مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية
المجلد42 العدد (3) – 2026: 61-81

Damascus University Journal for engineering sciences
Vo 42 number (3) -2026: 61-81

تحسين أداء الجزء الشمالي الشرقي من شبكة التوتر العالي 230 ك.ف السورية باستخدام UPFC

جمال عبد الرحيم الناصير [1*]

[1*] أستاذ مساعد، دكتور، قسم هندسة الطاقة الكهربائية– كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية–جامعة دمشق
JamalAlnasseir@damascusuniversity.edu.sy.

الملخص:

في الآونة الأخيرة، أصبحت أنظمة القدرة الحديثة واسعة الانتشار جغرافياً ومعقدة، ذلك ما أثر بشكل كبير على استقرار هذه الأنظمة بكافة أشكاله وأنواعه. وبالتالي أصبحت عملية زيادة الاستطاعات المنقولة على خطوط النقل تساؤل جدير بالاهتمام من قبل الباحثين. في المقابل، ظهرت أجهزة أو أنظمة التيار المتناوب المرنة (Flexible AC Transmission Systems (FACTs)) لتقدم حلاً لتحسين استقرار الأنظمة الكهربائية. تعتمد هذه التجهيزات في عملها على عناصر إلكترونيات القدرة الكهربائية المتطورة ذات قيم توترات وتيارات اسمية عالية، وأزمنة الفصل والفصل صغيرة جداً، والتي تلعب دور هام في تحسين استقرار نظام القدرة وأداء شبكات النقل والتوزيع. يمكن تصنيف أجهزة FACTs إلى مجموعتين، تعتمد المجموعة الأولى منها في عملها على الثيرستور (GTO)، والذي يتحكم بالمفاعلات أو المكثفات، لاستجرار أو حقن استطاعة ردية، أما المجموعة الثانية، فتستخدم ترانزستورات إلكترونيات قدرة أكثر تقدماً (IGBT)، يتم من خلالها التحكم بجريان الاستطاعة الفعلية في نظام القدرة وتحسين منحني التوتر. يمكن دمج الوظائف السابقة في نظام واحد من أنظمة FACTs، هذا النظام هو نظام التحكم بجريان الاستطاعة الموحد Unified Power Flow Controller (UPFC). يعتمد مبدأ عمل UPFC على استجرار استطاعة ردية من الشبكة وحقنها على شكل استطاعة فعلية، وبذلك يصبح جريان الاستطاعة أمثل في الشبكة، كما يساهم في تحسين الاستقرار العابر ومنحي التوتر في الشبكات وخاصة المكروية، كما يدعم الاستقرار العابر ويساعد على إخماد اهتزازات الاستطاعة. أجريت هذه الدراسة لتحسين أداء جزء من شبكة التوتر العالي السورية (230 KV)، حيث اعتمدت الدراسة على نتائج مأخوذة من معطيات وزارة الكهرباء، تشير إلى انخفاض توترات الشبكة المدروسة بشكل واضح، لذلك كان الحل المقترح تركيب النظام UPFC عليه لتحسين أداء الشبكة، وقد بينت النتائج، تحسن هبوط التوتر بحيث أصبح على الأكثر بحدود (0.05 p.u.) كما أصبحت منحنيات زوايا الدائر للمولدات أكثر استقرارا خلال الحالة العابرة، وهبوطات التوترات أثناء حدوث العطل أصبحت أقل بشكل واضح.

الكلمات المفتاحية: تحسين منحني التوتر، جريان الاستطاعة، الاستقرار العابر، أنظمة التيار المتناوب المرنة FACTs، نظام جريان التحكم بجريان الاستطاعة الموحد UPFC.

تاريخ الإيداع: 2023/8/28
تاريخ القبول: 2023/10/25

حقوق النشر: جامعة دمشق –سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب **CC BY-NC-SA**

http://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.php/index/index
ISSN (online): 2789-6854

Improving the performance of the northeastern part of the Syrian High Voltage network 230 kV using UPFC

Jamal AbdelrahimAlnasseir[*1]

[*1]. Associated professor at Electric Power Department, Faculty of Mech. & Elec. Engineering, Damascus University
JamalAlnasseir@damascusuniversity.edu.sy.

Received: 28/8/2023
Accepted: 25/10/2023

Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a

CC BY- NC-SA

Abstract:

Modern power systems have become large, complex, and extended beyond limits. Therefore, they are constantly faced with the issue of stability, its challenges, and its types, and how it is possible to increase the transmitted power on transmission lines. On the other hand, Flexible AC Transmission Systems (FACTs) have emerged, which depend in their work on advanced power electronics elements with high rated-voltages and currents, and very small switching time, which will play an important role in improving the stability of the power system, performance of transmission and distribution networks. FACTs can be classified into two groups, the first group of which relies on thyristors (GTO), which controls reactors or capacitors, to draw or inject reactive power, while the second group uses more advanced power electronics transistors (IGBT), through which the flow is controlled real power in the power system and the improvement of the voltage profile.

The previous functions can be combined in one FACTs system, this system is Unified Power Flow Controller (UPFC). The working principle of UPFC is based on extracting reactive power from the network and injecting it in the form of real power, and thus the power flow becomes optimal in the network, and it also contributes to improving transient stability and voltage profiles in networks, especially micro-grid, and also supports transient stability and helps to dampen power vibrations.This study was carried out to improve the performance of part of the Syrian high-voltage network (230kV), as the study relied on results taken from the Ministry of Electricity, indicating that there is clear decrease in voltage of the studied network, so the suggested solution is to install the UPFC system to improve the network performance, and it showed Results: The voltage drop improved so that it became at most within the limits of (5%), and the transmitted power on the transmission line increased by the limits of (0.05 p.u.), the rotor angles curves also became more stable during the transient state, and the voltage dips during the fault occurrence became significantly less.

key words: Improvement of voltage profile, power flow, transient stability, flexible alternating current systems (FACTs), Unified Power Flow Controller (UPFC).

المقدمة:

أصبحت أنظمة القدرة الكهربائية في الوقت الحالي ذات تعقيد كبير حيث أصبحت مؤلفة من آلاف قضبان التجميع ومئات مجموعات التوليد، وهناك حاجة دائمة إلى إنشاء خطوط نقل جديدة، ولكنها ذات كلفة عالية وتحتاج لفترة زمنية لإنشاء هذه الخطوط حتى توضع بالخدمة. ضمن هذه الشروط ولمواجهة الارتفاع الكبير في الطلب على الطاقة، كان لا بد من الاستفادة العظمى من خطوط النقل الحالية وتحميلها بسعتها العظمى، ولكن ذلك قد يسبب بدوره زيادة في احتمالية فقدان استقرار نظام القدرة ونقص موثوقية النظام. ظهرت مع التطور الكبير في مجال الإلكترونيات أنظمة النقل المرنة التي تركب على خطوط النقل ((Flexible AC Transmission Systems (FACTs)، والتي لا يقتصر دورها على تحسين جريان الاستطاعة في خطوط النقل الحالية، وإنما أيضاً تشغيل نظام النقل والتغلب على مشاكل الاستقرار والوثوقية التي يتعرض لها النظام. تستخدم هذه الأنظمة على شكل معوضات تسلسلية أو تفرعية أو مركبة، وهي أنظمة التحكم الإلكترونية تعتمد في عملها على التحكم بمحددات خط النقل لتحسين جريان الاستطاعة الفعالة والاستطاعة الردية في خط النقل وكذلك المحافظة على قيمة التوتر ثابتة على طول الخط. إن الهدف الأساسي من تركيب المعوضات التسلسلية هو:

زيادة الاستطاعة المنقولة على خط النقل.

التحكم بجريان الاستطاعة الحقيقية والردية.

تحسين زاوية الاستقرار العابر، والمحافظة على الاستقرار.

يعد نظام التحكم بجريان الاستطاعة الموحد أحد أهم أنواع أنظمة التوتر التيار المتناوب (FACTS) المركبة، وهو من الأنظمة التفرعية–التسلسلية المركبة القادرة على التحكم بجريان الاستطاعة الفعلية والردية ضمن خط نقل معين وتنظيم توتر النظام من خلال توفير تعويض سريع للاستطاعة الردية. يتألف UPFC من منبعي مبدل توتر VSCs، تعتمد على عناصر

قارن المرجع (T. Okeke and others, 2013,1) بين أثر أنظمة FATCs المختلفة وأثرها في التعويض الستلسلي والتفرعي، بينما أجرى المرجع (M. Bocovich and other, 2013,2) مقارنة بين تطبيقات أنظمة FACTs وأفضل موقع لتركيب هذه الأنظمة، بينما درس المرجع (P. H. Kathar, and others, 2109, 3) أثر المعوض TCSC على استقرار التوتر وجريان الاستطاعة، وأوضحت المراجع (H. Kathar, and others, 2109, 3, Tariq Masood, S.A. Qureshi, 2017, 4, X.Y Zhou and R.K Aggarwal, 2014, 5) أثر كل من المعوض التفرعي STATCOM والتسلسلي TCSC في جريان الاستطاعة وإخماد اهتزازت نظام القدرة، بينما درست المراجع (C. Dinkaran, 2017, 6, M. Yadav and A. Soni, 2016, 7, Acharya, Naresh and others, 2005, 8, S. Monemi, and others, 2022, 9, P, Kumkratug, 2011, 10) إمكانية تحسين أداء نظام القدرة باستخدام المعوضات التسلسلية والتفرعية، ودرس المرجع (B. C. Wibawa, and all, 2019, 11) إمكانية استخدام المعوضات التفرعية في خطوط التوتر العالي جداً.

1- أنواع المعوضات:

يمكن تصنيف المعوضات إلى ثلاث أنواع رئيسية وهي:

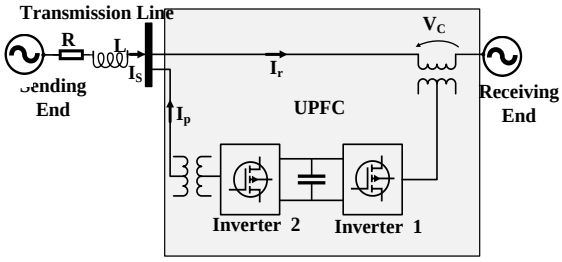
المعوضات التفرعية.

المعوضات التسلسلية.

المعوضات المركبة التسلسلية التفرعية.

1-2 نظام التحكم بجريان الاستطاعة الموحد Unified Power Flow Controller (UPFC):

إلكترونيات قدرة حديثة، كما في الشكل(1)، يوصل أحدهما على التسلسل مع خط النقل والآخر على التفرع (N. S. Samara, Master thesis, California University, Pomona, 2022, 12, T. ALLAOUI M. and all, 2007, 13)



الشكل(1) نظام التحكم بجريان الاستطاعة الموحد UPFC (N. S. Samara, Master thesis, California University, Pomona, 2022, 12)

يؤمن UPFC وظائف مختلفة، فعندما يكون التوتر التسلسلي (Vc) توتر متغير المطال وزاوية طور، وسيعمل UPFC كمنظم توتر، إذا كان هذا التوتر (Vc) المحقون في الشبكة متوافق في الطور مع توتر النظام المتناوب. ويعمل كمعوض تسلسلي إذا كان التوتر (Vc) المحقون متعامد مع تيار الخط، كما يمكن أن يعمل UPFC كمنظم زاوية طور. يمكن تحسين أداء UPFC من التخفيف الترابط بين نظام التحكم في جريان الاستطاعة الفعلي والردي (M. Bocovich and others, 2013, 2).

يعبر UPFC عن مزج لمعوضين، الأول المعوض التزامني الساكن (STATCOM)، والثاني المعوض التسلسلي التزامني الساكن، والمربوطين معاً إلى قضيب تجميع تيار مستمر مشترك، وذلك للسماح بجريان الاستطاعة الفعلية\الردية بالاتجاهين بين خرج المعوض التسلسلي SSSC وخرج المعوض التفرعي STATCOM. يبين الشكل(2) مبدأ عمل المعوض التفرعي، حيث سيقدم استطاعة فعلية\ردية وفق ما يلي (N. S. Samara, Master thesis, California University, Pomona, 2022, 12, T. ALLAOUI M. and all, 2007, 13, ABB, "Power Oscillation Damping, 2019, 14, Ajit K. Jadhav, V.A. Kulkarni, 2018, 15):

إذا كان مطال التوتر $E_s > E_t$ ⇦ يولد استطاعة ردية.

إذا كان مطال التوتر $E_s < E_t$ ⇦ يمتص استطاعة ردية.

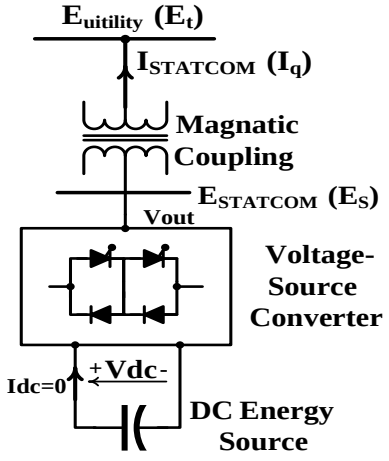
إذا كانت E_s متقدمة بالطور على E_t ⇦ يولد استطاعة حقيقة.

إذا كانت E_s متأخرة بالطور عن E_t ⇦ يمتص استطاعة حقيقة.

يوضح الشكل(3) مبدأ عمل المعوض التزامني التسلسلي SSSC ، حيث أنه سيحقن تيار في خط النقل كما يلي (ABB, "Power Oscillation Damping, 2019, 14, Ajit K. Jadhav, V.A. Kulkarni, 2018, 15):

إذا كان التوتر المحقون متوفق في طور مع تيار الخط، فإن التوتر سيساهم في تبادل الاستطاعة الحقيقة.

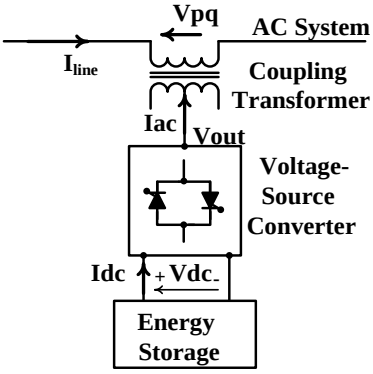
أما إذا كان التوتر المحقون متعامد بالطور مع تيار الخط، عندئذٍ سيتم تبادل الاستطاعة الردية (أي يمتص أو يحقن استطاعة ردية) (N. S. Samara, Master thesis, 12, T. California University, Pomona, 2022,



الشكل(2) مبدأ عمل المعوض التفرعي STATCOM

N. S. Samara, Master thesis, California University,) (12Pomona, 2022,

ALLAOUI M. and all, 2007, 13, ABB, "Power Oscillation Damping, 2019, 14, Ajit K. Jadhav, V.A. Kulkarni, 2018, 15).



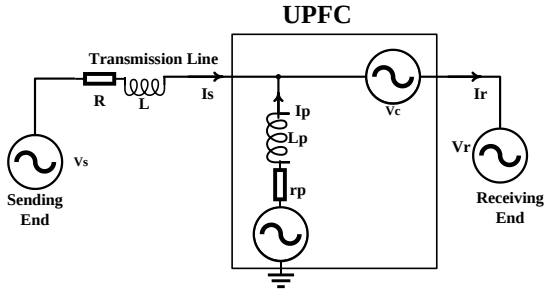
الشكل(3) مبدأ عمل المعوض التسلسلي SSSC

N. S. Samara, Master thesis, California University,)

(12Pomona, 2022,

2-2 النموذج الرياضي للنظام UPFC:

يوضح الشكل(4) الدارة المكافئة لنظام UPFC، حيث يتم تمثيل المبدلات الإلكترونية التسلسلية والتفرعية بمنابع توتر (Vc) و (Vp) على التوالي. يمكن تمثيل خط النقل على شكل مقاومة أومية r على التسلسل مع المفاعلة L. تمثل المحددات rp و Lp مقاومة ومفاعلة المحولة التفرعية والمفاعلة التسريبية على التوالي. يتم إهمال أزمنة فصل ووصل القواطع الإلكترونية وإشباع في المحولات والتأخيرات الزمني لأجهزة التحكم في الدائرة المكافئة ويفترض أن نظام النقل متماثل (N. S. Samara, Master thesis, California University, 12, T. ALLAOUI M. and all, 2007, Pomona, 2022, 13,).



الشكل(4) الدارة المكافئة للنظام UPFC

N. S. Samara, Master thesis, California University,)

(12Pomona, 2022,

باستخدام تحويل Park، يمكن التعبير عن التيار المار في خط النقل بالنسبة للمعوض التزامني التسلسلي بالمعادلات التالية [12, 13].

$$\frac{di_{sd}}{dt} = \omega i_{sq} - \frac{r}{L} i_{sd} + \frac{1}{L}(V_{sd} - V_{cd} - V_{rd}) \quad (1)$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = \omega i_{sd} - \frac{r}{L} i_{sq} + \frac{1}{L}(V_{sq}\ (2) - V_{cq} - V_{rq}) \quad (2)$$

حيث يشير الحرفان d و q إلى مركبات تحويل بارك للتيارات والتوترات. وبالمثل، يمكن وصف المبدل التفرعي بالمعادلات [12, 13]:

$$\frac{di_{pd}}{dt} = \omega i_{pd} - \frac{r}{L} i_{pd} + \frac{1}{L}(V_{pd} - V_{cd} - V_{rd}) \quad (3)$$

$$\frac{di_{pq}}{dt} = \omega i_{pd} - \frac{r}{L} i_{pq} + \frac{1}{L}(V_{pq} - V_{cq} - V_{rq}) \quad (4)$$

باستخدام مبدأ توازن الطاقة وإهمال ضياعات المبدل الإلكتروني، يمكن كتابة معادلة قضيب تجميع التوتر المستمر (N. S. Samara, Master thesis, California University, 12, T. ALLAOUI M. and all, 2007, Pomona, 2022, 13,).

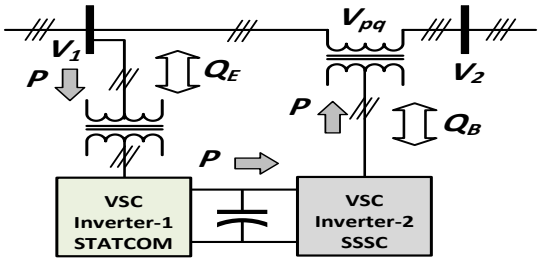
$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{2}{3CV_{dc}}(V_{cd} i_{rd} + V_{cq} i_{rq} - V_{pd} i_{pd} - V_{pq} i_{pq}) \quad (5)$$

وتشكل المعادلات السابقة النموذج الرياضي للنظام UPFC. [12] [13].

3-2 مبدأ عمل المعوض UPFC:

يوضح الشكل(5) وبشكل مبسط مبدأ عمل المعوض UPFC، حيث يربط المبدل الأول VSC1 على التفرع مع الخط من خلال محولة ربط، بينما يتم وصل المبدل الثاني VSC2 الآخر على التسلسل مع خط النقل من خلال محول أيضاً. يؤمن التوتر المستمر من خلال بنك مكثفات التوتر المستمر. يتم التحكم في المبدل التسلسلي لحقن توتر V_{pq}، على التسلسل مع الخط، والذي يتغير في مطاله من 0 إلى V_{pqmax}، وفي زاية طوره من °0 إلى °360. وبذلك يتبادل المبدل التسلسلي

الاستطاعة الفعلية والردية مع خط النقل. على الرغم من أن الاستطاعة الردية يتم توليدها\ امتصاصها داخلياً عن طريق المبدل التسلسلي، فإن توليد\امتصاص الاستطاعة الفعلية أصبح ممكناً من خلال بنك تخزين الاستطاعة (بنك المكثفات). يستخدم المبدل التفرعي للتحكم بالاستطاعة الفعلية المطلوبة من المبدل الثاني، والذي يشتق من خط النقل نفسه. يحافظ المبدل التفرعي على التوتر المستمر لبنك المكثفات. وبالتالي فإن صافي الاستطاعة الفعلية المستجرة من نظام التيار المتناوب يساوي للضياعات بين المبدلات والمحولات المربوطة من خلالها. بالإضافة إلى ذلك، يعمل المبدل التفرعي بنفس عمل المعوض STATCOM، حيث ينظم بشكل مستقل التوتر على طرفي قضيب التجميع المستمر من خلال توليد\امتصاص الكمية المطلوبة من الاستطاعة الردية.



الشكل(5) مبدأ عمل النظام UPFC [12]

(N. S. Samara, Master thesis, California University, Pomona, 2022, 12)

يوضح الشكل(6) مفاهيم التحكم بجريان الاستطاعة المختلفة باستخدام النظام UPFC والمفهوم العام لحقن توتر تسلسلي ووظائف النظام UPFC ، وهي كما يلي:

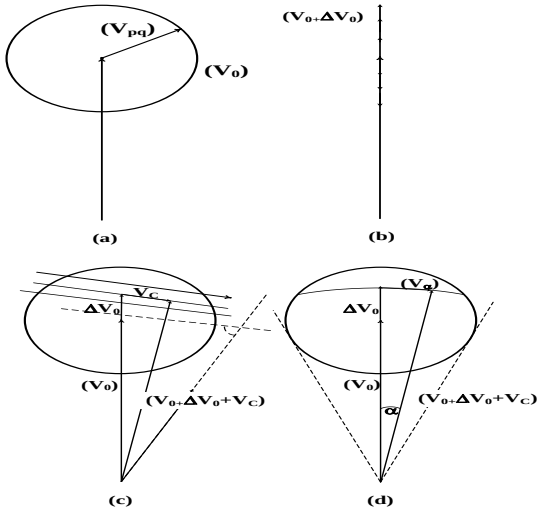
a) حقن توتر تسلسلي.

b) تنظيم التوتر التفرعي.

c) تنظيم التوتر التفرعي ومقاومة الخط.

d) تنظيم التوتر التفرعي وزاوية الطور. كما في الشكل(6) (N. S. Samara, Master thesis, California University, Pomona, 2022, 12, T. ALLAOUI M. and all, 2007, 13, ABB, "Power Oscillation Damping, 2019, 14).

حيث يوضح الشكل(6-a) كيف يمكن أن يُضاف شعاع التوتر (V_{pq}) إلى التوتر الأساسي (V_0)، مع العلم أن زاوية التوتر تتغير ضمن المجال (0° to 360°). أما الحال الثانية (الشكل(6-b))، مدى تأثر تنظيم التوتر إذا كان (V_{pq}= V_0)، المولد متفق بالطور مع التوتر (V_0). يعرض (الشكل(6-c)) كيف يمكن جمع تنظيم التوتر في التعويض التسلسلي، حيث يمثل التوتر (V_{pq}) مجموع مركبة تنظيم التوتر مع توتر التعويض التسلسلي (V_0)، وتكون النتيجة عباقر عن التوتر (V_C)، المتأخر بالطور عن تيار الخط بمقدار (90°). من أجل إجراء عملية تأخير في الطور المبينة في (الشكل(6-d))، يولد النظام UPFC التوتر(V_{pq}) من جمع مركبة تنظيم التوتر (V_0)، مركبة التوتر المتأخرة بالطور (V_a). إن وظيفة التوتر (V_a) هي تغيير زاوية الطور لشعاع التوتر المراد تنظيمه، (V_0+V_0)، بالزاوية ( ). يمكن من خلال النظام UPFC التحكم بوظيفة من الوظائف السابقة على الأقل أو بالثلاث وظائف من خلال دارات التحكم المناسبة، اعتماداً على متطلبات نظام القدرة (N. S. Samara, Master thesis, California University, Pomona, 2022, 12, T. ALLAOUI M. and all, 2007, 13).



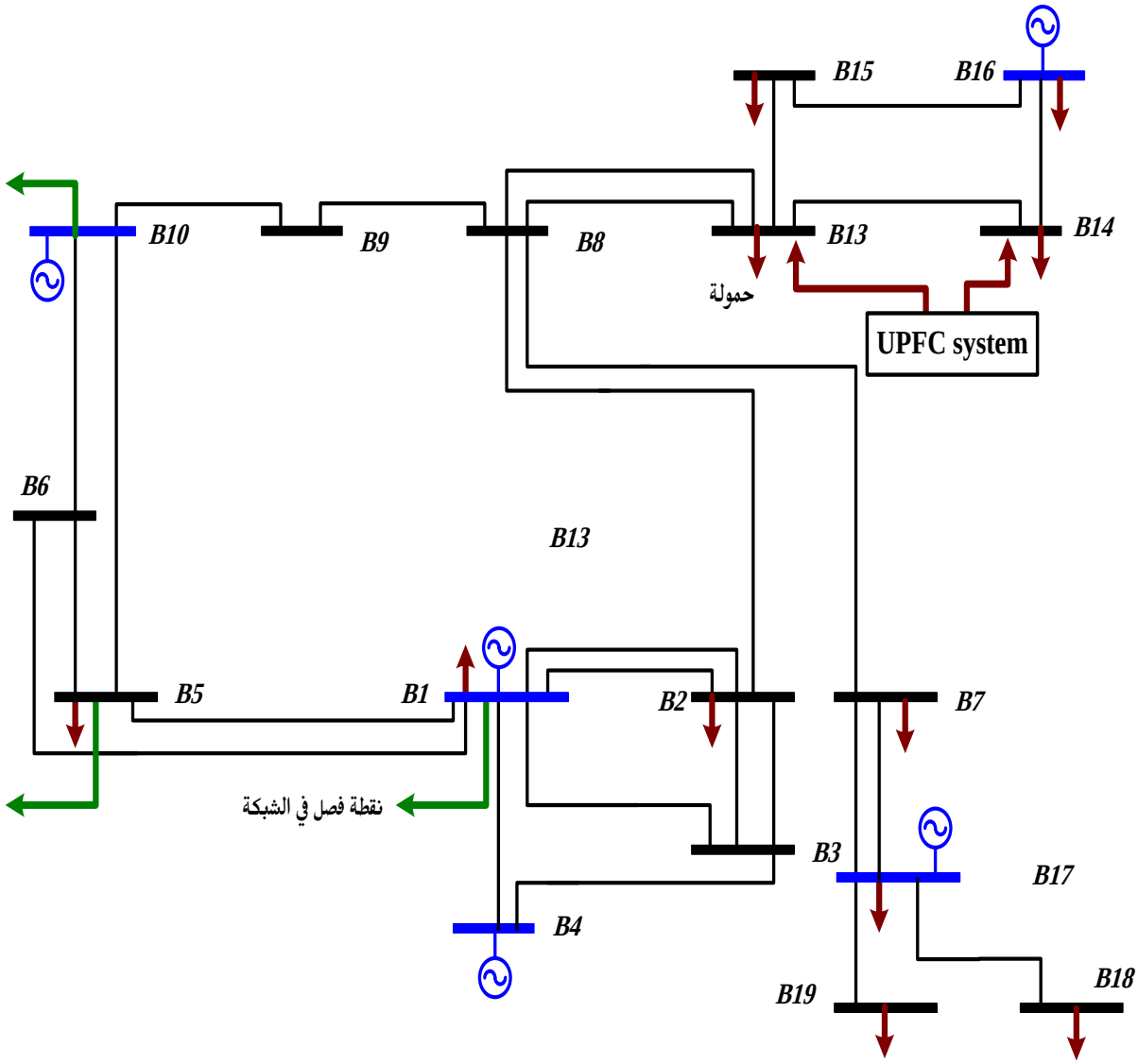
الشكل(6) مبدأ التحكم بالتوتر وجريان الاستطاعة في النظام UPFC(N. S. Samara, Master thesis, California University, Pomona, 2022, 12)

3 نمذجة الشبكة السورية:

يوجد العديد من البرمجيات المتاحة التي يمكن من خلالها دراسة أثر نظام الـ UPFC على شبكات النقل من حيث تحسين جريان الحمولة والاستقرار الديناميكي والعابر لهذه الشبكات، ومن أشهر هذه البرامج: ETAP، NEPLAN، POWERWORD، MATLA وغيرها. ولقد تم اختيار أحد هذه البرمجيات المتخصصة في الشبكات الكهربائية وهو برنامج Power System Analysis Tool (PSAT)، والذي يعمل ضمن البيئة البرمجية MATLAB، والذي يمكن من خلاله إجراء تحليل لأداء نظام القدرة الكهربائي في ظروف العمل المختلفة.

1-6 وصف الشبكة المعدّة للدراسة:

يبين الشكل(7) جزء الشبكة المعدّ للدراسة، وهي تمثل الجزء الشمالي الشرقي من شبكة التوتر العالي الكهربائية السورية توتر 230kV.



الشكل (7) الشبكة السورية المعدّة للدراسة

وقد تم اختيار هذا الجزء من الشبكة لدراسته استناداً إلى بيانات وزارة الكهرباء ونتائج حسابات جريان الاستطاعة ونتائج دراسات سابقة، والتي بينت انخفاض توترات قضبان التجميع في الجزء الشمالي الشرقي للشبكة الكهربائية السورية 230Kv، كما هي مبينة في الجدول(1)، وهذه الهبوطات أكبر من الحدود المسموح بها. لذلك كان لا بد من دراسة وتحليل هذه المشكلة، وإيجاد الحلول المناسبة. يحتوي هذا الجزء من الشبكة أربعة محطات توليد هي: السويدية والثورة والبعث والتيم وسبعة عشر قضيب تجميع، يصل بينها 25 خط نقل، وقد تم التعويض عن الخطوط التي تم قطعها بجريان الاستطاعة الفعلية والردية في هذه الخطوط بواسطة منابع توليد أو أحمال حسب قيمة جريان الاستطاعة فيها، وتم اعتماد قضيب تجميع الثورة كقضيب مرجع، وقد أخذت كافة المعلومات المتعلقة بمحددات جميع عناصر الشبكة استناداً إلى بيانات وزارة الكهرباء ونتائج الدراسات السابقة.

الجدول(1) انخفاض التوتر على الجزء الشمالي الشرقي من الشبكة السورية 230kV (وزارة الكهرباء)

قضيب التجميع	القامشلي	السويدية	الحسكة-1	الحسكة-2	تل خميس
U%	14	15	11.5	11.8	11.5

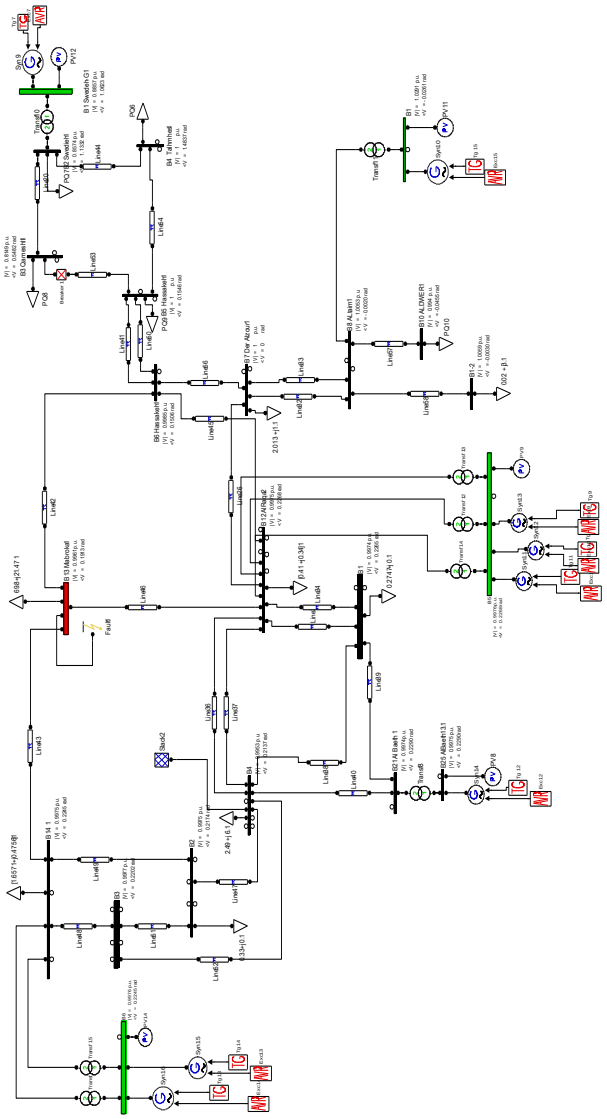
يحتوي هذا الجزء من الشبكة أربعة محطات توليد هي: السويدية والثورة والبعث والتيم وسبعة عشر قضيب تجميع، يصل بينها 25 خط نقل، وقد تم التعويض عن الخطوط التي تم قطعها بجريان الاستطاعة الفعلية والردية في هذه الخطوط بواسطة منابع توليد أو أحمال حسب قيمة جريان الاستطاعة فيها، وتم اعتماد قضيب تجميع الثورة كقضيب مرجع، وقد أخذت كافة المعلومات المتعلقة بمحددات جميع عناصر الشبكة استناداً إلى بيانات وزارة الكهرباء ونتائج الدراسات السابقة. بالنسبة لمحددات المولدات فقد أخذت عند الاستطاعة الاسمية لها وتوتر التوليد والتردد الاسمي، وكل مولدة مزودة بمنظم آلي للتوتر (AVR) ومنظم للسرعة (TG). أما خطوط النقل فقد تم تمثيلها باستخدام دارة الخط π. وتم اختيار مناسب من منظمات التوتر الآلي الموجود في البيئة البرمجية PSAT والذي يتميز بمجال تغير للتوتر بين (+100kV, -100kV) وربح (g=200pu)، من أجل الحفاظ على التوتر بالقرب من 1pu. وبالنسبة لمنظم العنفة، تم اختيار مناسب بقيمة مرجعية للسرعة عند (1pu) وقيمة الانخفاض هي (0.02pu) والقيمة العظمى للعزم (1.2pu) والقيمة الصغرى (0.3pu). وربطت المولدات عن طريق محولات الاستطاعة الملائمة. كما وصلت الأحمال إلى قضبان التجميع كما وردت في المعطيات المتعلقة بالشبكة السورية، أما الأحمال فقد تم تمثيلها باستخدام نموذج الحمل باستطاعة فعلية وردية ثابتة. يوضح الشكل(8) نموذج الشبكة المعدة للدراسة ضمن البيئة البرمجية PSAT قبل وجود نظام الـ UPFC، والشكل(9) نموذج الشبكة مع وجود نظام الـ UPFC، حيث تم ربط النظام UPFC بين قضيبي تجميع الحسكة وتل حمد، أي بين قضيب التجميع13، وقضيب التجميع14 في الشكل(7). سيتم دراسة أثر ربط نظام التحكم بجريان الاستطاعة الموحد UPFC على جريان الاستطاعة وتوترات قضبان التجميع وعلى زاوية الدائر (الاستقرار العابر) والتوتر عند حدوث قصر ثلاثي الطور متناظر.

3-1 دراسة جريان الاستطاعة وتوترات قضبان التجميع قبل وبعد ربط نظام الـUPFC:

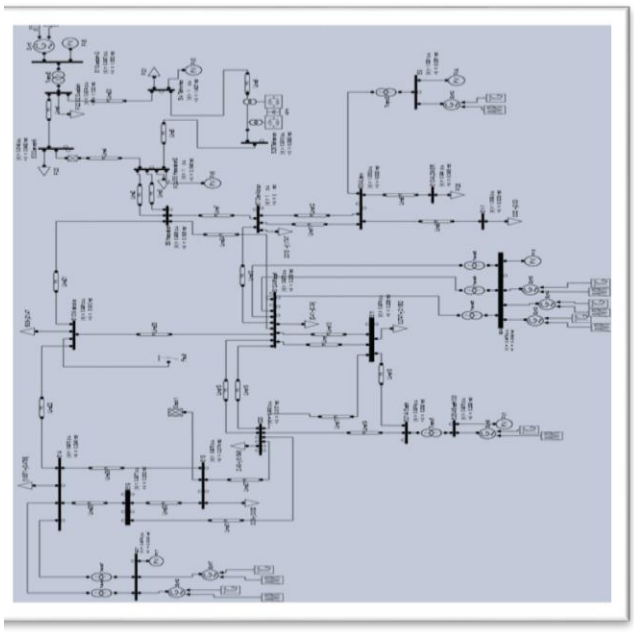
تمت دراسة جريان الاستطاعة في حالتين: الأولى قبل تركيب نظام التحكم الموحد بجريان الاستطاعة UPFC، والثانية بعد

http://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.php/index/index
ISSN (online): 2789-6854

تركيب النظام بالقرب من قضيب تجميع تل خميس. ثم أخذت جميع توترات قضبان التجميع قبل وبعد تركيب نظام الـUPFC، وكذلك جريان الاستطاعة في خطوط النقل، يبين الجدولان(2) و(3) نتائج جريان الحملة (التوترات قبل وبعد الربط، والاستطاعات المولدة، والشكلين (10)، (11) تغيرات التوتر وجريان الاستطاعة في جميع خطوط الجزء المدروس من الشبكة. كما يتضح من النتائج أن توترات قضبان التجميع القريبة من مكان التركيب قد تحسنت بعد الربط بشكل واضح، وقد أصبحت قريبة من (1. p. u.) تقريباً، وأصبح هبوط التوتر ضمن الحدود المسموح بها، وأقل من (5%). كما هو مبين في الشكل(10). كما أن الاستطاعات المنقولة على خطوط النقل قد زادت أيضاً، وبالمقابل تنخفض الضياعات الفعلية والردية، (الشكل(11)).



الشكل(8) نموذج الشبكة من دون وجود نظام الـ UPFC



الشكل (9) نموذج الشبكة المدروسة بوجود الـ UPFC

http://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.php/index/index
ISSN (online): 2789-6854

الجدول(2) نتائج النمذجة قبل ربط نظام UPFC

POWER FLOW RESULTS

Bus	V	phase	P gen	Q gen	P load	Q load
	[p.u.]	[rad]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	
1 B1 Swedeh	1	-0.04918	1.2	0.34086	0	0
2 B9	1	-0.03656	0.88	0.35326	0	0
3 B1-1	0.97738	-0.02643	0	0	6e-005	9e-005
4 B10 ALDWER	0.97684	-0.02657	0	0	0.0033	0.00089
5 B11	0.99987	0.03202	0	0	0.2747	0.1062
6 B12 AlRaqa	0.99991	0.03292	0	0	0.41	0.34
7 B13 Mabrok	0.99117	0.00356	0	0	0.698	0.2147
8 B14	0.99996	0.01783	0	0	1.6571	0.4756
9 B15	1.0007	0.00835	0	0	0.33	0.032
10 B19	1.0008	0.01137	0	0	0	0
11 B2 Swedieh	0.96313	-0.03828	0	0	0.3	0.224
12 B20	1	0	-3.1899	0.51713	2.49	0.61546
13 B21 Al Bae	0.99991	0.02712	0	0	0	0
14 B24	1	0.0329	8	1.4002	0	0
15 B25 AlBaet	1	0.02713	0.8	-0.02176	0	0
16 B27	1	0.01782	2.64	0.39978	0	0
17 B3 Qameshl	0.95502	-0.06439	0	0	1.2039	0.61565
18 B4 Talhmh	0.96389	-0.04726	0	0	0.5	0.226
19 B5 Hassak	0.96921	-0.04062	0	0	0.37575	0.1503
20 B6 Hassake	0.97927	-0.02114	0	0	0	0
21 B7 Der Alz	0.97128	-0.0333	0	0	2.013	1.1747
22 B8 ALtaim	0.97543	-0.02643	0	0	0	0

http://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.php/index/index
ISSN (online): 2789-6854

LINE FLOWS

From Bus	To Bus	Line	P Flow [p.u.]	Q Flow [p.u.]	P Loss [p.u.]	Q Loss
B3 Qameshli	B2 Swedieh	1	-0.59538	-0.21795	1e-005	-0.05156
B12 AlRaqa1	B7 Der Alz	2	0.96954	0.40184	5e-005	-0.04277
B8 ALtaim	B7 Der Alz	3	0.42574	0.25221	0	-0.0228
B8 ALtaim	B7 Der Alz	4	0.42574	0.25221	0	-0.0228
B11	B12 AlRaqa	5	-0.96369	-0.04153	0	-0.00085
B11	B12 AlRaqa	6	-0.96369	-0.04153	0	-0.00085
B20	B12 AlRaqa	7	-1.3781	0.00513	3e-005	0.00114
B20	B12 AlRaqa	8	-1.3781	0.00513	3e-005	0.00114
B20	B11	9	-1.3278	0.00503	3e-005	-0.00214
B21 Al Baet	B11	10	-0.3249	-0.01034	0	-0.02632
B21 Al Baet	B20	11	1.1248	-0.01141	2e-005	-0.01415
B6 Hassakeh	B5 Hassak	12	0.6138	0.30563	1e-005	-0.03768
B13 Mabroka	B6 Hassake	13	0.73872	0.34244	1e-005	-0.03576
B14	B13 Mabrok	14	0.18162	0.04191	0	-0.13944
B4 Talhmhe	B2 Swedieh	15	-0.25672	-0.00397	0	-0.05349
B12 AlRaqa1	B6 Hassake	16	0.68096	0.21163	3e-005	-0.0987
B12 AlRaqa1	B13 Mabrok	17	1.2551	0.37337	2e-005	-0.00242
B15	B20	18	0.21016	-0.01855	0	-0.07198
B14	B19	19	0.38734	-0.06587	0	-0.0284
B14	B15	20	0.41383	-0.05186	0	-0.03851
B6 Hassakeh	B5 Hassak	21	0.6138	0.30563	1e-005	-0.03768
B19	B15	22	0.12633	-0.01712	0	-0.04392
B19	B20	23	0.26101	-0.02035	0	-0.07782
B5 Hassake	B3 Qameshl	24	0.60856	0.35571	1e-005	-0.04199
B5 Hassake	B4 Talhmh	25	0.24328	0.18062	0	-0.04141
B7 Der Alzo	B6 Hassake	26	-0.19203	-0.18007	0	-0.10281
B8 ALtaim	B10 ALDWER	27	0.0033	-0.06944	0	-0.07033
B8 ALtaim	B1-1	28	6e-005	-0.08171	0	-0.0818
B25 AlBaeth	B21 Al Bae	29	0.8	-0.02176	7e-005	0
B1 Swedeh-	B2 Swedieh	30	1.2	0.34086	0.04789	0
B9	B8 ALtaim	31	0.88	0.35326	0.02515	0
B24	B12 AlRaqa	32	2.6667	0.46673	0.00025	0
B24	B12 AlRaqa	33	2.6667	0.46673	0.00025	0
B24	B12 AlRaqa	34	2.6667	0.46673	0.00025	0
B27	B14	35	1.32	0.19989	6e-005	0
B27	B14	36	1.32	0.19989	6e-005	0

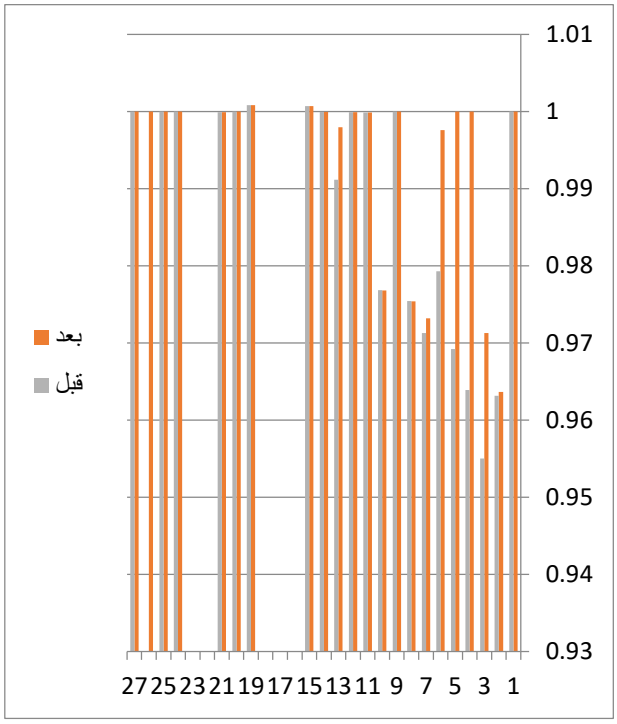
http://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.php/index/index
ISSN (online): 2789-6854

الجدول(3) نتائج النمذجة بعد ربط نظام UPFC

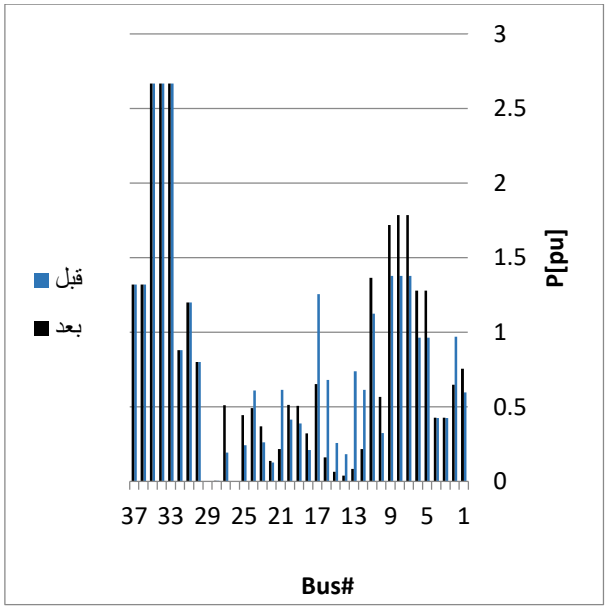
POWER FLOW RESULTS						
Bus	V	phase	P gen	Q gen	P load	Q load
	[p.u.]	[rad]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
1 B1 Swedeh	1	0.0858	1.2	-1.0881	0	0
2 B9	1	0.00245	0.88	0.10262	0	0
3 B1-1	0.97733	0.00539	0	0	6e-005	9e-005
4 B10 ALDWER	0.97679	0.00525	0	0	0.0033	0.00089
5 B11	0.99986	0.04145	0	0	0.2747	0.1062
6 B12 AlRaqa	0.99991	0.04264	0	0	0.41	0.34
7 B13 Mabrok	0.99797	0.02748	0	0	0.698	0.2147
8 B14	0.99996	0.02453	0	0	1.6571	0.4756
9 B15	1.0007	0.01278	0	0	0.33	0.032
10 B19	1.0008	0.01607	0	0	0	0
11 B2 Swedieh	0.96366	0.05105	0	0	0.3	0.224
12 B20	1	0	-4.8547	0.57493	2.49	0.61546
13 B21 Al Bae	0.99991	0.03293	0	0	0	0
14 B24	1	0.04263	8	0.84057	0	0
15 B25 AlBaet	1	0.03293	0.8	-0.01243	0	0
16 B26 Talham	1	0.04807	0	0	0	0
17 B27	1	0.02453	2.64	0.31632	0	0
18 B3 Qameshl	0.97129	0.0185	0	0	1.2453	0.63679
19 B4 Talhmh	1	0.04886	0.88	1.2962	0.5	0.226
20 B5 Hassak	1	0.03674	0.88	1.0079	0.4	0.16
21 B6 Hassake	0.99759	0.03019	0	0	0	0
22 B7 Der Alz	0.9732	-0.00149	0	0	2.013	1.1747
23 B8 ALtaim	0.97539	0.00539	0	0	0	0

LINE FLOWS						
From Bus	To Bus	Line	P Flow	Q Flow	P Loss	Q Loss
			[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
B3 Qameshli	B2 Swedieh	1	-0.75496	0.16121	2e-005	-0.04392
B12 AlRaqa1	B7 Der Alz	2	0.64781	0.35526	2e-005	-0.08022
B8 ALtaim	B7 Der Alz	3	0.42734	0.12688	0	-0.02365
B8 ALtaim	B7 Der Alz	4	0.42734	0.12688	0	-0.02365
B11	B12 AlRaqa	5	-1.2795	-0.04894	0	-0.0002
B11	B12 AlRaqa	6	-1.2795	-0.04894	0	-0.0002
B20	B12 AlRaqa	7	-1.785	0.02075	5e-005	0.0319
B20	B12 AlRaqa	8	-1.785	0.02075	5e-005	0.0319
B20	B11	9	-1.7186	0.01994	4e-005	0.0266
B21 Al	Baet B1	10	-0.56554	-0.0081	0	-0.02309
B21 Al	Baet B20	11	1.3655	-0.00433	3e-005	0.00031
B6 Hassakeh	B5 Hassak	12	-0.21695	-0.10684	0	-0.05408
B13 Mabroka	B6 Hassake	13	-0.08317	-0.01792	0	-0.05963
B14	B13 Mabrok	14	-0.03776	-0.04656	0	-0.14384
B4 Talhmhe	B2 Swedieh	15	-0.06426	1.0898	2e-005	-0.01714
B12 AlRaqa1	B6 Hassake	16	0.15981	-0.04116	0	-0.14153
B12 AlRaqa1	B13 Mabrok	17	0.65259	0.06671	1e-005	-0.0328
B15	B20	18	0.32147	-0.01824	0	-0.06962
B14	B19	19	0.50716	-0.06325	0	-0.02661
B14	B15	20	0.51338	-0.04947	0	-0.0364
B6 Hassakeh	B5 Hassak	21	-0.21695	-0.10684	0	-0.05408
B19	B15	22	0.13809	-0.01701	0	-0.04384
B19	B20	23	0.36906	-0.01962	0	-0.07486
B5 Hassake	B3 Qameshl	24	0.49034	0.76464	2e-005	-0.03337
B5 Hassake	B26 Talham	25	-0.44426	-0.02222	0	-0.04221
B26 Talhame	B4 Talhmh	26	-8731.075	-7985.0207	0	6.6241
B7 Der Alzo	B6 Hassake	27	-0.51053	-0.43816	2e-005	-0.0824
B8 ALtaim	B10 ALDWER	28	0.0033	-0.06944	0	-0.07033
B8 ALtaim	B1-1	29	6e-005	-0.0817	0	-0.0818
B25 AlBaeth	B21 Al Bae	30	0.8	-0.01243	7e-005	0
B1 Swedeh-	B2 Swedieh	31	1.2	-1.0881	0.08074	0
B9	B8 ALtaim	32	0.88	0.10262	0.02196	0
B24	B12 AlRaqa	33	2.6667	0.28019	0.00024	0
B24	B12 AlRaqa	34	2.6667	0.28019	0.00024	0
B24	B12 AlRaqa	35	2.6667	0.28019	0.00024	0
B27	B14	36	1.32	0.15816	6e-005	0
B27	B14	37	1.32	0.15816	6e-005	0

http://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.php/index/index
ISSN (online): 2789-6854



الشكل(10) مخطط توترات قضبان التجميع قبل وبعد ربط النظام



الشكل (11) مخطط جريان الاستطاعة الفعلية في الخطوط قبل وبعد ربط النظام

3-2 دراسة الاستقرار العابر للسرعة الزاوية للمولدات عند إجراء قصر ثلاثي الطور متناظر:

يعرف الاستقرار بأنه قدرة النظام على العودة إلى شروط التشغيل الطبيعية بعد تعرضه لاضطراب ما. ويقصد بالطبيعية هنا نقطة عمل متوازنة تكون فيها محددات النظام الرئيسية (التوتر، وزوايا الطور، والتردد) ضمن مجالات مقبولة كما هي موضوعة من قبل مشغلي النظام بحيث تبقى بشكل عام طبوغرافية الشبكة سليمة دون أن يؤدي تفعيل تجهيزات الحماية والتحكم عند حدوث الاضطراب إلى فقدان الأجزاء الرئيسية من النظام أو تجزئة الشبكة إلى جزر وهو الإجراء المتبع عادة لتجنب حدوث الانهيار الكامل للنظام.

بالعودة إلى محددات الشبكة السورية، فقد تبين أن زمن الفصل الحرج (وهو أطول زمن مسموح به للعطل دون خروج المولدات عن التزامن) لهذه الشبكة هو 500ms، وقد أعتمد هذا الزمن كفترة استمرار حدوث العطل. أجريت حالة عطل قصر ثلاثي الطور على قضيب تجميع المبروكة على سبيل المثال، ذلك لأن هذا النوع من أنواع القصر هو الأخطر على الشبكة الكهربائية، تمت بعد ذلك مناقشة حالة الاستقرار العابر للسرعة الزاوية (زاوية الدائر) لكافة مولدات النظام المدروس. وتبين مجموعة الأشكال (12، 13، 14، 15، 16) تغير السرعة الزاوية مع الزمن للمولدات قبل وبعد الربط، يشير الخط المتصل للسرعة الزاوية بعد الربط والخط المنقط للسرعة قبل الربط. تمت عملية النمذجة للشبكتين بآن واحد أي أن أرقام المولدات قبل تركيب نظام التحكم الموحد بجريان الاستطاعة وبعد كما يلي:

مجموعات التوليد في السويدية: رقمها قبل الربط 9 وبعد الربط 1.

مجموعات التوليد في التيم: رقمها قبل الربط 10 وبعد الربط2.

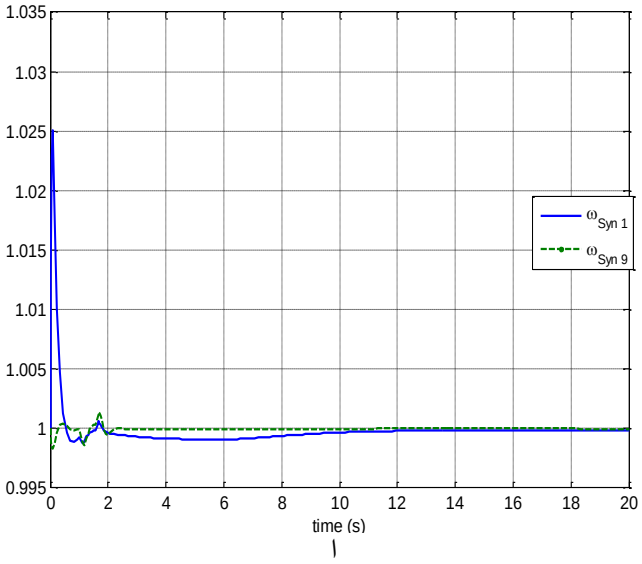
http://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.php/index/index
ISSN (online): 2789-6854

مجموعات التوليد في باسبار الرقة2 (والتي تعوض عن الخطوط التي تم قطعها): رقمها قبل الربط 11 وبعد الربط 3.

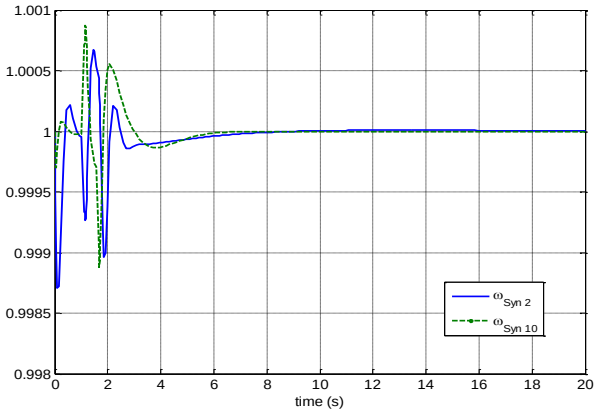
مجموعات التوليد في محطة البعث: رقمها قبل الربط14 وبعد الربط 6.

مجموعات التوليد في محطة تشرين: رقمها قبل الربط16 و بعد الربط8.

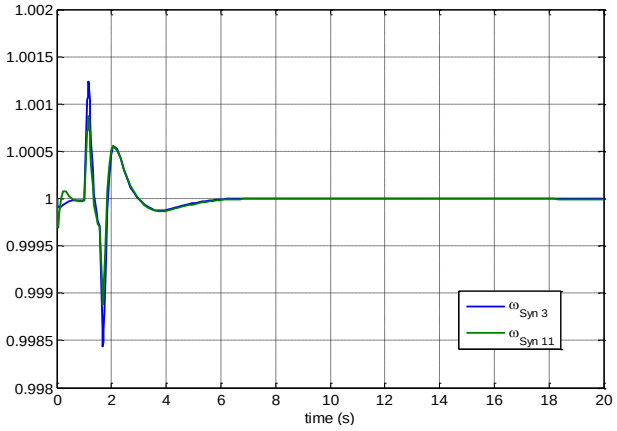
يلاحظ أن المولدات أصبحت أكثر استقراراً في الحالة العابرة بعد تركيب نظام التحكم الموحد بجريان الاستطاعة في معظم محطات التوليد، حيث أن أهم نقطة هي الهزة الأولى (المنحني غير المنقط) والتي تحدد هل سيبقى المولد مستقراً أم سيخرج عن الاستقرار، بالنسبة للمولد رقم1 والموافق له قبل الربط رقم9 فإن السرعة الزاوية أقل اهتزازاً في البداية للمولد رقم1 منه للمولد رقم9 قبل الربط، ثم يصبح منحني السرعة الزاوية أكثر استقراراً بعد الربط و يتضح ذلك في الشكل (12)، ويعود السبب في ذلك لانخفاض التوتر بشكل كبير عند حدوث القصر (تيار القصر الردي الكبير)، ومع ذلك فقد حافظ المولد على الاستقرار، أما المولد رقم3 والموافق رقم11، فقد كانت منحنيات السرعة الزاوية متطابقة تقريباً (الشكل(12)). ويلاحظ أنه بالنسبة لبقية المولدات فإنها أصبحت أكثر استقرارا أثناء الحالة العابرة بعد تركيب نظام التحكم الموحد بجريان الاستطاعة كما هو مبين في الأشكال (14) و (15) و(16).



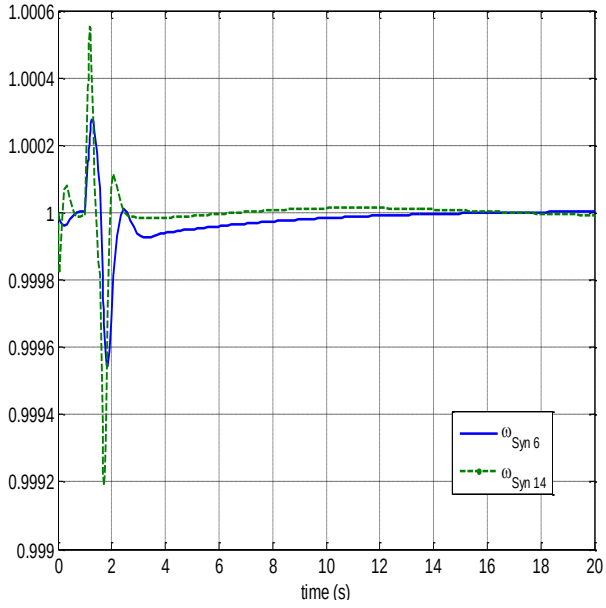
الشكل (12) السرعة الزاوية للمولدين رقم1 ورقم9 الموافق له



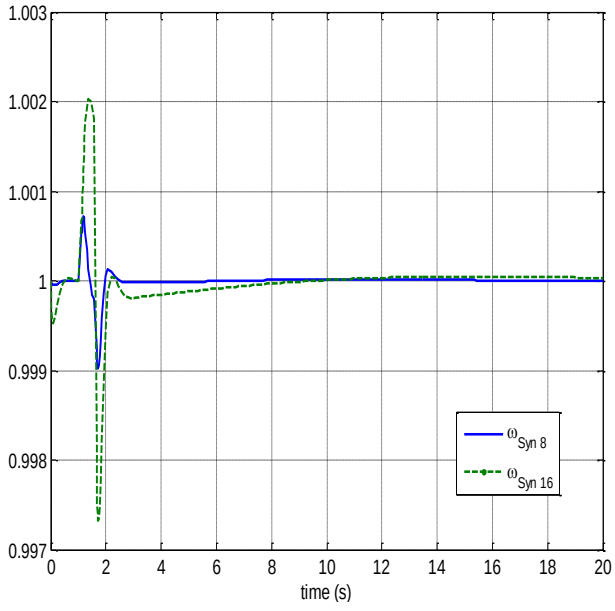
الشكل (13) السرعة الزاوية للمولدين رقم2 ورقم10 الموافق له



الشكل (14) السرعة الزاوية للمولدين رقم3 ورقم11 الموافق له



الشكل (15) السرعة الزاوية للمولدين رقم6 ورقم14 الموافق له

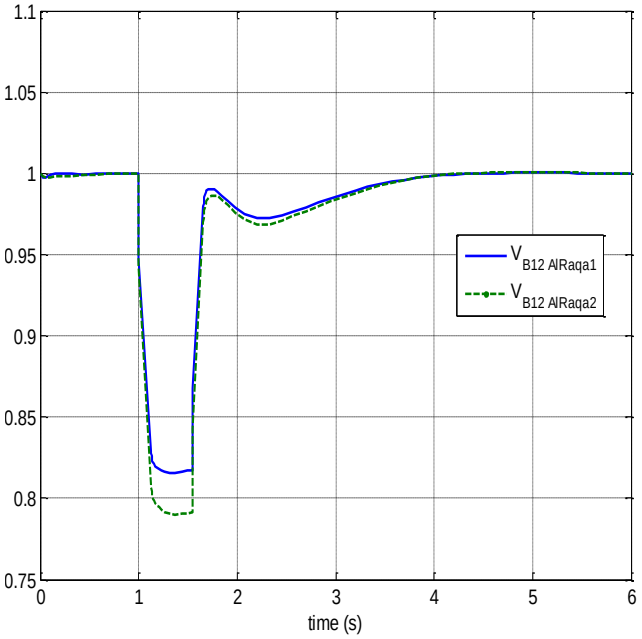


الشكل (16) السرعة الزاوية للمولدين رقم8 ورقم16 الموافق له

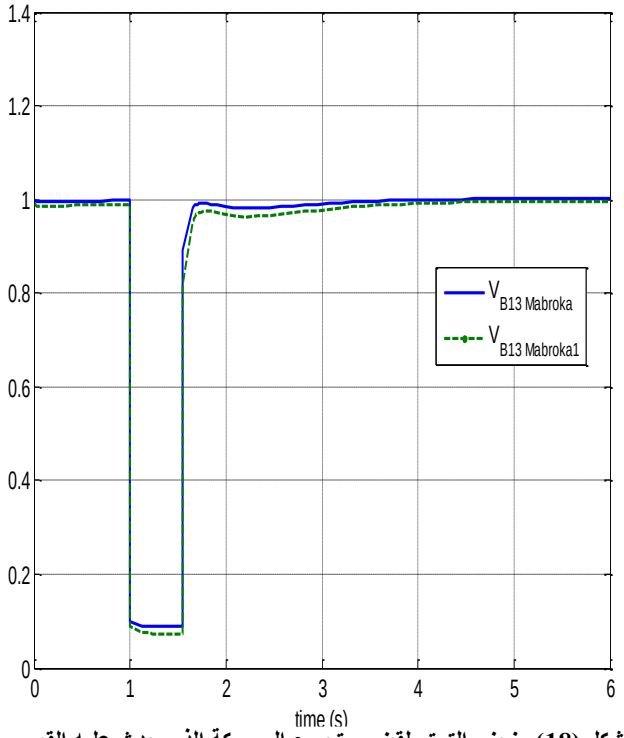
3-3 دراسة منحني توترات قضبان التجميع عند إجراء قصر ثلاثي الطور متناظر:

عند حدوث قصر ثلاثي الطور، يُدرس منحني التوتر لعدة قضبان تجميع بوجود وعدم وجود نظام UPFC، وذلك عند زمن فصل الحرج المذكور سابقاً. يبين الشكل (17) منحنيات التوتر لقضبان تجميع الرقة قبل وبعد الربط، كما هو واضح في هذا الشكل فإن هبوط التوتر أثناء العطل أقل بوجود نظام الـUPFC، كما أن التوتر يعود بسرعة إلى قيمته الاسمية بشكل أسرع منه في حالة عدم وجود النظام. وكذلك الحال بالنسبة لقضبان تجميع الحسكة1 وديرالزور والتيم، حيث تبين الأشكال (18، 19، 20، 21) أن وجود نظام UPFC سوف يعمل على تحسين منحني التوتر أثناء وبعد حدوث العطل.

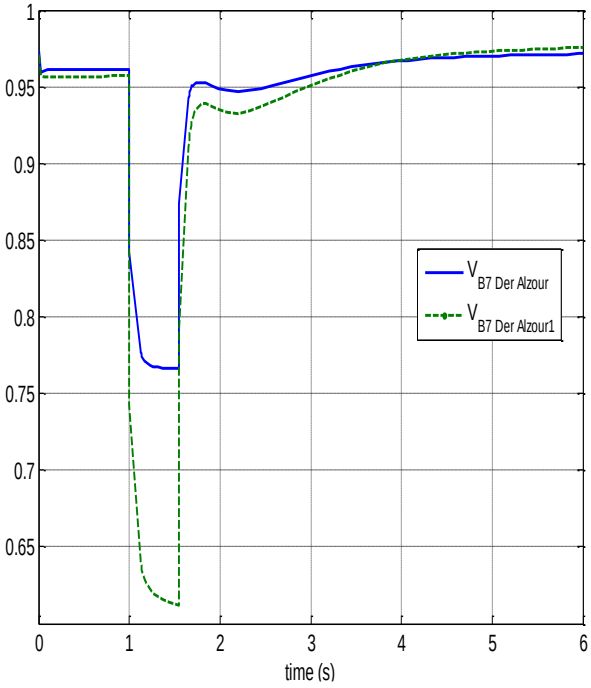
أما بالنسبة لقضيب تجميع المبروكة فإن وجود النظام يحسن من مدى انخفاض التوتر ويعود التوتر خلال نفس الزمن لقيمة أكبر عند رفع العطل كما هو مبين في الشكل(19) حيث يمثل الخط المنقط منحنى التوتر قبل ربط نظام الـ UPFC أما الخط المتصل فيمثل منحني التوتر بعد ربط النظام. بالنسبة لبقية توترات قضبان التجميع الأخرى فقد تحسنت بعد ربط النظام UPFC كما هو موضح في الأشكال (19، 20، 21).



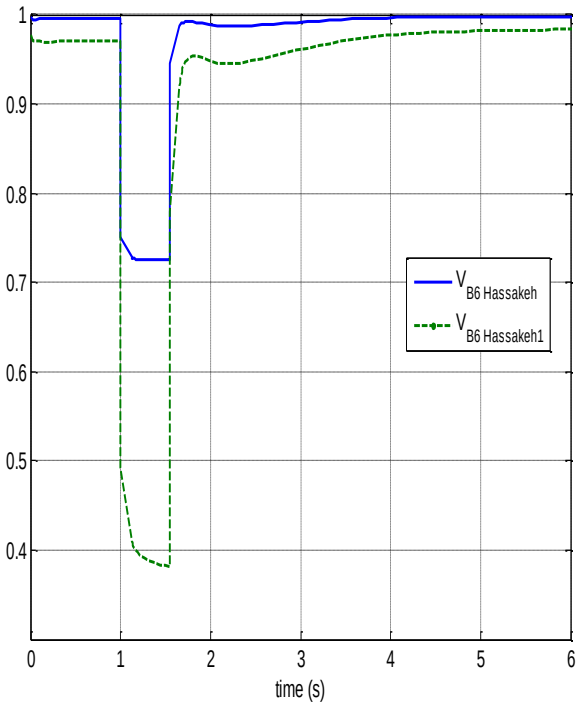
الشكل (17) منحني التوتر لقضيب تجميع الرقة1



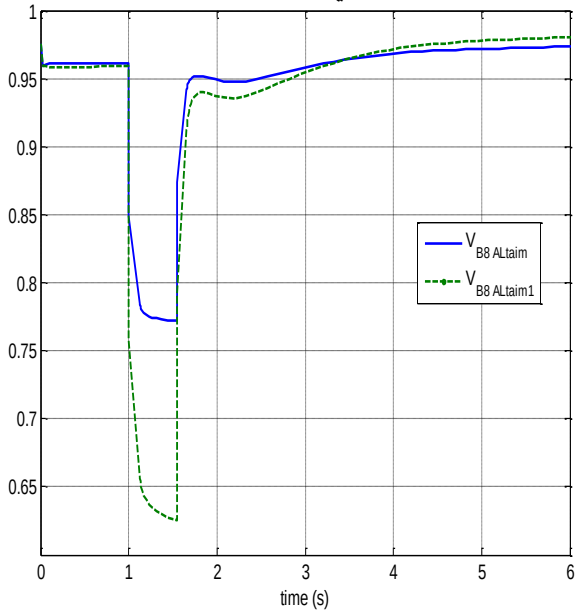
الشكل (18) منحني التوتر لقضيب تجميع المبروكة الذي حدث عليه القصر الثلاثي الطور



الشكل (20) منحني التوتر لقضيب تجميع دير الزور



الشكل (19) منحني التوتر لقضيب تجميع الحسكة1



الشكل (21) منحني التوتر لقضيب تجميع التيم

يمكن من خلال مناقشة الحالات المدروسة قبل وبعد ربط نظام UPFC في الشبكة المدروسة استنتاج ما يلي:

أثَّر هذا النظام في تحسين توترات قضبان التجميع وخاصة القريبة من مكان التركيب، مما يؤدي دوراً في تحسين جريان الاستطاعة، وذلك في حالة العمل المستقرة.

استخدام أمثل لخطوط نقل القدرة، حيث أدى النظام إلى تحسين جريان الاستطاعة بشكل أفضل، وهذا بدوره يساهم في تخفيض الضياعات.

يدعم هذا النظام موثوقية عمل شبكة النقل، وتزداد جودة التغذية لكافة أنواع الأحمال، ويوفر ذلك الخسارة الناجمة عن الانقطاعات.

زيادة الاستقرار العابر لمجموعات التوليد.

انخفاض هبوط التوتر أثناء حدوث القصر.

4 الخاتمة:

أجرت هذه الدراسة دراسة تجريبية حول مقدرة نظام UPFC للعمل في حالة العمل الطبيعي وأثناء الحالة العابرة على الجزء الشرقي من شبكة التوتر العالي 230kV السورية. إن وجود نظام الـUPFC يساعد على الحصول على حالة تشغيل أفضل للشبكة في الحالة المستقرة. وبالنسبة لأدائه أثناء الحالة العابرة وأثره على الاستقرار الديناميكي، فقد تبين أن مجموعات التوليد أصبحت أكثر استقراراً، وأن هبوط التوتر أثناء حدوث قصر ثلاثي الطور متناظر لكافة قضبان التجميع المدروسة والقريبة من مكان تركيب النظام أفضل، ويعود التوتر إلى قيمة أعلى عند رفع العطل في حالة وجود النظام، وهذا بدوره يساهم بشكل كبير في تحسين شكل منحني التوتر لشبكة التوتر العالي المدروسة.

التمويل: هذا البحث ممول من جامعة دمشق وفق رقم التمويل (501100020595).

(2019) 012068, doi:10.1088/1757-899X/673/1/012068.
[12] N. S. Samara,''Flexible AC Transmission Systems (FACTS)'', Master of Science in Electrical Engineering, Department of Electrical & Computer Engineering, California State Polytechnic University, Pomona, 2022.
[13] T. ALLAOUI M. A. DENAÏ M. BOUHAMIDA C. BELFEDAL, "ROBUST CONTROL OF UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER (UPFC)" ISTANBUL UNIVERSITY – JOURNAL OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING. 2007.
[14] ABB, "Power Oscillation Damping," 2019.
[15] Ajit K. Jadhav, V.A. Kulkarni, "Improvement in Power System Stability Using SSSC Based Damping Controller", 2018 International conference on Smart Electric Drives and Power System, 2018 IEEE.

References:

1] Therese Okeke and Ramy Zaher Flexible AC Transmission Systems (FACTS) published IEEE Conference, 2013.
[2] Michael Bocovich and Ned Mohan "Overview of Series Connected Flexible AC Transmission Systems (FACTS)", published IEEE Conference, 2013.
[3] P. H. Kathar, S. S. Mopari,"Comparative Analysis Of STATCOM And SSSC To Improve Voltage Stability And Loss Reduction", INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC & TECHNOLOGY RESEARCH VOLUME 8, ISSUE 12, DECEMBER 2019 ISSN 2277-8616.
[4] Tariq Masood, S.A. Qureshi "FACTS Control Devices (STATCOM, SSSC and UPFC) Re-Configuration Techniques By PSIM/MATLAB" IEEE-ICEE 9-12th April,2017, Lahore Pakistan.
[5] X.Y Zhou and R.K Aggarwal "Detailed modelling and simulation of UPFC using EMTP" published IEEE Conference, 2014.
[6] C. Dinkaran, "Implementation of Series and Shunt FACTS Devices for Transmission Lines" Vol. 06, (2015) No.08 pp. 2009-2017.
[7] Muasam Yadav and Anukar Soni "Improvement of power flow and voltage stability using unified power flow controller" published in ICEEOT 2016.
[8] Acharya, Naresh & Sode-Yome, A. & Nadarajah, Mithulananthan. (2005). Facts about flexible AC transmission systems (FACTS) controllers: Practical installations and benefits.
[9] S. Monemi, N. S. Samara, "Flexible AC Transmission Systems (FACTS)", Master thesis, California State Polytechnic University, Pomona, 2022.
[10] P, Kumkratug, Coordination of Series and Shunt Flexible AC Transmission System Devices Based Voltage Source Converter for Improving Power System Stability, American Journal of Applied Sciences 8 (5): 495-498, 2011 ISSN 1546-9239.
[11] B C Wibawa, A Prastiantono, D R Aryani, R Setiabudy and F Husnayain. "Transient stability improvement by FACTS devices: A Comparison between STATCOM and SSSC in an extra high voltage transmission system', IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 673