

کنترل مستقیم گشتاور موتور دی سی بدون جاروبک توسط کنترل کننده های هوشمند

محمد رضائی^۱، عباس شیری^۲

^۱ گروه برق، واحد بروجرد، دانشگاه آزاد اسلامی، بروجرد، ایران، Mohammad.Rezaei1987@yahoo.com

باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد بروجرد، دانشگاه آزاد اسلامی، بروجرد، ایران

^۲ دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران، Abbas.Shiri@srttu.edu

چکیده - موتور دی سی بدون جاروبک به دلیل ویژگی های زیاد مانند نسبت گشتاور به حجم بالا، عدم نیاز به نگهداری، اینرسی کم، سادگی تبادل حرارت با محیط خارج و راندمان بالا در صنایع مختلف کاربرد زیادی دارد. در این مقاله کنترل سرعت و گشتاور موتور BLDC مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. به همین منظور از روش کنترل مستقیم گشتاور برای کنترل موتور استفاده شده است. این روش یکی از روش های پر کاربرد در کنترل موتورهای می باشد. در این روش کنترلی، کلید زنی برای مبدل الکترونیک قدرت به گونه ایی انجام می شود که با کنترل زاویه و اندازه بردارها، عمل کنترل سرعت و گشتاور موتور انجام شود. در این مقاله به منظور بالا بردن دقت در ساختار کنترلی از کنترل کننده فازی استفاده شده است. این کنترل کننده به دلیل داشتن انعطاف پذیری در تعیین قوانین فازی و توابع عضویت کاربرد وسیعی دارد. به همین منظور در این مقاله از قوانین و توابع عضویت منحصر به فردی برای کنترل مناسب موتور BLDC استفاده شده است. همچنین از محیط شبیه سازی و برنامه نویسی نرم افزار متلب به منظور تجزیه و تحلیل نتایج شبیه سازی استفاده شده است. کلید واژه- موتور دی سی بدون جاروبک، کنترل مستقیم گشتاور، کنترل کننده فازی، کنترل سرعت.

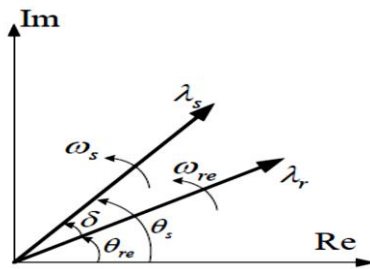
گشتاور بالا، هزینه نگهداری کم، ساختار ساده و روش کنترل آسان، در کاربردهای گوناگون از جمله حمل و نقل، هوافضا، صنایع نظامی، کامپیوتر و تولیدات خانگی گسترش یافته است [۳]. موتورهای BLDC، به دلیل نداشتن جاروبک و سیستم کموتاسیون مکانیکی، با حفظ ویژگی های خوب موتورهای DC، از مزایای موتورهای AC نیز بهره می برند. موتور BLDC از نظر چگالی گشتاور و نسبت توان به وزن، برتری های انکارناپذیری نسبت به موتور القایی دارد. همچنین به دلیل ذوزنقه ای بودن ولتاژ ضد محرکه و مربعی بودن شکل موج جریان ها در موتور BLDC، نحوه ساخت و آرایش سیم بندی این موتور ساده تر از انواع دیگر موتورهای AC با تغذیه سینوسی است. روش کنترل این موتور نیز به سادگی کنترل موتور DC است که قابلیت اطمینان بالا و هزینه ساخت پائین را برای درایو موتور BLDC به ارمغان می آورد [۴]. پیشرفت های اخیر کلیدهای نیمه هادی ولتاژ بالا، جریان بالا، باعث شده است تا ساخت این موتور ها و درایو های مخصوص به آن برای کاربردهای صنعتی مختلف عملی شود [۵]. گسترش

۱- مقدمه

امروزه توجه به انواع موتورهای الکتریکی که دارای ویژگی های متمایز تری نسبت به سایر موتورها هستند به صورت روز افزون افزایش یافته است. علاوه بر این امروزه توجه به درایو های الکتریکی مختلف به منظور بهره برداری بهتر از موتور ها به امری ضروری و اجتناب ناپذیر تبدیل شده است. درایوهای الکتریکی با سرعت متغیر امروزه در بسیاری از کاربردهای صنعتی و خانگی مورد استفاده قرار می گیرند [۱]. آرایش های متنوعی از درایوهای الکتریکی که از انواع موتورها، مبدل های استاتیکی الکترونیک قدرت و سیستم های کنترل پیشرفته استفاده می کنند به بازار عرضه شده اند و تلاش در جهت بالا بردن عملکرد این درایوها و کاهش قیمت تمام شده ادامه دارد [۲]. در این میان، طی دهه گذشته استفاده از موتورهای DC بدون جاروبک (BLDC) به دلیل ویژگی های برجسته آنها نظیر بهره زیاد، چگالی توان و

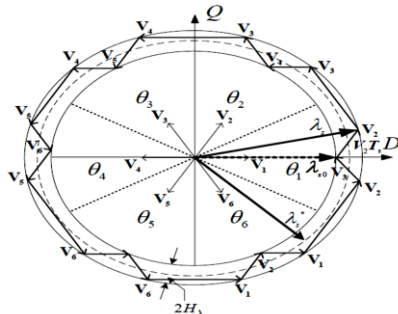
کند. بنابر این بر اساس رابطه (۲) گشتاور را می‌توان با کنترل دامنه و سرعت گردش بردار شار استاتور λ_s کنترل کرد. برای حاصل شدن عملکرد فوق باید بردار ولتاژ مناسب به ترمینال‌های موتور اعمال شود.

برای حالت عملکرد راستگرد اگر گشتاور واقعی کمتر از گشتاور مرجع باشد بردارهای ولتاژی که جهت بردار شار استاتور را در جهت گردش نگه می‌دارند انتخاب می‌شوند. هنگامی که زاویه بار بین شار استاتور و روتور افزایش یابد گشتاور افزایش می‌یابد. اگر گشتاور واقعی بزرگتر از گشتاور مرجع باشد بردار ولتاژی که در جهت مخالف است انتخاب می‌شود. در همین لحظه زاویه بار کاهش یافته و به دنبال آن گشتاور کاهش می‌یابد. بنابر این اصول این روش بر این پایه است که گشتاور با سرعت چرخش شار استاتور کنترل می‌شود که این موضوع در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: بردار فضایی شار پیوندی روتور و استاتور

اگر مقاومت استاتور صرفنظر کنیم تغییرات شار استاتور فقط به بردار ولتاژ اعمالی بستگی دارد که در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲: افزایش شار پیوندی استاتور در مختصات DQ

برای یک دوره زمانی کوتاه مثلا برای یک زمان نمونه برداری $T = \Delta t$ شار پیوندی استاتور و دامنه آن با اعمال بردار استاتور به صورت افزایشی تغییر می‌کنند. شار پیوندی استاتور در مرجع

استفاده از انواع موتورهای دی سی بدون جاروبک موجب شده است تا کنترل این مدل از موتور ها در مقالات مختلف با رویکرد های مختلف مورد بررسی قرار گیرد. در مرجع [۶] یک روش کنترلی جدید به منظور کاهش نوسانات گشتاور موتور BLDC پیشنهاد شده است. در این روش نمونه برداری از ولتاژ و جریان موتور انجام شده و بعد از نمونه برداری، تبدیل پارک صورت گرفته و سپس ساختار کلید زنی جدیدی به منظور کاهش ریپل گشتاور به کار رفته است. در مرجع [۷-۱۰] کنترل گشتاور موتور به روش پله ای انجام شده است در این مراجع هدف کاهش ریپل گشتاور و کنترل مناسب موتور می باشد.

۲- کنترل مستقیم گشتاور

کنترل مستقیم گشتاور می‌تواند با استفاده از اینورترهای ۶ سوئیچ یا ۴ سوئیچ انجام شود، که در اینورترهای ۴ سوئیچ حجم و هزینه درایو کاهش می‌یابد ولی در عوض کنترل موتور پیچیده تر می‌شود [۸]. ایده اصلی روش کنترل مستقیم گشتاور انتخاب بردار مناسب ولتاژ استاتور از ۸ حالت ممکن سوئیچینگ اینورتر است. این انتخاب بردار مناسب بر مبنای اختلاف بین گشتاور و شار موتور با مقادیر مرجع مربوط به آن ها می باشد. رابطه‌ی گشتاور برای یک موتور مغناطیس دائم به صورت رابطه زیر است.

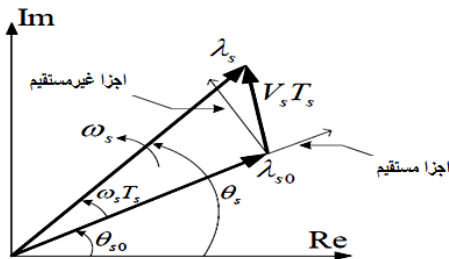
$$T_{em} = 3 \left(\frac{P}{2} \right) \frac{|V_s| |E|}{\omega_e |X_s|} \sin \delta = 3 \left(\frac{P}{2} \right) \frac{|\lambda_s| |\lambda_r|}{L_s} \sin \delta \quad (1)$$

در رابطه (۱) زاویه بین شار روتور و شار استاتور، P تعداد قطب ها، V_s ولتاژ استاتور، L_s اندوکتانس استاتور و ω_e سرعت زاویه ای است. رابطه بالا را می‌توانیم به صورت رابطه زیر بیان کنیم:

$$T_{em} = 3 \left(\frac{P}{2} \right) \frac{|\lambda_s + \Delta \lambda_s| |\lambda_r|}{L_s} \sin \Delta \delta \quad (2)$$

همانطور که از معادله (۲) مشخص است اگر زاویه بار δ افزایش یابد تغییرات گشتاور افزایش می‌یابد. برای افزایش زاویه بار، بردار شار استاتور باید سریعتر از شار روتور تغییر کند. چرخش شار روتور به سرعت زاویه ای روتور بستگی دارد بنابر این برای کاهش زاویه بار، شار استاتور باید آهسته تر از شار روتور تغییر

پایه‌ای است که چگونگی تغییرات شار و گشتاور به عنوان تابعی از بردار ولتاژ اعمالی را نشان می‌دهد. بر طبق این شکل اجزای مستقیم بردار ولتاژ اعمالی مقدار شار پیوندی استاتور و اجزای غیر مستقیم سرعت چرخش شار را تغییر می‌دهد که باعث تغییر گشتاور می‌شود. اگر گشتاور نیاز به تغییر داشته باشد در حالیکه مقدار شار مناسب باشد اجزای غیر مستقیم اعمال می‌شوند. اگر تغییر گشتاور نیاز نباشد ولی تغییر دامنه شار نیاز باشد بردارهای اجزای مستقیم انتخاب می‌شوند. بنابراین اگر تغییرات گشتاور و شار مورد نیاز باشد بردار ولتاژ میان اجزای مستقیم و غیر مستقیم اعمال می‌شود. هنگامی که بردارهای صفر ولتاژ (۰۰۰) و (۱۱۱) اعمال می‌شوند بردار شار پیوندی در موقعیت قبلی خود باقی می‌ماند. البته این اصل برای موتورهای القایی صحیح است. چون در موتورهای دارای آهنربا حتی در هنگامی که بردار صفر انتخاب شود به دلیل وجود شار آهنربا مقدار شار ثابت نیست. بنابراین در موتورهای سنکرون مغناطیس دائم از بردار صفر جهت کنترل شار پیوندی استاتور استفاده نمی‌شود.



شکل ۴: اجزای مستقیم و غیر مستقیم بردار شار پیوندی استاتور

شکل ۵ بلوک دیاگرام کنترلی یک موتور DC بدون جاروبک با استفاده از روش کنترل مستقیم گشتاور را نشان می‌دهد. در این مدل از اینورتر ۶ سوئیچ جهت کنترل موتور استفاده شده است.

جدول ۱ سوئیچینگ مربوط به کنترل موتور را نشان می‌دهد که به صورت آفلاین ذخیره شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این حالت کنترل برای ناحیه شار ثابت انجام شده است یعنی تغییرات شار صفر در نظر گرفته شده است. در این حالت فقط از قسمت‌هایی از جدول که با رنگ تیره تر نشان داده شده است استفاده می‌شود.

ثابت را می‌توان به صورت رابطه (۳) بیان کرد.

$$\lambda_s = \int (V_s - R_s i_s) dt \quad (3)$$

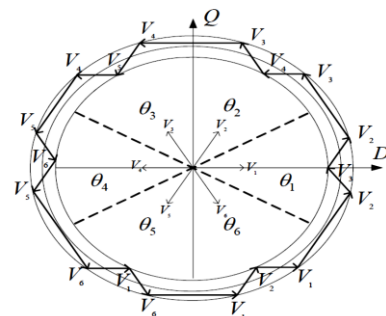
در بازه زمانی یا بازه سوئیچینگ یکی از ۶ بردار سوئیچینگ اعمال می‌شود و هر بردار ولتاژ اعمالی در یک بازه زمانی از پیش تعیین شده اعمال می‌شود و ثابت است، بنابراین رابطه (۳) را می‌توان به صورت رابطه (۴) بیان کرد.

$$\lambda_s = V_s t - R_s \int i_s dt + \lambda_{s/t=0} \quad (4)$$

که مقدار اولیه شار پیوندی استاتور در لحظه سوئیچینگ است. V_s ولتاژ اندازه‌گیری شده استاتور، i_s جریان اندازه‌گیری شده استاتور و R_s مقاومت استاتور است. باتوجه به شکل‌های بیان شده می‌توان نوشت

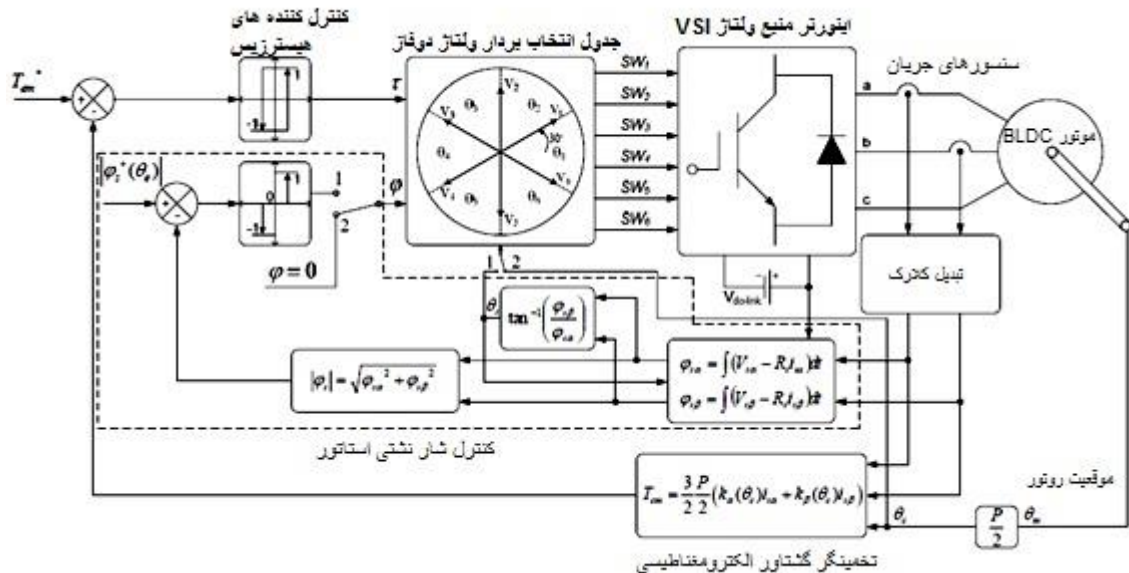
$$V_s = \frac{d}{dt}(\lambda_s) \quad \Delta \lambda_s = V_s \Delta t \quad (5)$$

هدف از کنترل شار در روش کنترل مستقیم گشتاور، نگه داشتن دامنه در یک باند هیستریزس از پیش تعیین شده است. با اعمال بردار ولتاژ مورد نیاز دامنه شار پیوندی استاتور را می‌توان کنترل نمود. برای انتخاب بردار ولتاژ جهت کنترل دامنه شار پیوندی استاتور صفحه ولتاژ به ۶ ناحیه تقسیم شده است که در شکل ۳ آورده شده است.



شکل ۳: مسیر مدور شار پیوندی در مرجع ساکن

در هر ناحیه ۲ بردار ولتاژ همسایه قرار گرفته‌اند که کمترین فرکانس سوئیچینگ را داشته و برای افزایش یا کاهش دامنه شار پیوندی استاتور انتخاب می‌شوند. برای مثال هنگامی که بردار ولتاژ V_2 در سکتور ۱ اعمال شود، دامنه شار استاتور (هنگامی که جهت پاد ساعتگرد است) افزایش می‌یابد. اگر ولتاژ V_3 انتخاب شود دامنه شار پیوندی استاتور کاهش می‌یابد. شکل ۴ یک شکل

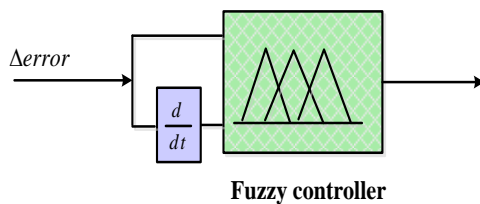


شکل ۵: بلوک دیاگرام کنترل مستقیم گشتاور موتور DC بدون جاروبک

جدول ۱: جدول سوئیچینگ موتور

φ	τ	θ					
		θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
1	1	$V_1(100001)$	$V_2(001001)$	$V_3(011000)$	$V_4(010010)$	$V_5(000110)$	$V_6(100100)$
	-1	$V_6(100100)$	$V_5(100001)$	$V_4(001001)$	$V_3(011000)$	$V_2(010010)$	$V_1(000110)$
0	1	$V_2(001001)$	$V_3(011000)$	$V_4(010010)$	$V_5(000110)$	$V_6(100100)$	$V_1(100001)$
	-1	$V_3(000110)$	$V_4(100100)$	$V_5(100001)$	$V_6(001001)$	$V_1(011000)$	$V_2(010010)$
-1	1	$V_3(011000)$	$V_4(010010)$	$V_5(000110)$	$V_6(100100)$	$V_1(100001)$	$V_2(001001)$
	-1	$V_4(010010)$	$V_5(000110)$	$V_6(100100)$	$V_1(100001)$	$V_2(001001)$	$V_3(011000)$

توابع عضویت مورد استفاده در ورودی و خروجی کنترل کننده در شکل ۷ و ۸ نمایش داده شده است. این کنترل کننده شامل ۵ تابع عضویت در ورودی و خروجی می باشد که توسط ۲۵ قانون به هم مرتبط می شوند. جدول ۲ قوانین مورد استفاده برای سیستم موتور را نمایش می دهد.

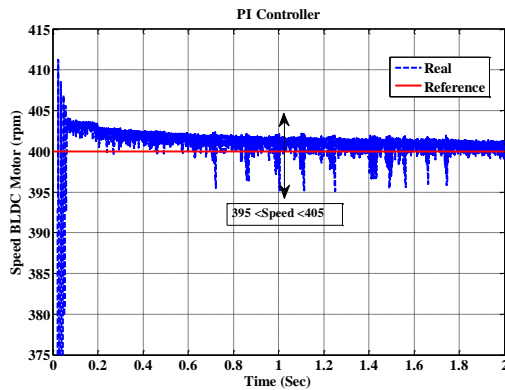


شکل ۶: ساختار کنترل کننده فازی

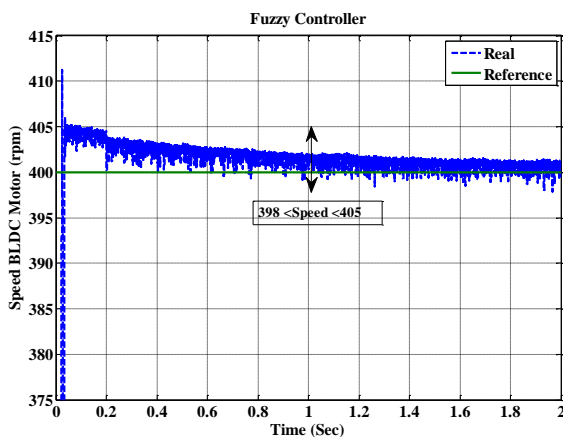
۳- کنترل کننده فازی

کنترل کننده فازی به دلیل داشتن انعطاف پذیری در طراحی و همچنین عدم نیاز به معادلات پیچیده سیستم بسیار مورد توجه قرار گرفته و امروزه در بسیاری از سیستم‌ها از آن استفاده می شود. کنترل کننده فازی دارای چهار بخش می باشد. بخش مربوط به فازی سازی، قوانین فازی، ماشین استنتاج فازی و دی فازی سازی. کنترل کننده فازی بر اساس تجربه طراح و دانش قبلی در مورد سیستم تحت مطالعه طراحی می شود. شکل ۶ ساختار کنترل کننده فازی طراحی شده برای سیستم موتور بدون جاروبک را نمایش می دهد.

عملکردی بسیار بهتر از کنترل کننده کلاسیک داشته است.

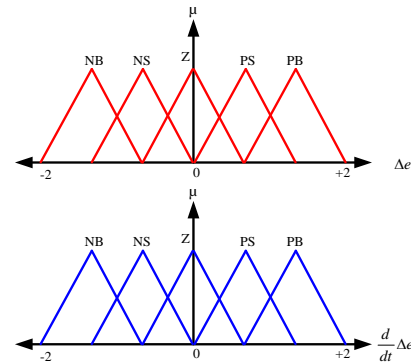


شکل ۹: کنترل دور موتور بدون جاروبک توسط کنترل کننده کلاسیک

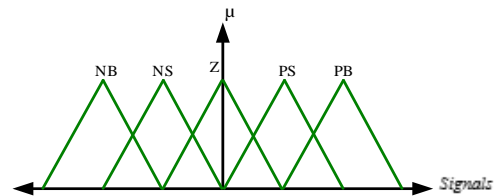


شکل ۱۰: کنترل سرعت موتور بدون جاروبک توسط کنترل کننده فازی

یکی از بخش‌های مهم در این مقاله کنترل دقیق گشتاور با کمترین میزان نوسانات حول مقدار مرجع می‌باشد. در شکل ۱۱ کنترل گشتاور موتور بدون جاروبک توسط کنترل کننده کلاسیک نمایش داده شده است. نوسانات گشتاور در این روش کنترلی زیاد می‌باشد. در شکل ۱۲ کنترل گشتاور موتور توسط کنترل کننده فازی مطرح شده است. همچنین در این بخش نیز مشاهده می‌کنیم که کنترل کننده فازی عملکردی بسیار بهتر از کنترل کننده کلاسیک داشته است.



شکل ۷: توابع عضویت ورودی کنترل کننده فازی



شکل ۸: توابع عضویت خروجی کنترل کننده فازی

جدول ۲: قوانین مورد استفاده در کنترل کننده فازی

Δe	NB	NS	Z	PS	PB
$\frac{d}{dt} \Delta e$					
NB	PB	PS	Z	Z	NS
NS	PB	PS	Z	NS	NS
Z	PS	Z	NS	NS	NB
PS	Z	NS	NB	NB	NB
PB	NS	NB	NB	NB	NB

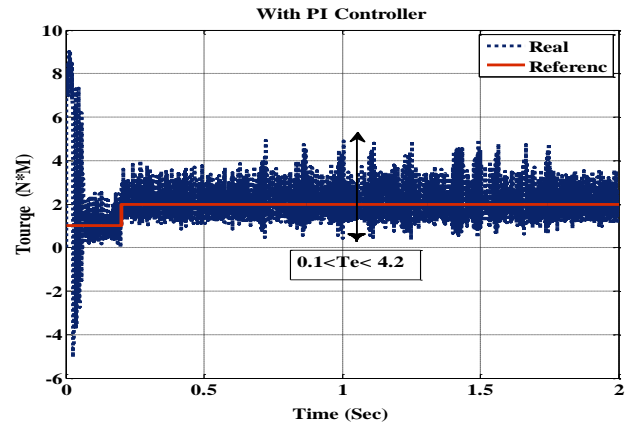
۴- تحلیل نتایج شبیه سازی

در این بخش نتایج حاصل از شبیه سازی کنترل موتور در نرم افزار متلب به روش شار مستقیم نمایش داده شده است. نتایج شبیه سازی نشان دهنده کنترل مناسب گشتاور به روش به کار برده شده برای موتور BLDC است. در شکل ۹ کنترل دور موتور BLDC با روش به کار برده شده با استفاده از کنترل کننده کلاسیک نمایش داده شده است. در شکل ۱۰ کنترل دور موتور BLDC با استفاده از کنترل کننده فازی نمایش داده شده است. براساس این شکل تغییر در نوسانات سرعت موتور حول مقدار مرجع کمترین مقدار ممکن را داشته است و کنترل کننده فازی

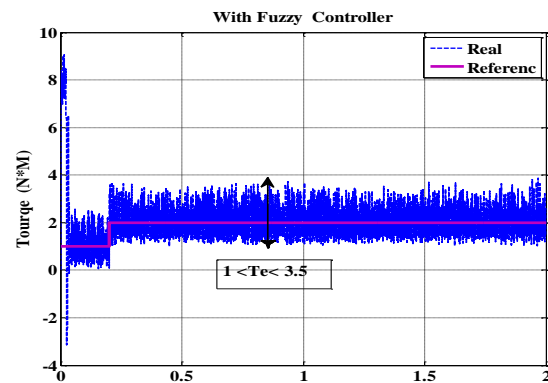
سازی نرم افزار متلب انجام شده و نتایج شبیه سازی بالا بودن کارایی روش های پیشنهادی را نمایش می دهند. از روش پیشنهادی می توان برای کنترل محرکه های مختلف مورد استفاده در کاربردهای مختلف صنعتی، نظامی، خودروهای برقی و غیره به دلیل پاسخ دهی مناسب استفاده کرد.

مراجع

- [1] Ho, Tze-Yee, et al. "The design of a high power factor brushless DC motor drive." *Computer, Consumer and Control (IS3C), 2012 International Symposium on*. IEEE, 2012.
- [2] Gao, Jin, and Yuwen Hu. "Direct self-control for BLDC motor drives based on three-dimensional coordinate system." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 57.8 (2010): 2836-2844.
- [3] Ozturk, Salih Baris, William C. Alexander, and Hamid Toliyat. "Direct torque control of four-switch brushless DC motor with non-sinusoidal back EMF." *Power Electronics, IEEE Transactions on* 25.2 (2010): 263-271.
- [4] Lu, Haifeng, Lei Zhang, and Wenlong Qu. "A new torque control method for torque ripple minimization of BLDC motors with un-ideal back EMF." *Power Electronics, IEEE Transactions on* 23.2 (2008): 950-958.
- [5] Ozturk, Salih Baris, and Hamid Toliyat. "Direct torque and indirect flux control of brushless DC motor." *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on* 16.2 (2011): 351-360.
- [6] Lu, Haifeng, Lei Zhang, and Wenlong Qu. "A new torque control method for torque ripple minimization of BLDC motors with un-ideal back EMF." *Power Electronics, IEEE Transactions on* 23.2 (2008): 950-958.
- [7] Masmoudi, Malek, Bassem El Badsy, and Ahmed Masmoudi. "DTC of B4-inverter-fed BLDC motor drives with reduced torque ripple during sector-to-sector commutations." *Power Electronics, IEEE Transactions on* 29.9 (2014): 4855-4865.
- [8] Masmoudi, Malek, Bassem El Badsy, and Ahmed Masmoudi. "Direct torque control of brushless DC motor drives with improved reliability." *Industry Applications, IEEE Transactions on* 50.6 (2014): 3744-3753.
- [9] Niapour, SA KH Mozaffari, et al. "Brushless DC motor drives supplied by PV power system based on Z-source inverter and FL-IC MPPT controller." *Energy Conversion and Management* 52.8 (2011): 3043-3059.
- [10] Jung, Sang-Yong, et al. "Commutation control for the low-commutation torque ripple in the position sensorless drive of the low-voltage brushless DC motor." *Power Electronics, IEEE Transactions on* 29.11 (2014): 5983-5994.



شکل ۱۱: کنترل گشتاور موتور بدون جاروبک توسط کنترل کننده کلاسیک



شکل ۱۲: کنترل گشتاور موتور بدون جاروبک توسط کنترل کننده فازی

۵- نتیجه گیری

در این مقاله با توجه به ویژگی های منحصر به فرد موتور BLDC این موتور به عنوان مورد مطالعاتی انتخاب گردید. علاوه بر این جهت کنترل گشتاور و دور موتور BLDC از روش کنترل مستقیم گشتاور یا همان روش DTC استفاده شده است. در کنترل مستقیم گشتاور از روش کنترل مستقیم شار برای کنترل موتور استفاده گردید. این روش یکی از روش های کاربردی در کنترل درایو موتور BLDC می باشد. در این مقاله به منظور بهبود شرایط کنترلی موتور از کنترل کننده فازی استفاده شده است. این کنترل کننده به دلیل داشتن انعطاف پذیری در تعیین توابع عضویت و قوانین فازی دارای کاربرد وسیعی در بخش های مختلف می باشد. شبیه سازی سیستم تحت مطالعه و روش های کنترلی به همراه الگوریتم های بهینه سازی در محیط برنامه نویسی و محیط شبیه