

کنترل بدون حسگر موتور BLDC به روش تشخیص نقاط گذر از صفر ولتاژهای خط به خط

ابوالفضل حلویایی نیاسر^۱، حسن مقبلی^۲ و ابوالفضل واحدی^۳

^۱دانشگاه کاشان، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی برق، halvaei@kashanu.ac.ir

^۲دانشگاه Texas A&M (شاخه قطر)، hassan.moghbelli@qatar.tamu.edu

^۳دانشگاه علم و صنعت ایران، قطب علمی اتوماسیون و بهره برداری از سیستمهای قدرت، avahedi@iust.ac.ir

چکیده - این مقاله به ارائه یک روش جدید کنترل بدون حسگر موقعیت موتور BLDC سه فاز که از یک اینورتر متعارف شش سوئیچ استفاده می کند، می پردازد. اساس روش ارائه شده در این مقاله، بر مبنای تشخیص نقاط گذر از صفر توابع ولتاژی خط به خط یا ولتاژهای ترمینال سه فاز نسبت به یکدیگر می باشد. در این راستا کفایت تا فقط ولتاژ دو ترمینال نسبت به ترمینال سوم اندازه گیری گردد. ثابت می گردد که نقاط کموتاسیون تقریباً نزدیک به نقاط گذر از صفر ولتاژهای اندازه گیری شده هستند. از مزایای این روش می توان به سادگی زیاد و عدم نیاز به ایجاد تاخیر فاز ۳۰ درجه که در روش های مرسوم کنترل بدون حسگر موتور BLDC سه فاز بکار می رود، اشاره نمود. تنها عیب این روش خطای فاز ناشی از افت ولتاژ روی امپدانس دو فاز استاتور بوده که بصورت تحلیلی مقدار این خطا بدست آورده می شود. درستی تحلیل های ارائه شده با استفاده از شبیه سازی و نتایج پیاده سازی آزمایشگاهی صحت گذاری می گردد.

کلید واژه - اینورتر شش سوئیچ، درایو الکتریکی، تشخیص نقاط گذر از صفر، کنترل بدون حسگر موقعیت، موتور BLDC.

ساختار ساده و قیمت پائین هستند. در این کاربردها، با استفاده از روش های بدون حسگر موقعیت مناسب، ساختار موتور و درایو به نحو چشمگیری ساده می شود [۱]. در این مقاله پس از معرفی درایو موتور BLDC و بررسی شکل موج های جریان و ولتاژ در آن، بصورت اجمالی انواع روش های بدون حسگر ارائه شده تاکنون مرور شده و سپس به معرفی یک روش جدید بدون حسگر موتور BLDC مناسب کاربردهای کم هزینه نظیر کاربردهای خانگی پرداخته می شود. روش ارائه شده تنها از اندازه گیری دو ولتاژ ترمینال نسبت به ترمینال سوم استفاده می کند. درستی روش ارائه شده با استفاده از شبیه سازی کامپیوتری و به صورت آزمایشگاهی صحت گذاری می گردد.

۱- مقدمه

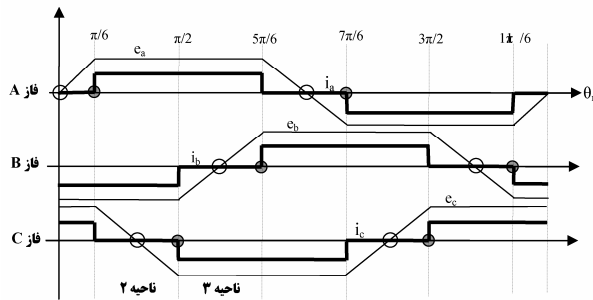
طی دو دهه گذشته استفاده از موتورهای DC بدون جاروبک (BLDC) در کاربردهای سرعت متغیر، به دلیل ویژگی های برجسته آنها نظیر بهره زیاد، چگالی توان و گشتاور بالا، هزینه نگهداری کمتر، ساختار ساده و روش کنترل آسان، در زمینه های گوناگون از جمله حمل و نقل، هوافضا، صنایع نظامی، کامپیوتر و تولیدات خانگی گسترش یافته اند. موتورهای BLDC، به دلیل نداشتن جاروبک و سیستم کموتاسیون مکانیکی، با حفظ ویژگی های خوب موتورهای DC، از مزایای موتورهای AC نیز بهره می برند. موتور BLDC از نظر چگالی گشتاور و نسبت توان به وزن، برتری های انکارناپذیری نسبت به موتور القایی دارد. همچنین به دلیل دوزنقه ای بودن ولتاژ ضدمحرکه و مربعی بودن شکل موج جریان ها در موتور BLDC، نحوه ساخت و آرایش سیم بندی این موتور ساده تر از انواع دیگر موتورهای AC با تغذیه سینوسی است. روش کنترل این موتور نیز به سادگی کنترل موتور DC است که قابلیت اطمینان بالا و هزینه ساخت پائین را برای درایو موتور BLDC به ارمان می آورد. کاربردهای فراوانی وجود دارند که نیازمند درایو الکتریکی سرعت متغیر با بهره بالا،

۲- درایو موتور BLDC با اینورتر شش سوئیچ

موتور BLDC متعارف شامل موتور BLDC، اینورتر و سیستم کنترل می باشد. سیستم کنترل، هر فاز موتور را متناوباً و هماهنگ با موقعیت روتور به نحوی تحریک می کند تا گشتاور الکترومغناطیسی ثابتی تولید شود. بنابراین، سیستم نیازمند حسگرهای موقعیت است تا موقعیت های خاصی از روتور (لحظات کموتاسیون) را آشکار ساخته و برای کنترل کننده ارسال نماید.

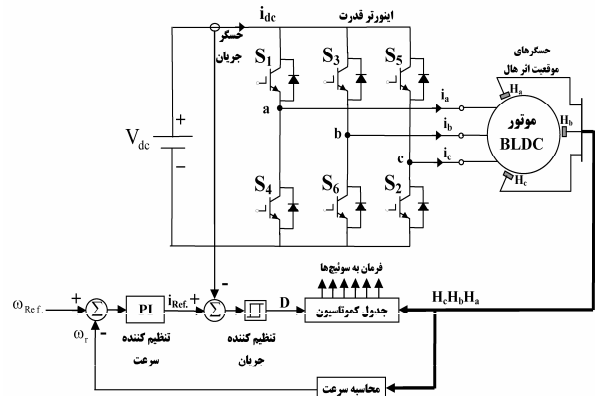
۳- انواع روش های بدون حسگر موتور BLDC

به دلیل شکل موج غیر سینوسی ولتاژ ضدمحرکه و جریان فازهای موتور BLDC، به کارگیری مستقیم تبدیل های دو محوری و استفاده از فازورهای فضایی دشوار و پیچیده است. لذا اغلب روش های بدون حسگر که برای موتورهای با تغذیه سینوسی بکار گرفته می شوند، برای موتور BLDC کاربرد نخواهند داشت. روش های کنترل بدون حسگر موقعیت موتور BLDC را می توان به پنج گروه اصلی ذیل تقسیم بندی نمود [۲] که عبارتند از: (۱) روش های بر مبنای ولتاژ ضدمحرکه، (۲) تخمین شار نشستی استاتور، (۳) استفاده از تغییرات اندوکتانس استاتور، (۴) استفاده از توابع مناسبی از ولتاژ و جریان، (۵) استفاده از تئوری های کنترلی. از میان دسته روش های ذکر شده، روش های دسته اول به دلیل سادگی، آسان بودن پیاده سازی بیشتر کاربرد دارند که شکل ۳ اساس این روش را نشان می دهد که در آن با تشخیص نقاط گذر از صفر ولتاژ ضدمحرکه فاز خاموش و ایجاد یک تاخیر فاز ۳۰ درجه می توان زمان کموتاسیون جریان بعدی را تخمین زد. روش های بر مبنای ولتاژ ضدمحرکه به گونه های مختلف بکار برده شده اند که از جمله می توان به موارد زیر اشاره نمود: (الف) اندازه گیری ولتاژ ترمینال های نسبت به نقطه ستاره موتور، (ب) اندازه گیری هارمونیک سوم ولتاژ ضدمحرکه، (ج) اندازه گیری جریان دیود های هرزه گرد، (د) انتگرال گیری از ولتاژ ضدمحرکه. از میان روش های فوق الذکر، روش اندازه گیری ولتاژ ترمینال استاتور بطور گسترده و به شکل های مختلف در درایو موتورهای BLDC بکار گرفته شده اند. در حالت عملی به دلیل در دسترس نبودن ولتاژ نقطه ستاره موتور از یک اتصال ستاره متعادل مقاومتی برای اندازه گیری ولتاژ ترمینالها و ایجاد نقطه ستاره مجازی استفاده می شود. شکل ۴ اندازه گیری ولتاژهای ترمینال موتور BLDC در حالت واقعی وقتی که از روش ولتاژ PWM نرم برای کنترل جریان موتور استفاده می شود را نمایش می دهد.

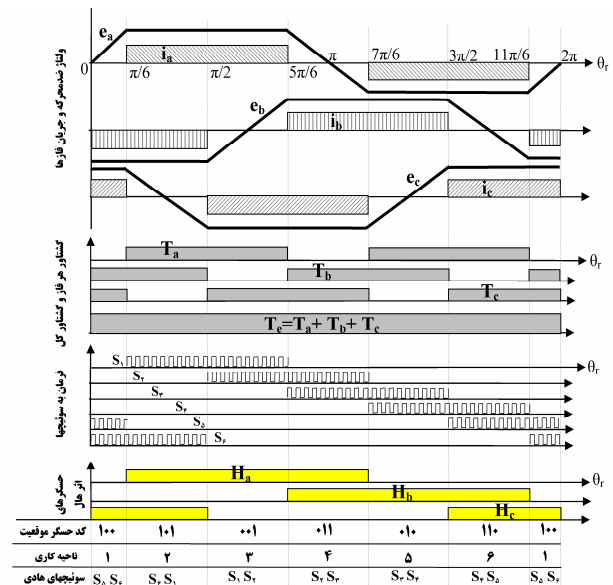


شکل ۳: روش تشخیص نقاط گذر از صفر ولتاژ ضدمحرکه فاز خاموش برای تخمین نقاط کموتاسیون

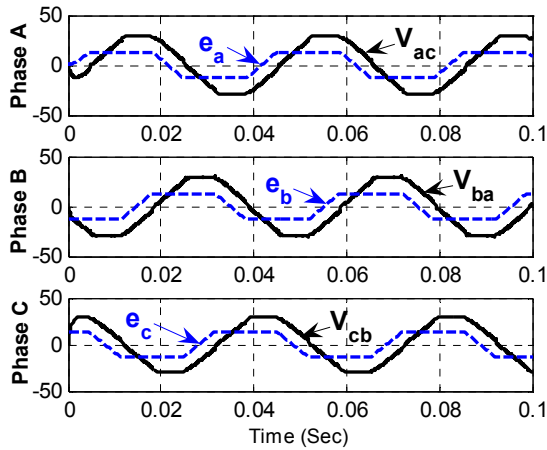
این حسگرها غالباً از نوع اثر هال بوده و معمولاً در داخل خود موتور و هنگام ساخت، جانمایی می شوند. شکل ۱ یک درایو موتور BLDC متعارف شش سوئیچه را نشان می دهد. در هر لحظه از زمان جریان تنها از دو فاز موتور عبور می کند و فاز سوم خاموش است. لذا استفاده از تنها یک حسگر جریان کفایت می کند که این حسگر، جریان لینک DC را اندازه گیری می نماید. کنترل کننده پس از دریافت سیگنال حسگرهای اثر هال، موقعیت زاویه ای روتور را تشخیص داده و تصمیم می گیرد که کدام فاز را تحریک نماید. شکل ۲ شکل موج های ولتاژ ضدمحرکه، جریان فاز، گشتاور هر فاز، گشتاور کل و سیگنال های اثر هال را در یک درایو موتور BLDC سه فاز ایده آل نمایش می دهد. یک دوره تناوب از عملکرد ماشین را می توان به شش ناحیه ۶۰ درجه ای تقسیم نمود که در هر ناحیه، سوئیچ های معینی کنترل می شوند.



شکل ۱: درایو متعارف موتور BLDC با اینورتر شش سوئیچه



شکل ۲: شکل موج های ولتاژ و جریان و حسگرها در درایو موتور BLDC با اینورتر شش سوئیچه ایده آل

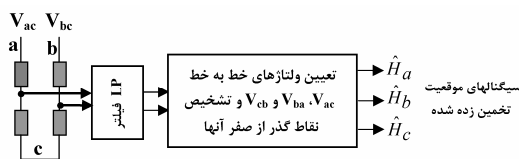


شکل ۵: تغییرات ولتاژهای خط به خط و ولتاژهای ضدمحرکه هر فاز

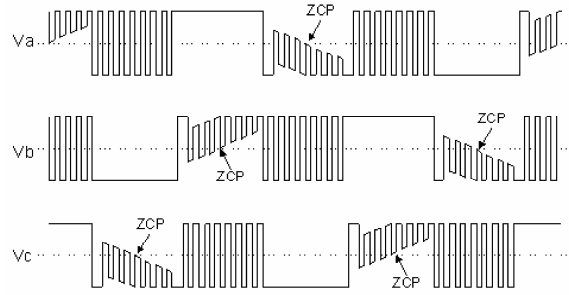
اختلاف فاز دارند. شکل ۵ تغییرات ولتاژ خط به خط فازهای مختلف نسبت به ولتاژهای ضدمحرکه هر فاز را در یک موتور BLDC سه فاز نمایش می دهد. البته اختلاف کمی بین نقاط گذر از صفر ولتاژهای خط به خط و نقاط کموتاسیون وجود دارد که ناشی از افت ولتاژ روی امپدانس فازهاست که در بخش بعد به آن پرداخته می شود. اگرچه در این روش از سه ولتاژ خط به خط V_{ac} ، V_{ba} و V_{cb} استفاده می گردد، اما در عمل تنها کافیست تا دو تا از ولتاژهای ذکر شده اندازه گیری شوند و ولتاژ خط به خط سوم از ترکیب دو ولتاژ اندازه گیری شده قابل محاسبه است. شکل ۶ مدار شماتیک اندازه گیری دو ولتاژ خط به خط V_{ac} و V_{bc} را نشان می دهد که در آن اختلاف ولتاژ دو ترمینال a و b موتور نسبت به ترمینال فاز c با مقسم مقاومتی به راحتی قابل انجام است. ولتاژهای اندازه گیری شده برای تعیین مقدار موثرشان و حذف نویزهای فرکانس بالای سوئیچینگ از دو فیلتر پائین گذر مناسب عبور داده می شوند. سپس دو ولتاژ خط به خط V_{cb} و V_{ba} از روی مقادیر اندازه گیری شده به طریق زیر محاسبه می شوند:

$$\begin{cases} V_{ba} = V_{bc} - V_{ac} \\ V_{cb} = -V_{bc} \end{cases} \quad (1)$$

در نهایت با استفاده از مدارات اشمیت ترینگر می توان نقاط کموتاسیون را که منطبق بر نقاط گذر از صفر ولتاژهای خط به خط هستند، تشخیص داده و از سیگنال های بدست آمده برای کموتاسیون جریان فازها استفاده نمود.



شکل ۶: اندازه گیری و تشخیص نقاط گذر از صفر ولتاژهای خط به خط



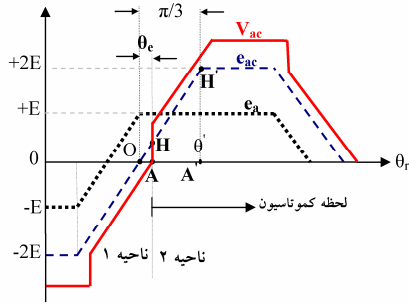
شکل ۴: تعیین نقطه عبور از صفر (ZCP) با اندازه گیری ولتاژ PWM ترمینال فاز خاموش

برای حذف اثرات سوئیچینگ فرکانس بالا ولتاژ اندازه گیری شده ابتدا فیلتر شده و سپس به وسیله مبدلهای آنالوگ به دیجیتال اندازه گیری می گردد. مشکلات عمده این روش عبارتند از: کاهش دامنه ولتاژ ضدمحرکه در سرعت های پائین و لذا مشکل بودن اندازه گیری ولتاژ، وجود نویزهای ولتاژ فرکانس بالا ناشی از سوئیچینگ، خطاهای اندازه گیری ناشی از فیلتر نمودن ولتاژ و نیاز به ایجاد نقطه ستاره مجازی. مراجع مختلف به روش های گوناگون درصد رفع عیوب ذکر شده برآمده اند. مرجع [۳] از یک شیفت دهنده فاز ۳۰ درجه مستقل از زمان استفاده نموده است. برای جبران سازی تاخیر فاز ناشی از فیلترها در [۴] از روش جستجو در جدول استفاده گردیده است. در [۵] بدون استفاده از بازسازی و ساختن ولتاژ نقطه ستاره موتور، بطور مستقیم نقاط عبور از صفر ولتاژهای ضدمحرکه فازها را بدون نیاز به فیلتر کردن تعیین نموده است. این مرجع روش تصحیح خطا برای خطاهای ناشی از خازن های پارازیتی و جریان ناپیوسته در بارهای سبک ارائه نموده است. در روش که در ادامه این مقاله بیان خواهد گردید، بدون استفاده از شیفت فاز ۳۰ درجه و یا ایجاد نقطه ستاره مجازی، یک روش بر مبنای نقطه گذر از صفر ترمینال های دو فاز نسبت به فاز سوم ارائه خواهد گردید که از نظر ساختار بسیار ساده و به راحتی با پردازنده های ارزان قیمت و یا میکروکنترلرها قابل پیاده سازی است [۶].

۴- کنترل بدون حسگر موتور BLDC با استفاده ولتاژهای خط به خط

در موتور BLDC سه فاز، ولتاژهای خط به خط نسبت به ولتاژهای ضدمحرکه هر فاز ۳۰ درجه اختلاف فاز دارند. دلیل این مطلب آنست که ولتاژهای خط به خط شامل ولتاژهای ضدمحرکه خط به خط بوده که این ولتاژها با ولتاژهای فاز متناظر ۳۰ درجه

۵- تحلیل خطای تخمین روش بدون حسگر ارائه شده



شکل ۸: کموتاسیون (تغییر) جریان بین دو فاز b و c با تشخیص نقطه گذر از صفر ولتاژ خط به خط V_{ac}

در ناحیه ۱، ولتاژ e_{ac} برحسب ولتاژ V_{ac} برابرست با:

$$e_{ac}(\theta) = V_{ca}(\theta) + RI \quad (۶)$$

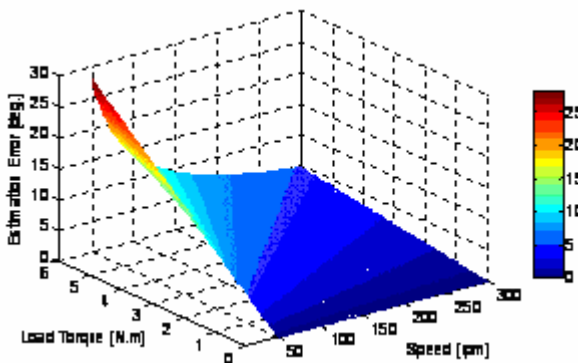
مطابق با شکل ۸ و در زاویه $\theta = \theta'$ (لحظه عبور از صفر ولتاژ V_{ac}) مقدار ولتاژ ضدمحرکه e_{ac} برابر با مقدار RI خواهد بود. لذا مقدار تاخیر فاز (θ_e) بین نقاط گذر از صفر ولتاژهای V_{ac} و e_{ac} با استفاده از تشابه بین دو مثلث OAH' و OAH به صورت ذیل قابل محاسبه است:

$$\frac{\theta_e}{\pi/3} = \frac{RI}{2E} \Rightarrow \theta_e = \frac{R \cdot I_l}{2K_t K_e \omega_r} \times \frac{\pi}{3} \quad (۷)$$

که در آن K_e ، K_t ، T_l و ω_r به ترتیب گشتاور بار، ثابت گشتاور، ثابت ولتاژ و سرعت زاویه‌ای روتور می‌باشند. با در نظر گرفتن افت ولتاژ افت ولتاژ $L di/dt$ مقدار خطای تخمین می‌تواند به صورت ذیل اصلاح شود:

$$\theta_e = \frac{(RI + L di/dt)}{2K_e \omega_r} \times \frac{\pi}{3} \quad (۸)$$

شکل ۹ مقدار خطای تخمین موقعیت برای موتور با پارامترهای داده شده در جدول پیوست برحسب مقادیر مختلف سرعت و گشتاور بار نمایش می‌دهد. بیشترین خطای تخمین مربوط به حالت اعمال گشتاور بار زیاد به موتور در سرعت‌های پائین بوده که عملاً سبب کاهش عملکرد مطلوب موتور در این سرعت‌ها می‌شود. افزایش سرعت باعث کاهش خطای تخمین می‌گردد، در صورتیکه افزایش بار سبب افزایش خطا می‌شود.



شکل ۹: تغییرات خطای تخمین برحسب سرعت و گشتاور بار

منابع ایجاد کننده خطا در این روش را می‌توان به سه دسته اصلی افت ولتاژ امپدانس استاتور، تاخیر ناشی از فیلترهای پائین‌گذر و خطاهای اندازه‌گیری تقسیم بندی نمود که با توجه اهمیت افت ولتاژ روی امپدانس استاتور به عنوان مهم‌ترین منبع ایجاد خطای تخمین، در این بخش بصورت تحلیلی مقدار این خطا بدست آورده می‌شود. مطابق با مدار معادل موتور BLDC نشان داده شده در شکل ۷، ولتاژهای ترمینال نسبت به نقطه ستاره موتور از رابطه زیر بدست می‌آیند:

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s - M & 0 & 0 \\ 0 & L_s - M & 0 \\ 0 & 0 & L_s - M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (۲)$$

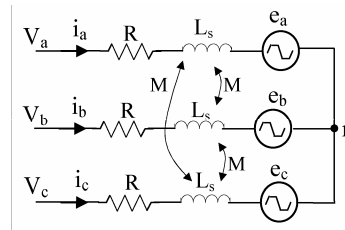
که در آن، e_a ، e_b ، e_c ولتاژهای ضدمحرکه فازها و L_s و M نیز به ترتیب اندوکتانس خودی هر فاز و متقابل بین فازها می‌باشند. ولتاژهای خط به خط بکار رفته در بخش قبل را می‌توان از ترکیب روابط فوق به صورت زیر تعیین نمود:

$$V_{ac} = e_{ac} + R \cdot (i_a - i_c) + (L_s - M) \cdot \frac{d}{dt} (i_a - i_c) \quad (۳)$$

$$V_{ba} = e_{ba} + R \cdot (i_b - i_a) + (L_s - M) \cdot \frac{d}{dt} (i_b - i_a) \quad (۴)$$

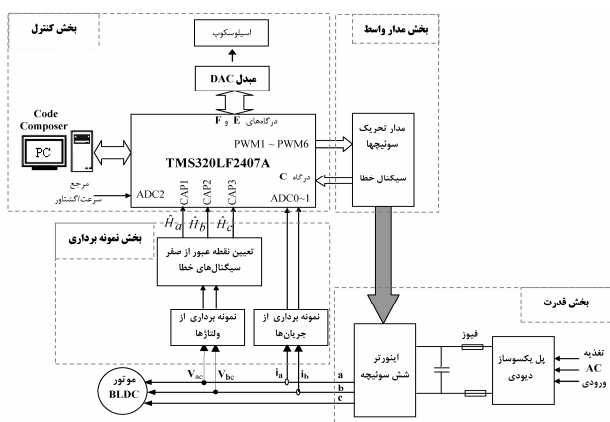
$$V_{cb} = e_{cb} + R \cdot (i_c - i_b) + (L_s - M) \cdot \frac{d}{dt} (i_c - i_b) \quad (۵)$$

از روابط فوق مشاهده می‌گردد که نقطه گذر از صفر ولتاژ خط به خط (V_{xy}) با نقطه گذر از صفر ولتاژ ضدمحرکه خط به خط (e_{xy}) به اندازه زمان متناظر با افت $R \cdot (i_x - i_y) + (L_s - M) \cdot \frac{d}{dt} (i_x - i_y)$ تاخیر فاز دارد که این تاخیر عملاً منجر به خطای کموتاسیون می‌گردد. جهت ساده سازی و به دست آوردن روابطی تحلیلی برای خطای تخمین ناشی از امپدانس موتور، فرض می‌شود که افت ولتاژ اندوکتانس در مقایسه با افت ولتاژ روی مقاومت استاتور ناچیز باشد. شکل ۸ کموتاسیون جریان از ناحیه اول به ناحیه دوم کاری موتور را با استفاده از نقطه گذر از صفر تابع ولتاژی V_{ac} نمایش می‌دهد که جریان از فاز c به فاز a موتور منتقل می‌شود. ولتاژ V_{ac} با توجه به صرف نظر کردن از اثر سلف بصورت پله ای تغییر می‌کند.

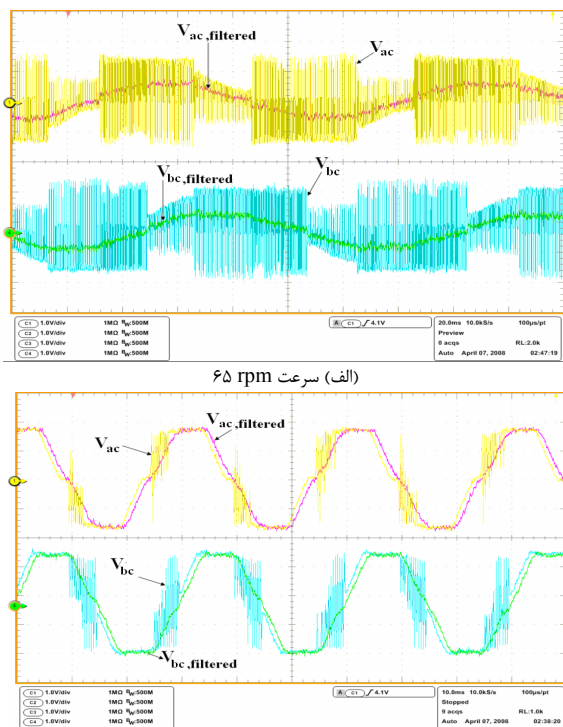


شکل ۷: مدار معادل موتور BLDC سه فاز

شکل ۱۱ شماتیک سیستم آزمایشگاهی درایو بدون حسگر موتور BLDC مورد استفاده را نمایش می دهد. کنترل کننده مورد استفاده در این تست یک پردازنده دیجیتال سیگنال (DSP) نوع TMS320LF2407A است که از قابلیت Capture آن برای تشخیص تغییر لبه های سیگنال های موقعیت تخمین زده شده استفاده می گردد [۷]. در شکل ۱۲ ولتاژهای PWM خط V_{ac} و V_{bc} همراه با مقادیر فیلتر شده آنها نشان داده شده اند. فرکانس قطع فیلترها برابر با ۱۰۰ هرتز انتخاب شده است تا علاوه بر جلوگیری از ایجاد سیگنال های تخمین موقعیت اشتباه، تاخیر فاز اضافی و در نتیجه خطای تخمین بیشتری ایجاد نگردد.



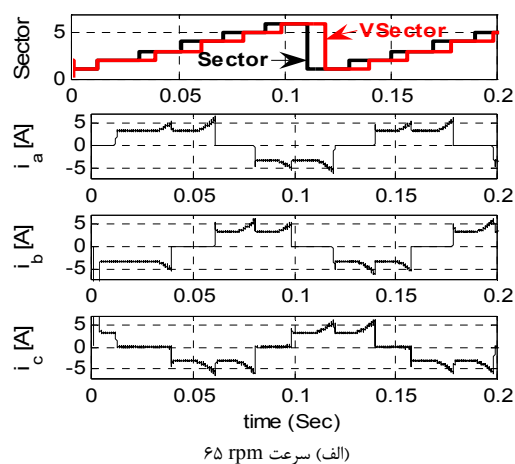
شکل ۱۱: شماتیک مدار آزمایشگاهی درایو بدون حسگر موتور BLDC



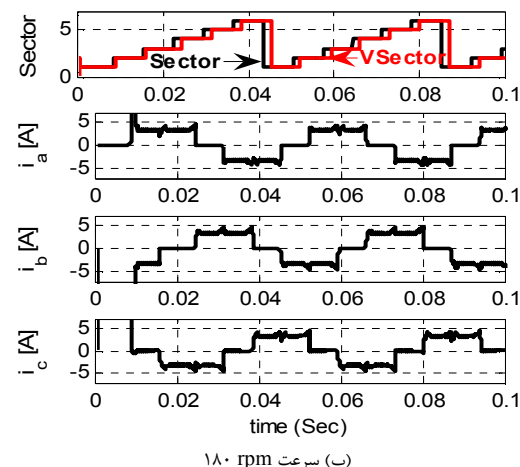
(ب) سرعت ۱۸۰ rpm

شکل ۱۲: ولتاژهای اندازه گیری شده دو ترمینال a و b نسبت به c

جهت صحت گذاری تحلیل های ارائه شده در این بخش نتایج شبیه سازی موتور به روش بدون حسگر ارائه شده برای موتور با پارامترهای داده شده در پیوست در دو سرعت ۶۵ rpm و ۱۸۰ rpm و تحت بار ۵ N.m آورده شده است که نتایج در شکل ۱۰ نمایش داده شده اند. موتور مورد استفاده یک موتور گشتاور بالا، سرعت پائین است که برای کاربرد دوچرخه برقی طراحی و ساخته شده است. در سرعت ۶۵ rpm، به دلیل تاخیر فاز ناشی از خطای تخمین جریان های فاز در لحظات کموتاسیون با بالادستی همراه هستند که مقدار آن نیز قابل ملاحظه است. اما در سرعت بالا یعنی ۱۸۰ rpm، خطای ناشی از افت ولتاژ روی امپدانس استاتور کاهش می یابد، و خطای ناشی از فیلترهای پائین گذر بر آن غالب می آید. افزایش بار در سرعت پائین سبب افزایش بیشتر خطای تخمین می گردد. حد پایداری این روش زمانی است که خطای تخمین از ۶۰ درجه بیشتر نشود. لذا این روش با یک محدودیت ذاتی در سرعت پائین مواجه است.



(الف) سرعت ۶۵ rpm



(ب) سرعت ۱۸۰ rpm

شکل ۱۰: تغییرات جریان فازهای موتور در درایو بدون حسگر

۸- نتیجه گیری

در این مقاله یک روش جدید برای کنترل بدون حسگر موتور BLDC سه فاز با تشخیص نقاط گذر از صفر ولتاژهای خط به خط تبیین گردید. روش ارائه شده دارای مزایای زیر است: (۱) تنها به اندازه گیری ولتاژ ترمینال دو فاز نسبت به فاز سوم نیاز دارد. (۲) نیازی به ایجاد نقطه ستاره مجازی که در روش های معمول بدون حسگر استفاده می شود ندارد. (۳) نیازی به ایجاد هیچ تاخیر فاز ۳۰ درجه ندارد و نقاط کموتاسیون تقریباً منطبق بر نقاط گذر از صفر ولتاژهای خط به خط هستند. در مقابل مزایای ذکر شده، این موتور در سرعت پائین و تحت بار زیاد دارای خطای تخمین زیاد بوده که عملکرد روش بدون حسگر را مختل می کند. لذا این روش تحت بار نامی از یک سرعت مشخص به بعد قابل کاربرد است که برای موتور بکار رفته در این مقاله، این حداقل سرعت تقریباً ۵۰ rpm است. با توجه به سادگی پیاده سازی روش ارائه شده، این روش می تواند برای بارهایی نظیر فن ها و دمنده ها که مشخصه گشتاور افزایشی نسبت به سرعت دارند بکار رود.

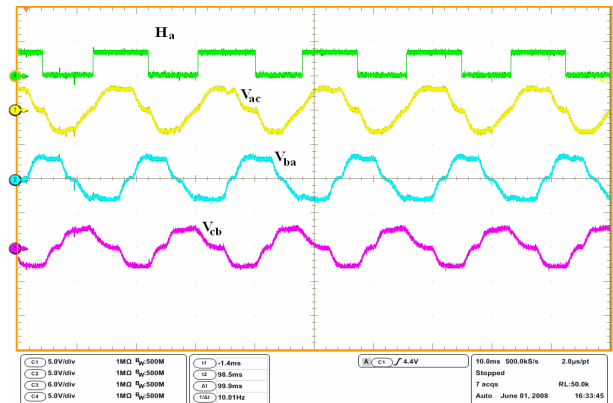
مراجع

- [1] P. Pillay, R. Krishnan; "Modeling, simulation, and analysis of permanent-magnet motor drives. II. The brushless DC motor drive", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 25, No. 2, pp 274-279, March/April 1989.
- [2] J. P. Jahnson, M. Ehsani, and Y. Guzelaunler, "Review of sensorless methods for brushless DC," in Proc. IEEE IEEE IAS Annual Meeting Conf., 1999 pp 143-150.
- [3] Q. Jiang, C. Bi, R. Huang, "A New Phase-Delay-Free Method to Detect Back EMF Zero-Crossing Points for Sensorless Control of Spindle Motors", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 41 No. 7, pp 2287-2294, July 2005.
- [4] J.H. Soong, I. Choy; "A Rotor Position Sensorless Control Based on Neutral Voltage Compensation of Brushless DC Motors", *Proceedings of the IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC)*, pp 1431-1436 2004
- [5] Genfu Zhou, Zhigan Wu, Jianping Ying; "Improved Sensorless Brushless DC Motor Drive", *Proceedings of the IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC)*, pp 1353-1357 2005.
- [6] C. Wang, G. Sung, K. Fang, Sh. Tseng; "A Low-power Sensorless Inverter Controller of Brushless DC Motors", in *Proc. IEEE International Symposium on Circuits and Systems, ISCAS'07*, pp. 2435-2438 2007.
- [7] A. Halvaei Niasar, H. Moghbelli, A. Vahedi; "Torque Control of Brushless DC Motor Drive based on DSP Technology", in *Proc. of the IEEE International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2007)*, Seoul, South Korea, pp. 524-528, 2007.

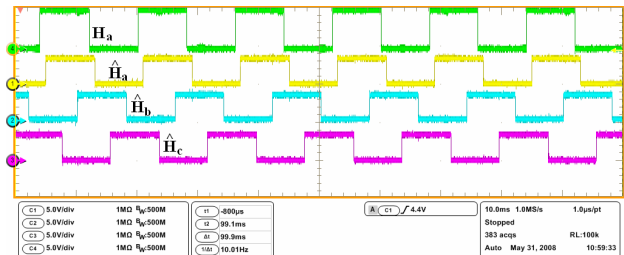
پیوست: مشخصات موتور BLDC مورد استفاده

$P_n = 180$ [Watt]	$\omega_n = 300$ [rpm]
$T_n = 5.7$ [N.m]	$I_n = 4.5$ [A]
$K_t = 1.25$ [N.m/A]	$K_e = 0.0667$ [V/rpm]
$Z = 16$	$R = 0.64$ [Ω]
$L_s = 1.0$ [mH]	$M = 0.25$ [mH]

شکل ۱۳ تغییرات سه ولتاژ خط به خط ساخته شده برای تعیین سیگنال های تخمین زده شده موقعیت نمایش داده شده اند. با استفاده از مدارات تشخیص نقطه گذر از سیگنال های موقعیت (سیگنال های مجازی اثر هال $\hat{H}_a, \hat{H}_b, \hat{H}_c$) تخمین زده می شوند. شکل ۱۴ تغییرات جریان فازهای موتور در هنگام راه اندازی موتور BLDC را نمایش می دهد که از روش امتداد دهی روتور در موقعیتی مشخص و سپس کنترل حلقه باز استفاده می شود. هنگامیکه روتور به سرعت مناسبی رسید، از سیگنال های موقعیت تخمین زده شده و روش کنترل بدون حسگر استفاده می شود.

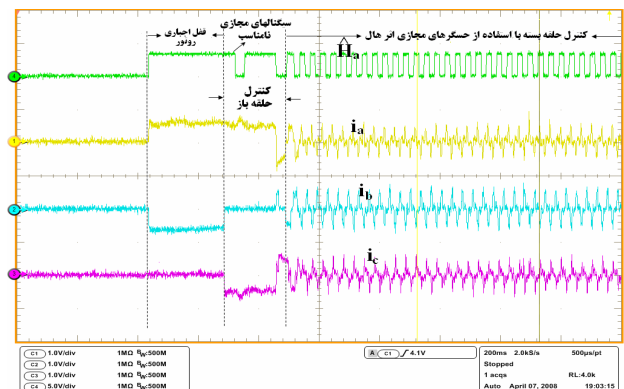


شکل (الف) موج ولتاژهای خط به خط برای تخمین نقاط کموتاسیون



(ب) سیگنال های موقعیت تخمین زده شده و مقایسه با سیگنال واقعی موقعیت H_a

شکل ۱۳: تخمین لحظات کموتاسیون با تشخیص نقاط گذر از صفر ولتاژهای خط به خط موتور BLDC



شکل ۱۴: تغییرات جریان فازهای موتور در هنگام راه اندازی به روش حلقه باز