

طراحی و تحلیل یک درایو الکتریکی برای کاهش ضربان گشتاور موتور جریان مستقیم بدون جاروبک مبتنی بر اینورتر منبع ولتاژ سه سطحی

محمد حسین قاندر^۱، آرش کیومرثی^۲

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد، گرایش الکترونیک-قدرت و ماشین های الکتریکی، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان؛

E-Mail: ghaedfarm@gmail.com

^۲ دانشیار، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، (نویسنده مسئول).

E-Mail: kiyoumars@eng.ui.ac.ir

چکیده

در این مقاله یک درایو موتور جریان مستقیم بدون جاروبک طراحی شده است تا بتواند ضربان گشتاور این موتور را کاهش دهد. این طرح بر اساس روش کنترل مستقیم گشتاور است. روش کنترل مستقیم گشتاور معمولی دارای معایب ضربان گشتاور فرکانس بالا و همچنین فرکانس کلید زنی متغیر است ولی این مزیت را دارد که ضربان گشتاور در اثر کموتاسیون را در موتور جریان مستقیم بدون جاروبک کاهش می دهد. در طرح پیشنهادی برای کاهش رپل گشتاور فرکانس بالا از یک اینورتر سه سطحی استفاده شده است و برای ثابت کردن فرکانس از یک رگولاتور گشتاور بجای کنترل کننده ی هیستریزس استفاده شده است.

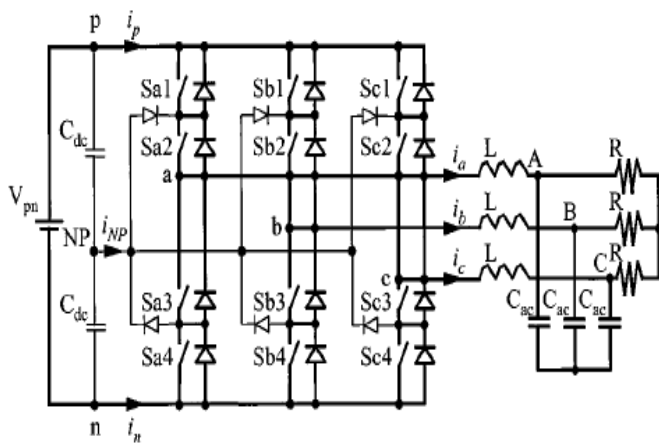
واژه های کلیدی

موتور جریان مستقیم بدون جاروبک، ضربان گشتاور، کموتاسیون جریان، فرکانس کلید زنی ثابت، اینورتر سه سطحی

۱-مقدمه

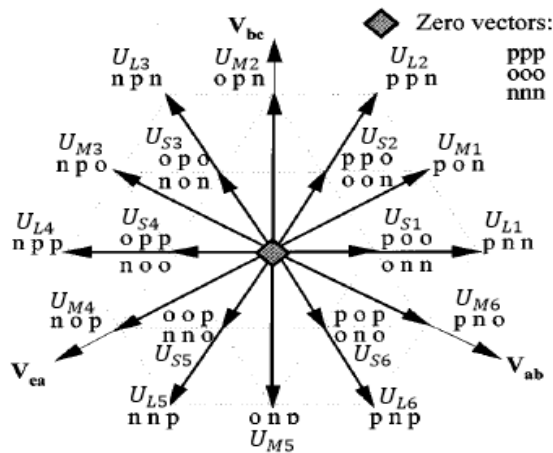
موتورهای مغناطیس دائم جریان مستقیم بدون جاروبک^۱ بطور وسیعی در بسیاری از کاربردها از قبیل درایوهای سرو، تجهیزات جانبی کامپیوتر و وسایل نقلیه ی الکتریکی استفاده می شوند. این استفاده ی وسیع به دلیل چگالی توان بالا، بازده بالا و کنترل ساده این موتور می باشد. این موتور با این که دارای ولتاژ و جریان AC است ولی مشخصه گشتاور در برابر جریان آن شبیه موتور DC تحریک مستقل است و در عین حال مشکلات کموتاسیون مکانیکی و جرقه و جاروبک را ندارد. عیب این موتور داشتن رپل های گشتاور مختلف است که باعث ایجاد کارکرد با کیفیت کمتر موتور می شوند. رپل گشتاور به دلیل کموتاسیون جریان ها معمولاً به عنوان یک عیب اصلی در درایوهای موتور جریان مستقیم بدون جاروبک در نظر گرفته می شود. مطلوب این است که رپل گشتاور این موتور حداقل شود زیرا ممکن است رپل سرعت غیر قابل قبول، لرزش و نویز صوتی

را نتیجه دهد [1]. بنا بر این؛ تحقیقات گوناگونی رپل گشتاور این موتور و بخصوص رپل گشتاور کموتاسیون را بررسی کرده اند و روش هایی برای حداقل کردن آن ارائه داده اند. الگوریتم کنترل رایج برای یک موتور جریان مستقیم بدون جاروبک، کنترل جریان با مدولاسیون پهنای پالس است. این روش بر این فرض مبتنی است که مشابه موتورهای دارای جاروبک، در این موتور هم بین جریان فازها و گشتاور رابطه ی خطی وجود دارد. بنا بر این؛ جریان فاز تنظیم می شود تا گشتاور کنترل شود. این روش بسیار ساده است و قبلاً بطور وسیعی در کاربردهای کم هزینه استفاده شده است [2]. اما در واقعیت به دلیل غیر ایده آل بودن شکل موج ولتاژهای ضد محرکه ارتباط بین گشتاور الکترومغناطیسی و جریان فازها غیر خطی است، زیرا سطح شکل موج ولتاژهای ضد محرکه واقعی ثابت نیست، بلکه نوساناتی دارد. یک روش رفع این مشکل، کنترل مستقیم گشتاور است. طرح کنترل مستقیم گشتاور در [3] و [4] برای درایوهای موتور القایی در اواسط دهه ی ۱۹۸۰ ارائه شد. بیش از یک دهه بعد، در اواخر دهه ی ۱۹۹۰ این تکنیک برای موتور سنکرون مغناطیس دائم تحلیل شد [5]. اخیراً این روش برای موتور جریان مستقیم بدون جاروبک هم بکار رفته است که به حداقل کردن رپل های فرکانس پایین گشتاور و سریع شدن زمان پاسخ گشتاور نسبت به کنترل مرسوم مدولاسیون پهنای پالس جریان منجر شده است. البته این روش معایب متغیر بودن فرکانس سوئیچینگ و ضربان فرکانس بالای گشتاور بیشتر را دارد. در [6] بردار های فضایی ولتاژ در یک ساختار هدایت دو فاز تعریف می شوند. همچنین گشتاور و شار موتور جریان مستقیم بدون جاروبک توسط این بردار های ولتاژ و معادله ی گشتاور بدست آورده شده در آنجا، با روش کنترل مسقیم گشتاور کنترل شده اند. در [7] اثبات شده است که کنترل شار-دور استاتور در موتور جریان مستقیم بدون جاروبک در ناحیه ی گشتاور ثابت نیاز نیست و یک طرح کنترل مستقیم گشتاور ارائه شده است که در آن فرض می شود شار نیازی به کاهش یا افزایش یافتن ندارد. مشکل رپل گشتاور کموتاسیون در



شکل (۱) اینورتر سه سطحی نقطه خنثی کلمپ شده [10]

منظور از p در شکل (۲) یعنی روشن شدن دو کلید بالایی در یک پایه از یک فاز و اتصال آن فاز به قسمت مثبت لینک DC و n یعنی روشن شدن دو کلید پایینی می باشد. همچنین O به معنی روشن شدن دو کلید وسطی می باشد.



شکل (۲) بردارهای ولتاژ هدایت سه فاز در اینورتر نقطه خنثی کلمپ شده [10]

بردارهای هدایت دو فاز به این شکل ساخته می شوند که در هر لحظه یک پایه ی اینورتر هیچ ولتاژی را از ورودی اینورتر به خروجی وصل نکند، یعنی تمام کلید های آن پایه خاموش باشند. در اینجا برای نشان دادن حالت های کلید های هر پایه، اگر همه ی کلید ها خاموش باشند از ۰، اگر دو کلید پایینی وصل باشند از ۱، اگر دو کلید وسطی روشن باشند از ۲ و اگر دو کلید بالایی وصل باشند از ۳ استفاده شده است. بردارهای ولتاژ بزرگ عبارتند از:

$$V_1(2,1,0), V_2(1,2,0), V_3(1,0,2), V_4(0,1,2), V_5(0,2,1), V_6(2,0,1)$$

مشابه بردارهای هدایت سه فاز کوچک، هر بردار ولتاژ هدایت دو فاز کوچک هم به دو طریق می تواند ساخته شود. بردارهای کوچک عبارتند از:

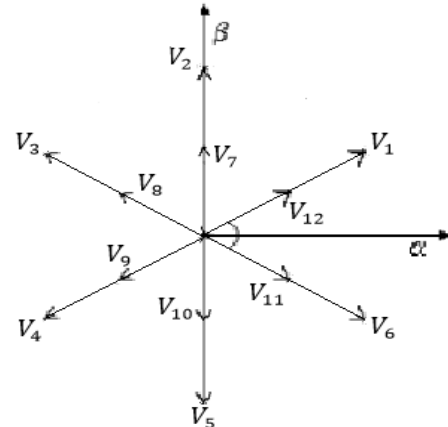
دو محدوده ی سرعت بطور جداگانه در [1] بررسی شده و کاهش داده شده است. یکی برای سرعت های کمتر از سرعتی که منجر می شود به این که ولتاژ ضد محرکه برابر ۲۵ درصد ولتاژ لینک DC بشود، و محدوده ی دیگر سرعت های بیشتر از این سرعت است. دسته ای از مقالات برای بهبود عملکرد درایو های کنترل مسقیم گشتاور از اینورترهای چند سطحی استفاده کرده اند. اینورترهای چند سطحی این مزیت را دارند که نسبت به اینورترهای دو سطحی معمولی سطوح ولتاژ متنوع تری برای وصل به ترمینال های موتور می توانند ایجاد کنند؛ و بنا بر این، بردارهای افزایش و کاهش دهنده ی گشتاور، اختلاف اندازه ی کمتری نسبت به هم دارند. همچنین بردارهای ولتاژ بیشتری در دسترس است که می توانند برای کنترل شار و گشتاور استفاده شوند، که قبلاً در اینورتر دو سطحی نبودند. یکی از این اینورترها اینورتر سه سطحی نقطه خنثی کلمپ شده است. در مرجع [8] با استفاده از اینورتر سه سطحی نقطه خنثی کلمپ شده و روش کنترل مسقیم گشتاور موتور سنکرون مغناطیس دائم کنترل شده است. در این مقاله از یک رگولاتور کنترل گشتاور استفاده شده است که باعث ثابت شدن فرکانس سوئیچینگ شده است. در مرجع [9] با استفاده از اینورتر سه سطحی ریپل گشتاور کم شده است.

در این مقاله با استفاده از اینورتر سه سطحی نقطه خنثی کلمپ شده و روش کنترل مستقیم گشتاور یک ساختار درایو پیشنهاد می شود که در آن با استفاده از یک رگولاتور کنترل گشتاور بجای کنترل کننده ی هیستریزس، فرکانس سوئیچینگ ثابت می شود. همچنین ریپل فرکانس بالای گشتاور هم با استفاده از اینورتر سه سطحی نقطه خنثی کلمپ شده کم می شود. تفاوت مرجع [9] با این مقاله این است که در این مرجع شکل ظاهری بردارهای کوچک ولتاژ هدایت دو فاز با آنچه در اینجا محاسبه و رسم شده است تفاوت دارد و فرکانس سوئیچینگ، متغیر می باشد. علاوه بر این، جدول سوئیچینگ متفاوتی هم نسبت به این مقاله دارد. ریپل فرکانس پایین گشتاور نیز با روشی مشابه روش بکار رفته در مرجع [1] کاهش می یابد که این یک نوع روش کنترل مسقیم گشتاور است، ولی تفاوت مرجع [1] با این تحقیق این است که در آنجا اینورتر معمولی و فرکانس سوئیچینگ متغیر بکار رفته است. همچنین تفاوت دیگر این است که در آن مرجع این نتیجه بدست آمد که اگر ولتاژ لینک DC چهار برابر نیروی ضد محرکه شود تقریباً ریپل گشتاور کموتاسیون از بین می رود ولی این رابطه تقریبی است زیرا از جزء های دارای مقاومت اهمی در رابطه ی شیب جریان ها صرف نظر شده است؛ ولی در این تحقیق رابطه ی دقیق تری با استفاده از مقاومت اهمی بدست آمده است.

۲- اینورتر سه سطحی با نقطه خنثی کلمپ شده و بردارهای ولتاژ تولیدی آن

بردارهای فضایی ولتاژ تولیدی این اینورتر به دو دسته ی هدایت دو فاز و هدایت سه فاز تقسیم می شوند (شکل (۱) و (۲)).

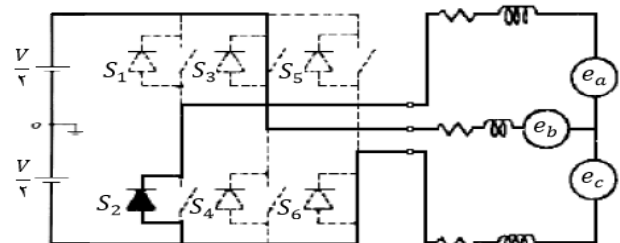
$$V_{11} \frac{(v_{1,0})}{(v_{1,0})}, V_{12} \frac{(v_{1,1})}{(v_{1,1})}, V_{13} \frac{(v_{1,2})}{(v_{1,2})}, V_{14} \frac{(v_{1,3})}{(v_{1,3})}, V_{15} \frac{(v_{1,4})}{(v_{1,4})}, V_{16} \frac{(v_{1,5})}{(v_{1,5})}, V_{17} \frac{(v_{1,6})}{(v_{1,6})}$$



شکل (۳) بردارهای ولتاژ هدایت دو فاز اینورتر سه سطحی نقطه خنثی کلمپ شده

۳-ضربان گشتاور کموتاسیون موتور جریان مستقیم بدون جاروبک

در سیم پیچ های فاز توسط مغناطیس دائم روی روتور و در هنگام چرخیدن روتور در موتور BLDC، ولتاژهای ضد محرکه دوزنقه ای شکل تولید می شود. در این موتور جریان هر فاز معمولاً وقتی وصل می شود که ولتاژ ضد محرکه ی آن فاز در قسمت مسطح شکل موج دوزنقه ای قرار دارد؛ آنگاه به طور ایده آل یک گشتاور بدون ریپل بوجود می آید. در موتور جریان مستقیم بدون جاروبک هر گاه توسط فرمان آتش سوئیچی، قرار است جریان فازی وصل شود و جریان فاز دیگری به صفر برسد، به دلیل خاصیت سلفی سیم پیچ ها جریان فازی که قرار است از صفر به یک مقداری برسد فوری به آن مقدار نمی رسد و جریان فازی که قرار است از یک مقداری به صفر برسد هم فوری صفر نمی شود. انرژی مغناطیسی ذخیره شده در سیم پیچ فازی که جریانش قرار است صفر شود؛ باعث می شود جریان آن فاز ناگهان صفر نشود و حتی اگر کلیدی که جریان از آن عبور می کرد خاموش شود جریان آن فاز از طریق دیود دیگر ادامه یابد تا نهایتاً به صفر برسد. یک مثال از این موضوع در شکل (۴) نشان داده می شود.



شکل (۴) مدار موتور جریان مستقیم بدون جاروبک در یکی از زمان های کموتاسیون

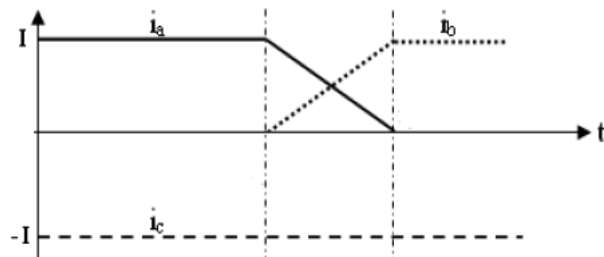
مطلب نشان داده شده در شکل بالا این است که قبلاً کلیدهای S_1 و S_6 روشن بوده اند یعنی جریان فاز a مثبت بوده است و جریان فاز c

منفی بوده است. اکنون قرار است جریان فاز a به صفر برسد و فاز b جایگزین آن شود، پس کلید S_1 خاموش می شود و کلید S_6 جایگزین آن می شود. جریان فاز a به طور ناگهانی صفر نمی شود و با خاموش شدن کلید S_1 ؛ از طریق دیود کلید S_6 تداوم می یابد. شیب دو جریان در حال کموتاسیون از روابط زیر بدست می آید.

$$\frac{di_a}{dt} = -\frac{V_{dc} + rE}{L} - \frac{R}{L}i_a \quad (1)$$

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{r(V_{dc} - E)}{L} - \frac{R}{L}i_b \quad (2)$$

اگر دو خط جریان در حال کموتاسیون دارای شیب مساوی باشند شکل (۵) بدست می آید. در این صورت گشتاور در لحظات کموتاسیون تقریباً ثابت می ماند.



شکل (۵) دو جریان شیب دار با شیب های یکسان و حاصل جمعشان

ولی اگر شیب آنها متفاوت باشد؛ ضربان گشتاور کموتاسیون بصورت افزایش یا کاهش ایجاد می شود. یکسان بودن شیب ها یعنی برابر بودن لحظه ی صفر شدن یک جریان و لحظه ی رسیدن جریان دیگر به مقدار نهایی.

اکنون زمانی که در آن i_a برابر صفر و i_b برابر I می شود، باید محاسبه شود.

$$i_a(t) = -\frac{V_{dc} + rE}{L} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right) + I e^{-\frac{R}{L}t} \quad (3)$$

$$i_b(t) = \frac{r(V_{dc} - E)}{L} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right) \quad (4)$$

$$i_a(t=t_c) = 0 \rightarrow t_c = -\frac{L}{R} \ln \frac{V_{dc} + rE}{\frac{rR}{V_{dc} + rE} + I} \quad (5)$$

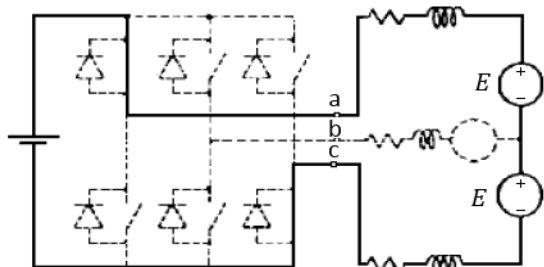
$$i_b(t=t_c) = I \rightarrow t_c = -\frac{L}{R} \ln \frac{I - \frac{r(V_{dc} - E)}{L}}{-\frac{r(V_{dc} - E)}{L}} \quad (6)$$

با برابر قرار دادن دو مدت زمان بدست آمده رابطه زیر بدست می آید.

$$rE + rRI = V_{dc} \quad (7)$$

اگر قسمت سمت چپ عبارت (۷) کوچکتر باشد یعنی سرعت چرخش موتور و در نتیجه نیروی ضد محرکه کمتر بوده است و ریپل افزایشی گشتاور ایجاد می شود. این یعنی جریان زیاد شونده (در این مثال جریان فاز b) شیب تندتری دارد و برای جلوگیری از آن باید هنگامی که گشتاور کمی زیاد شد کلید فازی که تازه روشن شده است (در این مثال کلید S_6) دوباره مثل قبل خاموش شود تا از شدت شیب افزایشی جریان آن فاز کم شود و بعد وقتی گشتاور شروع

موضوع رابطه ی شیب گشتاور باید بررسی شود. شکل (۶) وقتی i_a مثبت و i_c منفی است را نشان می دهد. گشتاور و مشتق آن در رابطه ی (۸) و (۱۰) محاسبه می شوند.



شکل (۶): مدار موتور BLDC

$$T_e = \tau \lambda_{pm} i_a \frac{P}{\gamma} = P \lambda_{pm} i_a \quad (۸)$$

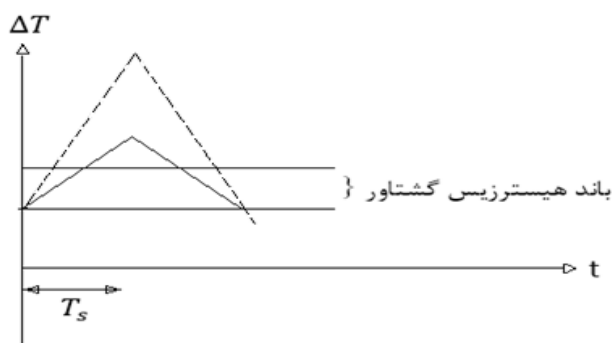
با KVL در مدار موتور شکل (۵) رابطه ی (۹) بدست می آید.

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{\tau L} [V_{ac} - \tau R i_a - \tau E] \quad (۹)$$

از رابطه (۸) و (۹) رابطه (۱۰) بدست می آید.

$$\frac{dT_e}{dt} = P \lambda_{pm} \frac{1}{\tau L} [V_{ac} - \tau R i_a - \tau E] \quad (۱۰)$$

در شکل (۷) خط ممتد، اختلاف گشتاور واقعی با گشتاور مرجع در هنگام استفاده از اینورتر سه سطحی است. خط چین همین معنی را ولی هنگام استفاده از اینورتر دو سطحی معمولی نشان می دهد. اگر زمان نمونه گیری در سیستم، T_s باشد، هنگامی که سیستم تشخیص می دهد اختلاف گشتاور از باند هیستریزس بیشتر شده است در آن هنگام خط چین مقدار بیشتری نسبت به خط ممتد دارد و خط ممتد به دلیل شیب کمترش، مقدار کمتری دارد. البته اگر بجای کنترل کننده هیستریزس رگولاتور گشتاور در این تحقیق هم بکار رود همین تاثیر در کاهش ضربان گشتاور وجود دارد.



شکل (۷): اختلاف گشتاور واقعی و گشتاور مرجع در اطراف باند هیستریزس

۵- رگولاتور گشتاور

روش کنترل مستقیم گشتاور مرسوم این معایب را دارد که فرکانس سوئیچینگ متغیر دارد و همچنین رپل فرکانس بالای بیشتری نسبت به روش کنترل جریان دارد. در طرح پیشنهادی در این جا سعی می شود که این معایب بر طرف شوند. برای ثابت شدن فرکانس سوئیچینگ، بجای کنترلر هیستریزس از یک رگولاتور گشتاور استفاده شده است. بلوک دیاگرام کنترلر جدید که بجای هیستریزس استفاده شده است، در شکل (۸) نشان داده می شود.

به کم شدن کرد دوباره آن کلید روشن شود. برای انجام این فرایند جدول سوئیچینگ شماره ۱ در کموتاسیون بکار می رود.

اگر قسمت سمت چپ عبارت (۷) بیشتر شود یعنی سرعت چرخش موتور و در نتیجه نیروی ضد محرکه بیشتر بوده است و رپل کاهشی گشتاور بوجود می آید. این یعنی جریان کم شونده (در این مثال جریان فاز a) شیب تندتری دارد و برای جلوگیری از آن باید هنگامی که گشتاور کمی کم شد، کلید فازی که خاموش شده است (در این مثال کلید S_1) دوباره مثل قبل وصل شود تا از شدت شیب کاهشی جریان آن فاز کم شود و بعد وقتی گشتاور شروع به زیاد شدن کرد دوباره آن کلید خاموش شود. برای انجام این فرایند جدول سوئیچینگ شماره ۲ و ۳ و ۴ و ۵ در کموتاسیون بکار می رود. اگر به دلیل تقریب در این رابطه در مقالات دیگر (به دلیل نبودن ترم مقاومتی) این جدول سوئیچینگ، در سرعت هایی که منجر به ولتاژ ضد محرکه ای با مقدار بیشتر از ۲۵ درصد ولتاژ لینک dc می شد، وارد عمل می شدند، در حالی که در سرعت هایی با مقدار کمتر باید وارد عمل می شدند. ولی اکنون با این رابطه ی دقیق تر، این جدول سوئیچینگ به موقع یعنی در سرعت مناسبتری بکار می رود.

۴- نحوه ی کاهش رپل فرکانس بالای گشتاور با استفاده از اینورتر سه سطحی نقطه خنثی کلمپ شده

در اینورتر دو سطحی، این نتیجه گرفته می شود که به منظور کنترل گشتاور برای مثال برای افزایش گشتاور در جهت چپ گرد بردار ولتاژی مثل V_r در شکل (۳) بکار می رود. برای کاهش گشتاور هم از بردار مخالف جهت V_r یعنی بردار V_d استفاده می شود. وقتی بردار V_r وصل می شود تا گشتاور زیاد شود؛ به ترمینال فاز b، $\frac{V_{dc}}{2}$ وصل می شود و به ترمینال فاز c، $\frac{-V_{dc}}{2}$ وصل می شود. پس دو سر هر کدام از سیم پیچهای فاز b و c، افت ولتاژ ایجاد می شود. وقتی برای کاهش گشتاور از بردار V_d استفاده می شود ولتاژ $\frac{-V_{dc}}{2}$ به فاز b و ولتاژ $\frac{V_{dc}}{2}$ به فاز c وصل می شود. پس دو سر هر سیم پیچ $\frac{-V_{dc}}{2}$ افت ولتاژ ایجاد می شود. با وجود اینورتر سه سطحی بردار های دیگری هم هستند که برای کاهش گشتاور قابل استفاده هستند. برای مثال برای کاهش گشتاور از بردار V_r می توان استفاده کرد. این بردار از نظر جهت هم جهت با V_r است ولی از نظر اندازه نصف V_r می باشد. وقتی برای کاهش گشتاور از بردار V_r استفاده می شود، به ترمینال فاز b، $\frac{V_{dc}}{2}$ و به ترمینال فاز c، صفر ولت وصل می شود؛ یعنی دو سر هر کدام از سیم پیچهای فاز های b و c، $\frac{V_{dc}}{2}$ وصل می شود، یعنی نصف ولتاژی که برای افزایش گشتاور استفاده می شد. با این تغییری که در استفاده از اینورتر سه سطحی نسبت به دو سطحی دیده می شود نتیجه گرفته می شود که گشتاور با شیب کمتری کاهش می یابد. همچنین با شیب کمتری هم زیاد می شود و این باعث کاهش رپل فرکانس بالای گشتاور می شود. برای اثبات این

گشتاور وضعیت تعیین کننده ی فرمان افزایش یا کاهش گشتاور (T) تعیین می شود. اگر از بردار های ولتاژ بزرگ برای افزایش گشتاور استفاده شده باشد، از یک بردار ولتاژ کوچک که همجهت با همان بردار افزایشده گشتاور است، استفاده می شود تا گشتاور کم شود. ولی اگر برای افزایش گشتاور از بردار ولتاژ کوچکی استفاده شود، از بردار ولتاژ صفر V_0 برای کاهش گشتاور استفاده می شود

جدول (۱): جدول سوئیچینگ طرح پیشنهادی

Flux Φ	Torque T	Sectors					
		I	II	III	IV	V	VI
0	+2	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1
	+1	V_7	V_8	V_9	V_{10}	V_{11}	V_{12}
	0	V_0	V_0	V_0	V_0	V_0	V_0
	-1	V_{10}	V_{11}	V_{12}	V_7	V_8	V_9
	-2	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4

بردارهای ولتاژ بکار رفته در این جدول سوئیچینگ همه از نوع هدایت دو فاز هستند. استفاده از چهار موج مثلی در رگولاتور گشتاور، باعث می شود که متناسب با اندازه ی باری که روی موتور است، بردار های ولتاژ انتخاب شوند. جداول سوئیچینگ در لحظات کموتاسیون نیز بر اساس توضیحات قسمت ۳ در سرعت های بیشتر برای کاهش ریبیل گشتاور کموتاسیون بکار می روند.

جدول (۲): جدول سوئیچینگ (۱) در لحظات کموتاسیون

Flux Φ	Torque T	Sectors					
		I-II	II-III	III-IV	IV-V	V-VI	VI-I
0	+2	U_{L3}	U_{L4}	U_{L5}	U_{L6}	U_{L1}	U_{L2}
	+1	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2

جدول (۳): جدول سوئیچینگ (۲) در لحظات کموتاسیون

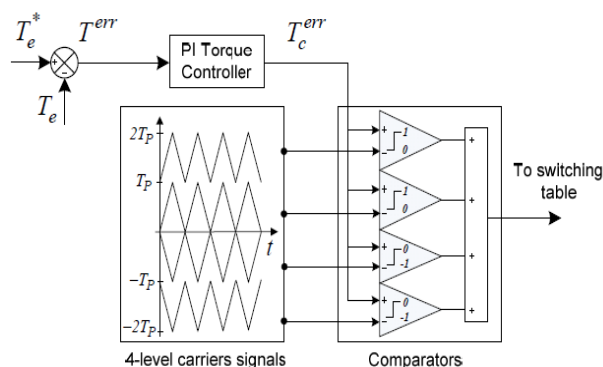
Flux Φ	Torque T	Sectors					
		I-II	II-III	III-IV	IV-V	V-VI	VI-I
0	+1	U_{S3}	U_{S4}	U_{S5}	U_{S6}	U_{S1}	U_{S2}
	0	V_8	V_9	V_{10}	V_{11}	V_{12}	V_7

جدول (۴): جدول سوئیچینگ (۳) در لحظات کموتاسیون

Flux Φ	Torque T	Sectors					
		I-II	II-III	III-IV	IV-V	V-VI	VI-I
0	0	V_{11}	V_{12}	V_7	V_8	V_9	V_{10}
	-1	U_{S6}	U_{S1}	U_{S2}	U_{S3}	U_{S4}	U_{S5}

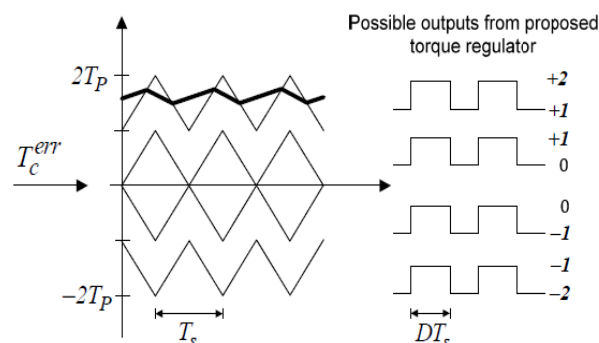
جدول (۵): جدول سوئیچینگ (۴) در لحظات کموتاسیون

Flux Φ	Torque T	Sectors					
		I-II	II-III	III-IV	IV-V	V-VI	VI-I
0	-1	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
	-2	U_{L6}	U_{L1}	U_{L2}	U_{L3}	U_{L4}	U_{L5}



شکل (۸): رگولاتور گشتاور جایگزین کنترلر هیستریزس [8]

طبق شکل (۸) اختلاف گشتاور مرجع با گشتاور واقعی، وارد کنترل کننده ی PI می شود. خروجی PI با شکل موج های مثلی در مقایسه کننده ها مقایسه می شود و خروجی مقایسه کننده ها با هم جمع می شود. طبق شکل بالا دو مقایسه کننده ی بالایی خروجی های ۰ و ۱ دارند و دو مقایسه کننده ی پایینی خروجی های ۰ و -۱ دارند. در این صورت برای مثال اگر خروجی PI در اندازه ای باشد که از موج مثلی با قله ی $2T_p$ بگذرد، +۲ (در صورت بزرگتر بودن خروجی PI از موج مثلی) و +۱ (در صورت کوچکتر بودن خروجی PI از موج مثلی) به جدول سوئیچینگ داده می شود. و یا اگر خروجی PI از موج مثلی با قله ی $-T_p$ بگذرد، -۱ (در صورت کوچکتر بودن خروجی PI از موج مثلی) و ۰ (در صورت بزرگتر بودن خروجی PI از موج مثلی) خروجی های این کنترلر هستند.



شکل (۹): مقایسه ی خروجی PI با شکل موج های مثلی [8]

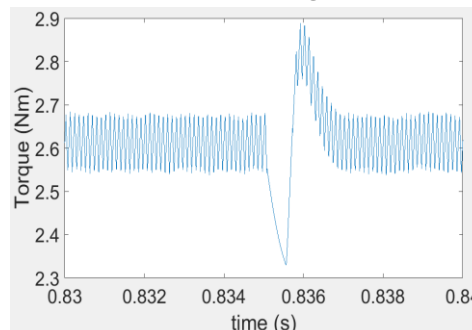
شکل (۹) نحوه ی مقایسه ی خروجی PI با شکل موج های مثلی و خروجی مقایسه گر ها را نشان می دهد. در این شکل منظور از خروجی T_c^err خروجی PI است. ضریب تناسبی در کنترل کننده ی PI باید بگونه ای طراحی شود که شیب خروجی PI از شیب موج مثلی بیشتر نشود.

۶-جدول سوئیچینگ

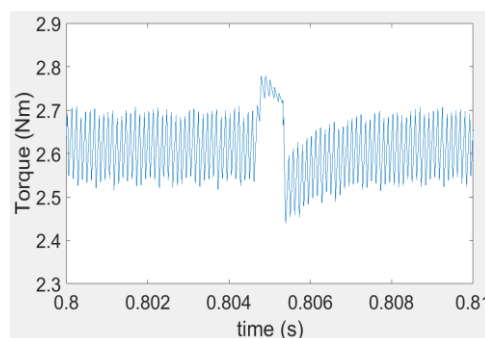
برای افزایش گشتاور در یک سکتور از شار-دور در قاب مرجع ساکن باید بررسی شود که کدام بردار ولتاژ از همه بیشتر گشتاور را زیاد می کند و کمترین تغییر را روی شار-دور استاتور دارد. بوسیله رگولاتور

۷- بحث در نتایج شبیه سازی

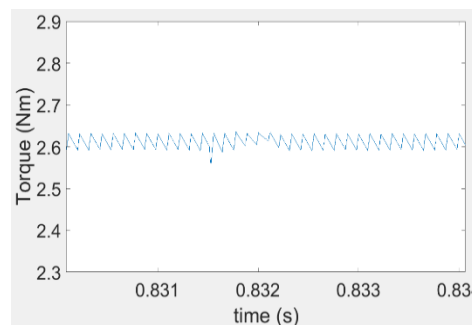
طرح پیشنهادی در این مقاله در نرم افزار Matlab شبیه سازی شد. تمام نتایج در سرعت ۲۶ رادیان بر ثانیه هستند. از مقایسه ی شکل های (۱۰) و (۱۱) و (۱۲) که گشتاور در لحظه ی کموتاسیون در طرح های مختلف را نشان می دهند معلوم می شود که طرح پیشنهادی نسبت به دو طرح دیگر ضربان گشتاور کمتری دارد.



شکل (۱۰): گشتاور در روش کنترل جریان لینک dc



شکل (۱۱): گشتاور در روش کنترل مستقیم گشتاور



شکل (۱۲): گشتاور در طرح پیشنهادی

جدول (۶): مشخصات موتور جریان مستقیم بدون جاروبک

تعداد قطب ها	۶
ممان اینرسی	۰/۰۰۰۸۵ Kg.m ²
مقاومت اهمی	۸/۵ Ω
اندوکتانس	43 mH
شار رتور	۰/۴۹ Wb
ولتاژ لینک DC	150 V
گشتاور نامی	۵/۲ Nm
جریان نامی	۲/۶ A

۸- نتیجه گیری و جمع بندی

در این مقاله شرایط موتور جریان مستقیم بدون جاروبک در کار عادی و لحظات کموتاسیون بررسی شد و بر اساس آن و برای کاهش ضربان های گشتاور فرکانس بالا و پایین، بردار های ولتاژ مناسب از اینسورتر سه سطحی نقطه خنثی کلمپ شده؛ در جداول سوئیچینگ قرار داده شد. همچنین فرکانس کلید زنی هم با بکاربردن یک رگولاتور گشتاور بجای کنترل کننده هیستریزس ثابت شد.

مراجع و منابع

- [1] Y. Liu, Z. Q. Zhu, and D. Howe, 2007, "Commutation-torque-ripple minimization in direct torque-controlled PM brushless DC drives," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 43, no. 4, pp. 1012–1021.
- [2] Z. Q. Zhu, Y. Liu, and D. Howe, 2005, "Comparison of performance of brushless DC drives under direct torque control and PWM current control," *Korean IEE Int. Trans. Elect. Mach. Energy Convers. Syst.*, vol. 5-B, no. 4, pp. 337–342.
- [3] I. Takahashi and T. Noguchi, 1986, "A new quick-response and high efficiency control strategies of an induction motor," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 22, no. 5, Sep./Oct, pp. 820-827.
- [4] M. Depenbrock, 1988, "Direct self-control of inverter-fed induction machine," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 3, no. 4, Oct, pp. 420-429.
- [5] L. Zhong, M. F. Rahman, W. Y. Hu, and K. W. Lim, 1997, "Analysis of direct torque control in permanent magnet synchronous motor drives," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 12, no. 3, May, pp. 528-536.
- [6] Y. Liu, Z. Q. Zhu, and D. Howe, 2005, "Direct torque control of brushless DC drives with reduced torque ripple," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 41, no. 2, Mar./Apr, pp. 599–608.
- [7] S. B. Ozturk and H. A. Toliyat, 2007, "Direct torque control of brushless dc motor with non-sinusoidal back-EMF," in *Proc. IEEE IEMDC Biennial Meeting*, Antalya, Turkey, vol. 1, May, pp. 165–171.
- [8] D. Mohan, X. Zhang and G. Foo, 2016, "Three Level Inverter fed Direct Torque Control of IPMSM with Constant Switching Frequency and Torque Ripple Reduction," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, Iss. 12, Dec, pp. 7908-7918.
- [9] R. Mars, B. Bouzidi, B. Badsı, A. Yangui, 2018, "DTC of Three-Level Inverter Fed Brushless DC Motor Drives With Torque Ripple Reduction," *IEEE. Thirteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, pp. 1-10,
- [10] N. Celanovic and D. Boroyevich, 2000, "A comprehensive study of neutral-point voltage balancing problem in three-level neutral-point-clamped voltage source PWM inverters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 15, no. 2, Mar, pp. 242–249.