



تحليل الأداء الديناميكي لمحرك حثي ثلاثي الأطوار باستخدام تقنية MATLAB/SIMULINK

عبد الستار حسن جاسم¹ ، تحسين زيار جاسم²
¹قسم الهندسة الكهربائية، جامعة تكريت، تكريت، صلاح الدين، العراق
abdulsatar174@yahoo.com
²محطة كهرباء بيجي الحرارية

الخلاصة

تم في هذا البحث وضع نموذج رياضي للمحركات الحثية ثلاثية الطور عن طريق مجموعة من المعادلات الكهربائية والميكانيكية التي تصف عمل المحرك وأدائه، حيث أجريت نمذجة المحرك باستخدام تقنية برمجية حديثة (MATLAB/SIMULINK) والتي من خلالها تمت دراسة الحالات العابرة التي يتعرض لها المحرك، حيث تم تحديد مختلف دلالات ومميزات المحرك، كالسرعة، العزم، تيار الجزء الثابت وتيار الجزء الدوار وذلك بإخضاع المحرك لعدة حالات مثل: بدء التشغيل، التحميل المفاجئ للمحرك، فصل أحد أطوار التغذية عن المحرك، الزيادة المفاجئة للفولتية، نقصان المفاجئ للفولتية، تبديل الأطوار وتأثير البرق. النمذجة استخدمت لبيان تأثير حجم المحرك على السلوك الديناميكي له والذي يعطي اختيار المحرك الصحيح للتطبيق المطلوب. حيث أكدت نتائج البحث التي تم الحصول عليها فاعلية التقنية الحديثة المستخدمة في محاكاة الحالات العابرة التي يتعرض لها المحرك وبالتالي إمكانية التنبؤ بتصرف المحرك الحثي أثناء الاضطرابات التي يتعرض لها.

الكلمات الدالة: محرك حثي، السلوك الديناميكي، نمذحه وتحليل .

Dynamic Performance Analysis of Three Phase Induction Motor Using Matlab/Simulink Technique

Abstract

In this paper a good mathematical model for three phase induction motor using their electrical and mechanical equations which describe its operation and performance. The modern computational technique (Matlab/Simulink) has been used to study transient conditions of the motor. The behavior of the motor observed according to their speed, torque, stator current and rotor current by subjecting the motor to different conditions like, starting, sudden load, one phase disconnected, sudden increasing or decreasing the motor voltage and lightning effect. The model is used to investigate the effects of variation in the machine size on the dynamic performance, to select the appropriate motor for specific application. The simulation results show the activity of the modern technique in predicting the behavior of an induction motor under different operating conditions.

Keywords: Induction Motor, Dynamic Model, Matlab/Simulink.

المقدمة

هذه الدراسة إلى معرفة إمكانية بقاء استقرار المحركات عند حدوث اضطرابات مختلفة على المحرك. حيث تعرف الحالة العابرة بأنها حالة انتقاله بين حالتي استقرار متعاقبتين لنظام ما، كأن يمثل هذا النظام عمل المحرك عند إقلاعه أو تغيير الحمل عليه بشكل مفاجئ أو تغيير أحد عناصره أو تغيير في جهد الشبكه أو فقدان أحد أطوار التغذية. إن حدوث الحالة العابرة في

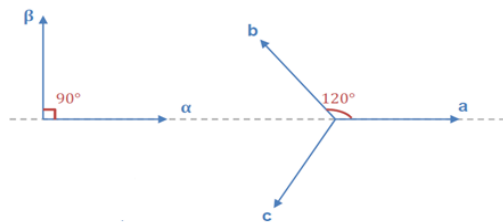
لأهمية استقرارية الشبكة الكهربائية والأحمال المربوطة عليها يجب دراسة المسببات التي تؤثر على الشبكة واستقراريتها، ومن هذه المسببات هي الحالة العابرة في المحركات الحثية، حيث تعد دراسة الحالة العابرة في الوقت الحاضر من الدراسات البالغة الأهمية لتحديد السلوكية الديناميكية للمحركات الحثية، وتهدف

كما ذكر الباحث (Mcculluch) [4] إن هبوط فولتية الشبكة يؤثر تأثيرا مباشرا على أداء المحركات الحثية، حيث تم دراسة تصرف المحرك أثناء حصول عطل ثلاثي الطور على أطراف خطوط تغذية المحرك (three phase fault)، إذ تم ملاحظة تغير كافة متغيرات المحرك تغيرا ملحوظا كما تم ذكر الطرق المستخدمة للسيطرة على الاضطرابات الحاصلة في المحرك.

تكمن أهمية البحث في أنه يضع نموذج برمجي للمحرك الحثي يمكن من خلاله دراسة حالات العمل المختلفة للمحرك في نظام العمل المستقر والديناميكي كما يتيح إمكانية دراسة أثر هذه العوامل على المحرك في ميدان العمل باستخدام تقنية (Matlab)، حيث تعطي هذه التقنية إمكانية لتصميم المحركات بأقل كلفة ممكنة وذلك اعتمادا على المحاكاة.

النموذج الرياضي للمحرك الحثي

من أجل دراسة المحرك الحثي وتحليل جميع ظواهره ومعرفة سيرعمليات تحويل الطاقة فيه، كان لا بد من الحصول على المعادلات الرياضية التي تستخدم في النموذج الرياضي العام للمحرك التي تصف عمل المحرك في الحالة المستقرة والعبارة، إذ تستطيع دراسة أنظمة عمل المحرك ودراسة أنظمة القيادة المختلفة له لتنظيم السرعة أو العزم، تم تحليل المحرك في كلا النظامين الثلاثي والثنائي مع تبيان الفروق المختلفة وآليات التحويل بين هذين النظامين، إذ تم تحليل المحرك الحثي ثلاثي الأطوار نظريا وذلك باستخدام المعادلات للمحاور الثلاثية (a, b, c) ومن ثم تحويل هذه المحاور إلى نظام المحاور المتعامدة كما في الشكل رقم (1).



شكل (1) الفرق بين النظام الثلاثي و النظام المتعامد

التحليل النظري للمحرك الحثي بالتمثيل ثلاثي الطور
المعادلات أدناه تمثل فولتيات الأطوار الثلاثة لكل من الجزء الدوار و الجزء الثابت [3,5,6]
(فولتيات الجزء الدوار)

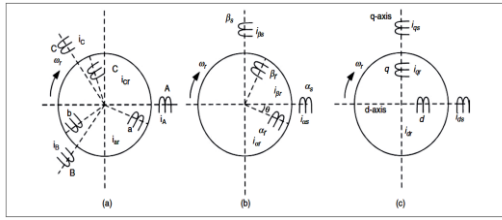
$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + M \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ \cos(\theta + 120^\circ) & \cos \theta & \cos(\theta - 120^\circ) \\ \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_A}{dt} \\ \frac{di_B}{dt} \\ \frac{di_C}{dt} \end{bmatrix} \quad (1)$$

المحركات الحثية يؤدي إلى حدوث تيارات كبح يمكن إن تصل إلى عدة أضعاف التيار المقرر للمحرك، وهذه التيارات تؤدي بدورها إلى نشوء قوى كهرو ديناميكية على الأجزاء الجبهوية للملفات بحيث يمكن إن تتلفها، كما تظهر إثناء الحالة العابرة اهتزازات في العزم الناتج على محور المحرك وهذه الاهتزازات قد تكون غير متخامده مما يؤدي إلى عمل غير مستقر للنظام، أما العزوم الكابحة الناشئة فإنها قد تؤثر في محور دوران المحرك، لذلك تعتبر حالات العمل المستقرة للمحرك الحثي هدف رئيسي في كثير من التطبيقات الصناعية، حيث يكون العزم على محور الدوران مستقرا مع استقرار السرعة والتيار المسحوب، وبالتالي استقرار الشبكه المغذية للمحرك. إن التيارات العالية التي يسحبها المحرك عندما يمر بالحالة العابرة تؤثر تأثيرا مباشرا على الشبكه المجهزة للمحرك، وتشمل قواطع الدورة (circuit breaker)، كابلات التوصيل (cables)، محولات (transformers) وخطوط النقل (transmission lines)، فعند اشتغال مجموعة من المحركات بنفس اللحظة سيكون التيار المسحوب من مجهر القدرة كبيرا جدا مما يسبب هبوط في جهد الشبكة وبالتالي حصول إرباك في عمل المعدات المربوطة على الشبكة.

إن مسألة اقتصاد الطاقة الكهربائية وتوفيرها تزداد أهمية سنه بعد سنه لأن عدد المحركات التي تستهلك هذه الطاقة تزداد أيضا، لذا فإن تحديد القدرة الفعالة والخيالية في الحالات العابرة للمحركات الحثية تكتسب أهمية كبيره. لهذا كله نجد من الضروري إجراء دراسة دقيقه للحالات العابرة التي تحدث في المحركات الحثية وذلك لتحديد آثارها على استثمار هذه المحركات وتصميمها [1].

قام الباحثان بوجوص والبازي [2] بدراسة الحالة العابرة التي تحدث في المحركات الحثية باستخدام تقنية MATLAB وذلك عند التغذية الجيبية وغير الجيبية حيث تم تحديد مختلف دلائل ومميزات المحرك كالعزم والسرعة والقدرة الفعالة والمتفاعلة فضلا عن ذلك تم دراسة تأثير التوافقيات المختلفة الموجودة في موجة الجهد المغذي على قيم تيارات وعزوم الصدمة وزمن الحالة العابرة، وتم التطرق أيضا الى عملية تبادل الطاقة بين كل من المحرك والمصدر.

أشار الباحثان كعدان وناجي [3] على ان استخدام بيئة MATLAB هو الحل الأمثل لدراسة مختلف الحالات التي يمر بها المحرك الحثي وبدقة عالية، حيث تم ملاحظة إن استجابة المحرك لمختلف الحالات العابرة التي يمر بها تعطي تصورا كاملا عن استقرارية النظام وتمكنه من تجاوز مختلف اضطرابات العمل.



شكل (2) التحويلات بين الانظمة

للنظام الثلاثي (abc) يمكن كتابة :

$$\begin{aligned} i_A &= I_m \cos \omega t \\ i_B &= I_m \cos(\omega t - 120^\circ) \\ i_C &= I_m \cos(\omega t + 120^\circ) \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

حيث ان I_m يمثل القيمة العظمى للتيار للأطوار الثلاثة للنظام الثنائي الدوار، يمكن كتابة :

$$\begin{aligned} i_{\alpha s} &= I_m \cos \omega t \\ i_{\beta s} &= I_m \cos(\omega t - 90^\circ) \dots \dots \dots (4) \end{aligned}$$

من الشكل (2) نستنتج إن المحاور الدوارة ($\alpha\beta 0$) متطابقة مع المحاور المتعامدة (dq)، والمحور (A) في النظام الثلاثي متطابق مع المحور (α) في النظام الثنائي وكذلك المحور (d) متطابق مع المحور (α) وبالتالي تطابق المحور (d) مع المحور (A).
للتحويل بين هذه الانظمة تستخدم مصفوفة التحويل

$$\begin{aligned} [i_{\alpha s}, i_{\beta s}, i_{os}] &= [\dot{A}][i_A, i_B, i_C] \\ [i_A, i_B, i_C] &= [\dot{A}^{-1}][i_{\alpha s}, i_{\beta s}, i_{os}] \dots (5) \end{aligned}$$

كما يأتي [4]:

حيث إن قيمة (i_0) تمثل تيار الخط المتعادل الذي تكون قيمته مساوية للصفر في النظام الثلاثي المتوازن.

$$i_0 = i_a + i_b + i_c \dots \dots \dots (6)$$

يمكن كتابة مصفوفة التحويل كما يأتي :

$$\dot{A} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos 0^\circ & \cos \frac{2\pi}{3} & \cos \frac{4\pi}{3} \\ \sin 0^\circ & \sin \frac{2\pi}{3} & \sin \frac{4\pi}{3} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} (7)$$

الآن يمكن التحويل من محاور ($\alpha\beta 0$) الدوارة الى المحاور المتعامدة ($dq0$).

تبين المعادلة أدناه حساب تيارات الجزء الدوار في المحاور المتعامدة (dq) بدلالة

حيث أن

M ، L_r ، R_r تمثل كل من المقاومة والمحاثة التسريبيه والمحاثة التبادلية للجزء الدوار على التوالي.
(فولتيات الجزء الثابت)

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L_s \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + M \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + 120^\circ) & \cos(\theta - 120^\circ) \\ \cos(\theta - 120^\circ) & \cos \theta & \cos(\theta + 120^\circ) \\ \cos(\theta + 120^\circ) & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{di_b}{dt} \\ \frac{di_c}{dt} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2)$$

M ، L_s ، R_s تمثل كل من المقاومة والمحاثة والمحاثة التبادلية للجزء الثابت على التوالي.

حيث :

$$\begin{aligned} [R_s] &= \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 \\ 0 & r_b & 0 \\ 0 & 0 & r_c \end{bmatrix} \\ [R_r] &= \begin{bmatrix} r_A & 0 & 0 \\ 0 & r_B & 0 \\ 0 & 0 & r_C \end{bmatrix} \end{aligned}$$

تمثيل المحرك في نظام المحاور المتعامدة:

إن عملية النمذجة تبدأ من دراسة المقادير الكهربائية لكل من الدوار والثابت، أي دراسة الجهد والتيار والفيض للحصول على معادله معبرة عن المحرك الحثي، والمقادير السابقة هي مقادير ثلاثية الطور، لذلك يتم اللجوء قبل القيام بالدراسة الى إسقاط نظام المحاور الثلاثية لهذه المقادير على محاور ثنائية وذلك للأسباب التالية :

1- إن عملية دراسة المقادير الكهربائية الثلاثية الطور بشكل شعاعي يجب أن تأخذ بعين الاعتبار التمثيل الكهربائي والفراغي للملفات. أي إننا نغذي الثابت بجهود ثلاثية الطور مزاحة عن بعضها بزاوية 120 درجة. كما إن ملفات الثابت تكون متوضعة توضعاً فراغياً بحيث تكون الزاوية بين كل ملفين متجاورين هي 120 درجة، وبالتالي وجود معادلات تفاضلية يصعب حلها.

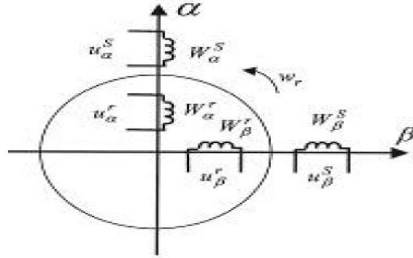
2- تقليل المعادلات البرمجية التي تمثل عمل المحرك وبالتالي سرعة معالجة أعلى. وجد إن عملية التمثيل على نظام المحاور الثلاثية هي عملية صعبة بسبب وجود الثوابت أمتثلنية للمعادلات التفاضلية والتي تجعل من الصعب حل هذه المعادلات، لذلك سوف يتم إسقاط نظام المحاور الثلاثية في الدوار والثابت على محورين متعامدين [3,6,7].

حيث يتم التحويل حسب العلاقة :

$$3 - \phi|_{abc} \Leftrightarrow 2 - \phi|_{\alpha\beta 0} \Leftrightarrow 2 - \phi|_{dq0}$$

الشكل (2) يبين تحويل النظام الثلاثي الى النظام الثنائي.

حيث يتألف هذا المحرك من ملفين (طورين) موجودين على محورين متعامدين ($\beta\alpha$) في كل من الثابت والدائر وكما مبين في الشكل (3).



شكل (3) تمثيل المحرك الحثي بالنظام المتعامد

فحسب الشكل (3) يستبدل المحرك ألحثي ثلاثي الطور بمحرك ثنائي الأقطاب، فيه لكل من الثابت والدوار زوج من الملفات على المحورين ($\beta\alpha$) الثابتين والمتعامدين، ويدور الجزء الدوار فيه بسرعة W_r في حين ان المجال المغناطيسي الدوار يدور بسرعة تزامنيه W_s نتيجة مرور تيارات متناوبة مزاحة بزاوية 90 درجة حسب الزمن في ملفات الثابت، أي أنه عندما تمر موجة الفيض على المحور (α) بنقطة الصفر تمر الموجة على المحور (β) بقيمة عظمى والعكس صحيح، بينما ملفات الثابت فمزاحة فراغياً عن بعضها بمقدار 90 درجة. عندها يمكن كتابة المعادلات التي تصف عمل المحرك كالآتي :

معادلات الجهد [2] :

$$\begin{aligned} v_{s\alpha} &= R_s * i_{s\alpha} + L_s \frac{di_{s\alpha}}{dt} + M \frac{di_{r\alpha}}{dt} \\ v_{s\beta} &= R_s * i_{s\beta} + L_s \frac{di_{s\beta}}{dt} + M \frac{di_{r\beta}}{dt} \\ 0 &= R_r * i_{r\alpha} + L_r \frac{di_{r\alpha}}{dt} + M \frac{di_{s\alpha}}{dt} + w_r (L_r * i_{r\beta} + M * i_{s\beta}) \\ 0 &= R_r * i_{r\beta} + L_r \frac{di_{r\beta}}{dt} + M \frac{di_{s\beta}}{dt} - w_r (L_r * i_{r\alpha} + M * i_{s\alpha}) \end{aligned} \quad (12)$$

حيث ان

$v_{s\alpha}, v_{s\beta}$ تمثل فولتيات المحاور الثنائية للجزء الثابت

$i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ تمثل تيارات المحاور الثنائية للجزء الثابت

$v_{r\alpha}, v_{r\beta}$ تمثل فولتيات المحاور الثنائية للجزء الدوار

$i_{r\alpha}, i_{r\beta}$ تمثل تيارات المحاور الثنائية للجزء الدوار

تجدر الملاحظة أن أي قيمة للتيارات والجهود في النموذج الرياضي الممثل للمحرك له معنى فيزيائي، لأن هذا النموذج يعكس حوادث تحول الطاقة في المحرك الكهربائي. فالعزم الكهرومغناطيسي يتحدد بجميع التراكيب التي تحوي قيم التيارات التي تمر بملفات الثابت والدائر. فالتركيب (i) $\{ \frac{3}{2} PM \}$ $\{ i_{\beta r} * i_{\alpha s} - i_{\beta r} * i_{\alpha} \}$ يحدد العزم الدوراني (Trot) المتولد على محور

تيارات المحاور ($0\alpha\beta$) :

$$\begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha r} \\ i_{\beta r} \\ i_{or} \end{bmatrix} \dots (8)$$

حيث تبين المعادلة أدناه تيارات المحاور ($0\alpha\beta$) للجزء الدوار بدلالة التيارات للنظام الثلاثي :

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha r} \\ i_{\beta r} \\ i_{or} \end{bmatrix} = \hat{A} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_{or} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (9)$$

كما يمكن حساب تيارات المحاور (dq) المتعامدة للجزء الثابت كما يأتي :

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \\ i_{os} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \dots \dots \dots (10)$$

من المفاهيم الأساسية لملفات الجزء الثابت والدوار نستطيع كتابة المصفوفة التالية [3,6] :

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{ds} + L_{ds}p & 0 & M_{dp} & 0 \\ 0 & r_{qs} + L_{qs}p & 0 & M_{qp} \\ M_{dp} & 0 & r_{dr} + L_{dr}p & 0 \\ 0 & M_{qp} & 0 & r_{qr} + L_{qr}p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (11)$$

حيث تمثل (p) d/dt

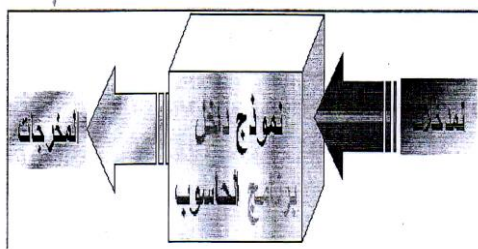
من خلال النظر إلى المعادلة (11) يتبين انه بالإمكان وصف أداء المحرك من خلال محورين متعامدين بدلا من ثلاثة محاور وبالتالي تقليل عدد المعادلات المستخدمة في البرمجة.

إن الظواهر المرافقة للحالات العابرة معقدة بحيث إن الدراسة الرياضية للمحرك دون فرضيات وتبسيطات تكاد تكون مستحيلة وغير ممكنة، وتتجم الصعوبة عن عدم خطية منحنى المغنطة وعدم خطية عناصر المحرك وعلاقتها بقيم التيارات المارة في الملفات وكذلك عدم التوزيع ألجبيي لمنحنى الساحة المغناطيسية وتغيرها حسب أنظمة عمل المحرك [2]. تسهيلات لذلك ولتمثيل المحرك الحقيقي والظواهر المعقدة فيه أثناء الحالة العابرة، تعتمد النظرية العامة للمكائن الكهربائية التي تقوم بتمثيل المحرك الحقيقي بمحرك آخر نموذجي مكافئ بحيث تكون الحوادث الفيزيائية في هذا المحرك النموذجي مشابهة لتلك التي تحدث في المحرك الحقيقي،

من جميع النواحي التركيبية والتفاعلية وصولاً إلى الحل الأمثل لها [1].

المحاكاة باستخدام (Matlab/ Simulink)

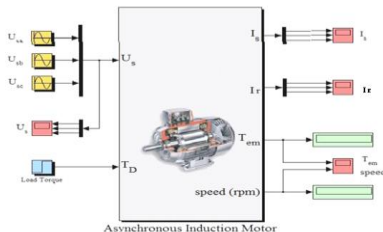
تم استخدام برمجيات (Matlab/Simulink) في نمذجة وتحليل المحرك الحثي ثلاثي الطور لدراسة حالاته المستقرة والحركية بالإضافة إلى استخدام كتل نظام القدرة (power system blockset) في الدراسة، إذ تعد برمجيات (simulink) الأكثر حداثة والأوسع انتشاراً حيث تستخدم هذه التقنية في النمذجة (modeling) والمحاكاة (simulation) والتحليل (analysis) خاصة في المنظومات المتغيرة، وتعتمد هذه التقنية على المصفوفات والمعادلات الرياضية، كما أنها تستخدم في تحليل المنظومات الخطية وغير الخطية ذات الزمن المستمر (continues time) أو الزمن المتقطع (sample time) أو المزج بينهما [8,9,10] وكما مبين بالشكل (4).



شكل (4) توضيح يمثل عملية المحاكاة

نموذج المحرك الحثي المستخدم

يتألف نموذج المحرك الحثي المبين في الشكل (5) من إشارات الدخل والخروج اللازمة، حيث يتبين إن الإدخال للمحرك يمثل أطراف الجزء الثابت الذي يرتبط بالمصدر الخارجي بالإضافة إلى العزم الميكانيكي المسلط.



شكل (5) المخطط الرئيسي للنظام

تتألف وحدة المحرك الحثي من المداخل التالية :

- جهود الثابت U_s في نظام المحاور الثلاثية a, b, c
- عزم الحمل T_h ، وهو عبارته عن إشارة قفزه واحدة (unit step) تقوم بتحميل المحرك بالحمل الميكانيكي

المحرك الحثي، أما قيم التيارات في كل من الثابت والدوار وعلى المحور نفسه فتحدد العزوم النبضية أو الاهتزازية (T_{pulse}) التي تظهر في المحرك وهذه العزوم ان وجدت بقيم كبيرة تعمل على إطالة زمن الإقلاع وزيادة الاهتزازات في موجة العزم.

كما أن القيم $3/2 PM (i_{as} * i_{\beta s} + i_{ar} * i_{\beta r})$ يمكن اعتبارها وكأنها تنتج عزوماً نسميها بالعزوم المشوهة (T_{def}) والتي تؤثر بشكل أساسي في الأجزاء الجبهوية لملفات الثابت والدوار ولكنها تستخدم عادة عند تحديد الوثوقية في المحرك وتشكل جزءاً لا يؤثر في المحرك. أي أنه في المحصلة تصبح معادلة العزوم الكهرومغناطيسية المتولدة كالآتي :

$$T_{em} = T_{rot} + T_{pulse} + T_{def}$$

$$T_{em} = \frac{3}{2} p M [(i_{rx} * i_{\beta \beta} - i_{gx} * i_{r\beta}) + (i_{gx} * i_{rx} - i_{\beta \beta} * i_{r\beta}) + (i_{gx} * i_{\beta \beta} + i_{rx} * i_{r\beta})] \dots \dots \dots (13)$$

أما معادلة الحركة فهي بالشكل الآتي :

$$\frac{dw_r p}{dt j} = (T_{em} - T_c) \dots \dots \dots (14)$$

حيث أن

J عزم القصور الذاتي .

T_{em} العزم الكهرومغناطيسي.

T_c عزم الحمل.

وكما ذكر فإن تحديد القدرة الفعالة والخيالية في الحالات العابرة تعد مسألة حيوية وتزداد أهميتها مع مرور الزمن ويمكن تحديدها من النموذج الرياضي الممثل للمحرك [2].

المحاكاة و النمذجة

المحاكاة

إن طريقة المحاكاة تؤدي دوراً مهماً في عملية التعليم، فهي تقدم المساعدة للتعلم من خلال بناء نموذج رياضي مشابه للواقع عند تنفيذه على الحاسوب مما يسهل تصميم بناء العديد من النماذج الصعبة، وبذلك يمكن التصور الكامل لما يحصل في العملية التعليمية ولما سينتج عنه من تشغيل النظام الحقيقي وذلك باستخدام الرسوم التخطيطية وقابلية الحركة لتلك الرسوم عند التنفيذ على الحاسوب [1] .

النمذجة

هي تمثيل مفهوماتي أو إجرائي أو فيزيائي أو رياضي لنظام أو جزء من النظام وبشكل يوضح سلوك ذلك النظام حيث يساعد بصيغة ما على حل مشكلة علمية أو حياتية بتبسيط العمليات المعقدة وجعلها أكثر وضوحاً

$$\begin{aligned}\frac{di_{r\alpha}}{dt} &= -\frac{R_r}{L_r} i_{r\alpha} - \frac{M}{L_r} \frac{di_{s\alpha}}{dt} - w_r \left(i_{r\beta} + \frac{M}{L_r} i_{s\beta} \right) \\ \frac{di_{r\beta}}{dt} &= -\frac{R_r}{L_r} i_{r\beta} - \frac{M}{L_r} \frac{di_{s\beta}}{dt} - w_r \left(i_{r\alpha} + \frac{M}{L_r} i_{s\alpha} \right)\end{aligned}\quad \dots\dots\dots(15)$$

تدخل اشارة الدخل والتي هي جهود الثابت في النظام الثلاثي V_{sa} , V_{sb} , V_{sc} حيث يتم تحويلها إلى النظام الثنائي $V_{s\alpha}$, $V_{s\beta}$ لتدخل إلى نموذج المحرك لتتم الاستفادة منها ومن عزم الحمل T_d ضمن النموذج الذي سيعطي في خرجه تيارات الثابت والدوار (ممثلة في نظام المحاور الثنائية) بالإضافة إلى قيم السرعة الميكانيكية والعزم الكهرومغناطيسي للمحرك T_{em} . سيطبق فيما بعد على قيم الجهود والتيارات مجموعة تحويلات معاكسة للحالات السابقة لنحصل في نهاية النموذج على تيارات الثابت والدوار في النظام الثلاثي.

و المخرج التالية :

- تيارات الثابت I_s في نظام المحاور الثلاثية a , b , c

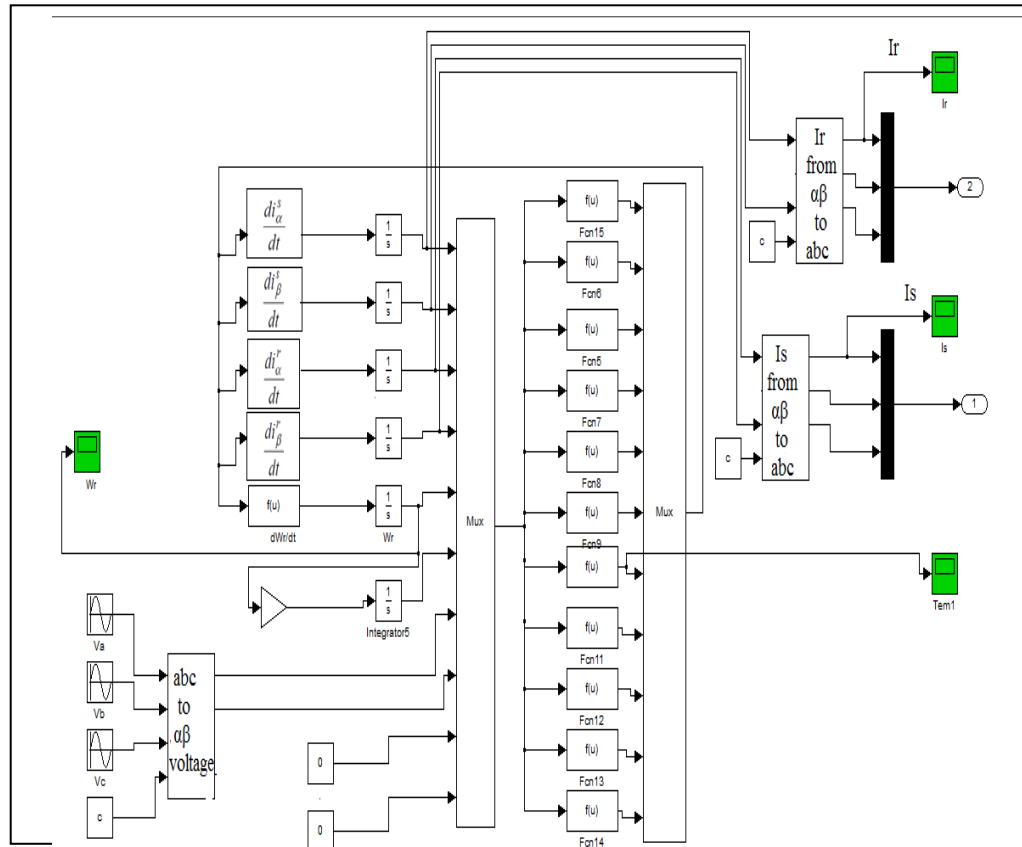
- تيارات الدوار I_r في نظام المحاور الثلاثية a , b , c

- العزم الكهرومغناطيسي للمحرك T_{em}

- السرعة الميكانيكية للمحرك speed

يوضح الشكل (6) البنية الداخلية التفصيلية لوحدة المحرك الحثي ضمن المخطط الرئيسي للنظام، حيث اعتمد في بناء النظام على النموذج الرياضي للمحرك في نظام المحاور الثنائية $(\beta\alpha)$ حيث تم حل المعادلات الكهربائية والميكانيكية التي تمثل تصرف المحرك الحثي. باعادة كتابة المعادلات (12) بالشكل الذي سيتم استخدامها في تمثيل المحرك الحثي وكما في (15):

$$\begin{aligned}\frac{di_{s\alpha}}{dt} &= \frac{1}{L_s} u_{s\alpha} - \frac{R_s}{L_s} i_{s\alpha} - \frac{M}{L_s} \frac{di_{r\alpha}}{dt} \\ \frac{di_{s\beta}}{dt} &= \frac{1}{L_s} u_{s\beta} - \frac{R_s}{L_s} i_{s\beta} - \frac{M}{L_s} \frac{di_{r\beta}}{dt}\end{aligned}$$



شكل (6) المخطط الداخلي لوحدة المحرك الحثي

نلاحظ في حالة بدء المحرك الغير محمل، شكل (7)، بأن سرعة المحرك تستغرق وقت أقصر مما هو عليه في حالة التحميل الكامل للمحرك كما في الشكل (8)، حيث يستغرق المحرك غير المحمل (0.1) ثانيه للوصول إلى حالة الاستقرار، بينما يستغرق المحرك المحمل بالحمل التام (0.33) ثانيه للوصول إلى السرعة المقننة، كما يلاحظ وجود (over shoot) في سرعة المحرك غير المحمل بمقدار (0.86 %)، كذلك فإن قيم التيار في الجزء الثابت و الدوار تبدأ بالتناقص وصولاً إلى حالة الاستقرار، حيث يتبين بأن تيار البدء عندما يكون المحرك محملاً بالحمل التام يكون مساوي لثلاثة أضعاف التيار المقنن تقريباً (275 %)، ففي لحظة البدء يكون الانزلاق مساوياً إلى (1)، عندها يكون تردد تيار الدوار مساوي إلى تردد الثابت، حيث إن تردد تيار الجزء الدوار يبدأ بالتناقص عما كان عليه في لحظة البدء.

إن سبب تناقص تردد تيار الدوار يعود إلى إن الانزلاق قد أصبح قليل القيمة و هذا يعني دوران الدوار بسرعة تقترب من السرعة التزامنية. يبين الشكل (9-أ) تغير سرعة المحرك عند تسليط حمل مفاجئ على المحرك، حيث إن مقدار النقصان في السرعة مساوي (10.6 %) وصاحب هذا التغير في السرعة تغير التيار في كل من الجزء الثابت والجزء الدوار كما مبين في الأشكال (9-ب) و (9-ج) حيث إن تردد الجزء الدوار ازداد بسبب نقصان السرعة. فإن العزم تغيرت قيمته من الصفر تقريباً إلى عزم الحمل كما مبين في الشكل (9-د).

الأشكال (10) و (11) تبين تأثير فصل أحد الأطوار عن المحرك على كل من السرعة، العزم و تيار الجزء الثابت والجزء الدوار في الحالتين (بدون حمل و نصف الحمل) على التوالي. نلاحظ الاضطراب الحاصل في منحنى السرعة في لحظة العطل، حيث تتخفص سرعة المحرك عن السرعة المقننة وبعدها تبدأ بالتذبذب صعوداً ونزولاً. كما تبين إن تيارات الجزء الثابت والدوار يبدأان بالزيادة، إذ أن مقدار الزيادة في تيار الثابت يكون مساوي (1100 %) وذلك عندما يكون المحرك غير محمل، بينما تكون الزيادة في تيار الثابت عندما يكون المحرك محمل بنصف الحمل التام تكون مساوية (125%)، كما نلاحظ إن تردد تيار الجزء الدوار يزداد ازدياداً كبيراً في لحظة العطل، وسبب ذلك إن المجال المغناطيسي في الجزء الساكن أصبح غير دواراً، وبالتالي ازدياد نسبة الفيض المتشاك بين الساكن والدوار، فمن المعلوم إن المجال المغناطيسي للجزء الثابت يكون دواراً بالسرعة التزامية وذلك في حالة تغذية المحرك بثلاثة أطوار تفصل ما بينهما 120 درجة.

مواصفات المحركات المستخدمة

المحرك الصغير

محرك حثي ثلاثي الطور ذو قدره حصانية مساوية (10 hp) أي ما يعادل (7 kw) بفولتية (380 v line to line) وتردد (50 Hz) وأربعة أقطاب [10].

مقاومة الجزء الثابت = 0.7384 أوم

مقاومة الجزء الدوار = 0.7402 أوم

محاثه الجزء الثابت = 3.045 ملي هنري

محاثه الجزء الدوار = 3.045 ملي هنري

المحاثه التبادلية = 124 ملي هنري

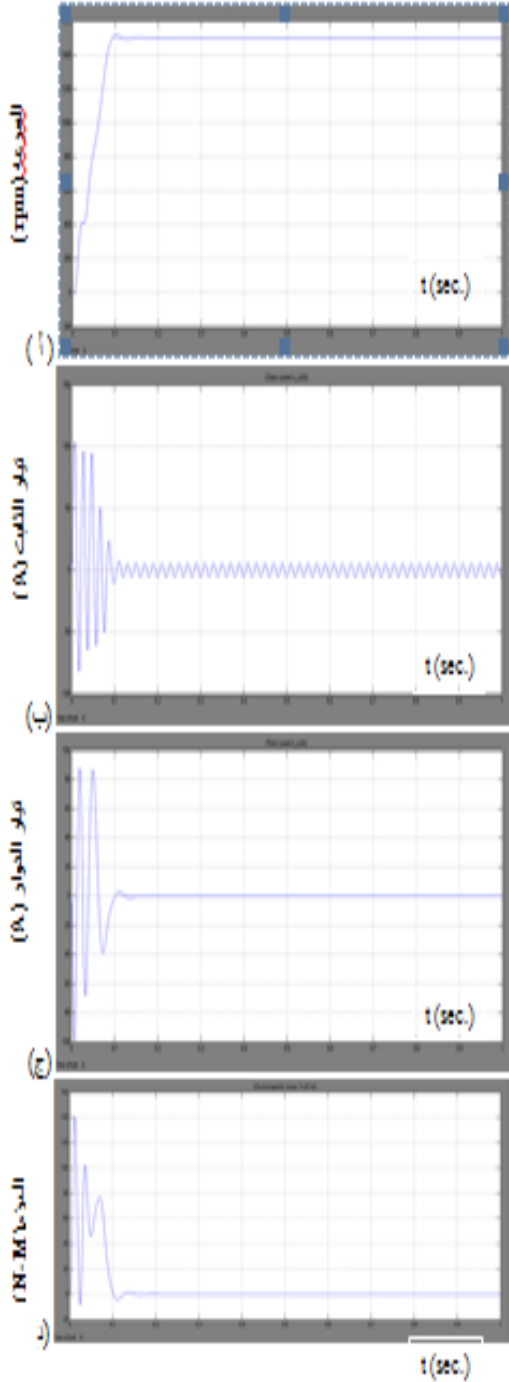
عزم القصور الذاتي = 0.0343 kg. m²

نتائج التمثيل بالحاسبة و مناقشتها

تم تعريض المحرك لسبعة ظروف مختلفة وملاحظة تصرف متغيرات المحرك من سرعة وعزم وتيار، هذه الظروف تشمل:

- 1- بدء المحرك
 - 2- التحميل المفاجئ للمحرك
 - 3- فصل احد الأطوار عن المحرك
 - 4- الزيادة المفاجئة للفولتية
 - 5- الهبوط المفاجئ للفولتية
 - 6- تبديل الأطوار
 - 7- تأثير البرق
- * في الحالة الأولى سيبدأ المحرك بالعمل بدون حمل، بعدها سيكون الحمل المطبق على المحرك لحظة البدء مساوي للحمل التام للمحرك (full load).
- * في الحالة الثانية سيكون الحمل المفاجئ على المحرك مساوي للحمل التام للمحرك (full load).
- * في الحالة الثالثة سيتم محاكاة المحرك بثلاثة أحمال مختلفة، حيث يتم فصل احد الأطوار عندما يكون المحرك: أ- غير محمل، ب- محمل بنصف الحمل التام، ج- محمل بالحمل التام
- * في الحالة الرابعة سترتفع الفولتية من (220v) إلى (280v) طور (27 %) بوجود الحمل التام.
- * في الحالة الخامسة ستنخفض الفولتية الطور من (220v) إلى (180v) (18 %) بوجود الحمل التام.
- * في الحالة السادسة سيتم تبديل الأطوار بعدم وجود حمل على المحرك.
- * في الحالة السابعة سيتم محاكاة المحرك في حالة ضرب البرق لأحد أطوار خط النقل، حيث تعتبر هذه الحالة إحدى الحالات العابرة التي يتعرض لها الكثير من المحركات أثناء العمل، إذ تم محاكاة المحرك بفولتية تصل إلى (3000v) ولمدة (2 ms).
- الأشكال أدناه تبين تصرف المحرك (10hp) نتيجة تعريضه للظروف المذكورة أعلاه.

العزم المطلوب لتدوير المحرك من الصفر إلى السرعة المقننة كبيراً جداً، مما يزيد تيار البدء المسحوب من الشبكة وبالتالي إمكانية تلف لفائف المحرك الكبير عند توصيله مباشرة إلى الشبكة، والعكس تماماً في التحميل المفاجئ للمحركين أثناء العمل كما مبين في الشكلين (9) و (18).



شكل (7) : منحنى بدء المحرك الصغير بعدم وجود حمل (no load)

الشكل (12) يبين تصرف المحرك في حالة فصل أحد الأطوار المغذية للمحرك و هو محمل بالحمل التام، حيث يبين منحنى السرعة انهيار المحرك وعدم استطاعته المقاومة والبقاء في نطاق العمل.

الأشكال (13) و (14) تبين تصرف المحرك في حالة زيادة ونقصان فولتية التغذية، حيث يلاحظ في حالة زيادة الفولتية تزداد السرعة ويقل تيار الجزء الثابت، بينما في حالة نقصان فولتية التغذية تقل سرعة المحرك عن السرعة المقننة ويزداد تيار الجزء الثابت بينما تيار الجزء الدوار يزداد تردده.

الشكل (15) يبين استجابة المحرك عند التبديل بين الأطوار، حيث يتبين ان تردد تيار الدوار يتضاعف في لحظة الإبدال، أي يصبح ضعف تردد المصدر وذلك لأن المجال المغناطيسي في الجزء الثابت يدور بالسرعة التزامية بعكس اتجاه دوران الجزء الدوار.

الشكل (16) يبين استجابة المحرك عند ضرب البرق لأحد أطوار خط النقل عندما يكون محملاً بالحمل التام، حيث تبين المنحنيات ان المحرك يبدأ بالانهيار بعد زوال تأثير البرق ومن ثم يبدأ بمواصلة الدوران .

سيتم اختبار محرك كبير حسب المواصفات المذكورة أدناه وملاحظة فرق الاستجابة بين المحركين (الصغير والكبير)، إذ سيتم محاكاة المحرك الكبير بفحص البدء والتحميل المفاجئ.

مواصفات المحرك الكبير

محرك حثي ثلاثي الطور ذو قدره حصانيه (215 hp أي ما يعادل (160 kw) بفولتية (380v line to line) وتردد (50 hz) وأربعة أقطاب [10].

مقاومة الجزء الثابت = 0.01379 أوم

مقاومة الجزء الدوار = 0.007728 أوم

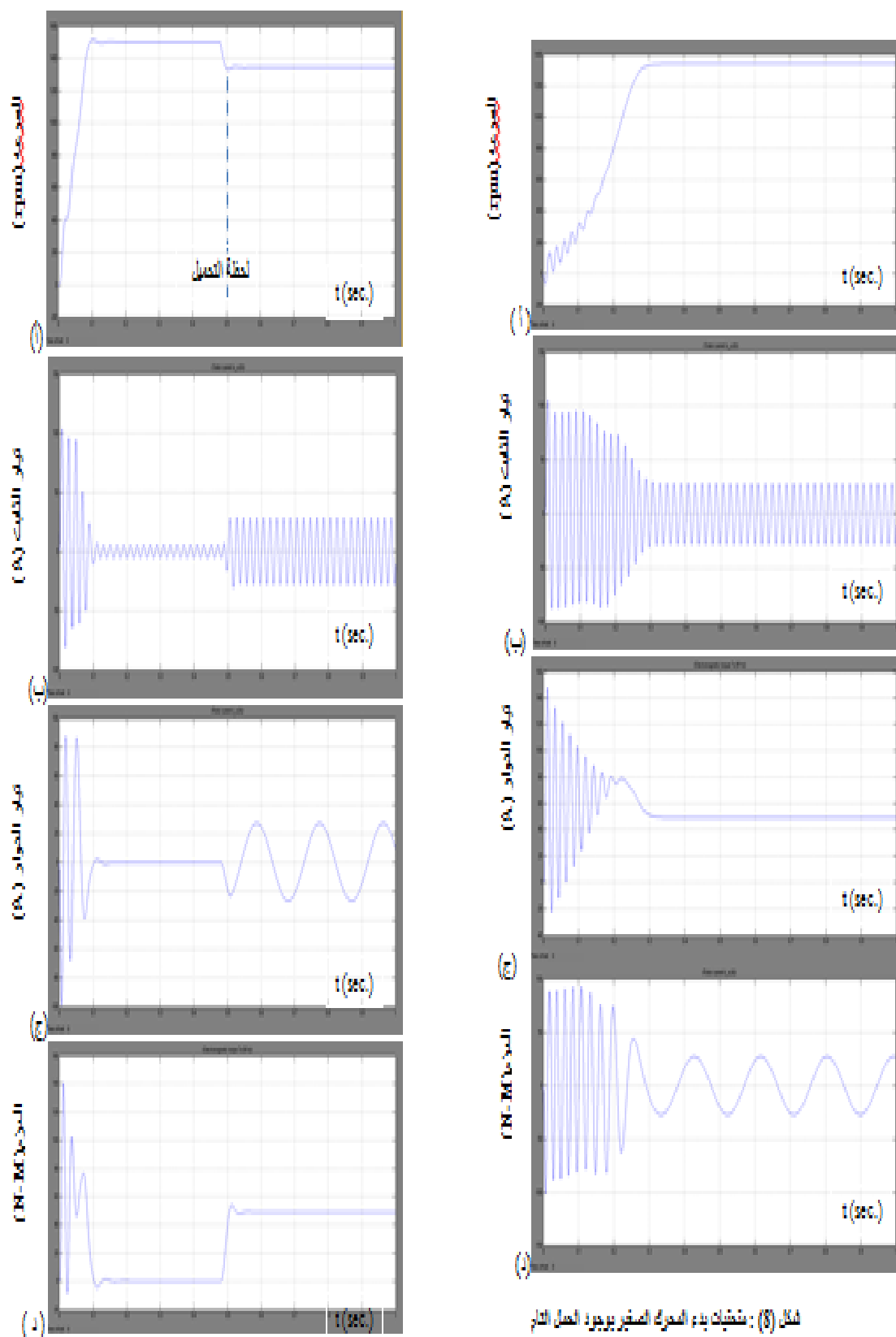
محاثة الجزء الثابت = 0.152 ملي هنري

محاثة الجزء الدوار = 0.152 ملي هنري

المحاثة التبادلية = 7.69 ملي هنري

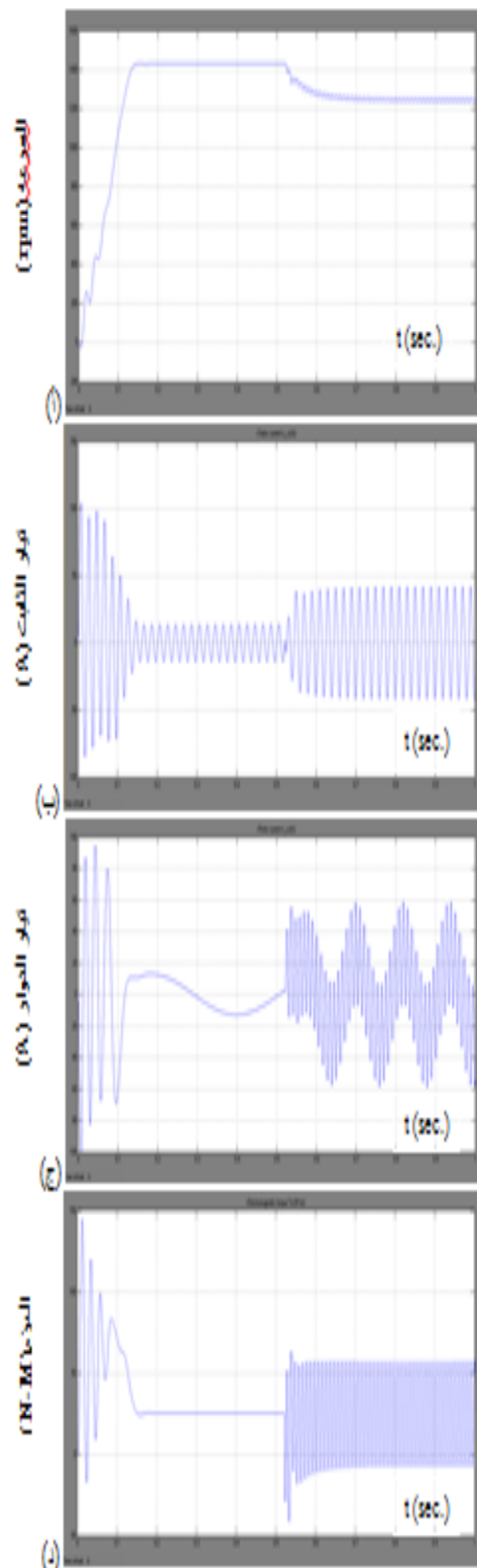
عزم القصور الذاتي = 2.9 kg m^2

الشكل (17) يبين منحنيات المحرك (215 hp) بعدم وجود حمل مطبق على محور الدوران، حيث ان المحرك يدور بسرعة تقترب من السرعة التزامية وان العزم يقترب من الصفر. و بمقارنة الشكل (7) مع الشكل (17) يتبين بأن المحرك الصغير يبدأ من السرعة صفر وينتهي بالسرعة المقننة دون أن يعبر السرعة التزامية، أي عدم وجود (over shoot)، بينما سرعة المحرك الكبير تبدأ من الصفر وتنتهي بالسرعة المقننة مع ظهور (over shoot) مع زمن استقرار يصل إلى خمسة أضعاف زمن استقرار المحرك الصغير. إن السبب الرئيسي لهذا التصرف هو عزم القصور الذاتي التابع للمحرك الكبير، حيث إن كتلته الكبيرة تجعل من

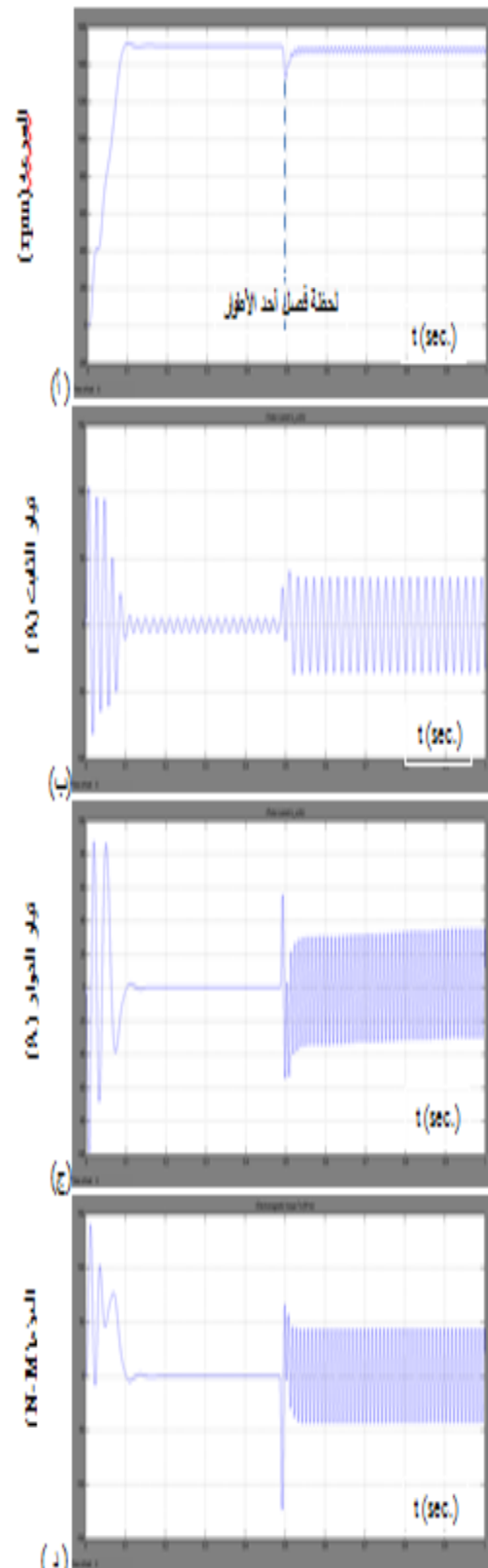


شكل (8) : استجابة بدء الحركة الصغير بوجود الحمل الثام

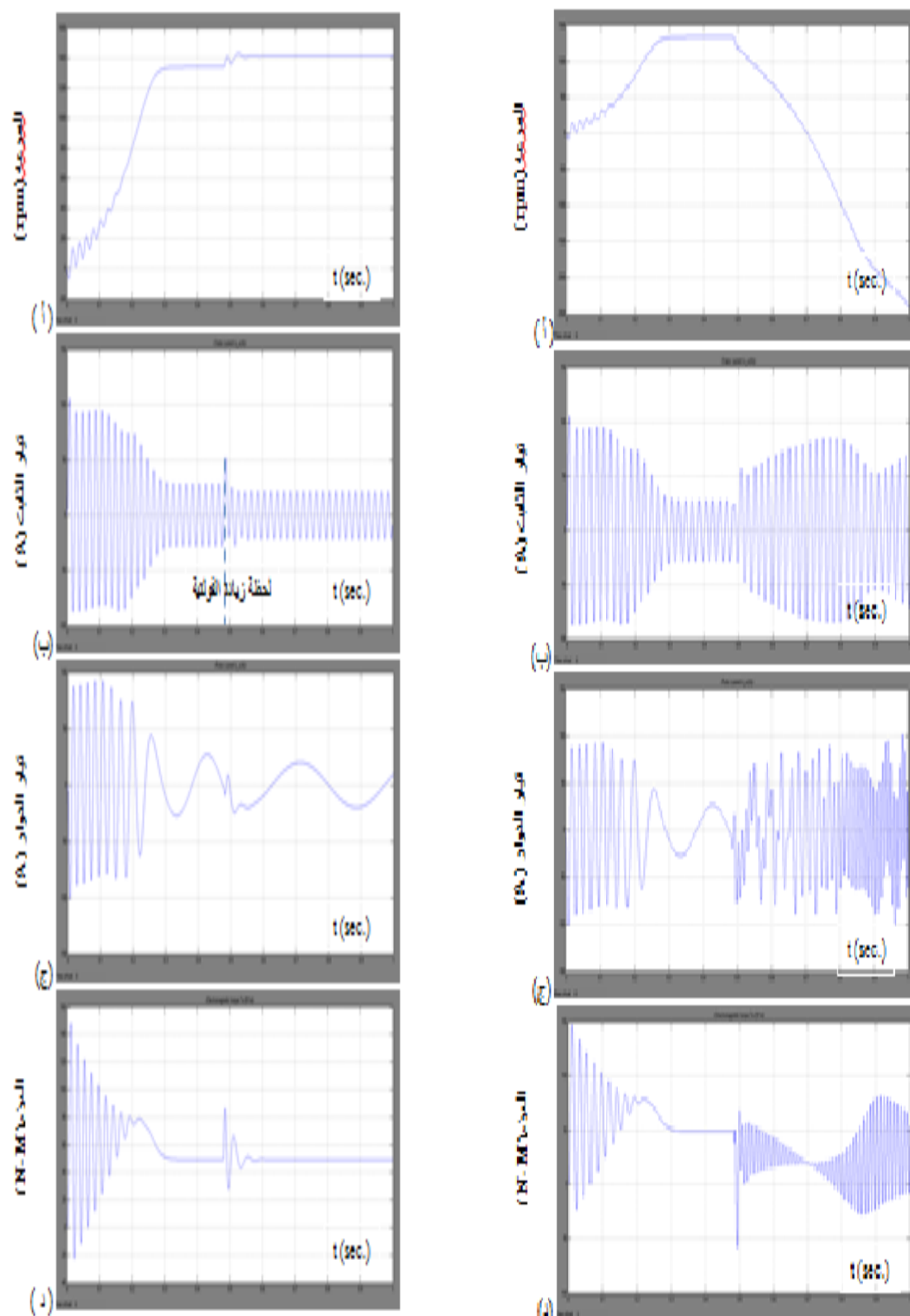
شكل (9) : استجابة التحول إلى الحركة الصغير



شكل (11) : منحنيات فصل أحد الأطوار عن المحرك الصغير بوجود نصف الحمل الدائم

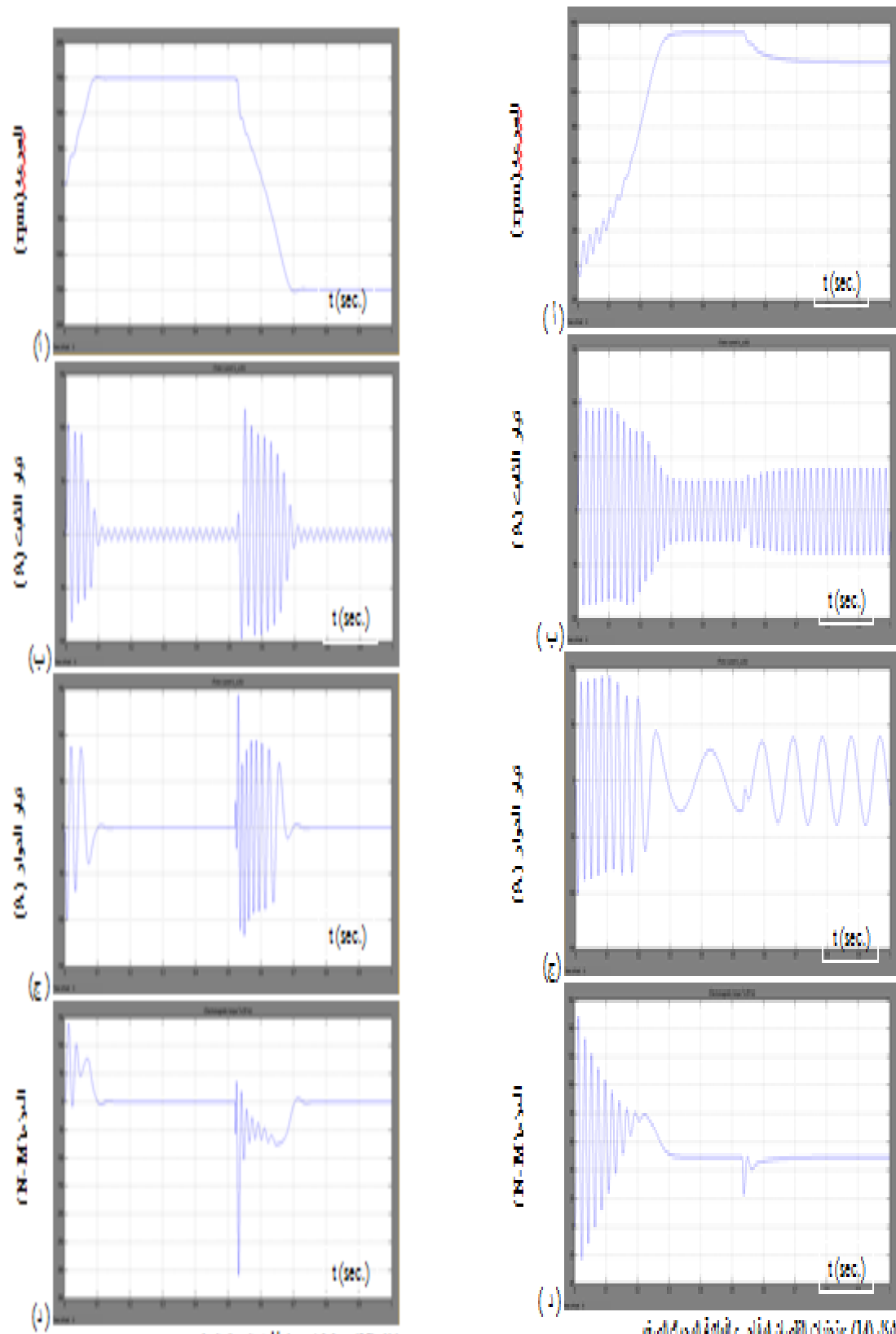


شكل (10) : منحنيات فصل أحد الأطوار عن المحرك الصغير بعدم وجود حمل



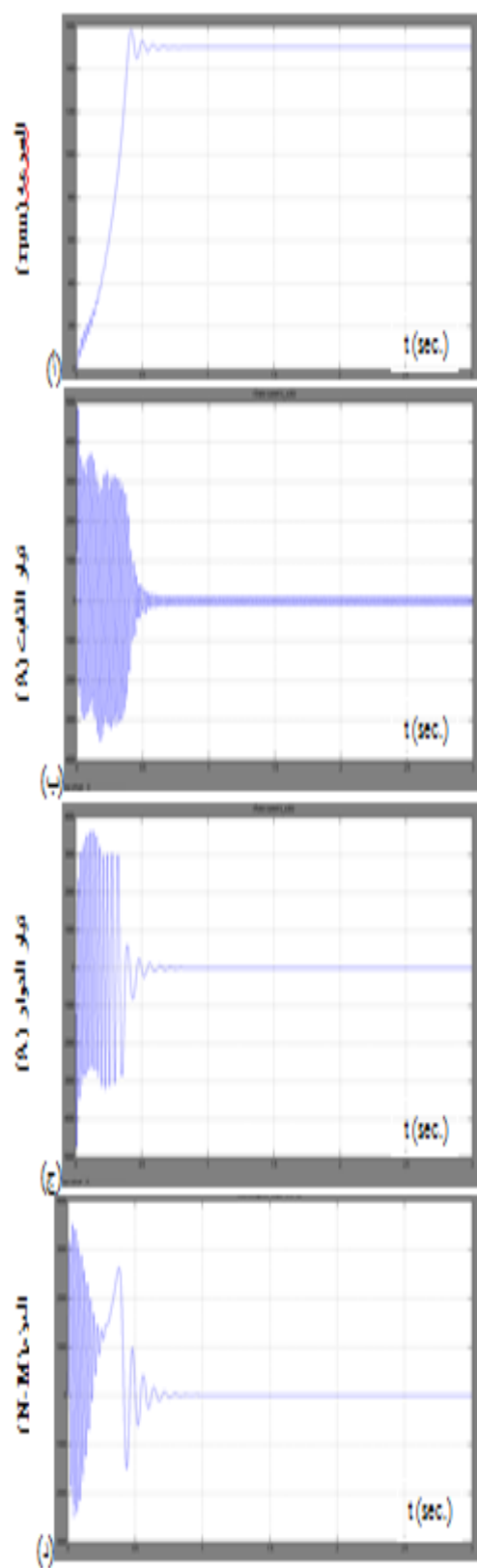
شكل (12) : منحنيات فصل أحد الأنوار عن المحرك الصغير بوجود الحمل الثام

شكل (13) : منحنيات لزيادة المفاجئة لتوليد المحرك الصغير

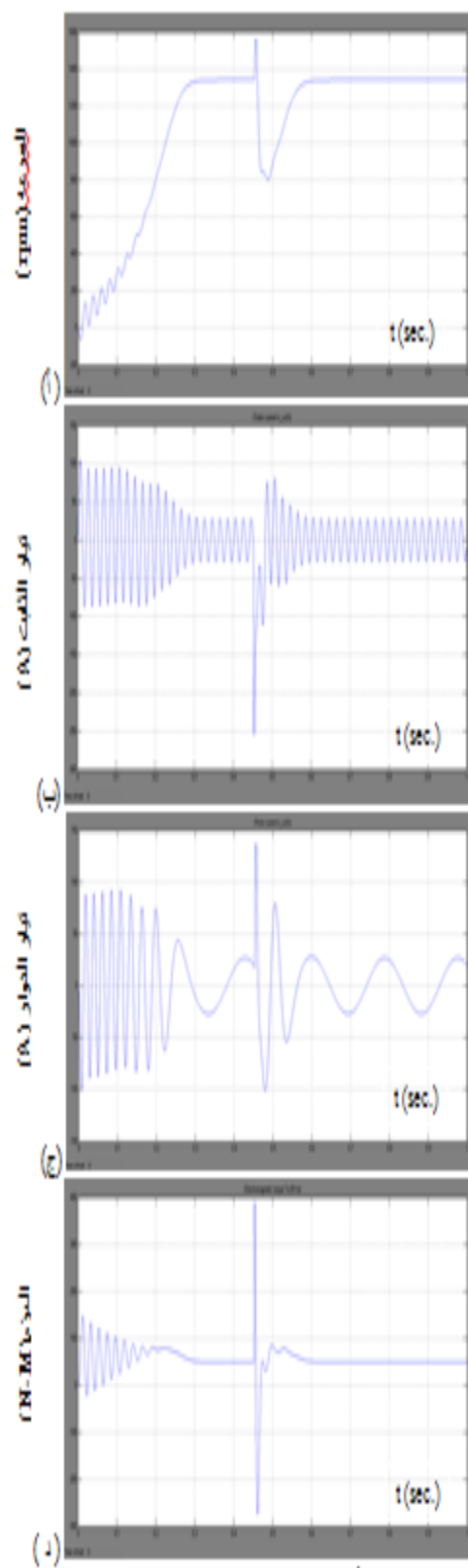


شكل (15) : منحنيات اهتزاز لمحرك صغير

شكل (14) : منحنيات الاهتزاز لمحرك كبير



شكل (17) : منحنيات بدء المحرك الكبير بعد وجود حمل (no load)



شكل (16) : منحنيات تأثير التردد

الاستنتاجات

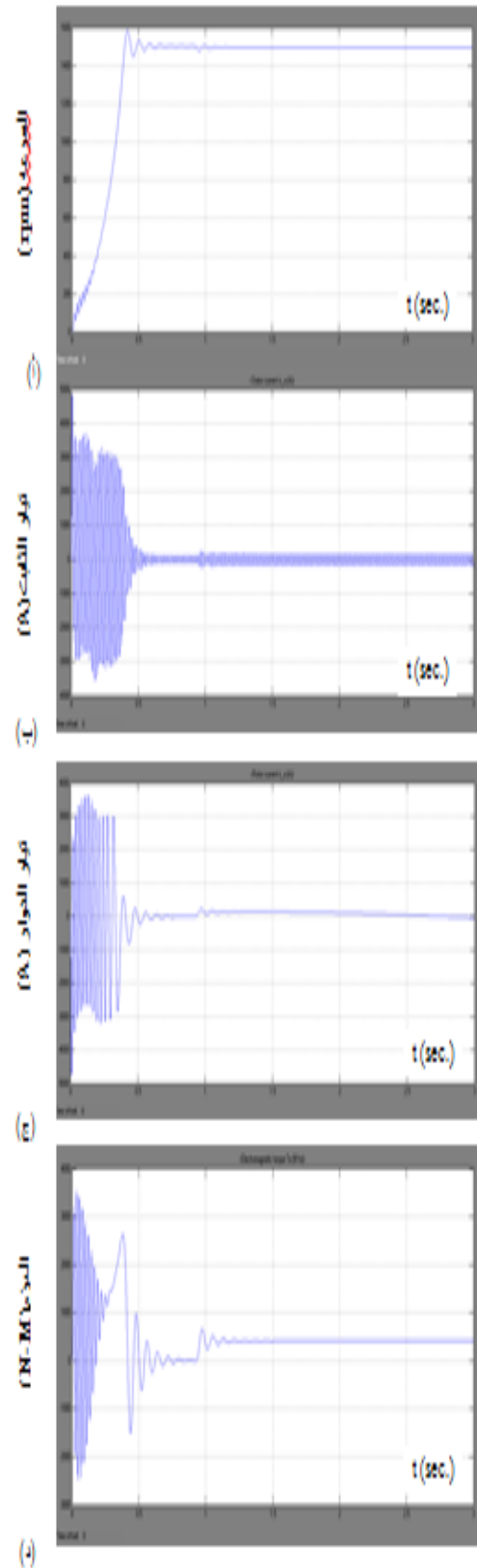
تم في هذا البحث توظيف تقنية برمجية حديثة هي برامجات Matlab / Simulink من أجل تمثيل المحرك الحثي على الحاسبة في حالاته التشغيلية المختلفة. لقد أظهرت النتائج المستحصلة من التمثيل بالحاسبة كفاءة ومقدرة هذه التقنية في تمثيل المحرك بالاعتماد على نظرية المكاين الكهربائية . استخدم في حل المعادلات التفاضلية غير الخطية للمحرك عند العمل في السرعة المتغيرة طريقه رانج كوتا الرابعة –Rung Method Kutta Forth Order للتحويل العددي وبالإمكان استخدام أي طريقه أخرى بسهولة دون تغيير في البرنامج الأصلي والتي تعد من الخصائص المهمة لهذه التقنية تميزها عن البرمجيات الأخرى.

تمثيل المحرك في المحاور الثنائية ($\alpha\beta$) سوف يلغي الحدود المثلثية الموجودة في مصفوفة المحاتات التبادلية بين الثابت والدوار وبالتالي تكون ثوابت حدود المعادلات التفاضلية عبارة عن قيم مع الزمن، والحل الرياضي لها ممكن لبساطة التعامل مع المعادلات من ناحية زمن التحليل وحجم الذاكرة.

تعطي الدراسة طريقة استخدام صحيحة للمحرك الحثي في الميدان التطبيقي من خلال بحث ما يتعرض له المحرك من ظروف عمل مختلفة طبيعية وغير طبيعية لحالته المستقرة والعبارة. كما تم في هذه الدراسة إجراء مقارنة بين محركين 10 HP و 215 HP وتبين إن سلوك المحرك الصغير في الفترة العبارة عند البدء أفضل من المحرك الكبير والعكس تماماً في التحميل المفاجئ للمحركين أثناء العمل.

المصادر

- 1- السهلاني، حياة فهد ذهب حمدان، "تصميم مختبر افتراضي لاختبار المكاين الحثية ثلاثية الطور"، مجلة الهندسة والتكنولوجيا، الجامعة التكنولوجية، 2005.
- 2- بوغوص، هاكوب و الجازي، علي، "دراسة الحالات العبارة في المحركات التحريضية ثلاثية الطور عند تغذيتها بتوترات غير جيبيه"، جامعة دمشق للعلوم الهندسية، 2005 .
- 3- كعدان، أسعد و ناجي، محمد، "التحكم بالمحركات التحريضية باستخدام متحكم الإشارة الرقمية"، جامعة حلب – كلية الهندسة الكهربائية والإلكترونية، 2010
- 4- Mcculluch, M. D., "The Effect of Voltage Dips on Induction Motor", Electric Power Research Group, University of Witwaterand – department of Electrical Engineering
- 5-Zuckerberger, A. and Alexandrovitz, A., "Modeling and Simulation of Unsymmetrical Supplied Three Phase Induction Motor" ETEP ,Vol. 6, No. 1, 1996.



شكل (١٨) : تمثيل بدء المحرك الكبير عند تسلط حمل مفاجئ

10- MATLAB R., "Dynamic System Simulation for Matlab", H manual, Math Works , Inc., 2010.

6- paul. c. Krause, "Analysis of Electric Machinery", McGraw hill, New York, 1986.

7- Kopilov, I. P. "Mathematical Simulation of Electrical Machines", VishayaShkola 1987 ,p.248

8- Al-Hajzber, S. M. M., "Modeling and Computer Simulation of a Current Source Inverter Fed Synchronous Motor Drive System", M.Sc Thesis, University of Mosul, 2000.

9- Chee Mun Ong, "H Dynamic Simulation of Electric Machines", Using Matlab/ Simulink Book, 1998.