

حل مشكلة الانزياح الزاوي في حلقة التحكم بالمرشحات الفعالة التفرعية باستخدام التحكم الانزلاقي

الدكتور محمد علاء الدين العلي*

(تاريخ الإيداع 4 / 6 / 2012. قُبل للنشر في 20 / 5 / 2013)

▽ ملخص ▽

درس هذا البحث إمكانية الحد من تأثير ظاهرة الانزياح الزاوي، الناتجة عن استخدام التحكم الخطي بالمرشحات الفعالة التفرعية، وذلك باستخدام التحكم اللاخطي وتحديداً التحكم الانزلاقي. تظهر مشكلة الانزياح الزاوي - الحاصلة بين الإشارة المرجعية المراد ملاحظتها وإشارة الخرج المراد حقنها- بشكلٍ أوضح، عند زيادة مرتبة النظام المتحكم به، وكذلك عند احتواء الإشارة المرجعية على ترددات من مراتب مرتفعة. عند استخدام التحكم الخطي بالمرشحات الفعالة التفرعية، فإن تيار المرشح المحقون إلى الشبكة الكهربائية سيكون مزاحاً عن تياره المرجعي بزوايا تتزايد مع زيادة التردد التوافقي في الشبكة الكهربائية، وبالتالي الحد من فعالية المرشح في ترشيح التوافقيات في الشبكات الكهربائية.

في هذا البحث، تمت دراسة إمكانية استخدام متحكم لا خطي من النمط الانزلاقي *Sliding Mode Control* *SMC*، من أجل حل مشكلة الانزياح الزاوي من جهة، ومن أجل إظهار أثر مرتبة مرشح الخرج وقيم برامتراته على أداء المعوض الفعال التفرعي من جهةٍ أخرى. ضمن هذا الإطار وبهدف التعرف على أهمية استخدام هذا النوع من التحكم اللاخطي، تمت مقارنته مع حالة متحكمين خطيين، الأول تقليدي (*PI*) والآخر متقدم (*RST*). تم إجراء هذه المقارنة بدايةً من خلال دراسة نظرية في المجالين الزمني والتردد باستخدام برامج *Matlab, Simulink*، ومن ثم من خلال دراسة تطبيقية على شبكتين كهربائيتين، الأولى أنموذجية والأخرى حقيقية هي مطحنة تل بلاط. النمذجة والمحاكاة للشبكتين المدروستين بما فيهما المرشح الفعال التفرعي وطرق التحكم به، تمت باستخدام مجموعة برامج *Matlab, Simulink, Sim-Power Systems*.

الكلمات المفتاحية: المرشحات الفعالة التفرعية، التحكم الانزلاقي، الانزياح الزاوي.

* أستاذ مساعد - قسم هندسة نظم القدرة الكهربائية - كلية الهندسة الكهربائية والإلكترونية - جامعة حلب - حلب - سورية.

Résoudre le Problème du Déphasage Dans la Boucle de Régulation du Filtre Actif Shunt en Utilisant la Commande Non-Linéaire De La Mode Glissante

Mohamad Alaa Eddin Alali*

(Déposé le 4 / 6 / 2012 . Accepté 20 / 5 / 2013)

▽ Résumé ▽

Cet article étudie la possibilité de limiter le phénomène du déphasage, causé par la commande linéaire du filtre actif shunt, en utilisant la commande non linéaire, et spécialement la mode glissante appelée aussi sliding mode control (SMC). Ce problème du déphasage, qui a lieu entre l'entrée et la sortie de la boucle de régulation, s'accroît d'une part avec l'ordre du système d'origine et d'autre part si la référence à poursuivre contient des harmoniques de rangs élevés. Quand la commande linéaire est utilisée, le courant injecté par le filtre actif shunt est déphasé de sa référence, par des angles grandissants avec l'ordre des courants harmoniques du réseau électrique.

Dans l'objectif de résoudre ce problème de déphasage, cette recherche effectue une comparaison entre une commande linéaire classique (PI) et avancée (RST) d'une part, et une commande non linéaire par la mode de glissement d'autre part. Cette comparaison sera réalisée en utilisant deux réseaux électriques, l'un est typique et l'autre est réel, il s'agit du réseau industriel du moulin de Tal Blat à Alep en Syrie. La modélisation et la simulation des réseaux étudiés y compris le filtre actif shunt et ses commandes, seront effectués en employant les logiciels Matlab, Simulink, Sim-Power System.

Mots- clefs: filtres efficaces sibi-darité, commande de glissement, déplacement angulaire.

*Professeur agrégé: Département des systèmes électriques énergétique, Université d'Alep, Syrie.

مقدمة:

تنتج معظم مشاكل اضطرابات شبكات التوزيع الكهربائية عن مرور التيارات الاضطرابية من توافقيات وعدم توازن واستطاعة ردية. تعتبر مشكلة توافقيات التيار من أهم المشاكل التي تعاني منها هذه الشبكات، لذلك قدمت الدراسات المُجرأة في الأبحاث العلمية العديد من الحلول، التي يعتبر أهمها على الإطلاق هو استخدام المرشحات الفعالة التفرعية *Shunt Active Filters* [1]. استفادت هذه المرشحات من التطور التكنولوجي الهائل الحاصل في مجال إلكترونيات القدرة، مما أدى إلى انتشار استثمارها بشكلٍ واسعٍ وسريع في شبكات التوزيع الكهربائية، وخصوصاً الصناعية منها. بعد ثبات البنية العامة للمرشح الفعال التفرعي المستخدم للحد من التيارات التوافقية في الشبكات الكهربائية، بدأ الاهتمام ينصب على تحسين أدائه من خلال تطوير أنظمة التحكم الخاصة به، ومن خلال الحد من المركبات الناتجة عن تردد تقطيع قالبة المرشح، التي تمرر الإشارة إلى الشبكة الكهربائية. لقد أدى ذلك إلى طرح استخدام مرشحات خرج غير فعالة من المرتبة الثالثة، مع متحكمات خطية متطورة من نفس المرتبة (*RST, H₂, H_∞...etc*) [1]. لقد أسهم هذا الاستخدام المتميز لعلم التحكم في تطوير أداء المرشحات الفعالة، لكنه بنفس الوقت سلط الضوء على مشكلة غاية بالأهمية، تتمثل بالانزياح الزاوي الحاصل بين إشارتي الدخل والخرج لحلقة التحكم بالمرشح الفعال [1]. يزداد مقدار الانزياح (في حالة التحكم الخطي) من جهة مع زيادة مرتبة النظام المتحكم به، ومن جهة أخرى مع زيادة مرتبة التوافقيات الموجودة في الإشارة المرجعية المراد ملاحظتها. يؤدي الانزياح الزاوي في حالة المرشحات الفعالة التفرعية إلى حقن تيار إلى الشبكة الكهربائية، لا يؤدي إلى إفناء تيارات الشبكة التوافقية، بل إنه أحياناً يفاقمها. للتغلب على هذه المشكلة، تم اللجوء إلى التحكم اللاخطي، الذي غالباً ما يلاحق الإشارة المرجعية وفق مجال *Band* بعرض معين، يكون هذا المجال كبيراً نسبياً في حالة عروة البطء *Hysteresis* [2]، فيما يكون أصغر في حالة التحكم الانزلاقي *Sliding Mode Control SMC* [3]. مشكلة التحكم باستخدام عروة البطء هو عدم ثبات تردد تقطيع قالبة المرشح الفعال، بالإضافة لعرض حزمة البطء (الخطأ) المرتفعة نسبياً.

أهمية البحث وأهدافه:

تأتي أهمية البحث من خلال دراسة أثر استخدام التحكم اللاخطي الانزلاقي بالمرشحات الفعالة التفرعية، وذلك من وجهة نظر الانزياح الزاوي، مدخلين أثر تغيير مرتبة مرشح الخرج غير الفعال وقيمة برامتراته على كل من جودة تعويض وديناميكية (سرعة أداء) المرشح الفعال التفرعي.

طرائق البحث ومواده:

تتلخص أهداف البحث الرئيسية ومنهجيته بتسلسل النقاط التالية:

- ◆ تقديم مشكلة الانزياح الزاوي وتأثيرها على التحكم بالمرشحات الفعالة التفرعية من خلال نمذجة رياضية باستخدام *Simulink*.
- ◆ عرض سريع لاستخدام متحكمات خطية تقليدية (*P*) وحديثة (*RST*) في التحكم بالمرشحات الفعالة التفرعية، وربط أدائها بمشكلة الانزياح الزاوي وبكل من مرتبة وقيم برامترات مرشح الخرج.
- ◆ دراسة أثر استخدام التحكم اللاخطي وتحديد التحكم الانزلاقي في التحكم بالمرشحات الفعالة التفرعية، وحل مشكلة الانزياح الزاوي.

♦ مقارنة نتائج التحكم اللاخطي مع حالة التحكم الخطي، من خلال إجراء دراسة نظرية في المجالين الزمني والتردد باستخدام برامج *Matlab, Simulink*.

♦ استخدام برامج *Matlab, Simulink, Sim-Power System* في نمذجة ومحاكاة حالة شبكتين كهربائيتين، الأولى أنموذجية والثانية واقعية حاوية على اضطرابات التيار وخصوصاً التوافقيات، وتطبيق أشكال التحكم المختلفة على هذه الشبكة، بهدف تأكيد صحة النتائج النظرية والحسابية في هذا البحث.

. استخدام التحكم الخطي بالمرشحات الفعالة التفرعية وتقديم مشكلة الانزياح الزاوي

أ. البنية العامة للمرشح الفعال التفرعي

من أجل تبسيط بنية المرشح الفعال التفرعي، نعرض عبر الشكل (1) للمخطط الصندوقي الممثل للبنية العامة للمرشح الفعال التفرعي، والذي يتشكل بدوره من جزئين رئيسيين، يردان عادةً في المراجع تحت اسم دائرة القدرة *Power Circuit* ودائرة القيادة والتحكم *Command and Control Circuit*. تتألف دائرة القدرة من:

▪ قالب ذات منبع جهد *Voltage Source Converter: VSI*، مكونة من قواطع قدرة، قابلة للقيادة في حالتها الفتح والإغلاق مثل (*GTO, IGBT...etc*)، مع ديويدات موصولة على التفرع *Anti-parallel Diodes*،
 ▪ دائرة تخزين الطاقة الكهربائية، والتي غالباً ما تكون ذات طبيعة سعوية (ومن هنا كانت تسمية القالب ذات منبع الجهد، ولو كانت تحريضية لأصبحت ذات منبع تيار)،

▪ مرشح خرج *Output Filter*، يمتلك تسميات مختلفة أخرى مثل مرشح التغذية *Supply Filter*، مرشح أو ملف الإبدال *Commutation Inductor*، وأخيراً مرشح أو ملف الربط *Coupling Inductor*.
 أما بالنسبة لدائرة القيادة والتحكم، تتألف من:

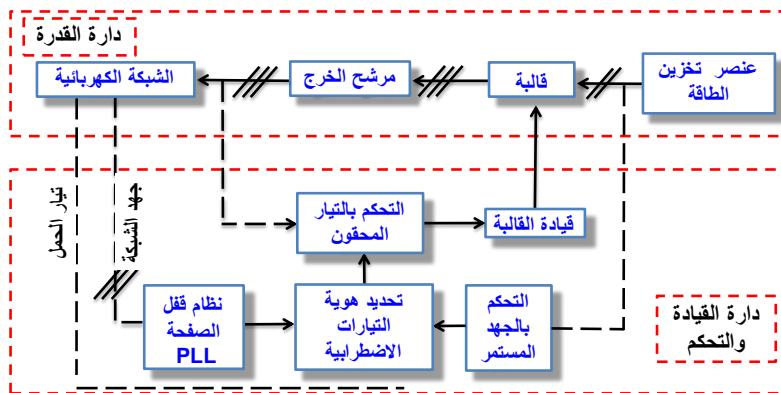
▪ طريقة تحديد هوية التيارات الاضطرابية *Disturbance Currents Identification Method*،

▪ التحكم بالجهد المستمر المطبق على عنصر تخزين الطاقة،

▪ ضبط تيار القالب المحقون إلى الشبكة الكهربائية،

▪ قيادة القالب ذات منبع الجهد أو بطاقة التحكم بالقالبية *VSC Command*.

يتمثل الجزء الأهم في دائرة القيادة والتحكم بحلقة التحكم بالتيار المحقون من المرشح الفعال التفرعي إلى الشبكة الكهربائية، التي تمثل المحور الأساسي للبحث الحالي.



شكل (1) المخطط الصندوقي الكهروميكانيكي الممثل للبنية العامة للمرشح الفعال التفرعي

ب . حلقة التحكم بالتيار المحقون

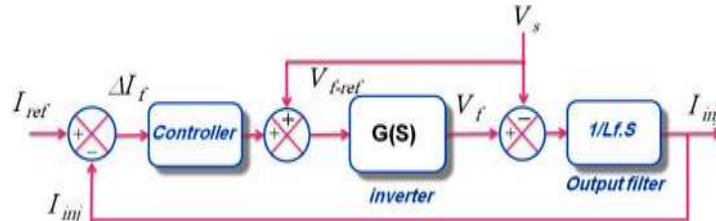
يُعبّر الشكل (2) عن حلقة التحكم بالتيار المحقون I_{inj} من المرشح الفعال إلى الشبكة الكهربائية، مع V_{f-ref} الجهد المرجعي الذي يجب على القالبية توليده من أجل تحقق التساوي بين التيار المرجعي I_{ref} (التيار التوافقي المار في الشبكة الكهربائية والمكتشف في دائرة القيادة والتحكم) المطلوب ملاحظته والتيار المحقون، حيث نكتب:

$$\bar{V}_{f-ref} = \bar{V}_s + \frac{d}{dt} \bar{I}_{ref} \quad (1)$$

بحسب العلاقة الأخيرة، يتشكل الجهد المرجعي \bar{V}_{f-ref} من حدين على ترددين مختلفين. يُمثل الحد الأول جهد الشبكة الكهربائية V_s والذي يمكن قياسه مباشرةً، بينما يُمثل الحد الثاني-الذي يجب الحصول عليه بواسطة المتحكم- هبوط الجهد على مرابط المحارضة L_f (الممثلة لمرشح الخرج من المرتبة الأولى)، وذلك عندما يجتازها التيار المرجعي. في هذا المخطط الصندوقي، يعبر $G(s)$ عن تابع النقل المُمثل للقالبية، والذي يمكن نمذجته كما يلي:

$$\begin{cases} G(s) = K \\ K = \frac{V_{dc}}{2V_p} \end{cases} \quad (2)$$

مع V_{dc} الجهد في الطرف المستمر للقالبية، V_p مطال الإشارة الحاملة المثلية *Saw-Tooth Carrier Signal* المستعملة في قيادة القالبية باستخدام تقنية تعديل عرض النبضة *Pulse Width Modulator: PWM*. يمكن عدّ الريح K يساوي الواحد في الحالة التي يكون فيها $V_{dc}=2V_p$.



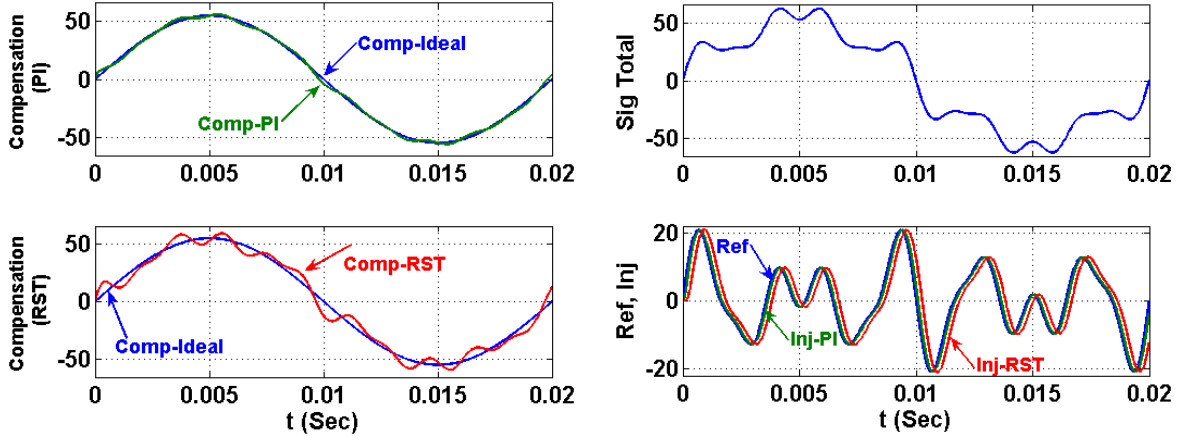
شكل (2) المخطط الصندوقي للتحكم بتيارات المرشح الفعال التفرعي

ج . مفهوم الانزياح الزاوي

إن السيئة الرئيسية التي تعاني منها كل طرق التحكم الخطي (H_{∞} , H_2 , RST , PID , PI ...) هي إدخال انزياح زاوي *Phase Shifting* بين دخل حلقة التحكم بالتيار المحقون (التيار المرجعي) I_{ref} وخرجها I_{inj} . يمنع هذا الانزياح الذي يزداد مع زيادة كل من مرتبة النظام المتحكم به ومرتبة التوافقيات المراد ملاحظتها، من تطبيق طرق التحكم هذه على حالة المرشح الفعال التفرعي، الذي يمكن أن يحتوي التيار المرجعي فيه على ترددات توافقية من جميع المراتب. من أجل فهم أعمق لهذه المشكلة، سنأخذ مثلاً على ذلك نمذجة باستخدام *Simulink* لحلقة التحكم السابقة نفسها الشكل (2)، مع استخدام متحكمين خطيين أحدهما تقليدي من نوع PI (مع مرشح خرج من المرتبة الأولى) والآخر حديث من نوع RST (مع مرشح خرج من المرتبة الثالثة). يعرض المنحني العلوي من الشكل (3) لإشارة اضطرابية *Sig Total*، تحتوي على المركبة الأساسية 50 Hz ، بالإضافة لتوافقيات من المراتب ($5, 7, 11$). يعرض المنحني السفلي من نفس الشكل للإشارة المرجعية Ref الممثلة للتوافقيات المكتشفة، منضدة فوق الإشارتين المحقونتين في خرج حلقة التحكم $Inj-PI$ في حالة المتحكم من نوع PI و $Inj-RST$ في حالة المتحكم من نوع RST . نلاحظ من خلال هذا الشكل الأخير

تطابق الإشارات الثلاثة في المطال، لكن مع انزياح الإشارتين المحقونتين عن الإشارة المرجعية بازياحين زاويين مختلفين، يتعاضم بزيادة مرتبة تابع نقل حلقة التحكم (حالة المتحكم من نوع RST).

أخيراً، ينعكس هذا الانزياح الزاوي على جودة التعويض، حيث يتبين من خلال الشكل (4) العلوي اقتراب الإشارة المرشحة بعد الحقن ($Comp-PI$) لحالة المتحكم من نوع PI من الشكل الجيبي المثالي $Comp-Ideal$ رغم عدم التطابق معه، فيما تبتعد الإشارة المرشحة بعد الحقن ($Comp-RST$) لحالة المتحكم من نوع RST عن الشكل الجيبي المثالي كما هو موضح في الشكل (4) السفلي.



شكل (4) تأثير الانزياح الزاوي على جودة الترشيح

شكل (3) مبدأ ظاهرة الانزياح الزاوي في المتحكمات الخطية

من الجدير التنويه هنا إلى أن الشكل الجيبي المثالي ينتج عن حقن الإشارة المرجعية Ref كما هي دون أي انزياح زاوي. يتضح من خلال هذا المثال مدى خطورة مشكلة ظاهرة الانزياح الزاوي، وإلى أي حد يمكنها الإضرار بجودة الترشيح لدى المرشح الفعال التفرعي.

عرض مفهوم التحكم اللاخطي بالمرشحات الفعالة التفرعية وحل مشكلة الانزياح الزاوي

على اعتبار أن مبدأ التحكم الخطي يعتمد على ملاحقة مطال الإشارة المرجعية فقط، مع حقنها بانزياح زاوي، يزداد مع زيادة كل من تردد الإشارة المرجعية ومرتبة النظام في الحلقة المغلقة، فإنه تم في هذا البحث اقتراح استخدام مبدأ التحكم اللاخطي وتحديدًا التحكم الانزلاقي من أجل الحد من مشكلة الانزياح الزاوي. غالباً ما يلاحق التحكم اللاخطي الإشارة المرجعية وفق مجال $Band$ بعرض معين، يُمثل الفرق بين دخل وخرج حلقة التحكم (إشارة الخطأ)، وبالتالي يتجاوز مشكلة الانزياح الزاوي المترافقة مع تطبيق التحكم الخطي.

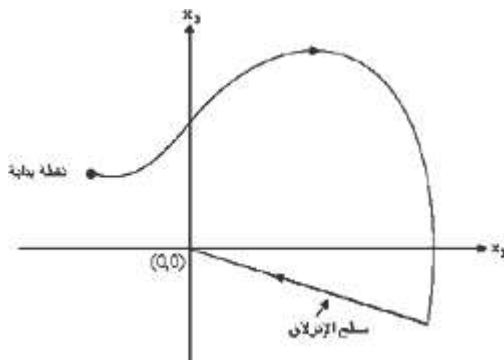
أ. التحكم (النمط) الانزلاقي

النمط $Mode$ أو التحكم الانزلاقي، هو عبارة عن نظام عمل خاص بالأنظمة ذات البنية المتغيرة. تم في البداية دراسة هذا النوع من الأنظمة في الاتحاد السوفياتي السابق من قبل علماء رياضيات وتحكم مثل $Filipov$ و $Emelyanov$ و $Utkin$ [4]، وذلك ابتداءً من مثال لنظام من المرتبة الثانية موصوف باستخدام معادلات تفاضلية. ويتحكم في المجال المنقطع. بعد ذلك أجريت العديد من الأبحاث في مناطق مختلفة من العالم، بهدف تكملة دراسة هذه النظرية أو لدراسة إمكانية استخدامها في تطبيقات عملية مختلفة. بقي استخدام هذه النظرية محدوداً مدة طويلة، بسبب الاهتزازات (التذبذبات) $Chattering$ الناتجة عن ظاهرة الانزلاق. في الواقع، كان تردد التقطيع (الإبدال) $Switching Frequency$ للعناصر الإلكترونية في ذلك الوقت

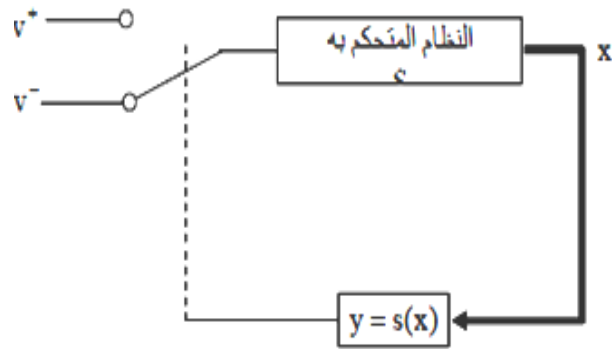
محدوداً. يمكن توضيح الفكرة الأساسية لنظرية الأنظمة ذات البنية المتغيرة، من خلال التركيبة الموضحة في الشكل (5). ليكن لدينا النظام S المراد التحكم به، يملك هذا النظام دخلاً v (مقدار التحكم)، وخرجاً y (متحول الحالة أو المقدار المتحكم به). تسمح هذه التركيبة بتغيير بنية النظام، وذلك بتبديل حالة القواطع الإلكترونية كما هو الحال في المبدلات الستاتيكية *Static Converter*. يعطى قانون التحكم في هذه الحالة على الشكل التالي، مع $s(x)$ تابع الانزلاق أو سطح الانزلاق:

$$v = \begin{cases} v^+ & \text{si } s(x, t) > 0 \\ v^- & \text{si } s(x, t) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

عند الوصول إلى مرحلة النمط الانزلاقي، يكون مسار خرج النظام على سطح الانزلاق، حيث ترتبط عندها متحولات الحالة للنظام المتحكم به فيما بينها عن طريق العلاقة $s(x, t) = 0$. عندئذ، يكون مسار الحالة للنظام، الخاضع لقانون التحكم السابق، معرّفًا في كل منطقة، عدا $s(x, t) = 0$. خلال النمط الانزلاقي، يكون دخل المنظم $sign(s)$ المسؤول عن تشكيل التحكم المنقطع v مساوياً للصفر ($s=0$)، بينما يأخذ خرج المنظم قيمة محددة. بالتالي، يؤمن عنصر التحكم ربحاً كبيراً، مما يؤدي إلى القضاء على الاضطرابات الخارجية والداخلية المؤثرة على النظام.



شكل (6) مسار متحولات الحالة بعد تطبيق خوارزمية النمط الانزلاقي من أجل نقطة بداية محددة



شكل (5) بناء النظام ذي البنية المتغيرة بتبديل وضعية القواطع وفقاً لإشارة تابع التبديل

من أجل تخيل مفهوم تابع أو سطح الانزلاق، نعرض للشكل 6 الذي يبين أنه من أجل نقطة بداية محددة، فإنه سيتم توجيه مخطط الحالة للنظام وفق مسار معين إلى سطح الانزلاق، ومن ثم إلى نقطة التوازن.

ب . التحكم المكافئ

إن فكرة التحكم المكافئ، عبارة عن طريقة ديناميكية لوصف النظام على سطح الانزلاق. تتكون المرحلة الأولى لهذه الطريقة من إيجاد شعاع الدخل المكافئ V_{eq} ، الذي يضمن بقاء مسار الحالة للنظام المتحكم به على سطح الانزلاق المَعْرِف. لحساب شعاع الدخل المكافئ (التحكم المكافئ) يجب الأخذ بالحسبان الشروط التالية:

$$\begin{aligned} s(x, t) &= 0 \\ \dot{s}(x, t) &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

إن الشرطين السابقين ضروريان للحفاظ على مسار الحالة للنظام على سطح الانزلاق. يمكن تفسير التحكم المكافئ فيزيائياً بوصفه تابعاً مستمراً يمثل القيمة الوسطية الناتجة عن تبديل قيمة الدخل v بين v^+ و v^- .

ج . شروط الجذب

يسمى الشرط الأساسي والضروري الواجب تحقيقه ليتمكن متحول الحالة المتحكم به من الاتجاه والوصول إلى سطح الانزلاق، بشرط الوصول أو شرط الجذب. تحت هذا الشرط، يدعى مسار متحول الحالة للنظام بنمط الانجذاب. تعطي شروط الانجذاب المستخدمة غالباً كما يلي، مع m عدد مداخل النظام:

$$\begin{aligned} \dot{s}_i < 0 \quad \text{si} \quad s_i > 0 \\ \dot{s}_i > 0 \quad \text{si} \quad s_i < 0 \end{aligned} \quad i=1, \dots, m \quad (5)$$

من أجل التحكم بديناميكية مسار متحول الحالة خلال نمط الانجذاب، من لحظة انطلاق مسار متحول الحالة من النقطة البدائية وحتى بداية النمط الانزلاقي، فإنه من الضروري اللجوء إلى قانون الجذب (أي الحصول على التحكم V_{att} الذي يحقق شرط الإنجذاب)، حيث تعطي بنيات متعددة لقانون الجذب، نذكر منها:

• الجذب بسرعة ثابتة

$$\dot{s}_i = -q_i \operatorname{sgn}(s_i) \quad (6)$$

يجبر هذا القانون مسار متحول الحالة على الوصول إلى سطح الانزلاق بسرعة ثابتة:

$$\left| \dot{s}_i \right| = -q_i \quad (7)$$

يجب اختيار قيمة q_i بحيث تحقق زمنًا قصيرًا نسبيًا للوصول إلى سطح الانزلاق، وعدم حصول اهتزازات كبيرة حول النقطة المرجعية.

• الجذب بسرعة ثابتة وبسرعة تناسبية

$$\dot{s}_i = -q_i \operatorname{sgn}(s_i) - k_i s_i \quad (8)$$

إن إضافة الحد $(k_i s_i)$ يجبر مسار متحول الحالة من الاقتراب من سطح الانزلاق بسرعة أكبر، عندما تكون قيمة s_i كبيرة. كلما كانت قيمة k_i كبيرة، كلما كان زمن البقاء في نمط الانجذاب قصيرًا، بينما نجد أن اختيار قيمة صغيرة لـ q_i يُخفض من الاهتزازات حول النقطة المرجعية.

ع . التحكم الانزلاقي بالمرشحات الفعالة التفرعية

من خلال الشكل (2) السابق، نختار تابع أو سطح الانزلاق هو الفرق بين التيار المرجعي والتيار المحقون $(s = I_{ref} - I_{inj})$. نشق تابع الانزلاق فنحصل على:

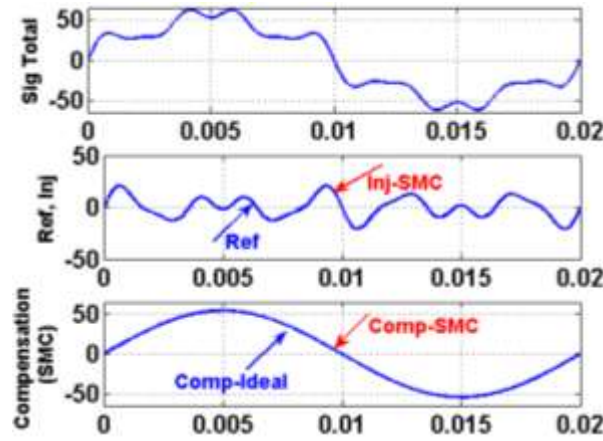
$$\dot{s} = \frac{dI_{inj}}{dt} \quad (9)$$

نحصل على التحكم المكافئ V_{eq} عندما يتحقق أن $(\dot{s} = 0)$ ، أما قانون الجذب (أي الحصول على التحكم V_{att})، فإنه يحقق علاقة الانجذاب بسرعة ثابتة وبسرعة تناسبية، ومنه نكتب مستعنيين بالشكل (2) والمعادلات المرافقة:

$$\dot{s} = -q \operatorname{sgn}(s) - k s = \frac{V_f - V_s}{L} \quad (10)$$

نستنتج أخيراً من خلال هذه العلاقة قيم جهد خرج القالبة المطلوب توليده، من أجل حقن تيار المرشح الفعال المساوي إلى التيار المرجعي المطلوب ملاحقته:

$$V_f = L (q \operatorname{sgn}(s) + k s)$$



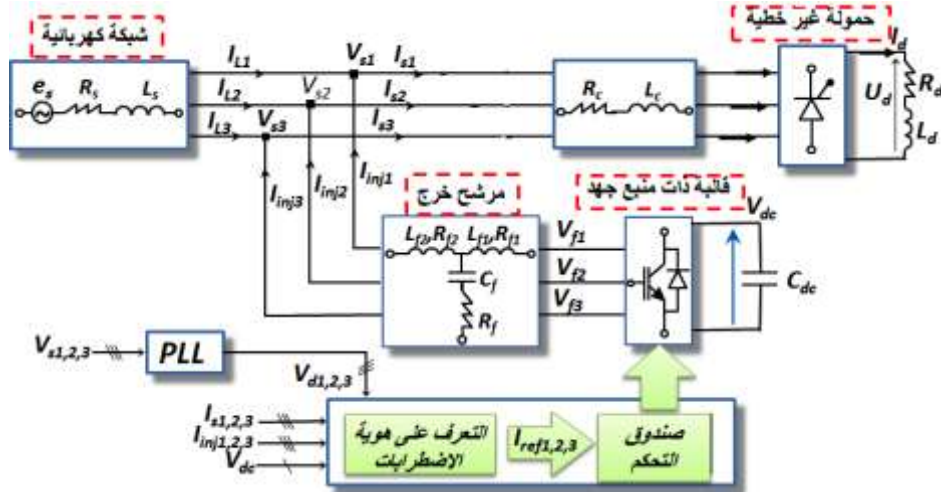
شكل (7) فعالية نمط التحكم الانزلاقي في الحد من مشكلة الانزياح الزاوي

الآن ويهدف تبيان تأثير تطبيق نظرية التحكم (النمط) الانزلاقي اللاخطية على مشكلة الانزياح الزاوي، الناتجة عن التحكم الخطي بالمرشحات الفعالة التفرعية، سنأخذ نفس المثال السابق والمتمثل بحالة التحكم بمرشح خرج من المرتبة الأولى، لكن في هذه المرة باستخدام مبدأ التحكم الانزلاقي. يمثل المنحني العلوي من الشكل (7) الإشارة الاضطرابية *Sig Total* السابقة نفسها، فيما يعرض المنحني الأوسط للإشارة المرجعية *Ref* الممثلة للتوافقيات المكتشفة، منضدة فوق الإشارة المحقونة في خرج حلقة التحكم *Inj-SMC* الناتجة عن استخدام المتحكم الانزلاقي، ويعرض الشكل (7) السفلي تنضد الإشارة المرشحة بعد الحقن لحالة المتحكم الانزلاقي (*Comp-SMC*) فوق الإشارة المرشحة المثالية *Comp-Ideal*. نلاحظ من خلال الشكل الأوسط التطابق التام (ودون أي انزياح زاوي) بين الإشارة المحقونة مع الإشارة المرجعية، مما انعكس تطابقاً كاملاً للإشارة المرشحة مع الشكل الجيبي للإشارة المرشحة المثالية. يدل هذا المثال البسيط على فعالية هذا النوع من التحكم اللاخطي في معالجة مشكلة الانزياح الزاوي، مما انعكس إيجابياً على جودة ترشيح المرشحات الفعالة التفرعية، علماً أنه سيتم لاحقاً في هذا البحث إعادة تطبيق هذا النوع من التحكم على شبكتين كهربائيتين إحداهما واقعية.

النتائج والمناقشة:

أ . تطبيقات التحكم اللاخطي في الشبكات الكهربائية (مقارنة مع التحكم الخطي)

ضمن هذا السياق، سيتم عرض تطبيقين لشبكتين كهربائيتين الأولى أنموذجية والثانية واقعية. من خلال التطبيق الأول، سيتم التركيز على آلية حساب برامترات المتحكمات، ودراسة أدائها في المجالين الزمني والترددية، فيما سيتم التركيز في المثال الثاني على الشبكة الواقعية وأداء المتحكم الانزلاقي فقط، في ظل عمل أقرب إلى الأداء الحقيقي للمرشحات الفعالة التفرعية.



شكل (8) البنية العامة للشبكة المدروسة

جدول (1) قيم العناصر المكونة للبنية المدروسة

الشبكة الكهربائية	
400kVA, 230 V, $u_{cc}=4\%$	
(R_s, L_s)	(1.269 mΩ, 46.49 μH)
الحمولة الاضطرابية	
(R_c, L_c) (100 KVA, $u_{cc}=4\%$)	(14.6 mΩ, 155.6 μH)
المعوض الفعال التفرعي	
V_{dc}	(840 V)
C_{dc}	(4,4 mF)
(L_{f1}, L_{f2})	(100 μH, 100 μH)
(R_{f1}, R_{f2})	(5 mΩ, 5 mΩ)
(C_f, R_f)	(200 μF, 16 mΩ)
Switching Frequency	16 kHz

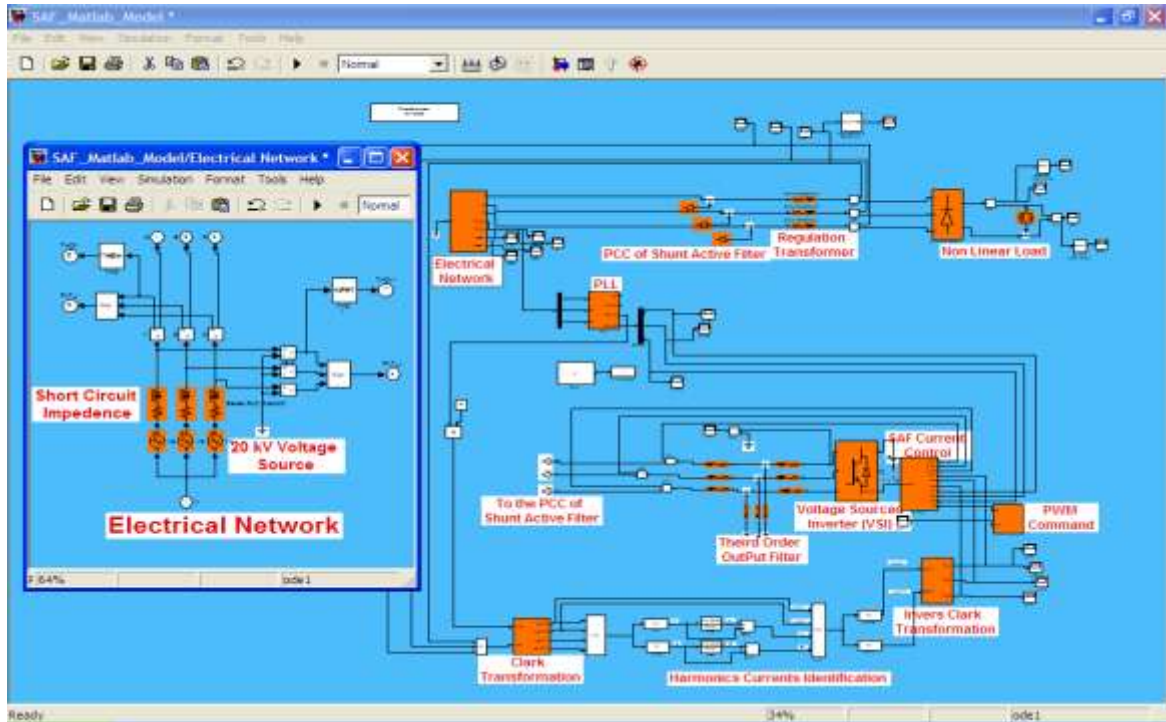
1. دراسة شبكة كهربائية أنموذجية

يمثل الشكل (8) والجدول (1) البنية العامة وقيم العناصر المكونة للشبكة المدروسة. تتكون البنية المدروسة

من:

- شبكة كهربائية ثلاثية الطور ثلاثية الأسلاك ممثلةً بوساطة المقادير (e_s, R_s, L_s) .
- جسر تقويم ثلاثي الطور ديودي، يغذي حمولة (R_c-L_c) ، لتمثيل حمولة غير خطية مسببة للتيارات التوافقية.
- محولة تنظيم (R_c-L_c) موصولة إلى مدخل الحمولة غير الخطية.

• مرشح فعال تفرعي يتكون من قالبة ذات منبع جهد. عنصر تخزين الطاقة هو عبارة عن مكثفة ذات سعة C_{dc} وذات جهد مستمر V_{dc} . مرشح الخرج المستخدم هو مرشح غير فعال من المرتبة الأولى (R_f, L_f) أو من المرتبة الثالثة (من نوع T) ممثل بوساطة ($R_{f1}, L_{f1}, R_{f2}, L_{f2}, R_{f3}, L_{f3}$).
أخيراً، ستسمح لنا حالات المحاكاة المجراة على النماذج المشكلة ضمن بيئة برامج *Matlab, Simulink, Sim* *Power System* (والمعروضة عبر الشكل (9)) بتقييم دقة وسرعة أداء بنية المعوض الفعال التفرعي، وذلك في حالات التحكم الخطي واللاخطي المقترحة في هذا البحث.

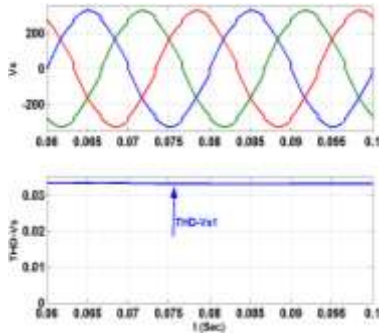


شكل(9) البنية العامة للشبكة المدروسة بما فيها المرشح الفعال منمذجة في بيئة *M, S, SimPower Systems*

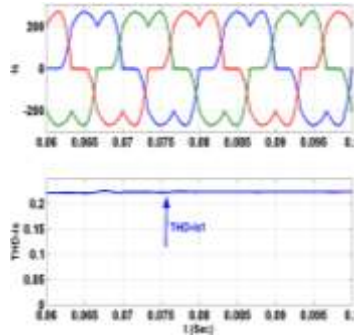
2. عرض لتطبيق التحكم الخطي

. الشبكة الكهربائية بدون مرشح

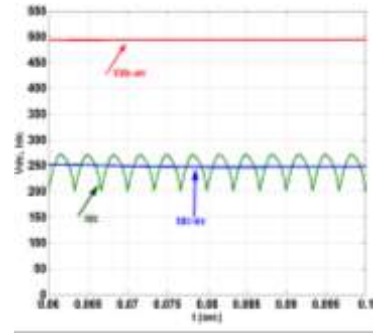
في البداية، سنعرض نتائج المحاكاة للشبكة الكهربائية الموصوفة في الجدول (1)، وذلك قبل وصل المرشح الفعال. يتبين من خلال الأشكال (9,10,11) أن استطاعة الحمل هي $P_{dc}=I_d*V_d=123 \text{ kW}$ ، وأن كلاً من تيار وجهد الحمل في الطرف المتناوب مشوهان بالتوافقيات بنسبة تشوه كلية للتيار مقدارها 23.24% وللجهد مقدارها 3.3%. من جهة أخرى ومن خلال الشكلين (12,13)، نجد أن المحتوى التوافقي لتيارات الطور R هي ($I_r(5)=56 \text{ A}, I_r(7)=20 \text{ A}$)، وللجهود هي ($V_r(5)=8.1 \text{ V}, V_r(7)=4.1 \text{ V}$)، وللجهود هي ($I_r(11)=7.8 \text{ A}, I_r(13)=6.45 \text{ A}, I_r(17)=3.6 \text{ A}, I_r(19)=2.6 \text{ A}$).
($V_r(11)=2.5 \text{ V}, V_r(13)=2.4 \text{ V}, V_r(17)=1.8 \text{ V}, V_r(19)=1.5 \text{ V}$).



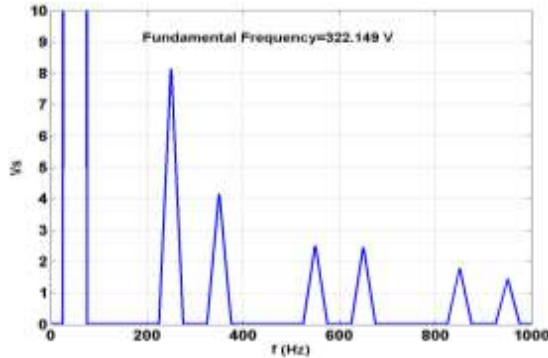
شكل (11) جهد الشبكة ونسبة التشوه الكلي للجهد



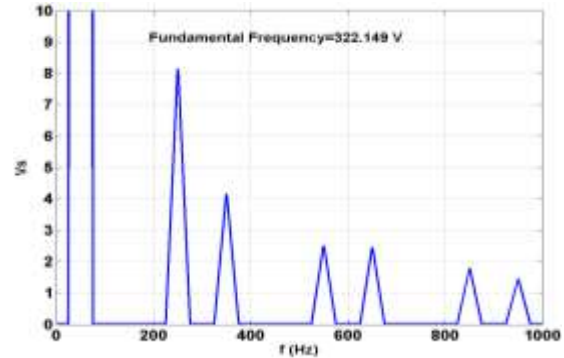
شكل (10) تيار الحمل ونسبة التشوه الكلي للتيار



شكل (9) تيار وجهد الحمل في الطرف المستمر



شكل (13) الطيف التوافقي لجهد الطور R



شكل (12) الطيف التوافقي لتيار الطور R

مرشح خرج من المرتبة الأولى

تم ضمن هذا السياق، تم عرض حالتين لمرشح الخرج، الأولى تناول حالة مرشح خرج ذي محارضة صغيرة (200 μH) بهدف الحفاظ على ديناميكية (سرعة أداء) المرشح الفعال، فيما تحقق الحالة الثانية هدف منع المركبات الناتجة عن تردد تقطيع القالب من المرور إلى الشبكة الكهربائية، وذلك من خلال محارضة بقيمة (2 mH).

• حالة مرشح خرج ذي محارضة صغيرة

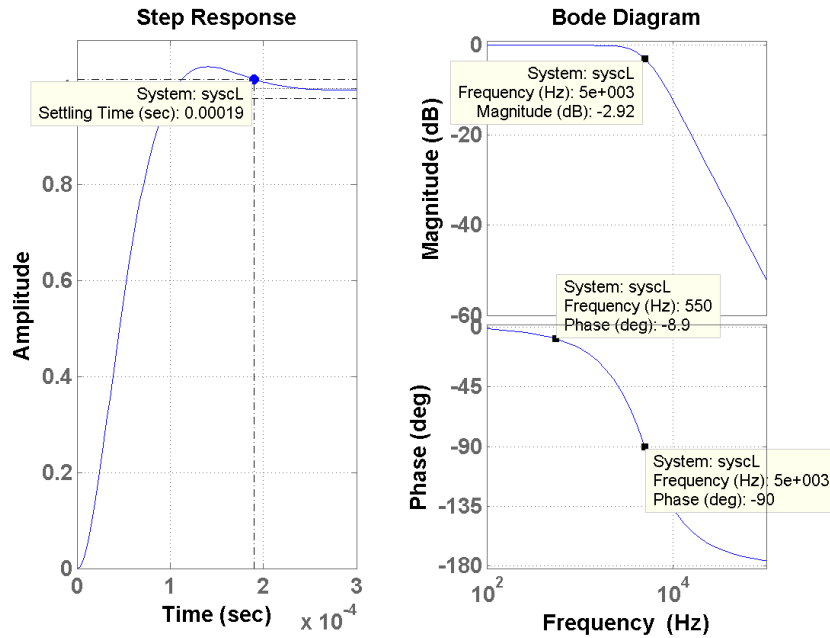
من الشكل (2)، وباعتبار أن النظام المتحكم به يمثل مرشح الخرج من المرتبة الأولى (L_f, R_f) على التسلسل مع ممانعة الشبكة الكهربائية (L_s, R_s)، يمكن أن نكتب العلاقة بين التيار المحقون I_{inj} والتيار المرجعي I_{ref} كما يلي:

$$\frac{I_{inj}}{I_{ref}} = \frac{\left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \left(\frac{1}{(L_s + L_f)s + (R_s + R_f)} \right)}{1 + \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \left(\frac{1}{(L_s + L_f)s + (R_s + R_f)} \right)} \quad (11)$$

مع $\left(K_p + \frac{K_i}{s} \right)$ المتحكم التناسبي التكاملية PI.

يجب أن يحقق تابع التحكم في الحلقة المغلقة *Closed Loop* ميزتين أساسيتين هما: سرعة الاستجابة بالنسبة للزمن، وتردد القطع *Cut-Off Frequency* للنظام في الحلقة المغلقة، الذي يمثل عرض حزمة الترددات التي يجب أن تمررها حلقة التحكم المغلقة، لكي يقوم المرشح الفعال بتعويضها. بما أن معالجة التوافقيات تتم حتى التوافقية ذات المرتبة 50، فإن تردد القطع يجب أن لا يقل عن 2500 Hz، كما يجب أن لا يقترب تردد القطع كثيراً من تردد تقطيع القالب

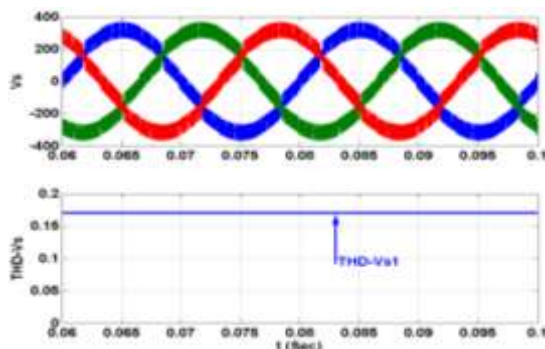
Switching Frequency، وذلك من أجل التمكن من الإبقاء على تمثيل القابلة بوساطة ربح بسيط K . في هذه الحالة، تم اختيار تردد قطع بقيمة 5000 Hz . ويزمن صعود للنظام قدره $19 \mu\text{.sec}$ ، كما هو مبين في الشكل (14).



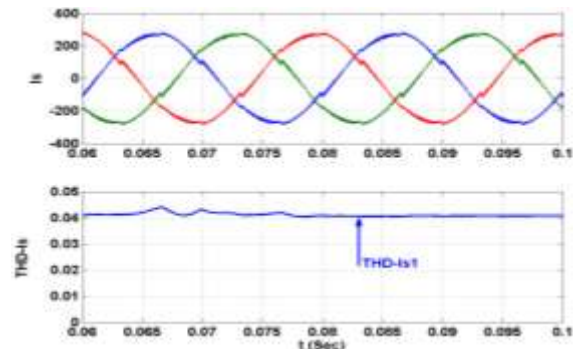
الشكل (14) الاستجابة لتتابع الخطوة ومخطط بود للنظام المدروس في الحلقة المغلقة

انطلاقاً من اختيار كل من سرعة الاستجابة وتردد قطع الحلقة المغلقة، يتم حساب برامترات المتحكم التكاملي التناسبي K_p و K_I . نلاحظ من خلال الشكل تطابق خيارات تردد القطع وزمن الصعود مع النتائج، كما نلاحظ مقدار الانزياح الزاوي الناتج عن هذا النوع من التحكم، حيث نجد أن هذا الانزياح يصل إلى 8.9° من أجل التوافقية الحادية عشرة (550 Hz).

نقوم الآن بدراسة أثر وصل المرشح الفعال إلى الشبكة الكهربائية من خلال الأشكال (15,16,17). نلاحظ عبر هذه الأشكال اقتراب موجتي التيار والجهد إلى الشكل الجيبي، وانخفاض نسبة التشوه التوافقي الكلي للتيار إلى 4.05% ، مع تأكيد هذه النتيجة من خلال انخفاض المحتوى التوافقي لتيارات الطور R إلى ($I_r(5)=7 \text{ A}$, $I_r(7)=3.3$) إلى ($I_r(11)=2.4 \text{ A}$; $I_r(13)=2.2 \text{ A}$, $I_r(17)=1.5 \text{ A}$, $I_r(19)=1.25 \text{ A}$).

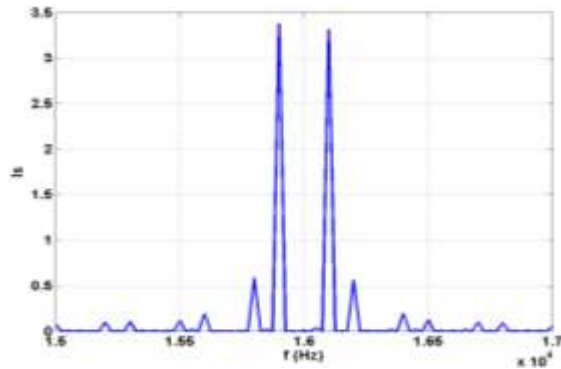


شكل (16) جهد الحمل ونسبة التشوه الكلي للجهد

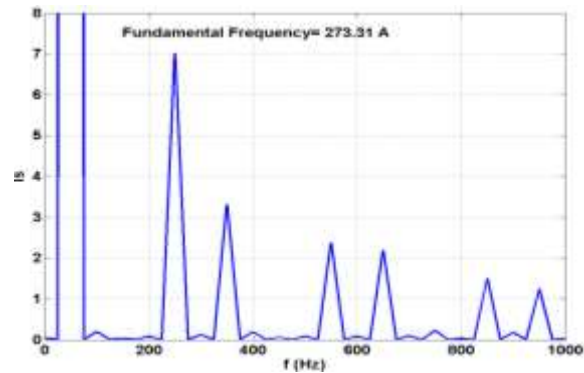


شكل (15) تيار الشبكة ونسبة التشوه الكلي للتيار

المشكلة تكمن هنا في ارتفاع نسبة التشوه التوافقي الكلي للجهد إلى 16.99% . يمكن تفسير ذلك من خلال عرض الشكل (18) الذي يبين أن أكبر مركبتي تيار ناتجتين عن تردد تقطيع القالب، والمحقونة إلى الشبكة الكهربائية هي $(Ir(318) \approx Ir(322) = 3.3 A)$ ، بالإضافة إلى مركبات أخرى ذات مطال أصغر. يؤدي عبور هاتين المركبتين إلى ممانعة الشبكة الكهربائية إلى نشوء هبوط جهد توافقي على هذين الترددتين بقيمة $(Vr(318) \approx Vr(322) = 15.6V)$ ، سيتتضدان فوق جهد الشبكة الكهربائية، مما يؤدي لارتفاع نسبة التشوه التوافقي الكلي إلى قيمة عالية. أي أن المرشح الفعال في هذه الحالة قد قام بتعويض التوافقيات المعيارية بشكلٍ مقبول، لكنه تسبب بحقق توافقيات أخرى ناتجة عن تردد تقطيع القالب، مما أدى إلى الإساءة أكثر إلى نوعية جهد الشبكة الكهربائية وارتفاع نسبة التشوه التوافقي الكلية له إلى أكثر من 16% .



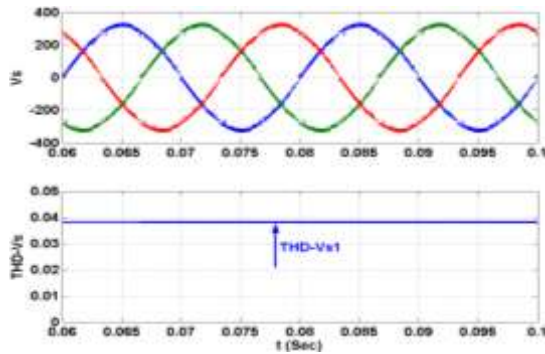
شكل (18) مركبات التيار الناتجة عن تردد تقطيع القالب



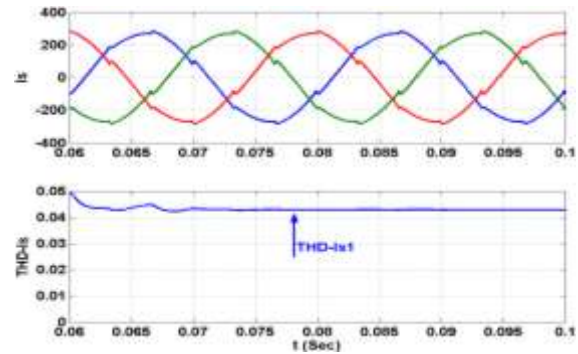
شكل (17) الطيف التوافقي لتيار الطور R في الشبكة

• حالة مرشح خرج ذو محارضة مرتفعة نسبياً

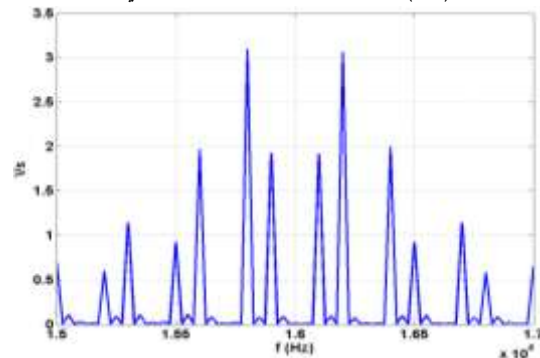
في هذه الحالة، تم اختيار رفع قيمة محارضة مرشح الخرج عشرة أضعاف إلى $(2 mH)$ ، حيث نقوم الآن بإجراء المحاكاة للنظام في هذه الحالة فنحصل على الأشكال (19,20,21). نلاحظ من خلال هذه الأشكال تناقص أثر تردد تقطيع القالب على موجتي الجهد والتيار، بفضل المحارضة المرتفعة، لكن ذلك أدى إلى تناقص ديناميكية النظام، مما انعكس سلباً على نسبة التشوه الكلي للتيار، التي أصبحت في هذه الحالة 4.3% ($Ir(5) = 9.4 A$)، وبالتالي وصول التشوه الكلي للجهد إلى 3.8% . من الجدير بالذكر أن قيمة $2 mH$ لمرشح الخرج لم تلغ نهائياً المركبات الناتجة عن تردد تقطيع القالب، بل أصبحت $(Vr(318) \approx Vr(322) = 3.1 V)$ كما هو مبين في الشكل (22). رغم التحسن الظاهري الذي تقدمه هذه النتيجة مقارنةً مع سابقتها، إلا أن مقارنة نسبة التشوه التوافقي الكلي للجهد مع حالة عدم وجود مرشح فعال، تعيد إلى الأذهان صعوبة التوفيق -من خلال مرشح خرج من المرتبة الأولى (الذي يقدم درجة حرية واحدة من وجهة نظر التحكم)- بين المحافظة على ديناميك النظام، مع منع المركبات الناتجة عن تردد تقطيع القالب من المرور إلى الشبكة الكهربائية.



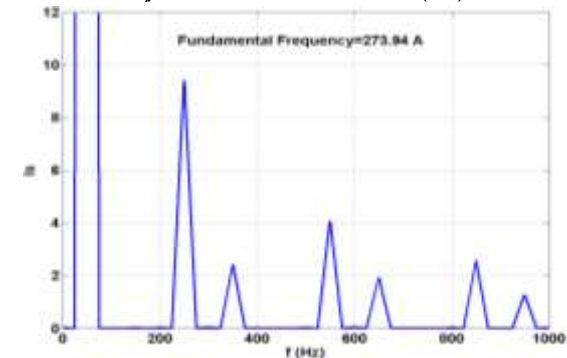
شكل (20) جهد الشبكة ونسبة التشوه الكلي للجهد



شكل (19) تيار الشبكة ونسبة التشوه الكلي للتيار



شكل (22) مركبات الجهد الناتجة عن تردد تقطيع القالبية

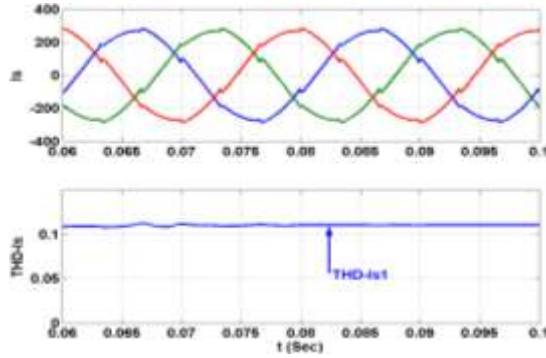


شكل (21) الطيف التوافقي لتيار الطور R في الشبكة

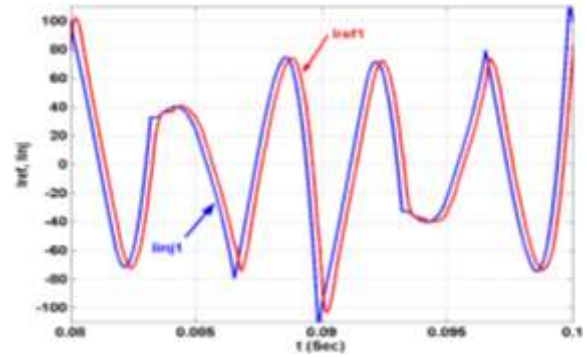
. مرشح خرج من المرتبة الثالثة

سنعمد في هذه الحالة إلى استبدال مرشح الخرج ذي المرتبة الأولى بمرشح خرج من المرتبة الثالثة (شكل 8)، وذلك من أجل الحصول على درجة حرية إضافية، تمكنا من تحقيق المعيارين المطلوبين من مرشح الخرج (منع مرور المركبات الناتجة عن تقطيع القالبية من المرور إلى الشبكة الكهربائية دون التأثير على ديناميكية المرشح الفعال). في هذه الحالة، تم اختيار محارضي مرشح الخرج $(L_{f1}+L_{f2})$ مساوية لـ $(200 \mu H)$ ، للمحافظة على ديناميك النظام، فيما نحقق معيار منع مركبات تردد تقطيع القالبية من المرور إلى الشبكة الكهربائية من خلال تردد قطع لمرشح الخرج يقترب من 2000 Hz .

بإجراء المحاكاة لهذا النظام نحصل على الشكلين (23,24). من خلال هاذين الشكلين نلاحظ مقدار الانزياح الزاوي الحاصل بين التيار الاضطرابي محدد الهوية I_{ref} وتيار المرشح الفعال المحقون إلى الشبكة الكهربائية I_{inj} . ينعكس هذا الانزياح سلباً على جودة تعويض المرشح الفعال، مما يؤدي إلى وصول نسبة التشوه التوافقي الكلي للتيار بعد التعويض إلى 11%، مع $(I_r(5)=24 \text{ A}, I_r(7)=11.5 \text{ A}, I_r(11)=8.3 \text{ A}; I_r(13)=7.7 \text{ A}, I_r(17)=4.7 \text{ A}, I_r(19)=4 \text{ A})$ ، علماً أن المركبات الناتجة عن تردد تقطيع القالبية قد اختفت تماماً في طرف الشبكة الكهربائية، التي وصل التشوه التوافقي الكلي للجهد فيها إلى 2.77%.

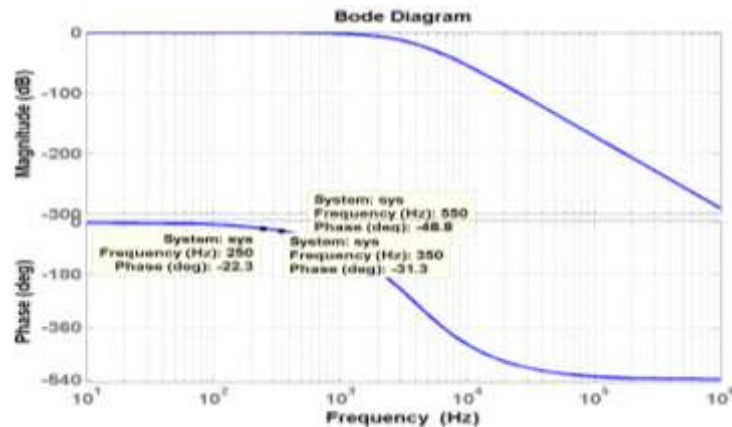


شكل(24) جهد الشبكة ونسبة التشوه الكلي للجهد



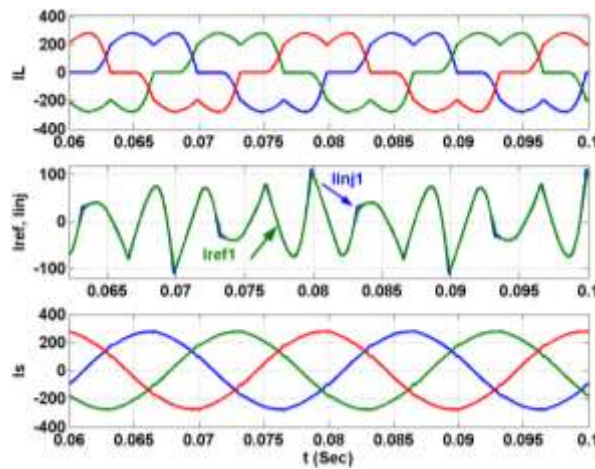
شكل(23) تتضد التيار المرجعي والمحقون بعضهما فوق البعض

من أجل عرض مشكلة الانزياح الزاوي لهذه الحالة في المجال الترددي، نعرض عبر (25) لمخطط بود للريح والزاوية لحلقة التحكم بمرشح الخرج، التي تضم مرشح الخرج ذي المرتبة الثالثة والمتحكم من نوع RST ذي المرتبة الثالثة أيضاً والمستخدم في هذه الحالة. من خلال هذا الشكل نلاحظ أن ملاحقة المطال تتم بشكلٍ كامل، لكن ملاحقة الزاوية تتم مع انزياح كبير، يزيد بزيادة مرتبة النظام، ويزيادة تردد الإشارة الملاحقة. بالفعل، فهذا الانزياح يكون (22.39) من أجل التوافقية الخامسة، ويصبح (31.39) من أجل التوافقية السابعة، ليصل إلى (48.89) من أجل التوافقية الحادية عشرة. إن هذه الانزياحات الزاوية تؤثر بشكلٍ كبير على جودة تعويض المرشح الفعال التفرعي كما رأينا في الأشكال السابقة.

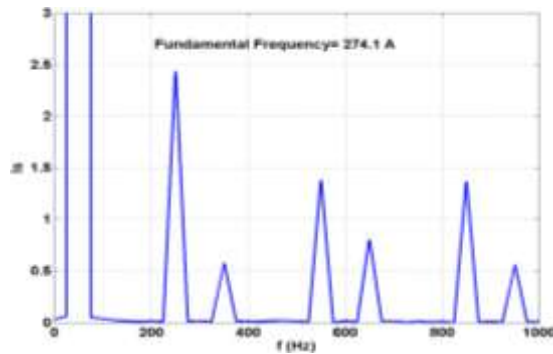


شكل(25) مخطط بود لحلقة التحكم المغلقة تظهر أثر الانزياح الزاوي في المجال الترددي

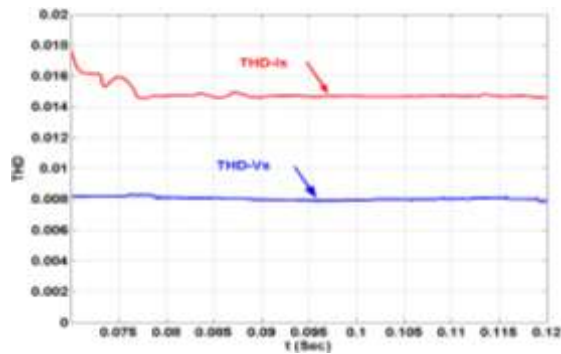
3 . تطبيق التحكم اللاخطي (التحكم أو النمط الانزلاقي)



شكل(26) محاكاة في المجال الزمني لتيارات الحمل والشبكة والتيارين المرجعي والمحقون



شكل(28) الطيف التوافقي لتيار طور R في الشبكة



شكل(27) نسبة التشوه الكلي لجهد وتيار الشبكة

تم هنا تجاوز مشكلة الانزياح الزاوي من خلال تطبيق نظرية التحكم الانزلاقي اللاخطية. سيتم في هذه الحالة الاستفادة من كون التحكم لاخطي، من أجل تجاوز مشكلة ملاحقة الزاوية، وبالتالي إمكانية رفع قيمة محارضة مرشح الخرج، دون التأثير على ديناميكية عمل النظام. بناءً على ذلك، سيتم العودة إلى مرشح الخرج ذي المرتبة الأولى بمحارضة قيمتها (2 mH). يعرض الشكل (26) لكل من تيار الحمل غير الخطي i_L والتيار الاضطرابي المرجعي محدد الهوية i_{ref} وذلك المحقون إلى الشبكة الكهربائية i_{inj} منضدين بعضهما فوق بعض، بالإضافة إلى تيار الشبكة الكهربائية بعد التعويض i_s . من خلال هذا الشكل نلاحظ أن التطابق شبه كامل بين التيار المرجعي والتيار المحقون، مما يدل على أن هذه الطريقة غير الخطية في التحكم، قد أزلت وبشكل شبه كامل مشكلة الانزياح الزاوي. لقد انعكست هذه النتيجة على موجة التيار التي أصبحت جيبيية كاملة في جهة الشبكة الكهربائية. تأكيد هذه النتيجة يمكن ملاحظته من خلال الشكلين (27,28)، حيث أصبحت نسبة التشوه الكلي لتوافقيات التيار 1.47% مع ($I_r(5)=2.43 A$)، ولجهد 0.78%. $I_r(7)=0.58 A$, $I_r(11)=1.38 A$, $I_r(13)=0.8 A$, $I_r(17)=1.36 A$, $I_r(19)=0.56 A$

4. دراسة شبكة كهربائية واقعية

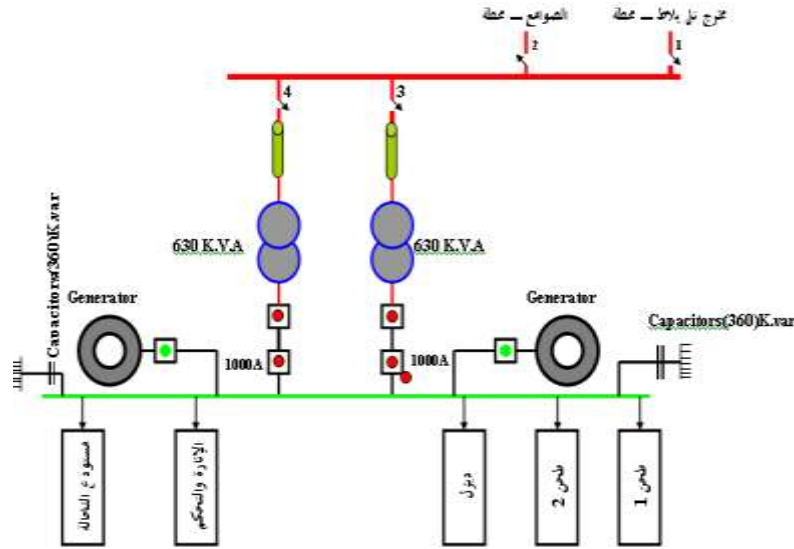
في المرحلة الأخيرة من هذا البحث، أردنا تأكيد النتيجة عالية الجودة التي تم الحصول عليها من خلال تطبيق التحكم (النمط) الانزلاقي، وأثره في تحسين أداء المرشح الفعال التفرعي، من خلال أخذ شبكة كهربائية واقعية، وبالتالي تعميم تطبيق هذه الطريقة على كل أنواع الشبكات الكهربائية، مهما ازداد تعقيدها. وقع الاختيار هنا على محطة تل بلاط لكون أن الشبكة الكهربائية فيها هي شبكة صناعية قد تم من خلال أبحاث سابقة دراسة نمذجتها [5]. في هذه الحالة، لم نجد من الضرورة إعادة تجريب التحكم الخطي على هذه الشبكة، منعاً للتكرار غير المجدي.

أ. الوصف العام للمحطة

تقع محطة تل بلاط في ريف حلب، منطقة السفيرة، إلى الجنوب الشرقي من مدينة حلب، وهي من شركات القطاع العام الرئيسة في سوريا في صناعة الدقيق. تعمل المحطة طيلة أيام السنة عدا أيام الجمعة، أي (300) يوم عمل في العام، بنظام ثلاث ورديات (24) ساعة يومياً. تستهلك المحطة سنوياً من الطاقة الكهربائية حوالي (3-3.5) مليون ك.و.سا، بكلفة تصل لحدود 6.3/ مليون ل.س.

ب. البيانات الكهربائية

تتغذى المحطة كما هو مبين في الشكل (29) من مخرج متوسط خاص (خان طومان) من محطة حلب - ك، وهو بدوره يغذي محولتين باستطاعة /630 kVA/ لكل منهما. يغذي خرج المحولات /5/ خمسة مخارج على التوتر / 0.4 kV/. يوجد في المحطة أيضاً ثلاث مجموعات توليد ذاتي باستطاعة $(175 \times 1 + 750 \times 1 + 845 \times 1)$ kVA، حيث تتم عمليات الإقلاع والفصل بشكل آلي وقت الانقطاع.



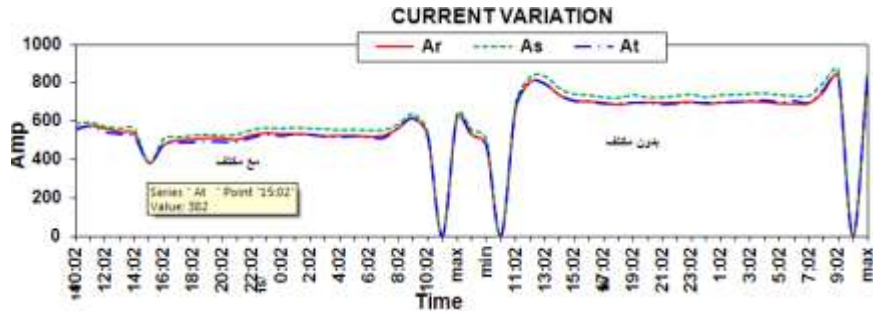
شكل (29) الشبكة الكهربائية المغذية لمحطة تل بلاط

إن أغلب المحركات المستخدمة في المحطة هي محركات تيار متناوب، يُقاد بعضها بواسطة عدد من القابلات *Inverters*. تعتبر نسبة التحميل في هذا الموقع الصناعي مثالية وتقدر بحوالي (80%)، حيث يصل الحمل إلى /800/ أمبير تقريباً. يتراوح عامل الاستطاعة وفق نتيجة القياس بين 0.7 بدون مكثفات و 0.99 مع المكثفات، حيث تم تركيب اللوحة بالكامل في طرف التوتر المنخفض كما هو مبين في الشكل السابق.

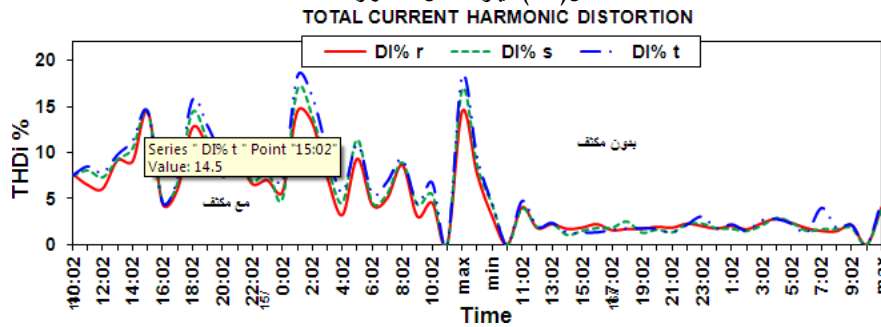
ج . القياسات الميدانية في الشبكة الكهربائية للموقع الصناعي المدروس

بهدف إجراء نمذجة دقيقة للشبكة المدروسة، عمدنا في البداية إلى إجراء قياسات ميدانية في أجزاء مختلفة من المطحنة، ومن ثم نمذجة عناصر الشبكة الكهربائية باستخدام مجموعة برامج *Matlab, Simulink, Sim-Power Systems*، أخذين هذه القياسات بالحسبان. تم إجراء القياسات الميدانية للشبكة الكهربائية المغذية للمطحنة باستخدام جهازي تحليل طاقة، حيث عمِدَ إلى أخذ القياسات لمدة يوم كامل. تم إجراء القياس على مخارج المحولتين المغذيتين للمطحنة، لكن في هذا البحث وسعياً لتنوع البيانات، تم أخذ القياسات للمحولة الثانية، وذلك خلافاً للأبحاث المجراة سابقاً على المحطة، التي كانت تأخذ المحولة الأولى [5]. بكل الأحوال، هذا لن يؤثر على دقة النتائج، على اعتبار أن تأثير اضطرابات التيار (توافقيات) المارة عبر إحدى المحولتين لا تؤثر على المحولة الثانية (لصغر النسبي لهذه التيارات من جهة، ولكون ممانعة الشبكة تكبر مع الارتفاع في مستوى التوتر، أي الـ 20 kV في حالتنا).

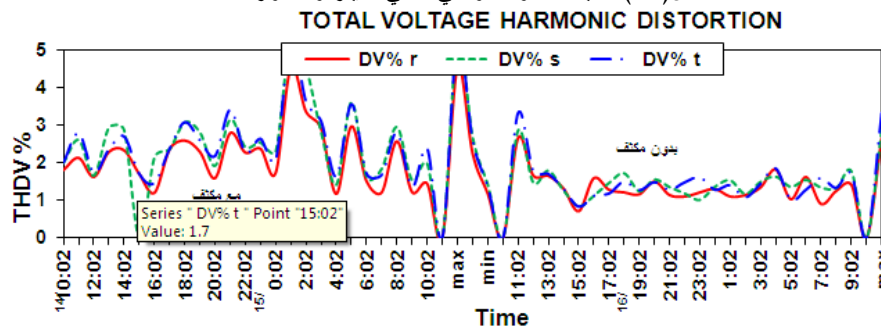
أعطت القياسات المجراة على خرج المحولة الثانية المنحنيات التالية. تمثل الأشكال من 30 إلى 34 -على الترتيب وخلال زمن إجراء القياسات ولأطوار الثلاث- كل من تيارات الأطوار، نسبة التشوه الكلي للتيار والجهد وقيم التشوه الإفرادية للتيارات أحادية الطور.



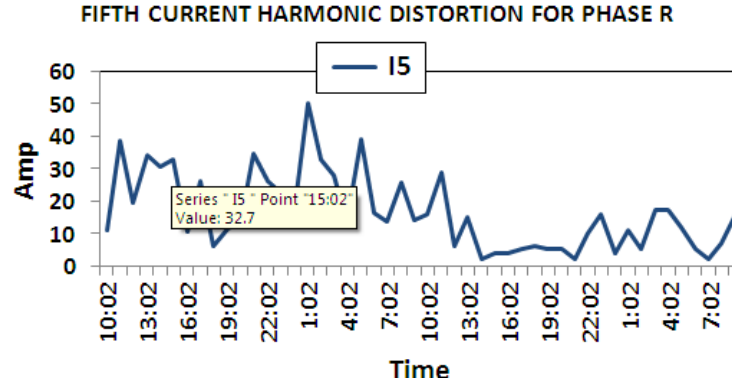
شكل (30) تيار الحمل للأطوار الثلاثة



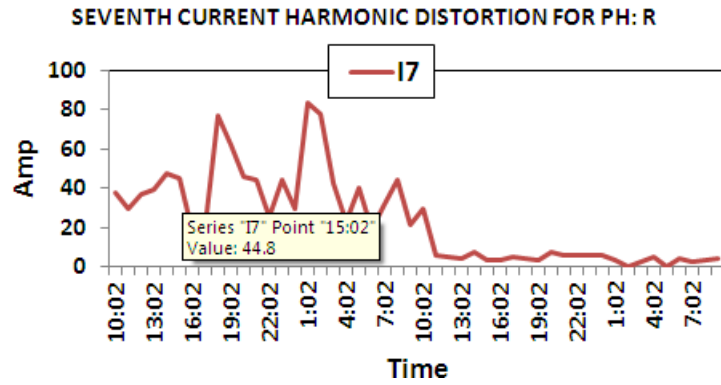
شكل (31) نسبة التشوه التوافقي الكلي للتيار وللأطوار الثلاثة



شكل (32) نسبة التشوه التوافقي الكلي للجهد وللأطوار الثلاثة



شكل (33) قيم التيارات التوافقية ذات المرتبة الخامسة للطور R



شكل (34) قيم التيارات التوافقية ذات المرتبة السابعة للطور R

ع . نمذجة ومحاكاة النظام المدروس بتطبيق التحكم الانزلاقي

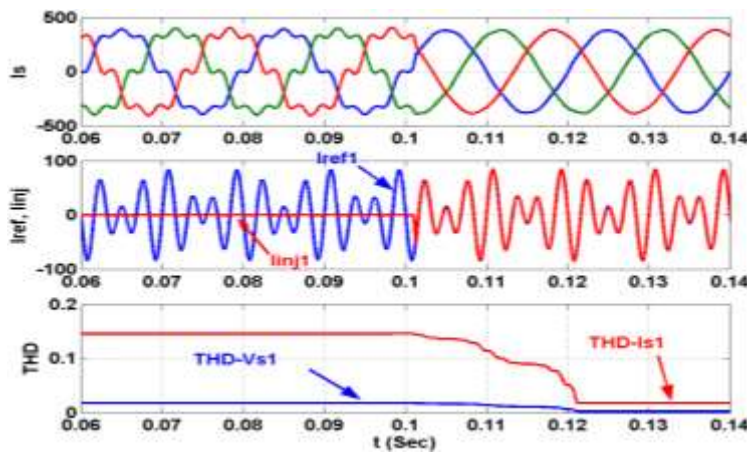
انطلاقاً من القياسات الميدانية، تم أخذ البيانات الكهربائية الموافقة للتوقيت للساعة 15:02. في هذا التوقيت تعطي القياسات المجرة في طرف التوتر المنخفض للمحولة الثانية ما يلي: التيارات الطورية متوازنة ومساوية لـ 382 A، نسبة التشوه الكلي للجهد ولأطوار الثلاثة تساوي 1.7%، وهي تقابل نسبة تشوه كلي للتيار بقيمة 14.5%. علماً أن قيم التيارات التوافقية ذات المراتب 5، 7 للطور الأول هي ($I_r(5)=32.7 A$, $I_r(7)=44.8 A$). وفقاً للبنية العامة لشبكة المطحنة الكهربائية والموضحة في الشكل (29)، فقد تمت نمذجة العناصر المختلفة للشبكة اعتماداً على بارامترات كتالوجات التصنيع و/أو مراجع وزارة الكهرباء وقياساتها، وذلك حسب طبيعة العنصر الكهربائي. عُمد إلى نمذجة الأحمال الخطية بوساطة استطاعاتها المستجرة على التردد 50 Hz، أما بالنسبة للأحمال غير الخطية (بغالبيتها محركات تحريضية مقادة)، فقد تمت نمذجة تياراتها التوافقية المستجرة، وذلك لتخفيف زمن المحاكاة وحجم المعطيات في البرنامج. من الجدير بالذكر أنه لا يوجد نماذج لتيارات بترددات محددة في برامج *Matlab*، لذلك تمت برمجة هذا الجزء برمجة خاصة، أُضيفت إلى مكتبة *Matlab* [5].

يبين الجدول (2) بارامترات الشبكة المدروسة ونماذج عناصر الشبكة، مصممة ضمن بيئة البرامج المستخدمة.

جدول (2) قيم العناصر المكونة للشبكة الكهربائية للمطحنة

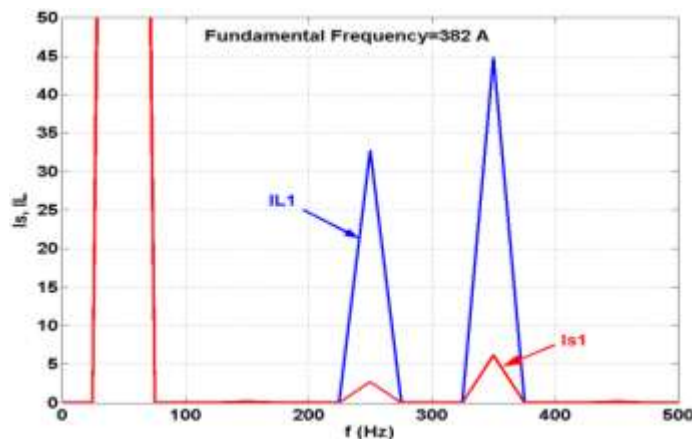
الشبكة الكهربائية	
es, Scc, Rcc, Lcc	20kV , 300 MVA , 0.2108 Ω , 0.002013H
محولة القدرة (20kV/0.4kV) ، (D11 YN)	
$Sn , \Delta P_{Cu} , \Delta P_o , ucc, I_o$	630 KVA , 6.5 KW , 1.3 KW , 3.8% , 1.6%

في هذا التطبيق الواقعي، عمدنا إلى استخدام نفس منهجية النمط الانزلاقي المشروحة سابقاً، في التحكم بتيار المرشح الفعال المحقون إلى الشبكة الكهربائية. في حالة المحاكاة هذه وكما هو مبين في الشكل (35)، تم وضع قاطع يمنع وصل المرشح الفعال إلى الشبكة الكهربائية حتى اللحظة 0.1Sec من زمن المحاكاة، بعدها يبدأ المرشح الفعال بحقن التيار i_{inj} الذي يتطابق تماماً مع التيار المرجعي i_{ref} . إن هذا التطابق يؤكد مرة ثانية على حذف طريقة التحكم هذه لمشكلة الانزياح الزاوي من جهة، ويسمح من جهة ثانية لتعويض شبه كامل لتوافقيات التيار، مما ينعكس انخفاضاً في نسبة التشوه الكلي للتيار من 14.5% إلى 1.77% وللجهد من 1.7% إلى 0.22% . يتجلى هذا الانخفاض الشديد في نسبة التشوه التوافقي الكلي، في شكل موجة تيار الشبكة الكهربائية بعد التعويض، الذي أصبح شبه جيبي خالص.



شكل (35) محاكاة في المجال الزمني لتيار الشبكة والتيارين المرجعي والمحقون ونسب التشوه الكلي للجهد والتيار قبل وبعد التعويض

أخيراً، ولتأكيد هذه النتائج في المجال الترددي، يبين الشكل (36) تيار الشبكة i_s قبل وبعد التعويض. لقد انخفضت قيمة التوافقيات الخامسة والسابعة للتيار على الترتيب من 32.7 A إلى 2.7 A ومن 44.8 A إلى 6.15 A .



شكل (36) الطيف التوافقي لتيار الطور R في الشبكة قبل وبعد التعويض

تؤكد هذه النتائج من جانب آخر دقة النمذجة للشبكة المدروسة، وذلك بمقارنة نتائج المحاكاة قبل التعويض مع القياسات الميدانية للتيار الطوري، بالإضافة لكل من توافقيات الجهد والتيار الكلية والإفرادية.

الاستنتاجات والتوصيات:

في هذا البحث، تمت دراسة إمكانية التخلص من ظاهرة الانزياح الزاوي الحاصلة في حلقة التحكم بتيار المرشح الفعال التفرعي المحقون إلى الشبكة الكهربائية عند استخدام التحكم الخطي، وذلك باستخدام النمط الانزلاقي من التحكم اللاخطي. ضمن هذا الإطار، تم تعميق مناقشة ربط قيم برامترات مرشح الخرج للمرشح الفعال التفرعي مع جودة الترشيح من جهة ومع مشكلة الانزياح الزاوي من جهة أخرى، وذلك من خلال استخدام متحكمين خطيين، الأول تقليدي من نوع PI والثاني متقدم من نوع RST .

كبدل عن المتحكمات الخطية، تم في هذا البحث اقتراح استخدام التحكم اللاخطي ذي النمط الانزلاقي، كحل لمشكلة الانزياح الزاوي من جهة، ولفك جزء من الارتباط بين قيم برامترات مرشح الخرج مع الأداء الترشحي للمرشح الفعال. بهدف دعم الدراسة الرياضية للأفكار المطروحة، تم أخذ مثالين تطبيقيين لشبكتين كهربائيتين، الأولى نموذجية والثانية واقعية، تتمثل بمطحنة تلب بلاط الصناعية. لقد أثبتت عمليات النمذجة والمحاكاة المجراة باستخدام مجموعة برامج $Matlab, Simulink, Sim-Power Systems$ على أهمية استخدام التحكم الانزلاقي في تحسين أداء المرشح الفعال التفرعي، من خلال التخلص من مشكلة الانزياح الزاوي، وإعطاء مرونة أكبر في اختيار برامترات مرشح الخرج في المرشح الفعال التفرعي.

المراجع:

- 1-ALALI M. A. E.,- *Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des réseaux Electriques Basse Tension, Automatisation des Systèmes de Puissance Electriques. Thèse (Thesis) de l'Université Louis Pasteur -Strasbourg I, Strasbourg, France 2005-216.*
2. م. نبيل قرانيا، "دراسة إمكانية تحسين أداء المرشحات الفعالة في شبكات التوتر المنخفض باستخدام التحكم اللاخطي (دراسة حالة في منشأة صناعية)"، رسالة ماجستير، جامعة حلب 2010-128.
3. م. محمد ناصيف، " شرائح معالجة الإشارة الرقمية واستخدامها في تنفيذ خوارزمية النمط الانزلاقي في قيادة المحركات التحريضية، رسالة ماجستير، جامعة حلب 2010-170.
- 4-GUFFON S,- *Modélisation et Command a Structure Variable de Filtres Actifs de Puissance, Thèse (Thesis) de l'INPG -Grenoble, France. 2000-177*
- 5-ALALI M.A.E , - *Résoudre le Problème des Harmoniques au Moulin de TAL BLAT en Employant des Filtres Passifs Parallèles, Research Journal of Aleppo University, Engineering Science Series, volume 72, 2009-144.*