Optimization Of Power Flow In A Local Electrical Network Using Phase Shift Transformers

Dr. Faysal Sha'aban*
Batoul Yousef**

(Received 4 / 10 / 2024. Accepted 4 / 12 / 2024)

□ ABSTRACT □

The use of phase shift transformer to control the active power flow in three-phase power transmission network is an alternative to new investment in high-cost overhead lines. The control of the active power flow is achieved by adjusting the phase angle of the voltage at the transformer terminals, In this research, we chose a local network within the coastal area of 230 Kv to control the flow of actual power after the Zeizoun station went out of service, as this led to an increase in the load of the Baniyas-Jableh line from 78% to 96% of its nominal load limit, using a phase shift transformer to ensure the operation of the electric power transmission lines within the permissible load limits and to ensure the continuity of the electric supply in a reliable manner.

The case of installing a phase shift transformer on the Baniyas-Lattakia line was studied, after the Zizoun station was taken out of service. It was found that by controlling the transmission voltage angle, optimum power flow was achieved, represented by loading all electrical power transmission lines within their nominal load limits. where the actual power percentage transmitted through the Baniyas-Jableh line was reduced from 96% to 91% at the expense of increasing the load of the Baniyas-Lattakia line from 80% to 91% of its nominal load value, by adjusting the phase angle between the input and output voltages of the transformer at a value of 2.3°, The network operation simulation with and without phase shift transformer is performed using Power World Simulator software, according to the simulation results, the busbar voltages and angles, active power flow values in the lines and total losses are calculated.

Keywords: Phase shift transformer, transmission line, phase shift angle, active power flow control.

Copyright **:**Tishreen University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

* **Professor - Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - Tishreen University- Latakia- Syria.**
** **Postgraduate student (Master) - Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - Tishreen University- Latakia- Syria. Batoul.yousef@tishreen.edu.sy**

أمثلة سريان الاستطاعة في شبكة كهربائية محلية باستخدام محولات الإزاحة الطورية

د. فيصل شعبان*

بتول يوسف**

(تاريخ الإيداع 4 / 10 / 2024. قُبِل للنشر في 4/ 12 / 2024)

□ ملخّص □

يعد استخدام محول الإزاحة الطورية للتحكم في سريان الاستطاعة الفعلية في شبكة نقل الكهرباء ثلاثية الطور كبديل للاستثمارات الجديدة في الخطوط الهوائية العالية التكلفة. يتم تحقيق التحكم في سريان الاستطاعة الفعلية عن طريق ضبط زاوية الطور للجهد عند أطراف المحول، في هذا البحث قمنا باختيار شبكة محلية ضمن المنطقة الساحلية 230Kv للتحكم في سريان الاستطاعة الفعلية بعد خروج محطة زيزون عن الخدمة حيث أدى ذلك لظهور زيادة تحميل خط بانياس– جبلة من 78% إلى 96% من حد تحميله الاسمي، وذلك باستخدام محول الإزاحة الطورية بما يضمن عمل خطوط نقل الطاقة الكهربائية ضمن حدود التحميل المسموحة وتحقيق ضمان استمرار التغذية الكهربائية بشكل موثوق.

تم دراسة حالة تركيب محول الإزاحة الطورية على خط بانياس اللاذقية، بعد خروج محطة زيزون عن الخدمة، وتبين من خلال التحكم بزاوية جهد الإرسال تحقيق سريان استطاعة أمثل والمتمثل بتحميل جميع خطوط نقل الطاقة الكهربائية ضمن حدود تحميلها الاسمي ، حيث تم تقليل نسبة الاستطاعة الفعلية المنقولة عبر خط بانياس– جبلة من 96% إلى 91% على حساب زيادة تحميل خط بانياس– اللاذقية من 80% إلى 91% من قيمة تحميله الاسمي، وذلك من خلال ضبط زاوية الطور بين جهود طرفي الدخل والخرج للمحول عند القيمة 2.3°

تم إجراء محاكاة عمل الشبكة مع وبدون محول الإزاحة الطورية باستخدام برنامج Power World Simulator، وفقًا لنتائج المحاكاة، تم حساب قيم جهود وزوايا قضبان التجميع وقيم سريان الاستطاعة الفعلية في الخطوط و الضياعات الكلية.

الكلمات المفتاحية: محول الإزاحة الطورية، خط النقل، زاوية الإزاحة الطورية، التحكم في سريان الاستطاعة الفعلية

حقوق النشر : مجلة جامعة تشرين– سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص CC BY–NC–SA 04

* **أستاذ– كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة تشرين – اللاذقية– سورية.**

** **طالب دراسات عليا(ماجستير)– كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة تشرين– اللاذقية– سورية.**

Batoul.yousef@tishreen.edu.sy

مقدمة:

يتم نقل الطاقة الكهربائية بين مستويات الجهد المختلفة في الشبكة الكهربائية من خلال خطوط النقل. يؤدي التحميل الزائد في خط النقل إلى تقليل أمان نظام الطاقة. عندما تتدفق الطاقة بين عقدتين، يحدث انخفاض في الجهد واختلاف زاوية الطور بين الطرف المرسل والطرف المستقبل. لذا، يجب التحكم في سريان الاستطاعة من أجل تحقيق الاستخدام الأمثل للسعة التمريرية لخطوط النقل.

يمكن تحسين كفاءة تشغيل النقل باستخدام جهاز FACTS محول الإزاحة الطورية هو أحد عائلات FACTS التي يمكن استخدامها للتحكم في سريان الاستطاعة في الشبكة. لذلك، فإن محول الإزاحة الطورية هو الخيار الأول للتحكم في سريان الاستطاعة الفعلية بين منطقتين للنظام لأنه أقل تكلفة من أنظمة FACTS، ويعمل بشكل مرضٍ في ظل ظروف الحالة المستقرة على سبيل المثال، يمكن استخدام PST لفرض سريان الاستطاعة وفقًا للكمية التعاقدية. لهذا السبب، يتم عادةً تثبيت محولات الإزاحة الطورية (Phase Sift Transformers PSTs) على خطوط الربط.

تم تقديم لمحة عامة موجزة عن التقنيات الحالية فيما يتعلق بمحولات الإزاحة الطورية (PST). تم إجراء تصنيف على أساس ما إذا كان المحولات PSTs متماثلة أو غير متماثلة وعلى أساس الطابع المباشر أو غير المباشر وكدراسة حالة، تمت دراسة محولات إزاحة الطور في ميدن، هولندا بشكل أكثر عمقًا. كما تم تطوير نموذج على جهاز محاكاة رقمي في الوقت الفعلي (RTDS) من أجل إثبات قدرات محولات إزاحة الطور [1].

تم استخدام محول الإزاحة الطورية للتحكم بسريان الاستطاعة عبر خط النقل الواصل بين مدينتي تونغو–ثاريون في شبكة ماينمار الوطنية في حالات التحميل الثقيل والخفيف تم تركيب محول الإزاحة الطورية على التسلسل مع الخط كما تم إجراء محاكاة لسريان الاستطاعة الفعلية باستخدام نموذج المحول (PST) في بيئة Matlab–Simulink، وفقًا لنتائج المحاكاة، يتم حساب جهود النظام وزوايا الطور المقابلة لسريان الاستطاعة في الخط المدروس [2].

تمت محاكاة تأثير محول الإزاحة الطورية من خلال محاكاة تنظيم سريان الاستطاعة في شبكة نموذجية 500 كيلو فولت. حيث تبين أنه باستخدام محول إزاحة الطور، يمكن نقل سريان الاستطاعة من خطوط التحميل الثقيل إلى خطوط التحميل الخفيف، وتحسين توزيع سريان الاستطاعة وتحسين سعة نقل المقطع العرضي [4]،[3] .

الغرض من PST هو عادةً التحكم في سريان الاستطاعة عبر خطوط النقل. يمكن التحكم في كل من حجم واتجاه سريان الاستطاعة عن طريق تغيير إزاحة الطور، على الرغم من أن محولات (PST) تمكن من التحكم في سريان الاستطاعة عبر خط النقل، إلا أن السريان نفسه لا يزال يعتمد على حالة الشبكة [6]،[5].

عملية وصل شبكات الكهرباء البلدان المتجاورة لها العديد من الميزات وأهمها المساهمة في أمن واستمرارية إمدادات الكهرباء داخل تلك الشبكات المترابطة. تم دراسة التحكم بسريان الاستطاعة في شبكة نقل الطاقة الكهربائية العراقية 400 كيلو فولت، 50 هرتز المرتبطة مع الدول المجاورة (إيران وسوريا وتركيا) باستخدام محول الإزاحة الطورية (PST) بين شبكات الدول المذكورة وأثبتت نتائج الدراسة فعالية المحول (PST) بالمقارنة مع الأجهزة الأخرى للتحكم في سريان الاستطاعة الفعلية بين شبكتين مستقلتين كبيرتين من مناطق أو دول مختلفة باستخدام Matlab-Simulink [7].

بالمقارنة مع أنظمة (FACTS) يعد جهاز التحكم في تدفق الطاقة الموحد (UPFC) أسرع استجابة وأداءه أقوى، ولكن (PST)أكثر اقتصادية وموثوقية، وتكلفة المعدات أقل بنسبة 49.86٪ من تكلفة (UPFC). تتمتع طريقة تنظيم

سريان الاستطاعة التي تعتمد (PST) بتأثير حالة مستقرة جيد. ويمكنها تحسين كفاءة استخدام أصول شبكة الطاقة الكهربائية، وتحسين توزيع سريان الاستطاعة في وقت قصير وبتكلفة منخفضة [8].

أهمية البحث وأهدافه:

من الناحية العلمية: تعد نمذجة الشبكة الكهربائية السورية أو أحد مكوناتها أحد اللبنات الأساسية لتحسين عمل الشبكة وتطويرها في المستقبل، بالاعتماد على البرمجيات الحديثة والمعتمدة عالمياً. كما أن دراسة استخدام محولات الإزاحة الطورية من المواضيع المطلوبة كونها في حالة تطور مستمر وتم استخدامها ودراستها لتحسين المنظومات الكهربائية في العديد من البلدان كونها تتمتع بالميزات التالية:

- التحكم في سريان الاستطاعة الفعلية في شبكة النقل بشكل مستقل عن التوليد.
- حماية خطوط النقل ومعدات الجهد العالي من التحميل الزائد الحراري.
- تحسين استقرار نظام نقل الطاقة.
- التحكم في سريان الاستطاعة بين الشبكات المختلفة لخطوط النقل الهوائية الطويلة المتوازية، أو الكابلات المتوازية.

من الناحية الاقتصادية: استخدام محول الإزاحة الطورية يحقق الاستفادة القصوى من خطوط نقل الطاقة الكهربائية الحالية دون الحاجة لإنشاء خطوط نقل جديدة عالية التكلفة، كما تحافظ على استمرار التغذية الكهربائية بشكل موثوق دون الحاجة لتحميل خطوط محددة بحمولات قريبة أو أعلى من حمولتها الاسمية.

هدف البحث:

يهدف البحث لدراسة تأثير استخدام محول الإزاحة الطورية في التحكم بسريان الاستطاعة الفعلية في الشبكة الممتدة من بانياس إلى اللاذقية. بهدف الحصول على سريان استطاعة أمثل يضمن عمل خطوط النقل ضمن الحدود التصميمية المسموحة، وخصوصاً بعد خروج محطة زيزون الحرارية من الخدمة.

منهجية البحث:

تم اعتماد منهجية تحليلية تجريبية في بيئة افتراضية باستخدام برنامج Power World Simulator وفق الترتيب التالي:

1- جمع بيانات الشبكة المدروسة والتي تتضمن أطوال وممانعات الخطوط.

2- وضع نموذج محاكاة عمل الشبكة وحساب سريان الاستطاعة وتحديد الخطوط عالية التحميل.

3- استخدام نموذج محول الإزاحة الطورية وبيان مدى قدرته على التحكم بسريان الاستطاعة في خطوط نقل الشبكة قيد الدراسة.

طرائق البحث ومواده:

1- التحكم في سريان الاستطاعة الفعلية:

1-1 التحكم في سريان الاستطاعة الفعلية عبر خط النقل:

العلاقة المبسطة بين الاستطاعة الفعلية المنقولة عبر خط نقل بين العقد المرسلة والمستقبلة والجهود في كلتا العقدتين هي:

$$P = \frac{|V_S||V_R|}{X_{Line}} \sin(\delta) \qquad (1)$$

حيث:

V_S: جهد عقدة الإرسال.

V_R: جهد عقدة الاستقبال.

δ: الإزاحة الزاوية بين جهود العقدتين.

X_{Line}: مفاعلة الخط.

تتناسب الاستطاعة الفعلية المنقولة عبر خط النقل مع الجهود على طرفي الإرسال والاستقبال وزاوية الطور بينهما، كما تتناسب عكسياً مع مفاعلة الخط. وبالتالي، يمكن التحكم في سريان الاستطاعة عبر الخط عن طريق تغيير الجهد عند العقدة، والممانعة بين العقد والزاوية بين الجهود الطرفية.

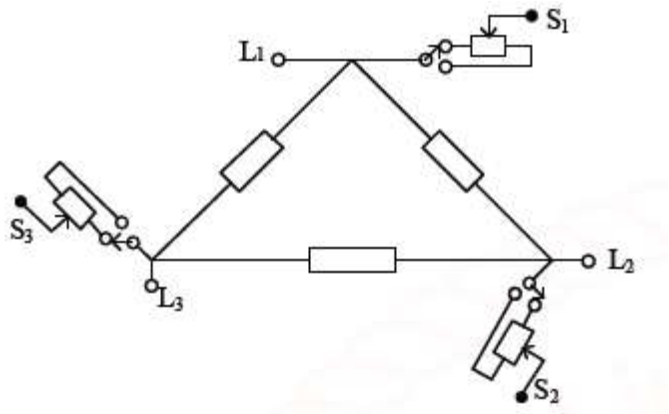
يمكن أيضاً تغيير سريان الخط عن طريق تغيير ممانعة الخط. ويمكن القيام بذلك عن طريق إدخال ممانعة تسلسلية متغيرة. بعد ذلك، يمكن أيضًا التحكم في سريان الاستطاعة الفعلية عن طريق تغيير زاوية الطور بين جهد طرفي الإرسال والاستقبال بجهد متعامد محقون على التسلسل مع جهد الطور.

2- محول الإزاحة الطورية:

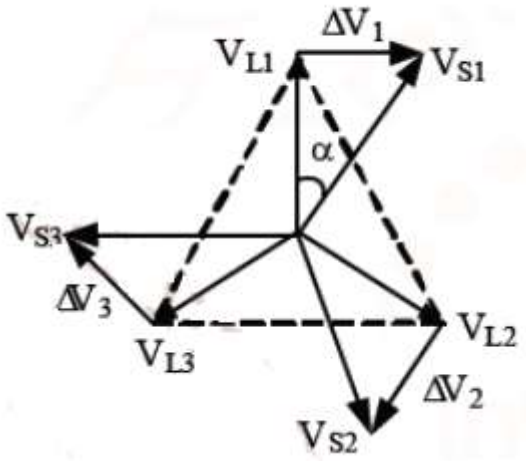
يتم تركيب محول الإزاحة الطورية كمفاعلة تسلسلية مع إزاحة طورية في خط النقل. يتم زيادة سريان الاستطاعة عبر الخط عن طريق إضافة زاوية α إلى الزاوية الحالية δ، يمكن التحكم في إزاحة الطور ضمن حدود معينة. المحول PSTهو جهاز يتم تبديله ميكانيكيًا ويقوم بإدخال جهد خطي متغير باستخدام محول مغير التفريعة تحت الحمل (On Load Tap Changer OLTC)على التسلسل مع جهد الطور. كما يوضح الشكل (1) هذا بالنسبة لمحول الإزاحة الطورية المتناظر المباشر ويوضح الشكل (2) المخطط الطوري الخاص به.

$$P = \frac{|V_S||V_R|}{X_{Line}+X_{PST}} \sin(\delta + \alpha) \qquad (2)$$

يمكن تفسير الحالة أعلاه أيضًا بطريقة أخرى: الاستطاعة الفعلية تتناسب مع زاوية الطور بين العقد. بالتالي يمكن تغيير الاستطاعة الفعلية عن طريق تغيير زوايا الطور [9].



الشكل(1): الدارة المكافئة لمحول الإزاحة الطورية المتناظر المباشر



الشكل(2): المخطط الطوري لمحول الإزاحة الطورية المتناظر المباشر

3- النظرية الأساسية لمحولات الإزاحة الطورية:

محول الإزاحة الطورية (PST) هو نوع خاص من أنواع المحولات والدي يستخدم للتحكم في سريان الاستطاعة من أجل تخفيف الازدحام في شبكات نقل الطاقة الكهربائية ثلاثية الطور. مصطلح مزيح الطور يشير بشكل عام للجهاز المستخدم لحقن الجهد مع إمكانية التحكم بزاوية الطور و/ أو المقدار بدون حمل (Off Load) وتحت الحمل (On-Load). يتميز عمل محول الإزاحة الطورية التقليدي بمايلي:

1- زمن استجابة مرتفع نتيجة لقصور الأجزاء المتحركة.

2- مستوى عالٍ من الصيانة بسبب التلامس الميكانيكي وتبديل الزيت.

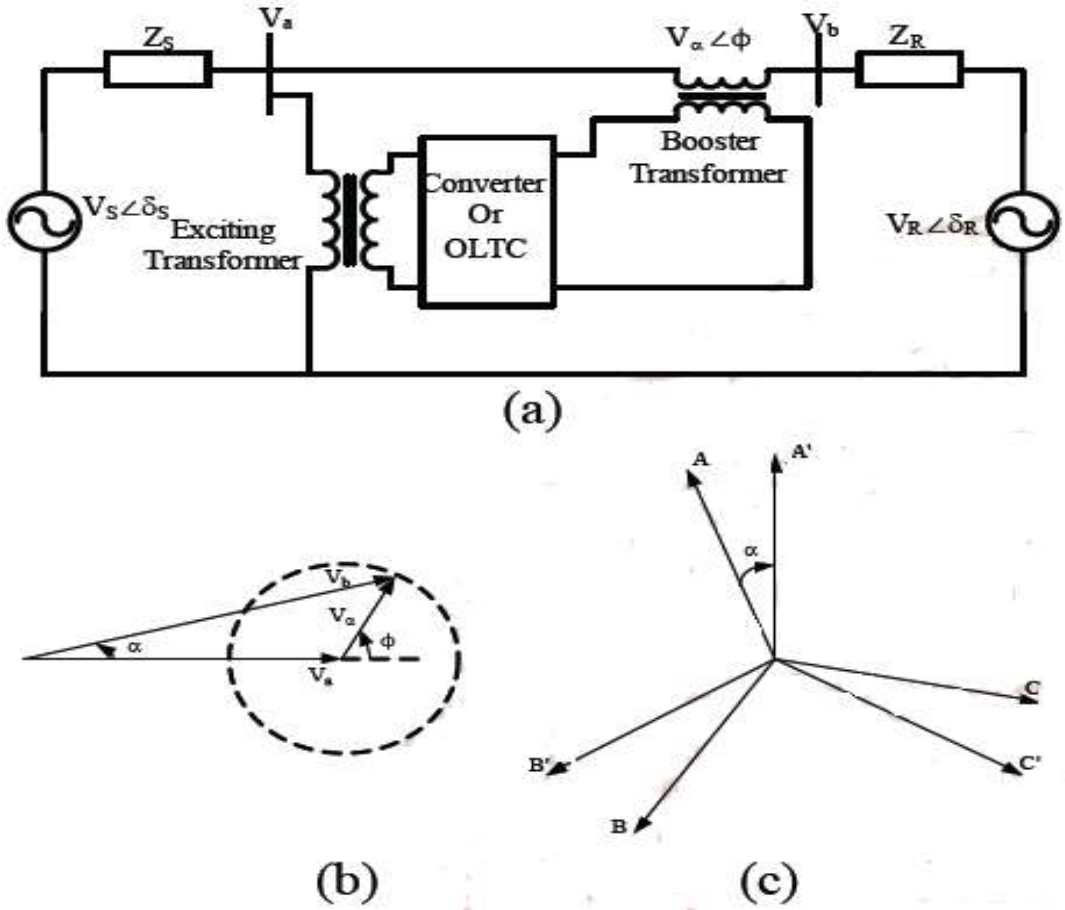
تتكون دارة القدرة الرئيسية لمحول الإزاحة الطورية من الأقسام التالية كما يبين الشكل 2(a):

1- المحول المهيج الذي يوفر جهد الدخل لمحول الإزاحة الطورية.

2- المحول التسلسلي الذي يحقن جهدًا قابلاً للتحكم V_α في خط النقل.

3- المبدل أو مغير التفريعة الذي يتحكم في مقدار و/أو زاوية الطور للجهد المحقون يتم استخدام المبدلات الالكترونية في حالة التحكم بالمحول من خلال تجهيزات تعتمد على إلكترونيات القدرة، ويتم استخدام مغير التفريعة في حالة محول الإزاحة الطورية المتحكم به ميكانيكيًا.

يوضح الشكل (3-a) مخططًا صندوقي للمحول (PST) مثبت على خط نقل بين قضيبي التجميع (a, b) يتم تمثيل طرفي الإرسال والاستقبال لخط النقل بواسطة الجهود V_S و V_R، والممانعات المقابلة Z_S و Z_R، بالترتيب.



الشكل (3): مخططات محول الإزاحة الطورية:

(a): الدارة المكافئة، (b): المخطط الطوري، (c): إزاحة طورية أمامية (متقدمة)

اعتماداً على مقدار وزاوية الطور للجهد المحقون V_α، يتم تغيير مقدار و/أو زاوية الطور لجهد النظامV_b كما يبين الشكل (3–b)، باستخدام محول الإزاحة الطورية المرن، يكون مجال التحكم المحقق عبارة عن دائرة مركزها في طرف الطور V_a ونصف قطرها يساوي مطال الجهد المحقون V_α، يتم التحكم في جهد خرج محول تحويل الطور من خلال تغيير المطال V_α وزاوية الطور Ø للجهد المحقون [1].

يتم تحديد سريان الاستطاعة الفعلية على خط النقل الذي يشتمل على PST بواسطة المعادلة الأتية:

$$P = \frac{|V_S||V_R|}{X_{eq}} \sin(\delta_S - \delta_R \pm \alpha) \qquad (3)$$

حيث:

X_{eq}: المفاعلة المكافئة الصافية للخط ومصادر التوليد.

δ_S: زاوية الطور للجهد V_S.

δ_R: زاوية الطور للجهد V_R.

بناءً على المعادلة (3)، فإن الزاوية α هي المتغير السائد للتحكم في سريان الاستطاعة.

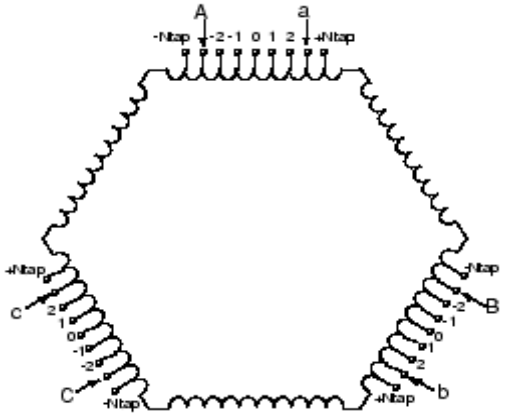
4- أصناف محولات الإزاحة الطورية:

تأتي محولات PST بأشكال مختلفة عديدة. ويمكن تصنيفها وفقًا لهذه الخصائص :

- ✓ تعتمد محولات PST المباشرة على ثلاثة محولات. يتم الحصول على الإزاحة الطورية عن طريق توصيل الملفات بطريقة مناسبة.
- ✓ تعتمد محولات PST غير المباشرة على محولين منفصلين، أحدهما مهيج متغير التفريعة (عدد اللفات) لتنظيم مطال الجهد المتعامد والآخر محول تسلسلي لحقن الجهد المتعامد في الطور الصحيح.
- ✓ تخلق محولات PST غير المتناظرة جهد خرج بزاوية طور ومطال متغيرين مقارنة بجهد الدخل.
- ✓ تخلق محولات PST المتناظرة جهد خرج بزاوية طور متغيرة مقارنة بجهد الدخل، ولكن بنفس المطال [7].

5- محول الإزاحة الطورية نوع السداسي- الدلتا:

النموذج المستخدم عبارة عن محول إزاحة طورية (PST) نوع سداسي دلتا كما هو موضح في الشكل (4)، يتكون كل طور من ملفين مقترنين: ملف ثابت وملف مزود بمنفذين متغيرين متصلين بأطراف الإدخال (ABC) وأطراف الإخراج (abc) للمحول، يتم استخدام اثنين من مبدلات الطور أثناء الحمل (OLTC) لتغيير إزاحة الطور من -30درجة إلى 30+ درجة، وبما أن كل الملفات لديها نفس عدد اللفات، يقوم كل من OLTCs بتغيير الإزاحة الطورية عن طريق تحريك نهايات دخل المحول (A,B,C) ونهايات خرج المحول (a,b,c) بشكل متماثل بالنسبة إلى التفريعة المركزية المحايدة. يتميز هذا الاتصال السداسي الدلتا بميزة الحفاظ على نسبة جهد $\frac{1}{1}$ أثناء تغيير إزاحة الطور.



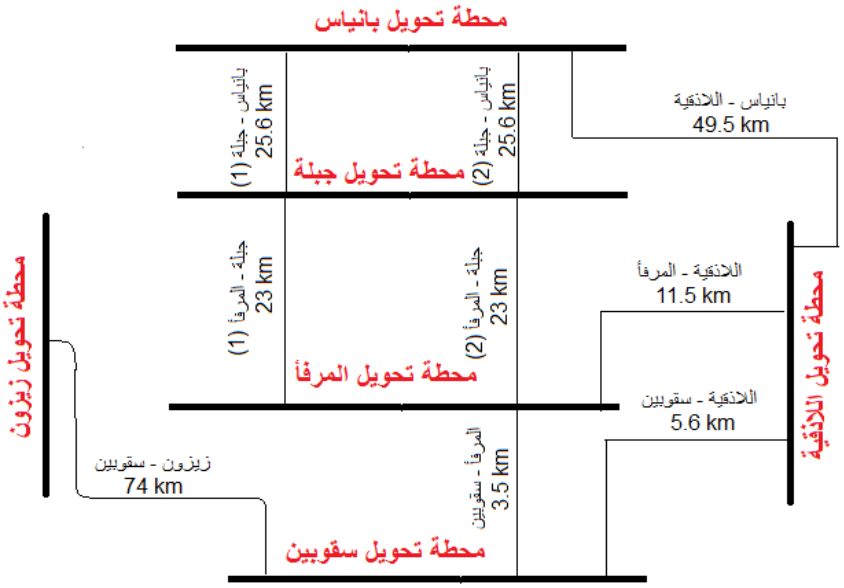
الشكل (4) محول الإزاحة الطورية من النوع السداسي- الدلتا

من المزايا المهمة لهذا التصميم أنه لا يلزم سوى مبدل تفريعة واحد لكل طور. يتمتع تصميم محول PST السداسي - الدلتا بميزة أخرى وهي أن زاوية الطور تتغير بشكل خطي تقريبًا مع ضبط مغير التفريعة.

6- الحالة المدروسة:

في هذا البحث، قمنا بمحاكاة شبكة نقل الطاقة الكهربائية ثلاثية الطور (230Kv) في المنطقة الساحلية الواصل المبينة في الشكل (5) باستخدام برنامج (Power World Simulator)، تم دراسة ثلاث حالات وهي كالآتي حالة الشبكة قبل خروج محطة توليد زيزون عن الخدمة وحالة خروج محطة زيزون عن الخدمة وحالة إضافة محول الإزاحة الطورية على خط بانياس- اللاذقية لبيان تأثير المحول PST في أمثلة سريان الاستطاعة الفعلية في الشبكة المدروسة من خلال تخفيف تحميل خط النقل بانياس – جبلة القريب من حد تحميله الأقصى على حساب زيادة تحميل خط بانياس اللاذقية بما يضمن عمل الشبكة بشكل آمن وموثوق.

معطيات خط النقل والشبكة المدروسة قيد الدراسة كما يبين الجدول (1) تم الحصول عليها من قسم الإحصاء في وزارة الكهرباء، وتتضمن بيانات خطوط النقل المستخدمة في الشبكة الكهربائية قيد الدراسة.

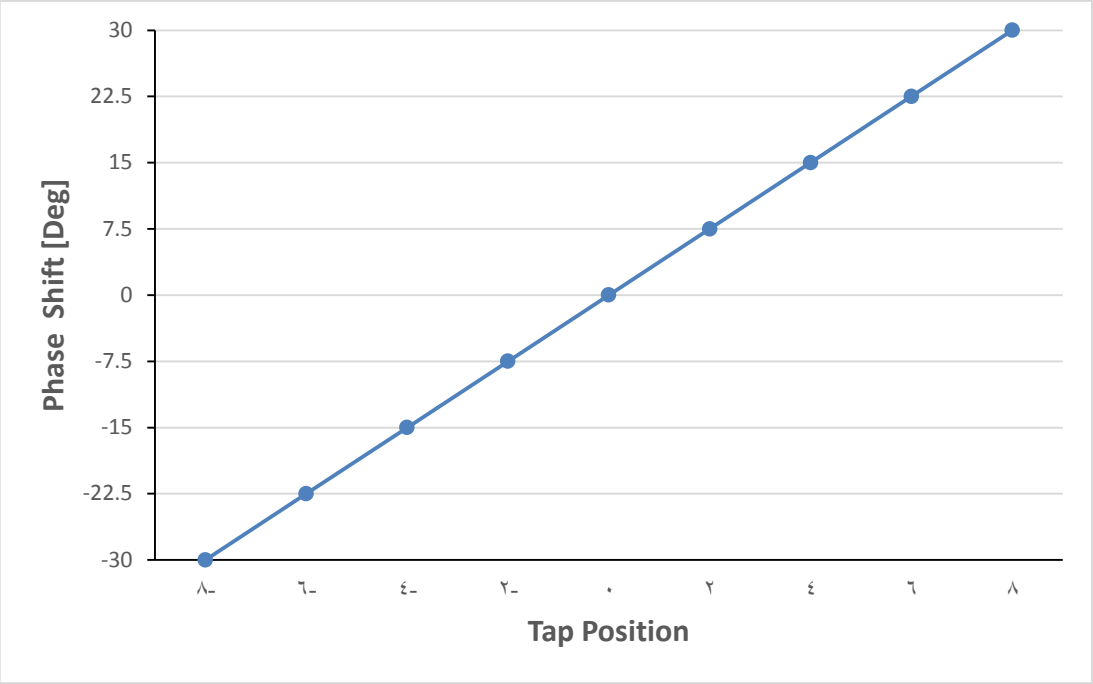


الشكل (5) مخطط الشبكة 230Kv بين مدينة بانياس واللاذقية

الجدول(1) بارمترات خط النقل اللاذقية – بانياس

جهد الخط	230 Kv
طول الخط	49.5 Km
حجم الناقل	Ac 450/50 mm
التردد	50Hz
مقاومة الخط	0.077 Ohm/Km
مفاعلة الخط	0.413 Ohm/Km
تيار التحميل الأقصى	750 A

يبين الجدول(2) بارومترات المحول PST، في هذه الحالة، يتم اختيار الاستطاعة الاسمية للمحول أكبر أو تساوي الاستطاعة التصميمية للخط والتي تساوي 298 MVA قمنا باختيار محول باستطاعة 400(MVA) لأداء سريان الاستطاعة الفعلية يتم اختيار محول (OLTC) 16 خطوة لتغيير التفريعة أثناء الحمل (on-load) والإزاحة الطورية بمقدار $\pm 30°$. وبالتالي، يتم تغيير التفريعة من −8 إلى +8 ويكون تغيير زاوية الطور لكل تفريعة 3.75° [1] كما يبين الشكل (6).



الشكل (6) تغير زاوية الإزاحة الطورية بالنسبة لموضع التفريعة

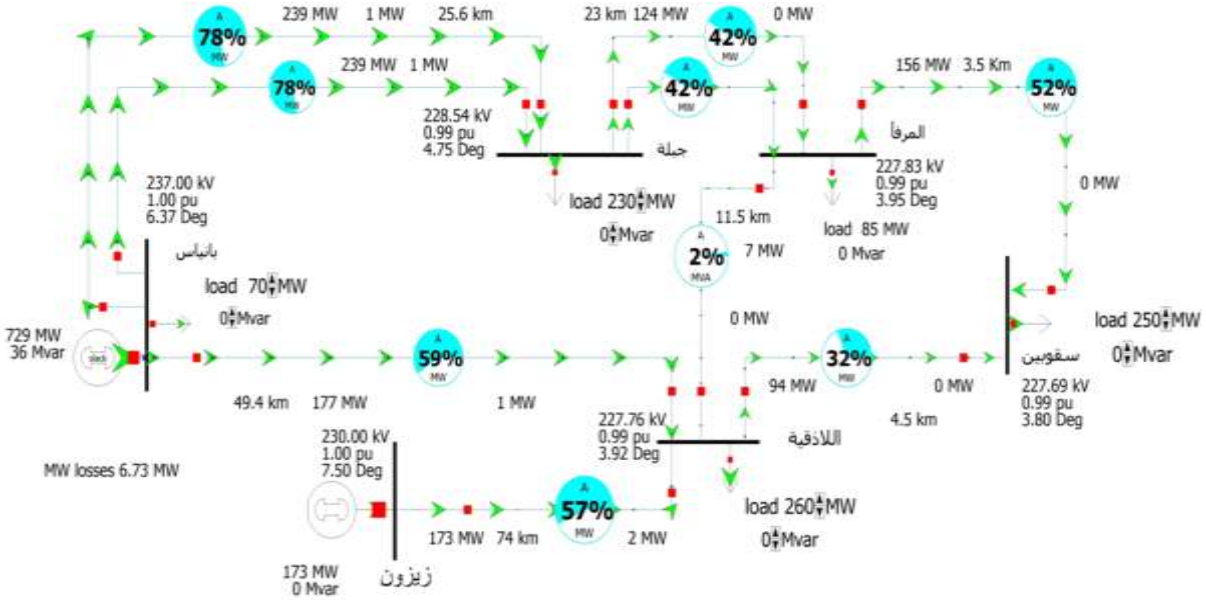
الجدول (2) بارومترات محول الإزاحة الطورية

استطاعة التصميم	400 MVA
إزاحة الطور	$[-30° + 30°]$
OLTC	16 Steps
جهد الخطوة لكل تفريعة	4296V
تيار النظام	750 A
الجهد الاسمي	230Kv

النتائج والمناقشة:

1- محاكاة عمل الشبكة الكهربائية المدروسة قبل خروج محطة زيزون عن الخدمة:

قمنا بمحاكاة الشبكة عند الحمولات الاسمية والمبينة في الشكل (7) بدون خروج محطة توليد زيزون عن الخدمة حيث يتبين من الشكل (7) بوجود محطة زيزون في الخدمة، أن جميع خطوط الشبكة تعمل وفق الحدود المسموحة للتحميل بنسب تحميل مختلفة، وفقاً لاستطاعة الحمل الاسمية، والمبينة في الجدول (3).



الشكل (7) سريان الاستطاعة في الشبكة المدروسة بدون خروج محطة زيزون عن الخدمة

الجدول(3) نتائج سريان الحمولة بوجود محطة زيزون

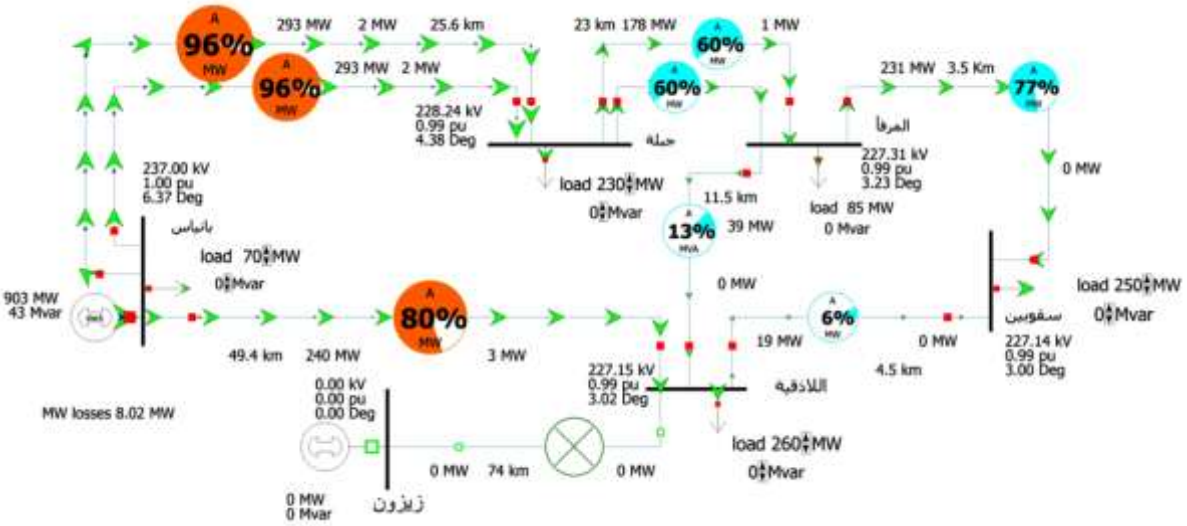
خط النقل	سريان الاستطاعة الفعلية (MW)	زاوية الطور إرسال/استقبال [Deg]	نسبة تحميل الخط	ضياعات خط النقل (MW)	الضياعات الكلية (MW)
بانياس– جبلة (دارة مضاعفة)	2*229	4.75/6.37	78%	1 * 2	6.73
جبلة– المرفأ (دارة مضاعفة)	2*124	3.95/4.75	42%	< 1	
المرفأ– سقوبين	153	3.8/3.95	52%	< 1	
سقوبين– اللاذقية	98	3.92/3.8	32%	< 1	
المرفأ – اللاذقية	7	3.92/3.95	2%	< 1	
بانياس– اللاذقية	177	3.92/6.37	59%	1	
زيزون – اللاذقية	173	3.92/7.5	57%	2	

يتبين من الجدول (3) أن الاستطاعة الفعلية المنقولة عبر خط بانياس– جبلة كانت 229 MW (دارة مضاعفة) والتي تمثل نسبة 78% من التحميل الأقصى للخط والذي يعادل 298 MW بينما كانت الاستطاعة الفعلية المنقولة عبر خط بانياس – اللاذقية 177 MW بنسبة تحميل تعادل 59%. وزاوية جهد الإرسال تعادل 6.37°.

2– محاكاة عمل الشبكة الكهربائية بعد خروج محطة زيزون عن الخدمة:

قمنا بمحاكاة عمل الشبكة الكهربائية بعد خروج محطة توليد زيزون من الخدمة كما هو مبين بالشكل (8) والجدول (4) الذي يبين نتائج سريان الاستطاعة الفعلية في الشبكة قيد الدراسة أن الاستطاعة الفعلية المنقولة عبر خط بانياس –

جبلة كانت 586 MW (دارة مضاعفة) بنسبة تحميل تعادل 96% مما يجعل خط النقل يعمل بالقرب من حد تحميله الأقصى، بينما نسبة تحميل خط بانياس اللاذقية بلغت 240 MW بنسبة تحميل بلغت 80% وبقية خطوط الشبكة تعمل ضمن مجال التحميل المسموح بنسب متفاوتة عند نفس استطاعة الحمولة قبل خروج محطة زيزون عن الخدمة وثبات زاوية الإرسال عند قيمة 6.37°، والضياعات الكلية للشبكة الكهربائية المدروسة 8.02 MW



الشكل (8) سريان الاستطاعة في الشبكة المدروسة بعد خروج محطة زيزون عن الخدمة

الجدول(4) نتائج سريان الحمولة بدون محطة زيزون

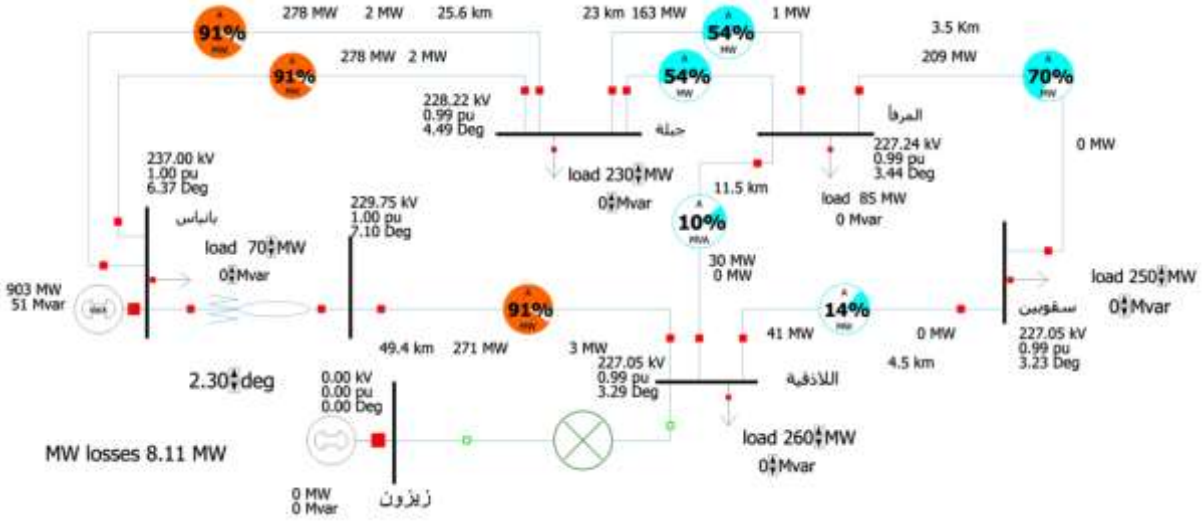
خط النقل	سريان الاستطاعة الفعلية (MW)	زاوية الطور إرسال/استقبال [Deg]	نسبة تحميل الخط	ضياعات خط النقل (MW)	الضياعات الكلية (MW)
بانياس– جبلة	2*293	4.83/6.37	96%	2 * 2	8.02
جبلة– المرفأ	2*178	3.23/4.83	60%	2 * 1	
المرفأ– سقوبين	231	3/3.23	77%	< 1	
اللاذقية– سقوبين	6	3/3.02	6%	< 1	
المرفأ – اللاذقية	39	3.02/3.23	13%	< 1	
بانياس– اللاذقية	240	3.02/6.37	80%	3	
زيزون – اللاذقية	0	0/3.02	0%	0	

3– محاكاة عمل الشبكة بعد تركيب محول الإزاحة الطورية على خط بانياس – اللاذقية:

قمنا بمحاكاة الشبكة الكهربائية مع إدخال محولة الإزاحة الطورية على خط بانياس – اللاذقية في محطة تحويل بانياس 230 Kv وضبط زاوية جهد خرج محول الإزاحة الطورية عند القيمة 2.3°، نلاحظ كما هو موضح بالشكل (9) والجدول (5) تساوي نسب تحميل خط جبلة – بانياس وخط بانياس – اللاذقية بنسبة تحميل بلغت 91% كما يتبين

أيضاً أن جميع الخطوط تعمل ضمن الحدود المسموحة، فقد تم زيادة قيمة سريان الاستطاعة الفعلية المنقولة عبر خط بانياس– اللاذقية بمقدار 31MW بحيث تصبح 271 MW عند زاوية جهد الإرسال 7.10° وتخفيض قيمة سريان الاستطاعة الفعلية عبر خط

بانياس– جبلة بمقدار 30 MW بحيث تصبح 556 MW وزاوية جهد الإرسال ثابتة عند القيمة 6.37° والضياعات الكلية للشبكة الكهربائية المدروسة 8.11 MW

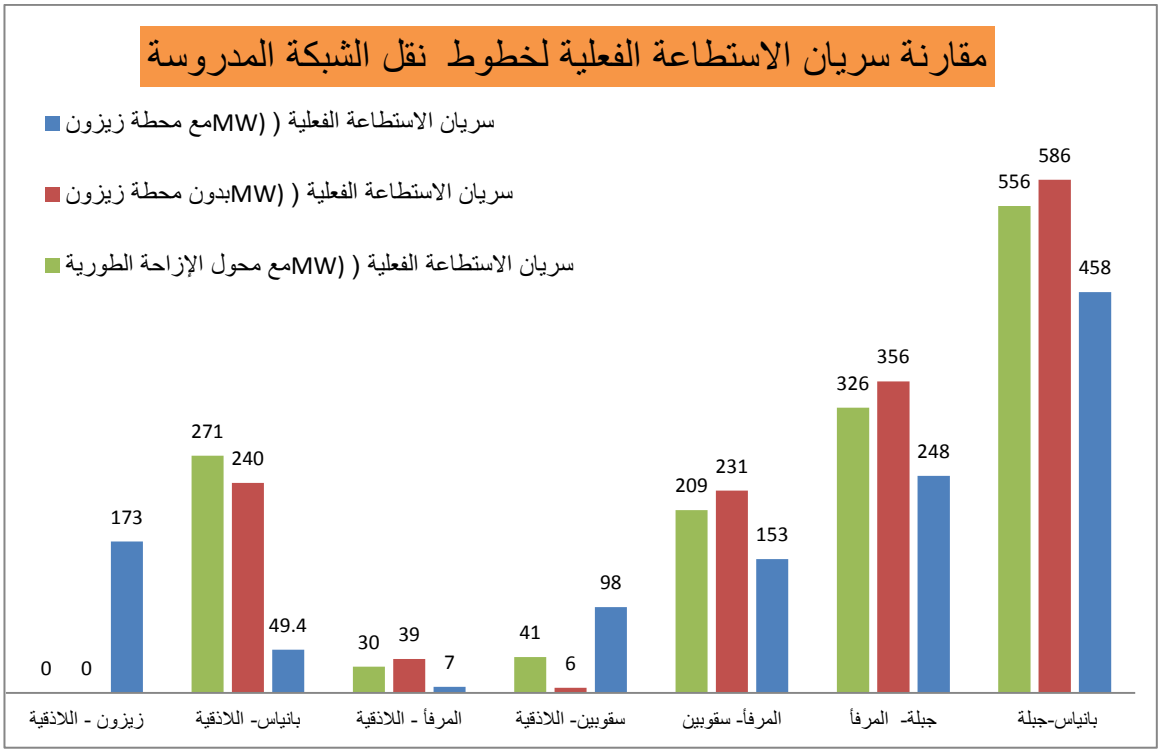


الشكل(9) سريان الاستطاعة في الشبكة المدروسة بدون محطة زيزون مع استخدام محول الإزاحة الطورية

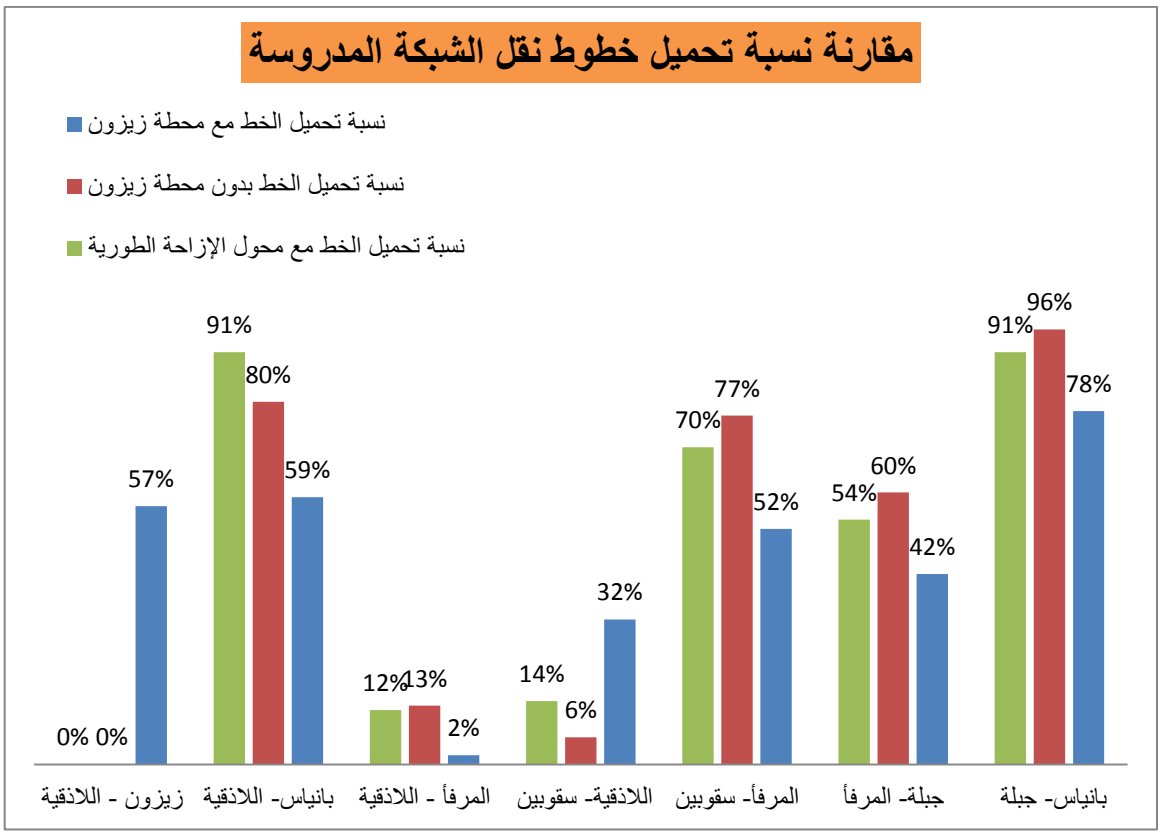
الجدول(5) نتائج سريان الحمولة بدون محطة زيزون مع استخدام محول الإزاحة الطورية

خط النقل	سريان الاستطاعة الفعلية (MW)	زاوية الطور إرسال/استقبال [Deg]	نسبة تحميل الخط	ضياعات خط النقل (MW)	الضياعات الكلية (MW)
بانياس– جبلة	2*278	4.52/6.37°	91%	2 * 2	8.11
جبلة– المرفأ	2*163	3.5/4.52	54%	2 * 1	
المرفأ– سقوبين	209	3.29/3.5	70%	< 1	
اللاذقية– سقوبين	41	3.29/3.36	14%	< 1	
المرفأ – اللاذقية	30	3.36/3.50	12%	< 1	
بانياس– اللاذقية	271	3.36/7.43	91%	4	
زيزون – اللاذقية	0	0/0	0%	0	

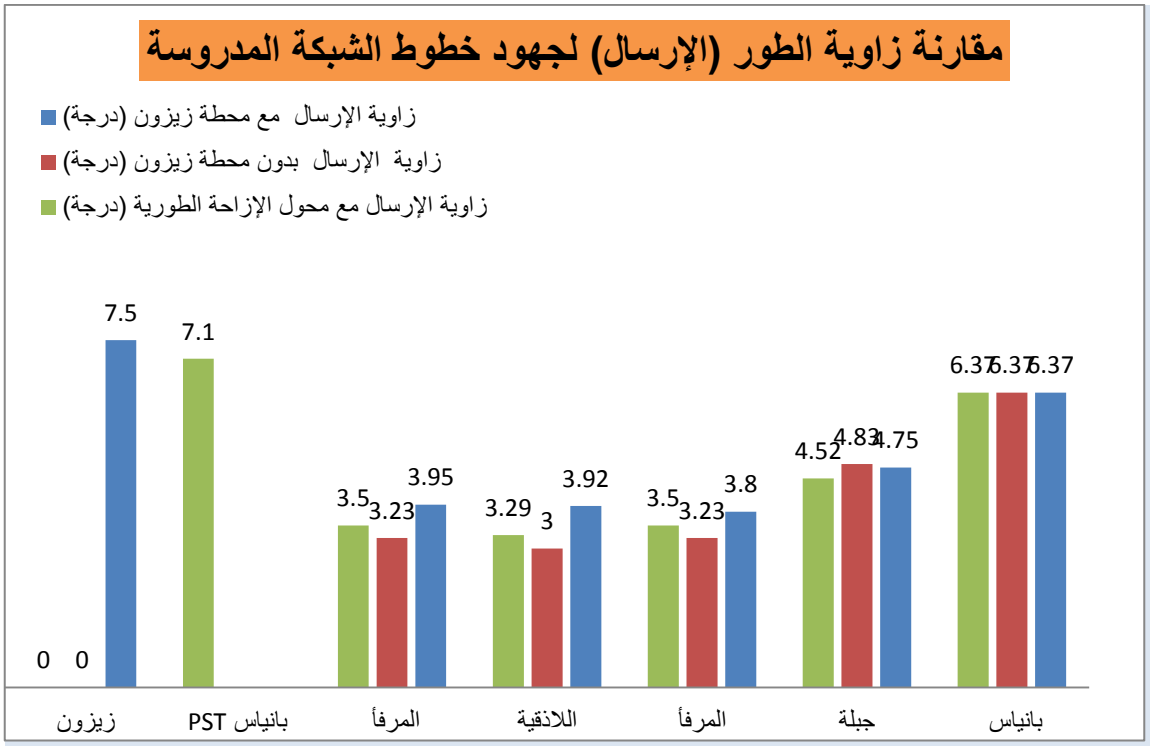
تبين الأشكال البيانية (10,11,12) بالترتيب مقارنة كل من سريان الاستطاعة الفعلية ونسب تحميل ومقارنة زوايا جهود الإرسال لخطوط نقل الشبكة الكهربائية المدروسة عند حالات عمل الشبكة المدروسة مع وبدون استخدام محول الإزاحة الطورية.



الشكل (10) المخطط البياني لمقارنة سريان الاستطاعة الفعلية في خطوط نقل الشبكة المدروسة



الشكل (11) المخطط البياني لمقارنة نسبة تحميل خطوط نقل الشبكة المدروسة



الشكل (12) المخطط البياني لمقارنة زاوية الارسال لجهود خطوط الشبكة المدروسة

الاستنتاجات والتوصيات:

- ✓ قدم هذا البحث نموذج محاكاة لشبكة نقل التوتر العالي 230Kv الممتدة من بانياس إلى اللاذقية باستخدام برنامج Power World Simulator.
- ✓ أظهرت نتائج المحاكاة زيادة نسبة تحميل خط بانياس– جبلة بحيث تصبح قريبة من حد التحميل الأقصى 96%.
- ✓ أظهرت نتائج البحث أن استخدام محول الإزاحة الطورية يخفف من ازدحام خطوط نقل الشبكة قيد الدراسة حيث تمت موازنة سريان الاستطاعة الفعلية لكل من خط بانياس– جبلة وخط بانياس– اللاذقية لتصبح 91%.
- ✓ أظهرت نتائج المحاكاة أنه باستخدام محول الإزاحة الطورية قيمة الضياعات الكلية للشبكة الكهربائية قيد الدراسة ترتفع من القيمة 8.02 MW إلى القيمة 8.11 MW
- ✓ أظهرت نتائج المحاكاة أن زاوية الإرسال الملائمة لخط نقل بانياس– اللاذقية هي 7.1°
- ✓ نوصي في هذا البحث استناداً إلى النتائج التي تم الحصول عليها باستخدام محول الإزاحة الطورية، عندما تكون هناك حاجة لتخفيف ازدحام خطوط نقل الطاقة الكهربائية، بحيث تتم موازنة قيم سريان الاستطاعة الفعلية بين الخطوط، بما يساهم في الحفاظ على السلامة الفنية لخطوط النقل، من خلال تخفيض قيمة سريان الاستطاعة الفعلية في الخطوط عالية التحميل على حساب زيادة قيمة سريان الاستطاعة على خطوط أخرى بما يضمن التشغيل الآمن والموثوق للشبكة الكهربائية.

References:

[1]. Verboomen. J, Hertem, D. V, Schavemaker, P. H, Kling. W.L, Belmans . R. *A Phase Shifting Transformers: Principles and Applications*, IEEE Conf. on Future Power Systems, Amsterdam, November (2005).

[2]. Thandar. O, Myint, Su. M, Khaing, Z. A. *Analysis of Active Power Flow Control with Phase Shifting Transformerin AC Transmission Line*, International Journal of Trend in Scientific Research and Development (IJTSRD), The Republic of the Union of Myanmar, Vol . 6, No. 2, 2018, 666-667.

[3]. Jin. W, Liu. H, Zhang.W, Yuan. J. *Power Flow Regulation Effect and Parameter Design Method of Phase-Shifting Transformer*, Energies, Vol. 17, 1622, 1-15.

[4].AL-Rawi. A. M, Mostafa. M. O. *Power Flow Control Using Phase Shift Transformers*, Tikrit Journal of Eng. Sciences, Vol. 17, NO. 1, 2010, 10-15.

[5]. Cano. J.M. C, Rejwanur. M. R, Norniella. J.G. *Phase shifting transformer model for direct approach power flow studies*, Electrical Power and Energy Systems, Vol. 91, 2017, 71-79.

[6].Halasiddappa. A.M, Shivakumar. M. R. *Phase shifting transformer to reduce power congestions and to redistribute power in interconnected systems*, International Journal of Electrical and Computer Engineering, Vol. 13, NO. 2, 2023, 1215-1220.

[7]. Mohsin. Q. K, Lin. X, Wang. Z, Sunday. O, Khalid. M. S, Zheng. P. *Iraq Network 400kV, 50Hz Interconnect with Iran,Turkey and Syria Using Phase-Shifting Transformers in Control and Limit Power Flow of Countries*, IEEE, 2014.

[8]. Yu. M, Yuan. J, Li. Z, Yang. X. *Power Flow Optimization and Economic Analysis Based on High Voltage Phase Shifting Transformer*, Energies, Vol. 15, 2363, 2022, 1-26.