

تحسين محددات المحركات التحريضية باستخدام التعويض التسلسلي (الطولاني) للاستطاعة الردية.

الدكتور عزت حسن*

(تاريخ الإيداع 26 / 11 / 2008. قُبِلَ للنشر في 28/1/2009)

□ الملخص □

تناول البحث علاقة الاستطاعة الردية التي يستهلكها المحرك التحريضي مع جهد التغذية؛ إذ بيّن مقدار التغير وسببه في استهلاك هذه الاستطاعة مع تزايد جهد التغذية أو تناقصه، ومع ثبات قيمة الحمل المطبقة على محور المحرك أو تغييره وبالتالي تم إيجاد العلاقة بين معامل الاستطاعة الردية ($tg \varphi$) وجهد التغذية عند حمولات مختلفة ومقارنة النتائج.

ونتيجة للتأثيرات السلبية للاستطاعة الردية في محددات المحرك فقد عالج البحث كيفية تحسين محددات المحرك عن طريق استخدام التعويض التسلسلي للاستطاعة الردية؛ إذ يمكن باستخدام طريقة التعويض المذكورة زيادة معامل الحمل وعزم إقلاع المحرك من دون التغيير في قيمة الاستطاعة الاسمية أو في وزن المحرك وحجمه، أو يمكن بالعكس تخفيض وزن المحرك وحجمه عند عزم الإقلاع نفسه ومعامل الحمل وتعدّ النتيجة إيجابية في كلتا الحالتين.

الكلمات المفتاحية: محركات تحريضية- استطاعة ردية- تعويض الاستطاعة الردية- تحسين عامل الاستطاعة.

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

Improvement of the Induction Motor Parameters By Successive (Longitudinal) Compensation of the Reactive Power

Dr. Izzat Hasan*

(Received 26 / 11 / 2008. Accepted 28 / 1 / 2009)

□ ABSTRACT □

This research has dealt with the link between the reactive power of the induction motor consumption and power supply. It has also shown that the amount and cause of power consumption vary, according to rise and drop in power supply as well as the constancy and variability of the applied load on the motor axis. This helps us find the relation between the reactive power factor ($tg\varphi$) and the power supply of different load-values. Then, the results are analyzed.

Due to the negative reactive power effects on the motor parameters, the current research has also analyzed how to improve motor parameters, using the successive (longitudinal) reactive power. This will help us increase the loading factor, the motor momentum start-up, without change in the nominal power values or the motor volume and weight. Conversely, the motor-weight and volume of the same load factor and starting-up momentum can be reduced. The obtained results are positive in both cases.

Key Words: Induction motors, power reactive, compensation power reactive, improvement power factor.

* Professor, Department of Electrical Power, Faculty of Mechanical & Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

المحرك التحريضي بالتعريف هو آلة كهرومغناطيسية تعمل على التيار المتناوب تقوم بتحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية. لقد سمي بالمحرك التحريضي؛ لأن جهد الدائر (يعني القوة المحركة الكهربائية التي تولد تيار الدائر والساحة المغناطيسية في الدائر) ينشأ بالتحريض، ولا يأتي من أي منبع خارجي. كذلك يطلق عليه أسم المحرك غير المتواقت؛ لأن سرعة دوران الدائر (n_2) لا تساوي سرعة دوران الساحة المغناطيسية (n_1) في الثغرة الهوائية [1,2].

تقسم المحركات التحريضية حسب نوعية التيار المتناوب الذي تعمل عليه إلى محركات أحادية الطور ومحركات ثلاثية الطور. لقد شاع استخدام المحركات التحريضية أحادية الطور بشكل واسع في الاستخدامات المنزلية: كالخلاطات والغسالات والعصارات والبرادات والمراوح و... الخ. أما المحركات التحريضية ثلاثية الطور فتعدّ في عصرنا الحالي من أكثر أنواع الآلات الكهربائية استخداماً، وبشكل أساس في المنشآت الصناعية. تتطلب هذه المحركات حوالي (50%) من الطاقة الكهربائية المتولدة في محطات توليد الطاقة الكهربائية، وأكثر من ذلك في البلدان المتطورة صناعياً. يعود الاستخدام الواسع لهذه المحركات إلى بساطة تصميمها، وسعرها المنخفض مقارنة مع المحركات ذات التيار المستمر والمحركات المتواقتة، وموثوقية استثمارها العالية، كما أنها لا تحتاج إلى وسائط من أجل تهيئتها سوى خط للتيار المتناوب (لا تحتاج إلى منبع DC من أجل التهييج) [1,3].

إلى جانب هذه الخواص الجيدة التي تمتاز بها المحركات التحريضية هناك بعض العيوب والنواقص مقارنة مع المحركات الأخرى؛ إذ تستهلك هذه المحركات إلى جانب الاستطاعة الفعلية حوالي (65 ÷ 60) من الاستطاعة الردية المنقلة في شبكات التغذية بالطاقة الكهربائية؛ أي أنها تحتاج إلى تيار ردي على عكس المحركات المتواقتة القادرة على توليد الاستطاعة الردية عند وجود تهييج زائد. يحتاج المحرك التحريضي إلى التيار والاستطاعة الردية (Q) من أجل تشكيل الفيض أو الساحة المغناطيسية الأساسية، ومن أجل تغطية الفيض المغناطيسي المتسرب في الجزء الثابت والجزء الدائر لهذا المحرك. تشكل الاستطاعة الردية التي يحتاجها المحرك لتشكيل الساحة المغناطيسية الأساسية القسم الأكبر من الاستطاعة التي يستهلكها، وذلك بسبب وجود الثغرة الهوائية الكبيرة بين الثابت والدائر، وبالتالي تيار اللاحمل الكبير. إن القيمة الكبيرة للاستطاعة الردية (Q) ولتيار اللاحمل أو التمغظ (I_0) يؤثر بشكل ملحوظ في معامل الاستطاعة ويؤدي إلى إنقاصه؛ لذا سأقوم في هذا البحث بدراسة أهمية استخدام معوضات الاستطاعة الردية في المحركات التحريضية.

أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية هذا البحث في تحديد العلاقة بين الاستطاعة الردية التي يستجرها المحرك التحريضي من منبع التغذية وبعض محدداته المهمة (كالجهد مثلاً) والأثر السلبي لذلك في المحرك، وبالتالي إيجاد الطريقة أو الوسيلة المناسبة للتقليل من استجرار هذه الاستطاعة وانعكاس ذلك إيجابياً على المحرك (كالتقليل من وزن المحرك وحجمه)، لما له من أهمية اقتصادية وتصميمية كبيرة.

طريقة البحث ومواده:

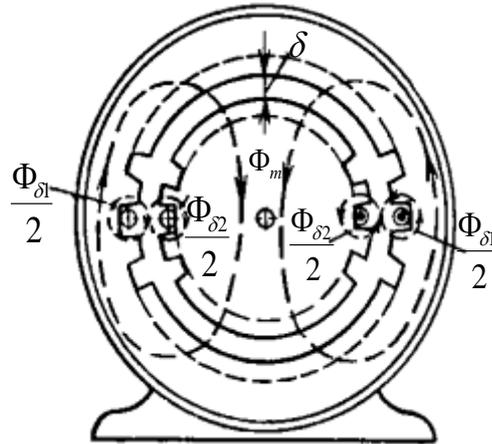
تعدّ المحركات التحريضية العنصر الأساس في تشغيل معظم المنشآت الصناعية وإدارتها، وبالتالي هي العنصر الأساس في تطوير الاقتصاد الوطني وتنميته. إن خاصية عمل الآلة التحريضية تتلخص في حاجتها إلى الاستطاعة الردية من أجل تأمين الساحة المغناطيسية الدوارة؛ لذا تصنف من مستهلكات الاستطاعة الردية حتماً. إن زيادة استهلاك الاستطاعة الردية تؤدي إلى زيادة تيار اللاحمل أو تيار التمتعظ، وبالتالي زيادة الضياعات في المحرك ونقصان المردود ومعامل الاستطاعة؛ لذا كان لا بد من البحث عن الطرق الممكنة لحل هذه المسألة وقد اعتمدت طريقة البحث على:

- دراسة المحركات التحريضية بوصفها مستهلكات للاستطاعة الردية وتوضيح الغاية من استجرائها لها.
- إيجاد علاقة الاستطاعة الردية بالجهد المطبق على ملفات ثابت المحرك التحريضي.
- توضيح كيفية تحسن محددات المحرك التحريضي باستخدام التعويض التسلسلي للاستطاعة الردية بعد إعطاء فكرة مختصرة عن مفهوم التعويض التسلسلي (الطولاني) للاستطاعة الردية.

المحركات التحريضية بوصفها مستهلكات للاستطاعة الردية:

تستهلك المحركات التحريضية، بالإضافة إلى الاستطاعة الفعلية، حوالي $(60 \div 65)\%$ من الاستطاعة الردية الكلية السارية في شبكة التغذية بالطاقة الكهربائية، والتي تذهب لتوليد الساحة المغناطيسية الأساسية (Φ_m) ولتغطية الفيض المغناطيسي المتسرب في كل من الثابت $(\Phi_{\delta 1})$ والدائر $(\Phi_{\delta 2})$. إن الفيض المغناطيسي الأساس هو الفيض الذي فيه خطوط السيالة، ويعني المسار المغناطيسي الوسطي للسيالة، يمر من الثابت عبر الثغرة الهوائية إلى الدائر عائداً إلى الثابت؛ ليشكل حلقة مغلقة. إن وجود ثغرة هوائية كبيرة نسبياً بين الثابت والدائر للمحرك التحريضي يؤدي إلى زيادة المقاومة المغناطيسية لمرور السيالة، وبالتالي حتى يستطيع الفيض المغناطيسي اختراق الثغرة يتطلب قوة محرّكة مغناطيسية كبيرة لملفات المحرك، وبالتالي تيار مغنطة كبير وتيار لاحمل كبير، يمكن أن يصل إلى $(25 \div 60)\%$ من التيار الاسمي وذلك حسب قيمة الثغرة الهوائية [1,4].

إن وجود الثغرة الهوائية بين الثابت والدائر يؤدي أيضاً إلى زيادة الفيض المغناطيسي التسريبي للثابت $(\Phi_{\delta 1})$ وللدائر $(\Phi_{\delta 2})$. يبين الشكل (1) مخطط توزيع الفيض المغناطيسي الأساس والتسريبي للمحرك التحريضي لأجل طور واحد [4].



الشكل (1) الفيوض: الأساسية Φ_m والتسريبية Φ_{δ} للمحرك التحريضي لأجل طور واحد.

تتغير الاستطاعة الردية للمحرك التحريضي من القيمة (Q_0) عند العمل على فراغ إلى القيمة (Q_n) عند الحمولة الاسمية، عندئذ تزداد الاستطاعة الردية مع تزايد حمولة المحرك؛ لأن ذلك متعلق بالفويض المغناطيسية التسريبيه، المتعلقة بتيار الحمولة.

تحسب الاستطاعة الردية الكلية المستهلكة في المحرك التحريضي عند الجهد الاسمي بالعلاقة:

$$Q = Q_0 + \beta^2 \cdot I^2 \cdot X = Q_0 + \beta^2 \cdot Q_\delta \quad (1)$$

إذ إن:

Q_0 - الاستطاعة الردية المستهلكة من قبل المحرك التحريضي عند العمل على فراغ.

Q_δ - الاستطاعة الردية التسريبيه عند نسبة حمولة تساوي ($\beta = P/P_n$).

تحدد الاستطاعة الردية الاسمية للمحرك من خلال المعطيات على اللوحة الاسمية أو الكاتلوك بالعلاقة:

$$Q_n = (P_n / \eta_n) \cdot tg \varphi_n \quad (2)$$

إذ أن:

$tg \varphi_n = Q_n / P_n$ معامل الاستطاعة الردية ويتوافق مع $Cos \varphi_n$ ؛ η_n - المردود الاسمي للمحرك.

طالما أنه عند العمل على فراغ يكون معامل الاستطاعة للمحرك ($Cos \varphi_0 \approx 0.1 \div 0.2$) والموافق

لـ ($Sin \varphi_0 \approx 0.99 \div 0.97$)، فتهمل المركبة الفعلية لتيار اللاحمل، وبإهمال الضياعات الميكانيكية والحديدية للمحرك

يمكننا عدّ أن ($Sin \varphi_0 \approx 1$). عند ذلك نستطيع أن نحدد الاستطاعة الردية التي يستجرها محرك تحريضي ثلاثي

الطور من أجل عملية التمغنط بالعلاقة التقريبية:

$$Q_0 = \sqrt{3} \cdot I_0 \cdot U_n = \sqrt{3} \cdot I_n \cdot U_n \cdot Cos \varphi_n \cdot \frac{I_0}{I_n \cdot Cos \varphi_n} = \frac{P_n}{\eta_n} \cdot \frac{I_0}{I_n \cdot Cos \varphi_n} \quad (3)$$

حيث (I_0) تيار العمل على فراغ ويقاس عند عمل المحرك من دون حمولة وعند تطبيق التوتر الاسمي (U_n).

أما الاستطاعة الردية اللازمة لتغطية الفيوض التسريبيه للمحرك فتتعلق بالحمولة وتحدد بالعلاقة:

$$Q_\delta = (Q_n - Q_0) \cdot \beta^2 = \beta^2 \frac{P_n}{\eta_n} (tg \varphi_n - \frac{I_0}{I_n \cdot Cos \varphi_n}) \quad (4)$$

بتعويض قيمة (Q_n) من العلاقة (2) وقيمة (Q_δ) من العلاقة (4) بالعلاقة (1) نحصل على:

$$Q = \frac{P \cdot tg \varphi}{\eta} = \frac{P_n}{\eta_n} \left[\frac{I_0}{I_n \cdot Cos \varphi_n} + \beta^2 (tg \varphi_n - \frac{I_0}{I_n \cdot Cos \varphi_n}) \right] \quad (5)$$

إذ إن: $Cos \varphi$, Q , P معطيات عند حمولة محددة للمحرك تختلف عن حمولته الاسمية.

علاقة الاستطاعة الردية للمحرك التحريضي بالجهد:

لندرس كيف تتغير الاستطاعة الردية لمحرك تحريضي عند تغير جهد التغذية. عند تزايد الجهد يتزايد الفيض

المغناطيسي (Φ_m) المولد للقوة المحركة الكهربائية (E_1) والمتكافئ تقريباً مع تزايد جهد الشبكة (U_1). يرافق عملية

تزايد الفيض المغناطيسي تزايد تيار المغنطة، الذي بدوره يؤدي إلى تزايد المركبة الردية للاستطاعة التي يستهلكها

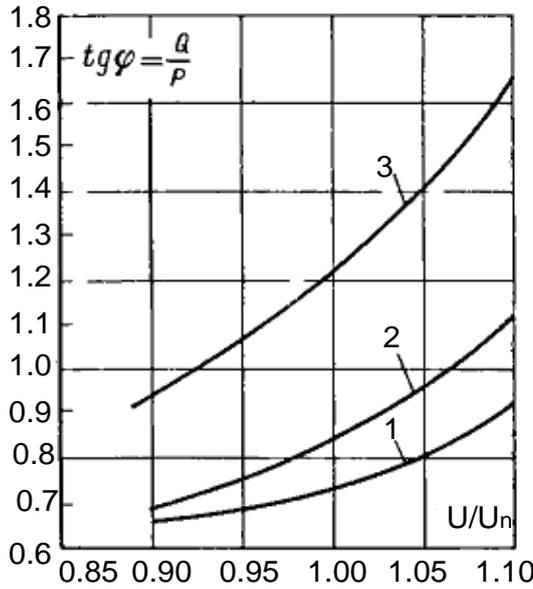
المحرك التحريضي عند العمل على فراغ. عند إشباع الدارة المغناطيسية للمحرك يتزايد تيار المغنطة ولكن ليس بنسبة

تزايد الجهد نفسها، بل بدرجة أكبر. عند ذلك تزداد الاستطاعة الردية للتسرب بشكل متناسب مع تزايد الجهد [4,2,1].

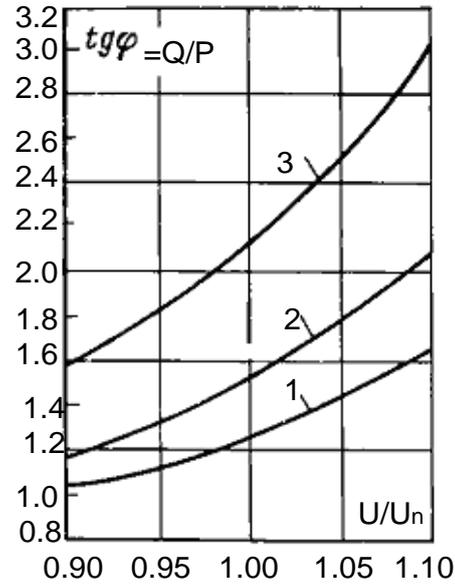
تحدد عملياً الاستطاعة الردية للمحرك بنتيجة تزايد الجهد المطبق بوساطة استطاعة التمغنط. يجب الأخذ بعين الاعتبار أنه عند تزايد الجهد تبقى الاستطاعة الفعلية على محور المحرك ثابتة لا تتغير، ويقودنا هذا الاستنتاج بأن معامل الاستطاعة الردية ($tg \varphi = Q/P$) في هذه الحالة يتزايد بشكل واضح وملحوظ.

عند انخفاض الجهد المطبق يتناقص الفيض المغناطيسي وتيار المغنطة، بالتالي تزداد المركبة الفعلية لتياري الثابت والدائر مع الحفاظ على ثبات الحمولة على محور المحرك، ونتيجة لتزايد هذه التيارات تزداد مركبة الاستطاعة الردية، المحددة بوساطة الفيض المتسرب. تتناقص الاستطاعة الردية الكلية للمحرك وذلك حسب علاقات (Q_0) و (Q_δ). من المعروف جيداً أنّ انخفاض جهد التغذية للمحرك مع الحفاظ على قيمة العزم المقاوم على محور المحرك (الحمولة على محور المحرك ثابتة) يؤدي إلى ازدياد تيار المحرك، ونتيجة ذلك تسخن درجة حرارة الملفات وترتفع. لكن غالبية المحركات التحريضية تصمم على هبوط جهد مسموح قدره ($\pm 5\%$) من الجهد الاسمي، يعني ذلك أن المحرك قادر على أن يعمل عند هذه التغيرات للجهد بحيث يكتسب استطاعته الاسمية من دون ارتفاع درجة حرارة الملفات.

تبين الأشكال (2, 3, 4) علاقة ($tg \varphi = Q/P$) بالجهد لمحركات ذات استطاعة فعلية مختلفة وعند حمولات مختلفة. تم الحصول على المنحنيات (1, 2, 3) على الأشكال (2, 3, 4) من أجل معاملات حمولة مختلفة تساوي: (1, 0.75, 0.5) بالترتيب.



الشكل (3) - علاقة $tg \varphi$ بالجهد لمحرك تحريضي استطاعته (20Kw)

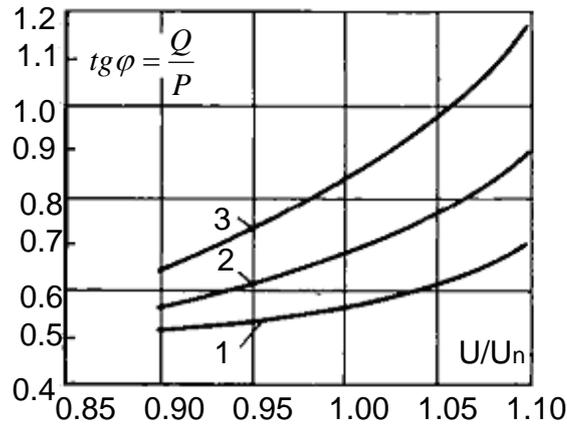


الشكل (2) - علاقة $tg \varphi$ بالجهد لمحرك تحريضي استطاعته (1 Kw)

لنأخذ على سبيل المثال الشكل (3) الذي يخص محركاً تحريضياً ثلاثي الطور توتره الاسمي ($U_n = 380V$) واستطاعته الاسمية ($P_n = 20Kw$) وسرعته التزامنية ($n_1 = 1500 r.p.m$). إن قيم $tg \varphi$ عند حمولات مختلفة من المنحنيات على الشكل (3) وعند ($0.9U_n$, U_n , $1.1U_n$) والقيم الحسابية للاستطاعة (Q) مبينة في الجدول (1).

الجدول (1) علاقة Q مع U و β لأجل محرك تحريضي استطاعته 20Kw.

U	$0.9U_n$			U_n			$1.1U_n$		
$\beta = P/P_n$	1	0.75	0.5	1	0.75	0.5	1	0.75	0.5
P, Kw	20	15	10	20	15	10	20	15	10
$tg\varphi$	0.64	0.68	0.94	0.72	0.84	1.22	0.91	1.21	1.63
$Q = P \cdot tg\varphi, KVar$	12.7	10.2	9.4	14.4	12.6	12.2	18.2	16.6	16.3
$Cos\varphi$	0.84	0.83	0.73	0.81	0.76	0.63	0.74	0.67	0.52

الشكل (4) - علاقة $tg\varphi$ بالجهد لمحرك تحريضي استطاعته (2000 Kw)

من خلال النظر في قيم الجدول (1) والتمحيص بها جيداً نجد ما يلي:

1- إن تزايد الحمل المطبق على محور المحرك مع ثبات الجهد المطبق على ملفات الثابت (جهد التغذية) تؤدي إلى تزايد معامل الاستطاعة ($Cos\varphi$)، وإلى انخفاض معامل الاستطاعة الردية ($tg\varphi$)، لكن مع هذا فإن الاستطاعة الردية الكلية (Q) للمحرك التحريضي تتغير، بسبب تزايد الاستطاعة الردية للتسرب المغناطيسي (الاستطاعة الردية التي يستجرها المحرك من أجل تغطية الفيض المغناطيسي التسري).

2- إن تزايد الجهد المطبق على ملفات الثابت للمحرك التحريضي (جهد التغذية) مع ثبات الحمل المطبق يؤدي إلى تناقص معامل الاستطاعة ($Cos\varphi$)، ويزداد هنا أيضاً عامل الاستطاعة الردية ($tg\varphi$) وتزداد الاستطاعة الردية الكلية (Q)، ولكن ليس بدرجة تزايد الجهد نفسها (بسبب زيادة الاستطاعة الردية للتمغنط). عند تزايد الجهد المطبق بمقدار (10%) من أجل $\beta = 1$ تزداد الاستطاعة الردية بمقدار 20% [$[(18.2/14.4) \cdot 100 \approx 126\%]$].

التعويض التسلسلي (الطولاني) للاستطاعة الردية:

تسمى طريقة تعويض الاستطاعة الردية، التي توصل عندها الممانعة السعوية لبطارية المكثفات على التسلسل مع مقاومة الحمولة بطريقة التعويض التسلسلي كما هو موضح على الشكل (5,a) [5]. تعطى الاستطاعة الردية المستهلكة في خطوط نقل الطاقة الكهربائية بالعلاقة:

$$Q_L = I^2 \cdot X_L \quad (6)$$

يعوض قسم من هذه الاستطاعة بوصل مكثفات تعويض على التسلسل والتي تعطى استطاعتها بالعلاقة:

$$Q_C = I^2 \cdot X_C \quad (7)$$

وبالتالي فإن الاستهلاك الكلي للاستطاعة الردية في الخط بعد وصل المكثفات يساوي:

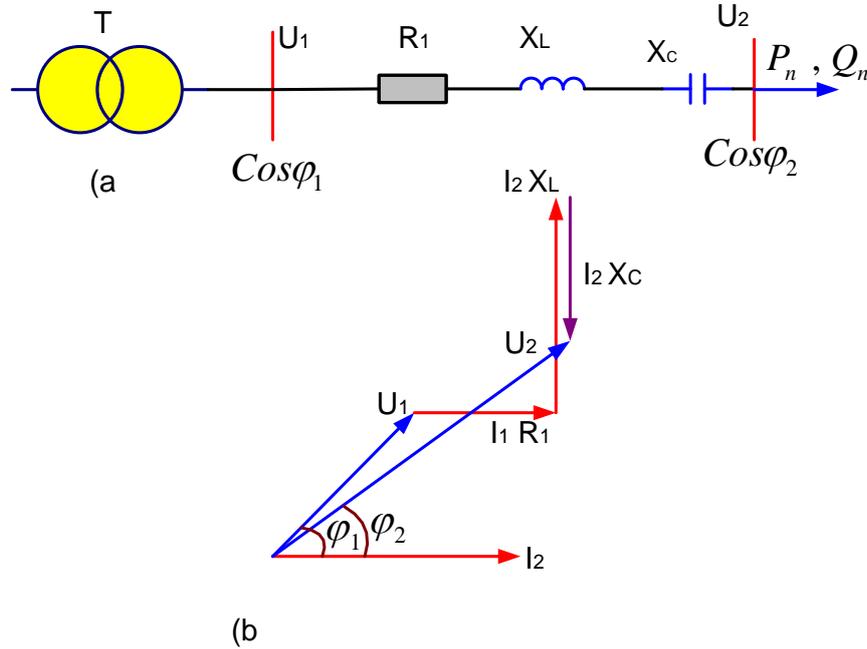
$$Q'_L = Q_L - Q_C = I^2 (X_L - X_C) \quad (8)$$

في الحالة التي يكون فيها ($X_L > X_C$) يحصل تعويض جزئي للاستطاعة الردية في الخط. أما إذا كانت ($X_L = X_C$) فإنه يحصل تعويض كامل (100%) للاستطاعة الردية والتي عندها يكون ($\cos \varphi_2 \approx \cos \varphi_1$)، وأخيراً إذا كانت ($X_L < X_C$) فإنه سيتولد في الخط استطاعة ردية، وبالتالي يكون ($\cos \varphi_2 > \cos \varphi_1$) وذلك لأنه:

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{Q_n + I^2 (X_L - X_C)}{P_n + I^2 \cdot R_1} < \operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{Q_n}{P_n} \quad (9)$$

تستخدم طريقة التعويض التسلسلي من أجل تحسين معامل الاستطاعة ($\cos \varphi$) لمستهلكات الطاقة الكهربائية

[8,7,6,5].



الشكل (5) - المخطط الأولي لوصف معوض تسلسلي (a) ومخططة الشعاعي (b).

U_2 , U_1 - الجهد عند المنبع وعند مستقبلات الطاقة الكهربائية بالترتيب.

X_L , R_1 - المقاومة الفعلية والممانعة التحريضية الردية لخط النقل.

X_C - الممانعة السعوية للمعوض التسلسلي.

Q_n , P_n - الاستطاعة الفعلية والردية لمستهلك الطاقة الكهربائية .

يؤدي استخدام التعويض التسلسلي إلى زيادة قيمة الجهد أو رفعها على القضبان التي تغذي مستهلكات الطاقة، والتي تتعلق بتيار الحمولة. من أجل بارامترات الخط فقط (مقاومة فعلية وممانعة تحريضية) فإن شعاع الجهد (U_2) سيكون أصغر من شعاع الجهد (U_1) بمقدار قيمة الضياع في الجهد

$$\Delta U = \frac{P_n \cdot R_1 + Q_n \cdot X_L}{U_1} \quad (10)$$

أما عند وصل مكثف على التسلسل (معوض تسلسلي) فيكون:

$$\Delta U' = \frac{P_n \cdot R_1 + Q_n (X_L - X_C)}{U_1} \quad (11)$$

ويكون مقدار إنقاص هبوط الجهد عند ذلك:

$$\Delta U_K = \Delta U - \Delta U' = Q_n \cdot X_C / U_1 \quad (12)$$

يفسر ذلك بظهور هبوط توتر قدره ($I_2 \cdot X_C$) اتجاهه معاكس لاتجاه هبوط الجهد ($I_2 \cdot X_L$). يمكن عن طريق اختيار قيمة الممانعة السعوية أن نجعل القيمة المطلقة للشعاع (U_2) تساوي القيمة المطلقة للشعاع (U_1) أو أكبر منها، عندئذ يكون $\Delta U' < 0$.

من هنا تأتي الأهمية الثانية في استخدام المعوضات التسلسلية، وهي إمكانية استخدامها بوصفها وسائل لتنظيم الجهد (بوصفها منظمات للجهد). عندئذ تتلخص الأهمية الكبرى لهذه المعوضات في التنظيم الأوتوماتيكي للجهد عند تغيير حمولات مستهلكات الطاقة. في هذه الحالة يتم اختيار قيمة الممانعة الردية السعوية بالعلاقة [5]:

$$X_C = \frac{U_n (\Delta U - \Delta U_{all})}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot I_{all} \cdot \sin \varphi_2} \quad (13)$$

إذ أن:

U_n - الجهد الاسمي للشبكة ؛ I_{all} - التيار المسموح به لبطارية المكثفات .

ΔU - هبوط الجهد من دون المعوضات التسلسلية %.

ΔU_{all} - القيمة المعيارية المسموح بها لهبوط الجهد % .

تحسين محددات المحرك التحريضي باستخدام المعوضات التسلسلية:

يعد البحث أن الوسيلة أو الطريقة المناسبة لتقليل وزن المحركات وحجمها والآلات الكهربائية من أهم المتطلبات الأساسية للتصميم لما لذلك من أهمية اقتصادية وتصميمية كبيرة. يمكن أن تكون إحدى الطرق المناسبة لحل هذه المسألة هي استخدام مكثفات (معوضات) سعوية تسلسلية أولية، حيث توصل هذه المكثفات على التسلسل مع ملفات ثابت المحرك التحريضي [7].

يبين الشكل (6,a) المخطط الشعاعي لمحرك تحريضي من دون استخدام مكثفات التعويض والشكل (6,b) المخطط الشعاعي باستخدام مكثفات التعويض. نعدّ الفيض المغناطيسي (Φ_m) مرجعاً أساسياً (منطبق على محور الفواصل) وحيث يولد هذا الفيض قوة محرّكة كهربائية في ملف الثابت ($E_1 = E'_2 = K_e \cdot E_2$) مساوية للجهد المطبق على فرع التمرنظ في الدارة المكافئة للمحرك التحريضي والمتأخرة عن الفيض المغناطيسي بزاوية قدرها ($\pi/2$). تحدد قيمة هذه القوة بالعلاقة [7,2,1]:

$$(E_1 = E'_2 = K_e \cdot E_2) = 4.44 \cdot f_1 \cdot W_1 \cdot K_{w1} \cdot \Phi_m \quad (14)$$

إذ إن:

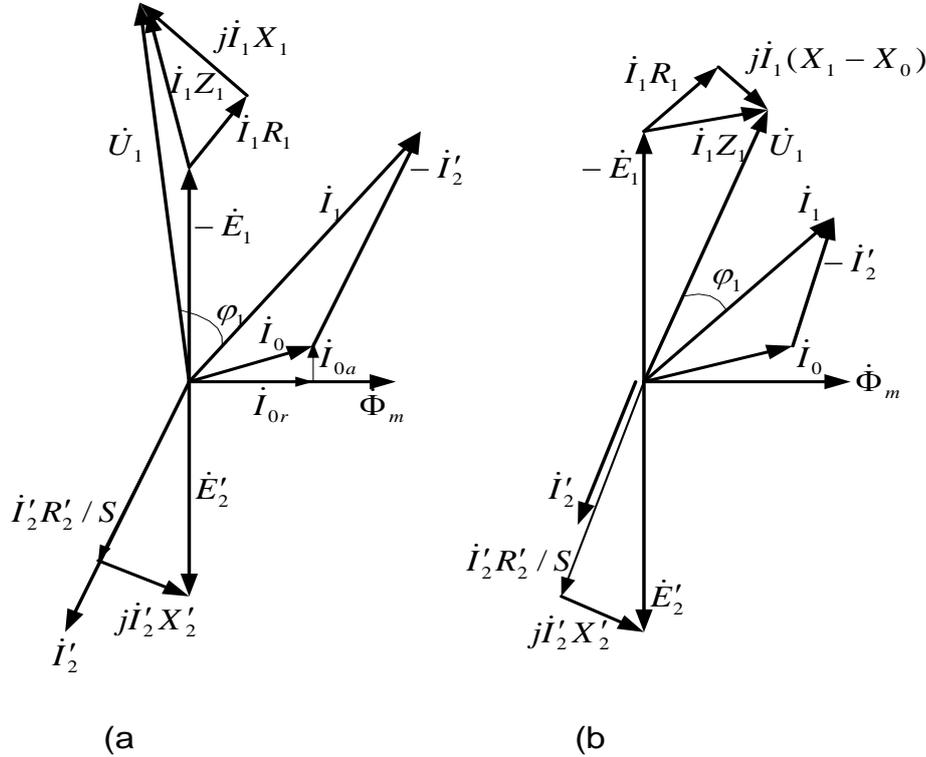
f_1 - تردد الشبكة بالهرتز ؛ W_1, K_{W1} - معامل اللف وعدد لفات الطور لملف الثابت.

يلاحظ من مقارنة الشكلين (6,a) و (6,b) أن استخدام مكثفات للتعويض موصولة على التسلسل مع ملفات الثابت يؤدي إلى زيادة القوة المحركة الكهربائية (E_1) المتولدة في ملفات الثابت، وبالتالي زيادة القوة المحركة الكهربائية في ملفات الدائر (E_2).

عندما تكون الدارة المغناطيسية للمحرك التحريضي غير مشبعة مغناطيسياً يمكن أن نعد أن المقاومات الفعلية والممانعات التحريضية التسريبية لملفي الثابت والدائر ثابتة لا تتغير، ولا تتعلق إطلاقاً بدرجة التعويض. في هذه الحالة تغير ممانعة مكثفات التعويض سيتغير كل من تيار المغنطة للدائر والتيار المستجر من قبل المحرك بشكل متناسب طرداً مع القوة المحركة الكهربائية (E_1)؛ وذلك لأن منحنى المغنطة يكون خطياً (الآلة غير مشبعة مغناطيسياً)، وتيار الدائر يعطى بالعلاقة:

$$I_2 = \frac{E_2 \cdot S}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2 \cdot S^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{(R_2/S)^2 + X_2^2}}$$

$$I_2' = \frac{E_2' \cdot S}{\sqrt{R_2'^2 + X_2'^2 \cdot S^2}} = \frac{E_2'}{\sqrt{(R_2'/S)^2 + X_2'^2}} \quad \text{و} \quad (15)$$



الشكل (6) - المخططات الشعاعية لمحرك تحريضي في حالة: (a) عدم وجود معوضات (b) وجود معوضات.

كما أن الضياعات في ملفات المحرك وعزمه الكهرومغناطيسي سيتغيران بشكل متناسب طردياً مع مربع القوة المحركة الكهربائية:

$$T = \frac{P \cdot m_2}{2\pi \cdot f_1} \cdot E_{2S} \cdot I_{2S} \cdot \cos \psi_{2S} = \frac{P \cdot m_2}{2\pi \cdot f_1} \cdot E_2^2 \cdot \frac{R_2 / S}{(R_2 / S)^2 + X_2^2} \quad (16)$$

إذ أن:

$$\operatorname{tg} \psi_{2S} = \frac{X_2 \cdot S}{R_2} \quad \text{أو} \quad \cos \psi_{2S} = \frac{R_2 / S}{\sqrt{(R_2 / S)^2 + X_2^2}} \quad (17)$$

ومنه تكون زاوية تأخر التيار (I_2) عن القوة المحركة الكهربائية (E'_2) تساوي:

$$\psi_2 = \operatorname{arctg}(X_2 \cdot S / R_2)$$

إذا تم تشغيل المحرك التحريضي المعوض على العزم نفسه الذي يعمل عنده المحرك التحريضي غير المعوض ($T = \text{Const}$)، فإن التيارات في المحرك ستكون أصغر (أقل) ومعامل الاستطاعة والمردود سيكونان أكبر. كذلك سيكون عزم الإقلاع (T_{St}) وخاصية التحميل (معامل التحميل λ) أكبر في المحرك المعوض منها في المحرك غير المعوض.

في المحركات التحريضية المشبعة مغناطيسياً سوف يزداد تيار المغنطة بدرجة أكبر من تزايد القوة المحركة الكهربائية. إلا أنه من الناحية النوعية تبقى خاصية علاقة القيم المذكورة أعلاه بدرجة التعويض (X_C / X_1) كما تقدم. إن جميع الصيغ أو المعادلات المذكورة أعلاه مع بعض التقريب ستكون مقبولة وصالحة للاستخدام أيضاً في المحركات التحريضية المشبعة مغناطيسياً [7].

باستخدام التعويض التسلسلي يمكن أن نحل واحدة من المسائل التالية:

1- عند الحفاظ على أبعاد المحرك التحريضي المعوض تسلسلياً وحجمه مساوية الحجم هذا المحرك وأبعاده من دون معوض تسلسلي وعند الاستطاعة الاسمية نفسها يؤدي استخدام المعوضات التسلسلية إلى زيادة عزم الإقلاع ومعامل الحمولة (λ)؛

2- عند الحفاظ على عزم الإقلاع نفسه و معامل الحمولة (λ) نفسه لكلا النوعين من المحركات التحريضية المعوضة وغير المعوضة يؤدي استخدام المعوضات إلى تقليل حجم المحرك وأبعاده. من أجل اختبار الحالة الأولى أجريت الحسابات مستفيدين من مخابر الكلية ومصفاة بانياس على محركين تحريضيين استطاعتهما (400 Kw) و (3 Kw) لأجل تيار تردده (50 Hz) و (200 Hz). تم الحفاظ على قيمة الاستطاعة الاسمية للمحرك، وأبعاد أقسامه الفعالة ووزنه من دون تغيير بغض النظر عن درجة التعويض.

النتائج والمناقشة:

يبين الشكل (7) نتائج الحسابات وفقاً لتأثيرات محددة للتعويض على كلٍ من عزم الإقلاع والعزم الأعظمي للمحرك عند تردد (200 Hz).

إن عزوم المحرك معطاة بالوحدات النسبية بوصفها نسبة بين العزم عند التعويض إلى العزم من دون تعويض:

$$T_{\max} = \frac{T_{\max,c}}{T_{\max,nc}} \quad ; \quad T_{St} = \frac{T_{St,c}}{T_{St,nc}}$$

لقد أظهرت الحسابات وجود قيم ما للممانعات المعوضة، يمكن عندها الحصول على أكبر قيمة لكل من عزم الإقلاع والعزم الأعظمي. يكون للتعويض التسلسلي فعالية كبيرة لأجل المحركات ذات الاستطاعة الكبيرة، وكلما كان تردد التيار لهذه المحركات أكبر. إن تأثير التعويض التسلسلي على القيمة العظمى لكل من عزمي الإقلاع والأعظمي موضحة في الجدول (2).

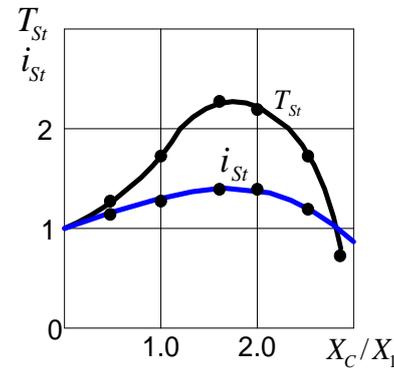
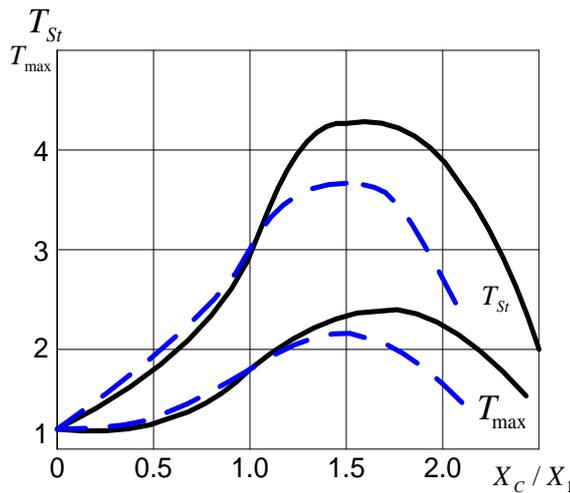
الجدول (2) - يبين تأثير التعويض التسلسلي في القيمة العظمى لكل من عزمي الإقلاع والأعظمي

X_C / X_1	2.0	1.5	2.0	1.5
$P_n (Kw)$	400	400	3000	3000
$f_1 (Hz)$	50	200	50	200
T_{max}	1.6	2.1	1.8	2.45
T_{St}	1.8	3.85	2.1	4.2

سنبين لاحقاً نتائج الحسابات التي تساعد في تقدير تأثير التعويض التسلسلي في التيار المستجر للمحرك وعلى معامل الاستطاعة والمردود من أجل استطاعة اسمية ثابتة تساوي $P_n = (3 Kw)$ وتردد $f_1 = 50 Hz$ (جدول 3):

الجدول (3) - يبين تأثير التعويض التسلسلي في التيار المستجر للمحرك وفي المردود ومعامل الاستطاعة من أجل $P_n = (3 Kw)$ و $f_1 = 50 Hz$.

X_C / X_1	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
$I_n (A)$	11.17	11.02	10.84	10.75	10.61	10.45
η_n	0.821	0.823	0.824	0.825	0.826	0.828
$Cos\phi_n$	0.851	0.866	0.879	0.887	0.896	0.908
$\theta_n (C^0)$	74.4	72.8	70.8	69.7	68.6	67.0



الشكل (7) - منحنيات تأثير الممانعة التعويضية في عزمي الإقلاع والأعظمي

الشكل (8) - منحنيات تأثير ممانعات التعويض في كل من تيار الإقلاع وعزم الإقلاع.

الإقلاع والأعظمي:

---- عند استطاعة $P_n = 400 Kw$ وتردد $f_1 = 200 Hz$ ؛

___ عند استطاعة $P_n = 3 Kw$ وتردد $f_1 = 200 Hz$ ؛

لقد أجريت الحسابات مع الأخذ بعين الاعتبار تغير إشباع الدارة المغناطيسية للمحرك عند تغير درجة حرارة التعويض التسلسلي؛ إذ أظهرت المعطيات المبينة أعلاه أنّ استخدام التعويض التسلسلي عند قيم متغيرة لـ (X_C / X_1) ، على الرغم من أن هذا التغير صغير وغير ملحوظ تقريباً، سيؤدي إلى تحسين ملحوظ في مؤشرات الطاقة للمحرك التحريضي في نظام العمل الاسمي [7].

يبين الشكل (8) النتائج التي حصلنا عليها تجريبياً عند استخدام مكثفات تعويض تسلسلية لمحرك تحريضي ثلاثي الطور استطاعته الاسمية $(250 Kw)$ موصول على شبكة متناوبة ثلاثية الطور ترددها $(50 Hz)$. إن عزم الإقلاع للمحرك التحريضي المعوض عند $(X_C / X_1 = 1.8)$ بالمقارنة مع عزم الإقلاع للمحرك نفسه من دون تعويض يزداد بمقدار (2.2) مرة. يلاحظ أيضاً أن شكل المنحني التجريبي لعزم الإقلاع النسبي (T_{St}) يتطابق بشكل جيد مع النتائج الحسابية. إن تيار الإقلاع (المنحني $i_{St} = I_{St,c} / I_{St,cm}$) عند التغير في درجة التعويض يتغير ولكن بدرجة أقل ويصل إلى قيمته العظمى $i_{St} = 1.33$ عند $(X_C / X_1 \approx 1.3)$.

يعبر أيضاً عن القوة المحركة الكهربائية للطور في الثابت بالعلاقة:

$$E_1 = 4.44 \cdot f_1 \cdot W_1 \cdot K_{W1} \cdot B_\delta \cdot \ell_1 \cdot \tau = 4.44 \cdot f_1 \cdot W_1 \cdot K_{W1} \cdot B_\delta \cdot \ell_1 \cdot \pi \cdot D_1 / 2P \quad (18)$$

طالما أن التحريض المغناطيسي في الثغرة الهوائية (B_δ) يعطى، لذا يمكن عدّ ولأجل نظام العمل الاسمي أن جداء عدد لفات الطور للثابت (W_1) بالطول الفعال للنواقل (ℓ_1) والقطر الداخلي للثابت (D_1) له قيمة ثابتة:

$$W_1 \cdot \ell_1 \cdot D_1 = const$$

بالتالي، فإن زيادة عدد اللفات يمكن أن يؤدي إلى إنقاص أبعاد المحرك. من المناسب لأجل المحركات المستخدمة في التجهيزات المنزلية ووفقاً للخواص التكنولوجية عند تحضيرها، تصغير طول حديد الثابت (ℓ_1) . إن زيادة عدد لفات الطور للثابت (W_1) يؤدي إلى زيادة المقاومة الفعلية والممانعة التحريضية التسريبية لملف الطور للثابت، وهذا يؤدي إلى إنقاص عزمي الإقلاع والأعظمي للمحرك التحريضي [7,1,2]:

$$T = \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot R'_2 / S}{2\pi \cdot f_1 [(R_1 + R'_2 / S)^2 + (X_1 + X'_2)^2]} \quad (19)$$

لهذا السبب المذكور لا يسمح بزيادة عدد اللفات لملف الثابت في المحركات التحريضية غير المعوضة. أما إذا تم زيادة عدد اللفات (W_1) و بالوقت نفسه استخدم التعويض التسلسلي فإن ذلك سيؤدي إلى إنقاص طول المحرك المعوض ووزنه مقارنة مع المحرك غير المعوض مع الأخذ بعين الاعتبار الحفاظ على قيمة ثابتة لكل من عزم الإقلاع ومعامل الحمولة (λ) في الحالتين. يوضح الجدول (4) المبين أدناه تأثير التعويض التسلسلي في طول حديد الثابت ووزن المحرك.

الجدول (4) - يبين تأثير التعويض التسلسلي في طول حديد الثابت ووزن المحرك.

X_C / X_1	1.5	1.0	2.5	2.0
$P_n (Kw)$	400	400	3000	3000
$f_1 (Hz)$	50	200	50	200
$\ell_c / \ell_{n,c}$	0.82	0.55	0.89	0.75
$G_c / G_{n,c}$	0.88	0.73	0.945	0.78

لقد أظهرت الدراسة أنّ لكل نوع من أنواع المحركات درجة تعويض خاصة به والتي من أجلها يملك المحرك أقل أبعاد ممكنة، وبالتالي أقل وزن ممكن.

الاستنتاجات والتوصيات:

- إن تزايد الحمل المطبقة على محور المحرك التحريضي مع الحفاظ على قيمة الجهد المطبق على ملفات الثابت من دون تغيير يؤدي إلى تزايد معامل الاستطاعة الفعلية ($\cos \varphi = P/S$)، وإلى انخفاض معامل الاستطاعة الردية ($\tan \varphi = Q/P$)، لكن مع هذا تزايد قيمة الاستطاعة الردية الكلية (Q) المستهلكة، بسبب زيادة الاستطاعة الردية اللازمة لتغطية الفيض المغناطيسي التسريبي في المحرك.
- إن تزايد الجهد المطبق على ملفات ثابت المحرك التحريضي مع الحفاظ على قيمة الحمل على محور المحرك ثابتة يؤدي إلى تناقص معامل الاستطاعة ($\cos \varphi$) وتزايد معامل الاستطاعة الردية ($\tan \varphi$)، وبالتالي ازدياد كمية الاستطاعة الردية الكلية المستهلكة أيضاً، بسبب زيادة الاستطاعة الردية للتمغظ.
- إن استخدام التعويض التسلسلي (الطولاني) للاستطاعة الردية في المحرك التحريضي مع الحفاظ على وزن المحرك المعوض تسلسلياً وحجمه مساوٍ لحجمه ووزنه من دون تعويض، ولأجل الاستطاعة الاسمية نفسها يؤدي إلى زيادة كلٍ من عزم الإقلاع وعامل الحمل (λ) للمحرك.
- إن استخدام التعويض التسلسلي (الطولاني) للاستطاعة الردية في المحرك التحريضي مع الحفاظ على عزم الإقلاع نفسه ومعامل الحمل نفسها قبل التعويض وبعده يؤدي إلى تقليل حجم المحرك ووزنه أو إلى تكبير الاستطاعة الاسمية.
- إن زيادة التجهيزات والآلات الكهربائية المغذاة من الشبكة الكهربائية والمستهلكة للاستطاعة الردية تؤثر بشكل سلبي وكبير في الشبكة الكهربائية، وفي جودة التغذية الكهربائية، ولما كانت المحركات التحريضية هي العنصر الأساس المستهلك للاستطاعة الردية من الشبكة، حيث تستهلك هذه المحركات في البلدان المتطورة صناعاتاً حوالي % (60 ÷ 65) من الاستطاعة الردية الكلية المنقولة في شبكة التغذية بالطاقة الكهربائية؛ لذا ينصح بالتوجيه إلى جميع مالكي المنشآت الصناعية (العامة والخاصة) إلى العمل على تعويض الاستطاعة الردية لهذه المحركات، وبالتالي تحسين معامل الاستطاعة للمنشأة ككل وللشبكة وهذا ينعكس إيجابياً من الناحية الفنية والاقتصادية على المستهلكين وعلى شبكات التغذية الكهربائية.

المراجع:

- 1- ALGER, P. L. *Induction machines* . 2nd . ed. ,Gordon and breach New York , 1970, 281.
- 2 – NAGRATH, I. J. ; KOTHARI, D. P. *Ecclectic machines* . 2nd . ed. , New Delhi – 1997, 778.
- 3- GLYSHCOB, V. M.; GREBEN, V. P. *Reactive power compensation in industrial electrical installation*. Moscow , energy , 1975 , 112.
- 4 – MENEN, G .P. *Reactive power* . 2nd . ed. , Moscow, Energy , 1978 , 88 .

- 5 – ДАНЦИС, Я. Б. *Емкостная компенсация реактивных нагрузок токоприемников промышленных предприятий*. Ленинград. Энергия, 1980, 176.
- 6- CARPOV, F. F. *Reactive power compensation in distribution network* . Moscow , energy, 1975 , 92 .
- 7- ВИНУКОВ, В. А. *Перспективный тяговый электропривод транспортных средств* . Выпуск 777 , Москва , 1986, 103 .
- 8- كاميليا يوسف محمد . *المكثفات وتحسين معامل القدرة* . الطبعة الثالثة ، مصر ، الإسكندرية ، 199 ، 324 .

