

التعويض الأمثل للاستطاعة الردية في شبكات التوزيع الكهربائية*

م. محمد موفق الخطيب**

الملخص

تعد مسألة تعويض الاستطاعة الردية في شبكات التوزيع الكهربائية من المسائل الحيوية بيئياً واقتصادياً، لذلك فقد جرى من خلال هذا البحث:

التطرق لأحدث التجهيزات المستخدمة في تعويض الاستطاعة الردية في شبكات التوزيع الكهربائية واستعراض مميزاتهما، ثم بعد ذلك استُعرضت العلاقات الرياضية التي يستخدمها برنامج ETAP إذ يحوي البرنامج على وظيفة (OCP) تمكننا من حساب الاستطاعة المثلى وتحديد المكان الأمثل لمعوضات الاستطاعة الردية في شبكات التوزيع الكهربائية بهدف تخفيض الضياع وتحسين أداء هذه الشبكات.

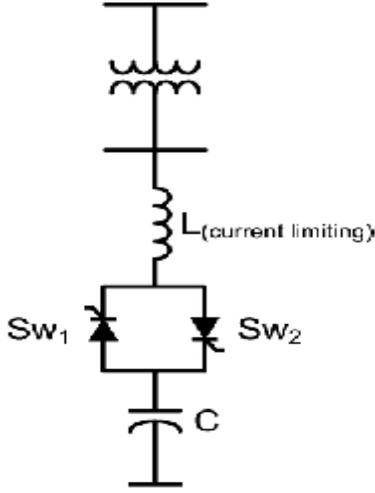
هذا فضلاً عن شرح نظري مبسط عن الخوارزميات الجينية لأن البرنامج يركز عليها في عمله.

كما طُبّق هذا البرنامج على جزء من شبكة ريف دمشق في ضوء بارامترات تشغيلها الحقيقية، دُرست الآثار الاقتصادية لهذا التطبيق فضلاً عن الآثار الفنية الإيجابية، إذ لوحظ تحسن في قيمة عامل الاستطاعة وتحسن في أوضاع التوتر على عقد الشبكة (Voltage Profile).

الكلمات المفتاحية: برنامج ETAP6.0، الأمثلة optimization، الخوارزميات الجينية، المكثفات ذات القواطع الثايرستورية، تعويض الاستطاعة الردية

*أعد البحث في سياق التسجيل لرسالة الدكتوراه للمهندس محمد موفق الخطيب

**قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق



الشكل (1) المعوض الساكن من نوع TSC

إن للمعوض الساكن من نوع TSC الخصائص والميزات الآتية:

- تحكم متدرج بالاستطاعة الردية.
- تأخير وسطي نحو نصف دور (أو دور واحد بشكل أعظمي).
- لا يوجد توليد للتوافقيات. [2]
- يمكن توصيل المكثفات وبتوترات وتيارات عابرة أصغرية إذا قُدحَ الثايرستور في اللحظة التي يكون توتر المكثف مساوياً لتوتر الشبكة.
- تكون المركبة العابرة للتيار مساوية للصفر إذا وصلَ المكثف في اللحظة التي يكون فيها توتر المنبع يساوي التوتر الأعظمي للنظام وكان التوتر الابتدائي للمكثف يساوي توتر النظام الأعظمي.
- إلا أن للمعوضات الساكنة من نوع TSC المساوي الآتية:
- لها بنية غير اقتصادية نظراً إلى حاجة كل مرحلة من مراحل المكثفات إلى قواطع ثايرستورية منفصلة.
- يجب أن يتحمل العنصر الثايرستوري غير الموصل ضعفي القيمة العظمى لتوتر التغذية.
- على الثايرستور أن يتحمل العمل في حالة القصر كحالة عابرة، وأن يكون محمياً بواسطة الحماية اللازمة.

1- المقدمة:

من المعلوم أن هناك أساليب وإجراءات عديدة لتحسين أداء شبكات التوزيع الكهربائية، إلا أن أهمها وأكثرها نجوعاً هو تعويض الاستطاعة الردية عن طريق حقنها في عقد (باسبارات) شبكة التوزيع، فضلاً عن مفعول تعويض الاستطاعة الردية لتحسين عامل الاستطاعة وتحسين وضع التوتر (Voltage Profile) على عقد الشبكة، هناك الفائدة الأهم من الناحيتين البيئية والاقتصادية ألا وهي خفض مقدار الاستطاعة الحقيقية الضائعة P_{loss} في فروع هذه الشبكة [1].

2- الأساس النظري لمعوضات الاستطاعة الردية الثايرستورية:

يمكن أن تصنف المعوضات الردية الساكنة الثايرستورية إلى:

1.2 المكثفات ذات القواطع الثايرستورية TSC:

وقد كان أول طرح لـ TSC (Thyristor Switch Capacitor) في عام 1971 وذلك من قبل شركة ASEA. يبين الشكل (1) المخطط الأساسي للمعوض الساكن من نوع TSC إذ يتكون الفرع لكل طور من المكثف C وقاطعين ثايرستوريين Sw_1 و Sw_2 فضلاً عن العنصر الثانوي وهو الوشيعية L، والهدف منها هو الحد من معدل ارتفاع التيار في الثايرستورات ومنع حدوث الطنين مع الشبكة، وعادة ما تختار بحيث تكون:

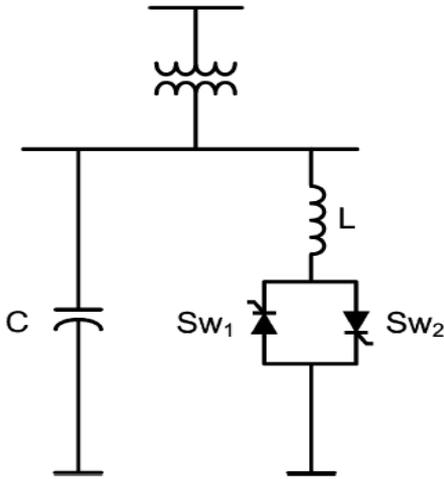
$$X_L = 6\% * X_c$$

يجري عادة تقسيم المكثفات إلى مراحل مناسبة بحيث تُنخَلُ أو تُخْرَجُ هذه المراحل عن طريق القواطع الثايرستورية ثنائية الاتجاه.

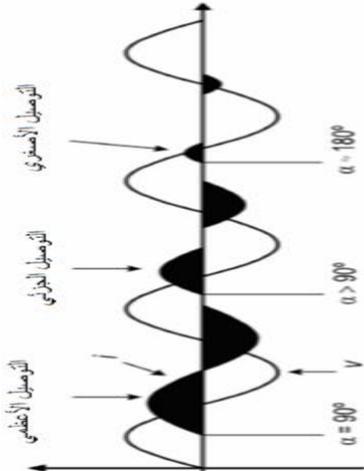
3.2-المفاعلات المحكومة بالثايرستورات TCR في دارات الـ TSC:

فيما يلي لمحة عن TCR إذ يبيّن الشكل (3) المخطط الأساسي للمعوض الساكن من نوع TCR إذ يتكون الفرع لكل طور من وشيعة L وقاطعين ثايرستوريين Sw_1 و Sw_2 ويمكن التحكم بزوايا التوصيل للثايرستورات، ومن ثمّ نحصل على تعويض ردي بتحكم ناعم، إلا أن استخدام هذه التقنية يؤدي إلى توليد توافقيات فردية للتيار.

يُتَحَقَّقُ التوصيل الكامل للوشيعة عن طريق زاوية قسح للبوابة مساوية لـ 90° وتُحَقَّقُ توصيل جزئي عن طريق زاوية للبوابة بين 90° و 180° كما هو مبين بالشكل (4)



الشكل (3) يبيّن مخطط لمعوض من نوع TCR.



الشكل (4) يبيّن تأثير زاوية قسح الثايرستورات مع التيار

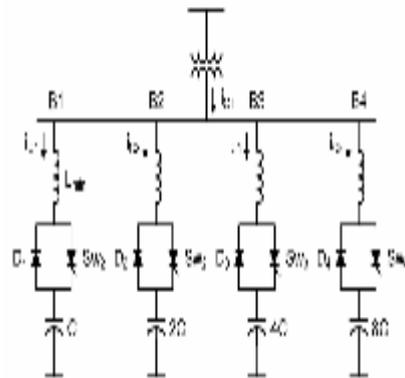
- التحكم بقيمة تعويض الاستطاعة الردية لا يكون بشكل مستمر وإنما بشكل متدرج.

يمكن تطوير النموذج السابق باستبدال واحد من القواطع الثايرستورية بديود واستخدام توزيع ثنائي للاستطاعة الردية لكل فرع.

2.2- التوزيع الثنائي للـ TSC:

إذا اختيرت الاستطاعة الاسمية لكل مجموعة من المكثفات بناء على مجموعات ثنائية كما هو مبين بالشكل (2)، فإنه ومن خلال هذا التوزيع يمكن الحصول على تدرج في الاستطاعة الردية يقدر بخمس عشرة مرحلة من خلال أربعة فروع لدارة الـ TSC، ومن ثمّ يمكن تدرج الاستطاعة الردية المعطاة من خلال تفعيل فرع أو فرعين أو ثلاثة أو أربعة فروع حيث يُوصَلُ كل فرع من فروع الدارة السابقة بتطبيق نبضات قسح على بوابات الثايرستورات في اللحظة التي يكون فيها توتر المنبع عند قيمته العظمى السالبة، ومن ثمّ نحصل على توصيل طبيعي (لين) للثايرستورات وحالة عابرة أصغرية إذ يتزايد التيار بدءاً من الصفر.

إن ميزة هذه الطريقة أنها تحقق العديد من مستويات التعويض للاستطاعة الردية بعدد قليل من الفروع؛ وهذا ما يسمح لنا بتغيير ناعم ومن دون وجود توافقيات فضلاً عن بساطة مكونات هذه الدارة.

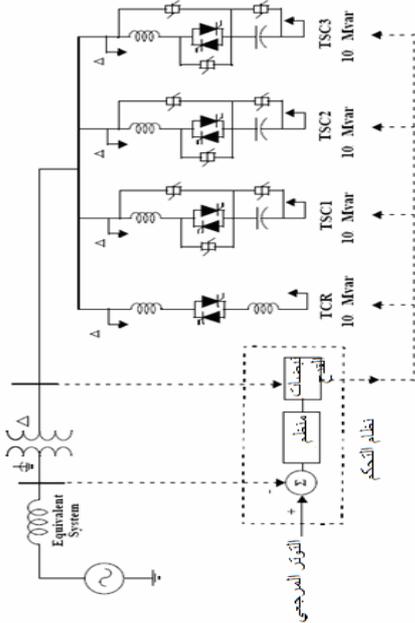


الشكل (2) التوزيع الثنائي للـ TSC

يمكن الحد من كثير من مشكلات جودة الطاقة أو حتى إلغاؤها باستخدام التحكم الملائم بالاستطاعة الردية [3] وقد استُخدمَ في السنوات الأخيرة الـ SVC بصورة واسعة للتحكم بالاستطاعة الردية في الشبكات الكهربائية [4,5] ويمكن تعرّف الخصائص العابرة للمعوضات الساكنة الثايرستورية عند وصلها بالشبكات الكهربائية عن طريق تمثيلها في برنامج Matlab.

3- الحالة العابرة للمعوضات الثايرستورية:

يبين الشكل (6) مخطط الخط الواحد لمعوض ثايرستوري ساكن موصول إلى محول 20/66kV أمّا الشكل (7) فيبين كيفية تمثيل المعوضات الساكنة الثايرستورية على برنامج Matlab والمعوض المبين أدناه مكون من ثلاث دارات TSC استطاعة كل منها 10MVar موصولة على التفرع مع دائرة TCR استطاعتها 10MVar موصولة على التفرع مع نظام القدرة الكهربائي على توتر 20Kv؛ وذلك بهدف تحليل أداء النظام في الحالة العابرة.

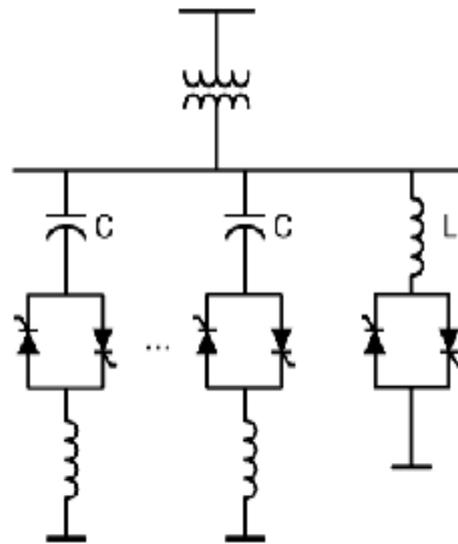


الشكل (6) مخطط الخط الواحد لمعوض ثايرستوري

تمتاز المعوضات الساكنة من نوع TCR بما يأتي:

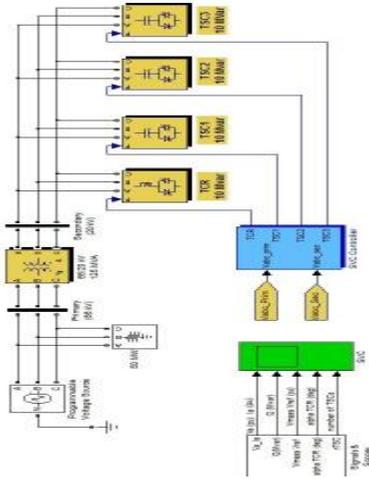
- تحكم ناعم بالاستطاعة الردية.
 - زمن التأخير في الاستجابة لا يتجاوز نصف دور.
 - لا تسبب حالات عابرة عملياً.
- أمّا السيئة الرئيسة لهذه التشكيلة: فهي توليد توافقيات فردية للتيار ذات تردد منخفض.
- عند استخدام المعوضات من نوع TSC فإن الاستطاعة الردية تقسم إلى عدد مناسب من المراحل، ومن ثمّ فإنّ التغيير في الاستطاعة الردية يتم بشكل متدرج.
- عند إضافة معوض من نوع TCR فإننا نحصل على تحكم ناعم مستمر بالاستطاعة الردية.
- ومن ثمّ عن طريق تحكم متناسق بين مراحل المكثفات والمفاعلة التحريضية نحصل على تحكم غير خطوي STEPLESS Control.
- تمتاز هذه التشكيلة من المعوضات الساكنة بالميزات الآتية:
- تحكم بالاستطاعة الردية ناعم ومستمر.
 - لا تسبب حالات عابرة عملياً.
 - توليد منخفض للتوافقيات.

والشكل (5) يبين مخططاً لتشكيلة TSC - TCR

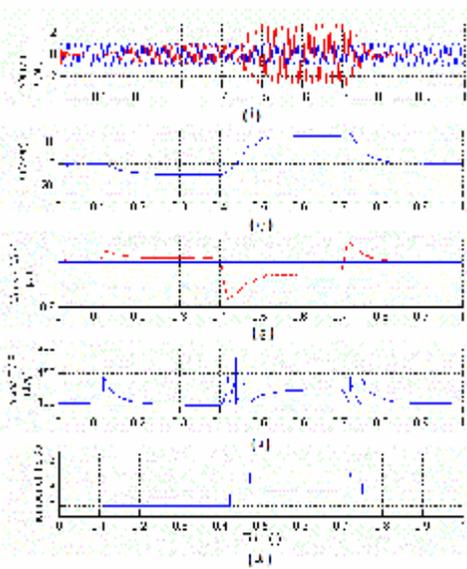


الشكل (5) مخطط لتشكيلة TSC - TCR

المعوضات الثايرستورية في الحالة العابرة إذ يبين الشكل (8-أ) تغيرات كل من التيار والتوتر على ثانوي المحول بالقيمة الواحدة مع الزمن ويبين الشكل (8-ب) تغيرات الاستطاعة الردية المقدمة من قبل المعوض، أما الشكل (8-ج) فيبين التوتر المقيس عند أطراف الحمل مقارنة بالتوتر المرجعي المطلوب وأيضاً يبين الشكل (8-د) الزاوية التي يعمل عندها الثايرستورات للـ TCR، ويبين الشكل (8-هـ) عدد دارات الـ TSC المستخدمة من أجل العملية التحكمية.



الشكل (7) تمثيل المعوضات الساكنة الثايرستورية



الشكل (8) الحالة العابرة

نلاحظ أن التحكم الذي تؤمنه دارة الـ TCR مستمر وغير متقطع بحيث يؤمن استطاعة ردية تحريضية من الصفر وحتى الاستطاعة الاسمية 10MVar. أما دارات الـ TSC فتؤمن كل منها استطاعة ردية سعوية 10MVar؛ وهذا ما يجعل هذه التشكيلة قادرة على تغيير الاستطاعة الردية من الاستطاعة الردية التحريضية ذات الـ 10MVar وحتى الاستطاعة الردية السعوية بمقدار 3*10MVar؛ وذلك بشكل متدرج ومستمر بحيث تؤمن الاستطاعة المطلوبة لنظام القدرة الكهربائي.

أما استخدام دارات الـ TSC من دون الـ TCR فيؤمن لنا استطاعة ردية سعوية متغيرة بشكل قفزات قيمة كل قفزة 10MVar في مثالنا هذا.

بني النموذج السابق الشكل (7) عن طريق برنامج sim نسخه 2013؛ وذلك باستخدام مكتبة Matlab/simulink power system/application library وكذلك مكتبة flexible ac transmission system (FACTS) library/power electronic based FACTS

حيث توجد دارات الـ SVC بنوعها الـ TCR و TSC ومتحكماتها على شكل نماذج جاهزة يمكن التعامل معها مباشرة (block) بحيث يعمل المتحكم بالمعوضات الساكنة (SVC control) على المقارنة بين التوتر المقيس والتوتر المطلوب ويعطي الإشارات التحكمية اللازمة لدارات الـ SVC إذ تعمل على تحقيق التوتر المطلوب. وقد تمت نمذجة جزء من شبكة الـ 66kV عن طريق منبع التوتر القابل للبرمجة يمكننا من تغيير التوتر فضلاً عن حمل على طرف التوتر العالي يمثل حمل محولات التوزيع.

يمكن أن تعرف تأثير الخصائص العابرة للمعوضات الثايرستورية في أداء هذا النظام عن طريق تغيير التوتر وبشكل اختياري على جانب التوتر العالي عند أزمنة اختيارية مثلاً 0.4s و 0.7 بحيث تكون قيمة التوتر Pu 1.025 و 0.93 على الترتيب، والشكل (8) يبين أداء

- تستخدم الخوارزميات الجينية معلومات التابع الهدف وليس المشتقات.
 - العمل على ترميز المتغيرات التحكمية وليس على المتغيرات ذاتها.
 - البحث يمكن أن يكون على فضاء البحث عن الحلول منقطعاً بدلاً من المستمر.
 - إمكانية حل أي مسألة يمكن توصيفها عن طريق التمثيل الصبغي.
 - إمكانية حل المسائل ذات الحلول المتعددة.
 - من السهل تعلم هذه الطريقة ولا تتطلب عملياً معرفة عميقة بالرياضيات.
 - الطريقة مناسبة جداً لحل المسائل متعددة الأبعاد و اللاتفاضلية وغير المستمرة .
 - يمكن تمرير نتائجها وبسهولة إلى النماذج الرياضية والموديولات الحاسوبية.
 - تتطلب عملاً برمجياً بسيطاً وغير معقد (يسهل كتابته).
 - تتطلب وقتاً حاسوبياً قصيراً إلى حد كبير مقارنة بالطرائق الأخرى.
- وفيما يأتي تعريف مختصر بالخوارزميات الجينية وأسس تنفيذها:

1.4- تعريف مختصر بالخوارزميات الجينية: [9]

هيتقنية متطورة من تقنيات البحث عن الحل الأمثل تحاكي عملية الاصطفاء في الطبيعة تعتمد أسلوب البحث الاستكشافي (الموجه) (heuristicsearch) وتستخدم عوامل تحكم مستوحاة من التطور البيولوجي في الطبيعة مثل التوريث inheritance والطفرة mutation والعبور crossover والاصطفاء selection. [10]

إن فكرة الخوارزميات الجينية مستوحاة من نظرية داروين في التطور، إذ تسعى إلى تطوير الحلول لمسألة ما بأن يبدأ الحل من خلال مجموعة من الحلول ثم تُصطَفَى الحلول من كل جيل بحسب صلاحية هذا الحل (مقدرته على الاستمرار). [6]

مما سبق نجد أن للتشكيلة السابقة (الشكل (7)) القدرة على التحكم بالتوتر بحيث تعمل على تثبيت التوتر عند قيمته المطلوبة IPU؛ وذلك عن طريق تغيير قيمة الاستطاعة الردية، إذ يُقَارَنُ بين التوتر المقيس والتوتر المطلوب، ومن خلال تحليل إشارة الخطأ يعطي المتحكم التناسبي التكاملية PI المدمج في دارة SVC Controller الأوامر اللازمة لإدخال دارة أو أكثر من دارات الـ TSC، وكذلك أوامر التحكم بزاوية قرح الثايرستورات لدارة الـ TCR لتأمين الاستطاعة الردية.

4- الخوارزميات الحديثة المستخدمة لحل مسألة الأمثلة Optimization:

إن استخدام المعوضات الثايرستورية الساكنة لتقليل الضياع في شبكات التوزيع الكهربائية إلى قيمته الصغرى هي في جوهرها مسألة أمثلة يلزم حلها للوصول إلى هدفنا المنشود، وهو القيمة الصغرى للضياع. تعرف عملية الأمثلة Optimization بشكل رياضي بالمعادلات الآتية:

$$\begin{aligned} \min f(x) \\ g(x) = 0 \\ h(x) \geq 0 \end{aligned}$$

إذ:

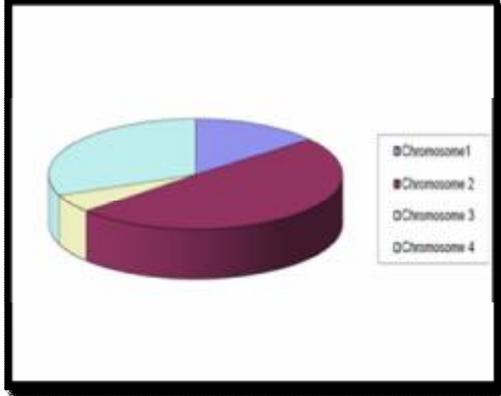
$f(x)$: التابع الهدف الذي يقود عملية الأمثلة.

$g(x)$ و $h(x)$ تمثل القيود على عملية الأمثلة.

إن الهدف من عملية الأمثلة هو إيجاد قيم المتغيرات التي تجعل تابع الهدف أصغرياً أو أعظمية بحسب ما هو مطلوب؛ وذلك مع تحقيق القيود اللازم وضعها على عملية الأمثلة.

تعد الخوارزميات الجينية من أفضل الطرائق التي تخدم مسألة الأمثلة لتمتعها بالمميزات الآتية: [6-8]

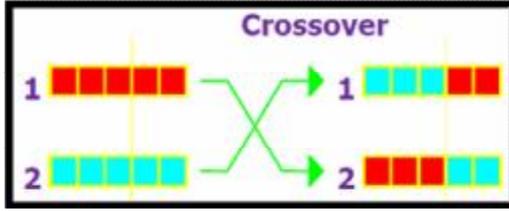
- تجري عملية البحث من جيل إلى جيل و ليس من نقطة إلى نقطة.



الشكل (9) وصف آلية الاصطفاء عن طريق دولاب الحظ

2.2.4-العبور Crossover:

وهي عملية صبغية تُطبَّق على أوبن (صبغيين) يُختاران من مجتمع الحلول إذ يجري تبادل أجزاء من الصبغيات بين الصبغيين الأبوين؛ وذلك بهدف إنتاج صبغيين أبناء. والشكل التخطيطي رقم (10) يبين آلية حدوث العبور.



الشكل (10) آلية حدوث العبور

إن عملية العبور لا تتم على كل صبغيين يتم اختبارهما وإنما تجري هذه العملية وفق احتمالية حدوث العبور P_c ويقدر احتمال حدوث العبور في المسائل القياسية التي تستخدم الخوارزميات الجينية بين $P_c=[40-90]\%$ وهنا يبرز دور عملية العبور التي تقدم لنا حلولاً جديدةً وتمكننا من الاطلاع على حلول أخرى لم تكن موجودة في جيل الحلول الابتدائي Initial Generation الذي اختير مسبقاً عشوائياً.

ويجب أن نعلم أن عدد الحلول أو عدد أفراد المجتمع الصبغي يبقى نفسه ولا يتغير منذ الجيل الأول وحتى انتهاء مسألة الأمثلة، وأن العمليات التي تحصل على الصبغيات من عبور وطفرة واصطفاء لا تغير من عدد

2.4-أدوات الخوارزميات الجينية:

يجري أولاً بناء جيل من الحلول، وهي مجموعة من الحلول التي تولَّد عشوائياً ثم يجري التأثير عليها من خلال عمليات الاصطفاء والعبور والطفرة كما يأتي:

1.2.4-الاصطفاء Selection:

تكمُن أهمية عملية الاصطفاء للحل (Selection) بأنها تحسن من صلاحية جيل الحلول حتى نصل إلى جيل له صلاحية مساوية لصلاحية الحل الأفضل بين الحلول التي يتكون منها هذا المجتمع ولكن بعد هذه المرحلة فإن صلاحية المجتمع تبقى ثابتة ولا إمكانية لزيادتها. إن الطريقة الفضلى للاصطفاء والأكثر شيوعاً التي تعطي أفضل النتائج هي طريقة الاصطفاء المتناسب طرداً مع صلاحية الحل (الاصطفاء التناسبي) Fitness proportional Selection أو الاصطفاء وفق دولاب الحظ Roulette Wheel Selection إذ تمتاز هذه الطريقة بأن احتمال اصطفاء حل ما يتناسب طرداً مع صلاحية هذا الحل.

ووفق هذه الطريقة يجري تمثيل جيل الحلول بدولاب حظ يتكون من قطاعات أو أجزاء يتناسب حجم كل قطاع مع صلاحية الحل الذي يمثله، ومن ثمَّ عند تدوير هذا الدولاب ورمي كرة (بشكل مجازي) فإن احتمال أن تدخل الكرة أي قطاع يتناسب طرداً مع قوس القطاع الذي يطابق صلاحية الحل. ويبين الشكل (9) جيلاً من الحلول مكوناً من أربعة حلول حيث الحل الثاني هو أفضل الحلول.

وبسبب وجود مركبتين للتيار المركبة الحقيقية I^a والمركبة الردية I^r فإنه يمكن صياغة علاقة الضياع كما يأتي:

$$TPL_a = \sum_{ik=1}^n |I_{ik}^a|^2 R_{ik} \quad (3)$$

$$TPL_r = \sum_{ik=1}^n |I_{ik}^r|^2 R_{ik} \quad (4)$$

إن المركبة TPL_a المرتبطة بالمركبة الفعلية للتيار لا يمكن الحد منها في شبكات التوزيع الشعاعية في حين أنه يمكن أن نخفض المركبة TPL_r المرتبطة بالمركبة الردية للتيار عن طريق توفير جزء من الاستطاعة الردية بشكل محلي.

عند توزيع المكثفات على العقد (الباسبارات) فإنها تحقق تياراً ردياً ومن ثمَّ يصبح التيار الجديد الردي للفرع (i,k)

$$I_{rik}^{new} = I_{ik}^r - I_{ik}^c \quad (5)$$

الجزء الردي من تيار الفرع (i,k) للنظام الأصلي قبل إضافة المكثفات الذي نحصل عليه من حسابات جريان الحموله.

ويمكن التعبير عن المركبة من الضياع TPL_r^{com} المرافقة للمركبة الردية لتيار الفرع في نظام القدرة بعد وجود المكثفات بالعلاقة الآتية:

$$TPL_r^{com} = \sum_{ik=1}^n (I_{ik}^r - I_{ik}^c)^2 R_{ik} \quad (6)$$

ر في الاستطاعة يعطى بالعلاقة 7 وهي حاصل طرح العلاقتين 6 و4 كما يأتي:

$$T_{LS} = TPL_r - TPL_r^{com} \quad (7)$$

$$T_{LS} = \sum_{ik=1}^n |I_{ik}^r|^2 R_{ik} - \sum_{ik=1}^n (I_{ik}^r - I_{ik}^c)^2 R_{ik} \quad (8)$$

$$T_{LS} = \sum_{ik=1}^n (2I_c I_{ik}^r - I_c^2) R_{ik} \quad (9)$$

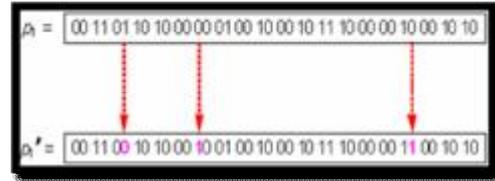
الحلول ولكنها تحسن وتطور هذه الحلول مع المحافظة على عددها.

3.2.4- الطفرة Mutation:

تعرف الطفرة بشكل بسيط بأنها تبديل صفر ب واحد أو واحد ب صفر؛ وذلك عند تمثيل الحلول بالترميز الثنائي، أي هو التغير الذي يصيب مورثة في صبغي ما. تحدث الطفرة وفق احتمالية حدوث الطفرة P_m ويقدر احتمال حدوث الطفرة في المسائل القياسية التي تستخدم الخوارزميات الجينية بـ:

$$P_m = 0.1\%$$

يبين الشكل (11) آلية حدوث الطفرة على صبغي (حل لمسألة) معين مستخدم في الخوارزميات الجينية.



الشكل (11) آلية حدوث الطفرة على صبغي

5-الصياغة الرياضية للمسألة[11]

تعطى علاقة التيار المار في الفرع (i,k) الذي يصل بين الباسبارين (i و k) من شبكة التوزيع كما يأتي:

$$I_{ik} = \frac{P_{ik} - jQ_{ik}}{V_i^s} \quad (1)$$

إذ:

I_{ik} التيار المار في الفرع (i,k) [A]

P_{ik} الاستطاعة الحقيقية المارة في الفرع (i,k) [kW]

Q_{ik} الاستطاعة الردية المارة في الفرع (i,k) [KVar]

V_i التوتر على العقدة i [kV] R_{ik} مقاومة الفرع (i,k)

ويعطى مجموع الضياع في خطوط النقل بالعلاقة:

$$TPL = \sum_{ik=1}^n |I_{ik}|^2 R_{ik} \quad (2)$$

N_{bus} : عدد الباسبارات المرشحة لتكريب المكثفات عليها.

x_i : تأخذ إحدى القيمتين إما صفرًا أو واحدًا، إذ يعني الصفر أنه لن تُركَّب أي مكثفات على الباسبار i .

C_{0i} : تكاليف التركيب.

C_{1i} : ثمن المكثفات لكل KVAR.

B_i : عدد مجموعات المكثفات.

C_{2i} : تكاليف التشغيل لكل مجموعة في السنة.

T : المدة المخطط لها بالسنوات.

C_2 : تسعيرة الكيلو الواط الساعي.

l : مستوى الحمولة (أعظمي أو متوسط أو أصغري).

T_i : الامتداد الزمني بالساعات لمستوى الحمولة l .

P_i^l : مجموع الضياعات عند مستوى الحمولة l .

2.5- مقيدات عملية الأمثلة: Constraints

إن القيود الأساسية لعملية توزيع المكثفات يجب أن تلائم قيود جريان الحمولة في الشبكة المدروسة فضلاً عن أن طولية التوتر في باسبارات من نوع (PQ) يجب أن تبقى بين الحدود العليا والدنيا المسموحة، كما أن عامل الاستطاعة يجب أن يكون أكبر من الحدود الدنيا المطلوبة ويمكن أن يصل إلى الحدود العليا، هذا ويمكن صياغة مقيدات عملية الأمثلة بشكل رياضي كما يأتي:

$$V_{min} \leq V \leq V_{max}$$

$$PF_{min} \leq PF \leq PF_{max}$$

وذلك لكل الباسبارات من نوع (PQ).

كما أن وظيفة OCP يمكن أن تأخذ بالحسبان القيود المكانية لتوزيع المكثفات، فقد تكون هناك مشكلة في المساحة المتاحة أو في الظروف المكانية لمركز التحويل أو التوزيع أو غيرها.

ويحدد تيار المكثف الذي يعطي أكبر وفر في الضياع باشتقاق العلاقة السابقة بالنسبة إلى تيار المكثف

$$\frac{dT_{LS}}{dI_c} = 0 \quad (10)$$

$$\sum_{ik=1}^n (I_{ik}^r - I_c) R_{ik} = 0 \quad (11)$$

ومنه نستنتج قيمة تيار المكثف الذي يعطي الضياع الأصغري كما يأتي:

$$I_{c,i} = \frac{\sum I_{ik}^r R_{ik}}{\sum R_{ik}} \quad (12)$$

ومن ثم تعطى علاقة الاستطاعة للمكثف كما يأتي:

$$Q_c = V_i I_{c,i} \quad (13)$$

إذ:

Q_c : استطاعة المكثف مقدر بـ kVAR

V_i : طولية التوتر في الباسبار i مقدر بـ kV

$I_{c,i}$: تيار المكثف المحقون في العقدة i مقدر بـ A

1.5- التابع الهدف لتابع الـ OCP: [12]

إن الهدف من عملية التوزيع الأمثل للمكثفات هو جعل الكلفة الإجمالية للعملية أصغرية، إذ تتكون هذه الكلفة من أربعة مكونات:

§ تكاليف شراء المكثفات.

§ تكاليف التركيب.

§ تكاليف الصيانة والتشغيل.

§ تكاليف ضياع الاستطاعة الحقيقية.

ويمكن تمثيل هذه الكلفة الإجمالية بالعلاقة الرياضية الآتية:

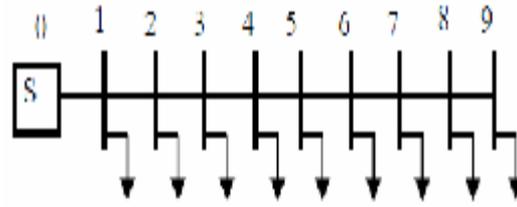
$$\sum_{i=1}^{N_{bus}} (x_i C_{0i} + Q_{c,i} C_{1i} + B_i C_{2i} T) + C_2 \sum_{i=1}^{N_{load}} T_i P_i^l$$

إذ:

$Q_{c,i}$: استطاعة المكثف على الباسبار i

6. تطبيق البرنامج على جزء من شبكة التوزيع لريف دمشق:

قبل تطبيق البرنامج ETAP على شبكة واقعية، رأينا أنه من الأفضل تطبيقه أولاً على شبكة معيارية من شبكات الـ IEEE كمسألة اختبار Test Problem للتأكد من سلامة استثمارنا لهذه البرمجيات. دُرست شبكة IEEE ذات الـ 9 باسبارات [13] وذلك بهدف التأكد من صحة استثمارنا للبرنامج، وفيما يلي الشكل (12) شكل توضيحي يبين شبكة IEEE ذات التسعة باسبارات حيث التوتر الاسمي لها 23kV أما البارامترات الخاصة بهذه الشبكة من حمولات وممانعة خطوط النقل فهي موضحة بالجدول رقم (1)



الشكل (12) شبكة IEEE ذات الـ 9 باسبارات

الجدول (1) بارامترات الشبكة ذات الـ 9 باسبارات

Line No.	From Bus, i	To Bus, i+1	R _{i,i+1} (Ω)	X _{i,i+1} (Ω)	PL (kW)	QL (kVAR)
1	0	1	0.1233	0.4127	1840	460
2	1	2	0.0140	0.6057	980	340
3	2	3	0.7463	1.2050	1790	446
4	3	4	0.6984	0.6084	1598	1840
5	4	5	1.9831	1.7276	1610	600
6	5	6	0.9053	0.7886	780	110
7	6	7	2.0552	1.1640	1150	60
8	7	8	4.7953	2.7160	980	130
9	8	9	5.3434	3.0264	1640	200

وعند دراسة هذه الشبكة تبين لنا أن الضياع فيها يقدر بـ 875kW

ولدى استخدام الوظيفة OCP تبين ضرورة إضافة مكثفات تأثيرستورية إلى الباسبارات ذات الأرقام 3 و5 و6 و8 باستطاعة 800 و800 و400 و400 kVar، على

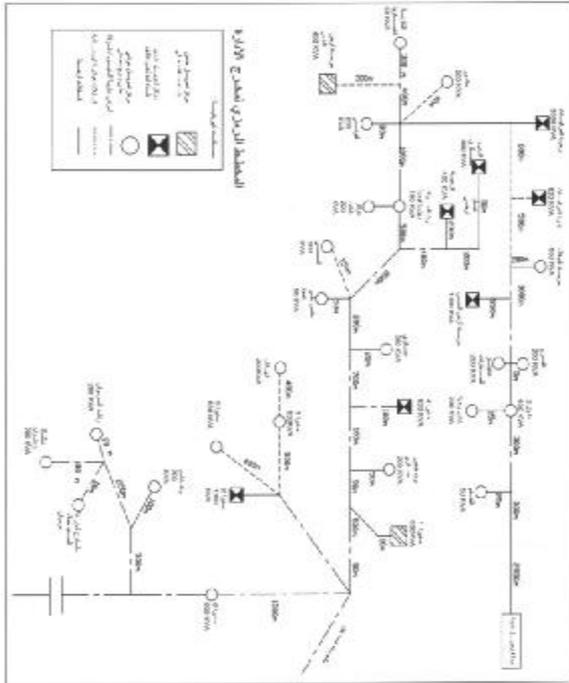
الترتيب، وعند إضافة المكثفات التأثيرستورية المطلوبة لاحظنا:

اتخافاً في قيمة الضياع من القيمة 875kW إلى القيمة 680kW أي إن إضافة هذه المكثفات أدى إلى خفض في الضياع بنحو 29%

بعد ذلك أخذ جزء من شبكة دوما وهو عبارة عن مخرج " الإدارة " المنطلق من محطة تحويل دوما على التوتر 20kV، وبيّن الشكل (13) مخطط هذا الجزء من شبكة توزيع دوما، أمّا الجدول (2) فيبين المحددات الكهربائية لهذا الجزء من شبكة توزيع دوما.

ولتحديد بارامترات تشغيل هذه الشبكة قمنا بإجراء القياسات الميدانية عند كل مركز تحويل (باسبار)؛ وذلك بمساعدة الأطر المتخصصة في شركة كهرباء ريف دمشق، والجدول (3) يبين نتائج هذه القياسات التي أجريت في أثناء الذروة الشتوية لعام 2012.

أمّا الشكل (14) فيبين مخطط هذا الجزء من شبكة توزيع دوما لدى تمثيله في برنامج ETAP، وذلك بعد تهيئته.



الشكل (13) مخطط مخرج الإدارة من شبكة توزيع دوما

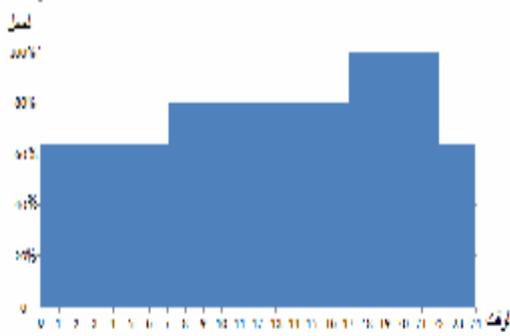
الجدول (2): المحددات الكهربائية للجزء المدروس من شبكة توزيع دوما

رقم الخط	نوعه	mm ² مقطعه	طوله m	R Ω/Km	X Ω/Km
1	هوائي + أرضي		3250	0.192966	0.144
2	ألمنيوم فولاذ	120/21	300	0.2833	0.38
3	ألمنيوم فولاذ	120/21	5	0.2833	0.38
4	كيل	120	208	0.2833	0.12
5	ألمنيوم فولاذ	120/21	1000	0.2833	0.38
6	كيل	120	500	0.2833	0.12
7	كيل	120	600	0.2833	0.12
8	هوائي + أرضي		450	0.45961	0.2355
9	ألمنيوم فولاذ	50/8	400	0.68	0.38
10	ألمنيوم فولاذ	50/8	1000	0.68	0.38
11	ألمنيوم فولاذ	50/8	500	0.68	0.38
12	ألمنيوم فولاذ	50/8	400	0.68	0.38
13	ألمنيوم فولاذ	50/8	800	0.68	0.38
14	ألمنيوم فولاذ	50/8	200	0.68	0.38
15	ألمنيوم فولاذ	50/8	700	0.68	0.38
16	ألمنيوم فولاذ	50/8	100	0.68	0.38
17	ألمنيوم فولاذ	50/8	90	0.68	0.38
18	ألمنيوم فولاذ	50/8	500	0.68	0.38
19	ألمنيوم فولاذ	50/8	800	0.68	0.38
20	ألمنيوم فولاذ	50/8	950	0.68	0.38
21	ألمنيوم فولاذ	50/8	250	0.68	0.38
22	ألمنيوم فولاذ	50/8	302	0.68	0.38
23	ألمنيوم فولاذ	50/8	500	0.68	0.38

الجدول (3): بارامترات التشغيل المقيسة للجزء المدروس من شبكة توزيع دوما

رقم لباسبار	اسم مركز التحويل	استطاعته kVA	نسبة التحميل	عامل الاستطاعة
1	الخاتم	50	50	0.80
2	دلول/2	630	62	82
3	خاص/وهبة	200	60	0.88
4	الفرج	200	65	0.92
5	حميشو للسيارات	200	50	0.95
6	حرسنا أرض الخمس	1000	79	0.81
7	حرسنا الهلال	630	103	0.80
8	إدارة المركبات	630	47	0.85
9	رحبة المركبات	3000	35	0.85
10	عاشور	200	75	0.93
11	أفيوني	200	65	0.95
12	حرسنا أرض الخس	400	83	0.76
13	الكازية العسكرية	50	60	0.80
14	السيدة ريتا توما	100	75	0.96
15	مركز خاص	200	50	0.85
16	الرحبة	400	45	0.85
17	المعهد العسكري	400	50	0.85
18	الحمصي	200	70	0.95

0.90	50	50	خاص على عمود	19
0.85	50	200	عسكري	20
0.81	63	630	مديرا (4)	21
0.85	50	200	خاص	22
0.83	118	630	مديرا (1)	23
0.85	69	630	مديرا (6)	24
0.94	65	200	مركز تحويل خاص	25
0.95	70	200	راشد عرموش	26
0.96	75	200	منشأة زعفران	27
0.85	58	1000	مديرا (2)	28
0.82	85	630	مديرا (5)	29
0.79	67	630	مديرا (3)	30
0.83	72	200	الهاتف	31



الشكل (15) منحنى الحمولة اليومي المعتمد

كما أُدخِلتْ معطيات الدخل الاقتصادية التالية؛ وذلك بناء على معطيات ومشورة مديرية العقود ومديرية التخطيط والإحصاء في المؤسسة العامة لنقل الكهرباء:

علماً بأن معطيات الدخل الاقتصادية كانت كما يأتي:

• مدة الدراسة: 10 سنوات

• سعر الكيلو وات الساعي \$0.09

• عامل الحسم: 4%

• استطاعة المكثفات الثايرستورية: 100kVar

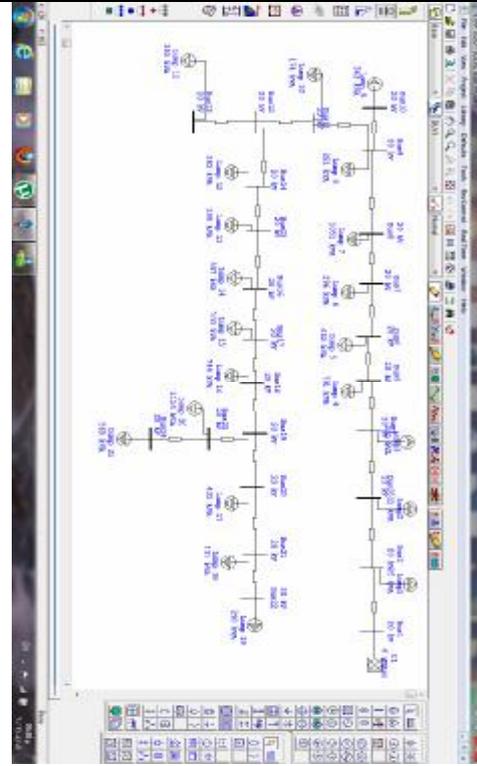
• تكلفة الـ kVar من المكثفات الثايرستورية: \$40[2]

وقد أُخِذتْ بالحسبان القيود المكانية بحيث يسمح بوضع المكثفات في مراكز التحويل من نوع بناء ولا يسمح بتوزيع المكثفات عند مراكز التحويل المحمولة على الأعمدة، كما رُوِعتْ حدود عامل الاستطاعة وتوترات العقد بحيث:

$$95\% \leq V \leq 102\%$$

$$90\% \leq PF \leq 96\%$$

وبنتيجة تطبيق وظيفة OCP من برنامج ETAP تبين ضرورة إضافة مكثفات إلى عقد الشبكة المدروسة كما



الشكل (14) مخطط مختزل لمخرج الإدارة من شبكة توزيع دوما

معطيات الدخل:

أُخِذَ بالحسبان منحنى الحمل اليومي المعتمد من قبل المؤسسة العامة لنقل الكهرباء/ مديرية التخطيط والإحصاء، إذ إنَّ الحمولة تتغير في اليوم الواحد وفق ثلاثة مستويات للحمولة: حمولة أعظمية أو الذروة وحمولة متوسطة وحمولة أصغرية، كما هو مبين بالشكل (15).

98.3	98.1	93.6	84.6	3
98.3	98	93.7	84.6	4
98.17	97.9	93.7	84.3	5
97.5	97	93.6	84.9	6
97.25	96.8	93.6	85.3	7
97	96.5	93.9	85.3	8
96.7	96.1	94.2	85.3	9
96.7	96.1	96	76.4	10
95.8	95.2	93.9	85.3	11
95.4	94.7	94	85.1	12
95.4	94.7	85	84.9	13
94.8	94.1	94.8	85	14
94.7	93.9	94.8	84.6	15
94.4	93.9	95.1	84.5	16
94.3	93.5	94.6	84.9	17
94.1	93.4	94.8	84.9	18
93.9	93.2	94	84.5	19
93.8	93.2	90.6	90.6	20
93.8	92.9	95	95	21
93.8	92.9	95.5	95.5	22
94	93.1	95.7	82.5	23
93.9	93	96	80.3	24

1.5- مناقشة النتائج:

بعد تطبيق وظيفة OCP من برنامج ETAP6.0 الذي يعتمد على الخوارزميات الجينية بهدف الاستخدام الأمثل لمعوضات الاستطاعة الردية إذ يحدد الخرج التنفيذي للبرنامج مكان مصدر الاستطاعة الردية وقيمتها المثلى، وقد أظهرت الدراسة النتائج الإيجابية الآتية:

١- استرداد قيمة رأس المال المدفوع خلال السنة الثانية من سنوات الدراسة.

٢- تحقيق وفر صافٍ في نهاية مدة الدراسة يقدر بنحو \$ 794,000.

٣- تحقيق وفر في ضياع الاستطاعة الحقيقية بنسبة 25 %.

٤- تخفيض حمولة مراكز التحويل بشكل عام خاصة تلك المراكز المحملة بأكثر من حمولتها الاسمية.

٥- تحسين أوضاع التوتر وقيمة عامل الاستطاعة لباستبارات الشبكة.

٦- تحسين الأداء في الحالة العابرة عند عمليات تغيير الأحمال وحالات الفصل والوصل.

هو مبين بالجدول (4)، إذ إنَّ الخرج التنفيذي لبرنامج ETAP 6.0 يعطي المكان الأمثل والاستطاعة المثلى للمكثفات الواجب إضافتها إلى شبكة ما.

الجدول (4) استطاعة المكثفات لمخرج الإدارة

وأماكن توزعها

رقم الباسبار	استطاعة المكثف المطلوب kVar
3	100
5	300
6	200
8	200
10	200
16	200
18	300
23	300
24	300

أما الجدول (5) وهو من الخرج التنفيذي لبرنامج ETAP فيبين النتائج الاقتصادية لعملية توزيع المكثفات لمخرج الإدارة من شبكة دوما على طول مدة دراسة المشروع.

الجدول (5) النتائج الاقتصادية

السنة	تكاليف التركيب	تكاليف التشغيل	وفر الضياع	وفر السنوي الصافي	الوفر التراكمي
1	71100	3150	60231	-14019	-14019
2	0	3029	57914	54885	40866
3	0	2912	55687	52774	93640
4	0	2800	53545	50744	144384
5	0	2693	51485	48793	193177
6	0	2589	49505	46916	240093
7	0	2490	47601	45112	285205
8	0	2394	45770	43377	328581
9	0	2302	44010	41708	370290
10	0	2213	42317	40104	410394

كما أن الجدول (6) يبين الأثر الإيجابي لتوزيع المعوضات الردية التايستورية إذ أدت إلى تحسن قيمة التوتر وعامل الاستطاعة لباستبارات الشبكة بشكل عام.

الجدول (6) أوضاع التوتر وقيمة عامل الاستطاعة قبل التحسين

وبعد.

رقم الباسبار	عامل الاستطاعة	عامل الاستطاعة بعد التحسين	التوتر %	التوتر بعد التحسين %
1	84.5	93.4	100	100
2	84.5	93.5	98.2	98.45

المراجع*

- 1) L.Ramesh, S.P.Chowdhury, S.Chowdhury, A.A.Natarajan, C.T.Gaunt "Minimization of Power Loss in Distribution Networks by Different Techniques" ,International Journal of Energy and Power Engineering 2-1-2009.
- 2) N.Acharya,N.Mithulananthan,"Facts about flexible AC transmission system (FACTS) controllers"
- 3) T. J. Miller, Reactive Power Control in Electric Systems. NewYork: Wiley, 1982.
- 4) Canadian Electrical Association, "Static compensators for reactivepower control," 1984.
- 5) L. Gyugyi, R. Otto, and T. Putman, "Principles and applicationsof static, thyristor-co ntrolled shunt compensators," IEEE Trans.Power App. Syst., vol. PAS-97, no. 5, pp. 1935–1945, Oct. 1980.
- 6) en.wikipedia.org/wiki/Genetic_algorithm22/10/2011
- 7) [http://www.obitko.com/tutorials/genetic - algorithms](http://www.obitko.com/tutorials/genetic-algorithms)20/8/2011
- 8) OlesyaPeshko "Global Optimization Genetic Algorithms",pp 2010.
- 9) http://www.ro.feri.unimb.si/predmeti/int_reg/Pre-davanja/Eng/3.Genetic%20algorithm/_18.html 22/10/2011
- 10) Daivid A. Coley "An Introduction to Genetic Algorithms for Scientists and Engineers", World Scientific Publishing , University of Exeter , Copyright© 1999 by World Scientific Publishing Co. Pte.Ltd.
- 11) Etap 6.0 help, optimal capacitor placement, calculation method,2012.
- 12) K. Ellithy , A. Al-Hinai , A. Moosa, "Optimal Shunt Capacitors Allocation In Distribution Networks Using Genetic Algorithm- Practical CaseStudy", International Journal of Innovations in Energy Systems and Power, Vol. 3, no. 1 April 2008.
- 13) R. SrinivasaRao, S. V. L. Narasimham, " Optimal Capacitor Placement in a RadialDistribution System using Plant GrowthSimulation Algorithm", World Academy of Science, Engineering and Technology 45 2008