

تطوير خوارزمية وبرنامج حاسوبي لتحليل جريان الاستطاعة في نظم القدرة الكهربائية الحاوية على نظام VSC-HVDC

د.م. نبيل الفقيه*

الملخص

إن الحاجة إلى قابلية تحكم عالية في شبكات التيار المتناوب و/أو ربط أنظمة قدرة غير متزامنة (ذات تردد مختلف) يجعلان من نظام حلقة الوصل بالتيار المستمر عالي التوتر - مبدل منبع توتر VSC-HVDC link تقانة جذابة لمعظم شبكات نقل القدرة الكهربائية. من ميزات نظام VSC-HVDC قابلية التحكم العالية بالاستطاعة الفعلية والردية على طرفي المبدلات والقدرة على تحسين استقرار أنظمة القدرة AC المحيطة به. يتيح التحكم بجريان الاستطاعة تحقيق نقل استطاعة أعظمي، واستقرار نظام القدرة وتحسين جودة الطاقة الكهربائية وموثوقيتها.

هَدَفَ البحث إلى تطوير نموذج رياضي وخوارزمية لتحليل جريان الاستطاعة في الحالة المستقرة لنظام قدرة كهربائية يحتوي على VSC-HVDC. وُسِّعَتْ مصفوفة اليعقوبي في خوارزمية نيوتن-رافسون، وهي العلاقة بين التوتر والاستطاعة في حالات عدم التطابق، بمتغيرات النظام VSC-HVDC من أجل التحكم بكل من الاستطاعة الفعلية والردية وقيمة التوتر بشكل مستقل. أنجز برنامج حاسوبي، تضمن وسائل التحكم في بارامترات VSC-HVDC وأعطى خصائص تقارب عالية جداً. تضمنت الدراسة النظام VSC-HVDC link (BTB) مبدلاه متصلًا نعقب-عقب مباشرة والنظام full VSC-HVDC الذي يصل بين قضيبي جميع تيار متناوب عبر حلقة وصل تيار مستمر DC link.

جرى التحقق من الخوارزمية المطورة وفعاليتها البرنامج المنجز من خلال تطبيقه على عدد من الأنظمة القياسية ومنها ما جرى على IEEE 14-bus system.

الكلمات المفتاحية: VSC-HVDC link، FACTS، جريان الاستطاعة، نيوتن-رافسون، مبدل منبع توتر.

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

1- المقدمة

تغير مشهد أنظمة القدرة الكهربائية خلال العقدین الماضیین تغيراً جذرياً. يعود هذا التغير إلى عوامل سياسية وتكنولوجية واجتماعية مختلفة. أدى تحرير أسواق الكهرباء والاهتمام الكبير بالطاقات المتجددة خصوصاً طاقة الرياح والطاقة الشمسية والتخطيط للعديد من المشاريع الكبيرة إلى إعادة هيكلة نظام القدرة الكهربائية التقليدي.

قبل تحرير أسواق الكهرباء، كانت كل شبكة وطنية تحت سيطرة شركة متكاملة عامودياً (غالباً مملوكة كلياً من الدولة أو من جهة احتكارية واحدة)، وكان جريان الاستطاعة في الشبكة معلوماً تماماً. كان مرفق التنسيق المركزي قادراً على التحكم بجريان الاستطاعة الفعلية والردية بوساطة التحكم في محطات التوليد، وصل خطوط نقل أو فصلها، وتعديل وضعيات مبدل التفريعات في المحولات Tab-changing transformers وإدخال معوضات سعوية لتعويض الاستطاعة الردية.

كان مشغل نظام القدرة يملك التحكم بنظامي النقل والتوليد ويستطيع أن يعطي المولدات إشارة لتغيير نقطة تشغيلها. وهكذا، يمكن أن يكون جريان الاستطاعة الفعلية والردية تحت سيطرة الشركة نفسها.

مع تحرير أسواق الكهرباء، استقل التوليد عن النقل وأصبح التعاقد على الطاقة يجري بشكل ثنائي في أسواق تبادل الطاقة، وغدا المطلوب هو أن يتبع جريان الاستطاعة فروقات الأسعار.

يعدّ التوليد المتقطع للعديد من مصادر الطاقات المتجددة، على سبيل المثال الطاقة الريحية والطاقة الشمسية، سبباً في جريان استطاعة غير متوقع في الشبكة ما يزيد الغموض في شبكات النقل ويمكن أن يؤدي إلى زيادة تحميل بعض الخطوط.

يمكن معالجة التحديات المتمثلة في زيادة الاستطاعة المنقولة وسرعة تغيير جريان الاستطاعة بإنشاء خطوط نقل جديدة لتخفيف جريان الاستطاعة عن الخطوط المرهقة (تحميل زائد) Overloading، بشكل خاص إنشاء خطوط جديدة تربط مناطق تحكم مختلفة ذات أهمية.

ولكن قد يصعب أحياناً إنشاء خطوط هوائية جديدة في حال عدم توافر رغبة اقتصادية وبيئية واجتماعية. من المشكلات الرئيسية للخطوط الهوائية الجديدة أثرها البيئي والبصري، فضلاً عن ذلك قلق العامة من أثر الحقول الكهرومغناطيسية الناتج عن هذه الخطوط.

تُحفز الاتجاهات السابقة في أنظمة القدرة الكهربائية البحث عن بدائل أخرى ترفع نسبة استثمار خطوط التوتر العالي الهوائية high voltage overhead lines القائمة. وتحظى التطورات التقنية الجديدة بالمزيد من الاهتمام، وترد في المرجع [1] فكرة عامة عن التطورات التقنية في شبكات النقل المستقبلية.

تشمل التقانات الحديثة أجهزة التحكم بجريان الاستطاعة مثل محولات إزاحة زاوية الطور phase shifting transformers، وأنظمة النقل المرنة Flexible Alternating Current Transmission Systems (FACTS) تقانة التيار المستمر عالي التوتر High-Voltage Direct-Current (HVDC) [2]

هذه الأنظمة، قادرة على خفض الجريان الحلقي loop flow للاستطاعة، وتخفيف الاختناقات في خطوط النقل وتتيح لمشغل نظام النقل Transmission System Operator (TSO) التحكم بتشغيل شبكته بشكل أقرب إلى القيم الاسمية، كما يؤدي سلوكها الديناميكي أيضاً دوراً مفيداً في استقرار توتر الشبكات المحيطة بها.

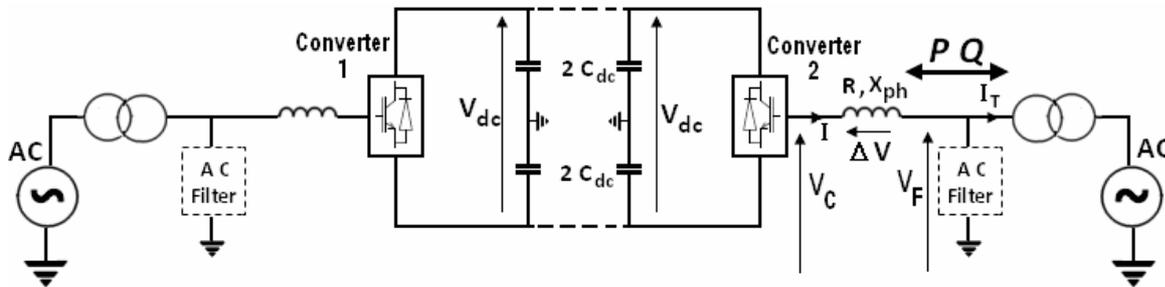
تتقاسم الأنظمة المستندة إلى مبدلات منبع التوتّر Voltage Source Converters (VSCs) وهي المعوض التسلسلي التزامني الساكن Static Synchronous Series Compensator (SSSC) ونظام التحكم الموحد بجريان الاستطاعة Unified Power Flow Controller (UPFC) ونظام VSC-HVDC، وإمكانية التحكم بنظام القدرة بدرجة أكبر أو أقل، فهي قادرة على تنظيم توترات العقد أو حقن استطاعة ردية في أحد أطرافها والتحكم بجريان الاستطاعة الفعلية. يستخدم كل من UPFC و VSC-HVDC مبدلين أحدهما قادر على ضبط توتر قضيب التجميع والآخر يتحكم بالاستطاعة الردية المحقونة. غير أن هناك اختلافاً في مرونة التحكم التي

هَدَفَ البحث إلى تطوير نموذج رياضي وخوارزمية لحساب جريان الاستطاعة في نظام قدرة كهربائية يحتوي على النظام VSC-HVDC ثم كتابة برنامج حاسوبي ملائم يمكن من خلاله تحليل جريان الاستطاعة في نظام القدرة.

2- لمحة عن VSC-HVDC

إن الوظيفة الرئيسة للنظام VSC-HVDC هي نقل استطاعة بالتيار المستمر DC ثابتة من محطة المقوم (rectifier station) إلى محطة المعرج (Inverter station) بقابلية تحكم عالية.

يبين الشكل (1) مخططاً رمزياً لحلقة وصل بالتيار المستمر عالي التوتر - مبدل منبع توتر VSC-HVDC link ومكوناته.



الشكل (1) مخطط رمزي لوصلة VSC-HVDC link

خلالها. تعمل المفاعلات أيضاً كمرشحات تيار متناوب للحد من التوافقيات ذات الترددات العالية في التيار المتناوب التي تسببها عملية التبديل في المبدلات. وتُعدّ المفاعلات مكوناً أساسياً من أجل التحكم في جريان الاستطاعة الفعلية.

مرشحات التيار المتناوب Ac filters:

يحتوي توتر الخرج المتناوب على توافقيات منشؤها التبديل في IGBT. لمعالجة تلك التوافقيات، يُنَبِّتُ مرشح ترددات عالية high-pass filter على التفرع على طرف التوتر المتناوب.

مكثفات التيار المستمر DC capacitors:

توجد في جهة التيار المستمر مجموعتان من المكثفات متماثلتان. تعتمد سعة المكثفات على التوتر المستمر المطلوب. وظيفة المكثف في المقام الأول توفير ممر تحريضي منخفض للتيار المتقطع و تخزين القدرة كي تكون قادرة على التحكم بجريان الاستطاعة. كما يقلل

تتيحها وحدات التحكم الثلاث، فالنظامان UPFC و VSC-HVD يؤديان ذلك بفاعلية أكبر من النظام SSSC.

في السنوات القليلة الماضية، أصبح النظام VSC-HVD خياراً جذاباً لمعظم شبكات نقل الطاقة الكهربائية. فمن ميزاته، قابلية التحكم العالية في الاستطاعة الفعلية والرديّة على طرفي المبدلات والقدرة على تحسين استقرار أنظمة القدرة AC المحيطة به.

تؤدي قابلية التحكم العالية بجريان الاستطاعة دوراً مهماً في أسواق الكهرباء المحررة، فلدى VSC-HVDC القدرة على جعل جريانات الاستطاعة الفيزيائية نظير جريانات الاستطاعة وفق العقود التجارية.

2-1 المكونات الأساسية لنظام VSC-HVDC:

يُستخدم في نظام VSC-HVDC مبدلان (IGBT) ترانزستور ثنائي القطبية ذو بوابة معزولة Insulated Gate Bipolar Transistors يمثلان منبعي توتر (voltage source converters) (VSCs)، أحدهما يعمل مقوّمًا (rectifier) والآخر يعمل معرّجًا (inverter). المبدلان متصلان عقب-عقب، إمّا مباشرة (back-to-back) ويدعى VSC-HVDC (BTB) أو عبر كابل تيار مستمر عالي التوتر (full VSC-HVDC) بحسب الغاية [3] و [4].

المحولات Transformers:

وُصِّلَ المبدل إلى نظام التيار المتناوب عن طريق محولة قدرة، أهم وظيفة للمحولة هي تحويل توتر نظام التيار المتناوب إلى قيمة مناسبة للمبدل.

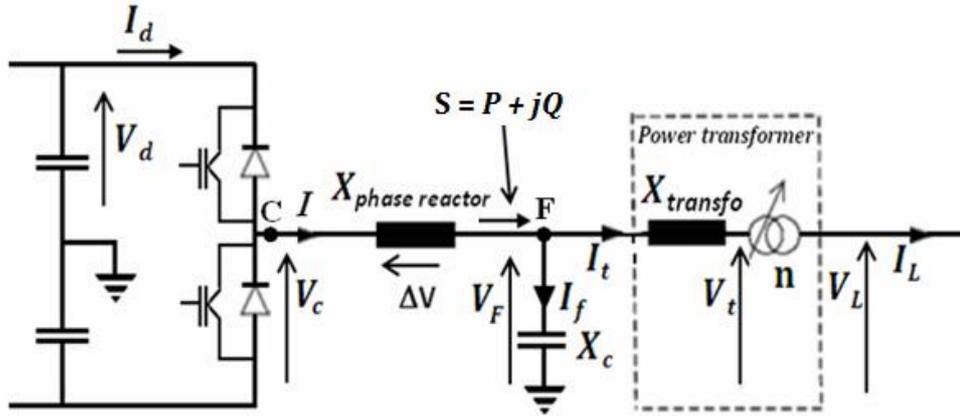
مفاعلات الطور Phase reactors

إن وظيفة مفاعلات الطور phase reactors التحكم بجريان الاستطاعة الفعلية والرديّة عن طريق تنظيم التيارات

تزامنية سرعة التحكم بها عالية جداً، يُعطى توترها اللحظي V_C بالمعادلة (1):

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

إذ: M مؤشر التعديل، ω التردد الأساسي، θ انزياح زاوية طور توتر الخرج تبعاً لموقع الموجة المعدلة. يمكن تعديل المتغيرات M و θ بشكل مستقل بوساطة متحكم VSC لإعطاء أي قيمة مركبة للتوتر وانزياح زاويته. نتيجة لذلك، يمكن تغيير هبوط التوتر ΔV على المفاعلة X_{phase} للتحكم بجريان الاستطاعة الفعلية والرديية. يبين الشكل (2) الدارة المكافئة لمحطة مبدل VSC-HVDC link.



الشكل (2) مخطط دارة مبسط لمحطة مبدل VSC-HVDC [6]

إذ:

$$V_F = \text{توتر قضيب تجميع المرشح.}$$

$$V_C = \text{توتر المبدل.}$$

$\theta = \text{زاوية الطور بين توتر قضيب تجميع المرشح } V_F \text{ وتوتر المبدل } V_C.$

تفترض صيغتا المعادلتين (2) و (3) أن مفاعلة الطور عديمة الضياع.

يُبين الشكل (3) المخطط الشعاعي لنظام VSC يعمل كمخرج ويقدم استطاعة رديية لنظام القدرة AC. في هذه الحالة قيمة $\theta \times \cos$ أكبر من V_C .

المكثف من تموج التوتر على الجانب dc. يمكن الاطلاع على تصميم المكثف في [5].

كابلات التيار المستمر DC cables:

يُستخدم في تطبيقات VSC-HVDC نوع متطور من الكابلات، عازلة مصنوع من بوليمر polymer خاص، وتُعد الكابلات البوليميرية الخيار الأفضل في HVDC، بسبب المتانة الميكانيكية، والمرونة، وانخفاض الوزن [6].

2-2 مبدأ عمل VSC-HVDC:

أشرنا أعلاه، إلى أنه يمكن تمثيل المبدل بمنبع توتر متناوب متغير، يمكن التحكم بقيمة توتره وزاويته وتردده بشكل مستقل. هذا يعني أنه يمكن عدّ جسر VSC آلة

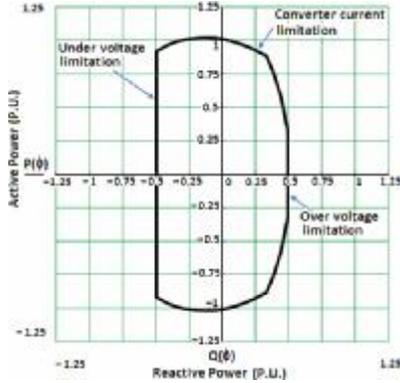
يمكن التحكم بجريان الاستطاعة الفعلية بين المبدل والشبكة عن طريق تغيير زاوية الطور θ بين التوتر ذي التردد الأساسي V_C المتولد من المبدل و التوتر V_F في قضيب تجميع المرشح [7]، [8]. تحسب الاستطاعة الفعلية وفق المعادلة (2).

$$P = \frac{|V_C| \cdot |V_F|}{\omega L} \cdot \sin \theta \quad (2)$$

يتحدد جريان الاستطاعة الرديية بقيمة التوتر V_C المتحكم به بوساطة عرض النبضة في جسر المبدل [3]، [7]، [8]. وتحسب الاستطاعة الرديية في نهاية الاستقبال (عند قضيب التجميع F) وفق المعادلة (3). يعتمد الحد الأقصى للتوتر الأساسي لخرج المبدل على التوتر المستمر V_{dc} .

$$Q = \frac{|V_F| \cdot (|V_C| \cos \theta - |V_F|)}{\omega L} \quad (3)$$

استجراتها. ما يُتيح للنظام VSC-HVDC العمل في أرباع الدائرة الأربعة [10]، [11]، [12]، [13] كما هو مبين في الشكل (5).



الشكل (5) خصائص P-Q لنظام VSC-HVDC نموذجي

بفرض توتر المبدل $V_C \angle \theta_C$ وتوتر قضيب تجميع المرشح $V_F \angle \theta_F$ ، وممانعة الطور $Z \angle \gamma$ ، عند ذلك يُعطى التيار بالمعادلة:

$$I_{CF} = \frac{|V_C| \angle \theta_C - |V_F| \angle \theta_F}{|Z| \angle \gamma}$$

$$I_{CF} = \frac{|V_C|}{|Z|} \angle (\theta_C - \gamma) - \frac{|V_F|}{|Z|} \angle (\theta_F - \gamma) \quad (4)$$

وتعطى الاستطاعة الظاهرية في نهاية الإرسال S_{CF} عند قضيب التجميع (C) بالمعادلة الآتية:

$$S_{CF} = V_C \cdot I_{CF}^* \quad (5)$$

$$S_{CF} = |V_C| \angle \theta_C \left[\frac{|V_C|}{|Z|} \angle (\gamma - \theta_C) - \frac{|V_F|}{|Z|} \angle (\gamma - \theta_F) \right]$$

$$S_{CF} = \frac{|V_C|^2}{|Z|} \angle \gamma - \frac{|V_C||V_F|}{|Z|} \angle (\gamma + \theta_C - \theta_F) \quad (6)$$

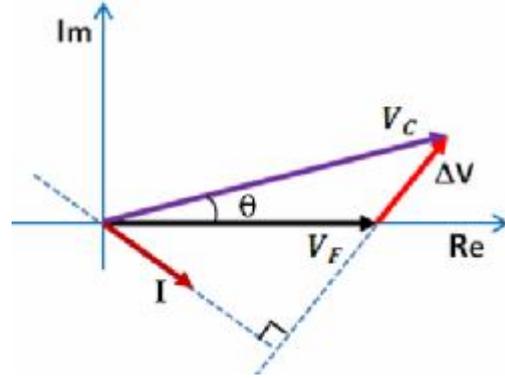
إذاً، الاستطاعة الفعلية والردية:

$$P_{CF} = \frac{|V_C|^2}{|Z|} \cos \gamma - \frac{|V_C||V_F|}{|Z|} \cos (\gamma + \theta_C - \theta_F) \quad (7)$$

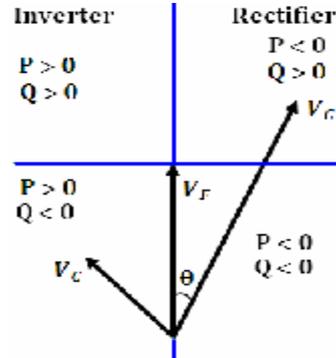
$$Q_{CF} = \frac{|V_C|^2}{|Z|} \sin \gamma - \frac{|V_C||V_F|}{|Z|} \sin (\gamma + \theta_C - \theta_F) \quad (8)$$

3- النموذج الرياضي لنظام VSC-HVDC

استناداً إلى مبدأ عمل VSC-HVDC، يمكن تمثيل كل محطة تبديل بمنبع توتر عقدي V_{VR} خلف مفاعلة X_{VR}



الشكل (3) مخطط شعاعي لنظام VSC يُقدم استطاعة ردية وبيّن المخطط الشعاعي المبسط في الشكل (4) كيف تعتمد إشارة الاستطاعة الفعلية والردية على زاوية طور وقيمة توتر جسر المبدل V_C .



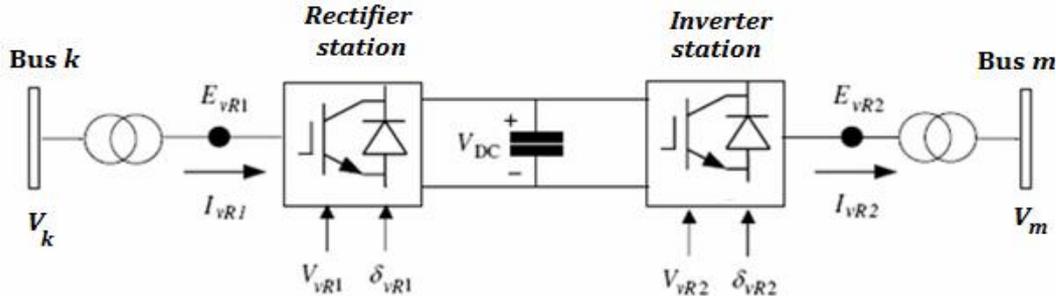
الشكل (4) علاقة جريان الاستطاعة ونمط العمل (مخرج أو مقوم) بموقع الشعاع V_C

على سبيل المثال، إذا كان توتر الخط V_F متقدماً على توتر الجسر V_C ، يكون جريان الاستطاعة الفعلية من شبكة AC إلى المبدل. في نظام VSC-HVDC، إن جريان الاستطاعة الفعلية على طرف AC يساوي الاستطاعة الفعلية المنقولة من الطرف DC في الحالة المستقرة بفرض إهمال الضياعات.

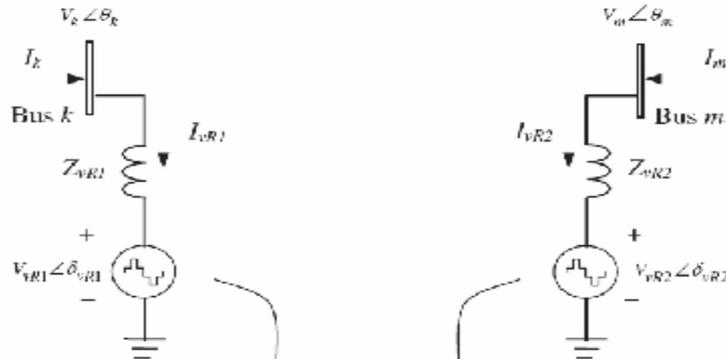
يُستثمر توليد الاستطاعة الردية واستجراتها في نظام VSC-HVDC لتعويض حاجة الشبكة الكهربائية. يمكن ملاحظة مجال الاستطاعة الفعلية/الردية على مخطط P-Q في الشكل (5)، يتضح من الشكل العديد من الخصائص المهمة لحلقات وصل التيار المستمر [9] DC link، إذ إنّ نظام VSC-HVDC قادر على العمل في أي نقطة داخل المنحنى. يستطيع VSC-HVDC تعديل كل من الاستطاعة الفعلية والردية بشكل مستقل ويمكنه عكس جريان الاستطاعة الفعلية، كذلك حقن استطاعة ردية أو

نظام VSC-HVDC وإدراجه في خوارزمية جريان الاستطاعة نيوتن-رافسون، نستخدم الدارة المكافئة المبينة في الشكل (7).

(ممانعته Z_{VR}). يمثل منبع التوتر المتزامن المركبات الأساسية لسلسلة فورييه للتوتر المبدل الجيبي على أطرف مبدلات VSC-HVDC. يبين الشكل (6) مخططاً رمزياً لنظام VSC-HVDC. عند اشتقاق النموذج الرياضي



الشكل (6) مخطط رمزي لنظام VSC-HVDC، يؤدي VSC في طرف الإرسال دور المقوم و في الطرف الآخر دور المعرّج [14]



الشكل (7) الدارة المكافئة للنظام [14] VSC-HVDC

على فرض أن المبدلين عديما الضياع، فإن جريان الاستطاعة الفعلية الداخلة (المسلمة) إلى نظام DC يجب أن يساوي الاستطاعة الفعلية التي تصل إلى نظام AC على طرف المعرّج مضافاً إليها ضياعات النقل في كابل DC.

يُمثل نظام VSC-HVDC بشكل ملائم بمنبعي توتر موصلين على التفرع ومرتبطين معاً بمعادلة قيد الاستطاعة الفعلية. يتصل كل منبع توتر إلى نظام AC بواسطة مفاعلة محولته. تُعطى المعادلات الملائمة لمنبعي التوتر كما يأتي:

$$E_{VR1} = V_{VR1} (\cos \delta_{VR1} + j \sin \delta_{VR1}) \quad (9)$$

$$E_{VR2} = V_{VR2} (\cos \delta_{VR2} + j \sin \delta_{VR2}) \quad (10)$$

في التطبيق الحالي، تقع توترات طور منبعي التوتر التفرعيين المستخدمين في تمثيل محطة المقوم ومحطة المعرّج وزواياه، ضمن المجالات الآتية:

معادلة قيد الاستطاعة لأجل full VSC-HVDC، أي أن المحطتين VSC متصّلتان عقب-عقب عبر كابل DC كالاتي:

$$Re\{V_{VR1} \cdot I_{VR1}^* + V_{VR2} \cdot I_m^* + P_{DC,loss}\} = 0 \quad (12)$$

نموذج جريان الاستطاعة إذا كان اتجاه جريان الاستطاعة من المحطة المتصلة مع قضيب التجميع k (المقوم rectifier) إلى المحطة المتصلة مع قضيب التجميع m (المعرّج inverter) يمكن أن نكتب معادلات جريان الاستطاعة المحقونة في قضيب التجميع k كما يأتي:

$$P_k = V_k^2 G_{VR1} + V_k V_{VR1} [G_{VR1} \cos(\theta_k - \delta_{VR1})$$

الجانب DC من المبدلين. يُنفَّذ حل نظام المعادلات اللاخطية باستخدام طريقة نيوتن-رافسون. كل محطة تبديل قادرة على التحكم بقيمة الاستطاعة الفعلية المحقونة في قضيب التوتر المتناوب الخاص بها. عند تحليل جريان الاستطاعة، يُعيَّن أحد المبدلين ليكون المحطة الرئيسية (master station) والمبدل الآخر المحطة التابعة (slave station). فضلاً عن ذلك، لدى كل محطة إمكانية التحكم إما في قيمة التوتر أو في الاستطاعة الردية المحقونة في قضيب التجميع الموصلة إليه. إذا نُظِّمَتْ في VSC- HVDC الاستطاعة الفعلية على طرف المقوم و نُظِّمَتْ قيمة التوتر على طرف المعرِّج، يكون للنظام الخطي للمعادلات الشكل الآتي:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta Q_k \\ \Delta P_{VR} \\ \Delta Q_{VR} \\ \Delta P_{HVDC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_k}{\partial \delta_{VR1}} & \frac{\partial P_k}{\partial V_{VR1}} V_{VR1} & 0 \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_{VR1}} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_{VR1}} V_{VR1} & 0 \\ \frac{\partial P_{VR}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{VR}}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_{VR}}{\partial \delta_{VR1}} & \frac{\partial P_{VR}}{\partial V_{VR1}} V_{VR1} & 0 \\ \frac{\partial Q_{VR}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_{VR}}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial Q_{VR}}{\partial \delta_{VR1}} & \frac{\partial Q_{VR}}{\partial V_{VR1}} V_{VR1} & 0 \\ \frac{\partial P_{HVDC}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{HVDC}}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_{HVDC}}{\partial \delta_{VR1}} & \frac{\partial P_{HVDC}}{\partial V_{VR1}} V_{VR1} & \frac{\partial P_{HVDC}}{\partial \delta_{VR2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta V_k \\ \Delta \delta_{VR1} \\ \Delta V_{VR1} \\ \Delta \delta_{VR2} \end{bmatrix} \quad (20)$$

نُمثِّل عدم تطابق الاستطاعة الفعلية ΔP_{HVDC} لـ حلقة الوصل DC بالمعادلة الآتية:

$$\Delta P_{HVDC} = \Delta P_{VR1} - \Delta P_{VR2} \quad (21)$$

ولما كان تنظيم الاستطاعة الفعلية يجري على طرف المقوم (بمعنى $\Delta P_{VR1} = P_{VR1}^{specified} - P_{VR1}^{calculated}$)، تصبح معادلات الاستطاعة الفعلية المقابلة من المعرِّج زائدة على الحاجة (أي ΔP_{VR1} و ΔP_{VR2}) وغير مستخدمة في المعادلة (20). فضلاً عن ذلك، نظراً إلى أن قيمة توتر القضيب m تبقى ثابتة تصبح معادلات الاستطاعة الردية للمعرِّج زائدة أيضاً (أي: ΔQ_{VR1} و ΔQ_{VR2}). تُعطى عناصر اليعقوبي التي استخدمناها في نظام المعادلات (20) وهي المشتقات الجزئية لمحتوي المقوم والمعرِّج في VSC-HVDC كما يأتي:

$$\text{من المعادلات (13) و (14) ونحصل على:}$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} = -Q_k - V_k^2 G_{VR1},$$

$$+ B_{VR1} \sin(\theta_k - \delta_{VR1}) \quad (13)$$

$$Q_k = -V_k^2 B_{VR1} + V_k V_{VR1} [G_{VR1} \sin(\theta_k - \delta_{VR1}) - B_{VR1} \cos(\theta_k - \delta_{VR1})] \quad (14)$$

يُعبَّر عن جريان الاستطاعة نحو المقوم بالمعادلات الآتية:

$$P_{VR1} = V_{VR1}^2 G_{VR1} + V_{VR1} V_k [G_{VR1} \cos(\delta_{VR1} - \theta_k) + B_{VR1} \sin(\delta_{VR1} - \theta_k)] \quad (15)$$

$$Q_{VR1} = -V_{VR1}^2 B_{VR1} + V_{VR1} V_k [G_{VR1} \sin(\delta_{VR1} - \theta_k) - B_{VR1} \cos(\delta_{VR1} - \theta_k)] \quad (16)$$

بشكل مشابه، يجري الحصول على معادلات الاستطاعة من أجل قضيب التجميع m ومن أجل المعرِّج بتبديل الدلائل (subscripts) k بـ m و V_{VR1} بـ V_{VR2} على التوالي.

$$P_{VR2} = V_{VR2}^2 G_{VR2} + V_{VR2} V_m [G_{VR2} \cos(\delta_{VR2} - \theta_m) + B_{VR2} \sin(\delta_{VR2} - \theta_m)] \quad (17)$$

$$Q_{VR2} = -V_{VR2}^2 B_{VR2} + V_{VR2} V_k [G_{VR2} \sin(\delta_{VR2} - \theta_m) - B_{VR2} \cos(\delta_{VR2} - \theta_m)] \quad (18)$$

إذ:

θ_k = زاوية توتر قضيب التجميع k

θ_m = زاوية توتر قضيب التجميع m

δ_{VR1} = زاوية التوتر V_{VR1} (المقوم)

δ_{VR2} = زاوية التوتر V_{VR2} (المعرِّج)

$$Y_{VR} = G_{VR} + jB_{VR}$$

فضلاً عن ذلك، تلزم معادلة أخرى لتمثيل قيد الاستطاعة، وتُعطى إما على شكل المعادلة (11) أو على شكل المعادلة (12) بحسب التطبيق. في حالة VSC- full HVDC فإن المعادلة الملائمة:

$$P_{VR1} + P_{VR2} + P_{DC} = 0 \quad (19)$$

عند تحليل جريان الاستطاعة في نظام قدرة يتكون من n قضيب تجميع ويحتوي على نظام VSC-HVDC توجد خمس معادلات إضافية لكل نظام VSC-HVDC تُدمج مع نظام المعادلات غير الخطية $n \times (n-1)$ لتأخذ بالحسبان محطتي التبديل ومعادلة قيد الاستطاعة الموجودة على

$$\frac{\partial P_{HVDC}}{\partial V_k} V_k = P_k + V_k^2 G_{VR1},$$

$$\frac{\partial P_{HVDC}}{\partial V_{VR1}} V_{VR1} = -V_k V_{VR1} [G_{VR1} \cos(\theta_k - \delta_{VR1}) + B_{VR1} \sin(\theta_k - \delta_{VR1})],$$

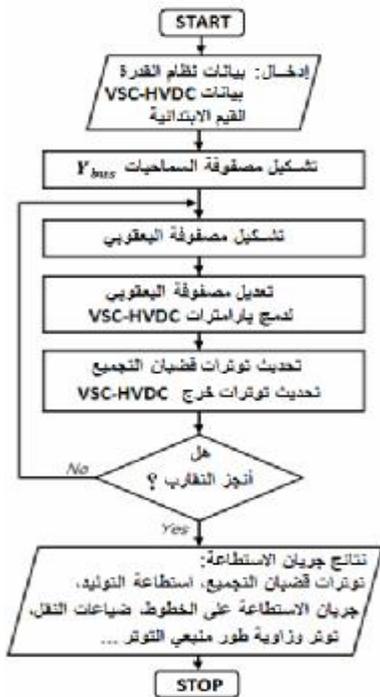
من المعادلات (17) و (18) نحصل على:

$$\frac{\partial P_{HVDC}}{\partial \delta_{VR2}} = -Q_{VR2} - V_{VR2}^2 G_{VR2}.$$

4- خوارزمية تحليل جريان الاستطاعة في نظام قدرة

يحتوي على VSC-HVDC link

بناءً على الأسس الرياضية التي ذكرناها في الفقرات السابقة، أُعدت الخوارزمية المتبعة التي يلخصها المخطط الانسيابي المبين في الشكل (8).



الشكل (8): المخطط الانسيابي لجريان الاستطاعة، طريقة نيوتن

رافسون مع VSC-HVDC

تتضمن الخوارزمية الإجراءات الآتية: بيانات دخل النظام، وهي البيانات الأساسية التي يحتاج إليها الحساب التقليدي لجريان الاستطاعة، أي عدد قُضبان التجميع وأنواعها، بيانات خطوط النقل، وبيانات التوليد والأحمال فضلاً عن بارامترات VSC-HVDC وموقعه في نظام القدرة والقيم الابتدائية.

استناداً إلى النموذج الرياضي و الخوارزمية المطورة قمنا بتصميم برنامج حاسوبي بلغة البرمجة C++ سمي voltage source converter load (VSCCLF اختصاراً). يتكون البرنامج المنجز من الدوال (flow functions). الرئيسة المبينة في الجدول (1).

$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_{VR1}} = -V_k V_{VR1} [G_{VR1} \sin(\theta_k - \delta_{VR1}) - B_{VR1} \cos(\theta_k - \delta_{VR1})],$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial V_k} V_k = P_k + V_k^2 G_{VR1},$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial V_{VR1}} V_{VR1} = -V_k V_{VR1} [G_{VR1} \cos(\theta_k - \delta_{VR1}) + B_{VR1} \sin(\theta_k - \delta_{VR1})],$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} = P_k - V_k^2 G_{VR1},$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \delta_{VR1}} = V_k V_{VR1} [G_{VR1} \cos(\theta_k - \delta_{VR1}) + B_{VR1} \sin(\theta_k - \delta_{VR1})],$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_k} V_k = Q_k - V_k^2 B_{VR1},$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_{VR1}} V_{VR1} = -V_k V_{VR1} [G_{VR1} \sin(\theta_k - \delta_{VR1}) - B_{VR1} \cos(\theta_k - \delta_{VR1})],$$

من المعادلات (15) و (16) نحصل على:

$$\frac{\partial P_{VR1}}{\partial \delta_{VR1}} = -Q_{VR1} - V_{VR1}^2 B_{VR1},$$

$$\frac{\partial P_{VR1}}{\partial \theta_k} = -V_{VR1} V_k [G_{VR1} \sin(\delta_{VR1} - \theta_k) - B_{VR1} \cos(\delta_{VR1} - \theta_k)],$$

$$\frac{\partial P_{VR1}}{\partial V_{VR1}} V_{VR1} = P_{VR1} + V_{VR1}^2 G_{VR1},$$

$$\frac{\partial P_{VR1}}{\partial V_k} V_k = -V_{VR1} V_k [G_{VR1} \cos(\delta_{VR1} - \theta_k) + B_{VR1} \sin(\delta_{VR1} - \theta_k)],$$

$$\frac{\partial Q_{VR1}}{\partial \delta_{VR1}} = P_{VR1} - V_{VR1}^2 G_{VR1},$$

$$\frac{\partial Q_{VR1}}{\partial \theta_k} = V_{VR1} V_k [G_{VR1} \cos(\delta_{VR1} - \theta_k) + B_{VR1} \sin(\delta_{VR1} - \theta_k)],$$

$$\frac{\partial Q_{VR1}}{\partial V_{VR1}} V_{VR1} = Q_{VR1} - V_{VR1}^2 B_{VR1},$$

$$\frac{\partial Q_{VR1}}{\partial V_k} V_k = -V_{VR1} V_k [G_{VR1} \sin(\delta_{VR1} - \theta_k) - B_{VR1} \cos(\delta_{VR1} - \theta_k)],$$

من المعادلات (13) و (14) أيضاً نحصل على:

$$\frac{\partial P_{HVDC}}{\partial \theta_k} = -Q_k - V_k^2 G_{VR1},$$

$$\frac{\partial P_{HVDC}}{\partial \delta_{VR1}} = -V_k V_{VR1} [G_{VR1} \sin(\theta_k - \delta_{VR1}) - B_{VR1} \cos(\theta_k - \delta_{VR1})],$$

5- الاختبارات الحاسوبية Computer Simulation

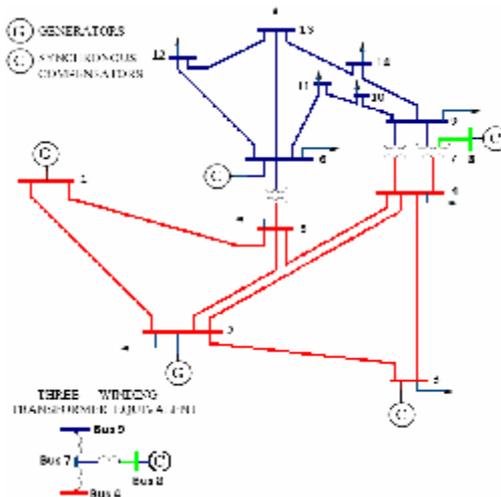
باستخدام البرنامج المنجز VSCLF، نُفِّدَت اختبارات عملية حاسوبية على شبكات اختبارية قياسية عدة تعرض منها ما نُفِّدَ على نظام النقل IEEE 14-bus Transmission System. كثيراً ما يُستخدم نظام القدرة IEEE 14 bus System كشبكة اختبارية لتحليل جريان الاستطاعة. يتسم جزؤه السفلي بأنه منطقة التوليد في حين جزؤه العلوي منطقة الأحمال [15]، ويحتوي على خمس مولدات ثلاث منها معوضات تزامنية كما هو مبين في الشكل (9). تُبيِّن الجداول (2) و (3) و (4) معطيات نظام القدرة IEEE 14-bus test system.

الجدول (2) توترات قُضبان التجميع في IEEE 14 bus system

Bus number	Voltage [kV]
1-2-3-3-5	69
6-7-9-10-11-12-13-14	13.8
8	18

استطاعة الأساس $S_{base} = 100 \text{ MVA}$

باستخدام البرنامج المنجز VSCLF، دُرِسَ نظام القدرة IEEE 14-bus test system في حالات مختلفة. لاختبار تأثير النظام VSC-HVDC في نظام القدرة، وأُجْرِيَت الاختبارات بدايةً من دون النظام VSC-HVDC ثم بوجوده. وُعِدَّت في الاختبارات جميعها القيمة المطلقة العظمى لعدم تطابق الاستطاعة المحقونة في العقد في من أجل دقة $\epsilon = 10^{-12}$.



الشكل (9): مخطط الخط الواحد لنظام IEEE 14-bus Transmission System [15]

الجدول (1) الدوال الرئيسية في البرنامج VSCLF

اسم الدالة	الوظيفة
PowerFlowsData	قراءة بيانات نظام القدرة
HVDCdata	قراءة بيانات VSC-HVDC
YBus	تشكيل مصفوفة السماحيات
HVDCNewtonRaphson	تنفيذ حل تكراري يستخدم طريقة نيوتون-رافسون
NetPowers	حساب جدولة الاستطاعات
CalculatePowers	حساب الاستطاعات المحقونة في قُضبان التجميع
HVDCCalcPowers	حساب الاستطاعات المحقونة في قُضبان التجميع من قبل VSC-HVDC
PowerMismatches	حساب عدم تطابق الاستطاعة
HVDCMismatches	حساب عدم تطابق الاستطاعة مع-VSC HVDC
NewtonRaJacobian	تشكيل مصفوفة اليعقوبي
HVDC_Jacobian	إضافة عناصر VSC-HVDC إلى مصفوفة اليعقوبي
StateVariabUpdat	تحديث المتغيرات الحالية
HVDC_Updating	تحديث متغيرات VSC-HVDC الحالية
HVDCLimits	التحقق من القيم الحدية لمنابع التوتر في نظام VSC-HVDC
PQflows	حساب جريان الاستطاعة
HVDCPQpower	حساب جريان الاستطاعة في نظام-VSC HVDC

أما البيانات المطلوب إدخالها في البرنامج زيادة على بيانات نظام القدرة وموقع VSC-HVDC فهي:

NHVDC	VSC-HVDC
Rdc	عدد الأنظمة VSC-HVDC
Psp	مقاومة الكابل DC (HVDC link)
HVDCsend(i)	جريان الاستطاعة الفعلية المرغوب فيها
HVDCrec(i)	قُضيب تجميع الإرسال في VSC-HVDC
VvrLo	قُضيب تجميع الاستقبال في VSC-HVDC
VvrHi	الحد الأدنى لقيمة منبع التوتر
	الحد الأعلى لقيمة منبع التوتر
البيانات عند قُضيب تجميع الإرسال SENDING BUS	
Xvr1	مفاعلة محول الإرسال
TarVol1	القيمة المرغوب فيها لتوتر قُضيب تجميع AC
VSta1	حالات التحكم بقيمة توتر العقدة: 1 is on; 0 is off
Qsp1	جريان الاستطاعة الردية المرغوب فيه
QSta1	حالات التحكم في الاستطاعة الردية: 1 is on; 0 is off
Vvr1	القيمة الابتدائية لتوتر المنبع التفرعي (المقوم)
Tvr1	القيمة الابتدائية لزاوية توتر المنبع التفرعي (المقوم)
البيانات عند قُضيب تجميع الاستقبال RECEIVING BUS	
Xvr2	مفاعلة محول الاستقبال
TarVol2	القيمة المرغوب فيها لتوتر قُضيب تجميع AC
QSta2	حالات التحكم في الاستطاعة الردية: 1 is on; 0 is off
Qsp2	جريان الاستطاعة الردية المرغوب فيه
Vvr2	القيمة الابتدائية لتوتر المنبع التفرعي (المعرج)
Tvr2	القيمة الابتدائية لزاوية توتر المنبع التفرعي (المعرج)

الجدول (3): معطيات نظام النقل في [15] IEEE 14 bus system

From Bus	To Bus	Resistance (pu)	Reactance (pu)	Line charging (pu)	Tap ratio
1	2	0.01938	0.05917	0.0528	1
1	5	0.05403	0.22304	0.0492	1
2	3	0.04699	0.19797	0.0438	1
2	4	0.05811	0.17632	0.0374	1
2	5	0.05695	0.17388	0.0340	1
3	4	0.06701	0.17103	0.0346	1
4	5	0.01335	0.04211	0.0128	1
4	7	0.00000	0.20912	0.0000	0.978
4	9	0.00000	0.55618	0.0000	0.969
5	6	0.00000	0.25202	0.0000	0.932
6	11	0.09498	0.19890	0.0000	1
6	12	0.12291	0.25581	0.0000	1
6	13	0.06615	0.13027	0.0000	1
7	8	0.00000	0.17615	0.0000	1
7	9	0.00000	0.11001	0.0000	1
9	10	0.03181	0.08450	0.0000	1
9	14	0.12711	0.27038	0.0000	1
10	11	0.08205	0.19207	0.0000	1
12	13	0.22092	0.19988	0.0000	1
13	14	0.17093	0.34802	0.0000	1

الجدول (4): بيانات قضبان التجميع في نظام القدرة [15] IEEE 14-bus

Bus No.	Bus Type*	P Generated (pu)	Q Generated (pu)	P Load (pu)	Q Load (pu)	Q _{max} Generated (pu)	Q _{min} Generated (pu)
1	1	0.00	0.000	0.000	0.000	1.00	-1.00
2	2	0.40	-0.424	0.217	0.127	0.50	-0.40
3	2	0.00	0.000	0.942	0.190	0.40	0.00
4	3	0.00	0.000	0.478	0.000	0.00	0.00
5	3	0.00	0.000	0.076	0.016	0.00	0.00
6	2	0.00	0.00	0.112	0.075	0.24	-0.06
7	3	0.00	0.00	0.000	0.000	0.00	0.00
8	2	0.00	0.00	0.000	0.000	0.24	-0.06
9	3	0.00	0.00	0.295	0.166	0.00	0.00
10	3	0.00	0.00	0.090	0.058	0.00	0.00
11	3	0.00	0.00	0.035	0.018	0.00	0.00
12	3	0.00	0.00	0.061	0.016	0.00	0.00
13	3	0.00	0.00	0.135	0.058	0.00	0.00
14	3	0.00	0.00	0.149	0.050	0.00	0.00

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

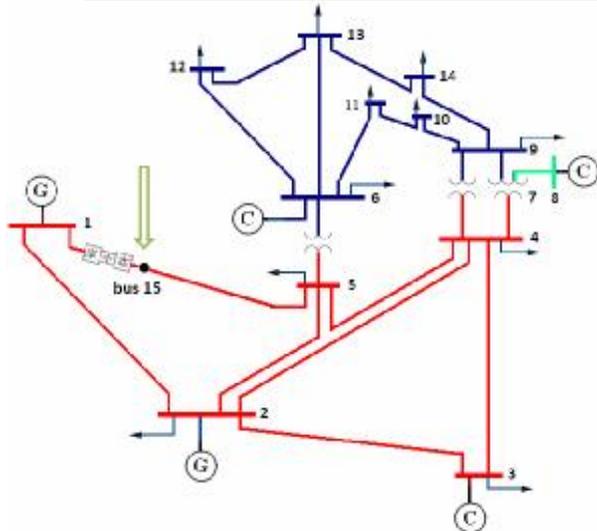
بعد إدخال بيانات نظام القدرة IEEE 14-bus testsystem اللازمة في البرنامج المنجز (من دون تفعيل VSC-HVDC) حصلنا على نتائج حساب جريان الاستطاعة المبيّنة في الجدولين (5) و (6) و توترات قضبان التجميع المبيّنة في الجدول (10) (العمود الثاني والثالث) وقد أنجز التقارب بعد 6 عمليات تكرار .

1-5 نظام القدرة IEEE 14-bus من دون VSC-HVD (base case)

حلّ في هذا الاختبار جريان الاستطاعة، باستخدام البرنامج المنجز، لتكوين فكرة عن تشغيل نظام القدرة في الحالة الأصلية.

الجدول (5): جريان الاستطاعة و الضياعات في IEEE 14-bus Transmission System من دون VSC-HVDC (base case)

Line No	From Bus	To Bus	Sending power flow		Receiving power flow		power losses	
			Active MW	Reactive MVAR	Active MW	Reactive MVAR	Active MW	Reactive MVAR
1	1	2	157.14	-2.98	-152.88	10.19	4.26	7.21
2	1	5	75.49	7.86	-72.70	-1.60	2.79	6.26
3	2	3	73.98	-1.65	-71.58	7.19	2.40	5.54
4	2	4	55.89	-0.17	-54.19	1.42	1.70	1.26
5	2	5	41.31	0.37	-40.40	-1.15	0.91	-0.78
6	3	4	-22.62	10.74	23.06	-13.13	0.44	-2.39
7	4	5	-61.60	5.47	62.11	-5.17	0.51	0.30
8	4	7	28.71	1.32	-28.71	0.39	0.00	1.71
9	4	9	16.22	4.93	-16.22	-3.35	0.00	1.58
10	5	6	43.40	6.32	-43.40	-1.57	0.00	4.74
11	6	11	6.87	4.66	-6.81	-4.53	0.07	0.14
12	6	12	7.77	2.68	-7.69	-2.51	0.08	0.17
13	6	13	17.55	7.84	-17.31	-7.36	0.24	0.48
14	7	8	0.00	-21.12	-0.00	21.90	0.00	0.78
15	7	9	28.71	20.72	-28.71	-19.35	0.00	1.37
16	9	10	5.72	3.15	-5.71	-3.11	0.01	0.04
17	9	14	9.71	2.95	-9.57	-2.67	0.14	0.29
18	10	11	-3.29	-2.69	3.31	2.73	0.02	0.04
19	12	13	1.59	0.91	-1.58	-0.90	0.01	0.01
20	13	14	5.39	2.46	-5.33	-2.33	0.06	0.13



الشكل (10): مخطط الخط الواحد لنظام IEEE 14-bus بوجود

VSC-HVDC (BTB) على الخط L_{1-5} جهة bus 1

الجدول (6): ضياعات النقل الكلية base case

Total Transmission Losses without VSC-HVDC	
Active (MW)	13.6345
Reactive (MVAR)	35.1994

يُظهر الجدول (8) أن الخط L_{1-2} ، في نظام القدرة IEEE 14-bus من دون النظام VSC-HVDC هو الخط الأكثر إرهاقاً ومحمل بنسبة % 120.90.

1-2-5 الاختبار الأول case 1: نظام النقل IEEE 14-bus

بوجود VSC-HVD إلى الخط L_{1-5}

لتحليل جريان الاستطاعة بعد إضافة النظام، VSC (BTB)

HVDC إلى الخط L_{1-5} تُعدّل الشبكة الأصلية بحيث

تتضمن قضيب تجميع إضافياً خاصاً بهذا النظام. كما في

الشكل (10).

أنجز التقارب بعد 7 عمليات تكرار. وبحسب النتائج المبيّنة في الجدول (8)، أدى وضع النظام-VSC (BTB) HVDC على الخط L_{1-5} إلى انخفاض تحميل الخط L_{1-2} إلى النسبة % 102.11 مقابل زيادة نسبة تحميل الخطين L_{4-5} و L_{4-5} ، أمّا تغيير جريان الاستطاعة في بقية الخطوط فهو طفيف. يبيّن الجدول (8) تحميل خطوط نظام القدرة IEEE14-bus من دون النظام VSC-HVDC ثم بوجوده على الخط L_{1-5} . وقد اخترنا الموقع الأمثل للنظام VSC-HVDC في نظام القدرة من أجل إدارة التحميل الزائد بحسب [16]. بيّنت نتائج التحليل المبيّنة في الجدول (10) أن تغيير قيم توترات قصبان التجميع قبل إضافة VSC-HVDC إلى الخط L_{1-5} وبعده يكاد لا يُذكر، أمّا الذي تغيير فهو زوايا طور التوترات وهو الذي أدى إلى تغيير جريان الاستطاعة على الخطوط.

اعتمدنا في هذا الاختبار مواصفات النظام-VSC (BTB) HVDC وبارامتراته الآتية: جريان الاستطاعة الفعلية المرغوب فيها 100 MW، وجريان الاستطاعة الردية المرغوب فيها 8 MVAR والبارامترات المبيّنة في الجدول (7). الجدول (7) بارامترات النظام VSC-HVDC (BTB) في الاختبار

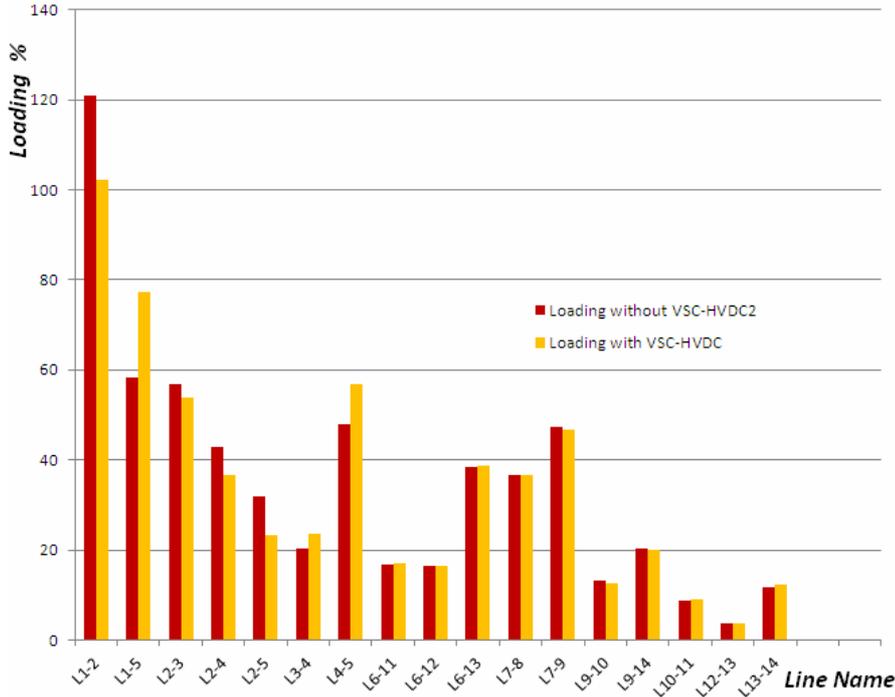
الأول case1

VSC HVDC on Line 1-5	
NHVDC=1	Psp(1)=1.00
HVDCsend(1)=1	HVDCrec(1)=15
Xvr1(1)=0.1	Xvr2(1)=0.1
TarVol1(1)=1.06	TarVol2(1)=1.0
Qsp1(1)=0.08	Qsp2(1)=-0.08
Vvr1(1)=1.0	Vvr2(1)=1.0
Tvr1(1)=0.0	Tvr2(1)=0.0
VvrHi(1)=1.1	VvrLo(1)=0.9
VSta1(1)=1	VSta2(1)=0
QSta1(1)=0	QSta2(1)=1
Rdc(1)= 0.0	

الجدول (8): تحميل الخطوط في نظام النقل IEEE 14-bus قبل تركيب النظام VSC-HVDC (BTB) على الخط L_{1-5} وبعده

Line No.	Line	Rating (MVA)	base case		with VSC-HVDC on line 1-5	
			Loading (MVA)	% Loading	Loading (MVA)	% Loading
1	1-2	130	157.17	120.90	132.74	102.11
2	1-5	130	75.90	58.38	100.32	77.17
3	2-3	130	74.00	56.92	70.05	53.88
4	2-4	130	55.89	42.99	47.73	36.72
5	2-5	130	41.32	31.78	30.42	23.40
6	4-3	130	26.54	20.42	30.51	23.47
7	5-4	130	62.32	47.94	73.80	56.77
11	6-11	50	8.31	16.62	8.58	17.16
12	6-12	50	8.22	16.44	8.26	16.52
13	6-13	50	19.23	38.46	19.39	38.78
14	8-7	60	21.90	36.5	21.95	36.58
15	7-9	75	35.41	47.21	35.15	46.87
16	9-10	50	6.53	13.06	6.25	12.5
17	9-14	50	10.15	20.30	9.94	19.88
18	11-10	50	4.29	8.58	4.52	9.04
19	12-13	50	1.83	3.66	1.86	3.72
20	13-14	50	5.92	11.84	6.12	12.24

يُبين الشكل (11) منحى تحميل الخطوط في نظام النقل قبل إضافة النظام VSC-HVDC (BTB) وبعده



الشكل (11) منحى تحميل خطوط النقل قبل إضافة النظام VSC-HVDC (BTB) إلى الخط L_{1-5} وبعده في نظام القدرة IEEE 14-bus

بمقارنة نتائج جريان الاستطاعة في نظام القدرة من دون وجود النظام VSC-HVDC ومعه، يمكن استنتاج أن الخوارزمية المطورة والبرنامج المنجز يتسمان بالكفاءة في تحليل جريان الاستطاعة في نظام قدرة يحتوي على نظام VSC-HVDC.

يبين الجدول (10) (العמוד السادس والسابع) أن إضافة النظام VSC-HVDC إلى الخط L_{2-5} لم يُغيّر -إلى حد كبير- قيم توتر النظام ما عدا تغييراً طفيفاً في قيم توتري قضيبى التجميع bus4 و bus5. ويرجع السبب إلى أن النظام VSC-HVDC يحقن توتراً تسلسلياً في الخط L_{2-5} ، مما يُسبب تغييراً في قيم توتر القضبان المجاورة لـ VSC-HVDC. على الرغم من أن قضيبى التجميع bus1 و bus6 مجاوران للقضيب bus5، لم تتأثر قيم توتريهما بوجود VSC-HVDC نظراً إلى أن bus1 عملياً هو قضيب توليد (PV) وأن المولد على القضيب bus6 معوض تزامني يعمل على دعم تنظيم التوتر. يمكن أن نلاحظ من الشكل (12) تأثير إضافة النظام VSC-HVDC في قيم توترات قضبان تجميع نظام القدرة.

2-2-5- الاختبار الثاني case 2: نظام النقل IEEE14-bus

وجود VSC-HVD على الخط L_{2-5}

وُضِعَ في هذا الاختبار النظام VSC-HVDC على الخط L_{2-5} من جهة bus2 ليكون قريباً من محطات التوليد. فُعلَّ النظام VSC-HVDC وضبطت بارامتراته كما في الجدول (9) حيث الاستطاعة الفعلية والرديّة التي يمررها على الخط L_{2-5} هي 35 MW و 7 MVAR على التوالي. أظهرت النتائج تغييراً ملحوظاً في جريان الاستطاعة الفعلية والرديّة على خطوط النقل كلّها. يبيّن الجدول (11) بعض النتائج المختارة من تحليل جريان الاستطاعة.

الجدول (9) بارامترات النظام VSC-HVDC (BTB) في

الاختبار الثاني case2

VSC-HVDC on Line 1-5	
NHVDC=1	Psp (1)=0.35
HVDCsend (1)=2	HVDCrec (1)=15
Xvr1(1)=0.1	Xvr2(1)=0.1
TarVol1(1)=1.035	TarVol2(1)=1.0
Qsp1(1)=0.07	Qsp2(1)=-0.07
Vvr1(1)=1.0	Vvr2(1)=1.0
Tvr1(1)=0.0	Tvr2(1)=0.0
VvrHi(1)=1.1	VvrLo (1)=0.9
VSta1(1)=1	VSta2(1)=0
QSta1(1)=0	QSta2(1)=1
Rdc (1)= 0.0	

الجدول (10): توترات قضبان التجميع قبل تركيب النظام VSC-HVD (BTB) وبعده

Bus No.	Without VSC-HVDC Base case		With VSC-HVDC on Line 1-5		With VSC-HVDC on Line 2-5	
	V (pu)	Θ (deg)	V (pu)	Θ (deg)	V (pu)	Θ (deg)
1	1.0600	0.0000	1.0600	0.00	1.0600	0.00
2	1.0350	-4.8618	1.0350	-4.05	1.0350	-4.77
3	1.0100	-12.8976	1.0100	-11.64	1.0100	-12.94
4	1.0049	-10.2395	1.0049	-8.56	1.0067	-10.45
5	1.0109	-8.7303	1.0106	-6.76	1.0139	-9.06
6	1.0010	-14.9348	1.0010	-13.06	1.0010	-15.20
7	1.0040	-13.6510	1.0039	-11.93	1.0048	-13.87
8	1.0410	-13.6510	1.0410	-11.93	1.0410	-13.87
9	0.9817	-15.4873	0.9815	-13.74	0.9826	-15.72
10	0.9772	-15.7163	0.9770	-13.94	0.9779	-15.95
11	0.9853	-15.4715	0.9851	-13.65	0.9856	-15.73
12	0.9848	-15.8987	0.9848	-14.03	0.9848	-16.16
13	0.9794	-15.9681	0.9793	-14.11	0.9795	-16.23
14	0.9613	-16.8533	0.9611	-15.06	0.9618	-17.10
15			1.0632	4.90	1.0462	-6.04

1

الجدول (11): جريان الاستطاعة والضيعات في نظام النقل IEEE 14-bus بوجود VSC-HVDC على الخط 2-5 Line

Line No	From Bus	To Bus	Sending power flow		Receiving power flow		power losses	
			Active MW	Reactive MVAR	Active MW	Reactive MVAR	Active MW	Reactive MVAR
1	1	2	154.50	-2.35	-150.38	9.13	4.12	6.78
2	1	5	78.05	6.27	-75.08	0.69	2.97	6.96
3	2	3	75.15	-1.76	-72.67	7.62	2.48	5.86
4	2	4	58.53	-1.76	-56.68	3.50	1.86	1.74
5	2	5	35.00	7.00	-34.32	-8.54	0.68	-1.54
6	3	4	-21.53	9.20	21.91	-11.74	0.38	-2.54
7	4	5	-58.25	1.34	58.70	-1.24	0.45	0.11
8	4	7	28.89	1.78	-28.89	-0.05	0.00	1.73
9	4	9	16.33	5.11	-16.33	-3.50	-0.00	1.61
10	5	6	43.10	7.48	-43.10	-2.79	-0.00	4.69
11	6	11	6.70	4.56	-6.64	-4.43	0.06	0.13
12	6	12	7.74	2.67	-7.66	-2.50	0.08	0.17
13	6	13	17.46	7.79	-17.22	-7.31	0.24	0.48
14	7	8	0.00	-20.67	-0.00	21.42	0.00	0.75
15	7	9	28.89	20.73	-28.89	-19.35	0.00	1.38
16	9	10	5.89	3.24	-5.88	-3.20	0.01	0.04
17	9	14	9.82	3.01	-9.69	-2.72	0.14	0.30
18	10	11	-3.12	-2.60	3.14	2.63	0.01	0.03
19	12	13	1.56	0.90	-1.55	-0.89	0.01	0.01
20	13	14	5.27	2.40	-5.21	-2.28	0.06	0.12



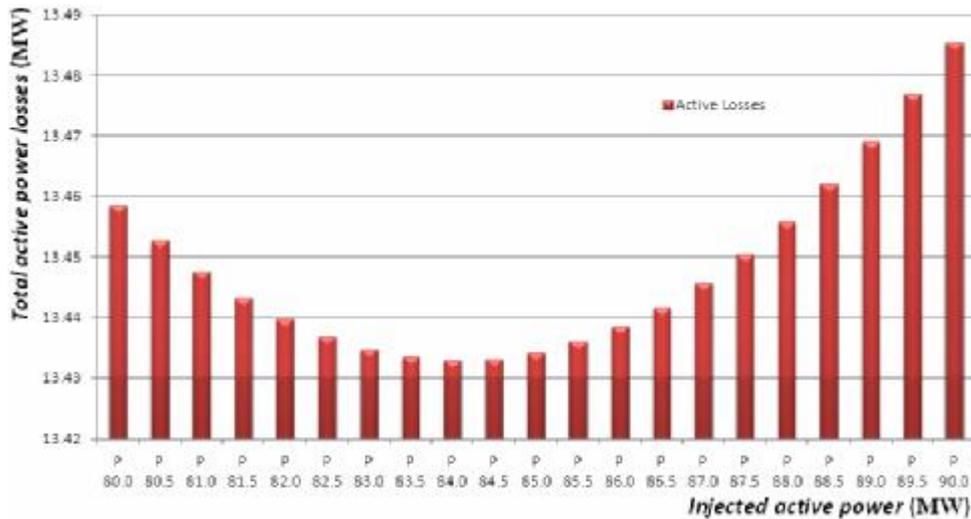
الشكل (12) تأثير إضافة النظام VSC-HVDC إلى الخط 2-5 في توترات قصبان التجميع

الشبكة. ومن الممكن الحصول على ضياع استطاعة كلي أقل يتوقف على قيمة جريان الاستطاعة المرغوب فيها عبر VSC-HVDC كما هو مبين في الشكل (13). إن ضياع الاستطاعة الفعلية الكلي في هذه الحالة، هو دوماً أقل من ضياع الاستطاعة الفعلية الكلي في الحالة الأصلية (13.6345 MW). نلاحظ أيضاً من الشكل (13) أن ضياع الاستطاعة الفعلية الكلي الأصغر في نظام القدرة IEEE 14 bus هو 13.4329 MW يتحقق عندما يحقن النظام VSC-HVDC في الخط L_{2-3} استطاعة فعلية قدرها 84 MW.

3-2-5 الاختبار الثالث case 3: تحليل جريان

الاستطاعة بعد إضافة النظام إلى الخط L_{2-3}

يمكن لمشغل شبكة نقل القدرة أن يختار موقع VSC-HVDC. نلاحظ في شبكة IEEE 14 bus أن هناك حملاً كبيراً على bus 3 قيمته 94.20 MW، يُغذى عبر جريان استطاعة من bus 2 إلى bus 3 ومن bus 4 إلى bus 3. يُحمل نتيجة لذلك الخطان L_{2-4} و L_{5-4} تحميلاً إضافياً لتغذية الحمل على bus 3. يمكن تجنب هذه الحلقة بوضع VSC-HVDC على الخط L_{2-3} . بذلك، يتم جريان المزيد من الاستطاعة على الخطين L_{1-2} و L_{2-3} لتغذية الحمل في bus 3 وينخفض تحميل الخطوط الأخرى في

الشكل (13): علاقة ضياع الاستطاعة الفعلية الكلي بالاستطاعة الفعلية المحقونة عند وضع VSC-HVDC على الخط L_{2-3}

يُبين الجدول (12) جريان الاستطاعة بعد إضافة النظام VSC-HVDC (BTB) إلى الخط L_{2-3} .

الجدول (12): جريان الاستطاعة والضيعات في *IEEE 14-bus Transmission System* بوجود VSC-HVDC على Line 2-3 (Psp=84 MW)

Line No	From Bus	To Bus	Sending power flow		Receiving power flow		losses	
			Active	Reactive	Active	Reactive	Active	Reactive
			MW	MVAR	MW	MVAR	MW	MVAR
1	1	2	159.22	-3.47	-154.85	11.02	4.37	7.56
2	1	5	73.21	7.88	-70.58	-2.29	2.63	5.59
3	2	3	84.00	8.00	-80.98	0.06	3.02	8.06
4	2	4	51.25	0.74	-49.82	-0.30	1.43	0.44
5	2	5	37.89	1.03	-37.13	-2.25	0.77	-1.22
6	3	4	-13.22	6.47	13.38	-9.58	0.16	-3.11
7	4	5	-56.59	3.54	57.02	-3.50	0.43	0.04
8	4	7	28.90	1.39	-28.90	0.34	0.00	1.73
9	4	9	16.33	4.95	-16.33	-3.35	0.00	1.60
10	5	6	43.09	6.44	-43.09	-1.76	0.00	4.68
11	6	11	6.69	4.69	-6.62	-4.56	0.06	0.13
12	6	12	7.75	2.69	-7.66	-2.51	0.08	0.17
13	6	13	17.46	7.85	-17.22	-7.38	0.24	0.48
14	7	8	0.00	-21.02	-0.00	21.79	0.00	0.77
15	7	9	28.90	20.68	-28.90	-19.30	0.00	1.38
16	9	10	5.91	3.11	-5.89	-3.07	0.01	0.04
17	9	14	9.83	2.93	-9.69	-2.64	0.14	0.29
18	10	11	-3.11	-2.73	3.12	2.76	0.01	0.03
19	12	13	1.56	0.91	-1.56	-0.91	0.01	0.01
20	13	14	5.27	2.49	-5.21	-2.36	0.06	0.12

يُبين الجدول (13) نتائج أخرى لتحليل جريان الاستطاعة قبل تركيب النظام VSC-HVDC (BTB) وبعده
الجدول (13) نتائج أخرى لتحليل جريان الاستطاعة

Parameter	Without VSC-HVDC	With VSC-HVDC on line 1-5	with VSC-HVDC on line 2-5	with VSC-HVDC on line 2-3
Active Power Generation (MW)	272.63	272.71	272.55	272.43
Active Losses (MW)	13.6345	13.7074	13.5525	13.4329
% P_{Loss}	% 5.001	% 5.026	% 4.972	% 4.931

التجميع الموصل إليه، ومن ثم تغيير نموذج قضيب التجميع
6 من نموذج PV إلى نموذج PQ. يؤدي VSC-HVDC
وظيفة المعوض التزامني ويُنبت توتر قضيب التجميع 6
على القيمة 1.001 p.u. أي يمكن الاستغناء عن المعوض
التزامني في قضيب التجميع 6. يعمل المقوم في وضعية
"التحكم بجريان الاستطاعة الردية" بقيمة 0 MVAR، نظراً
إلى أن قضيب التجميع المرجع bus slack يُبقي قيمة توتر

4-2-5 الاختبار الرابع case 4: تحليل جريان الاستطاعة
بعد إضافة full VSC-HVDC Link بين bus 1 و bus 6
يمكن تقليل ضياع النقل في شبكة قائمة بإنشاء خطوط نقل
جديدة فيها، يخفض خط النقل الجديد الحمولة على خطوط
النقل القديمة، ويسهم في تجنب إرهاق بعض خطوط الشبكة.
إن إضافة النظام full VSC-HVDC Link إلى الشبكة بين
bus1 في منطقة المولدات و bus6 في منطقة الأحمال كما
في الشكل (14)، بدلاً من إضافة خط نقل AC ومحول، لها
عدة ميزات زيادة على التحكم بجريان الاستطاعة، منها أنه
يمكن لـ VSC-HVDC link أن يحافظ على توتر قضيب

ضبط بارامترات النظام full VSC-HVDC كما في الجدول (14)، أنجز التقارب بعد 8 عمليات تكرار .
الجدول (14) بارامترات النظام full VSC-HVDC في الاختبار الرابع case4

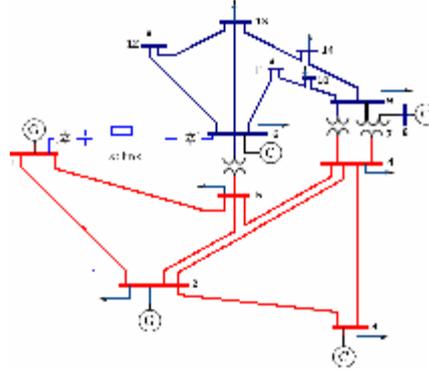
VSC-HVDC on Line 1-5	
NHVDC=1	Psp(1)=0.84
HVDCsend(1)=1	HVDCrec(1)=6
Xvr1(1)=0.1	Xvr2(1)=0.1
TarVol1(1)=1.065	TarVol2(1)=1.001
Qsp1(1)=0.08	Qsp2(1)=-0.08
Vvr1(1)=1.0	Vvr2(1)=1.0
Tvr1(1)=0.0	Tvr2(1)=0.0
VvrHi(1)=1.1	VvrLo(1)=0.9
VStal(1)=1	VSta2(1)=0
QStal(1)=0	QSta2(1)=1
Rdc(1)= 0.051	

من نتائج تحليل جريان الاستطاعة، نجد أنه عندما ينقل HVDC Light@ M1 استطاعة فعلية 84 MW يكون ضياع الاستطاعة الفعلية في خطوط النقل والمحولات وفي كابلي DC يساوي 9.0447 MW، وبحسب [17] (من أجل النظام Light@ M1 المستخدم)، إن الضياع في محطة المقوم 1.55 MW والضياع في محطة المعرج 1.64 MW أي إن ضياع الاستطاعة الفعلية الكلي في نظام النقل IEEE 14 bus يساوي 12.2347 MW وهو أقل من ضياع الاستطاعة الفعلية في الحالة الأصلية (base case) (13.6345 MW).

الجدول (15): جريان الاستطاعة والضياعات في نظام القدرة 14-bus بوجود full VSC-HVDC بين Bus1 و Bus6

Line No	From Bus	To Bus	Sending power flow		Receiving power flow		power losses	
			Active MW	Reactive MVAR	Active MW	Reactive MVAR	Active MW	Reactive MVAR
1	1	2	101.42	11.13	-99.61	-11.40	1.81	-0.27
2	1	5	42.63	6.32	-41.71	-7.88	0.91	-1.57
3	2	3	63.51	-0.57	-61.74	3.45	1.77	2.88
4	2	4	35.08	-0.23	-34.41	-1.67	0.67	-1.89
5	2	5	19.31	-0.54	-19.12	-2.45	0.20	-2.99
6	3	4	-32.46	9.74	33.24	-11.30	0.78	-1.55
7	4	5	-66.09	0.17	66.66	0.29	0.57	0.46
8	4	7	12.44	5.40	-12.44	-5.02	0.00	0.37
9	4	9	7.03	7.40	-7.03	-6.84	0.00	0.56
10	5	6	-13.43	8.44	13.43	-7.84	0.00	0.61
11	6	11	23.30	0.54	-22.78	0.53	0.51	1.07
12	6	12	9.79	1.84	-9.67	-1.59	0.12	0.25
13	6	13	25.96	5.95	-25.49	-5.03	0.47	0.92
14	7	8	-0.00	-21.54	0.00	22.35	0.00	0.81
15	7	9	12.44	26.56	-12.44	-25.62	0.00	0.94
16	9	10	-9.90	9.04	9.96	-8.88	0.06	0.16
17	9	14	-0.14	6.82	0.20	-6.68	0.06	0.13
18	10	11	-18.96	3.08	19.28	-2.33	0.32	0.75
19	12	13	3.57	-0.01	-3.54	0.04	0.03	0.03
20	13	14	15.53	-0.80	-15.10	1.68	0.43	0.88
21	1	6	84.00	8.00	-83.67	-8.00	0.33	0.00

قضيب التجميع ثابتة، ويعمل المعرّج في وضعية "التحكم بالتوتر AC" مثبتاً قيمة توتر قضيب التجميع 6.



الشكل (14): مخطط الخط الواحد لنظام IEEE 14-bus بوجود full VSC-HVDC بين bus 1 و bus 6

اختير في هذا الاختبار النظام HVDC Light@ M1 (101 MVA± 80 kV rating)، يمكن الاطلاع على خصائص Light@ M1 في المراجع [6]، [17]، [18]. يراوح جريان الاستطاعة الفعلية عبر حلقة الوصل DC link بين 10 و 100 MW. واخترنا كابلأ أرضياً مناسباً بحسب ما ورد في جداول المرجع [19] بمقاومته 0.0601 Ω/km، ومن ثم فإن مقاومة الكابل الواحد بطول 20 km تساوي 1.202 Ω، ولما كانت استطاعة الأساس 100 MVA وتوتر الأساس 69kV فإن مقاومة كابلي التيار المستمر $R_{dc} \cong 0.051 pu$. بعد

6- الاستنتاجات والتوصيات:

- 1- تحليل السلوك الديناميكي للنظام VSC-HVDC في شبكات النقل وأثره في استقرار الشبكات المحيطة به.
- 2- استخدام البرنامج المنجز في دراسة جدوى استخدام النظام VSC-HVDC في شبكة النقل الكهربائية السورية على ضوء تطور الطلب على الطاقة الكهربائية وشروط الربط بالشبكات المجاورة.

• طُوِّرَ نموذج رياضي وخوارزمية لتحليل جريان الاستطاعة بالحالة المستقرة في نظام قدرة متناوب يحتوي على النظام VSC-HVDC، استند إلى دمج المعادلات الرياضية التي تعبر عن الدارة المكافئة للنظام VSC-HVD في مصفوفة اليعقوبي لخوارزمية نيوتن-رافسون.

• أنجز برنامج حاسوبي استناداً إلى الخوارزمية المطورة يمكن استخدامه في تحليل جريان الاستطاعة في أي نظام قدرة توافرت بياناته اللازمة مع VSC-HVDC أو من دونه، كما أن البرنامج قابل للتعديل أو التطوير والربط مع برامج تصميم أخرى.

• إضافة النظام VSC-HVDC إلى خط نقل في نظام قدرة كهربائية يتيح ضبط جريان الاستطاعة الفعلية والردية على ذلك الخط، ويسهم في استثمار أفضل لخطوط النقل القائمة وتخفيف حمولة الخطوط المرهقة وتلبية حاجة نظام القدرة من الاستطاعة الردية.

• يجري التحكم بالاستطاعة الفعلية بوساطة زاوية توتر ملف الطور، ويجري التحكم بالاستطاعة الردية بوساطة قيمة توتر ملف الطور.

• موقع النظام VSC-HVDC في نظام القدرة الكهربائية وقيمة جريان الاستطاعة الفعلية المحقونة، لهما دور مهم في تخفيض الجريان الحلقي للاستطاعة في الشبكة وإنقاص ضياعات النقل الكلية.

• الحصول على ضياع استطاعة كلي (ضياعات النقل والضياعات في النظام VSC-HVDC) أقل يتوقف على الاختيار المناسب للاستطاعة الفعلية والردية المحقونة.

• إن العيب الرئيس لنظام VSC-HVDC فضلاً عن كلفته المرتفعة هو الضياعات العالية في مبدلاته.

• البحث قابل للتطوير في المجالات الآتية:

*7- المراجع

- L. Zhang, " Modeling and Control of VSC-HVDC Links Connected to Weak AC Systems," Ph.D. dissertation, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2010.
- S. G. Johansson, G. Asplund, E. Jansson, R. Rudervall, "Power system stability benefits with VSC DC-transmission systems," Cigré, B4204, Session, 2004.
- Acha' E.; Fuerte-Esquivel, C.R.; Ambriz-Pérez, H.; Angeles- Camacho, C. *FACTS: Modeling and Simulation in Power Networks*. John Wiley & Sons, 2004, 420.
- IEEE 14-bus test system data http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf14/pg_tca14bus.htm
- Samimi, P. Naderi, "A new Method for Optimal Placement of TCSC Based on Sensitivity Analysis for Congestion Management," Smart Grid and Renewable Energy, 2012, 3, 10-16.
- PerHaugland, "It's time to connect: Technical description of HVDC Light® technology," ABB, 2006.
- ABB, "User guide for the PSS/E implementation of the HVDC Light® model version 1.1," 2006.
- ABB, "HVDC Cables: submarine and land power cables," ABB's high voltage cable unit in Sweden, 2006.
- S. Cole, D. Van Hertem, L. Meeus, R. Belmans, "Technical developments for the future transmission grid", IEEE, International Conference on Future Power Systems 2005.
- D. Van Hertem, J. Verboomen, R. Belmans, W. L. Kling, "Power flow controlling devices: An overview of their working principles and their application range", IEEE, International Conference on Future Power Systems 2005.
- G. Asplund, K. Eriksson, K. Svensson, "DCtransmission based on Voltage Source Converters," Cigré, Colloquium in South Africa 1997.
- Mohan N., Undeland T. M., Robbins W. P., "Power electronics-Converters, Applications, and Design", 2003, John Wiley & Sons Inc.
- M. M. de oliveira. "Power Electronics for Mitigation of Voltage Sags and Improved Control of ac Power Systems", Ph.D. thesis, Royal Institute of Technology, ISSN-1100-1607, TRITA-EES-0003, Stockholm, Sweden, 2000.
- ABB, "It's time to connect," ABB's Technical description of HVDC Light®technology, March 2008.
- Gunnar Asplund. Dc transmission based on voltage source converter. In CIGRE98, 1998.
- Gunnar Asplund, Kjell Eriksson, and Ove Tollerz. Hvd light, a tool for electric power transmission to distant loads. In VI Sepope Conference, 1998.
- F.Schettler, H.Huang, and N.Christl. Hvd transmission systems using voltage sourced converters-design and applications. In IEEE power Engineering Society Summer Meeting, 2000.
- S. Li. T. A. Haskew, L. Xu, "Control of HVDC Light System Using Conventional and Direct Current Vector Control Approaches," IEEE Trans. Power Electron., vol. 25, no. 12, pp. 3106-3118 Dec. 2010.
- User guide for the PSS/E Implementation of the HVDC Light Detailed model Version 1.1.6, ABB Memorandum, Document number 06TS0257 Rev. 16, September 26, 2008.