

## تحسين جودة الطاقة باستخدام التحكم التنبئي بمرشح فعال تفرعي

مناف سليمان\*

(تاريخ الإيداع 6 / 1 / 2015. قُبل للنشر في 9 / 8 / 2015)

### □ ملخص □

تم في هذا البحث تقديم طريقة جديدة للتحكم بمرشح فعال تفرعي (SAF) وذلك من أجل إلغاء توافقيات التيار وتعويض الاستطاعة الرديئة ، وهذه الطريقة تعتمد على التحكم التنبئي المباشر بالطاقة (P-DPC) ، وهو يدمج بين التحكم المباشر بالطاقة والتحكم التنبئي ، فالتحكم المباشر بالطاقة يقوم بالتحكم بالاستطاعة الحقيقية والاستطاعة الرديئة للحصول على عامل استطاعة واحد ، وعند دمج التحكم التنبئي فإن المتحكم يقوم بالتنبؤ بالتصرف المستقبلي للنظام وذلك من أجل جميع القيم التي يمكن أن يأخذها شعاع الجهد للمرشح ، ويتم اختيار أفضل شعاع من أجل العينة القادمة عن طريق تصغير تابع ربح . وتم التحكم بهذا المرشح بوجود حمل لاخطي على الشبكة ، وتمت محاكاة هذا النظام على الحاسب باستخدام البيئة البرمجية Matlab , Simulink and Simpower ، وبيّنت النتائج أنّ هذه الطريقة أدت إلى تخفيض عامل التشوه الكلي للتيار (THD%) والحصول على تيار جيبي وتحسين عامل الاستطاعة بشكل ممتاز .

الكلمات المفتاحية : التحكم التنبئي - التحكم المباشر بالطاقة DPC-المرشح الفعال التفرعي SAF-توافقيات التيار - عامل الاستطاعة .

\* قائم بالأعمال - قسم الأتمتة الصناعية - كلية الهندسة التقنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

## "Power quality improvement using Predictive control of Shunt active filter "

Monaf Solieman \*

(Received 6 / 1 / 2015. Accepted 9 / 8 / 2015)

### □ ABSTRACT □

This paper proposes a new approach to control a Shunt active filter (SAF) to eliminate harmonic currents and compensate reactive power , this approach called Predictive Direct Power Control (P-DPC) where the Direct Power Control is combined with a Predictive Control , PDC controls active and reactive power to get an unity power factor and when it combined with Predictive Control , the controller can predict future behavior for all possible voltage vectors , and the best vector is chosen for the next sample by minimizing a cost function . we connect this filter with a nonlinear load to the grid and simulate this system using Matlab , Simulink and Simpower , the results shows that P-DPC decrease Total Harmonic Distortion (THD%) of line current and make it sinusoidal and improve the power factor .

**Key Words** : Predictive Control - Direct Power Control (DPC) – Shunt active filter (SAF)  
- current harmonics- power factor.

---

\* Academic Assistant , Department of Industrial Automation , Faculty of Technical Engineering , Tishreen University, Lattakia , Syria .

## مقدمة :

إنّ تزايد الأحمال غير الخطية بسبب وصل التجهيزات الالكترونية مع المقومات الثايرستورية والديودية والتي تولد توافقيات عالية في الشبكة ، أدى إلى تشوه كبير في أمواج التيار والجهد الأمر الذي يؤثر بشكل كبير على موثوقية التجهيزات الالكترونية أو حتى إلى تعطيلها [1]. إن أهم التوافقيات التي تسبب التشوه في الشبكة هي التوافقيات الخامسة  $5^{th}$  والسابعة  $7^{th}$  والحادية عشر  $11^{th}$  والثالثة عشر  $13^{th}$  ، وقد استخدمت تقليدياً المرشحات غير الفعالة المكونة من ملفات ومكثفات موصولة مع الشبكة بشكل تفرعي من أجل تعويض التشويه في التيار وتحسين عامل الاستطاعة ، ولكنها تحوي العديد من السيئات مثل الطنين والتعقيد إضافة إلى زيادة الحجم والوزن [2]، وعلى سبيل المثال فإن مرشح غير فعال من أجل محرك تحريضي استطاعته 1.5 MW يزن حوالي 5 طن [1]. أما حديثاً فتستخدم المرشحات الفعالة وهي ذات حجم وتكلفة أقل وأكثر مرونة في التطبيق العملي من المرشحات الغير فعالة ، وقد ازداد الاهتمام بها كثيراً خصوصاً بعد ظهور معالجات الإشارة الرقمية Digital Signal Processing (DSP) والمصفوفات المنطقية القابلة للبرمجة Field-Programmable gate Arrays (FPGAs) والتي تعطي إمكانيات كبيرة للتحكم بهذه المرشحات [3].

إن أكثر المرشحات الفعالة شيوعاً من أجل إلغاء التلوث بتوافقيات التيار وتعويض الاستطاعة الردية هو المرشح الفعال التفرعي SAF، وهو يعتمد على بنية مبدل التوتر كمصدر للجهد Voltage Source Converter (VSC)، ويربط بشكل تفرعي مع الحمل الغير خطي [4]. إن المبدل VSC يعمل كمعرج Inverter ويعمل كمقوم Rectifier وبالتالي يمكن التحكم به للعمل بالاتجاهين أي الحفاظ على جهد مستمر ثابت في خرجة (dc-side) وينفس الوقت إلغاء توافقيات التيار عن طريق حقن تيار يساوي التوافقيات ويعاكسها بالإشارة بجهة الدخل (ac-side). وهناك العديد من الطرق للتحكم بالمبدل VSC والتي يمكن تعميمها عندما يعمل كمرشح فعال تفرعي SAF ، وتقسم بشكل عام إلى طرق تحكم مباشر وطرق تحكم غير مباشر [5]، أما بالنسبة لطرق التحكم الغير مباشر فإن أشهرها وأكثرها استخداماً هو التحكم الموجه للجهد Voltage Oriented Control (VOC) والذي يضمن استجابة ديناميكية عالية وأداء مستقر وذلك بفضل الحلقة الداخلية للتحكم بالتيار ويحتاج إلى وحدة تعديل عرض النبضة Pulse Width Modulation (PWM) ويحتاج إلى استخدام نظام الإحداثيات الدوارة [6] (d - q)، أما الطرق المباشرة فأشهرها هو التحكم المباشر بالطاقة Direct Power Control (DPC)، والذي يتحكم بشكل مباشر بالاستطاعة الحقيقية والردية ولا يحتاج إلى حلقة داخلية للتحكم بالتيار ولا إلى وحدة تعديل عرض النبضة PWM ، كما أنه لا يستخدم نظام الإحداثيات الدوارة (d - q) بل يستخدم فقط تحويل Clarke إلى المستوي [7] ( $\alpha - \beta$ ) وبالتالي فهو سهل التطبيق مقارنة مع التحكم الموجه للجهد VOC. ونحن في هذه الدراسة سنقوم باستخدام التحكم التنبئي المباشر بالطاقة P-DPC للتحكم بمرشح SAF مع العلم أنّ العديد من الدراسات استخدمت التحكم المباشر بالطاقة DPC للتحكم بمرشح [4] [8] SAF، ولكن أي من الدراسات لم تستخدم التحكم التنبئي المباشر بالطاقة P-DPC للتحكم بمرشح SAF ، وهذه الطريقة تدمج بين التحكم التنبئي والتحكم المباشر بالطاقة وهذا الدمج يمكن أن يأخذ العديد من الأشكال حسب متطلبات كل نظام [5] [9].

### أهمية البحث وأهدافه :

تكمن أهمية البحث من أهمية المرشحات الفعالة التفرعية في تحسين جودة الطاقة بالتخلص من توافقيات التيار والحصول على عامل استطاعة واحدي ، كما تكمن في أهمية التحكم المباشر بالطاقة من حيث سهولة التوصيل وسهولة تصميم وتطبيق المتحكم مقارنة مع الطرق الأخرى الغير مباشرة، ومن أهمية التحكم التنبئي الذي يزيد من كفاءة وسرعة المتحكم .

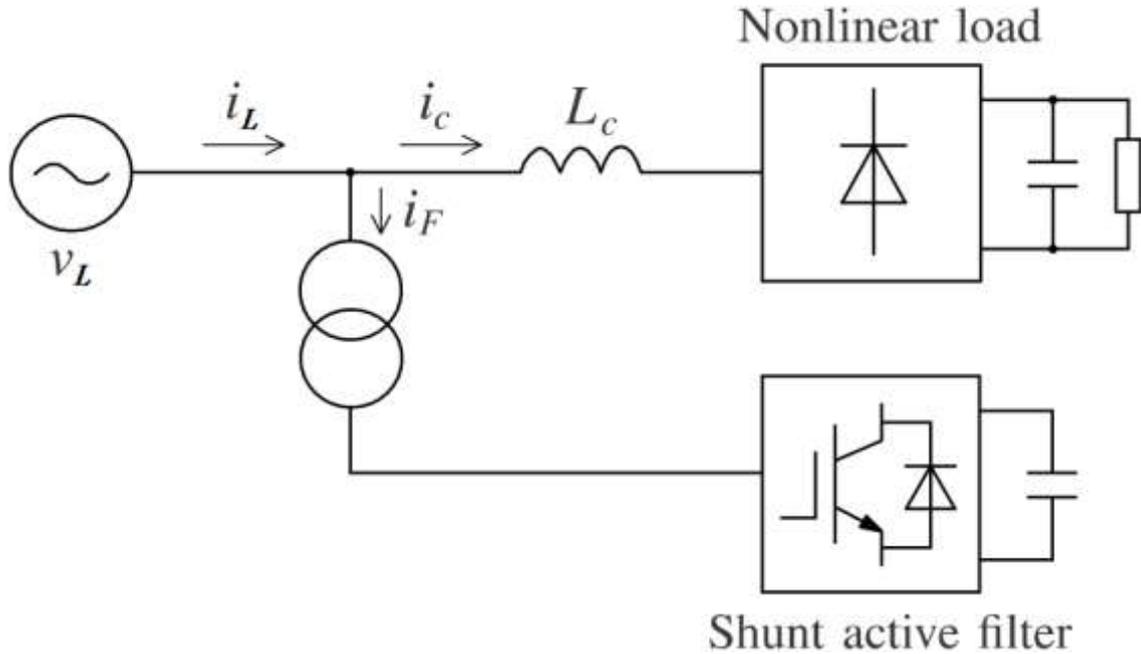
وبناءً على ذلك فإنّ الهدف من هذا البحث هو تصميم متحكم تنبئي مباشر بالطاقة P-DPC للتحكم بمرشح SAF بوجود حمل غير خطي ودراسة أداء النظام وكيفية استجابته عند حصول تغير في الحمل.

### طرائق البحث وموادّه :

لقد أنجز هذا البحث اعتماداً على دراسة العديد من البحوث المنجزة في هذا المجال والتوقف عند نتائجها و توصياتها ، وتمّ الاعتماد على البيئة البرمجية Simulink and SImpower , Matlab في وضع النماذج الرياضية للمنبع والحمل والمرشح وتصميم متحكم P-DPC واستخلاص النتائج .

#### • المرشح الفعال التفرعي (SAF) Shunt Active Filter :

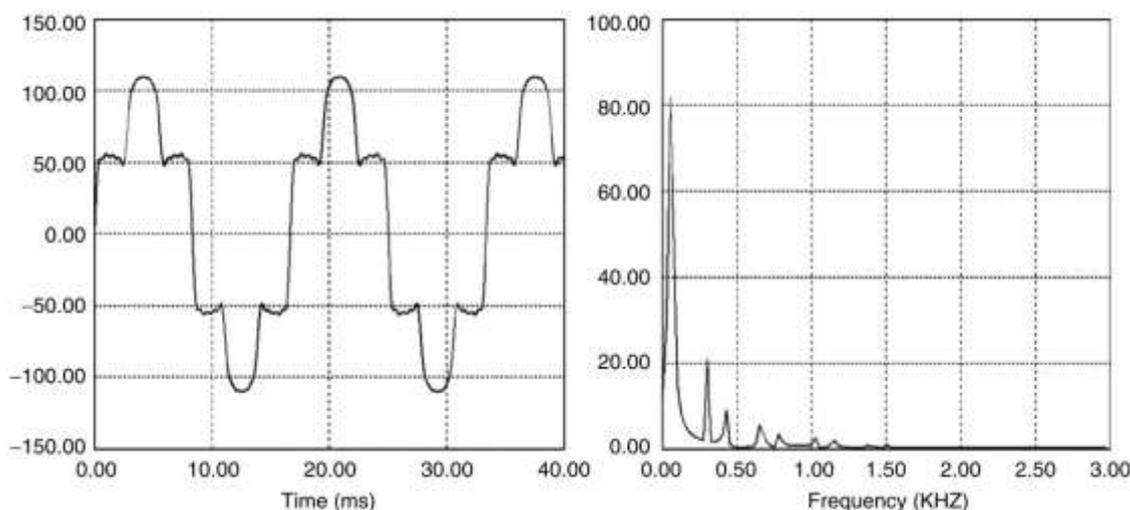
يبين الشكل (1) بنية النظام الذي يستخدم مرشح SAF كما حددها AKAGI[3]، وهذه البنية تصلح لمرشح أحادي أو ثلاثي الطور ، حيث يوصل المرشح مع مقوم ديودي يغذي حمل سعوي، وبالتالي فإن الحمل الغير خطي يمثل المقوم الديودي والحمل السعوي، وهذه هي البنية الأكثر شيوعاً واستخداماً بالنسبة للمرشحات الفعالة التفرعية .



شكل (1) المرشح الفعال التفرعي SAF

وحسب [3] AKAGI فإنّ الحمل السعوي في كثير من الحالات يمكن التعبير عنه كمحرك تحريضي مُقاد بواسطة معرج توتر كمصدر للجهود (Voltage Source Inverter (VSI)، أو ما يعرف بنظام القيادة الكهربائية لضبط السرعة (Adjustable Speed Drive(ASD) . والمرشح يمكن أن يوصل بشكل مباشر أو يوصل بوجود ملف

تحريضي ، ويقوم المرشح بإلغاء التوافقيات الناتجة عن الحمل الغير خطي عن طريق إنتاج تيار  $i_{ih}$  يعاكس التيار الناتج عن توافقيات تيار الحمل  $i_{lh}$ . أما بالنسبة للبنية الداخلية للمرشح SAF تستخدم بنية المبدل VSC الذي يستخدم المكثف كوحدة تخزين للطاقة . وفي هذا البحث فإن المرشح الفعال بالإضافة إلى حذف توافقيات التيار وتعويض الاستطاعة الردية سيقوم بتغذية حمله الخاص والحفاظ على جهد مستمر ثابت في خرجة ، وقد طرح هذا المبدأ لأول مرة في [10]. أما بالنسبة للحمل السعويالمربوط مع المقوم الديوديفهو عبارة عن نظام قيادة كهربائية لضبط السرعة ASD ، والشكل (2) يبين شكل إشارة التيار لنظام ASD وظيف التوافقيات لهذا التيار ، ونلاحظ من الشكل أنه في نظم القيادة الكهربائية لضبط السرعة تكون التوافقيتين الخامسة والسابعة كبيرة جداً [1].



شكل (2) إشارة وظيف توافقيات التيار لنظام ASD نمونجي

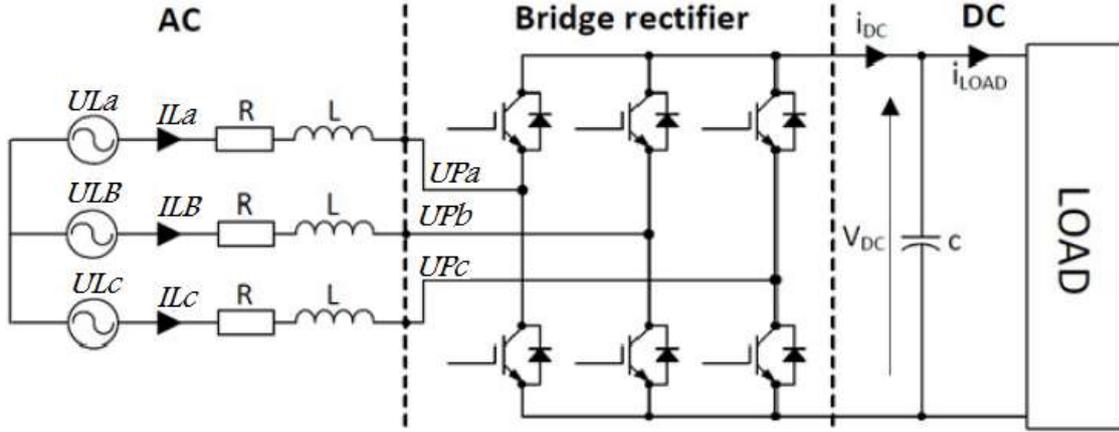
#### ● التحكم المباشر بالطاقة (DPC) Direct Power Control :

يعدّ التحكم المباشر بالطاقة DPC من أكثر تقنيات التحكم بمعدلات VSC شيوعاً ، وقد استتبقت من تقنية التحكم المباشر بالعزم للمحركات التحريضية [7] Direct Torque Control (DTC). والشكل (7) يبين المخطط الأصلي لتقنية DPC ، حيث يتم اختيار قيمة الصفر بالنسبة للاستطاعة الردية المرجعية  $Q_{ref}$  من أجل الوصول إلى عامل استطاعة واحد ، أما الاستطاعة الحقيقية المرجعية  $P_{ref}$  فيتم الحصول عليها عبر متحكم تناسبي تكاملي IP ، وتتم مقارنتهما مع الاستطاعتين P و Q المحسوبتين بشكل آني . وباستخدام متحكمات تعويق مغناطيسي hysteresis controllers وبحساب الزاوية  $\theta$  التي تحدد موقع شعاع الجهد  $U_L$  ضمن إحداثيات  $(\alpha - \beta)$ ، يتم اختيار حالات قرح المفاتيح  $S_a, S_b, S_c$  من خلال جدول قرح switching table ، وبالتالي فإنّه لا حاجة في هذه الطريقة لوجود وحدة لتعديل عرض النبضة PWM ، ولا يوجد حلقة داخلية للتحكم بالتيار ، كما نلاحظ أننا لا نحتاج لاستخدام الاحداثيات الدوارة (d - q) بل نحتاج التحويل إلى إحداثيات  $(\alpha - \beta)$ ، وبالتالي يمكن تصميم وتطبيق المتحكم بسهولة مقارنة مع الطرق الأخرى .

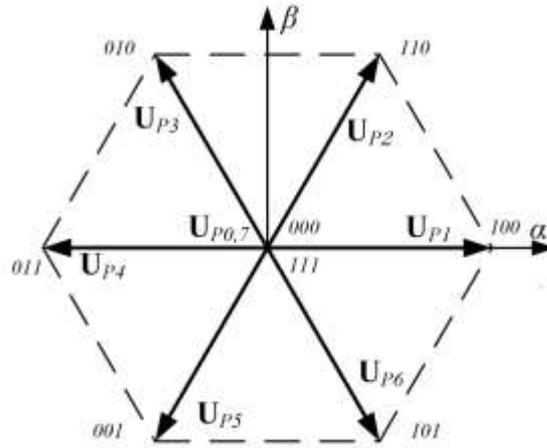
#### ● مبدل التوتّر كمصدر للجهد (VSC) Voltage Source Converter :

من أهم خصائص مبدل VSC هو الاتجاه الثنائي لتدفق الطاقة، فهو يعمل كمعرج Inverter أو كمقوم Rectifier ولا يولد توافقيات كثيرة في التيار [9]. وأغلب هذه المبدلات تستخدم ترانزستورات من نوع IGBT ، وهذه

الترانزستورات مناسبة جداً لمبدلات VSC فهي تعمل بتردد عالي وتتحمل قيم عالية من التيار والجهد [3]. والشكل (3) يبين مبدل VSC مربوط مع الشبكة ، ففي الجانب المتناوب ( ac-side ) هنالك المنبع بالإضافة لملف ومقاومة ، وفي الجانب المستمر (dc-side) يوجد المكثف مع الحمل . أما المبدل فيحوي على ست ترانزستورات من نوع IGBT تقسم إلى ثلاثة أذرع تعمل حسب حالات القدح للترانزستورات  $S_a, S_b, S_c$  ، وفي كل ذراع يكون أحد الترانزستورات في حالة ON والآخر في حالة OFF ، وبالتالي لدينا 64 حالة لعمل المبدل لا يسمح منها إلا بثمان حالات تولد كل حالة شعاع جهد  $U_p$  وهو الجهد على خرج المبدل، والشكل (4) يبين هذه الحالات الثمانية وحالات القدح للبوابات مع شعاع الجهد للمبدل  $U_p$  ضمن الإحداثيات  $\alpha - \beta$

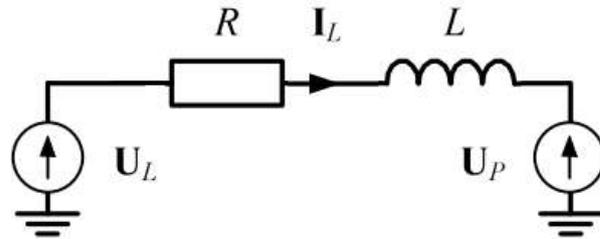


شكل (3) مبدل التوتر كمصدر للجهد VSC



شكل (4) أشعة الجهد المولدة من قبل مبدل VSC

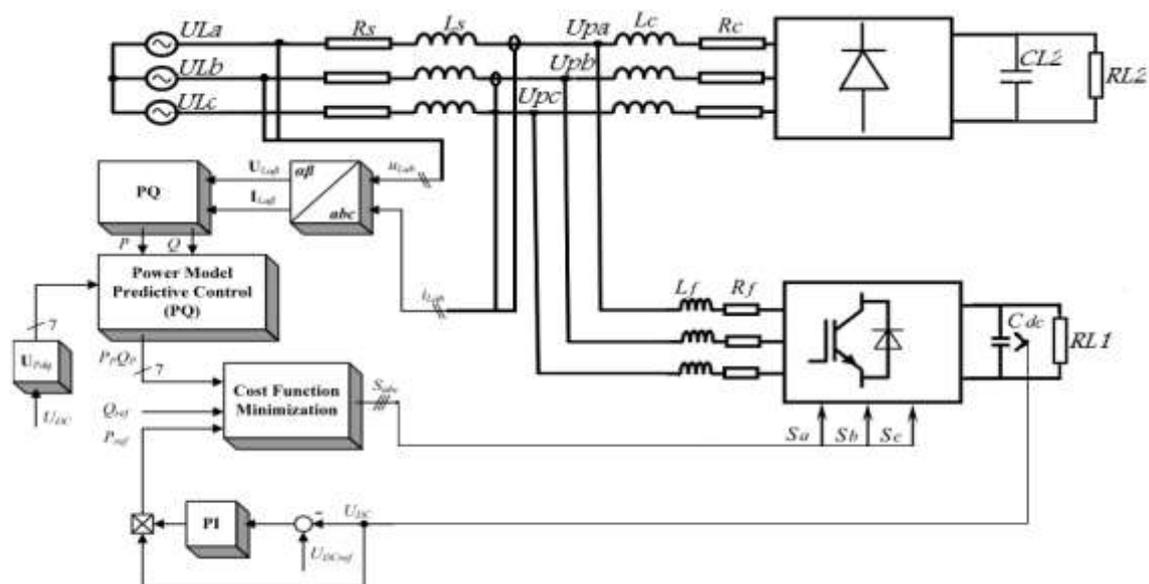
ويبين الشكل (5) الدارة المكافئة لأحد الأطوار لمبدل VSC ، وباستخدام قانون كيرشوف وتحويل Clarke إلى الإحداثيات  $\alpha - \beta$  نكتب المعادلة (1) والمعادلة (2)، حيث  $U_{L\alpha}, U_{L\beta}$  و  $I_{L\alpha}, I_{L\beta}$  هي قيم الجهد والتيار في نظام الإحداثيات  $\alpha - \beta$  .



شكل (5) الدارة المكافئة لأحد أطوار مبدل VSC

### ● التحكم التنبئي المباشر بالطاقة (P-DPC) : Predictive Direct Power Control

استخدم التحكم التنبئي أو ما يعرف بالتحكم باستخدام نموذج تنبئي Model Predictive Control (MPC) بدايةً في تطبيقات التحكم بعمليات تكرير النفط، ثم استخدم في مجال الصناعات الكيماوية، وتم تعميمه لاحقاً ليشمل جميع المجالات ومنها التحكم بنظم القدرة [11]. يستخدم MPC نموذج النظام بالإضافة إلى القياسات الحالية للعملية من أجل حساب التصرف المستقبلي لخرج المتحكم من أجل العينة التالية، ويحسب أوامر المتحكم المستقبلية لكل خطوة عن طريق تصغير تابع ربح [12] cost function حيث تم الحصول على  $P_{ref}$  عن طريق متحكم تناسبي تكاملي PI وتم اختيار ثوابته بشكل تجريبي. ويبين الشكل (6) المخطط الصندوقي لمتحكم P-DPC المستخدم للتحكم بالمرشح الفعال SAF، وكيفية ربطه مع النظام حيث يقوم متحكم P-DPC بالتنبؤ بقيم الاستطاعة الحقيقية والردية  $P_p, Q_p$  من أجل جميع قيم شعاع الجهد للمبدل  $U_{p0} \rightarrow U_{p6}$  باعتبار أن  $U_{p0}$  منطبق على  $U_{p7}$  (كما في الشكل (4)) واختيار أفضل شعاع  $U_p$  عن طريق تصغير تابع الربح المبين في المعادلة (3)، حيث  $P_p, Q_p$  هي قيم الاستطاعة الحقيقية والردية المنتبأ بها. وبما أنه لدينا سبعة أشعة  $U_{p0} \rightarrow U_{p6}$  فسيكون لدينا سبع قيم للاستطاعة الحقيقية والردية المنتبأ بها  $P_p, Q_p$ ، وبالتالي سبع قيم لتابع الربح  $J$ ، وسيقوم المتحكم باختيار الشعاع الذي يعطي أقل قيمة للتابع  $J$ . وبمعرفة الشعاع  $p$  يمكن معرفة حالة قذح المفاتيح  $S_a, S_b, S_c$  كما هو مبين في الشكل (4). وبعد قذح مفاتيح المبدل VSC يقوم المتحكم بتكرار هذه العملية وحساب أفضل حالة لقذح المفاتيح من أجل العينة القادمة.



شكل (6) المخطط الصندوقي لمتحكم P-DPC موصول مع النظام

من أجل حساب الاستطاعة الحقيقية والرديية في نظام إحداثيات  $\alpha - \beta$  نستخدم نظرية AKAGI في الطاقة [13] المبينة في المعادلة (4) .

ومن المعادلة (4) يمكن كتابة المعادلتين (5) و (6) .

وباشتقاق طرفي المعادلتين (5) و (6) بالنسبة للزمن نحصل على المعادلتين (7) و (8) .

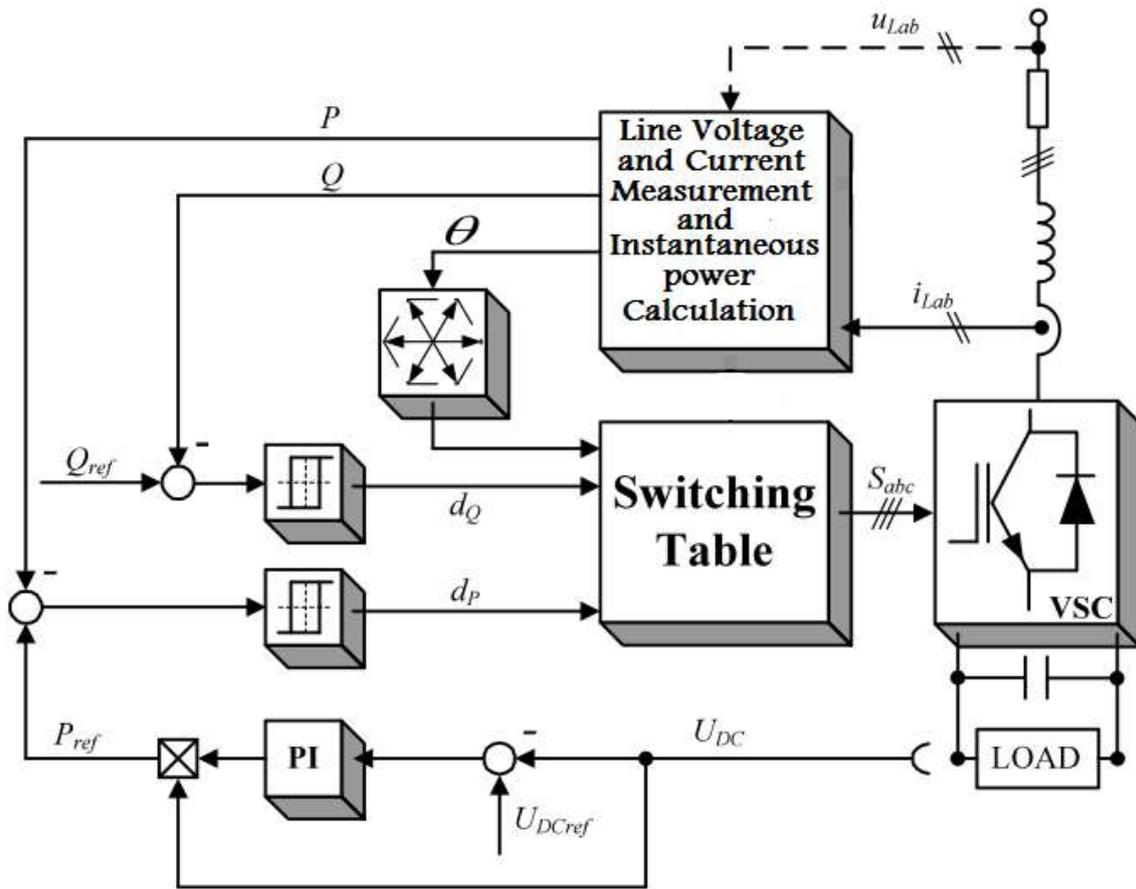
ومن المعادلتين (1) و (2) نكتب المعادلتين (9) و (10) حيث  $L = L_S$  و  $R = R_S$  في جميع المعادلات القادمة.

وبما أن إشارة الجهد في إحداثيات  $\alpha - \beta$  هي إشارة جيبيية تعطى بالمعادلتين (11) و (12)، حيث  $U_m$  هي القيمة العظمى لمطال الجهد في نظام إحداثيات  $\alpha - \beta$  ، و  $\omega$  هي السرعة الزاوية لإشارة الجهد .

وباشتقاق المعادلتين (11) و (12) نحصل على المعادلتين (13) و (14).

$$\frac{dP}{dt}$$

$$\frac{dQ}{dt}$$



شكل (7) المخطط الصندوقي للتحكم المباشر بالطاقة DPC

وسنقوم الآن بإيجاد الاستطاعة الحقيقية المتنبأ بها  $P_p$  وبنفس الطريقة يمكن إيجاد الاستطاعة الردية المتنبأ بها  $Q_p$ . لإيجاد الاستطاعة الحقيقية المتنبأ بها  $p$  نعوض كلاً من المعادلات (9) و(10) و(13) و(14) في المعادلة (7) فنحصل على المعادلة (15).

وبإعادة كتابة المعادلة (15) كمعادلة فروق نحصل على المعادلة (16)، حيث  $\Delta P$  هو التغير في الاستطاعة الحقيقية، وجمع  $\Delta P$  مع قيمة الاستطاعة  $P$  نحصل على الاستطاعة الحقيقية المتنبأ بها  $P_p$  كما في المعادلة (17)، وباعتبار  $\Delta t$  هو زمن العينة  $T_s$ ، نكتب المعادلة (18).

$$P_p = T_s \left[ U_{La} \left( \frac{1}{L} \right) + \dots \right]$$

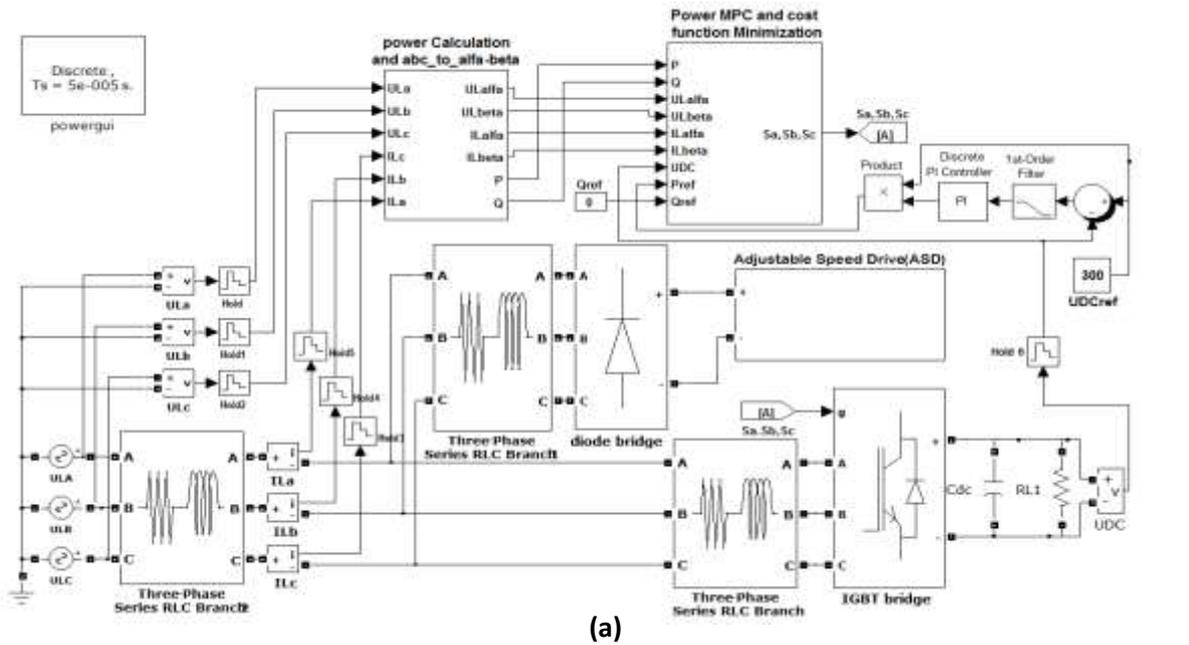
وبنفس الطريقة نحصل على الاستطاعة الردية المتنبأ بها  $Q_p$  المبينة في المعادلة (19).

$$Q_p = T_s \left[ U_{L\alpha} \right]$$

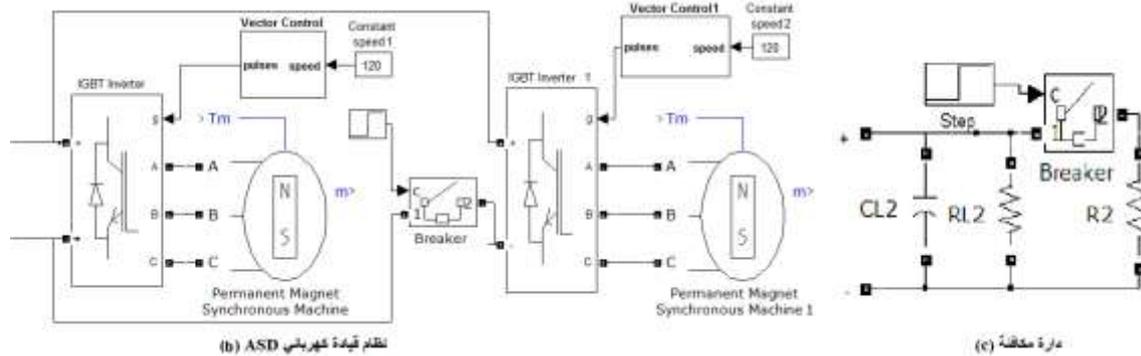
وتم حل المعادلات من أجل حساب  $Q_p$  و  $P_p$  بالاستفادة من [5] مع ملاحظة أنه في الدراسة [5] تم إهمال المقاومتين  $RI_{L\alpha}$  و  $RI_{L\beta}$  أما في دراستنا فلم نهمل قيم المقاومتين. نلاحظ من الشكل (6) أن هناك سبع قيم لكل من  $U_{p\alpha}$  و  $U_{p\beta}$  وبتعويض هذه القيم في المعادلتين (18) و (19) نحصل على سبع قيم مختلفة للاستطاعات المتنبأ بها  $Q_p$  و  $P_p$  وبالتالي نحصل على سبع قيم لتابع الريح  $J$  ونختار شعاع الجهد الذي يعطي أصغر قيمة لتابع الريح  $J$ ، ويمكن التعبير عن شعاع الجهد بالمستوي العقدي عن طريق المعادلة (20) [9].

### النتائج و المناقشة :

بين الشكل (8(a)) نموذج النظام باستخدام Simulink and Smpower، ويبين كيفية ربط المتحكم P-DPC مع مرشح SAF المربوط بشكل تفرعي مع حمل غير خطي عبارة عن نظام قيادة لضبط سرعة المحرك عن طريق التحكم الشعاعي vector control (مبين في الشكل (8(b))) مربوط مع مقوم ديودي، حيث نلاحظ في يسار الشكل منبع ثلاثي الطور موصول مع فرع RL يمثل مقاومة وتحريضية الشبكة الكهربائية، وأما جسر IGBT فيمثل المرشح التفرعي والذي يقود حمله الخاص المعبر عنه بمقاومة ومكثف، ويتم التحكم به عن طريق نبضات  $S_a, S_b, S_c$  مأخوذه من خرج المتحكم P-DPC المعبر عنه بالصندوق Power MPC and costfunction minimization، أما الجسر الديودي Diod bridag فهو يمثل مع نظام القيادة الكهربائية لمحرك تحريضي ASD الحمل الغير خطي ومن الشكل (8(b)) وعن طريق مفتاح Breaker يتم وصل محرك ثاني مشابه للأول لنحدث تغيراً في الحمل عند زمن 1.5 s، واما الصندوق Power calculation and abc\_to\_alfa-beta فهو يتولى حساب الاستطاعات عن طريق مقاييس الجهد والتيار الموجودة على دخله ويقوم بالتحويل إلى إحداثيات  $\alpha - \beta$ . والجدول (1) يبين الخصائص الكهربائية للنظام التي استخدمت في عملية النمذجة، وتم اختيار هذه القيم بناءً على نماذج مخبرية موجودة في العديد من الدراسات، الشكل (8(c)) يمثل الدارة المكافئة لنظام قيادة لضبط سرعة المحرك التحريضي المبينة في الشكل (8(b))، ولم نستخدم الدارة المكافئة في عملية النمذجة بل استخدمنا نظام القيادة الحقيقي المبين في الشكل (8(c)) والمكون من محركين متطابقين مع دارات القيادة ونظام تحكم بالسرعة باستخدام التحكم الشعاعي.



(a)



(b) نظام قيادة غير متري ASD

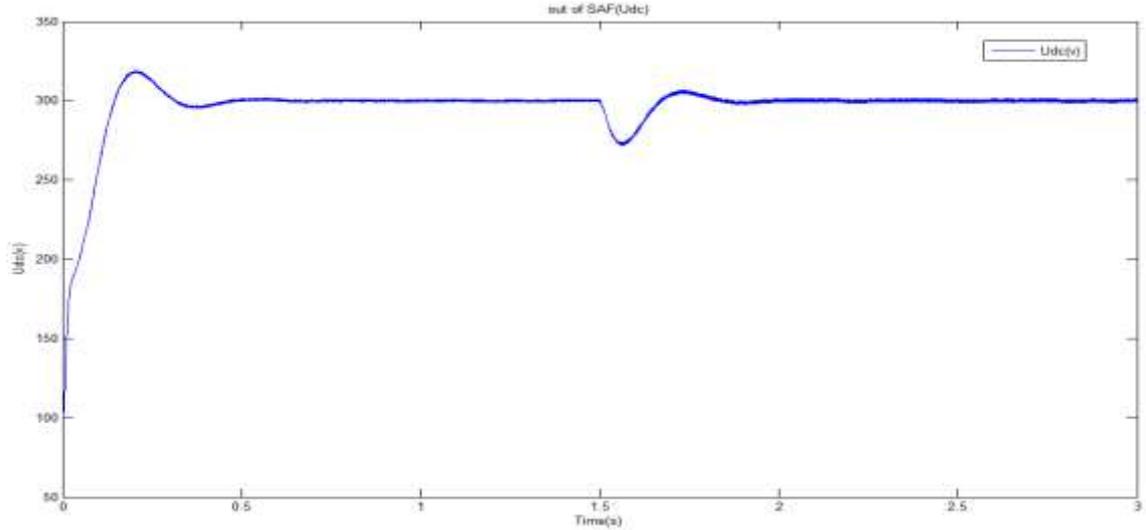
(c) دارة مكثفة

شكل (8) نموذج النظام باستخدام Simulink and SImpower

الشكل (9) يبين الخرج المستمر لمبدل VSC ، ونلاحظ من الشكل أن المبدل الذي يعمل كمرشح SAF يقوم بتغذية حملة الخاص ويحافظ على جهد مستمر في الخرج يساوي الجهد المرجعي 300 V وعند تغير الحمل اللاخطي أي عند زمن النمذجة 1.5 s نلاحظ أن متحكم P-DPC يقوم بسرعة بإرجاع قيمة جهد الخرج إلى الجهد المرجعي .

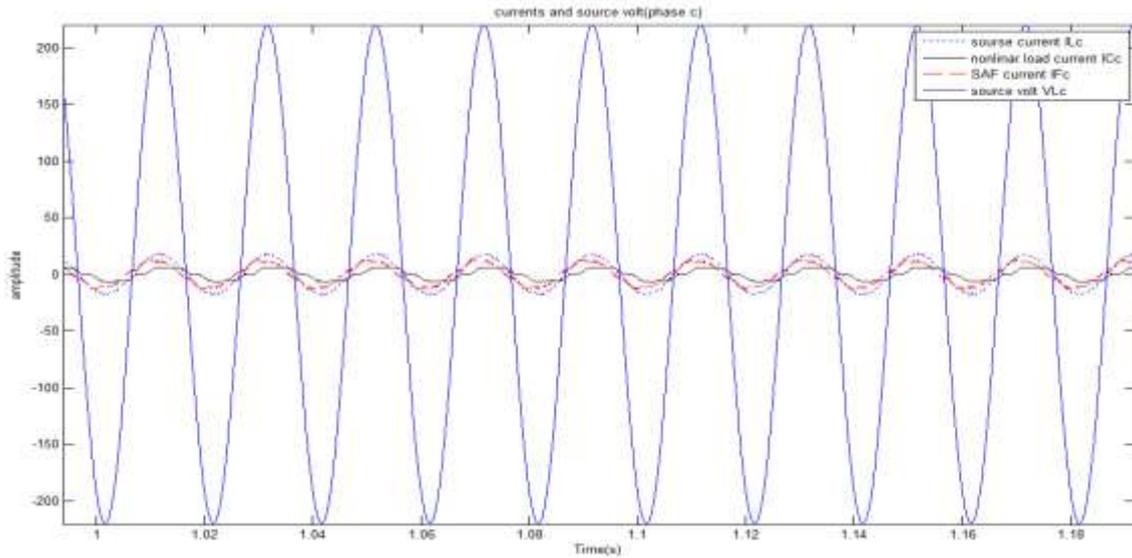
الجدول (1): الخصائص الكهربائية للنظام

220 V	جهد المنبع UL
50 Hz	تردد المنبع f
0.1 Ω	المقاومات Rs , Rf , Rc
10 mH	الملفات Lf , Lc
3 mH	ملف المنبع Ls
2.2 mF	المكثفات CL2 , Cdc
50 Ω	المقاومة RL1
50 Ω → 25 Ω	المقاومة RL2
300 V	الجهد المستمر المرجعي Udc_ref
20 KHz	تردد أخذ العينات fs

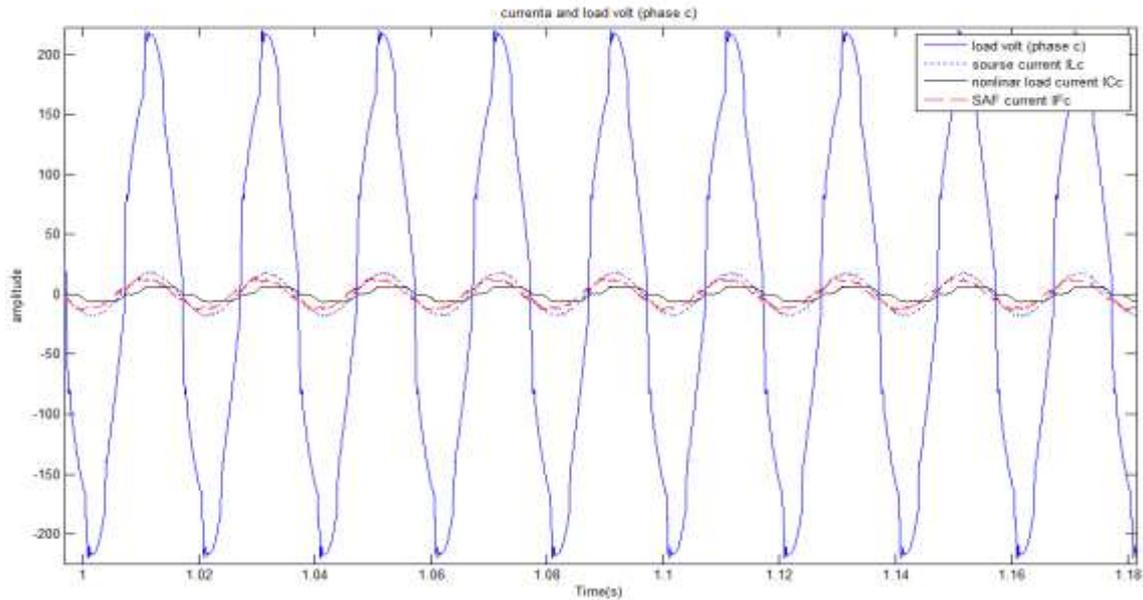


شكل (9) الخرج المستمر لمرشح SAF

يبين الشكل (10) إشارة الجهد لأحد أطوار المنبع وهو الطور C وقد أعدنا رسم إشارات التيار لوحدها في الأشكال (12) و(13) بسبب مطال الجهد الكبير مقارنة مع مطالات التيار، يبين الشكل (11) إشارة الجهد لأحد أطوار الحمل وهو الطور C مرسوماً مع إشارات التيارات بوجود المرشح التفرعي، وقد تم حساب عامل التشوه الكلي لإشارة جهد الحمل  $THD_v\%$  بوجود المرشح التفرعي وقيمته تساوي 22%.

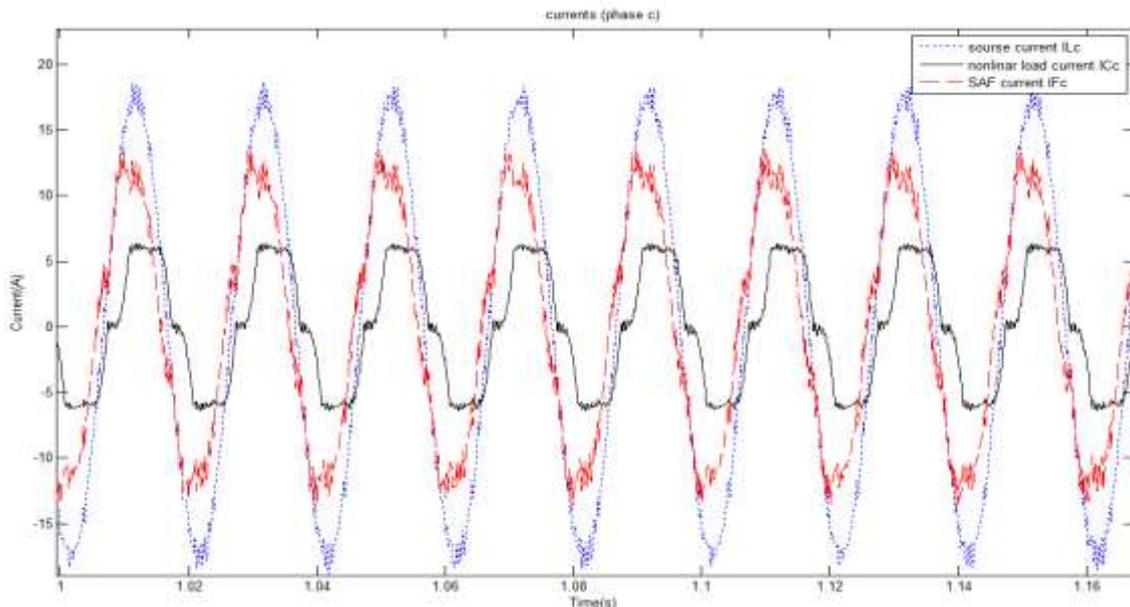


شكل (10) إشارة جهد المنبع (الطور c) مع إشارات التيار

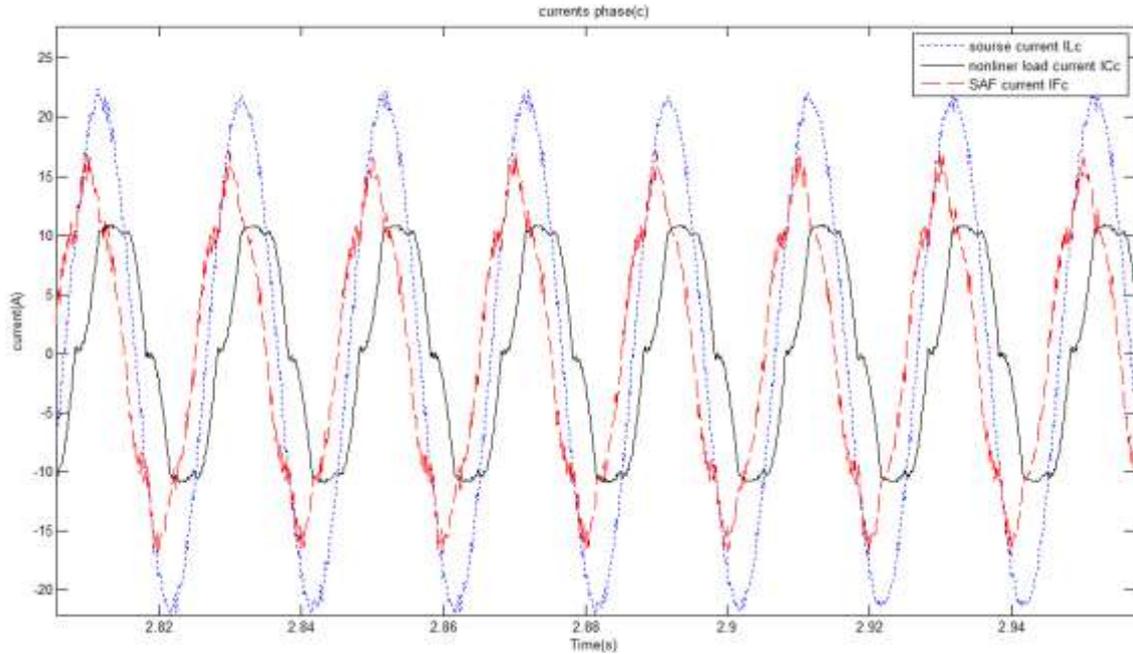


شكل (11) إشارة جهد الحمل (الطور c) مع إشارات التيار

يبين الشكل (12) إشارة تيارات دخل كل من مرشح SAF والحمل اللاخطي إضافة إلى تيار المنبع عند الحمل الأول حيث يتم وصل محرك واحد فقط ، والشكل (13) يبين إشارة تيارات دخل كل من مرشح SAF والحمل اللاخطي و تيار المنبع عندما يتم وصل المحرك الثاني ، وفي كلا الشكلين نلاحظ الخرج الجيبي لتيار المنبع نتيجة إضافة مرشح SAF ، ونلاحظ أنّ التيار يساوي 5A عند وجود المحرك الأول وعند وصل المحرك الثاني على التفرع باستخدام Breaker يزيد التيار إلى الضعف 10A لأنّ المحركين متشابهين وكل محرك يسحب تيار 5A، وفي حال قمنا بالنمذجة باستخدام الدارة المكافئة المبينة في الشكل (8(c)) فإنّ الزيادة في التيار لن تتناسب مع الزيادة في المقاومة لأننا نرسم التيار من قبل المقوم الديودي وبالتالي فالعلاقة غير خطية.



شكل (12) تيارات المرشح SAF والحمل اللاخطي والمنبع عند وصل محرك وحيد

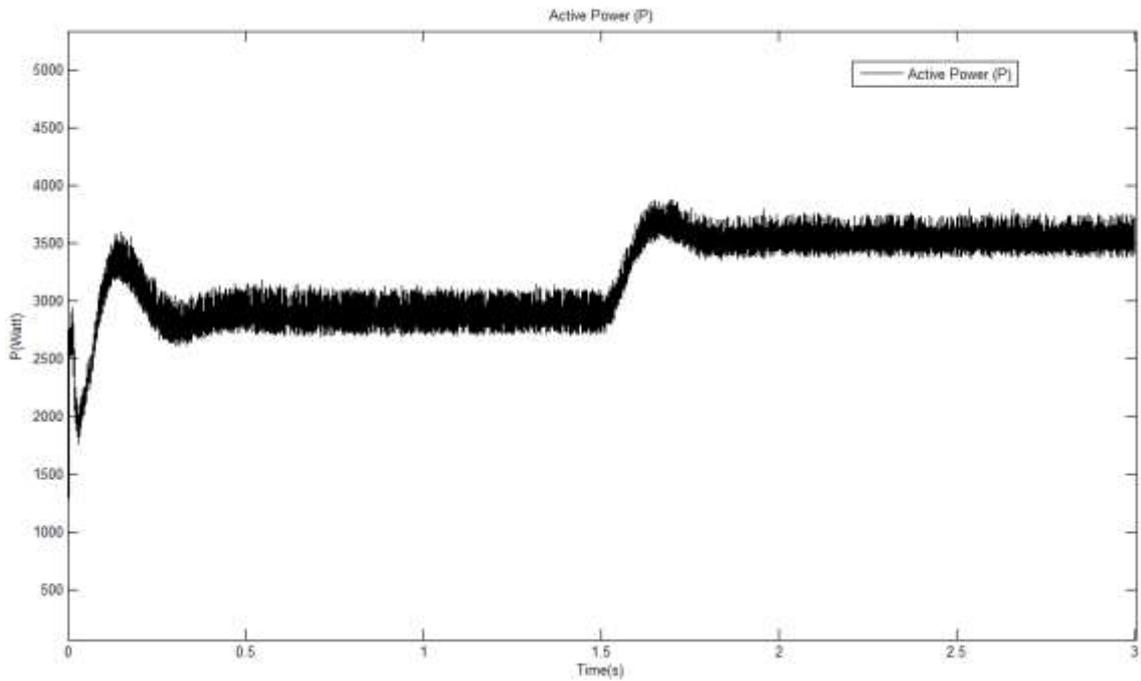


شكل (13) تيارات المرشح SAF والحمل اللاخطي والمنبع عند وصل محركين

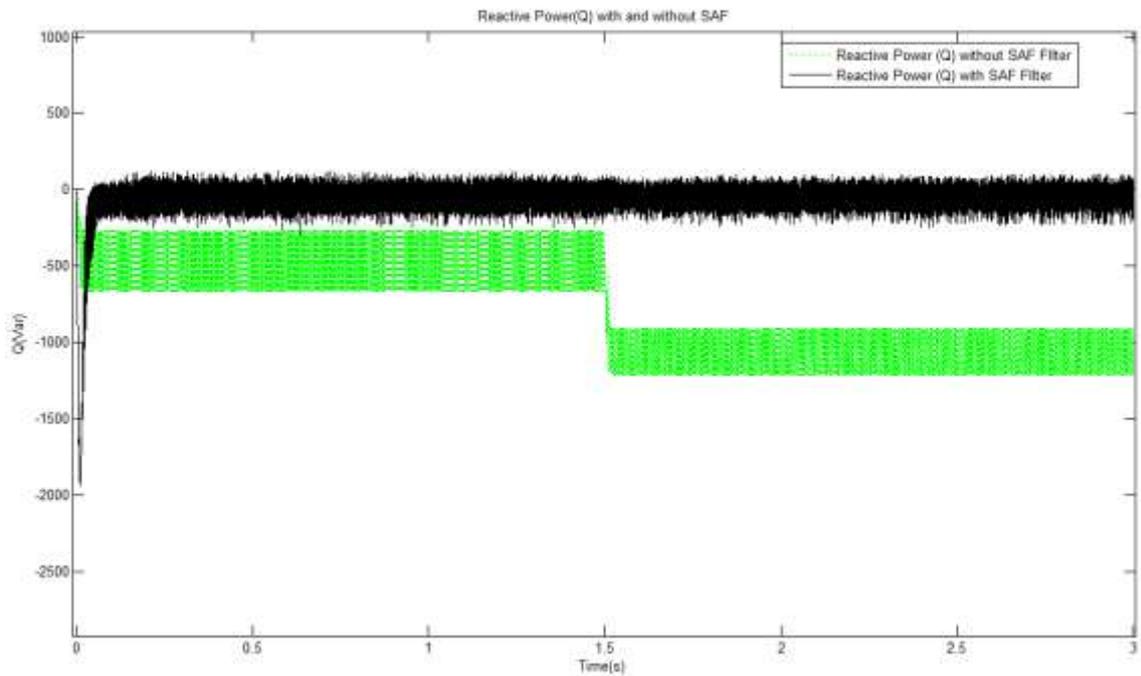
الشكل (14) يبين الاستطاعة الحقيقية المسحوبة من المنبع ، ونلاحظ أن المتحكم يحافظ على استطاعة كافية لتغذية كل من الحمل الغير خطي والمرشح SAF ، وعند تغير الحمل الغير خطي عند الزمن 1.5 s فإن متحكم P-PDC يحافظ على استطاعة أعلى قادرة على تغذية النظام بعد زيادة محرك ثانيللحمل الغير خطي.

الشكل (15) يبين الاستطاعة الردية للمنبع بدون وجود مرشح SAF وبوجود المرشح SAF ونلاحظ أنه من دون استخدام المرشح فإن الاستطاعة الردية تتأرجح بقيم قريبة من  $1000(\text{Var})$  بوجود محركين ، وبعد إضافة المرشح فإن المتحكم يحافظ عليها قريبة من القيمة المرجعية الصفرية وبالتالي الحصول على عامل استطاعة واحد ، وهناك تأرجح للاستطاعة بين الصفر و  $-200$  وهي أفضل نتيجة أمكننا التوصل إليها، حيث تمكنا من تخفيض الاستطاعة الردية بشكل كبير وتخفيض التآرجح نوعاً ما، وتعد هذه النتيجة جيدة بالمقارنة مع متحكمات تقليدية .

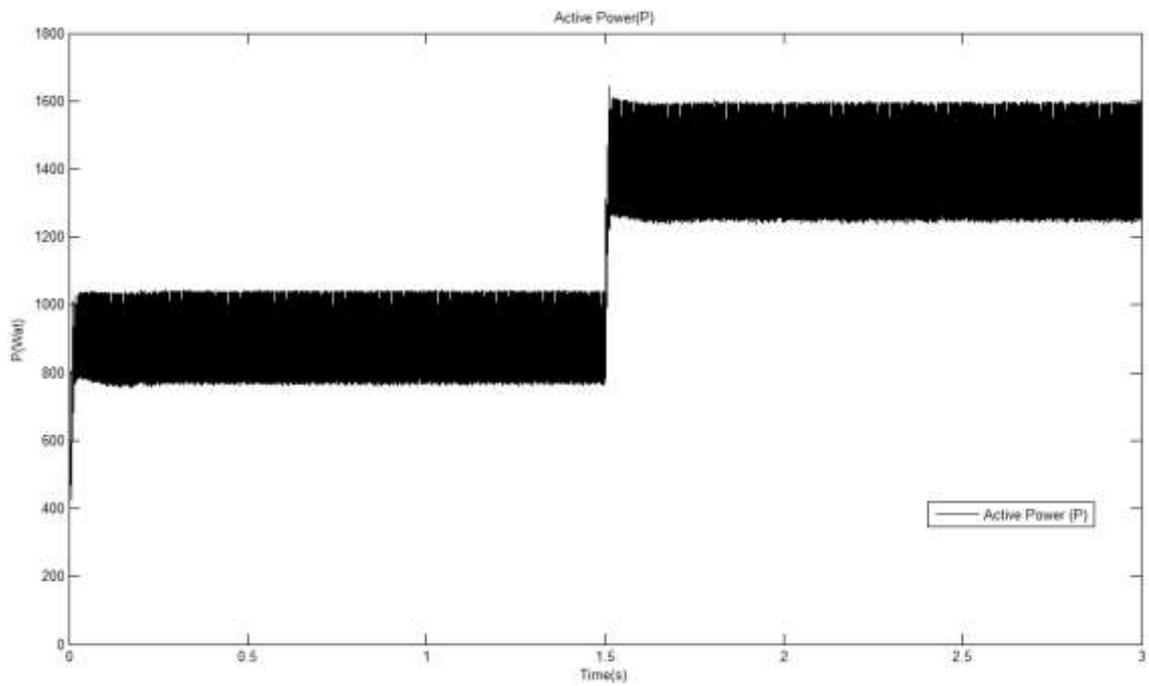
والشكلين (16) و (17) يبينان الاستطاعة الحقيقية والاستطاعة الردية بالنسبة للحمل ، وإن الغرض من المرشح التفرعي هو تحسين الاستطاعة المسحوبة من المنبع فقط ، وعلى هذا الأساس تم تصميم المتحكم P-PDC ، والشكلين (18) و (19) يبينان الاستطاعة الحقيقية والاستطاعة الردية بالنسبة للمرشح ، ونلاحظ من الأشكال التي تبين الاستطاعة أن الاستطاعة المسحوبة من المنبع تساوي بالحقيقة استطاعة الحمل واستطاعة المرشح ، ويمكن ملاحظة ذلك بسهولة من الأشكال التي تبين الاستطاعة.



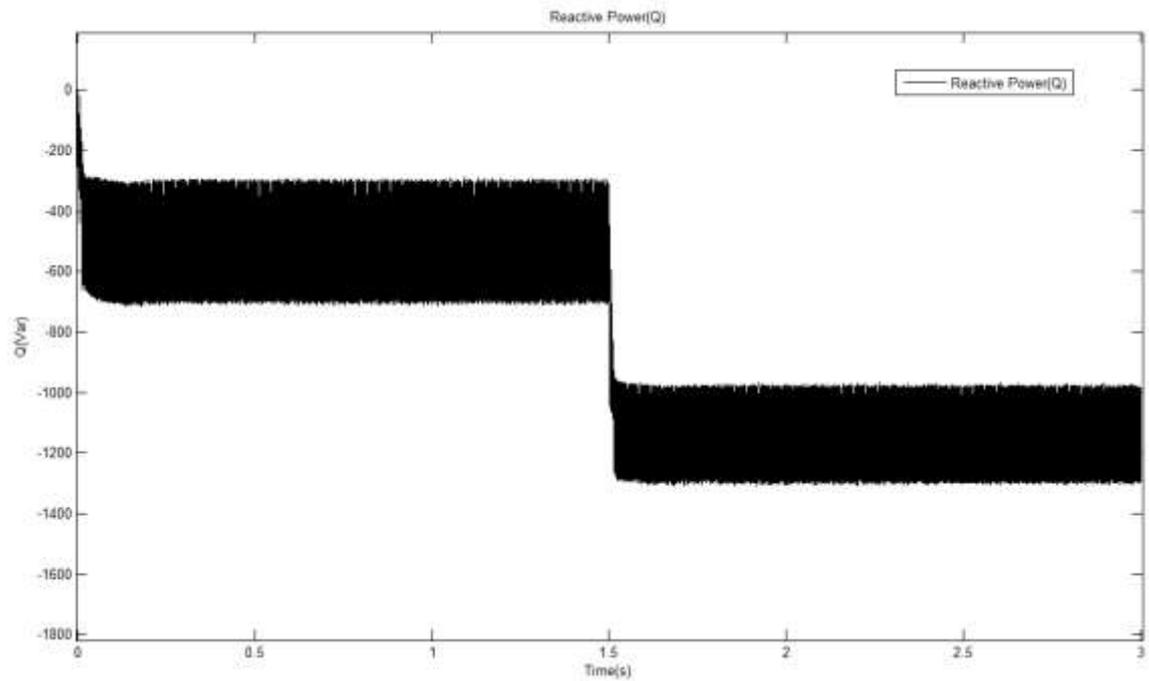
شكل (14) الاستطاعة الحقيقية للمنبع P



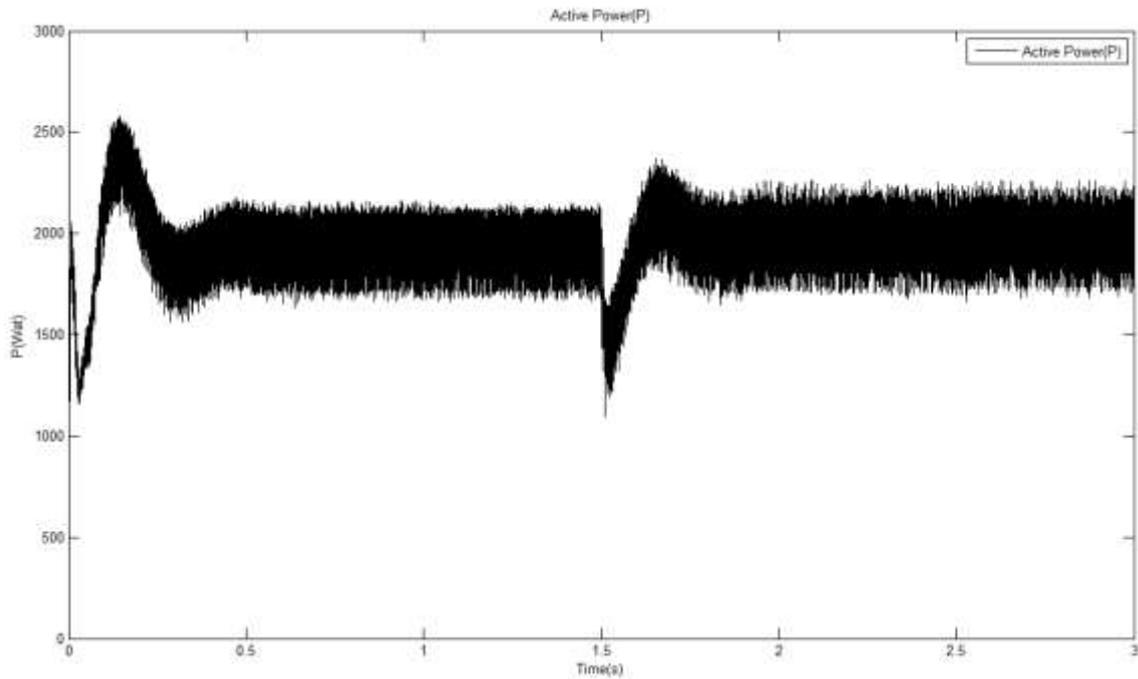
شكل (15) الاستطاعة الردية للمنبع Q مع وبدون مرشح



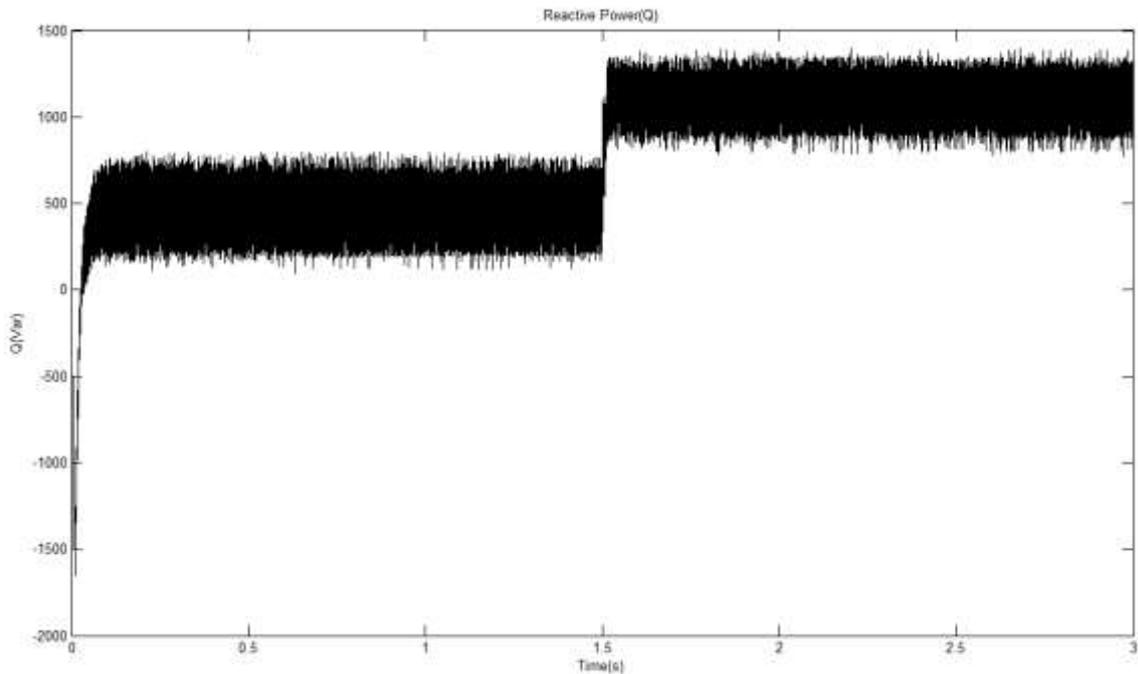
شكل (16) الاستطاعة الحقيقية للحمل P



شكل (17) الاستطاعة الردية للحمل Q

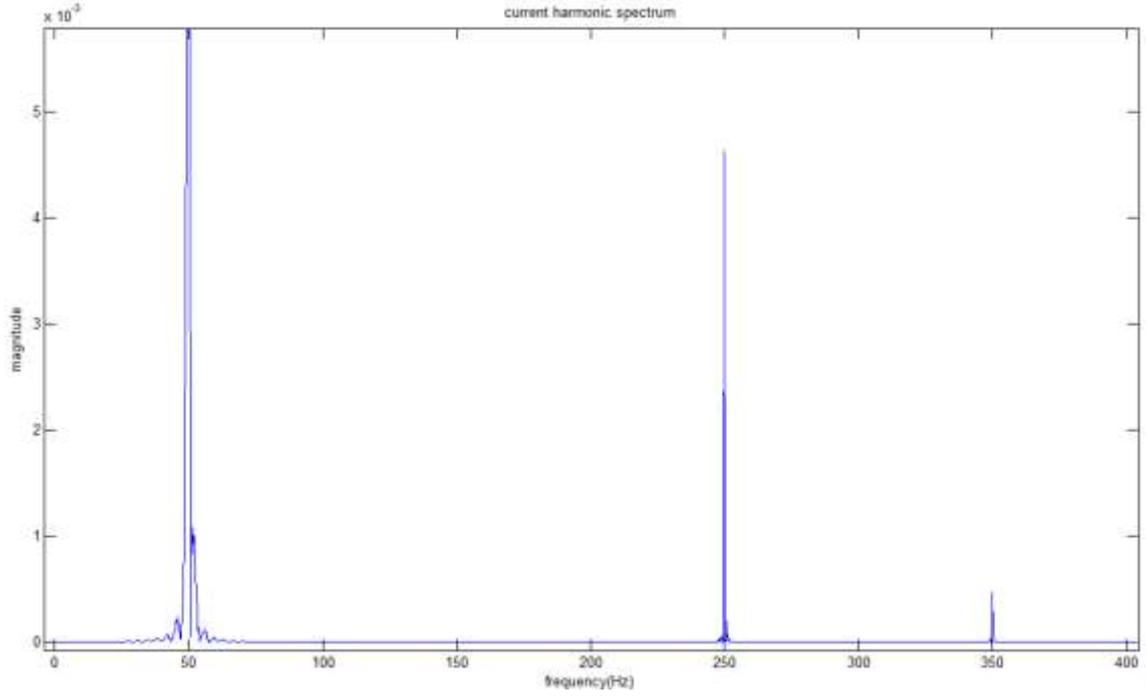


شكل (18) الاستطاعة الحقيقية للمرشح P

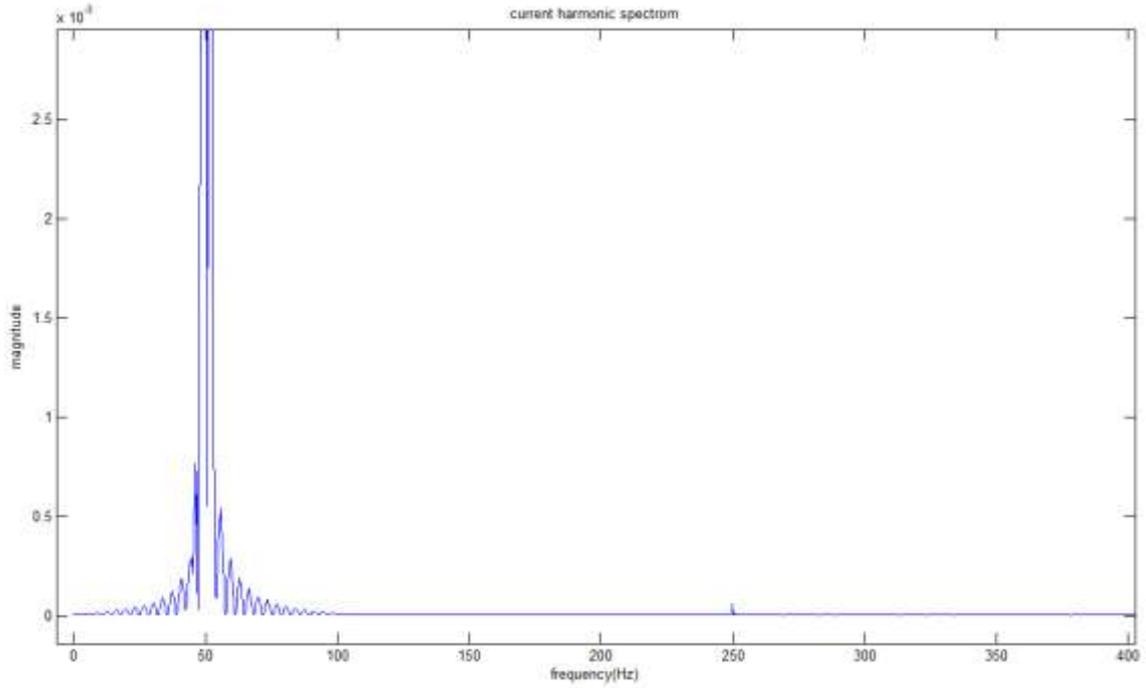


شكل (19) الاستطاعة الردية للمرشح Q

يبين الشكل (20) طيف التوافقيات لتيار المنبع قبل إضافة الحمل ، ونلاحظ من الشكل تأثير التوافقية الخامسة عند التردد عند التردد 250 Hz والتوافقية السابعة عند التردد 350 Hz. أما الشكل (21) فيبين طيف التوافقيات لتيار المنبع بعد إضافة مرشح SAF والذي يبين تخفيض كبير جداً في التوافقتين الخامسة والسابعة .



شكل (20) طيف توافقيات التيار للمنبع دون وجود مرشح SAF



شكل (21) طيف توافقيات التيار للمنبع بوجود مرشح SAF

وقد تمّ حساب عامل التشوه الكلي لتيار المنبع  $\%THD_i$  قبل وبعد إضافة مرشح SAF ، فكانت قيمة  $\%THD_i$  قبل إضافة مرشح SAF وبوجود المحرك الأول فقط تساوي 17% ، وبعد إضافة المرشح نقصت إلى 4.3%. أما عند إضافة المحرك الثاني على التفرع فكانت قيمة  $\%THD_i$  قبل وصل المرشح تساوي 12% ، أما بعد

إضافة المرشح نقصت إلى 3.6% ، وهذه القيم تعبر عن أداء ممتاز لمتحكم P-DPC. ولوحظ زيادة في مطالات الإشارات بالقرب من التردد 50 Hz لأنها المركبة الأساسية وكلما اقتربت الإشارة من الشكل الجيبي تزداد قيمة التوافقية ذات التردد 50 Hz وجوارها. وقمنا بتكبير الشكل (21) لكي نلاحظ الأثر البسيط جداً للتوافقية الخامسة.

### الاستنتاجات و التّوصيات :

- لقد قمنا بتطبيق التحكم التنبئي المباشر بالطاقة P-DPC من أجل التحكم بمرشح فعال تفرعي SAF وهذه الطريقة لم تستخدم من قبل للتحكم بمرشح SAF.
- مرشح SAF قادر على تحسين عامل الاستطاعة وتخفيض توافقيات التيار وبنفس الوقت يقوم بتغذية حملة الخاص.
- استخدام P-DPC للتحكم بمرشح SAF أدى إلى تخفيض ممتاز في عامل التشوه الكلي للتيار  $THD_i\%$  وجعل إشارة تيار المنبع جيبيّة إلى حدٍ ما.
- ينتج عن الحمل السعودي المدروس التوافقيتين الخامسة والسابعة بشكل رئيسي .
- يستجيب متحكم P-DPC بسرعة للتغيرات في الحمل الغير خطي.
- يمكن تطوير P-DPC للتحكم بمرشحات فعالة تعتمد على بنية Three-level converter التي تعطي استطاعة أكبر من المرشحات ذات البنية Two-level converter المستخدمة في دراستنا.

### المراجع :

1. EMADI , A ; NASIRI, A; and BEKIAROV, S. B. *Uninterruptible power supplies and active filter*. CRCpress LLC, United States of America, 2005, 272.
2. SINGH , B ; Al-HADDAD. K ; and CHANDRA , A. *A review of active filter for power quality improvement*. 1999. IEEE Trans, Ind Electron, Vol.46, 1999, pp-960-971.
3. AKAGI , H. *Modern active filters and traditional passive filters*. Bull. Pol. Ac. Tech, Vol.54, No.3, 2006, 255-269.
4. CHAOUI , A; GAUBERT , P.J ;and BOUAFIA .A. *Direct Power Control Switching Table Concept and Analysis for Three-phase Shunt Active Power Filter*. J. Electrical Systems, 9-1, 2013, 52-65.
5. AURTENECHÉ, S; RODRIGUEZ, M.A; OYARBIDE, E; and TORREALDAY J. R. *Predictive control strategy for dc/ac converters based on direct power control*. IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 54, no. 3, 2007, pp. 1261–1271.
6. KAZMIERKOWSKI, M. P; KRISHNAN, R; and BLAABJEG, F. *Control in Power Electronics*. Academic Press, Elsevier Science , USA, 2002, 518.
7. Noguchi, T; Tomiki, H; Kondo, S; and Takahashi, I. *Direct power control of PWM converter without power-source voltagesensors*. IEEE Trans. Indust. Appl. 34, 1998, 473–479.
8. CICHOWLAS, M; MALINOWSKI, M; KAZMIERKOWSKI, M. P; and SOBCZUK, D. L. *Active Filtering of Three-Phase PWM Boost Rectifier Under Different Line Voltage Conditions*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 52, no 2, 2005, pp. 410-419.

9. ANTONIEWICZ, P; and KAZMIERKOWSKI, M.P. *Predictive direct power control of three-phase boost rectifier*. Bull. Pol. Ac. Tech, Vol154, No.3, 2006, 287-292.
10. KATAOKA, T; FUSE, Y; NAKAJIMA, D; and NISHIKATA, S. *A three-phase voltage-type PWM rectifier with the function of an active power filter*. Power Electronics and Variable Speed Drives, 2000, pp. 386-391.
11. KOUVARITAKIS, B; and CANNON, M. *Nonlinear Predictive Control theory and practice*. IET Control Engineering Series 61, UK, 2001, 261.
12. ZHENG, T. *Model Predictive Control*. Sciyo, India, 2010, 304.
13. AKAGI, H; KANAZAWA, Y; and NABAE, A. *Instantaneous reactive power compensation comprising switching devices without energy storage components*. IEEE Trans. Ind. Appl, vol.20, no 3, 1984, p. 625-630.