

تمثيل المرشحات الفعالة الأحادية الطور

المهندس زياد السقا¹ الدكتور المهندس هاشم ورقوزق²
الدكتور المهندس روبيير ربيبيه³

الملخص

الغاية من البحث وضع المفاهيم العامة وآلية عمل المرشحات بشكل عام ، ثم دراسة قيم مكونات المرشحات الفعالة، وسعة المكثف، قيمة التوتر في حقل التيار المستمر، ومطال المركبات التوافقية، ونسبة التشوه الكلي.

كما يهمننا إظهار نوعية الحمل لجسر التقويم المراد ترشيح تياره القادم من الشبكة. في هذا البحث بعد عرض هذه المفاهيم وإجراء القياسات المخبرية اللازمة للتوترات العابرة الناشئة على عناصر التبديل، وقيم التوافقيات، قمنا بتمثيل المرشح التفرعي الفعال باستخدام معرج جسري أحادي الطور اعتماداً على برنامج PSIM في التمثيل. بينا فيه آلية عمل النظام وكيف تم تمثيله، وحللنا تيارات الشبكة قبل الترشيح وبعده وآلية عمل عناصر المرشح.

أظهرت نتائج تمثيل المرشح الفعال، كفاءة عملية الترشيح وأنه يمكن حذف جميع توافقيات التيار في الشبكة، والحصول على مركبات تيار شبكة جيبية متوازنة. الكلمات المفتاحية: المرشحات الفعالة - التوافقيات - إلكترونيات القدرة - المعرجات والقيادة الشعاعية- قاعدة المعرفة.

¹ قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

² قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

³ قسم هندسة الطاقة الكهربائية - معهد الطاقة - غرونوبل- فرنسا

1- مقدمة:

تزايد استخدام المبدلات الإلكترونية AC/DC & DC/AC Converters في التطبيقات التقنية، وهي تستجر تيارات عابرة وغير جيبيية بمطالات كبيرة خلال كل فترة من فترات التبديل بين أذرع المبدل، لذا فإنها تولد العديد من التوافقيات برتب ومطالات مختلفة وبشكل دوري. ففي الجسر الثيرستوري أحادي الطور تكون رتبة تردد توتر الحمل ضعف رتبة تردد توتر المنبع، لذا فإنه ينشأ عند كل نصف دور تيار نبضي عابر يُستجر من المنبع، وهو غير جيبي، ونجد في مركبة هذا التيار خلال الدور الواحد العديد من رتب التوافقيات الزوجية والفردية، أما في الجسر الثلاثي الطور التفرعي المضاعف (كريتنز) Three Phase six Pulse Bridge PD3، فتظهر ست مناطق تشوه في أثناء تشغيله عند زوايا إزاحة مختلفة ($\alpha=0, \alpha=180$)، فضلاً عن ظهور ست فجوات توتر ناتجة عن لحظات التوصيل للعناصر الإلكترونية. في حين أن مبدل التردد ثلاثي الطور: (Cyclo-Converter) المستخدم لقيادة سرعة المحركات التزامنية وتنظيمها يعمل دائماً عند تردد أدنى من تردد الشبكة ($f \leq \frac{2}{3} F$)، فيؤدي إلى نشوء تيارات تشويه في الشبكة الكهربائية، بعضها ذو تردد أدنى من تردد الشبكة بعضها الآخر ذو تردد أعلى عدة مرات منه، كما أنه قد تنشأ ترددات ليست من مضارب صحيحة من تردد الشبكة، هذه التيارات غير دورية وغير منتظمة. وهناك أيضاً أفران الصهر بالقوس الكهربائي Arc-Furnace ذات الاستطاعات الكبيرة (1-100 MW)، وهي من أكبر الأحمال غير الخطية التي تسبب نشوء تيارات عابرة في الشبكة، بسبب ظاهرة القصر غير المنتظم التي تحدث ضمن الفرن الكهربائي، ومن ثمَّ يحصل تغير في موجتي التوتر والتيار للشبكة وتصبح الشبكة ملوثة بشكل غير مقبول تقنياً [6].

أما أحمال الإنارة الفلوريساننتية فإنها هي أيضاً من أكثر الأحمال الملوثة في الشبكات الكهربائية وهي تعمل على استهلاك القدرة الرديّة وتوليد تيارات غير جيبيّة في الشبكة.

كما أن تشغيل المحولات الكهربائيّة عند اللاحمل وإجراء عمليات الإقلاع المتكرر للمحركات التحريضية يسبب حالات عابرة في التيار والتوتر وتشويهاً في الشبكة العامة.

- أخذت طرائق مراقبة هذه الظواهر ومعالجتها تنمو وتتطور بسرعة في السنوات الأخيرة، فضلاً عن أن أجهزة قياس التوافقيات (Harmonics) في التوتر والتيار، وتحديد نسبة التشوه الكلي (Total Harmonic Distortion) بالتوتر THD_v أو بالتيار THD_i أصبحت في متناول جميع الباحثين. لكن مسألة تصميم وتنفيذ الأنظمة الإلكترونيّة القادرة على إعادة تيار وتوتر الشبكة للشكل الجيبي هي في طور البحث والتحديث، كما أنها أكثر كلفة مادية وتعقيداً هندسياً من غيرها من التجهيزات الإلكترونيّة، فبعض هذه الأنظمة يهتم بمعالجة وتعويض (Compensation) التيارات الدورية غير الجيبيّة، وبعضها الآخر يهتم بمعالجة التيارات غير الدورية (Non Periodic) لكن في النهاية الغاية من التعويض والمعالجة هو تأمين شبكة عامة قادرة على تقديم تيارات وتوترات دورية جيبيّة.

تُعالجُ هذه التوافقيات وعامل الاستطاعة المتأخر في الشبكات باستخدام مرشحات غير فعالة (Passive-Filter) ومرشحات فعالة (Active-Filter) بأنواعها المختلفة: المرشحات الفعالة التسلسلية، والتفرعية أو المختلطة. فضلاً عن ظهور أنظمة تقويم فعالة حديثة ذات عامل استطاعة واحدي تعتمد على مبدأ التعرّيج، هذه الأنظمة دخلت في كثير من التطبيقات العمليّة مثل المبدلات الترددية، ووحدات التغذية المنقطعة، وأنظمة عدم الانقطاع ...

- الغاية من البحث هي توضيح المفاهيم العامة للمرشحات وآلية عملها بشكل عام ثم دراسة مكونات المرشحات الفعالة التفرعية والعلاقات الناظمة لعملها فضلاً عن تمثيل مرشح فعال تفرعي يعمل على تحسين مواصفات تيار الشبكة الذي تم تشويبه عن طريق استخدام جسر تقويم مُحمل بحمل أومي وتحريضي، وسيهتم البحث أيضاً في أسس اختيار مكونات النظام وخاصةً سعة المكثف C في دارة المعرج (المبدل Inverter) والذي نعدّه مصدر القدرة المخترنة التي يمكن استخدامها لتعويض فجوات التوتر التي تحدث في الشبكة، إضافة إلى قيمة التوتر على طرفي هذا المكثف V_{dc} (حلفة التوتر المستمر) (DC-Link)، كذلك سنذكر أثر نوعية الحمل المطبق على جسر التقويم ، وآلية قيادة المبدل الإلكتروني بقيمة تردد التقطيع المستخدم لنظام تعديل عرض النبضة (P.W.M) الذي سنعتمده لقيادة المبدل الإلكتروني (Pulse Width Modulation).

2: الأسس النظرية Theoretical Principles

1-2: تعاريف عامة:

تعطى الاستطاعة اللحظية الفعالة والتي تمثل معدل الاستطاعة المولدة المنقولة على الشبكة أو المتداولة بين الشبكة والمرشح الفعال بالعلاقة الآتية:

$$P(t) = \sum_{i=1}^q V_i(t) \cdot i_i(t) \quad (1)$$

حيث : q : عدد الأطوار في الشبكة، أ عدد صحيح متغير،

يعطى التيار اللحظي الفعال (Instantaneous real current) $i_p(t)$ ، والتيار

اللحظي الردي (Instantaneous reactive current) $i_q(t)$ بالشكل:

$$\left. \begin{aligned} i_p(t) &= \frac{P_L(t)}{V_p^2(t)} \cdot v_p(t) \\ i_q(t) &= i(t) - i_p(t) \end{aligned} \right\} (2)$$

حيث إن:

$P_L(t)$: استطاعة الحمل المتوسطة خلال زمن محدد من الدور.

$v_p(t)$ و $V_p(t)$: هما القيم الفعالة واللحظية للتوتر المرجعي (reference) خلال

زمن محدد من الدور ويرتبطان بالعلاقة:

$$V_p(t) = \sqrt{\frac{1}{T_c} \int v_p^2(t) dt} \quad (3)$$

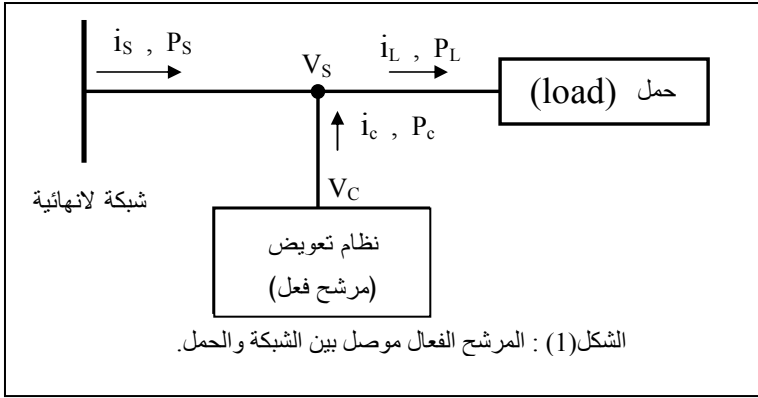
T_c : دور موجة التوتر

يمكن تقسيم تيار الحمل $i_L(t)$ في حالة استخدام المرشح التفرعي، كما في الشكل (1)

إلى مركبتين $i_p(t)$ و $i_q(t)$ ، حيث يعمل المرشح الفعال على تقديم تيار ردي

$i_c(t)$ من رتبة ومطال $i_q(t)$ لتعويضه، في حين أن التيار الفعال $i_p(t)$ سيقدم

عندئذٍ من الشبكة.



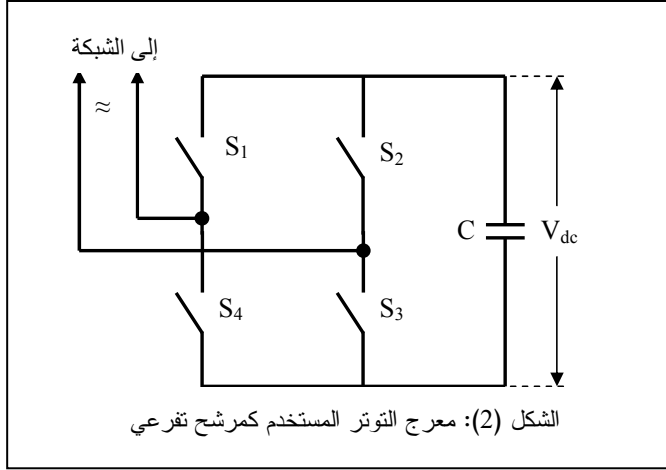
- يعطى متوسط الاستطاعة اللحظية خلال فترة دور بالشكل الآتي:

$$P_x(t) = \frac{1}{T_C} \int_{t-T_c}^t v_x(t) \cdot i_x(t) dt \quad (4)$$

حيث x : رمز يستخدم للمنبع (S) أو للحمل (L) أو للمكثف (C) في دائرة المرشح الفعال ويمكن استخدام كيرشوف في العقدة V_s بحيث إن:

$$P_s(t) + P_c(t) = P_L(t) \quad (5)$$

وتؤخذ القدرة التي يقدمها المرشح الفعال التفرعي من القدرة المخزنة في المكثف C (حلقة التيار المستمر في المعرج DC-Link) كما في الشكل (2):



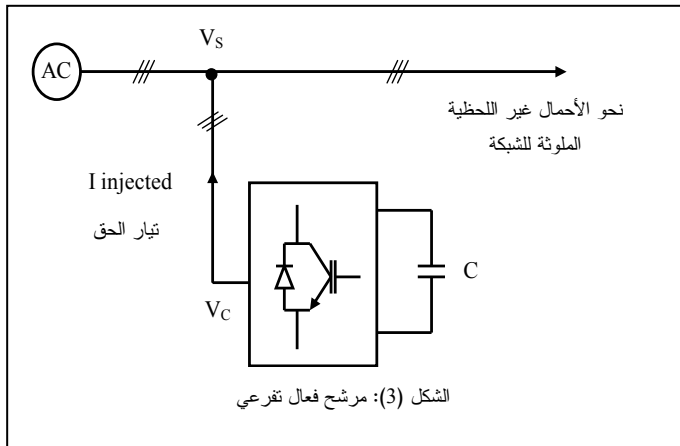
يمكن أن يكون المعرج الجسري للتوتر (Voltage-Inverter) المستخدم في المرشح أحادي الطور أو ثلاثي الطور، وعليه فإن التحكم يتتبع وصل القواطع (S_1, S_2) وفصلها سيعمل على تحقيق عمليات استرجار قدرة من الشبكة في فترة من فترات التشغيل لموجة التيار، أو حقن قدرة في وقت آخر من الموجة. أي إنَّ هذا المبدل الإلكتروني سيعمل على ملء الثغرات في موجة التيار بالقدرة أو بتعبير آخر العمل على ترميم موجة التيار والتوتر حتى تصبح موجة الشبكة، موجة جيبية مستقرة، وسنعرض آلية القيادة لاحقاً.

- الدور T_c في المعادلات السابقة هو فترة غير ثابتة، ويمكن اختيارها تبعاً لطبيعة التيارات غير الدورية في موجة الشبكة، وبعض الباحثين [1] يقترح أخذها من المضاريب الصحيحة لتردد تيار الخط، بقصد الحفاظ على الشكل الجيبي لتيار المنبع عموماً، يختلف دور توتر الخط عن دور التيار اللحظي $i_p(t)$ لذا فإن الفترة أو الدور T_c ستختلف عن دور تيار المنبع، ويمكن أن تساوي دور المنبع الرئيسي، نصف الدور، أو مضاريب صحيحة للدور، وذلك تبعاً للأسلوب والغاية من التعويض المراد إجراؤه والاستطاعة المخزنة.

2-2: أنواع المرشحات الفعالة :

1-2-2: المرشح الفعال التفرعي : Parallel Active Filter :

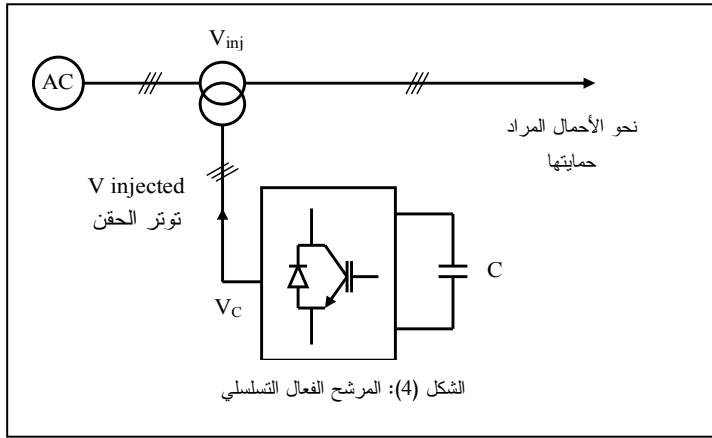
يُربطُ الجسر المعرج والمكثف (C) والملفات الخانقة المكونة للمعرج التفرعي على التفرع مع الشبكة العامة كما في الشكل (3)، وتقاد دارته كمولد تيار، مهمتها حقن تيارات تشويش بترددات مختلفة بحيث تكون مكافئة بالقيمة والمطال ومعاكسة بالاتجاه لتيارات التشويش الحقيقية الموجودة في الشبكة العامة [3].



نطمح أن يكون التيار جهة الشبكة العامة عادة جيبياً ودورياً متزناً، لذا فإن مهمة المرشح الفعال هي منع تيارات التشويش (تيارات التوافقيات غير المرغوب فيها)، التيارات الرديئة، والتيارات عدم التوازن، المولدة من الحمل الملوث من المرور عبر ممانعة الشبكة الواقعة قبل نقطة وصل المرشح الفعال (V_s) .

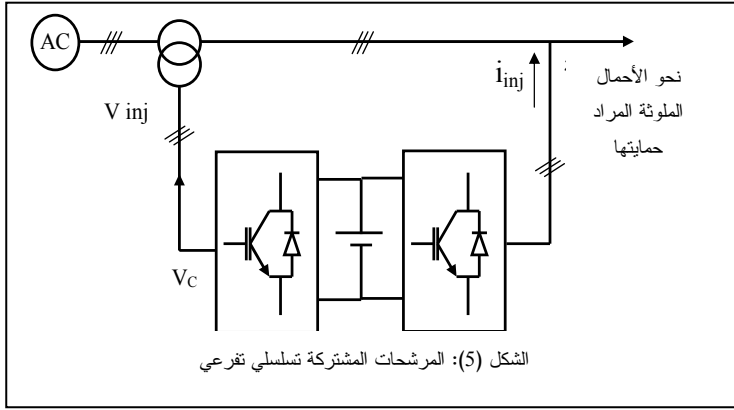
2-2-2 : المرشح الفعال التسلسلي: Serial Active Filter

يمكن اعتبار المرشح الفعال التسلسلي منبع توتر شكل (4)، حيث يولد توترات تعاكس توترات التشويش (فجوات التوتر) (Hole-tension)، عدم التوازن (Disequilibrium) والتوافقيات (Harmonics) القادمة من المنبع الناتجة أيضاً عن مرور تيارات تشويش عبر ممانعات الشبكة، بحيث يصبح التوتر على طرف الحمل المراد حمايته ذا شكل جيبي ونقي.



3-2-2 : المرشحات المشتركة تفرعي - تسلسلي:

تتكون من مرشح تفرعي موصول مع مرشح تسلسلي كما في الشكل (5)، هذا النظام يسمح لنا بالاستفادة من ميزات كلا المرشحين، ويمكن الحصول على توتر وتيار جيبي للشبكة الكهربائية.

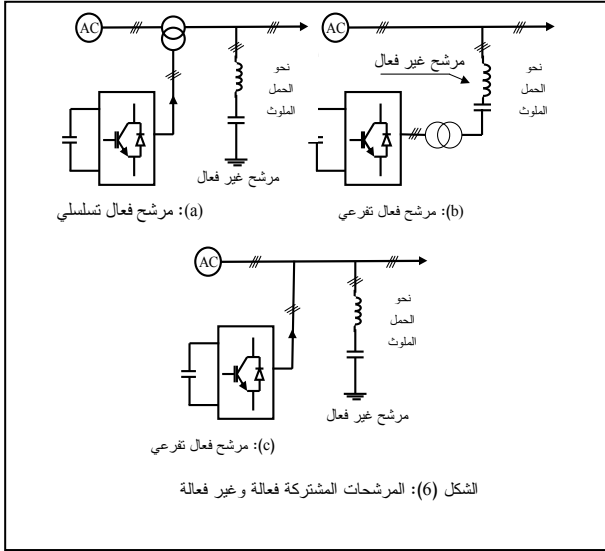


4-2-2 : المرشحات المختلطة الفعالة وغير الفعالة:

من أجل تصغير حجم المرشحات الفعالة وتخفيض كلفتها، يمكن معالجة التوافقيات بإجراء جمع مشترك بين مرشح فعال باستطاعة صغيرة أو متوسطة وربطه على الشبكة مع مرشحات غير فعالة باستطاعات كبيرة شكل (6).

مهمة المرشح غير الفعال حذف التوافقيات الدائمة المسيطرة، في حين يقوم المرشح الفعال على حذف الجزء الباقي من التوافقيات، نجد عالمياً التركيبات الآتية:

- مرشح فعال تسلسلي مع مرشحات غير فعالة تفرعية (6-a)
- مرشح فعال تسلسلي موصل على التسلسل مع مرشح غير فعال (6-b)
- مرشح فعال تفرعي مع مرشح غير فعال تفرعي (6-c).



3-2 : آلية تخزين القدرة في المرشح:

يعتمد تخزين القدرة في المرشح الفعال التفرعي أو التسلسلي على استخدام مكثف C غير كهربي الذي يؤدي دور منبع تيار مستمر V_{dc} . وعند التنفيذ العملي لهذا النظام يجب تأمين نظام شحن ومراقبة لتوتر المكثف المستمر V_{dc} ، إن عملية اختيار ثوابت وأبعاد نظام التخزين (V_{dc}, C) لها دور فعال وديناميكي في نوعية التعويض للمرشح الفعال التفرعي [2].

من المراجع والتجريب نلاحظ أن اختيار قيمة التوتر المستمر في الحلقة المستمرة DC Link أعلى من 2 إلى 5 مرات من توتر المنبع يؤدي إلى تحسين أداء المرشح الفعال [1].

كما أن تعرجات التوتر المستمر التي تنشأ على طرفي المنبع المستمر V_{dc} ، والنتيجة عادة عن هبوط التوتر نتيجة شحن المكثف وتفريغه تؤثر بشكل مباشر في قيمة السعة المختارة للمكثف C ، وتؤثر بشكل سلبي على جودة التعويض للمرشح، لذا يجب تنظيم التوتر المستمر على طرفي المكثف. ويزداد مطال هذه التعرجات بالتأكيد كلما

ارتفع تيار المرشح وصغر تردده، لذا عند تقدير سعة المكثف تؤخذ التوافقيات الأولية من موجة التيار المراد حذفها ويحسب على أساسها سعة المكثف C.

- هناك عدة طرائق لتحديد سعة المكثف C منها:

1-3-2 الطريقة الأولى:

تعتمد على حساب القدرة التي يمكن أن يقدمها المرشح الفعال خلال نصف دور الاستطاعة والمرتبطة بتيارات التوافقيتين الخامسة والسابعة الناشئة من جسر كريتز (جسر تقويم ثلاثي الطور تفرعي مضاعف PD3). وبعد اختيار نسبة التعرّيج $\zeta = 0.07$ لهذا الجسر والتي نطلق عليها عامل التعرّيج ζ ، عند زاوية إزاحة مساوية الصفر $\alpha = 0$. واعتماداً على قيمة التوتر المستمر V_{dc} الناتج عن الجسر، باستخدام العلاقة الآتية يمكن حساب سعة المكثف [2].

$$C_{dc} = \frac{V_s \sqrt{I_5^2 + I_7^2} - 2I_5 \cdot I_7 \cos(2\alpha - 7\alpha)}{2w\zeta \cdot V_{dc}^2} \quad (6)$$

حيث: V_s توتر الطور الفعال للشبكة، α زاوية الإزاحة بالطور.

I_5, I_7 : تيارات التوافقيات للرتب الخامسة والسابعة.

ω : السرعة الزاوية وتساوي إلى $2\pi f$.

2-3-2 الطريقة الثانية:

وهي الأكثر بساطة تعتمد على قياس تيار التوافقيات الأدنى I_h ، وتحسب السعة من العلاقة:

$$C_{dc} = \frac{I_h}{w_h \zeta \cdot V_{dc}} \quad (7)$$

حيث: $w_h = 2\pi \cdot f_h$ هي التردد الزاوي للتوافقية المراد تعويضها.

ζ : عامل التعرّج للجسر المستخدم

3-3-2 : الطريقة الثالثة:

تعتمد أيضاً على القدرة المخزنة في المكثف باعتبار أن هذه القدرة تصل إلى القيمة العظمى عند الزمن t_2 خلال انتقال المكثف من حالة التفريغ إلى حالة الشحن وبالعكس [3]، وهذه القدرة تساوي الصفر عندما يكون توتر المكثف مساوياً للصفر $V_c = 0$ ، وعليه فإن قيمة القدرة المخزنة بدءاً من الزمن t_1 حتى t_2 يمكن التعبير عنها بالعلاقة:

$$\Delta W = \int_{t_1}^{t_2} V \cdot i \cdot dt \quad (8)$$

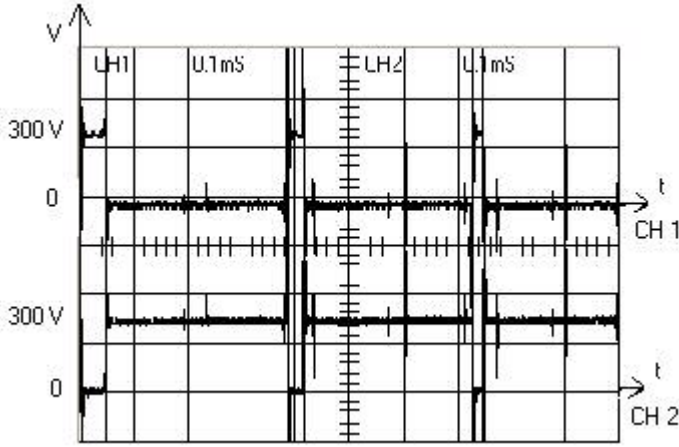
انطلاقاً من قيمة القدرة المخزنة ΔW يمكن حساب سعة المكثف باستخدام العلاقة الآتية: $C = \frac{2 \cdot \Delta W}{(V_{dc})^2}$ ، ونظراً لأن رفع قيمة التوتر المستمر V_{dc} يحسن من أداء

المرشحات كما ذكرنا، وأن قيمة هذا التوتر المستمر لها علاقة مباشرة مع خواص عناصر القطع وميزاتها (ترانزستورات الاستطاعة) المكونة للمعرج (Inverter) فإنه يجب أن تكون مواصفات هذه القواطع الإلكترونية المستخدمة مناسبة لهذا التوتر.

وبالعودة لآلية عمل المعرج خلال مراحل التبديل الثماني التي يقوم بها خلال الدور الواحد والتي ستوضح لاحقاً، وبالنظر للجدول (1) المرفق لاحقاً الذي يبين أقصى توتر يمكن أن يولده المعرج في كل فترة من فترات العمل، نجد أن أقصى توتر يمكن نشوءه على القواطع الإلكترونية يتراوح بين $\pm 2/3 V_{dc}$ أي إنه يقارب 500 فولت، لكن عملياً ومن خلال عمليات تشغيل المعرجات قمنا بتسجيل شكل موجة التوتر على العناصر لمعرج عادي، المبيّنة في الشكل (8).

إذ تبين القناة الأولى شكل التوتر على طرفي الترانزيستور العلوي لأحد أضلاع الجسر في حين تبين القناة الثانية شكل التوتر على طرفي الترانزيستور السفلي، ونجد من الشكل أعلاه أنه عند كل فترة تبديل، تنشأ موجة توتر عابرة على الترانزيستور

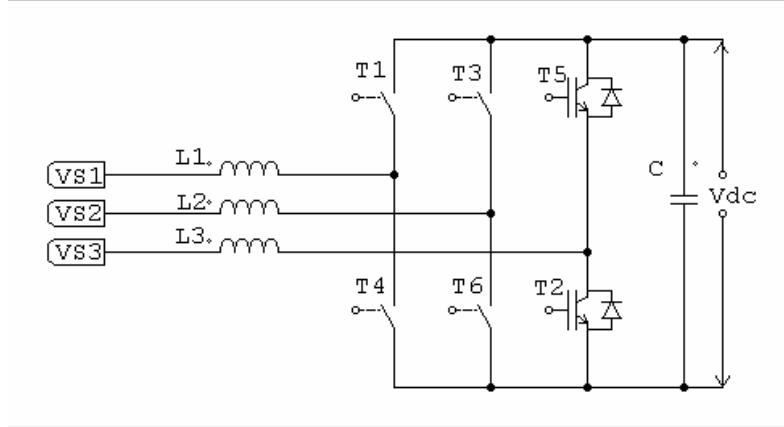
تصل قيمتها إلى (2-3) أمثال موجة التوتر الأساسي المستمر المطبق، لذا يجب اختيار توتر تشغيل مناسب للقواطع الذي يصل عادةً إلى 1200 فولت تحاشياً من انهيار هذه القواطع (IGBT).



الشكل (8) شكل موجة التوتر على أحد القواطع الإلكترونية.

4-2: التمثيل الشعاعي لعمل المعرج والتوترات الناشئة:

الشكل (9) يمثل معرج توتر ثلاثي الطور، الذي هو أساس تركيب المرشح الفعال التفرعي، والعناصر المستخدمة هي من نوع ترانزيستور IGBT. تُقدِّحُ بشكل تكاملي لكل ذراع بطريقة تعديل عرض النبضة PWM، بحيث إذا شُغِّلَ أحد القواطع يعمل على فصل القاطع الثاني في الذراع نفسه، حتى لا يُفَصِّرُ المكثف (التوتر المستمر) [4].



الشكل (9) بنية المرشح التفرعي

- يعمل نظام تعديل عرض النبضة المستخدم على التحكم بقيادة القواطع وسوف نرسم إلى مجموعة القواطع (T₁, T₄) بقاطع قلاب وحيد S₁ لأنه عندما يعمل T₁ يكون T₄ حاجزاً ويرمز لحالة القذح وبالوضعيات (1) والعكس في الحالة الثانية عندما يعمل T₄ يكون T₁ حاجزاً ويرمز عندئذ للحالة بالوضعيات (0)، وكذلك مجموعة القواطع (T₃, T₆) بقاطع قلاب وحيد S₂ ومجموعة القواطع (T₅, T₂) بقاطع قلاب وحيد S₃ ، لذا لدينا الوضعيات الآتية:

T₁ موصل و T₄ حاجز ← S₁=1

T₁ حاجز و T₄ موصل ← S₁=0

T₃ موصل و T₆ حاجز ← S₂=1

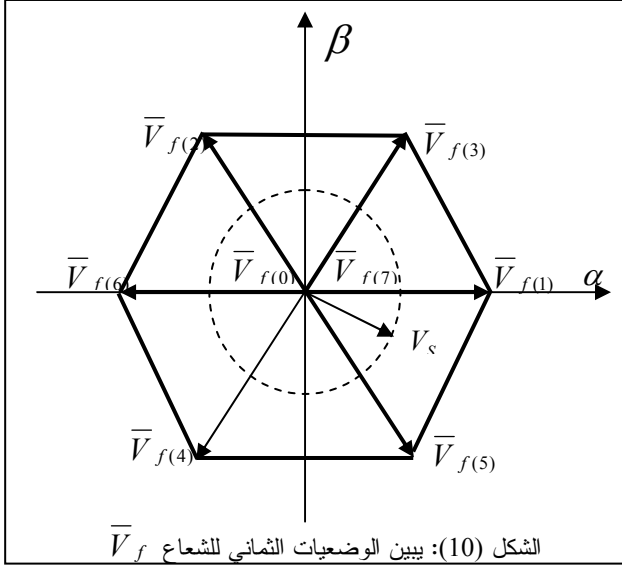
T₃ حاجز و T₆ موصل ← S₂=0

T₅ موصل و T₂ حاجز ← S₃=1

T₅ حاجز و T₂ موصل ← S₃=0

- باعتبار أن الشعاع V_f هو توتر خرج المعرج ، فإن الوضعيات الثماني للشعاع V_f يمكن توضيحها بالشكل (10).

كما أن الجدول (1) أدناه يوضح وضعيات المفاتيح (القواطع) في كل حالة وقيم أشعة التوتر في الإحداثيات α , β الواجب توليده من قبل المعرج والذي يمكن اعتباره التوتر المرجعي للمعرج [5].



جدول رقم (1) يبين وضعيات الفصل والوصل لكل ذراع من أذرع المبدل وقيمة شعاع التوتر الناتج

بدلالة التوتر المستمر المطبق

رقم الحالة	S ₁	S ₂	S ₃	V _{f1}	V _{f2}	V _{f3}
0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	2V _{dc} /3	-V/3	-V _{dc} /3
2	0	1	0	-V/3	2V/3	-V _{dc} /3
3	1	1	0	V/3	V/3	-2V _{dc} /3
4	0	0	1	-V/3	-V/3	2V _{dc} /3
5	1	0	1	V/3	-2V/3	V _{dc} /3
6	0	1	1	-2V/3	V/3	V _{dc} /3
7	1	1	1	0	0	0

5-2 : الاستطاعة الظاهرية في المرشحات الفعالة التفرعية:

تقوم المرشحات الفعالة التفرعية بتعويض التيارات العشوائية في تيار الشبكة من خلال:

1- تعويض تيار التوافقيات مختلفة الرتبة.

2- تعويض تيارات التوافقيات والاستطاعة الرديّة.

3- تعويض حالات عدم التوازن في التيارات والاستطاعة الرديّة.

1-5-2 : تعويض تيارات التوافقيات:

تتكون الاستطاعة المستجرة من قبل الأحمال غير الخطية من ثلاث مركبات أساسية.

الاستطاعة الفعالة P_a ، الاستطاعة الرديّة P_r ، استطاعة التشويش التوافقي D_h ومن ثمّ تكون الاستطاعة الظاهرية S_S :

$$S_S = \sqrt{P_a^2 + P_r^2 + D_h^2} = 3 V_s . I_L \quad (9)$$

حيث: V_s : القيمة الفعالة الطورية لتوتر الشبكة عند نقطة ربط المرشح .

I_L : تيار الشبكة اللاخطي.

الاستطاعة الظاهرية للمرشح الفعال S_{fil} اللازم حقنها في الشبكة لتعويض تيار التوافقيات I_h الناتج عن الحمل، يجب أن تعادل أو تعوض تيار التوافقيات الناجم عن الحمل، ونظراً لأن الحمل في الأساس هو جسر كريتز فإنّ المرشح الفعال يجب أن يعوض تيارات التوافقيات الناتجة عن جسر كريتز (أو حسب نوع الجسر المستخدم) وعليه فإنّ:

$$S_{fil} = \sqrt{D_h^2} = 3 . V_s . I_h \quad (10)$$

حيث إنَّ قيمة تيار التوافقيات يشكل جزءاً من التيار الكلي للحمل، ولدى طرح تيار المركبة الأساسية I_{fon} من تيار الحمل الكلي نحصل على تيار التوافقيات I_h بالعلاقة الآتية:

$$I_h = \sqrt{I_L^2 - I_{fon}^2} \quad (11)$$

إن تيار الشبكة المستجر من قبل جسور التقويم ثلاثية الطور يتبع تيار الحمل المستمر ويُحسب من العلاقة:

$$I_L = \sqrt{\frac{2}{3}} I_c \cos \alpha \quad (12)$$

حيث: I_c : التيار المستمر الناتج عن جسر التقويم .
كما أن تيار المركبة الأساسية I_{fon} يمكن أن يعطى بدلالة التيار المستمر لجسر التقويم بالعلاقة:

$$I_{fon} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_c \quad (13)$$

بتعويض العلاقات (13) , (12) في العلاقات (10) , (9) وإجراء نسب قيمة الاستطاعة الظاهرية للمرشح S_{fil} إلى الاستطاعة الظاهرية الكلية، نجد أن العامل χ_h له دلالة على نسبة استطاعة المرشح إلى الاستطاعة الظاهرية الكلية، وذلك كي نستطيع معرفة مقدار مساهمة المرشح التفرعي في عمليات التعويض، وخاصة أن تيار الحمل المستمر سوف يتغير تبعاً لزاوية الإزاحة بالطور لجسر التقويم الثيرستوري وعليه نجد:

$$\chi_h = \frac{S_{fil}}{S_s} = \frac{3.V_s.I_h}{3.V_s.I_L} \quad (14)$$

$$\chi_h = \frac{\sqrt{I_c^2 \cdot \left(1 - \frac{(\sqrt{6}/\pi)^2}{(\sqrt{2/3})^2}\right)}}{\sqrt{2/3} \cdot I_c} = 0.294$$

ويمكن حساب التيار I_c في جسور التقويم بالشكل الآتي:

$$I_c = \frac{U_{co} \cdot \cos \alpha}{R_L} \quad (15)$$

$$U_{co} = \frac{2 \cdot q}{\pi} \sqrt{2} \cdot V_s \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_s \quad (16)$$

$$I_c = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_s \cos \alpha \quad \text{وبالتعويض نجد :}$$

حيث : U_{co} التوتر المقوم عند زاوية تأخير بالطور $\alpha = 0$

R_L : مقاومة الحمل الاومية .

α : زاوية الإزاحة .

$q=3$: عدد الأطوار .

من العلاقة أعلاه نجد أن نسبة مساهمة المرشح التفرعي الفعال، عند زاوية إزاحة للجسر الثيرستوري تساوي الصفر، تعادل 30% من استطاعة الحمل الكلية وإنها تتأثر بزاوية التأخير بالطور لجسر كريبتز المعتبر كحمل غير خطي.

ويمكن التعبير عن العامل χ_h من جديد بالشكل الآتي:

$$\chi_h = \frac{\sqrt{\left(\sqrt{\frac{2}{3}} I_c \cos \alpha\right)^2 - \left(\frac{\sqrt{6}}{\pi} I_c \cos \alpha\right)^2}}{\sqrt{\frac{2}{3}} I_c} \quad (17)$$

حيث لم تدخل $\cos \alpha$ في المقام لأننا أخذنا كامل الحمل دون إزاحة ، وبالتالي تصبح χ_h مساوية إلى:

$$\chi_h = 0.294 \cos \alpha \quad (18)$$

بالنتيجة نرى أنه كلما كبرت زاوية الإزاحة بالطور احتجنا لاستطاعة تعويض أقل تقدم من المرشح.

2-5-2: تعويض التيارات التوافقية والاستطاعة الرديّة:

نعدُّ أن المرشح التفرعي سيقوم بتعويض التيارات التوافقية والاستطاعة الرديّة الناتجة عن الحمل اللاخطي السابق، لذا فإنَّ العامل الجديد χ_{hr} يعطى بالشكل:

$$\chi_{hr} = \frac{S_{fil}}{S_s} = \frac{\sqrt{P_r^2 + D_h^2}}{3.V_s . I_L} \quad (19)$$

$$\chi_{hr} = \frac{\sqrt{(3.V_s . I_{fon} . \sin \alpha)^2 + (3.V_s . I_h)^2}}{3.V_s . I_L}$$

بتعويض قيم التيارات في العلاقة أعلاه نجد في النهاية العلاقة الآتية:

$$\chi_{hr} = \cos \alpha \sqrt{1 - \frac{9}{\pi^2} . \cos^2 \alpha} \quad (20)$$

بأخذ عدة قيم للزاوية α نجد انه عند $\alpha = 0$ نحصل على نسبة التعويض السابقة نفسها $\chi_h = \chi_{hr} = 0.294$ لكن بزيادة α نجد أن أقصى قيمة يمكن أن نحتاجها للتعويض ستكون عند $\alpha = 42^\circ$ وستكون النسبة $\chi_{hr} = 0.52$ وهذا يدلنا على مقدرة المرشح التفرعي على تحسين عامل الاستطاعة بنسب جيدة .

3-5-2: تعويض تيارات التوافقيات وعدم التوازن والاستطاعة الرديّة:

مهمة المرشح التفرعي تعويض تيارات التوافقيات والاستطاعة الرديّة كما سبق، فضلاً عن حالة عدم التوازن بين التيارات، ونظراً لأن الشبكة ثلاثية الأطوار (لا يوجد

حيادي) نعدُّ أن ظاهرة عدم التوازن معطاة بدلالة تيار عكسي I_i ، بالاستعانة بالعلاقات السابقة يمكن القول: إنَّ نسبة الاستطاعات يمكن أن تعطى بالشكل:

$$\chi_{hr} = \frac{\sqrt{(3.V_s . I_h)^2 + (3.V_s . I_{fon} \cdot \sin \alpha)^2 + (3.V_s . I_h)^2}}{3.V_s . I_L} \quad (21)$$

وبالتعويض نجد:

$$\chi_{hri} = \sqrt{\cos^2 \alpha \left[1 - \frac{9}{\pi^2} (1 - \sin^2 \alpha) \right] + \frac{9}{\pi^2} \left(\frac{I_i}{I_{fon}} \right)^2} \quad (22)$$

إذا كانت $\frac{I_i}{I_{fon}} = 0$ نعود للعلاقة السابقة (20) وإذا كانت النسبة 0.4 فإنَّ استطاعة

المرشح الفعال المتداولة سوف تزداد مع ازدياد زاوية الإزاحة بالطور α وستصل النسبة لحدود 0.65 عند $\alpha = 45^\circ$.

2-6: تحديد أبعاد مكثف التعويض:

يربط مكثف بجهة التوتر المستمر من المبدل الإلكتروني Inverter، وتحسب سعته واستطاعته الرديّة وتوتره من المعطيات الآتية:

- توتر المكثف 750 فولت توتر مستمر، الاستطاعة الرديّة الواجب تأمينها يجب أن لاتقل عن 30% من استطاعة الحمل ويفضل أن لا تتجاوز 50% من استطاعة الحمل

$$Q_C = C . w . V^2 \quad \text{من العلاقة الآتية:}$$

ونظراً لأن حمل الاسـططاعة 5KW، وأن $Q_C = 1500 \text{ VA}$ و $w = 2 \pi f = 314$ وبالتعويض في العلاقة السابقة نجد أن:

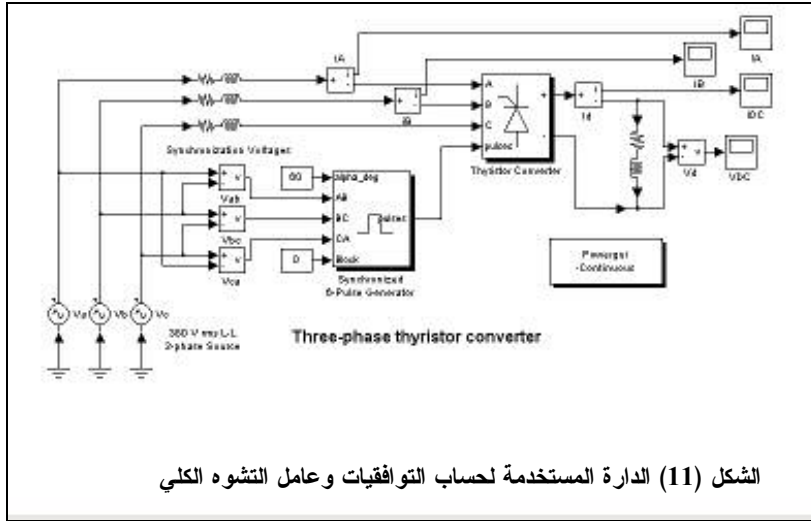
$$C = \frac{1500}{314 \times 750^2} = 8.5 \mu F$$

أي يمكن اعتماد قيمة المكثف ما بين $C = 8.5 \div 10 \mu F$.

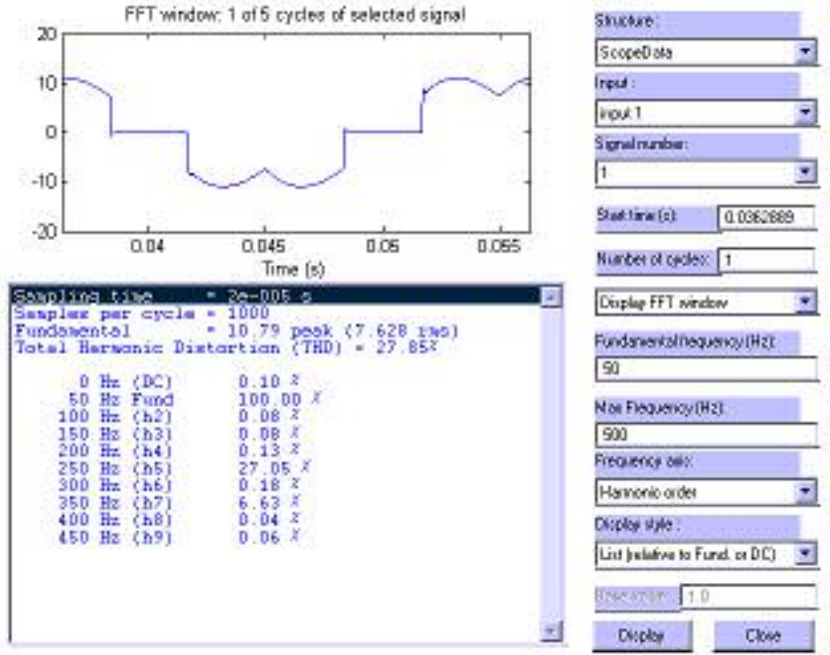
3: الإجراءات العملية:

1-3: إيجاد عامل التشوه الكلي والتوافقيات لجسر كريتز:

حُلَّت موجة التيار الناتج عن جسر كريتز (ثلاثي الطور مضاعف) عند تحميله بحمل مختلط (أومي 25Ω ، تحريضي 20mH) من الدارة العملية المبينة في الشكل (11) والتي مُثِّلت باستخدام بيئة Matlab\ Simulink .
والجدول رقم (2) يبين قيم التوافقيات الخامسة والسابعة الناتجة من هذه الدارة فضلاً عن عامل التشوه الكلي في التيار $THD_i\%$ عند مختلف زوايا الإزاحة بالطور بدءاً من $\alpha=0^\circ$ وحتى $\alpha=120^\circ$:



ويبين الشكل (12) كيفية الحصول على شكل موجة التيار وقيم التوافقيات المختلفة مع عامل التشوه الكلي عند زاوية إزاحة 60° درجة، وذلك من خلال الدارة السابقة.



الشكل (12) شكل التيار عند زاوية إزاحة 60 درجة

الجدول (2) يبين قيم التوافقيات الخامسة والسابعة

الناتجة وعامل التشوه الكلي % THD_i

α	I_{peak}	I_{rms}	THD %	H_1 %	H_5 %	H_7 %
0	22.09	15.62	23.83	100	20.23	12.59
5	22	15.56	24.18	100	20.54	12.76
10	22.74	15.37	24.52	100	20.93	12.76
15	21.28	15.05	24.76	100	21.31	12.60
20	20.66	14.61	24.88	100	21.66	12.24
25	19.89	14.06	25.03	100	22	11.93
30	18.95	13.40	25.21	100	22.48	11.42

35	17.95	12.69	25.43	100	22.96	10.95
40	16.72	11.82	25.7	100	23.54	10.31
45	15.42	10.90	26.03	100	24.17	6.64
50	13.96	9.87	26.44	100	24.91	8.86
55	12.41	8.77	27.00	100	25.82	7.92
60	10.79	7.63	27.85	100	27.05	6.63
65	9.11	6.44	29.16	100	28.73	4.99
70	7.33	5.18	31.36	100	31.22	2.95
75	5.5	3.89	35.85	100	35.38	3.77
80	3.64	2.57	45.42	100	43.76	12.17
83	3.9	2.76	70.26	100	61.71	33.59
85	3.46	2.45	74.73	100	64.7	37.4
86	3.26	2.3	77.05	100	66.23	39.37
90	2.48	1.75	86.57	100	72.33	47.55
95	1.67	1.18	98.68	100	79.8	58.04
100	1.02	0.72	111.09	100	87.43	68.53
105	0.55	0.93	123.95	100	95.7	78.75
110	0.25	0.18	138.9	100	106.12	89.6
115	0.1	0.07	163.05	100	123.51	106.43
120	0.04	0.03	205.76	100	151.97	138.63

نلاحظ من الجدول (2) عند اعتبار عمل الجسر كمقوم حتى 90° ما يأتي:

- تبلغ قيمة المركبة الخامسة الأعظمية (72.33%) عند زاوية إزاحة قدرها 90° .
- تبلغ قيمة المركبة السابعة الأعظمية (47.55%) عند زاوية إزاحة قدرها 90° .
- تبلغ قيمة عامل التشوه الكلي (86.37%).

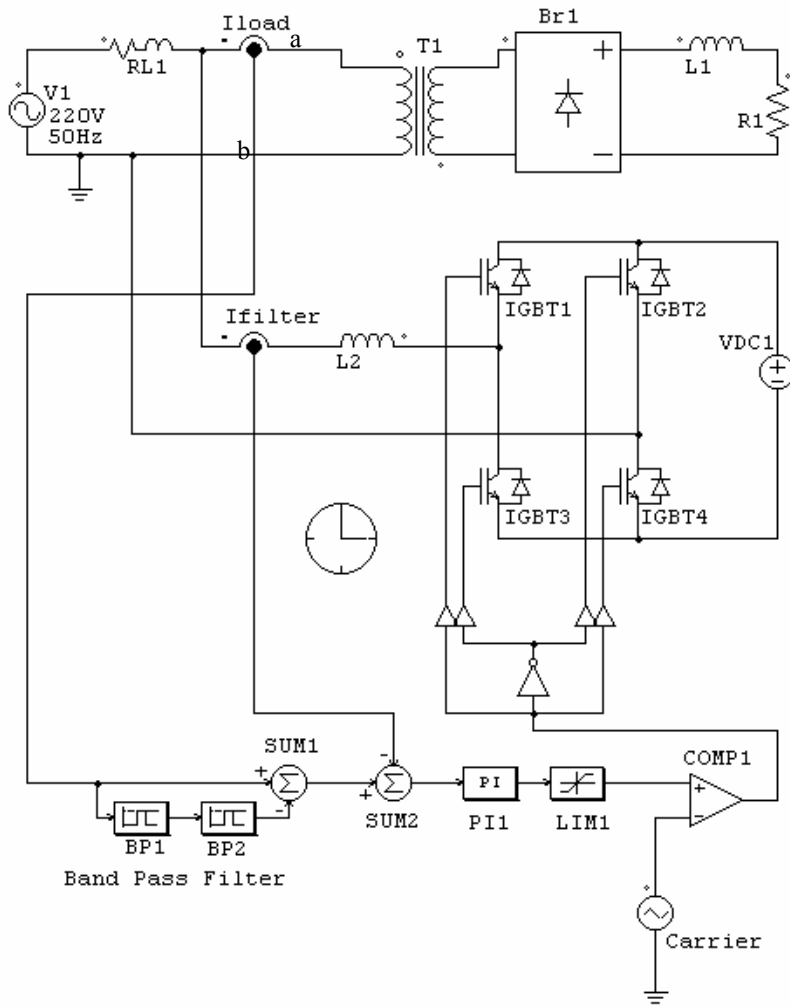
2-3: تمثيل المرشح الفعال أحادي الطور :

تعدُّ دارات التقويم المختلفة بنوعيتها (الأحادية والثلاثية الطور) من أهم مصادر التلوث لتيارات الشبكة، وهي مستخدمة بشكل كبير في كثير من التجهيزات الكهربائية (مبدلات، وحدات التغذية المتقطعة S.M.P، شاحن البطاريات، أجهزة تلبس المعادن....)، ويؤدي استخدامها إلى نشوء تيارات توافقية ذات مراتب مختلفة كما بينا سابقاً، هذا أدى إلى ظهور أنظمة تقويم حديثة ذات عامل استطاعة واحد تعتمد على مبدأ التعرّيج، دخلت هذه الأنظمة في كثير من التطبيقات العملية مثل المبدلات الترددية، وحدات التغذية المتقطعة، أنظمة عدم الانقطاع...، لكن ما تزال هناك كثير من التجهيزات تستخدم المقومات الكلاسيكية مما يستدعي استخدام المرشحات الفعالة للتخلص من التوافقيات التي تصدرها هذه المقومات.

- قمنا فيما يأتي بتمثيل مرشح فعال أحادي الطور باستخدام برنامج (PSIM) وذلك لترشيح تيار الحمل لمقوم جسري أحادي الطور كما في الشكل (13).

1-2-3: دائرة الاستطاعة لمرشح فعال أحادي الطور:

نلاحظ من الشكل (13) أن دائرة الاستطاعة تتألف من نظامين موصلين على التفرع، الأول دائرة المقوم الجسري أحادي الطور محملاً بحمل مختلط ($L1=5\text{mH}$ ، $R1=2\Omega$)، والثاني دائرة المرشح الأحادي الطور، والذي يتألف من جسر ترانزيستوري نوع (IGBT) رُبط على التوازي مع جسر التقويم عبر ملف تسلسلي ($L2=3\text{mH}$)، حيث a, b نقاط الربط مع مدخل الشبكة، إضافة إلى مكثف موصول مع الطرف المستمر للجسر الذي يطلق عليه (D.C. Link)، ونظراً لأن التوتر المستمر على طرفي المكثف الموصول مع الجسر الترانزيستوري يحتاج إلى حلقة تنظيم إضافية، فقد استُعيضَ عنه بمنبع للتوتر المستمر $V_{dc} = 750V$ في أثناء التمثيل، وذلك للتبسيط [7].

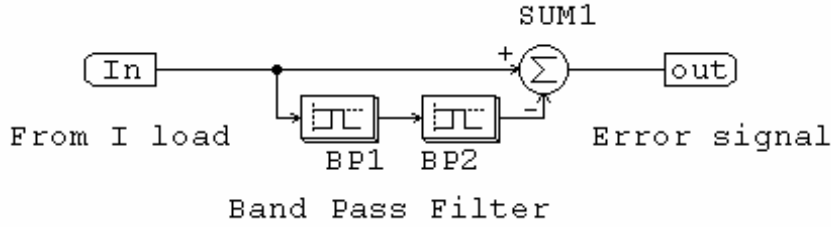


الشكل (13): مخطط الدارة الكاملة التي مُنِّت على الحاسب.

2-2-3 : دارة قيادة المرشح:

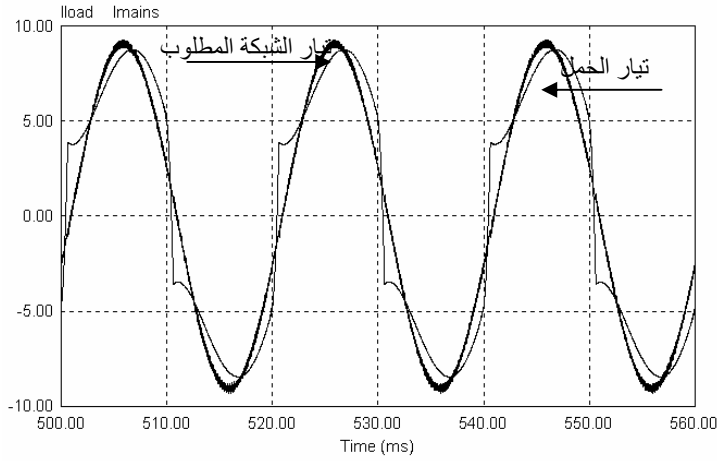
تتألف دارة قيادة المرشح التي مُنِّت والمبينة في الشكل (13) من:

- مرشح مضاعف من الدرجة الثانية موصول مع دائرة طارح، حيث تدخل إشارة تيار الحمل من مجس التيار (Current sensor) فيستخلص منها المركبة الرئيسية للموجة الجيبية والتي ستشكل من ثمَّ الإشارة المرجعية المطلوبة لتيار الشبكة، ثم تطرُح إشارة تيار الحمل الأساسية من هذه الإشارة المرجعية للحصول على القيمة المطلوبة لتيار المرشح. والشكل (14) يوضح تسلسل الربط لهذه الحلقة.

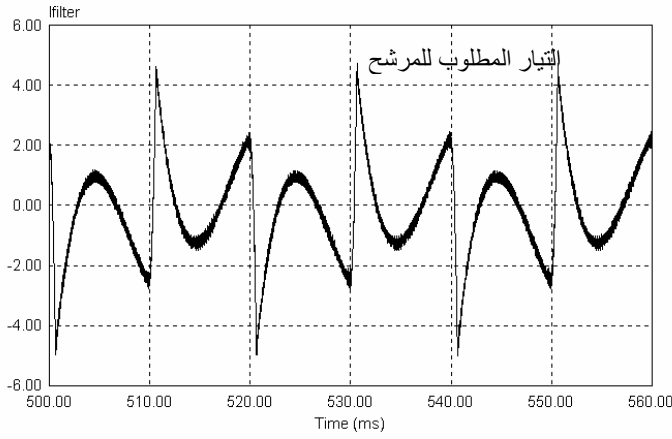


الشكل(14): دائرة الترشيح لتيار الحمل للحصول على القيمة المطلوبة لتيار المرشح.

والشكل (15) أدناه يوضح لنا صورة إشارة مركبة تيار الحمل (والمأخوذة من حساس التيار Current sensor) التي تحتوي التوافقيات وصورة إشارة المركبة الجيبية الأساسية المستخلصة منه التي ستشكل القيمة المطلوبة لتيار الشبكة. وهما الإشارتان اللتان قورنتا من خلال المقارن للحصول على الإشارة المطلوبة لتيار المرشح والتي سميناهما (Error signal). والشكل (16) يبين شكل هذه الإشارة، إذ نجد أن التغيرات في هذا التيار تتعلق بتغير إشارة تيار الحمل، بحيث إن مجموعهما يؤدي دوماً للحصول على الشكل الجيبي المرشح المطلوب لتيار الشبكة.



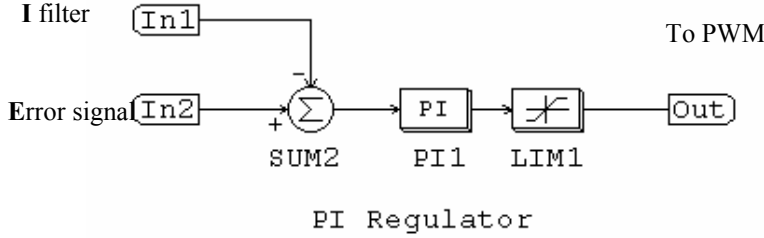
الشكل (15): صورة عن تيار الحمل مع المركبة الأساسية المستخلصة منه بعد مضي 0.5sec



الشكل (16): شكل القيمة المطلوبة لتيار المرشح (Error signal) .

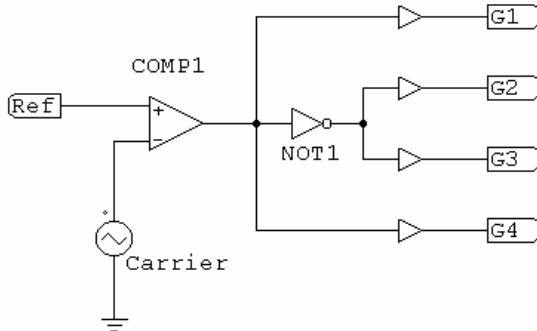
- دائرة المنظم : وتتألف من منظم تناسبي تكاملي كما في الشكل (17)، حيث تُقارنُ من خلاله القيمة المطلوبة لتيار المرشح (Error signal) والمطبقة على المدخل غير

العاكس للمنظم (In2) مع القيمة الحقيقية (I filter) المطبقة على المدخل العاكس (In1)، ويوصل خرج هذا المنظم إلى محدد من أجل تحديد مطال إشارة الخرج (إشارة الخطأ) لتكون ضمن الحدود المناسبة للدائرة. ويشكل خرج هذه الدائرة إشارة دخل لدائرة نظام تعديل عرض النبضة (P.W.M).



الشكل (17): دائرة المنظم التناسبي التكاملي (PI regulator)

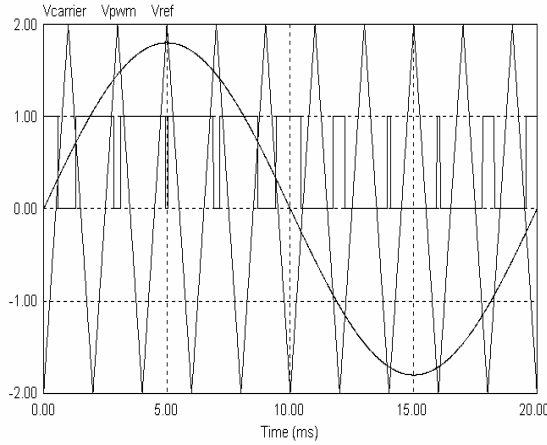
- دائرة تعديل عرض النبضة (Pulse Width Modulation) PWM : الغاية من هذه الدائرة المبينة في الشكل (18)، مقارنة موجة إشارة الخطأ الناتجة على خرج المنظم التناسبي التكاملي مع الموجة المثلثية الحاملة (Carrier)، حيث تم اختيار التردد المناسب لهذه الموجة الحاملة بقيمة 10KHz.



الشكل (18) : يوضح دائرة تعديل عرض النبضة (P.W.M).

تؤخذ إشارة الخرج المنطقي للمقارن (1,0) إما مباشرة أو معكوسة منطقياً إلى بوابة الترانزيستور المناسب في الجسر، حيث (G1,G2,G3,G4) تمثل بوابات العناصر الترانزيستورية (IGBTs).

والشكل الآتي (19) يوضح تمثيلاً لمبدأ عمل نظام تعديل عرض النبضة، حيث تم فيه مقارنة دور كامل لموجة جيبية ترددها 50Hz ومطالها 1.8V، مع موجة حاملة مثلثية ترددها 500Hz ومطالها 2V.



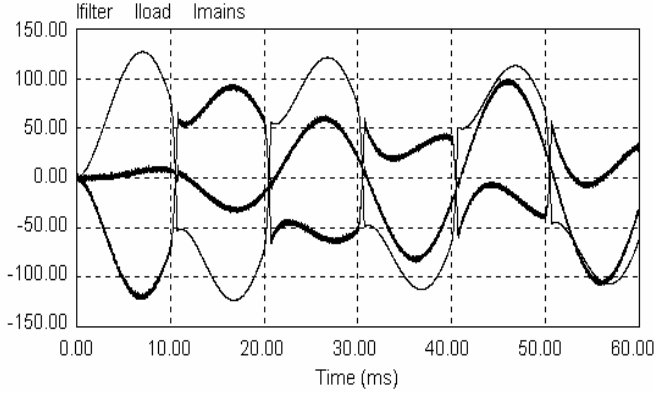
الشكل (19): يبين مبدأ عمل تعديل عرض النبضة (PWM).

نلاحظ من الشكل أنه عندما تكون القيمة المطلقة للإشارة المرجعية أكبر من القيمة المطلقة للإشارة المثثية (الحاملة)، نحصل في خرج المقارن على قيمة واحد (1) منطقي، أما عندما تكون أصغر فتكون قيمة خرج المقارن صفراً (0) منطقياً.

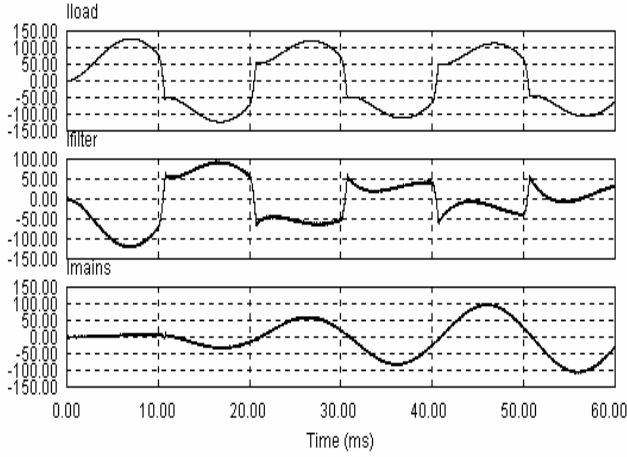
3-3: نتائج التمثيل:

تبين الأشكال الآتية نتائج التمثيل التي تم الحصول عليها من تنفيذ البرنامج الذي وُضِعَ للدارة المطلوبة (الشكل 13). ويوضح الشكل (20) كلاً من تيار الحمل للمقوم أحادي الطور، وتيار المرشح الفعال، وتيار الشبكة النهائي بعد الترشيح. وذلك بدءاً من الزمن

تمثيل المرشحات الفعالة الأحادية الطور
 حيث يمثل الشكل (20-a) أشكال التيارات الناتجة، في حين يبين الشكل (20-b) كلاً من هذه التيارات.



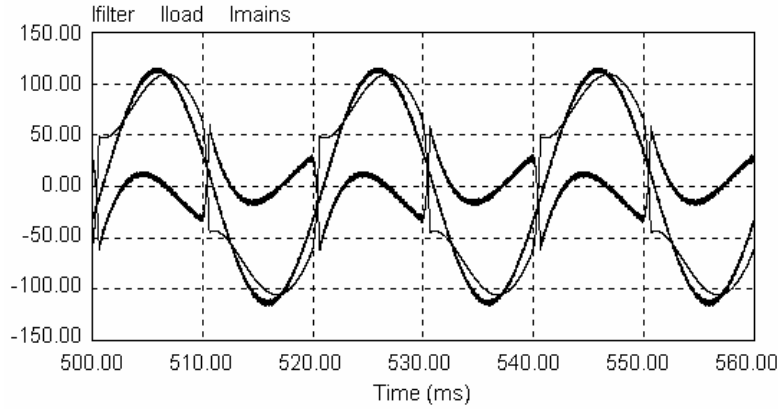
الشكل (20-a): يبين أشكال التيارات الناتجة من عملية التمثيل معاً بدءاً من $t=0$ sec.



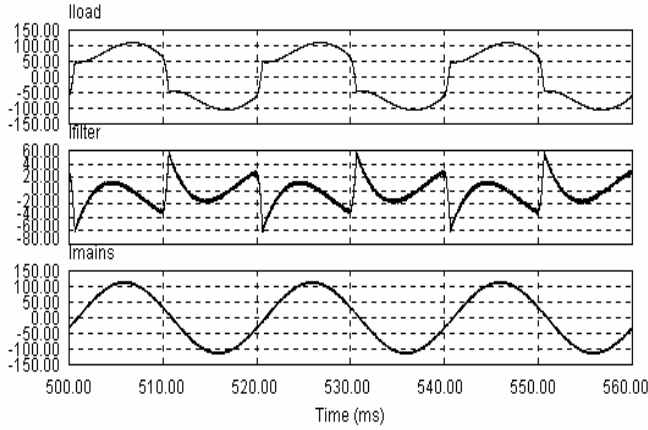
الشكل (20-b): يبين أشكال التيارات الناتجة من عملية التمثيل بدءاً من $t=0$ sec.

ويبين الشكل (21-a) تغيرات هذه التيارات بعد زمن وقدره $t = 0.5$ sec من التشغيل لتبيان استقرار عمل المرشح الفعال. إذ نلاحظ أن المرشح الفعال التفرعي مع دارات

التحكم والقيادة التي ضُبِّطَتْ، للحصول على شكل مثالي جيبي لتيار الشبكة خالٍ من أية توافقيات أو تشوهات.

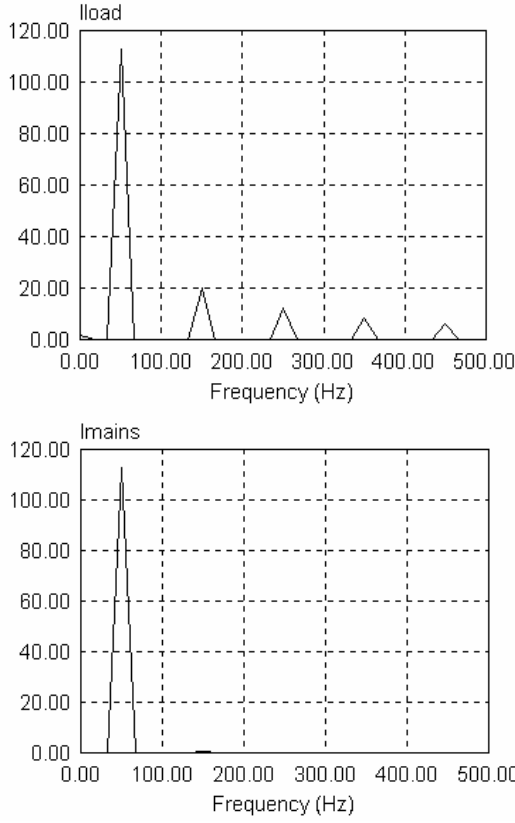


الشكل(21-a): يبين أشكال التيارات الناتجة من عملية التمثيل بدءاً من $t=0.5 \text{ sec}$.



الشكل(21-b): يبين أشكال التيارات الناتجة من عملية التمثيل بدءاً من $t=0.5 \text{ sec}$.

- يبين الشكل (22) التوافقيات الموجودة في موجة تيار الشبكة قبل إضافة المرشح وبعده، إذ نلاحظ انعدام التوافقيات في تيار الشبكة.



الشكل (22) يبين توافقيات تيار الحمل I_{load} وتيار الشبكة I_{mains} بعد الترشيح .

4: الخاتمة:

1. من خلال استخدام البرمجيات في تمثيل أنظمة القدرة الكهربائية (برنامج PSIM)، تم إيجاد النموذج التمثيلي للمرشح الفعال أحادي الطور الذي ساعد على إظهار نتائج عمل المرشحات الفعالة، وكيف أن تيار الشبكة الذي كان حاملاً للعديد من التوافقيات، أصبح قبل عقدة الربط للمرشح الفعال من جهة الشبكة متناوباً وجيبي الشكل.

2. استخدام البرمجيات يسمح لنا بمعرفة سلوك كل عنصر من مكونات نظام العمل، وذلك أنه يمكن قياس أية إشارة في الدارة ومعرفة قيمها وتغيراتها مع الزمن، وهذا يسمح لنا بالاختيار السليم لعناصر القدرة.
3. اختيار سعة المكثفات المستخدمة في المرشح التفرعي عملية أساسية في المرشحات الفعالة، كما أن اختيار قيمة التوتر المستمر المطبق على هذا المكثف له دور كبير في تحسين أداء المرشح التفرعي.
4. تبين القراءات العملية التي قمنا بقياسها على طرفي العناصر الترانزيستورية في مبدل ترددي، أن التوتر العابر الذي ينشأ في لحظات الوصل والفصل كبير نسبياً بالمقارنة مع التوتر الاسمي للدارة، وقد يصل إلى ثلاثة أمثال توتر المنبع أو أكثر.
5. عملياً واستناداً إلى نتائج عملية التمثيل السابقة التي سهلت علينا اختيار الثوابت (V_{dc}, C, L) ، نقوم حالياً بتنفيذ معرج جسري مُقاد بواسطة الحاسب في الزمن الحقيقي وذلك باستخدام نظام (Digital Signal Processor) نموذج (DS- 1104) لتحقيق مرشح فعال يعمل عند ترددات عمل مختلفة حسب نظام (P.W.M.)، والقيادة الشعاعية (Vector Control).

References

- [1] SAADATE, S., et ALALI, E. ; “A Propos des filtres passif et actif” ,Green UHP ,CNRS Upres-A 7037 , Nancy – 2002 .
- [2]Casadei , D. – Rcgiani, U. ; “ Active Power Filters Based On A Single Current Measurement System “ , Dept of Electrical Engineering , University of Bologna , Bologna – Italy .
- [3]Gene , S.G. ; “ Shunt Active Power Filters “ , Aliterature Review , SN# 20114802 IEEE , 2004 .
- [4]Ginn , H. , and Dr. Follett ,R. ;” Space Vector modulation Technique to reduce harmonics in Shipboard Power Supply “ , IEEE – Mississippi State Uni .
- [5]Vas, Peter, “ Vector Control of AC Machines “ , Clarendon press , 1994, Auxford .
- [6]Ashok. S, “ Effect of Power System Harmonics on Power System Equipment & Loads” , Dep. Of Electrical Eng. R.E.C. Calicut .
- [7]<http://www.powersimtech.com> : PSIM Ver. 6.0.

تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق 2005/12/5.