

تشخیص سیگنال‌های کموتاسیون برای موتور جریان مستقیم بدون جاروبک چهار فاز با استفاده از مقایسه گرهای ولتاژ ضدمحرکه خط به خط

رضا علائی^۱، محمدمهدی نظام آبادی^۲

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران ralaei1974@yahoo.com

^۲ استادیار، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران nezamabadi.m@wita.ac.ir

چکیده - در این مقاله، یک الگوریتم جدید راه‌اندازی بدون حسگر برای موتور جریان مستقیم بدون جاروبک چهار فاز با استفاده از مقایسه گرهای ولتاژ ضدمحرکه خط به خط پیشنهاد شده است. برای استخراج سیگنال‌های کموتاسیون، ولتاژهای ضدمحرکه از فیلترهای پایین‌گذر و مقایسه گرهای عبور داده می‌شوند. استفاده از فیلترهای پایین‌گذر با فرکانس قطع پایین سبب می‌شود که سیگنال‌های کموتاسیون واقعی، تاخیر قابل توجهی بیش از ۹۰ درجه الکتریکی داشته باشند، که سرعت موتور را محدود می‌کند. برای رفع این مشکل یک الگوریتم کموتاسیون جدید بدون حسگر بر پایه انتقال کموتاسیون به اندازه $1/35-\alpha$ معرفی شده است که تاخیر کموتاسیون را جبران کرده و کارکرد صحیح موتور را تضمین می‌نماید. سیگنال‌های کموتاسیون استخراج شده در این روش فاقد نویز و اعوجاج هستند و کنترل حلقه بسته سرعت موتور را امکان پذیر می‌سازند. این روش برخلاف سایر روش‌های بدون حسگر که جهت راه‌اندازی موتور مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند، به سخت افزار پیچیده و محاسبات نرم افزاری پر حجم نیاز ندارد و هزینه ساخت آن نیز کم‌تر است. نتایج آزمایش عملی، امکان پذیر بودن و موثر بودن روش پیشنهادی را تایید می‌کند.

کلیدواژه- کنترل بدون حسگر، موتور جریان مستقیم بدون جاروبک، ولتاژ ضدمحرکه خط به خط

روش‌های راه‌اندازی بدون حسگر، از متغیرهای الکتریکی موتور برای تشخیص موقعیت روتور استفاده می‌شود. در مرجع [۳] از یک مدار چهار کلید و با استفاده از ولتاژ ضدمحرکه استاتور جهت راه‌اندازی موتور جریان مستقیم بدون جاروبک سه فاز استفاده شده است. در این روش به منظور صرفه جویی در هزینه‌ها و کاهش تلفات کلید زنی از چهار کلید قدرت به جای شش کلید استفاده شده است ولی عیب این روش، نیاز سیستم راه‌اندازی به دو منبع تغذیه می‌باشد. استفاده از روش تفاضل ولتاژ ضدمحرکه مزیت‌های در دسترس بودن اطلاعات مربوط به موقعیت روتور و کموتاسیون بدون شیفت فاز را به وجود می‌آورد [۴]. در این روش از مشاهده گر اختلال، جهت تشخیص تفاضل ولتاژ ضدمحرکه استفاده می‌شود. این روش نقاط کموتاسیون دقیقی را بدست می‌آورد اما نویز ناشی از حسگرهای ولتاژ و جریان، تاثیر بزرگی در دقت و صحت نقطه عبور از صفر ولتاژ ضدمحرکه در سرعت‌های پایین خواهد داشت. در [۵] یک روش جهت کاهش ریبیل گشتاور موتور جریان مستقیم بدون جاروبک چهار فاز با استفاده از تخمین ولتاژ ضدمحرکه فاز به فاز ارائه شده است. گشتاور مورد نظر با تزریق جریان فازها، که متناسب با مقادیر لحظه‌ای ولتاژ ضدمحرکه فازهای در حال هدایت هستند، تولید می‌شود. این روش تغییرات سریع و لحظه‌ای گشتاور الکترومغناطیسی را در زمان‌های کموتاسیون

۱- مقدمه

امروزه با توجه به محدودیت‌های منابع سوخت و تلاش‌های مستمر برای کاهش آلودگی‌های محیط زیست، سبب ایجاد انگیزه برای طراحی و استفاده از موتورهای راه‌اندازی پر بازده شده است. از میان ماشین‌های شناخته شده، موتور جریان مستقیم بدون جاروبک به دلیل مزایای فراوان مانند تلفات حرارتی کم، راندمان بالا، نویز پایین، کنترل پذیری بالا و هزینه سرویس و نگهداری پایین در دو دهه اخیر در زمینه‌های مختلف بکار گرفته شده است [۱]. موتور جریان مستقیم بدون جاروبک در واقع یک موتور جریان مستقیم است که قطعات کموتاتور و جاروبک در آن حذف گردیده و عملکرد این ادوات و تزریق قدرت به سیم‌پیچی‌ها، توسط کلیدهای الکترونیکی انجام می‌گیرد. این موتور برای راه‌اندازی نیازمند مدار راه‌انداز و دانستن موقعیت روتور می‌باشد. برای کموتاسیون مناسب، موقعیت روتور موتور جریان مستقیم بدون جاروبک باید توسط حسگرهای موقعیت بدست آید. محدودیت‌های حسگرهای تعیین موقعیت نظیر قیمت بالا، نصب مکانیکی دشوار و قابلیت اطمینان ضعیف سبب شده است تا کارکرد بدون حسگر موتورهای جریان مستقیم بدون جاروبک به یک موضوع مورد توجه در سال‌های اخیر تبدیل شود [۲]. در

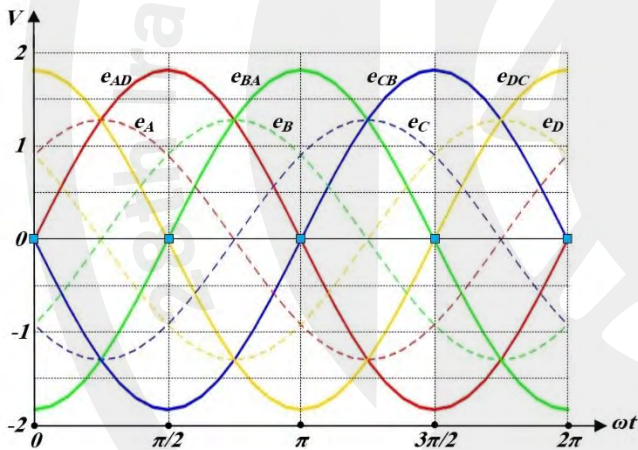
جریان مستقیم بدون جاروبک چهار فاز طبق رابطه (۱) بیان می‌شوند. که مقادیر $u_{DA}, u_{CD}, u_{BC}, u_{AB}$ ولتاژهای خط به خط، i_C, i_B, i_A و i_D جریان‌های فاز، $e_{DA}, e_{CD}, e_{BC}, e_{AB}$ ولتاژهای ضدمحرکه خط به خط، M و L, R به ترتیب مقاومت، اندوکتانس خودی و متقابل فازهای استاتور هستند. گشتاور الکترومغناطیسی روی محور روتور نیز از رابطه (۲) قابل محاسبه است.

$$T_e = \frac{i_A e_{A+} + i_B e_{B+} + i_C e_{C+} + i_D e_{D+}}{\omega_m} \quad (2)$$

$$T_e = T_L + J \frac{d\omega_m}{dt} + B_f \omega_m$$

که ω_m سرعت مکانیکی محور موتور، T_L گشتاور بار، B_f ضریب اصطکاک بار و J ممان اینرسی ارجاعی به محور روتور می‌باشند [۷]. ولتاژهای ضدمحرکه در موتور چهار فاز، ۹۰ درجه الکتریکی با هم اختلاف فاز دارند. شکل ۲ رابطه بین ولتاژهای ضدمحرکه خط به خط و نقاط کموتاسیون را نشان می‌دهد.

- نقاط عبور از صفر ولتاژهای ضدمحرکه خط به خط
- نقاط کموتاسیون



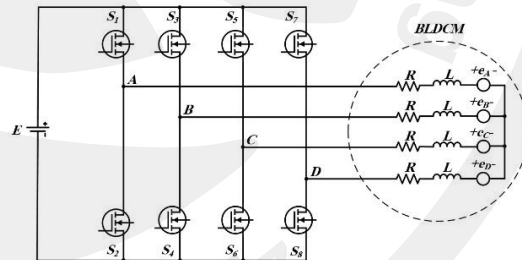
شکل ۲: رابطه بین ولتاژهای ضدمحرکه خط به خط با نقاط کموتاسیون

مطابق با شکل ۲ چهار نقطه عبور از صفر ولتاژهای ضدمحرکه خط به خط $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ با چهار نقطه کموتاسیون مطابقت دارد. بنابراین کموتاسیون بدون حسگر بوسیله تشخیص نقاط عبور از صفر ولتاژهای ضدمحرکه خط به خط بدست خواهد آمد [۸، ۹]. مدار تشخیص سیگنال‌های کموتاسیون بدون حسگر، در شکل ۳ نشان داده شده است. جهت استخراج سیگنال‌های کموتاسیون، ابتدا ولتاژهای ترمینال از فیلترهای پایین‌گذر عبور داده می‌شوند تا ولتاژهای ضدمحرکه فاز را آشکار سازند. سپس ولتاژهای ضدمحرکه فاز با یکدیگر مقایسه می‌شوند و پس از عبور از مدار ایزوله‌کننده، سیگنال‌های کموتاسیون بدست می‌آیند. استفاده از فیلتر پایین‌گذر با فرکانس قطع پایین باعث عقب افتادگی کموتاسیون در نقاط عبور از

کنترل می‌کند، بنابراین ریبیل‌های گشتاور کاهش خواهند یافت. یک روش کنترلی برای موتور جریان مستقیم بدون جاروبک چهار فاز بر پایه تخمین اندوکتانس‌های فاز و برآورد ولتاژ ضدمحرکه فاز به فاز در [۶] بیان شده است. در این روش، جریان استاتور با توجه به تخمین ولتاژهای ضدمحرکه مربوط به فازهای در حال هدایت تزریق می‌شود. این مقاله یک الگوریتم جدید راه‌اندازی بدون حسگر برای موتور جریان مستقیم بدون جاروبک چهار فاز با استفاده از مقایسه‌گرهای ولتاژ ضدمحرکه خط ارائه می‌دهد و کارکرد موتور را تا سرعت نامی بدون استفاده از حسگرهای تعیین موقعیت تضمین می‌کند. در بخش دوم مقاله، کموتاسیون بدون حسگر بر اساس ولتاژ ضدمحرکه خط به خط بیان خواهد شد. در بخش سوم الگوریتم پیشنهادی کموتاسیون بر اساس $135-\alpha$ جهت استخراج سیگنال‌های کموتاسیون ارائه خواهد شد و نشان داده خواهد شد که این الگوریتم، توانایی محاسبه دقیقی در تعیین مقدار تاخیر مورد نیاز جهت رسیدن به نقطه عبور از صفر ولتاژهای ضدمحرکه خط دارد و در پایان نتایج عملی و ارزیابی عملکرد سیستم، موثر بودن روش پیشنهادی را تایید می‌کند.

۲- کموتاسیون بدون حسگر موتور جریان مستقیم بدون جاروبک چهار فاز بر اساس ولتاژ ضدمحرکه خط به خط

موتور جریان مستقیم بدون جاروبک چهار فاز مطابق با شکل ۱ دارای چهار سیم‌پیچ بر روی استاتور بوده و ماده‌ی مغناطیسی دائم نیز روی روتور قرار دارد.



شکل ۱: ساختار اینورتر چهار فاز به همراه مدار معادل موتور

فرآیند کموتاسیون در این موتور به صورت الکتریکی می‌باشد و سیم‌پیچ‌های استاتور توسط ولتاژهای پله‌ای شکل، که از خروجی اینورتر بدست می‌آیند تغذیه می‌شوند. ولتاژهای خط به خط در موتور

$$\begin{bmatrix} u_{AB} \\ u_{BC} \\ u_{CD} \\ u_{DA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & -R & 0 & 0 \\ 0 & R & -R & 0 \\ 0 & 0 & R & -R \\ -R & 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_D \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & M-L & 0 & 0 \\ 0 & L-M & M-L & 0 \\ 0 & 0 & L-M & M-L \\ M-L & 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_D \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{AB} \\ e_{BC} \\ e_{CD} \\ e_{DA} \end{bmatrix} \quad (1)$$

از فیلتر پایین گذر سبب تاخیر می شود.

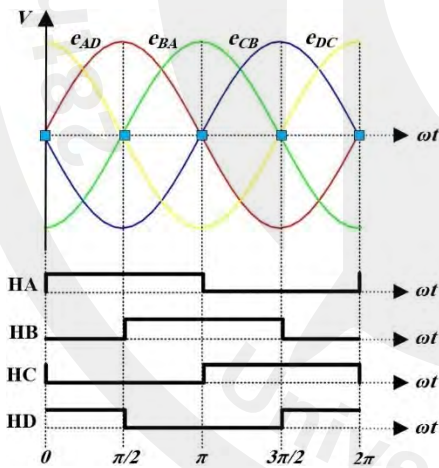
$$\alpha = \gamma + d \quad (۴)$$

که γ عقب افتادگی به دلیل استفاده از ولتاژ ضدمحرکه خط، d عقب افتادگی به دلیل استفاده از فیلتر پایین گذر و α نماد عقب افتادگی کموتاسیون است. مقدار عقب افتادگی بدلیل استفاده از فیلتر پایین گذر را می توان از رابطه (۵) بدست آورد [۱۰].

$$d = \arctan\left(\frac{CR_xR_y\omega}{R_x+R_y}\right) \quad (۵)$$

۳- الگوریتم پیشنهادی کموتاسیون موتور جریان مستقیم بدون جاروبک چهار فاز بر اساس انتقال 135-a

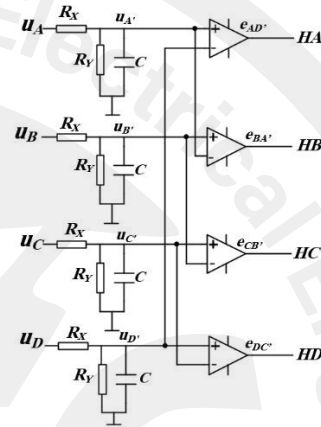
این مقاله با استفاده از مقایسه بین دو ولتاژ ضدمحرکه فاز، نقطه عبور از صفر ولتاژ ضدمحرکه خط را بدست می آورد. با اعمال ولتاژهای ترمینال موتور به مدار، ولتاژهای ضدمحرکه آشکار و پس از مقایسه ولتاژهای ضدمحرکه، سیگنال های HA، HB، HC و HD تولید می شوند. همانطور که در شکل ۴ مشخص است، سیگنال HA که از مقایسه دو ولتاژ ضدمحرکه فاز e_A و e_D بدست آمده با سیگنال HC که از مقایسه دو ولتاژ ضدمحرکه فاز e_C و e_B بدست آمده است از لحاظ زمانی یکسان، ولی از لحاظ مقدار مخالف هم هستند.



شکل ۴: سیگنال های تولید شده توسط مقایسه گر ها

با توجه به شکل ۴ چون در لحظات کموتاسیون، دو تا از ولتاژهای ضدمحرکه با یکدیگر از یک نقطه عبور می کنند لذا جهت ساده سازی مدار تشخیص سیگنال های کموتاسیون که در شکل ۳ نشان داده شده است (شامل فیلتر پایین گذر، مقایسه کننده و ایزوله کننده مدار) و کم کردن حجم محاسبات نرم افزاری، می توان دو مقایسه گر را حذف نمود و طراحی مدار مطابق شکل ۵ ساده تر خواهد شد. ولتاژهای ضدمحرکه بعد از عبور از فیلتر پایین گذر، جهت تولید سیگنال های کموتاسیون به $e_{AD'}$ و $e_{BA'}$ تغییر می یابند. فرض می شود وقتی e_{AD}

صفر ولتاژهای ضدمحرکه خط به خط می شود. در بسیاری از مقالات برای کاهش عقب افتادگی کموتاسیون از فیلترهای پایین گذر با فرکانس قطع بالا استفاده می کنند. در صورت استفاده از یک فیلتر با فرکانس قطع بالا، عقب افتادگی کموتاسیون کاهش می یابد ولی فیلترینگ مناسبی بر روی ولتاژهای ضدمحرکه انجام نمی شود. لذا سیگنال های اعوجاج داری، وجود خواهند داشت که سبب کموتاسیون نادرست می شوند.



شکل ۳: مدار تشخیص سیگنال های کموتاسیون

بنابراین به منظور به حداقل رساندن تداخل الکترومغناطیسی و تولید سیگنال های کموتاسیون بدون نویز و اعوجاج، ولتاژهای ضدمحرکه خط به خط نیاز به فیلتر شدن شدید دارند. ویژگی دامنه فرکانس، ویژگی فاز، فرکانس قطع فیلتر پایین گذر به ترتیب در رابطه (۳) تعریف شده است [۲].

$$\begin{cases} |H(\omega)| = \frac{u_{AB'}}{u_{AB}} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{R_x}{R_y} + 1\right)^2 + (R_x C \omega)^2}} \\ \psi(\omega) = -\arctan\left(\frac{R_x C \omega}{\frac{R_x}{R_y} + 1}\right) \\ f_{co} = \frac{R_x + R_y}{2\pi C R_x R_y} \end{cases} \quad (۳)$$

که R_x و R_y مقاومت های مقسم فیلتر، C خازن فیلتر، $|H(\omega)|$ ویژگی دامنه فرکانس، $u_{AB'}$ شکل موج پایه ولتاژ u_{AB} ویژگی فاز فرکانس، f_{co} فرکانس قطع فیلتر و ω سرعت زاویه ای می باشد. مقادیر مربوط به فیلتر پایین گذر که در این مقاله استفاده شده در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: مقادیر فیلتر پایین گذر

R_x	R_y	C	f_{co}
47kΩ	33 kΩ	1μf	8 Hz

با بررسی شکل های ۲ و ۳ می توان نتیجه گرفت که نقاط عبور از صفر ولتاژهای ضدمحرکه خط به خط نسبت به نقاط عبور از صفر ولتاژهای فاز، ۴۵ درجه الکتریکی عقب تر هستند و همچنین استفاده

فاز بر اساس انتقال کموتاسیون به اندازه $135-\alpha$ جهت استخراج سیگنال‌های کموتاسیون پیشنهاد شده است. کموتاسیون مربوط به فازها در جدول ۲ نشان داده شده است.

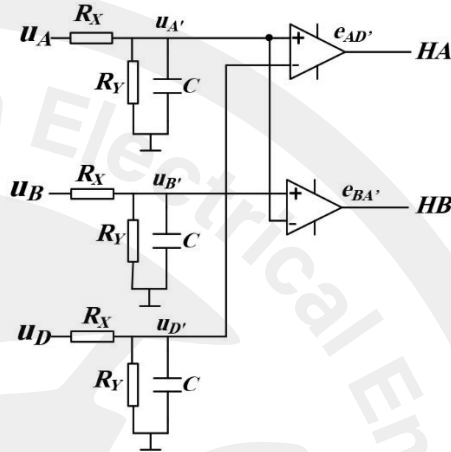
■ نقاط کموتاسیون ایده‌ال

- ▲ نقطه عبور از صفر واقعی ولتاژ ضدمحرکه خط به خط
- نقطه عبور از صفر ایده‌ال ولتاژ ضدمحرکه فاز

جدول ۳: مشخصات موتور

مقدار	کمیت
۲۴ ولت	ولتاژ
۴۸ وات	توان
۴	تعداد فاز
۴	تعداد قطب
۸ اهم	مقاومت هر فاز استاتور
۶ میلی هانری	اندوکتانس هر فاز استاتور
۲۲۰۰ دور در دقیقه	سرعت نامی
۰/۰۲۸ ولت ثانیه / رادیان	ثابت ولتاژ ضدمحرکه
سینوسی	ولتاژ ضدمحرکه

مقدار مثبت به صفر می‌رسد برابر $e_{AD}=0$ و زمانی که از مقدار منفی به صفر می‌رسد برابر $e_{AD}=0$ است. در شکل ۶ لحظات کموتاسیون با پیکان سیاه رنگ مشخص شده است. نقطه P ، نقطه عبور از صفر ایده‌ال ولتاژ ضدمحرکه e_{AD} می‌باشد. همانطور که قبلاً اشاره شد، e_{AD} بعد از عبور از فیلتر پایین گذر و مقایسه کننده به e_{AD}' تغییر می‌یابد.

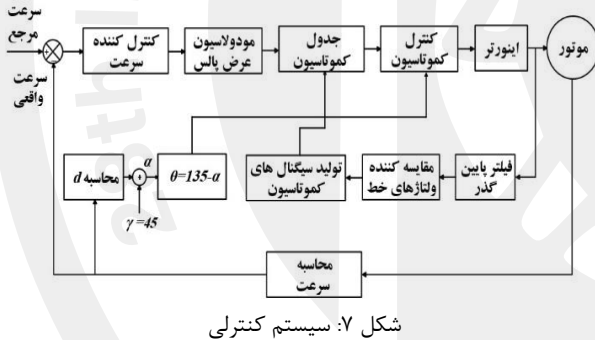


شکل ۵: ساده سازی مدار تشخیص سیگنال‌های کموتاسیون

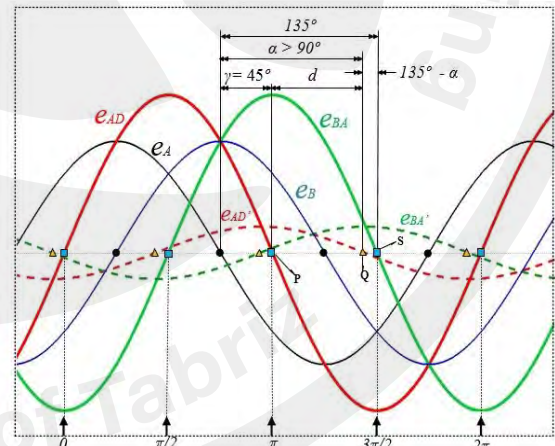
جدول ۲: کموتاسیون فازها در حالت $135-\alpha$

کلیدهای قدرت	فاز کموتاسیون	زمان کموتاسیون	H_X
S_1, S_6	A+, C-	$t(e_{AD+}=0)$	00
S_3, S_8	B+, D-	$t(e_{BA+}=0)$	10
S_5, S_2	C+, A-	$t(e_{AD-}=0)$	11
S_7, S_4	D+, B-	$t(e_{BA-}=0)$	01

در شکل ۷ می‌توان سیستم کنترلی مدار راه‌انداز بدون حسگر را بر اساس انتقال کموتاسیون مشاهده کرد.



شکل ۷: سیستم کنترلی



شکل ۶: دیاگرام کموتاسیون حالت $135-\alpha$

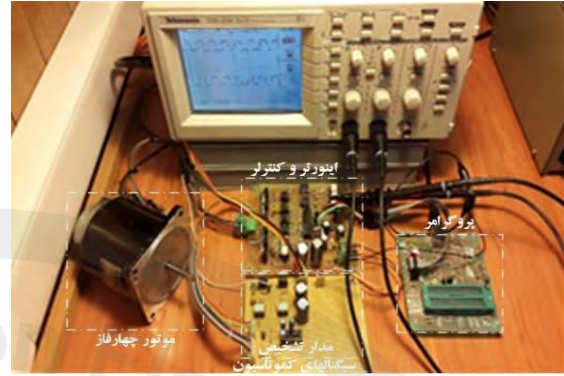
۴- نتایج آزمایشگاهی

۴-۱- پیاده سازی سخت افزار

روش کنترل بدون حسگر پیشنهادی، با موفقیت پیاده سازی شده است. نمونه آزمایشگاهی که شامل موتور جریان مستقیم بدون جاروبک چهار فاز و سیستم کنترل می‌باشد در شکل ۸ نشان داده شده است. سیستم توسط یک میکروکنترلر AVR از نوع ATMEGA 88P با فرکانس ۱۶ مگاهرتز کنترل می‌شود، فرکانس مدولاسیون پهنای پالس برابر ۳۱ کیلو هرتز می‌باشد، همچنین از HCPL-3120 جهت راه‌اندازی ماسفت‌های IRF2807 استفاده شده است. در این مقاله از یک موتور جریان مستقیم بدون جاروبک چهار فاز با مشخصات جدول ۳ استفاده شده است.

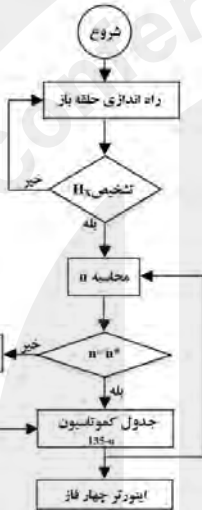
با توجه به استفاده از فیلتر پایین گذر با فرکانس قطع پایین لذا با درجه الکتریکی می‌باشد، بنابراین لحظه کموتاسیون از نقطه P به نقطه Q که نقطه عبور از صفر واقعی ولتاژ ضدمحرکه خط می‌باشد تغییر می‌یابد. با توجه به این که نقطه Q ، لحظه کموتاسیون نمی‌باشد، لذا نقطه Q باید به اندازه $135-\alpha$ تاخیر داده شود تا به نقطه S که لحظه کموتاسیون ایده‌ال است برسد. بنابراین یک الگوریتم کموتاسیون بدون حسگر موتور جریان مستقیم بدون جاروبک چهار

برای کنترل سرعت موتور، از مدولاسیون پهنای پالس استفاده شده و با توجه به نیاز و تعداد پایه‌های PWM موجود بر روی میکروکنترلر، روش H-PWM-L-ON در نظر گرفته شده است. در این روش طبق شکل ۹ فقط کلیدهای بالایی (S_1, S_3, S_5, S_7) با مدولاسیون پهنای پالس کنترل می‌شوند و کلیدهای پایینی (S_2, S_4, S_6, S_8) در زمان‌های کموتاسیون خود، بطور کامل هدایت می‌کنند. شکل ۱۱ فلوجارت روش کنترل سرعت بدون حسگر موتور را نشان می‌دهد.

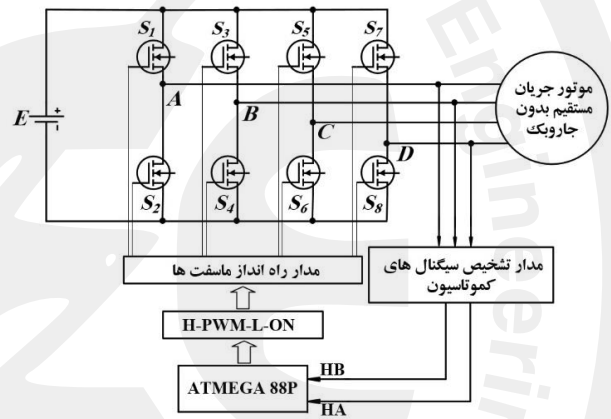


شکل ۸: نمونه سیستم آزمایشگاهی

شکل ۹ سیستم راه‌انداز بدون حسگر موتور جریان مستقیم بدون جاروبک چهار فاز پیشنهادی را نشان می‌دهد. یک اینورتر با هشت کلید از نوع ماسفت، وظیفه جریان‌دهی به فازهای موتور را برعهده دارد.



شکل ۱۱: فلوجارت کنترل سرعت موتور



شکل ۹: سیستم راه‌انداز بدون حسگر

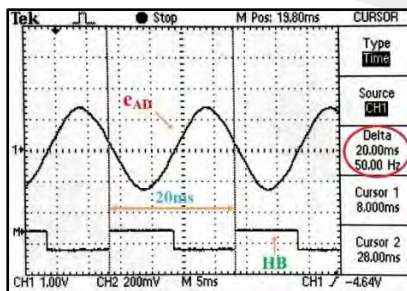
۳-۴- ارزیابی عملکرد سیستم

الف - ارزیابی سیستم با چرخش موتور جریان مستقیم بدون جاروبک چهار فاز توسط یک موتور DC

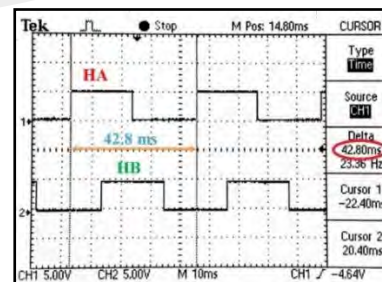
جهت اندازه‌گیری تاخیر مورد نیاز، موتور جریان مستقیم بدون جاروبک چهار فاز را که با یک موتور DC کوپل شده است به سرعت ۱۵۰۰ دور در دقیقه می‌رسانیم تا ولتاژ ضدمحرکه خط به خط مطابق با شکل ۱۲ قابل مشاهده و اندازه‌گیری باشد. همانطور که از شکل ۱۳ مشخص است مقدار تاخیر لازم در سرعت ۱۵۰۰ دور در دقیقه برای رسیدن به لحظه کموتاسیون برابر با ۵۲۰ میکرو ثانیه توسط اسکوپ اندازه‌گیری شده که با مقدار تئوری بدست آمده در جدول ۴ برابر است.

۴-۲- روش عملی استخراج سیگنال‌های کموتاسیون

برای استخراج سیگنال‌های کموتاسیون، ابتدا ولتاژهای ترمینال از میان فیلترهای پایین‌گذر عبور داده می‌شوند تا ولتاژهای ضدمحرکه فاز آشکار شوند. شکل ۱۰ سیگنال‌های مربوط به کموتاسیون HA و HB را در سرعت ۷۰۰ دور در دقیقه نمایش می‌دهد. همانطور که از شکل ۱۰ مشخص است، سیگنال‌های کموتاسیون HA و HB فاقد هرگونه اعوجاج و نویزی هستند که این مطلب نشانده این است که مدار تشخیص سیگنال‌های کموتاسیون کارکرد درستی از خود نشان می‌دهد.



شکل ۱۲: ولتاژ e_{AB} و سیگنال کموتاسیون HB در سرعت ۱۵۰۰ دور در دقیقه



شکل ۱۰: سیگنال‌های استخراج شده کموتاسیون در سرعت ۷۰۰ دور در دقیقه

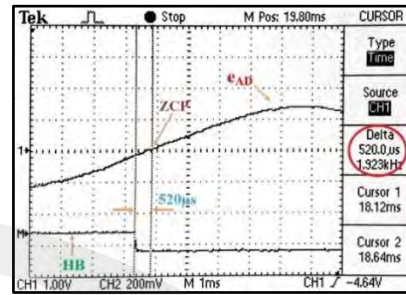
۵- نتیجه گیری

در این مقاله یک الگوریتم جدید بدون حسگر جهت استخراج سیگنال‌های کموتاسیون، با استفاده از مقایسه گرهای ولتاژ ضدمحرکه خط به خط برای موتور جریان مستقیم بدون جاروبک چهار فاز ارائه شده که در مقایسه با سایر روش‌های کنترل بدون حسگر بر اساس ولتاژ ضدمحرکه دارای این نتایج می‌باشد:

- ۱- الگوریتم کموتاسیون جدیدی برای موتور جریان مستقیم بدون جاروبک چهار فاز بر پایه α -135 برای غلبه بر عقب افتادگی کموتاسیون که بیش از ۹۰ درجه الکتریکی است، معرفی و پیاده سازی شده است که کارکرد موتور را در محدوده سرعت ۴۰۰ تا ۲۲۰۰ دور در دقیقه تضمین می‌کند.
- ۲- تحلیل‌های تئوری و نتایج عملی، نشان داده است که این الگوریتم توانایی محاسبه دقیقی در تعیین مقدار تاخیر مورد نیاز جهت رسیدن به نقطه عبور از صفر ولتاژهای ضدمحرکه خط دارد.
- ۳- با توجه به اینکه اکثر روش‌ها از ولتاژ فاز جهت کنترل موتور استفاده می‌کنند، لذا نیاز به نقطه نول دارند، در صورتی که در روش مذکور با استفاده از ولتاژ خط نیاز به نقطه نول و مشکلات ناشی از آن حذف شده است.
- ۴- الگوریتم پیشنهادی بوسیله میکروکنترلر AVR قابل اجرا است، لذا این روش نسبت به سایر روش‌ها، حجم نرم افزار و سخت افزار کمتری داشته و پیاده سازی و هزینه ساخت نیز کمتر است.

مراجع

- [1] Shivam Tiwari, S. Rajendran, "Four Quadrant Operation and Control of Three Phase BLDC Motor for Electric Vehicles," 2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia, pp. 577-582.
- [2] Chenjun Cui, Gang Liu and kun Wang, "Sensorless Drive for High-Speed Brushless DC Motor Based on the Virtual Neutral Voltage," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 6, pp. 3275-3285, Jun. 2015.
- [3] K.M. Reshma, T.B. Isha, "A Back-EMF Based Sensorless Speed Control of Four Switch BLDC Motor Drive," 2018 International Conference on Control, Power, Communication and Computing Technologies, pp.283-287.
- [4] S. Wang and An-Chen Lee, "A 12-Step Sensorless Drive for Brushless DC Motors Based on Back-EMF Differences," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 30, no. 2, pp. 646- 654, June 2015.
- [5] Mohammad Shakouhi, Mustafa Mohamadian and Ebrahim Afjei, "Torque Ripple Minimization Control Method for a Four Phase Brushless DC Motor with Non-Ideal Back Electromotive Force," IET Electric Power Applications, vol. 7, no. 5, pp. 360-368, May 2013.
- [6] Mohammad Shakouhi, Mustafa Mohamadian and Ebrahim Afjei, "Fault-Tolerant Control of Brushless DC Motors Under Static Rotor Eccentricity," IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 62, no. 3, pp. 1400-1409, Mar. 2015.
- [7] Xi Chen, Gang Liu, "Sensorless Optimal Commutation Steady Speed Control Method for a non-ideal Back-EMF BLDC Motor Drive System including Buck Converter," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Oct. 2019.

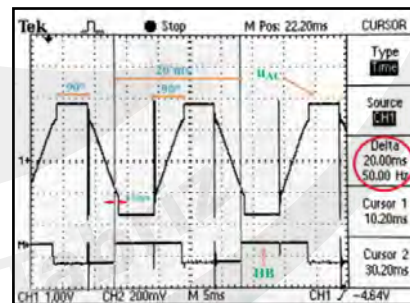


شکل ۱۳: مقدار تاخیر مورد نیاز در سرعت ۱۵۰۰ دور در دقیقه

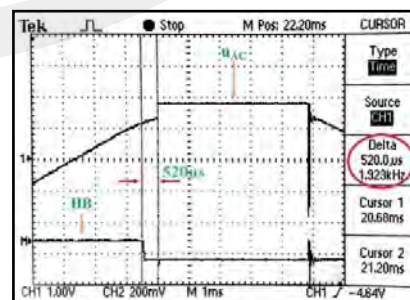
ب- ارزیابی سیستم با راهاندازی موتور جریان مستقیم بدون جاروبک چهار فاز
موتور جریان مستقیم بدون جاروبک را راهاندازی کرده و به سرعت ۱۵۰۰ دور در دقیقه رسانده می‌شود، سپس کلیدهای ماسفت طبق جدول کموتاسیون، با تاخیر ۵۲۰ میکروثانیه که توسط نرم افزار ایجاد شده است روشن خواهند شد. شکل ۱۴ ولتاژ u_{AC} هنگام روشن شدن کلیدهای S_6 و S_1 را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل مشخص است ابتدا به مقدار ۵۲۰ میکرو ثانیه تاخیر ایجاد می‌شود و سپس فاز C و A موتور جریان مستقیم بدون جاروبک چهار فاز توسط کلیدهای S_6 و S_1 مدار اینورتر، به ترتیب به ولتاژ مثبت و منفی منبع تغذیه وصل می‌شوند. در شکل ۱۵ مقدار تاخیر ایجاد شده به طور واضح‌تر مشخص شده است.

جدول ۴: محاسبه تئوری تاخیر برای فرکانس قطع ۸ هرتز

N (RPM)	d (degree)	$\theta = 135 - \alpha$ (degree)	$T=1/f$ (ms)	Delay (μs)
1500	80.67	9.33	20	518.33



شکل ۱۴: ولتاژ u_{AC} و سیگنال کموتاسیون HB در سرعت ۱۵۰۰ دور در دقیقه



شکل ۱۵: مقدار تاخیر ایجاد شده جهت روشن شدن کلیدها در سرعت ۱۵۰۰ دور در دقیقه

- [8] Chenjun Cui, Gang Liu and kun Wang, "A Novel Method for High-Speed Brushless DC Motor Operating in a Wide Range," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 9, pp. 4998-5008, Sept. 2015.
- [9] Wenzhuo Li, Jiancheng fang, "Position Sensorless Control without Phase Shifter for High-speed BLDC Motors with Low Inductance and Nonideal Back EMF," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, no.2, pp.1354-1366, Feb. 2016.
- [10] Xinda Song, Bangcheng Han, Kun Wang, "Sensorless Drive of High-speed BLDC Motors Based on Virtual 3rd-harmonic Back-EMF and High-precision Compensation," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 34, no. 9, pp. 8787 – 8796, Dec. 2018.

