مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (١٠) العدد (٦) ٢٠٢٦

Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (10) No. (6) 2026

التمييز بين تيار الاندفاع المغناطيسي وتيار العطل في محولات القدرة الكهربائية بالاعتماد على تحويل المويجة

م. لارا مفتي *

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٥/١٢/٢٣ قُبِل للنشر في ٢٠٢٦/٣/٢٦)

□ ملخّص □

لقد شكلت مسألة التمييز الدقيق والفعال لتيار الاندفاع المغناطيسي عن تيار العطل الداخلي في محولات القدرة الكهربائية تحديا" كبيرا" لمهندسي الحماية منذ زمن بعيد. لذا، يهدف هذا البحث إلى تقديم طريقة جديدة للتمييز بين تيار الاندفاع المغناطيسي وتيار العطل في محولات القدرة الكهربائية تعتمد على التحويل المويجي. يتميز التحويل المويجي بقدرته على تحديد الموقع الزمني – الترددي للاضطرابات في الإشارات العابرة. لذا، تم تطبيق تحويل المويجة المتقطع (DWT) على التيارات التفاضلية للأطوار الثلاثة لمحول القدرة، ومن ثم حساب التغيير النسبي في الطاقة الطيفية لمعاملات تحويل المويجة الناتجة، وذلك لأجل التمييز الدقيق والفعال بين تيار الاندفاع المغناطيسي وتيار العطل في محولات القدرة الكهربائية.

بهدف تقييم أداء الطريقة المقدمة، تم تطبيقها على محول القدرة يُشكل جزءاً من نظام قدرة كهربائي اختباري تمت نمذجته في بيئة MATLAB/SIMULINK البرمجية. لقد أظهرت نتائج النمذجة والمحاكاة للطريقة المقدمة أنها فعالة، وملائمة، وموثوقة في التمييز بين تيار الاندفاع المغناطيسي وتيار العطل لمحولات القدرة الكهربائية.

الكلمات المفتاحية: تيار الاندفاع المغناطيسي، تيار العطل، محولات القدرة، التحويل المويجي المتقطع.

* ماجستير في هندسة الطاقة الكهربائية في جامعة اللاذقية، اللاذقية، سورية، Lara.moufty@latakia-univ.edu.sy

مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (١٠) العدد (٦) ٢٠٢٦

Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (10) No. (6) 2026

Discrimination Between Inrush Current and Fault Current in Power Transformers Based on Wavelet Transform

Eng. Lara Moufty *

(Received 23/12/2025 . Accepted 26/3/2026)

□ **ABSTRACT** □

The accurate and effective discrimination between magnetizing inrush current and internal fault current in power transformers has long represented one of the greatest challenges for protection engineers. Therefore, this paper aims to present a novel method for distinguishing between magnetizing inrush current and fault current in power transformers based on wavelet transform techniques.

The wavelet transform is characterized by its capability to provide time–frequency localization of transient disturbances in signals. Accordingly, the proposed method applies the Discrete Wavelet Transform (DWT) to the three-phase differential currents of the power transformer. Subsequently, the relative variation in the spectral energy of the resulting wavelet coefficients is calculated in order to achieve accurate and reliable discrimination between magnetizing inrush current and internal fault current in power transformers.

To evaluate the performance of the proposed method, it is applied to a power transformer forming part of a test electric power system modeled in the MATLAB/Simulink environment. The modeling and simulation results demonstrate that the proposed method is effective, practical, and reliable in distinguishing between magnetizing inrush current and internal fault current in power transformers.

Keywords: Magnetizing Inrush Current, Fault Current, Power Transformers, Discrete Wavelet Transform.

* Master degree in Electrical Power Engineering, Latalia University, Latkia, Syria. Lara.moufty@latakia-univ.edu.sy

1- مقدمة:

تولي مؤسسات الكهرباء العالمية أهمية خاصة لحماية محولات القدرة الكهربائية الكبيرة لدورها الهام في ضمان موثوقية واستمرار التغذية بالطاقة الكهربائية إلى المستهلك، بالإضافة إلى غلاء ثمنها وتكلفة صيانتها. يطلب من نظام حماية المحولات أن يكون موثوقاً (reliable)، أي أن يعمل عندما يكون مطلوباً منه أن يعمل، وأن يكون آمناً (secure)، أي أن لا يعمل عندما لا يكون مطلوباً منه أن يعمل، هذا بالإضافة إلى الحساسية والسرعة في العمل. تشكل الحماية التفاضلية الحماية الرئيسية لمحولات القدرة الكهربائية. لذا، يجب على هذه الحماية أن تأخذ بالحسبان تأثير تيار الاندفاع المغناطيسي، الذي ينشأ بسبب التطبيق المفاجئ للجهد عليها، وذلك بسبب القيمة المرتفعة لهذا التيار، التي قد تبلغ أحياناً عشرة أضعاف قيمة تيار الحمل الاسمي الكلي للمحول، والتي قد تؤدي إلى العمل الخاطئ للزواجل التفاضلية، والتي بدورها قد تؤثر على استقرار وموثوقية نظام القدرة الكهربائي. لقد شكلت مسألة التمييز الدقيق والفعال لتيار الاندفاع المغناطيسي عن تيار العطل الداخلي في محولات القدرة الكهربائية تحديا" كبيرا" لمهندسي الحماية منذ زمن بعيد (Horowitz et al.,2008).

لحل المشكلة سابقة الذكر، تم استخدام خطة الكبح (القفل) لعمل الزاجل التفاضلي التي تعتمد على مبدأ قياس مستوى التوافقية الثانية المتواجدة في التيار التفاضلي لمحول القدرة. لقد تم في هذه الخطة كبح عمل الزاجل التفاضلي عند حدوث اندفاع مغناطيسي في محول القدرة اعتماداً على مستوى التوافقية الثانية المتواجدة في التيار التفاضلي (Rahman et al.,1988;Anderson,1999). لكن، تعد طريقة الكبح بالتوافقية الثانية للزاجل التفاضلي غير مناسبة لتمييز تيار الاندفاع المغناطيسي عن تيار العطل، وذلك لأنه في حالات معينة قد يحتوي تيار العطل الداخلي لمحول القدرة على كمية هامة من التوافقية الثانية، قد يحدث هذا نتيجة لإشباع محولات التيار، أو لوجود مكثف تفرعي أو لوجود السعات الموزعة على طول خطوط نقل القدرة الكهربائية الطويلة ذات الجهود العالية جداُ (EHV) والمرتبطة مع محولات القدرة(Liu et ai.,1992). بالإضافة إلى ذلك، قد تكون كمية التوافقية الثانية في تيار الاندفاع المغناطيسي صغيرة نسبياً (7%) في محولات القدرة الحديثة وذلك بسبب التحسينات التي طرأت على صناعة مادة قلب محول القدرة Sidhu et al.,1992) لذا، كان لا بد من تطوير طرق حديثة لتحسين موثوقية وأمان الحماية التفاضلية لمحولات القدرة تكون قادرة على التمييز الدقيق والفعال بين تيار الاندفاع المغناطيسي وتيار العطل الداخلي.

لمعالجة المشكلة سابقة الذكر تم اقتراح العديد من خطط الحماية، اعتمد معظمها بشكل أساسي على استخدام الذكاء الاصطناعي (الشبكات العصبونية، المنطق الضبابي، والشبكات العصبونية الضبابية المتكيفة). في هذا السياق، تم في المراجع (Tripathy,2010; Athamneh et al.,2024) استخدام الشبكات العصبونية للتمييز بين تيار الاندفاع المغناطيسي وتيار العطل. لكن، تحتاج الشبكات العصبونية المقدمة في تلك المراجع إلى إعادة تدريب وذلك لكي تصبح مناسبة للاستخدام مع محولات قدرة أخرى مختلفة (في الاستطاعة والجهد الاسميين، وفي مادة القلب الحديدي، وفي توصيل الملفات) عن المحولات التي دربت عليها. كما تم في المراجع (Hussein et al.,2024;Dapshima et al.,2025) استخدام المنطق الضبابي للتمييز بين تيار الاندفاع المغناطيسي وتيار العطل. لكن يعتمد المنطق الضبابي على القواعد الشرطية، لذا فهو غير آمن للتعامل مع كل الحالات العابرة الشائعة.

استخدم باحثون في المرجع(Gomez–morante et al.,1999) ولأول مرة تحويل المويجة (WT) للتمييز بين تيار الاندفاع المغناطيسي وتيار العطل الداخلي. اعتمدت خطة الحماية المقدمة على حساب الطاقة الكامنة في التيارات التفاضلية في المجال الزمني – الترددي. اعتماداً على هذه الطاقات المحسوبة عرف الباحثون تابعاً مميزاً، يكون هذا التابع أكبر من الصفر في حال حدوث اندفاع مغناطيسي، ويكون أصغر من الصفر في حال حدوث عطل داخلي. كما تم في المرجع (Hossam Aldin et al.,2011) تقديم خطة حماية للتمييز بين تيارات محول القدرة المختلفة، اعتمدت الخطة المقترحة على تطبيق تحويل المويجة المتقطع DWT لأجل خمسة مستويات، وبالتحديد اعتمدت على حساب معاملات التفاصيل للمستويين الثالث والرابع (d3، d4). ثم تم حساب نسبة الانحراف التقريبي المتوسط لمعاملات التفاصيل للمستوي الرابع d4 إلى الانحراف التقريبي المتوسط لمعاملات التفاصيل للمستوي الثالث d3، لكل نافذة متحركة. ثم تم تمييز نوع التيار المقاس من خلال الحصول على نماذج التمييز لكل نوع من أنواع التيارات من خلال رسم شكل الموجة لهذه النسب المحسوبة بالنسبة للزمن. استخدم باحثون في المرجع

(Oliveira et al.,2014) تحويل المويجة المتقطع DWT للحصول على التغيير في طيف الطاقة لمعاملات تحويل المويجة، وذلك للتمييز بين تيارات الأعطال الداخلية، تيارات الأعطال الخارجية، تيار الاندفاع المغناطيسي، والأعطال الابتدائية الداخلية. لقد استخدم الباحثون في المراجع السابقة المويجة الأم دوبتشي 4 التي تحتاج 8 معاملات حقيقية لإجراء عملية الترشيح كما استخدموا عدة مستويات للترشيح مع بعض العمليات الإضافية التي ساهمت في ابطاء اتخاذ القرار وزادت التعقيد الحسابي لعملية تمييز تيار الاندفاع المغناطيسي عن تيار العطل الداخلي والخارجي.

قدم باحثون في المرجع (Safty et al.,2006) خطة حماية هجينة اعتمدت على تحويل المويجة وعلى المنطق الضبابي. حيث، تم استخدام تحويل المويجة لتحليل إشارة التيار التفاضلي إلى تفاصيل وتقريبات details and approximations. ثم استخدمت القيم العظمى لتفاصيل الموجة كمدخلات للنظام الضبابي ولبناء توابع العضوية. لقد استخدم المنطق الضبابي ثلاث متغيرات للخرج، خصص المتغير الأول للعطل الداخلي، وخصص المتغير الثاني للعطل الخارجي، أما المتغير الثالث فقد خصص للاندفاع المغناطيسي. كما استخدم باحثون في المرجع (Ramesh et al.,2014)نفس الاستراتيجية المستخدمة في المرجع (Safty et al.,2006) لكن تم هنا استخدام متغيرين فقط للخرج، مع استخدام تابع عضوي بشكل مثلث ليمثل حالة إعطاء إشارة فصل (لأجل العطل الداخلي) أو إشارة قفل (لأجل تيار الاندفاع المغناطيسي).

استخدم باحثون طريقة هجينة تعتمد على تحويل المويجة المتقطع DWT للحصول على الخصائص المميزة للتيار التفاضلي والشبكات العصبونية ANN للتمييز بين تيارات الأعطال الداخلية، تيارات الأعطال الخارجية، تيار الاندفاع المغناطيسي.

تجمع الطرق الهجينة (Ramesh et al.,2014; Atiyah et al.,2026) عيوب كل من الطرق المكونة لها والمذكورة أعلاه. لذا، يقدم هذا البحث طريقة حماية جديدة، دقيقة وفعالة وسريعة، تعتمد على تحويل المويجة المتقطع DWT لتمييز تيار الاندفاع المغناطيسي عن تيار العطل الداخلي في محولات القدرة الكهربائية. تم في البداية تطبيق تحويل المويجة على التيار التفاضلي وتم حساب التغير النسبي في الطاقة الطيفية لمعاملات تحويل المويجة الناتجة بهدف التمييز بين تيار الاندفاع المغناطيسي وتيار العطل.

استخدم باحثون في المرجع(Atiyah et al.,2026) طريقة هجينة تعتمد على تحويل المويجة المتقطع DWT للحصول على الخصائص المميزة للتيار التفاضلي والشبكات العصبونية ANN للتمييز بين تيارات الأعطال الداخلية، تيارات الأعطال الخارجية، تيار الاندفاع المغناطيسي.

2- أهمية البحث وأهدافه:

تأتي أهمية البحث من ضرورة إيجاد حل دقيق وفعال لمشكلة التمييز بين حالة الاندفاع المغناطيسي وحالة العطل الداخلي في محولات القدرة الكهربائية، وذلك لضمان موثوقية عمل زاجل الحماية التفاضلي وبالتالي لضمان موثوقية واستمرار التغذية بالطاقة الكهربائية للمستهلك.

3- مواد البحث وطرائقه:

في هذا البحث قمنا بنمذجة ومحاكاة نظام قدرة كهربائي اختباري نموذجي، ومن ثم محاكاة تطبيق مفاجئ للجهد على محول القدرة الكهربائي المستخدم فيه، وذلك لمحاكاة حالة الاندفاع المغناطيسي في المحول، كما تم محاكاة العديد من حالات الأعطال الداخلية والخارجية على المحول، وذلك في بيئة MATLAB/SIMULINK البرمجية، ثم بعد ذلك كتابة برنامجاً خاصاً بالطريقة المقدمة وبتحويل المويجة المتقطع ضمن بيئة MATLAB أيضاً، ثم اختباره على محول قدرة نموذجي اختباري.

4- تحويل المويجة (WT) (MATLAB Toolbox,2023):

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

- له خاصية تحديد الموقع الترددي – الزمني 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 المجال الزمني.

يعرّف تحويل المويجة 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 المويجة الأم $\psi(t)$. تعرف المويجة الأم بالعلاقة التالية:

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

حيث تمثل "a"، "b" مجال التعديل والإزاحة الزمنية للمويجة، على التتالي. تحدد معاملات تحويل المويجة المستمر $C_f(a, b)$ أو (CWT) بالجداء الداخلي التالي:

$$C_f(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t).\ \psi^*_{b,a}(t).dt \qquad (2)$$

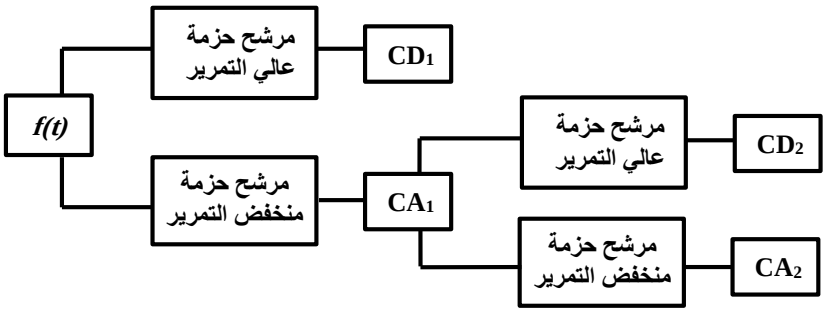
يشير الرمز "*" إلى المرافق العقدي.

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

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

حيث تم التعويض عن a و b في العلاقة (1) بـ a_0^m و ka_0^m، على التتالي. حيث n، k، a_0، هي أرقام صحيحة، a_0 تمثل عامل الإزاحة (يتم عادةً اختياره مساوياً إلى "2")، وتمثل m رقم مجال التعديل 1,2,3,.. (Gilbert et al.,1996).

يحتوي تحويل المويجة على أزواج متتالية من مرشحات التمرير المنخفض والتمرير المرتفع للإشارة. 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 تجنباً لوجود بيانات زائدة. يُبين الشكل (1) عملية الترشيح ثنائي المرحلة للإشارة الزمنية $f(t)$ باستخدام DWT .

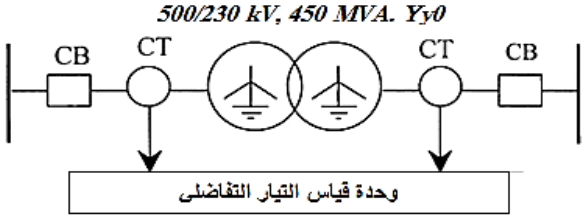


الشكل (1) عملية الترشيح ثنائي المرحلة للإشارة الزمنية $f(t)$ باستخدام DWT

5- تطبيق تحويل المويجة للتمييز بين الاندفاع المغناطيسي والعطل الداخلي لمحول القدرة:

5-1- محول القدرة المدروس:

لاختبار فعالية الطريقة المقدمة سيتم تطبيقها على محول استطاعة كهربائي اختباري ثلاثي الطور ثنائي الملفات، استطاعته الاسمية 450MVA، نسبة تحويله 500/230kV، توصيل ملفاته Yy0، يشكل هذا المحول جزءاً من نظام قدرة كهربائي اختباري نموذجي مغذى من طرفيه كما هو مبين بالشكل (2).



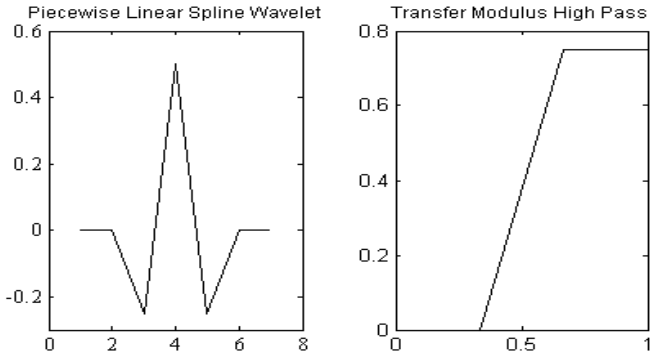
الشكل (2): محول قدرة كهربائي اختباري 500/230 kV.

لقد تم كتابة جميع البرامج اللازمة للنمذجة والمحاكاة في بيئة MATLAB البرمجية، والتي منها حصلنا على جميع النتائج الواردة في هذا البحث. لقد تم محاكاة العديد من حالات الأعطال والاندفاع المغناطيسي لمحول القدرة المدروس. لأجل كل حـــالة محاكاة قمنا بتغيير نوع العطل، مكان العطل، زاوية ورود العطل، الفيوض المتبقية في قلب المحول، وكذلك تغيير محددات النظام.

5-2- تطبيق تحويل المويجة المتقطع:

لقد تم في هذا البحث تطبيق تردد تقطيع قدره 25kHz، لتقطيع إشارة التيار التفاضلي، ومن ثم تطبيق تحويل المويجة المتقطع (*DWT*) عليها، وذلك وفقاً للبنية الثنائية المرحلة المبينة في الشكل (1). حيث تمثل *f(t)* الإشارة الأصلية ذات التردد 25kHz، التي سيتم في المرحلة الأولى ارسالها الى مرشحي تمرير حزمة تردد (مرشح تمرير حزمة عالية التردد ومرشح تمرير حزمة منخفضة التردد). في المرحلة الأولى، ستكون الإشارة ذات المجال الترددي (12.5–6.25 kHz) هي خرج مرشح تمرير حزمة عالية التردد، بينما ستكون الإشارة ذات المجال الترددي (0–6.25) kHz هي خرج مرشح تمرير حزمة منخفضة التردد. في المرحلة الثانية، سيتم تكرار هذه العملية على إشارة خرج مرشح تمرير الحزمة المنخفض التردد، وهكذا دواليك. ما يهمنا في بحثنا هو خرج مرشح تمرير الحزمة عالية التردد في المرحلة الأولى فقط، لأن العطل يولد ترددات عالية وهدفنا التمييز بين العطل والاندفاع.

يلعب الاختيار المناسب للمويجة الأم، من ناحية السرعة وتحديد الموقع الترددي – الزمني، دوراً هاماً في أداء الخوارزمية المقدمة في هذا البحث. لذا، اخترنا في هذا البحث مويجة أم تدعى المويجة الخطية ذات القطع المستقيمة (Piecewise Linear Spline Wavelet) نظراً لخواصها المناسبة لتحليل الإشارات العابرة من ناحية السرعة والقدرة على تحديد الموقع الترددي – الزمني (Hajjar et al.,2019) من الجدير ذكره هنا، أن لهذه المويجة مرشح تمرير حزمة عالي الترددات ذي 3 معاملات، لذا فهي أبسط وأسرع بكثير من المويجة الأم دوبتشي4 (db4)، الشائعة الاستخدام في دراسات نظم القدرة الكهربائية، التي لها مرشح تمرير حزمة عالي الترددات ذي 8 معاملات حقيقية. يُبين الشكل (3) المويجة الأم المستخدمة في هذا البحث مع استجابتها الترددية.



الشكل (3) المويجة "*Piecewise Linear Spline*" مع استجابتها الترددية.

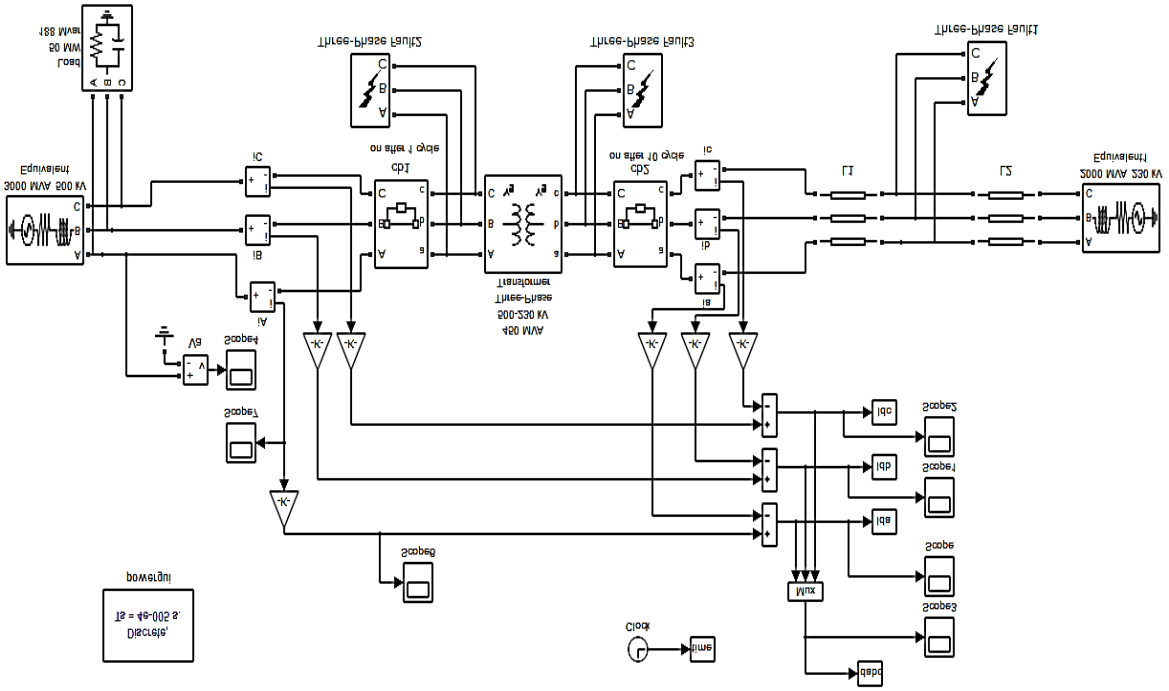
5- 3- تحليل الخصائص المميزة للتيارات العابرة لمحول القدرة باستخدام تحويل المويجة المتقطع:

باستخدام تحويل المويجة المتقطع، تم تحليل إشارات تيار الاندفاع المغناطيسي وتيار العطل لمحول القدرة المستخدم، ومن ثم اعتماداً على معاملات تحويل المويجة لكل منهما تحديد الخصائص المميزة لها، وبناءً على ذلك، نقوم بإعداد الخوارزمية المناسبة لاتخاذ القرار المناسب (عمل طبيعي، اندفاع مغناطيسي، عطل (خارجي/ داخلي)).

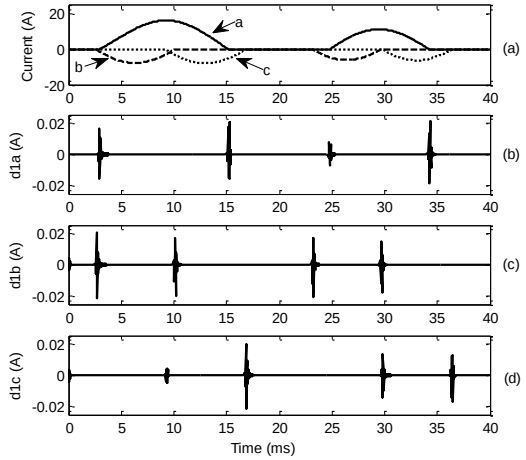
5- 3- 1- تيار الاندفاع المغناطيسي:

تتغير قيمة وشكل تيار الاندفاع المغناطيسي في محول القدرة اعتماداً على عدة عوامل نذكر منها: لحظة تطبيق الجهد على محول القدرة، الفيض المغناطيسي المتبقي وقطبيته في قلب محول القدرة، وعدم خطية قلب محول القدرة.

يبين الشكل (4) النمذجة لنظام قدرة كهربائي اختباري الذي قمت بتنفيذه في بيئة MATLAB/SIMULINK البرمجية، يبين الشكل (5-a) أشكال أمواج التيارات التفاضلية للأطوار الثلاثة (a, b, c)، خلال دورتين زمنيتين متتاليتين (40 ميلي ثانية لأجل التردد الاسمي 50Hz)، المقاسة من جهة الطرف الثانوي لمحولات التيار، والناتجة عن محاكاة حالة اندفاع مغناطيسي على محول القدرة الاختباري المدروس، من جراء تطبيق منبع جهد جيبي بشكل مفاجئ عليه، عند زاوية إغلاق للمفتاح قدرها (0^o) للطور a، ولأجل مغناطيسية متبقية في القلب الحديدي لأطوار المحول (a, b, c) قدرها (0.8, −0.4, −0.4)، على التتالي. يتضح من الشكل تشوه أمواج التيارات التفاضلية بشكل كبير، كما يتضح أيضاً ظهور ثغرات في تيارات الاندفاع المغناطيسي عند أزمنة مختلفة. تتغير قيم التيارات التفاضلية عند أطراف هذه الثغرات من قيم قريبة من الصفر إلى قيم هامة، كما تتغير من قيم هامة إلى قيم قريبة من الصفر. هذا الأمر متوقع، لأن الانتقال المفاجئ من حالة إلى حالة أخرى يؤدي إلى ظهور تموجات (ripples) في الإشارات، غالباً تكون غير مرئية في الإشارات ذات التردد الإسمي، الشكل (5-a). لكن، يمكن رؤية هذه التموجات بوضوح باستخدام تحويل المويجة. بما أننا في هذا البحث مهتمين بالمركبة التي يمكن تحديدها بشكل أفضل في المجال الزمني– الترددي، لذا سنستخدم تفاصيل الإشارة d1 (خرج مرشح تمرير الحزمة عالية التردد في المستوى الأول)، الذي سنحصل عليه من تطبيق تحويل المويجة المتقطع *DWT* على التيارات التفاضلية للأطوار الثلاثة، وذلك لاستخراج الخصائص المميزة الكامنة فيها، كما هو مبين في الشكل (5-b-d). نلاحظ من الشكل (5-b-d)، أن هناك نتوءات (spikes) خلال فترة الاندفاع المغناطيسي العابرة في الأطوار الثلاثة. وملاحظة الشكل (5-b) نجد أن هناك نتوءات حادة عند أطراف الفجوات، حيث يتغير عندها تيار الاندفاع المغناطيسي فجأة من حالة إلى حالة أخرى مختلفة.



الشكل (4): نمذجة نظام القدرة الاختباري المدروس في بيئة MATLAB/SIMULINK البرمجية.



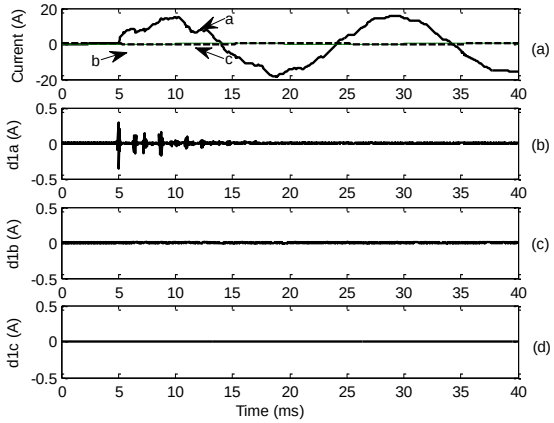
الشكل (5) تيارات الاندفاع المغناطيسي لمحول القدرة المدروس لأجل $\varphi = 0^0$:

(a) التيارات التفاضلية للأطوار الثلاثة، d1(b) للطور *a*، d1(c) للطور *b*، d1(d) للطور *c*

5- 3- 2- الأعطال الداخلية لمحول القدرة الاختباري المدروس:

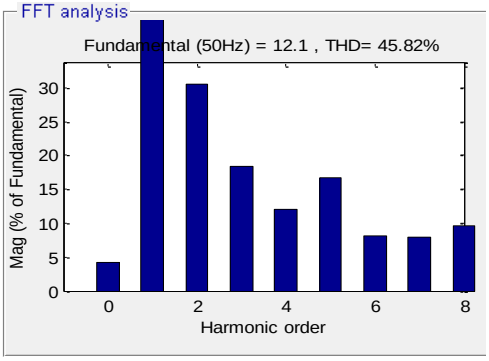
يبين الشكل (6-a) التيارات التفاضلية للأطوار الثلاثة المقاسة من جهة ثانوي محولات التيار، الناتجة عن محاكاة حالة عطل (قصر) الطور *a* مع الأرض داخل منطقة حماية المحول الاختباري (من جهة الجهد 230kV للمحول)، لأجل زاوية ورود عطل قدرها $\varphi = 90^0$ للطور *a*. نلاحظ ظهور تشوهات عالية التردد في شكل موجة التيار للطور *a*، يعود سبب هذه التشوهات إلى تأثير التحريضية والسعة الموزعة لخط النقل، بالإضافة إلى تأثير التحريضية والسعة لمحول القدرة الاختباري عند هذا المجال من التردد العالي المدروس، أدت هذه المؤثرات إلى ظهور كمية هامة من التوافقية الثانية في تيار العطل الداخلي، حوالي % 30 من قيمة التوافقية الأساسية، كما يبين الشكل (7)، الذي تم الحصول عليه بتطبيق تحويل فوريه السريع *FFT* على

التيار التفاضلي. وبناءً عليه، سيرى الزاجل التفاضلي، ذي الكبح بالتوافقية الثانية، هذا العطل على أنـــــه حالة اندفاع مغناطيسي، وبالتالي لن يعمل الزاجل في هذه الحالة، أي أن الزاجل يفقد موثوقيته.

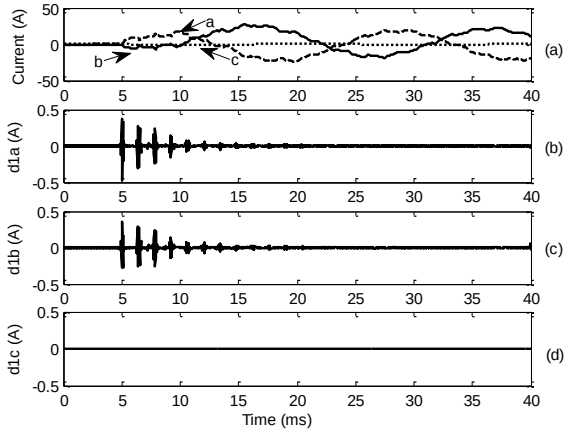


الشكل (6) تيارات عطل (قصر) الطور *a* مع الأرض داخل منطقة الحماية لأجل الزاوية $\varphi=90^0$:
(a) التيارات التفاضلية للأطوار الثلاثة، d1(b) للطور *a*، d1(c) للطور *b*، d1(d) للطور *a*.

للحصول على الخصائص المميزة لتيارات العطل الداخلي قمنا بتطبيق تحويل المويجة المتقطع *DWT*، عند المستوى الأول، على التيارات التفاضلية للأطوار الثلاثة الناتجة عن محاكاة العطل داخل المحول، وذلك للحصول على الإشارات ذات الترددات العالية d1(a,b,c)، كما هو مبين في الشكل (6-b-d). نلاحظ من الشكل (6-b) ظهور العديد من النتوءات الحادة (spikes) عند لحظة حدوث العطل، تكون قيمها أعظمية عند بداية حدوث العطل. من الجدير ذكره أن هذه الظاهرة تتواجد على الأقل في طور واحد من الأطوار الثلاثة للمحول مهما كان نوع العطل. يبين الشكل (6-a) التيارات التفاضلية للأطوار الثلاثة، الناتجة عن محاكاة حالة عطل (قصر) الطورين *a, b* مع الأرض داخل منطقة حماية المحول (من جهة الجهد 230kV للمحول)، لأجل زاوية ورود عطل قدرها $\varphi = 90^0$ للطور *a*.



الشكل (7) توافقيات التيار التفاضلي لأجل عطل (قصر) الطور *a* مع الأرض داخل منطقة الحماية.

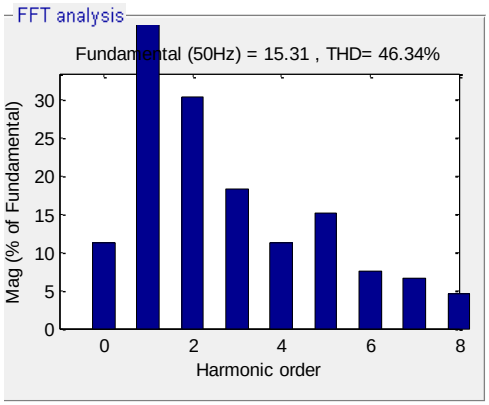


الشكل (8) تيارات عطل (قصر) الطورين *a, b* مع الأرض داخل منطقة الحماية لأجل $\varphi = 90^0$:

(a) التيارات التفاضلية للأطوار الثلاثة، (b) d1 للطور *a*، d1(c) للطور *b*، (d) d1 للطور *c*.

نلاحظ أيضاً من الشكل (7-b-c) ظهور العديد من النتوءات الحادة (spikes) عند لحظة حدوث العطل، تكون قيمها أعظمية عند لحظة حدوث العطل.

يبين الشكل (9) التيار التفاضلي للطور *a* لأجل حالة عطل (قصر) الطورين *b, a* مع الأرض مع تحليل التوافقيات المتواجدة فيه باستخدام تحويل فوريه السريع FFT. نلاحظ من هذا الشكل أن قيمة التوافقية الثانية حوالي % 30 من قيمة التوافقية الأساسية، وبناءً على هذا، سيرى الزاجل التفاضلي، ذي الكبح بالتوافقية الثانية، العطل على أنه حالة اندفاع مغناطيسي، وبالتالي لن يعمل الزاجل في هذه الحالة، أي أن الزاجل يفقد موثوقيته.



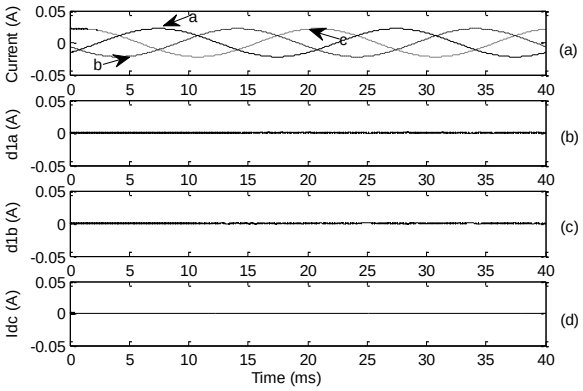
الشكل (9) توافقيات التيار التفاضلي للطور *a* لأجل حالة عطل (قصر) الطورين *a , b* مع الأرض داخل منطقة الحماية.

5-3-3- حالة العمل الطبيعي/الأعطال الخارجية لمحول القدرة الاختباري:

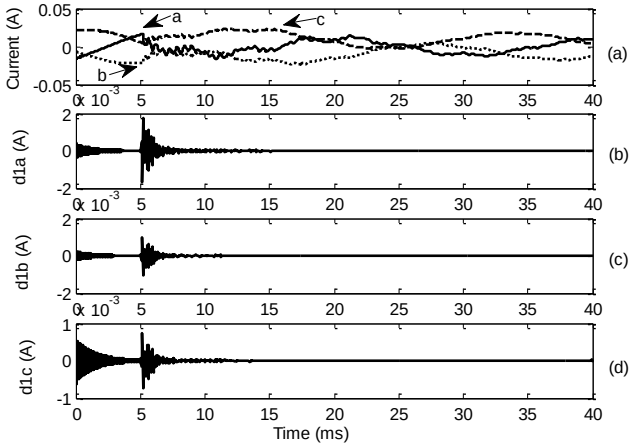
يجب على زاجل الحماية التفاضلي أن لا يعمل في حالة العمل الطبعي وعند حدوث عطل خارج منطقة الحماية الخاصة به، أي يجب أن يكون آمنا (مستقراً). لذا، يجب أن يكون تعيير هذا الزاجل أكبر من أكبر تيار تفاضلي ناتج عن حالة عطل خارجي أو حمل كبير، وذلك لضمان استقرار الزاجل، وأصغر من أصغر تيار تفاضلي ناتج عن حالة عطل داخلي، وذلك لضمان موثوقية عمل الزاجل.

يبين الشكل (10) التيارات التفاضلية الثلاثة للزاجل التفاضلي لأجل حالة العمل الطبيعي مع تحويل المويجة المتقطع المقابل لها. نلاحظ أن القيمة العظمى لهذه التيارات غير مساوية للصفر (تبلغ القيمة العظمى لها حوالي 0.021 A)، وهذا ناتج عن أخطاء محولات التيار وعدم تماثل نسب تحويل محولات التيار. كما نلاحظ أن تحويل المويجة المتقطع المقابل لهذه التيارات معدوم، لذا لن يتم تفعيل عمل الزاجل التفاضلي هنا.

يبين الشكل (11) التيارات التفاضلية للأطوار الثلاثة للزاجل التفاضلي لأجل حالة عطل ثلاثي الطور خارج منطقة الحماية مع تحويل المويجة المتقطع المقابل لها. نلاحظ أن القيمة العظمى لهذه التيارات التفاضلية غير مساوية للصفر (تبلغ القيمة العظمى لها حوالي 0.025 A)، وهذا ناتج عن أخطاء محولات التيار وعدم تماثل نسب تحويل محولات التيار. لذا يجب تعيير الزاجل التفاضلي على قيمة محددة أكبر من هذه القيمة تدعى بعتبة تشغيل الزاجل، وذلك لضمان موثوقية واستقرار الزاجل التفاضلي. لقد تم في بحثنا هذا اختيار عتبة تشغيل الزاجل التفاضلي على القيمة 0.25A، لذا لن يتم تفعيل عمل الزاجل التفاضلي عند قيم أقل من هذه القيمة. نلاحظ من الشكل (11) أن تحويل المويجة المتقطع المقابل لهذه التيارات غير معدوم وهو موافق للخاصية التي أشرنا إليها سابقاً (التخامد السريع)، لكن بما أن القيمة العظمى للتيار التفاضلي الناتج عن العطل الخارجي الثلاثي الطور أقل من قيمة عتبة
تشغيل الزاجل فلن يتم تفعيل عمل الزاجل التفاضلي هنا.



الشكل (10) التيارات التفاضلية للأطوار الثلاثة مع تحويل المويجة المقابل لها في حالة العمل الطبيعي.



الشكل (11) التيارات التفاضلية للأطوار الثلاثة مع تحويل المويجة المقابل لها لأجل حالة قصر خارجي ثلاثي الطور.

5-4- المقارنة بين الخصائص المميزة لكل من تيارات الاندفاع المغناطيسي وتيارات الأعطال:

أظهرت الدراسة والتحليل لتيارات عديدة من حالات الأعطال وحالات الاندفاع المغناطيسي باستخدام تحويل المويجة أن لتيارات الأعطال وتيارات الاندفاع المغناطيسي خصائص مميزة مختلفة. فلأجل حالات الأعطال المبينة في الأشكال (8, 6)، يمكننا الملاحظة بوضوح بأنه يوجد العديد من النتوءات الحادة ابتداءً من لحظة حدوث العطل، وأن القيمة العظمى لهذه النتوءات تظهر عند بداية حدوث العطل، تتخامد هذه النتوءات بسرعة إلى قيمة قريبة من الصفر خلال دورة واحدة، على خلاف حالات الاندفاع المغناطيسي، حيث تبدي تيارات الاندفاع المغناطيسي تخامداً منخفضاً وبطئياً خلال فترة الاندفاع المغناطيسي، التي قد تستمر حتى 10 دورات في محولات القدرة الصغيرة وتستمر حوالي دقيقة واحدة في محولات القدرة الكبيرة (Anderson,1999). يمكن استخدام هذا الاختلاف كخاصية أساسية للتمييز الفعال والدقيق بين الأعطال الداخلية وحالات الاندفاع المغناطيسي.

6- طريقة التمييز بين تيارات الاندفاع المغناطيسي وتيارات الأعطال:

6-1- تحويل الخصائص المميزة إلى كميات قابلة للحساب:

حتى نتمكن من التمييز بين تيار الاندفاع المغناطيسي وتيار العطل لابد من تحويل الخصائص المميزة للإشارات المستخلصة منهما بوساطة تحويل المويجة المتقطع إلى كميات قابلة للحساب. لتحقيق ذلك، سنحسب تابع الطاقة الطيفية (Energy Function) للإشارات المستخلصة من التيارات التفاضلية للأطوار الثلاثة بوساطة تطبيق تحويل المويجة المتقطع، ثم نحسب نسبة هذه الكميات المحسوبة، كما هو مبين في المعادلات التالية:

(Hajjar et al.,2019)

$$E_{a-ratio} = \frac{E_a^k - d1}{E_a - d1} \quad (4)$$

$$E_{b-ratio} = \frac{E_b^k - d1}{E_b - d1} \quad (5)$$

$$E_{c-ratio} = \frac{E_c^k - d1}{E_c - d1} \quad (6)$$

حيث، تمثل $E_a - d1$، $E_b - d1$، $E_c - d1$، على التتالي، قيم تابع الطاقة الطيفي لمعاملات تحويل المويجة الناتجة عن تطبيق تحويل المويجة على التيارات التفاضلية للأطوار الثلاثة c, b, a، على التتالي، عند المستوى الأول d1، لأجل نافذة الحساب الأولى. بينما، تمثل $E_a^k - d1$، $E_b^k - d1$، $E_c^k - d1$ قيم تابع الطاقة الطيفي لمعاملات تحويل المويجة الناتجة عن تطبيق تحويل المويجة على التيارات التفاضلية للأطوار الثلاثة c, b, a عند المستوى الأول d1، على التتالي، لأجل نافذة الحساب المتحركة (moving windwo) ذات الرقم k_{th} بعد النافذة الأولى.

يعطى تابع حساب الطاقة الطيفية للإشارة بالعلاقة التالية:

$$E(n) = \sum_{k=n}^{m} d_1^2(k) \quad (7)$$

حيث تمثل n العينة الحالية، و m عدد العينات في النافذة المتحركة (Moving Window) المختارة (Hajjar et al.,2019).

لقد تم في هذا البحث اختيار عرض النافذة المتحركة مساوياً إلى ربع دورة (5 ميلي ثانية لأجل التردد 50 Hz)، بينما يتم تحريكها كل ربع دورة.

6-2- اتخاذ القرار المنطقي من قبل الزاجل التفاضلي:

سيتم اتخاذ القرار المنطقي من قبل الزاجل التفاضلي للتمييز بين حالة الاندفاع المغناطيسي وحالة العطل بالإعتماد على نسبة التغيير في الطاقة الطيفية $E_a - ratio$، $E_b - ratio$، $E_c - ratio$، لأجل كل نافذة متحركة بالنسبة للنافذة الأولى، والذي يعطى كما يلي:

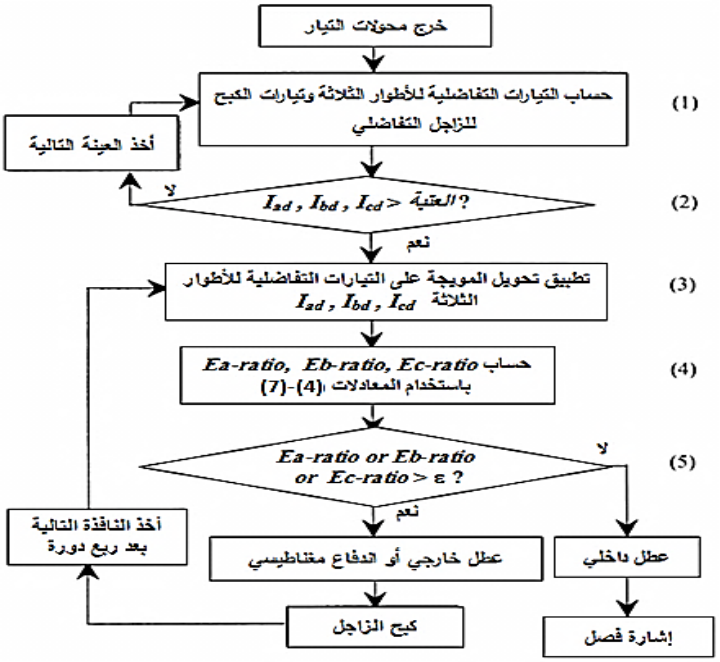
if ($E_{a-ratio} > \varepsilon$ *or* $E_{b-ratio} > \varepsilon$ *or* $E_{c-ratio} > \varepsilon$) *then*
There is an inrush current
else
There is an internal fault
end if

حيث، تمثل ε قيمة حدية تعرف مسبقاً (ε = 0.4 في بحثنا هذا).

بعد إجراء العديد من حالات المحاكاة والتحليل لحالات الاندفاع المغناطيسي، تبين أنه على الأقل واحدة من القيم التالية: *Ea-ratio, Eb-ratio, Ec-ratio* ستكون أكبر من القيمة الحدية ε عند حدوث اندفاع مغناطيسي في محول القدرة، بينما ستكون كل القيم السابقة الذكر أصغر من القيمة الحدية ε لأجل كل حالات الأعطال.

6-3- بنية الزاجل التفاضلي المعتمد على تحويل المويجة المتقطع:

يبين الشكل (12) مخططاً صندوقياً مبسطاً للزاجل التفاضلي المعتمد على تحويل المويجة. يتم في الصندوق (1) حساب التيارات التفاضلية الثلاثة وتيارات الكبح الثلاثة للزاجل التفاضلي. يتم في الصناديق (1) و (2) استخدام تيارات الكبح فقط لمنع الفصل الخاطئ للزاجل التفاضلي بسبب عدم تماثل نسب تحويل محولات التيار، وأخطاء محولات التيار المتواجدة بين طرفي محول القدرة وأخطاء منظم جهد محول القدرة تحت الحمل ULTC، الصندوق (2) يعني أنه سيتم



الشكل (12): مخطط صندوقي مبسط للزاجل التفاضلي المعتمد على تحويل المويجة المتقطع.

تفعيل الزاجل التفاضلي إذا كان أي تيار تفاضلي من تيارات الأطوار الثلاثة (c, b, a) أكبر من عتبة تشغيل الزاجل. سيتم في الصندوق (3) تطبيق تحويل المويجة على التيارات التفاضلية للأطوار التي قيمتها أكبر من عتبة تشغيل الزاجل، وفقاً لنافذة الحساب المختارة. سيتم في الصندوق (4) تطبيق المعادلات من (4) – (7)، وفي النهاية سيتم في الصندوق (5) اتخاذ القرار المناسب لتمييز حالة العطل الداخلي عن حالة الاندفاع المغناطيسي/العطل الخارجي. إذا اكتشف الزاجل عطلاً داخل محول القدرة سيعطي الزاجل أمراً لقواطع الدارة المسؤلة بفصل محول القدرة، وخلافاً لذلك سيتم قفل عمل الزاجل وسيتم الإنتقال إلى النافذة المتحركة التالية.

7- تقييم استجابة الزاجل التفاضلي المعتمد على تحويل المويجة المتقطع:

لتقيم أداء خطة الحماية المقدمة تم محاكاة ودراسة العديد من الحالات العابرة لأجل ظروف مختلفة على محول القدرة الاختباري في بيئة MATLAB/SIMULINK البرمجية. شملت هذه الحالات:

1- أعطال القصر داخل منطقة حماية المحول (طور مع الأرض، طورين مع وبدون الأرض، ثلاثة أطوار).

2- الاندفاع المغناطيسي عند زوايا تغذية بالطاقة مختلفة للمحول وعند فيوض مغناطيسية متبقية مختلفة في قلب محول القدرة. لقد تم محاكاة حالات اندفاع مغناطيسي عند عدم وجود فيوض مغناطيسية متبقية في أطوار محول القدرة الاختباري الثلاثة، وعند وجود فيوض مغناطيسية متبقية قدرها 80% من الفيض الاسمي في قلب الطور a للمحول و40%- من الفيض الاسمي في قلوب الطورين b, c للمحول.

3- أعطال القصر خارج منطقة حماية المحول.

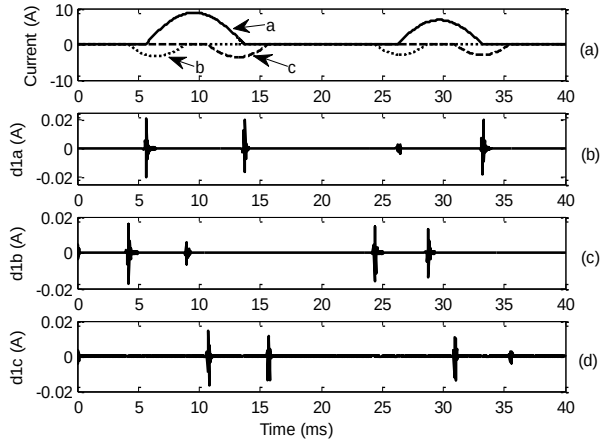
7-1- تقييم استجابة الزاجل لحالات الاندفاع المغناطيسي:

سنبين فيما يلي نتائج تطبيق الخوارزمية الرقمية المقدمة على حالة اندفاع مغناطيسي لمحول القدرة الاختباري عند عدم وجود مغناطيسية متبقية، ولأجل زاوية اغلاق قدرها $\varphi = 0^0$. يبين الشكل (13-a) التيارات التفاضلية الثلاثة، بينما يبين الشكل (13-b-d) نتيجة تطبيق تحويل المويجة المتقطع على هذه التيارات التفاضلية عند المستوى الأول d1. تبين الأشكال (14-a), (14-b)، على التتالي، نسبة الطاقة المحسوبة والاستجابة النموذجية للزاجل التفاضلي المعتمد على تحويل المويجة المتقطع. من الشكل (14) يمكننا ملاحظة أن الطريقة المقدمة يمكنها التمييز بين حالات الأعطال الداخلية للمحول وحالات الاندفاع المغناطيسي بشكل صحيح.

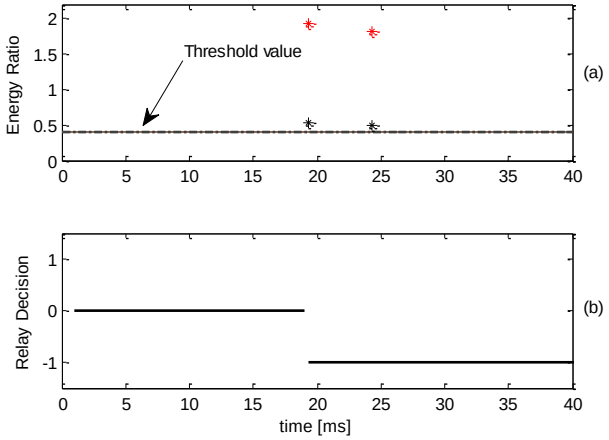
فيما يلي نبين نتائج تطبيق الخوارزمية الرقمية المقدمة على حالة اندفاع مغناطيسي لمحول القدرة الاختباري عند وجود مغناطيسية متبقية قدرها (0.8, -0.4, -0.4)، ولأجل زاوية اغلاق قدرها $\varphi = 90^0$. يبين الشكل (14-a) التيارات التفاضلية الثلاثة، بينما يبين الشكل (15-b-d) نتيجة تطبيق تحويل المويجة المتقطع على هذه التيارات التفاضلية عند المستوى الأول d1. تبين الأشكال (16-a), (16-b)، على التتالي، نسبة الطاقة المحسوبة والاستجابة النموذجية للزاجل التفاضلي المعتمد على تحويل المويجة. من الشكل (16) يمكننا ملاحظة أن الطريقة المقدمة يمكنها التمييز بين حالات الأعطال الداخلية للمحول وحالات الاندفاع المغناطيسي بشكل صحيح.

7-2- تقييم استجابة الزاجل لحالات الأعطال الداخلية:

تبين الأشكال (17) و (18) نتائج تطبيق الخوارزمية الرقمية المقدمة لأجل حالة عطل (قصر) الطور a مع الأرض) داخل منطقة حماية المحول، لأجل زاوية عطل قدرها $\varphi = 90^0$. يبين الشكل (17-a) التيارات التفاضلية الثلاثة للمحول، بينما يبين الشكل (17-b-d) نتيجة تطبيق تحويل المويجة المتقطع على هذه التيارات التفاضلية عند المستوى الأول d1. تبين الأشكال (18-a), (18-b)، على التتالي، نسبة الطاقة المحسوبة والاستجابة النموذجية للزاجل التفاضلي المعتمد على تحويل المويجة المتقطع. من الشكل (18) يمكننا ملاحظة أن الطريقة المقدمة يمكنها التمييز بين حالات الأعطال الداخلية للمحول وحالات الاندفاع المغناطيسي بشكل صحيح.



الشكل (13) تيارات الاندفاع المغناطيسي للمحول الاختباري بدون مغناطيسية متبقية، لأجل $\varphi = 0^0$:
(a) التيارات التفاضلية للأطوار الثلاثة، (b) d1 للطور *a*، (c) d1 للطور *b*، (d) d1 للطور *c*.

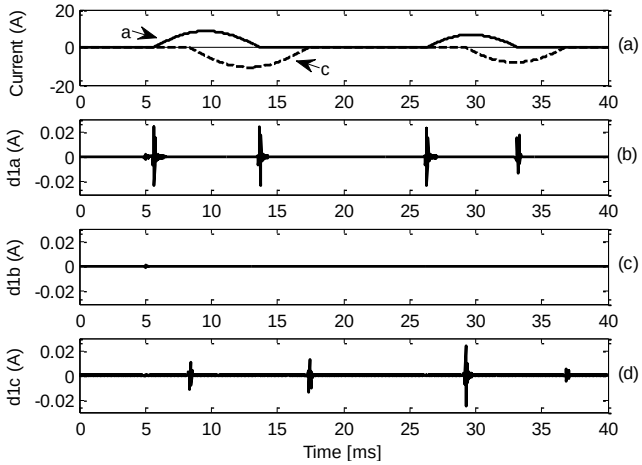


الشكل (14) استجابة الزاجل التفاضلي لتيارات الاندفاع المغناطيسي للمحول بدون مغناطيسية متبقية، ولأجل $\varphi = 0^0$:
(a) نسبة الطاقة لمعاملات تحويل المويجة للأطوار الثلاثة، (b) قرار الزاجل (إشارة كبح).

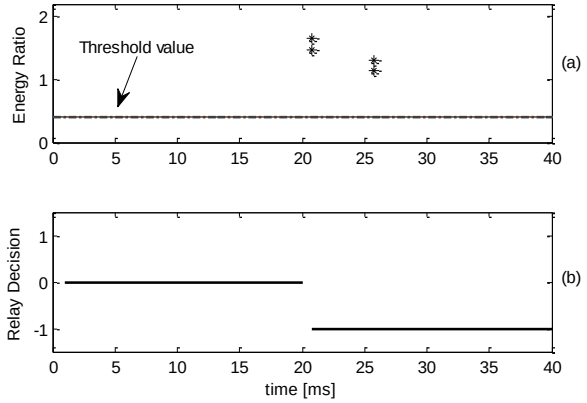
تبين الأشكال (19) و (20) نتائج تطبيق الخوارزمية الرقمية لأجل حالة عطل (قصر) الطورين a , b مع الأرض داخل منطقة حماية المحول، لأجل زاوية عطل قدرها $\varphi = 90^0$. يبين الشكل (19-a) التيارات

التفاضلية الثلاثة لمحول القدرة الاختباري، بينما يبين الشكل (19–b–d) نتيجة تطبيق تحويل المويجة المتقطع على هذه التيارات

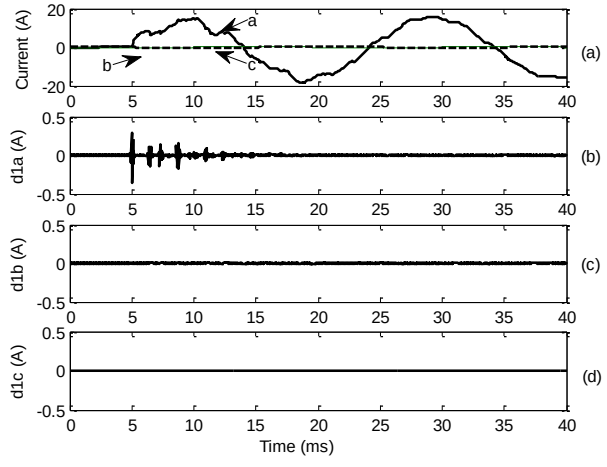
التفاضلية عند المستوى الأول d1. تبين الأشكال (20–a), (20–b)، على التتالي، نسبة الطاقة المحسوبة والاستجابة النموذجية للزاجل التفاضلي المعتمد على تحويل المويجة. من الشكل (20) يمكننا ملاحظة أن الطريقة المقدمة يمكنها التمييز بين حالات الأعطال الداخلية للمحول وحالات الاندفاع المغناطيسي بشكل صحيح.



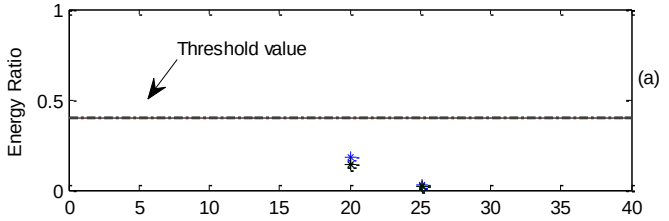
الشكل (15) تيارات الاندفاع المغناطيسي للمحول الاختباري بوجود مغناطيسية متبقية، لأجل $\varphi = 90^0$:
(a) التيارات التفاضلية للأطوار الثلاثة، d1(b) للطور a، d1(c) للطور b، d1(d) للطور c.



الشكل (16) استجابة الزاجل التفاضلي لتيارات الاندفاع المغناطيسي للمحول بوجود مغناطيسية متبقية، ولأجل $\varphi = 90^0$:
(a) نسبة الطاقة لمعاملات تحويل المويجة للأطوار الثلاثة، (b) قرار الزاجل (إشارة كبح).

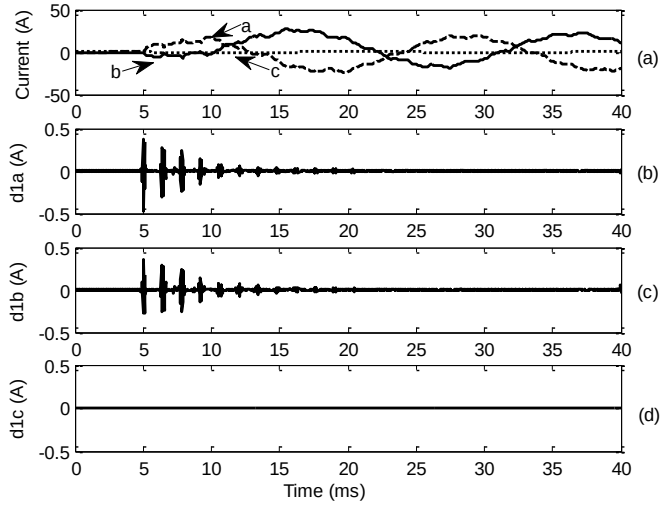


الشكل (17) تيارات عطل (قصر) الطور *a* مع الأرض داخل منطقة الحماية لأجل الزاوية $\varphi = 90^0$:
(a) التيارات التفاضلية للأطوار الثلاثة، (b) d1 للطور *a*، (c) d1 للطور *b*، (d) d1 للطور *c*.

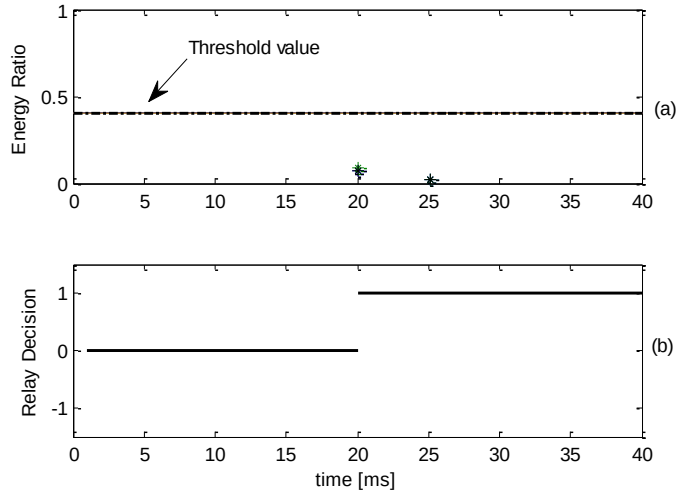


الشكل (18) استجابة الزاجل التفاضلي لحالة قصر الطور a مع الأرض، لأجل $\varphi = 90^0$:
(a) نسبة الطاقة لمعاملات تحويل المويجة للأطوار الثلاثة، (b) قرار الزاجل (إشارة فصل).

تبين الأشكال (21) و (22) نتائج تطبيق الخوارزمية الرقمية لأجل حالة عطل (قصر) ثلاثي الطور مع الأرض داخل منطقة حماية محول القدرة، لأجل زاوية عطل قدرها $\varphi = 90^0$. يبين الشكل (21-a) التيارات التفاضلية الثلاثة لمحول القدرة، بينما يبين الشكل (21-b-d) نتيجة تطبيق تحويل المويجة المتقطع على هذه التيارات التفاضلية عند المستوى الأول d1. تبين الأشكال (22-a), (22-b)، على التتالي، نسبة الطاقة المحسوبة والاستجابة النموذجية للزاجل التفاضلي المعتمد على تحويل المويجة. من الشكل (22) يمكننا ملاحظة أن الطريقة المقدمة يمكنها التمييز بين حالات الأعطال الداخلية للمحول وحالات الاندفاع المغناطيسي بشكل صحيح.

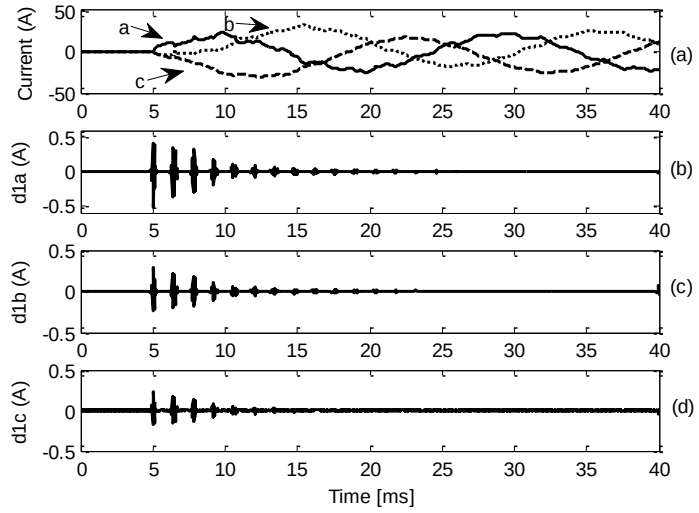


الشكل (19) تيارات عطل (قصر) الطورين a, b مع الأرض داخل منطقة الحماية لأجل الزاوية $\varphi = 90^0$:
(a) التيارات التفاضلية للأطوار الثلاثة، (b) d1 للطور *a*، (c) d1 للطور *b*، (d) d1 للطور *c*.

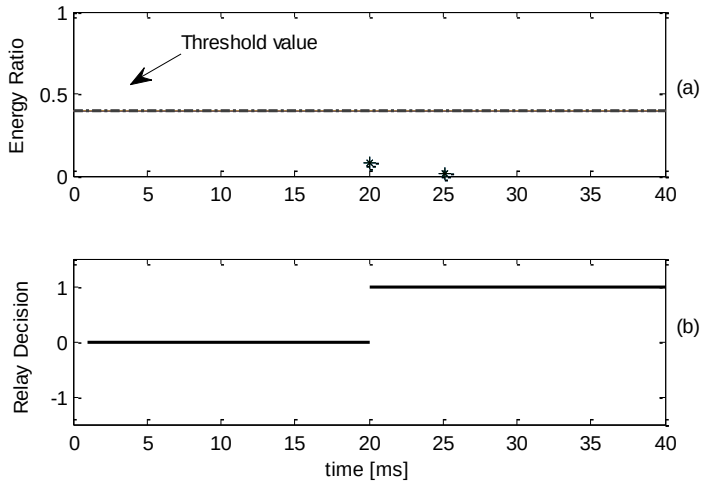


الشكل (20) استجابة الزاجل التفاضلي لحالة قصر الطورين a, b مع الأرض، لأجل $\varphi = 90^0$:
(a) نسبة الطاقة لمعاملات تحويل المويجة للأطوار الثلاثة، (b) قرار الزاجل (إشارة فصل).

بما أنه يتم اتخاذ قرار التمييز اعتباراً من النافذة المتحركة الثانية، فسيكون الزمن اللازم لاتخاذ قرار التمييز على الأقل $t_{decision} = t_2 - t_1$ ، حيث تمثل t_2 اللحظة الزمنية الموافقة لنهاية النافذة المتحركة الثانية وتمثل t_1 اللحظة الزمنية الموافقة للحظة تفعيل الزاجل التفاضلي. وبالتالي، سيكون الزمن اللازم لاتخاذ قرار التمييز في الطريقة المقترحة 15ms وفقاً لمعطيات البحث.



الشكل (21) تيارات عطل (قصر) ثلاثي الطور مع الأرض داخل منطقة الحماية لأجل الزاوية $\varphi = 90^0$:
(a) التيارات التفاضلية للأطوار الثلاثة، (b) d1 للطور a، (c) d1 للطور *b*، (d) d1 للطور *c*.



الشكل (22) استجابة الزاجل التفاضلي لحالة عطل (قصر) ثلاثي الطور مع الأرض ، لأجل $\varphi = 90^0$:
(a) نسبة الطاقة لمعاملات تحويل المويجة للأطوار الثلاثة، (b) قرار الزاجل (إشارة فصل).

لدى إجراء محاكاة للعديد من الأعطال الخارجية ثلاثية الطور تبين أن قيمة تيار الخطأ المار في الزاجل هو 0.021A، لذا تم اختيار عتبة تشغيل الزاجل على قيمة أكبر منها بعشر مرات لزيادة أمان الزاجل التفاضلي. نتيجة للعديد من الاختبارات للخوارزمية المقدمة على العديد من حالات الأعطال والاندفاع المغناطيسي لمحول القدرة المدروس تبين أن هذه القيمة هي الأنسب للتمييز بين تيارات الاندفاع المغناطيسي وتيارات الأعطال.

8- الاستنتاجات والتوصيات:

قدم هذا البحث طريقة للتمييز بين تيار الاندفاع المغناطيسي والأعطال في محولات القدرة، تعتمد هذه الطريقة على تحويل المويجة للتيارات التفاضلية للأطوار. تم اختبار هذه الطريقة من خلال محاكاة العديد من حالات الاندفاع المغناطيسي والأعطال على محول قدرة اختباري. أظهرت نتائج النمذجة والمحاكاة أن الطريقة المقدمة فعالة ومناسبة للتطبيق على محولات الاستطاعة المختلفة.

8-1- الاستنتاجات:

1- تم تطوير خوارزمية حماية تفاضلية جديدة لحماية محولات القدرة باستخدام تحويل المويجة لتحليل التيارات التفاضلية للأطوار الثلاثة بهدف التمييز بين حالات التشغيل المختلفة للمحول.

2- أظهرت الخوارزمية المقترحة قدرتها على التمييز الدقيق والموثوق بين تيارات الأعطال الداخلية وتيارات الاندفاع المغناطيسي وكذلك تيارات الأعطال الخارجية.

3- تتميز طريقة الحماية المقترحة بسرعة الاستجابة، حيث يمكنها إعطاء قرار الحماية خلال ¾ دورة (15 ملي ثانية)، الأمر الذي يعزز من كفاءة وسرعة عمل نظام الحماية.

8-2- التوصيات:

1- تطبيق الخوارزمية باستخدام برنامج محاكاة الحالات العابرة الكهرومغناطيسية EMTP.

2- نمذجة القصر بين لفات الملف الواحد لمحول القدرة واختبار الخوارزمية المطبقة عليه.

9- المراجع العلمية:

ATHAMNEH, A. A; ALQUDAH, A. M. 2024, *Transformer Inrush Current and Internal Fault Discrimination Using Multitypes of Convolutional Neural Network Techniques*. Journal of Electrical and Computer Engineering, UK. Vol., no. 1,17.

ATIYAH,W.A; KARIMI, S; MORADI, M.2026, *Hybrid wavelet transform and backpropagation neural network technique to distinguish internal faults and inrush currents in power transformers*. Electrical Engineering, Springer Germany. Vol.108,no.1 , 42.

ANDERSON, P. M.1999, *Power system protection*. Wiley-Interscience New York. IEEE Press, ,1330.

DAPSHIMA, B. A; AHMAD, S. K; WALI, M. H; MSHELIA, A. B.2025, *Real-Time Detection of Incipient Transformer Faults Using a Mamdani Fuzzy Inference System and dq0 Analysis*. International Journal of Science Innovation and Engineering India. Vol. 2, no.6, 999-1011.

GILBERT, S; TRUONG, N.1996, *Wavelets and filter Banks*. 2nd. Wellesley-Cambridge Press, U.S.A, 500.

GOMEZ-MORANTE, M; NICOLETTI, D.W.1999, *A Wavelet-based Differential Transformer Protection.* IEEE Transactions on Power Delivery U.S.A. Vol. 14, 1351 - 1358.

HAJJAR, A.A; ALSYOUFI, Y.R. 2019, A high-speed algorithm to discriminate between power swing and faults in distance relats based on a fast wavelet. Department of Electrical Power Engineering, Tishreen University Latakia Syria. no172, 269-276.

HOROWITZ, S.H; PHADKE, A.G.2008, *Power system relaying*. 3rd ed. Somerset Research Studies Press Ltd, UK,332.

HOSSAM ELDIN, A.A; REFAEY, M.A.2011, *A Novel Algorithm for Discrimination Between Inrush Current and Internal Faults in Power Transformer Differential Protection Based on Discrete Wavelet Transform*. Electric Power Systems Research NetherLand. vol. 81, 19-24.

HUSSEIN, R. I; GOKSENLI, N; BEKTAS, E; TEKE, M; TUMAY, M; YASEEN, E.S. 2024, *Enhanced Transformer Protection Using Fuzzy-Logic-Integrated Differential Relays: A Comparative Study with Rule-Based Methods*. Journal of Robotics and Control UKSW Indonesia. Vol.5, no.5, 2715–5072.

LIU, P; MALIK, O.P; CHEN, D; HOPE, G.S; GUO, Y.1992, *Improved operation of differential protection of power transformers for internal faults*. IEEE Trans Power Delivery U.S.A. Vol. 7, no.4, 1912–1919.

MATLAB,2003, *Wavelet Toolbox User's Guide*. R2023b, MATLAB, Natick, MA, Mathworks.

OLIVEIRA, M.O; BRETAS, A.S; FERREIRA, G.D.2014, *Adaptive Differential Protection of Three-phase Power Transformers Based on Transient Signal Analysis*. Electrical Power and Energy Systems NetherLand. Vol. 57, 366–374.

PIHLER, J; GRCAR, B; DOLINAR, D.1997, *Improved operation of power transformer protection using artificial neural network.* IEEE Trans Power Delivery U.S.A. Vol. 12, no.3, 1128–1136.

RAHMAN, M.A; JEYASURYA, B.1988, *A state-of-the-art review of transformer protection algorithms*. IEEE Trans Power Delivery U.S.A. Vol.3, no.2, 534–544.

RAMESH, K; SUSHAMA, M.2014, *Power Transformer Protection Using Wavelet based Fuzzy Logic.* Journal of Electrical Engineering. Vol. 14, 1 – 8.

SAFTY, S; GHARIEBh, S; BADR, AL; MANSOUR, M.2006, *A Wavelet Fuzzy Expert Technique for Classification of Power Transformer Transients.* Proceedings of International Conference on power system technology U.S.A. 1-5.

SIDHU, T.S; SACHDEV, M.S; WOOD, H.C; NAGPAL, M.1992, *Design, implementation and testing of a microprocessor-based high-speed relay for detecting transformer winding faults*. IEEE Trans Power Delivery U.S.A.Vol.7, no.1, 108–117.

TALWARE, R. S; KULKARNI, S.V; GAWANDE, G.P; PATIL, S.M; RAUT, J.K; MATHURKAR, K.2003, *Transformer Protection Improvement Using Fuzzy Logic*. European Chemical Bulletin India. Vol.12, no.S3 , 2991–3004.

TRIPATHY, M.2010, *Power Transformer Differential Protection Using Neural Network Principal Component Analysis and Radial Basis Function Neural Network*. Simulation Modeling Practice and Theory NetherLand. Vol. 18, 600-611.

TRIPATHY, M; MAHESHWARI, R.P; VERMA, H.K.2010, *Power Transformer Differential Protection Based on Optimal Probabilistic Neural Network.* IEEE transaction on power delivery U.S.A, Vol. 25, 102 - 112.

ZAMAN, M.R; RAHMAN, M.A.1998, *Experimental testing of the artificial neural network-based protection of power transformers*. IEEE Trans Power Delivery U.S.A. Vol 13,no.2, 510–517.