مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (39) العدد (3) 2017
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (39) No. (3) 2017

نمذجة محولات التحكم بزاوية الطور واستخداماتها

الدكتور نبيل الفقيه*
محمد موفق الخطيب**

(تاريخ الإيداع 29 / 12 / 2016. قُبِل للنشر في 7/ 6 / 2017)

□ ملخّص □

يعد استخدام محولات التحكم بزاوية الطور (PST) ضرورة ملحة في الشبكات الكهربائية التي يتم العمل على تحسين مردودها لأنها تتيح التحكم بسريان الاستطاعة في خطوط الشبكة بما يفيد في تقليل الضياعات.

تعد PST تقانة ناضجة يستخدمها مشغلو شبكة النقل الكهربائية فهي تقدم حلاً متكاملاً للتحكم بسريان الاستطاعة يتصف بالوثوقية العالية والاقتصادية.

تم في هذا البحث التعرض إلى تصنيف محولات التحكم بزاوية الطور واستخداماتها، كما تم اقتراح نموذج حاسوبي يتسم بالبساطة دون الخوض في تفاصيل التحكم في هذا المحول، حيث يعطي النموذج المقترح نتائج استخدام هذا المحول عن طريق تمثيل توتر الإزاحة بالطور وقد تم تمثيل هذا النموذج على برنامج Matlab/Simulink

اعتماداً على النموذج الرياضي الذي تم بناؤه في بيئة matlab أصبح لدينا نموذجاً مقترحاً يبين أثر هذا المحول عن طريق تمثيل التوتر على خرجه وقد تم التحقق من النتائج باستخدام برنامج neplan وذلك بدراسة حالة بينت دور هذا النوع من المحولات في التحكم بسريان الاستطاعة والآثار الإيجابية على الشبكة المتمثلة في تحسين التوتر وتقليل الضياعات.

الكلمات المفتاحية: نمذجة، محولات التحكم بزاوية الطور، التحكم بسريان الاستطاعة، سريان الاستطاعة، Matlab/Simulink

* أستاذ – قسم هندسة الطاقة الكهربائية – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية– جامعة دمشق– سورية.
** طالب دراسات عليا (دكتوراه)– قسم هندسة الطاقة الكهربائية – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية– جامعة دمشق– سورية.

مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (39) العدد (3) 2017
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (39) No. (3) 2017

Phases Shifting Transformer Simulation and Application

Dr. Nabeel Al Faqeeh*
Mohammad Moufak Alkateeb**

(Received 29 / 12 / 2016. Accepted 7 / 6 / 2017)

□ ABSTRACT □

Phase Shifting Transformer has played an important role in electrical networks to improve their efficiency because it has the ability to control power flow in electrical transmission network that can lead to power loss minimization. PST technology is considered as mature technology which is used by transmission system operators. These transformers provide an integrated solution to control power due to the advantages of low economic and high reliability.

In this research an exposure to the classification of phase shifting transformers and their application then a simple model for Phase shifting transformer is suggested without seeking in the details of transformer, this model presents the result for using PST via modeling phase shifting voltage, this model is performed using Matlab/Simulink program according to differential equation. Depending on the mathematical model which has been built in an Matlab environment we have a model shows the impact of this transformer through the representation of output voltage , results are verified using Neplan program via a case study demonstrated the role of this type of transformers in controlling power flow in transmission system achieving remarkable power loss reduction and improving voltage profile

Keywords: Phase Shifting Transformer (PST), Simulation , Matlab/Simulink ,Power control , Load Flow

*Professor, Electric Power Department, Faculty of Mech. & Elec. Engineering, Damascus University, Syria.
**Postgraduate Student, Electric Power Department, Faculty of Mech. & Elec. Engineering, Damascus University, Syria.

مقدمة:

تعرف محولات التحكم بزاوية الطور "Phase Shifting Transformer (PST)" على أنها تجهيزات للتحكم بسريان الاستطاعة على خط ما في شبكة معقدة لنقل الطاقة الكهربائية إذ أن المهمة الأساسية لها **التحكم بزاوية الإزاحة الطورية** بين توتر الدخل وتوتر الخرج وهذا بدوره يؤدي إلى التحكم بمقدار الاستطاعة الفعلية السارية في الخط [1].

تعد محولات التحكم بزاوية الطور ضرورة ملحة في الشبكات الكهربائية التي يتم العمل على تحسين مردودها لأنها تسمح بالتحكم بسريان الاستطاعة في خطوط الشبكة بشكل مستقل عن التوليد و بشكل يرضي مشغلي أنظمة نقل القدرة الكهربائية. أضحت طريقة تصنيع محولات التحكم بزاوية الطور معروفة لذلك يتم استخدامها من قبل مشغلو شبكة النقل الأوروبية "Transmission System Operator (TSO)" كحلول وقائية للتحكم بسريان الاستطاعة بين عقدتين في شبكة النقل[2] .

تقدر تكلفة هذا النوع من المحولات بنحو / 7/ مليون دولار لمحولة ذات استطاعة 800 MVA [3]، كما أن محولات التحكم بزاوية الطور PST تقدم حلاً متكاملاً للتحكم بسريان الاستطاعة يتصف بالوثوقية العالية والاقتصادية بالمقارنة مع أنظمة النقل المتناوبة المرنة (FACTS) التي تشمل UPFC و IPFC و STATCOM و SVC.[4,5]

يتوفر حالياً محولات للتحكم بزاوية الطور من تصنيع كبرى الشركات العالمية مثل ABB و Siemens حيث قامت شركةSiemens مؤخراً بتصنيع محولة للتحكم بزاوية الطور باستطاعة 600 MVA بزاوية إزاحة للطور $\pm 40°$ ذات ± 32 خطوة في مدينة وينز في أستراليا لتضعها في الخدمة في سلوفينيا [6]. كما قامت شركة ABB بتصنيع محولات للتحكم بزاوية الإزاحة الطورية باستطاعات تصل إلى 1630 MVA وبتوترات تصل إلى 420kV وبزاوية تصل إلى $70°$ [7].

أهمية البحث وأهدافه:

تأتي أهمية البحث من أهمية محولات التحكم بزاوية الطور كون لها القدرة على التحكم بسريان الاستطاعة في شبكات النقل الكهربائية الأمر الذي يعطي مرونة في تشغيل هذه الشبكات حيث غالبا ما تعاني من تحميل زائد في خطوطها بالاضافة إلى تسليط الضوء على المزايا الفنية الأخرى لهذه المحولات من تخفيض الضياع وتحسين التوتر.

طرائق البحث ومواده:

إعداد نموذج حاسوبي لمحولات التحكم بزاوية الطور على برنامج matlab من خلال تمثيل المعادلات التفاضلية اللازمة.

يمتاز برنامج neplan بقدرته على تحصيل البيانات من برنامج آخر مثل برنامج matlab وبالتالي الاستفادة من النموذج الحاسوبي الذي تم إعداده لدراسة حالة باستخدام برنامج Neplan لشبكة معيارية بهدف بيان دور هذه المحولات في التحكم بسريان الاستطاعة على خط نقل ضمن الشبكة المدروسة وكذلك دراسة الآثار الفنية لهذه المحولة من حيث تخفيض الضياعات وتحسين التوترات.

2-تصنيف محولات التحكم بزاوية الطور:

يمكن تصنيف محولات التحكم بزاوية الطور من حيث البنية و التطبيق حيث يمكن أن نميز من حيث البنية نوعين من المحولات وهما: ثنائي النواة (غير المباشر) وأحادي النواة (المباشر)

أما من ناحية التطبيق فتقسم المحولات إلى محولات متناظرة ومحولات غير متناظرة [8].

يتيح التصميم **المتناظر** التحكم بزاوية الطور مع الحفاظ على طويلة التوتر على الجانبين (الحمل- المنبع)، بينما يسمح التصميم **غير المتناظر** بالتحكم بزاوية الطور وطويلة التوتر وهذا الأمر بدوره يغير أيضاً من سريان الاستطاعة الردية.

أولاً: التصميم أحادي النواة: Single Core Design

يمكن التمييز بين نوعين مختلفين من التصميم أحادي النواة (متناظر وغير متناظر)

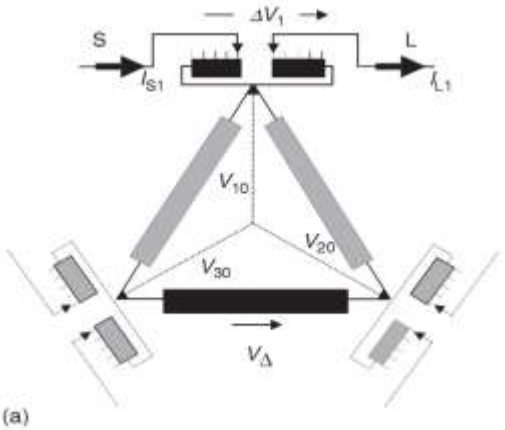
التصميم المتناظر:

بإتباع التصميم المبين في الشكل (1) يمكننا الحصول على تصميم متناظر. يحتاج هذا التصميم إلى مبدل وضعيات أحادي عدد /2/ لكل طور أو إلى مبدلي وضعيات تحت الحمل ثلاثي الطور(On load-Tap (OLTC changer

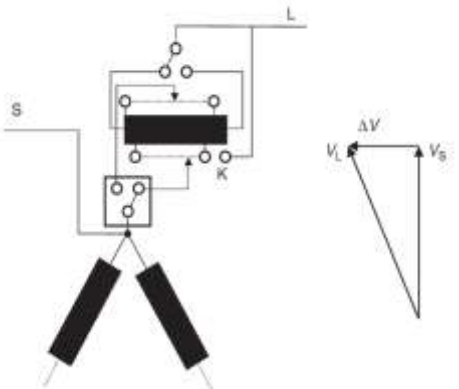
يتميز التصميم الأحادي النواة بالبساطة والاقتصادية كما أن زاوية الإزاحة بالطور هي البارامتر الوحيد الذي يؤثر على سريان الاستطاعة(في النوع المتناظر).

إلا أن له المساوئ التالية

- يتم وصل مبدل الوضعيات إلى النظام تحت الحمل و بالتالي يخضع مباشرة إلى حالات زيادة التوتر وحالات الأعطال.
- يتحدد التوتر والتيار المطبق على OLTC بالمواصفات الاسمية والتي قد لا تسمح دائماً بالاختيار الاقتصادي الأمثل.
- يؤدي تغير عدد اللفات من خلال OLTC إلى تغير ممانعة القصر لمحول PST لذلك لا يمكن التخطيط على أن محول PST سوف يساهم بالحد من قيمة تيار القصر في نظام القدرة.



الشكل /1/ محول أحادي النواة متناظر



الشكل /2/ محول أحادي النواة غير متناظر

التصميم غير المتناظر:

يمكن الحصول على التصميم غير المتناظر باستخدام التصميم المبين في الشكل /2/، و الذي يمتاز باستخدام اللفات لنصف مبدل وضعيات (tap changer) وبالتالي تخفيض عدد المبدلات المطلوبة، إلا أن النسبة بين توتر المنبع وتوتر الحمل تختلف مع اختلاف زاوية الطور وهذا بدوره يؤثر على سريان الاستطاعة.

إن لفات التنظيم يمكن أن تكون مرتبطة بطورين مختلفين وهذا يسبب إزاحة في الطور بين لفات التنظيم ولفات المحول.

عادة ما تكون لفات التنظيم موصلة من طرف المنبع إلا أن التوصيل غير المباشر من طرف الحمل قد يكون ممكناً أيضاً.

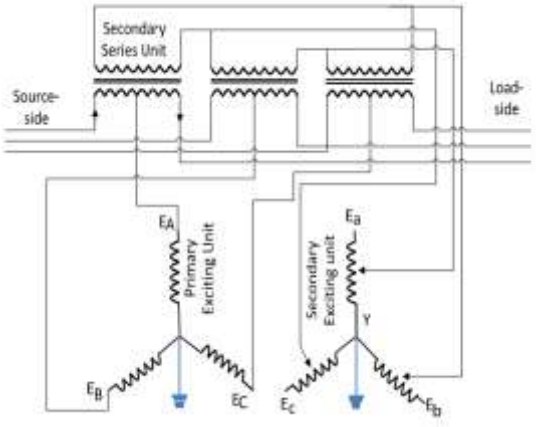
يمكن الانتقال من محول تنظيم عادي إلى محول إزاحة بالطور في الوضعية الوسطى للـ OLTC دون الحاجة إلى فصل الوحدة.

ثانياً:التصميم ثنائي النوى Two-Core design:

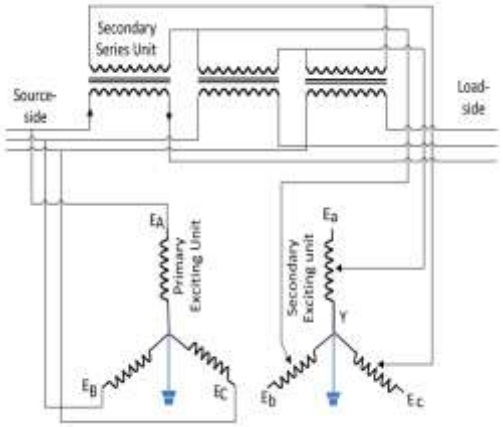
تتكون هذه المحولة من وحدتين، وحدة تسلسلية ووحدة أساسية.

تمتاز المحولات ثنائية النوى بالمرونة في اختيار توتر الخطوة والتيار المار في لفات التنظيم.

من أجل التصاميم ذات الاستطاعة الصغيرة والتوترات المنخفضة فإن المحولات ثنائية النوى يمكن أن تكون محتواة في خزان واحد بينما تتطلب المحولات ذات الاستطاعة الأكبر وذات التوترات الأعلى تصميماً ثنائي الخزان [9] .



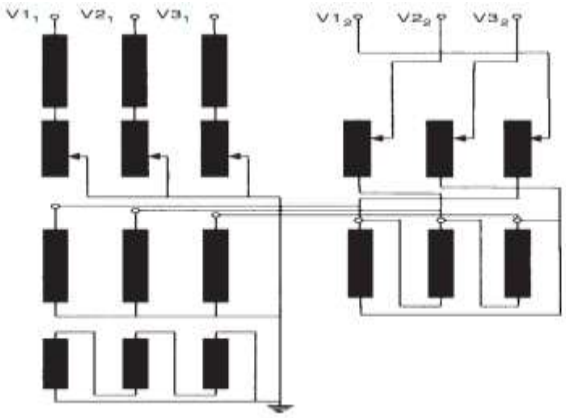
الشكل (3) محول ثنائي النواة متناظر



الشكل(4)محول ثنائي النواة غير متناظر [9]

يبين الشكلان (3)-(4) على التتالي التصميم المتبع لمحول ثنائي النواة المتناظر وغير المتناظر

ثالثاً: المحولات التربيعية Quadrature booster Transformer تجمع بين محول ذاتي مع محول PST بنوعيه (أحادي أو ثنائي النواة) يكون موصلاً إلى طرف التوتر المنظم للمحول كما هو مبين بالشكل (5)



الشكل(5): محول تربيعي

يمكن التحكم بتوتر الخرج وتعديله على الأرباع الأربعة بواسطة هذه الطريقة التي تتيح التحكم بكل من الطويلة والزاوية.

في حالة الاستطاعة الكبيرة تستخدم تلاث OLTC أحادية الطور بينما تستخدم OLTC ثلاثية الطور في حالات الاستطاعة المنخفضة.

إن مستوى العازلية للـ OLTC مستقل عن توترات النظام ويمكن أن يكون أدنى منه.

إن ممانعة القصر هي مجموع ممانعة المحول الأساسي وممانعة المحول التسلسلي وحيث أن وحدة الممانعة التسلسلية ثابتة ومستقلة عن زاوية الإزاحة بالطور، وعليه فإنه من الممكن تصميم هذه الوحدة لتكون محمية بشكل ذاتي، وتغير الممانعة مع تغير زاوية الطور يمكن أن يبقى صغيراً عندما تكون ممانعة الوحدة الأساسية صغيرة.

3-مبدأ عمل محولات التحكم بزاوية الطور:

تعطى العلاقة التي تحدد سريان الاستطاعة في خط نقل كما يلي:

$$P = \frac{Vs*Vr}{Xl} sin\delta \qquad (1)$$

$$Q = \frac{Vs*Vr}{Xl}\left(\cos\delta - \frac{Vr}{Vs}\right) \qquad (2)$$

حيث:

Xl ممانعة خط النقل

Vr توتر الاستقبال

Vs توتر الإرسال

δ زاوية الاستطاعة

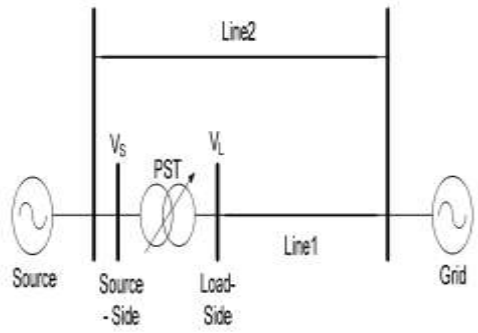
ومن العلاقة السابقة يمكن القول أنه يمكن التحكم بالاستطاعة المارة في خط نقل ما من خلال التحكم بالتوتر إلا أن تغيير التوتر ينعكس بشكل كبير على الاستطاعة الردية التي تعطى بالعلاقة (2) كما أن رفع التوتر لا يمكن أن يكون حلاً عملياً إذ أن له أثراً سلبياً على التجهيزات الموضوعة في الخدمة والتي تصمم للعمل عند توتراتها الاسمية.

كما يمكن التحكم بسريان الاستطاعة عن طريق تغيير مفاعلة خط النقل الأمر الذي يمكن تحقيقه عن طريق إدخال مكثفات تسلسلية مع خط النقل[10] أو عن طريق **TCSC** Thyristor Controlled Series Capacitor [11].

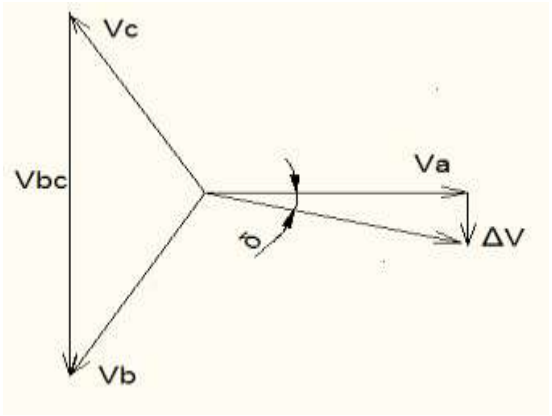
كما يمكن التحكم بسريان الاستطاعة عن طريق محول التحكم بزاوية الطور الأمر الذي يمكن تحقيقه عن طريق محولات التحكم بزاوية الطور PST وهي موضوع بحثنا.

يبين الشكل (6) وصل نظامي قدرة بواسطة خطي نقل، حيث تم وضع محول PST في الخط الأول بهدف التحكم بسريان الاستطاعة فيه.

ويبين الشكل (7) المخطط الشعاعي لمحولة التحكم بزاوية الطور حيث تمثل الزاوية δ زاوية فرق الطور الناتجة عن المحول [12].



الشكل(6) مخطط لنظام قدرة يحوي PST



الشكل(7) المخطط الشعاعي لمحول PST

يمكن التحكم بزاوية الطور بين المنبع والحمل عن طريق التحكم بالتوتر ΔV الموصول بشكل عمودي على التوتر الأساسي.

وفي حالة الحمل التحريضي فإن التوتر العرضاني يجب أن يكون على فرق بالطور 90° (متقدم أو متأخر) على التوتر من جهة الحمل VL وبناء على ذلك فإن زاوية الإزاحة بالطور يمكن أن تكون متقدمة أو متأخرة.

تعني زاوية إزاحة بالطور المتقدمة أن التوتر من جهة الحمل يكون متقدماً على التوتر من جهة المنبع أما زاوية إزاحة بالطور المتأخرة فتعني أن التوتر من جهة الحمل يكون متأخراً عن التوتر من جهة المنبع[13].

تتوافر محولات التحكم بزاوية الطور بتصاميم مختلفة وبأنواع مختلفة إلا أنها تستخدم نفس التقنية بهدف خلق توتر متعامد مع التوتر الأساسي.

يتم الحصول على التوتر المتعامد ΔV باستخدام ملفات موصولة بشكل مثلثي أو عن طريق ملفات موصولة بشكل عرضي.

يتم ربط طرف المنبع وطرف الحمل عن طريق الملف الثانوي للمحول التسلسلي (الذي يوصل بشكل مثلثي) كما يتم وصل ملفات الأولي بشكل مثلثي التي تسمى ملفات التهييج ليتم وصلها إلى الطورين الآخرين وذلك بهدف الحصول على توتر الإزاحة بالطور عن طريق طرح توتري الطورين الآخرين من بعضهما البعض ولهذا فإنه تحت ظروف التحميل فإن التغير الذي يحصل في ΔV يمكن الحصول عليه باستخدام مبدل الوضعيات تحت الحمل OLTC.

يتم إدخال مبدلات الوضعية تحت الحمل على التسلسل مع الملفات والتي تكون موصولة بين المنبع والحمل. السيئتان الأساسيتان لهذا النوع هو تعرض OLTC إلى زيادة التوتر وتعرضها إلى الأعطال وبالتالي يجب اختيار OLTC ذات مواصفات عالية، الأمر الذي يجعلها حلاً غير اقتصادي.

4-استخدامات محولات PST:[14]

استخدام محولات الازاحة الطورية في شبكات نقل القدرة يسهم بـ:

- تحسين مردود وأداء تشغيل أنظمة القدرة حيث تسمح PST بالتحكم بسريان الاستطاعة في الشبكة بغض النظر عن التوليد، وبالتالي تحسين مردود وأداء أنظمة نقل القدرة الكهربائية مما يسهم في تحسين الوثوقية عن طريق التخفيف من حالات زيادة التحميل أو التخفيف من حالات سريان الاستطاعة غير المرغوب بها وبخاصة عند حصول حالة طارئة.
- تخفيض الضياعات عن طريق تحقيق سريان الاستطاعة الأمثل في الشبكة.
- تخفيض تكاليف تشغيل نظام النقل الكهربائي من خلال تقليل حالات زيادة التحميل والتي تؤدي إلى حالات عدم الاستقرار. كما أن لمحولات التحكم بزاوية الطور أثراً إيجابياً في زيادة سرعة إيصال الطاقة إلى المستهلكين عند الحالات الطارئة.
- الاستخدام الأقصى لخطوط النقل القائمة: يعد استخدام محولات التحكم بزاوية الطور هو الحل الأكثر وثوقية وجدوى اقتصادية لمعالجة الموضوعات المرتبطة بسريان الاستطاعة حيث تمكننا من تحميل الخطوط القائمة إلى الحد الذي يقارب حدود التحميل الحراري دون الوصول إلى حالات زيادة التحميل وهذا ما يؤجل الحاجة إلى خطوط جديدة أو يلغيها.

مزايا محولات الإزاحة الطورية PST:[15]

1. توزيع متوازن للأحمال على الخطوط المتجاورة.
2. زيادة الاستطاعة المنقولة دون المساس بمعيار الوثوقية والحالات الطارئة.
3. زيادة وثوقية النظام من خلال التخفيف من حالات زيادة التحميل التي قد تحصل بعد حدوث الاضطرابات والتخفيف والحد من سريان الاستطاعة غير مرغوب به.
4. السماح بدخول التوليد الجديد إلى الشبكة مثل مزارع العنفات الريحية **[17]**.
5. التخلص من حالات الاختناق التي قد تحصل نتيجة لحقن كميات كبيرة من الطاقة الكهربائية **[17]**.

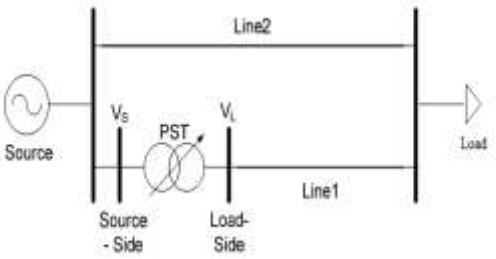
يتحدد سريان الاستطاعة في الخطوط المتجاورة بممانعة كل خط من هذه الخطوط حيث يسبب عدم التساوي في الممانعات تحميلاً غير متوازن لهذه الخطوط وبالتالي يمكن استخدام محولات PST في الخطوط غير المحملة بهدف تحميلها التحميل المطلوب، كما يمكن استخدام PST في الخطوط المحملة بشكل كبير بهدف التحكم بسريان الاستطاعة المارة فيها.

عند ربط نظامين عن طريق خطوط طويلة ومحملة فإن خروج أحد الخطين عن الخدمة يسبب اختلافاً كبيراً في زاوية الطور على طرفي القاطع الآلي وهذه الزاوية تكون كبيرة بحيث لا تسمح بالوصل الآني لمعيدات الإغلاق الآلي وفي حال عدم وجود PST فإننا بحاجة إلى الانتظار فترة زمنية حتى يصبح الحمل خفيفاً وبالتالي يكون الاختلاف في زاوية الطور مقبولاً إلا أن وجود محول PST يسمح لنا بتعويض الزاوية الأمر الذي يمكننا من إعادة الخط إلى الخدمة مباشرة عن طريق معيد الإغلاق الآلي.

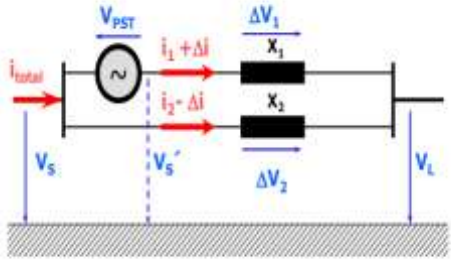
كما يمكن استخدام PST بعد الحالات الطارئة لزيادة الطاقة المنقولة في الخطوط المتبقية وذلك بهدف تخفيف الحمولة عن الخطوط التي ستكون محملة بشدة ، حيث تبقى محولة PST بحالة الاستعداد ليتم ربطها في حالة فصل أحد الخطوط المجاورة التي تغذي أحمالاً كبيرة.

5-نمذجة محولات PST:

يمكن تمثيل الدارة المبينة بالشكل(8) في برنامج Matlab/Simulink حيث يمكن تمثيل التوتر الناجم عن محول الإزاحة بالطور عن طريق منبعي التوتر الأول هو التوتر الأساسي والثاني هو توتر الإزاحة بالطور حيث يكون هناك زاوية بين التوترين تقدر بـ 90 درجة وفقاً للمراجع [1,2,3,4].



الشكل(8)



الشكل(9)

سنقوم بتمثيل دارة مشابهة للدارة المبينة في الشكل(9). الدارة مكونة من خطي نقل توتر 230 ك.ف الأول خط نقل هوائي والثاني كابل أرضي وقد تم أخذ بارامترات خطوط النقل الهوائية والأرضية المستخدمة في الشبكة السورية[16] كما هو مبين بالجدول(1).

الجدول(1) بارامترات خطوط الشبكة السورية للتوتر 230 ك.ف

نوع الخط	المقطع mm^2	التوتر الاسمي U_n [kV]	المقاومة لكل كم r_o [Ω /km]	المحارضة لكل كم x_o [Ω /km]
خط الهوائي	AL-51/400 ألمنيوم/فولاذ	230	0.044	0.413
كابل الأرضي	800 نحاس	230	0.077	0.136

وقد تم افتراض وجود حمل مختلط (أومي-تحريضي) في نهاية خطي النقل وسيتم تمثيله من خلال R_l,L_l (مقاومته الأومية ومحارضته التحريضية على التتالي) وبفرض استطاعة هذا الحمل S

S=400MW+j200MVar

سنمثل الحمل بمقاومته الأومية وممانعته التحريضية عن طريق العلاقات التالية:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}\,U} \qquad (3)$$

$$Z = \frac{U}{I} \qquad (4)$$

وبالتالي تكون ممانعة الحمل حسب العلاقتين (3,4)

Z_{load}=188.25-j91.625 [Ω]

بحسب قانون كيرشوف نكتب المعادلات التفاضلية التي من خلالها سيتم تمثيل التيارات المارة في كل خط نقل كما يلي:

$$Vs = I1R1 + L1\frac{dI1}{dt} + Vl \qquad (5)$$

$$V`s = I2R2 + L2\frac{dI2}{dt} + Vl \qquad (6)$$

$$Vl = I1Rl + Ll\frac{di1}{dt} + I2Rl + Ll\frac{di2}{dt} \qquad (7)$$

ومن المعادلة 5

$$L1\frac{dI_1}{dt} = Vs - Vl - I1R1 \qquad (8)$$

وبأخذ تكامل لطرفي العلاقة وإصلاحها

$$I1 = \int \frac{Vs}{L1} - \frac{Vl}{L1} - I1\frac{R1}{L1}\, dt \qquad (9)$$

وبالمثل نجد من المعادلة 6

$$I2 = \int \frac{V`s}{L2} - \frac{Vl}{L2} - I2\frac{R2}{L2}\, dt \qquad (10)$$

تم تمثيل المعادلتين 9 و 10 في برنامج matlab/simulink باستخدام أبسط العناصر الموجودة في مكتبة simulink مثل العنصر gain sum integral وباستخدام عنصري source يمثل الأول التوتر الأساسي والثاني يمثل توتر الإزاحة بالطور والمزاح عن التوتر الأساسي بـ 90 درجة

يمكن حساب Vs من المعادلتين 5 و 6 وذلك بتعويض قيمة Vl في المعادلة 5 من المعادلة 6

$$Vs = I1R1 + L1\frac{dI1}{dt} + V`s - I2R2 - L2\frac{di2}{dt} \qquad (11)$$

كما يمكن حساب التيار المار في الحمل

$$Il = I1 + I2 \qquad (12)$$

في النموذج المقترح المبين بالشكل(10) قمنا بتمثيل المعادلات 9 و10 و 11 و 12 بهدف إظهار أثر تغيير زاوية الطور على سريان الاستطاعة في الخطوط.

تم تمثيل المحول عن طريق التوتر V`s وهو التوتر الناتج على مخارج المحول (محول PST)

حيث Vs التوتر المطبق في بداية خط النقل

V`sالتوتر الناتج عن محولة الإزاحة بالطور

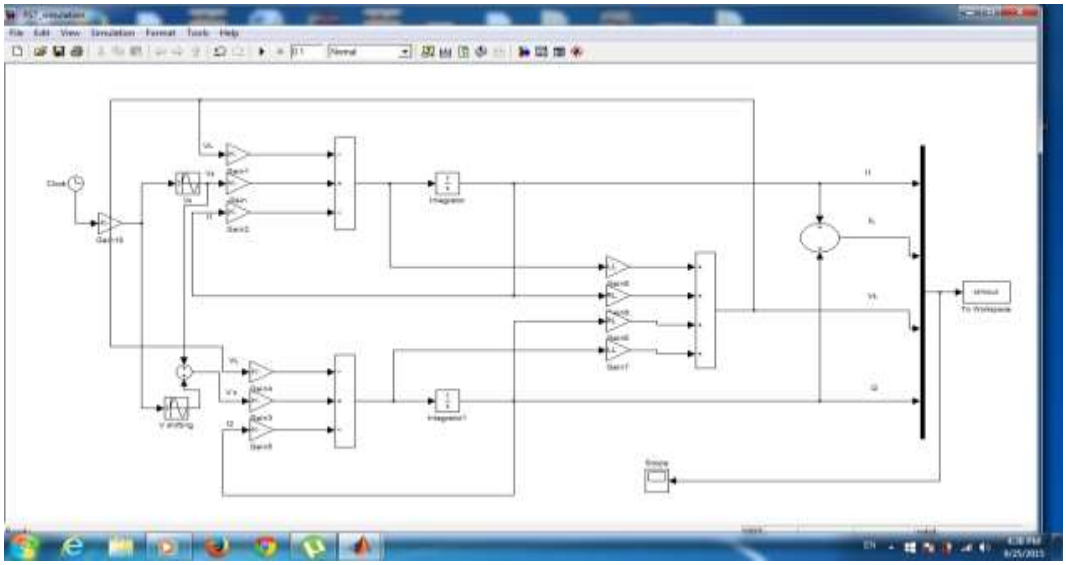
Vl التوتر المطبق على الحمل الموجود بنهاية خط النقل

R1,L1 مقاومة ومحارضة الخط الأول

R2,L2 مقاومة ومحارضة الخط الثاني

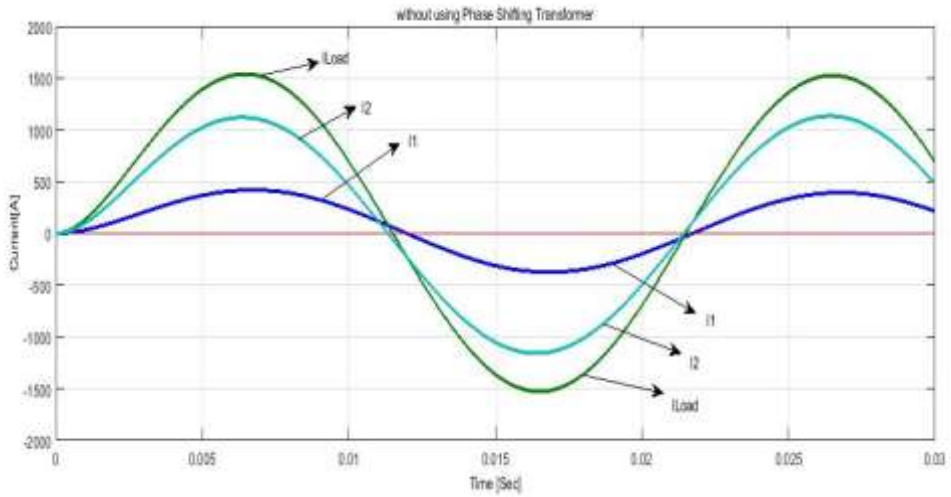
يمتاز النموذج المقترح بالبساطة دون الدخول في تفاصيل المحول حيث يعطي نتائج استخدام هذا المحول عن طريق تمثيل توتر الازاحة بالطور دون الخوض في كيفية تشكيل هذا التوتر.

تجدر الاشارة إلى وجود نموذج جاهز في برنامج Matlab–help–Demo [17] يمكن الاستفادة منه بحال كان المطلوب التركيز على التفاصيل الدقيقة للمحول أو على تفاصيل التحكم إلا أننا اعتمدنا نموذجنا الخاص بنا لبساطته ولبعده عن التعقيد.



الشكل(10) النموذج المقترح لـ PST على برنامج Matlab/Simulink

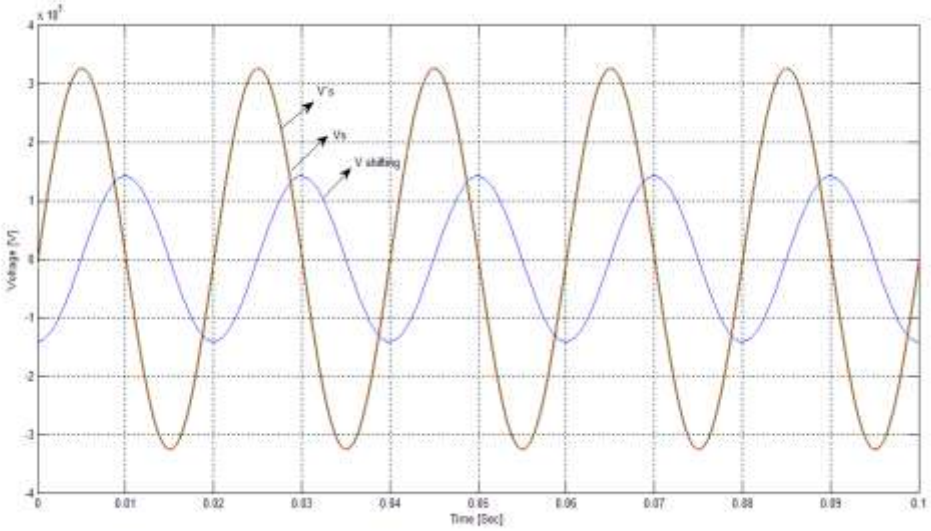
فيما يلي منحنيات التوتر والتيار قبل تفعيل محول الزاوية وبعده:



الشكل(11): منحنيات التيارات قبل استخدام PST

الشكل (11) يبين التيارات المارة في الخطين نظراً لاختلاف البارامترات المحددة لكل خط ونلاحظ من الشكل أن أحد الخطين محمل ضعفي الآخر تقريباً لذا سنعمل على استخدام محول التحكم بزاوية الطور بهدف موازنة التيار المار في كلا الخطين.

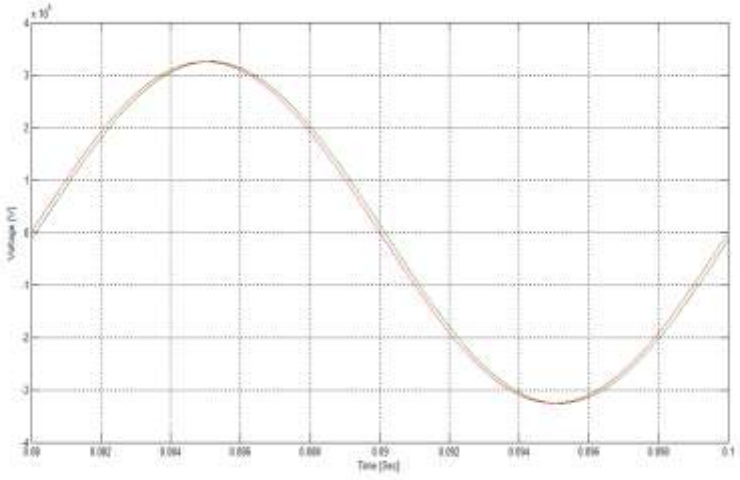
إن محولة التحكم بزاوية الطور مسؤولة عن إضافة توتر الإزاحة بالطور وسيكون هذا التوتر مزاحاً عن التوتر الأساسي بـ 90 درجة.



الشكل(12) منحنيات التوتر قبل وبعد استخدام PST

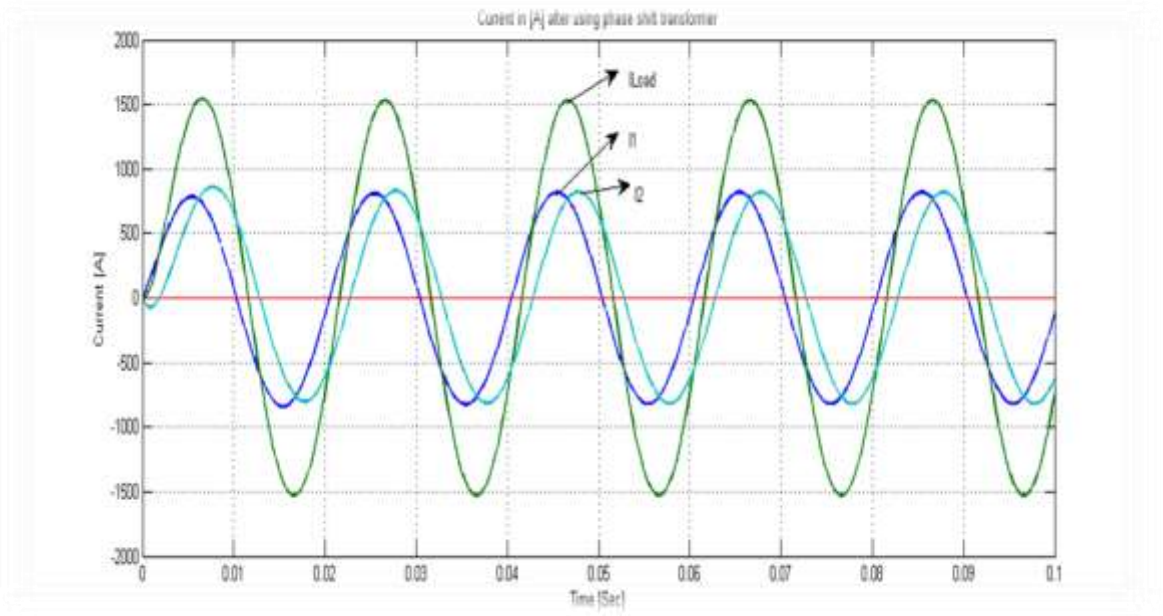
يبين الشكل (12) التوتر الأساسي والتوتر بعد محولة الإزاحة بالطور وكذلك توتر الإزاحة بالطور حيث تم تكبير توتر الإزاحة (V shifting) في المخطط عشرة مرات بحيث يكون واضح على المخطط ونلاحظ أن توتر الإزاحة مزاح عن التوتر الأساسي بزاوية مقدارها 90 درجة وقد تم الاحتفاظ بقيمة توتر الإزاحة الطورية على قيمته الأساسية وهي 10ك.ف

والشكل(13) يبين الفرق بزاوية الطور الناجم عن تطبيق محولة تعديل زاوية الطور قبل وبعد إضافة محول تعديل زاوية فرق الطور.



الشكل(13) تأثير PSTعلى منحنيات التوتر

وبعد أن شاهدنا أثر توتر الإزاحة في تغيير زاوية الطور لا بد من مشاهدة أثر هذا التوتر في التحكم بسريان الاستطاعة وأثره الايجابي في موازنة التيار المار في نفس مثالنا السابق، أي حالة خطي نقل متوازيين.

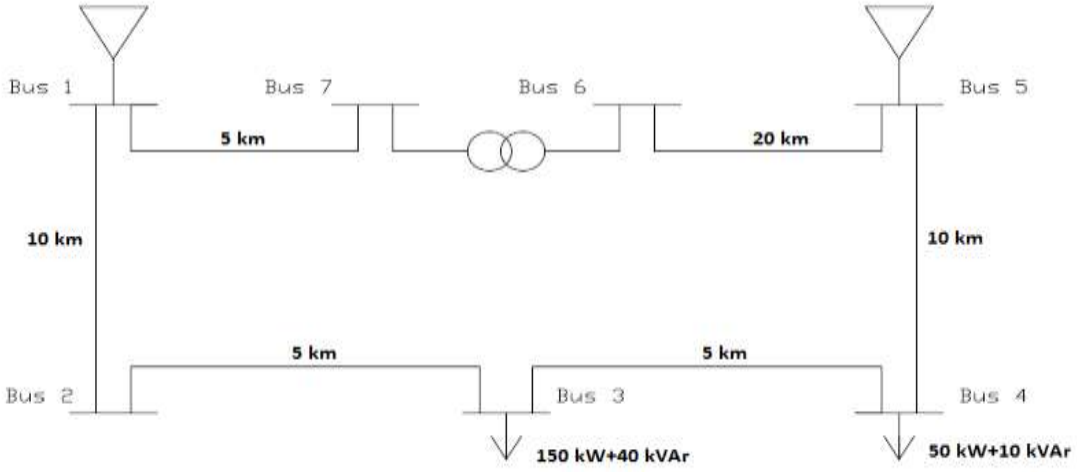


الشكل(14) منحنيات التيار في كلا الخطين وتيار الحمل

من الشكل (14) نلاحظ تماثل التيار المار في كل خط وهذا بدوره أدى إلى تساوي الطاقة المنقولة في كل خط وبالتالي لن يعاني أي من الخطين من زيادة التحميل وإنما أصبح كل من الخطين محملين بحمل متساوي نتيجة وجود محولة التحكم بزاوية الطور.

6-دراسة حالة:

تم تمثيل حالة على برنامج NEPLAN على النسخة 5.5.3 وهو برنامج خاص بتمثيل نظم القدرة الكهربائية يمتاز بقدرته على استيراد نتائج النمذجة التي حصلنا عليها في برنامج matlab بهدف توظيفها في دراسة حالة على هذا البرنامج بهدف بيان دور محولات التحكم بزاوية الطور في التحكم بسريان الاستطاعة في شبكة ما حيث تم دراسة الشبكة المعيارية IEEE ذات الست باسبارات المعدلة والمعتمدة في المرجع [19] وذات مخطط الخط الواحد المبين في الشكل (15)



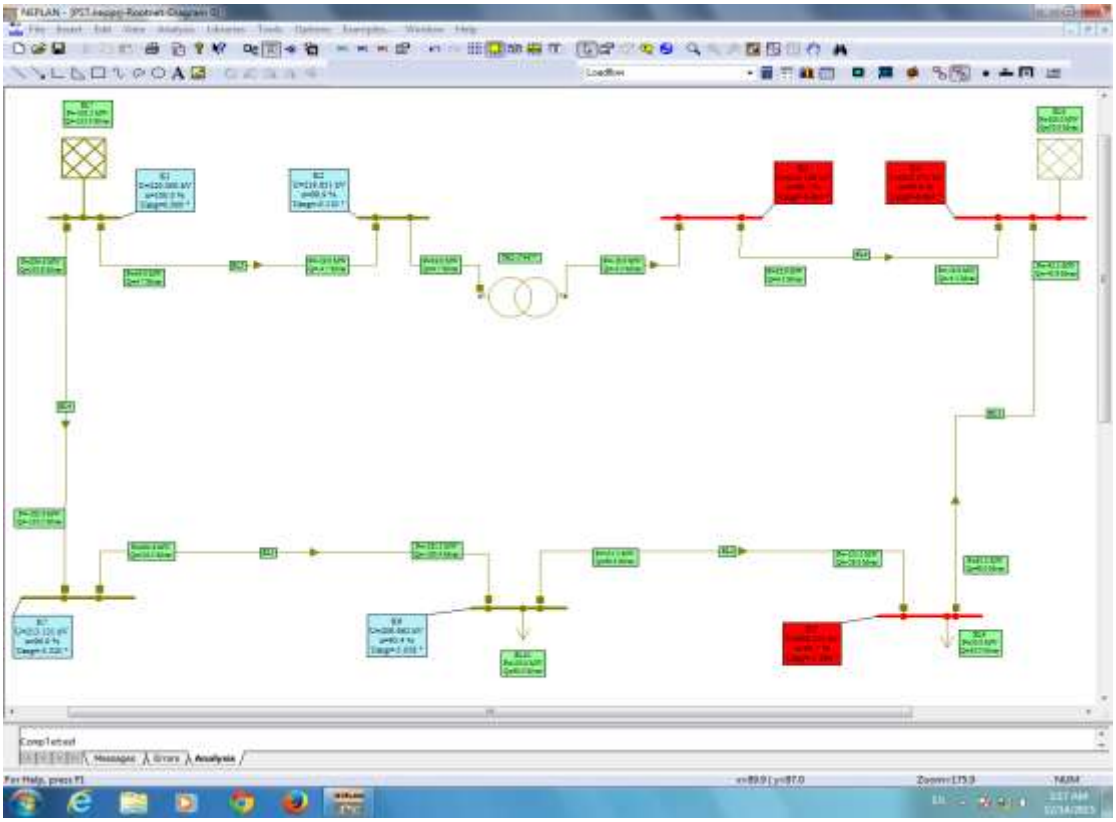
الشكل(15) طبولوجية شبكة الاختبار

تجدر الإشارة إلى أن التوتر الاسمي للشبكة 220 ك.ف وبارامترات خط النقل المستخدم ذو لمقاومة 0.1 أوم لكل كم أما المفاعلة فهي 1 أوم لكل كم وقد تمت دراسة أثر الاستطاعة المتحكم بها على توترات الباسبارات 1و2و3 المبينة في الشكل (16) حيث كانت هذه الباسبارات تعاني من انخفاض في التوتر وعلى الضياعات في الشبكة المختارة وتم تنظيم الجدول (2) وباعتماد حدود التوتر المقبولة بين 95-105% نلاحظ بداية أن الباسبار 2 يعاني من انخفاض في التوتر أقل من 95% وذلك في حال كون الاستطاعة المنقولة أقل من 55 ميغاوات كما أن الباسبارين 1و3 يعانيان من انخفاض في التوتر حتى تصبح الاستطاعة المنقولة 30 ميغاوات عندها يصبح توترا الباسبارين ضمن الحدود الطبيعية.

تبلغ أصغر قيمة للضياعات الحقيقية والردية عندما تصبح قيمة الاستطاعة المتحكم بها 65 ميغاوات عندها تكون قيمة الضياعات 2.92 ميغا وات و 29.533 ميغا فار وعند هذه القيمة لا يعاني أي من باسبارات الشبكة من هبوط أو ارتفاع في التوتر عن الحدود المقبولة.

الجدول(2) ضياعات الشبكة وتوترات الباسبارات المدروسة

controlled power %	P loss MW	Q loss MVAr	Bus 6 kV	Bus 5 kV	Bus 4 kV
10	3.770825	37.71505	204.866	204.738	207.646
20	3.542955	35.449139	206.16	205.572	208.233
30	3.261213	32.666453	208.067	206.797	209.097
40	3.117394	31.262597	209.31	207.592	209.658
50	3.012047	30.253043	210.526	208.367	210.204
55	2.974691	29.905209	211.123	208.746	210.471
60	2.93241	29.541751	212.29	209.485	210.992
64	2.932411	29.541751	212.29	209.485	210.992
65	2.928208	29.533481	212.86	209.844	211.245
70	2.935778	2.935778	213.419	210.196	211.492
80	2.987667	30.246475	214.505	210.874	211.97
90	3.032695	30.742158	215.031	211.201	212.199



الشكل (16) تمثيل الشبكة على برنامج Neplan

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

1. يتميز النموذج المقترح لمحول التحكم بزاوية الطور بالبساطة اعتماداً على المعادلات التفاضلية المناسبة باستخدام برنامج Matlab/Simulink .

2. باستخدام النموذج المقترح تم التحكم بسريان الاستطاعة في خطي نقل متوازيين باستخدام التحكم بزاوية الإزاحة بالطور الذي كان له أثراً ايجابياً في موازنة تحميل الخطوط المتوازية.

3. باستخدام النموذج المقترح تم تسليط الضوء على أحد أهم ميزات استخدام محولات التحكم بزاوية الطور وهي حماية بعض الخطوط من التحميل الزائد.

4. تم اجراء دراسة حالة باستخدام نموذج PST المقترح باستخدام برنامج Neplan بينت الأثر الايجابي لمحولات التحكم بزاوية الطور من حيث تحسين التوترات في شبكة اختيارية، كما أن لها أثراً إيجابياً ملحوظاً على تخفيض الضياع في الشبكة المدروسة تجاوز 22% للاستطاعة الفعلية و 38% للاستطاعة الردية.

التوصيات:

1. يوصى باستخدام محولات التحكم بزاوية الطور في الشبكات النقل الكهربائية التي تعاني من الاختناقات
2. يوصى باجراء دراسة لتقييم أداء هذا النوع من المحولات في الشبكة السورية
3. يوصى باستمرار البحث في تقييم أداء محولات التحكم بزاوية الطور في الحالات الديناميكية

المراجع

[1]. Siemens Energy Sector. Power Engineering Guide. Edition 7.0

[2]. http://www.gridtech.eu/project-scope/technologies/12-technologies/22-pst-phase-shifting-transformers.27/7/2015," PST (Phase Shifting Transformers)", GOZEN Host LLC © 2012 All rights reserved.

[3]. TOM OVERBYE, ROSS BALDICK LECTURE 10*,"Transformer, Load&Generator Models, Ybus"* Power System Analysis

[4] ZHANG X. P., REHTANZ C., PAL B., "*Flexible AC Transmission System: Modeling and Control",* Germany: Springer; 2006.

[5] DAMOR, K.G. PATEL, D.M. *Comparison Of Different Fact Devices*, IJSTE– International Journal of Science Technology & Engineering| Vol. 1, Issue 1, July 2014| ISSN(online): 2349-784X

[6].http://www.energy.siemens.com/hq/en/power-transmission/transformers/phase-shifiting-transformers/phase-shifting-transformers.htm#content=Description,11/8/2015," Reference: Phase Shifting Transformer, siemens.com,Global Website© Siemens AG 2002-2015 All Rights Reserved - Corporate Information

[7].http://new.abb.com/products/transformers/power/system-intertie-transformers/phase-shifting,3-8-2015," Phase-shifting transformers (PST)"

[8] VERBOOMEN J., HERTEM D. V., SCHAVEMAKER P. H., KLING W. L., BELMANS R., "*Phase Shifting Transformer: Methods and Applications*", in Proc. Intl. IEEE Conf. on Future Power Systems., Amsterdam, Netherland, Nov 2005, p. 6.

[9] UMAR KHAN, *Modeling and Protection of Phase Shifting Transformers*, University of Western Ontario - Electronic Thesis and Dissertation Repository, November 2013

[10] R. GRUENBAUM, J. RASMUSSEN, C. LI, *Series Capacitors for Increased Power Transmission Capability of a 500 kV Grid Intertie*, IEEE EPEC _London, ON, Canada, 2012

[11] M. SOBEK, L. BENA, ROMAN, R. CIMBALA, *Using of the Thyristor Controlled Series Capacitor in Electric Power System Cimbala*, ELEKTROENERGETIKA, Vol.4, No.4, 2011 ,Technical University of Košice

[12]http://nptel.ac.in/courses,22/10/2015, Module 4 Voltage and Power Flow Control, Lecture 19 : Power Flow Control

[13] IEEE Std C57.135: *"IEEE Guide for the Application, Specification and Testing of Phase Shifting Transformers*", 2001.

[14] Phase shifting transformers Reliable and efficient power flow Shifting Transformers , Transformer Course EP-3

[15] JAMES. H. H, : *Electric Power Transformer Engineering",* CRC Press LLC 2004.

[16] PETE-*planning directorate*, 2015

[17]Matlab_help_ OLTC Phase Shifting Transformer (Phasor Model), Power_PSTdeltahex.mdl. 2015

[18] http://www.electrical-knowhow.com/2012/01/phase-shiftingtransformers. html, Phase control, Copyright 20111 ABB. All rights reserved. 1LAB 000428

[19] www.academia.edu/14586097/_Users_Guide_Electrical.Abb, 29/10/2015.