

بررسی اثرات نحوه کلیدزنی در تکنیک کنترل مستقیم گشتاور بر ولتاژ وجه مشترک و جریان بلبرینگ

محمد تقی صادق زاده^(۱) - غلامرضا عرب^(۲) - امیر حسین میرزایان^(۳) - سید محمد مدنی^(۴)

(۱) کارشناس ارشد - شرکت ملی گاز ایران

(۲) دانشیار - دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهرکرد و عضو علمی قطب آنالیز غیرخطی، بهینه سازی و کنترل

(۳) کارشناس ارشد - دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهرکرد

(۴) استادیار - دانشکده مهندسی برق، دانشگاه اصفهان

تاریخ دریافت: بهار ۱۳۹۰ تاریخ پذیرش: زمستان ۱۳۹۰

خلاصه: جریان‌های بلبرینگ در موتورهای القایی به عنوان یکی از عوامل مخرب بلبرینگ به شمار می‌روند. القای ولتاژ شفت از طریق خازن‌های پارازیتی در موتور در نتیجه ولتاژ فرکانس بالای وجه مشترک موتور، عامل ایجاد این نوع جریان به شمار می‌رود. بنابراین کاهش هرچه بیشتر ولتاژ وجه مشترک باعث کاهش جریان بلبرینگ می‌گردد. در این مقاله با توجه به اهمیت روزافزون روش کنترل مستقیم گشتاور در کنترل موتور القایی در صنعت، روش‌های مختلف سویچ‌زنی این نوع از درایوها، بر اساس جداول سویچ‌زنی متفاوت بررسی و ارزیابی می‌گردد و نتایج شبیه‌سازی به منظور حصول کمترین ولتاژ وجه مشترک در کنار حفظ مشخصات کارایی درایو ارائه می‌گردد. پس از مقایسه، جدول کلیدزنی مناسب از لحاظ حداقل ولتاژ وجه مشترک، ریپل گشتاور کمتر و کیفیت بهتر در دنبال کردن خروجی مرجع پیشنهاد شده است.

کلمات کلیدی: جریان بلبرینگ، ولتاژ وجه مشترک، DTC

۱- مقدمه

استفاده از سویچ‌های IGBT که با فرکانس‌های بالا سویچ‌زنی می‌شوند، باعث می‌شود ولتاژ وجه مشترک موتور در هر لحظه مقداری غیرصفر داشته باشد که با فرکانس بالا نوسان می‌کند. در فرکانس‌های بالا خازن‌های پارازیتی موتور که شامل خازن روتور-سیم پیچ استاتور، بلبرینگ، سیم پیچ استاتور-بدنه می‌باشند، باعث کوپلاژ خازنی با شفت (روتور) و انتقال ولتاژ وجه مشترک از طریق مدار فرکانس بالای مقسم خازنی به شفت می‌شود.

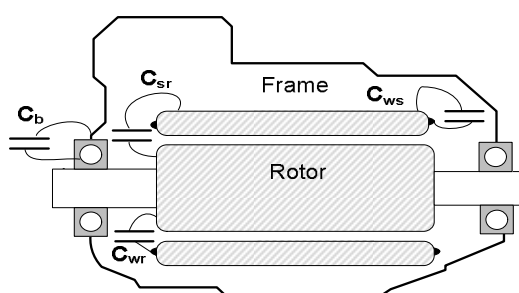
ولتاژ فرکانس بالای شفت باعث شارژ و دشارژ خازن بلبرینگ از طریق فیلم نازک روانکار می‌شود که بسته به اینکه حلقه مسیر جریان از چه طریقی بسته می‌شود، انواع مختلفی دارد. همان طور که اشاره شد دامنه و فرکانس ولتاژ وجه مشترک به عنوان عامل جریان بلبرینگ به شمار می‌رود که بایستی در سطح مطلوب کنترل شود.

در [۳] به بررسی و مقایسه روش‌های مختلف سویچ‌زنی PWM و تاثیر آن بر کاهش ولتاژ وجه مشترک اشاره گردیده است. در [۴]

در سالیان اخیر، استفاده از درایوهای موتور القایی و اهمیت کنترل آن به منظور پاسخ به خواسته‌های صنعت، پیشرفت روزافزونی داشته است. موتورهای القایی موتورهای بسیار مقاومی هستند. یکی از عوامل خرابی این گونه موتورها مربوط به بلبرینگ است که ناشی از غلغل مکانیکی و الکتریکی می‌باشد. جریان بلبرینگ به عنوان عامل الکتریکی خرابی بلبرینگ به شمار می‌آید.

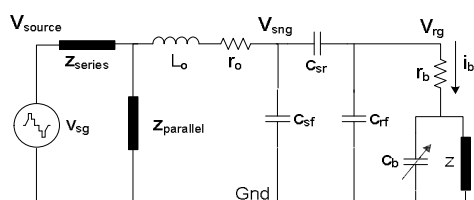
به طور کلی خرابی موتورهای القایی ناشی از چهار دسته عیب است که شامل عیوب بلبرینگ، استاتور، روتور و بقیه عوامل دیگر که به ترتیب، سهم 41%، 37%، 10%، 12% از خرابی‌های موتور را در برمی‌گیرند [۱].

خرابی بلبرینگ ناشی از ارتعاشات موتور و یا بار متصل به آن، آلودگی و فساد روانکار، کم و یا زیاد زدن گریس، سهل‌انگاری در نصب و یا تعمیر و نگهداری، جریان بلبرینگ و ... می‌باشد که در میان عوامل ذکر شده، جریان بلبرینگ سهم 10% در بین عوامل خرابی بلبرینگ دارد [۲].



شکل (۱): خازن‌های پارازیتی موتور القایی
Fig. (1): Parasitic capacitances of induction motor

در مدار معادل موتور شکل (۲)، تصادفی بودن میزان ضخامت فیلم نازک روانکار یا عنصر غیر خطی Z ، اثر کابل و درایو با امپدانس‌های r_o ، L_o ، Z_{series} ، $Z_{parallel}$ و ولتاژ وجه مشترک با V_{sg} مدل‌سازی شده است [۱۷].

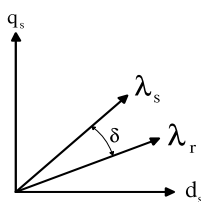


شکل (۲): مدار معادل فرکانس بالای موتور از نگاه وجه مشترک
Fig. (2): Induction motor high frequency equivalent circuit with cable, bearing and common mode voltage effect

۳- روش کنترل مستقیم گشتاور (DTC)

در این روش براساس شکل (۳) گشتاور الکترومغناطیسی تولیدی توسط ماشین القایی مستقیماً و با اندازه‌گیری ولتاژ و جریان ماشین و با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} |\lambda_s| |\lambda_r| \sin(\delta) \quad (1)$$



شکل (۳): حرکت بردار شار استاتور نسبت به شار روتور

Fig. (3): The stator flux movement vector via the rotor flux

که λ_s بردار شار استاتور، λ_r بردار شار روتور و δ زاویه بین شار استاتور و شار روتور می‌باشد. از رابطه فوق گشتاور مرجع محاسبه شده و در بلوک دیاگرام شکل (۴) روش DTC، استفاده می‌شود.

چندین روش مدولاسیون اینورترهای سه سطحی ارائه شده که با کاهش تعداد حالات سویچ‌زنی از ۲۷ به ۷ حالت، ولتاژ وجه مشترک حذف گردیده است، اما بر پارامترهای کارایی مبدل تأثیر کاهشی داشته است. در [۵] به بررسی و مقایسه ولتاژ وجه مشترک اینورترهای سه سطحی و مبدل‌های ماتریسی پرداخته شده است. در [۶] استفاده از یک اینورتر دوپل با مدولاسیون مکمل برای هر اینورتر به منظور حذف ولتاژ وجه مشترک پیشنهاد گردیده است. در [۷] به بررسی و مقایسه روش‌های مختلف استفاده از بردارهای فعال به جای بردار صفر اشاره شده است.

امروزه یکی از روشهای نوین و پراهمیت در صنعت برای کنترل ماشین القایی، روش کنترل مستقیم گشتاور DTC می‌باشد [۸]. پس از جایگزین شدن روش کنترل جداگانه توسط روش کنترل مستقیم گشتاور روش DTC، به عنوان جایگزین روش کنترل برداری شناخته شد [۹]. در این روش گشتاور الکترومغناطیسی و شار ماشین مستقیماً (بدون استفاده از ولتاژ و جریان ماشین) با استفاده از فرمان‌های برداری به اینورتر توسط جداول Look up کنترل می‌شود [۱۰-۱۲].

به منظور یافتن پاسخ بهتر و بهبود پارامترهای کیفی درایو، تاکنون جداول متعددی پیشنهاد گردیده‌اند. یکی از پارامترهای کیفی، ولتاژ وجه مشترک است که هر چقدر دامنه آن کمتر باشد، کاهش هرچه بیشتر جریان بلبرینگ را به همراه دارد [۱۳]. یکی از این جداول که به علت کیفیت دنبال کردن ورودی مرجع و ریپل مناسب گشتاور مورد توجه است، جدول کلیدزنی مرسوم می‌باشد که ۳ سطحی و دارای بردار ولتاژ صفر می‌باشد [۱۴]. اما با توجه به تحقیقات صورت گرفته عدم استفاده از بردار صفر در جداول کلیدزنی باعث کاهش سطح ولتاژ وجه مشترک می‌شود [۱۵]. بنابراین استفاده از چنین جداولی در کنار حفظ معیارهای مطلوب دیگر معیار رسیدن به جدول سویچ‌زنی بهینه می‌گردد. در [۱۶] با حذف بردار ولتاژ صفر و ایجاد جداول (۲) سطحی سعی شده است هدف کمینه‌بودن دامنه ولتاژ وجه مشترک حاصل گردد ولی نوسانات گشتاور و دنبال کردن خروجی مرجع را در بر نمی‌گیرد. لذا در این مقاله ۵ نوع جدول کلیدزنی بررسی و شبیه‌سازی گردیده است. یکی از این جداول ۳ سطحی و دارای بردار ولتاژ صفر و ۴ جدول دیگر ۲ سطحی بوده و فاقد بردار ولتاژ صفر هستند. این ۵ جدول از نظر کمینه بودن دامنه ولتاژ وجه مشترک، ریپل گشتاور و دنبال کردن خروجی مرجع مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

۲- مدل سازی جریان بلبرینگ

برای مدل‌سازی جریان بلبرینگ بایستی از مدل مؤلفه صفر مجموعه درایو-کابل-موتور به همراه در نظر گرفتن اثر خازن‌های پارازیتی موتور استفاده گردد.

ظرفیت‌های خازنی موتور القایی مطابق شکل (۱) شامل: C_{sr} ظرفیت خازنی روتور-استاتور، C_{wr} ظرفیت خازنی سیم پیچ-روتور، C_{ws} ظرفیت خازنی سیم پیچ-استاتور و C_b ظرفیت خازنی بلبرینگ، ناشی از فیلم نازک روانکار می‌باشد [۴].

Table (1): Common mode voltage for different switching states

جدول (۱): ولتاژ وجه مشترک برای حالت‌های کلیدزنی متفاوت

States	V_{ao}	V_{bo}	V_{co}	V_{com}
V_0	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$
V_1	$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/6$
V_2	$V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/6$
V_3	$-V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/6$
V_4	$-V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$V_{dc}/6$
V_5	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/6$
V_6	$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$V_{dc}/6$
V_7	$V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$

۵- نتایج شبیه سازی

موتور القایی قفس سنجابی 200 HP، 60 HZ، 460V، 2 قطب برای تعیین نتایج شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. پاسخ درایو به سرعت مرجع 500 RPM و تغییرات گشتاور از بی‌باری تا 792 N.M به مدت 0.5 ثانیه شبیه‌سازی گردیده است. پارامترهای مدار معادل موتور در جدول (۲) آمده است [۲-۱۵].

Table (2): Parameters of the induction motor equivalent circuit

جدول (۲): پارامترهای مدار معادل ماشین القایی

Pn (KW)	149.2
V(v)	460
F(Hz)	60
$R_s(\Omega)$	$14.85e-3$
$L_{ls}(H)$	$0.3027e-3$
$R_r(\Omega)$	$9.295e-3$
$L_{lr}(H)$	$0.3027e-3$
$L_m(H)$	$10.46e-3$
J(Kg.m ²)	3.1
$C_{WR}(nF)$	1.1
$C_{WS}(nF)$	11
$C_{SR}(nF)$	100
$C_b(nF)$	200
$R_b(\Omega)$	6

۵-۱- جدول (A)

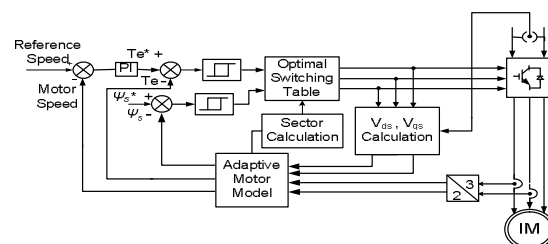
اولین جدول کلیدزنی که بررسی می‌شود، جدول کلیدزنی مرسوم (A) است. حلقه هیستریزس خطای گشتاور این جدول (۳) سطحی است.

Table (3): Switching pattern A

جدول (۳): جدول کلید زنی (A) [۱۴]

b_T	b_λ	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
	1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1
1	0	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7
	-1	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
-1	1	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2
	0	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0
	-1	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4

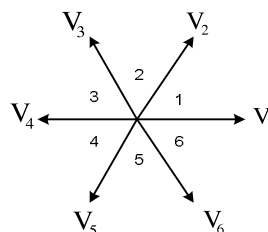
چگونگی انتخاب بردار ولتاژ در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل (۴): بلوک دیاگرام روش DTC

Fig. (4): DTC block diagram

در بلوک دیاگرام شکل (۴)، optimal switching table، جدول کلیدزنی می‌باشد. بردار ولتاژ مناسب با توجه به ورودی‌های جدول کلیدزنی (خطای گشتاور و خطای شار استاتور) انتخاب و به اینورتر اعمال می‌شود. شکل (۵)، بردارهای ولتاژ را در صفحه فضایی نشان می‌دهد. این بردارها از نظر اندازه با هم برابر و از نظر زاویه ۶۰ درجه با یکدیگر اختلاف فاز دارند.



شکل (۵): بردارهای ولتاژ

Fig. (5): Voltage vectors

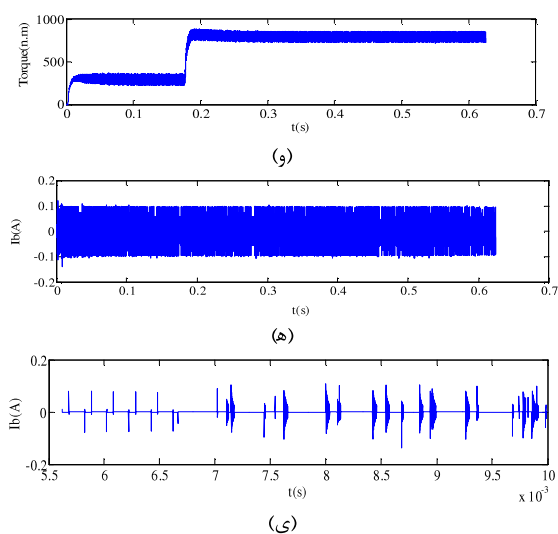
۴- ولتاژ وجه مشترک

ولتاژ وجه مشترک تولیدی توسط یک ماشین سه فاز از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$V_{com} = (V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) / 3 \quad (2)$$

که در این رابطه V_{ao} ، V_{bo} ، V_{co} ، ولتاژ ساق‌های سه فاز تغذیه کننده ماشین نسبت به نقطه خنثی اتصال ستاره موتور، O، هستند. اگر ماشین توسط سه فاز متقارن تغذیه شود، ولتاژ وجه مشترک صفر است، ولی اگر ماشین توسط اینورتر تغذیه شود ولتاژ وجه مشترک صفر نخواهد بود، چرا که جمع جبری سه فاز خروجی در هر لحظه مقداری غیرصفر خواهد داشت.

اندازه ولتاژ وجه مشترک تابع ولتاژ لینک DC (V_{dc}) و حالت کلیدزنی اینورتر است. جدول (۱)، مقادیر ولتاژ وجه مشترک را بر حسب V_{dc} به ازای بردارهای ولتاژ متفاوت نشان می‌دهد. مطابق جدول (۱)، دامنه ولتاژ وجه مشترک برای بردارهای ولتاژ V_0 و V_7 ، ۳ برابر حالت‌های دیگر است. به همین دلیل برای کاهش ولتاژ وجه مشترک باید جداولی پیشنهاد شود که فاقد بردارهای V_0 و V_7 باشند.



شکل (۷): نتایج شبیه سازی با جدول (A): (الف) جریان استاتور (ب) ولتاژ لینک DC (ج) سرعت روتور (د) ولتاژ وجه مشترک (و) گشتاور الکترومغناطیسی (ه) جریان بلبرینگ (ی) جریان بلبرینگ

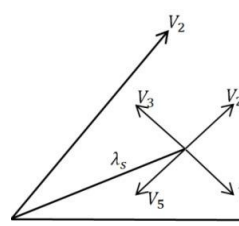
Fig. (7): Simulation results with the table (A): (a) stator current (b) Dc Link (c) rotor speed (d) common mode voltage (e) the electromagnetic torque (f) bearing current (g) bearing current

همان طور که در شبیه سازی های انجام شده مشاهده می شود، دامنه ولتاژ وجه مشترک در حدود ± 300 V می باشد. ماکزیمم جریان بلبرینگ 0.1A می باشد. اما نتایج حاصل از جدول کلیدزنی A نشان می دهد که هم سرعت روتور به خوبی مرجع را دنبال می کند و هم تغییرات ولتاژ لینک DC قابل قبول است. از طرفی مهم ترین پارامتر یعنی ریپل ضربانات گشتاور نیز مطلوب است.

۵-۲- جدول (B)

دومین جدول کلیدزنی که بررسی می شود، جدول (B) است. همان طور که مشاهده می شود، این جدول دارای ۴ سطر است، بنابراین حلقه هیستریزس خطای گشتاور و شار دو سطحی است و در نتیجه فاقد بردارهای ولتاژ V_7 و V_0 می باشد. با توجه به جدول (B) و بر اساس نواحی مشخص شده در شکل (۵) با این فرض که بردار شار استاتور در ناحیه R_1 باشد بردارهای V_1 و V_2 به منظور افزایش گشتاور و بردارهای V_4 و V_5 به منظور کاهش گشتاور استفاده می شوند از طرفی همانگونه که بردارهای V_2 و V_4 شار استاتور را افزایش می دهند بردارهای V_1 و V_5 نیز به منظور کاهش شار استاتور به کار می رود. از آنجا که این جدول بردارهای ولتاژ V_7 و V_0 را شامل نمی شود. با توجه به جدول (۱) انتظار می رود که دامنه ولتاژ وجه مشترک به $\frac{1}{3}$ حالت قبل (جدول A) یعنی $\frac{V_{DC}}{6}$ کاهش یابد که البته نتایج شبیه سازی نیز این امر را تأیید می کند. نتایج شبیه سازی جدول کلیدزنی B در شکل (۸) ترسیم گردیده است.

(۱۴)



شکل (۶): انتخاب بردار ولتاژ برای جدول (A)
Fig. (6): The voltage vector selection for table (A)

با توجه به جدول (A) و همانگونه که در شکل (۶) نشان داده شده است با این فرض که بردار شار استاتور در ناحیه نشان داده شده R_1 باشد، بردارهای V_2 و V_6 به منظور افزایش گشتاور و بردارهای V_3 و V_5 به منظور کاهش گشتاور استفاده می شوند. از طرفی همانگونه که بردارهای V_2 و V_3 شار استاتور را افزایش می دهند بردارهای V_5 و V_6 نیز به منظور کاهش شار استاتور به کار می روند و به طور مشابه در دیگر نواحی نیز مطابق جدول (A) بردارهای ولتاژ مناسب اعمال می شوند. در صورت عدم تغییر گشتاور یا شار استاتور بردارهای V_0 و V_7 اعمال خواهند شد. لذا با توجه به جدول (۱) انتظار می رود ولتاژ وجه مشترک حاصل از این جدول کلیدزنی حدود ۳ برابر جداول فاقد بردار ولتاژ V_7 و V_0 باشد.

نتایج شبیه سازی توسط نرم افزار Matlab/Simulink برای جریان استاتور، گشتاور الکترومغناطیسی، ولتاژ لینک DC، سرعت روتور و ولتاژ وجه مشترک در شکل (۷) ترسیم گردیده است.

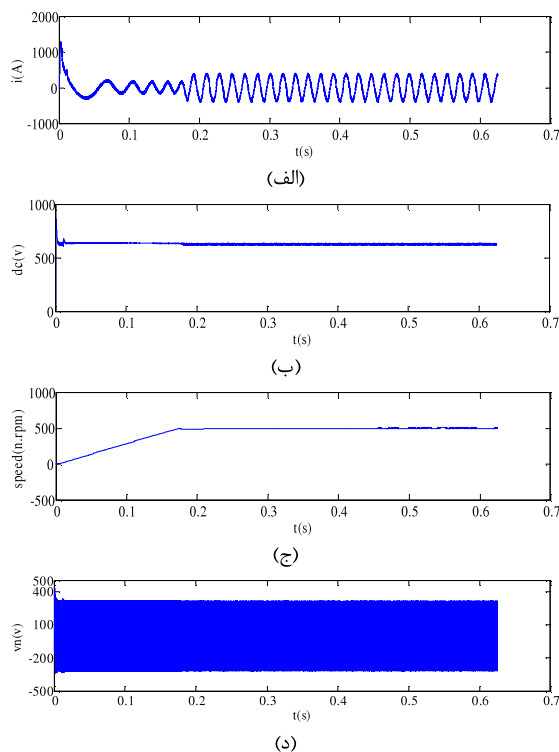
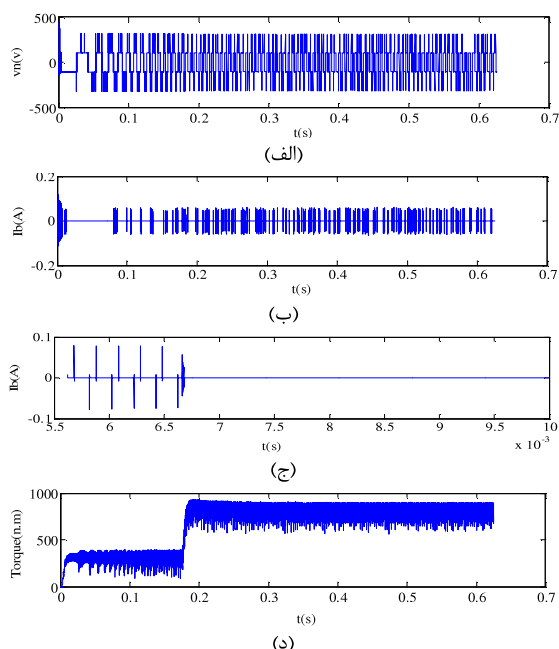


Table (5): Switching pattern C
جدول (۵): جدول کلیدزنی (C) [۱۶]

b_T	b_λ	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
1	1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1
	-1	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
0	1	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3
	-1	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5

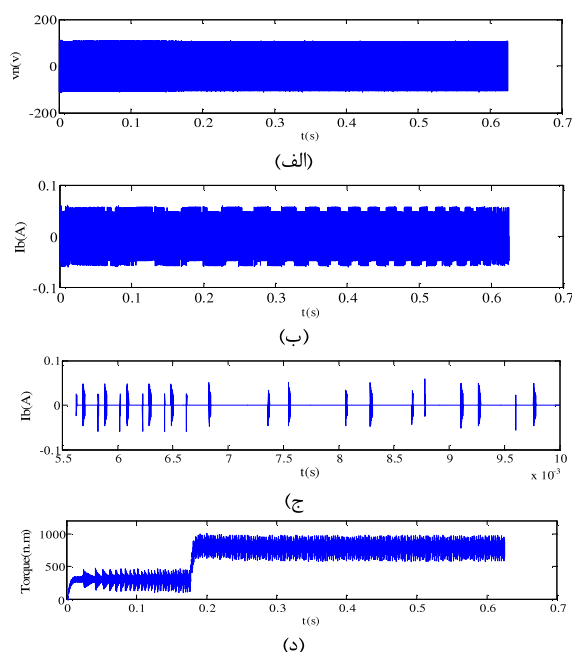
این جدول هم مانند جدول (B) دارای ۴ سطر است که با توجه به جدول (C) و بر اساس نواحی مشخص شده در شکل (۵) با این فرض که بردار شار استاتور در ناحیه R_1 باشد بردارهای V_2 و V_6 به منظور افزایش گشتاور و بردارهای V_4 و V_6 به منظور کاهش گشتاور استفاده می‌شوند. از طرفی همانگونه که بردارهای V_2 و V_4 شار استاتور را افزایش می‌دهند بردار V_6 نیز به منظور کاهش شار استاتور به کار می‌رود. از آنجا که این جدول بردارهای ولتاژ V_0 و V_7 را شامل نمی‌شود لذا با توجه به جدول (۱) انتظار داریم که دامنه ولتاژ وجه مشترک به $\frac{1}{3}$ حالت A یعنی $\frac{V_{DC}}{6}$ کاهش یابد، اما تفاوت این جدول با حالت B به جز نوسانات گشتاور که انتظار می‌رود کاهش یابد این است که این جدول در هر ناحیه به دلیل تکرار یکی از سطرها به منظور کاهش یا افزایش شار استاتور و گشتاور به جای ۴ بردار از ۳ بردار استفاده می‌کند که انتظار می‌رود تعداد نوسانات ولتاژ وجه مشترک را کاهش دهد. نتایج شبیه‌سازی جدول کلیدزنی C در شکل (۹) شرح ترسیم گردیده است.



شکل (۹): نتایج شبیه‌سازی با جدول (C): (الف) ولتاژ وجه مشترک (ب) جریان بلبرینگ (ج) جریان بلبرینگ (د) گشتاور الکترومغناطیسی
Fig. (9): Simulation results with the table (C): (a) common mode voltage (b) stator current (c) bearing current (d) electromagnetic torque

Table (4): Switching pattern B
جدول (۴): جدول کلیدزنی (B) [۱۶]

B_T	b_λ	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
1	1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1
	-1	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6
0	1	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3
	-1	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4



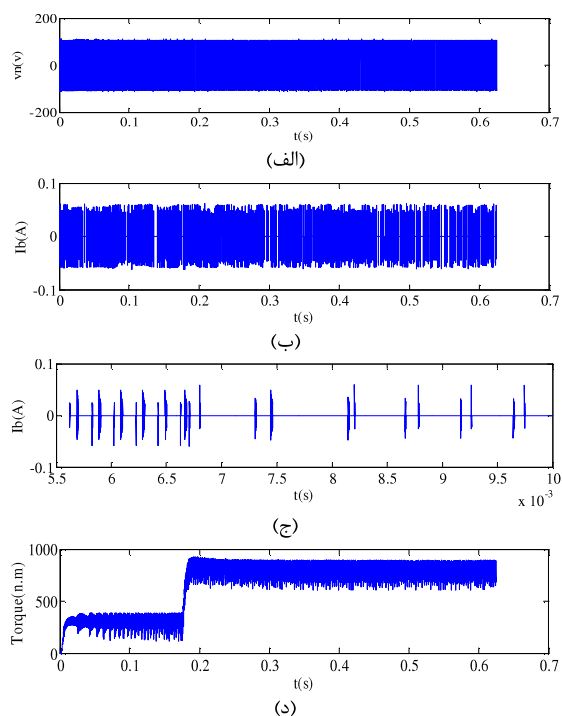
شکل (۸): نتایج شبیه‌سازی با جدول (B): (الف) ولتاژ وجه مشترک (ب) جریان استاتور (ج) جریان بلبرینگ (د) گشتاور الکترومغناطیسی
Fig. (8): Simulation results with the table (B): (a) common mode voltage (b) stator current (c) bearing current (d) electromagnetic torque

همان طور که در نتایج شبیه‌سازی قابل ملاحظه است، ولتاژ وجه مشترک مطابق انتظار به مقدار مطلوب $\frac{V_{DC}}{6}$ یعنی $\pm 100V$ کاهش یافته است. ماکزیمم جریان بلبرینگ $0.05A$ می‌باشد، که همان طور که مشاهده می‌شود، کاهش یافته است. از طرفی از نظر دنبال کردن خروجی مرجع برای جریان استاتور و سرعت روتور نیز پاسخ مناسبی به دست می‌دهد و ولتاژ لینک DC نیز نوسانات مناسبی دارد (مانند حالت A است)، اما نوسانات زیاد گشتاور (حدود ۳ برابر حالت A) به دلیل نامناسب بودن این جدول کلیدزنی است.

۵-۳- جدول (C)

سومین جدول کلیدزنی که به آن می‌پردازیم جدول (C) است.

تفاوت این جدول با جداول (B و C) در کاهش نوسانات گشتاور می‌باشد، که درستی یا عدم درستی این ادعا با مشاهده نتایج شبیه سازی قابل بررسی است. نتایج شبیه‌سازی جدول کلیدزنی D در شکل (۱۰) شرح ترسیم گردیده است.



شکل (۱۰): نتایج شبیه‌سازی با جدول (D): (الف) ولتاژ وجه مشترک (ب) جریان بلبرینگ (ج) جریان بلبرینگ (د) گشتاور الکترومغناطیسی
 Fig. (10): Simulation results with the table (D): (a) common mode voltage (b) stator current (c) bearing current (d) electromagnetic torque

همان‌طور که در نتایج شبیه‌سازی قابل ملاحظه است ولتاژ وجه مشترک به $\frac{V_{DC}}{6}$ یعنی ± 100 V کاهش یافته است. همان‌طور که مشخص است جریان بلبرینگ به 0.05A کاهش یافته است. از دیگر مشخصه‌های این روش کلیدزنی، دنبال کردن خروجی مرجع مناسب است. از طرفی نوسانات گشتاور نسبت به جداول (B و C) بهتر شده ولی باز هم این نوسانات از جدول (A) بیشتر است. پس در نهایت جدول (E) که جدول مطلوب می‌باشد، پیشنهاد داده می‌شود.

۵-۵- جدول پیشنهادی کلیدزنی (E)

پنجمین جدول کلیدزنی که مورد بررسی قرار می‌گیرد، جدول (E) است که دومین جدول کلیدزنی جدید موجود در این مقاله نیز می‌باشد. این جدول مانند جدول (A) دارای نوسانات گشتاور مناسب و از طرفی مانند جداول (B, C, D) دارای ۴ سطر است، بدین معنی که حلقه هیستریزس گشتاور و شار، دوسطحی است، که با توجه به جدول (E) و بر اساس نواحی مشخص شده در شکل (۵) با این فرض که بردار

همان‌طور که در نتایج شبیه‌سازی قابل ملاحظه است ولتاژ وجه مشترک به $\frac{V_{DC}}{6}$ یعنی ± 100 V کاهش نیافته است و در واقع همان $\frac{V_{DC}}{2}$ یعنی ± 300 V است هرچند که تعداد نوسانات این پارامتر کاهش یافته است.

علت بروز اختلاف بین نتایج واقعی و تئوری در تأخیر کلیدزنی سوئیچهای اینورتر است. فرض کنید در شرایط $b_T=1$ سیگنال خطای شار تغییر علامت دهد. در این صورت بردار ولتاژ اعمال شده از V_2 به V_6 تغییر خواهد کرد. یعنی وضعیت سوئیچهای اینورتر از 110 به 011 تبدیل می‌شود ولی از آنجایی که روشن و خاموش شده سوئیچهای ساقهای اینورتر در عمل دقیقاً در یک لحظه صورت نمی‌گیرد. لذا برای مدت کوتاهی وضعیت 111 رخ خواهد داد که منجر به ولتاژ وجه مشترک ± 300 V می‌شود. بنابراین نشان می‌دهد که فرض استفاده از جدول دوسطحی به تنهایی کافی نیست و علاوه بر آن بایستی از بردارهای مناسب به جای بردارهای صفر استفاده کرد. از طرفی نوسانات گشتاور از حالت (B) بهتر شده، ولی باز هم این نوسانات مطلوب نیست. پس در این حالت نه تنها نوسانات گشتاور بهتر نشد بلکه ولتاژ وجه مشترک نیز افزایش یافت. این دلایل کافی است تا این جدول کلیدزنی نامناسب تشخیص داده شود.

۵-۴- جدول (D)

چهارمین جدول کلیدزنی که به بررسی آن می‌پردازیم جدول (D) است که یکی از دو جدول کلیدزنی جدیدی می‌باشد که در این مقاله ارائه می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود این جدول هم مانند جداول (B و C) دارای ۴ سطر است که با توجه به جدول (D) و براساس نواحی مشخص شده در شکل (۵) با این فرض که بردار شار استاتور در ناحیه R_1 باشد بردارهای V_2 و V_6 به منظور افزایش گشتاور و بردارهای V_4 و V_5 به منظور کاهش گشتاور استفاده می‌شوند. از طرفی همانگونه که بردارهای V_2 و V_4 شار استاتور را افزایش می‌دهند بردارهای V_5 و V_6 نیز به منظور کاهش شار استاتور به کار می‌روند و به طور مشابه در دیگر نواحی نیز مطابق جدول (۱) بردارهای ولتاژ مناسب اعمال می‌شوند. بنابراین انتظار داریم که دامنه ولتاژ وجه مشترک به $\frac{1}{3}$ حالت A یعنی $\frac{V_{DC}}{6}$ کاهش یابد.

Table (6): Switching pattern D

جدول (۶): جدول کلیدزنی (D)

b_T	b_λ	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
1	1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1
	-1	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
0	1	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3
	-1	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4

مطابق نتایج شبیه‌سازی، ولتاژ وجه مشترک، طبق انتظار به $\frac{V_{DC}}{6}$ یعنی ± 100 V کاهش یافته است. از طرفی از نظر دنبال کردن خروجی مرجع برای جریان استاتور و سرعت روتور نیز پاسخ مناسبی به دست می‌دهد. علاوه بر این ضربانات گشتاور نیز دقیقاً به مقدار مطلوب جدول (A) کاهش یافته است. بنابراین جدول (E) حالت بهینه‌ای است که هم ضربانات گشتاور مناسبی دارد و هم ولتاژ وجه مشترک کاهش یافته و به کمترین مقدار خود رسیده است.

۶- نتیجه گیری

حدود 41% علت خرابی موتورهای القایی ناشی از خرابی بلبرینگ است و 10% علل خرابی بلبرینگ، جریانهای عبوری از آن می‌باشد و کاهش ولتاژ وجه مشترک باعث کاهش جریان بلبرینگ می‌گردد. در این مقاله جداول کلیدزنی مختلف مورد استفاده در روش DTC و تاثیر آنها بر ولتاژ وجه مشترک مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند و نتایج آنها در جدول (۸) از نظر نوسانات گشتاور و دامنه ولتاژ وجه مشترک آمده است.

همان‌طور که از نتایج می‌توان استنتاج کرد، اگر به تنهایی کاهش تعداد پالس‌های جریان بلبرینگ مد نظر باشد جدول (D) مناسب است اما جدول بهینه‌ای که در آن هم ولتاژ وجه مشترک و در نتیجه جریان بلبرینگ، کاهش یافته باشد و هم از نظر ضربانات گشتاور مطلوب باشد جدول (E) می‌باشد، که به عنوان جدول پیشنهادی ارائه شده است.

Table (8): Comparison of switching pattern effects on the common mode voltage and torque fluctuations

جدول (۸): مقایسه تأثیر جداول سوئیچ زنی بر دامنه ولتاژ وجه مشترک و نوسانات گشتاور

جدول کلیدزنی	نوسانات گشتاور (N.m)	دامنه ولتاژ وجه مشترک (V)
A	100	300
B	200	100
C	230	300
D	170	100
E	100	100

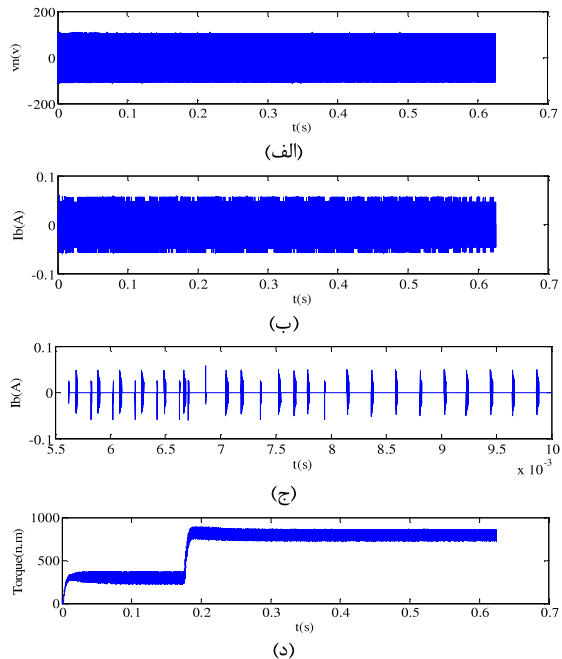
شار استاتور در ناحیه R_1 باشد بردارهای V_2 و V_6 به منظور افزایش گشتاور و بردارهای V_3 و V_5 به منظور کاهش گشتاور استفاده می‌شوند. از طرفی همانگونه که بردارهای V_2 و V_3 شار استاتور را افزایش می‌دهند بردارهای V_5 و V_6 نیز به منظور کاهش شار استاتور به کار می‌روند و به طور مشابه در دیگر نواحی نیز مطابق جدول (E) بردارهای ولتاژ مناسب اعمال می‌شوند. بنابراین فاقد بردارهای ولتاژ V_0 و V_7 می‌باشد. در نتیجه با توجه به جدول (۱) انتظار می‌رود که ولتاژ وجه مشترک به $\frac{V_{DC}}{6}$ یعنی ± 100 V کاهش یابد.

Table (7): Switching pattern E

جدول (۷): جدول کلید زنی (E)

b_T	b_λ	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
1	1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1
	-1	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
0	1	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2
	-1	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4

نتایج شبیه سازی جدول (E) در شکل (۱۱) ترسیم گردیده است.



شکل (۱۱): نتایج شبیه سازی با جدول (E): (الف) ولتاژ وجه مشترک (ب) جریان بلبرینگ (ج) جریان بلبرینگ (د) گشتاور الکترومغناطیسی

Fig. (11): Simulation results with the table (E): (a) common mode voltage (b) stator current (c) bearing current (d) electromagnetic torque

References

- [1] A. Binder, A. Muetze, "Scaling effects of inverter-induced bearing currents in ac machines", *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, Vol.44, No.3, pp.769-776, May/June 2008.
- [2] A. Muetze, "Radio frequency measurement method for detecting bearing currents in induction motors", Thesis for the Degree of Doctor of Science at Lappeenranta University, May 2009.
- [3] W. Hofmann, J. Zitzelsberger, "PWM-control methods for common mode voltage minimization - a survey", *Inter. Symp. on Pow. Electro., Electri. Dri., Auto. and Mot.*, pp.32-35, SPEEDAM 2006.
- [4] H. Zhang, A.V. Jouanne, "Multilevel inverter modulation schemes to eliminate common-mode voltages", *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, Vol.36, No.6, pp.1645-1653, Nov./Dec. 2000.
- [5] M. Jussila, J. Alahuhtala, "Common-mode voltages of space-vector modulated matrix converters compared to three-level voltage source inverter", *Pow. Elec. Spec. Conf., PESC '06.* 37th, 2006.
- [6] M.R. Baiju, K.K. Mohapatra, "A dual two-level inverter scheme with common mode voltage elimination for an induction motor drive", *IEEE Trans. on Power Electron*, Vol.19, No.3, pp.794-805, May 2004.
- [7] A.M. Hava, U. Enre, "Performance analysis of reduced common-mode voltage pwm methods and comparison with standard pwm methods for three-phase voltage-source inverters", *IEEE Trans. on Power Electron*, Vol.24, No.1, pp.241-252, Jan. 2009.
- [8] Domenicoc., P. Francesco, "Foc and Dtc: Two viable schemes for induction motors torque control", *IEEE Trans. on Power Electron*, Vol.17, No.5, pp.779-787, Sep. 2002.
- [9] F. Blaschke, "The principle of field orientation as applied to the new transvector closed loop control system for rotating-field machines", *Siemens Review*, pp.217-220, 1972.
- [10] T. Isao, N. Toshihiko, "A new quick response and high-efficiency control strategy of an induction motor", *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, Vol.1a-22, No.5, pp.820-827, Sep/Oct. 1986.
- [11] M. Depenbrock, "Direct-self control (Dsc) of inverter-fed induction machine", *IEEE Trans. on Power Electron*, Vol.3, No.4, pp.420-429, Oct. 1988.
- [12] J.N. Nash, "Direct torque control induction motor vector control without an encoder", *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, Vol.33, No.2, pp.333-340, Mar/Apr 1997.
- [13] C. Maurizio, P. Marcello, "A new direct torque control strategy for the minimization of common-mode emissions", *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, Vol.4, No.2, Mar/Apr, 2006.
- [14] E. Hassankhan, D.A. Khaburi, "DTC-SVM scheme for induction motors fed with a three-level inverter", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 44, 2008.
- [15] Y.V. Siva Reddy, M. Vijayakumar, "Direct torque control of induction motor using sophisticated lookup tables based on Neural networks", *Aiml Journal*, Vol.7, Issue 1, June 2007.
- [16] V.A. Lakshmi, T.B. Reddy, "Direct torque control algorithm for the reduction of common mode voltage using look-up tables", *Inter. J. of Rec. Trends in Eng.*, Vol.2, No.5, Nov. 2009.
- [17] A. Muetze, A. Binder, "Techniques for measurement of parameters related to inverter-induced bearing currents", *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, Vol.43, No.5, Sep./Oct. 20.