

A New Differential Protection Scheme for Rotor Windings of Type 3 Wind Generator (DFIG) Depends on Park Transform

Dr. Ammar Hajjar *

Dr. Izzat Hasan **

Hiba Khalil ***

(Received 13 / 12 / 2021. Accepted 27 / 4 / 2022)

□ ABSTRACT □

In the last years, the investment of wind energy has increased for electric power production as a clean and sustainable source, under a large increase in demand for energy by consumers. The Doubly-Fed Induction Generator (DFIG) is one of the most widely used types of wind generators in modern wind farms, due to the ability to control of rotation speed in proportion of wind speed and control both the real and reactive power independently. The rotor of these generators is exposed to many faults due to the nature of its design. These faults may lead to damage the generator and trip of wind plant and consequently to great economic losses. Accordingly, the interest in protecting wind generators from faults has increased recently.

Therefore, this paper presents a new differential protection scheme to protect the rotor of wind generator from faults. This scheme depends on using the Park Transformation in order to obtain and compare the differential currents in $d - q$ frame. This scheme takes into account the dynamic variations of the rotor frequency which has extremely low values during different operations modes.

To verify the performance of the adopted differential protection scheme in this paper, a wind plant with a type 3 wind generator DFIG was modeled in MATLAB/SIMULINK software environment and several internal and external faults of rotor was simulated. The results of modeling and simulation proved the effectiveness and reliability of the adopted protection scheme to protect the rotor windings of the wind generator from all faults, as well as its ability to distinguish between internal and external faults.

Keywords: Wind generator, Doubly-Fed induction generator (DFIG), Differential protection of rotor windings, Park transformation.

* Professor, Department of Electrical Power Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. E-mail: ammarhajjar@hotmail.com

*** Professor, Department of Electrical Power Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. IzzatHassan@gmail.com

** MSc. Student, Renewable Energy and Environment Engineering, Department of Electrical Power Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. E-mail: syhiba667@gmail.com.

إعداد خطة حماية تفاضلية جديدة لحماية ملفات دوائر المولد الريحي (DFIG) بالاعتماد على تحويل بارك

د. عمّار حجّار *

د. عزّت حسن **

هبا خليل ***

(تاريخ الإيداع 13 / 12 / 2021. قُبِلَ للنشر في 27 / 4 / 2022)

□ ملخّص □

تزايد في السنوات الأخيرة استثمار طاقة الرياح بهدف إنتاج الطاقة الكهربائية باعتبارها مصدراً نظيفاً ومستداماً في ظل التزايد الكبير في الطلب على الطاقة الكهربائية من قبل المستهلكين. يعد المولد التحريضي ذي التغذية المضاعفة (Doubly-Fed Induction Generator: DFIG) من أكثر أنواع المولدات الريحية استخداماً في المزارع الريحية الحديثة بسبب إمكانية التحكم بسرعة دورانه التي تتناسب مع سرعة الرياح وإمكانية التحكم المستقل بكل من استطاعته الفعلية والردية. يتعرض دوائر المولدات الريحية للعديد من الأعطال بسبب طبيعة تصميمه، قد تؤدي هذه الأعطال إلى عطب المولد وتوقف عمل المحطة الريحية وبالتالي إلى خسائر اقتصادية كبيرة. بناءً على ذلك، زاد الاهتمام في الآونة الأخيرة بحماية المولدات الريحية من الأعطال.

يقدم هذا البحث خطة حماية تفاضلية جديدة لحماية ملفات دوائر المولد الريحي من الأعطال، تعتمد هذه الخطة على استخدام تحويل بارك من أجل الحصول على التيارات التفاضلية في المستوي d-q ومقارنتها مع عتبة محددة مسبقاً، تأخذ هذه الخطة في الحسبان التغيرات الديناميكية لتردد الدوائر ذات القيم المنخفضة في حالات التشغيل المختلفة. لاختبار أداء خطة الحماية التفاضلية المقدمة في هذا البحث تم نمذجة نظام ريحي يحوي مولداً ريحياً DFIG في بيئة MATLAB/SIMULINK البرمجية، كما تم محاكاة العديد من الأعطال الداخلية والخارجية بالنسبة لملفات الدوائر. لقد أثبتت نتائج النمذجة والمحاكاة فعالية وموثوقية الخطة المقدمة من أجل حماية ملفات دوائر المولد الريحي من كافة الأعطال بالإضافة إلى قدرتها على التمييز بين الأعطال الداخلية والخارجية.

الكلمات المفتاحية: المولد الريحي، المولد التحريضي ذي التغذية المضاعفة (DFIG)، الحماية التفاضلية لملفات الدوائر، تحويل بارك.

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

ammarhajjar@hotmail.com

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

IzzatHassan@gmail.com

طالبة ماجستير - هندسة الطاقات المتجددة والبيئة - قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية. syhiba667@gmail.com

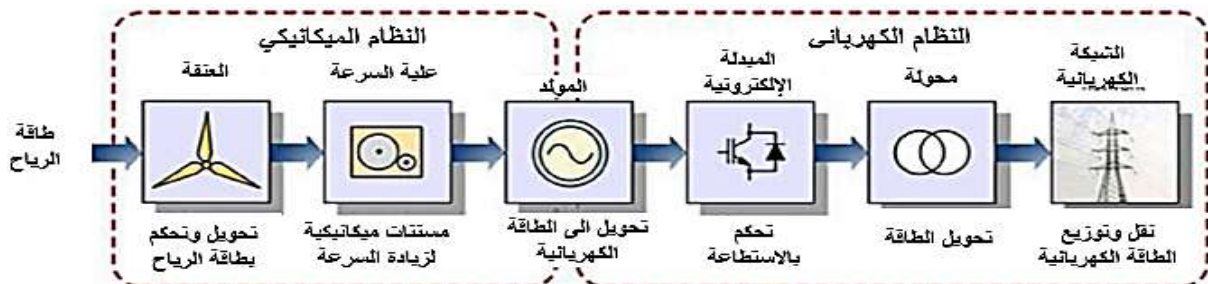
مقدمة:

لقد تم إدخال المولدات الريحية إلى الشبكات الكهربائية كواحدة من أكثر مصادر الطاقة المتجددة الواعدة، وذلك للحد من استخدام الوقود الأحفوري في ظل التزايد الكبير في الطلب على الطاقة الكهربائية. حيث شهدت المولدات الريحية في الآونة الأخيرة تطوراً ونموً سريعاً، من مولدات ذات دوائر يدور بسرعة ثابتة ومحددة إلى مولدات ذات دوائر متغيرة السرعة يتم التحكم بها بحسب سرعة الرياح للحصول على أكبر استطاعة كهربائية ممكنة، وذلك بسبب إدخال عناصر إلكترونية داخل تصميمها، أنظر إلى الشكل (1). لقد استطاعت هذه المولدات تقليل الضغط الميكانيكي المفروض على مكونات النظام الريحي عند هبوب الرياح وتحسين جودة الطاقة الكهربائية وبالتالي تحقيق كفاءة أكبر بالمقارنة مع مولدات الرياح ثابتة السرعة.

بشكل عام، يوجد أربعة أنواع رئيسية من المولدات الريحية، هي [1]:

1. النوع الأول Type-1: هو مولد تحريضي ذي قفص سنجاب Squirrel-Cage Induction Generator (SCIG) سرعته ثابتة لا يمكن التحكم بها لأنها محددة بتردد الشبكة.
 2. النوع الثاني Type-2: هو مولد تحريضي ذي حلقات انزلاق Wound Rotor Induction Generator (WRIG) تكون ملفات الدوائر فيه موصولة إلى مقاومة خارجية متغيرة للتحكم بخصائص العزم / السرعة.
 3. النوع الثالث Type-3: هو مولد تحريضي ذي تغذية مضاعفة Doubly-Fed Induction Generator (DFIG) مزود بمبدلة إلكترونية للتحكم بسرعته.
 4. النوع الرابع Type-4: هو مولد تحريضي أو متوافق، مزود بمبدلة إلكترونية تكون موصولة بشكل كامل ومباشر مع الشبكة Full- Converter Induction/Synchronous Generator.
- تعتمد المزارع الريحية الحديثة على استخدام النوعين الثالث والرابع من المولدات الريحية نظراً لامتعهما بالمميزات التالية، وهي غير متوفرة في المولدات التقليدية العادية [2]:

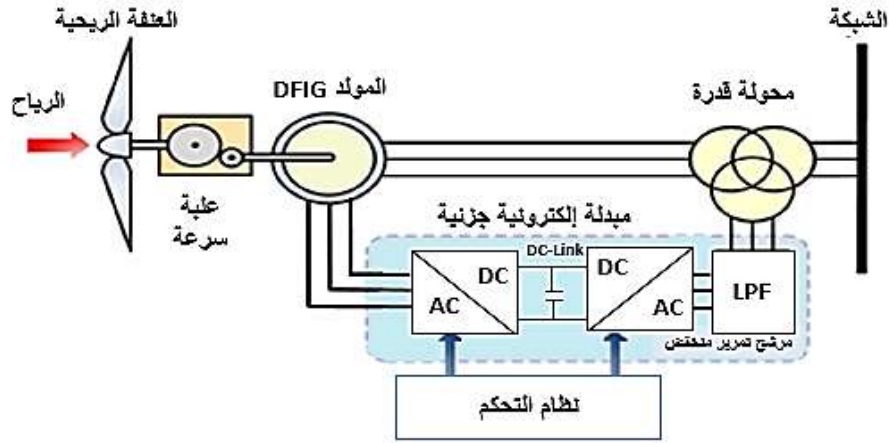
- إمكانية إنتاج الطاقة على مجال واسع من سرعات الرياح.
- إمكانية التحكم بشكل سريع ومستقل بالاستطاعتين الفعلية والردية.
- إمكانية الحد من قيمة تيار العطل بسبب وجود العناصر الإلكترونية فيها.
- قدرتها على الاستمرار في العمل عند انخفاض الجهد، الناتج عن الأعطال الخارجية لفترات قصيرة Low Voltage Ride Through (LVRT).



الشكل (1): مخطط بسيط لنظام ريحي متغير السرعة DFIG مربوط مع الشبكة العامة.

يتكون المولد الريحي من النوع الثالث DFIG المستخدم في بحثنا هذا، أنظر إلى الشكل (2)، من مولد تحريضي توصل ملفات الثابت فيه إلى الشبكة الكهربائية عبر محولة قدرة، ويوصل الدائر فيه إلى العنفة الريحية عبر علبة السرعة وإلى الشبكة الكهربائية عبر مبدلة إلكترونية مكونة من جزأين، الجزء الأول هو عبارة عن مبدلة تكون من جانب الشبكة (GSC: Grid Side Converter) يتم التحكم بها للمحافظة على جهد ثابت للحلقة الوسطية V_{DC_Link} ، بغض النظر عن استطاعة الدائر، وكذلك للمحافظة على عامل استطاعة واحد في دائرة دائر المولد، أما الجزء الثاني فهو عبارة عن مبدلة تكون من جانب الدائر (RSC: Rotor Side Converter) وظيفتها تحقيق تحكم مستقل بالاستطاعتين الفعلية والردية، يكون بين الجزأين حلقة تيار مستمر وسيطيه DC-Link وظيفتها تنظيم الجهد وتخزين الطاقة الفائضة خلال الأعطال.

يتم التحكم في تردد الدائر بوساطة العناصر الإلكترونية التي تتبع استراتيجيات التحكم، وبالتالي يتم التحكم بسرعة العنفة، حيث يمكن تغيير هذه السرعة من (30-40)٪ من سرعة المولد، مما يقلل من كلفة المبدلة الإلكترونية هنا مقارنة مع المولد من النوع الرابع ذي المبدلة الإلكترونية الكاملة (Full-Converter Type Generator) [3].



الشكل (2): البنية التصميمية للمولد الريحي ذي التغذية المضاعفة DFIG.

بالرغم من الميزات التي يتمتع بها المولد الريحي ذي التغذية المضاعفة (DFIG) إلا أن توحيد وتطوير خطة حماية شاملة لكل أجزائه يشكل تحدياً كبيراً لمهندس الحماية، وذلك للأسباب التالية [4]:

- حساسيتها لأي انخفاض مفاجئ في جهد الشبكة بسبب توصيل ثابت المولد الريحي مباشرة إلى الشبكة، بالإضافة إلى ضرورة تحقيق المتطلبات اللازمة للوصل مع الشبكة مثل تعزيز قدرة التحكم في سريان الاستطاعة وإمكانية استمرار العمل عند انخفاض الجهد لفترات قصيرة من أجل الحفاظ على العمل بشكل صحيح وغيرها، يعد تحقيق هذه المتطلبات أمراً مهماً ويتطلب دراسة دقيقة.
- قد يكون اتجاه سريان الاستطاعة من الدائر موجباً أو سالباً، يعتمد هذا على وضعية تشغيل المولد، حيث يمكن أن تتأرجح سرعة المولد حول السرعة التزامنية (زيادة أو نقصاناً).
- اختلاف تردد كل من الجزء الثابت والجزء الدائر.
- تردد الدائر منخفض ومتغير (5-20 Hz).

لذلك، تعد دراسة خصائص تيارات العطل وكذلك تحليلات الدارة القصيرة خطوة أساسية عند تصميم خطة حماية فعالة وموثوقة من الأعطال الداخلية والخارجية لكل جزء من أجزاء المولدات الريحية، حيث يختلف سلوكها خلال العطل عن سلوك المولدات التقليدية بسبب وجود العناصر الإلكترونية فيها التي تجعل تيار العطل صغير نسبياً لا تستطيع الحماية التقليدية اكتشافه في ظل ظروف العمل الديناميكية [5-8].

لقد نمت الأبحاث العلمية بشكل كبير في السنوات الأخيرة باتجاه تطوير خطط حماية مخصصة لحماية دوائر وثابت المولد الريحي DFIG من كافة الأعطال. بهذا الشأن، تم في المرجعين [9, 10] اقتراح العديد من خطط الحماية لحماية المولد الريحي من الأعطال الخارجية على الشبكة (خارج بنية المولد)، حيث قدم الباحثون خطة حماية تستخدم مقاومة كبح ديناميكية تسلسلية متحكم بها من جهة الثابت مع محاكاة عطل خارجي ثلاثي الطور على الشبكة، وأظهرت نتائج النمذجة والمحاكاة أداءً جيداً في الاستجابة للعطل، إضافة إلى القدرة على الحد من قيمة التيارات الزائدة على الجزء الثابت.

تم في المرجعين [11,12] تصميم وحدة تحكم باستخدام الخوارزمية الجينية والمنطق الضبابي في بيئة MATLAB/SIMULINK البرمجية، وذلك للحماية من الجهود المرتفعة وتحسين خاصية Low Voltage Ride Through (LVRT)، لكن كانت البيانات المستخدمة لتقييم الأداء قليلة. أما في المرجعين [13, 14] فقد تم استخدام ملفات فائقة التوصيل Super-conducting magnetic energy Storage Fault Current Limiter (SMES-FCL) لتخزين الطاقة الفائضة والحد من التيارات الناتجة عن الأعطال، لقد أظهرت هذه الملفات أداءً جيداً في حماية المولد الريحي، إضافة إلى تحسين متطلبات LVRT وحل مشكلة تأرجح الاستطاعة، لكن تعد الملفات فائقة التوصيل عالية الثمن.

قدم باحثون في المرجع [15] خطة حماية لمزرعة ريحية كبيرة، تحوي مولدات ريحية من النوع الثالث DFIG، لحماية ثابت ودوائر المولدات من الأعطال الخارجية على الشبكة، وذلك بالاعتماد على دارة حماية من الجهود المرتفعة Crow-bar Circuit، كما قدموا خطة تحكم تأخذ بالحسبان ديناميكية الفيض المغناطيسي لتحسين خاصية LVRT، وأظهرت نتائج الاختبار جدوى وفعالية هذه الطريقة.

أما فيما يتعلق بالحماية الداخلية لكل من ثابت ودوائر المولد الريحي فقد تعددت الأبحاث حول حماية كل منهما على حدى أو حماية كلاهما معاً. حيث اقترح باحثون في المرجع [16] خطة حماية لملفات الثابت تعتمد على تحويل الموجة المتقطع Discrete Wavelet Transform (DWT) وتحويل بارك الممتد Extended Park Vector Approach (EPVA) وذلك لتحليل إشارات تيارات الثابت وتفعيل الحماية عند تجاوزها لعتبة محددة مسبقاً، لكن قد تعطي هذه الخطة إشارات فصل خاطئة عند وجود اضطرابات في الشبكة بوجود العطل الداخلي. للتغلب على تأثير اضطرابات الشبكة على خطة الحماية هذه تم في المرجع [17] تطبيق خطة حماية لاكتشاف أعطال ملفات الثابت باستخدام نظرية التوافقيات لتحليل إشارة تيار الدائر، حيث أظهرت نتائج الاختبار فعالية هذه الطريقة وعدم تأثرها باضطرابات الشبكة، وذلك عند محاكاة مجموعة من الأعطال الداخلية والخارجية. أما في المراجع [18, 19] فقد اقترح باحثون خطط حماية تستخدم تحويل الموجة المتقطع DWT لتحليل إشارات جهد الدائر وتيار الثابت وقد كان أدائهاً جيداً، لكن كان عدد حالات الأعطال المدروسة قليلاً.

لقد كانت خطط الحماية من الأعطال الداخلية السابقة الذكر مخصصة لحماية ثابت المولد الريحي فقط، أما في المرجع [20] فقد اقترح الباحثون خطة حماية مخصصة لملفات الدائر تعتمد على تحويل فورييه السريع (Fast Fourier

(Transform: FFT) وذلك من أجل اكتشاف بدايات حدوث الأعطال باستخدام إشارات تيار الدائر. كذلك تم في المرجع [21] استخدام مركبة التتابع السالب لتيارات ملفات الدائر من أجل اكتشاف أعطال ملفات الدائر بوجود عطلين داخلي وخارجي، لكن كان من الصعب اكتشاف الأعطال بوجود اضطرابات خارجية بسبب ظهور التوافقيات في الإشارة وصعوبة تمييزها عن مركبة التتابع السالب. لحل هذه المشكلة تم في المرجع [22] استخدام تحويل فورييه FFT لتحليل إشارات تيارات الثابت من أجل اكتشاف أعطال ملفات الدائرو أعطت هذه الطريقة سهولة وسرعة في اكتشاف العطل، حيث تم استخدام نظرية الحلقات المتعددة في تمثيل نموذج المولد الريحي. في المرجع [23] تم اكتشاف أعطال القصر بين لفات ملفات الدائر باستخدام القيمة الفعلية (RMS) لتيارات الدائر وباستخدام مركبات التتابع المباشرة والعكسية لهذه التيارات والنسبة بينهما، حيث تزداد هذه النسبة بوجود العطل، لكن تم تقييم أداء خطة الحماية السابقة لأجل حالة عطل واحدة فقط.

أما في المرجع [24] فقد تم استخدام مرشح كالمان (Kalman Filter) للكشف عن الأعطال غير المتناظرة في ملفات الدائر في ظل التغييرات الديناميكية لسرعة الرياح. لقد أثبتت هذه الطريقة جدارتها في اكتشاف العطل في حالي الوصل والعزل عن الشبكة. أما في المرجع [25] فقد تم تصميم نظام حماية لاكتشاف أعطال لفات ملف الدائر في الزمن الحقيقي، وذلك باستخدام التحليل الطيفي وتحويل الموجة، حيث بينت نتائج الاختبار بأن تحويل الموجة هي أداة أسرع في الكشف عن العطل ولكن التحليل الطيفي هو الأكثر بساطة من ناحية التنفيذ.

اقترح باحثون في المراجع [26, 27] خططاً لحماية ملفات ثابت ودائر المولد الريحي معاً، حيث تم في المرجع [26] تطوير خطة تعتمد على الدارة المكافئة للمولد في الإحداثيات $d-q$ لاكتشاف الأعطال بناءً على تيارات الثابت والدائر على كل من المحورين d و q ، ولكن لم يتم إزالة الضجيج من الإشارة الأمر الذي أثر على دقة النتائج، كما تم اختبار أداء خطة الحماية المقترحة لأجل حالات عطل محدودة فقط. تم في المرجع [27] استخدام تحويل فورييه السريع FFT لتحليل ومعالجة إشارات كل من تيارات وجهود ثابت المولد الريحي لتقدير الاستطاعة الردية من أجل تشخيص الأعطال وذلك بوجود نظام تشخيص تلقائي وجمع للبيانات عن بعد، لكن لم تعمل هذه الطريقة بشكل صحيح عند عمل المولد بسرعة قريبة من السرعة التزامنية.

يقدم هذا البحث خطة حماية تفاضلية جديدة لحماية ملفات دوائر المولد الريحي من الأعطال، تعتمد هذه الخطة على استخدام تحويل بارك من أجل الحصول على التيارات التفاضلية في المستوي $d-q$ ومقارنتها مع عتبة محددة مسبقاً، تأخذ هذه الخطة في الحسبان التغييرات الديناميكية لتردد الدائر ذات القيم المنخفضة في حالات التشغيل المختلفة، كما أنها تمتلك المقدرة على التمييز بين أعطال الدائر الداخلية والخارجية.

أهمية البحث وأهدافه:

تأتي أهمية البحث من ضرورة الاستثمار الأمثل لمحطات طاقة الرياح واستمرارية تشغيلها للحصول على الاستطاعة القصوى منها ولتفادي الخسائر الاقتصادية العالية الناتجة عن أعطالها، حيث أن معدلات الفشل وتكلفة الصيانة وخاصة للجزء الدائر تكون مرتفعة جداً في أنظمة التوليد الريحية بسبب ظروف الإنشاء والتثبيت الصعبة إضافة لظروف العمل الديناميكية. يهدف هذا البحث إلى تطوير خطة حماية تفاضلية فعالة وموثوقة لحماية ملفات دوائر المولد الريحي من الأعطال، تكون قادرة على التمييز بين الأعطال الداخلية والخارجية وتأمين الفصل السريع للمولد الريحي.

طرائق البحث ومواده:

لقد تمّ في هذا البحث نمذجة نظام توليد ريحي، مزود بمولد تحريضي ذي تغذية مضاعفة 2MW-DFIG، موصول إلى الشبكة الكهربائية وذلك في بيئة MATLAB/SIMULINK البرمجية. لقد تم التركيز في هذا البحث على نمذجة المولد وخطة الحماية المقترحة لحماية ملفات الدوائر فقط دون التطرق إلى الأجزاء الأخرى للنظام مثل نموذج العنفة وأنظمة التحكم، كما تم اختبار خطة الحماية التفاضلية النسبية المثوية المقدمة لحماية ملفات الدوائر المعتمدة على تحويل بارك من خلال محاكاة الأنواع المختلفة للأعطال (قصر ثلاثي الطور - قصر ثنائي الطور - قصر ثنائي الطور مع الأرض - قصر أحادي الطور مع الأرض) داخل وخارج منطقة حماية دوائر المولد الريحي.

1. نموذج المولد الريحي من النوع الثالث DFIG:

لتبسيط تمثيل المولد التحريضي من النوع الثالث DFIG، تم استخدام تحويل بارك Park Transformation من أجل الانتقال من النظام الثلاثي الطور (abc) إلى النظام الثنائي الطور (dq)، أنظر إلى الشكل (3)، وذلك لتبسيط وتسهيل العمليات الحسابية، حيث يسمح النظام (dq) بالتحكم بشكل مستقل بالمكونات المباشرة (على المحور d) والمكونات العكسية (على المحور q) من خلال إمكانية التعامل مع مكونات ذات طبيعة مستمرة وغير دورية أو جيبية. لقد تم تمثيل المولد التحريضي ذي التغذية المضاعفة في مستوي الإحداثيات dq وفقاً للنموذج الديناميكي للمولد الريحي في الإطار التزامني المبين في الشكل (3-b) كما يلي [28]:

جهود الثابت:

$$\frac{d\psi_{sq}}{dt} = V_{sq} - R_s I_{sq} - \omega_s \psi_{sd} \quad (1)$$

$$\frac{d\psi_{sd}}{dt} = V_{sd} - R_s I_{sd} - \omega_s \psi_{sq} \quad (2)$$

فيوض الثابت:

$$\psi_{sq} = L_s I_{sq} + L_m I_{rq} \quad (3)$$

$$\psi_{sd} = L_s I_{sd} + L_m I_{rd} \quad (4)$$

جهود الدوائر:

$$\frac{d\psi_{rq}}{dt} = V_{rq} - R_r I_{rq} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{rd} \quad (5)$$

$$\frac{d\psi_{rd}}{dt} = V_{rd} - R_r I_{rd} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{rq} \quad (6)$$

فيوض الدوائر:

$$\psi_{rq} = L_r I_{rq} + L_m I_{rd} \quad (7)$$

$$\psi_{rd} = L_r I_{rd} + L_m I_{sd} \quad (8)$$

تعطى محارضة الثابت والدوائر كما يلي:

$$L_s = L_{ls} + L_m \quad (9)$$

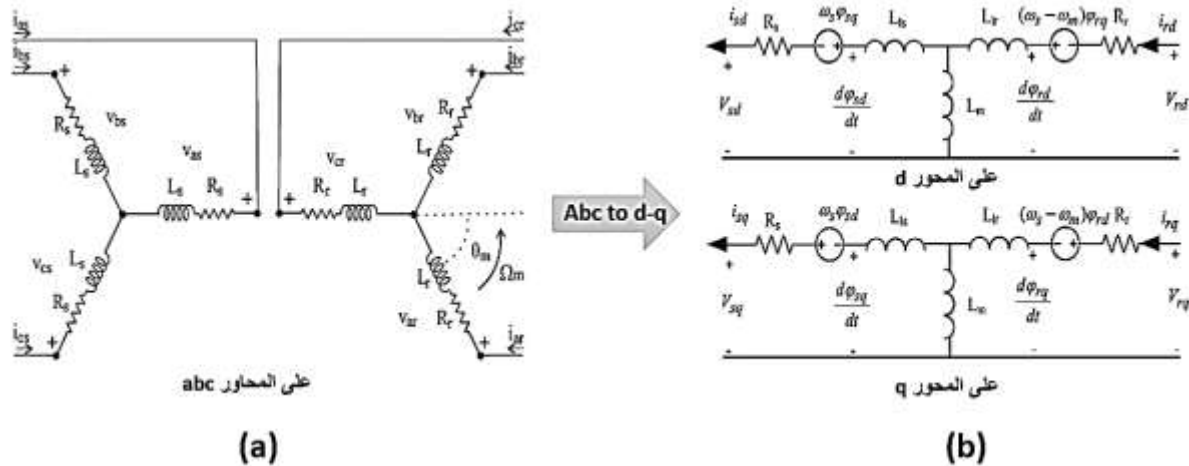
$$L_r = L_{lr} + L_m \quad (10)$$

حيث، تشير الرموز Φ, V, I, θ إلى التيار والجهد والفيض على التوالي، وتشير الرموز s, r للدلالة على الجزء الدائر والثابت على التوالي. وتشير ωr إلى السرعة الزاوية للدائر، و تشير ωs إلى السرعة الزاوية للساحة المغناطيسية في الثابت، بينما R_r, R_s تشيران إلى مقاومة الثابت والدائر على التوالي. وتشير L_m إلى المحارضة المتبادلة بين الثابت والدائر، L_{ls}, L_{lr} تشيران إلى المحارضة التسريية لكل من الدائر والثابت على التوالي.

بناءً على ما سبق، يعبر عن الاستطاعة الفعلية والاستطاعة الردية للجزء الثابت بالمعادلات التالية:

$$P_s = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \quad (11)$$

$$Q_s = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \quad (12)$$



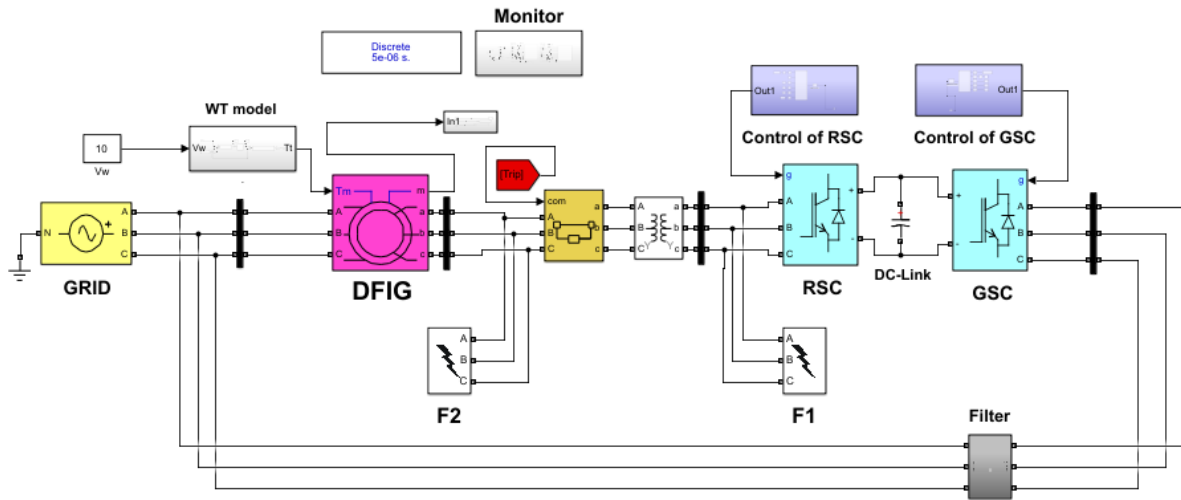
الشكل (3): النموذج الديناميكي للمولد: (a) في الإحداثيات abc - (b) في الإحداثيات dq.

لقد تم في هذا البحث نمذجة ومحاكاة مولد ريحي من النوع الثالث (مولد تحريضي ذي تغذية مضاعفة DFIG) مع كل من المبدلات الإلكترونية GSC و RSC وفق المحددات المبينة في الجدول (1).

الجدول (1): محددات المولد الريحي من النوع الثالث المستخدم في النظام الريحي المدروس.

| المحدد | القيمة | المحدد | القيمة |
|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| الاستطاعة الاسمية للمولد | $P = 2 \text{ MW}$ | جهد الحلقة DC-Link | $V_{dc} = 1200 \text{ V}$ |
| الجهد الاسمي للمولد | $V = 690 \text{ V}$ | ثابت العطالة | $H = 0.5$ |
| المقاومة الداخلية لملف الثابت | $R_s = 0.0108 \text{ p.u.}$ | تردد الشبكة | $F_n = 50 \text{ Hz}$ |
| المقاومة الداخلية لملف الدائر | $R_r = 0.0121 \text{ p.u.}$ | نسبة لفات الثابت إلى الدائر | $N_s / N_r = 0.333$ |
| المحارضة التسريية لملف الثابت | $L_{ls} = 0.102 \text{ p.u.}$ | عدد أزواج أقطاب المولد | $P = 2$ |
| المحارضة التسريية لملف الدائر | $L_{lr} = 0.11 \text{ p.u.}$ | المحارضة المتبادلة | $L_m = 3.362 \text{ p.u.}$ |

حيث يعمل المولد الريحي هنا على حقن استطاعة فعلية إلى الشبكة العامة مقدارها 1.5 MW ولا يقدم أي استطاعة رديه لها باعتبار أن سرعة المولد هي 1.1 p.u لأجل حالة تشغيل عند سرعة أعلى من السرعة التزامنية. للتحكم بمبدلة الشبكة GSC تم استخدام التحكم الموجه لجهد الشبكة (VOC) Voltage Oriented Control، وللتحكم بمبدلة الدائر RSC تم استخدام التحكم الشعاعي (Vector Control)، كما تم تطبيق نظام الحماية التفاضلية واختباره من خلال محاكاة مجموعة من الأعطال الداخلية والخارجية بالنسبة لملفات الدائر في نقطتين مختلفتين، يبين الشكل (4) نموذج النظام الريحي المنفذ في بيئة MATLAB/SIMULINK البرمجية.



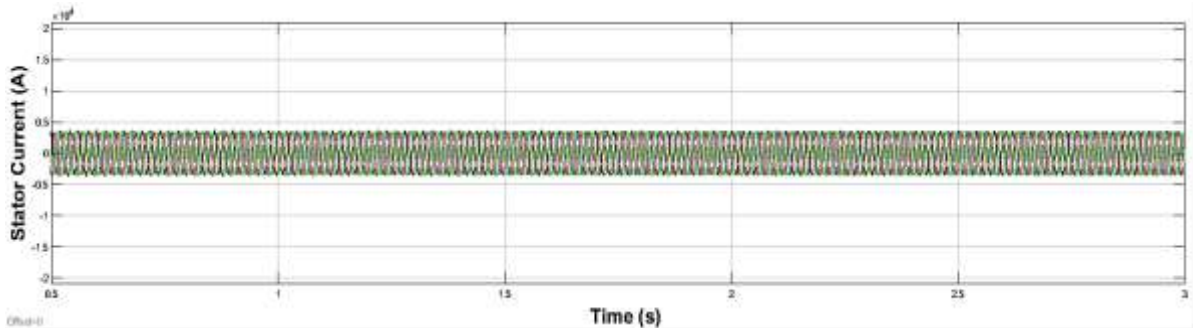
الشكل (4): نموذج النظام الريحي المنفذ في بيئة MATLAB/SIMULINK البرمجية.

2. حماية ملفات دوائر المولد الريحي DFIG:

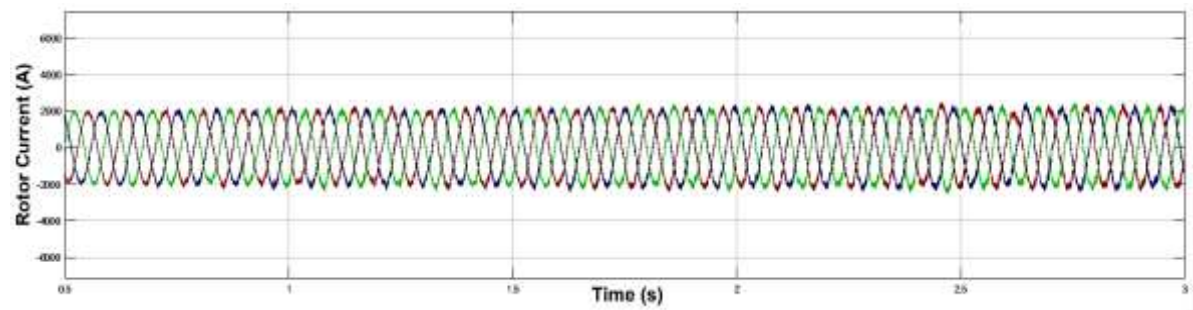
نظراً لأن دوائر المولد الريحي DFIG يعتبر من أعلى أجزائه ثمناً وخاصة في المحطات الريحية الكبيرة يكون من الأهمية بمكان تأمين خطة حماية فعالة وموثوقة له من كافة أنواع الأعطال. لقد بينت أن 38% من أعطال المولد الريحي تكون في الجزء الثابت و 10% من الأعطال تكون في الجزء الدائر و 40% من الأعطال تكون في المسفرت [29]. بشكل عام، يتم استخدام زواجل الحماية التقليدية في هذه المولدات لحماية ملفات الثابت مثل زواجل الحماية من التيار الزائد والحماية التفاضلية وغيرها، ولكن بالنسبة لملفات الدائر لا توجد خطة موحدة لحمايتها، قد يكون بعضها عبارة عن إجراءات داخل أنظمة التحكم للمبدلات الإلكترونية الموصلة معه. يمكن استخدام زواجل الحماية المستخدمة في حماية ملفات الثابت من أجل حماية ملفات الدائر، ولكن تردد وجهد ملفات الدائر يكون مختلف تماماً عن تردد وجهد ملفات الثابت، أنظر إلى الشكلين (5) و (6)، حيث يشكل تردد ملفات الدائر (30 – 0) % من تردد ملفات الثابت (تردد الشبكة). بالإضافة لذلك، يكون تردد الدائر متغيراً، وقد يكون موجباً أو سالباً يتبع هذا إلى حالة تشغيل المولد الريحي (بسرعة أعلى أو أقل من السرعة التزامنية). لملف الدائر وضعية خاصة بسبب اتصاله مع العناصر الإلكترونية التي يسبب ظهور توافقيات وحالات عابرة سريعة، أما جهد الدائر فقد يكون عدة أجزاء من جهد الثابت ويعتمد على الانزلاق s ونسبة عدد لفات ملف الثابت إلى عدد لفات ملف الدائر N_s / N_r .

سيتم فيما يلي تقديم خطة حماية تفاضلية جديدة لحماية ملفات دوائر المولد الريحي من النوع الثالث، أنظر إلى الشكل (7)، تعتمد هذه الخطة على استخدام تحويل بارك للحصول على التيارات التفاضلية في مستوي الإحداثيات d-q

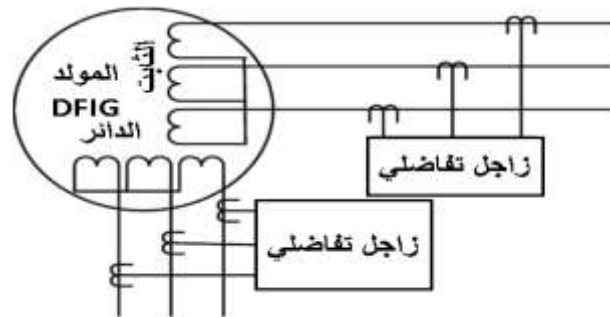
ومقارنتها مع العتبة للحصول على إشارة الفصل التي تُرسل بدورها إلى قاطع الدارة المناسب. تأخذ هذه الخطة في الحسبان التغييرات الديناميكية لعمل المولد الريحي، كما أنها تملك المقدرة على التمييز بين أعطال الدائر الداخلية والخارجية.



الشكل (5): تيار الثابت بحالة العمل الطبيعي دون وجود أعطال.



الشكل (6): تيار الدائر بحالة العمل الطبيعي دون وجود أعطال.



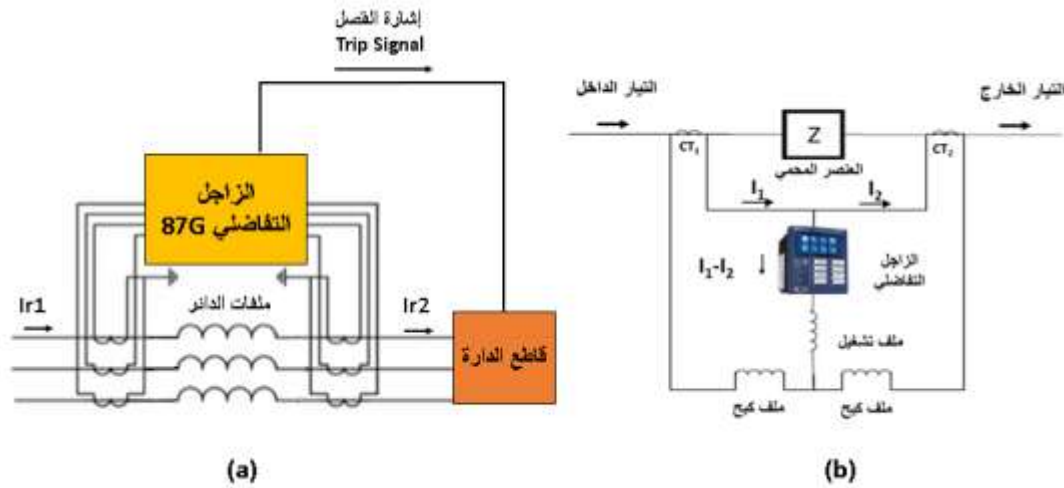
الشكل (7): الحماية التفاضلية لملفات الدائر [30]

3. الحماية التفاضلية المقترحة لملفات الدائر:

تعد الحماية التفاضلية الحماية الأكثر موثوقية ودقة في حماية عناصر أنظمة الطاقة الكهربائية [31]. يعتمد مبدأ عملها على حساب الفرق بين تيارات الدخل والخرج للعنصر المراد حمايته، أنظر إلى الشكل (8-a)، إذا تجاوز هذا الفرق بين التيارات عتبة التعيير (عتبة محددة مسبقاً)، سيعمل الزاجل معتبراً أنه عطل داخلي وإلا فلن يعمل، ويسمى هذا الفرق بالتيار التفاضلي ويعبر عنه كما يلي:

$$I_{diff} = |I_1 - I_2| \quad (13)$$

قد يعمل أحياناً زاجل الحماية التفاضلي بشكل خاطئ بسبب عدم توازن جهود الشبكة أو بسبب إشباع محولات التيار أو بسبب أخطاء نسب تحويل محولات التيار وغيرها من الأمور التي تؤثر سلباً على عمل الزواجل التفاضلية. لحل هذه المشكلة يتم عادة استخدام الحماية التفاضلية النسبية المنوية التي يتكون فيها الزاجل التفاضلي من ملفين الأول ملف تشغيل Operat والثاني ملف كبح Restraint، أنظر إلى الشكل (8-b).

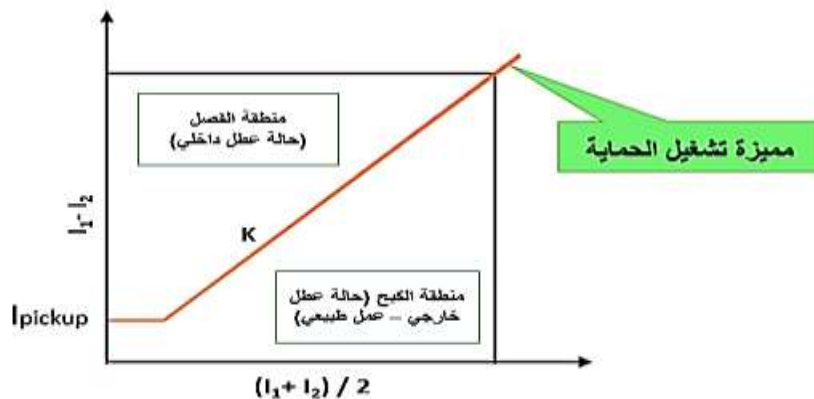


الشكل (8): (a) مولد مزود بزاجل حماية تفاضلي، (b) الزاجل التفاضلي النسبي المنوي [32].

تعرف نسبة عدد لفات ملف التشغيل N_o إلى عدد لفات ملف الكبح N_r بثابت الانحدار (الميل) $K = N_o / N_r$ الذي يحدد عادة كنسبة مئوية يمكن تعديلها لزيادة أو خفض حساسية زاجل الحماية التفاضلي، تكون قيمة هذا الميل (0.1 - 0.4). لذا، من الأهمية بمكان اختيار القيمة الدقيقة للميل K لأن الاختيار غير الدقيق لها قد يؤدي إلى تشغيل الزاجل التفاضلي بشكل خاطئ أو عدم تشغيله خلال الأعطال، يوضح الشكل (9) مميزة تشغيل الحماية التفاضلية النسبية المنوية. يعبر عن مميزة تشغيل الزاجل التفاضلي كما يلي:

$$\text{Relay Logic} = \begin{cases} 1 & |I_1 - I_2| > K \left| \frac{I_1 + I_2}{2} \right| + I_{\text{pickup}} \\ 0 & |I_1 - I_2| < K \left| \frac{I_1 + I_2}{2} \right| + I_{\text{pickup}} \end{cases} \quad (14)$$

I_{pickup} : هو أصغر تيار يعمل عنده الزاجل التفاضلي (تيار التشغيل) وتكون قيمته عادة 0.25.



الشكل (9): مميزة تشغيل الحماية التفاضلية النسبية المنوية.

إذا كان خرج الزاغل $Relay Logic = 1$ فهذا دليل على وجود عطل داخلي مما يستدعي عمل الزاغل التفاضلي، أما إذا كان خرج الزاغل $Relay Logic = 0$ فهذا دليل على وجود عطل خارجي أو حالة عمل طبيعية مما يستدعي قفل عمل الزاغل التفاضلي.

تعتمد خطة الحماية التفاضلية المقترحة في هذا البحث على استخدام تحويل بارك للحصول على التيارات التفاضلية لملفات الدائر في مستوي الإحداثيات (dq)، ومن ثم تطبيق خوارزمية الحماية التفاضلية النسبية المئوية عليها. من التمثيل الديناميكي للمولد الريحي المبين في الشكل (3-b)، وفي حال التحكم بالمبدلة الإلكترونية من جهة الشبكة GSC وباستخدام الجهد الموجه لجهد المنبع (VOC) يكون شعاع جهد الشبكة منطبق على المحور d أي:

$$V_{sq} = 0 \text{ و } V_{sd} = V_s$$

خلال ظروف العمل الطبيعي يبقى الفيض الثابت ثابتاً لأن الثابت يكون موصول مباشرة إلى الشبكة، وبالتالي سيكون:

$$\frac{d\phi_s}{dt} = 0$$

بتعويض ما سبق في المعادلتين (1) و(2) والأخذ في الحسبان أن مقاومة ملفات الثابت تكون صغيرة جداً لدرجة يمكن إهمالها، يكون الفيض الثابت على المحورين d و q كما يلي:

$$\phi_{sd} = 0 = L_m I_{rd} - L_s I_{sd} \quad (15)$$

$$\phi_{sq} = -\frac{V_{sd}}{\omega_s} = L_m I_{rq} - L_s I_{sq} \quad (16)$$

وبالتالي يمكن كتابة العلاقة بين تيارات الثابت والدائر في الإحداثيات (dq) مع التحكم (VOC) كما يلي:

$$I_{rd} = \left(\frac{L_s}{L_m}\right) I_{sd} \quad (17)$$

$$I_{rq} = -\frac{|V_s|}{\omega_s L_m} + \frac{L_s}{L_m} I_{sq} \quad (18)$$

من المعادلات (17)، (18) نلاحظ أن التيارات في مستوي الإحداثيات d-q لا تتعلق بسرعة الرياح المتغيرة. بما أن جميع المحددات في المعادلات (17) و(18) ثابتة، أي $L_m, L_s, V_s, \omega_s = \text{constant}$ ، ستعمل خطة الحماية هذه لأجل أي حالة تشغيل (لأجل سرعات أعلى أو أقل من السرعة التزامنية). ما يهمنا في هذا البحث هو تيارات ملفات الدائر I_{rd}, I_{rq} (في المستوي d-q)، انظر إلى الشكل (10)، يمكن التعبير عن التيارات التفاضلية بحالة العمل الطبيعي والأعطال الخارجية في مستوي المحورين (dq) كما يلي:

$$|I_{r1d} - I_{r2d}| = 0 \quad (19)$$

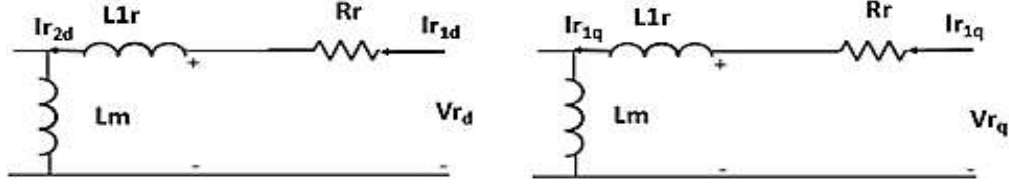
$$|I_{r1q} - I_{r2q}| = 0 \quad (20)$$

نلاحظ أن التيارات التفاضلية في مستوي المحورين الإحداثيين d و q هو نفسه في نقطة بداية الملف ونهايته.

أما تيارات الكبح التي ستقارن مع التيارات التفاضلية، التي لن تكون مساوية للصفر بحالة العطل، فيعبر عنها كما يلي:

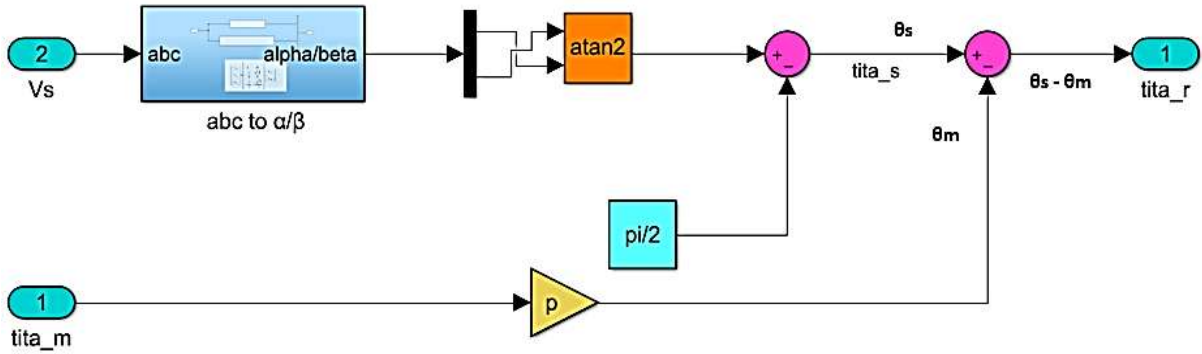
$$|I_{r1d} - I_{r2d}| > K \frac{|I_{r1d} + I_{r2d}|}{2} + I_{pickup} \quad (21)$$

$$|I_{r1q} - I_{r2q}| > K \frac{|I_{r1q} + I_{r2q}|}{2} + I_{pickup} \quad (22)$$



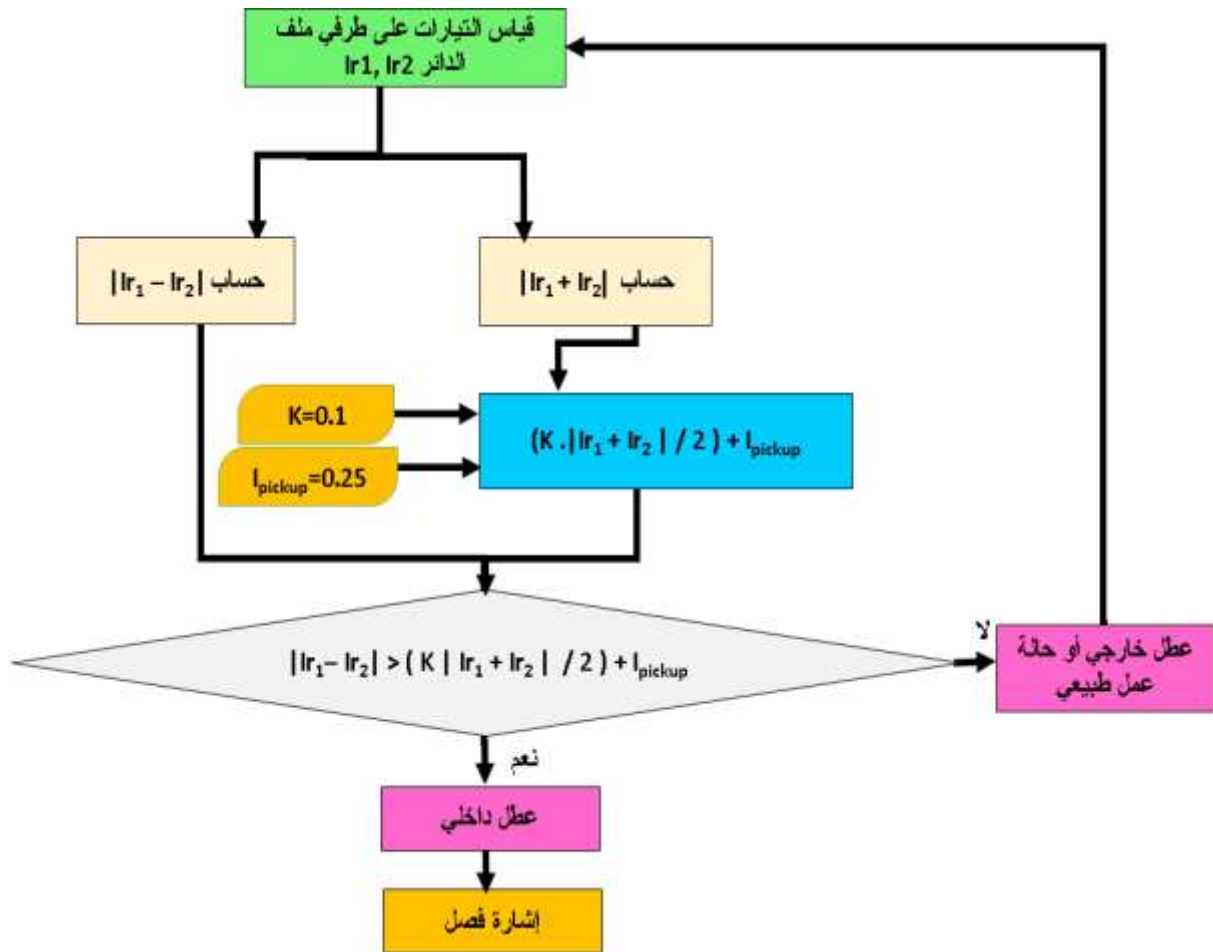
الشكل (10): ملف الدائر في مستوي الإحداثيات dq.

لتحويل تيارات ملفات الدائر من الإحداثيات (abc) إلى الإحداثيات (dq) تم استخدام حلقة مغلقة Phase-Locked Loop (PLL) وذلك للحصول على زاوية (طور) جهد الثابت θ_s اللازمة للمقارنة مع زاوية دوران الدائر θ_m التي يتم الحصول عليها مباشرة من المولد الريحي، $\theta_r = (\theta_s - \theta_m)$ ، أنظر إلى نمذجة هذه الحلقة في بيئة ماتلاب MATLAB / SIMULINK البرمجية في الشكل (11).



الشكل (11): نمذجة الحلقة المغلقة PLL في بيئة MATLAB / SIMULINK البرمجية.

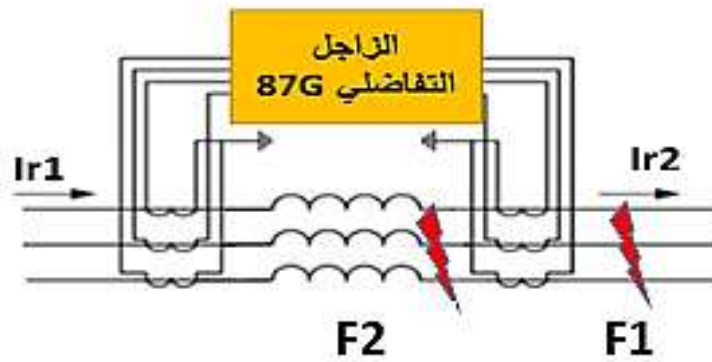
بعدها يتم حساب التيارات التفاضلية $|I_{r1d} - I_{r2d}|$ و $|I_{r1q} - I_{r2q}|$ يتم مقارنتها مع تيارات الكبح $K \frac{|I_{r1d} + I_{r2d}|}{2} + I_{pickup}$ و $K \frac{|I_{r1q} + I_{r2q}|}{2} + I_{pickup}$. ويتم تفعيل خطة الحماية هذه عندما يكون التيار التفاضلي أكبر من تيار الكبح وهذا يحدث عند حدوث عطل داخلي فقط، ليتم بعدها إرسال إشارة فصل إلى قاطع الدارة الخاص بدائر المولد الريحي، وهكذا يتم تأمين حماية كاملة لملفات دوائر المولد الريحي. يوضح الشكل (12) مخطط صندوق خطة الحماية المقترحة لملفات دوائر المولد الريحي.



الشكل (12): مخطط صندوقي لخطة الحماية التفاضلية النسبية المئوية المقترحة لحماية ملفات دوائر المولد الريحي.

النتائج والمناقشة:

لاختبار أداء خطة الحماية التفاضلية المقترحة لحماية ملفات دوائر المولد الريحي تم باستخدام بيئة MATLAB/SIMULINK البرمجية نمذجة نظام توليد ريحي مكون من مولد تحريضي ذي تغذية مضاعفة (DFIG)، حيث توصل ملفات الثابت فيه إلى الشبكة العامة ذات التردد 50 Hz، وتوصل ملفات الدائر فيه إلى المبدلة الإلكترونية بجزأها GSC و RSC. ثم تم محاكاة أنواع الأعطال المختلفة (قصر ثلاثي الطور - قصر ثنائي الطور - قصر ثنائي الطور مع الأرض - قصر أحادي الطور مع الأرض) في النقطتين F1, F2 خارج وداخل منطقة الحماية لملفات الدائر على التوالي، أنظر إلى الشكل (13). لقد تم محاكاة الأعطال في النقطة F1 خلال الفترة الزمنية $t = 1 - 1.1 \text{ sec}$ ، ومحاكاة الأعطال في النقطة F2 خلال الفترة الزمنية $t = 2 - 2.1 \text{ sec}$ ، وذلك لأجل مقاومة عطل قدرها $R_f = 0.5 \text{ m}\Omega$.

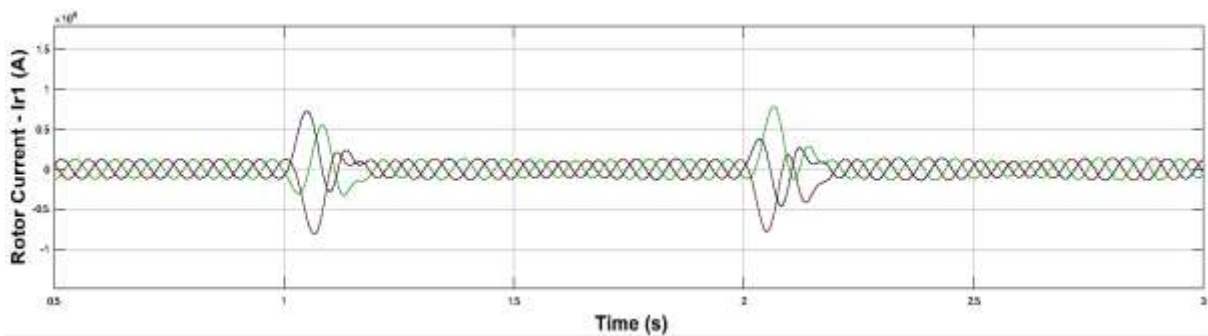


الشكل (13): نقاط العطل المدروسة بالنسبة لملفات الدائر.

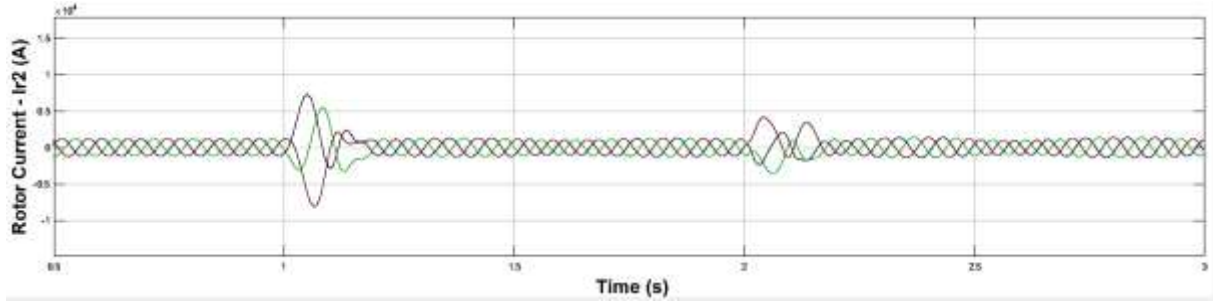
1.4. دراسة أداء خطة الحماية لأجل حالة قصر ثلاثي الطور ABC:

بفرض حدث قصر ثلاثي الطور في النقطتين F1، F2 مع مقاومة عطل قدرها $R_f = 0.5 \text{ m}\Omega$ ، في النظام الريحي المدروس المبينة محدداته في الجدول (1)، سيؤثر ذلك سلباً على كامل النظام الريحي والشبكة العامة مالم يتم تفعيل نظام الحماية مباشرة لعزل النظام الريحي وإيقافه عن العمل، حيث سيؤثر هذا العطل على خرج النظام الريحي (الاستطاعة الفعلية - الاستطاعة الردية - تيارات الثابت والدائر - تيارات الشبكة وغيرها).

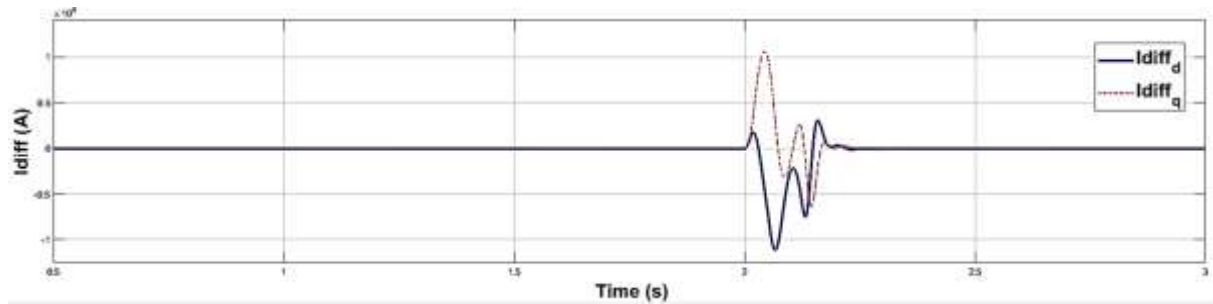
يبين الشكل (14) تيارات بداية ملفات الدائر عند حدوث قصر ثلاثي الطور في النقطتين F1، F2، حيث نلاحظ ارتفاع قيمة هذه التيارات من 0.19 KA في حالة العمل الطبيعي إلى 0.7 KA في حالة القصر الثلاثي الطور، أي ما يعادل أربعة أضعاف قيمة هذه التيارات تقريباً في كلا الحالتين (العطلين). نلاحظ من الشكل (15) أيضاً ارتفاع قيمة تيارات نهاية ملفات الدائر إلى قيمة كبيرة نسبياً خلال فترتي العطل الداخلي والعطل الخارجي. يبين الشكل (16) التيارات التفاضلية على كلا المحورين d و q، كما هو ظاهر من الشكل تكون هذه التيارات مساوية للصفر في حالتي العمل الطبيعي والعطل الخارجي، أما في حالة العطل الداخلي تصبح قيمة هذه التيارات 1.1 KA تقريباً مما يؤدي إلى تشغيل زاجل الحماية وفصل القاطع المخصص. يبين الشكل (17) إشارة خرج زاجل الحماية التفاضلي المرسله لقاطع الدارة خلال فترة الأعطال. نلاحظ من هذا الشكل أن خرج الزاجل يكون فعال (1 منطقي) لأجل العطل الداخلي فقط أما لأجل العطل الخارجي فيكون غير فعال (0 منطقي). من هنا نلاحظ أن أداء الحماية التفاضلية المقترحة لحماية ملفات دوائر المولد الريحي فعالة وموثوقة.



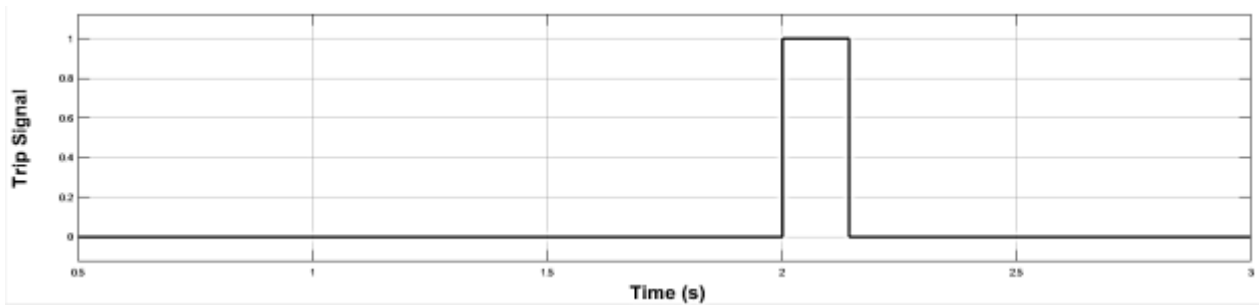
الشكل (14): تيارات بداية ملفات الدائر لأجل حالة قصر ثلاثي الطور (داخلي وخارجي).



الشكل (15): تيارات نهاية ملفات الدائر لأجل حالة قصر ثلاثي الطور (داخلي وخارجي).



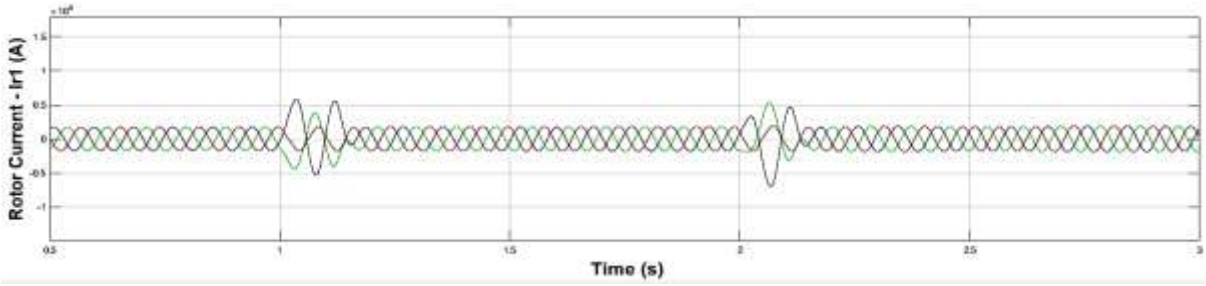
الشكل (16): التيارات التفاضلية على المحورين d و q لأجل حالة قصر ثلاثي الطور (داخلي وخارجي).



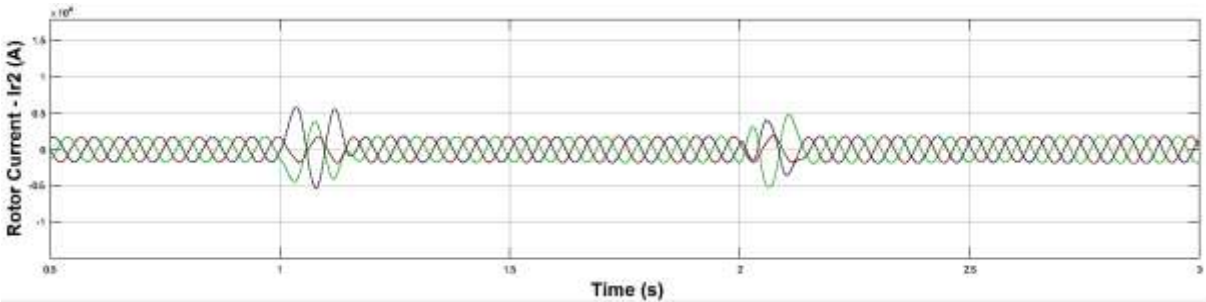
الشكل (17): إشارة الخروج لزاجل الحماية التفاضلي المرسله لأجل حالة قصر ثلاثي الطور (داخلي وخارجي).

2.4. دراسة أداء خطة الحماية لأجل حالة قصر ثنائي الطور AB:

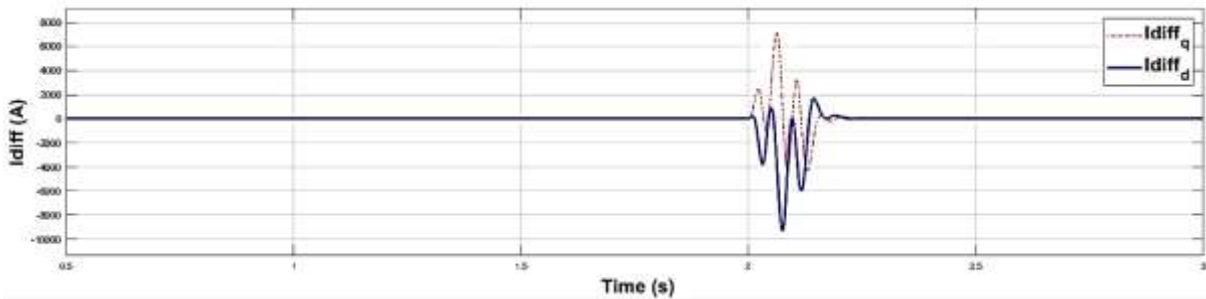
يبين الشكل (18) تيارات بداية ملفات الدائر عند حدوث قصر ثنائي الطور AB في النقطتين F1 ، F2 ، نلاحظ من الشكل ارتفاع قيمة تيارات بداية ملفات الدائر من 0.19 KA إلى 0.5 KA تقريباً في نقطتي العطل، أي ارتفعت قيمة تيارات العطل بمقدار ثلاث أضعاف قيمة هذه التيارات تقريباً في كلا الحالتين (العطلين) . يبين الشكل (19) تيارات نهاية ملفات الدائر خلال فترة العطل، أما الشكل (20) فيبين التيارات التفاضلية على المحورين d, q، كما هو ظاهر من الشكل تكون هذه التيارات مساوية للصفر في حالتي العمل الطبيعي والعطل الخارجي، أما في حالة العطل الداخلي تصبح قيمة هذه التيارات 7 KA تقريباً مما يؤدي إلى تشغيل زاجل الحماية وفصل القاطع المخصص. يبين الشكل (21) إشارة خرج زاجل الحماية التفاضلي المرسله لقاطع الدارة خلال فترة الأعطال. نلاحظ من هذا الشكل أن خرج الزاجل يكون فعال (1 منطقي) لأجل العطل الداخلي فقط أما لأجل العطل الخارجي فيكون الخرج غير فعال (0 منطقي). من هنا نلاحظ أن أداء الحماية التفاضلية المقترحة لحماية ملفات دائر المولد الريحي فعالة وموثوقة.



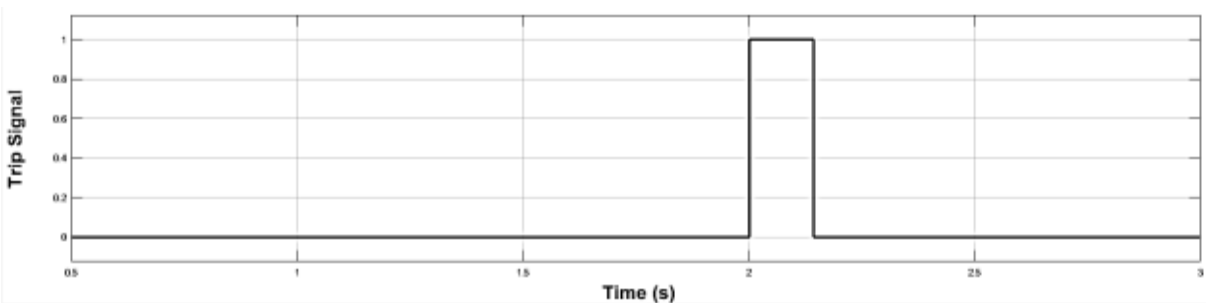
الشكل (18): تيارات بداية ملفات الدائر لأجل حالة قصر ثنائي الطور (داخلي وخارجي).



الشكل (19): تيارات نهاية ملفات الدائر لأجل حالة قصر ثنائي الطور (داخلي وخارجي).



الشكل (20): التيارات التفاضلية على المحورين d و q لأجل حالة قصر ثنائي الطور (داخلي وخارجي).

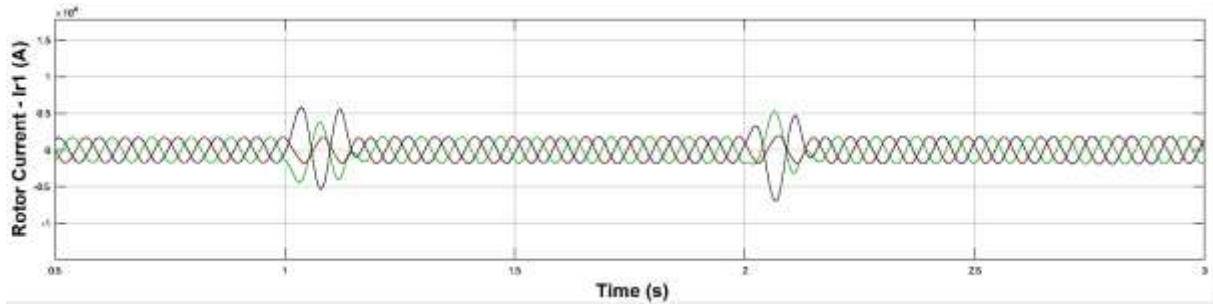


الشكل (21): إشارة الخروج لزلزل الحماية التفاضلي المرسله لأجل حالة قصر ثنائي الطور (داخلي وخارجي).

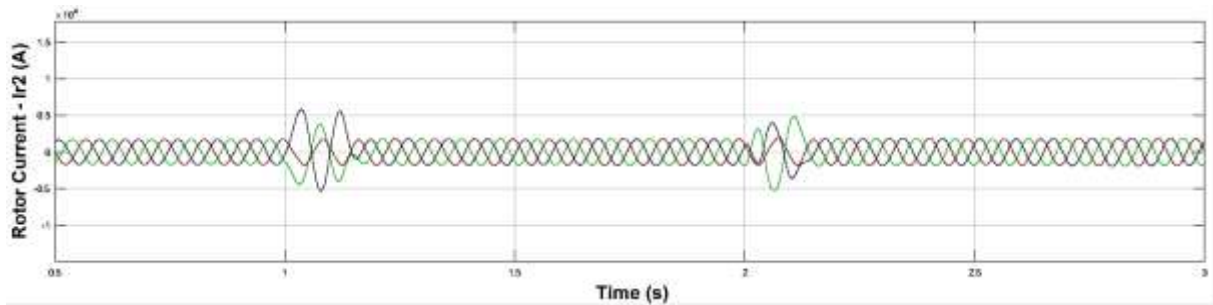
3.4. دراسة أداء خطة الحماية لأجل حالة قصر ثنائي الطور مع الأرض ABG:

يبين الشكلان (22) و (23) تيارات بداية ونهاية ملفات الدائر، على التوالي، عند حدوث قصر ثنائي الطور مع الأرض ABG في النقطتين F1, F2. نلاحظ من هذين الشكلين ارتفاع قيمة التيارات من لحظة حدوث القصر حتى لحظة انتهاءه. أما الشكل (24) فيبين التيارات التفاضلية على المحورين q, d، كما هو ظاهر من الشكل تكون هذه التيارات

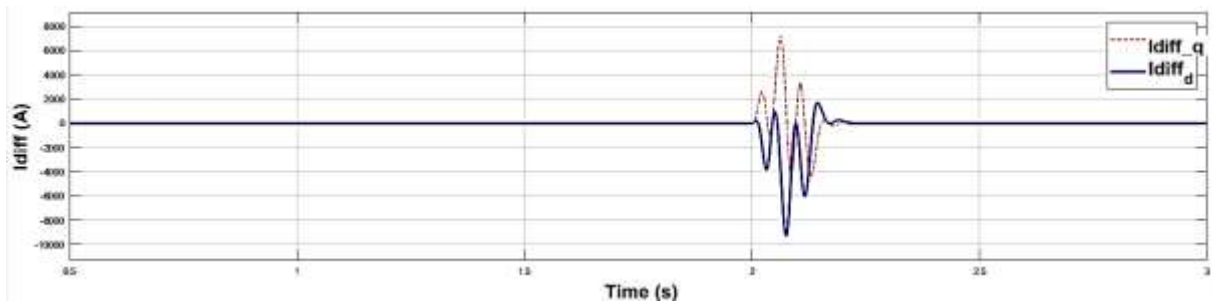
مساوية للصفر في حالتي العمل الطبيعي والعطل الخارجي، أما في حالة العطل الداخلي تصبح قيمة هذه التيارات 7 KA تقريباً مما يؤدي إلى تشغيل زاجل الحماية وفصل القاطع المخصص. يبين الشكل (25) إشارة خرج زاجل الحماية التفاضلي المرسل لقاطع الدارة خلال فترة الأعطال. نلاحظ من هذا الشكل أن خرج الزاجل يكون فعال (1 منطقي) لأجل العطل الداخلي فقط أما لأجل العطل الخارجي فيكون الخرج غير فعال (0 منطقي). من هنا نلاحظ أن أداء الحماية التفاضلية المقترحة لحماية ملفات دوائر المولد الريحي فعالة وموثوقة.



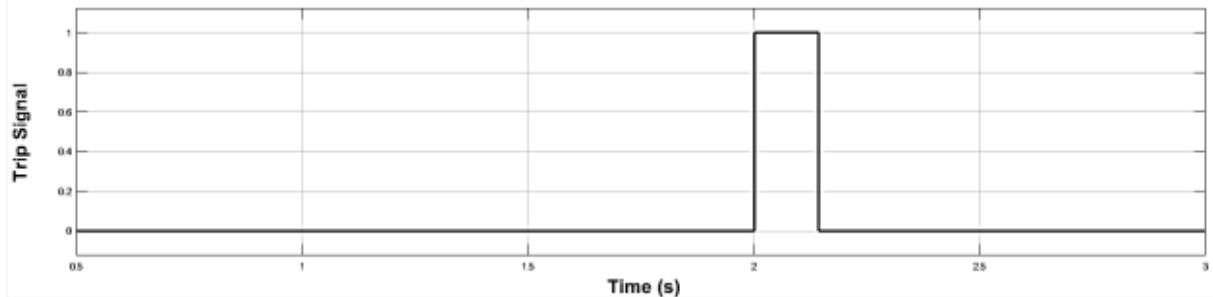
الشكل (22): تيارات بداية ملفات الدائر لأجل حالة قصر ثنائي الطور مع الأرض (داخلي وخارجي).



الشكل (23): تيارات نهاية ملفات الدائر لأجل حالة قصر ثنائي الطور مع الأرض (داخلي وخارجي).



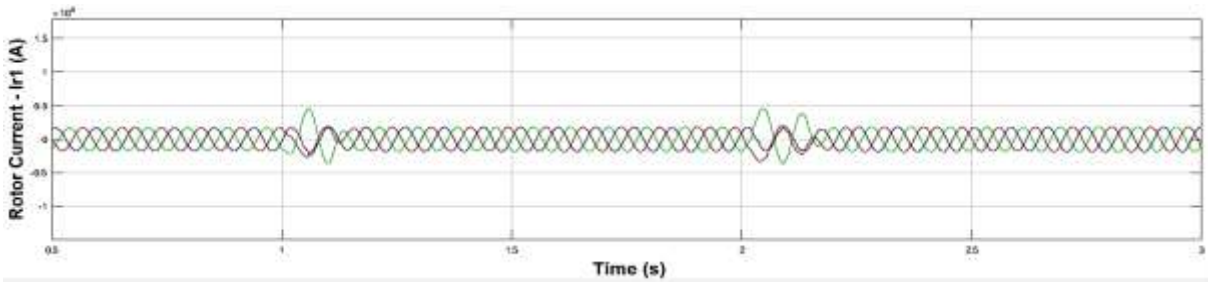
الشكل (24): التيارات التفاضلية على المحورين d و q لأجل حالة قصر ثنائي الطور مع الأرض (داخلي وخارجي).



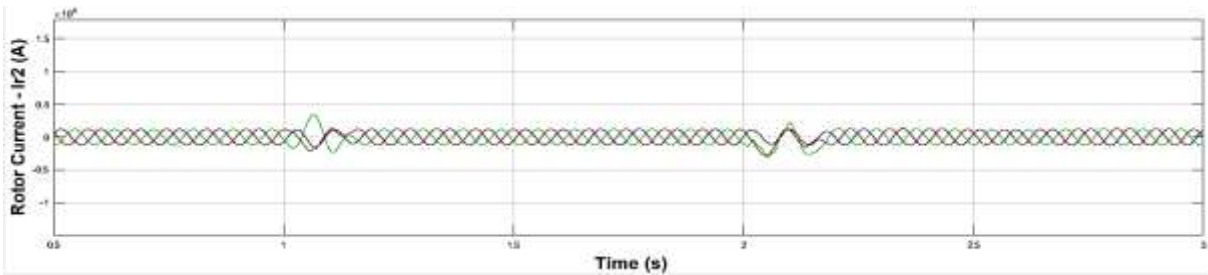
الشكل (25): إشارة خرج لزاغل الحماية التفاضلي المرسل لقاطع الدارة لأجل حالة قصر ثنائي الطور مع الأرض (داخلي وخارجي).

4.4. دراسة أداء خطة الحماية لأجل حالة قصر أحادي الطور مع الأرض AG:

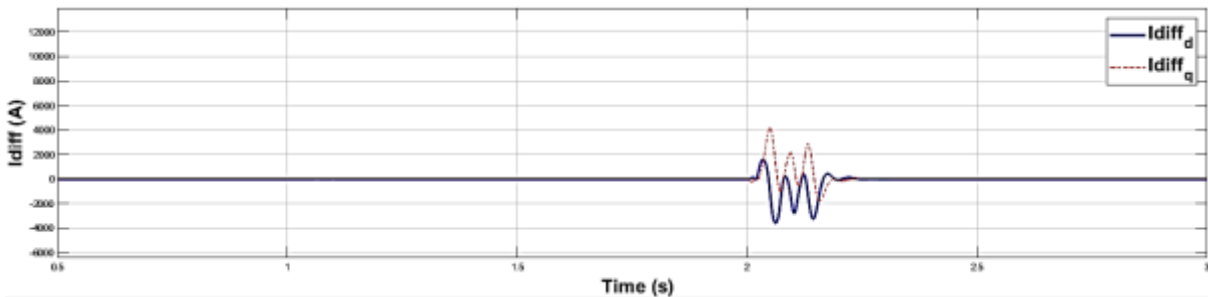
يبين الشكلان (26) و(27) تيارات بداية ونهاية ملفات الدائر، على التوالي، عند حدوث قصر أحادي الطور مع الأرض AG في النقطتين F1, F2. نلاحظ من هذين الشكلين ارتفاع قيمة التيارات من لحظة حدوث القصر حتى لحظة انتهاءه. أما الشكل (28) فيبين التيارات التفاضلية على المحورين d, q، كما هو ظاهر من الشكل تكون هذه التيارات مساوية للصفر في حالي العمل الطبيعي والعطل الخارجي، أما في حالة العطل الداخلي تصبح قيمة هذه التيارات عالية مما يؤدي إلى تشغيل زاجل الحماية وفصل القاطع المخصص. يبين الشكل (29) إشارة خرج زاجل الحماية التفاضلي المرسله لقاطع الدارة خلال فترة الأعطال. نلاحظ من هذا الشكل أن خرج الزاجل يكون فعال (1 منطقي) لأجل العطل الداخلي فقط أما لأجل العطل الخارجي فيكون الخرج غير فعالاً (0 منطقي). من هنا نلاحظ أن أداء الحماية التفاضلية المقترحة لحماية ملفات دائر المولد الريحي فعالة وموثوقة.



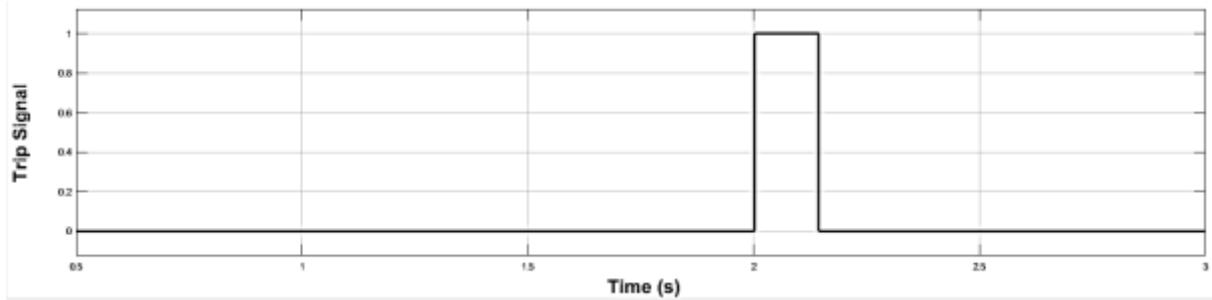
الشكل (26): تيار بداية ملفات الدائر بحالة العطل الأحادي الطور مع الأرض الداخلي والخارجي.



الشكل (27): تيار نهاية ملفات الدائر بحالة العطل الأحادي الطور مع الأرض الداخلي والخارجي.



الشكل (28): التيار التفاضلي على المحورين d و q بحالة العطل الأحادي الطور الداخلي والخارجي.



الشكل (29): إشارة الخرج لزاجل الحماية التفاضلي المرسله لأجل حالة العطل المدروسة.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

1. لا تتعلق خطة الحماية التفاضلية المقدمة بسرعة الدائر، وبالتالي ستعمل عند أي حالة تشغيل للمولد الريحي.
2. لقد ساهم استخدام تحويل بارك في تطوير خطة حماية تفاضلية فعالة وموثوقة مخصصة لحماية ملفات دائر المولد الريحي من كافة أنواع لأعطال.
3. لخطة الحماية هذه المقدره على اكتشاف العطل الداخلي لملفات الدائر وتمييزه عن العطل الخارجي بسرعة وكفاءة عاليتين.

التوصيات:

- 1- يوصى باستخدام خطة الحماية التفاضلية للمولد الريحي المعتمدة على تحويل بارك للحصول على حماية فعالة وموثوقة لدائر المولد الريحي ولكونها بسيطة وسريعة في اكتشاف العطل.
- 2- يوصى بتطبيق الحماية التفاضلية المعتمدة على تحويل بارك للكشف عن أعطال القصر بين لفات الملف الواحد.
- 3- يوصى بدمج عدة أنواع من الحميات (زواجل تفاضلية - زواجل تيار زائد وغيرها) لتشكيل خطة حماية كهربائية كاملة للمولد الريحي من الأعطال الداخلية والخارجية معاً.
- 4- تعزيز تقنيات التحكم خلال الأعطال لتحقيق متطلبات LVRT بحال حدوث أعطال خارجية في الشبكة بالتزامن مع نظام الحماية الداخلية.

References:

1. BARCH, J. BARTOK, G. BENMOUYA, G. BOLADO, O. J. "Fault current contributions from wind plants". A Report to the T&D Committee, Electric Machinery Committee and Power System Relaying Committee of the IEEE PES, 2012.
2. LI, H. CHEN, Z. "Overview of different wind generator systems and their comparisons". IET Renewable Power Generation. 2(2), 2008, 123–138.
3. ACKERMANN, T. *Wind Power in Power System*, John Wiley & Sons Ltd. Stockholm, Sweden 2005.
4. MANSOURI, M. NAYERIPOUR, M. and NEGNEVITSKY, M. "Internal electrical protection of wind turbine with doubly fed induction generator", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 55, 2016, pp. 840 – 855.

5. CHEN, B. SHRESTHA, A. ITUZARO, F. and FISHER, N. "Addressing Protection Challenges Associated with Type3 and Type4 Wind Turbine Generators." presented at the 40th Annual Western Protective Relay Conference, October 2013.
6. HAJ-AHMED, M. FEILAT, E. KHASAWANEH, H. "Investigation of fault characteristics of different types of wind generators". IEEE, 2017. p. 1-6.
7. PANNELL, G. ATKINSON, D. J. and ZAHAWI, B. "Analytical study of grid fault response of wind turbine doubly fed induction generator". IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 25, no. 4, 2010, pp. 1081–1091.
8. YIN, J. "Research on Short-Circuit Current Calculation Method of Doubly-Fed Wind Turbines Considering Rotor Dynamic Process". Frontiers in Energy Research, 2021, 9, 204.
9. OKEDU, K. E. MUYEEN, S. M. TAKAHASHI, R. and TAMURA, J. "Wind farms fault ride through using dfig with new protection scheme", IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(2), 242–254.
10. ZOU, Z. XIAO, X. LIU, Y. ZHANG, Y. and Y. WANG, 'Integrated protection of DFIG based wind turbine with a resistive-type SFCL under symmetrical and asymmetrical faults', IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(7), 1–5.
11. VRIONIS, T. D., X. I. KOUTIVA and N. A. Vovos, 'A genetic algorithm-based low voltage ride-through control strategy for grid connected doubly fed induction wind generators', IEEE Transactions on Power Systems 29(3), 2014, 1325–1334.
12. NOURELDEEN, O. and I. HAMDAN, 'An efficient ANFIS crowbar protection for dfig wind turbines during faults, em '2017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)', 2017, pp. 263–269.
13. XIAO, X., R. YANG, X. CHEN, and Z. ZHENG, 'Integrated dfig protection with a modified SMES-FCL under symmetrical and asymmetrical faults', IEEE Transactions on Applied Super conductivity, 28(4), 2018, 1–6.
14. GUO, W. ZHANG, G. ZHANG, J. SONG, N. Gao, Z. Xu, X. Jing, L. Teng, Y. Zhu, Z. and Xiao, L. 'Development of a 1-mva/1-mj superconducting fault current limiter–magnetic energy storage system for LVRT capability enhancement and wind power smoothing', IEEE Transactions on Applied Super conductivity, 2018 28(4), 1–5.
15. NADOUR, M. ESSADKI, A. NASSER, T. "Improving low-voltage ride-through capability of a multi-megawatt DFIG based wind turbine under grid faults". Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5.1, 1-13.
16. DOUGLAS, H. PILLAY, P. and BARENDSE, P. "The detection of inter turn stator faults in doubly-fed induction generators". Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, Vol. 2, 2005, pp. 1097–1102.
17. SHAH, D. NANDI, S. and NETI, P. "Stator-inter turn-fault detection of doubly fed induction generators using rotor-current and search-coil-voltage signature analysis" IEEE Transactions on Industry Applications, 45(5), 2009, 1831–1842.
18. ROSHANFEKR, R. and JALILIAN, A. 'Wavelet-based index to discriminate between minor inter-turn short-circuit and resistive asymmetrical faults in stator windings of doubly fed induction generators: a simulation study'. IET Generation, Transmission Distribution, 10(2), 2016, 374–381.
19. ABDELEMAM, A. M. M., EL-RIFAIE, A. M. and MOUSSA, S. M. "Discrete wavelet transform based protection for a wind farm double fed induction generator", IEEE, 2017, pp. 1–6.
20. STEFANI, A. YAZIDI, A. ROSSI, C. FILIPPETTI, F. CASADEI, D. and CAPOLINO, G. "Doubly fed induction machines diagnosis based on signature analysis of

- rotor modulating signals* " IEEE Transactions on Industry Applications, 44(6), 2008, 1711–1721.
21. JUNKING, L., LONG, H., & DONG, W. "Rotor winding inter-turn fault analysis of doubly-fed induction generator based on negative sequence component", em '2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)', 2013 pp. 785–788.
 22. JUN-QING, Li, WANG and LONG. H, "Study of rotor winding inter-turn short circuit fault in doubly fed induction generator based on current signal spectrum analysis", em '2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)', 2013 pp. 789–792.
 23. REHMAN, A. U., CHEN, Y., WANG, L., ZHAO, Y., YIN, Y., CHENG, Y., & Tanaka, T. "Experimental research and analysis on rotor winding inter-turn short circuit fault in DFIG". In: 2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD). IEEE, 2016. p. 164-167.
 24. HASHEMI, Z. RAHIDEH, A. "Rotor electrical fault detection of wind turbine induction generators using an unscented Kalman filter". Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering, 2020, 44.2: 979-988.
 25. Rehman, A. U., Chen, Y., Zhang, M., Zhao, Y., Wang, L., Liu, Y., ... & Tanaka, T. *Fault detection and fault severity calculation for rotor windings based on spectral, wavelet and ratio computation analyses of rotor current signals for a doubly fed induction generator in wind turbines*. Electrical Engineering, 102(3),2020, 1091-1102.
 26. KANG, Y. C. KANG, H. G. LEE, J. H. ZHENG, T. Y. Lee, B. E. and Park, G. C. "Protection algorithm for the windings of a doubly-fed induction generator using the d-q equivalent circuits" em '2009 Transmission Distribution Conference Exposition: Asia and Pacific', 2009, pp. 1–4.
 27. ABADI, M. B. CRUZ, S. M. A. GONCALVES, A. P. GONCALVES, P. F. C. Mendes, A. M. S. Ribeiro, A. and Silva, F. "Detection of stator and rotor faults in a dfig based on the stator reactive power analysis". em 'IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society', 2014, pp. 2037–2043.
 28. G. ABAD, J. López, M. Á. Rodríguez, L. MARROYO, and G. IWANSKI, *Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2011, ch. 4.
 29. KIA, M. Y. KHEDRI, M. NAJAFI, H. R. and SHAMSI, M. A. "Hybrid modelling of doubly fed induction generators with inter-turn stator fault and its detection method using wavelet analysis", IET Generation, Transmission Distribution 7(9), 2013, 982–990.
 30. NAYERIPOUR, M. MANSOURI, M. "Differential principle for Inter Turn Fault Protection in Doubly Fed Induction Generator". In: Proceedings of the 29th international power system conference, PSC2014;28October,2014(Persian).
 31. SILVA, M. and BAINY, G. "Generalized Alpha Plane for Numerical Differential Protection Applications" IEEE Trans. Power Deliv., vol. 31, no. 6, Dec. 2016, pp. 2565–2566.
 32. UDDIN, M. REZAEI, N. "An FPGA-based Cost-effective Digital Differential Relay for Wind Farm Protection". In: 2020 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. IEEE, 2020. p. 1-8.