

پیاده‌سازی ۲۴ قطعی استراژی کنترل مستقیم گشتاور در مبدل‌های چندسطحی

محمدآراسته^{۱*}، عبدالرضارحمتی^۲، شاهرخ فرهنگی^۳، سید ادیب ابریشمی فر^۴

۱- دانشجوی دکتری مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- دانشیار مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

۴- استادیار مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

marasteh@iust.ac.ir

(دریافت مقاله: شهریور ۱۳۸۹، پذیرش مقاله: دی ۱۳۸۹)

چکیده- در این پژوهش کنترل مستقیم گشتاور در نوعی محرکه پنج سطحی خازنی بر اساس جدول کلیدزنی ۲۴ قطعی پیاده‌سازی شده است. در جدول ارائه شده مشکل فراجش و ولتاژ ناشی از بالا بودن dv/dt اعمال شده به استاتور در مقایسه با جدول کلیدزنی ۱۲ قطعی کاهش یافته است. جدول ارائه شده از تمامی بردارهای موجود در مبدل پنج سطحی کمک گرفته و در نتیجه انعطاف بیشتری نسبت به کارهای قبلی داشته و ریبیل سرعت (گشتاور) را کاهش می‌دهد. شبیه‌سازی در سیمولینک این بهبود را تأیید می‌کند. این راهبرد برای نوعی محرکه پنج سطحی مقیاس کوچک توسط پردازنده TMS320F2812 پیاده‌سازی و نتایج عملی در اینجا ارائه شده است.

کلید واژگان: کنترل مستقیم گشتاور، جدول کلیدزنی، محرکه چندسطحی خازنی، انعکاس ولتاژ، فراجش ولتاژ.

۱- مقدمه

توسعه این محرکه‌ها از دهه ۸۰ میلادی با استفاده از GTO آغاز شد. اما با ابداع IGCT و IGBT ولتاژ بالا در دهه ۹۰ میلادی و به دلیل مشخصه‌های عالی کلیدزنی، سادگی در کنترل و تلفات کم توان، این دو نوع کلید، عناصر اصلی امروزی در طراحی و ساخت محرکه‌های توان بالا به‌شمار می‌روند [۱]. اگرچه ساختارهای متعددی برای این محرکه‌ها ارائه شده اما سه روش مهار دیودی، پل H متوالی و خازن

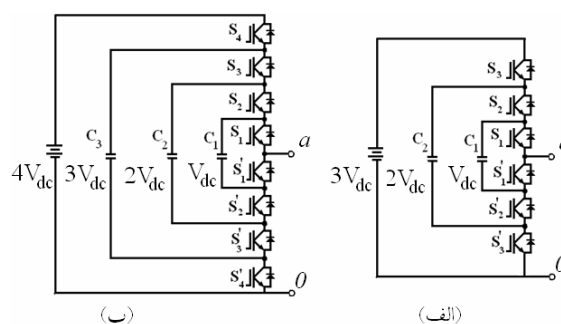
محرکه‌های توان بالا در صنعت امروزی کاربرد گسترده‌ای دارند. پمپ‌های خط لوله در صنعت نفت و پتروشیمی، پروانه‌های پر قدرت در صنعت سیمان، موتورهای کشنده در صنعت حمل و نقل و آسیاب‌های چرخشی در صنعت فولاد، تعدادی از این کاربردها است. از این رو پژوهش در زمینه بهبود عملکرد و افزایش قدرت این محرکه‌ها افزایش یافته و در دهه گذشته حوزه پژوهشی محرکه‌های توان بالا یکی از فعال‌ترین حوزه‌ها در الکترونیک قدرت بوده است [۱].

1. Diode Clamp
2. Cascaded H bridge

خط انتقال رفتار می‌کند و در نتیجه، برای هر لبه پالس با اضافه ولتاژ روبه‌رو خواهیم شد. بر طبق نظریه خط انتقال با افزایش طول کابل، ولتاژ انعکاس یافته نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه در کاربردهایی مانند معدن‌ها یا سکوی‌های دریایی که به دلیل محدودیت فضا، موتور و مبدل فاصله زیادی دارند، این مشکل تشدید می‌شود. در محرکه‌های توان پایین یا متوسط که از مبدل‌های دوسطحی استفاده می‌کنند این موضوع مطالعه و رابطه فراجش ولتاژ با زمان صعود پالس و طول کابل مشخص شده است. در [۶] نشان داده شده که در فواصل طولانی، فراجش می‌تواند از دو برابر ولتاژ تغذیه DC نیز بیشتر شود.

در مبدل‌های مدولاسیون پهنای پالس روش‌های متعددی برای کاهش این مشکل ارائه شده است. بدیهی است که کاهش سرعت کلیدزنی (افزایش dt) برای کاهش فراجش ولتاژ مناسب نیست زیرا به افزایش تلفات کلیدزنی می‌انجامد. روش دیگری که برای کاهش dV/dt متداول است، طراحی فیلتر در خروجی مبدل است که به‌عنوان نوعی راه حل غیر فعال^۲ بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در طراحی فیلترهای مختلف و محل قرار گرفتن آن، علاوه بر کاهش فراجش ولتاژ اهدافی مانند کاهش تلفات فیلتر، کاهش ولتاژ حالت مشترک و توزیع بهتر ولتاژ در سیم‌پیچی استاتور نیز دنبال می‌شود. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که برای رسیدن به این اهداف باید فیلتر در خروجی مبدل قرار گیرد [۸]. فیلترهایی نیز طراحی شده که وظیفه کاهش dV/dt و کاهش ولتاژ حالت مشترک را به‌طور هم‌زمان انجام می‌دهد [۹]. به هر حال استفاده از این فیلترها علاوه بر افزایش هزینه، تابع تبدیل سیستم را تغییر داده و کنترل را پیچیده می‌سازد و لذا سیستم کنترل، دینامیک فیلتر را نیز باید در نظر بگیرد [۱۰] و [۱۱].

شناور^۱ کاربرد بیشتری یافته و تجاری‌سازی شده‌اند [۲] و [۳]. در میان این محرکه‌ها، از آنجا که محرکه خازن شناور نشان داده شده در شکل ۱ مانند پل H متوالی به ترانسفورماتور حجیم نیاز نداشته و همچنین اعوجاج نوع مهار دیودی را ندارد، مورد توجه قرار گرفته است. در میان روش‌های کنترل دور موتورهای القایی، روش کنترل مستقیم گشتاور که روشی با کارایی بالا در محرکه‌های دوسطحی است، در محرکه‌های چندسطحی نیز اجرا شده است [۴] و [۵]. در [۵] کنترل مستقیم گشتاور با استفاده از جدول کلیدزنی ۱۲ قطعی در محرکه خازنی پیاده‌سازی و برای متعادل‌سازی خازن‌ها از افزونگی بردارها استفاده شده است.



شکل ۱ مبدل خازنی (الف) چهارسطحی (ب) پنج سطحی

یکی از مشکلات اصلی در مبدلهایی که از کلیدهای سریعی مانند IGBT استفاده می‌کنند، مشکل فراجش ولتاژ است که ممکن است به عایق سیم‌پیچی استاتور صدمه وارد کند. میزان فراجش ولتاژ بر طبق نظریه انعکاس، به dV/dt ولتاژ اعمال شده به استاتور بستگی دارد که در کلیدهای سریع، به‌علت کوچک بودن dt ، بزرگ است [۶]. میزان فراجش همچنین به طول کابل بستگی دارد [۷]. کابل موتور در برابر این پالس‌ها مانند

است. ضریب پراکندگی σ برابر است با:

$$\sigma = 1 - \frac{L_m}{L_s L_r}$$

در کنترل مستقیم گشتاور، دامنه شارها در حدود مقدار نامی حفظ شده و گشتاور را با تغییر زاویه گشتاور تنظیم می کنند که حداکثر گشتاور به ازای $\delta_{\psi} = \pi/2$ به دست می آید. زاویه گشتاور با استفاده از بردار ولتاژ استاتور قابل تنظیم است. معادله ولتاژ استاتور چنین است:

$$\bar{u}_s = r_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\psi}_s}{dt} \quad (2)$$

با توجه به این که مقاومت r_s ناچیز است داریم:

$$\bar{u}_s \approx \frac{d\bar{\psi}_s}{dt} \Rightarrow \bar{\psi}_s = \bar{\psi}_{s.} + \bar{u}_s \Delta t \quad (3)$$

در محرکه های چندسطحی نیز مانند محرکه های دو سطحی با انتخاب بردارهای مناسب ولتاژ، می توان مکان هندسی شار استاتور را کنترل کرد. مؤلفه ای از بردار ولتاژ که در راستای شار استاتور باشد، فقط بر دامنه شار اثر می گذارد و فقط مؤلفه عمود بر شار استاتور زاویه گشتاور را تغییر می دهد. به بیانی دیگر مؤلفه مماسی بر گشتاور و مؤلفه شعاعی آن بر دامنه شار اثر می گذارد. اگر مؤلفه مماسی و شعاعی شار را به ترتیب با ψ_{Ts} و ψ_{Rs} و مؤلفه مماسی و شعاعی ولتاژ را به ترتیب با u_{Ts} و u_{Rs} نشان دهیم، در این صورت:

$$\psi_{Rs} = \psi_{s.} + u_{Rs} \Delta t \quad (4)$$

$$\psi_{Ts} = u_{Ts} \Delta t \quad (5)$$

میزان تغییر زاویه گشتاور توسط مؤلفه مماسی شار تعیین می شود. با این فرض که شار رتور مطابق شکل ۲ با حرکت

در محرکه های چندسطحی که در ولتاژها و جریان های بالا استفاده می شوند، هزینه فیلترهای غیرفعال بسیار بالاست. در این محرکه ها برای کاهش اندازه فیلتر می توان از مزیت ذاتی تقسیم ولتاژ DC به چند ولتاژ کوچکتر در این مبدل ها استفاده کرد [۱۲]. در [۱۳] کاهش dV/dt در مبدل پنج سطحی مهار دیودی با استفاده از نوعی فیلتر کوچک نشان داده شده است. اگرچه مبدل های چندسطحی قابلیت کاهش dV/dt را دارند، اما راهبرد کلیدزنی باید به گونه ای باشد که از این قابلیت استفاده کند. در جدول کلیدزنی ارائه شده در [۵]، در هنگام تغییر قطاع تغییر دامنه ولتاژ اعمالی به استاتور برابر با دو پله می شود که این می تواند موجب بروز مشکل در عایق سیم پیچی استاتور شود. در روش ارائه شده در مقاله حاضر، جدول کلیدزنی به گونه ای اصلاح شده که تغییر دامنه اعمال شده، همواره به یک پله محدود شود. از طرفی از آنجا که در روش ارائه شده از تمامی بردارها استفاده می شود، علاوه بر ضریب مدولاسیون بالاتر، انعطاف بیشتری داشته و با انتخاب بردار بهینه، ریپل گشتاور یا سرعت کاهش می یابد. نتایج پیاده سازی با پردازنده TMS320F2812 نشان دهنده این بهبود است.

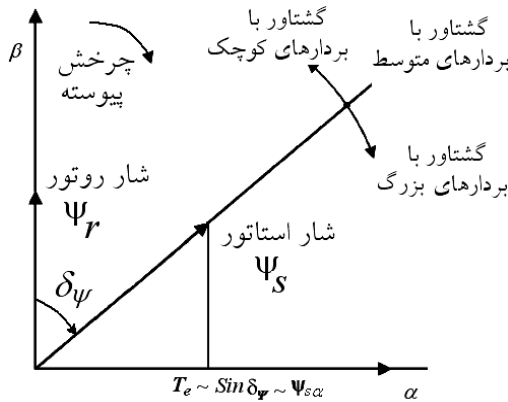
۲- کنترل مستقیم گشتاور در محرکه چند سطحی

در یک موتور القایی سه فاز متقارن، گشتاور الکترومغناطیسی برابر است با:

$$T_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} |\bar{\psi}_s| |\bar{\psi}_r| \sin \delta_{\psi} \quad (1)$$

که در آن $|\bar{\psi}_s|$ و $|\bar{\psi}_r|$ به ترتیب دامنه شار استاتور و رتور و δ_{ψ} زاویه بین دو بردار شار است. L_r و L_s ، L_m به ترتیب اندوکتانس مغناطیس کنندگی، استاتور و رتور

ولتاژ به جز بردارهای افزونه^۱ برای محرکه‌های چهار و پنج سطحی در شکل ۳ و ۴ نشان داده شده است. بردارها در شش ضلعی‌هایی منتظم قرار داشته و با افزایش سطوح، تعداد این شش ضلعی‌ها افزایش می‌یابد. با توجه به تشابه، در ادامه فقط محرکه پنج سطحی تحلیل می‌شود.



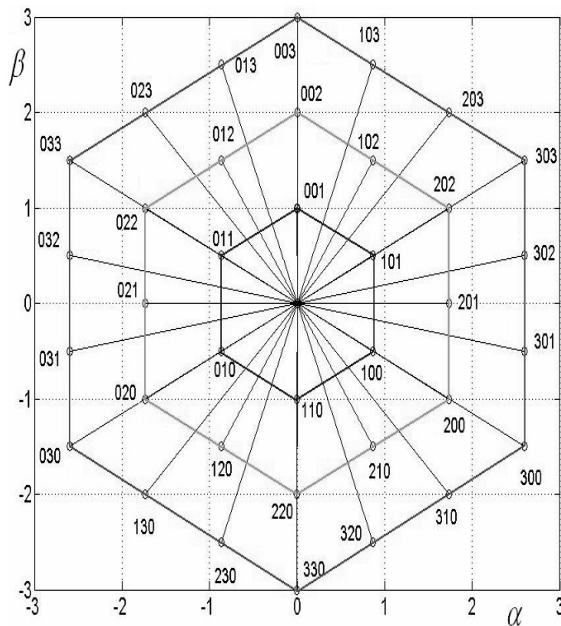
شکل ۲ اثر بردار ولتاژ استاتور بر گشتاور

یکنواخت در حال حرکت است، اثر مؤلفه مماسی ولتاژ را بررسی می‌کنیم. اگر مؤلفه مماسی بردار ولتاژ بزرگ باشد، $u_{Ts} \Delta t$ و در نتیجه سرعت تغییر مؤلفه Ψ_{Ts} بزرگ بوده و به دلیل فاصله گرفتن بردار شار استاتور از شار رتور، تغییر زاویه قابل ملاحظه‌ای ایجاد خواهد شد و در این حالت گشتاور افزایش خواهد یافت. اگر مؤلفه مماسی بردار ولتاژ مقداری متوسط باشد، $u_{Ts} \Delta t$ و در نتیجه سرعت تغییر مؤلفه Ψ_{Ts} متوسط بوده و با توجه به حرکت شار رتور، زاویه بردار شار استاتور و رتور تغییر چندانی نمی‌کند و به بیانی دیگر، تغییر زاویه گشتاور نخواهیم داشت. اگر مؤلفه مماسی بردار ولتاژ کوچک باشد، $u_{Ts} \Delta t$ و در نتیجه سرعت تغییر مؤلفه Ψ_{Ts} کم بوده و با توجه به حرکت شار رتور، زاویه بردار شار استاتور و شار رتور کاهش یافته و به بیانی دیگر زاویه گشتاور کاهش می‌یابد و در این حالت گشتاور کاهش خواهد یافت.

در مقایسه با دوسطحی، در محرکه‌های چندسطحی تعداد زیادی بردار ولتاژ با اندازه‌های متفاوت وجود دارد که با استفاده از آنها می‌توان بردار شار را با سرعت‌های مختلف و در جهتهای مختلف کنترل کرد. به این ترتیب در محرکه‌های چندسطحی، کنترل سریع‌تر و دقیق‌تری بر شار و گشتاور می‌توان اعمال کرد. بردار ولتاژ استاتور در محرکه‌های پنج سطحی به صورت زیر است:

$$\bar{u}_s = u_a + u_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + u_c e^{j\frac{4\pi}{3}} \quad (6)$$

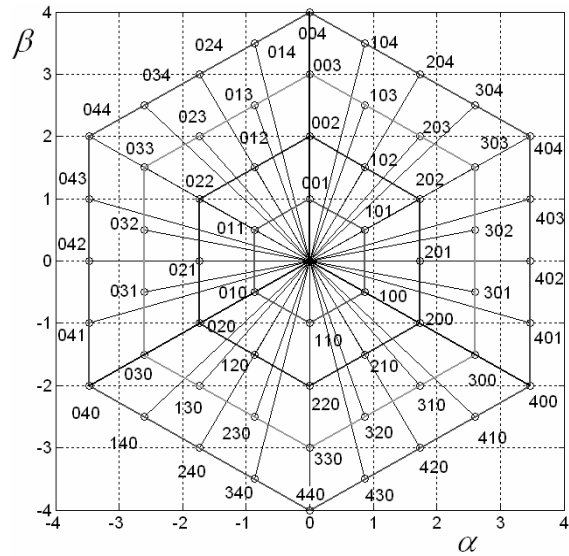
این بردار فضایی را می‌توان به صورت شماره بردار cba نشان داد که در آن a، b و c به ترتیب اندازه سطح ولتاژ را در هر یک از فازها نشان می‌دهند. تمامی بردارهای فضایی



شکل ۳ بردارهای فضایی ولتاژ در محرک خازنی چهار سطحی

1. redundant

سپس اثر بردارهای مختلف را بر گشتاور و سرعت بررسی کرد. در [۵] برای پیاده‌سازی راهبرد کنترل مستقیم گشتاور در محرکه پنج سطحی، صفحه $\alpha\beta$ مطابق شکل ۷ به ۱۲ قطاع تقسیم شده است. با فرض آن‌که شار استاتور در قطاع θ_1 و جهت چرخش در جهت عقربه‌های ساعت باشد، نخست اثر بردارهایی را که باعث افزایش شار می‌شود بررسی می‌کنیم. مطابق شکل ۸، سه بردار 403 ، 302 و 202 را در نظر می‌گیریم. اگرچه تمامی این بردارها باعث افزایش شار می‌شوند، اما اثر آنها بسته به مؤلفه مماسی آن‌ها - که در شکل ۸ نشان داده شده - متفاوت است. با توجه به توضیحات قبلی، بردارهای 403 ، 302 و 202 به ترتیب باعث افزایش گشتاور، حفظ تقریبی گشتاور و کاهش گشتاور می‌شوند.



شکل ۴ بردارهای فضایی ولتاژ در محرک خازنی پنج سطحی

دامنه و زاویه بردارها را به صورت تحلیلی با استفاده از روابط مثلثاتی در شکل ۵ می‌توان محاسبه کرد. با توجه به تقارن در شش ضلعی منتظم، با محاسبه مقادیر زاویه و اندازه بردارها در محدوده‌ای 60° درجه‌ای مطابق شکل ۶، سایر بردارها نیز به آسانی محاسبه می‌شود. با توجه به این‌که زاویه بین محور a و محور c برابر 120° درجه است، بنابراین زاویه θ_1 برابر 60° درجه است و در نتیجه دامنه بردار 104 برابر است با:

$$c_{1,\epsilon}^2 = (\epsilon V_{dc})^2 + (V_{dc})^2 - 2(\epsilon V_{dc})(V_{dc}) \cos 60^\circ$$

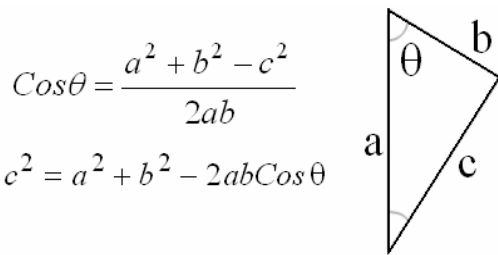
$$= 1.3 V_{dc}^2 \Rightarrow C_{1,\epsilon} = 3/16 V_{dc}$$

با مشخص شدن اندازه بردار 104 می‌توان زاویه θ_2 را به دست آورد:

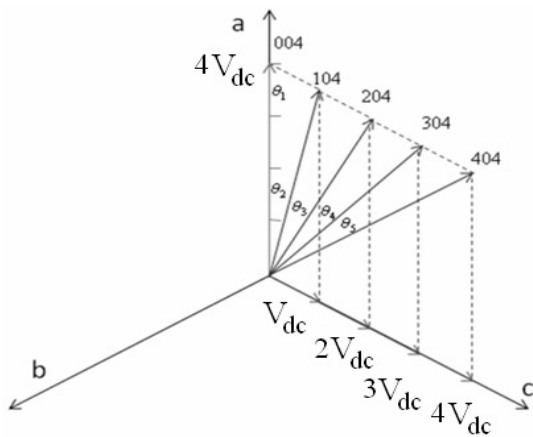
$$\cos \theta_2 = \frac{(\epsilon V_{dc})^2 + (3.16 V_{dc})^2 - (V_{dc})^2}{2(\epsilon V_{dc})(3.16 V_{dc})} = 0.4971$$

$$\theta_2 = 13/9^\circ$$

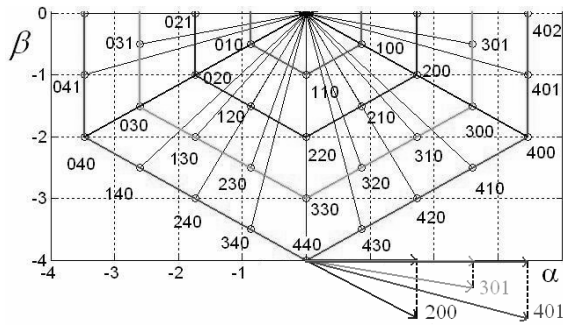
به همین ترتیب می‌توان سایر زوایه‌ها را به دست آورد. نتایج در جدول ۱ ارائه شده است. به این روش، دامنه بردارها را در هر شش ضلعی می‌توان قابل محاسبه و



شکل ۵ روابط مثلثاتی محاسبه دامنه و زاویه بردارها



شکل ۶ بردارهای فضایی در بازه‌ای 60° درجه‌ای



شکل ۹ اثر بردارهای کاهنده شار بر گشتاور

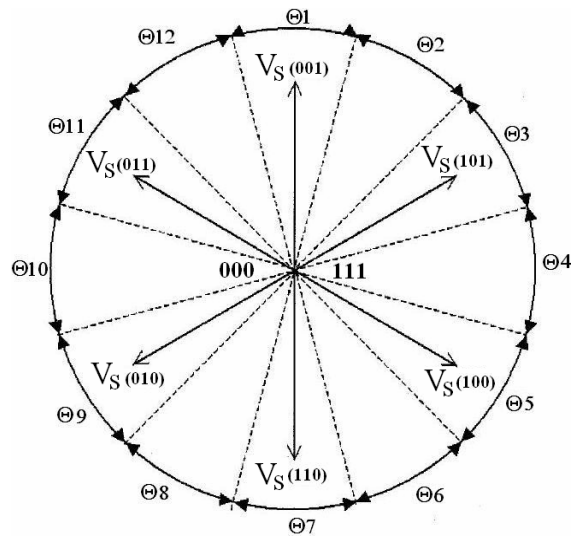
اکنون اثر بردارهایی را که باعث کاهش شار می‌شود بررسی می‌کنیم. مطابق شکل ۹، سه بردار ۴۰۱، ۳۰۱ و ۲۰۰ باعث کاهش شار می‌شوند اما اثر آنها بر گشتاور بسته به مؤلفه مماسی آنها متفاوت است. برطبق شکل ۹، بردارهای ۴۰۱، ۳۰۱ و ۲۰۰ به ترتیب باعث افزایش گشتاور، حفظ تقریبی گشتاور و کاهش گشتاور می‌شوند. در [۵] بردارهای ولتاژ با توجه به سرعت رتور انتخاب شده است: بردارهای با دامنه کم برای سرعت‌های پایین و بردارهای با دامنه زیاد برای سرعت‌های بالا در نظر گرفته شده است. از سوی دیگر برای چهار سطح ولتاژ غیر صفر در محرکه پنج سطحی، چهار محدوده متفاوت سرعت در نظر گرفته شده و برای هر محدوده، یک جدول کلیدزنی ارائه شده است (جدول ۲). در این جدول FI و TI گشتاور و شار را نشان می‌دهد. مقدار ۱ و -۱ به ترتیب به معنای آن است که کمیت مورد نظر بیش از حد مجاز یا کمتر از حد مجاز است و صفر به معنای قرار داشتن در محدوده مجاز است. در جدول ۲ محدوده $\omega_{m3} < \omega_m$ مربوط به سرعت‌های بالا است.

۳- متعادل‌سازی ولتاژ خازن‌ها

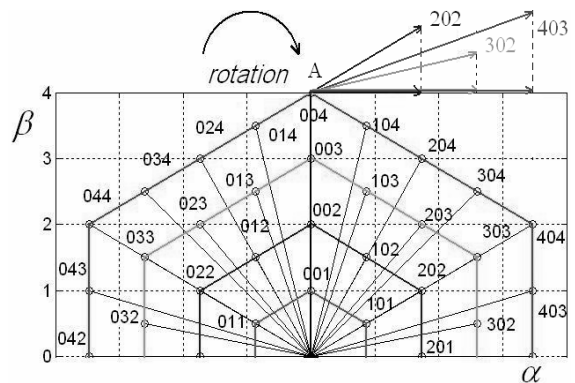
در مبدل‌های خازنی از افزونگی بردارها برای متعادل‌سازی ولتاژ خازن‌ها استفاده می‌شود. برای مثال اگر در فاز a به

جدول ۱ اندازه و زاویه بردارهای فضایی ولتاژ

شماره بردار	زاویه	دامنه
۰۰۴	۰	εV_{dc}
۱۰۴	$۱۳/۹$	$۳/۸ V_{dc}$
۲۰۴	۳۰	$۳/۴۸ V_{dc}$
۳۰۴	$۴۶/۱$	$۳/۸ V_{dc}$
۴۰۴	۶۰	εV_{dc}



شکل ۷ تقسیم بندی صفحه به ۱۲ قطاع در مبدل چندسطحی



شکل ۸ اثر بردارهای افزاینده شار بر گشتاور

۴- کنترل مستقیم گشتاور و فرجهش ولتاژ

بر طبق نظریه خط انتقال، ولتاژ انعکاس یافته برابر است با [۱۶]:

$$V_r = (1 + \Gamma)V_s \quad (7)$$

$$\Gamma = \frac{Z_m - Z_c}{Z_m + Z_c}$$

که در آن Γ ضریب انعکاس، Z_m امپدانس موتور و Z_c امپدانس مشخصه کابل است. نوسان ولتاژ در فواصل کوتاه وجود ندارد و از فاصله‌ای به بعد شروع می‌شود که طول بحرانی کابل نام دارد. طول بحرانی تابع سرعت انتشار پالس V_p (حدود ۱۵۰ متر بر میکروثانیه) و زمان صعود پالس t_r (وابسته به نوع کلید و نحوه کلید زنی) است [11]:

$$\text{طول نقطه بحرانی} = \left(\frac{t_r V_p}{\gamma}\right) \quad (8)$$

سطح ولتاژ V_{dc} نیاز باشد، با چهار ترکیب مختلف کلیدها می‌توان به آن دست یافت (جدول ۳). هر یک از این ترکیبها تأثیر متفاوتی بر ولتاژ خازن‌ها می‌گذارد و در نتیجه می‌توان بسته به نیاز، ترکیب مناسب را اعمال کرد. به‌همین ترتیب برای سطح ولتاژ $2V_{dc}$ شش بردار افزونه و برای سطح ولتاژ $3V_{dc}$ چهار بردار افزونه وجود دارد که تأثیر آنها بر ولتاژ خازن‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است. تأثیر کلیدزنی بر ولتاژ خازن‌ها سه حالت دارد: ولتاژ خازن تغییری نمی‌کند (۰) و ولتاژ افزایش (+) یا کاهش می‌یابد (-). با توجه به این‌که در هر فاز مبدل پنج سطحی سه‌خازن وجود دارد که هر یک مستقل از بقیه ممکن است به شارژ یا دشارژ نیاز داشته یا در حالت متعادل باشد، در مجموع برای هر سطح ولتاژ $2V_{dc}$ حالت مختلف وجود دارد که برای سه فاز تعداد حالت‌های ممکن به ۵۱ حالت می‌رسد.

جدول ۲ جدول‌های کلیدزنی برای سرعت‌های مختلف

$\omega_m < \omega_{m1}$

TI	FI	θ1	θ2	θ3	θ4	θ5	θ6	θ7	θ8	θ9	θ10	θ11	θ12
۰	۱	۰۰۰	۱۱۱	۰۰۰	۱۱۱	۰۰۰	۱۱۱	۰۰۰	۱۱۱	۰۰۰	۱۱۱	۱۱۱	۱۱۱
۰	-۱	۱۱۱	۱۱۱	۰۰۰	۱۱۱	۱۱۱	۱۱۱	۰۰۰	۱۱۱	۱۱۱	۱۱۱	۰۰۰	۱۱۱
۱	۱	۰۱۰	۰۲۱	۰۱۱	۰۱۲	۰۰۱	۱۰۲	۱۰۱	۲۰۱	۱۰۰	۲۱۰	۱۱۰	۱۲۰
۱	-۱	۰۱۱	۰۱۲	۰۰۱	۱۰۲	۱۰۱	۲۰۱	۱۰۰	۲۱۰	۱۱۰	۱۲۰	۰۱۰	۰۲۱
-۱	۱	۱۰۰	۲۱۰	۱۱۰	۱۲۰	۰۱۰	۰۲۱	۰۱۱	۰۱۲	۰۰۱	۱۰۲	۱۰۱	۲۰۱
-۱	-۱	۱۰۱	۲۰۱	۱۰۰	۲۱۰	۱۱۰	۱۲۰	۰۱۰	۰۲۱	۰۱۱	۰۱۲	۰۰۱	۱۰۲

$\omega_{m1} < \omega_m < \omega_{m2}$

TI	FI	θ1	θ2	θ3	θ4	θ5	θ6	θ7	θ8	θ9	θ10	θ11	θ12
۰	۱	۱۰۰	۱۰۰	۱۱۰	۱۱۰	۰۱۰	۰۱۰	۰۱۱	۰۱۱	۰۰۱	۰۰۱	۱۰۱	۱۰۱
۰	-۱	۱۰۱	۱۰۱	۱۰۰	۱۰۰	۱۱۰	۱۱۰	۰۱۰	۰۱۰	۰۱۱	۰۱۱	۰۰۱	۰۰۱
۱	۱	۰۰۰	۰۰۰	۱۱۱	۱۱۱	۰۰۰	۰۰۰	۱۱۱	۱۱۱	۰۰۰	۰۰۰	۱۱۱	۱۱۱
۱	-۱	۱۱۱	۱۱۱	۰۰۰	۰۰۰	۱۱۱	۱۱۱	۰۰۰	۰۰۰	۱۱۱	۱۱۱	۰۰۰	۱۰۰
-۱	۱	۲۰۰	۲۱۰	۲۲۰	۱۲۰	۰۲۰	۰۲۱	۰۲۲	۰۱۲	۰۰۲	۱۰۲	۲۰۲	۲۰۱
-۱	-۱	۲۰۲	۲۰۱	۲۰۰	۲۱۰	۲۲۰	۱۲۰	۰۲۰	۰۲۱	۰۲۲	۰۱۲	۰۰۲	۱۰۲

$\omega_{m2} < \omega_m < \omega_{m3}$

TI	FI	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	θ_9	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}
۰	۱	۲۰۰	۲۱۰	۲۲۰	۱۲۰	۰۲۰	۰۲۱	۰۲۲	۰۱۲	۰۰۲	۱۰۲	۲۰۲	۲۰۱
۰	-۱	۲۰۲	۲۰۱	۲۰۰	۲۱۰	۲۲۰	۱۲۰	۰۲۰	۰۲۱	۰۲۲	۰۱۲	۰۰۲	۱۰۲
۱	۱	۱۰۰	۱۱۰	۱۱۰	۰۱۰	۰۱۰	۰۱۱	۰۱۱	۰۰۱	۰۰۱	۱۰۱	۱۰۱	۱۰۰
۱	-۱	۱۰۱	۱۰۱	۱۰۰	۱۰۰	۱۱۰	۱۱۰	۰۱۰	۰۱۰	۰۱۱	۰۱۱	۰۰۱	۰۰۱
-۱	۱	۳۰۱	۳۱۰	۳۲۰	۲۳۰	۱۳۰	۰۳۱	۰۳۲	۰۲۳	۰۱۳	۱۰۳	۲۰۳	۳۰۲
-۱	-۱	۳۰۲	۳۰۱	۳۱۰	۳۲۰	۲۳۰	۱۳۰	۰۳۱	۰۳۲	۰۲۳	۰۱۳	۱۰۳	۲۰۳

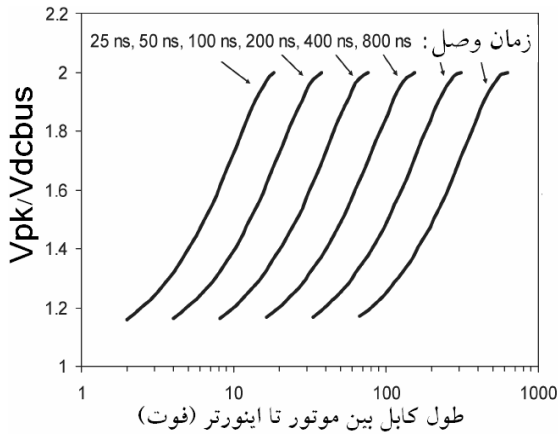
$\omega_{m3} < \omega_m$

TI	FI	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	θ_9	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}
۰	۱	۳۰۱	۳۱۰	۳۲۰	۲۳۰	۱۳۰	۰۳۱	۰۳۲	۰۲۳	۰۱۳	۱۰۳	۲۰۳	۳۰۲
۰	-۱	۳۰۲	۳۰۱	۳۱۰	۳۲۰	۲۳۰	۱۳۰	۰۳۱	۰۳۲	۰۲۳	۰۱۳	۱۰۳	۲۰۳
۱	۱	۲۰۰	۲۱۰	۲۲۰	۱۲۰	۰۲۰	۰۲۱	۰۲۲	۰۱۲	۰۰۲	۱۰۲	۲۰۲	۲۰۱
۱	-۱	۲۰۲	۲۰۱	۲۰۰	۲۱۰	۲۲۰	۱۲۰	۰۲۰	۰۲۱	۰۲۲	۰۱۲	۰۰۲	۱۰۲
-۱	۱	۴۰۱	۴۱۰	۴۳۰	۳۴۰	۱۴۰	۰۴۱	۰۴۳	۰۳۴	۰۱۴	۱۰۴	۳۰۴	۴۰۳
-۱	-۱	۴۰۳	۴۰۱	۴۱۰	۴۳۰	۳۴۰	۱۴۰	۰۴۱	۰۴۳	۰۳۴	۰۱۴	۱۰۴	۳۰۴

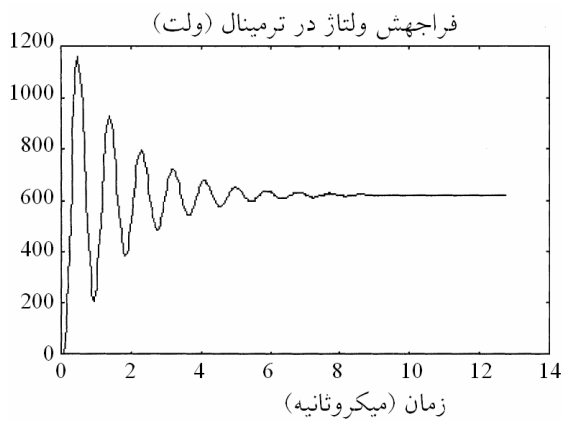
در این جدول $\omega_{m1} = ۳۷۵$ ، $\omega_{m2} = ۷۵۰$ و $\omega_{m3} = ۱۱۲۵$ دور بر دقیقه است.

جدول ۳ حالت‌های کلیدزنی و تأثیر آن بر ولتاژ خازن‌ها

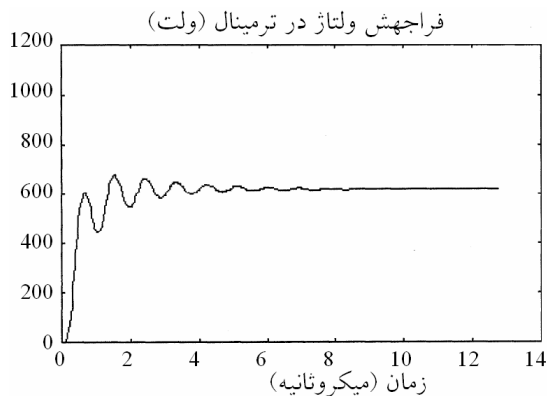
State	S4	S3	S2	S1	Out	ΔV_{c3}	ΔV_{c2}	ΔV_{c1}	Level
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱	۰	۰	۰	۱	V_{dc}	۰	۰	-	۱
۲	۰	۰	۱	۰	V_{dc}	۰	-	+	۱
۳	۰	۰	۱	۱	$۳V_{dc}$	۰	-	۰	۲
۴	۰	۱	۰	۰	V_{dc}	-	+	۰	۱
۵	۰	۱	۰	۱	$۲V_{dc}$	-	+	-	۲
۶	۰	۱	۱	۰	$۲V_{dc}$	-	۰	+	۲
۷	۰	۱	۱	۱	$۳V_{dc}$	-	۰	۰	۳
۸	۱	۰	۰	۰	V_{dc}	+	۰	۰	۱
۹	۱	۰	۰	۱	$۲V_{dc}$	+	۰	-	۲
۱۰	۱	۰	۱	۰	$۲V_{dc}$	+	-	+	۳
۱۱	۱	۰	۱	۱	$۳V_{dc}$	+	-	۰	۳
۱۲	۱	۱	۰	۰	$۳V_{dc}$	۰	+	۰	۴
۱۳	۱	۱	۰	۱	$۳V_{dc}$	۰	+	-	۳
۱۴	۱	۱	۱	۰	$۳V_{dc}$	۰	۰	+	۳
۱۵	۱	۱	۱	۱	$۴V_{dc}$	۰	۰	۰	۴



شکل ۱۰ فراجهش تابعی از زمان صعود پالس و طول کابل



شکل ۱۱ اضافه ولتاژ ناشی از زمان صعود ۰.۲ میکروثانیه



شکل ۱۲ اضافه ولتاژ ناشی از زمان صعود ۲ میکروثانیه

محركه‌های تجاری زمان صعود ۵۰ نانوثانیه تا ۱۰۰۰ نانوثانیه دارند [۱۸]. میزان فراجهش ولتاژ در این محدوده زمانی و برای طولهای مختلف کابل در شکل ۱۰ نشان داده شده است [۶]. با افزایش زمان صعود می‌توان میزان فراجهش را کاهش داد اما تلفات کلیدزنی افزایش می‌یابد. فراجهش ولتاژ ناشی از زمان صعود ۰/۲ و ۲ میکروثانیه در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است.

برای محاسبه دقیق فراجهش می‌توان از تبدیل موجک و مدل موتور القایی استفاده کرد [۱۹].

در این مقاله، جدول کلیدزنی با هدف کاهش dv/dt اصلاح می‌شود. جدول کلیدزنی یا جدول ۲۴ قطاعی ارائه شده در این مقاله برای سرعت‌های بالا، مطابق جدول ۴ است. مزیت این جدول در مقایسه با جدول ۲ آن است که در انتقال از هر قطاع به قطاع مجاور در حالت $TI=1$ ، اندازه تغییر ولتاژ به V_{dc} محدود شده است. این مزیت به علت استفاده از تمامی بردارهای منتهی به شش ضلعی بیرونی به دست می‌آید. در جدول ۵ در حالت‌های $TI=0$ و $TI=1$ نیز با توجه به افزودگی بردارها که از جمع بردار با $(1,1,1)$ یا $(2,2,2)$ به دست می‌آید، بردارهای معادل جایگزین شده است. (موتور، ولتاژهای اعمال شده به فازها را به صورت تفاضلی می‌بیند و اعمال بردار ۳۲۱ و ۲۱۰ اثر یکسانی دارد. در هر دو حالت ولتاژهای خط v_{ab} ، v_{ca} و v_{bc} به ترتیب برابر $1, -1, -1$ و $2, -1, -1$ است، لذا بردار ۳۲۱ را بردار افزونه بردار ۲۱۰ می‌نامند.) بنابراین بیشترین تغییر به یک پله محدود می‌شود و به ندرت تغییر دوپله‌ای خواهیم داشت.

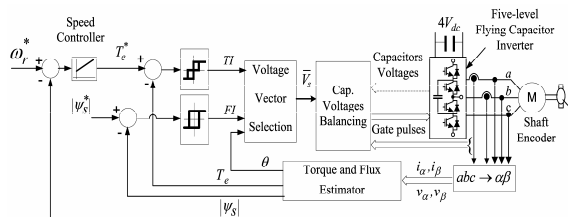
جدول ۴ جدول کلیدزنی ۲۴ قطاعی

TI	FI	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴		
۰	۱	۳۰۱	۳۰۰	۳۱۰	۳۱۰	۳۲۰	۳۳۰	۳۳۰	۳۳۰	۳۳۰	۱۳۰	۰۳۰	۰۳۱	۰۳۱	۰۳۲	۰۳۳	۰۲۳	۰۲۳	۰۱۳	۰۰۳	۱۰۳	۱۰۳	۲۰۳	۳۰۲	۳۰۲	۳۰۲	
۰	-۱	۳۰۲	۳۰۱	۳۰۰	۳۰۰	۳۱۰	۳۲۰	۳۳۰	۳۳۰	۳۳۰	۱۳۰	۰۳۰	۰۳۰	۰۳۱	۰۳۲	۰۳۳	۰۲۳	۰۲۳	۰۱۳	۰۰۳	۱۰۳	۱۰۳	۲۰۳	۳۰۳	۳۰۳	۳۰۳	
۱	۱	۲۰۰	۲۰۰	۲۱۰	۲۱۰	۲۲۰	۲۲۰	۲۲۰	۲۲۰	۲۲۰	۱۲۰	۰۲۰	۰۲۱	۰۲۱	۰۲۲	۰۲۲	۰۱۲	۰۱۲	۰۰۲	۰۰۲	۱۰۲	۱۰۲	۲۰۲	۳۰۲	۳۰۱	۳۰۱	
۱	-۱	۲۰۱	۲۰۱	۲۰۰	۲۰۰	۲۱۰	۲۱۰	۲۲۰	۲۲۰	۲۲۰	۱۲۰	۰۲۰	۰۲۰	۰۲۱	۰۲۱	۰۲۲	۰۲۲	۰۱۲	۰۱۲	۰۰۲	۱۰۲	۱۰۲	۲۰۲	۳۰۲	۳۰۱	۳۰۲	
-۱	۱	۴۰۰	۴۱۰	۴۲۰	۴۳۰	۴۴۰	۴۴۰	۴۴۰	۴۴۰	۴۴۰	۱۴۰	۰۴۰	۰۴۱	۰۴۲	۰۴۳	۰۴۴	۰۳۴	۰۲۴	۰۱۴	۰۰۴	۱۰۴	۲۰۴	۳۰۴	۴۰۴	۴۰۳	۴۰۲	۴۰۱
-۱	-۱	۴۰۱	۴۰۰	۴۱۰	۴۲۰	۴۳۰	۴۴۰	۴۴۰	۴۴۰	۴۴۰	۱۴۰	۰۴۰	۰۴۱	۰۴۳	۰۴۳	۰۴۴	۰۳۴	۰۲۴	۰۱۴	۰۰۴	۱۰۴	۲۰۴	۳۰۴	۴۰۴	۴۰۳	۴۰۲	۴۰۲

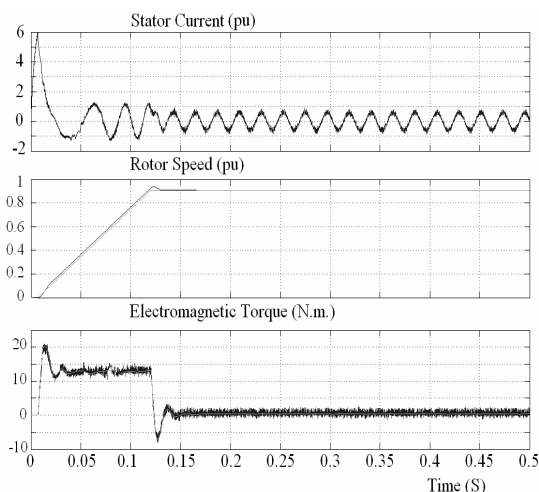
جدول ۵ جدول کلیدزنی با استفاده از بردارهای افزونه در حالت TI=1

TI	FI	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴		
۰	۱	۳۰۱	۳۰۰	۳۱۰	۳۱۰	۳۲۰	۳۳۰	۳۳۰	۳۳۰	۳۳۰	۱۳۰	۰۳۰	۰۳۱	۰۳۱	۰۳۲	۰۳۳	۰۲۳	۰۲۳	۰۱۳	۰۰۳	۱۰۳	۱۰۳	۲۰۳	۳۰۲	۳۰۲	۳۰۲	
۰	-۱	۳۰۲	۳۰۱	۳۰۰	۳۰۰	۳۱۰	۳۲۰	۳۳۰	۳۳۰	۳۳۰	۱۳۰	۰۳۰	۰۳۰	۰۳۱	۰۳۲	۰۳۳	۰۲۳	۰۲۳	۰۱۳	۰۰۳	۱۰۳	۱۰۳	۲۰۳	۳۰۳	۳۰۳	۳۰۳	
۱	۱	۳۱۱	۳۱۱	۳۲۱	۳۲۱	۳۳۱	۳۳۱	۳۳۱	۳۳۱	۳۳۱	۱۳۱	۱۳۱	۱۳۲	۱۳۳	۱۳۳	۱۲۳	۱۲۳	۱۱۳	۱۱۳	۰۱۳	۲۱۳	۲۱۳	۳۱۳	۳۱۳	۳۱۲	۳۱۲	
۱	-۱	۳۱۲	۳۱۲	۳۱۱	۳۱۱	۳۲۱	۳۲۱	۳۳۱	۳۳۱	۳۳۱	۱۳۱	۱۳۱	۱۳۲	۱۳۲	۱۳۳	۱۳۳	۱۲۳	۱۲۳	۱۱۳	۱۱۳	۲۱۳	۲۱۳	۳۱۳	۳۱۳	۳۱۲	۳۱۳	
-۱	۱	۴۰۰	۴۱۰	۴۲۰	۴۳۰	۴۴۰	۴۴۰	۴۴۰	۴۴۰	۴۴۰	۱۴۰	۰۴۰	۰۴۱	۰۴۲	۰۴۳	۰۴۴	۰۳۴	۰۲۴	۰۱۴	۰۰۴	۱۰۴	۲۰۴	۳۰۴	۴۰۴	۴۰۳	۴۰۲	۴۰۱
-۱	-۱	۴۰۱	۴۰۰	۴۱۰	۴۲۰	۴۳۰	۴۴۰	۴۴۰	۴۴۰	۴۴۰	۱۴۰	۰۴۰	۰۴۱	۰۴۳	۰۴۳	۰۴۴	۰۳۴	۰۲۴	۰۱۴	۰۰۴	۱۰۴	۲۰۴	۳۰۴	۴۰۴	۴۰۳	۴۰۲	۴۰۲

۵- شبیه‌سازی در سیمولینک



شکل ۱۳ ساختار محرکه چندسطحی با راهبرد DTC



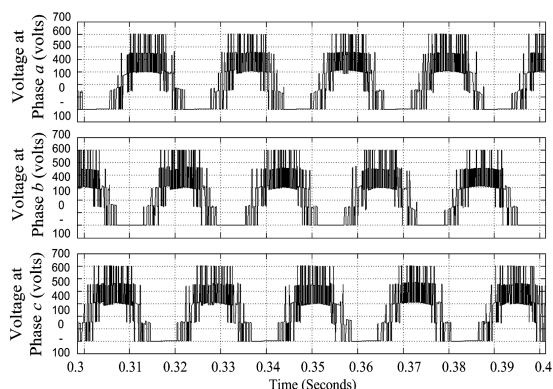
شکل ۱۴ جریان استاتور، سرعت و گشتاور با جدول ۲

راهبرد کنترل مستقیم گشتاور برای نمونه‌ای در مقیاس کوچک با استفاده از موتور ۳ کیلووات ۴۰۰ ولت شبیه‌سازی و پیاده‌سازی شده است. پارامترهای کنترل مستقیم گشتاور و موتور در پیوست ارائه شده است. ساختار کامل محرکه چندسطحی در شکل ۱۳ نشان داده شده است. برای بررسی عملکرد راهبرد کنترل مستقیم گشتاور، موتور از سرعت صفر به ۹۵٪ سرعت نامی شتاب داده شده و جریان استاتور، سرعت و گشتاور با استفاده از جدول ۲ در حالت ۱۲ قطاعی در شکل ۱۴ نشان داده شده است. ولتاژهای اعمال شده به سه فاز موتور در این حالت در شکل ۱۵ نشان داده شده است. تغییر ولتاژ به اندازه دو پله چند بار روی داده شده است. شبیه‌سازی مشابهی با استفاده از جدول ۵ انجام شده و نتایج در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ آورده شده است. اگرچه مقایسه شکل‌های ۱۴ و ۱۶ نشان می‌دهد که کارایی موتور تفاوتی نکرده، اما بررسی شکل ۱۷ نشان می‌دهد که تغییر ولتاژهای اعمالی در هر سه فاز به یک پله محدود شده است.

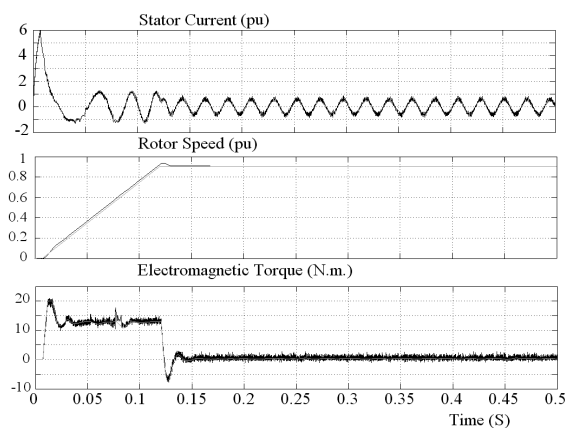
۶- پیاده‌سازی توسط پردازنده TMS320F2812

محركه پنج سطحی خازنی در شکل ۱۸ نشان داده شده است. بخشهای مختلف سیستم در این شکل نامگذاری شده است. پردازنده اصلی EZDSPF2812 است که با سرعت 150MIPS توانایی خوبی برای پیاده‌سازی DTC دارد. این پردازنده مجهز به ۱۶ کانال مبدل آنالوگ به دیجیتال است که برای اندازه‌گیری نه خازن شناور در سه فاز، دو جریان فاز، سه ولتاژ فاز و نیز ولتاژ لینک DC به کار می‌رود. شش درگاه ورودی- خروجی با ۵۶ پایه قابلیت فرمان به ۲۴ عدد IGBT را به راحتی فراهم می‌سازد. برای اندازه‌گیری ولتاژ خازن‌ها مطابق شکل ۱۸ از سنسورهای ولتاژ DC استفاده شده است. از ژنراتور DC مطابق شکل ۱۹ به عنوان بار مکانیکی موتور استفاده شده است. مقدار بار توسط گرمکن‌های برقی تنظیم می‌شود.

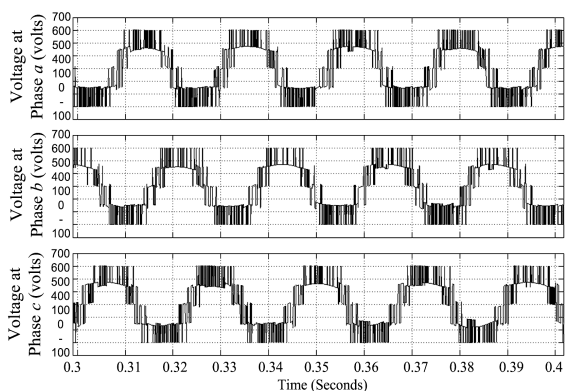
موتور با استفاده از جدول ۲ در حالت ۱۲ سکتوری از سرعت صفر به ۹۵٪ سرعت نامی شتاب داده شده و ولتاژ اعمال شده به فاز در شکل ۲۰ نشان داده شده است (پروب $\times 10$). تغییرات دوپله‌ای به میزان ۳۰۰ ولت به‌ویژه بین ۳۰۰ و ۶۰۰ ولت در این شکل دیده می‌شود. آزمایش مشابهی با استفاده از جدول ۵ انجام و ولتاژ اعمالی به فاز در شکل ۲۱ نشان داده شده است. در کل محدوده بیشتر تغییرات به اندازه یک پله یعنی ۱۵۰ ولت است. منحنی سرعت نسبت به زمان در شکل‌های ۲۲ و ۲۳ نشان داده شده است. با توجه به تعداد بردارهای جدول ۵، کارایی سیستم نه تنها کاهش نیافته، بلکه ریبیل سرعت نیز به دلیل افزایش تعداد بردارهای قابل استفاده، تا اندازه‌ای کاهش یافته است.



شکل ۱۵ ولتاژهای اعمال شده به سه فاز موتور نسبت به زمین با جدول ۲



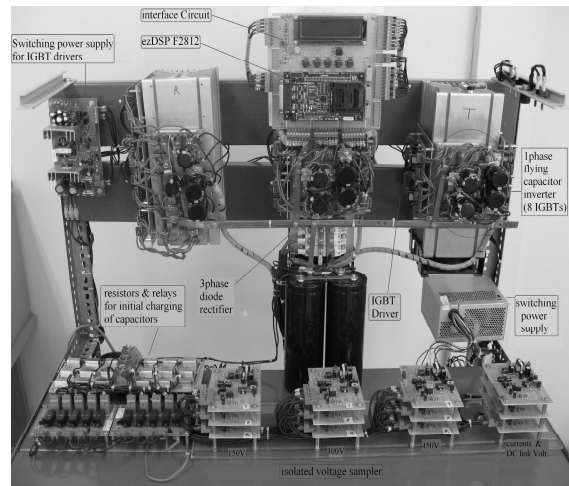
شکل ۱۶ جریان استاتور، سرعت و گشتاور با جدول ۵



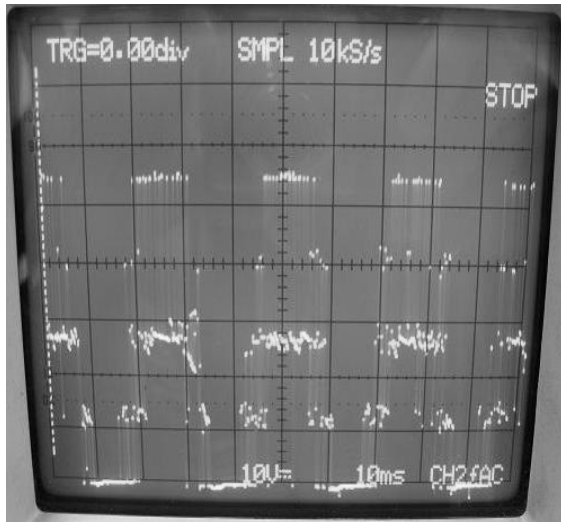
شکل ۱۷ ولتاژهای اعمال شده به سه فاز موتور نسبت به زمین با جدول ۵

قدردانی

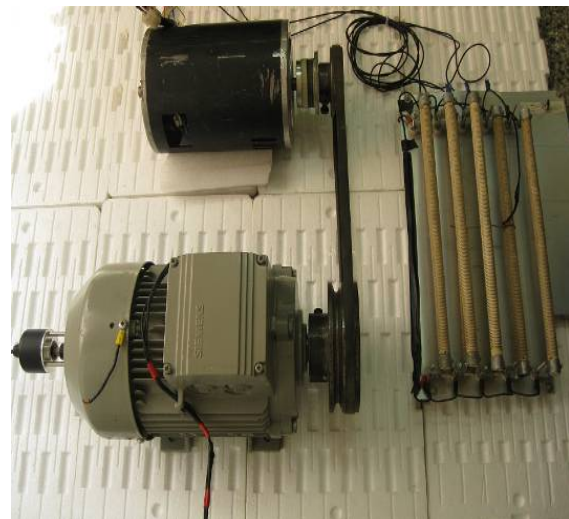
این تحقیق با حمایت مالی جهاد دانشگاهی صورت گرفته است. به این وسیله نویسندگان مراتب سپاس خود را از جهاد دانشگاهی اعلام می‌نمایند.



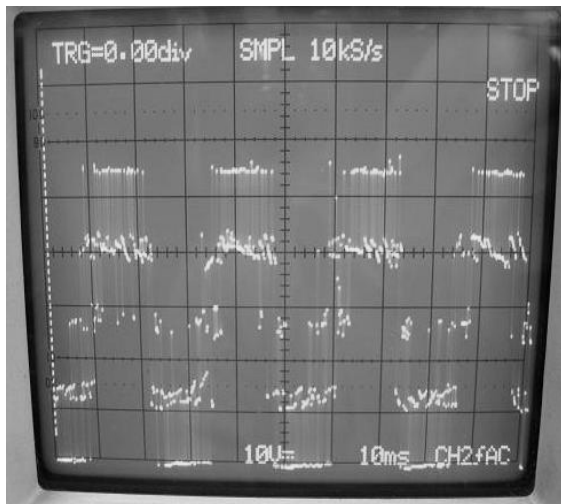
شکل ۱۸ سامانه محرکه DTC پنج سطحی خازنی



شکل ۲۰ ولتاژ اعمال شده به استاتور در روش مبتنی بر جدول ۲، $volt/div=100$, $time/div=10ms$



شکل ۱۹ موتور سه‌فاز، ژنراتور DC و بار

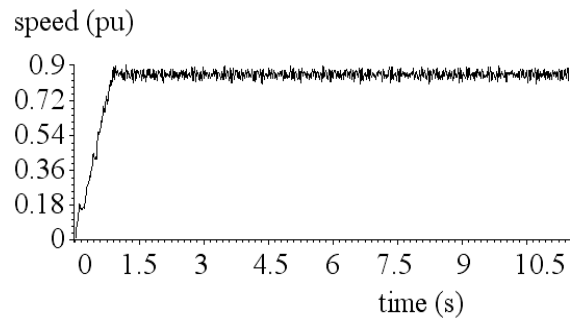


شکل ۲۱ ولتاژ اعمال شده به استاتور در روش مبتنی بر جدول ۵، $volt/div=100$, $time/div=10ms$

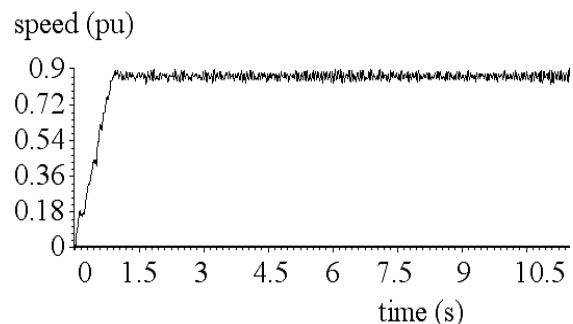
۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله روش جدیدی برای تدوین جدول کلیدزنی در کنترل مستقیم گشتاور محرکه پنج سطحی ارائه شده که dV/dt خروجی را کاهش داده و در نتیجه میزان فراجش ولتاژ را کاهش می‌دهد. استفاده از جدول جدید، همچنین رپیل سرعت را کاهش می‌دهد. نتایج عملی تأییدی بر درستی تحلیل ارائه شده و نتایج شبیه‌سازی است.

- Topologies for Industrial Medium-Voltage Drives", IEEE Trans. Indust. Electron., vol. 54, no. 6, Dec. 2007
- [2] S. S. Fazel, Steffen Bernet, D. Krug, and K. Jalili, "Design and Comparison of 4-kV Neutral-Point-Clamped, Flying-Capacitor, and Series-Connected H-Bridge Multilevel Converters", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 43, Jul./Aug. 2007, pp. 1032-1040.
- [3] D. Krug, S. Bernet, S. S. Fazel, K. Jalili, and M. Malinowsk, "Comparison of 2.3-kV Medium-Voltage Multilevel Converters for Industrial Medium-Voltage Drives", IEEE Trans. Indust. Electron., vol. 54, no. 6, Dec. 2007
- [4] J. Rodríguez, J. Pontt, S. Kouro, and P. Correa, "Direct Torque Control With Imposed Switching Frequency in an 11-Level Cascaded Inverter", IEEE Trans. Indust. Electron., vol. 51, Aug. 2004 pp. 827-833.
- [5] M.F. Escalante, J.-C. Vannier and A. Arzande, "Flying Capacitor Multilevel Inverters and DTC Motor Drive Applications", IEEE Trans. Indust. Electron, vol.49, Aug. 2002, pp.809 – 815.
- [6] M. J. Melfi, "Low-Voltage PWM Inverter-Fed Motor Insulation Issues", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 42, no. 1, Jan./Feb. 2006



شکل ۲۲ تغییرات سرعت موتور در روش مبتنی بر جدول ۲



شکل ۲۳ تغییرات سرعت موتور در روش مبتنی بر جدول ۵

پیوست

مشخصات موتور القایی

$$V=400V, P=3kW, p=2(4pole), R_s=1.87\Omega, \\ R_r=1.86\Omega, L_{ls}=L_{lr}=7.54mH, L_m=210mH, \\ J=0.01kg\cdot m^2.$$

پارامترهای کنترل مستقیم گشتاور

پهنای باند هیستریزس گشتاور 0.5 N.m.

پهنای باند هیستریزس شار 0.02Wb

شار اولیه ماشین 0.8Wb

حداکثر فرکانس کلیدزنی 5000Hz

زمان نمونه برداری 33us

۹- منابع

- [1] José Rodríguez, Steffen Bernet, BinWu, Jorge O. Pontt and Samir Kouro, "Multilevel Voltage-Source-Converter

- Current”, IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 35, no. 6, Nov./Dec. 1999
- [13] J. Liu, P. Pillay, and H. Douglas, “Wavelet Modeling of Motor Drives Applied to the Calculation of Motor Terminal Over-voltages”, IEEE Trans. Indust. Electron., vol. 51, no. 1, Feb.
- [7] T. R. Mukundan, “Calculation of Voltage Surges on Motors Fed from PWM Drives—A Simplified Approach”, IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 23, no. 4, Jul. 2008
- [8] R. Ortega, A. de Rinaldis, M. W. Spong, S. Lee, and K. Nam, “On Compensation of Wave Reflections in Transmission Lines and Applications to the Overvoltage Problem AC Motor Drives”, IEEE Trans. Automatic Control, vol. 49, no. 10, Oct. 2004
- [9] J. Yang, S. B. Lee, J. Yoo, S. Lee, Y. Oh, and C. Choi, “A Stator Winding Insulation Condition Monitoring Technique for Inverter-Fed Machines”, IEEE Trans. Power Electron., vol. 22, no. 5, Sep. 2007
- [10] J. Rodríguez, J. Pontt, C. Silva, R. Musalem, P. Newman, R. Vargas, and S. Fuentes, “Resonances and Overvoltages in a Medium-Voltage Fan Motor Drive With Long Cables in an Underground Mine”, IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 42, no. 3, May/Jun. 2006
- [11] E. J. Bartolucci, , and B. H. Finke, “Cable Design for PWM Variable-Speed AC Drives”, IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 37, no. 2, Mar./Apr. 2001
- [12] D. Leggate, J. Pankau, D. W. Schlegel, R. J. Kerkman, and G. L. Skibinski, “Reflected Waves and Their Associated