظيم السرعة ومركبة شعاع الفيض المغناطيسي على المحور d.

في الخطوة الثانية تم استبدال متحكم النمط المنزلق في الحلقة الداخلية بمتحكمات PI لتنظيم التيارات، بينما تم الحفاظ على متحكمات PI في الحلقة الخارجية لتنظيم السرعة ومركبة شعاع الفيض المغناطيسي على المحور d، وكذلك تم إضافة محور تحكم ثالث باستخدام مفهوم النمط المنزلق لتنظيم مركبة شعاع الفيض المغناطيسي على المحور q. بعد ذلك تم تحليل ومحاكاة تلك الخوارزميتين في بيئة المحاكاة Matlab\Simulink.

3-1 التمثيل الرياضي للمحرك التحريضي ثلاثي الطور:

يعطى النموذج الرياضي للمحرك التحريضي ثلاثي الطور الذي يستخدم مركبتي شعاع فيض الدوار $\Phi_{r\alpha}^k, \Phi_{r\beta}^k$ مع مركبتي شعاع تيار الثابت $i_{s\alpha}^k, i_{s\beta}^k$ كمتحولات حالة، في نظام محاور الإحداثيات الثنائية المتعامدة والدوارة بسرعة عشوائية ω_k كما يلي [3]:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{s\alpha}^k \\ \dot{i}_{s\beta}^k \\ \dot{\Phi}_{r\alpha}^k \\ \dot{\Phi}_{r\beta}^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_5 & \omega_k & a_3 & a_4\omega \\ -\omega_k & -a_5 & -a_4\omega & a_3 \\ a_2 & 0 & -a_1 & \omega_k - \omega \\ 0 & a_2 & -\omega_k + \omega & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha}^k \\ i_{s\beta}^k \\ \Phi_{r\alpha}^k \\ \Phi_{r\beta}^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b & 0 \\ 0 & b \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s\alpha}^k \\ v_{s\beta}^k \end{bmatrix} \quad (1)$$

حيث أن ثوابت المعادلة السابقة تعطى بالعلاقات التالية:

$$a_1 = \frac{R_r}{L_r}, \quad a_2 = \frac{L_m R_r}{L_r}, \quad a_3 = \frac{L_m R_r}{\sigma L_s L_r^2}, \quad a_4 = \frac{L_m}{\sigma L_s L_r},$$

$$a_5 = \frac{L_r^2 R_s + L_m^2 R_r}{\sigma L_s L_r^2}, \quad b = \frac{1}{\sigma L_s}$$

أما علاقة العزم الكهرومغناطيسي فيمكن كتابتها بدلالة تيارات الثابت وفيوض الدوار كما يلي:

$$T_{em} = \frac{P L_m}{L_r} (\Phi_{ra}^k i_{s\beta}^k - \Phi_{r\beta}^k i_{s\alpha}^k) \quad (2)$$

والمعادلة الميكانيكية الأساسية يعبر عنها بالعلاقة التالية:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} (T_{em} - T_d - f\omega) \quad (3)$$

حيث:

$v_{s\beta}^k, v_{s\alpha}^k$: مركبتي شعاع جهد الثابت في نظام محاور إحداثيات ثنائية متعامدة ودوارة بسرعة عشوائية ω_k .

$\omega = p\Omega$: السرعة الزاوية الكهريائية للدوار وتساوي حاصل ضرب السرعة الزاوية

الميكانيكية للدوار Ω بعدد أزواج الأقطاب p .

L_m : المحارضة المتبادلة الدورية للثابت والدوار.

$L_{s(r)}$: المحارضة الدورية للثابت (للدوار).

$\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s L_r)$ تعرف بعامل التشنت.

J : عزم العطالة.

T_d : عزم الحمل المقاوم.

f : ثابت عزم الاحتكاك.

في المعادلتين (1) و(2)، المقادير الكهريائية (التيارات، الفيوض والجهود) في الثابت والدوار تم التعبير عنها في نظام محاور الإحداثيات المتعامدة α^k, β^k والدوارة بسرعة عشوائية ω_k .

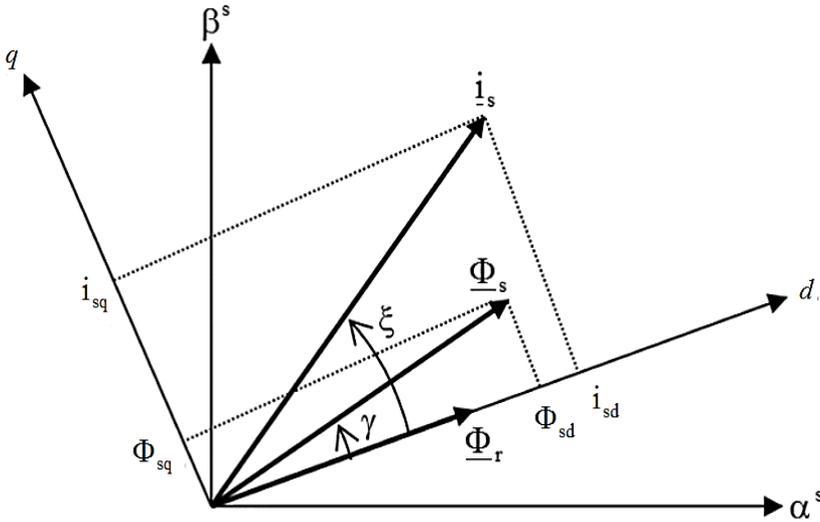
لإيجاد النموذج الرياضي للمحرك التحريضي في نظام المحاور المرتبطة بالثابت، المرتبطة بالدوار، أو المرتبطة بالحقل الدوار فإنه يكفي تبديل ω_k على التوالي بـ 0 (الرمز العلوي بـ s)، بـ ω (الرمز العلوي بـ r)، أو بـ ω_s (بدون رمز علوي).

2-3 التمثيل الصندوقي للمحرك التحريضي بالاعتماد على نظام القيادة الشعاعية:

قبل البدء بتنظيم سرعة المحرك التحريضي، لا بد من الحصول على المخططات الصندوقية الممثلة له وذلك للتمكن من حساب ثوابت المتحركات. في الواقع، بالاعتماد على نظام القيادة الشعاعية [7]، [8].

يمكن تقريب أداء المحرك التحريضي ثلاثي الطور بمحرك تيار مستمر ذي تهيج مستقل وذلك باعتبار نظام محاور الإحداثيات الثنائية دوار بسرعة الحقل الدوار، أي $\omega_k = \omega_s$ ، وتوجيه شعاع فيض الدوار $\underline{\Phi}_r$ باتجاه المحور d كما هو مبين في الشكل (1)، أي أن:

$$\begin{aligned} \underline{\Phi}_r &= \underline{\Phi}_{rd} = \underline{\Phi}_r \\ \underline{\Phi}_{rq} &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$



الشكل (1): توجيه شعاع تدفق الدوار باتجاه المحور d

باستخدام الفرضيتين السابقتين وبإهمال الاضطرابات الداخلية يمكن كتابة المعادلتين (1) و(2) على الشكل التالي:

$$\frac{di_{sd}}{dt} = -a_5 i_{sd} + b v_{sd} \quad (5)$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = -a_5 i_{sq} + b V_{sq} \quad (6)$$

$$\frac{d\Phi_{rd}}{dt} = a_2 i_{sd} - a_1 \Phi_{rd} \quad (7)$$

$$\frac{d\Phi_{rq}}{dt} = a_2 i_{sq} - (\omega - w_k) \Phi_{rd} = 0 \quad (8)$$

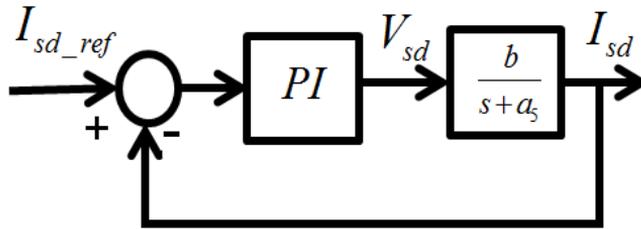
$$T_{em} = \frac{PL_m}{L_r} \Phi_{rd} i_{sq} \quad (9)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{P}{J} \left(\frac{PL_m}{L_r} \Phi_{rd} i_{sq} - T_d - \frac{f}{P} \omega \right) \quad (10)$$

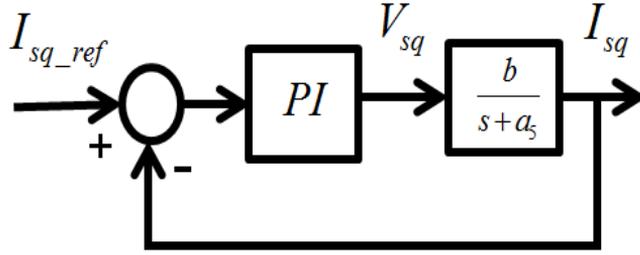
2-3 تنظيم التيارات باستخدام متحكمات PI:

سنقوم بتنظيم مركبتي التيار i_{sd} و i_{sq} كلاً على حدة باستخدام منظمات PI، والتي تمتاز ببساطتها وسهولة تطبيقها.

يوضح الشكل (2) المخطط الصندوقي لحلقة تنظيم التيار على المحور d، حيث تم حساب ثوابت المنظم باستخدام طريقة حذف صفر مع قطب، وبنفس الطريقة يمكن تنظيم مركبة التيار على المحور q كما هو موضح في الشكل (3).

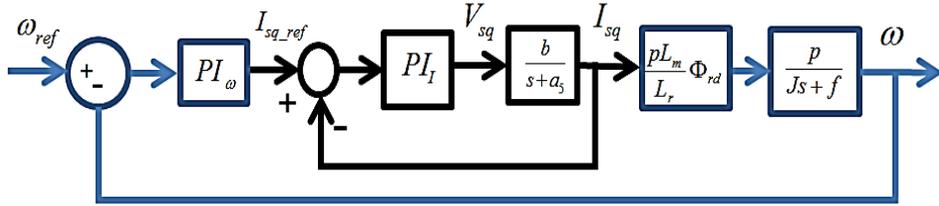


الشكل (2): المخطط الصندوقي لحلقة تنظيم التيار حسب المحور d باستخدام المنظم PI

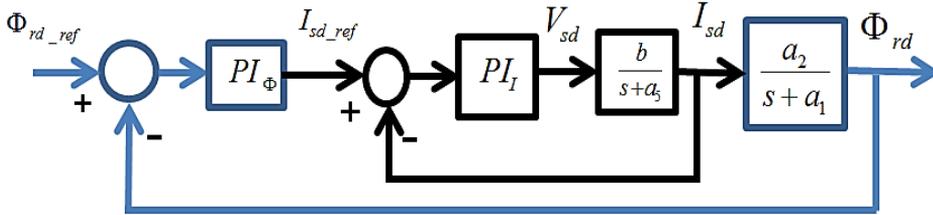


الشكل (3): المخطط الصندوقي لحلقة تنظيم التيار حسب المحور q باستخدام المنظم PI

في الحلقة الخارجية تم تنظيم كل من السرعة ومركبة الفيض على المحور q، حيث الشكل (4) يبين المخطط الصندوقي لتنظيم السرعة، بينما يبين الشكل (5) المخطط الصندوقي لتنظيم مركبة شعاع فيض الدوار على المحور d.



الشكل (4): المخطط الصندوقي لحلقة تنظيم السرعة مع تنظيم التيار على المحور q



الشكل (5): المخطط الصندوقي لحلقة تنظيم مركبة شعاع فيض الدوار مع تنظيم التيار على المحور d

3-3 متحكم النمط المنزلق:

يعتبر النمط الانزلاقي عبارة عن نظام عمل خاص بالأنظمة ذات البنية المتغيرة، وقد تم دراسته لأول مرة في الاتحاد السوفييتي سابقاً، وهي تمتاز بمتانتها وقدرتها على مقاومة تغيرات بارامترات الآلة وسهولة تطبيقها نسبياً [9]. تعتمد هذه المنهجية على قانون ليابونوف لضمان استقرار النظام [10].

تتضمن هذه الخوارزمية مرحلتين: المرحلة الأولى هي مرحلة الجذب، حيث يتم جذب متحول الحالة الخاضع للتحكم باتجاه السطح الانزلاقي .

المرحلة الثانية فهي مرحلة الانزلاق، حيث ينزلق المتحول باتجاه نقطة التوازن [9] [11]. يتضمن قانون التحكم النهائي وفق هذه الخوارزمية حدين أساسيين: الحد الأول يعبر عن الجهد المكافئ، والحد الثاني يعبر عن جهد الجذب كما توضح المعادلة الآتية [9] [12]:

$$v = v_{eq} + v_{att} \quad (11)$$

حيث:

v_{eq} : الجهد المكافئ وهو الجهد الذي يصف ديناميكية النظام على سطح الانزلاق.
 v_{att} : جهد الجذب وهو الجهد الذي يلزم متحول الحالة الخاضع للنظام بالتحرك نحو سطح الانزلاق.

- تنظيم التيار على المحور d:

بدايةً لا بد من اختيار تابع تبديل مناسب يربط بين المتحول المراد تنظيمه والقيمة المرجعية لهذا المتحول، يجب أن تحقق معادلة تابع التبديل شرطين: الشرط الأول أن تكون هذه المعادلة متناهية للصفر عند التنظيم، والشرط الثاني أن تعطي باشتقاقها الدخل الفعال في النظام.

يمكن كتابة تابع التبديل لحلقة تنظيم التيار وفق المحور d والذي يحقق الشروط المذكورة أعلاه كالاتي:

$$S_{id} = I_{sd-ref} - I_{sd} \quad (12)$$

باشتقاق العلاقة السابقة نجد:

$$\dot{S}_{id} = -\dot{I}_{sd} \quad (13)$$

بتعويض العلاقة (5) نجد:

$$\dot{S}_{id} = -a_5 i_{sd} + b V_{sd} \quad (14)$$

لكي نلزم التيار بالتحرك نحو سطح الانزلاق فإنه لا بد من تعويض \dot{S}_{id} بقانون جذب مناسب.

حيث إن قانون الجذب يجب أن يحقق الشروط الموصوفة بالعلاقات الآتية [9] [11]:

$$S_{id} = 0 \ \& \ \dot{S}_{id} = 0 \quad (15)$$

$$S_{id} > 0 \ \& \ \dot{S}_{id} < 0 \quad (16)$$

$$S_{id} < 0 \ \& \ \dot{S}_{id} > 0 \quad (17)$$

هنالك عدة قوانين للجذب منها قانون الجذب بسرعة ثابتة وتناسبية كما توضح العلاقة:

$$\dot{S}_{id} = -K_1 \text{sig} S_{id} - Q_1 S_{id} \quad (18)$$

حيث إن: K_i ، Q_i ثابتين تجريبيين.

بإجراء مساواة بين العلاقتين (18) و(14) نجد:

$$-K_1 \text{sig} S_{id} - Q_1 S_{id} = -a_5 i_{sd} - b V_{sd} \quad (19)$$

بإصلاح العلاقة (19) نجد:

$$V_{sd} = \frac{1}{b} (a_5 i_{sd} + K_1 \text{sig} S_{id} + Q_1 S_{id}) \quad (20)$$

- تنظيم التيار على المحور q:

من أجل تنظيم تيار المحرك على المحور q نفرض أولاً تابع التبديل التالي:

$$S_{iq} = I_{sq\text{-ref}} - I_{sq} \quad (21)$$

باشتقاق العلاقة السابقة نجد:

$$\dot{S}_{iq} = -\dot{I}_{sq} \quad (22)$$

بتعويض العلاقة (6) نجد:

$$\dot{S}_{iq} = -a_5 i_{sq} + b V_{sq} \quad (23)$$

مشتق قانون التبديل يكتب كمايلي:

$$\dot{S}_{iq} = -K_2 \text{sig} S_{iq} - Q_2 S_{iq} \quad (24)$$

بإجراء مساواة بين العلاقتين (24) و(23) نجد:

$$-K_2 \text{sig} S_{iq} - Q_2 S_{iq} = -a_5 i_{sq} + b V_{sq} \quad (25)$$

بإصلاح العلاقة (25) نجد:

$$V_{sq} = \frac{1}{b} (a_5 i_{sq} + K_1 \text{sig} S_{id} + Q_1 S_{id}) \quad (26)$$

- تنظيم الفيض على المحور q:

وجدنا عند استخدام المتحكمات التقليدية (PI) أنه للحصول على قيمة تردد المقادير الكهربائية في الدوار نلجأ للعلاقة (8).

حيث أن العلاقة الأخيرة تتضمن بارامترات متغيرة online لكن العلاقة ستبقى تعتمد القيم الاسمية للمحرك، وهذا ما يسبب الدخول بحالة إشباع مغناطيسي وعدم قدرة النظام على تحقيق التوجيه الصحيح لشعاع الفيض المغناطيسي.

لذلك سنستخدم هنا تنظيم مركبة الفيض على المحور q باستخدام متحكم خاص بها يعطي على خرجه قيمة ω_s وذلك وفق الشكل التالي:

- تنظيم التيار على المحور q:

من أجل تنظيم فيض الدوار على المحور q نفرض أولاً تابع التبديل التالي:

$$S_{\Phi q} = \Phi_{rq-ref} - \Phi_{rq} \quad (27)$$

باشتقاق العلاقة السابقة نجد:

$$\dot{S}_{\Phi q} = -\dot{\Phi}_{sq} \quad (28)$$

بتعويض العلاقة (8) نجد:

$$\dot{S}_{\Phi q} = -a_2 i_{sq} - (\omega - w_k) \Phi_{rd} \quad (29)$$

مشتق قانون التبديل يكتب كمايلي:

$$\dot{S}_{\Phi q} = -K_3 \text{sig} S_{\Phi q} - Q_3 S_{\Phi q} \quad (30)$$

بإجراء مساواة بين العلاقتين (30) و (29) نجد:

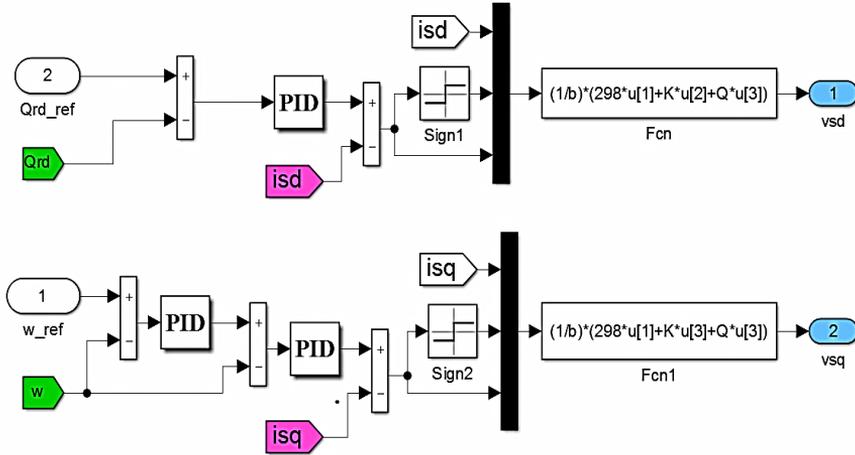
$$-K_3 \text{sig} S_{\Phi q} - Q_3 S_{\Phi q} = -a_2 i_{sq} - (\omega - w_k) \Phi_{rd} + a_1 \Phi_{rq} \quad (31)$$

بإصلاح العلاقة (31) نجد:

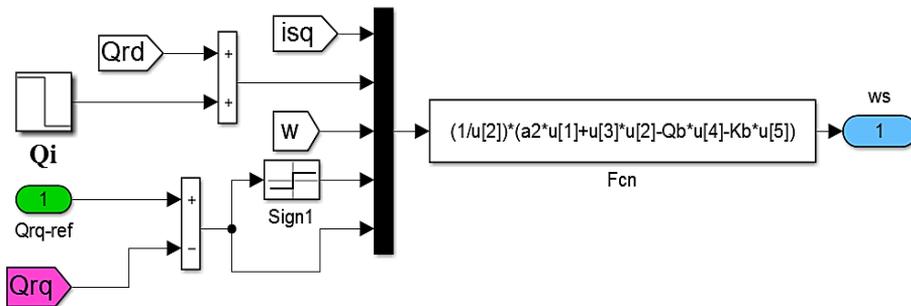
$$w_k = \frac{1}{\Phi_{rd}} (a_2 i_{sd} + \omega \Phi_{rd} - K_3 \text{sig} S_{\Phi q} - Q_3 S_{\Phi q}) \quad (32)$$

في كلا حالتين تنظيم السرعة والفيض سواء باستخدام متحكمات PI أو باستخدام متحكمات النمط المنزلق فإنه يتم تحويل مركبات جهد الثابت V_{sd}^k ، V_{sq}^k إلى الجهود الثلاثية بالاعتماد على تحويل بارك بعد تحديد قيمة W_k .
 لكن الاختلاف بين الحالتين أنه لأجل متحكمات PI فإنه يتم الحصول على إشارة w_k من العلاقة (8) أما لأجل متحكمات النمط المنزلق يتم الحصول عليها من خلال العلاقة (32).

الشكل (6) يوضح المخطط الصندوقي لتنظيم التيارات في الحلقة الداخلية باستخدام متحكمات النمط المنزلق وتنظيم السرعة و فيض الدوار على المحور d باستخدام متحكمات منظمات PI، بينما الشكل (7) يوضح المخطط الصندوقي لتنظيم فيض الدوار على q باستخدام متحكم النمط المنزلق.

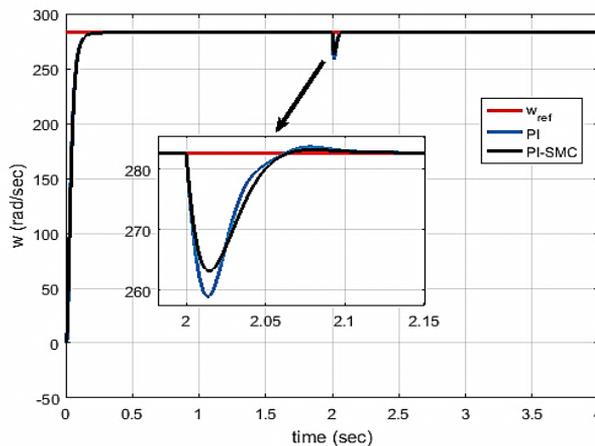


الشكل (6): المخطط الصندوقي لتنظيم التيارات في الحلقة الداخلية باستخدام متحكمات النمط المنزلق وتنظيم السرعة و فيض الدوار على المحور d باستخدام متحكمات منظمات PI



الشكل (7): المخطط الصندوقي لتنظيم فيض الدوار على q باستخدام متحكم النمط المنزلق
4- مناقشة النتائج:

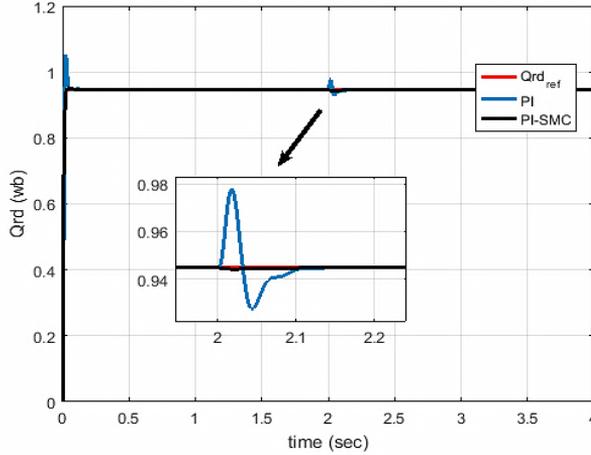
تم بداية تنظيم سرعة المحرك عند القيمة الاسمية (282.8 rad/sec)، وتنظيم مركبتي شعاع الفيض المغناطيسي عند القيم ($\Phi_{rd} = 0.945\text{wb}, \Phi_{rq} = 0\text{wb}$) مع تطبيق عزم اسمي (1.664 N.m) في اللحظة 2 sec، فكانت استجابة النظام من أجل تنظيم السرعة كما في الشكل (8)، حيث نلاحظ أن كلا نظامي القيادة يحققان سرعة استجابة واحدة، مع أفضلية نظام القيادة PI-SMC في التغلب على حالة تطبيق الحمل.



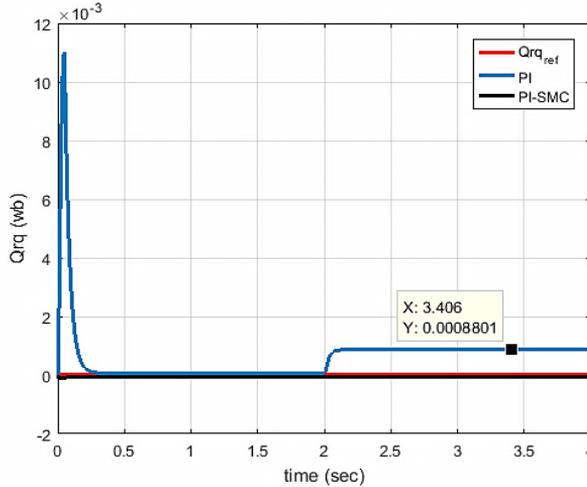
الشكل (8): استجابة النظام من أجل تنظيم السرعة

الشكلين (9) و(10) يوضحان استجابة النظام من أجل تنظيم شعاع الفيض المغناطيسي، حيث نلاحظ أن كلا نظامي القيادة يمتلكان نفس سرعة الاستجابة من أجل تنظيم مركبة الفيض على المحور d ، مع أفضلية نظام القيادة المقترح PI-SMC في التغلب الاضطراب الناتج عن تطبيق الحمل. أما من أجل تنظيم مركبة الفيض على المحور q

فلاحظ وجود خطأ ستاتيكي صغير جداً من أجل نظام القيادة التقليدي PI-PI أما من أجل نظام القيادة PI-SMC فقيمة الخطأ تساوي الصفر.

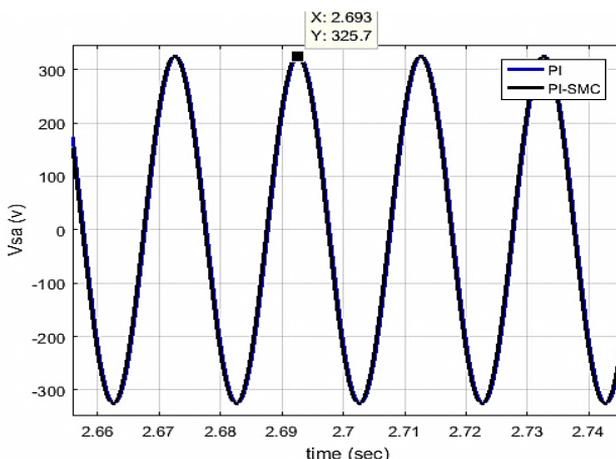


الشكل (9): استجابة النظام من أجل تنظيم مركبة الفيض على المحور d



الشكل (10): استجابة النظام من أجل تنظيم مركبة الفيض على المحور q

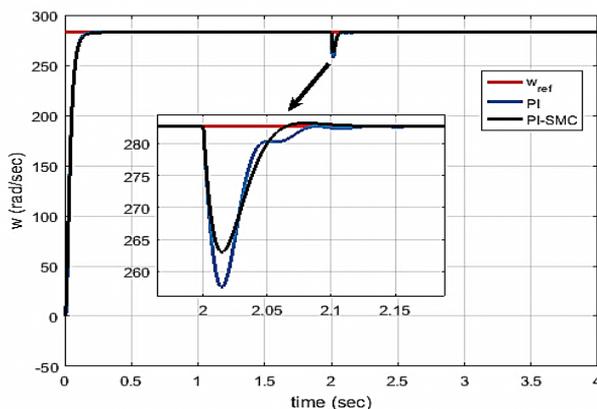
الجهد المطبق على الطور الأول يوضحه الشكل (11) حيث نلاحظ أنه يتم تطبيق نفس قيمة الجهد من أجل كلا نظامي القيادة.



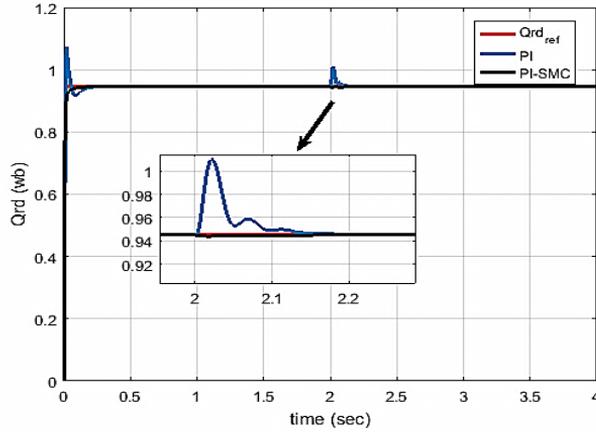
الشكل (11): جهد الطور الأول للمحرك التحريضي

عند زيادة قيمة مقاومة الدوار بمقدار 40%، وإعادة رسم نتائج المحاكاة، نلاحظ من الشكل (12) أن كلا نظامي القيادة يحافظان على نفس الأداء من أجل تنظيم السرعة، كما نلاحظ ذلك من أجل تنظيم مركبة الفيض على المحور d حيث يوضح الشكل (13) استجابة النظام من أجل تنظيم الفيض على المحور d ، أما على المحور q فنلاحظ من الشكل (14) أن مقدار الخطأ يزداد بشكل كبير من أجل نظام القيادة التقليدي PI-PI مقارنة مع نظام القيادة المقترح PI-SMC.

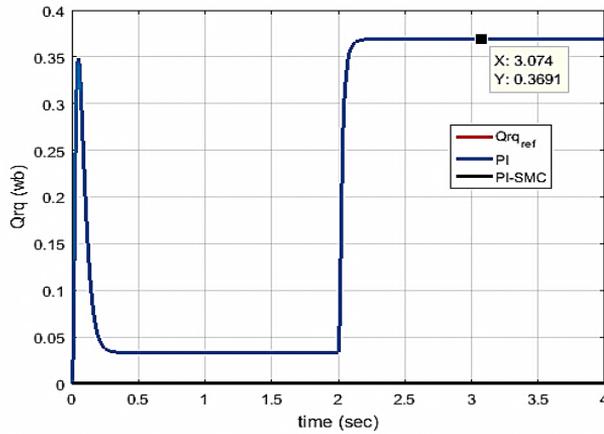
السبب في زيادة الخطأ الستاتيكي من أجل تنظيم الفيض على المحور q هو زيادة الجهد المطبق، حيث نلاحظ أن الجهد المطبق في حالة نظام القيادة PI-PI قد زاد بنسبة 7% بينما من أجل نظام القيادة PI-SMC فكانت نسبة زيادة الجهد هي 3.6% وذلك بحسب ما يوضحه الشكل (15).



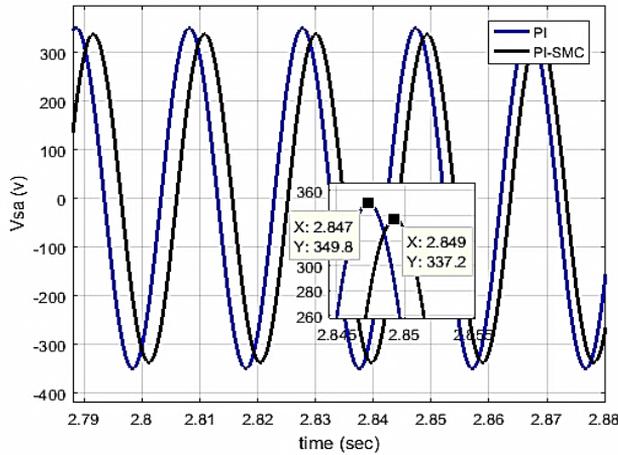
الشكل (12): استجابة النظام من أجل تنظيم السرعة بعد زيادة مقاومة الدوار بمقدار 40%



الشكل (13): استجابة النظام من أجل تنظيم الفيض على المحور d بعد زيادة مقاومة الدوار بمقدار 40%

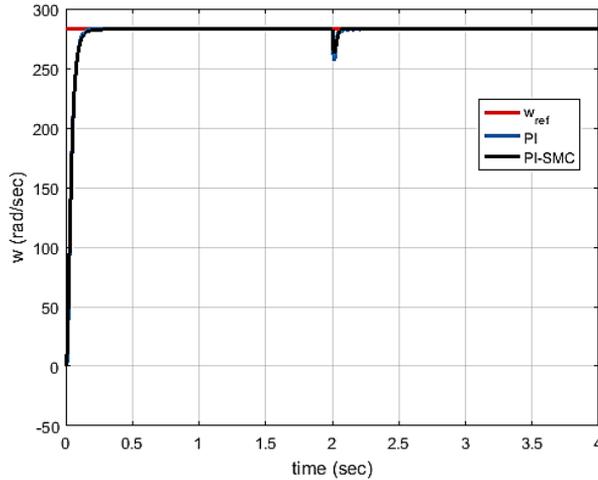


الشكل (14): استجابة النظام من أجل تنظيم الفيض على المحور q بعد زيادة مقاومة الدوار بمقدار 40%

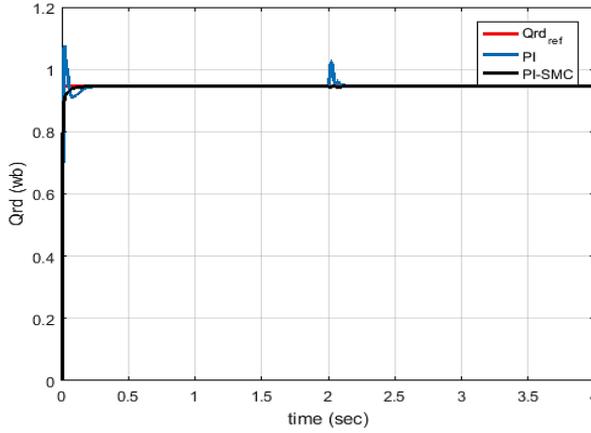


الشكل (15): الجهد المطبق على الطور الأول بعد زيادة مقاومة الدوار بمقدار 40%

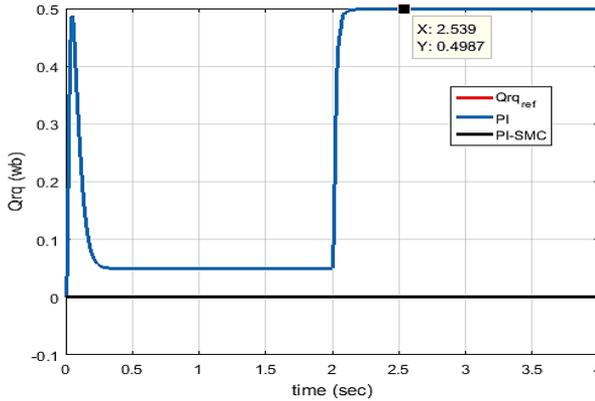
من أجل زيادة قيمة مقاومة الدوار بمقدار 60%، فإن الشكل (16) يوضح استجابة النظام من أجل تنظيم السرعة، حيث نلاحظ أن أداء النظام من أجل تنظيم السرعة مشابه لما سبق، ونفس الأمر نلاحظه من أجل تنظيم الفيض على المحور d كما يوضح ذلك الشكل (17).



الشكل (17): استجابة النظام من أجل تنظيم السرعة بعد زيادة مقاومة الدوار بمقدار 60%

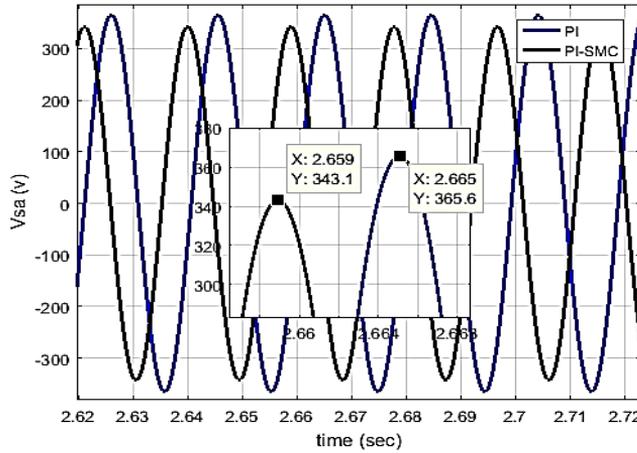


الشكل (18): استجابة النظام من أجل تنظيم الفيض على المحور d بعد زيادة مقاومة الدوار بمقدار 60%
 الشكل (18) يوضح استجابة النظام من أجل تنظيم مركبة الفيض على المحور q حيث نلاحظ أن مقدار الخطأ الستاتيكي من أجل تنظيم الفيض على المحور q قد ازداد بشكل أكبر، وهذا الأمر ناتج كما ذكرنا سابقاً عن الزيادة في قيمة الجهد المطبق كما يوضح ذلك الشكل (19)، فمن أجل نظام القيادة PI-PI كانت نسبة الزيادة هي 12.3%، أما من أجل نظام القيادة PI-SMC كانت نسبة الزيادة هي 5.5%.

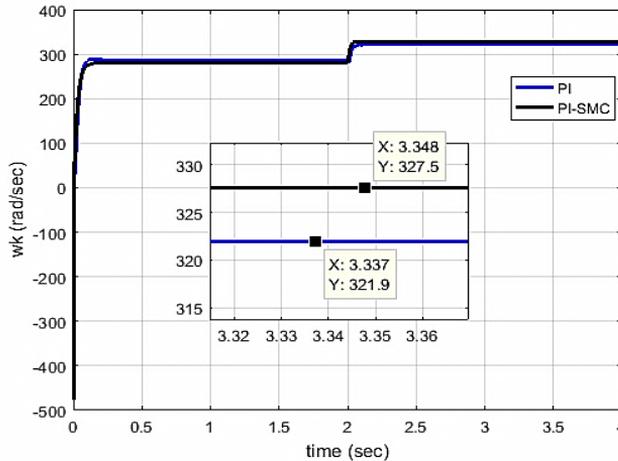


الشكل (19): استجابة النظام من أجل تنظيم الفيض على المحور q بعد زيادة مقاومة الدوار بمقدار 60%
 من الجدير بالذكر أنه بعد زيادة قيمة مقاومة الدوار، فإن الجهد سوف يزداد حتماً لتعويض مقدار هبوط الجهد الناتج عن زيادة قيمة المقاومة، لكن هناك سبب آخر لزيادة الجهد، وهو الخطأ الناتج في حساب قيمة سرعة المحاور w_k والتي تستخدم من أجل التحويل من الاشارات الثنائية التي ينتجها نظام القيادة إلى الإشارات الثلاثية الواجب

تطبيقها (تحويل بارك العكسي)، فكما ذكرنا أنه من أجل نظام القيادة التقليدي فيتم حساب قيمة w_k بناء على العلاقة (8) أما من أجل نظام القيادة المقترح فيتم توليدها وفق قانون التحكم اللازم تطبيقه من أجل تنظيم الفيض على المحور q كما يوضح ذلك العلاقة (32)، إن الشكل (21) يوضح إشارة سرعة المحاور w_k من أجل كلا نظامي القيادة بعد زيادة قيمة مقاومة الدوار.

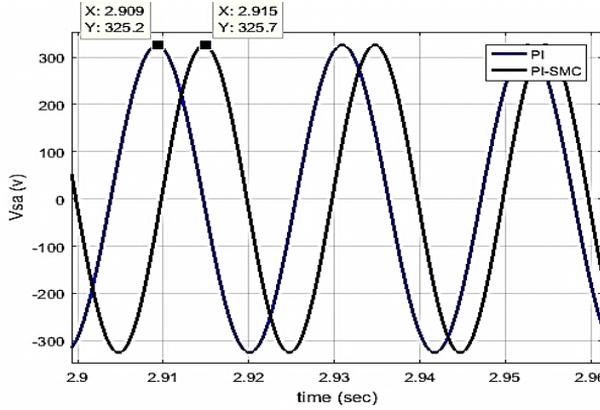


الشكل (20): الجهد المطبق على الطور الأول بعد زيادة مقاومة الدوار بمقدار 60%

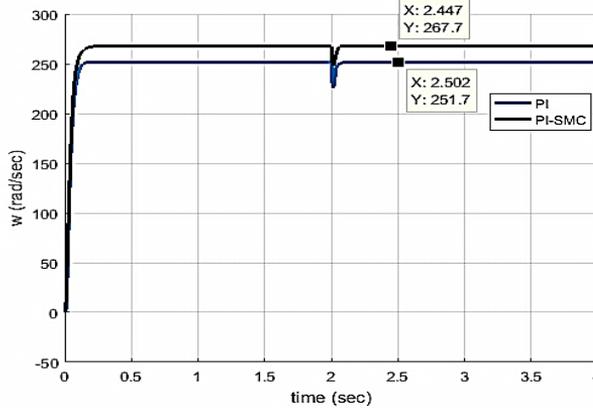


الشكل (21): إشارة سرعة المحاور w_k من أجل كلا نظامي القيادة بعد زيادة قيمة مقاومة الدوار بمقدار 60% قيمة الزيادة الكبيرة في الجهد المطبق سينعكس أثرها على قيمة السرعة التي يمكن أن يعمل عندها المحرك.

فمن المعلوم أنه لا يمكن تطبيق قيم للجهد أكبر من القيمة الاسمية، فمن أجل الحفاظ على حدود القيم الاسمية للمحرك، كما يوضح ذلك الشكل (22)، ومع زيادة قيمة مقاومة الدوار بمقدار 50% فإن أكبر سرعة يمكن أن يدور عندها المحرك من أجل نظام القيادة التقليدي هي 252.7 rad/sec أي ما يعادل 89% من السرعة الاسمية. أما من أجل نظام القيادة PI-SMC فإن أكبر سرعة يمكن أن يدور عندها المحرك هي 267.7 rad/sec أي ما يعادل 94% من السرعة الاسمية، ويوضح ذلك الشكل (23).



الشكل (22): إشارة الجهد المطبق على الطور الأول من أجل كلا نظامي القيادة، بعد زيادة قيمة مقاومة الدوار وضبط قيمة السرعة بحيث يتم المحافظة على القيمة الاسمية للجهد



الشكل (23): إشارتي السرعة لكل من نظامي القيادة بعد زيادة قيمة مقاومة الدوار مع الأخذ بعين الاعتبار الحفاظ على القيمة الاسمية للجهد

5- الخاتمة والاستنتاجات:

توضح نتائج المحاكاة أنه عند استخدام متحكم النمط المنزلق في نظام القيادة الشعاعي فإن أداء المحرك التحريضي أصبح أكثر كفاءةً، إذ تم التغلب على مشكلة الاشباع المغناطيسي الحاصلة عند وجود الحمل وتغيّر قيمة مقاومة الدوار، حيث كان نظام القيادة المقترح يولد إشارة w_k مناسبة من أجل تنظيم مركبة فيض الدوار على المحور q، وبالتالي ساهم هذا الأمر بالحيلولة دون حدوث زيادة كبيرة في الجهد مع زيادة قيمة مقاومة الدوار، فمن أجل زيادة قيمة مقاومة الدوار بمقدار 40% كانت نسبة زيادة الجهد هي 7% من أجل نظام القيادة التقليدي و 3.6% من أجل النظام المقترح، أما من أجل زيادة مقاومة الدوار بمقدار 60% فقد كانت نسبة زيادة الجهد هي 12.6% من أجل النظام التقليدي و 5.5% من أجل النظام المقترح.

مقدار زيادة الجهد ينعكس بشكل مباشر على قيمة السرعة التي يمكن أن يعمل عندها المحرك، فمع زيادة قيمة مقاومة الدوار ومن أجل الحفاظ على قيمة اسمية للجهد ينبغي تقليل قيمة السرعة المطلوبة لعمل المحرك، لكن من خلال إدخال مفهوم النمط المنزلق فإنه يمكن الحد من مقدار هذا التأثير، حيث أوضحت نتائج المحاكاة أنه للحفاظ على قيم مسموحة للجهد عند القيم الاسمية ومع زيادة قيمة مقاومة الدوار بمقدار 50% فإنه يمكن تشغيل المحرك عند 89% من السرعة الاسمية من أجل نظام القيادة التقليدي، بينما يمكن الوصول إلى 94% من السرعة الاسمية من أجل نظام القيادة المقترح.

القيم الاسمية لبارامترات المحرك

P	2	R_r, R_s	31Ω, 45.83Ω
Power	250W	L_r, L_s	1.11H, 1.24H
V_s	Y/Δ 400V/230V	L_m	1.054H
I_s	Y/Δ 0.76A/1.32A	J	1e-3Kg.m²
N	1350rpm	F	1e-3Kg.m²/sec

المراجع

- 1- O.S. Ebrahim M.F. Salem P.K. Jain M.A. Badr "**Application of Linear Quadratic Regulator Theory to The Stator Field-Oriented Control Of Induction**", Electric Power Applications Received On 8th July 2009
- 2- M. Nasir Uddin, Tawfik S. Radwan, And M. Azizur Rahman, "**Performances Of Fuzzy-Logic-Based Indirect Vector Control For Induction Motor Drive**", Transactions On Industry Applications, Vol. 38, No. 5, September/October 2002
- 3- Abdulrahman Huseen Alassaad, "**Optimal Controllers Based Drive System Implementation To Control Three Phase Induction Motor**", Faculty Of Electrical & Electronic Engineering, Electrical Drive Department, Matser Thesis, 2019.
- 4- Ashutosh Mishra , Prashant Choudhary, "**Speed Control Of An Induction Motor By Using Indirect Vector Control Method**", International Journal Of Emerging Technology And Advanced Engineering, 2012.
- 5- Biranchi Narayan Kar, K.B. Mohanty, Madhu Singh, "**Indirect Vector Control Of Induction Motor Using Fuzzy Logic Controller**", IEEE, 2011.
- 6- Ramzi Trabelsi, Adel Khedher, Mouhamed Faouzi Mimouni, Faouzi m'sahli, "**Backstepping Control For An Induction Motor Using An Adaptive Sliding Rotor-Flux Observer** ", Electric Power Systems Research 93 , 2012.
- 7- Blaschke F., "**The Principle Of Field Oriented As Applied To The New Transvector Closed-Loop Control System For Rotating Machines**", Siemens Review, 39(4), Pp. 217-220. 1972.
- 8- Leonhard W, "**Control of Electrical Drives**", Spring Verlag, 425 Pages. 1996.
- 9- Ahmad Amer Al-Mallouhi, "**FPGA-Based Design And Implementation Of Dc Motor Drive System Using Sliding Mode Control Technique**", Faculty Of Electrical & Electronic Engineering, Electrical Drive Department, Matser Thesis, 2010.
- 10- Can Dikmen, Aydemir Arısoy, Hakan Temeltaş, "**Attitude Control Of A Quadrotor**", Ieee, 78-1-4244-3628-6/09, 2009.
- 11- Xiaoguang Zhang, Lizhi Sun, And Li Sun, "**Nonlinear Speed Control For Pmsm System Using Sliding-Mode Control And**

Disturbance Compensation Techniques", Transactions On Power Electronics, Vol. 28, No. 3, March 2013.

12- Biranchi Narayan Kar, Satish Choudhury, Kanungo Barada Mohanty, **"Indirect Vector Control of Induction Motor Using Sliding-Mode Controller"**, Sustainable Energy and Intelligent System Maduravoyal, Chennai, Tamil Nadu, India. July. 20-22, 2011.

