

کنترل بدون حسگر مکانیکی برای موتورهای جریان مستقیم بدون جاروبک با استفاده از دوازده پالس شاخص

امیرحسین رمضانخانی¹، داوود عرب خابوری²، مرتضی جامعی³

¹ کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت، تهران، a_ramezankhani@alumni.iust.ac.ir

² دانشیار، دانشگاه علم و صنعت، تهران، khaburi@iust.ac.ir

³ کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت، تهران، morteza_jamei@alumni.iust.ac.ir

چکیده

در این مقاله روشی برای کنترل بدون حسگر مکانیکی برای موتورهای جریان مستقیم بدون جاروبک¹ با استفاده از دوازده پالس شاخص ارائه شده است. ابتدا موتور BLDC به صورت ریاضی مدل سازی گردیده و معادلات ولتاژ و گشتاور استخراج شده است. سپس روش تولید دوازده پالس که شامل پالس شاخص² و کموتاسیون³ است توضیح داده شده و مقدار سرعت و فاصله زمانی بین هر پالس محاسبه شده است. در آخر با استفاده از پالس شاخص، مقدار انحراف از نقطه عبور از صفر⁴ تخمین زده شده و خطای کموتاسیون اصلاح گردیده است. یکبار مزایای روش پیشنهاد شده این است که تاخیر 30 درجه بعد از تشخیص ZCP برای لحظات کموتاسیون، به صورت دقیق است. همچنین مقدار سرعت به صورت دقیق تخمین زده شده و خطای تشخیص ZCP، سریع تصحیح می گردد. روش پیشنهادی در محیط Matlab/Simulink شبیه سازی شده و نتایج آن، صحت روش پیشنهادی را تایید میکند.

واژه های کلیدی

موتور جریان مستقیم بدون جاروبک، پالس شاخص، نیروی ضد محرکه برگشتی⁵، پالس کموتاسیون

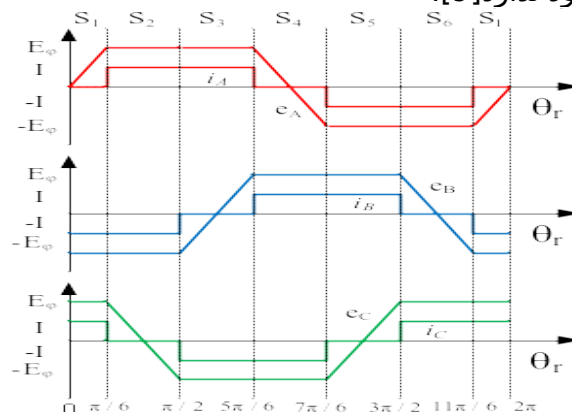
مقدمه

موتورهای BLDC به علت داشتن مزایایی مثل بازدهی بالا، اندازه کوچک، چگالی انرژی بالا و هزینه نگهداری کم به صورت گسترده ای در خودروهای الکتریکی، رانها و غیره استفاده میشوند[1]. برای کنترل موتور BLDC از روش 6 ناحیه استفاده می شود. مطابق شکل 1، در هر 60 درجه الکتریکی جریان یک فاز مثبت، فاز دیگر منفی و فاز سوم خاموش است[2]. بنابراین برای کنترل این موتور، لازم است هر 60 درجه از موقعیت موتور اطلاع پیدا کرد، تا جریان هماهنگ با ولتاژ ضد محرکه الکتریکی باشد. در یک دوره تناوب 6 ناحیه وجود دارد، که

شامل تغذیه دو فاز از سه فاز در هر ناحیه است[3]. برای تشخیص موقعیت موتور BLDC، از حسگرهایی مانند اثر هال، انکودر و غیره که در استاتور نصب شده اند، استفاده میگردد[4 و 5].

حسگرهای مکانیکی به مسائلی نظیر دمای بالا، رطوبت و محیطهای سخت، حساس و آسیب پذیر هستند و در نتیجه قابلیت اطمینان موتورهای BLDC پایین می آیند. همچنین حسگرها باعث افزایش هزینه و حجم موتور میشوند[6].

برای حل این معایب، محققان روشهای کنترل بدون حسگر را برای موتور BLDC ارائه کرده اند. که هر کدام از آنها بر اساس ولتاژ و جریان سیمپیچ استاتور عمل میکنند. به روشهایی برای تشخیص موقعیت روتور مثل، تشخیص ZCP ولتاژ ضد محرکه برگشتی، هارمونیک سوم، اندازه گیری جریان در دیوهای هرزگردی و غیره میتوان اشاره کرد[7 و 8]. روش مبتنی بر ZCP، به علت اجرای آسانتر و ارزانتر بودن بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. در موتورهای BLDC، با حرکت روتور در سیمپیچهای استاتور ولتاژ القا میشود. ولتاژ القا شده تابعی از موقعیت روتور بوده و این ولتاژ در حالت سکون وجود ندارد[9].



شکل 1: شکل موجهای Back-EMF و جریان فازها

¹ Brushless Direct Current (BLDC)

² Index pulse (IP)

³ Commutation pulse (CP)

⁴ Zero crossing point (ZCP)

⁵ Back-electromotive force (Back_EMF)

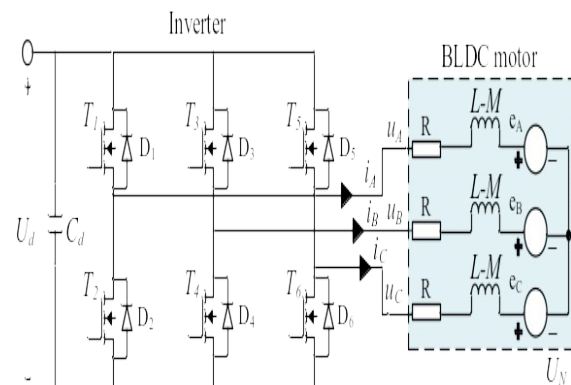
بنابراین با این ولتاژ نقاط کموتاسیون بدست می-آید. در این روش، ZCP ولتاژ ضدمحرکه شناسایی شده و سپس با تاخیر به اندازه 30 درجه الکتریکی، لحظات دقیق کموتاسیون مشخص شده و شش سیگنال موقعیت روتور در هر سیکل به کلیدهای الکترونیکی ارسال میشود [10]. مطابق شکل 1، هنگامی که لحظات کموتاسیون دقیق باشند، بیشترین گشتاور ممکن، بدست میاید [11].

به علت نویز مدولاسیون و سیگنالهای تداخلی، از یک فیلتر پایین گذر برای پردازش سیگنال ZCP استفاده میشود. استفاده از فیلتر پایین گذر باعث ایجاد تاخیر در سیستم و انحراف در لحظات کموتاسیون میشود. انحراف موجب اعوجاج و افزایش مقدار پیک جریان فاز میگردد که باعث کاهش گشتاور تبدیلی میشود [12].

تحقیقات روی کنترل بدون حسگر بر دو موضوع متمرکز است، اولاً، قابلیت اطمینان در عملکرد موتور و ثانیاً، بهبود دقت کموتاسیون [13]. در این مقاله یک روش برای بهبود دقت کموتاسیون به کمک پالس شاخص ارائه پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی خطای تشخیص ZCP را تصحیح کرده و باعث میشود که دقت لحظات کموتاسیون، بهتر شوند. مزایای این روش شامل تشخیص سریع خطا و تصحیح آن است. همچنین تخمین دقیق زاویه تاخیر 30 درجه الکتریکی است.

مدلسازی موتور BLDC

در این پژوهش مدل الکتریکی موتور BLDC با مفروضاتی نظیر اتصال ستاره فازها، با صرفنظر از اشباع هسته و تلفات هیستریزس و جریان گردابی ارائه شده است. بلوک دیاگرام سیستم درایو موتور BLDC در شکل 2 نشان داده شده است.



شکل 2: بلوک دیاگرام سیستم درایو موتور BLDC

معادلات ولتاژ فاز موتور BLDC به شرح زیر است [14]:

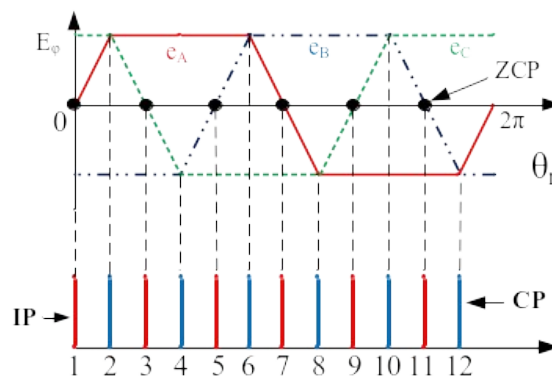
$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_N \\ U_N \\ U_N \end{bmatrix} \quad (1)$$

که u_B, u_A و u_C مقادیر ولتاژهای فاز ترمینال، i_B, i_A و i_C جریانهای فاز، e_B, e_A و e_C ولتاژهای Back-EMF، U_N ولتاژ نقطه صفر موتور، R مقاومت سیمپیچ، L اندوکتانس سیم پیچ و M اندوکتانس متقابل به ترتیب هستند.

روش پیشنهادی

1- تولید دوازده پالس

در روش پیشنهادی، از دوازده پالس استفاده شده که شش پالس آن برای کموتاسیون و شش پالس آن برای تصحیح خطای تشخیص ZCP استفاده می-شود. پالسهای فرد به عنوان شاخص و پالسهای زوج به عنوان کموتاسیون استفاده میشود. CP به کلیدهای اینورتر اعمال میشوند. یک دایره 360 درجه است که اگر بر دوازده پالس تقسیم شود، فاصله هر پالس برابر 30 درجه شده و به همین علت فاصله تاخیر 30 درجه به صورت دقیق بدست میآید. با تغییر فرکانس پالسها سرعت موتور تغییر میکند. در شکل 3، دوازده پالس نشان داده شده است.



شکل 3: دوازده پالس روش پیشنهادی و ولتاژهای Back-EMF

زمان بین هر فاصله زمانی به صورت زیر محاسبه میگردد:

$$T_{IB} = \frac{1}{12 * rps * \frac{p}{2}} \quad (2)$$

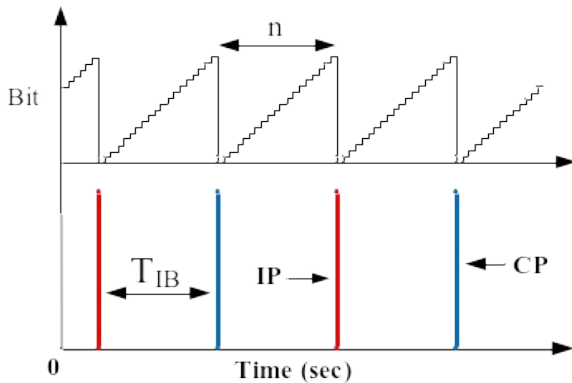
که سرعت برحسب ثانیه، تعداد قطبها به ترتیب هستند.

براساس رابطه 2، فرکانس اعمالی به کلیدها بدست میآید:

$$F_p = \frac{1}{T_{IB}} \quad (3)$$

در تایمر n بیتی، با اعمال پالس ساعت (کلاک)، شمارنده می‌شمارد و هنگامی که به مقدار تنظیم شده برسد، تایمر سرریز شده و شمارنده صفر می-شود. در هنگام سرریز شدن تایمر، یک تابع وقفه فعال شده و مقدار زمان تناوب پالس، یک واحد افزایش مییابد. با تغییر مقدار اولیه شمارنده، میتوان فرکانس پالس را تغییر داد. در شکل 4 تایمر نشان داده شده است.

شده و پالس بعدی به اندازه زمان محاسبه شده شیفته داده میشود.

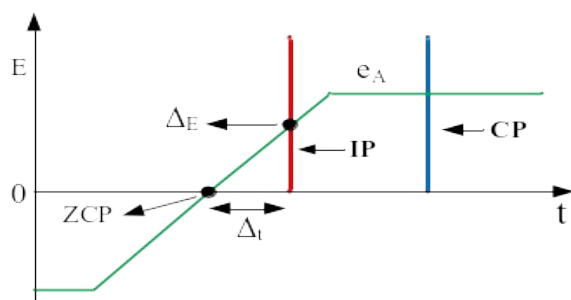


شکل 4: مقایسه سرریز شمارنده با هر پالس

2- تخمین انحراف بوسیله پالس شاخص

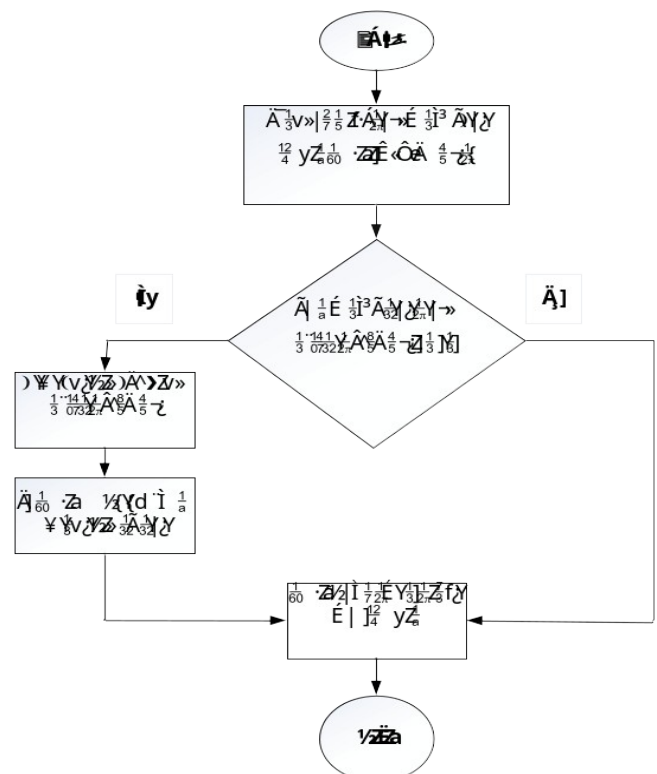
در زمانی که ZCP به درستی تشخیص داده شود، مطابق شکل 3، پالس شاخص با نقطه عبور از صفر تلاقی داشته و پالس کموتاسیون با 30 درجه تاخیر دقیق، در لحظات مناسب اعمال میشوند. اما اگر ZCP به درستی تشخیص داده نشود، IP از ZCP انحراف دارد که در نتیجه CP دارای خطا است. مطابق شکل 5، انحراف از ZCP مشخص است که برای تصحیح خطا، ابتدا مقدار شیب خط ولتاژ Back_EMF، m را بدست آورده، آنگاه مقدار خطای ولتاژ ضدمحرکه Δ_E در نقطه تلاقی با پالس شاخص، خوانده شده و سپس با تقسیم آن بر مقدار شیب خط ولتاژ ضدمحرکه، مقدار زمان انحراف از ZCP، Δt بدست میآید. به اندازه زمان انحراف بدست آمده، پالس بعدی را شیفته داده تا مقدار خطا تصحیح گردد. مقدار زمان انحراف از ZCP طبق رابطه زیر محاسبه میگردد:

$$\Delta_t = \frac{\Delta_E}{m} \quad (4)$$



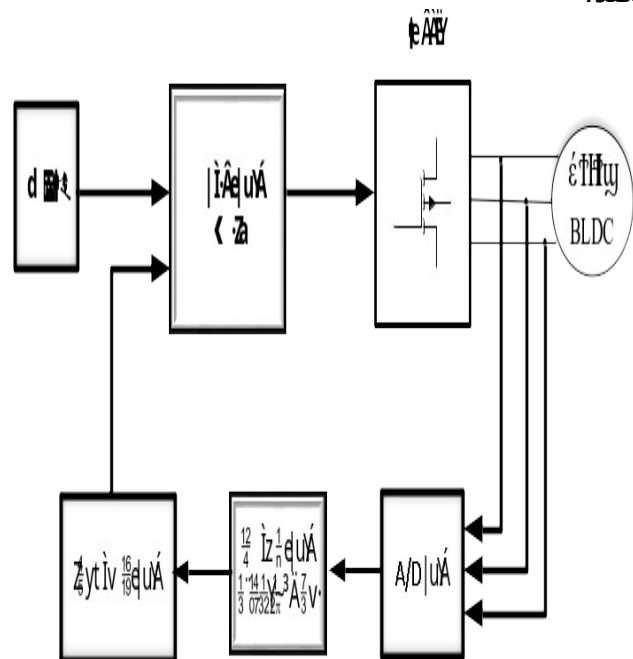
شکل 5: انحراف پالس شاخص از نقطه عبور از صفر

شکل 6، فلوجارت روش بهبود خطای کموتاسیون با استفاده از پالس شاخص را نشان میدهد. در فلوجارت، ابتدا مقدار ولتاژ ضدمحرکه، در نقطه تلاقی با پالس شاخص بدست آمده و اگر مقدار بدست آمده برابر صفر بود، برنامه کنترلکننده خطا تا رسیدن پالس شاخص بعدی صبر میکند و اگر خطا برابر صفر نبود، آنگاه زمان انحراف خطا محاسبه



شکل 6: فلوجارت روش پیشنهادی

در شکل 7 ساختار کلی روش پیشنهادی آمده است که شامل یک واحد آنالوگ به دیجیتال، واحد تشخیص لحظه گذر از صفر، واحد تولید پالس، تصحیح خطا و اینورتر می باشد و با تغییر سرعت مرجع ورودی، سرعت موتور تغییر میکند.



شکل 7: ساختار کلی روش پیشنهادی

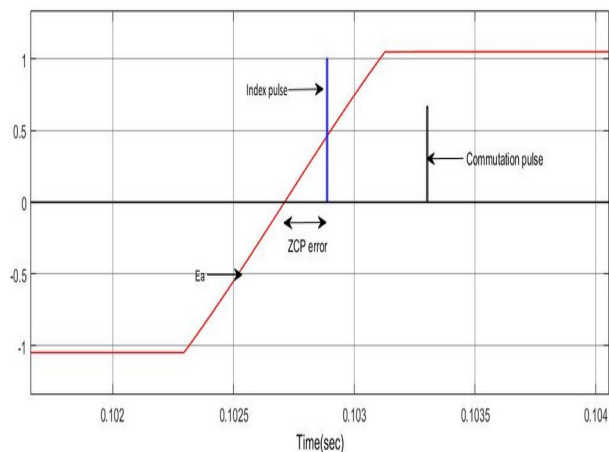
شبیه سازی روش پیشنهادی و نتایج

روش پیشنهادی بهبود خطای کموتاسیون توسط مقایسه پالس شاخص با نقطه عبور از صفر، توسط نرم افزار سیمولینک متلب شبیه سازی شده است. پارامترهای موتور استفاده شده در شبیه سازی، در جدول 1 آمده است. خطای کموتاسیون در لحظه 0.1 ثانیه و به اندازه 3.5 درصد اعمال شده و واحد تصحیح خطا، در دو سیکل کاری آن را اصلاح نموده است.

جدول 1: پارامترهای موتور

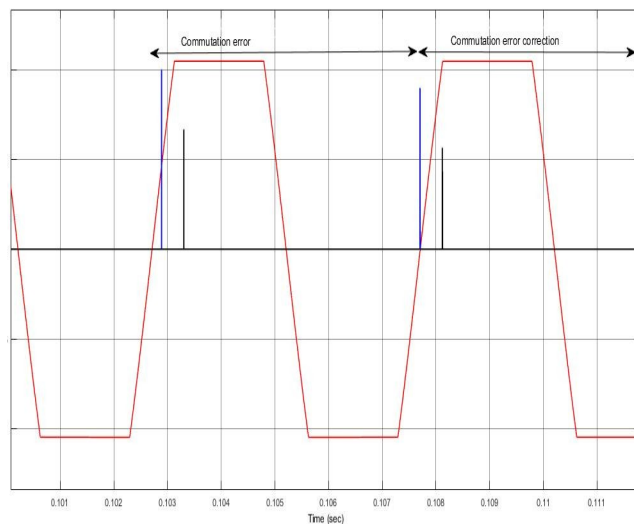
مقدار	پارامترها
ولتاژ نامی (V)	400
توان نامی (W)	1000
سرعت نامی (rpm)	3500
مقاومت فاز (Ω)	2.875
اندوکتانس فاز (mH)	8.5
جفت قطب	4
گشتاور بار (N.m)	1

شکل 8، IP یا ولتاژ ضدمحرکه فاز A مقایسه و مقدار خطای آن مشخص شده است. خطای تشخیص عبور از صفر موجب میشود که CP دارای انحراف شود. هنگامی که خطای ZCP مشخص گردد، میتوان پالسهای بعدی را به اندازه آن خطا، شیفت داد تا خطای کموتاسیون برطرف شود.



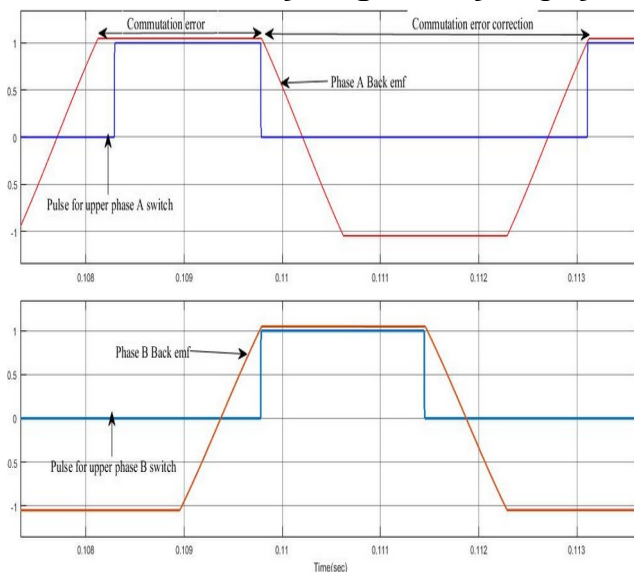
شکل 8: لحظه خطای کموتاسیون، مقایسه پالس شاخص با ولتاژ ضدمحرکه فاز A

شکل 9، لحظه خطای کموتاسیون با لحظه تصحیح خطای کموتاسیون مقایسه شده است. در زمان خطای کموتاسیون پالس شاخص دارای انحراف از ZCP است که این انحراف در سیکل بعدی با شیفت دادن پالسهای دیگر تصحیح میگردد.



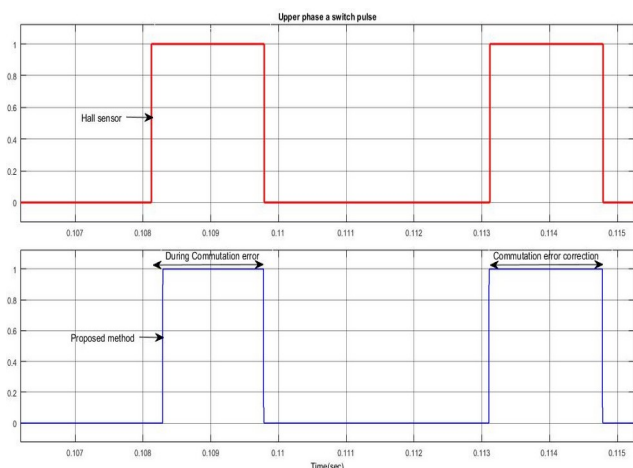
شکل 9: مقایسه لحظه خطای کموتاسیون با لحظه تصحیح خطای کموتاسیون

پالسهای اعمالی به کلیدهای قدرت توسط پالس کموتاسیون ساخته میشود. در شکل 10، پالس اعمالی به کلید بالایی بازوی فاز A، در لحظه خطای کموتاسیون و لحظه تصحیح خطای کموتاسیون آمده است. در هنگام خطای کموتاسیون، پالس نسبت به ولتاژ ضدمحرکه انحراف دارد که در سیکل بعدی مقدار این انحراف تصحیح میگردد.



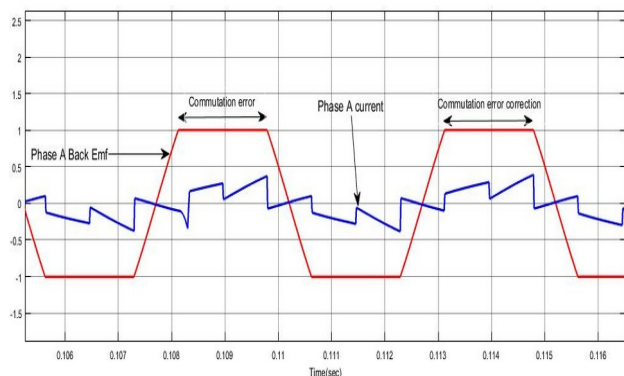
شکل 10: مقایسه دوفاز، لحظه خطای کموتاسیون با لحظه تصحیح خطای کموتاسیون در پالس اعمالی به کلید بالایی بازوی فاز

پالسهای اعمالی به کلید بالایی بازوی فاز A، در دو روش پیشنهادی با روش حسگر اثرهال در شکل 11، مقایسه میشود. این مقایسه نشان میدهد که روش پیشنهادی خطای نسبتاً کمی نسبت به روش حسگر اثرهال دارد.



شکل 11: مقایسه پالس اعمالی به کلید بالایی بازوی فاز A در روش پیشنهادی با روش استفاده از حسگر اثر هال

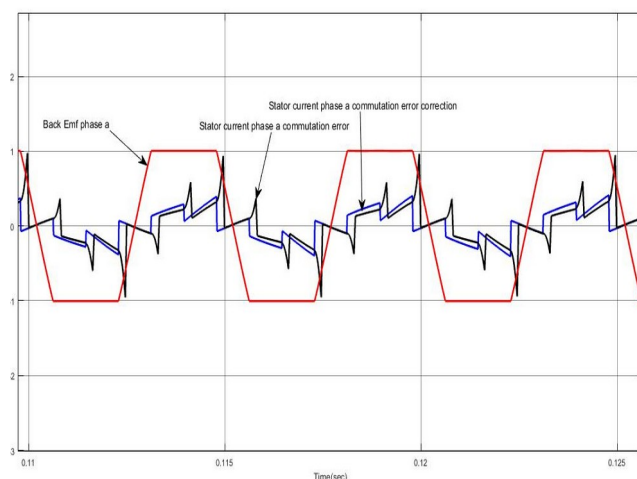
در زمان وقوع خطای کموتاسیون، جریان اعمالی به فاز A، دچار انحراف شده و علاوه بر کاهش گشتاور، رپل آن بیشتر میشود. بعد از بهبود خطای کموتاسیون، دامنه پیک جریان و رپل گشتاور کاهش پیدا کرده است. در شکل 12 جریان اعمالی به فاز A، در زمان خطا و بعد از رفع خطا قابل مشاهده است. در شکل 13، مقایسه‌ای بین جریان فاز A، در حالت خطای تصحیح شده با حالت خطای کموتاسیون شده است که باعث شده جریان دارای دامنه پیک بیشتری باشد.



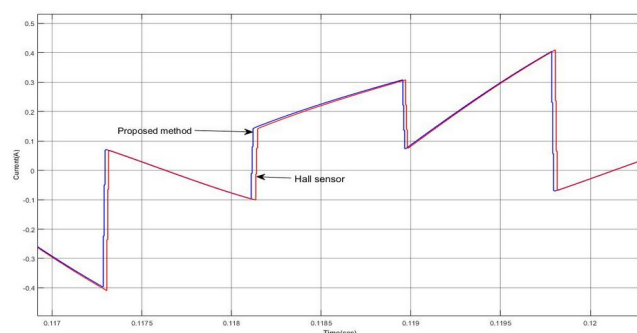
شکل 12: جریان فاز A، در دو حالت خطا و بعد از تصحیح خطا

شکل موج جریان در روش پیشنهادی دارای انحراف کمی نسبت به حالتی که از حسگر اثر هال استفاده شده است، دارد. در شکل 14، جریانه باهم مقایسه شده است. مقدار اختلاف جریان روش پیشنهادی با زمانی که از حسگر اثر هال استفاده شده است، خیلی کم میباشد. بهبود خطای کموتاسیون باعث میشود که انحراف در جریان اعمالی به فازهای موتور تصحیح شده و در نتیجه توان تبدیلی موتور افزایش یافته و رپل گشتاور کاهش پیدا میکند. در شکل 15، گشتاور لحظه خطا با لحظه تصحیح خطا مقایسه شده و همچنین گشتاور روش پیشنهادی با زمانی که از حسگر اثر هال

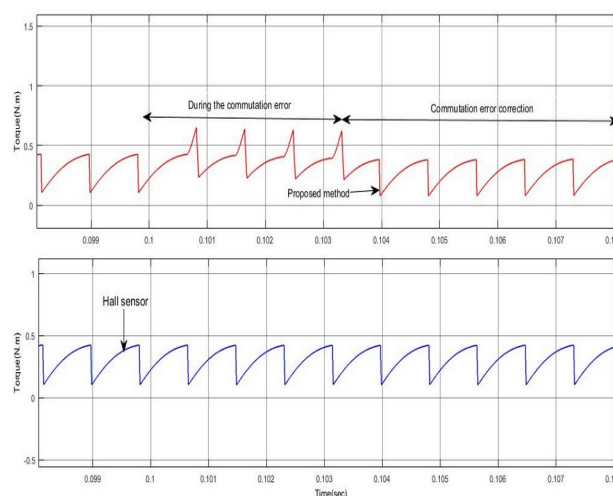
استفاده شده، مقایسه گردیده است. مقدار رپل گشتاور روش پیشنهادی نزدیک به حالتی است که از حسگر اثر هال استفاده شده است.



شکل 13: جریانه‌های فاز A، مقایسه حالت تصحیح شده خطای کموتاسیون با حالت خطای کموتاسیون



شکل 14: مقایسه جریانه‌های فاز A، روش پیشنهادی با روش حسگر اثر هال



شکل 15: مقایسه گشتاور روش پیشنهادی با حسگر اثر هال

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله روشی برای کنترل بدون حسگر مکانیکی برای موتورهای جریان مستقیم بدون جاروبک با استفاده از دوازده پالس شاخص ارائه شده است. ارائه شده است. در این روش ابتدا دوازده پالس ایجاد که شامل پالسهای شاخص و کموتاسیون می باشد. نهایتاً، پالس های شاخص مقدار انحراف از نقطه عبور از صفر را تعیین میکند و سپس پالسهای بعدی را تصحیح میکند. در نتیجه خطای تشخیص نقطه عبور از صفر تصحیح و اعوجاج جریان کاهش میابد. از مزایای این روش شامل تصحیح سریع انحراف از نقطه عبور از صفر و رفع سریع آن و تاخیر دقیق زاویه 30 درجه الکتریکی برای لحظات کموتاسیون می باشد. نتایج شبیه سازی موثر بودن روش پیشنهادی را تایید میکند.

مراجع و منابع

- [1] Song, Xinda, Bangcheng Han, Shiqiang Zheng, and Jiancheng Fang. "High-precision sensorless drive for high-speed BLDC motors based on the virtual third harmonic back-EMF." *IEEE transactions on Power Electronics* 33, no. 2 (2017): 1528-1540.
- [2] Carey, Kellen D., Nathan Zimmerman, and Cristinel Ababei. "Hybrid field oriented and direct torque control for sensorless BLDC motors used in aerial drones." *IET Power Electronics* 12, no. 3 (2019): 438-449.
- [3] Yang, Lei, Z. Q. Zhu, Hong Bin, Zhuya Zhang, and Liming Gong. "Virtual third harmonic back EMF-Based sensorless drive for high-speed BLDC motors considering machine parameter asymmetries." *IEEE Transactions on Industry Applications* 57, no. 1 (2020): 306-315.
- [4] Patel, A. N., and B. N. Suthar. "Optimization of Specific Power of Surface Mounted Axial Flux Permanent Magnet Brushless DC Motor for Electrical Vehicle Application." *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering* 16, no. 3 (2020): 363-370.
- [5] Li, Haitao, Shiqiang Zheng, and Hongliang Ren. "Self-correction of commutation point for high-speed sensorless BLDC motor with low inductance and nonideal back EMF." *IEEE Transactions on Power Electronics* 32, no. 1 (2016): 642-651.
- [6] Kim, Tae-Hyung, and Mehrdad Ehsani. "Sensorless control of the BLDC motors from near-zero to high speeds." *IEEE transactions on power electronics* 19, no. 6 (2004): 1635-1645.
- [7] Liu, Gang, Chenjun Cui, Kun Wang, Bangcheng Han, and Shiqiang Zheng. "Sensorless control for high-speed brushless DC motor based on the line-to-line back EMF." *IEEE Transactions on Power Electronics* 31, no. 7 (2014): 4669-4683.
- [8] Sanatgar, M., M. R. Alizadeh Pahlavani, and A. Bali Lashak. "An Improved Control Approach for Dual Mechanical Coupled BLDC Motor With Nine-Switch Inverter." *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering* 15, no. 3 (2019): 386-400.
- [9] Zhao, Dongdong, Xipo Wang, Bo Tan, Liangcai Xu, Cong Yuan, and Yigeng Huangfu. "Fast commutation error compensation for BLDC motors based on virtual neutral voltage." *IEEE Transactions on Power Electronics* 36, no. 2 (2020): 1259-1263.
- [10] Park, Joon Sung, Ki-Doek Lee, Sung Gu Lee, and Won-Ho Kim. "Unbalanced ZCP compensation method for position sensorless BLDC motor." *IEEE Transactions on Power Electronics* 34, no. 4 (2018): 3020-3024.
- [11] Liu, Gang, Xi Chen, Xinxiu Zhou, and Shiqiang Zheng. "Sensorless commutation deviation correction of brushless DC motor with three-phase asymmetric back-EMF." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 67, no. 7 (2019): 6158-6167.
- [12] Zhang, Haifeng, Gang Liu, Xinxiu Zhou, and Shiqiang Zheng. "High-Precision Sensorless Optimal Commutation Deviation Correction Strategy of BLDC Motor with Asymmetric Back EMF." *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 17, no. 8 (2020): 5250-5259.
- [13] Zhang, Haifeng, and Haitao Li. "Fast commutation error compensation method of sensorless control for MSCMG BLDC motor with nonideal back EMF." *IEEE Transactions on Power Electronics* 36, no. 7 (2020): 8044-8054.
- [14] Mondal, Santanu, Arunabha Mitra, and Madhurima Chattopadhyay. "Mathematical modeling and simulation of Brushless DC motor with ideal Back EMF for a precision speed control." In *2015 IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*, pp. 1-5. IEEE, 2015.