مقارنة بين أداء الخوارزميات الحسابية وخوارزميات الذكاء الاصطناعي من أجل التنسيق الأمثل لزواجل التيار الزائد

م. ماجده محمد* أ.د. عمار حجار** د. محسن داؤد***

(الإيداع: 13 شباط 2026، القبول: 11 آيار 2026)

ملخّص:

تستخدم زواجل التيار الزائد كحماية رئيسية في شبكات التوزيع والنقل الفرعي، وذلك لرخصها وبساطتها وسهولة تركيبها وصيانتها. يواجه هذا النوع من الزواجل مشكلة التنسيق الأمثل (تعيير تيار التشغيل ومنحنيات التشغيل الزمني)، بحيث تتحقق المتطلبات الأساسية لنظام الحماية (الموثوقية، السرعة، الانتقائية، الحساسية). يعتبر التنسيق الأمثل لهذه الزواجل أمراً صعبا باستخدام الطرق التقليدية (طريقة المحاولة والخطأ والطرق الطبولوجية).

لذا يستخدم هذا البحث ثلاث خوارزميات لايجاد التنسيق الأمثل لهذه الزواجل بالاعتماد على البرمجة الخطية (خوارزمية المجموعة الفعالة، الخوارزمية الجينية، وخوارزمية محاكاة التلدين)، كما يقدم مقارنة بين أداء هذه الخوارزميات بهدف الحصول على التنسيق الأمثل لهذه الزواجل. وبناء على ذلك، قمنا باعداد البرامج اللازمة في بيئة ماتلاب البرمجية لتحديد أزواج زواجل الحماية (الداعمة/الرئيسية)، ولحساب سريان الحمولة، ولحساب تيارات القصر الثلاثية الطور، بهدف الوصول إلى التعيير الأمثل لمنحني التشغيل الزمني لزواجل التيار الزائد. حيث قمنا بتحويل مشكلة التنسيق الأمثل غير الخطية إلى مشكلة برمجة خطية. ثم تم تطبيق الخوارزميات الثلاث السابقة الذكر على ثلاث شبكات اختبارية (IEEE–3 Bus, IEEE–14 Bus, IEEE–30Bus). حيث أظهرت نتائج المقارنة تفوق خوارزمية المجموعة الفعالة على الخوارزمية الجينية وخوارزمية محاكاة التلدين، خاصة مع ازدياد حجم النظام الكهربائي.

الكلمات المفتاحية: زواجل التيار الزائد، التنسيق الأمثل، خوارزمية المجموعة الفعالة، الخوارزمية الجينية، خوارزمية محاكاة التلدين.

* طالبة دراسات عليا (دكتوراه) – قسم هندسة الطاقة الكهربائية–كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية–جامعة اللاذقية–اللاذقية– سورية.

** أستاذ دكتور– قسم هندسة الطاقة الكهربائية– كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية– جامعة اللاذقية– اللاذقية– سورية.

*** أستاذ دكتور – قسم هندسة الميكاترونيك– كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية– جامعة اللاذقية–اللاذقية– سورية.

A comparison between the performance of deterministic algorithm and Artificial Intelligent algorithms for optimal coordination of overcurrent relays

Majda A. Mohamad* Ammar A. Hajjar ** Mohsen H.Daood ***

(Received: 13 February 2026, Accepted: 11 May 2026)

ABSTRACT:

Overcurrent relays are widely used as primary protection devices in distribution and sub-transmission networks due to their low cost, simplicity, and ease of installation and maintenance. This type of relay faces the challenge of optimal coordination specifically, the proper setting of pickup currents (Ipu) and time–current characteristic curves (TDS: Time Dial Setting), such that the fundamental requirements of a protection system, namely reliability, speed, selectivity, and sensitivity, are satisfied. Achieving optimal coordination of overcurrent relays using conventional methods (such as trial-and-error and topological approaches) is considered difficult.

Therefore, this research employs three optimization algorithms to obtain the optimal coordination of overcurrent relays based on linear programming techniques (Active-Set algorithm, Genetic Algorithm, Simulated Annealing algorithm). Performance comparison among these algorithms is presented with the objective of achieving optimal relay coordination. Accordingly, the required programs were developed in the MATLAB environment to identify primary–backup relay pairs, perform load-flow analysis, and calculate three-phase short-circuit currents, with the aim of determining the optimal settings of the time–current characteristic curves (TDS) of overcurrent relays. The nonlinear optimal coordination problem was subsequently transformed into a linear programming problem. The three aforementioned algorithms were then applied to three test systems (IEEE 3-Bus, IEEE 14-Bus, and IEEE 30-Bus). The comparative results demonstrate the superiority of the Active-Set algorithm over both the Genetic Algorithm and the Simulated Annealing algorithm, particularly as the size of the power system increases.

Keywords: Overcurrent relays, optimal coordination, Active-Set algorithm, Genetic Algorithm, Simulated Annealing algorithm.

***PHD. Student at the Department of Electrical Power Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Lattakia University, Lattakia, Syria.**

**** Professor at the Department of Electrical Power Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Lattakia University, Lattakia, Syria.**

***** Professor at the Department of Mechatronics, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Lattakia University, Lattakia, Syria.**

1- مقدمة:

تتعرض أنظمة القدرة الكهربائية إلى العديد من الأعطال التي قد تؤدي إلى الاضرار بشكل كبير في عناصر النظام الكهربائي. لذا لا بدَّ من حماية هذه الأنظمة من هذه الأعطال وذلك للحفاظ على موثوقية وسلامة النظام الكهربائي. تعتبر زواجل التيار الزائد من الأجهزة المستخدمة بشكل شائع لحماية شبكات التوزيع والنقل الفرعي بشكل أساسي ولحماية شبكات النقل بشكل داعم، وذلك بسبب بساطتها وسهولة صيانتها وتركيبها [1،2].

يتكون نظام الحماية من زاجلي حماية أحدهما رئيسي والآخر داعم، تعمل الحماية الداعمة فقط عند فشل الحماية الرئيسية في عزل العنصر المصاب العطل، مع المحافظة على هامش تنسيق زمني بين زاجلي الحماية الأساسية والداعمة، وهذا ما يدعى بتنسيق الحمايات (تعيير زواجل التيار الزائد من خلال ضبط محدداتها، وهما منحني التشغيل الزمني (TDS) وتيار التشغيل (Ipu)).

قدمت الكثير من الدراسات حلولا لمشكلة تنسيق زواجل التيار الزائد ذات المميزات العكسية ، بهدف تقليل الزمن عمل هذه الزواجل مع الحفاظ على الانتقائية والموثوقية والحساسية [3].

حيث استخدم المرجع [4] طريقة المحاولة والخطأ (Trial and Error)، لكن هذه الطريقة لا تؤدي إلى التنسيق الأمثل للزواجل بالإضافة إلى أنها تستهلك زمنا كبيرا بسبب التكرارات الكثيرة. لذلك اعتمد الباحثون في المراجع [5،6] النظرية البيانية (Graph Theory)، حيث تم بدايةً تحديد نقاط فتح للشبكة الكهربائية (Break Points) من أجل تحديد الزواجل التي سيتم بدء عملية التعيير منها، مشكلة هذه النظرية تكمن في صعوبة تحديد نقاط الفتح للشبكة كما أنه لا توجد ضمانة إلى أن هذه الطريقة ستؤدي إلى الحصول على التنسيق الأمثل للزواجل. استخدم الباحثون في [7،8] الطريقة التحليلية التقليدية مثل طريقة مضاعفات لاغرانج وغيرها لتنسيق زواجل التيار الزائد، لكن هذه الطريقة تتطلب عدد كبير من التكرارات وضرورة تحديد حل ابتدائي من أجل ضمان التقارب إلى الحل الأمثل.

للحصول على التنسيق الأمثل لزواجل التيار الزائد طبق الباحثون نظريات الحل الأمثل، حيث استخدم المرجع [9] البرمجة اللاخطية (NLP: Non Linear Programming) من أجل تعيير كل من (TDS) و(Ipu) للزواجل، لكن تستهلك هذه الطريقة زمنا كبيرا للوصول إلى الحل الأمثل حيث يتطلب كل تكرار للبرمجة اللاخطية استدعاء البرمجة الخطية (LP: Linear Programming)، ثم قام الباحثون في المرجع [10] بصياغة مشكلة التنسيق الأمثل كمشكلة خطية باعتبار ان قيم تيارات التشغيل (Ipu) محددة مسبقا، ومن ثم تم ايجاد القيم المثلى لمنحنيات التشغيل الزمن (TDS). تعد الخوارزميات الخطية سريعة ومناسبة للعمل في الزمن الحقيقي (Real Time). استخدم الباحثون في المراجع [11-15] خوارزميات الذكاءالاصطناعي المستلهمة من الطبيعة لايجاد الحل الأمثل. بالرغم من أن هذه الخوارزميات مجالا كبيرا من الحلول واحتمالية أقل للوقوع في حلول مثلى محلية (Local Optimum) إلا أنها تحتاج إلى متطلبات عالية للحوسبة ولها زمن تقارب بطيء عند زيادة حجم مجال البحث بالاضافة إلى أنها حساسة بشكل كبير إلى قيم بارامتراتها الابتدائية.

لذا، تم في هذا البحث تطبيق خوارزميات البرمجة الخطية الحسابية (خوارزمية المجموعة الفعالة (Active Set)) وخوارزميات الذكاء الاصطناعي (الخوارزمية الجينية (GA) و خوارزمية محاكاة التلدين (SA)) لحل مشكلة التنسيق الأمثل لزواجل التيار الزائد في الشبكات الكهربائية، والمقارنة بين أداء كل منهم من حيث السرعة وتابع الهدف. حيث تم صياغة مشكلة التنسيق الأمثل كمشكلة خطية من أجل الخوارزميات الثلاث سابقة الذكر.

2- أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية هذا البحث من:

1- ضرورة تحديد أفضل الخوارزميات المستخدمة للحصول على التنسيق الامثل لزواجل التيار الزائد، التي تحقيق المتطلبات الأساسية لزواجل الحماية (الحساسية، لسرعة، الموثوقية، الانتقائية).

2- الحفاظ على موثوقية النظام لكهربائي.

3- طرائق البحث وموارده (منهجية البحث):

لقد تم في هذا البحث الحصول على التنسيق الأمثل لزواجل التيار الزائد العكسية وفق الخطوات التالي:

1-اختيار النظام الكهربائي الاختباري المناسب (IEEE-3Bus, IEEE-14Bus, IEEE-30Bus).

2-تحديد أزواج الحماية (الرئيسية /الداعمة) وفق طريقة تتبع الطبولوجيا (Topology Tracing).

3-حساب سريان الحمولة.

4-حساب أزواج تيارات العطل الثلاثي الطور القريب جدا من الزاجل الرئيسي لأزواج الحماية (الرئيسية /الداعمة) وفق طريقة مكافئ ثفنن (Thevenin Equivalent).

5-تحديد القيم المثلى لمنحني التشغيل الزمني (TDS) باستخدام الطرق الثلاث سابقة الذكر والمقارنة بين أداء كل منها.

4- مفهوم تنسيق زواجل التيار الزائد ذات المميزات العكسية:

4-1- نموذج المنحني الزمني لعمل الزاجل:

يمكن محاكاة زواجل التيار الزائد ذات مميزات التشغيل العكسية وفقا للمعايير القياسية البريطانية (IEC) باستخدام المعادلة التالية [16] :

$$T = \frac{K1*TDS}{M^{K2}-1} \qquad (1)$$

حيث أن مميزات تشغيل زواجل التيار الزائد هي العلاقة بين تيار تشغيل الزاجل وزمن تشغيله، يكون لزواجل التيار الزائد ذات مميزات التشغيل العكسية علاقة عكسية بين زمن التشغيل وتيار التشغيل، أي كلما زاد التيار المشغل كلما انخفض زمن التشغيل.

(K1,K2): ثوابت عددية تتعلق بنوع مميزة تشغيل زاجل التيار الزائد العكسية (العكسية القياسية، العكسية جدا، فائقة العكسية). في هذا السياق تم في بحثنا هذا استخدام مميزة التشغيل العكسية القياسية.

TDS: منحني التشغيل الزمني للزاجل العكسي.

M: أمثال تعيير تيار التشغيل وهي النسبة بين تيار القصر المار في الزاجل وتيار التشغيل ($M = \frac{I}{Ipu}$).

4-2- الصياغة الرياضية لمشكلة التنسيق الأمثل لزواجل التيار الزائد العكسية [1]:

تعد المعادلة (1) غير خطية اذا اعتبرنا كل من (TDS) و(Ipu) متغيرين مجهولين وتتطلب تطبيق خوارزمية برمجة غير خطية. لكن اذا اعتبرنا أن قيم تيارات التشغيل (Ipu) محددة مسبقا وقمنا بتعويضها في المعادلة (1) تصبح المعادلة (1) خطية كما يلي:

$$T = a * TDS \qquad (2)$$

حيث:

$$a = \frac{K1}{M^{K2}-1} \qquad (3)$$

وبالتالي يمكن تطبيق خوارزميات البرمجة الخطية عليها للحصول على القيم المثلى لمنحنيات التشغيل الزمنية (TDS).

يمكن التعبير عن تابع الهدف (J) الذي يمثل تقليل مجموع أزمنة تشغيل الزواجل الرئيسية بالمعادلة التالية:

$$J = minimize[\sum_{i=1}^{n} T_{ni}] \qquad (4)$$

$$J = minimize[\sum_{i=1}^{n} a_i * TDS \qquad (5)$$

حيث: Tni: هو زمن تشغيل الزاجل الرئيسي من أجل عطل ثلاثي الطور قريب منه .

n: عدد الزواجل الرئيسية.

التابع في المعادلة (5) يخضع للقيود التالية:

1- قيود عدم مساواة تتعلق بهامش التنسيق الزمني (CTI: Coordination Time Interval): وذلك لتحقيق التنسيق الزمني بين الزاجل الرئيسي والزاجل الداعم، وفقا للمعادلة التالية:

$$T_{Backup} \geq T_{Primary} + CTI \qquad (6)$$

2- الحدود العليا والدنيا لمنحنيات التشغيل الزمنية:

$$TDS^{min} \leq TDS \leq TDS^{max} \qquad (7)$$

3- الحدود العليا والدنيا لأزمنة تشغيل الزواجل:

$$T_{min} \leq T_{ni} \leq T_{max} \qquad (8)$$

وبهذا نستطيع الحصول على التعيير الأمثل لمنحنيات التشغيل الزمنية وفق المعادلة (5) بوجود القيود (6) و(7) و (8) باستخدام الخوارزميات المقترحة.

4-3- خوارزمية البرمجة الخطية الحسابية (استراتيجية المجموعة الفعالة (Active Set Strategy)):

تعتبر خوارزمية المجموعة الفعالة خوارزمية رياضية لايجاد الحل الأمثل. تستخدم في حل المسائل الرياضية الخطية المقيدة وغير المقيدة، حيث تبدأ بتحديد مجموعة القيود الفعالة ليتم بعد ذلك تحويلها من قيود عدم مساواة إلى قيود مساواة وبالتالي يتم الحصول على صياغة أبسط [17].

4-4- الخوارزمية الجينية (GA: Genetic Algorithm):

الخوارزمية الجينية هي خوارزمية مصممة لايجاد الحل الأمثل مستوحاة من الاختيار الطبيعي وعلم الجينات. تعد هذه الخوارزمية مناسبة لمسائل إيجاد الحل الأمثل الخطية وغير الخطية، المقيدة وغير المقيدة. تبدأ الخوارزمية بتوليد تجمع سكاني ابتدائي عشوائي يدعى بالسكان (Population)، بعد ذلك تطبق بشكل تكراري معاملات العبور والطفرة والاختيار حتى يتم الوصول للحل الأمثل [18].

4-5- خوارزمية محاكاة التلدين (SA: Simulated Annealing):

تعد هذه الخوارزمية مناسبة أيضاً لمسائل إيجاد الحل الأمثل الخطية وغير الخطية، المقيدة وغير المقيدة. تحاكي هذه الخوارزمية العملية الفيزيائية لتسخين المعادن وتبريدها من خلال تخفيض درجة حرارتها ببطء من أجل تقليل العيوب، وبالتالي تقليل ضياعات النظام. تعتبر درجة الحرارة بارامتر التحكم الأساسي في خوارزمية محاكاة التلدين، درجة الحرارة تحدد احتمالية قبول حل سيئ في أي خطوة، وتستخدم لتحديد مجال البحث [19].

4-6- طريقة تتبع الطبولوجيا (Topology Tracing):

تستخدم طريقة تتبع الطبولوجيا من أجل تحديد أزواج الحماية (الرئيسية /الداعمة) وفق الخطوات التالية:

1- اعداد قائمة الزواجل، والتي عن طريقها يتم تحديد مواقع الزواجل في الشبكات الكهربائية.
2- يعتبر أول زاجل بالقائمة زاجل داعم.
3- يتم إيجاد قضيب التجميع المقابل للزاجل الداعم المحدد بالخطوة (2).
4- تعتبر الزواجل المرتبطة بقضيب التجميع المحدد بالخطوة (3)، والمتواجد في الخطوط المجاورة البعيدة عنه كزواجل رئيسية.
5- يتم تكرار الخطوات (من 2 حتى 5) من أجل كل زاجل في قائمة الزواجل.

من الجدير ذكره أنه سيتم في بحثنا هذا تطبيق البرمجة الخطية للخوارزميات الثلاث على مشكلة التنسيق الأمثل لزواجل التيار الزائد ذات المميزات العكسية. حيث سنعتبر كما ذكرنا سابقا أن قيم تيارات التشغيل (Ipu) محددة مسبقا، وتحدد قيمة تيار التشغيل وفق المعادلة التالية:

$$I_{pu} = K * I_{Lmax} \qquad (9)$$

حيث: $1.25 \leq K \leq 2$ ، سنعتبر أن K=1.5 عند التطبيق.

ويبين الجدول (1) قيم البارامترات الابتدائية لخوارزميات الذكاء الاصطناعي المستخدمة في هذا البحث.

الجدول رقم (1): البارامترات الابتدائية لخوارزميات الذكاء الاصطناعي

النظام الاختباري	الخوارزمية الجينية			خوارزمية محاكاة التلدين			
	حجم العينة	عدد الأجيال	معامل تقارب التابع	درجة الحرارة الابتدائية	معامل إعادة التلدين	معامل تقارب التابع	عدد التكرارت
IEEE-3Bus	80	150	1e-6	400	50	1e-5	5000
IEEE-14Bus	300	150	1e-8	800	150	1e-5	10000
IEEE-30Bus	300	150	1e-8	1600	300	1e-5	20000

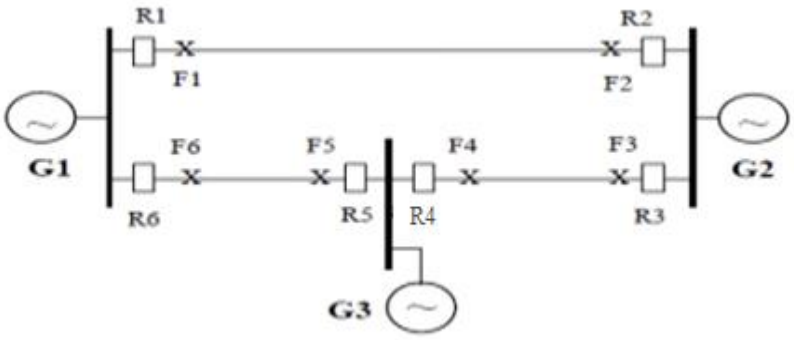
بالنسبة للخوارزمية الجينية تم الحفاظ على معاملات الطفرة والعبور ثابتة كمايلي: معامل الطفرة= 0.2 ومعامل العبور=0.8.

5- اختبار أداء الخوارزميات الثلاث في التنسيق الأمثل لزواجل التيار الزائد العكسية:

من أجل تحديد أداء الخوارزمية الأفضل لايجاد التنسيق الأمثل لزواجل التيار الزائد، قمنا بتطبيق الدراسة على ثلاث أنظمة اختبارية (IEEE-3 Bus, IEEE-14 Bus, IEEE-30Bus). في كل الحالات المدروسة، تم اختيار زواجل التيار الزائد ذات المميزات العكسة القياسية (K1= 0.14, K2=0.02)، بهامش تنسيق زمني (CTI=0.2)، ومجال قيم أزمنة منحنيات التشغيل الزمنية (0.1<TDS<1.1).

أولا: النظام الاختباري (IEEE-3 Bus):

يبين الشكل 1 مخطط الخط الواحد للنظام الاختباري المذكور أعلاه، المكون من ثلاث خطوط نقل وثلاث مولدات، بيانات هذا النظام موضحة في الجدول 2 وفقا للمرجع [21]. تتم حماية الخطوط بواسطة 6 زواجل تيار زائد عكسية متماثلة، يبين الجدول 2 رقم كل زاجل ونسب تحويل محولات التيار وقيم تيارات التشغيل الموافقة له.



الشكل رقم (1): مخطط الخط الواحد للنظام الاختباري (IEEE-3 Bus)

يظهر الجدول 3 أزواج زواجل الحماية (الرئيسية/الداعمة) التي تم الحصول عليها من خلال تطبيق خوارزمية تتبع الطبولوجيا لأجل الشبكة (IEEE-3 Bus)، كما يظهر الجدول أزواج تيارات العطل الثلاثي الطور المقابلة لها لأجل أعطال حاصلة في الجوار القريب جدا من الزواجل الرئيسية.

الجدول رقم (2): بيانات النظام الاختباري (IEEE-3 Bus)

بيانات المولدات						
المولد 1:	100 MVA	69 KV	20%			
المولد 2:	100 MVA	69 KV	12%			
المولد 3:	100 MVA	69 KV	18%			
بيانات خطوط النقل:						
الخط 12:	50 KM	Z=5.5+j22.85 OHM				
الخط 23:	40 KM	Z=4.4+j18.00 OHM				
الخط 13:	60 KM	Z=7.6+j27.00 OHM				
بيانات الزواجل: تم افتراض أن كل الزواجل هي زواجل تيار زائد بمميزات عكسية قياسية						
رقم الزاجل	1	2	3	4	5	6
نسبة التحويل للتيار	300/5	200/5	200/5	300/5	200/5	400/5
تيار تشغيل (الثانوي)	5	1.5	5	4	2	2.5
تيار التشغيل (الأولي)	300	60	200	240	80	200

الجدول رقم (3): تيارات عطل أزواج الزواجل (رئيسي/داعم) للشبكة IEEE-3 Bus

الزاجل الرئيسي	الزاجل الداعم	تيارعطل الزاجل الرئيسي (KA)	تيار عطل الزاجل الداعم (KA)
1	5	5.0169	0.8465
2	4	2.9398	1.2079
3	1	2.8956	1.1637
4	6	3.3032	0.9942
5	3	3.4399	1.1309
6	2	5.0915	0.9211

يبين الجدول 4 التعيير الأمثل للمضاريب الزمنية لزواجل التيار الزائد (TDS) التي تم الحصول عليها بتطبيق البرنامج المنجز بلغة ماتلاب البرمجية (البرمجة الخطية باستخدام الخوارزميات الثلاث السابقة الذكر). نلاحظ من هذا الجدول أن الخوارزمية الحسابية (المجموعة الفعالة) هي الأسرع م خوارزميات الذكاء الاصطناعي (الخوارزمية الجينية وخوارزمية محاكاة التلدين) عند العمل في الزمن الحقيقي. ومن النتائج المدونة في الجدول 5 يتبين بأن خوارزمية المجموعة الفعالة تعطي أقل قيمة لتابع الهدف.

الجدول رقم (4): التعيير الأمثل للمضاريب الزمنية للزواجل (TDS)

رقم الزاجل	المضاريب الزمنية للزواجل (TDS)		
	خوارزمية المجموعة الفعالة	الخوارزمية الجينية	خوارزمية محاكاة التلدين
1	0.1000	0.1002	0.1001
2	0.1802	0.1836	0.1683
3	0.1191	0.1214	0.1303
4	0.1201	0.1222	0.1108
5	0.1524	0.1557	0.1501
6	0.1192	0.1226	0.1084
زمن تشغيل الخوارزمية بالثانية	1.18	5.25	8.24
$\sum TDS$	0.791	0.8057	0.768

الجدول رقم (5): التعيير الأمثل لأزمنة تشغيل زواجل التيار الزائد

الخوارزمية	خوارزمية المجموعة الفعالة		الخوارزمية الجينية		خوارزمية محاكاة التلدين	
الأزواج	T_{backup}	T_{main}	T_{backup}	T_{main}	T_{backup}	T_{main}
1:(P=3, B=1)	0.5094	0.3035	0.5102	0.3093	0.5097	0.3015
2:(P=6, B=2)	0.4494	0.2494	0.4577	0.2566	0.4197	0.2197
3:(P=5, B=3)	0.4728	0.2728	0.4819	0.2789	0.5173	0.2563
4:(P=2, B=4)	0.5116	0.3116	0.5210	0.3174	0.4724	0.2724
5:(P=1, B=5)	0.4415	0.2415	0.4512	0.2419	0.4350	0.2316
6:(P=4, B=6)	0.5121	0.3121	0.5268	0.3178	0.4656	0.2656
قيمة تابع الهدف	1.691		1.72		1.76	

من أجل تعميم الدراسة قمنا باختبار أداء الخوارزميات الثلاث على الشبكتين (IEEE–14 Bus – IEEE–30 Bus).

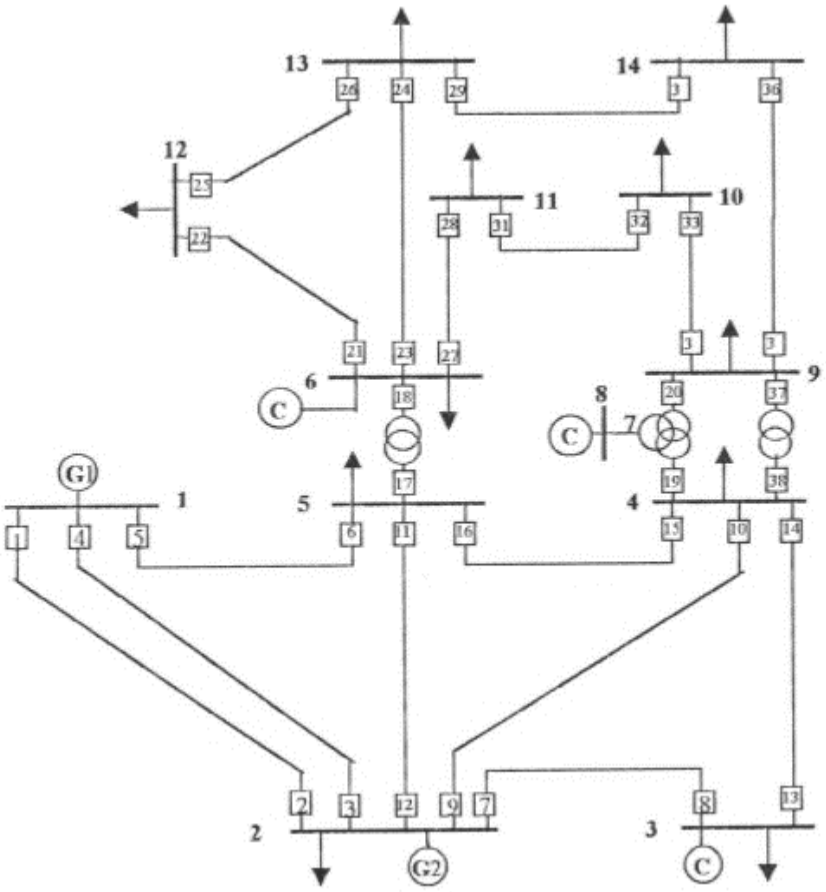
ثانيا: النظام الاختباري (IEEE–14 Bus Test System):

يبين الشكل 2 مخطط الخط الواحد للنظام الاختباري IEEE–14 Bus ، المكون من 21 خط نقل 5 مولدات، 3 محولات خافضة للجهد (132/33 KV)، بيانات هذا النظام معطاة في المرجع [21]. تتم حماية الخطوط بواسطة 38 زاجل من زواجل التيار الزائد العكسية المتماثلة.

يبين الجدول 5 التعيير الأمثل للمضاريب الزمنية للزواجل (TDS) التي تم الحصول عليها باستخدام الخوارزميات الثلاث. تظهر النتائج المدونة في هذا الجدول أن خوارزمية المجموعة الفعالة هي الأسرع، لكن بالمقابل تبدو الخوارزمية الجينية دقيقة بقدر دقة

خوارزمية المجموعة الفعالة تبعا لقيمة تابع الهدف. تبين الأشكال 3 و 4 أن خوارزمية محاكاة التلدين تعطي قيما أكبر لأزمنة تشغيل أزواج زواجل الحماية (داعم/رئيسي) بالمقارنة مع خوارزميتي المجموعة الفعالة والخوارزمية الجينية.

يوضح الشكل 5 هوامش التنسيق الزمنية بين أزواج الزواجل (رئيسي/داعم) حيث أن المحور الأفقي يمثل أزواج الزواجل والمحور العمودي يمثل هامش التنسيق الزمني ($T_{Backup} - T_{Primary}$). نلاحظ من هذا الشكل أن الخوارزميات الثلاث استطاعت الحفاظ على هامش التنسيق الزمني ($T_{Backup} - T_{Primary} \geq CTI \geq 0.2$)، لكن بالمقابل تبين أن خوارزميتي (محاكاة التلدين والخوارزمية الجينية) أعطتا قيما كبيرة لهامش التنسيق عند بعض أزواج الزواجل للنظام (IEEE-14Bus) وهذا يعني تأخير بزمن عمل الزاجل الداعم مما يؤثر على متطلبات عمل الزواجل المذكورة سابقا، فيما استطاعت خوارزمية المجموعة الفعالة الحفاظ على هامش التنسيق هذا ضمن حدود مقبولة.



الشكل رقم (2): مخطط الخط الواحد للنظام الاختباري (IEEE-14 Bus)

ثالثا: النظام الاختباري (IEEE-30 Bus):

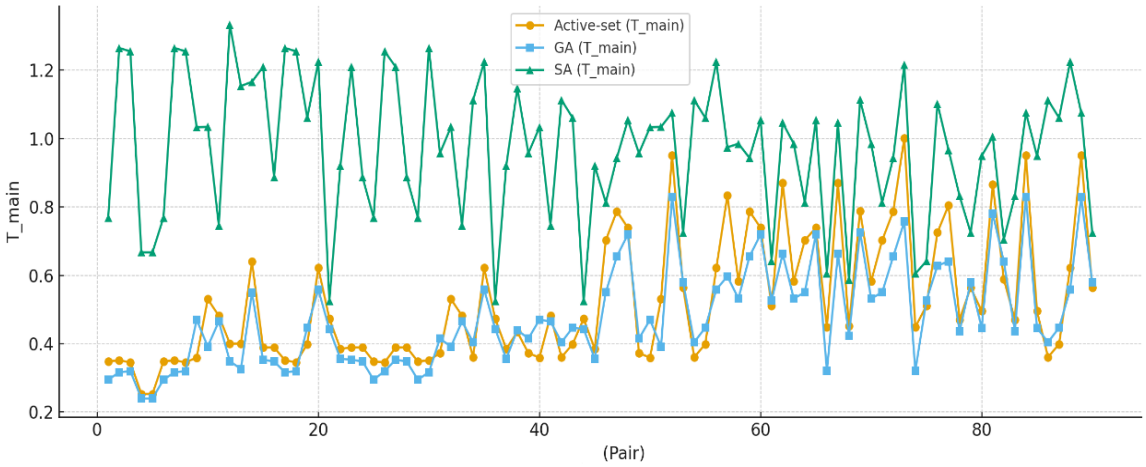
يبين الشكل 6 النظام الاختباري IEEE-30 Bus المكون من 41 خط نقل، 6 مولدات، 4 محولات خافضة للجهد (33 132/KV) [21]. يتم حماية خطوط النظام بواسطة 76 زاجل للتيار الزائد.

عند تطبيق البرنامج المنجز لإيجاد الحل الأمثل لزواجل التيار الزائد العكسية على الشبكة (IEEE-30Bus) حصلنا على النتائج المدونة في الجدول 7، والتي تؤكد أفضلية خوارزمية المجموعة الفعالة سواء بالنسبة لزمن التشغيل أو قيمة تابع الهدف،

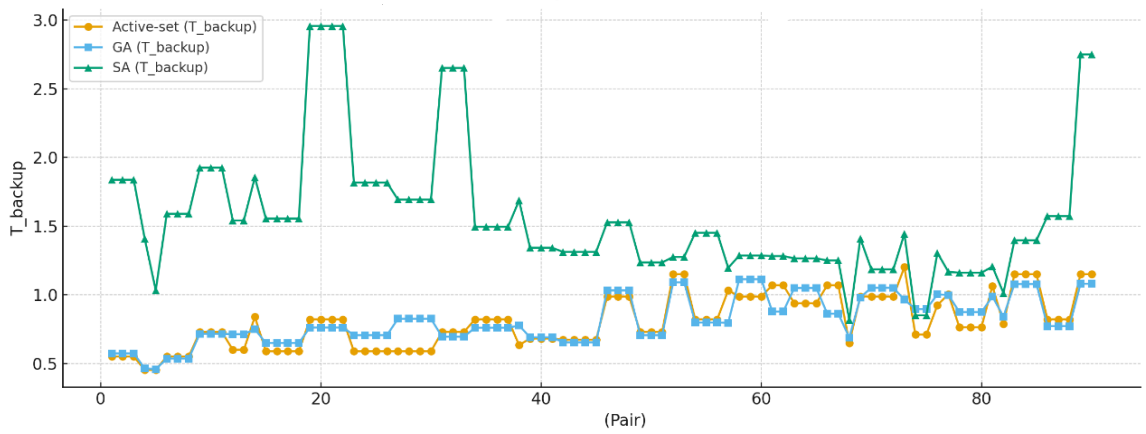
فيما أظهرت خوارزمية محاكاة التلدين قيمة كبيرة لتابع الهدف بسبب فشلها في الحفاظ على القيد المبين بالمعادلة (8). يبين الشكل 7 مقدرة خوارزمية المجموعة الفعالة على إبقاء قيم المضاريب الزمنية للزواجل (TDS) ضمن حدود مقبولة وبقيم أصغرية في حين أظهرت الخوارزميتين الأخريتين ميلاً إلى الوصول إلى قيم حدية.

ويعود سبب القيم الكبيرة لأزمنة عمل الحمايات في خوارزميتي محاكاة التلدين والخوارزمية الجينية والمبينة في الجدول 5 والشكل 5، إلى إن هاتين الخوارزميتين تعتبران طرقا عشوائية حيث يتم اختيار وتحديد القيم الابتدائية بشكل عشوائي عند كل تشغيل، وبالتالي يمكن أن تؤدي إحدى القيم الابتدائية العشوائية إلى قيم كبيرة للزمن، أو إلى الوصول لحل أمثل محلي.

بالإضافة إلى أن خوارزميتي محاكاة التلدين والخوارزمية الجينية تختلفان في آلية العمل فيزيائيا ورياضيا، حيث تحتاج خوارزمية محاكاة التلدين (المستوحاة من العملية الفيزيائية لتلدين المعادن) لتابع هدف بمعامل غرامة وذلك لدمج القيود في تابع الهدف لأنها لا تتقبل وجود قيود ضمن بنيتها البرمجية، في حين أننا نستطيع في البنية البرمجية للخوارزمية الجينية (مستوحاة من الاختيار الطبيعي وعلم الجينات) تضمين قيود المساواة وعدم المساواة كمدخلات لها. أي أن بنية الخوارزمية الجينية أكثر بساطة، حيث أثبتت النتائج تفوق الخوارزمية الجينية على خوارزمية محاكاة التلدين من حيث الاستقراروالأداء، في حين أن خوارزمية محاكاة التلدين أقل كفاءة في هذه الحالة.



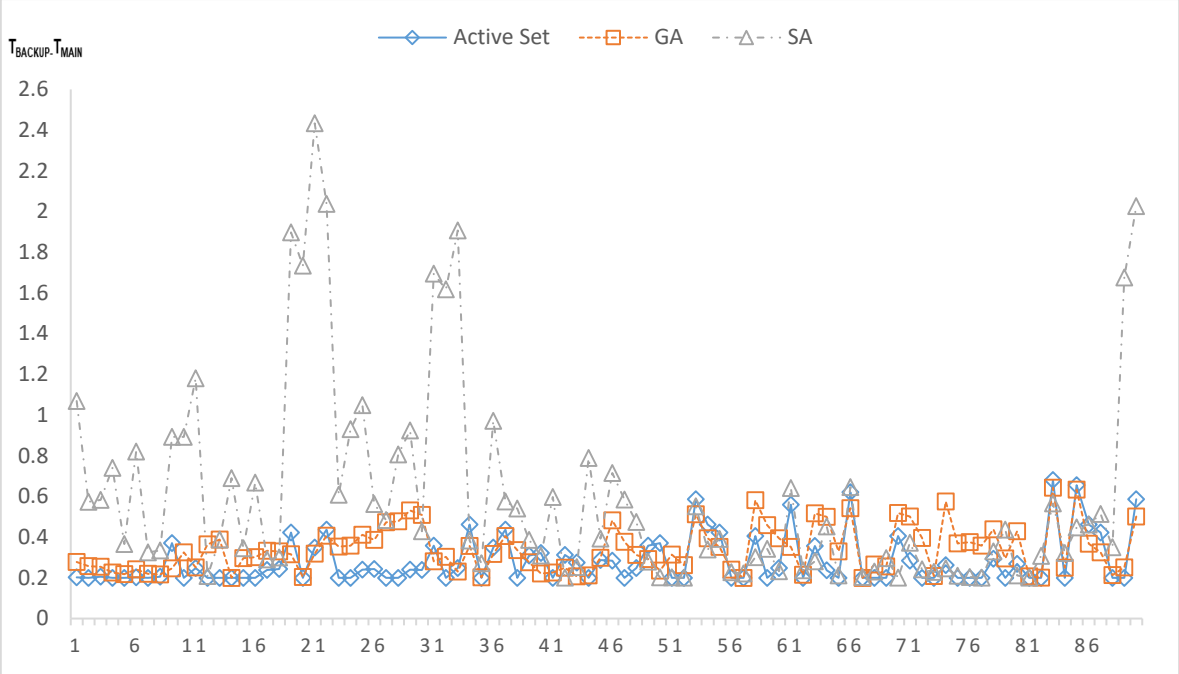
الشكل رقم (3): زمن تشغيل الزواجل الرئيسية من أجل الخوارزميات الثلاث للشبكة (IEEE-14Bus)



الشكل رقم (4): زمن تشغيل الزواجل الداعمة من أجل الخوارزميات الثلاث للشبكة (IEEE-14Bus)

الجدول رقم (6): التعيير الأمثل للمضاريب الزمنية للزواجل (TDS) للشبكة (IEEE-14Bus)

الزاجل	خوارزمية المجموعة الفعالة	الخوارزمية الجينية	خوارزمية محاكاة التلدين
1	0.1437	0.1511	0.4788
2	0.2791	0.2880	0.8674
3	0.2791	0.2836	0.6365
4	0.1437	0.1412	0.4143
5	0.1012	0.1000	0.2669
6	0.2591	0.3092	0.6655
7	0.1349	0.1208	0.2978
8	0.3359	0.3714	0.8870
9	0.1530	0.1432	0.5506
10	0.2509	0.3029	0.7741
11	0.2492	0.3519	0.7162
12	0.1638	0.1570	0.5947
13	0.5004	0.4654	0.9111
14	0.1936	0.2384	0.5148
15	0.4792	0.4868	0.9435
16	0.1580	0.1558	0.3081
17	0.1948	0.2024	0.3014
18	0.5083	0.4918	0.8602
19	0.2777	0.2618	0.3079
20	0.3569	0.3449	0.6308
21	0.4684	0.3646	0.5421
22	0.3230	0.3899	0.4208
23	0.4158	0.3463	0.4984
24	0.3217	0.3172	0.4335
25	0.5477	0.4619	0.6401
26	0.3717	0.4025	0.4669
27	0.4826	0.4816	0.6883
28	0.5087	0.5460	0.6110
29	0.5054	0.4059	0.6076
30	0.3950	0.5006	0.4730
31	0.4560	0.9492	0.6437
32	0.5996	0.5992	0.6965
33	0.5386	0.6143	0.8185
34	0.5567	0.5200	0.6299
35	0.3123	0.3354	0.4012
36	0.7328	0.6866	0.8897
37	0.4076	0.3812	0.7807
38	0.1982	0.1846	0.4738
زمن التشغيل (sec)	0.963682	19.070738	18.582908
قيمة تابع الهدف $\sum T_{ni}$	46.858129	47.813815	87.421202
$\sum TDS$	13.3043	13.8546	22.6433

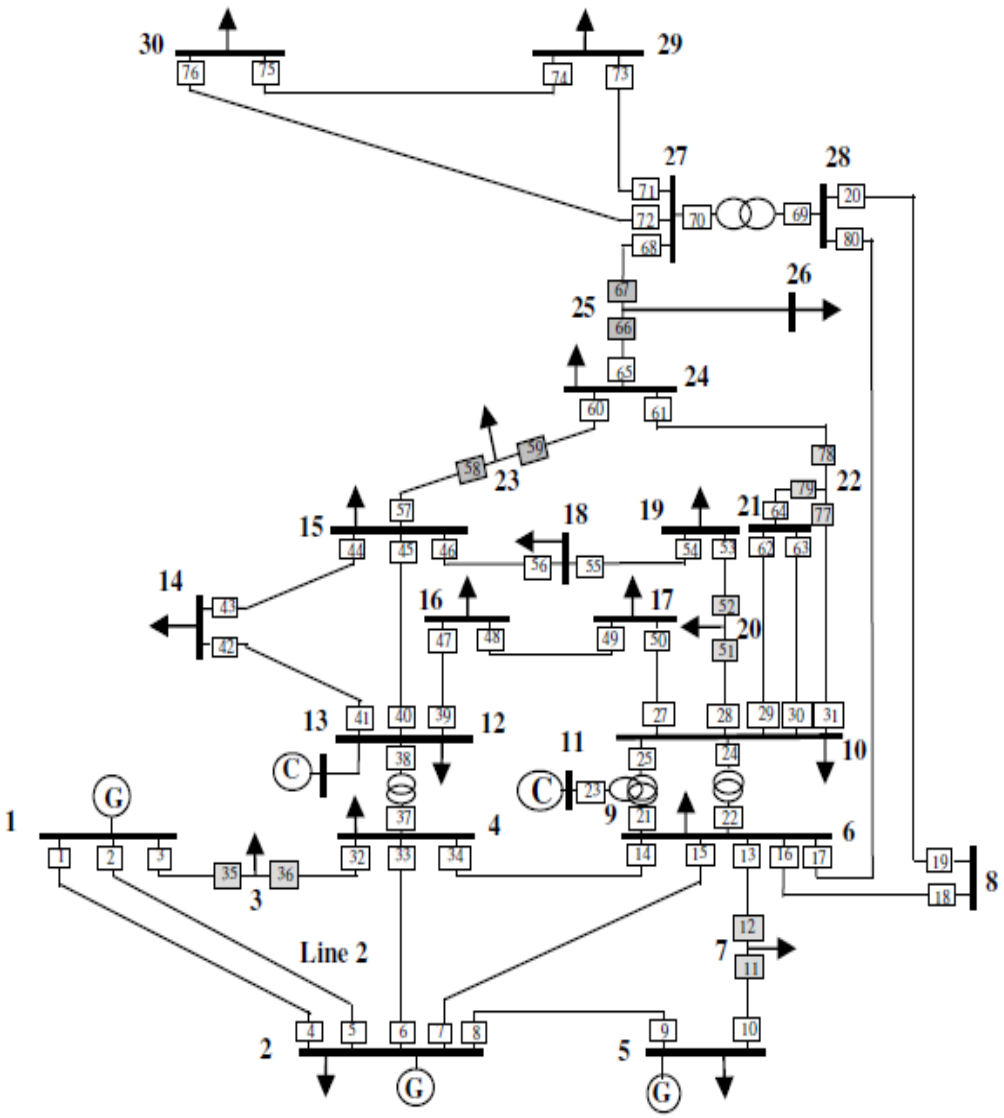


الشكل رقم (5): هوامش التنسيق الزمنية لأزواج الزواجل للشبكة (IEEE-14Bus)

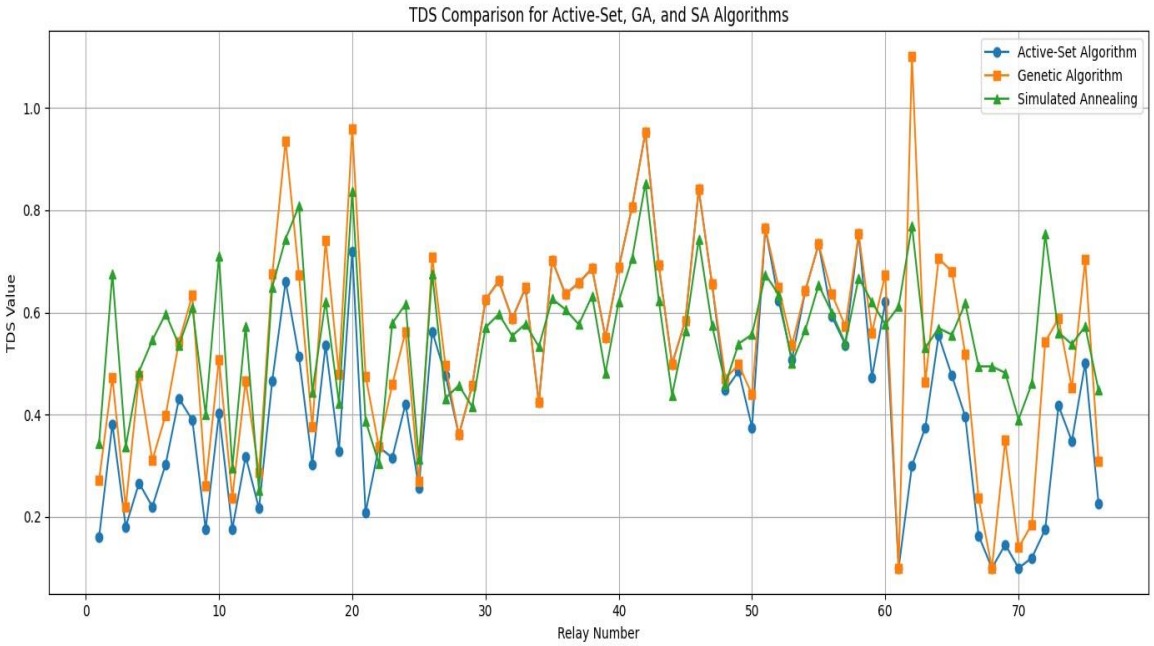
الجدول رقم (7): مقارنة أداء الخوارزميات الثلاث بالنسبة للشبكة (IEEE-30Bus)

	خوارزمية المجموعة الفعالة	الخوارزمية الجينية	خوارزمية محاكاة التلدين
قيمة تابع الهدف	135.460812	162.440966	1090419.399
زمن التشغيل (sec)	1.712910	27.265653	35.320305
$\sum TDS$	34.49287586	41.04304191	42.37878685

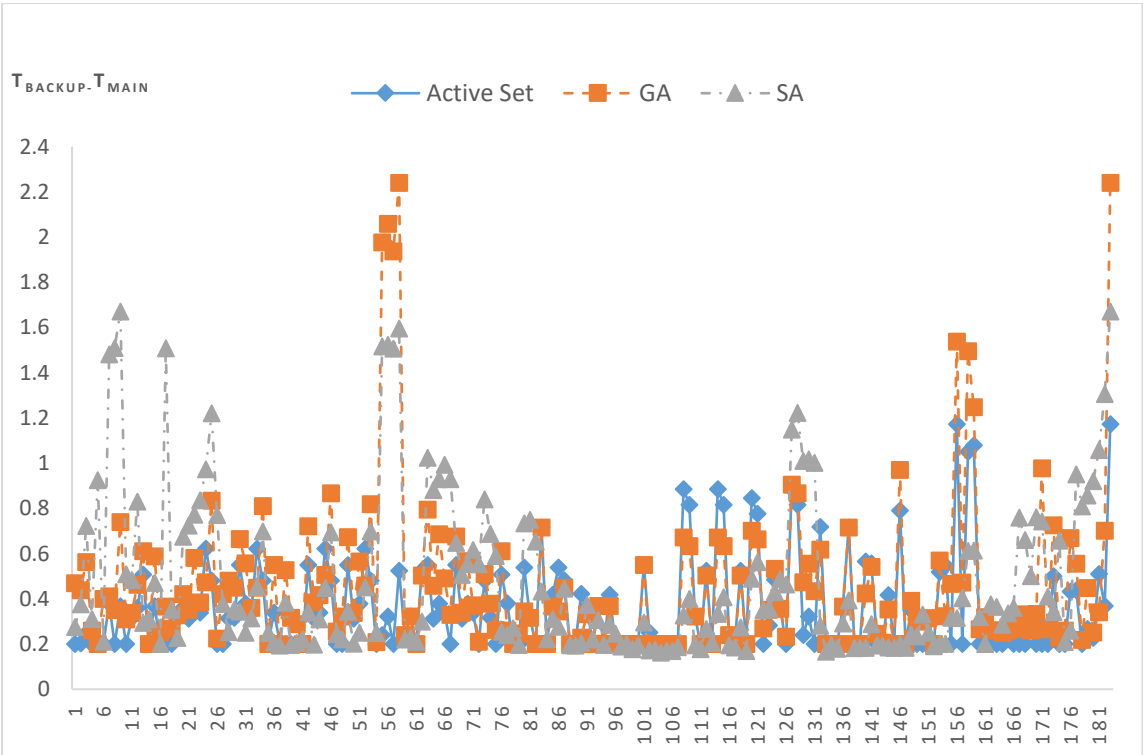
تؤكد المنحنيات المبينة بالشكل 8 أن الخوارزميات الثلاث حافظت على هامش التنسيق الزمني لازواج الزواجل (رئيسي/ داعم) للشبكة (IEEE-30BUS)، لكن بالمقابل أظهرت أن خوارزميتي (محاكاة التلدين والخوارزمية الجينية) أعطتا قيما كبيرة لهامش التنسيق عند بعض أزواج الزواجل.



الشكل رقم (6): مخطط الخط الواحد للنظام الاختباري (IEEE-30Bus)



الشكل رقم (7): مقارنة قيم التعيير الأمثل للمضاريب الزمنية للزواجل (TDS) للشبكة (IEEE-30Bus)



الشكل رقم (7): هوامش التنسيق الزمنية لأزواج الزواجل للشبكة (IEEE-30Bus)

6- الاستنتاجات والتوصيات:

6-1- الاستنتاجات:

1- تعطي خوارزمية المجموعة الفعالة (الحسابية) أزمنة تشغيل أصغر لزواجل التيار الزائد العكسية بالمقارنة بين خوارزميات الذكاء الاصطناعي المدروسة (خوارزمية محاكاة التلدين والخوارزمية الجينية)، مع الحفاظ على المتطلبات الأساسية لزواجل الحماية (الموثوقية، السرعة، الانتقائية، الحساسية)، وبالتالي تعتبر الأكثر كفاءة في ضبط إعدادات زواجل الحماية في الأنظمة الكهربائية، خاصة في التطبيقات التي تتطلب سرعة في الحساب مثل الزمن الحقيقي.

2- أثبتت الدراسة فعالية خوارزمية المجموعة الفعالة في حل مشاكل التنسيق الأمثل الخطية في الأنظمة الكهربائية الصغيرة الحجم والكبيرة الحجم.

3- بالمقارنة بين أداء خوارزمتي الذكاء الاصطناعي المستخدمتين، تعتبر الخوارزمية الجينية الأكثر استقرارا ودقة بالمقارنة مع خوارزمية محاكاة التلدين.

6-2- التوصيات:

1- نوصي باستخدم خوارزمية المجموعة الفعالة عند العمل في الزمن الحقيقي، كونها تعطي الحل الأمثل بشكل أسرع.

2- نوصي بتطبيق الدراسة على الشبكات التي تحتوي على مولدات موزعة، وهذا ما نعمل عليه في المرحلة القادمة.

7- المراجع العلمية:

[1] Hajjar A, Talaat H, Abdelaziz A, (2002), An adaptive protection scheme for optimal coordination of overcurrent relays," Electric Power Systems Research Journal, 61, pp. 1-9.

[2] Prachi .S, Madhura. G, S.U. Kulkarni, (2013), Genetic Algorithm Approach into Relay Coordination, International Journal of Electrical Engineering & Technology (IJEET), 4 (3), pp. 35-42.

[3] Damchi Y, Dolatabadi M, Rajabi H, Sadehc J, (2018), MILP approach for optimal coordination of directional overcurrent relays in interconnected power systems, ELSEVIER, 158, 267-274.

[4] Albrecht A, Feero W, (1964), Digital computer protective device coordination program -general program description, IEEE Trans, 83 (4), 402-410.

[5] Mahat P,Chen Z, Bak B, Leth G, (2011), A Simple Adaptive Overcurrent Protection of Distribution Systems with Distributed Generation, IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, 2 (3), 428-437.

[6] IEEE Std C37.90-1989, (1994), IEEE Standard for Relays and Relay Systems Associated with Electric Power Apparatus, (ANSI).

[7] SHAH K, DETJEN E, PHADKE A, (1988), Feasibility of Adaptive Distribution Protection System Using Computer Overcurrent Relaying Concept, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, 24 (5), 792-797.

[8] Nmah B, (2024), Solving a Relaxed Min-Cost Redundancy Allocation Model using Lagrange Multiplier and Newton's Method, Journal of Advances in Mathematics and Computer Science,39 (11), 152-159.

[9] Singh M, Panigrahi B, Abhyankar A, (2011), Optimal Overcurrent Relay Coordination in Distribution System, IEEE.

[10] Urdaneta A, Restrepo H, Marquez S, Sanchez J, (1996), Coordination Of Directional Overcurrent Relay Timing Using Linear Programming, IEEE Transactions on Power Delivery, 11 (1),122-129.

[11] WADOOD A, ALBALAWI H, MOHAMMED A, PARK H, (2025), Modified Swarm-Based Artificial Intelligence Optimization for Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays in Power System, IEEE, 13, 71007- 71026.

[12] KHURSHAID T, WADOOD A , FARKOUSH S , YU J, KIM C, RHEE S, (2019), An Improved Optimal Solution for the Directional Overcurrent Relays Coordination Using Hybridized Whale Optimization Algorithm in Complex Power Systems, IEEE, 7, 90418-90435.

[13] Foqha T, Khammash M, Alsadi S, Omari O, Refaat S, Al-Qawasmi K, Elrashidi A, (2023), Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays Using Hybrid Firefly–Genetic Algorithm, Energies, 16 (5328).

[14] Wang Y, Habib K, Abdul Wadood A, Khan S, (2023), The Hybridization of PSO for the Optimal Coordination of Directional Overcurrent Protection Relays of the IEEE Bus System, Energies, 16 (3726).

[15] Abdul Wadood A, Khurshaid T, Farkoush S, Yu J, Kim C, Rhee S, (2019), Nature-Inspired Whale Optimization Algorithm for Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays in Power Systems, Energies, 12 (2297).

[16] IEC Standard, (1976), Single Input Energizing Quantity Measuring Relays with Dependent Specified Time, Publication No. 255-4.

[17] Vanderbei R, (2008), Linear Programming Foundations and Extensions, Third Edition, springer, Stanford University, New York, USA.

[18] Haupt R, Haupt S, (2004), PRACTICAL GENETIC ALGORITHMS, second edition, WILEY, New Jersey, USA.

[19] Matlab User Guide, (2009), Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox, USA.

[20] Urdaneta A, Nadira R, Jimenez L, (1988), Optimal Coordination Of Directional Overcurrent Relays In Inter Connected Power System, IEEE Transactions on Power Delivery, 3 (3).