

تصميم نظام تحكم خاص بعمل المرشحات الفعالة بهدف تحسين جودة الطاقة الكهربائية ومحاكاته باستخدام MATLAB

الدكتور محسن خطيب*

الدكتور ثائر إبراهيم**

ضحى جديد***

(تاريخ الإيداع 4 / 12 / 2012. قُبل للنشر في 18 / 6 / 2013)

▽ ملخص ▽

يقدم هذا العمل مرشحاً فعالاً تفرعياً ثلاثي الطور لتحسين جودة الطاقة الكهربائية من حيث تقليل التوافقيات في الشبكة الكهربائية. تعتمد عملية التعويض على قيم تيارات الحمل اللاخطي و تيارات المرشح الفعال و اشتقاق التيارات المرجعية من التيارات المقاسة. يتم تحويل التيارات المقاسة من الإحداثيات الثلاثية a-b-c إلى الشكل المرجعي الدوار أي إلى الإحداثيات d-q. تم استخدام المتحكم التناسبي التكاملي التزامني أخذت الإشارات الناتجة عن المتحكم إلى دارة قيادة تعديل عرض النبضة ومنها تم التحكم بمفاتيح قالبة تعمل كمنبع جهد متحكم به تمثل المرشح الفعال. تم اثبات أداء كل من المرشح الفعال التفرعي والمتحكم التناسبي التكاملي التزامني اعتماداً على النتائج المأخوذة من النماذج المشغولة في بيئة الماتلاب.

الكلمات المفتاحية: المرشح الفعال, التوافقيات, جودة الطاقة, التحكم بالشعاع الفراغي, المحاكاة باستخدام MATLAB.

* أستاذ مساعد - قسم هندسة الأتمتة الصناعية - كلية الهندسة التقنية - جامعة تشرين - طرطوس - سورية.

** مدرس - قسم هندسة الأتمتة الصناعية - كلية الهندسة التقنية - جامعة تشرين - طرطوس - سورية.

*** دراسات عليا (ماجستير) - قسم هندسة الأتمتة الصناعية - كلية الهندسة التقنية - جامعة تشرين - طرطوس - سورية.

Design and Simulation of a Special Active Filter's Control System to Improve Electric Power Quality Using MATLAB

Dr. Mohsen Khateeb^{*}
Dr. Their Ibrahim^{**}
Douha Jdeed^{***}

(Received 4 / 12 / 2012. Accepted 18 / 6 / 2013)

▽ ABSTRACT ▽

This paper presents a three phase shunt Active Power Filter (APF) for power quality improvements in terms of harmonics compensation. The compensation process is based on measure non-linear load currents and Active Filter currents, and then extract the references from measured currents. Measured currents are then transferred from abc frame to d-q reference frame. A Synchronous Proportional Integral controller (Synchronous PI controller) is used. The control signals then drive the Pulse Width Modulation (PWM) routine, where its output controls the Voltage Source Inverter (VSI) switching devices. The performance of the Active Filter and the Synchronous PI controller is validated though the simulink results in MATLAB environment.

Key words: Active filter, Harmonics, Power quality, Space vector control, MATLAB simulink.

^{*} Associate Professor, Department of Automation Industrial, Faculty of Technical Engineering, Tishreen University, Tartous, Syria.

^{**} Assistant Professor, Department of Automation Industrial, Faculty of Technical Engineering, Tishreen University, Tartous, Syria.

^{***} Postgraduate Student, Department of Automation Industrial, Faculty of Technical Engineering, Tishreen University, Tartous, Syria.

مقدمة:

تتزايد مشكلة التوافقيات الناتجة عن أحمال مستهلكي الطاقة المتصلة مع شبكة التغذية الكهربائية بسبب تزايد وجود الأحمال اللاخطية التي تستخدم العناصر الإلكترونية فيها وخاصة الأحمال التي تحوي على مبدلات قدرة إلكترونية مثل الكومبيوترات و التلفازات و وحدات الشحن UPS و أنظمة التحكم بسرعات و عزم المحركات والتي تتزايد حساسيتها للتوافقيات مع تطورها [1]، مما جعل الحاجة لتقليل هذه التوافقيات ملحة.

بدأ العمل على تقليل التوافقيات منذ عشرات السنين، حيث استُخدمت سابقاً المرشحات غير الفعالة المؤلفة من مكثفات وملفات LCS والتي تولف حسب التوافقية المراد تعويضها، لكن نتيجة للسليبيات التي واجهتها مثل الحجم الزائد للمكثفات وحالات الطنين والحاجة إلى إضافة مرشح لكل توافقية على حدة و بسبب صعوبة العمل معها والحاجة إلى تغيير أو إضافة مرشحات جديدة عند تغيير التشويه التوافقي في شبكات التغذية التي تحوي أحمالاً لاخطيةً و بالتالي الكلفة الاقتصادية الزائدة، سيتم في هذا البحث وضع الأسس الهندسية لتصميم مرشحات فعالة تفرعية وفق استطاعات محددة، تعتمد في بنيتها على عناصر إلكترونية فعالة (Power Electronics) و تتمتع بمواصفات فنية تفوق عمل المرشحات غير الفعالة حيث تمتاز عنها بصغر حجم عناصرها و قدرة تحمل أعلى وبالتالي عمر تشغيل أطول وقدرتها على تحسس أي قيمة للتشويه التوافقي و تعويضها أنياً في الزمن الحقيقي، وسيتم وضع الخوارزمية الرياضية لتصميم مرشح فعال تفرعي لتحسين جودة الطاقة في الشبكات الكهربائية و وضع الأسس الهندسية لتصنيع مثل هذا المرشح محلياً. كما سيتم اختيار المنظم المناسب للمرشح الفعال التفرعي لتقليل الخطأ والتشوه الأعظمي و وضع نماذج تحاكي عمل المرشح الفعال باستخدام الـ MATLAB و اختبار هذا المرشح مع دارة تقويم و مبدلة ثايرستورية كأحمال لاخطية و تحديد قدرة التحمل و جودة الترشيح و التحقق من النتائج في تحسين شكل الموجة.

أهمية البحث و أهدافه:

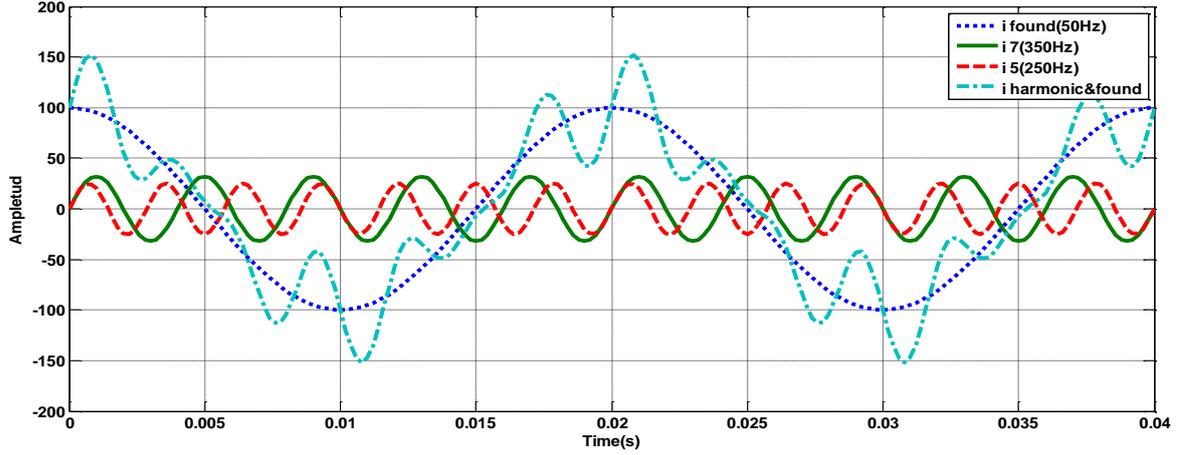
- 1- اختيار المنظم المناسب للمرشح الفعال التفرعي لتقليل الخطأ و التشوه الأعظمي بعد أن تمت دراسة ومقارنة مختلف أنواع المتحكمات و ميزاتهما.
- 2- اختيار الطريقة الأفضل لاشتقاق التيارات المرجعية للمرشح الفعال بعد أن تمت دراسة و مقارنة اشتقاقها من عدة مصادر و بطرق عدة.
- 3- وضع نماذج تحاكي عمل المرشح الفعال باستخدام MATLAB.
- 4- اختبار هذا المرشح مع دارة تقويم و مبدلة ثايرستورية و التحقق من النتائج في تحسين شكل الموجة.

طرائق البحث و مواده:

أنجز هذا العمل اعتماداً على دراسة العديد من البحوث المنجزة في هذا المجال و الاطلاع على نتائجها. تم استخدام بيئة الـ MATLAB في وضع النماذج التي تحاكي المرشح الفعال و أنظمة التحكم و استخلاص النتائج.

1- مشكلة التوافقيات Harmonics problem:

يتم توزيع الطاقة الكهربائية غالباً كثلاث موجات من الجهد تشكل نظاماً جيبياً ثلاثي الطور. إحدى ميزات هذا النظام هي شكل موجته والتي يجب أن تبقى دائماً أقرب ما يمكن إلى الموجة الجيبية النقية، و نتيجةً للأحمال اللاخطية المتصلة مع الشبكة تصبح هذه الإشارات مشوهة كما في الشكل (1).



الشكل (1): إشارة مشوهة بالتوافقيتين الخامسة و السابعة.

تتألف الإشارة المشوهة من المركبة الأساسية للتيار ذات التردد 50Hz و مجموعة من التوافقيات ذات الترددات من مضاعفات التردد الأساسي، و يمكن وصفها حسب فورييه [4,3,2,1] بالعلاقة:

$$i_{(t)} = I_{H1} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + \varphi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_{Hn} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (1)$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_{Hn} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(n\omega t - \varphi_n) \quad (2)$$

حيث:

I_0 : مطال المركبة المستمرة و تكون عادة معدومة في التوابع الدورية المتناوبة عندما تكون الإشارة متناظرة بالنسبة لمحور الزمن.

I_{Hn} : القيمة الفعالة للتوافقيات ذات المرتبة n .

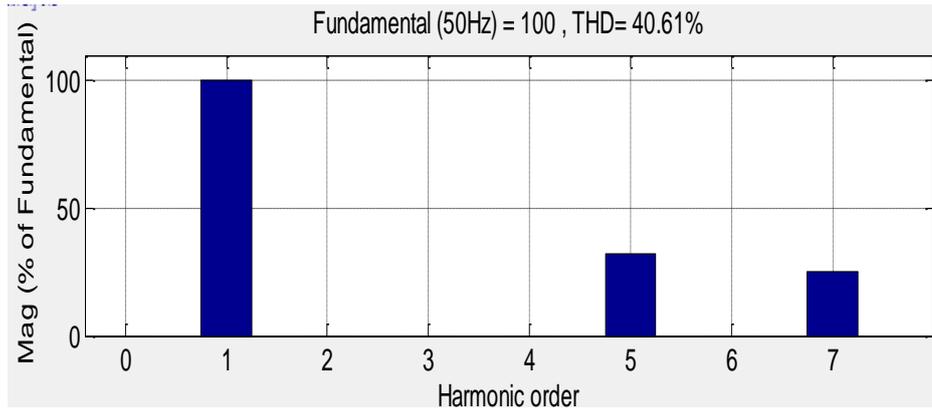
I_{H1} : القيمة الفعالة للتوافقية الأساسية.

$\omega = 2\pi f$: التردد الزاوي للمركبة الأساسية.

φ_1 : زاوية الإزاحة بالطور بين إشارتي تيار و توتر المركبة الأساسية.

φ_n : زاوية الإزاحة بالطور بين تيار المركبة التوافقية ذات الرتبة n و التوتر.

يعبر عادةً عن التوافقيات بالطيف التوافقي، يرسم مخطط طيف المطالات بخطوط شاقولية عند كل توافقية n بحيث تمثل هذه الخطوط مطالات التوافقيات المشكلة للتابع الدوري و تبدو على شكل رسم بياني كما في الشكل (2)، تستخدم هذه المخططات لتبيان مدى تأثير كل توافقية، بحيث نقوم بحجب تأثير التوافقيات ذات المطالات الكبيرة غير المرغوب بها عن طريق تصميم مرشحات لتعويض هذه التوافقيات.



الشكل (2): رسم بياني نسيجي للتوافقيات

من أهم مصادر التوافقيات: المنظمات والمبدلات الإلكترونية، تجهيزات اللحام الكهربائي، أفران القوس الكهربائي، المصابيح الضوئية الغازية، المحولات والمحركات الكهربائية....
من الآثار السلبية للتوافقيات التشويش، التموج، الاهتزاز الميكانيكي للمحركات والضجيج والتداخل في دارات التحكم والاتصالات وانهيار المكثفات وتسخين المحولات وتسخين الكابلات والعمل الكاذب لتجهيزات الحماية والإنذار.....

قامت بعض الدول المتطورة بوضع توصيات و معايير لضبط التوافقيات و التشوهات الناتجة عنها ضمن مستويات محددة بهدف الحد من انتشارها و المحافظة على جودة الطاقة، سنكتفي بعرض المعيار العالمي IEEE Std 519 [6,5] لحدود تشوهات التيار المبين في الجدول (1) في نقطة الربط المشتركة Point of Common Coupling (PCC). حيث يعطى عامل التشوه الكلي للتيار بالعلاقة: [6,5]

$$THD\% = 100 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{Hn}^2}}{I_{H1}} \quad (3)$$

حيث:

I_{Hn} التوافقية ذات المرتبة n .

I_{H1} المركبة الأساسية.

يعطى عامل التوافقية بالعلاقة:

$$HFI_{Hn}\% = 100 \cdot \frac{I_{Hn}}{I_{H1}} \quad (4)$$

الجدول 1: المعيار الأمريكي لحدود تشوهات التيار IEEE Std 519 للأحمال اللاخطية في PCC.

Maximum Harmonic Current Distortion % of Fundamental (تشوه التيار التوافقي الأعظمي كنسبة مئوية من المركبة الأساسية)						
Harmonic Order (Odd Harmonics) (رتبة التوافقية الفردية)						
$I_{sc}/I_L(SCR)$	<11	11<=h<=17	17<=h<=23	23<=h<=35	h<=35	THDI
<20	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20-50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
50-100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100-1000	12	5.5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2.5	1.4	20

حيث:

I_{sc} : تيار دارة القصر الأعظمي في نقطة التوصيل المشتركة PCC.

I_L : تيار الحمل الأعظمي الأساسي للمستهلك في PCC.

يبين الجدول (1) حدود مطالات التوافقيات الفردية و قيم THDI المسموحة من أجل كل مجال لقيم نسبة القصر (Short Circuit Resistance (SCR).

2- النظرية d-q (الكشف التزامني) أو نظرية الشكل التزامني المرجعي Synchronous Reference

:Frame(SRF)

تعتمد هذه النظرية على تقنيات تقدير الإشارات في مجال الزمن، و يمكنها تمثيل التيارات و الجهود في الحالات العابرة و المستقرة، كما تسمح بالتحكم بالمرشحات الفعالة في مجال الزمن الحقيقي [2, 7]، إضافةً إلى سهولة حساباتها التي تتضمن الحسابات الجبرية فقط [7]. تتألف هذه النظرية بشكل أساسي من تحويلي بارك المباشر والعكسي حيث يتم تحويل التيارات و الجهود من الإحداثيات الثلاثية a-b-c الثابتة التي تكون مزاحة عن بعضها بزوايا 120° إلى المحاور الثنائية الدوارة d(direct)-q(quadratic) و التي تدور بسرعة زاوية ωt تساوي سرعة دوران شعاع الفراغ لكل من الجهد و التيار في الإحداثيات الثلاثية [7]، حيث يتم الحصول على زاوية دوران شعاع الفراغ للجهد θ باستخدام حلقة الإقفال الطوري (PLL) Phase Locked Loop.

بفرض لدينا النظام ثلاثي الطور التالي:

$$i_a = k_f \cdot \cos \theta \quad (5)$$

$$i_b = k_f \cdot \cos(\theta - 120^\circ) \quad (6)$$

$$i_c = k_f \cdot \cos(\theta + 120^\circ) \quad (7)$$

بالتحويل إلى إحداثيات الثنائية الثابتة:

$$i_\alpha = \frac{3}{2} \cdot i_a \quad (8)$$

$$i_\beta = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (i_b - i_c) \quad (9)$$

بالتحويل إلى الشكل الثنائي المرجعي الدوار:

$$i_d = \frac{2}{3\sqrt{2}} \cdot (i_\alpha \cdot \cos \theta + i_\beta \cdot \sin \theta) \quad (10)$$

$$i_q = \frac{2}{3\sqrt{2}} \cdot (i_\beta \cdot \cos \theta - i_\alpha \cdot \sin \theta) \quad (11)$$

تبدو المركبة الأساسية ذات التردد 50Hz في الإحداثيات الثلاثية كقيمة مستمرة dc عند التحويل إلى الإحداثيات الثنائية الدوارة، يمكن حذفها بسهولة باستخدام مرشح تمرير منخفض (Low Pass Filter(LPF) فتبقى مركبة متناوبة تعبر عن التوافقيات، ويجب ملاحظة أنه باستخدام مرشح تمرير منخفض لحذف المركبة المستمرة (المركبة الأساسية في الإحداثيات ثلاثية الطور) يتم تجنب خطأ الطور الذي يمكن أن يحدث في حال استخدام مرشح

تمرير مرتفع (HPF) High Pass Filter, ثم تمرر المركبة المتناوبة و المكافئة للتوافقيات إلى متحكم يولد إشارات تحكم لجعل هذه التوافقيات معدومة, ثم تحوّل إشارات التحكم الثنائية d-q قبل دخولها دارة القيادة PWM إلى الإحداثيات ثلاثية الطور a-b-c باستخدام تحويلات بارك العكسية. يتم تطبيق SRF في استخراج كل من تيار الحمل والمنبع و جهد المنبع.

3- المرشحات الفعالة:

صممت المرشحات الفعالة لتعويض توافقيات التيار و الجهد, و يتم تركيبها بالقرب من الأحمال اللاخطية المسببة للتوافقيات, و تصنف بشكل رئيسي إلى مجموعتين: مرشحات فعالة كمنبع للجهد (VSAs Voltage Source Active Filters) و هي تستخدم المكثف كعنصر تخزين للطاقة, مرشحات فعالة كمنبع للتيار (CSAs Current Source Active Filters) وهي تستخدم الملف كعنصر تخزين.

يبين الشكل (3) مرشحاً فعالاً تفرعياً ثلاثي الطور مصمماً لتعويض توافقيات تيار حمل لاخطي ثلاثي الطور متوازن, و يمكن وضع المعادلات الأساسية للنظام والمرشح الفعال وفق التالي: [2, 8, 9]

$$V_a = V_{fa} + R_f \cdot i_{fa} + L_f \cdot \frac{di_{fa}}{dt} \quad (12)$$

$$V_b = V_{fb} + R_f \cdot i_{fb} + L_f \cdot \frac{di_{fb}}{dt} \quad (13)$$

$$V_c = V_{fc} + R_f \cdot i_{fc} + L_f \cdot \frac{di_{fc}}{dt} \quad (14)$$

حيث: $V_{a,b,c}$: جهد المنبع لكل من الأطوار الثلاثة.

$V_{fa,fb,fc}$: الجهد على خرج المرشح الفعال.

R_f : مقاومة المرشح الفعال.

L_f : محارضة المرشح الفعال.

$I_{fa,fb,fc}$: تيار المرشح الفعال.

سنستخدم للتحكم بالمرشح الفعال الطريقة المتزامنة كإطار أساسي للتحكم, و في هذه الطريقة سيتم أولاً تحويل

تيار الحمل و جهد المنبع إلى الإحداثيات d-q, فنحصل على المعادلتين: [3, 10, 11, 12]

$$V_d = R \cdot i_d + L \cdot \frac{di_d}{dt} - \omega \cdot L \cdot i_q + V_{dq} \quad (15)$$

$$V_q = R \cdot i_q + L \cdot \frac{di_q}{dt} + \omega \cdot L \cdot i_d + V_{dq} \quad (16)$$

حيث:

$V_{d,q}$: جهد المنبع في الإحداثيات الثنائية الدوارة.

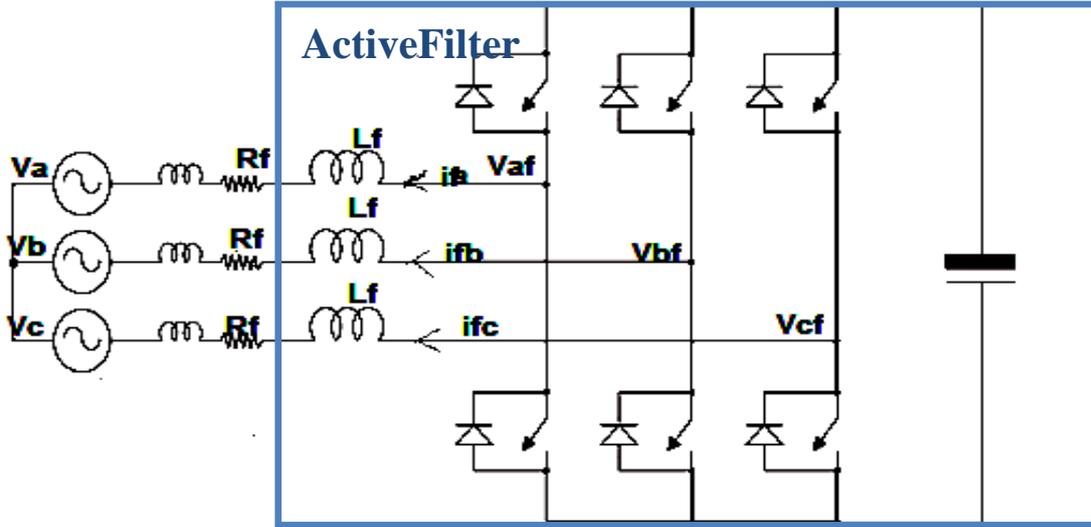
R : المقاومة الكلية في الدارة.

L : المحارضة الكلية في الدارة.

$I_{d,q}$: التيار في الإحداثيات الثنائية الدوارة.

ω : التردد الزاوي.

V_{dq} : جهود التعويض على خرج المرشح في الإحداثيات الثنائية الدوارة.

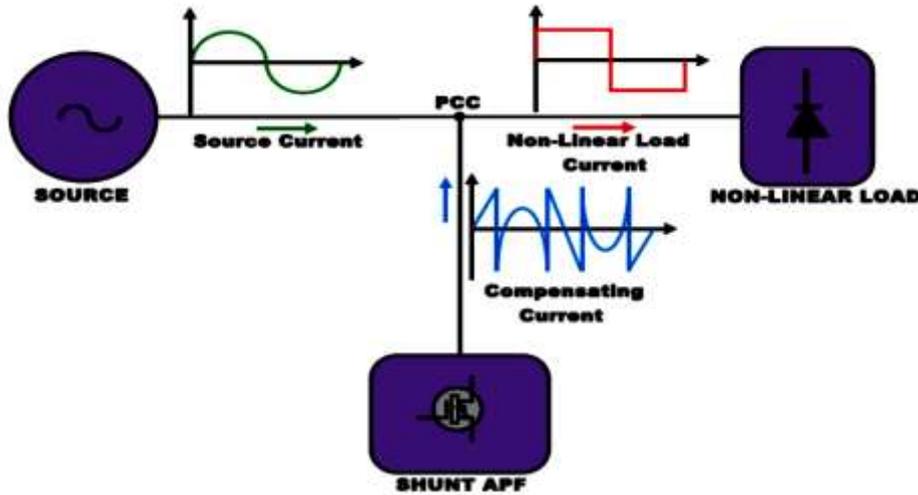


الشكل(3): مرشح فعال تفرعي ثلاثي الطور.

تحول المعادلتان السابقتان نظام التحكم المعقد في الإحداثيات الثلاثية إلى حلقتي تحكم واحدة للتحكم بالتيار والثانية للتحكم بالجهد على طرفي المكثف.

4- المرشح الفعال التفرعي Shunt Active Filter:

يوصل المرشح الفعال التفرعي على التفرع مع الأحمال اللاخطية التي صمم لتعويضها عبر محارضة تحدد قيمتها حسب متطلبات النظام [2,7], يعمل المرشح الفعال التفرعي كمنبع تيار مثالي و يمنع تيارات توافقية ليلغي التيارات التوافقية الناتجة عن وجود الحمل اللاخطي [1,2,3,7] الشكل (4).

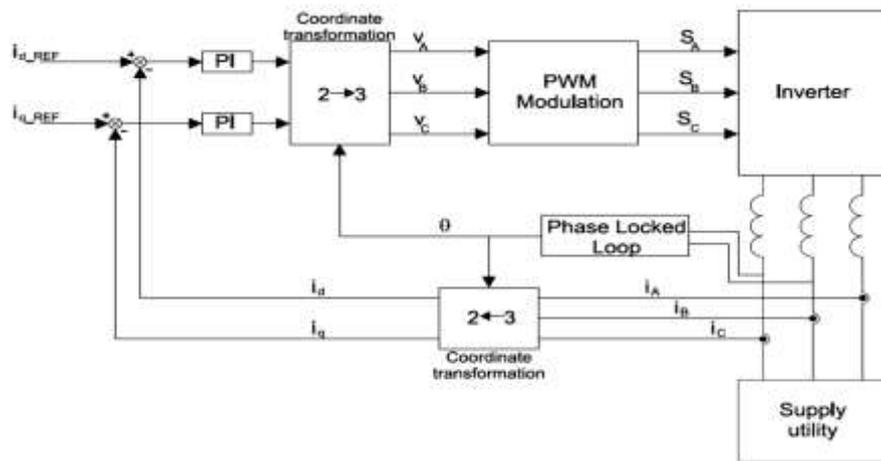


الشكل (4): المرشح الفعال التفرعي

يمكن أن تكون المرشحات الفعالة التفرعية أحادية الطور أو ثلاثية الطور، و هي تستخدم قالبية كمنبع للتيار Voltage Source Inverter (VSI)، و يكون التيار الناتج عنها مساوٍ بالقيمة و معاكساً بالإشارة للتيارات التوافقية التي صمم لتعويضها [1,6].

5- المتحكم PI التزامني Synchronous PI controller:

إن تمثيل جهود و تيارات الأطوار الثلاثة لنظام الطاقة بإطار مرجعي d-q، و الذي يدور بنفس تردد جهد التغذية، يحول المكونات الأساسية للجهد و التيار إلى قيم مستمرة [7,2]. بعد أن أصبحت إشارات الخطأ بالشكل d-q، يمكن استخدام متحكم PI تزامني لكل من المحورين d و q، و بما أن المركبة الأساسية للتيار المرجعي هي قيمة مستمرة [4]، سيقال المتحكم PI الخطأ الستاتيكي إلى الصفر. يبين الشكل (5) المخطط الصندوقي لعمل المتحكم PI التزامني، حيث تم الحصول على التيارات المرجعية I_{d_REF} و I_{q_REF} من تيار الحمل بعد تحويله إلى الإحداثيات الثنائية الدوّارة باستخدام النظرية d-q و حذف المركبة المستمرة باستخدام القيمة المتوسطة. تعد طريقة استخراج التوافقيات من تيار الحمل هي الأبسط و تمكن المرشح الفعال من العمل كعمّوض توافقيات فقط و ليس كمخفض للتوافقيات الناتجة عن حالات الطنين، لذا قمنا بعد الدراسة المرجعية بجمع أفضل الخيارات لكل من نوع المتحكم المستخدم و طريقة اشتقاق التيارات المرجعية و المصدر الذي اشتقت منه هذه التيارات للحصول على التعويض الأفضل و الاستفادة من ميزات كل منها.



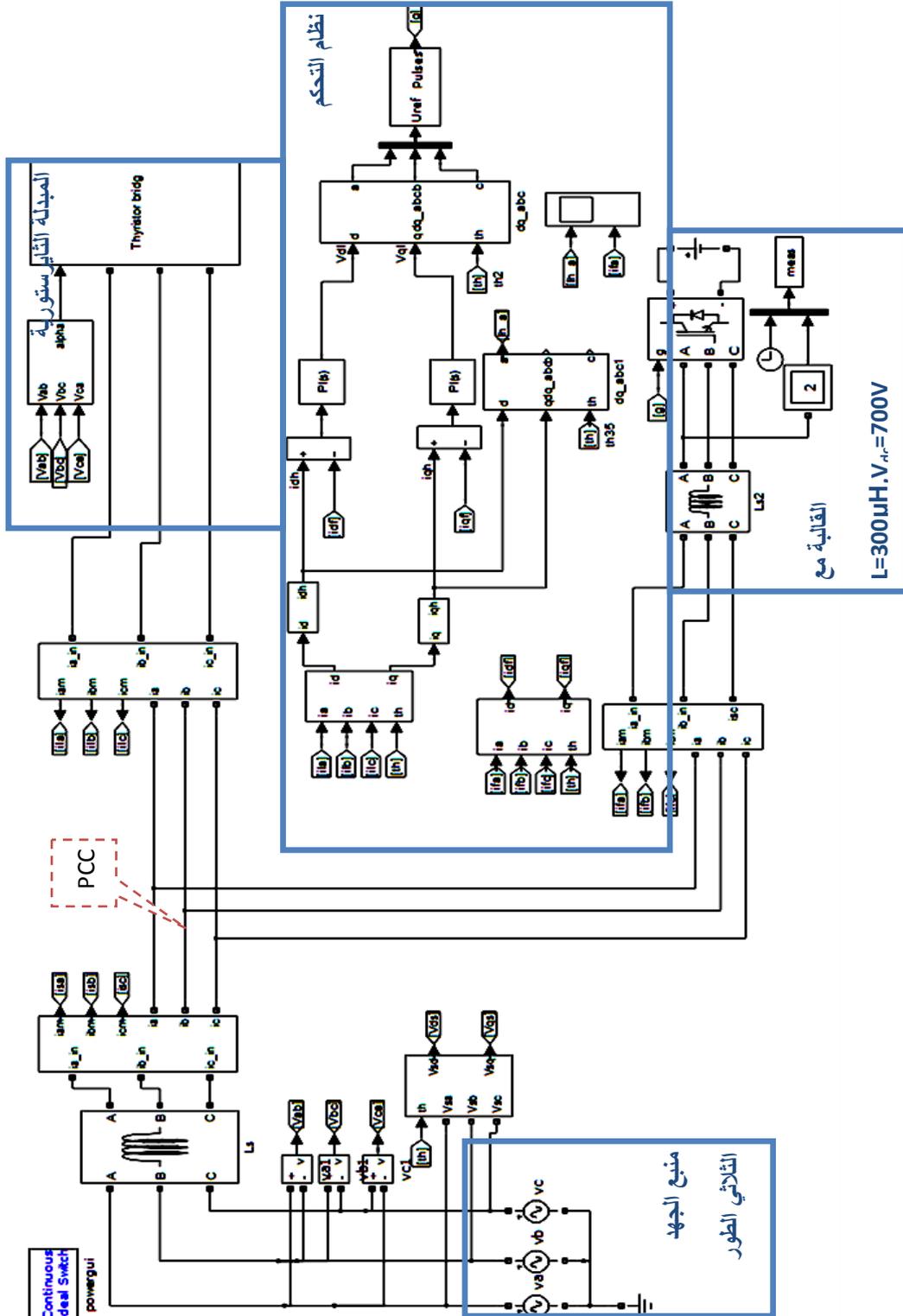
الشكل (5): المتحكم PI التزامني

6- محاكاة ونمذجة لمرشح فعال تفرعي مع متحكم PI تزامني باستخدام MATLAB:

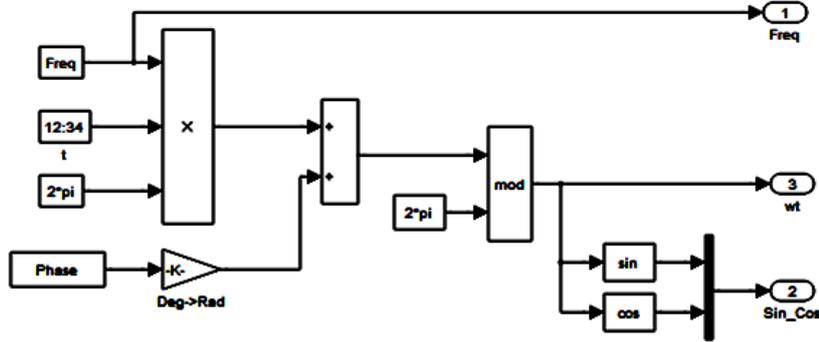
تم العمل والنمذجة على مرحلتين: الأولى استخدمنا فيها حمل لاخطي ثابت عبارة عن دارة تقويم ديودية مع متحكم PI تزامني، والثانية استخدمنا المتحكم التزامني نفسه ولكن مع حمل لاخطي متغير عبارة عن مبدلة ثايرستورية، نتحكم بها بتغيير زوايا القدح α ، و في كلتا الحالتين استخدمنا قيمة محارضة الملفات الخطية التي تربط المرشح بالشبكة بـ $L_f=300\mu H$ [7,2].

المرشح الفعال عبارة عن قالبة نصف جسرية بستة مفاتيح من النوع IGBT تعمل بتردد تبديل حتى 20kHz [6]، و لتسهيل النمذجة تم استبدال المكثف على طرفي حلقة التيار المستمر للقالبة بمنبع جهد مستمر بقيمة 700V [7,2]. يبين الشكل (6) نظام القدرة الكامل المؤلف من منبع التغذية ثلاثي الطور والمرشح الفعال والحمل اللاخطي. تم قياس تيارات كل من الحمل في نقطة التوزيع و المرشح الفعال باستخدام صناديق قمنا بتصميمها لتحديد التيارات بالزمن الحقيقي. تم تحويل التيارات المقاسة إلى الشكل الثنائي باستخدام صندوق abc_to_dq و هو جاهز في مكتبات MATLAB، تحتاج هذه الصناديق لتحديد زاوية دوران الشعاع المرجعي θ و التي يجب أن تكون

مطابقة لزاوية دوران شعاع جهد المنبع، و استخدمنا حلقة الإقفال الطوري (PLL) Phase Locked Loop لتأمين هذه الزاوية، كما هو مبين في الشكل (7).



الشكل (6): النموذج الكامل للمرشح الفعال مع مبدلة ثايرستورية كحمل لاختي.



الشكل (7): حلقة الإقفال الطوري PLL.

عند تحويل تيارات الحمل الثلاثية المبينة في الشكل (8-أ) إلى الشكل الثنائي الذي يدور بنفس تردد تيار المنبع تبدو المركبة الأساسية لتيار الحمل كمركبة مستمرة على كل من المحورين d-q و تظهر المركبة المستمرة كإزاحة في المطال بقيمة تكافئ المركبة الأساسية لتيار الحمل. استخدمنا لحذفها صندوق القيمة المتوسطة بدلاً من استخدام مرشحات التمرير المنخفض أو المرتفع المطبقة في جميع المراجع المدروسة و بالتالي تم تقليل الزمن الطويل اللازم للمحاكاة في حال استخدام مرشحات التمرير (حيث استغرق إنجازها عدة ساعات إضافة إلى حالات التوقف العديدة التي واجهها الحاسب بسبب العمليات الرياضية الكثيرة التي يتم إجراؤها عند استخدام مرشحات التمرير حيث تمتلئ ذاكرة العمل في الماتلاب قبل إنجاز المحاكاة) و الحصول على دقة أكثر في الحذف. الإشارات الناتجة بعد حذف المركبة المستمرة تمثل التوافقيات المراد تعويضها و لكن بالشكل الثنائي d-q كما في الشكل (8-ب) الذي يبين تيارات الحمل في الإحداثيات الثنائية الدوّارة قبل و بعد حذف المركبة المستمرة حيث يبدأ حذف المركبة المستمرة عند اللحظة $t=0.02S$. يلاحظ من الشكل أنه بعد حذف المركبة المستمرة تبقى التوافقيات كإشارة متغيرة متناوبة.

بطرح تيارات المرشح من تيارات الحمل نحصل على إشارة الخطأ في الإحداثيات الثنائية المبينة في الشكل (8-ج)، و التي استخدمنا لتقليلها متحكمين PI تزامنيين واحد لكل محور و يعطى تابع النقل لهما بالعلاقة: $G = k_p + \frac{k_I}{s}$. يعطى خرج المتحكم المبين في الشكل (8-ج) بالعلاقة:

$$P = k_p E_{ss} + K_I E_{ss}$$

حيث:

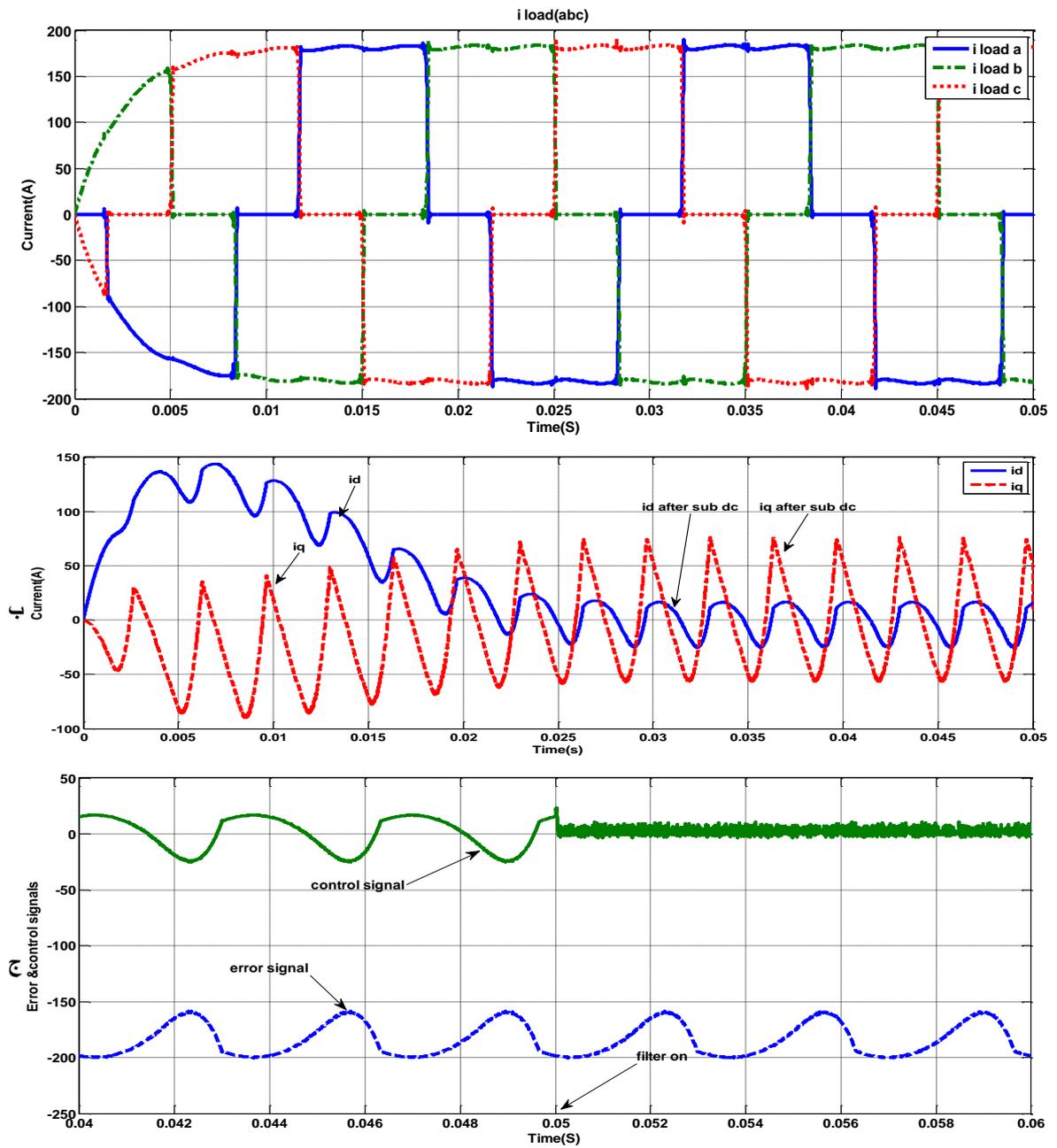
P إشارة التحكم و التي هي خرج المتحكم.

K_p ثابت الريح التناسبي.

K_I ثابت الريح التكامل.

E_{ss} الخطأ في الحالة المستقرة (الخطأ الستاتيكي).

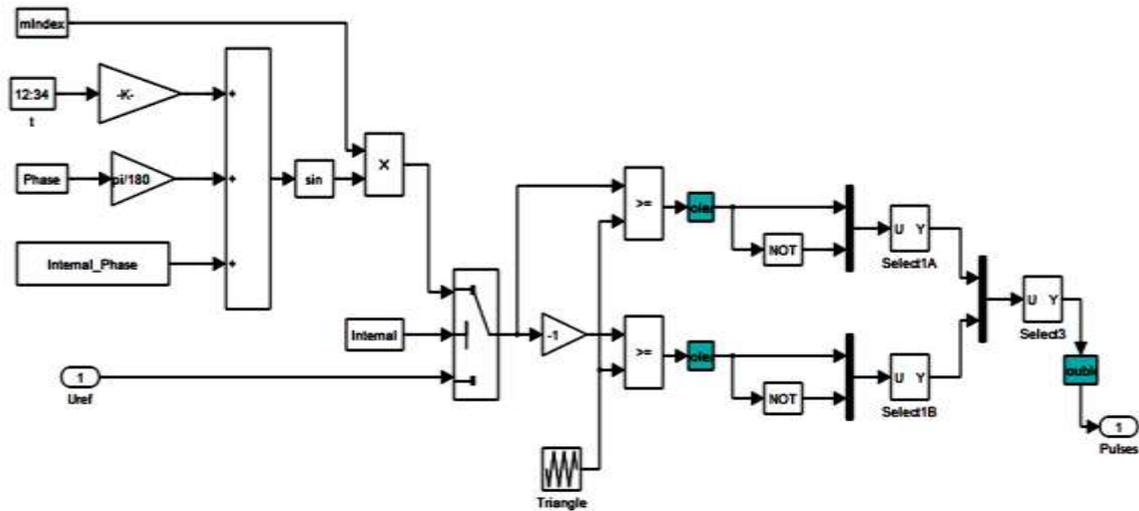
قمنا بضبط ثوابت المتحكم عند القيم: $k_p=1$ و $k_I=0.1$ و هي قيم توصلنا إليها بتجريب قيم مختلفة فكانت هي الأفضل حيث نحصل عندها على قيم صغيرة جداً للخطأ الستاتيكي خلال زمن مقبول.



الشكل (8): أ- تيار الحمل في الشكل الثلاثي a-b-c, ب- تيار الحمل في الشكل الثاني d-q, ج- إشارة الخطأ و إشارة التحكم.

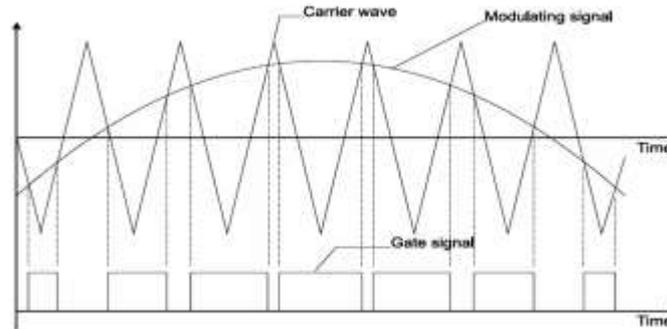
تحول إشارات التصحيح الناتجة عن المتحكمين من الشكل d-q إلى الشكل الثلاثي a-b-c باستخدام صناديق

التحويل abc_to_dq بنفس الزاوية θ . لتدخل إلى دارة الـ PWM drive المبينة في الشكل (9).



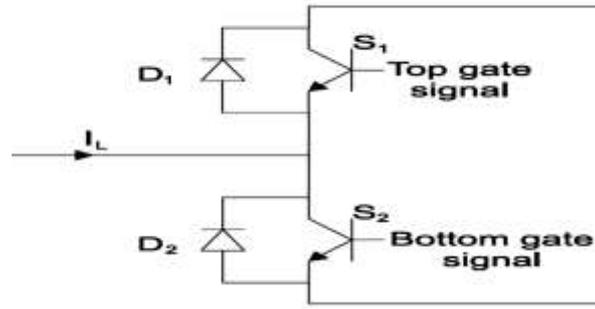
الشكل (9): دائرة الـ PWM drive.

تقارن دائرة القيادة هذه تيارات التصحيح الناتجة عن المتحكمين مع إشارة حاملة مثلثية بتردد 3kHz، و تشكل الإشارات الناتجة نبضات لفتح المفاتيح IGBTs في القالبية التي تمثل المرشح الفعال، و يبين الشكل (10) آلية تعديل عرض النبضة التي نحصل من خلالها على نبضات القذح.



الشكل (10) آلية تعديل عرض النبضة.

تقوم هذه النبضات بتحديد لحظات وصل و فصل مفاتيح القالبية بحيث تعطي على خرجها تيارات دورية تدعى بتيارات التعويض و التي تكون مساوية و معاكسة لتيارات التشويه. عند التطبيق العملي يجب مراعاة أزمنة فصل و وصل مفاتيح القالبية بحيث لا يبدأ المفتاح الثاني في أحد أذرع القالبية بالتوصيل حتى يقوم المفتاح الأول في نفس الذراع بالفصل تماماً كما في الشكل (11)، هذا ما يعبر عنه عادةً بزمن الإقفال Lockout Time، حيث أن زمن الإقفال هو الفترة الزمنية اللازمة للمفتاح ليفصل تماماً و يختلف هذا الزمن حسب نوع المفاتيح المستخدمة، في حالتنا هذه سنعتبر أن التبديل مثالي و زمن الإقفال مهملاً كون المفاتيح المستخدمة مثالية.



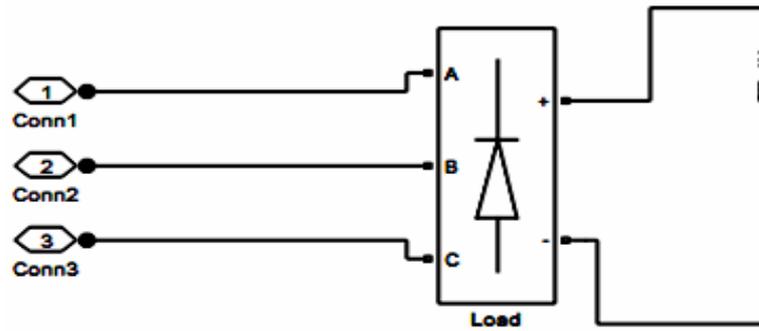
الشكل (11): مفاتيح في أحد أذرع القالبية.

النتائج و المناقشة:

1- المرحلة الأولى: الحمل اللاخطي دائرة تقويم أي حمل ثابت يعطي توافقيات ثابتة, تمت النمذجة كالتالي:

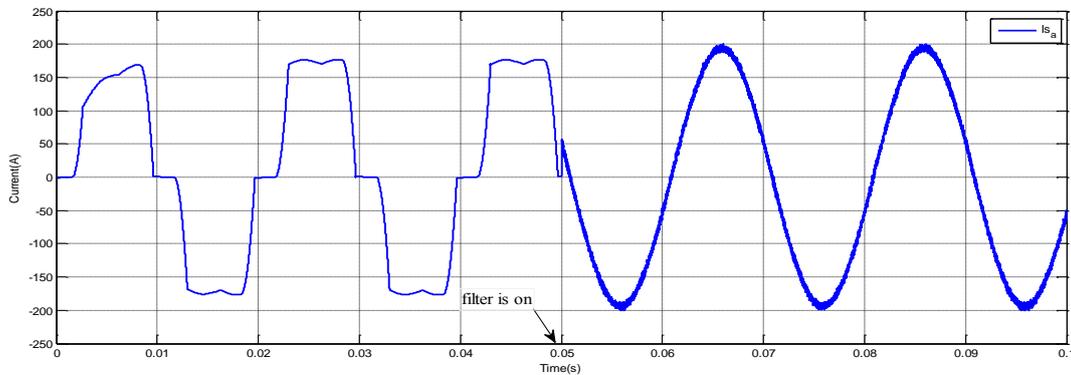
الحمل اللاخطي عبارة عن دائرة تقويم جسرية ثلاثية الطور مع حمل أومي 2Ω و محارضة 5mH كما في

الشكل (12).

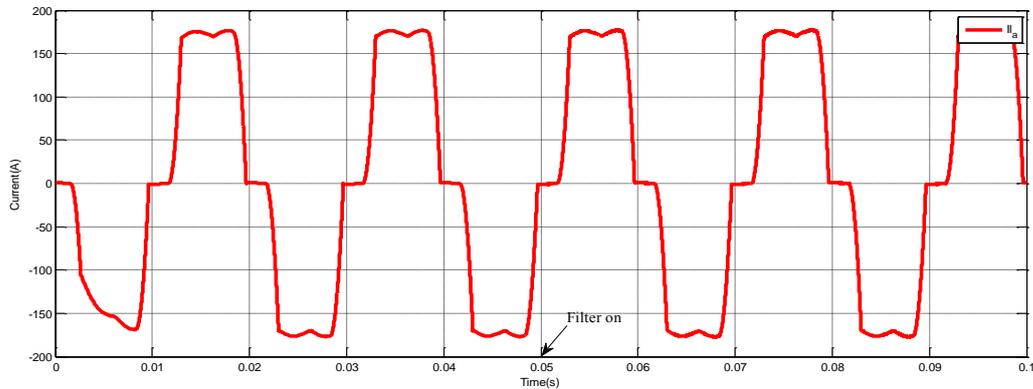


الشكل (12): الحمل اللاخطي دائرة تقويم ديودية.

سنكتفي في الحالة الأولى بمناقشة التوافقيتين الخامسة و السابعة كونهما الأخطر في حالة دائرة التقويم, ولمتابعة حالة التيارات قبل و بعد الترشيح على شاشة الراسم نفسها، أضفنا للمرشح مفتاحاً يقوم بالتوصيل عند اللحظة $t=0.05\text{S}$, بحيث يبدأ التعويض عند هذه اللحظة, و يبين الشكل (13) تيار المنبع قبل و بعد الترشيح و يلاحظ من الشكل أن تيار الشبكة بعد الترشيح الذي يبدأ في اللحظة $t=0.05\text{S}$ يعود إلى شكله الجيبي الخالي من التوافقيات.

الشكل (13) تيار المنبع i_s قبل و بعد الترشيح, تم تفعيل المرشح في اللحظة $t=0.05$.

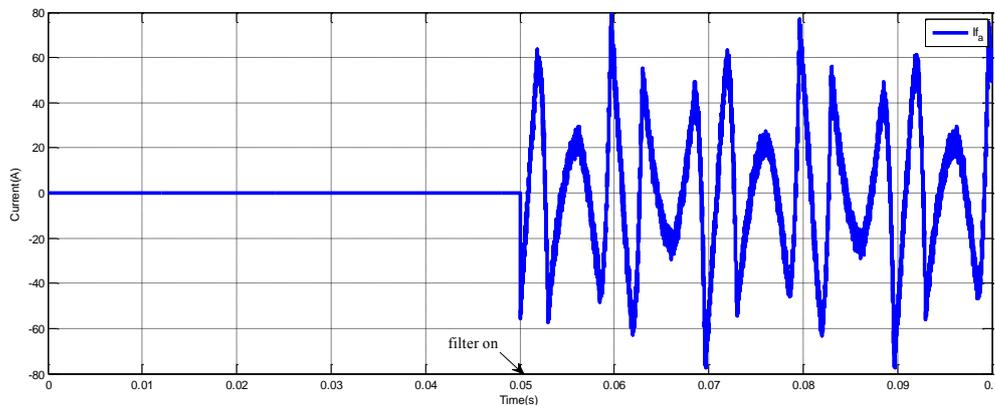
كما يبين الشكل (14) تيار الحمل قبل و بعد الترشيح و يلاحظ أنه لم يتأثر بالترشيح و منه نستنتج أن التوافقيات بقيت محصورة في الحمل و المرشح حذف التوافقيات من تيار الشبكة.



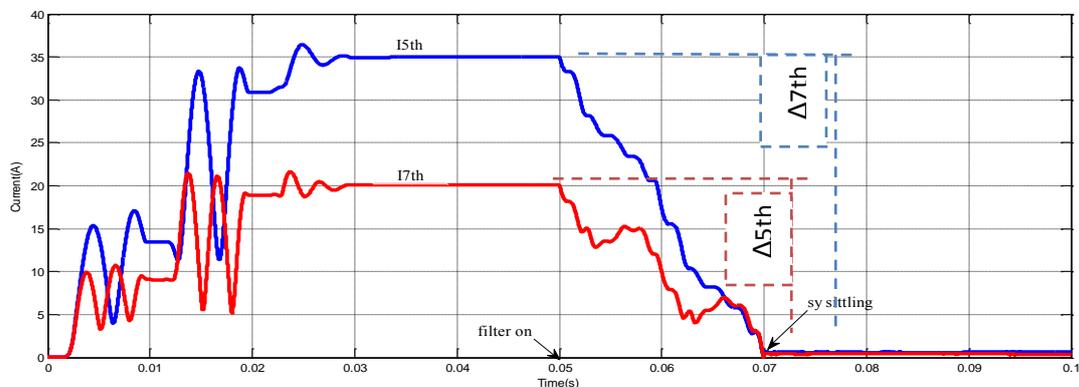
الشكل (14) تيار الحمل i_a قبل و بعد الترشيح.

يبدأ مقياس الـ THD و HF بالعمل في اللحظة $t=0.02S$ لحساب عامل التشوه التوافقي الكلي و عامل التوافقيتين الخامسة و السابعة, و في اللحظة $t=0.05S$ يتم وصل المرشح الفعال.

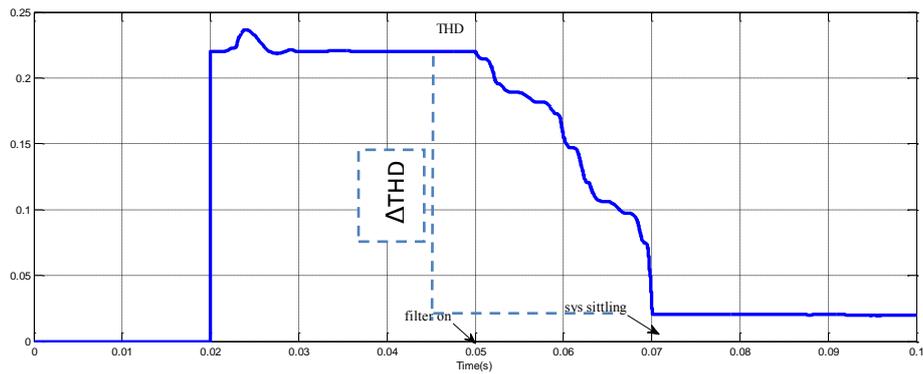
يبين الشكل (15) تيار المرشح و يلاحظ منه أن تيار المرشح بعد التوصيل يصبح مساوياً و معاكساً لتوافقيات الحمل وبالتالي يكون ناتج طرحهما مساوياً تقريباً للصفر. تبدأ كل من التوافقيتين الخامسة و السابعة المبينتين في الشكل (16) و THD المبين في الشكل (17) بالانخفاض تدريجياً, ويستقر النظام في اللحظة $t=0.07S$ عند قيم صغيرة جداً توضح لاحقاً في الجدول (2).



الشكل (15): تيار المرشح الفعال قبل و بعد الترشيح.

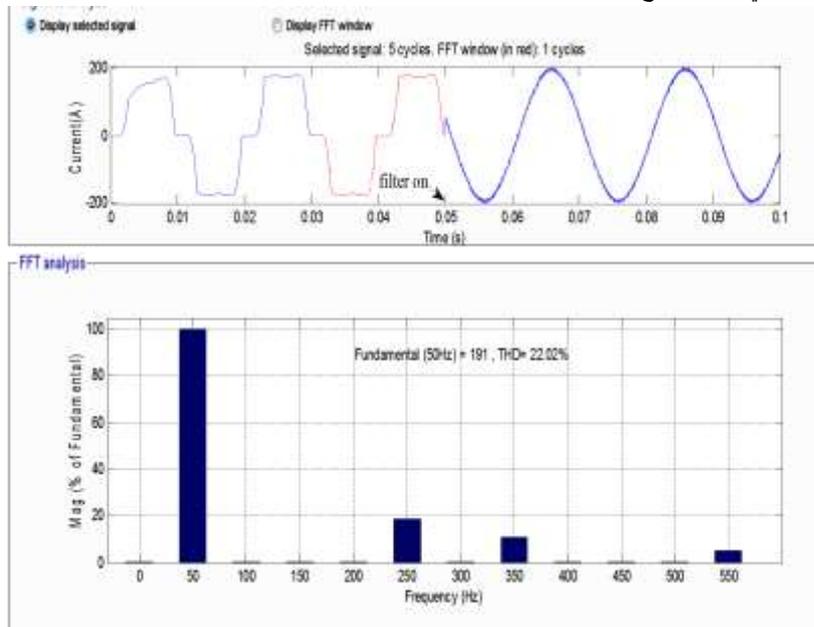


الشكل (16): التوافقيتان الخامسة و السابعة قبل و بعد الترشيح, تم تفعيل المرشح في اللحظة $t=0.05$.



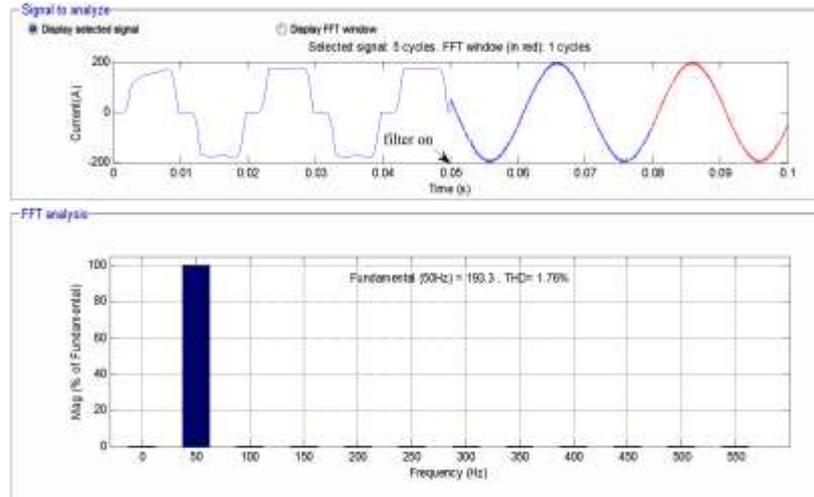
الشكل (17): عامل التشوه الكلي THD, تم تفعيل المرشح في اللحظة $t=0.05$.

نلاحظ من الأشكال (16) و(17) الانخفاض الكبير في مطالات التوافقيات الخامسة والسابعة و THD, وبين الشكل (18), تيار المنبع و طيفه التوافقي قبل الترشيح.



الشكل (18): تيار المنبع و طيفه التوافقي قبل الترشيح.

يلاحظ من الشكل (18) أن قيمة $THD=22.02\%$ و هي خارج الحدود المعيارية. يبين الشكل (19) تيار المنبع و طيفه التوافقي بعد الترشيح.



الشكل (19) تيار المنبع و طيفه التوافقي بعد الترشيح.

يلاحظ من الشكل (19) أن قيمة $THD=1.76\%$ أي أنها أصبحت ضمن الحدود المعيارية. يبين الجدول (2)، قيم كل من THD و HF للتوافقيتين الخامسة و السابعة قبل و بعد الترشيح، يلاحظ من خلاله الانخفاض في قيم التوافقيات و عامل التشوه التوافقي الكلي.

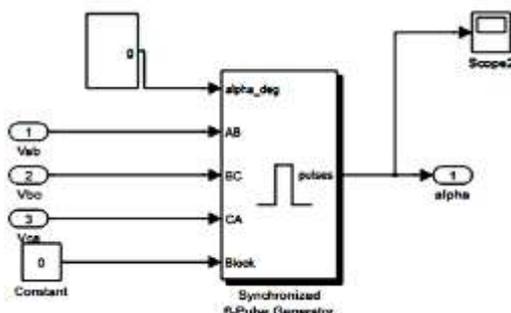
الجدول 2: قيم THD و HF للتوافقيتين الخامسة و السابعة قبل و بعد الترشيح.

THD(%)		5^{th} (A)	7^{th} (A)	$HF(5^{th})(\%)$	$HF(7^{th})(\%)$
قبل الترشيح	22	35.01	20.09	18.62	10.68
بعد الترشيح	1.76	0.5981	0.4358	0.31	0.23

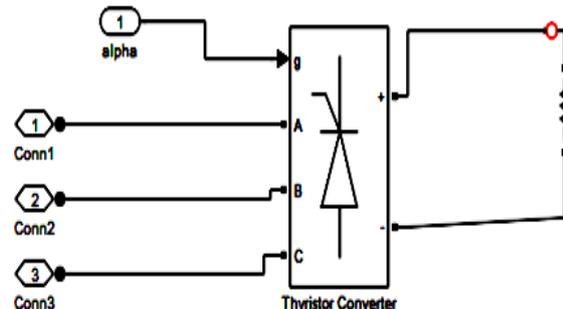
2- المرحلة الثانية: الحمل اللاخطي عبارة عن مبدلة ثايرستورية مبينة في الشكل (20-أ)، نتحكم بها عن طريق تغيير زوايا القدح α كما في الشكل (20-ب)، حيث ستأخذ القيم وفق الأزمنة المبينة في الجدول (3):

الجدول (3): قيم α .

Time(s)	0.0	0.5	0.9
α°	0	30	60

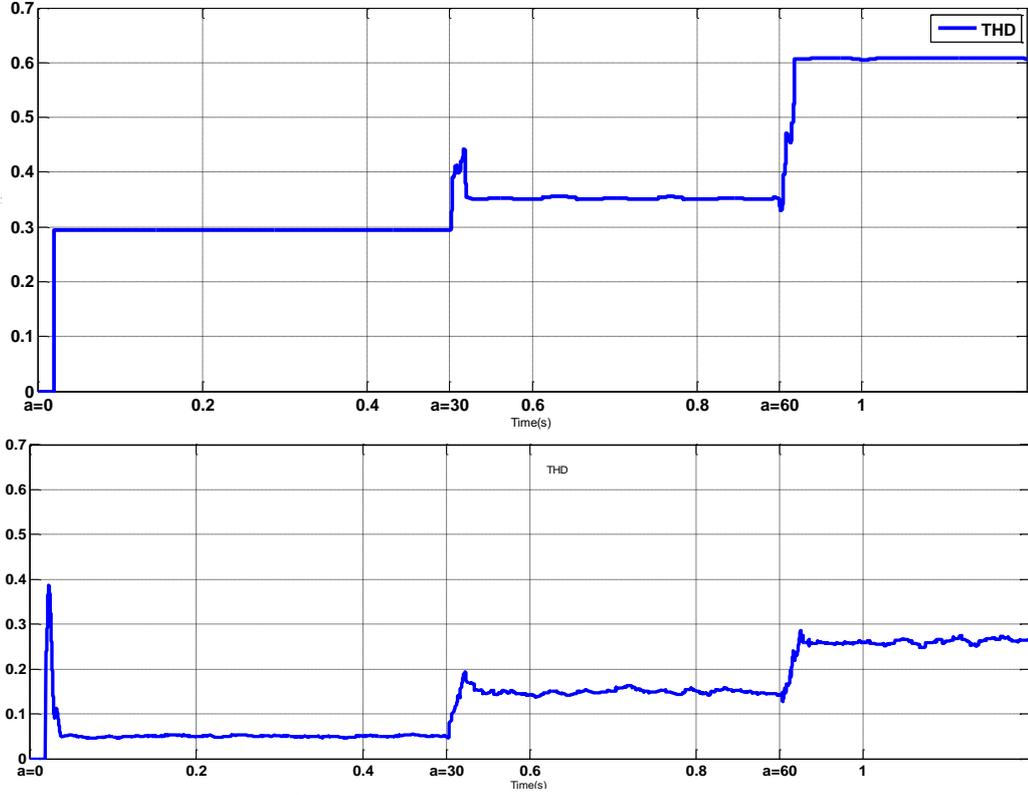


الشكل (20-أ): دائرة القدح.



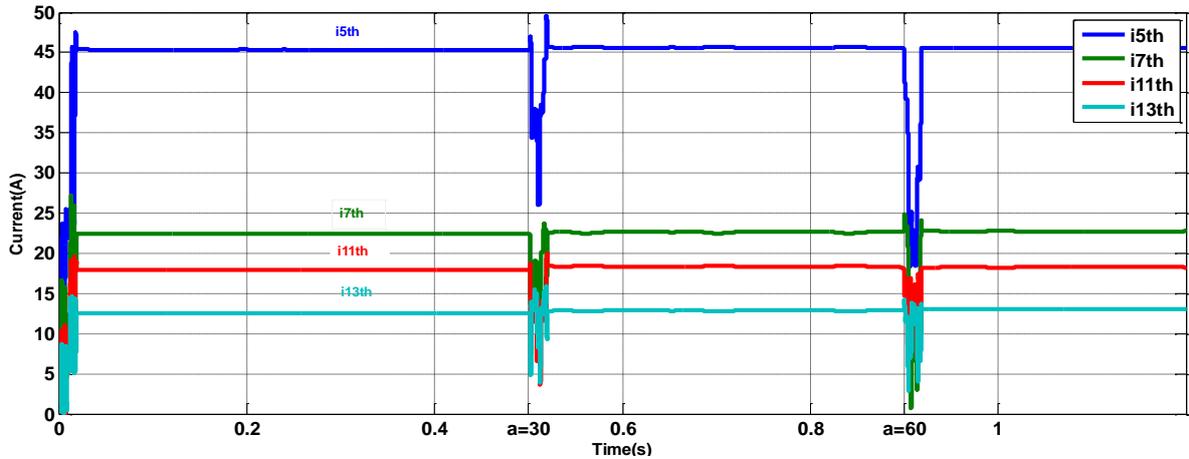
الشكل (20-ب): المبدلة الثايرستورية.

نقوم بتشغيل النظام في اللحظة $t=0.0S$ ، و يبدأ المرشح العمل في تلك اللحظة، يكون تيار المنبع خلال فترة التشغيل التي تستمر حتى $t=1.2S$.
نقوم بقياس THD و عامل التوافقيات 5^{th} , 7^{th} , 11^{th} , 13^{th} ، حيث يزداد أثرها بتغيير α ، و يمكن ملاحظة قيم الـ THD قبل الترشيح في الشكل (21-أ) و بعد الترشيح في الشكل (21-ب).



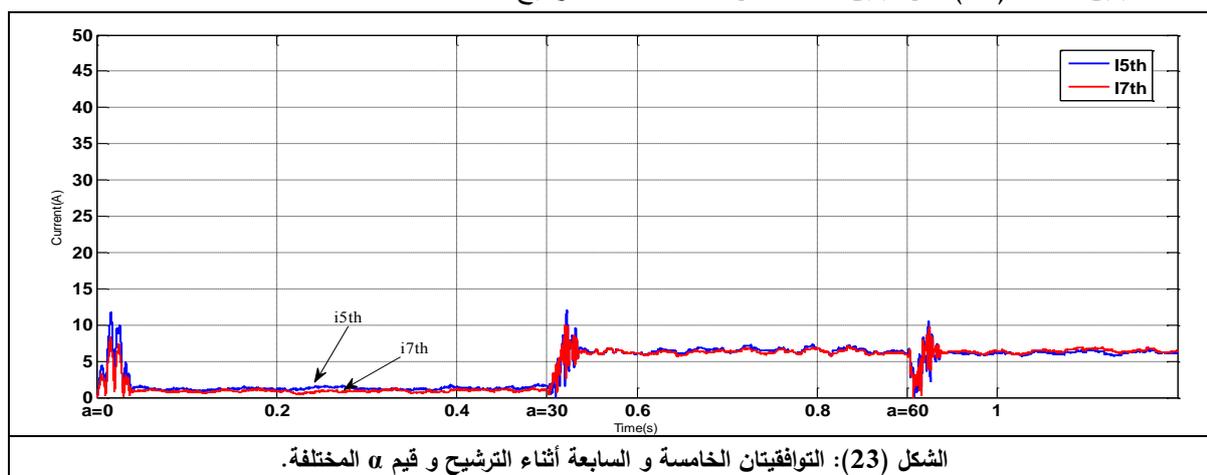
الشكل (21): أ- قيم THD قبل الترشيح مع قيم α المختلفة، ب- قيم THD أثناء الترشيح و قيم α المختلفة.

يلاحظ من الشكل (21) الانخفاض الكبير في قيم THD عند كل قيمة لزوايا القدح. يبين الشكل (22) قيم التوافقيات 5^{th} , 7^{th} , 11^{th} , 13^{th} قبل الترشيح.



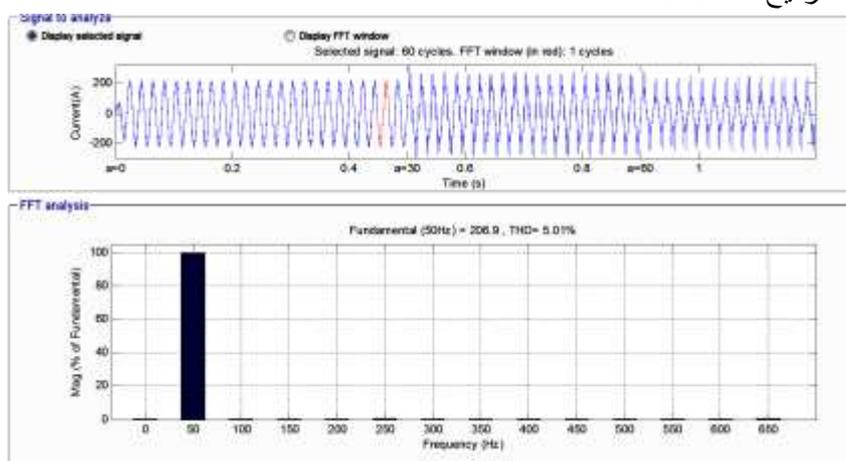
الشكل (22) قيم التوافقيات 5^{th} , 7^{th} , 11^{th} , 13^{th} قبل الترشيح مع قيم α المختلفة.

يبين الشكل (23) التوافقتين الخامسة و السابعة أثناء الترشيح.



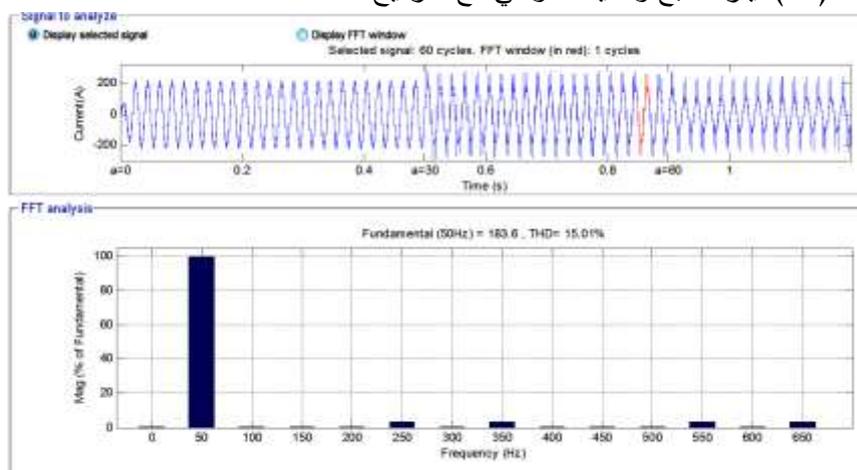
يلاحظ من الشكل (23) انخفاض مطالات التوافقتين الخامسة و السابعة. و يبين الشكل (24) تيار المنبع و

طيفه التوافقي مع الترشيح عند $\alpha=0$.



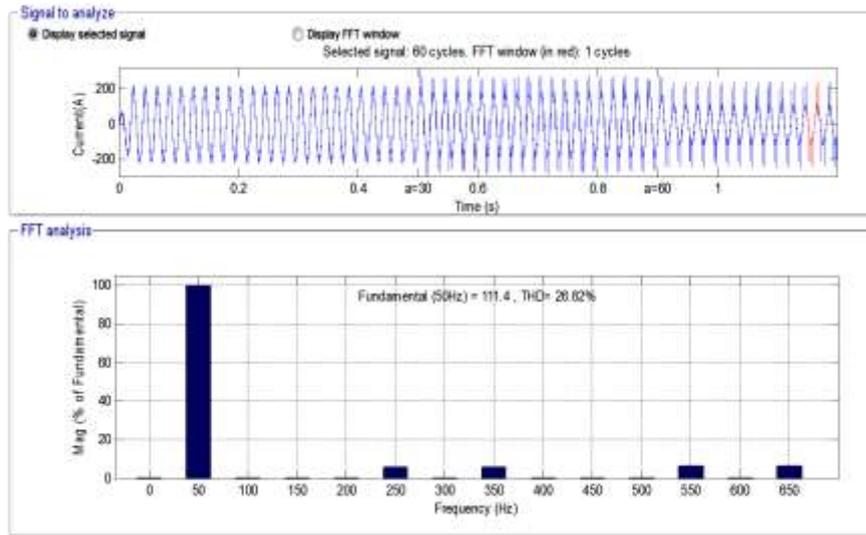
الشكل (24): تيار المنبع و طيفه التوافقي مع الترشيح , $\alpha=0$, THD=5.01%.

يبين الشكل (25) تيار المنبع و طيفه التوافقي مع الترشيح عند $\alpha=30$.



الشكل (25): تيار المنبع و طيفه التوافقي مع الترشيح , $\alpha=30$, THD=15%.

يبين الشكل (26) تيار المنبع و طيفه التوافقي مع الترشيح عند $\alpha=60$.



الشكل (26) تيار المنبع و طيفه التوافقي مع الترشيح , $\alpha=60$, THD=26.82%.

يلاحظ من الأشكال السابقة (24,25,26) انخفاض قيم THD بعد الترشيح عند كل قيمة لزوايا القرح، و يبين الجدول (4) قيم THD و HF للتوافقيات 5^{th} , 7^{th} , 11^{th} , 13^{th} قبل و بعد الترشيح وفق قيم α , حيث يلاحظ أن قيم THD بعد الترشيح أصبحت ضمن حدود المعيار العالمي حتى قيم $\alpha \leq 30$.

الجدول 4: قيم THD و HF للتوافقيات 5^{th} , 7^{th} , 11^{th} , 13^{th} قبل و بعد الترشيح وفق قيم α .

α°	THD%	HF(5^{th})%	HF(7^{th})%	HF(11^{th})%	HF(13^{th})%
0.0	30	23.73	11.77	9.377	6.586
بعد الترشيح	5.01<12	0.79	0.541	0.834	0.618
30	35.89	23.932	11.79	9.654	6.685
بعد الترشيح	15<=15	3.139	3.039	3.40	3.089
60	62.12	23.869	11.9	9.57	6.8
بعد الترشيح	26.82>15	3.29	3.337	3.66	3.627

مناقشة النتائج:

✓ في حالة الحمل اللاخطي دارة تقويم:

1- تم تخفيض THD بنسبة 20.24%. كما تم تخفيض عامل التوافقية الخامسة بنسبة 0.1831% و السابعة بنسبة 0.1045%.

2- نسبة THD بعد الترشيح هي > 12 و هي ضمن الحدود المطلوبة في المعيار IEEE Std 519.

3- قام المرشح بتعويض التوافقيات التي يحقنها الحمل اللاخطي في الشبكة عند نقطة اتصاله معها و بالتالي ستبقى هذه التوافقيات محصورة بالحمل المسبب لها دون أن يمتد تأثيره إلى تيار الشبكة.

4-قاد المتحكم PI المرشح لتوليد تيارات مساوية و معاكسة لتوافقيات الحمل على خرج المرشح, أي أنه أنجز المطلوب منه.

✓ في حالة الحمل اللاخطي مبدلة ثايرستورية مقادة مع قيم مختلفة لـ α :

- 1- تم تخفيض الـ THD و التوافقيات 5^{th} , 7^{th} , 11^{th} , 13^{th} عند كل قيمة لـ α كما في الجدول (4).
- 2- تحسّس المرشح الفعال لتغيرات الحمل اللاخطي المتصل معه و قام بتعويض التوافقيات الجديدة الناتجة عنه و جعلها ضمن الحدود المعيارية (>12) و ذلك حتى قيم زوايا القرح >30.
- 3- قام المرشح الفعال بتعويض التوافقيات الناتجة عن التغيرات في الحمل اللاخطي المتصل معه حتى قيم محددة لزوايا القرح.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

- 1- سهولة استخدام طريقة الكشف التزامني d-q لتحديد تيارات الخطأ.
- 2- ساعد استخدام المتحكم PI التزامني في قيادة خرج المرشح الفعال بشكل يطابق و يلاحق تيارات التوافقيات الملوثة (بما أن المرشح الفعال المستخدم هو تفرعي لتعويض توافقيات التيار) و تقليل الخطأ الستاتيكي في الزمن الحقيقي كوننا نعمل على الحالة المستقرة و ليس العابرة.
- 3- يعتبر المتحكم PI التزامني المستخدم ملائماً للعمل مع أحمالٍ لاخطيةٍ متنوعةٍ.
- 4- قام المرشح بتحسين قيمة THD في حالة الحمل الثايرستوري و جعله ضمن الحدود المعيارية حتى قيمة زوايا قرح >60°.
- 5- تحسّس المرشح الفعال التفرعي للتغيرات في الأحمال اللاخطية المتصل معها و قام بتعويض التوافقيات الجديدة الناتجة عنها بنسب مختلفة, وهذه أهم ميزة للمرشح الفعال.
- 6- يساهم النظام الذي قمنا بتصميمه في تصميم الشبكات الكهربائية الصناعية قبل استثمارها و بعد مراحل التطوير لأنه قادر على تعويض أي توافقيات جديدة يمكن أن تدخل النظام في حال إضافة أحمالٍ لاخطيةٍ جديدةٍ للمنشأة.

التوصيات:

- 1- استخدام النظام المدروس في الدراسة لتصميم مثل هذه الأنواع من المرشحات الفعالة في الشبكات الصناعية التي تحوي أحمالاً لاخطية.
- 2- تبين من الدراسة المرجعية و التطبيق على النموذج الذي قمنا بتصميمه أن طريقة الكشف التزامني d-q لاشتقاق التيارات التوافقية من تيار الحمل هي الأفضل حيث تمكّن و بسهولة من تحديد التيارات التوافقية لذلك ينصح باستخدامها في تصميم المرشحات الفعالة.
- 3- دراسة فعالية متحكمات أخرى للتحكم بالمرشحات الفعالة.
- 4- تطبيق معايير الحد من التشوه بالتوافقيات في الصناعات للتقليل من المشاكل الناتجة عن التوافقيات.
- 5- وضع معايير لتحديد التشوه بالتوافقيات بما يناسب الشبكات الصناعية في الجمهورية العربية السورية.

- 6- وضع منهجية علمية صناعية لتصنيع مثل هذه المرشحات في الجمهورية العربية السورية و باستطاعات مختلفة نظراً لكونه يشكل دعماً للدخل القومي في سوريا.
- 7- نوصي بالرقابة على الأجهزة التي تدخل البلد على أنها تحقق مواصفات الجودة العالمية من أجل تجنب التشوهات في تيارات الشبكات الكهربائية التي تسببها هذه الأجهزة، لأنه يتم إدخال أجهزة تسبب تشوهات كبيرة تفوق بكثير النورمات العالمية الخاصة بتحديد مستوى التوافقيات حيث قمنا بقياس THD لمبة توفير و هي منتشرة بكثرة في الأسواق فكانت قيمته %123.4 أي هي قيمة كبيرة جداً و غير مقبولة.

المراجع:

- [1]Rudnick,H; Dixon,J; Morán,L. *Delivering Clean and Pure Power*. IEEE power & energy magazine, 2003.
- [2]Kumar, P. *Investigations on Shunt Active Power Filter For Power Quality Improvement*. Thesis for the degree of Master of Technology, National Institute of Technology Rourkela University, Rourkela India,2007,67.
- [3]Patidar, R; Singh, S. *Active and Reactive Power Control and Quality Management in DG-GRID Interfaced Systems*.ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences,Vol.4,NO.3, May 2009,10.
- [4]Sriranjani, R; Jayalalitha, S. *Investigation the Performance of the Various Types of Harmonic Filters*. World Applied Sciences Journal 17 (5): 643-650, 2012.
- [5]Hoevenaars, T; LeDoux, K; Colosino, M. *Interpreting IEEE Std 519 and Meeting its Harmonic Limits in VFD Applications*. IEEE Paper No. PCIC-2003-15.
- [6]Kumar, M. *Control Implementations for High Bandwidth Shunt Active Filter*. Thesis, North Carolina State University,2011.
- [7]Adil,M; Al-Zamil; David, Torrey, A. *A Passive Series, Active Shunt Filter for High Power Applications*. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 16, NO. 1, JANUARY, 2001.
- [8]Zahira, R, Fathima,A. *A Technical Survey on Control Strategies of Active Filter for Harmonic Suppression*. Scieverse, ScinceDirect, India, Procedia Engineering 30(2012) 686 – 693,8.
- [9]Malinowski, M. *Sensorless Control Strategies for Three-Phase PWM Rectifier* .PH.D. Thesis, Warso University, Warso Poland,2011,128.
- [10] Pandit, P. *Modeling and Analysis of Active Front-End Induction Motor Drive for Reactive Power Compensation*. Thesis of Master of Science degree, University of Tennessee, Knoxville, May 2005,134.
- [11] Sharma, A; Diwan, R; Tiwari, P. *A Novel Approach to Perform Convalescence in Power Quality in Electric Distribution System*. IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSRJEEE), ISSV:2278-1676.2.3(Sep-Oct 2012),pp21-25.
- [12] السقا، زياد؛ ورقوزق، هاشم؛ بيرييه، روبيير. تمثيل المرشحات الفعالة الأحادية الطور. مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية، دمشق سوريا، المجلد الثالث و العشرون، العدد الأول، 2007، 34.