

تخمين موضع وسرعة محرك ميكروي متواقت ذي مغناط دائمة باستخدام تقنيتي الفيض المتشابك والنمط الانزلاقي

*د. ياسر الحسون

(الإيداع: 11 نيسان 2018، القبول: 30 آب 2018)

ملخص:

تتميز المحركات المتواقتة الميكروية ذات المغناط الدائمة Micro_PMSM بأن كثافة الاستطاعة عالية جداً وهذا مناسب للتطبيقات التي تتطلب حجم صغير واستطاعة عالية مثلاً في تطبيق مقبض طبيب الأسنان والذي يستخدمه طبيب الأسنان في إزالة التسوس من أسنان المريض لأنه في المقبض المعتمد على العنفة الهوائية تكون السرعة غير متحكم بها مما يخفض من فعاليته عند تنظيف السن حيث تنقص سرعة المقبض عند إزالة التسوس. أما من الناحية الأخرى فإن التحكم بهذه المحركات يتصف بالصعوبة نتيجة وجود المغناط الدائمة التي تعطي فيض مغناطيسي ثابت والذي لا يمكن التحكم به. لذلك تم تصميم نظام تحكم لقيادة هذا المحرك بالاعتماد على تخمين فيض الثابت التسريبي في تخمين موضع دوار المحرك وسرعته. حيث تم تحصيل الخطأ بين تيارات الثابت المخمنة والحقيقية لتصحيح الخطأ الناتج في الموضع المخمن. وذلك باستخدام برنامج Matlab/simulink، حيث تم تطبيق خوارزمية التحكم الشعاعي بالفيض الموجه (FOC) Field Oriented Control والتي تعتمد على توجيه فيض الدوار وفق المحور الطولاني وذلك عن طريق طلب تيار مرجعي $i_{sd}=0$ وسرعة مرجعية.

توصلنا الى أن خوارزمية التحكم بالفيض الموجه قد نجحت في تخمين الموضع مع وجود خطأ صغير في السرعة، أما الخطأ في الموضع فلم يتجاوز الـ 1%. ولكنها غير مناسبة عند تغيير بارامترات المحرك.

الكلمات المفتاحية: المحرك الميكروي المتواقت، خوارزمية التحكم الشعاعي بالفيض الموجه، تخمين الموضع

*أستاذ مساعد في قسم هندسة القيادة الكهربائية، كلية الهندسة الكهربائية والإلكترونية، جامعة حلب

Position & Speed Estimation of a Micro Permanent–Magnet Synchronous Motor by Stator Flux Linkage Estimator

*Dr. Yasser ALHASSOUN

(Received:11 April 2018 , Accepted: 30 August 2018)

Abstract:

Micro_PMSM have a very high power density and it's suitable for applications that require a small size and high power, such as applying a dentist handle, which is used by dentists to remove caries from the patient's teeth because in the handle of the wind turbine the speed is uncontrolled which reduces its effectiveness when cleaning the tooth where the speed of the motor handle decreases during removing caries.

On the other hand, the control of these motors is difficult due to the presence of permanent magnets, which produce a static and uncontrollable magnetic field. Therefore, we used a control system for driving this motor, based on stator flux linkage estimator for estimating the position and velocity of the motor. Where the error was obtained between the estimated and the real currents to correct the error produced in the estimated position. Using Matlab/simulink program, we applied and simulated the Field Oriented Control (FOC) algorithm. Where the field is applied to the d-axis by demanding the reference current $i_{sd}=0$ and reference velocity.

The results showed that the field oriented control algorithm have been succeeded in estimating the position but with a low error in speed. The error in position does not exceed 0.35%. But this is not appropriate when the motor parameters are changed

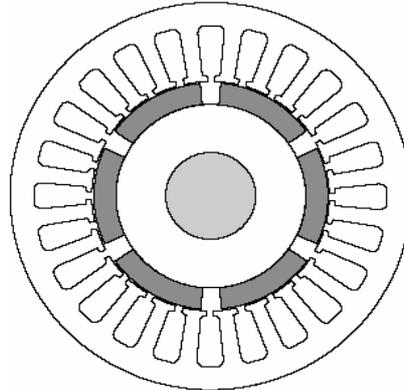
Keywords: PMSM Motor, Field Oriented Control algorithm, position estimation.

1 - مقدمة:

في الآونة الأخيرة تطورت تطبيقات المحركات الميكروية بشكل كبير، حيث تتميز هذه المحركات بصغر حجمها وضياعات الاستطاعة المنخفضة إضافة إلى أن المحرك الميكروي لا يعطي عزم كبير على خرج، وبالتالي تكون تطبيقات هذه المحركات خاصة مثل التطبيقات الطبية في الجراحة الدقيقة ومقبض طبيب الأسنان وكذلك في الحواسيب والطائرات بدون طيار [A]. وسنركز على مقبض طبيب الأسنان الذي يستخدمه الأطباء في إزالة الأجزاء التالفة من الأسنان، حيث تصنف قبضة طبيب الأسنان إلى نوعين: نوع مقاد بالهواء المضغوط (Air-driven dental hand pieces) وآخر كهربائي بنظام قيادة محدد. تتميز القبضة المقادة بالهواء بأن عزم الخرج ثابت. مؤخراً تم استخدام المقبض ذي النوع الكهربائي عوضاً عن الميكانيكي لعدة أسباب نذكر منها: أن سرعة العنفة غير ثابتة وخصوصاً عند إزالة الأجزاء المتضررة من السن، هذه المشكلة لا نراها في القبضة الكهربائية، حيث توجد إمكانية إضافة نظام للتحكم بالسرعة والحفاظ على السرعة المطلوبة بالإضافة إلى مشكلة الضجيج السمي الصادر عن العنفة والقبضة ويكون هذا الضجيج أقل في حالة القبضة الكهربائية، كما يتميز هذا النوع من المحركات الميكروية بكثافة الطاقة العالية والمردود المرتفع والوثوقية العالية [B].

2- بنية المحرك الميكروي ذي المغناط الدائمة

تتألف المحركات المتواقة ذات المغناط الدائمة بشكل عام من جزأين أساسيين هما: الجزء الثابت ويملك ستة وشائع مستقلة يخرج منه في النهاية ستة أطراف يمكن توصيلها على شكل نجمي أو مثلثي بحيث يكون مشابه تماماً للجزء الثابت في المحرك التحريضي من حيث التركيب وطريقة اللف [C]. والجزء الدوار يتكون من مغناط دائمة وظيفتها إنتاج فيض مغناطيسي ثابت. يتميز المحرك المتواقت الميكروي ذي المغناط الدائمة باستخدام المغناط الطبيعية على الدوار بدلاً من ملفات التهييج في المحركات ذات المغناط الكهربائية حيث تصنع هذه المغناط من مواد مغناطيسية قاسية مثل فولاذ الكوبالت ومختلف خلائط الألمنيوم، بينما تتوضع على الثابت ملفات ثلاثية الطور تلف ضمن أحاديث موجودة على السطح الخارجي للثابت، بسبب وجود المغناط الدائمة على الدوار فإن هذا النوع من المحركات لا يحتاج إلى حلقات انزلاق ومسفرات لنقل الطاقة الكهربائية من الثابت إلى الدائر وبالتالي ضياعات نحاسية أقل من المحركات ذات المغناط الكهربائية. في المحركات ذات المغناط الدائمة يمكن أن يتوضع المغناطيس بأشكال مختلفة على الدوار، حيث يتوضع على السطح الخارجي للدوار ونحصل على محركات متواقة ذات مغناط دائمة سطحية أو يتوضع على السطح الداخلي للدوار ونحصل على محركات متواقة ذات مغناط دائمة داخلية وبذلك نحصل على نوعين وهما: المحركات الميكروية المتواقة ذات المغناط الدائمة السطحية حيث يتوضع المغناطيس على السطح الخارجي للدوار، هذا التصميم يزيد من كلفة البناء ويجعل الأقطاب تتمغنط بشكل أسهل وبهذا التركيب يصبح العزم المقاوم أقل. ويستخدم هذا المحرك في التطبيقات ذات السرعات المنخفضة لأن مجال التمكنط سوف يصبح كبير خلال السرعات العالية [D]، كما يبين الشكل (1).



الشكل رقم (1): محرك متواقت ذي مغناط دائمة سطحية على الدوار

أما المحركات الميكروية المتواقتة ذات المغناطيس الدائمة الداخلية فان المغناطيس الدائمة تتوضع داخل الدوار وهذه المحركات غير شائعة على عكس الحال بالنسبة للمحركات ذات المغناطيس السطحية وتستخدم من أجل تطبيقات السرعة العالية [E].

2- أهمية البحث

عند تطبيق خوارزمية التحكم الشعاعي بالفيض الموجه للتحكم بسرعة المحرك الميكروي المتواقت ذي المغناطيس الدائمة من الضروري وجود معلومة دقيقة عن موضع الدوار ولكن في التطبيقات الطبية العاملة في السرعات العالية (تطبيق مقبض طبيب الأسنان مثلاً) لا يمكن استخدام حساس سرعة لقياس موضع الدوار لأسباب عديدة كالحودود الفيزيائية للتطبيق والضجيج ودرجات الحرارة من أجل حل هذه المشكلة اقترحنا تصميم نظام قيادة يعتمد على طريقة التحكم الشعاعي بالفيض الموجه FOC مع تخمين موضع وسرعة المحرك باستخدام تقنيتي مخمن الفيض المتشابه ومخمن النمط الانزلاقي.

3- تخمين السرعة والموضع بالاعتماد على مخمن فيض الثابت المتشابه

تبرز أهمية استخدام خوارزميات تخمين السرعة والموضع في المحركات الكهربائية العاملة في مجال السرعة العالية في الاستغناء عن لاقط السرعة والموضع أو ما يدعى أحياناً بالمشفرات الرقمية والتي تقيس السرعة الزاوية للدوار بالنسبة للثابت، وتصبح هذه الحاجة ضرورية في مجال السرعات العالية جداً لأن لواقط السرعة والموضع لن تكون قادرة على أداء عملها كونها ذات طبيعة ميكانيكية. من أجل ذلك تم اللجوء الى تخمين فيض الثابت المتشابه في تخمين موضع دوار المحرك وسرعته. سيتم في البداية تخمين تيارات الثابت بالاعتماد على الفيض المتشابه المخمن، وبعدها نستخدم الخطأ بين تيار الثابت المخمن والحقيقية لتصحيح الخطأ الناتج في الموضع المخمن.

المعادلات الكهربائية للمحرك المتواقت الميكروي ذي المغناطيس الدائمة في جملة محاور ثنائية متعامدة مرتبطة بالثابت تعطى بالعلاقتين التاليتين [E]:

$$v_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + L_d \cdot p i_{s\alpha} + e_{\alpha} \quad (1)$$

$$v_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + L_q \cdot p i_{s\beta} + e_{\beta} \quad (2)$$

حيث e_{α} و e_{β} تمثلان القوة المحركة الكهربائية العكسية على المحورين α و β والرمز p يمثل المشتق بالنسبة للزمن، و $i_{s\alpha}$ و $i_{s\beta}$ التيارات المارة في ملفات ثابت المحرك وفق المحورين α و β على التوالي، و $v_{s\alpha}$ و $v_{s\beta}$ الجهود المطبقة على ملفات ثابت المحرك وفق المحورين α و β ، R_s مقاومة ملفات الثابت، و L_d تحريضية ملفات الثابت وفق المحور d ، λ_m يمثل الفيض الناتج عن المغناطيس الدائم، وفيما يلي علاقة القوة المحركة الكهربائية العكسية بالنسبة للموضع:

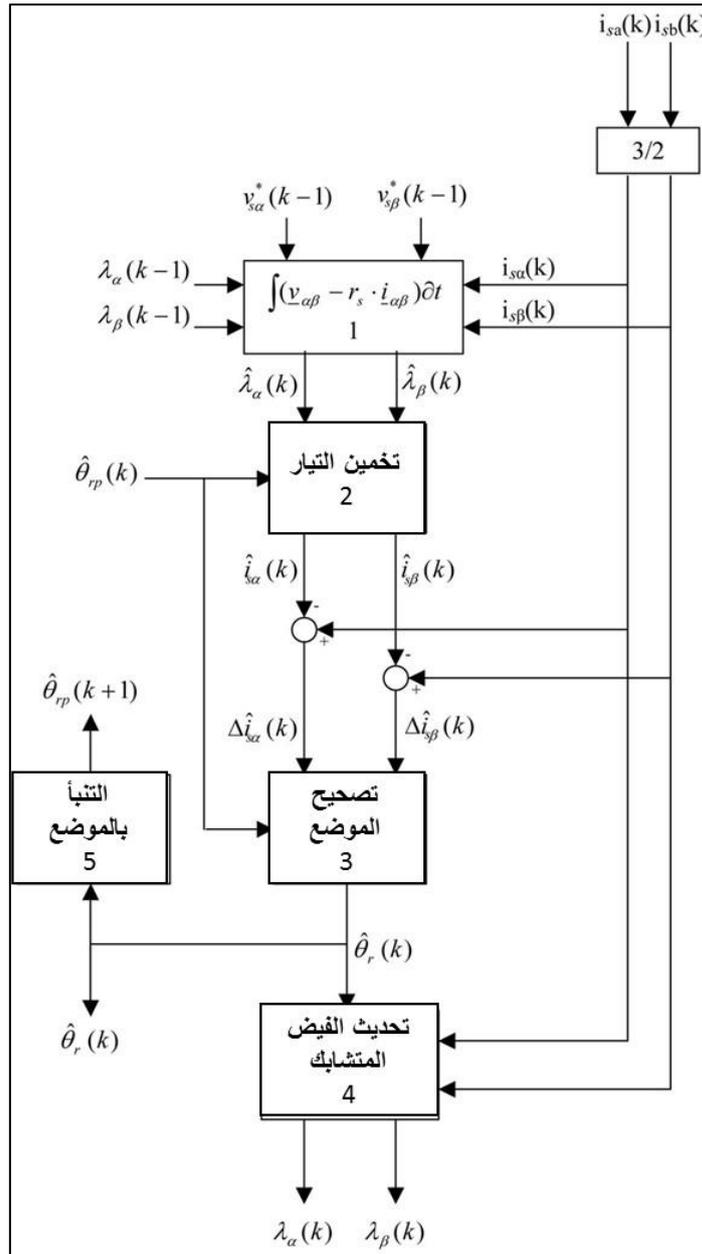
$$e_{\alpha} = \omega \lambda_m \cdot \sin(\theta_r) = -v_{s\alpha} + R_s i_{s\alpha} + L_d \cdot p i_{s\alpha} \quad (3)$$

$$e_{\beta} = \omega \lambda_m \cdot \cos(\theta_r) = -v_{s\beta} + R_s i_{s\beta} + L_q \cdot p i_{s\beta} \quad (4)$$

معادلة الفيوض على المحاور α و β بالنسبة للتيارات الثنائية وموضع الدوار تعطى بالشكل:

$$\lambda_{\alpha} = L_{sd} i_{s\alpha} + \lambda_m \cos(\theta_r) \quad (5)$$

$$\lambda_{\beta} = L_{sq} i_{s\beta} + \lambda_m \sin(\theta_r) \quad (6)$$



الشكل رقم (2): خوارزمية الفيض المتشابه

سيتم توضيح كل خطوة في الخوارزمية وفق الفقرات التالية:

3-1 تخمين فيض الثابت

في البداية يتم قياس تيارات وجهود المحرك في لحظة زمنية معينة باعتبار زمن أخذ العينات T_s ولدينا k يعبر عن لحظة أخذ العينات الحالية و $(k-1)$ يمثل اللحظة السابقة يمكن كتابة المعادلة الكهربائية العامة بالشكل التالي [F]:

$$v_j = r_s \cdot i_j + \frac{d\lambda_j}{dt} \quad (7)$$

حيث $j=a,b,c$ لكل طور، أول خطوة في تخمين الفيض هي إيجاد الفرق بين جهد الثابت وهبوط الجهد على المقاومة ومكاملة الناتج وذلك بتحويل المعادلة (7) إلى الشكل المتقطع كما يلي:

$$\hat{\lambda}_\beta(k) = T[v_{s\beta}^*(k-1) - r_s \cdot i_{s\beta}(k)] + \lambda_{\beta}(k-1) \quad (8)$$

$$\hat{\lambda}_{\alpha}(k) = T[v_{s\alpha}^*(k-1) - rs.i_{s\alpha}(k)] + \lambda_{\alpha}(k-1) \quad (9)$$

حيث أن التيارين $i_{s\alpha}$ و $i_{s\beta}$: هما تيارا الثابت ضمن جملة محاور ثنائية متعامدة مرتبطة بالثابت كما في (3)، $\alpha\hat{\lambda}$ ، $\beta\hat{\lambda}$ تمثلان الفيوض المخمنة وفق المحورين α و β ، يمكن ملاحظة أن جهود الأطوار غير مقاسة وإنما يتم تحصيلها من أوامر التحكم في اللحظة السابقة.

المعادلتان (8) و (9) هما تكامل المعادلة (7) ويعطيان قيم $\lambda_{s\alpha}(k-1)$ و $\lambda_{s\beta}(k-1)$ وهذه سيئة لعملية تخمين الفيض، لتجنب هذه السيئة يتم الاعتماد على الخطوة الرابعة من مراحل التخمين والتي يتم الاعتماد فيها على موضع الدوار المصحح والتيارات المقاسة لتحديث قيمة الفيض $\lambda_{s\alpha}$ و $\lambda_{s\beta}$ في اللحظة السابقة للحظة أخذ العينات لحساب قيمة الفيض في لحظة أخذ العينات.

2-3 مخمن تيار الثابت

الخطوة الثانية للخوارزمية هي تخمين تيارات الثابت بالاعتماد على الفيض المخمن من الخطوة الأولى وموضع دوار المحرك في اللحظة $(k+1)$ اللحظة التالية للحظة أخذ العينات والذي يتم التنبؤ به بالاعتماد على المعادلتين (8) و (9) يمكن كتابة معادلة مخمن تيارات الثابت كما يلي:

$$\hat{i}_{s\beta} = \frac{1}{L_d} [\hat{\lambda}_{\beta}(k) - \lambda_m \sin(\hat{\theta}_p(k))] \quad (10)$$

$$\hat{i}_{s\alpha} = \frac{1}{L_d} [\hat{\lambda}_{\alpha}(k) - \lambda_m \cos(\hat{\theta}_p(k))] \quad (11)$$

3-3 تصحيح الموضع

تعتبر خطوة تصحيح الموضع المتنبئ به من أهم الخطوات في خوارزمية التخمين، لتصحيح موضع الدوار المخمن المتنبئ به يتم استخدام الفرق بين التيارات المخمنة والمقاسة، حيث أن خطأ التيارين معرفين كالتالي:

$$\Delta i_{s\beta}(k) = i_{s\beta} - \hat{i}_{s\beta}(k) \quad (12)$$

$$\Delta i_{s\alpha}(k) = i_{s\alpha} - \hat{i}_{s\alpha}(k) \quad (13)$$

4-3 تحديث الفيض المتشابه

في الخطوة الرابعة من خوارزمية التخمين يتم استخدام التيارات المقاسة وموضع الدوار المصحح لإعادة حساب الفيض. يتم تحويل المعادلات (5) و (6) إلى الشكل المتقطع مع الزمن فنحصل على المعادلات التالية

$$\lambda_{\alpha}(k) = L_d i_{s\alpha}(k) + \lambda_m \cos(\hat{\theta}_r(k)) \quad (14)$$

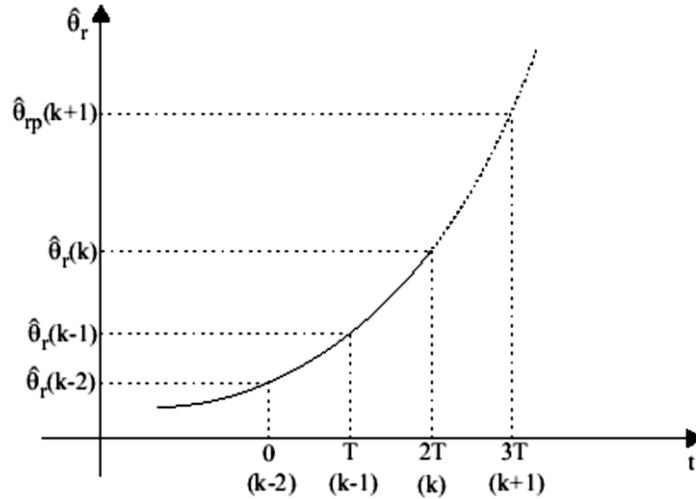
$$\lambda_{\beta}(k) = L_d i_{s\beta}(k) + \lambda_m \sin(\hat{\theta}_r(k)) \quad (15)$$

تستخدم قيم الفيض المصححة في الخطوة الأولى من التخمين.

3-5 التنبؤ بالموضع

باستخدام قيم الموضع الحالي والسابق يتم التنبؤ بقيمة الموضع في اللحظة التالية للحظة أخذ العينات ($k+1$) بالاعتماد على كثير حدود. كما في الشكل رقم (3). باعتبار أن الموضع يتعلق بالزمن وفق كثير حدود من المرتبة الثانية وباعتبار A و B و C هي معاملات تابع الموضع التربيعي كالتالي [G]:

$$\theta_r = At^2 + Bt + C \quad (16)$$



الشكل رقم (3): الرسم البياني المعبر عن علاقة كثير الحدود للتنبؤ بالموضع

هذا يعني أنه إذا كان لدينا ثلاث قيم مخمّنة للموضع قبل اللحظة $k+1$ وهي ($k-2, k-1, k$) يمكن استخدامها لتحديد قيم A و B و C .

بفرض أنه عند اللحظة $t=0$ يكون لدينا العينة رقم ($k-2$) ومنه حسب المعادلة (16) نحصل على الموضع كالتالي:

$$\hat{\theta}_r(k-2) = C \quad (17)$$

وفي اللحظة ($k-1$) يكون لدينا:

$$\hat{\theta}_r(k-1) = AT^2 + BT + C \quad (18)$$

وعند اللحظة (k) يكون:

$$\hat{\theta}_r(k) = A(2T)^2 + B(2T) + C \quad (19)$$

وعند اللحظة ($k+1$) يكون:

$$\hat{\theta}_r(k+1) = A(3T)^2 + B(3T) + C \quad (20)$$

بحل المعادلات (17) و (18) و (19) يمكن حساب الثوابت A و B و C وبتعويضها في (20) يمكن التنبؤ بالموضع في اللحظة ($k+1$) كما يلي:

3-6 تصحيح الموضع

تم استنتاج طريقة تصحيح الموضع المخمن من خوارزمية التخمين المدروسة. ويمكن حساب الخطأ في الموضع المخمن بالاعتماد على المعادلات (5) و (6) والتي تعبر عن علاقة الفيض في جملة المحاور الثنائية المتعامدة والمتعلقة بالثابت،

$$\hat{\theta}_{rp}(k+1) = 3\hat{\theta}_r(k) - 3\hat{\theta}_r(k-1) + \hat{\theta}_r(k-2) \quad (21)$$

نلاحظ أن الفيض في جملة المحاور الثنائية المتعامدة المتعلقة بالثابت يتعلق بالتيارات الثنائية وبالموضع يمكن تحويل هذه المعادلات الى الشكل الخطي كالتالي:

$$\Delta\lambda_{\alpha} = \frac{\partial\lambda_{\alpha}}{\partial i_{\alpha}} \Delta i_{\alpha} + \frac{\partial\lambda_{\alpha}}{\partial i_{\beta}} \Delta i_{\beta} + \frac{\partial\lambda_{\alpha}}{\partial \theta_r} \Delta\theta_r \quad (22)$$

$$\Delta\lambda_{\beta} = \frac{\partial\lambda_{\beta}}{\partial i_{\alpha}} \Delta i_{\alpha} + \frac{\partial\lambda_{\beta}}{\partial i_{\beta}} \Delta i_{\beta} + \frac{\partial\lambda_{\beta}}{\partial \theta_r} \Delta\theta_r \quad (23)$$

بفرض أن: الفيض المخمن في المرحلة الأولى من خوارزمية التخمين دقيق وخطأ التيار ناتج عن خطأ الموضع المتبقي به. من المعادلتين (22) و(23) وبعد تعويض $\Delta\lambda_{\alpha}=0$ و $\Delta\lambda_{\beta}=0$ يمكن استخدام الخطأ في التيار المخمن في تخمين الموضع كالتالي:

$$\Delta\theta_{\alpha} = \frac{-\left(\frac{\partial\lambda_{\alpha}}{\partial i_{\alpha}} \Delta i_{\alpha} + \frac{\partial\lambda_{\alpha}}{\partial i_{\beta}} \Delta i_{\beta}\right)}{\frac{\partial\lambda_{\alpha}}{\partial \theta_r}} \quad (24)$$

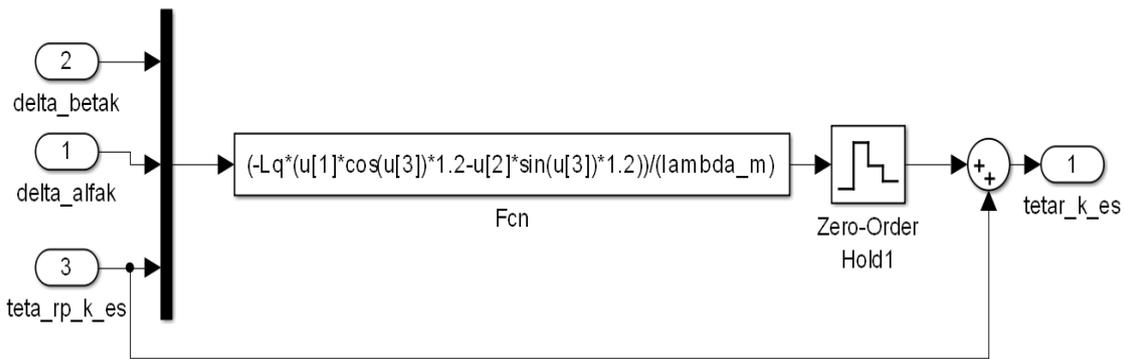
$$\Delta\theta_{\beta} = \frac{-\left(\frac{\partial\lambda_{\beta}}{\partial i_{\alpha}} \Delta i_{\alpha} + \frac{\partial\lambda_{\beta}}{\partial i_{\beta}} \Delta i_{\beta}\right)}{\frac{\partial\lambda_{\beta}}{\partial \theta_r}} \quad (25)$$

وبحساب متوسط أخطاء الموضع المحسوبة بالعلاقتين (24) و (25) يمكن حساب خطأ الموضع المحصل كما يلي:

$$\Delta\theta(k) = \frac{\Delta\theta_{\alpha}(k) + \Delta\theta_{\beta}(k)}{2} \quad (26)$$

ومنه تكون علاقة حساب موضع الدوار كالتالي:

$$\hat{\theta}_r(k) = \hat{\theta}_{rp}(k) + \Delta\theta(k) \quad (27)$$



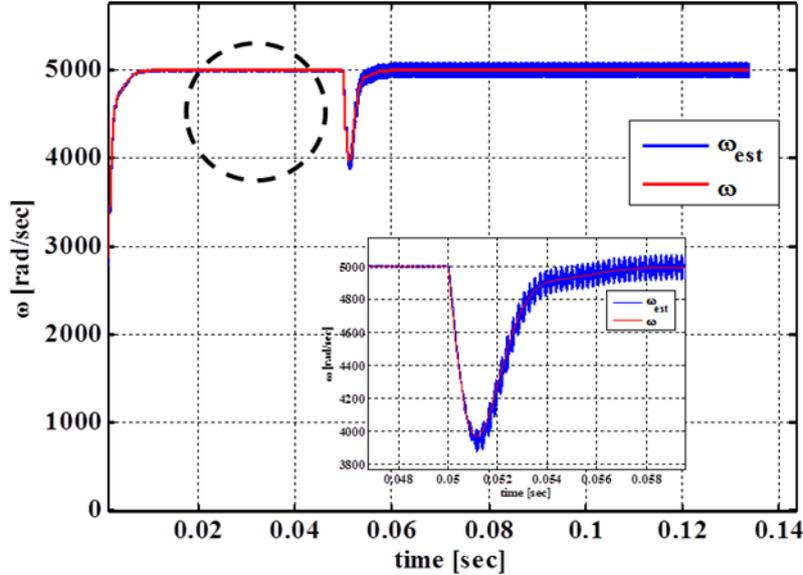
الشكل رقم (4): مخطط صندوقي تصحيح الموضع

4- نتائج محاكاة تطبيق خوارزمية التحكم الشعاعي بالفيض الموجه اعتماداً على مخمن الفيض المتشابك

تمت محاكاة طريقة تخمين الموضع بالاعتماد على تخمين الفيض باستخدام برنامج Matlab/simulink، حيث تم تطبيق خوارزمية التحكم الشعاعي بالفيض الموجه (FOC) Field Oriented Control، ومن المعروف أن هذه الخوارزمية تعتمد

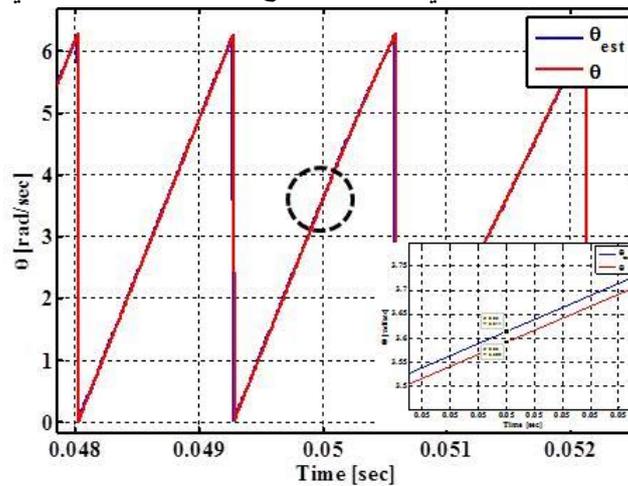
على توجيه فيض الدوار وفق المحور d وذلك عن طريق طلب تيار مرجعي $i_{sd}=0$ ، وتم طلب سرعة مرجعية ω_{ref} $=5000$ rad/sec وتم تحميل المحرك في اللحظة $t=0.05$ sec لاختبار الخوارزمية. حيث تم إقلاع المحرك من اللحظة صفر وباعتبار الموضع البدائي للدوار $\theta=0$ rad.

ان خوارزمية الـ FOC تحتاج إلى موضع الدوار للحصول على المقادير الكهربائية بالنسبة لجملة محاور ثنائية متعامدة ودوارة بسرعة الدوار، لذلك تم الاعتماد على الموضع المخمن باستخدام خوارزمية تخمين الفيض في تطبيق خوارزمية الـ FOC. السرعة المخمنة تم الحصول عليها باشتقاق الموضع بالنسبة للزمن وبين الشكل (5) إشارة السرعة المخمنة مقارنة بالسرعة الحقيقية، حيث نلاحظ أن الخطأ في إشارة السرعة المخمنة بالنسبة للحقيقية لا يتجاوز 2.3% وهي قيمة مقبولة.



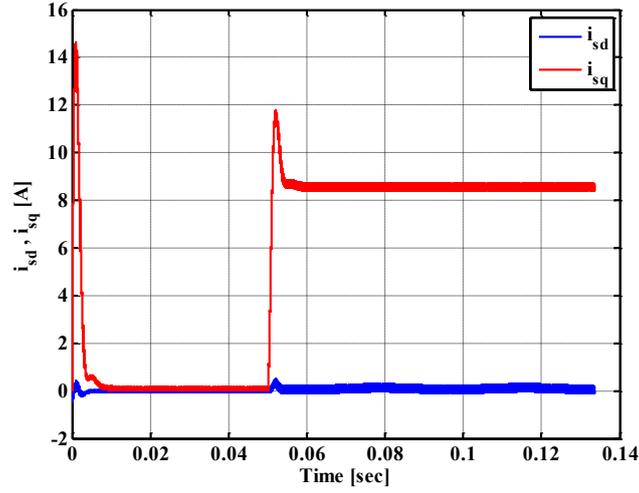
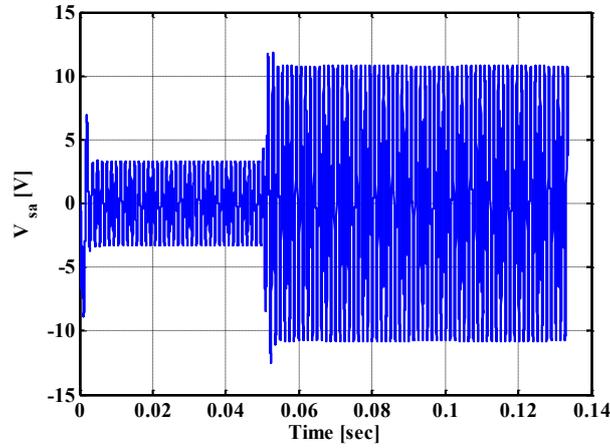
الشكل رقم (5): إشارة سرعة المحرك المخمنة مع سرعة المحرك الحقيقية

نلاحظ أن خوارزمية تخمين الموضع نجحت في تخمين موضع الدوار كما في الشكل (6)، الذي يبين الموضع المخمن مقارنة بالموضع الحقيقي، حيث نلاحظ أن الخطأ في تخمين الموضع لا يتجاوز 0.35% وهي نسبة جيدة.

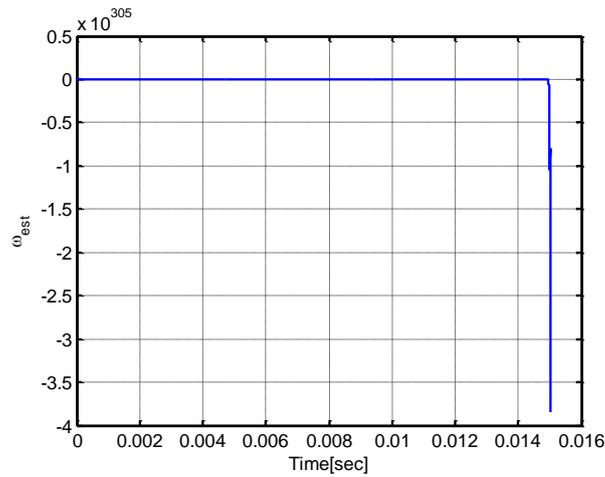


الشكل (6) إشارة الموضع الحقيقي (Type equation here.) مقارنة بالموضع المخمن

أما تيار المحرك الثنائيين على المحورين q, d مبيان في الشكل (7)، حيث نلاحظ أن قيم التيارات ضمن الحدود الاسمية في الحالة المستقرة ويوجد تجاوز في الحالة العابرة عند الإقلاع والتحميل.

الشكل (7) إشارة التيارات الثنائية i_{sd} , i_{sq} الشكل (8) إشارة التيارات الثنائية i_{sd} , i_{sq}

كما نلاحظ من الشكل (8) أن قيمة الجهد بقيت ضمن الحدود الاسمية كما في (8). لكن فشلت الخوارزمية عند تغيير بارامترات المحرك وخصوصاً عند زيادة مقاومة الثابت حيث أن الخوارزمية فشلت في تخمين موضع الدوار كما هو موضح في الشكل (9).



الشكل (9) إشارة السرعة المخمنة عند تغيير البارامترات

5- مخمن النمط الانزلاقي

تمت نمذجة المحرك الميكروي المتواقت ذي المغناط الدائمة ضمن بيئة Matlab بالاعتماد على معادلات الدارة المكافئة لطور واحد والمعبّر عنها في جملة محاور إحداثيات ثنائية $d-q$ دوارة بسرعة الحقل الدوار، وبغية تخمين الموضوع بالاعتماد على مخمن النمط الانزلاقي سيتم الاستناد على معادلات المحرك ضمن محاور الإحداثيات الثنائية الثابتة $(\beta-\alpha)$ في تصميم مخمن النمط الانزلاقي وباعتبار أن القوة المحركة الكهربائية العكسية على المحورين $(\beta-\alpha)$ تكتب بالشكل [H]:

$$\left. \begin{aligned} e_{s\alpha} &= -\omega(L_{sq}i_{s\beta}) \\ e_{s\beta} &= \omega(L_{sd}i_{s\alpha} + \Phi_m) \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

يمكن كتابة معادلات المحرك على شكل مصفوفات كما يلي:

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + sL_{sd} & 0 \\ 0 & R_s + sL_{sq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{s\alpha} \\ e_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (1)$$

حيث إن $e_{s\beta}$ ، $e_{s\alpha}$ القوة المحركة الكهربائية العكسية على المحورين α و β بالترتيب، s معامل لابلاس، $v_{s\alpha}$ و $v_{s\beta}$ الجهود المطبقة على ملفات ثابت المحرك وفق المحورين α و β على التوالي، $i_{s\alpha}$ و $i_{s\beta}$ التيارات المارة في ملفات ثابت المحرك وفق المحورين α و β على التوالي. بأخذ الاضطراب d بعين الاعتبار نشكل المصفوفات التي تصف فضاء الحالة بالاعتماد على المعادلة (1) كما يلي:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{s\alpha} \\ \dot{i}_{s\beta} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} v_{s\alpha} - e_{s\alpha} - d_{s\alpha} \\ v_{s\beta} - e_{s\beta} - d_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (2)$$

حيث إن:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_{sd}} & 0 \\ 0 & -\frac{R_s}{L_{sq}} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{sd}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{sq}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

حيث $\dot{i}_{s\alpha}$ مشتق التيار $i_{s\alpha}$ بالنسبة للزمن، $\dot{i}_{s\beta}$ مشتق التيار $i_{s\beta}$ بالنسبة للزمن، ويمثل $d_{s\alpha}$ و $d_{s\beta}$ الخطأ الناتج عن عدم الدقة في نموذج المحرك. بالاعتماد على مصفوفات فضاء الحالة المعبر عنها في المعادلة (2) يمكن التعبير عن مخمن النمط الانزلاقي المستخدم في تخمين تيارات المحرك الميكروي عديم المسفرتات MPMSM كما يلي [I]:

$$\begin{bmatrix} \hat{\dot{i}}_{s\alpha} \\ \hat{\dot{i}}_{s\beta} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \hat{i}_{s\alpha} \\ \hat{i}_{s\beta} \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} v_{s\alpha} - Z_{s\alpha} \\ v_{s\beta} - Z_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (4)$$

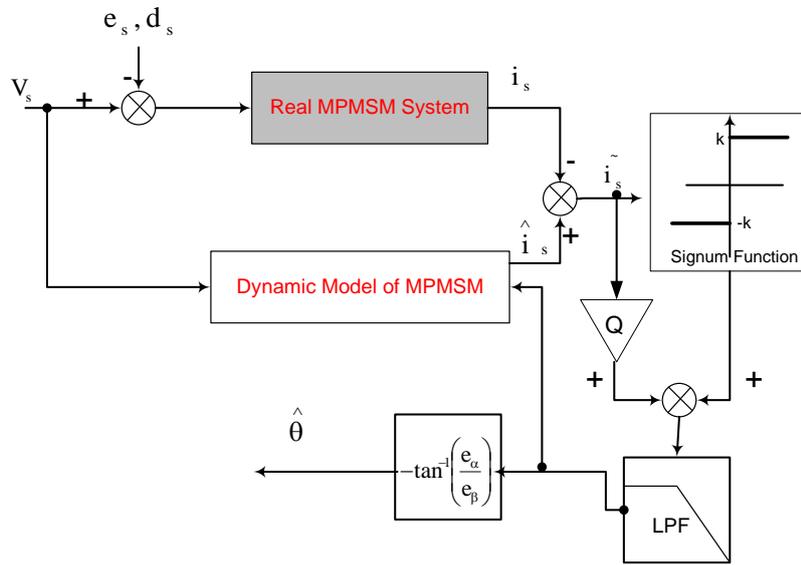
حيث $\hat{i}_{s\alpha}$ و $\hat{i}_{s\beta}$ تيارات المحرك المخمنة وفق محاور الإحداثيات الثنائية $(\beta-\alpha)$ ، $Z_{s\alpha}$ ، $Z_{s\beta}$ تقابل القوة المحركة الكهربائية الكهربائية العكسية مضافاً إليها اضطرابات عدم الدقة في النموذج ويتم فرضها بحيث يكون التخمين صحيح. تم استخدام تابع signum للحصول على قيم $Z_{s\alpha}$ ، $Z_{s\beta}$ ، ولكن هذا التابع لوحده يؤدي إلى وجود اهتزازات في الإشارة المخمنة وتم حل المشكلة عن طريق استخدام مرشح والذي يؤدي بدوره إلى إزاحة الإشارة المخمنة وكذلك يبقى القليل من الاهتزازات في إشارة الموضوع المخمنة وهذا يؤدي إلى وجود اهتزازات كبيرة في إشارة السرعة لأنها تحسب باشتقاق إشارة الموضوع بالنسبة للزمن. تم حل هذه المشكلة باستخدام تابع التبديل signum ولكن بإضافة ثابت مضروب بالخطأ إليه كما في العلاقة التالية:

$$\begin{bmatrix} Z_{s\alpha} \\ Z_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{s\alpha} + d_{s\alpha} \\ e_{s\beta} + d_{s\beta} \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} \text{sgn}(\hat{i}_{s\alpha} - i_{s\alpha}) \\ \text{sgn}(\hat{i}_{s\beta} - i_{s\beta}) \end{bmatrix} + Q \begin{bmatrix} \hat{i}_{s\alpha} - i_{s\alpha} \\ \hat{i}_{s\beta} - i_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (5)$$

حيث K و Q ثابتا التبديل وهما موجبان.

يظهر الشكل (10) المخطط الصندوقي لمخمن النمط الانزلاقي، حيث يبين المخطط مجرى خوارزمية التخمين، بالبداية يتم مقارنة التيارات الثنائية المخمنة بالتيارات الثنائية الحقيقية وبضرب الخطأ بالثابت Q وإشارة الخطأ بالثابت K ونقوم بجمع القيمتين الناتجتين للحصول على $e_{s\alpha}$ و $e_{s\beta}$ المخمنتين اللتين يتم ترشيحهما للتخلص من الاهتزازات في إشارة الموضع ويتم إيجاد الزاوية من العلاقة التالية:

$$\hat{\theta} = -\tan^{-1}\left(\frac{e_{s\alpha}}{e_{s\beta}}\right) \quad (6)$$

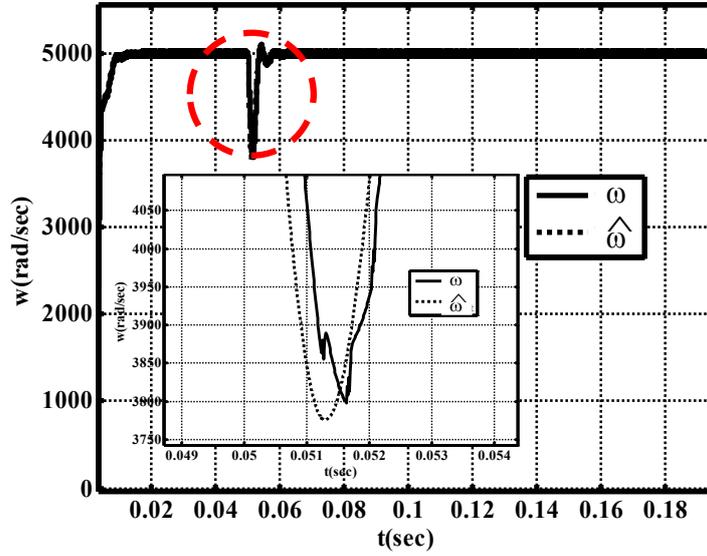


الشكل (10) المخطط الصندوقي لمخمن النمط الانزلاقي المقترح

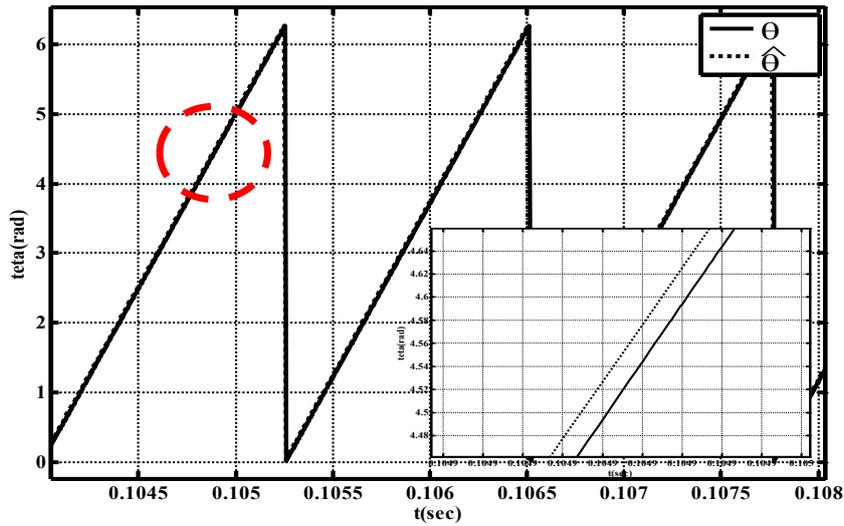
يتم الحصول على السرعة المخمنة باشتقاق الزاوية المخمنة بالنسبة للزمن، نتيجة الاختيار الجيد لقيم الثوابت K,Q الموضحة بالشكل (10) للحصول على الزاوية المطلوبة، حيث إن الاختيار الجيد لهذين الثابتين سيققل من الخطأ الناتج عن عدم دقة النموذج الديناميكي الناتج عن عدم الدقة في بارامترات المحرك.

من أجل جعل المحاكاة قريبة من الواقع العملي فقد تم نمذجة قابلية الجهد وضبط زمن أخذ العينات لخوارزمية التحكم والتخمين على الزمن 10µsec وذلك لأن المحرك يملك استجابة كهربائية سريعة جداً وتساوي 126µsec، وكما هو معروف يجب أن يكون زمن أخذ العينات أصغر بعشر مرات على الأقل من زمن الاستجابة للتيارات، ونتيجة لهذه الاستجابة فإننا نحتاج لتردد قطع كبير جداً لترانستورات قابلية الجهد لتجنب ظهور قفزات في التيار وهذا غير ممكن عملياً، لذلك سيتم وضع ثلاثة ملفات على خرج قابلية الجهد وذلك لتقليل اهتزازات التيار، كما تم ضبط تردد التقطيع على القيمة 50kHz، حيث إن السرعة المرجعية هي 5000rad/sec وتم الاعتماد على السرعة والموضع المخمنين في التحكم بسرعة المحرك. يبين الشكل (11) إشارة السرعة المخمنة مقارنة بالسرعة الحقيقية، حيث إن نسبة الخطأ بين السرعة الحقيقية والمخمنة في الحالة المستقرة هي 0% أما عند تطبيق اضطراب خارجي (لحظة التحميل) تكون نسبة الخطأ هي 4.0706% وتعود بعد التحميل إلى 0%

. يبين الشكل (12) زاوية دوار المحرك الحقيقية والمخمنة، حيث إن نسبة الخطأ بين الموضعين الحقيقي والمخمن هي 6.84%.

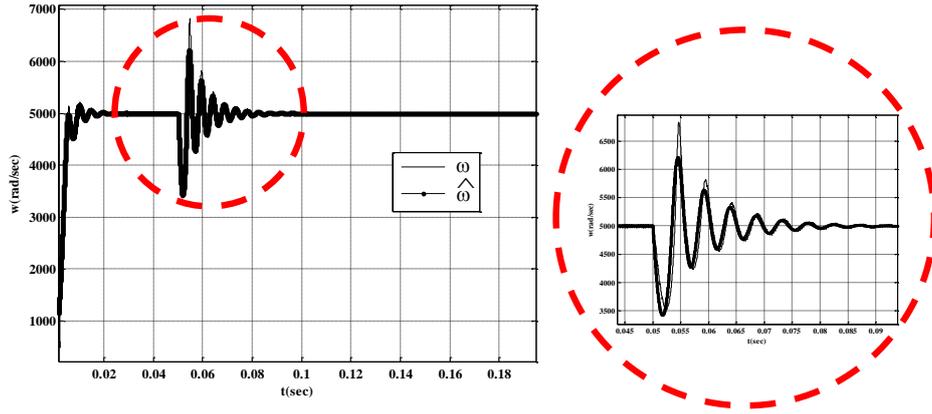


الشكل (11) السرعة الحقيقية مقارنة بالسرعة المخمنة دون تغير البارامترات

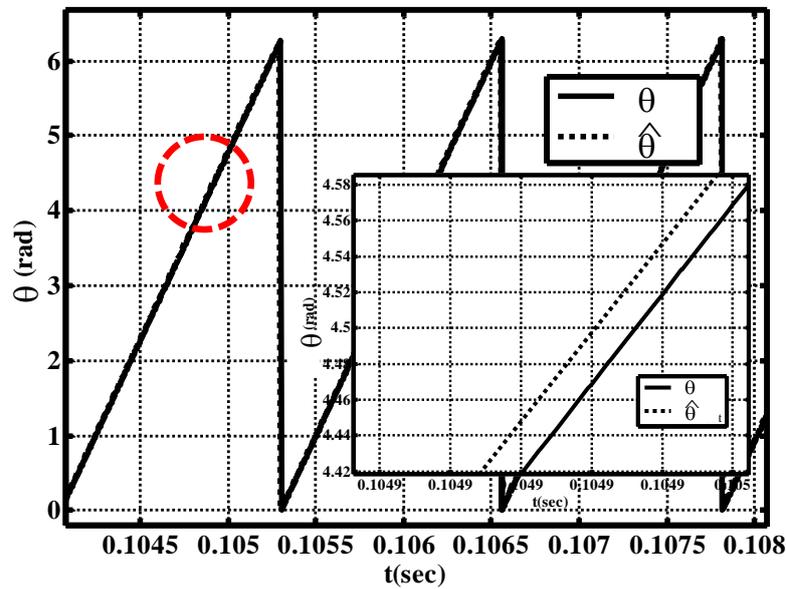


الشكل (12) اشارة الموضع الحقيقي مقارنة بالموضع المخمن ($\hat{\theta}$) دون تغير البارامترات

قمنا بمحاكاة تشغيل المحرك والتحكم بسرعيته بافتراض زيادة مقاومة ملفات الثابت R_s بنسبة 50% من القيمة الاسمية ثم حصلنا على إشارات السرعة والموضع كما في الشكل (13) و الشكل (14)، حيث نلاحظ أن الموضع المخمن لا يتأثر بتغير المقاومة أما سرعة المحرك فيتأثر شكل وسرعة استجابتها وذلك بسبب حساب ثوابت متحكم السرعة على القيمة الاسمية للمقاومة مما يؤدي إلى اختلاف في أداء نظام التحكم عن الأداء المرغوب به.



الشكل (13) إشارة السرعة الحقيقية مقارنة بالسرعة المخمّنة دون تغير البارامترات



الشكل (14) إشارة الموضع الحقيقي (θ) مقارنة بالموضع المخمن ($\hat{\theta}$) في حال زيادة مقاومة المحرك بمقدار 50%

5- نتائج ومقترحات:

تمت دراسة طريقة تخمين موضع دوار المحرك الميكروي المتوائت ذو المغناطيس الدائمة بالاعتماد على طريقتي مخمن النمط الانزلاقي (Sliding Mode Observer) ومخمن الفيض المتشابه كما تم العمل على تقليل الاهتزازات الموجودة في السرعة المخمّنة والتي تنتج عن استخدام تابع signum وذلك بإضافة ثابت مضروب بقيمة الخطأ بين التيار المخمن والحقيقي وجمع الناتج للحصول على القوة المحركة الكهربائية العكسية المخمّنة والتي يتم الاعتماد عليها في تخمين التيارات وذلك في طريقة مخمن النمط الانزلاقي أما في مخمن الفيض المتشابه فقد تم الاعتماد على معادلات المحرك في المحاور الثنائية المتعامدة والمرتبطة بالثابت في تشكيل مخمن الفيض والاعتماد عليه في تخمين الموضع.

بتطبيق مخمن الفيض المتشابه لتخمين موضع وسرعة المحرك الميكروي المتوائت ذي المغناطيس الدائمة وعند طلب سرعة مرجعية 5000rad/sec وزمن أخذ عينات 10µsec مع وجود قابلية الجهد تم ملاحظة أن الخوارزمية نجحت في تخمين الموضع مع وجود خطأ صغير في السرعة، حيث أن أكبر خطأ في السرعة المخمّنة لا يتجاوز 2.3% أما الخطأ في الموضع لا يتجاوز الـ 0.35% حيث تم الاعتماد في خوارزمية التخمين على التيارات المقاسة فقط والجهود الثلاثية المرجعية المطبقة من نظام القيادة على المحرك.

بتطبيق مخمن النمط الانزلاقي لتخمين موضع وسرعة المحرك الميكروي المتواقت ذو المغناط الدائمة Micro_PMSM وعند طلب سرعة مرجعية 5000rad/sec وزمن أخذ عينات مقداره 10µsec مع وجود قابلية الجهد تم ملاحظة أن الخوارزمية نجحت مع وجود خطأ صغير في السرعة، حيث إن أكبر قيمة لخطأ السرعة هي 4.07% وكذلك فإن خطأ الموضع صغير فلا يزيد عن 6.84% حيث تم الاعتماد في خوارزمية التخمين على التيارات المقاسة فقط والجهود الثلاثية المرجعية المطبقة من نظام القيادة على المحرك، ونلاحظ أن الخوارزمية المتبعة في تخمين الموضع أعطت أداءً جيداً مناسباً للتطبيق المطلوب وهو مقبض طبيب الأسنان. أما عند تغيير مقاومة المحرك بزيادة مقدارها 50% فشلت خوارزمية تخمين الفيض المتشابك في إعطاء الموضع الصحيح بينما نجحت خوارزمية مخمن النمط الانزلاقي في تخمين الموضع.

6-المراجع العلمية

- 1- Gerlando A., Foglia G., Iacchetti M., Perini R.,(2010). **Design Criteria and Operation Analysis of a High Speed Brushless PM Micro-Motor**, *XIX International Conference on Electrical Machines*, pp. 1-8..
- 2- MODREANU N.-M., ANDREI M.-I., MOREGA M., TUDORACHE T., (2014). **BRUSHLESS DC MICRO-MOTOR WITH SURFACE MOUNTED PERMANENT MAGNETS**, *Rev. Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. et Énerg.* **59(3)**, pp. 237-247.
- 3- KRISHNAN R.,(2010). **Permanent Magnet Synchronous and Brushless Dc Motor Drives**, Taylor and Francis Group ,LLC,558 pages.
- 4- Chi W.- C., Cheng M.-Y., (2014) **Implementation of a sliding-mode-based position sensorless drive for high-speed micro permanent-magnet synchronous motors** , *ISA Transactions*, **53(2)**, 444-453.
- 5- AL- Sabbagh, S., Sabah-Mahdi, A. (2010). **PULSE WIDTH MODULATION FOR HIGH PERFORMANCE HYBRID STEPPER MOTOR**, Faculty of Engineering, University of Baghdad, Iraq- Baghdad.
- 6- Chen J.-L., Liu T.-H., Chen C.-L., (2010). **Design and implementation of a novel high-performance sensorless control system for interior permanent magnet synchronous Motors**, *IET Electric Power Applications*, **4(4)**, 226-240
- 7- Ricardo Picatoste R., (2004). **Accuracy Positioning Systems Used in Radioactive Environments**, thesis of (Ph.D). Center of Electronic Industrial, Spanch.
- 8- ANDERSEN G. K., (2003). **Sensorless Control for PMSM**, Aalborg University, PED-817, 2-17.
- 9- Zhang B., Pi Y., Luo Y., (2012) **Fractional order sliding-mode control based on parameters auto-tuning for velocity control of permanent magnet synchronous motor**, *ISA Trans.*, **51(5)**, 649-656.