

## تحليل الأداء الديناميكي لمحرك تيار مستمر مُقاد بمبدلة

1

### ثايرستورية ثلاثية الطور في بيئة Matlab/Simulink

المهندس واصف السلعوس<sup>2</sup>      الدكتور معزوز صلاحات<sup>3</sup>  
الدكتور علي الجازي<sup>4</sup>

#### المخلص

تتناول هذه المقالة تحليل الأداء الديناميكي لنظام تحكم بمحرك تيار مستمر بواسطة مبدلة ثايرستورية مُقادة بشكل كامل. استخدمت البيئة البرمجية Matlab/Simulink لمحاكاة ونمذجة التحكم بسرعة نظام قيادة محرك التيار المستمر ودُرس نظامان للقيادة: أ- نظام قيادة محرك تيار مستمر باستخدام منظم PID مع حلقة تغذية خلفية بالسرعة، ب- نظام قيادة محرك تيار مستمر بواسطة منظم PID مع حلقتي تغذية خلفية (متداخلتين) بالسرعة والتيار. تم التوصل إلى أن الأداء الديناميكي لنظام محرك التيار المستمر بحلقتي التغذية الخلفية يمتاز باستجابة ديناميكية عالية وسرعة استجابة عابرة أعلى مقارنة بحالة حلقة التغذية بالسرعة فقط.

الكلمات المفتاحية:

محركات التيار المستمر، التحكم في محركات التيار المستمر، المتحكم PID، حلقة التغذية الخلفية.

<sup>1</sup> أعد البحث في سياق رسالة دكتوراه للمهندس واصف السلعوس بإشراف الدكتور المهندس علي الجازي والدكتور المهندس معزوز صلاحات.

<sup>2</sup> قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

<sup>3</sup> قسم هندسة الميكاترونكس - كلية هندسة التكنولوجيا - جامعة البلقاء - الأردن.

<sup>4</sup> قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

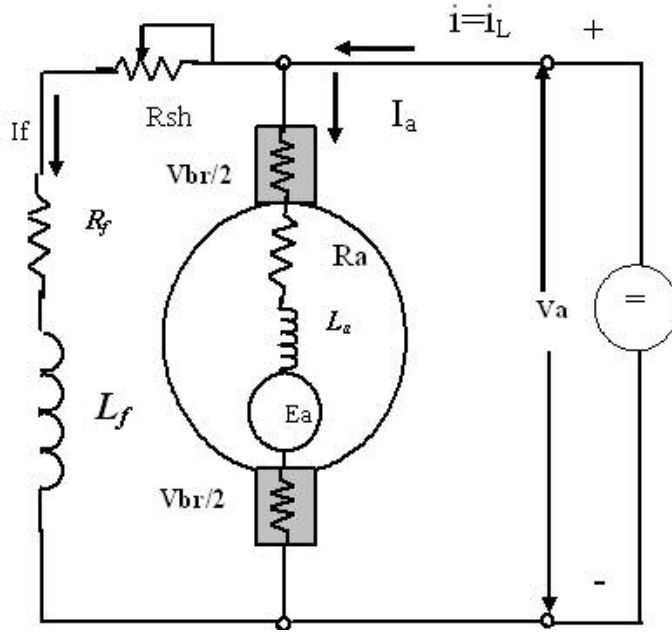
## 1- المقدمة: Introduction

دُرِسَتْ في هذا البحث حالتان من طرائق التحكم في سرعة محرك تيار مستمر يقود عربة أو روبوتاً جوالاً، ويتعرض لحالات متعددة ومختلفة من التحميل. استخدم المتحكم PID في قيادة المحرك، حيث اعتمد في الحالة الأولى إشارة السرعة كإشارة تغذية خلفية كما هو مبين في الشكل (4). أمّا في الحالة الثانية فاعتمدت إشارتا السرعة ( $\omega_r$ ) وإشارة التيار ( $i_d$ ) كإشارات تغذية خلفية كما هو مبين في الشكل (8). أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها من خلال أخذ عينات من إشارات التوتر، السرعة والتيارات أن المحرك يستجيب ويتحسس لتغيرات الحمولة في حالة الزيادة أو النقصان على محوره، ويحافظ على الدوران بالسرعة الاسمية التي حددت في النموذج بـ  $127 \text{ rad/sec}$ ، حيث تم وضع النتائج كلها للحالتين عند الشروط نفسها من التحميل، ومن ثمّ اختبار أشكال الإشارات جميعها خلال مختلف مراحل العمل:

- 1- العمل في الحالة العابرة وتتمثل في مرحلة الإقلاع ومراحل التغيرات في الحمولة.
- 2- العمل في الحالة المستقرة وتمثل مرحلة العمل عند السرعة الاسمية.

## 2- النموذج الرياضي Mathematical Models

عند عمليات النمذجة والمحاكاة لأي نظام قيادة لا بد من اختيار النموذج الرياضي المرغوب في استخدامه من حيث النظام خطي أو غير خطي، فضلاً عن ذلك تم العمل على بناء المخطط الصندوقي للمحاكاة اعتماداً على بنية نمذجة محددة فمثلاً يمكن اختيار المكتبة Matlab\Simulink أو المكتبة Matlab/SimPowerSystem. يُمثل المحرك عادة بمجموعة من المعادلات التفاضلية التي تصف سلوك المحرك عند تعرضه لحالات تشغيل مختلفة، ولهذا وُضِعَتِ المعادلات العامة للمحرك اعتماداً على الدارة المكافئة المبينة في الشكل (1): [1]



الشكل (1): دائرة مكافئة لمحرك تيار مستمر تفرعي

آ- معادلة التوتر:

$$V_a = e_a + i_a R_a + L_{aq} \frac{di_a}{dt} + V_{bru}, \quad e_a = K_a \phi \omega_m \quad (1)$$

$$K_a = \left(\frac{2p}{2a} Z\right) (1/2\pi), \quad \omega_m = \frac{2\pi \cdot n_r}{60}$$

ب- تعطي معادلة التوتر في الحالة المستقرة بالعلاقة:

$$V_a = e + i_a R_a \quad (2)$$

ج- معادلة الاستطاعة الكهربائية:

$$P_e = \omega_m \cdot T_{em} = e_a \cdot i_a, \quad T_{em} = \frac{P_e}{\omega_m}, \quad T_{em} = K_b \cdot i_a \quad (3)$$

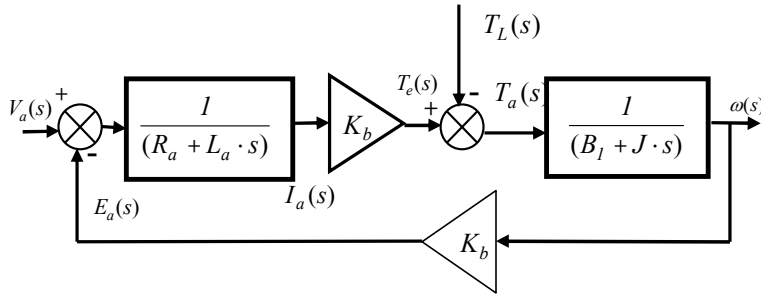
د- معادلة الحركة:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} + B_1 \cdot \omega_m = T_{em} - T_{mech} = T_a \quad (4)$$

إذ:  $V_a$ : توتر المتحرض،  $i_a$ : تيار المتحرض،  $R_a$ : مقاومة المتحرض،  $L_{aq}$ : محارضة المتحرض  $e_a$ : القوة المحركة الكهربائية (العكسية)،  $T_{em}$ : العزم الكهرومغناطيسي،  $T_{mech}$ : عزم الحمل (العزم الميكانيكي المطبق على محور الدوران)،  $B_1$ : عزم الاحتكاك اللزج وفي حالة التحميل يضاف إليه تأثير الحمل ليصبح  $B_{total}$ ،  $T_a$ : العزم الفعال.  $\omega_m$ : سرعة الدوران،  $P_e$ : الاستطاعة الكهرومغناطيسية،  $K_b$  ثابت (Torque constant) و  $K_a$  : ثابت (Induced emf constant)،  $J$ : عزم العطالة الكلي،  $V_{brush}$ : هبوط التوتر على المسفرات. من المعادلات المبينة (1) و(2) و(3) و(4) تم استنتاج مخطط المحاكاة المستخدم في البحث مباشرة، ويمكن استنتاج مخطط المحاكاة بتحويل هذه العلاقات الرياضية المذكورة إلى مستوى لابلاس واستنتاج توابع التحويل التي تمثل محرك التيار المستمر كما يأتي. [1]، [6]

$$G_{\omega}(s) = \frac{\omega_m(s)}{V(s)} = \frac{K_b}{s^2 (J_{total} L_a) + s(B_1 L_a + J_{total} R_a) + (B_1 R_a + K_b^2)} \quad (5)$$

$$G_{\omega L}(s) = \frac{\omega_m(s)}{T_L(s)} = \frac{-(R_a + s L_a)}{s^2 (J_{total} L_a) + s(B_1 L_a + J_{total} R_a) + (B_1 R_a + K_b^2)} \quad (6)$$



الشكل (2) مخطط صندوقي يمثل محرك التيار المستمر اعتماداً على توابع التحويل الخاصة به.

يمكن تمثيل جسر التقويم المستخدم في الدارة كنظام خطي اعتماداً على العناصر المتوافرة في مكتبة Simulin ، ومن ثم يصبح الشكل العام لتابع النقل:

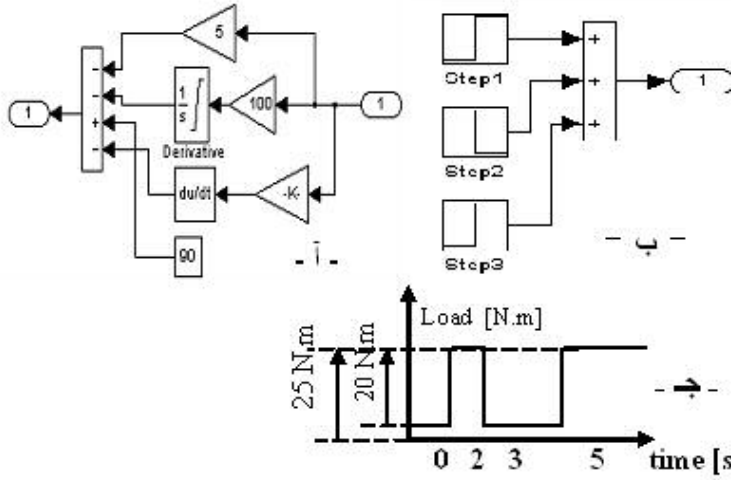
$$G_{conv} = K / (1 + T.s)$$

إذ إن: K : هو معامل الكسب لجسر التقويم.

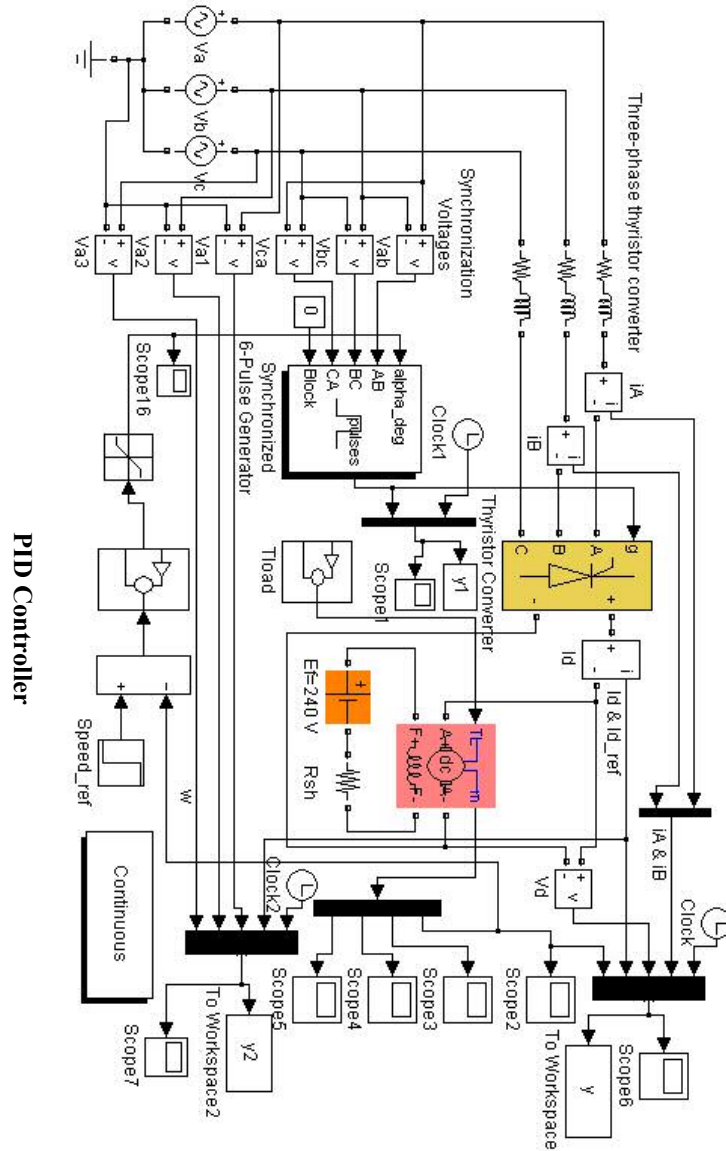
T: هو ثابت الزمن وتقدر قيمته (0-0.01) sec من أجل منبع ذي تردد 50 Hz

### 3- النموذج الأول:

يعتمد مبدأ عمل هذا النموذج على تغذية خلفية من إشارة السرعة  $(\omega)$ ، إذ إن بناء المخطط الصندوقي لمحاكاة نظام القيادة تم بالاعتماد على العناصر المتوافرة في مكتبة Matlab\SimPowerSys. أما العنصر PID، فقد تم بناؤه اعتماداً على مكتبة Matlab\Simulink، ويبين الشكل (3) البنية العامة للحاكمة التي تم اعتمادها في كلا النموذجين في هذا البحث، فضلاً عن عنصر يتكون من مجموعة من عناصر step fun لتشكل تغيرات الحمل. [6]، [5]



الشكل (3): أ- مخطط صندوقي لعناصر الحاكمة PID، ب- مخطط صندوقي لتغيرات الحمل على محور المحرك، ج- مخطط تغيرات الحمل عند المدد الزمنية المدروسة .



الشكل (4): المخطط الكامل لمحاكاة نظام قيادة محرك تيار مستمر باستخدام إشارة السرعة كحلقة تغذية خلفية (النموذج الأول)

#### 4- محددات المحرك ونظام القيادة :

- محرك تيار مستمر :

$$V_{DC}=240V, P=5HP, I_a=16.2A, V_f=240V, \\ \omega=127.7 \text{ rad/sec}=1220 \text{ r.p.m}, I_f=1A, R_f=240\Omega, \\ L_{af}=1.8H, L_{af}=120H, D=0, T_f=0, R_a=0.6\Omega, L_a=0.012H, B_m=0, \\ J_{total}=1\text{Kg.m}^2.$$

- المنبع الثلاثي الطور :

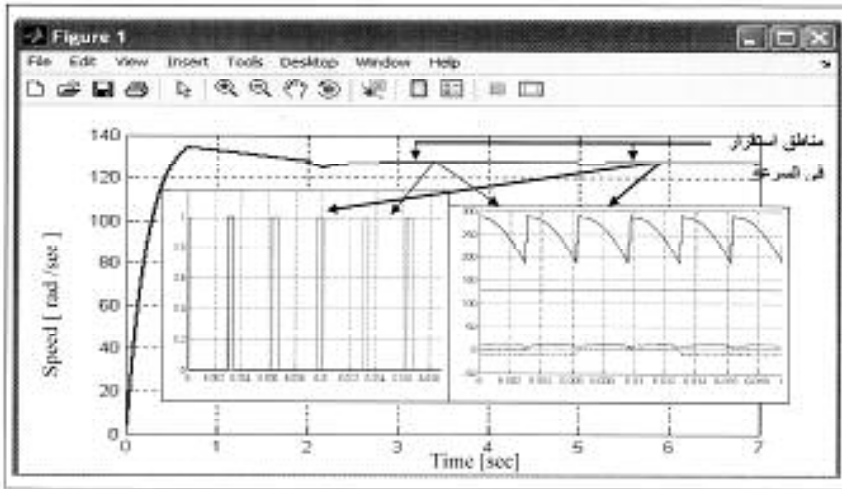
$$V_m=170 \text{ V/ph}, q=3, \psi=20^\circ$$

- جسر التقويم ثلاثي الطور مضاعف ( جسر كريتز ) مقاد .

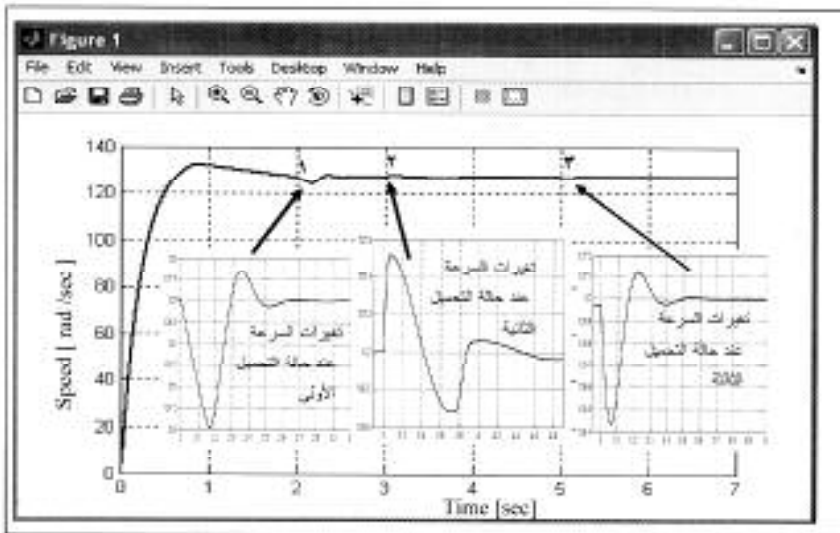
- عزم الحمولة متغير  $T_{Load}$ .

- تمت عملية المحاكاة خلال الزمن  $t=0 \text{ sec}$  إلى  $t=7 \text{ sec}$ .

يبين الشكل (5) منحنى السرعة عند جميع التغيرات التي تمر بها السرعة من لحظة إقلاع المحرك مروراً بالتغيرات التي تحدث عند تغير قيمة الحمل، وحسب القفزات المقترحة في التصميم. لإظهار التغيرات التي تطرأ على الإشارات المرغوب في دراستها أُخِذَتْ عينات خلال مدد زمنية مختلفة. كما يبين إشارات نبضات القدر Trigger Pulses لعناصر جسر التقويم وأيضاً إشارة التوتتر  $V_d$  والسرعة  $\omega$  و تيار المحرك  $i_d$ ، وكذلك تيارات الأطوار خلال مدة دور واحد من مرحلة استقرار السرعة، أي عودة دوران المحرك بالسرعة الاسمية بعد كل مرحلة تغير في عزم الحمل. يظهر الشكل (6) وضوح التغيرات في السرعة الناتجة عن حالات التحميل المفاجئة ولمشاهدة دقة استجابة نظام القيادة في مدد زمنية محددة ليعود المحرك للدوران عند السرعة الاسمية بشكل مستقر . من خلال الشكل (6) أظهرت نتائج عملية النمذجة أن النظام المقترح يستجيب استجابة جيدة عند تغير الحمولة عند المدد الثلاث التي أُشيرَ إليها في الشكل (6) بالأرقام (1)، (2)، (3)، حيث عادت السرعة إلى القيمة الاسمية بعد انتهاء الحالة العابرة التي سببها التغير في الحمولة.

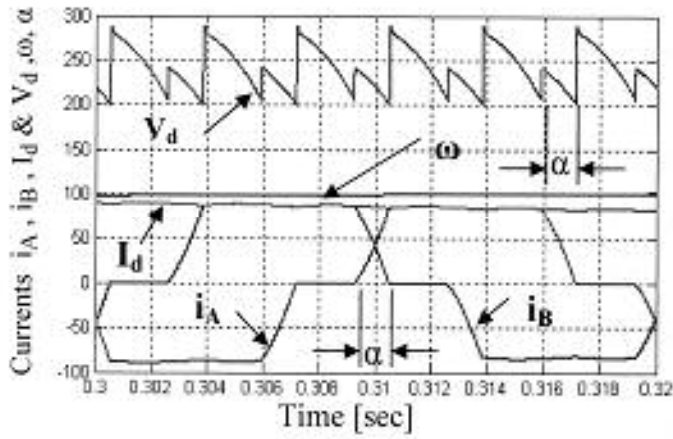


الشكل (5): يبين التوتر المقوم  $v_d$  المطبق على المحرك ونبضات قرح عناصر التقويم خلال مدة عمل المحرك في الحالة المستقرة.

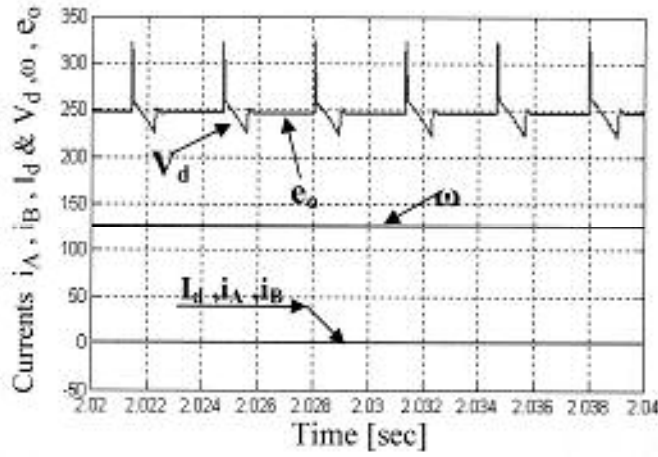


الشكل (6): منحنى السرعة عند حالات التحميل الثلاث: -الأولى عند 2 ثانية- الثانية عند 3 ثانية- والثالثة عند 5 ثانية.

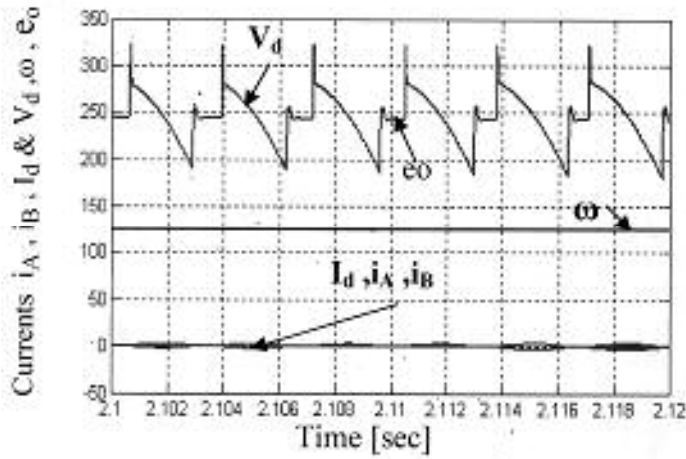




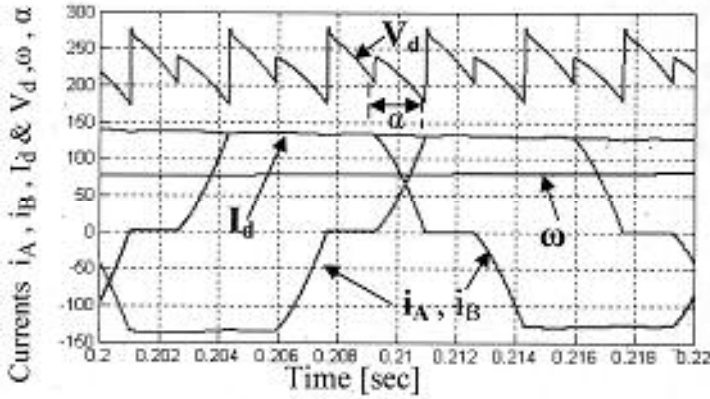
الشكل (7-1) يبين:  $V_d$ : التوتر المقوم،  $\omega$ : السرعة الزاوية،  $I_d$ : التيار المستقر من جسر التقويم،  $i_A, i_B$ : التيارات المستجرة من المنبع المتناوب ومدد التطابق  $\alpha$ .



الشكل (7-2ب): يبين تغيرات إشارات كل من:  $V_d$ : التوتر المقوم،  $\omega$ : السرعة الزاوية،  $I_d$ : التيار المستمر المستجر من قبل المحرك،  $i_A, i_B$ : لتيارات المستجرة من المنبع المتناوب،  $e_0$ : القوة المحركة الكهربائية العكسية (emf).



الشكل (7-ج): يبين تغيرات إشارات كل من  $V_d$ : التوتر المقوم،  $\omega$ : السرعة الزاوية،  $i_A, i_B$ : التيارات المستجرة من المنبع المتناوب،  $e_o$ : القوة المحركة الكهربائية العكسية لحظة تغير الحمل.



الشكل (7-د): تغيرات إشارات كل من  $V_d$ : التوتر المقوم،  $\omega$ : السرعة الزاوية،  $i_A, i_B$ : التيارات المستجرة من المنبع المتناوب خلال مرحلة الإقلاع .  
من الأشكال السابقة (7-أ) وحتى (7-د) نلاحظ:

1- تتغير مدد التطابق تبعاً لقيمة تيار المحرك  $I_a$ ، حيث تأخذ مدة التطابق أكبر قيمة لها خلال مدة تسارع المحرك التي يتم فيها أكبر قيمة للتيار، ومن ثمّ تتناقص وتزيد مدة التطابق مع تناقص وتزايد قيمة التيار على اعتبار أن المحارضة للحمل ولمنبع التغذية المتناوب تبقى ثابتة.

2- تمت مقارنة قيمة زاوية التطابق في الحالتين. حالة قياسها من منحني التيارات  $i_A, i_B$  ومن منحني التوتر  $V_d$ .

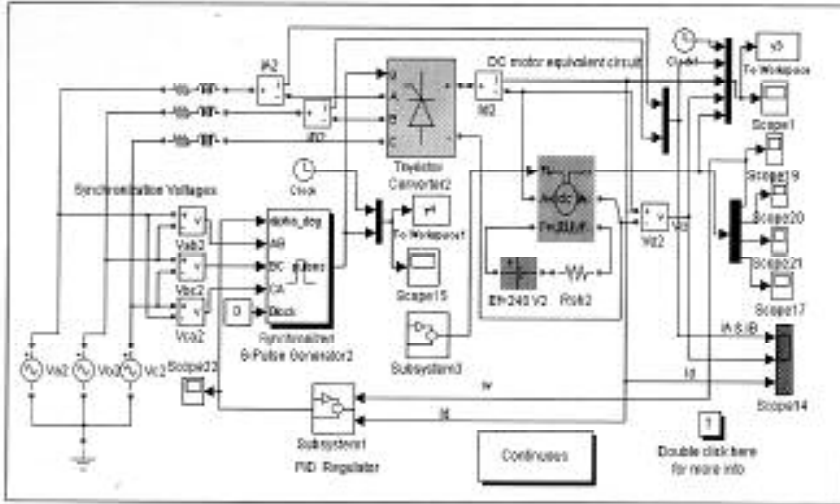
3- ظهور القوة المحركة الكهربائية العكسية خلال المدة الزمنية التي تحدد ما بين القيمة العظمى والصغرى للسرعة، وهنا نلاحظ أنه خلال هذه المدة انخفضت السرعة وكأن المحرك تعرض لعملية كبح ومن ثمّ ظهرت القوة المحركة الكهربائية العكسية  $e_o$ .

#### 5- النموذج الثاني:

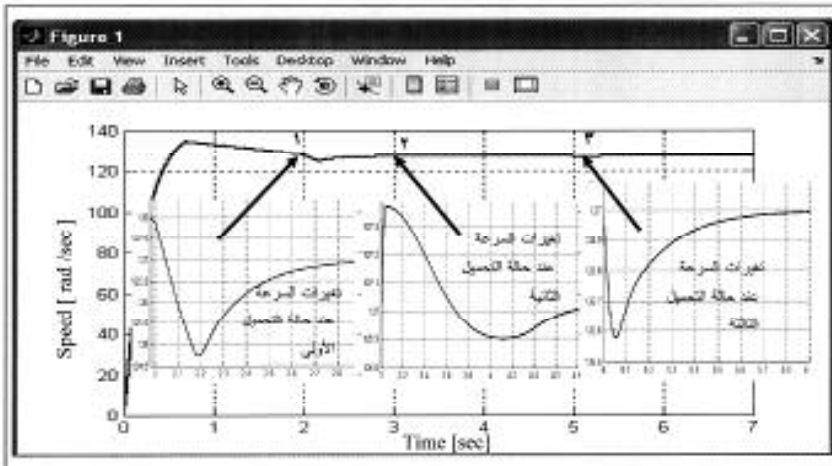
يتمثل هذا النموذج مع النموذج السابق تماماً من حيث العناصر المستخدمة والمتغيرات إنما مع إضافة حلقة تغذية خلفية من إشارة التيار لتصبح إشارة القيادة لدارة توليد النبضات المطبقة على جسر التقويم مقادة من محصلة إشارتين هما السرعة  $\omega$  والتيار  $i_a$  مع إضافة عناصر المتحكم PID اللازمة لكل حلقة، بحيث نحصل على تغيرات لإشارة السرعة تماثل تغيرات إشارة السرعة في النموذج الأول وإجراء مقارنة بين النموذجين من حيث سرعة ودقة استجابة نظام القيادة للتغيرات الناتجة في عزم الحمولة.

أُتبعَت الخطوات نفسها التي اتبعت عند المحاكاة في النموذج الأول الذي يعتمد على استخدام حلقة تغذية خلفية من السرعة فقط .

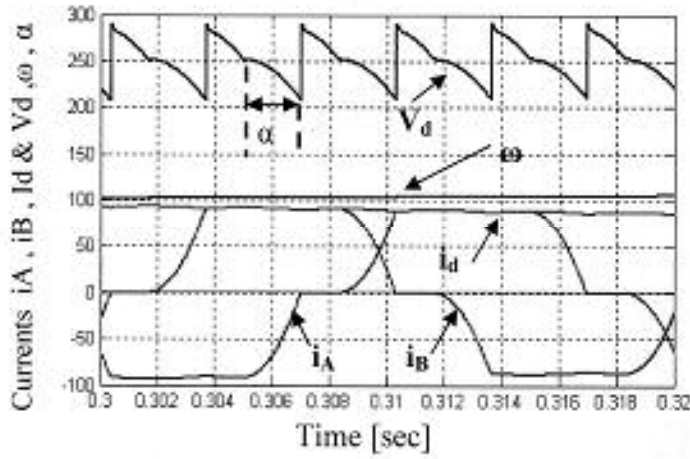
تم تسجيل النتائج تبعاً وبنفس الترتيب الذي اتبع في النموذج السابق بهدف السهولة والدقة في المقارنة بين نتائج الحالتين.



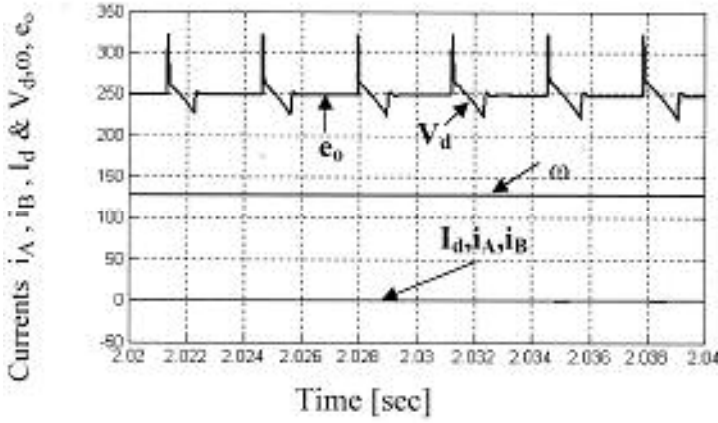
الشكل (8): يبين مخطط كامل لدارة القيادة باستخدام إشارة السرعة والتيار (النموذج الثاني).



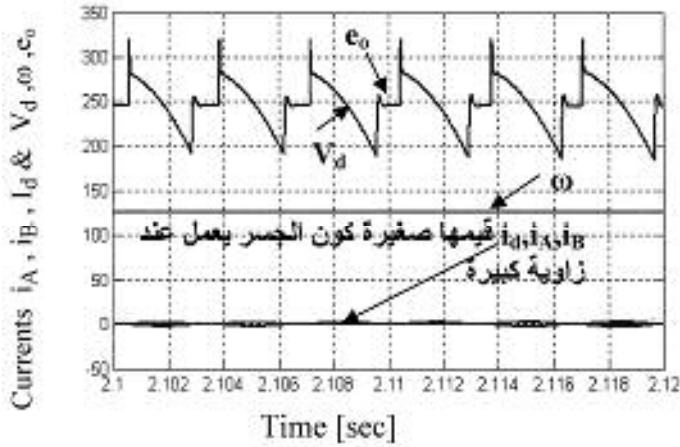
الشكل (9): يبين التغيرات في السرعة عند مدد تغيير الحمولة الناتجة من النموذج الثاني (حلقة تغذية خلفية من التيار وأخرى من السرعة).



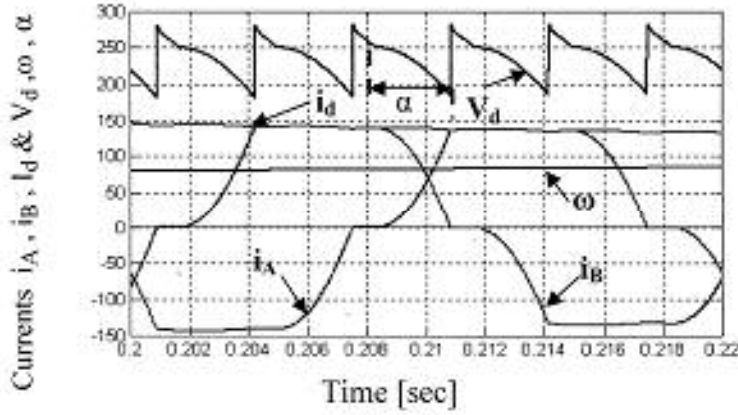
الشكل (10-أ): يبين تغيرات إشارات كل من  $V_d$ : التوتر المقوم،  $\omega$ : السرعة،  $I_d$ : التيار المستمر المستقر من قبل المحرك،  $i_A$ ,  $i_B$ : التيارات المستجرة من المنبع المتناوب خلال مدة الإقلاع، ومدد التطابق.



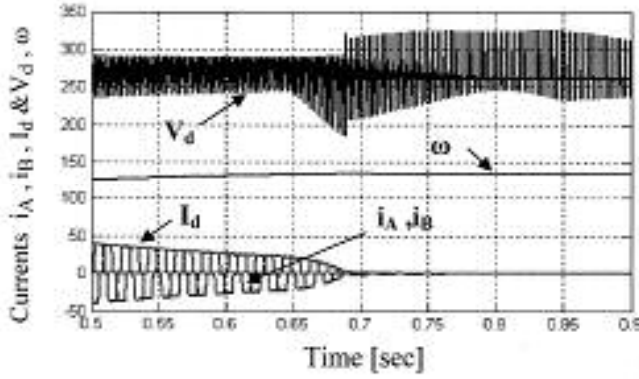
الشكل (10-ب): يبين تغيرات إشارات كل من  $V_d$ : التوتر المقوم،  $\omega$ : السرعة الزاوية،  $I_d$ : التيار المستمر،  $i_A$ ,  $i_B$ : التيارات المستجرة من المنبع المتناوب،  $e_0$ : القوة المحركة الكهربائية العكسية لحظة تغير الحمل.



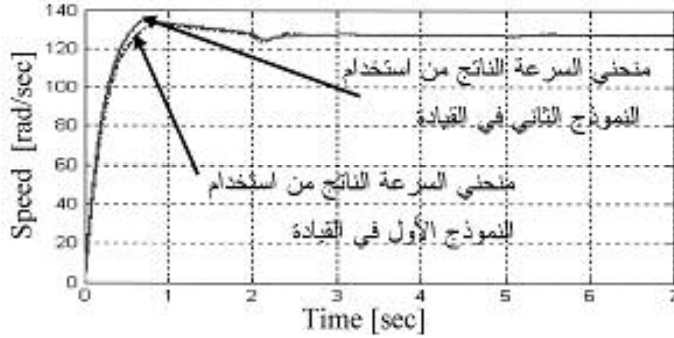
الشكل (10-ج): يبين تغيرات إشارات كل من:  $V_d$  : التوتر المقوم،  $\omega$  السرعة الزاوية،  $I_d$  : التيار المستمر،  $i_A$  ,  $i_B$  : التيارات المستجرة من المنبع المتناوب،  $e_o$  : القوة المحركة الكهربائية العكسية لحظة تغير الحمل.



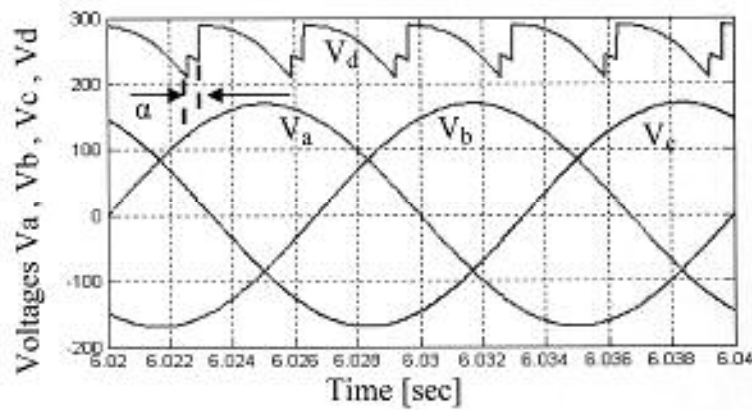
الشكل (10-د): يبين تغيرات إشارات كل من:  $V$  : التوتر المقوم،  $\omega$  السرعة الزاوية،  $I_d$  : التيار المستمر،  $i_A$  ,  $i_B$  : التيارات المستجرة من المنبع المتناوب.



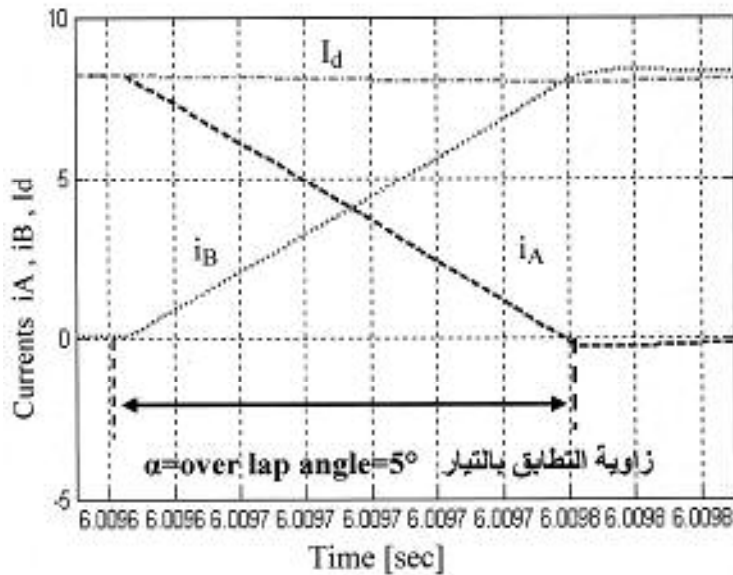
الشكل (10-هـ): يبين تغيرات إشارات كل من:  $V_d$ : التوتر المقوم،  $\omega$  السرعة الزاوية،  $I_d$ : التيار المستمر،  $i_A, i_B$ : التيارات المستجرة من المنبع المتناوب. تبين الأشكال السابقة (10-أ، ب، ج، د) مع مقارنتها بالأشكال (7-أ، ب، ج، د)، (تطابقاً) كبيراً بين هذه المنحنيات، مما يدل على تطابق الاستجابة لكلتا حالتين نظام القيادة. من أجل مقارنة السرعة في الحالتين تم رسمهما على مخطط واحد حيث نلاحظ مدى التطابق بين تغيرات السرعة في الحالتين: حالة منظم بحلقة تغذية خلفية من السرعة  $\omega$ ، وحالة منظم مع حلقتي تغذية خلفية السرعة والتيار ( $i$  and  $\omega$ ) كما هو مبين في الشكل (11).



الشكل (11): يبين التغيرات في السرعة مع تغيرات التحميل في كلتا حالتين التحكم.

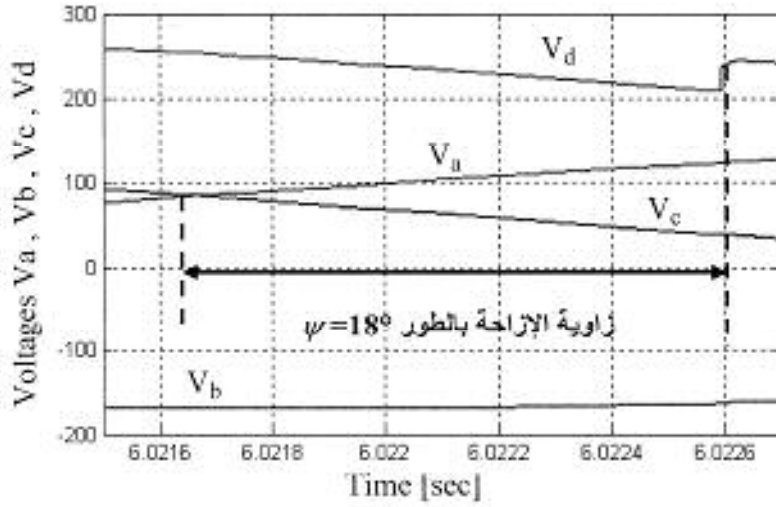


الشكل(12): يبين توترات الأطوار الثلاثة والتوتر المقوم الناتج في خرج جسر التقويم والمغذي للمحرك عند العمل تحت الحمل وعند الحالة المستقرة للسرعة.



الشكل(13) : يوضح زاوية التتابق في التيار والتي تعادل 5 درجات .





الشكل(15): يوضح زاوية الإزاحة بالطور التي تعمل عندها عناصر التقويم خلال مرحلة التحميل (النقطة 3)، واستقرار السرعة .

#### 6- النتائج: Conclusions

- 1- مقدرة نظام القيادة على الاستجابة للتغيرات المفاجئة على النظام (تغير الأحمال) ابتداءً من مرحلة الإقلاع حتى الوصول إلى الاستقرار للأسباب الآتية:
- 2- استخدام حلقات تغذية خلفية من إشارات السرعة والتيار، ومن ثمّ مراقبة التغيرات بشكل مستمر.
- 3- الاختيار المناسب لقيم بارمترات منظمات PID التي استُخدمت.
- 4- مدى فاعلية وتأثير الحاكمة عند تعرض النظام للتحميل وتخفيض التحميل في المدة الزمنية المدروسة كما هو واضح في المنحنيات المبينة في (الأشكال 6 و 9)، حيث تستجيب الحاكمة وتعيد السرعة إلى القيمة الاسمية بعد الهبوط الناتج عن التحميل، أو الزيادة الناتجة عن إنقاص الحمل المطبق على محور المحرك، عند كلتا حالتَي التنظيم

فإن زمن الاستجابة وإعادة السرعة للقيمة الاسمية يختلف من حالة تحميل إلى أخرى الأشكال (6 و 9).

5- تطابق منحني السرعة في الحالتين (منظم بحلقة تغذية خلفية لإشارة السرعة ومنظم بحلقة تغذية خلفية لإشارة السرعة والتيار) عند وصول السرعة إلى القيمة الاسمية بعد كل حالة من حالات التحميل. هذا التطابق يتم ضبطه (الحصول عليه) من خلال اختيار قيم بارمترات المنظمات PID، الأشكال (3) و (11)، ولكن لحظة حدوث الحالة العابرة (حالة التحميل) نلاحظ من خلال منحنى الاستجابة في منحنى السرعة يختلف بين الحالتين حيث تم إخماد الاهتزاز في الحالة الثانية وهي الأفضل، الأشكال (6 و 9) .

6- تغير قيمة التوتر  $V_d$  وشكله عند مدد زمنية مختلفة (بداية الإقلاع، مدة التحميل، مدة تخفيض التحميل).

7- التغيرات في مدد التطابق على كامل المدة المدروسة بدءاً من الإقلاع حتى الاستقرار تُظهر التغيرات في التيارات المستجرة من الشبكة والتيار المستجر من جسر التقويم.

8- يدلُّ ظهور القوة المحركة العكسية  $e_0$  على منحنى التوتر  $V_d$  على حدوث ما يشبه عملية كبح في المحرك لتعود السرعة إلى القيمة الاسمية بعد أن تصل إلى قيمة أعلى من القيمة الاسمية عند الإقلاع وعند حدوث حالات تحميل مختلفة (انخفاض السرعة لحظياً عند تطبيق الحمل، وارتفاعها لحظياً عند رفع الحمل أو جزء منه، وفي كلتا الحالتين يتدخل نظام التحكم ويعيد السرعة إلى قيمتها الاسمية كما بينته المنحنيات المبينة في الأشكال (6 و 9).

### References

- [1] R.Krishnan, "Electric Motor Drives", Book, 2002  
[2] Matlab\ Simulink, Matlab\ SimPowerSystem Ver. 2006a..  
[3] Jimmie J. Cathy, " Electric Machines, Analysis and applying Matlab", MCGRAW – HILL , International , Edition , 2001 .  
[4] Matlab ver.6.3, Simulink, "Dynamic System Simulation for Matlab", manual , Mathworks, Inc., 2000- 2001.  
[5] Bogmila Mrozek, Zbigniew Mrozek, "Modeling and Fuzzy Control of DC Drive", 2000, May 23-26, Ghent, pp186-190  
[6] Chee-Mun Ong, "Dynamic Simulation of Electric Machine", Using Matlab/ Simulink .Book, 1998 , p. 167 – p. 258  
[7] د.مصطفى الحزوري، د. علي الجازي. البرمجة /3-، 2008، كتاب، جامعة دمشق.

تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق: 2008/6/12.