

تحليل وتصميم المرشحات غير الفعالة لتقليل توافقيات تيار الخط في المقومات المحكومة

بشار عباس فضيل

أ.م.د حسين ابزار زينل

قسم الهندسة الكهربائية / جامعة الموصل

الخلاصة

سعى العديد من الباحثين إلى استخدام طرائق مختلفة لتقليل التوافقيات الظاهرة في موجة تيار الإدخال للمقوم القنطري، وفي هذه الدراسة تم استخدام طريقة ربط المرشحات غير الفعالة والتي تعد من أكثر الطرائق شيوعاً واستخداماً. المرشحات غير الفعالة التي تم استخدامها في هذه الدراسة هي التي تربط على التوازي مع المقوم القنطري، إذ إن فكرة عمل هذه المرشحات هي توفير مسار ذي ممانعة واطنة جدا لتوافقيات التيار ويجب أن يكون هذا النوع من المرشحات قادراً على تحمل الفولتية المقننة للنظام. في هذه الدراسة سيتم عرض نوعين من المرشحات غير الفعالة المستخدمة (مرشح أحادي التنعيم، مرشح ثنائي المرتبة ذو إمرار عالٍ)، إذ سيتم شرح مبدأ عمل هذه المرشحات مع التحليل الرياضي لهذه المرشحات والتحليل الرياضي للموجات غير الجيبية. وسيتم تصميم المرشحات عند زوايا قذح مختلفة. ودراسة الإجهاد المسلط على عناصر المرشح وعلى المرشح بالكامل عند كل حالات التصميم.

Analysis and Design of Passive Filters to Reduce Line Current Harmonics for Controlled Rectifiers

Hussein I.Zynal

Bashar A.Fadeel

Ph. D.

M.Sc.

Dept. of Electrical Engineering, Mosul University

Abstract

Many researchers have sought to use different methods to reduce harmonics in the input current wave of the rectifier, In this study the method of passive filter connections are used, which is the most commonly used method. The filters that have been used in this study are connected in parallel (shunt) with the rectifier. Where the idea of these filters to provide a path with a very low impedance to the harmonics of the current. These filters must be capable of withstanding rated voltage of the system. In this study two types of passive filters are explained and used (Single tuned filter and Second order high-pass filters). Also mathematical analysis of these types of filters and waves are given. Filters were designed at several values of the firing angles of the rectifier.

Keywords: Harmonics, Passive filters, Controlled rectifiers.

قائمة الرموز والمختصرات

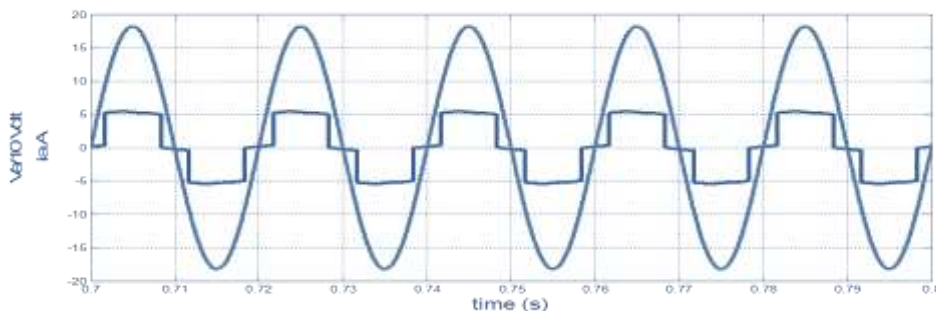
الرمز	الوحدة	الوصف	الرمز	الوحدة	الوصف
E	V	جذر متوسط التربيع للفولتية	THD	%	التشوه التوافقي الكلي
I	A	جذر متوسط التربيع للتيار	$P_{in(Real)}$	W	القدرة الحقيقية من جهة الإدخال
S	VA	القدرة الظاهرية	$P_{in(app)}$	VA	القدرة الظاهرية من جهة الإدخال
P	W	معدل سريان القدرة	$I_{1(rms)}$	A	القيمة المؤثرة لتيار المركبة الأساسية
G	VAr	القدرة غير الفعالة	$I_{T(rms)}$	A	القيمة المؤثرة للتيار
n	-----	مرتبة التوافقية	v_a	V	القيمة الأينية لفولتية إدخال المقوم/طور
L	H	محاثة المرشح	i_a	A	القيمة الأينية لتيار إدخال المقوم
R	Ω	مقاومة المرشح	I_a	A	معدل تيار الحمل
$Stress$	-----	الإجهاد الكلي	$Zf(s)$	Ω	ممانعة المرشح بصيغة لابلاس
$Stress$	-----	إجهاد الفولتية	f_0	Hz	التردد الرنيني
$Stress$	-----	إجهاد التيار	Q_c	-----	عامل الجودة

المقدمة:

إن استخدام الأجهزة التي تحتوي على عناصر وأجزاء من دوائر الكترونييات القدرة في الحياة اليومية بصورة كبيرة أدى إلى الزيادة في ظهور التوافقيات المتولدة من هذه العناصر في أنظمة القدرة. هذه العناصر التي يكون مبدأ عملها هو التقويم (Rectification) من التيار المتناوب (A.C) إلى التيار المستمر (D.C) هي بصورة عامة تكون غنية بظهور التوافقيات [1]. إن السلبية الرئيسية لهذه المقومات هي في كونها غير خطية بطبيعتها، فهي تولد تيارات توافقية في مصدر القدرة المتناوب. إن الطبيعة غير الخطية لهذه المقومات تتسبب في حدوث تشوه عالٍ في تيار الإدخال، مما يؤدي إلى حدوث عدد من المشكلات في شبكة التوزيع الرئيسية، لذلك دعت الحاجة إلى إيجاد طريقة للتخلص أو لتقليل التوافقيات المتولدة من هذه المقومات. التوافقيات يمكن أن تكون لها تأثيرات كبيرة على أجزاء الشبكة الكهربائية وأنظمة القدرة وأيضاً على المستهلكين في الشبكة. منذ خمسينات القرن المنصرم تم استخدام عدة طرائق وتقنيات لتقليل تأثير التوافقيات ومن أكثر هذه الطرائق استخداماً وأكثرها فعالية هي استخدام المرشحات غير الفعالة (Passive Filters) والتي تعد من الحلول الفعالة لتقليل التوافقيات لأنظمة القدرة المتوسطة والعالية الفولتية (الأكثر من 12KV) [2]. إن العديد من الشركات الصناعية تقوم بتركيب المرشحات غير الفعالة مع أجهزتها وذلك لتقليل من تأثير التوافقيات والبقاء ضمن الحدود المسموح بها من IEEE.519 والتي تُحدد قيمة التشوه التوافقي الكلي THD في الشبكة الكهربائية بـ 5% كحد أعلى وعدم التأثير على مصادر تجهيز القدرة [3].

1-توافقيات تيار الإدخال:

عند ربط حمل عالي الحثية لدائرة المقوم القنطري ثلاثي الطور المحكوم نحصل على تيار مستمر في جهة الإخراج و تيار على شكل موجة مربعة في جهة الإدخال، وهذا يحتوي على العديد من التوافقيات والذي بدوره يؤثر سلباً على المصدر المجهز للقدرة. الشكل (1) يبين تيار وفولتية الإدخال مع تأثير ممانعة المصدر:



الشكل (1) موجة فولتية و تيار الإدخال للمقوم القنطري عند زاوية قح ($\alpha=0^\circ$).

زينل: تحليل وتصميم المرشحات غير الفعالة لتقليل توافقيات تيار الخط في المقومات المحكومة

باستخدام متوالية فورير لتحليل الموجات يمكن أن نصيغ معادلة تيار الإدخال بالخطوات الآتية على افتراض إن الموجة مربعة مثالية وبإهمال فترة التداخل [4]:-

$$i_s(t) = \sum_{n=1,5,7,11,13, \dots}^{\infty} \sqrt{2} I_{sn} \sin(n\omega t + \phi_n) \text{ For } n = 1,5,7,11,13, \dots \dots \dots (1)$$

$$I_{sn} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{a_n^2 + b_n^2} = \frac{2\sqrt{2}I_a}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{3} \dots \dots \dots (2)$$

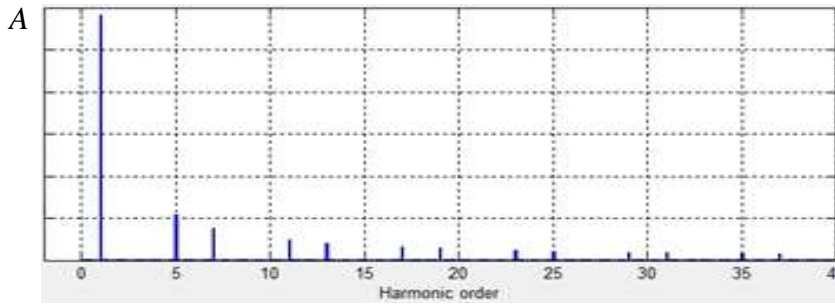
$$\phi_n = \tan^{-1} \frac{a_n}{b_n} \dots \dots \dots (3)$$

حيث أن:

I_{sn} : هو قيمة جذر متوسط التربيع لتيار التوافقية ذي المرتبة n .

ϕ_n : هي الزاوية بين تيار التوافقية n والفولتية.

نلاحظ من المعادلة (1) أن تيار الإدخال يحتوي على تيار المركبة الأساسية ومجموعة من التوافقيات الفردية ماعدا مضاعفات العدد (ثلاثة) هي (5,7,11,13,17,.....). وبين الشكل (2) الطيف الترددي لتيار الإدخال.



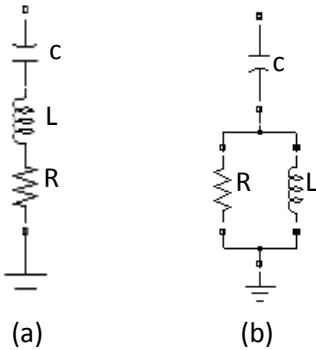
الشكل (2) الطيف الترددي لتيار الإدخال للمقوم القطري عند $\alpha=0^\circ$.

2-أنواع المرشحات:

أ-مرشح الإمرار الحزمي (Band-Pass Filters):

والذي يُستخدم لترشيح التوافقيات ذوات المراتب الواطئة مثل (5th,7th,11th,13th,etc.)، ويمكن أن يُضبط (يُنغم) لإلغاء تردد واحد فقط ويسمى (مرشحات أحادية التنغيم) أو ترددين اثنين ويسمى (مرشحات ثنائية التنغيم) [1],[3].

ب-مرشح الإمرار العالي (High-Pass Filters):



والذي يُستخدم لترشيح التوافقيات ذوات المراتب العالية وهي بعدة أنواع مثل (مرشح أحادي المرتبة ذو إمرار عالٍ، مرشح ثنائي المرتبة ذو إمرار عالٍ، مرشح ثلاثي المرتبة ذو إمرار عالٍ) وهناك نوع خاص من هذه المرشحات هو (نوع C) والذي يستخدم لتزويد القدرة المفاعلية ويتجنب حدوث حالة رنين التوازي، كما يستخدم أيضاً لترشيح مراتب التوافقيات الواطئة مثل (التوافقية الثالثة) مع المحافظة على خسائر قليلة جداً عند تردد الموجة الأساسية [1],[3]. الشكل (3) يبين تركيب الدوائر لمرشح أحادي التنغيم ومرشح ثنائي المرتبة ذو إمرار عالي.

الشكل (3): (a) مرشح أحادي التنغيم، (b) مرشح ثنائي المرتبة ذو إمرار عالي.

2-1 مرشحات أحادية التنغيم:

في هذا النوع من المرشحات تتكون الدائرة من متسعة ومحاثة ومقاومة على التوالي كما مبين في الشكل (3a). يمكن كتابة ممانعة الدائرة بهذه المعادلة [1],[2]:

$$Z(S) = R + j\omega L - \frac{j}{\omega C} = R + SL + \frac{1}{SC} = \frac{RCS + LCS^2 + 1}{SC}$$

$$Zf(S) = \frac{LCS^2 + RCS + 1}{CS} \dots \dots \dots (4)$$

من المعادلة (4) يمكن إيجاد التردد الرنيني وكما يلي [6]:

$$Zf(S) = LS + R + \frac{1}{CS} \dots \dots \dots (5)$$

يؤخذ الجزء الخيالي من المعادلة (5) ويعوض عن كل S بـ $j\omega_0$ ينتج

$$j\omega_0 L + \frac{1}{j\omega_0 C} = 0 \dots \dots \dots (6)$$

$$\therefore f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \dots \dots \dots (7)$$

إذ إن قيمة المقاومة هي التي تحدد قيمة الحدة للمرشح وأيضا قيمة عامل الجودة Q_c وحسب المعادلة الآتية [3]:

$$Q_c = \frac{\sqrt{L}}{R} \dots \dots \dots (8)$$

ويمكن تعريف عامل الجودة: هو النسبة بين أعظم طاقة خزن إلى معدل القدرة المبددة خلال دورة وقيمتها تحدد عرض الحزمة وعمق الترشيح عند تردد الانشقاق الرنيني.

2-2 مرشح ثنائي المرتبة ذو إمرار عالي:

يتكون هذا المرشح من متسعة على التوالي مع محاثة ومقاومة على التوازي كما موضح بالشكل (3b)، يتم اختيار قيم العناصر لكي يكون عمل المرشح مشابه لعمل مرشح احادي التنعيم عند التردد الذي يكون اقل من تردد التنعيم وشبيه بمرشح احادي المرتبة ذي إمرار عالٍ عند الترددات العالية.

عند الترددات الواطئة يتصرف المرشح وكأنما (LC) على التوالي، اما عند الترددات العالية فتكون كأنما (RC) على التوالي.

وتعد من أكثر المرشحات المستخدمة مع مرافقات مرشحات الامرار العالي المستخدمة في الأنظمة الصناعية. وعند زيادة قيمة Q_c يتصرف المرشح وكأنه (LC) نقي على التوالي [1],[3].

يمكن كتابة معادلة الممانعة لدائرة المرشح وكما يأتي [1]:

$$Zf(S) = \frac{RLCS^2 + LS + R}{S(CLS + CR)} \dots \dots \dots (9)$$

3- متطلبات تصميم المرشحات:

عند تصميم المرشحات غير الفعالة هنالك ثوابت يجب معرفتها قبل عملية التصميم وهي [3]:

1. مقدار القدرة غير الفعالة المعوضة إلى الدائرة.

2. قيمة تردد التوافقية المراد إلغاؤها.

3. عامل الجودة والتي تحدد عرض الحزمة وعمق الترشيح عند التردد المطلوب.

نلاحظ من الشكل (1) أن شكل موجة التيار غير جيبي لذلك لحساب قيمة القدرة غير الفعالة المعوضة المطلوبة يجب أن نتعرف على العلاقات الآتية [7] [8]:

1-3 القدرة الظاهرية:

القدرة الظاهرية يمكن أن تُعرَّف على أنها حاصل ضرب قيمة جذر متوسط التربيع للفولتية (ج.م.ت) في جذر متوسط التربيع للتيار (ج.م.ت) عند أطراف مصدر تجهيز القدرة. على فرض أن الفولتية المطبقة لا تحتوي على المركبة المستمرة، يمكن كتابة معادلة القدرة الظاهرية بالصيغة الآتية [8],[7]:

$$S^2 = \left(\sum_1^n E_n^2 \right) \left(\sum_1^n I_n^2 \right) \dots \dots \dots (10)$$

2-3 القدرة غير الفعالة:

عندما لا يكون الشكل الموجي للفولتية والتيار جيبياً يكون هنالك مقدار يضاف إلى معادلة القدرة في حالة كون الأحمال غير خطية ويسمى هذا المقدار عامل التشوه، لذا يمكن كتابة معادلة القدرة الظاهرية كما يأتي [8],[7]:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \dots \dots \dots (11)$$

حيث إن: $(Q^2 + D^2)$ تشمل القدرة المفاعلية وقدرة التشوه.

$$S^2 - P^2 = \left(\sum_1^n E_n^2 \right) \left(\sum_1^n I_n^2 \right) - \left(\sum_1^n E_n I_n \cos \psi_n \right)^2$$

$$\therefore S^2 - P^2 = \left(\sum_1^n E_n I_n \sin \psi_n \right)^2 + \sum_{m=1}^{m=n} \sum_1^n [E_n^2 I_m^2 - E_n E_m I_n I_m \cos(\psi_n - \psi_m)] \dots (12)$$

$$\therefore S^2 - P^2 = \left(\begin{array}{l} \text{agroup of terms} \\ \text{involving like} \\ \text{freq.products} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} \text{agroup of terms} \\ \text{involving cross -} \\ \text{freq.products} \end{array} \right).$$

أما إذا كانت مراتب التوافقيات الموجودة في موجة الفولتية هي مراتب التوافقيات نفسها لموجة التيار والحمل الخطي فأن قيمة عامل التشوه تساوي صفراً $(D=0)$:

$$S^2 = P^2 + Q^2 \dots \dots \dots (13)$$

ولأجل تصميم المرشحات فإننا نفرض الفرضية الآتية:

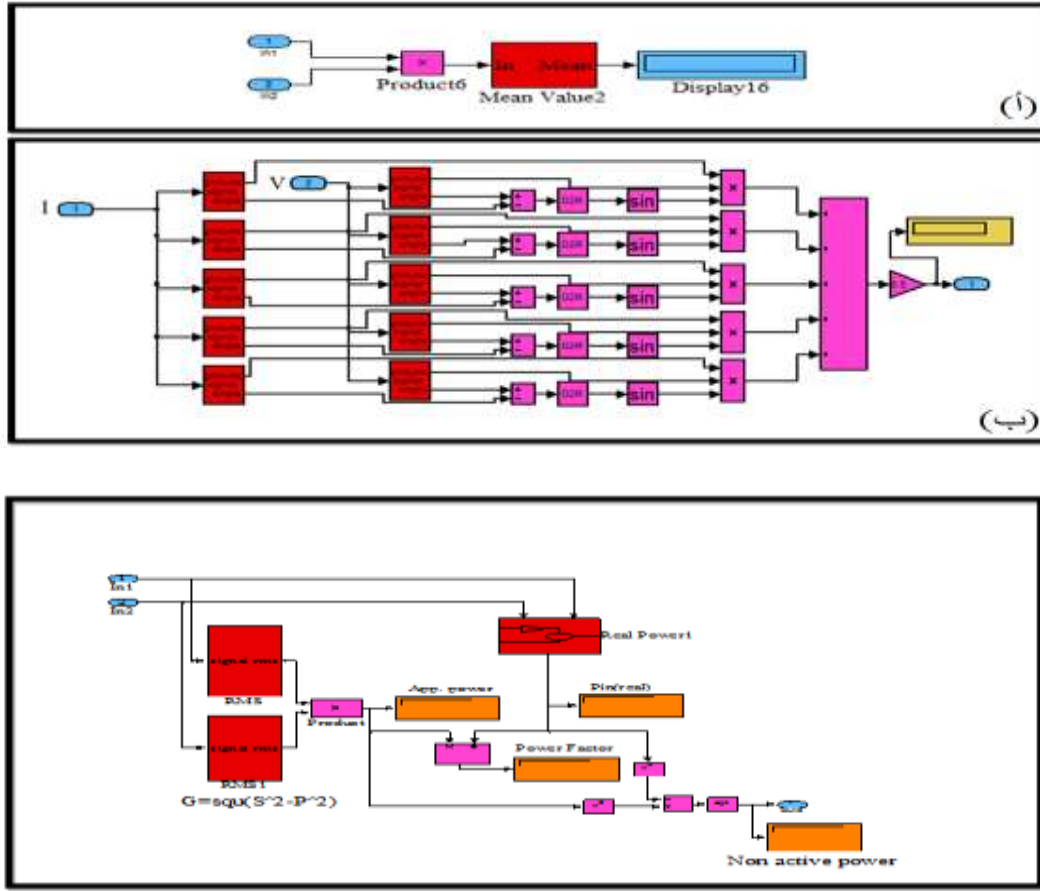
$$G^2 = (Q^2 + D^2) = S^2 - P^2 \dots \dots \dots (14)$$

$$\therefore G = \sqrt{S^2 - P^2} = (\text{القدرة غير الفعالة}).$$

حيث إن G: هي مقدار القدرة غير الفعالة وتحتوي على تأثير كل من القدرة المفاعلية وتأثير التشوه.

4- دائرة حساب القدرة:

عند تصميم المرشحات غير الفعالة يجب أن يحسب مقدار مهم يدخل في عملية التصميم ألا وهو القدرة غير الفعالة المعوضة من المرشح اللازمة لتعديل عامل القدرة. لذلك لحساب القدرة غير الفعالة باستخدام برنامج (MATLAB-P.S.B) وبالإستعانة بالمعادلات المذكورة سابقاً تم بناء الدوائر الموضحة كالتالي: الشكل (4) يوضح التمثيل الحاسوبي لدائرة حساب القدرة الحقيقية و جزء توضيحي لدائرة حساب القدرة المفاعلية إذ تم اخذ مراتب توافقيات أعلى من الموضح بالشكل. بعد حساب القدرة الحقيقية تم تصميم دائرة لحساب القدرة غير الفعالة، وبعد ذلك يتم حساب عامل القدرة وذلك بقسمة قيمة القدرة الحقيقية على قيمة القدرة الظاهرية. الشكل (5) يوضح التمثيل الحاسوبي لدائرة حساب القدرة غير الفعالة وعامل القدرة.



الشكل (5) يوضح التمثيل الحاسوبي لدائرة حساب القدرة غير الفعالة وعامل القدرة.

5-الإجهاد:

عند تصميم وبناء المرشح غير الفعال يجب أن يؤخذ بنظر الاعتبار قيمة مستوى إجهاد الفولتية والتيار على المرشح بالكامل وعلى العناصر المكونة للمرشح ويسمى بالإجهاد، وان مقدار الإجهاد هو الذي يحدد حجم المرشح وحجم مكوناته. يُعرّف الإجهاد على أنه قيمة جذر متوسط التربيع (ج.م.ت) للفولتية أو للتيار مقسمة على قيمة (ج.م.ت) للمركبة الأساسية للفولتية أو للتيار. إن حجم متسع المرشح هي بصورة رئيسة تتأثر بالإجهاد للفولتية، أما حجم المحاثات للمرشح فهي تتأثر بالإجهاد للتيار [3].

الإجهاد الكلي للمرشح يُعرف بالمعادلة (28):

$$Stress = \frac{Stress V + Stress I}{2} \dots \dots \dots (15)$$

إذ إن:

$$Stress V = \frac{V_{r.m.s}}{V_1 r.m.s} \dots \dots \dots (16)$$

$$Stress I = \frac{I_{r.m.s}}{I_1 r.m.s} \dots \dots \dots (17)$$

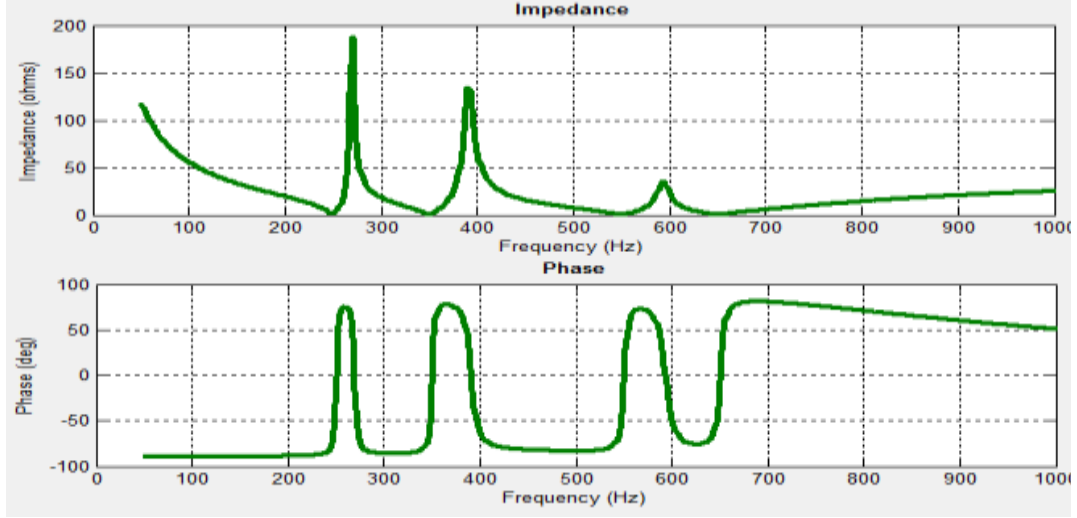
في حالة وجود أكثر من متسعة في المرشح فإنه يؤخذ معدل إجهاد الفولتية لكل المتسعات.

6-خصائص الممانعة-التردد:

من خصائص المرشحات غير الفعالة المربوطة على التوازي مع المقوم القنطري المحكوم أنها توفر مساراً ذا ممانعة واطنة جداً عند تردد التوافقية المراد إلغاؤها، لذلك بعد عملية تصميم المرشحات غير الفعالة يتم رسم استجابة

زينل: تحليل وتصميم المرشحات غير الفعالة لتقليل توافقيات تيار الخط في المقومات المحكومة

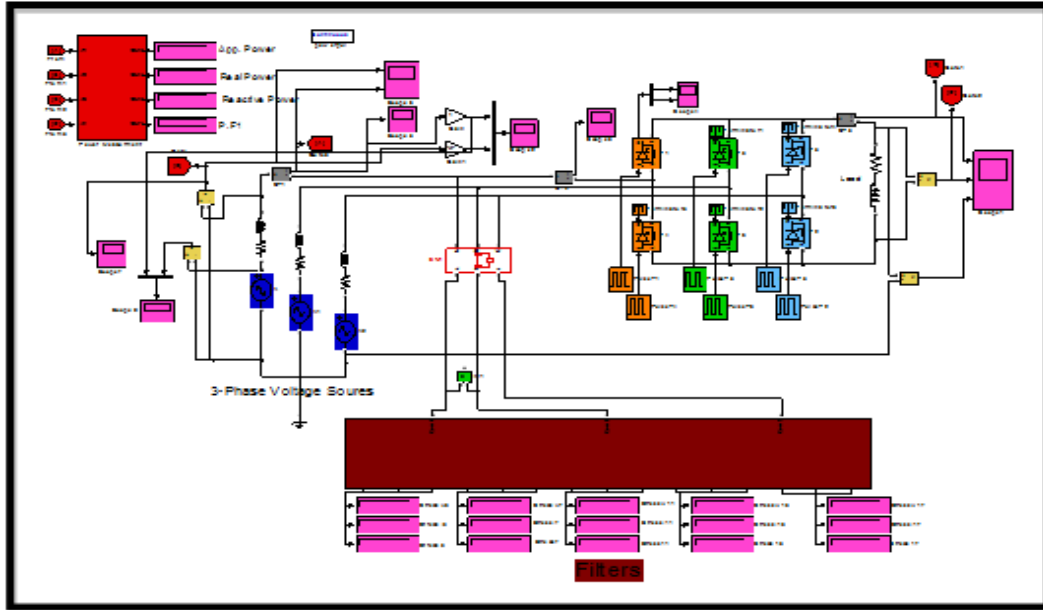
الممانعة-التردد (Impedance-Frequency Response) وذلك بتسليط مدى واسع من الترددات لكل مرشح على حدة وعلى المرشحات مجتمعة وقياس الممانعة عند كل تردد. الشكل (6) يوضح خصائص الممانعة-التردد عند ربط جميع المرشحات مع بعضها ويبين أيضا المحل الهندسي (Phase-Frequency) للمرشحات.



الشكل (6) يوضح خصائص الممانعة-التردد لجميع المرشحات مربوطة مع بعضها ويبين أيضا المحل الهندسي (Phase-Frequency) للمرشحات.

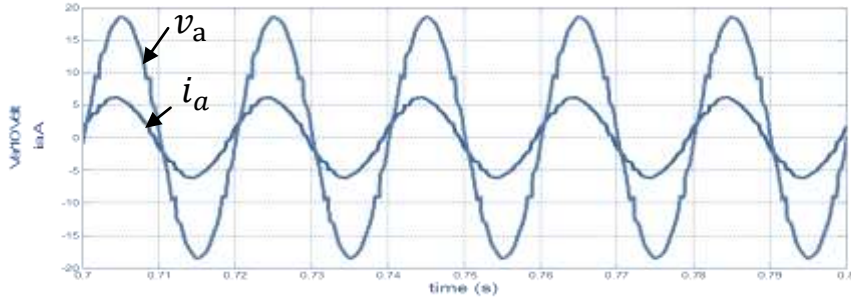
7-نتائج التمثيل الحاسوبي:

يبين الشكل (7) التمثيل الحاسوبي لدائرة المقوم القنطري ثلاثي الطور المحكوم مع ربط المرشحات غير الفعالة وأيضا ربط دائرة قياس القدرة الظاهرية والحقيقية وغير الفعالة وقياس عامل القدرة، إذ تم تصميم أربع مرشحات نوع أحادي التنعيم لإلغاء كل من التوافقيات (5th,7th,11th&13th) ومرشح نوع ثنائي المرتبة ذي إمرار عالٍ لإلغاء التوافقيات (17th to ∞) وذلك باستخدام قيمة القدرة غير الفعالة المحسوبة لكل طور.

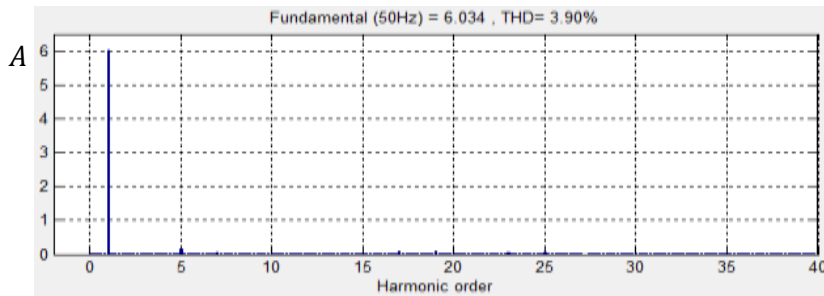


الشكل (7) التمثيل لدائرة المقوم القنطري المحكوم مع ربط المرشحات غير الفعالة

تم تشغيل الدائرة عند زاوية قرح ($\alpha=0^\circ$) وقيمة تردد ($f=50\text{Hz.}$) وتيار حمل (5A)، وتم الحصول على التشوه التوافقي الكلي بقيمة ($\text{THD}=3.90\%$) وعامل القدرة بقيمة ($\text{P.F}=0.9668$ Leading)، علماً بأن قيمة التشوه التوافقي الكلي قبل ربط المرشحات كانت ($\text{THD}=22.84\%$) وعامل القدرة كان ($\text{P.F}=0.9647$ Lagging). الشكل (8) يبين شكل موجتي فولتية وتيار الإدخال للمقوم القنطري بعد ربط المرشحات غير الفعالة، أما الشكل (9) فيبين الطيف الترددي لموجة تيار الإدخال بعد عملية الترشيح، إذ نلاحظ أن شكل موجة التيار أصبح قريباً جداً من الموجة الجيبية وقيم التوافقيات صغيرة جداً.



الشكل (8) موجتي فولتية وتيار الإدخال للمقوم القنطري بعد ربط المرشحات غير الفعالة



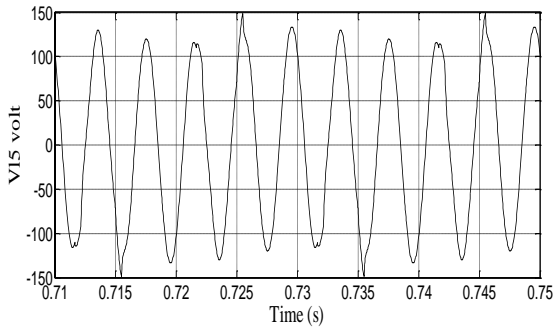
الشكل (9): الطيف الترددي لموجة تيار الإدخال بعد عملية الترشيح.

يبين الشكل (10) الفولتيات الظاهرة على أطراف كل من المحاثات والمتسعات للمرشحات المصممة لإلغاء التوافقية الخامسة وتبين أيضاً التوافقيات الظاهرة على المحاثات والمتسعات، إذ نلاحظ من أشكال الطيف الترددي ما يأتي:

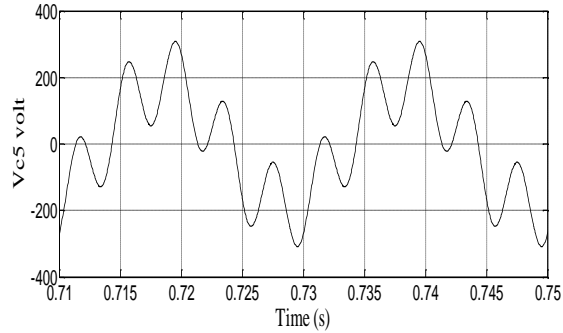
يمر في المرشح المصمم تياران بترددين مختلفين هما تيار المركبة الأساسية عند التردد ($f=50\text{Hz.}$) وهو التيار اللازم لتعويض القدرة غير الفعالة، أما التيار المار الثاني فهو تيار التوافقية المراد إلغاؤها عند التردد الرنيني المطلوب، يظهر عبر المتسعة فولتية عند التردد الأساسي للمصدر ناتجة عن مرور تيار المركبة الأساسية وتظهر فولتية أخرى هي فولتية التوافقية المراد إلغاؤها، أما عبر المحاثات فتظهر فولتية صغيرة جداً هي فولتية المركبة الأساسية لأن ممانعة المحاثات عند هذا التردد تكون قليلة جداً وتظهر فولتية أخرى هي فولتية التوافقية المراد إلغاؤها وتكون مساوية لقيمة الفولتية عبر المتسعة لتلك التوافقية.

في الخطوة التالية تم تشغيل الدائرة المُمثلة للمقوم القنطري المحكوم مع دائرة المرشحات غير الفعالة والمصممة عند ($\alpha=0^\circ$) ولعدة قيم من زاوية القرح (α) وإيجاد قيم التشوه التوافقي الكلي (THD) وقيم عامل القدرة (P.F) عند زوايا قرح مختلفة الشكل (11) يبين التشوه التوافقي الكلي وعامل القدرة عند تغيير زاوية القرح من ($\alpha=0^\circ$) إلى ($\alpha=85^\circ$) وبتدرج 5° مع ملاحظة إن القيم من ($\alpha=0^\circ$) إلى ($\alpha=70^\circ$) هي حالة التوصيل المستمر للتيار، أما بقية القيم فهي حالة التوصيل المتقطع للتيار:

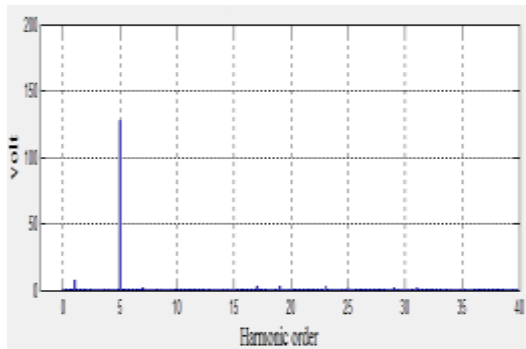
زينل: تحليل وتصميم المرشحات غير الفعالة لتقليل توافقيات تيار الخط في المقومات المحكومة



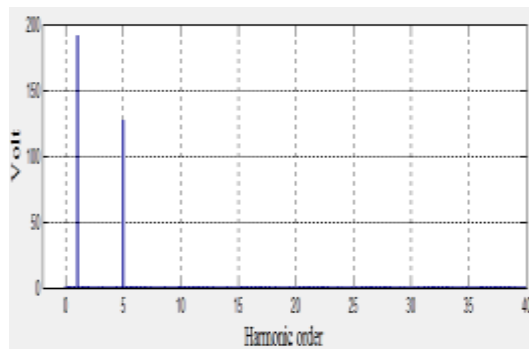
(ج)



(أ)

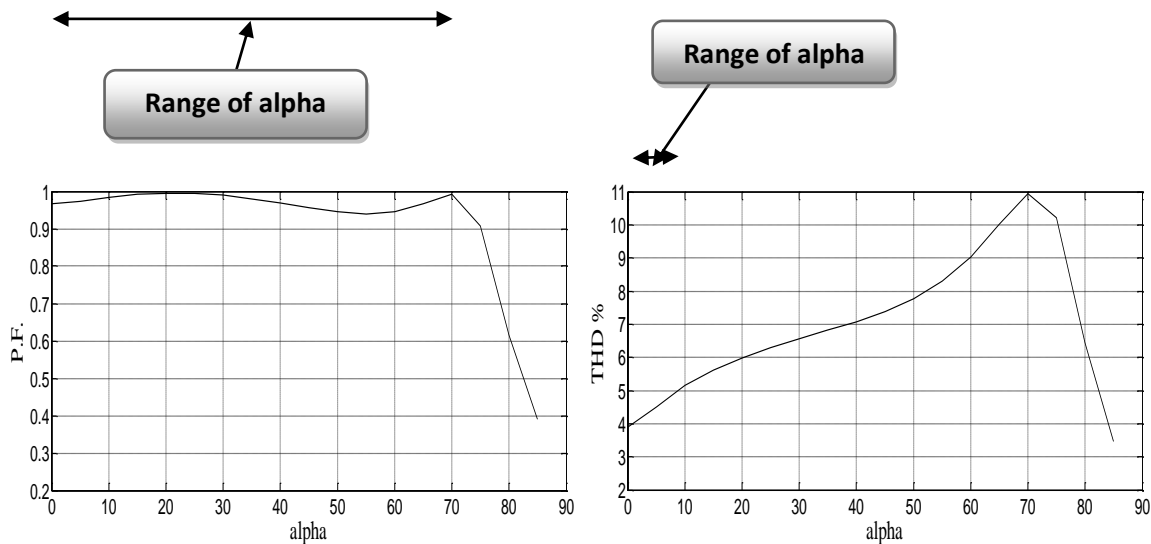


(د)



(ب)

الشكل (10): (أ) شكل الفولتية الظاهرة على متسعة المرشح المُصمم لإلغاء التوافقيات الخامسة، (ب) الطيف الترددي لفولتية المتسعة المُصممة لإلغاء التوافقيات الخامسة، (ج) شكل الفولتية الظاهرة على محاثّة المرشح المُصمم لإلغاء التوافقيات الخامسة، (د) الطيف الترددي لفولتية المحاثّة المُصممة لإلغاء التوافقيات الخامسة.



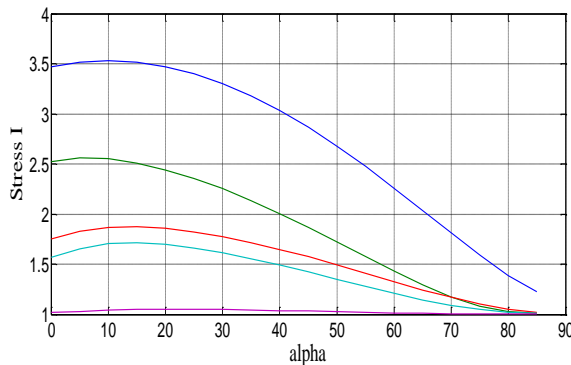
الشكل (11): (أ) العلاقة بين عامل التشوه التوافقي الكلي وزاوية القدح،

(ب) العلاقة بين عامل القدرة وزاوية القدح.

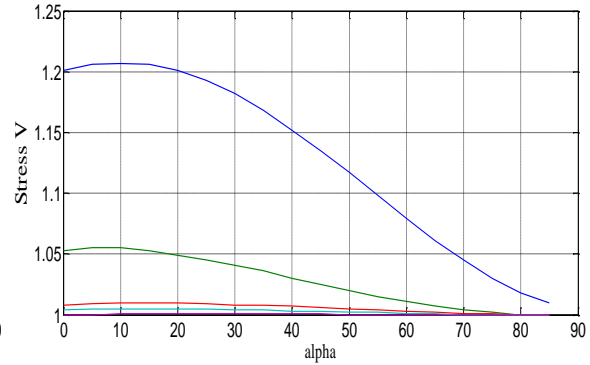
نلاحظ من الشكل (11) انه عند تصميم المرشحات عند زاوية قدح $(\alpha=0^\circ)$ يكون مدى تغيير زاوية القدح قليل جدا ويتراوح بين $(\alpha=0^\circ)$ إلى $(\alpha=8.7^\circ)$ إذ عند زيادة قيمة زاوية القدح عن هذه القيمة فإن قيمة عامل التشوه التوافقي

الكلي THD سوف تتجاوز الحد المسموح به (5%)، أما عامل القدرة فيكون قريبا من الواحد ولمدى بين ($\alpha=0^\circ$) إلى ($\alpha=70^\circ$). الشكل (11) يوضح رسم العلاقة لكل من (التشوه التوافقي الكلي مع زاوية القذح) ورسم علاقة (عامل القدرة مع زاوية القذح).

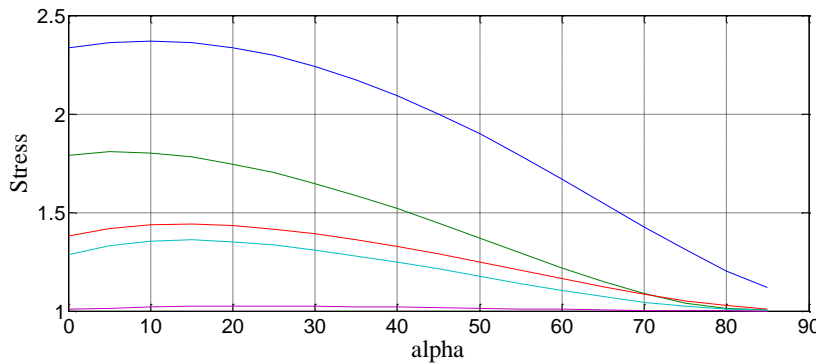
تم حساب الإجهاد بالاستعانة بالمعادلات (15) و (16) و (17). إذ يمثل SV إجهاد الفولتية المسلطة على المتسعات ويمثل SI إجهاد التيار المار في المحاثات ويمثل S الإجهاد الكلي المسلط على المرشح. وكما مبين في الأشكال (12) و (13) و (14).



الشكل (13) قيم إجهاد التيار للمرشحات المصممة لإلغاء التوافقيات الخامسة والسابعة والحادية عشرة والثالثة عشرة والسابعة عشرة مع زوايا قذح مختلفة.



الشكل (12) قيم إجهاد الفولتية للمرشحات المصممة لإلغاء التوافقيات الخامسة والسابعة والحادية عشرة والثالثة عشرة والسابعة عشرة مع زوايا قذح مختلفة.

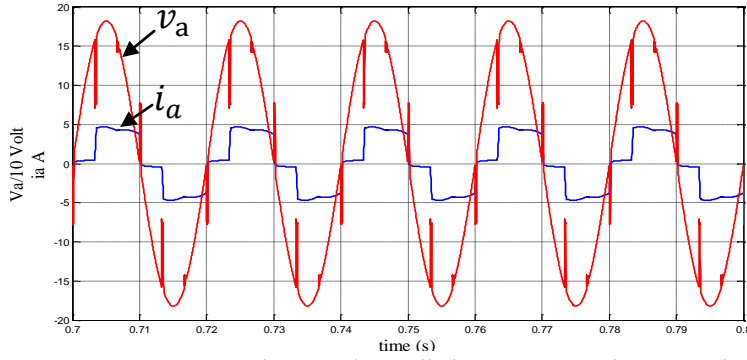


الشكل (14) قيم الإجهاد الكلي للمرشحات المصممة لإلغاء التوافقيات الخامسة والسابعة والحادية عشرة والثالثة عشرة والسابعة عشرة مع زوايا قذح مختلفة.

يبدو من الأشكال (12)، (13) و (14) أن إجهاد الفولتية والتيار والإجهاد الكلي في تناقص مع ازدياد زاوية القذح لان تيار التوافقيات كافة في تناقص مع ازدياد زاوية القذح.

لغرض تصميم المرشحات عند زوايا قذح مختلفة تم تشغيل دائرة المقوم القنطري المحكوم عند زاوية قذح ($\alpha=30^\circ$) إذ تم حساب قيمة القدرة غير الفعالة المطلوبة من خلال دائرة حساب القدرة المصممة وكانت النتيجة ($G=229.6\text{Var.}$) وقيمة عامل القدرة ($P.F=0.8622$ Lagging)، إذ نلاحظ أن قيمة القدرة غير الفعالة قد ازدادت عن قيمتها عند تشغيل الدائرة عند ($\alpha=0^\circ$) وذلك بسبب زيادة الإزاحة الطورية بين التيار والفولتية. الشكل (15) يمثل موجة فولتية والتيار الإدخال عند ($\alpha=30^\circ$) قبل استخدام المرشحات.

زينل: تحليل وتصميم المرشحات غير الفعالة لتقليل توافقيات تيار الخط في المقومات المحكومة

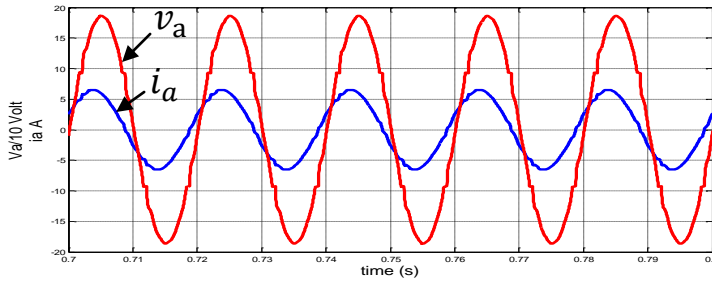


الشكل (15) فولتية و تيار الإدخال للمقوم القنطري المحكوم عند $(\alpha=30^\circ)$

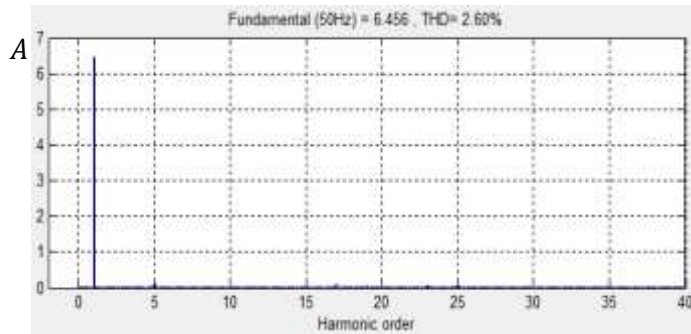
بعد تصميم المرشحات غير الفعالة عند زاوية القدح $(\alpha=30^\circ)$ تم تشغيل دائرة المقوم القنطري المحكوم مع المرشحات عند زاوية القدح $(\alpha=0^\circ)$ إذ ظهرت النتائج كالتالي:

قيمة عامل التشوه الكلي (THD=2.60%) وقيمة عامل القدرة (P.F=0.9141 Leading)، إذ نلاحظ وكما مبين في الشكل (16) تحسناً واضحاً في شكل موجة فولتية و تيار الإدخال للمقوم القنطري بالمقارنة مع الشكل (8) وذلك بسبب الزيادة في قيمة المتسعة الكلية ومن ثم زيادة في قيمة القدرة غير الفعالة المعوضة عند التردد $(f=50\text{Hz.})$ أي بمعنى آخر زيادة في قيمة تيار المركبة الأساسية نسبةً إلى بقية التوافقيات وبذلك يحصل هذا التحسن بقيمة عامل التشوه التوافقي الكلي، الشكل (17) يبين الطيف الترددي لموجة تيار الإدخال للمقوم القنطري بعد عملية الترشيح.

أما بالنسبة إلى عامل القدرة فإنه أقل مما في حالة التصميم عند $(\alpha=0^\circ)$ والسبب يعود إلى الزيادة في القدرة غير الفعالة المعوضة مما يجعل عامل القدرة متقدماً.

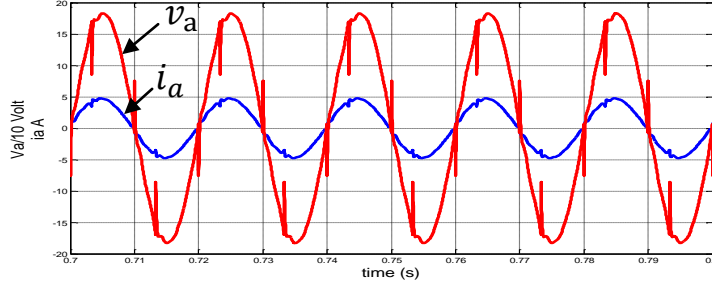


الشكل (16) موجتا فولتية و تيار الإدخال للمقوم القنطري بعد ربط المرشحات غير الفعالة المُصممة عند $(\alpha=30^\circ)$ وتشغيل الدائرة عند زاوية قدح $(\alpha=0^\circ)$.



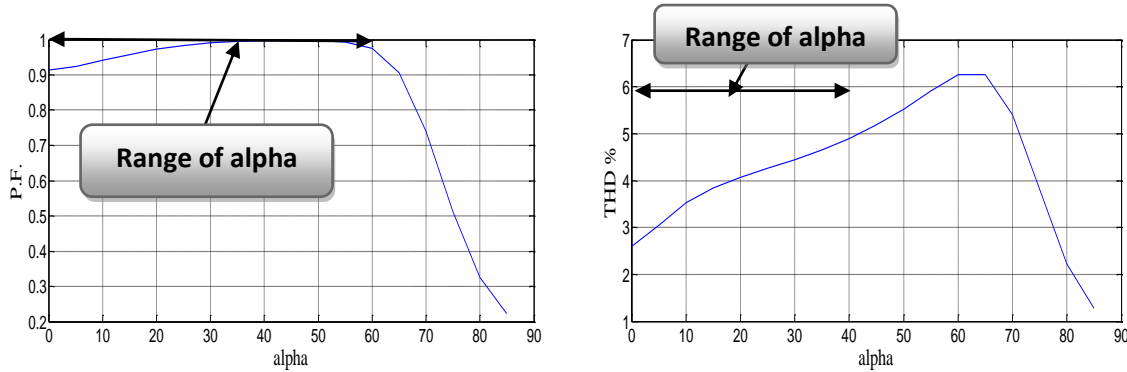
الشكل (17) يبين الطيف الترددي لموجة تيار الإدخال بعد عملية الترشيح عند $(\alpha=0^\circ)$

الشكل (18) يبين شكل موجتي فولتية وتيار الإدخال للمقوم القنطري المحكوم بعد ربط المرشحات غير الفعالة المُصممة عند زاوية قرح ($\alpha=30^\circ$) وتشغيل الدائرة عند زاوية قرح ($\alpha=30^\circ$)، وكانت قيمة تيار الإخراج عند هذه الزاوية ($I_{do} = 4.43A$).



الشكل (18) موجتا فولتية وتيار الإدخال للمقوم القنطري بعد ربط المرشحات غير الفعالة المُصممة عند ($\alpha=30^\circ$) وتشغيل عند زاوية قرح ($\alpha=30^\circ$)

تم تشغيل دائرة المقوم القنطري مع المرشحات المُصممة عند زاوية قرح ($\alpha=30^\circ$) بعدة قيم من زاوية القرح وحساب قيمة عامل التشوه التوافقي الكلي وقيمة عامل القدرة عند كل زاوية وذلك بغية معرفة تأثير تصميم المرشحات عند هذه الزاوية على التشوه التوافقي الكلي وعلى عامل القدرة مع ملاحظة إن القيم من ($\alpha=0^\circ$) إلى ($\alpha=70^\circ$) هي حالة التوصيل المستمر للتيار، أما بقية القيم فهي حالة التوصيل المتقطع للتيار، الشكل (19) يوضح رسم العلاقة بين زاوية القرح وعامل التشوه التوافقي الكلي، أما الشكل (20) فيوضح رسم العلاقة بين زاوية القرح وعامل القدرة.

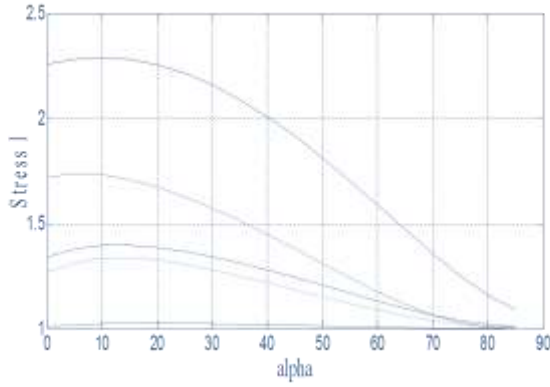


الشكل (19) رسم العلاقة بين عامل التشوه التوافقي الكلي وزاوية القرح، التصميم عند $\alpha=30^\circ$.
الشكل (20) رسم العلاقة بين عامل القدرة وزاوية القرح.

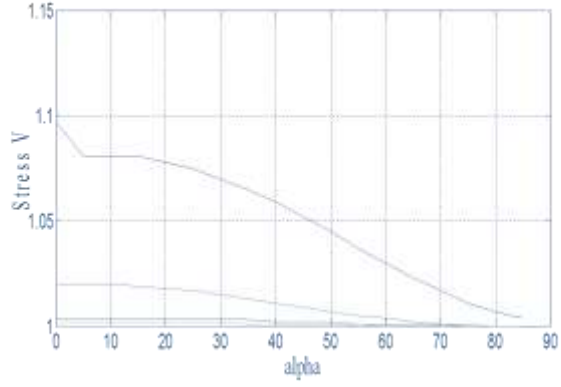
نلاحظ من الشكلين (19) و (20) أنه عند تصميم المرشحات عند زاوية قرح ($\alpha=30^\circ$) سيؤدي إلى أن يكون مدى تغيير زاوية القرح واسعاً ويتراوح بين ($\alpha=0^\circ$) إلى ($\alpha=41.5^\circ$)، أما مدى تغيير زاوية القرح مع عامل القدرة بين ($\alpha=0^\circ$) إلى ($\alpha=60^\circ$).

عند حساب قيم الإجهاد لهذه الحالة وبالمقارنة مع التصميم بزواوية قرح ($\alpha=0^\circ$) نلاحظ أن إجهاد الفولتية المُسلطة على المتسعة للمرشح المُصمم لإلغاء التوافقية الخامسة هو أقل في هذه الحالة ($\alpha=30^\circ$) وأيضاً نلاحظ إجهاد التيار المار في المحاثة للمرشح المصمم لإلغاء التوافقية الخامسة هو أقل من حالة تصميم المرشحات عند زاوية قرح ($\alpha=0^\circ$) وكما موضح في الأشكال (21) و (22) و (23).

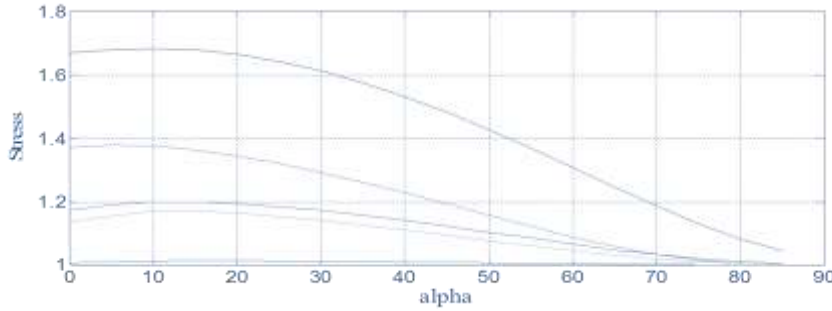
زينل: تحليل وتصميم المرشحات غير الفعالة لتقليل توافقيات تيار الخط في المقومات المحكومة



الشكل (22) العلاقة بين إجهاد التيار للمرشحات المصممة عند زاوية قرح $(\alpha=30^\circ)$ مع زوايا قرح مختلفة.



الشكل (21) العلاقة بين إجهاد الفولتية للمرشحات المصممة عند زاوية قرح $(\alpha=30^\circ)$ مع زوايا قرح مختلفة.



الشكل (22) العلاقة بين الإجهاد الكلي للمرشحات المصممة عند زاوية قرح $(\alpha=30^\circ)$ مع زوايا قرح مختلفة.

تبيين من تغيير التصميم لعدة زوايا قرح ما يأتي:

- ❖ إذا كان الحمل لا يحتاج إلى تغيير زاوية القرح، يفضل التصميم عند زاوية قرح $(\alpha=0^\circ)$ للحصول على أفضل THD وعامل قدرة اقرب إلى الواحد.
- ❖ أما إذا كان التطبيق يحتاج إلى زوايا قرح مختلفة، يفضل التصميم عند زاوية قرح $(\alpha=30^\circ)$ للحصول على مدى واسع من تغيير α بحيث إن THD تكون اقل من 5% وعامل قدرة قريبا من الواحد.

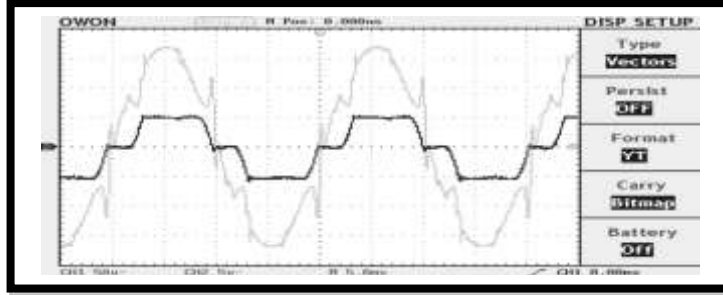
8-النتائج العملية:

تم إجراء الاختبار العملي باستخدام بورد التايرستور المختبري والمبينة خصائصه في الملحق (A)، استخدم المقوم ليغذي حملاً عالي الحثية.

واجري الاختبار العملي على الدائرة الموضحة في الشكل (7)، واستخدمت راسمة موجات رقمية (Owon digital storage oscilloscope) لنقل إشارة فولتية والتيار الإدخال للمقوم القنطري إلى الحاسوب، إذ تم تحليل الإشارات المنقولة إلى الحاسوب باستخدام برنامج (Matlab) لحساب قيمة القدرة غير الفعالة اللازمة لتصميم المرشحات غير الفعالة المطلوبة لإلغاء التوافقيات الظاهرة في موجة تيار الإدخال وتعويض القدرة غير الفعالة لتعديل عامل القدرة.

وتم أيضا استخدام جهاز (3-PHASE POWER QUALITY (3945-B Power Pad)) لقياس قيمة القدرة غير الفعالة وقيمة عامل القدرة عمليا وقيمة عامل التشوه التوافقي الكلي THD للتيار ولزاوية قرح ($\alpha=0^\circ$) من اجل المقارنة بين نتائج الاختبار العملي ونتائج التمثيل الحاسوبي قبل وبعد ربط المرشحات.

تم ربط الدائرة عمليا في المختبر، وجُهزت بفولتية ($v_p = 182\text{volt}$)، وكانت قيمة الممانعة الداخلية للمصدر والمتمثلة بقيمة المقاومة ($r_a = 100\text{m}\Omega$) وقيمة المحاثة ($L_a = 17.16\text{mH}$) وبحمل ($R = 59.5\Omega$) مع محاثة تنعيم ($L = 300\text{mH}$) وبتيار حمل (5A) عند زاوية قرح المقوم ($\alpha = 0$). يمثل الشكل (23) موجتا فولتية وتيار الإدخال للمقوم القنطري.



الشكل (23): فولتية وتيار الإدخال للمقوم القنطري ثلاثي الطور عمليا عند زاوية قرح ($\alpha=0$).

تم إدخال موجة الفولتية والتيار المبينة في الشكل (23) عن طريق الحاسوب إلى دائرة حساب القدرة المفاعلية وعامل القدرة في برنامج (Matlab). الجدول (1) يبين النتائج التي تم حسابها ونتائج التمثيل الحاسوبي إذ نلاحظ تقارب نتائج التمثيل الحاسوبي مع النتائج العملية بنسبة كبيرة:

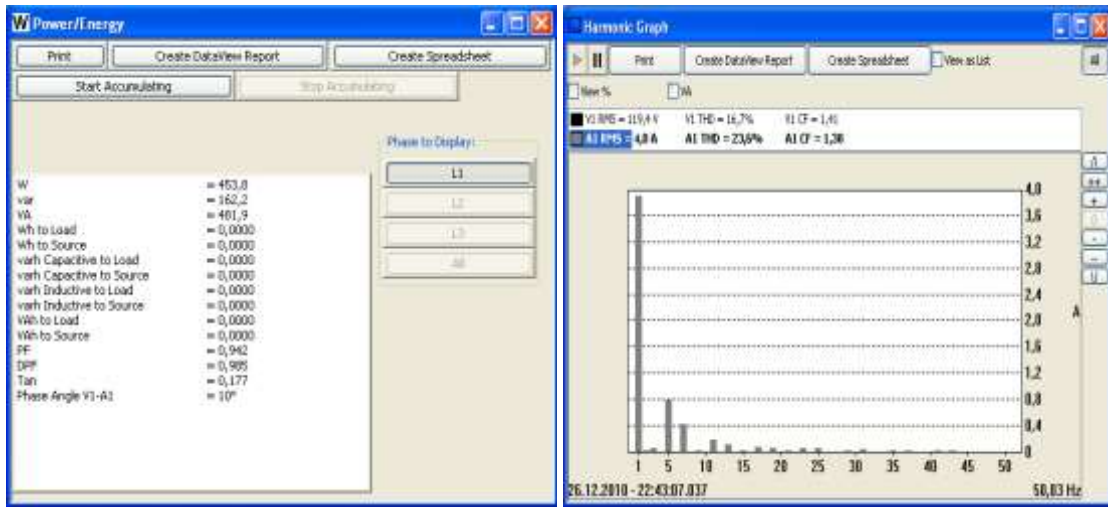
الجدول (1) النتائج العملية ونتائج التمثيل الحاسوبي لقيم القدرة الظاهرية والحقيقية و غير الفعالة وعامل القدرة عند زاوية قرح ($\alpha=0$).

حاسوبي	عملي	المتغيرات
477.8	525.1	القدرة الظاهرية (VA)
456.1	498.8	القدرة الحقيقية (W)
142.3	164.1	القدرة غير الفعالة (VAR)
0.9546 Lag	0.9499 Lag	عامل القدرة

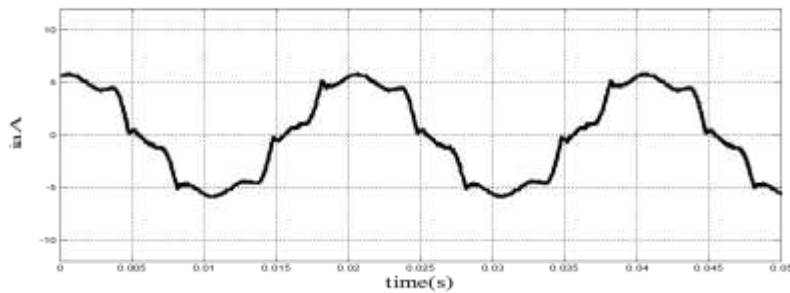
تم استخدام جهاز (Power Pad) لقياس القدرة غير الفعالة وعامل القدرة وعامل التشوه التوافقي الكلي THD إذ تم تحليل موجة فولتية وتيار الإدخال للمقوم القنطري ثلاثي الطور عند زاوية قرح ($\alpha=0^\circ$) لمعرفة الطيف الترددي. الشكل (24) يبين الطيف الترددي لموجة تيار الإدخال للمقوم القنطري وعامل التشوه التوافقي الكلي وقيم القدرة غير الفعالة وعامل القدرة.

تم ربط المرشحات غير الفعالة المُصممة مع دائرة المقوم القنطري ثلاثي الطور المحكوم عمليا. في الخطوة الأولى تم ربط المرشح المُصمم لتقليل التوافقية الخامسة فقط وملاحظة النتائج ولغرض المقارنة بنتائج التمثيل الحاسوبي تم تصميم مرشحات غير فعالة بأخذ تأثير الممانعة الداخلية للمصدر المُقاسة عمليا. الشكل (25) يبين الأشكال الموجية لتيار الإدخال بعد ربط مرشح التوافقية الخامسة فقط عمليا وتمثيل حاسوبي

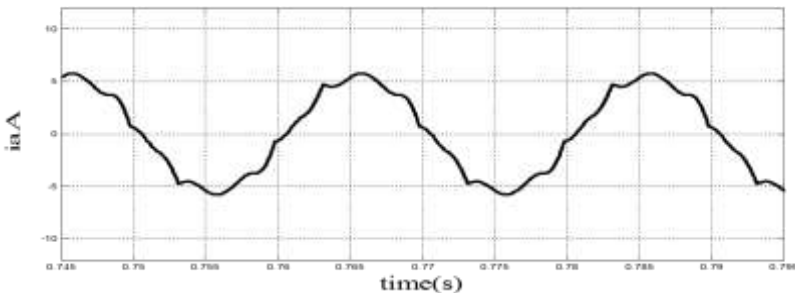
زينل: تحليل وتصميم المرشحات غير الفعالة لتقليل توافقيات تيار الخط في المقومات المحكومة



الشكل (24) النتائج العملية من جهاز Power Pad للتوافقيات الظاهرة، عامل التشوه التوافقي الكلي، القدرة غير الفعالة وعامل القدرة عند زاوية قرح ($\alpha=0^\circ$).



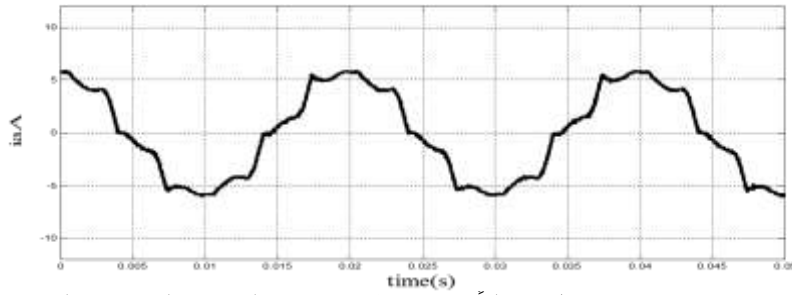
الشكل (25a) موجة تيار الإدخال (عملياً) عند ربط مرشح التوافقية الخامسة فقط.



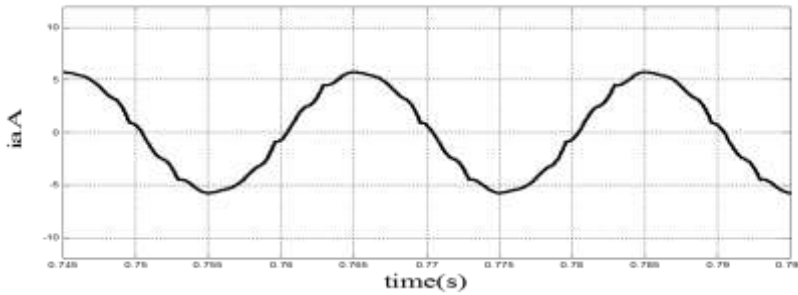
الشكل (25b) موجة تيار الإدخال عند ربط مرشح التوافقية الخامسة فقط باستخدام التمثيل الحاسوبي.

في الخطوة التالية يتم ربط مرشحين لتقليل التوافقيات الخامسة والسابعة ومقارنتها بنتائج التمثيل الحاسوبي لتقليل التوافقيات نفسها. الشكل (26) يبين شكل موجة تيار الإدخال العملية والتمثيل الحاسوبي لموجة تيار الإدخال.

من أهم المعوقات التي واجهت هذه الدراسة من الناحية العملية هو عدم استقرارية مصدر تجهيز القدرة بصورة كبيرة إذ إن فولتية وتردد المصدر متغيران بصورة مستمرة مما أدى إلى ابتعاد المرشحات المُصممة عن نقاط العمل المطلوبة لتقليل التوافقيات، وأيضاً من الأسباب الأخرى هو صعوبة الحصول على قيمة المحاثات المستخدمة في تصميم المرشحات.



الشكل (26a) موجة تيار الإدخال (عملياً) عند ربط مرشحات التوافقية الخامسة والسابعة فقط.



الشكل (26b) موجة تيار الإدخال عند ربط مرشحات التوافقية الخامسة والسابعة فقط باستخدام التمثيل الحاسوبي.

9-الاستنتاجات:

تم في هذا البحث استخدام طريقة ربط المرشحات غير الفعالة وهي من الطرائق الشائعة المستخدمة لتقليل التوافقيات، ويمكن استخدامها في الأنظمة الكهربائية عند مقننات عالية ومتوسطة وواطنة. وبالاعتماد على نتائج التحليل الرياضي والتمثيل الحاسوبي والنتائج العملية تم التوصل إلى الاستنتاجات الآتية:-

1. إذا كانت زاوية القدح للمقوم متغيرة يفضل تصميم المرشحات عند معدل زوايا القدح للحصول على أفضل نسبة للتشوه التوافقي الكلي وأفضل عامل قدرة.
2. عند تصميم المرشحات عند معدل زوايا القدح تكون نسبة التشوه التوافقي الكلي اقل من 5% وعامل القدرة قريب من الواحد ولمدى واسع من تغير زاوية القدح.
3. عند تصميم المرشحات عند معدل زوايا القدح وتشغيل المقوم عند زوايا قده مختلفة يمكن الحصول على اقل إجهاد للفرولتية والتيار والإجهاد الكلي لعناصر المقوم.
4. من الاستنتاجات المهمة هو انه يمكن تعميم طريقة التصميم المتبعة في هذا البحث لتشمل إي نوع من أنواع الأحمال غير الخطية.
5. توجد نقطة سلبية على هذا النوع من المرشحات ألا وهي فشله في ترشيح الترددات المطلوب ترشيحها في الشبكات رديئة التردد، أما في الشبكات المستقرة فتعتبر هذه الطريقة من الطرق الفعالة لترشيح التوافقيات.

المراجع

- [1] Alexandre B. Nassif, and WilsunXu, "Passive Harmonic Filters for Medium-Voltage Industrial Systems: Practical Considerations and Topology Analysis", Power Symposium, Las Cruces, NM, Issue Date: Sep. 30-Oct.2 2007, IEEE.

- [2] Marwan Hazim Shehab Ahmed, "Current Harmonic Reduction of a Three-phase Controlled Converter By Using Two Anti-parallel Thyristors for Injection Current Adjustment", M. Sc. Thesis, University of Mosul, 2009. (in Arabic).
- [3] Alexandre B. Nassif, WilsunXu, and WalmirFreitas, "An Investigation on the Selection of Filter Topologies for Passive Filter Applications", IEEE VOL. 24, NO. 3, july, 2009.
- [4] Gary W. Chang, Hung-Lu Wang, and Shou-Yung Chu, "A Probabilistic Approach for Optimal Passive Harmonic Filter Planning", IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 22, NO. 3, JULY 2007
- [5] Muhammad H. Rashid, "Power Electronics: Circuits, Devices and Applications ", Third Edition, Pearson Prentice Hall, U.S.A, 2004.
- [6] Three phase harmonic filters, Blocks (SimPowerSystems) , MATLAB, v7.8.0 (R2009a).
- [7] W. SHEPHERD and P.ZAND,"ENERGY FLOW AND POWER FACTOR IN NONSINUSOIDAL CIRCUITS", First published, Cambridge University Press, 1979.
- [8] IEEE Standard 1459-2000, "IEEE Trial-Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions" , 2000, IEEE.