مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية
المجلد41 العدد (4) – 2025: 333-353

Damascus University Journal for engineering sciences
Vo 41 number (4) -2025: 333-353

دراسة تأثير نظام التحكم الموحد بجريان الاستطاعة على أداء الحاكمة المسافية المستخدمة في حماية خط النقل

هاني أحمد إبراهيم*[1] مصطفى الحزوري[2] حسان السويدان[3]

[1*] طالب دراسات عليا (دكتوراه) مهندس، قسم هندسة الطاقة الكهربائية –كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق، hani89.ibrm@damascusuniversity.edu.sy.

[2] أستاذ ، دكتور، مهندس في قسم هندسة الطاقة الكهربائية –كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق moustafa.hazouri@damascusuniversity.edu.sy.

[3] أستاذ ، دكتور، مهندس في قسم هندسة الطاقة الكهربائية–كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق، hassan.sowidan@damascusuniversity.edu.sy.

الملخص:

استخدمت أجهزة نقل التيار المتناوب المرنة FACTs مؤخراً بشكل واسع في خطوط النقل بهدف تحسين تدفق القدرة الكهربائية وتحسين استقرار منظومة القدرة الكهربائية ومميزاتها المختلفة والمتعددة، لكن وجودها في خطوط النقل أدى إلى بعض التحديات المرتبطة بعمل أجهزة نظام الحماية، حيث تلعب الحاكمة المسافية دوراً هاماً في خطوط النقل كجزء من نظام الحماية الذي يجب أن يؤخذ بعين الاعتبار، فوجود أجهزة الـ FACTs يسبب تغير في الممانعة المقاسة من قبل الحاكمة المسافية، والذي يمكن أن يسبب فصل خط نقل غير مناسب أو عمل الحاكمة بشكل غير مناسب، إذ من المعروف أن الأداء الخاطئ لنظم الحماية يمكن أن يؤدي إلى مشاكل في الشبكة الكهربائية تصل حتى التعتيم الكامل بما لهذا من عواقب سلبية على المستهلكين واقتصاد البلد، لذلك ترتب على ذلك تحليل أداء ودراسة تأثير هذه الأجهزة على عمل الحاكمة المسافية تحت مختلف الظروف والشروط.

الهدف من هذا العمل دراسة تأثير جهاز التحكم الموحد بجريان الاستطاعة الـ UPFC المستخدم لتحسين استقرار منظومة القدرة الكهربائية على أداء الحاكمة المسافية، حيث تم في هذا البحث تحليل تأثير جهاز التحكم الموحد بجريان الاستطاعة يربط لخط نقل قدرة على أداء حاكمة الحماية المسافية الموجودة بداية الخط النقل باستخدام برنامج الـ Matlab/Simulink، حيث تم في بيئة برنامج الـ Matlab/Simulink محاكاة الحاكمة المسافية وجهاز التحكم الموحد بجريان الاستطاعة وخط النقل وتم دراسة حالة حدوث عطل على خط النقل وتقييم أداء الحاكمة.

أظهرت النتائج تغيير الممانعة المقاسة من قبل حاكمة الحماية المسافية، وبالتالي إمكانية التشغيل غير موثوق للحاكمة المسافية في حالة وجود جهاز التحكم الموحد بجريان الاستطاعة الـ UPFC ما لم يؤخذ بعين الاعتبار مسبقاً في مرحلة التعيير للحاكمة الحماية المسافية.

الكلمات المفتاحية: أجهزة نقل التيار المتناوب المرنة، الحاكمة المسافية، جهاز التحكم الموحد بجريان الاستطاعة، محاكاة الحاكمة المسافية، محاكاة UPFC، برنامج Matlab، عطل.

تاريخ الايداع : 2023/4/6
تاريخ القبول: 2023/9/25

حقوق النشر: جامعة دمشق – سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب **CC BY-NC-SA**

ISSN (online): 2789-6854
http://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.php/index/index

Study of the Effect of the Unified Power Flow Control System on the Performance of the Distance Relay Used in the Transmission line

Hani Ahmad Ibrahim[*1] Mustafa Alhazure[2] Hasan Alsuedan[3]

[*1.] Postgraduate Student, Eng, Damascus University,Faculty of Mechanical and Electrical Engineering-Department of Electrical Power Engineering, hani89.ibrm@damascusuniversity.edu.sy

[2.] Professor, Department of Electrical Power Engineering - Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus University.
moustafa.hazouri@damascusuniversity.edu.sy

[3.] Professor, Dr, Eng, Department of Electrical Power Engineering-Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus University. hassan.sowidan@damascusuniversity.edu.sy.

Received: 6/4/2023
Accepted: 25/9/2023

Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a

CC BY- NC-SA

Abstract:

Flexible Alternating Current Transmission devices (FACTs) have recently been widely used in transmission lines with the aim of improving the flow of electric power and improving the stability of the electric power system and its various and many advantages, but its presence in transmission lines has led to some challenges related to the work of protection system devices, where the distance relay plays an important role in transmission lines Transmission as part of the protection system that must be taken into account, the presence of FACTs devices causes a change in the impedance measured by the distance relay, which can cause improper transmission line disconnection or improper operation of the relay, as it is known that the wrong performance of protection systems, It can lead to even electrical network problems Complete blackout, with its negative consequences for consumers and the country's economy, therefore it resulted in analyzing the performance and studying the impact of these devices on the work of the distance relay under various circumstances and conditions.

The aim of this work is to study the effect of the UPFC Unified Power Flow Control device used to improve the stability of the electric power system,where in the Matlab/Simulink program environment, the distance relay, the unified power flow control device, and the transmission line were simulated, and the case of a fault on the transmission line was studied and the performance of the relay was evaluated.

The results showed a change in the visible measured impedance by the distance relay, and thus the possibility of unreliable operation of the distance relay in the presence of such devices unless taken into account in advance in the calibration stage of the distance relay.

Keywords:

Flexible Alternating Current Transmission devices, Distance relay, Unified Power Flow Control system, Distance relay simulation, UPFC simulation, MATLAB program,Fault.

المقدمة:Introduction

تتعرض خطوط نقل الطاقة الكهربائية أثناء عملها للعديد من الأعطال المتناظرة وغير المتناظرة، والتي تؤدي إلى انقطاع الطاقة الكهربائية عن الأجزاء التي تغذيها هذه الخطوط وحدوث مشاكل في استقرار الشبكة، وقد تؤدي إلى الانهيار التام، الأمر الذي يستلزم استخدام أجهزة حماية لاكتشاف هذه الأعطال وتصنيفها وعزلها عن الشبكة حفاظاً على الأرواح والمعدات، ومن أهم أجهزة الحماية المستخدمة لحماية خطوط النقل هي الحاكمة المسافية والتي تعمل على تصنيف الأعطال وتحديد مكان حدوثها وتعتبر هاتين الخاصتين على درجة عالية من الأهمية، وخاصة أن خطوط نقل الطاقة الكهربائية تمتد لمسافات طويلة تصل لمئات الكيلومترات فتحديد مسافة العطل يسهل سرعة اكتشافه و إجراء الصيانة اللازمة له(الجابي وآخرون،2015،95).

يعتبر نظام القدرة الكهربائي من الأنظمة الضخمة والمعقدة لاحتوائه على عدد كبير من محطات التوليد و التحويل وخطوط النقل والتوزيع وأجهزة التحكم، حيث أصبح من الصعب جداً الحفاظ على نظام مستقر مع التغييرات التي قد يشهدها النظام لذلك فمن المهم جداً تحسين استقرار نظام القدرة الكهربائي، التطور الحديث في نظام القدرة الكهربائي ينصب على تركيب أجهزة نقل التيار المتناوب المرنة في أماكن مختلفة حيث تساهم هذه الأجهزة في تحسين تدفق القدرة الكهربائية إلى جانب تحسين الاستقرار، يعد ربط هذه الأجهزة مع الشبكات الكهربائية من الموضوعات المعاصرة والتي ما تزال محط اهتمام الباحثين، يأتي هذا البحث ليضيء على أحد المواضيع العلمية لربط أحد أجهزة نقل التيار المتناوب المرنة وتأثيرها على نظام الحماية لخطوط النقل .

في هذا البحث نقوم بدراسة تأثير جهاز التحكم الموحد بجريان الاستطاعة الـ UPFC على أجهزة حماية خطوط النقل وبشكل خاص تأثيرها على حاكمة الحماية المسافية، ويشمل دراسة تأثير تغيير موقع العطل على قراءات الحاكمة المسافية.

تم في هذا البحث محاكاة الحاكمة المسافية وجهاز التحكم الموحد في بيئة برنامج Matlab/Simulink، بينت النتائج تغير الممانعة المقاسة من قبل حاكمة الحماية المسافية بوجود جهاز التحكم الموحد بجريان الاستطاعة.

1- الهدف objective:

يتلخص هدف البحث في النقاط الرئيسية التالية:

- دراسة تأثير جهاز التحكم الموحد بجريان الاستطاعة على أداء الحاكمة المسافية المركبة على خط النقل.
- صياغة النموذج الرياضي لمعايرة إعدادات الحاكمة المسافية بوجود جهاز التحكم الموحد بجريان الاستطاعة.
- محاكاة خط النقل والحاكمة المسافية وجهاز التحكم الموحد بجريان الاستطاعة وذلك باستخدام برنامج الـ Matlab.

2- الدراسة المرجعية: Reference study

يوجد العديد من الأبحاث المرتبطة بموضوع البحث منها:

درس الباحثون Gorakshanath, A, Ganesh, P, & Mohan, T أداء الحاكمة المسافية لخط نقل [400kV] مع/بدون وجود جهاز Statcom، استخدم الباحثون طريقة برمجية في بيئة برنامج الـ Matlab وخوارزمية محددة لتحليل أداء الحاكمة، ناقش الباحثون تغيير موقع جهاز Statcom وموقع حدوث عطل طور مع الأرض، وجد الباحثون أن وجود جهاز Statcom في حلقة العطل له تأثير على أداء الحاكمة المسافية وسبب عمل الحاكمة في منطقة عمل غير مناسبة (Gorakshanath et al.,2014,8). ومن ناحية آخرى درس الباحثان Mohamed, Z, & Abdelaziz, C تأثير جهاز Sccc على أداء الحاكمة المسافية لخط نقل [kV] 220 مع الأخذ بعين الاعتبار وجود مقاومة عطل، قام الباحثان بتحليل حساب الممانعة المقاسة من قبل الحاكمة المسافية بطريقة رياضية عند حدوث عطل طور مع الأرض، توصل الباحثان أن الممانعة المقاسة مرتبطة بموقع العطل و بارمترات جهاز Sccc و بارمترات دارة التتابع (الموجبة و السالبة والصفرية) ونسبة

تحويل محولات التوتر والتيار، قارن الباحثان التحليل الرياضي مع التحليل البرمجي في بيئة برنامج الـ Matlab أظهرت النتائج تأثير تغيير مقاومة العطل مع وجود جهاز Sccc على أداء الحاكمة المسافية (Mohamed et al.,2014,8).

3- مواد وطرائق البحث: Research materials and methods

لقد اعتمدنا في هذا البحث طريقة النمذجة والمحاكاة للحاكمة المسافية ولجهاز التحكم الموحد بجريان الاستطاعة باستخدام بيئة الـ Simulink في برنامج الـ Matlab، حيث تم الاعتماد على معادلات وتوابع العمل الخاصة بالحاكمة المسافية لبناء النموذج الخاص بها.

4- نظام الحماية في نظام القدرة الكهربائية:

Protection system in electrical power system

تعد خطوط النقل من العناصر المهمة جداً في نظام القدرة الكهربائي، في بداية الأمر كانت تستخدم الحاكمة ضد زيادة التيار والتسريب الأرضي لحماية خطوط النقل كحماية أساسية، وخصوصاً في حالة التغذية الخطية من جهة واحدة، ولكن مع وجود خطوط متوازية وتغذية من أكثر من اتجاه فإنه يصعب الاعتماد على هذا النوع من الحماية لأنه يفتقد لعنصر مُهم جداً وهو العنصر الاتجاهي، وهو عنصر هام من عناصر الحماية حيث يتم التمييز بين العطل الواقع في منطقة الحماية والعطل خارجها، الحاكمة ضد زيادة التيار والتسريب الأرضي لا تملك هذه الخاصية ويحدث الفصل لخطوط أخرى غير التي وقع فيها العطل، فكان لابد من استخدام أجهزة حماية أخرى كحاكمة أساسية في حماية خطوط النقل فكانت الحاكمة الحماية المسافية (الجابي وآخرون،2015،3939).

مبدأ عمل حاكمة الحماية هو تحديد الحالات غير الطبيعية في نظام القدرة الكهربائي والبدء وبسرعة عالية وقدر الإمكان لإعادة نظام القدرة إلى الحالة الطبيعية مرة أخرى، إن السرعة العالية تتطلب تحسين الاستجابة في أزمنة قليلة تقاس بالميلي ثانية، لذلك تتمتع حواكم الحماية بخصائص وهي: التشخيص الدقيق للمشكلة وسرعة الاستجابة وتقليل الاضطرابات في نظام القدرة ولتحقيق هذا الهدف يجب دراسة واختبار جميع أنواع الأعطال والحالات غير الطبيعية التي يمكن أن تحدث، كما يجب تحليل الاستجابة المطلوبة لكل حادثة من الحوادث الحاصلة وتصميم معادلات الحماية لتجهيز الاستجابة المطلوبة، يتم تركيب أجهزة الحماية في الشبكة لحماية الجزء المعطل من تفاقم العطل ومنع انتشاره وحماية النظام من حالات التشغيل غير الطبيعية الناتجة عن هذه الأعطال، كما تعمل أجهزة الحماية على تحديد وتصنيف العطل وتحديد مكانه عن طريق تحليل ممنهج لبارامترات الشبكة (التوترات/التيارات)، ومن ثم إرسال إشارة فصل إلى القواطع المعينة من أجل فصل العطل وعزل الجزء المعطل(John et al.,2022,7).

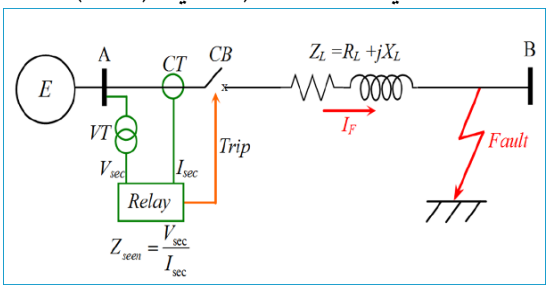
وظيفة نظام الحماية: Protection system function

إن وظيفة نظام الحماية ليست منع حدوث العطل فذلك شبه مستحيل، لآن الكثير من الأعطال أسبابها قد تكون خارجية لا قدرة لأجهزة الحماية على منعها، لكن دور نظام الحماية هو سرعة فصل الأعطال بدقة وذلك بواسطة حاكمة الحماية الـ Protective relay وبتفصيل أكثر نقول إن دور نظام الحماية هو:

- اكتشاف الأعطال، تحديد مدى خطورتها ومكانها بدقة عالية.
- إرسال إشارة الفصل Trip signal إلى القواطع الكهربائية Circuit breakers المطلوب فتحها أو إرسال إشارة منع التوصيل Block signal للقواطع المطلوب منع توصيلها.
- عزل المنطقة أو العناصر المتأثرة بالعطل فقط، وذلك بفتح القواطع المناسبة، والمحافظة على استمرارية التشغيل لباقي المنظومة السليمة.

العملية تبدأ من دخول ما يعرف بـ Relaying signals إلى الحاكمة الـ Relay بواسطة محول التيار/ التوتر، ثم تقوم

الحاكمة بناءً على دراسة هذه الإشارات بإرسال إشارة فصل إلى ملف فصل القاطع ليتم فتحه، الزمن الذي يأخذه جهاز الحماية ليصل إلى قرار Trip or Block يكون في العادة سريع جداً وفي حدود 20 ميلي ثانية أو أقل، قد يضاف إليه زمن تأخير Delay time في بعض أنواع الحواكم، بينما الزمن الذي يستغرقه القاطع لإتمام فتح الدارة يكون أكبر من ذلك ويتراوح بين 50 إلى 100 ميلي ثانية ومجموع الزمنين معاً يمثل الوقت الحقيقي لإزالة العطل(جيلاني، (2019)،23) .



الشكل (1) خط نقل AB مع وجود حاكمة مسافية بداية الخط

يتم حماية نظام القدرة الكهربائية بمجموعة كبيرة من حواكم الحماية المختلفة الوظائف والأنواع التي يتم تغذيتها أما بالتيار أو بالتوتر أو بالتيار والتوتر معاً من محولات التيار ومحولات التوتر وتقوم هذه المحولات بتقليل قيمة التيار والتوتر إلى المستوى المطلوب لعمل حواكم الحماية فضلاً عن العزل الفيزيائي لهذه الحواكم عن التوترات العالية والفائقة، وهي تصنف أما حسب الجيل أو حسب الوظيفة. الحاكمة المسافية تستخدم التوتر والتيار كمدخلات وكذلك زاوية الممانعة كاتجاهية تعمل عندما تقل قيمة الممانعة عن قيمة الضبط.

5- الحاكمة المسافية:Distance relay

تعتبر أجهزة الحواكم المسافية هي الأهم ضمن منظومة أجهزة الحماية المستخدمة في خطوط نقل القدرة الكهربائية خاصة في التوترات العالية، حيث تتميز بميزة هامة مقارنة بأجهزة حواكم زيادة التيار وهي القدرة على تحديد مكان العطل وليس فقط اكتشاف العطل.

تعد الحاكمة المسافية حماية انتقائية وذات وثوقية عالية لأنها تعمل على فصل الجزء المعطل من الخط دون غيره، بالوقت التي توجد هناك حمايات آخرى لا تتحسس لتيار العطل عند حدوث قصر على الخط (J,2018,522).

يستخدم لعمل الحاكمة المسافية معايير مختلفة منها ارتفاع التيار–انخفاض التوتر–تغير الممانعة، إذ إن استخدام معيار ارتفاع التيار يعد الطريقة الأبسط والأسرع لتحديد العطل، ولكن في بعض الحالات فإن تيار العطل قد يكون أصغر من قيمة تيار الإقلاع وذلك بسبب ممانعة المنبع العالية، وبالتالي فإن استخدام معيار انخفاض التوتر في هذه الحالة يعد معيار إضافي لإقلاع الحاكمة، وفي أغلب الحواكم المسافية تعتمد معيار تغير الممانعة.

يعتمد مبدأ عمل الحاكمة المسافية وفق تغير الممانعة على مقارنة قيمة الممانعة المقاسة Impedance measurement التي تتغير قيمتها عند حدوث عطل على الخط مع ممانعة آخرى تسمى ممانعة المعايرة / الضبط أو الوصول Setting impedance، كما هو موضح بالشكل(1) (جيلاني، (2019)، (178

حيث:

VT: محولة توتر. CT : محولة تيار.

Z_{seen}: الممانعة المنظورة من الحاكمة المسافية.

I_F: تيار العطل. Z_L: ممانعة الخط.

E: منبع القدرة الكهربائي.

CB: القاطع المرتبط بالحاكمة المسافية.

فإذا كانت الممانعة المقاسة تساوي أو أقل من ممانعة الوصول فإن الحاكمة تعطي أمر لفصل القاطع الآلي المرتبط بالمنطقة المعطلة وبالتالي إزالة هذا الجزء المعطل، أما إذا كانت الممانعة المقاسة أكبر من ممانعة الوصول فإن الحاكمة لا تعطي أي أمر فصل.

تقوم الحاكمة المسافية بحساب الممانعة من نقطة الحاكمة إلى نقطة حصول العطل، حيث أن هذه الممانعة تتناسب طرداً مع

مسافة العطل فالتالي يمكن معرفة مسافة العطل بمعرفة ممانعته Z_{seen}.

6- ضبط مناطق الحاكمة المسافية:

Distance relay zones setting

بهدف دقة عمل الحاكمة المسافية والتغلب على أخطاء القياس في محولات التوتر والتيار، يتم تقسم المسافات بين قضبان تجميع خطوط نقل القدرة الكهربائية إلى مناطق حماية متعددة Zones وهي (جيلاني، (2019)،213) :

6 -1-المنطقة الأولى: Zone-1

يتم ضبطها بحيث تغطي 80% إلى 85% فقط من طول الخط المراد حمايته وتفصل لحظياً، وتتوقف النسبة المختارة على دقة أجهزة القياس المستخدمة.

$$\text{Zone-1}= (0.8\div0.85) *(Z_{AB}) \qquad \textbf{(1)}$$

6-2-المنطقة الثانية: Zone-2

يتم ضبطها بطرق مختلفة تعتمد على طول الخط التالي للخط المراد حمايته، وشكل الشبكة المتصل بها (خاصة عندما يكون هناك أكثر من خط خارج من نفس الحماية)، لكن بكل الأحوال يجب أن تغطي المنطقة الثانية الخط الأول (الاساسي) كله بالإضافة إلى نسبة من الخط التالي وهو يمثل 20% إلى 50% من الخط التالي، و في نفس الوقت فإن المنطقة الثانية تمثل حماية احتياطية في حال عدم عمل الحاكمة في منطقة الحماية الأولى، وتجدر الإشارة هنا إلى أن زمن فصل المنطقة الثانية يكون في حدود ربع ثانية، و ربما يصل إلى نصف ثانية أي أنها تعمل بتأخير زمني T_2 على عكس المنطقة الأولى الذي تفصل لحظياً.

$$\text{Zone-2}= (Z_{AB}) + (0.2\div0.5)*(Z_{BC}) \qquad \textbf{(2)}$$

6 -3-المنطقة الثالثة: Zone-3

تغطي الخط المراد حمايته كاملاً بالإضافة للخط التالي له بالكامل أيضاً (قد يضاف أيضاً 20% من طول الخط الثالث) أو (قد يضاف 25%من ممانعة المحول المركب نهاية الخط التالي)، ويشترط أن تكون ممانعة المنطقة الثالثة أقل من مجموع ممانعة الخط مضاف إليه ممانعة المحول الموجود في المنطقة عند نهاية الخط المراد حمايته، وتجدر الإشارة هنا إلى أن زمن فصل المنطقة الثالثة يكون في حدود نصف ثانية، وربما يصل إلى ثانية أي أنها تعمل بتأخير زمني T_3.

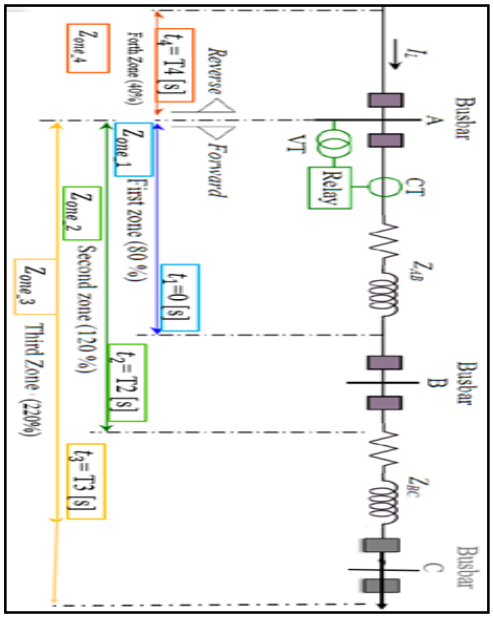
$$\text{Zone-3}= (Z_{AB}) + (Z_{BC}) + 0.2*(Z_{CD}) \qquad \textbf{(3)}$$

6 -4-المنطقة الرابعة: Zone-4

في بعض الحواكم يضاف منطقة رابعة إلى المناطق الثلاث السابقة، هذا المنطقة تعمل في المنطقة الخلفية للحاكمة على عكس جهة عمل المناطق الثلاث السابقة، يتم ضبطها بحيث تغطي 20% إلى 40% من طول الخط المراد حمايته ويفصل بتأخير زمني T_4.

$$\text{Zone-4}= (0.2\div0.4) *(Z_{AM}) \qquad \textbf{(4)}$$

يوضح الشكل (2) ضبط مناطق الحماية للحاكمة المسافية (جيلاني، (2019)،215) :



الشكل (2) ضبط مناطق الحماية للحاكمة المسافية.

تتوقف طريقة حساب الممانعة المنظورة من قبل الحاكمة المسافية على نوع العطل الحاصل على خط النقل، فليس صحيحاً لحساب الممانعة، أن يتم قسمة توتر العطل الطوري على تيار العطل الطوري في جميع الحالات وإنما في حالة واحدة فقط وهي حالة الأعطال المتناظرة، أما في حالة

الأعطال غير المتناظرة فيتم استخدام طريقة المركبات المتناظرة وهي طريقة لتحليل و دراسة الأعطال غير المتناظرة، وليست طريقة لتصميم الحاكمة المسافية بمعنى أن الحاكمة المسافية ستظل تقرأ قيم التوترات والتيارات لجميع أطوار خط النقل، لكن بناء على التحليل بطريقة المركبات المتناظرة فإن المعادلات المستخدمة داخل الحاكمة المسافية في حالة الأعطال غير متناظرة لكل نوع من أنواع الأعطال ستختلف عن المعادلات المستخدمة في حالة الأعطال المتناظرة (جيلاني، (2019)،179) .

يتم ضبط الحاكمة المسافية بناءً على ممانعة التتابع الموجبة، والتي تمثل الممانعة الحقيقية بين موقع الحاكمة وموقع العطل، بينما تستخدم ممانعة التتابع الصفرية عند وجود عطل أرضي.

مما تقدم سابقاً يتم حساب الممانعة المنظورة من الحاكمة المسافية حسب نوع العطل الحاصل على خط النقل في حالة الأعطال غير متناظرة وذلك وفق الجدول (1)(جيلاني، (2019)،187) :

الجدول (1) حساب الممانعة المنظورة من الحاكمة المسافية في حالة الأعطال غير متناظرة

Type	V_R	I_R	Z_{seen}
A – G	V_A	I_A +	V_A /(I_A+
B - G	V_B	I_B	V_B /(I_B+
C – G	V_C	I_C +	V_C / (I_C +
A-B/	$V_A - V_B$	$I_A - I_B$	$(V_A - V_B)$/
B-C/ B-C-G	$V_B - V_C$	$I_B - I_C$	$(V_B - V_C)$/ $(I_B - I_C)$
C-A/ C-A-G	$V_C - V_A$	$I_C - I_A$	$(V_C - V_A)$/ $(I_C - I_A)$
A-B-C	V_A or V_B or V_C	I_A or I_B or I_C	V_A /I_A or V_B/I_B or V_C/ I_C

حيث:

V_A, V_B, V_C : توترات الأطوار الثلاثة.

I_A, I_B, I_C : تيارات الأطوار الثلاثة.

$K_0 = (Z_0 - Z_1) / Z_1$. (5)

: عامل التعويض المتبقي.

Z_0 : ممانعة التتابع الصفرية.

Z_1 : ممانعة التتابع الموجبة.

I_0 : تيار التتابع الصفري.

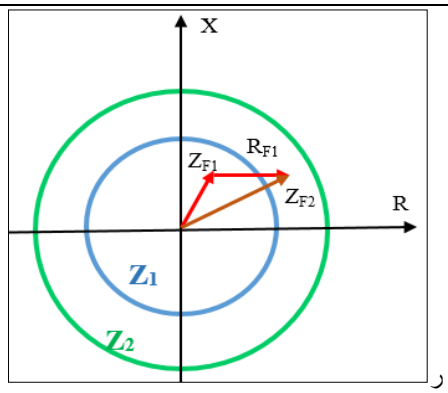
$I_0 = (I_A + I_B + I_C)/3$. **(6)**

7-أنواع أجهزة الحاكمة المسافية: Types of distance relay :

هناك أنواع عديدة لأجهزة الحاكمة المسافية تختلف أساساً فيما بينها في حدود(خصائص) عمل الحاكمة، والتي تختلف تبعاً لنوع الجهاز وطريقة تصنيعه وهي في الغالب تكون دوائر أو متوازي مستطيلات أو حتى شكل متعرج حسب متطلبات التشغيل، تتميز أجهزة الحماية الرقمية بالقدرة على تعديل شكل هذه المناطق والحدود بأشكال مختلفة على عكس أجهزة الحماية الإلكتروميكانيكية، والتي تكون في الغالب تمثل فيها هذه المناطق بواسطة عدة دوائر ثابتة الشكل، وهو ما يعطي ميزة إضافية لأجهزة الحماية الرقمية وفيما يلي أشهر أنواع أجهزة الحاكمة المسافية(J,2018,524):

7-1- حاكمة الممانعة Impedance relay

أول وأبسط أنواع أجهزة الحاكمة المسافية، حدود عمل الحاكمة عبارة عن دائرة كما في الشكل (3) (جيلاني، (2019)،198) ، الفكرة الأساسية تقوم الحاكمة بحساب الممانعة من مكان الحاكمة إلى نقطة العطل لنحصل على قيمة ممانعة العطل Z_F وتتخذ الحاكمة قرار الفصل إذا وقعت القيمة داخل حدود عمل الحاكمة كما في حالة Z_{F1}:

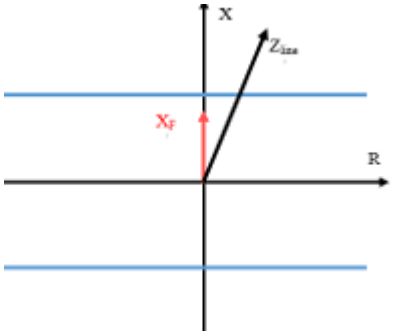


الشكل (3) خصائص عمل حاكمة الممانعة

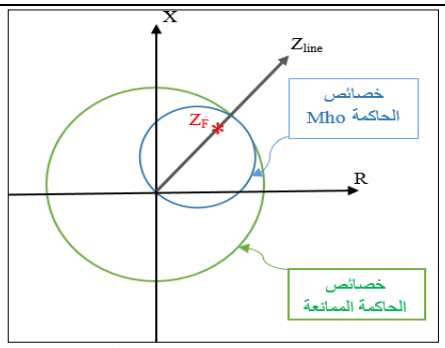
يتأثر أداء الحاكمة بشدة إذا وقع العطل خلال مقاومة أرضية R_{F1}، وفي هذه الحالة نقطة العطل ستقع خارج حدود الدائرة التي تمثل المنطقة Zone-1، وتكون قيمة ممانعة العطل Z_{F2} وبالتالي فإن الحاكمة سترى نفسها غير مسؤولة كحماية أساسية عن فصل هذا العطل، لكنها ستتعامل معه كحماية احتياطية Zone-2، وبالتالي يفصل العطل بعد زمن تأخير وهذا بالطبع شيء غير مرغوب فيه.

7-2- حاكمة المفاعلة: Reactance relay

هذا النوع يمثل حالة خاصة من الـ Impedance relay حيث يهتم هذا الجهاز فقط بقياس المفاعلة X من مكان الحاكمة إلى نقطة العطل وتتخذ الحاكمة قرار الفصل إذا وقعت القيمة داخل حدود عمل الحاكمة (الخط الأزرق) كما في حالة X_F كما في الشكل(4) (جيلاني، (2019)،199) ، وبالطبع فالميزة الأساسية له أنه لا يتأثر مطلقاً بقيمة مقاومة العطل R_F كما تتأثر حاكمة الممانعة.

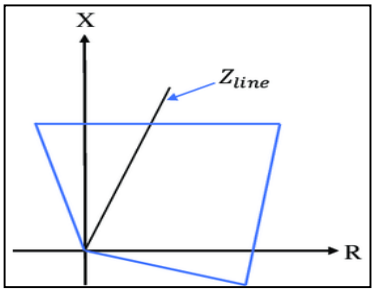


الشكل (4) خصائص حاكمة المفاعلة.



الشكل (5) خصائص عمل الحاكمة Mho.

تعتبر الحاكمة المضلعة: Quadrilateral relay نوع من أنواع الـ Reactance relay وهي تمثل أسلوباً جديداً للتغلب على مشكلة R_F وتأثيرها الخاطئ على القياس، يظهر الشكل(6) (جيلاني، (2019)،208) خصائص الحاكمة المضلعة:



الشكل (6) خصائص عمل الحاكمة المضلعة

7-3 حاكمة السماحية Admittance relay

النوع الأشهر من أجهزة الحماية المسافية وتعرف أيضاً بـ Mho relay، حيث أن المتجه الذي يمثل Z_{Fault} دائماً يكون أقرب للمنحني الرأسي بزاوية تصل إلى حوالي 60 درجة، كما في الشكل(5) (جيلاني، (2019)،200)

أكثر الحواكم Mho انتشاراً هي حاكمة Mhoذاتية الاستقطاب: Polarized Mho relay وهي ذات خصائص تشغيل دائرية، يستخدم فيه إشارة جديدة تسمى توتر الاستقطاب $V_{Polarized}$ بالإضافة إلى توتر وتيار العطل $V_F - I_F$.

هذا النوع نجح في التغلب على مشكلة وقوع نقطة العطل خارج منطقة التشغيل بسبب وجود مقاومة العطل R_F.

8- الظـواهر المـؤثرة علـى الحاكمـة المسـافية:

Phenomena affecting the distance relay

رغـم المحـاولات السـابقة للوصـول إلـى الأداء الجيـد لأجهـزة الحواكم المسافية فلا يزال هناك عدة ظواهر تؤثر على أداء الحواكم المسافية من أهمها (جيلاني، (2019)،214) :

9-1) Over reach.
9-2) under reach.
9-3) Parallel lines.
9-4) In-Feed.
9-5) Power Swing.
9-6) FACTs.

8-1) تحت الوصول:Over reach

في هذه الحالة الحاكمة المسافية ترى العطل البعيد كأنه قريب نتيجة أخطاء أجهزة القياس.

8-2) فوق الوصول:Under reach

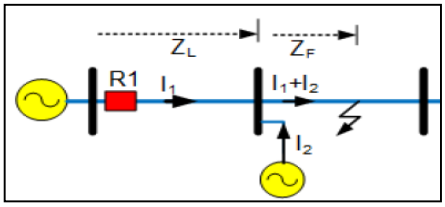
في هذه الحالة الحاكمة المسافية ترى العطل القريب كأنه بعيد.

8-3) الخطوط المتوازية:Parallel lines

تصـنف علـى أنهـا مـن مشـاكل الـ Over-reach، ففـي حالـة الخطوط المتوازي، تتأثر الممانعة التي تراها الحاكمة تتأثر بما يعرف بـ Mutual Impedance بين الخطين ويرمز لها بالرمز Z_m، وعند خروج أحد الخطين وبقاء الخط الآخر دون تعديل في قيم الضبط، تقوم الحاكمة الذي بقت في الخدمة بطرح قيمة Z_m من قيمة ممانعة أي عطل، رغم أن Z_m لم يعد لها وجود، وبالتالي فنحن أمام مشكلة Over-reach لأن الجهاز يرى ممانعة أقل من الممانعة الحقيقية.

8-4) In –Feed:

تصنف على أنها من مشاكل الـ Under reach وتظهر عند وجود تغذية إضافية عند نهاية الخط كما في الشكل (7):



الشكل (7) مشكلة الـ In –Feed

التوتر عند الحاكمة R_1 هو:

$$V_R = I_1 * Z_L + (I_1 + I_2) * Z_F \qquad (7)$$

التيار المار بالحاكمة:

$$I_R = I_1 \qquad (8)$$

بناءً عليه الممانعة المنظورة من الحاكمة:

$$Z_{seen} = Z_L + Z_F\left[1 + \frac{I_2}{I_1}\right] \qquad (9)$$

ولكن في الحقيقة تكون الممانعة:

$$Z_{seen} = Z_L + Z_F \qquad (10)$$

وهي أقل من الممانعة المنظورة من الحاكمة.

8-5) تأرجح الاستطاعة Power Swing:

ظاهرة تأرجح الاستطاعة تحدث غالباً بسبب تغير في قيم زوايا توترات المولدات المتصلة بالشبكة (تتغير angle δ وهي الزاوية بـين التـوتر عنـد الإرسـال والتـوتر عنـد الاسـتقبال) فتتـأرجح الاسـتطاعة بينهمـا، وهـي مـن الظـواهر التـي تسـبب مشـاكل عديدة وتشغيل خاطئ لأجهزة الحواكم المسافية، كما قد تحدث هذه الظاهرة عقب حدوث اضطراب ضخم في الشبكة.

8-6) أجهزة نقل التيار المتناوب المرنة:FACTs

FACTs: Flexible Alternative Current Transmission devices.

تستخدم أجهزة نقل التيار المتناوب المرنة في نظم الطاقة الكهربائية وذلك لزيادة سعة خطوط النقل وكذلك تحسين حدود الاستقرار الديناميكي والعابر، وبالرغم من ذلك فإن استخدام أجهزة نقل التيار المتناوب المرنة تؤثر سلباً على أداء الحاكمة المسافية المستخدمة.

لقد تم اقترح مفهوم أجهزة الـ FACTs من قبل الباحث N.G.Hingorani في عام1988م، والذي يعبر عن قابلية التحكم في أنظمة نقل القدرة الكهربائية عن طريق استخدام الكترونيات القدرة الكهربائية، يوجد عدة أنواع من أجهزة الـ FACTs، والتي يمكن أن تصنيف حسب طريقة توصيلها مع خطوط النقل إلى أجهزة تسلسلية مثل جهاز الـ TCSC Thyristor Controlled Series Capacitors أو أجهزة

تفرعية مثل جهاز الـ Static Synchronous STATCOM Compensatorأو أجهزة مختلطة مثل جهاز الـ UPFC Unified Power Flow Controller(N et al., (2000), 44).

9-جهاز التحكم الموحد بجريان الاستطاعة: Unified Power Flow Controller device

لقد تم ابتكار جهاز التحكم الموحد بجريان الاستطاعة الـUPFC من قبل الباحثL.Gyugyi في عام 1991م، الاستخدام الرئيسي له هو التحكم بجريان الاستطاعة الفعلية والردية في خطوط نقل القدرة الكهربائية بهدف تحميل وتشغيل نظام القدرة الكهربائي بشكل اقتصادي وموثوق ومرن، يؤمن جهاز الـ UPFC تحكم كامل بالمحددات التي تؤثر على جريان الاستطاعة الفعلية والردية في خطوط النقل (ممانعة الخط، مطال وزاوية الطور للتوتر)(N et al.,(2000),299).

من أهم ميزات جهاز الـ UPFC قدرته على التحكم بشكل لحظي وانتقائي بجميع البارامترات المؤثرة في جريان الاستطاعة على خطوط النقل هذه الإمكانيات الفريدة مجتمعة محددة بالصفة " الموحد" في اسم هذا الجهاز ، من ناحية أخرى يمكن لهذا الجهاز أن يتحكم بشكل مستقل بجريان الاستطاعة الفعلية والردية على خط النقل والتوتر على طرفيه.

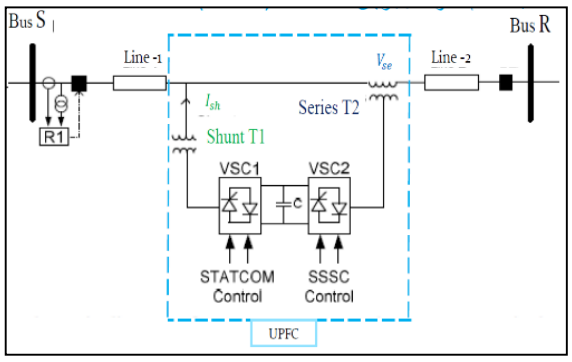
هناك العديد من المميزات لجهاز الـ UPFCمنها:

- التحكم بجريان القدرة على طول خط النقل.
- تعويض الاستطاعة الردية.
- زيادة سعة النقل الأعظمية.
- تنظيم التوتر بشكل أفضل.
- تحسين الاستقرار النظام.
- تحسين جودة الطاقة.
- تثبيط تذبذبات النظام.

يتوضع جهاز الـ UPFC بين قضيبين تجميع (عقدتين) يشار إليهما بعقدة الإرسال وعقدة الاستقبال وهو يتكون من معرجي منبع توتر (Voltage source converters) (VSCs)، وكلا المعرجان موصلان معاً بطريقة back-to-backبواسطة وصلة مشتركة DC مع مكثفة تخزين.

المعرج الأول: المعوض التسلسلي التزامني الساكنSssc : منبع توتر مستمر يربط على التسلسل مع الخط عن طريق محولة، يستخدم المعوض التسلسلي لحقن توتر منفصل متحكم به بشكل متعامد مع تيار الخط من أجل زيادة أو إنقاص الاستطاعة الردية الكلية عبر خط النقل، كما يقوم بحقن توتر متعامد مع توتر نهاية خط النقل من أجل تنظيم جريان الاستطاعة الحقيقة، يمكن تمثيل الـ Sssc كمنبع توتر متناوب تسلسلي ذي مطال متغير متحكم به يوصل على التسلسل مع خط النقل.

بينما المعرج الثاني: المعوض المتزامن الساكن: Statcom: منبع توتر يربط على التفرع مع الخط من خلال محولة، يعمل المعوض التفرعي على تنظيم التوتر في خط النقل وذلك عن طريق توليد أو امتصاص استطاعة ردية عند نقطة توصيله مع الخط، كما يعمل على توليد أو امتصاص استطاعة ردية أو فعلية متحكم بها بناء على طويلة توتر الخرج و زاويته، يمكن تمثيل الـ Statcom كمنبع تيار متناوب متحكم به يوصل على التفرع مع خط النقل(N et al.,(2000),301).



الشكل(8) جهاز الـ UPFC يصل بين قضيبي تجميع.

يوضح الشكل (8) جهاز الـ UPFC يصل بين قضيبين تجميع عبر محولة تفرعية T_1 ومحولة تسلسلية T_2 :(M et al. (2016),11)

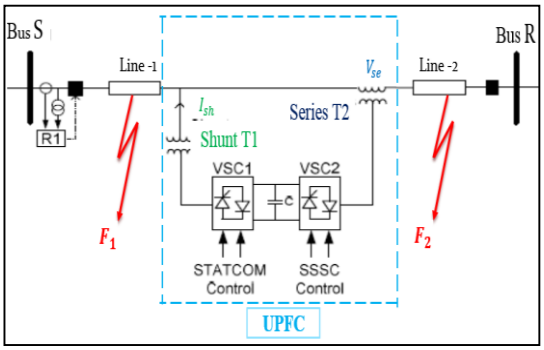
10- تـأثير جهـاز الـ UPFC علـى أداء الحاكمـة المسافية: Effect of the UPFC device on distance relay performance

سـنقوم بدراسـة تـأثير جهـاز الـ UPFCعلـى أداء الحاكمـة المسافية وفق:

- طريقة رياضية لإيجاد معادلة الممانعة المنظورة من قبل الحاكمة المسافية بوجود جهاز الـ UPFC.
- طريقـة المحاكـاة Simulation فـي بيئـة برنـامج الـ Matlab.

10-1- دراسة تأثير جهاز الـ UPFC على أداء الحاكمة المسافية بالطريقة الرياضية:

سوف ندرس حالة حصول عطل قبل جهاز الـ UPFC وحالة عطل بعد جهاز الـ UPFC مع الأخذ بعين الاعتبار وجود جهاز الـ UPFC وسط خط النقل والعطل الحاصل هو عطل طور مع الأرض كما في الشكل (9)(M et al.,(2016),11):



الشكل(9) مكان حصول عطل على خط النقل.

- حالة عطل F_1 قبل الـ UPFC:

يكون جهاز الـ UPFC خارج حلقة العطل ولا يؤثر على الممانعة المقاسة من الحاكمة المسافية كما في حالة عدم وجود UPFC.

- حالة عطل F_2 بعد الـ UPFC:

في هذه الحالة تكون الدارة المكافئة لخط النقل مع وجود الـ UPFC وفق الشكل(10) (M et al.,(2016),11): حيث تم تمثيل الـ Statcom كمنبع تيار متناوب I_{sh} على التفرع مع خط النقل، وتم تمثيل الـ Sssc كمنبع توتر متناوب V_{se} على التسلسل مع خط النقل.

V_s:

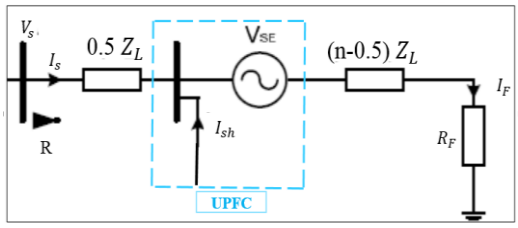
توتر المنبع. – I_s: تيار المنبع.

R_F: مقاومة العطل. – I_F: تيار العطل.

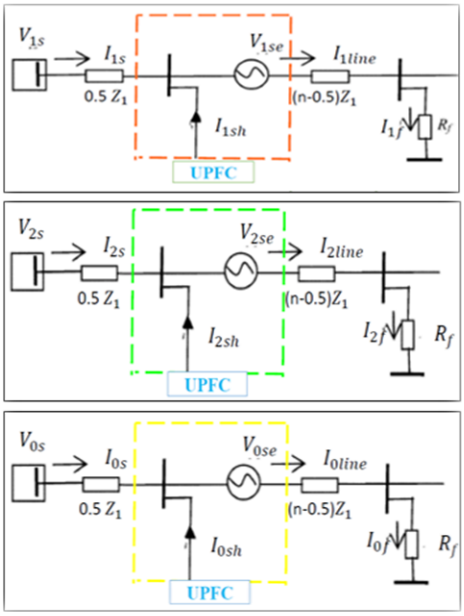
Z_L: ممانعة الخط.

n: المسافة بين الحاكمة والعطل بالنسبة لطول الخط L .

n * L: موقع العطل.



الشكل(10) الدارة المكافئة لخط النقل مع وجود الـUPFC.



الشكل(11) تمثيل دارة التتابع الموجبة والسالبة والصفرية عند عطل طور مع الأرض.

يمكن تمثيل دارة التتابع الموجبة والسالبة والصفرية مع وجود عطـل طـور مـع الأرض وفـق الشـكل (11) M et al.,(2016),12):

المعادلات الموافقة لكل دارة وفق الآتي على الترتيب:

$$\mathbf{V_{1S} = I_{1S}0.5Z_1 + V_{1se} + I_{1line}(n - 0.5)Z_1 + R_fI_{1f}} \quad \mathbf{(11)}$$

$$\mathbf{I_{1line} = I_{1S} + I_{1sh}} \quad \mathbf{(12)}$$

$$V_{2S} = I_{2S}0.5Z_1 + V_{2se} + I_{2line}(n - 0.5)Z_2 + R_fI_{2f} \quad (13)$$

$$I_{2line} = I_{2S} + I_{2sh} \quad \mathbf{(14)}$$

$$V_{0S} = I_{0S}0.5Z_1 + V_{0se} + I_{0line}(n - 0.5)Z_1 + R_fI_{0f} \quad \mathbf{(15)}$$

$$I_{0line} = I_{0S} + I_{0sh} \quad \mathbf{(16)}$$

لكن لدينا:

$$V_S = V_{1S} + V_{2S} + V_{0S} \quad \mathbf{(17)}$$

$$V_{se} = V_{1se} + V_{2se} + V_{0se} \quad \mathbf{(18)}$$

$$I_f = I_{1f} + I_{2f} + I_{0f}. \quad \mathbf{(19)}$$

$$I_S = I_{1S} + I_{2S} + I_{0S}. \quad \mathbf{(20)}$$

$$I_{sh} = I_{1sh} + I_{2sh} + I_{0sh}. \quad \mathbf{(21)}$$

وبالتالي التوتر المقاس عند نقطة الحاكمة:

$$V_S = nI_SZ_1 + nI_{0S}(Z_0 - Z_1) + I_{sh}(n - 0.5)Z_1 + I_{0sh}(n - 0.5)(Z_0 - Z_1) + V_{se} + R_fI_f \quad \mathbf{(22)}$$

التيار المار بالحاكمةI_relay :

$$I_{relay} = I_S + \frac{Z_0 - Z_1}{Z_0}I_{S0} \quad \mathbf{(23)}$$

تصبح الممانعة المقاسة من قبل الحاكمة المسافية مع وجود الـ UPFC وفق العلاقة:

$$Z_R = \frac{V_S}{I_{relay}} = nZ_1 + \frac{I_{sh}}{I_{relay}}(n - 0.5)Z_1 + \frac{I_{0sh}}{I_{relay}}(n - 0.5)(Z_0 - Z_1) + \frac{V_{se}}{I_{relay}} + \frac{I_f}{I_{relay}}R_f \quad \mathbf{(24)}$$

لكن ثانوي المحول التفرعي موصول بشكل مثلثي وبالتالي تيار التتابع الصفري المحقون من الـ Statcom يكون معدوم.

$$\boldsymbol{I_{0sh} = 0} \quad \mathbf{(25)}$$

تصبح الممانعة المقاسة من قبل الحاكمة المسافية مع وجود الـ UPFC وفق العلاقة:

$$Z_R = nZ_1 + \frac{I_{sh}}{I_{relay}}(n - 0.5)Z_1 + \frac{V_{se}}{I_{relay}} + \frac{I_f}{I_{relay}}R_f \quad \mathbf{(26)}$$

بشكل عام تعطى الممانعة المقاسة من قبل الحاكمة المسافية مع وجود الـ UPFC وفق العلاقة:

$$Z_R = nZ_1 + \frac{I_{sh}}{I_{relay}}(n - d)Z_1 + \frac{V_{se}}{I_{relay}} + \frac{I_f}{I_{relay}}R_f \quad \mathbf{(27)}$$

d: موقع الـUPFC من خط النقل (المسافة بين الحاكمة و UPFC بالنسبة لطول الخط).

من العلاقة السابقة نجد أن معادلة الممانعة المقاسة من قبل الحاكمة المسافية عند حصول عطل طور مع الأرض مع وجود الـ UPFC تتكون من أربعة أقسام:

القسم الأول من المعادلة يمثل ممانعة التتابع الموجبة من نقطة موقع الحاكمة إلى نقطة موقع حصول العطل، والذي يجب أن يكون القيمة الصحيحة للحاكمة المسافية.

القسم الثاني من المعادلة يظهر تأثير الـ Statcom على الممانعة المقاسة من خلال التيار التفرعي المحقون من الـ Statcom.

القسم الثالث من المعادلة يظهر تأثير الـ Sccc على الممانعة المقاسة من خلال التوتر التسلسلي المحقون من الـ Sccc.

القسم الرابع يظهر تأثير مقاومة العطل في حال وجودها على الممانعة المقاسة.

علماً أن معادلة الممانعة المقاسة من قبل الحاكمة المسافية بدون وجود الـ UPFC تعطى بالعلاقة:

$$Z_R = \frac{V_S}{I_{relay}} = \frac{V_S}{I_S + \frac{Z_0 - Z_1}{Z_0}I_{S0}} \quad \mathbf{(28)}$$

حيث:

I_0: تيار التتابع الطوري الصفري.

Z_0: ممانعة التتابع الصفرية لخط النقل.

Z_1: ممانعة التتابع الموجبة لخط النقل.

Z_2: ممانعة التتابع السالبة لخط النقل.

Z_F: ممانعة العطل.

Z_{seen} : الممانعة المنظورة من الحاكمة المسافية.

I_{relay}: تيار الحاكمة المسافية.

Z_{1s}: ممانعة التتابع الموجب لمنبع التغذية.

Z_{2s}: ممانعة التتابع السالب لمنبع التغذية.

Z_{0s} : ممانعة التتابع الصفري لمنبع التغذية.

R_f : مقاومة العطل.

I_f: تيار العطل.

V_{se}: التوتر الطوري التسلسلي المحقون من جهاز Sssc.

I_{sh}: التيار الطوري التفرعي المحقون من جهاز Statcom.

I_{1s}: تيار التتابع الموجب الطوري عند موقع الحاكمة.

I_{2s}: تيار التتابع السالب الطوري عند موقع الحاكمة.

I_{0s}: تيار التتابع الصفري الطوري عند موقع الحاكمة.

I_{0line}: تيار التتابع الصفري الطوري لخط النقل.

I_{1line}: تيار التتابع الموجب الطوري لخط النقل.

I_{2line}: تيار التتابع السالب الطوري لخط النقل.

V_{1s}: توتر التتابع الموجب الطوري عند موقع الحاكمة.

V_{2s}: توتر التتابع السالب الطوري عند موقع الحاكمة.

V_{0s}: توتر التتابع الصفري الطوري عند موقع الحاكمة.

V_{1se}: توتر التتابع الموجب الطوري التسلسلي المحقون من جهاز Sssc.

V_{2se} : توتر التتابع السالب الطوري التسلسلي المحقون من جهاز Sssc.

V_{0se}: توتر التتابع الصفري الطوري التسلسلي المحقون من جهاز Sssc.

I_{1sh}: تيار التتابع الموجب الطوري التفرعي المحقون من جهاز Statcom.

I_{2sh} : تيار التتابع السالب الطوري التفرعي المحقون من جهاز Statcom.

I_{0sh} : تيار التتابع الصفري الطوري التفرعي المحقون من جهاز Statcom.

I_{1f} : مركبة تيار العطل التتابع الموجب الطوري.

I_{2f} : مركبة تيار العطل التتابع السالب الطوري.

I_{0f} : مركبة تيار العطل التتابع الصفري الطوري.

L : طول خط النقل.

بناءً على التحليل الرياضي السابق فإن استخدم جهاز الـ UPFC في خط النقل أدى إلى تغير في الممانعة المقاسة من قبل الحاكمة المسافية والتي يمكن أن تسبب فصل غير مناسب أو عمل الحاكمة بشكل غير مناسب، مما يؤكد أهمية البحث، وضرورة تحليل وتأثير جهاز الـ UPFC على أداء الحاكمة المسافية تحت مختلف الظروف والشروط.

2-11 دراسة تأثير جهاز الـ UPFC على أداء الحاكمة المسافية بطريقة المحاكاة في بيئة برنامج Matlab:

سنقوم بتحليل تأثير جهاز الـ UPFC على أداء الحاكمة المسافية في بيئة برنامج Matlab، حيث سنقوم بمحاكاة الحاكمة المسافية وجهاز الـ UPFC، ثم ننتقل الى مرحلة دراسة حالة حصول عطل على خط نقل بوجود جهاز الـUPFC، ولكن قبل ذلك لابد من توضيح الأمور التالية:

1-2-10 محاكاة الحاكمة المسافية Mho:

مكتبة برنامج ال -Matlab لا تحوي نموذج جاهز للحاكمة المسافية، لذلك من الضروري بناء نموذج خاص للحاكمة المسافية بالاعتماد على المعادلات الممثلة لخصائص التشغيل الحاكمة.

يمكن الحصول على خصائص التشغيل الحاكمة المسافية Mho أما مقارنة بالطور (Phase comparison) أو مقارنة المطال (Amplitude comparison) لموجهات الأشعة الخاصة بإشارات التوتر والتيار للخط المحمي (Ezechukwu 1, (2013) ,).

– المقارنة بالطور: مطبقة بشكل كبير في الحواكم الحديثة وهي مستخدمة في هذا البحث حيث تمثل خصائص الحاكمة

المسافية عموماً باستخدام إشارتي دخل للمقارن Comparatorوهما S_1,S_2 وفق العلاقتين:

$$S_1 = I_r Z_R - K_1 V_r \quad (29)$$

$$S_2 = K_2\, V_r + K_3\, I_r\, Z_R + K_4\, V_pol \quad (30)$$

حيث:

S_1, S_2: إشارات دخل المقارن.

Z_R: ممانعة وصول الحاكمة.

V_r: توتر حلقة الممانعة.

I_r: تيار حلقة العطل.

V_{pol}: توتر الاستقطاب.

K_4, K_3, K_2, K_1 : ثوابت عقدية تحدد خصائص الحاكمة.

تعتبر الإزاحة الزاوية للأشعة: S_1,S_2 موجبة إذا كان S_1 متقدم على S_2 ويعمل المقارن الطوري إذا تحقق الشرط:

$$90^o \le \widehat{S_1} - \widehat{S_2} \le 90^o \quad (31)$$

أو

$$\left|\widehat{S_1} - \widehat{S_2}\right| \le 90^o \quad (32)$$

هذا الطريقة مستخدمة في تطوير خصائص الحاكمة المسافية Mho، حيث من الممكن أن تصمم خصائص التشغيل على أي شكل بتغيير قيم بارمترات K في مدخلات المقارن.

2-2-10 خصائص الحاكمة المسافية Mho ذاتية الاستقطاب: Mho self-polarized characteristics

تتحدد خصائص الحاكمة Mho Self-Polarized بدائرة في مستوي الممانعة R-X، هذه الخصائص يمكن أن نحصل عليها من العلاقات (29) –(30) بضبط:

$$K_2 = K_1 = 1$$
$$K_4 = K_3 = 0$$

ومنه:

$$S_1 = I_r Z_R - V_r \quad (33)$$
$$S_2 = V_r \quad (34)$$

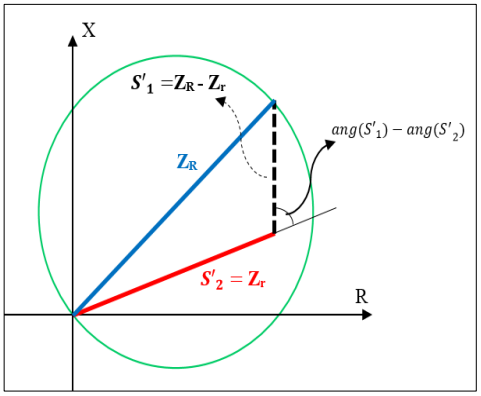
لتمثيل خصائص الحاكمة Mho في مستوي R-X من الضروري تمثيل إشارتي دخل المقارن S_1,S_2 في مستوي الممانعة وهذا يتم بتقسيم العلاقتين السابقتين على I_r ومنه نحصل على العلاقات:

$$S'_1 = Z_R - Z_r \quad (35)$$

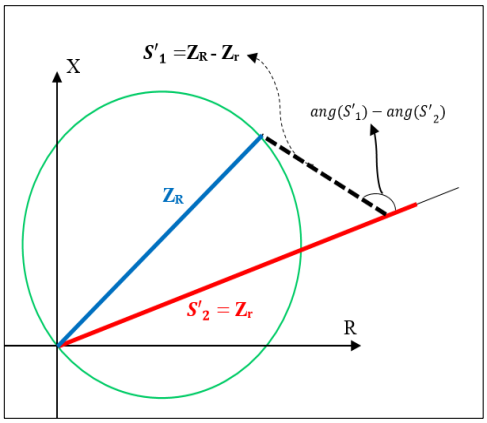
$$S'_2 = Z_r \quad (36)$$

حيث: Z_r: الممانعة المنظورة من الحاكمة.

يوضح الشكل(12-1) حاكمة الحماية Mho ذاتية الاستقطاب وشروط التشغيل المتوافقة، حيث يظهر أن الممانعة المقاسة Z_r تقع داخل دائرة الخصائص والفرق الزاوي بين S_1,S_2 يكون أقل من 90 درجة والذي يوافق شروط التشغيل الحاكمة، بينما يوضح الشكل(12–2) شروط التشغيل غير المتوافقة، حيث يظهر أن الممانعة المقاسة Z_r تقع خارج دائرة الخصائص، والفرق الزاوي بين S_1,S_2 يكون أكبر من 90 درجة والذي لا يوافق شروط التشغيل الحاكمة(J et al., (1994), 11).



الشكل(12–1) خصائص التشغيل المتوافقة للحاكمة Mho



الشكل(12–2) خصائص التشغيل غير المتوافقة للحاكمة Mho

3-2-10 نموذج الحاكمة المسافية Mho ذاتية الاستقطاب: Model of Mho self –polarized

ضبط مناطق عمل الحاكمة المسافية يعتمد على ممانعة التتابع الموجبة، لذلك مدخلات التوتر والتيار المناسبة مطلوبة لحساب ممانعة التتابع الموجبة المنظورة من الحاكمة عند نقطة الحاكمة في جميع أنواع الأعطال.

يبنى النموذج الطوري لخصائص الحاكمة المسافية Mho ذاتية الاستقطاب في بيئة برنامج Matlab اعتماداً على معادلات الممانعة الظاهرية المنظورة من الحاكمة المسافية لكل نوع عطل وفق الجدول(1) ومدخلات المقارن الطور المعطاة في المعادلات (33)- (34) لخصائص الحاكمة وهذه المدخلات هي مركبة التردد الأساسي لإشارات التوترات والتيارات وفق الشكل (13).

يتألف نموذج الحاكمة المسافية Mho ذاتية الاستقطاب من 6 عناصر:3 عناصر منها لحالات الأعطال الطورية (بدون وجود الأرض) و3 عناصر لحالات الأعطال الأرضية (طور مع أرض).

المكونات الهيكلية لنموذج عنصر الطور في حالة الأعطال الطورية ولنموذج العنصر الأرضي في حالة الأعطال الأرضية تمثل وفق الآتي:

- نموذج عنصر الطور:Phase element model

يظهر الشكل (13) نموذج عنصر الطور للحاكمة في بيئة برنامج الـ Matlab، حيث تغذي إشارات الدخل (التوترات والتيارات) المختلفة عناصر الحاكمة المناسبة على طول فترة المعايرة لمناطق الحماية الثلاث على شكل شعاع موجه.

نجد في الشكل (13) أن كل عنصر يحتوي ثلاثة بلوكات مختلفة حسب الطور، محتويات البلوك الأول أي (البلوك a-b) موضح في الشكل (14)، البلوكات الثاني والثالث أي (البلوكات a-c/c-b) مماثلة للبلوك الأول.

يحتوي كل بلوك على قسمين:

الأول (القسم العلوي) يتم فيه حساب ممانعة التتابع الموجبة الظاهرية كما هو موضح في الشكل (14-a).

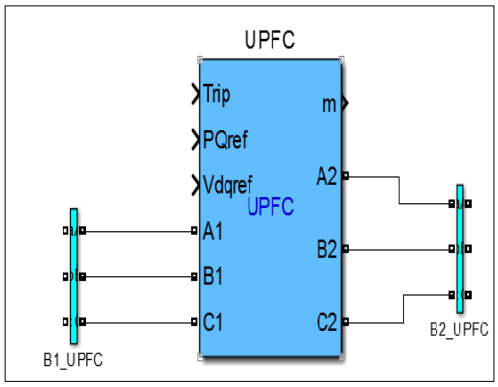
الثاني (القسم السفلي) يولد إشارات الفصل إذا تحقق المعيار الزاوي لخصائص الحاكمة Mho ذاتية الاستقطاب، ويفصل القاطع بعد تأخير زمني مناسب حسب منطقة عمل الحاكمة كما هو موضح في الشكل(14-b).

- نموذج العنصر الأرضي:Model ground element

يظهر الشكل (15) نموذج العنصر الأرضي للحاكمة ويمثل خوارزميات عمل الحاكمة في حالة الأعطال الأرضية كما في الجدول (1) مع الأخذ بعين الاعتبار: تعويض تيار التتابع الصفري (K_0I_0) يحسب ويضاف إلى تيار الطور، توترات الطور وتعويض تيارات الطور هي الآن كميات تشغيل جديدة بدلاً من قيم توترات وتيارات الخط المستخدمة في نموذج العنصر الطور.

4-2-10 نموذج جهاز UPFC: Model of UPFC device

تحوي مكتبة برنامج الـ Matlab على نموذج UPFC جاهز كما الشكل (16):



الشكل(16) نموذج UPFC من مكتبة Matlab

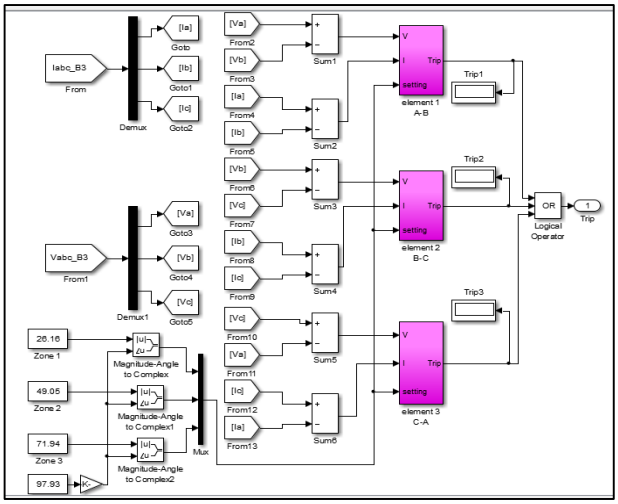
استخدم النموذج السابق مباشرة كمتحكم بجريان الطاقة ومنظم توتر، وتم تعديل بارامترات النموذج لتوافق خط النقل المدروس.

بارمترات نموذج جهاز الـ UPFC:

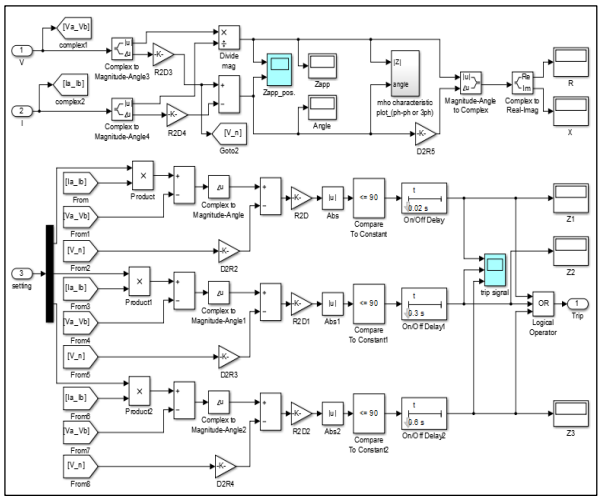
- توتر جهاز الـ UPFC [kV] وتردد الشبكة [Hz].

- معدل المعرج التفرعي/ التسلسلي بـ [VA].
- معامل الكسب التناسبي K_P.
- معامل الكسب التكاملي K_I.
- قيمة الاستطاعة المرجعية PQ_{ref}.
- قيمة التوتر المرجعي Vdq_{ref}
- توتر الوصلة المشتركة DC بـ [V].
- سعة مكثف الربط DC بـ Farad.

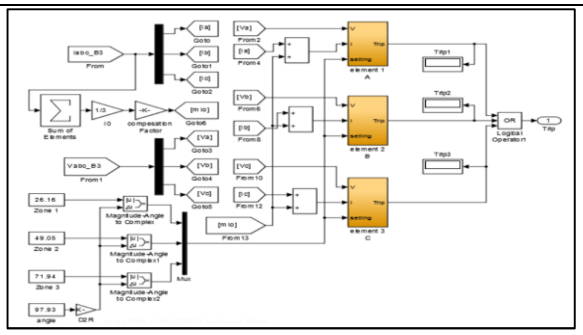
قيم البارامترات الخاصة بالنموذج يمكن أن تتغير حسب المطلوب وبما يتوافق مع الحالة المدروسة.



الشكل(13) نموذج العنصر الطور في الحاكمة



الشكل (14) البلوك الأول من العنصر الطور في الحاكمة



الشكل(15) نموذج العنصر الأرضي في الحاكمة

10-3-التطبيق العملي:Practical application

سنقوم في بيئة برنامج Matlab بمحاكاة شبكة نقل مكونة من خمسة خطوط نقل أطوالها متساوية ومنبع قدرة [MVA] 300 و توتر[KV]400 وحمل [MVA] 260 كما في الشكل(17)، يوضح الجدول (2) البيانات الخاصة بخطوط النقل (Purra.,et al., 2015, 4):

الجدول (2) البيانات الخاصة بخطوط النقل.

Value	Parameters
Length (Km)	100
R_0 (Ω/km)	0.01165
R_1 (Ω/km)	0.2676
L_0 (H/km)	0.00867
L_1 (H/km)	0.003008
C_0 (F/km)	12.74E-09
C_1 (F/km)	7.751E-09

بفرض أن جهاز الـ UPFC وسط خط النقل بين قضيب تجميع الثالث وقضيب تجميع الرابع كما في الشكل(17).

الحاكمة المسافية سيتم وضعها عند قضيب تجميع الثالث وسنأخذ بعين الاعتبار منطقتي الحماية الأولى والثانية والثالثة فقط وفق الآتي:

1- المنطقة الأولى: تغطي 80% من الخط الواصل بين قضيب تجميع الثالث وقضيب تجميع الرابع.

2- المنطقة الثانية: تغطي الخط الواصل بين قضيب تجميع الثالث وقضيب تجميع الرابع بالإضافة إلى 50% من الخط الواصل بين قضيب تجميع الرابع وقضيب التجميع الخامس.

3- المنطقة الثالثة: تغطي الخط الواصل بين قضيب تجميع الثالث وقضيب تجميع الرابع بالإضافة إلى الخط الواصل بين قضيب تجميع الرابع وقضيب التجميع الخامس و 20% من الخط الواصل بين قضيب تجميع الخامس وقضيب التجميع السادس.

بناء على البيانات الخاصة بخطوط النقل الواردة في الجدول (2) يمكن حساب ممانعات التتابع الموجبة والسالبة والصفرية لخطوط النقل مع الأخذ بعين الاعتبار F=60 [Hz] نحصل على النتائج التالية في الجدول(3):

الجدول(3) ممانعات التتابع الموجبة والسالبة والصفرية

Z_0 [Ω/km]	$Z_1=Z_2$ [Ω/km]
1.1645∠85.23	0.3272 ∠97.93

يمكن إيجاد خصائص الحاكمة Mho ذاتية الاستقطاب التي تم اختيارها لحماية خطوط النقل والتي تم وضعها عند قضيب تجميع الرابع لها معايرات المناطق التالية وفق الآتي:

وصول المنطقة الأولى:

$$Zone_1 = 0.8 * L_{line\ 3-4} * Z_{1\ line\ 3-4}$$
$$Zone_1 = 0.8 * 100 * (0.327\angle 97.93)$$
$$Zone_1 = 26.16\angle 97.93^o\ \Omega$$

هذه المنطقة ليس لها تأخير زمني أي لحظية، لكن في الواقع العملي تحتاج زمن قصير جداً لاستجابة التجهيزات لذلك يضبط عند زمن $t_1 = 2$ [ms]

وصول المنطقة الثانية:

$$Zone_2 = L_{line\ 3-4} * Z_{1\ line\ 3-4} + 0.5 * L_{line\ 4-5} * Z_{1\ line\ 4-5}$$
$$Zone_2 = 100 * (0.327\angle 97.93) + 0.5 * 100 * (0.327\angle 97.93)$$
$$Zone_2 = 49.05\ \angle 97.93^o\Omega$$

زمن تأخير المنطقة الثانية هو $t_2 = 0.3[s]$

وصول المنطقة الثالثة:

$$Zone_3 = L_{line\ 3-4} * Z_{1\ line\ 3-4} + L_{line\ 4-5} * Z_{1\ line\ 4-5} + 0.2 * L_{line\ 5-6} * Z_{1\ line\ 5-6}$$

$$Zone_3 = 100 * (0.327\angle 97.93) + 0.5 * 100 * (0.327\angle 97.93) + 0.2 * 100 * (0.327\angle 97.93)$$
$$Zone_3 = 71.94\angle 97.93^o\Omega$$

زمن تأخير المنطقة الثانية هو $t_3 = 0.6[s]$

عامل التعويض: K_0

$$K_0 = \frac{Z_{0_{34}} - Z_{1_{34}}}{Z_{1_{34}}}$$
$$Z_{0_{34}} = 116.45\angle 85.23.$$
$$Z_{1_{34}} = 32.72\angle 97.93$$

ومنه:

$$K_0 = 2.586\angle -17.58$$
$$K_0 = 2.488 - 0.705\ i$$

عدد واتجاه مناطق المعايرة ووصول المناطق وزمن التأخير يمكن أن تتغير حسب المطلوب.

البيانات الخاصة بجهاز ال UPFC المركب وسط خط النقل الواصل بين قضيبي تجميع الثالث والرابع موضحة بالجدول(4):

الجدول(4) بيانات جهاز الـ UPFC

Parameters	Values
Shunt and Series converter rating	50 MVA
System nominal voltage and frequency	400 KV F=60 HZ
Vac Regulator gains	
Current Regulator gains	
Bypass breaker	Initially closed and opens at t = 10s
P reference	
Q reference	0.3 pu.
V_{dq} ref	0.05 pu
DC link nominal voltage	40 kV
DC link capacitance	750e-6 F

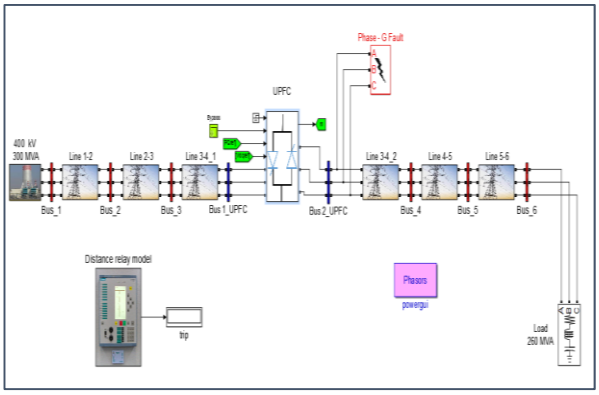
4-9 النتائج و المناقشة:Results and discussion

بناء على المحاكاة الموضحة في الشكل (17) وعلى اعتبار أن (70-80) % من الأعطال التي تحصل في خطوط النقل هي

من نوع عطل طور مع الأرض، سنقوم بدراسة أثر تغيير موقع هذا النوع من العطل على استجابة الحاكمة المسافية الموجودة عند قضيب تجميع الثالث مع/بدون وجود جهاز الـ UPFC نحصل على النتائج في الجدول (5) والجدول (6):

الجدول(5) استجابة الحاكمة المسافية بدون وجود UPFC

موقع العطل (كم)	الممانعة المنظورة من الحاكمة بدون وجود UPFC	استجابة الحاكمة		
		Zone1	Zone2	Zone3
20	0.213+ 6.540 i	Trip		
40	0.425+13.08 i	Trip		
60	0.638+19.621 i	Trip		
70	0.745+22.8914	Trip		
80	0.851+26.161 i	Trip		
90	0.957+29.432 i		Trip	
100	1.064+32.702 i		Trip	
120	1.276+39.242 i		Trip	
140	1.489+45.783 i		Trip	
150	1.596+49.053 i .702+52.323 i		Trip	
160	1.702+52.323 i			Trip
180	1.915+58.863 i			Trip
200	2.128+65.404 i			Trip
220	2.340+71.944 i			Trip

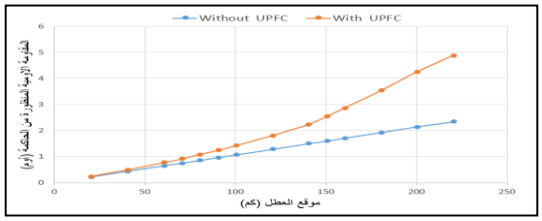


الشكل(17) محاكاة خط النقل في بيئة برنامج الـ Matlab مع وجود جهاز الـ UPFC وسط خط النقل

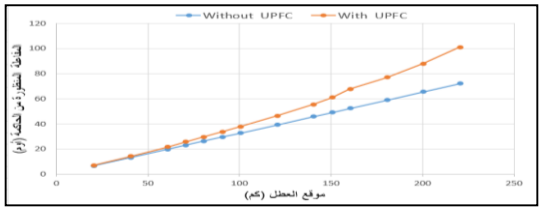
الجدول(6) استجابة الحاكمة المسافية مع وجود UPFC

موقع العطل (كم)	الممانعة المنظورة من الحاكمة بدون وجود UPFC	استجابة الحاكمة		
		Zone1	Zone2	Zone3
20	0.233+ 6.908 i	Trip		
40	0.488+14.101 i	Trip		
60	0.768+21.604 i	Trip		
70	0.906+25.564 i		Trip	
80	1.077+29.448 i		Trip	
90	1.239+33.618 i		Trip	
100	1.418+37.667 i		Trip	
120	1.794+46.306 i			Trip
140	2.218+55.417 i			Trip
150	2.531+61.024 i			Trip
160	2.859+67.640 i .702+52.323 i			Trip
180	3.530+76.900 i			Trip
200	4.245+87.737 i			Trip
220	4.871+100.97 i			Trip

يظهر الشكل (18) تغير المقاومة المنظورة من الحاكمة المسافية مع تغير موقع العطل، كما يظهر الشكل (19) تغير المفاعلة المنظورة من الحاكمة المسافية مع تغير موقع العطل وذلك في حالتي مع/ بدون وجود جهاز الـ UPFC:



الشكل(18) تغير المقاومة المنظورة من الحاكمة مع/بدون جهاز الـ UPFC مع تغيير موقع العطل



الشكل(19) تغير المفاعلة المنظورة من الحاكمة مع/بدون جهاز الـ UPFC مع تغيير موقع العطل.

– مما سبق نجد في حالة عدم وجود جهاز الـ UPFC و بناءً على النتائج في الجدول (5-1) تزداد الممانعة المنظورة من قبل الحاكمة المسافية مع زيادة موقع العطل، وتستجيب الحاكمة المسافية بشكل مناسب حسب موقع العطل و حسب ضبط مناطق الحماية، ولكن في حالة وجود جهاز الـ UPFC وبناءً على النتائج في الجدول (5-2) تتغير الممانعة المنظورة من قبل الحاكمة المسافية عما عنه في حالة عدم وجود جهاز الـ UPFC ويسبب تغيير استجابة الحاكمة المسافية و يظهر ذلك عند موقع العطل عند مسافات (-150- 120-70-80 140) كم، حيث وجدنا في حالة عدم وجود جهاز الـ UPFC وحدوث عطل طور مع الأرض وعند مسافة 80-70 كم ، تستجيب الحاكمة المسافية في مثل هذه الحالة في منطقة العمل الأولى، ولكن مع وجود جهاز الـ UPFC فإن الحاكمة المسافية تستجيب في منطقة العمل الثانية بدلاً من منطقة العمل الأولى إي مع وجود تأخير زمني وهذا غير مناسب، فقد يؤدي هذا إلى ضرر في التجهيزات و زيادة عدد مرات الصيانة و ما يترتب على ذلك من زيادة تكاليف في شبكة النقل.

كذلك الأمر عند مسافة 120-140-150كم، تستجيب الحاكمة المسافية في مثل هذه الحالة في منطقة العمل الثانية بدون وجود جهاز UPFC، ولكن مع وجود جهاز الـUPFC فإن الحاكمة المسافية تستجيب في منطقة العمل الثالثة بدلاً من منطقة العمل الثانية، إي مع وجود تأخير زمني وهذا غير مناسب أيضاً، فقد يؤدي هذا إلى ضرر في التجهيزات و زيادة عدد مرات الصيانة و ما يترتب على ذلك من زيادة تكاليف في شبكة النقل.

الخلاصة: Conclusion

تم في هذا البحث بناء نموذج الطوري للحاكمة المسافية Mho ذاتية الاستقطاب في بيئة برنامج Matlab اعتماداً على معادلات الممانعة الظاهرية المنظورة من الحاكمة المسافية ومدخلات المقارن الطور، وتم دراسة تأثير جهاز الـ UPFC على أداء الحاكمة المسافية، حيث أوضحت نتائج النمذجة والمحاكاة تأثير جهاز الـ UPFC على الممانعة المنظورة من الحاكمة المسافية، هذا التأثير سبب عمل الحاكمة وفق Under reach لجميع مواقع العطل مع وجود جهاز الـ UPFC وسط خط النقل، حيث الممانعة المنظورة من الحاكمة المسافية في هذه الحالة أكبر من الممانعة بدون وجود جهاز الـ UPFC.

تظهر النتائج بوضوح اعتماد عمل الحاكمة المسافية على العديد من الأمور منها تصميمية وشروط العمل وهذا يتضمن موقع ونوع العطل على الخط، أخيراً يتطلب التغلب على تأثير جهاز الـ UPFC معايرة متكيفة للحاكمة المسافية لحدود الفصل بدلاً من استخدام معايرة من النوع الثابت.

التمويل: هذا البحث ممول من جامعة دمشق وفق رقم التمويل(501100020595).

References:

1- الجابي، سميح، وزيدان، خالد. (2015). حماية نظم القدرة الكهربائية. ط:1. منشورات جامعة دمشق.636.

2- جيلاني، محمود. (2019). نظم الحماية الكهربية. ط:2. منشورات جامعة القاهرة.435.

3- Ciufo, J, &Cooperberg, A. (2022). Power System Protection Fundamentals and Applications. IEEE Press on Power and Energy Systems.563.

4- Das, J. (2018). Power Systems Protective_Relaying.4th. CRC Press Taylor & Francis Group.727.

5- Gorakshanath, A, Ganesh, P, & Mohan, T. (2014). Impact analysis of STATCOM on Distance Relay. International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology, 3(3), 90-97.

6- Mohamed Z, & Abdelaziz, C. (2016). Impact of SSSC on Measured Impedance in Single Phase to Ground Fault Condition on 220 kV Transmission Line. Leonardo Journal of Sciences, 20,109-124.

7- N, Hingorani, &L, Gyugyi. (2000). Understanding FACTS concepts and technology of flexible AC transmission systems. IEEE Press.445.

8- Shah, P. (2011). Impact of Statcom on Distance Relays. Master, Electrical Engineering, California State University. https://scholarworks.calstate.edu/downloads/r494vq02q.

9- A. E. (2013). Application of Comparators in Modern Power System Protection and Control. IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering, 8(3), 58-63.

10- J, R, & A, G. (1994, May 4–6), Z =V/I Does Not Make a Distance Relay. 48th Annual Georgia, Tech Protective Relaying Conference. Atlanta, Georgia.

11- Indumathi, M, &N.N. (2020). Distance Relay Algorithm for Tapped Transmission Line. International Journal of Engineering Research &Technology, 9(7), 1643-1646.

12- Purra , K, & P, R. (2013). Modeling and Performance Analysis of Mho-Relay in Matlab. International Journal & Magazine of Engineering, 2(1), 2348-4845.