

تحليل أداء المحرك الحثي أحادي الطور لقيم مختلفة من متسعة التشغيل

عمر شرف الدين يحيى
مدرس مساعد / كلية الهندسة
جامعة الموصل

د. ضياء علي بشير النعمة
أستاذ مساعد / كلية الهندسة
جامعة الموصل

الخلاصة

يتناول هذا البحث تأثير قيمة متسعة التشغيل في المحرك الحثي أحادي الطور على أداء المحرك ، وذلك من خلال دراسة كل من الكفاءة وعامل القدرة والاهتزازات التي تحصل للماكنة بتغيير قيمة هذه المتسعة . إن اختيار قيم غير مناسبة لمتسعة التشغيل يؤدي إلى تدني أداء المحرك وقد يؤدي إلى تلفه بسبب ارتفاع تيار اللفيفة المساعدة وتيار المحرك . تم في هذا البحث تطوير برنامج حاسوبي لإيجاد القيم المناسبة للمتسعة وتم تعزيز النتائج الحاسوبية بنتائج عملية أجريت على محرك حثي أحادي الطور مختبرياً" حيث تم الحصول على نتائج الاهتزازات الصادرة من المحرك وتأثير قيمة متسعة التشغيل عليها . ويمكن استخدام البرنامج الحاسوبي نفسه للتوصل إلى قيمة متسعة التشغيل المناسبة لأي محرك حثي أحادي الطور ذي لفيفتين .

الكلمات الدالة: " المحرك الحثي أحادي الطور ، متسعة التشغيل "

Performance Analysis of a Single Phase Induction Motor For Different Values of Running Capacitor

Abstract

The effect of the value of running capacitor on the performance of a single-phase induction motor is studied through the evaluation of the efficiency, power factor and vibration of the machine for different values of this capacitor choosing unsuitable value of the running capacitor worsen the performance of the motor and it may even damage the motor as a consequence of increasing auxiliary winding current.

In this research, a computer program has been developed for finding an optimum running capacitor for the induction motor.

Experimental results has been obtained in the laboratory and compared with the computer results for validation. The effect of the running capacitor on motor vibration has also been obtained and measured. Although this study was performed on a certain two-phase induction motor, the same developed computer program may be used to obtain the optimum value of the running capacitor for any single phase IM of known parameters.

Key word: single phase induction motor, running capacitor

المقدمة

ذلك إن القيمة الملائمة تتغير بتغير الحمل المسلط على المحرك، وللوقوف على تأثير قيمة متسعة التشغيل على أداء المحرك الحثي الأحادي الطور بصورة عامة من حيث الكفاءة وعامل القدرة ومركبة تيار المجال العكسي والاهتزازات الصادرة من المحرك والتي نادرا ما تذكر في الدراسات السابقة قمنا بدراسة تحليلية معززة بنتائج مختبرية للمحرك لكي نخرج بالقيمة المناسبة للمتسعة [5-2].

تركيب المحرك الحثي أحادي الطور

إن سبب وجود مجالين مغناطيسيين دوارين في المحرك الحثي أحادي الطور هو عدم تماثل الليفيتين الرئيسة والمساعدة من جهة وعدم توازن تياريهما من جهة أخرى فالإزاحة الطورية الفراغية بين الليفة الرئيسة والمساعدة هي 90 درجة كهربائية، وتختلف الليفة المساعدة عن الليفة الرئيسة في أن نسبة المقاومة إلى المفاعلة في الأولى أعلى منها في الثانية وبذلك يكون التياران الماران في الليفيتين مختلفي الطور. إن كل من الليفة الرئيسة والمساعدة موزعة توزيعا جيبيا في الفراغ وإن مرور تيار جيبى في كل منهما يولد قوة دافعة مغناطيسية نبضية يمكن تحليلها إلى مركبتين دوارتين . فبسبب الإزاحة الطورية الفراغية بين الليفيتين والإزاحة الطورية الزمنية بين التيارين يتكون مجالان مغناطيسيان دواران أحدهما بالاتجاه الأمامي وهو الأكبر والأخر بالاتجاه العكسي وهو الأقل [1].

لهذا السبب تربط متسعة على التوالي مع الليفة المساعدة لغرض زيادة الإزاحة الطورية بين تيارى الليفيتين وبالتالي زيادة المجال الأمامي وتقليل المجال العكسي ، لذلك يعد المحرك الحثي الأحادي الطور السعوي في هذه الحالة محركا ثنائي الطور غير متماثل

إن أكثر المحركات الكهربائية ذات القدرات الحصانية الجزئية استخداما في العالم في كثير من التطبيقات المنزلية والصناعية هي المحركات الحثية أحادية الطور وذلك لمتانتها وبساطة تركيبها وقلة كلفتها وصيانتها. غير أن أداء هذه المحركات تكتنفه بعض المشاكل التي يمكن معالجتها في المحركات التي تحتوي على متسعة تشغيل بالخصوص. يختلف أداء المحرك الحثي الأحادي الطور ذي متسعة التشغيل عن أداء المحرك الحثي ألقصبي الثلاثي الطور المتماثل الذي يعمل من مصدر ثلاثي الطور متوازن. والسبب في ذلك يعود بالأساس إلى وجود مجالين مغناطيسيين دوارين في الأول ووجود مجال مغناطيسي واحد في الثاني. إن وجود المجال الدوار العكسي في المحرك الحثي الأحادي الطور يولد عزمًا معاكسًا للعزم الأمامي المطلوب الذي يتولد من المجال الأمامي يضاف إلى ذلك فإن تفاعل المجال الأمامي للساكن مع المجال العكسي للدوار وتفاعل المجال العكسي للساكن مع المجال الأمامي للدوار يولدان عزمًا طفيلية ترددها ضعف تردد المصدر ومحصلتها صفر .

ينتج عن ذلك اهتزازات يصحبها ضجيج وتكون حركة المحرك ليست سلسلة كما يحصل في المحرك الحثي الثلاثي الطور المتوازن. يبين الشكل (1) الدائرة التي تمثل المحرك الحثي الأحادي الطور ذي متسعة تشغيل [1].

يمكن من خلال دراسة تحليلية للمحرك الحثي الأحادي الطور اختيار قيمة ملائمة لمتسعة التشغيل لجعله يعمل قريبا من عمل المحرك الحثي الثنائي الطور المتوازن وذلك بتقليل المجال العكسي الدوار إلى أقل قيمة ممكنة . إن قيمة المتسعة هذه لا تعطي أعلى كفاءة كما إنها لا تعطي أعلى عامل قدرة يضاف إلى

من المجال العكسي تكون متخلفة عن نظيرتها المتولدة على الليفة (m) بمقدار 90 درجة زمنية وذلك لان المجال العكسي يقطع الليفة (a) بعد 90 درجة من قطعة الليفة (m) لذا فان القوة الدافعة الكهربائية العكسية الكلية المتولدة في الليفة (a) هي نتيجة قطع المجالين الأمامي والعكسي. [3][4]

تحليل أداء المحرك الحثي أحادي الطور

تم تحليل الدائرة المكافئة للمحرك الحثي أحادي الطور حاسوبيا وباستخدام برنامج ماتلاب 7.6 بالاستناد إلى المعادلات للمحرك الحثي وتغيير قيمة المتسعة بعدة قيم وملاحظة تأثير هذه القيم على كل من الكفاءة وعامل القدرة وتيار الليفة المساعدة ، وكما سيبين ذلك لاحقا ، وقد استند برنامج التحليل إلى بعض الفرضيات منها :

- 1- المصدر نقي (موجة نقية).
- 2- إهمال التوافقيات الفراغية .
- 3- إهمال التشبع في الماكنة.
- 4- ثوابت المحرك ثابتة لا تتغير .

وهنا بعض التعاريف المهمة:

إن الفولتية المسلطة على الليفة الرئيسية (m) والليفة المساعدة (a) هي نفس فولتية المصدر وكما مبين في المعادلة أدناه :

$$V = V_m = V_a \dots\dots\dots (1)$$

وان مركبتا التعاقب للفولتية المسلطة هي مركبة التعاقب الأمامية (V_{mf}) وان مركبة التعاقب العكسية (V_{mb}) .

$$V_{mf} = V/2 (1 - j/a) \dots\dots\dots (2)$$

$$V_{mb} = V/2 (1 + j/a) \dots\dots\dots (3)$$

وان قيمة الممانعتين الأمامية (Z_f) والعكسية (Z_b) عند أي انزلاق معين هما:

وغير متوازن . يبين في الشكل (2) الدائرة المكافئة لكل طور للمحرك الحثي السعوي أحادي الطور. [2]

(V_m , V_a) هما فولتيتا المصدر الثنائي الطور غير المتوازن ، (I_m , I_a) هما تيارا الطورين على الترتيب. وان (Z_{1m} , Z_{1a}) هما الممانعتان التسريبتان لليفتين (m) و (a) ونقصد في الأولى الليفة الرئيسية (main) وفي الثانية الليفة المساعدة (auxiliary) . يمكن تحليل كل من التيارين الأصليين إلى المركبات المتماثلة (I_{mf} , I_{mb} , I_{af} , I_{ab}) بالشكل الذي يجعل التيارين (I_{mf} , I_{af}) يولدان مجالا أماميا دوارا ذا قيمة ثابتة وكذلك يجعل التيارين (I_{mb} , I_{ab}) يولدان مجالا عكسيا دوارا ذا قيمة ثابتة .

إن (a) هي نسبة عدد اللفات الفعالة للليفة المساعدة إلى عدد اللفات الفعالة لليفة الرئيسية، وان (aI_a) هو تيار الليفة (a) منسوباً إلى الليفة (m) . فمن وجهة نظر الليفة (m) فان رد الفعل الداخلي للمجالين الأمامي والعكسي هو نفسه كما في المحرك الثنائي الطور المتوازن . فإذا كانت ممانعتا الدوار و التمغنط منسويتين إلى الليفة (m) فان ممانعتي المجالين الأمامي والعكسي (Z_f , Z_b) المنظورتين من الليفة (m) ، وان القوتين الدافعتين العكسيتين (E_{mb} , E_{mf}) المتولدتين في الليفة (m) من المجالين الأمامي والعكسي على التوالي يساويا الهبوط بالفولتية على هاتين الممانعتين .

أما مركبتا القوة الدافعة الكهربائية المتولدتان على قيم الليفة (a) فستكونان (a) مرة بقدر المركبتين المشابهة؛ لهما المتولدتين على الليفة (m) ، وذلك بسبب اختلا 22 عدد اللفات . كما إن المركبة المتولدة على الليفة (a) من المجال الأمامي تكون متقدمة على نظيرتها المتولدة على الليفة (m) بمقدار 90 درجة زمنية وذلك لان المجال الأمامي يقطع الليفة (a) قبل 90 من قطعة لليفة (m) وان مركبة الفولتية المتولدة على الليفة (a)

$$I_{mf} = \frac{(V_{mf} (Z_o + Z_b) + V_{mb} \times Z_d)}{((Z_o + Z_f)(Z_o + Z_b) - Z_d^2)} \dots (9)$$

$$I_{mb} = \frac{(V_{mb} (Z_o + Z_f) + V_{mf} \times Z_d)}{((Z_o + Z_f)(Z_o + Z_b) - Z_d^2)} \dots (10)$$

إذ أن :

$$Z_o = ((Z_{1a}'/a^2) + Z_{1m}) / 2 \dots (11)$$

$$Z_d = ((Z_{1a}'/a^2) - Z_{1m}) / 2 \dots (12)$$

وان القدرة المدفوعة من قبل لفيفة الجسم الساكن إلى المجال الأمامي :

$$P_{gf} = 2 \times |I_{mf}|^2 \times R_f \dots (13)$$

وان القدرة المدفوعة من قبل لفيفة الجسم الساكن إلى المجال العكسي :

$$P_{gb} = 2 \times |I_{mb}|^2 \times R_b \dots (14)$$

وان القدرة الداخلية المتحولة إلى قدرة ميكانيكية بالواط هي :

$$P_{mech} = (1-s) \times (P_{gf} - P_{gb}) \dots (15)$$

وان القدرة الخارجة هي :

$$P_{out} = P_{mech} - P_o \dots (16)$$

حيث أن (P_o) هي المفاقيد الدورانية وان تيار الخط (I_t) هو عبارة عن تيارى اللفيفة الرئيسة واللفيفة المساعدة وينكون كل تيار من مركبتين [1][3][4] ، وكما مبين بالمعادلات أدناه :

$$Z_f = R_f + j X_f \dots (4)$$

$$Z_b = R_b + j X_b \dots (5)$$

إذ أن (R_f) الجزء المقاومي من الممانعة الأمامية.

إذ أن (R_b) الجزء المقاومي من الممانعة العكسية.

إذ أن (X_f) المفاعلة من الممانعة الأمامية.

إذ أن (X_b) المفاعلة من الممانعة العكسية.

ويمكن كتابتها بأبسط صورها :

$$Z_f = (r_2'/s + j x_2') // jx_m \dots (6)$$

$$Z_b = ((r_2'/(2-s)) + j x_2') // jx_m \dots (7)$$

حيث إن r₂' مقاومة الجسم الدوار منسوبة إلى اللفيفة الساكنة.

حيث إن x₂' مفاعلة الجسم الدوار منسوبة إلى اللفيفة الساكنة.

حيث إن x_m مفاعلة التمكنظ .

وان قيمة الممانعة لللفيفة المساعدة (Z_{1a}) والمنسوبة لللفيفة الساكنة :

$$Z_{1a}' = Z_{1a} - j / (w \times c_{run}) \dots (8)$$

حيث يلاحظ من خلال هذه المعادلة أن الممانعة

تحتوي على قيمة متسعة التشغيل وعند تغيير هذه القيمة

فإننا نحصل على قيم متغيرة من الممانعة والتي بدورها

تعمل على تغيير كل من قيم تيار اللفيفة المساعدة

(I_{mb}) وكذلك القدرة المدفوعة من قبل لفيفة الساكن إلى

المجال العكسي (P_{gb}) ، وكذلك ستعمل على إحداث

تغيير في كل قيم عامل القدرة وكذلك على كفاءة الماكنة

وكما سيعرض في الجداول والمنحنيات لاحقاً.

إن مركبتي التعاقب الموجب والسالب لتيارات الجسم

الساكن هما :

$$r_{1m} = 5 \Omega , r_{1a} = 13 \Omega , r_2' = 3.77 \Omega$$

$$x_{1m} = 4.1 \Omega , x_{1a} = 10 \Omega , x_m = 59 \Omega ,$$

$$P_o = 150 \text{ watt} , a = 1.28$$

وتم تشغيل برنامج التحليل الحاسوبي الذي تمت كتابته استنادا الى المعادلات الموضحة في الفقرة اعلاه. وباختيار قيم مختلفة لمتسعات التشغيل من (صفر إلى 45) ميكروفاراد وعلى افتراض ان المحرك محمل بالحمل التام تم الحصول على النتائج الحاسوبية الموضحة بالجدول (1) في الملحق (2).

نجد مثلا ان من المتغيرات المهمة التي تحدد اداء المحرك مركبة التيار للمجال العكسي (I_{mb}) فالشكل (4) يوضح تغير هذا التيار اذ ينخفض الى ادنى مستوى له عند المتسعة 27 ميكروفاراد اما الكفاءة وعامل القدرة الموضحين في الشكل (5) فتبلغ ذروتها عند 23 ميكروفاراد و 35 ميكروفاراد على الترتيب .

يمثل الشكل (6) التيار الكلي للمحرك (تيار الإدخال) حيث يلاحظ انه في البداية يكون ذو قيمة عالية نوع ما ومن ثم بإضافة متسعة التشغيل يقل إلى أن يصل إلى اقل قيمة له عند الوصول إلى أفضل قيمة لمتسعة التشغيل لذلك المحرك وعند زيادة قيمة المتسعة بعيدا عن القيمة المثلى يلاحظ العودة في زيادة هذا التيار. تؤكد النتائج ما توقعناه سابقا من ان افضل كفاءة وافضل عامل قدرة واقل مجال عكسي لا يحدثون عند القيمة لنفس المتسعة ولكن هذه القيم متقاربة .

اعتماد على البرمجة الخطية وبأخذ التقبيدات التالية بنظر الاعتبار التي تجعل أداء المحرك جيدا :

- 1- تيار (I_{mb}) لا يزيد عن 0.5 أمبير.
 - 2- الكفاءة لا تقل عن 60 % .
 - 3- عامل القدرة لا يقل عن 0.9 .
- يتبين من الشكلين (4 ، 5) فان قيمة المتسعة اللازمة لتحقيق تلك القيود الثلاثة تنحصر بين

$$I_t = I_m + I_a \dots\dots\dots (17)$$

$$I_m = I_{mf} + I_{mb} \dots\dots\dots (18)$$

$$I_a = I_{af} + I_{ab} \dots\dots\dots (19)$$

$$I_{af} = j \times I_{mf} / a \dots\dots\dots (20)$$

$$I_{ab} = -j \times I_{mb} / a \dots\dots\dots (21)$$

وان القدرة المسحوبة من قبل الليفة الرئيسية وكذلك القدرة المسحوبة من الليفة المساعدة:

$$P_m = V \times I_m \times \text{Cos}\theta_m \dots\dots\dots (22)$$

$$P_a = V \times I_a \times \text{Cos}\theta_a \dots\dots\dots (23)$$

والقدرة الداخلة إلى المحرك :

$$P_{in} = V \times I_t \times \text{Cos}\theta_t \dots\dots\dots (24)$$

إذ أن (θ_m) زاوية طور تيار الليفة الرئيسية.

إذ أن (θ_a) زاوية طور تيار الليفة المساعدة.

إذ أن (θ_t) زاوية طور تيار الإدخال.

ويمكن حساب كفاءة المحرك الحثي أحادي الطور من خلال المعادلة :

$$\text{Efficiency } (\eta) = P_{out} / P_{in} \dots\dots\dots (25)$$

24

ويوضح الشكل (3) مخطط سريان القدرة لهذا المحرك

النتائج الحاسوبية

استخدم محرك حثي مقنناته 220 فولت ، 1 كيلو واط 50 هرتز ، تيار مقنن 5.7A ، ذو الثوابت التالية التي تم الحصول عليها من الفحوصات المختبرية (فحصي انعدام الحمل وسكون الدوار) :

إن أي زيادة في هذا القيمة فان سوف تحدث عملية عكسية في أداء المحرك أي انه سوف يسحب تيارا عاليا في الليفة المساعدة وكذلك يحصل هنالك زيادة في الضوضاء والاهتزازات بل قد يتعدى الأمر إلى أن يتحول إلى مولد حثي (تعمل إحدى الليفتين مولدا) إذا كانت قيمة المتسعة اكبر من اللازم ، ويبين الشكل (6) والشكل (10) مدى التقارب في النتائج لكل من التيار الكلي والقدرة الداخلة عند المقارنة بين الجزء العملي والنظري.

الاستنتاجات

من خلال النتائج التي تم الحصول عليها من الجانب النظري والجانب العملي للمحرك الحثي أحادي الطور ذي متسعة التشغيل ، انه لقيمة هذه المتسعة تأثيرا كبيرا على أداء المحرك إضافة إلى عامل القدرة والكفاءة لهذا المحرك فضلا عن الضوضاء والاهتزازات التي قد تحدث عن اختيار قيمة غير ملائمة من متسعة تشغيل للمحرك والارتفاع الحاصل في تيار الليفة المساعدة إضافة إلى سحب المحرك تيارا "فوق التيار المقنن".

ووجد انه بمعرفة قيمة متسعة التشغيل المناسبة لمحرك تم الحصول على محرك قليل الضوضاء والاهتزازات فضلا على التحسن الحاصل في كل من الكفاءة وعامل القدرة والتيار المسحوب من المصدر .

إن قيمة متسعة التشغيل الملائمة التي تم الحصول عليها من خلال النتائج العملية كانت قريبة نوعا ما التي تم الحصول عليها من خلال البرنامج الحاسوبي الذي تم تطويره لهذا الغرض . ويمكن استخدام البرنامج نفسه للحصول على قيمة متسعة التشغيل الملائمة لأي محرك حثي أحادي الطور آخر .

ان نسبة الخطأ التي ظهرت في بعض القراءات يعزى الى :

(23 - 27) ميكروفاراد ، وهذه هي القيمة المثلى للمتسعة لهذا المحرك.

النتائج العملية

تم نيوتن. الجانب العملي من البحث الحصول على نتائج عملية للمحرك الحثي أحادي الطور ذي المقننات المذكورة أنفا" ، وبعد ربط الدائرة العملية المبينة في الشكل (7) وعند تسليط حمل معين ميكانيكي بقيمة 3.92 نيوتن. متر وهو قريب من الحمل المقنن تم الحصول على النتائج المبينة بالجدول (2) في الملحق (2).

حيث يتبين من خلال القراءات مأخوذة للمحرك في الغرفة المعزولة لمختبر عديم الصدى للحصول على أفضل القراءات والأصوات للماكنة انه عند عدم وجود أي قيمة للمتسعة في الليفة المساعدة فانه يسحب تيارا عاليا وهنالك ضوضاء واهتزاز كبيرين في المحرك أثناء العمل ، بالإضافة إلى سوء الكفاءة وعامل القدرة للماكنة . لكن بعد التدرج في إضافة المتسعة إلى الليفة المساعدة فانه تم الحصول على نتائج جيدة لكل من الكفاءة وكما مبينة في الشكل (8) وكذلك الانخفاض في كل من الضوضاء والاهتزازات في الماكنة وكما مبينة في الشكل (9) فقد وجد أن أفضل قيمة لهذا المحرك من متسعة تشغيل هي بحدود (23) مايكروفاراد وهي تقع ضمن المدى الذي تم التوصل إليه من النتائج الحاسوبية. إن أي زيادة في هذا القيمة فان سوف تحدث عملية عكسية في أداء المحرك أي انه سوف يسحب تيارا عاليا في الليفة المساعدة وكذلك يحصل هنالك زيادة في الضوضاء والاهتزازات بل قد يتعدى الأمر إلى أن يتحول إلى مولد حثي (تعمل إحدى الليفتين مولدا) إذا كانت قيمة المتسعة اكبر من اللازم.

- 2- Jacek F. Gieras. Chong Wang. Joseph Cho Lai, "Noise of Poly-phase Electric Motors". Taylor & Francis Group, LLC. Hand book, 2006.
- 3-S.K. Sen "Rotating Electrical Machinery". Second Edition, Handbook, 1976.
- 4- مكائن التيار المتناوب تأليف الأستاذ الدكتور باسل محمد سعيد والدكتور ضياء علي بشير النعمة. مديرية دار الكتب للطباعة والنشر، جامعة الموصل. (1989)
- 5-H. Huaug. E.F.Fuchs, "optimal Placement of the run capacitor in single phase induction motor designs". IEEE. Trans. September. V,3. no,3, 1988.
- 6- Mahdi Alshamasin "Optimization of the Performance of Single Phase Capacitor-Run Induction". Americal Journal of applied Sciences 6(4), 745-751, Jordan, 2009.
- 7- E. Muljadi , Y. Zhao." Adjustable Ac Capacitor for a single phase induction motor". IEEE. Trans. Ind. Appli.V.29, pp.479-485, 1993.
- 8- Sedat Sunter. Mehmet Ozdemir. Bilal Gumus.."Modelling and Simulation of Single phase Induction Motor with Adjustable switched Capacitor". 9th International Conference of Power Electronic and Motion Control EPE-PEMC2000 Kosice, Turkey.

أ- طبيعة المصدر والتوافقيات التي تحدث داخل الماكينة له تأثير سلبي على اداء الماكينة وعلى مقنناتها. أما في البرنامج لم يؤخذ هذا الأمر على اعتبار ان المصدر خالي من التوافقيات وان العناصر ثابتة لا تتغير .

ب- التأثير الحاصل على قيم المحرك من المقاومة والمحاثة لكل من الملف الرئيسي والمساعد اثناء ارتفاع درجة الحرارة المحرك اثناء العمل (skin effect) ، اما في البرنامج لم يؤخذ هذا الأمر وان العناصر ثابتة لا تتغير .

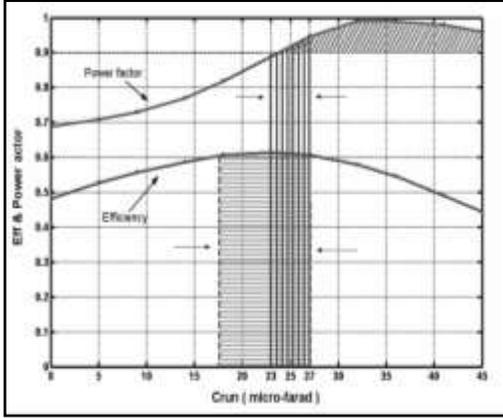
ج- حالة التشبع (Saturation) التي تحصل في الماكينة اثناء العمل وما له من تأثير على مقنناتها أهملت في البرنامج.

د- قيم التيار والسرعة في البرنامج الحاسوبي هي قيم ثابتة ، اما في الجزء العملي فهناك مساحة من التغيير لهذه القيم باتجاه الزيادة او النقصان بالشيء القليل حسب الاسباب التي مر ذكرها اعلاه. فكل هذه الامور اعطت بالنتيجة نسبة من الخطا في القراءات التي تم الحصول عليها مخبريا .

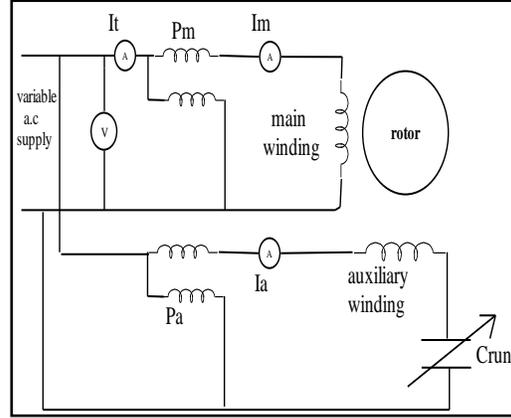
كما أظهرت النتائج الحاسوبية والعملية توافقا بينا مع وجود نسبة خطأ في المتغيرات تباينت بين القليل جدا مثل القدرة الخارجة وتيار الإدخال (0.2 %) وبين المقبولة مثل الكفاءة وعامل القدرة (10 %) ، حول القبة المثلى للمتسعة ويرجع سبب ذلك إلى الفرضيات التي استند عليها التحليل النظري للماكينة.

المصادر

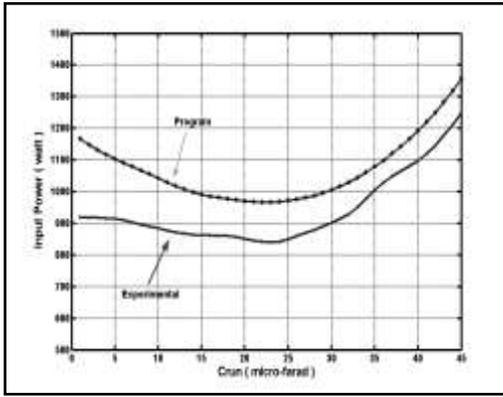
- 1- Charles Kingsley, "ELECTRICAL MACHINERY", Sixth Edition, the McGraw-Hill Companies, Handbook, 2003.



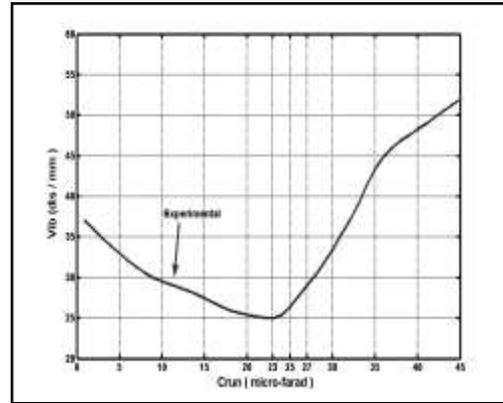
الشكل (8) الكفاءة مع متسعة التشغيل



الشكل (7) الدائرة العملية



الشكل (10) القدرة الداخلة مع متسعة التشغيل



الشكل (9) الاهتزازات مع متسعة التشغيل