

تقليل توافقيات التيار مع تحسين عامل القدرة للمقومات أحادية الطور المحكومة بتقنية حقن توافقيات التيار

عاصف عبدالاله صالح
المهد التقني/نينوى

د.حسين ابزار زينل

أ.دياسل محمد سعيد
قسم الهندسة الكهربائية/جامعة الموصل

الخلاصة

تعمل نظم التوزيع الكهربائية للتيار المتردد (AC) عند مستويات فولتية وتردد ذات مقادير محددة وثابتة. ونتيجة للاستخدام المتزايد للأحمال غير الخطية والأحمال المربوطة عن طريق مفاتيح إلكترونية تتولد تيارات وفولتيات غير جيبيية في أنظمة التوزيع. تستخدم المقومات الأحادية والثلاثية الطور غير المحكومة والمحكومة للحصول على تيار مستمر وفولتية منتظمة لكن ذلك سيكون على حساب شكل تيار المصدر الذي يحتوي عليه العديد من التوافقيات مما يؤثر على جودة ونوعية القدرة. لذا فإن شكل موجة التيار شغل اهتمام العديد من الباحثين، وتعد تقنية حقن الخط بتوافقيات التيار إحدى الطرق المهمة والفعالة في هذا المجال. إن هدف البحث هو تقليل توافقيات تيار الإدخال مع تحسين عامل القدرة للمقوم القنطري أحادي الطور بنوعيه غير المحكوم والمحكوم باستخدام طريقة حقن خط التجهيز بتوافقيات التيار بقطبية معاكسة من خلال ربط شبكة رنين غير فعالة بين طرفي التيار المستمر والمتردد للمقوم. نتيجة لربط شبكة الحقن (شبكة الرنين) يتولد تيار التوافقية الثانية والذي يدور بين جهتي الإدخال والإخراج. تم تقليل نسبة تشوه التوافقية الكلي (THD) للتيار من (50% إلى 10%) وعامل قدرة قريب من الواحد ولقيم مختلفة من زاوية القدح (α).

AC Current Harmonics Reduction & improve the power factor for Single Phase controlled Rectifiers Using Current Injection Method

Basil M.Saied
Ph. D.

Hussein I.Zynal
Ph. D.

Aasef.A.Saleh
M.Sc.

Dept. of Electrical Engineering, Mosul University

Abstract

The AC electrical distribution system works at limited values of voltage and frequency levels. The increase of using non linear loads and loads those connected by electronic keys produces non sinusoidal voltages and currents in the distribution systems.

Single and three phase, controlled and uncontrolled rectifiers, are used for obtaining DC current and voltage. This affect the shape of the supply current which included many harmonics. The quality and quantity of the power obtained are affected as a result. The shape of the current wave is therefore attracted the attention of many researcher groups. The line injection by current harmonics is one of the most important and effective techniques used for such treatment.

The aim of this research work is to reduce the harmonics in the input current and improving the power factor of the single phase, controlled and uncontrolled, rectifiers. This is usually carried out by employing injection method technique with reversible polarity through connecting a passive resonance circuit between the input and output of the rectifier. The passive resonance circuit creates second harmonic current which will circulate between the AC and DC sides of the rectifier and decreases the total harmonic distortion (THD). In this work, the ratio of (THD) is reduced from 50% to 10% with power factor increased nearly to unity for different values of the trigger angle (α).

قائمة الرموز:	
f = تردد المصدر	$I'_{in(n)}$ = القيمة المؤثرة لمركبات التوافقيات لتيار الإدخال بعد الحقن
f_2 = تردد فولتية التوافقية الثانية	I_{in} = القيمة المؤثرة لتيار الإدخال قبل الحقن
ρ = عامل الحقن	I_m = قيمة الذروة لتيار التوافقية الثانية
α = زاوية القذح	I_{fm} = قيمة الذروة لتيار التوافقية الثانية المار في محاطة الضبط
i_{in} = القيمة الآنية لتيار الإدخال قبل الحقن	I_f = القيمة المؤثرة لتيار التوافقية الثانية المار في محاطة الضبط
i'_{in} = القيمة الآنية لتيار الإدخال بعد الحقن	v_s = القيمة الآنية لفولتية إدخال المقوم
i_{in1} = القيمة الآنية للمركبة الأساسية لتيار الإدخال قبل الحقن	v_2 = قيمة الآنية لفولتية التوافقية الثانية
i_{inj} = القيمة الآنية لتيار الحقن المثالي	V_m = قيمة الذروة لفولتية إدخال المقوم
i'_{inj} = القيمة الآنية لتيار الحقن الفعلي	V_{th} = القيمة المؤثرة لفولتية دائرة ثفنن (مركبة التوافقية الثانية)
i_f = القيمة الآنية لتيار التوافقية الثانية المار في ملف الضبط	V_{th}^{\wedge} = قيمة الذروة لفولتية دائرة ثفنن
I_{a0} = معدل تيار الحمل عند زاوية القذح ($\alpha=0$)	L_f = محاطة الضبط
I_{da} = تيار الحمل المستمر عند زاوية القذح (α)	Z_{Lf} = ممانعة ملف الضبط
I'_{in1} = القيمة المؤثرة للمركبة الأساسية لتيار الإدخال بعد الحقن	

1- المقدمة:

يعد المقوم القنطري أحادي الطور المحكوم وغير المحكوم أحد أنواع مغيرات القدرة الذي يستخدم بشكل واسع ويعد من أهم العناصر غير الخطية والمؤثرة بسبب التوافقيات التي يولدها المقوم في تيار الخط المجهز للقدرة فضلا عن التشوه في فولتية المصدر. لذلك فان تقليل التوافقيات التي تولدها مغيرات القدرة من أهم العناوين التي تصدرت الأبحاث في هذا المجال. ويسعى الباحثون للحصول على تيار جيبي في جهة الإدخال للمقوم بأقل توافقيات وعامل قدرة قريب من الواحد مع الحفاظ على متطلبات الحمل. وفيما يأتي بعض الطرق المقترحة من قبل بعض الباحثين لتقليل توافقيات تيار الخط.

قام الباحثون (Atluri Rama Prasad , Phoivos D.Ziogas and Stefanos Manias) باقتراح طريقة جديدة لتقليل توافقيات التيار في المقوم القنطري أحادي الطور غير المحكوم وتتضمن هذه الطريقة استخدام المرشحات حيث يتم ربط مرشح رنين غير فعال على التوالي في جهة الإدخال للمقوم (جهة التيار المتناوب) وربط مرشح سعوي في جهة الإخراج للمقوم حيث تتضمن العملية تقليل معظم توافقيات التيار فضلا عن تحسين عامل القدرة وجعله قريبا من الواحد. ومع ذلك فان احد مساوئ هذه الدائرة هو التعقيد في عمليات التشغيل. [1]

كذلك اقترح الباحثان (S.Kim,P.Enjeti) طريقة جديدة لتحسين عامل القدرة واختزال توافقيات التيار للمقوم القنطري ثلاثي الطور غير محكوم باستخدام تقنية حقن الخط. وتتضمن هذه الطريقة ربط محولة من نوع نجمي - مثلثي ($\Delta - Y$) بين طرفي التيار المستمر والمتناوب وبذلك يتولد تيار التوافقية الثالثة ذاتيا ويحقن إلى خط التجهيز في جهة التيار المتناوب للمقوم ويكون شكل التيار اقرب ما يكون للموجة الجيبية مع اختزال لعدد كبير من توافقيات تيار خط التجهيز. إن مساوئ هذه الطريقة هي الكلفة الإضافية للمحولة نوع ($\Delta - Y$) والتي تقدر مقننتها حوالي (43%) من قدرة إخراج المقوم. [2]

وقام الباحثون (X.Dai, Y.Xu, D.He): بربط شبكة حقن بين طرفي الإدخال والإخراج للمقوم القنطري أحادي الطور غير المحكوم. تتألف الشبكة من دائرة رنين غير فعالة مؤلفة من محاطة وثلاث متسعات وتقوم الشبكة بسحب تيار التوافقية الثانية في جهة الإخراج للمقوم وحقنها إلى خط التجهيز. أعطت نتائج التمثيل بالحاسبة والنتائج العملية تقريبا واضحا حيث تم تقليل (THD) من (50 الى 10%) بالإضافة إلى تحسين عامل القدرة وجعله قريب من الواحد. [3]

وقام الباحثون (C.Sharmeela, M.R.Moha, and G.Uma) باستخدام طريقة جديدة لتقليل توافقيات التيار للمقوم القنطري أحادي الطور غير المحكوم باستخدام الشبكة العصبية , حيث يتم ربط جهة التيار المتناوب للمقوم على التوازي مع دائرة عاكس (Inverter) والذي يستخدم بوصفه مرشحا حثيا فعالا. إن وظيفة دائرة الشبكة العصبية هي السيطرة على التيار المار خلال المرشح الحثي وجعله بنفس الطور مع تيار الإدخال فضلا عن تحسين شكل موجة التيار وقد أعطت هذه الطريقة

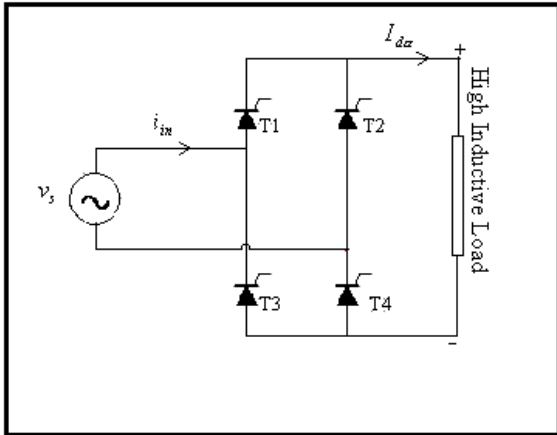
تقليلا واضحا في توافقيات تيار الإدخال حيث تم تقليل تشوه التوافقية الكلي من (54% إلى 4.3%) مع تحسين عامل القدرة من (0.613 إلى 0.99) ومع ذلك فإن احد مساوئ هذه الطريقة هي التعقيد في دائرة المقوم. [4] وفي عام 2006 قام الباحث Aasef.A.A باستخدام تقنية حقن الخط للمقوم القنطري أحادي الطور المحكوم وغير المحكوم , والمقوم أحادي الطور المحكوم نوع المحولة ذات التفرعة الوسطية , وأجرى البحث دراسة تحليلية لإيجاد المعادلات الضرورية التي تربط اختيار متغيرات شبكة الحقن مع عناصر الدائرة الرئيسية للحصول على اقل THD في تيار إدخال المقوم , وفي هذه الدراسة تم تقليل THD من 48.21% إلى 10% وتحسن عامل القدرة من 0.91 إلى 0.99 عند زاوية قرح للمقوم مساوية للصفر , ومن 41% إلى 21% عند زاوية قرح للمقوم تساوي 60 درجة , كما تم تقليل THD إلى 13% عند استخدام المحولة ذات التفرعة الوسطية. [5]

اقترح الباحثان Basil M.Saied and Hussein I.Zynal طريقة جديدة لتقليل توافقيات التيار وتحسين عامل القدرة للمقوم القنطري الثلاثي الطور بنوعيه المحكوم وغير المحكوم باستخدام تقنية حقن الخط وتتضمن هذه الطريقة ربط دائرة رنين بين طرفي التيار المستمر والمتناوب وبذلك يتولد تيار التوافقية الثالثة ذاتيا ويحقن إلى خط التجهيز في جهة التيار المتناوب للمقوم. تستخدم المتسعات في هذه الطريقة كأدوات حقن بالإضافة إلى تحسين عامل القدرة. يكون شكل التيار اقرب مايكون إلى الموجة الجيبية مع اختزال لعدد كبير من توافقيات تيار خط التجهيز. [6]

وفي عام 2007 اقترح الباحثان J.Itoh , I.Ashida دائرة جديدة لمقوم تصحيح عامل القدرة باستخدام طريقة حقن التيار التوافقي في المقوم ثلاثي الطور , والدائرة المقترحة تحوي على مفتاحين ومرشحين LC وشبكة حقن التيار فاندتها تقليل التوافقيات الظاهرة في تيار إدخال المقوم وجعل عامل القدرة قريب من الواحد فضلا عن الحصول على كفاءة عالية وبكلفة اقل من مقوم تصحيح عامل القدرة التقليدي. وتم الحصول نسبة تشوه توافقي كلي $THD=8.5\%$ عند حمل مقوم 1KW , كما أنها تخفض خسائر المقوم بمقدار 20%. [7]

2- وصف الدائرة المقترحة:

من خلال ما جاء في أعلاه للمقوم أحادي الطور نلاحظ أن معظم الطرق المستخدمة مع المقوم أحادي الطور في حالة المقوم غير المحكوم , لذا سيتناول هذا البحث حالة المقوم



الشكل (1): دائرة المقوم القنطري احادي الطور المحكوم

مع شبكة الحقن

القنطري بنوعيه المحكوم وغير المحكوم.

يبين الشكل رقم (1) دائرة المقوم القنطري أحادي الطور المحكوم مع شبكة الحقن . تتألف شبكة الحقن من محاثاة الضبط ومتسعة في جهة التيار المستمر للمقوم ومتسعتي الحقن (متسعتي تحسين عامل القدرة) في جهة التيار المتناوب.

نتيجة لربط شبكة الحقن يتولد تيار التوافقية الثانية الدوار بين جهتي الإخراج والإدخال حيث يتم تقسيم تيار التوافقية الثانية المار في ملف الضبط بالتساوي إلى ثلاث متسعات يتم اختيار قيم المتسعات وذلك للحصول على أفضل عامل قدرة ويتم اختيار المحاثاة لضبط قيمة وطور تيار التوافقية الثانية.

3- توليد فولتية التوافقية الثانية ذاتيا:

للحصول على تيار التوافقية الثانية لعملية الحقن يجب أن يكون هناك مصدر لفولتية التوافقية الثانية. وعند تحليل موجة فولتية الإخراج (الشكل 2.ب) نلاحظ بان هذه الموجة تحوي على مركبة فولتية التوافقية الثانية التي تستخدم مصدرا لتميرير تيار التوافقية الثانية ذاتيا في شبكة الحقن. يوضح الشكل (2.أ) فولتية وتيار الإدخال للمقوم حيث أن معادلة فولتية التجهيز هي:

$$v_s = V_m \sin wt \quad \dots(1)$$

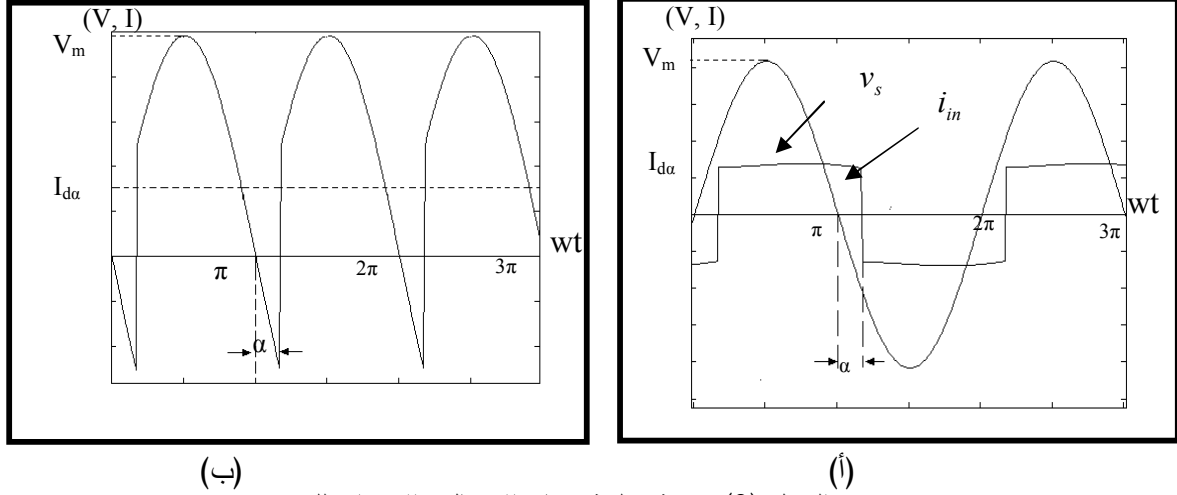
عند تحليل الموجة في الشكل (2.ب) باستخدام متوالية فورير يمكن كتابة معادلة مركبة التوافقية الثانية للفولتية كالآتي:

$$v_2(wt) = -\frac{2V_m}{\sqrt{3}\pi} \left(\frac{10}{3} - 2 \cos 2\alpha \right)^{\frac{1}{2}} \sin(2wt + \gamma_2) \quad \dots(2)$$

حيث أن (γ_2) هي الزاوية بين فولتية التوافقية الثانية والفولتية الأساسية.

$$\gamma_2 = \tan^{-1} \frac{\left(\frac{2}{3} \cos 3\alpha - 2 \cos \alpha\right)}{\left(\frac{2}{3} \sin 3\alpha - 2 \sin \alpha\right)} \quad \dots(3)$$

يتضح من المعادلتين (2,3) بان قيمة وطور مركبة فولتية التوافقية الثانية يعتمد على زاوية القرح (α).



(أ) موجة فولتية و تيار الإدخال (ب) موجة فولتية و تيار الإخراج للمقوم

الشكل (2): موجة فولتية و تيار الإدخال والإخراج للمقوم
(أ): موجة فولتية و تيار الإدخال (ب): موجة فولتية و تيار الإخراج

4- تحليل تيار الإدخال:

في هذه الفقرة سنتناول نظرية حقن الخط بتوافقيات التيار بحالتيه المثالية والفعلية (الحقيقية). تهدف نظرية الحقن إلى إيجاد الموجة التي تحوي على بقية التوافقيات باستثناء المركبة الأساسية بحيث عند جمعها مع موجة التيار قبل الحقن سوف تلغى التوافقيات وتبقى مركبة التيار الأساسية فقط.

1-4 تحليل مبدأ الحقن من الناحية النظرية (الحالة المثالية)

لغرض تحليل موجة تيار الإدخال نفرض بان محاطة الحمل ذات قيمة عالية بحيث يجعل شكل موجة تيار الإدخال موجة مربعة يمكن فهم نظرية الحقن (المثالية) رياضياً كما يأتي:

$$i_{in} = i_{in1} + i_{inj} \quad \dots(4)$$

حيث يمثل (i_{inj}) القيمة الآتية لمركبات التوافقيات لتيار الإدخال (تيار الحقن المثالي بعكس الطور)، ويمثل (i_{in1}) القيمة الآتية للمركبة الأساسية لتيار الإدخال للمقوم قبل الحقن.

باستخدام متوالية فورير يمكن تحليل موجة تيار الإدخال للمقوم (الشكل 3أ) وكما في المعادلة الآتية:

$$i_{in} = I_{d\alpha} [1.27 \sin(wt - \alpha) + 0.4244 \sin 3(wt - \alpha) + 0.2546 \sin 5(wt - \alpha) + 0.1818 * \sin 7(wt - \alpha) + \dots] \quad \dots(5)$$

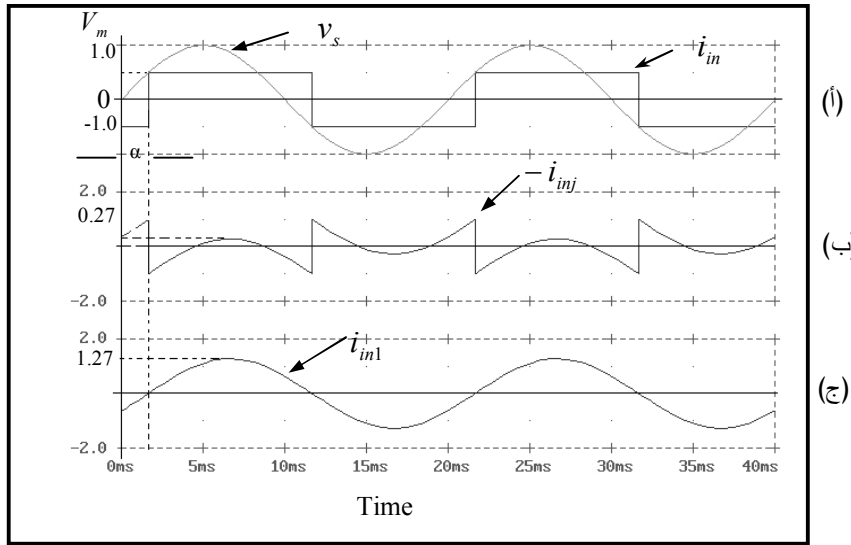
لذا يمكن التعبير عن تيار الحقن والمبين في الشكل (3.ب) بالمعادلة الآتية:

$$\therefore i_{inj} = -I_{d\alpha} [0.4244 \sin 3(wt - \alpha) + 0.2546 \sin 5(wt - \alpha) + 0.1818 \sin 7(wt - \alpha) + \dots] \quad \dots(6)$$

نلاحظ من المعادلة (6) إن تيار الحقن هو عبارة عن المتوالية التي تشمل كل مركبات التوافقيات لتيار الإدخال وعند جمعها مع المعادلة (5) (جمع الشكل 3أ) مع الشكل (3ب)) يكون التيار الناتج هو تيار المركبة الأساسية فقط والمبينة في الشكل (3ج):-

$$i'_{in} = 1.27 * I_{d\alpha} * \sin(wt - \alpha) \quad \dots(7)$$

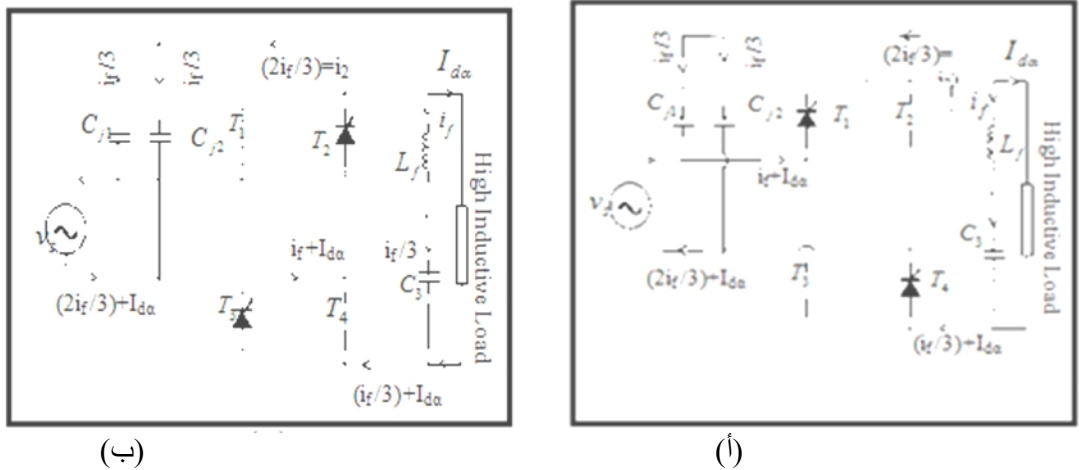
حيث يمثل (i'_{in}) القيمة الآنية لتيار الإدخال للمقوم بعد الحقن.



الشكل (3): موجات التيار (الحالة المثالية) (أ): موجة تيار الإدخال قبل الحقن (ب): موجة تيار الحقن (ج): موجة المركبة الأساسية لتيار الإدخال (تيار الإدخال)

2-4 تحليل نظرية الحقن من الناحية الفعلية (الحقيقية)

الشكل (1) يمثل دائرة المقوم القنطري أحادي الطور المحكوم بعد ربط شبكة الحقن التي تمثل شبكة رنين غير فعالة مكونة من ثلاث متسعات متساوية ومحاثة ، يتم حقن تيار التوافقية الثانية عن طريق متسعتي الحقن الى جهة التيار المتناوب للمقوم. يبين الشكل (4) (أ) و (ب) مسارات التيار في دائرة المقوم عند ربط شبكة الحقن. يوضح (أ) مسارات التيار في الشبكة عندما يكون (T_4, T_1) في حالة توصيل، بينما يوضح (ب) لنفس الشكل مسارات التيار في الشبكة عندما يكون (T_3, T_2) في حالة توصيل. يتضح من الشكل بان تيار المصدر بعد الحقن يساوي ($I_{da} + \frac{2i_f}{3}$) إذ يمثل (i_f) القيمة الآنية لتيار التوافقية الثانية.



الشكل (4): توضيح مسارات التيارات لدائرة المقوم القنطري أحادي الطور المحكوم مع شبكة الحقن (أ): (T_1, T_4) في حالة توصيل (ب): (T_2, T_3) في حالة توصيل

تم تحليل موجات التيار بصورة مشابهة للحالة المثالية. يوضح الشكل (5) (أ) موجة تيار الإدخال قبل الحقن وتمثل أيضا دالة الفتح والغلق التي يتعرض لها تيار الحقن والنتيجة من عملية توصيل او قطع ثايرستورات المقوم وقد تم تحليلها

بوساطة متوالية فورير والتي تم بيانها في المعادلة (6). وتمثل الموجة في (ب) من هذا الشكل تيار التوافقية الثانية (i_2) وهو جزء من تيار ملف الضبط ($i_2 = \frac{2}{3}i_f$). يمكن التعبير عن (i_2) حسب المعادلة الآتية:

$$i_2 = -I_m \cos 2(\omega t - \alpha) = -I_m \sin(2\omega t - 2\alpha + \frac{\pi}{2}) \quad \dots(8)$$

حيث أن (I_m) هي قيمة الذروة لتيار التوافقية الثانية.

يمكن تعريف عامل الحقن رياضياً بأنه النسبة بين قيمة الذروة لتيار التوافقية الثانية الى قيمة الذروة لتيار الحمل

$$\rho = \frac{I_m}{I_{d\alpha}} \quad \dots(9)$$

وعند حقن التيار الى جهة الإدخال للمقوم عن طريق متسعتي الحقن يتعرض الى عملية الفتح والغلق وكما مبين في المعادلة الآتية:-

$$\begin{aligned} i'_{inj} = i_2 = -\rho * I_{d\alpha} * \cos 2(\omega t - \alpha) & \quad (\alpha < \omega t < \pi + \alpha) \\ i'_{inj} = -i_2 = \rho * I_{d\alpha} * \cos 2(\omega t - \alpha) & \quad (\pi + \alpha < \omega t < 2\pi + \alpha) \end{aligned} \quad \dots(10)$$

حيث يمثل (i'_{inj}) تيار الحقن الفعلي يبين الفرع (ج) من الشكل (5) موجة تيار الحقن الفعلي بعد عمليتي الفتح والغلق لذا يمكن كتابة معادلة تيار الحقن كما يأتي :-

$$\begin{aligned} i'_{inj} &= SW * i_2 \\ i'_{inj} &= SW * (-\rho * I_{d\alpha} * \cos 2(\omega t - \alpha)) \end{aligned} \quad \dots(11)$$

حيث تمثل (SW) دالة الفتح والغلق والمبين خصائصها في الملحق (B).

عند التعويض عن (SW) في المعادلة (11) يمكن كتابة معادلة تيار الحقن بالشكل التالي:-

$$\begin{aligned} i'_{inj} &= \rho I_{d\alpha} [0.427 \sin(\omega t - \alpha) - 0.765 \sin 3(\omega t - \alpha) - 0.303 \sin 5(\omega t - \alpha) - \\ & 0.198 \sin 7(\omega t - \alpha) + \dots] \end{aligned} \quad \dots(12)$$

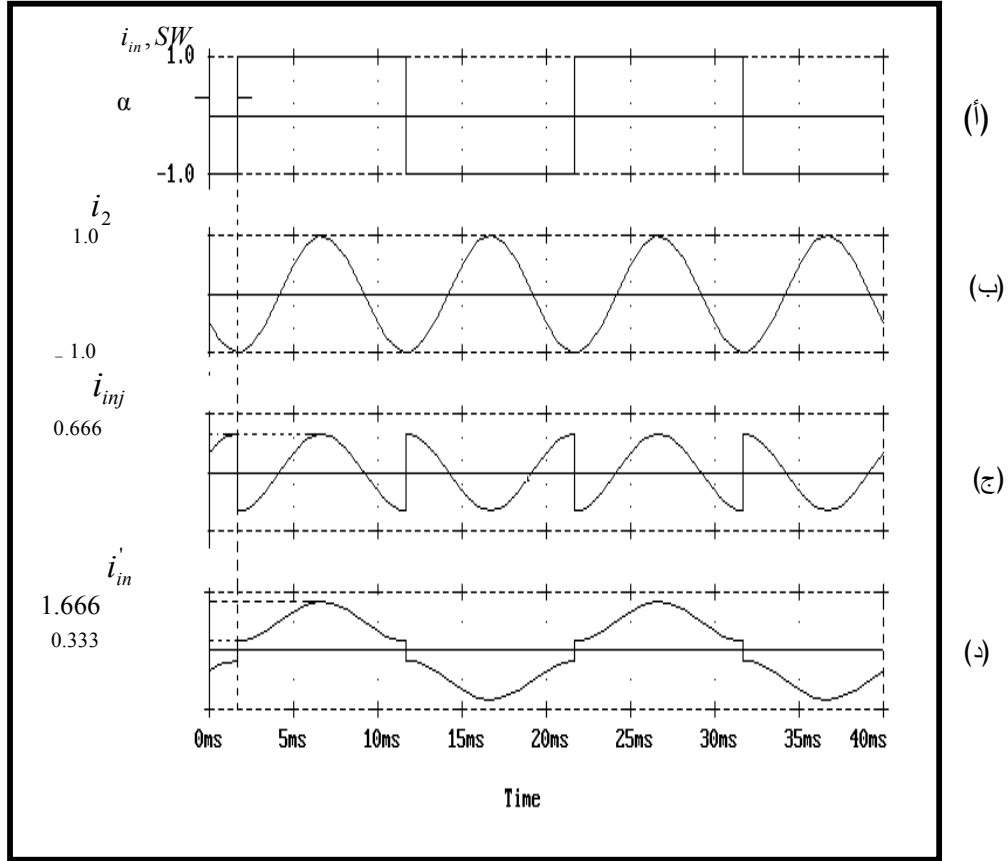
وللحصول على موجة التيار بعد الحقن يتم جمع موجة التيار قبل الحقن في الشكل (5) (أ) مع تيار الحقن الفعلي في الشكل (5) (ج) ويكون شكل الموجة الناتجة لتيار الإدخال كما موضح في الشكل (5) (د). ونلاحظ بان شكل هذه الموجة قريب من الموجة الجيبية ويمكن كتابة معادلة هذه الموجة (معادلة التيار بعد الحقن) كما يأتي:-

$$i'_{in} = i_{in} + (SW * i_2) = i_{in} + i'_{inj} \quad \dots(13)$$

وعند التعويض عن (i_{in}) من المعادلة (5) و (i'_{inj}) من المعادلة (12) في المعادلة (13) ينتج:-

$$\begin{aligned} i'_{in} &= I_{d\alpha} [(1.27 + 0.427\rho) \sin(\omega t - \alpha) + (0.4244 - 0.765\rho) \sin 3(\omega t - \alpha) \\ & + (0.2546 - 0.303\rho) \sin 5(\omega t - \alpha) + (0.1818 - 0.198\rho) \sin 7(\omega t - \alpha) \\ & + (0.144 - 0.148\rho) \sin 9(\omega t - \alpha) + \dots] \end{aligned} \quad \dots(14)$$

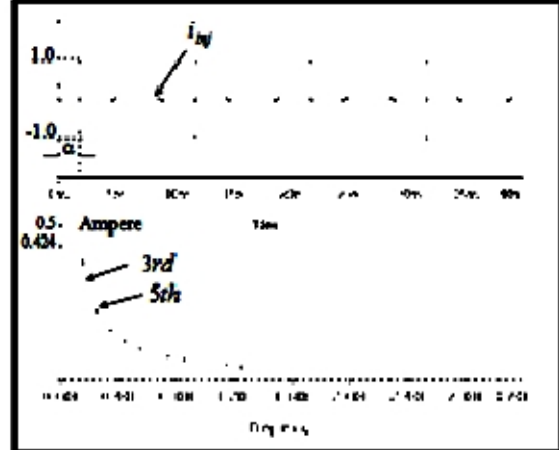
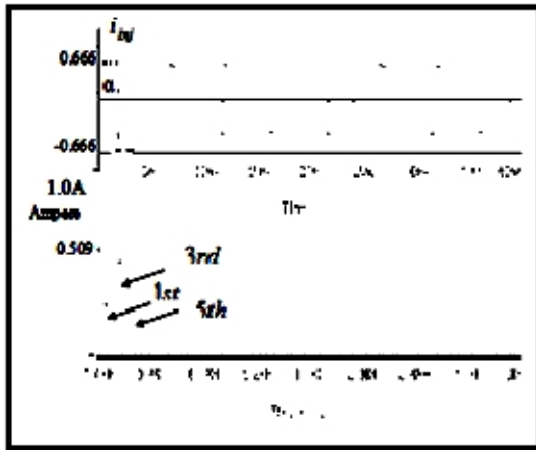
المعادلة (14) تبين بأن قيمة الذروة لكل توافقية في تيار الإدخال بعد الحقن تعتمد على قيمة الذروة لتيار التوافقية الثانية ($I_m = \rho I_{d\alpha}$).



الشكل (5): موجات التيار (الحالة الفعلية للحقن $\rho = 0.666$)

- (أ): موجة تيار الادخال (i_{in}, SW) (ب): موجة تيار التوافقية الثانية (i_2)
 (ج): موجة تيار الحقن (i_{inj}) (د): موجة تيار الادخال بعد الحقن (i'_{in})

ولمقارنة الحالة الفعلية للحقن مع الحالة المثالية نلاحظ أن الشكل (6) الفرع (أ) يبين موجة تيار الحقن المثالية مع الطيف الترددي. أما الفرع (ب) لنفس الشكل يبين موجة تيار الحقن الفعلية مع الطيف الترددي. وعند مقارنة الشكلين نلاحظ التقارب بين أشكال الموجات وكذلك التقارب بين قيم مركبات التوافقيات .



الشكل (6): موجة تيار الحقن مع الطيف الترددي ($\rho = 0.666$) (أ): الحالة المثالية (ب): الحالة الفعلية

5- إيجاد أفضل عامل حقن (ρ_{opt})

يمكن تعريف عامل النوعية والذي يسمى تشوه التوافقية الكلية للتيار حسب المعادلة الآتية:

$$THD = \sqrt{\frac{I_{in}^{\prime 2} - I_{in1}^{\prime 2}}{I_{in1}^{\prime 2}}} \quad \dots(15)$$

بالتعويض عن قيم مركبات توافقيات التيار من المعادلة (14) في المعادلة (15) ينتج:

$$THD = \frac{1}{0.427\rho + 1.27} \sqrt{0.714\rho^2 - 0.88\rho + 0.278} \quad \dots(16)$$

وبإيجاد المشتقة ($\frac{dTHD}{d\rho}$) للمعادلة (16) بالنسبة لعامل الحقن (ρ) نحصل على قيمة (ρ) لأقل قيمة لتشوه التوافقية

الكلي (THD) وتساوي (0.666)، ويسمى عامل الحقن لهذه الحالة (ρ_{opt}) أو أفضل عامل حقن، وعند تعويض هذه القيمة في المعادلة (16) تكون قيمة (THD) مساوية تقريباً (10%).

وعند تعويض قيمة (ρ_{opt}) في المعادلة (14) نحصل على المعادلة الآتية:

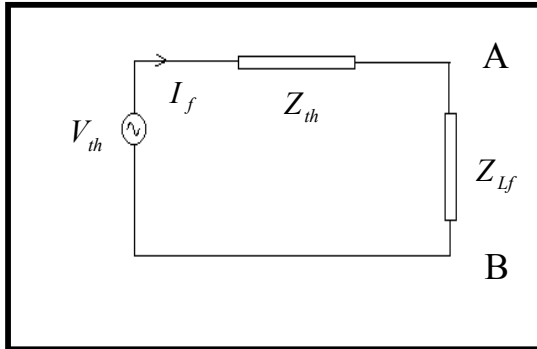
$$i'_{in} = I_{da} [1.556 \sin(wt - \alpha) + 0.082 \sin 3(wt - \alpha) + 0.055 \sin 5(wt - \alpha) + 0.051 \sin 7(wt - \alpha) + 0.045 \sin 9(wt - \alpha) + \dots] \quad \dots(17)$$

نلاحظ من المعادلة (17):

- أن قيمة المركبة الأساسية لتيار الإدخال بعد الحقن قد ازدادت (من $1.27I_{da}$ الى $1.55I_{da}$) لأن تيار الحقن الفعلي (i'_{inj}) المبين في المعادلة (12) يحتوي على المركبة الأساسية ضمن مركبات التوافقيات التابعة له والتي تضاف الى المركبة الأساسية للتيار قبل الحقن.
- إن قيمة الذروة لمركبات التوافقيات لتيار الإدخال بعد الحقن قد قلت بشكل كبير مما يدل على فعالية عملية الحقن.

6- إيجاد قيمة وطور تيار التوافقية الثانية

للحصول على تيار التوافقية الثانية ذاتياً يجب أن تكون دائرة الحقن في حالة رنين (أو شبه رنين) لتدوير هذا التيار بين جهتي التيار المستمر والمتناوب للمقوم.



بالرجوع الى الشكل (1) نلاحظ بان دائرة الحقن تتكون من محاطة وممتعة في جهة الإخراج ومن متسعتي الحقن في جهة الإدخال فضلاً عن مصدر فولتية التوافقية الثانية المتولدة ذاتياً في جهة الإخراج. يوضح الشكل (7) دائرة ثفنن المكافئة بين النقطتين (B,A) للدائرة المبينة في الشكل (1) حيث ان:

الشكل (7): مخطط دائرة ثفنن المكافئة بين (A,B) للدائرة في الشكل (1)

...(18)

$$V_{th}^{\wedge} = V_2 = \frac{2V_m}{\sqrt{3\pi}} \left(\frac{10}{3} - 2 \cos 2\alpha \right)^{\frac{1}{2}} \quad \dots(19)$$

وحيث ان:

$$Z_{th} = R_{th} + jX_{th}$$

$$X_{th} = \frac{1}{2\pi f_2 (C_{j1} + C_{j2} + C_3)} \quad \dots(20)$$

يمكن إيجاد قيمة الذروة لتيار التوافقية الثانية من الشكل (7) وكما يأتي:

$$I_{fm} = \frac{V_{th}^{\wedge}}{|Z_{th} + Z_{Lf}|} = \frac{2V_m}{\sqrt{3\pi}|Z_{th} + Z_{Lf}|} \left(\frac{10}{3} - 2 \cos 2\alpha \right)^{\frac{1}{2}} \quad \dots(21)$$

وللحصول على أفضل حالة حقن يجب ضبط قيمة وطور تيار التوافقية الثانية وكما يلي:
أ- القيمة العظمى لتيار التوافقية الثانية (I_m) تساوي:

$$I_m = \frac{2}{3} I_{fm} \quad \dots(22)$$

من المعادلتين (9) و(22) ولأفضل حالة حقن ($\rho = \frac{2}{3}$) تكون:

$$I_{fm} = I_{d\alpha} \quad \dots(23)$$

من المعادلتين (21) و(23) يمكن حساب $|Z_{th} + Z_{Lf}|$ كما يأتي:

$$|Z_{th} + Z_{Lf}| = \frac{2V_m}{\sqrt{3\pi}I_{d\alpha}} \left(\frac{10}{3} - 2 \cos 2\alpha \right)^{\frac{1}{2}} \quad \dots(24)$$

ب- في الشكل (7) يمكن كتابة معادلة التيار الآني بالصيغة الآتية:

$$i_f(wt) = -I_{fm} \sin(2wt + \gamma_2 - 2\beta_2) \quad \dots (25)$$

(β_2) هي الزاوية بين فولتية التوافقية الثانية وتيار التوافقية الثانية وتساوي:

$$\beta_2 = \cos^{-1} \left[\frac{R_{th} + R_{Lf}}{|Z_{th} + Z_{Lf}|} \right] = \sin^{-1} \left[\frac{X_{th} - X_{Lf}}{|Z_{th} + Z_{Lf}|} \right] \quad \dots(26)$$

وبما أن ($i_2(wt)$) هو جزء من ($i_f(wt)$) ويساوي ($i_2 = \frac{2}{3}i_f$) لذا يمكن التعبير عن (i_2) بالصيغة الآتية:

$$i_2(wt) = -I_m \sin(2wt + \gamma_2 - 2\beta_2) \quad \dots(27)$$

وللحصول على أفضل طور لتيار التوافقية الثانية يجب أن يتفق طور تيار التوافقية الثانية مع طور المركبة الأساسية لتيار الإدخال قبل الحقن، أي أن تتفق قيمة الذروة مع منتصف تيار الإدخال قبل الحقن لذا:

$$2wt - 2\alpha + \frac{\pi}{2} = 2wt + \gamma_2 - 2\beta_2 \quad \dots(28)$$

أي أن:

$$\beta_2 = \frac{\gamma_2}{2} + \alpha - \frac{\pi}{4} \quad \dots(29)$$

وعند تعويض قيمة (β_2) في المعادلة (26) يمكن حساب كل من (R_{Lf}) و(X_{Lf}) وكما يأتي:

$$R_{Lf} = |Z_{th} + Z_{Lf}| \cos \beta_2 - R_{th} \quad \dots(30)$$

$$X_{Lf} = |Z_{th} + Z_{L}| \sin \beta_2 - X_{th} \quad \dots(31)$$

لذا يتم حساب (L_f) وكما يأتي:

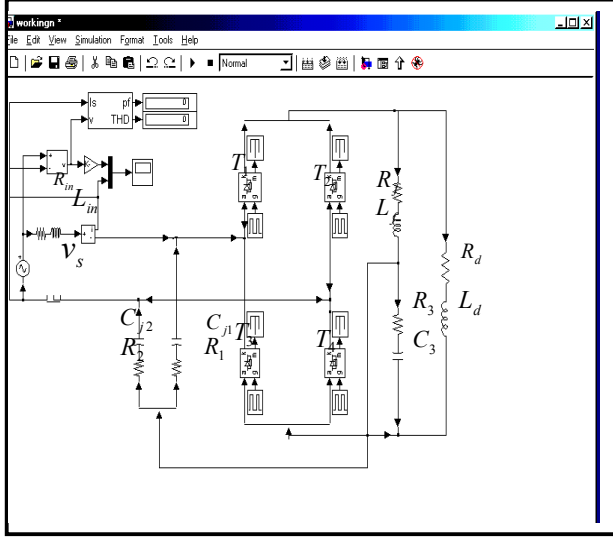
$$L_f = \frac{X_{Lf}}{2\pi f_2} \quad \dots(32)$$

لغرض تسهيل اختيار عناصر ملف الضبط نفرض ان زاوية القدح ($\alpha=0$) لذا من المعادلة (3) ($\gamma_2=\pi/2$) ومن المعادلة (29) ($\beta_2=0$) وعند تعويض قيمة (β_2) في المعادلة (31) نحصل على ($X_{Lf} = -X_{th}$) أي ان دائرة ثفنن تكون في حالة

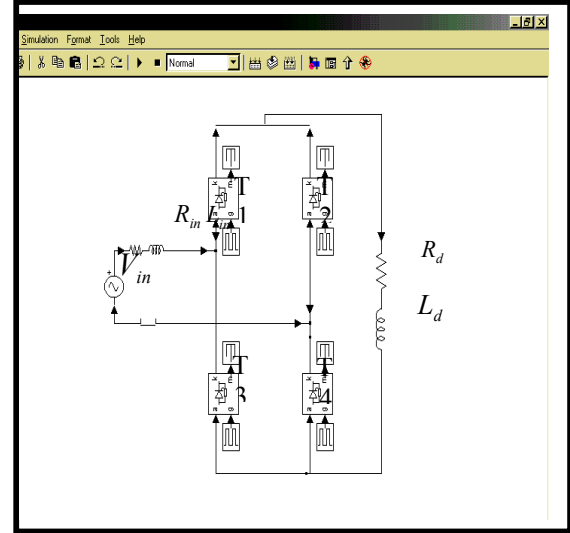
رنين لذا ($(Z_{th} + Z_{Lf}) = (R_{th} + R_c)$) وهذا يعني انه يمكن حساب (R_c). وعند ازدياد زاوية القدح يبدأ ($I_{d\alpha}$) بالنقصان ولضبط قيمة وطور تيار التوافقية الثانية يجب زيادة قيمة محاطة ملف الضبط.

7- نتائج تمثيل دائرة المقوم القنطري

تم تمثيل دائرة المقوم القنطري أحادي الطور غير المحكوم والمحكوم (مع شبكة الحقن وبدونها) والمبينة في الشكلين (8) و(9) باستخدام برنامج (Matlab-PSB) وكذلك تم الربط العملي للمقوم في المختبر وبقية عناصر الشبكة نفسها تم رسم شكل موجة تيار الإدخال و الفولتية قبل ربط شبكة الحقن وبعدها ولزاويا قرح مختلفة وكان شكل الموجة بعد الحقن قريباً من الموجة الجيبية. يبين الجدول (1) قيم كل من (THD) و(PF) و(الكفاءة η) و(عامل الانتفاع للمحولة UF) قبل ربط شبكة الحقن وبعدها ويبين الملحق (A) المعادلات الخاصة بالحساب النظري لكل من (UF, η , PF) مع دائرة التمثيل.



الشكل (9) تمثيل دائرة المقوم القنطري احادي الطور المحكوم مع شبكة الحقن



الشكل (8) تمثيل دائرة المقوم القنطري أحادي الطور

جدول (1) نتائج التمثيل للمقوم القنطري أحادي الطور

بعد ربط شبكة الحقن				قبل ربط شبكة الحقن				زاوية القرح (α)
UF%	كفاءة المقوم η %	THD%	PF	UF%	كفاءة المقوم η %	THD%	PF	
60	92	10	0.99	62	98.75	48.12	0.91	0
57	86	12	0.9	55	87.4	47.2	0.8	30
56	82.4	14.7	0.85	52	86.5	44	0.66	45
45	80.5	21	0.72	35	84.32	41	0.463	60

عند ملاحظة الجدول (1) يمكن استنتاج ما يلي:

- هنالك تحسن كبير في قيمة (THD) بعد ربط شبكة الحقن.
- هنالك تحسن واضح في قيمة عامل القدرة.
- عند زيادة زاوية القرح (α) هنالك زيادة ملموسة في قيمة (THD) والسبب يعود إلى نقصان تيار المركبة الأساسية بنسبة $|\cos\alpha|$ وليس بسبب ازدياد قيمة التوافقيات.
- هنالك نقصان في كفاءة المقوم بعد الحقن والسبب يعود إلى فقدان جزء من القدرة في عناصر دائرة الحقن.
- هنالك زيادة ملموسة في (UF) مع زيادة زاوية القرح (α) والسبب يعود إلى نقصان قيمة المركبة الأساسية لتيار الإدخال مع تحسن عامل القدرة.

يبين الشكلان (10) و (11) النتائج العملية ونتائج التمثيل لموجة فولتية وتيار الإدخال (مع ربط شبكة الحقن وبدونها) ولزاوية قرح ($\alpha=0$) ويمكن ملاحظة التحسن الكبير في شكل موجة تيار الإدخال، كما يوضح الشكلان (12) و (13) النتيجة العملية ونتيجة التمثيل على الحاسبة لموجة فولتية وتيار الإدخال للمقوم القنطري (مع ربط شبكة الحقن وبدونها) وعند زاوية القرح ($\alpha=30$) ويمكن ملاحظة التحسن في شكل موجة التيار بعد الحقن. أما الشكل (14) يمثل موجة التيار

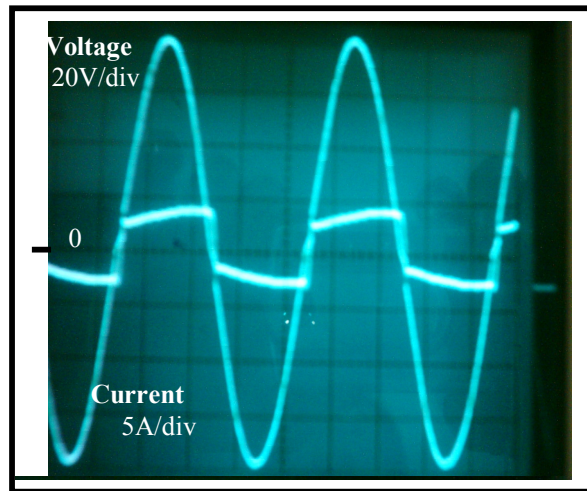
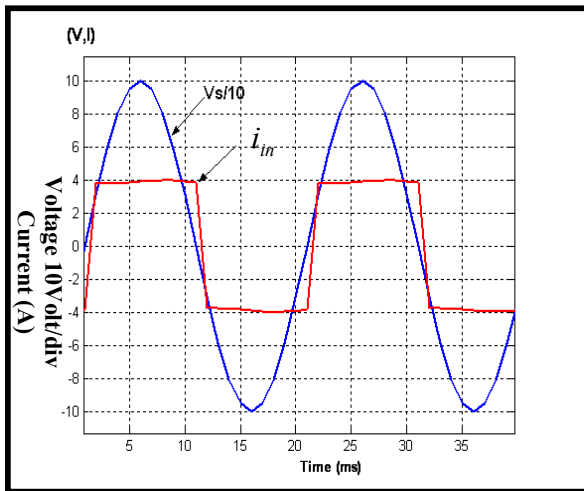
لكل من الثايرستريين (T_1, T_2) بعد ربط شبكة الحقن في حين يمثل الشكل (15) موجة تيار كل من الثايرستريين (T_3, T_4) بعد ربط شبكة الحقن. نلاحظ من الشكلين (14) و (15) ان هنالك فرقا في الشكل والقيمة بين التيار الذي يمر في ثايرسترات النصف العلوي (T_1, T_2) وبين التيار الذي يمر في ثايرسترات النصف السفلي (T_3, T_4) والسبب يعود إلى أن ثايرسترات النصف العلوي تحمل تيار التوافقية الثانية والذي يمر في المحاثّة بالإضافة إلى تيار الحمل. أما ثايرسترات النصف السفلي فتحمل تيار الحمل و

$\left(\frac{1}{3}\right)$ من تيار التوافقية الثانية والذي يمر في المتسعة (C_3) فقط.

يوضح الشكل (16) موجة التيار لمتسعتي الحقن (الحالة العملية وحالة التمثيل) علما بان هذا التيار يتكون من مركبتين هما المركبة الأساسية لتيار المصدر ومركبة تيار الحقن (التوافقية الثانية) ونلاحظ التقارب الواضح بين الموجة العملية وموجة التمثيل على الحاسبة. إما الشكل (17) فيبين تيار المتسعة (C_3) للحالة العملية وحالة التمثيل وهو يمثل تيار التوافقية الثانية فقط (جزء من تيار الحقن).

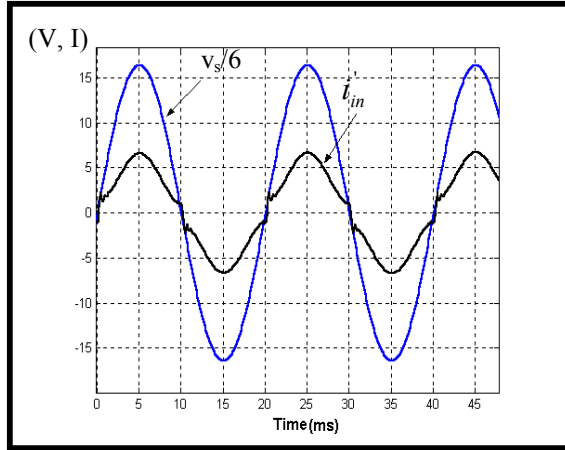
8- الاستنتاجات:

- بالاعتماد على نتائج التحليل الرياضي والتمثيل على الحاسبة والنتائج العملية تم التوصل إلى الاستنتاجات الآتية:
- 1- على الرغم من أن التيار في شبكة الحقن هو تيار التوافقية الثانية ولكن التيار المحقون إلى الخط لا يحتوي على تيار التوافقية الثانية بل يحتوي على توافقيات تيار الإدخال قبل الحقن وقيم مقاربة.
 - 2- عند التحليل النظري لموجة التيار قبل الحقن وبعده وجد بان قيمة تشوه التوافقية الكلي (THD) انخفضت من (43%) إلى (10%).
 - 3- عند تمثيل دائرة المقوم باستخدام (Matlab-PSB) وجد بان قيمة تشوه التوافقية الكلي (THD) قبل ربط شبكة الحقن $(41,44,47.2,48.12)\%$ ولزوايا قرح $(60,45,30,0)$ على الترتيب وعند ربط شبكة الحقن وللقيم نفسها من زوايا القرح انخفضت قيمة (THD) إلى $(21,16,12,10)\%$ على الترتيب وهذا يدل على فعالية شبكة الحقن في تقليل التوافقيات ومن ثمة تحسين شكل موجة تيار الإدخال.
 - 4- للحصول على أفضل عملية حقن كانت قيمة الذروة لتيار الحقن تساوي (0.666) من تيار الحمل ويكون أفضل طور لهذا التيار عندما تتفق قيمة الذروة لتيار التوافقية الثانية مع منتصف الجزء الموجب لتيار الإدخال قبل الحقن.
 - 5- عند تحليل فولتية إخراج المقوم باستخدام متوالية فورير وجد بان اعلي مركبة للتوافقيات هي فولتية التوافقية الثانية وان هذه الفولتية المتولدة ذاتيا استخدمت كمصدر لحقن تيار التوافقية الثانية.
 - 6- ازدادت قيمة المركبة الأساسية لتيار الإدخال للمقوم بعد ربط شبكة الحقن بمقدار (5.7%) عن قيمتها قبل ربط شبكة الحقن وعند زاوية قرح $(\alpha=30)$ والسبب في ذلك هو وجود قيمة للمركبة في تيار الحقن.
 - 7- أظهرت عملية الحقن عن طريق المتسعات تحسنا واضحا في عامل القدرة حيث كانت قيمة عامل القدرة $(0.463, 0.66, 0.8, 0.91)$ قبل ربط شبكة الحقن ولقيم $(\alpha=0, \alpha=30, \alpha=45, \alpha=60)$ على الترتيب وعند ربط شبكة الحقن كان هنالك تحسنا واضحا في عامل القدرة حيث أصبحت قيمته تساوي $(0.72, 0.85, 0.9, 0.99)$ على الترتيب.
 - 8- أثبتت نتائج التحليل الرياضي ونتائج التمثيل والنتائج العملية التي تم الحصول عليها التقارب الكبير بين النتائج وهذا دليل الاختيار المناسب لمتغيرات شبكة الحقن.

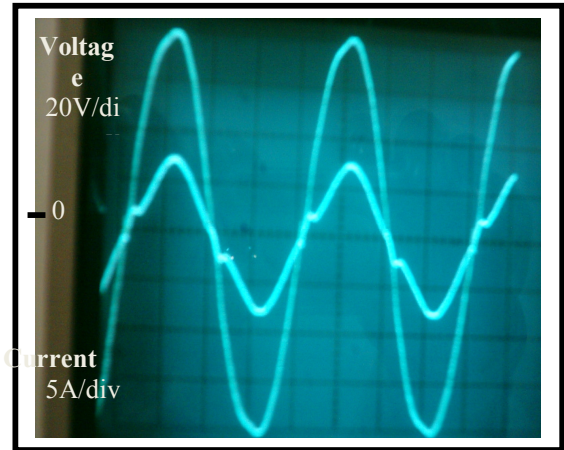


الشكل(10): موجة فولتية وتيار الإدخال للمقوم القنطري أحادي الطور بدون شبكة الحقن عند $(\alpha = 0)$

(أ): النتيجة العملية (ب): نتيجة التمثيل على الحاسبة



(ب)

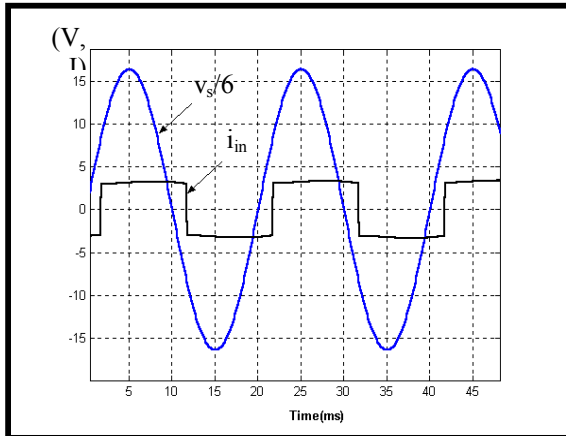


(أ)

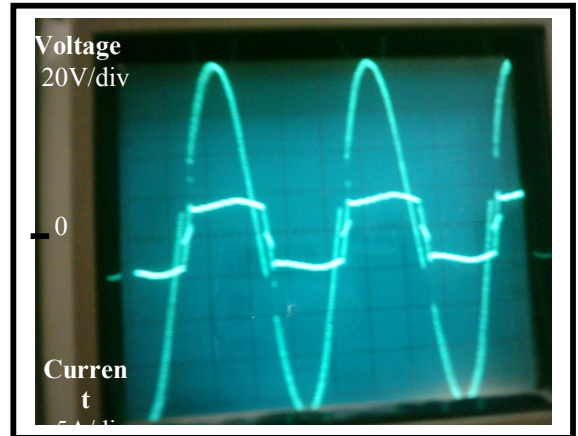
Time=5ms/div

الشكل(11): موجة فولتية و تيار الإدخال للمقوم القنطري أحادي الطور مع شبكة الحفن عند ($\alpha = 0$)

(أ):النتيجة العملية (ب)نتيجة التمثيل على الحاسبة



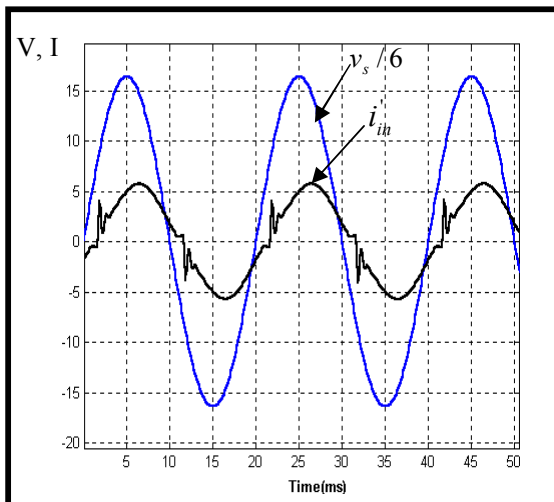
(ب)



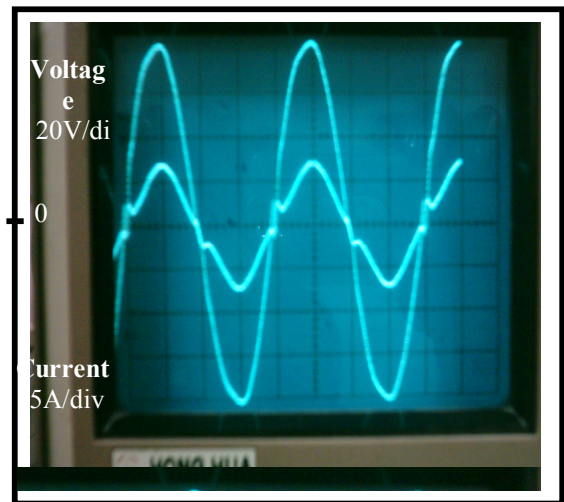
Time=5ms/div

الشكل(12): موجة فولتية و تيار الإدخال للمقوم القنطري أحادي الطور بدون شبكة

الحفن عند ($\alpha = 30$) (أ):النتيجة العملية (ب)نتيجة التمثيل على الحاسبة



(ب)

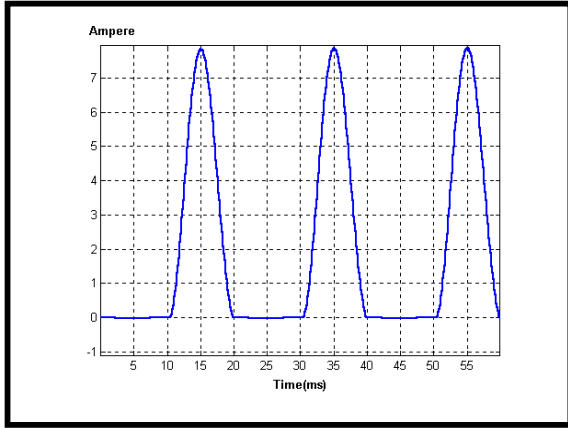


(أ)

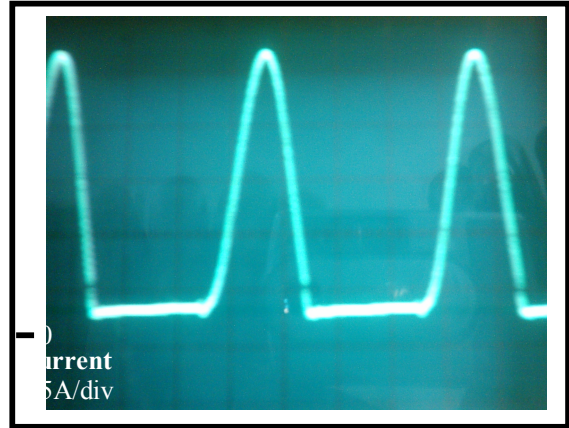
Time=5ms/div

الشكل(13): موجة فولتية و تيار الإدخال للمقوم القنطري أحاديالطور مع شبكة الحفن

عند ($\alpha = 30$) (أ):النتيجة العملية (ب)نتيجة التمثيل على الحاسبة



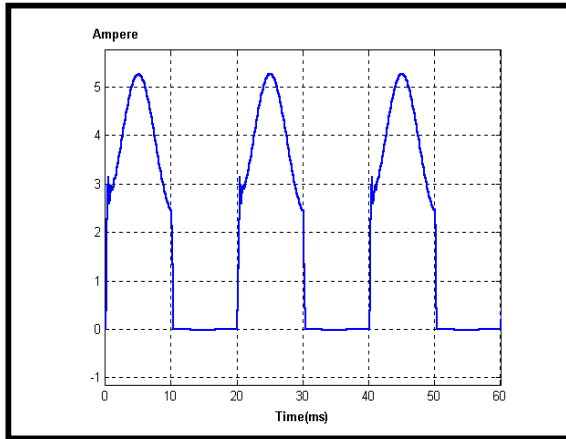
(ب)



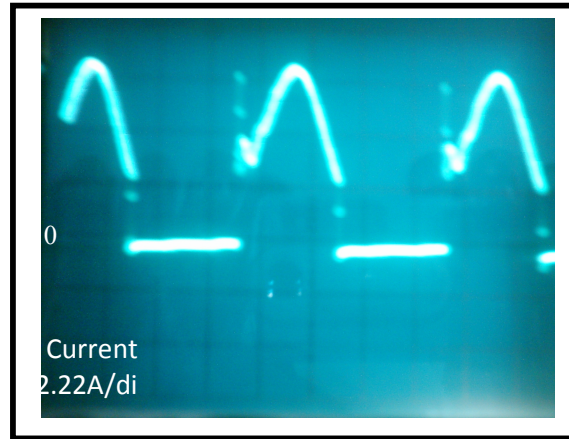
(أ)

Time=5ms/div

الشكل (14): موجة التيار لكل من الثايرسترين (T_1, T_2) مع شبكة الحقن عند ($\alpha=0$) (أ): النتيجة العملية (ب): نتيجة التمثيل على الحاسبة



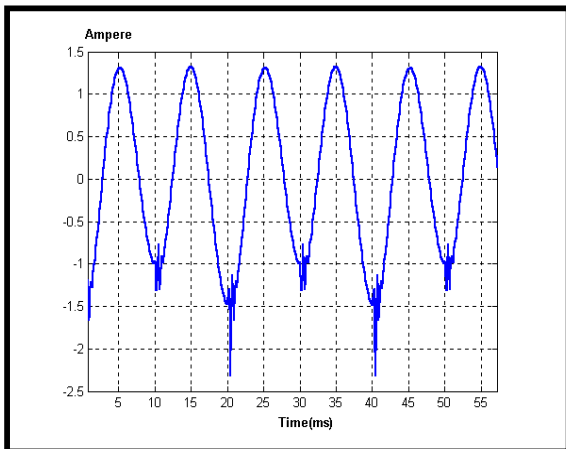
(ب)



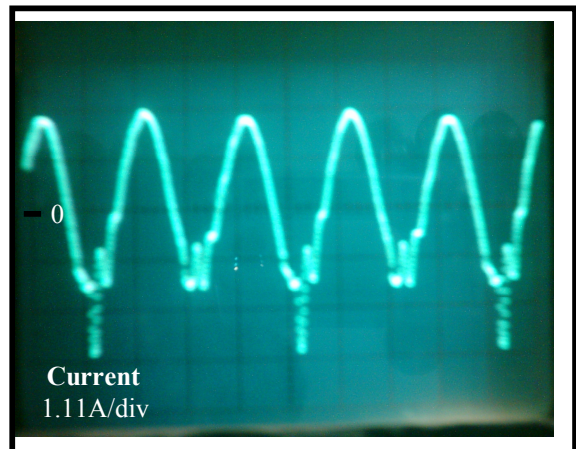
(أ)

Time=5ms/div

الشكل (15): موجة التيار لكل من الثايرسترين (T_3, T_4) مع شبكة الحقن عند ($\alpha=0$) (أ): النتيجة العملية (ب): نتيجة التمثيل على الحاسبة



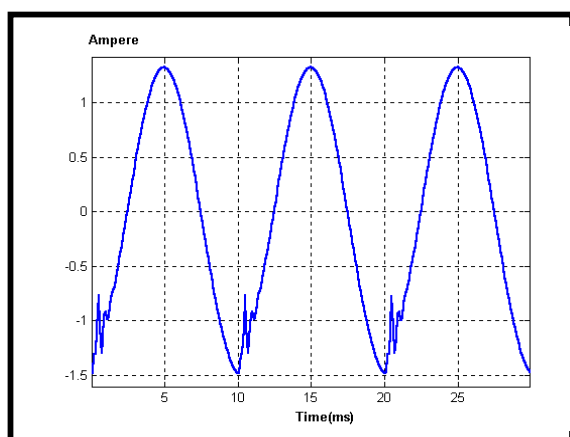
(ب)



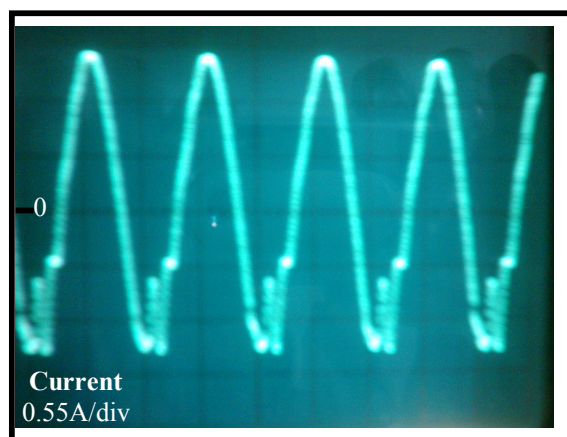
(أ)

Time=5ms/div

الشكل (16): موجة التيار لمتسعتي الحقن (I_{C1}, I_{C2}) عند ($\alpha=0$) (أ): النتيجة العملية (ب): نتيجة التمثيل على الحاسبة



(ب)



(أ)

Time=5ms/div

الشكل(17): موجة تيار المتسعة (C_3)عند ($\alpha=0$) (أ): النتيجة العملية (ب): نتيجة التمثيل على الحاسبة

المصادر:

- [1] Atluri Rama Prasad, Phoivos D.Ziogas, and Stefanos Manias "A novel Passive Waveshaping Method for Single Phase Diode Rectifiers" ,IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 37, No.6 ,December 1990.
- [2] S.Kim, P.Enjeti. P.Packebush and I.J.Pital,"A New Approach to Improve Power Factor and Reduce Harmonics in A Three Phase Diode Rectifier Type Utility Interface" , IEEE Trans. on Industry Application, Vol.30, No.6 PP.1557-1564, November/December 1994.
- [3] X.Dai. , Y.Xu. and D.He. "Novel Passive Rectifier with Low THD Based on Harmonics Injection and Counteracting Principle" ,IEE Trans. on Power Elect. Power Appl., Vol.145, No.4, July1998.
- [4] C. Sharmeela*, M.R.Mohan, and G.Uma#"Line Harmonics Reductions Using Neural Based Controller for Shunt Active Filters" ,College of Engineering, Guindy Anna University,Chennai-600 025, India *hellosharmeela@yahoo.co.in, #uma@annauniv.edu ,March 2003.
- [5] A.A.Al-Hyali "AC Current Harmonic Reduction for Single Phase Rectifier Using Current Injection", M.Sc. Thesis , Mosul University ,2006.
- [6] Basil M.Saied and Hussein I.Zynal "Minimizing Current Distortion of a Three Phase Bridge Rectifier Based on Line Injection Technique ,IEEE Transaction on Power Electronics, November 2006.
- [7] I. Ashida, J.Itoh,"A Novel Three Phase PFC Rectifier Using a Harmonic current Injection Method" , Nagaoka University of Technology, Niigata , Japan,IEEE,2007.

ملحق (A)

قوانين حساب عامل القدرة والكفاءة وعامل الانتفاع للمحولة

$$P_{in(real)} = \frac{1}{T} \int_0^T (i_{in} * v_s) dt \quad \dots(A1)$$

$$P_{in(app)} = I_{T(rms)} * V_{rms} \quad \dots(A2)$$

$$PF = \frac{P_{in(real)}}{P_{in(app)}} = \frac{I_1 V_{1rms} \cos \phi}{I_{T(rms)} V_{rms}} = \frac{I_1}{I_{T(rms)}} \cos \phi = K_{dist.} * K_{disp.} \quad \dots(A3)$$

على اعتبار أن (V_{1rms}) موجة جيبية نقية

$$\eta = \frac{P_{odc}}{P_{in(real)}} \quad \dots(A4)$$

$$P_{odc} = \frac{1}{T} \int_0^T (i_L(t) * v_L(t)) dt \quad \dots(A5)$$

$$PU = \frac{P_{odc}}{P_{in(app)}} \quad \dots(A6)$$

حيث أن:

(PF) يمثل عامل القدرة ، $P_{in(app)}$ القدرة الظاهرية في جهة الإدخال ، $P_{in(real)}$ القدرة الحقيقية في جهة الإدخال ، P_{odc} معدل القدرة في جهة الإخراج ، I_1 القيمة المؤثرة لتيار المركبة الأساسية ، $I_{T(rms)}$ القيمة المؤثرة للتيار الكلي ، $K_{dist.}$ عامل التشوه ، $K_{disp.}$ عامل الإزاحة ، η الكفاءة ، PU عامل الانتفاع للمحولة ، $i_L(t)$ القيمة الآنية لتيار الحمل ، $v_L(t)$ القيمة الآنية لفولتية الحمل.