

## نمذجة ومحاكاة للقيادة بالخطوة الميكروية لمحرك خطوي هجين

م. معين الحلبي\*

### الملخص

دُرِسَ في هذا البحث النموذج الرياضي الديناميكي المبسط للمحرك الخطوي الهجين، والهدف هو تبسيط الدراسة والتركيز على جوانب محددة في هذا الموضوع. وقد وضع النموذج الرياضي، الذي يصف الأداء الديناميكي (الميكانيكي والكهربائي) للمحرك المدروس. إذ يعطى النموذج الميكانيكي بقوانين نيوتن، أما النموذج الكهربائي فيعطى بقوانين كيرشوف للدائرة المكافئة الكهربائية لكل طور.

مُتَّـلَّ النموذج الناتج من خلال المعادلات المميزة لها وخوارزمية القيادة المناسبة لتشغيل هذا المحرك على الحاسب في بيئة *Matlab/Simulink*، وذلك لتشغيل المحرك الخطوي الهجين بالخطوة الميكروية.

ساعدت نتائج المحاكاة بالطريقة المدروسة على تحليل القيادة بالخطوة الميكروية، وكيف يمكننا الحصول على انتقال زاوية موضع الدائر بشكل ناعم لتقليل مسألة الطنين الكهروميكانيكي، وكيفية الحصول على الدقة العالية بالموضع.

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

\* مهندس كهرباء، اختصاص هندسة الطاقة الكهربائية، جامعة دمشق.

## 1- المقدمة: Introduction

تعدُّ 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 من خلال التحكم بعدد الخطوات، وهي في الواقع مستقرة نسبياً حتى في حالة الحلقة المفتوحة *Open Loop* وفي أي موضع، ومن ثمَّ لا تحتاج إلى تغذية خلفية *Feed Back* للتحكم بها في كثير من التطبيقات. مع أنه في بعض التطبيقات تزود المحركات الخطوية بتغذية خلفية بالموضع باستخدام المرمزات *Encoders*. يجري التبديل في هذه المحركات كهربائياً، وليس لديها ملفات على الدوائر، واستجابة الخطوة فيها ذات قفزة سريعة وزمن ثبات *Settling Time* طويل نسبياً [5].

## 2- الغاية من البحث: Purposes

تعاني المحركات الخطوية الهجينة عند قيادتها بالخطوة الكاملة أو نصف الخطوة من ارتجاج وعدم النعومة في الحركة عند السرعات المنخفضة، إذ تشير معظم البحوث إلى أن تردد الاهتزاز (الطنين) يقع ضمن حدود  $150 \div 250$  Hz ومن ثمَّ القيادة بالخطوة الميكروية تعالج مسألة الطنين.

تتطلب الحاجة إلى تصغير زاوية خطوة المحرك الخطوي زيادة عدد أسنان الدائر، ولكن هذا ينطوي على صعوبات تقنية كبيرة وكلفة باهظة. فقد صنَّعتُ محركات ذات 50 سناً للدائر وجرى الحصول على دقة  $1.8^\circ$  فقط، كما صنَّعتُ 100 سن للدائر وجرى الحصول على دقة  $0.9^\circ$ ، ولرفع الدقة لابدَّ من حلول أخرى.

إن الهدف الأساسي للقيادة بالخطوة الميكروية هو التغلب على مساوئ تشغيل المحرك عند السرعات المنخفضة، إذ تمَّ الاهتمام بإظهار التغيّرات الحاصلة في شكل زاوية الموضع للدائر وتيارات الأطوار.

## 3- تعريف النمذجة والمحاكاة: Modeling and Simulation

تعرف النمذجة *Modeling* بأنها مجموعة من المعادلات الرياضية العادية والتفاضلية التي تصف سلوك النظام، أمَّا المحاكاة *Simulation* فهي تطويع هذه المعادلات لوضعها ضمن مخطط صندوقي يتكون من مجموعة من العناصر بحيث يقوم كل عنصر بأداء مهمة مطلوبة منه وتستخدم في:

- الحالات التي لا تتوفر فيها النماذج الفيزيائية، بحيث يجري من خلالها تحري سلوك هذه الأنظمة، ومن ثمَّ مناقشة هذه النتائج، ولابدَّ هنا من دخول الخبرة في إمكانية قبول النتائج أو رفضها.

- إجراء نمذجة ومحاكاة لنماذج فيزيائية موجودة ومختبرة عملياً، ثم مقارنة نتائج المحاكاة بالنتائج العملية أو المخبرية لهذه النظم من قبل باحثين آخرين مثلاً منشورات *IEEE, IEE*.

- في حالة توافر النماذج الفيزيائية، يقوم بعض الباحثين بإجراء الاختبارات العملية على هذه النماذج، وبناء نماذج لمحاكاة هذه الأنظمة بهدف الكشف عن مدى دقة النموذج الرياضي وقدرة النموذج والبرنامج اللذين تم اختيارهما لإعطاء نتائج تكون قادرة على إعطاء نتائج محاكاة متطابقة قدر الإمكان مع الواقع العملي، وتستخدم مثل هذه الحالة في المخابر الجامعية لتمكين الدارسين من التعامل مع الحالة الفيزيائية وحالة المحاكاة ومعرفة أسباب الاختلاف في النتائج إن وجدت.

### 5- النمذجة الرياضية: Mathematical deling

يتألف النموذج الديناميكي لأي آلة كهربائية دوارة من جزعين: النموذج الميكانيكي والنموذج الكهربائي. يعطى النموذج الديناميكي الميكانيكي بقوانين نيوتن للقوة. أمّا النموذج الديناميكي الكهربائي فيعطى بقوانين كيرشوف، ويمكن أن يُشتقّ 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 الآتية هذا النموذج:

$$w = \frac{d q}{dt} = q \quad (1)$$

$$v\& = \frac{dw}{dt} = \frac{1}{J}(T - T_l - T_f) \quad (2)$$

إذ:  $\theta$  التوضع الزاوي للدائر [degree]، السرعة الزاوية الميكانيكية للدائر [rad/sec]،  $J$  عزم عطالة الدائر [kg.m<sup>2</sup>]،  $T$  العزم الكهرومغناطيسي الناشئ [Nm]، وهو قيمة جبرية تابعة للتيارات والفيض المغناطيسي المتشابك، ويعتمد بشكل عام على موضع الدائر.  $T_l$  عزم الحموله [Nm]، و  $T_f$  عزم الاحتكاك [N.m] الذي نعبر عنه بالعلاقة  $T_f = D\omega$  إذ:  $D$  عامل الاحتكاك للزج [N.m.s].

- النموذج الديناميكي الكهربائي:

تعطي المعادلات الرياضية الآتية هذا النموذج:

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

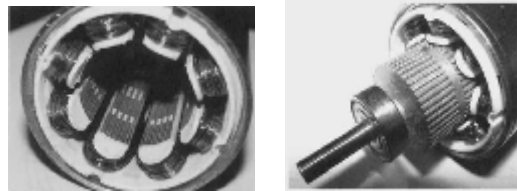
إذ:  $u_i$  الجهد، و  $i_i$  التيار، و  $R_i$  مقاومة الطور  $i^{th}$ . هي السيلية المغناطيسية المتشابكة المرافقة للطور  $i^{th}$ . لإكمال النموذج للمحرك، نحتاج إلى تحديد التوابع  $T, f_i$ :

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

تستخدم في المحاكاة العديد من العناصر المتاحة في البيئات البرمجية الجاهزة، وهذه العناصر بُنيت اعتماداً على النماذج الرياضية للأنظمة، لذلك يجري عادة استخدام هذه العناصر كصندوق مغلق *Black Box*، له مجموعة من المداخل والمخارج دون التدخل في إجراء أي تعديل على بنية هذه العناصر، أمّا إذا كان الهدف هو تحري تأثير بعض الخصائص بسبب حالات تشغيل غير مستقرة أو حالات تغذية غير نظامية فيجب العودة للنموذج الرياضي وتعديله بما يتناسب مع إمكانية إظهار أثر تلك الحالات، ومن ثمّ يجب بناء عنصر على غرار هذه العناصر يتناسب مع النموذج الرياضي المقترح.

### 4- المحركات الخطوية الهجينة: oHybrid Stepper Mtors

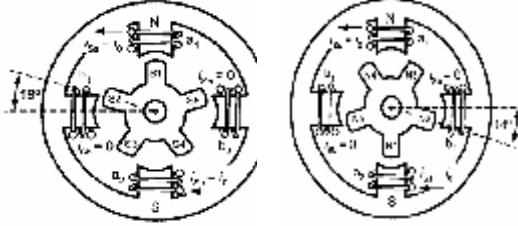
يعدّ المحرك الخطوي الهجين من الآلات الكهربائية التزامنية *Synchronous Electrical Machines*، مع أن بنيته مختلفة تماماً عن الآلة التزامنية ذات المغناطيس الدائم. يتألف المحرك الخطوي بشكل نموذجي من ثابت مكون من حديد طري *Soft Iron* زودّ بالملفات ودائر ذي مغناطيسية دائمة، كما هو مبين بالشكل (1)، إذ للدائر مجموعتان من الأسنان التي تكون على المحيط مترافقة مع بعضها بعضاً بعرض السن. بشكل نموذجي، توجد 50 سنّاً في كل مجموعة. تمغنت المجموعة الأولى كأقطاب جنوبية وتمغنت المجموعة الأخرى كأقطاب شمالية، بالنتيجة  $N_r = 50$  إذ  $N_r$  عدد أسنان الدائر [2].



الشكل 1 بنية المحرك الخطوي الهجين ثنائي الطور

$$f_b(q) = I_M \sin(N_r \cdot q) \quad (9)$$

إذ:  $I_M$  هي ثابت، و  $q = 0$  متوافقة مع الدور كما هو مبين بالشكل الآتي:



الشكل 2 مقطع عرضي للجزء الدوار للمحرك

بتطبيق قانون فاراداي وقانون أوم وقانون كيرشوف نجد:

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

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

Or

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

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

إذ:  $L_S$  الحثية الذاتية،  $R_S$  المقاومة الأومية لملفات الطور الواحد، و  $K_m \equiv N_r \cdot I_M$  ثابت العزم، و  $w = dq/dt$  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

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

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

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

إذ:  $N$  عدد الأطوار و  $i_{N+1} = i_f$  هو تيار الحقل (أو تيار الحقل الوهمي المتولد من المغناطيس الدائم، إن وجد) [4].

## 6- النمذجة الرياضية للمحرك الخطوي الهجين: *Mathematical Modeling of Hybrid Stepper Motor*

إن وضع نموذج ديناميكي دقيق للمحرك الخطوي ذي المغناطيس الدائم معقد بعض الشيء، وذلك بسبب الترابط المتبادل بين أطوار المحرك وتغير الحثية الذاتية للملفات مع موضع الدائر. يمكننا تبسيط النموذج الرياضي بافتراضات معينة كما يأتي:

إهمال تأثير الاشباع المغناطيسي في الدارة المغناطيسية، وعدّ توزيع السيلية المغناطيسية للمغناطيس الدائم المتشابكة مع ملفات الدائر بشكل جيبي وتابعة لتغيرات موضع الدائر، وعدّ الحثية المتبادلة بين الأطوار  $Ph_b$  و  $Ph_a$  معدومة والحثية الذاتية ثابتة، وإهمال تيارات الإعصارية وعروة البطء المغناطيسي وافترض أن توزع ملفات الطور الثابت على طول محيطه بشكل جيبي.

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

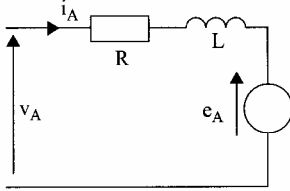
$$l_a = L_S \cdot i_a + f_a(q) \quad (6)$$

$$l_b = L_S \cdot i_b + f_b(q) \quad (7)$$

إذ:  $f_a(q)$  و  $f_b(q)$  هي السيلية المغناطيسية المتولدة من قبل المغناطيس الدائم للدوار والمتشابكة في أطوار الثابت  $Ph_b$  و  $Ph_a$  على التوالي. شكّلت سطوح أسنان الدائر والثابت بحيث تعطي فيوضاً مغناطيسيةً متشابكةً  $f_a(q)$  و  $f_b(q)$  كما يأتي:

$$f_a(q) = I_M \cos(N_r \cdot q) \quad (8)$$

نرسم الدارة الكهربائية المكافئة لأحد الأطوار وليكن طور  $Ph_1$  or  $Ph_a$  كما هو مبين في الشكل الآتي:



الشكل 3 الدارة المكافئة للطور

من المعادلات السابقة يمكننا إعادة كتابة النموذج الرياضي الكامل للمحرك وذلك بعد إضافة الحدين  $T_f$  المعبر عن عزم الاحتكاك و  $T_d$  عزم الإعاقة للمحرك وتهيئته ليصبح قابلاً لإجراء عملية المحاكاة باستخدام عناصر البيئة البرمجية *Matlab* بالشكل الآتي:

$$i_a = \int \left( -\frac{R_S}{L_S} i_a + \frac{K_m}{L_S} w \sin(N_r q) + \frac{u_a}{L_S} \right) dt \quad (25)$$

$$i_b = \int \left( -\frac{R_S}{L_S} i_b - \frac{K_m}{L_S} w \cos(N_r q) + \frac{u_b}{L_S} \right) dt \quad (26)$$

$$w = \int \left( \frac{1}{J} \left[ K_m i_a \sin(N_r q) + i_b \cos(N_r q) \right] - T_l - T_f \right) dt \quad (27)$$

$$q = \int w dt \quad (28)$$

$$T_d = K_d \cdot \sin(4N_r q) \quad [4] \quad (29)$$

إذ:  $K_d$  هو  $K_d = -\frac{1}{2} L_f 4 N_r i_f^2$  [4] وهو ثابت عزم

الإعاقة *Detent torque* تراوح قيمته بشكل

نموذجي من 5% to 10% من قيمة  $K_m i_0$  إذ: هو التيار الاسمي [6].

الجدول أدناه يبين ثوابت المحرك الهجين المستخدم في المحاكاة:

إذ نعبّر عن القوة المحركة الكهربائية العكسية في كل طور بالعلاقات الآتية:

$$e_a \equiv -\frac{d}{dt} f_a(q) = K_m \cdot w \cdot \sin(N_r q) \quad (16)$$

$$e_b \equiv -\frac{d}{dt} f_b(q) = -K_m \cdot w \cdot \cos(N_r q) \quad (17)$$

يُمثل الحد  $R_S(i_a^2 + i_b^2)$  الضياعات الأومية في المقاومة الأومية لأطوار الثابت وهي مبددة بشكل أساسي كحرارة، في حين يُمثل الحد  $\frac{1}{2} L_S \frac{d}{dt}(i_a^2 + i_b^2)$  القدرة المختزنة 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.

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

ومن ثم يعطى العزم بالعلاقة الآتية:

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

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

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

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

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

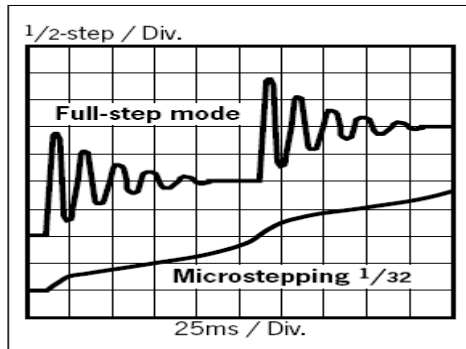
$$J \frac{dw}{dt} = -i_a K_m \sin(N_r q) + i_b K_m \cos(N_r q) - T_l - T_f \quad (23)$$

$$\frac{dq}{dt} = w \quad (24)$$

7- محاكاة المحرك الخطوي الهجين:

*Simulation of Hybrid Stepper Motor*

يبين الشكل (4) منهجية القيادة بالخطوة الميكروية أو القيادة الجيبية للمحرك إذ يبين كون شعاع العزم المحصل من تيارات الأطوار الجيبية المعطاة وفق العلاقات الآتية  $i_a=i_0\cos(d_m), i_b=i_0\sin(d_m)$  يتحرك بشكل تدريجي وناعم، مما ينتج عنه قوة شد ناعمة لحركة الدائر في أثناء خروجه من تحت قطب طور  $Ph_a$  ودخوله إلى قطب طور  $Ph_b$ ، إذ:  $d_m$  زاوية الخطوة الميكروية بالدرجة، وبالنتيجة يمنع ذلك انفلات الدائر باتجاه القطب المجاور بسبب قوة الشد الكبيرة مقارنة بطرائق القيادة التقليدية وماينتج عنها من اهتزاز حول موضع التوازن كما هو مبين في الشكل (5).



الشكل 5 موضع الداور عند القيادة بالخطوة الكاملة والخطوة الميكروية

#### 9- خوارزمية القيادة بالخطوة الميكروية:

##### Microstepping Drive Algorithm

لتنشكيل خوارزمية القيادة بالخطوة الميكروية نتبع الخطوات الآتية:

أولاً: نحدد عدد الخطوات الميكروية في الخطوة الطبيعية الواحدة  $n$ .

ثانياً: حساب زاوية الخطوة الميكروية  $\delta_m$ .

$$\delta_m = \frac{\text{rotor tooth pitch}}{4n}$$

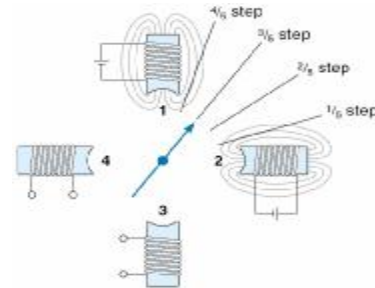
$L_s$	$R_s$	$K_m$	$N_r$	$J$
1.4 m.H	0.7 $\Omega$	0.25 N.m/A	50	1.2e-7 kg.m

B or D	V	$I_a$	$I_b$	$K_d$	$\theta_s$
1e-3 kg.m/s	28 V	2 A	2 A	2e-3 N.m	1.8°

#### 8- القيادة بالخطوة الميكروية: *Micro-stepping Drive*

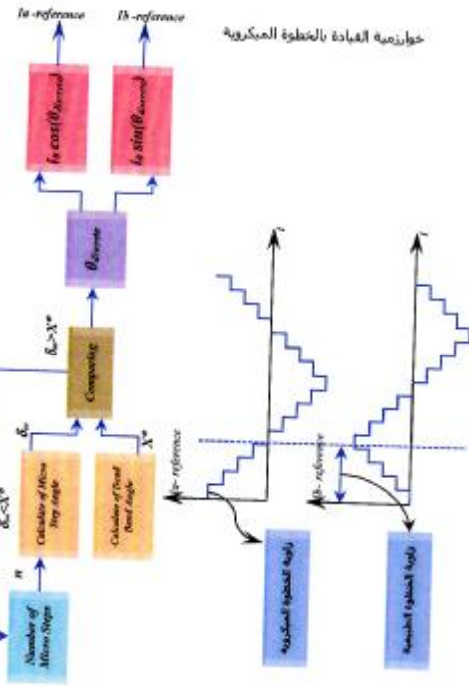
تعريف القيادة بالخطوة الميكروية: هي تجزئة الخطوة الطبيعية الواحدة *One Natural Step* إلى عدة خطوات صغيرة تتحقق بواسطة المبدلات الإلكترونية وفق خوارزمية تحكم محددة، إن فكرة الخطوة الميكروية آتية من القيادة الجيبية (التغذية بتوتر جيبية) للمحرك الهجين وكأنه محرك تزامني، وعند قيادة المحرك الهجين من منبع تغذية جيبية ثنائي الطور، بدلاً من الموجة المربعة، فإنه من المتوقع أن تكون حركة الدائر لاخطوية *Step Less* وناعمة جداً *Very Smooth*. تطبق هذه الطريقة على بعض المحركات في حالات خاصة، ولكن في العديد من الحالات فإن الحركة الناعمة بشكل تام لا تتحقق بسبب عزم الإعاقة، وتأثير الممانعة المغناطيسية المتغيرة، وبعض التوافقيات المتحرزة في الجهد بواسطة المغناطيس الدائم [2].

قطب طور  $Ph_b$

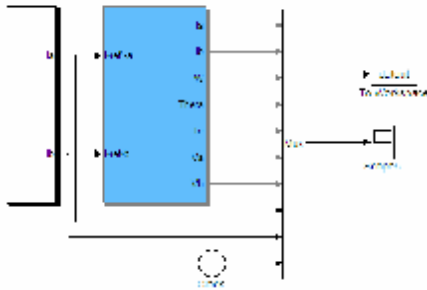


قطب طور  $Ph_b$

الشكل 4 منهجية القيادة بالخطوة الميكروية



10- محاكاة الخطوة الميكروية في البيئة البرمجية *Matlab/Simulink*  
 بالاعتماد على النموذج الرياضي القابل للبرمجة في البيئة البرمجية *Matlab/Simulink* من خلال المعادلات (25-26-27-28-29) وخوارزمية القيادة المقترحة والتي ضُمَّت في مخطط المحاكاة المبين في الشكل (6): [7][1]



الشكل 6 مخطط النمذجة والمحاكاة في بيئة *Matlab* للمحرك الهجين

إذ: *rotor tooth pitch* زاوية الخطوة السنية للدائر وتعطى:

$$\text{rotor tooth pitch} = \frac{2\pi}{N_r}$$

ثالثاً: حساب عرض المنطقة الميتة  $X^\circ$ ، وهي الزاوية التي يبقى عندها الدائر بحالة كبح ويبيدي عندها المحرك عزمًا يتغلب على العزوم كلها (عزم العطالة الكلي - عزم الحمولة - عزم الإعاقه).

$$X^\circ = \frac{\sin^{-1}\left(-\frac{T}{T_{peak}}\right)}{N_r}$$

إذ:  $T$  العزم المطلوب للتغلب على العزوم كلها،  $T_{peak}$  عزم المسك الأعظمي ويعطى  $kmio$ .  
 رابعاً: مقارنة بين الخطوة الميكروية وعرض المنطقة

الميتة، إذ  $X^\circ > \delta_m$  يتحرك الدائر، أمّا  $X^\circ < \delta_m$  فلا يتحرك الدائر ويحدث فقدان لخطوات ميكروية.  
 خامساً: نحسب الزاوية  $\theta_{discrete}$  من العلاقة:

$$\theta_{discrete} = \theta_{discrete} + \delta_m$$

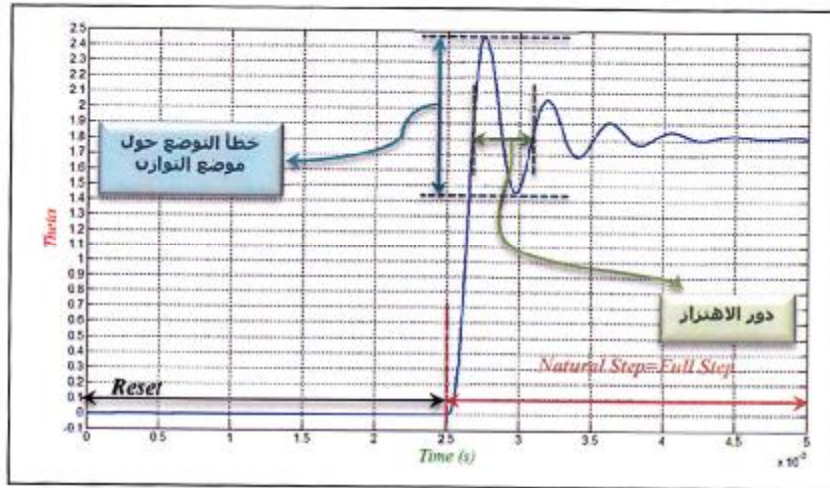
ومن ثم نحسب تيارات القيادة بالخطوة الميكروية وفق العلاقات الآتية:

$$i_a = i_0 \cos(\theta_{discrete}), \quad i_b = i_0 \sin(\theta_{discrete})$$

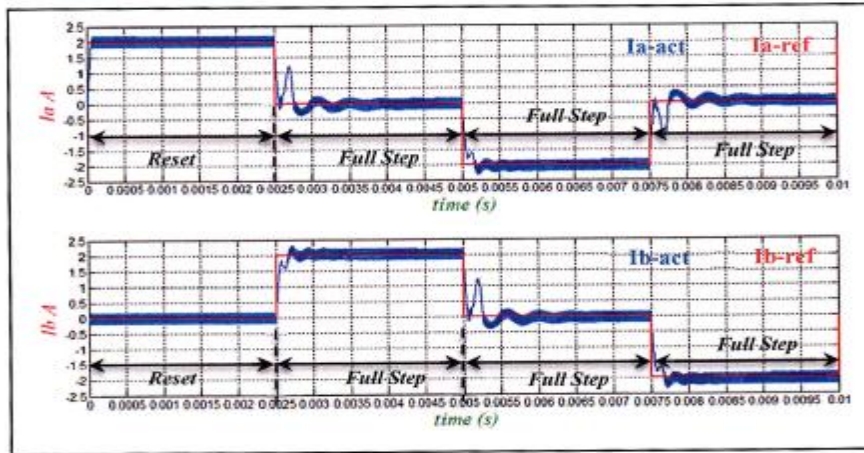
والمخطط الصندوقي الآتي يبين خوارزمية القيادة بالخطوة الميكروية:

المنحنى نفسه وعند عدد الخطوات الميكروية المذكورة أعلاه نفسها، أيضاً أظهرَ منحنى استجابة السرعة ومنحنى العزم الكهرمغناطيسي بالنسبة إلى القيادة الكاملة والخطوة الميكروية عند عدد خطوات  $n=4$

وبعد إجراء النمذجة والمحاكاة تم الحصول على النتائج المبينة أدناه، بحيث يُظهرُ منحنى استجابة الموضع لخطوة واحدة عند نمط القيادة بالخطوة الكاملة بتهييج طور وحيد *One Phase On* (كما هو معروف أنه في هذا النمط يكون فيه الاهتزاز أكبر مقارنة بنمط التهييج بطورين *Two Phase On*)، ولذلك أظهرَ المنحنى نفسه لكن عند عدد خطوات ميكروية  $n=2$ ، ثم عند  $n=4$ ،  $n=8$ ،  $n=16$ ، أيضاً أظهرتُ منحنيات تيارات القيادة المرجعية والحقيقية بالنسبة إلى الخطوة الكاملة والخطوة الميكروية على

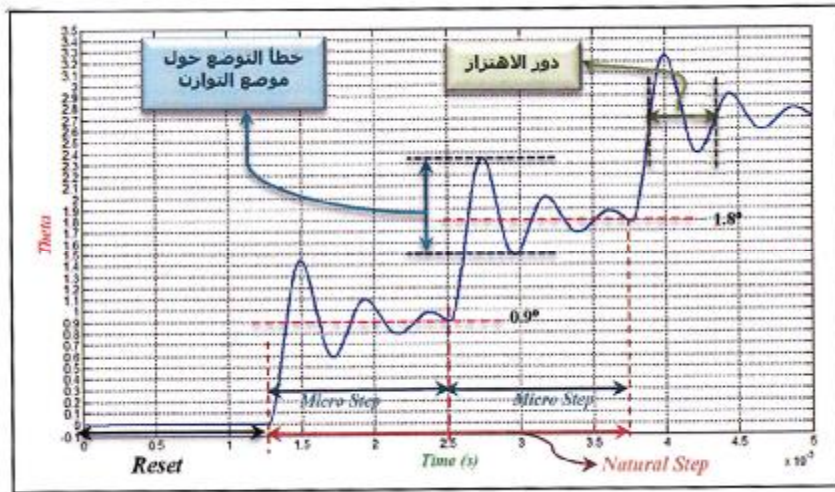


الشكل 7 منحنى استجابة الموضع بنمط الخطوة الكاملة *One Phase On*

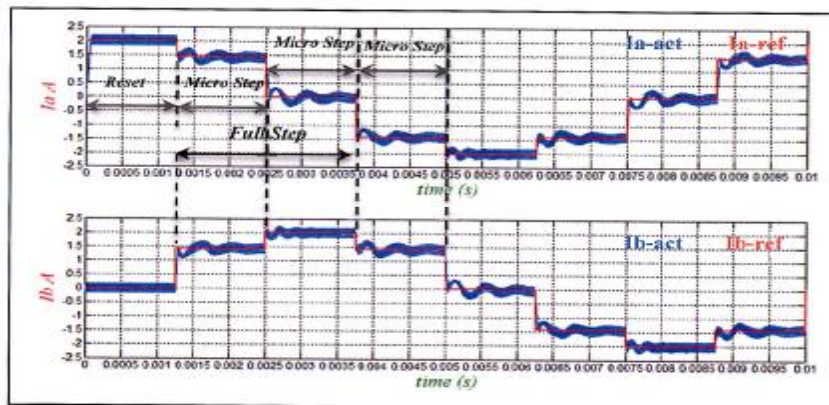


الشكل 8 تيارات الأطوار  $Ph_a$ ،  $Ph_b$  مقارنة بالتيارات المرجعية بنمط الخطوة الكاملة *One Phase On*

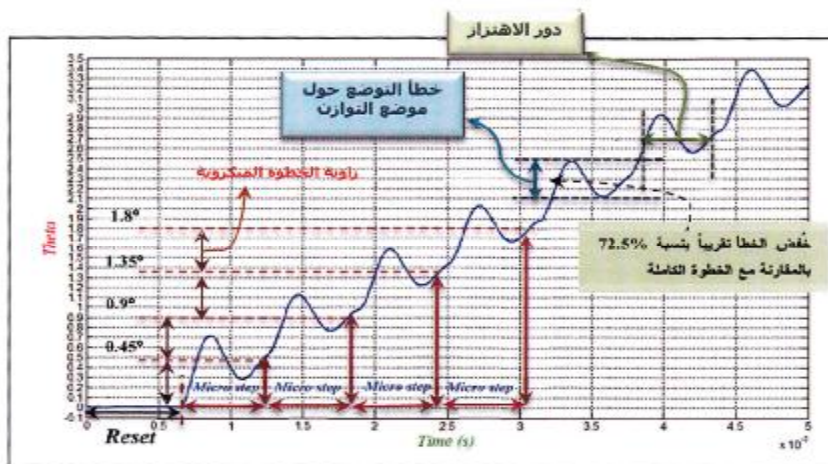




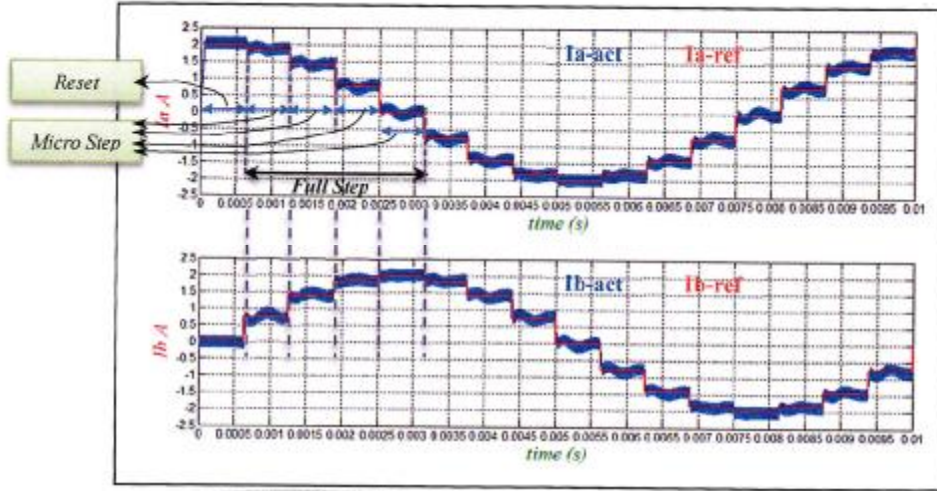
الشكل 9 منحنى استجابة الموضع عند  $n=2$



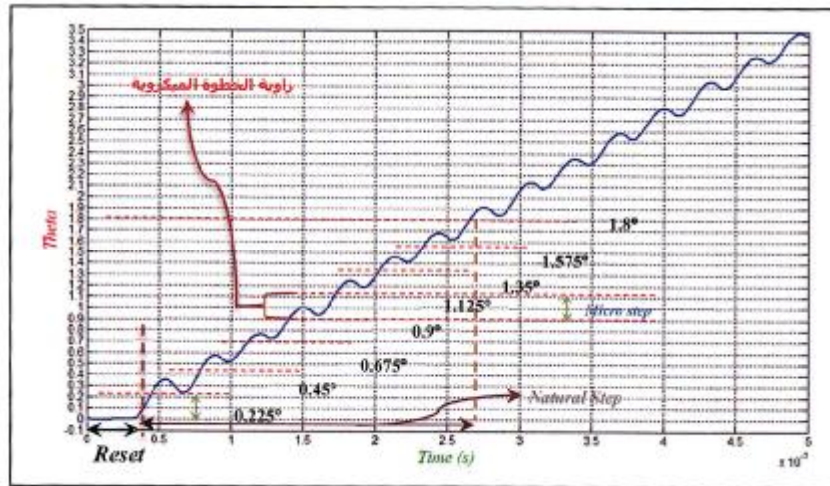
الشكل 10 تيارات الأطوار  $Ph_a$ ,  $Ph_b$  مقارنة بالتيارات المرجعية عند  $n=2$



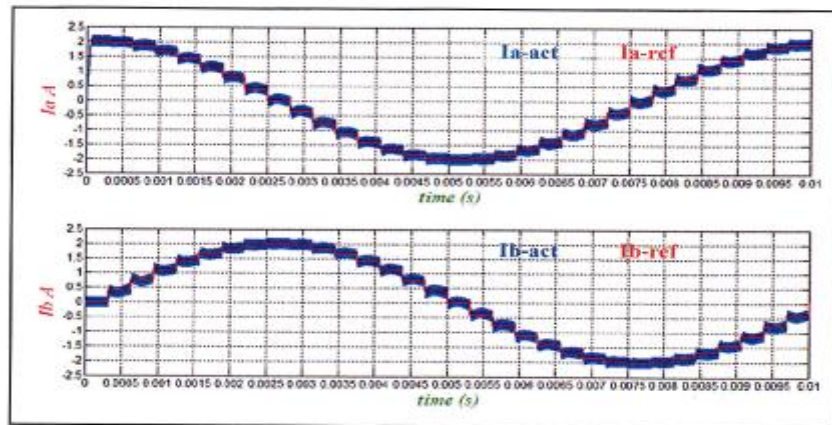
الشكل 11 منحنى استجابة الموضع عند  $n=4$



الشكل 12 تيارات الأطوار  $Ph_a, Ph_b$  مقارنة بالتيارات المرجعية عند  $n=4$

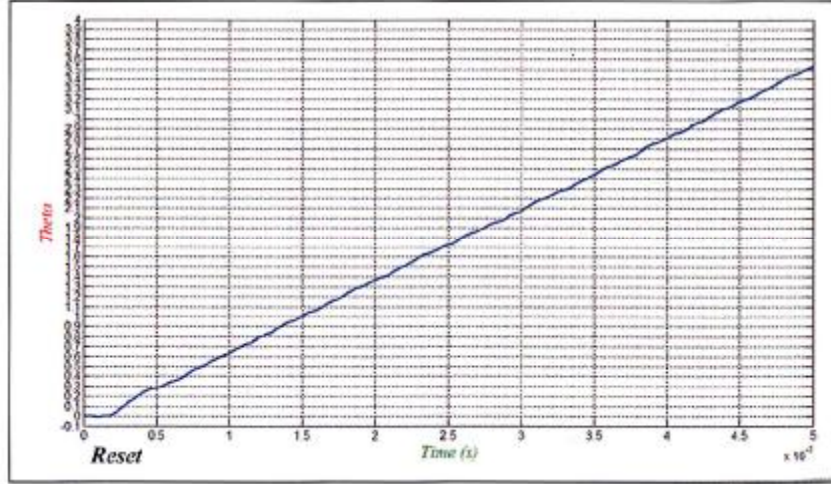


الشكل 13 منحنى استجابة الموضع عند  $n=8$

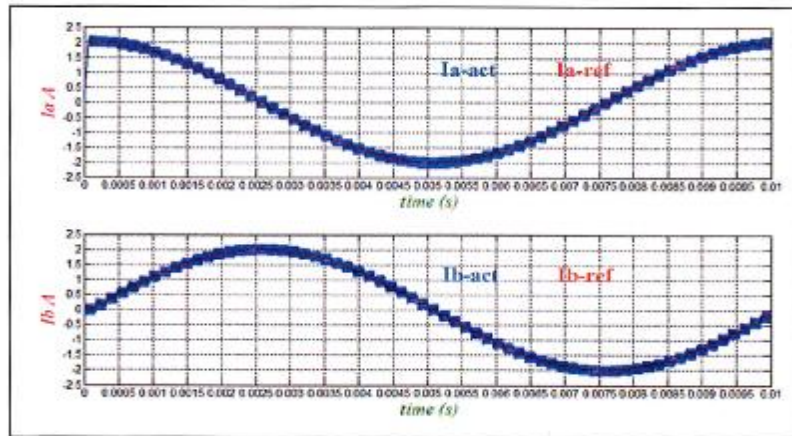


الشكل 14 تيارات الأطوار  $Ph_a, Ph_b$  مقارنة بالتيارات المرجعية عند  $n=8$

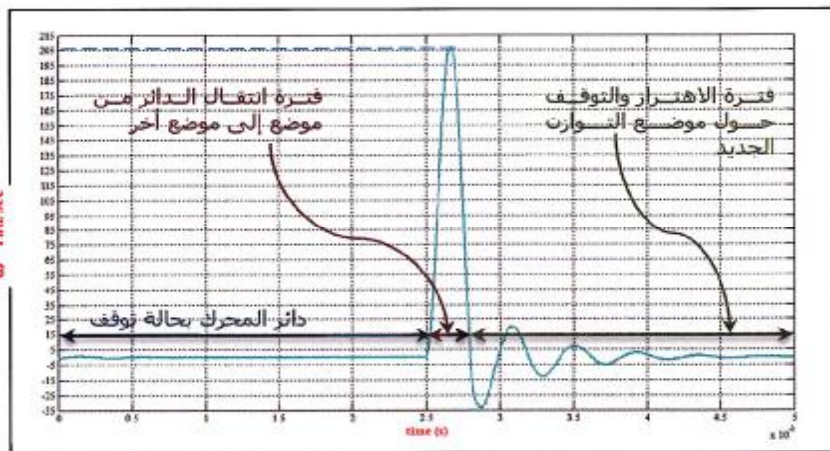




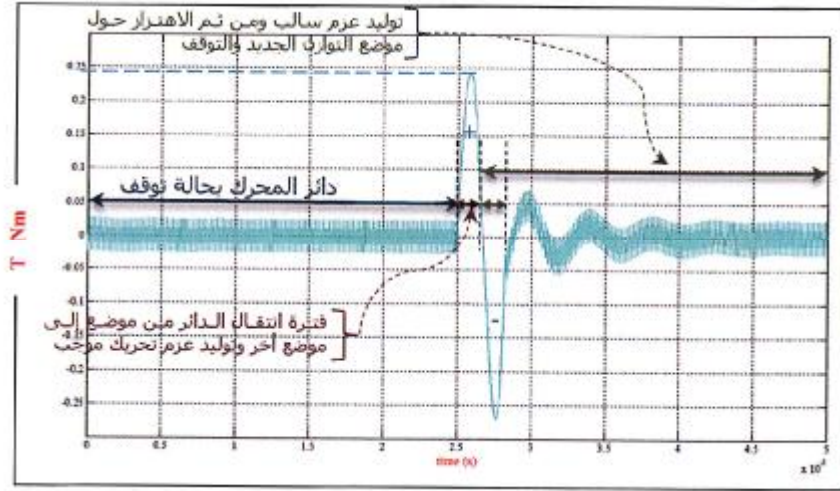
الشكل 15 منحنى استجابة الموضع عند  $n=16$



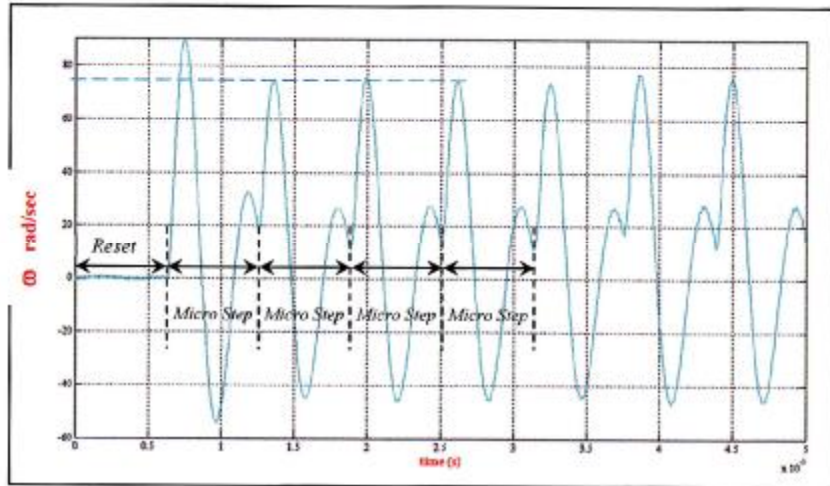
الشكل 16 تيارات الأطوار  $Ph_a, Ph_b$  مقارنة بالتيارات المرجعية عند  $n=16$



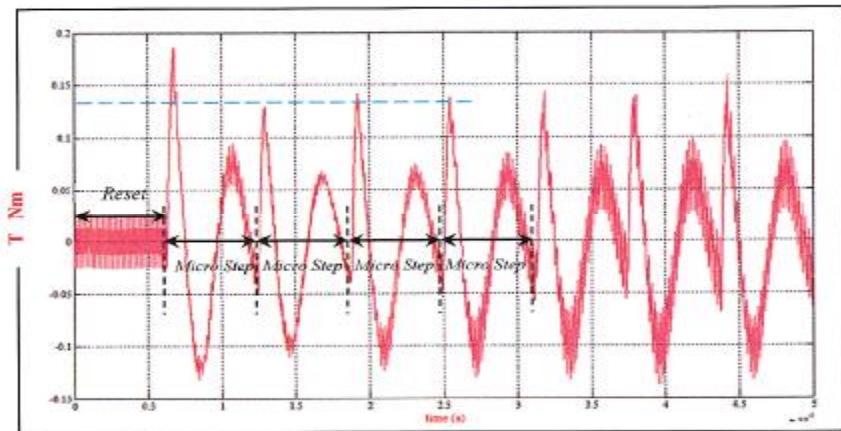
الشكل 17 منحنى استجابة السرعة بنمط الخطوة الكاملة *One Phase On*



الشكل 18 منحنى العزم الكهرومغناطيسي المتولد بنمط الخطوة الكاملة *One Phase On*



الشكل 19 منحنى استجابة السرعة عند  $n=4$



الشكل 20 منحنى العزم الكهرومغناطيسي المتولد عند  $n=4$

11- مناقشة النتائج: *Discussion of Results*

من خلال النتائج التي تم الحصول عليها باستخدام النموذج الحاسوبي للمحرك الخطوي الهجين ثنائي الطور، ومحاكاة نظام القيادة عند التشغيل بنمط الخطوة الكاملة (One Phase On)، وعند خطوة واحدة والخطوة الميكروية تم التوصل إلى النتائج الآتية:

1- إن سلوك المحرك الخطوي الهجين اهتزازي عند السرعات المنخفضة، فمثلاً عند موضع توازن محدد وليكن عند القيم الآتية:

$$i_b=0, i_a=i_0, u_b=0, u_a=u_0$$

$$T \approx -i_a K_m \sin(N_r \theta) \approx -i_0 K_m N_r \theta$$

من أجل  $q$  قيمة صغيرة وقريبة من الصفر، فإن أي اضطراب خفيف لموضع الدائر عن موضع التوازن يؤدي إلى زيادة كبيرة لعزم الإعادة *Restoring Torque*، إن المعادلة الواصفة لأجل  $|\theta|$  صغيرة تعطى كما يأتي:

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} = - (i_0 N_r K_m) \theta - D \frac{d \theta}{dt}$$

أو:  $2\zeta w = D/J, \omega^2 = i_0 N_r K_m / J$

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} + 2\zeta w \frac{d \theta}{dt} + \omega^2 \theta = 0$$

إذ:  $\zeta$  نسبة الإخماد، وهي معادلة بسيطة للنواس (حركة توافقية بسيطة) مع تخميد وتمثل الاستجابة الاهتزازية لموضع الدائر عند السرعة المنخفضة [3]، نلاحظ من علاقة تردد الاهتزاز (الطنين) المتخامد يبقى ثابتاً عند القيادة بالخطوة الميكروية  $n=2, n=4$ ، كما هو مبين من الأشكال (7-9-11)، لأنه يتبع متحولات الجملة (قيمة التيار الاسمي - وعدد أسنان الدائر - وثابت عزم المحرك - وعزم عطالة الدائر)، لكن ينخفض الاهتزاز حول موضع التوازن كما هو مبين في الشكل (13-15)، أي عند زيادة عدد الخطوات

الميكروية ينخفض الاهتزاز وتصبح حركة الدائر أكثر نعومة.

2- إن مطال الطنين (خطأ التوضع حول موضع التوازن) ينخفض عندما يقاد بالخطوة الميكروية، إذ عند  $n=4$  تقريباً يُخَفَّضُ هذا الخطأ %72.5 وعند  $n=8$  تقريباً %87.5 ومن تم تكون الدقة قد ازدادت وتعزى بأن محصلة القوى التي تجذب قطب الدائر من تحت قطب الثابت للطور  $Ph_a$  إلى تحت قطب الثابت للطور  $Ph_b$  تصبح تغيراتها بشكل أكثر نعومة ودقة تبعاً لتغيرات القيادة الجيبية.

3- نلاحظ أنه عند زيادة عدد الخطوات الميكروية نحصل على نعومة أكثر في الموضع كما هو مبين عند  $n=16$ ، خطوة ميكروية (تراكم الخطوات) كما هو مبين في الشكل (15).

4- يبين الشكل (17) منحنى استجابة السرعة عند القيادة بالخطوة الكاملة، إذ يوضح هذا الشكل مدة انتقال الدائر من موضع توازن محدد إلى موضع آخر (وهي حالة السرعة بالاتجاه الموجب)، ومن ثم الاهتزاز والتوقف عند موضع التوازن الجديد. في حين يبين الشكل (18) منحنى العزم الكهرومغناطيسي عند القيادة بالخطوة الكاملة، إذ يوضح هذا الشكل كيف أنه يولد المحرك عزم تحريك موجباً لانتقال الدائر وخروجه من تحت قطب الطور  $Ph_a$ ، ثم يولد المحرك عزمًا سالباً ليكبح دائره، ثم الاهتزاز المتخامد حول موضع التوازن الجديد ويليها التوقف. في حين يظهر الشكل (19) منحنى استجابة السرعة والشكل (20) منحنى العزم الكهرومغناطيسي المتولد عند القيادة بالخطوة الميكروية وعند عدد خطوات ميكروية  $n=4$ ، إذ ينخفض مطال منحنى استجابة السرعة ومطال منحنى العزم بالنسبة إلى الخطوات الميكروية كما هو

مبيّن من خلال هذه الأشكال، وهذا يعزى إلى أن محصلة القوى الناتجة عند القيادة بالخطوة الميكروية تتحرك بنعومة أكثر مما يمنع حدوث انفلات الدائر واهتزازه مقارنة بالقيادة بالخطوة الكاملة كما هو مبيّن في الأشكال (17)،(18).

#### 12- الخلاصة: *Conclusions*

- 1- من أهم مميزات القيادة بالخطوة الميكروية:**
  - 1- الحد من الضجيج في أثناء الدوران عند الترددات المنخفضة (نعومة الحركة) والاستقرار عند التوقف.
  - 2- إمكانية الحصول على زاوية موضع أقل.
  - 3- الدقة العالية في الموضع.
  - 4- تقليل مسألة الطنين الكهرو - ميكانيكي.
- 2- ومن أهم مساوئ القيادة بالخطوة الميكروية:**

لا يمكن تشغيل المحرك عند الترددات العالية (سرعات عالية)، لأنّ تردد القيادة بالخطوة الميكروية عالٍ، بمعنى آخر تردد الخطوة الميكروية (عدد النبضات أو الخطوات الميكروية) مضروب بتردد الخطوة الطبيعية نحصل على تردد القيادة الكلي، إذ عند السرعات العالية يكون الدور الزمني للخطوة الطبيعية صغيراً لا يمكن تجزئته إلى أجزاء ميكروية مقارنة بالسرعات المنخفضة.

## \*المراجع 13

- [1] .André Veltman, Duco W.J. Pulle and Rik W. De Doncker, (Fundamentals of Electrical Drives), Springer, 2007.
- [2] .Gheorghe BALUTA, (Microstepping Mode for Stepper Motor Control) 1-4244-0969-1/07©C2007 IEEE.
- [3].John Chiasson, (Modeling and High-Performance Control of Electric Machines), Wiley Interscience, 2005.
- [4].F.Khorrami, P.Krishanmurthy, H.Melkote, (Modeling and Adaptive Nonlinear Control of Electric Motors), Springer, 2003.
- [5].Johan N. Chiasson and Robert T. Novotnak, (Nonlinear Speed Observer for the PM Stepper Motor) IEEE Trans. Automat. Contr. vol 38, October 1993.
- [6].M.Zribi and J. Chiasson, (Position Control of a PM Stepper Motor by Exact Linearization), IEEE Trans. Automat. Contr. vol 36, May 1991.
- [7].Matlab\Simulink, Matlab\SimPower System Ver R2009a, Mathwork.