أثر ملفات التنعيم على تردد التقطيع في المقطعات

الدكتور علي الجازي[1]

الملخص

تم عرض عملية نمذجة ومحاكاة لمحرك تيار مستمر مقاد بواسطة مقطع تسلسلي، الاستطاعة الاسمية للمحرك 3.5kW، وسرعة اسمية 127 rad/sec، وهو ذو تهييج مستقل.

يُقاد المحرك باستخدام مقطع تسلسلي ثيرستوري. غُذي هذا المقطع بطريقتين، الأولى من منبع تيار مستمر، والثانية من منبع توتر متناوب (50 Hz) مع وجود ملف تنعيم وعدم وجوده في الحالتين.

عملنا على دراسة تأثير ملف التنعيم في أداء نظام التحكم والمحرك في كلتا الحالتين السابقتين. وقد تضمنت الدراسة عمل المحرك في أثناء مختلف حالات التشغيل (حالة الإقلاع والحالة العابرة والحالة المستقرة) وذلك عند قيم مختلفة لتردد التقطيع للمقطع. عرضنا نتائج الدراسة التحليلية التي تم التوصل إليها من خلال بناء النماذج في بيئة Matlab\Simulink وقمنا بمناقشتها في كل حالة.

الكلمات المفتاحية: محركات التيار المستمر، التحكم في محركات التيار المستمر، المقطعات، حلقة التغذية الخلفية.

[1]قسم هندسة الطاقة الكهربائية– كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية– دمشق.

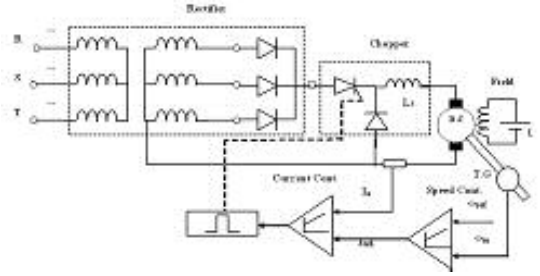
1- مقدمة:

في كثير من التطبيقات العملية والصناعية يلزم تغيير التوتر المستمر ذو القيمة الثابتة إلى توتر مستمر متغير(Variable-Voltage DC source)، لذلك يتم استخدام المقطعات (DC – choppers) التي تعمل على التغيير المباشر للتوتر المستمر DC إلى توتر مستمر DC آخر، وهذا ما يماثل عملية التحويل في محولات التيار المتناوب التي تعمل على زيادة التوتر أو إنقاصه حسب المطلوب.

تستخدم المقطعات بشكل واسع في محركات الجر التي تُستخدم في السيارات الكهربائية وتطبيقات أخرى مثل: منظمات التوتر المستمر DC Voltage Regulators Trolley cars, Marins Hoists, Fork Lift Trucks,، إذْ تؤمن المقطعات إمكانية تحكم بتسارع ناعم للآلات، ومردود عالٍ لعملية التبديل، واستجابة ديناميكية عالية، فضلاً عن قدرتها على كبح السرعة لمحرك التيار المستمر، وبإعادة القدرة للشبكة. تظهر هذه الميزة في أنظمة النقل التي يحدث فيها عمليات توقف متتالية.

2- الهدف من البحث:

من المعروف أن المقطعات بأنواعها جميعها تتغذى من منابع تيار أو توتر مستمر DC، وتشير المراجع والبحوث جميعها التي تتعامل مع هذا الموضوع إلى اعتبار أن منبع التغذية للمقطع هو بطارية (مدخرة)، تمتاز مثل هذه المنابع بانعدام التعريج (ripple) في موجة التوتر، ومن ثَمَّ تكون خالية من التشوهات. لذلك كانت الغاية الرئيسة من البحث دراسة أداء المقطع عند تغذيته من منبع توتر متناوب جيبي عبر دارة تقويم (جسر تقويم تستخدم فيه عناصر من الثيرستور أو الديود) الشكل(1)، ودراسة استجابة نظام القيادة الذي يقود هذا المحرك عند إقلاع المحرك من السكون حتى الوصول إلى السرعة الاسمية، ثم تحميل المحرك بحمل قريب من الحمل الاسمي، والتعرّف على أشكال أمواج التيارات والتوترات في مختلف أجزاء نظام القيادة، وبيان أثر محارضة التنعيم في تردد التقطيع. في هذا البحث سندرس حالة مقطع تسلسلي مغذى من جسر تقويم ثلاثي الطور تفرعي بسيط يعمل عند زاوية إزاحة تساوي الصفر، تُقاد دارة توليد النبضات من خلال إشارتي السرعة والتيار للمحرك. سيتم الاهتمام بإظهار التغيرات الحاصلة في شكل التيار المستجر من المنبع المتناوب وأثر محارضة التنعيم المضافة على التسلسل في خرج المقطع قبل المحرك، وكذلك أثر قيم ممانعات منبع التغذية المتناوب فيتردد التقطيع.



الشكل(1) البنية العامة للنظام المراد دراسته

3- مبدأ عمل المقطعات وأنواعها :

توجد عملياً أنواع مختلفة من المقطعات يتم تصنيفها والتمييز بينها حسب طريقة وصل المقطع مع الحمل. [2] [3]

1- مقطع من النموذج Step Down Chopper خافض للتوتر.

2- مقطع من النموذجStep Up Chopperرافع للتوتر.

أو حسب أسلوب التنظيم:

1- Buck Regulator .

2- Boost Regulator .

3- Buck-Boost Regulator .

4- Cuk Regulator .

– مبدأ عمل المقطع المقترح:

يتكون النظام المقترح المراد دراسته من:

1- مقطع تسلسلي Step-down Chopper خافض للتوتر من الثيرستور نوع GTO/Diod.

2- يتم توليد نبضات قيادة الثيرستور وتردد هذه النبضات اعتماداً على إشارتي السرعة وتيار المحرك، وهنا يمكن استخدام حالتي النمذجة لحلقة القيادة بالتيار؛ إما كإشارة تيار مستمرة Continuous أو بحالة متقطعة Discrete.

3- منبع التغذية للمقطع هو جسر تقويم تفرعي بسيط ثلاثي الطور.

4- نظام المقطع مع المحرك ودارة القيادة قد بُنِيَتْ باستخدام عناصر في المكتبةMatlab\ Simulink، إنما تمت تغذية المقطع من مدخرة بتوتر280V، ولهذا عند استبدال المدخرة بمنبع DC تم الحصول عليه من منبع متناوب. يجب أن يحقق المنبع الجديد التوتر نفسه الذي تقدمه المدخرة؛ ولهذا تم اقتراح جسر تقويم ثلاثي الطور بسيط، علماً بأنه يمكن استخدام جسر تقويم أحادي الطور بسيط (أربعة عناصر ديود أو ثيرستور لهذه الغاية).

5- عند استخدام المنبع الثلاثي الطور وجسر التقويم الثلاثي الطور البسيط يجب أن يقدم الجسر توتراً مستمراً يساوي 280 V، أي أن توتر الطور الأعظمي لثانوي المحول يجب أن يساوي القيمة 340V:

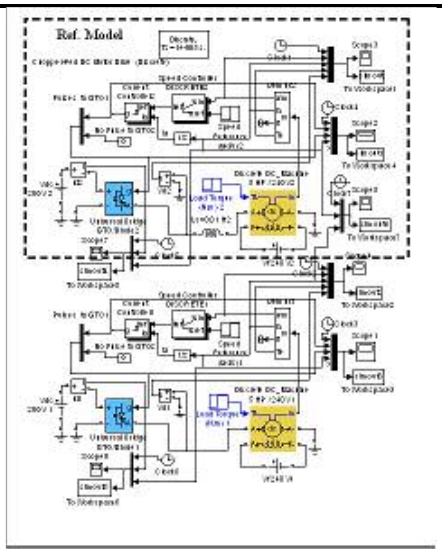
$$V_{dc} = \frac{q}{\pi} V_m \cdot \sin\frac{\pi}{q} \quad ; \quad \psi = 0 \Rightarrow V_m \approx 340\,V$$

حيث ψ: هي زاوية قدح عناصر التقويم Triggering angle لإجراء عملية المقارنة بين نتائج النمذجة في الحالات المقترح دراستها جميعها، وإظهار أثر المحارضة التسلسلية (محارضة التنعيم) في أداء المقطع سنتبع المراحل الآتية:

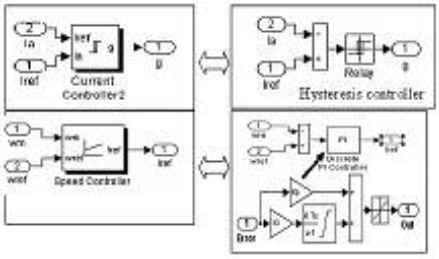
4- إجراء محاكاة لنظام القيادة بحالة تغذية المقطع من مدخرةV 280 .

أولا سنقوم بإظهار الحالة والنتائج للنظام عند استخدام مدخرة، ثم إعطاء النتائج عند استخدام جسر تقويم تفرعي ثلاثي الطور.تمت المحاكاة في هذه الحالة لنظام القيادة عند حالتين الأولى بوجود المحارضة التسلسلية (L=0.01H) والثانية بحالة عدم وجود هذه المحارضة مع بيان أثر ذلك في تردد التقطيع، ومن ثَمَّ في التيار والتوتر المقدم للحمل (المحرك) من المنبع. ويبين الشكل (2) المخطط الصندوقي الكامل الذي تمت وفقه المحاكاة لكلتا الحالتين.

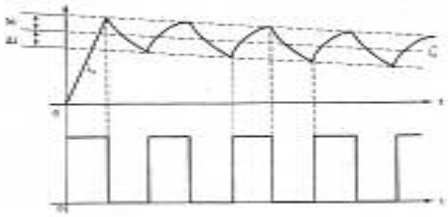
التحكم بتردد التقطيع ومن ثَمَّ التيار المستجر من قبل المحرك خلال مراحل تشغيله [مرحلة الإقلاع، مرحلة الدوران بالسرعة الاسمية (بعد انتهاء فترة الإقلاع)، مرحلة التحميل ثم العودة للدوران بالسرعة الاسمية] يتم من خلال عنصر التحكم بالسرعة (Speed Controller) الذي يقوم بمقارنة السرعة الحقيقية (ω_m) للمحرك بالسرعة المرجعية (ω_{ref})، بحيث يكون خرجه هي إشارة التيار المرجعي(I_{ref}) ويعتمد على متحكم من النموذج (PI). يقوم عنصر التحكم بالتيار (Current Controller) بمقارنة التيار الحقيقي المستجر من قبل المحرك بالتيار المرجعي (I_{ref}) الذي تم توليده من خلال عنصر التحكم بالسرعة انظر الشكل(3). ومن ثَمَّ يتم تغيير تردد الإشارة الناتجة التي تغذي بوابة الثيرستور من خلال تغيير قيمة الـــ(Hysetresis Band) بمقدار ($\pm h/2=\Delta i$)، وهذه القيمة يتم تغييرها حسب تردد التقطيع المطلوب .[2]



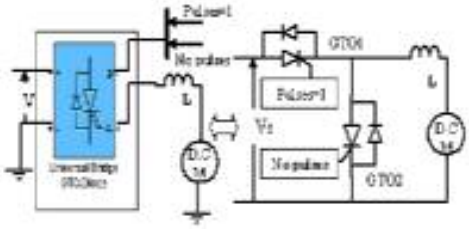
الشكل (2): مخطط صندوقي لمحاكاة نظام القيادة عند حالة تغذية المقطع من مدخرة



الشكل(3-آ): عناصر حلقة التحكم ومكوناتها.

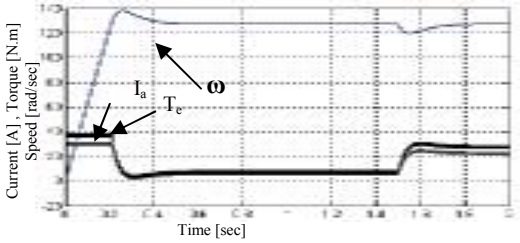


Hysteresis controller operation

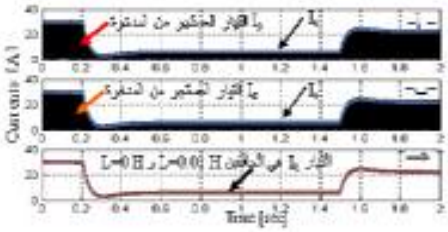


الشكل(3-ب): عناصر المقطع ومكوناته.

يبيّن الشكل (4- ب ، جـــ) نتائج المحاكاة لنظام القيادة بحالة وجود محارضة التنعيم وعدم وجود محارضة التنعيم وذلك لكل من إشارة التيار المستجر من المدخرة والتيار المستجر من قبل المحرك مع بيان تردد التقطيع للمقطع التسلسلي، وتبيّن نتائج المحاكاة أنه في حالة عدم وجود محارضة التنعيم غيّرت دارة القيادة من تردد التقطيع. لإظهار النتائج بشكل واضح رُسِمَتِ الإشارات خلال فترة زمنية t=0.01 sec. أي خلال فترة دوران المحرك بالسرعة الاسمية، وبعد تعرضه لحالة التحميل.

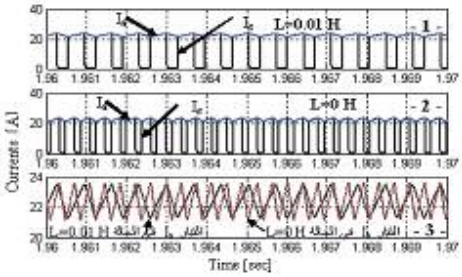


الشكل (4-آ) :إشارة العزم الكهرومغناطيسي Te – تيار المتحرض Ia – السرعة الزاوية ω.



الشكل (4-ب): تيار المتحرض I_a – التيار I_s المستجر من المنبع (المدخرة):

آ: المحارضة L=0.01 H، ب: المحارضة L=0 H (تردد التقطيع1.2كيلو هرتز)

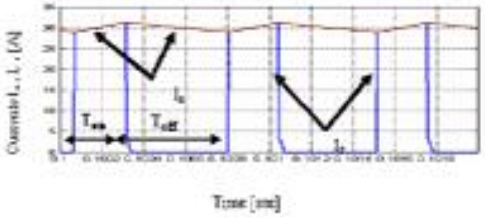


الشكل (4-جـــ): تيار المتحرض Ia ، التيار Is المستجر من المنبع (المدخرة)[المنحنى ذو الخط العاتم الشاقولي] عند: 1 – المحارضة L=0.01 H، 2 – المحارضة L=0 H (عند تردد التقطيع 1.2 كيلو هرتز)، 3– التيار Ia في الحالتين L=0.01 H و L=0 H

من الشكل(4-جـ) ولاسيما الجزء –جـــ– نلاحظ أنه عند الحالة التي تكون فيها L=0.01 H فإن تردد

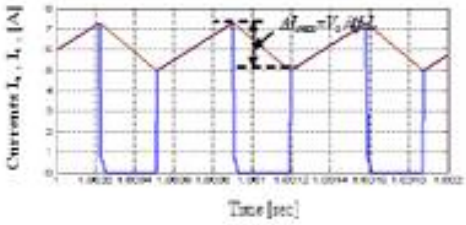
التعرج في التيار (Current Ripple Frequency) أقل من الحالة التي تكون فيها L=0 H. أو عند الحالة التي تكون فيها L=0 H فإن تردد التعرج في التيار (Current Ripple Frequency) أكبر من الحالة التي تكون فيها L=0.01 H .

وبمعنى آخر عند إضافة ملف الترشيح (التنعيم) على التسلسل مع المقطع (DC. Chopper Converter) سيكون التعرج في إشارة تيار المتحرض أقل.

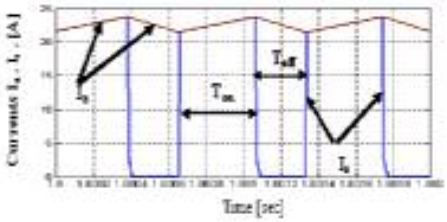


الشكل(5):هو جزء من الشكل(4-آ) إنما لتوضيح شكل التيارات خلال مرحلة الإقلاع

التيار I_s يمثل المساحة المحصورة بين الخطين خلال مرحلة توصيل المقطع وعندها التيار I_a يتزايد. وخلال مرحلة فصل المقطع I_a يتناقص ولانستجر I_s من المنبع.

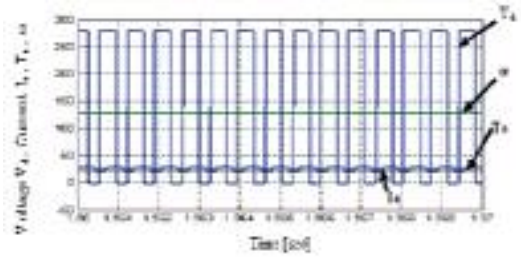


الشكل(6): هو جزء من الشكل (4-آ) إنما لتوضيح شكل إشارات التيارات خلال مرحلة عمل المحرك عند اللاحمل

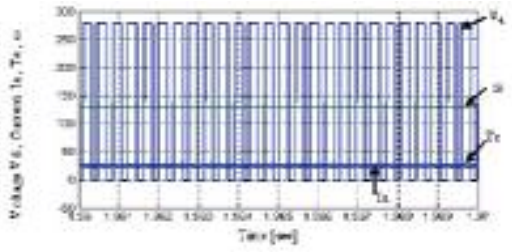


الشكل(7): هو جزء من الشكل (4-آ) إنما لتوضيح شكل إشارات التيارات خلال مرحلة التحميل للمحرك (فترات توصيل المقطع ازدادت) .

لإظهار أثر ملف التنعيم L الموجود على التسلسل مع المحرك على شكل إشارة توتر خرج المقطع، أُخِذَتْ عينة من نتائج المحاكاة في الحالة المستقرة لعمل المحرك وهي الفترة التي يعود فيها المحرك للدوران بالسرعة الاسمية بعد عملية التحميل، ويبيّن الشكل (8) شكل التوتر V_d توتر المقطع، العزم T_e الناتج عن المحرك ، والتيار I_a المستجر من قبل المحرك عندما تكون قيمة المحارضة L=0.01H، ويبيّن الشكل (9) شكل التوتر V_d توتر المقطع، العزم T_e الناتج عن المحرك، والتيار I_a المستجر من قبل المحرك عندما تكون قيمة المحارضة L=0، ونرى هنا أن تردد التقطيع للمقطع دون L قد ازداد بحدود (70%) مع المحافظة على تيار متحرض وسرعة دوران وعزم شبه ثابت، وأن عامل تعرج التيار منخفض ومستمر (غير متقطع).



الشكل(8) : يبيّن شكل الإشارات Vd , Ia , ω, Te عند قيمة L=0.01 H

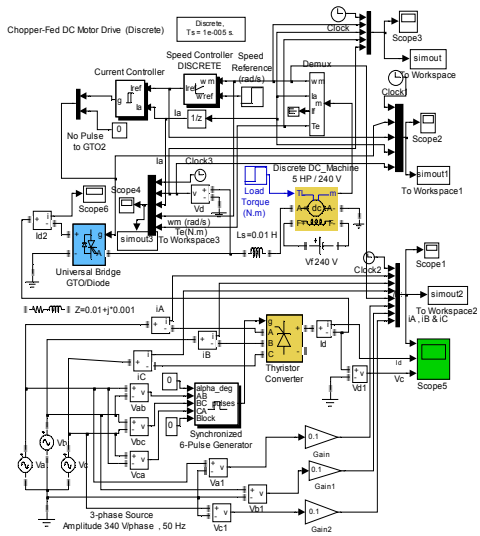


الشكل(9) : يبين شكل الإشارات Vd , Ia , ω, Te عند قيمة L=0

5- إجراء محاكاة لنظام القيادة بحالة تغذية المقطع من جسر تقويم (Converter) .

اختير الجسر الثلاثي الطور البسيط بهدف الحصول على توتر مستمر ذي عامل تعريج منخفض بنسبة أقل

مما لو تم استخدام جسر تقويم أحادي الطور، وستتم المحاكاة للنظم عند عدة قيم لتردد التقطيع، وذلك تبعاً للمخطط العام المبين في الشكل(10) **[4]**.



الشكل (10): مخطط صندوقي لمحاكاة نظام القيادة عند حالة تغذية المقطع من منبع متناوب ثلاثي الطور.

– استخدام جسر تقويم ثلاثي الطور غير مُقاد (أو مُقاد عند زاوية قدح $\psi=0$) كمنبع تغذية للمقطع التسلسلي وتغيير تردد التقطيع حسب ماهو مبيّن أدناه، ومتابعة العمل عند استخدام ملف تنعيم، وعند حالة عدم استخدام ملف تنعيم .

أ– تشغيل المقطع عند تردد 150 Hz أي $f' = 3 \times f$

ب– تشغيل المقطع عند تردد 250 Hz أي $f' = 5 \times f$

ج – تشغيل المقطع عند تردد 350 Hz أي $f' = 7 \times f$

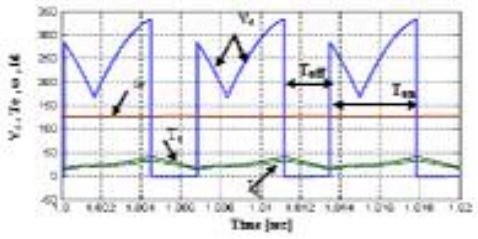
د– تشغيل المقطع عند تردد 450 Hz أي $f' = 9 \times f$

هـ– تشغيل المقطع عند تردد1.2 kHzأي $f' = 24 \times f$

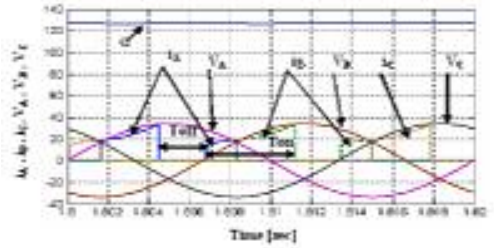
سنورد فيما يأتي نتائج المحاكاة التي تمت، وسوف نركز على شكل إشارة توتر التقطيع V_d الناتج عند كل تردد تقطيع مقترح، كذلك سنورد عزم المحرك T_e، وتيار المتحرض I_a. كما سنورد التوترات المتناوبة الثلاثية الطور للمنبع المتناوب، والتيارات المستجرة للأطوار أي سنورد (V_A,V_B,V_C) والتيارات (i_a , i_b , i_c)وذلك في حالتين: حالة استخدام ملف تنعيم، وحالة عدم استخدام ملف تنعيم.

من هذه المنحنيات نحاول متابعة تغير شكل توتر التقطيع V_d لدى إضافة الملف أو حذفه، علماً بأن الزمن الذي رسمت عنده النتائج كان واحداً (لإظهار الفرق). كما نحاول متابعة تيارات الأطوار المتناوبة وفترات زمن ظهورها خلال الدور.

الشكل(11-آ–ب) يبيّن نتائج المحاكاة لنظام القيادة عند تردد منبع متناوب 50 هرتزاً وتردد التقطيع 150 هرتزاً مع وجود ملف التنعيم. الأشكال اللاحقة كلّها رُسِمَتْ خلال الفترة الزمنية 1.82 sec – t=1.8، أي خلال دور واحد 0.02 sec بعد انتهاء فترة الحالة العابرة الناتجة عن التحميل وعودة المحرك للدوران عند السرعة الاسمية.

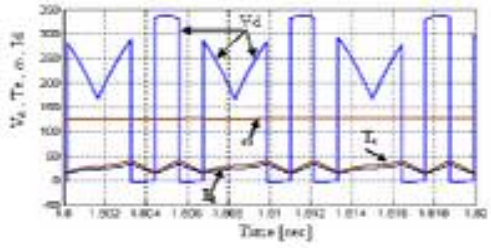


الشكل(11–آ) : العزم، التيار، السرعة، وشكل التوتر الناتج عن المقطع عند تردد تقطيع 150 هرتزاً (مع ملف تنعيم).

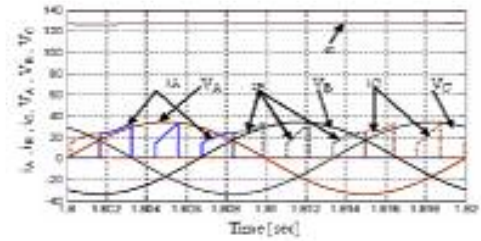


الشكل(11–ب): توترات الأطوار الثلاثة والتيار المستجر من المنبع المتناوب (مع ملف تنعيم)

الشكل(12–آ–ب) يبيّن نتائج المحاكاة لنظام القيادة عند تردد منبع متناوب 50 هرتزاً وتردد التقطيع 150 هرتزاً مع عدم وجود ملف التنعيم .

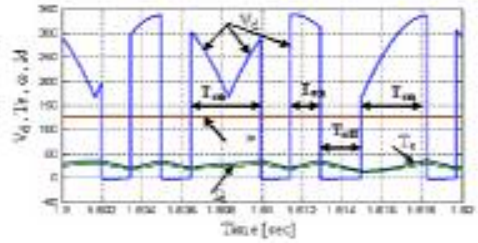


الشكل(12–آ) العزم، التيار، السرعة، وشكل التوتر الناتج عن المقطع عند تردد تقطيع 150 هرتزاً(مع عدم وجود ملف تنعيم).

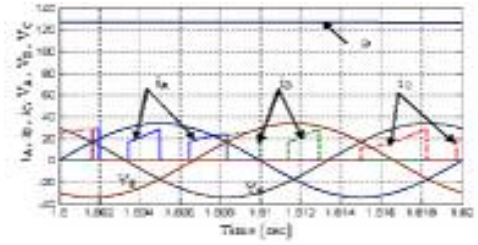


الشكل(12–ب): توترات الأطوار الثلاثة والتيار المستجر من المنبع المتناوب (مع عدم وجود ملف تنعيم)

الشكل(13-آ–ب) يبيّن نتائج المحاكاة لنظام القيادة عند تردد منبع متناوب 50 هرتزاً وتردد التقطيع 250 هرتزاً مع وجود ملف التنعيم .

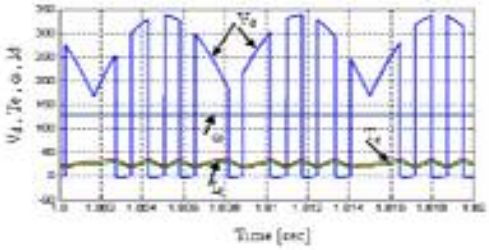


الشكل(13–آ) :العزم، التيار، السرعة، وشكل التوتر الناتج عن المقطع عند تردد تقطيع 250 هرتزاً (مع ملف تنعيم).

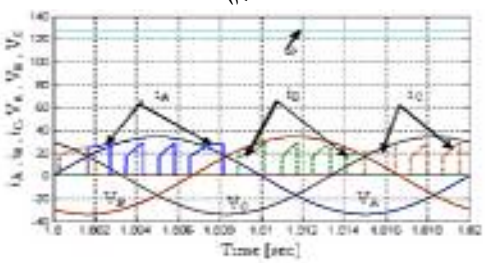


الشكل(13–ب): توترات الأطوار الثلاثة والتيار المستجر من المنبع المتناوب (مع ملف تنعيم)

الشكل(14-آ–ب) يبيّن نتائج المحاكاة لنظام القيادة عند تردد منبع متناوب 50 هرتزاً وتردد التقطيع 250 هرتزاً مع عدم وجود ملف التنعيم.

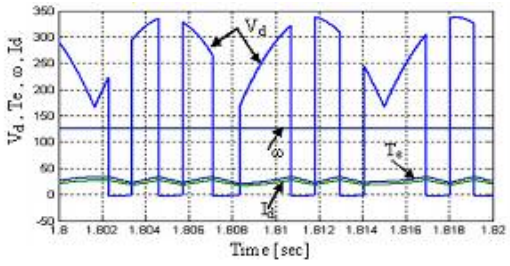


الشكل(14–أ): العزم، التيار، السرعة، وشكل التوتر الناتج عن المقطع عند تردد تقطيع 250 هرتزاً (مع عدم وجود ملف تنعيم).

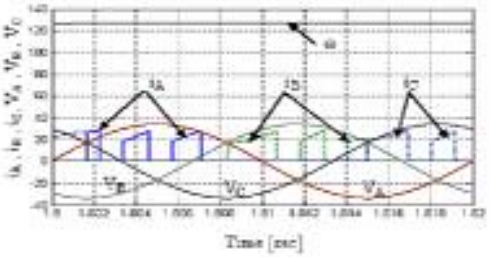


الشكل(14–ب) : توترات الأطوار الثلاثة والتيار المستجر من المنبع المتناوب (مع عدم وجود ملف تنعيم)

الشكل(15–آ–ب) يبيّن نتائج المحاكاة لنظام القيادة عند تردد منبع متناوب 50 هرتزاً وتردد التقطيع 350 هرتزاً مع وجود ملف التنعيم.

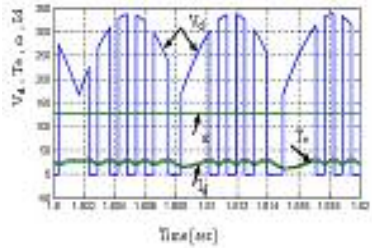


الشكل(15–آ): العزم، التيار، السرعة، وشكل التوتر الناتج عن المقطع عند تردد تقطيع350 هرتزاً (مع وجود ملف تنعيم).

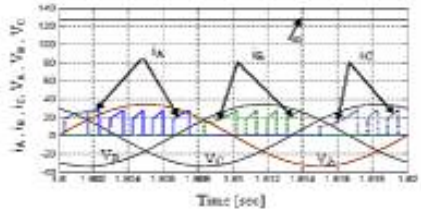


الشكل(15–ب): توترات الأطوار الثلاثة والتيار المستجر من المنبع المتناوب (مع ملف تنعيم)

الشكل(16–آ–ب) يبيّن نتائج المحاكاة لنظام القيادة عند تردد منبع متناوب 50 هرتزاً وتردد التقطيع 350 هرتزاً مع عدم وجود ملف التنعيم .

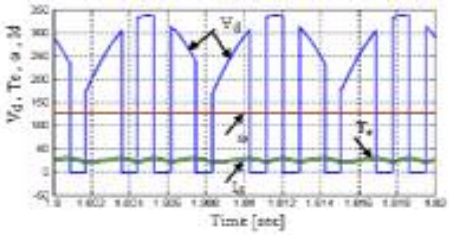


الشكل(16–آ) العزم، التيار، السرعة، وشكل التوتر الناتج عن المقطع عند تردد تقطيع 350 هرتزاً (مع عدم وجود ملف تنعيم).

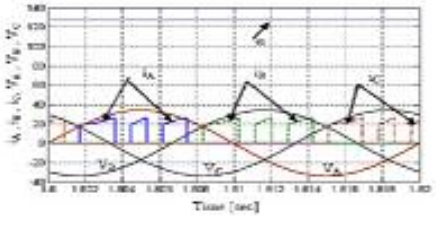


الشكل(16–ب): توترات الأطوار الثلاثة والتيار المستجر من المنبع المتناوب (مع عدم وجود ملف تنعيم)

الشكل(17–آ–ب) يبيّن نتائج المحاكاة لنظام القيادة عند تردد منبع متناوب 50 هرتزاً وتردد التقطيع 450 هرتزاً مع وجود ملف التنعيم .

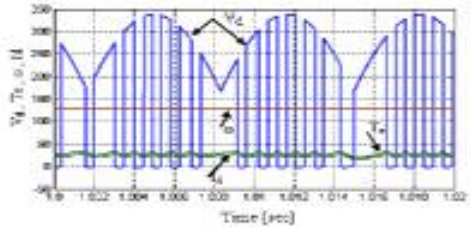


الشكل(17–آ): العزم ، التيار، السرعة، وشكل التوتر الناتج عن المقطع عند تردد تقطيع450 هرتزاً (مع وجود ملف تنعيم).

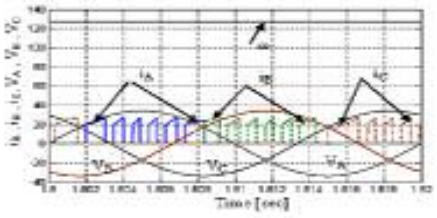


الشكل(17–ب) : توترات الأطوار الثلاثة والتيار المستجر من المنبع المتناوب (مع عدم وجود ملف تنعيم)

الشكل(18–آ–ب) يبيّن نتائج المحاكاة لنظام القيادة عند تردد منبع متناوب 50 هرتزاً وتردد التقطيع 450 هرتزاً مع عدم وجود ملف التنعيم .

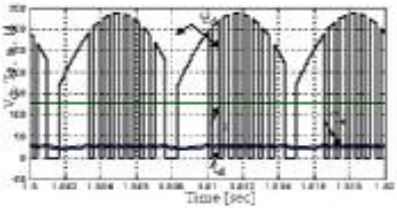


الشكل(18–آ): العزم، التيار، السرعة، وشكل التوتر الناتج عن المقطع عند تردد تقطيع450 هرتزاً (مع عدم وجود ملف تنعيم).

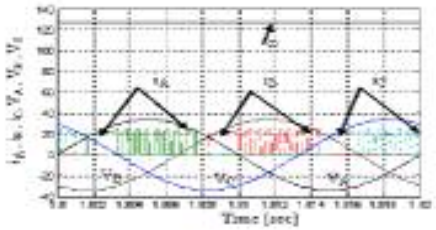


الشكل(18–ب): توترات الأطوار الثلاثة والتيار المستجر من المنبع المتناوب (مع عدم وجود ملف تنعيم)

الشكل(19–آ–ب) يبيّن نتائج المحاكاة لنظام القيادة عند تردد منبع متناوب 50 هرتزاً وتردد التقطيع 1.2 كيلو هرتز مع وجود ملف التنعيم .

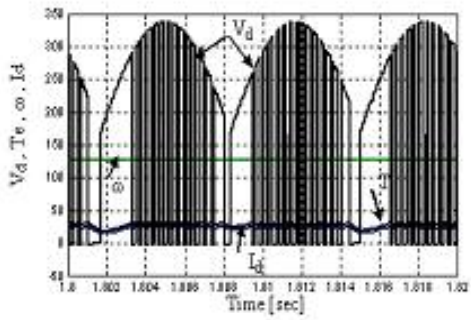


الشكل(19–آ): العزم، التيار، السرعة، وشكل التوتر الناتج عن المقطع عند تردد تقطيع1.2 هرتزاً (مع وجود ملف تنعيم).

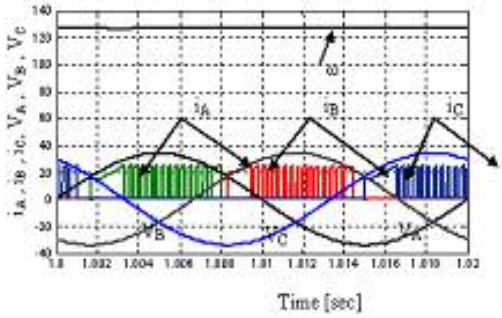


الشكل(19–ب) : توترات الأطوار الثلاثة والتيار المستجر من المنبع المتناوب (مع وجود ملف تنعيم)

الشكل(20–آ–ب) يبيّن نتائج المحاكاة لنظام القيادة عند تردد منبع متناوب 50 هرتزاً وتردد التقطيع 1.2 كيلو هرتز مع عدم وجود ملف التنعيم .



الشكل(20–آ): العزم، التيار، السرعة، وشكل التوتر الناتج عن المقطع عند تردد تقطيع1.2 هرتز (مع عدم وجود ملف تنعيم).



الشكل(20–ب) : توترات الأطوار الثلاثة والتيار المستجر من المنبع المتناوب (مع عدم وجود ملف تنعيم)

6- النتائج:

1- من المنحنيات السابقة التي تم تمثيلها في حالة وجود ملف تنعيم ودون ملف تنعيم، وتغيير التردد من 150 هرتزاً حتى 1.2 كيلو هرتزاً للمقطع في حالة التغذية للمقطع من مبدل AC/DC. نجد أن نظام القيادة والتحكم يحاول مهما كان تردد التقطيع عدم قطع تيار المحرك والمحافظة على تقديم عزم الحمل المطلوب دون حدوث اهتزاز في دوران المحرك، كما نلاحظ أن تردد التقطيع الذي نقترحه لنظام P.W.M لايبقى ثابتاً عند التردد المقترح بل يتغير تبعاً لحالة وجود حثية أو عدمها، فوجود الحثية يسهم في تنعيم التيار، لذا يرى النظام أنه لا داعي لزيادة تردد التقطيع ما دامت القيمة المتوسطة للتيار ثابتة وسرعة الدوران ثابتة.

2- لا وجود لفترات تطابق (Over Lap) في إشارات التيارات المستجرة من المنبع المتناوب كما هو في حالة جسور التقويم.

3- وجود الممانعة خلف المقطع يسهم في استمرارية تيار الحمل في الديود الحر.

4- في حالة غياب محارضة التنعيم (L) لإشارة التيار تؤدي محارضة المحرك دوراً مشابهاً، ولكن حسب التردد الجديد الذي يفرضه نظام القيادة بسب غياب محارضة التنعيم انظر الشكل(4-جـ) .

5- قيمة التغير العظمى في التيار $\Delta I_{max}=V_s/4f.L$ الذي يمثل التعرج (Ripple) في تيار الحمل تتناسب عكساً مع كلٍ من المحارضة وتردد التقطيع، وتتناسب طرداً مع توتر التغذية الشكل(4-جـ).

6-عند استخدام المنبع المستمر في تغذية المقطع وجدنا أن فترات عمل المقطع T_{on} وكذلك فترات التوقف T_{off} منتظمة خلال كل حالة من حالات التشغيل، ولكنها تختلف من حالة إلى أخرى بما يتناسب والمحافظة على تأمين التيار المطلوب للمحرك (الأشكال 8 و9).

7-عند استخدام المنبع المتناوب مع جسر التقويم لتغذية المقطع وجدنا أن فترات عمل المقطع T_{on} وكذلك فترات التوقف T_{off} تختلف من حالة إلى أخرى سواء في التوتر أو التيار، وهذا ما يدل على أن نظام التحكم يراقب باستمرار إشارة التيار I_a ويحاول المحافظة على التيار المطلوب من قبل المحرك، فعندما يكون التوتر صغيراً (مثلاً عند أطراف موجة التوتر المقوم) يقوم نظام التحكم بإعطاء أمر إلى المقطع بزيادة فترة التوصيل T_{on} (الأشكال 11 و13).

8- من خلال النتائج ومن النظر إلى إشارتي العزم والتيار عند كل حالة من حالات التشغيل، نجد أنه كلما

كان توتر التغذية للمقطع أقرب إلى الشكل المستمر كان هناك انتظام ونعومة (صغر سعة التأرجح) في إشارتي العزم والتيار عما هو في حالة الترددات الصغيرة وأخذ ذلك بالحسبان عند اختيار جسر التقويم. وكذلك أثر وجود المحارضة التسلسلية أو عدم وجودها في كل من التيار والعزم للمحرك، ومن ثَمَّ قبول تشغيل النظام أو عدم قبوله دون هذه المحارضة، والاكتفاء بأثر المحارضة الذاتية للمحرك

– ملحق Appendix

– النموذج الرياضي لمحرك التيار المستمر في الحالة المستمرة **(Continuous)**

يوضع النموذج الرياضي لمحرك التيار المستمر بشكل عام بثلاثة أشكال، وهذه الأشكال يمكن أن تكون في الحالة **(Continuous)** معادلات تفاضلية، توابع نقل بدلالة تحويل لابلاس، معادلات الحالة **State Space Equation** أو نقلها إلى الحالة (Discrete)، علماً بأن نتائج المحاكاة للمحرك في الحالتين ستكون نفسها إنما في الحالة (Discrete) ستكون المحاكاة أ سرع.

آ– المعادلات التفاضلية:

$$V_a = e_a + i_a R_a + L_{aq}\frac{di_a}{dt} + V_{bru} \quad (\mathrm{V})$$

$$e_a = K_a \phi \omega_m$$

$$V_f = i_f + L_{af}\frac{di_f}{dt} \quad ; \quad R_f = R_{ff} + R_{sh}$$

$$P_e = \omega_m \cdot T_{em} = e_a \cdot i_a$$

$$T_{em} = \frac{P_e}{\omega_m} \quad , \quad T_{em} = K_b \cdot i_a$$

$$J\frac{d\omega_m}{dt} + B_m \cdot \omega_m = T_{em} - T_{mech} = T_a$$

ب– تحويل النموذج الرياضي للمحرك من شكل بالمعادلات التفاضلية إلى الشكل بمعادلات الحالة State Space Equation

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{L_a}(V_a - e_a - R_a \cdot i_a)$$

$$e_a = K_b \cdot \omega_m \ , T_{em} = K_b \cdot i_a \quad , \quad V_{bru} = 0$$

$$\frac{di_a}{dt} = -\frac{R_a}{L_a} i_a - \frac{K_b}{L_a}\omega_m + \frac{1}{L_a}V_a$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{K_b}{J} i_a - \frac{B_m}{J}\omega_m - \frac{1}{J}T_L$$

$$\begin{bmatrix} pi_a \\ p\omega_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_a}{L_a} & \frac{-K_b}{L_a} \\ \frac{K_b}{J} & \frac{-B_m}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ \omega_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{La} & 0 \\ 0 & \frac{-1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ T_L \end{bmatrix}$$

$$\dot{X} = AX + BU \quad , \quad X = [i_a \quad \omega_m]^t \quad , \quad U = [V_a \quad T_L]^t$$

$$Y = CX + DU \ ; \ C = [0 \quad 1] \ ; \ D = 0$$

ويمكن استخدام معادلات الحالة هذه في مخطط المحاكاة للمحرك باستخدام العنصر state-space المتوافر في المكتبة Matlab\ Simulink\ Continuous بعد حساب عناصر المصفوفات A ,B C ,D, من خلال محددات المحرك.

– النموذج الرياضي لمحرك التيار المستمر في الحالة (Discrete State)

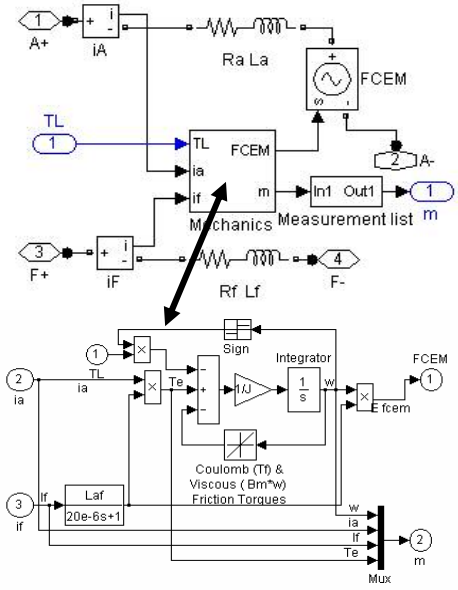
سهلت البيئة البرمجية المستخدمة عمليات تحويل النموذج الرياضي من شكل إلى شكل آخر حسب رغبة مستثمر البرنامج، أو حسب متطلبات التطبيق، لذلك يمكن الانتقال من شكل النموذج الرياضي بمعادلات الحالة إلى نموذج رياضي بتوابع تحويل في مستوي لابلاس وبالعكس، وإمكانية الانتقال من شكل معادلات الحالة بشكل (Continuous State- Space) إلى (Discrete State- Space).

لذلك للانتقال من الحالة (Continuous) إلى الحالة (Discrete) فقد وفرت بيئة البرمجة المستخدمة Matlab هذه الإمكانية من خلال استخدام الأمر الآتي:

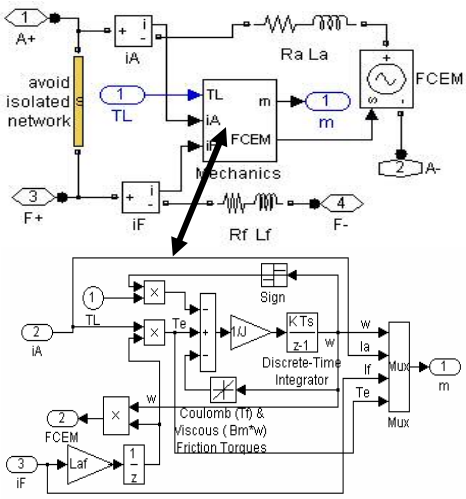
[F,G,H,J]=**c2dm** (A,B,C,D,Ts,'zoh'), where zoh is Zero order hold

من أجل الحصول على محاكاة أسرع نُقِلَ النموذج الرياضي إلى المستوي Z إي إلى الحالة المتقطعة (Discrete)، إذْ تم تحويل تابع النقل في حلقة التهييج إلى ما يكافئه في المستوي Z، وعنصر التكامل في

الحلقة التي تعبر عن الجزء الميكانيكي للمحرك إلى ما يكافئه في المستوي Z، وTs هو الـ (Sampling Time) وK عنصر كسب يساوي الواحد والأشكال الآتية تبيّن مخططات المحاكاة للمحرك في الحالتين**(Continuous)** و**(Discrete)**



الشكل (A-1) المخطط الصندوقي لمحاكاة المحرك في الحالة (Continuous)



الشكل (A-2) المخطط الصندوقي لمحاكاة المحرك في الحالة (Discrete)

– حلقة التحكم بالمحرك:

تتكون حلقة التحكم بالمحرك المدروس في البحث من عنصرين:

1- عنصر التحكم بالسرعة (Speed Controller) وهو من النوع (PI) المتوافر في البيئة البرمجية Matlab، ومدخلاه هما إشارة السرعة الحقيقية وإشارة السرعة المرجعية، أمَّا خرجه فهي إشارة تيار مرجعي I_{ref}. ونظراً إلى أنَّ المحرك قد تم تمثيله بالحالة (Discrete) يجب تمثيل عنصر التحكم بالسرعة بالحالة نفسها وعند القيمة نفسها لـــ (Ts) الشكل(3-1)، وقد اختيرت معاملات الكسب K_P , K_i كما هو مبين سابقاً تجريبياً، بحيث يتم الحصول على الاستجابة المطلوبة في السرعة عند تغير ظروف تشغيل المحرك مع تحديد مجال التغيرات العليا والدنيا لتيار المحرك ضمن المجال I_{lim}=±30 A. علماً بأنه في الحالة العامة يتم تصميم المتحكمات بطرائق رياضية تحليلية مثل**(مسار الجذور، مخططات بود) أو تجريبياً باستخدام طريقة زيكلر– نيكولز.**

2- عنصر التحكم بالتيار (Current Controller) ومدخلاه هما إشارة التيار الحقيقية وإشارة التيار المرجعية، أمَّا خرجه فهي إشارة التحكم بفصل المقطع ووصله، يتم التحكم بتردد التقطيع من خلال تغيير قيمة (Hysteresis band) من خلال ريليه ضمن العنصر، وقد تم تغييرها تجريبياً إذْ عند كل قيمة للتردد هناك قيمة للـــ(Hysteresis band) ،

–محددات المحرك :

P_n=3.5KW , V_a=240V , V_f=240V , R_a=0.5 ohm , L_a=0.01H , R_f=240ohm , L_{af}=1.23H , J_{tot}=0.05 kg.m^2 , B_m=0.02

– محددات منظم السرعة:

K_P=1.6 , Ki=16 , limited current=30 A

References

[1] Matlab\ Simulink, Matlab\ Sim Power System Ver. 2006a, Mathworks

[2] R. Krishnan, "Electric Motor Drives", Book, Prentice Hall of India, 2002

[3] Jimmie J. Cathy , " Electric Machines , Analysis and applying Matlab " , MCGRAW – HILL , International , Edition , 2001 .

[4] Matlab ver. 6.3 , Simulink, " Dynamic System Simulation for Matlab, " manual , Mathworks, Inc., 2000- 2001.

[5] Chee-Mun Ong , "Dynamic Simulation of Electric Machine", Using Matlab/ Simulink, Book, 1998 by Prentice Hall PTR , p. 167 – p. 258.

تاريخ ورود البحث إلى مجلة جامعة دمشق: 2009/2/26.