

خوارزمية جديدة للتمييز بين تأرجح الاستطاعة والعطل المتناظر في زواجل الحماية المسافية الرقمية تعتمد على تحويل المويجة

د. عمّار عدنان حجّار *
د. محمّد عمّار ساعاتي **
يامن راشد السيوفي ***

(تاريخ الإيداع 22 / 6 / 2017. قُبل للنشر في 13 / 7 / 2017)

□ ملخّص □

يهدف هذا البحث إلى تقديم خوارزمية سريعة للتمييز بين تأرجح الاستطاعة والعطل المتناظر في زواجل الحماية المسافية الرقمية، تكون هذه الخوارزمية قادرة على إعطاء أوامر حجب لعمل هذه الزواجل عند اكتشافها لتأرجح الاستطاعة وذلك لتجنب الفصل غير المرغوب فيه لهذه الزواجل وبالتالي لتجنب الفصل المتعاقب لخطوط نقل الطاقة الكهربائية الذي قد يؤدي إلى حدوث حالة التعتيم الجزئي أو الكامل. تقوم هذه الخوارزمية أيضاً بإلغاء أمر الحجب للزواجل عند اكتشافها لحدوث عطل أثناء تأرجح الاستطاعة من أجل فصله بأسرع وقت ممكن.

تعتمد هذه الخوارزمية على استخدام تحويل المويجة (WT: Wavelet Transform) لتحليل إشارات الجهد والتيار إلى عدة مستويات ترددية مناسبة لتمييز الأعطال عن تأرجح الاستطاعة، ليتم بعدها حساب الطاقة الطيفية للإشارات ذات المجالات الترددية المستهدفة ومقارنتها مع قيم مرجعية لنحصل بذلك على إشارة الحجب أو الفصل المناسبة لزواجل الحماية المسافية.

لاختبار أداء الخوارزمية المقدمة، تم نمذجة نظام قدرة كهربائي اختباري، مكوّن من مولد متزامن مع قضيب تجميع لانهائي يصل بينهما خطا نقل، ضمن بيئة ماتلاب (MatLab/Simulink)، كما تم محاكاة عدة حالات لتأرجح الاستطاعة والأعطال، ثم طبقت الخوارزمية المقدمة. لقد أثبتت نتائج الاختبار للخوارزمية كفاءة وسرعة عاليتين في التمييز بين تأرجح الاستطاعة والعطل المتناظر وفي إعطاء الأوامر المناسبة لجميع الحالات المختبرة.

الكلمات المفتاحية: تأرجح الاستطاعة، عطل متناظر، زواجل مسافية، خوارزمية حجب، تحويل المويجة، خطوط النقل.

* أستاذ - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

** مدرس - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق - دمشق - سورية.

*** طالب ماجستير - قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

A new algorithm to discriminate between power swing and symmetrical fault in digital distance relays based on wavelet transform

Dr. Ammar Adnan Hajjar *
Dr. Mohamed Ammar saati **
Yamen Rashed Alsyoufi ***

(Received 22 / 6 / 2017. Accepted 13 / 7 / 2017)

□ ABSTRACT □

This paper aims to introduce a fast algorithm to discriminate between power swing and symmetrical fault in digital distance relays. The introduced algorithm is capable to issue a block decision to these relays when detect a power swing to avoid undesired tripping of the relays and consequently to avoid cascaded tripping of the power transmission lines which may causes partial or full blackout. The algorithm can also reset the block decision when it detects a fault during a power swing to remove the fault as soon as possible.

The introduced algorithm depends on the usage of wavelet transform to analyze the voltage and current signals into different levels of frequencies suitable to discriminate between faults and power swing, then the energy of the desired signal are calculated and compared with a reference value to issue a block or trip decision suitable for the distance relay.

To test the performance of the introduced algorithm, a typical power system, consists of synchronous generator and infinite bus interconnected through two parallel transmission lines, is modeled in MatLab/Simulink platform. Then several cases of faults and power swings are simulated. The simulation results of the introduced algorithm showed high speed and efficiency in discriminating between power swing and symmetrical faults and in issuing a suitable decision for all tested cases.

Keywords: Power swing, Symmetrical fault, Distance protection, Blocking algorithm, Wavelet transform, Transmission lines.

*Prof. - Faculty of Mechanical and Electrical engineering -Tishreen University - Lattakia - Syria.

** assistant Prof. - Faculty of Mechanical and Electrical engineering -Damascus University - Damascus - Syria.

*** Postgraduate Student - Faculty of Mechanical and Electrical engineering - Tishreen University - Lattakia - Syria.

الاستطاعة والأعطال، ثم طبقت الخوارزمية المقدمه. لقد أثبتت نتائج الاختبار للخوارزمية كفاءة وسرعة عاليتين في التمييز بين تأرجح الاستطاعة والعطل المتناظر وفي إعطاء الأوامر المناسبة لجميع الحالات المختبرة.

الكلمات المفتاحية: تأرجح الاستطاعة، عطل متناظر، زواجل مسافية، خوارزمية حجب، تحويل الموجة، خطوط النقل.

مقدمة:

يتعرض نظام القدرة الكهربائي إلى حالات اضطراب متنوعة مثل التغيرات المفاجئة في حمولة النظام، فقدان خط نقل، فقدان مولد، أو حدوث عطل أو إزالة عطل. تسبب هذه الاضطرابات عدم توازن بين استطاعتي الدخل (ميكانيكية) والخرج (كهربائية) في النظام، ينتج عن ذلك اهتزازات الكتروميكانيكية [1]. وقد يسبب هذا حالة تدعى تأرجح الاستطاعة، وتعرف بأنها تغير سريان الاستطاعة عندما تتغير زوايا الدائر للمولدات المتزامنة بالنسبة لبعضها البعض. هناك نوعان لتأرجح الاستطاعة، تأرجح الاستطاعة المستقر وتأرجح الاستطاعة غير المستقر. إذا كان تأرجح الاستطاعة مستقراً فستخامد التآرجحات خلال فترة زمنية قصيرة، أما إذا كان تأرجح الاستطاعة غير مستقر فستؤدي التآرجحات إلى زيادة زاوية الدائر مسببةً بذلك دخول النظام في حالة عمل غير مستقر [2].

يمكن لتأرجح الاستطاعة أن يسبب تلفاً أو ضرراً لتجهيزات نظام القدرة الكهربائي، كما يمكن أن يسبب أيضاً العمل الخاطئ لزواجل الحماية المسافية. فعند حدوث تأرجح الاستطاعة قد تنتقل الممانعة التي يشاهدها زاجل الحماية المسافية من منطقة القفل (اللاعمل) في الحالة المستقرة إلى منطقة العمل للزاجل مسببةً بذلك عمله بشكل خاطئ (حالة عمل غير مرغوبة) [3]. عملياً، إذا كان تأرجح الاستطاعة مستقراً فيجب على زواجل حماية خط النقل ألا تعمل، لأن فقدان غير الضروري لخط النقل سيؤدي الى التحميل الزائد للخطوط المجاورة وبالتالي سيؤدي هذا إلى حالة الفصل المتعاقب لهذه الخطوط، مما سيؤدي إلى حدوث حالة تعتيم جزئي أو كامل. أما إذا كان التآرجح غير مستقر فيجب أن تعمل زواجل الحماية من الخروج عن التزامن (OOS: Out of step)، المتوضعة عند نقطة توازن الاستطاعة، بينما يجب حجب (منع عمل) الزواجل المسافية المتوضعة في الأماكن الأخرى [4]. لتحقيق هذا الهدف يجب ايجاد طريقة خاصة لاكتشاف تأرجح الاستطاعة وبالتالي حجب عمل زواجل الحماية المسافية عند تأرجح الاستطاعة، لكن بنفس الوقت تكون قادرة على إلغاء حجب هذه الزواجل في حال حدوث أعطال (أعطال متناظرة خاصة) وذلك لكي تتمكن هذه الزواجل من فصل العطل.

في هذا السياق، طور باحثون خططاً عديدة للتمييز بين تأرجح الاستطاعة والعطل المتناظر بهدف اتخاذ الاجراء المناسب لزاجل الحماية المسافية (حجب/عدم حجب). يمكن تصنيف هذه الخطط إلى: خطط تقليدية [5-10]، خطط تعتمد على الذكاء الاصطناعي [11]، [12]، وخطط تعتمد على تحليل الإشارة [13]، [14].

تعتبر تقنيات الحجاب (Blinder) والمميزات متحدة المركز من أشهر الطرق التقليدية المستخدمة لحجب عمل الزواجل المسافية عند تأرجح الاستطاعة، تعتمد هذه التقنيات على قياس سرعة تغير الممانعة الظاهرية [5،6]. لكن يتطلب تطبيق هذه الطرق تنفيذ عمليات تحليل معقدة للشبكة بغية إيجاد البيانات اللازمة لضبط الزواجل [6]، كما أنها غير قادرة على تمييز الأعطال عن التآرجحات السريعة، كما أنها تفشل في كشف العطل المتناظر أثناء تأرجح الاستطاعة لأن كلاً منهما يعتبر ظاهرة متوازنة. استُخدمت طريقة جهد مركز التآرجح (SCV: Swing Center Voltage) للكشف عن تأرجح الاستطاعة [5]. امتازت هذه الطريقة بعدم حاجتها لإجراء دراسات موسعة للشبكة، وبقدرتها على اكتشاف العطل أثناء تأرجح الاستطاعة خلال دورتين، لكن يعد هذا الزمن غير مناسب لحماية خطوط

الجهد العالي جداً. في حين استغرقت الطريقة المقدمة في المرجع [7] 30 ميلي ثانية لاكتشاف العطل المتناظر أثناء وجود تأرجح الاستطاعة، وذلك عن طريق اشتقاق الاستطاعة الفعلية والرديئة ثلاثية الطور. استُخدمت في المرجعين [9،8] الاستطاعة الفعلية للخطية ثلاثية الطور ومركبات التردد لإشارتي الجهد والتيار للكشف عن العطل أثناء وجود تأرجح في الاستطاعة. بينما استعانت الطريقة المقدمة في المرجع [10] بعنصر التيار التراكمي لتمييز تأرجح الاستطاعة عن العطل. امتازت هذه الطريقة ببساطتها وسهولة تنفيذها، لكنها واجهت صعوبة بالغة في تحديد قيم العتبة المطلوبة، وفشلت أيضاً في تمييز العطل الذي يحدث عند زاوية استطاعة قريبة من 180 درجة.

ساعدت طرق التعلم المراقب مثل آلة شعاع الدعم (SVM: Support Vector Machine) ونظام الاستدلال العصبي - الضبابي المنكيف (ANFIS: Adaptive Neuro Fuzzy Inference System) في تطوير طرق لحجب تأرجح الاستطاعة باستخدام إشارات دخل متعددة [12,11]. تتطلب هذه الطرق عمليات محاكاة كثيرة لتدريبها على حالات عديدة للأعطال ولتأرجحات الاستطاعة.

تتغير بعض البارامترات أثناء تأرجح الاستطاعة، حيث يمكن رصد تلك التغيرات من خلال مراقبة موجة الجهد و/أو موجة التيار. وبناءً على ذلك، اقترح العديد من الباحثين استخدام تقنيات تحليل الإشارة من أجل الكشف عن حالة تأرجح الاستطاعة. حيث استخدم في المرجع [13] تحويل فورييه السريع بالاعتماد على المركبة المستمرة للكشف عن الأعطال أثناء تأرجح الاستطاعة، لكنها واجهت صعوبة في اختيار قيمة العتبة.

ازداد في العقدين الماضيين استخدام تحويل الموجة وعلى نطاق واسع في دراسات نظم القدرة الكهربائية كأداة فعالة لتحليل الإشارات العابرة. إذ يتفوق تحويل الموجة على تحويل فورييه بقدرته على الاحتفاظ بالمعلومات الزمنية، لكنه يعطي المعلومات الترددية على شكل حزم. قدم باحثون في المرجع [14] خوارزمية لتمييز تأرجح الاستطاعة عن العطل تعتمد على تحويل الموجة، حيث أخذوا عينات من إشارة التيار خلال التأرجح وعالجوها عن طريق تحويل الموجة وذلك بهدف الحصول على قيم مميزة، واستطاعوا من خلال مقارنة هذه القيم مع قيم محددة التمييز بين تأرجح الاستطاعة والعتل، لكن تطلبت هذه الخوارزمية عمليات حسابية معقدة وزمن حساب كبير. اعتمد الباحثون في المرجع [15] على حقيقة أنه عند تأرجح الاستطاعة يتغير التردد حول التردد الاسمي للنظام بشكل صغير (من 1-7) هرتز، بينما يتغير التردد بشكل كبير في حالة العطل، لذا استخدموا تحويل الموجة لتحليل إشارة التيار لطور واحد عند المستوى التاسع d9 وذلك لاكتشاف تأرجح الاستطاعة، ولتحليل اشارات الجهود للأطوار الثلاثة عند المستويات d4, d3, d2, d1 وذلك لاكتشاف حدوث العطل أثناء تأرجح الاستطاعة، وذلك لأجل تردد تقطيع قدره 40.96 كيلوهرتز. لكن استخدام 4 مستويات ترددية لكل طور من أطوار الجهد مع استخدام (db4: Daubechies 4) كموجة أم (Mother Wavelet) والتي لها مرشح تمرير حزمة ذو 8 معاملات حقيقية يتطلب عمليات حسابية كبيرة وزمناً كبيراً لإنجاز العمليات الحسابية.

بالنظر إلى الدراسات السابقة وإلى خواص تأرجح الاستطاعة والعتل وإلى خواص تحويل الموجة وجدنا أن الاختيار المناسب لخوارزمية الترشيح من ناحية السرعة والتحديد (الترددية - الزمنية) يلعب دوراً هاماً في أداء الخوارزمية المقترحة. لذا، عملنا على تطوير خوارزمية تمييز لتأرجح الاستطاعة عالية السرعة تختصر العمليات الحسابية وتعطي نتائج أدق وأسرع من الخوارزمية المقدمة في المرجع [15]. وبناءً على ذلك استخدمنا في هذا البحث موجة أم عالية السرعة تدعى الموجة الخطية ذات القطع المستقيمة (Piecewise Linear Spline Wavelet) لها مرشح تمرير حزمة ذو 3 معاملات حقيقية، وذلك لاستخراج اشارتين مميزتين مختلفين في المجال الترددي من إشارات

الجهود والتيار (d1 للجهود و d9 للتيارات)، ليتم بعد ذلك استخدام الطاقات الطيفية لهاتين الاشارتين لتمييز تأرجح الاستطاعة عن الأعطال (العطل المتناظر خاصة). لقد أظهرت نتائج المحاكاة بالحاسوب سرعة عالية وأداءً مميزاً لمختلف الحالات التي تم اختبارها.

أهمية البحث وأهدافه:

تأتي أهمية هذا البحث من ضرورة رفع موثوقية وأمان زواجل الحماية المسافية وبالتالي رفع موثوقية وأمان نظام القدرة الكهربائي، وذلك عن طريق تجنب الفصل غير المرغوب فيه لخطوط النقل، الناتج عن العمل الخاطئ لهذه الزواجل عند تأرجح استطاعة، الذي قد يؤدي إلى التحميل الزائد للخطوط المجاورة للخط المفصول وبالتالي إلى الفصل المتعاقب لهذه الخطوط الذي يؤدي إلى حالة تعتيم جزئي أو كامل.

يهدف هذا البحث إلى تطوير خوارزمية سريعة ودقيقة لتمييز تأرجح الاستطاعة عن العطل، تكون قادرة على:

- حجب عمل الزواجل عند تأرجح الاستطاعة وذلك لتجنب الفصل غير المرغوب فيه.
- إلغاء حجب عمل الزواجل عند حدوث عطل داخل منطقة الحماية للزواجل أثناء تأرجح استطاعة وذلك ليتم فصل الخط المصاب بالعطل.

طرائق البحث و مواده:

لقد تم في هذا البحث استخدام بيئة الماتلاب (MatLab/Simulink) لنمذجة نظام قدرة اختباري على الحاسوب الشخصي، ولمحاكاة حالات أعطال وتأرجحات استطاعة مختلفة، كما تم تطوير خوارزمية مناسبة لزواجل الحماية المسافية الرقمية وذلك لتمييز تأرجح الاستطاعة عن الأعطال تعتمد على تحويل الموجة.

1- نظرية تحويل الموجة:

الموجة (Wavelet) هي عبارة عن موجة قصيرة الأمد، يمكن تعريفها بأي تابع مهتز قيمته الوسطية تساوي الصفر. تحويل الموجة هو أداة حديثة نسبياً لمعالجة الإشارة تستخدم لتحليل ومعالجة الإشارات العابرة. يقوم تحويل الموجة بتحويل الإشارة الزمنية إلى نسخ مزاحة ومعدلة (مضغوطة أو موسعة) من الموجة الأم (تابع الأساس). يمتلك تحويل الموجة بعض المميزات الفريدة التي جعلته الأكثر ملائمة لتحليل ومعالجة الإشارات العابرة في نظام القدرة الكهربائي [16]، نذكر منها:

- له خاصية تحديد الموقع (الترددى - الزمنى) للاضطراب، حتى عند حدوث اضطراب صغير جداً في الإشارة.

- له مقدرة كبيرة على استخراج مكونات الإشارة عند مجالات مختلفة للتردد في حين يحافظ على المعلومات في الإطار الزمنى.

يعرّف تحويل الموجة المستمر (CWT: Continuous Wavelet Transform) للإشارة الزمنية $f(t)$ على أنه مجموع الإشارات الزمنية الناتجة عن ضرب الإشارة الأصلية $f(t)$ بالنسخ المزاحة والمعدلة من الموجة الأم $\psi(t)$. تعرف الموجة الأم بالعلاقة التالية:

$$\psi_{b,a}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

حيث تمثل "a"، "b" مجال التعديل والإزاحة الزمنية للموجة، على التوالي. تحدد معاملات تحويل الموجة المستمر $C_f(a, b)$ أو (CWT) بالجاء الداخلي التالي:

$$C_f(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \psi_{b,a}^*(t) \cdot dt \quad (2)$$

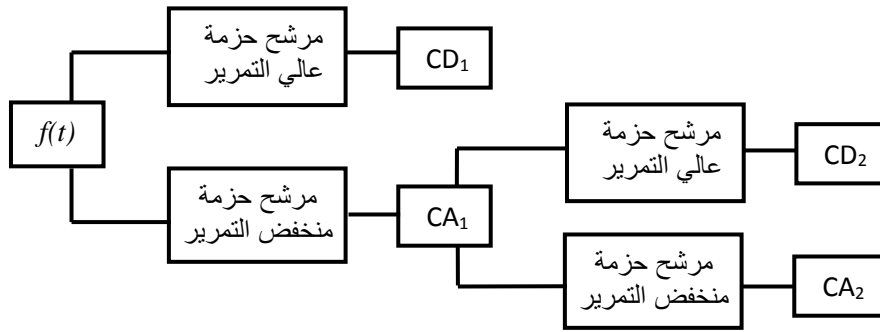
حيث يشير الرمز "*" إلى المرافق العقدي.

يمكن الحصول على تحويل الموجة للإشارة المقطعة إلى عينات باستخدام تحويل الموجة المتقطع (DWT: Discrete Wavelet Transform) كما يلي:

$$DWT(m, n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_k f(k) \psi^* \left(\frac{n - ka_0^m}{a_0^m} \right) \quad (3)$$

حيث تم التعويض عن a و b في العلاقة (1) بـ a_0^m و ka_0^m ، على التوالي. حيث n, k, a_0 ، هي أرقام صحيحة، a_0 تمثل عامل الإزاحة (يتم عادةً اختياره مساوياً إلى "2" لأجل الشبكة الثنائية)، تمثل رقم مجال التعديل m ، $0, 1, 2, 3, \dots$

يحتوي تحويل الموجة، بشكل عام، على أزواج متتالية من مرشحات التمرير المنخفض والمرفع للإشارة [18,17]. لأجل كل زوج من هذه المرشحات تسمى أجزاء من الإشارة $f(t)$ المنخفضة الترددات بالتقريبات (CA: Approximations)، بينما تسمى أجزاء من نفس الإشارة $f(t)$ العالية الترددات بالتفاصيل (CD: Details). بعد كل عملية ترشيح للإشارة يتم الاحتفاظ بعينة من البيانات والتخلص من العينة التالية لها وذلك لتجنب وجود بيانات زائدة. يُبين الشكل (1) عملية الترشيح ثنائي المرحلة للإشارة $f(t)$.



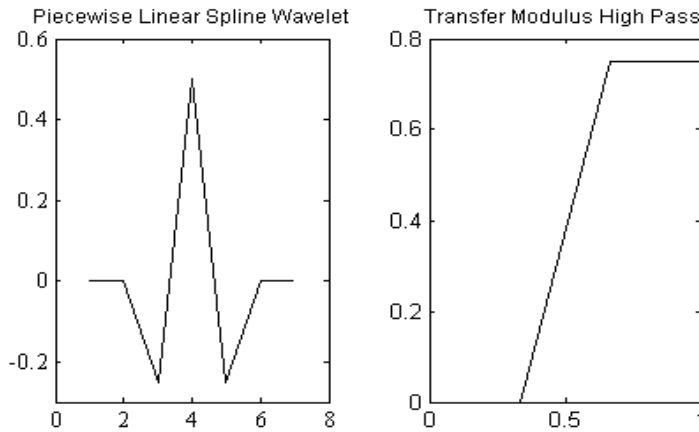
الشكل (1) عملية الترشيح ثنائي المرحلة للإشارة $f(t)$

4- مقدمة إلى الخوارزمية المستخدمة:

يترافق تأرجح الاستطاعة بتغير صغير في التردد يقع ضمن مجال ضيق حول التردد الاسمي (من 1-7 هرتز)، بينما يترافق حدوث العطل بتغير كبير في التردد يتراوح من عشرات الهرتز إلى مئات الكيلو من الهرتز. يختلف هذا التغير تبعاً لعدة عوامل منها موقع العطل، ولحظة حدوث العطل، وحالة عمل النظام قبل العطل. وبالتالي، إن تحليل الإشارة باستخدام تحويل الموجة يعطي مجالات ترددية عالية وذات طاقة كبيرة فقط عندما يحدث

عطل في النظام، بينما يكون لدى المجال الذي يشمل التردد الاسمي طاقة بشكل دائم تتغير تبعاً لتغير إشارتي الجهد والتيار عند تأرجح الاستطاعة [15].

لقد استخدمنا في هذا البحث تردد تقطيع قدره 34.133 كيلوهرتز كما اخترنا موجة أم تدعى الموجة الخطية ذات القطع المستقيمة (Piecewise Linear Spline Wavelet) نظراً لخواصها المناسبة لتحليل الاشارات العابرة من ناحية السرعة والقدرة على التحديد (الترددى - الزمنى) [18]. لهذه الموجة مرشح تمرير حزمة عالي الترددات ذو 3 معاملات، لذا فهي أبسط وأسرع بكثير من الموجة الأم (db4) المستخدمة في المرجع [15] التي لها مرشح ذو 8 معاملات. يُبين الشكل (2) الموجة الأم المستخدمة في هذا البحث مع استجابتها الترددية [19].



الشكل (2) الموجة "Piecewise Linear Spline" مع استجابتها الترددية [19].

لقد قمنا بدمج إشارات الجهود والتيارات كل على حدا لتشكيل إشارتي التيار النمطي والجهد النمطي كما في العلاقتين (4) و (5)، وذلك بغية حذف أي تشويش متعرض في خط النقل ناتج عن الاقتران المتبادل بين الخطوط المتوازية والمتجاورة و/أو الدارات المتعددة التي تتشارك في نفس حرم الخط. إضافة لتخفيف العبء الحسابي حيث سيتم معالجة هاتين الاشارتين فقط بدلاً من معالجة ستة إشارات للجهد والتيار (ثلاثة للجهد وثلاثة للتيار) [19].

$$I_m = I_a - 2I_b + 2I_c \quad (4)$$

$$V_m = V_a - 2V_b + 2V_c \quad (5)$$

بتحليل أي من الاشارات V_m أو I_m إلى المستوى الترددي التاسع اعتماداً على تردد التقطيع، نحصل على المجالات الترددية المبينة في الجدول (1). بتطبيق تحويل الموجة على إشارة الجهد V_m لأجل المستوى الترددي الأول d1 نحصل على إشارة الجهد الموافقة للمجال الترددي (8533.25-17066.5) هرتز الذي يمكننا من خلالها رصد وجود حالة عطل أثناء تأرجح الاستطاعة، وبتطبيق تحويل الموجة على إشارة التيار I_m لأجل المستوى الترددي التاسع d9 نحصل على إشارة التيار الموافقة للمجال الترددي (33.33-66.66) هرتز المناسبة لرصد تأرجح الاستطاعة.

الجدول (1): مستويات الموجة والمجالات الترددية الموافقة لتردد التقطيع 34.133 كيلوهرتز

المستوى الترددي	المجال الترددي (هرتز)	التردد المركزي (هرتز)
d1	8533.25-17066.5	12800
d2	4266.625-8533.25	6400

3200	2133.3125-4266.625	d3
1600	1066.656-2133.3125	d4
800	533.328-1066.656	d5
400	266.664-533.328	d6
200	133.332-266.664	d7
100	66.666-133.332	d8
50	33.333-66.666	d9

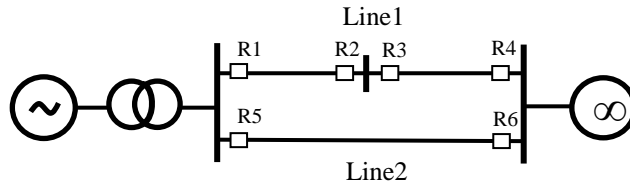
لحساب الطاقة الطيفية للإشارتين Vm و Im عند المستويين الأول والتاسع على التوالي، نأخذ نافذة حسابية لتطبيق تحويل الموجة عرضها دورتين (40 ملي ثانية) ثم نطبق تحويل الموجة على الإشارتين مرة كل نصف دورة (كل 10 ملي ثانية) فنحصل على $dVm1$ و $dIm9$ ، ومن ثم نقوم بحساب الطاقة الطيفية لكل من $dVm1$ و $dIm9$ من خلال تطبيق معيار فروبنوس (*Frobenius*) التالي:

$$E = \sqrt{\sum_{i=1}^N [d(i)]^2} \quad (6)$$

حيث N يمثل عدد العينات في النافذة الحسابية.

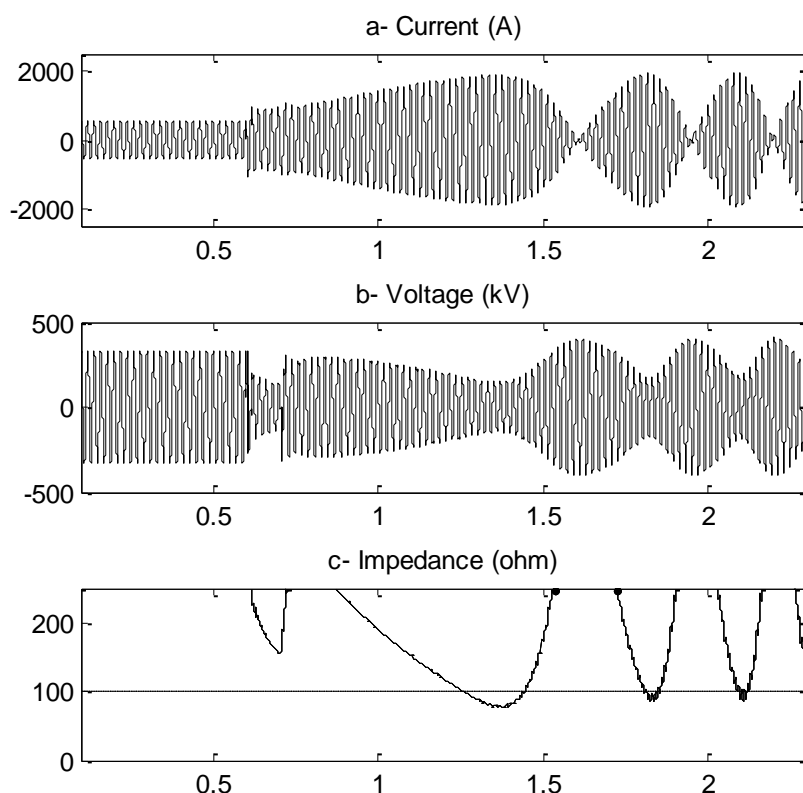
5- النظام المدروس:

سنطبق الخوارزمية المقدمة على نظام قدرة اختباري جهده 400 كيلو فولت وتردده 50 هرتز، يتكوّن من خطي نقل على التوالي موصولين مع مولد متزامن وقضيب تجميع لا نهائي كما هو مبين في الشكل (3)، محددات النظام موجودة في الملحق. أنجزت عمليات النمذجة والمحاكاة لهذا النظام باستخدام برنامج MatLab/Simulink.



الشكل (3): النظام المدروس - مولد مع قضيب تجميع لا نهائي

بدايةً تم تطبيق عطل ثلاثي الطور على الخط الثاني (Line2) عند الزمن 0.6 ثانية، ومن ثم تم إزالة هذا العطل بعد فاصل زمني قدره 0.1 ثانية وذلك عن طريق فتح القواطع المسؤولة عن حماية الخط الثاني. نتيجة لإزالة العطل نشأت حالة تأرجح استطاعة، يبين الشكل (4) موجات التيار والجهود مع الممانعة المشاهدة من قبل زاجل الحماية المسافية $R1$ خلال فترة تأرجح الاستطاعة.

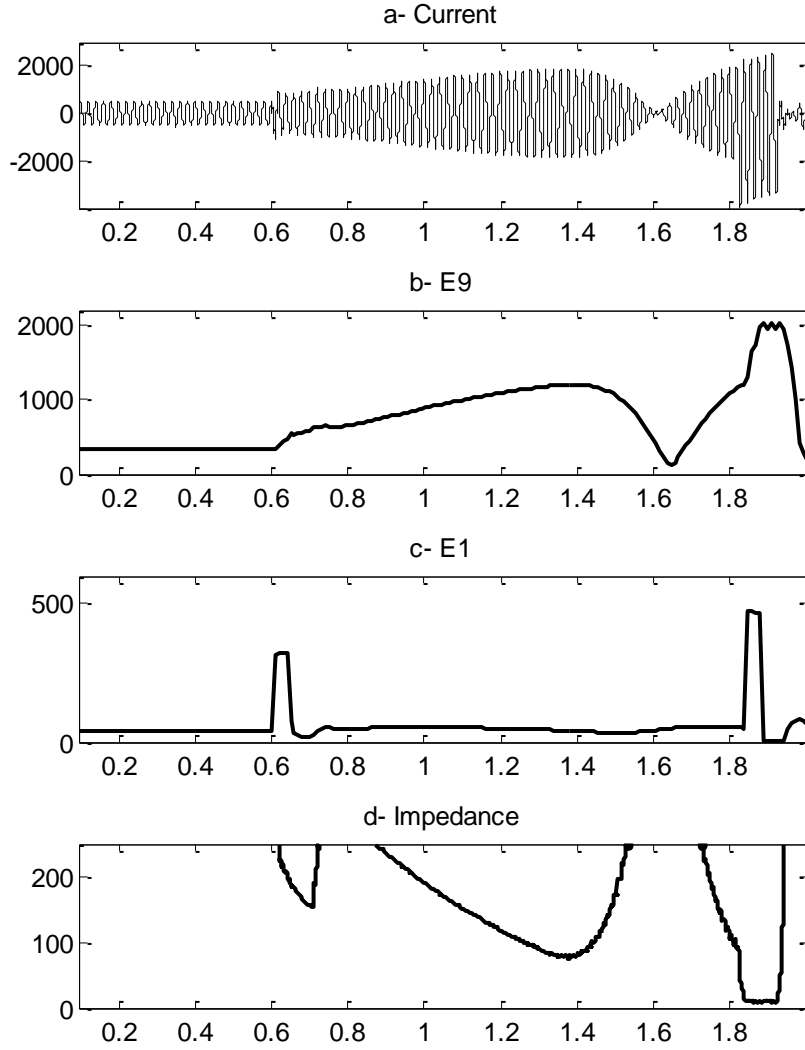


الشكل (4) تآرجح الاستطاعة: a- موجة التيار، b- موجة الجهد، c- الممانعة

يتبين من الشكل (4-c) أن الممانعة المقاسة من قبل الزايل RI تنخفض إلى ما دون الخط المتقطع الذي يمثل قيمة الممانعة الموافقة لمنطقة الحماية الأولى. ومن ثمّ تم تنفيذ أعطال ثلاثية الطور على الخط الأول (Line1) في مواقع مختلفة داخل منطقة الحماية الأولى للزايل RI وأثناء وجود الممانعة التي يشاهدها ذلك الزايل ضمن منطقة الحماية الأولى، كما هو مبين في الجدول (2).

الجدول (2): حالات لبعض الأعطال التي تم تجريبيها على الخط الأول

الحالة	مسافة العطل (كم)	زمن العطل (ثانية)	مقاومة العطل (أوم)
1	10	1.81	0.01
2	10	1.82	10
3	50	1.81	10
4	50	1.82	0.01
5	100	1.81	0.01
6	100	1.82	10



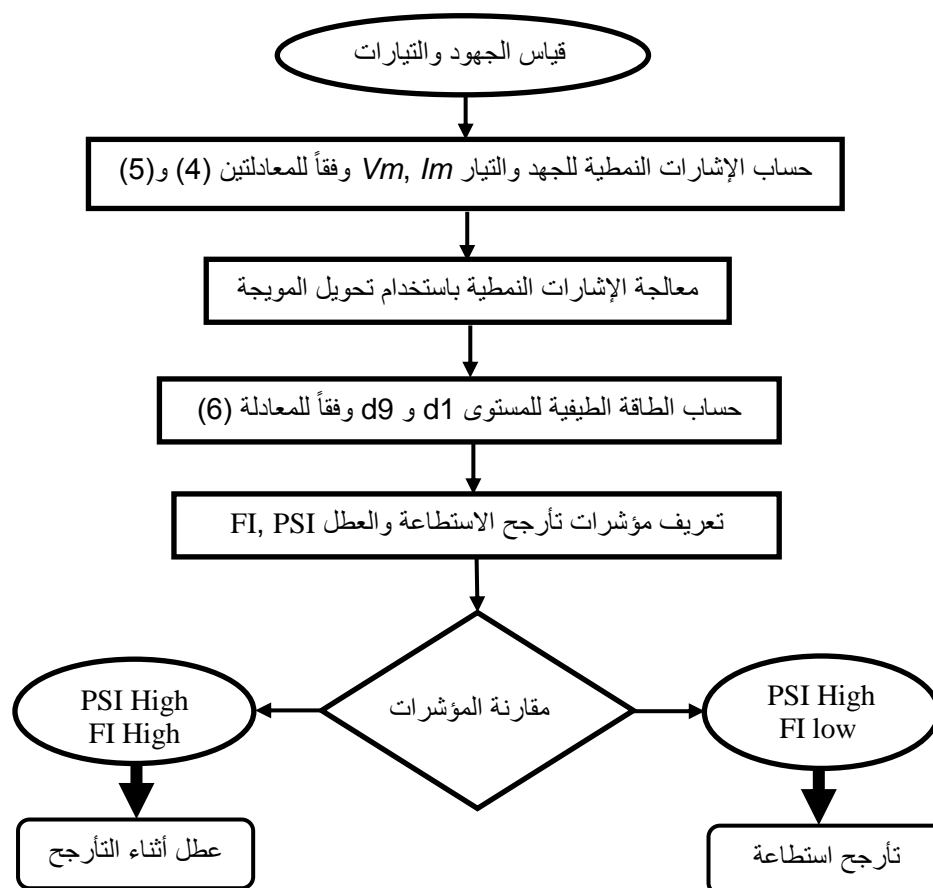
الشكل (5): a- موجة التيار b- طاقة المستوى التاسع للتيار c- طاقة المستوى الأول للجهد d- الممانعة.

نبين في الشكل (5) النتائج الموافقة للحالة الثانية من الجدول (2)، حالة حدوث عطل ثلاثي الطور عند اللحظة 1.82 ثانية على بعد 10 كم من جهة الزايل RI . حيث يظهر على الشكل موجة التيار للطور A ، وطاقة المستوى التاسع لإشارة التيار، بالإضافة إلى طاقة المستوى الأول لإشارة الجهد، مع الممانعة التي يشاهدها الزايل. ترصد الطاقة $E9$ تغير مطال التيار حول التردد الاسمي للنظام مما يدل على وجود حالة تأرجح استطاعة، بينما ترصد الطاقة $E1$ حالة عطل.

6- خوارزمية التمييز:

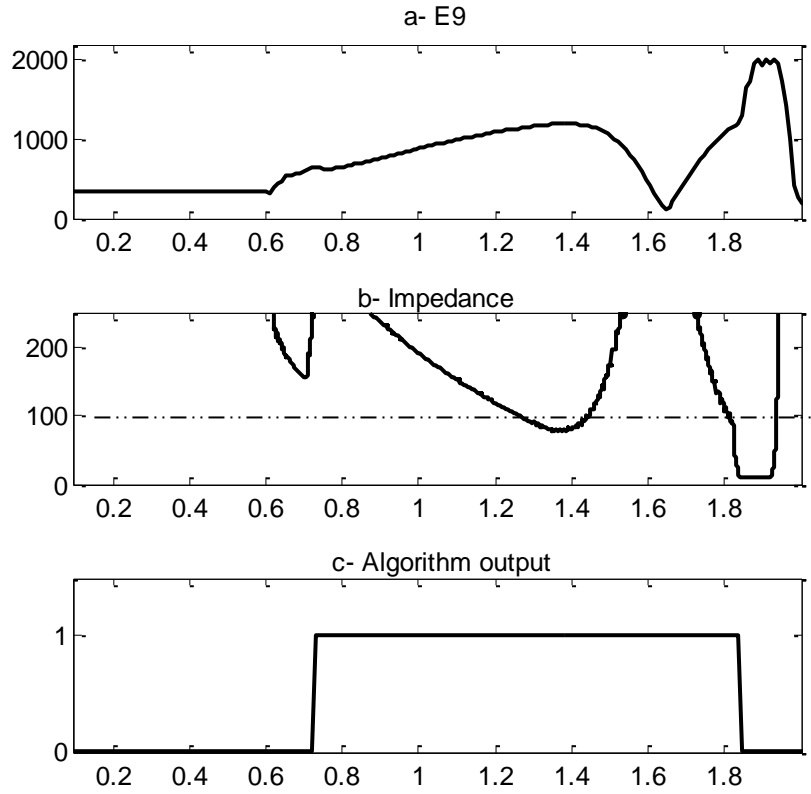
تتكون الخوارزمية من عدة مراحل يتم إنجازها واحدة تلو الأخرى. في البداية يتم تقطيع إشارات الجهد والتيار ثلاثية الأطوار بتعدد التقطيع 34.133 كيلوهرتز، ثم يتم إيجاد الاشارات النمطية للتيار والجهد Im و Vm عند موقع الزايل RI ، لتتم معالجتها باستخدام تحويل المويجة من أجل الحصول على إشارة الجهد النمطي الموافقة للمستوى الأول $d1$ وإشارة التيار النمطي الموافقة للمستوى التاسع $d9$. ومن ثم تستخدم المعادلة (6) لحساب الطاقة ($E1$) لإشارة الجهد النمطية ضمن المستوى الترددي الأول ($d1$)، وبهذا يتم الحصول على مؤشر واحد للجهد يكون كفيلاً

يكشف العطل المتناظر، وتحسب أيضاً الطاقة ($E9$) لإشارة التيار النمطية ضمن المستوى الترددي التاسع ($d9$)، فنحصل على مؤشر واحد أيضاً للتيار يكون كفيلاً بكشف تأرجح الاستطاعة.



الشكل (6): مخطط توضيحي للخوارزمية المقدمه، High=1, Low=0، مؤشر تأرجح الاستطاعة، FI مؤشر العطل

يسبب تأرجح الاستطاعة ارتفاعاً مستمراً في طاقة التيار $E9$ ، وبالتالي عندما ترصد الخوارزمية هذا الارتفاع المستمر في الطاقة فإنها ستعطي لمؤشر تأرجح الاستطاعة القيمة واحد منطقي ($PSI=1$) ويكون هذا الخرج بمثابة إشارة حجب لعمل زجل الحماية المسافية الرقمي عند تأرجح الاستطاعة. بينما يؤدي حدوث أي عطل إلى ظهور ترددات عالية تسبب ارتفاعاً مفاجئاً في طاقة الجهد $E1$ ، وبالتالي عندما ترصد الخوارزمية أي ارتفاع مفاجئ في طاقة الجهد $E1$ ستعطي لمؤشر العطل القيمة واحد منطقي ($FI=1$) ويكون هذا الخرج بمثابة إشارة إلغاء حجب عمل الزجل لكي يتمكن من القيام بفصل العطل بأسرع وقت ممكن. يظهر الشكل (6) مخططاً مبسطاً يوضح آلية عمل خوارزمية التمييز المقترحة.



الشكل (7): a- الطاقة الكلية لموجة التيار، b- الممانعة التي يشاهدها الزاغل، c- خرج الخوارزمية

نلاحظ من الشكل (7-a) أنه حدث عطل عند الزمن 0.6 ثانية وتم ازالته بعد زمن قدره 0.1 ثانية مما أدى لحدوث تأرجح استطاعة، نتج عن ذلك انخفاض في قيمة الممانعة المشاهدة من قبل الزاغل RI الى أقل من عتبة التشغيل للزاغل ضمن منطقة الحماية الأولى (الخط المنقطع)، كما هو مبين في الشكل (7-b). يظهر من الشكل (7-c) أن الخوارزمية استجابت لحالة تأرجح الاستطاعة بعد فترة قصيرة (بهدف التأكد من استمرار التأرجح) معطية خرجاً مساوياً للواحد وهذا يوافق أمراً بحجب عمل الزاغل لتجنب الفصل غير المرغوب به أثناء تأرجح الاستطاعة. في حين أصبح الخرج مساوياً للصفر عند حدوث عطل مفاجئ أثناء وجود تأرجح الاستطاعة، ويفسر ذلك على أن الخوارزمية تحسنت لحظياً لوجود العطل وأعطت إشارة بوجود إلغاء حجب الزاغل وبذلك يتمكن الزاغل من استعادة قدرته على إعطاء أوامر الفصل للقواطع. أي أنه إذا كان $PSI=1, FI=1$ فهذا مؤشر عن حدوث عطل أثناء تأرجح الاستطاعة وبالتالي يكون خرج الخوارزمية صفر منطقي، أما إذا كان $PSI=1, FI=0$ فهذا مؤشر عن تأرجح الاستطاعة وبالتالي يكون خرج الخوارزمية واحد منطقي

الخاتمة:

قدم هذا البحث خوارزمية عالية السرعة مخصصة لتمييز تأرجح الاستطاعة عن الأعطال ولتمييز الأعطال (العطل المتناظر خاصة) أثناء تأرجح الاستطاعة. تعتمد هذه الخوارزمية على تحويل الموجة لتحليل إشارتي الجهد والتيار النمطيين إلى عدة مستويات ترددية. تستخدم هذه الخوارزمية المستوى الترددي الأول للجهد (ذو التردد العالي) للكشف عن وجود العطل، بينما تستخدم المستوى التاسع للتيار (ذو التردد

القريب من تردد عمل النظام) للكشف عن وجود تأرجح استطاعة. لقد تم اختبار الخوارزمية المقدمة على نظام قدرة كهربائي نمذجي، أظهرت نتائج الاختبار كفاءة وسرعة عالية سواءً في كشف التأرجح أو العطل في مختلف حالات العمل.

الملحق

محددات النظام المدروس:

المولد المتوافق:

$S_n=600$ MVA, $V_n=22$ kV, $f_n=50$ Hz, $X_d=1.81$, $X'_d=0.3$, $X''_d=0.23$, $X_q=1.76$, $X''_q=0.25$,
 $X_l=0.18$, $T'_{do}=8$, $T''_{do}=0.03$, $T''_q=0.03$, $R_s=0.003$, $H=4.4$, $F=0$, $p=20$

المحول:

$S_n=600$ MVA, $f_n=50$ Hz, $V_1/V_2=22/400$ kV

خطوط النقل:

$Line_1=line_2=280$ km, $line_{R1_R2}=line_{R3_R4}=140$ km

$R_1=0.12$ Ohms/km, $L_1= 0.002334$ H/km, $C_1=1.0876*10^{-8}$ F/km

$R_0=0.309$ Ohms/km, $L_0= 0.0034404$ H/km, $C_0=7.751*10^{-9}$ F/km

المراجع

- [1] IEEE PSRC WG D6. (2005,June). Power Swing and Out-of-Step Considerations on Transmission Line.
- [2] NERC. (2013). Protection System Response to Power Swings.
- [3] Alstom Grid. (2011). NETWORK PROTECTION & AUTOMATION GUIDE.
- [4] G. Benmouyal, D. Hou, and D. Tziouvaras, Zero-setting power swing blocking protection, 2004. [Online Available]: http://www2.selinc.com/techpprs/6172_ZeroSetting_20050302.pdf
- [5] IEEE Power System Relaying Committee of the IEEE Power Engineering Society, Power swing and out-of-step considerations on transmission line, Rep. PSRCWG D6, Jul. 2005. [Online]. Available: <http://www.pes-psrc.org>
- [6] J. P. E. Mooney and N. Fischer, Application guidelines for power swing detection on transmission systems, in *Proc. Power Syst. Conf.*, 2006, pp. 159–168.
- [7] X. Lin, Y. Gao, and P. Liu, A novel scheme to identify symmetrical faults occurring during power swings, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 23, no. 1, pp. 73–78, Jan. 2008
- [8] C. Pang and M. Kezunovic, Fast distance relay scheme for detecting symmetrical fault during power swing, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 25, no. 4, pp. 2205–2212, Oct. 2010.
- [9] B. Mahamedi and J. G. Zhu, A novel approach to detect symmetrical faults occurring during power swings by using frequency components of instantaneous three-phase active power, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 27, no. 3, pp. 1368–1376, Jul. 2012.

- [10] A. P. Apostolov, D. Tholomier, and S. H. Richards, Superimposed components based sub-cycle protection of transmission lines, in *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Power Syst. Conf. Expo.*, 2004, vol. 1, pp. 592–597.
- [11] H. K. Zadeh and Z. Li, A novel power swing blocking scheme using adaptive neuro-fuzzy inference system, *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 78, pp. 1138–1146, 2008.
- [12] K. Seethalekshmi, S. N. Singh, and S. C. Srivastava, A classification approach using support vector machines to prevent distance relay maloperation under power swing and voltage instability, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 27, no. 3, pp. 1124–1133, Jul. 2012.
- [13] H. K. Karegar and B. Mohamedi, “A new method for fault detection during power swing in distance protection,” 6th International Conference on ECTI-CON 2009., pp. 230–233, 2009.
- [14] Dubey, Rahul; Samantaray, Subhransu. (2013). Wavelet singular entropy-based symmetrical fault-detection and out-of-step protection during power swing. *IET Generation, Transmission & Distribution*. Volume 7(10), 1123-1134.
- [15] S. M. Brahma, Distance relay with out-of-step blocking function using wavelet transform. *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 22, no. 3, pp.1360–1366, Jul. 2007.
- [16] D.C. Robertson, Wavelets and electromagnetic power system transients, *IEEE Transactions on Power Delivery* 11 (2) (1996) 1050–1058.
- [17] O. Rioul, M. Vetterli, Wavelet and signal processing, *IEEE Signal Processing Magazine* 8 (4) (1991) 14–38.
- [18] S. Gilbert, N. Truong, Wavelets and Filter Banks, Wellesley-Cambridge Press, USA, 1996.
- [19] A. A. Hajar; A high speed non-communication protection scheme for power transmission lines based of wavelet transform; *Electr. Syst. Res.* 96;194–200.