

خوارزمية تحكم بمرشح نشط (فعال) تعمل وفق نظرية فريزه للقدرة الغير فعالة

*منصور حشاد و طارق العائب

قسم الهندسة الكهربائية والإلكترونية بالمعهد العالي للتقنيات الهندسية\ طرابلس، ليبيا

المصغ	الكلمات المفتاحية:
المرشحات النشطة التي تعتمد على نظرية القدرة اللحظية لأكاجي، والتي أقرحها في بدايات الثمانينات من القرن الماضي، هي الأشهر بين الباحث في هذا المجال، فسنوياً إلى يومنا هذا تُكتب عشرات الأوراق البحثية بالخصوص. تعتمد النظرية أساساً على تحويل كلارك للنظام ثلاثي الأطوار، ثم تعريف القدرة اللحظية الفعالة والغير فعالة في المحاور ألفا وبيتا، وعلى أساس ذلك يتم تعيين تيارات المرشح النشط في المحاور ألفا بيتا، ثم القيام بالتحويل العكسي لكلارك لتعيين التيارات المرجعية للمرشح الفعال. المرشحات الفعالة تقوم بتعويض التيار، بحيث في الحالة المثالية يكون التيار المعوض المسحوب من الشبكة جيبياً ومتوازناً و في طور مع الجهد، أي تحسين معامل القدرة. يصف هذا البحث استراتيجية تحكم لمرشح نشط، وفق النظرية اللحظية لفريزه، التي نشرها في بداية عشرينات القرن الماضي، ومع شهرتها بين نظريات القدرة إلا أنها لم تشتهر كخوارزمية تحكم في المرشحات النشطة. حسب علم المؤلفين أنه و لأول مرة في هذا البحث يتم تقديم خوارزمية تحكم تعمل وفق نظرية فريزه بحمولة غير خطية عبارة عن دائرة كهربائية بمقوم نصف موجة محكوم، ما يُشكل تحدياً حقيقياً للتحقق من صحة استراتيجية التحكم المقترحة. التجارب التمهيدية تمت باستخدام البرنامج الغني عن التعريف Matlab	الدوائر الغير خطية التوافقيات القدرة الظاهرية القدرة الغير فعالة المرشحات النشطة إلوفيتشي بودان فريزه.

Control algorithm for shunt active filter based on Fryze power theory

*Mansour S. Hashad, Tarek Al-Ayeb

HIET , Al Fornage, Tripoli, Libya

Keywords:

Active Filter
Akagi
Fryze Power Theory
Instantaneous Power Theory
Illović

ABSTRACT

Active filters (AF) based on the Akagi instantaneous power theory, proposed in the early 1980s, are the most popular among researchers in this field, dozens of articles are published each year. This theory is mainly based on the Clarke transformation of a three-phase system, then the determination of the active and reactive instantaneous power in the alpha and beta systems, so on this basis, the AF currents are determined, next by using the Clarke inverse transformation, the reference currents for AF control algorithm are done. Shunt AF in the ideal case make the compensated mains current, sinusoidal, balanced and in phase with the voltage, i.e. improving the power factor. The article describes the shunt AF control strategy according to Fryze instantaneous theory, which he published in the early 1920s, and despite its popularity among the power theory, it has not been popular as a control algorithm. The article presents a control algorithm that works in accordance with the Fryze theory with non-linear load i.e. single-phase thyristor rectifier, which is a real challenge to verification of the control strategy. The simulation experiments were carried out using the well-known Simulink-Matlab program. the shape of the building, its mass and the appropriate insulation materials in the dry hot climate.

(1) المقدمة

الإلكترونية. تفرض المعايير الدولية المتعلقة بجودة الطاقة الكهربائية IEC-519, IEC 61000, EN 50160 وأخرى، أن المعدات والألات الكهربائية يجب ألا تنتج توافقيات تيار أكبر من القيم المحددة، كما تحدد حدود التشوه في

يسحب الحمل الغير الخطي تياراً غير جيبى، لأنه يسحب المركب الأساسي بالإضافة إلى مركب التوافقيات مما يتسبب في فقد طاقة أكبر في التوزيع ومشاكل التداخل في أنظمة الاتصالات وأحياناً فشل تشغيل المعدات

*Corresponding author:

E-mail addresses: ms_hashad@hashad.com, (T. Al-Ayeb) tarekalayeb@gmail.com

Article History : Received 28 June 2021 - Received in revised form 15 August 2021 - Accepted 15 September 2021

يمكن اعتبار نظرية فريزيه بمثابة مقدمة رئيسية لتعريفات القدرة في المجال الزمني. لا تستند معادلات القدرة التي اقترحها فريزيه على تحليل فورييه، وكان اعتراضه ضد نظرية بودان يتمحور حول أمرين، أن القدرة مفهوم أساسي ويجب أن لا يُعرف بطريقة غير مباشرة في النطاق الترددي، والثاني أن الحسابات تتطلب امكانيات تحليلية كبيرة، لأن التطبيقات العملية مثل محللات الطيف الحديثة في الوقت الحقيقي لم تكن موجودة في ذلك الوقت. بلغة بسيطة، تعريف فريزيه يقول أن كل ما ليس منتجاً يُعرف على أنه غير منتج، أي لا يتم التفريق بين القدرة الغير فعالة عموماً، وبين القدرة الردية (المصاحبة للمجالات المحافضة). وهذا من العيوب التي أنتقدت عليها النظرية، فهي لا تسمح بتصميم المرشحات السلبية.

في حالة الترشيح الفعال نرى أن ما تم تصنيفه كعيب هو الميزة الأقوى. وهو أساس عمل الخوارزمية (كل ما لا ينفج يُحذف) كما سنرى على نتائج التجارب التشبيبية التي تم اجراءها في هذه الورقة البحثية. لغرض توحيد المصطلحات والتعريفات، وربطاً للسياق، سنذكر هنا أيضاً الأمور المعروفة من نظريات الدوائر الكهربائية والتي اعتمد عليها فريزيه. لأي إشارتين عامتين للجهد والتيار أحادي الطور، v و i ، متكررتين بفترة T يتعامل فريزيه مع المقادير التالية في حسابات القدرة:

$$V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2 dt} \quad (1)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad (2)$$

القدرة الفعالة

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T v i dt \quad (3)$$

القدرة الظاهرية

$$S = V I \quad (4)$$

القدرة الغير فعالة لفريزيه

$$Q_F = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (5)$$

معامل القدرة الفعالة

$$\lambda_a = \frac{P}{S} \quad (6)$$

ومعامل القدرة الغير فعالة

$$\lambda_{na} = \sqrt{1 - \lambda_a^2} = \frac{Q_F}{S} \quad (7)$$

نظرية فريزيه وضعت أسس تقسيم التيار اللحظي إلى مكونين لحظيين متعامدين، وهما المركبة الفعالة للتيار i_a والمركبة الغير فعالة i_{na} . المركبة الفعالة هي المسؤولة والتي تنتج نفس القدرة الفعالة للتيار الكلي:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v i dt = \frac{1}{T} \int_0^T v i_a dt =$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T v (Gv) dt = G \frac{1}{T} \int_0^T v^2 dt = GV^2 \quad (8)$$

حيث يمكن فهم G على أنها الموصلية المكافئة للنظام. لذلك، تمكن فريزيه من تعريف التيار الفعال اللحظي بواسطة.

جهد المصدر.

حالياً تستخدم المرشحات النشطة بوفرة كحل للتقليل من وجود التوافقيات، وبكفاءة أكثر مما تقدمه المرشحات السلبية.

خوارزميات التحكم بالأولى يتم تطويرها وتحسين أداؤها بشكل مستمر نظراً لما تتيحه دوائر تحكمها من قدرات برمجية ومعالجات رقمية للإشارات في الزمن الحقيقي، وأيضاً لقدرات دوائر إلكترونيات القوى وكفاءتها العالية. من بين ما تم تطويره وأكثرها شهرة وانتشاراً بين الباحثين، هي خوارزمية أكاجي المنشورة في سنة 1983 والتي تعرف Instantaneous reactive power p-q theory [1].

بالنسبة للنظريات التي تحاول وصف القدرة الكهربائية في الدوائر الغير خطية بمنحنيات غير جيبية كثيرة جداً، والموضوع إلى يومنا هذا يدور حوله جدل بشكل غير مسبوق، فالرهان على من سيدخل التاريخ ويسجل حلاً لهذه المعضلة المستمرة.

في سنة 2010 اصدرت IEEE نمطاً جديداً اعتمد على بعض التعريفات الأساسية للخروج من هذا الجدل بشكل قانوني، ولكنه لا يغلق الموضوع بشكل علمي ومعرفي [2].

نظرية القدرة اللحظية لأكاجي عليها انتقادات تخص عدم قدرتها على تفسير الظواهر الفيزيائية وأيضاً نطاق صلاحيتها لا يتسع للأحمال الغير متماثلة وبالرغم من ضعفها - حتى لا نقول عجزها - في تفسير الظواهر الفيزيائية، إلا أن سهولة فهمها وجمال بنيتها الرياضياتية أعطتها شعبية كبيرة بين الباحثين وخصوصاً بين مصممي المرشحات النشطة [3] - [5].

فريزيه Fryze في سنة 1932 [6]، وفي اعتراضه على تعريف بودان للقدرة في النطاق الترددي [7]، وضع أساساً لتعريف القدرة بواسطة تقسيم موجة التيار والجهد إلى مركبات متعامدة.

الكثير من الحسابات الحالية للقدرة الفعالة والغير فعالة في المجال الزمني للأنظمة أحادية الطور تعتمد أساساً على طريقة فريزيه.

من بين النظريات الحديثة التي تعتمد على ذلك هي نظرية CPC لتشارنيتسكي وقد بين فيها إمكانية الترشيح السلي جزئياً لمحتوى التوافقيات العليا، وهو ما لم يفعله فريزيه [8].

بالرغم من أن نظرية فريزيه أقدم بكثير من نصف قرن من نظرية أكاجي، إلا أنها لم تجد اهتماماً كبيراً في نطاق الاستخدام كخوارزميات التحكم إلا مؤخراً، ومن هنا كانت فكرة هذه الورقة البحثية. حسب علم المؤلفين أنه و لأول مرة في هذا البحث يتم تقديم خوارزمية تحكم تعمل وفق نظرية فريزيه بحمولة غير خطية عبارة عن دائرة كهربائية بمقوم نصف موجة محكوم، ما يُشكل تحدياً حقيقياً للتحقق من صحة استراتيجيات التحكم المقترحة.

يعتقد المؤلفان أن تطبيق نظرية فريزيه أسهل ويمكن أن يعطي نتائج أحسن، سواء على مستوى الترشيح أو إزاحة التوافقية الأساسية للتيار لتكون في طور مع الجهد مما سيحسن من معامل القدرة.

لإثبات الفرضية أعلاه، قام المؤلفان بالإختبار التشبيبي في برنامج الماتلاب على حمولة غير خطية، عبارة عن مقوم تايرستوري يغذي حملاً مادياً-حثي، مما يشكل تحدياً حقيقياً. والتحدي محله أن تيار الحمل سيحتوي على التوافقية الصفرية والمركبات الزوجية بالإضافة إلى المركبات الفردية، وبنسبة عالية،

مفهوم القدرة الكهربائية حسب نظرية فريزيه

فإن نظرية فريزيه، ليس لدى المؤلفين معلومة تفيد بأنه قد تم استعمالها فعلياً في نطاق المرشحات النشطة على المستوى التطبيقي. يبدو للمؤلفين أن استعمال نظرية فريزيه كخوارزمية تحكم، أسهل وأوضح من النظرية اللحظية لأكاجي، وهي ليس فقط ترشح التوافقيات العليا، بل وكذلك تحسن معامل القدرة بشكل غير منفصل.

من عيوب نظرية فريزيه في نطاق الترشح النشط أنها ترشح التيار حسب الجهد. هذا ينتج من منطوق نظرية فريزيه ذاتها، بحيث إذا كان منعي التغذية الجهدية يحتوي على توافقيات علياً فإن هذه التوافقيات ستوجد في التيار المرشح تبعاً لذلك.

هذا العيب المذكور يمكن تجاوزه بعدة طرق، مثلاً باستعمال مرشح تسلسلي لترشيح التوافقيات العليا في الجهد الكهربائي بدايةً، ثم بعد ذلك تتم عملية ترشيح التيار.

نحتاج -في هذه الحالة المذكورة- لتقسيم منحنيات الجهد وفق مرجعيات، وللتفصيل في كيفية تعيين مركبات الجهد المتعامدة وفق مرجعيات أخرى، فإننا نرسل القاريء الكريم للتفاصيل في الورقة البحثية [10].

عملية ترشيح الجهد يخرج عن نطاق هذه الورقة البحثية، ولهذا سيتم تجاوزه تماماً؛ عليه سيتم فرض منحنى جيبي لجهد مصدر التغذية. هذا الفرض لا يؤثر عملياً على سلامة النتائج، ومن الناحية النظرية يمكن ترشيح الجهد بطريقة "ما" أو تنفيذ التحكم بمرجعية تيارية بالنسبة للتوافقية الأساسية للجهد.

المحاكاة والنتائج

لتوضيح فعالية الخوارزمية تم تقديم دائرة غير خطية بدون استعمال المرشح المقترح، ثم بعد ذلك ولنفس الدائرة تم تطبيق الخوارزمية وبهذا يمكن مقارنة الفرق الحادث في تيار المصدر، ومدى التحسن في القيم الكهربائية، مما يمكن من الحكم موضوعياً على الخوارزمية المقترحة في هذه الورقة البحثية.

بدون استخدام المرشح

الدائرة الكهربائية التي تم تطبيق الخوارزمية عليها مغطاة بالشكل (1)، وهذه الدائرة عبارة عن دائرة مقوم نصف موجة محكوم، بحمل مادي حثي (فعال-حثي) أحادي الطور. العنصر الغير خطي هو التايستور ويتم اعطاء نبضة على بوابته عند 90 درجة كهربائية (أي عند 5 مللي ثانية من بداية الموجة الموجبة)، فرق الجهد للمصدر الجهدية 230 فولت\ 50 هيرتز، وتياره تم ترميزه بـ i_s بينما الحمل عبارة عن مقاومة 25Ω وملف 5 mH.

تيار الحمل تم ترميزه بـ i_a وفي هذه الحالة هو مساوٍ لتيار المصدر نظراً لعدم وجود تفرع تيار، أو بكلمات أخرى لم يتم استعمال المرشح الفعال للتيار.

$$i_a = Gv; \quad G = \frac{P}{v^2} \quad (9)$$

والتيار الغير الفعال

$$i_{nF} = i - i_a \quad (10)$$

والعلاقة تكون متعامدة بين كلا مركبتي التيار، حيث:

$$\frac{1}{T} \int_0^T i_a i_{nF} dt = \frac{G}{T} \int_0^T v i_{nF} dt = \frac{G}{T} \int_0^T v(i - i_a) dt = 0 \Rightarrow I^2 = I_a^2 + I_n^2 \quad (11)$$

حيث I_a ، I_{nF} جذر متوسط القيمة التربيعية للمركبة الفعالة و الغير فعالة المتعامدين للتيار.

المركبة الغير فعالة للتيار، هي ما يدور على ترشيحها موضوع هذه الورقة. مما ذكر يمكن الإستنتاج أن ترشيحها سيرفع عملياً معامل القدرة إلى الواحد تقريباً.

من المعادلة (8) ينتج فوراً أن λa تصل إلى الحد الأقصى و تساوي الواحد فقط، إذا كان التيار اللحظي المار بالجهد يتناسب بقيمة ثابتة مع الجهد اللحظي المسبب له (كما العلاقة بين الجهد والتيار المار خلال مقاومة في قانون أوم).

اثبات أن هذا شرط ضرورة لا شرط كفاية ينتج من متباينة كوشي-شوارز و تم تقديمه أيضاً في [9] - [10]، وكذلك تم تقديم المنهج الرياضي لتقسيم الموجة اللحظية للجهود والتيارات لمركبات متعامدة.

في هذا التحليل التشبيهي قمنا بتصميم خوارزمية تحكم بمرشح فعال، تعمل وفق نظرية القدرة لفريزيه، وذلك بترشيح المركبة الغير فعالة لفريزيه من التيار المسحوب من الشبكة بواسطة حمل غير خطي.

كما تم ذكره بأن تقسيم فريزيه للتيار في النطاق الزمني لمركبتين متعامدتين من أقدم التقسيمات

$$i = i_a + i_{nF} \quad (12)$$

لهذا فكل النظريات اللاحقة التي اعتمدت على تقسيم التيار بإعتبار المركبة الفعالة لفريزيه، تعاملت مع المركبة الغير فعالة وقسمتها إلى مركبات متعامدة (في الغالب يتم التقسيم لمركبات بشكل دوغامي وذلك بفرضها بالخبرة) فمثلاً في نظريته [11] التي سماها Current's Physical Component اختصاراً CPC قام لشك تشارنيتسكي بتقسيم التيار في الدوائر أحادية الطور الخطية التي تحتوي على منحنيات جهدية وتيارية، غير جيبيية إلى المركبات:

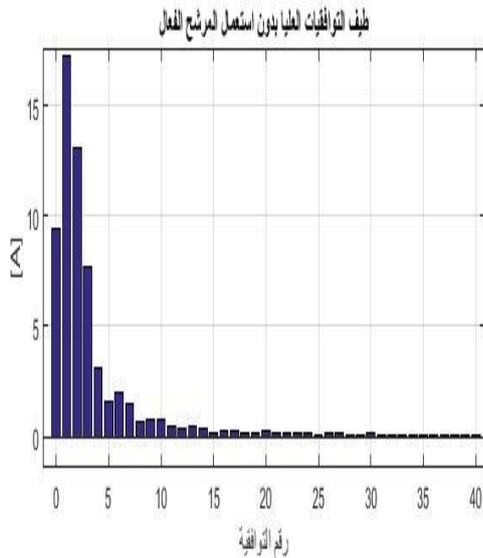
$$i = i_a + i_r + i_s$$

حيث i_r التيار الغير فعال (reactive current)

والتيار i_s (scattered current)

تشارنيتسكي بين أن المركبة i_r يمكن ترشيحها بنسبة كبيرة عن طريق مرشحات LC السلبية. تجب الإشارة هنا أن المركبة الغير فعالة التي أقرحتها تشارنيتسكي هي المركبة التي تم اقتراحها في 1972 من قبل شيفرد و زاكي خان [12].

رجوعاً إلى نظرية فريزيه، وكما تم التنويه سابقاً بأنه وبعكس نظرية أكاجي،



شكل 3: توافقيات تيار المصدر.

وكانت القيم الأساسية من غير وجود مرشح كالآتي:

- شدة التيار المسحوب من المصدر 19[A]
- القدرة الفعالة للمصدر 1818 [W]
- القدرة الظاهرية للمصدر 4186.4 [VA]
- معامل القدرة 0.433
- نسبة احتواء التوافقيات التيارية نسبةً إلى التوافقية الأولى حسب تعريف IEEE std. هو $THDi = 120\%$

نلاحظ هنا ارتفاع قيمة المعامل $THDi$ مما يعني أن نسبة تواجد التوافقيات فاقت المركبة الأساسية (الأولى) وهذا ناتج عن طبيعة الحمل الذي تم اختياره عن قصد، لتقييم تمكن الخوارزمية من أداء عملها بالشكل المطلوب في أصعب الظروف، بل الأصعب على الإطلاق.

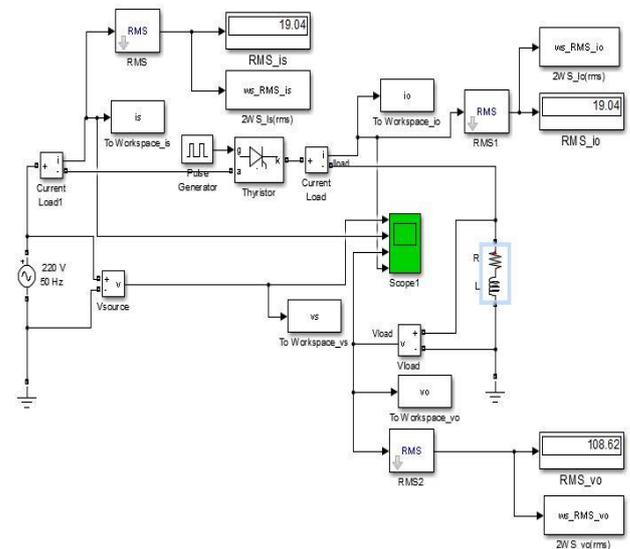
القيم القصوى (المطالات) للتوافقيات التسع الأولى والمركبة المستمرة -حسب الشكل (3)- لتيار المصدر بالأمبر مُعطاة رقمياً بالجدول (1).

جدول 1 القيم القصوى للتوافقيات

رتبة التوافقية	قيمة المطال للتوافقية [A]
المركبة الفابتة	9.4
التوافقية الأساسية	17.2
التوافقية الثانية	13
التوافقية الثالثة	7.74
التوافقية الرابعة	3.15
التوافقية الخامسة	1.57
التوافقية السادسة	2
التوافقية السابعة	1.47
التوافقية الثامنة	0.67
التوافقية التاسعة	0.76

بعد استخدام المرشح الفعّال

بعد إجراء التجارب السابقة تمت إضافة مرشح فعال ثلاثي المستويات الجهدية NPC بتحكم تيارى نوع دلتا. التيار المرجعي للمرشح هو المركبة الغير فعالة لفريزته لتيار الحمل، حيث تم



شكل 1: مقوم نصف موجة محكوم بحمل مادي-حيثي.

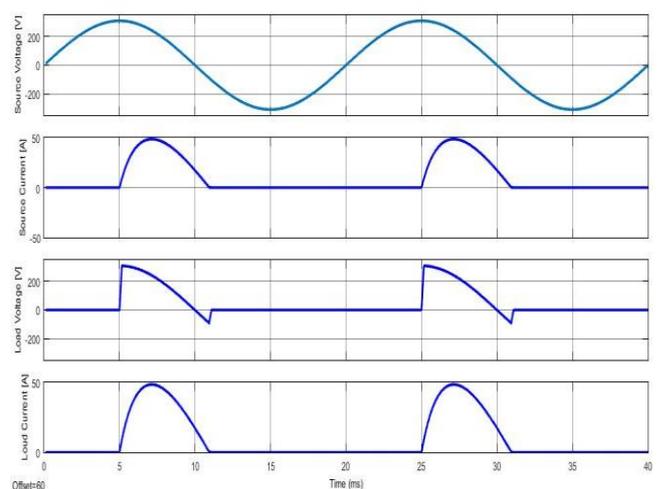
الدائرة بالشكل (1) رغم بساطتها فقد تم اختيارها عن قصد على الأقل لثلاث أسباب:

الأول: أنه يمكن بهذا الشكل التركيز على توضيح عمل الخوارزمية نفسها، وليس التركيز على تعقيد الدائرة الكهربائية،

الثاني: فإن تشوه التيار كبير جداً ويحتوي على توافقيات عليا بنسبة كبيرة وكذلك يحتوي حتى على المركبة المستمرة والمركبات الزوجية، وهذا بلا شك سيكون تحدياً كبيراً لعمل المرشح بالشكل المقبول.

الثالث: وجود طاقة مغناطيسية كبيرة مستحثة في الملف المغناطيسي وبالتالي بالإضافة للتشوه الموجي فهناك قدرة رد فعلية بإختصار "ردية" (تعكس سرعة التبادلات في الطاقة المحفوظة).

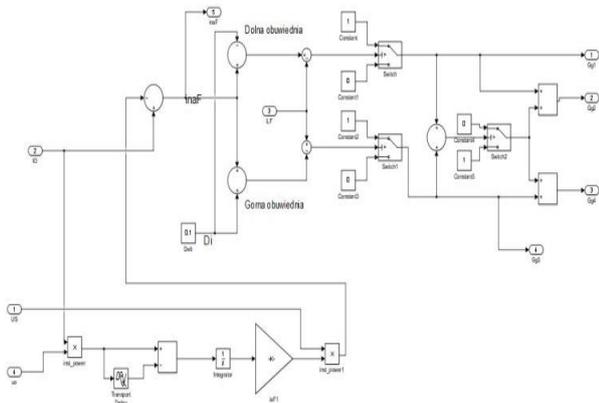
الموجات اللحظية قبل استعمال المرشح الفعال معطاة بالشكل (2).



شكل 2: المنحنيات أ-جهد التغذية، ب-تيار التغذية،

ج-جهد الحمل، د-تيار الحمل.

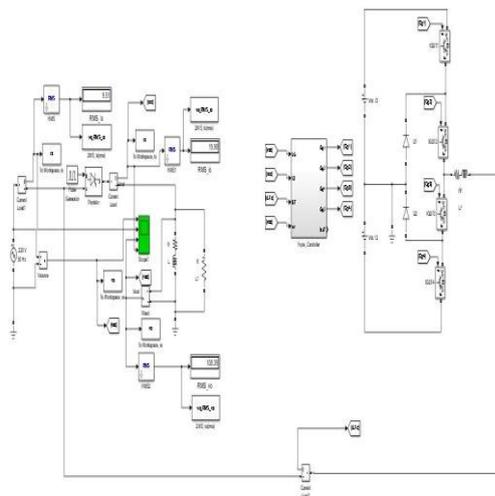
توافقيات تيار المصدر (ذاته تيار الحمل) مُعطاة على الشكل (3).



شكل 5: دائرة تنفيذ خوارزمية التحكم

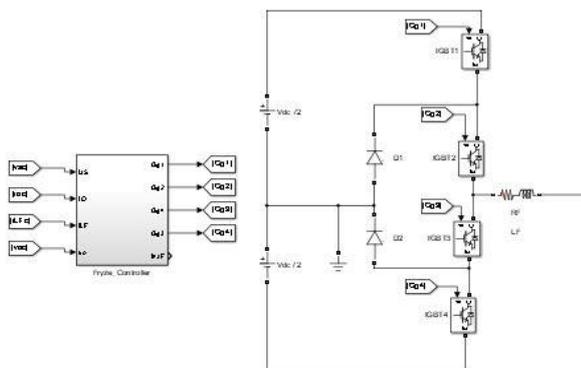
لعله من الواضح في الشكل (5) بساطة دائرة التحكم، كذلك لا توجد أي مشكلة عملية في تنفيذها بطرق مختلفة، سواء عن طريق البناء أو البرمجة.

في الشكل (6) تم اعطاء الدائرة الكهربائية للمقوم نصف الموجة المحكوم والمرشح الفعال ثلاثي المستويات.



شكل 6: الدائرة الكهربائية الكلية.

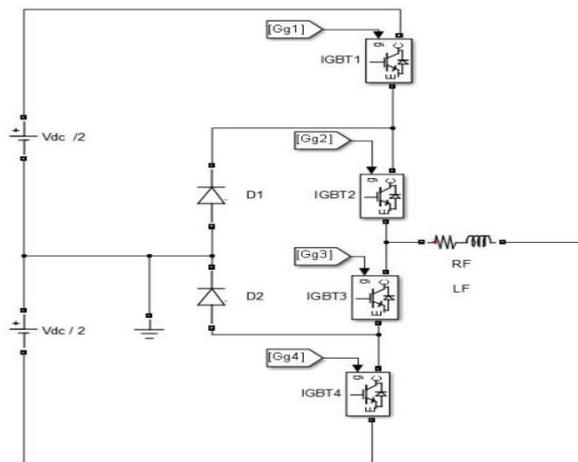
الشكل (7) يوضح دائرة المرشح الفعال:



شكل 7: الدائرة الكهربائية للمرشح الفعال.

تقسيم تيار الحمل إلى مركبتين متعامدتين نسبةً إلى جهد المصدر.
المرشح الفعال معطى على الشكل (4).

المرشح عبارة عن طور واحد من العاكس الجهدى ثلاثي المستويات نوع NPC بغرض إعطاء القيمة الجهدية $V_{dc}/2$ على مخرج العاكس، يتم تشغيل الترانزستورات IGBT رقم 1، 2 وإعطاء الجهد 0 [V] يتم تشغيل رقم 2، 3 بينما $V_{dc}/2$ يتم تشغيل رقم 3، 4 وهكذا دائماً يتم تشغيل زوج من الترانزستورات المتعادية.



شكل 4: المرشح الفعال ثلاثي المستويات

نظراً لوجود الملف LF بحثية كبيرة على مخرج العاكس الجهدى، فإنه يتحول إلى مصدر تيارى.

تيار الخرج يكون عبارة عن تقليد مركبة فريزيه الغير فعالة (التيار المرجعي). الطرف الأخر للملف LF يتم توصيله بين مصدر الجهد و الثايرستور حتى يحقن المركبة المسببة لتشوه التيار الخاص بالمصدر، وبالتالي يتم سحبها من المرشح النشط ولا يتم سحبها من المصدر.

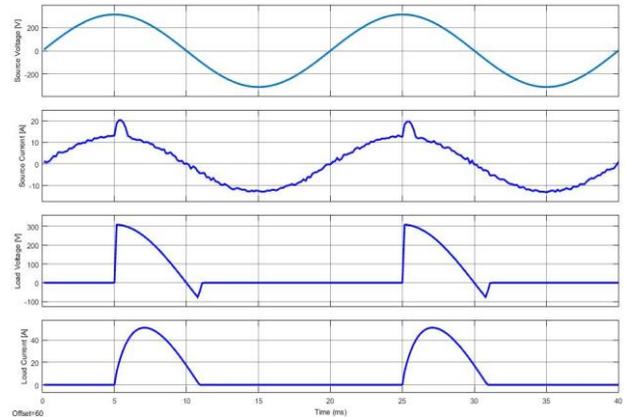
التيار المرجعي في الخوارزمية يتم تعيينه بالترتيب الآتي (وهو ما ينتج من القوانين (1، 4-9، 12)):

بدايةً نعين تيار فريزيه الفعال حسب المعادلة (9)

ثم نعين المركبة الغير فعالة حسب المعادلة (10) وهذه هي الإشارة المرجعية للتحكم i_{ref} . هذه الإشارة تُقارن بشكل مستمر ولحظي مع التيار الحالي للمرشح المار عبر الملف LF فإذا كان التيار الفعلي على مخرج المرشح أكبر من القيمة المرجعية بهامش افتراضي فإنه يتم تشغيل الترانزستورات 3، 4 أما إذا كان أصغر فإنه يتم تشغيل الترانزستورات 1، 2 أما في الحالة المتبقية يتم تشغيل الترانزستورات 2، 3. الدائرة المنطقية التي تحقق الخوارزمية مُعطاة بالشكل (5).

التوافقية الثامنة	0.472
التوافقية التاسعة	0.394

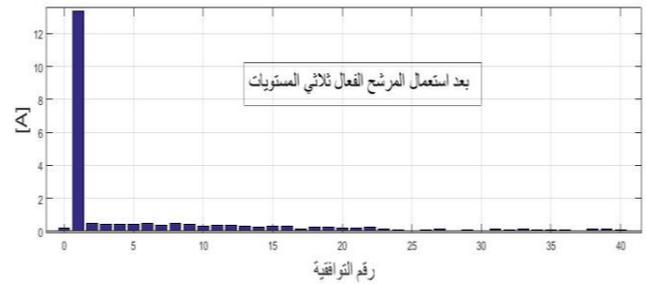
الموجات اللحظية بعد استعمال المرشح الفعال معطاة بالشكل (8) ونلاحظ الفرق على المنحنى الثاني "ب" الخاص بتيار التغذية للمصدر مقارنة مع نفس المنحنى في الشكل (2).



شكل 8: المنحنيات بعد الترشيح أ- جهد التغذية، ب- تيار التغذية،

ج- جهد الحمل، د- تيار الحمل.

طيف التوافقيات العليا (بعد الترشيح) حتى التوافقية الأربعين لتيار المصدر معطاة بالشكل (9) وهي أيضاً يجب مقارنتها مع الطيف على الشكل (3). نلاحظ اختفاء شبه تام حتى للمركبة المستمرة.



شكل 9: توافقيات تيار المصدر بعد الترشيح الفعال

وكانت القيم الأساسية بوجود مرشح كالآتي:

- شدة التيار المسحوب من المصدر 9.5 [A]
- القدرة الفعالة للمصدر 2074.6 [W]
- القدرة الظاهرية للمصدر 2090.9 [VA]
- معامل القدرة 0.955

نسبة احتواء التوافقيات التيارية نسبةً إلى التوافقية الأولى حسب تعريف IEEE std. هو $THDi = 12\%$ القيم العددية للمطالات لكل توافقية من التوافقيات التسع الأولى والمركبة المستمرة - حسب الشكل (9) - تيار المصدر بالأمبير معطاة، رقمياً بالجدول (2).

جدول 2: قيم القصى للتوافقيات لتيار المصدر

رتبة التوافقية	قيمة المطال للتوافقية [A]
المركبة الثابتة	0.2
التوافقية الأساسية	13.34
التوافقية الثانية	0.464
التوافقية الثالثة	0.44
التوافقية الرابعة	0.4
التوافقية الخامسة	0.411
التوافقية السادسة	0.456
التوافقية السابعة	0.38

مناقشة نتائج المحاكاة

تم تنفيذ دائرة قدرة شكل (1) في برنامج الماتلاب للمحاكاة. وكما هو موضح بالشكل (2) فإن موجة تيار المصدر تعتبر مشوهة (غير جيبيية) بشكل كبير حيث بلغت نسبة التوافقيات إلى التوافقية الأساسية 120% وبعد الترشيح انخفضت إلى 12% أي عشرة أضعاف وهو واضح حتى بالعين المجردة على الشكل (8-ب) مقارنةً مع الشكل (2-ب).

في الجدول (3) تمت مقارنة القيم الكهربائية لشدة التيار والقدرة الفعالة والظاهرة ومعامل إحتواء الهرمونات العليا للتيار، قبل وبعد تشغيل المرشح النشط.

جدول 3: مقارنة لبعض القيم الأساسية قبل وبعد إضافة المرشح

بعد المرشح	قبل المرشح	القيم الأساسية
9.5 [A]	19 [A]	شدة التيار المسحوب من المصدر
2074.6 [W]	1817.7 [W]	القدرة الفعالة للمصدر
2090.9 [W]	4186.4 [W]	القدرة الظاهرية للمصدر
0.955	0.433	معامل القدرة
12 [%]	120 [%]	نسبة إحتواء التوافقيات في تيار المصدر THDi

في الجدول (4) تم وضع القيم للمطالات الخاصة بتيار المصدر، قبل وبعد الترشيح بغرض المقارنة المباشرة. الجدير بالذكر أنه بالإضافة لإنخفاض قيم مطالات التوافقيات العليا، فإن الأساسية أنخفضت من 17.2 أمبير إلى 13.34 أمبير مما يعني أنه حدث أنزياح لها. هذا الإنزياح كان بسبب تبادلات الطاقة في المجال المغناطيسي للملف، وبعد تشغيل المرشح فإنه تم تأمينها من قبل المرشح وبالتالي تقليل الحمل على مصدر التغذية.

جدول 4: مقارنة لقيم التوافقيات بتيار المصدر قبل وبعد استعمال

المرشح

نسبة التخفيض	بعد الترشيح	قبل الترشيح	رتبة التوافقية
47	0.2	9.4	المركبة الثابتة
1.29	13.34	17.2	التوافقية الأساسية
28	0.464	13	التوافقية الثانية
17.59	0.44	7.74	التوافقية الثالثة
7.88	0.4	3.15	التوافقية الرابعة
3.82	0.411	1.57	التوافقية الخامسة
4.39	0.456	2	التوافقية السادسة
3.87	0.38	1.47	التوافقية السابعة
1.42	0.472	0.67	التوافقية الثامنة
1.93	0.394	0.76	التوافقية التاسعة

الخلاصة

تعد المرشحات النشطة (الفعالة) حلاً حديثاً لمشاكل جودة الطاقة مقارنة مع المرشحات السلبية. تسمح المرشحات الفعالة بتعويض تيار التوافقيات وعدم الاتزان بالإضافة إلى تصحيح معامل القدرة.

تقدم هذه الورقة نظرية فريزيه كخوارزمية تحكم مناسبة بالمرشحات الفعالة. النتائج الجيدة التي تم التحصل عليها تؤيد إستعمال هذه الخوارزمية حتى في الحالات ذات الإحتواء الهرموني الكبير، بما في ذلك المركبة الثابتة والمركبات الزوجية، لمزيد من المعلومات ومقارنة النتائج يمكن الرجوع لبعض الدراسات نذكر منها على سبيل المثال [13]-[16].

- [1]- Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. Fujita K.: "Generalized theory of the instantaneous reactive power and its application", *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 103, No. 4, pp. 58-65, 1983.
- [2]- IEEE std 1459-2010, "Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions". https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1589271/mod_resource/content/1/IEEE%20Std%201459-2010.pdf
- [3]- L.S. Czarnecki, "Power Properties of Three-Phase Electric Circuits and Their Misinterpretations by the Instantaneous Reactive Power p-q Theory", XII International Symposium on Theoretical Electrical Engineering, ISTET 03, July 2003.
- [4]- L.S. Czarnecki, "Does the Instantaneous Reactive Power p-q Theory specify power properties of electrical loads correctly?", *Proc. of the 4th IASTED Int. Conf. on Power and Energy Systems*, June 28-30, Rhodes, Greece, 2004.
- [5]- L.S. Czarnecki, "Constraints of the Instantaneous Reactive Power p-q Theory", *IET Power Electronics*, Vol. 7, No. 9, pp.2201-2208,2014.
- [6]- Fryze S.: "Moc rzeczywista, urojona i pozorna w obwodach elektrycznych o przebiegach odkształconych prądu i napięcia", *Przegląd Elektrotechniczny* 1931, nr 7, str. 193-203; nr 8, str. 225-234; nr 22, str. 673-676, 1932.
- [7]- Budeanu C. I.: "Puissances reactivs et fictives" *Inst. Romain de l'Energie*, Bucharest, 1927.
- [9]- Hashad M.: *Teoria mocy w obwodach elektrycznych – ortogonalizacja przebiegów*. Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, 2007, nr57 pp 22-35.
- [10]- Hashad M.: 2018, Controversy over the definition of power in electrical circuits (Non-linear - non-sinusoidal - asymmetric), Part I: Orthogonal compounds, *Journal of Science and Technology*. https://tjnbvtve.tve.gov.ly/first_AP_2018.php
- [11]- Czarnecki L.: Currents' Physical Components (CPC) in Circuits with No-sinusoidal Voltage and Currents. No. 2005. *Electrical Power Quality and Utilisation*, Journal No. 2, 2005.
- [12]- W. Shepherd, P. Zakikhani, 1972, Suggested definition of reactive power for nonsinusoidal systems, *Proc. IEE*, Vol. 119, No. 9, 1361-1362.
- [13]- H. S. Latha, K. Naga Sujatha and G. Radhika, "A Novel approach of Hybrid Active Power Filter using Fryze Current Controller," 2021 6th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES), 2021.
- [14]- Nie and J. Liu, "Current Reference Control for Shunt Active Power Filters Under Unbalanced and Distorted Supply Voltage Conditions," in *IEEE Access*, vol. 7, 2019.
- [15]- R. P. Keshawala, S. N. Pandya, S. K. Patel and D. P. Suthar, "Comparative analysis of 3-phase 3-wire shunt active power filters using various control strategies," 2018 IEEMA Engineer Infinite Conference (eTechNxT), 2018.
- [16]- K. R. Padiyar; Anil M. Kulkarni, "Fryze–Buchholz–Depenbrock Method for Load Compensation," in *Dynamics and Control of Electric Transmission and Microgrids*, IEEE, 2019.