

تحسين الاستقرار العابر لنظم الطاقة الكهربائية باستخدام المعوضات المتواقة الساكنة التسلسلية

الدكتور محمد عبد الحميد*

(تاريخ الإيداع 9 / 6 / 2010. قُبل للنشر في 3 / 11 / 2010)

□ ملخص □

تظهر الاهتزازات ذات الترددات المنخفضة عندما يتم ربط أنظمة الطاقة الكبيرة عبر خطوط ربط ضعيفة نسبياً. إن هذه الاهتزازات قد تزداد وتكبر مسببة فصل النظام إذا لم يتوفر التخميد الكافي. إن التطور الحديث في الكترنيات القدرة الكهربائية فتح مجالاً لاستخدام منظمات متطورة تعتمد على أنظمة نقل التيار المتناوب المرنة (FACTS)، هذه المنظمات قادرة على التحكم في حالة الشبكة بشكلٍ سريع، كما يمكن استخدام هذه الميزة لتحسين استقرار نظم الطاقة الكهربائية. المعوضات المتواقة الساكنة التسلسلية (SSSC) هي واحدة من مجموعة الـ FACTS والتي تستخدم على نطاق واسع في خطوط النقل الطويلة في الأنظمة الحديثة. إن نظام الـ SSSC يمكن أن يحقن جهداً متحكماً به بشكلٍ مستقل عن مطال التيار في الخط. تم في هذا البحث دراسة تأثير نظام الـ SSSC على الاستقرار العابر لنظم الطاقة الكهربائية، حيث تم تطبيق الدراسة على نظام متعدد الآلات مؤلف من منطقتين يربط بينهما خطا نقل، ورسمت الاستجابة الزمنية لمتحولات النظام. بينت النتيجة أن استخدام المعوضات المتواقة الساكنة التسلسلية يزيد من حدود استقرار النظام وبالتالي يزيد من الاستقرار العابر للنظام.

الكلمات المفتاحية: استقرار نظم الطاقة الكهربائية، المعوضات المتواقة الساكنة التسلسلية

*أستاذ مساعد - قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية و الكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Power System Transient Stability Enhancement Through Static Synchronous Series Compensator

Dr. Mohammed Abd El-hamid*

(Received 9 / 6 / 2010. Accepted 3 / 11 / 2010)

□ ABSTRACT □

Low frequency oscillations are observed when large power systems are interconnected by relatively weak tie lines. These oscillations may sustain and grow to cause system separation if no adequate damping is available. Recent development of power electronics introduces the use of flexible ac transmission system (FACTS) controllers in power system. FACTS controllers are capable of controlling the network condition in a very fast manner and this feature of FACTS can be exploited to improve the stability of a power system. Static Synchronous Series Compensator (SSSC) is one of the important members of FACTS family that is increasingly applied with long Transmission lines by the utilities in modern power system. The SSSC can inject controllable compensating voltage independently of the magnitude of the line current. In this research, the effect of SSSC on power system transient stability has been studied, the SSSC applied to multi-machine power system consists of two area interconnected through double transmission lines. The time response of system variables have been drawn. The result showed that the stability margin of the system is increased by using SSSC, so the power system transient stability increased.

Key words: Power System stability, Static Synchronous Series Compensator.

*Associate professor, Electrical power system Department of Mechanical & Electrical college, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

تعاني أنظمة الطاقة الكهربائية من اهتزازات ذات ترددات منخفضة نتيجةً للاضطرابات التي تتعرض لها. إن هذه الاهتزازات قد تستمر وتتزايد مسببة فصل النظام إذا لم يتوفر في النظام التخميد الكافي لهذه الاهتزازات. يوجد مجموعة من الطرق التي تزيد من حدود استقرار النظام عبر تحسين تخامد الاهتزازات في النظام. تعتبر المعوضات الساكنة المتواكبة التسلسلية (SSSC) والتي هي أحد أنظمة الـ FACTS المتطورة واحداً من الحلول الاقتصادية التي تؤدي إلى تحسين استطاعة النقل في الخطوط وتحسين استقرار النظام. ركزت الكثير من الأبحاث على دراسة الـ SSSC وأهمية استخدامها في أنظمة الطاقة الكهربائية. في [1] تم التحكم في تحريضة وسعات خطوط النقل عبر استخدام الـ SSSC، الذي يمكنه أن يعطي تعويضاً للجهد متحكماً به بشكل مستقل عن مطال تيار الخط، تم تحليل أداء الـ SSSC الذي يعتمد في عمله على قابلية PWM ثلاثية المستوى-متعددة الجسور باستخدام المحاكاة في EMTP، حيث تم فرض إدخال نظام SSSC مباشرةً في خط النقل لنظام مكون من آلة مفردة مع خط نقل وذلك عبر محاولات ربط، وأبدت مرونةً في تحديد جهد التشغيل الأمثل المطلوب عبر إدخال أو فصل عدداً من الجسور. كما تم تصنيع نموذج مماثل للتحقق من نتائج المحاكاة ودراسة إمكانية تطبيقها عملياً [2]. تم تطوير نظام الـ SSSC بالاعتماد على مبدلة مؤلفة من ست جسور H متتالية، تم توصيلها على التسلسل مع كل طور وتم مقارنتها مع نموذج مبدلة ثلاثية المستوى، بينت نتائج المحاكاة باستخدام EMTP أنها لا تعاني من مشاكل عدم توازن الجهد في المكثفات العلوية والسفلية [3]. استخدم الـ SSSC مع منظم مؤلف من دائرة تعويض تقديم - تأخير لإخماد اهتزازات التردد، حيث تم توليف ثوابت المنظم بطريقة الخوارزمية Tabu [4]. تم اختبار تحسين أداء النظام SSSC باستخدام مبدلة من نوع GTO ذات 12 نبضة [5]، وباستخدام مبدلة GTO ذات 48 نبضة وتم اختبار النظامين في تحسين تنظيم الجهد وتعويض الاستطاعة الردية [6]. تم دراسة مميزات الأداء لـ SSSC في المجال الترددي، حيث استخدم نموذجين من الـ SSSC، الأول يحوي على تنظيم لمركبة الجهد على المحور المتعامد V_q ، والأخر يقوم بتنظيم الممانعة X_q ، حيث أظهر النظام ممانعة أصغر عند التردد المتواكف مشابهاً بذلك خط النقل المعوض سعويًا [7]. في [8] تم دراسة تأثير حالات عمل مختلفة لـ SSSC على الاستقرار الديناميكي لنظام طاقة بسيط مؤلف من آلة متواكبة موصولة إلى قضيب تجميع لانهائي. تم إجراء دراسة مقارنة بين أداء الـ SSSC و STATCOM في تحسين استطاعة التواكف واستطاعة التخميد، حيث إن الوظيفة الأساسية لـ SSSC هي التعويض عن انخفاض الجهد عبر ممانعة الخط بينما يقوم STATCOM بدعم الجهد عند نقاط التوصيل [9]. استخدمت طريقة ليابانوف لتقييم الاستقرار العابر لنظام طاقة بوجود نظام SSSC [10]. في [11] تم استخدام طريقة الحل الأمثل لتحديد الحجم الأمثل لاستخدام منظمات SSSC لتقليل الضياعات في خطوط النقل وتحسين الاستجابة العابرة. في [12] تم استخدام التحكم الأمثل مع SSSC من أجل التعويض التسلسلي في الخط.

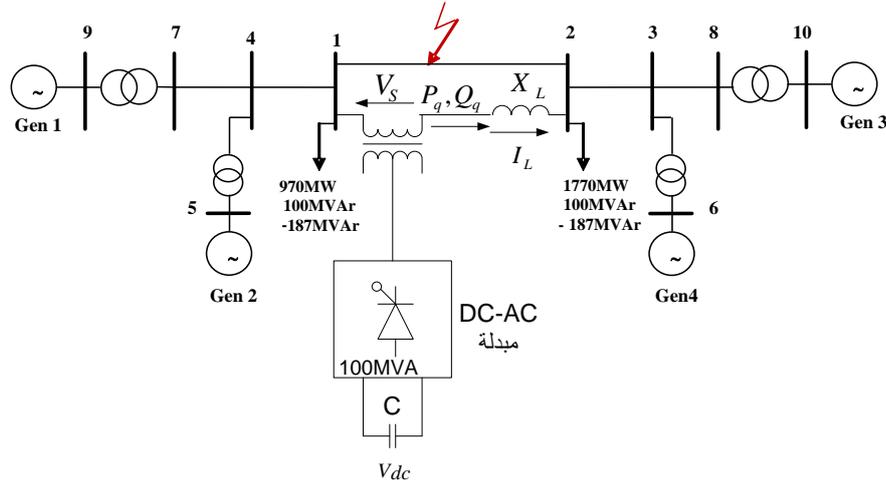
أهمية البحث وأهدافه:

إن تطور الأنظمة الكهربائية والتفكير في ربط أنظمة الطاقة الكهربائية مع بعضها البعض لزيادة موثوقية أنظمة الطاقة، دفع الباحثين في مجال نظم الطاقة إلى التفكير في الوسائل التي تزيد من فعالية خطوط الربط وزيادة استقرارها عبر استخدام المنظمات التي تعتمد في عملها على الإلكترونيات الصناعية نظراً لمرونتها في التحكم في الاستطاعة

المتدفقة في الخطوط. يهدف البحث إلى دراسة تأثير استخدام أنظمة التعويض المتوافقة التسلسلية SSSC على زيادة حدود الاستقرار وتحسين استقرار أنظمة الطاقة الكهربائية.

طرائق البحث ومواده:

في هذا البحث سوف ندرس تأثير نظام SSSC على استقرار نظم الطاقة عبر استخدام نظام للطاقة الكهربائية مؤلف من منطقتين يربط بينهما خطوط ربط، كل منطقة تتألف من محطتي توليد باستطاعة اسمية 900MVA، بجهد 20-kV، تغذيان الطاقة إلى الشبكة عبر محولة رافعة للجهد 20-230kV كما هو مبين في الشكل (1)، [15]. تم وصل نظام الـ SSSC باستطاعة 100MVA، على التسلسل مع الخط الواصل بين قضيبي التجميع 1 و 2. سنقوم بنمذجة نظام الطاقة وجميع مكوناته باستخدام برنامج Simulink في بيئة الـ MATLAB وسوف يتم اختيار طريقة رونغا-كوتا من أجل حل المعادلات التفاضلية للنظام وإجراء محاكاة للنظام، حيث أنه سيتم تشغيل البرنامج عند وجود نظام المعوض المتوافق الساكن التسلسلي وايضاً في حالة عدم وجوده وذلك عند حدوث قصر ثلاثي الطور. سوف يتم رسم الاستجابات الزمنية لمحاولات النظام في الحالتين السابقتين ومقارنتهما مع بعضهما البعض لبيان أهمية استخدام نظام المعوض المتوافق التسلسلي في تحسين أداء النظام.



الشكل (1) مخطط الخط الواحد لنظام القدرة المدروس

1 - نموذج نظام الـ SSSC [13,12]:

يعتبر نظام الـ SSSC واحداً من أنظمة الـ FACTS المتطورة. إن الوظيفة الأساسية له هي التحكم بتدفق الاستطاعة في خط النقل. وهذا يتم من خلال التحكم المباشر في تيار الخط (الاستطاعة) أو بشكل آخر عبر التحكم غير المباشر في ممانعة الخط التسلسلية أو حقن جهد تسلسلي في الخط وذلك باستخدام أجهزة الكترولونات القدرة الكهربائية. يمثل الشكل (2) مخطط الخط الواحد لنظام المعوض المتوافق التسلسلي موصولاً مع خط النقل الواصل بين قضيبي التجميع 1 و 2 لنظام القدرة المبين في الشكل (1). كما يحتوي الشكل (2) على دائرة التحكم في الـ SSSC. X_L تمثل مفاعلة الخط الواصل بين قضيبي التجميع 1 و 2 ذات الجهد V_1 و V_2 على التوالي. الاستطاعة الفعلية P والردية Q المتدفقة عند قضيبي التجميع 2 يمكن التعبير عنهما بالعلاقات التالية:

$$P = \frac{V_1 V_2}{X_L} \sin(\delta_1 - \delta_2) = \frac{V^2}{X_L} \sin \delta \quad (1)$$

$$Q = \frac{V_1 V_2}{X_L} (1 - \cos(\delta_1 - \delta_2)) = \frac{V^2}{X_L} (1 - \cos \delta) \quad (2)$$

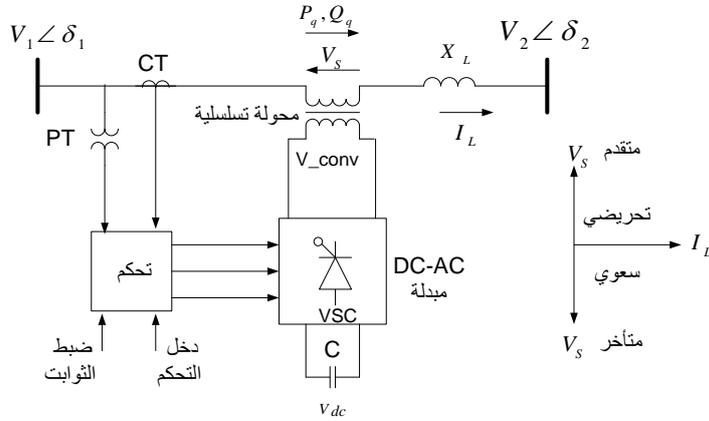
$$\delta = \delta_1 - \delta_2 \quad (3)$$

V_1 و V_2 مطال الجهد، و δ_1 و δ_2 زوايا الطور. للتبسيط سوف نختار $V_1 = V_2 = V$ والفرق بين الزوايا الطورية هو $\delta = \delta_1 - \delta_2$. يحدد كل نظام SSSC بجهد وتيار اسميين، وهو قادر على التعويض بـ X_q (تحريضية و سعوية) على التسلسل مع مفاعلة خط النقل X_L . بذلك، تصبح علاقتنا الاستطاعة المتدفقة المعطاة في المعادلتين (1) و (2) على النحو الآتي:

$$P_q = \frac{V^2}{X_{eff}} \sin \delta = \frac{V^2}{X_L(1 - X_q/X_L)} \sin \delta \quad (4)$$

$$Q_q = \frac{V^2}{X_{eff}} (1 - \cos \delta) = \frac{V^2}{X_L(1 - X_q/X_L)} (1 - \cos \delta) \quad (5)$$

تحدد المفاعلة المعوضة، X_q ، بحيث تكون سالبة عندما يعمل الـ SSSC في النمط التحريضي وموجبة عندما يعمل في النمط السعوي. يعبر عادةً عن درجة التعويض التسلسلي، S، كنسبة من المفاعلة التسلسلية، X_q ، إلى مفاعلة خط النقل، X_L ، حيث $X_q = SX_L$. بشكلٍ مشابه، من أجل التعويض التسلسلي التحريضي، تكون مفاعلة الخط التسلسلية هي، $X_{line} = X_L + X_q$ ، حيث، $X_q = SX_L$. بذلك تكون الوظيفة الأساسية للتحكم هي المحافظة على جهد الخرج لنظام SSSC، وهو V_s ، بشكل متعامد مع تيار خط النقل، I_L .



الشكل (2) المعوض المتوافق التسلسلي SSSC موصولاً مع خط نقل.

2 - دائرة التحكم بنظام الـ SSSC [14]:

نظراً لأن SSSC لا يستخدم أي منبع طاقة فعال، فإن الجهد المحقون يجب أن يبقى متعامداً مع التيار. بتغيير مطال، V_q ، للجهد المحقون والمتعامد مع التيار، فإن SSSC ينجز وظيفته كمعوض يقدم مفاعلة متغيرة، تحريضية أو سعوية أي:

$$I_L = I_d \quad (I_q = 0)$$

$$V_s = V_2 - V_1 = V_d + jV_q$$

$$V_d = 0$$

$V_q > 0$: سعوي SSSC

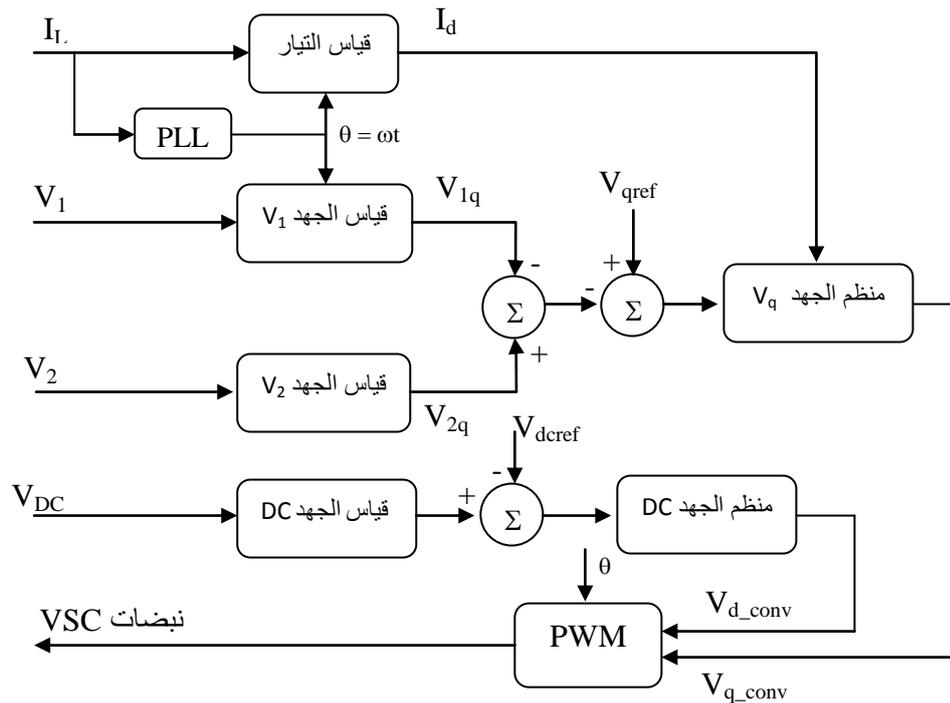
$V_q < 0$: تحريضي SSSC

إن تغيير الجهد المحقون يتم بواسطة مبدلة الجهد VSC الموصولة على طرف الملف الثانوي لمحولة الربط. والتي تستخدم مبدلة PWM تعتمد على مفاتيح IGBT للحصول على الجهد V_{con} من منبع الجهد DC. تتألف دائرة التحكم المبينة في الشكل (3) من:

• حلقة الوصل الطورية PLL والتي تواقف مع مركبة التعاقب الموجب للتيار. يستخدم خرج الحلقة PLL والذي هو الزاوية ($\theta = \omega t$) لحساب المركبات المباشرة والمتعامدة للجهود والتيارات ثلاثية الطور المتناوبة (V_d, V_q, I_d, I_q).

• أنظمة القياس التي تقيس المركبات المتعامدة q للتعاقب الموجب للجهود المتناوبة V_1, V_2 ، بالإضافة إلى جهد التيار المستمر V_{dc} .

• منظمات الجهد AC و DC والتي تحسب مركبتي مبدلة الجهد V_{d_conv} و V_{q_conv} ، اللازمتين للحصول على الجهد المستمر المطلوب V_{dref} ، والجهد المحقون، V_{q_ref} ، يساعد منظم الجهد V_q ، منظم تغذية أمامية يتتبعاً قيمد الجهد V_{con} ، من قياس التيار I_d .



الشكل (3) مخطط الخط الواحد لدائرة التحكم بنظام SSSC.

3- المعادلات الميكانيكية للمولد المتواقت [15-19]:

$$\dot{\omega} = \frac{1}{2H} (P_m - P_e - D\omega) \quad (6)$$

$$\dot{\delta} = \omega - \omega_o \quad (7)$$

$\dot{\delta} = d/dt$	تفاضل المتحول
δ, ω	السرعة الزاوية و زاوية القدرة على التوالي.
H, D	ثابت التخادم وثابت العطالة للمولد على التوالي.
P_e, P_m	الاستطاعة الميكانيكية و الكهربائية على التوالي.
ω_o	السرعة الزاوية الاسمية لدوار المولد.

4- المعادلات الكهربائية للمولد المتواقت [19-15]:

لقد تم استخدام نموذج منسوب إلى المحورين q, d (المحور المباشر و المحور المتعامد أو غير المباشر) مع استخدام المميزات العابرة للآلة.

$$\left. \begin{aligned} v_q &= r_s i_q + \dot{\lambda}_q + \omega \lambda_d \\ v_d &= r_s i_d + \dot{\lambda}_d - \omega \lambda_q \\ v'_{fd} &= r'_{fd} i'_{fd} + \dot{\lambda}'_{fd} \\ v'_{kd} &= r'_{kd} i'_{kd} + \dot{\lambda}'_{kd} \\ v'_{kq1} &= r'_{kq1} i'_{kq1} + \dot{\lambda}'_{kq1} \\ v'_{kq2} &= r'_{kq2} i'_{kq2} + \dot{\lambda}'_{kq2} \end{aligned} \right\} \quad [V] \quad (8)$$

تعطى الفيوض المترابطة بالعلاقات التالية:

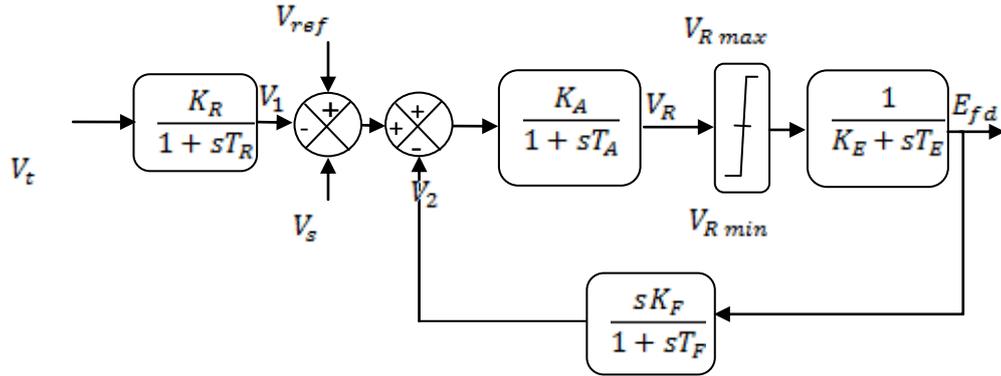
$$\left. \begin{aligned} \lambda_q &= L_q i_q + L_{mq} i'_{kq} \\ \lambda_d &= L_d i_d + L_{md} i'_{fd} + L_{md} i'_{kd} \\ \lambda'_{fd} &= L_{md} i_d + L_{md} i'_{kd} + L'_{fd} i'_{fd} \\ \lambda'_{kd} &= L_{md} i_d + L_{md} i'_{fd} + L'_{kd} i'_{kd} \\ \lambda'_{kq1} &= L_{mq} i_q + L'_{kq1} i'_{kq1} \\ \lambda'_{kq2} &= L_{mq} i_q + L'_{kq2} i'_{kq2} \end{aligned} \right\} \quad [Wb.turn] \quad (9)$$

L, m تحريضية التمغظ و التسريعية .	الكميات على المحورين d و q ،	q, d
k, f كميات تشير إلى ملفات الحقل و الإخماد.	كميات تشير إلى الدوار و الثابت،	S, r

5 - نموذج نظام التهيج [19-15]:

زودت كل مجموعة توليد بنظام تهيج من النوع الأول كما هو مبين في الشكل (4).

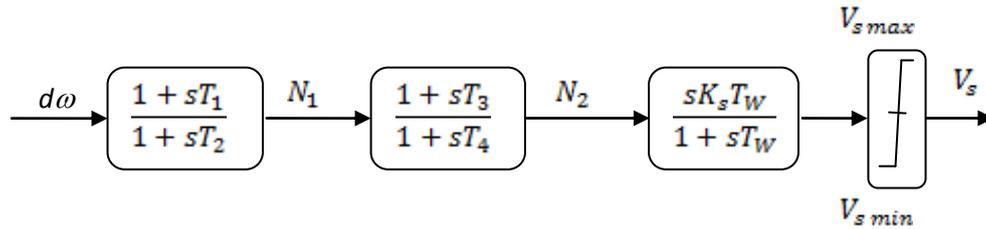
الجهد على أطراف الآلة، جهد حقل التهيج	E_{fd}, V_t
الثابت الزمني و الريج لدارة منظم الجهد الآلي على التوالي	K_A, T_A
الثابت الزمني و الريج لدارة المهيج على التوالي	K_E, T_E
الثابت الزمني و الريج لدارة مخمد الاهتزاز للمهيج على التوالي	K_F, T_F
الثابت الزمني و الريج لدارة المرشح على التوالي.	K_R, T_R



الشكل (4) نموذج نظام التهبيج (Exciter) من نوع IEEE Type-1 معدل

6 - نموذج مخمد الاهتزاز التقليدي PSS [15-19]:

تم استخدام مخمد اهتزاز من النوع التقليدي مع كل مولد، حيث يتألف مخمد الاهتزاز التقليدي PSS من صندوقي تعويض من نوع متقدم-متأخر بالإضافة إلى صندوق تصريف يضمن عدم استجابته إلى المجموعة المستمرة DC أو إلى الترددات الصغيرة جداً كما هو مبين في الشكل (5). يعمل مخمد الاهتزاز عند وصله إلى نظام التهبيج لآلة المتوائمة لتعديل زاوية العزم لمحور الدوران بالتالي زيادة التخادم. يغذى دخل المخمد بإشارة تغير السرعة لمحور الدوران $d\omega$. يعطي هذا المخمد إشارة موجبة إلى دخل المنظم الآلي للجهد.



الشكل (5) مخمد الاهتزاز التقليدي PSS

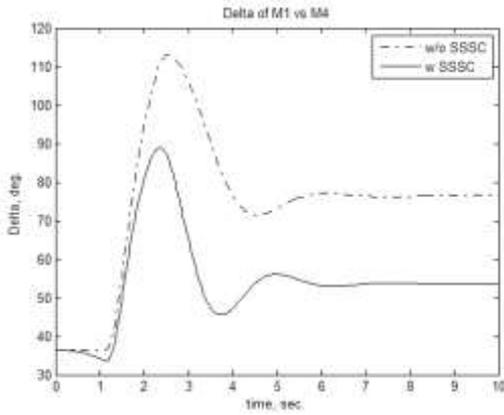
النتائج والمناقشة:

يتألف نظم الطاقة من منطقتين كل منطقة تحوي على محطتي توليد كل منهما باستطاعة 900MVA. يربط بين المنطقتين دائرة نقل ثنائية بطول 220-km، تم تزويد نظام الطاقة في المنطقة الواقعة بين قضيبي التجميع 1 و 2 بنظام تعويض متوائمة تسلسلي ساكن SSSC، باستطاعة 100-MVA وذلك على التسلسل مع خط النقل، وهي قادرة على حقن الجهد حتى 15% من الجهد الاسمي للنظام، يحوي SSSC على وصلة DC بجهد اسمي 40-kV مع مكثفات تكافئ $375\text{-}\mu\text{F}$. تم نمذجة نظام الطاقة وجميع مكوناته باستخدام برنامج Simulink في بيئة الـ MATLAB وتم اختيار طريقة رونغا-كوتا من أجل حل المعادلات التفاضلية للنظام وإجراء محاكاة للنظام، تم تشغيل البرنامج عند وجود نظام المعوض المتوائمة الساكن التسلسلي وايضاً في حالة عدم وجوده وذلك عند حدوث

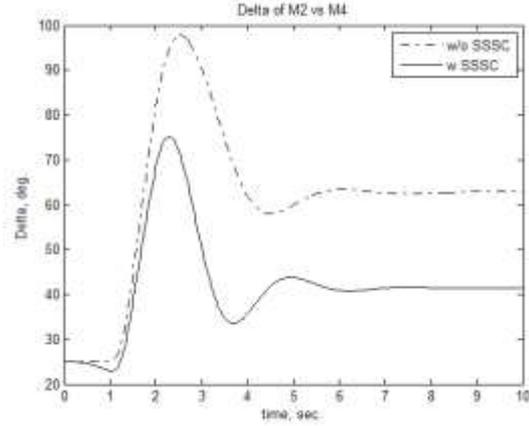
قصر ثلاثي الطور ورسمت الاستجابات الزمنية لمتحولات النظام في الحالتين السابقتين وتمت مقارنتهما مع بعضهما البعض لبيان أهمية استخدام نظام المعوض المتواقت التسلسلي في تحسين أداء النظام.

دراسة الاستقرار العابر للنظام وتأثير نظام الـ SSSC على أداء النظام:

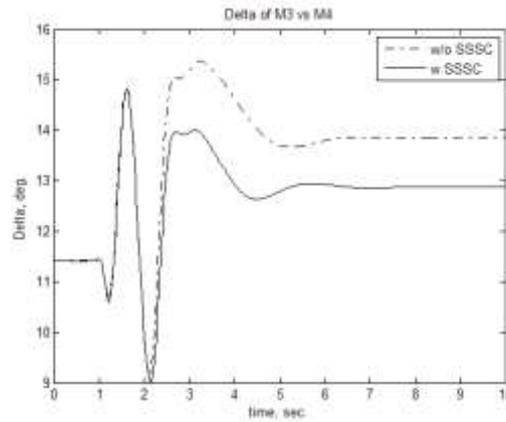
1. تم إحداث قصر ثلاثي الطور في منتصف خط النقل الواصل بين قضيبي التجميع 1 و 2 وذلك لمدة 0.16 ثانية ورسمت الاستجابة الزمنية لزاوية القدرة و السرعة والجهود على أطراف المولدات، كما هو مبين في الأشكال التالية.



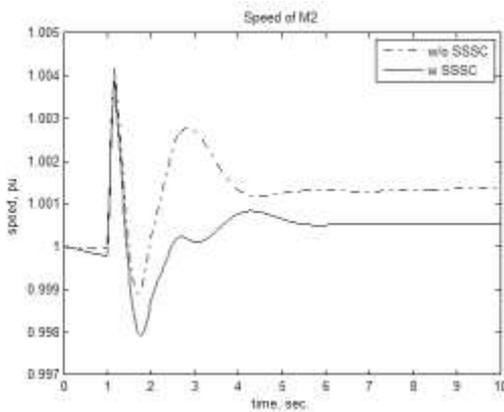
الشكل (7) زاوية القدرة للآلة 2



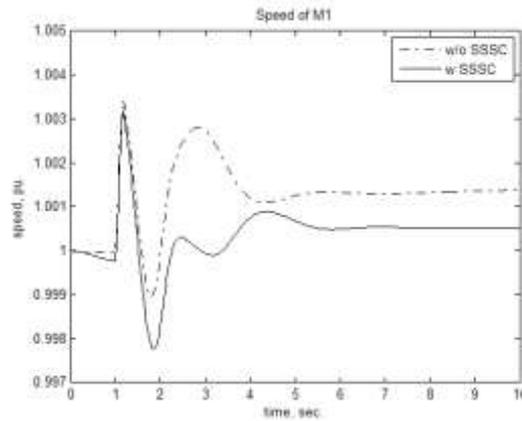
الشكل (6) زاوية القدرة للآلة 1



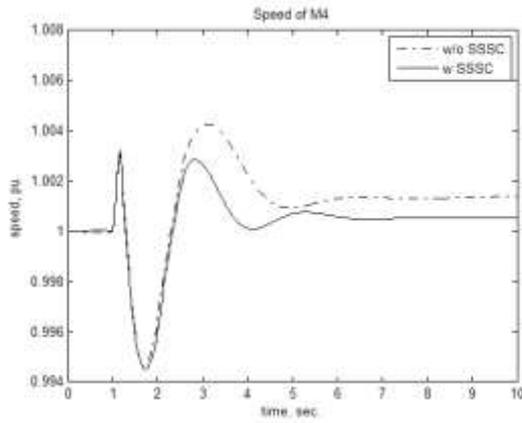
الشكل (8) زاوية القدرة للآلة 3



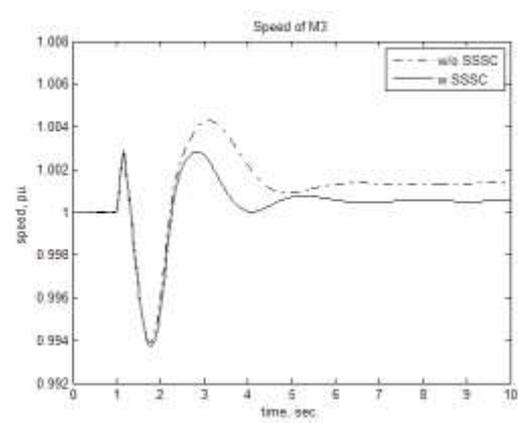
الشكل (10) السرعة للآلة 2



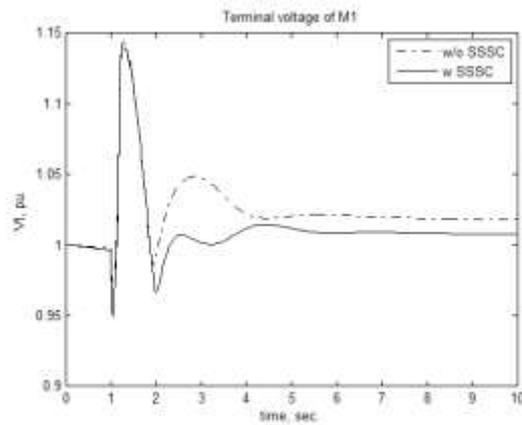
الشكل (9) السرعة للآلة 1



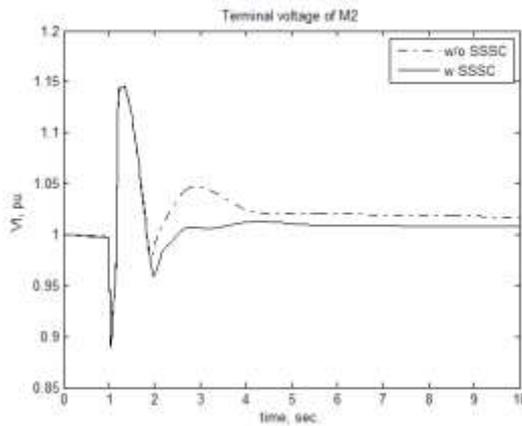
الشكل (12) السرعة للألة 4



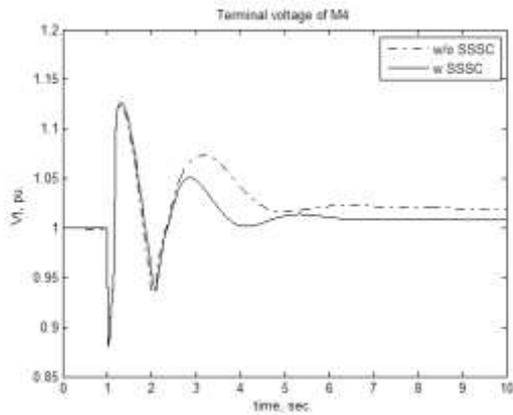
الشكل (11) السرعة للألة 3



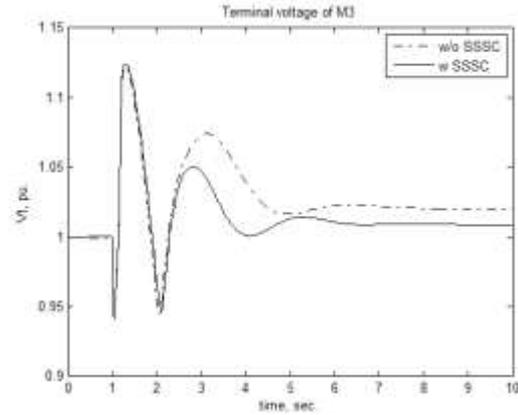
الشكل (13) الجهد على طرفي الآلة 1



الشكل (14) الجهد على طرفي الآلة 2



الشكل (16) الجهد على طرفي الآلة 4



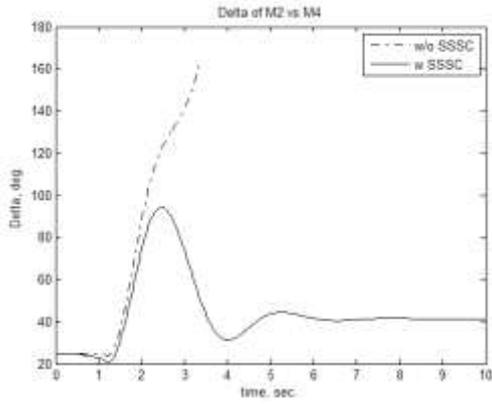
الشكل (15) الجهد على طرفي الآلة 3

تمثل الأشكال (6)، (7) و (8) المقارنة بين الاستجابة الزمنية لزوايا القدرة للآلات 1 و 2 و 3 منسوبة إلى الآلة 4 وذلك عند استخدام نظام الـ SSSC وفي حال عدم استخدامه. يبين الجدول التالي قيم التجاوز الأعظمي والقيم التي استقرت عليها زوايا القدرة.

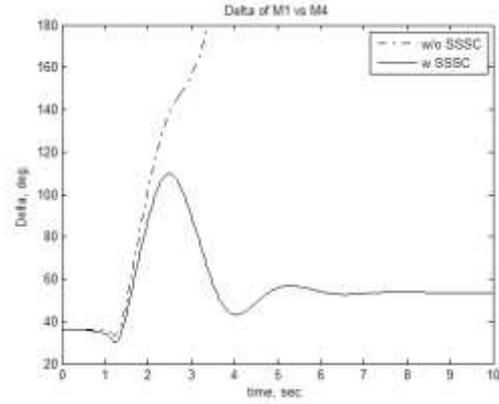
بدون استخدام SSSC		عند استخدام SSSC		
التجاوز الأعظمي	القيمة التي استقرت عليها الزاوية	التجاوز الأعظمي	القيمة التي استقرت عليها الزاوية	
113.1	76.23	88.95	53.84	M1
97.86	62.55	75.12	41.62	M2
15.37	13.86	14.8	12.86	M3

من المقارنة نجد أن استخدام نظام الـ SSSC في النظام يؤدي إلى تقليل التجاوز الأعظمي كما أن الزوايا تستقر على قيم أقل، وهذا يزيد من حدود استقرار النظام. من منحنيات الاستجابة الزمنية للسرعة والمبينة في الأشكال (9)، (10)، (11) و (12) نلاحظ أن قيمة خطأ الحالة المستقرة تنخفض عند استخدام نظام الـ SSSC، كما نلاحظ ذلك من الأشكال (13)، (14)، (15) و (16) والتي تمثل استجابة الجهد على أطراف الآلات عند وجود الـ SSSC وفي حال عدم وجودها.

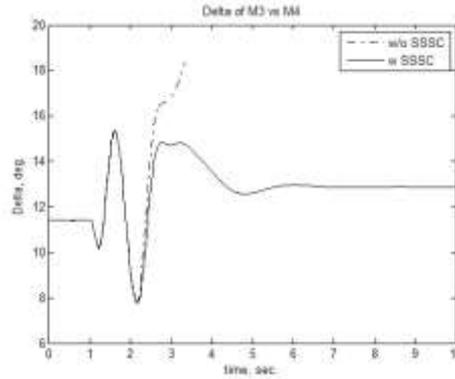
2. تم إحداث قصر ثلاثي الطور على بعد 70 كم من قضيب التجميع 2 وذلك لمدة 0.16 ثانية ورسمت الاستجابة الزمنية لزوايا القدرة و السرعة والجهد على أطراف المولدات، كما هو مبين في الأشكال التالية.



الشكل (18) زاوية القدرة للألة 2



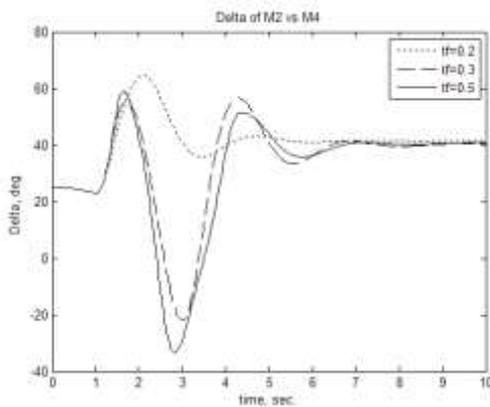
الشكل (17) زاوية القدرة للألة 1



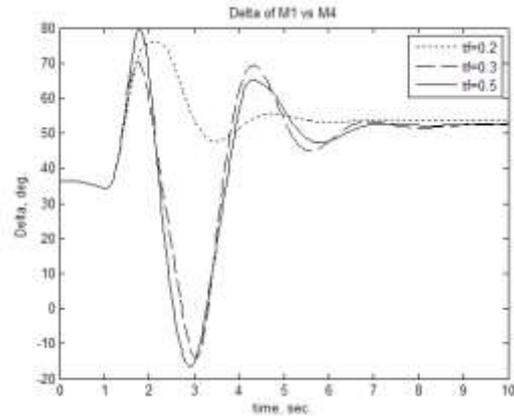
الشكل (19) زاوية القدرة للألة 3

تبين المنحنيات (17)، (18) و (19) والتي تمثل الاستجابة الزمنية لزوايا القدرة عند حدوث قصر ثلاثي الطور بالقرب من قضيب التجميع 2، أن نظام القدرة بدون استخدام الـ SSSC كان غير مستقراً بينما كان مستقراً بوجود الـ SSSC في الخدمة.

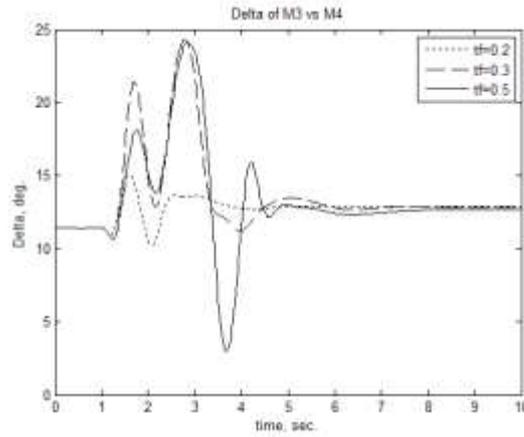
3. دراسة أداء النظام في حالة وجود نظام الـ SSSC وذلك عند حدوث قصر ثلاثي الطور على بعد 70 كم من قضيب التجميع 1 وذلك من أجل أزمنة عطل مختلفة.



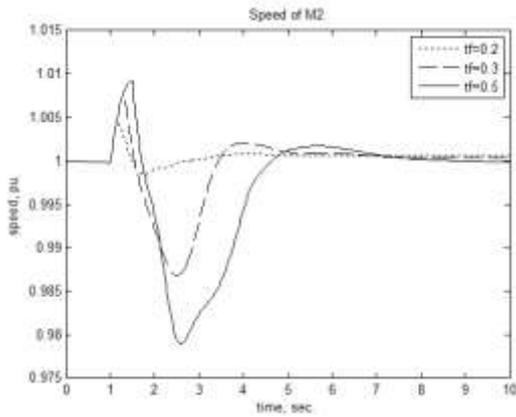
الشكل (21) زاوية القدرة للألة 2



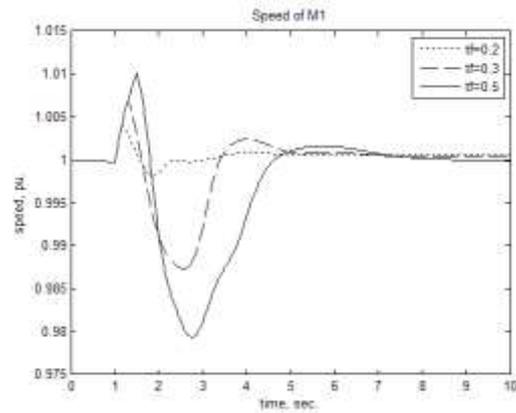
الشكل (20) زاوية القدرة للألة 1



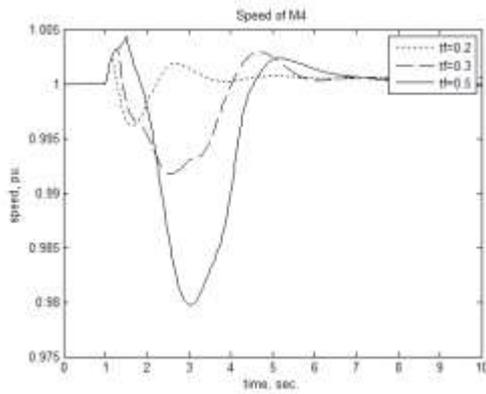
الشكل (22) زاوية القدرة للآلة 3



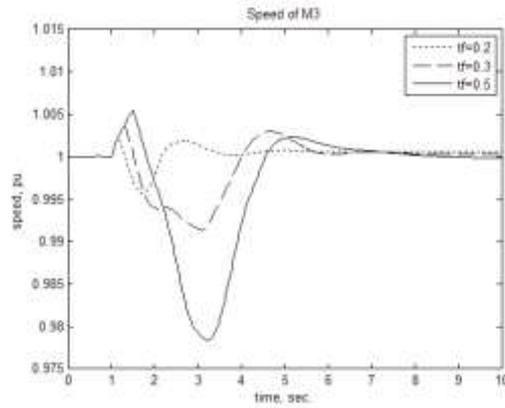
الشكل (24) السرعة للآلة 2



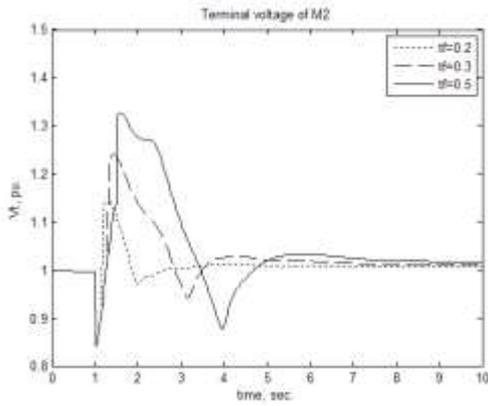
الشكل (23) السرعة للآلة 1



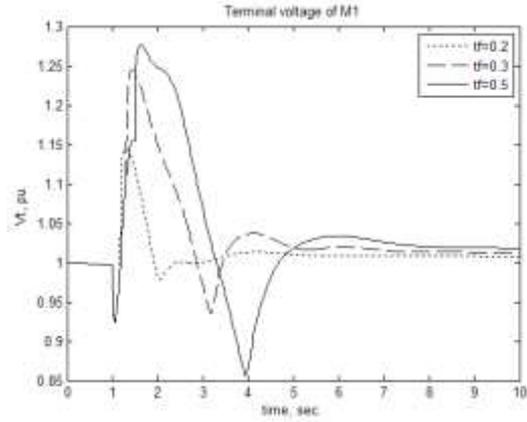
الشكل (26) السرعة للآلة 4



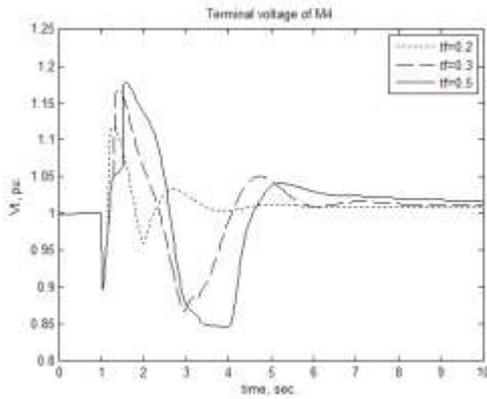
الشكل (25) السرعة للآلة 3



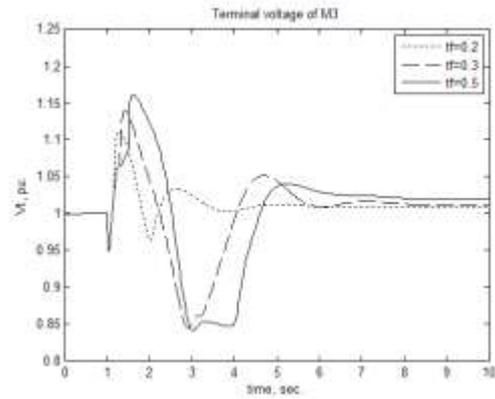
الشكل (28) الجهد على طرفي الآلة 2



الشكل (27) الجهد على طرفي الآلة 1



الشكل (30) الجهد على طرفي الآلة 4



الشكل (29) الجهد على طرفي الآلة 3

تبين الأشكال (20)، (21) و (22) زوايا القدرة عند عمل النظام بوجود الـ SSSC وذلك من أجل أزمنة مختلفة لاستمرار القصر ثلاثي الطور، وهي 0.2، 0.3 و 0.5 ثانية، كما تمثل الأشكال (23)، (24)، (25) و (26) سرعة الآلات من أجل أزمنة مختلفة للعطل، بينما تبين الأشكال (27)، (28)، (29) و (30) الجهد على أطراف الآلات. نلاحظ من الأشكال السابقة أن الاهتزازات تزداد ومطالها أيضاً يزداد مع زيادة زمن استمرار العطل ولكن يبقى النظام مستقرًا .

الاستنتاجات والتوصيات:

تم في هذا البحث دراسة أداء نظام الطاقة الكهربائية متعدد الآلات والذي يحوي نظام تعويض متوافق تسلسلي SSSC. تمت دراسة نظام الـ SSSC، حيث وجدنا أن نظام الـ SSSC يمكن التحكم به ليقدم تعويضاً تسلسلياً للاستطاعة الرديئة، كما انه يتحكم بالاستطاعة المتدفقة في الشبكة. تم اختبار الاستقرار العابر للنظام من خلال تطبيق قصر ثلاثي الطور في أماكن مختلفة من الشبكة وأزمنة عطل مختلفة. من النتائج يمكن أن نستخلص أن استخدام نظام الـ SSSC قدم زيادةً في حدود استقرار النظام.

المراجع:

- [1] GYUGYI, L.; SCHUDER, C.; SEN, K. *Static Synchronous Series Compensator: A solid-state Approach to the Series Compensation of Transmission Lines*. IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 12, No. 1, January 1997, 406-417.
- [2] HAN, B.; KIM, H.; BAEK, S. *Performance Analysis Of SSSC Based On Three-Level Multi-Bridge PWM Inverter*. Electric Power System Research vol. 61, 2002, 195-202.
- [3] HAN, B.; KIM, H.; BAEK, S. *Static Synchronous Series Compensator based on Cascaded H-bridge inverter*. Electric Power System Research vol. 65, 2003, 159-168.
- [4] NGAMROO, I.; KONGPRAWECHNON, W. *A Robust Controller Design Of SSSC for Frequency Oscillations in Interconnected Power Systems*. Electric Power System Research vol. 67, 2003, 161-176.
- [5] NOROUZI, A.H.; SHARAF, A.M. *Two Control Schemes to Enhance the Dynamic Performance of the STATCOM and SSSC*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 1, January, 2005, 435-442.
- [6] EL-MOURSI, M.S.; SHRAF, A.M. *Novel Controllers for the 48-Plus VSC STATCOM and SSSC for Voltage Regulation and Reactive Power Compensation*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, No. 4, November. 2005, 1985-1997.
- [7] PRADHAN, A.C.; LEHN P.W. *Frequency Domain Analysis of The Static Synchronous Series Compensator*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No. 1, Sep. 2006, 440-449.
- [8] CASTRO, M.S.; AYRES, H.M.; DA COSTA, V.F.; DA SILVA, L.C.P *Impacts of the SSSC Control modes on Small- Signal and Transient Stability of a Power System*. Electric Power System Research, 77,2007, 1-9.
- [9] AL-JOWDER, F. *Improvement of Synchronizing Power and Damping Power by Means of SSSC and STATCOM A Comparative study*. Electric Power System Research, 77, 2007, 1112-1117.
- [10] KUMKRATUG, P.; LAOHACHAI, P. *Direct Method for Transient Stability Assessment of a Power System with a SSSC*. Journal of Computer, Vol. 2. No. 8. October 2007, 77-82.
- [11] EL-ZONKOLY, A. *Optimal Sizing of SSSC Controllers to Minimize Transmission and a Novel Model of SSSC to Study Transient Response*. Electric Power System Research, 78, 2008, 1856-1864.
- [12] EL-MOURSI, M.; SHARAF, A.M.; EL-ARROUDI, K. *Optimal Control Schemes for SSSC for Dynamic Series Compensation*. Electric Power System Research, 78, 2008, 646-656.
- [13] PING Z.X.; PAL B. *Flexible AC Transmission Systems: Modeling and Control*. Springer, Germany, 2006,383.
- [14] Panda S.; Padhy N.P. *A PSO-based SSSC Controller for Improvement of Transient Stability Performance*, International Journal of Computer Systems science and Engineering, 2,1,winter 2007, 28-35
- [15] KUNDUR P. *Power System Stability And Control* . Mc Graw-Hill, 1994,1176.
- [16] YAO-NAN Y. - *Electric Power System Dynamics*. Academic Press, INC. New York, 1983,255.
- [17] ANDERSON P.M.; FOUAD A.A. *Power System Control and Stability*. The Jowa State University Press, 1977,464.
- [18] CHEE- M. O. *Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab/Simulink*. Prentic Hall PTR, United States of America, 1998, 626.
- [19] SAUER W.; PAI M.A. *Power System Dynamics and Stability*. Prentic Hall PTR, United States of America, 1998, 357.

قائمة بالمختصرات:

FACTS: Flexible Alternating Current Transmission System.
 SSSC: Static Synchronous Series Compensator.
 GTO: Gate –Turn off Thyristors
 STATCOM: Static Compensator
 PWM: Pulse Wide Modulation.
 IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor.
 EMTP: Electromagnetic Transient Program.

ملحق:

يبين الجدول (1) معطيات خطوط النقل بالقيم الواحدية منسوبة لأساس 230 kV و 100MVA ، كما يبين الجدول (2) معطيات المولدات، بينما يبين الجدولان (4) و (5) قيم ثوابت نظام التهييج و التوربين مع منظم السرعة على التوالي.

الجدول (1) معطيات ممانعات الخطوط في النظام المدروس

From	To	R(pu)	X(pu)	B/2(pu)
5	6	0.0025	0.025	0.021875
6	7	0.001	0.01	0.00875
7	8 each line	0.022	0.22	0.1925
8	9	0.001	0.01	0.00875
9	10	0.0025	0.025	0.021875

الجدول (2) ثوابت المولدات المتواقتة المستخدمة

Parameter		Gen 1,2	Gen 3,4
المفاعلة المتواقتة على المحور d.	x_d	1.8	1.8
المفاعلة العابرة على المحور d.	x'_d	0.3	0.3
المفاعلة دون العابرة على المحور d.	x''_d	0.25	0.25
المفاعلة المتواقتة على المحور q.	x_q	1.7	1.7
المفاعلة العابرة على المحور q.	x'_q	0.55	0.55
المفاعلة دون العابرة على المحور q.	x''_q	0.25	0.25
مقاومة الثابت.	r_s	0.0025	0.0025
التحريضية التسريعية للثابت.	XI	0.2	0.2
الثابت الزمني العابر للدائرة المفتوحة على المحور d.	T'_{do}	8.0	8.0
الثابت الزمني دون العابر للدائرة المفتوحة على المحور d.	T''_{do}	0.03	0.03
الثابت الزمني العابر للدائرة المفتوحة على المحور q.	T'_{qo}	0.4	0.4
الثابت الزمني دون العابر للدائرة المفتوحة على المحور q.	T''_{qo}	0.05	0.05
ثابت العطالة.	H	6.5	6.175

الجدول (3) ثوابت أنظمة التهييج

Parameter	Value
K_A	200
T_A	0.001
K_E	1.0
T_E	0.0
K_F	0.0
T_F	0.0
K_r	1.0
T_r	0.02