

## Control Of Shunt Converter For DPFC Distributed Power Transmission System

Dr. Faisal SHAaban\*  
Dr. Nasmata Abu-Tabaq\*\*  
Ahmad Ali\*\*\*

(Received 12 / 12 / 2021. Accepted 22 / 3 / 2022)

### □ ABSTRACT □

Flexible AC Transmission Systems (FACTS) are the best systems for controlling the power flow in electrical grids, but the difficulty of installing, designing and high their high price has significantly reduced their use.

The recent emergence of the Distributed Static Series Compensator (DSSC) as a basic development of Static Synchronous Compensator (SSSC) has contributed to a significant development in the reduction of the design costs of this equipment, especially if the costs of manufacturing the Unified Power Flow Controller (UPFC), And Distributed Power Flow Controller (DPFC).

In this research, we provided a control method in the Shunt Converter of the DPFC system based on finding the mathematical model represented to make this template, adjusting the PID controller parameters, and controlling the DC-Link continuous current effort on both ends of the capacitor effort used in the branching block, using radiological control, Pulse Width Modulation (PWM), and optimal lengthening method.

Our results showed the ability of this method to accurately and effectively control the amount of reactive capacity provided by the branching mold of the network, and to automate the values required of it, as we were able through the method provided by DC-Link voltage control on the condenser of the branch template at fixed values, and adjust the efforts of the electrical transport network bars.

The recent emergence of the DSSC as a basic development of SSSC has contributed to a significant development in the reduction of the design costs of this equipment, especially if the costs of manufacturing the UPFC unified regulator are considered as the best FACTS devices, especially the recent development that led to the emergence of the DPFC distributed regulator.

**Keywords:** electrical transmission networks, electrical power flow control, reactive capacity, actual capacity, flexible power transmission systems, differential integrative proportional control.

---

\* Professor, Electrical Power Department, Faculty Mechanical & Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria, dr.faisalslemanshaaban@tishreen.edu.sy.

\*\*Assistant Professor, Electrical Power Department, Faculty Mechanical & Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria, dr.nesmatobotabak@tishreen.edu.sy

\*\*\* PhD Student, Electrical Power Department, Faculty Mechanical & Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria, ahmad.m.ali@tishreen.edu.sy

## التحكم بالقالبة التفرعية Shunt Converter لنظام نقل الطاقة الكهربائية الموزع DPFC

د. فيصل شعبان\*

د. نسمة أبو طبق\*\*

احمد علي\*\*\*

تاريخ الإيداع 12 / 12 / 2021. قُبِلَ للنشر في 22 / 3 / 2022

### □ ملخص □

تعد أنظمة نقل الطاقة الكهربائية المرنة FACTS من أفضل الأنظمة للتحكم بسريان الاستطاعة الكهربائية في الشبكات الكهربائية، ولكن صعوبة تركيبها وتصميمها وارتفاع ثمنها الكبير حد من استخدامها بشكل كبير. ساهم ظهور الـ DSSC مؤخراً كتطوير أساسي عن SSSC في الحد من التكاليف التصميمية لهذه المعدات، وخاصة بتخفيض تكاليف تصنيع منظم سريان الاستطاعة الموحد الـ UPFC ومنظم سريان الاستطاعة الموزع الـ DPFC. قدمنا في هذا البحث طريقة للتحكم في القالبة التفرعية لنظام DPFC تعتمد على إيجاد النموذج الرياضي الممثل لعمل هذه القالبة، ضبط ثوابت المتحكم PID، والتحكم في جهد التيار المستمر DC-Link على طرفي جهد المكثف المستخدم في القالبة التفرعية، وذلك باستخدام التحكم الشعاعي، التعديل العرضي للنبضة، وطريقة المطال الأمثل. أظهرت النتائج التي حصلنا عليها قدرة هذه الطريقة على التحكم الدقيق والفعال بكمية الاستطاعة الردية التي تقدمها القالبة التفرعية للشبكة، والملاحقة الآلية للقيم المطلوبة منها، كما استطعنا من خلال الطريقة المقدمة التحكم بالجهد DC-Link على طرفي مكثف القالبة التفرعية عند قيم ثابتة، وضبط جهود بارزات شبكة النقل الكهربائية.

**الكلمات المفتاحية:** شبكات النقل الكهربائية، التحكم بسريان الاستطاعة الكهربائية، الاستطاعة الردية، الاستطاعة الفعلية، أنظمة نقل التيار الكهربائي المرنة، المتحكم التناسبي التكاملية التفاضلية.

\* استاذ، هندسة الطاقة الكهربائية، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية.

dr.faisalslemanshaaban@tishreen.edu.sy

\*\* مدرس، هندسة الطاقة الكهربائية، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية.

dr.nesmatobotabak@tishreen.edu.sy

\*\*\* طالب دكتوراه، هندسة الطاقة الكهربائية، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية.

ahmad.m.ali@tishreen.edu.sy

**مقدمة:**

استخدمت العديد من الطرق لتحسين عملية نقل الطاقة الكهريائية من محطات التوليد الكهريائية الى المستهلكين، وذلك من خلال الحد من نقل الاستطاعة الردية عبر شبكات نقل الطاقة الكهريائية وتعويضها من معدات مساعدة يتم اضافتها الى شبكات نقل الطاقة الكهريائية، مع امكانية التحكم في بارامتر أو أكثر من بارامترات الشبكة الكهريائية. نذكر من هذه الطرق:

- طريقة الاستثارة للمولد Generator Excitation انطلاقاً من اعتبار أن المولدات تستطيع ان تعطي للشبكة أو تسحب منها استطاعة ردية الى حد معين. [1]
- المعوضات التزامنية Synchronous Compensator للتحكم في الجهد والاستطاعة الردية للجهود العالية والمتوسطة في شبكات نقل القدرة الكهريائية. [2]
- المفاعلات الحثية الموصولة على التفرع Shunt Reactors مع شبكات الجهد العالي لسحب الاستطاعة الردية السعوية الزائدة المولدة.
- المكثفات المتصلة على التسلسل Series Capacitors في موقع أو أكثر على طول خط النقل لتعويض جزء من المفاعلة الحثية لخط النقل. [3]
- المكثفات المتصلة على التفرع Shunt Capacitors، وعادة ما توصل على التوازي بصفة دائمة عند الأحمال ذات معامل القدرة المتدني. [4]
- الخطوط المدمجة.
- محولات الازاحة الطورية PST.

جميع الطرق السابقة كانت تعاني من مشاكل تتعلق بالموثوقية والامان والاستقرار. فكان لتطور الكهرونيات القدرة الكهريائية خلال العقود الأخيرة الفضل في التفكير بالانتقال كلياً الى فصل ووصل آلي لهذه المعدات الى الشبكة الكهريائية، وهكذا تم تصميم وتصنيع أجهزة Flexible AC Transmission System (FACTS). [5-8]

تطورت أجهزة FACTS منذ ظهورها تبعاً لاستخدامها وطرق تركيبها، حيث ظهر المعوض الستاتيكي للاستطاعة الردية Compensator (SVC static VAR) وهو عملياً ربط لمكثفات وملفات الى شبكة النقل الكهريائية عبر مفاتيح الكهرونية [9-10]، ثم ظهر المعوض الستاتيكي التزامني Static Synchronous Compensator (STATCOM) وهو عبارة عن مكثف مربوط تفرعياً مع شبكة النقل الكهريائية عبر قابلية ثايرستورية متحكم بها [11]، أيضاً تم تطوير المعوضات التسلسلية وظهر المعوض الستاتيكي التزامني التسلسلي Static Synchronous Compensator (SSSC) الذي يربط تسلسلياً مع خطوط نقل الطاقة الكهريائية [12]، وجميع هذه الأنظمة تعمل على مهمة واحدة سواء بتنظيم الجهد أو حقن وامتصاص الاستطاعة الردية من الشبكة... الخ، وهكذا حتى طور العلماء أنظمة مدمجة تعمل على الربط بين نظام تسلسلي من أنظمة التعويض وآخر تفرعي مثل منظم سريان القدرة الموحد Unified Power Flow Controller (UPFC) [13]، و ال Interline Power Flow Controller (IPFC) [14].

يعد منظم سريان القدرة الموحد Unified Power Flow Controller (UPFC) أشهر أجهزة FACTS وأكثرها قدرة على التحكم في بارامتر أو أكثر من بارامترات الشبكة بأن واحد، و هو توليفة من المعوض الستاتيكي التزامني التفرعي (STATCOM) والمعوض الستاتيكي التزامني التسلسلي (SSSC). [15]

أعلن البرفسور ديباك ديفان عن قيامه بتوزيع الـ SSSC من جهاز واحد مكلف ومعقد الى عدة اجهزة موزعة عبر ابراج الشبكة الكهربائية عن طريق فك الارتباط بين الأطوار الثلاثة من جهة، والتعويض احادي الطور لكل طور على حدا، مع تصميم محولات تيار ملفها الأولي خط النقل وملفها الثانوي وشيعة معزولة، وبذلك استطاع التخلص من جميع تكاليف العزل وثمان المحولات الثلاثية الطور التسلسلية الغالية جداً، ووضع اللبنة الاولى في طريق فك التعقيد في انظمة FACTS وأعلن عن جهازه الجديد (DSSC) Distributed Static Series Compensator الذي لا يتجاوز وزنه 15Kg ويركب مباشرة على برج النقل. [16]

على الرغم من أن أنظمة FACTS قدمت العديد من الفوائد إلا أنها لم تشهد قبولاً تجارياً واسع النطاق. بسبب ارتفاع تكاليفها، والمشاكل المتعلقة بموثوقيتها، ولذلك كان تطبيقها محدوداً في كثير من البلدان. في الآونة الأخيرة تم إدخال مفهوم Distributed-FACTS حيث ظهر المتحكم (DPFC) Distributed Power Flow Controller كبديل موثوق، منخفض التكلفة، صغير الحجم والوزن، والذي يحقق نفس وظائف UPFC مع الغاء وصلة الـ DC المشتركة، والمحولات الضخمة الغالية الثمن، اضافة الى كونه يتطلب عازليه أقل ومرونة أكبر في التحكم بسيان الاستطاعة. [17]

يتألف الـ DPFC من جزئين رئيسين، أحدهما يوصل تفرعياً مع شبكة النقل الكهربائية Shunt Converter ويشبه الى حد كبير بنية الـ STATCOM، والآخر تم تصميمه انطلاقاً من تطوير البرفسور ديفان للـ SSSC، وبذلك يمكن القول ان نظام الـ DPFC يتألف من الـ STSTCOM و الـ DSSC. [18]

سنقوم بهذا البحث باستخراج النموذج الرياضي للقالبية التفرعية Shunt Converter والتحكم بها باستخدام تقنية التحكم الشعاعي في ضبط ثوابت المتحكم PID، عبر استخدام طريقة تعديل عرض النبضة لاستخراج وضبط ثوابت التحكم بحلقة التيار، وطريقة المطال الأمثل لاستخراج وضبط ثوابت التحكم بحلقة الجهد.

## أهمية البحث وأهدافه:

### أهمية البحث:

**أولاً: من الناحية العلمية:** تأتي أهمية هذا البحث من الناحية العلمية كونه يدرس امكانية ربط القالبية التفرعية لنظام DPFC مع بارات الجهد المنخفض، مما يعني توفير كبير في سعر المحولات وتكاليف العزل، كما تتبع أهميته كونه سيؤدي الى نموذج رياضي يصف سلوك حلقات التحكم وبالتالي ثبات الجهد على مكثفات القالبية التفرعية، كما وسيتيح البحث امكانية حقن الاستطاعة الردية بشكل متحكم به او ملاحقتها آلياً.

**ثانياً: من الناحية الاقتصادية:** تأتي أهمية هذا البحث من الناحية الاقتصادية كونه يؤدي إلى زيادة السعة التمريرية لخطوط النقل الكهربائية، يخفض من تكاليف العزل والمحولات، وتوليد الاستطاعة الردية التي تحتاجها الأحمال مباشرة دون دفع تكاليف الوقود اللازمة لتوليدتها من محطات التوليد.

**ثالثاً: من الناحية البيئية:** خفض الوقود اللازم في محطات التوليد اللازمة لتوليد الاستطاعة من شأنه الحصول على نفس الاستطاعة المطلوبة مترافقاً مع أقل نسبة من انبعاثات وغازات الاحتراق في محطات التوليد، اضافة الى ان زيادة القدرة التمريرية للشبكة الكهربائية يؤدي الى الاعتماد على شبكتنا الحالية دون الحاجة لبناء شبكة جديدة وما يترتب عليه من استهلاك اراضي زراعية ومساحات خضراء لبناء أبراج نقل التوتر العالي ومد الشبكة وما يلزمها من محطات تحويل.

**أهداف البحث :** يهدف البحث الى

- نمذجة شبكة نقل الطاقة الكهربائية [230KV] المدروسة في بيئة MATLAB وعلاقتها الرياضية بما يسمح بحساب كافة بارامترات الشبكة وتأثيراتها.
- استخراج النموذج الرياضي للقابلية التفرعية Shunt Converter لنظام الـ DPFC.
- ضبط متحكمات الـ PID واستخراج علاقتها بعناصر الدارة.
- ضبط التوتر على طرفي المكثف بحيث نحصل على جهد ثابت ومستقر DC-Link.
- الملاحظة الآلية لاستهلاك الاستطاعة الردية بشكل آلي لتغطية حاجة الشبكة.
- امكانية ضبط البارامترات لتوليد الاستطاعة الردية المرغوبة وفق قيمة مرجعية.

**فرضيات البحث :** تتمثل فرضيات البحث بالنقاط التالية:

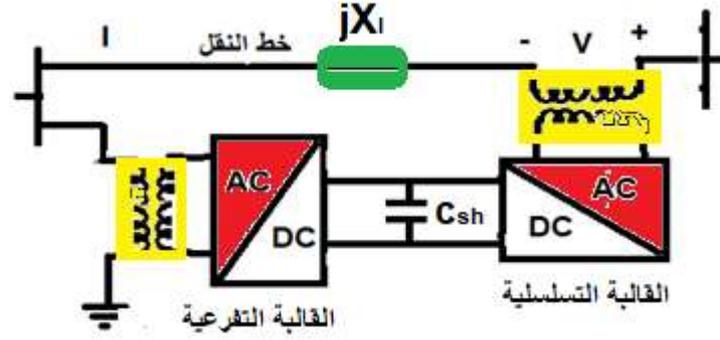
- استخراج ثوابت متحكم PID وربطها بعناصر القابلية التفرعية Shunt Converter.
- الحفاظ على جهد الـ DC-Link على طرفي مكثف القابلية التفرعية ثابتاً.
- ان يؤدي النظام المقترح الى جعل القابلية التفرعية تلاحق الاستطاعة الردية للشبكة بشكل آني.
- جعل القابلية التفرعية تمتص الاستطاعة الفعلية من الشبكة بالتردد الاساسي.
- قيام القابلية التفرعية بتقديم استطاعة فعلية الى شبكة النقل بالتردد التوافقي الثالث.
- تحسين بارامترات الجهد والتيار على بارات الشبكة المدروسة.
- التوفير اقتصادياً مع تقديم نفس امكانيات الـ UPFC.

**منهجية البحث**

تم اعتماد المنهج الوصفي التحليلي التجريبي.

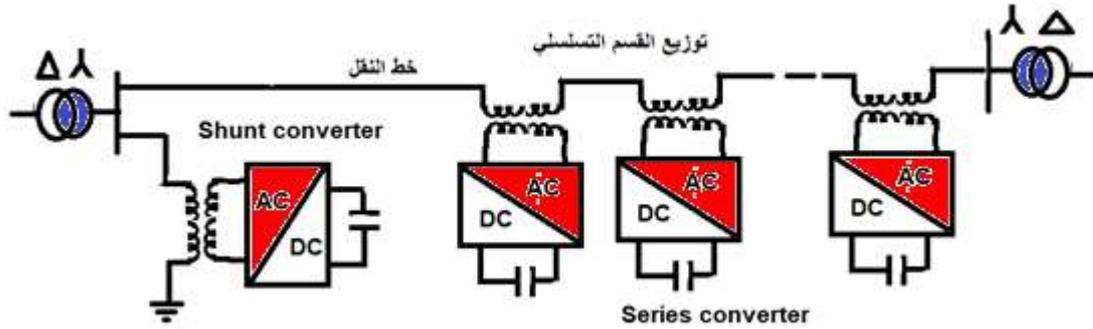
**طرائق البحث ومواده:****1- منظم نقل الطاقة الكهربائية الموحد UPFC وتطويره الى DPFC**

يتألف نظام UPFC كما هو مبين في الشكل (1)، من قابلية تفرعية Shunt Converter واخرى تسلسلية Series Converter ترتبطان مع بعضهما البعض بواسطة وصلة التيار المستمر DC-LINK (مكثف)، وهذا يتطلب محولات ثلاثية الطور على التسلسل مع خط النقل في القسم التسلسلي، وربط القسم التفرعي الى بارات الجهد العالي وما له من تكاليف كبيرة لمحولات الجهد العالي والعزل، ثم مشاكل ضبط الجهد DC-LINK عبر طرفي مكثف وصلة التيار المستمر، جميع هذه العوامل ادت الى ارتفاع كبير في تكاليف الـ UPFC وانتقال الأعطال المتشكلة بين قسميه التفرعي والتسلسلي كونهما متصلين مع بعضهما البعض. وهذا ما دعى الى تطويره عبر الغاء وصلة التيار المستمر DC-LINK من جهة، وتوزيع القسم التسلسلي Series Converter من جهة أخرى، وربط القابلية التفرعية على بارات الجهد المنخفض، حيث كان لتطوير الـ SSSC من قبل البروفسور ديباك ديفان الى الـ DSSC الخطوة الأولى في تطوير متحكم سريان القدرة الموحد UPFC الى الـ DPFC.



الشكل(1): البنية الأساسية لمكونات منظم سريان الاستطاعة الموحد الـ UPFC

يتألف نظام نقل القدرة الكهربائية الموزع (DPFC) Distributed Power Flow Controller كما هو مبين في الشكل(2) من قالبية تفرعية Shunt Converter تربط على التفرع مع الشبكة الكهربائية، ومهمتها امتصاص الاستطاعة الكهربائية الفعلية بالتردد التوافقي الأساسي ( $f=50\text{ Hz}$ ) وذلك عبر القالبية التايرستورية المتحكم بها لشحن مكثف القدرة DC-Link، ومن ثم حقن هذه الاستطاعة بالتردد التوافقي الثالث ( $f=150\text{Hz}$ ) في حيايدي محول القدرة للجهد العالي بحيث يسري تيار توافقي ثالث في أطوار الشبكة الكهربائية الثلاثة تماماً كسلوك التيار التسلسلي الصفري. كما هو مبين في الشكل(2).



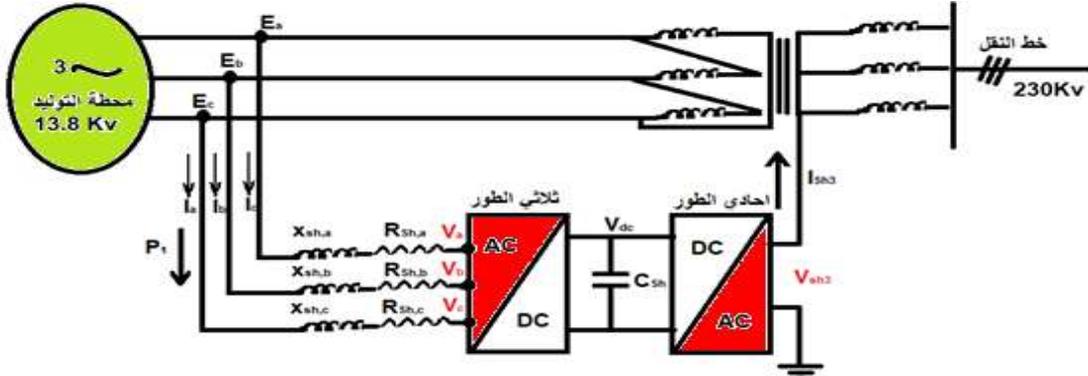
الشكل(2): البنية الأساسية لمنظم سريان الاستطاعة الموزع (DPFC)

تقوم القالبات التسلسلية بامتصاص هذه الاستطاعة بالتردد التوافقي الثالث عبر قالبات الكترونية متحكم بها لشحن مكثفاتها DC-LINK ومن ثم ضخ هذه الاستطاعة في خط النقل مباشرة بالتردد الأساسي. باختصار، هي نفس آلية الـ UPFC المتطورة مع الغاء لوصلة التيار المستمر التي كانت تربط بين القالبية التفرعية والقالبية التسلسلية، ولضمان تبادل الاستطاعة الفعلية بين القالبتين تم استخدام خط النقل نفسه لتبادل الاستطاعة الفعلية بتردد آخر، التردد التوافقي الثالث سيسلك نفس سلوك التسلسل الصفري وبالتالي سينقسم بالتساوي على الاطوار الثلاثة، مع ضمان عدم تسرب هذا التيار الى جهة الاستهلاك او التوليد وذلك بسبب بنية شبكة النقل الكهربائية حيث المحولات  $\Delta$ - $Y$  تعمل المحولات الموصولة بشكل مثلثي كدارة قصر لهذه التيارات فيما يؤمن ربط حيايدي المحولات المتصلة بشكل نجمي مع الارض ممر تبادل لهذه التيارات كما هو معلوم من مبدأ عمل DPFC. وبالتالي نتج الـ DPFC عن الـ UPFC بإلغاء وصلة الـ DC-LINK وتحويل الـ SSSC الى الـ DSSC البسيط في التصميم والرخيص الثمن، والذي يؤدي نفس الوظائف المناطة بـ UPFC [19].

## 2- بنية القبالة التفرعية Shunt converter لمنظم سريان الاستطاعة الموزع DPFC.

يبين الشكل (3) بنية القبالة التفرعية Shunt Converter في نظام الـ DPFC المقترحة. حيث يتم ربط مداخل محول هذه القبالة مع بارات الجهد المنخفض لمحولات  $\Delta$ -Y وبالتالي تأمين تغذيتها من جهة محطات التوليد 13.8 Kv مما يسهم في خفض تكاليف محول الجهد اللازم لعمل الثايرستورات في هذه القبالة، وذلك لان عملية تغذيتها من بارات الجهد المنخفض لمحول ثلاثي الطور أرخص بكثير مما لو تم ربطها الى بارات الجهد العالي 230Kv، وذلك من حيث الحجم والسعر ومتطلبات العزل.

تم في هذا التصميم استبدال القبالة ثلاثية الطور المربوطة على التفرع مع بارات الجهد العالي بقالتين، احدهما ثلاثية الطور تربط مع بارات الجهد المنخفض، واخرى احادية الطور تتلقى الاستطاعة من القبالة ثلاثية الطور وحقنها في حيايدي ملف الجهد العالي لمحول القدرة وذلك بالتردد التوافقي الثالث. [20]



الشكل(3): بنية القبالة التفرعية shunt converter لمنظم سريان الاستطاعة الموزع

## 3- النموذج الرياضي وثوابت نظام التحكم الشعاعي للقبالة التفرعية.

يبين الشكل (3) بنية القبالة التفرعية موضوع البحث، نجد أنها مؤلفة من منبع توليد الاستطاعة الكهربائية ثلاثي الطور ذي الجهود  $E_a, E_b, E_c$  والذي يمثل خرج محطة التوليد، ومن محول القدرة اللازم لعمل المبدلة الثايرستورية والممثل بـ  $X_{sh}, R_{sh}$ ، اضافة الى المبدلة الثايرستورية AC/DC، مكثف القدرة  $C_{sh}$ ، والمبدلة الثايرستورية احادية الطور.

تعطى الجهود ثلاثية الطور المولدة من قبل محطة التوليد بالعلاقة:

$$e_a(t) = E_{max} \cdot \sin(\omega \cdot t - 0.0) \quad (1)$$

$$e_b(t) = E_{max} \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \quad (2)$$

$$e_c(t) = E_{max} \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{4 \cdot \pi}{3}\right) \quad (3)$$

هذه الجهود والتيارات ثلاثية الطور يمكن استخدامها في عمليات التحكم وفقاً للتحويل الشعاعي الى ثنائي الطور وفق تحويل كلارك (Clarke Transformation) حيث وأن المجموع الجبري لتيارات الأطوار الثلاثة في كل لحظة معدوم:

$$i_a(t) + i_b(t) + i_c(t) = 0 \quad (4)$$

أما المجموع الشعاعي لهذه التيارات هو شعاع طويلته ثابتة ويدور بسرعة زاوية  $\omega$  وفق العلاقة:

$$\vec{i} = \frac{2}{3} \cdot (i_a + a \cdot i_b + a^2 \cdot i_c) \quad , a = e^{j120^\circ} \quad (5)$$

بغية إجراء عمليات التحكم ينبغي الانتقال من تمثيل النظام الكهربائي كثلاثي الطور  $(a,b,c)$  الى النظام ثنائي الطور  $(\alpha, \beta)$  وذلك بتعويض قيمة  $a$  بقيمتها في العلاقة (5) نجد:

$$\vec{i} = \frac{2}{3} \left( i_a - \frac{1}{2}(i_b + i_c) \right) + j \cdot \frac{1}{\sqrt{3}}(i_b - i_c) = i_\alpha + j \cdot i_\beta \quad (6)$$

نسمي القسم الحقيقي  $i_\alpha$  والقسم التخيلي  $i_\beta$  وبذلك نحصل على ثابت تحويل كلارك كما في العلاقة (7):

$$\begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & \frac{-1}{3} & \frac{-1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{-1}{\sqrt{3}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \quad (7)$$

هذا التمثيل ينبغي ان نجعله يدور بسرعة زاوية مساوية للسرعة الزاوية للنظام، وبالتالي يتم الانتقال من تمثيل النظام من خلال المركبتين الأفقية والعمودية  $\alpha, \beta$  الى الاحداثيات الدوارة  $d, q$  التي تدور بسرعة زاوية  $\omega$  وتصنع مع الاحداثيات الثابتة زاوية متغيرة  $\phi$ . وهذا ما يسمى بتحويل بارك (park transformation) فاذا كانت زاوية شعاع التيار مع الاحداثيات الثابتة هي  $\varepsilon$  ومع الاحداثيات الدوارة  $(\varepsilon - \phi)$  فإن:

$$i_\alpha + j \cdot i_\beta = |\vec{i}| \cdot e^{j\varepsilon} \quad (8)$$

وفي الاحداثيات الدوارة  $(d, q)$  يصبح:

$$\vec{i}_{dq} = i_d + j i_q = |\vec{i}| e^{j(\varepsilon - \phi)} \quad (9)$$

$$i_d + j i_q = (i_\alpha + j i_\beta) \cdot e^{-j\phi} \quad (10)$$

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\phi & \sin\phi \\ -\sin\phi & \cos\phi \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$(12)$$

من الشكل (3) الذي يوضح بنية القالبية التفرعية فإن توتر المنبع يعطى بالعلاقة:

$$\begin{cases} E_a = R \cdot i_a + L \cdot \frac{d}{dt} \cdot i_a + u_a \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} E_b = R \cdot i_b + L \cdot \frac{d}{dt} \cdot i_b + u_b \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} E_c = R \cdot i_c + L \cdot \frac{d}{dt} \cdot i_c + u_c \end{cases} \quad (15)$$

بالاعتماد على التحويل في المعادلة (9) يمكن التعبير عن جملة المعادلات (13,14,15) ثم تحويلها وفق العلاقة (11) و (12) يمكن ايجاد هذه المعادلات على الاحداثيات  $d, q$  بالعلاقة:

$$\begin{cases} E_{a,dq} = R \cdot \vec{i}_{a,dq} + L \cdot \frac{d\vec{i}_{a,dq}}{dt} + j\omega L \cdot \vec{i}_{a,dq} + \vec{u}_{a,dq} \\ E_{b,dq} = R \cdot \vec{i}_{b,dq} + L \cdot \frac{d\vec{i}_{b,dq}}{dt} + j\omega L \cdot \vec{i}_{b,dq} + \vec{u}_{b,dq} \\ E_{c,dq} = R \cdot \vec{i}_{c,dq} + L \cdot \frac{d\vec{i}_{c,dq}}{dt} + j\omega L \cdot \vec{i}_{c,dq} + \vec{u}_{c,dq} \end{cases} \quad (16)$$

الآن وبتعويض العلاقة (12) في جملة المعادلات (16) نجد:

$$\begin{cases} E_{a,dq} = (R \cdot i_{a,d} + e_{La,d} - \omega \cdot L \cdot i_{a,q} + u_{a,d}) + j(R \cdot i_{a,q} + e_{La,q} + \omega \cdot L \cdot i_{a,d} + u_{a,q}) \\ E_{b,dq} = (R \cdot i_{b,d} + e_{Lb,d} - \omega \cdot L \cdot i_{b,q} + u_{b,d}) + j(R \cdot i_{b,q} + e_{Lb,q} + \omega \cdot L \cdot i_{b,d} + u_{b,q}) \\ E_{c,dq} = (R \cdot i_{c,d} + e_{Lc,d} - \omega \cdot L \cdot i_{c,q} + u_{c,d}) + j(R \cdot i_{c,q} + e_{Lc,q} + \omega \cdot L \cdot i_{c,d} + u_{c,q}) \end{cases} \quad (17)$$

تمثل جملة المعادلات (17) نظام عمل القالبية، حيث يشير كل من القسم الحقيقي والتخيلي الى معادلة المركبة المباشرة والعكسية  $U_{dq}$  اللازم تشكيلها على دخل الـ Shunt Converter.

#### 4- دارات التحكم في القبالة التفرعية Control Of Shunt Converter

من المعادلة (17) التي تصف سلوك النظام، وبأخذ كل من القسم الحقيقي والتخيلي نجد أن معادلتنا للتحكم للمركبة المباشرة والعكسية لإشارة الجهد الواجب تشكيلها على دخل القبالة هي:

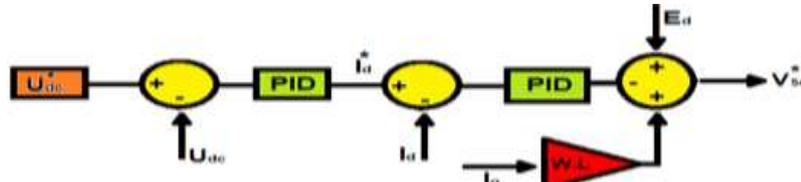
$$U_{sd}^* = E_d + \omega \cdot L \cdot i_q - \left( R + \frac{d}{dt} \right) \cdot i_d \quad (18)$$

$$U_{sq}^* = E_q - \omega \cdot L \cdot i_d - \left( R + \frac{d}{dt} \right) \cdot i_q \quad (19)$$

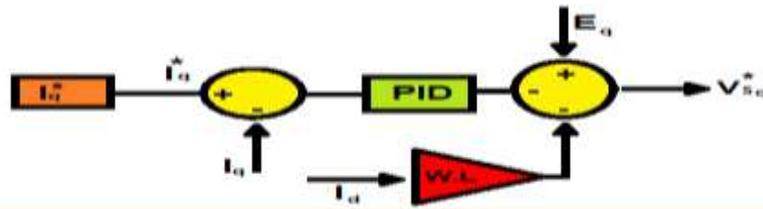
وبالتالي نحتاج الى حلقة تحكم بالتيار لانتاج قيمة  $i_d^*$ ،  $i_q^*$  المرغوبة، أما خرج القبالة هو مكثف ينبغي الحفاظ على ثبات التوتر على طرفيها، حيث تعطى معادلة الخرج بالعلاقة:

$$U_{dc} = \frac{1}{C_{sh}} \cdot \int i_d^* \quad (20)$$

انطلاقاً من المعادلات (18,19,20) يمكن ايجاد دارات التحكم في كل من الجهود والتيار، مع قيمة مرجعية لكل من جهد الـ DC-LINK على طرفي المكثف الشكل(4)، والقيمة المرجعية للاستطاعة الردية الشكل(5).

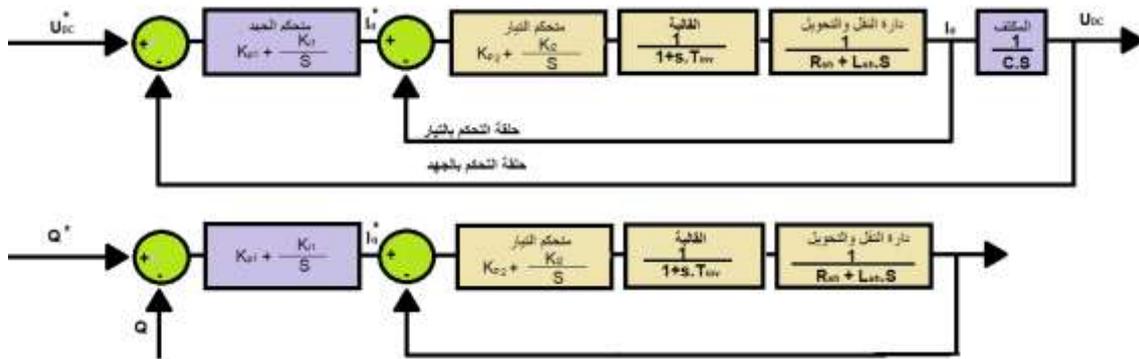


الشكل(4): بنية دارة التحكم للمركبة المباشرة d في القبالة التفرعية



الشكل(5): بنية دارة التحكم للمركبة العكسية q في القبالة التفرعية

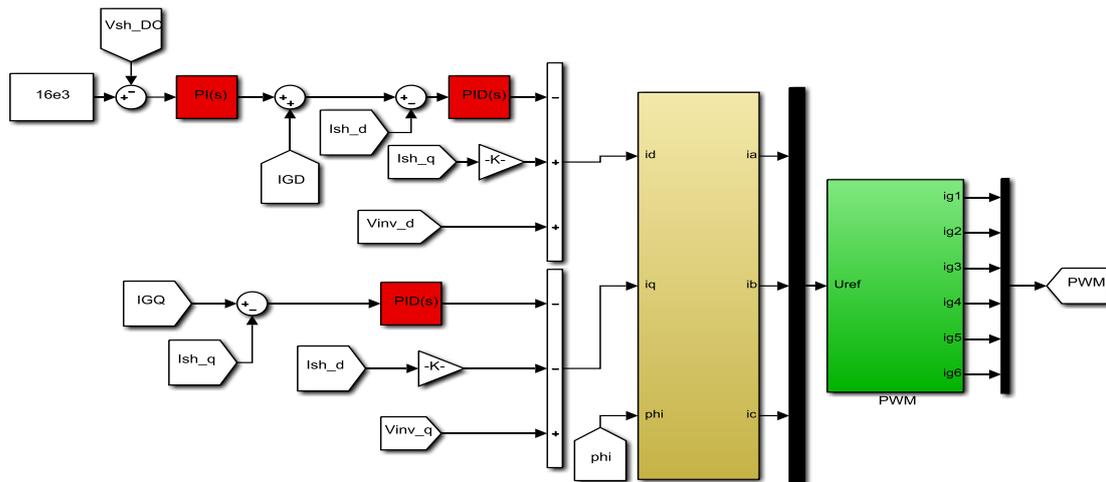
انطلاقاً من دارتي التحكم الأساسيتين في تشكيل المركبة المباشرة والعكسية للجهود المرجعية يتم استخراج دارات التحكم بالعملية ذات التغذية العكسية السالبة لملاحقة القيم المرغوبة كما في الشكل(6).



الشكل(6): حلقتنا التحكم بجهد الـ DC-LINK والتيار المباشر والعكسي، والتحكم بالاستطاعة الردية

بايجاد كل من تابع نقل الحلقة المفتوحة، والمغلقة، واستخدام طريقة المطال الأمثل (Amplitnde Optimum(AO) في ضبط ثوابت متحكم التيار نجد أن  $K_{p2} = \frac{1}{2} \cdot L_{sh} \cdot f_{inv}$  و  $K_{i2} = \frac{1}{2} \cdot R_{sh} \cdot f_{inv}$ .

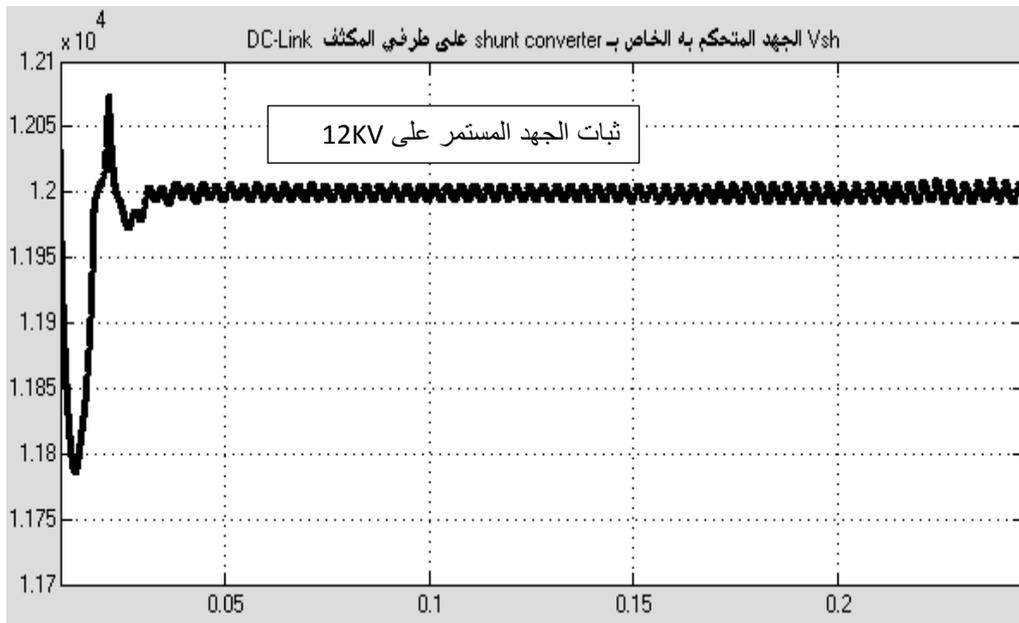




الشكل (9) دائرة النمذجة والمحاكاة على MATLAB لنظام التحكم المقترح

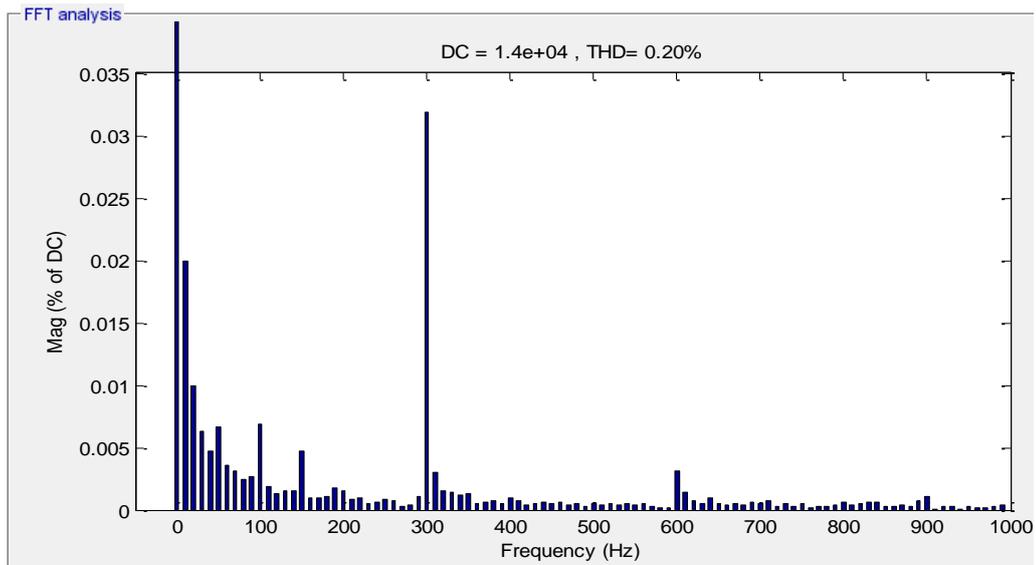
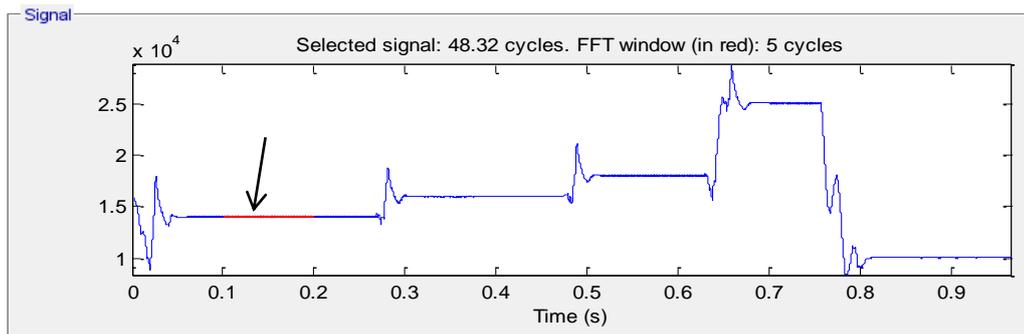
### النتائج والمناقشة:

بتطبيق نتائج الدراسة التحليلية والرياضية للنظام وتمثيل معادلات التحكم على برنامج ماتلاب واختبار العملية، تبين قدرة النظام على ضبط جهد الـ DC-LINK بشكل فعال، مع القدرة الفائقة على ملاحقة أي قيمة مرجعية أخرى، حيث تم تجريب ذلك من  $8-30[KV]$  واستطاع النظام ملاحقة جميع القيم المرجعية محققاً ثبات للجهد على طرفي المكثف كما هو مبين في الشكل (10).

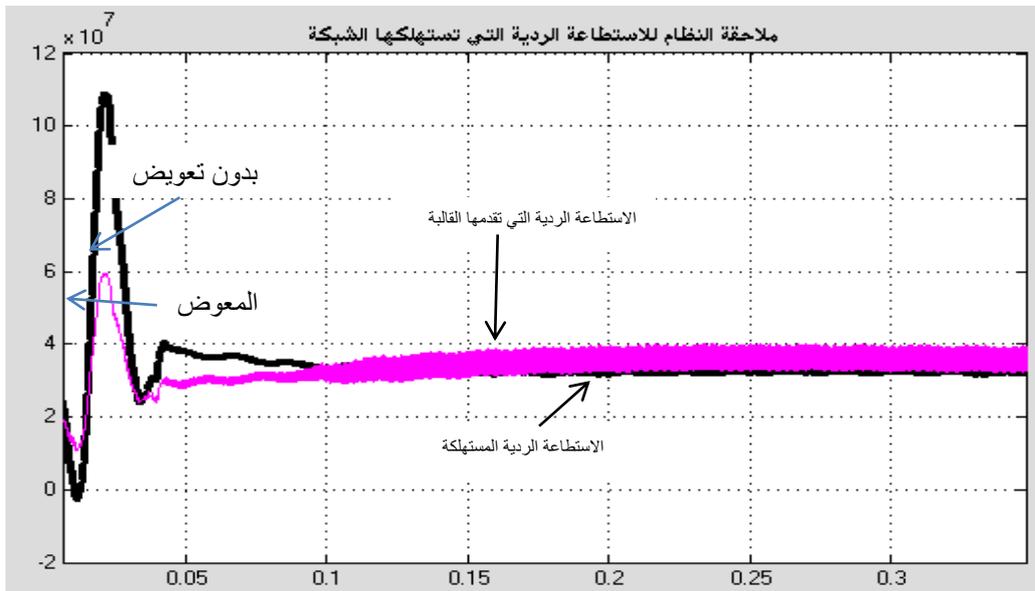


الشكل (10) ثبات الجهد بنتيجة عملية التحكم المقترحة على طرفي مكثف القدرة DC-LINK عند 12KV

يبين الشكل (11) ثبات الجهد أيضاً عند قيم مرجعية أخرى، حيث تم اختبار قدرة النظام على ضبط جهد الـ DC-LINK من أجل قيم مختلفة وعديدة مع عامل  $THD=0.2\%$  عند  $14[KV]$ .

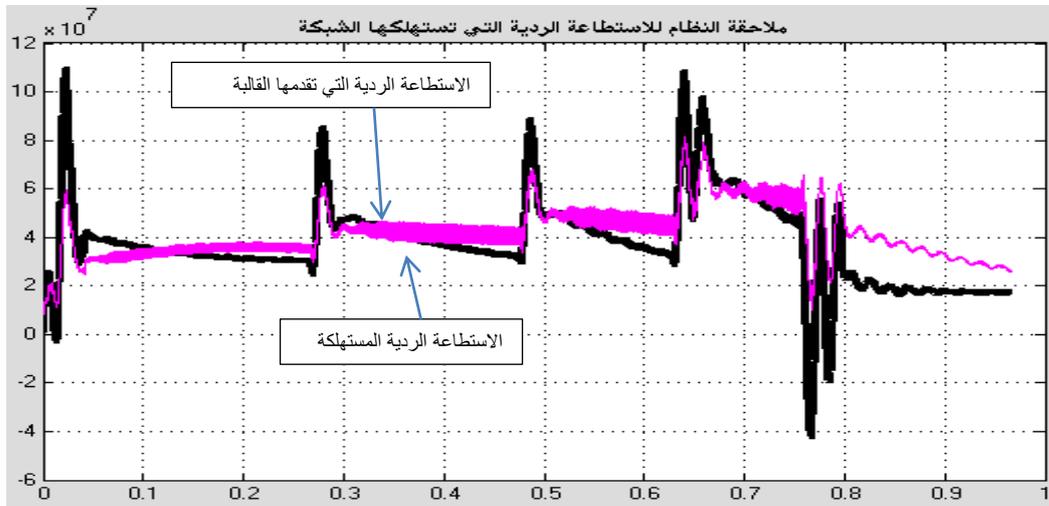


الشكل(11): ملاحقة النظام لإشارة جهد الـ DC-LINK المرجعية ونسبة THD%



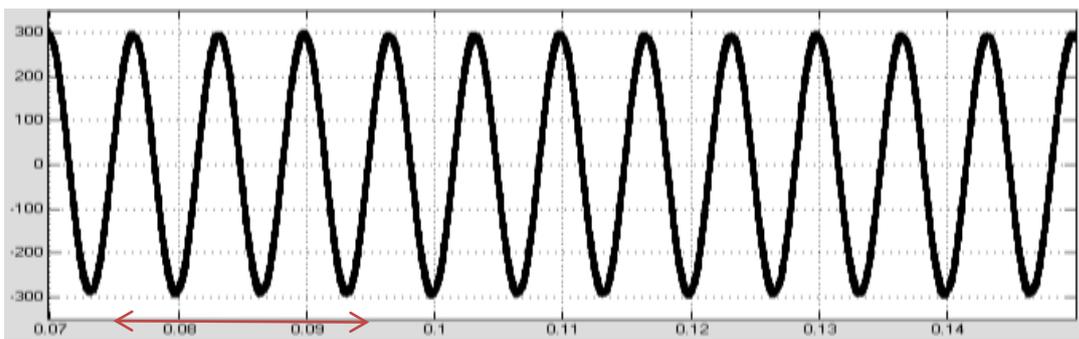
الشكل(12): الاستطاعة الردية المعوضة عند 30[MVAR]

من الشكل (12) نجد أن نظام التحكم المقترح استطاع تعويض كامل الاستطاعة الردية للحمولة عند [30MVAR] في حالة العمل المستمر والثابت عند عدم وجود تغيرات في الحمل.



الشكل(13): الاستطاعة الردية التي تنتجها القالبية التفرعية والاستطاعة الردية المستهلكة

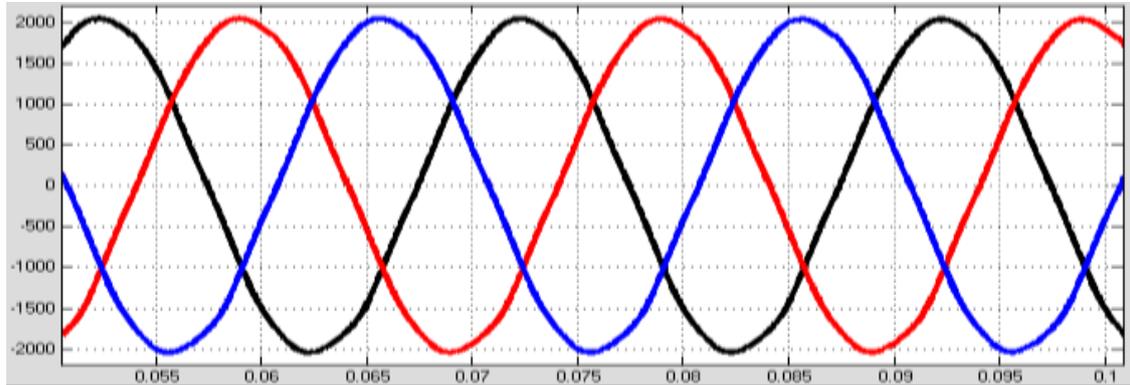
أما الشكل(13) فيوضح قدرة نظام التحكم المقترح على ملاحقة الاستطاعة الردية عند وجود تغيرات في الحمل، حيث نجد من نتائج عمل النظام عند عدة سويات للاستطاعة الردية المستهلكة وذلك عند عدة قيم اختبارية للحمولة تم خلالها ضبط متطلبات الشبكة على قيم مختلفة من الاستطاعة الردية، وفي المقابل تم رصد سلوك النظام المقترح حيال ذلك، وكما هو واضح من الشكل(13)، فقد قام النظام المقترح آلياً بملاحقة الاستطاعة الردية المستهلكة في الشبكة وبالتالي العمل على تعويض مرن للاستطاعة الردية بشكل فعال وديناميكي دون الحاجة الى توليد هذه الاستطاعة او نقلها عبر شبكة خطوط النقل، وهذا ما يفسح المجال امام الشبكة لإمكانية نقل كم أكبر من الاستطاعة الفعلية عبر خطوطها.



الشكل(14): التيار التوافقي الثالث الذي تنتجه القالبية احادية الطور وتضخه في حياي محول نقل القدرة

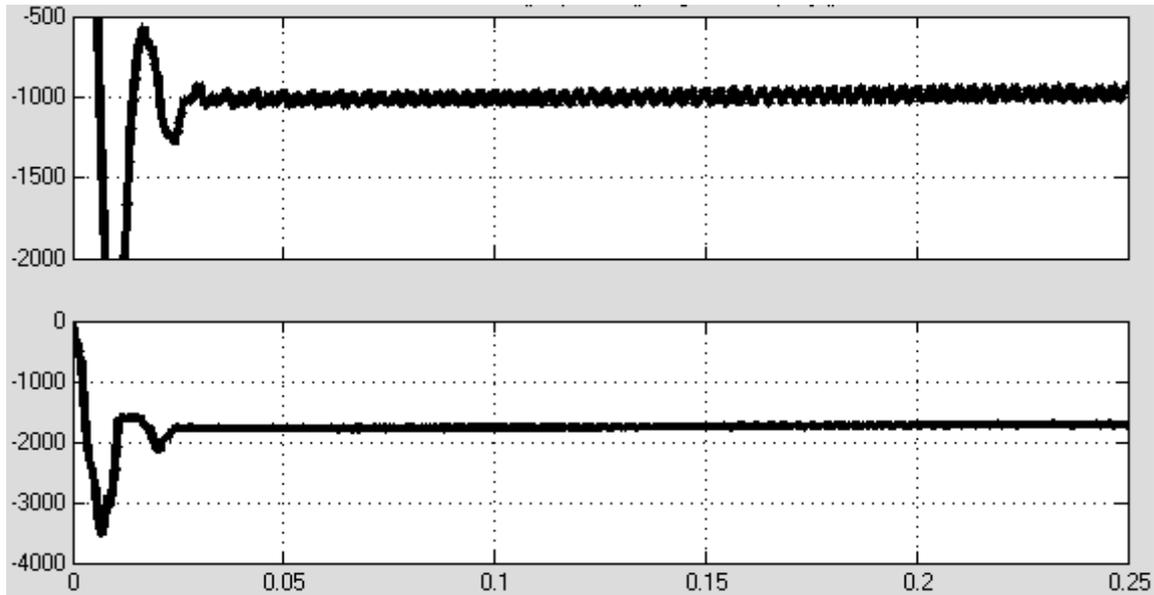
يبين الشكل (14) أن التيار الذي قامت القالبية احادية الطور بانتاجه هو بالتردد التوافقي الثالث حيث يتضح وجود 3 تكررات من 0.08-0.1 ثانية، وبالتالي خلال 20 ميلي ثانية كان عدد التكررات 3 أي التردد هو 150هرتز، وتم ذلك باستخدام مقارنة اشارة مثلثية بتردد [10KHZ] مع اشارة مرجعية جيبية بتردد [150HZ] حيث تطبق النبضات وفق تقنية PWM (تعديل عرض النبضة) على دائرة القالبية احادية الطور.

يبين الشكل (15) تيارات دخل القالبية التفرعية ، عبارة عن تيارات ثلاثية الطور متناظرة ومتعاقبة بشكل صحيح ومتوافق مع تعاقب أطوار الشبكة، وهذا يشير الى دقة عملية ومعادلة التحكم في القالبية التفرعية حيث لم ينتج عن ذلك تشوه في موجة الجهد والتيار أو ظهور مدروجات يمكن أن تتسبب بضيعات غير مرغوبة.

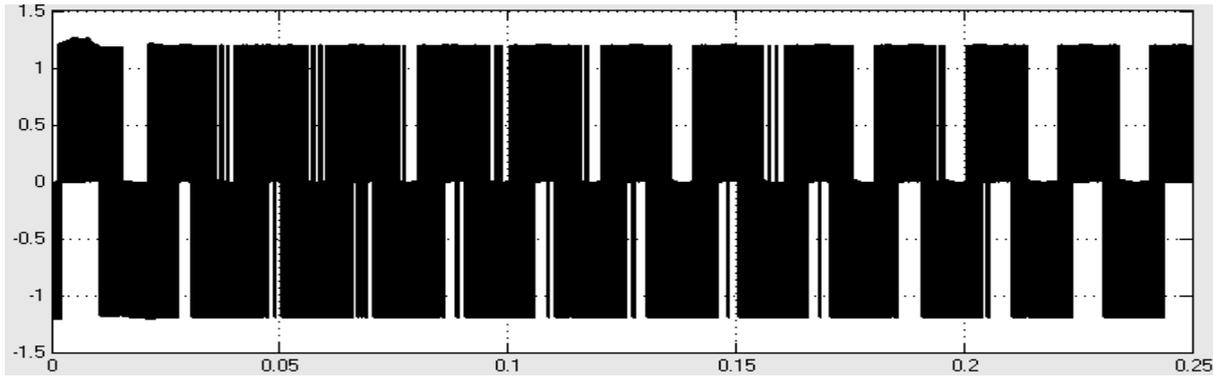


الشكل(15): تيارات دخل القالبية التفرعية ثلاثية الطور بالتردد الأساسي

أما عملية ضبط الجهد الطوري المطبق على دخل القالبية الثايرستورية، ومركبتي التيار المباشرة والعكسية  $I_d, I_q$  والنتيجة عن حلقتي التحكم بالتيار مبينة في الشكل (16) والشكل (17)، حيث نلاحظ أن النظام استطاع ضبط كل من قيمتي المركبة المباشرة والعكسية للتيار والجهد الطوري المتحكم به، وهذا ما يؤدي الى مزيد من استقرار نظام التحكم وثبات قيمة الجهد على مكثفات القدرة لتسلك سلوك مدخرات ضخمة ثابتة الجهد موجودة على التفرع مع الشبكة عبر مفاتيح الكترونية تعمل على تحويل جهدها الثابت عند الحاجة الى استطاعة للتبادل بينها وبين الشبكة، وبالتالي ضبط لعمليات استهلاك الاستطاعة الردية، وضبط لمعدل سريان الاستطاعة من خلال شبكة نقل القدرة الكهربائية، وتنظيم آلي للجهد عند بارات الشبكة.



الشكل(16): التيارات  $I_d, I_q$  المتحكم بها في القالبية التفرعية



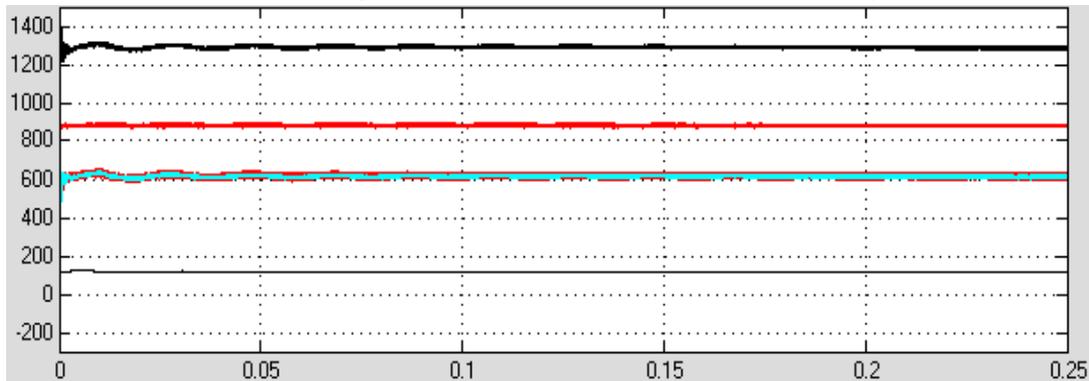
الشكل (17) جهد التحكم الطوري المتمكم به والمطبق على القابلية التايرستورية في نظام التعويض

يبين الشكل (18) نتائج مراقبة قيم كل من الاستطاعة الفعلية، الاستطاعة الردية، وجهود بارات الشبكة، ومقارنتها مع تطبيق تقنيات التعويض باستخدام الـ UPFC الضخم جداً والغالي الثمن، تبين قدرة النظام المقترح على ضبط بارامترات الشبكة على القيم المرغوبة، حيث نجد وصول بعض بارات الشبكة الى ضبط قيمة جهدها على  $1[pu]$  تقريباً، وهذا يشير الى قيام نظام النقل بالملاحقة الآلية لعمليات سحب الشبكة من الاستطاعة الردية وضياعات الاستطاعة في خطوط نقل القدرة الكهربائية والحفاظ على قيم جهود بارات شبكة النقل عند القيم المطلوبة.

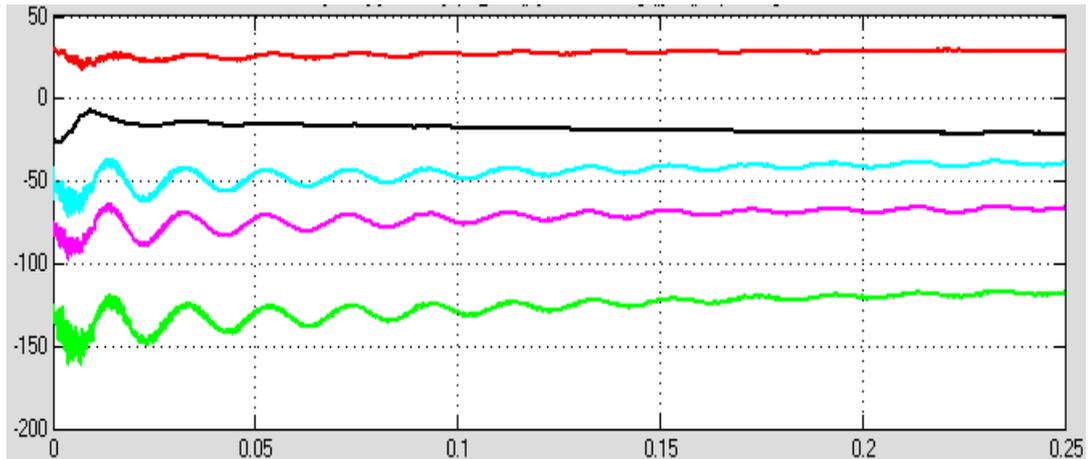
1.001	0.9955	117.3	118.1	-20.48	-23.15
1	0.9982	613.5	611.6	-68.27	-65.3
1	0.9981	611.6	609.6	-41.03	-37.55
0.9939	0.9927	878.1	875.6	29.16	27.96
0.9974	0.997	1284	1280	-120.5	-116.8
V (pu)		Active Powers (MW)		Reactive Powers (Mvar)	
B1	B2	B3	B4	B1	B2

الشكل (18): قيم بارات الشبكة من أجل جهود بارات الشبكة والاستطاعة الفعلية والردية السارية فيها

بينما يشير الشكل (19) نتائج ضبط الاستطاعة الفعلية والردية على بارات الشبكة خلال الزمن، حيث يلاحظ ثبات قيمة واتجاه هذه الاستطاعة وبلوغ قيمها الى قرابة التحميل الحراري المرجعي الموضح في الشكل (18).

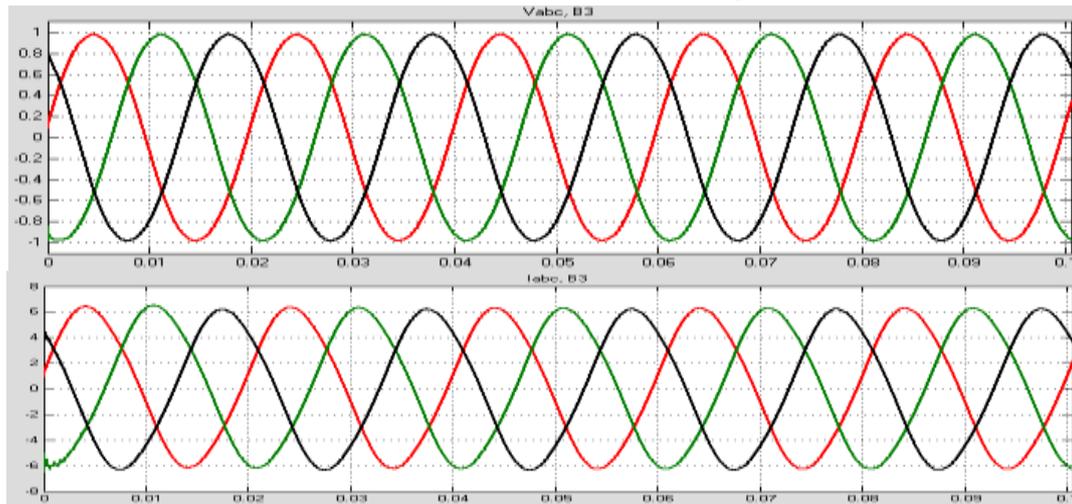


الشكل (19-a) نتائج التحكم بسرمان الاستطاعة على بارات شبكة نقل الطاقة الكهربائية

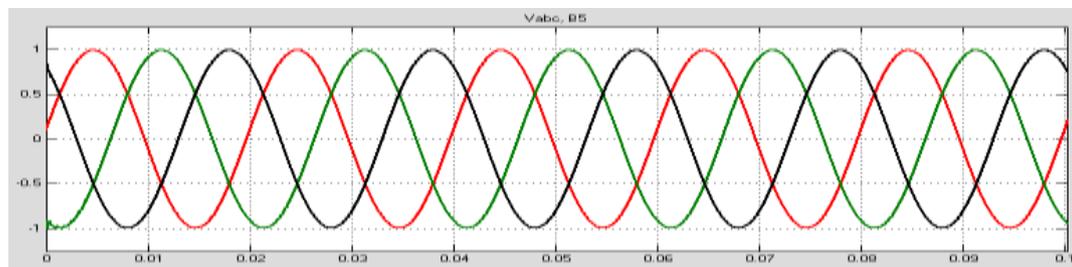


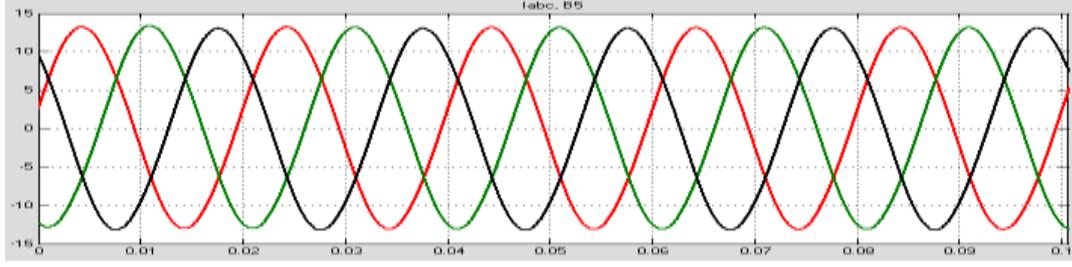
الشكل(19-b) نتائج التحكم بتيار الاستطاعة الردية على ابارت شبكة نقل الطاقة الكهربائية

يبين كل من الشكل(20) والشكل(21) كل من الجهود والتيارات ثلاثية الطور من طرفي الحمل والاستقبال والموافقة لكل من البارين B3, B5، حيث نجد أنها متناظرة ذات تردد 50 هرتز، غير مشوهة وتساوي 1[pu]، أما سعة خطوط النقل فقد ارتفعت وبلغت حتى 7[pu] في طرف الارسال، و 13[pu] على بار ربط الشبكة.



الشكل(20): الجهود والتيارات على بار الحمولة





الشكل(21): الجهود والتيارات على بار ربط الشبكة المدروسة مع الشبكة

### الاستنتاجات والتوصيات:

تم في هذا البحث التحكم في القالبية التفرعية لأحد أجهزة نقل التيار المتناوب المرنة وهو منظم سريان القدرة الموزع DPFC، ونمذجة هذه القالبية على برنامج MATLAB ثم ربطها مع الشبكة المرجعية لاختبارها، حيث أظهرت النتائج التي حصلنا عليها ان طريقة التحكم المقترحة في القالبية استطاعت:

- الإجابة على فرضيات البحث في قيام القالبية بمهامها.
- قدرة القالبية التفرعية على تعويض ديناميكي للاستطاعة الردية للنظام.
- إمكانية التحكم في بارامترات الشبكة بشكل يحاكي قدرات الUPFC.
- قدرة النظام على تحسين القيم الفنية لبارامترات الشبكة بطريقة أسهل ومرونة أكثر.
- قدرة النظام على التحكم بسريان الاستطاعة في خطوط نقل القدرة الكهربائية، وتعويض الاستطاعة الردية، وبالتالي الى زيادة القدرة التمريرية لشبكة النقل الكهربائية
- نوصي بمتابعة دراسة عملية التحكم تحت تأثير ربط مصادر ومحطات توليد ريدية وشمسية مع شبكات نقل القدرة الكهربائية، يتم تركيبها على التفرع مع مكثفات القالبية التفرعية.

### References:

- [1] Fænn.J.F, *Design of a Generator Excitation System*, Geophysical Institute Faculty of Mathematics and Natural Sciences, University Of Bergen, June 1, 2021, 1-50.
- [2] Luo.X, Li.F, Niu.T, *Influence of Synchronous Condensers on Operation Characteristics of Double-Infeed LCC-HVDCs*, Processes, MDPI, 2021, 9, 1704.
- [3] Gruenbaum.R, Rasmussen.J, Li.S, *Series Capacitors for Increased PowerTransmission Capability of a 500 kV Grid Intertie*, IEEE, 767-772.
- [4] Sallam.A.A, *Shunt Capacitor Effect on Electrical Distribution System Reliability*, IEEE, Vol. 43, No. 1. 2015, 170-176.
- [5] Zhang.X.P, Pal.B, Rehtanz.CH, *Flexible AC Transmission Systems:Modelling and Control*, Springer, New York, Library of Congress Control, DOI 10.1007/978-3-642-28241-6, 2012, 568.
- [6] Hingerani.N.G, *Facts Controllers In Power Transmission And Distribution*, ISBN 13, VOL, 978-81-224-2541-3, 2007. 549.
- [7] Ding.T, Li.F, Bo.R, Sun.H, *Optimal Power Flow With the Consideration of Flexible Transmission Line Impedance*, IEEE. Transactions On Power Systems, Vol. 31, No. 2, March 2016, 1655-1660.
- [8] Gandoman.F.H, Ahmadi.A, Sharaf.A.M, Siano.P, Pou.J, *Review of FACTS technologies and applications for power quality in smart grids with renewable energy systems*, ScienceDirect. VOL.82, 2018, 502–514.

- [9] Rabea.F, Kamel.S, Jurado.F, *Implementation of a Simplified SVC Model into Newton-Raphson Load Flow Algorithm*, IEEE, 978-1-4673-9063-7. 2018, 374-379.
- [10] Dange.D.S, Bonde.U.G, *Reactive Power Flow Control using Static VAR Compensator to Improve Transmission System*, IRJET, Vol.08, 2021, 3169-3172.
- [11] Ananthavel.S, Padmanaban.S, Shanmugham.S, *Analysis of enhancement in available power transfer capacity by STATCOM integrated SMES by numerical simulation studies*. Science Direct, VOL.19, 2016, 671–675.
- [12] Shaban.F, Shaheen.H, *Studying the Effects of Static Synchronous Series Compensator (SSSC) on the Electrical Power System*. Tishreen University, Vol.33, No.6, 2011, 75-89.
- [13] Peng.F.Z, Liu.Y, Zhang.S, *Transformer-Less Unified Power-Flow Controller Using the Cascade Multilevel Inverter*. IEEE, VOL. 31, NO. 8, 2018, 5461-5472.
- [14] Asija.D, Naga Sai.V, *Power Flow Management in Multiline Transmission System Through Reactive Power Compensation Using IPFC*. Springer Nature Singapore. 8-5828-10-981-978/10.1007, 2018, 383-390.
- [15] Gandoman.F, Ahmadi.A, *Review of FACTS technologies and applications for power quality in smart grids with renewable energy systems*. ScienceDirect, Reviews 82, 2018, 502–514.
- [16] Gaigowal.S, Renge.M, *DSSC A Distributed Power Flow Controller*, ScienceDirect. 117, 2016, 745-752.
- [17] Shrivastava.S, Sharma.V, Bhargava.A, *Modeling and Performance Analysis of Distributed Power Flow Controller on Multi Machine System*, ISSN: 2394 - 658X, European Journal of Advances in Engineering and Technology, 52, 2018, 99-105.
- [18] Krishna.B, Prashanth.B, Sujatha.P, *Experimental Verification Of Multi-Level Dpfc With Hardware Results*. International Journal of Pure and Applied Mathematics, Volume 120 No. 6 2018, 9447-9473.
- [19] Charawande.I, Dhamse.D, *Modeling and Analysis of DPFC to Improve Power Quality*. ISSN, 2017, 2319-8753.
- [20] Tang.Y, Zheng.X, *Research for Equivalent Mathematical Model of MMC-DPFC*, IEEE, DOI 10.1109, 2017, 231-239.