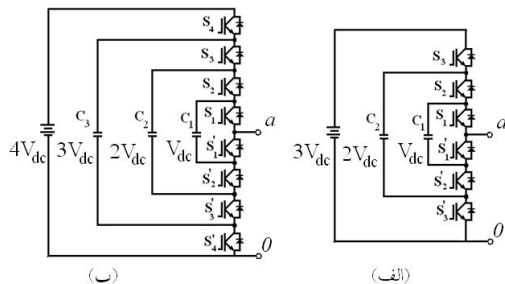


پیاده‌سازی کنترل مستقیم گشتاور در اینورتر چندسطحی خازنی با کاهش ولتاژ مود مشترک

محمد آراسته¹، عبدالرضا رحمتی²، شاهرخ فرهنگی³ و سید ادیب ابریشمی⁴

^{1,4} دانشگاه علم و صنعت ایران، Arasteh@ee.iust.ac.ir

³ دانشکده فنی دانشگاه تهران، farhangi@ut.ac.ir



شکل 1- مبدل خازنی (الف) 4سطحی (ب) پنج سطحی

تجاری‌سازی شده‌اند [2] - [3]. در میان این محرکه‌ها، محرکه‌ی خازن شناور نشان داده شده در شکل 1 از این نظر که همانند پل H متوالی به ترانس حجیم نیاز نداشته و در ضمن اعوجاج نوع اینورتر مهار دیودی را ندارد مورد توجه قرار گرفته است.

در میان روش‌های کنترل دور موتور القایی، روش کنترل مستقیم گشتاور یا DTC⁴ که یک روش با کارایی بالا در محرکه‌های 2سطحی است و به محاسبات پیچیده و زمان بر نیاز ندارد، در محرکه‌های چندسطحی نیز اجرا شده است [4]-[5]. به هر حال باید با تدابیری از عیب فرکانس کلیدزنی متغیر پرهیز کرد. در [6][7] روش ثابت نگهداشتن فرکانس کلیدزنی ارائه شده است. در [5] کنترل مستقیم گشتاور با استفاده از جدول کلیدزنی 12 قطاعی در محرکه‌ی خازنی پیاده سازی شده و برای متعادل‌سازی خازن‌ها از افزونگی بردارها استفاده شده است.

یکی از مشکلات اصلی در موتورهای القایی، عبور جریان‌های الکتریکی از یاتاقان‌ها است. این جریان که در اثر تزویج مغناطیسی یا تزویج الکترواستاتیکی ایجاد می‌شود به تدریج باعث خوردگی یاتاقان‌ها و از کارافتادگی موتور می‌شود. جریان ایجاد شده توسط تزویج مغناطیسی که از سال 1924 میلادی شناسایی

چکیده: پدیده‌ی جریان یاتاقان‌ها در موتورهای کنترل شونده توسط اینورتر، باعث نقص تدریجی یاتاقان‌ها و در نهایت توقف موتورهای الکتریکی می‌شود. در این مقاله با تحلیل ولتاژ مود مشترک که عامل ایجاد این جریان‌ها است، الگوریتم کاهش آن در کنترل مستقیم گشتاور ارائه شده است. بر اساس تحلیل ارائه شده، دامنه‌ی ولتاژ مود مشترک 33% کاهش می‌یابد. شبیه‌سازی‌ها در محیط سیمولینک موید تحلیل ارائه شده است. روش فوق توسط پردازنده‌ی TMS320F2812 روی محرکه‌ی پنج سطحی نوع خازن شناور پیاده‌سازی و نتایج عملی ارائه شده است.

کلمات کلیدی: محرکه‌ی چندسطحی، اینورتر خازن شناور، ولتاژ مود مشترک، کنترل مستقیم گشتاور، جریان یاتاقان‌ها.

1- مقدمه

امروزه محرکه‌های توان بالا در صنعت کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده‌اند. پمپ‌های خط لوله در صنعت نفت و پتروشیمی، فن‌های پرقدرت در صنعت سیمان، موتورهای کشانش در صنعت حمل و نقل و آسیاب‌های چرخشی در صنعت فولاد بخشی از این کاربردها هستند. از این روی پژوهش‌ها در زمینه بهبود عملکرد و افزایش قدرت این محرکه‌ها افزایش یافته و در دهه‌ی گذشته حوزه‌ی محرکه‌های توان بالا یکی از فعال‌ترین حوزه‌های الکترونیک قدرت بوده است [1]. توسعه این محرکه‌ها از دهه‌ی 80 میلادی با استفاده از GTO آغاز شد. اما با ابداع IGCT و IGBT ولتاژ بالا در دهه‌ی 90 میلادی و به دلیل مشخصه‌های عالی کلیدزنی، سادگی کنترل و تلفات کم، امروزه این دو کلید عناصر انتخابی برای طراحی و ساخت محرکه‌های توان بالا به شمار می‌روند [1]. اگرچه ساختارهای متعددی برای این محرکه‌ها ارائه شده است ولی سه نوع مهار دیودی¹، پل H متوالی² و خازن شناور³ کاربرد بیشتری پیدا کرده و

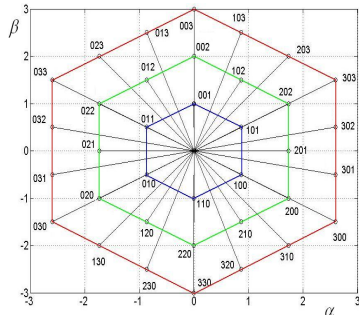
¹ Diode clamped

² Cascaded H bridge

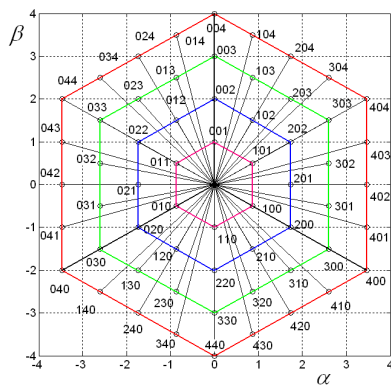
³ Flying capacitor

⁴ Direct Torque Control

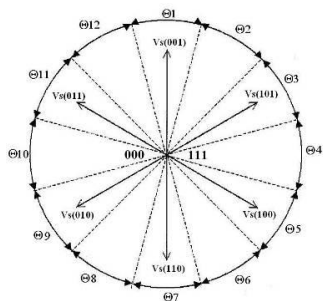
شار هستند. مقدار 1 و 1- به ترتیب به معنی آن است که کمیت مورد نظر بیش از حد مجاز یا کمتر از حد مجاز است. صفر نیز به معنی آن است که کمیت مورد نظر در داخل محدوده است.



شکل 5- بردارهای فضایی در اینورتر چهارسطحی



شکل 6- بردارهای فضایی در اینورتر پنج سطحی



شکل 7- تقسیم بندی صفحه $\alpha\beta$ به 12 قطاع

جدول 1- جدول کلیدزنی محرکه‌ی چهارسطحی در سرعت‌های بالا

Tl	Fl	01	02	03	04	05	06	07	08	09	010	011	012
0	1	200	210	220	120	020	021	022	012	002	102	202	201
0	-1	202	201	200	210	220	120	020	021	022	012	002	102
1	1	100	110	110	010	010	011	011	001	001	101	101	100
1	-1	101	101	100	100	110	110	010	010	011	011	001	001
-1	1	301	310	320	230	130	031	032	023	013	103	203	302
-1	-1	302	301	310	320	230	130	031	032	023	013	103	203

که در آن \bar{u}_s ، \bar{i}_s و $\bar{\psi}_s$ به ترتیب بردار ولتاژ، بردار جریان و بردار شار استاتور می باشند. با توجه به اینکه مقدار مقاومت r_s ناچیز است رابطه (1) را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\bar{\psi}_s = \bar{\psi}_{s0} + \bar{u}_s \Delta t \quad (2)$$

که در آن $\bar{\psi}_{s0}$ موقعیت فعلی بردار شار و $\bar{\psi}_s$ موقعیت جدید بردار شار استاتور را نشان می دهد. بردار ولتاژ استاتور به صورت زیر قابل تعریف است:

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

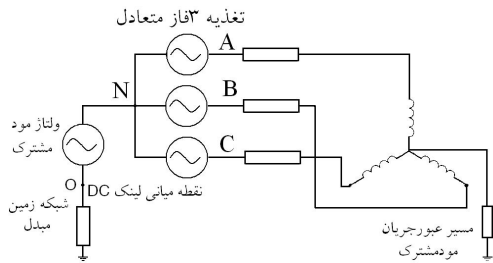
در این رابطه u_a ، u_b و u_c به ترتیب مقدار ولتاژ در فازهای a و b و c را نشان می دهند. در مقایسه با DTC دوسطحی، در محرک‌های چندسطحی تعداد زیادی بردار ولتاژ با اندازه‌های متفاوت وجود دارد که با استفاده از آنها می توان بردار شار را با سرعت‌های مختلف و در جهت‌های مختلف کنترل کرد. به این ترتیب در محرک‌های چندسطحی کنترل سریع تر و دقیق تری روی شار و گشتاور خواهیم داشت. این بردار فضایی را می توان بصورت شماره بردار cba نشان داد که در آن a ، b و c به ترتیب اندازه سطح ولتاژ را در فازهای a ، b و c نشان می دهند. کلیه بردارهای فضایی ولتاژ برای محرکه‌ی 4سطحی و پنج سطحی به ترتیب در شکل‌های 5 و 6 نشان داده شده اند. با تقسیم صفحه $\alpha\beta$ به 12 قطاع مطابق شکل 7، در هر قسمت بردارهای ولتاژ مناسب برای دنبال کردن مرجع شار و گشتاور اعمال می شود. بردارهای ولتاژ بر اساس سرعت روتور انتخاب می شوند به این صورت که بردارهای با دامنه کم برای سرعت‌های پایین و بردارهای با دامنه زیاد برای سرعت‌های بالا اختصاص داده می شوند. با توجه به اینکه در محرک چهارسطحی و پنج سطحی به ترتیب 3 و 4 سطح ولتاژ وجود دارد، می توان متناظر با آنها 3 و 4 محدوده سرعت متفاوت در نظر گرفت و در هر محدوده یک جدول کلیدزنی ارائه داد. جدول 1 و 2 بردارهای لازم برای محدوده سرعت بالا را به ترتیب در محرک‌های چهار و پنج سطحی نشان می دهند. اندیس‌های TI و FI اندیس گشتاور و

جدول 2- جدول کلیدزنی محرکه‌ی پنج‌سطحی در سرعت‌های بالا

TI	FI	01	02	03	04	05	06	07	08	09	010	011	012
0	1	301	310	320	230	130	031	032	023	013	103	203	302
0	-1	302	301	310	320	230	130	031	032	023	013	103	203
1	1	200	210	220	120	020	021	022	012	002	102	202	201
1	-1	202	201	200	210	220	120	020	021	022	012	002	102
-1	1	401	410	430	340	140	041	043	034	014	104	304	403
-1	-1	403	401	410	430	340	140	041	043	034	014	104	304

نول عملاً برابر با ولتاژ مود مشترک خواهد شد. به عبارت دیگر، ولتاژ نقطه‌ی نول بیانگر میزان ولتاژ مود مشترک خواهد بود. تاثیر سطوح مختلف ولتاژ هر فاز روی ولتاژ مود مشترک محرکه‌ی چهار و پنج‌سطحی در جدول 4 و 5 ارائه شده است. از این جدول می‌توان ولتاژ مود مشترک ناشی از اعمال هر یک از بردارها را به دست آورد. برای مثال در یک محرک پنج‌سطحی بزرگترین بردارها که در آن حداقل یک فاز سطح 4 و یک فاز سطح ولتاژ صفر دارد را بررسی می‌کنیم. بردار 004 سطوح ولتاژ صفر، صفر و چهار را به ترتیب در فازهای a, b و c دارد. بنابراین ولتاژ مود مشترک طبق رابطه 5 و جدول 5 برابر است با:

$$V_{com} = \frac{-2V_{dc} - 2V_{dc} + 2V_{dc}}{3} = -\frac{2}{3}V_{dc}$$



شکل 8- مدار مود مشترک موتور و محرکه‌ی خازنی

جدول 4- تاثیر سطح ولتاژ بر ولتاژ مود مشترک محرکه‌ی چهار سطحی

سطح ولتاژ	مشارکت در ولتاژ مود مشترک
3	+3Vdc/2
2	+Vdc/2
1	-Vdc/2
0	-3Vdc/2

جدول 5- تاثیر سطح ولتاژ بر ولتاژ مود مشترک محرکه‌ی پنج سطحی

سطح ولتاژ	مشارکت در ولتاژ مود مشترک
4	+2Vdc
3	+Vdc
2	0
1	-Vdc
0	-2Vdc

بررسی جدول 2 نشان می‌دهد که در [5] بسیاری از بردارها استفاده نشده است. جدول 3 که به جدول 24 قطاعی موسوم است، از همه‌ی بردارها استفاده کرده و علاوه بر قابلیت انعطاف بالاتر، امکان گزینش بهتر بردارها بر اساس کاهش ولتاژ مود مشترک را می‌دهد.

3- ولتاژ مود مشترک در محرک چند سطحی

مدار معادل محرکه‌ی خازنی همراه با نقطه مرجع صفر و امپدانس معادل شبکه زمین در شکل 8 نشان داده شده است. محرکه یک ولتاژ 3 فاز مود تفاضلی (توالی مثبت) و یک ولتاژ مود مشترک (توالی صفر) تولید می‌کند. ولتاژهای 3 فاز بار نسبت به نقطه‌ی وسط O برابر است با:

$$\begin{aligned} V_{A0} &= V_{AN} + V_{N0} \\ V_{B0} &= V_{BN} + V_{N0} \\ V_{C0} &= V_{CN} + V_{N0} \end{aligned} \quad (4)$$

ولتاژ V_{N0} توالی صفرسیستم است که به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$V_{N0} = (V_{A0} + V_{B0} + V_{C0}) / 3 \quad (5)$$

با فرض آن که نقطه وسط مبدل از طریق امپدانس زمین شده ولی نقطه نول موتور زمین نشده است، ولتاژ سر وسط مبدل نسبت به

جدول 3- جدول کلیدزنی 24 قطاعی در محرکه‌ی پنج‌سطحی

TI	FI	01	02	03	04	05	06	07	08	09	010	011	012	013	014	015	016	017	018	019	020	021	022	023	024
0	1	301	300	310	310	320	330	230	230	130	030	031	031	032	033	023	023	013	003	103	103	203	303	302	302
0	-1	302	301	300	300	310	320	330	330	230	130	030	030	031	032	033	033	023	013	003	003	103	203	303	303
1	1	200	200	210	210	220	220	120	120	020	020	021	021	022	022	012	012	002	002	102	102	202	202	201	201
1	-1	201	201	200	200	210	210	220	220	120	120	020	020	021	021	022	022	012	012	002	002	102	102	202	202
-1	1	401	400	410	420	430	440	340	240	140	040	041	042	043	044	034	024	014	004	104	204	304	404	403	402
-1	-1	402	401	400	410	420	430	440	340	240	140	040	041	042	043	044	034	024	014	004	104	204	304	404	403

قبلی هر ستون جایگزین شده است. به همین ترتیب بردارهای کلیدزنی محرک چهارسطحی نشان داده شده در جدول 8 با کاهش ولتاژ مود مشترک مطابق جدول 9 خواهد شد.

جدول 6- ولتاژ مود مشترک ناشی از اعمال بردارهای مختلف

ولتاژ مود مشترک	بردار ولتاژ اعمالی
2Vdc/3	404,044,440
Vdc/3	304,430,340,403,034,043
0	204,402,420,240,042,024, 303,033,330
-Vdc/3	104,410,401,140,041,014, 023,032,320,302,203,230
-2Vdc/3	004,400,040, 103,130,301,310,013,031, 202,220,022
-Vdc	003,030,300, 102,201,210,021,012,120
-4Vdc/3	002,200,020

ولتاژ مود مشترک در بردارهای 104، 204، 304 و 404 به ترتیب برابر است با: $-Vdc/3$ ، 0 ، $Vdc/3$ و $2Vdc/3$. یک مقایسه ساده نشان می‌دهد که بیشترین ولتاژ مود مشترک در بردارهای منتهی به 6 ضلعی بیرونی زمانی است که دو فاز دارای سطح ولتاژ صفر یا 4 باشند. این بردارها عبارتند از: 004، 400، 404، 040 و 044. با حذف این بردارها از جدول کلیدزنی می‌توان ولتاژ مود مشترک را به صورت محسوسی کاهش داد. به همین ترتیب می‌توان بردارهایی که در سایر 6 ضلعی‌ها بیشترین ولتاژ مود مشترک را ایجاد می‌کنند را شناسایی کرد و سایر بردارها را جایگزین آن‌ها نمود. در 6 ضلعی بعدی که بزرگترین سطح ولتاژ 3 می‌باشد، بردارهای 003، 300 و 030 بیشترین ولتاژ مود مشترک یعنی ولتاژ $-Vdc$ را ایجاد می‌کنند. در 6 ضلعی با بزرگترین سطح ولتاژ 2 نیز بردارهای 200، 020 و 002 بیشترین ولتاژ مود مشترک یعنی $-4Vdc/3$ را ایجاد می‌کنند. ولتاژ مود مشترک ناشی از کلیه بردارها در جدول 6 نشان داده شده است. به این ترتیب می‌توان بردارهای سطر اول و آخر را از جدول کلیدزنی حذف و با جایگزینی نزدیک‌ترین و مناسبترین بردار، جدولی با کاهش ولتاژ مود مشترک مطابق جدول 7 به دست آورد. در این جدول پس از حذف هر بردار، در حالت کاهش شار بردار بعدی هر ستون و در حالت افزایش شار، بردار

جدول 7- جدول کلیدزنی 24 قطاعی بر اساس کاهش ولتاژ مود مشترک در محرک‌های پنج‌سطحی

TI	FI	Θ1	Θ2	Θ3	Θ4	Θ5	Θ6	Θ7	Θ8	Θ9	Θ10	Θ11	Θ12	Θ13	Θ14	Θ15	Θ16	Θ17	Θ18	Θ19	Θ20	Θ21	Θ22	Θ23	Θ24
0	1	301	310	310	310	320	330	230	230	130	031	031	031	032	033	023	023	013	103	103	103	203	303	302	302
0	-1	302	301	301	301	310	320	330	330	230	130	130	130	031	032	033	033	023	013	103	103	103	203	303	303
1	1	210	210	210	210	220	220	120	120	021	021	021	021	022	022	012	012	102	102	102	102	202	202	201	201
1	-1	201	201	201	201	210	210	220	220	120	120	120	120	021	021	022	022	012	102	102	102	102	202	202	202
-1	1	401	410	410	420	430	340	340	240	140	041	041	042	043	034	034	024	014	104	104	204	304	403	403	402
-1	-1	402	401	401	410	420	430	430	340	240	140	140	041	042	043	043	034	024	014	104	104	204	304	304	403

جدول 8- جدول کلیدزنی 24 قطاعی در محرک‌های چهارسطحی

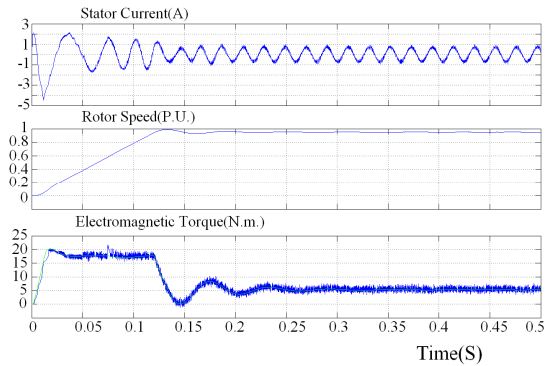
TI	FI	Θ1	Θ2	Θ3	Θ4	Θ5	Θ6	Θ7	Θ8	Θ9	Θ10	Θ11	Θ12	Θ13	Θ14	Θ15	Θ16	Θ17	Θ18	Θ19	Θ20	Θ21	Θ22	Θ23	Θ24
0	1	200	200	210	210	220	220	120	120	020	020	021	021	022	022	012	012	002	002	102	102	202	202	201	201
0	-1	201	201	200	200	210	210	220	220	120	120	020	020	021	021	022	022	012	012	002	002	102	102	202	202
1	1	100	100	110	110	110	110	010	010	010	010	011	011	011	011	001	001	001	001	101	101	101	101	100	100
1	-1	101	101	101	101	100	100	100	100	110	110	110	110	010	010	010	010	011	011	011	011	001	001	001	001
-1	1	301	310	310	310	320	330	230	230	130	031	031	031	032	033	023	023	013	103	103	103	203	303	302	302
-1	-1	302	301	301	301	310	320	330	330	230	130	130	130	031	032	033	033	023	013	103	103	103	203	303	303

جدول 9- جدول کلیدزنی 24 قطاعی بر اساس کاهش ولتاژ مود مشترک در محرکه‌ی چهارسطحی

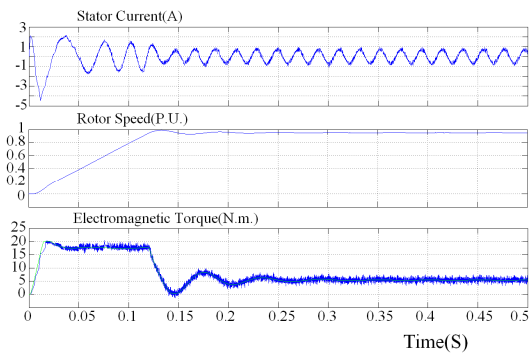
TI	FI	Θ1	Θ2	Θ3	Θ4	Θ5	Θ6	Θ7	Θ8	Θ9	Θ10	Θ11	Θ12	Θ13	Θ14	Θ15	Θ16	Θ17	Θ18	Θ19	Θ20	Θ21	Θ22	Θ23	Θ24
0	1	200	200	210	210	220	220	120	120	020	020	021	021	022	022	012	012	002	002	102	102	202	202	201	201
0	-1	201	201	200	200	210	210	220	220	120	120	020	020	021	021	022	022	012	012	002	002	102	102	202	202
1	1	210	210	220	220	120	120	120	021	021	021	022	022	012	012	012	102	102	102	202	202	201	201	201	210
1	-1	102	102	202	202	201	201	201	210	210	210	220	220	120	120	120	021	021	021	022	022	012	012	012	102
-1	1	301	310	310	310	320	330	230	230	130	031	031	031	032	033	023	023	013	103	103	103	203	303	302	302
-1	-1	302	301	301	301	310	320	330	330	230	130	130	130	031	032	033	033	023	013	103	103	103	203	303	303

4- نتایج شبیه سازی

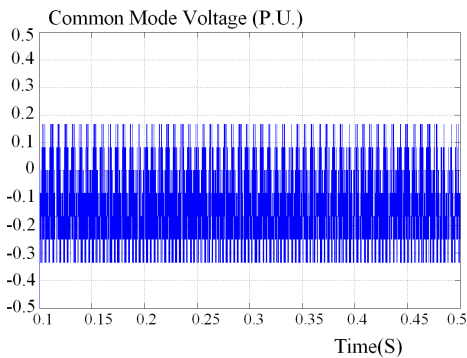
بلوک دیاگرام DTC با محرکه‌ی پنج سطحی در شکل 9 نشان داده شده است. مهم‌ترین بخش روش DTC، تخمین گر شار و استاتور است که به کمک آن مقادیر واقعی شار و استاتور تخمین زده شده و پس از مقایسه هیستریزیسی با فرمان، اندیسهای FI و TI تعیین می شود. با استفاده از این اندیسها و تعیین سکتور، بلوک تعیین بردار ولتاژ از جدول کلیدزنی بردار لازم را استخراج می کند. نهایتاً بلوک متعادل سازی بردار را به صورت مناسب اعمال می کند. مشخصات موتور مورد استفاده در پیوست ارائه شده است. سرعت مرجع برابر 0/95 پریونیت قرار داده شده و نتایج شبیه‌سازی با استفاده از جدول 2 و 7 در شکل‌های 10 و 11 ارائه شده است. کاهش ولتاژ مود مشترک در شکل 13 کاملاً مشخص و در مقایسه با شکل 12 به میزان 33% کاهش یافته است. شبیه سازی برای محرکه‌ی چهار سطحی نیز انجام و نتایج در شکل‌های 14 تا 17 نشان داده شده است. کاهش ولتاژ مود مشترک به میزان 33% در شکل 17 مشخص است. مقایسه شکل‌های 10 با 11 و نیز 14 با 15 نشان می دهد که کارایی سیستم در دو حالت یکسان بوده و استفاده از جدول کاهش ولتاژ مود مشترک کارایی را کاهش نمی دهد.



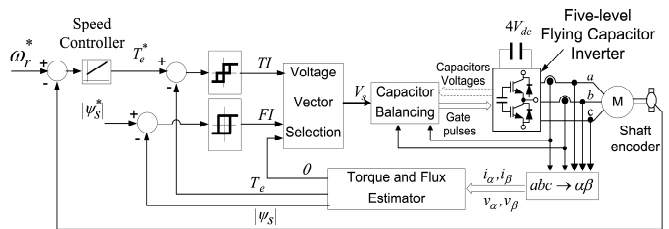
شکل 10- جریان، سرعت و گشتاور موتور با جدول 2



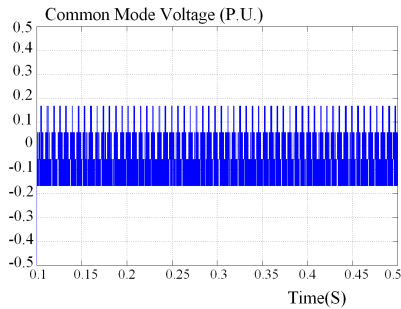
شکل 11- جریان، سرعت و گشتاور موتور با جدول 7



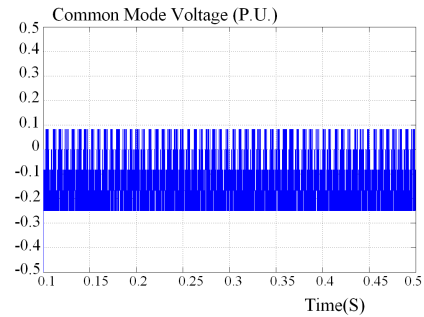
شکل 12- ولتاژ مود مشترک پریونیت محرک پنج سطحی با جدول 2



شکل 9- بلوک دیاگرام محرکه‌ی پنج سطحی با روش DTC



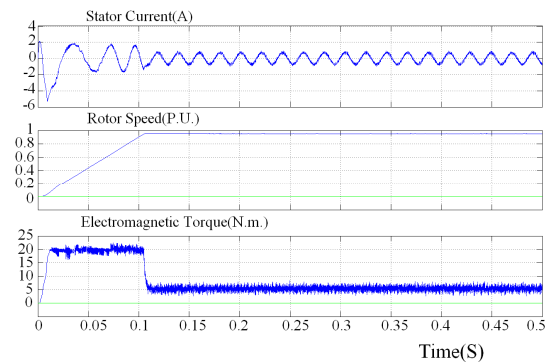
شکل 17- ولتاژ مود مشترک پریونیت محرک چهار سطحی با جدول 9



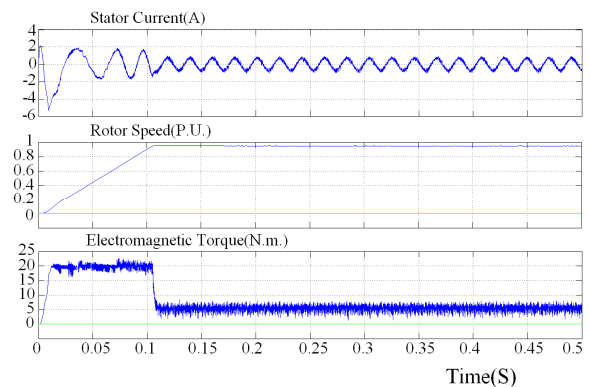
شکل 13- ولتاژ مود مشترک پریونیت محرک پنج سطحی با جدول 7

5- پیاده‌سازی توسط پردازنده TMS320F2812

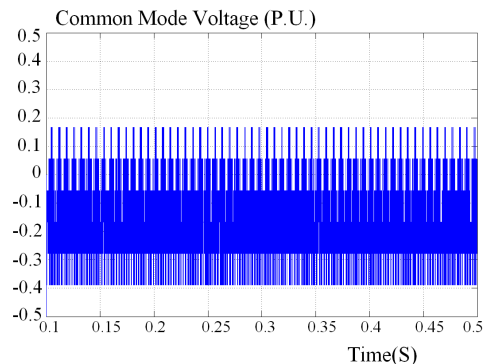
محرکه‌ی پنج سطحی خازنی در شکل 18 نشان داده شده است. بخش‌های مختلف سیستم در تصویر نامگذاری شده است. برد پردازنده اصلی EZDSPF2812 است که با سرعت 150MIPS توانایی خوبی برای پیاده‌سازی DTC دارد. این پردازنده مجهز به 16 کانال مبدل آنالوگ به دیجیتال است که جهت اندازه‌گیری 9 خازن شناور در 3 فاز، دو جریان فاز، 3 ولتاژ فاز و نیز ولتاژ لینک DC کفایت می‌کند. 6 پورت ورودی- خروجی با 56 پایه قابلیت فرمان به 24 عدد IGBT را به راحتی فراهم می‌کند. با توجه به بازار ایران، از IGBT مدل 2MBI100U4 استفاده شده است. برای درایو IGBTها و اندازه‌گیری ولتاژ خازن‌ها از درایورها و ترانس‌دیوسر ولتاژ DC ساخت جهاد دانشگاهی استفاده شده است. جهت بار مکانیکی موتور از یک ژنراتور DC مطابق شکل 19 استفاده شده است. میزان بار توسط المنت‌های حرارتی قابل تنظیم است. سرعت مرجع برابر 0.95 سرعت نامی قرار داده شده و موتور با استفاده از دو جدول کلیدزنی 2 و 7 راه اندازی شده است. بر طبق شکل‌های 20 و 21 پاسخ سیستم در هر دو حالت تقریباً یکسان است. ولتاژ خط و نیز ولتاژ مود مشترک در هر دو حالت در شکل‌های 22 تا 24 نشان داده شده است (پروب اسکوپ روی $\times 10$ قرار داده شده است). مقایسه شکل 25 با 24، کاهش 33% ولتاژ مود مشترک را تایید می‌کند.



شکل 14- جریان، سرعت و گشتاور موتور با جدول 1



شکل 15- جریان، سرعت و گشتاور موتور با جدول 9



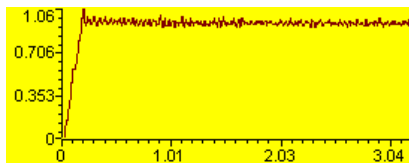
شکل 16- ولتاژ مود مشترک پریونیت محرک چهار سطحی با جدول 1

6- نتیجه گیری

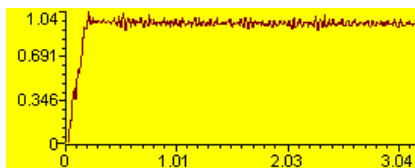
در این مقاله الگوریتمی برای کاهش ولتاژ و ولتاژ مشترک در اینورترهای چندسطحی خازنی ارائه شده است که ولتاژ و ولتاژ مشترک را 33% کاهش می دهد. نشان داده شد که با توجه به تعداد زیاد بردارها در اینورترهای چندسطحی، حذف بردارهایی که منجر به ولتاژ و ولتاژ مشترک می شوند تاثیر نامطلوبی بر کارایی سیستم ندارد. نتایج شبیه سازی و عملی موید روش ارائه شده در انتخاب جدول کلیدزنی می باشد.

قدردانی

با توجه به این که این تحقیق با حمایت مالی جهاد دانشگاهی صورت گرفته است، به این وسیله نویسندگان مراتب سپاسگزاری خود را از جهاد دانشگاهی اعلام می نمایند.



شکل 20- سرعت موتور با استفاده از جدول 2



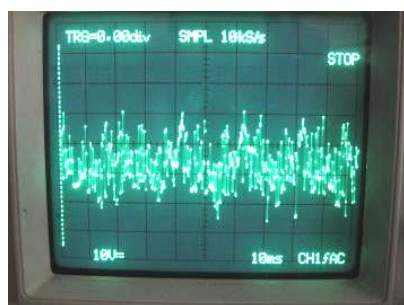
شکل 21- سرعت موتور با استفاده از جدول 7



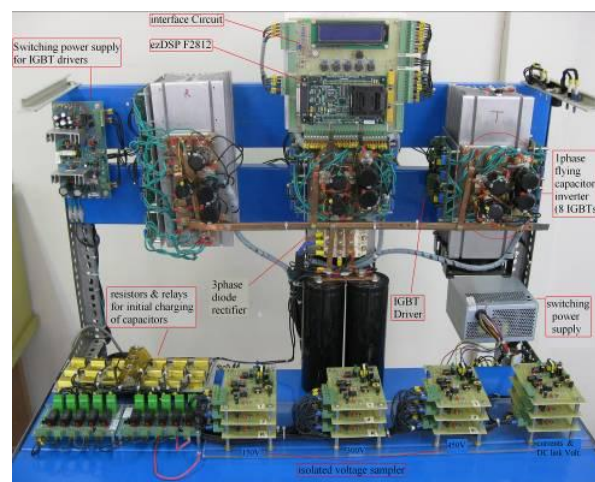
شکل 22- ولتاژ خط با استفاده از جدول 2



شکل 23- ولتاژ خط با استفاده از جدول 7



شکل 24- ولتاژ و ولتاژ مشترک با جدول 2

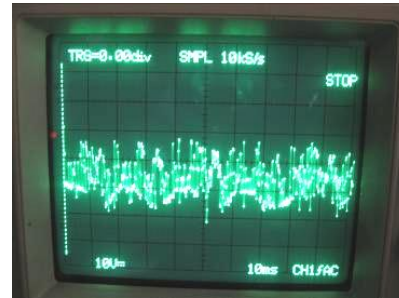


شکل 18- سامانه‌ی محرکه‌ی DTC پنج سطحی خازنی



شکل 19- موتور 3 فاز همراه با ژنراتور DC و بار

- [8] S. Chen, T. A. Lipo, and D. Fitzgerald, "Modelling of bearing currents in inverter drives," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, Vol. 32, no. 1, pp. 21–32, Jan./Feb. 1996.
- [9] J. Erdman, R. Kerkman, and D. Schlegel, "Effect of PWM inverters on AC motor bearing currents and shaft voltages," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, Vol. 32, no. 2, pp. 250–259, Mar./Apr. 1996.
- [10] A. V. Jouanne, H. Zhang, and A. K. Wallace, "An Evaluation of Mitigation Techniques for Bearing Currents, EMI and Overvoltages in ASD Applications", *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, Vol. 34, NO. 5, Sep./Oct. 1998
- [11] Busse, D., Erdman, J. M., Kerkman, R. J., Schlegel, D. W. and Skibinski, G. L. (1997c), "An evaluation of the electrostatic shielded induction motor: a solution for rotor shaft voltage buildup and bearing current," *IEEE Trans. Ind. Applicat*, vol. 33, no. 6, Nov./Dec.97
- [12] Xiyu Chen, Dianguo Xu, Fengchun Liu, Jianqiu Zhang, "A Novel Inverter-Output Passive Filter for Reducing Both Differential- and Common-Mode dv/dt at the Motor Terminals in PWM Drive Systems," *IEEE Trans. on Ind. Electron.*, vol. 54, no. 1, pp. 419-426, Feb. 2007.
- [13] Hanigovszki, Norbert ; Poulsen, Joern ; Blaabjerg, Frede . "A Novel Output Filter Topology to Reduce Motor Overvoltage," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, may/june 2004 Vol. 40, no. 3 pp. 845-852.
- [14] Hirofumi Akagi and Shunsuke Tamura, "A Passive EMI Filter for Eliminating Both Bearing Current and Ground Leakage Current From an Inverter-Driven Motor," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, no. 5, sep. 2006
- [15] D. Hyypio, "Mitigation of Bearing Electro-Erosion of Inverter-Fed Motors Through Passive Common-Mode Voltage Suppression," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 41, no. 2, pp. 576–583, Mar./Apr. 2005.
- [16] C. Mei, J. C. Balda, W. P. Waite, "Cancellation of Common-Mode Voltages for Induction Motor Drives Using Active Method," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, no. 2, June 2006.
- [17] Fei Wang, "Motor shaft voltages and bearing currents and their reduction in multilevel medium-voltage PWM voltage-source-inverter drive applications", *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, Vol. 36, Issue:5, Sep./Oct. 2000, pp. 1336 – 1341.
H. Zhang et al, "Multi-level inverter modulation schemes to eliminate common-mode voltages," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 36, pp. 1645-1653, Nov./Dec. 2000.



شکل 25- ولتاژ مود مشترک با جدول 7

ضمیمه

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 40us

مراجع

- [1] J. Rodríguez, S. Bernet, B. Wu, J. O. Pontt and Samir Kouro, "Multilevel Voltage-Source-Converter Topologies for Industrial Medium-Voltage Drives", *IEEE Trans. on Ind. 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. on Ind. 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. Industrial Electronics*, 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. on Ind. Electron.*, vol.49, Aug. 2002, pp.809 – 815.
- [6] N. R. N. Idris, and A. H. M. Yatim, "Direct Torque Control of Induction Machines With Constant Switching Frequency and Reduced Torque Ripple", *IEEE Trans. on Ind. Electron.*, vol. 51, no. 4, Aug. 2004
- [7] N. R. N. Idris, C. L. Toh, and M. E. Elbuluk, "A New Torque and Flux Controller for Direct Torque Control of Induction Machines," *IEEE Trans. Ind. Applicat*, vol. 42, NO. 6, Nov./Dec. 2006