

Using Hybrid Filter To Reduce Harmonics in Variable Speed Drive System

Dr. Ghassan HAYEK*
Dr. Nesmat ABU TABAK**
Reem HWIJI***

(Received 5 / 6 / 2023. Accepted 18 / 7 / 2023)

□ ABSTRACT □

The issue of harmonics is dangerous for the network and consumers because of its negative effects. This paper deals with the issue of eliminating harmonics by using hybrid filters. This research focused on hybrid filters because they are a combination of two filters with different structure and performance. The filter studied in this research consists of a parallel active filter connected to the common point with the network, where it is preceded on the network side by a passive filter (parallel capacitor) and followed by a passive filter (coil) on the load side.

The main goal is to improve the performance of the filter using the hybrid type, and we have reached the results for this goal by modeling and simulation in the MATLAB program. A three-phase induction motor drive system, driven by direct torque control technology, has been modeled to operate in different modes such as acceleration, deceleration and braking. Then we analyzed the current and voltage harmonics, and due to the large harmonic distortion, a passive filter was initially added, so the distortion decreased to some extent. After that we added an active filter, which reduced distortion even further. And by introducing the hybrid filter and got a better result than the previous two cases.

Keywords: Hybrid Filter, Harmonics, Total Harmonic Distortion, Variable Speed Drive System, Passive Filter.

Copyright



:Tishreen University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

* Professor, Department of Electrical Power, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

**Associate Professor, Department of Electrical Power, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria, nesmat975@gmail.com.

***Master Student, Power Systems, Department of Electrical Power, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria, hwijireem@gmail.com.

استخدام المرشح الهجين لتقليل التوافقيات في نظام قيادة متغير السرعة

د. غسان حايك*

د. نسمة أبو طيق**

ريم حويجي***

(تاريخ الإيداع 5 / 6 / 2023. قُبِلَ للنشر في 18 / 7 / 2023)

□ ملخص □

تعتبر مسألة التوافقيات خطرة على الشبكة والمستهلكين لما لها من آثار سلبية. يعالج هذا البحث مسألة التخلص من التوافقيات باستخدام المرشحات التي يوجد منها أنواع متعددة. ركز هذا البحث على المرشحات الهجينة لأنها تمثل دمج من مرشحين مختلفين بالبنية والأداء. المرشح المدروس في هذا البحث يتكون من مرشح فعال تفرعي مرتبط بالنقطة المشتركة مع الشبكة حيث يسبقه من جهة الشبكة مرشح غير فعال (مكثف تفرعي) ويليه من جهة الحمل مرشح غير فعال (ملف).

الهدف الرئيسي هو تحسين في أداء المرشح باستخدام النوع الهجين وقد توصلنا بالنتائج لهذا الهدف بطريقة النمذجة والمحاكاة في برنامج MATLAB. حيث تم نمذجة نظام قيادة محرك تحريضي ثلاثي الطور مقاد بتقنية التحكم المباشر بالعزم ليعمل بأنماط مختلفة كالتسارع والتباطؤ والكبح. ثم حللنا توافقيات التيار والجهد ونظراً للتشوه التوافقي الكبير تم بدايةً إضافة مرشح غير فعال فانخفض التشوه لحد ما. وبعد ذلك أضفنا مرشح فعال تفرعي فانخفض التشوه أكثر. وبإدخال المرشح الهجين حصلنا على نتيجة أفضل من الحالتين السابقتين.

الكلمات المفتاحية: المرشح الهجين، التوافقيات، التشوه التوافقي الكلي، نظام قيادة متغير السرعة، المرشح غير الفعال.

حقوق النشر : مجلة جامعة تشرين- سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص



CC BY-NC-SA 04

* أستاذ - قسم الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.
** أستاذ مساعد - قسم الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية -
nesmat975@gmail.com
*** طالبة ماجستير باختصاص نظم القدرة الكهربائية - قسم الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية -
hwijireem@gmail.com

مقدمة:

أصبحت جودة الاستطاعة جزءاً مهماً من نظم القدرة والآلات الكهربائية. جذب هذا الموضوع الكثير من الباحثين الأكاديميين والصناعيين للتعلم في هذا المجال. تعني جودة الاستطاعة بشكل عام جودة الجهد و/أو جودة التيار والتي تعرف ك: الإجراء والتحليل والتحسين في جهد البار للحفاظ على شكل موجة الجهد على مطالها الاسمي وترددها الاسمي. أما المسبب لتشوه موجة الجهد أو التيار فهو بشكل أساسي ما يسمى التوافقيات. لأن دخول توافقيات على موجة جيبيية سيحولها لإشارة دورية غير جيبيية وبالنتيجة إشارة غير جيدة. بالنتيجة يمكن القول بأن مشكلة جودة الاستطاعة هي مشكلة توافقيات بشكل أساسي [1].

عالج البحث [2] مسألة التوافقيات العليا وسبب ظهورها وآثارها السلبية وبالأخص على المحركات التحريضية كالتسخين وانخفاض المردود وعامل الاستطاعة. تم حساب العزوم الدوارة المتولدة عن التوافقيات وكيف يمكن التخفيف من أثرها بالطريقة التصميمية للمحرك. قدم المرجع دراسة تحليلية للعلاقات الرياضية للعزم والقوة المحركة المغناطيسية بوجود توافقيات. كما قدم أيضاً الدارة الكهربائية المكافئة للمحرك عند كل توافقية حيث تزداد المقاومة الأومية للملفات في المحركات المتوسطة والكبيرة الاستطاعة. تعود هذه الزيادة لظاهرة انزياح التيار وهذا يعني زيادة الفقد الكهربائي عند زيادة تردد التوافقية. بالإضافة لذلك تزداد الضياعات المغناطيسية بسبب التيارات الإعصارية.

في المرجع [3] تم دراسة الآثار الناجمة عن التوافقيات على مكثفات تعويض الاستطاعة الردية. تم أيضاً تحديد أسلوب لدراسة هذا الأثر وطريقة لتفادي التحميل الزائد للمكثفات وحالات الرنين المخربة لها. تعتبر التجهيزات الكهربائية الحديثة التي تضم أحمال لاخطية (المنظمات الإلكترونية الساكنة- أنصاف نواقل) من أهم مصادر التوافقيات. أضف إلى ذلك تجهيزات اللحام القوسية والتلامسية وأفران صهر المعادن بالقوس الكهربائي والمصابيح الغازية الكهربائية والمحولات الكهربائية. تشكل التوافقيات الناتجة عن المبدلات التايستورية خطورة على مجموعة مكثفات تعويض الاستطاعة الردية. اقترح الباحث تركيب مخمدات للتوافقيات ذات الأثر الكبير في التحميل الزائد للمكثفات. واقترح الانتباه عند تصميم دائرة التحكم في وصل وفصل المكثفات بحيث يمنع حالة وصل القيم التي يحصل عندها حالات رنين.

تم في المرجع [4] بيان الأثر المتبادل بين مكثفات تعويض الاستطاعة الردية في المنشآت الصناعية ومصادر التوافقيات وخاصة أجهزة تنظيم السرعة للمحركات التحريضية ومحركات التيار المستمر. تم أيضاً دراسة حالة في معمل النسيج في اللاذقية الذي يعتبر من الأحمال اللاخطية المسببة للتوافقيات. تبين بأن المكثفات تتفاعل بشكل قوي مع الأحمال اللاخطية ويكبر تشويه التيار والجهد عند العمل بحدود الرنين أو بالقرب منه. إن خطر استخدام مكثفات التعويض يتمثل في حالة الرنين بين محارضة المنبع وسعة المكثف مما يؤدي لانتفاخ المكثفات وانفجارها. وأكثر التوافقيات خطورة هي الخامسة والسابعة والحادية عشرة لأن تياراتها أكبر بالنسبة للتوافقيات الأخرى.

في المرجع [5] تسبب التوافقيات العليا في أنظمة التحكم بالسرعة ظهور نبضات في العزم الكهرومغناطيسي وإشارة السرعة. تم في البحث تقييم عمل المحرك التحريضي المقصور في الأنظمة الدورية غير الجيبيية باستخدام طريقة الأشعة العامة. قدم أيضاً برنامج حسابي للضياعات الناتجة عن التوافقيات لتقييم أثر التوافقيات على أنظمة القيادة الكهربائية.

هناك عدة طرق للتخلص أو للتخفيف من التوافقيات [1.6.7] ومنها: توصيل ملفات محولات القدرة بطريقة معينة تلغي التوافقية الثالثة ومضاعفاتها الفردية (التاسعة والخامسة عشرة...)، توصيل مرشحات غير فعالة (مكثفات، ملفات ومقاومات بتشكيلات معينة)، توصيل مرشحات فعالة (قالبية جهد أو تيار لتأمين انعدام التيار أو الجهد التوافقي)،

توصيل مرشحات هجينة (فعالة وغير فعالة وهي دمج بين عدة أنواع من المرشحات)، سنهتم في دراستنا أكثر بالمرشحات الهجينة وخاصة الفعال تفرعي وغير الفعال تسلسلي تفرعي.

في المرجع [8] تم وضع نموذج رياضي وتنفيذ برنامج حاسوبي لتصميم المرشحات غير الفعالة أحادية التوليف للحد من التوافقيات العليا في الشبكات الكهربائية الصناعية. أخذ بعين الاعتبار المواصفات العالمية للحدود المسموحة واستطاعة المرشح ونقطة الرنين واختلاف درجة الحرارة والتردد. حيث يبدي المرشح المكون من مكثف وملف على التسلسل ممانعة منخفضة لتيار التوافقية مما يسمح بامتصاص التيار الموافق لتردد التوافقية.

تم في [9] تصميم مرشحين الأول غير فعال والثاني فعال في برنامج MATLAB وذلك للمقارنة بين أداء النظام في الحالتين لجهة التخلص من التوافقيات. بينت النتائج فعالية المرشح الفعال المقترح بالمقارنة مع المرشح غير الفعال بالتخلص من الاضطرابات الكهرومغناطيسية في المبدلة الترددية. تمت الدراسة على منظومة قيادة محرك تحريضي ثلاثي الطور مع وضع المرشح الفعال التسلسلي جهة المحرك. إن المرشح غير الفعال نجح في الحد من الاضطراب المتباين المتمثل باندفاعات في موجة التيار لكنه لا يحد من الاضطراب المتماثل المتمثل بالتيار التسريبي. بينما المرشح الفعال يحد من الاضطرابين في آن واحد معاً. كما أن المرشح غير الفعال له أثر سلبي على عمل المحرك حيث يؤثر على استقراره ويذبذب السرعة والعزم بينما لا يحدث ذلك مع وجود المرشح الفعال. يزيد ذلك مردود المحرك وعمره الافتراضي ويقلل التسخين والاضطرابات الكهرومغناطيسية.

اقترح [10] استخدام المرشح الفعال التسلسلي بتقنية القالبية متعددة المستويات حيث استخدم طريقة الإطار المرجعي المتزامن للحصول على الإشارات المرجعية للجهد. ثم تقارن تلك الإشارات مع الجهود المقاسة ليتولد النبضات بطريقة التعديل النبضي الجيبي Sinusoidal Pulse Width Modulation. بينت النتائج تحسين جودة الطاقة الكهربائية عند استخدام المرشح الفعال التسلسلي متعدد المستويات وتحسن موجة الجهد بعد محاكاة حالات اضطراب مختلفة. إلا أن العدد الكبير للمفاتيح الإلكترونية يعتبر من مساوئ هذه الطريقة لذلك اقترح تطوير بنى جديدة تحل هذه المشكلة.

تضمن البحث [11] استخدام المنطق الضبابي (Fuzzy Logic) للتحكم بمرشح فعال تفرعي لتعويض التوافقيات والاستطاعة الرديئة. تم تصميم متحكمين ضبابيين مهمتهما تنظيم جهد مكثف قالبية المرشح والتحكم بتيار خرج المرشح. تمت نمذجة ومحاكاة شبكة توتر منخفض مكونة من منبع متناوب وحمل لا خطي وتحليل أداء المرشح الفعال مع التحكم الضبابي به عند حالات عمل مختلفة. حقق المتحكمان الضبابيان أداء أفضل وأكثر ديناميكية بالمقارنة مع المتحكمات التقليدية المستخدمة لنفس الغرض دون الحاجة لنموذج النظام.

في البحث [12] تم تقديم طريقة للتحكم بالمرشح الفعال التفرعي تدمج بين التحكم المباشر بالطاقة والتحكم التنبؤي Predictive Direct Power Control (P-DPC). أي التحكم بالاستطاعة الحقيقية والرديئة للحصول على عامل استطاعة واحد وبالدمج مع المتحكم التنبؤي فإن المتحكم يتنبأ بالسلوك القادم للنظام واختيار أفضل شعاع للجهد من أجل العينة اللاحقة عن طريق تصغير تابع كلفة محدد. بينت النتائج تخفيض عامل التشوه التوافقي للتيار أي الحصول على تيار جيبي وتحسين عامل الاستطاعة. استنبطت طريقة التحكم المباشر بالاستطاعة (DPC) من طريقة التحكم المباشر بالعزم Direct Torque Control (DTC). إلا أن البحث لم يراعي حالات تحميل مختلفة للمحركات بل اكتفى بإضافة حمل كنوع من تغيير الحمل غير الخطي.

في المرجع [13] نجد دراسة مرجعية عن المرشحات الهجينة من مرشحات فعالة وغير فعالة لتعويض التوافقيات والاستطاعة الردية للأحمال اللاخطية. ناقش الباحث توصيلات مختلفة للمرشح الهجين ثلاثي الطور واختار للتعمق مرشح فعال على التسلسل مع مرشح غير فعال. يتم التحكم بالمرشح الفعال بحيث يلغي توافقيات الجهد في نقطة الربط PCC. في [14] تم استخدام مرشح هجين من مرشح غير فعال (دائرة LCL) ومرشح فعال. ما يميز هذا العمل هو استخدام القالب متعددة المستويات (17 مستوى) في القسم الفعال من المرشح بغرض ترشيح توافقيات الجهد والتيار. تم اختبار المرشح على عدة أنواع من الحمل اللاخطي (أومي، أومي- تحريضي، محولة رافعة بقفزات وحمل مقوم) وأثبت بالنتائج أنه تم تخفيض معامل التشوه التوافقي في الجهد والتيار بنسبة حوالي 65.63.

استخدم المرجع [15] المرشح الهجين والمقاد بطريقة التعديل الفراغي الشعاعي. المرشح الفعال التفرعي على التسلسل مع المرشح غير الفعال LC حيث تم ضبط الجهد المستمر على مكثف المرشح بواسطة متحكم تناسبي تكاملي PI. استخدم أيضاً تشكيل ثاني بإضافة مرشح غير فعال تفرعي. الحمل لاخطي مقوم مع حمل مختلط أومي-تحريضي. استخدم المرجع [16] المرشح الهجين فعال تفرعي على التسلسل مع غير فعال للتوافقيات الـ 5th, 7th, 9th. كما يملك الجزء الفعال على خرج مرشحه الخاص به بالإضافة لاستخدام محولات تيار لإنقاص القيم الاسمية للمرشح الفعال. الحمل مختلط اومي تحريضي على خرج مقوم.

كخلاصة للدراسة المرجعية لاحظنا أن: اقتصر المرشحات غير الفعالة على عدد محدود من التوافقيات يؤدي لبقاء مجموعة توافقيات قد يكون مطالها كبير فيقلل ذلك من فعالية الترشيح. استخدام المرشح الفعال يوسع طيف التوافقيات الممكن ترشيحها مع بقاء التوافقيات ذات التردد العالي ملوثة لجهد وتيار المنبع. يوجد كثير من الحلول في المرشح الهجين منها البسيط ومنها المعقد كتشكيل أو كطريقة تحكم يجعل ذلك التنفيذ الواقعي صعب ومكلف. غالبية أو جميع المراجع في مجال التوافقيات تركز على حمل لاخطي (مقوم وحمل مختلط أومي- تحريضي) ونادراً ما تم معالجة مسألة قيادة محرك تحريضي وتحليل التوافقيات حسب نمط عمل المحرك ومنه تأتي أهمية هذا البحث المقدم.

أهمية البحث وأهدافه:

يعتبر هذا البحث مساهمة علمية في مجال المرشحات الهجينة المستخدمة للتخلص من التوافقيات في نظام قيادة متناوب متغير السرعة. حيث اقترحنا تشكيل جديد بسيط من المرشحات الهجينة واعتمدنا دراسة حمل غير مطروق بنفس الاسلوب في الدراسات المرجعية (قيادة محرك تحريضي ثلاثي الطور وتحبيد التوافقيات). كما أننا قارنا بين طرق متعددة لترشيح التوافقيات (غير فعال- فعال- هجين- هجين مقترح) وتبين أن المرشح الهجين المقترح أعطى أقل معامل تشوه توافقي منخفض لتيار وجهد المنبع عند حالات تشغيل مختلفة للمحرك.

طرائق البحث ومواده:

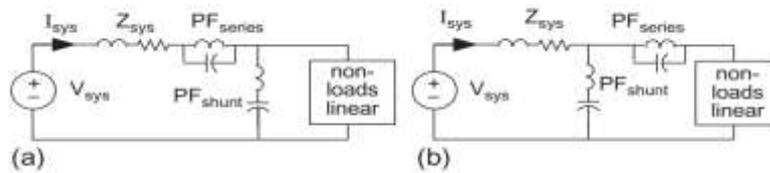
بعد دراسة مرجعية عن نماذج المرشحات المستخدمة لتحبيد التوافقيات في نظام قيادة كهربائي تم بناء نموذج لنظام القيادة والتحكم به في بيئة Simulink في برنامج MATLAB. اعتمد في هذا البحث على تحليل نتائج النمذجة والمحاكاة والمقارنة من أجل إثبات صحة وفعالية الطريقة المقترحة لتقليل التوافقيات. قارنا في هذا البحث بين عدة أنواع من مرشحات التوافقيات وفي عدة حالات من عمل نظام قيادة المحرك التحريضي ثلاثي الطور.

النتائج والمناقشة:

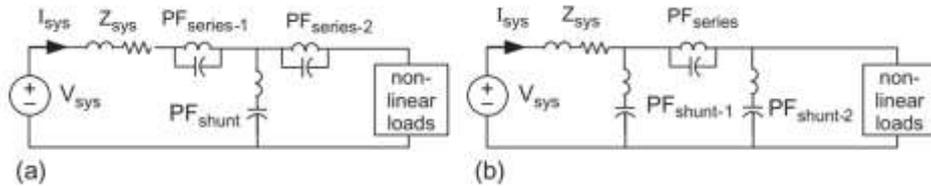
في الفقرات التالية سنعرض دراسة مرجعية مختصرة عن المرشحات الهجينة وطرق التحكم بها ثم نستعرض مقترحنا ونتائج تطبيقه على نظام قيادة افتراضي.

المرشح الهجين

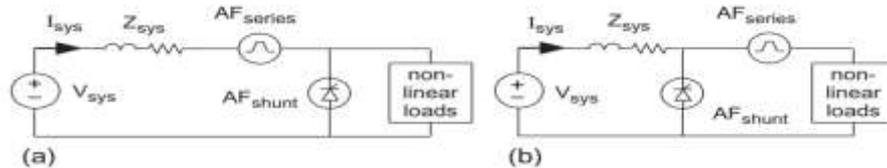
في هذا العمل سنفصل في موضوع المرشح الهجين نظراً للإيجابيات بالمقارنة مع الأنواع الأخرى من المرشحات. يمكن من خلال الأشكال التالية توضيح تشكيلات مختلفة للمرشح الهجين [1]. يتشكل المرشح الهجين من تجميع نوعين من المرشحات غير الفعالة أو من تجميع مرشح فعال مع مرشح غير فعال. فالأشكال (1,2,3,4) فيها مرشح هجين مكون من مرشحات غير فعالة تسلسلية وتفرعية لتقليل التوافقيات الناتجة عن حمل لاخطي. تقلل المرشحات التسلسلية توافقيات التيار المولدة عليها بينما تقلل المرشحات التفرعية توافقيات الجهد المولدة عليها.



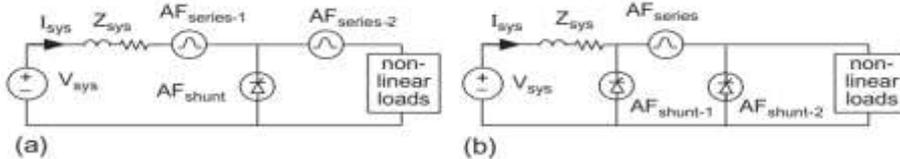
الشكل (1) مرشح هجين من مرشحات غير فعالة أحدهما تسلسلي والثاني تفرعي



الشكل (2) مرشح هجين من ثلاثة مرشحات غير فعالة تسلسلية وتفرعية

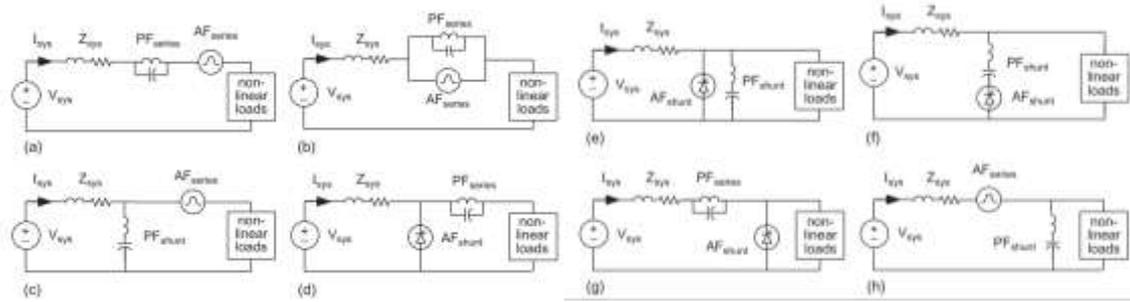


الشكل (3) مرشح هجين من مرشحين فعالين تسلسلي وتفرعي

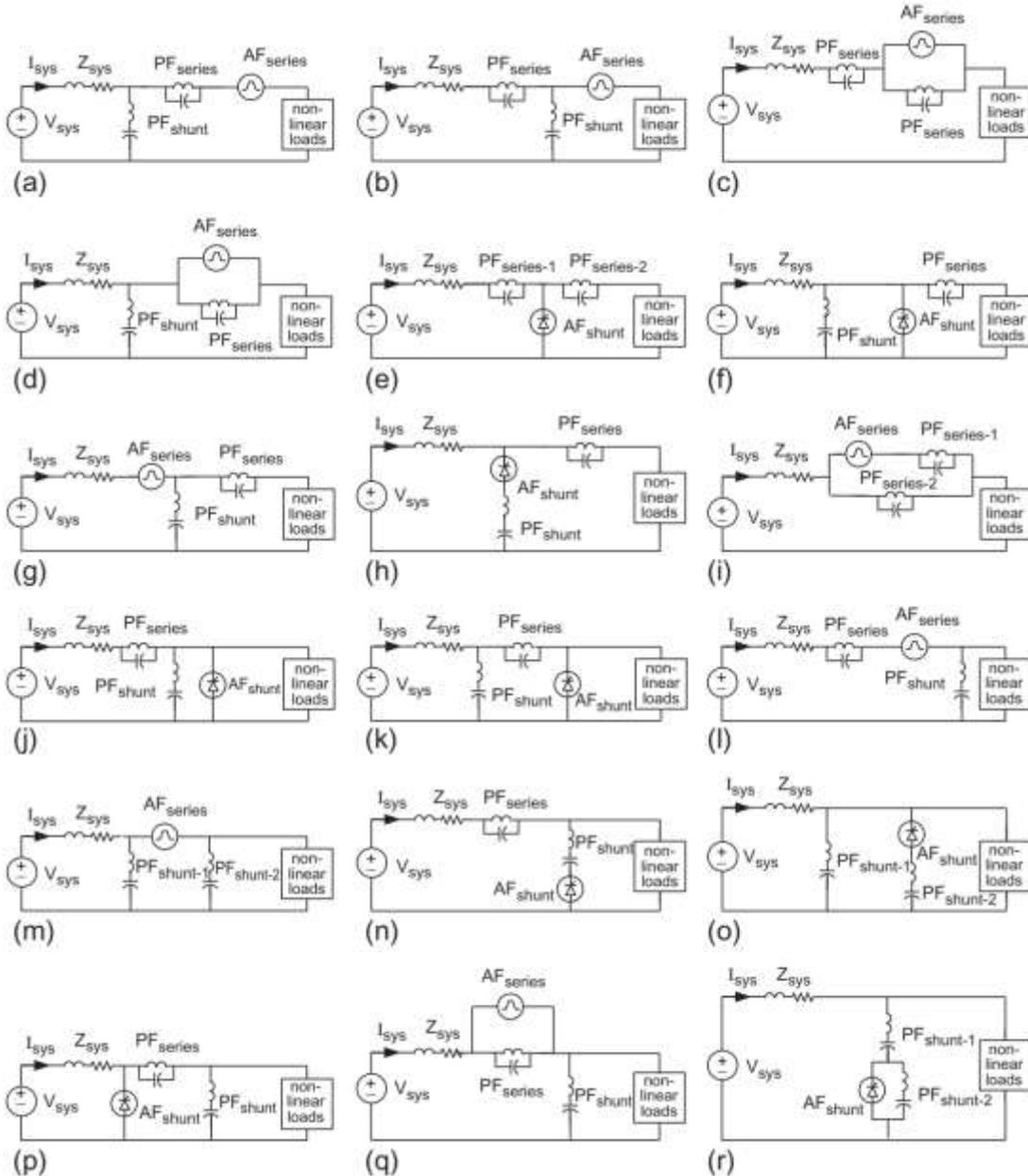


الشكل (4) مرشح هجين من ثلاثة مرشحات فعالة تسلسلية وتفرعية

في الشكل (5) نلاحظ تشكيلات مرشح هجين من مرشحات غير فعالة ومرشحات فعالة أيضاً بهدف تقليل التوافقيات الناتجة عن حمل لاخطي. تقوم المرشحات غير الفعالة بتقليل عدد محدود من التوافقيات العالية جداً المولدة عليها بينما تقوم المرشحات الفعالة بتحديد مجال من ترددات التوافقيات الأقل تردداً. في الشكل (6) تشكيلات متعددة لمرشح هجين من مرشح فعال ومرشحين غير فعالين.



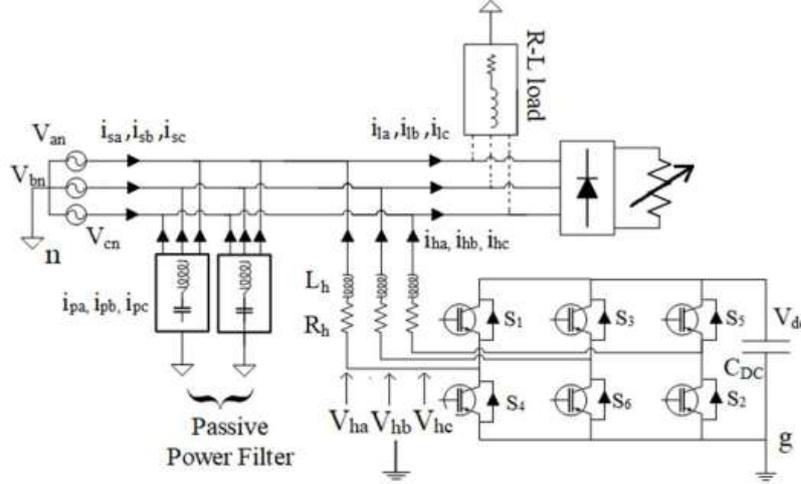
الشكل (5) تشكيلات هجينة من مرشح فعال ومرشح غير فعال



الشكل (6) تشكيلات متعددة من المرشحات الهجينة من مرشح فعال ومرشحين غير فعالين

تصميم المرشحات

يتضمن المرشح الهجين، في [17]، مرشحا غير فعال للتوافقيات الخامسة والسابعة على التفرع مع مرشح فعال تفرعي كما في الشكل (7).



الشكل (7) بنية ومكونات المرشح الهجين في المرجع [17]

يتضمن البحث حساب تفصيلي للمرشح الهجين وتطبيق تجريبي ونمذجة ومحاكاة لنظام واقعي.

حساب المرشح غير الفعال

تحسب سعة المكثف في المرشح غير الفعال، بدلالة تردد التوافقية f_r المراد تحييدها وجهد المكثف V واستطاعته الردية Q_C المطلوب تقديمها من العلاقة:

$$C_r = \frac{Q_C}{2\pi f_r V^2} \quad (1)$$

والمحارضة من العلاقة:

$$L_r = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 C_r} \quad (2)$$

وعامل الجودة من العلاقة:

$$Q = \frac{\omega L_r}{R} \quad (3)$$

حيث رتبة التوافقية وهي نسبة تردد التوافقية إلى التردد الأساسي:

$$r^{th} = \frac{f_r}{f} \quad (4)$$

حساب المرشح الفعال

الأهم في حساب المرشح الفعال هو الجهد المستمر وسعة المكثف ومحارضة الملف. يحسب تيار التوافقية بعد تعويض التوافقية الخامسة والسابعة من العلاقة:

$$I_h = \sqrt{I_{lrms}^2 - I_{ll}^2} \quad (5)$$

I_h : القيمة الفعالة لتيار التوافقية.

I_{lrms} : القيمة الفعالة لتيار الخط.

I_{ll} : القيمة الفعالة لتيار المنبع.

تعطى استطاعة المرشح الفعال التفرعي بالعلاقة:

$$S = 3V_{ph}I_{ph} \text{ kVA} \quad (6)$$

الجهد المستمر لمكثف المرشح

$$V_{DC} = 2\sqrt{\frac{2}{3}}V_{ll} \quad (7)$$

يمكن حساب سعة المكثف بطريقتين:

الأولى: باستخدام مبدأ انحفاظ الطاقة

$$0.5C_{DC}[V_{DC}^2 - V_{DC1}^2] = 3V_{ph} \cdot a \cdot I \cdot t \quad (8)$$

V_{DC} : الجهد المستمر المرجعي.

V_{DC1} : الجهد المستمر الأعظم أو الأصغر للوصلة المستمرة.

a : معامل زيادة التحميل.

V_{ph} : جهد الطور.

I : تيار الطور.

t : الزمن اللازم للوصول للقيمة المرجعية.

الطريقة الثانية: طريقة تموج الجهد المستمر

$$C_{DC} = \frac{I_d}{2\omega V_{DC} \text{ripple}} \quad (9)$$

I_d : تيار المرشح الفعال.

$$I_d = \text{active filter kVA/DC link voltage} \quad (10)$$

حساب تحريضية الملف

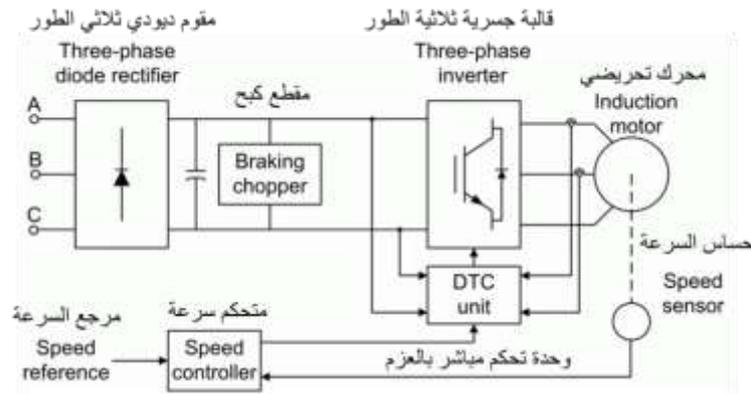
اختيار تحريضية الملف يتبع لتأرجح التيار I_{crp} وباعتبار التأرجح 10% من I_d عندها تعطى المحارضة بالعلاقة:

$$L_f = \frac{\sqrt{3}V_{DC}}{12f_s I_{crp}} \quad (11)$$

النظام المدروس

يبين الشكل (8) المخطط الصندوقي للتحكم بالمحرك حسب الشكل (9) حيث يتم التحكم بسرعة المحرك بحلقة مغلقة من خلال التحكم المباشر بالعزم والفيضان المغناطيسي للثابت. يستخدم لهذا الغرض مبدلة ترددية مؤلفة من مقوم ديودي ومقطع جهد مستمر للكبح الديناميكي وقالبية متحكم بها بواسطة جدول حالات التشغيل. متحكم السرعة من النوع PI (تناسبي - تكاملي) وظيفته تأمين ملاحقة سرعة المحرك للسرعة المرجعية.

أما مكونات وصلة التيار لمستمر فهي: مكثف تنعيم الجهد ومقطع كبح ديناميكي يضم مقاومة الكبح ومفتاح إلكتروني مقاد بمتحكم تناسبي. وظيفة مقاومة الكبح هي الحد من ارتفاع الجهد في وصلة التيار المستمر عند تباطؤ المحرك وعندما يسعى عزم الحمولة لتسريعه. يتفعل المقطع عند تجاوز الجهد المستمر الحد الأعلى للعروة ويتوقف المقطع عند انخفاض الجهد عن الحد الأدنى للعروة. بالتالي هي وسيلة لتنظيم الجهد المستمر للمبدلة الترددية. يستخدم المقطع إذن في وصلة التيار المستمر لامتصاص الاستطاعة المنتجة من قبل المحرك عند التباطؤ.

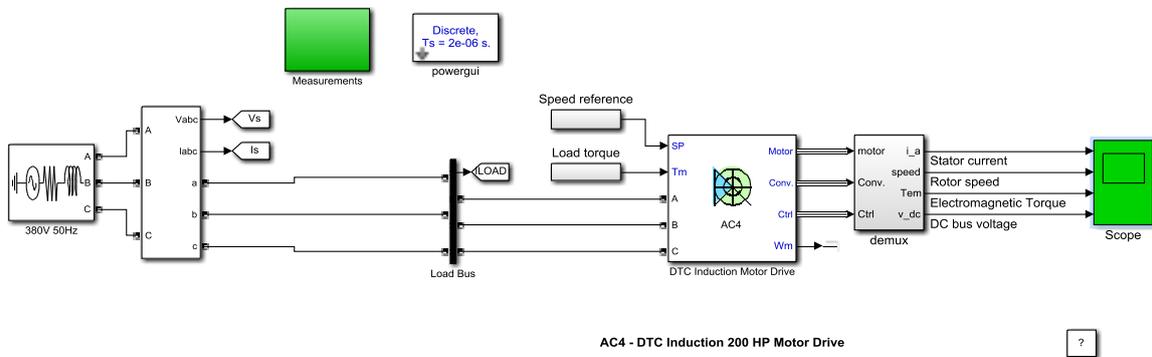


الشكل (8) مخطط مبسط للتحكم بالمحرك

نموذج الـ MATLAB للنظام المدروس

1 محاكاة النظام دون مرشح

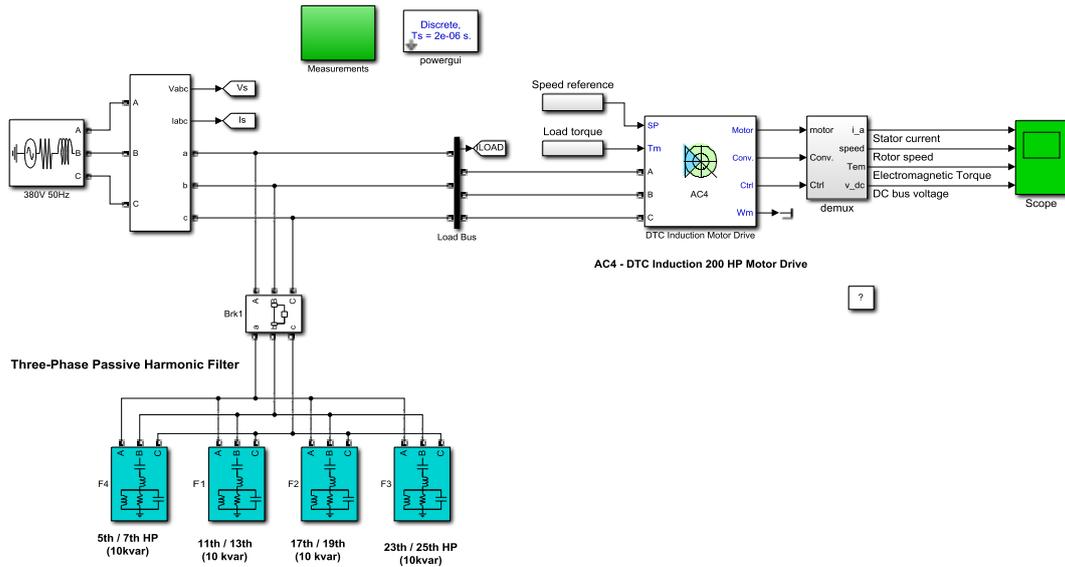
في الشكل (9) يتم قيادة محرك تحريضي ثلاثي الطور حوالي $150kVA$ ذو دوائر مقصور ممثل بنموذج Park ومقادير بواسطة طريقة التحكم المباشر بالعزم مع عروة بطاء. يتغذى من شبكة $380V\ ph - ph; 50Hz$. الهدف هو التحكم بسرعة المحرك بحيث تلاحق مرجع معين يتغير بين قيم ثابتة بشكل انحدار صاعد أو هابط. كما أن وصلة التيار المستمر للقالبية فيها دائرة مقطع تيار مستمر من أجل الكبح الديناميكي للمحرك. هذا النموذج مقتبس من النماذج الجاهزة في برنامج MATLAB_Simulink_help بهدف العمل على نموذج مرجعي دقيق النتائج وموثق. بالنسبة لبارامترات النموذج تم اعتماد البارامترات نفسها في النموذج الجاهز إلا فيما يخص جهد التغذية حيث تم التحويل لـ $380V/50Hz$ بدل $460V/60Hz$.



الشكل (9) النموذج الرياضي للتحكم بالمحرك

2 محاكاة استخدام مرشح غير فعال

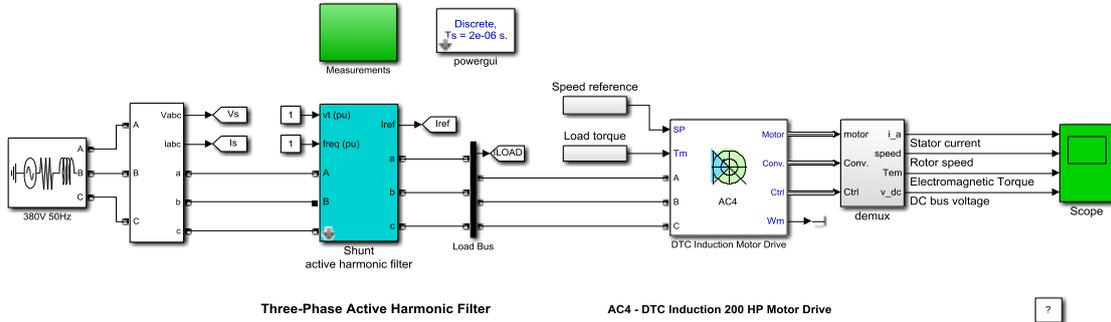
يبين الشكل (10) استخدام مرشح غير فعال مع النظام المدروس حيث تم إضافة المرشح على التفرع بين المنبع والحمل وتم قياس التيار عند الحمل وعند المنبع والمقارنة بينهما. بعد معرفة نوع التوافقيات الملوثة لتيار الحمل تم تزويد النظام بمرشحات غير فعالة لنفس التوافقيات المحددة. التوافقيات هي: $5^{th}, 7^{th}, 11^{th}, 13^{th}, 17^{th}, 19^{th}$. لدينا أربعة مرشحات مزدوجة التوليف كل منها يعوض استطاعة ردية $10kVAR$ ويعامل جودة $16, 23^{th}, 25^{th}$.



الشكل (10) نموذج النظام المدروس مع استخدام مرشح غير فعال

3 محاكاة تشغيل النظام مع مرشح فعال

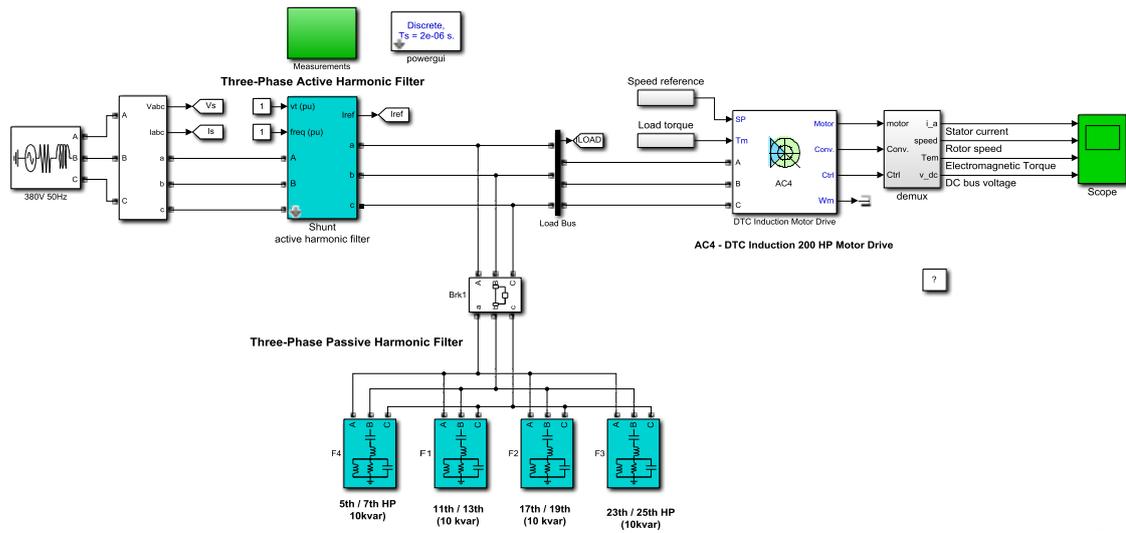
بعد أن جربنا في الفقرة السابقة استخدام المرشح غير الفعال وتبين أنه غير كاف لتحييد التوافقيات قمنا في هذه الفقرة بمحاكاة استخدام المرشح الفعال. يبين الشكل (11) مخطط المحاكاة لنظام القيادة بعد إضافة مرشح فعال تفرعي على التوازي بين المنبع والحمل. وظيفة المرشح الفعال هي توليد التيار التوافقي اللازم لتحييد توافقيات التيار.



الشكل (11) النظام المدروس مع مرشح فعال تفرعي

4 محاكاة تشغيل النظام مع مرشح هجين

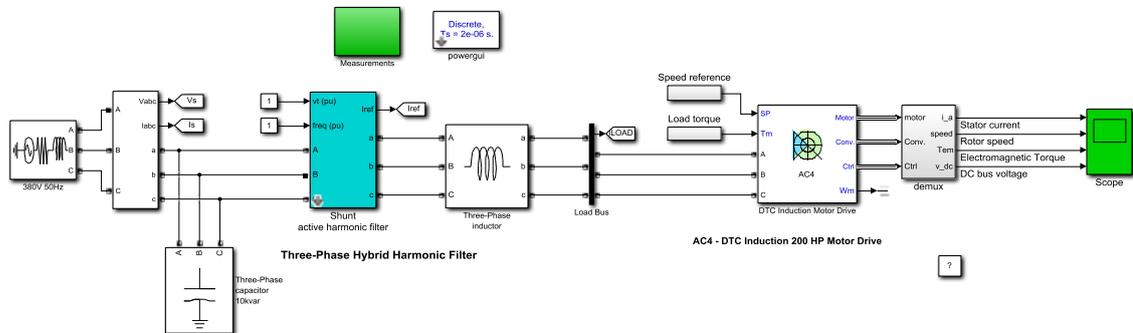
من أجل التخلص من مشاكل المرشح الفعال تم إضافة مرشح غير فعال بين المرشح الفعال والحمل كما في الشكل (12). هذا التركيب هو أحد أشكال المرشح الهجين وهو مرشح فعال تفرعي ومرشح غير فعال تفرعي. تم استخدام نفس المرشحين المستخدمين سابقاً كل على حدى واستخدامهما هنا كمرشح هجين.



الشكل (12) المرشح الهجين فعال تفرعي وغير فعال تفرعي

5 محاكاة تشغيل النظام مع مرشح هجين مقترح

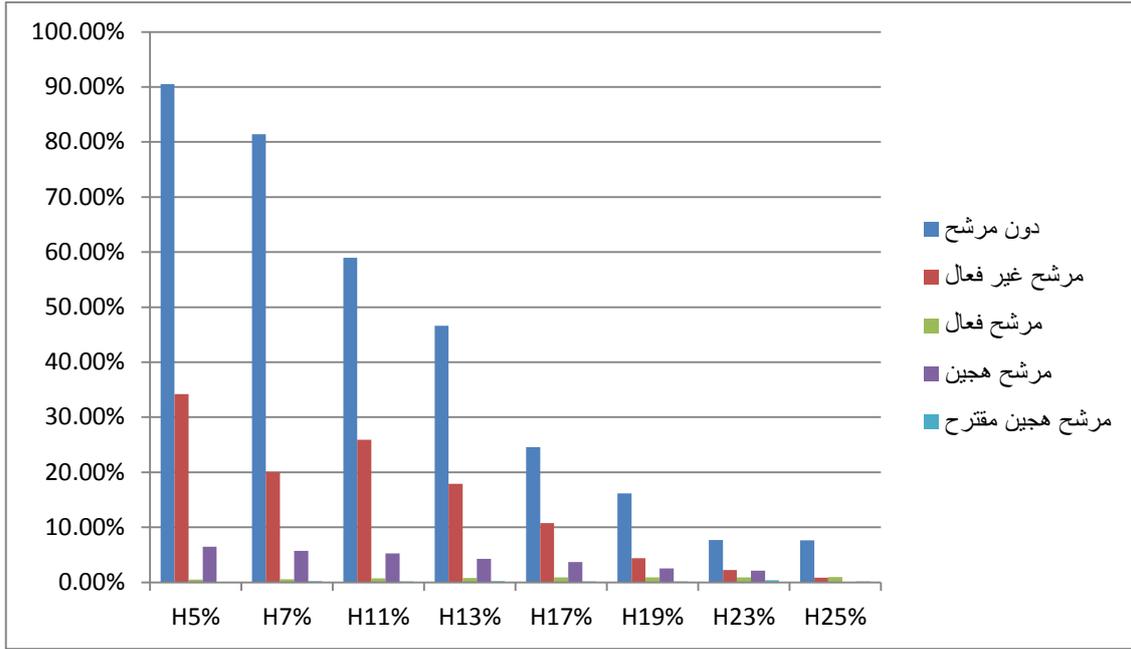
يوضح الشكل (13) نموذج قيادة المحرك التحريضي بعد إضافة المرشح الهجين المقترح. لقد تم إضافة ملف لتنعيم التيار جهة الحمل ومكثف لتنعيم الجهد جهة المنبع. نظرياً الهدف هو التخلص من التوافقيات عالية التردد للتيار والجهد التي لم نستطع التخلص منها في المرشح الهجين التقليدي. قيمة محارضة الملف $10^{-4}H$ وقيمة الاستطاعة الرديئة المعوضة من المكثف $10kVAR$ أما المرشح الفعال فله نفس البارامترات السابقة.



الشكل (13) نموذج قيادة المحرك مع استعمال المرشح الهجين المقترح

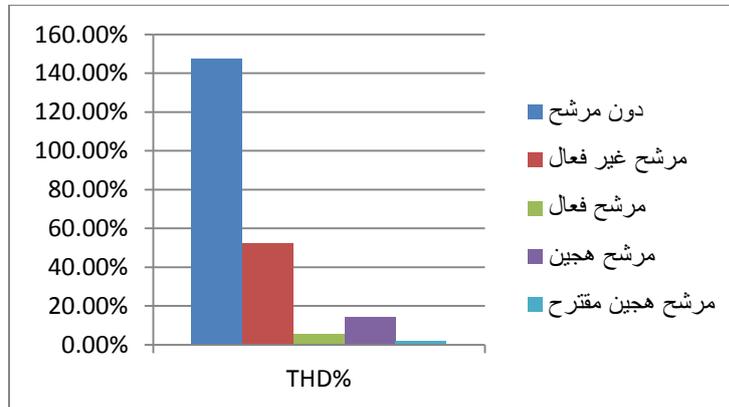
النتائج والمناقشة:

فمنا فيما يلي بمقارنة بين الحالات المدروسة في المحاكاة السابقة من خلال التوافقيات ومعامل التشوه التوافقي لتيار وجهد المنبع. يوضح الشكل (14) مقارنة بين الحالات المدروسة من حيث التوافقيات ذات المطال الأكبر حيث قمنا برسم نسب التوافقيات من التوافقية الأساسية لكل الحالات على شكل مخطط. واضح من الشكل (14) أن التوافقيات كانت بأعلى نسبة في حالة النظام دون مرشح ثم تناقص نسبة التوافقيات مع مرشح غير فعال. عند إضافة مرشح فعال فقط تنخفض نسبة التوافقيات كثيراً أما مع مرشح هجين (فعال وغير فعال) فتعود للارتفاع ولكن تبقى أقل من حالة مرشح غير فعال فقط. أفضل حالة من ناحية انخفاض مطالات التوافقيات هي في حالة المرشح الهجين المقترح حيث نلاحظ انخفاض كبير جداً في نسب التوافقيات.



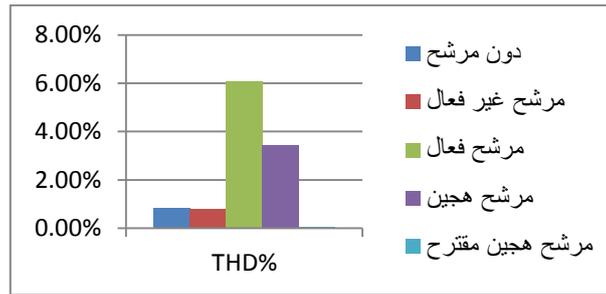
الشكل (14) مقارنة التوافقيات في الحالات المدروسة

في الشكل (15) تم عرض تغير معامل التشوه التوافقي للتيار حيث يلاحظ ارتفاع قيمته دون مرشح إلى 147% بينما يهبط إلى 52.16% مع مرشح غير فعال أي نقص بمقدار ثلثين. أما في حالة المرشح الفعال فيهبط بشدة إلى 5% ليعاود الارتفاع عند استخدام المرشح الهجين إلى 14.24%. أفضل الحالات من ناحية معامل التشوه التوافقي (أصغر قيمة له) هي حالة المرشح الهجين المقترح إذ تصل إلى 1.88%، وذلك لأن المرشح الهجين المقترح يدمج بين مزايا المرشح الفعال والغير فعال ونتيجة تركيب البنية لهما.



الشكل (15) مقارنة عامل التشوه التوافقي لتيار المنبع للحالات المدروسة

يوضح الشكل (16) مقارنة معامل التشوه التوافقي في إشارة جهد المنبع حيث يكون منخفضاً في الحالة دون مرشح 0.85% ينقص معامل التشوه التوافقي في حالة إضافة مرشح غير فعال بنسبة قليلة إلى 0.78%. إلا أن معامل التشوه التوافقي يرتفع بشدة عند استخدام مرشح فعال ويصل إلى 6.09%. ثم ينخفض بشكل نسبي عند إضافة المرشح الهجين إلى 3.43%. أفضل الحالات من ناحية معامل التشوه التوافقي للجهد (نقصانه) هي حالة المرشح المقترح حيث انخفض إلى 0.07% وهي قيمة صغيرة جداً وشبه مثالية.

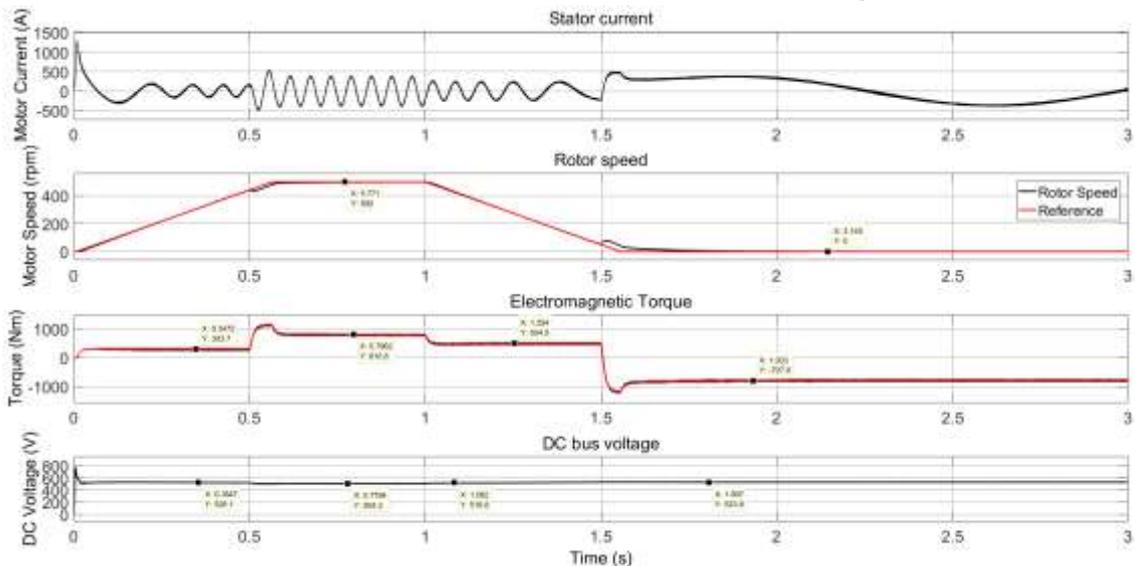


الشكل (16) مقارنة معامل التشوه التوافقي لجهد المنبع للحالات المدروسة

بعد هذه المقارنة بين الحالات المدروسة في هذا البحث سنركز على نتائج استخدام المرشح الهجين المقترح من ناحية شكل موجة جهد وتيار المنبع ومعامل التشوه التوافقي لهما.

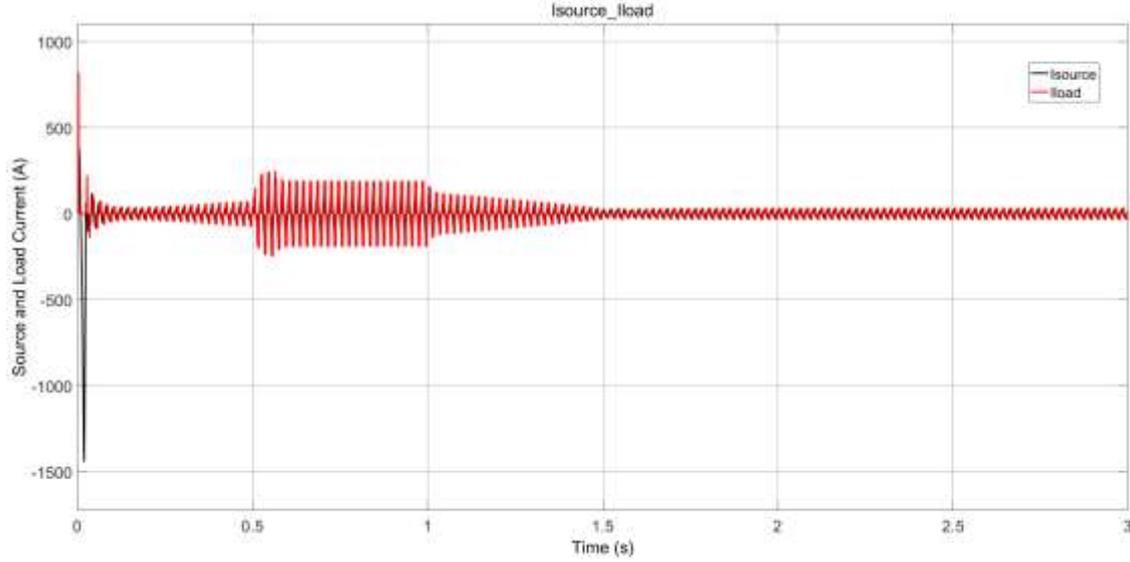
نتائج تأثير إضافة المرشح الهجين المقترح

من خلال الشكل (17) نتأكد أولاً أن عمل المحرك لم يتأثر بإضافة المرشح الهجين المقترح. نلاحظ بالفعل أن السرعة لا تزال تتبع مرجعها والجهد المستمر مثبت على قيمته المرجعية. يبين الشكل (17) استجابة المحرك المقاد بوجود المرشح الهجين المقترح حيث لوحظ أنه يستجيب بشكل طبيعي لمرجع السرعة والعزم أي أن المرشح لم يؤثر على أدائه بصورة سلبية.



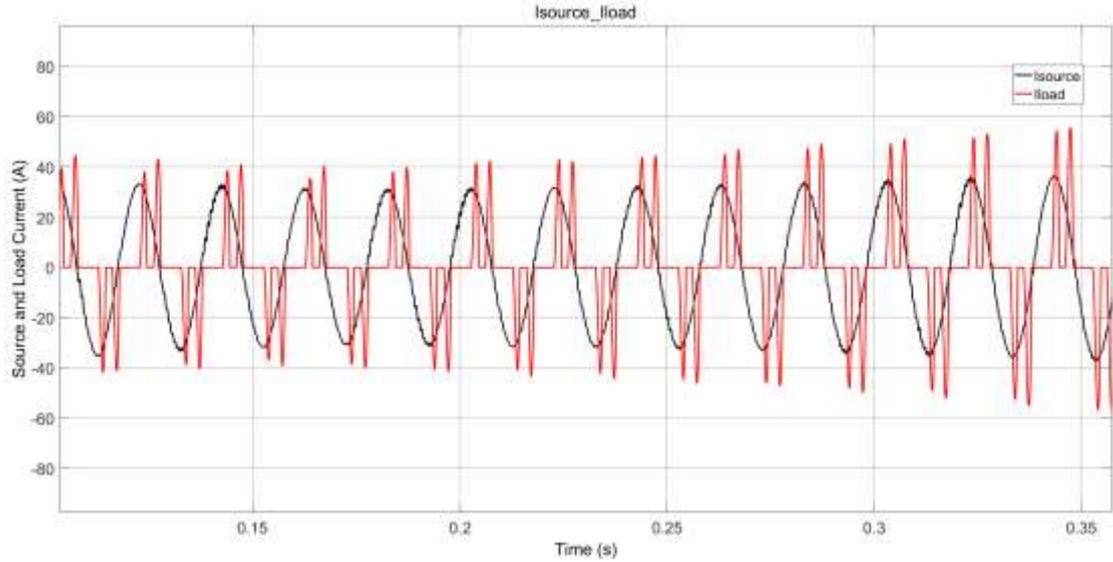
الشكل (17) استجابة المحرك في حالة المرشح الهجين المقترح

لتحقيق الاستجابة الزمنية في الشكل (17) سيتغير التيار قبل المقوم وهو ما يسمى تيار الحمل والتيار الشبكة وهو ما يسمى تيار المنبع كما هو موضح في الشكل (18). في الشكل (18) مقارنة بين تيار المنبع والتيار الحمل مع استخدام المرشح الهجين المقترح حيث نلاحظ تغير التيارين بشكل متماثل لتلبية تتبع مرجع السرعة وتغيير الحمولة.



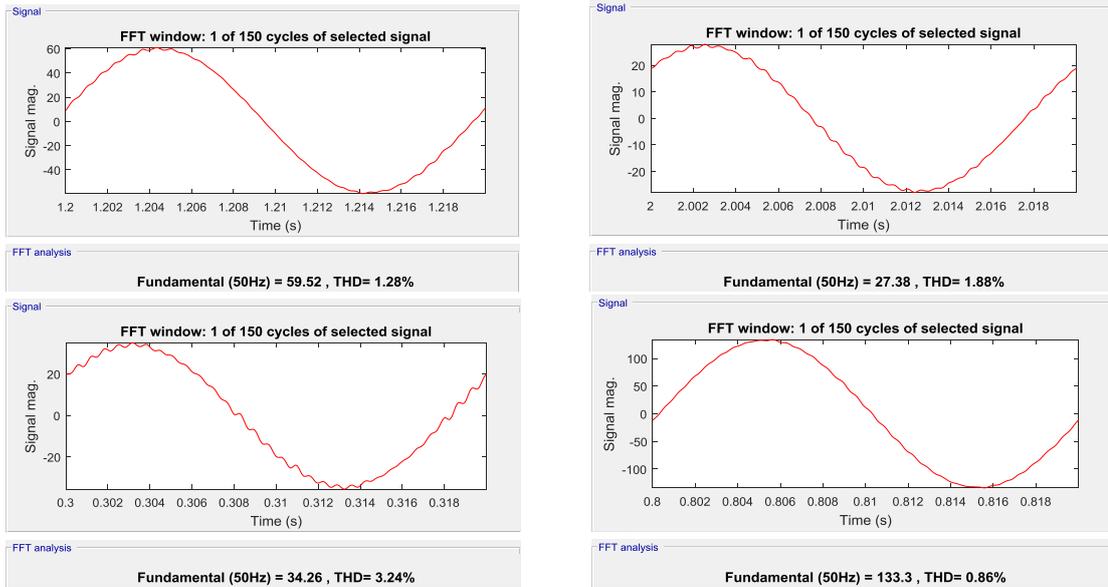
الشكل (18) تيار المنبع وتيار الحمل حالة المرشح الهجين المقترح

للتوضيح أكثر تم تكبير الشكل (18) كما في الشكل (19) حيث نلاحظ التغير النبضي لتيار الحمل بينما يتغير تيار المنبع بشكل جيبى مع تعرج بسيط في حالة التسارع. كما أن تيار المنبع ينزاح قليلاً متقدماً على تيار الحمل. بالنتيجة تيار الحمل مليء بالتوافقيات بينما تيار المنبع أصبح نظيفاً بفضل المرشح الهجين المقترح.

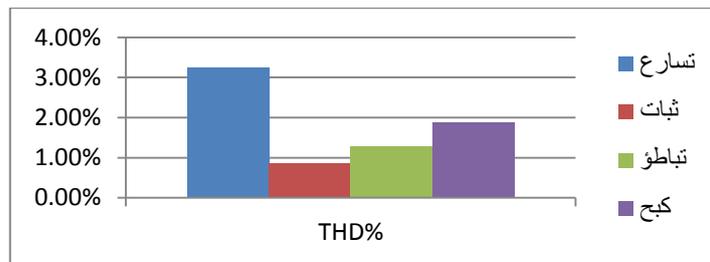


الشكل (19) تكبير الشكل (18) تيار المنبع وتيار الحمل حالة المرشح الهجين المقترح (تسارع)

نفس الملاحظات السابقة يمكن تعميمها على حالتي ثبات السرعة والتباطؤ والكبح. يوضح الشكل السابق تحسن كبير جداً بموجة تيار المنبع لتصبح جيبيية وبالتالي من المتوقع تحسن كبير في معامل التشوه التوافقي للتيار. لوحظ، الشكل (20)، أن معامل التشوه التوافقي انخفض إلى $THD = 1.88\%$ في فترة الكبح وهي أصغر قيمة من بين الحالات المدروسة لتيار المنبع. كما لوحظ أن معامل التشوه التوافقي لتيار المنبع قد تحسن في جميع مجالات عمل المحرك خاصة عند الحمل الإسمي وبشكل أقل عند الكبح والتسارع كما يوضح الشكل (21).

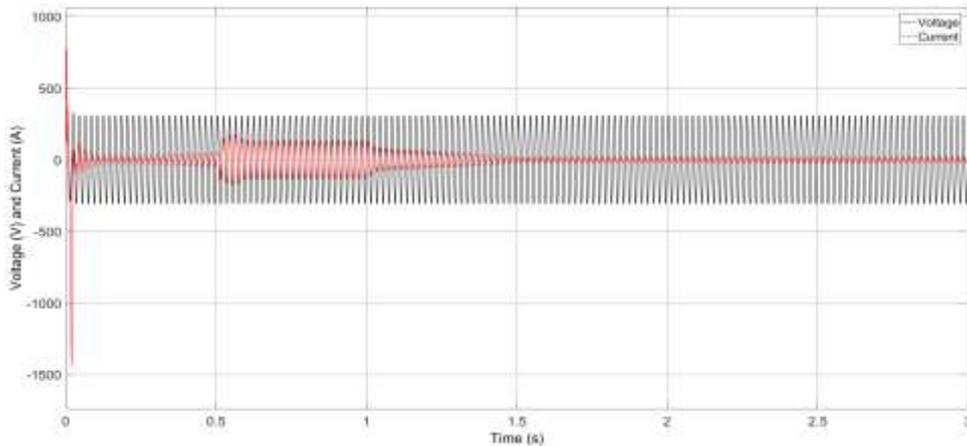


الشكل (20) تغير معامل التشوه التوافقي لتيار المنبع حسب مجالات عمل المحرك (مرشح هجين مقترح)



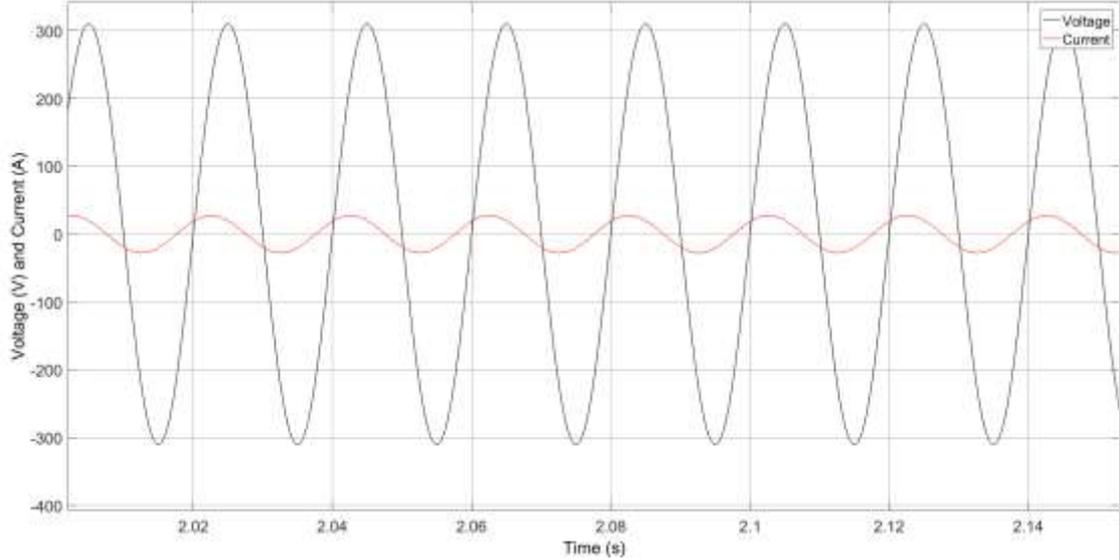
الشكل (21) مقارنة معامل التشوه التوافقي لتيار المنبع حسب مجالات عمل المحرك (مرشح هجين مقترح)

لقد تحسن شكل موجة التيار بشكل كبير في حالة المرشح الهجين المقترح ماذا عن موجة الجهد للمنبع؟ فيما يلي تم عرض نتائج المحاكاة بالنسبة لإشارة جهد المنبع. المفروض أن يتحسن شكل موجة الجهد بشكل ملحوظ بفضل استخدام المكثف في المرشح الهجين المقترح. يبين الشكل (22) تيار وجهد المنبع مع المرشح الهجين المقترح على طول مجال عمل المحرك التحريضي.



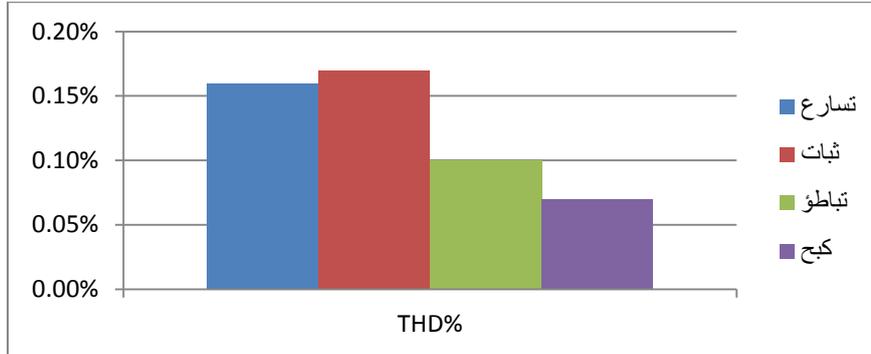
الشكل (22) جهد وتيار المنبع مع المرشح الهجين المقترح

للتوضيح أكثر تم تكبير الشكل (22) في الشكل (23) في حالة الكبح حيث يلاحظ جهد وتيار جيبيين والتيار سعوي متقدم على الجهد. لوحظ أيضاً أن الجهد والتيار جيبيين مع توافق في الطور في حالة الحمل الإسمي في حالة التباطؤ وثبات السرعة. أما في حالة التسارع حيث يتسارع المحرك دون حمل فيتقدم التيار على الجهد أي تيار سعوي.



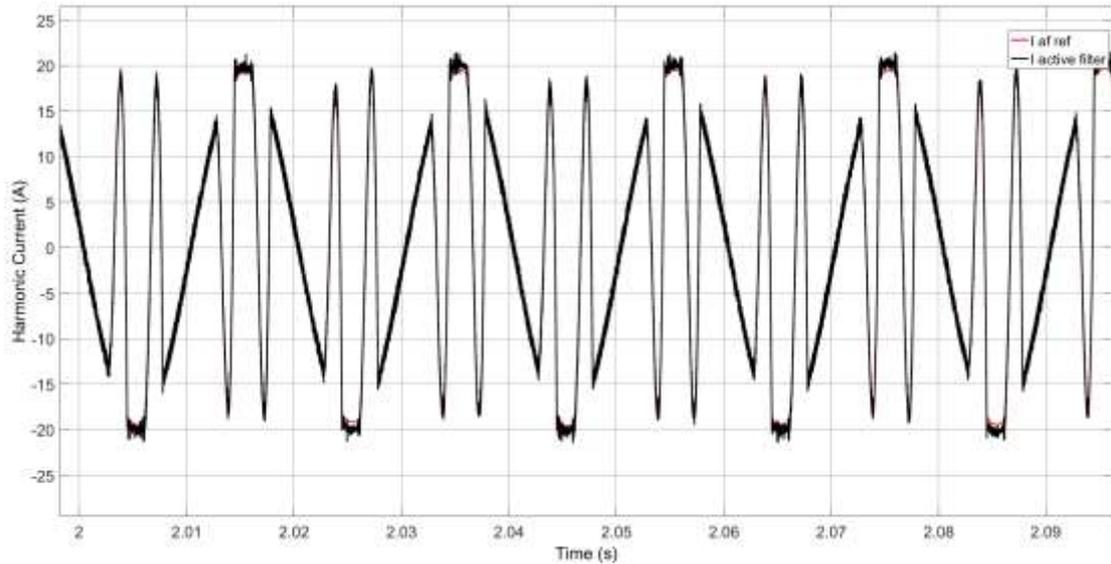
الشكل (23) تكبير الشكل (22) جهد وتيار المنبع مع المرشح الهجين المقترح حالة الكبح

أما معامل التشوه التوافقي للجهد فواضح أنه منخفض ويتغير حسب نمط عمل المحرك كما في الشكل (24). عند المقارنة في الشكل (24) بين مجالات العمل يلاحظ أن حالة الكبح فيها أقل تشوه توافقي للجهد بينما أعلى تشوه هو في حالة الحمل الكامل أي ثبات السرعة.



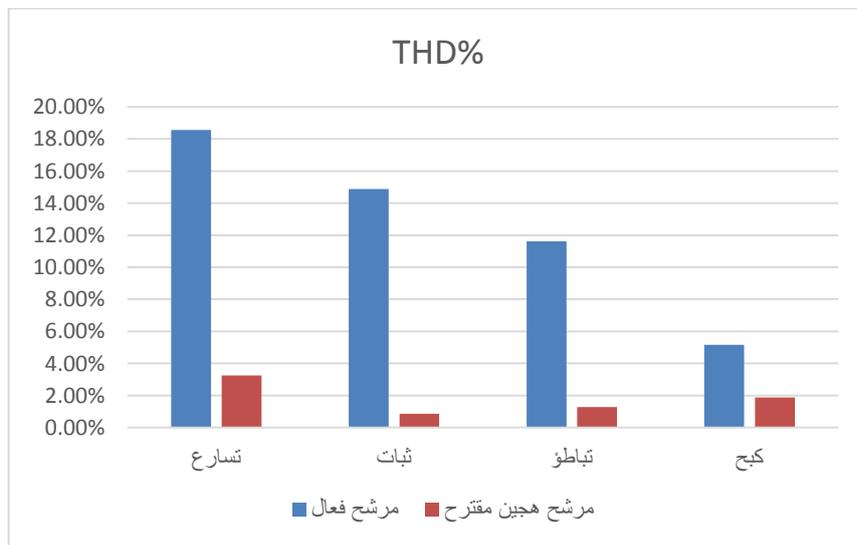
الشكل (24) مقارنة معامل التشوه التوافقي لجهد المنبع مع المرشح الهجين المقترح حسب نمط عمل المحرك

إن الأداء الجيد للمرشح الهجين يعود لكل من المرشح الفعال والمرشح غير الفعال سوية. فالمرشح الفعال يقوم بتوليد التيار التوافقي المرجعي ليغني تيار التوافقيات وهذا ما يحدث بالفعل ويمكن التحقق من ذلك في الشكل (25). حيث يظهر التيار التوافقي المرجعي باللون الأحمر بينما التيار التوافقي المنتج من المرشح الفعال باللون الأسود ويلاحظ التطابق الشديد بينهما وهو المطلوب. يبين الشكل (25) في منطقة الكبح للمحرك وجود تطابق بين تيار المرجع والتيار الخارج مع بعض التذبذب.



الشكل (25) تيار المرشح الفعال عند استخدام المرشح الهجين المقترح في منطقة الكبح

خلاصة النتائج في الفقرة السابقة أن التشوه التوافقي للتيار والجهد تم تخفيضهما بشكل شبه مثالي بفضل استعمال المرشح الهجين المقترح. كما أن جهد المنبع أصبح أكثر ثباتاً وجهد المكثف في المرشح الفعال انخفض وأصبح أقل تذبذباً. نقارن في الشكل (26) بين المرشح الفعال والمرشح الهجين المقترح حيث يلاحظ التميز واضح للمرشح الهجين المقترح من ناحية تخفيض التشوه التوافقي الكلي.



الشكل (26) مقارنة عامل التشوه التوافقي لتيار المنبع بين مرشح فعال والمرشح الهجين المقترح

الاستنتاجات والتوصيات:

- التحليل التوافقي للتيار والجهد للمنبرع في جميع الحالات المدروسة ليس ثابتاً بل يزداد أو ينقص حسب نمط عمل النظام (تغير مرجع السرعة والعزم للمحرك التحريضي متغير السرعة) وقيمة معامل التشوه التوافقي هي بين 0.86% و 1.47%.

- استخدام المرشحات غير الفعالة حسن من شكل موجة التيار والجهد بحوالي 65% أي بشكل كبير وأثر المرشح غير الفعال كان أكبر في توافقيات الجهد من توافقيات التيار.
- إضافة المرشح الفعال أثار مباشرة في إنقاص توافقيات التيار بحوالي 95% ولكن ازدادت توافقيات الجهد ولوحظ أن المرشح الفعال يلوث التيار والجهد بتوافقيات عالية التردد.
- استخدام مرشح هجين من مرشح فعال ومرشح ترددات عالية غير فعال لم يف بالغرض عند نسبة مساهمة منخفضة بالاستطاعة الردية وعند زيادة المساهمة أصبح سلوك النظام مهتراً (حالة رنين) وبلغ مطال التيار قيم عالية غير مقبولة بالمقارنة مع القيم الطبيعية. لهذا السبب تم العودة للاستعانة بالمرشح غير الفعال لترشيح التوافقيات المنخفضة.
- استخدام مرشح هجين مكون من مرشح فعال ومرشح غير فعال للتوافقيات المنخفضة يلبي الغرض في أنقاص توافقيات التيار والجهد ولكن بنسبة أقل من المرشح الفعال أي تحسين بحوالي 90%. فالمرشح الفعال أفضل من الهجين من ناحية توافقيات التيار ولكن المرشح الهجين أفضل من المرشح الفعال من ناحية توافقيات الجهد.
- استخدام المرشح الهجين المقترح حل جميع المشكلات السابقة من ناحية تخفيض ملحوظ وشديد في معامل التشوه التوافقي حوالي 98.7% ويشمل ذلك توافقيات التيار وجهد المنبع. حيث وصلت قيمة معامل التشوه التوافقي للتيار إلى 1.88% وللجهد إلى 0.07% وهي قيم شبه مثالية. المشكلة الوحيدة هي في تقدم تيار المنبع على الجهد (تيار سعوي) أي عدم القدرة على ضبط عامل الاستطاعة $\cos(\varphi)$ للمنبع على قيمة قريبة من الواحدية. نوصي بتطوير البحث بالاتجاهات التالية:
- استخدام المرشحات الفعالة والهجينة في نظام التحكم بالسرعة المتغيرة في المصانع والآلات غير المزودة به ودراسة أثر ذلك على أرض الواقع واختبار أدائها.
- تطوير خوارزمية التحكم بالمرشح الفعال (الهجين) بحيث تستبدل طريقة عروة بطاء التيار بطريقة تحكم أخرى تسبب تلوث أقل بالتوافقيات ذات التردد العالي.
- البحث عن طريقة لضبط عامل الاستطاعة على قيمة قريبة من 1.
- تطوير خوارزمية التحكم المباشر بالعزم باستخدام طرق الذكاء الصناعي ودراسة أثر ذلك على التوافقيات.

References:

- [1]. Mohammad A.S. Masoum, Ewaldf. Fuchs, “Power Quality in Power Systems and Electrical Machines”, second Edition, 2015 Elsevier.
- [2]. Sozi Haj Hussein, “Higher Harmonics and its effect on the stability of the Induction Machine’s work”. *Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (38) No. (3) 2016*.
- [3]. Abdalla said, Ali Mahmoud, Raghda Barakat, “The Effect of Harmonics on the Reactive Power Compensation Capacitors” *Tishreen University Journal for Studies and Scientific Research- Engineering Sciences Series Vol (25) No (14) 2003*.
- [4]. Bassam Ateiah, Fowad Jabal, Basam Mouselli, “Effect of Harmonics Generated by Adjustable Speed Drives (ASD) on Reactive Power Compensation Capacitors”. *Tishreen University Journal for Studies and Scientific Research- Engineering Sciences Series Vol. (27) No (3) 2005*.
- [5]. Ali Mahmoud, “Evaluation of losses in the induction motor resulting from higher harmonics when fed through thyristor voltage converters”. *Tishreen University Journal for Studies and Scientific Research- Engineering Sciences Series Vol. (15) No (1) 1993*.

- [6]. C. Sankaran, “*Power Quality*”, 2002 by CRC Press LLC.
- [7]. Kaniliam Y, Mohammad, “*Harmonics in electrical networks*” forth edition 2005.
- [8]. Fouad Jabal, “Designing Filters geared to reducing Harmonics in Industrial and Electrical Networks”. Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (30) No. (2) 2008
- [9]. Ghassan Hayek, Ahmad Haj Ahmad, Tarek Hosein. “*Modeling and Simulation Of Filters To Handle The Electromagnetic Compatibility (EMC) Of Inverter In Electrical drives*” Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (36) No. (5) 2014.
- [10]. Carlo Makdisie, Issam Houssamo, Hassan Kenjrawy. “*Use a Multi-level Series Active Filter Controlled by Sinusoidal Pulse Width Modulation Technology to Power Quality Enhancement in an Electrical Distribution Network*. Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (43) No. (1) 2021
- [11]. Ola Khaddam, “*Improving electrical power quality in a low – voltage network using an active fuzzy – controlled filter*”. Master thesis 2016
- [12]. Monaf Solieman. “*Power quality improvement using Predictive control of Shunt active filter*”. Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (37) No. (4) 2015.
- [13]. Meera S Nair, Deepa Sankar, “*A Review of Hybrid Filter Topologies for Power Quality Compensation*”, international Research Journal of Engineering and Technology (IRGET), Vol (2), No (4), July, 2015.
- [14]. Marshal Andrea Hutabarat, Syafruddin Hasan, Ali Hanafiah Rambe, Suherman, “*Design and simulation hybrid filter for 17 level multilevel inverter*”, Bulletin of Electrical Engineering and Informatics, Vol. 9, No. 3, June 2020, pp. 886~897.
- [15]. Jarupula Somlal, Venu Gopala Rao Mannam, “*Analysis of Discrete & Space Vector PWM Controlled Hybrid Active Filters for Power Quality Enhancement*”, International Journal of Advances in Engineering & Technology, Jan 2012.
- [16]. Narendra Babu P, Biwajit Kar, Biswajit Halder, “*Modelling and Analysis of Hybrid Active Power Filter for Power Quality Improvement Using Hysteresis Current Control Technique*”, IEEE, 2016.
- [17]. Dhrumil Daftary, M. T. Shah, “*Design and Analysis of Hybrid Active Power Filter for Current Harmonics Mitigation*”, IEEE 2019.