

## نودج فعال للمحرك الحثي باستخدام PSPICE

خالء بن ابراهيم الءوئش

كلية الهندسة، جامعة الملك سعود، الرياض، المملكة العربية السعودية

المستخلص: يعرض هذا البحث طريقة لوضع نموذج فعال للمحرك الحثي حيث تم تكوين هذا النموذج من المعادلات التفاضلية التي تحكم الحالة العابرة لهذا المحرك. و يتكون النموذج من دوائر مكافئة قابلة للاستخدام مع كثير من حزم تحليل الدوائر الكهربائية. و قد تم استخدام برنامج PSPICE في هذا البحث لإجراء محاكاة أداء المحرك الحثي، كما تمت مقارنة نتائج المحاكاة بنتائج مخبرية حيث أعطت توافقاً مقبولاً.

### ١. مقدمة

عند استخدام أي من محركات التيار المتردد سواءً المحرك الحثي أو المحرك المتزامن أو محرك الممانعة المغناطيسية في نظام للتحريك حيث يتم التحكم بسرعة المحرك فإن المحرك يكون جزءاً داخل دائرة تغذية راجعة و بذلك فإن السلوك الفعال له لا بد أن يؤخذ في الاعتبار. و لدراسة الحالة العابرة للمحرك نستخدم عادةً طريقة تحويل متغيرات الأوجه إلى ما يكافئها في محورين متعامدين (d-q) [١-٣].

و مما يساعد في هذا المجال استخدام برامج تحليل الدوائر الكهربائية حيث تتوفر فيها نماذج للكثير من المكونات. و من هذه البرامج SPICE و EMTP اللذان يعتبران أقرب للإكمال. يمتاز EMTP باحتوائه على العديد من النماذج للمحركات الكهربائية إضافة إلى المكونات الكهربائية مع القدرة على محاكاة سلوك دوائر التحكم المربوطة بدائرة قدرة. إلا أنه لا يحتوي إلا على عدداً محدوداً من نماذج مكونات الكرونيات الإشارة. و في المقابل فإن SPICE يحتوي العديد من تلك المكونات الإلكترونية [٤]. و في الوقت الحاضر لا يحتوي SPICE على نماذج للمحركات الكهربائية. و فيما يتعلق بالمحرك الحثي وُجِدَت بعض الدراسات لتمثيل المحرك الحثي في حالة الاستقرار [٥] و كذلك تأثير التشبع على أداء المحرك [٦]

و يمكن التعبير عن النموذج الفعال للمحرك الحثي بإطار مرجعي إما ثابت أو مثبت على الدوار (rotor) أو أن له سرعة التزامن. أما في حالة المحرك المتزامن و محرك الممانعة المغناطيسية فإن الإطار المرجعي المناسب هو المثبت على الدوار لأنه ينتج عنه استبدال الملفات المتغيرة مع الزمن بملفات ثابتة القيم.

و في هذا البحث عُرض النموذج النظري لتلك المحركات و تم بناءً عليه وضع دوائر مكافئة يمكن استخدامها محاكاة تلك المحركات بواسطة أي من حزم تحليل الدوائر الكهربائية المشهورة. و قد تم استخدام برنامج PSPICE محاكاة السلوك الفعال لتلك المحركات كما تمت مقارنة نتائج المحاكاة بنتائج مخبرية.

## ٢. نموذج نظري للمحرك الحثي

يمكن وضع نموذج للمحرك الحثي باستخدام طريقة d-q سواء بإطار مرجعي ثابت أو دوار. والعلاقة بين

متغيرات d-q و a-b-c يمكن تحديدها باستخدام تحويل الإطار المرجعي [٢] كما يلي:

$$(١) \quad \begin{bmatrix} f_{as} \\ f_{bs} \\ f_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 1 \\ \cos(\theta-120^\circ) & \sin(\theta-120^\circ) & 1 \\ \cos(\theta+120^\circ) & \sin(\theta+120^\circ) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{qs} \\ f_{ds} \\ f_{0s} \end{bmatrix}$$

حيث ان المركبة ذات التتابع الصفري ( $f_{0s}$ ) تساوي صفراً في حالة المحرك المتوازن الموصل على شكل دلتا او

نجمة معزولة نقطة التعادل ، لذا يمكن اعادة كتابة المعادلة رقم (١) بالصورة التالية:

$$(٢) \quad \begin{bmatrix} f_{qs} \\ f_{ds} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta-120^\circ) & \cos(\theta+120^\circ) \\ \sin\theta & \sin(\theta-120^\circ) & \sin(\theta+120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{as} \\ f_{bs} \\ f_{cs} \end{bmatrix}$$

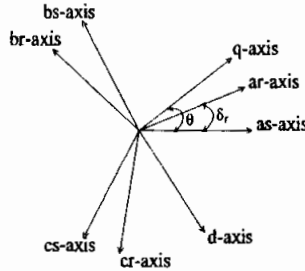
وحيث  $\theta$  هي الزاوية بين إحداثي as وإحداثي q كما هو موضح في الشكل رقم (١)

مع ملاحظة ان التحليل المستنتج في هذا البحث قد تم الوصول اليه بافتراض مايلي :

١- عدم تشبع الدائرة المغناطيسية.

٢- اهمال التوافقيات الزمنية والفراغية في المحرك.

٣- تماثل واتزان ملفات اطوار الآلة.



شكل ١: إحداثيات المحرك الحثي

المعادلات التي تحكم النموذج الفعّال للمحرك الحثي يمكن التعبير عنها بما يلي

$$(٣) \quad \begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{qr} \\ v_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & \omega L_s & pL_m & \omega L_m \\ -\omega L_s & R_s + pL_s & -\omega L_m & pL_m \\ pL_m & (\omega - \omega_r)L_m & R_r + pL_r & (\omega - \omega_r)L_r \\ -(\omega - \omega_r)L_m & pL_m & -(\omega - \omega_r)L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix}$$

$$(٤) \quad \omega_r = \frac{d\delta_r}{dt}$$

$$(٥) \quad \omega = \frac{d\theta}{dt}$$

حيث  $L_r = L_{lr} + L_m$  و  $L_s = L_{ls} + L_m$

أما العزم الناتج فيمكن التعبير عنه بما يلي

$$(٦) \quad T_e = \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr})$$

حيث P هي عدد الأقطاب

كما أن العلاقة بين السرعة و العزم هي

$$(7) \quad T_e - T_L = \frac{J}{P/2} \frac{d\omega_r}{dt} + \frac{B}{P/2} \omega_r$$

حيث  $\omega_r$  هي سرعة دوران الدوار (rotor)

J هو عزم القصور

B هو معامل الاحتكاك

$T_L$  هو عزم الحمل الميكانيكي المدار

١-٢ نموذج ذو إطار مرجعي ثابت  $\omega=0$

في حالة الإطار المرجعي الثابت يمكن إختيار  $\theta=0$  و بذلك تصبح الجهود المكافئة في d-q

$$(8) \quad v_{qs}^s = \frac{2}{3} v_{as} - \frac{1}{3} v_{bs} - \frac{1}{3} v_{cs}$$

$$(9) \quad v_{ds}^s = -\frac{1}{\sqrt{3}} v_{bs} + \frac{1}{\sqrt{3}} v_{cs}$$

و هذه العلاقات صحيحة سواء كان الجهد متوازناً أو غير متوازن أو كان جيئياً أو غير جيئى.

كما أن التيار المعبر عنه ب d-q يمكن تحويله إلى a-b-c كالتالي

$$(10) \quad i_a = i_{qs}^s$$

$$(11) \quad i_b = -\frac{1}{2} i_{qs}^s - \frac{\sqrt{3}}{2} i_{ds}^s$$

$$(12) \quad i_c = -\frac{1}{2} i_{qs}^s + \frac{\sqrt{3}}{2} i_{ds}^s$$

بناءً على ما سبق يمكن رسم دوائر مكافئة ذات إطار مرجعي ثابت للمحرك الخثى كما هو مبين في الشكل

رقم (٢). و كما هو مبين فإن تيارات الدخل قد عُبر عنها بمصادر جهد محكمة بتيار كما أن جهد  $v_{qs}^s$  و

$v_{ds}^s$  قد عُبر عنها بمصادر جهد محكمة بجهد. كما أن العزم الكهروميكانيكي قد عُبر عنه بمصدري جهد

محكومين بتيار و عن عزم الحمل الميكانيكي بمصدر جهد أما السرعة فإن يمثلها التيار ( $i_{\omega}$ ) و عزم القصور عُبر عنه

بالملف LJ حيث

$$(13) \quad L_J = \frac{J}{(P/2)}$$

$$(14) \quad R_B = \frac{B}{(P/2)}$$

٢-٢ نموذج ذو إطار مرجعي تزامني الدوران  $\omega=\omega_e$

يمكن التعبير عن الجهد في إطار مرجعي تزامني الدوران كما يلي

$$(15) \quad v_{qs}^e = \frac{2}{3} (v_{as} \cos \omega_e t + v_{bs} \cos(\omega_e t - 120^\circ) + v_{cs} \cos(\omega_e t + 120^\circ))$$

$$(16) \quad v_{ds}^e = \frac{2}{3} (v_{as} \sin \omega_e t + v_{bs} \sin(\omega_e t - 120^\circ) + v_{cs} \sin(\omega_e t + 120^\circ))$$

كما أن التيارات في هذه الحالة

$$(17) \quad i_a = i_{qs}^e \cos \omega_e t + i_{ds}^e \sin \omega_e t$$

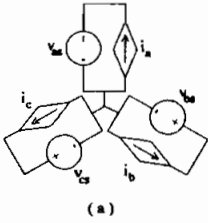
(١٨)

$$i_b = i_{qs}^e \cos(\omega_e t - 120^\circ) + i_{ds}^e \sin(\omega_e t - 120^\circ)$$

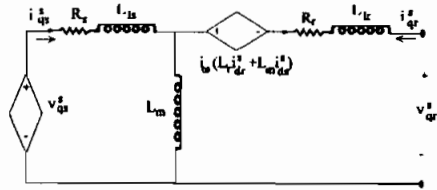
(١٩)

$$i_c = i_{qs}^e \cos(\omega_e t + 120^\circ) + i_{ds}^e \sin(\omega_e t + 120^\circ)$$

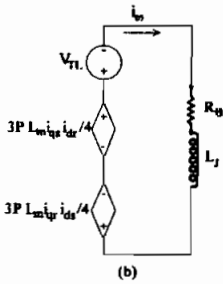
و بناءً على هذه العلاقات يمكن رسم الدوائر المكافئة المبينة بالشكل رقم (٣)، و يلاحظ إضافة مصدري جهد كلي منهم ثلاثي الطور متوازن و ذلك لاستخدامهما في التحويل.



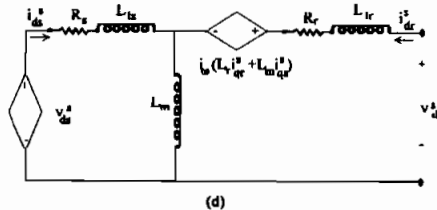
(a)



(c)



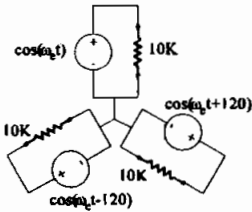
(b)



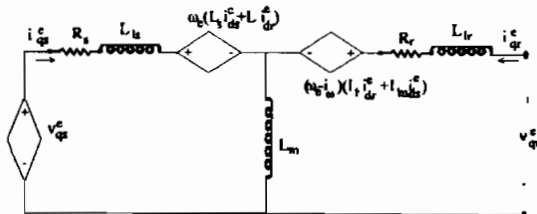
(d)

شكل ٢: الدوائر المكافئة ذات إطار مرجعي ثابت (a) جهد الدخل ثلاثي الطور (b) العزم و السرعة (c) دائرة إحداثي q

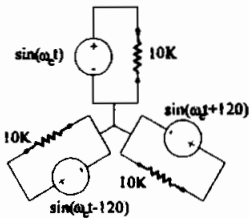
(d) دائرة إحداثي d



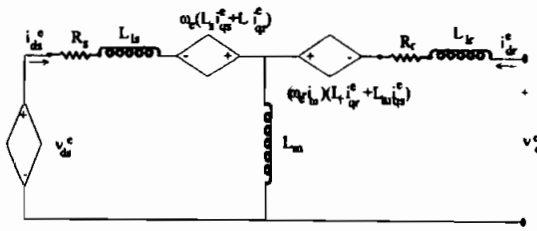
(a)



(b)



(a)



(c)

شكل ٣: الدوائر المكافئة للنموذج ذو الإطار المرجعي المتزامن (a) مصدري جهد ثلاثي الطور

(b) دائرة إحداثي q (c) دائرة إحداثي d

### ٣. نتائج المحاكاة الفعالة للمحرك الحثي و النتائج المخبرية

يمكن إجراء المحاكاة الفعالة للدوائر المبينة في الشكلين (٢ و ٣) باستخدام أي من الحزم البرمجية لتحليل الدوائر الكهربائية. وقد تم استخدام PSPICE لفرض المحاكاة الفعالة في هذا البحث. ولتأكيد نتائج المحاكاة تم أخذ نتائج مخبرية و يعطي الجدول رقم (١) خصائص هذا المحرك و متغيراته التي تم قياسها. يبين الشكل رقم (٤) نتائج المحاكاة باستخدام متغيرات الإطار المرجعي الثابت حيث يبين الحالة العابرة (transient) بعد تسليط جهد متوازن يساوي القيمة المقدرة (rated) على المحرك الغير مُحَمَّل. و بعد وصول المحرك إلى سرعته القصوى حُمِّل المحرك بحمل يساوي ٨٠٪ من العزم المُقدَّر. و بعد استقرار المحرك يتم رفع جهد الدخل بمقدار ٢٠٪ و يلي ذلك رفع الحمل الميكانيكي.

جدول ١: بيانات المحرك المستخدم.

$\Delta-Y$ 220/380 V
5/2.9 A
1.0 KW, PF=0.71, 1700 rpm, 60 Hz
$R_s=5.63 \Omega$ , $R_r=3.882 \Omega$
$L_m=0.2263 H$ , $L_{ls}=0.03188 H$ , $L_{lr}=0.03188 H$
$J=0.018122 \text{ Kg/m}^2$

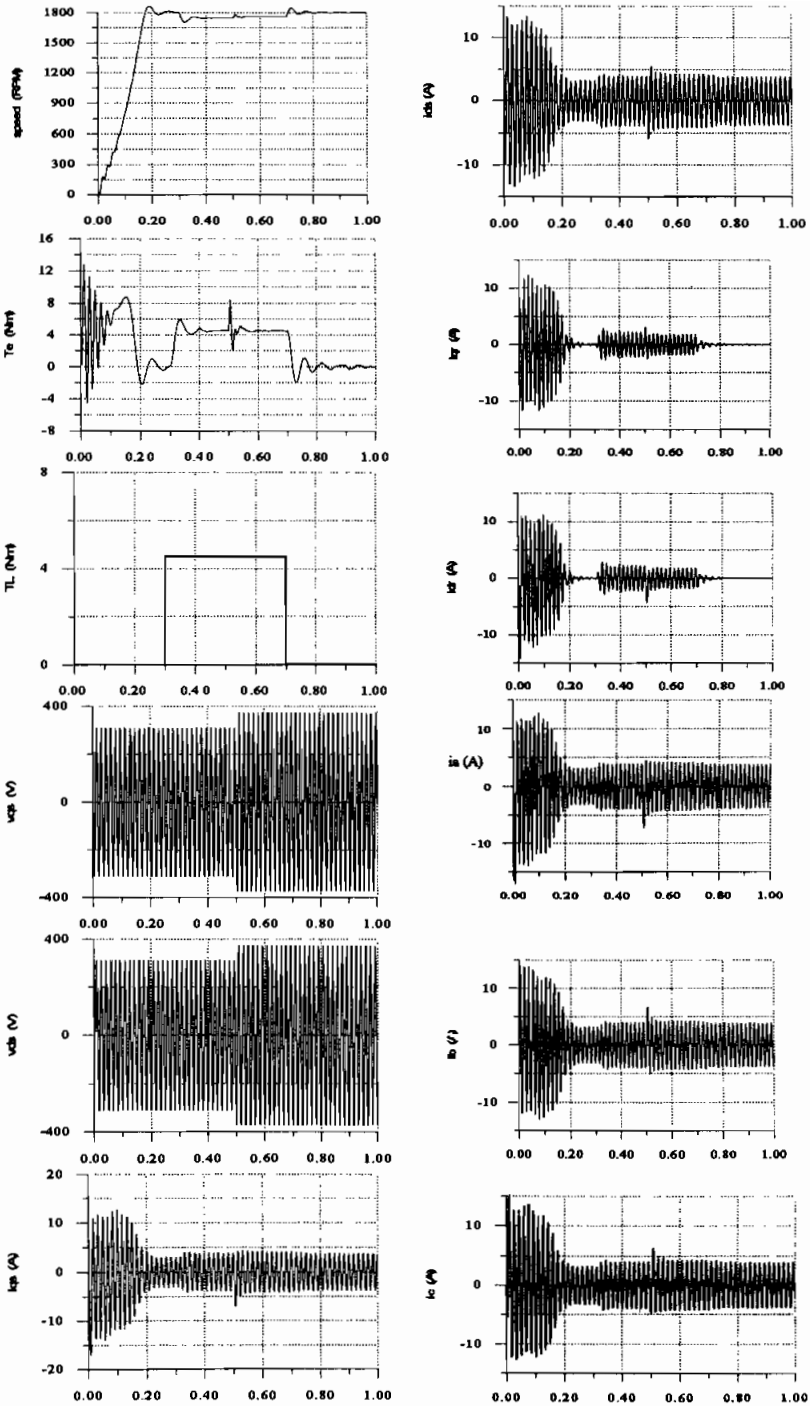
باستخدام النموذج ذو الإطار المرجعي الدوار التزامني لمحاكاة المحرك تحت نفس الظروف السابقة أُعطيت النتائج المبينة بالشكل رقم (٥) و يلاحظ أن الجهد ذو قيم تيار مستمر كما أن التيار يصبح مستمراً عند وصول المحرك إلى وضع الاستقرار و هذا ناتج عن استخدام الإطار المرجعي التزامني. و من الملاحظ أن وقت تنفيذ البرنامج في حالة الإطار التزامني أقصر بكثير منه في حالة الإطار الثابت حيث استغرق الأول ٢٦ ث بينما الثاني ٩٠ ث باستخدام حاسوب 486 DX2-66. و السبب في ذلك يعود إلى أن المتغيرات في حالة الإطار التزامني أبسط مما يعطي إمكانية لأن تكون سعة الخطوات أكبر.

و للتأكد من صحة نتائج المحاكاة تم إجراء بعض القياسات المخبرية على المحرك حيث يبين الشكل رقم (٦) خواص التسارع الحرّ (بلون أي حمل) للمحرك عند تغذيته بجهد = ٣٨٠ف، و يلاحظ قرب نتائج المحاكاة من النتائج المخبرية مما يعطي ثقة بأسلوب المحاكاة المتبع.

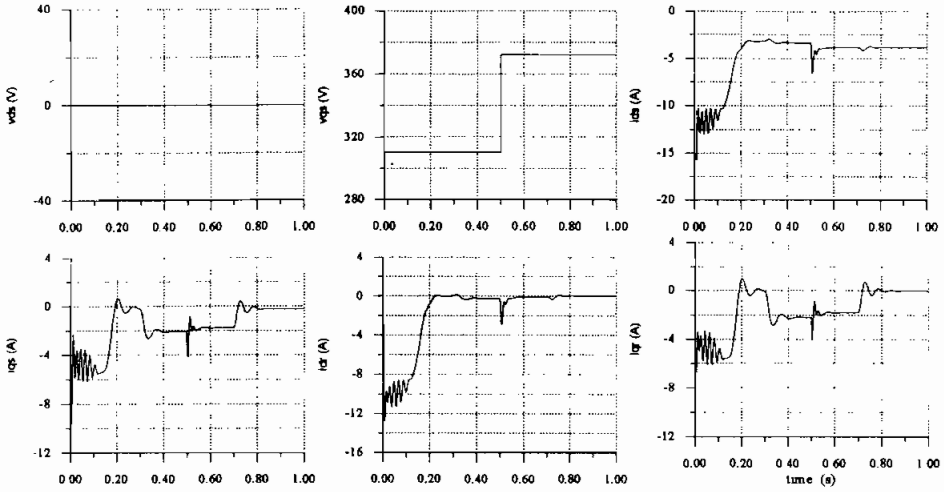
### ٤. الخلاصة

عرضت هذه الورقة طريقة لوضع نموذج للمحرك الحثي. ذلك النموذج يمكن أن يكون ذا إطار مرجعي ثابت أو تزامني. و قد عرضت دوائر مكافئة للمحرك قابلة للاستخدام مع كثير من الحزم البرمجية المستخدمة لتحليل الدوائر الكهربائية و قد استخدم برنامج PSPICE لإجراء محاكاة لأداء محرك ثلاثي الطور و تمت مقارنة نتائج المحاكاة مع نتائج مخبرية أجريت على ذات المحرك و كان في التوافق بين تلك النتائج تأكيد لصحة النموذج الذي استخدم.

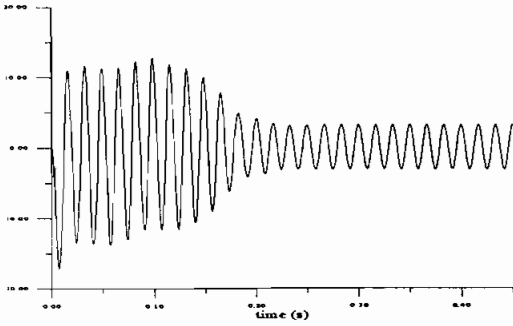
و بالرغم من أن البحث قد اقتصر على المحرك الحثي فإن توسيع نطاق النمذجة لتشمل أنواعاً أخرى من المحركات ممكن. كما أن أخذ حالة التشبع بالاعتبار ممكن أيضاً.



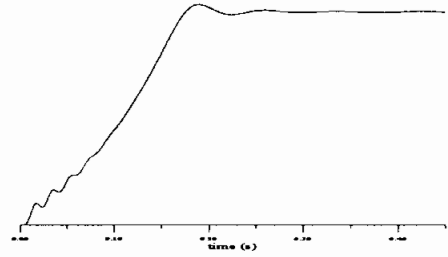
شكل ٤: تمارع حُر للمحرك عند جهد دخل جيبي و زيادة له بمقدار ٢٠٪ و تحميل ب ٨٠٪ من العزم المقرر.



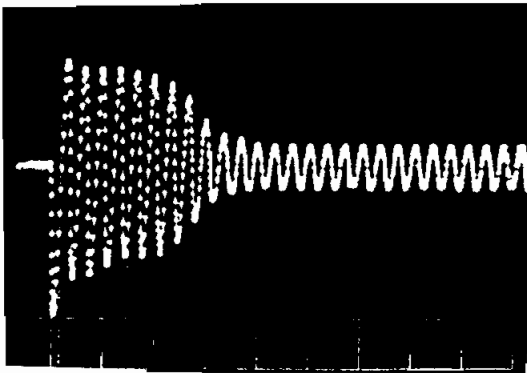
شكل ٥: التيارات في حالة الإطار المرجعي الدور المتزامن



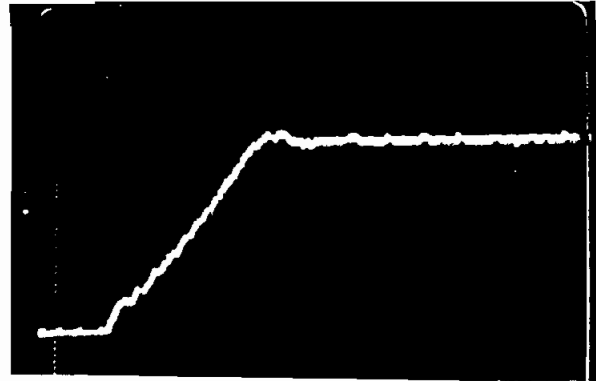
(أ)



(ب)



(ج)



(د)

شكل ٦: خواص التسارع الحر، جهد الدخل = ٣٨٠ف  
 (أ) تيار الخط (i<sub>dr</sub>)، محاكاة (ب) تيار الخط (i<sub>dp</sub>)، مخبرياً  
 (ج) السرعة، محاكاة (د) السرعة، مخبرياً

- [1] Bose, B. K. *Power Electronics and AC Drives* Prentice-Hall, 1986
- [2] Krause, P. C. *Analysis of Electric Machines*, Mc Graw Hill, 1986
- [3] Krause, P. C. and Thomas, C. H. "Simulation of Symmetrical Induction Machinery" *IEEE Trans*, Vol. PAS-84, No.11(Nov. 1965), 1038-1053.
- [4] Franceschini G., et. al. "SPICE Assisted Simulation of Controlled Electric Drives: An Application to switched Reluctance Drives" *IEEE Trans*, Vol.IA-27, No. 6,(Nov/Dec 1991), 1103-1110
- [5] Arkadan A.A, Rossillo-Johnson, V. and Demerdash, N. A. "A DC-AC Inverter-Induction Motor System Network Model Compatible With Commonly Known Network analysis software Packages" *APEC'89*, 13-17 Mar89, Baltimore, MD, USA, 195-202
- [6] Reynaud, J. F. and Pillay, P "Modeling of Saturation Effects in the Magnetizing Branch of an Induction Motor Using PSPICE" *Proc. IEEE Southeastcon '92*, 12-15 April 92, Birmingham, AL, USA, 513-516