

نمذجة ومحاكاة المرشحات لمعالجة الاضطرابات الكهرومغناطيسية (EMC) للمبدلة الترددية في القيادة الكهربائية

الدكتور غسان حايك*

الدكتور أحمد حاج أحمد**

طارق حسين***

(تاريخ الإيداع 31 / 8 / 2014. قُبل للنشر في 20 / 10 / 2014)

□ ملخص □

إن التطور الكبير لعناصر الكترونيات القدرة أدى إلى زيادة سرعة استجابة ومردود المبدلات الترددية التي أصبحت تستخدم اليوم على نطاق واسع للتحكم في سرعة المحركات التحريضية في كثير من التطبيقات. وبالرغم من المزايا العديدة للمبدلات الترددية فإن ما تنتجه من اضطرابات (تشويش) وتداخل كهرومغناطيسي Electromagnetic Compatibility (EMI) يؤدي إلى زيادة تسخين المحرك وتضرر عازليته وانخفاض مردوده وانخفاض العمر الفني للمحرك وغيرها من الآثار السلبية على المحرك. إن المصدر الرئيسي لهذه الاضطرابات (التشويش) هو التبديل السريع بين ترانزستورات المبدلة وما ينتج عن ذلك من تغير سريع في قيمة الجهد (dv/dt) والتيار (di/dt) بالإضافة الى العناصر العرضانية الناشئة بين ملفات المحرك والهيكل المؤرض. في هذا البحث سوف نقوم بتصميم نوعين من المرشحات التي سنتوضع بين المحرك والمبدلة الترددية، المرشح الأول غير فعال والمرشح الثاني هو مرشح فعال وسنقوم بنمذجة ومحاكاة هذين المرشحين باستخدام برنامج (MATLAB) للوصول إلى الحل الأمثل للتخلص من الاضطرابات الناتجة عن المبدلة الترددية. وتبين نتائج المحاكاة فعالية المرشح الفعال المقترح بالمقارنة مع المرشح غير الفعال في التخلص من الاضطرابات الكهرومغناطيسية الناتجة عن المبدلات الترددية.

الكلمات المفتاحية: المبدلات الترددية - محرك تحريضي ثلاثي الطور - التوافق الكهرومغناطيسي (EMC) -

مرشح

* أستاذ - قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية .
** مدرس - قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية .
*** طالب دراسات عليا (ماجستير) - قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية .

Modeling and Simulation Of Filters To Handle The Electromagnetic Compatibility (EMC) Of Inverter In Electrical drives

Dr. Ghassan Hayek*
Dr. Ahmad Haj Ahmad**
Tarek Hosein***

(Received 31 / 8 / 2014. Accepted 20 / 10 / 2014)

□ ABSTRACT □

The development of power electronics has led to increase response's speed of inverters that are widely used today to control the inductive motors speed in many applications. Although these inverters have many advantages, what they produce from noises and electromagnetic interference (EMI) led to increase motor heating and reduce its life and other negative effects on the motor. The main source of these noises is the fast switching between inverter transistors and what it cause from fast changes in the value of (dv/dt) and (di/dt) in addition to appearance of parasitic elements between the motor's inductances and frame. In this work we will design two types of filters that will be located between inverter and motor. the first one is a passive filter and the second is active filter those will be modeling and Simulink using matlab to find the best solution eliminate these inverter noises. The simulation results show the efficiency of the active filter compering with the passive filter, where the active filter eliminate the electromagnetic disturbances produced by inverters.

Key words: Inverter – three phase induction motor – Electromagnetic compatibility (EMC) – Filter.

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

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

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

مقدمة :

إن التطور الكبير لعناصر الكهرونيات القدرة وبخاصة بعد ظهور تكنولوجيا ترانزستور (IGBT) الحديثة مما أدى إلى زيادة سرعة استجابة ومردود المبدلات الترددية التي أصبحت تستخدم اليوم على نطاق واسع للتحكم في سرعة المحركات التحريضية في كثير من التطبيقات. وبالرغم من المزايا العديدة للمبدلات الترددية بالمقارنة مع الطرق التقليدية (علبة تغيير السرعة، المسننات، الجنزير) من حيث إنها أكثر كفاءة وأصغر حجماً وأخف وزناً وأقل ضجيجاً فإن لها العديد من المساوئ من أبرزها ما تنتجه من اضطرابات (تشويش) وتداخل كهرومغناطيسي (EMI)، حيث إن المصدر الرئيسي لهذه الاضطرابات (التشويش) هو التبديل السريع بين ترانزستورات المبدلة وما ينتج عن ذلك من تغير سريع في قيمة الجهد (dv/dt) والتيار (di/dt) بالإضافة إلى العناصر الطفيلية الناشئة ومشاكل التداخل الكهرومغناطيسي EMI في العناصر الالكترونية المجاورة [1].

مع زيادة الحاجة إلى تنظيم التوافق الكهرومغناطيسي (EMC)، أصبح ما تنتجه المبدلات الترددية من اضطرابات وتداخل كهرومغناطيسي مصدر قلق كبير لما له من آثار سلبية على المحرك وشبكة التغذية الكهربائية [2].

أهمية البحث وأهدافه:

أهمية البحث تكمن في إطالة عمر المحرك وزيادة موثوقية المبدلة الترددية عبر التخلص من الاضطرابات الكهرومغناطيسية الناتجة عن المبدلة الترددية. الهدف من البحث هو تصميم مرشح لتخفيض الاضطرابات الناتجة عن المبدلة الترددية باستخدام النمذجة والمحاكاة باستخدام برنامج (MATLAB).

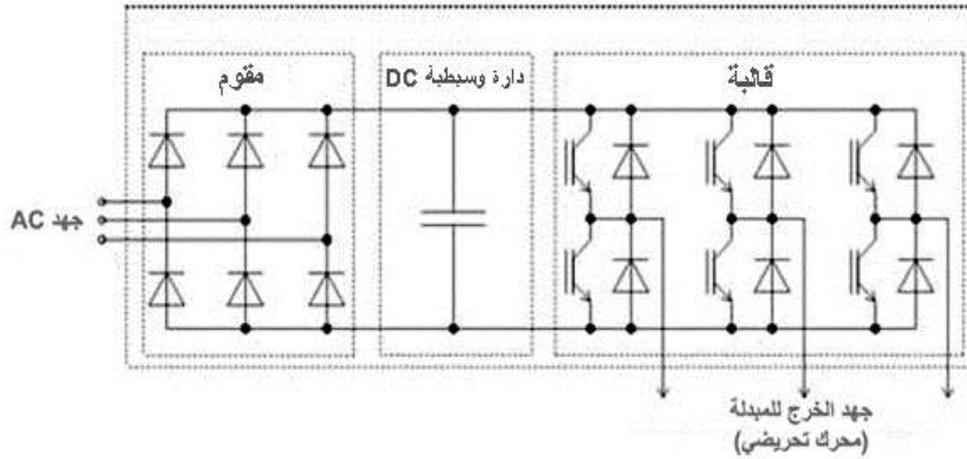
طرائق البحث ومواده:

سنقوم في هذا البحث بوضع تصميمين لمرشح للاضطرابات الكهرومغناطيسية الناتجة عن المبدلات الترددية أحدهما فعال والآخر غير فعال يتوضعان بين المبدلة والمحرك، ثم سنقوم بنمذجة ومحاكاة هذين التصميمين باستخدام (MATLAB) والمقارنة بين النتائج للوصول إلى المرشح الأفضل.

في البداية يجب التعرض إلى طريقة عمل منظومة قيادة محرك تحريضي حيث تستخدم المبدلة الترددية لتحويل طاقة التيار المتناوب ذي جهد وتردد ثابتين على المدخل إلى طاقة تيار متناوب بجهد خرج وتردد متحكم به حيث يمكن تعديل قيمته وتردده ضمن مجال واسع عبر التحكم بنبضات القذح للترانزستورات، عادة يتم استخدام المبدلات الترددية غير المباشرة (تحتوي على دائرة وسيطية للتيار المستمر) لقيادة المحركات التحريضية (لكونها الأكثر انتشاراً في التطبيقات الصناعية) كما هو مبين في الشكل (1).

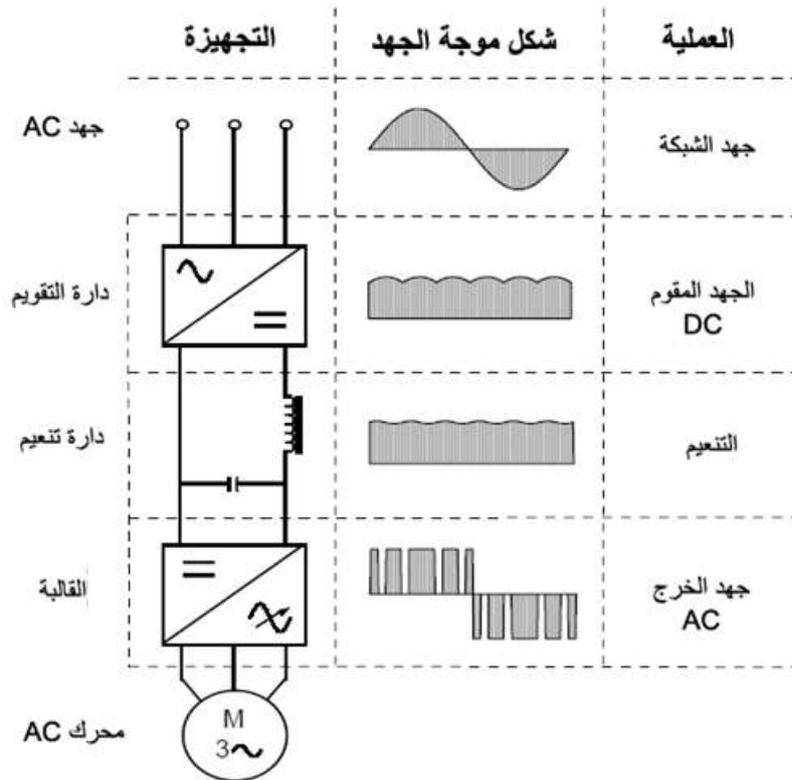
وتتألف هذه المبدلة من الأجزاء التالية:

- دائرة تقويم (ديود) تؤمن الدخل للقالبية.
- دائرة وسيطية يتم فيها تعميم خرج دائرة التقويم باستخدام سعة.
- دائرة قالبية على خرج دائرة التقويم تتكون من ترانزستورات IGBT (في أغلب الحالات).
- تستخدم مع القالبية نبضات التعديل العرضاني Pulse Width Modulation (PWM) الأكثر انتشاراً اليوم.



الشكل (1) مبدلة ترددية غير مباشرة

ويوضح الشكل (2) المراحل الأساسية لعمل نظام القيادة PWM. حيث تقوم دائرة التقويم بتحويل جهد التغذية المتناوب إلى جهد DC ثابت، ويتم تنعيم الجهد عبر مرشح للتقليل من تموجات الجهد الناتج عن عملية التقويم، ثم تقوم القابلة الجسرية بتحويل الجهد المستمر الثابت إلى جهد خرج ذي قيمة وتردد قابل للتعديل [3].

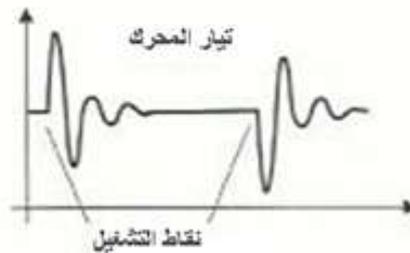


الشكل (2) مراحل العمل لمنظومة قيادة محرك كهربائي

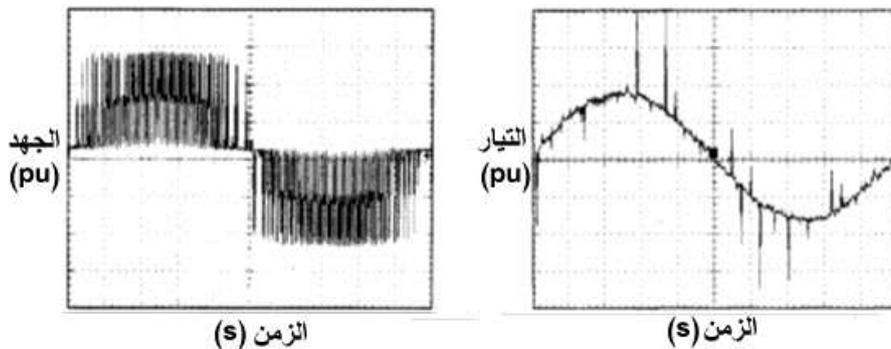
يتم قرح الترانزستورات باستخدام سلسلة منقطعة من نبضات القرح (بدل نبضة واحدة طويلة) وبالتالي تتكون موجة جهد الخرج من سلسلة من النبضات المستطيلة ذات عرض قابل للتعديل عبر تعديل عرض نبضات التحكم

للترانزستورات، وذلك من أجل أن يكون الجهد الفعال لخرج المبدلة أقرب ما يكون للشكل الجيبي وبالتالي تقليل التوافقيات في الجهد. ولكن لتوليد موجة جهد تحتوي على عدد أكبر من النبضات يتطلب من ترانزستورات المبدلة القيام بعدد أكبر من عمليات الفصل والوصل، ويسمى معدل التبديل الذي تعمل عنده الترانزستورات بتردد التبديل (F_c). وزيادة تردد التبديل تصبح موجة التيار المغذاة للمحرك أكثر جيبيية، وهذا التحسين في موجة تيار الخرج تقلل تسخين المحرك وبالتالي زيادة عمر عازلية المحرك.

ولكن زيادة تردد التبديل لترانزستورات المبدلة وما ينتج عن ذلك من تغير سريع في قيمة الجهد (dV/dt) والتيار (di/dt) يعتبر المصدر الرئيسي للاضطرابات في موجة الجهد والتيار التي تنتج عن المبدلة الترددية حيث تصبح موجة الجهد والتيار مكونة من سلسلة من اندفاعات قصيرة الزمن (على شكل قمم) كما هو مبين في الشكل (3). الشكل (4) يبين شكل موجة الجهد والتيار عند خرج المبدلة الترددية.



الشكل (3) تيار المحرك عند النقاط الزمنية لتشغيل عناصر القالبية



الشكل (4) الجهد والتيار عند خرج المبدلة الترددية من دون مرشح

وتعد هذه الاضطرابات مشكلة حقيقية عند استخدام المبدلات الترددية في قيادة محرك تحريضي، وتتمثل الآثار السلبية لهذه الاضطرابات في ما يلي [4]:

- تضرر عازلية الملفات.
- انخفاض مردود المحرك.
- زيادة التيارات الدوامية.
- سريان تيار تسريي عالي من ملفات المحرك عن طريق الهيكل الخارجي عبر الساعات العرضانية الناشئة بينها.
- تداخل كهرومغناطيسي (EMI) Electromagnetic Interference على العناصر الالكترونية وحساسات الموضع للأقطاب المغناطيسية.

بالإضافة إلى ما ذكر انتشار هذه الاضطرابات في الشبكة وتأثيرها على التجهيزات الموصولة مع هذه الشبكة [5].

ينتج عن المبدلات الترددية نوعان من التشويش (الاضطرابات):

• **الاضطراب المتباين (DM) Differential Mode noise**: حيث تمر إشارة الاضطراب عبر خط إلى الحمل وتعود عبر الخط الآخر، أي تمر في الخطين باتجاهين متعاكسين ولذلك سمي بالمتباين.

• **الاضطراب المتماثل (CM) Common Mode noise**: تمر إشارة الاضطراب عبر جميع الخطوط في نفس الاتجاه وتعود عبر سعات عرضانية طفيلية ناشئة إلى الأرض ولذلك سمي بالمتماثل.

من أجل الحد من الاضطرابات الكهرومغناطيسية الناتجة عن المبدلة الترددية فإننا سنستخدم مرشحاً يتوضع بين المبدلة الترددية والمحرك.

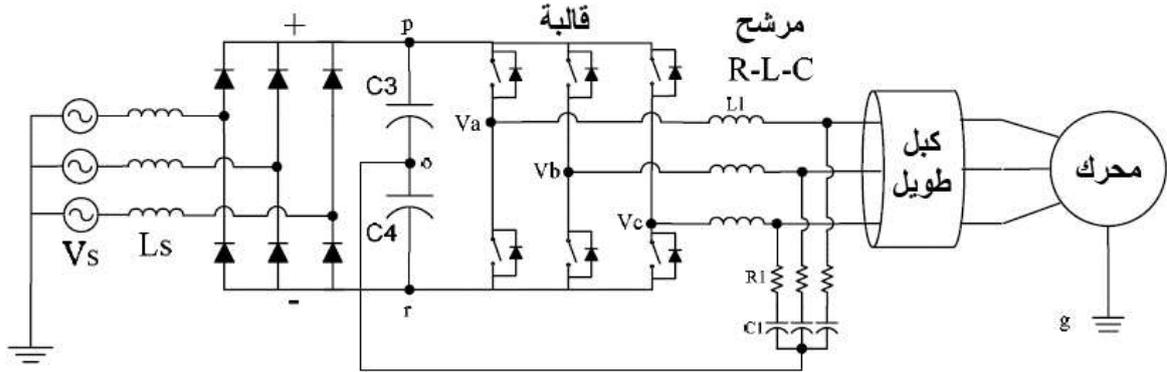
هناك نوعان من المرشحات [6]:

○ مرشحات فعالة.

○ مرشحات غير فعالة.

- المرشح غير الفعال المقترح:

المرشح المقترح هو مرشح R-L-C ذات توصيل نجمي والنقطة الحياضية للمرشح موصولة مع النقطة الوسطية بين المكثفين الموصولين على التسلسل في دائرة التيار المستمر كما هو موضح في الشكل (5).

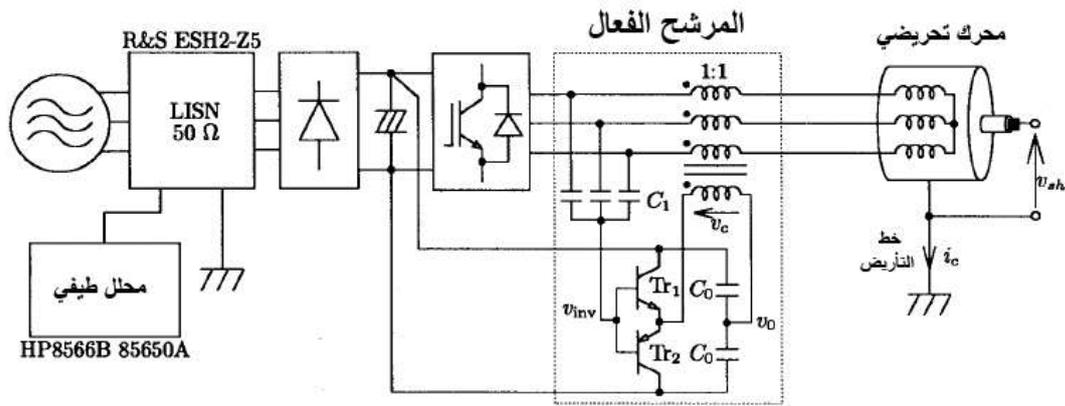


الشكل (5) مرشح غير فعال R-L-C

- المرشح الفعال المقترح:

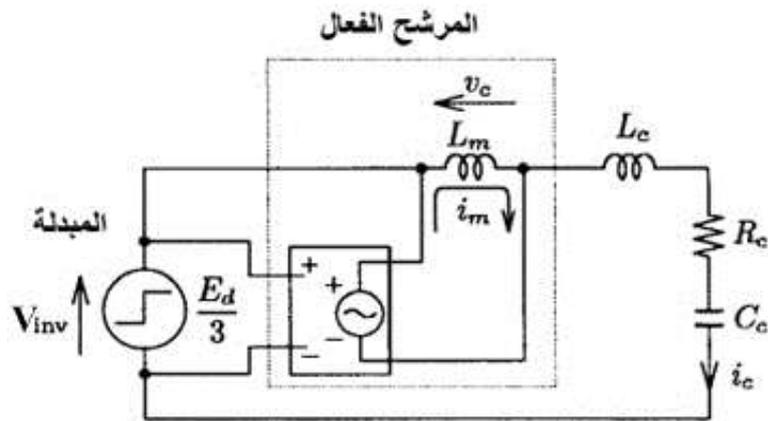
يبين الشكل (6) المرشح الفعال المقترح، يتوضع المرشح بين المبدلة الترددية والمحرك وهو يتكون من العناصر التالية: متعقب الاضطراب الذي يحتوي على ترانزستورين، محولة إلغاء الاضطراب، ثلاث مكثفات لتعقب جهود الاضطراب التي تظهر على خرج المبدلة الترددية، مكثفين جانبيين لمنع مرور المركبات المستمرة في الملف الإضافي لمحولة إلغاء الاضطراب. يتم قياس التيار التسريبي باستخدام Line Impedance Stabilization Network (LISN) (دائرة قياس التيار المتسرب) ويستخدم محلل طيفي لقياس طاقة الاضطراب.

يمر تيار الاضطراب (i_c) إلى الأرض عبر سعات عرضانية بين ملفات المحرك والهيكل، الهدف من المرشح الفعال التخلص من جهود الاضطراب المتماثل بحيث لا يمر تيار $i_c = 0$.



الشكل (6) المرشح الفعال

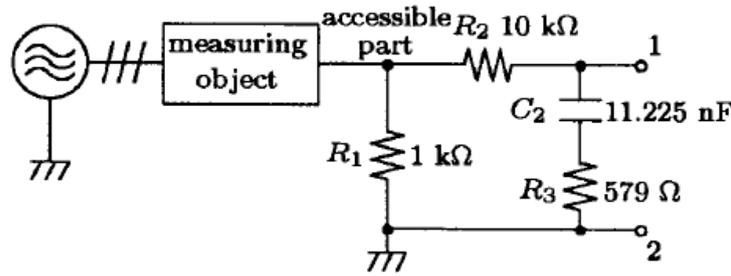
يبين الشكل (7) الدارة المكافئة للاضطراب، حيث C_c هي السعات الطفيلية بين ملفات المحرك والهيكل الخارجي، والمقاومة والمحاكاة للاضطراب المتماثل هي R_c و L_c . في الدارة المكافئة تم وضع جهد التغذية للمبدلة كمنبع جهد V_{inv} (أي يعطي جهد على شكل قفزات مستطيلة) لأن عملية التبديل في طور من أطوار المبدلة تسبب قفزة مستطيلة في جهد الاضطراب بمقدار $1/3$ من الجهد المستمر. في حال عدم وجود المرشح فإن التغير السريع في مستوى الجهد V_{inv} تسبب مرور تيار الاضطراب (i_c) إلى الأرض.



الشكل (7) الدارة المكافئة للاضطراب cm

منبع الجهد المتحكم به والمفاعلة L_m المحاطين بمربع منقط يمثلان المرشح. متعقب الاضطراب بالإضافة إلى المكثفات الثلاثة (C_1) تمثلان في الدارة المكافئة بواسطة منبع جهد متحكم به، من جهة أخرى فإن محولة إلغاء الاضطراب مماثلة للملف الخانق بالإضافة إلى توصيل ملف إضافي لخرج متعقب الاضطراب، لذلك فإننا نعبر عن محولة إلغاء الاضطراب في الدارة المكافئة بملف مغناطيسي (L_m) مع إهمال التحريضية المتسرية.

تستخدم دارة (LISN) الموضحة في الشكل (8) لقياس التيار المتسرب حيث يربط الجهاز على شبكة التغذية قبل المقوم ويوصل الأرضي لدارة الجهاز مع تأريض المحرك حيث يقوم الجهاز بقياس تيار الاضطراب في طريق عودته إلى الشبكة [7].

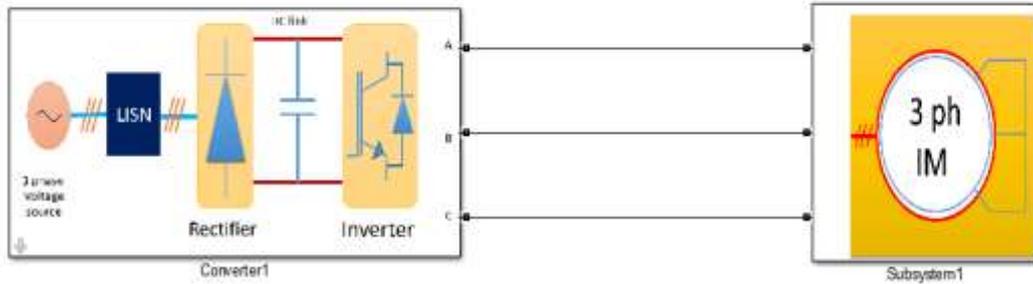


الشكل (8) (LISN)

إن مهمة المكثفات الثلاثة التفرعية الموصولة بشكل نجمي في الشكل (6) هي تحسس جهود الاضطراب التي تولدها المبدلة الترددية [8]، ثم يقوم متعقب الانبعاث بتطبيق جهد مماثل للجهد الذي تتحسسه المكثفات على محولة إلغاء الاضطراب. الملفات الأولية الثلاث لمحولة إلغاء الاضطراب ذات القطبية المبينة بالنقاط في الشكل (6) موصولة بين خرج المبدلة الترددية وأسلاك التغذية للمحرك، ولذلك فإن قطبية جهد التعويض V_c معاكسة لقطبية جهد الاضطراب الذي تولده المبدلة، وبالتالي فإنه يتم إلغاء جهد الاضطراب ولا يمر تيار اضطراب في خطوط التغذية للمحرك.

النمذجة:

يتم وضع نموذج منظومة قيادة كهربائية لمحرك تحريضي ثلاثي الطور عبر مبدلة ترددية ثلاثية الطور والمبينة في الشكل (9).



الشكل (9) نموذج منظومة قيادة محرك تحريضي

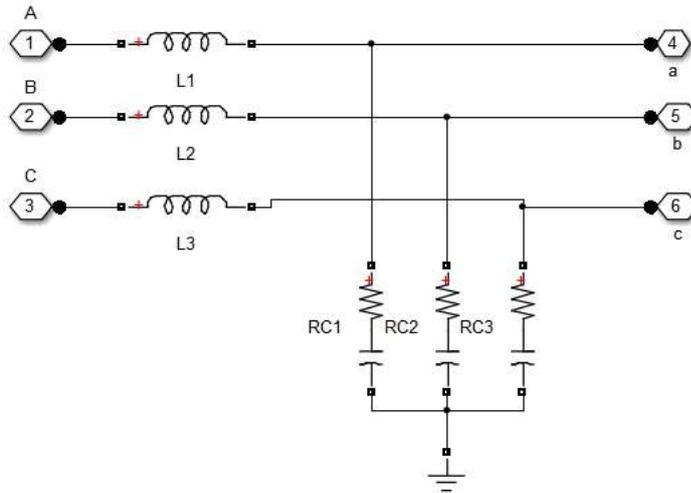
وتتكون هذه المنظومة من الأجزاء التالية:

- منبع جهد متناوب ثلاثي الطور.
- دائرة (LISN) من أجل قياس التيار التسري.
- دائرة تقويم جسرية ديودية ثلاثية الطور.
- دائرة DC وسيطية والتي تحتوي على مكثفات لتنعيم إشارة خرج المقوم.
- قالبة جسرية (IGPT) ثلاثية الطور.
- محرك تحريضي ثلاثي الطور له المواصفات التالية:

$$S_n=3730 \text{ VA} , V_n=380 \text{ V} , f_n=50 \text{ Hz}$$

تم نمذجة كل من المرشحين المقترحين سابقا كما يبين الشكل (10) و الشكل (11).

-a مرشح غير فعال:

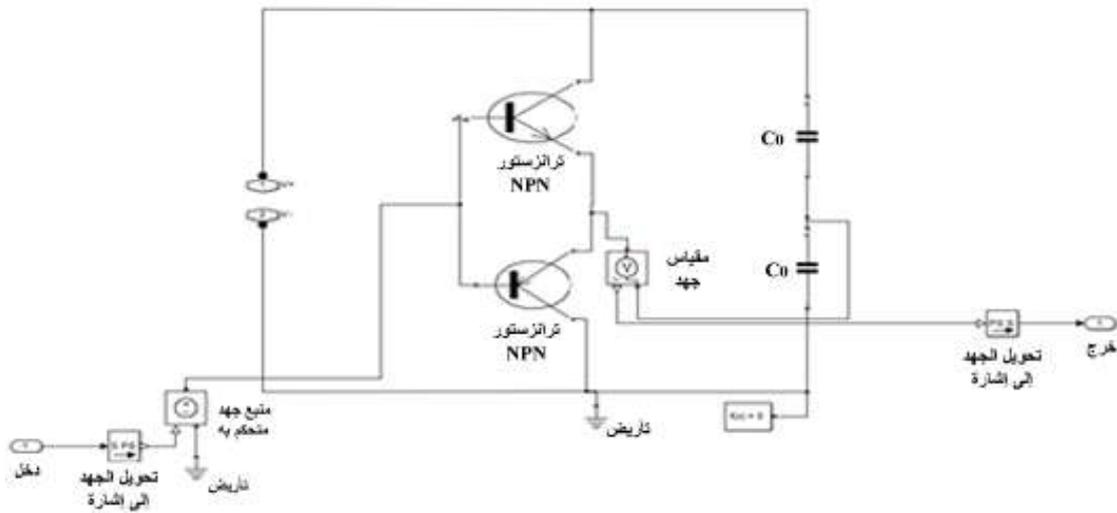


الشكل (10) مرشح غير فعال

حيث: $L=0.3 \text{ H}$, $R=470 \Omega$, $C=0.89 \mu\text{F}$

مرشح فعال:

-b

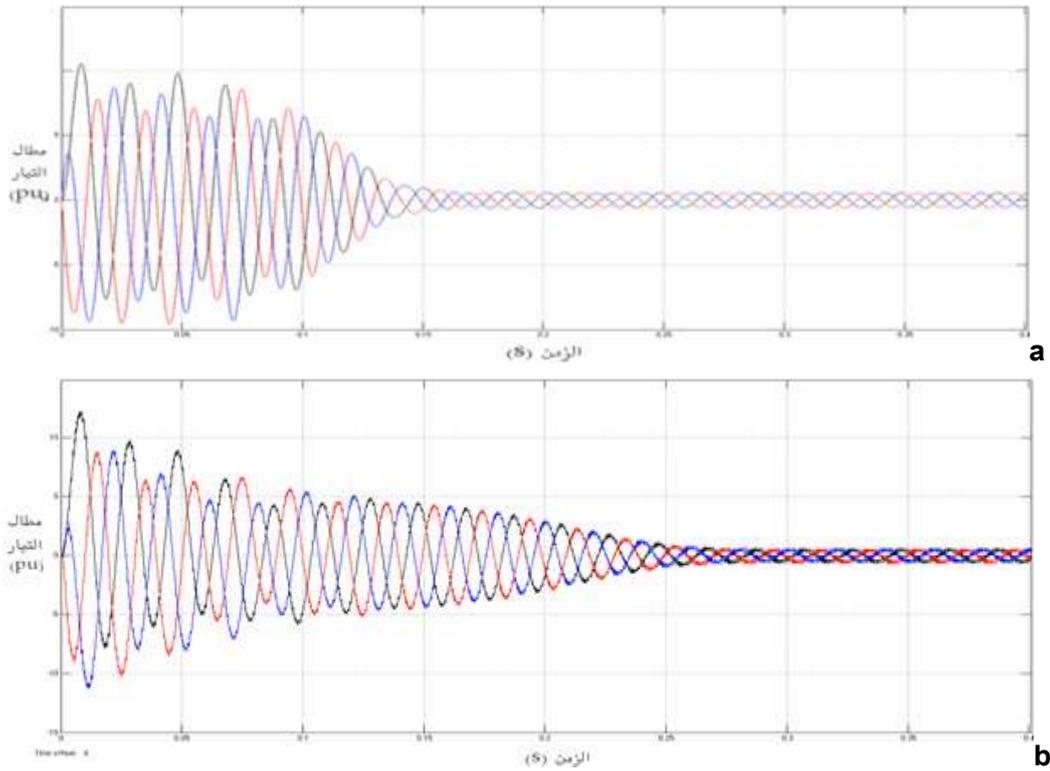


الشكل (11) مرشح فعال

حيث: $C_0=10 \mu\text{F}$, $C_1=0.5 \text{ nF}$

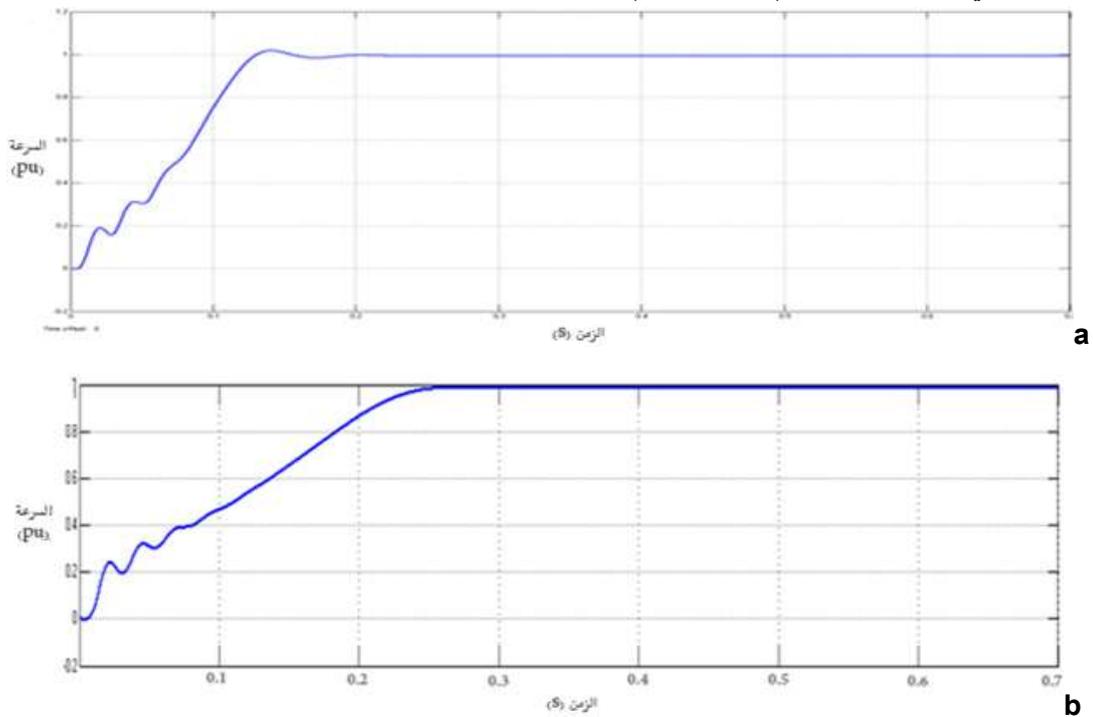
النتائج والمناقشة:

تبين النتائج الموضحة في الشكل (12) المقارنة بين عمل المحرك عند تغذيته من الشبكة الرئيسية مباشرة (الشكل 12-a) وعمله باستخدام المبدلة الترددية (الشكل 12-b)، حيث نرى ظهور اندفاعات وتذبذبات في تيار المحرك عند وجود المبدلة الترددية.



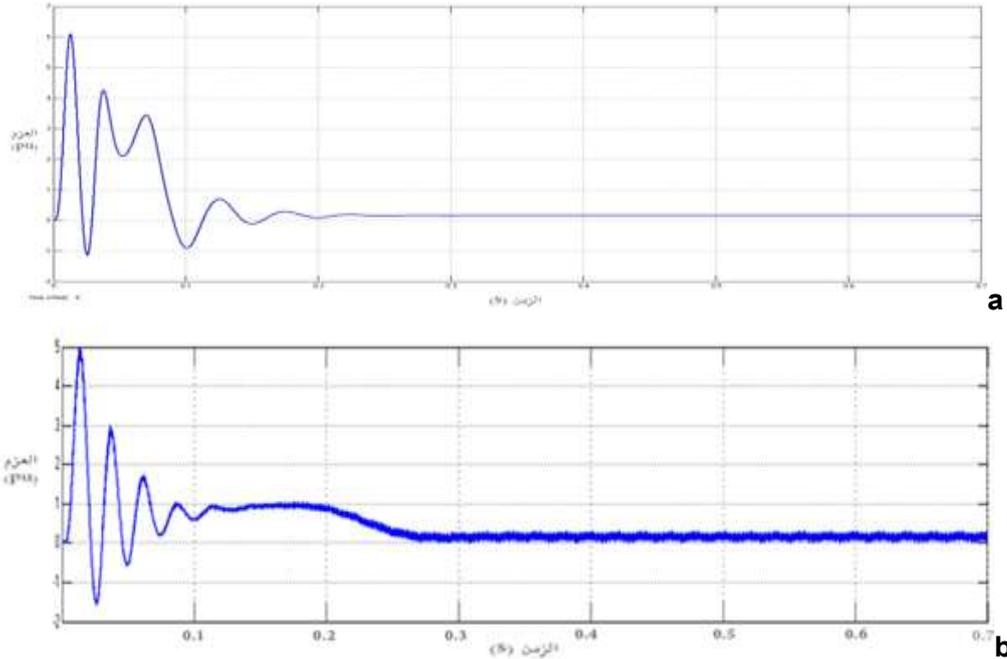
الشكل (12) تيارات المحرك a- بدون وجود مبدلة b- بوجود المبدلة

بينما يوضح الشكل (13) كيف أن سرعة المحرك تصل إلى حالة الاستقرار بدون وجود مبدلة (الشكل 13-a) بزمن أقل منه في حال وجود مبدلة (الشكل 13-b).



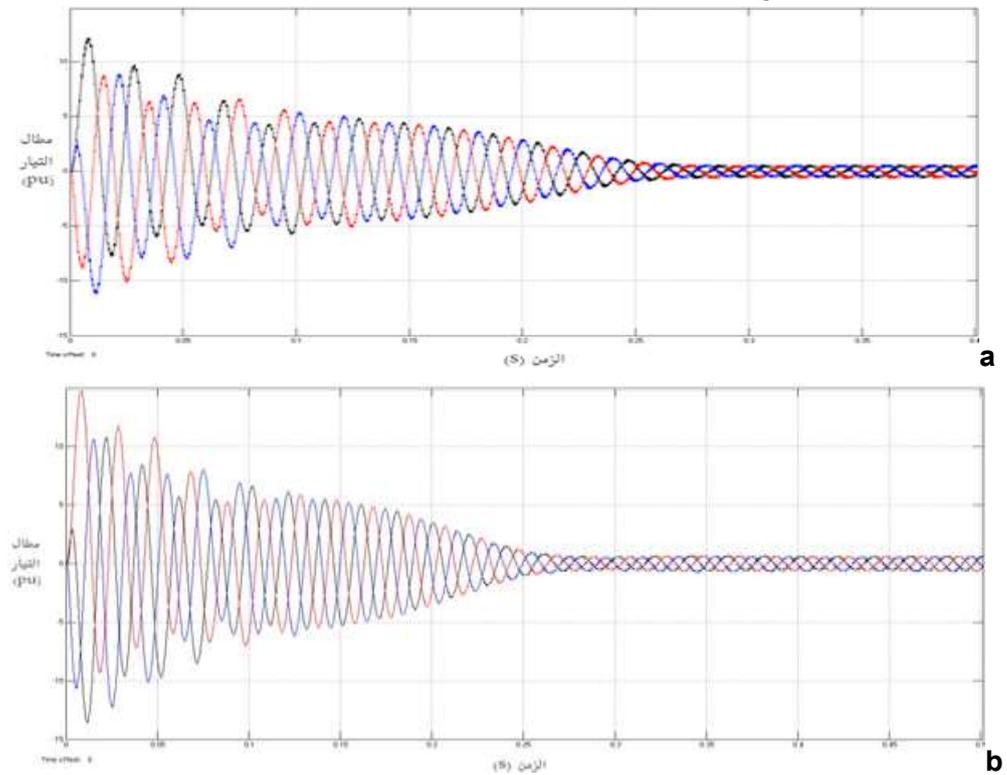
الشكل (13) سرعة الدائر للمحرك a- بدون مبدلة b- بوجود مبدلة

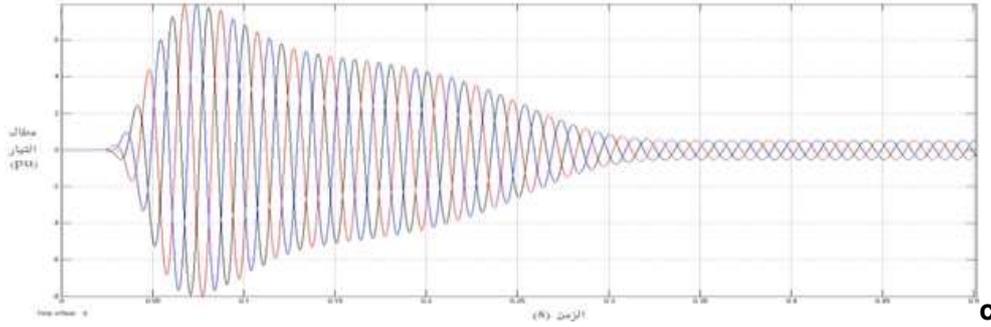
ويبين الشكل (14) ظهور تذبذب في منحنى العزم عند وجود مبدلة.



الشكل (14) عزم المحرك -a بدون مبدلة -b بوجود مبدلة

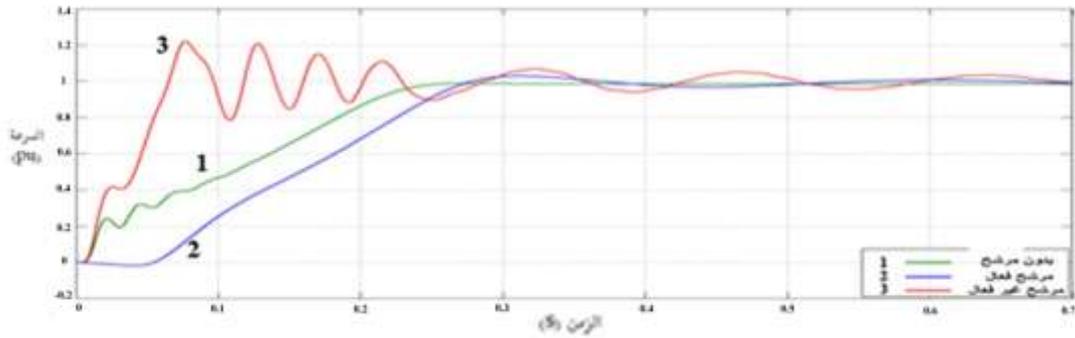
يبين الشكل (15) تيارات التغذية للمحرك عند استخدام المرشح غير الفعال والمرشح الفعال. حيث نلاحظ أن عند وجود المرشح غير الفعال فإن اندفاعات التيار تقل نوعاً ما، ولكن عند استخدام المرشح الفعال فإن اندفاعات التيار تنخفض بشكل كبير وتصبح تقريبا معدومة.





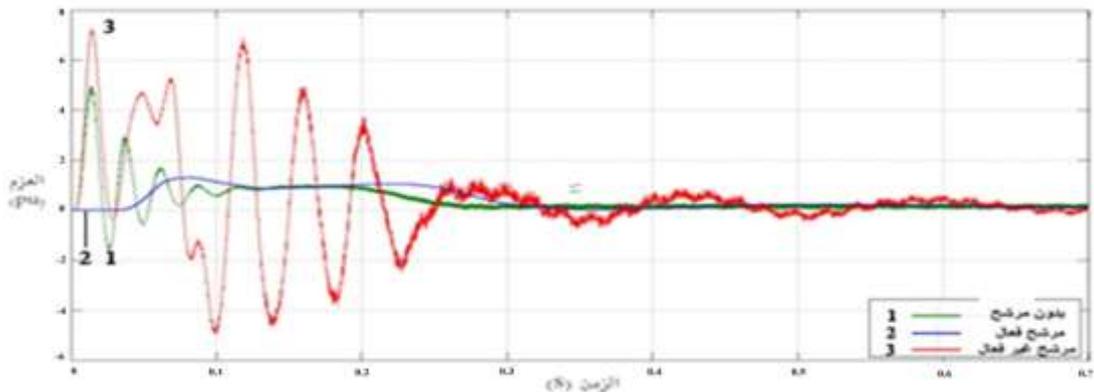
الشكل (15) تيارات المحرك -a بدون مرشح -b مع مرشح غير فعال -c مع مرشح فعال

يبين الشكل (16) منحنى سرعة الدائر بدون مرشح وعند وجود المرشح غير الفعال وعند وجود المرشح الفعال المقترح، نلاحظ أنه عند استخدام المرشح الفعال المقترح فإن منحنى السرعة يصبح أكثر انسيابية عند الاقلاع وذا استقرار جيد بعد زمن مقبول جداً، بينما عند استخدام المرشح غير الفعال فإن منحنى السرعة عند الاقلاع يصبح متموج وغير مستقر نوعاً ما.



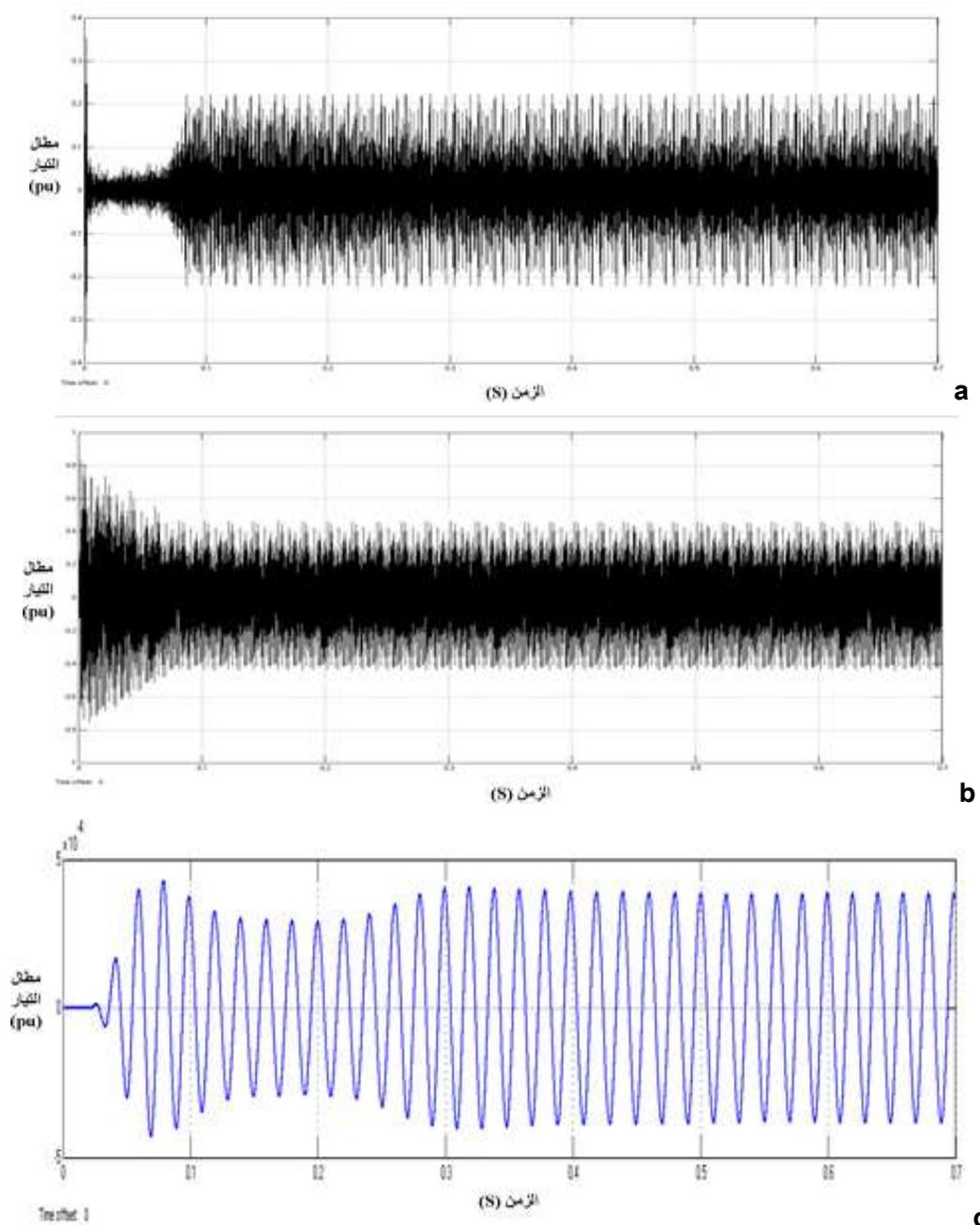
الشكل (16) سرعة المحرك (بدون مرشح - مع مرشح غير فعال - مع مرشح فعال)

يوضح الشكل (17) منحنى العزم بدون مرشح وعند وجود المرشح غير الفعال وعند وجود المرشح الفعال المقترح، نلاحظ أنه عند استخدام المرشح الفعال المقترح فإن منحنى العزم يصبح أكثر استقراراً بشكل ملحوظ، بينما عند استخدام المرشح غير الفعال فإن منحنى العزم يصبح متموج وغير مستقر.



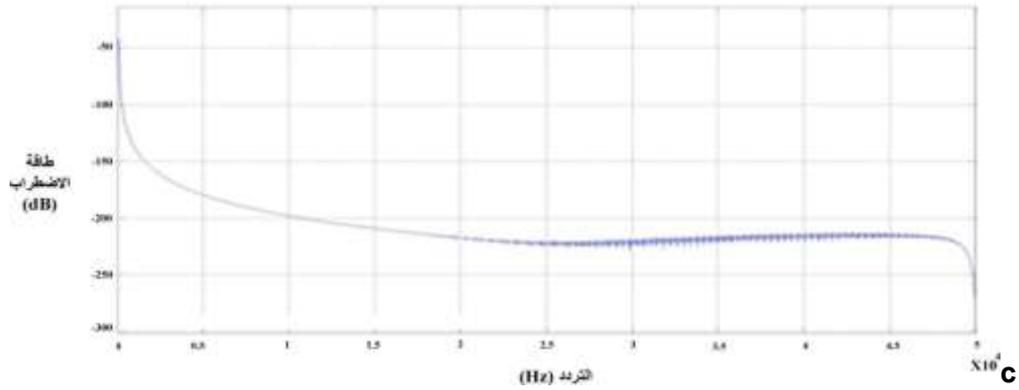
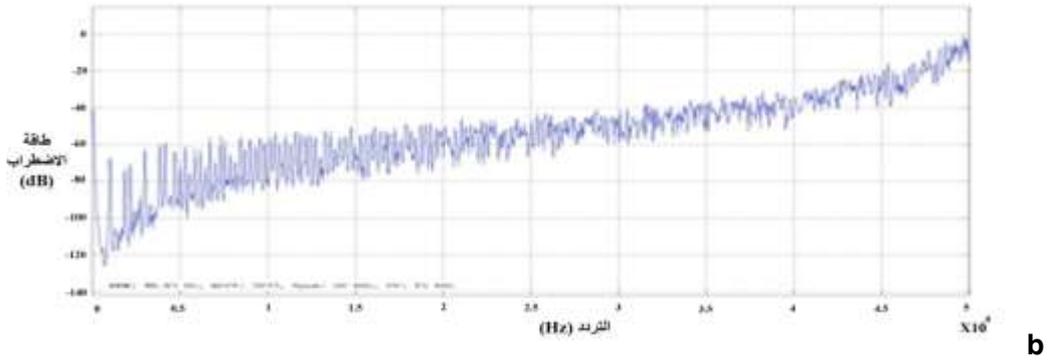
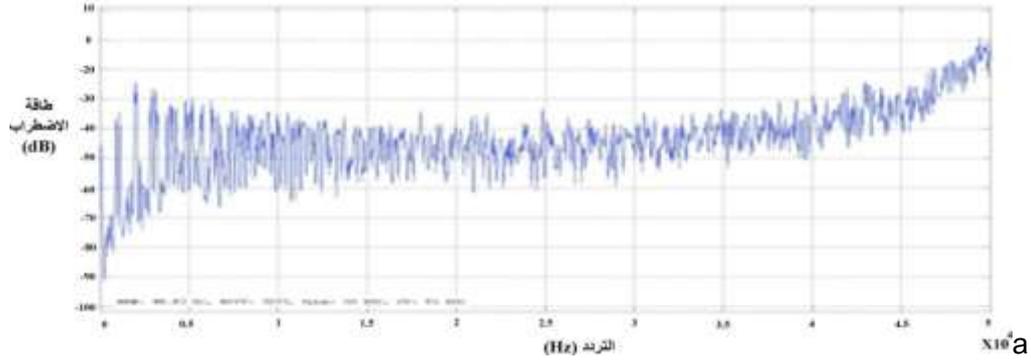
الشكل (17) عزم المحرك -a بدون مرشح -b مع مرشح غير فعال -c مع مرشح فعال

باستخدام (LISN) فإنه يمكننا قياس التيار التسريبي، وكما يبين الشكل (18) نلاحظ انخفاض تيار الاضطراب بشكل ملحوظ عند استخدام المرشح الفعال، بينما نلاحظ ازدياد في قيمته عند استخدام المرشح غير الفعال المقترح.



الشكل (18) تيار الاضطراب i_{cm} -a بدون مرشح -b مع مرشح غير فعال -c مع مرشح فعال

وباستخدام المحلل الطيفي نستطيع ايجاد التحليل الطيفي لانبعاثات الاضطرابات الكهرومغناطيسية الناتجة عن المبدلة الترددية والمبينة في الشكل (19)، حيث نلاحظ وجود انخفاض في انبعاثات الاضطرابات عند استخدام المرشح الغير فعال ولكن لا يقارن بانخفاضها الكبير عند استخدام المرشح الفعال المقترح.



الشكل (19) التحليل الطيفي للاضطرابات الكهرومغناطيسية المنبعثة عن المبدلة الترددية

a- بدون مرشح b- مع مرشح غير فعال c- مع مرشح فعال

الاستنتاجات والتوصيات:

نلاحظ من نتائج المحاكاة أن المرشح غير الفعال المقترح ينجح في الحد من الاضطراب المتباين DM المتمثل بانديفاعات في موجة التيار الجيبية. لكنه لا يحد من الاضطراب المتماثل CM المتمثل بالتيار التسريبي بل على العكس يزيد منه. بينما المرشح الفعال المقترح يحد من كلا الاضطرابين في آن واحد فهو يتخلص من الانديفاعات والتيار التسريبي.

بالإضافة لذلك فإن المرشح غير الفعال المقترح له أثر سلبي على عمل المحرك حيث يؤثر على استقراره ويؤدي إلى حدوث تذبذب في سرعة وعزم المحرك، بينما لا نجد ذلك عند استخدام المرشح الفعال.

المرشح الفعال المقترح أكثر فعالية ونجاعة بمراحل من المرشح غير الفعال في التخلص من الاضطرابات الكهرومغناطيسية الناتجة عن المبدلة الترددية وتخفيض التداخل الكهرومغناطيسي إلى حدوده الدنيا في منظومة قيادة محرك تحريضي.

بالنتيجة يترتب على استخدام المرشح الفعال الفوائد التالية:

- تخفيض تسخين المحرك وبالتالي زيادة العمر الفني للمحرك وعازليته.
- زيادة مردود المحرك.
- تخفيض قيمة التيارات التسريبية.
- الحد من الاضطرابات الكهرومغناطيسية المتحصلة المنبعثة وبالتالي التخلص من التداخل الكهرومغناطيسي EMI على العناصر الالكترونية.

بناء على ما ورد في البحث من دراسة حول الاضطرابات الكهرومغناطيسية للمبدلة الترددية وطرائق التخلص منها ومعالجتها وعلى نتائج البحث نوصي لما يتقدم من أبحاث الاهتمام بما يلي:

- تكثيف الابحاث حول EMC وتطوير طرق وتقنيات جديدة للحد من الاضطرابات الكهرومغناطيسية.
- اجراء تجارب عملية على المرشح الفعال المقترح لإثبات جودة أدائه.
- دمج هذا المرشح مع تقنيات أخرى للحد من الاضطرابات الكهرومغناطيسية (التحجيب - مرشحات الشبكة - وغيرها.....) للحصول على أفضل النتائج في الحد من الاضطرابات الكهرومغناطيسية.

المراجع:

- [1]Rendusara, Dudi A. and Enjeti, Prasad N., "An improved inverter output filter configuration reduces common and differential modes dv/dt at the motor terminals in PWM drive systems," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 13, No. 6, November 1998, pp. 1135-1143.
- [2]PAUL, C. R. *Introduction to Electromagnetic Compatibility*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [3]Jinjun Liu, Weiyun Chen, Jindong Zhang, Dehong Xu, and Fred C. Lee, "Evaluation of power losses in different CCM mode single-phase boost PFC converters via a simulation tool," IEEE Industry Application Conference 2001, pp. 2455 - 2459.
- [4]W. A. Tabisz, M. M. Jovanovic and F.C. Lee, "Present and future of distributed power systems," IEEE APEC 1999, pp. 11 - 18.
- [5]Kenny, Barbara H. and Santiago, Walter, "Filtering and Control of High Speed Motor Current in a Flywheel Energy Storage System," International Energy Conversion Engineering Conference (IECEC), August 16-19 2004.
- [6]Shih, Fu-Yuan, D. Y. Chen, and Y. T. Chen, "A Procedure for Designing EMI Filters for AC Line Applications," *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 11, pp. 170-181, Jan. 2009.
- [7]Xin, Wu, M. H. Pong, Z. Y. Lu, and Z. M. Qian, "Novel Boost PFC with Low Common Mode EMI: Modeling and Design", *Proc. of APEC*, vol. 1, pp. 178-181, 2011.
- [8]Xin, Wu, N. K. Poon, C. M. Lee, and M. H. Pong, "A Study of Common Mode Noise in Ye, Zhihong, D. Boroyevich, K. Xing, F. C. Lee, and C. Liu, "Active Common-Mode Filter for Inverter Power Supplies with Unbalanced and Nonlinear Load", *Proc. of IAS*, vol. 3, pp. 1858- 1863, 2012.