Determining the Parameters of an Active Power Filter in Electrical Distribution Networks Using Evolutionary Optimization Algorithms

Dr. Raseel Aljendy*

(Received 10 / 3 / 2026. Accepted 25 / 5 / 2026)

□ ABSTRACT □

In most countries worldwide, ensuring the power quality (PQ) has become a critical issue for power systems, including industrial and urban distribution networks. To overcome these problems, the active power filter (APF) is widely used in distribution networks and industrial networks. The active filter's controller consists of two main components: one dedicated to generating the reference current, and the other responsible for producing the control signal for the inverter. This unit analyzes the harmonic components, subsequently generating compensating reference currents through various control systems, such as a proportional-integral (PI) controller.

Using of evolutionary algorithms especially, particle swarm optimization (PSO) and salp swarm algorithm (SSA), to determine the optimal parameters of APF and the gains of PI controller (K_p,K_i) has been presented in this paper. The simulation results show the effectiveness of the proposed algorithms and achieve a good performance under a variable load. In a related context, the total harmonic distortion THD for current supply has been minimized from 11.5% to 1.99%, and the voltage of DC-link has a stable value with zero deviation from reference value using SSA.

Keywords: Evolutionary Algorithm, Particle Swarm Optimization, Salp Swarm Optimization, Active Power Filter(APF) and Power Quality.

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

* **Assistant Professor, Department of Electrical Power Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Latakia University (formerly Tishreen), Latakia, Syria.** raseel.aljendy@latakia-univ.edu.sy

استخدام خوارزميات الحل الأمثل التطورية لتحديد بارامترات المرشح الفعال في شبكات التوزيع الكهربائية

د. رسيل الجندي *

(تاريخ الإيداع 10 / 3 / 2026. قُبِل للنشر في 25/ 5 / 2026)

ملخّص

في معظم دول العالم، أصبح ضمان جودة الطاقة الكهربائية مسألة ملحة لأنظمة الطاقة الكهربائية، بما في ذلك الشبكات الصناعية وشبكات التوزيع في المدن.

للتغلب على هذه المشكلات يستخدم المرشح الفعال على نطاق واسع في شبكات التوزيع والشبكات الصناعية، حيث ينقسم نظام التحكم في المرشح الفعال إلى قسمين، القسم الأول مسؤول عن توليد التيار المرجعي ، والآخر لتوليد إشارة التحكم للمبدلة. تقوم هذه الوحدة بتحليل التيار التوافقي للتيار والجهد، وتوليد تيارات تعويضية مرجعية باستخدام وحدات التحكم المختلفة مثل المتحكم التناسبي – التكاملي.

تم في هذه الورقة البحثية عرض استخدام الخوارزميات التطورية وبشكل خاص : خوارزميتي سرب الجسيماتPSO وخوارزمية سرب السالبات SSA لتحديد المعاملات المثلى للمرشح الفعال ومعاملات الربح لوحدة التحكم التناسبية التكاملية (K_p, K_i) . تُظهر نتائج المحاكاة فعالية الخوارزميات المقترحة وتحقيق أداء جيد تحت ظروف الحمل المتغير. وفي سياق متصل، تم تقليل التشوه التوافقي الكلي (THD) من 11.5% إلى 1.99%، بينما حافظ الجهد في وصلة الجهد المستمر للمرشح الفعال على قيمة ثابتة دون أي انحراف عن القيمة المرجعية باستخدام خوارزمية SSA.

الكلمات المفتاحية: خوارزميات البحث الأمثل، خوارزمية سرب الجسيمات، خوارزمية سرب السالبات، المرشح الفعال، جودة الطاقة الكهربائية.

حقوق النشر : مجلة جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)– سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص CC BY–NC–SA 04

* مدرس– قسم هندسة الطاقة الكهربائية–كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية– جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً) – اللاذقية–سورية.
raseel.aljendy@latakia-univ.edu.sy

1- مقدمة:

إن التقدم الكبير في مجال أنصاف النواقل والإلكترونيات الصناعية والاستخدام الواسع للأحمال غير الخطية (الأجهزة الإلكترونية، المبدلات الإلكترونية، المحركات الكهربائية القابلة للتحكم....) أدى إلى انحراف معايير وبارامترات جودة الطاقة الكهربائية في الشبكات الكهربائية وعلى وجه التحديد حدوث تشوهات في إشارات الجهد والتيار وظهور التوافقيات، وبالتالي ارتفاع درجة الحرارة وتلف الكابلات والمحركات والمحولات والمعدات الحساسة وزيادة فاقد الكهرباء في الشبكات الكهربائية لهذه الأنظمة.

تُستخدم المرشحات الفعالة، باهتمام كبير، لتعويض التوافقيات والاستطاعة الردية في شبكات التوزيع الكهربائية. ويُعد المرشح الفعال القائم في بنيته على عاكس منبع الجهد (VSI) ، وتحديدًا الترانزستورات ثنائية القطبية ذات البوابة المعزولة (IGBT) مع مكثف مُثبَّت في وصلة التيار المستمر جهازًا مبنيًا على أساس إلكترونيات القدرة. تُستخدم المكثفات الموجودة في وصلة الجهد المستمر لتخزين الطاقة اللازمة لتعويض التوافقيات العليا والاستطاعة الردية و يعتمد مبدأ عمل المرشح الفعال (APF) على كشف وتقدير التركيب التوافقي للحمل غير الخطي، وحقن قيمة مساوية للمركبة التوافقية لتيار الحمل عند نقطة التوصيل المشتركة (PCC)، بقيمة مساوية للمركبة التوافقية لتيار الحمل ولكن بطور معاكس [1-5]. ونتيجةً لذلك، يتم تعويض المركبات التوافقية لتيار الحمل ومنع انتشارها في الشبكة، مما يحافظ على تيار المصدر جيبيًا نقيًا.

تم استعراض تقنيات تحكم متنوعة لحلقة التحكم الداخلية للتيار في المرشح الفعال (APF)، مثل وحدة التحكم المثلثية للتيار، ووحدة التحكم الجيبية بتقنية تعديل عرض النبضة (PWM)، ووحدة التحكم الدورية و المتحكم التشبعي [6]. وقد تناولت دراسات قليلة خوارزمية التحكم في المرشح الفعال للتحكم في جهد وصلة التيار المستمر[7].

تعتمد جودة تشغيل المرشح الفعال على حثية التزامن والمكثف المثبت في حلقة التيار المستمر،حيث تعد قيمة السعة لبنك المكثف C_d لوصلة DC معياراً مهماً ، لأنه عندما تكون سعة المكثف C_d صغيرة ، يمكن أن تحدث تقلبات الجهد والجهد الزائد وفشل مفاتيح القالبة (Inverter)، و ستؤدي السعة الكبيرة لمجموعة المكثف إلى زيادة التكلفة والأبعاد الكلية للمرشح الفعال ككل. يفضل أن يكون جهد المكثف على جانب التيار المستمر ثابتاً طول فترة التشغيل قدر الإمكان لضمان تعويض التيار التوافقي في المرشح الفعال. تُعدّ بارامترات المكثف بالغة الأهمية، إلى جانب استراتيجيات التحكم، للحفاظ على استقرار جهد المكثف.

تمت دراسة اختيار وتصميم حثية الملف المتصل بالمرشح الفعال بناءً على أنماط تتبع التيار المختلفة [8]؛ كما أُجريت أبحاث حول خصائص الحثية المشتركة وتحسين خصائص المرشح الفعال [8]. إلا أن الدراسات المتعلقة بتحديد معلمات مكثف التيار المستمر لمرشح الطاقة الفعال قليلة.

في المرجع [10]، طُرحت استراتيجية لنظام مُدمج من المرشحات االتفرعية السلبية والمرشحات التسلسية الفعالة. وفي المراجع [9-10]، طُرحت خوارزميتان للتحديد الأمثل لحجم المرشحات الفعالة في أنظمة الطاقة الكهربائية. وفي كلتا الدراستين، طُبقت الخوارزمية الجينية كأداة للتحسين. أما في المراجع [11-12] اقترحت طريقة هجينة جديدة تعتمد على التحسين القائم على الجغرافيا الحيوية BBO لحل مشاكل تقدير التوافقيات في حالات تشغيل مختلفة لأنظمة الطاقة الكهربائية.

أما في دراستنا سيتم عرض استخدام خوارزمية سرب الجسيمات (PSO) وخوارزمية سرب السالبات(SSA)التطورية لتحديد المعاملات المثلى للمرشح الفعال (C_d، L_{APF}) ومعاملات الربح لوحدة التحكم التناسبية التكاملية (K_p، K_i) لضبط الجهد في وصلة التيار المستمر على قيمة مستقرة من دون أي انحراف عن القيمة المرجعية، ولتحسين بارامترات جودة الطاقة الكهربائية وتقليل التشويه التوافقي للجهد والتيار.

2- أهمية البحث و أهدافه:

الهدف من هذه الدراسة هو استخدام خوارزميات الحل الأمثل التطورية للتحكم بالمرشح الفعال لضمان جودة الطاقة الكهربائية وتقليل قيمة التشوه التوافقي للجهد والتيار في شبكات التوزيع 20/0.4 kV مع الحمل الصناعي في ظروف تشغيل مختلفة.

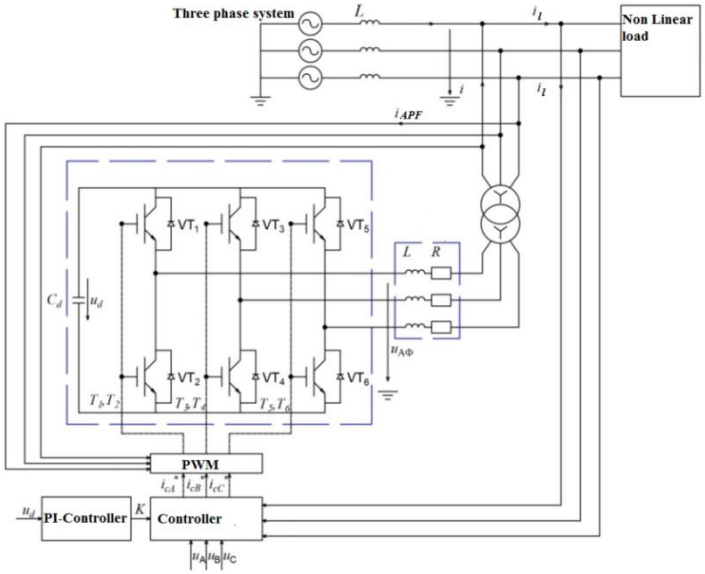
3-طرائق البحث و مواده:

استخدم في هذا البحث حزمة برنامج ماتلاب 2019 لنمذجة الموديل الرياضي لشبكة التوزيع الكهربائية وبرمجة الخوارزميات المستخدمة وربطها مع نموذج شبكة التوزيع 20/0.4 kV مع حمل صناعي.

3-1 مكونات نظام التحكم في المرشح الفعال

يعتمد النهج الأكثر شيوعاً للتحكم في المرشح الفعال من حيث تكوين التيارات التعويضية (I_d، I_q) على وحدة تحكم التكاملي التناسبي PI، حيث يعتمد مبدأ تشغيل المتحكم التناسبي التكاملي على توليد إشارة تحكم ، تتناسب قيمتها مع انحراف القيمة المضبوطة عن القيمة المرجعية (قيمة الخطأ – e(t))، في كل لحظة من زمن التشغيل. ليس هناك أدنى شك في أن وحدة التحكم PI هي وحدة التحكم الأكثر استخدامًا في العمليات الصناعية نظراً لبنيتها البسيطة نسبياً، والتي يمكن فهمها وتنفيذها بسهولة في التطبيقات العملية[8-7].

يبين الشكل 1 الرسم التخطيطي للمرشح الفعال



الشكل 1 المخطط التفصيلي للمرشح الفعال

بالإضافة لدور المتحكم في توليد وتشكيل التيارات التعويضية يلعب تحديد القيم المثلى لبارامترات المكثف والحثية للفلتر الفعال دوراً هاماً مساعداً لدور وحدة التحكم، يتم تحديد قيمة سعة المكثف بالعلاقة الرياضية التالية[14-13]:

$$C_d = \frac{2 \cdot S_{APF} \cdot n \cdot T}{U_{d\max}^2 - U_{d\min}^2} = \frac{2 \cdot S_{APF} \cdot n \cdot T}{(1.8U_{\max})^2 - (1.4U_{\max})^2} \quad [1]$$

حيث T هي دور تردد الشبكة ، n هو عدد دورات نقل الطاقة ، U_{dmax}، U_{dmin} التغيير المسموح به في الجهد عبر المكثف بالنسبة المئوية ، S_{APF} هو إجمالي الاستطاعة للفلتر الفعال مقاسة بالفولت أمبيرVA. لكن هذه الصيغة لا تضمن أن تكون قيمة السعة هي الأمثل.

حاليا من الناحية العلمية، تستخدم ترددات تبديل الترانزستور في النطاق 10-25 كيلو هرتز. أقصى تردد تبديل الترانزستورات في المرشح الفعال هو 25 كيلو هرتز ويمكن حساب أقصى تردد تبديل يمكن أن يعمل به المرشح الفعال بالعلاقة التالية:

$$f_{APFmax} = U_{PCCmax}/4h * L_{APF} \quad [2]$$

حيث h هو عرض التيار التشبعي حيث القيمة النموذجية لعرض تيار البطاء هو 5-8 % من قيمة التيار الاسمي ووفقا للمرجع [14].

من جهة أخرى يلعب تحديد القيمة المثلى لحثية المرشح (L_{APF}) دوراً مهماً، لأن هذه القيمة، بدورها، تؤثر على تشغيل وحدة التحكم للمرشح الفعال. من المعادلة (2)، يمكننا تحديد قيمة الحثية لملف المرشح الفعال التي عندها يمكن لمفاتيح الطاقة العمل بأقصى تردد تبديل ممكن وفقاً للعلاقة التالية:

$$L_{APF} = U_{PCCmax}/4h * f_{APFmax} \quad [3]$$

نتيجة لذلك ، فإن مهام تحديد القيمة المثلى لسعة المكثف و حثية الملف ، إلى جانب خوارزمية التحكم لوحدة التحكم في المرشح الفعال، تكون مرتبطة فيما بينها وتؤثر بشكل مشترك على أداء منظومة المرشح الفعال ككل.

3-2 خوارزميات الحل الأمثل التطورية

تحاكي الخوارزميات التطورية مفاهيم التطور في الطبيعة، وهناك العديد من الخوارزميات التطورية في الأدبيات العلمية، مثل الخوارزمية الجينية (GA)، والتطور التفاضلي (DE)، والاستراتيجية التطورية (ES)، والبرمجة التطورية (EP)[15].

طُرح عدد كبير جداً من الخوارزميات التطورية الاستدلالية في السنوات الأخيرة، مستلهمةً من مصادر عديدة، منها: العمليات الداروينية كالتطور التفاضلي، واستراتيجيات التطور، والخوارزميات الجينية [15]، وجميع المتغيرات ذات الصلة؛ والسلوك الجماعي الناشئ لمجموعات الحيوانات، بما في ذلك خوارزميات سرب الجسيمات، وخوارزمية مستعمرة النحل الاصطناعية، وخوارزمية مستعمرة النمل [17-16]، وخوارزمية سرب الخفافيش، وخوارزمية اليراعات.

مؤخرًا، طُرحت خوارزمية بحث استدلالية تُسمى خوارزمية سرب السالبات (SSA)، مستوحاة من أسراب السالب، في [18].

1-2-3 خوارزمية سرب الجسيمات

خوارزمية سرب الجسيمات هي إحدى خوارزميات التحسين الحسابية التطورية المستوحاة من السلوك الجماعي للكائنات الحية مثل أسراب الطيور أو الأسماك. تم تطويرها عام 1995 من قبل كينيدي وإيبرهارت.

تبدأ الخوارزمية بإنشاء الجسيمات الأولية وتعيين سرعات ابتدائية لها. ثم تُقيّم دالة الهدف عند كل موقع جسيم، وتُحدد أفضل قيمة للدالة وأفضل موقع. بعد ذلك، تختار الخوارزمية سرعات جديدة بناءً على السرعة الحالية، وأفضل مواقع الجسيمات، وأفضل مواقع جيرانها. ثم تُحدّث مواقع الجسيمات بشكل تكراري، وسرعاتها، وجيرانها. تستمر التكرارات حتى تصل الخوارزمية إلى معيار التوقف [16–17].

بالنسبة لفضاء بحث متعدد الأبعاد، يتم تحديد موضع الجسيم p بواسطة المتجه التالي:

$$Z_p = (z_{p1}, z_{p2}, \dots, z_{pn}) \quad [4]$$

وتتحدد سرعة الجسيم وفق المتجه التالي:

$$V_p = (v_{p1}, v_{p2}, \dots, v_{pn}) \quad [5]$$

حيث n: عدد جسيمات السرب.

يتحدد تحديث السرعة لكل جسيم p وفق العلاقة التالية:

$$v_{p,j}(t_i + 1) = v_{p,j}(t_i) + c_1 \cdot r_{1,j}(t_i) \cdot [g_{p,j}(t_i) - z_{p,j}(t_i)] + c_2 \cdot r_{2,j}(t_i) \cdot [\hat{g}_j(t_i) - z_{p,j}(t_i)] \quad [6]$$

حيث:

$z_{p,j}(t_i)$: موقع الجسيم j عند اللحظة t_i

$v_{p,j}(t_i)$: سرعة الجسيم j عند اللحظة t_i

$v_{p,j}(t_{i+1})$: السرعة الجديدة للجسيم j عند اللحظة t_{i+1}

$\hat{g}_j$: الموضع العالمي الذي تحقق فيه دالة الهدف أدنى قيمة لها

$\hat{g}_j(t_i)$: أفضل موقع عالمي تم التوصل إليه بواسطة السرب عند اللحظة t_i ويدعى ($gbest$).

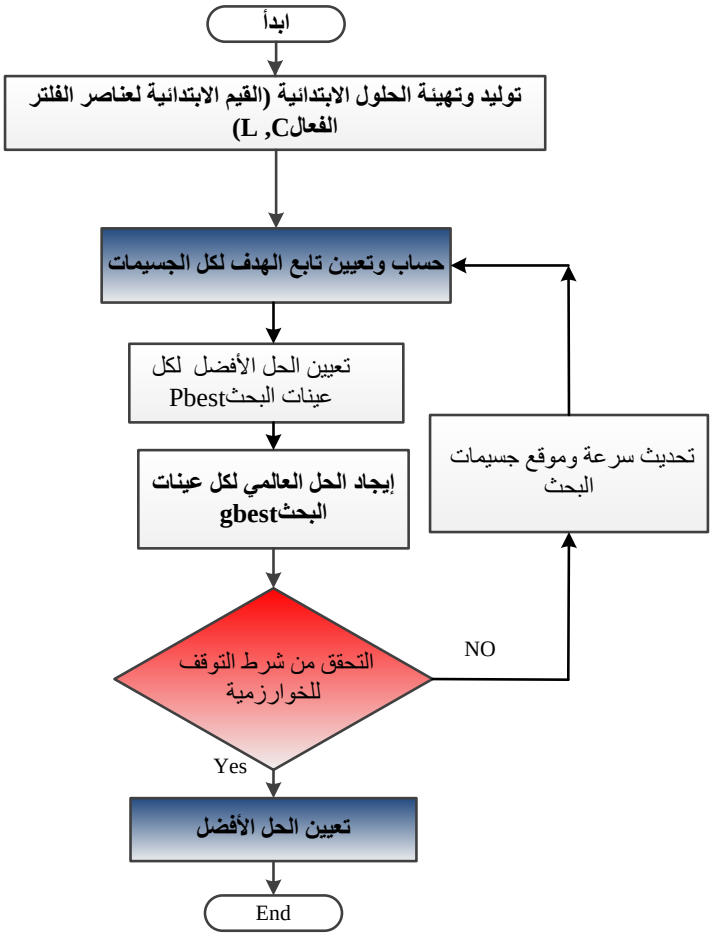
r1,r2 : أرقام عشوائية مستقلة في المجال بين [0,1]

c1,c2 : معاملات تسارع للخوارزمية.

يكتسب كل جسيم p، بسبب سرعته، موضعًا جديدًا. ويعتمد الموضع الجديد للجسيم على موضعه السابق وسرعته[17]:

$$z_p(t_i + 1) = z_p(t_i) + v_p(t_i + 1)$$

$z_{p,j}(t_{i+1})$: موقع الجسيم j عند اللحظة t_{i+1}



الشكل 2 المخطط الانسيابي لخوارزمية سرب الجسيمات

3-2-2خوارزمية قنديل البحر

في ظلّ بيئة الخوارزميات الاستكشافية الاستدلالية القائمة على السكان والمستوحاة من عالم الأحياء، ظهرت خوارزمية تحسين سرب السالبات (SSA) مؤخرًا، وسرعان مالاقت رواجاً كبيراً. مستوحاة من الترتيب المكاني الفريد لمستعمرات السالب، التي تنتشر في سلاسل طويلة تتبع قائدًا، تبدو هذه الخوارزمية واعدة في تحسين الأداء[18-19].

لنمذجة سلاسل القناديل رياضيًا، يُقسّم السرب أولًا إلى مجموعتين: القائد والأتباع. ويُفترض أيضاً وجود مصدر غذاء يُسمى F في فضاء البحث، وهو هدف السرب [18-20].

يتم تحديث موقع القائد بناء على المعادلات التالية:

$$x_j^1 = \begin{cases} F_{j+C_1\left((ub_j-lb_j)\right)C_2+lb_j)C_3\geq 0} \\ F_{j-C_1\left((ub_j-lb_j)\right)C_2+lb_j)C_3<0} \end{cases} \quad [7]$$

حيث يُمثل X_j^1 موقع القائد في البُعد j، و Fj موقع مصدر الغذاء، و ub_j و lb_j الحدين الأعلى والأدنى للبُعد j على التوالي، و c1 و c2 و c3 أعداد عشوائية. المعاملان c2 و c3 أعداد عشوائية مُولّدة بشكل منتظم في المجال [0,1]،

بينما c1 هو المعامل الأكثر أهمية ويُحدد وفقًا للتكرار الحالي /، وL هو الحد الأقصى لعدد التكرارات كما يلي[18-19]:

$$c1 = 2e^{-(4l/L)2}$$

[8]

موقع الأتباع يتم تحديثه وفقا للمعادلة التالية:

$$xij = \frac{1}{2}(x_j^i + x_j^{i-1})$$

[9]

يوضح x_j^i موضع القنديل التابع رقم i في كل بُعد.

3-3 توابع الهدف المستخدمة وصياغتها

تابع الهدف لتحقيق القيم المثلى لسعة المكثف وحثية الملف للمرشح الفعال الذي يؤدي إلى الحد الأدنى لقيمة معامل التشويه التوافقي للشكل الجيبي لموجة التيار والجهد تحت ظروف تغير شكل منحني الحمل، يصاغ تابع الهدف على النحو التالي:

$$Minimizef(L,C) = \sum_0^t THD_{U,I} + \Delta V_{bus} \qquad [10]$$

مع القيود التالية:

1- الحد الأقصى والأدنى للسعة لمكثف للمرشح الفعال:

$$C_{min} \le C \le C_{max}$$

2- الحد الأقصى والأدنى لحثية الملف للمرشح الفعال:

$$L_{min} \le L \le L_{max}$$

تابع الهدف لتحقيق القيم المثلى لـ Kp و Ki ، والتي تؤدي إلى الحد الأدنى لقيمة معامل التشويه للشكل الموجي الجيبي لشكل موجة التيار والجهد والحفاظ على جهد ثابت لمكثف يتم حسابه على النحو التالي :

$$Minimizef(K_p, K_i) = \int_0^\infty e^2 dt$$

[11]

حيث e: قيمة الخطأ (الفرق بين القيمة المقاسة والقيمة المرجعية في كل لحظة) مع القيود:

1- الحد الأقصى والأدنى للثابت التناسبي للمتحكم التناسبي التكاملي:

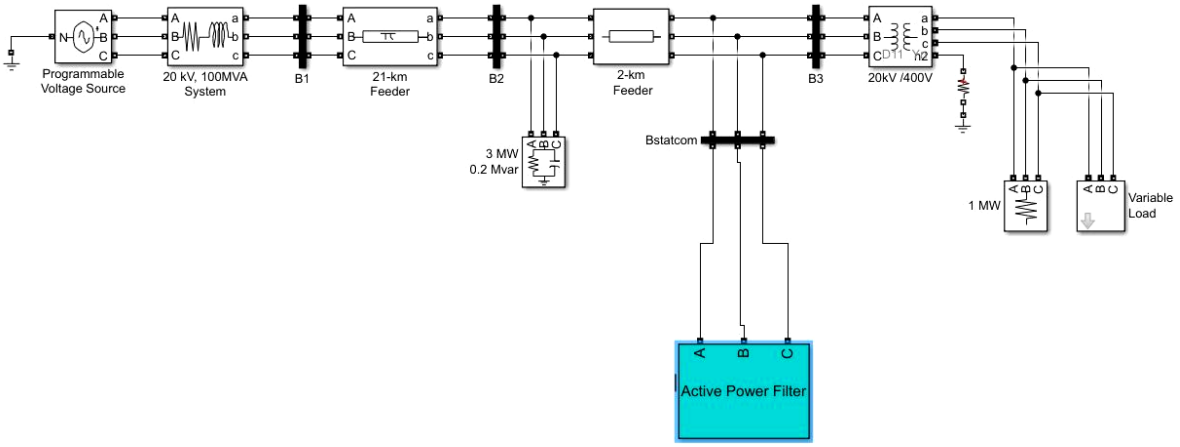
$$Kp_{min} \le Kp \le Kp_{max}$$

2- الحد الأقصى والأدنى للثابت التكاملي للمتحكم التناسبي التكاملي:

$$Ki_{min} \le Ki \le Ki_{max}$$

4- النتائج و المناقشة:

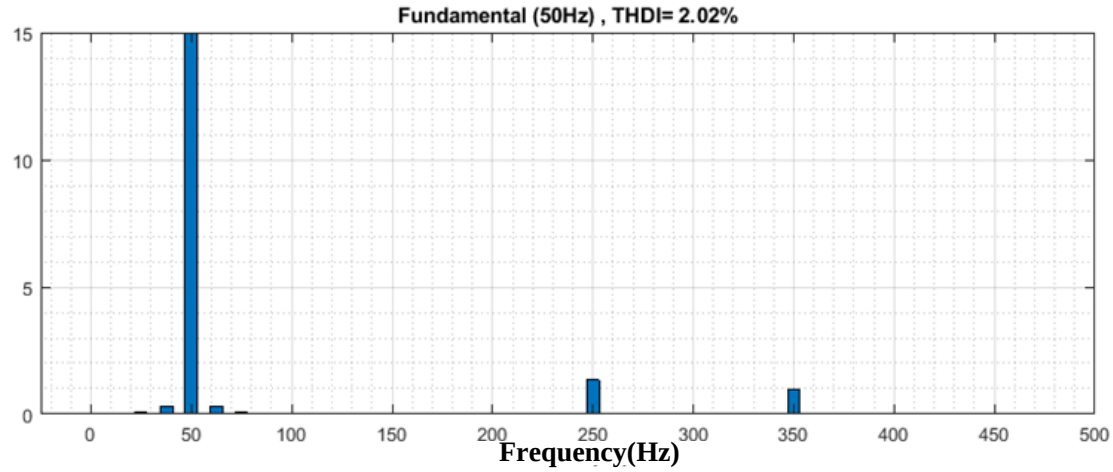
يتم عرض نتائج اختبار وحدة التحكم للمرشح الفعال المقترحة وخوارزميات الحل الأمثل على الشبكة الكهربائية الاختبارية 20/0.4 kV المبينة في الشكل 3 التي تستخدم لتغذية حمل صناعي (محركات باستطاعات مختلفة مع منظمات جهد ثايرستورية لهذه المحركات).



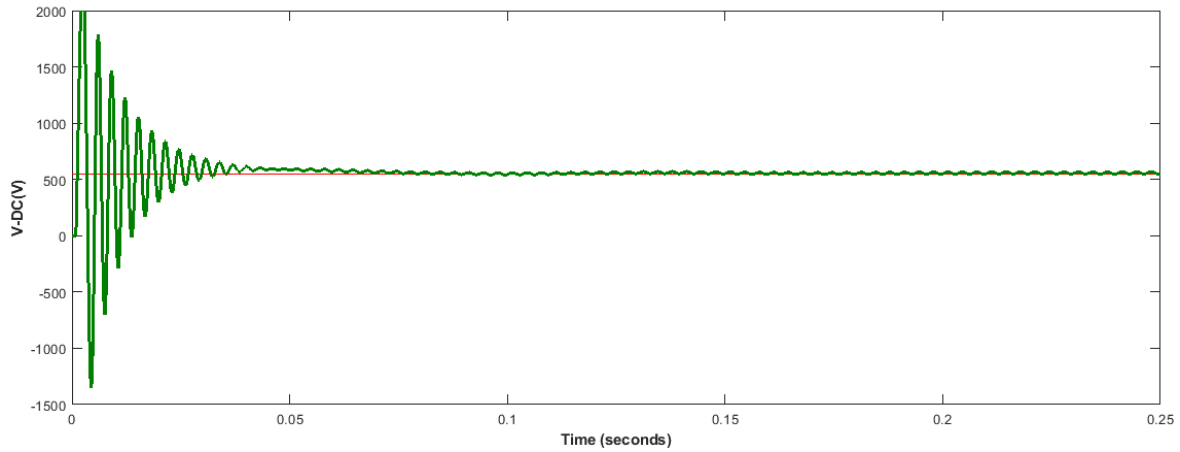
الشكل 3 نموذج شبكة الاختبار الكهربائية

4-1 نتائج تطبيق خوارزمية سرب الجسيمات PSO

باستخدام خوارزمية سرب الجسيمات بلغت القيم المثلى للمكثف والملف ، 5520.94 ميكروفاراد و4258 × 10^{-4} هنري على التوالي. علاوة على ذلك، بلغت القيم المثلى لمعاملات المُتحكم PI 0.2605 لـ K_p و952.595 لـ K_i. تُظهر نتائج المحاكاة لهذه الحالة باستخدام المُتحكم PSO-PIفي الشكل 4، حيث يُلاحظ انخفاض عامل التشويه التوافقي لموجة التيار من 11.5% إلى 2.02% مع APF، واستقرت قيمة جهد وصلة التيار المستمر عند 548 فولت بخطأ قدره 2 فولت عن الجهد المرجعي بعد 0.035s.



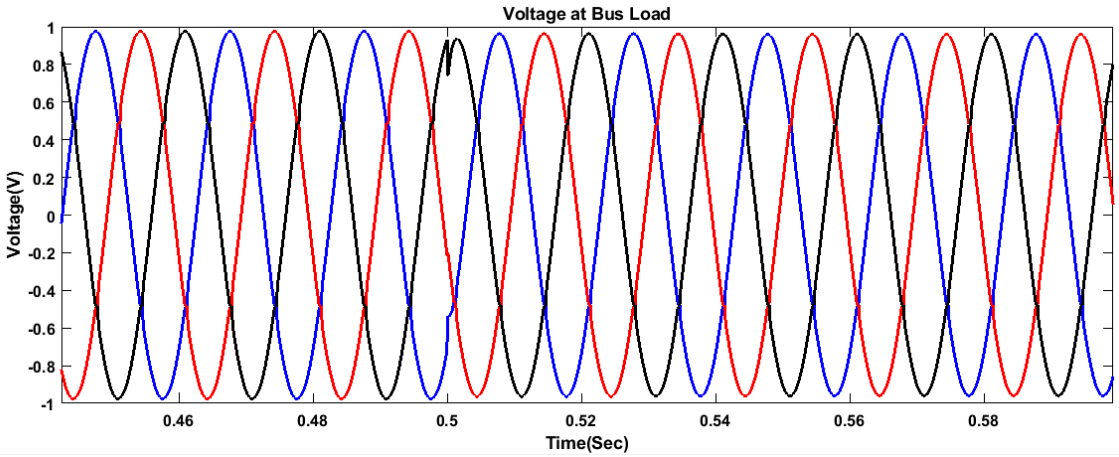
a)



b)

الشكل 4 نتائج المحاكاة باستخدام وحدة التحكم PSO–PI: a) تحليل THD، b) جهد وصلة التيار المستمر APF

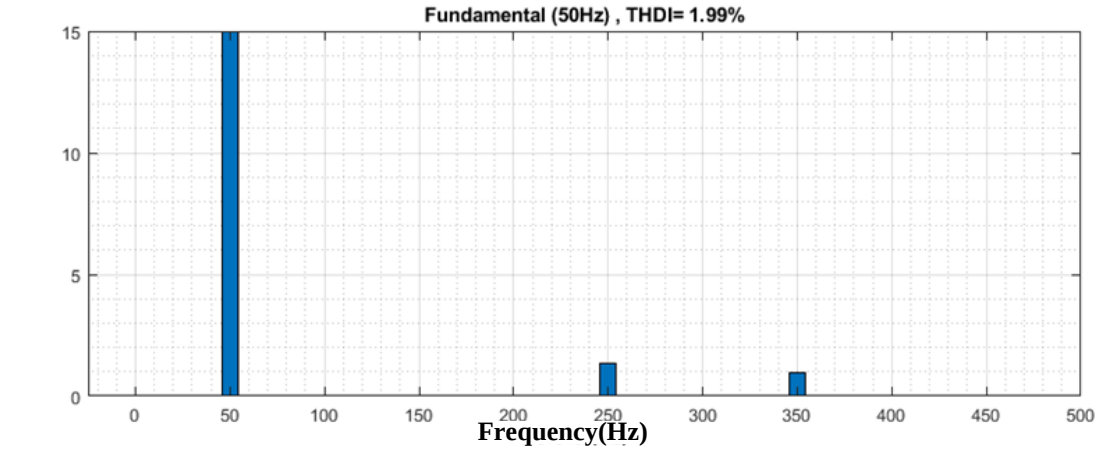
يوضح الشكل 5 كفاءة النظام التحكم المقترح للمرشح الفعال عند توصيل حمل متغير عند الزمن t = 0.5s ثانية. وكما هو موضح في الشكل 5، يستطيع APF المزود بوحدة تحكم PSO-PI الحفاظ على جهد الحمل عند 1 p.u مع تعويض الاستطاعة الردية لحظة توصيل الحمل المتغير (800 كيلو فولت أمبير، 100% من الاستطاعة الاسمية للمحول)، مما يعني أن وحدة تحكم PSO-PI؛ تعمل بكفاءة في ظل أحمال غير خطية ومتغيرة.



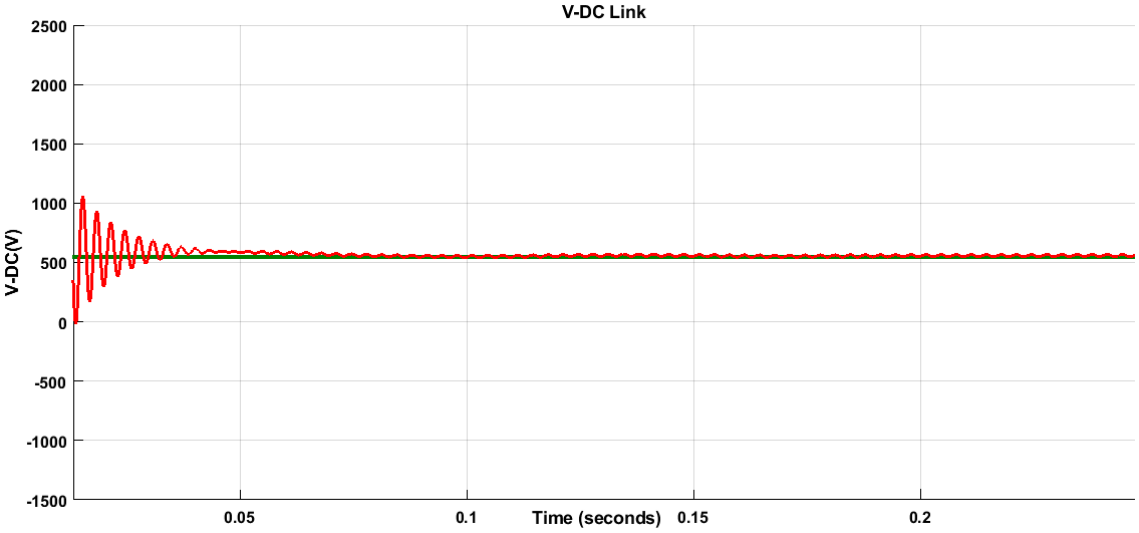
الشكل 5 الجهد الكهربائي على قضبان الحمل عند وصل الحمل المتغير

4–2 محاكاة خوارزمية سرب السالبات

القيم المثلى للمكثف والملف، التي تم الحصول عليها باستخدام خوارزمية سرب السالبات SSA، هي 6953 ميكروفاراد و6258 × 10^{-4} هنري على التوالي. علاوة على ذلك، فإن القيم المثلى لمعاملات مُتحكم PI هي 0.25 لـ *Kp* و960.595 لـ *Ki*. تُظهر نتائج المحاكاة لهذه الحالة باستخدام مُتحكم SSA-PI في الشكل 6 انخفاض عامل التشويه التوافقي لموجة التيار من 11.5% إلى 1.99% مع APF، واستقرت قيمة جهد وصلة التيار المستمر عند 550 فولت بدون وجود أي انحراف عن قيمة الجهد المرجعي.



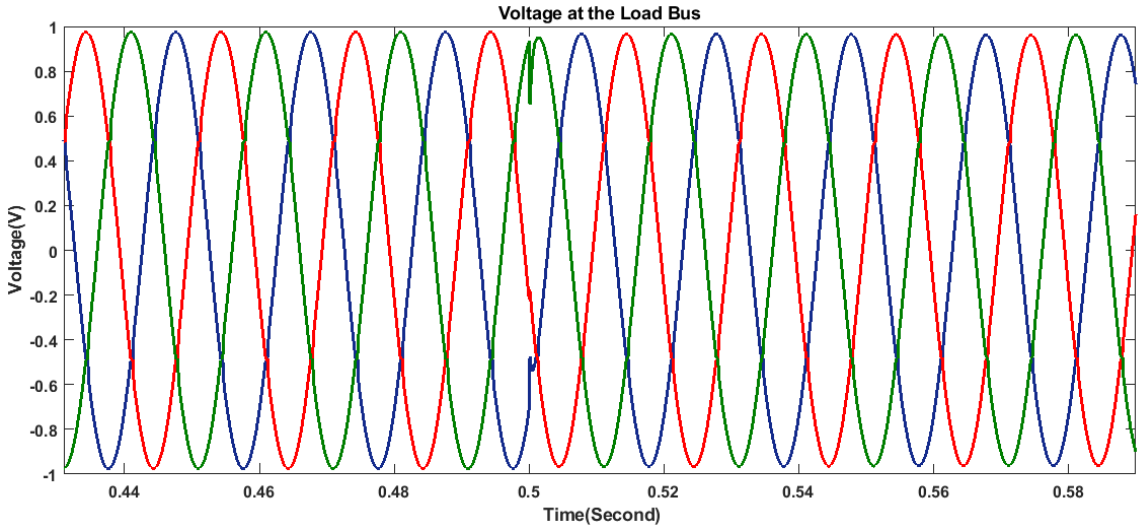
(a)



(b)

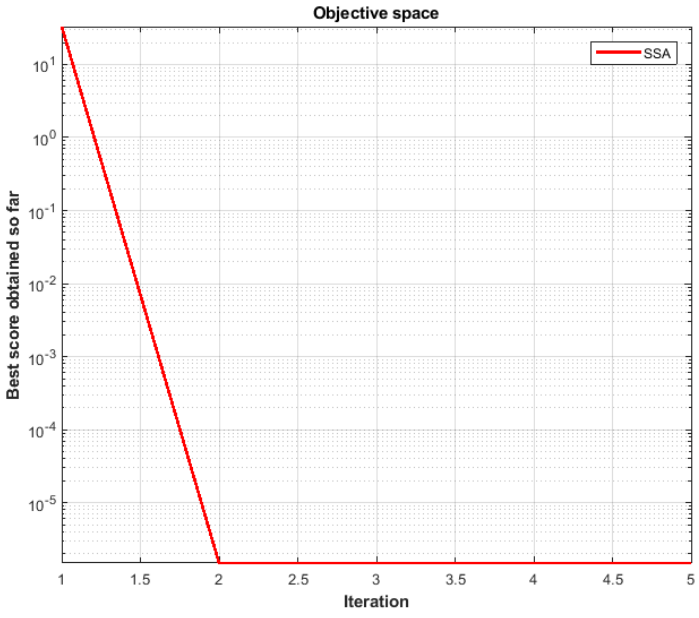
الشكل 6 نتائج المحاكاة باستخدام وحدة التحكمPI–SSA: a) تحليلTHD للجهد والتيار ،b) جهد وصلة التيارالمستمر APF في الشبكة

يوضح الشكل 7 آلية عمل وحدة التحكم المساعدة APF لتعويض الاستطاعة الردية عند توصيل حمل متغير عند الزمن $t = 0.5s$. ويتضح من الشكل أن وحدة التحكم المساعدة المزودة بوحدة التحكم التناسبية التكاملية (SSA-PI) تحافظ على جهد الحمل عند 1p.u مع تعويض الاستطاعة الردية عند توصيل الحمل المتغير.



الشكل7 الجهد الكهربائي على قضبان الحمل عند توصيل حمل متغير

يبين الشكل 8 تقارب خوارزمية سرب السالبات خلال التكررات المحددة للوصول إلى الحل الأمثل وتقليل قيمة خطأ خرج المتحكم PI وقيمة المكون التوافقي للتيار.



الشكل8 تقارب خوارزمية سرب السالبات في الوصول للحل الأمثل

يبين الجدول 1 المقارنة بين طرق التحكم وخوارزميات الحل الأمثل المستخدمة لتقليل التشوه التوافقي الكلي في موجة التيار و ضبط معايير جودة الطاقة الكهربائية عند الحمل،بينما الجدول 2 يظهر نتائج الحل الأمثل لبارامترات المرشح الفعال وثوابت المتحكم التناسبي– التكاملي.

الجدول 1. المقارنة بين طرق التحكم المختلفة في الشبكة الاختبارية المدروسة 20/0.4 kV

اسم خوارزمية التحكم المستخدمة	PSO-PI	SSA-PI
عامل التشوه التوافقي للتيار٪	2.02	1.99
الجهد في عقدة الحمل كقيمة واحدية p.u	1	1
الجهد في وصلة التيار المستمر مقاساً بالفولت	548	550

الجدول 2. المقارنة بين نتائج الخوارزميات المستخدمة في تحديد البارامترات المثلى للمرشح الفعال وثوابت المتحكم التناسبي– التكاملي

PSO-PI	SSA-PI
C=5520.94μF	C=6953μF
L=425.8mH	L=625.8mH
K_p=0.2605;K_i=952.595	K_p=0.25;K_i=960.595

5- الاستنتاجات و التوصيات:

5-1 الاستنتاجات:

تتناول هذه الورقة البحثية عرض استخدام خوارزمية سرب الجسيمات (PSO) وخوارزمية سرب السالبات(SSA)التطورية لتحديد المعاملات المثلى للمرشح الفعال (C_d، L_{APF}) ومعاملات الربح لوحدة التحكم التناسبية التكاملية (K_i ،K_p) لضبط الجهد في وصلة التيار المستمر على قيمة مستقرة من دون أي انحراف عن القيمة المرجعية، ولتحسين بارامترات جودة الطاقة الكهربائية وتقليل التشويه التوافقي للتيار.تم تقييم خوارزميات التحكم من خلال النمذجة والمحاكاة على شبكة كهربائية اختبارية باستخدام برنامج Matlab/Simulink. وبناءً على نتائج المحاكاة، أُجريت مقارنة بين نظامي التحكم وأظهرت نتائج المقارنة أن الخطأ بين جهد وصلة التيار المستمر وقيمته المرجعية صغير نسبيًا باستخدام وحدة التحكم PSO-PI، حيث بلغ 2 فولت، بينما اختفى هذا الخطأ تمامًا مع وحدة التحكم SSA-PI. ومع ذلك، كان أداء النظام الكلي مُرضياً في ظل الأحمال غير الخطية والمتغيرة، حيث انخفض قيمة معامل التشويه التوافقي للتيار من 11.5% إلى 1.99% عند استخدام وحدة التحكم SSA-PI. وبناء على هذه النتائج فقد حققت الخوارزميتيان المستخدمتان نتائج متقاربة من حيث تحسين جودة الطاقة الكهربائية في الشبكة المدروسة واستقرار الجهد في وصلة التيار المستمر.

عند مقارنة النتائج مع أدبيات نشرت في نفس المجال[23] تبين أن بحثنا قدم تابع هدف متعدد الأهداف و بالتالي راعت الدراسة جودة الطاقة الكهربائية من جهة ومن جهة أخرى المحافظة على جهد وصلة التيار المستمر في نفس الوقت. كما ذُكر سابقًا، يُعدّ تحديد القيمة المثلى لمكثف المرشح النشط مهمةً صعبةً للباحثين. ولا تُقدّم الدراسات المتعلقة باختيار معلمات المرشح النشط أي منهجية لتحديد هذه القيمة [4,21-22]. في المقابل، توجد دراسات تستخدم وصفًا رياضياً معقداً للغاية [13]، مما يُصعّب استخدامها نظراً لوجود عدد كبير من بيانات الإدخال، والتي لا يكون تحديدها متاحاً دائماً لحلّ مسائل التصميم. في العديد من الدراسات، اعتُبر تحسين معلمات المرشح النشط مسألةً أحادية البُعد، أي لتقليل عامل تشويه شكل موجة التيار الجيبية فقط. مع ذلك، من الضروري تحديد معلمات المرشح النشط ليس فقط لتقليل التشوه التوافقي، بل أيضًا لتنظيم الجهد في وصلة التيار المستمر، حيث يجب أن يكون الجهد ثابتًا مع تغيرات طفيفة.

يُبين البحث أن المرشح النشط المزود بوحدة تحكم مُحسّنة يتفوق على الأجهزة الأخرى التي تشابه في بنيتها الأساسية المرشح الفعال، مثل مُحسِّن جودة الطاقة الموحد (UPQC) ومُعوض الاستطاعة الردية الساكن في شبكات التوزيع (D-STATCOM)، وذلك لانخفاض تكلفته وبساطة تصميمه. يُوفر النهج المُقترح لتحديد القيمة المُثلى لمكثف المرشح الفعال ومعاملات الربح لوحدة التحكم التناسبية التكاملية الخاصة به، أفضل النتائج في تحقيق مستوى تشويه شكل موجة الجهد والتيار منخفض ومحقق للمواصفات القياسية العالمية لبارامترات جودة الطاقة الكهربائية.

5-2 التوصيات:

1. اعتماد وحدات تحكم مبنية على أساس الذكاء الصنعي تعتمد على المنطق الضبابي بدلا من المتحكم التناسبي-التكاملي ودمج تطبيقات المنطق الضبابي مع خوارزميات الحل الأمثل.
2. تطوير واجهة رسومية ضمن برنامج الماتلاب GUI لتحديد بارامترات المرشح الفعال مع مجموعة خوارزميات للحل الأمثل.

جداول ملحقة

بارامترات شبكة التوزيع الكهربائية المدروسة واستطاعة الحمل

	بارامترات شبكة التوزيع المدروسة	القيم المستخدمة
1	Three phase source voltage	20 kV
2	Transformer	20/0.4 kV
3	Transmission line	5 Km
4	Load & Heavily-nonlinear load	1MVA &10 Mvar
6	DC Reference Voltage, V_{dc}	550 V
7	S base	15 MVA

بارامترات الخوارزميات المستخدمة التي يمكن تغييرها من قبل المبرمج

SSA parameter	PSO parameter
Since c1 & c2 ∈ [0,1]), Search Agents=30	c1=2; % acceleration factor c2=2
Max iterarion=5	Max iterarion=5
	m=3; % number of variables n=100; % population size w_{max}=0.9; % inertia weight w_{min}=0.4; % inertia weight c1=2; % acceleration

References:

[1] I.I. Kartashov, V.N.Tulsky, R.G. Shamonov, Yu.V. Sharov, R.R. Nasyrov, "Control of Power Quality,"Russian book, Moscow, 2017.

[2] A. Baggini, "Handbook of Power Quality," University of Bergamo, Italy, 2008.

[3] A. A. Z. Diab, S. A. Selim, and B. E. Elnaghi " Particle swarm optimization based vector control of permanent magnet synchronous motor drive, " NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRus NW), Russia, IEEE Conf, 2016,pp. 740-746.

[4] S. Rahmani, K. Al-Haddad, F. Fnaiech, "A three- phase shunt active power filter for damping of harmonic propagation in power distribution networks", Proc. IEEE International symposium on Industrial Electronics, vol. 3, July 2006,pp. 1760-1764.

[5] S. Bangia, P.R. Sharma, M. Garg, "Comparison Analysis Of Shunt Active Filter And Transformer less Parallel Hybrid Active Filter," Computer Science & Information Technology (CS & IT),vol.3, pp.373-382,2013.

[6] P. Karuppanan, K. K.Mahapatra. "PI and fuzzy logic controllers for shunt active power filter — A report," ISA Transactions, vol. 51, pp.163-169,2012.

[7] Yu. Wang, and Yun-Xiang Xie., "Adaptive DC-link Voltage Control for Shunt Active Power Filter, "Journal of Power Electronics, vol. 14, no. 4, pp. 764-777, July 2014.

[8] Wu. Fuzhuan, P. Sheng, W. Binbin., "The Determination on DC Capacitor Parameter in Active Power Filter,"Advanced Mechatronic Systems, Tokyo, Japan, September 18-21, 2012,pp.265-268.

[9] K.S. Ravi Kumar, V.Divya, N.S.Prasanna, "Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithm based Harmonic Mitigation methods,2012 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, Bengaluru, India,December16-19, 2012.

[10] R. Nasyrov, R. Aljendy, A. Z. Diab, "Adaptive PI controller of active power filter for compensation of harmonics and voltage fluctuation based on particle swarm optimization (PSO)," Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus) IEEE Conference of Russian, pp. 719-724, 2018.

[11] E. SAMADAEI, A. KHOSRAVI, A. SHEIKHOLESLAMI, "OPTIMAL ALLOCATION OF ACTIVE POWER FILTER ON REAL DISTRIBUTION NETWORKS FOR IMPROVEMENT OF POWER QUALITY BY USE OF BBO: A CASE STUDY,"IIUM Engineering Journal, vol. 18, no. 1, 2017.

[12] N. Ghaffarzadeh, H. Sadeghi "A new efficient BBO based method for simultaneous placement of inverter-based DG units and capacitors considering harmonic limits," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 80, pp.37-45, 2016.

[13] M. K. Mishra, "A Study on Design and Dynamics of Voltage Source Inverter in Current Control Mode to Compensate Unbalanced and Non-linear Loads, " 2006 IEEE.

[14] V.S. Gerasimov, R.R. Nasyrov. Optimization of Structures, Parameters, and Operating Conditions of Power Supply Systems and Enhancement of Their Operational Efficiency, (in Russian), Moscow, 2017

[15] G. Zhang, L. Pan, F. Neri, M. Gong, A. Leporati, "Metaheuristic Optimization: Algorithmic Design and Applications, Hindawi Journal of Optimization", 2107.

[16] R. Poli, J. Kennedy, and T. Blackwell. Particle swarm optimization. SwarmIntell., vol1,no.1,pp.33–57, 2007.

[17] A. Tangherloni, L. Rundo, and M. S. Nobile. "Proactive particles in swarm optimization: A settings-free algorithm for real-parameter single objective optimization problems, " In Proc. IEEE Congress on Evolutionary Computation(CEC), pp. 1940–1947, 2017.

[18] S. Mirjalilia, A. H. Gandomi, S. Z. Mirjalili, and S. Saremi, "SalpSwarmAlgorithm: Abio-inspired optimizer for engineering design problems, "Adv. Eng. Softw., vol. 114, pp.163–91,2017.

[19] F. Tian, H. Wei, X. Li, M. Lv, and P. Wang. "An improved salp optimization algorithm inspired by quantum computing, " In Proc. 3rd International Conference on Advanced Algorithms and Control Engineering (ICAACE), vol1570, pp. 1–7. IOP Publishing, 2020.

[20] A. M. Shaheen and R. A. El-Sehiemy. "A multiobjective salp optimization algorithm for techno-economic-based performance enhancement of distribution networks, " IEEE Syst. J.,vol. 15,no.1,pp.1458–1466, 2020.

[21] B. N Singh., "Design and Digital Implementation of Active Filter with Power Balance Theory", IEEE Proc on EPA, Vol 2, No.5, pp.1149-1160, 2005.

[22] Z. Chen, Y. Luo, M. Chen, "Control and performance of a cascaded shunt active power filter for aircraft electric power system", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 59, No. 9, pp. 3614-3623, September 2012.

[23] Ch. Dikshit, Y. Anupam, "Optimizing the parameters of hybrid active power filters through a comprehensive and dynamic multi-swarm gravitational search algorithm",Engineering Applications of Artificial Intelligence.vol 123, Part C, August 2023.