

کنترل مستقیم گشتاور موتور القایی سه فاز ولتاژ پایین با استفاده از اینورتر سه سطحی ده سوئیچه

مهدی شاهپرستی و محمد فرزی

(۳) اینورتر بر ولتاژ شفت و جریان بلبرینگها تأثیر می‌گذارد که این پدیده تحت عنوان ولتاژ مد مشترک در مقالات مطرح شده است. ولتاژ مد مشترک منجر به کاهش طول عمر بلبرینگ می‌شود [۴]. بنابراین برای کنترل موتورهای القایی قدیمی امکان استفاده از اینورتر دوسطحی معمول وجود ندارد و در برخی از کاربردها برای نرم کردن ولتاژ اعمالی به موتور از یک صافی (سلف) استفاده می‌شود که منجر به افزایش هزینه، کاهش کارایی و محدود کردن پاسخ گذرای سیستم می‌شود [۵]. یکی از راه حل‌های ممکن، اینورترهای چندسطحی هستند که با تولید ولتاژ خروجی پلکانی و نزدیک به ولتاژ سینوسی این مشکلات را کاهش می‌دهند و در عین حال باعث کاهش ریپل گشتاور و افزایش دینامیک سیستم می‌گردند [۶].

بزرگ‌ترین محدودیت استفاده از اینورترهای چندسطحی نیاز به تعداد کلیدهای نیمه‌هادی بیشتر و افزایش هزینه است. ساختارهای اصلی مبدل‌های چندسطحی عبارتند از کلمپ دیودی، خازن شناور و سری (اتصال آبشاری). اینورتر کلمپ دیودی سه سطحی (NPC) بهترین گزینه برای ولتاژهای پایین است که در آن از ۱۲ کلید قدرت و ۶ دیود استفاده شده است [۷].

کنترل میدان گرا^۱ (FOC) و کنترل مستقیم گشتاور^۲ (DTC) دو روش مناسب کنترلی می‌باشند که کاربرد صنعتی فراوانی در کنترل موتورهای القایی دارند [۸]. تاکنون روش‌های مختلف کنترل مستقیم گشتاور معرفی شده‌اند که از جمله معروف‌ترین آنها روش کلاسیک کنترل مستقیم گشتاور بر پایه جدول سوئیچینگ^۳ (ST-DTC) می‌باشد. الگوریتم‌هایی که از باندهای هیستریزس استفاده می‌کنند دارای مزایایی از قبیل پیاده‌سازی آسان و ساختار ساده می‌باشند [۹]. فقدان مدولاتور PWM و رگولاتور جریان باعث می‌شود که روش DTC دارای بار محاسباتی کمتری باشد [۱۰]. روش کنترل مستقیم گشتاور موتور القایی با استفاده از اینورترهای چندسطحی، علاوه بر کاهش ریپل گشتاور، فرکانس کلیدزنی و استرس ولتاژ روی کلیدها، درجات آزادی بیشتری را نیز در انتخاب بردار مناسب ولتاژ فراهم می‌آورد [۱۱].

در این مقاله برای بهره‌گیری از مزایای اینورترهای چندسطحی برای کنترل موتورهای ولتاژ پایین، اینورتر سه سطحی ده سوئیچه با روش کنترل مستقیم گشتاور پیشنهاد شده است. این اینورتر تنها ده سوئیچ دارد و به راحتی با استفاده از یک پل سه سوئیچه و دو ساق دوسوئیچه قابل پیاده‌سازی است و در مقایسه با سایر ساختارهای معمول اینورتر سه سطحی از نظر تعداد نیمه‌هادی، هزینه، وزن، حجم و پیاده‌سازی مطلوب‌تر می‌باشد [۱۲]. برای مقایسه کارکرد موتور با هر یک از اینورترهای دوسطحی، ده سوئیچه و NPC، الگوریتم‌های کنترل مستقیم گشتاور بر پایه جدول کلیدزنی

چکیده: در این مقاله ساختار جدید اینورتر سه سطحی ۱۰ سوئیچه برای کنترل سرعت موتور القایی سه فاز ولتاژ پایین پیشنهاد شده است. اینورتر ۱۰ سوئیچه مبدل سه سطحی سوئیچ کاهش یافته جدیدی است که نسبت به ساختارهای معمول اینورترهای سه سطحی مثل NPC، CHB و خازن شناور دارای تعداد ادوات نیمه‌هادی کمتری می‌باشد. در نتیجه دارای هزینه، حجم کمتر و کنترل پذیری مطلوب‌تری است و برای کاربردهای ولتاژ پایین مناسب می‌باشد. در این مقاله الگوریتم کنترل مستقیم گشتاور مبتنی بر جدول کلیدزنی برای کنترل اینورتر ده سوئیچه توسعه یافته و نتایج شبیه‌سازی آن با اینورتر دوسطحی و اینورتر سه سطحی NPC از جنبه‌های متفاوتی مقایسه شده‌اند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی، بهبود عملکرد موتور با استفاده از اینورتر ده سوئیچه را تأیید می‌نماید.

کلیدواژه: اینورترهای چندسطحی، کنترل سرعت موتور القایی، کنترل مستقیم گشتاور، متعادل سازی ولتاژ خازن‌ها.

۱- مقدمه

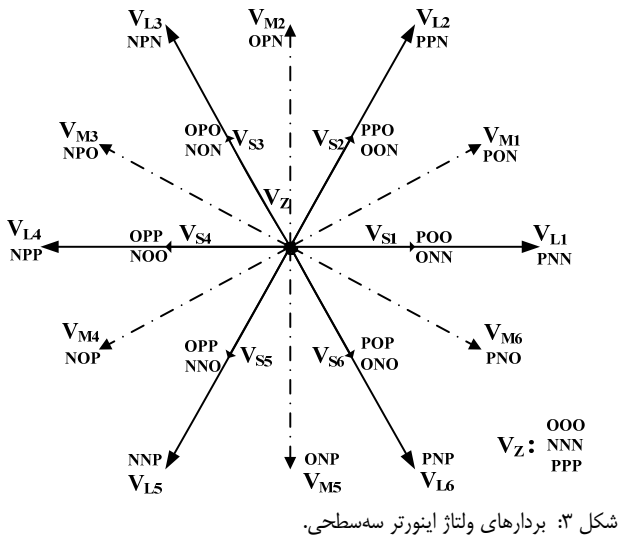
در حال حاضر استفاده از موتورهای القایی تغذیه شده با اینورتر در کاربردهای مختلف رشد وسیعی داشته و در حال توسعه است. در اکثر صنایع تمایل بسیاری برای استفاده از اینورتر منبع ولتاژ دوسطحی (VSI - 2L) برای کنترل موتورهای القایی توان بالا وجود دارد [۱]. با این وجود تغذیه موتورهای القایی توان پایین با ولتاژ کمتر از ۶۹۰ ولت با استفاده از VSI - 2L دارای محدودیت‌های بسیاری است که در ادامه به برخی از آنها اشاره خواهد شد. دلیل اصلی این محدودیت‌ها به ذات عملکرد اینورتر برمی‌گردد که در آن برای ساختن ولتاژ AC با فرکانس پایه متغیر از کلیدزنی پهنای باند ولتاژ DC بهره گرفته می‌شود [۲]. این پالس‌ها با دامنه تغییرات بزرگ و زمان صعود سریع منجر به مشکلات زیر می‌شوند [۳]:

- ۱) بسته به نوع کلیدزنی، بازده موتور به دلیل تلفات ناشی از هارمونیک‌ها کاهش یافته و دما، نویز و ارتعاشات آن افزایش می‌یابد [۳].
- ۲) برای اعمال ولتاژ نامی توسط اینورتر به موتور، ولتاژ لینک DC باید برابر ولتاژ نامی باشد. بنابراین اینورتر یک ولتاژ پالسی با زمان صعود سریع به موتور اعمال می‌کند که می‌تواند منجر به شکست عایقی و کاهش عمر موتور شود. خصوصاً در صورت استفاده از کابل بین موتور و اینورتر، پیک ولتاژ به موتور بسیار بزرگ‌تر می‌شود [۳].

این مقاله در تاریخ ۳۰ خرداد ماه ۱۳۹۲ دریافت و در تاریخ ۱۰ فروردین ماه ۱۳۹۶ بازنگری شد.

مهدی شاهپرستی، گروه مهندسی برق، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، (email: mshahparasti@yahoo.com).
محمد فرزی، گروه پژوهشی منابع تغذیه صنعتی، پژوهشکده برق جهاد دانشگاهی، تهران، (email: mfarzi@jdevs.com).

1. Field-Oriented Control
2. Direct Torque Control
3. Switching Table-DTC



جدول ۱: تعریف حالت‌های کلیدزنی برای اینورتر NPC.

حالت کلیدزنی	S_1	S_2	S_3	S_4	کد حالت کلیدزنی (S_x)
P	on	on	off	off	۲
O	off	on	on	off	۱
N	off	off	on	on	۰

جدول ۲: بردارهای ولتاژ اینورتر NPC.

	V_{L1}	V_{L2}	V_{L3}	V_{L4}	V_{L5}	V_{L6}
P-type	POP	OPO	PNP	PPN	ONP	PNP
N-type	ONN	NON	ONO	NOO	NNO	ONO

$$\Delta \bar{\Psi}_s = (\bar{V}_s - R_s \bar{i}_s) \Delta t \approx \bar{V}_s \Delta t \quad (2)$$

همچنین (۱) نشان می‌دهد نوسانات شار استاتور بر نوسانات گشتاور موتور نیز مؤثر است. زاویه شار روتور جهت محاسبه سکتور با (۳) مشخص می‌شود

$$\theta_s = \arctan \frac{\psi_{sq}}{\psi_{sd}} \quad (3)$$

نمای کلی روش DTC در شکل ۱ آمده است. بردار ولتاژ مورد نظر از جدول سوئیچینگ با توجه به خطای شار و گشتاور انتخاب می‌شوند. شار استاتور و گشتاور موتور با استفاده از جریان‌های استاتور، سیگنال‌های کنترلی و ولتاژ لینک DC تخمین زده می‌شوند.

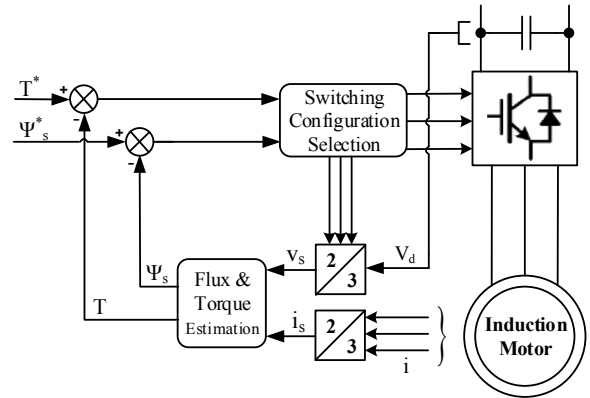
۲-۲ کنترل مستقیم گشتاور با اینورتر سه سطحی

اینورتر سه سطحی NPC در شکل ۲ نشان داده شده که هر ساق آن ۴ کلید و ۳ حالت کلیدزنی دارد که در جدول ۱ آمده است. با توجه به این که هر ساق اینورتر دارای ۳ حالت کلیدزنی می‌باشد در نتیجه در مجموع ۲۷ حالت کلیدزنی نشان داده شده در شکل ۳ و جدول ۲ به چهار دسته زیر قابل تقسیم‌بندی هستند [۷]:

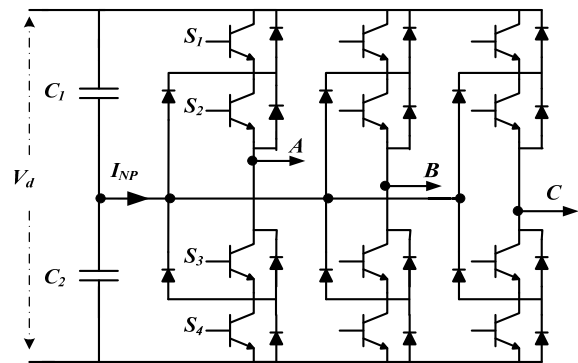
(۱) بردار صفر: (V_Z) با اندازه صفر

(۲) بردارهای کوتاه: (V_{S1} تا V_{S6}) با اندازه $V_d/3$ و حالت کلیدزنی

(۳) بردارهای متوسط: (V_{M1} تا V_{M6}) با اندازه $\sqrt{3}V_d/3$



شکل ۱: نمای کلی روش DTC.



شکل ۲: اینورتر سه سطحی NPC.

پیشنهاد شده که در عین کنترل دور موتور، قادر به حفظ تعادل ولتاژهای لینک DC هستند.

در ادامه در بخش ۲ روش ST-DTC برای اینورتر سه سطحی ده‌سوئیچ به توسعه داده می‌شود و در بخش ۳ الگوریتم پیشنهادی جهت متعادل کردن ولتاژ خازن‌ها معرفی می‌شود. در بخش ۴ نیز نتایج حاصل از شبیه‌سازی کنترل مستقیم گشتاور با استفاده از اینورتر دوسطحی، اینورتر ده‌سوئیچ و اینورتر NPC ارائه گردیده و با یکدیگر مقایسه خواهند شد و در نهایت در بخش پنجم نتایج حاصل از این مقاله بیان خواهد شد.

۲- کنترل مستقیم گشتاور

۱-۲ معادلات موتور القایی و تخمین پارامترها

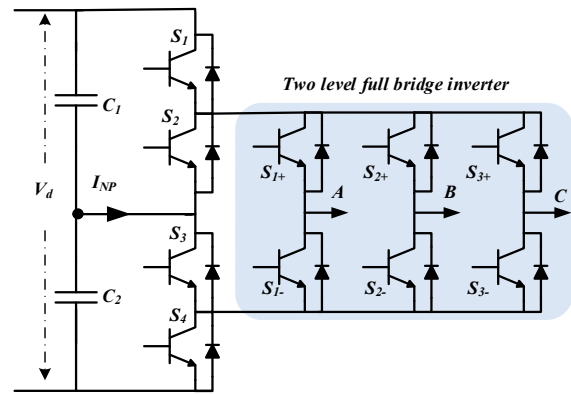
معادلات موتور القایی با مجموعه (۱) در چارچوب مرجع ساکن تعریف می‌شوند [۱۳]

$$\begin{aligned} \bar{V}_s &= R_s \bar{I}_s + \frac{d\bar{\Psi}_s}{dt} \\ \bar{V}_r &= R_r \bar{I}_r + \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} - j\omega_m \bar{\Psi}_r \\ T_e &= \frac{3}{2} \frac{P}{\sigma} \frac{L_m}{L_s L_r} (\bar{\Psi}_s \cdot j\bar{\Psi}_r) = \frac{3}{2} \frac{P}{\sigma} (\bar{I}_s \cdot j\bar{I}_r) = \\ &= \frac{3}{2} \frac{P}{\sigma} (\psi_{sd} i_{sd} - \psi_{sq} i_{sq}) \\ \sigma &= 1 - \frac{L_m}{L_s L_r} \end{aligned} \quad (1)$$

با صرف نظر از افت ولتاژ روی مقاومت استاتور رابطه بین نوسانات شار استاتور و بردار فضایی ولتاژ استاتور به صورت (۲) خواهد بود

جدول ۳: تعریف حالت‌های کلیدزنی اینورتر ده سوئیچه.

حالت کلیدزنی	S_1	S_2	S_3	S_4	
L	on	off	off	on	
P	on	off	on	off	ساق
N	off	off	on	on	چهارسوئیچه
Z	off	on	on	off	
		S_{i+}	S_{i-}		
P	on		off		بخش پل
N	off		on		اینورتری دوسطحی



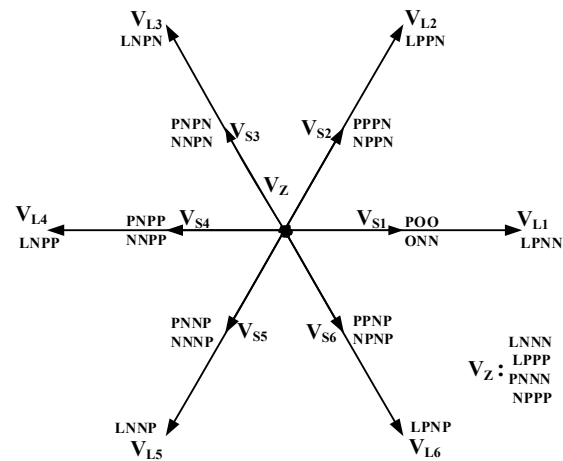
شکل ۴: اینورتر ده سوئیچه.

جدول ۴: بردارهای ولتاژ اینورتر ده سوئیچه.

	V_{L1}	V_{L2}	V_{L3}	V_{L4}	V_{L5}	V_{L6}
	LPNN	LPPN	LNPN	LNPP	LNNP	LPNP
	V_{S1}	V_{S2}	V_{S3}	V_{S4}	V_{S5}	V_{S6}
P-type	PPNN	PPPNN	PNPN	PNPP	PNNP	PPNP
N-type	NPNN	NPPN	NNPN	NNPP	NNNP	NPNP

جدول ۵: الگوی کلیدزنی برای اینورتر ده سوئیچه و NPC (i شماره سکتور).

X_T	$\downarrow\downarrow (-2)$	$\downarrow (-1)$	$\uparrow (+1)$	$\uparrow\uparrow (+2)$
X_ψ				
$\uparrow (+1)$	$V_{L_{i-1}}$	$V_{S_{i-1}}$	$V_{S_{i+1}}$	$V_{L_{i+1}}$
$\downarrow (-1)$	$V_{L_{i+1}}$	$V_{S_{i+1}}$	$V_{S_{i-1}}$	$V_{L_{i-1}}$



شکل ۵: بردارهای ولتاژ اینورتر ده سوئیچه.

۴ سطحی $(X_T: -2, -1, 1, 2)$ استفاده می‌شود. برای همه اینورترها از یک مقایسه‌کننده ۲ سطحی $(X_\psi: -1, 1)$ در کانال کنترل شار استفاده شده است. در اینورترهای ده سوئیچه و سه سطحی از استفاده از بردارهای صفر به علت کمبود آنها صرف نظر شده است. با توجه به فرمان‌های شار و گشتاور $(X_T$ و $X_\psi)$ و همچنین سکتور محاسبه شده از (۳) از جدول ۵ وضعیت کلیدهای اینورتر NPC و اینورتر ده سوئیچه تعیین می‌شود. همچنین جدول ارائه شده در [۱۵] برای اینورتر دوسطحی استفاده شده است.

۳- الگوریتم متعادل کردن ولتاژ خازن‌ها

در روش کنترل مستقیم گشتاور مشکل نامتعادلی ولتاژ خازن‌های لینک DC برای هر دو اینورترهای NPC و ده سوئیچه به وجود می‌آید. عدم تعادل ولتاژ خازن‌ها باعث بالا رفتن استرس ولتاژ روی کلیدها و افزایش احتمال آسیب دیدن ادوات [۱۶]، ایجاد هارمونیک‌های مرتبه پایین، نوسانات گشتاور نامطلوب و کاهش راندمان [۱۷] خواهد شد. تاکنون روش‌های گوناگونی برای حل مشکل انحراف ولتاژ نقطه خنثی در اینورتر NPC معرفی شده است [۱۶] و [۱۸].

در یک اینورتر سه سطحی انحراف ولتاژ (Δv) به صورت (۴) تعریف می‌شود

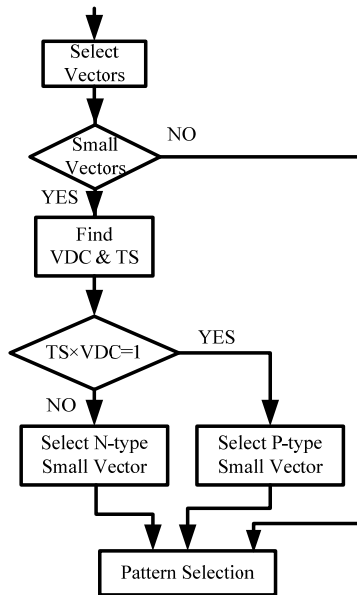
$$\Delta v = V_{C1} - V_{C2} \quad (4)$$

در این رابطه V_{C1} و V_{C2} ولتاژ خازن‌های لینک DC هستند. طبق بررسی‌های انجام شده در [۱۹] و بر طبق شکل ۶ مشخص شده است که بردارهای بلند و صفر بر عدم تعادل ولتاژ خازن‌های لینک DC تأثیر ندارند و اثر بردارهای متوسط با توجه به شرایط کار موتور متفاوت بوده و

(۴) بردارهای بلند: $(V_{L2}$ تا $V_{L6})$ با اندازه $2V_d/3$ تاکنون در الگوریتم‌های DTC ارائه شده در مقالات با توجه به اقتضای کاربرد از ترکیب بردارهای متفاوت استفاده شده است. مثلاً برای رفع مشکل انحراف ولتاژ لینک DC از بردارهای کوتاه و بلند استفاده شده و از بردار صفر به علت ماهیت دینامیک کند آن و همچنین از بردارهای متوسط تأثیر تصادفی بر ولتاژ خازن‌ها صرف نظر می‌شود [۱۴].

اینورتر سه سطحی ده سوئیچه در شکل ۴ نشان داده شده است. این اینورتر با ترکیب یک پل اینورتری ۶ سوئیچه و یک ساق چهارسوئیچه قابل پیاده‌سازی است و ساخت آن در مقایسه با دیگر اینورترهای سه سطحی ساده‌تر می‌باشد. در جدول ۳ تعریف حالت‌های کلیدزنی این اینورتر ارائه شده که در آن ساق چهارسوئیچه با چهار حالت کلیدزنی متفاوت باعث اعمال چهار سطح ولتاژ به بخش پل اینورتر می‌گردد و پل اینورتر دارای هشت کلیدزنی متفاوت است. در نتیجه از ترکیب کلیدزنی این دو بخش در کل ۱۹ حالت کلیدزنی متشکل از ۶ بردار بلند (V_L) ، ۱۲ بردار کوتاه (V_S) و یک بردار صفر (V_Z) است که بردار صفر به صورت‌های متفاوتی قابل پیاده‌سازی است. جدول ۴ و شکل ۵ بردارهای ولتاژ اینورتر ده سوئیچه را نشان می‌دهند که دیگر مشکل حضور بردارهای متوسط در NPC برای انحراف ولتاژ لینک DC وجود نخواهد داشت و با همان کیفیت اینورتر NPC می‌توان موتور را کنترل کرد. در عین حال تعداد سوئیچ‌ها و در نتیجه حجم، وزن و هزینه سیستم کاهش یافته است.

در این مقاله طبق شکل ۱ از (۱) تا (۳)، جهت تخمین شار و گشتاور استفاده می‌شود. برای کنترل مستقیم گشتاور در کانال کنترل گشتاور با استفاده از اینورتر دوسطحی از یک مقایسه‌کننده سه سطحی $(X_T: -1, 0, 1)$ و برای اینورتر ده سوئیچه و NPC از یک مقایسه‌کننده



شکل ۸: روندنمای الگوریتم پیشنهادی [۱۴].

جدول ۶: پارامترهای موتور القایی شبیه‌سازی.

Rated machine power	۳٫۸ kW
Rated speed	۱۷۵۰ rpm
Rated voltage	۴۶۰ V
Rated frequency	۶۰ Hz
Stator resistance (Rs)	۱٫۱۵ Ω
Rotor resistance (R'r)	۱٫۰۸۳ Ω
Stator inductance (Ls)	۰٫۲۰۹۶۷ H
Rotor inductance (L'r)	۰٫۲۰۹۶۷ H
Mutual inductance (Lm)	۰٫۲۰۳۷ H
Pole pairs (p)	۲
Inertia (J)	۰٫۱۰۲ kg.m ^۲
Friction coefficient (Kf)	۰٫۱۰۰۵۷ N.m.s/rd

فرمان کنترل گر می‌باشد. هرگاه انحراف ولتاژ از محدوده مثبت خارج شود $(\Delta v > +v_c)$ آن گاه خروجی کنترل گر +۱ خواهد شد $(VDC = +1)$ و برعکس.

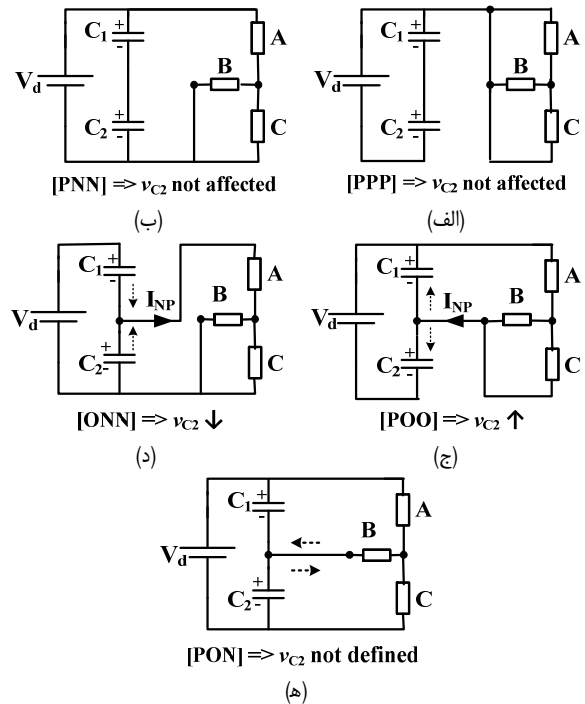
برای تعیین حالت ژنراتوری یا موتوری ماشین از گشتاور تخمین زده شده در (۱) استفاده می‌کنیم. بنابراین متغیری به نام علامت گشتاور (TS) مطابق (۷) تعریف می‌کنیم

$$T_e > 0 \Rightarrow TS = 1, \quad T_e < 0 \Rightarrow TS = -1 \quad (7)$$

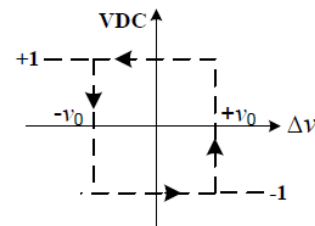
شکل ۸ شمای عملیاتی الگوریتم پیشنهادی جهت متعادل کردن ولتاژ خازن‌ها را نشان می‌دهد. ابتدا بردارهای کلیدزنی طبق جدول ۵ معین می‌گردد و در صورت انتخاب بردار کوتاه طبق شکل ۸ بردار کوتاه مناسب با توجه به علامت متغیر $TS \times VDC$ انتخاب خواهد شد.

۴- نتایج شبیه‌سازی

جهت مقایسه اینورترهای دوسطیحی، اینورتر سه‌سطیحی ده‌سویچ‌چه و اینورتر سه‌سطیحی NPC در کنترل مستقیم گشتاور، موتور با مشخصات مندرج در جدول ۶ برای شبیه‌سازی انتخاب شده است. شبیه‌سازی در



شکل ۶: اثر حالت‌های کلیدزنی بر انحراف ولتاژ نقطه خنثی، (الف) Zero Vector، (ب) Large Vector، (ج) P-Type Small Vector، (د) N-Type Small Vector و (ه) Medium Vector.



شکل ۷: کنترل گر هیستریز دوسطیحی جهت کنترل انحراف ولتاژ.

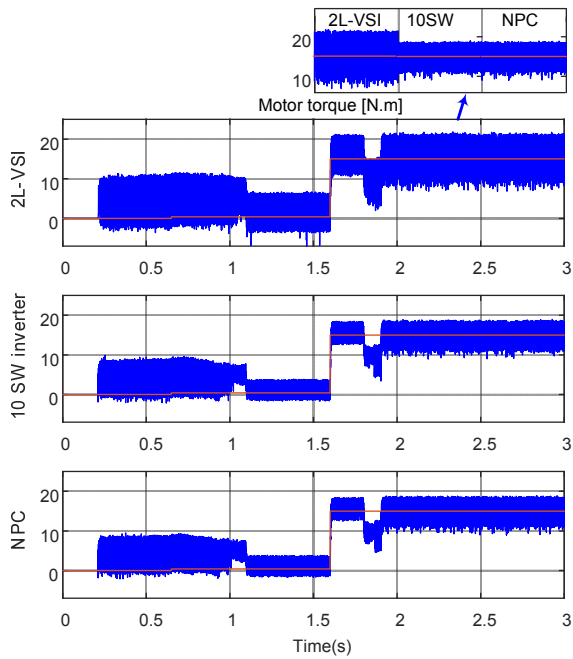
مشخص نمی‌باشد. بردارهای کوتاه مطابق جداول ۲ و ۴ دارای دو حالت کلیدزنی گروه P-Type و گروه N-Type هستند. همچنین شکل‌های ۶-ج و ۶-د نشان می‌دهند اعمال هر دسته از بردارهای کوتاه بر انحراف ولتاژ نقطه خنثی اثر می‌کند اما جهت تأثیر آنها مخالف یکدیگر است. بنابراین در حالت موتوری تغییرات ولتاژ به شرح زیر خواهد بود

$$\begin{aligned} \text{Applying P-Type small vector} &\Rightarrow V_{Cv} \uparrow \ \& \ \Delta v \downarrow \\ \text{Applying N-Type small vector} &\Rightarrow V_{Cv} \downarrow \ \& \ \Delta v \uparrow \end{aligned} \quad (5)$$

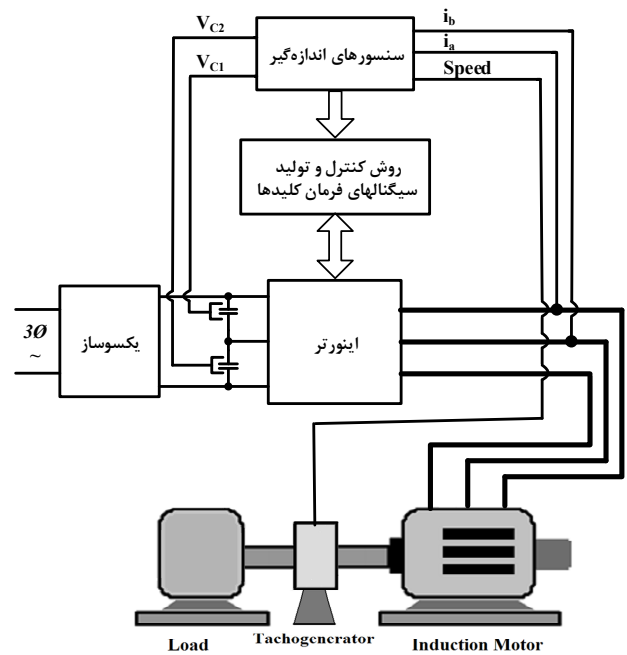
چنانچه ماشین در حالت ژنراتوری باشد جهت جریان در پایانه‌های ماشین خلاف حالت موتوری خواهد بود و در نتیجه اثرگذاری بردارهای کوتاه در حالت موتوری و ژنراتوری عکس یکدیگر است. بنابراین در حالت ژنراتوری تغییرات ولتاژ به صورت (۶) خواهد بود

$$\begin{aligned} \text{Applying P-Type small vector} &\Rightarrow V_{Cv} \downarrow \ \& \ \Delta v \uparrow \\ \text{Applying N-Type small vector} &\Rightarrow V_{Cv} \uparrow \ \& \ \Delta v \downarrow \end{aligned} \quad (6)$$

برای کنترل مقدار انحراف ولتاژ نقطه خنثی (Δv) ابتدا یک کنترل گر هیستریز دوسطیحی جهت کنترل انحراف ولتاژ در محدوده معین $(+v_c, -v_c)$ که در شکل ۷ نشان داده شده است تعریف می‌شود. در شکل ۷، Δv انحراف ولتاژ نقطه خنثی تعریف شده در (۴) و VDC^1



شکل ۱۱: گشتاور موتور.



شکل ۹: شماتیک کلی سیستم کنترل سرعت.

می‌دهد. مشاهده می‌شود در هر سه ساختار سرعت مرجع به درستی دنبال شده است. گشتاور مرجع و گشتاور موتور برای هر سه ساختار در شکل ۱۱ آمده است. این نتایج نشان می‌دهند که ریبیل گشتاور با استفاده از اینورترهای ۱۰ سوئیچه و سه‌سطحی NPC با هم یکسان بوده و بسیار کمتر از اینورتر دوسطحی است.

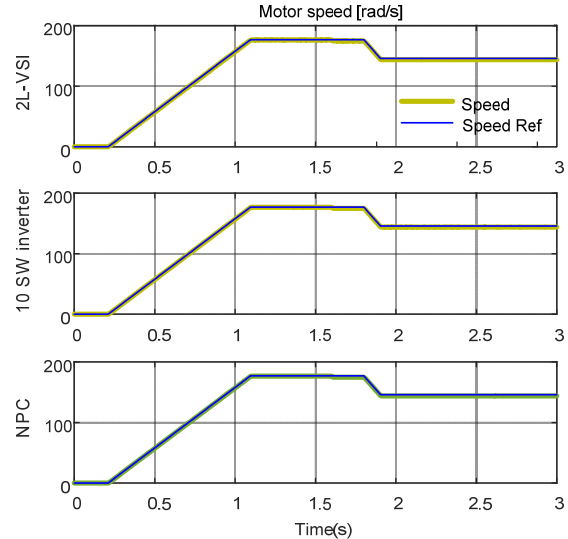
جریان استاتور موتور در شکل ۱۲ نشان داده شده است. از شکل ۱۳ مشاهده می‌شود ریبیل جریان موتور برای اینورترهای ۱۰ سوئیچه و سه‌سطحی NPC تقریباً با یکدیگر یکسان بوده و کمتر از اینورتر دوسطحی می‌باشد. ولتاژ خط به خط اعمالی به استاتور برای هر سه مبدل در شکل ۱۳ نشان داده شده و با توجه به سه‌سطحی بودن ولتاژ در ساختارهای ده‌سوئیچه و NPC کاهش ریبیل جریان و گشتاور در این ساختارها تضمین می‌شود.

برای بررسی دقیق‌تر وضعیت ولتاژ اعمالی و جریان موتور، طیف هارمونیک آنها به ازای سه اینورتر در شکل ۱۴ نشان داده است. مقدار مؤثر ولتاژ خط هر سه اینورتر یکسان و حدود ۴۲۴ ولت می‌باشد و THD ولتاژ خط برای اینورتر ۱۲٪ و برای اینورتر ده‌سوئیچه و NPC حدود ۷٪ می‌باشد. مشاهده می‌شود THD اینورترهای سه‌سطحی ۴۰ درصد کمتر از اینورتر دوسطحی است که منجر به اعمال تنش کمتر به موتور می‌شود و نیاز به فیلتر را برطرف می‌سازد. این بهبود به صورت دقیق‌تر در THD جریان موتور قابل مشاهده است که در آن THD جریان خط برای اینورترهای دوسطحی، ده‌سوئیچه و NPC به ترتیب ۶۸٪، ۲۲٪ و ۱۶٪ است.

برای بررسی کارایی الگوریتم ارائه شده برای کنترل انحراف ولتاژ نقطه خنثی، انحراف ولتاژ لینک DC در شکل ۱۵ نشان داده شده و مشاهده می‌شود انحراف ولتاژ در باند مرجع خود یعنی ± 1.5 ولت کنترل می‌گردد.

۴-۲ بازده

کلیدهای نیمه‌هادی اصلی‌ترین عامل اتلاف انرژی در یک مبدل الکترونیک قدرت هستند چون عناصر دیگر مانند خازن و سلف مصرف‌کننده توان اکتیو نیستند. در مبدل‌های مطرح‌شده در این مقاله از ترکیب IGBT و دیود برای واقعی‌سازی کلیدها استفاده شده است. تلفات

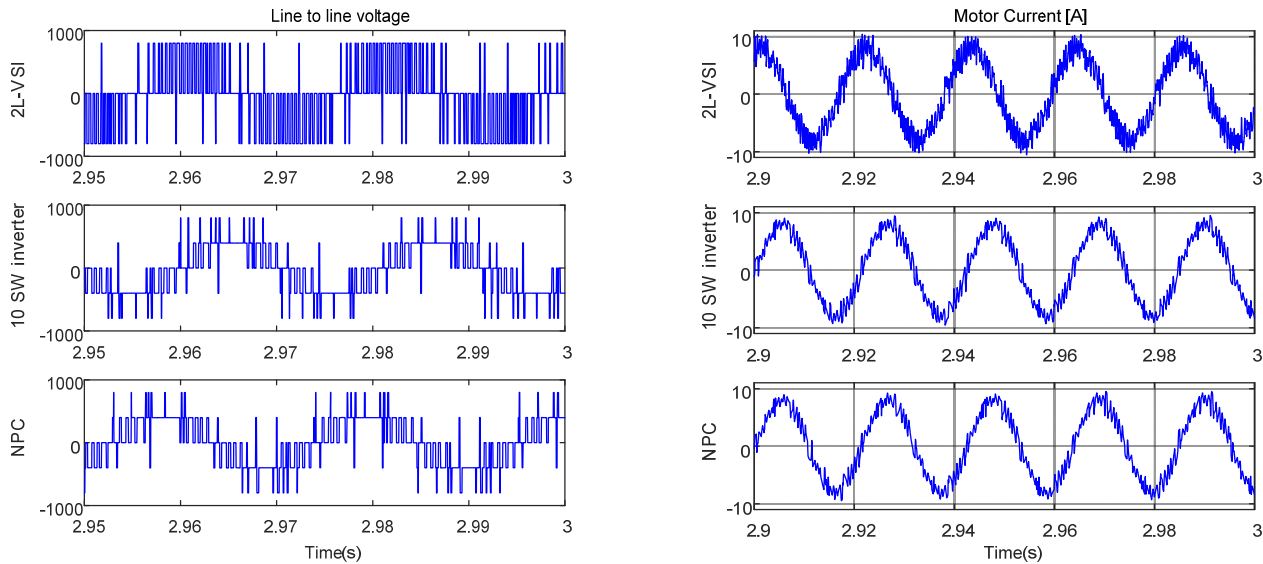


شکل ۱۰: سرعت موتور.

محیط $\text{SimPowerSystems}^{\text{TM}}$ نرم‌افزار متلب انجام می‌شود. ولتاژ لینک DC، مقاومت داخلی و همچنین خازن لینک DC برای همه اینورترها به ترتیب ۸۰۰ ولت، ۰/۰۰۱ اهم و ۱۰۰۰ میکروفاراد در نظر گرفته شده است. شکل ۹ شماتیک کلی سیستم کنترل سرعت موتور القایی را نشان می‌دهد که در آن سرعت موتور، جریان موتور و ولتاژ خازن‌های لینک DC اندازه‌گیری و به بخش کنترل فرستاده می‌شوند. در بخش کنترل، سیگنال‌های فرمان کلیدها بر اساس روش کنترل مستقیم گشتاور تعیین شده و به اینورتر اعمال می‌شود. در ادامه در بخش اول نتایج شبیه‌سازی زمانی برای مقایسه عملکرد مبدل‌ها در ردیابی سرعت مرجع، ریبیل گشتاور، وضعیت ولتاژ اعمالی به موتور و جریان موتور نمایش داده خواهد شد. برای مقایسه مبدل‌های الکترونیک قدرت هزینه و بازده اصلی‌ترین معیارهای مقایسه هستند که در بخش دوم و سوم به آنها پرداخته می‌شود.

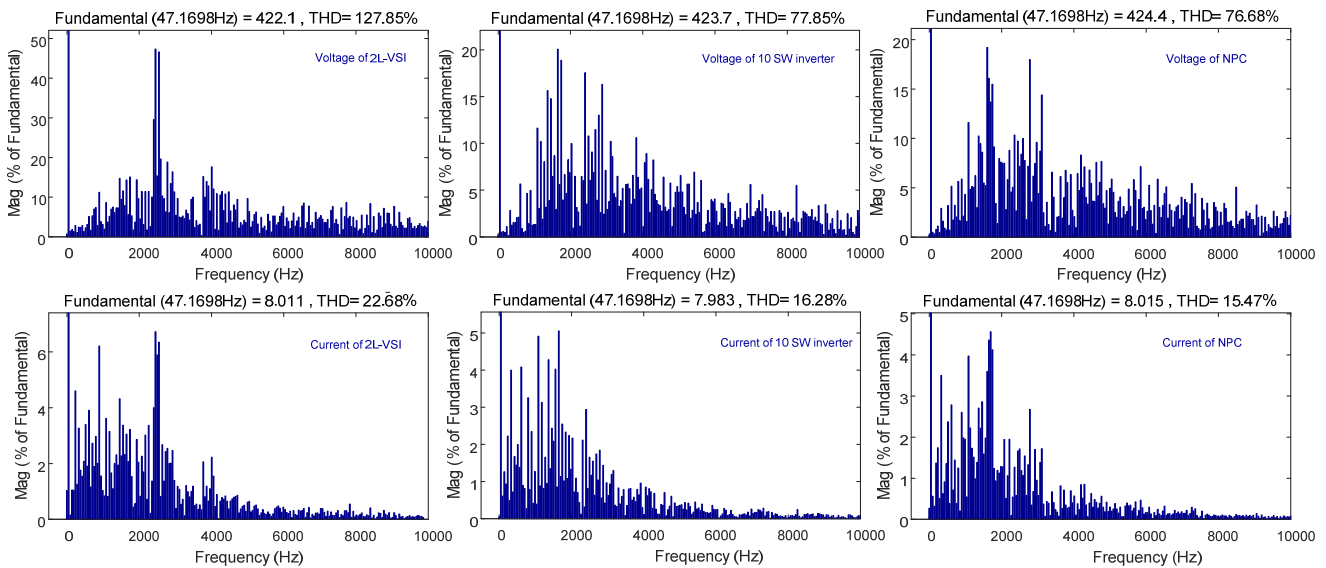
۴-۱ ردیابی سرعت مرجع

شکل ۱۰ سرعت موتور مورد استفاده با استفاده از سه اینورتر را نشان

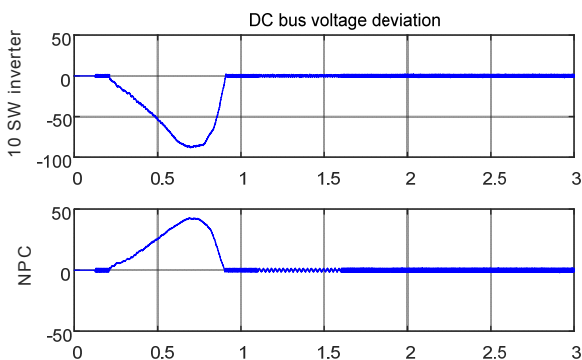


شکل ۱۳: ولتاژ خط به خط اعمالی به موتور.

شکل ۱۲: جریان موتور.



شکل ۱۴: مقایسه طیف هارمونیک ولتاژ و جریان خروجی مبدل‌ها.



شکل ۱۵: انحراف ولتاژ خازن‌های DC ($V_{C1} - V_{C2}$).

کلید را می‌توان به دو بخش هدایتی و کلیدزنی تقسیم کرد که میزان تلفات بستگی به پارامترهای داخلی کلید، ولتاژ قطع و جریان کلید در حالت روشن دارد. تلفات IGBT و دیود از رابطه زیر قابل محاسبه است [۲۰]

$$P_{IGBT} = \frac{E_{on} + E_{off} + E_{cond}}{T_{sw}} \quad (8)$$

$$P_{diode} = \frac{E_{off} + E_{cond}}{T_{sw}}$$

که در آن T_{sw} پریود کلیدزنی، E_{on} انرژی تلف‌شده در زمان روشن‌شدن، E_{off} انرژی تلف‌شده در زمان خاموش‌شدن و E_{cond} تلفات هدایتی هستند. این مقادیر بر درون‌یابی نمودارهای ارائه‌شده در برگه مشخصات و ولتاژ و جریان کلید به صورت آنلاین قابل محاسبه هستند.

با توجه به ولتاژ لینک DC، برای اینورتر NPC ولتاژ قطع کلیدها نصف ولتاژ لینک DC است، بنابراین با در نظر گرفتن ضریب اطمینان ۱/۵ برای پوشش‌دادن اضافه ولتاژهای گذرای ناشی از سلف پارازیتی مدار، یک کلید ۶۰۰ ولتی گزینه مناسب است. در اینورتر دوسطحی کلیدها باید قابلیت قطع کل ولتاژ لینک DC را داشته باشند، در نتیجه کلید ۱۲۰۰ ولتی

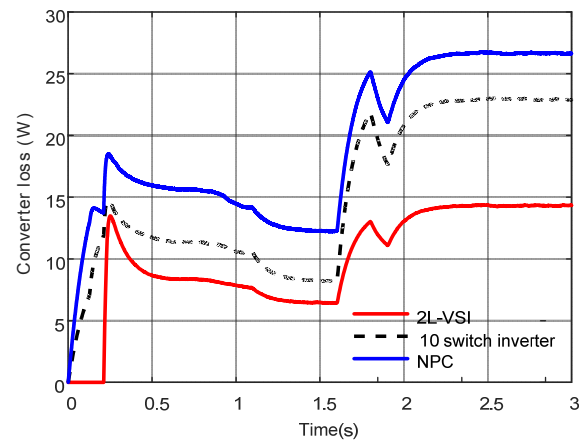
مناسب است. برای اینورتر ۱۰ سوئیچ ۶ کلید پل اینورتری ۱۲۰۰ ولتی و ۴ کلید دیگر ۶۰۰ ولتی انتخاب می‌شوند. برای مقایسه بازده این مبدل‌ها، در محیط نرم‌افزار متلب مشخصات کلیدها وارد شده است و تلفات مبدل‌ها بر اساس درون‌یابی نمودارها محاسبه شده است. در این شبیه‌سازی‌ها از کلید Fuji ۲ MBI ۵۰F_۱۲۰ (کلید ۱۲۰۰ ولت- ۵۰ آمپر) برای اینورتر دوسطحی استفاده شده است. برای مبدل NPC از کلید Fuji ۲ MBI ۵۰F_۰۶۰ (کلید ۶۰۰ ولت- ۵۰ آمپر) استفاده شده که

جدول ۷: TSDP سه ساختار.

TSDP	ساختار
۴۸۰۰۰	اینورتر دوسطحی
۵۴۴۰۰	اینورتر ۱۰ سوئیچه
۶۰۰۰۰	اینورتر NPC

مراجع

- [1] J. Li, H. P. Ren, and Y. R. Zhong, "Robust speed control of induction motor drives using first-order auto-disturbance rejection controllers," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 51, no. 1, pp. 712-720, Jan./Feb. 2015.
- [2] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, John Wiley & Sons, 2003.
- [3] WEG, *Induction Motors Fed by PWM Frequency Inverters: Technical Guide*, www.weg.net.
- [4] A. Edpuganti and A. K. Rathore, "Optimal pulsewidth modulation for common-mode voltage elimination scheme of medium-voltage modular multilevel converter-fed open-end stator winding induction motor drives," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 1, pp. 848-856, Jan. 2017.
- [5] A. H. Bonnett, "Analysis of the impact of pulse-width modulated inverter voltage waveforms on AC induction motors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 32, no. 2, pp. 386-392, Mar./Apr. 1996.
- [6] R. Teichmann and S. Bernet, "A comparison of three-level converters versus two-level converters for low voltage drives, traction and utility applications," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 41, no. 3, pp. 855-865, May/June. 2005.
- [7] B. Wu, *High-Power Converters and AC Drives*, Wiley-IEEE Press, 2006.
- [8] N. Mohan, *Advanced Electric Drives: Analysis, Control, and Modeling Using MATLAB/Simulink*, 1st Edition: John Wiley & Sons, 2014.
- [9] K. Lee, J. H. Song, I. Choy, and J. Y. Yoo, "Torque ripple reduction in DTC of induction motor driven by three-level inverter with low switching frequency," *IEEE Trans. on Power Elec.*, vol. 17, no. 2, Mar. 2002.
- [10] I. M. Alsofyani and N. R. N. Idris, "Look-up table-based DTC of induction machines with improved flux regulation and extended kalman filter state estimator at low-speed operation," *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, vol. 12, no. 4, pp. 1412-1425, Aug. 2016.
- [11] S. Kouro, J. Rebolledo, and J. Rodriguez, "Reduced switching-frequency-modulation algorithm for high-power multilevel inverters," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 5, pp. 2894-2901, Oct. 2007.
- [12] L. Mihalache, "A hybrid 2/3 level converter with minimum switch count," in *Proc. Conf. of the 2006 IEEE Industry Applications Conf. Forty-First IAS Annual Meeting*, vol. 2, pp. 611-618, Tampa, FL, USA, Oct. 2006.
- [13] P. Krause, O. Wasynczuk, S. D. Sudhoff, and S. Pekarek, *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*, 3rd Edition: Wiley-IEEE Press, 2013.
- [14] ع. صادقی، م. شاهپرستی، م. محمدیان و ع. یزدیان، "الگوریتم جدید کلیدزنی جهت جبران سازی انحراف ولتاژ خازن های لینک DC اینورتر NPC در روش کنترل مستقیم گشتاور موتور القایی سه فاز،" *نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران*، سال ۹، شماره ۱، صص. ۴۵-۵۱، بهار ۱۳۹۰.
- [15] م. شاهپرستی، ع. صادقی لاریجانی، ع. یزدیان ورجانی و م. محمدیان، "کنترل مستقیم گشتاور موتور القایی با استفاده از اینورتر منبع امپدانس،" *دوازدهمین کنفرانس دانشجویی مهندسی برق، تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز*، صص. ۱۳۸۸.
- [16] Z. Mohzani, B. P. McGrath, and D. G. Holmes, "A generalized natural balance model and balance booster filter design for three-level neutral-point-clamped converters," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 51, no. 6, pp. 4605-4613, Nov./Dec. 2015.
- [17] Y. S. Lai, Y. K. Chou, and S. Y. Pai, "Simple PWM technique of capacitor voltage balance for three-level inverter with DC-link voltage sensor only," in *Proc. 33rd Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON'07*, vol. 1, pp. 1749-1754, Nov. 2007.



شکل ۱۶: تلفات مبدل ها.

۶ عدد از آنها فرمان صفر دریافت می کنند و صرفاً به صورت دیود مورد استفاده قرار می گیرند و برای اینورتر ده سوئیچه ۶ کلید Fuji ۲ MBI ۵۰F_۰۶۰ و ۴ کلید Fuji ۲ MBI ۵۰F_۱۲۰ استفاده شده است. تلفات مبدل ها طی مدت شبیه سازی در شکل ۱۶ نشان داده شده است. از شکل مشاهده می شود تلفات اینورتر ده سوئیچه حدود ۲۵ درصد کمتر از مبدل NPC و حدود ۵۰ درصد بیش از مبدل دوسطحی است.

۳-۴ هزینه قطعات نیمه هادی مبدل ها

برای مقایسه هزینه این ساختارها از نرخ توان ادوات نیمه هادی TSDP^۱ طبق (۹) استفاده می شود [۲۱]

$$TSDP = \sum_{j=1}^N C_j V_{sj} I_{sj} \quad (9)$$

که N تعداد ادوات کلیدزنی، V_{sj} استرس ولتاژ و I_{sj} استرس جریان وارد بر کلیدها می باشد. C_{sj} ضریبی است که برای کلید قدرت ۱ و برای دیود ۰/۵ در نظر گرفته می شود. نتیجه محاسبه TSDP برای هر سه اینورتر در جدول ۷ ارائه شده است. از مقادیر جدول ۷ دیده می شود نرخ توان ادوات نیمه هادی اینورتر ده سوئیچه حدود ۱۰ درصد کمتر از اینورتر NPC است.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله اینورتر ده سوئیچه سه سطحی جهت کنترل موتور القایی با استفاده از روش کنترل مستقیم گشتاور ارائه شد. یک الگوریتم حلقه بسته جهت کنترل سرعت موتور و انحراف ولتاژ نقطه خنثی خازن های لینک DC پیشنهاد گردید.

از نتایج شبیه سازی مشاهده می شود که اینورتر ده سوئیچه به خوبی قادر به ردیابی سرعت مرجع می باشد و ریبیل گشتاور و ریبیل جریان موتور برای اینورتر دوسطحی کمتر از اینورتر دوسطحی است و مشابه اینورترهای سه سطحی معمول است. از لحاظ بازده، اینورتر ده سوئیچه دارای تلفات کمتر از اینورتر سه سطحی معمول و بیشتر از اینورتر دوسطحی است. همچنین نرخ توان ادوات نیمه هادی اینورتر ده سوئیچه کمتر از اینورتر سه سطحی است. ولتاژ خروجی اینورتر ده سوئیچه مشابه با اینورترهای سه سطحی معمول نزدیک تر به شکل موج سینوسی است و در نتیجه امکان تغذیه موتورهای ولتاژ پایین با هزینه کمتر و بازده بالاتر میسر می باشد.

محمد فرزی در سال ۱۳۷۴ مدرک کارشناسی مهندسی برق الکترونیک خود را از دانشگاه علم و صنعت و در سال ۱۳۸۶ مدرک کارشناسی ارشد مدیریت اجرایی خود را از همین دانشگاه دریافت نمود. از سال ۱۳۷۴ الی ۱۳۸۵ نامبرده به عنوان کارشناس ارشد طراحی و تولید در جهاد دانشگاهی واحد علم و صنعت به کار مشغول بوده و از سال ۱۳۸۵ تا کنون به عنوان هیأت علمی و مدیر پروژه‌های پژوهشی متعدد فعالیت‌های علمی خود را در پژوهشکده برق جهاد دانشگاهی دنبال کرده است و اینک نیز با عنوان مدیر گروه پژوهشی منابع تغذیه در این پژوهشکده مشغول به فعالیت می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان عمدتاً حوزه الکترونیک قدرت شامل موضوعاتی مانند مبدل‌های الکترونیک قدرت، کنترل دور موتورهای الکتریکی، سیستم رانش در قطارهای مترو، رکتیفایرهای جریان بالا و اینورترهای متصل به شبکه است.

- [18] H. du Toit Mouton, "Natural balancing of three-level neutral-point-clamped PWM inverters," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 5, pp. 1017-1025, Oct. 2002.
- [19] A. Sadeghi, M. Mohamadian, M. Shahparasti, and A. Fatemi, "A new switching algorithm for voltage balancing of a three-level NPC in DTC drive of a three-phase IM," in *Proc. of IEEE Twenty-Eighth Annual Applied Power Electronics Conf. and Exposition, APEC'13*, pp. 489-495, Long Beach, CA, USA, Mar. 2013.
- [20] Semiconductor Components Industries, *AND9140/D, Application Note for Thermal Calculations for IGBTs*, Apr. 2014, <http://onsemi.com>.
- [21] S. M. Dehghan, M. Mohamadian, and A. Y. Varjani, "A new variable-speed wind energy conversion system using permanent-magnet synchronous generator and Z-source inverter," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 24, no. 3, pp. 714-724, Sept. 2009.

مهدي شاهپرستي تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق قدرت در سال ۱۳۸۶ از دانشگاه بیرجند و در مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۸ و ۱۳۹۳ از دانشگاه تربیت مدرس به پایان رسانده است و هم‌اکنون استادیار گروه مهندسی برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق، تهران می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی موردعلاقه ایشان عبارتند از: منابع تغذیه بدون وقفه، اینورترهای موزاری و کاربرد الکترونیک قدرت در منابع تولید پراکنده.