A Protection Scheme for Turn-to-Turn Faults in Three-Phase Two-Winding Transformers based on Wavelet Transform

Rami Ibrahim AlEid*

(Received 21 / 11 / 2024. Accepted 16 / 1 / 2025)

□ ABSTRACT □

Power transformers are one of the most important equipment in the electric power systems. Turn faults between their windings are the most faults that are difficult to detect by traditional methods (differential and automatic protection) in their early stages. So This research introduce a new protection scheme to detect these faults ,quickly and accurately, and protect against them in three phase two winding transformers based on wavelet transform(WT).

In this method, Measured currents from the transformer are processed by wavelet transform which acts as a multi-level band pass filter, to extract two distinct bands of frequencies; the first band is high while the second band is relatively lower. The spectral energies of the extracted signals are then calculated to form two discriminating signals of the relay (operative and restraint). Based on the ratio between these discriminating signals the relay can distinguish the faults in early stages.

To verify the introduced method, these faults were modeled and simulated using Alternative Transient Program (ATP), then applied the proposed method. The results of the modeling and simulation showed that the proposed method is able to detect turn faults in three phase two winding transformer at early stages and protect the transformer from these faults.

Keywords: Protection Scheme, two-winding transformer, Turn-to-turn faults, Wavelet transform, modeling and simulation, ATP.

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

*MSc. Department of Electrical Power Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Latakia University, Lattakia, Syria. E-mail: ramiead2512@gmail.com

خطة حماية من القصر بين اللفات للمحولات الثلاثية الطور الثنائية الملفات بالاعتماد على تحويل المويجة

رامي ابراهيم العيد*

(تاريخ الإيداع 21 / 11 / 2024. قُبِل للنشر في 16/ 1 / 2025)

□ ملخّص □

تُعد محولات الاستطاعة من أهم عناصر نظام القدرة الكهربائي، وتُعد أعطال القصر بين لفات ملفاتها من الأعطال التي يصعب اكتشافها بالطرق التقليدية (الحماية التفاضلية والغازية) في مراحلها الأولية. لذا، يقدم هذا البحث خطة حماية جديدة لاكتشاف هذه الأعطال، بسرعة ودقة عاليتين، والحماية منها في محولات الاستطاعة الثلاثية الطور الثنائية الملفات بالاعتماد على تحويل المويجة (WT: Wavelet Transform).

لقد تم في هذه الخطة تطبيق تحويل المويجة (الذي يعمل كمرشح حزمة تمرير متعدد المستويات) على تيارات الأعطال المقاسة عند أطراف المحول وذلك لاستخراج حزمتين مختلفتين من الترددات منها، الحزمة الأولى عالية الترددات بينما الحزمة الثانية منخفضة الترددات نسبياً، ثم تم حساب الطاقات الطيفية لهاتين الحزمتين لتكوين اشارة العمل واشارة الكبح للزاجل، وبناءً على نسبتيهما يستطيع الزاجل اكتشاف العطل في مراحله الأولية وحماية المحول من القصر بين اللفات.

للتحقق من فعالية خطة الحماية المقدمة في هذا البحث تم نمذجة ومحاكاة هذه الأعطال باستخدام برنامج محاكاة الحالات العابرة الكهرومغناطيسية (ATP: Alternative Transient Program)، ومن ثم تم تطبيق الخطة المقدمة. لقد أظهرت نتائج النمذجة والمحاكاة بأن الطريقة المقدمة تستطيع اكتشاف أعطال القصر بين لفات ملفات المحولات الثلاثية الطور الثنائية الملفات والحماية منها في المرحلة الأولية لحدوثها بسرعة ودقة عاليتين.

الكلمات المفتاحية: خطة حماية، المحولات الثنائية الملفات، القصر بين اللفات، تحويل المويجة، النمذجة والمحاكاة، ATP.

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

* **ماجستير - قسم هندسة الطاقة الكهربائية – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية.**
بريد الكتروني : ramiead2512@gmail.com

مقدمة:

تُعد محولات الاستطاعة من أهم عناصر نظام القدرة الكهربائي، وتُعد أعطال القصر بين لفات ملفاتها من الأعطال التي يصعب اكتشافها بالطرق التقليدية (الحماية التفاضلية والحماية الغازية) في مراحلها الأولية. لهذا اتجه الباحثون نحو ايجاد طرق جديدة لاكتشاف هذه الأعطال والحماية منها بسرعة ودقة عاليتين.

بهذا الشأن، قدم باحثون في المرجع [1] نموذجاً رياضياً لمحول استطاعة، ومن ثم قاموا بإجراء عدة حالات قصر بين اللفات عليه (رياضياً) لمعرفة ممانعة الملف عند القصر. ولاكتشاف القصر بين اللفات تجريبياً تم إجراء الاختبار على محول حقيقي عن طريق تطبيق إشارة ترددية عليه، ومن ثم تم تحليل الاستجابة الترددية ومقارنة النتائج مع قيم الممانعة المحسوبة رياضياً. لقد استطاعت هذه الطريقة تحديد موقع القصر بين اللفات، وكافة الأعطال الميكانيكية والكهربائية للملفات، وكذلك أعطال القلب المغناطيسي لمحول الاستطاعة. لكن، لا يمكن لهذه الطريقة اكتشاف القصر بين اللفات في الزمن الحقيقي، لذا من الممكن أن يتطور القصر إلى درجة خطيرة قد تؤثر على أداء المحول قبل أن يتم اكتشافه.

قام باحثون في المرجع [2] بإجراء اختبار على محول استطاعة بهدف دراسة الإنفراغات الجزئية التي تنتج عن تحلل المادة العازلة لملفات المحول. حيث من خلال معرفة كمية هذه الإنفراغات تمكنوا من اكتشاف نوع العطل في المحول وتحديد مكان حدوثه. لكن، يتم إجراء هذا الاختبار عندما يكون محول الاستطاعة خارج الخدمة، لذلك لا يمكن الاكتشاف الفوري عن حدوث القصر بين اللفات.

قام باحثون في المرجع [3] بالاعتماد على قياس التوافقية الثالثة المتواجدة في تيار الخط لاكتشاف القصر بين اللفات. تتميز هذه الطريقة بالحساسية العالية في الكشف عن العطل الداخلي في المحول والحماية منه. لكنها، تعد صالحة للاستخدام فقط مع المحولات ذات الحيادي المعزول، كما أنها غير قادرة على تحديد موقع العطل بدقة، وتتأثر بأخطاء الأجهزة المساعدة في المحول.

قدم باحثون في المرجع [4] طريقة تعتمد على قياس كثافة الغازات المنطلقة (الناتجة عن تحلل المادة العازلة الزيتية في المحول) عند حدوث قصر بين اللفات، حيث تعد هذه الغازات مؤشراً على حدوث العطل في المحول. لكن، تعد هذه الطريقة بطيئة نسبياً، حيث أنه من الممكن أن يتطور هذا العطل إلى مراحل خطيرة قبل أن يتم اعطاء أمر الفصل إلى قواطع الدارة ليتم فصل المحول المعطل.

قدّم باحثون في المرجع [5] طريقة لاكتشاف القصر بين لفات ملفات المحول ذي التوصيل نجمي/ مثلثي تعتمد على قياس مركبة التتابع الصفري للجهود والتيارات. لا تتأثر هذه الطريقة بتيار الاندفاع المغناطيسي عند العمل في الزمن الحقيقي، لكنها غير قادرة على تحديد موقع العطل، وتتأثر بشكل كبير بأخطاء التجهيزات المساعدة في المحول.

قام باحثون في المرجع [6] بإضافة بعض الحساسات بالقرب من ملفات المحول لتتحسس أي تغير في الفيض المغناطيسي. حيث يؤدي القصر بين اللفات إلى تشوه الفيض المغناطيسي، مما يؤدي إلى تنبيه الحساسات وإعطاء إشارة بوجود قصر بين اللفات. تتميز هذه الطريقة بقدرتها على تحديد موقع العطل بدقة، لكنها تحتاج إلى تعديلات في تصميم المحول وهذا أمر غير مرغوب به لدى مصممي المحولات.

استخدم باحثون في المرجع [6] مركبة التتابع السالب للتيار لاكتشاف القصر بين اللفات. تعتمد هذه الطريقة على تحليل التيارات عند أطراف المحول، ففي حالة العمل الطبيعي لا يوجد أي أثر لمركبة التتابع السالب، أما في حالة القصر بين اللفات يحصل ارتفاع مفاجئ في مركبة التتابع السالب للتيار. لكن، يؤدي حدوث أي عطل خارج منطقة

حماية المحول (وكذلك التحميل غير المتوازن للمحول) إلى ظهور مركبة التتابع السالب. لذا، قدم الباحثون في هذا المرجع طريقة للتمييز بين الأعطال الواقعة داخل منطقة حماية المحول وخارجها، تعتمد هذه الطريقة على المقارنة بين نسبة مركبة التتابع السالب ونسبة تحويل المحول، ففي حالة الأعطال الخارجية تكون هاتين النسبتين متساويتين، بينما تكون هاتين النسبتين مختلفتين في حالة الأعطال الداخلية. لا تتأثر هذه الطريقة بالمحتوى التوافقي لتيارات الخط، وتحتاج فقط إلى قيم التيارات عند أطراف المحول.

طوّر باحثون في المرجع [8] خوارزمية لاكتشاف القصر بين لفات ملفات المحول تعتمد على التيارات الزائدة المرافقة للعطل. لقد تم في هذه الخوارزمية حساب مركبة التتابع الموجب والسالب لهذه التيارات الزائدة، ثم تم إيجاد الفرق بين القيم التفاضلية لهذه المركبات قبل وبعد العطل. بناءً على ذلك، تعد هذه الخوارزمية مستقلة عن شروط عمل المحول، وبالتالي لها موثوقية كبيرة في الأداء، مع إمكانية تحديد عتبة الفصل. يمكن لهذه الطريقة اكتشاف القصر بين اللفات بنسبة قصر قد تصل إلى 1% من اللفات.

قدم باحثون في المرجع [9] خوارزمية جديدة للحماية التفاضلية للمحولات تعتمد على قياس مركبة التتابع السالب من القيم اللحظية للتيارات، التي تم إعادة تشكيلها في المجال الزمني. لتعزيز موثوقية الخوارزمية المقدمة، قام الباحثون بدمج إشارة الكبح مع إشارة التشغيل ذات مركبة التتابع السالب خلال الزمن الحقيقي. كما اقترحوا طريقة للكبح تعتمد على التوافقيات الموجودة في القيم اللحظية للتيارات، وذلك لزيادة استقرار نظام الحماية لأجل الأعطال الخارجية عند إشباع محولات التيار، ثم قاموا بمقارنة أداء هذه الخوارزمية مع أداء خوارزمية الحماية التفاضلية وأداء خوارزمية الحماية التفاضلية ذات التتابع السالب التقليدية. لقد أظهرت النتائج سرعة هذه الخوارزمية في اكتشاف القصر بين اللفات بنسبة قصر قد تصل إلى 1% من ملف المحول. لكن، هناك عدة مآخذ أساسية على طرق قياس مركبة التتابع السالب المستخدمة في اكتشاف القصر بين اللفات، نذكر منها: عدم قدرة هذه الطرق على تحديد مكان حدوث العطل والطور المصاب بالعطل، لا يمكن أن تعمل هذه الطرق كخطة حماية أساسية وإنما تعمل كخطة حماية داعمة للحماية التفاضلية، العمل الخاطئ في حال عمل المحول على فراغ.

قدم باحثون في المرجع [10] طريقة لاكتشاف القصر بين اللفات تعتمد على مراقبة المتغيرات الكهربائية في المحول. حيث قاموا بحساب السماحية التفاضلية واعتبارها مؤشراً لحدوث العطل، ثم قاموا باختبارها تجريبياً على محول استطاعته 5 KV. تمتاز هذه الطريقة بالكشف الفعال عن القصر بين اللفات، وبأنها لا تتأثر بتغير الأحمال والأعطال الخارجية. ولكن، لا تستطيع هذه الطريقة التمييز فيما إذا كان العطل حادث على الطرف الأولي أو على الطرف الثانوي للمحول.

قدم باحثون في المرجع [11] خطة حماية تفاضلية متكيفة للمحولات تستخدم تحويل المويجة لتحليل الاشارات العابرة. لقد تم الاعتماد على تباين معاملات طيف الإشارة في تحليل الاضطرابات، ثم تم مقارنة أداء الخطة المقدمة لأجل مويجات أم مختلفة. لكن، تتطلب هذه الطريقة زمن تشغيل قدره 15 ميللي ثانية.

قام باحثون في المرجع [12] باستخدام معامل اكتشاف العطل لمعرفة فيما إذا كان العطل يقع داخل أم خارج منطقة حماية المحول. لقد أظهرت نتائج الاختبار أن هذا المعامل قادر على اكتشاف القصر بين اللفات بنسبة قد تصل إلى 2%، إلا أن لهذه الطريقة تعقيد حسابي كبير.

استخدم باحثون في المرجع [13] تحويل المويجة لتحليل إشارة تيار حيادي المحول في المجال الزمني ـ الترددي. تميزت هـــــذه الطريقة بقدرتها على الاكتشاف المباشر واللحظي لحدوث القصر بين اللفات، وبإمكانية التنبؤ بمكان

حدوث القصر في الملفات. لكن، هذه الطريقة غير صالحة للاستخدام مع المحولات ذات التوصيل المثلثي كونها تعتمد على تحليل إشارة تيار حيادي المحول.

استخدم باحثون في المرجعين [14–15] تحويل المويجة لاستخراج مكونات الإشارة في الحالة العابرة، حيث استخدموا طيف الإشارة كمعيار للتمييز بين العطل الداخلي والعطل الخارجي. لقد أثبتت نتائج الاختبار فعالية هذه الطريقة في اكتشاف الأعطال، ولكن لم يتطرق البحث الا لحالة عطل لفة مع الأرض فقط.

لتمييز الأعطال الداخلية في المحول، قدم باحثون في المرجع [16] طريقة تعتمد على تحويل المويجة لمراقبة وتحليل المركبات العابرة للتيارات وعلى حساب التباين في مستواها. حيث، يكون هذا التباين عالياً في حالة العطل الداخلي على خلاف الحالات العابرة الأخرى، مما يؤدي إلى سرعة في تمييز الأعطال الداخلية ومنها القصر بين اللفات. تميزت هذه الطريقة بقدرتها على تحديد الأنواع المختلفة للأعطال الداخلية في محولات الاستطاعة بشكل صحيح، وتمييز القصر بين اللفات بشكل سريع، كما أنها تحافظ على استقرار نظام الحماية خلال الاندفاع المغناطيسي والأعطال الخارجية، وأنها بسيطة وغير معقدة. ولكن تم تطبيق الطريقة على نسبة 5% فقط من اللفات التي حدث عليها القصر.

اقترح باحثون في المرجع [17] طريقة لاكتشاف القصر بين اللفات خلال الاندفاع المغناطيسي لمحول توزيع أحادي الطور، تعتمد هذه الطريقة على تحليل تيار المغنطة عند إقلاع المحول تحت ظروف العمل الطبيعية وظروف العطل، وذلك باستخدام تحويل المويجة. حيث استخدموا مصفوفات الارتباط التي بدورها استخدمت للحصول على طيف القدرة في المجال الزمني – الترددي، الذي بدوره استخدم لتحديد نسبة القصر بين اللفات خلال الاندفاع المغناطيسي. لقد بينت نتائج الاختبار لهذه الطريقة فعاليتها في اكتشاف القصر بين اللفات بنسبة قصر قد تصل إلى 2% من الملف خلال الاندفاع المغناطيسي. لكن، لم يطبق الباحثون هذه الطريقة على المحولات ثلاثية الطور، كما أن لها تعقيد حسابي كبير ولا يمكن تطبيقها في الواقع العملي.

بناءً على ما سبق، يقدم هذا البحث خطة حماية جديدة، سريعة ودقيقة، لاكتشاف أعطال القصر بين لفات ملفات محولات الاستطاعة الثلاثية الطور الثنائية الملفات والحماية منها بالاعتماد على تحويل المويجة (مرشح حزمة تمرير متعدد المستويات). يتم في هذه الطريقة تطبيق تحويل المويجة على تيارات الأعطال المقاسة عند أطراف المحول وذلك لاستخراج حزمتين مختلفتين من الترددات، الحزمة الأولى عالية الترددات بينما الحزمة الثانية منخفضة الترددات نسبياً، ثم يتم حساب الطاقات الطيفية لهاتين الحزمتين لتكوين اشارة العمل واشارة الكبح للزاجل، وبناءً على نسبتيهما يستطيع الزاجل اكتشاف العطل في مراحله الأولية وحماية المحول من القصر بين اللفات.

أهمية البحث وأهدافه:

تأتي أهمية هذا البحث من ضرورة تحقيق الموثوقية في أداء محولات الاستطاعة الثلاثية الطور الثنائية الملفات واستمرارها في الخدمة خلال عمرها الفني. أما هدف البحث فهو اعداد خطة حماية جديدة سريعة ودقيقة تعتمد على تحويل المويجة لحماية محولات الاستطاعة الثلاثية الطور الثنائية الملفات تكون قادرة على اكتشاف القصر بين لفات ملفاتها في مراحلها الأولية، وفصل المحول وإجراء الصيانة اللازمة له قبل أن يتطور العطل إلى مستوى خطير يستدعي استبدال المحول.

طرائق البحث ومواده:

لقد تمّ في هذا البحث نمذجة أعطال القصر بين لفات ملفات محول استطاعة ثلاثي الطور ثنائي الملفات على الحاسوب الشخصي باستخدام برنامج محاكاة الحالات العابرة الكهرومغناطيسية (ATP)، ثم تم تقديم خطة حماية لاكتشاف هذه الأعطال والحماية منها، ثم تم كتابة الكود البرمجي في بيئة ماتلاب (MATLAB) البرمجية، ثم تم اختبار الخطة المقدمة من خلال محاكاة العديد من أعطال القصر بين لفات ملفات المحول.

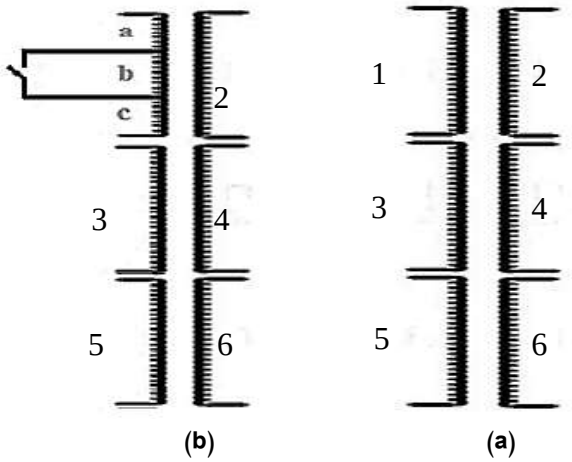
1- النمذجة والمحاكاة لأعطال القصر بين لفات ملفات المحول باستخدام البرنامج ATP:

1-1 نمذجة المحول في حالة العمل الطبيعي:

من أجل نمذجة المحول في حالة العمل الطبيعي، تم تمثيله على شكل دارات (R , L) ذات اقتران متبادل، كما هو مبين في الشكل (1-a). يُستخدم البرنامج الفرعي ATP/BCTRAN لتوليد بارامترات المحول (R , L) لأجل حالة العمل الطبيعي اعتماداً على بيانات الاختبارات القياسية (اختبارات الدارة المفتوحة والدارة المقصورة للتسلسلات الموجبة والصفرية). حيث يقوم البرنامج الفرعي ATP/BCTRAN بإنشاء المصفوفتين [R] ، [L]، تكون أبعاد هاتين المصفوفتين 6×6 في حالة العمل الطبيعي لمحول استطاعة ثلاثي الطور ثنائي الملفات. حيث، Ri و Li هما المقاومة والمحارضة الذاتية للفة i، على التتالي، Mij هي المحارضة المتبادلة بين اللفتين i, j. من الجدير ذكره أن البرنامج الفرعي ATP/BCTRAN لا يأخذ عدم التماثل المغناطيسي بالحسبان أي أن (Mij = Mji) [18]. بعد إنشاء المصفوفتين [R]، [L]، يقوم بإنشاء ملف ليتم قراءته مباشرة بواسطة البرنامج ATP، عندها يتم التعامل مع المحول على أنه أفرع R , L ذات اقتران متبادل.

1-2 نمذجة ومحاكاة عطل القصر بين اللفات:

لتمثيل حالة عطل قصر بين اللفات نجزئ الملف المصاب بالعطل إلى ثلاث أجزاء A, B, C، كما هو مبين في الشكل (1-b). وبناءً على ذلك، يتم تعديل أبعاد المصفوفتين [R]، [L] لتصبحان في حالة القصر بين اللفات (8×8) [19].



الشكل (1): (a) تمثيل محول الاستطاعة في حالة العمل الطبيعي كدارات (R , L) ذات اقتران متبادل
(b): تمثيل حالة قصر بين اللفات على ملف الطرف الأولي للمحول (الطور A).

$$[R] = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_6 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{15} & M_{16} \\ M_{21} & L_2 & M_{23} & M_{24} & M_{25} & M_{26} \\ M_{31} & M_{32} & L_3 & M_{34} & M_{35} & M_{36} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & L_4 & M_{45} & M_{46} \\ M_{51} & M_{52} & M_{53} & M_{54} & L_5 & M_{56} \\ M_{61} & M_{62} & M_{63} & M_{64} & M_{65} & L_6 \end{bmatrix} \quad (2)$$

يتم حساب عناصر المصفوفتان [R]، [L] المعدلتان باستخدام العلاقات التالية [19]:

$$R_a = \frac{n_a}{n_1} R_1 \quad (3)$$

$$R_b = \frac{n_b}{n_1} R_1 \quad (4)$$

$$R_c = \frac{n_c}{n_1} R_1 \quad (5)$$

حيث:

R_1: مقاومة الملف الأولي في الطور A.

N_1: عدد لفات الملف الأولي في الطور A.

n_a: عدد لفات جزء الملف A، n_b: عدد لفات جزء الملف B، n_c: عدد لفات جزء الملف C.

$n_a + n_b + n_c = n_1$.

$$M_{ai} = \frac{M_{1i}}{1+\frac{1}{K_1}+\frac{1}{K_2}} \quad (6)$$

$$M_{bi} = \frac{M_{1i}}{1+K_1+\frac{K_1}{K_2}} \quad (7)$$

$$M_{ci} = \frac{M_{1i}}{1+K_2+\frac{K_2}{K_1}} \quad (8)$$

حيث: $K_1 = \frac{n_a}{n_b}$ ، $K_2 = \frac{n_a}{n_c}$

وبناء على ذلك، تصبح المصفوفتان [R]، [L] بعد التعديل كما يلي:

$$[R] = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_6 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[L]=\begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} & M_{a2} & M_{a3} & M_{a4} & M_{a5} & M_{a6} \\ M_{ba} & L_b & M_{bc} & M_{b2} & M_{b3} & M_{b4} & M_{b5} & M_{b6} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_c & M_{c2} & M_{c3} & M_{c4} & M_{c5} & M_{c6} \\ M_{2a} & M_{2b} & M_{2c} & L_2 & M_{23} & M_{24} & M_{25} & M_{26} \\ M_{3a} & M_{3b} & M_{3c} & M_{32} & L_3 & M_{34} & M_{35} & M_{36} \\ M_{4a} & M_{4b} & M_{4c} & M_{42} & M_{43} & L_4 & M_{45} & M_{46} \\ M_{5a} & M_{5b} & M_{5c} & M_{52} & M_{53} & M_{54} & L_5 & M_{56} \\ M_{6a} & M_{6b} & M_{6c} & M_{62} & M_{63} & M_{64} & M_{65} & L_6 \end{bmatrix} \quad (10)$$

2- خطة الحماية من أعطال القصر بين اللفات للمحولات الثنائية الملفات:

يبين الشكل (2) المخطط الصندوقي لخطة الحماية المقدمة، وفيما يلي شرح لخطواتها الرئيسية:

الخطوة الأولى

اجراء اختبارات العمل على فراغ والدارة القصيرة للتتابع الموجب والصفري للمحول المدروس، ومن ثم ادخال هذه البيانات إلى البرنامج الفرعي BCTRAN الملحق ببرنامج ATP للحصول على المصفوفتين [R]، [L]، اللتان تمثلان نموذج المحول في حالة العمل الطبيعي، ومن ثم الحصول على تيارات ملفات الطرفين الأولي والثانوي في حالة العمل الطبيعي.

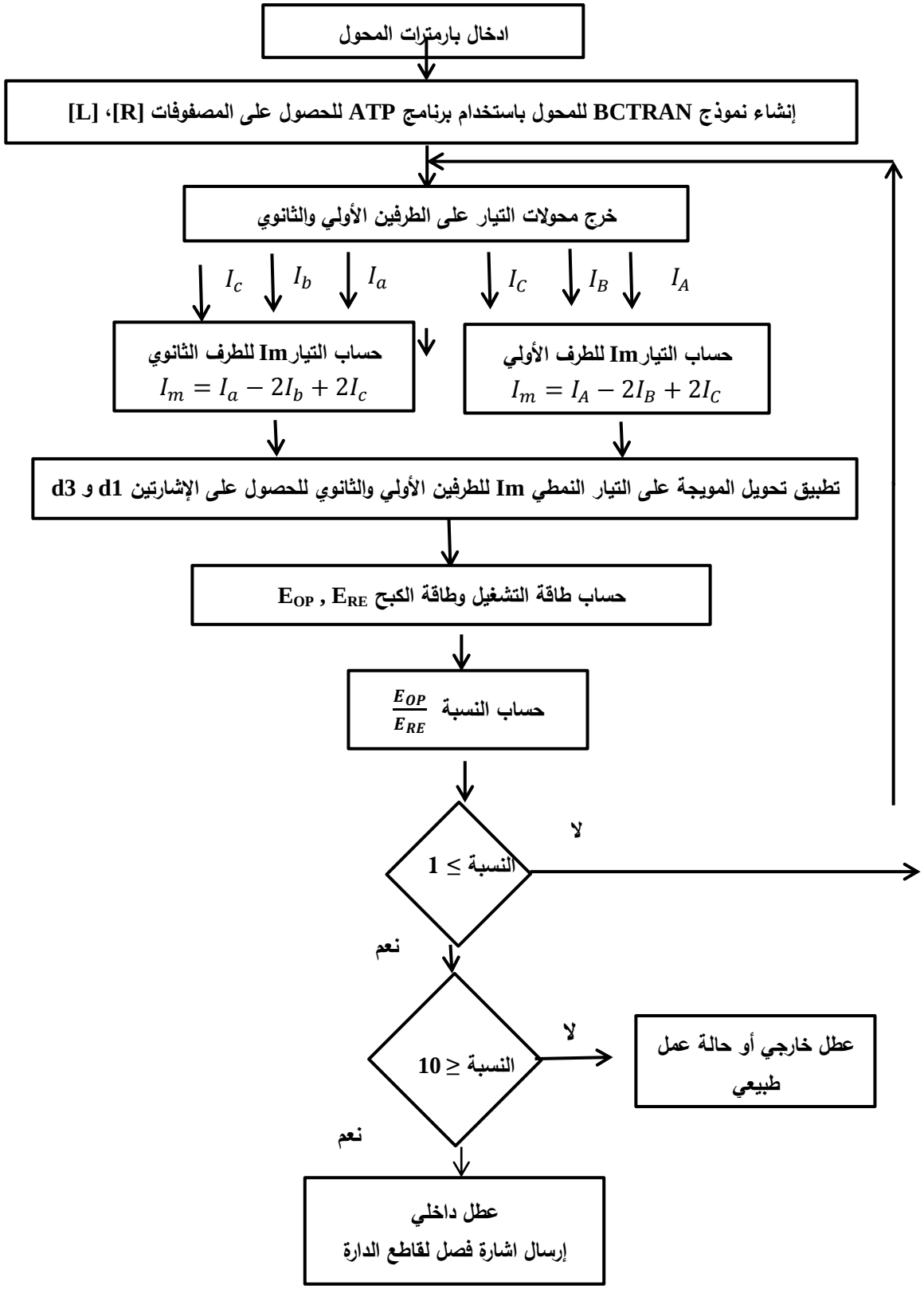
الخطوة الثانية

تعديل المصفوفتين [R]، [L] باستخدام برنامج ماتلاب المنجز في هذا البحث وادخال هاتين المصفوفتين من جديد إلى المحول وذلك لأجل محاكاة حالات عطل القصر بين اللفات.

الخطوة الثالثة

تقطيع اشارة التيار المقاس ومن ثم تطبيق تحويل المويجة عليها. لقد تم في هذا البحث استخدام تردد تقطيع للإشارة قدره 20kHz. سيكون خرج تحويل المويجة في المستوى الأول من الترشيح d1، وهي إشارة ذات مجال ترددي قدره (10–5kHz)، وهي خرج مرشح تمرير الحزمة العالية الترددات، ثم تكرر هذه العملية على إشارة خرج مرشح تمرير الحزمة المنخفض الترددات A1 لنحصل على المستوى الثاني من الترشيح d2 وهو إشارة ذات مجال ترددي قدره (5–2.5kHz، ثم تكرر هذه العملية على إشارة خرج مرشح تمرير الحزمة المنخفض الترددات A2 لنحصل على المستوى الثالث من الترشيح d3 وهو إشارة ذات مجال ترددي قدره (2.5–1.25kHz) وهكذا دواليك. ما يهمنا في بحثنا هو المستويين الأول والثالث d1 و d3 [21, 20] .

يؤدي الاختيار المناسب للمويجة الأم من ناحية السرعة والتحديد (الترددي – الزمني) دوراً هاماً في جودة أداء الخوارزمية المقترحة. لذا، اخترنا في هذا البحث مويجة أم تدعى مويجة دوبتشي 4، التي يرمز لها اختصاراً بـ db4، نظراً لخواصها المناسبة لتحليل الإشارات العابرة من ناحية السرعة والقدرة على التحديد (الترددي – الزمني).



الشكل (2): المخطط الصندوقي لخطة الحماية المقدمة

الخطوة الرابعة

يعتبر وجود التفاصيل d1 دليل على حالة عمل غير طبيعي عند زيادتها عن قيمة محددة مسبقاً، وبناءً على ذلك يتم حساب الطاقة الطيفية (E_H , E_L) للإشارات (I_H , I_L) بالترتيب، كل 10عينات (عرض النافذة المتحركة) وذلك للحصول على طاقة العمل وطاقة الكبح للزاجل وذلك اعتماداً على العلاقات التالية [21, 20]:

$$E_H(n) = E_{op}(n) = S \sum_{k=n-m}^{n} I_H^2(K) \qquad (11)$$

$$E_L(n) = E_{re}(n) = \sum_{k=n-m}^{n} I_L^2(K) \qquad (12)$$

حيث:

n : العينة الحالية،

m : عدد العينات في النافذة المتحركة،

S : عامل تناسب والذي تم اختياره 20 في هذه الدراسة.

الخطوة الخامسة

حساب النسبة بين الطاقات الطيفية E_{op} و E_{re} للتيارات لأجل كل نافذة متحركة m [21, 20] :

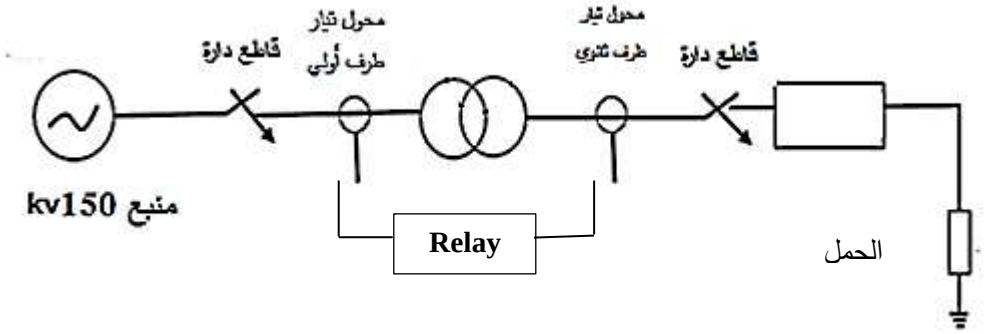
$$Ratio(n) = \frac{E_{op}(n)}{E_{re}(n)} \qquad (13)$$

إذا كانت هذه النسبة أكبر أو تساوي الواحد فهذا مؤشر على وجود عطل عندها يقوم الزاجل بإعطاء أمر الفصل لقواطع الدارة، وإلا يتم تكرار العملية من الخطوة الثالثة.

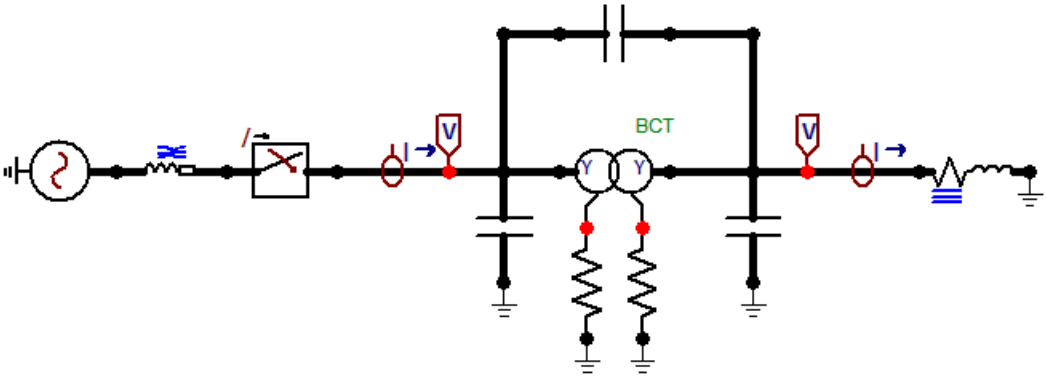
3- اختبار خطة الحماية المقدمة:

لاختبار خطة الحماية المقدمة تم تطبيقها على المحول المبين في النظام الاختباري المبين في الشكل (3). بيانات هذا النظام الاختباري مبينة على الشكل. يبين الشكل (4) نمذجة هذا النظام الاختباري باستخدام البرنامج ATP. حيث تم اجراء اختبارات العمل على فراغ والدارة القصيرة للتتابع الموجب والصفري للمحول المدروس، ومن ثم تم ادخال هذه البيانات إلى البرنامج الفرعي BCTRAN الملحق ببرنامج ATP للحصول على المصفوفتين [R]، [L]، اللتان تمثلان نموذج المحول في حالة العمل الطبيعي، ومن ثم الحصول على تيارات ملفات الطرفين الأولي والثانوي في حالة العمل الطبيعي. ومن ثم تم تعديل المصفوفتين [R]، [L] باستخدام برنامج ماتلاب المنجز في هذا البحث وادخال هاتين المصفوفتين من جديد إلى المحول وذلك لأجل محاكاة حالات عطل القصر بين اللفات. ثم تم تطبيق برنامج ماتلاب المنجز في هذا البحث لاختبار خطة الحماية المقدمة.

محول 150MVA
150/70 Kv
Y/Y



الشكل (3): مخطط الخط الواحد للنظام الاختباري المدروس

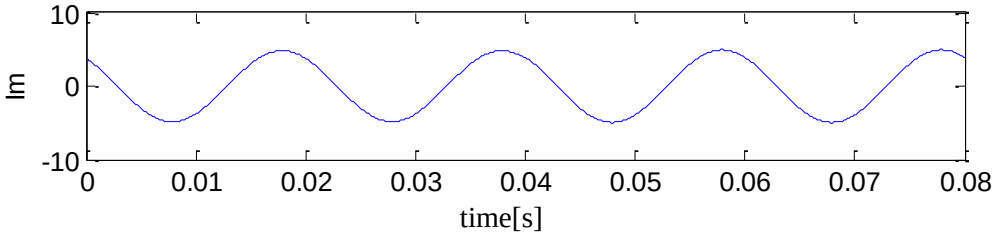


الشكل (4): نمذجة النظام الاختباري المدروس باستخدام البرنامج ATP

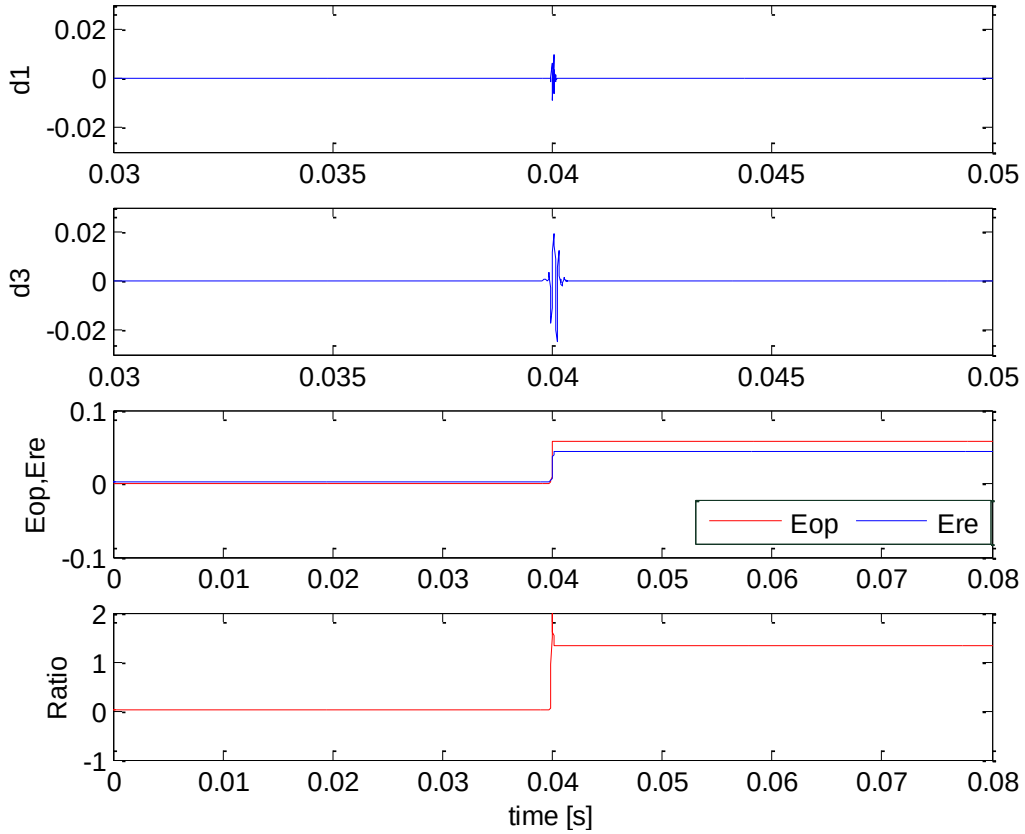
3-1- اختبار خطة الحماية لأجل قصر بين اللفات:

3-1-1 حالة قصر بين اللفات على الطرف الأولي للطور A بنسبة 1%:

تبين الأشكال (5) و (6) التيار النمطي Im الناتج عن تيارات الطرف الأولي والإشارات d1، d3، E_{OP}، E_{RE} وإشارة الفصل عند حدوث عطل قصر بين اللفات بنسبة 1% من ملف الطور A على الطرف الأولي في اللحظة الزمنية 0.04 ثانية. بما أن قيمة إشارة الفصل Ratio بعد حدوث العطل أقل من 10، فإن العطل يقع داخل منطقة الحماية للمحول.



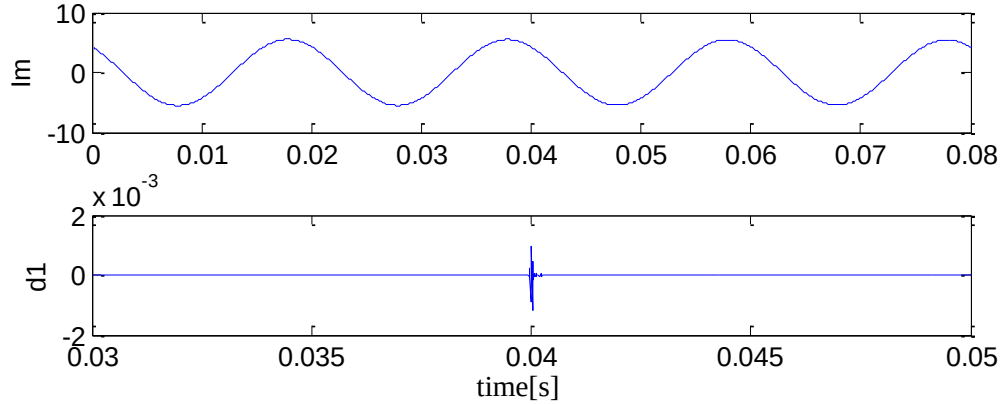
الشكل (5): التيار النمطي Im الناتج عن تيارات الطرف الأولي عند حدوث قصر بين اللفات على الطرف الأولي للطور A بنسبة 1%



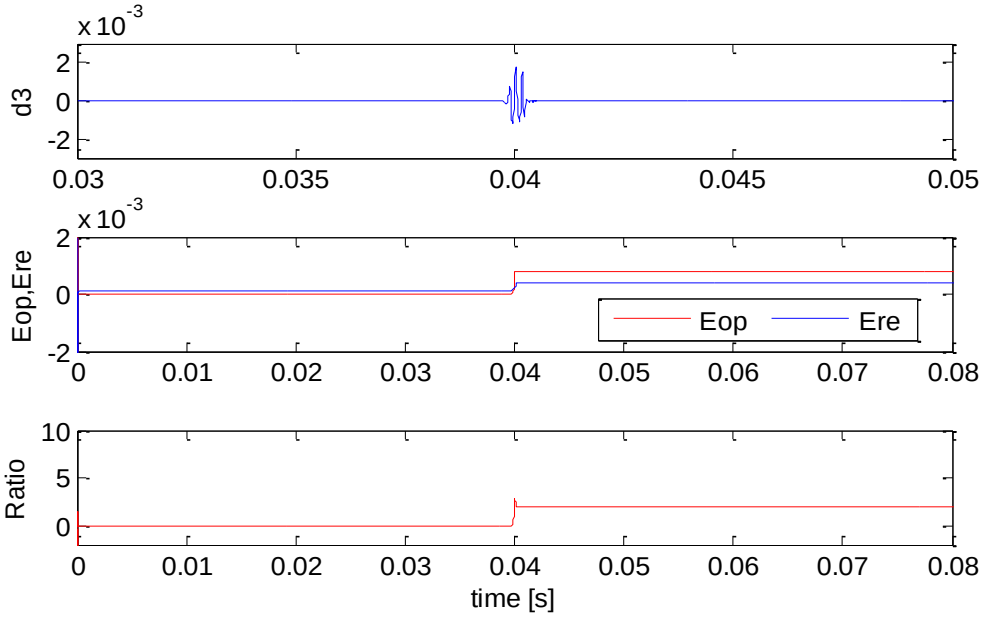
الشكل (6): الإشارات d1, d3, Eop, Ere وإشارة الفصل عند حدوث قصر بين اللفات على الطرف الأولي للطور A بنسبة 1%

3-1-2 حالة قصر بين اللفات على الطرف الثانوي للطور A بنسبة 2%:

تبين الأشكال (7) و (8) التيار النمطي Im الناتج عن تيارات الطرف الثانوي والإشارات d1، d3، E_{OP}، E_{RE} وإشارة الفصل عند حدوث عطل قصر بين اللفات بنسبة 2% من ملف الطور A على الطرف الثانوي في اللحظة الزمنية 0.04ثانية. بما أن قيمة إشارة الفصل Ratio بعد حدوث العطل أقل من 10، فإن العطل يقع داخل منطقة الحماية للمحول.



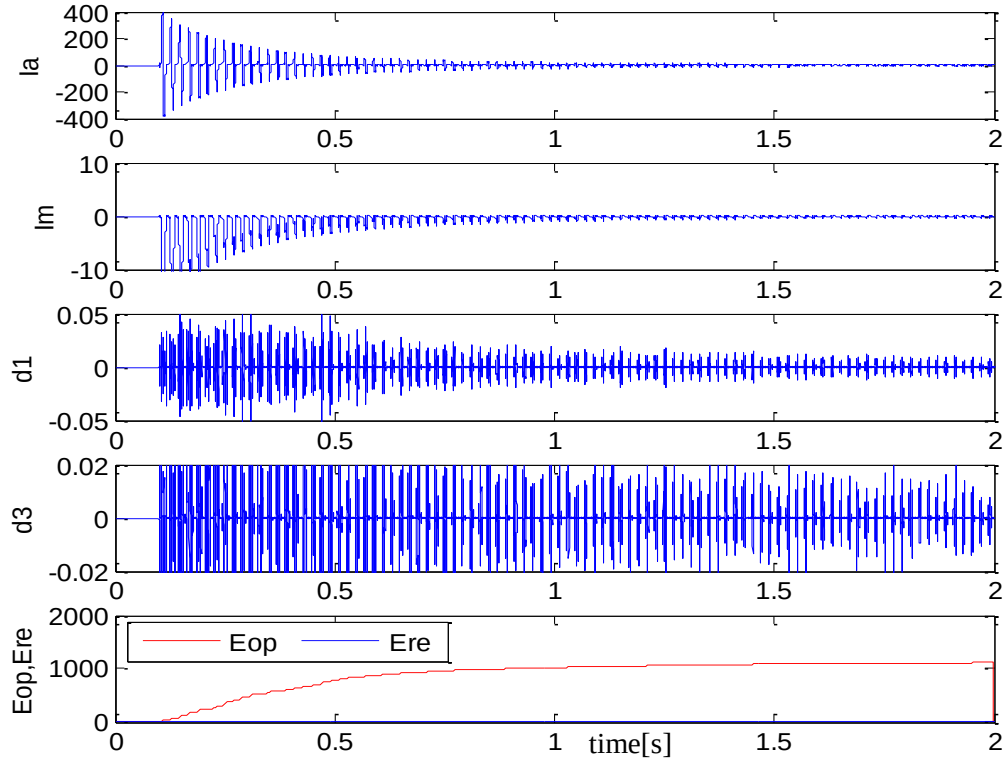
الشكل (7): التيار النمطي Im الناتج عن تيارات الطرف الثانوي والإشارة d1 عند حدوث قصر بين اللفات على الطرف الثانوي للطور A بنسبة 2%



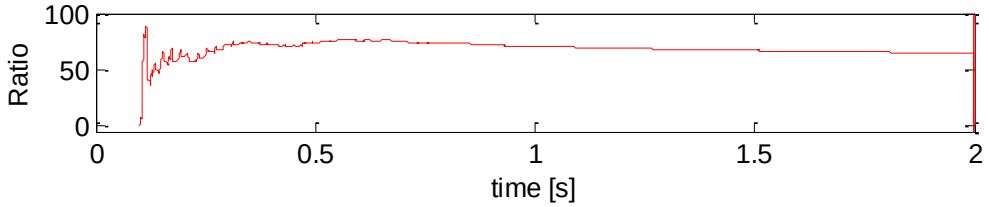
الشكل (8): الإشاراتd3, Eop, Ere وإشارة الفصل عند حدوث قصر بين اللفات على الطرف الثانوي للطور A بنسبة 2%

3-1-3 حالة الاندفاع المغناطيسي:

تبين الأشكال (9) و (10) التيار النمطي Im الناتج عن تيارات الطرف الأولي خلال الاندفاع المغناطيسي والإشارات d1، d3، E_{OP}، E_{RE} وإشارة الفصل بحالة الاندفاع المغناطيسي. تظهر النتائج بأن خطة الحماية المقترحة لا تتأثر بالاندفاع المغناطيسي كون تردد الإندفاع المغناطيسي مختلف جداً عن التردد المستخدم في الطريقة المقدمة.



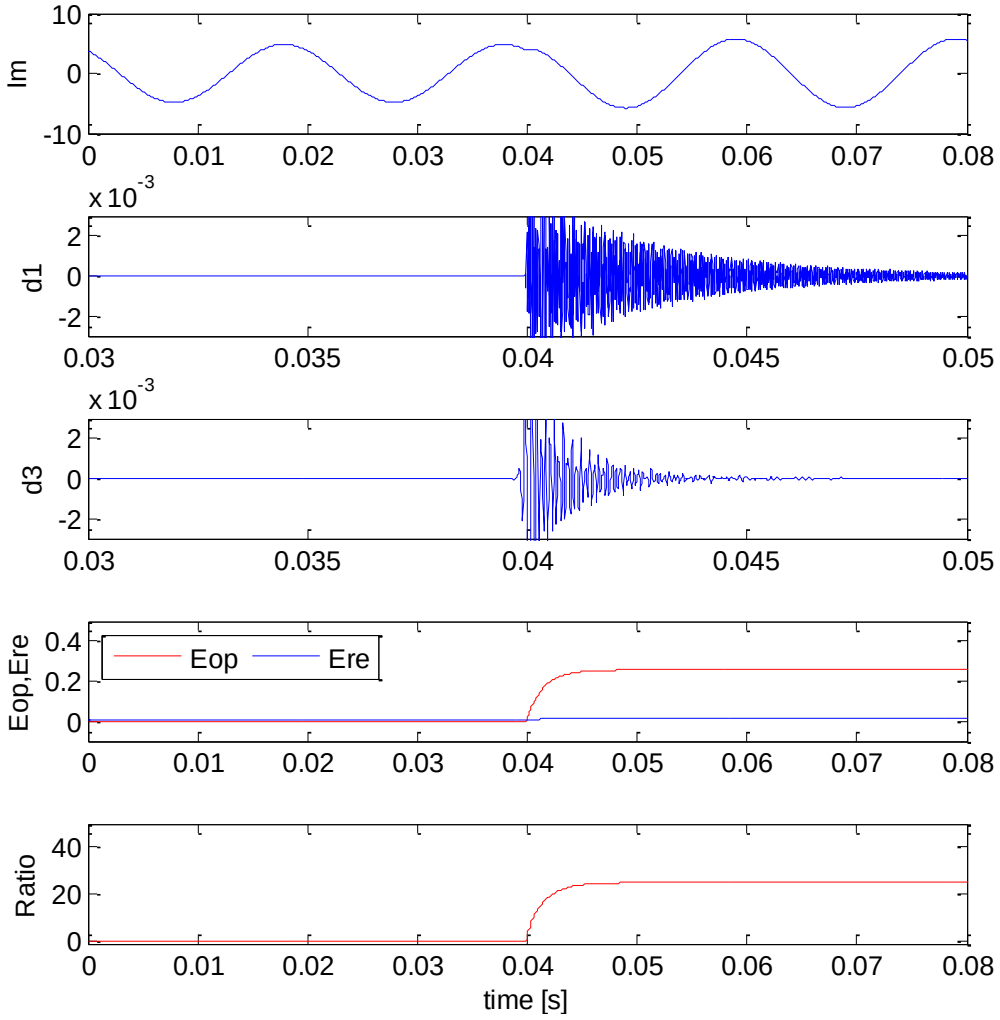
الشكل (9): التيار Ia والتيار النمطي Im الناتج عن تيارات الطرف الأولي والإشارات d1, d3, Eop, Ere بحالة الإندفاع المغناطيسي



الشكل (10): إشارة الفصل بحالة الإندفاع المغناطيسي

3-1-4 حالة العطل الخارجي (قصر طور مع الأرض):

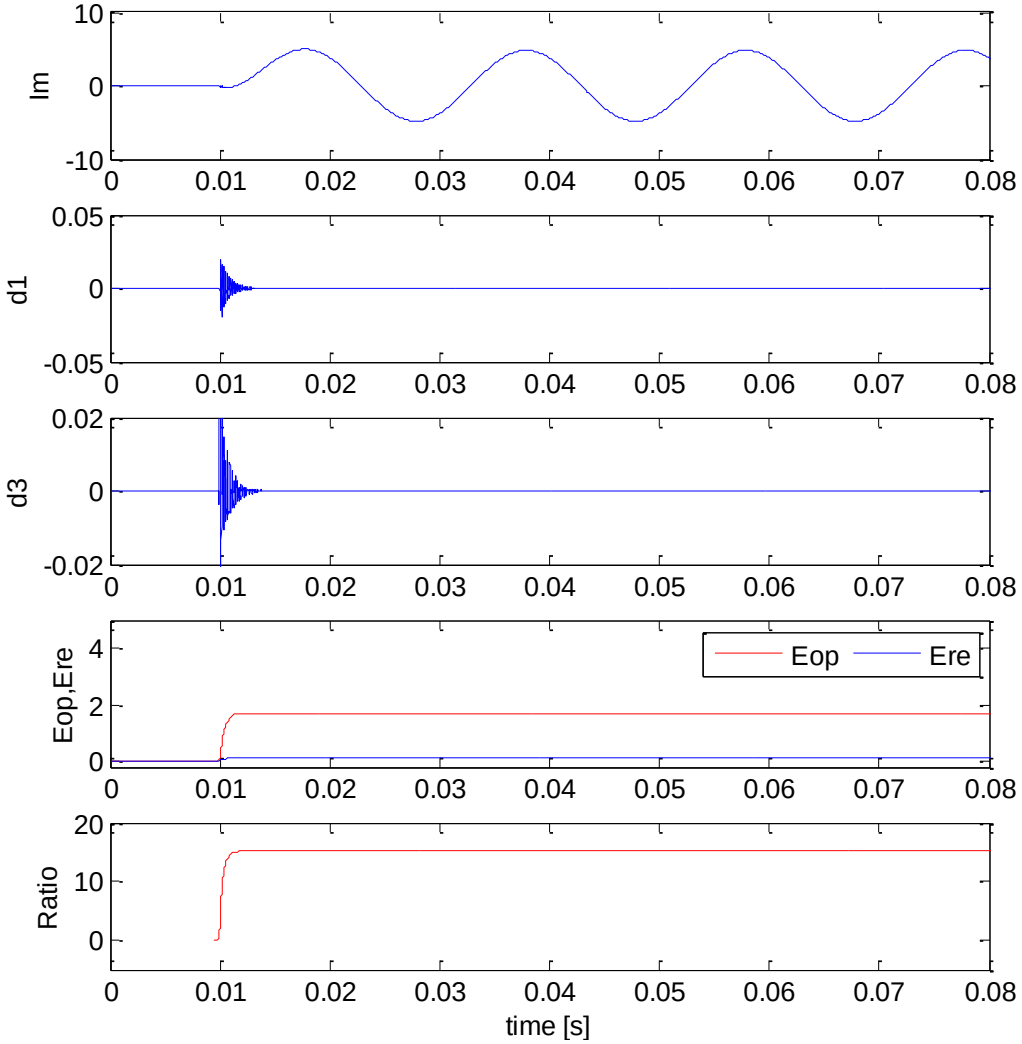
يبين الشكل (11) التيار النمطي Im الناتج عن تيارات الطرف الأولي والإشارات d1، d3، E_{OP}، E_{RE} وإشارة الفصل Ratio نمذجة ومحاكاة عطل قصر طور مع الأرض بمقاومة عطل 10Ω على الطرف الثانوي للمحول. بتطبيق خطة الحماية المقدمة على التيار النمطي Im نجد أن النسبة Ratio تتجاوز القيمة 10 مما يدل على أن العطل خارج منطقة الحماية للمحول مما يثبت فعالية خطة الحماية المقترحة في التمييز بين حالة العطل (خارج أو داخل منطقة الحماية للمحول).



الشكل (11): التيار النمطي Im الناتج عن تيارات الطرف الأولي والإشارات d1, d3, Eop, Ere وإشارة الفصل عند حدوث قصر طور مع الأرض خارج منطقة الحماية للمحول

3-1-5 حالة الفصل والوصل للحمل الكبير Switching:

يبين الشكل (12) التيار النمطي Im الناتج عن تيارات الطرف الأولي والإشارات d1، d3، E_{OP}، E_{RE} وإشارة الفصل عند إغلاق قاطع الدارة في اللحظة الزمنية 0.01 ثانية. بتطبيق خطة الحماية المقترحة على التيار النمطي Im نجد أن النسبة Ratio تتجاوز القيمة 10 حيث تم الكشف عن الحالات العابرة الناتجة عن عملية الوصل ولكن لم يتم فصل المحول حيث أن عملية الوصل والفصل والحالات العابرة الناتجة عنها تعتبر حالة عمل طبيعي مما يثبت فعالية الخوارزمية المقترحة في التمييز بين حالة العطل وحالة العمل الطبيعي.



الشكل (12): التيار النمطي Im الناتج عن تيارات الطرف الأولي والإشارات d1, d3, Eop, Ere وإشارة الفصل عند إغلاق قاطع الدارة

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

1- أظهرت نتائج النمذجة والمحاكاة أن خطة الحماية المقدمة قادرة على اكتشاف أعطال القصر بين لفات ملفات المحولات ثلاثية الطور ثنائية الملفات في مراحلها الأولية بدقة والتمييز بينها وبين حالات الأعطال الخارجية والاندفاع المغناطيسي وعمليات الفصل والوصل.

2- أظهرت النتائج أن استخدام تحويل المويجة يعطي فعالية ودقة وسرعة عالية في الكشف عن أعطال القصر بين لفات الملفات لحظة حدوثها.

التوصيات:

1- تنفيذ زاجل حماية رقمي يعمل وفق خطة الحماية المقدمة.

2- إعداد نموذج مخبري واختبار خطة الحماية المقدمة.

References:

[1] AHOUR, J.N. SEYEDTABAII, S. GHAREHPETIAN, G.B. *"Determination and localization of turn-to-turn fault in transformer winding using frequency response analysis"*. IET Sci. Meas. Technol., 2018, Vol. 12 Iss. 3, pp. 291-300.

[2] MIRZAEI,H.R. AKBARI,A. GOCKENBACH,E. MIRALIKHANI,K. *"Advancing New Techniques for UHF PD Detection and Localization in the Power Transformers in the Factory Tests"*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 22, No. 1; February 2015**.**

[3] NANDI, S. *"A Novel Frequency Domain Based Technique to Detect Transformer Inter-turn Faults"*.IEEE conf., Iran, 2007**.**

[4] KWEON, D. KIM, Y. *"Interpretation of Turn-to-Turn Insulation Fault by Dissolved Gas Analysis"*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 25, No. 4; August, 2018.

[5] WISZNIEWSKI, A. REBIZANT, W. SCHIEL, L. *"New algorithms for power transformer inter-turn fault protection"*. Electric Power Systems Research, 79 (2009) 1454–1461.

[6] HAGHJOO, F. MOSTAFAEI, M.*"Flux-based method to diagnose and identify the location of turn-to-turn faults in transformers"*. IET Gener. Transm. Distrib., 2016**,** pp. 1–9 **.**

[7] VAHEDI, A. BEHJAT, V. *"Online monitoring of power transformers for detection of internal winding short circuit faults using negative sequence analysis"*. 2010 John Wiley & Sons.

[8] FARZIN, N. VAKILIAN, M. *"Transformer Turn-to-Turn Fault Protection Based on Fault-Related Incremental Currents"*. 0885-8977 (c) 2018 IEEE.

[9] PERESA,L.M. SILVA,K.M. *"Power transformer protection using an instantaneous-current-value negative sequence differential element",* Electrical Power and Energy Systems 108 (2019) 96–106.

[10] LEAL,H.G.G. MEIRA,M.*"Inter-Turn Short-Circuit Detection Through Differential Admittance Monitoring in Transformers",* IEEE Transactions on instrumentation and measurments Vol. 2024**.**

[11] OLIVEIRA,M. OBRETAS,A.S. FERREIRA,G.D. *"Adaptive differential protection of three-phase power transformers based on transient signal analysis"*. Electrical Power and Energy Systems 57 (2014) 366-374.

[12] AHMADI, S. A. SAMIMI, M. H. *"Online Sensitive Turn-to-Turn Fault Detection in Power Transformers",* IEEE Transactions on industrial electronics Vol. 69 No. 12, December 2022**.**

[13] RAO, M. R. SINGH, B. P. *"Detection and Localization of Inter turn Fault in the HV Winding of a Power Transformer Using Wavelets",* IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 8 No. 4, August 2001**.**

[14] JIANG, F. BO, Z.Q. PSMCHIN, REDFEM, M. A. CHEN,Z. *"Power Transformer Protection Based On Transient Detection Using Discrete Wavelet Transform(DWT) "* IEEE (2000).
[15] MEGAHED,A.I. RAMADAN,A. ELMAHDY,W. *"Power Transformer Differential Relay Using Wavelet Transform Energies"* IEEE (2008).
[16] MARQUES, J.P. LAZARO, C. MORAIS, A.P. CARDOSO, G. *"A reliable setting-free technique for power transformer protection based on wavelet transform"* Electric Power Systems Research 162 (2018) 161–168.
[17] GUILLEN, D. OLIVARES J.C. GALVAN, E.A.*"Diagnosis of inter turn faults of single-distribution transformers under controlled conditions during energization".* https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.03.044
[18] BRANDWAJN, VDONNEL, H.W. DOMMEL, I. I. *"Matrix Representation Of Three-Phase N-Winding Transformers For Steady-State And Transient Studies"*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 6 June 1982**.**
[19] BASTARD,B. BERTRAND,P. MEUNIER,M. *"A Transformer Model For Winding Fault Studies",* IEEE Transaction on Power Delivery. Vol. 9. No. 2, April 1994**.**
[20] HAJJAR,A.A "*A high speed non communication protection scheme for power transmission lines based on wavelet transform"*. Electric Power Systems Research, 96 (2013) 194–200.
[21] HAJJAR,A.A. ALSYOUFI,Y.R. *"A high-speed algorithm to discriminate between power swing and faults in distance relays based on a fast wavelet"*. Electric Power Systems Research, 172 (2019) 269–276.