

تأثير تأرجح القدرة على أداء المرحلات المسافية

أثير حبش عبوش
ماجستير هندسة (قدرة ومكانن)

عبد الغني عبد الرزاق عبد الغفور
قسم الهندسة الكهربائية/كلية الهندسة
جامعة الموصل

الخلاصة

تعاني المرحلات المسافية من قصور في الأداء بسبب الاضطرابات العابرة التي تحدث عند انتقال القدرة وتأرجحها إضافة إلى حالات الأعطال المصاحبة لتأرجح انتقال القدرة في المنظومات. يتناول هذا البحث تمثيل ونمذجة مرحلة المسافة التقليدية واختبار عملها في حالات تأرجح القدرة المستقر وغير المستقر. كذلك تم نمذجة ومحاكاة مرحلة جديدة تستخدم للكشف عن حالات تأرجح القدرة وتعرف بمرحلة الخروج عن التزامن ((Out of Step (OOS)) باستخدام طريقة قياس معدل تغير ممانعة التعاقيب الموجب حيث تقوم هذه المرحلة بالاشراف على إشارات الافلات التي تصدرها المرحلة المسافية وتعمل على كبحها إذا كان تأرجح القدرة مستقر وتسمح لها بالعمل في حالة كشفها لتأرجح غير مستقر وحالة العطل. تم تمثيل ونمذجة هذه المرحلة باستخدام برنامج (Matlab Simulink V6.5) واختبر أداء المرحلة على نظام مكافئ ثنائي التغذية. وأظهرت النتائج فعالية هذه الطريقة وسرعة استجابتها في الحد من قصور مرحلات المسافة في الاستجابة للحالات العابرة بسبب تأرجح القدرة. كذلك أظهرت النتائج إمكانية عالية للتمييز بين الأعطال التي تحصل في مدة التأرجح.

The Effect of Power Swing on Distance Relays Performance

Abdul Ghani A. Abdul Ghafoor
Electrical Engineering Department
College of Engineering
University of Mosul

Atheer Habash Abosh
Master of Power and Machines
Engineering

Abstract

The distance relay is suffering from under-reach in its performance. This is because of some transient disturbance, which may happen when the power flows and swings. Besides that the power swings as a consequence of some fault cases. In this paper a new distance relay has been suggested and modeled for detecting stable and unstable power swings.

This relay is known as out of step relay (OOS). The method employed is to measure the rate of change of the positive sequence impedance of the relay which supervise the trip signal that comes out of the distance relay. It allows the distance relay to work, if it detects an unstable power swing or a fault. On the other hand it blocks it if the power swing is stable. The new relay have been modeled and simulated using MATLAB-SIMULINK software programs.

The performance of this relay has been tested on an equivalent two sources system. The results prove that the suggested relay is active and fast. Thus overcoming the limitation of the distance relay in case of under-reach. The results also show that the new relay has the ability in discriminating between the types of faults, that occur during power swings.

Key Word: Power swing, Distance relay , Out of step protection technique.

1. المقدمة:

تعد دراسة تأرجح القدرة من المسائل البالغة الأهمية في منظومات القدرة الكهربائية في الوقت الحاضر لذا عنيت باهتمام خاص من قبل الباحثين ولا سيما في العقدين الأخيرين وذلك نتيجة لتوسع الشبكات الكهربائية وتربطها مع بعضها البعض بين بلدان العالم المختلفة.

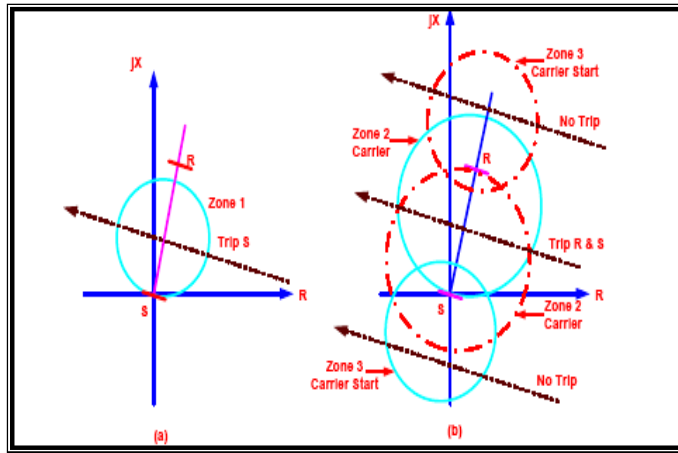
إن البحوث التي درست تأثير تأرجح القدرة على المرحلات المسافية أكدت على طريقة كشف الحالة العابرة في الممانعة الظاهرية المقاسة من قبل المرحلة وذلك بواسطة إيجاد الفرق بين ممانعتين يتم قياسها باستعمال المرشح من نوع (FIR) [1].

2. الاستقرار وتقنيات الكشف عن تأرجح القدرة :

يمكن تعريف الإستقرارية على أنها قابلية المنظومة الكهربائية على تجهيز قدرة مساوية أو أكبر من قدرة الاضطراب لغرض الإبقاء على حالة توازن المنظومة. والحالة التي يتضاءل بها التأرجح ويذهب إلى حالة الصفر أو نقطة أخرى جديدة قريبة من الصفر تعرف بتأرجح مستقر في القدرة وعلى العكس من ذلك فإذا تفاقم التأرجح وخرج عن النطاق الطبيعي أي أن المنظومة تعاني من حالة (Over damping) فإن هذه الحالة تعرف بتأرجح القدرة غير المستقر. ويمكن تقسيم الاستقرار إلى ثلاثة أنواع وهي استقرار الحالة المستقر، الإستقرارية الديناميكية، إستقرارية الحالة العابرة.

1-2: تأثير تأرجح القدرة على خطوط النقل ومرحلات النظام [1]:

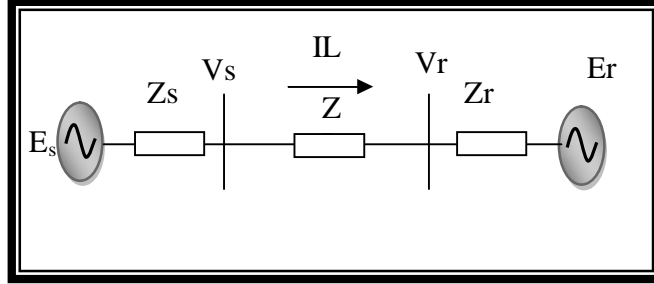
إن فقدان التوازن بين نظام القدرة والمولدات أو نظام القدرة المؤثر على مرحلات خطوط النقل يحصل بطرق متعددة والتنظيمات المطلوبة في حالة كبح تأرجح القدرة أو الفصل الذاتي تكون صعبة الحساب في الكثير من التطبيقات ، كما أن دراسة الاستقرار في الأنظمة الكبيرة تكون معقدة ويصعب تحديدها وكشف احتمالية وصول النظام إلى حالة التأرجح غير المستقرة.



الشكل (1) خواص الكبح الاتجاهية للقطاع الأول وحركة الممانعة عند حصول التأرجح [2]

أن المرحلات المسافية تستجيب لمركبات التعاقب الموجبة . وإن ممانعة التعاقب الموجب المقاسة عند أطراف المرحلة على الخط في حالة تأرجح القدرة تتغير طبقاً لزاوية القدرة (δ) للفولتية المكافئة لكل من النظامين ، وإن قطاع الحماية الأول للمرحلة المسافية الذي يكون التأخير الزمني فيه قليل ، يميل إلى العمل عند حصول أي تأرجح في القدرة ، وبالاعتماد على تنظيم التأخر الزمني للقطاع ، والزمن المستغرق لحركة مسار ممانعة التأرجح خلال خواص المرحلة المسافية . والشكل (1a.) يوضح عمل المرحلة المسافية ضمن القطاع الأول عند حركة مسار التأرجح على خواص المرحلة المسافية. في حين أن الشكل (1b) يوضح خواص كبح المقارنة الاتجاهية وكيفية تأثيرها بموقع التأرجح.

2-2 : الممانعة المقاسة من قبل المرحلة المسافية أثناء حصول تأرجح بالقدرة [2]:
عندما يعمل النظام في وضع خارج عن حالة الاستقرار ، فإن المرحلة المسافية سوف تتحسس في هذه الحالة على أساس أنها عطل طوري ، إذا كان مسار التأرجح يقطع خواص المرحلة المسافية [2].



الشكل (2) نظام ثنائي التغذية

ولبرهنة هذه الحالة ، نلاحظ أن الممانعة التي نقيسها المرحلة المسافية أثناء حالة التأرجح لنظام ثنائي التغذية البسيط ومن الشكل (2) يمكن حساب التيار I_L من العمومي S ، كما يأتي:

$$I_L = \frac{E_s - E_r}{Z_s + Z_L + Z_r} \quad \dots (1)$$

إن اتجاه التيار الذي يسري في المنظومة سيبقى محافظاً على اتجاهه أثناء حدوث التأرجح في القدرة، ما لم يحصل تغير في اتجاه الفولتية. وأن الممانعة المقاسة من قبل المرحلة عند العمومي S ستساوي.

$$Z_{re} = \frac{V_s}{I_L} = \frac{E_s - I_L Z_s}{I_L} = \frac{E_s}{I_L} - Z_s = \frac{E_s(Z_s + Z_L + Z_r)}{E_s - E_r} - Z_s \quad \dots (2)$$

ولنفرض أن الفولتية E_s تتقدم على الفولتية E_r بزواوية (δ) وان النسبة (E_s/E_r) تساوي k لذا سنحصل على الآتي:

$$\frac{E_s}{E_s - E_r} = \frac{k(\cos\delta + j\sin\delta)}{k(\cos\delta + j\sin\delta) - 1} = \frac{k[(k - \cos\delta) - j\sin\delta]}{(k - \cos\delta)^2 + \sin^2\delta} \quad \dots (3)$$

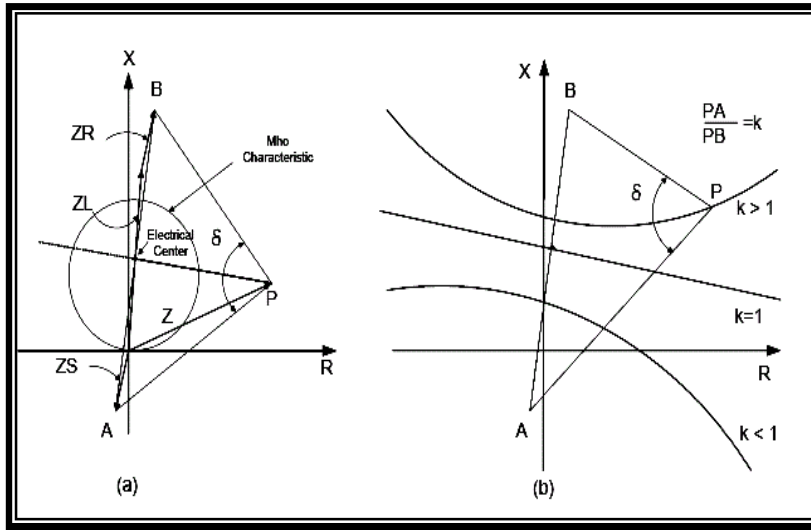
وفي حالات خاصة عندما تتساوى القيمة المطلقة لفولتية المصدرين أي أن k يساوي واحد سنحصل على الآتي:

$$Z_{re} = \frac{V_s}{I_L} = \frac{(Z_s + Z_L + Z_r)}{2} (1 - j \cot \frac{\delta}{2}) - Z_s \quad \dots (4)$$

وأخيراً فإن الممانعة المقاسة من قبل المرحلة المسافية ستكون كالآتي :

$$\frac{E_s}{E_s - E_r} = \frac{1}{2} (1 - j \cot \frac{\delta}{2}) \quad \dots (5)$$

مع العلم أن الزاوية δ هي زاوية فرق الطور بين المصدرين ، هناك ترجمة هندسية للمعادلة (5) والتي تمثلت بالشكل (3). تبين إن مسار الممانعة المقاسة من قبل المرحلة أثناء التأرجح حيث أن الزاوية بين فولتية المصدرين تتغير طبقاً للخط المستقيم الذي يقطع الجزئين A و B في نقطة المنتصف وهذه النقطة تسمى المركز الكهربائي للتأرجح. وتكون الزاوية بين الإشارتين التي تربط النقطة P بكل من A و B مساوية للزاوية (δ). وعندما تصل الزاوية (δ) إلى (180°) فإن الممانعة ستقع في المركز الكهربائي للتأرجح [3,1].



الشكل (3) مسار الممانعة عند حصول حالة التارجح [1]

3-2: تقنيات الكشف عن تأرجح القدرة :

1-3-2: طريقة معدل تغير الممانعة (طريقة ألب PSB و OST) [2]:

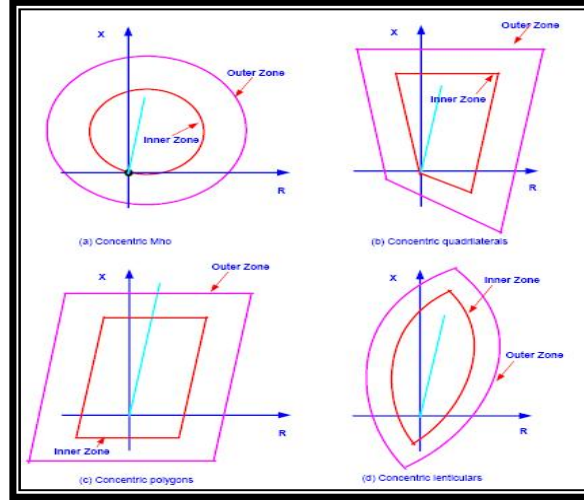
إن مخططات كبح تأرجح القدرة (Power Swing Blocking (PSB)) تستند في معظمها على قياس ممانعة التتابع الموجب في موقع المرحلة. عند ظروف التشغيل الطبيعية للنظام ، وان الممانعة المقاسة من قبل المرحلة تكون مساوية لممانعة الحمل ، وموقع هذه الممانعة يكون بعيداً عن خواص التشغيل للمرحلة المسافية. أما عند حصول العطل ، فان الممانعة المقاسة تنتقل بسرعة من موقع ممانعة الحمل إلى موقع آخر يمثل ممانعة ذلك العطل. وعندما يكون النظام في حالة العطل فان معدل تغير الممانعة المنظورة من قبل المرحلة يحسب أولاً بجمع الإشارة المترشحة في المرحلة. أما عندما يكون النظام في حالة التارجح ، فان الممانعة المقاسة تنتقل بصورة أبطء مما هي عليه في حالة العطل في مخطط (RX) للممانعة، ومعدل تغير سرعة انتقال الممانعة يعتمد على تردد الانزلاق (Slip frequency) لنظام مكافئ مغذى من جهتين . وفي هذه التقنية يستعمل الفرق بين معدل تغير الممانعة في حالة العطل ، وفي حالة تارجح القدرة للتمييز بين العطل وتارجح القدرة ولإتمام هذه الطريقة وتحديد الفرق يتم اختيار خاصيتين لممانعة نموذجية متمركزة تفصلها مسافة (ΔZ) في مستوي الممانعة ، ويستعمل مؤقت لتحديد وقت انتقال الممانعة بين هاتين الخاصيتين. فإذا قطعت الممانعة المقاسة كلا الخاصيتين المتمركزتين حول نقطة الأصل في مخطط المستوي المعقد (Complex Plane) قبل انقضاء زمن المؤقت ، فان المرحلة ستصنف هذا الوضع على انه عطل في النظام ، ومن جهة أخرى فإذا انقضى زمن المؤقت والممانعة المقاسة ، لم تقطع كلا الخواص الداخلية والخارجية ، فان المرحلة ستصنف الحدث كأنه حالة لتأرجح حاصل في القدرة [1,2,3].

2-3-2: مخططات الخواص المتمركزة وأنواعها [2]:

إن أبسط طريقة لقياس معدل تغير الممانعة تتم بحساب الوقت المطلوب الذي يستغرقه مسار الممانعة للعبور من خلال محددات الخواص للقطاعين الداخلي والخارجي حيث تكون الخواص الخارجية محيطة بالخواص الداخلية . وهذا المخطط ينجز بإضافة خواص نموذجية معيارية . تستعمل بصورة دقيقة كدوال للكشف عن تأرجح القدرة . أو بإضافة خواص ممانعة خارجية تحيط بخواص المرحلة المسافية. ويوضح الشكل (4) الخواص المتمركزة التي تستعمل للكشف عن ظروف تأرجح القدرة وإصدار إشارات الكبح أو الفصل (PSB) أو (Out of Step Tripping) (OST).

إن الفائدة من هذه الخواص المتمركزة تكمن في الكشف عن ظروف تأرجح القدرة واتخاذ القرار من قبل مرحلة الخروج عن التزامن ، وتتم قبل دخول مسار الممانعة في الخواص التشغيلية للمرحلة المسافية ، وهذا يعود بالفضل إلى تنظيم الخواص الداخلية لمرحلة الكشف بطريقة ، بحيث تكون أكبر من خواص عمل المرحلة المسافية ، أي

بمعنى أن تكون أكبر من خواص التشغيل لأخر قطاع محمي. ويكون التنظيم الرئيسي للمرحلة محدداً بتنظيم الحدود الخارجية ، والتي تكون محكومة بزاوية (δ) فضلاً عن التنظيم الزمني بين الحدود الداخلية والخارجية. وان العائق الذي يحدد طريقة الدوائر المتمركزة هو الخواص الخارجية لمرحلة الكشف والتي يجب أن لا تتخطى ممانعة الحمل . وهذا يعني أن هذه الطريقة محدده بالمحافظة على موقع ممانعة الحمل المنقل عبر خط النقل خارج الخواص الخارجية للمرحلة ، أو قد تكون خواص مرحلة الكشف محددة ببلوغ ممانعة التنظيم للقطاع الأخير . وهناك محددات أخرى لمرحلة الكشف ذو الخواص ،المضلع المتمركز، وهو أن بلوغ المقاومة للخواص الخارجية قد لا يصل إلى ممانعة الحمل. وهذا التحدي يظهر جلياً عند استعمال هذه الخواص للخطوط الطويلة والمحملة بصورة كبيرة [2,1] .



الشكل (4) خواص الـ (OST و PSB) المتمركزة للحماية المسافية [2]

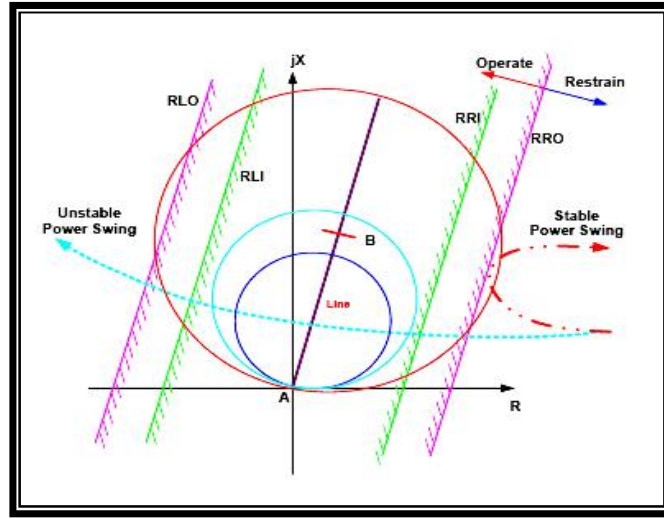
2-3-3: مخطط الحاجبين (Two-Blinder Scheme) [2]:

يوضح الشكل (5) مخطط الحاجبين الذي يستند على نفس المبدأ في قياس الوقت الذي يستغرقه مسار الممانعة للانتقال بين الحاجبين وقطع المسافة (ΔZ) المحددة التي تفصل بينهما . ويبدأ قياس الزمن عندما يقطع مسار الممانعة المنتقلة الحاجز الخارجي الذي يمثل الخواص الخارجية للمرحلة ، ويتوقف عندما يقطع الخواص الداخلية. فإذا كان الزمن المقاس بين الحاجبين أقل من زمن التنظيم لكشف تأرجح القدرة ، فإن هذا الوضع سيصنف على أساس أنه تأرجح في القدرة. ومن الفوائد المهمة في طريقة الحاجبين المستعملة في الكشف عن تأرجح القدرة إمكانية استخدامها دون اللجوء إلى خواص المرحلة المسافية . فضلاً عن ذلك، فعندما يكون مسار الممانعة بين الحاجبين أي في منطقة (ΔZ) ، فإن مرحلات الحماية يمكن أن تمنع من إصدار إشارة الإقالات عند وجود أحمال ضخمة أو حالة تأرجح في القدرة مستقر. وإذا كانت حالة كشف التأرجح غير المستقر في القدرة. فإن المرحلة ستسمح للعناصر المسامحة فوراً لإصدار إشارة الإقالات. أو أن الفصل سوف يتأخر ،حتى يمر مسار التأرجح داخل خواص مرحلة المسافية . إن إيجاد التنظيمات المضبوطة للحواجب عادة ما تكون صعبة وتتطلب تحليلات معقدة للمنظومة [2,1].

3: آلية تمثيل ونمذجة خواص مرحلة الخروج عن التزامن وعملها مع مرحلة المسافية:

2-3: آلية عمل مرحلة الخروج عن التزامن [5]:

إن معظم المرحلات المسافية الالكترونية الحديثة في الوقت الحاضر تلحق بأجزاء إضافية تستخدم للكشف عن ظروف الخروج عن التزامن ، أو الخروج عن الاستقرارية (OOS) ، وذلك لكي تصبح المرحلة قادرة على إصدار إشارة الإقالات بصورة دقيقة فضلاً عن إمكانية كشفها لتأرجحات القدرة المستقرة وتمييزها عن حالات التأرجحات غير المستقرة والأعطال التي تستوجب إصدار إشارة الإقالات. وتم تمثيل ونمذجة مرحلة الخروج عن التزامن التي تعتمد في عملها على تقنية الحساب المستمر لمعدل تغير ممانعة التعاقب الموجب في موقع المرحلة ، وقد تم ربط أداء عملها مع المرحلة المسافية وذلك لان المرحلة المسافية تعتمد على نفس المتغيرات في عملها. ويمكن لمرحلة الخروج عن التزامن أن تعمل مع أي نوع آخر من مرحلات الحماية وليس مع المرحلة المسافية فقط.

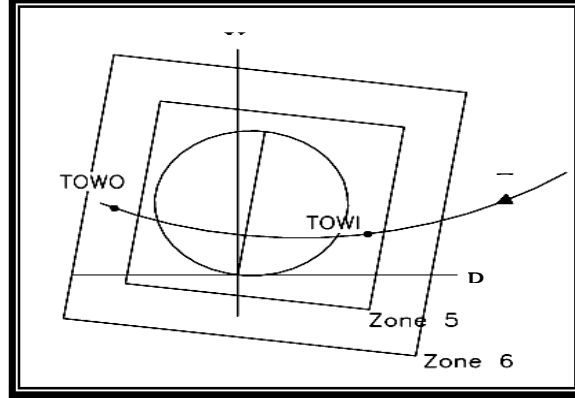


الشكل (5) مشروع الحاجبين لمرحلة الخروج عن التزامن [2]

إن مرحلة الخروج عن التزامن المصممة تتكون من جزئين جزء يحتوي على وحدات كبح تآرجح القدرة (OSB) والتي تميز بين تآرجح القدرة المستقر، وتآرجح القدرة غير المستقر، وعلى هذا الأساس تقوم بإصدار إشارة الكبح (Blocking Signal) عند الكشف عن تآرجح مستقر في القدرة، وتقوم بكبح أي إشارة إفلات يمكن أن تطلق من قبل المرحلة المسافية بسبب هذا التآرجح .

أما الجزء الثاني فيحتوي على وحدات الفصل (OST) وفي هذا الجزء يتم تشخيص حالات تآرجح القدرة غير المستقر، وحالات الأعطال التي تستوجب الفصل ويميزها عن حالات التآرجحات البسيطة والمستقرة حيث تسمح للمرحلة المسافية بالعمل وإصدار إشارة الإفلات إذا ما تعرضت المرحلة لظروف كهذه [6,5,2].
 إن وحدات الكبح (OSB) تستعمل مضلعان متمركزان حول نقطة الأصل كما هو مبين في الشكل (6) وكلا القطاعين (zone6, zone5) يعتمدان على تغير مسار ممانعة التعاقب الموجب (Z_{rel}) التي تعد المقياس لعمل المرحلة. والقطاع الخامس الداخلي خاص بالكشف عن تآرجح القدرة غير المستقر والأعطال، في حين يقوم القطاع السادس الخارجي بتشغيل مؤقتين (Two Timers) في حالة تجاوز مسار ممانعة التتابع الموجب المقاسة حدوده الخارجية، والمؤقت الأول يستعمل للكشف عن التآرجح المستقر (OSBD) Out-Of-Step-Blocking Detection في حين يستعمل الآخر للكشف عن التآرجح غير المستقر (OSTD) Out-Of-Step Tripping Detection. حيث أن الزمن التنظيمي للمؤقت (OSTD) يكون أقل من الزمن التنظيمي للمؤقت (OSBD).

ويتم الكشف عن التآرجح المستقر إذا ما تجاوز زمن بقاء مسار الممانعة بين القطاعين الزمن التنظيمي للمؤقت الأول (OSBD) قبل دخوله حدود القطاع الخامس. في حين أن هنالك شرطان للكشف عن تآرجح القدرة غير المستقر، الأول إذا ما تجاوز زمن بقاء مسار الممانعة بين القطاعين الزمن التنظيمي للمؤقت الثاني (OSTD) قبل دخوله خواص التشغيل للقطاع الخامس، وفي هذه الحالة سيكشف تآرجح القدرة غير المستقر ويتم إصدار إشارة الفصل. وهذا بسبب الفصل في طريق الدخول (TOWI) Trip-on-way-In والموضح في الشكل (6). أما بالنسبة للشرط الثاني فإذا انقضى الزمن التنظيمي للمؤقت الثاني (OSTD) وتجاوز مسار الممانعة القطاع الخامس من الجهة العكسية فان تآرجح القدرة غير المستقر سوف يكتشف في هذه الحالة وتصدر إشارة الفصل . وهذا يكون بسبب الفصل في طريق الخروج (TOWO) Trip-On-the-Way-Out.



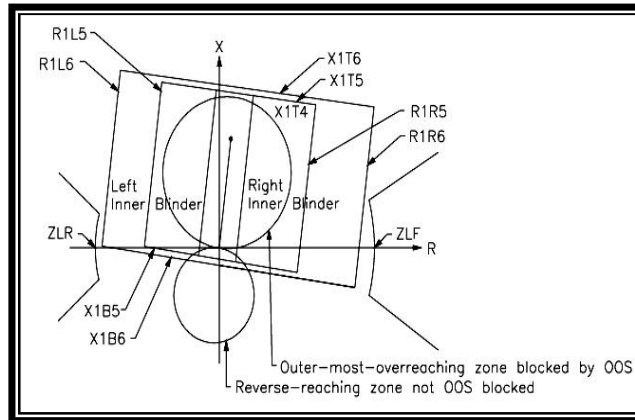
الشكل (6) : خواص مرحلة الكشف عن تأرجح القدرة (OSBD)

2-3: التنظيمات المنطقية لمرحلة الخروج عن التزامن [5]:

إن تنظيم الخواص الخارجية والداخلية لمرحلة الخروج عن التزامن للقطاعين الخامس والسادس تشمل تنظيم الحدود المقاومة والحدود المحاذية وتنظيم زمن المؤقتات وهي كالاتي:

1-2-3: تنظيم الحدود المقاومة (Resistive Blinder Setting):

إن الحدود المقاومة (R1R5,R1L5,R1R6,R1L6) هي حدود الخواص الداخلية والخارجية لمرحلة الخروج عن التزامن التي يوضحها الشكل (7). حيث يتم تنظيم الحدود الخارجية (R1R6 و R1L6) اعتماداً على أعظم حمل منتقل في المنظومة في كلا الاتجاهين الأمامي والعكسي أما الحدود المقاومة الداخلية (R1R5 و R1L5) فيعتمد تنظيمها على أساس أقل زمن مطلوب للقطاع الداخلي ليقيم بالكشف عن تأرجح القدرة المستقر (OSBD) [6,5].



الشكل (7) الخواص الداخلية والخارجية لمرحلة الخروج عن التزامن

وفي الغالب يتم تنظيم الحد الخارجي (R1R6) على نحو اقل من ممانعة أعظم حمل في الاتجاه الأمامي ، وكذلك يكون الحد الخارجي (R1L6) اقل من أعظم ممانعة حمل في الاتجاه العكسي ، وذلك لتلافي حالة تداخل ممانعة الحمل خواص التشغيل لمرحلة الخروج عن التزامن ، ولحساب أعظم ممانعة حمل في الاتجاه الأمامي نقوم بحساب (Z_{ILF}) وهي ممانعة التتابع الموجب للحمل ، ومن هذه الممانعة نجد القيمة المقاومة للحد الخارجي لخواص التشغيل لمرحلة (OSBD) كالاتي :

$$Z_{ILF} = \frac{V^2}{S_{1F MAX}} \quad \dots(6)$$

$$R1R6 \leq \frac{Z_{1LF}}{C_1} \quad \dots(7)$$

أما لحساب أعظم ممانعة حمل في الاتجاه العكسي فإننا نوجد الممانعة $Z1LR$ والتي تساوي أعظم ممانعة حمل في الاتجاه الأمامي $Z1LF$, ثم ننظم الحدود المقاومة للقطاع الخارجي السادس أقل بمقدار (10%) عن حافة أعظم ممانعة , وتمثل هنا $C1$ قيمة ثابتة تستعمل لزيادة الدقة في التصميم وتعتمد على طول خط النقل وتؤخذ كما يأتي [6,5] :

$$C_1=1.1 \text{ : للخطوط الأطول من 100 ميل}$$

$$C_1=1.2 \text{ : للخطوط بطول بين 100-50 ميل.}$$

$$C_1=1.3 \text{ : للخطوط الأقل من 50 ميل .}$$

ولإتمام التصميم نفرض قيمة (OSBD) وهي قيمة تنظيمية تقاس بعدد الدورات التي يفترض أن يكشف التآرجح خلالها ، كذلك نفرض أعظم تردد للانزلاق (f_{slip}) والذي يمثل الميل عن التردد الاعتيادي ويعتمد على معاملات الشبكة وعلى أساسه يتم تحديد نوع التآرجح ودرجة خطورته . من خلال ملاحظة الشكل (8) يمكن التوصل إلى الحساب الآتي:

$$\frac{AngR5 - AngR6 \left(\frac{\text{deg } ree}{\text{cycle}} \right)}{OSBD} = \frac{360(\text{deg.}/\text{cycle}).f_{slip}(\text{cycle}/\text{sec})}{f_s(\text{cycle}/\text{sec})} \quad \dots(8)$$

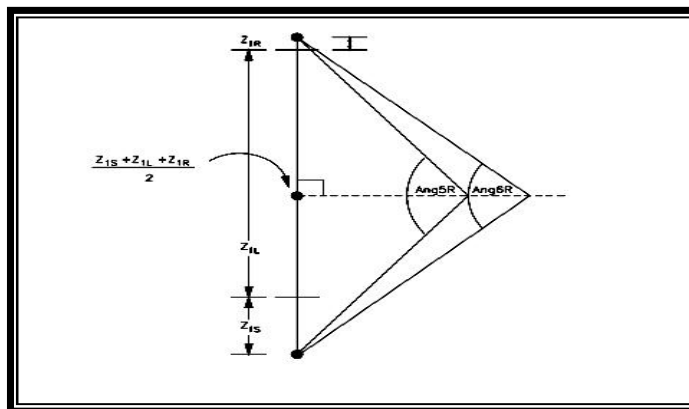
$$AngR5 = \frac{360(\text{deg}/\text{cycl}\theta).f_{slip}(\text{cycl}\theta/\text{sec})OSBD}{f_s(\text{cycl}\theta/\text{sec})} + AngR6 \quad \dots(9)$$

$$AngL5 = \frac{360(\text{deg.}/\text{cycle}).f_{slip}(\text{cycle}/\text{sec}).OSBD}{f_s(\text{cycle}/\text{sec})} + AngL6 \quad \dots(10)$$

$$AngR6 = 2.ATAN\left(\frac{Z_{s1} + Z_{L1} + Z_{r1}}{2.R1R6}\right) \quad \dots(11)$$

$$AngL6 = 2.ATAN\left(\frac{Z_{s1} + Z_{L1} + Z_{r1}}{2.R1R6}\right) \quad \dots(12)$$

حيث إن f_s : هو التردد الاعتيادي (المقنن) لنظام القدرة إما 50 أو 60 هيرتز.



الشكل (8) تنظيم زوايا الحدود الداخلية والخارجية لمرحلة الخروج عن التزامن [5]

أما لحساب الحدود المقاومة للقطاع الخامس فتكون كالآتي:

$$R1R5 = \frac{Z_{s1} + Z_{L1} + Z_{r1}}{2.TAN(AngR5/2)} \quad \dots(13)$$

$$R1L5 = \frac{Z_{s1} + Z_{L1} + Z_{r1}}{2.TAN(AngR5/2)} \quad \dots(14)$$

لتلافي تجاوز البلوغ وعدم الدقة في عمل مرحلة الخروج عن التزامن يجب تنظيم حدود المقاومة الداخلية حدود القطاع الخامس المحسوبة هنا (R1R5,R1L5)، بزيادة (10%) عن أكبر مقاومة البلوغ لأخر قطاع محمي من قبل المرحلة المسافية والذي يراد الإشراف عليه بوساطة مرحلة الخروج عن التزامن ، والذي يستوجب الكبح عند حصول حالة التأرجح [6,5] .

2-2-3: تنظيم الحدود المحاثية (Reactance Blinder Setting) [5]:

إن الحدود (X1T5,X1B5,X1T6,X1B6) والموضحة في الشكل (7) الحدود المحاثية للقطاع الخامس و السادس لمرحلة الكشف عن تأرجح القدرة وتكون عمودية على الحدود المقاومة وإن هذه الحدود لا تدخل كثيراً في كشف التأرجح إلا أنها تعتبر مكملة لخواص المرحلة حيث يتم تنظيم الخط (X1T5) على بعد (110%) من آخر قطاع محمي من قبل المرحلة المسافية والذي يراد كبحه عند حصول التأرجح ، فعلى سبيل المثال للإشراف على القطاع الأول والثاني من قبل مرحلة الخروج عن التزامن يكون التنظيم للحد (X1T5) كما يأتي :

$$X1T5 = 110\% \cdot 120\% * Z_{L1} * (CT_{ratio}/VT_{ratio}) \quad \dots(15)$$

ونفس الحال بالنسبة لحماية القطاع العكسي في حالة الرغبة بالإشراف عليه أثناء تأرجح القدرة ، فيكون تنظيمه الخط (X1B5) كما في المعادلة (15) أي بزيادة (110%) من قيمة آخر قطاع محمي من قبل المرحلة المسافية.

وبطريقة مماثلة يتم تنظيم (X1T6) بزيادة (50%) من الخط (X1T5) ويوازيه الخط (X1B6) بنفس التنظيم من الجهة المقابلة. وعلى الرغم من أن التأرجح في اغلب الأحيان لا يتجاوز القطاع الخامس والسادس من الأعلى والأسفل. لكن التنظيم يبقى ضرورياً لتلافي الأخطاء في عمل المرحلة ، وتكميلاً لخواص الحدود المقاومة [6,5].

3-2-3: تنظيم المؤقت [5]:

يتم تنظيم المؤقت الأول (OSBD) بالاستعانة بالخواص الخارجية والداخلية للحدود المقاومة لمرحلة الخروج عن التزامن وذلك طبقاً للعلاقة الآتية :

$$OSBD = \frac{(Ang5R - Ang6R).f_s (Hz)}{360^0 / cycle.f_{slip} (Hz)} \quad \dots(16)$$

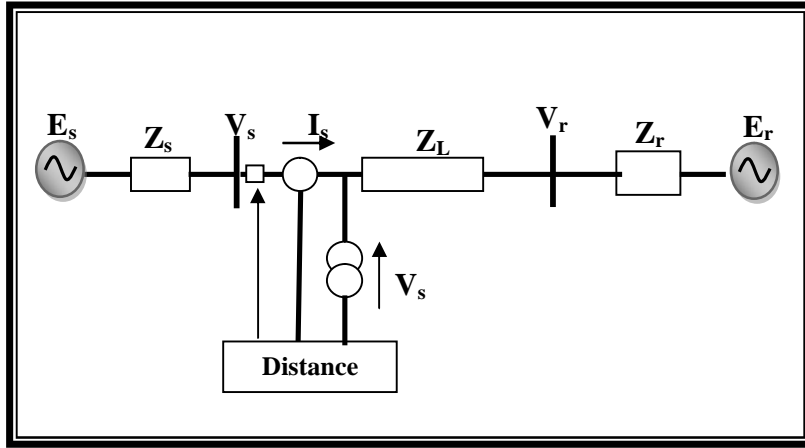
وعادة ما يتم في معظم المنظومات الكهربائية اختيار وقت (OSBD) بين 1 إلى 3 دورات لإتمام عملية الكبح. في حين يكون تدرج أو حيز تردد الانزلاق والذي يكون التأرجح فيه ما يزال في حالته المستقرة بين 1 و 5 (دورة/ثانية) [6,5,2,1].

أما بالنسبة لإصدار إشارة المؤقت الثاني (OSTD) فإن التنظيم الزمني للمؤقت يكون أقل من دورة واحدة أي أن التنظيم الزمني لمؤقت إصدار إشارات الكبح يجب أن يكون أكبر من مؤقت إصدار إشارة الفصل [4,1].

3-3: نمذجة وتمثيل المرحلة المسافية من نوع المسامحية:

إن حماية المسافة هي الطريقة الأوسع والأكثر انتشاراً لحماية خطوط النقل ، ومبدأ عمل المرحلة المسافية يكون بالاعتماد على قياس معدل تغير ممانعة التتابع الموجب والتي تكون محسوبة في موقع المرحلة بالاعتماد على القياسات المحلية للفولتية اللحظية والتيار اللحظي مع أخذ زاوية فرق الطور بينهما بنظر الاعتبار كما في الشكل (9) . حيث تستجيب المرحلة إلى الممانعة بين موقع المرحلة وموقع العطل ، والتي تتناسب مثاليًا مع المسافة بين موقع المرحلة ونقطة العطل.

- إن مراحل المسافة تستخدم للقيام بالواجبات الآتية:
- 1- الكشف والتفريق بين حالة العطل وحالة العمل الطبيعي لخط النقل .
 - 2- تقوم بقياس ممانعة دائرة القصر .
 - 3- إصدار إشارة الإفلات لأي عطل داخلي عند أي نقطة عطل على الخط المحمي من قبلها.
 - 4- عدم إصدار إشارة الإفلات لأي عطل خارجي خواص التشغيل الخاصة بالمرحلة أو خارج نطاق العمل [7].



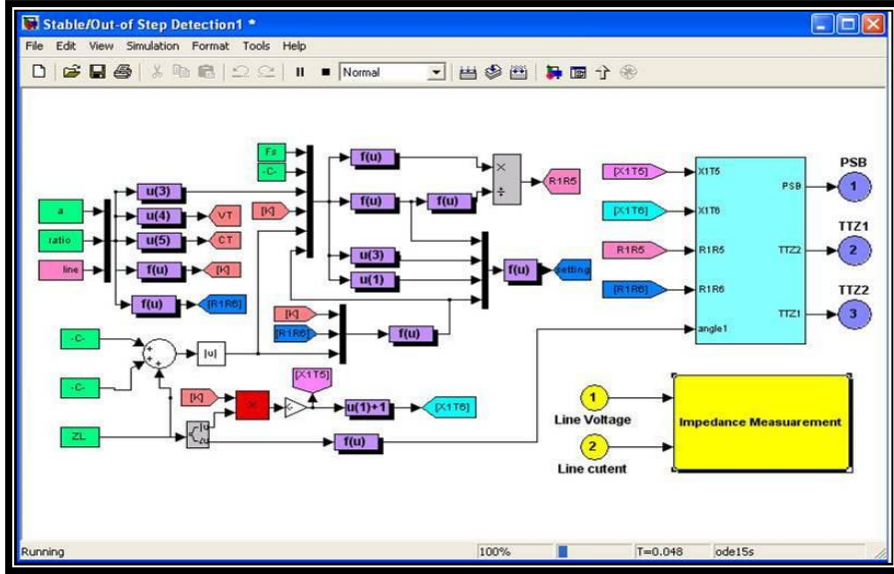
الشكل (9) يوضح موقع المرحلة المسافية عند العمومي القريب من جهة الإرسال

4-3: تمثيل المرحلتين بواسطة الحاسبة:

بعد الإشارة إلى أهم المعادلات الرياضية الداخلة في تصميم مرحلة الخروج عن التزامن فقد برمجت هذه المعادلات بالاستعانة ببرنامج الماتلاب ثم تم نمذجتها بواسطة (Matlab/Simulink) وذلك في سبيل اختبار أداء المرحلة على نظام ديناميكي وحركي يشابه الأنظمة الحقيقية ، ولخلق ظروف مضطربة وحالة الأعطال وملاحظة استجابة عمل المرحلة مع المرحلة المسافية على إصدار إشارات الإفلات عند الظروف الغير اعتيادية. كما طبقت الدراسة لحماية خط نقل مغذى من جهتين وذلك لأن معظم التطبيقات التي تُعنى بدراسة الكشف عن تأرجح القدرة يتم اختبارها على مثل هذا النوع من الأنظمة. أما إذا تطلب الأمر حماية خط معين في شبكة معقدة ففي هذه الحالة نقوم بإجراء دراسة مفصلة لسريان الحمل (Load flow) في المنظومة ومقدار التحميل الذي يعاني منه هذا الخط بعدها يتم إزالة الخط المعني بالحماية من الشبكة ثم يتم اختزال المنظومة بطريقة (ZBus أو YBus) أو أي طريقة أخرى ، وإيجاد المكافئ منها بين نقطتي الخط وتحويلها إلى نظام مكافئ ثنائي التغذية ، ثم يعاد الخط إلى المنظومة المكافئة الناتجة ويتم تصميم مرحلة الخروج عن التزامن بالاستعانة بالمعطيات الجديدة [3,1] .

1-4-3: تمثيل مرحلة الخروج عن التزامن:

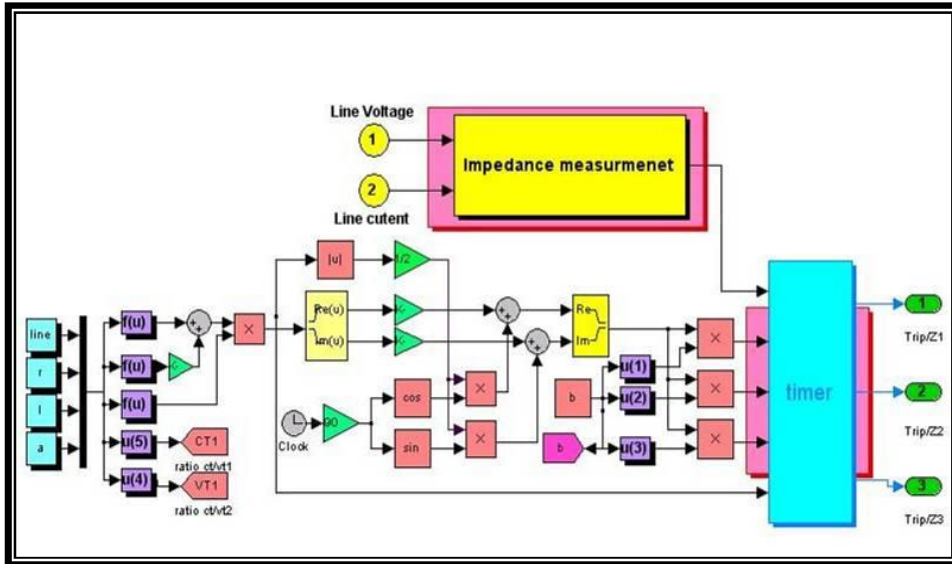
إن تصميم مرحلة الخروج عن التزامن ليس بالأمر السهل إذ أنها تتطلب الكثير من التنظيمات ففي السابق لم يكن من الممكن تصميم هكذا نوع من المرحلات عمليا لذا لم يكن هذا النوع من الحماية معروفاً ، حتى حصل التطور بأنظمة الحماية وظهرت الأجهزة الرقمية الحديثة وأصبح من الممكن تصميم هذا النوع من المرحلات بالاستعانة بالمعالجات والبوابات المنطقية والمؤقتات والمرحلة التي تم تصميمها في هذه الدراسة اعتمدت على برمجة المعادلات في الفقرة (2-3) وتحويلها إلى صندوق يحتاج إلى بعض المعطيات كي يقوم بداء مهمته كمرحلة حماية. يوضح الشكل (10) التركيب الداخلي لمرحلة الخروج عن التزامن.



الشكل (10) التركيب الداخلي لمرحلة الخروج عن التزامن

2-4-3 : تمثيل مرحلة المسافة :

تعد المرحلة المسافية من المرحلات القديمة والتي تم دراسة خواصها وتنظيماتها من قبل كثير من الباحثين ، وفي هذا البحث اعتمد أسلوب برمجي بسيط لإصدار إشارة الإفلات من قبل المرحلة وقد وضحت بالفقرة (3-3) ، إن إشارات الإفلات الصادرة عن المرحلة هي إشارة كشف عطل أو اضطراب يتم الإشراف عليها من قبل مرحلة الخروج عن التزامن وقد يتم كبحها أو يسمح لها بالمرور لتعطي الإشارة النهائية وهي الإشارة التي تصل إلى قاطع الدورة ويوضح الشكل (11) التركيب الداخلي لمرحلة المسافية.

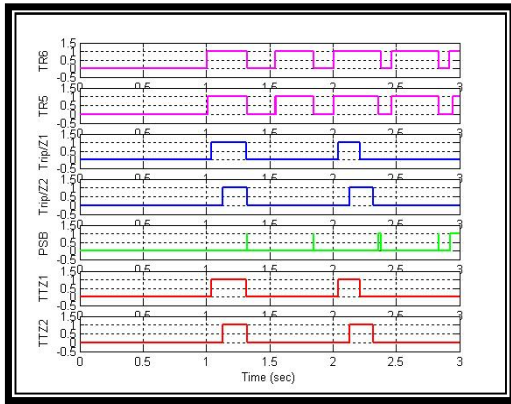


الشكل (11) يوضح التركيب الداخلي للمرحلة المسافية المصممة بواسطة برنامج الماتلاب

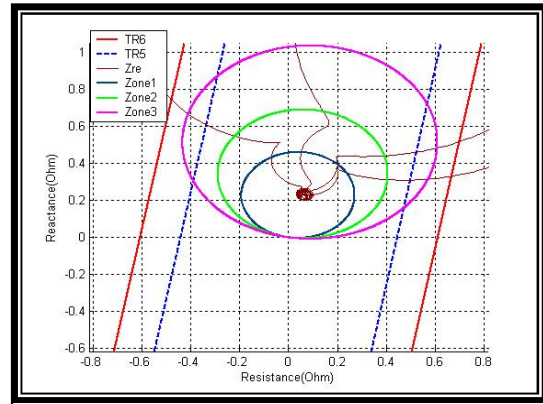
5 : النتائج والمناقشة:

1-5: المنظومة في حالة التشغيل المستمر بوجود الأعطال:

يتم في هذه الحالة بيان تأثير العطل الثلاثي الطور على أداء المرحلتين وكيفية إصدار إشارات الإفلات من قبلهما ، لان العطل الثلاثي الطور يعد من الأعطال المتماثلة. وهذا العطل يدفع إلى التغير في سلوكية المنظومة فتتغير الممانعة المقاسة من قبل المرحلتين كما هو مبين في الشكل المكبر (12) الذي يوضح خواص المرحلتين المسافية ومرحلة الخروج عن التزامن مع مسار الممانعة الظاهرية المقاسة من قبلهما. حيث نلاحظ أن مسار الممانعة يخترق الممانعة التشغيلية للقطاع الأول والثاني للمرحلة المسافية مع حدود الكشف للمرحلة التزامنية ، فعند حصول هذه الحالة يستوجب على مرحلة الخروج عن التزامن أن لا تصدر إشارة كبح لإشارة المرحلة المسافية وتسمح لها بالمرور معلنة بذلك وجود عطل صريح في المنظومة وهذا ما يوضحه الشكل (13) الذي يبين تعاقب إشارات الإفلات مع إشارة الكبح للمرحلة المسافية.



الشكل (13) تعاقب إشارات الإفلات للمرحلتين مع إشارة الكبح للمرحلة المسافية



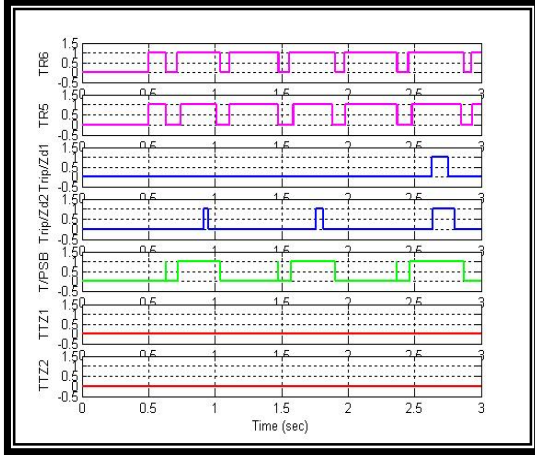
الشكل (12) خواص المرحلتين مع مسار الممانعة الظاهرية المقاسة من قبلهما للحالة المستقرة بوجود عطل ثلاثي الطور

2-5: المنظومة في حالة التآرجح دون وجود العطل (الحالة المستقرة) :

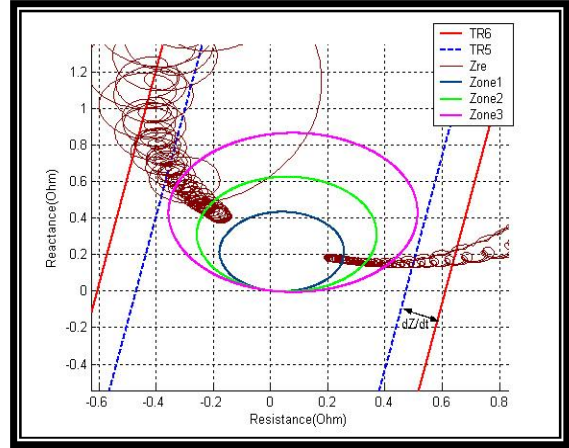
تبين هذه الحالة تأثير التآرجح على المرحلة المسافية وما يصاحبها من فعاليات من قبل مرحلة الخروج عن التزامن ، ولتبيان حالة التآرجح المستقر في القدرة وتميزه عن التآرجح غير المستقر نقوم بدراسة هذه الحالة وهذا التآرجح ناتج عن تغير في قيمة زاوية القدرة إذ أنها أعطيت بمقدار $(\delta=110^\circ)$.

يوضح الشكل (14) المسارات الدائرية التي تسلكها الممانعة الظاهرية المنظورة من قبل مرحلة المسافة عندما تعاني المنظومة من تآرجح في القدرة، إن المرحلة سوف تتحسس بتآرجح القدرة المستقر إذا كان زمن بقاء الممانعة المقاسة من قبل المرحلتين بين الحاجبين (dZ/dt) أكبر من زمن التنظيم أو زمن المؤقت الأول (OSBD) وهذا يصنف على أنه تآرجح قدرة مستقر وعلى أساسه سوف تطلق مرحلة الخروج عن التزامن إشارة كبح تآرجح القدرة (PSB) وتقوم هذه الإشارة بمنع المرحلة المسافية أو أي مرحلة أخرى من إيصال إشارتها إلى قاطع الدورة. إن تتابع إشارات الفصل وعدد المرات التي من المحتمل أن تعمل بها المرحلة المسافية وإشارة الكبح من قبل مرحلة الخروج عن التزامن والإشارة النهائية للمرحلة المسافية بعد أن يتم الإشراف عليها من قبل مرحلة الخروج عن التزامن موضحة في الشكل (15). حيث نلاحظ في الحقلين الأول والثاني عدد المرات التي يخترق فيها مسار الممانعة الحدود الداخلية والخارجية لمرحلة الخروج عن التزامن (TR6, TR5) وتصدر المرحلة نتيجة لذلك إشارة إفلات معلنة بداية التغير في زمن (ΔZ) وتقارن سرعة تغير مسار الممانعة مع زمن التنظيم (Setting Time) وتصدر نتيجة لذلك إشارة كبح (PSB) للمرحلة المسافية إذا كانت سرعة (ΔZ) أكبر من زمن التنظيم وتقوم هذه الإشارة بكبح ومنع ظهور أي إخراج من قبل المرحلة المسافية عندما تكون بصيغة (1) منطقي وكما يبين الشكل اخراجات المرحلة المسافية (Trip/Zd1, Trip/Zd2) قبل الإشراف عليها نجد أن المرحلة سوف تكون معرضة للعمل مرة واحدة بالنسبة للقطاع الأول ، وثلاث مرات بالنسبة للقطاع الثاني في حين يستوجب عدم إصدار أي إشارة من قبل مرحلة المسافة وذلك لعدم وجود عطل ولكون التآرجح ليس

ضمن إطار التآرجح غير المستقر في القدرة لان مرحلة الخروج عن التزامن استكشفت هذه الحالة وأصدرت إشارة الكبح ، ولكن عند جمع إشارات الكبح الصادرة من قبل مرحلة الخروج عن التزامن مع إشارات الإفلات لقطاعات المرحلة المسافية تكون النتيجة النهائية عدم إطلاق أي إشارة من قبل المرحلتين كما هو واضح في الحقلين الأخيرين حيث يمثل الحقل (TTZ1) إشارات الإفلات للقطاع الأول في حين يمثل (TTZ2) يمثل إشارات الإفلات للقطاع الثاني.



الشكل (15) إشارات الإفلات من قبل المرحلتين مع إشارة الكبح والإشارة النهائية الواصلة إلى قاطع الدورة



الشكل (14) مسارات الممانعة مع خواص المرحلتين

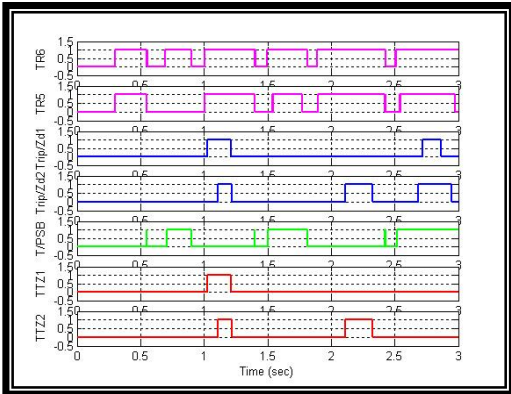
5-2-1: المنظومة في حالة التآرجح مع وقوع الأعطال :

في هذه الحال تم وضع عطل ثلاثي الطور على مسافة (40%) من طول الخط وضمن المدة الزمنية المحصورة بين (1.1-1.2 sec) والعطل الثاني يقع على مسافة (100%) من طول الخط وضمن المدة الزمنية المحصورة بين (2-2.3 sec) من الواضح أن العطل الأول يقع في قطاع الحماية الأول للمرحلة المسافية في حين يقع العطل الثاني في القطاع الثاني.

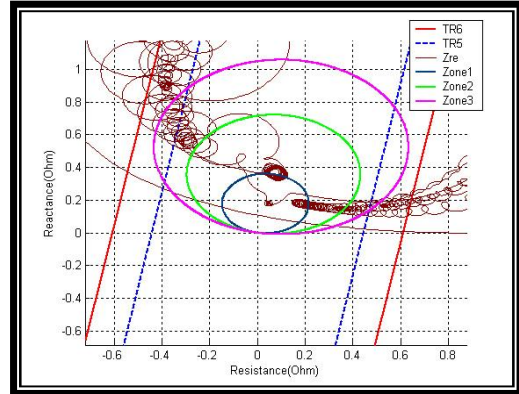
ويوضح الشكل (16) المسارات الدائرية للممانعة الظاهرية التي تنظرها المرحلتين حيث يبدو واضحاً أن هذا المسار يخترق الخواص التشغيلية لكلا المرحلتين أكثر من مرة مسبباً إصدار إشارات إفلات غير ضرورية من قبل مرحلة المسافة ، أما في حالة وقوع العطل الحقيقي الأول في المنظومة فنجد أن الممانعة سوف تدخل الخواص التشغيلية للقطاع الأول والثاني لمرحلة المسافة ويستمر بقاءها داخل القطاع إلى حين زوال التأثير المسبب للعطل في حين يدفع العطل الثاني بالممانعة للاستقرار داخل الخواص التشغيلية للقطاع الثاني ولا تتعدى الحدود المسامحة للقطاع الأول .

كما يوضح الشكل (17) تعاقب إصدار إشارات الإفلات من قبل المرحلتين مع إشارة الكبح التي تسيطر على إشارة المرحلة المسافية وتقوم بكبحها إذا ما اكتشفت حصول تآرجح مستقر في القدرة . ففي هذا الشكل نجد أن المرحلة المسافية معرضة للعمل مرتين بالنسبة للقطاع الأول وثلاث مرات بالنسبة للقطاع الثاني . حيث أن الإشارة تنطلق من قبل مرحلة المسافة الأولى في القطاع الأول هي بسبب اكتشاف المرحلة لوجود عطل في هذا القطاع ، أما الإشارة الثانية فهي بسبب التآرجح. أما عن إطلاق الإشارات في القطاع الثاني فتكون الإشارة الأولى ناتجة عن تأثير وجود عطل في القطاع الأول أما الإشارة الثانية فهي بسبب وجود العطل في القطاع الثاني فقط والإشارة الثالثة تكون عائدة إلى حصول حالة التآرجح في القدرة .

أما بالنسبة للإشارة النهائية التي يتم الإشراف عليها من قبل مرحلة الخروج عن التزامن فنجد أن المرحلة سوف تنطلق مرتين إشارة الكبح ، وتقوم بكبح الإشارة القادمة من القطاعين الأول والثاني والناتجة بسبب تآرجح القدرة لأن هذا التآرجح قد وقع في حيز التآرجح المستقر للمنظومة وتسمح لإشارة الإفلات الناتجة بسبب الأعطال بالمرور وكذلك نجد أن الإشارة الناتجة عن العطل الأول يتم إصدارها من قبل كلا القطاعين إلا أن قاطع الدورة سيميز بينهما لان الإشارة الواصلة إليه ستكون قادمة من القطاع الأول بسبب وجود فرق زمني بين الإشارتين. أما العطل الثاني فيتم اكتشافه من قبل القطاع الثاني فقط ، والذي يكون المسؤول عن إيصالها إلى قاطع الدورة.



الشكل (17) تعاقب إصدار إشارات الإفلات مع وجود الأعطال في القطاعين الأول والثاني



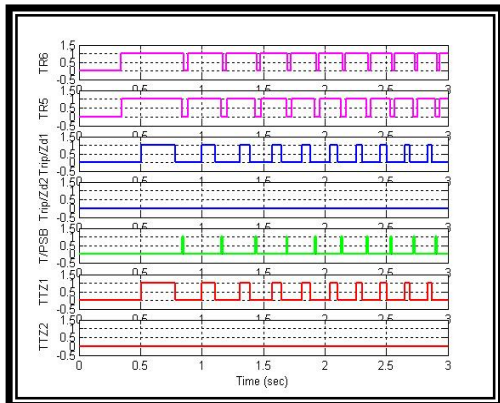
الشكل (16) مسار الممانعة المنظورة من قبل المرحلتين عندما تكون المنظومة في حالة التآرجح مع وجود عطل

3-5: المنظومة في حالة التآرجح غير المستقر دون وجود عطل:

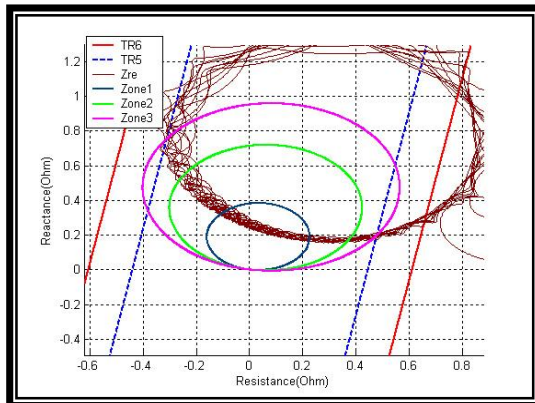
في كثير من الأحيان تتعرض المنظومة إلى حصول حالة التآرجح وهذا التآرجح في القدرة قد يحصل ويسلك سلوكا مضمحلا إلى أن يصل حالة ، الاستقرار أو قد يتفاهم ويدفع بالمنظومة إلى حالة اللااستقرار والخروج عن التزامن وإن السبب في هذا التآرجح هو في زاوية القدرة (δ) حيث أنها وضعت بمقدار (170°).

ويوضح الشكل (18) رسم مكبر لمسارات الممانعة الظاهرية المنظورة من قبل المرحلة المسافية ومرحلة الخروج عن التزامن ونلاحظ في هذه الحالة أن مسارات الممانعة الظاهرية تكمل نفسها مشكلة بذلك دوائر متحدة المركز ، إذ يخترق هذا المسار الخواص التشغيلية لكلا المرحلتين مسببة في ذلك عدم انتظام في إصدار إشارات الإفلات من قبل المرحلة المسافية وفي مثل هذه الحالة يصبح من الضروري استخدام مرحلة الخروج عن التزامن لتمييز نوع التآرجح وهل يقع في حيز التآرجح المستقر أو التآرجح غير المستقر .

إن تتابع إشارات الإفلات وإشارة الكبح موضحة في الشكل (19) وفي هذا الشكل نجد أن المرحلة المسافية ستكون معرضة لإصدار تسع إشارات إفلات في القطاع الأول وإشارتي إفلات في القطاع الثاني . في حين تقوم مرحلة الخروج عن التزامن بمقارنة سرعة تغير مسار الممانعة مع التنظيم الزمني للمرحلة وتصدر إشارات كبح لعمل المرحلة المسافية عندما يكون التآرجح ما يزال في حالته المستقرة ولكن مع زيادة التآرجح سوف يخرج عن الظروف المستقرة ويدفع بالمنظومة إلى العمل بوضع غير مستقر فتقوم وحدات فصل الخروج عن التزامن بأخذ دورها وتسمح لإشارة المرحلة المسافية بالعبور لأن سرعة المسار عند التآرجح غير المستقر تزداد كثيرا عن ما هي عليه في حالة التآرجح المستقر . وهذا ما نلاحظه في الشكل (19) حيث أن المرحلة المسافية سوف لن تصدر إشارة إفلات فعلية إلا بعد أن يدخل التآرجح في الحالة غير المستقرة في حين تكبح الإشارات الأولى لأن التآرجح في تلك المدة الزمنية يكون في حيز التآرجح المستقر .



الشكل (19) تتابع إصدار إشارات الإفلات عند حصول حالة التآرجح غير المستقر في القدرة



الشكل (18) يوضح مسار الممانعة الظاهرية عند حصول تآرجح غير مستقر في القدرة

6. الاستنتاجات:

ان تمثيل ونمذجة مرحلة تعمل على كشف التأرجح في القدرة أو ظروف الخروج عن الحالة الاعتيادية (Out of Step Detection) يمكن أن تعمل في أي منظومة كهربائية بصورة مفردة أو تكون ملازمة لمرحلات أخرى كالتالي تم دراستها في هذا البحث إذ يمكن أن تعمل مع المرحلات الاتجاهية والمسافية والفرقية وغيرها. فعملها لحماية خطوط نقل القدرة الكهربائية يستوجب توفر منظومة مكافئة ثنائية التغذية . ولكون سرعة انتقال أو تغير الممانعة في حالة العطل أو في حالة التأرجح غير المستقر لهذه المرحلة أكبر منها في حالة التأرجح المستقر، لذا تم أخذ هذه الفائدة بنظر الاعتبار لتحقيق التمييزية ما بين التارجح المستقر من جانب والتأرجح غير المستقر وحالات الأعطال من جانب آخر .

كما إن قيمة (δ) هي التي تحدد عمل المنظومة الكهربائية إذ أنها في حالة التشغيل الطبيعي للمنظومة تكون الزاوية بحدود ($0^\circ \leq \delta \leq 60^\circ$) أو ($300^\circ \leq \delta \leq 360^\circ$). وقد تعاني المنظومة من حالات التارجحات البسيطة التي لا تتجاوز فيها زاوية (δ) عن (15°) أو حسب معاملات المنظومة والتي لا تؤثر سلباً على عمل المرحلة المسافية. أما في حالة تأرجح القدرة المستقر فتكون قيمة الزاوية ($60^\circ \leq \delta \leq 120^\circ$) أو ($240^\circ \leq \delta \leq 300^\circ$) حيث تكون المنظومة في حالة الاستقرار العابرة (Transiently stable) أي إن وجود تأرجح القدرة يجعل المنظومة تعمل بصورة قلقة ولا يعني بالضرورة أن المنظومة غير مستقرة فقد يكون أي اضطراب طفيف هو المسبب لانتقال المنظومة إلى الحالة غير المستقرة. إما في حالة كون التشغيل خارج نطاق العمل الطبيعي أو خارج تزامن المنظومة فان قيمة الزاوية (δ) تكون بحدود ($120^\circ \leq \delta \leq 240^\circ$)، لذلك يحدث ما يعرف بتأرجح القدرة غير المستقر (Unstable Power Swing) والتي تعطي ظروف تشغيل صعبة جداً، إذ تكون المنظومة في حالة عدم الاستقرار العابرة (Transiently Unstable) لان الفرق بين سرعتي المولدتين (R و S) سوف يكون كبيراً جداً لذلك من الضروري فصل المولدتين عن بعضها لصعوبة عملهما معاً لتغذية الحمل بسبب فقدان التزامن (Loss of synchronism) ما بينهما.

باستخدام مرحلة الخروج عن التزامن OOS يمكن الكشف عن ظروف التأرجح، كذلك يمكن حساب مقدار التغيير في الاستقرار بوجود الاضطرابات، هذا بالإضافة إلى أنه يمكن الحصول على ممانعة التتابع الموجب ببساطة وبقائمة مباشرة من الخط، حيث أن مرحلة (OOS) تقوم بكبح الإشارات التي تصدر عن المرحلة المسافية في أوقات التأرجح المستقر وتسمح للإشارات التي تكون في مدة التأرجح غير المستقر والأعطال بالمرور.

7. المصادر :

- [1] "Power Swing And Out-Of-Step Considerations Transmission Lines", A report to the Power System Relaying Committee Of the IEEE Power Engineering Society, 2005.
- [2] D. Tziouvaras, and D. Dou, "Out-of-step protection fundamentals and advancements", Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Boise, ID USA, 2003, [online]. Available at: <http://www.selinc.com/techpprs/6163.pdf>
- [3] G. Benmouyal, D. Hou, and D. Tziouvaras, "Zero-setting Power Swing Blocking Protection", 31st Annual Western Protective Relay Conference, October 19-21, 2004, Spokane, Washingto.
- [4] F. Plumtre, S. Brettschneider, Cegertec, A.J Hiebert, M. Thompson, "Validation of Out-of-Step Protection With a Real Time Digital Simulator" Electrical report, [online]. Available at: <http://www.selinc.com>.
- [5] D. Hou, S. Chen, and S. Turner, "SEL-321-5 Relay Out-of-Step Logic," Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Application Guide AG97-13, July 23, 1997.
- [6] Joe Mooney and Normann Fischer, "Application Guidelines for Power Swing Detection on Power Systems", Proceedings of the 32nd Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2005.
- [7] Gerhard Ziegler, "Numerical Distance Protection, Principles and Application", Siemens,Erlangen,Publics-MCD-Verl.1999.