

النمذجة الحاسوبية لأنظمة القيادة الكهربائية

الدكتور غسان حايك*

(تاريخ الإيداع 3 / 1 / 2012. قُبل للنشر في 6 / 2 / 2012)

□ ملخص □

يعرض هذا البحث الطريقة الحديثة في التنبؤ بسلوك نظام القيادة الكهربائية باستخدام ال CAD (computer-aided design)؛ إذ تتكون أنظمة القيادة الكهربائية من عناصر متعددة لها تقنية خاصة بها مع مقاييس زمنية، وآلات كهربائية، وأنصاف نواقل، ودارات تحكم بدءاً من وحدات تشكيل نبضات القرح وتوليدها إلى سلسلة من المنظمات لتحسين الأداء. إن المحاكاة الحاسوبية بوصفها طريقة موثقة هي الإجراء المعتمد لتنفيذ الاختبارات على تلك الأنظمة بالشكل الأمثل، وفقاً لآليات ديناميكية مختلفة انطلاقاً من الآلات الكهربائية والميكانيكية وصولاً إلى الأنظمة الفرعية خطوة بخطوة.

الكلمات المفتاحية: النمذجة والمحاكاة، تعديل عرض النبضة، المبدلات الساكنة، مكونات نظام القيادة الكهربائية.

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

Simulation by Computer of Electrical Drives

Dr. Ghassan Hayek*

(Received 3 / 1 / 2012. Accepted 6 / 2 / 2012)

□ ABSTRACT □

This paper deals with a modern approach to predict the behavior of electrical drives using CAD (computer-aided design) with a dedicated methodology. The drive systems is built around several components which have their own technology and multiple time-scales: electrical machines, power semiconductor, control circuits from the firing sequences to the different regulators. By using digital simulation as a reliable way, an original procedure has been implemented to test the different dynamics from the very beginning the electrical and mechanical machine models to the other sub-systems with step-by-step optimization.

Keywords: Modeling and Simulation; PWM; Static Converters; Electrical Drive Components.

*Associate Professor, Electrical Energy Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

كما هو معلوم في عمليات التصميم المتخصصة، تعد أنظمة القيادة الكهربائية معقدة للغاية، واستخدام التصميم بمساعدة الحاسوب هو الطريقة المثلى لتحديد نوعية الأداء. عملية محاكاة التصميم حديثة العهد إلا أنه أصبح من الشائع محاكاة التصميم حاسوبياً، نظراً لتوفر البرامج العديدة لتطبيق تحليل مؤقت للأنظمة اللاخطية.

أهمية البحث وأهدافه:

يهدف البحث إلى تقديم طريقة حديثة بمساعدة الحاسوب لتصميم الحسابات المثلى وتنفيذها للحصول على نظام قيادة كهربائية فائق الأداء، والتنبؤ السريع لأية ظاهرة ديناميكية يتعرض لها. شملت الأبحاث السابقة في هذا المجال على وجوب تطبيق الكودات المعتمدة لحل المشكلات الهندسية الكهربائية، لذلك من الضروري في هذا البحث تطوير منهجية العمل بغية ترجمة المشكلة الهندسية إلى لغة الآلة (code language) لمحاكاة الأداء والتحكم الآلي، أو دمج كل ذلك في حالة عابرة إلكترومغناطيسية.

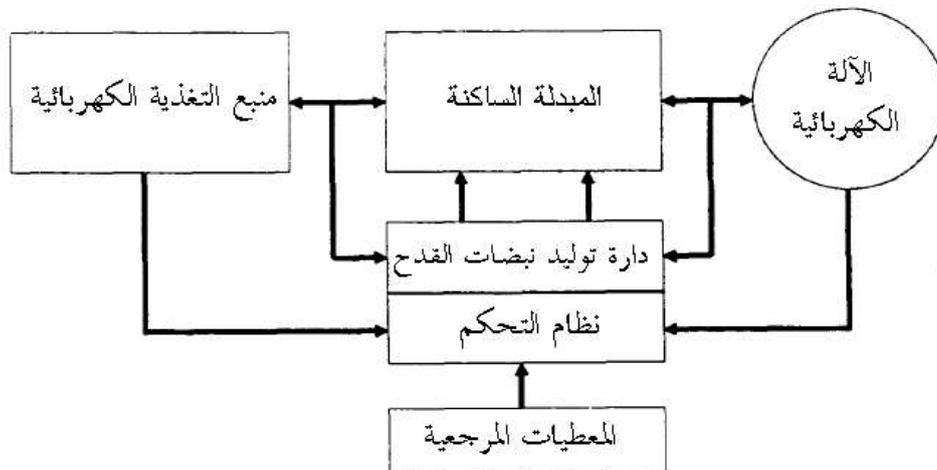
EMTP (electromagnetic transients program) [1],[3],[4],[5].

طرائق البحث ومواده:

يعرض هذا البحث نماذج متقدمة باستخدام الأداء العالي لأنظمة التحكم. في المثال الأول يستخدم عملية المسار للتحكم في الموضع لمحرك تيار مستمر ذي مغناطيس دائم، بينما يعالج المثال الثاني تنظيم عمل آلة متواقتة ذات مغناطيس دائم مع نظام تماثلي، وتستخدم الآلة نفسها لدراسة أداء مبدلة تيار إلكترونية مزدوجة، بغية تحديد القدرة العكسية (الكبح مع إعادة الطاقة إلى الشبكة).

1- منهجية التصميم:

تتألف أنظمة القيادة الكهربائية لآلات التيار المستمر DC، أو لآلات التيار المتناوب AC من أربعة عناصر أساسية: التغذية الكهربائية، المبدلة الساكنة (المبدلة الإلكترونية)، الآلة الكهربائية ونظام التحكم كما هو مبين في الشكل (1).



الشكل (1) المخطط الصندوقي لنظام قيادة كهربائية

من الضروري عند تصميم نظام متكامل وتحليله، القيام بتحديد السلسلة المنطقية لقيادة النظام، هذا من خلال تعريف الآلة المراد التحكم بها ثم طريقة التحكم، وهنا يمكن القيام بالتحكم رقمي من خلال عينات محددة من إشارات التحكم. بعد ذلك يتم إدخال المبدلات الإلكترونية للطاقة بوصفها واجهة ربط مع شبكة التغذية الكهربائية ودراسة تأثيراتها على سلوك الآلة وفي شبكة التغذية الكهربائية، ثم يتم إدخال التحسينات في كل مرحلة حتى الوصول إلى الأداء الأمثل.

تتألف المنهجية المعروضة في هذا البحث من المراحل التالية:

1-دراسة الموديل الرياضي للمنذج للآلة.

2-التحكم بالآلة.

3-الدراسة التتابعية أو تسلسل الأداء.

1-1 الموديل الرياضي للمنذج للآلة (Machine model):

يعطى السلوك الديناميكي للآلة الكهربائية من خلال المعادلة التقليدية التالية:

$$V = ri + \frac{d\lambda}{dt} \quad (1)$$

حيث يتم إهمال ظاهرة التشبع، والتيارات التسريعية، وظاهرة الإبطاء المغناطيسي مع افتراض أن القوة المحركة الكهربائية للآلة E له توزيع جيبي. ويوضع نموذج ميكانيكي مكافئ لكتلة الآلة على نظام العمود الدوار.

2-1 التحكم بالآلة (Machine control):

يمكن تنفيذ آليات التنظيم الديناميكي للمحرك المختار استناداً إلى قوانين التحكم بالأداء الستاتيكي والديناميكي؛ إذ يتم تحليل التحكم التماثلي في هذه المرحلة للوصول إلى الأداء الأمثل. يجب تنفيذ المنظمات الخطية واللاخطية مثل المنظم التناسبي- التكاملي-التفاضلي PID (proportional-integral-derivative) بوصفه نظاماً للتحكم مع استخدام وضعيات مختلفة للمسار، ونظام التحكم العائم الحديث (fuzzy control). تعتمد فترات أخذ العينات بالنسبة إلى التحكم الرقمي على ثوابت الزمن الخاصة بالآلة. ويجب القيام بعملية أحادية للانتقال من التنظيم التماثلي إلى الرقمي؛ إذ تحدد فترة أخذ العينة بغية محاكاة أداء المعالج الميكروي. ومن المهم تكييف فترة أخذ العينة مع نظام القيادة التماثلي وبارامترات التحكم لإعداد مجموعة تحكم ثابتة لأداء الآلة.

3-1 الدراسة التتابعية (Sequential):

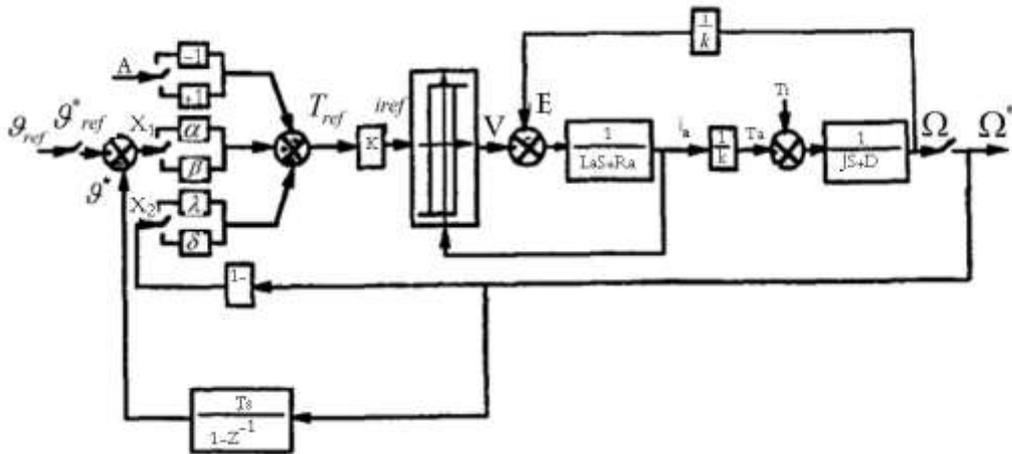
في هذه المرحلة، يتم تقييم سلسلة قرح النبضات على كل مبدلة إلكترونية ضمن دائرة التحكم المغلقة الخاصة بها. ولكن العقبة الأساسية هي محدودية التحكم بالمبدلات نظراً لبنية تصميمها وانخفاض توافقيات التردد لشكل موجة تيار التغذية. ويمكن تحليل تأثير ذلك في شبكة التغذية الكهربائية من خلال قياس طيف التيار واعتماد أنظمة ترشيح سلبية أو فعالة. يعتمد عزم الآلة بشكله الأمثل على سلسلة قرح النبضات للإقلال من العناصر التوافقية للعزم. يجب تنفيذ خريطة أنصاف النواقل والمبدلة الإلكترونية استناداً إلى التغذية الكهربائية وتردد الإبدال، كما يمكن استخدام تضمين تقنية تعديل عرض النبضة PWM

(pulse width modulation) في اختيار المبدلة لضمان أعلى درجة من الأداء.

2- تطبيق المنهجية:

1-2 التحكم بالوضعية لعملية المسار لمحرك DC:

مقدمة: تم إدخال طريقة التحكم بالوضعية للمسار في أنظمة القيادة الكهربائية، ولهذه الطريقة عدة مميزات منها بساطة التصميم ومقاومته لتفاوت قيم البارامترات والاضطراب الخارجي، كما هو مبين في الشكل (2) [2],[6],[10],[11].



الشكل (2) مخطط التحكم لمحرك DC ذو التغذية العكسية

نموذج المحرك: يستخدم لهذا الغرض المحرك DC بمغناطيس دائم؛ إذ يتم إدخال قيم تدفق الحقل المغناطيسي ϕ_r ونواقل دارة المتحرض بسرعة Ω ، والعزم الكهرومغناطيسي T_a ، والقوة المحركة الكهربائية E ، ويعبر عنها بالعلاقات التالية:

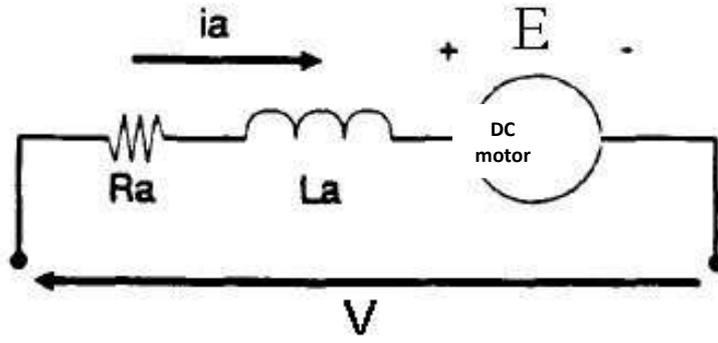
$$T_a = K \cdot i_a \quad (2)$$

$$E = K \cdot \Omega \quad (3)$$

حيث إن: $K = k \cdot \phi_r$

في حالة دراسة التحكم في الآلة من دون المبدلة يكفي تطبيق معادلة العزم الكهرومغناطيسي، نظراً لإهمال الحالات الكهرومغناطيسية العابرة، ولاعتماد القيادة الكهربائية على النظام الميكانيكي في معظم الأوقات. عند دراسة الطريقة التتابعية للتحكم يجب محاكاة تأثيرات المبدلة مع ديناميكية ملف المتحرض الكهرومغناطيسي لنموذج المحرك. من الناحية العملية، يطبق جهد التغذية V ذو الجهد القابل للتحكم على نهايات دارة المتحرض لتحقيق التيار i_a . ويحدد التيار i_a وفق المعادلة (4) بواسطة الجهد V ، والقوة المحركة الكهربائية E ، ومقاومة ملف المتحرض R_a ، ومحاكاة ملف المتحرض L_a كما هو مبين في الشكل (3).

$$V = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E \quad (4)$$



الشكل (3) الدارة المكافئة أو نموذج محرك DC

$V = 240V, R_a = 0.6\Omega, L_a = 0.01H, K = 0.433, J = 0.15Kgm^2, D = 0.0001Nms$
يعطى التفاعل بين العزم الكهرومغناطيسي T_a ، والنظام الميكانيكي من خلال المعادلة (5).

$$J \frac{d\Omega}{dt} + D\Omega = T_a - T_i \quad (5)$$

حيث إن: J و D هما عزم العطالة المكافئة الكلية، والتخامد و T_i هو عزم المقاومة الستاتيكي أو ما يعرف بعزم الحموله.

التحكم بالمحرك: يستخدم للتحكم بالمحرك العزم المرجعي T_{ref} ، وتعرف زاوية الموضع σ بالعلاقة (6).

$$X_1 = \theta_{refa} - \theta \quad (6)$$

$$X_2 = \frac{dX_1}{dt}$$

$$T_{ref} = \Psi_{i1} X_1 + \Psi_{i2} X_2 + A_i \operatorname{sgn}(\sigma_i) \quad (7)$$

علماً أن :

$$\Psi_{i1} = \sigma_i \quad \text{إذا} \quad \sigma_i X_1 \geq 0$$

$$\Psi_{i1} = \beta_i \quad \text{إذا} \quad \sigma_i X_1 < 0$$

$$\Psi_{i2} = \lambda_i \quad \text{إذا} \quad \sigma_i X_2 \geq 0$$

$$\Psi_{i2} = \delta_i \quad \text{إذا} \quad \sigma_i X_2 < 0$$

$$\operatorname{sgn}(\sigma_i) = +1 \quad \text{إذا} \quad \sigma_i \geq 0$$

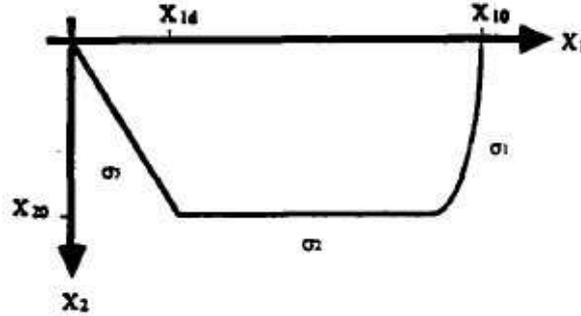
$$\operatorname{sgn}(\sigma_i) = -1 \quad \text{إذا} \quad \sigma_i < 0$$

حيث إن: X_1 و X_2 تمثلان متغيرات الحالة (إشارة خطأ الوضعية وسرعة الخطأ)، وتمثل القيم Ψ_{i1} و Ψ_{i2} و A_i بارامترات التحكم.

بالنسبة إلى الشكل (4) يتم حساب كل بارامتر وفقاً لحالة وضعية المسار وذلك حسب المعادلة التالية:

$$\lim_{\sigma_i \rightarrow 0} \sigma_i \frac{d\sigma_i}{dt} \leq 0 \quad (8)$$

حيث إن: $i=1,2,3$



الشكل (4) مخطط الطريقة الموضعية لتعريف المسار (منحني التحكم الأمثل)

$$X_{10} = 2\pi rd, X_{1d} = 2rd, X_{20} = 20rd/s, \lambda = 0.0025s^2, \eta = 10s$$

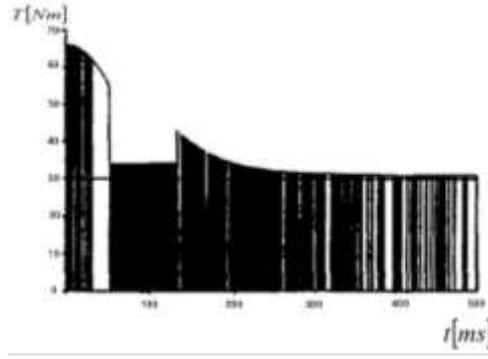
ويعبر عن التسارع (الإقلاع) بالمعادلة التالية: $\sigma_1 = \lambda x_3 + x_1 - x_{10}$

وعن السرعة الثابتة بالعلاقة: $\sigma_2 = x_2 - x_{10}$

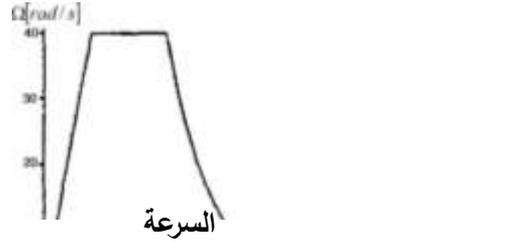
ويعبر عن التباطؤ (الفرملة) بالمعادلة التالية: $\sigma_3 = \eta x_2 + x_1$

دراسة التحكم التسلسلي والرقمي:

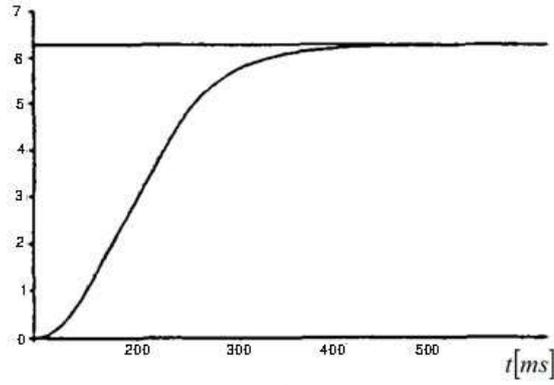
بالنسبة إلى دراسة التحكم الرقمي التسلسلي لآلة كهربائية يتم الاعتماد على منظمات مستمرة، وهذا التحكم يقود بوضوح إلى تردد عالٍ جداً للتيار الثابت للمحرك، كما هو واضح في الشكل (5)، ولاسيما عند زيادة معدل طاقة الآلة المتوافقة مع مبدلة الطاقة والحاسوب. يتبين عند القيام بتحليل التحكم الرقمي أن التردد ينخفض عندما يزداد دور العينة وتتابع الموضع وفقاً للمعطيات المرجعية، ولكن مع اضطرابات في الحالة التي يكون فيها دور العينة 25 ms الشكل (6). وعند ربط الآلة مع مبدلتين معاً (مقوم-مقطع)، يتم الحصول على استجابة الوضعية تبعاً للحدود الثابتة للتسارع والسرعة الثابتة والتباطؤ بحسب الحمل المقدر، وذلك في الحالة التي يكون فيها دور العينة 1 ms كما هو مبين في الشكل (7). ولكن تيار المتحرض للمحرك في هذه الحالة محدد بالقيمة 5 kHz لتردد التبديل، حسب الشكل (7).



العزم الكهرومغناطيسي



السرعة



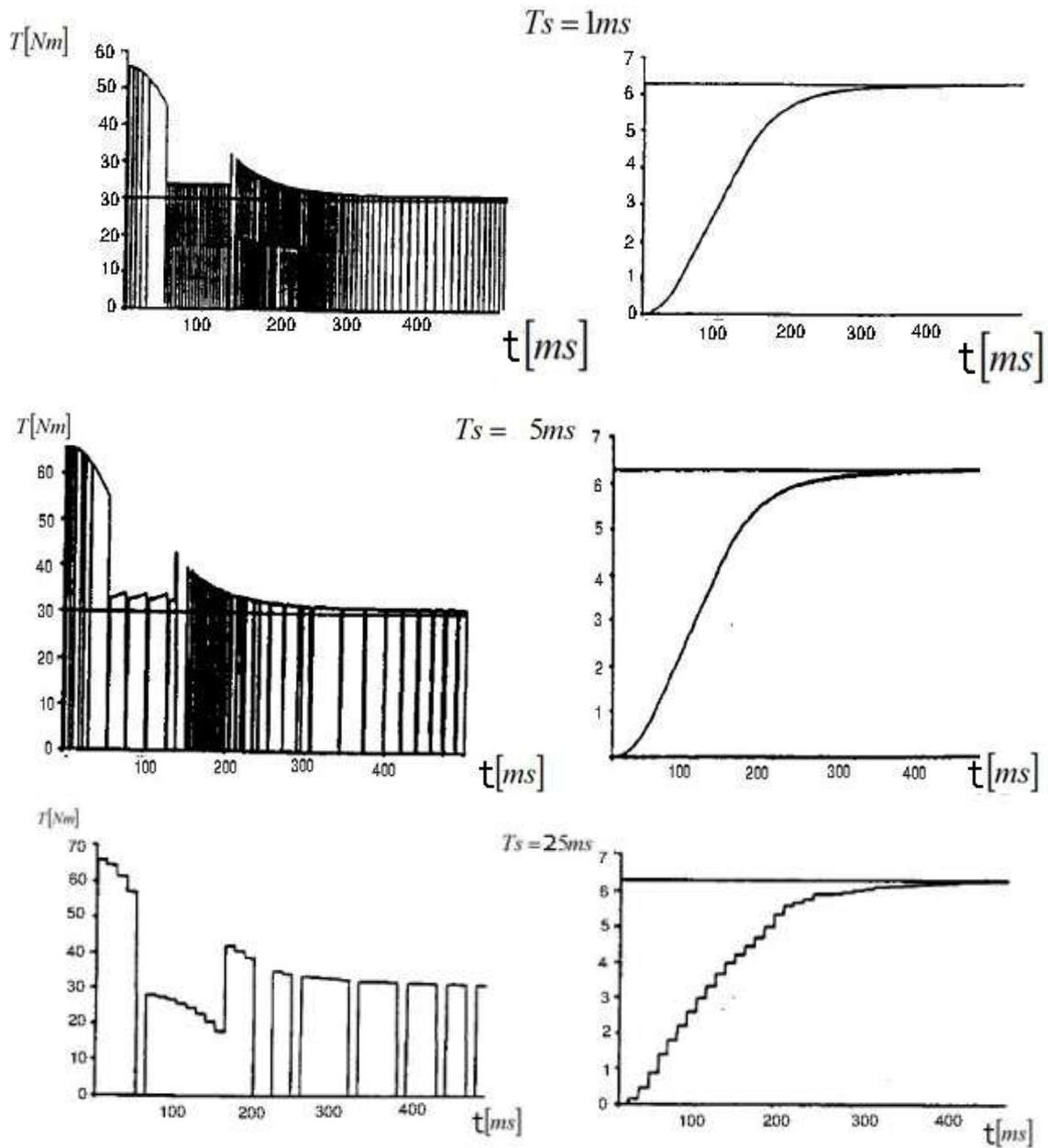
الوضعية

الشكل (5) طريقة المسار حسب التحكم بالمنظمات المستمرة

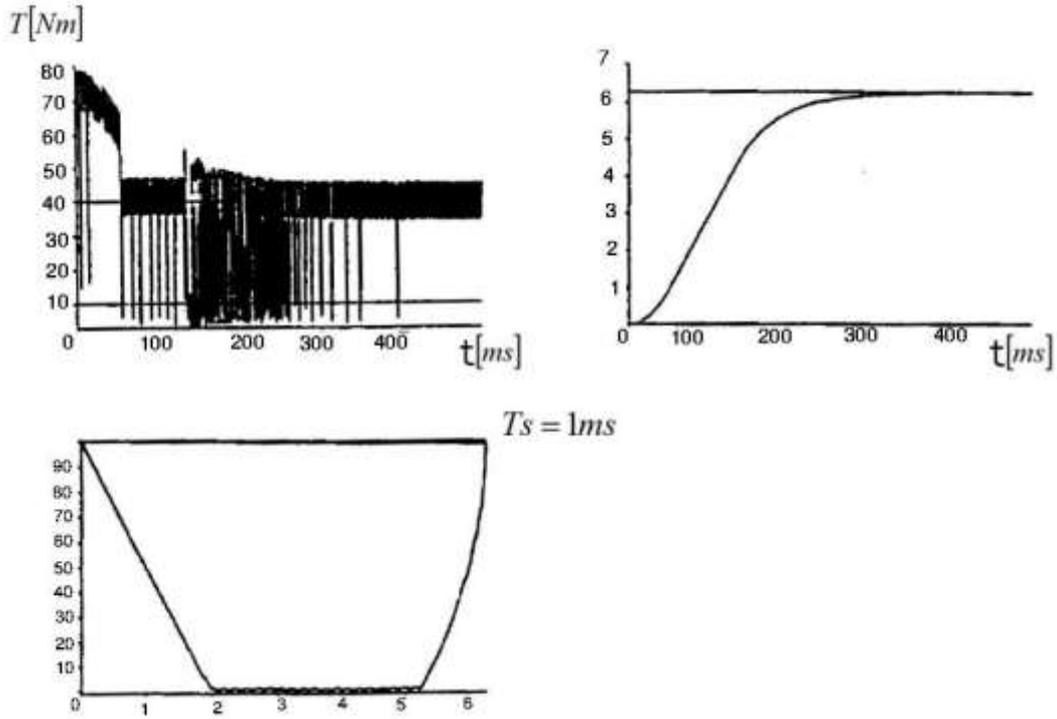
$$\sigma_1 = 0, \beta_1 = 10.5, \lambda_1 = 0, \delta_1 = 0, A_1 = 0,$$

$$\sigma_2 = 0, \beta_2 = 0, \lambda_2 = 0, \delta_2 = 1.7, A_2 = 0,$$

$$\sigma_3 = 6.0, \beta_3 = 0, \lambda_3 = 0, \delta_3 = 0, A_3 = 31.0$$



الشكل (6) طريقة المسار حسب التحكم الرقمي



الشكل (7) الاستجابة للنظام كله

2-2 تنظيم السرعة للآلة المتوافقة ذات المغناطيس الدائم:

مقدمة: تستخدم أنظمة القيادة لمحرك ذي مغناطيس دائم على نطاق واسع في العديد من التطبيقات. إن استخدام مغناطيس دائم في دارة الدوار للمحرك يجعل من غير الضروري تمرير تيار المغنطة عبر دارة الثابت من أجل تدفق ثابت للثغرة الهوائية، ومن ثمّ يلغي سيئات المحركات المتزامنة من خلال التعويض عن ملفات الحقل الخاصة بها، والتغذية بالتيار المستمر DC، وحلقات الانزلاق [7] [8] [9].

الموديل الرياضي المنمذج للمحرك: يمكن تمثيل الآلة باستخدام معادلات على المحورين d, q في إطار

المرجعية المتزامنة كما في المعادلات التالية:

$$V_{qs} = r_a i_{qs} + p\phi_{qs} + \omega_s \phi_{ds} \quad (9)$$

$$V_{ds} = r_a i_{ds} + p\phi_{ds} + \omega_s \phi_{qs} \quad (10)$$

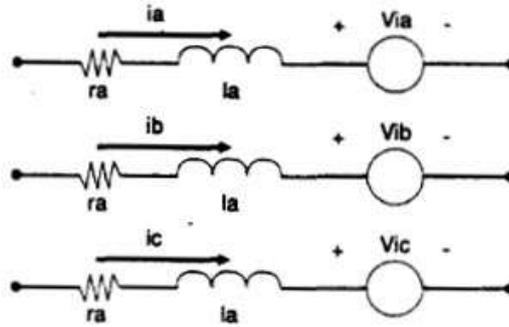
$$V_c = r_a i_a + I_a \frac{di_c}{dt} + V_{ic}$$

حيث إن:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}_c = [T]^{-1} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_{ia} \\ V_{ib} \\ V_{ic} \end{bmatrix}_c = [T]^{-1} \begin{bmatrix} V_{id} \\ V_{iq} \end{bmatrix}$$

علماً أنّ T تعرف بمتحولات بارك (park transformation).



الشكل (9) نموذج محرك ذو مغناطيس دائم

$$r_a = 1.4\Omega, L_a = 0.6mH, L_{md} = 6.0mH, L_{mq} = 5.2mH,$$

$$\phi_{af} = 0.1Wb, np = 3, J = 0.00176Kgm^2, D = 0.00038Nms$$

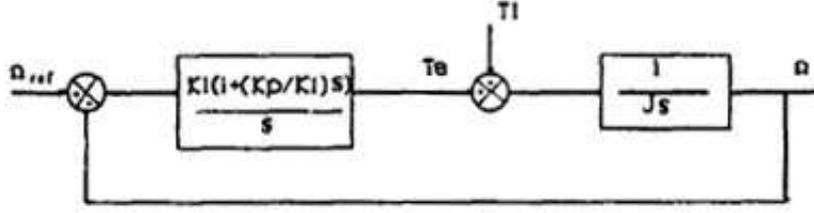
يحدد العزم الكهرومغناطيسي في آلة متزامنة ذات مغناطيس دائم كما في المعادلة (14)، في حين تعين المعادلة (5) التفاعل بين العزم الكهرومغناطيسي والجزء الميكانيكي وهو ذاته بالنسبة إلى محرك DC.

$$T_a = np[\phi_{af} i_{qs} + (L_{md} - L_{mq}) i_{ds} i_{qs}] \quad (14)$$

يظهر هذا الرسم نموذجين للمحرك، وهو مناسب لدراسة التحكم بالآلة وتأثير المبدلة أيضاً. في الحالة السابقة، تحدد المعادلة (14) استجابة عرض الحزمة لنظام القيادة، بينما يتم تحليل تأثيرات المبدلة باستخدام المعادلة (13) و (14).

التحكم بالمحرك:

عندما يكون الفيض المغناطيسي ثابتاً فإن العزم الكهرومغناطيسي يتناسب طردياً مع تيار المحرك i_a للمحور q كما هو واضح في الشكل (8)، وبينما يكون التيار السالب i_a موجهاً إلى إضعاف تدفق الفيض في الشغرة الهوائية. قوانين التحكم المعتمدة مرتبطة بالمنظم التناسبي التكاملي PI وذلك من أجل التحكم بالعزم الكهرومغناطيسي وتنظيم السرعة.



الشكل (10) المخطط الصندوقي التصميمي للمنظم PI

تصميم نظام التحكم بالسرعة والتحكم التماثلي:

الثابت الزمني لدارة الثابت للمحرك ضئيل بالمقارنة مع ثابت الزمن الميكانيكي، ولذلك يمكن إهماله في أثناء التصميم، ومن ثم فإن المعادلة التي تصف الأداء الديناميكي للمحرك هي معادلة ديناميكية. يظهر الشكل (10) رسماً بيانياً كتلياً مبسطاً لنظام التحكم مع جهاز تحكم PI، كما أنه يبين أن تابع النقل في دارة تحكم مغلقة تعطى بالمعادلة (15).

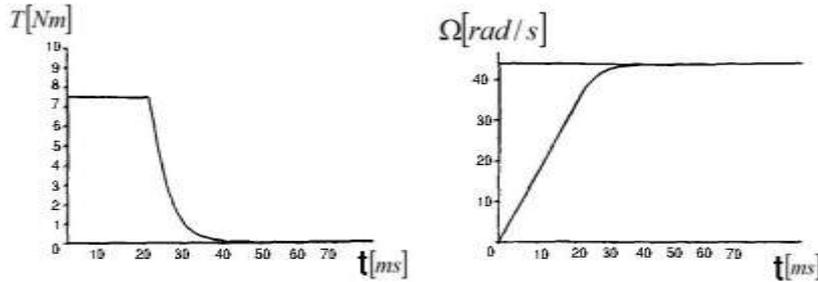
$$\frac{\Omega(p)}{\Omega_{ref}(p)} = \frac{1 + \tau s}{\frac{J}{K_i} s^2 + \tau s + 1}$$

حيث إن τ هي عرض الحزمة للمنظم، وبالنسبة إلى الاستجابة المتخامدة الحدية يتم حساب K_i و τ من خلال المعادلة (16) و (17).

$$K_i = \frac{4J}{\tau^2} \quad (16)$$

$$\tau = \frac{K_p}{K_i} \quad (17)$$

بفرض $K_p = 1.4$ و $K_i = 281.6$ تظهر نتائج المحاكاة في الشكل (11) السرعة والعزم الكهرومغناطيسي من دون المبدلات الساكنة، ويتضح من هذا الشكل عدم وجود إطلاق للسرعة كما هو محدد مبدئياً.



الشكل (11) نتائج محاكاة الحالة التماثلية

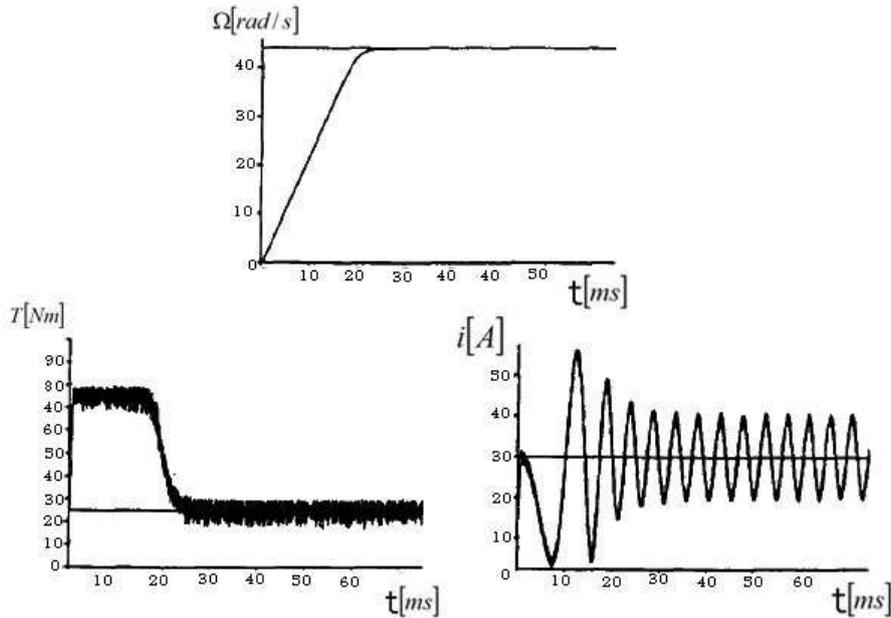
$$K_p = 1.04 Nms, K_i = 281.8 Nm, T_a = 15 Nm, \Omega_{ref} = 220 rd/s$$

التحكم الرقمي :

إن التحول من النظام التماثلي إلى النظام الرقمي يتطلب فترة تحديد أخذ العينات مع اعتماد التقريب بولر (Euler) بالنسبة إلى تابع النقل في نظام التحكم التماثلي.

$$\frac{1}{s} = \frac{T_s}{1 - z^{-1}} \quad (18)$$

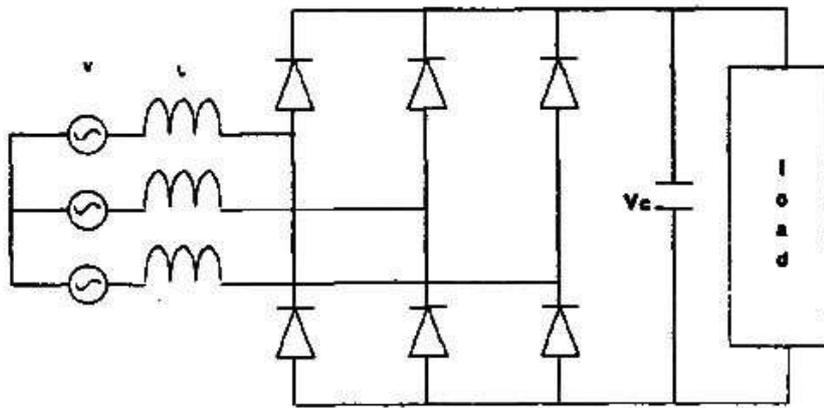
لأجهزة الطاقة الكهربائية. تحتوي تيارات دارة الثابت على توافقيات عالية التردد وبدورها تولد تلك التيارات تموجات من العزم عالية التردد أيضاً، كما هو واضح من الشكل (14).



الشكل (14) نتائج المحاكاة للدراسة التتابعية

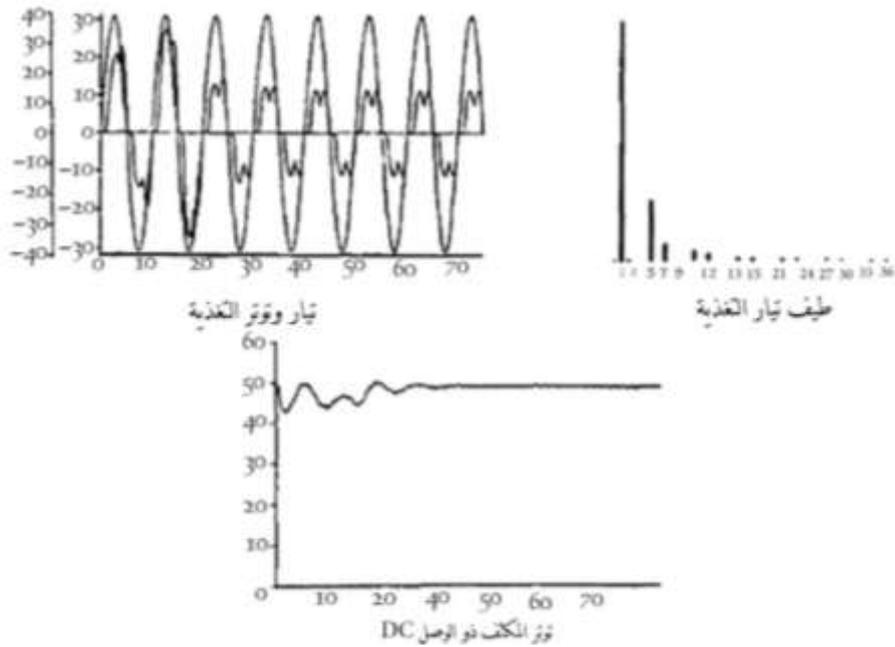
3-2 القدرة العكسية Power reversibility:

تستخدم مبدلة الطاقة الإلكترونية على الخط لحالتي القيادة الكهربائية كلتيهما بوصفها مقوماً جسرياً ثلاثي الطور (الشكل 15). وتستطيع هذه المبدلة القيام بتحويل التدفق للطاقة الكهربائية من الجانب المتناوب للتيار AC إلى الجانب الآخر للتيار المستمر DC ، على الرغم من أن التيار المقوم ليس مستمراً بشكل كامل. فإن عملية التقويم للطاقة AC-DC يجعل عامل الاستطاعة ضعيفاً والتوتر في الجانب من التيار المستمر غير ثابت (الشكل 16).



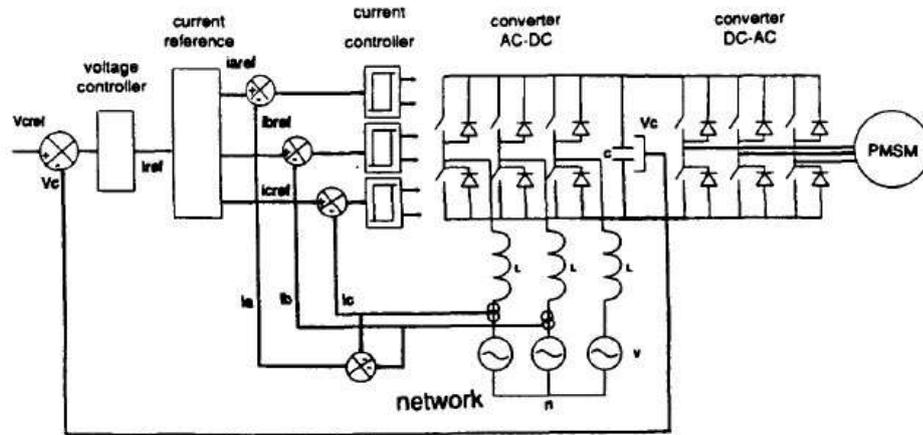
الشكل (15) مقوم جسري ثلاثي الطور

$$V_{\max} = 155V, f = 50Hz, L = 6mH, C = 700\mu F$$



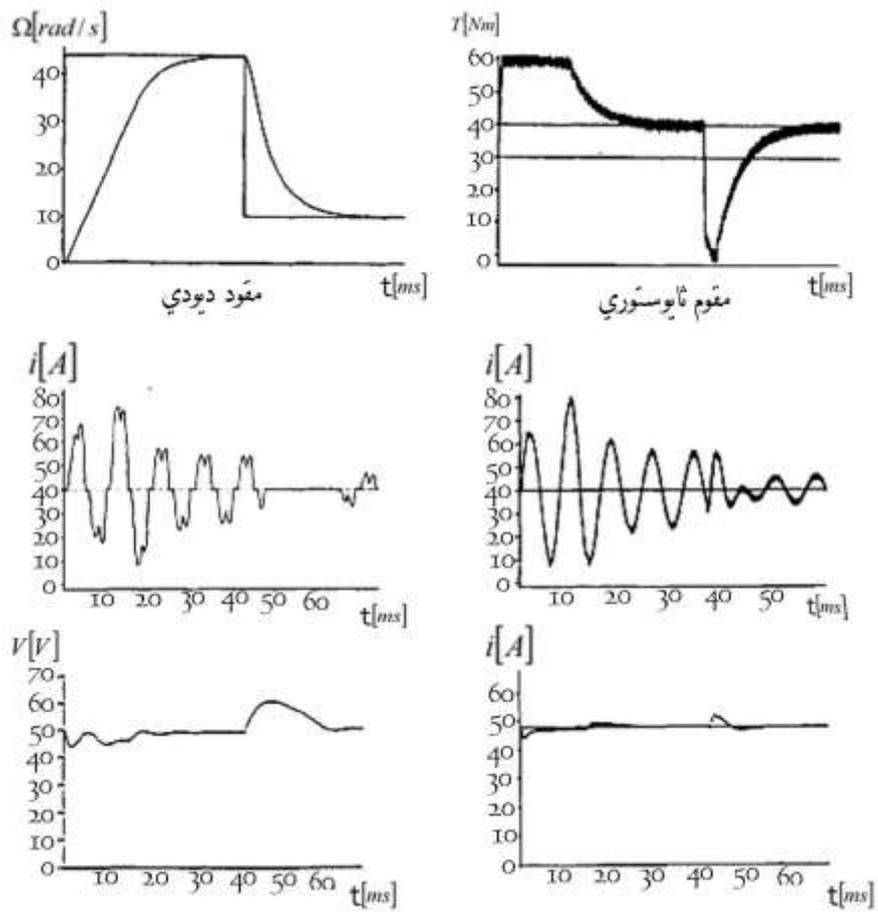
الشكل (16) منحنيات الجهد والتيار للخط للمقوم الجسري ثلاثي الطور

خلال عملية الكبح الكهرومغناطيسي يتم تدفق الطاقة الكهربية من المحرك إلى جهاز التحكم والمبدلة الترددية (الشكل 17). في أثناء عملية الكبح كما في حالة المقوم الجسري الديودي تبقى قطبية التوتر في الدارة الوسيطة للتيار المستمر هي ذاتها، بينما يحدث العكس بالنسبة إلى التيار في الدارة الوسيطة من حيث الاتجاه إلى القالبة، وهذا يتطلب معالجة هذه الطاقة بآليات معينة خلال عملية الكبح لتوتر الدارة الوسيطة للتيار المستمر منعاً لوصولها إلى مستويات مدمرة. إن التخلص من هذه السينات يتطلب وجود مبدلة عكسية (الشكل 17) بوصفه بديلاً من المقوم الجسري الديودي ثلاثي الطور (مثلاً استخدام مقوم جسري ثايرستوري ثلاثي الطور) والسماح للطاقة بالعودة إلى مصدر التغذية، و(الشكل 18) يوضح تلك الحالة. يبين (الشكل 19) توتر التيار المستمر مع قيمة ثابتة للمكثف الخاص بنصف الموجة المطلوبة في الدارة التقليدية، وعامل استطاعة جيد مع توافقيات ذات تردد منخفض أقل في تيار الخط.

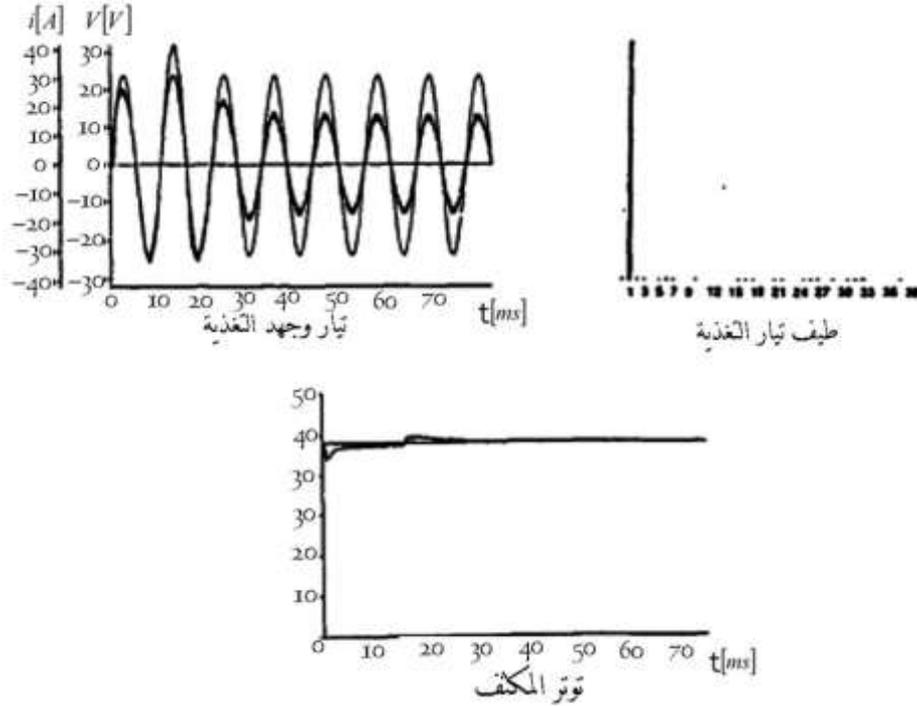


الشكل (17) مخطط التحكم لمبدلة رباعية الأرباع

$$V_{\max} = 120V, f = 50Hz, L = 6mH, C = 300\mu F$$



الشكل (18) الكبح الكهرومغناطيسي



الشكل (19) منحنيات جهد المكثف وتيار الخط للمبدلة رباعية الأرباع

النتائج والمناقشة:

أظهر هذا البحث المنهجية الأصلية المعتمدة في تصميم أنظمة القيادة الكهريائية مع توضيح مخطط مبدلات التيار الإلكترونية وأجهزة التحكم والطاقة . تساعد هذه المنهجية في إيجاد الحلول المناسبة للمشكلات التصميمية قبل إجراء عملية التنفيذ والاختبار، حيث إن استخدام الكود ATP (Alternative Transient Program) يجعل هذه المقاربة متاحة لكل مصمم سواء على الصعيد التعليمي أو الصناعي. لقد بينا أنه بالإمكان الحصول على نماذج حسابية، وعلى طرق هندسية تساعد في تحديد تأثير بارامترات النظام الكهروميكانيكي في آليات العمل على زمن الحالة العابرة، والتي تمثل أحد الحلول الهندسية لزيادة موثوقية عمل هذه الآليات.

الاستنتاجات والتوصيات:

- 1- إن درجة الموثوقية بهذه التقنية تابعة بشكل رئيس لنوع نظام القيادة الكهريائية، أو المشكلة التصميمية المراد حلها.
- 2- تبين من خلال نتائج البحث أن الطريقة الرقمية في التحكم لعملية التصميم لنظام قيادة DC مفضلة على تقنية التحكم التماثلية نظراً لأنها تعطي الحل الأمثل بطريقة أسرع.
- 3- تظهر نتائج البحث أن الاستجابة الديناميكية لنظام القيادة AC تكون متشابهة سواءً عند تطبيق الطريقة الرقمية، أو التماثلية في التحكم لعملية التصميم.

- 4- بينت نتائج الدراسة والبحث أن تطبيق هذه المنهجية باستخدام الحاسوب (CAD) تعدّ وسيلة جيدة لتحقيق الاستفادة المثلى من العملية التصميمية في تحسين أداء نظام القيادة الكهربائية.
- 5- يفضل عند استخدام الكبح بإعادة الطاقة إلى الشبكة الكهربائية استخدام مقوم جسري ثايرستوري.

المراجع:

- [1]- CAPOLINO, G.A: "CAD and simulation of electrical machines drives using general purpose programs", Conference on Elect. Mach. And Pow. Elect. Turkey may, 1992, vol.1/2, 262-276.
- [2]- CAPOLINO, G.A , Henau H.: "Sliding mode position control of induction machine: a discrete case", Proc. EPE. Italy, 1991 vol. 3.
- [3]- CAPOLINO, G.A , Henau H.: " Design and simulation of power electronics control circuits using EMTP", IEEE Work. Pow. Elect.(USA), 1990, 47-61 .
- [4]- CHEE-MUN ONG: *Dynamic Simulation of Electric Machinery*, New Jersey , 1998, 323-335.
- [5]- FU J.C.: "Position control of DC motors via variable structure systems control: a chattering alleviation approach", IEEE Tans. On Elect., 1990, 452-459.
- [6]- MOHAN, N.: *converters, Application and design*, John Wiley @ Sons, NY, 1989.
- [7]- SCHROEDER, D.: *Elektrische Antrieberegelung von Antiebsssystemen*, Berlin, 2001, 442-456.
- [8]- PETER, F. BROSCHE: *Moderne Stromrichter-antriebe*, vogel-buchverlage, Germany, 2008, 247-255.
- [9]- PILLAY, P., KRISHNAN, R.: "Modeling simulation, and analysis of permanent-magnet motor drives", IEEE Tans. On Ind. Appl., vol. 25, 1989, 265-273.
- [10]- PILLAY, P.: "Literature survey of permanent-magnet AC motors and drives", Proc. IEEE, 1989, 74-84.
- [11]-: PETER-KLAUS, BUDIG: *Stomrichtergespeiste Drehstromantriebe*, VDE Verlag, Berlin, 2001.