

## بهبود کنترل برداری میدان گرا با استفاده از مدولاسیون بردار فضایی

### برای درایو موتور دی سی بدون جاروبک

میلاد بهنام فرا<sup>۱</sup>، حسین ترکمن<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناس ارشد ۲- دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

(دریافت: ۹۷/۰۵/۰۹، پذیرش: ۹۷/۱۱/۱۴)

**چکیده:** مدولاسیون بردار فضایی در موتور دی سی بدون جاروبک (BLDC) با قسمت دوار مغناطیس دائم به دلیل فازهای خاموش و نیروی ضد محرکه دوزنقه‌ای نسبت به موتورهای معمول متفاوت است. برای غلبه بر این مسئله، در این مقاله یک روش SVPWM برای کنترل برداری میدان گرا در درایو موتور BLDC ارائه شده است. تفاوت‌های اساسی در پیاده‌سازی این روش، در تخمین گشتاور و ارائه بردارهای فضایی ولتاژ اینورتر مشخص شده است. به منظور کنترل موثر و مستقیم گشتاور، گشتاور برحسب نیروی ضد محرکه و جریان سه‌فاز محاسبه می‌شود. بر طبق خطای گشتاور بین گشتاور داده شده و گشتاور واقعی، بهترین بردار ولتاژ انتخاب می‌شود. عملکرد دینامیک موتور BLDC را سامانه کنترل مستقیم گشتاور به عهده دارد. در نتیجه انتظار می‌رود تا پاسخ دینامیکی بهتری را در برابر تغییرات بار داشته باشد.

### کلیدواژه‌ها: موتور BLDC، کنترل برداری میدان گرا، مدولاسیون بردار فضایی

#### ۱- مقدمه

از سال ۱۹۸۰ طراحی جدید مفهوم موتور مغناطیس دائم بدون جاروبک توسعه داده شد. موتورهای مغناطیس دائم بدون جاروبک بر اساس شکل موج  $back\ EMF$  در دو نوع طبقه‌بندی می‌شوند: موتورهای  $AC$  بدون جاروبک و موتورهای  $DC$  بدون جاروبک. موتور  $BLDC$  شکل موج  $back\ EMF$  دوزنقه‌ای و شکل موج جریان شبه مربعی دارد [۱]. موتور  $BLDC$  به دلیل استفاده در تمام زمینه‌های صنعتی از قبیل هوا و فضا، خودرو، اتوماسیون و پزشکی محبوب شده است. ویژگی‌هایی از قبیل: سرعت بالاتر، گشتاور بالا، ابعاد کوچک، پاسخ سریع، بازده بالا، تعمیر و نگهداری کمتر و طول عمر طولانی این موتور را در کاربرد های دفاعی مناسب کرده است به علاوه ماشین  $BLDC$  بر خلاف ماشین‌های  $DC$  عملکرد بدون جرقه دارد [۲-۳]. کنترل دیجیتال چهار ربعی موتور  $BLDC$  سه فاز با استفاده از  $dsPIC30F4011$  می‌تواند برای کاربردهای حمل و نقلی استفاده شود [۴]. روش‌های بدون حسگر با گشتاور راه اندازی بالا با استفاده از مقایسه‌کننده هیستریزیسی با روش خود راه‌انداز در [۵-۶] پیشنهاد شده است. در [۷] یک مدل داخلی کنترلر قابل تنظیم سرعت با استفاده از حلقه فاز قفل‌شده نیز برای موتور  $BLDC$  توسعه داده شده است. یک حالت

ترکیبی در [۸] برای کنترل موتور  $BLDC$  پیشنهاد شده که جریان اضافی برای کنترل با استفاده از مدار اضافی استخراج می‌شود. کنترلر هیستریزیسی جریان با استفاده از کنترل برداری برای اینورتر های منبع ولتاژ  $PWM$  در [۹] پیشنهاد شده است. اینورتر سه سطحی زمانی که با اینورتر دو سطحی مرسوم مقایسه می‌شود به طور گسترده در کاربردهای توان متوسط تا توان بالا به دلیل هارمونیک های کمتر ولتاژ خروجی و جریان در همان فرکانس کلیدزنی با کاهش ولتاژ نامی کلید های قدرت استفاده می‌شود [۱۰]. این از وقتی است که توپولوژی اینورتر کلمپ دیودی ( $NPC$ ) معرفی شده است [۱۱]. به علاوه اینورتر  $NPC$  در کاربردهای ولتاژ پایین برای بهبود کیفیت توان استفاده می‌شود [۱۲].  $PWM$  با موج حامل سینوسی ( $SPWM$ ) برای کنترل اینورتر دو سطحی برای اینورتر سه سطحی نیز قابل تعمیم است [۱۳]. اگرچه برای استفاده کامل از پتانسیل اینورترهای چند سطحی روش‌های جدید مدولاسیون مثل مدولاسیون بردار فضایی ( $SVM$ ) معرفی شده است [۱۴].  $SPWM$  از مقایسه موج‌های حامل  $Level\ shifted$  با موج مرجع سه فاز سینوسی برای تولید سیگنال‌های کلیدزنی استفاده می‌کند. اما در  $SVM$  بردار مرجع ولتاژ نمونه برداری شده است و سه بردار نزدیک به بردار مرجع برای کلید زنی انتخاب می‌شوند [۱۵]. برای اطمینان از عملکرد درست سه سطحی متعادل، کنترل  $PWM$  بایستی یک ولتاژ متعادل در اطراف خازن‌های لینک  $dc$  فراهم کند. نامتعادلی نقطه نوترال

ماشین‌های *BLAC*. این مقاله کاربردهای کنترل مستقیم گشتاور برای درایو موتور *BLDC* که در حالت هدایت ۱۲۰ درجه کار می‌کند را برای به دست آوردن کنترل لحظه‌ای گشتاور و کاهش اعوجاج گشتاور در نظر می‌گیرد. نوآوری این مقاله استفاده از *SVPWM* سه سطحی برای کنترل برداری میدان‌گرا موتور *BLDC* می‌باشد که مزیت آن نسبت به *SVPWM* معمولی و دو سطحی استفاده شده در کنترل برداری میدان‌گرای موتور *BLDC*، این است که در هنگام اعمال گشتاور بارهای مختلف، سرعت موتور بسیار کم افت می‌کند که در کاربردهای سرعت ثابت با تغییرات مختلف بار مناسب می‌باشد.

## ۲- بررسی اصول عملکرد و کموتاسیون موتور BLDC

در هر توالی کموتاسیون موتور *BLDC* یکی از سیم‌پیچ‌ها توان مثبت و دومین سیم‌پیچ منفی و سومی در حالت بدون انرژی است. گشتاور به دلیل اثر متقابل بین میدان مغناطیسی تولید شده توسط کویل‌های استاتور و مغناطیس دائم، تولید می‌شود. در حالت ایده‌آل پیک گشتاور زمانی که این دو میدان در ۹۰ درجه نسبت به یکدیگر قرار دارند اتفاق می‌افتد و چنانچه این دو میدان با همدیگر حرکت کنند، پیک گشتاور افت می‌کند. به منظور ادامه حرکت موتور، میدان مغناطیسی تولید شده توسط سیم‌پیچ‌ها باید هنگامی که قسمت دوار به میدان استاتور می‌رسد، تغییر موقعیت دهد

هر ۶۰ درجه الکتریکی چرخش، یکی از حسگرها تغییر وضعیت می‌دهد. برای تکمیل یک دوره الکتریکی باید ۶ پله طی شود. مطابق جدول (۱) با هر ۶۰ درجه الکتریکی، تعویض جریان فاز باید به روز شود. با این حال یک چرخه الکتریکی ممکن است با یک دور کامل مکانیکی قسمت دوار مطابقت نداشته باشد. تعداد چرخه‌های الکتریکی که باید تکرار شود تا یک چرخش کامل مکانیکی انجام شود توسط زوج قطب‌های قسمت دوار مشخص می‌شود. برای هر زوج قطب قسمت دوار یک چرخه الکتریکی کامل می‌شود. بنابراین، تعداد چرخه‌های الکتریکی برابر زوج قطب‌های قسمت دوار است. یک پل سه فاز اینورتر برای کنترل موتور *BLDC* استفاده می‌شود. ۶ کلید وجود دارد که این کلیدها بر اساس ورودی‌های حسگرها سوئیچ می‌شوند. روش مدولاسیون پهنای پالس برای روشن و خاموش کردن کلیدها استفاده می‌شود. برای تغییر سرعت، این سیگنال‌ها بایستی در یک فرکانس خیلی بالاتر از فرکانس موتور، مدولاسیون پهنای پالس شده باشند. فرکانس *PWM* باید حداقل ۱۰ برابر حداکثر فرکانس موتور باشد. زمانی که دیوتی سایکل *PWM* در داخل توالی‌ها تغییر می‌کند ولتاژ متوسط تغذیه‌کننده استاتور کاهش می‌یابد و بدین ترتیب سرعت را کاهش می‌دهد. مزیت دیگر داشتن *PWM* این است که اگر ولتاژ باس *DC* خیلی بالاتر از ولتاژ نامی موتور باشد موتور

هارمونیک‌های زوج را در خروجی تولید می‌کند که برای درایوهای *AC* مضر است. چندین مقاله برای حذف نامتعادلی‌های نقطه نوترال در اینورترهای چند سطحی ارائه شده است [۱۶]. در *SVM*، مقدار مولفه اصلی ولتاژ خروجی ۱۵٪ بیشتر از *SPWM* به دست می‌دهد. در میان روش‌های مدولاسیون مختلف، *SVM* برای کاربردهای درایو با فرکانس متغیر بسیار مناسب است. هارمونیک ولتاژ خروجی به طور مستقیم متناسب با فاصله بین بردار مرجع فضایی و نزدیکترین بردار اینورتر است. از این رو، زمانی که سطح ولتاژ خروجی افزایش می‌یابد، بردارهای اینورتر نزدیکتر شده که نتیجه آن هارمونیک کمتر و شکل موج‌های جریان بیشتر به سینوسی تبدیل می‌شوند. برای جایگزینی توابع کموتاتور و جاروبک‌ها، موتور *BLDC* به یک اینورتر و حسگر موقعیت که موقعیت قسمت دوار را برای کموتاسیون مناسب جریان تشخیص می‌دهد، نیاز دارد. چرخش موتور *BLDC* بر اساس بازخورد موقعیت قسمت دوار است که از حسگرهای هال به دست می‌آید. موتورهای *BLDC* معمولاً از سه حسگر هال برای تعیین توالی کموتاسیون استفاده می‌کنند. در موتور *BLDC* تلفات توان در استاتور هستند که گرما می‌تواند به راحتی از میان ساختمان و سامانه‌های خنک‌کنندگی در ماشین‌های بزرگ منتقل شود. موتورهای *BLDC* دارای مزایای بیش از موتورهای *dc* و موتورهای القایی هستند. بعضی از مزایا: مشخصه سرعت-گشتاور بهتر، پاسخ دینامیکی بالا، بازده بالا، عمر کاری طولانی، عملکرد بدون نویز و محدودهای سرعت بالاتر هستند. تا حالا بیشتر از ۸۰٪ کنترلرها، کنترلر *PI* هستند. چون که آنها به آسانی قابل فهم و قابل اجرا هستند. روش کنترل *PI* یک روش کنترل خطی است. موتور *BLDC* معمولاً از سه حسگر هال یا بیشتر برای به دست آوردن موقعیت قسمت دوار و اندازه‌گیری‌های سرعت استفاده می‌کند. اندازه‌گیری فقط در نمونه‌های گسسته موجود است. وابسته به تعداد قطب‌ها است ممکن است شش یا دوازده پالس حسگر در هر چرخش وجود داشته باشد. بدین ترتیب زمان نمونه‌برداری بر اساس سرعت موتور متغیر است. کنترل برداری میدان‌گرا با مدولاسیون بردار فضایی (*SVPWM*) برای موتور درایو *BLDC* طرح کرده ایم. *SVPWM* در اصل برای درایو موتورهای القایی و کنترل مستقیم شار پراکندگی و گشتاور الکترومغناطیسی توسعه داده شده بود. با در نظر داشتن ماشین الکتریکی، اینورتر الکترونیک قدرت و راهبرد کنترل هم‌سطح سامانه هستند.

یک رابطه بین گشتاور، شار و کلیدزنی بهینه ایجاد می‌شود به طوری که پاسخ سریع گشتاور به دست آید. که عملکرد دینامیکی بهتر از روش‌های کنترل مرسوم نشان می‌دهد. کنترل برداری کمتر نسبت به تغییر پارامترها حساس است و پیاده‌سازی آن آسان تر است. *DTC* با موفقیت به ماشین‌های القایی اعمال شد و اخیراً به

مدولاسیون پهنای پالس بردار فضایی (SVM) کاملاً از روش PWM متفاوت است. توسط روش های PWM، اینورتر را می توان از سه طبقه درایور جداگانه پوش - پول فرض کرد که باعث ایجاد هر شکل موج فاز به طور مستقل می گردد. SVM رفتار معکوس PWM را داشته و سامانه را به صورت یک واحد مجزا می نگرد. این روش به طور خاص، اینورتر را به هشت ناحیه منحصر به فرد فرض می کند. عمل مدولاسیون توسط تغییر وضعیت های مدولاسیون دیجیتال است که در آن هدف، تولید موج PWM ولتاژ خط بار است. این روش در هر دوره نمونه برداری با انتخاب صحیح وضعیت های کلیدزنی اینورتر و محاسبه مدت زمان مناسب برای هر حالت، میزان اعوجاج و هارمونیک ناشی از کلیدزنی را کاهش می دهد.

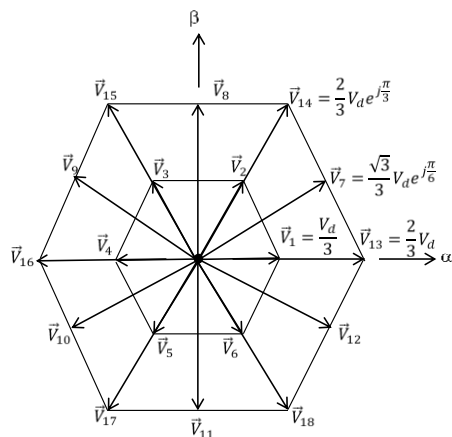
### ۳-۱- بردارهای فضایی ثابت

سه وضعیت کلیدزنی  $[P]$ ،  $[O]$  و  $[N]$  بیانگر عملکرد هر شاخه است. با در نظر گرفتن وضعیت سه فاز، تعداد کل وضعیت های کلیدزنی ممکن برای اینورتر مجموعاً ۲۷ حالت است. برای ولتاژ می توان چهار گروه را در نظر گرفت:

الف) بردار صفر ( $V_0$ ) بیانگر سه وضعیت کلیدزنی  $[P P P]$ ،  $[N N N]$  و  $[O O O]$  است که مقدار  $V_0$  صفر است. ب) بردار کوچک (از  $V_1$  به  $V_6$ )، تماماً مقدار  $\frac{V_d}{3}$  را دارا هستند. هر بخش کوچک دارای دو وضعیت کلیدزنی  $[P]$  و  $[N]$  بوده و آنها را به دو نوع بردار کوچک  $P$  یا  $N$  طبقه بندی می کنند. ج) بردار متوسط ( $V_7$ ،  $V_8$ ،  $V_9$ ،  $V_{10}$ ،  $V_{11}$ ،  $V_{12}$ ) که دارای دامنه  $\frac{\sqrt{3}}{3} V_d$  هستند.

د) بردار بزرگ ( $V_{13}$ ،  $V_{14}$ ،  $V_{15}$ ،  $V_{16}$ ،  $V_{17}$ ،  $V_{18}$ ) که همگی دارای دامنه  $\frac{2}{3} V_d$  هستند.

شکل (۱) دیاگرام بردار فضایی اینورتر NPC را نشان می دهد. تمام بردارهای ولتاژ و حالت های کلیدزنی در جدول (۲) آورده شده است.



شکل (۱): دیاگرام بردار فضایی اینورتر NPC

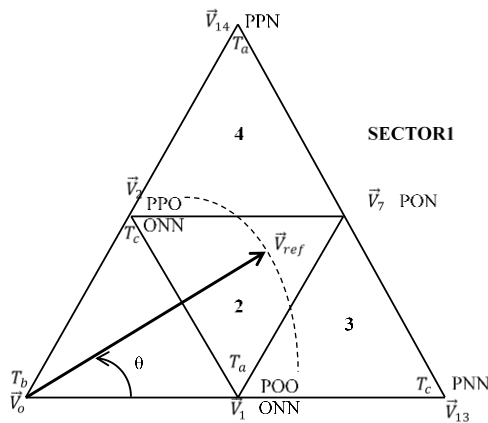
می تواند با محدود کردن درصد دیوتی سایکل PWM، متناظر با ولتاژ نامی موتور، کنترل شود. این ویژگی ها انعطاف پذیری را به کنترلر اضافه می کنند. با توجه به اینکه موتورها باید با ولتاژ های نامی مختلف ارتباط داشته باشند و ولتاژ متوسط خروجی کنترلر با ولتاژ نامی موتور توسط کنترل دیوتی سایکل PWM مطابقت داشته باشد بنابراین سرعت و گشتاور موتور به استحکام میدان مغناطیسی تولید شده توسط سیم پیچی تحریک شده موتور بستگی دارد. استحکام میدان مغناطیسی تولید شده توسط سیم پیچی تحریک شده موتور به جریان عبوری از میان آنها بستگی دارد. بنابراین تنظیم ولتاژ (و جریان) سرعت موتور را تغییر خواهد داد.

جدول (۱): توالی کموتاسیون

کد سنسور اثر هال	مرحله	فاز فعال	
۱۰۱	۱	Phase A	Phase C
۱۰۰	۲	Phase A	Phase B
۱۱۰	۳	Phase C	Phase B
۰۱۰	۴	Phase C	Phase A
۰۱۱	۵	Phase B	Phase A
۰۰۱	۶	Phase B	Phase C

### ۳-۲ کنترل میدان گرا برای مدولاسیون بردار فضایی سه سطحی

در کنترل میدان گرا (Field oriented)، جریان ها و ولتاژها در قاب مرجع  $d-q$  قسمت دوار دستکاری می شوند. این بدان معنی است که جریان های اندازه گیری شده موتور قبل از پردازش توسط کنترلرهای  $PI$  بایستی از نظر ریاضی از قاب مرجع سه فاز ساکن سیم پیچی های استاتور به قاب مرجع چرخان دو محوری  $d-q$  منتقل شود. به طور مشابه ولتاژهای که باید به موتور اعمال شود از قاب مرجع  $d-q$  قسمت دوار به قاب مرجع سه فاز استاتور قبل از این که بتوانند برای خروجی PWM استفاده شود منتقل می شوند. اگر چه تبدیلات قاب مرجع می تواند در یک مرحله انجام شود بهتر است که در فرایند دو مرحله ای انجام شود. جریان های موتور ابتدا از قاب سیم پیچی های استاتور موتور به قاب مرجع متعامد ثابت منتقل می شود سپس آنها از قاب ثابت استاتور به قاب مرجع دوار قسمت دوار منتقل می شود. دو کنترلر  $PI$  استفاده می شود؛ یکی برای عنصر جریان مستقیم و دیگری برای جریان عمود. ورودی کنترلر برای جریان مستقیم، ورودی صفر است. که عنصر جریان مستقیم را به صفر میل می کند بنابراین، بردار فضایی جریان را مجبور می کند که منحصر در جهت عمود باشد. از این رو فقط جریان عمود، گشتاور مفید تولید می کند که این بازده گشتاور سامانه را به حداکثر می رساند. در این مقاله از مدولاسیون بردار فضایی دو سطحی و مدولاسیون بردار فضایی سه سطحی استفاده شده است که در ادامه نتایج با هم مقایسه می شوند. در اینجا مدولاسیون بردار فضایی سه سطحی شرح داده می شود.



شکل (۳): بردارهای ولتاژ و زمان های آن‌ها

معادلات ذیل بیانگر روابط بین زمان و ولتاژ می باشد:

$$\vec{V}_1 T_a + \vec{V}_7 T_b + \vec{V}_2 T_c = \vec{V}_{ref} T_s \quad (1)$$

$$T_a + T_b + T_c = T_s$$

که در آن،  $T_a$  و  $T_b$  و  $T_c$  به ترتیب پارامترهای زمان برای  $\vec{V}_7$ ،  $\vec{V}_2$ ،  $\vec{V}_1$  هستند. بردارهای ولتاژ  $\vec{V}_1$ ،  $\vec{V}_7$ ،  $\vec{V}_2$  و  $\vec{V}_{ref}$  در شکل (۳) می‌توانند به صورت زیر بیان شوند:

$$\vec{V}_1 = \frac{1}{3} V_d, \quad \vec{V}_2 = \frac{1}{3} V_d e^{j\frac{\pi}{3}}, \quad \vec{V}_7 = \frac{\sqrt{3}}{3} V_d e^{j\frac{\pi}{6}}, \quad \vec{V}_{ref} = V_{ref} e^{j\theta} \quad (2)$$

با قرار دادن معادله (۲) در (۱) و جدا کردن قسمت‌های موهومی و حقیقی خواهیم داشت:

$$T_a + \frac{3}{2} T_b + \frac{1}{2} T_c = 3 \frac{V_{ref}}{V_d} (\cos \theta) T_s \quad (3)$$

$$\frac{3}{2} T_b + \frac{\sqrt{3}}{2} T_c = 3 \frac{V_{ref}}{V_d} (\sin \theta) T_s \quad (4)$$

با حل معادلات (۳) و (۴) می‌توان رابطه برای کل زمان در بازه  $0$  تا  $\frac{\pi}{3}$  به شکل معادلات زیر نوشت:

$$T_s = T_a + T_b + T_c \quad \text{for } 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{3}$$

$$T_a = T_s [1 - 2m_a \sin \theta]$$

$$T_b = T_s \left[ 2m_a \sin \left( \frac{\pi}{3} + \theta \right) - 1 \right]$$

$$T_c = T_s \left[ 1 - 2m_a \sin \left( \frac{\pi}{3} - \theta \right) \right] \quad (5)$$

در روابط فوق،  $m_a$  شاخص مدولاسیون بوده و توسط رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$m_a = \sqrt{3} \frac{V_{ref}}{V_d} \quad (6)$$

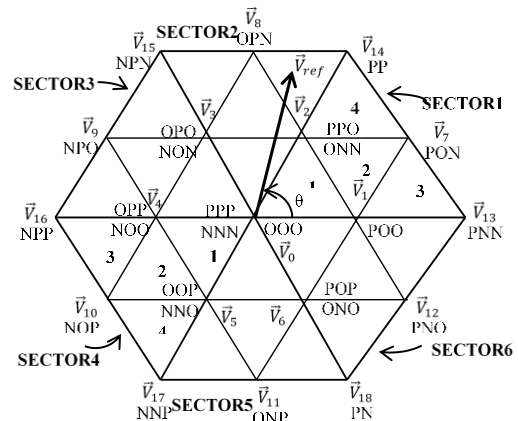
مقدار حداکثر  $V_{ref}$  به صورت زیر قابل محاسبه است:

جدول (۲): بردارهای ولتاژ و حالت های کلید زنی

دامنه بردار	حالت بردار	حالت کلید زنی	بردار فضایی	
0	بردار صفر	[PPP] [OOO] [NNN]	$\vec{V}_0$	
$\frac{1}{3} V_d$	بردار کوتاه	P-type	N-type	
		$\vec{V}_1$	$\vec{V}_{1P}$ [POO]	$\vec{V}_{1N}$ [ONN]
		$\vec{V}_2$	$\vec{V}_{2P}$ [PP0]	$\vec{V}_{2N}$ [OON]
		$\vec{V}_3$	$\vec{V}_{3P}$ [OPO]	$\vec{V}_{3N}$ [NON]
		$\vec{V}_4$	$\vec{V}_{4P}$ [OPP]	$\vec{V}_{4N}$ [NOO]
		$\vec{V}_5$	$\vec{V}_{5P}$ [OOP]	$\vec{V}_{5N}$ [NNO]
		$\vec{V}_6$	$\vec{V}_{6N}$ [POP]	$\vec{V}_{6P}$ [ONP]
		$\vec{V}_7$	[PON]	
		$\vec{V}_8$	[OPN]	
		$\vec{V}_9$	[NPO]	
		$\vec{V}_{10}$	[NOP]	
		$\vec{V}_{11}$	[ONP]	
$\frac{\sqrt{3}}{3} V_d$	بردار متوسط	$\vec{V}_{12}$	[PNO]	
		$\vec{V}_{13}$	[PNN]	
		$\vec{V}_{14}$	[PPN]	
		$\vec{V}_{15}$	[NPN]	
		$\vec{V}_{16}$	[NPP]	
		$\vec{V}_{17}$	[NNP]	
$\frac{2}{3} V_d$	بردار بلند	$\vec{V}_{18}$	[PNP]	

### ۳-۲- محاسبات زمان‌های کلید زنی

دیاگرام بردار فضایی که در شکل (۲) نشان داده شده است می‌تواند برای محاسبه زمان برای هر بخش (۱ تا ۶) مورد استفاده قرار گیرد. همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است. هر بخش دارای چهار ناحیه ۱ تا ۴ بوده که با وضعیت‌های کلیدزنی بردارها همراه است. جهت محاسبات زمانی می‌توان گفت: مجموع ولتاژ ضرب در بردار فضای منتخب برابر است با ضرب ولتاژ مرجع ( $V_{ref}$ ) در دوره زمانی نمونه‌برداری ( $T_s$ ). برای درک این مطلب، زمانی را در نظر بگیرید که ولتاژ مرجع در منطقه ۲ از بخش ۱ قرار دارد؛ بنابراین نزدیکترین بردار به ولتاژ مرجع، بردارهای  $V_1$ ،  $V_2$ ،  $V_7$  می‌باشند. که در شکل (۳) نشان داده شده است.



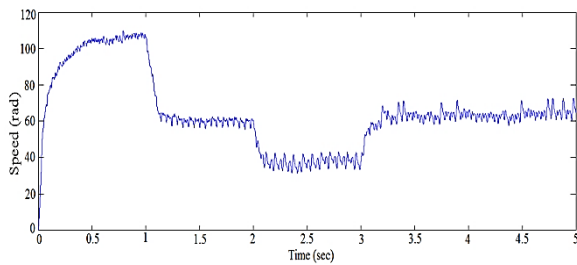
شکل (۲): تقسیم‌بندی بخش‌ها و منطقه‌ها

جدول (۳): پارامترهای موتور BLDC

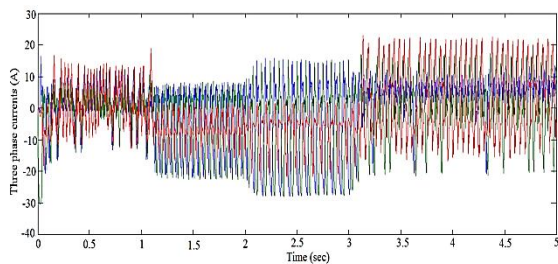
پارامتر	مقدار
تعداد قطب موتور	4
لختی J	0.0022 Kg-m <sup>2</sup>
ضریب دمپینگ D	0.000001
مقاومت استاتور R	0.7
اندوکتانس استاتور L	5.2mH
شار پیوندی	0.104
توان موتور P	748W
جریان موتور I	18A
ولتاژ ترمینال V	24V

در ثانیه اول گشتاور بار یک نیوتن اعمال می شود سپس در ثانیه دوم گشتاور بار ۲ نیوتن اعمال می شود و در ثانیه سوم گشتاور بار یک نیوتن اعمال می شود.

نتایج با استفاده از مدولاسیون دو سطحی به شرح زیر می باشد: همان طور که در شکل (۶) نشان داده شده است در ثانیه اول که گشتاور بار یک نیوتنی اعمال می شود سرعت در حدود ۵۰ rad/s افت می کند و در ثانیه دوم که گشتاور بار دو نیوتنی اعمال می شود سرعت در حدود ۲۰ rad/s افت می کند و در ثانیه سوم که گشتاور بار یک نیوتنی برداشته می شود سرعت در حدود ۲۰ rad/s افزایش می یابد. شکل (۷) شکل موج جریان های سه فاز استاتور را نشان می دهد



شکل (۶): شکل موج سرعت موتور



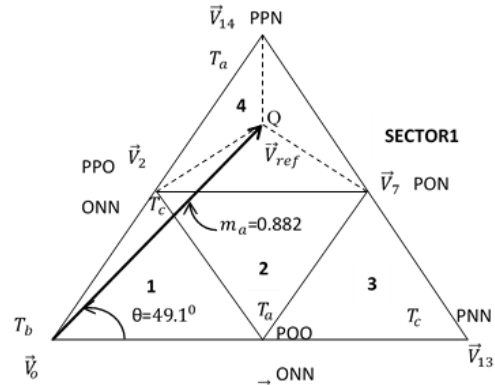
شکل (۷): شکل موج جریان های سه فاز استاتور

$$V_{ref,max} = \frac{\sqrt{3}}{3} V_d \quad (۷)$$

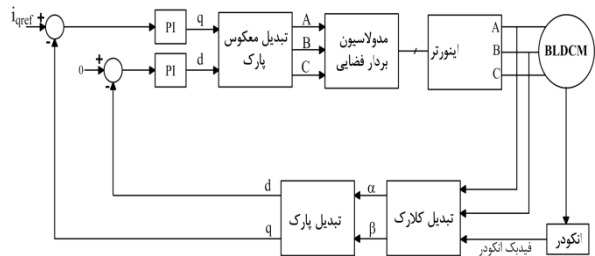
$m_a$  شاخص مدولاسیون بوده که مقدار آن به صورت زیر می باشد.  
 $0 \leq m_a \leq 1$

### ۳-۳- ارتباط بین مکان $V_{ref}$ و زمان

برای نشان دادن رابطه بین مکان  $\vec{V}_{ref}$  و زمان های کلیدزنی، مثال نشان داده شده در شکل (۴) در نظر گرفته می شود. با فرض این که سر  $\vec{V}_{ref}$  در مرکز منطقه ۴ نقطه Q قرار دارد زمان ها برای نزدیکترین بردارهای  $\vec{V}_2$ ،  $\vec{V}_7$  و  $\vec{V}_{14}$  باید یکسان باشد چون که فاصله از Q تا این بردارها یکسان است. این می تواند با  $m_a = 0.882$  و  $\theta = 49.1^\circ$  به دست آورده شود. که زمان های محاسبه شده  $T_a + T_b + T_c = 0.333T_s$  هستند. با حرکت  $\vec{V}_{ref}$  به طرف  $\vec{V}_2$  از نقطه Q در طول خط چین، تاثیر  $\vec{V}_2$  روی  $\vec{V}_{ref}$  بیشتر می شود. که به معنی زمان بیشتر برای  $\vec{V}_2$  است. وقتی که  $\vec{V}_{ref}$  با  $\vec{V}_2$  یکسان است زمان  $T_c$  برای  $\vec{V}_2$  به مقدار حداکثرش ( $T_c = T_s$ ) می رسد در حالی که  $T_a$  و  $T_b$  برای  $\vec{V}_7$  و  $\vec{V}_{14}$  به صفر کاهش می یابد. دیاگرام طرح کنترل میدان گرا در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل (۴): مثالی برای نشان دادن رابطه بین مکان  $V_{ref}$  و زمان های کلیدزنی

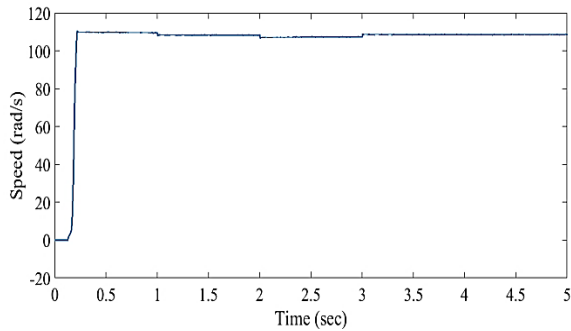


شکل (۵): طرح کنترل میدان گرا

### ۴- نتایج پیاده سازی

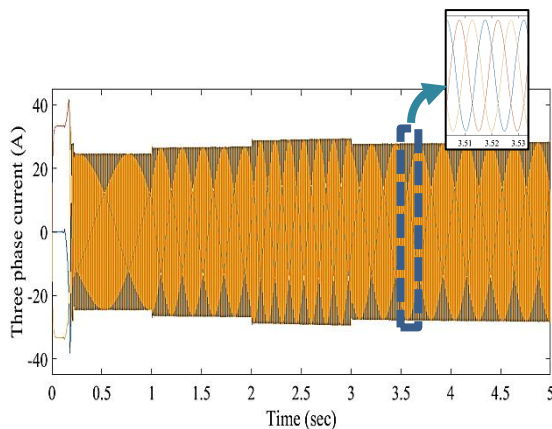
در این بخش بر اساس تئوری مطرح شده موتور با مشخصات جدول (۳) شبیه سازی می گردد:

مدولاسیون سه سطحی که استفاده شد با اعمال گشتاور بار سرعت خیلی کم افت می‌کند (حدود ۲ rad/s) در حالی که در شکل (۶) که از مدولاسیون دو سطحی استفاده کرده بود سرعت خیلی زیاد افت می‌کرد (در حدود ۵۰ rad/s)

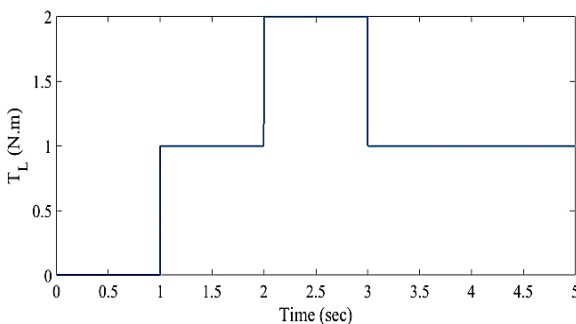


شکل (۱۱): شکل موج سرعت

شکل (۱۲) شکل موج جریان‌های سه فاز استاتور را نشان می‌دهد.

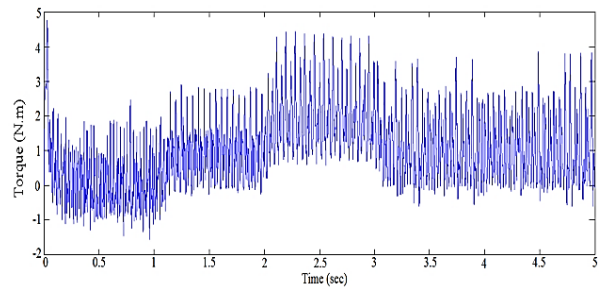


شکل (۱۲): شکل موج جریان‌های سه فاز استاتور



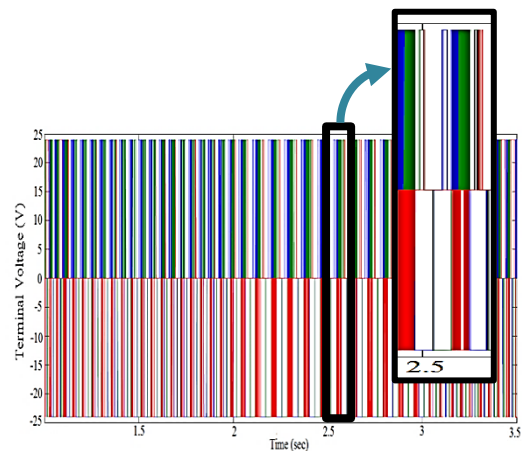
شکل (۱۳): شکل موج گشتاور بار

همان طور که در شکل (۱۳) نشان داده شده است در ثانیه اول گشتاور بار یک نیوتن اعمال می‌شود سپس در ثانیه دوم گشتاور بار دو نیوتن اعمال می‌شود و در ثانیه سوم گشتاور بار یک نیوتن اعمال می‌شود.

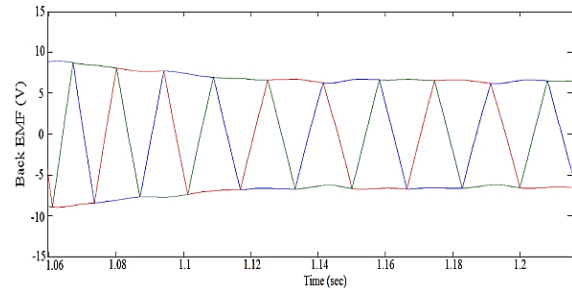


شکل (۸): گشتاور الکترومغناطیسی

همان طور که در شکل (۸) نشان داده شده است در بازه زمانی صفر تا یک ثانیه که گشتاور بار صفر است گشتاور الکترومغناطیسی صفر است و در بازه زمانی یک تا دو ثانیه که گشتاور بار یک نیوتن است گشتاور الکترومغناطیسی یک نیوتن است و در بازه زمانی دو تا سه ثانیه که گشتاور بار دو نیوتن است گشتاور الکترومغناطیسی دو نیوتن است و در بازه زمانی سه تا ۵ ثانیه گشتاور بار یک نیوتن است گشتاور الکترومغناطیسی یک نیوتن است. زیرا که از مدولاسیون دو سطحی استفاده شده است شکل موج ولتاژ ترمینال سه سطحی شده است همان طور که در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل (۹): ولتاژ ترمینال



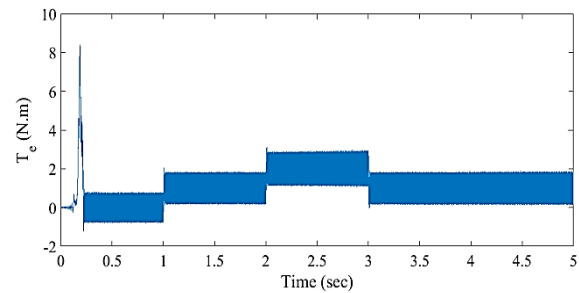
شکل (۱۰): شکل موج‌های Back-emf سه‌فاز

نتایج با استفاده از مدولاسیون سه سطحی به شرح زیر می‌باشد: همان طور که در شکل (۱۱) نشان داده شده است با استفاده از

درایو موتور BLDC به‌کار برده شد. همان‌طور که مشاهده گردید طرح ارائه‌شده نسبت به SVPWM معمول، این مزیت را دارد که با اعمال گشتاور بارهای مختلف به‌عبارتی تغییر بار در سامانه محرکه، افت سرعت خیلی کمتری دارد. این ویژگی در کاربردهای سرعت ثابت با بار متغییر بسیار کاربردی و مناسب می‌باشد.

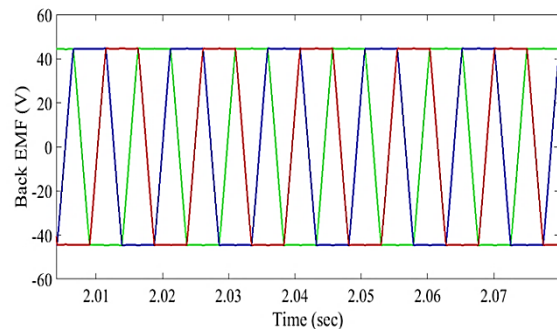
## ۶- منابع

- [1] M.V.Ramesh, J.Amarnath, S.Kamakshaiiah, M.Balakrishna, "Field Oriented Control for Space Vector Modulation based Brushless DC Motor drive," International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, Vol. 2, Issue 9, September 2013.
- [2] A. G. de Castro, and et.al., "Improved Finite Control-Set Model-Based Direct Power Control of BLDC Motor With Reduced Torque Ripple," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 54, no. 5, pp. 4476-4484, Sept.-Oct. 2018.
- [3] Qamar, N.A. and Hatziaioniu, C.J., "Cancellation of selected stator harmonics in BLDC by using an adaptive feedforward controller". Elsevier, Electric Power Systems Research, vol.154, pp.88-94, 2018.
- [4] Sheeba Joice, S. R. Paranjothi and V. Jawahar Senthil Kumar, "Digital Control Strategy for Four Quadrant Operation of Three Phase BLDC Motor with Load Variations, " IEEE Transactions on Industrial Informatics; vol. 9, no. 2, May 2013.
- [5] P. C. Biswas and B. C. Ghosh, "A novel flux estimation algorithm based position sensorless field oriented vector controlled permanent magnet brushless DC motor drive," 3rd International Conference on Electrical Information and Communication Technology (EICT), Khulna, 2017, pp. 1-6.
- [6] Vanchinathan, K. and Valluvan, K.R., "A metaheuristic optimization approach for tuning of fractional-order PID controller for speed control of sensorless BLDC motor". Journal of Circuits, Systems and Computers, vol.27, no.8, pp.1850123, 2018.
- [7] Ching-Tsai Pan and Emily Fang; "A Phase Locked Loop assisted Internal Model Adjustable Speed Controller for BLDC Motors," IEEE Transactions on Industrial Electronics; vol.55; no.9; September 2008.
- [8] Janpana, R. Chaisrichaoren and P. Boonyanant, "Control of the Brushless DC Motor in Combine Mode," Elsevier- Procedia Engineering, vol. 32, pp. 279 -285, 2012.
- [9] Mansour Mohseni and Syed M. Islam, "A New Vector-Based Hysteresis Current Control Scheme for Three Phase PWM Voltage Source Inverters," IEEE Transactions on Power Electronics, vol.25, no. 9, September 2010.
- [10] Du Toit Mouton, H, "Natural balancing of three-level neutralpoint- clamped PWM inverters," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.49, 2002.
- [11] K. J. Pratheesh, G. Jagadanand and R. Ramchand, "A Generalized-Switch-Matrix-Based Space Vector Modulation Technique Using the Nearest Level Modulation Concept for Neutral-Point-Clamped Multilevel Inverters," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 65, no. 6, pp. 4542-4552, June 2018.
- [12] L. Tan, B. Wu, M. Narimani, D. Xu and G. Joós, "Multicarrier-Based PWM Strategies With Complete Voltage Balance Control for NNPC Inverters," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 65, no. 4, pp. 2863-2872, April 2018.
- [13] Keliang, Z. and W. Danwei, "Relationship between space-vector modulation and three-phase carrier-based PWM: acomprehensive analysis [three-phase inverters]," IEEE

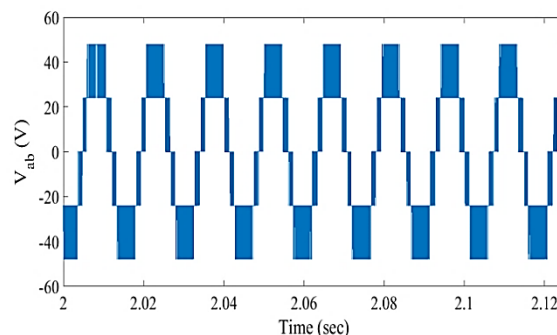


شکل (۱۴): شکل موج گشتاور الکترومغناطیسی

با توجه به شکل (۱۴) در بازه زمانی صفر تا یک ثانیه که گشتاور بار صفر است گشتاور الکترومغناطیسی صفر است و در بازه زمانی یک تا دو ثانیه که گشتاور بار یک نیوتون است گشتاور الکترومغناطیسی یک نیوتون است و در بازه زمانی دو تا سه ثانیه که گشتاور بار دو نیوتون است گشتاور الکترومغناطیسی دو نیوتون است و در بازه زمانی سه تا ۵ ثانیه گشتاور بار یک نیوتون است. شکل (۱۵) شکل موج‌های back-emf را نشان می‌دهد.



شکل (۱۵): شکل موج‌های Back-emf سه‌فاز



شکل (۱۶): شکل موج ولتاژ خط به خط خروجی اینورتر

همان‌طور که در شکل (۱۶) مشاهده می‌شود چون از مدولاسیون سه سطحی استفاده شده است ولتاژ خط به خط خروجی اینورتر، پنج سطحی می‌باشد.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله از روش کنترل برداری میدان‌گرا برای درایو موتور BLDC استفاده شد و از یک طرح SVPWM سه سطحی برای

- the three-level NPC inverter,” IEEE Power Electronics Letters, vol.2, pp:11-15, 2004.
- [16] K. Yamanaka; A. M. Hava; H. Kirino; Y. Tanaka; N. Koga; T. Kume,  
“A novel neutral point potential stabilization technique using the information of output current polarities and voltage vector,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol.38, pp:1572-1580, 2002.
- [14] Maswood, A.I., O.H.P. Gabriel, and M.A. Rahman, “High power multilevel inverter with unity PF front-end rectifier,” IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), pp:1-5, 2012.
- [15] S. Busquets-Monge; J. Bordonau; D. Boroyevich; S. Somavilla, “The nearest three virtual space vector PWM - a modulation for the comprehensive neutral-point balancing in Transactions on Industrial Electronics, vol.49, pp:186-196, 2002.



## **Improvement of Field-Oriented Control Of Brushless Motor Drive Using Space Vector Modulation**

**M. Behnamfar, H. Torkaman\***

**Shahid Beheshti University**

(Received: 31/07/2018, Accepted: 03/02/2019)

### **Abstract**

*The space vector modulation in a brushless DC motor (BLDC) with a permanent magnetic rotor is different from that in a conventional motor due to the silent phases and trapezoidal back EMF. To overcome this problem, in this paper, an SVPWM method is proposed for field-oriented control of the BLDC motor drive. The main differences in the implementation of this method are the torque estimation and the presentation of the space vectors of the specified inverter voltage. In order to control the effective and direct torque, the torque is calculated in terms of the electromagnetic force and the three-phase current. According to the torque error between the given torque and the reference torque, the best voltage vector is selected, which realizes the dynamic performance of the BLDC motor as a direct torque control system. As a result, it is expected to have a better dynamic response to load variations.*

**Keywords:** Field Oriented Control, Brushless Dc Motor, Space Vector Modulation

---

\* Corresponding author E-mail: h\_torkaman@sbu.ac.ir