

یک روش کنترل بدون حسگر جدید برای موتورهای DC بدون جاروبک مبتنی بر شار پیوندی خط به خط

مهرداد جعفر بلند^۱، محمد هادی ریسمانی^{۲*}

| اطلاعات مقاله | چکیده |
|--|---|
| دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۶/۲۵ | در این مقاله یک روش کنترل بدون حسگر جدید برای موتورهای DC بدون جاروبک (موتور BLDC) معرفی شده است. این روش مبتنی بر تابع شار خط به خط است. تابع مذکور مستقل از سرعت است و نسبت به تغییر بار حساس نمی باشد. با استفاده از این روش می توان موتور را در بازه وسیعی از سرعت کنترل نمود. خطای زاویه کموتاسیون که ناشی از خطای اندازه گیری و تغییر پارامترهای موتور است؛ با ایجاد ریپل گشتاور، بازده موتور را کاهش می دهد. در این مقاله حساسیت خطای زاویه کموتاسیون به صورت سه بعدی تحلیل شده است تا میزان وابستگی آن به خطای اندازه گیری و تغییر پارامترهای موتور مشخص شود. علاوه بر آن میزان کاهش گشتاور و بازده موتور ناشی از خطای زاویه کموتاسیون بررسی می گردد. همچنین پاسخ سیستم به تغییر سرعت و گشتاور نیز مطالعه شده است. کارایی روش پیشنهادی به کمک نتایج شبیه سازی نشان داده می شود. |
| پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۱۴ | |
| واژگان کلیدی: موتور DC بدون جاروبک ، کنترل بدون حسگر ، تابع شار ، تحلیل حساسیت. | |

۱- مقدمه

موتور DC بدون جاروبک به صورت گسترده در بسیاری از موارد کاربردی استفاده می شود. چگالی گشتاور بالا، پاسخ سریع، هزینه حفظ و نگهداری پایین و بازده بالا از ویژگی های این گونه موتورها است [۱]. موتورهای DC بدون جاروبک، بطور ذاتی، الکتریکی کنترل می شوند و به موقعیت رتور نیاز دارند. مشکلات حسگرهای مکانیکی از جمله قیمت بالا، فضاگیر بودن و احتمال خراب شدن حسگر، محققین را بر آن داشت تا در مورد روش های بدون حسگر موتور DC بدون جاروبک تحقیق نمایند [۲ و ۳]. یکی از روش های کنترل بدون حسگر موتور DC بدون جاروبک

استفاده از نقاط گذر از صفر نیروی ضد محرکه است [۴-۶]. از آنجا که سیگنال نیروی ضد محرکه در دسترس نیست، نقاط گذر از صفر از روی ولتاژهای فیلتر شده ترمینال موتور شناسایی می شوند. هر چه سرعت افزایش می یابد، فیلترها تاخیر بیشتری در مدار وارد می کنند که باعث می شود زمان های کلیدزنی به درستی تشخیص داده نشوند. یکی دیگر از روش های کنترل بدون حسگر موتور DC بدون جاروبک، استفاده از هارمونیک سوم نیروی ضد محرکه است. نقاط گذر از صفر هارمونیک سوم نیروی ضد محرکه، منطبق بر نقاط کموتاسیون است [۷-۹]. در مراجع [۱۰-۱۳] موقعیت رتور به کمک انتگرال گیری از نیروی ضد

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: Rismani_shiraz@yahoo.com

۱. دانشیار، دانشکده مهندسی برق و اویونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۲. دانشجوی دکتری مهندسی برق قدرت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

سرعت موتور و تغییرات بار وابسته نیست. با به کارگیری روش مذکور، موتور در هر دو حالت دائمی و گذرا، پاسخ مناسبی از خود نشان می‌دهد. خطای زاویه کموتاسیون که ناشی از خطای اندازه‌گیری و تغییر پارامترهای موتور است، بازده موتور را کاهش داده و ریپل گشتاور را افزایش می‌دهد. در این مقاله روش پیشنهادی به صورت سه بعدی تحلیل حساسیت می‌شود تا تاثیر خطای اندازه‌گیری و تغییر پارامترهای موتور بر خطای زاویه کموتاسیون مشخص شود. علاوه بر آن، در این مقاله میزان کاهش گشتاور و بازده موتور ناشی از خطای زاویه کموتاسیون بررسی می‌شود. از آنجایی که در تابع مذکور از انتگرال گیر استفاده شده است. این روش نسبت به نویز حساسیت کمی دارد. در این روش از ولتاژها و جریان های تفاضلی استفاده می‌شود. بنابراین نویز حالت مشترک حذف خواهد شد. از آنجا که روش پیشنهادی به نیروی ضد محرکه وابسته نیست، نیازی به فیلتر برای اندازه‌گیری آن ندارد. روش مذکور برای هر دو موتور قطب صاف و قطب برجسته مناسب است. زیرا این روش بر مبنای تخمین شار خط به خط است و به تغییرات اندوکتانس وابسته نیست. کارایی روش پیشنهادی به کمک نتایج شبیه سازی بررسی شده است.

۲- روش کنترل بدون حسگر پیشنهادی

در این بخش روش پیشنهادی توضیح داده خواهد شد. منابع خطا ارزیابی شده و تاثیر خطای موقعیت بر گشتاور و بازده موتور بررسی می‌شود. در نهایت روش راه‌اندازی به کار گرفته شده نیز معرفی می‌شود.

۲-۱- ساختار روش پیشنهادی اول

هریک از فازهای موتورهای AC با یک معادله دیفرانسیل درجه اول توصیف می‌شود. معادله ولتاژ فاز فعال موتور DC بدون جاروبک به صورت زیر است.

$$v_n = Ri_n + L \frac{di_n}{dt} + \frac{d\lambda_{nr}(\theta)}{dt} \quad (1)$$

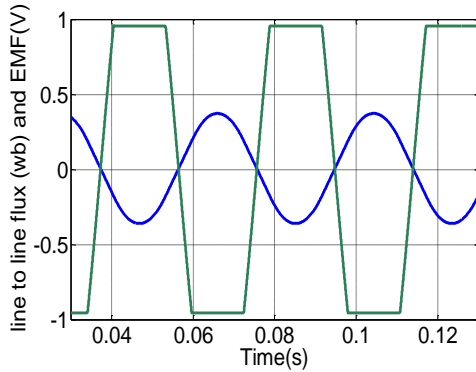
در رابطه ی فوق v_n ، i_n ، R ، L ، λ_{nr} و θ به ترتیب بیانگر امین ولتاژ فاز، جریان فاز، مقاومت استاتور، اندوکتانس

محرکه فاز خاموش تشخیص داده می‌شود. این روش حساسیت کمتری نسبت به نویز کلیدزنی از خود نشان می‌دهد، اما هنوز با مشکلات ناشی از فیلتر مواجه است. در مراجع [۱۴ و ۱۵] از جریان دیودهای هرزگرد برای تشخیص لحظات کموتاسیون استفاده می‌شود. بزرگترین اشکال این روش، استفاده از شش منبع تغذیه ایزوله است که برای تشخیص شارش جریان در دیود هرزگرد استفاده می‌شود. لحظات کموتاسیون را می‌توان از روی شار پیوندی فاز [۱۶ و ۱۷] یا شار پیوندی آهنربای دائم [۱۸ و ۱۹] به دست آورد.

در هر دو روش، شار پیوندی تابعی از سیگنال‌های جریان و موقعیت رتور است. برای تخمین شار پیوندی، ولتاژها و جریان‌های فاز اندازه‌گیری می‌شوند. از آنجا که نقطه خنثی موتور در دسترس نیست، این روش با مشکلات اندازه‌گیری ولتاژ فازها مواجه است. در لحظات کموتاسیون شیب جریان لینک DC تغییر می‌کند. از این رو در مرجع [۲۰] از این پدیده، برای کنترل بدون حسگر موتورهای DC بدون جاروبک استفاده می‌شود.

در مراجع [۲۱ و ۲۲] برای تشخیص نقاط کموتاسیون، تابع شار جدیدی معرفی شده است. این روش مستقل از سرعت است، اما از آنجایی که در تابع مذکور از مشتق گیر استفاده شده است روش مذکور نسبت به نویز حساس است. در مراجع [۲۳ و ۲۴] از تغییرات اندوکتانس استاتور برای تشخیص مکان رتور استفاده شده است. از آنجایی که در موتورهای قطب صاف، تغییرات اندوکتانس استاتور صرفاً ناشی از اشباع شار مغناطیسی است، این روش برای این گونه موتورها استفاده نمی‌شود. تشخیص مکان رتور با استفاده از رویت‌گرها در مراجع [۲۵-۲۷] بررسی شده است. این روش پیچیده می‌باشد زیرا به مدل ریاضی موتور نیازمند است.

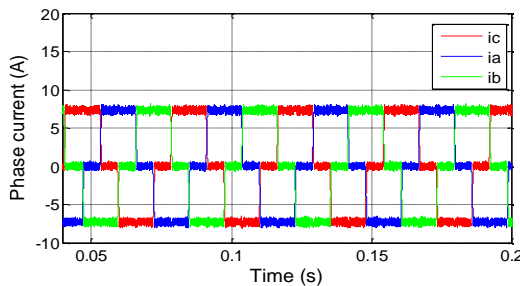
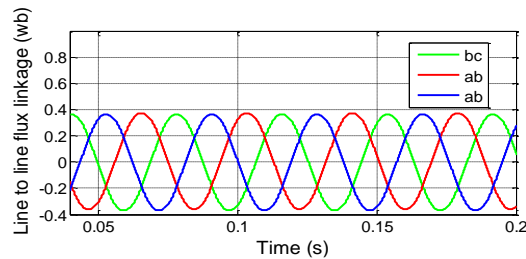
در این مقاله روش کنترل بدون حسگر جدیدی مبتنی بر تابع شار خط به خط، برای موتورهای DC بدون جاروبک معرفی شده است. با استفاده از این روش می‌توان موتور را در بازه وسیعی از سرعت کنترل نمود. این روش، به تغییر



شکل ۱- شکل شار خط به خط و نیروی محرکه بازگشتی

۲-۲- ساختار روش پیشنهادی دوم

شکل (۲) شارهای خط به خط و جریان های فازی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، کموتاسیون بین فازها زمانی رخ می‌دهد که شارهای خط به خط بیشینه یا کمینه هستند.



شکل ۲- شار خط به خط و جریان های فازی

در این روش هنگامی که اشباع در هسته موتور اتفاق می‌افتد به طبع روی مقدار اندوکتانس و مقاومت تغییراتی ایجاد می‌گردد. این تغییرات نقاط ماکزیمم و مینیمم را تحت تاثیر قرار داده، باعث می‌شود در شناسایی نقاط کموتاسیون اختلال ایجاد گردد. چنانچه این تغییرات ۱۰ درصد باشد تاثیر چندانی در عملکرد موتور ایجاد نمی‌گردد. ولی اگر تغییرات بیش از ۱۰ درصد باشد، عمل کموتاسیون به خوبی انجام نمی‌شود بنابراین ریبیل گشتاور ناشی از عملکرد کموتاسیون افزایش می‌یابد.

استاتور، شار ناشی رتور آهنربای دائم و موقعیت رتور است. از آنجایی که اکثر کارخانجات نقطه خنثی موتور را در دسترس قرار نمی‌دهند، ولتاژهای خط به خط به صورت زیر استفاده می‌شود.

$$v_{ab} = R(i_a - i_b) + L \frac{d(i_a - i_b)}{dt} + \frac{d\lambda_{abr}(\theta)}{dt} \quad (2)$$

$$v_{bc} = R(i_b - i_c) + L \frac{d(i_b - i_c)}{dt} + \frac{d\lambda_{bcr}(\theta)}{dt} \quad (3)$$

$$v_{ca} = R(i_c - i_a) + L \frac{d(i_c - i_a)}{dt} + \frac{d\lambda_{car}(\theta)}{dt} \quad (4)$$

در روابط فوق $\lambda_{xyr}(\theta)$ شارپیوندی خط به خط بوده که تابعی از موقعیت رتور است. V_{xy} اختلاف ولتاژ بین فازهای x و y بوده و i_x جریان فاز است.

با استفاده از رابطه (۲) تا (۴) شارهای خط به خط به صورت زیر به دست می‌آیند.

$$\lambda_{abr}(\theta) = \int v_{ab} dt - R \int (i_a - i_b) dt - L(i_a - i_b) \quad (5)$$

$$\lambda_{bcr}(\theta) = \int v_{bc} dt - R \int (i_b - i_c) dt - L(i_b - i_c) \quad (6)$$

$$\lambda_{car}(\theta) = \int v_{ca} dt - R \int (i_c - i_a) dt - L(i_c - i_a) \quad (7)$$

اگر بتوان شار خط به خط موتور را مطابق روابط (۵) تا (۷) محاسبه کرد و از آنجایی که شار خط به خط مطابق شکل (۱)، ۳۰ درجه با نیروی محرکه القایی اختلاف فاز دارد، آن‌گاه با جبران این ۳۰ درجه می‌توان در لحظه گذر از صفر شار خط به خط، همانند لحظه گذر از صفر نیروی محرکه بازگشتی [۴-۶] عمل کموتاسیون را انجام داد.

از آنجایی که شار خط به خط موتور نوسان ندارد و همچنین در هر سیکل فقط یک بار از لحظه صفر عبور می‌کند، بنابراین ریبیل کموتاسیون کمترین مقدار خود را خواهد داشت. در نتیجه ریبیل گشتاور ناشی از عمل کموتاسیون در این روش می‌تواند کاهش یابد.

$$\lambda_{abr}(\theta) = \int v_{DC}(1 \pm \eta_1)(s_a - s_b)dt - R_a(1 \pm \eta_2) \int (i_a(1 \pm \eta_4) - i_b(1 \pm \eta_5))dt - L(1 \pm \eta_3) (i_a(1 \pm \eta_4) - i_b(1 \pm \eta_5)) \quad (8)$$

در رابطه فوق، s_a و s_b به ترتیب توابع کلید زنی فازهای a و b هستند. همچنین منابع خطا عبارتند از:

$$\eta_1 = \text{خطای ولتاژ لینک DC (نویز + خطای حسگر)}$$

$$\eta_2 = \text{خطای مقاومت فاز}$$

$$\eta_3 = \text{خطای اندوکتانس استاتور}$$

$$\eta_4, \eta_5 = \text{خطای اندازه گیری جریان (نویز + خطای حسگر)}$$

۲-۴- تاثیرات خطای زاویه کموتاسیون

خطای زاویه کموتاسیون موجب افزایش ریپل گشتاور شده و بازده موتور را کاهش می‌دهد. شکل (۳) اثر خطای زاویه کموتاسیون را بر گشتاور کل نشان می‌دهد. نتایج خطای تخمین موقعیت رتور عبارتند از: افزایش ریپل گشتاور، کاهش گشتاور متوسط، کاهش نسبت گشتاور بر آمپر و کاهش بازده موتور. کاهش گشتاور که ناشی از خطای تخمین موقعیت رتور است، به صورت زیر محاسبه می‌شود: گشتاور لحظه ای و توان موتورهای DC بدون جاروبک با روابط زیر بیان می‌شوند.

$$T = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega} \quad (9)$$

$$P = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c \quad (10)$$

اگر خطای تخمین موقعیت رتور وجود نداشته باشد، گشتاور و توان موتورهای DC بدون جاروبک به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$T_{avr} = \frac{2EI}{\omega_r} \quad (11)$$

$$P_{avr} = 2EI \quad (12)$$

اگر خطای زاویه ی کموتاسیون وجود داشته باشد، $(0 \leq \theta_e \leq \frac{\pi}{3})$ ،

توان متوسط فاز a برای بازه زمانی X و Y به صورت زیر بیان می‌شود.

توصیه می‌شود که اگر احتمال می‌رود موتور در محدوده اشباع کار کند از روش اول جهت کموتاسیون استفاده گردد. دلیلش این است که اگر در عملکرد موتور اشباع صورت گیرد، در شناسایی گذر از صفر شار خط به خط مشکلی پیش نمی‌آید. چرا که در هنگام اشباع هسته موتور تاثیر کمتری روی فرکانس کاری موتور (فقط مکان نقطه گذر از صفر نیروی محرکه بازگشتی جابه جا می‌گردد) ایجاد می‌شود، که این عامل تاثیری بروی پیدایش گذر از صفر شار خط به خط ندارد.

از آنجایی که نقطه گذر از صفر شار خط به خط به فرکانس کاری موتور وابسته است، بنابراین برای حل مشکل روش اول و پیدا کردن زمان دقیق کموتاسیون می‌توان از هنگام گذر از صفر شار خط به خط جهت کموتاسیون استفاده نمود.

۲-۳- تحلیل حساسیت

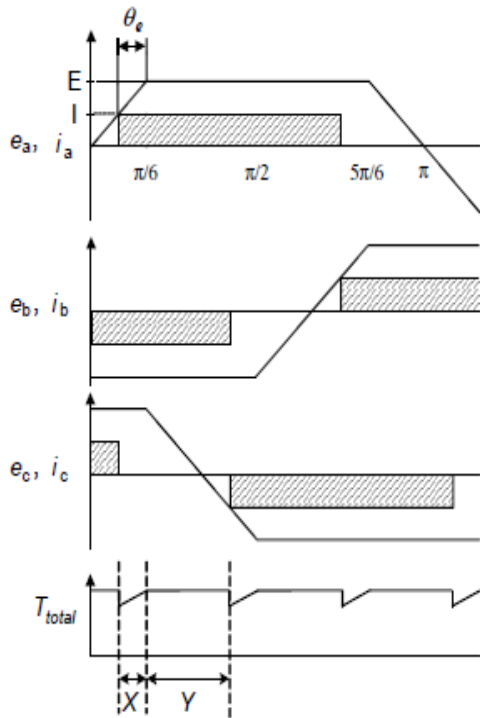
دو روش کنترل بدون حسگر پیشنهادی، مبتنی بر محاسبه شار خط به خط است. بر اساس معادلات (۵) تا (۷) این تابع به کیفیت و دقت جریان‌ها و ولتاژهای اندازه گیری شده بستگی دارد. علاوه بر آن تغییر پارامترهای موتور که ناشی از تغییرات دمایی و پدیده اشباع است نیز باید در نظر گرفته شود. خطای تخمین موقعیت در سیستم ناشی از عوامل زیر است.

خطای اندازه گیری: خطای اندازه گیری جریان و ولتاژ لینک DC رابطه ای یک به یک با دقت روش پیشنهادی دارد. ادوات الکترومغناطیسی و کلیدزنی‌ها در سیستم تولید نویز می‌کند. نویز در داده های دریافتی تاثیر گذاشته که منجر به خطای زاویه کموتاسیون می‌شود.

تغییرات پارامترهای موتور: تغییرات اندوکتانس، ناشی از اشباع محلی شار مغناطیسی است. همچنین تغییر مقاومت فازها، ناشی از تغییرات دمایی است.

معادله (۸) تابع شار پیشنهادی را با در نظر گرفتن کلیه منابع خطا نشان می‌دهد.

در رابطه فوق Ke ثابت نیروی ضد محرکه است. گشتاور متوسط و بازده موتور در شرایطی که خطای زاویه کموتاسیون وجود دارد در جدول (۱) نشان داده شده است.



شکل ۳- تاثیر خطای کموتاسیون بر گشتاور کل [۲۲]

جدول ۱- گشتاور متوسط و بازده موتور برحسب خطای زاویه کموتاسیون

| | | |
|----------------------|---|---|
| Average Torque (Nm) | $(0 \leq \theta_e \leq \frac{\pi}{3})$ | $2k_e I - (\frac{3}{\pi})^2 k_e I \theta_e^2$ |
| | $(\frac{\pi}{3} \leq \theta_e \leq \frac{2\pi}{3})$ | $(\frac{3}{\pi}) k_e I (\pi - 2 \theta_e)$ |
| Motor Efficiency (%) | $(0 \leq \theta_e \leq \frac{\pi}{3})$ | $\eta = \eta_1 (1 - \frac{1}{2} (\frac{3 \theta_e }{\pi})^2)$ |
| | $(\frac{\pi}{3} \leq \theta_e \leq \frac{2\pi}{3})$ | $\eta = \eta_1 (\frac{3}{2} - \frac{3 \theta_e }{\pi})$ |

$$P_{X,A} = \frac{\int_{\frac{\pi}{6}-\theta_e}^{\frac{\pi}{6}} \frac{6}{\pi} EI \theta d\theta}{\theta_e} = EI - \frac{3EI\theta_e}{\pi} \quad (13)$$

$$P_{Y,A} = EI \quad (14)$$

همچنین توان متوسط فازهای B و C عبارتست از:

$$P_{Y,B} = EI \quad (15)$$

$$P_{Y,C} = 0 \quad (16)$$

بنابراین توان متوسط فازهای A، B و C در بازه زمانی

$X+Y$ به ترتیب برابر است با:

$$P_{X+Y,A} = \frac{(EI - \frac{3EI\theta_e}{\pi})\theta_e + (EI)(\frac{\pi}{3} - \theta_e)}{\frac{\pi}{3}} \quad (17)$$

$$P_{X+Y,B} = EI \quad (18)$$

$$P_{X+Y,C} = 0 \quad (19)$$

بنابراین توان متوسط کل در بازه زمانی $X+Y$ به صورت زیر خواهد بود.

$$P_{X+Y,total} = \frac{(EI - \frac{3EI\theta_e}{\pi})\theta_e + (EI)(\frac{\pi}{3} - \theta_e)}{\frac{\pi}{3}} + EI = 2EI - (\frac{3}{\pi})^2 EI \theta_e^2 \quad (20)$$

توان متوسط کل، در شرایطی که خطای کموتاسیون نباشد، برابر است با:

$$P_{avr} = 2EI \quad (21)$$

بنابراین افت بازده ناشی از خطای کموتاسیون خواهد شد.

$$\eta_e = \frac{2EI - (\frac{3}{\pi})^2 EI \theta_e^2}{2EI} \times 100 \quad (22)$$

در نتیجه، بازده موتور از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\eta = \eta_1 (1 - \frac{1}{2} (\frac{3|\theta_e|}{\pi})^2) \quad (23)$$

در رابطه فوق η_1 بازده موتور در شرایطی است که خطای کموتاسیون وجود ندارد.

همچنین گشتاور متوسط در شرایطی که خطای زاویه کموتاسیون وجود دارد خواهد شد:

$$T_{avr} = \frac{2EI - (\frac{3}{\pi})^2 EI \theta_e^2}{\omega_r} = 2k_e I - (\frac{3}{\pi})^2 k_e I \theta_e^2 \quad (24)$$

۲-۵- روش راه اندازی

برای راه اندازی موتور، مقدار $\lambda_{xyr}(\theta)$ در لحظه راه اندازی باید مشخص باشد. یک روش مرسوم برای تعیین مقدار اولیه $\lambda_{xyr}(\theta)$ این است که رتور به یک موقعیت معلوم که در آن $\lambda_{xyr}(\theta)$ از پیش تعیین شده است، آورده شود. از آنجایی که تغییر پارامترها و خطای اندازه گیری بر تابع شار خط به خط تاثیر می گذارد، این روش برای راه اندازی موتور پیشنهاد نمی شود. در این مقاله از روش راه اندازی پیشنهادی در مرجع [۲۸] استفاده شده است. موتور با استفاده از این روش، راه اندازی شده و شتاب گیری می نماید تا به سرعتی برسد که کنترل کننده بدون حسگر پیشنهادی، بتواند کنترل موتور را به عهده گیرد. روش راه اندازی مذکور بر این اصل استوار است که چنانچه شار رتور و شار حاصل از سیم پیچی ها در یک جهت باشد، هسته اشباع شده و اندوکتانس سیم پیچی ها کاهش می یابد. بنابراین در مدت زمان معلوم t نسبت به حالتی که شارها مخالف هم هستند جریان زودتر به حالت دائمی می رسد.

۳- شبیه سازی

در این بخش کارآیی روش کنترل بدون حسگر دو روش پیشنهادی با استفاده از نتایج شبیه سازی نرم افزار MATLAB/SIMULINK با فرض صرفه نظر کردن اشباع هسته موتور بررسی می شود.

۳-۱- بررسی خطای زاویه کمیوتاسیون روش

پیشنهادی بروی مشخصه های موتور

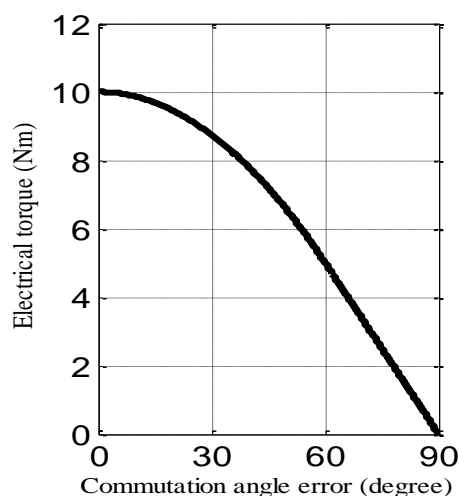
با توجه به جدول (۱) می توان تغییرات خطای زاویه کمیوتاسیون بر حسب گشتاور الکترومغناطیسی و راندمان موتور به ترتیب به صورت شکل (۴) و (۵) نشان داد. در این دو شکل گشتاور بار ۱۰ نیوتن متر در نظر گرفته شده است. با توجه به دو شکل می توان این نتیجه را گرفت که اگر خطای زاویه کمیوتاسیون افزایش یابد، مقدار گشتاور الکترومغناطیسی و راندمان موتور نیز کاهش می یابد. چنانچه خطای زاویه کمیوتاسیون ۰ تا ۲۵ درجه تغییر یابد، در دامنه دو مشخصه گشتاور و راندمان موتور تغییرات

چندانی ایجاد نمی گردد. ولی اگر خطا زاویه کمیوتاسیون بیش از ۲۵ درجه گردد به تبع مقداری از دامنه این دو مشخصه کاسته می شود و همچنین ریپل ناشی از گشتاور در موتور افزایش می یابد.

شکل (۶) تغییرات خطای زاویه کمیوتاسیون بر حسب زمان برای سه موتور که دارای سرعت متفاوت هستند را نشان می دهد. سرعت این موتورها از راه اندازی تا سرعت نامی تغییر یافته اند. در این سه موتور گشتاور بار یکسان و برابر با ۱۰ نیوتن متر در نظر گرفته شده است.

در شکل (۶) خطای زاویه کمیوتاسیون در راه اندازی مربوط به روش استفاده شده در هنگام راه اندازی است و برای تمامی موتورها این خطا یکسان است. خطای زاویه کمیوتاسیون در حالت دائم مربوط به روش پیشنهادی است و در هر موتور مقدار این خطا متفاوت است. تفاوت در زاویه خطای کمیوتاسیون باعث می شود که محدوده مجاز سرعت در روش پیشنهادی مشخص گردد. نتایج حاصل از خطای کمیوتاسیون در سرعت نامی موتورهای شکل (۶) به طور دقیق در جدول (۲) نشان داده شده است.

در جدول (۲) پیداست که چنانچه سرعت موتور افزایش خطای زاویه کمیوتاسیون چندان تغییری نمی کند. با توجه به شکل (۴) و (۵) می توان این نتیجه را گرفت که روش پیشنهادی مستقل از سرعت است بنابراین در تمامی سرعتها قابل استفاده می باشد.



شکل ۴- کاهش گشتاور ناشی از خطای زاویه کمیوتاسیون

این بخش موتور با سرعت ۴۰۰ دور بر دقیقه مورد بررسی قرار می‌گیرد. دلیل انتخاب موتور این است که استخراج نتایج ساخت بروی موتور ۴۰۰ دور بر دقیقه صورت گرفته است. جدول (۳) سایر پارامترهای موتور را نشان می‌دهد. سیستم کنترل پیشنهادی، از دو حلقه کنترل تشکیل شده است. حلقه اول از یک کنترل کننده سرعت PI تشکیل شده است که سرعت موتور را تنظیم می‌کند. حلقه دوم از یک کنترل کننده جریان هیستریزس تشکیل شده است که گشتاور موتور را تنظیم می‌کند.

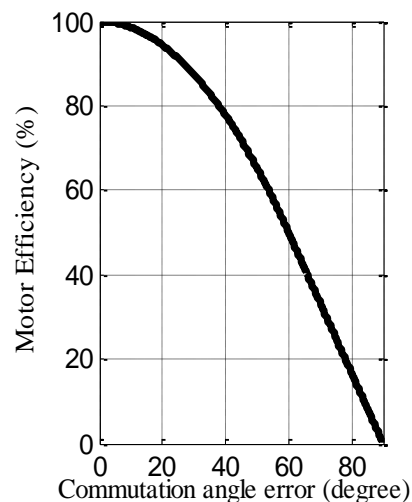
لازم به ذکر است که دو روش مذکور مبتنی بر یک اصول (شار خط به خط موتور) می‌باشند، بنابراین نتایج به دست آمده برای هر دو روش یکسان است.

جدول ۳- پارامترهای موتور DC بدون جاروبک استفاده شده در شبیه سازی

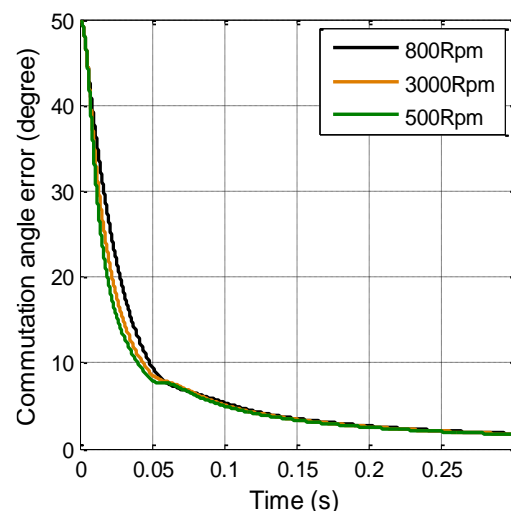
| مقدار | پارامتر |
|------------------------|-----------------------|
| 1Ω | مقاومت استاتور |
| ۲۰ mH | اندوکتانس استاتور |
| 0.005 kg.m^2 | اینرسی |
| 0.175 V.S | شار رتور آهنربای دائم |
| 0.005 N.m.s | ضریب اصطکاک |
| ۴ | جفت قطب‌ها |
| ۴۰۰ R.P.M | سرعت موتور |

شکل (۷) پاسخ روش پیشنهادی را به تغییرات سرعت از ۵۰ به ۴۰۰ دور بر دقیقه نشان می‌دهد. هنگام تغییر سرعت ابتدا جریان موتور افزایش یافته تا گشتاور موتور افزایش یابد و موتور شتاب گیرد و به سرعت مرجع جدید برسد. سپس گشتاور موتور کاهش یافته تا با گشتاور بار برابر شود. بنابراین همان طور که ملاحظه می‌شود، موتور گرچه حسگر سرعت ندارد اما با به کارگیری روش پیشنهادی، در لحظه تغییر سرعت عملکرد خوبی از خود نشان می‌دهد.

شکل (۸) پاسخ سیستم را به تغییر گشتاور از ۵ به ۱۰ نیوتن متر نشان می‌دهد.



شکل ۵- کاهش بازده موتور ناشی از خطای زاویه کموتاسیون



شکل ۶- خطای زاویه کموتاسیون برای سرعت‌های متفاوت

جدول ۲- خطای کموتاسیون در حالت سرعت نامی موتورهای شکل (۶)

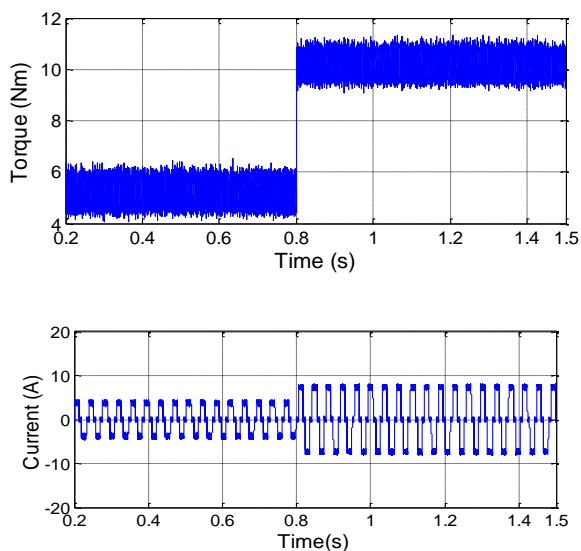
| | موتور ۱ | موتور ۲ | موتور ۳ |
|--------------------------|---------|---------|---------|
| سرعت نامی (دور بر دقیقه) | ۵۰۰ | ۳۰۰۰ | ۸۰۰ |
| زاویه خطای کموتاسیون | ۳/۳۰ | ۳/۴۵ | ۳/۵ |

۲-۳- بررسی نتایج حاصل از روش پیشنهادی

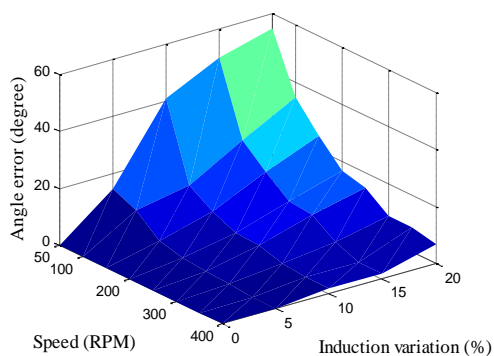
در یک موتور نمونه

با توجه به بررسی صورت گرفته در بخش قبل و مشخص شدن کاربرد دو روش پیشنهادی برای تمامی سرعت‌ها در

به شدت بر خطای موقعیت تاثیر می‌گذارد. می‌گذارد. خطای زاویه کموتاسیون، ناشی از خطای اندازه‌گیری جریان در شکل (۹-ج) نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود برای سرعت‌های ۲۰۰ تا ۴۰۰ دور بر دقیقه خطا زیر ۸ درجه است. در سرعت‌های زیر ۵۰ دور بر دقیقه خطای اندازه‌گیری جریان به شدت بر زاویه کموتاسیون تاثیر می‌گذارد. تاثیر خطای ولتاژ بر زاویه کموتاسیون در شکل (۹-د) نشان داده شده است. همان طور که از شکل مشخص است در سرعت‌های ۲۰۰ تا ۴۰۰ دور بر دقیقه خطای ولتاژ تاثیر چندانی بر زاویه کموتاسیون ندارد. در سرعت‌های زیر ۵۰ دور بر دقیقه خطای موقعیت با افزایش خطای ولتاژ به شدت افزایش می‌یابد.

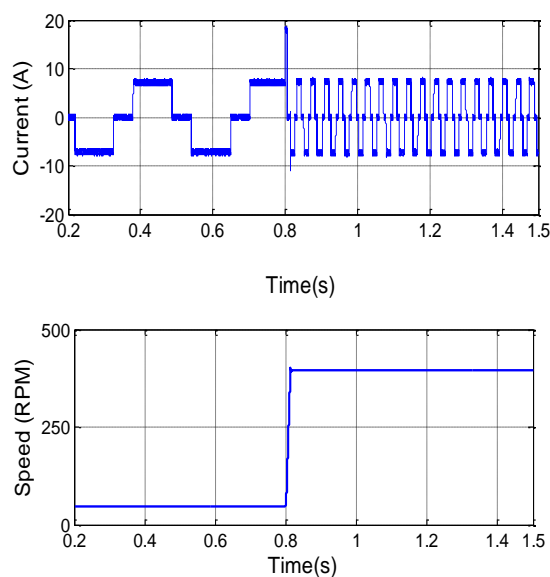


شکل ۸- پاسخ سیستم به تغییر گشتاور



شکل ۹- الف

همان طور که مشاهده می‌شود، تغییرات بار تاثیری بر روی شار خط به خط ندارد و پاسخ سیستم در شرایط تغییر بار بسیار خوب است. همان طور که در شکل‌های (۷) و (۸) مشخص است نویزهای کلیدزنی بر جریان فازها تاثیرگذار بوده اما از آنجا که در تابع شار خط به خط از انتگرال‌گیر استفاده شده است، نویزهای کلیدزنی نتوانسته‌اند بر این تابع تاثیر گذارند. قابل ذکر است، از آنجا که تابع مذکور از جریان‌ها و ولتاژهای تفاضلی استفاده می‌کند، نویز حالت مشترک در سیستم حذف خواهد شد. تحلیل سه بعدی خطای زاویه کموتاسیون، ناشی از تغییرات اندوکتانس، تغییرات مقاومت، خطای اندازه‌گیری جریان و خطای اندازه‌گیری ولتاژ در شکل (۹) نشان داده شده است. همان طور که در شکل (۹الف) ملاحظه می‌شود، هرچه تغییرات اندوکتانس افزایش و سرعت کاهش یابد، خطای زاویه کموتاسیون افزایش خواهد یافت.



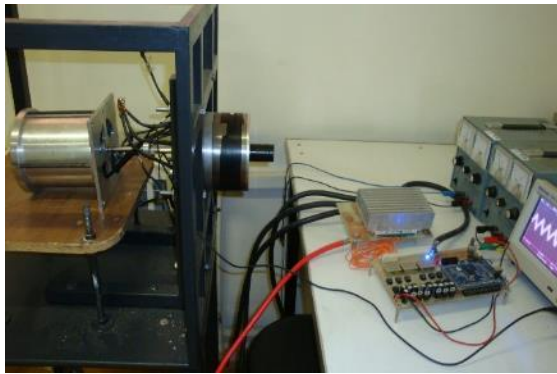
شکل ۷- پاسخ سیستم به تغییر سرعت

در شکل (۹-ب) نشان داده شده است که هرچه تغییرات مقاومت افزایش یابد خطای زاویه کموتاسیون افزایش خواهد یافت.

همان طور که مشاهده می‌شود خطا برای سرعت‌های ۲۰۰ تا ۴۰۰ دور بر دقیقه زیر ۴ درجه است.

هرچه سرعت کاهش یابد، خطای زاویه نیز افزایش خواهد یافت. در سرعت‌های زیر ۵۰ دور بر دقیقه تغییرات مقاومت

(IGBT) جهت کلید زنی استفاده شده است.



شکل ۱۰- چیدمان آزمایشگاهی

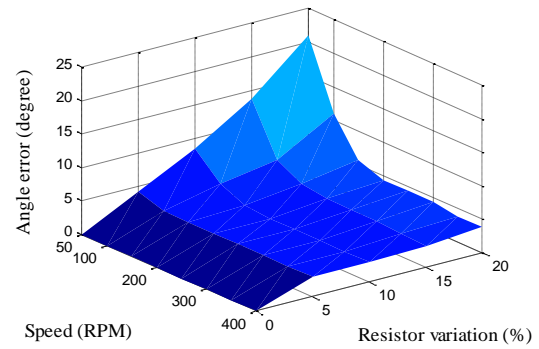


شکل ۱۱- برد به همراه اینورتر شش سویچه

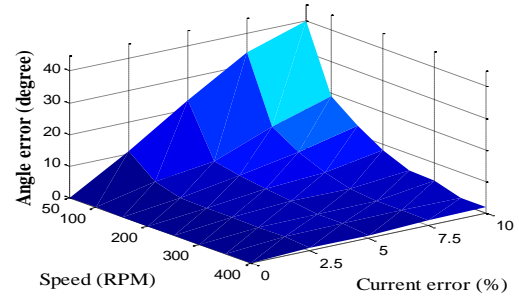


شکل ۱۲- مجموعه کنترلی درایو الکتریکی ساخته شده

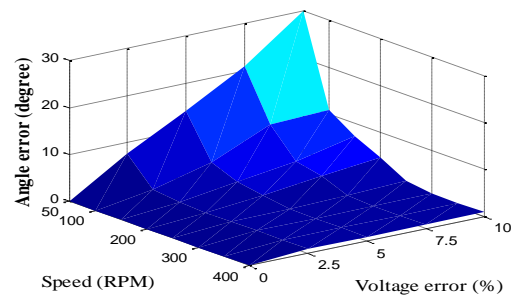
مجموعه کنترلی وظیفه درایو IGBT و کنترل سرعت موتور را بر عهده دارد، این زیر سیستم فرمان‌های خود را به صورت مستقیم از زیر سیستم کنترل دریافت کرده و به صورت سیگنال‌های کنترل شده، فرمان روشن و خاموش شدن سویچ‌ها را صادر می‌کند.



شکل ۹- ب



شکل ۹- ج



شکل ۹- د

شکل ۹- خطای زاویه کموتاسیون ناشی از الف) تغییرات اندوکتانس ب) تغییرات مقاومت ج) خطای اندازه گیری جریان د) خطای اندازه گیری ولتاژ

۴- نتایج حاصل از ساخت درایو الکتریکی موتور BLDC

با توجه به تحلیل‌های انجام شده در این قسمت نتایج حاصل شده از ساخت درایو موتور BLDC از نوع IPM، مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل (۱۰) چیدمان آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

شکل‌های (۱۱) و (۱۲) به ترتیب اینورتر شش سویچه و مجموعه کنترلی درایو الکتریکی ساخته شده را نشان می‌دهند. در این درایو به دلیل سهولت از مجموعه شش سویچه

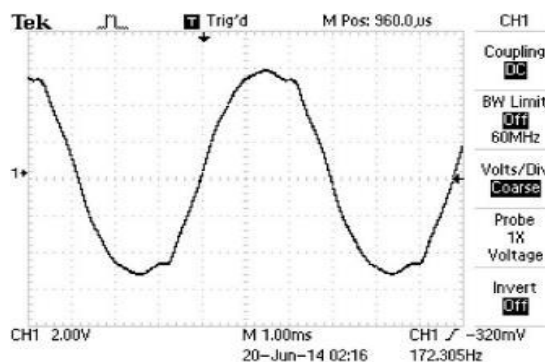
موتور مشخص گردید. همچنین تاثیر خطای زاویه کموتاسیون بر گشتاور و بازده موتور بررسی شد. نتایج شبیه سازی نشان داد که دو روش پیشنهادی به تغییرات بار و سرعت موتور وابسته نیست و پاسخ سیستم در هر دو حالت دائمی و گذرا خوب است. با استفاده از دو روش مذکور می توان موقعیت رتور را در بازه وسیعی از سرعت، از ۵۰ دور بر دقیقه تا سرعت های بالا به دست آورد. نشان داده شد که خطای زاویه زیر ۱۰ درجه، تاثیر چندانی بر گشتاور و بازده موتور ندارد. همچنین دو روش مذکور نسبت به نویز حساسیت کمی دارد. علاوه بر آن، این دو روش برای هر دو موتور قطب صاف و قطب برجسته قابل استفاده است. نتایج شبیه سازی، و نتایج ساخت کارآیی روش پیشنهادی را تایید می نماید.

شکل (۱۳)، شکل ولتاژ فاز موتور را در حالت بی باری را نشان می دهد.

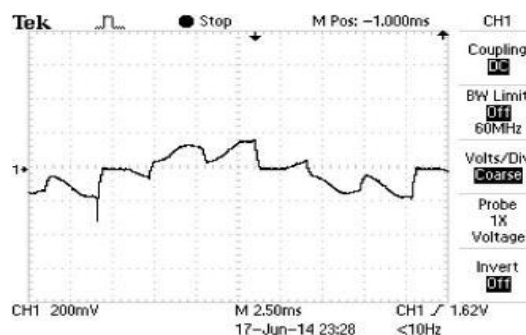
همانطور که از شکل (۱۳) پیداست در حالت بی باری افت ولتاژ ناشی از مقاومت و اندوکتانس سیم پیچ ناچیز است بنابراین می توان این شکل را به عنوان BACK-EMF موتور مورد ارزیابی قرار داد.

شکل (۱۴)، شکل جریان فاز A موتور را در حالتی که گشتاور بار ۵ نیوتن متر است را نشان می دهد.

با توجه به شکل (۱۳) و (۱۴) می توان این نتیجه را گرفت که درایو الکتریکی با استفاده از روش کنترلی پیشنهادی توانسته است عملیات کلید زنی اینورتر را به خوبی انجام دهد.



شکل ۱۳- BACK-EMF به دست آمده از تست بی باری موتور



شکل ۱۴- جریان الکتریکی فاز A موتور

۵- نتیجه گیری

در این مقاله روش کنترل بدون حسگر جدیدی برای موتورهای DC بدون جاروبک مبتنی بر تابع شار خط به خط معرفی شد. علاوه بر آن میزان وابستگی خطای زاویه کموتاسیون به خطای اندازه گیری و تغییر پارامترهای

۶- مراجع

- [1] T.Kim, H.Lee, M.Ehsani(2005), "State of the art and future trends in position sensorless brushless DC motor/generator drives," 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society.
- [2] P.P. Acarnley, J.F. Watson (2006), "Review of position-sensorless operation of brushless permanent-magnet machines," IEEE Transactions on Industrial Electronic, Vol.53, No.2, pp.352-362
- [3] K. Kim, M.youn (2002), " DSP-Based High-Speed Sensorless Control for a Brushless DC Motor Using a DC Link Voltage Control," Electric Power Components and Systems, vol.30, no.9, pp.889-906
- [4] K. Iizuka, H. Uzuhashi, and M. Kano (1985), "Microcomputer control for sensorless brushless motor," IEEE Transaction on Industry Applications, vol. IA-27, pp. 595-601
- [5] T.Chun, Q.Tran, H.Lee; H.Kim (2014), "Sensorless Control of BLDC Motor Drive for an Automotive Fuel Pump Using a Hysteresis Comparator," IEEE Transactions on Power Electronics, vol.29, no.3, pp. 1382 – 1391
- [6] P. Damodharan, K.Vasudevan (2010), "Sensorless Brushless DC Motor Drive Based on the Zero-Crossing Detection of Back Electromotive Force (EMF) From the Line Voltage Difference", IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 25, No. 3, pp. 661-668
- [7] J. Moreira (1996), "Indirect Sensing for Rotor Flux Position of Permanent Magnet AC Motors Operating in a Wide Speed Range," IEEE Transaction Industrial Application, Vol. 32, pp. 401-407
- [8] Z.Q. Zhu, D. Howe (2003), "Sensorless Flux-Weakening Control of Permanent Magnet Brushless Machines Using Third-Harmonic Back-EMF," IEEE International Electric Machines and Drives Conference, Vol.: 2, pp. 1229 –1235, 2003.
- [9] J. X. Shen, and S. Iwasaki, "Improvement of ASIC-Based Sensorless Control for Ultra high-Speed Brushless DC Motor Drive," IEEE international Electric Machines and Drives Conference, pp. 1049-1054
- [10] T. M. Jahns, R. C. Becerra, M. Ehsani (1991), "Integrated Current Regulation for a Brushless ECM Drive," IEEE Trans. Power Electron, vol. 6, pp. 118-126
- [11] R. C. Becerra, T. M. Jahns, and M. Ehsani (1991), "Four-Quadrant Sensorless Brushless ECM Drive," in Proceedings Record of IEEE-APEC'9, pp. 202-209
- [12] D. Regnier, C. Oudet, D. Prudham (1985), "Starting Brushless DC Motors Utilizing Velocity Sensors," in Proceedings of 14th Annual Symposium on incremental Motion Control Systems and Devices, pp. 99-107
- [13] D. Peters and J. Hart (1993), "ICs Provide Control for Sensorless DC Motors," in Proceedings of EDN, pp. 85-94
- [14] S. Ogasawara, H. Akagi (1990), "An Approach to Position Sensorless Drive for Brushless DC Motors," IEEE Conference of the Industry Applications Society Annual Meeting, vol.1, pp. 443 –447
- [15] S. Ogasawara, H. Akagi (2001), "An Approach to Position Sensorless Drive for Brushless DC Motors," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 27, No.5, pp. 928 –933
- [16] N. Ertugrul, P. P. Acarnley, and C. D. French (1993), "Real-Time Estimation of Rotor Position in PM Motors during Transient Operation," IEE Fifth European Conference on Power Electronics and Applications, pp. 311-316
- [17] N. Ertugrul and P. Acarnley (1994), "A New Algorithm for Sensorless Operation of Permanent Magnet Motors," IEEE Transaction Industrial Application, vol. 30, pp. 126-133
- [18] L.I. Iepure, I. Boldea, G.D. Andreescu, D.Iles, F. Blaabjerg (2010), "Novel motion sensorless control of single phase brushless D.C. PM motor drive, with experiments," International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), pp.329-336
- [19] L.I.Iepure, I.Boldea, G.D.Andreescu, F.Blaabjerg (2010). "Improved state observers for sensorless single phase BLDC-PM motor drives," IECON 2010 - 36th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, pp.870-875

- [20] W. Juan, M. Dixon, H. Rodrigo (2002), "Simplified Sensorless Control for BLDC Motor, Using DSP Technology," 19th Electric Vehicle Symposium, pp. 1431-1442
- [21] T.Kim, and M.Ehsani (2004), "Sensorless Control of the BLDC Motors From Near-Zero to High Speeds," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 19, No. 6, pp.1635-1645
- [22] T.Kim, M.Ehsani (2003), "An Error analysis of the Sensorless Position Estimation for BLDC Motors," 38th IAS Annual Industry Applications Conference, pp. 611-617
- [23] G. H. Jang, J. H. Park, and J. H. Chang (2002), "Position detection and startup algorithm of a rotor in a sensorless BLDC motor utilising inductance variation," IEE proceedings -Electric Power Applications, Vol. 149, No. 2, pp. 137-142
- [24] M. Yilmaz, R. Tuncay, O. Ustun, T. Krein (2009), "Sensorless Control of Brushless DC Motor Based on Wavelet Theory," Electric Power Components and Systems, Vol.37, No.10, pp.1063-1080
- [25] L. A. Jones and J. H. Lang (1989), "A State Observer for the Permanent Magnet Synchronous Motor," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 36, No.3, pp. 374-382
- [26] T. Furuhashi, S. Sangwongwanich, S. Okuma (1992), "A Position-and-Velocity Sensorless Control for Brushless DC Motors Using an Adaptive Sliding Mode Observer," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 39, No. 2, pp. 89-95
- [27] H. Fakham, M.Djemai, K. Busawon (2008), "Design and practical implementation of a back-emf sliding-mode observer for a brushless dc motor," IET Electric Power Applications, Vol.2, No.6, pp.353,361
- [28] W.J. Lee, S.k. Su (2006), "A New Starting Method of BLDC Motors without Position Sensor," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 42, No. 6, pp. 1532 – 1538