



استخدام الخوارزمية التنبؤية لتخمين القوة المحركة العكسية, موضع وسرعة المحرك BLDC

ريم طعمي^{1*}, مروان جبر لباد²

¹قسم هندسة التحكم والأتمتة، كلية الهندسة الكهربائية والإلكترونية، جامعة حلب، سوريا، toumireem@gmail.com

²قسم هندسة التحكم والأتمتة، كلية الهندسة الكهربائية والإلكترونية، جامعة حلب، سوريا، marwanlabbad@hotmail.com

*الباحث الممثل: ريم طعمي، toumireem@gmail.com

نشر في: 30 أيلول 2022

الخلاصة- من أجل التحكم بالمحرك (BLDC) فإنه عملياً يتطلب الحصول على إشارات تيارات الأطوار الثلاثة للمحرك (BLDC)، ويتطلب هذا الأمر استخدام ثلاثة حساسات لأثر (Hall) وهذه الحساسات التي تقدر التيارات غالبية الثمن ومن ناحية ثانية يؤدي استخدامها لنشوء ضجيج في إشارات التيارات المقدره، لذلك تم في هذا البحث استخدام الخوارزمية التنبؤية لتخمين إشارات التيارات للمحرك (BLDC) من دون الاعتماد على الحساسات وتم اختبار كفاءة هذه الخوارزمية عن طريق محاكاة محرك (BLDC) باستخدام الـ (Simulink) في برنامج الـ (Matlab)، ومن أهم النتائج التي تم الحصول عليها في هذا البحث كفاءة الخوارزمية التنبؤية في تخمين الإشارات المطلوبة وهي إشارة القوة المحركة العكسية وإشارات الأطوار الثلاثة. أما بالنسبة إلى إشارة السرعة الزاوية ففي عملية التخمين تذبذب كبير بسبب الاعتماد في ضبط عملية التخمين على ثمانية بارامترات ولا يوجد عملية أمثلية لضبطها ولكن على الرغم من ذلك فإنه تم تخمين إشارة موضع محور دوران المحرك بشكل ممتاز بالمقارنة مع الموضع الحقيقي.

الكلمات الرئيسية – المحرك (BLDC)، حساسات (Hall)، الخوارزمية التنبؤية.

1- المقدمة

وقد تم استخدام طرق عديدة لتخمين الإشارات السابقة ومن هذه الطرق نذكر [1]:

أولاً حساسات أثر (Hall) والتي تعتبر غالبية الثمن، وتؤدي لنشوء ضجيج على الإشارات المخمنة، لذلك كانت الأبحاث تتجه لتخمين الإشارات السابقة بدون استخدام هذه الحساسات فظهرت أبحاث تستخدم مرشحات كالمان ومرافقات لوبزغر، وأما مرشحات كالمان فيحتاج تصميمها إلى معرفة الكثافة الطيفية للضجيج والكثافة الطيفية للاضطراب وان استخدامها معقد، وإن ومرافقات لوبزغر لا تعالج مشكلة ضجيج الخرج، لذلك تم استخدام الخوارزمية التنبؤية والتي أدى استخدامها إلى نتائج تخمين ممتازة كما هو موضح في هذا البحث [2].

يوجد نموذجان رئيسان من محركات الـ (BLDC) الخاصة بأشكال إشارات الأطوار هما:

نموذج شبه المنحرف والنموذج الجيبي، حيث أن النموذج الأول هو الأكثر استخداماً في معظم التطبيقات لبساطته وانخفاض تكلفته وكفاءته العالية.

قمنا في هذا البحث بنمذجة محرك (BLDC) ومن ثم محاكاة الأنموذج بالـ (Simulink) باستخدام برنامج الماتلاب، ومن ثم استخدام الخوارزمية التنبؤية لتخمين إشارات القوة المحركة الكهربائية العكسية والسرعة والموضع، لتجنب استخدام حساسات أثر (Hall) التي تؤدي لنشوء الضجيج.

إن التطور السريع في الإلكترونيات الصناعية وتقنيات أنصاف النواقل وتطور نظريات التحكم الحديث بالمحركات فقد تم الاعتماد على محركات (Brushless DC Motor=BLDC) على نطاق واسع في معظم التطبيقات الصناعية.

تتميز محركات (BLDC) بالمقارنة مع محرك التيار المستمر (DC) بالعمر التشغيلي الطويل، والاستجابة الديناميكية العالية والكفاءة العالية وسرعة أفضل وميزة خطية بين السرعة والعزم أكثر خطية من ميزة المحرك (DC)، بالإضافة إلى عدم وجود الضجيج الصوتي، وكذلك فإن المحرك (BLDC) يقدم نسبياً عزم أكبر من المحرك (DC) بالنسبة لتغيير الوزن.

ومن أجل قيادة المحرك (BLDC) والتحكم به فإنه يتطلب تخمين الإشارات التالية:

إشارة القوة المحركة الكهربائية العكسية.

إشارة السرعة الزاوية.

إشارات تيارات الأطوار الثلاثة.

إشارة الموضع.

وتعطى القوة المحركة الكهربائية بالعلاقات التالية:

$$\begin{aligned} emf_a &= k_e \cdot \omega_m \cdot F(\theta_e) \\ emf_b &= k_e \cdot \omega_m \cdot F(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \\ emf_c &= k_e \cdot \omega_m \cdot F(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (2)$$

حيث أن:

$[k_e (V / rad / sec)]$: ثابت القوة المحركة الكهربائية العكسية للمحرك.

$[w_m (rad/sec)]$: السرعة الزاوية للدوار.

$[F(\theta_e)]$: التابع المرجعي للقوة المحركة الكهربائية العكسية ذو شكل شبه منحرف بمطال (± 1) ، ويعطى بالصيغة التالية:

$$F(\theta_e) = \begin{cases} 1 & : 0 \leq \theta_e \leq \frac{2\pi}{3} \\ 1 - \frac{6}{\pi}(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & : \frac{2\pi}{3} \leq \theta_e \leq \pi \\ -1 & : \pi \leq \theta_e \leq \frac{5\pi}{3} \\ -1 + \frac{6}{\pi}(\theta_e - \frac{5\pi}{3}) & : \frac{5\pi}{3} \leq \theta_e \leq 2\pi \end{cases} \quad (3)$$

ويعطى العزم الكهرومغناطيسي الكلي بالعلاقة التالية:

$$T_e = \frac{1}{\omega_m} (emf_a \cdot i_a + emf_b \cdot i_b + emf_c \cdot i_c) \quad (4)$$

المعادلة الميكانيكية:

$$T_e = B \cdot \omega_m + J \cdot \frac{d\omega_m}{dt} + T_l \quad (5)$$

حيث أن:

(T_e) : العزم الكهرومغناطيسي الكلي.

(B) : ثابت عزم الاحتكاك بين الزاوية الكهربائية والميكانيكية.

$(J(V/RAD/SEC))$: ثابت القوة المحركة الكهربائية العكسية.

(T_l) : عزم حمولة المحرك.

حيث تعطى العلاقة بين الزاوية الكهربائية والميكانيكية بالعلاقة التالية:

$$\theta_e = \frac{P}{2} \cdot \theta_m \quad (6)$$

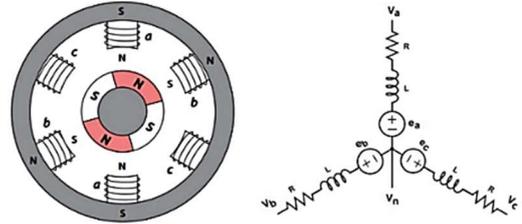
2- أهمية البحث وأهدافه:

تتلخص أهمية البحث في نمذجة المحرك (BLDC) وتمثيله بمعادلات الحالة، ومن ثم كيفية توليد الإشارة ثلاثية الطور ذات شبه المنحرف باستخدام القالب ثلاثية الطور للجهد المستمر، ومن ثم تخمين إشارات القوة المحركة العكسية وموضع وسرعة المحرك (BLDC)، وعدم استخدام حساسات (Hall)، والتعرف على طريقة التخمين التنبؤية.

3- طريقة البحث:

3.1 نمذجة المحرك (BLDC) بمعادلات الحالة [3]

يبين الشكل (1) محرك (BLDC) النموذجي ثلاثي الطور مع دارته الكهربائية الممثلة له:



طريقة توصيل الملفات بشكل نجمي (b) البنية الداخلية لمحرك BLDC

شكل 1: محرك الـ BLDC مع دارته المكافئة.

إن النموذج الرياضي للمحرك (BLDC) يوصف بنوعين من المعادلات الكهربائية والميكانيكية، كما يلي: [3]

المعادلات الكهربائية:

$$\begin{aligned} V_a &= R \cdot i_a + L \cdot \frac{di_a}{dt} + emf_a \\ V_b &= R \cdot i_b + L \cdot \frac{di_b}{dt} + emf_b \\ V_c &= R \cdot i_c + L \cdot \frac{di_c}{dt} + emf_c \end{aligned} \quad (1)$$

حيث أن:

(V_a, V_b, V_c) : جهود الأطوار الثلاثة.

(i_a, i_b, i_c) : تيارات الأطوار الثلاثة.

(emf_a, emf_b, emf_c) : القوة المحركة الكهربائية العكسية للأطوار الثلاثة.

(R, L) : مقاومة وذاتية الطور لملف الثابت.

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & 0 \\ -\frac{1}{L} & -\frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a - emf_a \\ V_b - emf_b \\ T_e - T_s \end{bmatrix} \quad (11)$$

حيث أن $[\theta_m (rad)]$: الزاوية الميكانيكية للدوار.

$[\theta_e (rad)]$: الزاوية الكهربائية للدوار.

من العلاقات (1) و(2) يمكن صياغة النمذجة الرياضية للمحرك (BLDC) بمعادلات الحالة التالية:

وإشارات الخرج هي

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ w_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ w_m \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{L}V_a - \frac{R}{L}i_a - \frac{1}{L}emf_a$$

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{1}{L}V_b - \frac{R}{L}i_b - \frac{1}{L}emf_b \quad (7)$$

$$\frac{di_c}{dt} = \frac{1}{L}V_c - \frac{R}{L}i_c - \frac{1}{L}emf_c \quad (8)$$

وحيث أنه يتحقق دوماً

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (8)$$

وبذلك نكتب:

$$i_c = -i_a - i_b$$

$$\frac{di_c}{dt} = -\frac{di_a}{dt} - \frac{di_b}{dt}$$

$$\frac{di_c}{dt} = -\frac{1}{L}V_a + \frac{R}{L}i_a + \frac{1}{L}emf_a - \frac{1}{L}V_b + \frac{R}{L}i_b + \frac{1}{L}emf_b$$

$$\frac{di_c}{dt} = \frac{R}{L}i_a + \frac{R}{L}i_b - \frac{1}{L}V_a - \frac{1}{L}V_b + \frac{1}{L}emf_a + \frac{1}{L}emf_b$$

(9)

وحسب المعادلة (5) نكتب

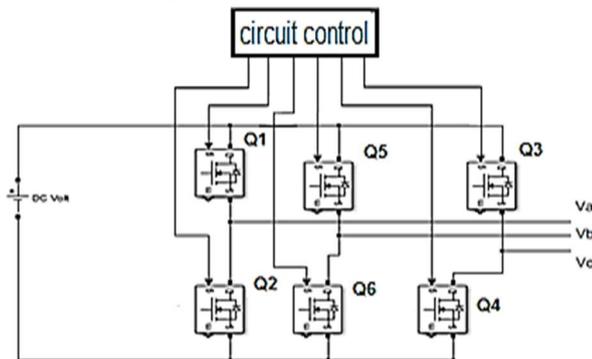
$$\frac{dw_m}{dt} = -\frac{B}{J}w_m + \frac{1}{J}(T_e - T_s) \quad (10)$$

من المعادلات (7) و(9) و(10) نكتب:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{di_b}{dt} \\ \frac{di_c}{dt} \\ \frac{dw_m}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ \frac{R}{L} & \frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ w_m \end{bmatrix} +$$

3.2 قيادة المحرك (BLDC) - قابلة الجهد

يتم قلب الجهد المستمر باستخدام القابلة الترانزيستورية مع دائرة التحكم بعمل الترانزيستورات، ويوضح الشكل (2) محاكاة القابلة باستخدام الـ (Simulink)، ويبين الجدول (1) نبضات فتح الترانزيستورات ومجالات عمل الترانزيستورات للحصول على الإشارات ثلاثية الطور على شكل شبه المنحرف. [4][5]



شكل 2: القابلة الترانزيستورية.

جدول 1: التحكم بفتح ترانزيستورات القابلة.

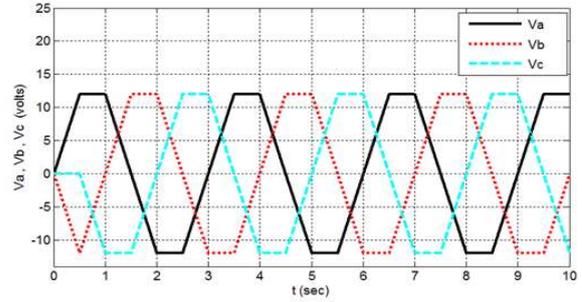
مجال العمل	الترانزيستورات		تيارات الأطوار		
			A	B	C
$0^\circ - 60^\circ$	Q_1	Q_4	+	-	Off
$60^\circ - 120^\circ$	Q_1	Q_6	+	Off	-
$120^\circ - 180^\circ$	Q_3	Q_6	Off	+	-

$300^\circ - 360^\circ$	Q_5	Q_4	Off	-	+
-------------------------	-------	-------	-----	---	---

يبين الشكل (3) الإشارات ثلاثية الطور على شكل شبه المنحرف اللازمة لقيادة المحرك (BLDC).

تم في هذه الفقرة شرح طريقة تخمين الإشارات اعتماداً على قوانين التنبؤ بطريقة on-line، واختبار النتائج باستخدام برنامج MATLAB. حيث تم في هذا البحث استنتاج قانون التنبؤ لتقدير الإشارات عن طريق افتراض تابع ليايونوف المعرف إيجابياً والذي يتضمن البارامترات المتغيرة المراد التنبؤ بها، ولكي تكون عملية التخمين متجهة بالمسار الصحيح فإنه يجب أن يكون مشتق تابع ليايونوف الزماني معرفاً سلبياً، ولكن عند اشتقاق تابع ليايونوف فإنه قد يكون غير معرف بسبب وجود حدود موجبة وأخرى سالبة، لذلك لجعل مشتق تابع ليايونوف معرفاً سلبياً فإننا نضع جميع الحدود غير المعرفة مساوية للصفر، ومن هذه العلاقة نستنتج قانون التخمين الذي يتضمن تخمين الإشارات [6][7][8]

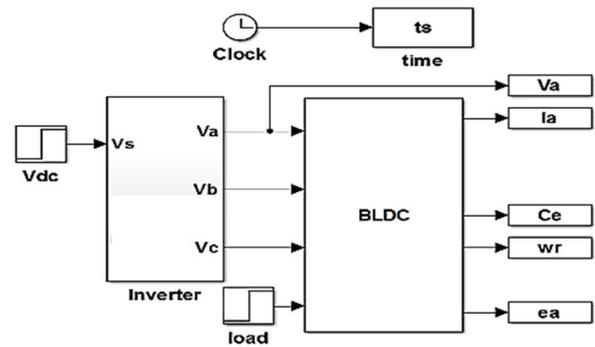
$180^\circ - 240^\circ$	Q_3	Q_2	-	+	Off
$240^\circ - 300^\circ$	Q_5	Q_2	-	Off	+



شكل 3: الإشارات ثلاثية الطور على شكل شبه المنحرف اللازمة لقيادة المحرك (BLDC).

3.3 مخطط الـ (Simulink) لمحرك (BLDC) مع دائرة القيادة

يوضح الشكل (4) مخطط المحاكاة للمحرك (BLDC) وذلك اعتماداً على تمثيله بمعادلات الحالة المعطاة بالعلاقات (7) و(8)، واستخدام دائرة القابلية الترانزستورية الموضحة في الشكل (2): [5]



شكل 4: مخطط المحاكاة للمحرك (BLDC)

حيث أن بارامترات محرك الـ (BLDC) موضحة في الجدول (2):

جدول 2: بارامترات محرك (BLDC).

الرمز	البارامتر	القيمة والوحدة
R	مقاومة المتحرض	0.7Ω
L	ذاتية المتحرض	2.72 mH
F	عامل الاحتكاك	$4e-5 \frac{N.m.sec}{rad}$
J	عزم العطالة	$0.0017 * 7.06e-3 \text{ kg.m}^2$
P	عدد الأقطاب	4

3.4 خوارزمية التخمين:

لنفرض نظام الدرجة الأولى معطى بالمعادلة التفاضلية التالية:

$$\dot{x}(t) + a.x(t) = bu(t) \quad (10)$$

والتي يمكن كتابتها بالشكل التالي:

$$\dot{x}(t) = -a.x(t) + bu(t) \quad (11)$$

حيث أن البارامترات a, b مجهولة، و $u(t)$ إشارة الدخل، $x(t)$ إشارة الخرج أو متحول الحالة.

لنفرض أن البارامترات المقترحة هي \hat{a}, \hat{b} ، ولنفرض أن خطأ التقدير للإشارة هو:

$$\varepsilon_1 = x - \hat{x} \quad (12)$$

حيث \hat{x} هو شعاع متحولات الحالة المخمن اعتماداً على تقدير \hat{a}, \hat{b} ويتم إيجاد \hat{x} عن طريق المعادلة السابقة التي تصبح بالشكل التالي:

$$\dot{\hat{x}}(t) = -\hat{a}.\hat{x}(t) + \hat{b}u(t) \quad (13)$$

تعتمد الخوارزمية التنبؤية على إيجاد المعادلة التفاضلية للخطأ كما يلي: باشتقاق معادلة الخطأ (12) نجد:

$$\dot{\varepsilon}_1 = \dot{x} - \dot{\hat{x}} \quad (14)$$

نبدل المعادلات (11) و(13) في المعادلة (14) فنجد:

$$\tilde{a} \cdot \hat{x} \cdot \varepsilon_1 - \tilde{b} \cdot u \cdot \varepsilon_1 + \frac{\tilde{a} \dot{\hat{a}}}{\gamma_1} + \frac{\tilde{b} \dot{\hat{b}}}{\gamma_2} = 0 \quad (25)$$

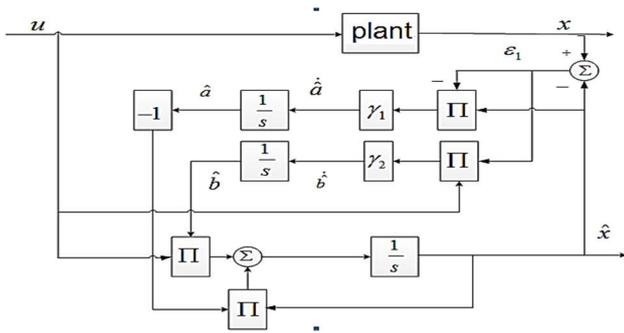
ومنه يمكن أن نفرض من العلاقة (25) ما يلي:

$$\tilde{a} \cdot \hat{x} \cdot \varepsilon_1 + \frac{\tilde{a} \dot{\hat{a}}}{\gamma_1} = 0, \quad -\tilde{b} \cdot u \cdot \varepsilon_1 + \frac{\tilde{b} \dot{\hat{b}}}{\gamma_2} = 0 \quad (26)$$

ومنه قوانين التكيف التي تقدر بارامترات جملة التحكم:

$$\dot{\hat{a}} = -\gamma_1 \cdot \hat{x} \cdot \varepsilon_1, \quad \dot{\hat{b}} = \gamma_2 \cdot u \cdot \varepsilon_1 \quad (27)$$

يبين الشكل (5) المخطط الصندوقي لقانون التكيف لتقدير بارامترات جملة التحكم:



شكل 5: المخطط الصندوقي لتقدير البارامترات باستخدام الخوارزمية التكيفية.

3.5 تطبيق الخوارزمية التنبؤية على المحرك (BLDC)

بالعودة إلى المعادلات (1) و (4) و (5) نجد أن النظام المقدر يمثل بالمعادلات التالية [8]:

$$V_a = \hat{R} \cdot \hat{i}_a + \hat{L} \cdot \frac{d\hat{i}_a}{dt} + emf_a$$

$$V_b = \hat{R} \cdot \hat{i}_b + \hat{L} \cdot \frac{d\hat{i}_b}{dt} + emf_b \quad (28)$$

$$V_c = \hat{R} \cdot \hat{i}_c + \hat{L} \cdot \frac{d\hat{i}_c}{dt} + emf_c$$

$$J \cdot \frac{d\hat{\omega}_m}{dt} + \hat{B} \cdot \hat{\omega}_m = T_e - T_l \quad (29)$$

$$\hat{\omega}_m = \frac{1}{T_e} (emf_a \cdot \hat{i}_a + emf_b \cdot \hat{i}_b + emf_c \cdot \hat{i}_c) \quad (30)$$

وباتباع خطوات الخوارزمية التنبؤية لتقدير البارامترات، وافترض توابع لياونوف المناسبة نحصل على القوانين التكيفية للتقدير بالصيغة التالية:

$$\dot{\hat{a}} = -\gamma_1 \cdot \hat{i}_a \cdot \varepsilon_1, \quad \dot{\hat{b}} = -\gamma_2 \cdot (V_a - emf_a) \cdot \varepsilon_1 \quad (31)$$

$$\dot{\varepsilon}_1 = -a \cdot x + b \cdot u - (-\hat{a} \cdot \hat{x} + \hat{b} \cdot u) \quad (15)$$

بإضافة الحدين $(a\hat{x} - a\hat{x})$ إلى (14) نجد:

$$\dot{\varepsilon}_1 = -a \cdot \varepsilon_1 + (\hat{a} - a) \cdot \hat{x} - (\hat{b} - b) \cdot u \quad (16)$$

وبفرض أن خطأ البارامترات معرف بالشكل التالي:

$$\tilde{a} = \hat{a} - a, \quad \tilde{b} = \hat{b} - b \quad (17)$$

ومنه نكتب المعادلة (16) بالشكل التالي:

$$\dot{\varepsilon}_1 = -a \cdot \varepsilon_1 + \tilde{a} \cdot \hat{x} - \tilde{b} \cdot u \quad (18)$$

لكي نتحقق عملية التخمين الممثلة بملاحقة البارامترات المقدرة \hat{a}, \hat{b} إلى a, b ، يجب أن نعرف تابع لياونوف المعرف إيجابياً، وأن يكون مشتقه بالنسبة للزمن معرفاً بشكل سلبي ويتم اختيار تابع لياونوف وفق أي شكل تربيعي، وليكن بالشكل التالي:

$$V(\varepsilon_1, \tilde{a}, \tilde{b}) = \frac{1}{2} (\varepsilon_1^2 + \frac{\tilde{a}^2}{\gamma_1} + \frac{\tilde{b}^2}{\gamma_2}) \quad (19)$$

ومنه مشتق تابع لياونوف:

$$\dot{V}(\varepsilon_1, \tilde{a}, \tilde{b}) = \varepsilon_1 \dot{\varepsilon}_1 + \frac{\tilde{a} \dot{\tilde{a}}}{\gamma_1} + \frac{\tilde{b} \dot{\tilde{b}}}{\gamma_2} \quad (20)$$

نبدل الصيغة التفرعية للخطأ (18) في المعادلة (20) فنجد:

$$\dot{V}(\varepsilon_1, \tilde{a}, \tilde{b}) = \varepsilon_1 (-a \cdot \varepsilon_1 + \tilde{a} \cdot \hat{x} - \tilde{b} \cdot u) + \frac{\tilde{a} \dot{\tilde{a}}}{\gamma_1} + \frac{\tilde{b} \dot{\tilde{b}}}{\gamma_2} \quad (21)$$

باشتقاق العلاقاتين (17) نجد:

$$\dot{\tilde{a}} = \dot{\hat{a}}, \quad \dot{\tilde{b}} = \dot{\hat{b}} \quad (22)$$

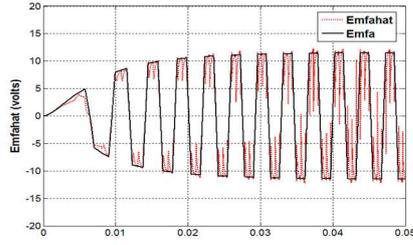
نبدل (22) في المعادلة (21) فنجد:

$$\dot{V}(\varepsilon_1, \tilde{a}, \tilde{b}) = -a \cdot \varepsilon_1^2 + \tilde{a} \cdot \hat{x} \cdot \varepsilon_1 - \tilde{b} \cdot u \cdot \varepsilon_1 + \frac{\tilde{a} \dot{\hat{a}}}{\gamma_1} + \frac{\tilde{b} \dot{\hat{b}}}{\gamma_2} \quad (23)$$

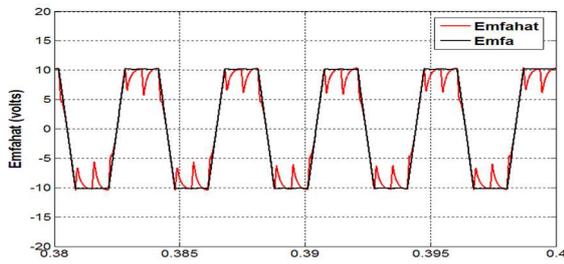
نفرض مشتق تابع لياونوف وفق الصيغة التالية:

$$\dot{V}(\varepsilon_1, \tilde{a}, \tilde{b}) = -a \cdot \varepsilon_1^2 \quad (24)$$

وهو معرف سلبياً وذلك بشرط أن يكون $(a > 0)$ وأن يتحقق شرط التكيف:



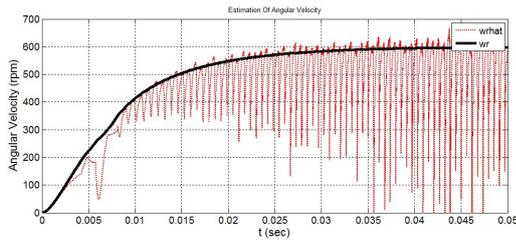
شكل 7: تخمين القوة المحركة الكهربائية العكسية للطور الأول خلال زمن البداية للمحاكاة (فترة الإفلاع).



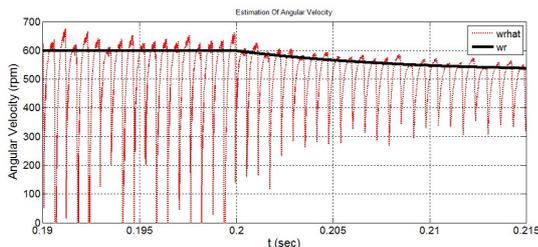
شكل 8: تخمين القوة المحركة الكهربائية العكسية للطور الأول خلال زمن النهاية للمحاكاة (فترة الاستقرار).

4.2 تخمين السرعة الزاوية

تبين الأشكال (9) (10) (11) (12) تخمين إشارة السرعة الزاوية لمحور دوران المحرك (BLDC) بالمقارنة مع السرعة الحقيقية.



شكل 9: تخمين السرعة الزاوية للمحرك (BLDC) بالمقارنة مع السرعة الحقيقية زمن الإفلاع.



شكل 10: تخمين السرعة الزاوية للمحرك (BLDC) بالمقارنة مع السرعة الحقيقية خلال فترة التحميل في اللحظة (0.2 sec).

حيث أن خطأ الإشارة يعطى بالعلاقة التالية:

$$\varepsilon_1 = i_a - \hat{i}_a$$

وحيث أن البارامترات المقدرة هي:

$$\hat{a} = \frac{\hat{R}}{L}, \quad \hat{b} = \frac{1}{L} \quad (32)$$

وبالأسلوب نفسه نجد أن بارامترات المعادلة (29) المقدرة لها الصيغة التالية:

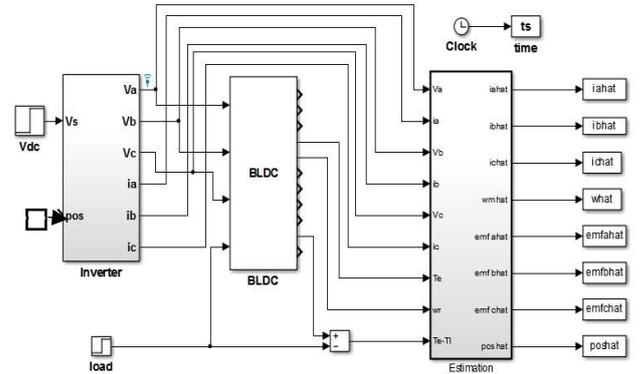
$$\hat{c} = -\gamma_3 \cdot \hat{\omega}_m \cdot \varepsilon_2, \quad \hat{d} = -\gamma_4 \cdot (T_e - T_l) \cdot \varepsilon_2 \quad (33)$$

حيث أن البارامترات المقدرة هي:

$$\hat{c} = \frac{\hat{B}}{J}, \quad \hat{d} = \frac{1}{J} \quad (34)$$

3.6 تمثيل نظام التحكم بالـ (Simulink) مع خوارزمية التخمين

بتمثيل معادلات الحالة التي تمثل المحرك (BLDC) ودارة القيادة له، وتمثيل خوارزمية التقدير التكيفية باستخدام توابع ليابونوف نحصل على مخطط الـ (Simulink) الموضح في الشكل (6):



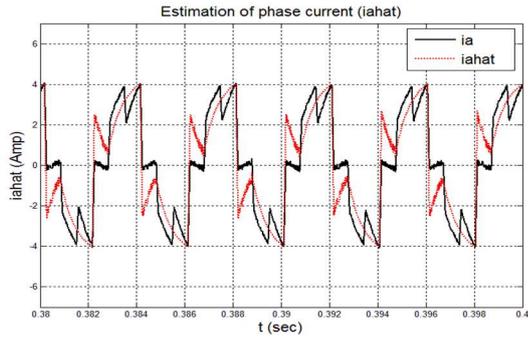
شكل 6: مخطط الـ (Simulink) لتمثيل المحرك (BLDC) ودارة القيادة له، و الخوارزمية التنبؤية.

4- نتائج محاكاة الخوارزمية التنبؤية

بتنفيذ مخطط الـ (Simulink) الموضح في الشكل (6) نحصل على نتائج المحاكاة التالية للخوارزمية التنبؤية:

4.1 تخمين القوة المحركة الكهربائية العكسية

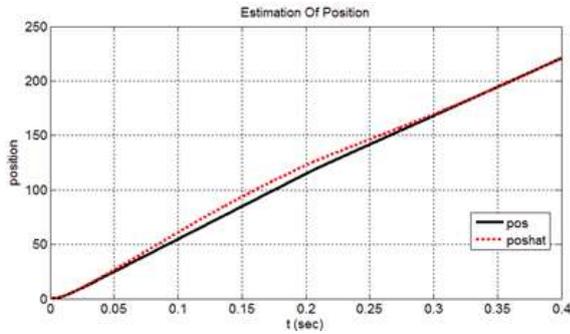
تبين الأشكال (7) و (8) تخمين إشارة القوة المحركة الكهربائية العكسية بالنسبة للطور الأول للمحرك (BLDC) باستخدام الخوارزمية التنبؤية باستخدام، وذلك بالمقارنة مع القوة المحركة الكهربائية العكسية الحقيقية للطور الأول، وذلك خلال فترات زمنية مختلفة من الاستجابة، وبالنسبة لتخمين إشارة القوة المحركة الكهربائية العكسية بالنسبة للطورين الثاني والثالث للمحرك (BLDC) فإننا سنحصل على إشارات مشابهة للإشارات الموضحة في الأشكال (7) و (8) ولكن مع انزياح (120°, 240°).



شكل 14: تخمين تيار الطور الأول خلال زمن النهاية للمحاكاة (فترة الاستقرار).

4.4 تخمين الموضع

يبين الشكل (15) تخمين إشارة موضع محور دوران المحرك (BLDC) بالمقارنة مع الموضع الحقيقي.



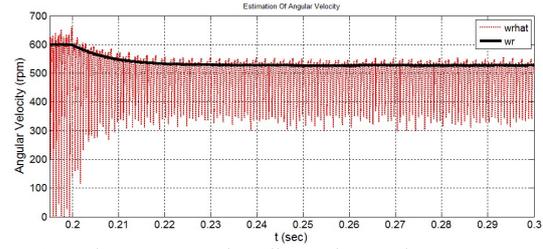
شكل 15: تخمين إشارة موضع محور دوران المحرك (BLDC) بالمقارنة مع الموضع الحقيقي.

5- الاستنتاجات و المناقشة

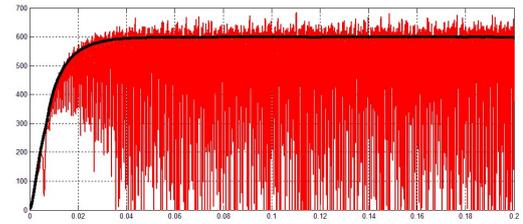
إن عملية التقدير باستخدام الخوارزمية التنبؤية لتخمين القوة المحركة العكسية وموضع وسرعة المحرك BLDC تعتمد على تقدير بارامترات المحرك BLDC والتي عددها أربعة بارامترات، وكل بارامتر يعتمد على ربحي تكيف (γ_1, γ_2) وبالتالي نحتاج لضبط ثمانية أرباح أما سيئة الخوارزمية التنبؤية فهي حاجتها لضبط ربح التكيف (γ_i) ، وحسب طريقة التخمين الموضحة سابقاً فإننا بحاجة إلى ضبط ثمانية أرباح $(\gamma_i = \gamma_1 = \dots = \gamma_8)$ ولكن خلال عملية المحاكاة فرضنا أن $(\gamma_i = \gamma_1 = \dots = \gamma_8)$ وذلك لسهولة المعايرة، وقد تم الحصول على نتائج جيدة كما تظهر الأشكال التي تقارن الإشارات المخمنة مع الإشارات الحقيقية.

بالرغم من وجود فروقات في تقدير التيارات i_a, i_b, i_c والقوة المحركة العكسية emf_a, emf_b, emf_c إلا أن تخمين إشارة الموضع وخاصة عند التحميل كان ممتازاً حسب ما يوضحه الشكل (12).

ولدراسة أدق ولاختيار الأنسب يمكن دراسة إحدى الطرق الحديثة وهي النمذجة البارامترية ومقارنتها مع طرق التقدير الأخرى لاستحصا على نتائج أفضل.



شكل 11: تخمين السرعة الزاوية للمحرك (BLDC) بالمقارنة مع السرعة الحقيقية في الفترة المستقرة.

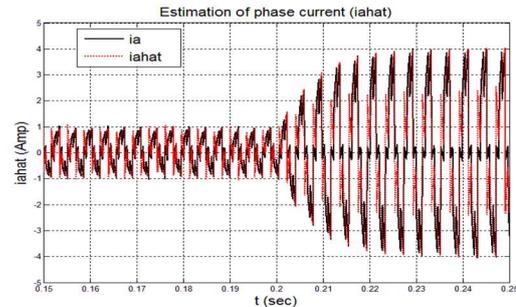


شكل 12: تخمين السرعة الزاوية للمحرك (BLDC) بالمقارنة مع السرعة الحقيقية خلال مرحلة الإقلاع والاستقرار بدون تحميل.

4.3 تخمين تيارات الأطوار الثلاثة

تبين الأشكال (13) و (14) تخمين إشارة تيار الطور الأول للمحرك (BLDC) باستخدام الخوارزمية التنبؤية باستخدام توابع ليايونوف، وذلك بالمقارنة مع تيار الطور الأول الحقيقي، وذلك خلال فترات زمنية مختلفة من الاستجابة، وبالنسبة لتخمين إشارة التيارات بالنسبة للطرين الثاني والثالث للمحرك (BLDC) فإننا سنحصل على إشارات مشابهة للإشارات الموضحة في الأشكال (10) و (11) ولكن مع انزياح (120,240) درجة.

حيث i_a تيار الطور، i_{ahat} تعني تيار الطور المخمن وبالتالي القوة المحركة العكسية المخمنة EMF_{hat}



شكل 13: تخمين تيار الطور الأول حيث تم تحميل المحرك في

اللحظة (t=0.2 sec)

at IEEE International, Volume: 02 Issue: 08| Nov-2015

المصادر

[6] Saleh Ameer, Adel Obed, University of Misan. And Middle Technical University, "Speed Control of Brushless DC Motor based on Fractional Order PID Controller", International Journal of Computer Volume 95, No.4 2014 June.

[7] Tayade.B.Avanti," Modeling and Simulation of BLDC Motor By Using Matlab/Simulation Tool, IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering e-ISSN: 2278-1676, PP 55-62, 2014

[8] د. علي أسامة، "هندسة التحكم التكيفي"، قسم هندسة التحكم، جامعة حلب؛ 8- 2015

[1] Hirave Yogini, Patil R.T, Bagade Ketan "Brushless DC Motor speed controller using DSP Processor approach", International Journal of Engineering Science Invention(ijesi). Volume 2 Issue 6 ,PP.19-26 June, 2013.

[2] Kuo.B.C, Golnaraghi.F, "Automatic Control Systems", 8th Edition· John Wiley & Sons, 2003

[3] Ogata Katsuhiko, "Modern Control Engineering", 5th edition, Pearson, International Education 2010

[4] Mondal Santanu, Mitra Arunabha, Chattopadhyay Madhurima, "Mathematical modeling and simulation of Brushless DC motor with ideal Back EMF for a precision speed control", Conference Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT), Paper at IEEE International 2015 August

[5] Mitra.Sudhanshu ,Nayak.R.Saida, Prakash Ravi, " Modeling and Simulation of BLDC Motor using MATLAB/SIMULINK Environment", Paper

Use the predictive algorithm to estimate the reverse motive force, position and speed of the motor (BLDC)

Reem Toumi^{1*}, and Marwan Labbad²

¹College of Control and Automation Engineering, University of Aleppo, Aleppo, Syria, toumireem@gmail.com.

²College of Control and Automation Engineering, University of Aleppo, Aleppo, Syria, marwanlabbad@hotmail.com.

*Corresponding author: Reem Toumi, toumireem@gmail.com.

Published online: 30 September 2022

Abstract— All articles *must* contain an abstract. The abstract text should be formatted using 11 points Times New Roman. Leave 8 pt. space after the abstract before the Keywords and 12 pt. space before the Introduction. The Introduction should start on the same page as the abstract. The abstract should give readers concise information about the content of the article and indicate the main results obtained and conclusions drawn. The abstract is not part of the text and should be complete in itself; no table numbers, figure numbers, references or displayed mathematical expressions should be included. The abstract should not normally exceed 200-300 words in a single paragraph.

Keywords— Hall sensors, Predictive algorithm, (BLDC) Motors