Using the NSGA-II Algorithm for Optimal Allocation of Shunt Capacitors in Radial Distribution Networks: A Case Study

Dr. Isam Housamo*
Dr. Nesmat Abu Tabak **
Tahseen KHarma***

(Received 25 / 7 / 2024. Accepted 12 / 11 / 2024)

□ ABSTRACT □

The optimal placement of capacitors in radial distribution networks plays a significant role in reducing losses and improving the voltage profile. A multi-objective optimization technique was used, specifically the Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II), to determine the optimal location and size (capacity) of fixed shunt capacitors in radial distribution networks with the aim of minimizing the total cost represented by losses and capacitor costs, while also improving the voltage profile simultaneously.

To verify the validity and effectiveness of the proposed algorithm, we developed a program in the MATLAB R2018a environment for the proposed NSGA-II algorithm, as well as a second program for load flow, and integrated both together. The proposed algorithm was tested on the standard IEEE-33 Bus radial distribution network, and the results demonstrated the effectiveness and efficiency of the algorithm in obtaining a diverse set of solutions for the posed problem, known as Pareto Front solutions, from which system designers can select the optimal solution that fits the characteristics of the studied electrical system.

Keywords: Optimal Capacitor Placement, Radial Distribution Networks, Multi-Objective Technique, Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II), Pareto Front

Copyright **:**Tishreen University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

* **Assistant Professor, Department of Electrical Energy Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria.**
** **Assistant Professor, Department of Electrical Energy Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria, nesmat975@gmail.com,**
*** **Postgraduate Student (Master), Department of Electrical Energy Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria, tahseen9393@gmail.com.**

استخدام الخوارزمية NSGA-II لتوزيع المكثفات التفرعية بالشكل الأمثل في شبكات التوزيع الشعاعية: دراسة حالة

عصام حسامو *

نسمت أبو طبق **

تحسين خرما***

(تاريخ الإيداع 25 / 7 / 2024. قُبِل للنشر في 12/ 11 / 2024)

□ ملخّص □

إن الموضع الأمثل للمكثفات في شبكات التوزيع الشعاعية يؤدي دوراً مهماً في تقليل الضياعات وتحسين مؤشر الجهد. استُخدمت تقنية لإيجاد الحل الأمثل متعددة الأهداف، والتي تدعى الخوارزمية الجينية ذات الفرز غير المُهيمَن عليه Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II)، لتحديد المكان والحجم (السعة) الأمثل للمكثفات التفرعية الثابتة في شبكات التوزيع الشعاعية بهدف تقليل التكلفة الكلية المتمثلة بتكلفة الضياعات وتكلفة المكثفات، وأيضاً بهدف تحسين مؤشر الجهد، وذلك في آن واحد.

وللتحقق من صحة وفعالية الخوارزمية المقترحة، أعددنا برنامجاً في بيئة ماتلاب البرمجية MATLAB R2018a للخوارزمية NSGA-II المقترحة، وبرنامجاً ثانياً لسريان الحمولة، ودمجناهما معاً. واختُبرت الخوارزمية المقترحة على شبكة توزيع شعاعية قياسية IEEE-33 Bus، وأظهرت النتائج فعالية وكفاءة الخوارزمية في الحصول على مجموعة متنوعة من الحلول للمشكلة المطروحة، التي تسمى حلول جبهة باريتو Pareto Front، حيث يمكن لمصممي النظام اختيار الحل الأمثل منها بما يتناسب مع خصائص النظام الكهربائي المدروس.

الكلمات المفتاحية: الموضع الأمثل للمكثفات، شبكات التوزيع الشعاعية، تقنية متعددة الأهداف، الخوارزمية الجينية متعددة الأهداف ذات الفرز غير المُهيمَن عليه NSGA-II، جبهة باريتو.

حقوق النشر : مجلة جامعة تشرين- سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص CC BY-NC-SA 04

* **مدرس – قسم هندسة الطاقة الكهربائية – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية.**

** **مدرس – قسم هندسة الطاقة الكهربائية – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية– nesmat975@gmail.com**

*** **طالب دراسات عليا (ماجستير) – قسم هندسة نظم القدرة الكهربائية – كلية الهمك – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية – tahseen9393@gmail.com**

مقدمة:

أصبحت عملية تقليل الضياعات الكهربائية في أنظمة التوزيع ذات أهمية كبيرة؛ بسبب النمو المتزايد لها، بالإضافة إلى دمج مصادر الطاقة المتجددة واستخدام الأحمال غير الخطية. هذا الأمر يتطلب طرق تشغيل أكثر كفاءة من الناحية الاقتصادية مع الحد الأدنى من الضياعات في الشبكة الكهربائية، حيث إن الموضع غير الأمثل للمكثفات يسبب زيادة في الضياعات وتقليل جودة الطاقة الكهربائية [1]. تستخدم المكثفات التفرعية على نطاق واسع في شبكات التوزيع لتعويض الاستطاعة الردية وتقليل الضياعات وتحسين قيمة الجهد الكهربائي. كما تساعد هذه المكثفات على الحفاظ على توزيع الجهد ضمن الحدود المقبولة وتحسين سعة النظام التشغيلية. تعتمد فاعلية هذه المكثفات على موقعها وحجمها ونوعها وعددها. ويكمن التحدي في اختيار الموضع والحجم الأمثل للمكثفات لتحقيق أقصى استفادة منها وتقليل تكلفة شرائها وتركيبها [2].

عكف الباحثون باستمرار على حل مشكلة تحديد الموضع والحجم الأمثل للمكثفات في أنظمة التوزيع، وقد استُخدم العديد من الطرق التقليدية العددية وتقنيات الحل الأمثل والخوارزميات التطورية حتى الآن لحل هذه المشكلة. استُخدمت منهجية البرمجة اللاخطية الصحيحة المختلطة MINLP في [3]، واستراتيجية البحث الإرشادية Heuristic Search Strategies في [4] لتقليل ضياعات الاستطاعة وتكلفة المكثفات. استخدمت الخوارزمية الجينية المفردة GA بهدف تحسين عامل الاستطاعة وتنظيم الجهد من خلال تحديد قيمة سعة المكثفات وأماكنها بالاعتماد على محاكاة برنامج ماتلاب Matlab Simulink في [5]. أيضا استخدمت الخوارزمية الجينية ذات الترميز الحقيقي Real Coded Genetic Algorithm مع عرض تأثير زيادة عدد تكرار الخوارزمية في إيجاد الحل الأنسب لتقليل ضياعات الاستطاعة في [6]. قدَّم الباحثون في [7] أسلوباً متقدماً يعتمد على الخوارزمية الجينية والمنطق الضبابي Fuzzy-GA لتحديد القيم المثلى للمكثفات الثابتة والمتبدلة بهدف تحسين مؤشر الجهد وتعظيم صافي التوفير في نظام توزيع شعاعي. كما استخدمت خوارزمية تحسين سرب الجسيمات Particle Swarm Optimization (PSO) في [8] لتقليل الضياعات وتحسين مؤشر الجهد حيث استخدمت عوامل حساسية الضياع LSI، التي توفر معلومات مهمة حول قضبان التجميع المرشحة لتركيب المكثفات؛ ومنه تقليل زمن حساب الحل. وقد استُخدمت خوارزمية NSGA-II في العديد من الأبحاث ذات الصلة ببحثنا هذا. في [9] قدم الباحثون منهجية جديدة باستخدام هذه الخوارزمية لدراسة التدفق الأمثل للاستطاعة مع الأخذ بالحسبان الموضع الأمثل للمكثفات بهدف تقليل تكاليف التشغيل وتعظيم كفاءة نظام القدرة.

في [10] قام الباحثون بإيجاد الموضع الأمثل للمكثفات الثابتة والمتبدلة على مرحلتين بهدف تقليل ضياعات الاستطاعة وتعزيز استقرار الجهد وقيمة التوفير السنوية، في المرحلة الأولى استُخدم المنطق الضبابي في حساب قضبان التجميع المرشحة لتوصيل المكثفات، في المرحلة الثانية استُخدمت خوارزمية NSGA-II في تحديد قائمة حلول باريتو المثلى؛ وثم استُخدم صانع قرار ضبابي لاختيار الحل الأكثر توافقا.

في [11] استُخدمت الخوارزمية بهدف تقليل كل من تكلفة المكثفات الثابتة وتشوه الجهد التوافقي THD وتحسين مؤشر الجهد VI، وذلك في آن واحد.

في هذا البحث قامت الخوارزمية بإيجاد أفضل الحلول بالاعتماد على القيود المفروضة عليها دون الاستعانة بتقنيات أخرى لتسهيل انتقاء الحلول كاستخدام عوامل حساسية الضياع LSI في برنامج سريان الحمولة، وهذا بفضل مبدأ النخبة الذي يحافظ على الحلول الجيدة في كل جيل، والذي يميزها عن طرق الحل الأمثل

المنفصلة من خلال قدرتها على التعامل مع المشاكل المعقدة وتحسين عدة أهداف في آن واحد، وتحليل مجموعة كبيرة من الحلول خلال زمن معقول.

أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية البحث في إيجاد حل أمثل لمكان وحجم المكثفات التفرعية الثابتة في أنظمة التوزيع الشعاعية من خلال خوارزمية للحل الأمثل متعددة الأهداف بهدف تقليل تكلفة النظام الكهربائي وتحسين كفاءته وجودته من خلال تقليل ضياعات النظام وتحسين مؤشر الجهد الكهربائي واستقراره ضمن الحدود المناسبة.

طرائق البحث ومواده:

يعتمد البحث على استخدام شبكة توزيع شعاعية قياسية وتحليلها لحساب الضياعات والجهود الكهربائية في الشبكة وثم إيجاد الحل الأمثل لموقع وحجم المكثفات التي ستوصل مع قضبان التجميع في الشبكة، واستُخدمت بيئة ماتلاب البرمجية لكتابة برنامج من أجل تحليل وحساب سريان الاستطاعة باستخدام خوارزمية (المسح الخلفي – الأمامي) والحصول على قيم الضياعات والجهود الكهربائية في الشبكة، وأيضاً كتابة برنامج للخوارزمية NSGA-II لإيجاد حلول باريتو المثلى عن طريق ربط البرنامجين ببعضهما.

خوارزمية المسح الخلفي – الأمامي لحساب سريان الاستطاعة:

تعمل خوارزمية المسح الخلفي – الأمامي backward - forward sweep على مرحلتين أساسيتين، المرحلة الأولى هي المسح الخلفي والمرحلة الثانية هي المسح الأمامي [12] .

المسح الخلفي backward sweep:

في هذه الخطوة يتم حساب تيارات الأحمال الموصولة إلى كل عقدة من شبكة التوزيع وفق التالي:

$$I_L(m) = \left(\frac{P_L(m) + jQ_L(m)}{V(m)}\right)^* = \left(\frac{P_L(m) - jQ_L(m)}{V^*(m)}\right) \qquad (1)$$

حيث: $I_L(m)$ تيار الحمل الموصول إلى العقدة m.

$P_L(m)$ و $Q_L(m)$ يمثلان الاستطاعة الفعلية والرديّة على التوالي للحمل الموصول إلى العقدة m.

$V(m)$ جهد العقدة m.

المسح الأمامي forward sweep:

تُستخدم هذه الخطوة بعد المسح الخلفي لتحديد جهد كل عقدة من الشبكة على النحو التالي:

$$V(n) = V(m) - I(mn) \times Z(mn) \qquad (2)$$

حيث: العقدة m والعقد n هما عقدتا الإرسال والإستقبال على التوالي للفرع mn.

$I(mn)$ تيار الفرع mn و $Z(mn)$ ممانعة الفرع mn.

تعتمد منهجية سريان الاستطاعة في هذه الخوارزمية على:

1) التيارات المكافئة للأحمال

2) مصفوفة تيارات العقد – تيارات الفروع BIBC (The bus-injection to branch-current matrix)

3) مصفوفة تيارات الفروع – جهود العقد BCBV (The branch-current to node-voltage matrix)

التيارات المكافئة للأحمال:

في أي عقدة من الشبكة يمكن التعبير عن الاستطاعة بالمعادلة التالية:

$$S_i = P_i + jQ_i = V_i \times I_i^* \qquad i = 1,2,3,\dots\dots,N_{Bus} \qquad (3)$$

$$I_i = \left(\frac{P_i + jQ_i}{V_i}\right)^* \qquad i = 1,2,3,\dots\dots,N_{Bus} \qquad (4)$$

من اجل التكرار رقم **k** والعقدة رقم **i** يمكن كتابة التيار كما يلي:

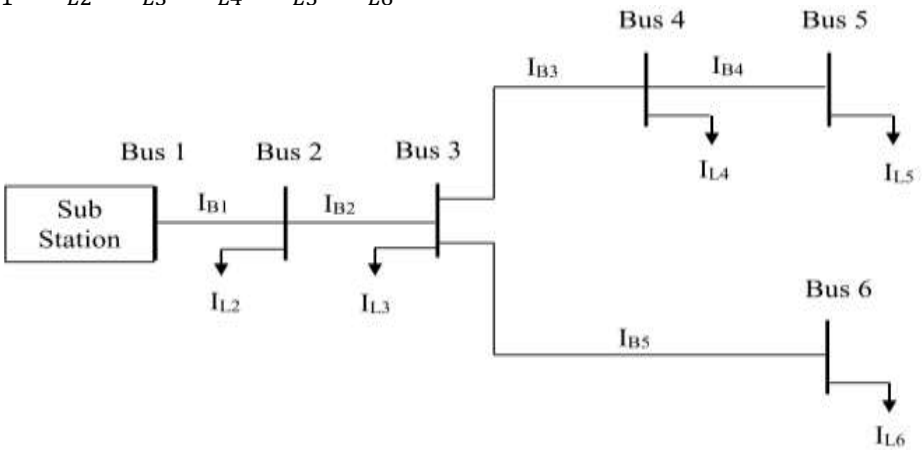
$$I_i^k = \left(\frac{P_i + jQ_i}{V_i^k}\right)^* \qquad i = 1,2,3,\dots\dots,N_{Bus} \qquad (5)$$

حيث N_{Bus} العدد الكلي لقضبان التجميع.

تشكيل مصفوفة تيارات العقد – تيارات الفروع BIBC:

بتطبيق قانون كيرشوف للتيار عند كل عقدة من الشبكة يتشكل لدينا مجموعة من المعادلات تربط ما بين تيارات الأحمال وتيارات الفروع كما هو موضح في الشكل (1) الذي من خلاله يتم شرح الخوارزمية وفق التالي:

$$\left.\begin{aligned} IB_5 &= I_{L6} \\ IB_4 &= I_{L5} \\ IB_3 &= I_{L4} + I_{L5} \\ IB_2 &= I_{L6} + I_{L3} + I_{L4} + I_{L5} \\ IB_1 &= I_{L2} + I_{L3} + I_{L4} + I_{L5} + I_{L6} \end{aligned}\right\} \qquad (6)$$



الشكل (1) شبكة توزيع بسيطة

من المعادلات السابقة يمكن كتابة مصفوفة BIBC بالشكل التالي:

$$\begin{bmatrix} IB_1 \\ IB_2 \\ IB_3 \\ IB_4 \\ IB_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{L2} \\ I_{L3} \\ I_{L4} \\ I_{L5} \\ I_{L6} \end{bmatrix} \qquad (7)$$

الشكل العام للمعادلة السابقة يمكن التعبير عنه كما يلي:

$$[IB] = [BIBC] \times [I_L] \qquad (8)$$

تشكيل مصفوفة تيارات الفروع – جهود العقد BCBV:

تلخص هذه المصفوفة العلاقة بين تيارات الفروع وجهود العقد حيث يمكن الحصول عليها بسهولة من خلال تطبيق قانون كيرشوف للجهد.

كما هو مبين في الشكل (1)، جهود العقد (2, 3, 4) يمكن التعبير عنها كما يلي:

$$V_2 = V_1 - IB_1 \times Z_{12} \quad (9)$$

$$V_3 = V_2 - IB_2 \times Z_{23} \quad (10)$$

$$V_4 = V_3 - IB_3 \times Z_{34} \quad (11)$$

بتبديل المعادلتين (9) و (10) في المعادلة الأخيرة (11) يمكن كتابة جهد العقدة 4 كما يلي:

$$V_4 = V_1 - IB_1 \times Z_{12} - IB_2 \times Z_{23} - IB_3 \times Z_{34} \quad (12)$$

نلاحظ من المعادلة الأخيرة أن جهود عقد الشبكة يمكن التعبير عنها كتابع لتيارات الفروع وبارامترات الخطوط والترتر الرئيسي للمحطة الفرعية.

بالتالي يمكن كتابة مصفوفة BCBV بالشكل التالي:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} IB_1 \\ IB_2 \\ IB_3 \\ IB_4 \\ IB_5 \end{bmatrix} \quad (13)$$

الشكل العام للمعادلة السابقة يمكن التعبير عنه كما يلي:

$$[\Delta V] = [BCBV] \times [IB] \quad (14)$$

كما يمكن كتابتها بالشكل:

$$[\Delta V] = [BCBV] \times [BIBC] \times [I_L] \quad (15)$$

$$[\Delta V] = [DLF] \times [I_L] \quad (16)$$

$$[DLF] = [BCBV] \times [BIBC] \quad (17)$$

يمكن الحصول على الحل التكراري لسريان الاستطاعة لشبكة التوزيع عن طريق حل المعادلات التالية:

$$I_i^k = \left(\frac{P_i + jQ_i}{V_i^k}\right)^* \quad (18)$$

$$[\Delta V^{k+1}] = [DLF] \times \left[I_L^k\right] \quad (19)$$

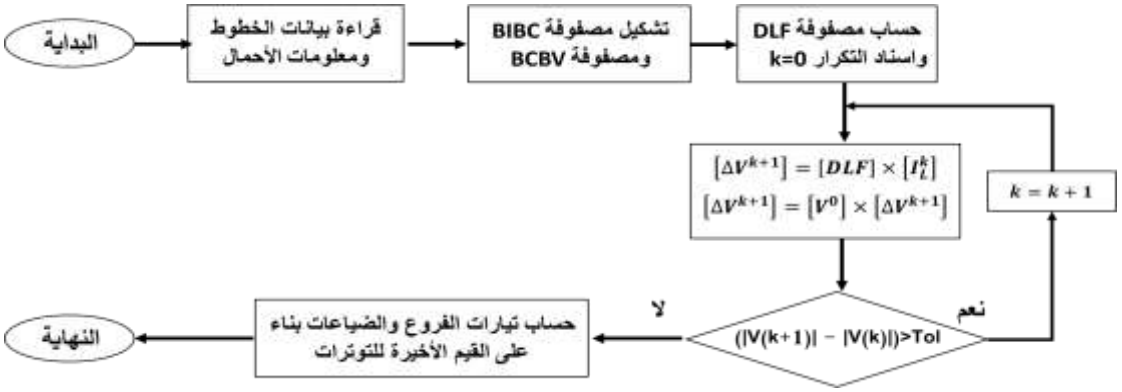
$$[\Delta V^{k+1}] = [V^0] \times [\Delta V^{k+1}] \quad (20)$$

وتحسب الضياعات الكلية للاستطاعة بالعلاقة التالية:

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^{nb} |IB_i|^2 . R_i \quad (20)$$

$$Q_{loss} = \sum_{i=1}^{nb} |IB_i|^2 . X_i \quad (21)$$

يمكن تلخيص خوارزمية المسح الخلفي – الأمامي بالمخطط التدفقي التالي المبيّن في الشكل (2).



الشكل(2) المخطط التدفقي لخوارزمية المسح الخلفي – الأمامي

تقنية الحل الأمثل متعددة الأهداف Multi-Objective Optimization

عادة ما تتكون مشاكل الحل الأمثل متعددة الأهداف Multi-objective optimization problems (MOPs) من أهداف متضاربة تتطلب تحسينًا متزامنًا مثلما هي مشاكل الهندسة الواقعية، أو حتى معظمها، والتي تتعامل على نحو أساسي مع أهداف متعددة من تقليل التكلفة وتحسين الاستقرار وتعزيز الموثوقية والاستدامة، إلخ. تعتبر طريقة واجهة باريتو (Pareto-front) أفضل طريقة لحل الأهداف المتعددة عن طريق إيجاد مجموعة من حلول التوفيق بينها، والمعروفة باسم الحلول غير المُهيمَن عليها أو أمثلية باريتو للحلول، ويُحافَظ على هذه الحلول في أرشيف يُحَسَّنْ في كل تكرار، ثم يتم اختيار أفضل حل وسط وفقًا لبنود جيدة بينها [13,14].

يمكن تعريف تقنية إيجاد الحل الأمثل متعددة الأهداف على أنها تقليل أو تعظيم عدد من الأهداف M في وقت واحد باستخدام مجموعة من متغيرات القرار $(x_1, x_2, \dots, x_n)$

$$f(X) = [f_1(X), \dots, f_m(X)] \qquad (21)$$
$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$$

X هو شعاع لمتغيرات القرار (متغيرات التحكم) والذي يمثل الحل المحتمل.

$$\left.\begin{array}{rll} Minimize\,,\ Maximize & f_m(X) & m = 1,2,\dots,M \\ subject\ to & g_j(X) \geq 0\,, & j = 1,2,\dots,J \\ & h_k(X) = 0 & k = 1,2,\dots,K \\ & x_i^{(L)} \leq x_i \leq x_i^{(U)}\,, & i = 1,2,\dots n \end{array}\right\} \qquad (22)$$

$g_j(X)$ و $h_k(X)$ توابع القيد.

$x_i^{(L)}$, $x_i^{(U)}$ الحدود العليا والدنيا لمتغيرات القرار.

بفرض لدينا حلين x و y حيث يمكن أن يهيمن أحد الحلين على الآخر أو لا يهيمن عليه، بالنسبة لحالة تقليل تابع الهدف (minimization case) نقول عن الحل x أنه يُهيمن على الحل y إذا كان [15]:

1 – الحل x ليس أسوأ من الحل y بالنسبة لجميع توابع الهدف:

$$f_i(x) \leq f_i(y) \quad for\ all\ i = 1, \dots, M \qquad (23)$$

2– الحل x أفضل تماما من الحل y بالنسبة لتابع هدف واحد على الأقل:

$$f_i(x) < f_i(y) \quad for\ all\ i = 1, \dots, M \qquad (24)$$

الخوارزمية الجينية ذات الفرز غير المُهيمَن عليه (NSGA-II)

كان ديب وسرينيفاس (Deb and Srinivas) أول من اقترح الخوارزمية الجينية ذات الفرز غير المُهيمَن عليه NSGA، والتي سميت بذلك نسبة إلى الحلول غير المُهيمَن عليها، والتي تكون مرتبة على عدة جبهات، ولكنها واجهت بعض الانتقادات مثل التعقيد الحسابي للفرز غير المُهيمَن عليه ونقص النخبة (Elitism) والحاجة إلى تحديد معامل المشاركة (Sharing parameter) [10]. قام كاليموني ديب وآخرون بمعالجة هذه الانتقادات، واقترح نسخة مطورة من خوارزمية NSGA، وأطلق عليها اسم NSGA-II والتي تتميز باستخدام مبدأ النخبة التي تساهم في زيادة احتمالية إنشاء نسل Offspring أفضل وآلية تنوع الحلول والحفاظ على الحلول غير المُهيمَن عليها في المجموعات السكانية، ويوضح الشكل (3) آلية فرز الحلول باستخدام مبدأ النخبة.

تُنفَّذ خوارزمية NSGA-II وفق الخطوات التالية:

1- إنشاء المجتمع الأولي، ويرمز له بـ P_t والذي يتكون من N حل للمشكلة المحسنة وتقييم لياقة الأفراد(الحلول).

2- توليد مجتمع الأبناء (النسل) يرمز له بـ Q_t باستخدام المشغلات الجينية التقليدية (الاختيار، التقاطع والطفرة) وتقييم لياقة الأفراد.

3- انضمام المجتمعين P_t و Q_t ليشكلان معاً مجموعة جديدة R_t ذات عدد الحلول 2N.

4- تُجْرَى مقارنة لكل حل في R_t مع الحلول الأخرى فيه وحسب درجة هيمنتها يُصَنَّف سكان R_t إلى جبهات غير مُهيمَن عليها يرمز لها بـ ($FR_1 - FR_2 - FR_3 - \cdots etc$) حيث يبدأ الترتيب بأول أفضل جبهة FR_1 ، ويستمر مع ثاني أفضل جبهة FR_2 وهكذا.

5- يتم حذف الجبهات التي لا يمكنها الدخول إلى المجتمع الجديد الذي يجب أن يكون عدد سكانه مساوي لعدد سكان المجتمع الأولي P_t .

6- قد تحتوي الجبهة الأخيرة (FR_3)كما هو مبين في الشكل (3) على عدد من الحلول أكثر من مواقع الحلول المتبقية للمجتمع الجديد P_{t+1} . لذلك، يتم إجراء فرز الحلول وفقًا لمسافة كل منهما لتحديد العدد الضروري من الحلول من الجبهة الأخيرة FR_3 التي تدخل المجتمع الجديد P_{t+1}. يُطلق على هذا الفرز اسم (مسافة الازدحام crowding distance) ويسمح باختيار الحلول الأنسب من الجبهة FR_3.

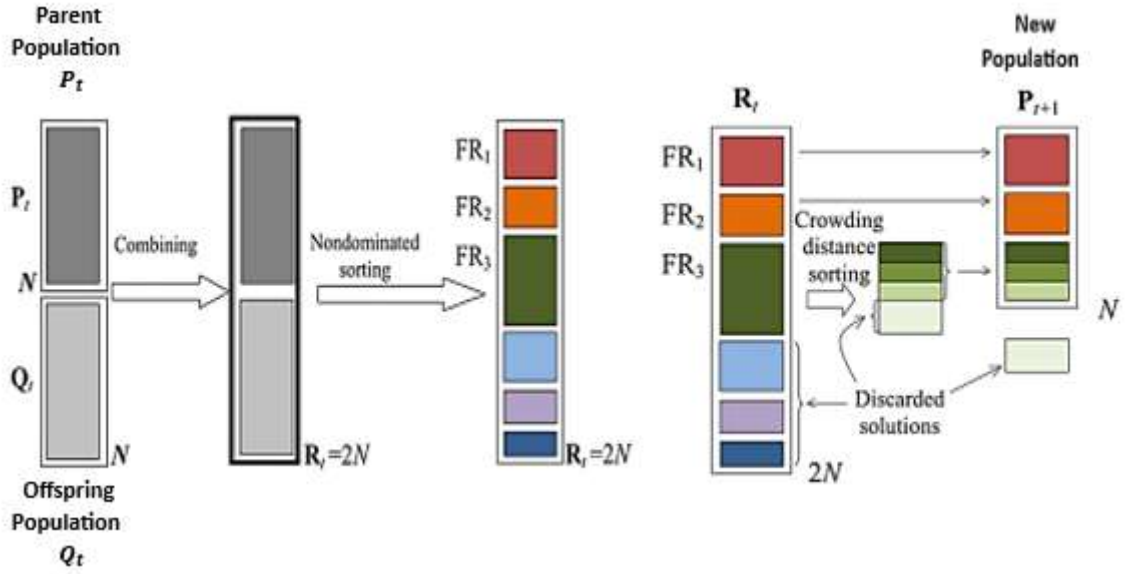
7- تستمر العملية حتى تلبية أي معايير توقف والتي عادة ما تكون الحد الأقصى لعدد الأجيال أو عدد مرات تشغيل الخوارزمية، وثم عرض حلول جبهة باريتو المثلى وانتقاء الحل الأمثل للمشكلة المدروسة.

يظهر مبدأ فرز (مسافة الازدحام) في الشكل (4) حيث يتم حساب متوسط المسافة بين نقطتين (حلين) على جانبي نقطة معينة على طول كل هدف وذلك للحصول على تقدير لكثافة الحلول المحيطة بهذا الحل في المجتمع. لكل حل في الجبهة FR_3 ولجميع توابع الهدف، يتم حساب مسافته الإجمالية للحلول المجاورة. في حالة وجود تابعي هدف، فإن المسافة الكلية للحل (i) للجبهة FR_3 المدروسة والحلول المجاورة $(i-1)$ و $(i+1)$ في نفس الجبهة FR_3 تشكل مستطيل ABCD، يمثل جانب المستطيل d_1 مسافة الحل (i) إلى الحلول المجاورة لتابع الهدف F_1 ، والجانب d_2 لتابع الهدف F_2 [16].

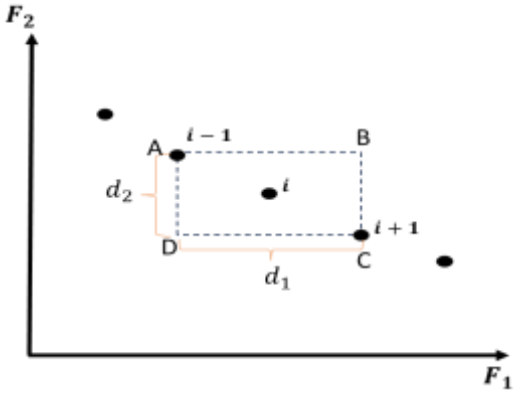
متوسط المسافة (The mean distance) بين الحل والحلول المجاورة لتوابع هدف معينة هو:

$$The\ mean\ distance = \frac{d_1+d_2}{2} \qquad (25)$$

يتم إجراء فرز تنازلي لجميع حلول الجبهة FR_3 وفقًا للمسافة المتوسطة للحل والحلول المجاورة لتوابع هدف معينة، بدءًا من الحل ذو قيمة المسافة الأكبر إلى الحل ذو قيمة المسافة الأقل. يضمن هذا، التوزيع المتساوي للحلول عبر الجبهة لأن الحلول القريبة من بعضها لا تتاح لها فرصة الدخول إلى المجتمع الجديد.



الشكل (3) توضيح آلية فرز الحلول باستخدام مبدأ النخبة



الشكل (4) فرز الحلول حسب المسافة المتوسطة بين حل معين والحلول المجاورة

تابع الهدف:

الهدف الأساسي من إيجاد الموضع الأمثل للمكثفات هو تقليل التكلفة الكلية والتي تشمل التكلفة الكلية لضياعات الاستطاعة الفعلية وتكلفة المكثفات وأيضاً بهدف تحسين مؤشر الجهد VI وذلك في آن واحد.

$$\min(Cost\ , VI) \qquad (26)$$

يكون تابع الهدف الأول (التكلفة) وفقاً للمعادلة التالية:

$$\mathrm{f}_1 = K_p \times \mathrm{Total}\ P_{\mathrm{loss}\ /cp} + \sum_{q=1}^{n} K_c \times Q_{qc} \qquad (27)$$

$K_p = 168\ [\$/\mathrm{kWh}]$ يمثل التكلفة السنوية لضياعات الاستطاعة الفعلية.

$\mathrm{Total}\ P_{\mathrm{loss}\ /cp}\ [\mathrm{kW}]$ تمثل القيمة الكلية لضياعات الاستطاعة الفعلية بعد تركيب المكثفات.

K_c [\$/kVAr] يمثل التكلفة السنوية للمكثفات الثابتة [17].

Q_{qc}[kVAr] تمثل استطاعة المكثف الموصول مع قضيب التجميع.

نحصل على قيمة Total $P_{\text{loss }/cp}$ من برنامج سريان الحمولة والتي يكون لها قيمة خاصة بكل حل من حلول خوارزمية NSGA-II.

يكون تابع الهدف الثاني (مؤشر الجهد) وفقاً للمعادلة التالية:

$$f_2 = \sum_{i=1}^{n} \frac{|V_{rated} - V_i|^2}{V_{rated}} \qquad (28)$$

V_{rated} تمثل جهد القضيب المرجعي ويساوي $1pu$.

V_i تمثل قيمة الجهد على القضيب i^{th} .

n عدد قضبان التجميع في الشبكة المدروسة.

القيود:

1- حدود الجهد:

يجب أن تبقى جهود قضبان التجميع ضمن الحدود المقبولة عند وصل المكثفات إلى شبكة التوزيع كما يلي:

$$V_{min} \le V_i \le V_{max} \quad , \qquad i = 1,2,\dots,n \qquad (29)$$

حيث $V_{min} = 0.9$ و $V_{max} = 1.05$ الحد الأدنى والحد الأعلى للجهد على التوالي.

2- حدود استطاعة المكثفات:

يتم التحكم بالاستطاعة الردية المقدمة من قبل المكثفات كما يلي:

$$Q_c^{min} \le Q_{ci} \le Q_c^{\max} \quad , \qquad i = 1,2,\dots,n \qquad (30)$$

حيث $Q_c^{min} = 50$ kVAr و $Q_c^{max} = 3000$ kVAr يمثلان الحد الأدنى والحد الأعلى للاستطاعة الردية المقدمة من قبل المكثفات على التوالي.

3- الاستطاعة الردية الكلية للمكثفات:

يجب أن يكون مجموع الاستطاعات الردية للمكثفات الموصولة (Q_c^{Total}) أصغر أو يساوي مجموع الاستطاعات الردية المطلوبة لأحمال شبكة التوزيع (Q_L^{Total}) كما يلي:

$$(Q_c^{Total}) \le (Q_L^{Total}) \qquad (31)$$

النتائج والمناقشة:

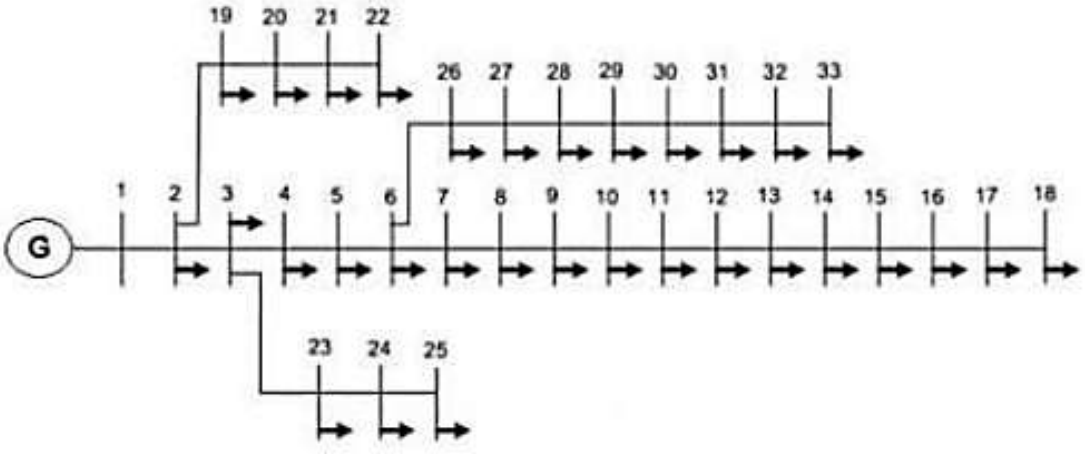
للتأكد من صلاحية وفعالية خوارزمية NSGA-II المقترحة في اختيار الموقع والاستطاعة المثلى للمكثفات تم تطوير برنامجين في بيئة ماتلاب البرمجية (MATLAB) وربطهما معا، البرنامج الأول لحساب سريان الحمولة باستخدام خوارزمية (المسح الخلفي – الأمامي BFS) والثاني لخوارزمية NSGA-II لإيجاد أفضل الحلول.

في البداية تم تشغيل البرنامج الأول لحساب قيم الجهود الكهربائية والاستطاعات في الحالة الأساسية وثم البرنامج الثاني لإيجاد الموقع والاستطاعة المثلى للمكثفات (الحلول ذات الحجم N) التي تحقق أقل قيمة للتكلفة الكلية $(Cost)$ ومؤشر الجهد (VI) في آن واحد وذلك من بين الحلول المقترحة في الخوارزمية ذات الحجم 2N، وتم تطبيق ذلك على شبكة توزيع شعاعية قياسية 33–Bus في ثلاث حالات ، في حالة توصيل مكثف واحد فقط ثم

مكثفين ثم ثلاث مكثفات وثم اختيار الحل الذي يحقق أقل قيمة للتكلفة، وبيّنت النتائج انخفاض جيد في ضياعات الاستطاعة الفعلية وتحسين قيم جهود قضبان التجميع مقارنة مع الضياعات والجهود في الحالة الأساسية قبل تركيب المكثفات.

شبكة توزيع شعاعية 33-Bus:

تم اختبار الخوارزمية المقترحة على شبكة توزيع شعاعية متوازنة وذات أحمال ثابتة مكونة من 33 قضيب تجميع بجهد اسمي 12.66 kV، ويبين الشكل (5) والجدول (1) التاليين مخطط ومعلومات الشبكة [18] :



الشكل (5) مخطط شبكة توزيع شعاعية 33-bus

الجدول (1) معلومات شبكة توزيع شعاعية 33-bus

Bus No		Line Data		Load Data	
From	To	R(Ω)	X(Ω)	P(kW)	Q(kVAR)
1	2	0.0922	0.047	100	60
2	3	0.493	0.2511	90	40
3	4	0.366	0.1864	120	80
4	5	0.3811	0.1941	60	30
5	6	0.819	0.707	60	20
6	7	0.1872	0.6188	200	100
7	8	1.7114	1.2351	200	100
8	9	1.03	0.74	60	20
9	10	1.044	0.74	60	20
10	11	0.1966	0.065	45	30
11	12	0.3744	0.1238	60	35
12	13	1.468	1.155	60	35
13	14	0.5416	0.7129	120	80
14	15	0.591	0.526	60	10
15	16	0.7463	0.545	60	20
16	17	1.289	1.721	60	20

17	18	0.732	0.574	90	40
2	19	0.164	0.1565	90	40
19	20	1.5042	1.3554	90	40
20	21	0.4095	0.4784	90	40
21	22	0.7089	0.9373	90	40
3	23	0.4512	0.3083	90	50
23	24	0.898	0.7091	420	200
24	25	0.896	0.7011	420	200
6	26	0.203	0.1034	60	25
26	27	0.2842	0.1447	60	25
27	28	1.059	0.9337	60	20
28	29	0.8042	0.7006	120	70
29	30	0.5075	0.2585	200	600
30	31	0.9744	0.963	150	70
31	23	0.3105	0.3619	210	100
32	33	0.341	0.5302	60	40
Total Load				**3715**	**2300**

يبيّن الجدول (2) نتائج الحل الأمثل لموقع واستطاعة المكثفات في ثلاث حالات لشبكة توزيع 33-bus والتي أظهرت انخفاض جيد في ضياعات الاستطاعة الفعلية وتحسن قيمة الجهد الكهربائي لقضبان التجميع بزيادة السعة الإجمالية لمكثفات تعويض الاستطاعة الردية المتوضعة في الموقع الأمثل وبالتالي تقليل التكلفة الكلية السنوية وزيادة موثوقية النظام الكهربائي. أيضاً يبيّن الشكل (6) قيم الجهد الكهربائي لقضبان التجميع في الحالات الثلاث وتبيّن الأشكال (9,8,7) توزع حلول جبهة باريتو لخوارزمية NSGA-II في الحالات الثلاث. تمت مقارنة نتائج الحالة الثالثة مع نتائج خوارزمية تلقيح الزهور Flower Pollination Algorithm (FPA) [19] والخوارزمية الجينية Genetic Algorithm (GA) [20].

الجدول (2) نتائج الحل الأمثل لموقع واستطاعة المكثفات في ثلاث حالات لشبكة توزيع 33-bus

شبكة توزيع شعاعية 33-bus	**بدون مكثفات**	**مكثف واحد**	**مكثفين**		**ثلاث مكثفات**								
					NSGA-II			**FPA** [19]			**GA** [20]		
الموقع والاستطاعة للمكثفات[kVAr]	-----	1200	450	1050	450	600	900	450	450	900	850	25	900
الموقع الأمثل للمكثفات	-----	bus 30	Bus 12	Bus 30	Bus 13	Bus 24	Bus 30	Bus 13	Bus 24	Bus 30	Bus 7	Bus 29	Bus 30
أدنى قيمة للجهد [pu]	0.94457 bus 13	0.91597 bus 18	0.92974 bus 18		0.93303 bus 18			0.9327			0.9251		
أعلى قيمة للجهد	0.97133	0.99742	0.99752		0.99765			---			---		

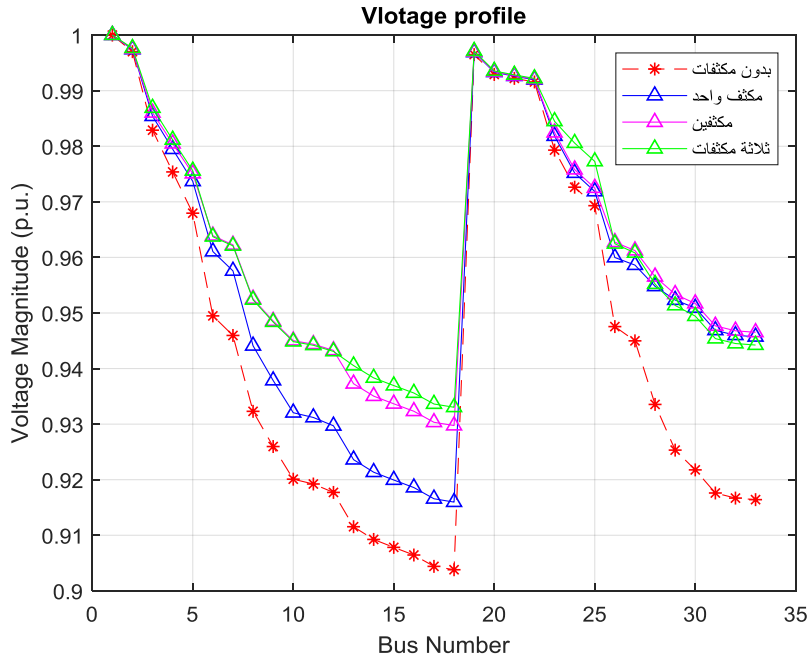
[pu]	bus 2	bus 2	bus 2	bus 2		
ضياعات الاستطاعة الفعلية [kW]	210.995	151.496	141.8637	138.9275	139.075	144.04
التكلفة السنوية للضياعات [$]	35447.25	25451.33	23833.1	23339.8251	23364.6	24198.72
تكلفة المكثفات [$/year]	-----	204	353.25	410.55	392.4	507.15
التكلفة الإجمالية السنوية [$/year]	35447.25	25655.33	24186.35	23750.3751	23757	24705.87
التوفير السنوي [$/year]	0	9791.92	11260.91	11696.8801	11685.96	10737.09

نلاحظ تقارب نتائج الخوارزمية المقترحة مع خوارزمية FPA والتي تعتبر من الخوارزميات التطورية وتتشابه في آلية عملها وتحليلها للحلول مع خوارزمية NSGA-II، بينما تتفوق على الخوارزمية الجينية المنفصلة في التوفير السنوي بقيمة تبلغ [$/year] 959.7901 رغم استخدام تقنية حساسية الضياع Loss Sensitivity Technique (LST) مع خوارزمية GA لاختيار القضبان المرشحة لتركيب المكثفات.

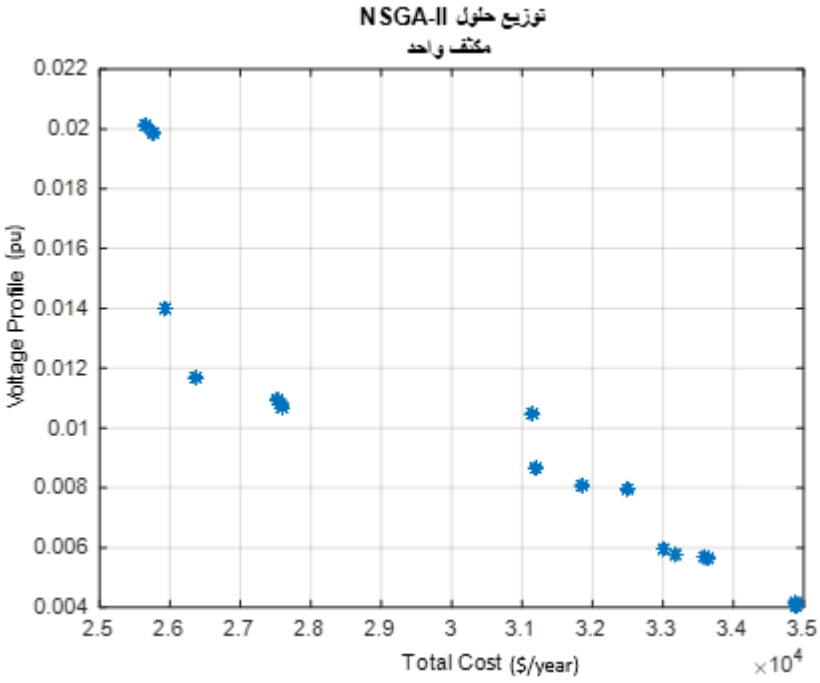
أيضاً يبيّن الجدول (3) النسب المئوية لتخفيض ضياعات الاستطاعة الفعلية والتكلفة الإجمالية السنوية في الحالات الثلاثة المدروسة والذي نلاحظ من خلاله تخفيض الضياعات والتكلفة السنوية بنسبة أكبر في حالة مكثفين باستخدام الخوارزمية المقترحة مقابل حالة ثلاث مكثفات باستخدام خوارزمية GA، مما يشير إلى أهمية التخطيط الجيد لاستخدام المكثفات في أنظمة توزيع الطاقة.

الجدول (3) النسب المئوية لتخفيض ضياعات الاستطاعة الفعلية والتكلفة الإجمالية السنوية

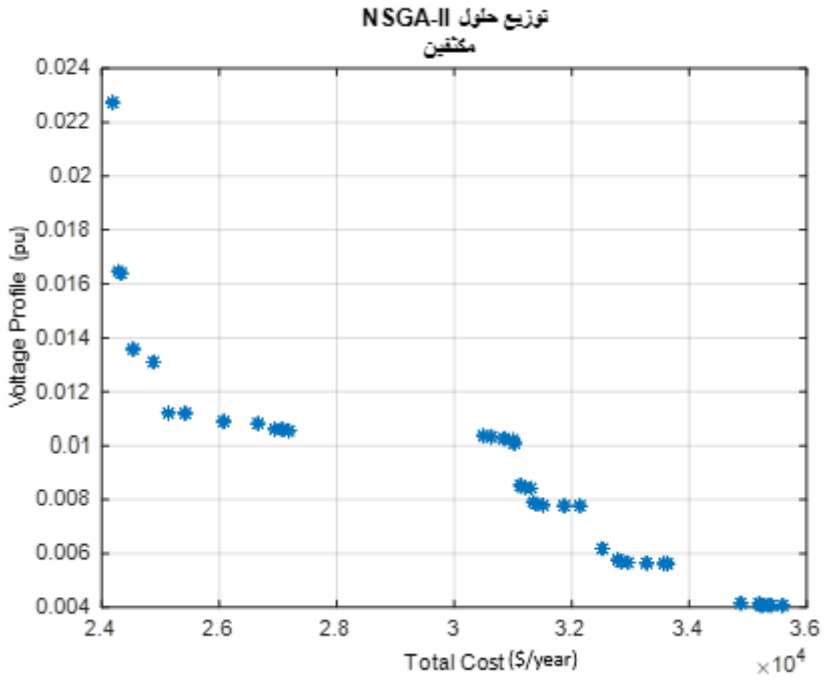
33-Bus	مكثف	مكثفين	ثلاث مكثفات		
			NSGA-II	FPA	GA
ضياعات الاستطاعة الفعلية	28.2 %	32.76 %	34.15 %	34.08 %	31.73 %
التكلفة الإجمالية السنوية	27.62 %	31.77 %	33 %	32.98 %	30.3 %



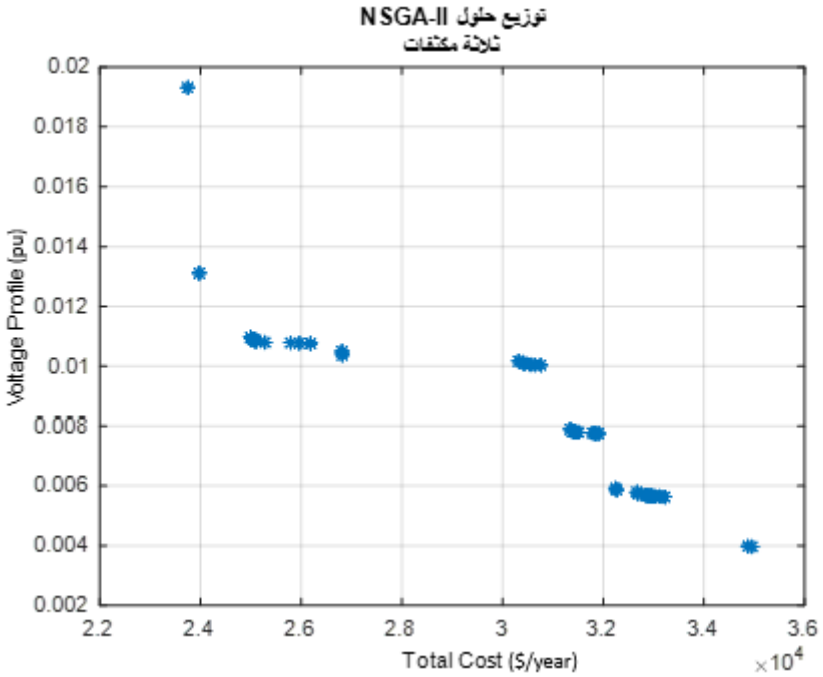
الشكل (6) قيم الجهد الكهربائي لقضبان التجميع قبل وبعد توصيل المكثفات لشبكة توزيع 33-bus



الشكل (7) توزع حلول جبهة باريتو لخوارزمية NSGA-II في حالة توصيل مكثف واحد مع شبكة توزيع شعاعية 33-bus



الشكل (8) توزع حلول جبهة باريتو لخوارزمية NSGA-II في حالة توصيل مكثفين مع شبكة توزيع شعاعية 33-bus



الشكل (9) توزع حلول جبهة باريتو لخوارزمية NSGA-II في حالة توصيل ثلاث مكثفات مع شبكة توزيع شعاعية 33-bus

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

تبين النتائج التي حصلنا عليها فعالية الخوارزمية الجينية ذات الفرز غير المُهيمَن عليه NSGA-II في إيجاد الحل الأمثل لتوضع المكثفات في شبكات التوزيع الشعاعية الذي يمكن اختياره من مجموعة حلول باريتو المثلى بما يتوافق مع خصائص النظام الكهربائي المدروس مما يكسب الخوارزمية مرونة أكثر مقارنة بطرق الحل الأمثل ذات الأهداف الفردية. تم تطبيق الخوارزمية المقترحة مع خوارزمية سريان الحمولة BFS على شبكة توزيع شعاعية قياسية 33–bus بهدف تقليل التكلفة الكلية من خلال تخفيض ضياعات الاستطاعة الفعلية وتكلفة المكثفات، وتحسين قيم الجهد الكهربائي لقضبان التجميع مقارنة مع التكلفة الكلية للنظام الكهربائي في الحالة الأساسية قبل تركيب المكثفات.

التوصيات:

1- إيجاد الحل الأمثل لتوضع المكثفات مع الأخذ بالاعتبار وجود أحمال لا خطية في الشبكة.

2- تطبيق خوارزمية NSGA-II في إيجاد الموضع الأمثل لمصادر التوليد الموزع في شبكات التوزيع مما يساهم بشكل أفضل في تخفيض الضياعات.

3- دراسة الموضع الأمثل للمكثفات التفرعية باستخدام خوارزمية NSGA-II في الشبكات الذكية المستقبلية.

4- الأخذ بالحسبان المكثفات التفرعية الثابتة والمتبدلة والأحمال المتغيرة في شبكة التوزيع المدروسة مما يوفر نموذج أقرب إلى الواقع العملي.

5- دراسة واختبار أداء خوارزمية NSGA-II في أنظمة التوزيع الكبيرة الشعاعية والحلقية.

References:

[1] Lohia S, Mahela OP, Ola SR. Optimal capacitor placement in distribution system using genetic algorithm. 2016 IEEE 7th Power India Int. Conf., vol. 2018-Janua, IEEE; 2016, p. 1–6. https://doi.org/10.1109/POWERI.2016.8077355.

[2] Masoum MAS, Fuchs EF. Optimal Placement and Sizing of Shunt Capacitor Banks in the Presence of Harmonics. Power Qual. Power Syst. Electr. Mach., 2015, p. 887–959. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-800782-2.00010-5.

[3] Nojavan S, Jalali M, Zare K. Optimal allocation of capacitors in radial/mesh distribution systems using mixed integer nonlinear programming approach. Electr Power Syst Res 2014;107:119–24.

[4] Chis M, Salama MMA, Jayaram S. Capacitor placement in distribution systems using heuristic search strategies. IEE Proceedings-Generation, Transm Distrib 1997;144:225–30.

[5] Mehanna MA, Abdullah MH. Practical Capacitor Bank Location Optimization Based On Genetic Algorithm, 2015.

[6] Sharma D, Mahor A. Optimal Placement of Capacitor in Radial Distribution System Using Real Coded Genetic Algorithm 2013.

[7] Das D. Optimal placement of capacitors in radial distribution system using a Fuzzy-GA method. Int J Electr Power Energy Syst 2008;30:361–7. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2007.08.004.

[8] Prakash K, Sydulu M. Particle swarm optimization based capacitor placement on radial distribution systems. 2007 IEEE Power Eng Soc Gen Meet PES 2007. https://doi.org/10.1109/PES.2007.386149.

[9] Maghami MR, Mutambara AGO. Optimum Power Flow with Respect to the Capacitor Location and Size in Distribution Network. Processes 2022;10. https://doi.org/10.3390/pr10122590.
[10] Mohamed El-Saeed MAE sayed, Abdel-Gwaad AF, Farahat MAE fattah. Solving the capacitor placement problem in radial distribution networks. Results Eng 2023;17:100870. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100870.
[11] Ebrahimi Moghadam M, Falaghi H, Farhadi M. A Novel Method of Optimal Capacitor Placement in the Presence of Harmonics for Power Distribution Network Using NSGA-II Multi-Objective Genetic Optimization Algorithm. Math Comput Appl 2020;25:17. https://doi.org/10.3390/mca25010017.
[12] Pathak O, Prakash P. Load flow solution for radial distribution network. 2018 2nd IEEE Int. Conf. Power Electron. Intell. Control Energy Syst. ICPEICES 2018, IEEE; 2018, p. 176–81. https://doi.org/10.1109/ICPEICES.2018.8897305.
[13] Ngatchou P, Zarei A, El-Sharkawi MA. Pareto multi objective optimization. Proc. 13th Int. Conf. Intell. Syst. Appl. to Power Syst. ISAP'05, vol. 2005, 2005, p. 84–91. https://doi.org/10.1109/ISAP.2005.1599245.
[14] Mohammed J. Analysis of optimal sizing and location of shunt capacitors in active distribution networks. Универзитет у Београду 2018.
[15] Marseguerra M, Zio E, Martorell S. Basics of genetic algorithms optimization for RAMS applications. Reliab Eng Syst Saf 2006;91:977–91. https://doi.org/10.1016/j.ress.2005.11.046.
[16] Deb K, Member A, Pratap A, Agarwal S, Meyarivan T. A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm : 2002;6:182–97.
[17] Taher SA, Hasani M, Karimian A. A novel method for optimal capacitor placement and sizing in distribution systems with nonlinear loads and DG using GA. Commun Nonlinear Sci Numer Simul 2011;16:851–62. https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2010.05.011.
[18] Tahir MJ, Rasheed MB, Rahmat MK. Optimal Placement of Capacitors in Radial Distribution Grids via Enhanced Modified Particle Swarm Optimization. Energies 2022;15:1–27. https://doi.org/10.3390/en15072452.
[19] Tamilselvan V, Jayabarathi T, Raghunathan T, Yang XS. Optimal capacitor placement in radial distribution systems using flower pollination algorithm. Alexandria Eng J 2018;57:2775–86. https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.01.004.
[20] Abul'Wafa AR. Optimal capacitor allocation in radial distribution systems for loss reduction: A two stage method. Electr Power Syst Res 2013;95:168–74.