

تصميم المرشحات المستخدمة للحد من التوافقيات في الشبكات الكهربائية الصناعية

الدكتور فؤاد جبل*

(تاريخ الإيداع 24 / 2 / 2008. قُبل للنشر في 12/5/2008)

□ الملخص □

الهدف من البحث هو وضع نموذج رياضي وتنفيذ برنامج على الحاسب الآلي يمكن استخدامه بسهولة لتصميم المرشحات الأحادية التوليف المستخدمة للحد من تأثير التوافقيات العليا في الشبكات الكهربائية الصناعية وخاصة على مكثفات تحسين عامل الاستطاعة .
تم الأخذ بالاعتبار أثناء التصميم المعايير الدولية التي تعطي القيم الحدية المسموح تطبيقها على المكثفات ، إضافة إلى استطاعة المرشح ونقطة الرنين وتوليف المرشح وأثر الانحرافات الناتجة عن الاختلاف في درجات الحرارة والتردد والتصنيع على توليف المرشح .

كلمات مفتاحية: مرشحات - مكثفات - التوافقيات - إخماد

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

Designing Filters geared to reducing Harmonics in Industrial and Electrical Networks

Dr. Fouad Jabal*

(Received 24 / 2 / 2008. Accepted 12 / 5 / 2008)

□ ABSTRACT □

The objective of this paper is to present a mathematical model and implement a PC program that can easily be used for designing single-tuned filters to limit the effect of high harmonics on industrial and electrical networks, especially on power factor capacitors. During the design process, the international standards giving the permissible limiting values applicable to capacitors have been taken into account, in addition to: filter power, resonance point, filter tuning, and the effect of variation resulting from manufacturing, frequency, and temperatures on filter tuning.

Keywords: Filters, Capacitors, Harmonics, reduction

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

مقدمة:

تعد المرشحات غير الفعالة ذات انتشار واسع عندما يراد تخميد التوافقيات في الشبكات الكهربائية وتصمم عادة من مجموعة مكثف - ملف موصلين على التسلسل ، حيث يبدي المرشح ممانعة منخفضة عند التردد الذي ولف عليه مما يسمح بامتصاص التيار المقابل لهذا التردد. لذلك فإنه يجب وضع مرشح توليف خاص بكل توافقية خطرة يراد الحد من تأثيرها.

يتم تصميم المرشحات عادة بافتراض عملها بالحالة الاستاتيكية بالرغم من أنها في الحياة العملية يمكن أن تعمل بالحالة الديناميكية (وصلها وفصلها وفقا لحاجة النظام) .

في حال تواجد أكثر من مرشح في النظام فإنه يفضل أولا فصل المرشحات الخاصة بالتوافقيات الأعلى ويتم التشغيل بالعكس ، أي تشغيل المرشحات الخاصة بالتوافقيات الدنيا أولا ، مع الأخذ بالاعتبار الحالة التي تكون فيها المكثفات مزودة بمفاعل فإنه في هذه الحالة يجب أن يبقى المرشح في حالة وصل دائم ليتمكن المرشح من القيام بوظيفته كمحسن لعامل الاستطاعة. حيث يعتمد فصل ووصل المرشحات على إستراتيجية تشغيل مبنية على تحليل الحالة العابرة للنظام والتي تأخذ بالاعتبار الشروط التشغيلية .

تستخدم المرشحات غير الفعالة الأحادية التوليف بشكل واسع وهي تقوم بدورين معا هما التخلص من التوافقيات الخطرة على النظام وتحسين عامل الاستطاعة .

هدف البحث وأهميته:

تكمُن أهمية البحث في وضع نموذج رياضي وتنفيذ برنامج على الحاسب الآلي يمكن استخدامه بسهولة لتصميم المرشحات الأحادية التوليف المستخدمة للحد من تأثير التوافقيات العليا في الشبكات الكهربائية الصناعية وخاصة على مكثفات تحسين عامل الاستطاعة .

طريقة البحث ومواده:

تم إنجاز هذا البحث اعتمادا على العديد من البحوث العلمية المنجزة في هذا المجال والتوقف عند نتائجها وتوصياتها ، حيث تم وضع نموذج رياضي وخوارزمية تم تنفيذها على الحاسب الآلي (برنامج على الحاسب بلغة Visual Basic) مما مكننا من تنفيذ هذا البحث واستخلاص النتائج .

سنتطرق في البحث إلى المراحل التصميمية المتعلقة بالمرشحات الأحادية التوليف والمستخدمه على نطاق واسع عند الترددات المنخفضة وسنأخذ النوع التسلسلي منها والتي تتمتع بالخصائص التالية :

- تعمل كممر ذي ممانعة منخفضة جدا للتيارات التوافقية عند التردد الذي تم توليف المرشح عليه .
- عندما تكون ممانعة النظام تحريضية فإن حالة الرنين تحدث عند تردد أخفض من التردد الذي تم توليف المرشح عليه .

▪ هناك زيادة حادة في الممانعة عند الترددات الأخفض من تردد التوليف .

▪ تزداد قيمة الممانعة للترددات الأعلى من تردد التوليف .

يتم وصف خصائص التوليف للمرشح من خلال عامل الجودة Q المعطى بالعلاقة التالية :

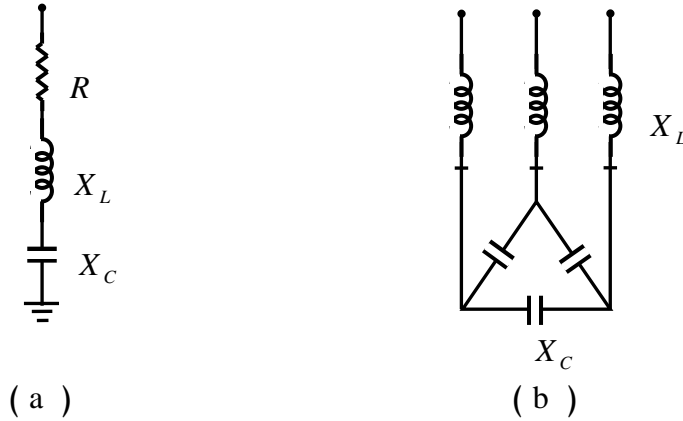
$$Q = \frac{h \cdot X_L}{R}$$

حيث: R مقاومة المرشح وهي تمثل فقط المقاومة الأومية للملف ويتم اختيارها بحيث

يكون $20 < Q < 30$.

h التوافقية المولفة. X_L مفاعلة المرشح .

يبين الشكل (1) دائرة مرشح أحادي التوليف .



الشكل (1) دائرة مرشح أحادي التوليف

(a) الوصل لطور واحد ، (b) وصل مثلثي ثلاثي الأطوار

العوامل والشروط التي تم أخذها بالاعتبار عند تصميم المرشح:

تصمم المرشحات بحيث يتم توليفها على تردد لا يساوي تماما تردد الرنين وذلك تجنباً للمخاطر المرافقة لحالة حدوث الرنين على مكونات نظام القدرة ، لذلك فإنه يجب الانتباه إلى أن نقطة الرنين (n_h) لا تساوي الرتبة (h) للنتشوه التوافقي وذلك لتجنب تلف المرشح نتيجة الرنين التسلسلي ، كما يجب أن تكون نقطة الرنين التصميمية (n_h) للمرشح المستخدم للحد من التوافقية (h) أصغر من العدد الصحيح (h) .

لتحديد مجال الرنين الآمن لنقطة الرنين نأخذ بالاعتبار العوامل التي تؤدي إلى انزياحها والتي تتمثل

بما يلي: [1]

1 - التعويض الردي: يجب أن تكون الاستطاعة الردية للمرشح مساوية للاستطاعة الردية المعوضة:

$$Q_C = \sum_{i=1}^m Q_{Fi}$$

حيث: Q_{Fi} الاستطاعة الردية التي يقدمها المرشح i عند التردد الأساسي 50 Hz .

m عدد المرشحات المركبة للتغلب على التوافقيات 5,7,11,13 .

$$Q_{Fi} = \frac{I_i}{I_1 + I_2 + \dots + I_m} Q_C$$

$$Q_{Ci} = U_C^2 \cdot \omega C = \frac{n_h^2 + 1}{n_h^2} \cdot U_{LL} \cdot \omega C$$

$$Q_{Li} = \frac{U_L^2}{\omega \cdot L} = \left(\frac{1}{n_h^2} \cdot U_{LL} \right) / \omega \cdot L$$

Q_{Ci} الاستطاعة الردية التي يجب أن يقدمها مكثف المرشح i عند التردد الأساسي
 Q_{Li} الاستطاعة الردية التي يجب أن يستهلكها ملف المرشح i عند التردد الأساسي
 2 - القيم الحدية للتشوه التوافقي الأعظمي للتيار والمحددة من قبل المواصفة IEEE 519-1992 والموضحة بالجدول (1) .

الجدول (1) القيم العظمى المسموح بها للتشوه التوافقي للتيار [5], [6]

Maximum Harmonic Current Distortion (%)						
Harmonic Order (ODD Harmonics in % of I_L)						
I_{SC}/I_L	$h < 11$	$11 < h < 17$	$17 < h < 23$	$23 < h < 35$	$h \geq 35$	THD %
< 20	4	2	1.5	0	0.3	5
$20 \div 50$	7	3.5	2.5	1	0.5	8
$50 \div 100$	10	4.5	4	1.5	0.7	12
$100 \div 1000$	12	5.5	5	2	1	15
> 1000	15	7	6	2.5	1.4	20
Even order harmonics are limited to 25% of the odd order harmonics						

يعطي الجدول (1) القيم العظمى للتشوه التوافقي المسموح بها للتيار ، حيث نلاحظ من الجدول أنه عندما يكون
 مثلا:

$$\frac{I_{sc}}{I_L} < 20$$

فإن التشوه الأعظمي لتيار التوافقية الخامسة يقع ضمن المجال :

$$0 < D_5 < 4\%$$

حيث: I_{SC} تيار القصر ، I_L تيار الحمل

1. تغيرات جهد مصدر القدرة [2]

التغيرات المسموح بها للجهد هي $\pm 5\%$ مما يؤدي إلى عدم ثبات قيمة SCC والتي تتغير وفقا لذلك بين
 قيمة دنيا وأخرى عليا SCC_{min} و SCC_{max} .

أما بالنسبة للتردد ، فإنه يسمح بتغييره ضمن المجال $\pm 1\%$ كما يلي :

$$\left| \frac{\Delta f}{f} \right| < 1\%$$

2. توليف المرشح [3]

يمكن أن يؤدي توليف المرشح إلى حدوث رنين تسلسلي تردده يقع بين نقطة الرنين التصميمية والتوافقية h .
 هناك عاملان رئيسيان يسهمان في توليف المرشح هما: تغير درجة الحرارة والانحرافات الناتجة عن التصنيع
 ويؤثران على كل من المكثف والملف .
 بالنسبة للسعة:

تتغير قيمتها بمقدار $\pm 2\%$ عن القيم التصميمية بسبب التغيرات المناخية ، وتتغير قيمتها أيضا ضمن
 المجال $5\% -$ إلى $10\% +$ نتيجة الانحرافات التصنيعية ، بالتالي فإن التغير الحاصل في قيمة سعة المكثف

نتيجة ذلك يتحدد بالعلاقة التالية :

$$-7\% \leq \frac{\Delta C}{C} \leq 12\%$$

بما أن معظم الملفات المستخدمة هي ذات قلوب هوائية لذلك فإن تحريضيتها لا تتغير بتغيرات درجة الحرارة ، إلا أنها تبقى عرضة للانحرافات التصنيعية. ويكون عادة بمقدار $\pm 3\%$ أي:

$$-3\% \leq \frac{\Delta L}{L} \leq 3\%$$

لذلك فإن نقطة الرنين التصميمية لمرشح أحادي التوليف والتي تتحدد بالعلاقة التالية :

$$n_h = \frac{1}{2 \times \pi \sqrt{L C}}$$

هي تابع للتردد وتحريضية ملف المرشح وللسعة ، ويؤدي تغير أي من هذه القيم إلى انزياح نقطة الرنين عن قيمتها التصميمية الأصلية .

يمكن الحصول على مجال تغير نقطة الرنين عن القيمة التصميمية كما يلي :

$$h \times \frac{1}{1.01 \times \sqrt{1.03 \times 1.12}} \leq n_h \leq h \times \frac{1}{0.99 \times \sqrt{0.97 \times 0.93}}$$

أو :

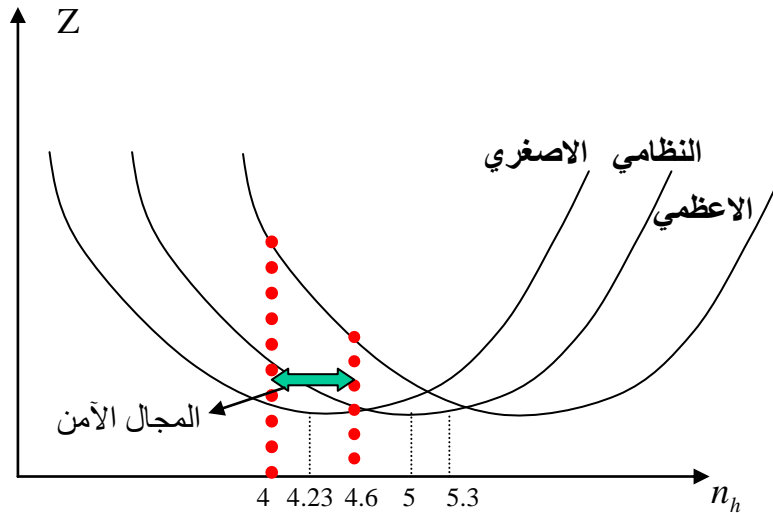
$$0.92 h \leq n_h \leq 1.06 h$$

لذلك فبالنسبة للتوافقية الخامسة حيث $h = 5$ نحصل على :

$$4.6 \leq n_5 \leq 5.3$$

وإذا كان $h = 4.6$ يكون :

$$4.23 \leq n_{4.6} \leq 4.88$$



الشكل (2) المجال الآمن لنقاط الرنين التصميمية

هذا يعني أنه لتصميم مرشح قادر على إخماد التوافقية الخامسة ومحمي من حالة حدوث رنين تسلسلي يجب أن يكون المجال المقترح للتصميم مساوي 4,6 أو أقل .

يبين الشكل (2) فكرة إيجاد المجال الآمن لتعيين نقطة الرنين التصميمية ، ولكن بشكل عام فتحدد نقطة الرنين التصميمية ولأجل أي توافقية h بالعلاقة التالية :

$$(h - 1) < n_h \leq 0.92 \times h$$

حيث n_h نقطة الرنين التصميمية و h رتبة التوافقية المطلوب تخميدها بالمرشح المصمم. بناء على ذلك فإن المجال التصميمي الآمن لنقطة الرنين لمرشح التوافقية الخامسة يساوي :

$$4 < n_5 \leq 0.92 \times 5 = 4.6$$

3 - تصميم المرشح :

يبين الشكل (b - 1) السابق دائرة التوصيل للمرشح عند تصميمه لوصله على الجهد المنخفض ، وبناء عليه يتم التصميم وفق طريقة الحساب المبسطة الشائعة الاستخدام التالية :

أ- مفاعلة المكثف :

تحسب مفاعلة المكثف من العلاقة التالية :

$$X_C = \frac{V_{Crated}^2}{Q_{Crated}}$$

حيث :

V_{Crated} الجهد الخطي للمكثف .

Q_{Crated} الاستطاعة الردية الثلاثية الأطوار للمكثف .

تحسب الاستطاعة الردية لكل مرشح سيوصل مع الشبكة بناء على الاستطاعة الردية المطلوبة لتحسين عامل الاستطاعة وفقاً للتردد الأساسي .

ب- التيار الخطي للمكثف I_{Crated}

ويحسب كما يلي :

$$I_{Crated} = \frac{Q_{Crated}}{\sqrt{3} V_{Crated}}$$

ت- مفاعلة الملف X_L ويحسب بالعلاقة التالية :

$$X_L = \frac{X_C}{(n_h)^2}$$

حيث :

h رتبة التوافقية التي ولف عليها المرشح وتؤخذ $n_h = 0.92 h$.

ث- الاستطاعة الردية المستجرة من قبل المرشح :

$$Q_F = \frac{V_{LL}^2}{X_C - X_L}$$

حيث :

. V_{LL} الجهد الخطي في نقطة الوصل .. Q_F الاستطاعة الردية المستجرة من قبل مجموعة المكثف - مفاعل .حيث قيمة Q_F أكبر من قيمة الاستطاعة الردية المستجرة من قبل المكثف لوحده .

ج- المركبة الأساسية لتيار المرشح :

$$I_F = \frac{Q_F}{\sqrt{3} V_{LL}}$$

ح- القيمة الفعالة لتيار الخط للمرشح

$$I_{F rms} = \sqrt{I_F^2 + I_h^2}$$

حيث I_h القيمة الفعالة للتيار الخطي المراد ترشيحه .

خ- تعطى القيمة الفعالة للجهد على المكثف وللتوافقيات الأساسية بالعلاقة التالية :

$$V_C = \sqrt{3} I_F X_C$$

د- هبوط الجهد في المكثف والعائد للتيار التوافقي I_h يعطى بالعلاقة التالية :

$$V_{Ch} = \sqrt{3} I_h \frac{X_C}{h}$$

ذ- القيمة الفعالة الحقيقية للجهد على المكثف :

$$V_{C rms} = \sqrt{V_C^2 + V_{Ch}^2}$$

ر- القيمة العظمى للجهد على المكثف :

$$V_{C peak} = \sqrt{2} V_C + \sqrt{2} V_{Ch}$$

ز- بافتراض أن الاستطاعة الظاهرية الكلية المستجرة من قبل المكثف هي ردية بالكامل ، عندها فإن الاستطاعة

المستجرة من قبل المكثف كجزء من المرشح هي :

$$Q_{CF} = \sqrt{3} V_{C rms} I_{F rms}$$

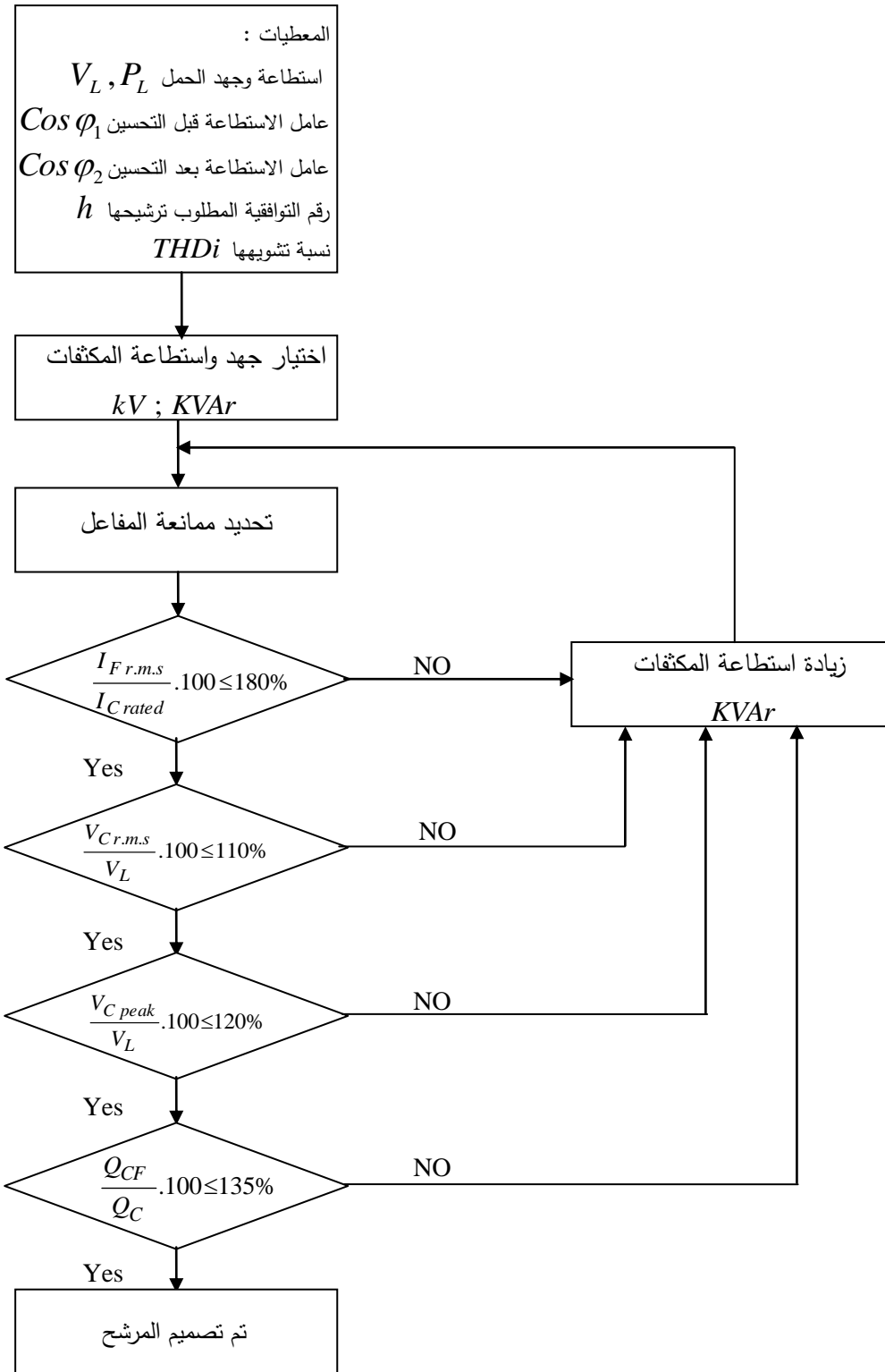
س- أخيرا يجب مقارنة القيم المحسوبة أعلاه مع القيم الحدية المسموح بها للمكثفات والتي يتضمنها

الجدول (2) . [4]

الجدول (2) القيم الحدية المسموح بها للمكثفات وفقا للمواصفة ANSI/IEEE 18-1980

الحد الأعظمي	
180 %	القيمة الفعالة الحقيقية للتيار
110 %	القيمة الفعالة الحقيقية للجهد
120 %	القيمة العظمى للجهد
135 %	الاستطاعة الردية

استنادا إلى العلاقات المذكورة أعلاه ووفقا للمخطط الانسيابي المبين في الشكل (3) ، تم تنفيذ برنامج حاسبي على الحاسب بلغة Visual Basic يقوم بحساب ممانعة المرشح لتصميمه لتخميد توافقية معينة في الشبكة .



الشكل (3) المخطط الانسيابي للبرنامج

4 - وصف البرنامج:

يتصف البرنامج بسهولة الاستخدام والسرعة والدقة في الحصول على النتائج. يأخذ البرنامج بالاعتبار أثناء الحساب نقطة الرنين التصميمية الآمنة التي استنتجت بناء على العوامل المؤثرة على توليف نقطة الرنين ، وعلى شرط الابتعاد عن نقطة الرنين تجنباً للمخاطر المحتملة على مكثفات تحسين عامل الاستطاعة .

يتم استخدام البرنامج كما يلي :

أولاً: يجب معرفة نسب التشوه التوافقي وتحديد التوافقيات الخطرة في الشبكة والتي يراد الحد منها ، وذلك من خلال إجراء القياسات الفعلية على الشبكة .

ثانياً: عند تشغيل البرنامج تظهر على سطح المكتب النافذة المبينة في الشكل (5) والتي يتم من خلالها إدخال المعطيات الضرورية عن الشبكة المدروسة والتي تشمل: استطاعة الحمل ، جهد الحمل ، عامل الاستطاعة قبل وبعد التعويض ، رتبة التوافقية الخطرة ونسبة التشوه كنسبة مئوية من المركبة الأساسية للتيار .

ثالثاً: يقوم البرنامج بعد إدخال المعطيات بحساب الاستطاعة الردية للمكثفات المطلوب تركيبها لتحسين عامل الاستطاعة وتظهر النافذة المبينة في الشكل (6) .

رابعاً: يتم اختيار الاستطاعة الردية القياسية للمكثفات وإدخالها ضمن النافذة المبينة بالشكل (6) $New Q_C$ ، مع العلم أنه إذا تم إدخال قيمة صغيرة لاستطاعة المكثفات لا تحقق الشروط المبينة في الجدول (2) فإن البرنامج ينتقل آلياً إلى قيمة أكبر تتحقق عندها هذه الشروط ، أما إذا تم إدخال قيمة أكبر من تلك اللازمة لتحقيق هذه الشروط فإن البرنامج يقبلها يتعامل معها للحصول على النتائج .

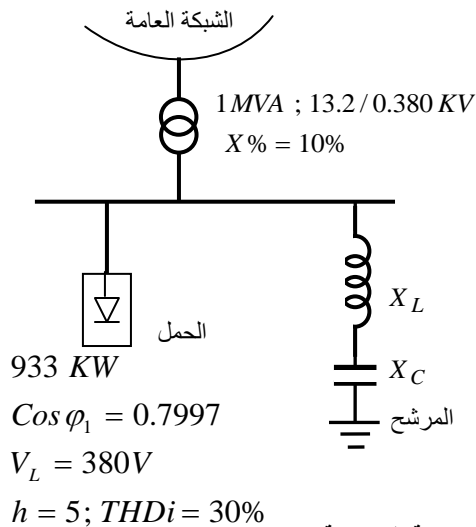
خامساً: بعد إدخال قيمة الاستطاعة للمكثف ، نضغط على calculate ضمن النافذة المبينة في الشكل (6)

ليقوم البرنامج بعدها بإعطاء نتائج الحساب وإظهارها ضمن نافذة كالمبينة في الشكل (7) .

سادساً: إذا أردنا إظهار قيم التحقق المتوافقة مع الجدول (2) والنتائج النهائية ، نقوم بالضغط على إيقونة (إظهار قيم التحقق) الموجودة ضمن النافذة المبينة بالشكل (7) لنحصل بعدها على النتائج المبينة في الشكل(8)التي تتضمن أيضاً ممانعة المرشح واستطاعة المكثفات.

وكتطبيق على ذلك تم إجراء دراسة تصميمية لمرشح أحادي التوليف للشبكة الكهربائية الصناعية المبينة في

الشكل (4) .



الشكل (4) الشبكة الكهربائية المدروسة

حيث تم إدخال معطيات الشبكة من خلال النافذة المبينة بالشكل (5) ، وبالضغط على Enter قام البرنامج بإظهار النافذة المبينة في الشكل (6) حيث تم اختيار القيمة الجديدة لاستطاعة المكثفات وهي 350 KVAR :

SI = 1168.104 KVA
 QI = 702.8362 KVAr
 Qc = 396.1739 KVAr
 New Qc = 350 KVAr
 Calculate

الشكل (6) نافذة إدخال NEW Q_c

P load = 933 KW
 V load = 0.380 KV
 COS Fay1 = 0.79873
 COS Fay2 = 0.95
 H = 5
 THDi = 0.3
 Enter

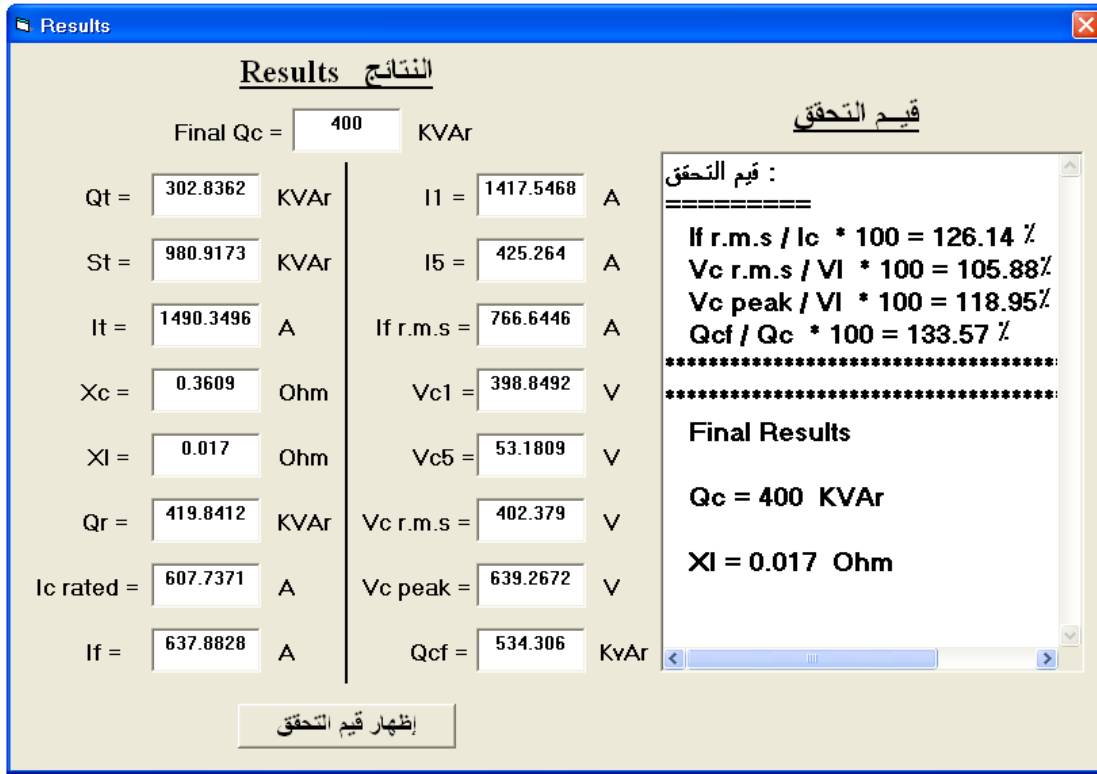
الشكل (5) نافذة إدخال المعطيات

وبعد الضغط على (calculate) قام البرنامج بتنفيذ الحساب وأعطى النتائج التالية المبينة في الشكل (7) ، حيث نلاحظ بأن الاستطاعة الردية للمكثفات والتي تحقق الشروط المطلوبة أصبحت 400KVAR :

Results النتائج
 Final Qc = 400 KVAr
 Qt = 302.8362 KVAr
 St = 980.9173 KVAr
 It = 1490.3496 A
 Xc = 0.3609 Ohm
 XI = 0.017 Ohm
 Qr = 419.8412 KVAr
 Ic rated = 607.7371 A
 If = 637.8828 A
 I1 = 1417.5468 A
 I5 = 425.264 A
 If r.m.s = 766.6446 A
 Vc1 = 398.8492 V
 Vc5 = 53.1809 V
 Vc r.m.s = 402.379 V
 Vc peak = 639.2672 V
 Qcf = 534.306 KVAr
 إظهار قيم التحقق

الشكل (7) نافذة إظهار النتائج

وللحصول على النتائج النهائية وقيم التحقق تم الضغط على إيقونة (إظهار قيم التحقق) ، التي أعطت بعدها النتائج المبينة في الشكل (8) .

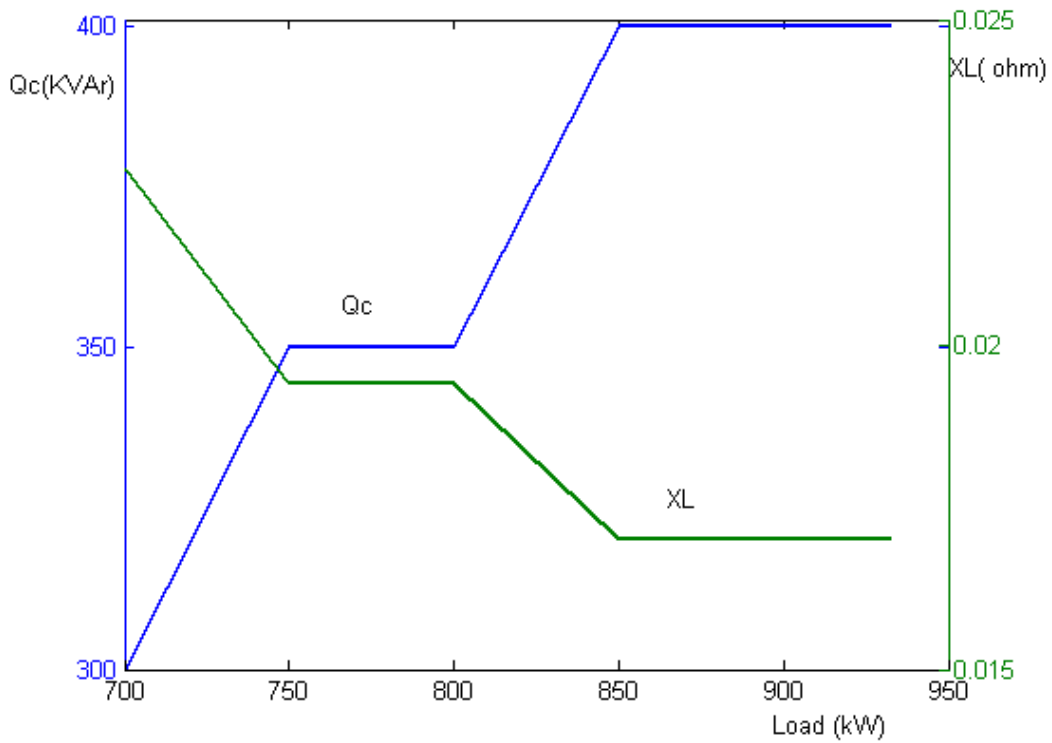


الشكل (8) نافذة إظهار النتائج وقيم التحقق والنتائج النهائية

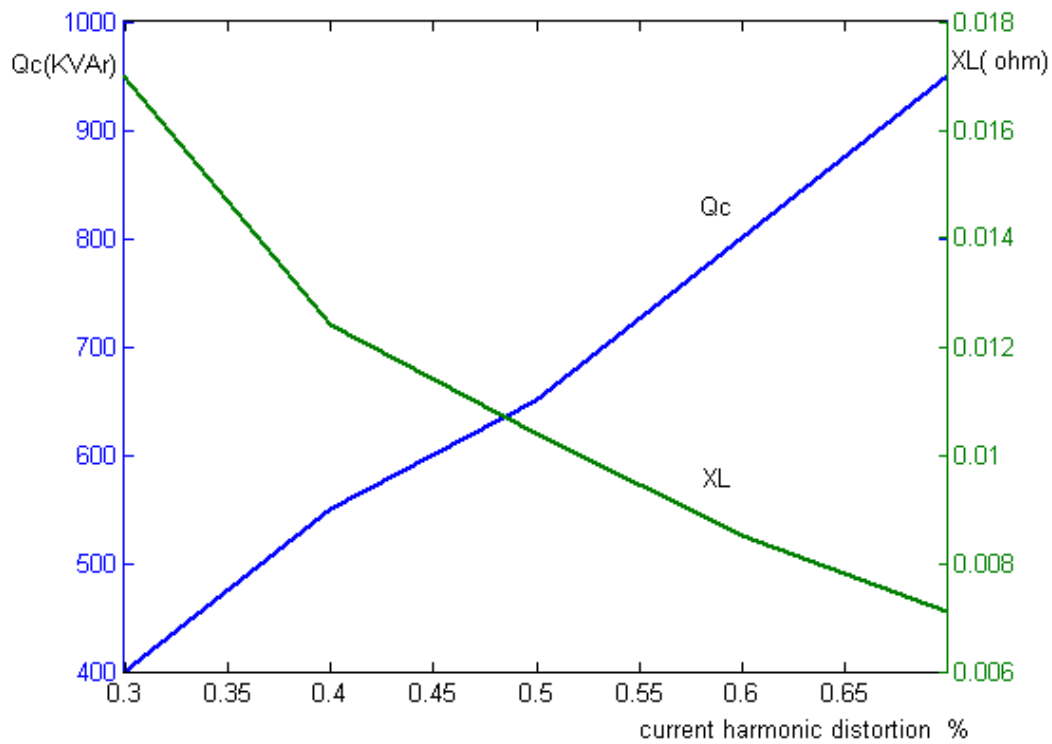
النتائج والمناقشة:

باستخدام هذا البرنامج ، نلاحظ أنه إذا بقيت جميع المعطيات ثابتة وتم تغيير استطاعة الحمل فإن استطاعة المكثفات تقل مع نقصان استطاعة الحمل وبالمقابل تزداد ممانعة المرشح كما هو موضح في الشكل (9) . أما إذا تم تغيير نسبة التشوه التوافقي للتيار وعند توافقية محددة (الخامسة) مع بقاء جميع المعطيات الأخرى ثابتة نلاحظ بأن استطاعة المكثفات المطلوبة تزداد مع زيادة هذه النسبة ، بينما تقل ممانعة المرشح كما هو موضح في الشكل (10) .

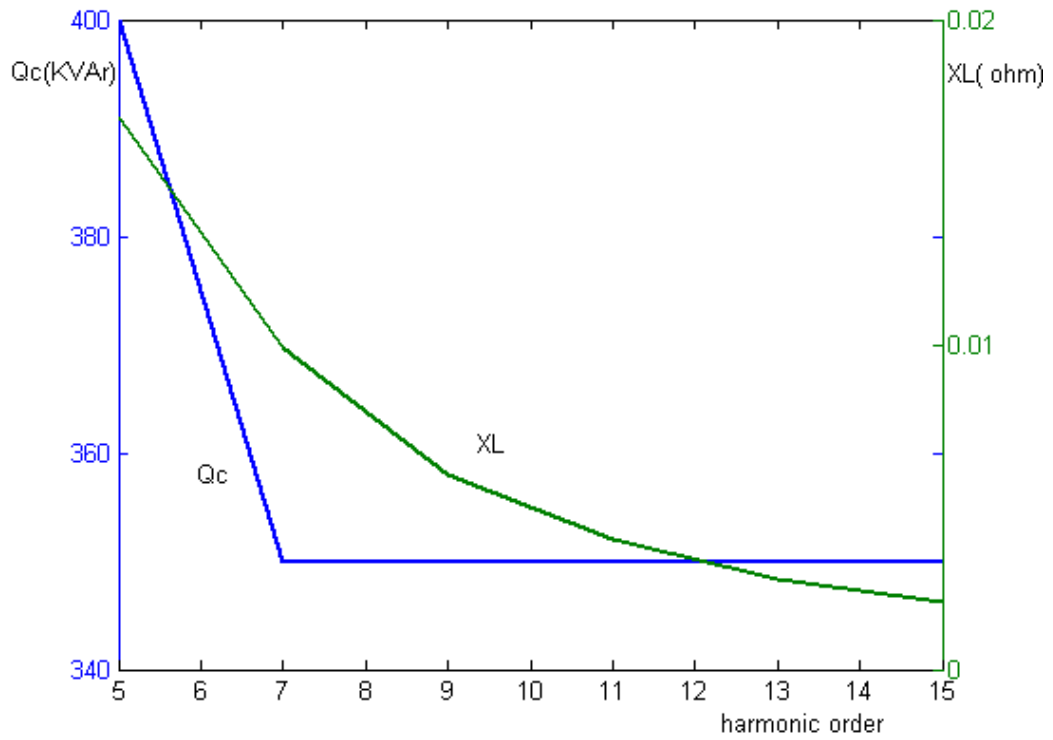
وإذا تم تغيير رتبة توافقية التيار مع بقاء جميع المعطيات الأخرى ثابتة ، نلاحظ أن استطاعة المكثفات المطلوبة تبقى ثابتة تقريباً مع زيادة هذه الرتبة ، بينما تقل ممانعة المرشح كما هو موضح في الشكل (11) . إذا تم تغيير عامل استطاعة الحمل قبل التحسين (والمطلوب تحسينه) مع بقاء جميع المعطيات الأخرى ثابتة، نلاحظ بأن استطاعة المكثفات المطلوبة تقل مع زيادة قيمة هذا العامل ، بينما تزداد تقريباً ممانعة المرشح كلما ازدادت قيمة عامل الاستطاعة لما قبل التحسين وتصبح ثابتة تقريباً كلما اقتربت قيمته من قيمة عامل الاستطاعة لما بعد التحسين ، كما هو موضح في الشكل (12) . يجب الإشارة إلى أنه تم اعتبار المكثفات على أنها مكونة من وحدات استطاعة كل منها 50KVar ، ويمكن تعديل هذا الرقم إلى قيم أكبر أو أصغر .



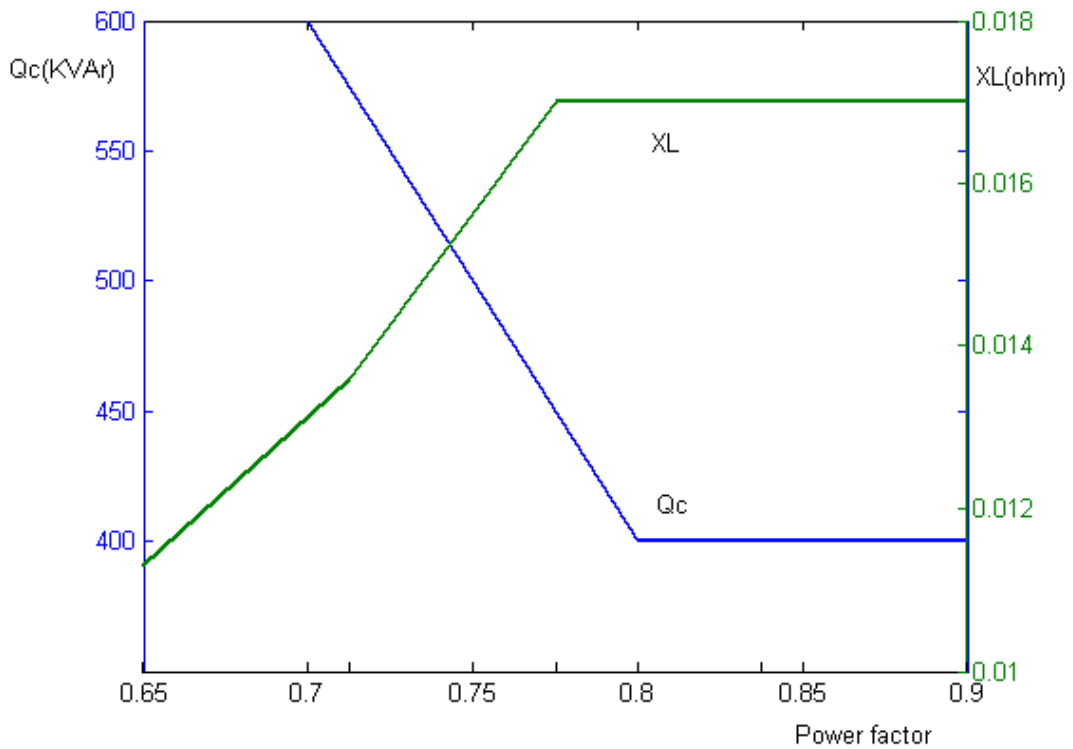
الشكل (9) استطاعة المكثف وممانعة المرشح كتابع لاستطاعة الحمل



الشكل (10) استطاعة المكثف وممانعة المرشح كتابع لنسبة التشوه التوافقي للتيار



الشكل (11) استطاعة المكثف وممانعة المرشح كتابع لرتبة التوافقية



الشكل (12) استطاعة المكثف وممانعة المرشح كتابع لعامل استطاعة الحمل قبل التحسين

الاستنتاجات والتوصيات:

تم خلال البحث استعراض الخطوات السليمة التي يجب اتباعها عند تصميم المرشحات الأحادية التوليف والمستخدم للحد من تأثير التشوه التوافقي للتيار على مكثفات تحسين عامل الاستطاعة في الشبكات الكهربائية الصناعية ، كما تم تنفيذ برنامج على الحاسب الآلي يساعد المهتمين بهذا المجال في الحصول على دقة في تصميم المرشحات وسرعة في إنجاز العمل. بينت أيضا ضمن البحث تأثير تغيير نسب التشوه واستطاعة الحمل وعامل استطاعة الحمل قبل التحسين ورتبة التوافقيات على ممانعة المرشح وعلى استطاعة المكثفات المطلوبة، حيث وجد أن استطاعة المكثفات تزداد بينما تقل ممانعة المرشح مع زيادة استطاعة الحمل وزيادة نسبة التشوه التوافقي للتيار، وعكس ذلك يحدث عند زيادة قيمة عامل الاستطاعة لما قبل التحسين ، وأن استطاعة المكثفات وممانعة المرشح تقلان مع زيادة رتبة التوافقيات.

المراجع:

1. LESZEK S. C , HERBERT L. G *The Effect of the Design Method on Efficiency of Resonant Harmonic Filters*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 1, 2005, 286-291
2. Ginn H.L.: *Resonant Harmonic Filters: Their Optimization and Limits of Effectiveness*. IEEE, PESSM, 2000, 783-788.
3. HERBERT, L.G. *Improvement of Resonant Harmonic Filter Effectiveness in The Presence of Distribution Voltage Distortion*. Dissertation of Ph.degree. Louisiana State University, 2002,122.
4. GONZALEZ A.D.: *Design of filters to reduce harmonic distortion in industrial power systems*. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.23,1987,504-511.
5. *IEEE Recommended Practice and requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*, IEEE Standard 519-1992, Published by IEEE, 1992.
6. *IEEE Guide for Application of Shunt Power Capacitors*, IEEE Standard 1036-1992, ISBN 0-7381-0376-4, 1992.

