

کاهش ضربان گشتاور در موتورهای بدون جاروبک آهن‌ربای دائم (PMBL) غیر ایدئال

ابوالفضل حلوائی نیاسر^۱

چکیده

محدودیت‌های موجود در طی فرآیند ساخت موتورهای بدون جاروبک آهن‌ربای دائم (PMBL) سبب می‌شود تا بسیاری از این موتورها دارای ولتاژ ضدمحركه سینوسی (مانند موتور PMSM) و یا دوزنقه‌ای خالص (مانند موتور BLDC) نباشند که به آن‌ها موتورهای PMBL غیر ایدئال گفته می‌شود. به کارگیری روش‌های متداول کنترلی موتورهای PMSM و BLDC سبب ایجاد ضربان گشتاور و ایجاد لرزش و نویز صوتی برای موتور PMBL غیر ایدئال می‌شود که منجر به کاهش بهره و عملکرد موتور گشته که برای برخی کاربردهای خاص غیر قابل قبول است. این مقاله به بررسی اثر به کارگیری انواع روش‌های متداول کنترلی بر مقدار ضربان گشتاور تولیدشده توسط یک موتور PMBL غیر ایدئال می‌پردازد. روش‌های کنترل جریان شبه‌مربعی با تنظیم جریان لینک DC و تنظیم جریان هر سه فاز، کنترل برداری، کنترل مستقیم گشتاور و روش کنترل برداری بهبود یافته برای یک موتور PMBL نمونه ارزیابی می‌گردند و در نهایت یک روش جدید جهت کاهش ریبیل گشتاور این موتور بر مبنای روش حذف هارمونیک گشتاور انتخابی و با استفاده از روش کنترل تک‌سیکلی ارائه می‌گردد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش حذف هارمونیک گشتاور انتخابی در مقایسه با سایر روش‌ها، عملکرد مطلوب‌تری دارد و گشتاور نرم‌تر با ضربان کمتری ایجاد می‌کند و قابل استفاده برای هر نوع موتور PMBL با هر شکل موج ولتاژ ضدمحركه دلخواه است.

واژه‌های کلیدی: درایو الکتریکی، موتور بدون جاروبک غیر ایدئال، ضربان گشتاور، هارمونیک گشتاور انتخابی، کنترل تک‌سیکلی.

۱- مقدمه

امروزه «موتورهای الکتریکی» به عنوان یکی از عمده‌ترین مصرف‌کنندگان توان الکتریکی به‌شمار می‌آیند. با گسترش کاربرد محرکه‌های الکتریکی در صنایع پیشرفته، درصد زیادی از این موتورها در کاربردهای سرعت متغیر به کار گرفته شده‌اند و تقریباً در تمامی آن‌ها از یک مبدل توان، جهت ایجاد تغذیه مناسب برای موتور استفاده می‌شود. از طرف دیگر، 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 پائین، 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 پائین، ساختار ساده و روش

۱. استادیار گروه قدرت، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه

کاشان، کاشان، ایران. halvaei@kashanu.ac.ir

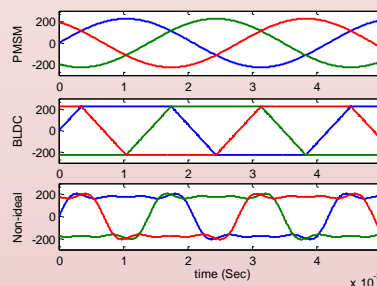
کنترل آسان، اشاره نمود. این موتورها به دلایل فوق ابتدا در کاربردهای دقیق و عملکرد بالا مانند حمل‌ونقل الکتریکی، هوافضا و صنایع نظامی مورد توجه قرار گرفتند؛ اما اخیراً به دلیل نیازهای جدید در کاربردهای خانگی و تجاری و نیمه‌صنعتی و کاهش چشمگیر قیمت این موتورها، استفاده از موتورهای بدون جاروبک در کاربردهای فوق نیز گسترشی بی‌سابقه یافته است [۱].

موتورهای PMBL برحسب نوع ولتاژ فاز تغذیه آن‌ها که سینوسی یا دوزنقه‌ای باشد، به دو دسته بدون جاروبک AC (BLAC یا PMSM) و بدون جاروبک DC (یا BLDC) تقسیم می‌شوند. در نوع PMSM ولتاژ ضدمحركه فاز آرمیچر، کاملاً سینوسی و در نوع BLDC ولتاژ ضدمحركه دارای شکل موج دوزنقه‌ای با بازه تخت ۱۲۰ درجه‌ای است. شکل موج‌های ولتاژ ضدمحركه این دو نوع موتور در شکل (۱) نشان داده شده است [۲ و ۳]. تفاوت در شکل موج ولتاژ ضدمحركه فازها سبب می‌شود تا روش‌های مورد استفاده در

دسته دیگری از موتورهای PMBL هستند که در دو دسته فوق جای نمی گیرند. با توجه به دقت و یا محدودیت های به کار رفته در طراحی و ساخت موتورهای PMBL، ممکن است ولتاژ ضدمحور که موتور ساخته شده، نه به شکل سینوسی باشد و نه دوزنقه ای ایدئال. به عبارت دیگر نه می توان نام PMSM را بر آن نهاد و نه BLDC. از دلایل عمده این موضوع می توان به توزیع نامناسب سیم پیچی های استاتور و همچنین شکل و گستردگی نامناسب آهنربای دائم روتور اشاره نمود. این موتورها در این مقاله به اختصار موتور PMBL غیر ایدئال نامیده شده اند. در شکل (۱-ج) نمونه ای از ولتاژ ضدمحور که در این موتورها را نشان داده شده است.

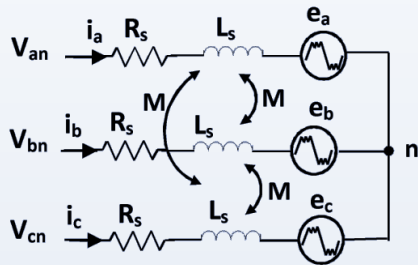
به کارگیری روش های متداول کنترلی موتورهای PMSM و BLDC برای موتورهای PMBL غیر ایدئال می تواند سبب ایجاد ضربان گشتاور لحظه ای قابل ملاحظه ای گردد که مقدار این ضربان مستقیماً به درصد اعوجاج شکل موج ولتاژ ضدمحور که موتور نسبت به شکل موج سینوسی و یا دوزنقه ای ایدئال بستگی دارد [۶ و ۷]. در برخی از کاربردهای حساس، وجود ضربان گشتاور که منجر به ایجاد لرزش مکانیکی و یا نویز صوتی می شود غیر قابل قبول است. در حالت کلی، روش متعارف و تجاری شده ای برای کنترل عاری از ضربان گشتاور این گونه موتورها وجود ندارد و سازندگان و یا استفاده کنندگان این موتورها بدون توجه به این موضوع از روش های کنترل برداری و یا کنترل جریان شبه مربعی استفاده می کنند. این مقاله با هدف ارائه یک روش کنترلی مناسب جهت ایجاد گشتاور الکترومغناطیسی با حداقل ضربان برای موتور PMBL غیر ایدئال، به بررسی روش های مختلف کنترلی ارائه شده برای موتورهای PMSM و BLDC پرداخته است و ضمن شبیه سازی و مقایسه این روش ها برای یک موتور PMBL نمونه، روش کنترلی برتر را معرفی می کند. روش برتر، با حذف هارمونیک های گشتاور انتخابی که وابسته به شکل موج ولتاژ ضدمحور که موتور PMBL ساخته شده هستند، حداقل ضربان گشتاور را با حداقل دامنه جریان ایجاد می کند.

کنترل این موتورها بسیار متفاوت از هم باشند [۴]. جهت ایجاد گشتاور لحظه ای ثابت و عاری از ضربان (با صرف نظر از نوسانات فرکانس بالای ناشی از سوئیچینگ PWM)، در کنترل موتورهای PMSM از تئوری های کنترلی در دستگاه مرجع دومحوری dq نظیر روش های کنترل برداری و کنترل مستقیم گشتاور استفاده می شود و جریان سینوسی به هر سه فاز موتور اعمال می گردد. در صورتی که در کنترل موتورهای BLDC، با استفاده از روش کنترل جریان فازها، جریان های شبه مربعی (شش پالسی) در فازهای موتور جاری می شود به نحوی که در هر لحظه از زمان تنها از دو فاز موتور جریان عبور می کند. برای موتورهای BLDC استفاده از روش های کنترلی در دستگاه dq معمول نیست و به کارگیری آن ها بسیار پیچیده است [۵]. مزیت اصلی موتور BLDC نسبت به موتور PMSM در کنترل آسان تر موتور با محاسبات بسیار کمتر، همانند موتورهای DC است. به دلیل حجم بالای محاسبات در روش های کنترل برداری موتور PMSM، باید از پردازنده های قوی استفاده نمود در حالی که کنترل موتور BLDC با میکروکنترلرهای ارزان قیمت، به راحتی قابل انجام است. افزون بر این، در کنترل برداری موتورهای PMSM و جهت داشتن گشتاور لحظه ای عاری از ضربان، دانستن مقدار لحظه ای موقعیت روتور ضروری است و برای این منظور معمولاً از اینکودرهای نوری استفاده می شود. این در حالی است که در کنترل موتورهای BLDC تنها دانستن موقعیت روتور که منطبق بر لحظات کموتاسیون هستند کفایت می کند و برای این منظور از سه حسگر ارزان قیمت موقعیت اثر «هال» استفاده می شود.



شکل (۱) شکل موج ولتاژ ضدمحور که القاشده در فاز استاتور در انواع مختلف موتورهای بدون جاروبک آهنربای دائم (PMBL).

است. اگر تعداد هارمونیک‌ها بالاتر باشد، پیچیدگی نیز بیشتر می‌شود. این روش مدل‌سازی زمانی مفید واقع می‌شود که از روش‌های کنترل برداری برای کنترل موتور PMBL استفاده شود که به آن «روش کنترل برداری بهبودیافته» گفته می‌شود. به دلیل حجم محاسبات بالا، خطاهای زیاد و پیچیدگی روش‌های کنترلی مربوطه، این روش مدل‌سازی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. روش دیگر مدل‌سازی موتور PMBL غیر ایدئال، استفاده از روشی مشابه مدل‌سازی موتور BLDC است که در آن از مدل فضای حالت سه‌فاز موتور در دستگاه ساکن abc استفاده می‌شود [۱۰]. در مدل‌سازی استاتور این نوع موتور به جای استفاده از ولتاژ دوزنقه‌ای موتور BLDC در شکل (۱-ب)، منبع ولتاژ وابسته به شکل موج ولتاژ ضدمحركه واقعی موتور، استفاده شده است. شکل (۲) مدار معادل الکتریکی مدل دینامیکی موتور PMBL غیر ایدئال را نمایش می‌دهد. لازم به ذکر است که اطلاق نام غیر ایدئال به این موتور، به خاطر سینوسی نبودن توزیع شار و یا ولتاژ ضدمحركه است و در مدل‌سازی از اثر اشباع، دندانه‌های شیارها صرف نظر شده است.



شکل (۲) مدار معادل الکتریکی مدل دینامیکی موتور PMBL غیر ایدئال سه‌فاز در دستگاه abc

همچنین فرض می‌شود موتور متعادل بوده و مقاومت، اندوکتانس خودی و اندوکتانس متقابل فازهای استاتور برابر هستند. معادلات ولتاژ موتور PMBL غیر ایدئال سه‌فاز، نسبت به نقطه ستاره (زمین نشده) به صورت زیر قابل بیان است:

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

در بخش دوم مقاله، چگونگی مدل‌سازی موتور PMBL غیر ایدئال سه‌فاز، ارائه می‌شود. در بخش سوم، انواع روش‌های کنترلی شامل کنترل جریان شبه‌مربعی با تنظیم جریان لینک DC و تنظیم جریان سه‌فاز، کنترل برداری، کنترل مستقیم گشتاور، و کنترل برداری بهبودیافته، معرفی می‌شود که برای کنترل حلقه بسته موتور PMBL غیر ایدئال مورد استفاده قرار می‌گیرند. در بخش چهارم، جهت حداقل نمودن رپیل گشتاور در این موتور، روش جدیدی بر مبنای الگوریتم حذف هارمونیک گشتاور انتخابی و روش کنترل تک سیکلی ارائه می‌شود و در بخش پنجم، نتایج شبیه‌سازی روش‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در بخش پایانی نیز بحث و نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲- مدل دینامیکی موتور PMBL غیر ایدئال

موتور PMBL غیر ایدئال برخلاف موتور PMSM دارای توزیع شار فاصله هوایی سینوسی نیست و استفاده از تئوری دومحوری dq برای آن‌ها به دلیل وجود مؤلفه‌های با هارمونیک‌های بالاتر، همراه با خطاهای فراوان مدل‌سازی خواهد بود. برای مدل‌سازی دینامیکی این موتورها دو روش اصلی وجود دارد که عبارت‌اند از: اول، مدل‌سازی در دستگاه‌های دومحوری dq چندگانه (MRF) یا تعمیم‌یافته [۵]؛ دوم، مدل‌سازی در دستگاه فضای حالت abc.

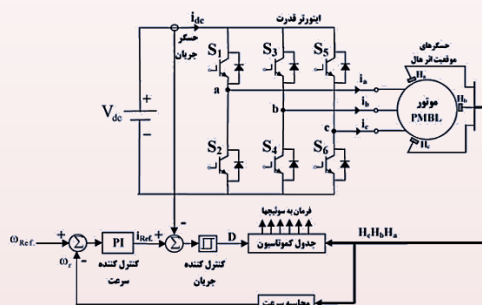
در روش مدل‌سازی در دستگاه‌های دومحوری dq چندگانه، با توجه به محتوای هارمونیک شکل موج ولتاژ ضدمحركه، دستگاه‌های dq سنکرون با سرعت‌های برابر سرعت زاویه‌ای هارمونیک‌های موجود تشکیل می‌شود و مقادیر ولتاژها، جریان‌ها و شارهای سه‌فاز به این دستگاه‌های dq چندگانه منتقل می‌شوند [۸ و ۹]؛ مثلاً اگر ولتاژ ضدمحركه شامل هارمونیک‌های ۱، ۳، ۵ و ۷ باشد، سه دستگاه دو محوری dq با سرعت سنکرون، ۵ برابر سرعت سنکرون و ۷ برابر سرعت سنکرون در نظر گرفته می‌شود. هارمونیک سوم چون در ایجاد گشتاور نقشی ندارد در مدل‌سازی دستگاه dq مربوطه لحاظ نمی‌شود. این روش مدل‌سازی دارای حجم محاسبات بسیار بالا و پیچیده‌ای است و نیازمند پردازشگرهای قوی

جدول (۱) پارامترهای موتور PMBL غیر ایده آل مورد استفاده

مقدار	نماد	کمیت
$\Omega \ 2/0$	R_s	مقاومت هر فاز
$0/8 \text{ mH}$	L_s	اندوکتانس خودی هر فاز
$0/1 \text{ mH}$	M	اندوکتانس متقابل فازها
۱۲	P	تعداد قطبها
$15V/(\text{rad}/\text{sec})$	K_e	ثابت ولتاژ ضد محرکه
۰	J	ممان اینرسی
$0/015 \text{ N.m}/\text{s}^2$	J	ممان اینرسی
۳۰۰V	V_{dc}	ولتاژ باس DC
۱۵ N.m	T_n	گشتاور بار نامی

۳-۱- کنترل موتور PMBL به روش کنترل جریان شبه-مربعی با تنظیم جریان لینک DC

این روش که به نام کنترل جریان شش پالسی هم شناخته می شود، ساده ترین روش کنترلی برای موتورهای PMBL است که بلوک دیاگرام این روش کنترلی در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳) بلوک دیاگرام درایو موتور PMBL غیر ایده آل به روش

کنترل جریان شبه مربعی با تنظیم جریان لینک DC

همانند موتورهای BLDC، با توجه به عبور جریان در دوفاز از موتور، کافی است جریان لینک DC در مقدار دلخواه تنظیم شود. جریان مرجع نیز توسط کنترل کننده سرعت تنظیم می شود. در هر لحظه از زمان یک سوئیچ از نیمه بالایی و یک سوئیچ از نیمه پایینی، جریان را هدایت می کنند و ترتیب سوئیچ زنی نیز بر مبنای اطلاعات موقعیت روتور به دست آمده از سه حسگر اثر هال تعیین می گردد. شکل (۴) نتایج شبیه سازی موتور را تحت گشتاور بار نامی و در سرعت نامی نمایش می دهد. سرعت مرجع در طی مدت

در معادلات فوق v_{cn}, v_{bn}, v_{an} ولتاژهای ترمینال استاتور نسبت به نقطه ستاره موتور، i_c, i_b, i_a جریان سه فاز موتور e_c, e_b, e_a 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 (۲) قابل محاسبه است:

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

که در آن ω_m سرعت مکانیکی محور روتور است و از معادله حرکت دورانی نیوتن، به صورت زیر به دست می آید:

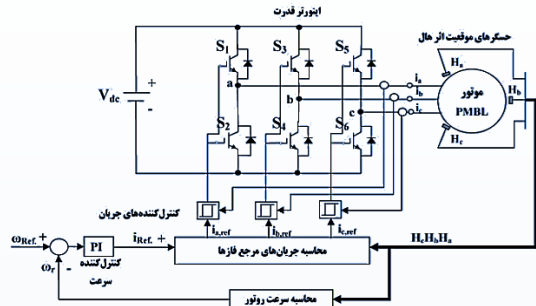
$$T_e = T_L + J \frac{d\omega_m}{dt} + B_f \omega_m \quad (3)$$

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

۳-۲ کنترل موتور PMBL غیر ایدئال

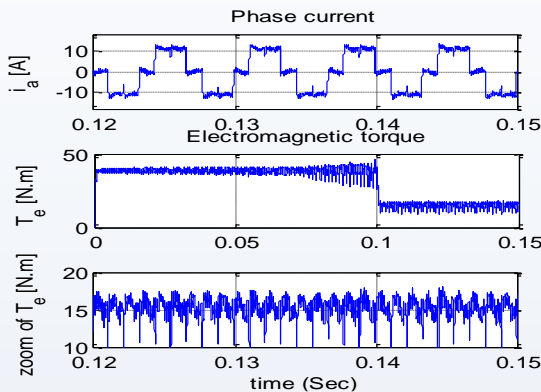
در این بخش روش های مختلف کنترلی ارائه شده برای موتورهای PMSM و BLDC بر روی یک موتور PMBL غیر ایدئال اعمال و شبیه سازی می شوند. این روش ها عبارت اند از: کنترل جریان شش پله ای، کنترل برداری، کنترل مستقیم گشتاور، کنترل برداری بهبود یافته و روش حذف هارمونیک گشتاور انتخابی. روش های مورد نظر اغلب یا تجاری شده اند و یا به عنوان یک روش قابل تجاری سازی پذیرفته شده اند. از پرداختن به سایر روش های غیر کارا نظیر کنترل اسکالر، و یا بسیار پیچیده از جهت کنترلی، مانند روش های خطی سازی با فیدبک و کنترل مود لغزشی صرف نظر می شود. موتور PMBL غیر ایدئال مورد نظر دارای ولتاژ ضد محرکه فاز همانند شکل (۱-ج) است که شامل هارمونیک های مرتبه های ۱، ۳، ۵، ۷ با دامنه های به ترتیب برابر ۱۰۰٪، ۳۳٪، ۲۰٪ و ۱۳٪ هارمونیک اصلی است که از تحلیل FFT ولتاژ ضد محرکه فاز موتور به دست آمده اند. این موتور، دارای توان نامی ۲،۵ kW و دور نامی ۱۵۰۰ rpm است. سایر مشخصات الکتریکی و پارامترهای مدار معادل آن در جدول (۱) آورده شده اند.

هیستریزیس یا PI باشند. شکل (۶) نتایج شبیه‌سازی این روش را نشان می‌دهد که اعوجاجات جریان آن در لحظات کموتاسیون نسبت به روش قبل کمتر شده است و در نتیجه ضربان گشتاور ناشی از کموتاسیون کاهش یافته است؛ اما ضربان گشتاور ناشی از غیر ایدئال بودن ولتاژ ضدمحرکه همچنان وجود دارد که مقدار آن در سرعت نهایی ۷ N.m یا ۴۶٪ است.



شکل (۵) بلوک دیاگرام درایو موتور PMBL غیرایده‌آل به روش کنترل

جریان شبه‌مربعی با تنظیم جریان سه‌فاز.

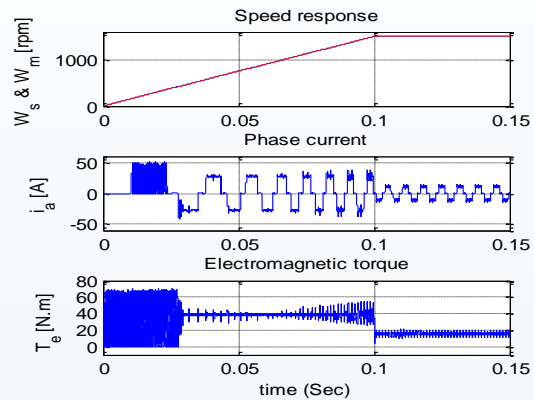


شکل (۶) نتایج شبیه‌سازی به روش کنترل جریان شبه‌مربعی با تنظیم جریان هر سه‌فاز.

۳-۳- کنترل موتور PMBL به روش کنترل مستقیم گشتاور

روش کنترل مستقیم گشتاور (DTC) از روش‌های جدید کنترل موتورهای القایی و PMSM است که طی دو دهه اخیر به‌خوبی توسعه داده شده و توسط شرکت‌هایی از جمله ABB تجاری گشته است [۱۳]. از مزایای روش DTC می‌توان به ساختار ساده‌تر، کنترل مستقیم شار و گشتاور، نیاز نداشتن به تبدیلات dq، عملکرد دینامیکی بالا و پاسخ سریع، و کلیدزنی سوئیچ‌ها به روش SVM اشاره نمود. اگرچه این روش در ابتدا برای موتورهای سینوسی بیان شد اما جذابیت‌ها

۰/۱ ثانیه به مقدار نهایی اش می‌رسد. جریان فازها هم به‌صورت شبه‌مربعی کنترل شده‌اند. ضربان گشتاور الکترومغناطیسی تولیدی موتور از دو منبع متفاوت ناشی می‌شود؛ یکی در مواقع کموتاسیون و به خاطر وصل شدن دیودهای هرزه‌گرد فاز خاموش ایجاد می‌شود [۱۱]؛ و دیگری به خاطر ایدئال نبودن ولتاژ ضدمحرکه فاز در بازه هدایت ۱۲۰ درجه‌ای جریان فاز است. ردیابی سرعت مرجع به نحو مطلوبی انجام شده است اما ضربان گشتاور زیاد بوده و پس از رسیدن به سرعت نهایی مقدار آن در حد ۱۰ N.m یا ۶۶٪ است. در شبیه‌سازی‌های بعدی، فقط به نمایش شکل موج‌های گشتاور و جریان در حالت نهایی فقط اکتفا می‌شود.



شکل (۴) نتایج شبیه‌سازی به روش کنترل

جریان شبه‌مربعی با تنظیم جریان لینک DC

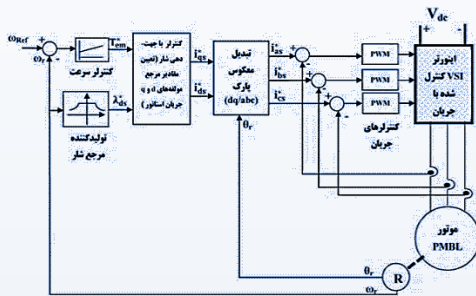
۳-۲- کنترل موتور PMBL به روش کنترل جریان شبه‌مربعی با تنظیم جریان سه‌فاز

این روش کنترلی، صورت بهبودیافته‌ای از روش کنترل جریان شبه‌مربعی است که در آن با استفاده از دو یا سه حسگر جریان، جریان‌های فازها به‌صورت مستقیم و در تمامی زمان‌ها کنترل می‌شوند [۱۲]. به‌عبارت‌دیگر، حتی در مواقعی که جریان یک فاز باید صفر باشد، سوئیچ‌های مربوط به آن فاز (فاز خاموش) به نحوی سوئیچ زنی می‌گردند که جریان فاز در صفر باقی بماند. از این رو دیودهای هرزه‌گرد فاز خاموش در طی بازه کموتاسیون دیگر هدایت نخواهند کرد و ضربان گشتاور ناشی از کموتاسیون صفر و یا حداقل خواهد شد. شکل (۵) بلوک دیاگرام این روش کنترلی را نشان می‌دهد که در آن از سه کنترل‌کننده جریان استفاده شده است. کنترل‌کننده‌های جریان می‌توانند از نوع

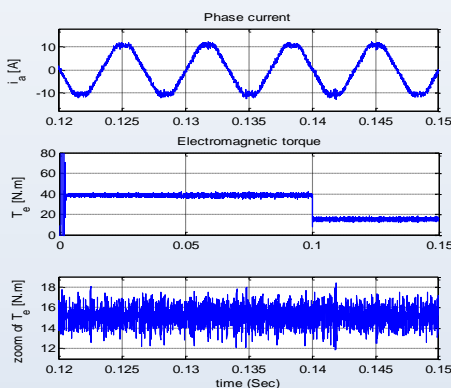
می‌توان دریافت که برای مستقل بودن گشتاور از شار در ناحیه سرعت صفر تا سرعت نامی، جریان i_{ds} باید صفر بماند. بر این اساس، مقدار مرجع جریان i_{ds} برابر صفر قرار داده می‌شود و مقدار مرجع جریان i_{qs} نیز از رابطه (۷) قابل دستیابی است:

$$i_{qs}^* = \frac{4T_{em}^*}{3P\lambda_m} \quad (7)$$

شکل (۹) بلوک دی‌گرام سیستم کنترل برداری موتور PMBL را نشان می‌دهد. این سیستم نوع ساده و پرکاربرد کنترل برداری است که از اینورتر منبع ولتاژ کنترل شده با جریان بهره می‌برد. شکل (۱۰) نتایج شبیه‌سازی درایو موتور PMBL غیر ایدنال به روش کنترل برداری را نشان می‌دهد. مقدار ضربان گشتاور در حد ۶ N.m یا ۴۰٪ است که نسبت به دو روش کنترل جریان شش‌پله‌ای و DTC رفتار مناسب‌تری دارد.



شکل (۹) بلوک دی‌گرام درایو موتور PMBL غیر ایدنال به روش کنترل برداری و با اینورتر منبع ولتاژ کنترل شده با جریان.



شکل (۱۰) نتایج شبیه‌سازی کنترل موتور PMBL به روش کنترل برداری.

جدول (۲) جدول سوئیچ زنی اینورتر در روش DTC بر مبنای هدایت جریان در دوفاز برای موتور PMBL غیر ایدنال

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

۳-۴- کنترل موتور PMBL به روش کنترل برداری

ایده اساسی در روش کنترل برداری برای هر نوع موتور AC آن است که اندازه بردار شار (روتور یا استاتور یا شار فاصله هوایی) ثابت بماند و جهت آن نیز بر راستای محور d دستگاه دو محوری dq قرار گیرد. با استفاده از این راهبرد، طبق روابط گشتاور در موتورهای AC، مؤلفه شار روی محور q صفر می‌شود و گشتاور متناسب با مؤلفه جریان استاتور، روی محور q یعنی i_{qs} خواهد شد. با جهت‌دهی بردار شار بر روی محور d ، دامنه شار با توجه به سرعت و شرایط کاری موتور توسط کنترل‌کننده جریان i_{ds} و مقدار گشتاور توسط کنترل‌کننده جریان i_{qs} کنترل می‌شود. کنترل برداری موتورهای PMSM از کنترل برداری سایر موتورهای نظیر موتور القایی ساده‌تر است زیرا محور d همواره منطبق بر راستای محور مغناطیسی آهنربای دائم روتور در نظر گرفته می‌شود [۱۸]؛ از این رو بردار شار روتور به صورت ذاتی در راستای محور d جهت‌دهی شده است. اما با نگاهی به رابطه گشتاور در موتور PMSM که به صورت زیر قابل بیان است:

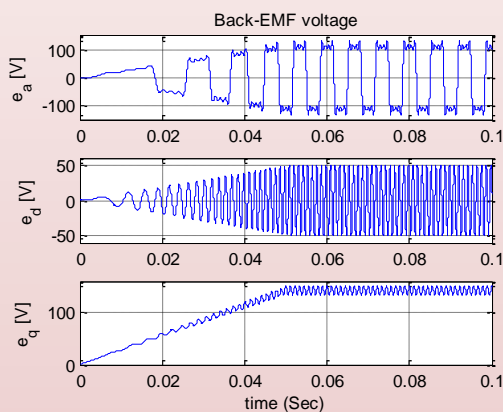
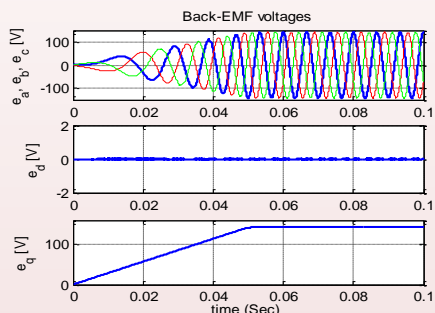
$$T_{em} = \frac{3P}{4} [\lambda_m i_{qs} + (L_d - L_q) i_{ds} i_{qs}] \quad (6)$$

تا رسیدن به سرعت نامی، نشان می‌دهد. در سرعت ثابت، مقادیر مؤلفه‌های ولتاژ ضدمحرکه در موتور PMSM کاملاً ثابت هستند درحالی‌که این مؤلفه‌ها در موتور PMBL به واسطه وجود هارمونیک‌ها دارای نوسان هستند.

برای ایجاد گشتاور موردنظر با حداقل دامنه جریان و یا تلفات اهمی استاتور در ناحیه زیر سرعت نامی، با توجه به قانون عمومی کنترل شار در موتورهای آهنربای دائم مقدار مرجع مؤلفه d جریان استاتور I_{ds} را برابر صفر در نظر می‌گیریم. مؤلفه همپلار I_{0s} نیز در سیستم مقارن بدون هارمونیک-های زوج و با اتصال ستاره زمین نشده برابر صفر است. از این رو مقدار مرجع جریان i_{qs}^* از رابطه توان فوق با استفاده از مقدار مرجع گشتاور (خروجی کنترل کننده PI سرعت) و داشتن مقدار e_q (محاسبه شده از تبدیل پارک ولتاژهای ضدمحرکه فازها) از رابطه (۹) به دست می‌آید:

$$i_{qs}^* = \frac{2\omega_m}{3} \frac{1}{e_q} \times T_{em}^* \quad (9)$$

در واقع روش کنترل برداری با وارد نمودن مستقیم مؤلفه متغیر با زمان ولتاژ ضدمحرکه e_q اصلاح می‌شود.



شکل (۱۱) تغییرات ولتاژهای ضدمحرکه استاتور و مؤلفه‌های d و q آن طی فرآیند شتاب‌گیری تا رسیدن به سرعت نامی.

۳-۵- کنترل موتور PMBL به روش کنترل برداری بهبود یافته

روش کنترل برداری از لحاظ ایجاد گشتاور با حداقل ضریب، جزو بهترین روش‌های کنترلی موتورهای با ولتاژ ضدمحرکه سینوسی نظیر PMSM است؛ اما به کارگیری این روش برای موتورهای با ولتاژ ضدمحرکه غیر سینوسی نظیر BLDC یا موتور PMBL غیر ایدئال نتایج خیلی مطلوبی ندارد. در برخی مراجع همچون [۱۹ و ۲۰]، برای کنترل موتور PMBL غیر ایدئال از دستگاه‌های دومحوری dq چندگانه (هر یک با سرعت متناسب با مرتبه هارمونیک موجود در ولتاژ ضدمحرکه فاز موتور) استفاده می‌کنند که در آن در هر دستگاه dq ، هارمونیک مربوطه کنترل می‌شود. این روش دارای حجم محاسباتی بالایی است و نیاز به پردازنده‌های قوی دارد و بسیار وابسته به پارامترهای مدار معادل موتور است.

می‌توان مشکل روش کنترل برداری در مواجهه با ولتاژ ضدمحرکه غیر سینوسی را با اندکی اصلاح در تعیین مقادیر مرجع جریان‌ها کاهش داد. این روش که به نام روش کنترل برداری بهبود یافته معروف شده است برای موتورهای BLDC به کار گرفته شده است و ما آن‌ها را برای موتور PMBL غیر ایدئال به کار می‌گیریم [۲۱ و ۲۲]. اساس این روش را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود. گشتاور لحظه-ای در موتور PMBL غیر ایدئال از رابطه توان زیر در دستگاه dq نیز قابل محاسبه است:

$$T_{em} \times \omega_m = \frac{3}{2} [e_d i_{ds} + e_q i_{qs} + e_0 i_{0s}] \quad (8)$$

که در آن e_d و e_q مؤلفه‌های d و q ولتاژ ضدمحرکه استاتور و ω_m سرعت مکانیکی روتور هستند. لازم به یادآوری است که در موتورهای PMSM که ولتاژهای ضدمحرکه کاملاً سینوسی هستند، مقادیر لحظه‌ای ولتاژهای e_d و e_q در هر سرعت، دارای مقادیر ثابتی هستند، اما در موتورهای PMBL غیر ایدئال که ولتاژ ضدمحرکه شامل هارمونیک است، مقادیر e_d و e_q ثابت نیستند و در هر سرعت، دارای نوساناتی هستند. شکل (۱۱) شکل موج‌های ولتاژهای ضدمحرکه سه‌فاز و مؤلفه‌های e_d و e_q آن‌ها در دو موتور PMSM و موتور PMBL مورد استفاده در این مقاله را طی فرآیند شتاب‌گیری

۴- کاهش ضربان گشتاور موتور PMBL به روش حذف هارمونیک گشتاور انتخابی و برمبنای

استراتژی کنترل تک سیگلی

به منظور ایجاد گشتاور لحظه‌ای عاری از ضربان ناشی از هارمونیک‌های ولتاژ ضدمحرکه، در صورتی که محتوای هارمونیک ولتاژ ضدمحرکه فاز معلوم باشد، می‌توان تمام یا برخی از هارمونیک‌های دلخواه در شکل موج گشتاور را با تزریق جریان مرجع مناسب حذف نمود. این روش برای موتورهای BLDC به کار گرفته شده است [۲۳ و ۲۴] و به آن کنترل با حذف هارمونیک گشتاور انتخابی و یا کنترل با تزریق جریان هارمونیک گفته می‌شود. برای ایجاد جریان‌های مرجع هارمونیک، روش‌های متفاوتی وجود دارد که در عمل به دلیل سادگی از کنترل‌کننده‌های جریان هیستریزس استفاده می‌شود. فرکانس سوئیچینگ بالا و تغییرات کنترل‌کننده‌های هیستریزس، از معایب آن هستند که برای رفع این مشکلات، استفاده از کنترل‌های جریان PI با توجه به فرکانس سوئیچینگ ثابتشان، شاید مفید به نظر برسند؛ اما زیاد شدن تعداد کنترل‌کننده‌های PI سیستم و تنظیم آن‌ها و همچنین عملکرد نامناسب آن‌ها در دستگاه سه‌محوری ساکن abc از معایب این روش هستند. استفاده از روش کنترل تک‌سیگلی ضمن حفظ مزیت کنترل‌کننده‌های PI از سادگی کنترل‌کننده‌های هیستریزس نیز بهره می‌برد.

در ادامه پس از بیان روش حذف هارمونیک گشتاور انتخابی، تئوری روش کنترل تک‌سیگلی و استفاده از آن در کاربرد موردنظر شرح داده می‌شود.

۴-۱- روش حذف هارمونیک گشتاور انتخابی در

کاهش ضربان گشتاور موتور PMBL

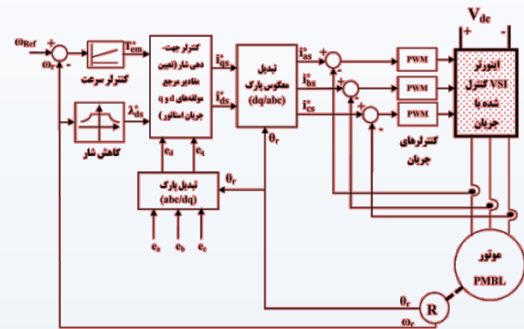
در این بخش، روش حذف هارمونیک گشتاور انتخابی برای موتور PMBL غیر ایدئال با موج ولتاژ ضدمحرکه مطابق با شکل (۱-ج) که فقط شامل هارمونیک‌های ۱، ۳، ۵ و ۷ است به‌طور خلاصه بیان می‌گردد. در صورتی که ولتاژ ضدمحرکه فاز a دارای هارمونیک‌های مضرب‌های بالاتر باشد:

$$(10)$$

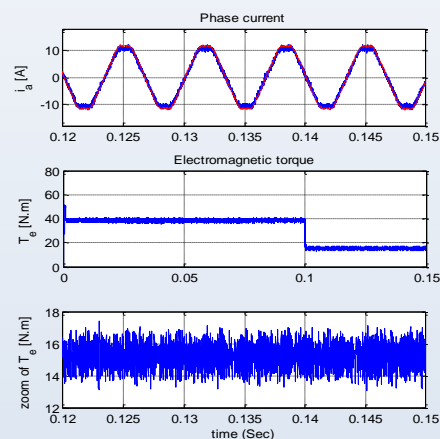
$$e_a(t) = E_1 \sin \omega t + E_3 \sin 3\omega t + E_5 \sin 5\omega t + E_7 \sin 7\omega t$$

و جریان اعمالی به فاز a موتور نیز به صورت رابطه (۱۱) باشد:

بر این اساس، برخلاف روش کنترل برداری موتورهای PMSM که تحت بار ثابت و در سرعت ثابت، جریان i_{qs}^* دارای مقدار ثابتی است، در این روش حتی در سرعت و گشتاور بار ثابت، برای ایجاد گشتاور الکترومغناطیسی لحظه‌ای ثابت، مقدار i_{qs}^* متناسب با عکس ولتاژ e_q تغییر می‌کند. شکل (۱۲) بلوک دیاگرام سیستم کنترل برداری بهبودیافته موتور PMBL را نشان می‌دهد. این سیستم بسیار شبیه سیستم کنترل برداری ارائه شده در شکل (۱۰) است. شکل (۱۳) نتایج شبیه‌سازی درایو موتور PMBL غیر ایدئال به روش کنترل برداری بهبودیافته را نشان می‌دهد. جریان فاز، مقدار مرجع خود را به خوبی دنبال نموده است. همچنین مقدار ضربان گشتاور حدود ۳،۷۵ N.m یا ۲۵٪ است که کاهش قابل‌ملاحظه‌ای را نسبت به روش‌های قبلی که اغلب مختص موتورهای BLDC و PMSM هستند، نشان می‌دهد.



شکل (۱۲) بلوک دیاگرام درایو موتور PMBL غیر ایدئال به روش کنترل برداری بهبودیافته.



شکل (۱۳) نتایج شبیه‌سازی کنترل موتور PMBL به روش کنترل برداری بهبودیافته.

هدف آن است که برای گشتاور بار T_1 اعمالی، مقدار متوسط گشتاور تولیدی موتور در رابطه (۱۵) برابر T_1 باشد و ضریب‌های هارمونیک از مرتبه‌های ۶ و ۱۲ گشتاور در رابطه ۱۴ صفر شوند. با حل دستگاه معادلات جبری زیر:

$$\begin{bmatrix} E_1 & E_5 & E_7 \\ E_7 - E_5 & -E_1 & E_1 \\ 0 & E_7 & E_5 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_1 \\ I_5 \\ I_7 \end{bmatrix} = \frac{2\omega_r}{3} \begin{bmatrix} T_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

و با فرض در نظر گرفتن مقادیر ۱۰۰٪، ۲۰٪ و ۱۳٪ برای هارمونیک‌های مرتبه‌های اول، پنجم و هفتم، ولتاژ ضدمحرکه هر فاز، مقادیر مرجع هارمونیک‌های جریان برابر خواهند شد با:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_5 \\ I_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.0063 \\ -0.047 \\ 0.0235 \end{bmatrix} \frac{2\omega_r}{3} T_1 \quad (19)$$

از این رو با اعمال جریان‌های مرجع سه فاز با دامنه هارمونیک اول، پنجم و هفتم (طبق رابطه ۱۹)، ضریب گشتاور ناشی از هارمونیک‌های ولتاژ ضدمحرکه فازها دقیقاً صفر خواهد شد. توجه شود که در رابطه ۱۹ مقدار گشتاور T_1 با مقدار گشتاور مرجع که همان خروجی کنترل کننده سرعت است، جایگزین می‌شود.

۴-۲- کنترل تک‌سیکلی برای تنظیم جریان مرجع هارمونیک موتور PMBL

روش کنترل تک‌سیکلی ابتدائاً در سیستم‌های الکترونیک قدرت و در کاربردهایی همچون فیلترهای اکتیو که موجب حذف بلوک‌های محاسباتی حجیم مانند تبدیل پارک، به کار گرفته شدند و بعد از آن، در مبدل‌های DC/DC و منابع تغذیه سوئیچینگ توسعه یافته‌اند [۲۵ و ۲۶]. به تازگی نیز در کنترل مبدل‌های استفاده‌شده در درایو موتورهای الکتریکی به کار گرفته شده است [۲۷-۲۹]. این روش کنترلی از نوع کنترل غیرخطی است که ساختاری بسیار ساده دارد و بر اساس کنترل عرض پالس در فرکانس ثابت کار می‌کند. در واقع این روش، روش توسعه یافته مدولاسیون عرض پالس PWM است که از یک انتگراتور با مدار ریست سخت‌افزاری، فیلپ فلاپ نوع D، مقایسه گر و مولد کلاک پالس، تشکیل شده است و در شکل (۱۴-الف) نشان داده شده است.

$$i_a(t) = I_1 \sin \omega t + I_3 \sin 3\omega t + I_5 \sin 5\omega t + I_7 \sin 7\omega t + \dots \quad (11)$$

در این حالت، توان فاصله هوایی فاز a موتور، شامل مقداری ثابت به علاوه هارمونیک‌های مرتبه بالاتر به صورت زیر خواهند بود:

$$P_a(t) = e_a i_a = P_0 + P_2 \sin 2\omega t + P_4 \sin 4\omega t + P_6 \sin 6\omega t + \dots \quad (12)$$

با توجه به تقارن ولتاژها و جریان‌های هارمونیک‌های فازهای مختلف نسبت به یکدیگر و اینکه جریان و ولتاژهای دو فاز b و c نسبت به مقادیر متناظر فاز a دارای $\pm 120^\circ$ اختلاف فاز هستند، توان فاصله هوایی مجموع، فقط شامل مقداری ثابت و هارمونیک‌های دارای مضرب‌های ۶ به صورت زیر (رابطه ۱۳) خواهد بود:

$$P_g(t) = P_0 + P_6 \sin 6\omega t + P_{12} \sin 12\omega t + P_{18} \sin 18\omega t + \dots \quad (13)$$

بنابراین گشتاور الکترومغناطیسی موتور از تقسیم توان فاصله هوایی مجموع بر سرعت موتور، به صورت زیر (رابطه ۱۴) قابل محاسبه است:

$$T_g(t) = \frac{P_g}{\omega_r} = T_0 + T_6 \sin 6\omega t + T_{12} \sin 12\omega t + T_{18} \sin 18\omega t + \dots \quad (14)$$

هدف از کنترل، تعیین مناسب تعداد و دامنه هارمونیک‌های مرتبه بالاتر جریان است، به نحوی که در ضمن ایجاد گشتاور ثابت T_0 حداقل ضریب گشتاور را ایجاد نمایند. چون هارمونیک‌های مرتبه بالاتر از ۷ در ولتاژ ضدمحرکه فاز موتور PMBL وجود ندارند، ایجاد هارمونیک‌های جریان بالاتر از ۷ فقط سبب افزایش تلفات مسی استاتور خواهند شد. همچنین هارمونیک سوم جریان هم اساساً نقشی در ایجاد گشتاور ایفا نمی‌کند. با توضیحات ارائه شده و با داشتن هارمونیک‌های ۷، ۵، ۱ ولتاژ ضدمحرکه و جریان فاز، فقط هارمونیک‌های ۶ و ۱۲ گشتاور وجود خواهند داشت و هارمونیک‌های مرتبه بالاتر از آن صفر خواهند شد؛ از این رو دامنه‌های گشتاور موجود در گشتاور لحظه‌ای عبارت خواهند شد از:

$$T_0 = \frac{3}{2\omega_r} [E_1 I_1 + E_5 I_5 + E_7 I_7] \quad (15)$$

$$T_6 = \frac{3}{2\omega_r} [I_1 (E_7 - E_5) - I_5 E_1 + I_7 E_1] \quad (16)$$

$$T_{12} = \frac{3}{2\omega_r} [-I_5 E_7 - I_7 E_5] \quad (17)$$

۵- تحلیل و مقایسه نتایج شبیه‌سازی

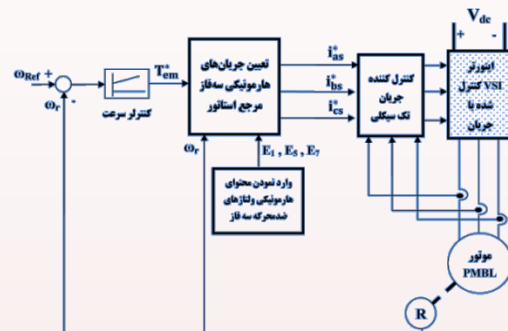
در بخش قبل، روش‌های مختلف کنترلی برای کنترل حلقه بسته سرعت به موتور PMBL غیر ایدئال اعمال شدند و شکل موج‌های گشتاور در هر روش به تصویر کشیده شد. برای مقایسه بهتر نتایج، مقادیر نسبت دامنه ضربه گشتاور به گشتاور متوسط موتور PMBL غیر ایدئال در سرعت نهایی با استفاده از روش‌های مختلف کنترلی در جدول (۳) گردآوری شده‌اند. همچنین نتایج تحلیل FFT گشتاور در نرم‌افزار متلب برای چهار روش برتر کنترل جریان شبه‌مربعی سه‌فاز، کنترل برداری، کنترل برداری بهبودیافته و کنترل با حذف هارمونیک انتخابی گشتاور و کنترل جریان تک‌سیکلی، در جدول (۴) به‌طور خلاصه ارائه شده‌اند. نتایج هر دو جدول نشان می‌دهند که دو روش «کنترل برداری بهبودیافته» و «کنترل با حذف هارمونیک انتخابی گشتاور و کنترل تک‌سیکلی» از سایر روش‌ها پاسخ مناسب‌تری دارند. در تمامی شبیه‌سازی‌های انجام‌شده (به‌استثنای روش DTC) از اینورتر منبع ولتاژ کنترل‌شده با جریان، استفاده شده است که قابلیت پیاده‌سازی ساده‌تری دارد.

۶- نتیجه‌گیری

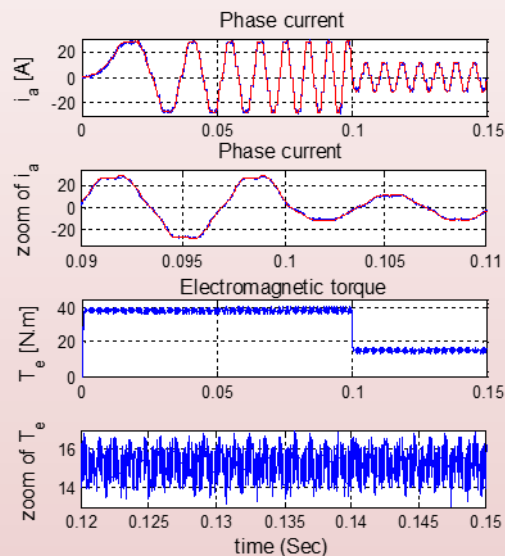
به‌منظور کاهش ضربه گشتاور و در نتیجه لرزش و نویز ایجادشده ناشی از اعوجاج در ولتاژ ضدمحرکه فازهای موتورهای بدون جاروبک آهنربای دائم (PMBL)، در این مقاله، شش روش کنترلی مورد بررسی قرار گرفتند و به یک موتور PMBL غیر ایدئال (با ولتاژ ضدمحرکه نه سینوسی و نه دوزنقه‌ای) اعمال شدند. نتایج شبیه‌سازی‌ها و تحلیل FFT نشان دادند که روش کنترل مستقیم گشتاور نامناسب‌ترین پاسخ را در بین تمام روش‌ها دارد و در مقابل، روش حذف هارمونیک گشتاور انتخابی بر مبنای کنترل جریان تک‌سیکلی، پاسخ گشتاور مناسب‌تری دارد و نسبت به سایر روش‌ها برتری دارد. نکته مهم در به‌کارگیری این روش آن است که شکل موج ولتاژهای ضدمحرکه موتور باید دقیقاً معلوم باشد زیرا مرجع جریان اعمالی به اینورتر بر مبنای شکل موج ولتاژ ضدمحرکه ساخته می‌شود. همچنین در صورت متغیر بودن محتوای هارمونیک شکل موج ولتاژ

جدول (۳) مقایسه ضربه گشتاور نسبی موتور PMBL غیر ایدئال با روش‌های مختلف کنترلی در سرعت نهایی

روش کنترلی	مقدار ضربه
کنترل جریان شبه‌مربعی با تنظیم جریان لینک C	۶۶٪
کنترل جریان شبه‌مربعی با تنظیم جریان فازها	۴۶٪
کنترل مستقیم گشتاور	۸۰٪
کنترل برداری	۴۰٪
کنترل برداری بهبود یافته	۲۵٪
روش حذف هارمونیک گشتاور انتخابی و کنترل تک‌سیکلی	۱۶٪



شکل (۱۵) بلوک دیاگرام درایو موتور PMBL غیر ایدئال به روش حذف هارمونیک گشتاور انتخابی و استراتژی کنترل جریان تک‌سیکلی.



شکل (۱۶) نتایج شبیه‌سازی کنترل موتور PMBL به روش حذف هارمونیک گشتاور انتخابی و راهبرد کنترل جریان تک‌سیکلی.

- [10] B. K. Lee, B. Fahimi, and M. Ehsani; "Dynamic Modeling of Brushless DC Motor Drives", European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Austria, 2001, pp. 1-9.
- [11] P. Pillay, and R. Krishnan; "Modeling, simulation, and analysis of permanent-magnet motor drives. II. The brushless DC motor drive", IEEE Trans. on Industry Applications, March/April 1989, vol. 25, No. 2, pp. 274-279.
- [12] G.H. Kim, S.J. Kang, and J.S. Won; "Analysis of the commutation torque ripple effect for BLDCM fed by HCRPWM-VSI", IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 1992, pp. 277-284.
- [13] ABB Technical Note: Motor Control with DTC, TD1 EN Rev. B, 2007.
- S.B. Ozturk, and H.A. Toliyat, "Direct Torque and Indirect Flux Control of Brushless DC Motor", IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, 2011, vol. 16, no. 2, pp. 351-360.
- [14] Y. Liu, Z.Q. Zhu, and D. Howe; "Direct torque control of brushless DC drives with reduced torque ripple", IEEE Trans. on Industry Applications, March/April 2005, vol. 41, no. 2, pp. 599-608.
- [15] G.R. Arab Markadeh, S.I. Mousavi, S. Abazari, and A. Kargar, "Position Sensorless Direct Torque Control of BLDC Motor", IEEE International Conf. on Industrial Technology, China, 2008, pp. 1-6.
- [16] S.B. Ozturk, and H.A. Toliyat, "Direct Torque Control of Brushless DC Motor with Non-sinusoidal Back-EMF", IEEE International Electric Machines & Drives Conference, (IEMDC), Turkey, 2007, pp. 165-171.
- [17] Freescale Semiconductor; "Sensorless PM Sinusoidal Motor Vector Control on MCF51AC256", Rev.0, Report DRM109, 04/2009.
- [18] A. Lidozzi, L. Solero, F. Crescimbin and R. Burgos, "Vector Control of Trapezoidal Back-EMF PM Machines Using Pseudo-Park Transformation", IEEE Power Electronics Specialists Conference, (PESC), Greece, 2008, pp. 2167-2171.
- [19] A.A. Oliveira, A. Monteiro, M. L. and Aguiar, D.P. Gonzaga, "Extended DQ Transformation for Vectorial Control Applications of Non-sinusoidal Permanent Magnet Synchronous Machines", IEEE Power Electronics Specialists Conference, Brazil, 2005, pp. 1807-1812.

ضدمحر که نسبت به سرعت، این تغییرات باید در سیستم کنترل لحاظ شوند. برای تطبیقی شدن این دو روش، پیشنهاد می‌شود تا یک رویتگر به نحوی طراحی گردد که بتواند شکل موج ولتاژهای ضدمحر که را به صورت برخط تخمین بزند و از این مقادیر تخمینی در سیستم کنترل استفاده شود.

مراجع

- [1] R. Krishnan, "Permanent-Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives", John-Wiley Press, 2002.
- [2] J.F. Gieras, and M. Wing; "Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications"; Second Edition, 2002, Marcel Dekker, Inc.
- [3] D.C. Hanselman; "Brushless Permanent-Magnet Motor Design", Magna Physics Publishing, 2006.
- [4] E. Klintberg, "Comparison of Control Approaches for Permanent Magnet Motors", Master of Science Thesis, Department of Energy and Environment, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden 2013.
- [5] P.L. Chapman, S.D. Sudhoff, and C.A. Whitcomb; "Multiple reference frame analysis of non-sinusoidal brushless DC drives", IEEE Trans. on Energy Conversion, Sept. 1999, vol. 14, no. 3, pp. 440 – 446.
- [6] T.M. Jahns, and W.L. Soong; "Pulsating Torque Minimization Techniques for Permanent Magnet AC Motor Drives---A Review", IEEE Trans. on Industrial Electronics, April 1996, vol. 43, no. 2, pp. 321-330.
- [7] A. N'diaye, C. Espanet, and A. Miraoui, "Reduction of the torque ripples in brushless PM motors by optimization of the supply - Theoretical method and experimental implementation", IEEE International Symposium on Industrial Electronics, France, 2004, pp. 1345-1350.
- [8] D. Grenier, and L.A. Dessaint; "A Park-like Transformation for the Study and the Control of a Non-Sinusoidal Brushless DC Motor", IEEE Industrial Electronics, Control, and Instrumentation Conf. (IECON), USA, 1995, pp. 837-843.
- [9] H. Lei, and H.A. Toliyat; "BLDC motor full speed range operation including the flux-weakening region", IEEE Industry Applications Conf., Salt Lake City, USA, 2003, vol. 1, pp. 618-624.

- [25] K.M. Smedley and S. Cuk, "One-cycle control of switching converters", IEEE Trans. on Power Electronics, 1995, vol. 10, no. 6, pp. 625-633.
- [26] A.S. Lock, E.R. da Silva, and M.E. Elbuluk, "Torque control of induction motor drives based on One-Cycle Control method," IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), Las Vegas, USA, 2012, pp. 1-8.
- [27] W. Song, K.M. Smedley, and F. Xiaoyun, "One-cycle Control of induction machine traction drive for high speed railway part II: Square wave modulation region," IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Texas, USA, 2011, pp. 1003-1009.
- [28] A. Halvaei Niasar, and E. Bolor Kashani, "Implementation of a Novel Brushless DC Motor Drive based on One-Cycle Control Strategy," Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering, September 2014, vol. 10, no. 3, pp. 244-249.
- [29] A. Halvaei Niasar, and E. Bolor Kashani, "Implementation of a Novel Brushless DC Motor Drive based on One-Cycle Control Strategy," Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering, September 2014, vol. 10, no. 3, pp. 244-249.
- Drives Conference, Madison, USA, 2003, pp. 1882-1888.
- [20] F. Bonvin, and Y. Perriard, "BLDC motor control in multiple dq axes - Power Electronics and Variable Speed Drives", IEE International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives, 2000, London, UK, pp. 500-505.
- [21] S. Bolognani, L. Tubina, and M. Ziliotto, "Sensorless control of PM synchronous motors with non-sinusoidal back EMF for home appliance", IEEE Electric Machines and
- [22] J.Y. Hung, and Z. Ding, "Design of currents to reduce torque ripple in brushless permanent magnet motors", IEE Proceedings B Electric Power Applications, 1993, vol. 140, no. 4, pp. 260-263.
- [23] A. N'diaye, C. Espanet, and A. Miraoui, "Reduction of the torque ripples in brushless PM motors by optimization of the supply - Theoretical method and experimental implementation", IEEE International Symposium on Industrial Electronics, France, 2004, pp. 1345-1350.
- [24] K.M. Smith, Z.Jr. Lai, and K.M. Smedley, "A new PWM controller with one-cycle response," IEEE Trans. on Power Electronics, 1999, vol. 14, pp. 142-150.