دورهٔ دهم، شمارهٔ ٤، زمستان ۱۳۸۹

پیادهسازی ۲۶ قطاعی استراتژی کنترل مستقیم گشتاور در مبدلهای چندسطحی

محمدآراسته'*، عبدالرضارحمتي'، شاهرخ فرهنگی"، سید ادیب ابریشمی فر

- ۱- دانشجوی دکترای 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
 - ٤- 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 محرکهٔ پنج سطحی خازنی بر اساس جدول کلیدزنی ۲۵ قطاعی پیادهسازی شده است. در جدول ارائه شده مشکل فراجهش ولتاژ ناشی از بالا بودن dv/dt اعمال شده به استاتور در مقایسه با جدول کلیدزنی ۱۲ قطاعی 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 ریپل سرعت (گشتاور) را کاهش می دهد. شبیه سازی در سیمولینک این بهبود را تأیید می کند. این راهبرد برای نوعی محرکهٔ پنج سطحی مقیاس کوچک توسط پردازنده TMS320F2812 پیاده سازی و نتایج عملی در اینجا ارائه شده است.

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

۱ – مقدمه

محرکههای توان بالا در صنعت امروزی کاربرد گستردهای دارند. پمپهای خط لول ه در صنعت نفت و پتروشیمی، پروانههای پرقدرت 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 فعال ترین حوزهها در الکترونیک قدرت بوده است [۱].

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 بهدلیل مشخصههای عالی کلیدزنی، سادگی در کنترل و تلفات کم توان، این دو نوع کلید، عناصر اصلی امروزی در طراحی و ساخت محرکههای توان بالا به شمار می روند [۱]. اگرچه ساختارهای متعددی برای این محرکهها ارائه شده اما سه روش مهار دیودی'، پل H متوالی ^۲و خازن

^{1.} Diode Clamp

^{2.} Cascaded H bridge

محمد آراسته و همکاران

خط انتقال رفتار می کند 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 می یابد و در نتیجه در کاربردهایی مانند معدنها یا سکوهای دریایی که به دلیل محدویت فضا، موتور و مبدل فاصله زیادی دارند، این مشکل تشدید می شود. در استفاده می کنند این موضوع مطالعه و رابطه فراجهش ولتاژ با زمان صعود پالس و طول کابل مشخص شده است. در [7] نشان داده شده که در فواصل طولانی، فراجهش می تواند از دو برابر ولتاژ تغذیه CC نیز بیشتر شود.

در مبدلهای مدولاسیون پهنای پالس روشهای متعـددی برای کاهش این مشکل ارائه شده است. بدیهی است که كاهش سرعت كليدزني(افزايش dt) براي كاهش فراجهش ولتاژ مناسب نيست زيرا به افزايش تلفات كليدزني میانجامد. روش دیگری کے برای کے اهش dV/dt متحاول است، طراحی فیلتر در خروجی مبدل است که بهعنوان نوعي راه حل غير فعال ٗ بسيار مورد توجه قرار گرفته است [۸]. در طراحی فیلترهای مختلف و محل قـرار گـرفتن آن، علاوه بر كاهش فراجهش ولتاژ اهدافي مانند كاهش تلفات فيلتر، كاهش ولتاژ حالت مـشترك و توزيـع بهتـر ولتـاژ در سیمپیچی استاتور نیز دنبال میشود. پژوهش ها 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 ولتـاژ حالـت مـشترک را بهطور همزمان انجام میدهد [۹]. به هر حال استفاده از این فيلترها علاوه بر افزايش هزينه، تابع تبديل سيستم را تغييـر داده و کنتـرل را پیچیـده مـیسـازد و لـذا سیـستم کنتـرل، دینامیک فیلتر را نیز باید در نظر بگیرد [۱۰] و [۱۱]. شیناور '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 [٤] و [٥]. در [٥] کنترل مستقیم گشتاور با استفاده از جدول کلیدزنی ۱۲ قطاعی در محرکه خازنی پیادهسازی و برای متعادلسازی خازنها از افزونگی بردارها استفاده شده است.



یکی از مشکلات اصلی در مبدلهایی که از کلیدهای سریعی مانند IGBT استفاده می کنند، مشکل فراجهش ولتاژ است که ممکن است به عایق سیم پیچی استاتور صدمه وارد کند. میزان فراجهش ولتاژ بر طبق نظریهٔ انعکاس، به dV/dt ولتاژ اعمال شده به استاتور بستگی دارد که در کلیدهای سریع، بهعلت کوچک بودن dt، بزرگ است [٦]. میزان فراجهش همچنین به طول کابل بستگی دارد [۷]. کابل موتور در برابر این پالسها مانند

2. Passive

^{1.} Flying Capacitor

.

است. ضریب پراکندگی
$$\sigma$$
 برابر است با:
 $\sigma = 1 - \frac{L_m^{\rm Y}}{L_s L_r}$

در کنترل مستقیم گشتاور، دامنه شارها در حدود مقدار نامی حفظ شده و گشتاور را با تغییر زاویه گشتاور تنظیم میکنند که حداکثر گشتاور بهازای π/χ بهدست $\delta_{w} = \pi/\chi$ می آید. زاویه گشتاور با استفاده از بردار ولتاژ استاتور قابل تنظيم است. معادلة ولتاژ استاتور چنين است:

$$\overline{u}_{s} = r_{s}\overline{i}_{s} + \frac{d\overline{\psi}_{s}}{dt}$$
(7)

$$\overline{u_s} \approx \frac{d\,\overline{\psi_s}}{dt} \Longrightarrow \overline{\psi_s} = \overline{\psi_s} + \overline{u_s} \Delta t \tag{(7)}$$

در محرکههای چندسطحی نیز مانند محرکههای دو سطحي با انتخاب بردارهاي مناسب ولتاژ، مي تـوان مكـان هندسی شار استاتور را کنترل کرد. مؤلفهای از بردار ولتـاژ که در راستای شار استاتور باشد، فقط بر دامنهٔ شار اثر می گذارد و فقط مؤلفه عمود بر شار استاتور زاویه گشتاور را تغییر میدهد. به بیانی دیگر مؤلفه مماسی بر گـشتاور و مؤلفه شعاعي آن بر دامنه شار اثر مي گذارد. اگر مؤلف ه مماسی و شعاعی شار را بهترتیب با ψ_{Ts} و ψ_{Rs} و مؤلفه مماسی و شعاعی ولتاژ را بهترتیب با u_{Rs} و u_{Rs} نـشان دهيم، در اين صورت:

$$\psi_{Rs} = \psi_{s.} + u_{Rs} \Delta t \tag{(1)}$$

 $\psi_{Ts} = u_{Ts} \Delta t$ (0)

ميزان تغيير زاويه گشتاور توسط مؤلفه مماسي شار تعيين می شود. با این فرض که شار رتور مطابق شکل ۲ با حرکت

۲- کنترل مستقیم گشتاور در محرک چند سطحى در يـــک موتــور القــايي ســـهفــاز متقــارن، گــشتاور الكترومغناطيسي برابر است با:

$$T_{e} = \frac{\mathbf{v}}{\mathbf{v}} p \frac{L_{m}}{\sigma L_{s} L_{r}} | \overline{\psi}_{s} | | \overline{\psi}_{r} | Sin \delta_{\psi} \tag{1}$$

که در آن $|\overline{\psi}_s|$ و $|\overline{\psi}_r|$ بهترتیب دامنه شار استاتور و L_r رتور و δ_{ψ} زاویه بین دو بـردار شـار اسـت. L_s ، L_m بهترتیب اندوکتانس مغناطیسکنندگی، استاتور و رتور ولتاژ به جز بردارهای افزونه ^۱ برای محرکههای چهار و پنج سطحی در شکل ۳ و ٤ 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 می شود.



شکل ۲ اثر بردار ولتاژ استاتور بر گشتاور



شکل ۳ بردارهای فضایی ولتاژ در محرک خازنی چهار سطحی

1. redundant

پیادهسازی ۲٤ قطاعی استراتژی کنترل مستقیم ...

یکنواخت در حال حرکت است، اثر مؤلف مماسی ولت اژ را بررسی می کنیم. اگر مؤلفه مماسی بردار ولت اژ بزرگ باشد، $\Delta t_s \Delta t$ و در نتیجه سرعت تغییر مؤلفه $T_s \Psi_T$ بزرگ بوده و بهدلیل 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 ولت اژ مقداری متوسط باشد، $\Delta t_s \Delta t$ و در نتیجه سرعت تغییر مؤلفه $T_s \Psi$ متوسط بوده و با توجه به حرکت شار رتور، بازاویه بردار شار استاتور و رتور تغییر چندانی نمی کند و به مؤلفه مماسی بردار ولتاژ کوچک باشد، $\Delta t_s \Delta t$ و در نتیجه سرعت بیانی دیگر، تغییر زاویه گشتاور نخواهیم داشت. اگر مؤلفه مماسی بردار ولتاژ کوچک باشد، $\Delta t_s \Delta t$ و در نتیجه سرعت مماسی بردار ولتاژ کوچک باشد، حرکت شار رتور، موافه و به بردار مؤلفه دیگر موره و با توجه به حرکت شار رتور، موافه و به بیانی تغییر مؤلفه و به بوده و با توجه به حرکت شار رتور، ماسی دیگر زاویه گشتاور کاهش میابد و در این حالت گرمتاور دیگر زاویه گشتاور کاهش میابد و در این حالت گرمتاور دیگر زاویه گشتاور کاهش میابد و در این حالت گرمتاور

در مقایسه با دوسطحی، در محرکههای چندسطحی تعداد زیادی بردار ولتاژ با اندازههای متفاوت وجود دارد که با استفاده از آنها می توان بردار شار را با سرعتهای مختلف و در جهتهای مختلف کنترل کرد. به این ترتیب در محرکههای چندسطحی، کنترل سریع تر و دقیق تری بر شار و گشتاور می توان اعمال کرد. بردار ولتاژ استاتور در محرکههای پنج سطحی بهصورت زیر است:

$$\overline{u_s} = u_a + u_b e^{j\frac{\tau\pi}{r}} + u_c e^{j\frac{t\pi}{r}}$$
(7)

دله بردار فضایی را میتوان به صورت شماره بردار cba نشان داد که در آن a، b، a و p بهترتیب اندازهٔ سطح ولتاژ را در هر یک از فازها نشان میدهند. تمامی بردارهای فضایی

204

202

310

420

2

304

303

302

301

410

 α^{3}

404

403

402

401

400



شکل ٤ بردارهای فضایی ولتاژ در محرک خازنی پنج سطحی

دامنه و زوایهٔ 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 زوایه و اندازهٔ بردارها در محدودهای ۲۰ درجهای مطابق شکل ۲، سایر بردارها نیز به آسانی محاسبه می شود. با توجه به این که زاویهٔ بین محور a و محور ع برابر ۲۰ درجه است، بنابراین زاویه 10 برابر ۲۰ درجه است و در نتیجه دامنه بردار 104 برابر است با:

 $c_{1,1}{}^{r} = (\epsilon V_{dc})^{r} + (V_{dc})^{r} - r(\epsilon V_{dc})(V_{dc})Cos r^{o}$ $= 1 r V_{dc}{}^{r} \Rightarrow C_{1,1} = r / r V_{dc}$ $1 r V_{dc}{}^{r} \Rightarrow C_{1,1} = r / r V_{dc}$ $1 r V_{dc}{}^{r} \Rightarrow C_{1,1} = r / r V_{dc}$ $0 r V_{dc}$ $1 r V_{dc}$ $1 r V_$

سپس انر بردارهای مختلف را بر گشتاور و سرعت بررسی کرد. در [٥] برای پیادهسازی راهبرد کنترل مستقیم گشتاور در محرکه پنج سطحی، صفحهٔ β۵ مطابق شکل ۷ به ۱۲ قطاع تقسیم شده است. با فرض آن که شار استاتور در قطاع ۵ و جهت چرخش در جهت عقربه های ساعت باشد، نخست اثر بردارهایی را که باعث افزایش شار میشود بررسی می کنیم. مطابق شکل ۸ سه بردار ۲۰۳، ماسی آن ها – که در شکل ۸ نشان داده شده – متفاوت مماسی آن ها – که در شکل ۸ نشان داده شده – متفاوت است. با توجه به توضیحات قبلی، بردارهای ۲۰۲ و متاور است. با عرف افزایش گشتاور، حفظ تقریبی گشتاور و کاهش گشتاور میشوند.



شکل ٥ روابط مثلثاتي محاسبه دامنه و زاويه بردارها



شکل ٦ بردارهای فضایی در بازهای ٦٠ درجهای



اکنون اثر بردارهایی را که باعث کاهش شار می شود بررسی میکنیم. مطابق شکل ۹، سے بردار ۲۰۱، ۳۰۱ و ۲۰۰ باعث کاهش شار میشوند اما اثـر آنهـا بـر گـشتاور بسته به مؤلفه مماسی آنها متفاوت است. برطبـق شـکل ۹، بردارهای ۲۰۱، ۲۰۱ و ۲۰۰ به ترتیب باعث افزایش گشتاور، حفظ تقریبی گشتاور و کاهش گشتاور می شوند. در [٥] بردارهای ولتاژ با توجه به سرعت رتـور انتخـاب شده است: بردارهای با دامنهٔ کم برای سـرعتهای پـایین و بردارهای با دامنهٔ زیاد برای سرعتهای بالا در نظر گرفت. 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 (جدول۲). در این جدول TI و FI گشتاور و شار را نشان میدهد. مقدار ۱ و ۱– بهترتیب به معنـا آن است که کمیت مورد نظر بیش از حد مجاز یا کمتر از حد مجاز است و صفر به معنا قرار داشتن در محدوده مجاز است. در جدول ۲ محدوده $\omega_{m3} < \omega_m$ مربوط به سرعتهای ىالا است.

۳- متعادلسازي ولتاژ خازنها

در مبدلهای خازنی از افزونگی بردارها برای متعادلسازی ولتاژ خازنها استفاده میشود. برای مثال اگر در فاز a به پیادهسازی ۲٤ قطاعی استراتژی کنترل مستقیم ...

جدول ۱ اندازه و زوایه بردارهای فضایی ولتاژ شماره بردار دامنه زاويه • •• • ٤ ٤Vdc 1.2 ۱۳/۹ ۳/٦Vdc ۳/٤۸Vdc 7.2 ۳. ۳/٦Vdc 3.5 ٤٦/١ ٤٠٤ ٦. ٤Vdc







شکل ۸ اثر بردارهای افزاینده شار بر گشتاور

8- کنترل مستقیم گشتاور و فراجهش ولتاژ بر طبق نظریهٔ خط انتقال، ولتاژ انعکاس یافته برابر است با [۱٦]:

$$V_{t} = (1 + \Gamma)V_{1}$$

$$\Gamma = \frac{Z_{m} - Z_{c}}{Z_{m} + Z_{c}}$$
(V)

که در آن Γ ضریب انعکاس، Zm امپدانس موتور و Zc امپدانس مشخصه کابل است. نوسان ولتاژ در فواصل کوتاه وجود ندارد و از فاصلهای به بعد شروع می شود که طول بحرانی کابل نام دارد. طول بحرانی تابع سرعت انتشار پالس Vp (حدود ۱۵۰متر بر میکروثانیه) و زمان صعود پالس tr (وابسته به نوع کلید و نحوه کلید زنی)

(A)
$$= \frac{t_r v_p}{\gamma}$$

۲.,

۲۰۲

۲١.

۲۰۱

سطح ولتاژ یV نیاز باشد، با چهار ترکیب مختلف کلیدها می توان به آن دست یافت (جدول۳). هر یک از این ترکیبها تأثیر متفاوتی بر ولتاژ خازنها می گذارد و در نتیجه می توان بسته به نیاز، ترکیب مناسب را اعمال کرد. به همین ترتیب برای سطح ولتاژ کل2VC شش بردار افزونه و برای سطح ولتاژ عکل25 چهار بردار افزونه وجود دارد که تاثیر آنها بر ولتاژ خازنها در جدول ۳ نشان داده شده است. تأثیر کلیدزنی بر ولتاژ خازنها سه حالت دارد: ولتاژ خازن تغییری نمی کند(۰) و ولتاژ افزایش (+) یا کاهش می یابد (-). با 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 ۲۷=۳۳ حالت مختلف وجود دارد که برای سه فاز تعداد حالتهای ممکن به ۵۱ حالت می رسد.

جدول ۲ جدولهای کلیدزنی برای سرعتهای مختلف

						ωn	n<ωm₁						
TI	FI	θ1	θ2	θ3	θ4	θ5	θ6	θ7	θ8	θ9	θ10	θ11	θ12
٠	١	•••	111	•••	111	•••)))	•••	111		111	111	111
٠	-1	111	111	•••	111	111	111	•••	111	111	111	•••	111
١	١	• ١ •	• ۲ ۱	• 1 1	• 1 ٢	••1	1.7	1 • 1	201	7.1 1		11.	17.
١	-1	• 1 1	• 1 ٢	••1	1.7	1.1 7.1 1		۱	۲۱۰	11.	17.	• 1 •	• 7 1
-1	١	۱	۲۱۰	11.	17.	• 1 •	• 7 1	• 1 1	۰۱۲	••• ١	1.7	1•1	7 • 1
- 1	-1	1.1	7.1	1	۲۱.	11.	17.	• 1 •	• 51	•11	• 1 ٢	••1	1.7
						ωm_1	<wm<0< th=""><th>)m₂</th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th></wm<0<>)m ₂					
TI	FI	θ1	θ2	θ3	θ4	θ5	θ6	θ7	θ8	θ9	θ10	θ11	θ12
٠	١	۱۰۰	۱۰۰	11.	11.	• ١ •	• 1 •	• 1 1	• 1 1	•• ١	•• 1	1 • 1	1 • 1
٠	-1	١٠١	١٠١	۱	1	11.	11.	• 1 •	• 1 •	• 1 1	• 1 1	•• ١	•••
١	١		•••	111	111	•••	•••	111	111	•••	•••	111)))
١	-1	111	111	•••	•••	111	111	•••	•••	111	111	•••	۱

٠٢١

۱۲۰

٠٢٢

٠٢٠

• 1 7

٠٢١

...

• 7 7

1.7

٠١٢

۲۰۲

•••

۲۰۱

۱۰۲

٠٢.

۲۲۰

۱۲.

۲۱۰

۲۲.

۲.,

پیادەسازى ۲٤ قطاعى استراتژى كنترل مستقیم ...

محمد آراسته و همکاران

						00111	2 100111 10	siiij							
ΤI	FI	θ1	θ2	θ3	θ4	θ5	θ6	θ7	θ8	θ9	θ10	θ11	θ12		
·	١	7	۲۱.	22.	17.	• 7 •	• 7 1	• 7 7	• 1 7	••٢	1.7	7.7	7•1		
·	-1	7.7	7•1	۲	71.	77.	17.	• 7 •	• 7 1	• 7 7	• 1 ٢	••٢	1.7		
١	١	1	11.	11.	• 1 •	• 1 •	• 11	• 1 1	•••	•• 1	1.1	1.1	1		
١	-1	1.1	1.1	۱۰۰	1	11.	11.	• 1 •	• 1 •	• 1 1	• 1 1	••1	•••		
-1	١	۳۰۱	۳۱۰	۳۲۰	۲۳.	15.	۰۳۱	•٣٢	• 7٣	۰۱۳	١٠٣	۲۰۳	۳۰۲		
-1	-1	۳۰۲	۳۰۱	۳۱۰	۳۲.	۲۳.	۱۳۰	۰۳۱	• 37	٠٢٣	٠١٣	1.٣	۲۰۳		
	00 _{m3} <00m														
ΤI	FI	θ1	θ2	θ3	θ4	θ5	θ6	θ7	θ8	θ9	θ10	θ11	θ12		
٠	١	۳۰۱	۳۱۰	۳۲۰	۲۳۰	18.	• 31	• 37	۰۲۳	۰۱۳	١٠٣	۲۰۳	۳۰۲		
٠	-1	۳۰۲	۳۰۱	۳۱۰	۳۲۰	۲۳۰	18.	• 31	• 37	۰۲۳	۰۱۳	1.7	۲۰۳		
١	١	7	71.	77.	17.	• * •	• ۲ ۱	• * *	• 1 ٢	•••	1.7	7.7	7 • 1		
١	-1	7.7	7.1	7	71.	77.	17.	• 7 •	• 7 1	• * *	• 1 ٢	•••	1.7		
-1	١	٤٠١	٤١٠	٤٣٠	٣٤٠	12.	• ٤ ١	۰٤٣	• 32	• 1 £	1.5	٣٠٤	٤٠٣		
-1	-1	٤٠٣	٤٠١	٤١٠	٤٣٠	٣٤٠	12.	٠٤١	٠٤٣	• 32	• 1 ٤	1.5	٣٠٤		

 $\omega m_2 < \omega m < \omega m_3$

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

State	S4	S3	S2	S1	Out	ΔVc3	$\Delta Vc2$	$\Delta Vc1$	Level
•	•	•	•	•	•	*	*	*	•
١	•	•	•	١	V _{dc}	*	•	-	١
٢	•	•	١	•	V _{dc}	*	-	+	١
٣	•	•	١	١	٣V _{dc}	*	-	*	۲
٤	•	١	•	٠	V _{dc}	-	+	•	١
٥	•	١	•	١	۲V _{dc}	-	+	-	۲
٦	•	١	١	•	۲V _{dc}	-	*	+	۲
v	•	١	١	١	٣V _{dc}	-	•	•	٣
٨	١	•	•	•	V _{dc}	+	*	*	١
٩	١	•	•	١	۲V _{dc}	+	•	-	۲
۱.	١	٠	١	٠	۲V _{dc}	+	-	+	٣
11	١	•	١	١	٣V _{dc}	+	-	*	٣
١٢	١	١	•	٠	٣V _{dc}	•	+	•	٤
١٣	١	١	•	١	۳V _{dc}	•	+	-	٣
١٤	١	١	١	٠	۳V _{dc}	•	•	+	٣
10	١	١	١	١	٤V _{dc}	•	•	•	٤

	· · · · · ī · · !			
خازنها	وتاتير أن بر ولتاز ·	ى كليدزنى	۲ حالتهای	جدول

محرکههای تجاری زمان صعود ۵۰ نانونانیه تا ۱۰۰۰ نانوثانیه دارند [۱۸]. میزان فراجهش ولتاژ در این محدوده زمانی و برای طولهای مختلف کابل در شکل ۱۰ نشان داده شده است [٦]. با افزایش زمان صعود می توان میزان فراجهش را کاهش داد اما تلفات کلیدزنی افزایش مییابد. فراجهش ولتاژ ناشی از زمان صعود ۲/۰ و ۲ میکروثانیه در شکلهای ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است.

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

در این مقاله، جدول کلیدزنی با هـدف کـاهش dv/ اصلاح میشود. جدول کلیدزنی یا جدول ۲٤ قطاعی ارائه شده در این مقاله برای سرعت های بالا، مطابق جدول ٤ است. مزیت این جدول در مقایسه با جدول ۲ آن است که در انتقال از هر قطاع به قطاع مجاور در حالت TI=-1، اندازهٔ تغییر ولتاژ به Vdc محدود شده است. این مزیت به علت استفاده از تمامی بردارهای منتهبی به شش ضلعی بیرونی بهدست می آید. در جدول ۵ در حالتهای •=TI و ۱=TI نیز با توجه به افزونگی بردارها که از جمع بردار با (۱،۱،۱) یا (۲،۲،۲) بهدست می آید، بر دارهای معادل جایگزین شده است. (موتور، ولتاژهای اعمال شده به فازها را بهصورت تفاضلي مي بيند و اعمال بردار ۳۲۱ و ۲۱۰ اثر یکسانی دارد. در هر دو حالت ولتاژهای خط vab، v_{ca} و v_{ca} به ترتیب برابر ۱-، ۱- و ۲ است، لـذا بـردار ۳۲۱ را بردار افزونه بردار ۲۱۰ می نامند.) بنابراین بیشترین تغییر به یک پله محدود می شود و بهندرت تغییر دوپلهای خواهيم داشت.



پیادهسازی ۲٤ قطاعی استراتژی کنترل مستقیم ...

ΤI	FI	۱	۲	٣	٤	٥	٦	٧	٨	٩	۱۰	11	۱۲	۱۳	١٤	10	۱٦	۱۷	۱۸	۱۹	۲.	21	۲۲	۲۳	۲٤
•	۱	۳۰۱	۳۰۰	۳۱۰	۳۱۰	۳۲۰	۳۳.	۲۳۰	۲۳۰	13.	۰۳۰	۰۳۱	۰۳۱	۰۳۲	۰۳۳	۰۲۳	۰۲۳	۰۱۳	•••	۱۰۳	١٠٣	۲۰۳	۳۰۲	۳۰۲	۳۰۲
٠	-1	۳۰۲	۳۰۱	۳	۳	۳۱۰	۳۲۰	۳۳.	۳۳.	۲۳۰	۱۳۰	• • • •	• • • •	۰۳۱	۰۳۲	۰۳۳	۰۳۳	۰۲۳	۰۱۳	•••	•••	۱۰۳	۲۰۳	۳ ۰ ۳	۳۰۳
۱	١	۲.,	۲.,	۲۱.	۲۱.	۲۲.	۲۲.	17.	17.	• 7 •	• 7 •	۰۲۱	• 7 1	• 7 7	• 77	• 17	• 17	•••	•••	1.7	1.7	7.7	7.7	۲۰۱	7.1
۱	-1	7.1	7 • 1	۲.,	۲.,	۲۱۰	۲۱.	77.	77.	17.	17.	• 7 •	• 7 •	• 7 1	۰۲۱	• 77	• 77	•17	•17	•••	•••	1.7	1.7	۲۰۲	7.7
-1	١	٤٠٠	٤١٠	٤٢٠	٤٣٠	٤٤٠	٣٤٠	۲٤۰	١٤٠	٠٤٠	۰٤١	۰٤۲	۰٤٣	٠٤٤	٠٣٤	٠٢٤	٠١٤	٠٠٤	١٠٤	۲۰٤	٣٠٤	٤٠٤	٤٠٣	٤٠٢	٤٠١
-1	-1	٤٠١	٤٠٠	٤١٠	٤٢٠	٤٣٠	٤٤٠	٣٤٠	۲٤۰	١٤٠	٠٤٠	۰٤١	۰٤٣	۰٤٣	٠٤٤	٠٣٤	٠٢٤	٠١٤	٠٠٤	١٠٤	۲۰٤	٣٠٤	٤٠٤	٤٠٣	٤٠٢

جدول ٤ جدول كليدزني ٢٤ قطاعي

جدول ٥ جدول كليدزني با استفاده از بردارهاي افزونه در حالت TI=1

ΤI	FI	۱	۲	٣	٤	٥	٦	٧	٨	٩	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	١٤	١٥	۱٦	۱۷	۱۸	۱۹	۲.	۲۱	۲۲	۲۳	۲٤
•	١	۳۰۱	۳	31.	۳۱.	۳۲.	۳۳.	۲۳۰	۲۳۰	۱۳۰	٠٣٠	۰۳۱	• 31	٠٣٢	۰۳۳	۰۲۳	۰۲۳	۰۱۳	•••	۱۰۳	۱۰۳	۲۰۳	۳۰۲	۳۰۲	۳۰۲
•	-1	۳۰۲	3.1	۳۰۰	۳	۳۱۰	۳۲۰	۳۳.	۳۳.	۲۳۰	13.	۰۳۰	• • • •	۰۳۱	۰۳۲	۰۳۳	۰۳۳	۰۲۳	۰۱۳	•••	•••	۱۰۳	۲۰۳	۳۰۳	۳۰۳
۱	١	711	۳۱۱	۳۲۱	۳۲۱	۲۳۱	۳۳۱	7371	7371	131	131	132	۱۳۲	١٣٣	١٣٣	۱۲۳	١٢٣	۱۱۳	۱۱۳	۳۱۲	۲۱۳	۳۱۳	۳۱۳	317	317
۱	-1	717	۳۱۲	۳۱۱	۳۱۱	۳۲۱	۳۲۱	۳۳۱	۳۳۱	221	221	131	١٣١	۱۳۲	۱۳۲	١٣٣	١٣٣	١٢٣	۱۲۳	۱۱۳	۱۱۳	۲۱۳	۲۱۳	۳۱۳	۳۱۳
-1	١	٤٠٠	٤١٠	٤٢٠	٤٣٠	٤٤٠	٣٤٠	۲٤۰	١٤٠	٠٤٠	۰٤١	۰٤٢	۰٤٣	٠٤٤	٠٣٤	٠٢٤	۰۱٤	٠٠٤	١٠٤	۲۰٤	٣٠٤	٤٠٤	٤٠٣	٤٠٢	٤٠١
-1	-1	٤٠١	٤٠٠	٤١٠	٤٢٠	٤٣٠	٤٤٠	٣٤٠	٢٤٠	١٤٠	٠٤٠	۰٤١	۰٤٣	۰٤٣	٠٤٤	٠٣٤	٠٢٤	۰۱٤	٠٠٤	١٠٤	۲۰٤	۳۰٤	٤٠٤	٤٠٣	٤٠٢





٥- شبيهسازي در سيمولينک

راهبرد کنتـرل مـستقیم گـشتاور بـرای نمونـهای در مقیـاس کوچک با استفاده از موتور ۳ کیلووات ۲۰۰ ولت شبیهسازی و پیادهسازی شده است. پارامترهای کنترل مستقیم گـشتاور 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 ۱٤ نشان داده شده است. ولتاژهای اعمال شده به سه فاز موتور در این حالت در شکل ۱۵ نشان داده شده است. تغییر ولتاژ بهاندازه دو پلـه چنـد بـار روی داده اسـت. شبیهسازی مشابهی با استفاده از جدول ۵ انجام شده و نتایج در شکل های ۱٦ و ١٧ آورده شده است. اگرچه مقایسه شکل های ۱۶ و ۱٦ نشان می دهد که کارایی موتور تفاوتی نکرده، اما بررسی شکل ۱۷ نشان میدهد که تغییر ولتاژهای اعمالي در هر سه فاز به يک يله محدود شده است.





با جدول ۲



شکل ۱۷ ولتاژهای اعمال شده به سهفاز موتور نسبت به زمین

با جدول ٥

۲- پیــادهســازی توســط پردازنــده TMS320F2812

محرکه 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 مرعت 150MIPS توانایی خوبی برای پیادهسازی DTC دارد. این پردازنده مجهز به ۱۲ کانال مبدل آنالوگ به دارد. این پردازنده مجهز به ۱۲ کانال مبدل آنالوگ به سهفاز، دو جریان فاز، سهولتاژ فاز و نیز ولتاژ لینکDC بهکار می رود. شش درگاه ورودی - خروجی با ۵۲ پایه قابلیت فرمان به ۲٤ عدد TGBT را بهراحتی فراهم می سازد. برای اندازه گیری ولتاژ خازنها مطابق شکل ۱۸ از سنسورهای ولتاژ DC استفاده شده است. از ژنراتور مطابق شکل ۱۹ به عنوان بار مکانیکی موتور استفاده شده است. مقدار بار توسط گرمکن های برقی تنظیم می شود.

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 نیشان داده شده است (پروب 10x). تغییرات دوپلهای به میزان ۳۰۰ ولت بهویژه بین ۳۰۰ و ۲۰۰ ولت در این شکل دیده می شود. 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 ۱۰۰ ولت است. منحنی سرعت نسبت به زمان در شکل های ۲۲ و ۲۳ نیشان داده شده است. با توجه به تعداد بردارهای جدول ۵، کارایی سیستم نه تنها کاهش نیافته، بلکه ریپل سرعت نیز به دلیل افزایش تعداد بردارهای قابل استفاده، تا اندازهای کاهش یافته است.

پیادهسازی ۲٤ قطاعی استراتژی کنترل مستقیم ...



شکل ۱۸ سامانه محرکه DTC پنج سطحی خازنی



شکل ۱۹ موتورسهفاز، ژنراتور DC و بار

۷- نتیجه گیری

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 فراجهش ولتاژ را کاهش می دهد. استفاده از جدول جدید، همچنین ریپل سرعت را کاهش می دهد. نتایج عملی تأییدی بر درستی تحلیل ارائه شده و نتایج شبیه سازی است.

قدردانی

این تحقیق بـا حمایـت مـالی جهـاد دانـشگاهی صـورت گرفته است. بهاین وسیله نویسندگان مراتب سـپاس خـود را از جهاد دانشگاهی اعلام مینمایند.



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



جدول ہ، volt/div=100, time/div=10ms

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 4kV 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 2.3kV 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 ۲۳ تغییرات سرعت موتور در روش مبتنی بر جدول ٥



مشخصات موتور القایی
V=400V,P=3kW,p=2(4pole),
$$R_s=1.87\Omega$$
,
 $R_r=1.86\Omega$, $L_{ls}=L_{lr}=7.54$ mH, $L_m=210$ mH,
 $J=0.01$ kg-m²,
 y پارامترهای کنترل مستقیم گشتاور
 y دهیسترزیس گشتاور 0.5 N.m.
 y پهنای باند هیسترزیس شار 0.02Wb
شار اولیه ماشین 0.8Wb
حداکثر فرکانس کلیدزنی 5000Hz
زمان نمونه برداری 33us

۹- منابع

 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