تحليل منحنى التوتر على الشبكة السورية

الدكتور خالد الحمصي[1] الدكتور حسان السويدان[2]

الملخص

من المعروف أنه عند تحميل خطوط نقل القدرة الكهربائية بالحمل الموافق للممانعة الموجية لها يكون جريان الاستطاعة الردية عبرها مساوياً للصفر ويكون منحنى التـــوتر ذا شـــكل مستقيم تقريباً.

وينجم عن الأحمال الخفيفة على خطوط نقل القدرة الكهربائية الطويلة ارتفاع في التوتر في نهاية الاستقبال لهذه الخطوط، أما الأحمال الكبيرة فتؤدي إلى انخفاض كبير في التوتر.

وتستخدم تجهيزات تعويض الاستطاعة الردية لتخفيض التوترات العالية ورفـــع التـــوترات المنخفضة في حالة زيادة التحميل، ومن ثَمَّ تحسين مستوى وشكل منحنى التوتر على عقد الشبكة وزيادة الاستطاعة المنقولة واستقرار النظام.

دُرِسَ في هذا البحث منحنى التوتر على الشبكة السورية وأثر تعويض الاستطاعة الرديـــة التفرعي في شبكات التوزيع على شكل هذا المنحنى، وضياعات النظام وتحسين قدرة النقل وإمكانية إعادة جدولة التوليد.

وتشير نتائج البحث إلى أن انتهاج سياسة جديدة لإدارة الاستطاعة الرديـــة علـــى الـــشبكة السورية سيؤدي إلى تحسين مستوى منحنى التوتر وشكله فضلاً عن فوائد اقتصادية وتقنية كبيرة على الاستطاعة المنقولة وضياعات النظام وجدولة التوليد.

الكلمات المفتاحية: منحنى التوتر، تعويض الاستطاعة الرديـــة، هبـــوط التـــوتر، قـــضبان التجميع، خطوط النقل، الأحمال، جدولة التوليد، الشبكة السورية، التحكم بالتوتر

[1] وزارة الكهرباء.

[2] كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية– جامعة دمشق.

1- مقدمة:

تختلف قيمة التوتر في أي عقدة من الشبكة وبدرجة معينة عن القيمة الوسطى لها ويرتبط ذلك بشكل الشبكة والأحمال وعوامل أخرى تؤدي دوراً في تحديد هبوط التوتر مثل توازن الاستطاعة الردية إذْ وكما هو معروف يتعلق مستوى التوتر على كامل نظام القدرة ذي التيار المتناوب بمقدار هذا التوازن.

ويؤدي انهيار توازن الاستطاعة الردية إلى تغيير مستوى التوتر في الشبكة حيث يرتفع التوتر بزيادة الاستطاعة الردية المولدة عن المستهلكة والعكس صحيح، إذ ينخفض التوتر عندما تصبح الاستطاعة الردية المولدة أقل من الاستطاعة الردية المستهلكة [1,9,10].

وتؤثر درجة توازن الاستطاعة الردية في تصميم منظمات التوتر وتخضع للتقييم عند إدخال وسائل تنظيم جديدة مثل محطات توليد جديدة وتغيير شكل الشبكة.

في الأنظمة الكهربائية التي تتضمن عجزاً في الاستطاعة الفعلية يكون التوتر أقل من القيمة الاسمية، وعموماً تأخذ هذه الأنظمة ما ينقصها من الاستطاعة الفعلية من الأنظمة المجاورة التي لديها فائض في الاستطاعة الفعلية.

وغالباً ما يصاحب العجز في الاستطاعة الفعلية عجز في الاستطاعة الردية ولكن لا يسمح لهذه الأنظمة بأن تأخذ ما ينقصها من الاستطاعة الردية من الأنظمة المجاورة وبدلاً من ذلك يتم استخدام أجهزة تعويض للاستطاعة الردية.

أما أبرز مستهلكي الاستطاعة الردية في نظم القدرة الكهربائية فهي المحولات، والخطوط الهوائية، والمحركات التحريضية، وتجهيزات التقويم، واللحام الكهربائي وغيرها [5].

وعند البحث في تحليل منحنى التوتر لابد من البحث في ضياع الاستطاعة الردية ولاسيّما أنَّ هذا الضياع في عناصر الشبكة الكهربائية كبير جداً ويصل إلى 50% من الاستطاعة الردية على هذه الشبكة.

ويشكل ضياع الاستطاعة الردية في المحولات على اختلاف مستوياتها 70-75% من ضياع الاستطاعة الردية الكلي، إذ تشكل الضياعات الردية في المحولات ثلاثية الطور عند نسبة تحميل 0.8 نحو 12% من الاستطاعة الاسمية للمحولة.

دُرِسَ في هذا البحث منحنى التوتر على الشبكة السورية وأثر تعـويض الاسـتطاعة الردية التفرعي في تحسين شكل هذا المنحنى، وكذلك أثر هذا التعويض في الاستطاعة المنقولة وضياعات النظام وإمكانية إعادة جدولة التوليد.

2- العلاقة بين التوتر والاستطاعة الردية

Relation Between Voltage and Reactive Power

تُعطى العلاقة بين فرق التوتر بين عقدتين في الشبكة وجريـان الاسـتطاعة الرديـة بالشكل [3]:

$$\Delta V = \frac{RP + XQ}{V} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(1)$$

إذْ:

R : مقاومة خط النقل بالـ ohm.

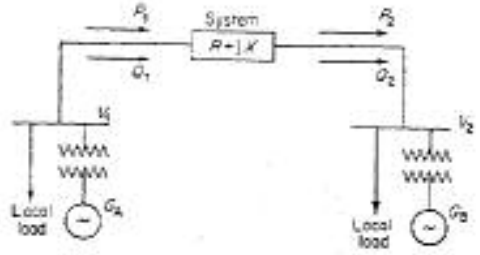
X : مفاعلة خط النقل بالـ ohm.

P: الاستطاعة الكلية بالـ MW.

Q: الاستطاعة الردية بالـ Mvar.

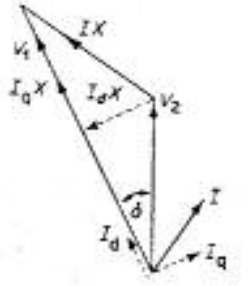
$\Delta V = V_1 - V_2$: فرق التوتر بين عقدتين بالـ KV.

في الشبكات الكهربائية التي تتميز بـ $X >> R$ أي في معظـم دارات الاسـتطاعة هناك علاقة بين هبوط التوتر ΔV والاستطاعة الردية Q. وسيتم بيان ذلك على نظام القدرة الكهربائية المكون من محطتي توليد A, B المبين في الشكل (1) :



الشكل (1) نظام قدرة كهربائي مكون من عقدتين

تتقدم المحطة A على المحطة B بزاوية الطور ويكون V_1 أكبر من V_2، ولهذا يكون هناك جريان الاستطاعة الفعلية والاستطاعة الردية من A إلى B. وهذه النتيجة يمكن ملاحظتها على المخطط الشعاعي المبين في الشكل (2).

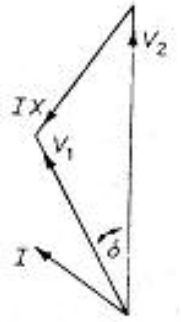


الشكل (2) المخطط الشعاعي للنظام المبين في الشكل (1) عند $V_1 > V_2$.

المقاومة الأومية للخط صفر، المفاعلة التحريضية X ohms, I_d , I_q مركبات التيار I على محوري الإحداثيات.

وواضح من هذا المخطط أن المركبة الطولية للتيار I_d ومن ثَمَّ P تتحدد بالزاوية δ، وتتحدد المركبة العرضانية للتيار I_q ومن ثَمَّ Q بـ $V_1 - V_2$.

في هذه الحالة $V_1 > V_2$ وتنتقل الاستطاعة الردية من A إلى B. إذ تم تغيير تهييج المولدات بحيث تكون $V_2 > V_1$ فإن الاستطاعة الردية تعكس اتجاهها كما هو مبين في الشكل (3).



الشكل (3) المخطط الشعاعي للنظام المبين في الشكل (1) عند $V_2 > V_1$

وهكذا فإنه يمكن إرسال الاستطاعة الفعلية من A إلى B أو من B إلى A عن طريق التحكم بكمية البخار(العنفات البخارية) أو بكمية الماء المقدمة إلـــى العنفـــة المائيـــة، ويمكن إرسال الاستطاعة الردية في كلا الاتجاهين عـــن طريـــق الـــتحكم بطويلـــة التوترات.

إن حالتي التشغيل السابقتين مستقلتان عن بعضهما بعضاً تقريباً إذا كانت $X >> R$. وممكن دراسة جريان الاستطاعة الردية بصورة مستقلة تقريباً عن جريان الاستطاعة الفعلية.

من جهة أخرى إذا كان هناك عجز في الاستطاعة الردية في نقطة ما فإن هذه النقطة يجب أن تُغذى من الخطوط المربوطة معها، ومن ثَمَّ فإن التوتر علـــى هـــذه النقطـــة سينخفض.والعكس بالعكس إذا كان هناك فائض في الاستطاعة الرديـــة فـــإن التـــوتر سيرتفع.

عند ضبط الشبكة في الشكل (1) بحيث تكون $Q_2 = 0$ فلن يكون هناك هبوط للتوتر بين A و B، وعندما تكون التوترات V_1, V_2 ثابتة يكون هبوط التوتر ΔV ثابتاً ومن ثَمَّ من معادلة هبوط التوتر:

$$\Delta V = \frac{RP_2 + XQ_2}{V_2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(2)$$

يكون لدينا:

$$Q_2 = \frac{V_2.\Delta V - RP_2}{X} = K - \frac{R}{X}P_2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(3)$$

حيث

K : ثابت.

إذا لم تكن Q_2 متوافرة على الشبكة فإنه يجب تأمينها من مصادر خارجية مثل المكثفات والمعوضات المتواقتة. عند تغيير P_2 إلى P_2' وبقاء V2 ثابتاً فإن الاستطاعة الردية في B يجب أن تتغير إلى Q_2' بحيث :

$$Q_2' - Q_2 = \frac{R}{X}\left(P_2' - P_2\right) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(4)$$

من جهة أخرى تعطى العلاقة بين التوتر في العقدة والاستطاعة الفعلية والردية بالتابع:

$$V = f(P,Q)$$

ويتعلق التوتر بالعقد المجاورة وكيفية تمثيلها على افتراض أنها قضبان تجميع لا نهائية

المشتق الكلي للتوتر:

$$dV = \frac{\partial V}{\partial P}dP + \frac{\partial V}{\partial Q}dQ$$

وباستخدام العلاقات:

$$\frac{\partial P}{\partial V}.\frac{\partial V}{\partial P} = 1 \ , \frac{\partial Q}{\partial V}.\frac{\partial V}{\partial Q} = 1$$

فإننا نحصل على :

$$dV = \frac{dP}{\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)} + \frac{dQ}{\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(5)$$

نلاحظ من المعادلة (5) أن تغيير التوتر في عقدة ما يتعلق بكميتين $\frac{\partial P}{\partial V}$، $\frac{\partial Q}{\partial V}$ وعادةً تكون الكمية $\frac{\partial Q}{\partial V}$ ذات أهمية أكبر في هذا المجال.

من المعادلة (1) والمعادلة (5) نستطيع أن نكتب:

$$\frac{\partial Q}{\partial V} = \frac{V_1 - V_2}{X} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (6)$$

ويتضح من هذه العلاقة أنه كلما كانت المفاعلة المرتبطـــة بالعقـــدة أصـــغر كانـــت القيمة $\frac{\partial Q}{\partial V}$ كبيرة، ومن ثَمَّ هبوط توتر أقل، وكلما زاد عدد الخطوط المتـــصلة مـــع العقدة انخفضت المفاعلة المحصلة، ومن ثَمَّ كبرت القيمة $\frac{\partial Q}{\partial V}$. أي إنَّ لشكل الـــشبكة ومكوناتها تأثيراً واضحاً في الاستطاعة الردية وهبوط التوتر.

هناك بعض الحالات التي تحدث فيها مشاكل في جريان الاستطاعة الردية تؤدي إلـــى فقدان استقرار التوتر نذكر منها على سبيل المثال لا الحصر :

1- خطوط النقل الطويلة التي لا يوجد فيها تحكم بالتوتر في قـــضبان تجميـــع نهايـــة الاستقبال المحملة بحمولات خفيفة أو حمولات زائدة.

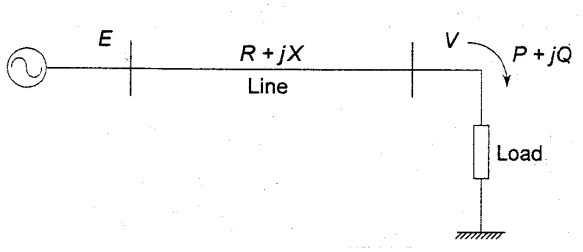
2- خطوط النقل الشعاعية : معظم الشبكات المتوازية مكونة من خطوط شعاعية ينجم عن فقدان أحد هذه الخطوط زيادة المفاعلة التحريضية وحدوث خلل ما بين الاستطاعة الردية المقدمة من الخط والاستطاعة الردية المطلوبة من الحمل الأمر الذي يؤدي إلى خلل في استقرار التوتر.

3- عجز في الاستطاعة الردية المولدة محلياً : يمكن أن يحدث تضارب بين جـــداول الصيانة وخروج بعض التجهيزات عن الخدمة يؤدي إلى عجز في الاستطاعة الردية ومشاكل في التحكم بالتوتر [4].

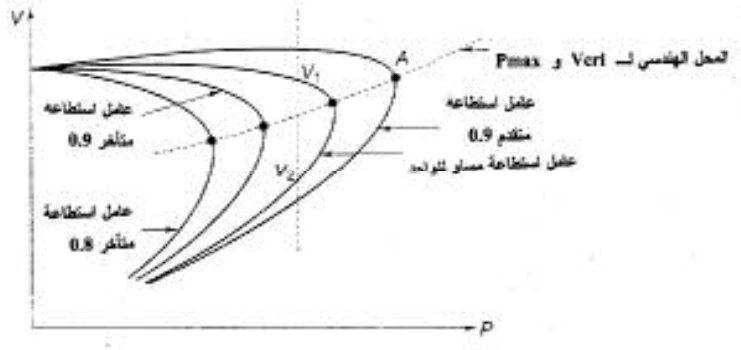
تستخدم المنحنيات PV والمنحنيات VQ لدراسة حدود التحميل المرتبطـــة باســـتقرار التوتر. من أجل الخط المبين في الشكل (4) نجد أنه لأجل كل قيمـــة للاســـتطاعة p

هناك قيمتان للتوتر عند عامل استطاعة محدد كما هو مبين في الشكل (5) حيث تـم رسم منحنيات PV لأجل قيم مختلفة لعامل الاستطاعة.

القيمة العليا للتوتر تشير إلى حالة مستقرة في حين تقع القيمة الدنيا في المنطقة غيـر المستقرة للتوتر.



الشكل (4) خط نقل يصل بين باسبارين



الشكل (5) منحنيات PV لأجل عوامل استطاعة مختلفة

من أجل جريان الاستطاعة الردية Q وبفرض $X >> R$ أي $\phi \approx 90°$ (وهو تقريب مقبول) يكون لدينا :

$$Q = \frac{EV}{X}\cos\delta - \frac{V^2}{X} \quad \text{.....(7)}$$

حيث δ زاوية الحمولة أو العزم. بإعادة ترتيب المعادلة السابقة نحصل على:

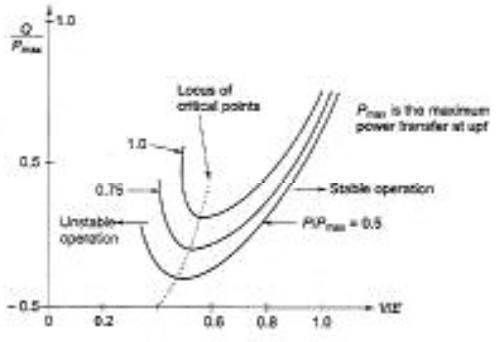
$$V^2 - EV\cos\delta + QX = 0 \quad \text{.....(8)}$$

وبأخذ المشتق الأول نحصل على :

$$\frac{dQ}{dV} = \frac{E\cos\delta - 2V}{X} \quad \text{.....(9)}$$

ويبين الشكل (6) المنحنيات $\frac{V}{E}$, $\frac{Q}{P_{\max}}$ لأجل قيم مختلفة لـــ $\frac{P}{P_{\max}}$ (Pmax الاستطاعة العظمى الموافقة للزاوية δ= 90º) ويتضح من هـــذا الـــشكل أن النظام يكون مستقراً في المنطقة حيث $\frac{dQ}{dV}$ موجب ويبلغ التوتر حد الاستقرار عنـــد $\frac{dQ}{dV} = 0$ التي تعدُّ نقطة العمل الحرجة، وتعطى قيمة الاســـتطاعة الرديـــة المنقولـــة الحدية بالعلاقة :

$$Q_{Limt} = \frac{V^2}{X}\cos 2\delta \quad \text{.....(10)}$$



الشكل (6) المميزات QV لخط النقل المبين في الشكل (4)

ويمكن تعميم هذه الدراسة على خط النقل على كامل نظام القدرة مع الأخذ بالحـــسبان عوامل أخرى إضافية تسهم في التأثير في استقرار التوتر مثـــل قـــوة نظـــام النقـــل،

مستويات نقل الاستطاعة، ومميزات الأحمال، وحدود توليد الاستطاعة الردية في المولدات فضلاً عن مميزات تجهيزات تعويض الاستطاعة الردية.
وسنقدم فيما يأتي استعراضاً سريعاً لطرائق التحكم بالتوتر المعروفة.

طرائق التحكم بالتوتر

هناك عدة طرائق للتحكم بالتوتر، وفي كل طريقة يتم تغيير التوتر وفقاً لتغير الحمل للحصول على توتر- ثابت قدر الإمكان- في طرف المستهلك من النظام:

التحكم بالتهييج

تستخدم هذه الطريقة فقط في محطات التوليد. عند تغير أحمال نظام القدرة يتغير توتر خرج المولدات نتيجة لهبوط التوتر على المفاعلة التزامنية للمولد، ويمكن الحفاظ على توتر ثابت على خرج المولدات عن طريق تغيير تيار التهييج للمولدات تبعاً للحمل وهو مايُعرف بطريقة التحكم بالتهييج.
يمكن التحكم بالتهييج باستخدام منظم آلي أو يدوي، ويفضل استخدام المنظمات الآلية في النظم الكهربائية المعقدة.

المحولات المنظمة للتوتر

المحولات المزودة بمبدل للتفريعات:

تصلح طريقة التحكم بالتهييج للخطوط القصيرة نسبياً، إلا أنها لاتصلح للنظم ذات الخطوط الطويلة لذلك تستخدم طرائق أخرى للتحكم مثل المحولات المزودة بمبدل للتفريعات، وعادةً تكون التفريعات على الطرف الثانوي للمحولات، ويتم التحكم بالتوتر في هذه الطريقة عن طريق تغيير نسبة عدد اللفات في المحولة.
وهناك نوعان من المحولات المزودة بمبدل للتفريعات: المحولات المزودة بمبدل للتفريعات على اللاحمل و المحولات المزودة بمبدل للتفريعات على الحمل.

المحولات المعدلة لطويلة التوتر:

في هذه الطريقة يتم على كل طور مثلاً الطور a إضافة تـــوتر ΔVan إلـــى التـــوتر الأساسي Van بحيث يكون التوتر المحصل:

$$V'an = Van + \Delta Van$$

ويتم تأمين التوتر ΔVan عن طريق محول تهييج ومحول تسلسلي وتكـــون زاويـــة الطور لـــ ΔVan مماثلة لزاوية الطور لVan .

المحولات المعدلة لزاوية الطور للتوتر:

يتم هنا حقن توتر ΔVbc له زاوية طور مختلفة عن زاوية الطور للتوتر الأساســـي Van، ومن ثَمَّ يصبح التوتر المحصل

$$V'an = Van + \Delta Vbc$$

بزاوية طور جديدة، وتطبق نفس التقنية على الطورين b ,c ويمكن الـــتحكم بمقـــدار إزاحة الطور عن طريق محول التهييج.

المكثفات التسلسلية:

عند وصل المكثفات التسلسلية تنخفض المفاعلة التحريضية بين الحمل ومصدر التغذية مما يؤدي إلى تقليل هبوطات التوتر، إلا أنه يجب الانتباه إلى أن هذه المكثفات تولـــد توترات عالية على أطرافها في حالات القصر.

المكثفات والملفات التفرعية:

تستخدم المكثفات التفرعية عند الأحمال التحريضية لتزودها بجزء مـــن الاســـتطاعة الردية التي تحتاجها هذه الأحمال ومن ثَمَّ تخفيض الاستطاعة الردية المنقولـــة عبـــر الخط وبقاء التوتر على الخط ضمن الحدود المرغوب فيها.

وبشكل مماثل تستخدم الملفات التفرعية مع الأحمال السعوية والخطوط ذات الحمولات الخفيفة لاستجرار جزء من الاستطاعة الردية والحفاظ على التـــوتر ضـــمن المجـــال المسموح[8].

ويتم ربط المكثفات إما مباشرة أو من خلال الملف الثالث للمحول الرئيسي. السيئة الرئيسية لهذه الطريقة أنه عند انخفاض التوتر على قضبان التجميع تنخفض الاستطاعة الردية المقدمة أي تنخفض فعالية هذه المكثفات وقت الحاجة إليها.

أما فيما يخصُّ المفاعلات التحريضية فهناك طريقتان أساسيتان لربط هذه المفاعلات:

- ربط المفاعلات التحريضية مع الباسبار بواسطة آلية وصل – فصل.
- ربط المفاعلات التحريضية إلى نهاية خط النقل بشكل ثابت.

3- دراسة منحنى التوتر عند الحمل الأعظمي للشبكة السورية للعام 2010

Voltage Profile Analysis on Syrian Network 2010

استناداً إلى الدراسة السابقة سنقوم بتحليل مستوى منحنى التوتر وشكله للشبكة السورية للعام 2010 المبينة في الشكل (7) واستراتيجية التعويض للأحمال والشبكة.

سنستخدم معطيات الشبكة السورية 400 kV, 230 kV، محولات التوليد والنقل والتوزيع التي تم الحصول عليها من وزارة الكهرباء، وتمثل الأحمال على طرف التوتر المنخفض للمحولات وسنستخدم برنامج تحليل الشبكات PSS/E لإنجاز الحسابات اللازمة [2].

وسَتُؤْخَذ القيم العليا للتوتر الواقعة في المنطقة المستقرة وسَتُؤْخَذ عوامل الاستطاعة من تسجيلات الشبكة، وتظهر بعض هذه التسجيلات قيماً منخفضة لعامل الاستطاعة للأحمال على المحولات 230/66 kV.

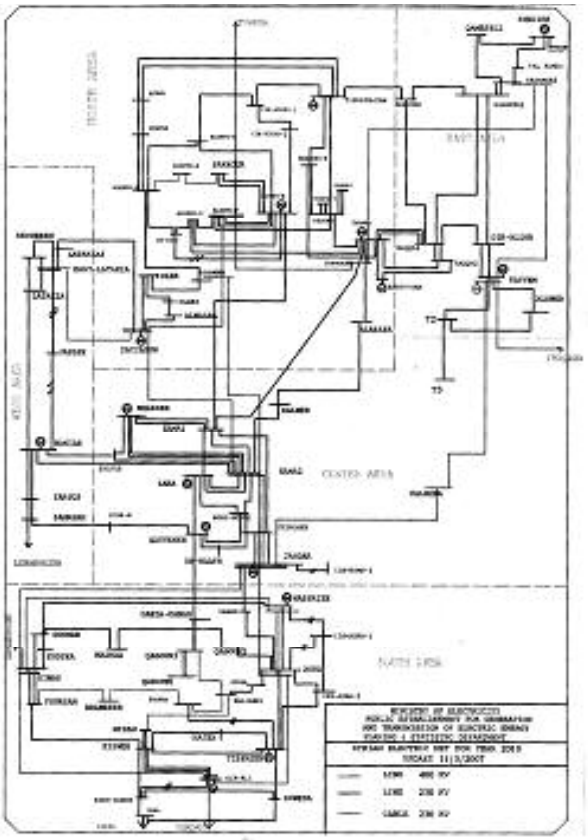
الاستطاعة الردية مقدمة من الشبكة حيث تقوم المولدات بإنتاج القسم الأعظم منها، وهذا يعني أن الاستطاعة الردية غير كافية [6]. ونتيجة لذلك يتم نقل الاستطاعة الردية من أجزاء أخرى من الشبكة، وهذه الاستراتيجية من التشغيل لها مساوئ متعددة أهمها:

- ضياعات استطاعة فعلية عالية نتيجة لزيادة التيار الردي في الخطوط والمحولات.
- هبوطات توتر عالية في الشبكة تؤدي إلى انخفاض التوتر في بعض أجزاء النظام وزيادة الضياعات.

– أحياناً تكون هناك حاجة لإعادة تشكيل الشبكة حيث تظهر الحاجة لإنشاء خطـــوط جديدة لتجنب هبوط التوتر في شبكة النقل.

كقاعدة عامة يجب عدم نقل الاستطاعة الردية لمسافات طويلـــة فـــي نظـــام القـــدرة الكهربائية بل يجب أن تولد وتستهلك محلياً قدر الإمكان.

المبدأ الآخر الذي يجب السعي لتحقيقه هو منحنى التـــوتر المنبـــسط Flat Voltage Profile الذي يعني أن التوتر يجب أن يكون متماثلاً في جميع العقد (قضبان التجميع).



الشكل (7) الشبكة الكهربائية السورية للعام 2010

منحنى التوتر:

يمكن التحقق من شكل منحنى التوتر عن طريق استعراض قضبان التجميع التي يكون فيها التوتر إما مرتفعاً أو منخفضاً بشكل كبير.ويبين الجدول /1/ بعض قضبان التجميع من الشبكة السورية التي تتميز بتوتر أكبر من 105%.

الجدول /1/ قضبان التجميع ذات التوتر أكبر من 105%

X------ BUS -----X	AREA	V(PU)	V(KV)	X------ BUS -----X	AREA	V(PU)	V(KV)
54026 PALMERA 400	12	1.0670	426.78	55013 SIN-HOMS 230	12	1.0567	243.05
55014 HOMS-NOR 230	12	1.0515	241.84	55015 PALMERA 230	12	1.2552	288.71
55400 JANDAR 1 230	12	1.0592	243.62	55430 HAMA 2 230	12	1.0593	243.64
55440 MHARDEH 230	12	1.0537	242.35	55450 HAMA 1 230	12	1.0508	241.69
55470 ZARA 230	12	1.0675	245.53	55700 BRATH 230	15	1.0581	243.35
55710 THAWRA 230	15	1.0609	244.00	57005 PALMERA 20.0	12	1.2552	25.105
57063 THAWRA 20.0	15	1.0572	21.143	57401 JANDAR 20.0	12	1.0597	21.194
57402 JANDAR 20.0	12	1.0597	21.194	57431 HAMA 2 20.0	12	1.0569	21.138
57432 HAMA 2 20.0	12	1.0569	21.138	59471 ZARSTO1 15.0	12	1.1221	16.831
59472 ZARSTO2 15.0	12	1.1221	16.831	59473 ZARSTO3 15.0	12	1.1221	16.831

ويتضح من هذا الجدول أن محطات الـ 230 kV والـ 400 kV الواردة تعاني من ارتفاع التوتر. وبصورة مماثلة يبين الجدول /2/ بعض قضبان التجميع من الشبكة السورية التي تتميز بتوتر أقل من 98%.

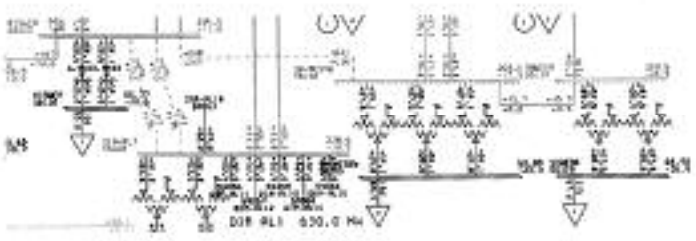
الجدول /2/ قضبان التجميع ذات التوتر أقل من 98%

X------ BUS -----X	AREA	V(PU)	V(KV)	X------ BUS -----X	AREA	V(PU)	V(KV)
55011 DARAA 230	11	0.8809	202.60	55012 BRAMEKEH 230	11	0.9601	220.83
55019 SACHOR 230	14	0.9641	221.73	55020 SIN-ALEP 230	14	0.9769	224.68
55021 HRETAN 230	14	0.9679	222.61	55022 ALEPO A 230	14	0.9620	221.27
55023 MABROKEH 230	15	0.9673	222.48	55024 TALHAMES 230	15	0.9633	221.55
55100 SH-MESKN 230	11	0.8851	203.58	55110 SOWEDA 230	11	0.8890	204.46
55120 KISWEH 230	11	0.9761	224.50	55130 FOURSAN 230	11	0.9602	220.85
55160 MIDAN 2 230	11	0.9645	221.82	55170 DOUMAR 230	11	0.9564	219.97
55180 QABOUN 1 230	11	0.9586	220.47	55190 DAHEIT-D 230	11	0.9597	220.74
55210 DIMAS 230	11	0.9631	221.51	55230 ZAMERA 230	11	0.9612	221.08
55240 MAERAA 230	11	0.9534	219.27	55600 IDLEB 230	14	0.9678	222.60
55620 ALEPPO-D 230	14	0.9634	221.58	55630 ALEPPO-H 230	14	0.9569	220.08
55640 ALEPPO-B 230	14	0.9573	220.19	55730 DAH-ALEP 230	14	0.9625	221.38
55930 HASSAKEH 230	15	0.9624	221.35	55940 QAMESHLI 230	15	0.9544	219.50
56032 SIN-ADRA66.0	11	0.9764	64.440	56041 SACHOR 66.0	14	0.9784	64.576
56042 SIN-ALEP66.0	14	0.9713	64.104	56043 HRETAN 66.0	14	0.9787	64.593
56044 ALEPO A 66.0	14	0.9727	64.201	56046 TALHAMES66.0	15	0.9739	64.277
56610 ZAYZOUN66.0	14	0.9777	64.530	56640 ALEPPO-B66.0	14	0.9761	64.423
56680 MESKNEH 66.0	14	0.9772	64.492	56730 DAH-ALEP66.0	14	0.9739	64.274
57003 DIMAS 20.0	11	0.9578	19.156	57151 ADRA 2 20.0	11	0.9793	19.585
57152 ADRA 2 20.0	11	0.9793	19.585	57211 DIMAS 20.0	11	0.9578	19.156
57671 ALEPPO F20.0	14	0.9780	19.560	57672 ALEPPO F20.0	14	0.9780	19.560
58611 ZAYZOUN15.0	14	0.9774	14.661	58631 ALEPPO-H15.0	14	0.9780	14.671

وعملياً هناك 26 محطة على مستوى التوتر 230 kV ذات توتر تشغيل أقل من 98% وهو ما يعادل (225.4 kV).

تحويل الاستطاعة الردية :

إن مشكلة نقل الاستطاعة الردية من المولدات إلى الحمل مبينة في الشكل (8) حيـــث يتم توليد الاستطاعة الردية من المولدات في محطة دير علي (228.6 kV) وتنقل عبر محطة الكسوة (224.6 kV) إلى محطة الشيخ مسكين (203.6 kV). ونلاحظ أن هناك هبوط توتر كبيراً (أكبر من 20 kV) على خط النقل من الكسوة إلى الشيخ مسكين.



الشكل (8) مثال على هبوط التوتر الناتج عن نقل الاستطاعة الردية

نلاحظ أن الحمل علـــى قـــضيب تجميـــع الـــشيخ مـــسكين 66 kV هـــو 162 MW و89.4Mvar والحمل على قضيب تجميع الـــسويداء هـــو 115 MW و 57.2 Mvar. وهنا من المفيد تركيب مكثفات تفرعية على شبكة التوزيع لتحسين عامل الاســـتطاعة للحمل على المحولات 230/66 kV، وهذا يعني أنه يجب تأمين الاستطاعة الردية التي يحتاجها الحمل وشبكة التوزيع في هذه المنطقة محلياً عن طريق مجموعـــة مكثفـــات تفرعية محلية بدلاً من المولدات البعيدة.

توازن الاستطاعة الردية :

في نظام القدرة الكهربائية هناك دائماً توازن بين الاستطاعة الكلية الفعليـــة والرديـــة والمولدة والاستطاعة الكلية والفعلية والردية المستهلكة، ويبين الجدول /3/ ملخص هذا التوازن للشبكة السورية

الجدول /3/ توازن الاستطاعة على الشبكة السورية

AREA	FROM GENERATION	TO LOAD	TO BUS SHUNT	TO LINE SHUNT	FROM CHARGING	TO NET INT	LOSSES	
11-35	8107.5	8000.0	0.0	0.0	0.0	1.3	106.2	MW
SYRIA	3683.7	3434.0	0.0	0.0	2094.8	-74.1	2418.6	Mvar

ويبين السطر الأول في هذا الجدول توازن الاستطاعة الفعلية في حين يبين السطر الثاني توازن الاستطاعة الردية.

وتبين الأعمدة Generation و Charging الاستطاعة المقدمة، في حين تظهر الأعمدة الأخرى الاستطاعة المستهلكة أي أن توازن الاستطاعة الردية هو:

Generation	+	Charging	=	Load	+	Bus-shunt	+	Line-shunt	+	Export	+	Losses
3683.7	+	2094.8	=	3434	+	0	+	0	-	74.1	+	2418.6

الاستطاعة الردية الإجمالية المقدمة 5778.5Mvar، واستطاعة الشحن الكلية على الشبكة الـ 400 kV والـ 230 kV وهي 2095 Mvar (1239 على شبكة الـ 400 و856 على شبكة الـ 230 kV). قيمة الضياعات التحريضية الكلية في خطوط النقل والمحولات هي 2419 Mvar أي أن هناك توازناً على الشبكة نفسها ولذلك يتم موازنة الاستطاعة الردية للحمل 3434 Mvar عن طريق توليد عالٍ للاستطاعة الردية في محطات التوليد.

يبين الجدول /4/ توازن الاستطاعة في كل منطقة من الشبكة السورية، ويلاحظ من هذا الجدول أنه لأجل المنطقة الجنوبية هناك استيراد مقداره 470 Mvar لتزويد الحمل بالاستطاعة الردية وتغطية الضياعات، فضلاً عن إنتاج المولدات المقدر بـ 1067Mvar. في المنطقة الوسطى، هناك فائض في التوليد يتم تصديره إلى بقية المناطق.

الجدول /4/ توازن الاستطاعة لكل منطقة من الشبكة السورية

AREA	FROM GENERATION	TO LOAD	TO BUS SHUNT	TO LINE SHUNT	FROM CHARGING	TO MET INT	LOSSES	
11	1777.5	2697.3	0.0	0.0	0.0	-948.4	28.6	MW
SOUTH	1067.3	1228.4	0.0	0.0	363.8	-469.6	672.3	Mvar
12	1910.0	966.1	0.0	0.0	0.0	916.0	27.9	MW
CENTER	830.5	410.6	0.0	0.0	521.7	481.2	460.3	Mvar
13	670.0	906.0	0.0	0.0	0.0	-242.6	6.6	MW
WEST	372.0	376.4	0.0	0.0	89.9	-134.5	210.9	Mvar
14	2050.0	2307.5	0.0	0.0	0.0	-280.0	22.5	MW
NORTH	967.2	937.2	0.0	0.0	464.6	-158.0	652.5	Mvar
15	1700.0	1123.1	0.0	0.0	0.0	556.3	20.6	MW
NORTH-EA	646.8	481.4	0.0	0.0	663.8	206.7	422.5	Mvar

ظاهرة فيرانتي:

إن الخط المفتوح من نهاية واحدة سيتعرض إلى ارتفاع في التـــوتر نتيجـــة لظـــاهرة فيرانتي، ويزداد تأثير هذه الظاهرة على الخطوط الطولية ذات سعات الشحن الكبيـــرة والممانعات الكبيرة.

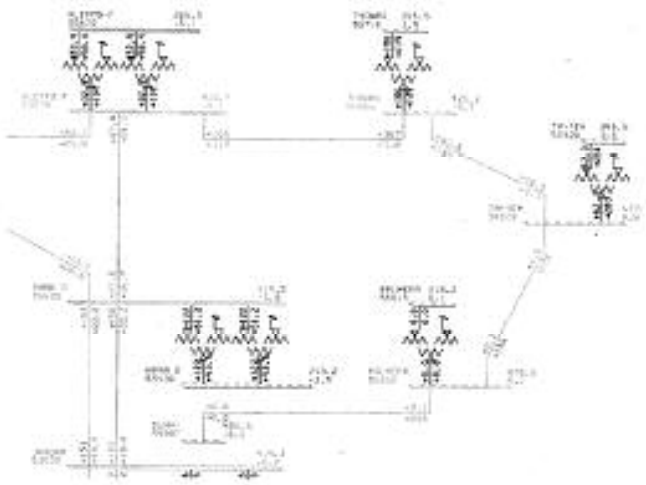
ويبين الجدول /5/ الحالات الحدية على شبكة الـــ 400 kV. إن فتح الخط من جنـــدر إلى تدمر من طرف جندر سيؤدي إلى ارتفاع التوتر إلـــى 481 kV علـــى الطـــرف المفتوح.

الجدول /5/ حالات فتح الخط الحدية (ظاهرة فيرانتي)

Line open at bus			Going to bus			ID	Voltage
54400	JANDAR	400	54026	PALMERA	400	1	481.5
54029	TAYYEM	400	54026	PALMERA	400	1	465.0
54670	ALEPPO F	400	54062	THAWRA	400	1	441.2

ويبين الشكل (9) جريان الحمولة على الشبكة مباشرة بعد تلك الحالات، حيث وصـــل التوتر في محطة التيم إلى 438 kV وعلى محطة تدمر إلى 470 kV.

لذلك يجب تركيب مفاعلات تفرعية للتعويض والحد من تأثير خطوط الـــــ 400 kV المفتوحة في المنطقة الشرقية.



الشكل (9) ارتفاع التوتر بعد فتح خط تدمر – جندر من طرف جندر

4- مقترحات لتحسين منحنى التوتر، الحمل الأعظمي للعام 2010 :

سنناقش الآن كيف أن التعويض التفرعي يستطيع تحسين شكل منحنى التوتر على الشبكة وسنعتمد أسلوب إضافة المكثفات التفرعية عند قضبان تجميع الأحمال لتحسين عامل الاستطاعة للحمل والحد من جريان الاستطاعة الردية إلى شبكة التوزيع [7].

طُبِّقَتْ طريقة المعالجة هذه على مناطق الشبكة السورية كلّها وسنكتفي بإيراد النتائج الخاصة بالمنطقة الجنوبية وذلك حفاظاً على مراعاة شروط النشر الخاصة بعدد الصفحات.

المنطقة الجنوبية :

تُشير نتائج حساب جريان الحمولة لهذه المنطقة قبل التعويض التفرعي إلى انخفاض التوتر على عقد الشيخ مسكين – درعا – السويداء وزيادة تحميل على خطوط دير علي – كسوة – والكسوة – شيخ مسكين.

ولتصحيح ذلك أُضِفَتْ مكثفات تفرعية في الأماكن المبينة في الجدول /6/.

الجدول /6/ أماكن إضافة المكثفات التفرعية في المنطقة الجنوبية

X------ BUS ------X		MVAR
56034	DARAA 66.0	30.0
56035	BRAMEKEH66.0	35.0
56100	SH-MESKN66.0	95.0
56110	SOWEDA 66.0	60.0
56120	KISWEH 66.0	50.0
56130	FOURSAN 66.0	80.0
56150	ADRA 2 66.0	80.0
56160	MIDAN 2 66.0	65.0
56170	DOUMAR 66.0	100.0
56190	DAHEIT-D66.0	125.0
56210	DIMAS66 66.0	50.0
56230	ZAHERA6666.0	50.0
56240	MAZRAA 66.0	50.0
57180	QABOUN 120.0	60.0

ويتضح من نتائج حساب جريان الحمولة لهذه المنطقة بعد وضع المكثفات أن التوتر أصبح مستوياً بشكل أكبر عما كان عليه قبل وضع المكثفات ويتراوح بـــين 230 kV و237 kV، كما نلاحظ أنه لم يعد هناك زيادة تحميل على الخطوط من دير علي إلـــى الكسوة والشيخ مسكين.

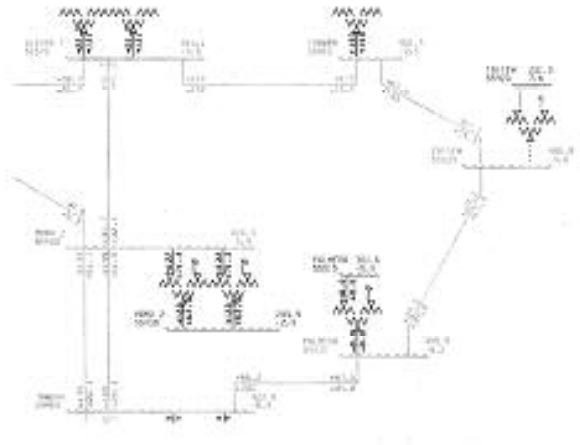
شبكة الـــتوتر العالي 400 kV:

استطاعة الشحن السعوية لهذه الشبكة العالية التوتر كبيرة ينـــتج عنهـــا فـــائض فـــي الاستطاعة الردية Mvar في حالات النقل الخفيف. إن الاستطاعة المنقولة على شبكة الـــ 400 kV قليلة جداًحتى في حالة الذروة، وجميع خطوط الـــ 400 kV على الشبكة السورية تعمل تحت منسوب حمل الممانعة الموجيـــة (Surge Impedance Loading SIL) مما يؤدي إلى فائض في الاستطاعة الردية.

لا توجد مفاعلات تحريضية تفرعية للتعويض على خطوط الـــ 400 kV ولذلك فـــإن كل الاستطاعة الردية الزائدة تصدر عبر المحولات إلى شبكة الـــ 230 kV.

وفضلاً عن التوترات العالية الناجمة عن ظاهرة فيرانتي فـــي حالـــة الخطـــوط ذات النهايات المفتوحة هناك حالة طارئة أخرى وهي حالة فصل المحـــول 400/230 kV

في محطة التيمّ تؤدي إلى ارتفاع التوتر على باسبارات المنطقة الشمالية الشرقية كما هو مبين في الشكل (10)، حيث يرتفع التوتر إلى 449 kV في عقدة التيّم وإلى 446 kV في عقدة تدمر، وهذه القيم تزيد على توترات التصميم لهذه الخطوط. هذا الواقع يؤكد الحاجة للتعويض بواسطة المفاعلات التحريضية على الشبكة.

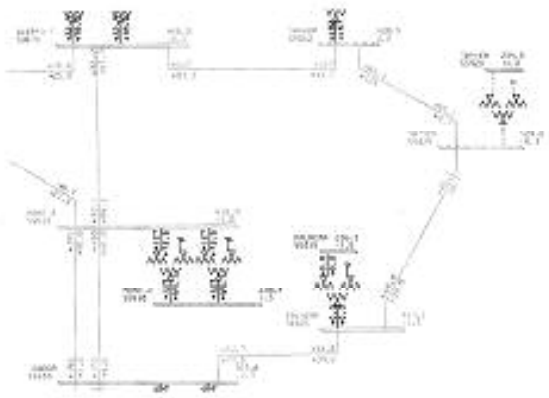


الشكل (10) التوترات بعد فصل المحول 400/230 kV في محطة التيم

إن ربط المفاعلات بشكل ثابت إلى نهاية خط النقل غالباً ما يكون مفيداً على الخطوط الطويلة من الشبكة بسيطة التعقيد، إذْ في يتم هذه الحالة فصل المفاعلات التحريضية فقط عند فصل الخط.

ولبيان مدى فائدة المفاعلات التحريضية رُبِطَتْ مفاعلات تحريضية باستطاعة 75Mvar إلى خطوط الـ 400 kV في عقدة تدمر.

نلاحظ في هذه الحالة أن فصل المحول في عقدة التيم سيؤدي إلى زيادة التوتر إلى 430 kV في هذه العقدة وإلى 419 kV في عقدة تدمر، كما هو مبين في الشكل (11).



الشكل (11) التوترات بعد فصل المحولة في عقدة التيم مع وجود التعويض التفرعي

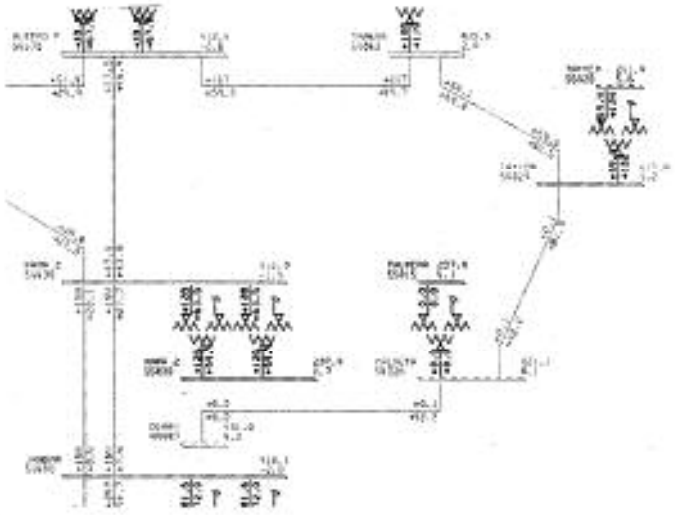
كما دُرِسَتْ ظاهرة فيرانتي على الشبكة مع وجود التعويض التفرعي، وقد أعطت هذه الدراسة النتائج الآتية المبينة في الجدول /7/.

الجدول /7/ تأثير ظاهرة فيرانتي في الخطوط ذات النهايات المفتوحة بوجود التعويض

Line open at bus		Going to bus		ID	Voltage
54670 ALEPPO F	400	54062 THAWRA	400	1	432.5
54220 DIR-ALI	400	50090 AMN400	400	1	431.8
54029 TAYYEM	400	54062 THAWRA	400	1	431.2
54400 JANDAR	400	54026 PALMERA	400	1	431.0
54062 THAWRA	400	54029 TAYYEM	400	1	430.1

إن ارتفاع التوتر في هذه الحالة أقل بكثير من تلك الحالة فـــي حـــال عـــدم وجـــود التعويض على الشبكة حيث وصل ارتفاع التوتر في أسوأ حالة إلى 481 kV.

ويبين الشكل (12) التوترات بعد فتح خط تدمر في عقدة جندر



الشكل (12) ارتفاع التوتر بعد فتح خط تدمر في عقدة جندر مع وجود مفاعلات التعويض التفرعية في عقدة تدمر

منحنيات التوتر:

بعد إضافة التعويض التفرعي إلى الشبكة أصبح منحنى التوتر مستوياً بشكل أفـضل، ويبين الجدول /8/ قضبان التجميع ذات التوتر الأكبر من 105% بعد إضافة التعويض التفرعي.

الجدول /8/ قضيب التجميع ذات التوتر الأكبر من 105% بوجود التعويض

X------ BUS -----X	AREA	V(PU)	V(KV)	X------ BUS -----X	AREA	V(PU)	V(KV)
55710 THAWRA	230	15 1.0501	241.52	57221 DIR-ALI 20.0	11	1.0501	21.003

وبمقارنة نتائج الجدول /8/ بالجدول /1/ يتضح لنا أنه بوجود التعويض التفرعـــي لا يوجد قضبان تجميع توترها أقل من 1pu في حين في الحالـــة التـــي لا يوجـــد فيهـــا تعويض كان هناك 44 قضيب تجميع بتوتر أقل من 0.98pu (الجدول 2).

توازن الاستطاعة الردية :

يبين الجدول /9/ توازن الاستطاعة لكل منطقة من الـــشبكة الـــسورية بعـــد إضـــافة التعويض التفرعي.

الجدول /9/ توازن الاستطاعة لكل منطقة من الشبكة السورية بوجود التعويض

AREA	FROM GENERATION	TO LOAD	TO BUS SHUNT	TO LINE SHUNT	FROM CHARGING	TO NET INT	LOSSES	DESIRED NET INT
11	1777.5	2697.3	0.0	0.0	0.0	-938.7	18.9	0.0
SOUTH	331.7	1228.4	-1023.5	0.0	386.5	4.2	509.2	
12	1910.0	966.1	0.0	0.0	0.0	920.1	21.7	0.0
CENTER	7.0	410.6	-235.8	156.7	512.6	-140.4	406.8	
13	670.0	906.0	0.0	0.0	0.0	-241.2	5.2	0.0
WEST	155.3	376.4	-295.0	0.0	80.0	-23.4	177.3	
14	2050.0	2307.5	0.0	0.0	0.0	-274.9	17.4	0.0
NORTH	295.1	937.2	-716.0	0.0	474.3	9.6	538.6	
15	1700.0	1123.1	0.0	0.0	0.0	560.1	16.8	0.0
NORTE-EA	33.1	481.4	-343.0	78.4	662.2	105.3	373.3	

ضياعات النظام:

بلغت الضياعات الكلية علـــى الخطـــوط 230kV و400kV فـــي الـــشبكة الـــسورية 106MW قبل التعويض و 82MW بعد إضافة التعويض التفرعي وبـــذلك فقـــد تـــم تخفيض الضياعات التقنية بمقدار 23% عن طريق إضافة التعويض التفرعـــي إلـــى شبكة التوزيع.

جدولة التوليد:

بهدف دراسة إمكانية إعادة جدولة التوليد بين المناطق واستخدام خطوط الـــ 400kV لنقل القدرة داخل سورية أُجْرِيَ تحليل الحساسية، حيث تم إيقاف المحطات المائية في شمال سورية واستبدلت بزيادة التوليد في المنطقة الوسطى والجنوبية والاستيراد مـــن مصر وتخفيض الحمل بمقدار 6.25%.

إجراء التغيرات هذه في جدول التوليد دون وجود تعويض أدى إلى حالة من جريـــان الحمولة لا يمكن حلها على عكس الحالة التي يوجد فيها تعويض للاستطاعة الرديـــة، وهذا يشير إلى ضرورة تشغيل المحطات المائية عند الحاجة إلى تشغيل النظـــام دون

تعويض في حين أنه يمكن إيقاف هذه المحطات في حال وجود توازن استطاعة ردية جيداً على النظام.

وبهذا فإن الوضع الحالي الذي تعمل فيه المحطات المائية في حالات الحمولات الخفيفة بهدف استقرار الشبكة سيتحسن في حال تطبيق التعويض التفرعي على الأحمال، وهذا سيعطي إمكانية تشغيل المحطات المائية بطريقة أفضل.

5- النتائج والتوصيات:

واضح أن نظام القدرة في القطر العربي السوري لا يعمل بصورة مثالية وينجم عن ذلك توترات منخفضة وضياعات نقل كبيرة وضخ استثمارات غير ضرورية ذات كلفة اقتصادية عالية.

تبين الدراسة التحليلية على الشبكة السورية أن هناك فوائد متعددة للتعويض التفرعي نذكر منها ما يأتي:

- تحسين مستوى منحنى التوتر وشكله على الشبكة، إذْ يقل التباين بين قيم التوتر على قضبان التجميع.
- تقليل ضياعات النظام نتيجة لانخفاض قيمة التيار على خطوط الشبكة.
- زيادة الاستطاعة المنقولة.
- إمكانية إعادة جدولة التوليد.

يجب عدم السماح لشبكة التوزيع باستجرار استطاعة ردية من شبكة النقل إلا ضمن الحدود المعقولة، وبالمقابل يجب تركيب تجهيزات تعويض تفرعي على شبكة التوزيع لتحسين عامل الاستطاعة للمحولات 230/66 kV مع ملاحظة أنه يجب فصل تجهيزات التعويض خلال أوقات الحمولات الخفيفة، وذلك لتجنب حقن شبكة النقل باستطاعة ردية إضافية.

الأمر الآخر المهم هو ضرورة مراقبة توازن الاستطاعة الردية على شبكة التوزيع ووصل المكثفات التفرعية أو فصلها حسب الحاجة.

طبعاً سيترتب على تطبيق التعويض التفرعي تكاليف اقتصادية إضافية علـــى شـــبكة التوزيع، ولكن هذه التكاليف مبررة حيث يؤدي التعويض التفرعي إلى تأجيل تركيـــب خطوط ومحولات جديدة نظراً إلى أنَّ التوتر يكون ضمن الحدود المسموحة، كمـــا أن تحميل الخطوط يكون ضمن المجال المسموح به.

لذلك يجب النظر إلى التعويض التفرعي على أنه وسيلة ناجعة ورائجة ذلك أنها تقلل من الكلفة الإجمالية للشبكة إلى أنَّ تخفيض تكاليف الاستثمار يكون أكبر مـــن كلفـــة التعويض التفرعي.

المراجع

1- Saadat Hadi , Power System Analysis ,Mc Graw –Hill , New York ,1999.
2- PSS/E Power System Analysis Program, PTI, Ver 29 , 2000.
3- Weedy B.M, Electric Power System, JOHN WILEY&SONS, 1989.
4- Kothari D.P. , Nagrath I.J , Modern Power System Analysis , Mc Grow Hill, New York.2003.
5- Lakervi E., Holmes E.J., Electricity Distribution Network Design, Short Run Press Ltd , England 1995.
6- Fabio Saccomano , Electric Power System , IEEE PRESS ,2003.
7-Northcote J., Wilson R., Control and Automation of Electrical Power Distribution System, CRC Press, 2007.
8- Duncan G., Mulukutla S., Power System Analysis and Design, Thomson Corporation, United States, 2008.
9- أ. د. علي حمزة : نظم القدرة الكهربائية– منشورات جامعة دمشق، 2008
10– أ. د. شوقي بطل: تحليل الشبكات الكهربائية– منشورات جامعة دمشق، 1987

تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق: 2009/4/2.