

## استخدام المتحكمات التنبؤية ذات أفق التنبؤ المنتهي لتنظيم التيار في محركات التيار المستمر

محمد ناصيف

عضو هيئة تدريسية، كلية الهندسة المعلوماتية، جامعة الاتحاد الخاصة

### الملخص

تم في هذا البحث دراسة كيفية استخدام المتحكمات التنبؤية ذات أفق التنبؤ المنتهي  $N$  لتنظيم تيار محرك DC بوجود مبدلة الجهد الجسرية من خلال حساب التيار في اللحظة اللاحقة  $[k+1]$  ومن ثم حساب الخطأ اللاحق الناتج عن جميع الحالات الممكنة من مبدلة الجهد، وبمعرفة قيم الأخطاء بالكامل يمكن المفاضلة بينها من خلال تابع الكلفة المفروض الذي يتم من خلاله معرفة الخطأ الأصغري وتطبيق الحالة التي تعطي هذا الخطأ على مبدلة الجهد في اللحظة  $[k]$  مما يضمن تنظيم التيار بتأرجح أصغري من دون الحاجة إلى إجراء حسابات رياضية معقدة.

من خلال التجارب والخوارزميات المنفذة ضمن بيئة MATLAB/Simulink تبين أن تنظيم التيار باستخدام المتحكم التنبؤي يعطي نتائج أفضل من استخدام المتحكمات التقليدية وذلك بالنظر إلى مقدار تأرجح التيار حول القيمة المرجعية والانزياح عنها، حيث لوحظ وجود انزياح للتيار الحقيقي عن القيمة المرجعية عند استخدام المتحكمات التقليدية (المتحكم البطائي)، كما تبين أن استخدام هذه المتحكمات يقلل من تردد التبديل مقارنةً بالمتحكمات التقليدية.

في نهاية البحث تم تقديم مقارنة شاملة للطرق المستخدمة في تنظيم التيار، بهدف الوصول إلى الطريقة الأمثل في التنظيم من حيث إظهار التحسن الذي طرأ في مقدار تأرجح التيار من جهة، ومن حيث التناظر في التأرجح حول القيمة المرجعية المطلوبة (بدون وجود offset) والديناميكية في الأداء وتردد التبديل من جهةٍ أخرى. كلمات مفتاحية: محرك تيار مستمر ذو التهييج المستقل، المتحكم التنبؤي، المتحكم البطائي.

ورد البحث للمجلة بتاريخ 2021/ 3/41

قبل للنشر بتاريخ 2021/ 3/311

## Using of Predictive Controllers with Finite Prediction Horizon for Current Regulation of DC Motors

Muhammad Nassif

Teaching Staff Member, Faculty of Informatics, Alittihad Private University

### Abstract

In this paper, predictive controllers with a finite prediction horizon  $N$  are used to regulate current of separately excited DC motor in the presence of the HB voltage converter by calculating the current in the following moment  $[k + 1]$  and then calculating the subsequent error resulting from all possible states of the voltage converter. Knowing the values of all errors can differentiate between them through the imposed cost function in which the minimum error is known, and the condition that gives this error is applied to the HB voltage converter at the moment  $[k]$ , which ensures that the current is regulated in a minimum oscillation without having to perform complicated mathematical calculations.

Using MATLAB/Simulink environment, it was found that the regulation of the current using the predictive controller gives better results than the use of conventional controllers like hysteresis controller, by looking at the amount of current oscillation around the reference value and its displacement, as it was observed that the real current is shifted from the reference value when using conventional controllers. It has also been shown that the use of predictive controller reduces the switching frequency compared to the traditional one.

At the end of the paper, a comprehensive comparison between the controllers used for regulating the rotor current was presented, with the aim of reaching the optimal method of regulation in terms of showing the improvement in the amount of current on the one hand, and in terms of symmetry in the oscillation around the required reference value (without the presence of the offset), the dynamic performance, and the switching frequency on the other hand.

**Keywords:** Separately excited direct current motor, Predictive controller, Hysteresis controller.

Received 4/3 /2021  
Accepted 31 /3 /2021

**1- مقدمة**

ظهرت فكرة متحكمات النموذج التنبئي في ستينيات القرن الماضي كتطبيق لنظرية التحكم الأمثلي، إلا أن تطبيقها في المجال الصناعي بدأ في أواخر السبعينيات، ومنذ ذلك الوقت تم تطبيقها بنجاح في مجال الصناعات الكيماوية على اعتبار أن الثابت الزمني كان طويلاً بما يكفي لإجراء الحسابات المطلوبة [1]. بعد ذلك تم تطبيق هذه النظرية في مجال الإلكترونيات الصناعية في ثمانينيات القرن الماضي وذلك عند العمل على ترددات تبديل منخفضة [2]. ومع تطور العناصر الإلكترونية وزيادة ترددات عملها بدأ استخدام هذه النظرية بالازدياد في السنوات العشر الأخيرة. بشكل عام يعتمد استخدام المتحكمات التنبئية على المبادئ الآتية [1]:

- استخدام النموذج الرياضي للنظام المدروس للتنبؤ بالأداء المستقبلي لمحاولات الحالة حتى أفق التنبؤ.
- اختيار تابع الكلفة الذي يوصف النظام المدروس.
- تطبيق الإجراء الأمثل الذي من شأنه تصغير قيمة تابع الكلفة [3].

**2- أهمية البحث**

تتجلى أهمية هذا البحث من خلال تقديم تقنيات جديدة في نمذجة خوارزميات القيادة المنفذة على محرك التيار المستمر بغية تنظيم قيمة التيار (وبالتالي تنظيم العزم)، واختيار الطريقة الأمثل بهدف تحسين إشارة التيار وتقليل تأرجحها باستخدام المتحكمات التنبئية.

**3- طريقة البحث وخطواته**

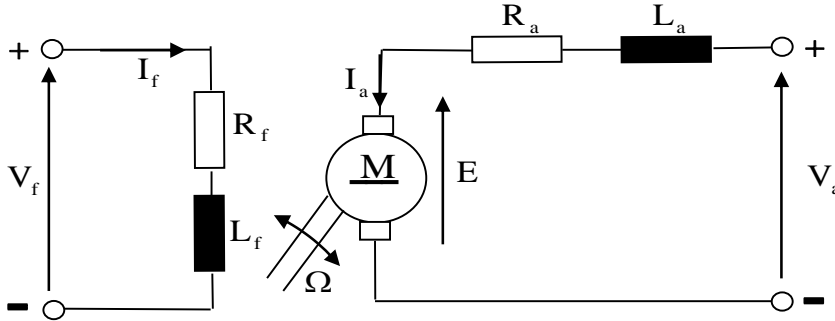
سيتم في هذا البحث إعطاء فكرة نظرية مبسطة عن النموذج الرياضي للمحرك المستخدم مع عرض كيفية تطبيق خوارزمية تنظيم التيار باستخدام المنظم البطائي التقليدي ثم الدخول في طرق تنظيم التيار باستخدام المتحكم التنبئي لبيان محاسن هذه الطريقة مقارنةً بالطرق التقليدية. سيتم عرض الخوارزميات بالتسلسل المنطقي المتبع مع دعم كل خوارزمية بنتائجها التي تم الحصول عليها من خلال بيئة MATLAB/Simulink، ثم ستم المقارنة بين الطرق المتبعة في تنظيم التيار.

#### 4- النموذج الرياضي لمحرك التيار المستمر DCM

بدايةً لا بد من تقديم لمحة سريعة عن مكونات محرك التيار المستمر، حيث يتكون من الأجزاء الرئيسية الآتية [4]، [5]:

أ- **الثابت أو المحرض:** وظيفته توليد التهيج الضروري للآلة، حيث يتلقى تغذيته من منبع مستقل للتيار المستمر جهده  $V_f$ . بالنسبة للآلات الصغيرة، يستبدل ملف التهيج الموجود على الثابت بمغانط دائمة التي تولد تدفقاً مغناطيسياً ثابتاً.

ب- **الدوار أو المتحرض:** يغذى ملفه من منبع للتيار المستمر جهده  $V_a$  (عادةً من مبدلة ذات قواطع إلكترونية). يحتوي الدوار على المجمع والمسفرات. يوضح الشكل (1) الدارة الكهربية المكافئة لهذا النوع من المحركات.



الشكل (1): الدارة المكافئة الكهربائية لمحرك تيار مستمر ذي تهيج مستقل

إن تفاعل تيار المتحرض مع التدفق المغناطيسي الذي ينتجه ملف التهيج يؤدي إلى نشوء عزم كهرومغناطيسي معبر عنه بالعلاقة الآتية:

$$T_{em} = k\Phi I_a \quad (1)$$

يدعى  $k$  بثابت الارتباط الكهرومغناطيسي ويتعلق ببنية الآلة.

أما معادلة جهد المتحرض فيمكن استنتاجها من الشكل (1):

$$V_a = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E \quad (2)$$

حيث:  $R_a$ ,  $L_a$  مقاومة وذاتية ملف المتحرض (الدوار)؛  $E$  القوة المحركة الكهربائية العكسية وتتناسب طردياً مع السرعة الزاوية الميكانيكية للدوار:

$$E = k\Phi\omega \quad (3)$$

عند قيمة ثابتة لتدفق الحقل المغناطيسي نستطيع أن نستنتج من المعادلتين (1) و (2) علاقة الحفاظ على الطاقة المطبقة على المتحرض:

$$T_{em}\omega = EI_a \quad (4)$$

أما المعادلة الميكانيكية الأساسية فتعطي بالعلاقة الآتية:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_{em} - T_L \quad (5)$$

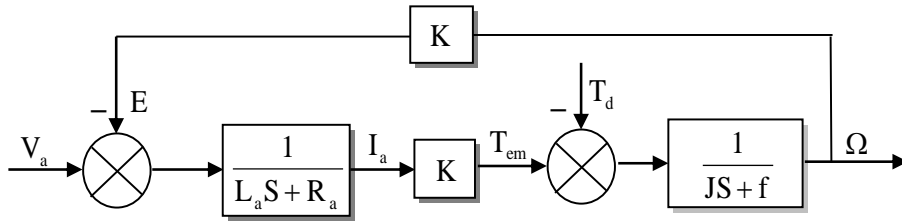
ويقسم عزم الحمل الكلي  $T_L$  إلى قسمين كما في العلاقة الآتية:

$$T_L = T_d + f\omega \quad (6)$$

حيث:  $J$  عزم عطالة المحرك؛  $T_L$  عزم الحمولة الكامل ويتكون من عزم الحمولة الجاف (المقاوم) وعزم الاحتكاك اللزج؛  $T_d$  عزم الحمولة الجاف أو المقاوم؛  $f$  ثابت الاحتكاك اللزج.

من المعادلات السابقة وبعد تبديل كل  $\frac{d}{dt}$  بـ  $s$ ، حيث  $s$  معامل لابلاس،

وباعتبار  $K = k\Phi$  يمكن أن نحصل على المخطط الصندوقي الممثل لمحرك DC ذي تهييج مستقل، كما هو موضح في الشكل (2).



الشكل (2): المخطط الصندوقي الممثل لمحرك تيار مستمر ذي تهييج مستقل

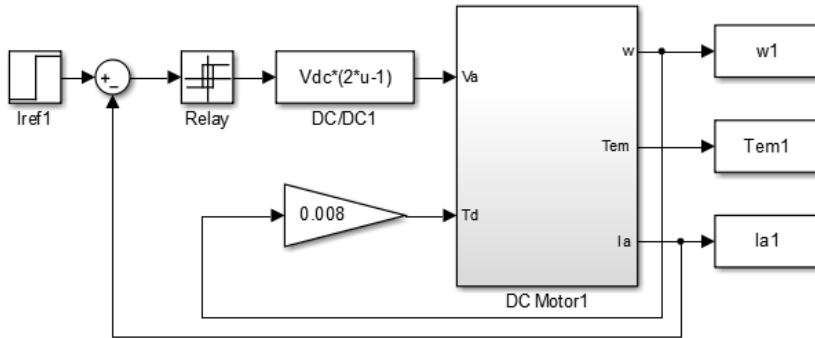
يبين المخطط الصندوقي المبين في الشكل (2) بأن محرك التيار المستمر يتكون من تابعي نقل من المرتبة الأولى، بالإضافة إلى تغذية عكسية ممثلة بالاضطراب الداخلي. إن تمثيل هذا المخطط باستخدام بيئة MATLAB/Simulink يمكن إنجازه بسهولة والحصول على أشكال السرعة والتيار المتحرض والعزم الكهرومغناطيسي بدلالة الزمن. يبين الجدول (1) مختلف القيم الضرورية لمحاكاة المحرك.

الجدول (1): القيم الاسمية وثوابت محرك التيار المستمر المستخدم

$V_a = 220V$	جهد المتحرض الاسمي
$I_a = 1.8A$	تيار المتحرض الاسمي
$n = 2000rpm$	سرعة الدوران الاسمية
$K = k\Phi = 0.949N.m/A$	الفيض الاسمي مضروباً بالثابت k
$R_a = 11.8\Omega$	مقاومة ملف المتحرض
$L_a = 0.2H$	ذاتية ملف المتحرض
$T_d = 1.59N.m$	العزم المقاوم الاسمي
$f = 0.000574Kg.m^2/sec$	ثابت الاحتكاك اللزج
$J = 0.0086Kg.m^2$	عزم العطالة

### 5- تنظيم تيار المحرك باستخدام المتحكم البطائي التقليدي

سيتم أولاً تنظيم تيار المتحرض  $I_a$  فقط، باستخدام المتحكم البطائي، بحيث يحتوي النظام على حلقة تنظيم وحيدة هي حلقة تنظيم التيار. يبين الشكل (3) النموذج المصمم لتنظيم التيار باستخدام المتحكم البطائي، حيث سنقوم بتطبيق عرض عروة صفري لنافاذة المتحكم. أما خرج المبدلة المراد تطبيقه عند الوصل، فيتم وضعه على قيمة الجهد الاسمي للمحرك (220V)، وبقيمة (-220V) عند الفصل.



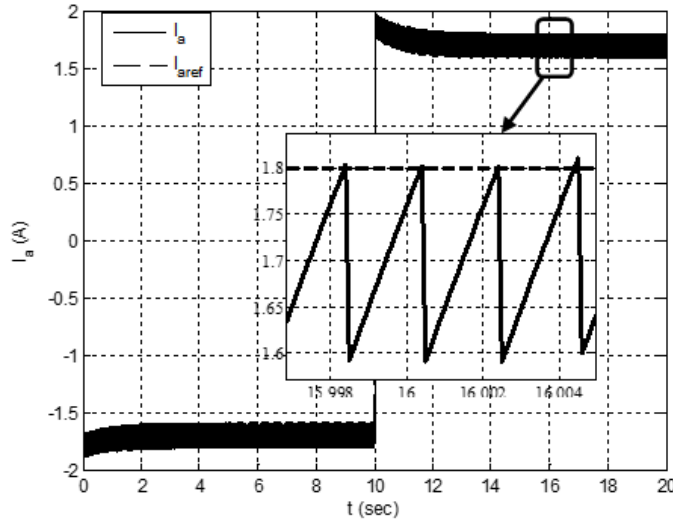
الشكل (3): نموذج تنظيم تيار المحرك المدروس باستخدام المتحكم البطائي وبوجود مبدلة الجهد

لقد تم تطبيق حمل لزوج على المحرك (مثل الحمل المستخدم في مكثات لف الورق أو القماش) باعتبار أن الخوارزمية تعتمد على تنظيم التيار بحلقة قائمة، وبالتالي لا يمكن استخدام حمل جاف في هذه الحالة [5]، وقد تم تطبيق الحمل بحيث يدور المحرك عند سرعة (190rad/sec) وهي سرعة أقل من السرعة الاسمية،

وبالطبع يمكن زيادتها بتصغير قيمة الريح (في النموذج تم ضبطه على القيمة 0.008). من الشكل (3) نلاحظ أيضاً أنه تم إدخال النموذج الرياضي لمبدلة الجهد الجسرية عند عملها بنمط أربعة ترانزستورات (نمط الأرباع الأربعة) وفق المعادلة الآتية [6]:

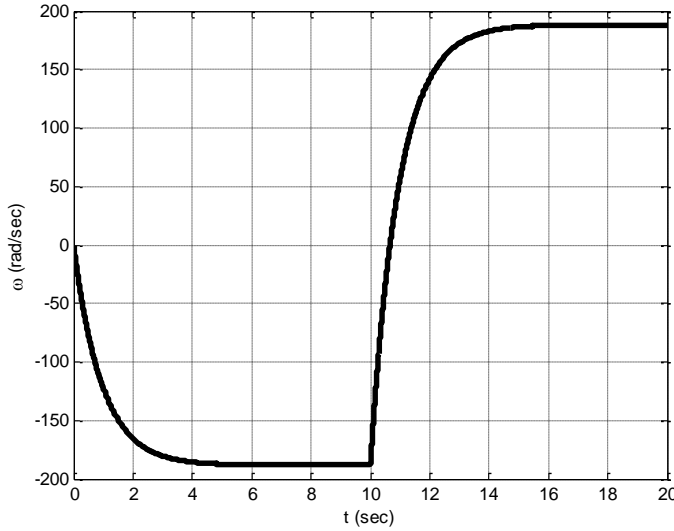
$$V_{out} = (2 \frac{t_{on}}{T_{PWM}} - 1) V_{dc} = (2\alpha - 1) V_{dc} \quad (7)$$

عند تشغيل الخوارزمية تم طلب تيار مرجعي بقيمة (1.8A) والعمل في كلا اتجاهي الدوران بحيث يتم تبديل اتجاه الدوران في اللحظة (t=10sec)، كما أنه تم ضبط زمن أخذ العينات على القيمة (T<sub>s</sub>=100μsec). يبين الشكلان (4) و(5) إشارتي التيار والسرعة على التوالي.



الشكل (4): إشارة تيار المحرك بعد التنظيم باستخدام المتحكم البطاني

من الشكل (4) نلاحظ أن التيار قد تم تنظيمه على القيمة الاسمية (1.8A) في كلا اتجاهي الدوران إلا أنه يعاني من انزياح سالب أي أن القيمة المرجعية للتيار لا تتوضع في منتصف مطال التأرجح (هناك خطأ ستاتيكي سالب)، قيمة الخطأ الستاتيكي تتغير وفق نقطة العمل (سرعة الدوران). كما يُلاحظ أن مطال التأرجح قد بلغ القيمة (0.2A) وهو يمثل ما يقارب 11% من قيمة التيار الاسمي.



الشكل (5): إشارة سرعة المحرك عند تنظيم التيار باستخدام المتحكم البطاني

## 6- تنظيم تيار المحرك باستخدام المتحكم التنبئي

لفهم مبدأ عمل المتحكم التنبئي نفرض أنه لدينا نظاماً له النموذج الرياضي

المعطى في المجال الزمني المتقطع والمعطى بالمعادلة (8) [1]، [7]:

$$\left. \begin{aligned} x[k+1] &= Ax[k] + Bu[k] \\ y[k] &= Cx[k] + Du[k] \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

حيث إن  $x[k+1], x[k]$ : مصفوفة متحولات الحالة في اللحظة  $[k]$  وفي اللحظة  $[k+1]$  على التوالي،  $y[k]$ : مصفوفة الخرج للنظام المدروس،  $u[k]$ : مصفوفة الدخل في النظام المدروس،  $A, B, C, D$ : مصفوفات تأخذ عناصرها قيماً ثابتة تتعلق ببارامترات النظام المدروس والاضطراب المطبق على الدخل. من المعادلة (8) يتبين أنه يمكن تخمين قيمة متحول الحالة اعتماداً على النموذج الرياضي للنظام المدروس وذلك في اللحظة  $[k+1]$ . في الواقع يمكن تخمين قيم متحول الحالة من أجل  $N$  عينة (أو ما يُسمى أفق التنبؤ) والمفاضلة بينها من خلال فرض تابع الكلفة، وهو تابع يفرضه المستخدم من خلال معرفته بالنظام المدروس. يمكن من خلال هذا التابع توصيف هذا النظام، بحيث إن تابع الكلفة يأخذ بالاعتبار كلاً من القيم المرجعية لمتحولات الحالة، قيم متحولات الحالة المستقبلية وقيم المداخل المستقبلية لعدد  $N$  من

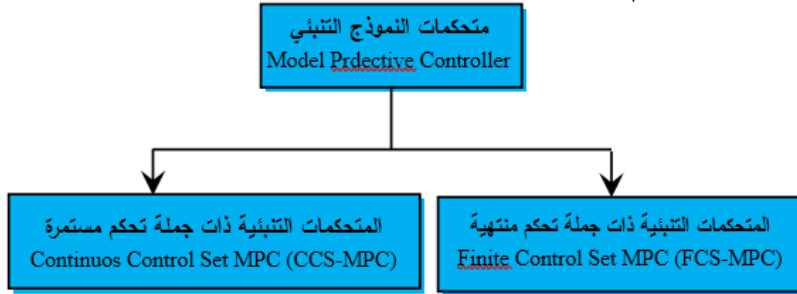


العينات. يُعطى تابع الكلفة العام بالعلاقة الآتية:

$$g = f(x[k], u[k], \dots, u[k + N]) \quad (9)$$

إن قيم المداخل التي يتم حسابها حتى  $N$  عينة، يجب أن تسعى إلى تصغير قيمة تابع الكلفة، إلا أن العينة الأولى فقط يتم تطبيقها في اللحظة  $[k+1]$  ويتم تكرار العملية كل  $T_s$ . في الواقع، كلما كان أفق التنبؤ أكبر كلما زادت العمليات الحسابية الواجب إجراؤها للحصول على قيم المداخل المطلوب حسابها. إن الكم الهائل من الحسابات الواجب إجراؤها في المتحكمات التنبؤية يشكّل عقبة أمام تطبيقها بشكلٍ واسع في المجالات الصناعية بالرغم من الميزات الكبيرة التي تتمتع بها هذه المتحكمات ومن أهمها قدرة هذه المتحكمات على تشكيل أمر التحكم الذي يأخذ بالاعتبار القيود المفروضة على النظام [1]، [7].

بناءً على أفق التنبؤ المطلوب يمكن التمييز بين نوعين رئيسيين من المتحكمات التنبؤية والمبينة في المخطط الموضح في الشكل (6) [8].

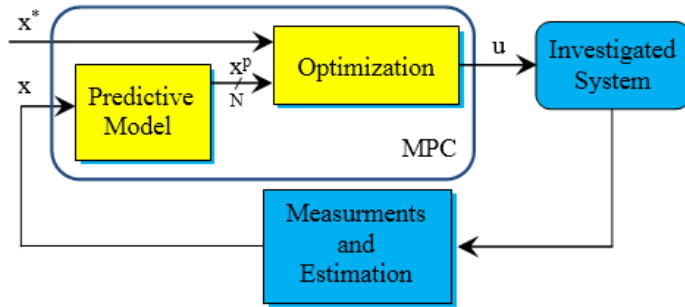


الشكل (6): تصنيف المتحكمات التنبؤية حسب أفق التنبؤ المطلوب

تُعتبر المتحكمات التنبؤية ذات جملة التحكم المنتهية (FCS-MPC) سهلة التطبيق والفهم على اعتبار أن أفق التنبؤ فيها  $(N=1)$ ، وذلك عند تخمين متحولات الحالة في اللحظة  $[k+1]$ . إن الحسابات الواجب إجراؤها للحصول على أمر التحكم وفق هذه الطريقة هي حسابات بسيطة وغير معقدة. يتميز هذا النوع من المتحكمات بالنقاط الآتية [9]:

- لا يحتاج لمرحلة تعديل عرض النبضة PWM.
- تردد التبديل الذي تعمل عنده القالبية متغير.

- سهل التطبيق عملياً على اعتبار أن  $(N=1)$ .
  - يمكن حساب الدخل الأمثلي أثناء العمل (On-Line Optimization).
  - يمكن أخذ القيود المفروضة على النظام المدروس بعين الاعتبار.
- يبين الشكل (7) المخطط الصندوقي العام لأي متحكم تنبؤي [10]. يقوم بلوك (Predictive Model) بإيجاد قيم متحولات الحالة حتى  $N$  عينة، بينما يقوم بلوك (Optimization) باختيار الدخل الأمثل، سواءً كان جهداً أو حالات مفاتيح، لتطبيقه على النظام المدروس.



الشكل (7): المخطط الصندوقي العام للمتحكم التنبؤي

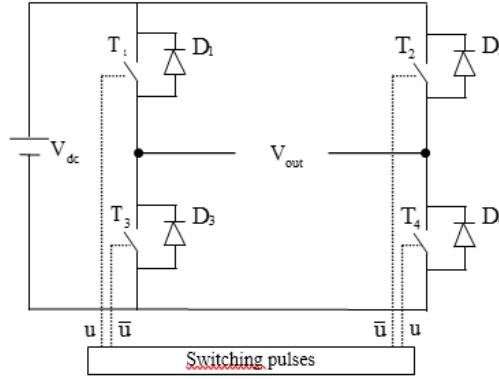
بعد دراسة المبدأ النظري للمتحكمات التنبؤية سيتم الانتقال الآن إلى تطبيق هذه المتحكمات لتنظيم التيار في محرك DC بغية مقارنته بالطرق التقليدية.

### 6-1 تنظيم تيار المحرك باستخدام المتحكم التنبؤي

يعتمد مبدأ تنظيم التيار  $I_a$  في المحرك المدروس على استخدام معادلة أويلر الأمامية للتنبؤ بقيمة التيار في اللحظة  $[k+1]$  من أجل جميع الحالات المتاحة في مبدلة الجهد الجسرية الميينة في الشكل (8). نلاحظ من هذا الشكل أنه حسب النبضات المطبقة على ترانزستورات المبدلة فإننا نملك ثلاث حالات لجهد الخرج ميينة في الجدول (2) [11].

الجدول (2): حالات خرج المبدلة تبعاً للنبضات المطبقة

$u = 1, \bar{u} = 0$	$V_{out} = V_{dc}$
$u = 0, \bar{u} = 1$	$V_{out} = -V_{dc}$
$u = 0, \bar{u} = 0$	$V_{out} = 0$

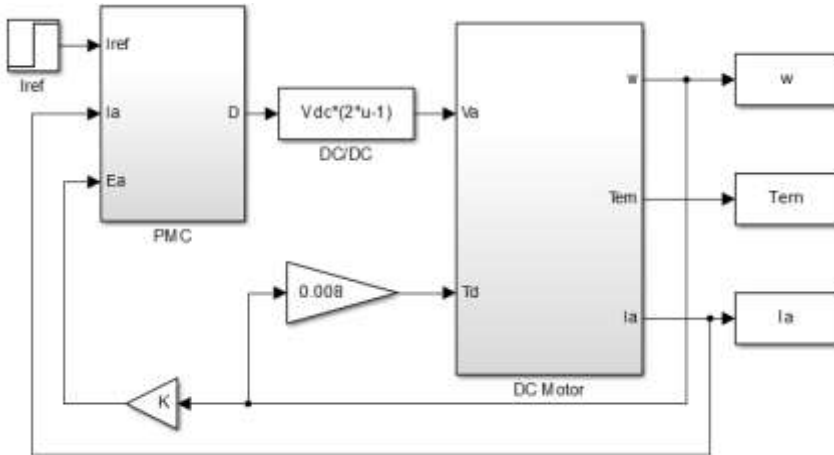


الشكل (8): مبدلة الجهد DC-DC الجسرية

بناءً على الحالات المبينة في الجدول (2) ومعادلة أولرر الأمامية وانطلاقاً من المعادلة (2) يمكن كتابة معادلة التيار في اللحظة  $[k+1]$  بالشكل الآتي:

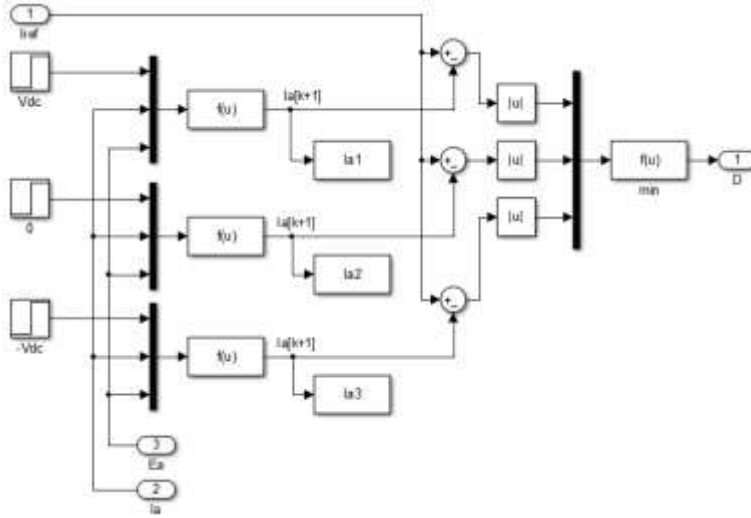
$$I_a[k+1] = \frac{T_s}{L_a} (V_a[k] - E_a[k]) + (1 - \frac{R_a T_s}{L_a}) I_a[k] \quad (10)$$

حيث يأخذ الجهد  $V_a[k]$  إحدى الحالات المذكورة في الجدول (2)،  $T_s$  يمثل زمن أخذ العينات. يبين الشكل (9) النموذج المصمم ضمن بيئة MATLAB/Simulink والمستخدم لتنظيم تيار المحرك المدروس باستخدام المتحكم التنبئي.



الشكل (9): نموذج تنظيم تيار المحرك المدروس باستخدام المتحكم التنبئي وبوجود مبدلة الجهد

نلاحظ التشابه بين الشكلين (3) و(9) من حيث تطبيق حمل لزوج على المحرك مع وجود مبدلة الجهد، فقط يكمن الاختلاف في استخدام متحكم مغاير له البنية الداخلية المبينة في الشكل (10).

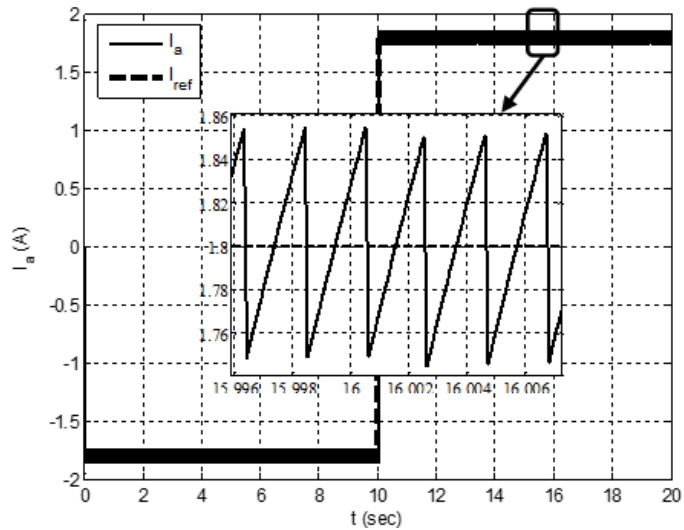


الشكل (10): البنية الداخلية للتحكم التنبئي المصمم

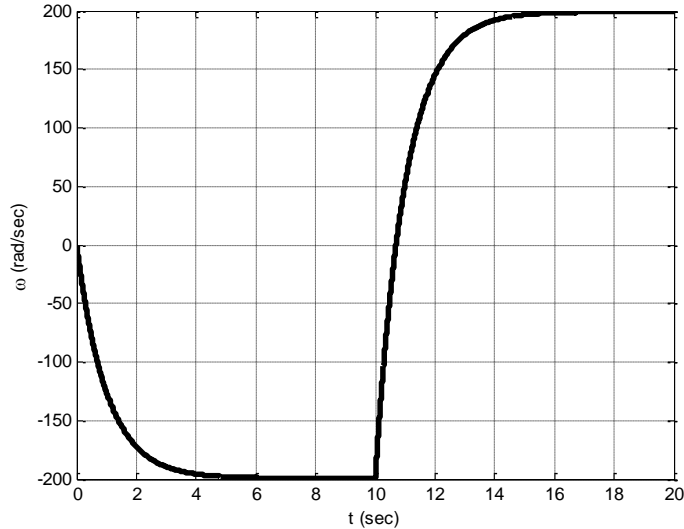
يبين الشكل (10) أنه تم استخدام ثلاثة توابع يتم من خلالها حساب التيارات الناتجة عن حالات مبدلة الجهد المبينة في الجدول (2) وفق المعادلة (10) ويتم بعدها إيجاد الأخطاء الثلاثة بطرح التيارات الناتجة من التيار المرجعي المطلوب، ثم يتم إدخال القيمة المطلقة للأخطاء إلى تابع الكلفة الذي يتم من خلاله تحديد الخطأ الأصغر واختيار نسبة التشغيل التابعة للحالة الأمثل (ذات الخطأ الأصغر) وتطبيقها على مبدلة الجهد.

تم تشغيل الخوارزمية الحالية عند شروط تشغيل الخوارزمية السابقة المبينة في الشكل (3) لتتم المقارنة بين المتحكمين وفق معايير موحدة، حيث تم طلب تيار مرجعي بقيمة (1.8A) والعمل في كلا اتجاهي الدوران ويتم تبديل اتجاه الدوران في اللحظة (t=10sec)، وبزمن أخذ عينات (Ts=100μsec). يبين الشكلان (11) و(12) إشارتي التيار والسرعة لهذه الطريقة على التوالي. نلاحظ من الشكل (11) أن إشارة التيار تتأرجح حول القيمة المرجعية بشكلٍ متناظر وبدون وجود انزياح وذلك عند سرعة دوران مبينة في الشكل (12) (لا يوجد خطأ ستاتيكي في إشارة التيار بسبب إمكانية تطبيق الجهد الصفري غير المتوفر عند استخدام المتحكم البطائي). يمكن الملاحظة من الشكل (12) أن قيمة السرعة قد زادت عن تلك المبينة في الشكل (5)

بسبب زيادة قيمة التيار كقيمة وسطية عند استخدام المتحكم التنبئي عن قيمته عند استخدام المتحكم البطائي.



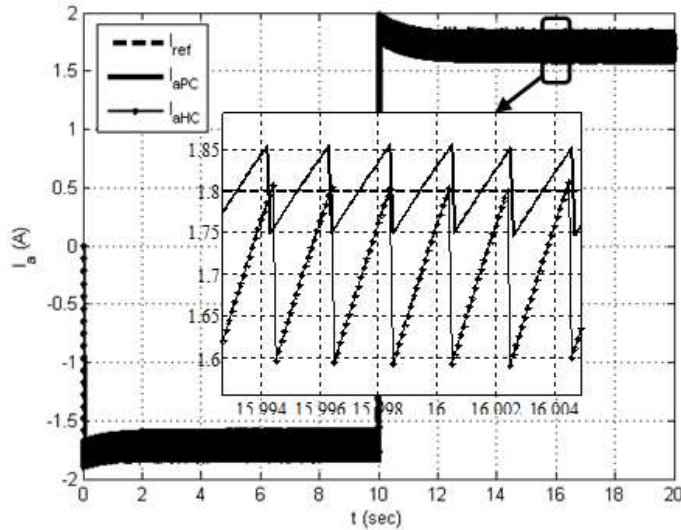
الشكل (11): إشارة تيار المحرك بعد التنظيم باستخدام المتحكم التنبئي



الشكل (12): إشارة سرعة المحرك عند تنظيم التيار باستخدام المتحكم التنبئي

## 8- الخاتمة وتحليل النتائج

في الخوارزميتين السابقتين تم عرض تسلسل منطقي وعملي لطرق تنظيم التيار في محرك التيار المستمر، حيث أكدت نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها ضمن بيئة MATLAB/Simulink أن الأسلوب المتبع في عملية تنظيم التيار باستخدام المتحكم التنبئي قد أعطى النتيجة الأفضل من حيث مطال التآرجح بدون وجود انزياح عن القيمة المرجعية المطلوبة وذلك باستخدام معادلات بسيطة وسهلة عند التنفيذ العملي. يبين الشكل (13) مقارنة بين إشارتي التيار مع الإشارة المرجعية عند تشغيل الخوارزميتين وفق الاعتبارات نفسها.

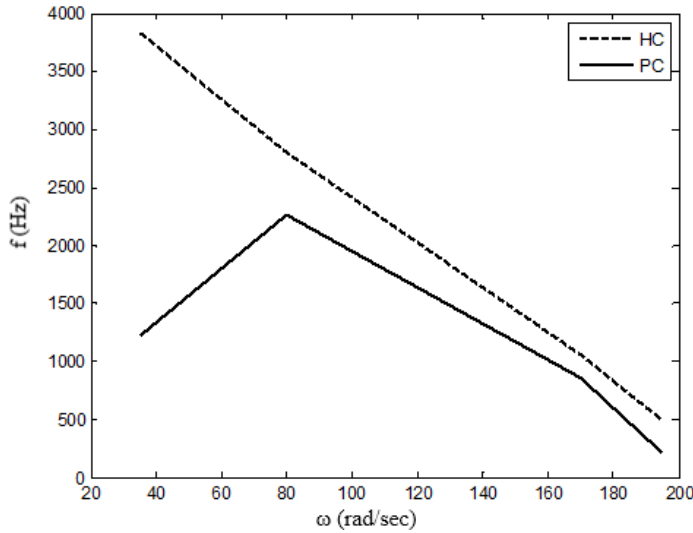


الشكل (13): إشارة التيار عند تنظيمها بالمتحكم البطائي وباستخدام المتحكم التنبئي

من الشكل (13) نلاحظ أن مقدار التآرجح في إشارة التيار المنظم باستخدام المتحكم التنبئي  $I_{aPC}$  قد انخفض بمقدار 50% مقارنةً مع نظيره باستخدام المنظم البطائي  $I_{aHC}$ ، كما أن إشارة التيار  $I_{aPC}$  تتآرجح حول القيمة المرجعية بشكلٍ متناظر من دون إزاحة وهذا يزيد من عزم وسرعة المحرك على اعتبار أن القيمة الوسطية لإشارة التيار  $I_{aHC}$  قد بلغت قيمة أقل من 1.8A (القيمة الاسمية لتيار المحرك وهي ذاتها القيمة المرجعية  $I_{ref}$ ) نتيجة الإزاحة، وهذا يتضح عند مقارنة إشارتي السرعة المبينتين في الشكلين (12) و(5). إن قيمة الإزاحة تتناسب مع نقطة العمل، أي أنها

تزداد وتتنقص مع سرعة الدوران وقيمة التيار المرجعي المطلوب وعرض عروة المنظم المستخدم بالإضافة إلى بنية المنظم.

من جهة أخرى، عند مقارنة تردد التبديل بين الطريقتين المستخدمتين نجد أن تردد التبديل عند استخدام المتحكم التنبئي قد انخفض وسطياً بمقدار 30% عند سرعات دوران مختلفة كما يبين الشكل (14)، وبالتالي يمكن القول بأن التخفيض في مقدار التآرجح في الخوارزمية التنبئية مقارنةً بطريقة المنظم البطائي لم يرافقه زيادة في تردد التبديل وهذا يعني ضياعات تبديل أقل.

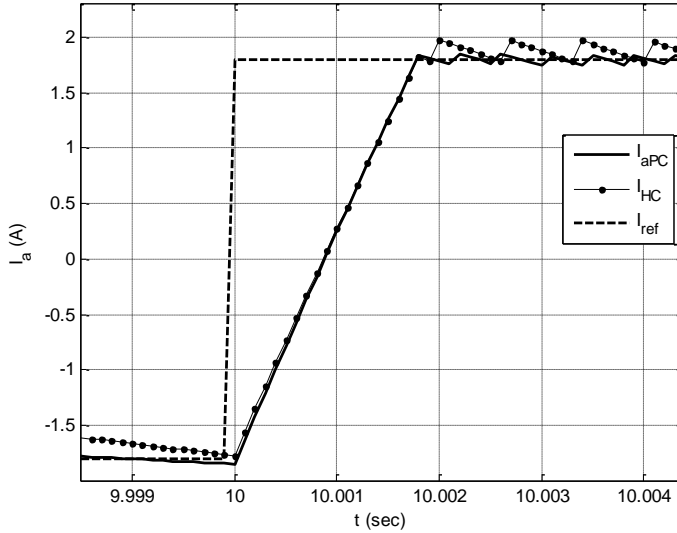


الشكل (14): تردد التبديل عند كامل مجال السرعة لخوارزميتي المتحكم البطائي والمتحكم التنبئي

بمقارنة الديناميكية بين الطريقتين المعروضتين سابقاً نجد أن استخدام المتحكم التنبئي لم يغير من سرعة استجابة التيار، حيث تم الانتقال من القيمة الاسمية السالبة للتيار إلى القيمة الاسمية الموجبة بزمن لا يتجاوز 2ms للطريقتين كما هو مبين في الشكل (15). الجدير بالذكر هو أنه لم نقم بمقارنة هذه الطرق مع طريقة التنظيم باستخدام منظم PI لأن الأخير كما هو معلوم بطيء الاستجابة وتردد تبديله يتبع تردد الإشارة الحاملة لنبضات PWM.

بالطبع لا توجد مشكلة في قيم الجهد المطبق على المحرك في كلا الخوارزميتين بسبب وجود مبدلة الجهد في كلا النموذجين، وكما تم ذكره سابقاً يتم

تطبيق الجهد على المحرك بقيمته الاسمية ولم يتم تطبيق جهد أعلى من القيمة الاسمية لأنه تم تصميم مبدلة الجهد عند القيمة الاسمية لجهد المحرك.



الشكل (15): ديناميكية إشارة التيار عند تنظيمها بالمتحكم البطاني وباستخدام المتحكم التنبئي

من خلال عرض طريقة بناء الخوارزمية التنبئية تبين أن الخوارزمية أعطت أداءً أفضل من الخوارزمية التقليدية كما أن تطبيقها عملياً لا يحتاج متطلبات تنفيذ كبيرة، حيث يعتمد تنفيذ الخوارزمية على تكرار تطبيق المعادلة (10) ثلاث مرات واختيار الحالة ذات الخطأ الأصغر من خلال حلقتي (If) والتي تمثل تابع الكلفة المفروض.

### المراجع

- 1- RODRIGUEZ J.; CORTES P., 2012- **Predictive Control of Power Converters and Electrical Drives**, John Wiley & Sons Ltd. Publication, 231 pages.
- 2- HOLTZ J.; STADTFELD S., 1983- **A Predictive Controller for The Stator Current Vector of AC Machines Fed from a Switched Voltage Source**, International Power Electronics Conference, IPEC, Tokyo, pp. 1665–1675.
- 3- ناصيف محمد، 2015- استخدام الشرائح الرقمية وفق طريقة المعالجة المتوازية لتصميم وتنفيذ خوارزميات متقدمة في قيادة آلات التيار المتناوب، كلية الهندسة الكهربائية والإلكترونية، جامعة حلب، 144 صفحة.



- 4- بري مضيف، 1994 - **تحويل طاقة**. منشورات جامعة حلب، 532 صفحة.
- 5- الرفاعي محمد بشير - **الآلات الكهربائية (1)**. منشورات جامعة حلب، 473 صفحة.
- 6- نعساني أحمد عمار، ناصيف محمد، 2013 - **نظم القيادة الآلية (1) - الجزء العملي**، منشورات جامعة حلب، 209 صفحات.
- 7- LINDER A., KANCHAN R., KENNEL R., STOLZE P., 2010- **Model – Based Predictive Control of Electric Drives**, *Cuvillier Verlag Gottingen*, 270 pages.
- 8- PREINDL M., BOLOGNANI S., 2013- **Model Predictive Direct Speed Control with Finite Control Set of PMSM Drive Systems**, *IEEE Trans. on PE*, **28(2)**, pp. 1007-1015.
- 9- KÜHL S., 2010- **Considering Anisotropies and Iron Saturation of PMSMs in Model Predictive Control Schemes**, *Technical University of Munich in Cooperation with University Of Padova*, 120 pages.
- 10- VAZQUEZ S.; LEON J.I.; FRANQUELO L.G.; RODRÍGUEZ J.; YOUNG H.A.; MARQUEZ A.; ZANCHETTA P., 2014- **Model Predictive Control: A Review of Its Applications in Power Electronics**, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, pp. 16-31.
- 11- Šlapák V.; Kyslan K.; Lacko M.; Fedák V.; Durovský F., 2016- **Finite Control Set Model Predictive Speed Control of a DC Motor**, *Hindawi Publishing Corporation*, **(10)**, 10 pages.