

دراسة تحليلية للانتقال الخطوي لمحرك خطوي هجين

م. معين الحلبي

مهندس كهرباء، اختصاص هندسة الطاقة الكهربائية، جامعة دمشق.

المخلص:

هدف هذا البحث إلى تفسير وتحليل الظواهر الفيزيائية المرافقة للانتقال الخطوي لمحرك خطوي هجين، ويقصد بالانتقال الخطوي حركة موضع الدائر خطوة تلو الأخرى أو دراسة الاستجابة للخطوة الكاملة. حيث تم بناء نموذج حاسوبي في البيئة البرمجية *Matlab/Simulink* اعتماداً على النموذج الرياضي المبسط للمحرك الخطوي الهجين ثنائي الطور الذي يصف الأداء الديناميكي الميكانيكي والكهربائي، وتم نمذجة نظام القيادة للمحرك عند نمط التهيج بطور وحيد. ولقد تم عرض نتائج المحاكاة الحاسوبية وإجراء تحليل فيزيائي لأوضاع تيارات الأطوار وتفسير تغيرات العزم الكهرومغناطيسي المتولد في المحرك وعلاقته بموضع الدائر خلال الانتقال من موضع لآخر.

الكلمات المفتاحية: محرك خطوي هجين، نمذجة المحرك الخطوي، النموذج الرياضي للمحرك الخطوي، الخصائص الديناميكية.

An Analytical Study to Stepping Transmission for a Hybrid Stepper Motor

Eng. Moeen Alhalabi¹

¹Electric Power Engineering-Damascus University.

Abstract:

This research aims to explaining and physical analysis to stepping transmission for hybrid stepper motor, stepping transmission means the rotor position movement is step by step or dynamic single step response.

The simplified mathematical model for two phase hybrid stepper motor was represented by using the computer program Matlab/Simulink, which describes their mechanical and electrical dynamic behavior of the mentioned motor was done. Whereas, the motor and drive system was modeled in order to run on one phase on mode.

It have illustrated computing simulation results and physical analysis for current waves and we have explained varieties of electromechanical torque which is produced in the motor and its relationship with rotor position during the movement from position to other.

Key words: Hybrid Stepping Motor, Modeling Step Motor, Mathematical Model of Step Motor, Dynamic Characteristics.

التزامنية *Synchronous Electrical Machines*، رغم أن بنيته مختلفة تماماً عن الآلة التزامنية ذات المغناطيس الدائم. يتألف المحرك الخطوي بشكل نموذجي من ثابت مكون من حديد طري *Soft Iron* زود بالملفات ودوائر ذو مغناطيسية دائمة، كما هو مبين بالشكل 1، حيث للدوائر مجموعتان من الأسنان التي تكون على المحيط مزاحة عن بعضها بعضاً بمقدار عرض السن. بشكل نموذجي، يوجد 50 سن في كل مجموعة. تمغنط المجموعة الأولى كأقطاب جنوبية وتمغنط المجموعة الأخرى كأقطاب شمالية، بالنتيجة $N_r=50$ حيث N_r عدد أسنان الدوائر [2]، وجود الدوائر المكتسب المغناطيسية الدائمة يؤدي إلى تولد عزم يسمى بعزم الإعاقة *Detent Torque* والذي ينشئ نتيجة التفاعل بين الدوائر ذو المغناطيسية الدائمة وملفات الثابت، حيث يعتمد هذا العزم على زاوية موضع الدوائر وعلى عدد أزواج الأقطاب المغناطيسية للجزء الدائر، ويعتبر هذا العزم غير مرغوب به عند السرعات المنخفضة لأنه يسهم في اهتزاز الدوائر لذا يدعى في بعض المراجع بعزم التعرج *Cogging Torque* لكن عند السرعات العالية فإن عزم عطالة الجزء الدائر يلغي تأثير هذا العزم.



الشكل (1) بنية المحرك الخطوي الهجين ثنائي

4- النمذجة الرياضية: [3]Mathematical

Modeling

يتألف النموذج الديناميكي لأي آلة كهربائية دوارة من جزئين: النموذج الميكانيكي والنموذج الكهربائي. يعطى النموذج الديناميكي الميكانيكي بقوانين نيوتن للقوة.

1-مقدمة عامة: General Introduction

تعتبر المحركات الخطوية بأنواعها المختلفة من الآلات الخاصة، وهي وسيلة كهروميكانيكية تحول النبضات الكهربائية إلى عزوم ميكانيكية وتستخدم في تطبيقات التوضع. صممت المحركات الخطوية لتأمين التوضع الدقيق وذلك بالتحكم بعدد الخطوات، وهي في الواقع مستقرة نسبياً حتى في حالة الحلقة المفتوحة *Open Loop* وفي أي موضع، وبالتالي لا تحتاج لتغذية خلفية *Feed Back* للتحكم بها في كثير من التطبيقات، رغم أنه في بعض التطبيقات تزود المحركات الخطوية بتغذية خلفية بالموضع باستخدام الرموزات *Encoder*. يتم التبديل في هذه المحركات كهربائياً، وليس لديها ملفات على الدوائر، وأن استجابة الخطوة فيها ذات قفزة سريعة وزمن ثبات *Settling Time* طويل نسبياً [4].

2-الغاية من البحث: Purpose

يهدف البحث إلى تحليل الظواهر العابرة خلال الانتقال الخطوي للمحرك الخطوي الهجين عند نمط القيادة بالخطوة الكاملة (نمط القيادة بطور وحيد *One Phase On*) وذلك بإجراء نمذجة ومحاكاة للنموذج الرياضي المبسط للمحرك وأنظمة القيادة باستخدام البيئة البرمجية *Mtialab/Simulink*، حيث أجرينا تحليلاً فيزيائياً لأموج تيارات الأطوار وتفسير تغيرات العزم الكهرومغناطيسي المتولد في المحرك وعلاقته بموضع الدوائر خلال الانتقال من موضع لآخر لنمط القيادة المذكورة عند السرعات المنخفضة.

3-موجز عن المحركات الخطوية الهجينة:

Outline of Hybrid Stepper Motors

يعتبر المحرك الخطوي الهجين *Hybrid Stepper Motor* اختصاراً *HSM* من الآلات الكهربائية

مكافئ للفيض المغناطيسي المتولد من المغناطيس الدائم (الجزء الدائر المكتسب المغناطيسية الدائمة)[3].

5- النمذجة الرياضية للمحرك HSM:

Mathematical Modeling of HSM

إن وضع نموذج ديناميكي دقيق للمحرك الخطوي الهجين HSM معقد بعض الشيء، وذلك بسبب الترابط المتبادل بين أطوار المحرك وتغير الحثية الذاتية للملفات مع موضع الدائر. ويمكننا تبسيط النموذج الرياضي بافتراضات معينة كما يلي:

إهمال تأثير الاشباع المغناطيسي في الدائرة المغناطيسية، واعتبار توزيع السيلية المغناطيسية للمغناطيس الدائم المتشابهة مع ملفات الثابت بشكل جيبي وتابعة لتغيرات موضع الدائر، واعتبار الحثية المتبادلة بين الأطوار Ph_A و Ph_B معدومة والحثية الذاتية ثابتة، وإهمال تأثير التيارات الإعصارية وعروة البطء المغناطيسي وافترض أن توزيع ملفات الطور الثابت على طول محيطه بشكل جيبي [7].

يعطى التشابك المغناطيسي (السيلية المتشابهة) الكلية $Total Flux Linkage$ في ملفات كل طور من أطوار الثابت بالعلاقات الآتية:

$$\lambda_a = L_S \cdot i_a + \phi_a(\theta) \quad (6)$$

$$\lambda_b = L_S \cdot i_b + \phi_b(\theta) \quad (7)$$

حيث: $\phi_a(\theta)$ و $\phi_b(\theta)$ هي السيلية المغناطيسية المتولدة من قبل المغناطيس الدائم للدوار والمتشابهة في أطوار الثابت Ph_A و Ph_B على التوالي. شكّلت أسطح أسنان الدائر والثابت بحيث تعطي فيوض مغناطيسية متشابهة $\phi_a(\theta)$ و $\phi_b(\theta)$ كما يلي:

$$\phi_a(\theta) = \lambda_M \cos(N_r \cdot \theta) \quad (8)$$

$$\phi_b(\theta) = \lambda_M \sin(N_r \cdot \theta) \quad (9)$$

أما النموذج الديناميكي الكهربائي فيعطى بقوانين كيرشوف، ويمكن أن يتم اشتقاقه من نموذج الدارة المكافئة الكهربائية، تربط بين النماذج الجزئية الكهربائية والميكانيكية من خلال القوة (أو العزم) التي تعتمد على التيار والحثيات التي تعتمد على الموضع.

- النموذج الديناميكي الميكانيكي للمحرك الدوار:

تعطي المعادلات الرياضية التالية هذا النموذج:

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = \dot{\theta} \quad (1)$$

$$\dot{\omega} = \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}(T - T_l - T_f) \quad (2)$$

حيث: θ التوضع الزاوي للدائر [degree]، ω السرعة الزاوية الميكانيكية للدائر [rad/sec]، J عزم عطالة الدائر [kg.m²]، T أو T_e العزم الكهرومغناطيسي الناشئ [Nm]، وهو قيمة جبرية تابعة للتيارات والفيوض المغناطيسي المتشابهة، ويعتمد بشكل عام على موضع الدائر، و T_l عزم الحمولة [Nm]، و T_f عزم الاحتكاك [N.m] والذي نعبر عنه بالعلاقة $T_f = D\omega$ حيث: D عامل الاحتكاك للزج [N.m.s]، و P استطاعة المحرك [W].

- النموذج الديناميكي الكهربائي:

تعطي المعادلات الرياضية التالية هذا النموذج:

$$u_i = i_i R_i + \frac{d}{dt} \phi_i \quad (3)$$

حيث: u_i الجهد، و i_i التيار، و R_i مقاومة الطور i^{th} . ϕ_i هي السيلية المغناطيسية المتشابهة المرافقة للطور i^{th} . لإكمال النموذج للمحرك، نحتاج لتحديد التوابع T, ϕ_i :

$$\phi_i = \phi_i(\theta, i_1, \dots, i_N, i_{N+1}) \quad (4)$$

$$T = T(\theta, i_1, \dots, i_N, i_{N+1}) \quad (5)$$

حيث: N عدد الأطوار و $i_{N+1} = i_f$ يعبر عن تيار الحقل لملف الدائر الوهمي الذي يولد فيوض مغناطيسي

حيث نعبر عن القوة المحركة الكهربائية العكسية المتولدة في كل طور بالعلاقات الآتية:

$$e_a \cong -\frac{d}{dt} \phi_a(\theta) = K_m \cdot \omega \cdot \sin(N_r \theta) \quad (16)$$

$$e_b \cong -\frac{d}{dt} \phi_b(\theta) = -K_m \cdot \omega \cdot \cos(N_r \theta) \quad (17)$$

يُمثل الحد $R_S(i_a^2 + i_b^2)$ الضياعات الأومية في المقاومة الأومية لأطوار الثابت وهي مبددة بشكل أساسي كحرارة، بينما يُمثل الحد $\frac{1}{2} L_S \frac{d}{dt} (i_a^2 + i_b^2)$ القدرة المخزنة في حثية الأطوار، ويُمثل الحد الأخير في علاقة الاستطاعة المستجرة الاستطاعة الكهرومغناطيسية $T\omega$ وهي معرفة بالحد $(i_a e_a + i_b e_b)$ ويجب لهذه الاستطاعة الكهرومغناطيسية أن ترسل إلى الدوار.

$$T\omega = -(i_a e_a + i_b e_b) \quad (18)$$

بالتالي يعطى العزم بالعلاقة الآتية:

$$T = -\frac{(i_a e_a + i_b e_b)}{\omega} \quad (19)$$

$$= -i_a K_m \sin(N_r \theta) + i_b K_m \cos(N_r \theta) \quad (20)$$

يمكن أن نستنتج مما سبق أنه عند عزم عطالة *Moment of Inertia* الدائر J وعزم حمولة T_l وعزم احتكاك T_f يمكننا التعبير عن النموذج الرياضي النهائي بالعلاقات الآتية [3][4][5]:

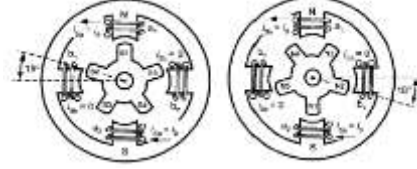
$$L_S \frac{di_a}{dt} = -R_S i_a + K_m \cdot \omega \cdot \sin(N_r \theta) + u_a \quad (21)$$

$$L_S \frac{di_b}{dt} = -R_S i_b - K_m \cdot \omega \cdot \cos(N_r \theta) + u_b \quad (22)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = -i_a K_m \sin(N_r \theta) + i_b K_m \cos(N_r \theta) - T_l - T_f \quad (23)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (24)$$

حيث: λ_M هو ثابت يعبر عن طولية السيادة المغناطيسية لـ $\phi_a(\theta)$ و $\phi_b(\theta)$ ، و $\theta = 0$ متوافقة مع الدوار كما هو مبين بالشكل الآتي:



الشكل (2) مقطع عرضي للجزء الدوار للمحرك

بتطبيق قانون فاراداي وقانون أوم وقانون كيرشوف على الدارة المكافئة المبينة بالشكل 3 نجد:

$$u_a - R_S \cdot i_a - \frac{d}{dt} \lambda_a = 0 \quad (10)$$

$$u_b - R_S \cdot i_b - \frac{d}{dt} \lambda_b = 0 \quad (11)$$

Or

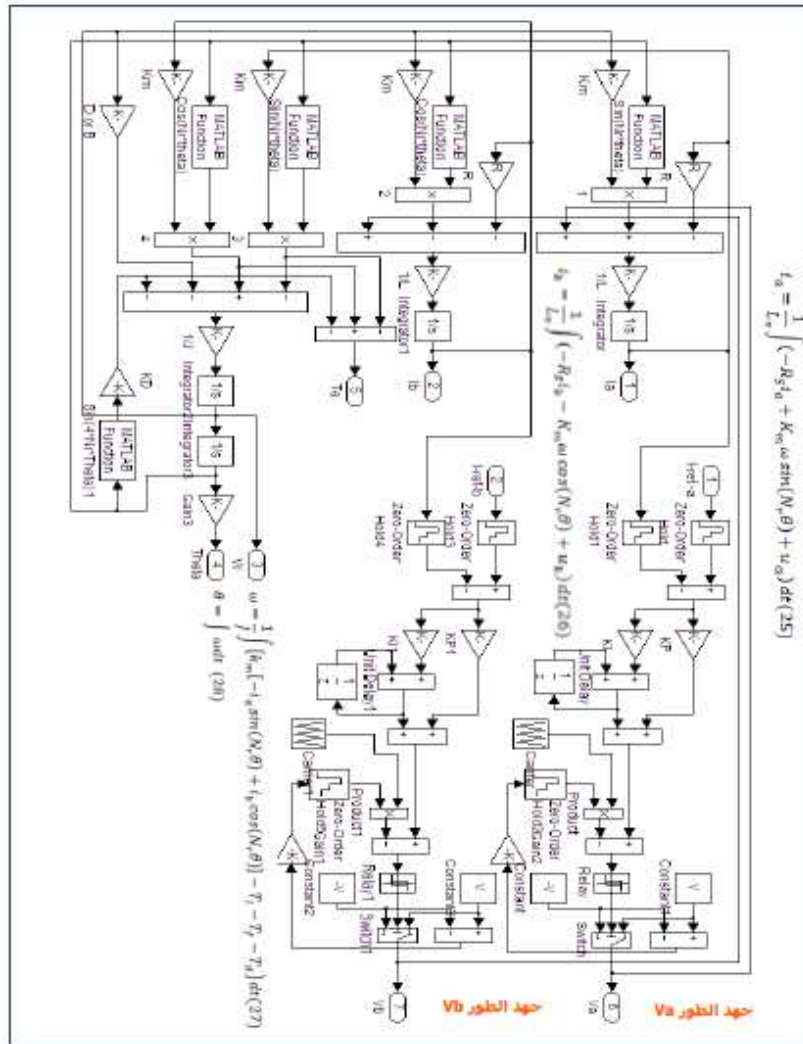
$$L_S \frac{di_a}{dt} = -R_S i_a + K_m \cdot \omega \cdot \sin(N_r \cdot \theta) + u_a \quad (12)$$

$$L_S \frac{di_b}{dt} = -R_S i_b - K_m \cdot \omega \cdot \cos(N_r \cdot \theta) + u_b \quad (13)$$

حيث: L_S الحثية الذاتية، المقاومة الأومية لملفات الطور الواحد، و $K_m = N_r \cdot \lambda_M$ ثابت العزم، و $\omega = d\theta/dt$ هي السرعة الزاوية للدائر، و u_a و u_b توترات الأطوار Ph_A و Ph_B على التوالي، i_a و i_b تيارات الأطوار Ph_A و Ph_B على التوالي، إن الاستطاعة المستجرة *Power Supplied* من المحرك عند توترات المنبع u_a و u_b هي $i_a u_a + i_b u_b$ ومنه يمكننا كتابة علاقة الاستطاعة كما يلي:

$$i_a u_a + i_b u_b = R_S i_a^2 + R_S i_b^2 + L_S i_a \frac{di_a}{dt} + L_S i_b \frac{di_b}{dt} - (i_a e_a + i_b e_b) \quad (14)$$

$$= R_S (i_a^2 + i_b^2) + \frac{1}{2} L_S \frac{d}{dt} (i_a^2 + i_b^2) - (i_a e_a + i_b e_b) \quad (15)$$



الشكل 5 مخطط ومعادلات محاكاة المحرك HSM في البيئة البرمجية Matlab

تعتبر طريقة القيادة أو التهيج بطور وحيد من أبسط طرق تشغيل المحركات HSM، من أهم مميزاتها أن مواضع استقرار الدائر تعتبر مواضع توازن حقيقية (أي تتقابل فيها أسنان الدائر والثابت معاً) وبالتالي دقة التوقف تكون أكبر بالمقارنة مع نمط التهيج بطورين كما هو مبين في الشكل 7، ومن أهم المساوئ تحدث اهتزازت حول موضع التوازن كبيرة،

يبين الشكل 4-a-b المخطط الصندوقي لمكونات نظام القيادة مع المحرك بشكل كامل، ويبين الشكل 5 مخطط مع معادلات المحاكاة الكامل والمفصل لنموذج المحرك مع نظام القيادة بالاعتماد على العناصر البيئية البرمجية Matlab/Simulink.

7- نمط التهيج وحيد الطور: **One Phase On Mode**

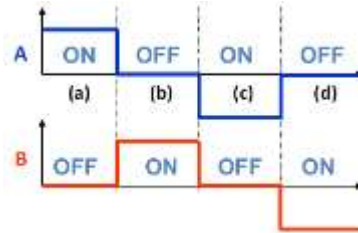
يدور بعكس عقارب الساعة وذلك بكل بساطة بعكس التتابع $Ph_3 \rightarrow Ph_2 \rightarrow Ph_1, \dots$ ، وتدعى طريقة التهيج وحيدة الطور أيضاً بطريقة القيادة بطور وحيد *Single-Phase Excitation*.

يبين الجدول (2) تتابع بنمط التهيج وحيد الطور لمحركات ثلاثية الطور على سبيل المثال، تمثل الأجزاء المظلمة في الجدول حالة التهيج، وبين الأجزاء الفارغة البيضاء التي لا يسري فيها تيار وبالتالي هي ليست مهيجة. عندما يدور المحرك مع عقارب الساعة فإن تتابع التهيج هو $Ph_1 \rightarrow Ph_2 \rightarrow Ph_3, \dots$ ، ولكي

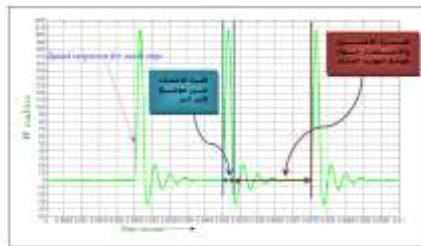
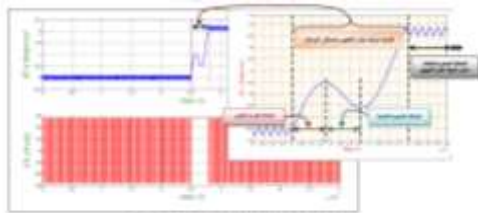
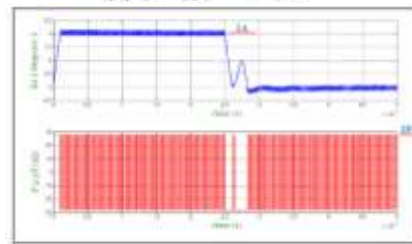
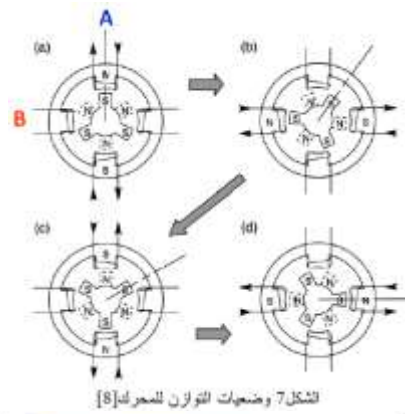
الجدول (2) تتابع تشغيل الأطوار في طريقة تهيج طور وحيد

Clock State	Reset	1	2	3	4	5	6	7	8
Ph_1									
Ph_2									
Ph_3									

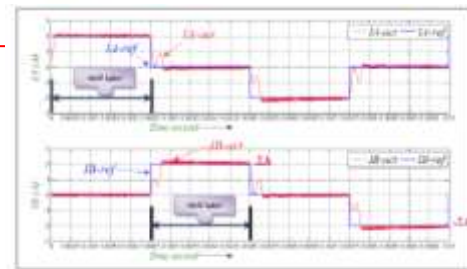
ويبين الشكل الآتي أمواج التهيج المطبقة على أطراف ملفات المحرك الخطوي الهجين ثنائي الطور:



الشكل (6) أمواج التهيج لمحرك HSM ثنائي الطور بخطوة كاملة



الشكل 10 ملخص لتتابع السرعة الزاوية التفاضلية المعطاة في (a) Phase (b) B



الشكل 11 مقارنة بين تيارات القيادة الرجعية والفعلة للأطوار Ph_2, Ph_1 .

8- مناقشة نتائج المحاكاة: Results

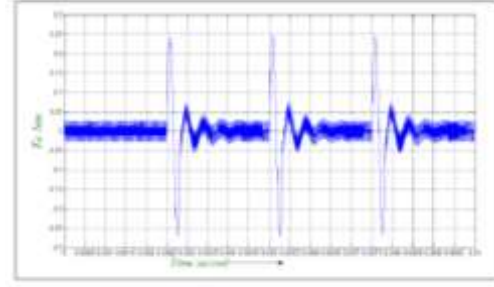
-التحليل الفيزيائي لانتقال الدائر استجابةً لخطوة وحيدة بنمط تهيج طور وحيد:

تم وضع أعمدة (دليل) على الأشكال 15-16 والهدف هو تجزئة الحالة العابرة إلى عدة مناطق من أجل تفسير وتحليل كل منطقة (حيث تعبر كل منطقة عن حالة أنتقال لموضع الدائر) على حدى.

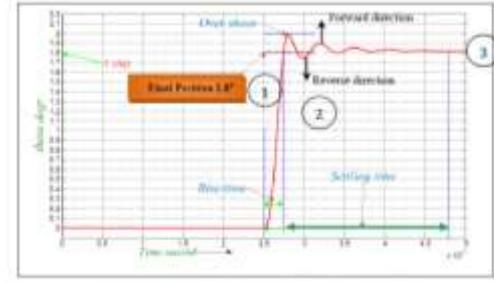
ولتفسير تغيرات العزم الكهرومغناطيسي المتولد في المحرك وعلاقته مع موضع الدائر (خلال الانتقال من موضع لآخر) وتيارات الأطوار المرافقة لها، نجري الدراسة إلى حالتين، حيث تمثل كلتا الحالتين حالة إقلاع دائر المحرك عند كل خطوة كوننا نناقش الموضوع عند السرعات المنخفضة:

الحالة الأولى: دائر المحرك متوضع تحت القطب الطور Ph_A - والقطب غير مهيج ونهيج القطب الطور Ph_B ، وتمثل انتقال دائر المحرك عن الموضع الأولي والذي يمكن اعتباره موضع مرجعي *Home Position*.

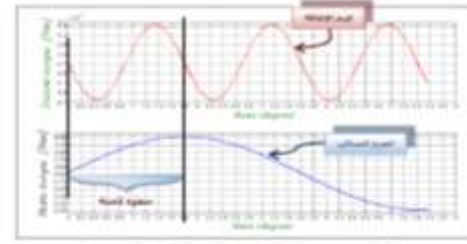
نهيج القطب الطور Ph_B (عند نقطة 0 الموضحة بالشكل 15) يبدأ التيار I_B بالتصاعد بشكل آسي إلى قيمة قريبة لنصف القيمة الاسمية، عندها يتولد عزم تحريك موجب. عند الدليل 1 نلاحظ من الشكل أن العزم وصل لقيمته العظمى في حين أن الدائر كان يتقدم ببطئ ومن ثم يزداد تقدم الدائر بشكل حاد، تمثل الحالة السابقة إقلاع الدائر وتخلصه من عزم الإعاقة الناجم عن المغناطيس الدائم. يكون الدائر بعد الدليل 1 قد تخلص من عزم الإعاقة واكتسب قدرة حركية وانخفض العزم المطلوب للتحريك مما يؤدي إلى انخفاض التيار I_B ويرافق هذا ارتفاع بالقوة المحركة الكهربائية.



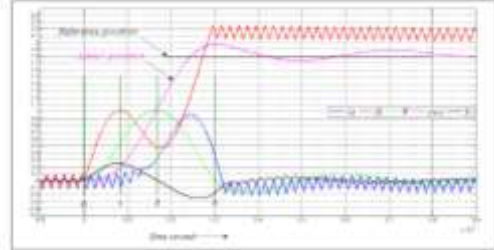
الشكل 12: استجابة العزم المتولد الكهرومغناطيسي T_e لموضع (Home Position)



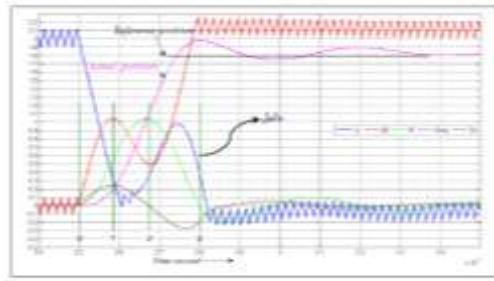
الشكل 13: معنى استجابة زاوية الموضع لخطوة وحيدة (Home Position)



الشكل 14: معنى عزم الإقلاع والعزم المتولد عند زاوية الموضع 0



الشكل 15: الحالة الأولى دائر المحرك تحريك تحت القطب الطور Ph_A غير مهيج وموضع تحت القطب الطور Ph_B



الشكل 16: الحالة الثانية دائر المحرك تحريك تحت القطب الطور Ph_B مهيج والموضع تحت القطب الطور Ph_A

بشكل لحظي وإنما يتخامد بشكل آسي بثابت زمني L/R وذلك تبعاً للقدرة المختزنة في الملف ولمقاومته. - تمكنا من خلال الأشكال 9-8 التعرف على سلوك المحرك عند حالة التشغيل بنمط طور وحيد *One Phase On* وهي أبسط أنماط القيادة عند السرعة المنخفضة، وتعطي هذه الحالة وصف لثلاث حالات عابرة:

الحالة الأولى: تطبيق التوتر على ملف الطور بنبضة عريضة وتزايد التيار بمنحني آسي والتخلص من عزم الإعاقة.

الحالة الثانية: حركة الدائر الذي ينجم عنه انخفاض في تيار الطور خلال فترة التصاعد وتعزى إلى القدرة الحركية المكتسبة للدائر.

الحالة الثالثة: الاستقرار والتوقف عند الموضع المطلوب وتنظيم تيار الطور عند التيار الاسمي من خلال منظم تناسبي تكاملي (PI)، حيث تم اختيار المنظم اعتماداً على محددات المحرك وزمن العينات [1]

$$k_p = L_S + \frac{R_S T_S}{2}$$

$$k_i = R_S T_S$$

زمن العينات T_S *Sampling Time* ويساوي $1 \times 10^{-5} \text{sec}$

- أيضاً بيّنا من خلال الأشكال 10-12-13 الظواهر العابرة وهي استجابة السرعة الزاوية الديناميكية الخطوية مع الزمن والعزم الكهرومغناطيسي الديناميكي المتولد مع الزمن واستجابة زاوية موضع الدائر الخطوية مع الزمن على التوالي عند نمط التهيج بطور وحيد.

- يبين الشكل 12 الظواهر العابرة للعزم الكهرومغناطيسي المتولدة في المحرك.

أما بالنسبة لسرعة الدائر فإنها تتزايد انطلاقاً من 0 وحتى الدليل 1، حيث تصل لسرعتها العظمى عند الدليل 2، حيث ينعدم العزم ويصبح تيار الطور I_B في أدنى قيمة له. وعند بدأ دخول الدائر تحت القطب يتولد عزم سالب يكبح دائر المحرك لإيقافه تحت القطب تماماً وبسبب القدرة الحركية المكتسبة يستمر الدائر بالحركة مما يسبب تجاوز للموضع المطلوب *Over Shoot*، إلى أن تصل السرعة إلى الصفر يحدث الانحراف الأعظمي عن موضع التوازن (الدليل 3)، حيث يكون العزم السالب في قيمته القصوى ويعمل على إعادة الدائر إلى تحت القطب وهذه الآلية تؤدي إلى اهتزاز الدائر بشكل متخامد تبعاً لعزم العطالة وثابت الاحتكاك للزج وللتيار وعزم المسك الساكن *Holding Torque or Static Torque* وثوابت الدارة المكافئة إلى أن يستقر في موضعه تحت القطب ويثبت التيار عند قيمته الاسمية.

أما بالنسبة لتيار I_A فيتصاعد إلى قيمة قريبة لنصف القيمة الاسمية بعد الدليل 2 وسبب نشوء التيار I_A هي القوة المحركة الكهربائية العكسية في الطور Ph_A أثناء الحركة، حيث مروه في الملف يُزيد من قيمة عزم الكبح من أجل التوقف عند الموضع المطلوب.

الحالة الثانية: دائر المحرك متوضع تحت القطب الطور Ph_A - والقطب مهيج يوجد عزم مسك مطبق على الدائر، ثم نلغي تهيج القطب الطور Ph_A ونهيج القطب الطور Ph_B ، وتمثل انتقال الدائر من خطوة إلى أخرى بشكل متتابع.

الحالة الثانية مطابقة للحالة الأولى المبينة في الشكل 16 لكن ما نلاحظه في الحالة الثانية أنه عند فصل تهيج القطب الطور Ph_A فإن التيار I_A لا يُقطع

الخاتمة: Conclusion

قمنا في هذا البحث باستعراض شرح موجز لآلية الانتقال الخطوي للمحرك الخطوي الهجين ثنائي الطور عدد الخطوات (200) خطوة، بغية:

1- التعرف على ماهية الانتقال لدائر المحرك الذي يحدث بشكل قفزات من خطوة إلى أخرى، من أجل وضع خوارزميات تحكم متقدمة ذكية تعالج القصور الناتج في خوارزميات التحكم التقليدية للتغلب على مساوئ تشغيل المحرك HSM عند السرعات المنخفضة وأهم المساوئ هي: - ظاهرة الطنين الكهروميكانيكي *Resonance*، - وضجيج المحرك *Noise*، مما ينعكس إيجابياً على النماذج الفيزيائية لأنظمة قيادة المحركات الخطوية.

2- إمكانية التحكم بفترات التهييج خلال فترة الانتقال والمثلة بزمان الارتفاع و زمن الثبات بهدف رفع كفاءة النظام.

3- الحصول على صورة كاملة للحالات العابرة لأموح تيارات الأطوار والعزم الكهرومغناطيسي وزاوية موضع الدائر والسرعة الزاوية الديناميكية الخطوية وذلك عند السرعات المنخفضة.

أما عند السرعات العالية ستكون الدراسة مختلفة تماماً وهو ما سنتناوله في الأبحاث القادمة.

- يبين الشكل 13 منحنى استجابة زاوية الموضع، حيث عند النقطة 1 يتسارع الدائر نحو الخطوة التالية (عند زمن الارتفاع *Rise Time*) ثم يتجاوز الموضع المحدد بفعل التأثير المتبادل للعطالة الكلية للنقطة 2 والعودة بالاتجاه المعاكس مع ظهور عدة اهتزازات متخامدة حول موضع التوازن والاستقرار 3 وذلك عند الزمن الثبات *Settling Time* ووقوف الدائر تحت قطب الطور ويتم التحكم بالسرعة الدورانية من خلال هذا الزمن.

- يبين الشكل 11 تيارت الأطوار Ph_B و Ph_A المرجعية والحقيقية.

- يبين الشكل 14 عزم الإعاقة وهو معدوم عند مواضع الاستقرار والممثل بالتوافقية الرابعة كما هو موضح في النموذج الرياضي. عند لحظة بدء التهييج وبداية حركة الدائر يكون هذا العزم هو عزم سالب أي عزم كبح، وعند دخول الدائر تحت القطب المهييج وأثناء الحركة يصبح عزم موجب بالقرب من موضع التوازن الجديد، وهو معاكس للعزم الكهرومغناطيسي ويعتبر عزم غير مفيد أثناء الحركة الخطوية لكنه مفيد من خلاله يمكننا معرفة مواضع التوازن بدون تهييج وذلك بتحريك دائر المحرك بيدنا نلاحظ أنه يستقر عند مواضع محددة وتمثل هذه المواضع عدد خطوات الدائر خلال دورة واحدة (360°). أيضاً بينا على نفس الشكل عزم المسك الساكن بدلالة زاوية الموضع.

المراجع : Reference

1. André Veltman, Duco W.J. Pulle and Rik W. De Doncker, (*Fundamentals of Electrical Drives*), Springer, 2007.
2. John Chiasson, (*Modeling and High-Performance Control of Electric Machines*), Wiley Interscience, 2005.
3. F. Khorrami, P. Krishnamurthy, H. Melkote, (*Modeling and Adaptive Nonlinear Control of Electric Motors*), Springer, 2003.
4. John N. Chiasson and Robert T. Novotnak, (*Nonlinear Speed Observer for the PM Stepper Motor*) IEEE trans. Automat. contr. vol 38, October 1993.
5. M. Zribi and J. Chiasson, (*Position Control of a PM Stepper Motor by Exact Linearization*), IEEE trans. Automat. contr. vol 36, May 1991.
6. Matlab\Simulink, Matlab\SimPower System Ver **R2009a**, Mathwork.
7. Hong Li and Miao Jin, (*Vector Control and SVPWM Strategy of Two-phase Hybrid Stepping Motor*), Electrical and Control Engineering (ICECE), 2011 International Conference on.
8. Jeff Shelton-21 February 2013, unit 7 (*Stepper Motor*).