مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (33) العدد (6) 2011
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (33) No. (6) 2011

دراسة تأثير المعوض التسلسلي المتواقت الساكن (SSSC) على نظام القدرة الكهربائية

الدكتور فيصل شعبان*
الدكتور حسام شاهين**

(تاريخ الإيداع 9 / 8 / 2011. قُبِل للنشر في 9 / 10 / 2011)

□ ملخّص □

تؤدي أجهزة نقل التيار المتناوب المرنة (Flexible AC Transmission Systems - FACTS) – التي تعتمد في مبدأ عملها على إلكترونيات القدرة ذات الفصل والوصل السريع– دوراً كبيراً في التحكم بسريان الاستطاعة في شبكات نقل الطاقة الكهربائية. الأمر الذي يمكننا من التحكم بهذه الشبكات بشكل أكثر فعالية سواء في الحالة المستقرة أو في الحالة الديناميكية، مما يؤدي إلى زيادة إمكانية تحميل هذه الشبكات، وزيادة قدرة التمرير فيها، وزيادة أمانها ، وتحسين استقرار الجهد لهذه الشبكات وتحسين الاستقرار العابر والديناميكي فيها. يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير أحد أجهزة الـFACTS وهو جهاز المعوض التسلسلي المتواقت الساكن (Static Synchronous Series Compensator SSSC) على نظام الطاقة الكهربائية في الحالات المستقرة والديناميكية.

ومن المحاكاة التي تمت تَبَيَّنَ أن لجهاز المعوض التسلسلي المتواقت الساكن القدرة على التحكم بسريان الاستطاعة وبالتالي زيادة قدرة تمرير خطوط النقل دون التأثير على البارامترات الأخرى لخطوط النقل.

الكلمات المفتاحية: نظام الطاقة الكهربائية، المعوض التسلسلي المتواقت الساكن، قدرة التمرير، الحالة المستقرة، الحالة الديناميكية.

* أستاذ مساعد – قسم هندسة الطاقة – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية.
** مدرس – قسم هندسة الطاقة – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية.

مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (33) العدد (6) 2011
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (33) No. (6) 2011

Studying the Effects of Static Synchronous Series Compensator (SSSC) on the Electrical Power System

Dr. Faisal Shaban*
Dr. Husam Shaheen**

(Received 9 / 8 / 2011. Accepted 9 / 10 / 2011)

□ ABSTRACT □

Flexible AC Transmission Systems (FACTS) devices incorporating high speed power electronic switches play a major role in controlling the power flow in power system networks. This role enables us to control these networks more effectively for both steady-state and dynamic operations, resulting in the possibility of increasing load-ability, transfer capability, security of these networks as well as improving voltage, transient and dynamic stabilities. This research aims to study the effects of Static Synchronous Series Compensator (SSSC)- one of the FACTS devices- on the electrical power system for both steady-state and dynamic operations.

From simulation results, we have seen that the SSSC device has the capability of controlling power flow and thus increasing the transfer capability of transmission lines without affecting the other parameters of transmission lines.

Keywords: Power System, Static Synchronous Series Compensator, Transfer Capability, steady-state and dynamic.

***Associate Professor, Electrical Power Department, Faculty Mechanical & Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.**
****Assistant Professor, Electrical Power Department, Faculty Mechanical & Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.**

مقدمة:

لمواجهة الطلب المتزايد على الطاقة الكهربائية عالمياً، دخلت في نظام الطاقة الكهربائي مجموعات جديدة ومتنوعة من محطات التوليد سواء تلك التي تعتمد على مصادر الطاقات المتجددة مثل الطاقة الشمسية، الريحية، الجوفية، المد والجزر، وطاقة النفايات الحيوية وغيرها، أو تلك التي تعتمد على الطاقات التقليدية. تنتشر هذه المحطات في أماكن مختلفة ومتباعدة من نظام الطاقة تبعاً للعوامل البيئية والجغرافية وتوافر مصادر الطاقة المذكورة. وقد أدت زيادة الطلب على الطاقة من جهة و زيادة التوليد من جهة أخرى إلى تشغيل شبكات نقل الطاقة الكهربائية الموجودة في ظروف تشغيل أكثر تعقيداً وقريبة من حدود استقرار هذه الشبكات. حيث واجهت هذه الشبكات مشاكل كبيرة في تلبية متطلبات التشغيل الآمن والموثوق به، وأصبحت غير قادرة في الوضع الحالي على تلبية تلك المتطلبات.

للتغلب على هذه المشكلة طرحت عدة حلول منها إنشاء شبكات نقل جديدة أو تشغيل شبكات النقل الحالية بأعلى كفاءة ممكنة. لكن خيار إنشاء شبكات نقل جديدة مقيد بعدد من القيود، كالقيود الاقتصادية والبيئية والسياسية؛ ولذلك تم استبعاد هذا الخيار. أما بالنسبة للخيار الثاني فإن تشغيل شبكات النقل الموجودة بأعلى كفاءة ممكنة مقيد أيضاً بعدد من القيود مثل حدود التشغيل الحرارية المسموحة، وحدود استقرار الجهد، وحدود استقرار التوليد وكذلك حدود الأمان.

ولحسن الحظ ومع تطور إلكترونيات القدرة الكهربائية فقد ظهر في عام 1988 مجموعة جديدة من أجهزة التحكم في الشبكات الكهربائية التي تتيح إمكانية تشغيل الشبكات الموجودة بكفاءة عالية دون حدوث تجاوز لحدود التشغيل المذكورة عن طريق التحكم بسريان الاستطاعة في هذه الشبكات، وقد أطلق على هذه المجموعة اسم أنظمة نقل التيار المتناوب المرنة (Flexible AC Transmission Systems - FACTS) [1-3]

يؤدي جهاز المعوض التسلسلي المتواقت الساكن (Static Synchronous Series Compensator SSSC) [4]،[5] الذي يعد واحداً من أجهزة الـFACTS المهمة دوراً كبيراً في التحكم بسريان الاستطاعة وبالتالي في تغيير حدود التشغيل المسموحة للشبكات الكهربائية وهذا يؤدي بدوره إلى تشغيل الشبكات الحالية بكفاءة عالية لمواجهة الطلب المتزايد على الطاقة من جهة وتأخير بناء شبكات جديدة مكلفة اقتصادياً وبيئياً من جهة ثانية.

أهمية البحث وأهدافه:

يواجه استخدام جهاز المعوض التسلسلي المتواقت الساكن في نظام الطاقة للتحكم بسريان الاستطاعة صعوبات كبيرة تتمثل في ربط هذا الجهاز مع الشبكة من جهة والتحكم به حتى يقوم بأداء الوظائف المصمم للقيام بها بشكل فعال من جهة أخرى، وبالتالي تجب دراسة هذه الصعوبات وتحليلها في جميع حالات تشغيل نظام الطاقة بمعالجة المسائل الآتية:

1- دراسة نمذجة جهاز المعوض التسلسلي المتواقت الساكن بشكل رياضي وبرمجي، ومحاكاة عمله ودراسته في حالة العمل المستقر لنظام الطاقة. أي إيجاد النموذج الرياضي المكافئ لهذا الجهاز عند ربطه بالشبكة، واستخدام هذا النموذج في معادلات سريان الاستطاعة، وبالتالي التحقق من قدرة هذا الجهاز على التحكم في سريان الاستطاعة الأمر الذي يساعد في تغيير حدود تشغيل النظام.

2- دراسة نمذجة جهاز المعوض التسلسلي المتواقت الساكن مع نظام التحكم المرتبط به، ومحاكاة عمله عند ربطه بالشبكة الكهربائية، ودراسة بارامترات هذا الجهاز المختلفة من ممانعات ومقاومات وتيارات وجهود.

طرائق البحث ومواده:

يُعَدُّ المعوض التسلسلي المتواقت الساكن أحد أجهزة الـFACTS التي تعتمد على قالبات منبع الجهد والتي يمكن أن تقدم تعويضاً تحريضياً أو سعوياً للشبكة بشكل منفصل عن تيار خط النقل. بشكل عام إن الـSSSC تتألف من قالبة مربوطة على التفرع مع مكثف توصل على التسلسل مع خط النقل عن طريق محول. يستخدم المحول التسلسلي لحقن جهد منفصل متحكم به بشكل متعامد مع تيار خط النقل من أجل زيادة أو إنقاص الطاقة الردية الكلية عبر خط النقل؛ وهكذا يمكن التحكم بالطاقة المنقولة. يمكن اعتماد نموذج معبر عن الـ SSSC وكأنه منبع جهد تسلسلي متحكم في مطاله وزاوية طوره أو كأنه ممانعة خطية متحكم بها بشكل فعال، وحيث أن الـ SSSC لها تركيبة قالبة منبع الجهد فإن المكثف يستخدم للحفاظ على الجهد المستمر مما يعطي الـ SSSC القدرة على زيادة أو إنقاص الطاقة المنقولة عبر خط النقل كجزء ثابت من الطاقة الكلية وبشكل مستقل عن زاوية الطور. وكنتيجة لقدرة الـ SSSC على توليد الطاقة الردية أو امتصاصها فإنها تجنب نظام الطاقة المحيط حدوث ظاهرة الطنين المغناطيسي التقليدية [4],[5].

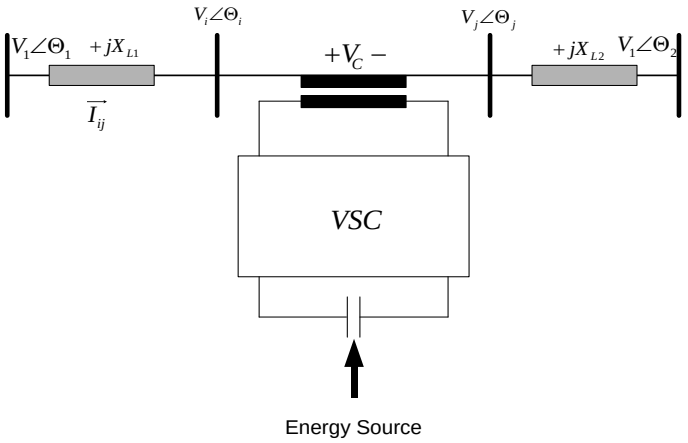
يمكن نمذجة الـ SSSC كمنبع جهد متناوب تسلسلي ذي مطال متغير متحكم به يوصل على التسلسل مع خط النقل، وفي هذه الحالة يحقن خرج منبع الجهد المتناوب الذي يمثل الـ SSSC على التعامد مع تيار خط النقل، وهذا الجهد المحقون يمكن أن يمثل بمفاعلة تحريضية أو سعوية توصل على التسلسل مع خط النقل، ومن التحكم بهذه المفاعلة فإن الـSSSC يمكن أن تؤثر على سريان الاستطاعة الكهربائية في خط النقل.

يعمل جهاز الـSSSC في الحالة المستقرة بشكل مشابه لعمل مبدل فرق الطور الستاتيكي، حيث إنه يقوم بحقن الجهد بشكل متعامد مع أحد جهود نهايات خط النقل من أجل تنظيم سريان الاستطاعة الفعلية. على أية حال، فإن جهاز الـSSSC متحكم أكثر دقة من مبدل فرق الطور لأنه لا يستهلك استطاعة ردية من نظام الـAC، ولديه مزودات الاستطاعة الردية الخاصة به على هيئة مكثفات DC. هذه المواصفات مجتمعة تجعل الـSSSC قادر على تنظيم الاستطاعة الردية أو مطال جهود العقد بالإضافة إلى الاستطاعة الفعلية.

نمذجة المعوضات التسلسلية المتواقتة الساكنة [2]،[4],[5]:

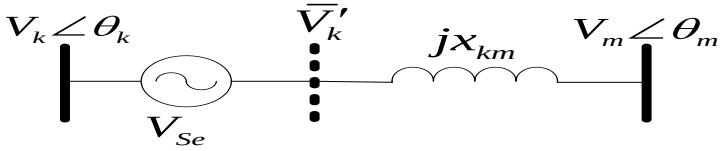
إن استخدام قالبات منبع الجهد يمكن أن يتم بثلاث طرق: 1- تركيبة توصل على التسلسل مع خط النقل، 2- تركيبة توصل على التفرع مع خط النقل، 3- تركيبة تسلسلية – تفرعية في نفس الوقت مع خط النقل. تدعى التركيبة التسلسلية التي توصل مع خط النقل بالمعوضات التسلسلية المتواقتة الساكنة (SSSC)، وبغض النظر عن حالة عملها فإنه يمكن نمذجتها كمنبع جهد تسلسلي مثالي V_{Se} موصول على التسلسل مع مفاعلة خط النقل X_L.

يمثل الشكل (1) التمثيل التخطيطي لجهاز الـ SSSC حيث تربط على التسلسل مع خط النقل عبر محولة تسلسلية، وتتحكم بسريان الاستطاعة وتحسين استقرار الجهد و التواقت بشكل أساسي.



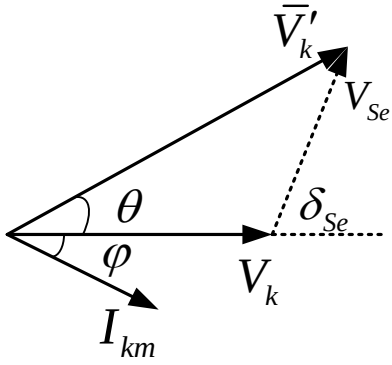
الشكل(1) التمثيل التخطيطي لجهاز الـ SSSC عند وصله مع خط نقل

يمكن نمذجة الـSSSC إما كمنبع جهد تسلسلي ذي مطال متغير متحكم به أو كممانعة خطية متحكم بها بشكل فعال. الشكل (2) يبين الدارة المكافئة لجهاز الـSSSC حيث تم نمذجة هذا الجهاز في هذه الحالة بمنبع جهد متناوب تسلسلي ذي مطال V_{Se} متحكم به على التسلسل مع ممانعة خط النقل.



الشكل 2 الدارة المكافئة لجهاز الـ SSSC عند وصله مع خط نقل

كما يوضح الشكل (3) المخطط الشعاعي لعمل هذا الجهاز:



الشكل(3) المخطط الشعاعي لعمل جهاز الـ SSSC

والجهد التسلسلي المحقون يعبر عنه بالعلاقة الآتية:

$$\dot{V}_{Se} = r.V_k.e^{j\delta_{Se}} \qquad (1)$$

حيث إن :

$r \cdot V_k = V'_k$ – مطال الجهد التسلسلي المحقون.

δ_{Se} – زاوية الجهد التسلسلي المحقون وتتراوح قيمتها بالمجال $0 < \delta_{Se} < 2\pi$.

وكما هو واضح من المخطط الشعاعي فإن زاوية طور الجهد المتوسط ومطاله $\overline{V}'_k$ تحدد من الجهد التسلسلي

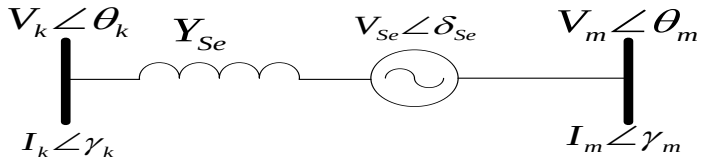
المحقون، لذلك فهي تؤثر في التيار وسريان الاستطاعة في النظام. التطبيقات العامة لجهاز الـSSSC هي التحكم بسريان الاستطاعة وتحسين استقرار الجهد وتأمين التواقت. ولأن الـSSSC يمكن أن تعمل كتحريضية أو كسعة فإنها تعطي مرونة أكبر في التحكم بسريان الاستطاعة.

1- نمذجة الـSSSC في الحالة المستقرة والحالة الديناميكية لنظام الطاقة:

1-1-الحالة المستقرة (نموذج سريان الاستطاعة) [6]، [3] :

لحل مشكلة سريان الاستطاعة بوجود جهاز الـSSSC في خط النقل فإنه يجب إيجاد السماحية المكافئة لهذا الجهاز عند وصله مع خط النقل وإدخال هذه السماحية في مصفوفة سماحيات العقد للشبكة.

يمثل الشكل (4) نموذج سريان الاستطاعة لجهاز الـ SSSC في الحالة المستقرة:



الشكل (4) نموذج جهاز الـ SSSC في الحالة المستقرة (نموذج سريان الاستطاعة)

منبع الجهد التسلسلي ثلاثي الطور للـ SSSC يعبر عنه بالعلاقة:

$$\dot{E} = V_{Se}\cdot(\cos\delta_{Se} + j\sin\delta_{Se}) \qquad (2)$$

إن المطال وزاوية الطور في هذا النموذج لجهاز الـSSSC يتم ضبطه باستخدام خوارزمية تكرارية مناسبة لتحقق سريان الاستطاعة الفعلية والردية المطلوب عبر الـSSSC.

بشكل مشابه لبقية أجهزة الـFACTS فإنه يوجد حدود أصغرية وأعظمية لمطال الجهد V_{Se}، وهو بدوره تابع لسعة الـSSSC. أما زاوية الطور للجهد التسلسلي δ_{Se} فيمكن أن تأخذ أية قيمة بين الـ(0) و الـ( ) ردايان.

اعتماداً على الدارة المكافئة الموضحة في الشكل (4)، وبافتراضات مناسبة للبارامترات ثلاثية الطور، فإن معادلة السماحيات تكتب بالصيغة الآتية:

$$\begin{bmatrix}\dot{I}_k\\ \dot{I}_m\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\dot{Y}_{Se} & -\dot{Y}_{Se} & -\dot{Y}_{Se}\\ -\dot{Y}_{Se} & \dot{Y}_{Se} & \dot{Y}_{Se}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{V}_k\\ \dot{V}_m\\ \dot{E}_{Se}\end{bmatrix} \qquad (3)$$

حيث تعرف الكميات التالية كما يأتي:

$$\dot{I}_m = [I_m^a\angle\gamma_m^a, I_m^b\angle\gamma_m^b, I_m^c\angle\gamma_m^c]^t$$
$$\dot{V}_m = [V_m^a\angle\theta_m^a, V_m^b\angle\theta_m^b, V_m^c\angle\theta_m^c]^t$$
$$\dot{E}_{Se} = [V_{Se}^a\angle\delta_{Se}^a, V_{Se}^b\angle\delta_{Se}^b, V_{Se}^c\angle\delta_{Se}^c]^t$$

وبالتالي:

$$\dot{Y}_{Se} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{Se}^{a} & 0 & 0 \\ 0 & \dot{Y}_{Se}^{b} & 0 \\ 0 & 0 & \dot{Y}_{Se}^{c} \end{bmatrix}$$

من الشكل (2) نجد أن سريان الاستطاعات الفعلية والردية الكلية في خط النقل مع وجود جهاز الـSSSC تعطى كما يلي:

$$P_{km} = (1+\varepsilon).\frac{V_k.V_m}{x_{km}}.\sin(\theta_k - \theta_m) \qquad (4)$$

$$P_{mk} = -P_{km}$$

$$Q_{km} = (1+\varepsilon).\frac{V_k}{x_{km}}(V_k - V_m.\cos(\theta_k - \theta_m)) \qquad (5)$$

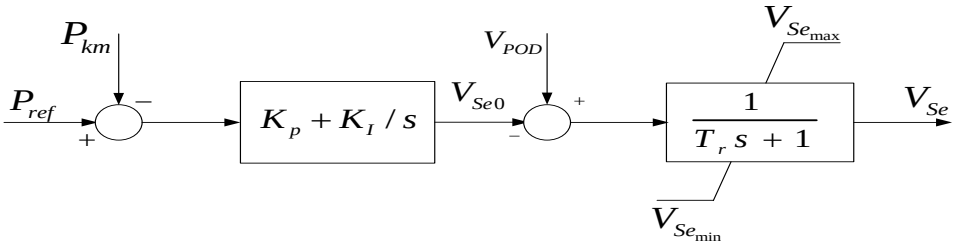
$$Q_{mk} = (1+\varepsilon).\frac{V_m}{x_{km}}(V_m - V_k.\cos(\theta_k - \theta_m)) \qquad (6)$$

حيث إن: ε – ثابت قيمته تعطى بالعلاقة الآتية

$$\varepsilon = \frac{V_{Se}}{\sqrt{V_k^2 + V_m^2 - 2V_kV_m\cos\theta_{km}}}$$

1-2- الحالة غير المستقرة (النموذج الديناميكي):

النموذج الديناميكي للـSSSC مبين بالشكل (5) مع المعادلات التفاضلية التي تصف السلوك الديناميكي للـSSSC **[7-9]**.



الشكل(5) نموذج جهاز الـSSSC في الحالة الديناميكية

من هذا الشكل نستنتج أن خرج منبع الجهد المتناوب الذي يمثل الـSSSC يعطى كما يأتي:

$$\dot{V_{Se}} = (V_{Se0} + V_{POD} - V_{Se})/T_r \qquad (7)$$

الدخل V_{Se0} يحدد وضع تشغيل الـSSSC والذي بدوره يحدد قيمة جهد الـSSSC في الحالة المستقرة. هناك ثلاثة أوضاع تحكم مختلفة تطبق على الـSSSC:

- الجهد الثابت
- المفاعلة الثابتة
- سريان الاستطاعة الثابت

من أجل كل نموذج تحكم، فإن جهد الدخل V_{Se0} يعبر عنه كالآتي:

a) **الجهد الثابت:** مطال الجهد V_{Se} في الحالة المستقرة يبقى ثابتاً بشكل مستقل عن تيار الخط، وبذلك يكون الدخل $V_{Se0} = const$

b) **المفاعلة الثابتة:** مطال الجهد V_{Se} يتغير بشكل متناسب مع تيار الخط مع المحافظة على قيمة الممانعة الكلية ثابتة (المفاعلة في الحقيقة) على طول خط النقل في نقطة تركيب الـSSSC. وفي وضع التشغيل هذا فإن الدخل V_{Se0} يعطى بالعلاقة:

$$V_{Se0} = kx_{km}.I_{km} \qquad (8)$$

حيث k درجة التعويض التسلسلي، I_{km} مطال تيار الخط، و x_{km} مفاعلة خط النقل.

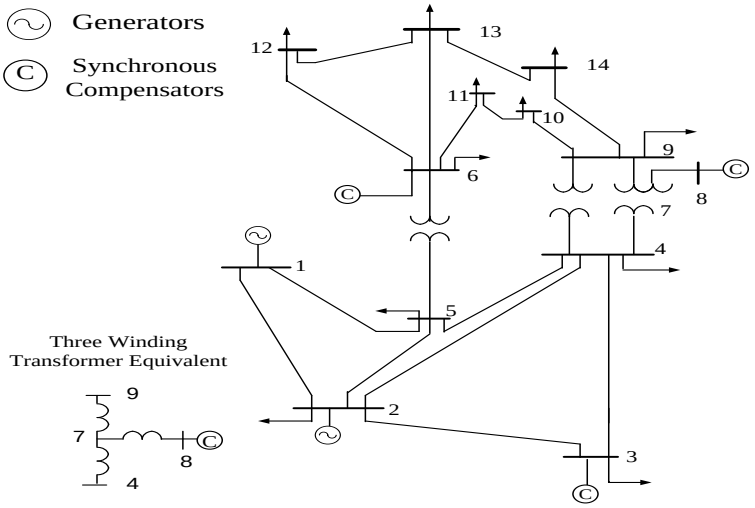
c) **سريان الاستطاعة الثابت (وضع التحكم بسريان الاستطاعة الثابت):** في هذا الوضع الجهد V_{Se0} هو خرج المتحكم التناسبي– التكاملي المستخدم للتحكم بسريان الاستطاعة في أنظمة النقل، كما هو موضح في الشكل (5) هناك إستراتيجيتان مطبقتان من اجل وضع التحكم بسريان الاستطاعة الثابت:

- **استطاعة الخط الثابتة:** إستراتيجية التحكم هذه تستخدم للحفاظ على سريان الاستطاعة في خط النقل ثابتاً في مكان تركيب الـSSSC.
- **الزوايا الثابتة:** إستراتيجية التحكم هذه تستخدم للتحكم بسريان الاستطاعة في خطوط النقل المتوازية.

النتائج والمناقشة:

1- تأثير جهاز المعوض التسلسلي المتواقت الساكن على نظام الطاقة في الحالة المستقرة:

إننا في الدراسة والتحليل والتوضيح لتأثير المعوضات التسلسلية المتواقتة الساكنة (SSSC) على سريان الاستطاعة في الحالة المستقرة لنظام الطاقة الكهربائية، سوف نعالج سريان الاستطاعة في نظام طاقة كهربائي مرجعي (نظام IEEE 14–عقدة (IEEE 14-bus system) قبل تركيب المعوضات التسلسلية المتواقتة الساكنة (SSSC) وبعده. النظام IEEE 14–عقدة (IEEE 14-bus system) يتألف من 5 مولدات، 4 محولات، 14 عقدة، 16 خط نقل و11 حمل كما هو موضح في الشكل (6)، وبارامترات هذا النظام (المولدات، المحولات، خطوط النقل، الأحمال المركبة) مأخوذة من المرجع[10]:



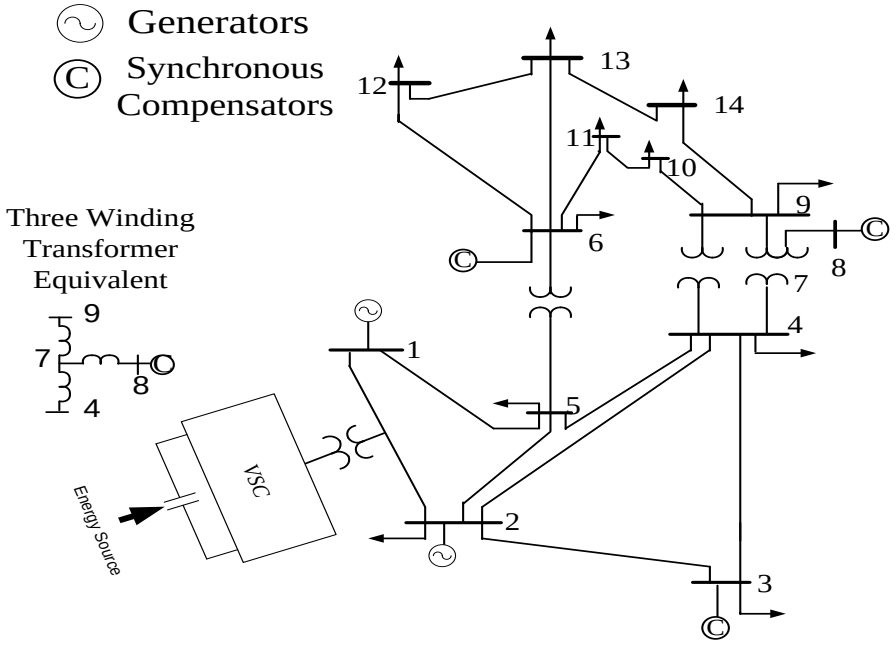
الشكل(6) يبين نظام IEEE 14– عقدة قبل تركيب الـ (SSSC).

الدراسة أو المحاكاة تمت باستخدام بيئة الماتلاب (Matlab 7)، وذلك بعد نمذجة المعوضات التسلسلية المتواقتة الساكنة (SSSC) في الحالة المستقرة لنظام الطاقة الكهربائية، واستخدام خوارزمية نيوتن رافسون في حل سريان الحمولة بوجود الـ(SSSC).

لقد اعتمدنا في نمذجة الـ(SSSC) النموذج الذي يعتبر أن الـ(SSSC) هو عبارة عن منبع جهد متناوب يمكن التحكم في مطاله وزاوية طوره، وبالتالي فإن متغيرات التحكم للـ(SSSC) هي مطال الجهد V_{se} وزاوية الطور δ_{se}، ومن متغيرات التحكم المذكورة زيادةً أو نقصاناً فإنه يمكن التحكم بسريان الاستطاعة في خط النقل الذي تركب فيه الـ(SSSC)، ومن نمذجة هذا النظام تبين لنا أنه قبل تركيب جهاز الـSSSC كان سريان الاستطاعة الفعلية في الخط رقم 11 الذي يربط بين العقدتين 1 و2 هو $1.932\ [p.u.]$، وبعد تركيب الـ(SSSC) في ذاك الخط ومن التحكم في سريان الاستطاعة في هذا الخط كما هو مبين بالشكل(7)، فإن سريان الاستطاعة في جهاز الـSSSC قد عدّل سريان الاستطاعة في الشبكة الأساسية، وأهم ما يمكن ملاحظته في هذه الشبكة هو زيادة قدرها 20% في الاستطاعة الفعلية السارية من العقدة 1 إلى القعدة 2 من خلال خط النقل 11. وطالما أن جهاز الـSSSC يوّلد استطاعة ردية ذاتية فإن الاستطاعة الردية المعوضة في الخط رقم 11 تقدر بـ21%. هنا متغيرات التحكم للـ(SSSC) تتمثل بمطال الجهد V_{se} وزاوية الطور δ_{se} وقيمها تعطى كما يأتي:

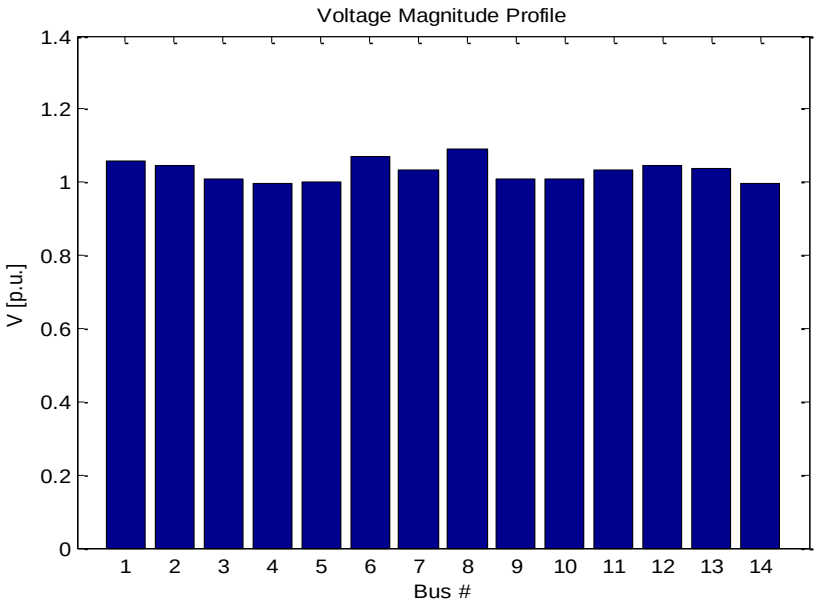
V_{se} في المجال $0.001 \le V_{Se} \le 0.2$

δ_{se} في المجال $0 \le \delta_{Se} \le 2\pi$

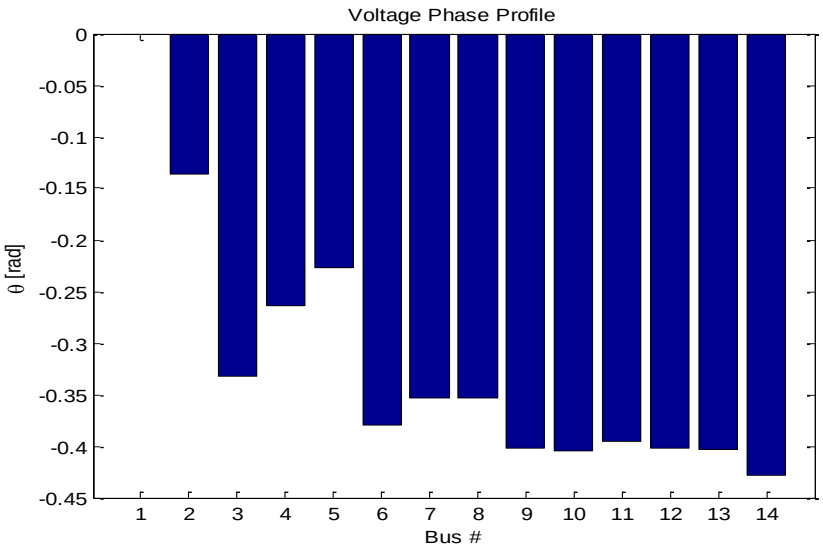


الشكل (7) يبين نظام IEEE 14-عقدة بعد تركيب الـ(SSSC).

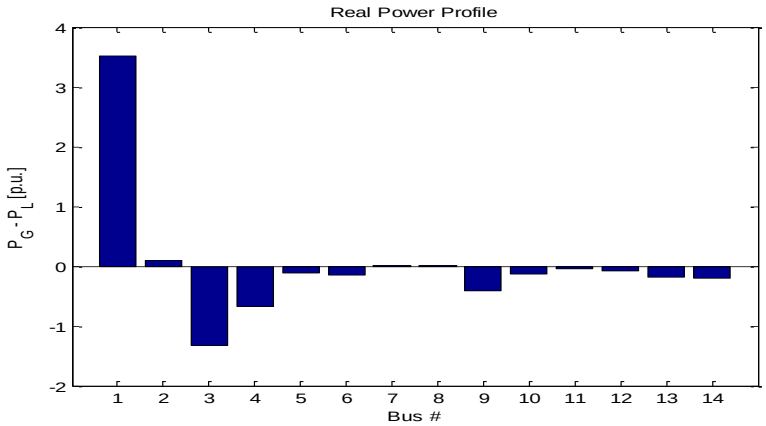
يستخدم جهاز SSSC لتثبيت الاستطاعة الفعلية التي تسري في الخط رقم 11 من العقدة 1 إلى العقدة 2 على قيمة معينة؛ وعلى سبيل المثال القيمة التالية: $P = 2.415\ [p.u.]$: هنا قيم مطال الجهد وزاوية الطور لخرج جهاز الـSSSC هي كما يلي: $V_{Se} = 0.2\ [p.u.]$ $\delta_{Se} = 85.7^{\circ}$ وممانعة جهاز الـSSSC هي $X_{Se} = 0.1\ [p.u.]$. بعد تركيب الـ(SSSC) مطالات جهود العقد وزوايا هذه الجهود مبينة بالشكلين (8)، (9)، والشكلان (10)، (11) يبينان لنا فرق الاستطاعة الفعلية والردية المولدة والمستهلكة في النظام الكهربائي المدروس.



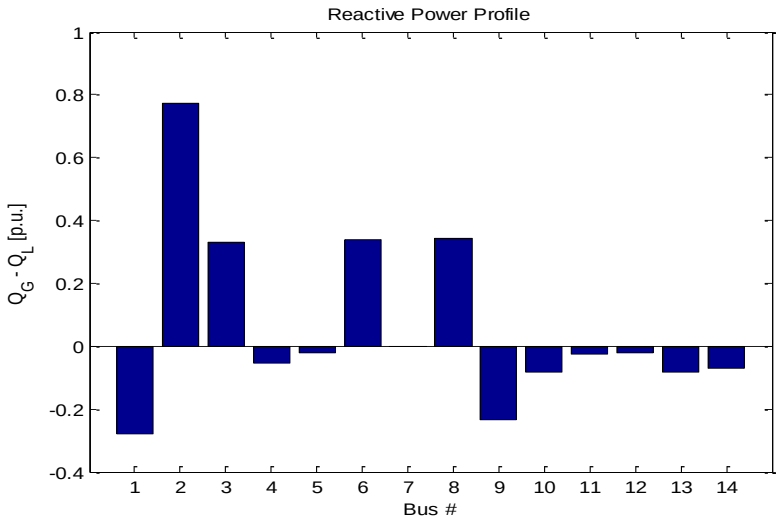
الشكل (8) يبين مطالات جهود العقد في نظام IEEE 14-عقدة بعد تركيب الـ(SSSC).



الشكل (9) يبين زوايا جهود العقد في نظام IEEE 14-عقدة بعد تركيب الـ(SSSC).



الشكل (10) يبين فرق الاستطاعة الفعلية المولدة والمستهلكة في نظام IEEE 14-عقدة بعد تركيب الـ(SSSC)



الشكل (11) يبين فرق الاستطاعة الردية المولدة والمستهلكة في نظام IEEE 14-عقدة بعد تركيب الـ(SSSC)

2- تأثير جهاز المعوض التسلسلي المتواقت الساكن على نظام الطاقة في الحالة غير المستقرة:

وللدراسة والتحليل والتوضيح لتأثير المعوضات التسلسلية المتواقتة الساكنة (SSSC) على استقرار نظام الطاقة الكهربائية في الحالة الديناميكية، سوف ندرس استجابة نظام قدرة كهربائي مزود بهذا الجهاز لحدوث عطل ثلاثي الطور إلى الأرض، وذلك لأن هذا العطل من أخطر الأعطال التي تصيب الشبكة الكهربائية.

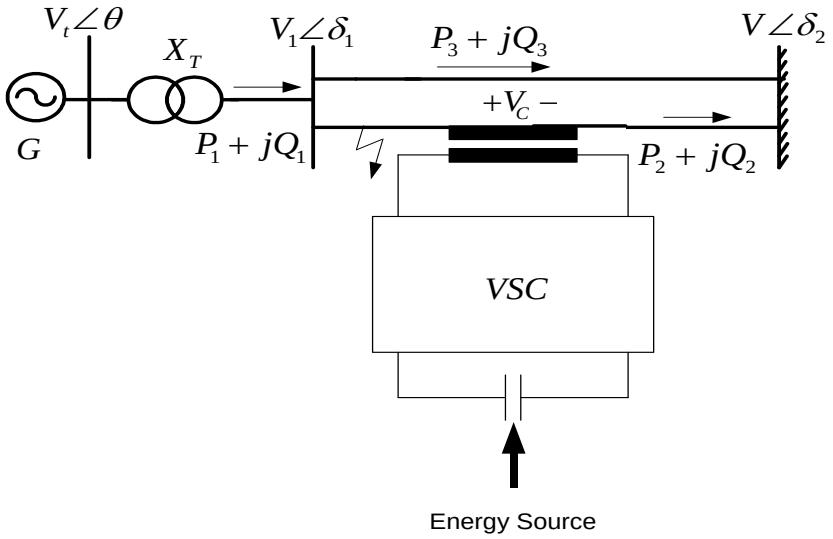
وسنعتمد في الدراسة أو المحاكاة استخدام برنامج النمذجة والمحاكاة PSCAD/EMTDC. وذلك بنمذجة المعوضات التسلسلية المتواقتة الساكنة (SSSC) في الحالة الديناميكية لنظام الطاقة الكهربائية لنتمكن من دراسة الاستجابة الديناميكية للنظام بوجود جهاز (SSSC). لقد اعتمدنا في نمذجة الـ(SSSC) في هذه النظام على النموذج الديناميكي المذكور سابقاً.

حالة عطل ثلاثي الطور:

في هذه الحالة، نفترض حدوث عطل ثلاثي الطور بفترة زمنية 100 ms إلى الأرض حسب المراحل الآتية:

المرحلة الأولى: يكون النظام في حالة عمل طبيعية قبل حدوث العطل.

المرحلة الثانية: عند اللحظة $t = 1$ sec يحدث عطل ثلاثي الطور إلى الأرض في الخط رقم 2 كما هو مبين في الشكل (12).



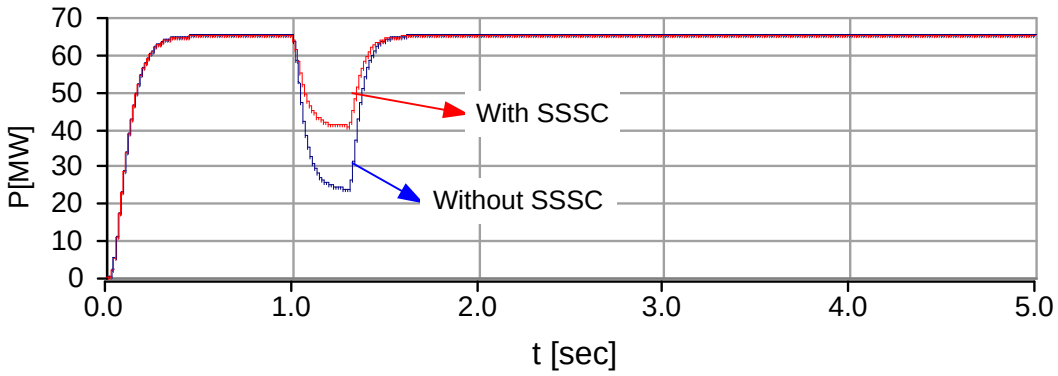
الشكل (12) مخطط نظام الطاقة المدروس مع وجود جهاز الـ(SSSC) عند حدوث عطل ثلاثي الطور

المرحلة الثالثة: عند اللحظة $t = 1.3$ sec يتم إزالة العطل.

المرحلة الرابعة يصبح النظام في حالة عمل ما بعد العطل.

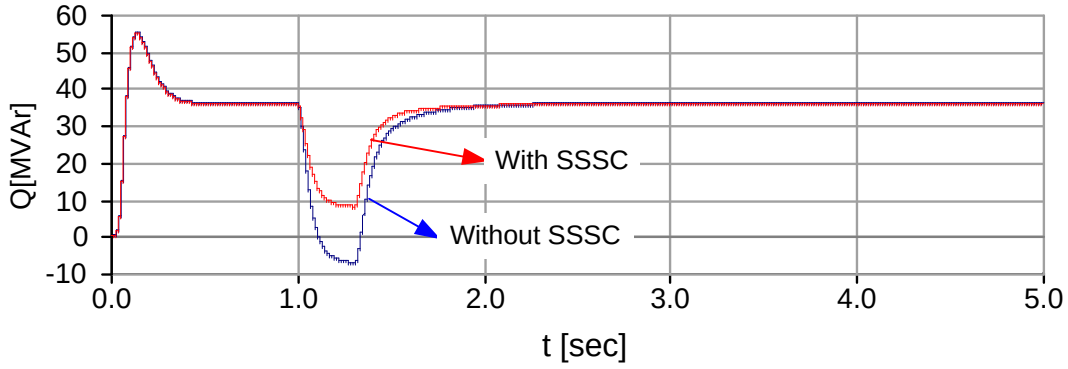
تظهر نتائج المحاكاة في الأشكال الآتية:

الشكل (13) يظهر استجابة الاستطاعة الفعلية للنظام قبل العطل وخلاله وبعده:



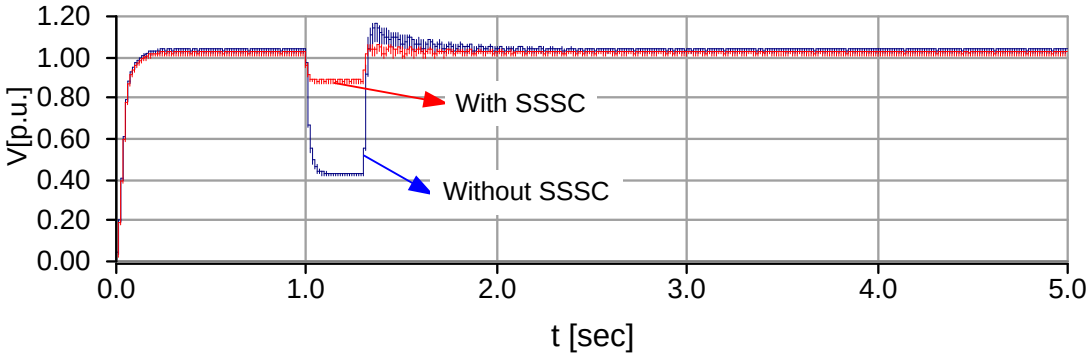
الشكل (13) استجابة الاستطاعة الفعلية للنظام عند حدوث عطل ثلاثي الطور مع الأرض في الخط رقم 2.

والشكل (14) يظهر استجابة الاستطاعة الردية للنظام قبل حدوث العطل وخلاله وبعده:



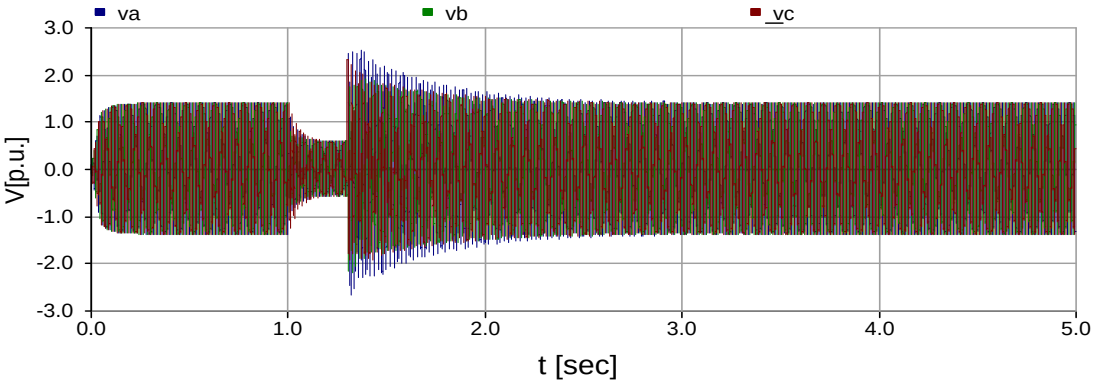
الشكل (14) استجابة الاستطاعة الفعلية للنظام عند حدوث عطل ثلاثي الطور مع الأرض في الخط رقم 2.

أما الشكل (15) فيظهر استجابة جهد خط النقل في النظام قبل حدوث العطل وخلاله وبعده:



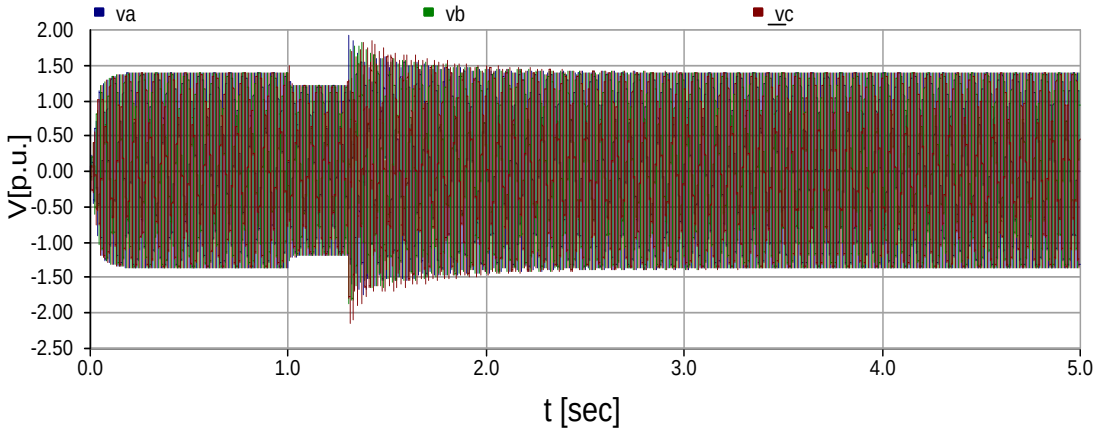
الشكل (15) استجابة جهد خط النقل في النظام عند حدوث عطل ثلاثي الطور مع الأرض في الخط رقم 2.

والشكل (16) يظهر استجابة جهود أطوار المنبع الثلاثة في النظام قبل وأثناء وبعد حدوث العطل دون وجود الـSSSC:



الشكل (16) استجابة جهود أطوار المنبع الثلاثة في النظام عند حدوث عطل ثلاثي الطور مع الأرض في الخط رقم 2.

الشكل (17) يظهر استجابة جهود أطوار المنبع الثلاثة في النظام قبل حدوث العطل وخلاله وبعده مع وجود الـ SSSC:



الشكل (17) استجابة جهود أطوار المنبع الثلاثة في النظام عند حدوث عطل ثلاثي الطور مع الأرض في الخط رقم 2.

من نتائج المحاكاة نستنتج أن لجهاز المعوض التسلسلي المتواقت الساكن (SSSC) قدرة كبيرة على تحسين استقرار نظام الطاقة الكهربائية في الحالة الديناميكية سواء الاستقرار العابر أو الاستقرار الديناميكي (تخامد اهتزازات نظام الطاقة). وهذا يظهر من استجابة كل من الاستطاعة الفعلية والردية وجهد الخط عند حدوث عطل ثلاثي الطور إلى الأرض.

الاستنتاجات والتوصيات:

لقد تم في هذا البحث دراسة تأثير أحد أجهزة نقل التيار المتناوب المرنة وهو جهاز المعوض التسلسلي المتواقت الساكن (SSSC) على نظام الطاقة في الحالة المستقرة، حيث تم نمذجة هذا الجهاز على شكل منبع جهد مُتَحَكَّمٌ بمطاله وزاوية طوره حتى يمكن حساب سريان الاستطاعة في شبكات النقل عند وجود هذا الجهاز. ومن المحاكاة التي تمت تبين أن لهذا الجهاز القدرة على التحكم بسريان الاستطاعة وبالتالي زيادة قدرة تمرير خطوط النقل دون التأثير على البارامترات الأخرى لخطوط النقل.

يمكن تطوير هذا البحث لإيجاد المكان الأمثل لتركيب جهاز المعوض التسلسلي المتواقت الساكن (SSSC) فيه والقيم المثلى لبارامترات هذا الجهاز، و إجراء دراسة بحثية في تصميم نظام التحكم المناسب لهذا الجهاز، ودراسة تأثيره على استقرار نظام القدرة الكهربائية.

المراجع:

[1] HINGORANI, N. G.; GYUGYI, L. *Understanding FACTS– Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems.* IEEE Press, 2000, pp 432.

[2] SONG, Y. H.; JOHNS, A. T. *Flexible AC Transmission System (FACTS)*, IEE Power and Energy Series 30, 1999, pp 592.

[3] ENRIGUE, A.; FUERTE-ESGUIVEL, C. R.; PEREZ, H. A.; CAMACHO C. A. *FACTS Modeling and Simulation in Power Network*, John Wiley & Sons, LTD. 2004, pp 420.

[4] GYUGYI, L.; SHAUDER, C. D.; SEN, K. K. *Static synchronous series compensator: A solid-state approach to the series compensation of transmission lines*, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 12, Jan.1997, pp. 406–417.

[5] SEN, K. K. *SSSC- Static Synchronous Series Compensator: Theory, Modeling and Application, IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 13, No. 1, Jan.1998, pp 241-246.

[6] ZHAO, J.; GUO, J.; ZHOU, X. *Modeling of Static Synchronous Series Compensator in Newton Power Flow Calculation in PSASP*, 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, Dalian, China, pp.1-5.

[7] KUMAR, L.; GHOSH, S. A. *Modeling and control design of a static synchronous series compensator*, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, No. 4, pp. 1448-1453, 1999.

[8] HAN, B.; MOON, S.; KARADY, G. *Dynamic Characteristic Analysis of Multi-Bridge PWM Inverter for SSSC*, Proc. IEEE Summer Power Meeting, 2001, pp1618-1623.

[9] SEN, K. K. *STATCOM-STATic Synchronous Compensator: Theory, Modeling, and Applications*, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol.2, 1999, pp. 1177–1183.

[10] FRERIS, L. L.; SASSON, A. M. *Investigation on the Load Flow Problem*, Proc. of IEE, Vol. 1968, 115, pp. 1459–1470.