

مروری بر روش‌های تحلیل، کنترل، پیاده‌سازی و ارزیابی محرکه‌های موتورهای DC بدون جاروبک

ابوالفضل حلوائی نیاسر

استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

halvaei@kashanu.ac.ir

چکیده:

امروزه با توجه به گسترش روزافزون کاربرد موتورهای الکتریکی در بخش‌های خانگی، تجاری و صنعتی، برای مصرف بهینه انرژی الکتریکی، طراحی و ساخت موتورهای الکتریکی پربازده و محرکه‌های سرعت متغیر مربوط، مورد توجه زیادی قرار گرفته است. در این بین، موتورهای DC بدون جاروبک (BLDC) به دلیل مزایای فراوان نظیر بازده بالا، چگالی توان و گشتاور زیاد، سهولت در کنترل، روش ساخت ساده، قابلیت اطمینان بالا و نگهداری کم‌هزینه‌تر، طی دو دهه اخیر در کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این موتور از جهت ساختمان شبیه موتور سنکرون آهن‌ربای دائم است، اما به سادگی موتور DC قابل کنترل است. این ویژگی‌ها سبب شده است تا اقبال بسیار زیادی به استفاده از این موتورها در طیف وسیعی از کاربردها نشان داده شود. این مقاله با هدف کمک به توسعه و ترویج استفاده از این موتورها در کاربردهای مختلف صنعتی و نیمه‌صنعتی، مروری به جنبه‌های مختلف موتورهای BLDC شامل ویژگی‌ها، مدل‌سازی، اینورترهای مورد استفاده و تحلیل روش‌های مختلف کنترلی و در نهایت به بیان نکات پیاده‌سازی محرکه موتور BLDC می‌پردازد. مزایا و معایب روش‌های مختلف کنترلی موتور BLDC، نکات مربوط به استفاده از روش‌های کنترل بدون حسگر، مؤثر بودن روش‌های کاهش ضربان گشتاور^۲ ناشی از کموتاسیون و کنترل در ناحیه کاهش شار برای یک موتور BLDC با جزئیات بیشتری توصیف می‌شوند. در نهایت در خصوص استفاده از روش‌های فوق در یک محرکه تجاری موتور BLDC پیشنهاداتی ارائه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: صرفه‌جویی در انرژی، بهره، موتور BLDC، محرکه (درایو) الکتریکی، اینورتر، مدل‌سازی، کنترل، بدون حسگر، کاهش شار، ضربان گشتاور.

۱. مقدمه

BLDC را در دستور کار قرار داده‌اند. کاربردهای بسیار دیگری هستند که سازمان‌های مختلف نظیر اداره استاندارد ایران، سازمان بهره‌وری انرژی و وزارتخانه‌های مسئول در حوزه تولید و مصرف انرژی، استفاده از درایوهای سرعت متغیر را برای شمار بسیاری از کاربردها توصیه کرده‌اند.

موتورهای الکتریکی مورد استفاده در صنایع و کاربردهای غیرصنعتی اغلب از نوع DC یا AC نوع القایی هستند. موتورهای DC علی‌رغم خواص مطلوبشان نظیر سهولت در کنترل و مشخصه گشتاور-سرعت مناسب، به دلیل دارا بودن کموتاتور و جاروبک و نیاز به تعمیرات دوره‌ای و نگهداری پرهزینه، جایگاه خود را به سایر موتورها داده‌اند. استفاده از موتورهای AC القایی علی‌رغم افزایش بهره‌وری ناشی از به‌کارگیری روش‌های کنترل سرعت متغیر که جایی برای موتورهای DC باقی نگذارده‌اند، در بسیاری از کاربردها فاقد بهره و کیفیت عملکرد مناسب هستند. طی دو دهه گذشته و با کاهش قیمت مواد آهن‌ربای دائم، طراحی و ساخت موتورهای بدون جاروبک آهن‌ربای دائم (PMBL) و استفاده از آن‌ها در کاربردهای توان پایین گسترش چشمگیری یافته است. از دلایل رویکرد مثبت به این نوع موتورها می‌توان به ویژگی‌های ممتازشان نظیر بهره بسیار زیاد، چگالی توان و گشتاور بالا، هزینه نگهداری پایین، ساختار ساده و روش کنترل آسان اشاره کرد. این موتورها به دلایل فوق، ابتدا در کاربردهای دقیق و عملکرد بالا نظیر حمل و نقل الکتریکی، هوافضا و صنایع نظامی مورد توجه قرار گرفتند. اما اخیراً به دلیل نیازهای جدید در کاربردهای خانگی، نیمه‌صنعتی و صنعتی و همچنین کاهش چشمگیر قیمت، کاربردشان گسترشی بی‌سابقه یافته است [۱]. این موتورها به دو دسته عمده AC آهن‌ربای دائم سنکرون (PMSM) و DC بدون جاروبک (BLDC) تقسیم‌بندی می‌شوند. استفاده از موتورهای BLDC در بسیاری از کاربردها به دلیل سهولت در کنترل و سادگی ساخت‌افزار موردنیاز، رواج بیشتری یافته است. هدف از این مقاله، بررسی جنبه‌های مختلف استفاده از موتورهای BLDC و ذکر پیشرفت‌های صورت گرفته در حوزه کنترل این دسته از موتورهاست. در ادامه مقاله، پس از بیان اصول عملکرد موتور BLDC، چگونگی مدل‌سازی موتور و محرکه آن بیان می‌شوند. پس از آن، انواع اینورترهای مورد استفاده در محرکه این موتور و روش‌های مختلف کنترل این موتور بیان می‌شوند. سپس روش‌های کنترل بدون حسگر این موتور جهت حذف حسگرهای موقعیت در این موتور بیان می‌شود. موضوعات کاهش ضربه گشتاور، کار در سرعت‌های بالا و همچنین نکات پیاده‌سازی

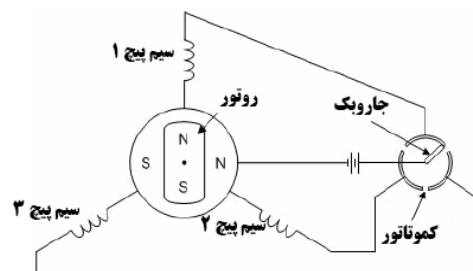
امروزه بهینه‌سازی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی، از دو دیدگاه اقتصادی و زیست محیطی قابل بحث است. بهینه‌سازی مصرف انرژی به معنای استفاده از تجهیزات الکتریکی، با حداقل انرژی مصرفی و حداکثر بهره‌وری است. موتورهای الکتریکی امروزه به‌عنوان یکی از عمده‌ترین مصرف‌کنندگان توان الکتریکی شناخته شده‌اند. حدود ۴۰٪ انرژی الکتریکی تولیدی در ایران توسط موتورهای الکتریکی مصرف می‌شود و این رقم در مقیاس جهانی به حدود ۶۵٪ درصد می‌رسد. بهینه‌سازی مصرف انرژی توسط موتورها با طراحی موتورهای با عملکرد بالا و طراحی سیستم‌های تغذیه و مبدل مناسب برای موتورها قابل حصول است. تلاش جهانی در هر دو زمینه فوق، به‌سرعت در حال انجام است و نتایج آن عبارت‌اند از: ۱. طراحی موتورهای الکتریکی با حداکثر بهره، حداقل ملزومات کنترلی و قیمت مناسب نظیر موتورهای آهن‌ربای دائم؛ ۲. طراحی سیستم‌های کنترل دور متغیر و محرکه‌های (درایوهای) الکتریکی^۱ برای انواع مختلف موتورها؛ ۳. استفاده از محرکه‌های الکتریکی در اغلب کاربردهای صنعتی، نیمه‌صنعتی و لوازم خانگی.

مطالعات انجام‌شده در صنایع ایران، حکایت از وضعیت نابسامان انتخاب و بهره‌برداری از موتورهای الکتریکی دارد. براساس این تحقیقات، اغلب موتورها بزرگ‌تر از میزان نیاز انتخاب شده و در شرایط نامناسبی بهره‌برداری می‌شوند. استفاده از موتورهای با بهره بالا در ایران رایج نبوده و گزارش مؤثری در مورد استفاده از محرکه (درایو) جهت صرفه‌جویی در مصرف انرژی در دست نیست. کاربردهای صنعتی بسیاری می‌توان یافت که موتورها در بهره بسیار پایین‌تر از مقدار حداکثر قرار دارند. با استفاده از درایوهای الکتریکی می‌توان بخش زیادی از سرمایه‌های هزینه‌شده در بخش انرژی را صرفه‌جویی نمود. خوشبختانه در بخش تجهیزات الکتریکی خانگی، استفاده از موتورهای الکتریکی با بهره بالا و سیستم‌های دور متغیر درایوهای الکتریکی طی چند سال اخیر، رشد بی‌سابقه‌ای داشته است و بسیار مورد توجه سازندگان و مصرف‌کنندگان این‌گونه تجهیزات است. برای مثال، استفاده از موتورهای DC بدون جاروبک در تجهیزات تهویه مطبوع، کولرهای گازی و ماشین‌های لباسشویی مورد استفاده در ایران که البته اغلب ساخت شرکت‌های خارجی هستند، صرفه‌جویی در مصرف انرژی در حد ۷۰ درصد ایجاد کرده است. همچنین برخی سازندگان داخلی تجهیزاتی با استفاده بسیار زیاد نظیر کولرهای آبی، تولید محرکه‌های سرعت متغیر با استفاده از موتورهای

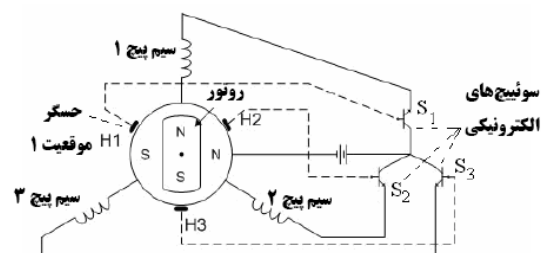
درایو این موتور در ادامه آورده می‌شوند و بخش آخر نیز به نتیجه‌گیری اختصاص دارد.

۲. اصول عملکرد موتور BLDC

برای معرفی بهتر موتور BLDC، بهتر است وجه تشابه و افتراق آن با دو موتور DC و PMSM توضیح داده شود. شکل (۱-الف) یک موتور DC با سه سیم پیچ در آرمیچر ساکن همراه با آهن‌ربای دائم دوار به‌عنوان تحریک را نمایش می‌دهد. کموتاتورها ثابت بوده و جاروبک می‌چرخد. اگر به‌جای جاروبک و کموتاتور که به‌عنوان کلید مکانیکی قطع و وصل جریان در فازها عمل می‌کنند، از سه سوئیچ الکترونیکی استفاده شود و زمان قطع و وصل جریان در فازها نیز توسط سه حسگر موقعیت که به فاصله ۱۲۰ درجه از یکدیگر قرار دارند، تشخیص داده شود، موتور BLDC پایه‌ای (با جهت جریان یک‌طرفه یا نیم‌موج) به‌دست می‌آید که در شکل (۱-ب) نشان داده شده است. موتورهای BLDC تجاری، اغلب به‌صورت سه‌فاز طراحی و ساخته شده‌اند. این موتور دارای روتور آهن‌ربای دائم همانند موتور PMSM بوده و استاتور آن نیز دارای سیم‌پیچی توزیع‌شده سه‌فاز همانند استاتور موتورهای القایی و سنکرون است. سه حسگر موقعیت اثرهال نیز به فاصله ۱۲۰ درجه الکتریکی از یکدیگر و بین سیم‌پیچ‌های یک سری از قطب‌های استاتور و در مجاورت روتور قرار دارند و با هر بار تغییر قطب روتور از مقابل آن، سیگنال خروجی‌اش تغییر حالت می‌دهد.



الف) موتور DC کموتاتور با آرمیچر ساکن و تحریک آهن‌ربای دائم



ب) موتور BLDC سه‌فاز

شکل (۱): مقایسه موتور DC کموتاتور و موتور BLDC سه‌فاز

تفاوت سیم‌پیچی استاتور یک موتور BLDC با موتورهای القایی و PMSM آن است که در موتور BLDC سیم‌پیچی متمرکز بوده یا به‌صورت یکنواخت توزیع می‌شود، ولی در سایر موتورهای AC توزیع سیم‌پیچی حتی‌الامکان نزدیک به سینوسی است. در نتیجه ولتاژهای القا شده در سیم‌پیچ‌های استاتور (ولتاژهای ضدمحرکه) به شکل دوزنقه‌ای هستند. شکل (۲-الف) تغییرات ولتاژهای ضدمحرکه در موتور BLDC سه‌فاز را نشان می‌دهد [۲].

برای ایجاد گشتاور ثابت در موتور BLDC جریان در هر فاز موتور زمانی جاری می‌شود که ولتاژ ضدمحرکه آن فاز در حداکثر مقدار خود قرار داشته باشد. تشخیص این زمان توسط حسگرهای اثرهال انجام می‌شود که سیگنال‌های آن‌ها در شکل (۲-د) نمایش داده شده‌اند. همچنین مطابق شکل (۲-الف) در هر لحظه از زمان، جریان تنها در دو فاز جاری است و فاز سوم خاموش است. جریان ایجاد شده در هر فاز در بازه‌های زمانی ۱۲۰ درجه مقدار ثابتی دارد و مطابق شکل (۲-الف) جریان هر فاز به شکل شبه‌مربعی است. حاصل ضرب ولتاژ ضدمحرکه هر فاز در جریان آن فاز برابر با توان فاصله هوایی است که با تقسیم آن بر سرعت روتور، گشتاور متناظر با آن فاز به‌دست می‌آید. شکل (۲) گشتاور هر فاز و گشتاور کل موتور BLDC را نشان می‌دهد. گشتاور هر فاز در بازه‌های ۱۲۰ درجه‌ای مقدار ثابتی دارد و در نتیجه، گشتاور الکترومغناطیسی لحظه‌ای مجموع همانند گشتاور موتور DC ثابت است [۳].

شکل موج‌های جریان و گشتاور نشان داده شده حالت عملکرد ایده‌آل موتور را نشان می‌دهند، ولی در عمل به‌خاطر تأخیر فاز ایجاد شده توسط اندوکتانس‌های استاتور، جریان‌ها و گشتاور موتور در نقاط تغییر جریان (نقاط کموتاسیون) ضربان یا اعوجاج دارند که در بخش‌های بعد تحلیل می‌شوند.

۳. مدل‌سازی موتور BLDC

برای تحلیل عملکرد موتور BLDC در شرایط کاری مختلف، مدل دینامیکی کاملی از موتور و درایو آن مورد نیاز است. با بهره‌بردن از نرم‌افزارهای بر مبنای المان‌های مداری نظیر Pspice و Saber درایو موتور BLDC به‌طور واقعی مدل می‌شود [۴]. اما مدل‌های عناصر به‌کاررفته در این نرم‌افزارها شامل توابع غیرخطی با بخش‌های نمایی بوده که زمان اجرای برنامه را طولانی می‌کنند. برای رهایی از مشکلات فوق، به‌جای استفاده از مدل واقعی عناصر مداری می‌توان

در معادلات فوق، v_a, v_b, v_c ، ولتاژهای ترمینال استاتور نسبت به نقطه ستاره موتور، e_a, e_b, e_c ، ولتاژهای ضد محرکه فازها، L_s و M نیز به ترتیب اندوکتانس خودی و متقابل فازهای استاتور هستند. گشتاور الکترومغناطیسی روی محور روتور نیز از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_r} \quad (2)$$

که در آن، ω_r سرعت روتور بوده و از معادله حرکت دورانی نیوتن به دست می‌آید:

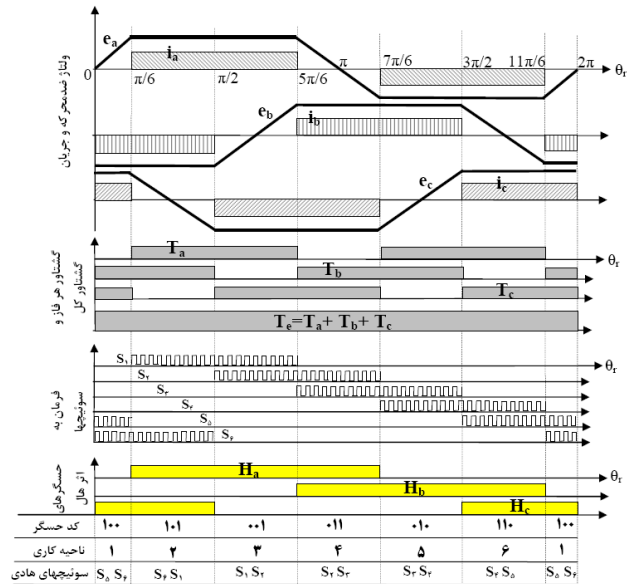
$$T_e = T_L + J \frac{d\omega_r}{dt} + B_f \omega_r \quad (3)$$

در این رابطه، T_L گشتاور بار بوده و J, B_f نیز به ترتیب ضریب اصطکاک بار و ممان اینرسی ارجاعی به محور روتور هستند [۸].

۴. اینورتر مورد استفاده در درایو موتور BLDC

در موتور BLDC به دلیل انجام عمل کموتاسیون جریان به صورت الکترونیکی، برخلاف موتورهای القایی و سنکرون، حتی در کاربردهای سرعت ثابت نیز نیاز دائمی به مبدل توان (اینورتر) دارد. با توجه به نوع کاربرد، قابلیت اطمینان، هزینه ساخت، رفتار دینامیکی و عواملی دیگر، اینورترهای مختلفی برای موتور BLDC پیشنهاد شده‌اند. کنترل اینورتر با کلیدزنی مناسب سوئیچ‌ها روی ولتاژ لینک dc به نحوی انجام می‌شود تا جریان‌های هر فاز در بازه‌های ۱۲۰ درجه ثابت باقی بماند. اینورترهای پیشنهاد شده برای موتورهای BLDC به دو دسته کلی تمام موج و نیم موج تقسیم‌بندی می‌شوند. در اینورتر تمام موج که در شکل (۵) نوع شش سوئیچه آن نمایش داده شده، جریان هر فاز دارای هر دو مقدار مثبت و منفی است. اما در اینورترهای نیم موج، جریان فازها فقط دارای مقدار مثبت‌اند. اینورترهای نیم موج شامل انواع مختلفی هستند که عبارت‌اند از: نوع Split-Supply که حداقل تعداد سوئیچ در هر فاز را داراست [۹]، نوع C-Dump که دارای چهار سوئیچ است [۱۰] و نوع نیم موج با ولتاژ لینک dc متغیر [۱۱]. شکل (۴) اینورتر نیم موج نوع لینک dc متغیر را نمایش می‌دهد. جهت جریان در اینورترهای نیم موج یک‌طرفه است، اما جهت توان در آن‌ها دوطرفه بوده و قابلیت عملکرد چهارربعی را هم دارند. اینورترهای نیم موج اگرچه ساختار ساده‌تری دارند، چون در یک دوره ۳۶۰ درجه، هر فاز فقط ۱۲۰ درجه هدایت می‌کند و همچنین در بعضی انواع آن، تنها از نصف ولتاژ لینک dc استفاده می‌شود، دارای بهره‌وری پایینی بوده و از ظرفیت نامی موتور استفاده

عملکرد آن‌ها را مدل کرد. استفاده از مفهوم «تابع سوئیچینگ» یک ابزار مؤثر در درک و بهینه‌سازی عملکرد مبدل‌های توان استاتیکی است [۵].



شکل (۲): شکل موج‌ها و فرمان به سوئیچ‌ها در موتور BLDC سه فاز

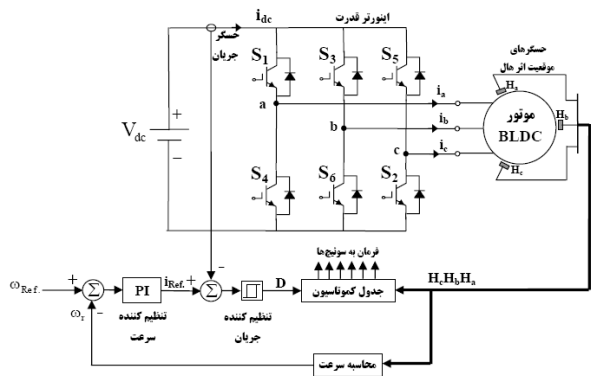
با استفاده از تابع سوئیچینگ به جای مدل‌سازی توپولوژی مدار، عناصر مدار برحسب توابعشان مدل می‌شوند که در ادامه و پس از مدل‌سازی موتور BLDC به آن پرداخته می‌شود. از آنجایی که توزیع شار در فاصله هوایی موتور BLDC به صورت سینوسی نیست، لذا نمی‌توان از سیستم مختصات دوماحوری qd0 مرسوم و تبدیل‌های متناظر استفاده کرد. البته در برخی مراجع به این روش‌ها پرداخته شده است و هارمونیک‌های مختلف شار موتور در دستگاه‌های qd0 هارمونیکی تحلیل شده‌اند [۶] و [۷]. پیچیدگی، حجم زیاد محاسبات مورد نیاز و دقت ناکافی از جمله معایب به‌کارگیری روش‌های میدان دوار برای موتورهای BLDC هستند که اغلب محققان را بر آن داشته تا از روش‌های تحلیلی فضای حالت برای مدل‌سازی موتور BLDC استفاده کنند.

شکل (۳)، مدل مداری موتور BLDC سه فاز را نشان می‌دهد [۸]. در این مدل فرض می‌شود که هر سه فاز کاملاً متعادل هستند. لذا معادلات ولتاژ به صورت ذیل خواهند بود:

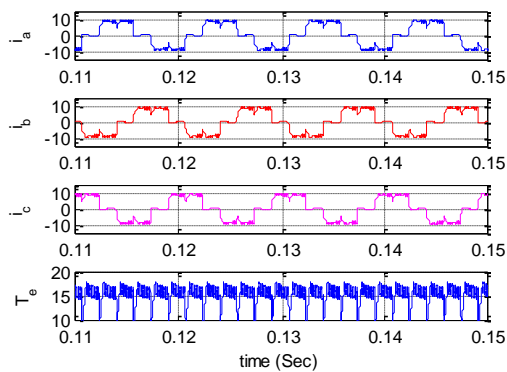
$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s - M & 0 & 0 \\ 0 & L_s - M & 0 \\ 0 & 0 & L_s - M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

تنظیم شود. این روش متداولترین روش کنترل موتور BLDC است که روش کنترل جریان لینک dc نیز نامیده می‌شود. شکل (۵) بلوک دیگرام درایو کنترل سرعت موتور BLDC به روش کنترل جریان لینک dc را نمایش می‌دهد. تشابه زیادی بین کنترل موتور dc و موتور BLDC به چشم می‌خورد [۳].

در شکل (۶) تغییرات جریان فازهای یک موتور BLDC نمونه را با استفاده از این روش کنترلی نشان می‌دهد. پارامترهای این موتور در جدول (۲) در بخش پیوست آورده شده‌اند. مشاهده می‌گردد که در لحظات کموتاسیون، به دلیل عملکرد دیودهای مکمل، جریان در هر سه فاز جاری می‌شود. همچنین به دلیل آنکه مدار الکتریکی جریان هر فاز با فازهای دیگر متفاوت است، نرخ تغییرات جریان فازها یکسان نبوده و بنابراین جریان فازها از حالت شبه مربعی ایده آل خارج می‌شوند. در نتیجه، گشتاور در این لحظات دیگر ثابت نبوده و بسته به مقدار سرعت دچار اعوجاجاتی به صورت بالازدگی یا فرورفتگی می‌شود. میزان اعوجاج نیز به سرعت، گشتاور بار، ولتاژ باس dc، مقادیر اندوکتانس و مقاومت هر فاز بستگی دارد. برای غلبه بر مشکل فوق، لازم است تا جریان فازها در تمامی زمان‌ها از جمله در بازه زمانی کموتاسیون نیز کنترل شود.

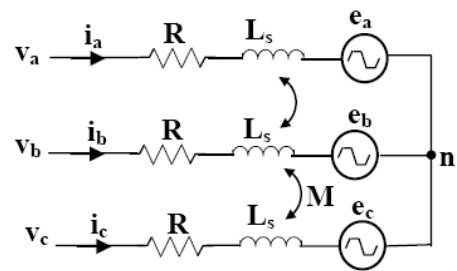


شکل (۵): درایو موتور BLDC به روش کنترل جریان لینک dc

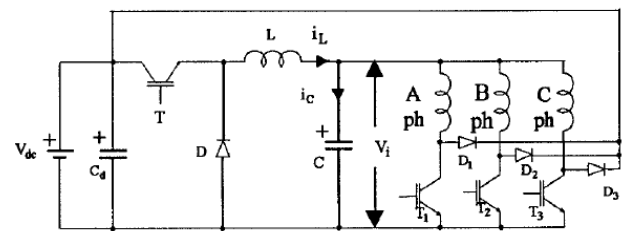


شکل (۶): تغییرات جریان‌های فازها در روش کنترل جریان لینک dc

نمی‌کنند. لذا کاربرد آن‌ها به توان‌های در حد کسری از اسب بخار محدود شده است. نوع دیگری از اینورترهای تمام‌موج هستند که به جای شش سوئیچ از چهار سوئیچ استفاده می‌کنند. این نوع اینورتر مشکلات سایر اینورترهای کاهش ساختاریافته نیم‌موج را کمتر دارند، اما به دلیل حذف دو سوئیچ در آن، مسائل خاص خود را دارد و رفع این مسائل نیازمند به‌کارگیری روش‌های کنترلی پیچیده‌تر هستند [۳] و [۱۲]. با توجه به قیمت ناچیز سوئیچ‌های نیمه‌هادی، به‌کارگیری اینورترهای نیم‌موج و چهار سوئیچ توجه اقتصادی ندارد.



شکل (۳): مدل مداری موتور BLDC سه فاز



شکل (۴): اینورتر نیم‌موج با ولتاژ لینک dc متغیر برای موتور BLDC

۵. روش‌های کنترل موتور BLDC

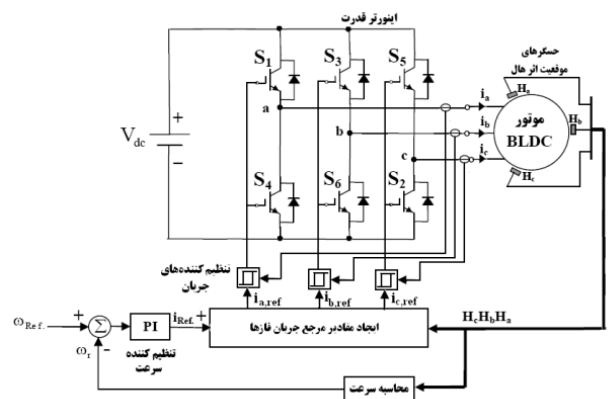
مزیت عمده موتورهای BLDC قابلیت کنترل آسان سرعت/گشتاور در آن‌هاست که همانند موتورهای dc فقط نیازمند تغییر دامنه جریان استاتور است. روش‌های مختلفی برای کنترل سرعت/گشتاور موتورهای BLDC پیشنهاد شده که در این بخش به اهم آن‌ها که در درایوهای تجاری نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند، پرداخته می‌شود. این روش‌ها عبارت‌اند از کنترل جریان لینک dc، کنترل مستقیم جریان فازها، کنترل مستقیم گشتاور.

در یک موتور BLDC در هر لحظه از زمان، جریان تنها در دو فاز جاری بوده و فاز سوم خاموش است (به غیر از لحظات کموتاسیون که جریان برای مدت کوتاهی در هر سه فاز جاری می‌شود). این جریان از منبع (یا لینک dc) وارد موتور شده و سپس به آن بازمی‌گردد. لذا برای کنترل جریان در موتور BLDC کافی است تا تنها جریان لینک dc که با فرض ثابت بودن بار، باید مقدار ثابتی داشته باشد حول مقدار مرجعش

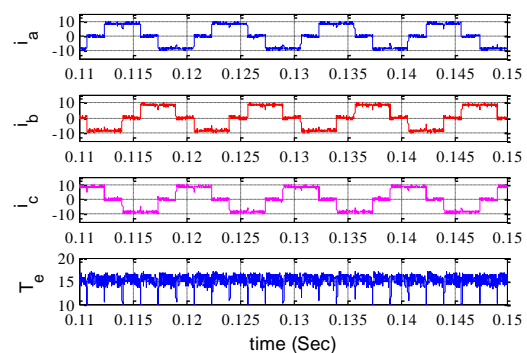
شکل (۹) بلوک دی‌گرام درایو موتور BLDC با روش کنترل مستقیم گشتاور را نشان می‌دهد [۱۶، ۱۸]. در روش DTC، مقادیر شار و گشتاور بدون تنظیم جریان و مستقیماً با کلیدزنی سوئیچ‌های اینورتر کنترل می‌شوند. لذا این روش بدون احتساب حلقه سرعت، تنها دارای دو حلقه کنترل است. اما در روش DTC برای موتور BLDC برخلاف موتورهای با تغذیه سینوسی (القایی و PMSM) نیاز به حلقه کنترل شار وجود ندارد و در صورت نیاز به کار موتور BLDC در ناحیه بالاتر از سرعت نامی، از روش کنترل زاویه پیش‌فازی (PAA) استفاده می‌شود که در بخش‌های بعد به آن پرداخته خواهد شد.

مطابق شکل (۹) خروجی مقایسه‌گر گشتاور (ΔT) به یک کنترل‌کننده هیستریزس وارد می‌شود که می‌تواند دوسطحی یا سه‌سطحی باشد که البته در این شکل، نوع دوسطحی است. خطای گشتاور دارای علامت مثبت، منفی یا صفر (به معنای قرار داشتن خطای گشتاور در باند هیستریزس) است که به ترتیب به معنای نیاز به افزایش/کاهش/بدون تغییر یافتن گشتاور است. بر این اساس، بردار ولتاژ مناسب از جدول انتخاب بردار ولتاژ انتخاب شده و به عبارتی، فرمان‌ها به دو سوئیچ مناسب از اینورتر اعمال می‌شوند. جدول (۱) بردار ولتاژ مناسب در هر ناحیه ۶۰ درجه را نشان می‌دهد. هر بردار ولتاژ با یک عدد باینری شش بیتی متناظر است. ترتیب بیت از چپ به راست معادل شماره سوئیچ بوده و عدد یک و صفر به ترتیب بیانگر وصل یا قطع بودن سوئیچ متناظر هستند. از جدول مشاهده می‌شود که در هر لحظه از زمان، تنها به دو فاز موتور فرمان اعمال می‌شود [۱۹]. در کنترل موتور BLDC به روش DTC نیز همانند کنترل DTC تمامی موتورها، گشتاور موتور باید تخمین زده شود.

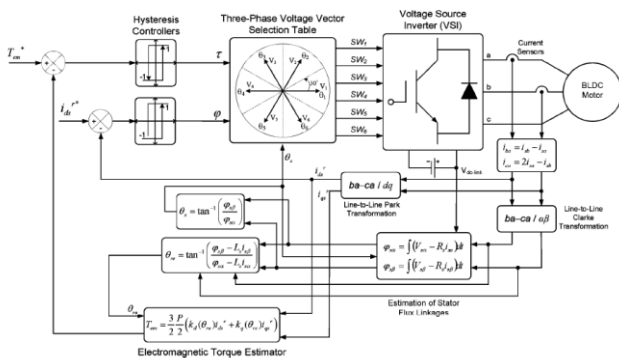
روش دیگر کنترل جریان، کنترل مستقیم جریان فازهاست. مطابق شکل (۷) در این روش، برای هر کدام از فازها یک کنترل‌کننده جریان جداگانه در نظر گرفته شده است. شکل (۸) تغییرات جریان فازهای یک موتور BLDC نمونه را با استفاده از این روش کنترلی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که جریان فازها دستخوش هیچ‌گونه اعوجاجی در لحظات کموتاسیون نمی‌شود [۱۳]. روش کنترل مستقیم گشتاور (DTC) از روش‌های جدید کنترل موتورهای القایی و PMSM است که طی دو دهه اخیر به‌خوبی توسعه داده شده است و توسط شرکت‌هایی از جمله ABB تجاری شده است [۱۴ و ۱۵]. از مزایای روش DTC می‌توان به ساختار ساده‌تر، کنترل مستقیم شار و گشتاور و حذف حلقه‌های کنترل جریان، عملکرد دینامیکی بالا و پاسخ سریع، کلیدزنی سوئیچ‌ها به روش SVM اشاره کرد. اگرچه این روش در ابتدا برای موتورهای سینوسی بیان شد، جذابیت‌ها و سادگی پیاده‌سازی این روش سبب شد تا برای موتورهای BLDC نیز به‌کار رود [۱۶ و ۱۷].



شکل (۷): درایو موتور BLDC به روش کنترل مستقیم جریان فازها



شکل (۸): تغییرات جریان در روش کنترل مستقیم جریان فازها



شکل (۹): درایو موتور BLDC به روش کنترل مستقیم گشتاور (DTC)

جدول (۱): جدول سوئیچینگ روش DTC برای موتور BLDC

| علامت ΔT ناحیه (θ_e) | + | - |
|--|-----------------|----------------|
| | ۱ (۳۰-۳۳۰ درجه) | V_2 (001001) |
| ۲ (۹۰-۳۰ درجه) | V_3 (011000) | V_6 (100100) |
| ۳ (۱۵۰-۹۰ درجه) | V_4 (010010) | V_1 (100001) |
| ۴ (۲۱۰-۱۵۰ درجه) | V_5 (000110) | V_2 (001001) |
| ۵ (۲۷۰-۲۱۰ درجه) | V_6 (100100) | V_3 (011000) |
| ۶ (۳۳۰-۲۷۰ درجه) | V_1 (100001) | V_4 (010010) |

استفاده از روش‌های جهت‌دهی شار (FOC) یا کنترل‌برداری در کنترل موتورهای BLDC آنچنان کاربردی نداشته و این روش‌ها ضمن دارا بودن حجم محاسبات زیاد، برتری خاصی نیز ندارند [۲۳ و ۲۴].

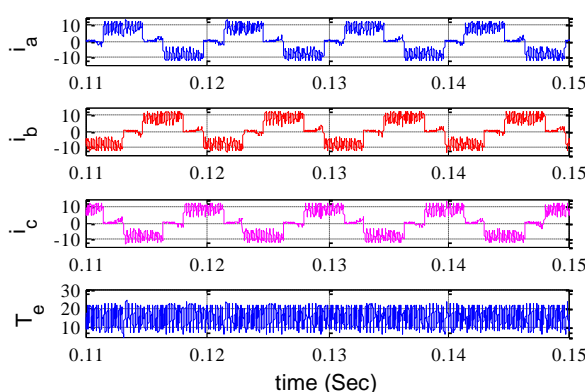
۶. کنترل بدون حسگر موتور BLDC

یکی از دیگر مزایای موتورهای BLDC نسبت موتورهای القایی و PMSM آن است که برای کنترل این موتور، تنها دانستن شش نقطه در یک ۳۶۰ الکتریکی کافی است. این شش نقطه با استفاده از سه حسگر موقعیت اثر حال قابل تعیین هستند. اگرچه این حسگرها قیمت ناچیزی دارند و نسبت به سایر حسگرهای موقعیت نظیر کدکننده‌های نوری^۴ و تحلیل‌گرها^۵ به مراتب ساده‌ترند، اما باید به این نکته توجه داشت که حسگرهای اثر حال در داخل موتور و در مجاورت آهن‌ربای دائم روتور قرار دارند و اگر این حسگرها دچار خرابی یا مشکل شوند، موتور باید توسط شخص متخصص و مجرب تعمیر شود. درحالی‌که حسگرهایی نظیر کدکننده نوری به محور موتور کوپل شده و در صورتی خراب به راحتی قابل تعویض و تعمیرند و نیازی به بازکردن خود موتور نیست.

علاوه بر آن، استفاده از حسگرهای موقعیت و سرعت باعث افزایش هزینه و پیچیدگی ساختار درایو می‌شوند. شرایط محیطی نامطلوب، دمای بالا و وجود ارتعاشات مکانیکی با توجه به حساسیت حسگرهای موقعیت، می‌توانند سبب بروز مشکل شوند. حسگرهای موقعیت اثر حال که عموماً در موتورهای BLDC به کار می‌روند، عملاً در دمای بالاتر از ۷۰ درجه سانتی‌گراد دچار خطا می‌شوند. با توجه به مسائل فوق و همچنین برای بالابردن قابلیت اطمینان درایو و عملکرد صحیح آن در صورت بروز خطا در حسگرها، سبب شده است تا استفاده از روش‌های کنترل بدون حسگر موقعیت برای موتورهای BLDC، مورد توجه محققان قرار گیرد [۲۵] و حتی بعضی از روش‌ها به صورت مدار مجتمع همراه با روش کنترلی موتور یکپارچه شوند [۲۶].

به دلیل شکل موج غیرسینوسی ولتاژ ضدمحرکه و جریان فازهای موتور BLDC، به‌کارگیری مستقیم تبدیل‌های دوماحوری و استفاده از فازورهای فضایی پیچیده است و همراه با خطاست. ازاین‌رو بیشتر روش‌های تخمین موقعیت روتور که برای موتورهای با تغذیه سینوسی به‌کار گرفته می‌شوند، برای موتور BLDC کاربرد نخواهند داشت.

تخمین گشتاور با استفاده از رابطه گشتاور و اندازه‌گیری پارامترهای ولتاژ و جریان موتور انجام می‌شود. همچنین از روش‌های کلاسیک نیز می‌توان گشتاور و موقعیت را تخمین زد [۱۸ و ۲۰]. شکل (۱۰) تغییرات جریان و گشتاور موتور BLDC به روش DTC را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که ضربان گشتاور و جریان نسبت به دو روش قبلی بسیار بیشتر است. تحقیقات زیادی در زمینه بهبود روش DTC و رفع مشکلات آن برای موتورهای مختلف انجام شده است [۲۱]. یکی از مشکلات روش DTC فرکانس سوئیچینگ متغیر و نسبتاً بالا در مقایسه با سوئیچ‌زنی به روش PWM است. تثبیت فرکانس سوئیچینگ در روش DTC یک از اهداف تحقیقات انجام شده بوده است. استفاده از ایده کنترل تک‌سیکلی (OCC)^۲ یکی از این روش‌هاست که ضمن حفظ سادگی کنترل‌کننده هیستریزس، تنها از یک حسگر جریان برای کنترل جریان فازها استفاده می‌کند و دارای فرکانس سوئیچینگ ثابتی هست [۲۲].



شکل (۱۰): تغییرات گشتاور و جریان موتور BLDC به روش DTC

3. Field Oriented Control
4. Encoder
5. Resolver

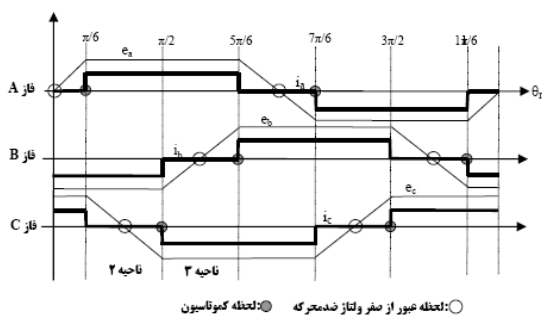
1. Pulse Width Modulation
2. One Cycle Control

مروری بر روش‌های تحلیل، کنترل، پیاده‌سازی و ارزیابی محرکه‌های... ۳۱

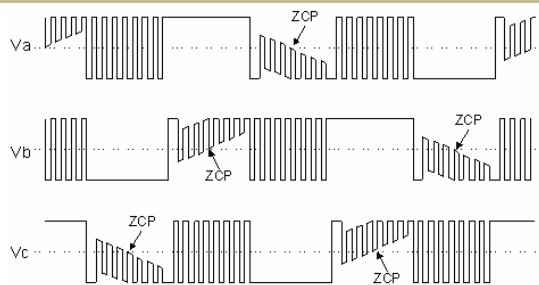
متعادل برای ایجاد نقطه ستاره مجازی و اندازه‌گیری ولتاژ ترمینال‌ها استفاده می‌شود. شکل (۱۲) اندازه‌گیری ولتاژهای ترمینال موتور BLDC را وقتی از روش ولتاژ PWM برای کنترل جریان موتور استفاده می‌شود، نمایش می‌دهد. در این شکل، از روش PWM نرم استفاده شده است [۲۷].

برای حذف اثرات سوئیچینگ فرکانس بالا از ولتاژ ترمینال فاز خاموش که از طریق ولتاژ نقطه ستاره موتور به ولتاژ ترمینال فاز خاموش منتقل می‌شود، ولتاژ ترمینال فاز خاموش ابتدا از یک فیلتر پایین‌گذر عبور داده شده و سپس نقطه گذر از صفر آن تعیین می‌شود [۳۳]. مشکلات عمده این روش عبارت‌اند از:

۱. کاهش دامنه ولتاژ ضدمحرکه در سرعت‌های پایین.
۲. وجود نویزهای ولتاژ فرکانس بالا ناشی از سوئیچینگ.
۳. خطای تأخیر ناشی از فیلتر کردن ولتاژ.
۴. خطاهای ناشی از ایجاد جابجایی ۳۰ درجه به علت وابستگی به سرعت.



شکل (۱۱): نقاط ZCP ولتاژهای ضدمحرکه و لحظات کموتاسیون



شکل (۱۲): تعیین نقطه گذر از صفر (ZCP) ولتاژ ضدمحرکه

برای حل مشکلات فوق، روش‌های مختلفی ارائه شده‌اند. مرجع [۲۸] ولتاژ فاز خاموش را در حالت صفر بودن فرمان PWM سوئیچ تحت کنترل اندازه‌گیری می‌کند. مرجع [۳۹] با اصلاح روش ارائه‌شده، اندازه‌گیری را در دو حالت خاموش و روشن بودن سوئیچ تحت کنترل PWM انجام می‌دهد. برای جبران دقیق تأخیر فاز ناشی از فیلترکردن، مرجع [۴۰] از جابجاکننده فاز مستقل از سرعت استفاده کرده است. در

روش‌های تخمین موقعیت در موتور BLDC را می‌توان به سه دسته اصلی ذیل تقسیم‌بندی کرد [۲۷]:

۱. روش‌های بر مبنای ولتاژ ضدمحرکه [۲۷ و ۲۸]
 ۲. استفاده از تغییرات اندوکتانس و شار استاتور [۲۹ و ۳۰]
 ۳. استفاده از تئوری‌های کنترلی [۳۱ و ۳۲]
- به دلیل سادگی روش‌های دسته اول و قابل اعمال بودن آن برای تمام موتورهای BLDC، اغلب روش‌های کنترل بدون حسگر موتورهای BLDC بر مبنای ولتاژ ضدمحرکه طراحی شده‌اند. در این بخش، روش‌های این دسته معرفی و پرکاربردترین آن‌ها توضیح داده می‌شوند و درباره سایر روش‌ها فقط به معرفی و ذکر ویژگی‌ها اکتفا می‌شود. روش‌هایی بر مبنای ولتاژ ضدمحرکه، خود انواع مختلفی دارند که عبارت‌اند از: اندازه‌گیری ولتاژ ترمینال‌ها [۳۳ و ۳۴]، استفاده از هارمونیک سوم ولتاژ ضدمحرکه [۳۵]، اندازه‌گیری جریان دیودهای مکمل سوئیچ‌ها [۳۶]، انتگرال‌گیری از ولتاژ ضدمحرکه فازها [۳۷] و استفاده از توابع مناسبی از ولتاژهای ضدمحرکه [۳۸]. از میان روش‌های فوق، اندازه‌گیری ولتاژ ترمینال‌ها بیش از همه مورد توجه قرار گرفته است که به خاطر کاربردی بودن آن به تفصیل بیان می‌شود.

در عملکرد عادی موتورهای BLDC در هر فاز، هارمونیک اصلی ولتاژ ضدمحرکه و جریان، فاز برابر دارند. مطابق با شکل (۱۱) می‌توان زمان‌های کموتاسیون جریان را با دانستن نقاط عبور از صفر (ZCP) ولتاژ ضدمحرکه و در نظر گرفتن تأخیر فاز ۳۰ درجه الکتریکی به دست آورد. برای تعیین نقطه گذر از صفر ولتاژ ضدمحرکه فازها، با توجه به این نکته که در موتور BLDC سه فاز برخلاف موتورهای القایی و سنکرون، در غیر از لحظات کموتاسیون، جریان فقط از دو فاز موتور عبور می‌کند و جریان فاز سوم (فاز خاموش) صفر است، می‌توان با اندازه‌گیری ولتاژ ترمینال استاتور نسبت به نقطه ستاره موتور، نقطه گذر از صفر ولتاژ ضدمحرکه فاز خاموش را تعیین کرد [۲۷ و ۲۸]. برای مثال، به فرض قرار داشتن موتور در ناحیه دوم کاری که جریان فاز a مثبت، جریان فاز b منفی و جریان فاز c صفر است و برای تغییر ناحیه کاری به ناحیه سوم، می‌توان ولتاژ ترمینال فاز c (فاز خاموش) نسبت به نقطه ستاره را اندازه‌گیری کرد. زمانی که این ولتاژ صفر شود، ولتاژ ضدمحرکه فاز c از سطح صفر ولت عبور کرده است. با دانستن سرعت موتور و ایجاد زمان تأخیر معادل با ۳۰ درجه الکتریکی، لحظه کموتاسیون جریان به دست می‌آید.

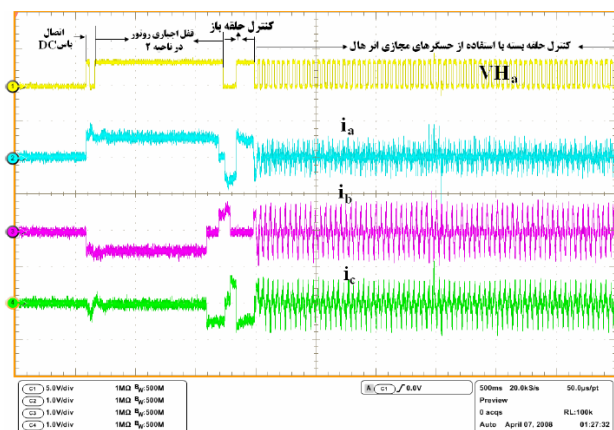
در حالت عملی، به دلیل در دسترس نبودن ولتاژ نقطه ستاره اغلب موتورهای BLDC موجود در بازار، از یک اتصال ستاره مقاومتی

1. Zero Crossing Point

یا رلوکتانس فاصله هوایی به قدر کافی تغییر می‌کند، به راحتی امکان‌پذیر است [۴۵]. اما در موتورهای BLDC که تغییرات رلوکتانس فاصله هوایی ناچیزی دارند، تخمین موقعیت اولیه رتور امکان‌پذیر نیست.

در راه‌اندازی موتور BLDC در هنگام به‌کارگیری روش‌های بدون حسگر، راه‌حل مناسب آن است که رتور در یک موقعیت دانسته‌شده قرار گرفته و سپس راه‌اندازی موتور از این موقعیت اولیه معلوم انجام شود. در این روش با تحریک دو فاز دلخواه استاتور، رتور در یک نقطه تعادل معلوم قرار می‌گیرد. پس از آن یک میدان دوار در جهت موردنظر با تحریک متناوب فازهای استاتور و با فرکانسی مناسب ایجاد می‌شود. مقدار و مدت زمان این تحریک به نحوی است که رتور بتواند با غلبه بر اصطکاک و اینرسی خود شتاب گرفته و به یک سرعت حداقلی برای اعمال روش کنترل بدون حسگر برسد. سپس با استفاده از سیگنال‌های موقعیت تخمین‌زده شده، روش کنترل بدون حسگر اعمال می‌شود. این روش راه‌اندازی موتور BLDC، روش حلقه باز نام داشته و شامل سه مرحله ذیل است [۴۶]: ۱. جهت‌دهی رتور در یک موقعیت معلوم؛ ۲. تحریک متوالی فازهای موتور با فرکانس مناسب؛ ۳. رسیدن به سرعت حداقلی و اعمال روش کنترل بدون حسگر.

در حالت جهت‌دهی اولیه رتور، مقدار جریان مرجع باید به درستی انتخاب شود تا از نوسانی شدن موتور حول نقطه تعادل جلوگیری شود. مدت زمان اعمال جریان در هنگام جهت‌دهی رتور و فرکانس میدان دوار در حالت شتاب‌گیری، باید به درستی انتخاب شوند. یکی از عیب‌های اصلی روش راه‌اندازی حلقه باز آن است که در هنگام جهت‌دهی رتور، ممکن است رتور در جهت عکس بچرخد؛ البته می‌توان نشان داد مقدار این چرخش کمتر از ۱۸۰ درجه الکتریکی است. اگر در یک کاربرد، حتی این مقدار ناچیز چرخش در جهت عکس نیز مجاز نباشد، باید راهکار دیگری انتخاب شود. شکل (۱۳)، نتایج واقعی راه‌اندازی و تغییرات جریان فازهای یک موتور BLDC را نشان می‌دهد [۳ و ۳۳].



شکل (۱۳): راه‌اندازی موتور BLDC به روش کنترل حلقه‌باز [۳]

[۳۴] بدون استفاده از بازسازی و ساختن ولتاژ نقطه ستاره موتور، به‌طور مستقیم نقاط عبور از صفر ولتاژهای ضدمحرکه فازها را بدون نیاز به فیلتر کردن تعیین نموده است. مرجع [۴۱] تنها با اندازه‌گیری ولتاژ ترمینال یک فاز نسبت به نقطه وسط باس DC، دو نقطه عبور از صفر ولتاژ ضدمحرکه یک فاز را بدون استفاده از مدار فیلتر و برای تمام دوره‌های عملکرد سوئیچ‌های قدرت (۰٪ تا ۱۰۰٪) تعیین کرده است و نقاط گذر از صفر ولتاژ ضدمحرکه فازهای دیگر را به‌صورت تقریبی و با میان‌یابی به دست آورده است. استفاده از ولتاژهای خط به خط ترمینال‌ها نیز نیاز به ایجاد نقطه ستاره و همچنین جابجایی فاز ۳۰ درجه‌ای را مرتفع می‌کند که ساختار مدار را بسیار ساده می‌کند [۳۳] و [۳۴]. سایر روش‌های دیگر اندازه‌گیری بر مبنای ولتاژ ضدمحرکه، منابع خطای بیشتری نسبت به روش اندازه‌گیری ولتاژ ترمینال داشته یا اینکه به مدارات اندازه‌گیری بیشتری نیازمند هستند.

دسته دوم روش‌های بدون حسگر از تغییرات اندوکتانس استاتور برای تخمین موقعیت رتور استفاده می‌کنند. این روش برای موتورهای کاربرد دارد که اندوکتانس‌های مختلف در دو راستای d و q دارند. همچنین از این روش می‌توان برای تخمین موقعیت رتور در حالت توقف موتور نیز استفاده کرد [۴۲]. از شار پیوندی استاتور که با استفاده از ولتاژها و جریان‌های اندازه‌گیری استاتور قابل محاسبه است، نیز می‌توان موقعیت رتور را تخمین زد [۲۹ و ۳۰]. تعیین موقعیت اولیه رتور در این روش ضروری است.

جذابیت و قابلیت روش‌ها و تئوری‌های کنترلی که درباره موتورهای PMSM به کار رفته‌اند، سبب شده است که برخی از این روش‌ها در تخمین موقعیت موتورهای BLDC مورد استفاده قرار گیرند. این روش‌ها که بر مبنای مدل ریاضی موتور بوده و به اطلاعات دقیقی از پارامترهای موتور نیازمند هستند، عبارت‌اند از: رویتگر لیونبرگر^۱ [۴۳]، رویتگر مودلفزشی^۲، فیلتر کالمن^۳ [۳۱]، تخمین‌گرهای فازی [۳۲] و شبکه‌های عصبی [۴۴]. عیب عمده اغلب این روش‌ها، حجم محاسبات بالا و وابستگی اغلب آن‌ها به پارامترهای مدل موتور است.

مسئله مهم دیگر در استفاده از روش‌های کنترل بدون حسگر، راه‌اندازی موتور است. موتور BLDC یک موتور خودراه‌انداز نیست و راه‌اندازی صحیح موتور و ایجاد گشتاور مناسب، مستلزم معلوم بودن موقعیت اولیه رتور است. از طرف دیگر، روش‌های کنترل بدون حسگر موقعیت نیز خودراه‌انداز نبوده و نیاز به دانستن موقعیت اولیه رتور دارند. تعیین موقعیت اولیه رتور در موتورهایی که با گردش رتور، اندوکتانس

1. Luenberger Observer
2. Sliding Mode Observer
3. Kalman Filter

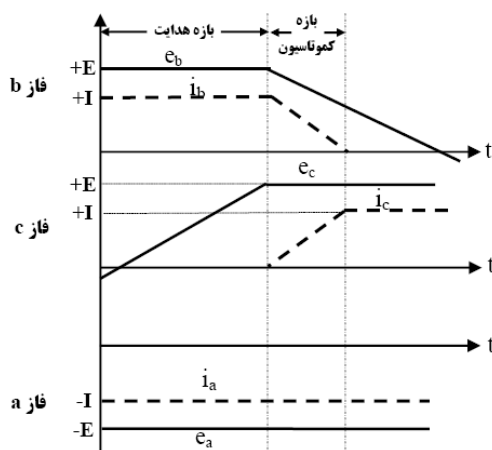
۷. ضربان گشتاور در موتور BLDC

در موتور BLDC به برخی نمونه‌های ارائه‌شده آن پرداخته می‌شود. روش کنترل مستقیم گشتاور یا DTC که در بخش ۵ به آن پرداخته شد، با کنترل لحظه‌ای و بی‌واسطه گشتاور، رفتار موتور را بهبود می‌بخشد. روش کنترل زاویه پیش‌فازی نیز با جبران‌سازی اثر تأخیر فاز ناشی از اندوکتانس استاتور، عمل کموتاسیون را اصلاح می‌کند. با توجه به آنکه این روش بیشتر در سرعت‌های بالا و در ناحیه توان ثابت مورد استفاده قرار می‌گیرد، در بخش بعد به آن پرداخته می‌شود. در روش کنترل مؤلفه‌های هارمونیک، از ایده دستگاه دومحوری qd0 استفاده می‌شود و در آن هارمونیک‌های جریان موتور در دستگاه‌های مختلف qd کنترل و نتایج با یکدیگر ترکیب می‌شوند. اغلب روش‌های این دسته دارای حجم محاسباتی بالا بوده و به تغییر پارامترهای موتور حساس‌اند.

۱-۷. تحلیل عمل کموتاسیون در موتور BLDC

در این بخش، نشان داده می‌شود که بدون استفاده از روش کنترل جریان مناسب، در اغلب شرایط کاری موتور، ضربان گشتاور وجود دارد. شکل (۱۴) حالت کموتاسیونی (ایده آل) را نشان می‌دهد که در آن، شیب افزایش و کاهش جریان دو فاز دخیل در کموتاسیون برابرند. کموتاسیون جریان در ناحیه ششم کاری موتور بوده که طی آن تغییر جریان در سطح مثبت و از فاز b به فاز c موتور است و جریان فاز a در سطح منفی و بدون تغییر باقی می‌ماند. با اندکی محاسبه می‌توان نشان داد که گشتاور الکترومغناطیسی لحظه‌ای موتور در بازه کموتاسیون، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$T_e(t) = \frac{2E \cdot i_a}{\omega_r} + \frac{6E \cdot i_a}{\pi} \left(\frac{t^2}{t_c} - t \right) = T_i + T_c \quad (۴)$$



شکل (۱۴): حالت ایده‌آل کموتاسیون جریان فازها در موتور BLDC

گشتاور لحظه‌ای $T_e(t)$ شامل دو مؤلفه است: T_i گشتاور ناشی از جریان فاز a است و در صورتی که جریان i_a دارای ضربان باشد، T_i نیز

علی‌رغم برتری‌های موتور BLDC نسبت به سایر موتورها، گشتاور تولیدی این موتور دارای ضربان بیشتری نسبت به موتور PMSM است. وجود ضربان عملاً باعث ایجاد نویز و لرزش و محدودیت کار موتور در سرعت‌های بالا می‌شود. وجود ضربان گشتاور در برخی کاربردها نظیر سیستم‌های کنترل وضعیت و رباتیک که نیازمند داشتن گشتاور نرم و بدون لرزش و نویزهای صوتی هستند، غیرقابل قبول بوده و لذا محققان به روش‌های مختلف درصدد کاهش ضربان گشتاور موتور BLDC برآمده‌اند. این موتورها به‌طور ذاتی، سه منبع اصلی ضربان گشتاور دارند [۴۷] که عبارت‌اند از: اثر دندانه‌های شیارهای استاتور، رلوکتانس متغیر روتور و کموتاسیون جریان. روش‌های کاهش ضربان گشتاور درایو موتور BLDC را می‌توان به دو دسته روش‌های مبنی بر طراحی موتور و مبنی بر طراحی سیستم کنترل تقسیم‌بندی کرد.

روش‌های مبنی بر طراحی موتور، معمولاً برای بهبود اثر شیارهای استاتور (یا گشتاور کاگینگ^۱) و رلوکتانس متغیر موتور ارائه شده‌اند. استفاده از سیم‌بندی با شیار بسته، مورب نمودن شیارهای استاتور، شکل‌دهی مناسب دندانه‌های استاتور روش‌هایی هستند که می‌توان ضمن کاهش دامنه گشتاور کاگینگ، فرکانس ضربان گشتاور را افزایش داد [۴۸].

در موتور BLDC به‌دلیل وجود اندوکتانس استاتور، جابجایی جریان (کموتاسیون) بین فازها به‌صورت ایدئال انجام نمی‌گیرد و جریان فازها به جای آنکه به‌صورت کاملاً مربعی تغییر کنند، همراه با تأخیر و به‌صورت نمایی به مقادیر نهایی خود می‌رسند. در نتیجه، گشتاور الکترومغناطیسی تولیدشده همراه با ضربان خواهد بود [۱۳].

ضربان گشتاور ناشی از کموتاسیون، عمده‌ترین منبع ایجاد ضربان گشتاور در موتور BLDC است و اغلب تحقیقات انجام‌شده در راستای کاهش این نوع ضربان بوده است. روش‌های مختلف کاهش ضربان گشتاور ناشی از کموتاسیون بر مبنای طراحی سیستم کنترل را می‌توان به طور کلی، در چهار دسته تقسیم‌بندی کرد:

۱. شکل‌دهی مناسب جریان^۲

۲. کنترل مستقیم گشتاور [۴۹]

۳. کنترل زاویه پیش‌فازی جریان

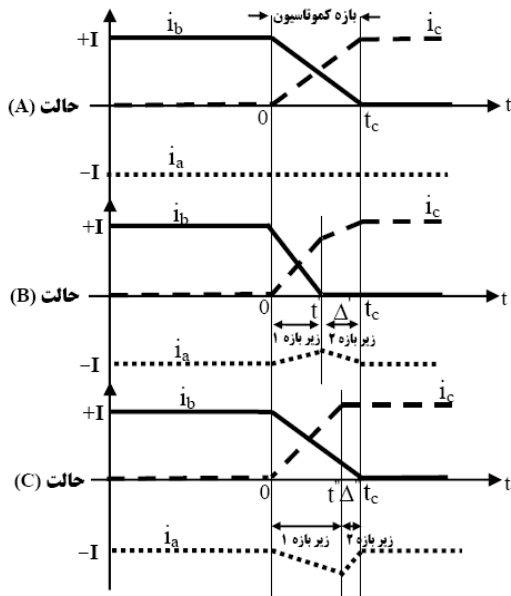
۴. کنترل مؤلفه‌های هارمونیک جریان [۵۰]

شکل‌دهی مناسب جریان یکی از روش‌های ساده و کاربردی برای بهبود عمل کموتاسیون است که پس از مطالعه تحلیلی عمل کموتاسیون

1. Cogging Torque
2. Current Shaping

موتور BLDC که موتور حتی در شرایط بی‌باری ایده آل نمی‌تواند از آن فراتر رود، سرعتی است که در آن رابطه زیر برقرار است [۱۳]:

$$V_{dc} = 2E \quad (9)$$



شکل (۱۵): کموتاسیون جریان در شرایط کاری مختلف: حالت ایده آل (A) سرعت بالا (B) سرعت پایین

۲-۷. روش‌های شکل‌دهی مناسب جریان

مراجع مختلف، روش‌های گوناگونی را برای شکل‌دهی جریان فازها در طی بازه کموتاسیون با هدف حذف ضربان گشتاور پیشنهاد کرده‌اند. برخی مراجع سعی نموده‌اند تا از دخالت دیوده‌های هرزه‌گرد در عمل کموتاسیون جلوگیری کرده و به عبارتی، رفتار جریانی دو فاز دخیل در کموتاسیون را یکسان کنند [۵۲]. تفاوت راه‌حل‌های ارائه‌شده در تعداد حسگرهای ولتاژ و جریان مورد استفاده در درایو و همچنین پیچیدگی روابط مورد استفاده برای کلیدزنی سوئیچ‌ها است. اغلب روش‌های فوق به یک رابطه تحلیلی برای دوره عملکرد سوئیچ‌ها می‌رسند که وابسته به پارامترهای موتور و درایو است. راه حل ساده دیگری که به روابط پیچیده تحلیلی نیازی ندارد، استفاده از کنترل مستقیم جریان فازهاست. توضیح این روش در بخش (۵) مقاله بیان شده است و بلوک دیاگرام و نتایج شبیه‌سازی این روش در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده‌اند. این روش در عمل، نیازمند به استفاده از حداقل دو حسگر جریان است. در شکل (۱۶)، تغییرات جریان یک موتور BLDC با دو روش کنترل جریان لینک dc و کنترل مستقیم جریان فازها را در بازه کموتاسیون مقایسه می‌کند. روش کنترل مستقیم

حاوی ضربان خواهد بود. T_e گشتاور ناشی از کموتاسیون است که رابطه غیرخطی با زمان داشته و فقط به شرط $t = t_c$ برابر با صفر می‌شود. به عبارت دیگر، اگر جریان هر دو فاز دخیل در کموتاسیون، دقیقاً در طی زمان t_c ثانیه به مقادیر نهایی خود برسند، کموتاسیون جریان ایدئال بوده و هیچ‌گونه ضربان گشتاوری وجود نخواهد داشت. در غیر این صورت، ضربان گشتاور یا به صورت بالازدگی یا پایین‌زدگی وجود خواهد داشت [۱۳].

شکل (۱۵) حالت‌های مختلف عمل کموتاسیون بین دو فاز b و c را نشان می‌دهد. حالت ایده آل (A) برای هر درایو موتور فقط در یک سرعت خاص اتفاق می‌افتد که این سرعت وابسته به نوع موتور و مقدار ولتاژ باس DC اینورتر است. در حالت (A)، تغییر جریان بین دو فاز b و c به‌طور مستقیم و از طریق سوئیچ‌ها انجام می‌شود و هیچ‌کدام از دیوده‌های هرزه‌گرد اینورتر، جریان را هدایت نمی‌کنند. در سایر سرعت‌ها کموتاسیون جریان مطابق حالت (B) یا (C) است که در آن، تغییر جریان از فاز b به فاز c مستقیماً از طریق سوئیچ‌ها انجام نمی‌شود، بلکه در طی بازه کموتاسیون، جریان برای لحظاتی از یک یا چند دیود هرزه‌گرد اینورتر نیز عبور می‌کند [۱۳ و ۵۱]. با نوشتن معادلات ولتاژ و جریان در هریک از شرایط کاری فوق و حل آن‌ها، می‌توان اثبات کرد که حالت کموتاسیون ایده آل (A) زمانی اتفاق می‌افتد که رابطه زیر برقرار باشد:

$$V_{dc} = 4E \quad (5)$$

و در این حالت ضربان گشتاور موتور (ΔT_e) صفر بوده و زمان کموتاسیون هم برابر است با:

$$\Delta T_e = 0; \quad t_c = \frac{LI}{2E}; \quad \text{case A} \quad (6)$$

در غیر این صورت، اگر $V_{dc} < 4E$ باشد که متناظر با سرعت‌های بالاتر، گشتاور دچار فرورفتگی شده و خواهیم داشت:

$$\Delta T_e = \frac{V_{dc} - 4E}{2V_{dc} - 2E} \text{ (pu)}; \quad t_c = \frac{LI}{V_{dc} - 2E}; \quad \text{case B} \quad (7)$$

و اگر هم $V_{dc} > 4E$ باشد که متناظر با سرعت‌های پایین است، گشتاور دچار بالازدگی شده و خواهیم داشت:

$$\Delta T_e = \frac{V_{dc} - 4E}{V_{dc} + 2E} \text{ (pu)}; \quad t_c = \frac{3LI}{V_{dc} + 2E}; \quad \text{case C} \quad (8)$$

در روابط فوق، I جریان لینک dc و اندوکنانس L برابر $L_s - M$ هستند. ذکر این نکته ضروری است که با افزایش سرعت موتور BLDC مطابق رابطه (۷) زمان کموتاسیون t_c افزایش می‌یابد.

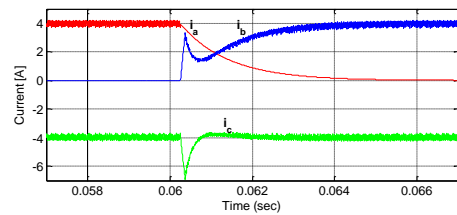
این بدان معناست که جریان فاز خاموش‌شونده دخیل در کموتاسیون، دیرتر به مقدار نهایی خود می‌رسد. حد نهایی سرعت

راه‌حل عملی برای رساندن سرعت موتور BLDC به بالاتر از سرعت نامی آن و کار در ناحیه توان ثابت، استفاده از روش کنترل زاویه پیش‌فازی (PAA) است. ایده اساسی این روش همان افزایش گشتاور موتور است. در حالت عادی، فرمان به یک سوئیچ برای جاری شدن جریان در فاز مربوط، وقتی اعمال می‌شود که ولتاژ ضدمحرکه آن فاز به مقدار نهایی خود رسیده باشد. حال اگر فرمان به سوئیچ کمی زودتر اعمال شود، مطابق رابطه (۲) که گشتاور برابر حاصل ضرب ولتاژ ضدمحرکه در جریان آن فاز است، افزایش می‌یابد. برای توجیه بهتر این موضوع بهتر است تا شکل موج‌های جریان و ولتاژ ضدمحرکه در موتور BLDC مجدداً بررسی شوند. شکل (۱۷) - الف) جریان و ولتاژ ضدمحرکه یک موتور BLDC را در حالت ایده آل نمایش می‌دهد. اما تأخیر فاز ناشی از اندوکتانس استاتور سبب می‌شود تا جریان فاز همراه با تأخیر و با ثابت زمانی مشخصی به مقدار نهایی‌اش برسد که در شکل (۱۷) - ب) نشان داده شده است. در سرعت‌های بالاتر، اثر تأخیر فاز ناشی از اندوکتانس استاتور بیشتر شده و جریان با تأخیر بیشتری به مقدار نهایی‌اش می‌رسد و در نتیجه سبب کاهش بیشتر گشتاور متوسط موتور می‌شود (شکل (۱۷) - ج). برای افزایش متوسط گشتاور و غلبه بر تأخیر فاز اندوکتانس استاتور همان‌طور که در شکل (۱۷) - د) نشان داده شده است، اگر جریان زودتر از زمان معمول جاری شود (به اندازه زاویه θ_a)، حالت گذرای جریان زودتر سپری شده و گشتاور متوسط افزایش می‌یابد [۵۴].

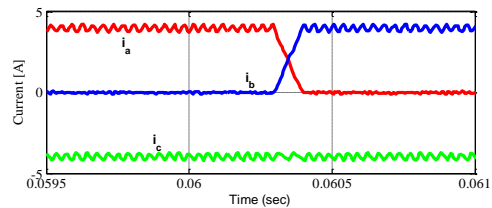
پیش‌فاز نمودن جریان نسبت به ولتاژ ضدمحرکه در این روش، سبب تغییر زاویه بین بردار نیروهای محرکه مغناطیسی روتور و استاتور شده و به دلیل عکس‌العمل آرمیچر، شار در فاصله هوایی کاهش می‌یابد. به عبارتی یک نیروی ضدمغناطیسی سبب مغناطیس‌زدایی از آهن‌ربای دائم روتور می‌شود. لذا مقدار زاویه پیش‌فازی می‌باید به نحوی مناسب انتخاب شود تا مغناطیس‌زدایی در حد مقادیر توصیه‌شده توسط سازنده آهن‌ربای دائم روتور باشد [۵۴]. روش PAA علی‌رغم سادگی ایده‌اش دارای این نقص اساسی است که یک رابطه عمومی تحلیلی دقیق بین سرعت و مقدار زاویه پیش‌فازی متناظر با آن وجود ندارد و اغلب از روش‌های عددی و بهینه‌سازی استفاده می‌شود. درحالی‌که برای موتورهای ac سینوسی، روش معمول کاهش شار دقیقاً متناسب با عکس سرعت است [۵۵]. چند رابطه تحلیلی پیشنهادشده برای زاویه پیش‌فازی عبارت‌اند از [۵۸-۵۶]:

$$\theta_a = \tan^{-1} \left(\frac{2\pi \times \omega L}{60 R} \right) \quad (10)$$

جریان فازها سبب شده است تا تغییرات جریان دو فاز دخیل در کموتاسیون همزمان صورت گیرد.



الف) روش کنترل جریان لینک dc



ب) روش کنترل مستقیم جریان فازها

شکل (۱۶): مقایسه پاسخ‌های جریانی دو روش پرکاربرد کنترل موتور BLDC در طی بازه کموتاسیون

۸. کنترل موتور BLDC در ناحیه توان ثابت

استفاده از موتورهای BLDC به دلیل داشتن مزایای فراوان در کاربردهای تراکشن نیز افزایش یافته است. از طرف دیگر، موتور مورد استفاده در کاربردهای تراکشن نظیر خودروهای هیبرید برقی، باید قابلیت کار در بازه وسیعی از ناحیه بالای سرعت نامی موتور را دارا بوده و به عبارتی، ناحیه توان ثابت وسیعی داشته باشد [۵۳]. روش‌های کنترل موتور در ناحیه توان ثابت برای موتورهای DC، القایی و سنکرون، به خوبی شناخته شده‌اند و در عمل نیز به کار گرفته می‌شوند. برای افزایش سرعت، گشتاور موتور باید به طور لحظه‌ای افزایش یابد که در تمامی این موتورها با توجه به محدود بودن ولتاژ موتور، شار موتور کاهش داده می‌شود. البته در موتور PMSM، کاهش شار با افزایش مؤلفه d جریان استاتور (i_{ds}) حاصل می‌شود. مقدار کاهش شار در تمامی انواع موتورهای فوق‌الذکر متناسب با عکس سرعت است؛ یعنی برای رسیدن به دو برابر سرعت نامی، شار موتور باید نصف شود. اما تغذیه و شکل موج‌های جریان در موتور BLDC دوزنقه‌ای بوده و همانند موتورهای القایی و PMSM نمی‌توان شار را کاهش داد. البته برخی محققان ایده استفاده از دستگاه‌های $qd0$ هارمونیک برای کنترل موتور BLDC در ناحیه توان ثابت و اعمال روش موتورهای با تغذیه سینوسی را مطرح کرده‌اند که دارای پیچیدگی و حجم محاسبات زیادی هستند [۲۴].

- درایور سوئیچ (بسته به نوع سوئیچ مورد استفاده)
- پل دیودی و خازن (ایجاد ولتاژ ثابت در لینک dc)
- منابع تغذیه ایزوله برای درایورهای سوئیچها

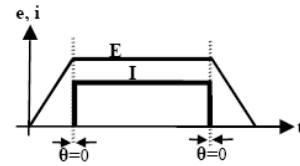
خوشبختانه با توجه به سادگی روش‌های کنترل موتور BLDC اغلب پردازنده‌ها از میکروکنترلرهای ارزان قیمت نظیر AVR گرفته تا پردازنده‌های دیجیتالی سیگنال سریع یا DSPها قابلیت پیاده‌سازی عملیات کنترلی حتی روش‌های بدون حسگر، روش‌های کاهش ضریب گشتاور و کار در ناحیه توان ثابت را دارا هستند. از این رو اغلب سازندگان پردازنده‌ها، برای معرفی محصول‌هایشان، درایو موتور BLDC با پردازنده ساخت خود را پیاده‌سازی کرده و کل سخت‌افزار و کدهای برنامه‌نویسی را در اختیار عموم قرار داده‌اند. شرکت تگزاس اینسترومنت، چندین پیاده‌سازی با DSPهای سری 2xxx خود را منتشر کرده است [۵۹ و ۶۰]. همچنین شرکت میکروچیپ، میکروهای سریع خود با نام dsPIC را برای این کار معرفی کرده است [۶۱]. شرکت Atmel چندین تراشه برای کنترل مختص موتور BLDC با حسگر و بدون حسگر طراحی و ساخته است [۲۶]. شرکت موتورولا هم با DSP این کار را انجام داده است [۶۲]. برای آشنایی با پیاده‌سازی توسط سایر میکروکنترلرها به مراجع [۶۳ و ۶۴] رجوع شود.

در خصوص استفاده از حسگر جریان، علی‌رغم اینکه چندین مرجع، کنترل موتور BLDC را بدون استفاده از حسگر جریان پیشنهاد کرده‌اند، اما برای کاربردهای صنعتی جهت بالابردن قابلیت اطمینان و حفاظت موتور، استفاده از یک حسگر جریان حتماً توصیه می‌شود. تعداد حسگرهای جریان بسته به نوع روش کنترلی می‌تواند به دو یا سه افزایش یابد. حسگر جریان می‌تواند از نوع اثرهال یا مقاومتی باشد. حسگرهای جریان اثرهال هم در بازه وسیعی خطی بوده و هم اینکه ایزولاسیون بین مدار کنترل و قدرت (جدا بودن زمین‌های طرف سیگنال و قدرت) را انجام می‌دهند.

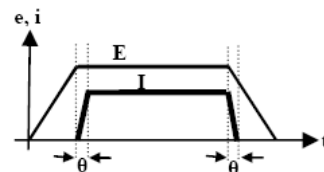
در درایو متعارف موتور BLDC برای کنترل سرعت موتور نیازی به استفاده از حسگر ولتاژ نبوده و استفاده از آن در درایو صرفاً برای حفاظت از خازن‌های لینک dc است؛ البته در صورت استفاده از روش‌های کنترل بدون حسگر، بسته به نوع روش حداقل یک حسگر ولتاژ مورد نیاز است. حسگر ولتاژ نیز می‌تواند از نوع اثرهال باشد یا توسط مقسم‌های مقاومتی و مدارات اپتوکوپلری پیاده‌سازی شود. سوئیچ‌های به‌کاررفته در درایو موتور BLDC اغلب از نوع IGBT یا ماسفت قدرت بوده که در درایوهای ارزان قیمت، استفاده از ماسفت‌ها با توجه به قیمت پایین‌ترشان بیشتر است. امروزه در بازار مازول‌های شش‌تایی ماسفت‌های قدرت و IGBT در دسترس بوده که کار با آنها

$$\theta_a = \tan^{-1} \left(\frac{\omega LI}{K_e \omega + RI} \right) \quad (11)$$

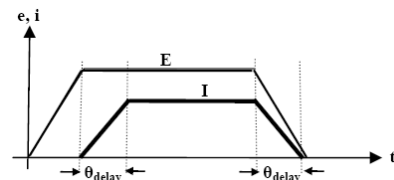
$$\theta_a = \frac{3\omega LI}{2V_{dc} - 3E} \quad (12)$$



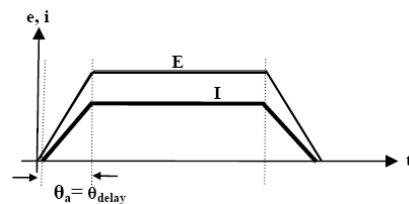
الف. حالت ایده‌آل



ب. حالت واقعی و در محدوده زیر سرعت نامی



ج. حالت واقعی و در سرعت‌های بالا



د. استفاده از روش کنترل زاویه پیش‌فازی

شکل (۱۷): ولتاژ ضد‌محرکه و جریان استاتور موتور BLDC

۹. پیاده‌سازی درایو موتور BLDC

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، مزیت اصلی موتور BLDC، سهولت در کنترل آن است؛ یعنی هم سخت‌افزار ساده‌تری برای کنترل نیاز دارد و هم برنامه‌های کنترلی آن به سادگی قابل پیاده‌سازی هستند. ملزومات پیاده‌سازی درایو موتور BLDC چیزی بیش از ملزومات درایو موتور DC نیست. سخت‌افزار موردنیاز برای پیاده‌سازی درایو موتور BLDC شامل موارد زیر هستند:

- پردازنده (میکروکنترلر یا DSP)
- حسگر جریان (حداقل یک عدد)
- حسگر ولتاژ (در صورت استفاده از روش‌های پیشرفته)
- سوئیچ‌ها یا مازول سوئیچ (IGBT یا MOSFET قدرت)

مؤثر و کم‌هزینه است. اینورترهای مختلفی برای کنترل موتور BLDC پیشنهاد شده‌اند که با توجه به قیمت پایین ادوات نیمه‌هادی در مقایسه با قیمت موتور و بهره‌گیری از میکروکنترلرهای جدید و پیشرفته و برای بهره‌برداری از ظرفیت کامل موتور، اینورتر شش سوئیچ بر تمام دیگر انواع اینورترها برتری دارد. درباره استفاده از روش‌های کنترل بدون حسگر در این موتورها، شاید جایگزینی سه حسگر موقعیت اثر حال ارزان‌قیمت با روش‌های بدون حسگر چندان صرفه اقتصادی نداشته باشد، اما استفاده از روش بدون حسگر در بعضی کاربردها و همچنین وجود این روش‌ها در کنار حسگرهای فیزیکی قابلیت اطمینان درایو را بالا می‌برد. روش‌های بر مبنای اندازه‌گیری ولتاژ ترمینال خط به خط بدون نیاز به جابجایی فاز هم به محاسبات کمتری نیازمند بوده و هم پیاده‌سازی ساده‌ای دارند. همچنین استفاده از روش ساده و ارزان‌قیمت کنترل مستقیم جریان فازها مؤثرترین و ساده‌ترین روش کاهش ضریب گشتاور ناشی از کموتاسیون در درایو موتور BLDC است. روش کنترل زاویه پیش‌فازی نیز برای کار موتور در سرعت‌های بالا و همچنین کاهش ضریب گشتاور، علی‌رغم مشکلات روش‌های موجود مناسب‌ترین روش بوده و به نظر می‌رسد جای کار بیشتر در این زمینه وجود دارد.

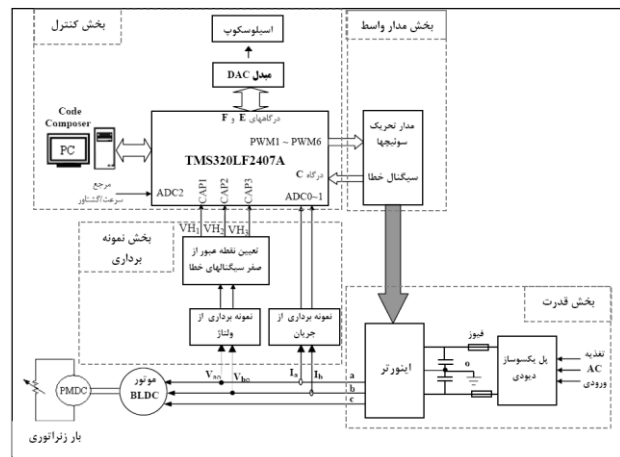
پیوست

جدول (۲): پارامترهای موتور BLDC مورد استفاده در شبیه‌سازی

| پارامتر | مقدار | پارامتر | مقدار |
|----------------------|-------------------------|----------------|-----------------------------------|
| سرعت نامی | $\omega_n = 1000$ [rpm] | توان نامی | $P_n = 1.5$ [kW] |
| اندوکتانس متقابل | $M = 0.1$ [mH] | اندوکتانس خودی | $L_s = 0.8$ [mH] |
| ثابت ولتاژ (K_e) | 0.15 [V/(rad/sec)] | مقاومت فاز | $R = 0.2$ [Ω] |
| ولتاژ لینک dc | $V_{dc} = 250$ [V] | تعداد قطب‌ها | $Z = 12$ |
| گشتاور بار نامی | $T_1 = 15$ [N.m] | ممان اینرسی | $J = 0.015$ [N.m/s ²] |

بسیار راحت‌تر از گذشته شده است. برای ایزولاسیون بین پردازنده و مدار قدرت و تقویت سیگنال‌های فرمان پردازنده، باید از درایورهای مناسب نیز استفاده کرد. برای ایجاد ولتاژ لینک dc می‌توان از پل دیودی تک‌فاز یا سه‌فاز همراه با خازن به‌عنوان فیلتر استفاده کرد یا باتری با سطح ولتاژ مناسب به‌کار گرفت. نکته مهم دیگر در پیاده‌سازی درایو، لزوم مجزا بودن زمین‌های گیت سه سوئیچ بالایی اینورتر از یکدیگر و همچنین از زمین مشترک سیگنال‌های گیت‌های سوئیچ‌های پایینی اینورتر است.

شکل (۱۸) یک نمونه طرح از پیاده‌سازی درایو بدون حسگر موتور BLDC با استفاده از پردازنده^۱ DSP سری TMS320LF2407A ساخت شرکت تگزاس اینسترومنت را نشان می‌دهد. استفاده از DSPها قابلیت‌های کنترلی فراوانی در اختیار برنامه‌نویس قرار می‌دهد. همچنین پروتکل‌های ارتباطی DSPها برای ارتباط با کاربر و مدارات جانبی دیگر، بسیار متنوع بوده و کار کنترل و مانیتورینگ درایو را بسیار آسان می‌کنند. در این مدار سیگنال‌های موقعیت اثرها به ورودی‌های CAP داده می‌شوند. فیدبک‌های جریان و فرمان سرعت نیز به مبدل A/D پردازنده وارد می‌شوند.



شکل (۱۸): شماتیک پیاده‌سازی درایو بدون حسگر موتور BLDC با

پردازنده DSP سری TMS320LF2407A [۶۵،۴]

۱۰. نتیجه‌گیری

در این مقاله، به معرفی و بررسی جنبه‌های مختلف موتورهای BLDC و بیان آخرین پیشرفت‌های صورت‌گرفته در این موتورها پرداخته شده است. برای کنترل سرعت موتور، روش کنترل مستقیم جریان فازها دارای بهترین عملکرد در بین تمامی روش‌های پیشنهادی است. استفاده از ایده روش کنترل تک‌سیکلی نیز برای موتور BLDC بسیار

- [1] Kusko, A., Peeran, S. M., "Definition of the Brushless Dc Motor", IEEE Industry Applications Conference (IAS), pp. 20-22, 1988.
- [2] Krishnan, R., "Permanent-Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives", John-Wiley Press, 2002.
- [۳] حلوایی نیاسر، ابوالفضل، طراحی و پیاده‌سازی درایو الکتریکی بدون حسگر موقعیت موتور BLDC با اینورتر کاهش ساختار یافته، رساله دکتری، دانشگاه علم و صنعت ایران، خرداد ۱۳۸۷.
- [4] Natarajan, S.P., Chellamuthu, C., Karki, B., Kumar, C.A., "Simulation and Performance Evaluation of Permanent Magnet Brushless DC Motor Using Saber Package", Workshop on Computers in Power Electronics (COMPEL), pp. 235-2420, 2000.
- [5] Lee, B.K., Ehsani, M., "A Simplified Functional Model for 3-Phase Voltage-Source Inverter Using Switching Function Concept", IEEE Industrial Electronics Conf., pp. 462-467, 1999.
- [6] Bonvin, F., Perriard, Y., "BLDC Motor Control in Multiple Dq Axes", IEE Power Electronics and Variable Speed Drives Conf., pp. 500-505, 2000.
- [7] Chapman, P.L., Sudhoff, S.D., Whitcomb, C.A., "Multiple Reference Frame Analysis of Non-Sinusoidal Brushless DC Drives", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 14, No. 3, pp. 440 – 446, Sept. 1999.
- [8] Halvaei Niasar, A., Moghbelli, H., Vahedi, A., "Modeling and Simulation Methods for Brushless DC Motor Drives", International Conf. on Modeling, Simulation and Applied Optimization (ICMSAO), pp.05-38/05-176, 2005.
- [9] Krishnan, R., Lee, Sh., "PM Brushless DC Motor Drive with a New Power-converter Topology", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 33, No. 4, pp. 973-982, July/August 1997.
- [10] Gopalarathnam, T., Toliyat, H. A., "A New Topology for Unipolar Brushless Dc Motor Drive with High Power Factor", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 18, No. 6, pp. 1397-1404, Nov. 2003.
- [11] Lee, B.S., Krishnan, R., "A Variable Voltage Converter Topology for Permanent-Magnet Brushless Dc Motor Drives Using Buck-Boost", IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), pp.689-694, 1999
- [12] Lee, B.K., Kim, T.H., Ehsani, M., "On The Feasibility Of Four-Switch Three-Phase BLDC Motor Drives for Low Cost Commercial Applications: Topology and Control", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 18, No. 1, pp. 164-172, January 2003.
- [13] Carlson, R., Mazenc, M.L., Dos, J.C., "Analysis of Torque Ripple Due to Phase Commutation in Brushless DC Machines", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 28, No. 3, pp. 632-638, May/June 1992.
- [14] ABB Technical Note: Motor Control with DTC, TD1 EN Rev. B, 2007
- [15] <http://www.abb.com/product/ap/seitp322/dc47706b5b2eabd4c125748a003ac770.aspx>
- [16] Ozturk, S.B., Toliyat, H.A., "Direct Torque and Indirect Flux Control of Brushless DC Motor", IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, Vol. 16, No. 2, pp. 351-360, 2011.
- [17] Ho, T.Y., Chen, M.S., Lin, J.S., Chen, P.H., "The Design and Implementation of the BLDC Motor Drive for a Washing Machine", IEEE Global Conf. on Consumer Electronics (GCCE), pp. 156-157, 2012.
- [18] Feyzi, M.R., Shafiei, M., Bahrami Kouhshahi, M., "Position Sensorless Direct Torque Control of Brushless DC Motor Drives Based on Sliding Mode Observer Using NSGA-II Algorithm Optimization", 2nd IEEE Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conf. (PEDSTC), pp. 151-156, 2011.
- [19] Arab Markadeh, G.R., Mousavi, S.I., Abazari, S., Kargar, A., "Position Sensorless Direct Torque Control of BLDC Motor", IEEE International Conf. on Industrial Technology, pp. 1-6, 2008.
- [20] Heidari, R., Markadeh, G A., Abazari, S., "Direct Torque and Indirect Flux Control of Brushless DC Motor with Non-Sinusoidal Back-EMF without Position Sensor", 19th Iranian Conf. on Electrical Engineering (ICEE), pp. 1-5, 2011.
- [21] Vas, P., "Sensorless Vector and Direct Torque Control", Oxford University Press, 1998.
- [22] Kai-Sheng Kan, K., Ying-Yu Tzou, T., "Adaptive Soft Starting Method with Current Limit Strategy for Sensorless BLDC Motors", IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), pp. 605-

- 610, 2012.
- [23] Grenier, D., Dessaint, L.A., "A Park-like Transformation for the Study and the Control of a Non-Sinusoidal Brushless DC Motor", IEEE Industrial Electronics, Control, and Instrumentation (IECON), pp. 837-843, 1995.
- [24] Lei, H., Toliyat, H.A., "BLDC Motor Full Speed Range Operation Including the Flux-Weakening Region", IEEE Industry Applications Conf., Vol. 1, pp. 618-624, 2003.
- [25] Acarnley, P.P., Watson, J.F., "Review of Position-Sensorless Operation of Brushless Permanent-Magnet Machines", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 53, No. 2, pp. 352-362, April 2006.
- [26] MC33035, NCV33035 Brushless DC Motor Controller, Semiconductor Components Industries, Publication order number: MC33035/D, April 2004, Rev. 7.
<http://onsemi.com>.
- [27] Kim, T., Lee, H.W., Ehsani, M., "Position Sensorless Brushless DC Motor/Generator Drives: Review and Future Trends", IET Electric Power Applications, Vol. 4, No. 2, pp. 557-564, April 2007.
- [28] Shao, J., Nolan, D., Hopkins, T., "A Novel Direct Back EMF Detection for Sensorless Brushless DC (BLDC) Motor Drives", IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Vol. 1, pp. 33-37, 2002.
- [29] Grainger, S., Allan, M., Westwood, T., Champaneri, R., "Sensorless Control of a Trapezoidal Brushless DC Motor Using the TMS320C25 DSP", Texas Instruments Report: SPRA323, ESIEE, Paris, September 1996.
- [30] Park, J.Y., Lieu, D.K., "Position Detection of Brushless DC Motor Using Inductance Bridge System", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 39, No. 5, pp. 3310-3312, September 2003.
- [31] Terzic, B., Jadric, M., "Design and Implementation of the Extended Kalman Filter for the Speed and Rotor Position Estimation of Brushless DC Motor", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 48, No. 6, pp. 1065-1073, Dec. 2001.
- [32] Park, B.G., Kim, T.S., Ryu, J.S., Hyun, D.S., "Fuzzy Back-EMF Observer for Improving Performance of Sensorless Brushless DC Motor Drive", Proceedings of the IEEE Applied Power Electronics Conf. and Exposition (APEC), 2006.
- [33] Halvaei Niasar, A., Vahedi, A., Moghbelli, H., "Sensorless Control of Four-Switch, Brushless DC Motor Drive without Phase Shifter", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 23, No. 6, pp. 3079-3087, November 2008.
- [34] Chen, C.H., Cheng, M.Y., "A New Cost Effective Sensorless Commutation Method for Brushless DC Motors Without Phase Shift Circuit and Neutral Voltage", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 22, No. 2, pp. 644-653, March 2007.
- [35] Shen, J.X., Zhu, Z.Q., Howe, D., "Practical Issues in Sensorless Control of PM Brushless Machines Using Third-Harmonic Back-EMF", Proceedings of the IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC), Vol. 2, pp. 1-5, 2006.
- [36] Ogasawara, S., Akagi, H., "An Approach to Position Sensorless Drive for Brushless DC Motors", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 27, No. 5, pp. 928-933, 2001.
- [37] Becerra, R.C., Jahns, T.M., Ehsani, M., "Four-Quadrant Sensorless Brushless ECM Drive", IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC), pp. 202-209, 1991.
- [38] Kim, T.H., Ehsani, M., "Sensorless Control of the BLDC Motors from Near-Zero to High Speeds", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 19, No. 6, pp. 1635-1645, November 2004.
- [39] Shao, J., "An Improved Microcontroller-based Sensorless Brushless DC (BLDC) Motor Drive for Automotive Applications", IEEE Industry Applications Society Conf. (IAS), Vol. 4, pp. 2512-2517, 2005.
- [40] Doo-Hee, J., In-Joong, H., "Low-Cost Sensorless Control of Brushless DC Motors Using a Frequency-independent Phase Shifter", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 15, No. 4, pp. 744-752, July 2000.
- [41] Zhang, L., Xiao, W., Qu, W., "Sensorless Control of BLDC Motors Using an Improved Low-Cost Back EMF Detection Method", IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC), pp. 1828-1834, 2006.
- [42] Parasiliti, F., Petrella, R., Tursini, M., "Initial Rotor Position Estimation Method for PM Motors", IEEE Industry Applications Society Conference (IAS), Vol. 2, pp. 1190-1197, 2000.
- [43] Ludovic, S., Sámi, S., "Brushless DC Motor

- Control Without Mechanical Sensors*", IEEE Power Electronics Specialists Conf. (PESC), pp. 375-381, 1996.
- [44] Ho, S.L., Fei, M.R., Cheng, K.W.E., Wong, H.C., "An Auto-Tuning Algorithm for the IRBF Network of Brushless DC Motor", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 40, No. 2, pp. 1168-1171, March 2004.
- [45] Jang, G.H., Park, J.H., Chang, J.H., "Position Detection and Start-up Algorithm of a Rotor in a Sensorless BLDC Motor Utilizing Inductance Variation", IEE Proceedings of Electric Power Applications, Vol. 149, No.2, pp. 137-142, 2002.
- [46] Krishnan, R., Ghosh, R., "Starting algorithm and Performance of a PM DC Brushless Motor Drive System with no Position Sensor", IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC), pp. 815-821, 1989.
- [47] Jahns, T.M., Soong, W.L., "Pulsating Torque Minimization Techniques for Permanent Magnet AC Motor Drives---A Review", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 43, No. 2, pp. 321-330, April 1996.
- [48] Gieras, J.F., Wing, M., "Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications"; Marcel Dekker Inc., 2002.
- [49] Yong, L., Zhu, Z.Q., Howe, D., "Commutation-Torque-Ripple Minimization in Direct-Torque-Controlled PM Brushless DC Drives", IEEE Trans. on Industry Applications Vol. 43, Issue: 4, pp. 1012-1021, 2007.
- [50] Kim, T.S., Ahn, S.C., Hyun, D.S., "A New Current Control Algorithm for Torque Ripple Reduction of BLDC Motors", Proceedings of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), pp.1521-1526, 2001.
- [51] Halvaei Niasar, A., Moghbelli, H., Vahedi, A., "Commutation Torque Ripple of Four-Switch Brushless DC Motor Drives_Part I: Analysis", IEEE International Workshop on Advanced Motion Control (AMC), pp. 541-546, 2006.
- [52] Song, J.H., Choy, I., "Commutation Torque Ripple Reduction in Brushless DC Motor Drives Using a Single DC Current Sensor", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 19, No. 2, March 2004, pp. 312-319.
- [53] Miller, J.M., "Power Electronics in Hybrid Electric Vehicle Applications", IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC '03, pp. 23-29, 2003.
- [54] Park, S.I., Kim, T.S., Ahn, S.C., Hyun, D.S., "An Improved Current Control Method for Torque Improvement of High-Speed BLDC Motor", IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Vol. 1, pp. 294-299, 2003.
- [55] Zhu, Z.Q., Shen, J.X., Howe, D., "Flux-Weakening Characteristics of Trapezoidal Back-EMF Machines in Brushless DC and AC Modes", IEEE International Power Electronics and Motion Control Conf. (IPEMC), Vol. 2, pp.1-5, 2006.
- [56] Safi, S.K., Acarnley, P.P., Jack, A.G., "Analysis and Simulation of the High-Speed Torque Performance of Brushless DC Motor Drives", IEE Proceedings of Electric Power Applications, Vol. 142, pp. 191 – 200, May 1995.
- [57] Wu, H.X., Cheng, S.K., Cui, S.M., "A Controller of Brushless DC Motor for Electric Vehicle", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 41, No. 1, pp. 519-513, January 2005.
- [58] Gu, B.G., Park, J.S., Choi, J.H., Rhyu, S.H., Jung, I.S., "Optimal Lead Angle Calculation for Brushless DC Motor", IEEE International Power Electronics Conf., pp. 1416-1420, 2010.
- [59] Texas Instruments, "Implementation of a Speed Controlled Brushless DC Drive Using TMS320F240", Literature Number: BPRA064, 1997.
- [60] Texas Instruments, "Implementation of a Sensorless Speed Controlled Brushless DC drive using TMS320F240", Literature Number: BPRA072, 1997.
- [61] Microchip, "Brushless DC Motor Fundamentals", Application Notes AN885, AN901, AN1160.
- [62] Motorola Semiconductor, "Sensorless Brushless dc Motor Using the MC68HC908MR32 Embedded Motion Control Development System", Application Note AN1858, 2000.
- [63] Freescale Semiconductor, "3-Phase BLDC Motor Control with Sensorless Back EMF Zero Crossing Detection Using 56F80x", AN1914, Rev. 1, 11/2005.
- [64] RENESAS, "H8/300H Brushless DC Motor Control Reference Platform", Application Note 139/1.0, September 2003.
- [65] Halvaei Niasar, A., Vahedi, A., Moghbelli, H.,

"Design and Implementation of Sensorless Control for Four-Switch, Three-Phase Brushless DC Motor Drive based on DSP Technology", Iranian Journal

of Electrical and Computer Engineering (IJECE), ,
Vol. 8, No. 1, pp. 1-8, Winter 2009.