

دراسة تأثير المكثفات التسلسلية المتحكم بها ثايرستورياً (TCSC) على زيادة القدرة التمريرية لخطوط النقل

الدكتور هيثم دغرور*
الدكتور حسام شاهين**
رشا صبيحة***

(تاريخ الإيداع 17 / 6 / 2012. قُبل للنشر في 4 / 10 / 2012)

□ ملخص □

تعد أنظمة نقل التيار المتناوب المرنة (Flexible AC Transmission Systems – FACTS) من أهم الحلول المقترحة للتحكم في سريان الاستطاعة في خطوط النقل وتنظيم جهود عقد نظام الطاقة الكهربائية، مما ينتج عنه إمكانية زيادة القدرة التمريرية لخطوط النقل، تقليل الضياعات في هذه الخطوط وتحسين الاستقرار لنظم الطاقة الكهربائية.

يعدّ جهاز المكثفات التسلسلية المقادة ثايرستورياً (TCSC) Thyristor Controlled Series Capacitor من أهم أجهزة الـ FACTS. ويملك هذا الجهاز القدرة على تغيير وتعديل سرينات الاستطاعة في خطوط شبكات النقل الكهربائية وذلك عن طريق تغيير المفاعلة المكافئة لخط النقل الذي يركب فيه الجهاز وذلك من خلال التحكم بزوايا القرح للثايرستور. لذلك فإن جهاز الـ TCSC يمكن أن يقلل من سرينات الخطوط المحملة بشكل زائد ويحافظ على جهود عقد النظام عند المستوى المطلوب إذا تم تركيبه في المكان المناسب وتشغيله بالبارامتر المناسب. بمعنى آخر فإن جهاز الـ TCSC يمكن أن يزيد القدرة التمريرية لخطوط نقل نظام الطاقة الكهربائية يعرض هذا المقال دراسة تأثير جهاز الـ TCSC على زيادة القدرة التمريرية لخطوط نقل نظام الطاقة الكهربائية في الحالة المستقرة. حيث وجدنا من خلال نتائج النمذجة والمحاكاة أن له القدرة الكبيرة على التحكم بسريان الاستطاعة في خطوط النقل وبالتالي زيادة القدرة التمريرية لهذه الخطوط دون التأثير على البارامترات الأخرى في نظام الطاقة.

الكلمات المفتاحية: نظام القدرة الكهربائية - المكثفات التسلسلية المتحكم بها ثايرستورياً (TCSC) - قدرة التمرير -

الحالة المستقر

* مدرس - قسم هندسة الطاقة - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية

** مدرس - قسم هندسة الطاقة - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية

*** طالبة دراسات عليا (ماجستير) - قسم هندسة الطاقة - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية

A Study on the Impact of Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) on the Transfer Capability Increasing of Transmission Lines

Dr. Haitham Dagheror *
Dr. Husam Shaheen **
Rasha Sbeiha***

(Received 17 / 6 / 2012. Accepted 9 / 5 / 2012)

□ ABSTRACT □

Flexible Alternating Current Transmission Systems (FACTS) devices have been proposed as an effective solution for controlling power flow in transmission lines and regulating bus voltage in electrical power systems, resulting in an increased transfer capability, low system losses, and improved stability of these systems.

Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) has the ability of modifying power flows in the lines of electrical networks through the modification of the equivalent reactance of the lines where it installed. This can be achieved through the control of the firing angles of the TCSC's thyristors. Therefore, the TCSC can decrease the overloading of overloaded lines and maintain the system bus voltages on a desired level if it is installed in the optimal location and operated with the optimal parameter. In other words, the TCSC can increase power system transfer capability.

This paper presents a study on the impact of TCSC device on the increasing of transmission lines transfer capability in steady-state operation of power system. We have seen from simulation results that TCSC device has the capability of controlling power flow and thus increasing the transfer capability of transmission lines without affecting other parameters of power system.

Keywords:Power System, Thyristor Controlled Series Capacitor(TCSC), Transfer Capability.

*Assistant Professor, Department of Electrical, Faculty of Mech.& Elect. Engineering, Tishreen university, Lattakia, Syria

**Assistant Professor, Department of Electrical, Faculty of Mech.& Elect. Engineering, Tishreen university, Lattakia, Syria

***postgraduate Student, Department of Electrical, Faculty of Mech.& Elect. Engineering, Tishreen university, Lattakia, Syria

مقدمة:

يتزايد الطلب على الطاقة الكهربائية بشكل متسارع مع تزايد عدد السكان وسرعة التطور سواء على المستوى المحلي أو الإقليمي أو الدولي. وتسعى الدول جاهدة لتلبية هذا الطلب من خلال بناء محطات توليد جديدة (تقليدية أو تعتمد على الطاقات المتجددة). إن الطلب المتزايد على الطاقة والذي ترافق مع توليد متزايد لتلبيته لم يترافق في الكثير من دول العالم مع تحديث لشبكات النقل الموجودة حتى تواكب الحمولة والتوليد المتزايدين. الأمر الذي أدى إلى تشغيل هذه الشبكات في ظروف حرجة وقريبة من حدود التشغيل المسموحة سواء من حيث التحميل الزائد أو من حيث تجاوز حدود الجهد أو حدود الاستقرار. علماً أن تشغيل النظام في مثل هذه الظروف يؤدي إلى حدوث الكثير من المشاكل قد تصل إلى حالة التعطيم الكامل. ولحل هذه المشكلة تم اقتراح حلين رئيسيين، يتمثل الحل الأول في بناء شبكات نقل جديدة والحل الثاني هو تشغيل شبكات النقل الحالية بأعلى كفاءة ممكنة. إلا أن بناء شبكات نقل جديدة هو في الواقع أمر مكلف اقتصادياً ومؤثر سلبياً بالبيئة لذلك تم تأجيل مثل هذا الحل في أغلب بلدان العالم. واتجهت الأنظار نحو الحل الثاني المتمثل في تشغيل شبكات النقل الموجودة بأعلى كفاءة ممكنة رغم بعض القيود مثل حدود التشغيل الحرارية المسموحة و حدود استقرار الجهد وحدود استقرار التوليد وكذلك حدود الأمان. ولحسن الحظ ومع تطور إلكترونيات القدرة الكهربائية اقترحت جمعية أبحاث القدرة الكهربائية Electrical Power Research Institute (EPRI) في عام 1988 مجموعة جديدة من أجهزة التحكم في الشبكات الكهربائية التي تتيح إمكانية تشغيل الشبكات الموجودة بكفاءة عالية بدون حدوث تجاوز لحدود التشغيل المذكورة عن طريق التحكم بتيار الاستطاعة في هذه الشبكات وقد أطلق على هذه المجموعة اسم أنظمة نقل التيار المتناوب المرنة (FACTS)[1-5]

يملك جهاز المكثفات التسلسلية المقادة ثايرستورياً (TCSC) والذي يعدّ واحداً من أجهزة الـ FACTS القدرة على التحكم بتيار الاستطاعة في الشبكات الكهربائية وبالتالي تعديل هذا التيار. الأمر الذي يؤدي إلى إعطاء مرونة كبيرة في تشغيل هذه الشبكات في ظروف التشغيل الجديدة التي فرضها التحميل والتوليد المتزايدين وضمن حدود التشغيل المسموحة أي تشغيل الشبكات الحالية بكفاءة عالية دون حدوث خروقات في حدود التشغيل المسموحة [6-8].

إن من أهم مساوئ أجهزة الـ FACTS ومنها جهاز الـ TCSC هي الكلفة الإنشائية الكبيرة نسبياً. وبالرغم من هذه الكلفة الكبيرة، إلا أن الدراسات بينت أنها وعلى المدى الطويل أكثر اقتصادية من إنشاء خطوط نقل جديدة. ويعدّ جهاز الـ TCSC الأقل كلفةً من بين أجهزة الـ FACTS المختلفة [9].

أهمية البحث وأهدافه:

تأتي أهمية البحث من تصديه أو تعرضه لمشكلة تشغيل شبكات النقل الحالية بظروف تشغيل حرجة نتيجة التحميل والتوليد المتزايدين. حيث أن تشغيل هذه الشبكات في مثل هذه الظروف يؤدي إلى حدوث الكثير من التجاوزات في الحدود الحرارية، حدود الجهد وحدود الاستقرار. الأمر الذي يؤدي إلى عدم قدرة هذه الشبكات على تأمين التغذية الكهربائية للمستهلكين بالشكل المطلوب، وقد يؤدي في بعض الأحيان إلى حدوث حالة التعطيم الكامل وما لها من نتائج سلبية كبيرة على المستهلكين وعلى اقتصاد البلد.

ويهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير المكثفات التسلسلية المتحكم بها ثايرستورياً على زيادة القدرة التمريرية لخطوط النقل في الحالة المستقرة. أي دراسة تأثير هذا الجهاز على تشغيل شبكات النقل الحالية بكفاءة عالية لمواجهة ظروف التشغيل الحرجة.

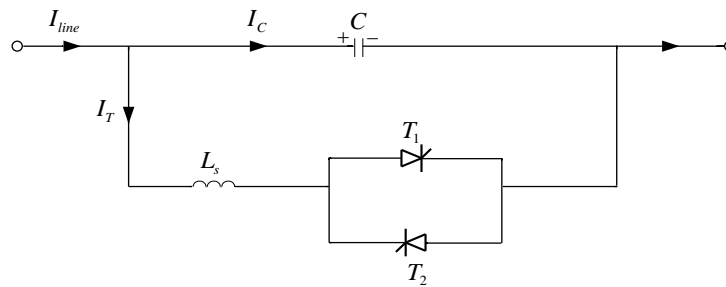
حيث تتم الدراسة من خلال:

نمذجة جهاز الـ TCSC بشكل رياضي وبرمجي ومحاكاة عمله ودراسة سلوكه في حالة العمل المستقرة لنظام الطاقة. أي إيجاد النموذج الرياضي المكافئ لهذا الجهاز عند ربطه بالشبكة ودمج هذا النموذج في نموذج سريان الاستطاعة، وبالتالي التحقق من قدرة هذا الجهاز على التحكم في سريان الاستطاعة وبالتالي زيادة القدرة التمريرية لخطوط النقل، الأمر الذي يساعد في تشغيل النظام بدون حدوث تجاوزات لحدود التشغيل المسموحة.

طرائق البحث ومواده:

بنية ومفهوم الـ TCSC:

يعدّ جهاز الـ TCSC أحد أجهزة الـ FACTS التي تتحكم بمفاعلات خطوط نقل القدرة الكهربائية بسرعة عالية وهو معوض استطاعة ردية [7]. وبنية الـ TCSC تتألف من مكثف تسلسلي موصول تفرعياً مع مفاعلة تحريضية متحكم بها عبر ثايرستورين مربوطين على التضاد التفرعي لتعطي بالنتيجة مفاعلة تسلسلية مكافئة متغيرة كما هو مبين في الشكل (1):



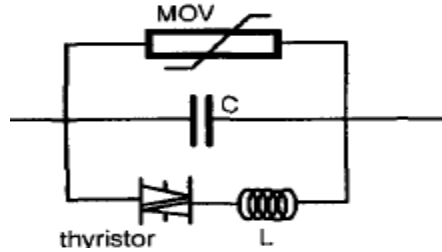
الشكل (1) مخطط مبسط لـ TCSC.

يتم التحكم بالمفاعلة التسلسلية المكافئة للـ TCSC زيادة أو نقصاناً عن طريق تغيير زوايا قرح الثايرستور بين 0 و 180° نظرياً. عندما تكون زاوية القرح 90° تصبح المفاعلة التحريضية مربوطة بالكامل مع الدارة و تساعد الـ TCSC في الحد من تيار العطل أيضاً. وعندما تكون زاوية قرح الثايرستور هي 180° تصبح المفاعلة التحريضية خارج الدارة ويصبح للمكثف التسلسلي ممانعة طبيعية. وعندما تكون زاوية القرح من 180° إلى قيمة أقل تزداد المفاعلة السعوية.

أن المكثف في جهاز الـ TCSC مزود بتحريضية متحكم بها عبر ثايرستور موصول على التوازي، حيث تحقن نبضات تيار الخرج لهذا الجهاز (التي تضاف بتوافق طوري مع تيار الخط) لرفع الجهد السعوي للخط مقارنة مع الجهد الذي نحصل عليه من أجل تيار الخط لوحده. كل ثايرستور يوصل مرة كل دور وله فترة توصيل زمنية معينة أقصر من نصف دور من التردد الأساسي.

إن التحكم عبر زاوية القرح يعطي ساعات بتأثير متغير مما يؤدي إلى تعويض جزئي لتحريضية خط النقل وبالتالي يعطي إمكانية التحكم بسريان الاستطاعة عبر الخط. يمكن أن يمدج جهاز الـ TCSC بعدة طرق في دراسات سريانات الاستطاعة فمثلاً يمدج كمفاعلة تحريضية متغيرة أو كمفاعلة سعوية متغيرة.

هناك نماذج لـ TCSC تحتوي على مادة Metal –Oxide Varistor (MOV) توصل مع المكثف وتستخدم للحماية من التيارات الزائدة كما هو مبين في الشكل (2):



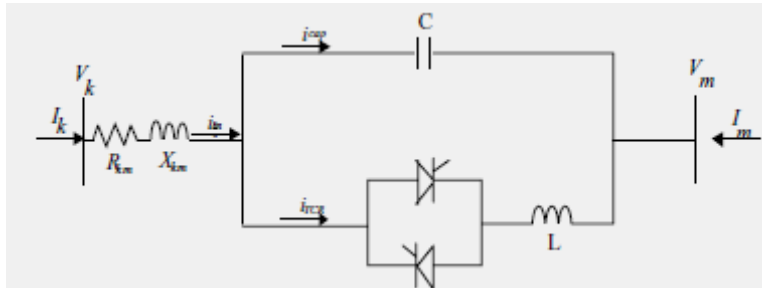
الشكل (2) دارة TCSC بوجود MOV.

يمكن أن يعمل جهاز الـ TCSC في المجال السعوي أو التحريضي ومجال العمل له محدود بزوايا قرح الثايرستورات وحماية MOV وحدود التيار للمكثفات.

أدى التطور في الكترونيايات القدرة إلى تطور المعوضات التسلسلية المتحكم بها عبر ثايرستور في أنظمة القدرة. وبالمقارنة مع المكثفات المربوطة عبر قواطع دارة فإن الـ TCSC سيكون أكثر تأثيراً لأن الثايرستورات ذات تعديل مرن ويمكن تطبيق العديد من نظريات التحكم المطورة عليها [10-15].

نمذجة المكثفات التسلسلية المتحكم بها ثايرستورياً في الحالة المستقرة (نموذج سريان الاستطاعة):

يمثل الشكل (3) الرسم التخطيطي لجهاز TCSC عند ربطه على التسلسل مع خط النقل بحيث يؤدي إلى التحكم بسريان الاستطاعة في الشبكة وزيادة القدرة التمريرية وزيادة الأمان في الحالة المستقرة. وبغض النظر عن حالة عمله فإنه يمكن نمذجته كفاعلة سعوية أو تحريضية متغيرة موصولة على التسلسل مع مفاعلة خط النقل X_L [3].

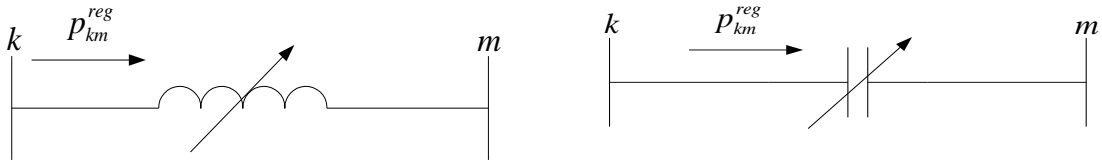


الشكل (3) الشكل التخطيطي لـ TCSC عند ربطه مع خط النقل

النموذج الأبسط لـ TCSC يوضح مفهوم المفاعلة التسلسلية المتغيرة. وهذه المفاعلة تعدل آلياً ضمن الحدود المسموحة للحصول على الكمية المحددة من سريانات الاستطاعة الفعلية عبرها. النموذج المطور يستخدم مباشرة زاوية القرح لـ TCSC المعطاة في صيغة علاقة لا خطية، ونختار زاوية القرح لـ TCSC لتكون قيمة ثابتة في حل سريان الاستطاعة حسب نيوتن رافسون. نموذج سريان الاستطاعة بوجود TCSC الممثل في هذا القسم يعتمد على مفهوم بسيط لمفاعلة تسلسلية متغيرة

قيمتها المعدلة آلياً تستخدم للحد من سريان الاستطاعة إلى القيمة المحددة.

يبين الشكل (a-4) و (b-4) تغيير مفاعلة X_{TCSC} المكافئة حسب النموذج TCSC الموصول تسلسلياً وحالة العمل إما في المجال السعوي أو في المجال التحريضي.



الشكل (4) المفاعلة المكافئة لـ TCSC : a- النمط التحريضي، b- النمط السعوي

حيث P_{km}^{reg} هي الاستطاعة الفعلية المجدولة (المراد نقلها) من العقدة k إلى العقدة m .
و يبين الشكل (5) المخطط الشعاعي لـ TCSC في حالتي العمل السعوي والتحريضي :



الشكل (5) المخطط الشعاعي لـ TCSC .

حيث V_k, V_m مطالات الجهود عند العقد k, m .

δ زاوية فرق الطور بين جهدي هاتين العقدتين.

V_I جهد خط النقل بين هاتين العقدتين.

وتعطى مصفوفة السماحية لجهاز الـ TCSC المبين في الشكل (4) بالعلاقة:

$$\begin{bmatrix} I_k \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} jB_{kk} & jB_{km} \\ jB_{mk} & jB_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_k \\ V_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

حيث :

I_k, I_m التيارات عند العقد k, m .

V_k, V_m مطالات الجهود عند العقد k, m .

B_{kk}, B_{mm} القابلية الذاتية عند k, m .

B_{km}, B_{mk} القابلية المتبادلة للخط بين k, m .

من أجل العمل التحريضي لدينا :

$$\left. \begin{aligned} B_{kk} = B_{mm} &= -\frac{1}{X_{TCSC}} \\ B_{km} = B_{mk} &= \frac{1}{X_{TCSC}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ومن أجل العمل السعوي تعكس الإشارات. X_{TCSC} هي المفاعلة المكافئة لـ TCSC ، حيث أن معادلات

سريان الاستطاعة الفعلية والرديبة عند العقدة k تعطى كما يلي:

$$P_k = V_k V_m B_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) \quad (3)$$

$$Q_k = -V_k^2 B_{kk} - V_k V_m B_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) \quad (4)$$

حيث: P_k الاستطاعة الفعلية عند العقدة k .

Q_k الاستطاعة الرديبة عند العقدة k .

θ_k و θ_m زوايا أطوار التوتّر عند العقد k, m .

أما من أجل معادلات سريان الاستطاعة عند العقدة m فاللاحقتين k, m يتغير ترتيبهما في المعادلات (3) و(4). في خوارزمية نيوتن رافسون تكون هذه المعادلات خطية بالنسبة للمفاعلة التسلسلية. من أجل الشرط المبين في الشكل (4) حيث تنظم المفاعلة التسلسلية سريان الاستطاعة الفعلية السارية من العقدة k إلى العقدة m عند نقطة محددة P_{km}^{reg} فتكون معادلات سريان الاستطاعة الخطية حسب نيوتن رافسون هي:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta P_m \\ \Delta Q_k \\ \Delta Q_m \\ \Delta P_{km}^{X_{TCSC}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_k}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_k}{\partial X_{TCSC}} X_{TCSC} \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_m}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_m}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_m}{\partial X_{TCSC}} X_{TCSC} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_k}{\partial X_{TCSC}} X_{TCSC} \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial Q_m}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_m}{\partial X_{TCSC}} X_{TCSC} \\ \frac{\partial P_{km}^{X_{TCSC}}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{km}^{X_{TCSC}}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{km}^{X_{TCSC}}}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_{km}^{X_{TCSC}}}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_{km}^{X_{TCSC}}}{\partial X_{TCSC}} X_{TCSC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta \theta_m \\ \frac{\Delta V_k}{V_k} \\ \frac{\Delta V_m}{V_m} \\ \frac{\Delta X_{TCSC}}{X_{TCSC}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

حيث:

$$\Delta P_{km}^{X_{TCSC}} = P_{km}^{reg} - P_{km}^{X_{TCSC}.cal}$$

هي تغير سريان الاستطاعة الفعلية للمفاعلة التسلسلية و ΔX_{TCSC} تعطى بالعلاقة:

$$\Delta X_{TCSC} = X_{TCSC}^{(i)} - X_{TCSC}^{(i-1)}$$

وهو التغير الترايدي في المفاعلة التسلسلية و $P_{km}^{X_{TCSC}.cal}$ هي الاستطاعة المحسوبة كتلك المعطاة في المعادلة (3).

عناصر جاكوبيان للمفاعلة التسلسلية كالتالي:

$$\frac{\partial P_k}{\partial X} X = -V_k V_m B_{km} \sin(\theta_k - \theta_m)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial X} X = V_k^2 B_{kk} + V_k V_m B_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)$$

$$\frac{\partial P_{km}^X}{\partial X} X = \frac{\partial P_k}{\partial X} X$$

حيث: X_{TCSC} للمتحمك التسلسلي تعدّل في نهاية كل تكرار تبعاً للمعادلة:

$$X_{TCSC}^{(i)} = X_{TCSC}^{(i-1)} + \left(\frac{\Delta X_{TCSC}}{X_{TCSC}} \right)^{(i)} X_{TCSC}^{(i-1)} \quad (6)$$

النتائج والمناقشة:

لدراسة وتحليل وتوضيح تأثير المكثفات التسلسلية المتحكم بها ثايرستورياً (TCSC) على زيادة القدرة التمريرية لخطوط النقل في نظام الطاقة الكهربائية، سوف ندرس سريان الاستطاعة في نظامي طاقة كهربائيين معياريين هما نظام IEEE 6-عقد و نظام IEEE 14-عقدة قبل وبعد تركيب المكثفات التسلسلية المتحكم بها ثايرستورياً (TCSC).

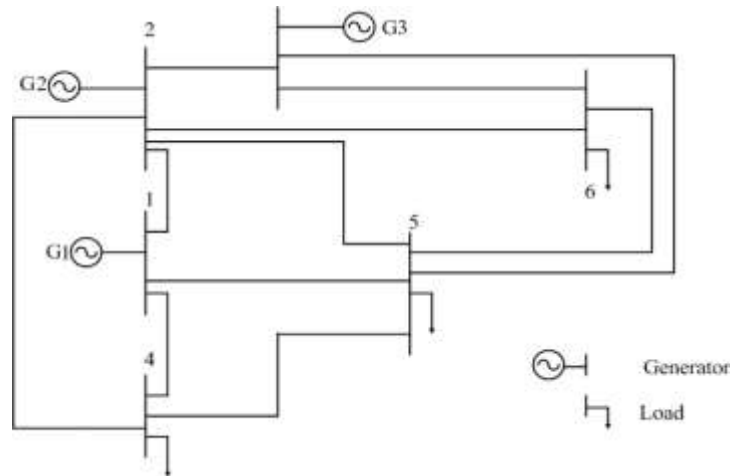
إن زيادة القدرة التمريرية لخط النقل تعني الحصول على كمية أكبر من الاستطاعة التي يمكن نقلها عبر شبكة نقل مترابطة بموثوقية عالية وبدون أن تتجاوز الحدود المسموحة للاستطاعة والتوتر. ومعلوم أن أجهزة الـ FACTS عموماً والـ TCSC بشكل خاص تلعب دوراً مهماً في زيادة القدرة التمريرية.

تمت الدراسة (النمذجة والمحاكاة) باستخدام بيئة الماتلاب (Matlab 7)، حيث تم نمذجة المكثفات التسلسلية المتحكم بها ثايرستورياً (TCSC) في الحالة المستقرة لنظام الطاقة الكهربائية ضمن خوارزمية نيوتن رافسون لحل سريان الاستطاعة كمفاعلة سعوية أو تحريضية متغيرة حسب عملها.

لقد اعتمدنا في نمذجة الـ (TCSC) على النموذج الذي يعتبر أن الـ (TCSC) هي عبارة عن سعة أو تحريضية متغيرة يمكن التحكم بها عن طريق تغيير زوايا التحكم (القدح) للثايرستور، وبالتالي فإن متغيرات التحكم للـ (TCSC) هي مفاعلتها السعوية أو التحريضية، ومن خلال متغيرات التحكم المذكورة زيادة أو نقصاناً فإنه يمكن التحكم بسريان الاستطاعة في خط النقل الذي تركيب فيه الـ (TCSC)، ومن نمذجة ومحاكاة هذين النظامين حصلنا على النتائج التالية:

نتائج النمذجة والمحاكاة على النظام المعياري IEEE 6-عقد:

يتألف نظام IEEE 6-عقد المدروس من 3 مولدات، 6 عقد، 11 خط نقل و 3 أحمال كما هو موضح في الشكل (6)، وبارامترات هذا النظام (بارامترات المولدات، خطوط النقل، الأحمال المركبة) مأخوذة من المرجع [16]:



الشكل (6) نظام IEEE 6- عقد.

يبين الجدول (1) نتائج سريان الاستطاعة في نظام IEEE-6 bus قبل تركيب الـ (TCSC):

الجدول (1) نتائج سريان الاستطاعة في نظام IEEE 6-bus system

| الضياعات الردية $Q_{loss} [p.u.]$ | الضياعات الفعلية $P_{loss} [p.u.]$ | الاستطاعة الردية $Q [p.u.]$ | الاستطاعة الفعلية $P [p.u.]$ | الخط | | رقم الخط |
|--------------------------------------|--|-----------------------------------|------------------------------------|------|-----|----------|
| | | | | من | إلى | |
| 0.0210 | 0.0153 | 0.4026 | 0.3962 | 1 | 4 | 1 |
| -0.005 | 0.0159 | 0.2385 | 0.3807 | 1 | 5 | 2 |
| -0.0320 | 0.0050 | 0.1789 | 0.1231 | 1 | 2 | 3 |
| -0.0073 | 0.0102 | 0.0647 | 0.3082 | 2 | 5 | 4 |
| -0.0102 | 0.0135 | -0.0215 | 0.4386 | 2 | 6 | 5 |
| 0.0215 | 0.0203 | 0.1815 | 0.6072 | 2 | 4 | 6 |
| -0.0311 | 0.0043 | -0.2551 | 0.1815 | 2 | 3 | 7 |
| -0.0129 | -0.017 | 0.2653 | 0.2674 | 3 | 5 | 8 |
| 0.0498 | 0.0141 | 0.7070 | 0.5098 | 3 | 6 | 9 |
| -0.0699 | 0.001 | -0.0584 | 0.0678 | 4 | 5 | 10 |
| -0.0534 | 0.0006 | -0.0993 | -0.0202 | 5 | 6 | 11 |

أما الجدول (2) فيظهر نتائج سريان الاستطاعة في خطوط شبكة ال IEEE 6- عقد بوجود TCSC في كل خط على حدا مع الأخذ بالاعتبار موضع TCSC في الخط أي في بداية الخط أو نهايته والأخذ بالاعتبار قيمة مفاعلة TCSC المناسبة للحصول على قيمة الاستطاعة المطلوبة:

الجدول (2) يظهر نتائج سريان الاستطاعة في نظام IEEE 6-bus system بوجود TCSC:

| النسبة المئوية لزيادة القدرة التمريرية % | موضع جهاز TCSC في الخط | | مفاعلة جهاز ال TCSC $X_{TCSC} [p.u.]$ | الاستطاعة الفعلية بعد تركيب ال TCSC $P_{sp} [p.u.]$ | الاستطاعة الفعلية قبل تركيب ال TCSC $P [p.u.]$ | الخط | | رقم الخط |
|--|------------------------------|-----|---|--|--|------|-----|----------|
| | من | إلى | | | | من | إلى | |
| 16 % | 4 | 7 | -0.0500 | 0.46 | 0.3962 | 4 | 1 | 1 |
| 10 % | 5 | 7 | -0.0500 | 0.42 | 0.3807 | 5 | 1 | 2 |
| 8 % | 2 | 7 | -0.0500 | 0.13 | 0.1231 | 2 | 1 | 3 |
| 12 % | 5 | 7 | -0.0500 | 0.34 | 0.3082 | 5 | 2 | 4 |
| 17 % | 7 | 2 | -0.0500 | 0.49 | 0.4386 | 6 | 2 | 5 |
| 16 % | 4 | 7 | -0.0500 | 0.71 | 0.6072 | 4 | 2 | 6 |
| 16 % | 5 | 7 | -0.0500 | 0.31 | 0.2674 | 5 | 3 | 8 |
| 22 % | 6 | 7 | -0.0500 | 0.62 | 0.5098 | 6 | 3 | 9 |
| 3 % | 7 | 4 | -0.0500 | 0.07 | 0.0678 | 5 | 4 | 10 |
| 15 % | 6 | 7 | 0.0500 | -0.017 | -0.0202 | 6 | 5 | 11 |

ملاحظة: العقدة رقم 7 هي عقدة تخيلية تنتج عن تركيب جهاز ال TCSC في الشبكة وللتوضيح نأخذ المثال التالي:

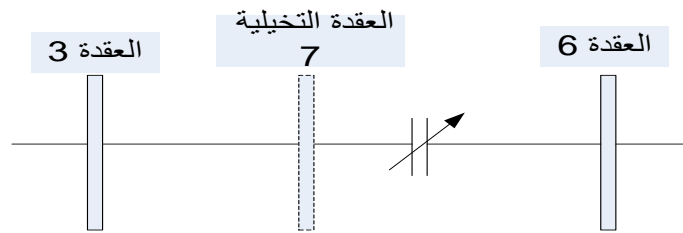
قبل تركيب الـ TCSC في الشبكة المذكورة كان سريان الاستطاعة الفعلية في الخط رقم 9 الذي يربط بين العقدتين 3 و 6 هو 0.5098 p.u

يمكننا التحكم بسريان الاستطاعة في هذا الخط (زيادة أو نقصاناً) عن طريق تركيب الـ TCSC في الشبكة، فإذا أردنا زيادة القدرة التمريرية لهذا الخط (أي زيادة الاستطاعة المنقولة فيه) بنسبة معينة نحدد قيمة الاستطاعة الفعلية المرغوبة في هذا الخط ولتكن على سبيل المثال القيمة 0.62 p.u وهي القيمة العظمى المسموحة لسريان الاستطاعة في هذا الخط (هذه القيمة يجب أن تكون ضمن الحدود التصميمية المسموحة للاستطاعة المنقولة) و مفاعلة الـ TCSC المقابلة هي المفاعلة الحدية.

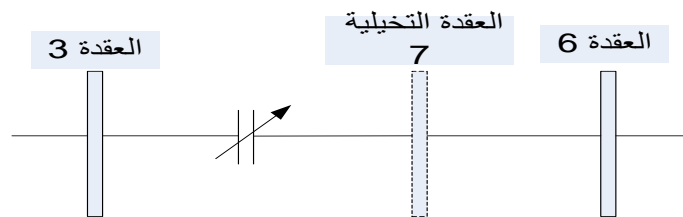
نجري سريان الاستطاعة بوجود الـ TCSC مع الأخذ بالاعتبار الاستطاعة المرغوبة في الخط رقم 9 فنلاحظ أن الـ TCSC قد عدل سريان الاستطاعة في الشبكة الأساسية وأصبح هذا السريان في الخط رقم 9 هو 0.62 p.u بنسبة زيادة قدرها 22% دون حدوث أي خروقات للحدود المسموحة بالنسبة للجهد أو الاستطاعة.

متغيرات التحكم لـ TCSC هي المفاعلة وتعطى في المجال [17]: $-0.8 * X_L < X_{TCSC} < 0.2 * X_L$ وللحصول على الاستطاعة المرغوبة في هذا الخط يجب أن تكون قيمة مفاعلة الـ TCSC هي -0.0500 p.u

ويوضح الشكل (7) مفهوم العقدة التخيلية المضافة فيكون موضع الـ TCSC إما بين العقدة التخيلية 7 و العقدة 6 كما في الشكل (a-7) أو بين العقدة 3 و العقدة التخيلية 7 كما في الشكل (b-7) للمثال السابق:



(a)

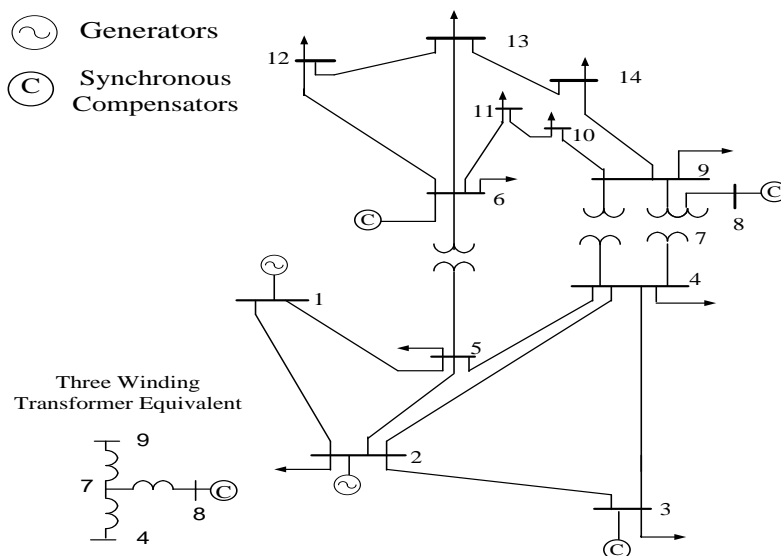


(b)

الشكل (7) يوضح مفهوم العقدة التخيلية.

نتائج النمذجة والمحاكاة في النظام المعياري IEEE 14-عقدة :

يتألف نظام IEEE 14-عقدة المدروس من 5 مولدات، 4 محولات، 14 عقدة، 16 خط نقل و 11 حمل كما هو موضح في الشكل (8)، وبارامترات هذا النظام (بارامترات المولدات، المحولات، خطوط النقل ، الأحمال المركبة) مأخوذة من المرجع [10]:



الشكل (8) نظام IEEE 14-عقدة قبل تركيب الـ (TCSC).

يبين الجدول (3) نتائج سريان الاستطاعة في نظام IEEE-14 bus قبل تركيب الـ (TCSC):

الجدول (3) نتائج سريان الاستطاعة في نظام IEEE 14-bus system

| الضياعات الرديية $Q_{loss} [p.u.]$ | الضياعات الفعلية $P_{loss} [p.u.]$ | الاستطاعة الرديية $Q [p.u.]$ | الاستطاعة الفعلية $P [p.u.]$ | الخط | | رقم الخط |
|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------|----|----------|
| | | | | إلى | من | |
| 0.1631 | 0.0724 | 0.16541 | 2.0446 | 2 | 1 | 1 |
| 0.1687 | 0.0535 | 0.1201 | 1.0444 | 5 | 1 | 2 |
| 0.0778 | 0.0294 | 0.0143- | 0.8194 | 3 | 2 | 3 |
| 0.0454 | 0.0277 | 0.0217 | 0.7147 | 4 | 2 | 4 |
| 0.0277 | 0.0206 | 0.0371 | 0.6211 | 5 | 2 | 5 |
| 0.0267- | 0.0028 | 0.1237 | -0.1520 | 4 | 3 | 6 |
| 0.0054- | 0.0023 | 0.0852 | -0.4062 | 5 | 4 | 7 |
| 0.0182 | 0.0000 | 0.0019- | 0.2943 | 7 | 4 | 8 |
| 0.0165 | 0 | 0.0443 | 0.1661 | 9 | 4 | 9 |
| 0.0455 | 0 | 0.0355 | 0.4229 | 6 | 5 | 10 |
| 0.0012 | 0.0006 | 0.0484 | 0.0619 | 11 | 6 | 11 |
| 0.0017 | 0.0008 | 0.0272 | 0.0769 | 12 | 6 | 12 |

| | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|----|----|----|
| 0.0047 | 0.0024 | 0.0793 | 0.1721 | 13 | 6 | 13 |
| 0.0094 | 0 | 0.2306 | 0.0000 | 8 | 7 | 14 |
| 0.0144 | 0.0000 | 0.2105 | 0.2943 | 9 | 7 | 15 |
| 0.0004 | 0.0002 | 0.0295 | 0.0640 | 10 | 9 | 16 |
| 0.0031 | 0.0015 | 0.0283 | 0.1014 | 14 | 9 | 17 |
| 0.0003 | 0.0001 | 0.0289 | 0.0262 | 11 | 10 | 18 |
| 0.0001 | 0.0001 | 0.0095 | 0.0150 | 13 | 12 | 19 |
| 0.0012 | 0.0006 | 0.0260 | 0.0497 | 14 | 13 | 20 |

أما الجدول (4) فيظهر نتائج سريان الاستطاعة في خطوط شبكة الـ IEEE 14-عقدة بوجود TCSC في كل خط على حده مع الأخذ بالاعتبار موضع TCSC في الخط أي في بداية الخط أو نهايته والأخذ بالاعتبار قيمة مفاعلة TCSC المناسبة للحصول على قيمة الاستطاعة المطلوبة:

الجدول (4) يظهر نتائج سريان الاستطاعة في نظام IEEE 14-bus system بوجود TCSC:

| النسبة المئوية لزيادة القدرة التمريرية % | موضع جهاز الـ TCSC في الخط | | مفاعلة جهاز الـ TCSC $X_{TCSC} [p.u.]$ | الاستطاعة الفعلية بعد تركيب الـ TCSC $P_{sp} [p.u.]$ | الاستطاعة الفعلية قبل تركيب الـ TCSC $P [p.u.]$ | الخط | | رقم الخط |
|--|----------------------------|----|--|--|---|------|----|----------|
| | إلى | من | | | | إلى | من | |
| 14% | | | | | | | | |
| 16% | 15 | 2 | -0.0400 | 2.34 | 2.0446 | 2 | 2 | 1 |
| 7% | 15 | 5 | -0.0500 | 1.21 | 1.0444 | 5 | 1 | 2 |
| 18% | 15 | 3 | -0.0500 | 0.88 | 0.8194 | 3 | 2 | 3 |
| 14% | 15 | 4 | -0.0500 | 0.84 | 0.7147 | 4 | 2 | 4 |
| 29% | 15 | 5 | -0.0400 | 0.71 | 0.6211 | 5 | 2 | 5 |
| 12% | 15 | 11 | -0.0500 | 0.08 | 0.0619 | 11 | 6 | 11 |
| 16% | 15 | 12 | -0.0500 | 0.086 | 0.0769 | 12 | 12 | 12 |
| 14% | 15 | 13 | -0.0500 | 0.20 | 0.1721 | 13 | 6 | 13 |

ملاحظة: العقدة رقم 15 هي عقدة تخيلية تنتج عن تركيب جهاز الـ TCSC في الشبكة.

أما بقية الخطوط التي لم تظهر في الجدول فلم يحصل أي زيادة تذكر بالقدرة التمريرية فيها بعد إضافة جهاز المكثفات التسلسلية المتحكم بها ثابستورياً.

وللتوضيح نأخذ المثال التالي:

قبل تركيب الـ TCSC في الشبكة المذكورة كان سريان الاستطاعة الفعلية في الخط رقم 11 الذي يربط بين العقدتين 6 و 11 هو 0.0619 p.u

يمكننا التحكم بسريان الاستطاعة في هذا الخط (زيادة أو نقصاناً) عن طريق تركيب الـ TCSC في الشبكة، فإذا أردنا زيادة القدرة التمريرية لهذا الخط (أي زيادة الاستطاعة المنقولة فيه) بنسبة معينة نحدد قيمة الاستطاعة الفعلية المرغوبة في هذا الخط ولتكن على سبيل المثال القيمة 0.08 p.u وهي القيمة العظمى المسموحة لسريان الاستطاعة في هذا الخط و مفاعلة الـ TCSC المقابلة هي المفاعلة الحدية.

نجري سريان الاستطاعة بوجود الـ TCSC مع الاخذ بالاعتبار الاستطاعة المرغوبة في الخط رقم 11 فنلاحظ أن الـ TCSC قد عدل سريان الاستطاعة في الشبكة الأساسية و أصبح هذا السريان في الخط رقم 9 هو 0.08 p.u بنسبة زيادة قدرها 29% دون حدوث أي خروقات للحدود المسموحة بالنسبة للجهد أو الاستطاعة.

الاستنتاجات والتوصيات:

تناول هذا البحث دراسة تأثير أحد أجهزة نقل التيار المتناوب المرنة (FACTS) وهو جهاز المكثف التسلسلي المتحكم به ثايرستورياً (TCSC) على زيادة القدرة التمريرية لخطوط النقل. حيث تمت نمذجة هذا الجهاز على شكل مفاعلة متغيرة إما سعوية أو تحريضية حتى يمكن التحكم من خلالها بسريان الاستطاعة في شبكات النقل. ومن خلال المحاكاة التي تمت لعمل هذا الجهاز في نظامي قدرة معياريين تبين أن لهذا الجهاز القدرة على التحكم بسريان الاستطاعة وبالتالي زيادة القدرة التمريرية لخطوط النقل دون التأثير على الحدود الحرارية وحدود الجهد المسموحة. يمكن تطوير هذا البحث لدراسة تأثير جهاز المكثف التسلسلي المتحكم به ثايرستورياً (TCSC) على أمان نظام الطاقة الكهربائية وزيادة التحميل في شبكات النقل. كما يمكن دراسة تأثيره على نظام القدرة الكهربائية في الحالة غير المستقرة.

المراجع:

1. HINGORANI, N.G. ; GYUGYI, L. Understanding FACTS – Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. IEEE Press, 2000, pp432.
2. SONG, Y. H.; JOHNS, A. T. Flexible AC Transmission System (FACTS), IEE Power and Energy Series 30, 1999, pp592.
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, pp420.
4. IEEE FACTS Working Group, FACTS applications, IEEE 96TP116-0, IEEE Power Engineering Society, 1996.
5. IEEE Power Engineering Society/CIGRE, FACTS Overview, Publication 95TP108, IEEE Press, New York, 1995.
6. FACTS: Application of thyristor controlled series capacitors in New York State, f EPRI, Rep. TR-103641, Dec. 1993.
7. Ricardo, J. D; Juan, M; R. A review of a quasi-static and a dynamic TCSC model, IEEE Power Engineering Review, November 2000, pp. 63–65.
8. STROMBERG, G. Thyristor controlled series capacitor, The Institution of Electrical Engineers, IEE, Savoy Place, London WC2R OBL, U, 1998, pp. 1–4.
9. Habur, K.; Oleary, D. FACTS- Flexible AC Transmission Systems, for Cost Effective and Reliable Transmission of Electrical Energy. <http://www.siemens.com/TransSys/pdf/CostEffectiveReliabTrans.pdf>.
10. SRINU, N.R.; VAISAKH, K.; ANAND, K. Determination of ATC with PTFDF using linear methods in presence of TCSC. 2010 The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE), 2010 , pp.146 – 151.
11. NAIK, R.S.; VAISAKH, K.; ANAND, K. Application of TCSC for enhancement of ATC with PTFDF in Power Transmission System. 2010 International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS), 2010 , pp. 1 – 6.

12. KE, J.L.; YING S.; WEI, J.L.; JIN, T. C. Impedance Control of Thyristor Controlled Series Capacitor to Improve the Transfer Capability of Remote Wind Farms. 2010 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), 2010 , pp.1 – 6.
13. MADHUSUDHANARAO, G.; RAMARAO, P.V.; KUMAR, T.J. Optimal location of TCSC and SVC for enhancement of ATC in a de-regulated environment using RGA. 2010 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICCIC), 2010 ,pp.1 – 6.
14. WU, Y.J.; LI L.C. Transfer capability study of tie-line installed TCSC considering transient stability constraints. 2011 IEEE Power Engineering and Automation Conference (PEAM), 2011 , pp. 260 – 263.
15. CHANSAREEWITTAYA, S.; JIRAPONG, P. Power transfer capability enhancement with optimal maximum number of facts controllers using evolutionary programming. IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2011 , pp. 4733 – 4738.
16. FRERIS, L. L.; SASSON, A. M. Investigation on the Load Flow Problem, Proc. of IEE, Vol. 1968,115, pp.1459–1470.
17. Saravanan, M.; Slochanal, S.M.R.; Venkatesh, P.; Abraham, P.S. Application Of PSO Technique For Optimal Location Of FACTS Devices Considering System Loadability And Cost Of Installation. IPEC 2005. The 7th International Power Engineering Conference, 2005, pp. 716 – 721.