

## أثر معوّضات الاستطاعة الرديّة في أداء حواكم الحماية المسافية\*

م. مهند الدبس\*\*

د. سميح الجابي\*\*\*

### الملخص

حاولت هذه الدراسة بيان مشكلة الأثر الناجم عن وجود المعوّضات التفرّعية والتسلسلية في خطوط نقل القدرة الكهربائية في أداء حواكم الحماية المسافية التي تحمي هذه الخطوط. ومن أجل بيان هذا الأثر استُخدمت برمجيات تحليل الشبكات الكهربائية وبشكل خاص برنامج NEPLAN لدراسة سلوك الحاكمة المسافية بوجود مختلف أنواع المعوّضات التفرّعية والتسلسلية، ومن أجل الأعطال الأساسية، وعند مواقع مختلفة من الخط المدروس. في هذه الدراسة أُجريت نمذجة شبكة نقل الطاقة السورية وفق NEPLAN واستُخدمت معوّضات تفرّعية مثل STATCOM وتسلسلية مثل TCSC ومختلطة مثل UPFC لتعويض الاستطاعة الرديّة على خط النقل المحمي. وتُجرى النمذجة لكثير من الحالات، لبيان أثر نمط العطل وموضعه في قيمة الممانعة المقيسة من الحاكمة المسافية. والغرض من تحديد أثر وجود المعوّضات في ممانعة العطل المنظورة من الحاكمة المسافية (أي موضع العطل)، هو معرفة الاتجاهات الممكنة لحل لهذه المشكلة وتحسين أداء حمايات خطوط نقل الطاقة الكهربائية.

الكلمات المفتاحية: الحاكمة المسافية، المعوّضات الرديّة، المعوض التزامني الستاتيكي (STATCOM)، المعوض الموحد (UPFC)، المعوض التسلسلي ذو التحكم التايستوري (TCSC)

\* أعد هذا البحث في سياق رسالة الدكتوراه للمهندس مهند الدبس بإشراف الأستاذ الدكتور سميح الجابي.

\*\* طالب دكتوراه - قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

\*\*\* أستاذ في قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

## 1- المقدمة:

تُستخدَمُ معوّضات الاستطاعة الرديّة في نظم نقل القدرة الحديثة بكثرة بغرض زيادة مقدرة الشبكة على نقل الطاقة الكهربائية وتخفيض تكلفة التوليد وزيادة أمان الشبكة واستقرارها ، ونظراً إلى أن زيادة الطلب المستمرة على الطاقة تدفع إلى الاستخدام الأقصى لخطوط النقل الموجودة، فإن المعوّضات الرديّة قد تشكّل حلاً اقتصادياً في كثير من الأحيان إذ تسهم بتخفيض قيمة الاستطاعة الرديّة كما تسهم بتحقيق مرونة أكبر في التحكم بنقل الاستطاعة على خطوط النقل.

وبالمقابل فإن الحماية الأساسية لخطوط نقل الطاقة في الشبكة هي الحماية المسافية، ويعتمد المبدأ الأساسي للحماية المسافية التقليدية على قياس الممانعة بين موضع الحاكمة ونقطة العطل، من خلال قياس قيمة التوتر وقيمة التيار المحصّلة من محولتي التوتر والتيار عند موضع الحاكمة.

ولا شك بأن وجود المعوّض على خط النقل سيغيّر قيم بعض محددات الخط (التوتر، التيار، الممانعة، زاوية الطور)، ممّا يؤدي إلى بروز خطأ في قيمة الممانعة المقيسة من الحاكمة، وتتعلق قيمة هذا الخطأ بموقع تركيب المعوّض وبطريقة توصيله (تفرعي أم تسلسلي) وبطريقة قيادته.

## 2- حواكم الحماية المسافية:

هي الحماية الأساسية لخطوط النقل وتعدّ من حواكم المنطقة المفتوحة (مالم تعتمد أي تخاطب مع الحاكمة المقابلة على نهاية الخط). ويقوم مبدأ الحاكمة المسافية على قياس قيمة التوتر والتيار ثم حساب الممانعة المنظورة من موضع الحاكمة إلى نقطة العطل، ومقارنة قيمة التوتر والتيار المقيسة أو قيمة الممانعة المحسوبة بقيمة مرجعية هي قيمة معايرة الحاكمة لاتخاذ قرار

الفصل، ويعتمد شكل مميزات الحاكمة على القيم التي تجري مقارنتها، فإذا أُجريت المقارنة بين المطالات نحصل في المستوي R-X على مميزات دائرية مركزها في المبدأ. أمّا مقارنة زوايا الأطوار فتعطي مميزات مستقيمة تمر من المبدأ.

أهم المميزات المستخدمة في حواكم الحماية المسافية هي مميزات الممانعة البسيطة وتعتمد على المقارنة بين  $(Z_{setting} \times I)$  مع  $(Z_f \times I)$  وشكلها دائرة مركزها في نقطة المبدأ وهي لاتجاهية، ومميزات حاكمة المفاعلة وتعتمد على المقارنة بين  $(X_{setting})$  مع  $(X_f)$  وتمثل خطأ مستقيماً موازياً للمحور R وهي اتجاهية، أمّا حاكمة السماحية (Mho) الاتجاهية فتجمع ميزات الحاكمتين السابقتين وتعتمد على المقارنة بين  $(U-I.Z_{setting})$  و  $(I.Z_f)$  وتمثل المميزات الناتجة دائرة يمر محيطها من المبدأ وقطرها يساوي  $Z_{setting}$ ، أمّا الحاكمة ذات المميزات المضلعة فهي اتجاهية وملائمة للخطوط القصيرة ولتعويض تيار الحمل ما قبل العطل.

ويتيح استخدام الحواكم الرقمية الحديثة توليد العديد من المميزات المضلعة أو العدسية بأشكال مختلفة مع إمكانية تعديل شكل المميزات بسهولة من خلال تغيير محدداتها الأساسية.

## 3- تعويض الاستطاعة الرديّة:

يُعيّن أسلوب التحكم بنقل الاستطاعة بشقيها الفعلي والردي من خلال معادلات نقل الاستطاعة في خط نقل، وتعطى المعادلات الأساسية لنقل الاستطاعة بالعلاقات الآتية:<sup>[2]</sup>

استطاعة الإرسال:

$$P_s = \frac{|V_s|^2}{|Z|} \cos\theta - \frac{|V_s||V_R|}{|Z|} \cos(\theta + \delta) \quad (1)$$

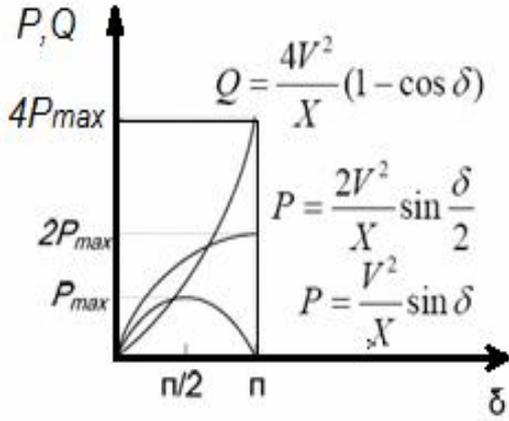
$$Q_s = \frac{|V_s|^2}{|Z|} \sin\theta - \frac{|V_s||V_R|}{|Z|} \sin(\theta + \delta) \quad (2)$$

استطاعة الاستقبال:

وبمقارنة هذه المعادلة بالمعادلة (5) نجد تحسناً في الاستطاعة الحقيقية المنقولة. وكذلك فإن الاستطاعة الرديّة المحقونة من المكثف من أجل تنظيم التوتر عند منتصف الخط ستكون:

$$Q_c = 4 \frac{V^2}{X_L} (1 - \cos \frac{\delta}{2}) \quad (9)$$

ويبين الشكل (1) الفرق بين منحني الاستطاعة الحقيقية المنقولة في الحالتين، كما يبين الاستطاعة الرديّة المحقونة:



الشكل 1

سيقود هذا التعويض إلى تغيير في قيمة الممانعة الموجية للخط  $Z_0$  إذ تصبح الممانعة الجديدة:

$$Z_{0(new)} = \frac{Z_0}{\sqrt{1 - K_{sh}}}$$

إذ  $K_{sh}$  درجة التعويض التفرعي وتعرف كالاتي:

$$K_{sh} = \frac{x_c}{x_{sh}} = \frac{B_{sh}}{B_c} = \frac{1}{\omega^2 C L_c}$$

وتعرف الممانعة الموجية للخط من العلاقة:

$$Z_0 = \sqrt{L/C}$$

وذلك باعتبار  $L$  هي المحارضة التسلسلية للخط، و  $C$  هي السعة التفرعية للخط.

$$P_R = -\frac{|V_R|^2}{|Z|} \cos \theta + \frac{|V_S||V_R|}{|Z|} \cos(\theta - \delta) \quad (3)$$

$$Q_R = -\frac{|V_R|^2}{|Z|} \sin \theta + \frac{|V_S||V_R|}{|Z|} \sin(\theta - \delta) \quad (4)$$

وبإهمال الضياعات  $R=0$  وباعتبار  $Z=jX$   $\theta = \pi/2$  تصبح المعادلات السابقة كالاتي:

$$P_S = P_R = \frac{|V_S||V_R|}{|X_L|} \sin \delta \quad (5)$$

$$Q_S = \frac{|V_S|^2}{|X_L|} - \frac{|V_S||V_R|}{|X_L|} \cos \delta \quad (6)$$

$$Q_R = \frac{|V_S||V_R|}{|X_L|} \cos \delta - \frac{|V_R|^2}{|X_L|} \quad (7)$$

وينتج من المعادلات السابقة أن الاستطاعة الأعظميّة الممكن إرسالها محدودة بالزاوية  $\theta + \delta$  فيما تعتمد القيمة العظمى للاستطاعة المستقبلية على القيمة  $\theta - \delta$ . وتكون الاستطاعة المستقبلية أعظميّة عندما تكون  $\theta - \delta = 0$  أي  $\theta = \delta$ . يجري التحكم بالاستطاعة الفعلية من خلال التحكم بالزاوية  $\delta$  فيما يجري التحكم بجريان الاستطاعة الرديّة من خلال التحكم بمطالات التوترات  $|V_S|$  و  $|V_R|$ .

ويمكن تعويض الاستطاعة الرديّة لخطوط نقل الطاقة بطريقتين رئيسيتين هما التعويض التفرعي والتعويض التسلسلي<sup>[1]</sup>.

**3-1- التعويض التفرعي:** الغرض من هذا التعويض هو تنظيم مطال التوتر وتحسين جودة الطاقة واستقرار النظام، ويجري ذلك من خلال التحكم بالاستطاعة الرديّة المنقولة على الخط الموحّض حيث تُمتصُّ الاستطاعة الرديّة الزائدة باستخدام ملف تفرعي أو حقن استطاعة رديّة باستخدام مكثف تفرعي. وفي حالة الخطوط الهوائية ذات الطبيعة التحريضية فإن التعويض المطلوب يكون ذا طبيعة سعوية، وبحسب [1] فإنه عند تعويض الخط بموحّض تفرعي في منتصفه فإن الاستطاعة الحقيقية عند طرفي الخط ستكون:

$$P_1 = P_2 = 2 \frac{V^2}{X_L} \sin \frac{\delta}{2} \quad (8)$$

### 2-3- التعويض التسلسلي:

يستخدم في الخطوط الطويلة ويهدف إلى التحكم بالممانعة التسلسلية الكلية للخط أو تغيير الطول الكهربائي للخط لهذا يُسمّى تعويض  $\theta$  أو تعويض طول الخط، إذ:

$$\theta = \beta D = \sqrt{\frac{L}{X_C}}$$

إذ  $\theta$  زاوية الخط،  $X_L$  المفاعلة التحريضية للخط،  $X_C$  المفاعلة السعوية للخط،  $D$  طول الخط،  $\beta$  الثابت الزاوي وهو يمثل الجزء التخيلي من ثابت الانتشار  $\gamma$ .

ومن العلاقة نلاحظ أنه بتخفيض قيمة  $X_L$  تُخفّض قيمة  $\theta$ . وتعطى قيمة الممانعة الموجية الجديدة بعد ربط المعوّض التسلسلي بالعلاقة:

$$Z_{0(new)} = \sqrt{X_L(ss) * X_C} = Z_0 \sqrt{1 - K_{ss}}$$

إذ  $K_{ss}$  درجة التعويض التسلسلي، وتعطى بالعلاقة:  $K_{ss} = \frac{X_{ss}}{X_L}$ ، وتكون قيمتها موجبة للتعويض التسلسلي السعوي وسالبة للتعويض التسلسلي التحريضي. ومن ثمّ يقلل التعويض التسلسلي السعوي من قيمة الممانعة التسلسلية الكلية للخط  $Z$ .

### 4- معوّضات الاستطاعة الرديّة:

أهم أنواع المعوّضات المستخدمة هي:

**1-4- المعوّضات التزامنية (الدوارة) وهي الأقدم،** وتعتمد على استخدام المحركات التزامنية، فمن خلال التحكم بتوتر التهيج  $E$  للمحرك يجري التحكم باتجاه جريان الاستطاعة الرديّة بين المحرك التزامني والخط المعوّض. وعندما يكون  $|E| > |V_R|$  فإن المحرك التزامني يكون في حالة زيادة تهيج وسوف يحقن استطاعة رديّة في الخط. أمّا عندما يكون  $|E| < |V_R|$  أي نقص تهيج المحرك التزامني فالمحرك سيمتص استطاعة رديّة من الخط.

### 2-4- النمط الستاتيكي غير الفعّال PASSIVE (مكثف

أو ملف): هي مكثفات ثلاثية الطور تربط على التفرع

مع قضبان الاستقبال، وتعبّر المعادلة الآتية عن قيمة الاستطاعة الرديّة في هذه الحالة:

$$Q_C = \frac{|V_R|^2}{X_C} * 10^{-6} [MVar]$$

### 3-4- معوّضات ستاتيكية تعتمد على إلكترونيات

القدرة SVC أي Static VAR Compensator وتسمّى أحدث هذه المعوّضات بـ FACTS، وتشير SVC هنا إلى الصنف العام من المعوّضات التي تعتمد على إلكترونيات القدرة بشكل عام تمييزاً لها عن المعوّض التفرعي SVC الذي يعرف بـ FCTCR (Fixed capacitor thyristor controlled reactor)

وقد باتت هذه المعوّضات الأكثر استخداماً في شبكات نقل القدرة لمقدرتها العالية على تحقيق التحكم بالتوتر وجريان الاستطاعة الرديّة والفعلية وتحسين استقرار شبكات النقل والتوزيع.<sup>[1]</sup>

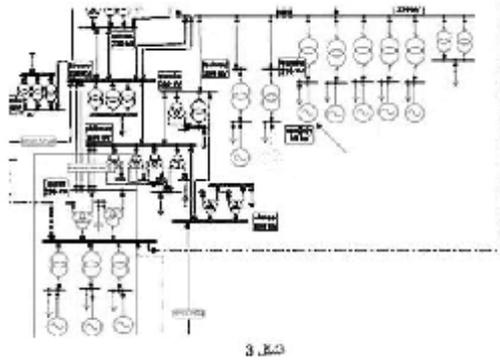
وتعبّر المعادلة الآتية عن الاستطاعة الرديّة المقدمة من المعوّض:

$$Q_{SVC} = |V_{SBL}|^2 B_{SVC} \quad (10)$$

إذ إنّ:

$$B_{SVC} = \frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi X_s}$$

إذ  $B_{SVC}$  هي سماحية المعوّض، فيما  $\alpha$  هي زاوية القدح إذ:  $\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \pi$ ، ويجري التحكم بالمعوّض عن طريق التحكم بالسماحية أي بزاوية القدح. فمع زيادة زاوية القدح تصبح  $Q_{SVC}$  سعوية، ويرتفع من ثمّ توتر بار التجميع ليقترّب من القيمة المطلوبة، وبالعكس في حال زيادة توتر بار التجميع تُخفّض زاوية القدح مما يجعل  $Q_{SVC}$  تحريضية، ومن ثمّ ينخفض توتر البار. وبيّن الشكل (2) العلاقة بين  $Q_{SVC}$  و  $\alpha$ :



الشكل 3

إحدى برمجيات تحليل الشبكات الذي يسمح بنمذجة شبكات نقل الطاقة الكهربائية وإجراء الحسابات الأساسية عليها مثل: جريان الحمولة، وحسابات القصر، والحالات العابرة، والتوافقيات، والحمايات الكهربائية. وهو مزود بمكتبة غنية بعناصر شبكات نقل الطاقة بما فيها الحمايات الكهربائية ومعوّضات الاستطاعة الرديّة.

يبين الشكل (3) جزءاً من شبكة نقل الطاقة السورية

المنمّجة باستخدام Neplan.

**5-1- أثر المعوّضات التفرّعية:** رُبطَ في البداية معوّض تفرّعي STATCOM على خط السويداء- تشرين، وهو من أطول الخطوط في المنطقة الجنوبية ومحدداته هي:

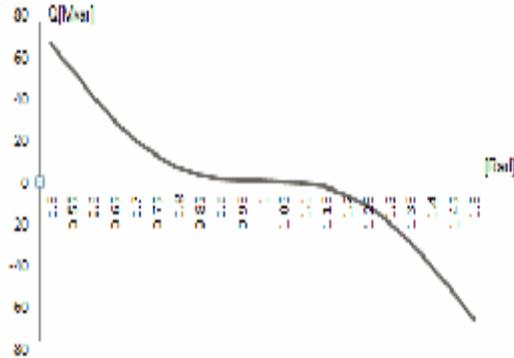
R	X	B
$\Omega$	$\Omega$	Mho $\times 10^{-6}$
8.624	46.25	306.21

Base Kv	Length Km	SEC mm <sup>2</sup>	I Max A
230	112	400/51	670

بإجراء حسابات جريان الحمولة على الشبكة نتجت القيم الآتية للخط (من جهة السويداء):

P [MW]	Q [MVar]	I [kA]	U <sub>Sweda</sub> [%]	U <sub>Ang</sub> deg
-82.3	-36.3	0.25	90.62	-9.9

وسيكون التوتر عند منتصف الخط %93. وعند تركيب المعوّض في منتصف الخط فإنه سيقدّم للخط استطاعة



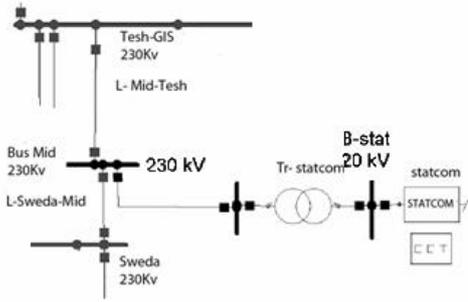
الشكل 2

### 5- أثر المعوّضات في أداء الحاكمة المسافية:

تناولت العديد من الدراسات آثار تركيب معوّضات الاستطاعة الرديّة المختلفة في أداء الحاكمة المسافية وفي حالات مختلفة.

فقد أُجريت في البحث [3] دراسة أثر المعوّض التسلسلي المركّب في منتصف خط نقل في الممانعة المنظورة من الحاكمة الذي يؤدي إلى تقليل قيمتها، فيما تناول البحثان [6]، [4] أثر تركيب المعوّض المختلط UPFC في الحاكمة المسافية في حالة الأعطال الأرضية وعند مواقع تركيب مختلفة للمعوّض، والخلاصة أن الحاكمة ستقيس، وبحسب درجة التعويض، قيمة أكبر أو أصغر من القيمة الحقيقية للممانعة في حالة العطل الأرضي. ويتناول البحث [7] أثر المعوّض STATCOM في الحاكمة المسافية في حالة عطل طور - أرض، وعطل طور - طور، وذلك عند تركيب المعوّض في مواضع مختلفة. ويخلص البحث إلى أن الممانعة المنظورة من الحاكمة ستزداد في حال قدّم المعوّض استطاعة رديّة وستقل في حال امتصّ المعوّض هذه الاستطاعة.

في هذا البحث سنقوم بإجراء دراسة لأثر المعوّضات في شبكة نقل الطاقة الكهربائية السورية؛ وذلك باستخدام برنامج Neplan، وهو



الشكل 4

المهمة، إذ إنه عند تنظيم التوتر عند القيمة 1pu على طرفي الخط فإن التوتر قد يكون أقل من 1pu عند منتصف الخط، وهو ما يخفّض من قدرة الخط على نقل الاستطاعة، لكن الربط في منتصف الخط يحتاج إلى كلفة اقتصادية كبيرة الحاجة لإنشاء عقدة جديدة عند منتصف الخط، لهذا السبب فإن ربط المعوّضات عند نهاية الخط هو الأكثر شيوعاً لكلفته الأقل. ويبين الشكل (4) مكان توضع المعوّض STATCOM.

والآن سنناقش حالة حدوث عطل ثلاثي الطور قاس في اللحظة 0.1Sec على بعد 90% من بار السويداء، في حال ربط المعوض على نهاية الخط من جهة بار السويداء وبفرض استجابة الحاكمة القريبة (أي على بار تشرين في اللحظة 0.2Sec)، ثم زوال العطل في اللحظة 0.6Sec، فإن قيم التيار والتوتر والممانعة المنظورة من الحاكمة من دون وجود المعوّض ستكون كما في الشكل (5).

إذ نجد في المخطط الأول التوتر المقيس عند بار السويداء 230Kv الذي كان قبل العطل عند القيمة 208Kv وعند حدوث العطل في اللحظة 0.1Sec هبط التوتر إلى القيمة 75Kv وبعد فصل القاطع من جهة تشرين ارتفع التوتر إلى القيمة 125Kv.

فيما يبين المخطط الثاني من الشكل (5) التيار المقيس عند بار السويداء ونلاحظ ارتفاع التيار من القيمة 250A قبل العطل إلى 1000A بعد العطل ثم ارتفاعه أيضاً حتى

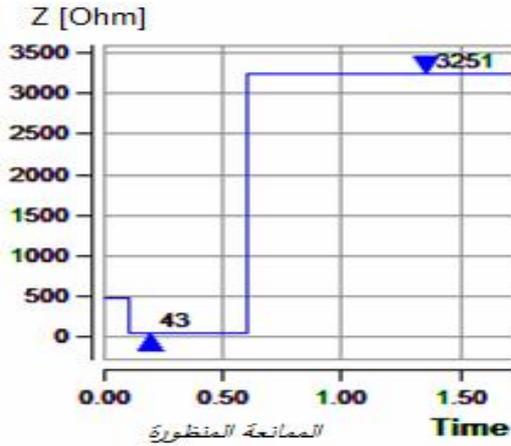
رديّة قدرها 164.097MVar، وذلك من أجل الحفاظ على توتر 98.9% عند نقطة الربط، أي سنحتاج إلى معوّض ذي استطاعة رديّة اسميّة قدرها 200MVar، وهو أكبر معوّض مستخدم في الصناعة حتى الآن، والسبب هو عدم وجود أي تعويض موزّع على الشبكة المدروسة بحيث يسهم في تخفيض الاستطاعة الرديّة المطلوبة في هذه النقطة. وبعد الربط تصبح قيم جريان الحمولة في الجزء الأول من الخط (السويداء- منتصف الخط):

نقطة الربط	P [MW]	Q [MVar]	I [kA]	U <sub>Sweda</sub> [%]
منتصف الخط	-83.7	-63.2	0.28	92.3
السويداء	-83.9	9.7	0.22	96

أمّا بالنسبة إلى الجزء الثاني من الخط ( تشرين - منتصف الخط) فقد أصبحت القيم:

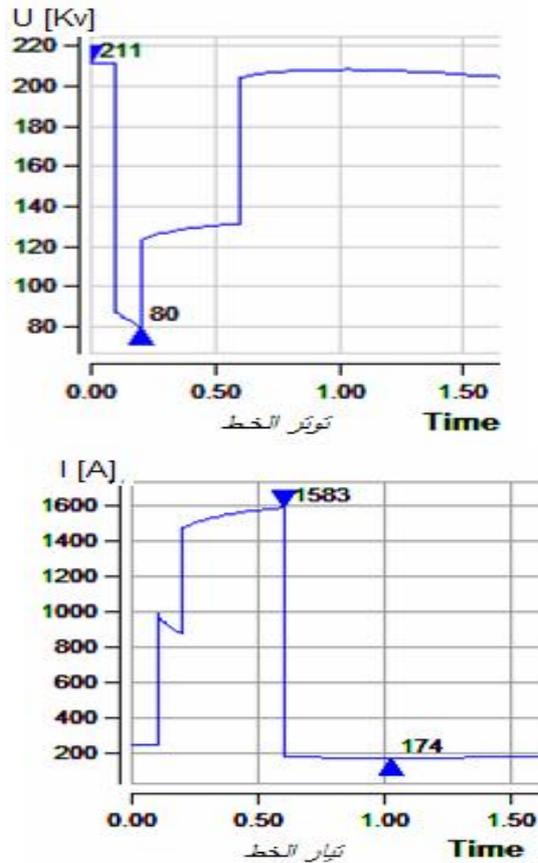
نقطة الربط	P [MW]	Q [MVar]	I [kA]
منتصف الخط	85.4	-22.3	0.23
السويداء	85.2	-17.7	0.23

وحتى يكون الاختيار أقرب ما يمكن للواقع سنكتفي بالمحافظة على توتر 96% عند بار الربط، وهو ما يعني إسهام المعوّض باستطاعة رديّة قدرها 79.9MVar، وهي قيمة قريبة من القيمة الواقعية لتعويض الخط المدروس. إن الميزة الأساسية لربط المعوّض في نقطة منتصف الخط هي تحسين التوتر عند هذه النقطة

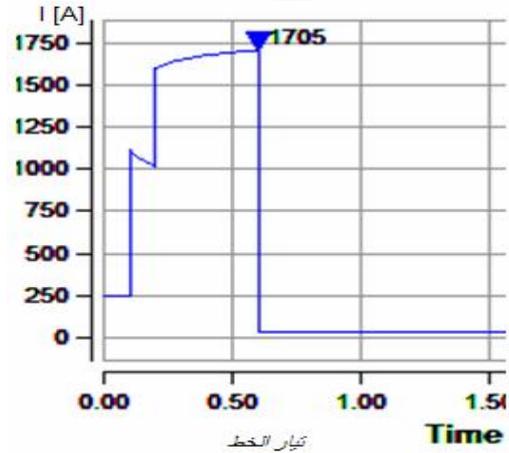
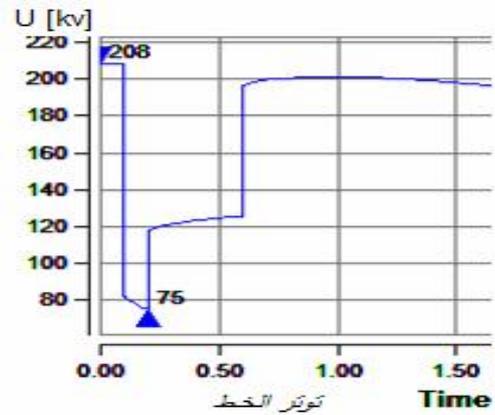


الشكل 5

فيما يبيّن الشكل (6) المحددات نفسها في حال ربط STATCOM في منتصف خط تشرين - السويداء:



القيمة 1705A بعد فصل قاطع تشرين، والسبب تغذية العطل فقط من جهة السويداء بعد فصل قاطع تشرين. أمّا المخطط الثالث من الشكل (5) فيبيّن الممانعة المقيسة عند بار السويداء أي من الحاكمة المسافية موضع الاهتمام، وهنا نجد أن الممانعة قد انخفضت من القيمة 486Ω قبل العطل إلى القيمة 43Ω بعد حدوث العطل (بسبب انخفاض التوتر وارتفاع التيار)، واستمرت في هذه الحالة تقريباً عند القيمة نفسها بعد فصل قاطع تشرين (بسبب ارتفاع التوتر وارتفاع التيار).





الشكل 7

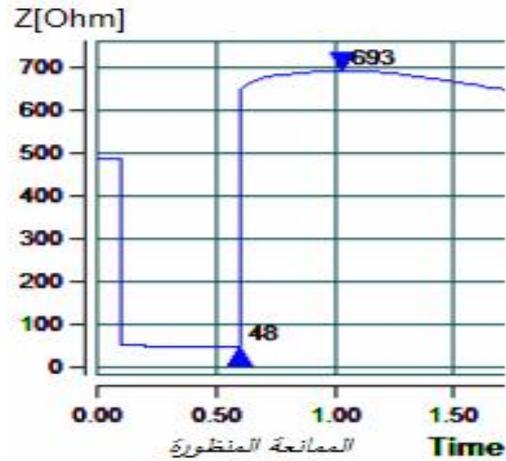
ونلاحظ أن قيمة الممانعة المنظورة من الحاكمة سترتفع من  $43\Omega$  في الحالة العادية إلى  $52\Omega$  بوجود العطل قبل فصل الخط من جهة تشرين، فيما ستصبح  $48\Omega$  بعد فصل هذا القاطع.

تحسب ممانعة الخط من نقطة توضع الحاكمة إلى نقطة العطل كما يأتي:

$$Z_R = 0.9 \times 112 \times (0.43 \angle 79.7^\circ) = 43.22\Omega$$

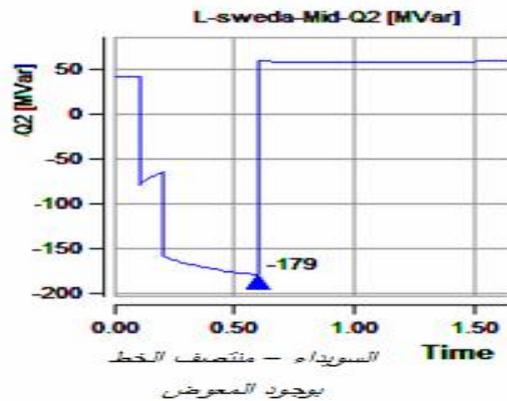
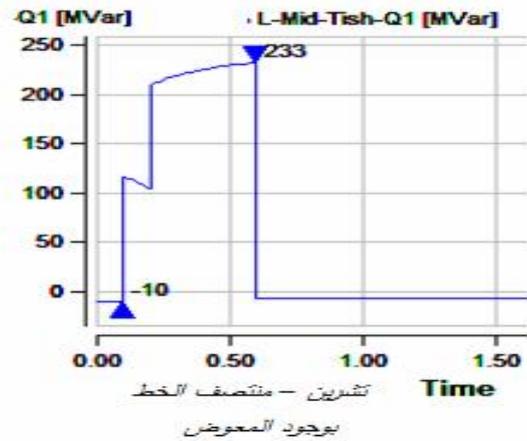
وتقع هذه القيمة ضمن المنطقة الثانية لمعايرة الحاكمة، إذ إنّ قيمة معايرة المنطقة الأولى هي  $0.85Z_L = 40.8\Omega$ ، أمّا معايرة المنطقة الثانية فتكون بالقيمة  $52.31\Omega$ . ومنه فالخطأ في قياس العطل المذكور قدره 21% قبل فصل قاطع تشرين، فيما تصبح قيمة الخطأ 12% بعد فصل هذا القاطع.

ولبيان أثر موقع العطل في قيمة الممانعة المقيسة أُعيدت التجربة السابقة بتغيير موقع العطل على الخط بخطوة قدرها 10% من طوله فحصلنا على النتائج المبينة في الجدول (1):



الشكل 6

كما يبين الشكل (7) قيم الاستطاعة الرديّة في الخط بقسميه (قبل المعوّض وبعده) في حال وجود المعوّض، وكذلك الاستطاعة الرديّة في الخط في من دون وجود المعوّض:



إذ  $I_L$ : تيار القصر في الطور المعطل،

$I_E$ : تيار القصر الأرضي،

$\phi_{sc}$ : الزاوية بين توتر القصر وتيار القصر للطور المعطل.

في حالة العطل الأرضي فإن قيمة مفاعلة ومقاومة العطل من دون وجود STATCOM ستكون  $5.82+j47.29\Omega$  فيما تصبح هذه القيمة عند ربط المعوض في منتصف الخط  $6.6602+j56.611\Omega$  وهذا يكافئ خطأً بنسبة 19.6% وسبب هذا الخطأ هو إسهام المعوض الستاتيكي بتيار العطل وبالأخص بالمركبة الصفرية لهذا التيار، إذ تكون قيمته قبل ربط المعوض  $0.289KA$  وبعد ربط المعوض تصبح  $0.451KA$ ، وهو ما يمثل زيادة في هذه المركبة قدرها 56%، وهذه الزيادة الكبيرة في المركبة الصفرية ستجعل قيمة الممانعة بين نقطة العطل وموضع المعوض مختلفة عن القيمة الحقيقية لها.

وبيّن الجدول (2) قيمة الممانعات المنظورة من الحاكمة في حالة العطل الأرضي من أجل مواضع عطل مختلفة على الخط المدروس:

الجدول 2

مسافة العطل %	الممانعة المقيسة $\Omega$		نسبة الخطأ % قبل فصل تشرين
	قبل فصل تشرين	بعد الفصل	
99	69.9	48.4	47
90	57	43	31.9
80	47.2	37	22.8
70	38.7	31.1	15.1
60	30.5	25.1	5.9
51	23.3	19.9	-4.8
40	18.8	16	-2.1
30	14.4	12.5	-0.0
20	9.8	8.6	2
10	4.9	4.4	2

ونلاحظ من النتائج المبينة في الجدول (2) أن قيمة الخطأ في الممانعة المقيسة تزداد كلما ازداد بعد العطل عن

الجدول 1

مسافة العطل %	الممانعة المقيسة $\Omega$		نسبة الخطأ %	
	قبل فصل تشرين	بعد الفصل	قبل فصل تشرين	بعد الفصل
99	80	54	68	13.6
90	53	48	22	11
80	44	42	15	9.3
70	36.2	35.8	7.7	6.5
60	30	30	4.1	4.1
51	24	24	1	-2
40	18.8		-2	
30	14		-2	

ويلاحظ أنه في حالة العطل ثلاثي الطور فإن الخطأ في قياس الممانعة سيكون أكبر ما يمكن من أجل أعطال نهاية الخط، وتخطئ الحاكمة من أجل الأعطال عند تخوم المنطقة الأولى فالأعطال الواقعة بين 75-85% من الخط ستراها الحاكمة في المنطقة الثانية بدلاً من المنطقة الأولى. كما أن الأعطال بالقرب من نهاية الخط تبدو وكأنها في المنطقة الثالثة قبل أن يفصل قاطع تشرين.

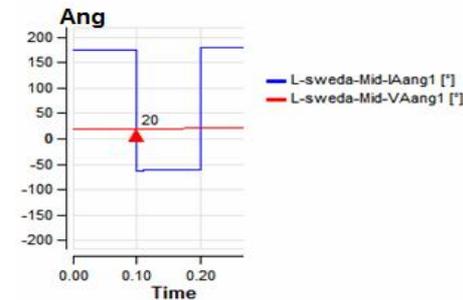
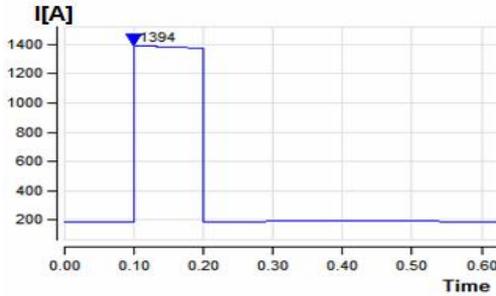
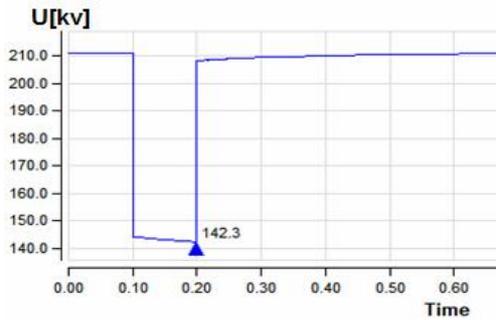
أما بخصوص الأعطال الأحادية فإن الخطأ سيكون مؤثراً بشكل أكبر، وتعتمد العديد من الحواكم الحديثة على مبدأ المركبات المترجمة لقياس تيارات وتوترات الأطوار وحذف أثر تيار الحمل ما قبل العطل، أو على مبدأ قياس ممانعة حلقة العطل بحيث تكون قيمة الممانعة المقيسة أقرب إلى الواقع، وتعطى الممانعة المقيسة من الحاكمة بالعلاقة الآتية<sup>[8]</sup>:

$$X_{ph-E} = \frac{U_{ph-E} \cdot \sin j_{sc}}{I_L + \frac{X_E}{X_L} \cdot I_E} \quad (11)$$

$$R_{ph-E} = \frac{U_{ph-E} \cdot \cos j_{sc}}{I_L + \frac{R_E}{R_L} \cdot I_E}$$

الحقيقية على الخط. ولبيان أثر هذا المعوّض في أداء الحاكمة المسافية رُبطَ معوّض تسلسلي من النوع TCSC الخط المدروس بالقرب من بار السويداء، وقد اختير معوّض ذو مفاعلة سعوية اسمية قدرها  $33\Omega$  تمثل نسبة تعويض قدرها 70%، ويقدم في حالة الحمل المدروس استطاعة رديّة قدرها 20MVar.

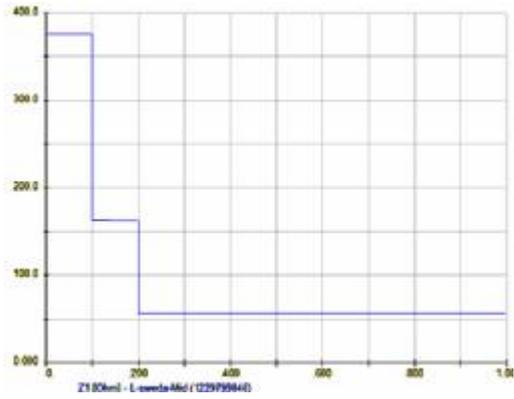
طُبِّقَتِ الأعطال الأساسية على الخط وحُصِّلَت قيم الممانعات المقيسة في كل حالة، وبيّن الشكلان (9) و (10) قيم المركبة الموجبة للممانعة المقيسة في حالة عطل أحادي على بعد 70% من الخط من دون المعوّض وبوجود المعوّض.



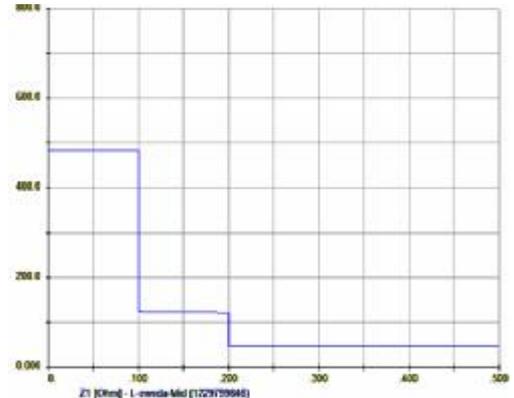
قيم التوتر والتيار والممانعة عند موضع الحاكمة عطل طور - طور، من دون المعوض TCSC

الحاكمة، وبالأخص في النصف الثاني من الخط، أمّا في حال وقوع العطل على النصف الأول من الخط (أي بين الحاكمة والمعوّض) فإن الخطأ في القياس سيكون صغيراً وهو ليس بالأمر الخطير في هذه الحالة.

أمّا في حالة عطل طور - طور عند 90% من الخط المدروس، فقد نتجت القيم المبينة في الشكل (8):



الممانعة الموجبة المقيسة بوجود المعوّض



الممانعة الموجبة المقيسة من دون المعوّض

الشكل 8: حالة عطل طور - طور

ونلاحظ من الشكل (8) أن الممانعة الموجبة المنظورة من الحاكمة ستكون أكبر في حالة ربط المعوّض التفرعي من القيمة الموافقة للعطل نفسه في حالة عدم ربط المعوّض.

## 5-2- أثر ربط المعوّضات التسلسلية:

إن التعويض التسلسلي للخطوط هدفه تغيير قيمة ممانعة الخط المعوّض من أجل التحكم بجريان الاستطاعة

الشكل 9

السالبة للخطأ على أن الممانعة المقيسة ستكون أصغر بوجود المعوّض التسلسلي. وفي الواقع فالمعوّض يخفّض قيمة الممانعة المنظورة من الحاكمة من دون وجود عطل بسبب معاكسة مفاعلة المعوّض السعويّة التسلسلية لمفاعلة الخط التحريضية. وبالطريقة السابقة نفسها يمكن إيجاد قيمة الممانعة المقيسة من أجل عطل أرضي في نقاط مختلفة من الخط المدروس، وهو ما يبيته الجدول (3):

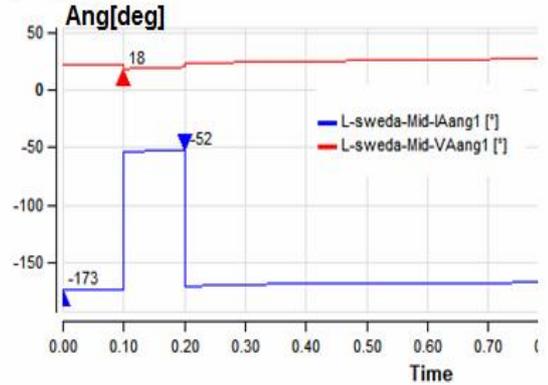
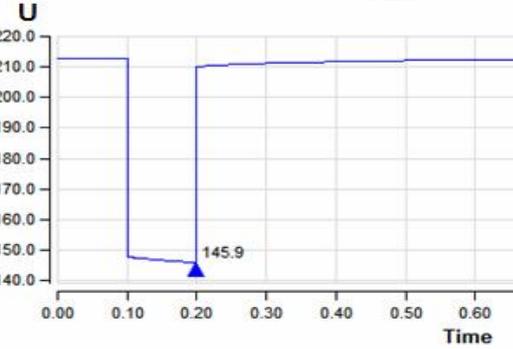
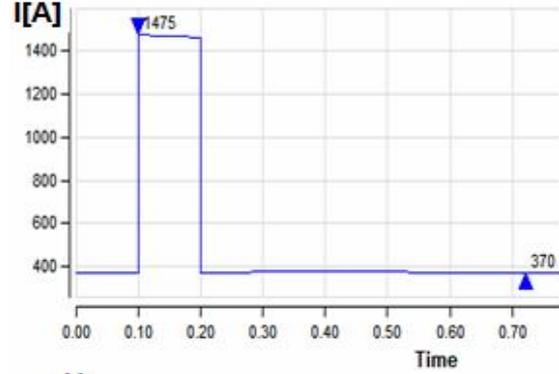
الجدول 3

العطل % مسافة	الممانعة المقيسة $\Omega$		نسبة الخطأ %
	من دون TCSC	بوجود TCSC	
90	46.2	40.8	-11.6
80	40.3	36	-10.6
70	35	32.2	-8
60	29.8	29.4	-1.2
50	24.7		
40	19.6		
30	14.5		
20	9.8	9.7	-0.5
10	4.81	4.86	1

ويلاحظ من النتائج في الجدول (3) أن قيمة الخطأ في قياس الممانعة تزداد كلما ازداد بعد العطل عن الحاكمة، وعلى العكس من حالة المعوّض التفرعي فالقيمة المقيسة ستكون أصغر من القيمة الفعلية وستحصل حالة تقلص مدى الحاكمة (Over Reach)، ومن ثمّ فالأعطال الواقعة عند 15% الأخيرة من طول الخط ستبدو للحاكمة في المنطقة الأولى بدلاً من المنطقة الثانية.

وأخيراً رُبط المعوّض الموحد UPFC على الخط المدروس، ويتكون هذا المعوّض من معوّض تفرعي STATCOM ومعوّض تسلسلي SSSC مربوطين على بار توتر مستمر DC مشترك، ويقوم المعوّض الموحد بوظيفة كلا المعوضين معاً من حيث التحكم بجريان الاستطاعة الحقيقية والتحكم بتوتر نقطة الربط.

وحالة هذا المعوّض أكثر تعقيداً من الحالات السابقة، إذ إنّ تغيير القيمة المقيسة للممانعة في هذه الحالة يتعلق بعدد كبير



قيم التوتر والتيار والممانعة عند موضع الحاكمة

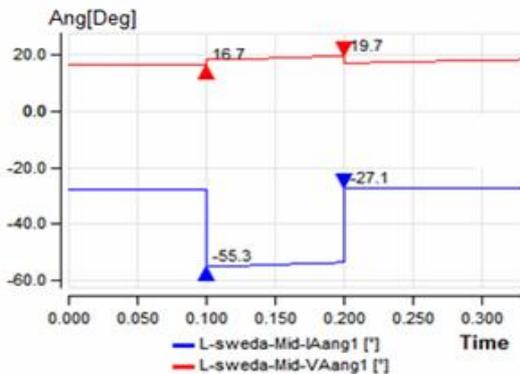
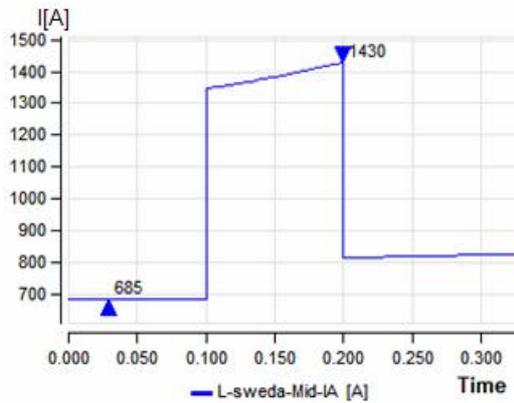
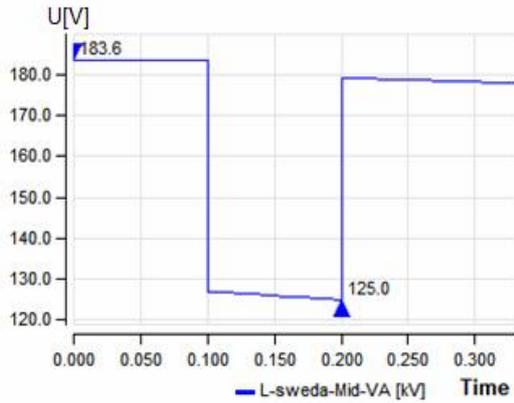
عطل طور - طور، بوجود المعوض TCSC

الشكل 10

ويلاحظ أن الممانعة المقيسة من دون وجود TCSC تكون بحدود  $35\Omega$ ، أما بوجود المعوّض فالممانعة المقيسة تكون  $32.2\Omega$ ، والخطأ في قياس تغيير الممانعة هو:  $35-32.2=2.8\Omega$ ، وهو ما يمثل نسبة خطأ قدرها (8%). وتدل الإشارة

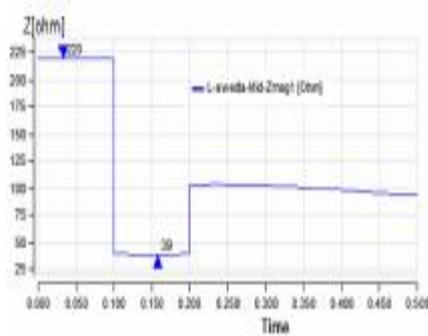
50	23.7	23	-2.9
40	18.9	19	0.5
30	14.5	14	-3.4
20	9.5	9	-5.2
10	4.7	5	6.3

كما بيّن الشكل (12) قيم التوتر والتيار وزواياهما المقيسة من الحاكمة من أجل عطل أحادي عند 90% من الخط:



الشكل 12

من المتغيّرات، منها قيمة المعاييرة للمعوّض، وقيمة محددات الخط والحمل وموقع العطل ونوعه. وقد تمّت معايرة المعوّض بحيث يحمل الخط استطاعة 200MW، أي ينقل الخط أعلى تيار حمل ممكن تقريباً، وبحيث يحافظ على توتر لا يقل عن 96% من التوتر الاسمي عند نقطة ربط المعوّض في منتصف الخط. ويبين الشكل (11) قيمة الممانعة المنظورة من الحاكمة من أجل عطل ثلاثي عند 90% من الخط المدروس:



الشكل 11

ويلاحظ من الشكل (11) أن قيمة الممانعة المقيسة من الحاكمة 39Ω، فيما القيمة الفعلية هي 42.6Ω وهو ما يمثل نسبة خطأ قدرها 8.5% أقل من القيمة الفعلية، وهذا الخطأ لا يمثل سلوكاً نمطياً للمعوّض بل هو الخطأ المقيس في الشروط المذكورة لمعايرة المعوّض ولموقع العطل، ولو اختلف أي من هذه المحددات سنرى اختلافاً في القيمة المقيسة للممانعة.

وبيّن الجدول (4) تغيّر قيم الممانعات المقيسة من الحاكمة المسافية عند بار السويداء عند تغيّر موقع العطل، وذلك من أجل عطل ثلاثي الطور على الخط المدروس:

الجدول 4

مساافة العطل %	الممانعة المقيسة Ω		نسبة الخطأ %
	من دون UPFC	بوجود UPFC	
90	42.6	39	-8.5
80	37.9	35	-7.6
70	33.2	31	-6.5
60	28.4	27	-5

- استخدام عوامل تعويض ثابتة تأخذ بالحسبان السلوك الطبيعي للمعوّض في الحالة العامة ومن أجل الأعطال المؤثرة. وميزة هذا الحل هي السهولة إذ لا يحتاج إلّا إلى تعديل قيمة المعايير أو إلى إضافة عامل جديد إلى الحاكمة المصممة. أمّا سيئته فهي عدم الدقة إذ إنه يصحّح أثر المعوّض في حالة حديثة وجيدة ولن يكون دقيقاً بالأخص عند استخدام المعوّضات الحديثة FACTs، وهذا الحل هو ما نجده في [10] وفي معظم مراجع الشركات المصنّعة مثل [8].

- استخدام تقانات الذكاء الصناعي وبالأخص تقنية الشبكات العصبونية بما تحمله من إمكانية للتعلّم في هذه الحالة. ويعتمد هذا الحل على إجراء العطل على الخط المنمذج ومن أجل أكبر قدر ممكن من الحالات واستمرار التعلّم في أثناء استخدام الحاكمة على الخط، وهذا الحل هو ما يقدم في المرجعين [6] و [9].

- أمّا هذه الدراسة فتقترح استخدام الحواكم المتكيفة، والتكيف يعني إمكانية تعديل سلوك الحاكمة بما يناسب التغيّر الحاصل في القيم المقيسة، وفي هذه الحالة لا بدّ من إجراء قياس ثنائي الموضع وتحصيل معطيات أو قرارات خارجية غير التوتّر والتيار عند موضع الحاكمة، ويكون الأمر سهلاً عندما يكون المعوّض قريباً من الحاكمة، أمّا عندما يكون بعيداً (في منتصف الخط أو عند البار المقابل) فإن استخدام الإتصال مع الطرف البعيد مباشرة يصبح ضرورياً، وهذا ليس بالأمر الصعب بالنسبة إلى نظم الحماية الحديثة.

فعند استخدام المعوّض التفرعي STATCOM مثلاً الذي يمكن تمثيله بمنبع تيار، فإن الخطأ في قياس الممانعة يعبر عنه بالعلاقة:

$$\frac{I_{sh}}{I_r} (n - 0.5) \cdot z_1 \quad (12)$$

ويلاحظ من القيم المقيسة للتيار والتوتّر أن الممانعة التي سنقيسها الحاكمة ستكون  $31.1\Omega$ ، وهو ما يمثل نسبة خطأ قدرها 27%، وهي نسبة خطأ كبيرة جداً، ومن ثمّ فالعطل على الجزء الأخير من الخط ستراه الحاكمة في المنطقة الأولى بدلاً من المنطقة الثانية.

ويبيّن الجدول (5) تغيّر قيم الممانعات المقيسة من الحاكمة المسافية عند تغيّر موقع العطل؛ وذلك من أجل عطل أحادي على الخط المدروس:

الجدول 5

مسافة العطل %	الممانعة المقيسة $\Omega$		نسبة الخطأ %
	من دون UPFC	بوجود UPFC	
90	42.6	31.1	27
80	37.9	28.5	24.7
70	33.2	25.4	23.3
60	28.4	24.4	14.2
50	23.7	-	-
40	18.9	18.3	3.6
30	14.5	13.8	2.9
20	9.5	9.3	2
10	4.7	4.6	1.9

وتبيّن النتائج السابقة أن الخطأ في الممانعة المقيسة سيزداد كلما ازداد بعد العطل عن موضع الحاكمة وبالأخص بعد نقطة ربط المعوّض.

#### 6- تعويض خطأ قياس الممانعة:

كما يتضح من دراسة الحالات المختلفة السابقة لربط معوّضات تفرعية وتسلسلية متعدّدة، ومن أجل أنماط الأعطال الأساسية، وفي مواقع مختلفة من الخط، فإن قيمة الخطأ في قياس الممانعة تعتمد على نوع المعوّض بالدرجة الأولى وعلى نوع العطل وموقعه بالدرجة الثانية.

ومن جهة ثانية فإن الحالة الديناميكية التي يمثلها سلوك المعوّض في حالة العطل تقتضي من الحاكمة سلوكاً متكيفاً لتجاوز الخطأ وتصحيح القياس، والاتجاهات العامة لتصحيح الخطأ في هذه الحالة هي:

التقليدية ستقيس قيمة غير صحيحة وبالأخص في حالة الأعطال الأرضية. ويتحسن الأداء باستخدام حاكمات تقيس تغيّر الممانعة أو حلقة العطل للتخفيف من قيمة الخطأ أي تأخذ بالحسبان قيمة الممانعة المنظورة ما قبل العطل وتهملها من قيمة الممانعة المنظورة عند العطل.

(b) لدى دراسة أثر المعوّضات التفرعية السعوية وكمثال عنها STATCOM، وجدنا أن قيمة الممانعة المقيسة من الحاكم المسافية ستكون أكبر من القيمة الحقيقية، أي إن الحاكم ستقع في حالة تمدد المدى (Under Reach).

(c) لدى دراسة أثر ربط معوّض سعوي تسلسلي TCSC في الخط وجدنا أن الحاكم المسافية ستقيس قيمة أقل من القيمة الفعلية لممانعة العطل أي إنها ستقع في حالة تقلص مدى الحاكم (Over Reach).

(d) أمّا في حالة وجود معوّض مختلط UPFC فالحالة أكثر تعقيداً وتتعلق بدرجة تأثير كلا المعوّضين التسلسلي والتفرعي المدمجين في UPFC، فإذا كان الأثر الأكبر للجزء التسلسلي من المعوّض فإن الحاكم تميل للوقوع في حالة تقلص مدى الحاكم (Over Reach). أمّا إذا كان الأثر الأكبر للجزء التفرعي فإن الحاكم تميل للوقوع في حالة تمدد مدى الحاكم (Under Reach).

(e) وجدنا في حالة المعوّضات التفرعية التي يمكن مكافأتها بمنبع تيار، أن الاعتماد على عوامل تعويض المركبة الصفرية في حالة الأعطال الأرضية يقلل من خطأ قياس الحاكم للممانعة، لكن وبسبب السلوك الديناميكي للمعوّض فإن الممانعة المقيسة تتغيّر بحسب إسهام المعوّض بتيار العطل في كل لحظة، ومن ثمّ فإن الحل الأمثل لتحقيق قياس دقيق للممانعة يعتمد على قياس ثنائي المصدر، إذ يمكن قياس تيار المعوّض وتوتر نقطة الربط وإدخال قيمتهما في خوارزمية حساب ممانعة العطل بما يُمكن من الحصول على قرار أدق للحاكم.

إذ:  $I_{sn}$  تيار المعوّض،  $I_r$  التيار المقيس من الحاكم،  $Z_1$  ممانعة الخط،  $n$  مسافة العطل مقدره بالقيم الواحدة وقيمة الأساس هي طول الخط المدروس. ولحساب  $n$  نستخدم العلاقة:

$$n = \frac{\frac{U_{Ph}}{\sqrt{3}Z_1} + 0.5I_{sn}}{I_{sn} + I_r} \quad (13)$$

وإذ  $I_{sn}$  هو تيار الخط الأقصر اللاحق.

$I_r$  هو باقي التيار المسهم بالعطل ويحسب بالعلاقة

$$r = I_{fault} - (I_L + I_{sn})$$

من العلاقة (13) يتبين أن الممانعة المقيسة من أجل عطل أحادي الطور عند مسافة  $n = 0.9$  تكون  $57\Omega$  أي إن مسافة العطل وفق القيمة المقيسة هي:

$$n = \frac{57}{43.2} = 1.3$$

وهو ما يعبر عن خطأ كبير في قياس مسافة العطل (أي ممانعة العطل).

وبإدخال العلاقة (13) في خوارزمية حساب مسافة العطل وتحصيل قيمة تيار المعوّض تنتج القيم الآتية في هذه الحالة:

U [KV]	$I_r$ [kA]	$I_{sn}$ [kA]	$Z_1$ [ $\Omega$ ]
81.2	1.03	0.114	47.376

ومنه تنتج قيمة  $n$  في هذه الحالة:  $n = 0.915$  وهي قريبة من القيمة الحقيقية  $n = 0.9$  وأفضل بكثير من القيمة السابقة  $n = 1.3$  عند عدم استخدام أي تعويض.

إن هذا الحل يجمع بين الدقة والبساطة، إذ إنه بسبب عدم توقع قيمة التيار المسهم من المعوّض في حالة العطل فإن أدق قياس متوقع يكون بمعرفة قيمة هذا التيار، وهو بسيط أيضاً لأنه لا يتطلب أكثر من قيمة إضافية وحيدة هي قيمة تيار المعوّض.

#### 7- الاستنتاجات:

(a) إن هدف وجود المعوّضات على خطوط نقل القدرة هو التحكم بتوتر قضبان التجميع (البارات) أو التحكم بنقل الحمل على الخط أي بممانعة الخط، ومن ثمّ فإن الحواكم

## المراجع\*

- 1-Yongan Deng. "Reactive Power Compensation of Transmission Lines" Concordia University, 2007
- 2-Abhijit C, Sunita H. "Power System Analysis Operation and Control", third edition ,PHI Learning Private Limited, 2010
- 3-Zellagui M, Chaghi A , "Impact of GCSC on Measured Impedance by Distance Relay in the Presence of Single Phase to Earth Fault" , LSP-IE Research Laboratory, 2012
- 4-Manokaran T, karpagam V. "Performance of Distance Relay Estimation in Transmission Line with UPFC". International Journal of Computer and Electrical Engineering, 2010
- 5-Zhou X.Y, Wang H.F, Aggarwal R.K, Beaumont P. "The Impact Of STATCOM On Distance Relay". 15th PSCC, 2005
- 6-Dash P.K, Pradhan A.K, Panda G. "Distance Protection in the Presence of UPFC", Electric Power Systems Research ,1999
- 7-Maturu S, Shenoy U.J . "Impact of STATCOM and SSSC Based Compensation on Transmission Line Protection". 16th NATIONAL POWER SYSTEMS CONFERENCE, 2010
- 8-Ziegler G. "Numerical Distance Protection". SIEMENS,1999
- 9-Dash P.K, Pradhan A.K ,Panda G, Liew A.C "Digital Protection of Power Transmission Lines in the Presence of Series Connected Facts Devices" IEEE, 2000.
- 10-Zhang W.H, Lee S.J, Choi M.S, "Setting Considerations of Distance Relay for Transmission Line with STATCOM" Journal of Electrical Engineering & Technology Vol. 5, No. 4, pp. 522~529, 2010