تطوير خوارزمية وبرنامج حاسوبي لتحليل جريان الاستطاعة في نظم القدرة الكهربائية الحاوية على نظامSTATCOM

د.م. نبيل الفقيه*

الملخص

تُعد مسألة إبقاء التوترات ضمن الحدود المطلوبة إحدى المسائل الأساسية في تشغيل نظام القدرة الكهربائية،ولما كانـت توترات العقد في نظام القدرة تتأثر بشكل ملحوظ بتغيرات الأحمال وبدخول العناصر الكهربائية أو بخروجها على الدارة المكافئة لنظام القدرة كانت الحاجة إلى تنظيم التوتر بقابلية تحكم عالية.

وبسبب تنامي استخدام أنظمة نقل التيـار المتنـاوب المرنـة FACTS بـشكل عـام ومنهـا المعوضـات التزامنيـة الساكنة STATCOM في نظم القدرة الكهربائية من أجل تحسين استقرار التوتر وبسبب الحاجة إلى برمجيات غير متاحة دوماً، كان هدف البحث هو تطوير نموذج رياضي وخوارزمية وبرنامج حاسوبي لتحليل جريان الاستطاعة في الحالـة المستقرة في نظام قدرة كهربائية يحتوي على معوض تزامني ساكن STATCOM.

وسعتْ مصفوفة اليعقوبي في خوارزمية نيوتن-رافسون، وهي العلاقة بين التوتر والاستطاعة في حالات عدم التطابق، بمتغيرات نظام STATCOM من أجل ضبط التوتر والتحكم بالاستطاعة الردية التي يقـدمها أو يمتـصها فـي العقـدة المشتركة مع نظام القدرة بقابلية تحكم عالية.

أنجز برنامج حاسوبي، تضمن وسائل التحكم في بارامترات نظام STATCOM أعطى خصائص تقارب عالية جداً. تـم التحقق من الخوارزمية المطورة وفعالية البرنامج المنجز من خلال تطبيقه على عدد من الأنظمة القياسية عرض منهـا ما تم على IEEE 5-bus system.وأجريت اختبارات على شبكة النقل الكهربائية السورية 400 kV.

الكلمات المفتاحية: STATCOM، FACTS، **معوض تزامني _ساكن، جريان الاستطاعة، نيوتن-رافسون، مبدل منبـع توتر.**

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

1- المقدمة:

تبرز في أنظمة نقل القدرة الكهربائية أهميـة الاسـتثمار الكامل لخطوط النقل القائمة وتخفيض الضياعات ما قـد يغنى عن إنشاء محطات توليد إضافية أو خطـوط نقـل جديدة تحتاج إلى زمن إنشاء وكلفة عالية. تُسهم **أنظمة نقل التيـار المتنـاوب المرنـة** Flexible alternating-current transmission systems (FACTS) -إلى حد كبير- في تقديم الحلول لمسألة نقل القدرة الكهربائية. فأنظمة FACTS تجعل من الممكن التحكم بقيمة توتر قضبان التجميـع وجريـان الاستطاعة الفعلية والردية على خطوط النقل [1].

تتقاسم أنظمة نقـل التيـار المتنـاوب المرنـة FACTS المستندة إلى **مبـدلات منبـع التـوتر** Voltage Source Converters (VSCs) وهي المعوض التزامنـي السـاكن Static Synchronous Compensator (STATCOM)و المعوض التسلسلي التزامني الساكن Static Synchronous Series Compensator (SSSC)و نظام الـتحكم الموحـد بجريـان الاسـتطاعة Unified Power Flow Controller (UPFC)و نظام التيار المستمر عالي التوتر- مبدل منبع تـوتر -VSC High Voltage Direct Current (VSC-HVDC)، إمكانية التحكم بنظام القدرة بدرجـة أكبـر أو أقل، فهي قادرة على تنظـيم تـوترات العقـد أو حقـن استطاعة ردية في أحـد أطرافهـا والـتحكم بجريـان الاستطاعة الفعلية والردية [2]،[3].

مع أن استقرار التوتر ذو طابع محلي إلا أن نتائج عـدم الاستقرار هذا قد يكون لها تأثير واسع في كامل الشبكة، وينجم عن بعـض الحـالات الطارئـة انخفـاض قـيم التوتر(Voltage Profile) انخفاضاً كبيراً قد يـصل فـي مراحله المتقدمة إلى الانهيار الكلي على أجزاء رئيـسة من نظام القدرة. لما كانت توترات العقد في نظام القدرة الكهربائية تتأثر بشكل ملحوظ بتغيرات الأحمال و بدخول العناصر الكهربائية أو بخروجها على الـدارة المكافئـة لنظام القدرة كان لابد من تنظيم التوتر فيها. فالانخفاض الكبير في التوتر نتيجة التحميل الزائـد يحمـل حـواكم انخفاض التوتر under-voltage والحواكم التي تتحـسس التوتر على فصل شامل للأحمال. كذلك، تتسبب زيـادة التوتر في أعطال الأجهزة بسبب انهيار العازليـة وفـي توليد إشباع مغناطيسي في المحولات يؤدي إلـى توليـد توافقيات [4].

يتغذى نظام القدرة الكهربائية الاستطاعة من العديد مـن وحدات التوليد ويزود عدداً كبيراً من الأحمـال، وتُعـد مسألة إبقاء التوترات ضمن الحـدود المطلوبـة إحـدى المسائل الأساسية في تشغيل نظام القـدرة مـع الأخـذ بالحسبان أنه بتغيير الأحمال تتغير متطلبات الاسـتطاعة الردية لنظام النقل، ولما كانت الاستطاعة الردية لا يمكن نقلها لمسافات طويلة فإنه يجري التحكم بالتوتر باستعمال وسائل خاصة توضع في نظام القـدرة.وتـشكل مـسألة الاختيار الصحيح لتجهيزات تعويض الاستطاعة الرديـة وتحديد مكان تركيبها، وكذلك تنسيق عمـل تجهيـزات التحكم بالاستطاعة الردية وتنظيم التوتر مـن التحـديات التي تواجه مشغلي نظم القدرة الكهربائية ومستثمريها.

يعد تعويض الاستطاعة الردية -في أغلب الأحيان- أكثر الطرائق فاعلية لتحسين كل مـن الاسـتطاعة الفعليـة المنقولة واستقرار التوتر، إذْ يجري الـتحكم بمـستويات التوتر من خلال حقن استطاعة ردية أو سحبها. تـزود مجموعات التوليد بالوسائل الأساسية للتحكم بالتوتر مـن خلال منظمات التوتر التي تتحكم بحقل التهـيج للحفـاظ على مستوى التوتر على أطراف المولّـدات، وللـتحكم بالتوتر في أنحاء نظام القدرة كلّه يجِب استخدام وسـائل إضافية لتعويض الاستطاعة الردية. أما الوسائل التقنيـة المستخدمة في عملية التعويض فهي المكثفات التفرعيـة، والمكثفات التسلسلية، والمفاعلات التفرعية، والمعوضات التزامنية الدوارة، والمعوضات الردية الساكنة Static Var

Compensators (SVCs) والمعوضات التزامنية الساكنة (STATCOMs).

توصل المكثفات التفرعية والمفاعلات التفرعية إلى الشبكة إما بشكل دائم أو توصل وتفصل طبقاً لشروط العمل. وتُضبطُ الاستطاعة الردية المقدمة أو المستجرة من قبل SVCs وSTATCOMs بشكل آلي إذْ يجري الحفاظ على توترات قضبان التجميع الموصولة عليها ضمن حدود مقبولة [4]، وتقوم وحدات التوليد مجتمعة، بتثبيت التوترات في نقاط معينة في النظام، أما التوترات في المواقع الأخرى من النظام فهي محددة بجريان الاستطاعة الفعلية والردية عبر عناصر الشبكة [5].

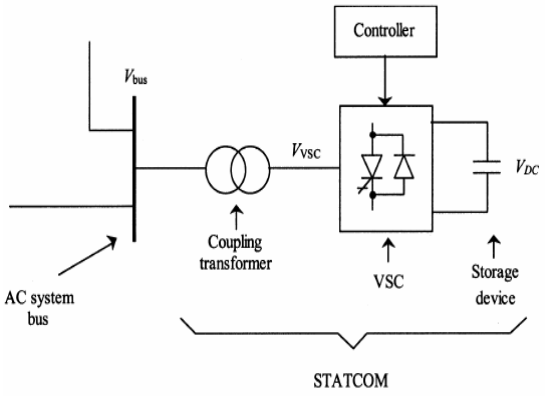
إن المعوض التزامني الساكن STATCOMيكافئ المعوض التزامني الدوار إلا أن سرعة استجابة الأول في توليد الاستطاعة الردية أو امتصاصها أعلى بكثير كونه لا يحتوي على أجزاء دوارة [6] ويؤدي STATCOM من حيث المبدأ جميع الوظائف التي يمكن أن يؤديها المعوض الردي الساكن (SVC) لكن بسرعة أكبر [7]؛ وهو مدمج أكثر ويحتاج إلى حيز أقل ولا يتأثر عمله بانخفاض توتر قضيب التجميع الموصل إليه [8]،[9]،[10].

2- هدف البحث:

بسبب تنامي استخدام أنظمة FACTS بشكل عام ومنها STATCOM في نظم القدرة الكهربائية من أجل تحسين استقرار التوتر وبسبب الحاجة إلى برمجيات غير متاحة دوماً، **هدفَ هذا البحث** إلى"تطوير نموذج رياضي وخوارزمية **لتحليل** جريان الاستطاعة في الحالة المستقرة في نظام قدرة كهربائية يحتوي على معوض تزامني ساكن STATCOM". اكتفينا في هذا البحث بإعطاء فكرة عن المكونات الرئيسة لنظام STATCOM ومبدأ عمله دون التطرق إلى تفاصيل اختيار عناصره أو تصميمها أو قيادة المبدلات ودارة التحكم، مع الإشارة إلى المراجع ذات الصلة. ونهتم بشكل أساسي في تطوير نموذج رياضي وخوارزمية وبرنامج حاسوبي لتحليل جريان الاستطاعة في الحالة المستقرة في نظام قدرة كهربائية يحتوي على معوض تزامني ساكن STATCOM.

3- لمحة عن المعوض التزامني الساكن STATCOM:

إن الوظيفة الرئيسة للمعوض التزامني الساكن STATCOM هي تقديم استطاعة رديه أو امتصاصها وتنظيم التوتر في نقطة وصله مع نظام القدرة الكهربائية بقابلية تحكم عالية [11]. يتكون المعوض التزامني الساكن STATCOMمن مبدل منبع توتر VSC وجهاز تخزين قدرة DC ودارات التحكم الخاصة به، ويتصل مع نظام القدرة الكهربائية AC من خلال محولة موصلة على التفرع إلى أحد قضبان التجميع. يبين الشكل (1) مخططاً رمزياً للمعوض التزامني الساكن STATCOM[7].



الشكل (1) مخطط رمزي لنظام STATCOM متصل مع نظام قدرة AC

يمكن أن يكون جهاز تخزين القدرة DC مدخرة يبقى توترها ثابتاً أو أن يكون مكثفاً يجري رفع التوتر أو خفضه على طرفيه بالتحكم بالمعرج (inverter)، وبهذه الطريقة تزداد القدرة المخزنة أو تنقص.يحول مبدل منبع التوتر VSC التوتر المستمر DC من جهاز التخزين إلى نظام توترات متناوب ثلاثي الطور، ويتصل مع نظام AC عبر مفاعلة المحولة [12]، [13].

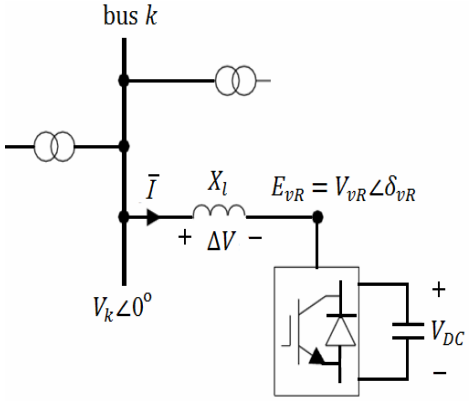
مبدأ عمل المعوض التزامني الساكن(STATCOM):

يمثل مبدل منبع التوتر (VSC) في نظام STATCOMكما هو مبين في الشكل (2) بمنبع توتر متناوب موصل إلى نظام AC عبر مفاعلة ، يمكن التحكم بقيمة وزاوية توتره وتردده بشكل مستقل. هذا يعني أنه يمكن عد جسر VSC آلة تزامنية لكن سرعة التحكم بها عالية جداً، يعطى توترها اللحظي بالمعادلة (1):

$$V_t = \frac{1}{2} V_{dc}\, M \sin(\omega t + \theta) + \text{harmonic terms} \quad (1)$$

إذْ: M مؤشر التعديل، ω التردد الأساسي، θ انزياح زاوية طور توتر الخرج تبعاً لموقع الموجة المعدلة.

يمكن تعديل المتغيرات M وθ بشكل مستقل بوساطة متحكم VSC لإعطاء أي قيمة للتوتر أولانزياح زاويته. إن التحكم بقيمة وزاوية طور هبوط التوتر ΔV على المفاعلة X_l يحدد قيمة واتجاه جريان الاستطاعة الفعلية والردية عبر المفاعلة X_l[14]، [15].



الشكل (2) مبدأ عمل مبدل منبع التوتر (VSC) موصل إلى قضيب تجميع.

يجري تبادل الاستطاعة الفعلية بين المبدل والشبكة عن طريق التحكم بزاوية الطور δ_{vR} ومن ثَم تغيير فرق زاوية الطور$(\delta_{vR} - \vartheta_k)$بين توتر المبدل $\bar{V}_{vR}$ والتوتر $\bar{V}_k$ على قضيب التجميع bus k[2]، [3]،وتعطى الاستطاعة الفعلية وفق المعادلة (2).

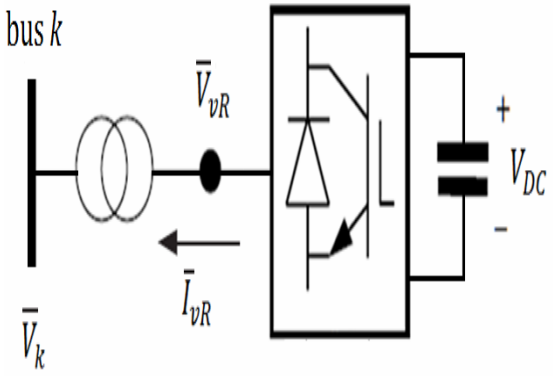
$$P = \frac{V_{vR} \cdot V_k}{X_l} \cdot \sin(\delta_{vR} - \vartheta_k) \quad (2)$$

يتحدد جريان الاستطاعة الرديية بقيمة التوتر V_{vR} المتحكم به بوساطة عرض النبضة في جسر المبدل [3]،[8]،[9]. يعتمد الحد الأقصى لتوتر خرج المبدل على التوتر المستمرV_{DC}.وتعطى الاستطاعة الردية في نهاية الإرسال وفق المعادلة (3):

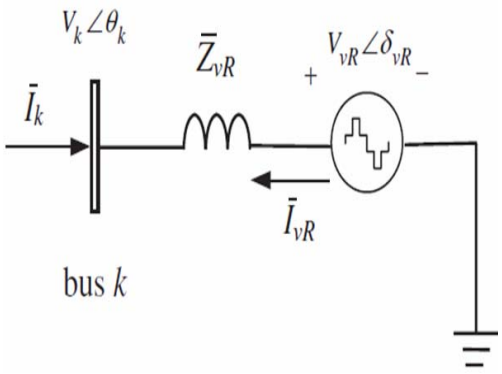
$$Q = \frac{V_{vR}^2}{X_l} - \frac{V_{vR} \cdot V_k}{X_l} \cdot \cos(\delta_{vR} - \theta_k) \quad (3)$$

يجري التحكم بتوتر المكثف بضبط جريان الاستطاعة **الفعلية** باتجاه VSC، ولابد خلال العمل الطبيعي من جريان استطاعة فعلية صغيرة إلى VSC لتعويض الاستطاعة الفعلية الضائعة داخله، لذا فإن قيمة فرق زاوية الطور $(\delta_{vR} - \theta_k)$ عملياً سالبة وقريبة من الصفر، وفي ظروف الحالة المستقرة وعند إهمال الضياعات فإن تبادل الاستطاعة الفعلية يساوي الصفر.

يبين الشكل (3a) مخططاً رمزياً لمبدل منبع توتر VSC موصل إلى نظام AC من خلال محولة موصلة على التفرع كما يبين الشكل(3b) الدارة المكافئة لنظام المعوض التزامني الساكن STATCOM.



(a) مبدل منبع توتر VSC موصل إلى نظام AC من خلال محولة موصلة على التفرع



(b) الدارة المكافئة للمعوض التزامني الساكن

الشكل (3) المعوض التزامني الساكنSTATCOM

4- النموذج الرياضي:

عند تحليل جريان الاستطاعة، يمكن تمثيل النظام STATCOMاستناداً إلى خصائصه تمامـاً مثـل مولـد تزامني ذي استطاعة ردية مقيدة [2]. تمثل العقدة التي يتصل بها STATCOM مع نظام القدرة بعقدة (bus) نموذجPV قد تتحول إلى عقدة نموذجPQ في حال تجاوز قيد الاستطاعة الردية Q، ففي تلك الحالة يسنَد إلى الاستطاعة الردية المولدة/المستجرة قيمة قيد الاستطاعة الردية الموافق.

نَعد في النموذج الرياضي أن توتر مبدل منبع التوتر يضبط تلقائياً من أجل بلوغ القيمة المطلوبة لتوتر النقطة المشتركة مع نظام القدرة. أي عد العقدة التي يتصل بها نظام STATCOM مع نظام AC عقدة تحكم تُحدد قيمة توترها والاستطاعة الفعلية والردية فيها في حين تعالج قيمة توتر مبدل منبع التوتر كمتغير حالة.

باستخدام الدارة المكافئة المبينة في الشكل (3b)، حيث مثلتْ محطة التبديل في نظام STATCOM بمنبع توتر عقدي $V_{vR}\angle\delta_{vR}$ خلف مفاعلته X_{vR} (ممانعته Z_{vR}) وتوتر قضيب التجميع الموصل إليه$V_k\angle\theta$، يمكن كتابة المعادلة الآتية:

$$\bar{I}_{vR} = (V_{vR}\angle\delta_{vR} - V_k\angle\theta)(G_{vR} + jB_{vR}) \quad (4)$$

إذْ:

$$\bar{Y}_{vR} = \frac{1}{\bar{Z}_{vR}} = G_{vR} + jB_{vR} \quad (5)$$

يمكن التعبير عن الاستطاعة الفعلية والردية المحقونة بوساطة منبع التوتر بالمعادلات الآتية:

$$\bar{S}_{vR} = \bar{V}_{vR}\bar{I}^*_{vR} = \bar{V}_{vR}\bar{Y}^*_{vR}(\bar{V}^*_{vR} - \bar{V}^*_k) \quad (6)$$

$$\bar{S}_{vR} = V^2_{vR}(G_{vR} - jB_{vR}) - V_{vR}V_k\angle(\delta_{vR} - \theta_k)(G_{vR} - jB_{vR})$$

$$\bar{S}_{vR} = V^2_{vR}G_{vR} - jV^2_{vR}B_{vR} - V_{vR}V_k[cos(\delta_{vR} - \theta_k) + jsin(\delta_{vR} - \theta_k)](G_{vR} - jB_{vR}) \quad (7)$$

إذاً، الاستطاعة الفعلية والردية:

$$P_{vR} = V^2_{vR}G_{vR} - V_{vR}V_k[G_{vR}cos(\delta_{vR} - \theta_k) + B_{vR}sin(\delta_{vR} - \theta_k)] \quad (8)$$

$$Q_{vR} = -V^2_{vR}B_{vR} - V_{vR}V_k[G_{vR}sin(\delta_{vR} - \theta_k) - B_{vR}cos(\delta_{vR} - \theta_k)] \quad (9)$$

تقع قيمة التوتر V_{vR} ضمن المجال:

التابع $V_{vR\,min} \le V_{vR} \le V_{vR\,max}$ لسعة مكثف STATCOM، أما زاوية الطور δ_{vR} فيمكن أن تأخذ (نظرياً) أي قيمة ضمن المجال $0 \le \delta_{vR} \le 2\pi$.

يمكن كتابة معادلات جريان الاستطاعة المحقونة في قضيب التجميع bus k كما يأتي:

$$P_k = V^2_kG_{vR} - V_kV_{vR}[G_{vR}\cos(\theta_k - \delta_{vR}) + B_{vR}\sin(\theta_k - \delta_{vR})] \quad (10)$$

$$Q_k = -V^2_kB_{vR} - V_kV_{vR}[G_{vR}\sin(\theta_k - \delta_{vR}) - B_{vR}\cos(\theta_k - \delta_{vR})] \quad (11)$$

إذْ:

δ_{vR}= زاوية التوتر V_{vR}

θ_k= زاوية توتر قضيب التجميع k

لتحليل جريان الاستطاعة في نظام قدرة يتكون من **n** قضيب تجميع ويحتوي على نظام STATCOM، نُضيف عن كل نظام STATCOM أربع معادلات، تأخذ بالحسبان محطة المبدل، إلى المعادلات غير الخطية 2×(n-1) لنظام

القدرة وينَفذُ حل نظام المعادلات غير الخطية باسـتخدام طريقة نيوتن-رافسون.

باستخدام معادلات جريان الاستطاعة(8)...(11)، يأخـذ نموذج معادلات النظام STATCOM الشكل الآتي:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta Q_k \\ \Delta P_{vR} \\ \Delta Q_{vR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial V_k}V_k & \frac{\partial P_k}{\partial \delta_{vR}} & \frac{\partial P_k}{\partial V_{vR}}V_{vR} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_k}V_k & \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_{vR}} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_{vR}}V_{vR} \\ \frac{\partial P_{vR}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{vR}}{\partial V_k}V_k & \frac{\partial P_{vR}}{\partial \delta_{vR}} & \frac{\partial P_{vR}}{\partial V_{vR}}V_{vR} \\ \frac{\partial Q_{vR}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_{vR}}{\partial V_k}V_k & \frac{\partial Q_{vR}}{\partial \delta_{vR}} & \frac{\partial Q_{vR}}{\partial V_{vR}}V_{vR} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta Q_k \\ \frac{\Delta V_k}{V_k} \\ \Delta \delta_{vR} \\ \frac{\Delta V_{vR}}{V_{vR}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

إذْ عدت قيمة التوتر V_{vR} ووزاويتـه δ_{vR} كمـا أشـرنا متغيرات حالة، أما عناصر مـصفوفة اليعقـوبي التـي استخدمناها في نظام المعادلات (12) فهـي المـشتقات الجزئية الآتية:

من المعادلات (8)، (9)، (10)، (11) يمكن الحصول على:

$$\frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} = -Q_k - V_k^2 G_{vR},$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_{vR}} = V_k V_{vR}[G_{vR}\sin(\theta_k - \delta_{vR}) - B_{vR}\cos(\theta_k - \delta_{vR})],$$

$$\frac{\partial P_{vR}}{\partial \delta_{vR}} = -Q_{vR} - V_{vR}^2 B_{vR},$$

$$\frac{\partial P_{vR}}{\partial \theta_k} = V_{vR} V_k [G_{vR}\sin(\delta_{vR} - \theta_k) - B_{vR}\cos(\delta_{vR} - \theta_k)],$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial V_k}V_k = P_k + V_k^2 G_{vR},$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial V_{vR}}V_{vR} = V_k V_{vR}[G_{vR}\cos(\theta_k - \delta_{vR}) + B_{vR}\sin(\theta_k - \delta_{vR})],$$

$$\frac{\partial P_{vR}}{\partial V_{vR}}V_{vR} = P_{vR} + V_{vR}^2 G_{vR},$$

$$\frac{\partial P_{vR}}{\partial V_k}V_k = V_{vR}V_k[G_{vR}\cos(\delta_{vR} - \theta_k) + B_{vR}\sin(\delta_{vR} - \theta_k)],$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} = P_k - V_k^2 G_{vR},$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \delta_{vR}} = -V_k V_{vR}[G_{vR}\cos(\theta_k - \delta_{vR}) + B_{vR}\sin(\theta_k - \delta_{vR})],$$

$$\frac{\partial Q_{vR}}{\partial \delta_{vR}} = P_{vR} - V_{vR}^2 G_{vR},$$

$$\frac{\partial Q_{vR}}{\partial \theta_k} = -V_{vR}V_k[G_{vR}\cos(\delta_{vR} - \theta_k) + B_{vR}\sin(\delta_{vR} - \theta_k)],$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_k}V_k = Q_k - V_k^2 B_{vR},$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_{vR}}V_{vR} = V_k V_{vR}[G_{vR}\sin(\theta_k - \delta_{vR}) - B_{vR}\cos(\theta_k - \delta_{vR})],$$

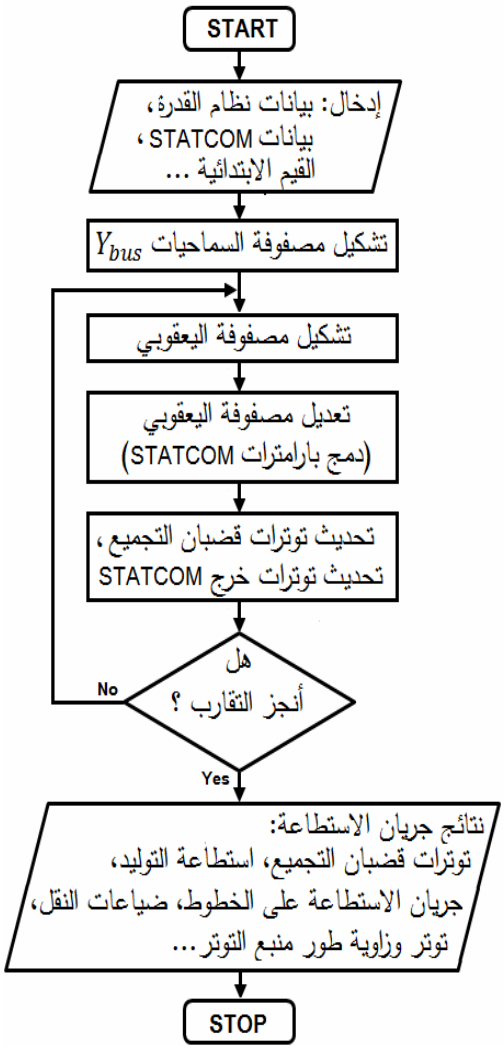
من المعادلة (9) نحصل على:

$$\frac{\partial Q_{vR}}{\partial V_{vR}}V_{vR} = Q_{vR} - V_{vR}^2 B_{vR},$$

$$\frac{\partial Q_{vR}}{\partial V_k}V_k = -V_{vR}V_k[G_{vR}\sin(\delta_{vR} - \theta_k) - B_{vR}\cos(\delta_{vR} - \theta_k)].$$

5- خوارزمية تحليل جريان الاستطاعة في نظام قـدرة يحتوي علىSTATCOM:

بناء على أسس النموذج الرياضـي والمعـادلات التـي ذكرناها في الفقرات السابقة، وسعتْ مصفوفة اليعقـوبي في خوارزمية نيوتن-رافسون التقليدية لحساب جريـان الاستطاعة وفق ما يلخصه المخطط الانسيابي المبين في الشكل (4).



الشكل (4): المخطط الانسيابي لجريان الاستطاعة، طريقة نيوتن-رافسون مع STATCOM

تتألف بيانات الدخل من بيانات نظام القدرة وهي البيانات الأساسية التي يحتاج إليها الحساب التقليدي لجريان الاستطاعة، أي عدد قضبان التجميع وأنواعها، بيانات خطوط النقل، وبيانات التوليد والأحمال فضلاً عن بارامترات نظام STATCOM وموقعه في نظام القدرة.

استناداً إلى النموذج الرياضي والخوارزمية المقترحة قمنا بتصميم برنامج حاسوبي بلغة البرمجة C++ سمي **STATCOMLF** اختصاراً لـ (STATCOM Load Flow). يتكون البرنامج المنجز من التوابع الرئيسة المبينة في الجدول (1).

الجدول (1)التوابع الرئيسة في البرنامج STATCOMLF

function	الوظيفة
PowerFlowsData	قراءة بيانات نظام القدرة
SSCData	قراءة بيانات STATCOM
YBus	تشكيل مصفوفة السماحيات
SSCNewRaphson	تنفيذ حل تكراري يستخدم طريقة نيوتون-رافسون
NetPowers	حساب جدولة الاستطاعات
CalcPowers	حساب الاستطاعات المحقونة في قضبان التجميع
SSCCalcPowers	حساب الاستطاعات المحقونة في قضبان التجميع من قبل STATCOM
PowerMismat	حساب عدم تطابق الاستطاعة
SSCMismatches	حساب عدم تطابق الاستطاعة مع STATCOM
NRaJacobian	تشكيل مصفوفة اليعقوبي
SSCJacobian	إضافة عناصر STATCOM إلى مصفوفة اليعقوبي
StateVarbUpdat	تحديث متغيرات الحالة
SSCUpdating	تحديث متغيرات الحالة لـ STATCOM
SSCLimits	التحقق من أن توتر المنبع STATCOM ضمن الحدود المسموحة
PQflows	حساب جريان الاستطاعة
SSCPQpower	حساب جريان الاستطاعة في النظام STATCOM

أما البيانات المطلوب إدخالها في البرنامج زيادة على بيانات نظام القدرة وموقع STATCOM فهي:

NSSC= i	عدد أنظمة STATCOM
SSCsend(i)	قضيب تجميع STATCOM
X vr (i)	مفاعلة المبدل
Tar Vol (i)	القيمة المرغوب فيها لتوتر قضيب التجميع
VSta(i)	حالتا التحكم في قيمة توتر العقدة: 1 is on; 0 is off
Psp(i)	جريان الاستطاعة الفعلية المرغوب فيه
P Sta (i)	حالتا التحكم في قيمة الاستطاعة الفعلية: 1 is on; 0 is off
Qsp(i)	جريان الاستطاعة الردية المرغوب فيه
QSta(i)	حالتا التحكم في قيمة الاستطاعة الردية: 1 is on; 0 is off
Vvr(i)	القيمة الابتدائية لتوتر المنبع
Tvr(i)	القيمة الابتدائية لزاوية توتر المنبع
VvrHi(i)	الحد الأعلى لقيمة منبع التوتر
VvrLo(i)	الحد الأدنى لقيمة منبع التوتر

6- الاختبارات الحاسوبية Computer Simulation:

أجرينا باستخدام البرنامج ***STATCOMLF*** اختبارات حاسوبية على عدة شبكات قياسية نعرض منها فقط ما أُجري على شبكة مكونة من خمس عقد 5-bus test network، كما أجرينا اعتماداً على البيانات المتاحة [16] اختبارات على شبكة النقل الكهربائية السورية 400 kV. وقد عد في الاختبارات جميعها التي أجريناها أن القيمة المطلقة العظمى لعدم تطابق الاستطاعة المحقونة في العقد من أجل دقة $\varepsilon=10^{-12}$

6-1 الشبكة الاختبارية IEEE 5-bus test network:

تتألف الشبكة الاختبارية 5-bus test network من خمسة قضبان تجميع ومولّدين وسبعة خطوط نقل، يبين الجدولان (2) و(3) معطيات الدخل لنظام *bus* -5 بالقيم الواحدية. عد توتر الأساس 230 kV و استطاعة الأساس 100MVA.

الجدول (2) بيانات خطوط النقل* 5 bus Line Data

Line	Bus to bus	Series Z	Shunt Y
1	**Line 1 – 2**	0.02+0.06	0+j0.060
2	**Line 1 – 3**	0.08+0.24	0+j0.05
3	**Line 2 – 3**	0.06+0.18	0+j0.04
4	**Line 2 – 4**	0.06+0.18	0+j0.04
5	**Line 2 – 5**	0.04+0.12	0+j0.030
6	**Line 3 – 4**	0.01+0.03	0+j0.020
7	**Line 4 – 5**	0.08+0.24	0+j0.050

*** All values in per unit on 230-kV, 100-MVA base.) بيانات دخل قضبان التجميع في النظام 3الجدول (5-bus test network**

Bus		Voltage		Generator				Load	
No.	Type*	|V|	θ	P	Q	Qmin	Qmax	P	Q
1	1	**1. 06**	**0.0**	**0. 00**		**-2.00**	**2. 00**	0.00	0.00
2	2	**1. 00**		**0. 40**		**-1. 50**	**1. 50**	0.20	0.10
3	3							0.45	0.15
4	3							0.40	0.05
5	3							0.60	0.10

*Bus Type: (1) swing bus, (2) generator bus (PV bus), and (3) load bus (PQ bus)

نُفذَ برنامج جريان الاستطاعة ***STATCOMLF*** من أجل حالتين. **الأولى** من دون وضع نظام STATCOM (الحالة الأصلية base case) ويبين الجدولان (4-a)، (4-b) بعض النتائج.

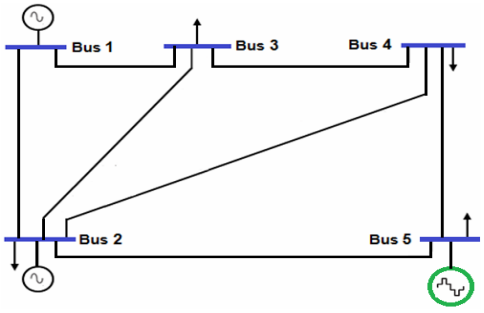
الجدول (4-a) جريان الاستطاعة من دون STATCOM: نتائج قضبان التجميع

Bus No.	Voltage (V,θ)	Load (MW,Mvar) pu	Generator (MW, Mvar) pu
1	1.06, 0.0000	0.0	1.3112, 0.9082
2	1.0000, -2.0612	0.2000, 0.1000	0.4000, -0.6159
3	0.9872, -4.6367	0.4500, 0.1500	0.0000
4	0.9841, -4.9570	0.4000, 0.0500	0.0000
5	0.9717, -5.7649	0.6000, 0.1000	0.0000

الجدول (4-b) جريان الاستطاعة من دون STATCOM: نتائج خطوط النقل

Line No	From Bus /To Bus	Power Flow	
		P , pu	Q , pu
1	1-2	89.33	74.00
2	1-3	41.79	16.82
3	2-3	24.47	-2.52
4	2-4	27.71	-1.72
5	2-5	54.66	5.56
6	3-4	19.39	2.86
7	4-5	6.60	0.52

عدلتْ في الحالة **الثانية** شبكة5-Bus بإضافة نظام STATCOM إلى قضيب التجميع5 *bus*، كما هو مبين على الشكل (5)، لإبقاء توتره على القيمة1 p.u. يبين الجدولان (5-a) و(5-b) نتائج حساب جريان الاستطاعة. وقد أنجز التقارب بعد **6** عمليات تكرار وبدقة 10^{-12}.



الشكل (5) مخطط الخط الواحد لنظام IEEE 5-bus يحتوي على STATCOM

الجدول (5-a) جريان الاستطاعة بوجود STATCOM: نتائج قضبان التجميع

Bus No.	Voltage (V,θ)	Load (MW, Mvar) pu	Generator (MW, Mvar) pu
1	1.06, 0.0000	0.0	1.3180, 0.8848
2	1.0000, -2.0633	0.2000, 0.1000	0.4000, -0.9143
3	0.9926, -4.7132	0.4500, 0.1500	0.0000
4	0.9911, -5.0576	0.4000, 0.0500	0.0000
5	1.0000, -6.2147	0.6000, 0.1000	0.0000, 0.3200

الجدول(5-b) جريان الاستطاعة بوجود STATCOM: نتائج خطوط النقل

Line No	From Bus /To Bus	Power Flow	
		P , pu	Q , pu
1	1-2	89.39	73.98
2	1-3	41.79	14.50
3	2-3	24.35	-5.43
4	2-4	27.60	-5.48
5	2-5	54.95	-17.63
6	3-4	19.32	-2.15
7	4-5	6.42	-8.21

وقد اعتمدنا في هذا الاختبار البارامترات والقيم الابتدائية المبينة في الجدول (6)

الجدول (6) بارامترات النظام STATCOM في الاختبار

STATCOMat bus **5**	
NSSC = 1	PSta (1)=1
SSCsend (1) = **5**	QSta (1)=0
Xvr (1) = 0.1	Vvr (1)=1.0
TarVol (1) = **1.0**	Tvr (1)=0.0
VSta (1) =1	VvrHi (1)=1.1
Psp (1) = **0.0**	VvrLo (1)=0.9

تُشير نتائج جريان الاستطاعة بوجود STATCOM إلى الآتي:

- يقدم STATCOM استطاعة ردية قدرها **32** MVAR لكي يبقي مقدار التوتر على قضيب التجميع 5 مساوياً 1.0 p.u.
- تحسن وضع التوتر (voltage profile) على قضبان التجميع.
- أنقص المولد على قضيب التجميع المرجعي الاستطاعة الردية التي يقدمها نحو2.6% كما زاد المولد على

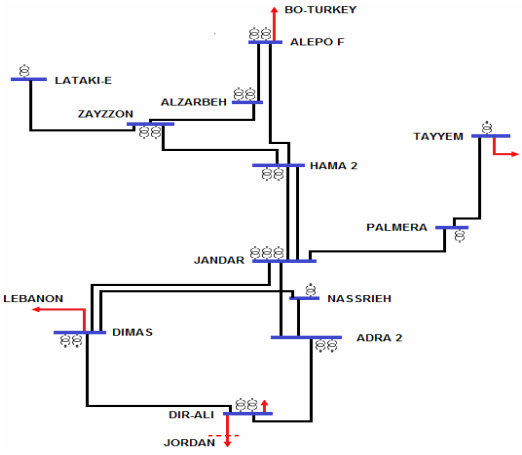
قضيب التجميع 2 الاستطاعة الردية التي يمتصها نحو 48.4% مقارنة بالحالة الأصلية.

- جريان الاستطاعة الردية على الخطوط L_{2-5}، L_{3-4}، L_{4-5} عكس اتجاهه.
- قيمة توتر مبدل منبع التوتر في STATCOM تساوي $V_{vR} = 1.032$ p.u. و زاويته $\delta_{vR} = -6.2147^0$.

ونلحظ أن الاستطاعة الردية المتاحة في الشبكة أكبر من الحالة الأصلية.

2-6 الشبكة الكهربائية السورية 400 kV:

نُفذَ في سياق هذا البحث اختبارات على الشبكة الكهربائية السورية 400 kV، بداية من دون إضافة STATCOM، ثم بعد إضافة STATCOM على أحد قضبان التجميع. تتألف شبكة النقل الكهربائية السورية 400 Kv وفقاً للمرجع [16] من 12 قضيب تجميع منها 5 قضبان توليد، و15 خط نقل كما هو مبين على الشكل (6). عد توتر الأساس 400kV واستطاعة الأساس 100 MVA.



الشكل (6) مخطط الخط الواحد لشبكة النقل الكهربائية السورية 400 kV

1-2-6 حساب جريان الاستطاعة من دون إضافة STATCOM:

يهدف هذا الاختبار إلى تحليل جريان الاستطاعة في شبكة النقل من دون STATCOM، ما يسمح بتكوين فكرة عن تشغيل نظام القدرة الكهربائية في الحالة الأصلية والتحقق من مدى مطابقة النتائج مع تلك المحسوبة في [17] لأجل البيانات نفسها.

عند حساب جريان الاستطاعة باستخدام البرنامج المنجز ***STATCOMLF*** (من دون تفعيل STATCOM) أنجز التقارب بعد 7عمليات تكرار. وبحسب النتائج المبينة في الجدولين (7) و(8) نلحظ الآتي:

1) تطابقاً تاماً في نتائج حساب جريان الاستطاعة مع تلك المحسوبة ببرنامج PSS/E [17].
2) أن قيم توتر قضيبي تجميع تدمر والتيم منخفضة وهي 389.67 Kv و352.43 kV على التوالي (علماً أن الحد الأدنى للتوتر المسموح في حالة التشغيل النظامي هي 380 kV وفي حالة الطوارئ هي 372 kV بحسب [18]).
3) عدم تكافؤ في توزيع جريان الاستطاعة على الخطوط.
4) لم يتجاوز تحميل أي من الخطوط حد التحميل الحراري.

الجدول (7): نتائج حساب توترات قضبان التجميع في نظام النقل 400 kV من دون STATCOM

Without STATCOM			Bus Voltage	
Bus			Magnitude	angle
No.	Type	Name	(pu)	(deg.)
1	Swing	DIR-ALI	1.0100	0.0000
2	PQ	DIMAS	1.0043	-2.0100
3	PQ	ADRA 2	1.0085	-1.6797
4	PQ	NASSRIEH	1.0078	-1.8726
5	PV	JANDAR	1.0183	-1.6514
6	PV	HAMA 2	1.0183	-1.6634
7	PV	ZAYZZON	1.0110	-2.2806
8	PQ	ALZARBEH	1.0026	-3.5132
9	PQ	ALEPPO F	1.0045	-3.5207
10	PV	LATAKI-E	1.0067	-2.1499
11	PQ	PALMERA	0.9742	-5.0449
12	PQ	TAYYEM	0.8811	-10.2735

الجدول (8) جريان الاستطاعة والضياعات في نظام النقل 400 kV من دون STATCOM

		Sending		**Receiving**		power	
		power flow		power flow		**losses**	
Line No	From Bus /To Bus	Active MW	Reactive MVAR	**Active** MW	Reactive MVAR	**Active** MW	Reactive MVAR
1	1-2	307.70	14.28	-306.84	-35.40	0.86	-21.12
2	1-3	206.89	-22.45	-206.41	-11.30	0.48	-33.75
3	2-4	-17.35	-42.21	17.36	-0.11	0.01	-42.32
4	2-5	-25.22	-85.89	25.28	4.63	0.06	-81.26
5	3-4	47.87	-3.93	-47.86	-15.79	0.01	-19.72
6	3-5	-5.66	-74.57	5.69	11.84	0.03	-62.73
7	5-6	1.56	-19.54	-1.56	-19.30	0.00	-38.84
8	5-6	1.56	-19.54	-1.56	-19.30	0.00	-38.84
9	5-11	217.91	106.66	-216.41	-164.33	1.50	-57.67
10	6-7	55.48	2.23	-55.41	-59.82	0.07	-57.59
11	6-9	108.04	-6.60	-107.73	-76.91	0.32	-83.51
12	7-8	114.10	8.33	-113.88	-59.42	0.22	-51.09
13	7-10	-14.69	14.65	14.70	-51.46	0.01	-36.81
14	8-9	-0.52	-52.38	0.53	41.21	0.01	-11.17
15	11-12	206.41	159.13	-203.40	-217.50	3.01	-58.37

6-2-2 حساب جريان الاستطاعة بعد إضافة STATCOM:

حسب في **الاختبار الأول**(case1) جريان الاستطاعة بعد إضافة STATCOM على قضيب التجميع bus 11(تدمر). وقد اعتمدنا في هذا الاختبار البارامترات والقيم الابتدائية المبينة في الجدول (9).

الجدول (9) بارامترات النظام STATCOM في الاختبار الأول case1

STATCOMat bus **11**	
NSSC = 1	PSta(1)=1
SSCsend (1)=**11**	QSta(1)=0
Xvr (1)=0.1	Vvr(1)=1.0
TarVol (1)=**1.0**	Tvr(1)=0.0
VSta(1)=1	**VvrHi(1)=1.2**
Psp(1)=**0.0**	VvrLo(1)=0.9

أنجز التقارب بعد 7 عمليات تكرار، وحصلنا على نتائج حساب توترات قضبان التجميع المبينة في الجدول (10) ونتائج جريان الاستطاعة الفعلية والردية والضياعات على خطوط الشبكة المبينة في الجدول (11).

الجدول (10) نتائج حساب توترات قضبان التجميع على شبكة النقل 400 kV بوجود STATCOM على bus 11

With STATCOM			Bus Voltage	
Bus			Magnitude	angle
No.	Type	Name	(pu)	(deg.)
1	Swing	DIR-ALI	1.0100	0.0000
2	PQ	DIMAS	1.0043	-2.0078
3	PQ	ADRA 2	1.0085	-1.6771
4	PQ	NASSRIEH	1.0078	-1.8701
5	PV	JANDAR	1.0183	-1.6443
6	PV	HAMA 2	1.0183	-1.6563
7	PV	ZAYZZON	1.0110	-2.2735
8	PQ	ALZARBEH	1.0026	-3.5061
9	PQ	ALEPPO F	1.0045	-3.5136
10	PV	LATAKI-E	1.0067	-2.1428
11	PQ	PALMERA	1.0000	-5.0565
12	PQ	TAYYEM	0.9116	-9.9851

الجدول (11) جريان الاستطاعة والضياعات في نظام النقل 400 kV بوجود STATCOM على bus 11

Line No	From Bus /To Bus	Sending power flow Active MW	Sending power flow Reactive MVAR	Receiving power flow **Active** MW	Receiving power flow Reactive MVAR	power **losses** **Active** MW	power **losses** Reactive MVAR
1	1-2	307.37	14.29	-306.51	-35.43	0.86	-21.14
2	1-3	206.57	-22.44	-206.09	-11.33	0.48	-33.77
3	2-4	-17.38	-42.21	17.39	-0.11	0.01	-42.32
4	2-5	-25.51	-85.86	25.57	4.61	0.06	-81.25
5	3-4	47.90	-3.93	-47.89	-15.79	0.01	-19.72
6	3-5	-6.01	-74.54	6.05	11.81	0.03	-62.73
7	5-6	1.56	-19.54	-1.56	-19.30	0.00	-38.84
8	5-6	1.56	-19.54	-1.56	-19.30	0.00	-38.84
9	5-11	217.26	14.63	-216.17	-79.43	1.09	-64.80
10	6-7	55.48	2.23	-55.41	-59.82	0.07	-57.59
11	6-9	108.04	-6.60	-107.73	-76.91	0.32	-83.51
12	7-8	114.10	8.33	-113.88	-59.42	0.22	-51.09
13	7-10	-14.69	14.65	14.70	-51.46	0.01	-36.81
14	8-9	-0.52	-52.38	0.53	41.21	0.01	-11.17
15	11-12	206.17	150.19	-203.40	-217.50	2.77	-67.31

يبين الجدول (12) الاستطاعة التي يقدمها المعوض التزامني الساكن وتوتر مبدل منبع التوتر قيمة وزاوية والاستطاعة الفعلية الكلية الضائعة في خطوط النقل.

إذْ:

$Q\ SSC$= الاستطاعة الردية المحقونة بوساطة VSC

Q_{send}= الاستطاعة الردية المحقونة في bus 11

الجدول (12):الاستطاعة التي يقدمها الـSTATCOMوتوتر وزاوية طور مبدل منبع التوتر

Voltage source	V_{vR} (pu)	**1.0760**
	$\delta_{vR}(deg.)$	**−5.0565°**
Total active transmission losses (MW)		5.9376
$P\ SSC$(pu)		0.0
$Q\ SSC$(pu)		**0.8178**
Q_{send} (pu)		**0.7596**

ملخص الاختبار الأول (case1) واستنتاجاته:

لوحظ عند ربط STATCOM على قضيب التجميع 11 ما يأتي:

1) ارتفاع قيمة توترات قضيبي تجميع **تدهر** **والقيم** إلى القيم 400.00 kV و364.64 kV أي ازدادت بالنسب 2.648% و3.462% على التوالي.
2) انخفاض إجمالي الاستطاعة الفعلية الضائعة في خطوط نظام النقل بنسبة 9.881% (انخفاض من 6,5886 MW إلى 5.9376MW).
3) يبين الجدول (12) أن STATCOMيقدم استطاعة رديـة **75.96**MVAR وأن توتر مبدل منبع التوتر:

$\overline{V}_{vR} = 1.076\angle\ 5.0565°$ p.u.

وأن فرق الصفحة: $(\delta_{vR} - \delta_{11}) = 0$

حسب في **الاختبـار الثـاني** (case2) جريـان الاستطاعة بعد إضافة STATCOM على قضيب التجميع **12** bus (التيم).وقد اعتمدنا في هـذا الاختبار البارامترات والقيم الابتدائية التـي وردت في الجدول (9) وأنجز التقارب بعـد 7 عمليات تكرار. حصلنا علـى نتـائج حـساب توترات قضبان التجميع المبينة فـي الجـدول (13) ونتائج جريان الاستطاعة الفعلية والردية والضياعات على خطوط الشبكة المبينـة فـي الجدول (14).

الجدول (13) نتائج حساب توترات قضبان التجميع في شبكة النقل 400 kV بوجود STATCOM على bus 12

With STATCOM			Bus Voltage	
Bus			Magnitude	angle
No.	Type	Name	(pu)	(deg.)
1	Swing	DIR-ALI	1.0100	0.0000
2	PQ	DIMAS	1.0043	-2.0029
3	PQ	ADRA 2	1.0085	-1.6713
4	PQ	NASSRIEH	1.0078	-1.8646
5	PV	JANDAR	1.0183	-1.6285
6	PV	HAMA 2	1.0183	-1.6404
7	PV	ZAYZZON	1.0110	-2.2576
8	PQ	ALZARBEH	1.0026	-3.4902
9	PQ	ALEPPO F	1.0045	-3.4978
10	PV	LATAKI-E	1.0067	-2.1269
11	PQ	PALMERA	**1.0237**	-5.0437
12	PQ	TAYYEM	**1.0000**	-9.6838

الجدول (14)جريان الاستطاعة والضياعات في نظام النقل 400 kV بوجود STATCOM على bus 12

		Sending		**Receiving**		power	
		power flow		power flow		**losses**	
Line No	From Bus /To Bus	Active MW	Reactive MVAR	**Active** MW	Reactive MVAR	**Active** MW	Reactive MVAR
1	1-2	306.63	14.31	-305.78	-35.50	0.86	-21.19
2	1-3	205.85	-22.42	-205.38	-11.39	0.47	-33.81
3	2-4	-17.45	-42.20	17.46	-0.12	0.01	-42.32
4	2-5	-26.17	-85.80	26.23	4.55	0.06	-81.25
5	3-4	47.98	-3.94	-47.96	-15.78	0.01	-19.72
6	3-5	-6.80	-74.47	6.83	11.74	0.03	-62.73
7	5-6	1.56	-19.54	-1.56	-19.30	0.00	-38.84
8	5-6	1.56	-19.54	-1.56	-19.30	0.00	-38.84
9	5-11	215.82	-69.97	-214.79	2.57	1.03	-67.39
10	6-7	55.48	2.23	-55.41	-59.82	0.07	-57.59
11	6-9	108.04	-6.60	-107.73	-76.91	0.32	-83.51
12	7-8	114.10	8.33	-113.88	-59.42	0.22	-51.09
13	7-10	-14.69	14.65	14.70	-51.46	0.01	-36.81
14	8-9	-0.52	-52.38	0.53	41.21	0.01	-11.17
15	11-12	204.79	-7.77	-203.40	-89.19	1.39	-96.97

يبين الجدول (15) الاستطاعة التي يقدمها المعوض التزامني الساكن وتوتر مبدل منبع التوتر قيمة وزاوية والاستطاعة الفعلية الكلية الضائعة في خطوط النقل.

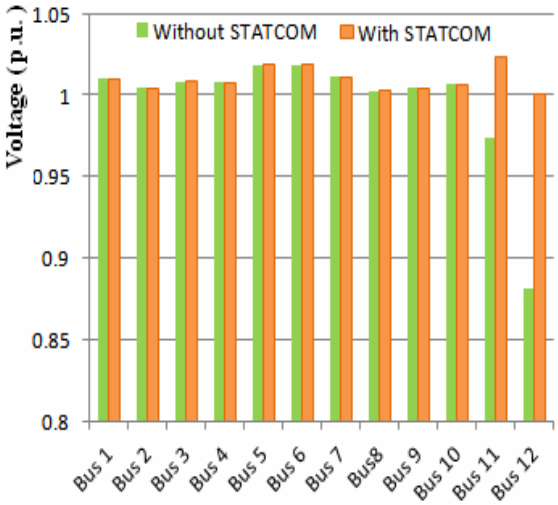
الجدول (15): الاستطاعة التي يقدمها الـ STATCOM وتوتر وزاوية طور مبدل منبع التوتر

Voltage source	V_{DR} (pu)	**1.1283**
	$\delta_{DR}(deg.)$	-9.6838^0
Total active transmission losses (MW)		4.4855
$P\ SSC$(pu)		0.0
$Q\ SSC$(pu)		**1.4477**
Q_{send} (pu)		**1.2831**

ملخص الاختبار الثاني (case2) واستنتاجاته:

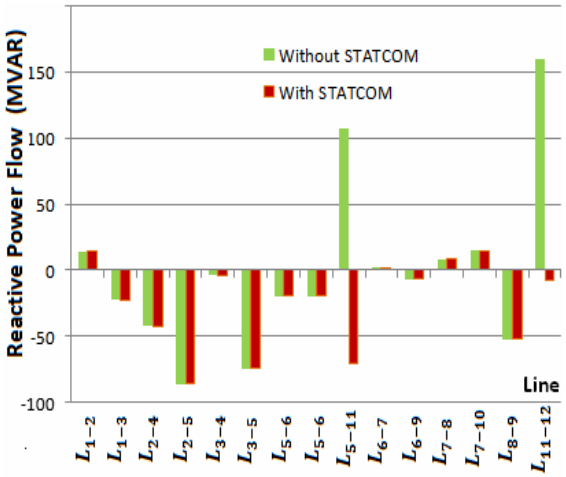
أدى ربط نظامSTATCOM على قضيب التجميع 12 إلى الآتي:

1) ارتفاع قيمة توترات قضيبي تجميع تدمر والتيم، كما هو مبين في الجدول (13) والشكل (7)، إلى القيم 409.48 kV و400.00 kV أي بالنسب 5.081% و 13.494%على التوالي.



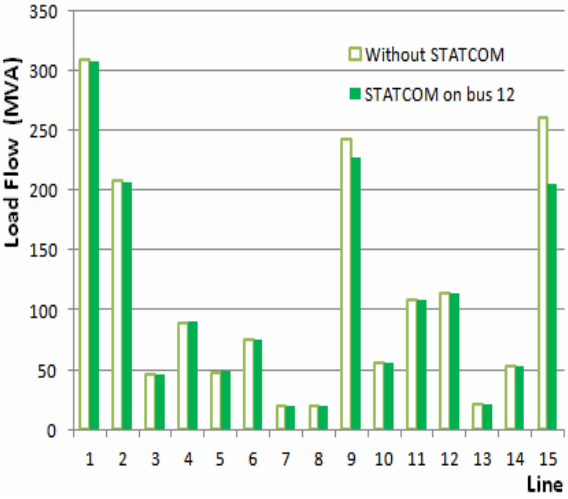
الشكل (7) مقارنة توترات قضبان التجميع على شبكة400 kV من دون STATCOM ومعه على bus 12

2) انخفاض جريان الاستطاعة الرديئة على بعض خطوط الشبكة وعكس اتجاهه على الخطين L_{5-11} وL_{11-12} كما هو مبين على الشكل (8).



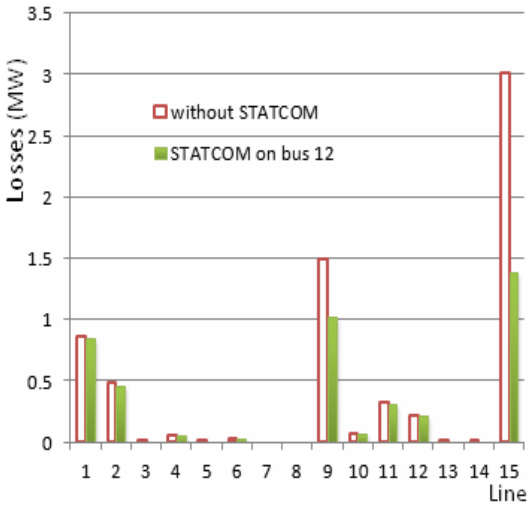
الشكل (8) مقارنة جريان الاستطاعة الردية على خطوط شبكة 400 kV من دون STATCOM ومعه على bus 12

3) انخفاض جريان الاستطاعة الظاهرية على معظم خطوط النقل، كما هو مبين على الشكل (9).



الشكل (9) جريان الاستطاعة على خطوط شبكة 400 kV من دون STATCOM ومعه على bus 12

4) انخفاض إجمالي الاستطاعة الفعلية الضائعة على خطوط النقل بنسبة 31.92% (انخفضت من 6.5886 MW إلى 4.4855 MW)، كما هو مبين في الجدول (15) والشكل (10).



الشكل (10) الضياعات الفعلية على خطوط شبكة النقل 400 kV من دون STATCOM ومعه على bus 12

5) يبين الجدول (15) أن STATCOM يقدم استطاعة ردية قدرها128.31MVAR وأن توتر مبدل منبع التوتر:

$$\bar{V}_{oR} = 1.1283\angle -9.6838^{o}\ \text{p.u.}$$

7- الاستنتاجات والتوصيات:

- طُور نموذج رياضي وخوارزمية لتحليل جريان الاستطاعة بالحالة المستقرة لنظام قدرة متناوب يحتوي على معوض استطاعة ردية ساكن STATCOM، استند إلى دمج المعادلات الرياضية التي تعبر عن الادارة المكافئة للنظام STATCOM في مصفوفة اليعقوبي لخوارزمية نيوتن- رافسون.
- استناداً إلى الخوارزمية المطورة، أنجز برنامج حاسوبي يمكن استخدامه في تحليل جريان الاستطاعة في أي نظام قدرة توافرت بياناته اللازمة مع STATCOM أو من دونه، كما أن البرنامج قابل للتعديل أو التطوير والربط مع برامج تصميم أخرى.
- إن إضافة النظام STATCOM إلى نظام قدرة كهربائية يتيح ضبط توتر العقدة المشتركة بينهما وتلبية حاجة نظام القدرة من الاستطاعة الردية.
- لما كان STATCOM يولد استطاعته الردية، لذا تُنقص بعض المولدات استطاعتها الردية المولدة أو تزيد استجرارها للاستطاعة الردية.
- يؤدي استخدام STATCOM في نظام القدرة إلى استثمار أفضل لخطوط النقل القائمة وخفض ضياعات النقل الكلية، وتحسين وضع التوتر (voltage profile) على قضبان التجميع، مما ينعكس إيجاباً على الاقتصاد الوطني والبيئة.
- لموقع نظام STATCOM في نظام القدرة الكهربائية دور مهم في خفض الجريان الحلقي للاستطاعة في الشبكة وإنقاص ضياعات النقل الكلية.
- البحث قابل للتطوير في المجالات الآتية:

1- تحليل السلوك الديناميكي للنظام STATCOM في شبكة النقل وأثره في تحسين استقرارها.

2- استثمار البرنامج المنجز في دراسة جدوى استخدام النظام STATCOM في شبكة النقل الكهربائية السورية 230 kV، 400 kV.

8- المراجع*

- KALYAN, K. S.; MEY, L. S. "***Introduction to FACTS Controllers: Theory, Modeling, and Applications***". John Wiley & Sons, 2009, 408.
- HINGORANI, N. G.; GYUGYI, L. "***Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems***". Wiley–IEEE Press: New York, 2000, 432.
- ZHANG, X. P.; REHTANZ, C.; PAL, B. "***Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control"***. Springer Verlag: Berlin, Germany 2006, 383.
- AMBRIZ-PEREZ, H. "***Advanced SVC Models for Newton-Raphson Load Flow and Newton Optimal Power Flow Studies***". IEEE Trans. On Power Systems, vol.15, No.1, 2000, 129-136.
- WEEDY, B. M; CORY, B. J.; JENKINS, N.; EKANAYAKE,J. B.; STRBAC,G. "***Electric Power Systems***". 5th. ed., John Wiley & Sons, 2012, 512.
- NEWMAN, M.; HOLMES, D.; NIELSEN, J.; BLAABJERG, F. "***A dynamicvoltage restorer (DVR) with selective harmonic compensation at medium voltage level***". IEEE Transactions on Industry Applications, 41(6), 2005, 1744–1753.
- ACHA, E.; AGELIDIS, V. G.; ANAYA-LARA, O.; MILLER, T. J. E. "***Power Electronic Control in Electrical System***s". 2nd. ed., Elsevier, 2002, 464.
- PADIYAR, K. R."*FACTS: Controllers in Power Transmission and Distribution*". ANSHAN PUB, 2009, 532.
- SAHOO, A.K.; DASH, S.S.; THYAGARA-JAN, T. "***Modeling of STATCOM and UPFCfor Power System Steady State Operation and Control***". IET-UK International Conference on Information and Communication Technology in Electrical Sciences (ICTES 2007), Chennai, Tamilnadu, India, 458-463.
- SODE-YOME, A.; MITHULANANTHAN, N. "***Comparison of shunt capacitor, SVC and STATCOM in static voltage stability margin enhancement*** ". International Journal of Electrical Engineering Education, Vol. 41, No. 2, 2004, 158-171
- VERTIKA, J. "***Introduction to FACTS Devices and Introducing New Generation of STATCOM***",

International Journal of Scientific Research Engineering & Technology (IJSRET), Vol. 1 No. 5 August 2012, 022-027.

- VILLA, J. A.; ACHA, E.; EXPOSITO, A. G. "***Voltage Source Converter Modeling for Power System State Estimation: STATCOM and VSC-HVDC***". Power System, IEEE Transaction on, Vol. 23, No. 4, 2008, 1552-1559
- HAN, B. M.; KARADY, G. G.; Park, J. K.; Moon, S. I. "***Interaction analysis model for transmission static compensator withEMTP***", *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 13, No. 4,1998,1297-1302.
- SENSARMA, P.S.; PADIYAR, K.R.; RAMNARAYANAN, V. "***Analysis and Performance Evaluation of a Distribution STATCOM for Compensating Voltage Fluctuations***", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 16, No. 2, 2001, 259-264.
- Steinke, J.K. ; Steimer, P.; Reichert, S.;Buchmann, B. "***Design comparison and control of medium voltage STATCOM with novel twin converter topology***". PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual Vol. 4, 2004, 2546 – 2552.
- Ministry of Electricity-Syria, Power Transmission Network Data, 2009-2011.
- PTI interactive power system simulator –PSS/E PEEGT Network UPTODATE to 30-12-2010 Pick-load 7876 MW +85 to Lebanon + import 180 MW, MON, MAY, 09-2011, 11:29.
- MANUAL ON TRANSMISSION PLANNING CRITERIA, CENTRAL ELECTRICITY AUTHORITY, NEW DELHI, JANUARY 2013.

تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق 2013/12/9