

کاهش ولتاژ وجه مشترک در مبدل ماتریسی با حذف بردار صفر

غلامرضا عرب مارکده^{۱*}، دانشیار، مالک محمدرضایی^۲، کارشناسی ارشد، محمدرضا تقی صادقزاده^۳، کارشناسی ارشد
دانشکده فنی و مهندسی و عضو قطب علمی آنالیز غیرخطی بهینه‌سازی و کنترل - دانشگاه شهرکرد - شهرکرد - ایران
arab-gh@eng.sku.ac.ir

^۲ دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شهرکرد - شهرکرد - ایران
malekmohammadrezaei@gmail.com

^۳ دانشکده تحصیلات تکمیلی - دانشگاه آزاد اسلامی نجف‌آباد - نجف‌آباد - ایران
mt_sadeghzadeh@yahoo.com

ارسال مقاله: ۹۰/۹/۵ اصلاحیه: ۹۱/۱/۲۷

پذیرش مقاله: ۹۱/۴/۵

چکیده: مبدل ماتریسی، یک مبدل تبدیل انرژی مستقیم با ضریب توان ورودی بالاست. در مدولاسیون مبدل ماتریسی مستقیم، روش مدولاسیون بردار فضایی (SVM) با کنترل هم‌زمان جریان ورودی و ولتاژ خروجی استفاده می‌شود. در این روش، مجموع ولتاژهای خروجی فازها در نقطه اتصال ستاره بار، برابر صفر نیست؛ بنابراین ولتاژ وجه مشترک (CMV) غیر صفر در نقطه اتصال ستاره تولید می‌شود. وجود ولتاژ وجه مشترک، باعث تولید جریان نشتی در نقطه اتصال موتور به زمین، افزایش جریان بلبرینگ موتور و کاهش عمر مفید آن می‌گردد. در این مقاله، روش‌های کاهش ولتاژ وجه مشترک، مورد مطالعه قرار می‌گیرد، سپس یک روش جدید برای کاهش ولتاژ وجه مشترک به میزان ۵۷٪ ولتاژ لینک dc با تعداد وضعیت‌های کلیدزنی کمتر نسبت به روش‌های قبل معرفی می‌گردد. در این روش، از یک بردار فعال به جای بردار صفر استفاده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی به منظور اثبات نقاط قوت روش پیشنهادی آورده شده است.

واژه‌های کلیدی: مبدل ماتریسی، ولتاژ وجه مشترک، مدولاسیون بردار فضایی، حذف بردار صفر.

۱. مقدمه

تحقیق‌ها نشان داده است در صورتی که میدان الکتریکی لایه روغن بین شافت و یاتاقان‌های موتور، دارای دامنه بیشتر از $15V(\text{peak})/\mu\text{m}$ باشد، تخلیه الکتریکی ایجاد می‌شود. از آنجا که ضخامت لایه روغن بین $0.2\mu\text{m}$ تا $2\mu\text{m}$ است، در صورت ایجاد ولتاژ روی شافت بین ۳ تا ۳۰ ولت (مقدار حداکثر)، تخلیه الکتریکی در لایه روغن اتفاق می‌افتد [۱۷].

در سال‌های اخیر، روش‌هایی برای کاهش ولتاژ وجه مشترک در مبدل ماتریسی با مدولاسیون بردار فضایی مطرح شده است [۱۸] و [۱۹].

در [۱۸] با استفاده از روش مدولاسیون SVM برای مبدل ماتریسی مستقیم، یک روش جدید برای کاهش ولتاژ وجه مشترک ارائه شده است. در این روش، از ۱۸ بردار فعال در کل دوره کلیدزنی استفاده شده که به جای بردار صفر، بردار فعال به کار برده شده است. قابل توجه است که مراحل کلیدزنی در این روش، ۱۲ مرحله است.

یک روش جدید مدولاسیون PWM برای مبدل ماتریسی در [۱۹] شرح داده شده است. در این روش، با توجه به ۲۷ بردار موجود در مبدل ماتریسی و ولتاژ وجه مشترک تولیدی هر کدام از بردارها، بردارهای ولتاژ خروجی گروه‌بندی می‌شوند؛ بنابراین با اعمال بردار مناسب، مقدار ولتاژ وجه مشترک تولیدی کاهش می‌یابد.

در [۲۰] دو روش کاهش ولتاژ وجه مشترک مقایسه شده‌اند. در روش اول، در قسمت اینورتر مبدل ماتریسی، به جای بردارهای صفر، از دو بردار فعال نزدیک به بردارهای فعال اصلی استفاده شده است. در روش دوم که برای عملکرد در ولتاژهای پایین مناسب می‌باشد، از ولتاژهای خط با کمترین مقدار لحظه‌ای و ولتاژ متوسط بین دو ولتاژ دیگر در قسمت یکسوکننده استفاده می‌شود و سپس در قسمت اینورتر بردارهای صفر در محل‌های مناسب قرار می‌گیرند. به این ترتیب، ولتاژ لینک DC و ولتاژ وجه مشترک کاهش می‌یابند. مشکل اصلی این روش، کاهش ضریب انتقال مبدل (q) می‌باشد که به ۰/۵ می‌رسد.

استفاده از روش کنترل کننده پیش بین برای کاهش ولتاژ وجه مشترک تولیدی یک مبدل ماتریسی در [۲۱] مطرح شده است. در روش مطرح شده، ولتاژ وجه مشترک به میزان ۷۰ درصد ولتاژ لینک DC رسیده است و تنها برای ولتاژهای بیشتر از ۴۰ درصد نامی کارایی دارد.

در این مقاله، ابتدا روش‌های موجود برای کاهش ولتاژ وجه مشترک شرح داده شده و سپس یک روش جدید با حذف بردار صفر

مبدل ماتریسی به عنوان یک مبدل AC-AC مستقیم، مبدلی بسیار مورد توجه در بین مبدل‌های AC-AC است [۲-۱]. مبدل ماتریسی یک مبدل با کموتاسیون اجباری است که از مجموعه‌ای سوئیچ تک‌جهته کنترل‌پذیر ساخته شده و امکان تولید ولتاژ متغیر با فرکانس پیوسته را فراهم می‌کند. این مبدل از نقطه نظرهای زیر نسبت به مبدل‌های PWM ارجحیت دارد [۳-۶]:

- جریان ورودی و خروجی سینوسی؛
- عدم نیاز به المان‌های بزرگ ذخیره‌کننده انرژی در لینک DC؛
- عملکرد چهار ناحیه‌ای؛
- طراحی ساده و فشرده.

مبدل‌های ماتریسی به دو ساختار مبدل ماتریسی مستقیم^۱ (DMC) و غیرمستقیم^۲ (IMC) تقسیم می‌شوند [۷-۱۱]. روش مدولاسیون بردار فضایی^۳ (SVM) به منظور کنترل مبدل ماتریسی غیرمستقیم، اولین مرتبه در سال ۱۹۹۵ مطرح شد [۱۲]. اصلاح کلیدزنی سوئیچ‌ها، روش مدولاسیون بردار فضایی معمول^۴ (CSVM)، در [۱۳] مطرح شده است. در سال ۲۰۰۳، روش بهبود یافته مدولاسیون بردار فضایی^۵ (ISVM) به منظور کاهش ولتاژ وجه مشترک پیشنهاد گردید [۱۴].

به دلیل اینکه مجموع ولتاژهای تولیدی در خروجی اغلب مبدل‌های الکترونیک قدرت، برابر صفر نیست، ولتاژ وجه مشترکی^۶ (CMV) ایجاد می‌شود که مقدار آن با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۱۵]:

$$U_{CMV} = \frac{U_A + U_B + U_C}{3} \quad (1)$$

وجود ولتاژ وجه مشترک غیرصفر با فرکانس بالا و دامنه زیاد، باعث تولید جریان نشتی در نقطه اتصال زمین موتور می‌شود [۱۶]. با در نظر گرفتن اثر خازن‌های نشتی بین سیم‌بندی موتور و شافت، وجود ولتاژ وجه مشترک غیر صفر، باعث القای ولتاژ بر روی شافت موتور می‌گردد.

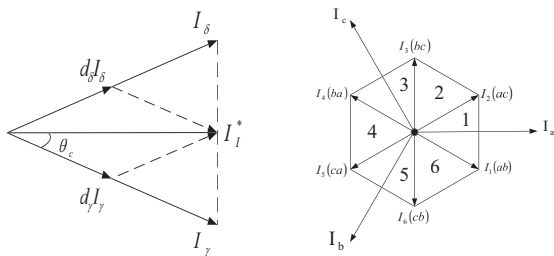
1. Direct Matrix Converter.
2. Indirect Matrix Converter.
3. Space Vector Modulation.
4. Conventional Space Vector Modulation.
5. Improved Space Vector Modulation.
6. Common-Mode Voltage.

بردارهای همجوار I_δ و I_γ آورده شده است. زمان عملکرد هر یک از بردارها (d_δ و d_γ) با رابطه‌های (۲) و (۳) محاسبه می‌شوند.

$$d_\gamma = m_c \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta_c\right) \quad (2)$$

$$d_\delta = m_c \cdot \sin(\theta_c) \quad (3)$$

که m_c اندیس مدولاسیون جریان به مقدار یک، و θ_c موقعیت بردار جریان است.



شکل (۲): جریان ورودی و بردارهای همجوار
(الف) بردارهای شش‌گانه
(ب) ایجاد بردار مرجع جریان ورودی توسط بردارهای همجوار

شکل (۲): جریان ورودی و بردارهای همجوار

۲.۱.۲. مدولاسیون قسمت اینورتر

در شکل (۳-الف) بردارهای شش‌گانه سوئیچ‌زنی ولتاژ خروجی به همراه بردار ولتاژ فاز خروجی نشان داده شده است. در شکل (۳-ب) نحوه تولید بردار فضایی ولتاژ مرجع خروجی (V_0^*) با استفاده از بردارهای همجوار V_α و V_β آورده شده است. زمان عملکرد هر یک از بردارها (d_β و d_α) با رابطه‌های (۳) و (۴) محاسبه می‌شوند.

$$d_\alpha = m_v \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta_v\right) \quad (4)$$

$$d_\beta = m_v \cdot \sin(\theta_v) \quad (5)$$

که m_v اندیس مدولاسیون ولتاژ است و مقدار آن با رابطه (۶) محاسبه می‌شود و θ_v موقعیت بردار ولتاژ است.

$$m = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{|u_{o,ref}|}{|u_i|} \quad (6)$$

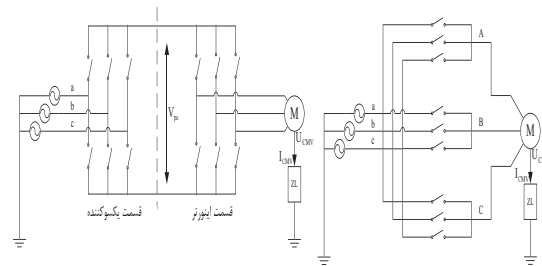
در روش مدولاسیون CSVM پیشنهاد شده است که در آن، میزان ولتاژ وجه مشترک به ۵۷٪ ولتاژ لینک dc می‌رسد. شبیه‌سازی برای روش‌های مدولاسیون CSVM و NZSVM^۱ و روش پیشنهادی انجام شده و نتایج با همدیگر مقایسه شده‌اند.

۲. روش‌های مدولاسیون بردار فضایی

۱.۲. روش مدولاسیون بردار فضایی

در شکل (۱-الف) مبدل ماتریسی مستقیم با ۹ سوئیچ دو جهته نشان داده شده است. ولتاژها و جریان‌های ورودی با حروف c, b, a و ولتاژها و جریان‌های خروجی با حروف A, B, C و ولتاژ وجه مشترک با U_{CMV} نشان داده شده‌اند. وجود ولتاژ وجه مشترک باعث تولید جریان نشستی (I_{CMV}) با فرکانس بالا می‌شود.

در اکثر روش‌های مدولاسیون، برای کنترل مبدل ماتریسی از مدولاسیون غیرمستقیم استفاده می‌شود که در آن، جریان ورودی و ولتاژ خروجی به طور هم‌زمان کنترل می‌شوند. در این حالت - که در شکل (۱-ب) نشان داده شده - مبدل ماتریسی به صورت یک مبدل PWM پشت به پشت بدون لینک DC در نظر گرفته می‌شود. به این ترتیب، مدولاسیون بردار فضایی برای مبدل ماتریسی در دو قسمت یکسوکننده و اینورتر تعریف می‌شود که در ادامه به آن اشاره می‌شود [۱۲].



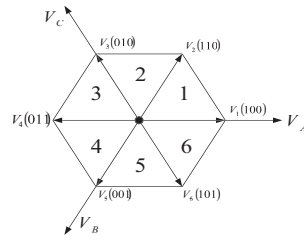
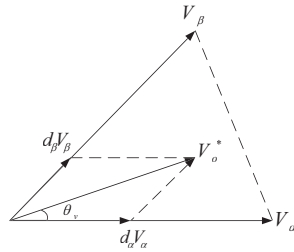
شکل (۱): ساختار مبدل ماتریسی
(الف) مبدل ماتریسی مستقیم
(ب) مبدل ماتریسی غیرمستقیم

شکل (۱): ساختار مبدل ماتریسی

۱.۱.۲. مدولاسیون قسمت یکسوکننده

در شکل (۲-الف) بردارهای شش‌گانه سوئیچ‌زنی جریان ورودی به همراه بردار جریان ورودی نشان داده شده است. در شکل (۲-ب) نحوه تولید بردار فضایی جریان مرجع ورودی (I_1^*) با استفاده از

1. Non-Zero Space Vector Modulation



شکل (الف) بردارهای شش گانه ولتاژ خروجی (ب) ایجاد بردار مرجع ولتاژ خروجی توسط بردارهای همجوار

شکل (۳): ولتاژ خروجی و بردارهای همجوار

• وقتی سکتور جریان ورودی فرد باشد، برای ایجاد بردار صفر در قسمت اینورتر از بردار [000] استفاده می‌شود، در غیر این صورت برای ایجاد بردار صفر در قسمت اینورتر از بردار [111] استفاده می‌شود.

در جدول (۱)، حالت‌های کلی برای سوئیچ‌زنی روش CSVM نشان داده شده و در جدول (۲)، مثال‌هایی از حالت کلی آورده شده است.

در جدول (۳)، مقدار ولتاژ وجه مشترک با توجه به حالت سوئیچ‌زنی قسمت اینورتر نشان داده شده است. در این جدول دیده می‌شود که بردار صفر، دارای بیشترین مقدار ولتاژ وجه مشترک است.

در روش مدولاسیون بردار فضایی معمول در مدت زمان d_0 از بردار صفر استفاده می‌شود که با توجه به جدول (۳)، دارای ولتاژ وجه مشترک با مقدار $\sqrt{3}/2V_{phase-peak}$ می‌باشد که این مقدار حداکثر ولتاژ وجه مشترک است.

۳.۲. مدولاسیون بردار فضایی بهبود یافته (ISVM)

در روش مدولاسیون بردار فضایی معمول، هر فاز که بیشترین یا کمترین مقدار را داشته باشد، به عنوان بردار صفر اعمال می‌گردد و باعث حداکثر شدن ولتاژ وجه مشترک در زمان اعمال بردار صفر می‌شود؛ بنابراین با انتخاب صحیح بردار صفر می‌توان مقدار ولتاژ وجه مشترک را کاهش داد. در [۱۴] یک روش جدید برای کاهش ولتاژ وجه مشترک ارائه شده است. در این روش در هر زمان ولتاژ فازی که قدر مطلق آن از سایر فازها کوچک‌تر باشد، به عنوان بردار صفر استفاده می‌شود.

۳.۱.۲. مدولاسیون کل مبدل

برای اطمینان از عملکرد مناسب مبدل، باید هر دو مدولاسیون قسمت‌های یکسوکننده و اینورتر با همدیگر ترکیب شوند. زمان عملکرد هر یک از بردارهای همجوار با رابطه‌های (۷) و (۸) محاسبه می‌شوند.

$$d_{\gamma\alpha} = d_\gamma \cdot d_\alpha, \quad d_{\gamma\beta} = d_\gamma \cdot d_\beta \quad (7)$$

$$d_{\delta\alpha} = d_\delta \cdot d_\alpha, \quad d_{\delta\beta} = d_\delta \cdot d_\beta$$

$$d_0 = 1 - (d_{\gamma\alpha} + d_{\gamma\beta} + d_{\delta\alpha} + d_{\delta\beta}) \quad (8)$$

با توجه به اینکه ۶ سکتور برای جریان ورودی و ۶ سکتور برای ولتاژ خروجی تعریف می‌شود، ۳۶ حالت مختلف برای سوئیچ‌زنی در نظر گرفته می‌شود.

۲.۲. مدولاسیون بردار فضایی معمول (CSVM)

همان‌طور که در بالا گفته شد، در مدولاسیون بردار فضایی، ۳۶ حالت سوئیچ‌زنی وجود دارد که پیاده‌سازی آن، به یک جدول کلیدزنی ۳۶ حالتی نیاز دارد. در [۱۳] یک حالت کلی تعریف شده و ۳۶ حالت مختلف به ۲ حالت کاهش یافته است. با توجه به اینکه مجموع سکتور جریان ورودی و ولتاژ خروجی زوج یا فرد باشد، برای انتخاب حالت مناسب تصمیم‌گیری می‌شود. در این روش، برای سوئیچ‌زنی از چهار قانون زیر استفاده می‌شود:

• ترتیب بردارهای ورودی (قسمت یکسوکننده) به صورت $\gamma\delta 0$ می‌باشد.

• وقتی مجموع سکتورهای بردار ولتاژ خروجی و جریان ورودی فرد باشند، باید ترتیب بردار خروجی (قسمت اینورتر) به صورت $\alpha\beta\alpha 0$ باشد.

• وقتی مجموع سکتورهای بردار ولتاژ خروجی و جریان ورودی زوج باشند، باید ترتیب بردار خروجی (قسمت اینورتر) به صورت $\beta\alpha\beta 0$ باشد.

جدول (۱): حالت‌های کلی سوئیچ‌زنی برای روش‌های مدولاسیون بردار فضایی

روش	جمع سکتورهای ورودی و خروجی	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳	حالت ۴	حالت ۵	حالت ۶	حالت ۷	حالت ۸	حالت ۹	
CSVM	زوج	$d_{\gamma\alpha}/2$	$d_{\gamma\beta}/2$	$d_{\delta\beta}/2$	$d_{\delta\alpha}/2$	d_0	$d_{\delta\alpha}/2$	$d_{\delta\beta}/2$	$d_{\gamma\beta}/2$	$d_{\gamma\alpha}/2$	
	فرد	$d_{\gamma\beta}/2$	$d_{\gamma\alpha}/2$	$d_{\delta\alpha}/2$	$d_{\delta\beta}/2$	d_0	$d_{\delta\beta}/2$	$d_{\delta\alpha}/2$	$d_{\gamma\alpha}/2$	$d_{\gamma\beta}/2$	
ISVM	$\theta_c < \pi/6$	زوج	$d_{\gamma\alpha}/2$	$d_{\gamma\beta}/2$	$d_{\delta\beta}/2$	$d_{\delta\alpha}/2$	d_0	$d_{\delta\alpha}/2$	$d_{\delta\beta}/2$	$d_{\gamma\beta}/2$	$d_{\gamma\alpha}/2$
		فرد	$d_{\gamma\beta}/2$	$d_{\gamma\alpha}/2$	$d_{\delta\alpha}/2$	$d_{\delta\beta}/2$	d_0	$d_{\delta\beta}/2$	$d_{\delta\alpha}/2$	$d_{\gamma\alpha}/2$	$d_{\gamma\beta}/2$
	$\theta_c \geq \pi/6$	زوج	$d_0/2$	$d_{\gamma\alpha}/2$	$d_{\gamma\beta}/2$	$d_{\delta\beta}/2$	$d_{\delta\alpha}$	$d_{\delta\beta}/2$	$d_{\gamma\beta}/2$	$d_{\gamma\alpha}/2$	$d_0/2$
		فرد	$d_0/2$	$d_{\gamma\beta}/2$	$d_{\gamma\alpha}/2$	$d_{\delta\alpha}/2$	$d_{\delta\beta}$	$d_{\delta\alpha}/2$	$d_{\gamma\alpha}/2$	$d_{\gamma\beta}/2$	$d_0/2$

جدول (۲): مثال‌هایی از روش‌های مدولاسیون بردار فضایی

روش	سکتور جریان ورودی	سکتور ولتاژ خروجی	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳	حالت ۴	حالت ۵	حالت ۶	حالت ۷	حالت ۸	حالت ۹
			ABC	ABC	ABC	ABC	ABC	ABC	ABC	ABC	ABC
CSVM	۱	۱	abb	aab	aac	acc	ccc	acc	aac	aab	abb
	۲	۱	aac	acc	bcc	bbc	bbb	bbc	bcc	acc	aac
ISVM	$\theta_c < \pi/6$	۱	abb	aab	aac	acc	ccc	acc	aac	aab	abb
		۲	aac	acc	bcc	bbc	bbb	bbc	bcc	acc	aac
	$\theta_c \geq \pi/6$	۱	bbb	abb	aab	aac	acc	aac	aab	abb	bbb
		۲	aaa	aac	acc	bcc	bbc	bcc	acc	aac	aaa

جدول (۳): حداکثر مقدار ولتاژ وجه مشترک با توجه به بردار ولتاژ خروجی

بردار ولتاژ خروجی	$U_{CMV}(\max)$
$V_7[111]$	$\sqrt{3}/2 \cdot V_{phase_peak} = V_{line_peak} / 2$
$V_0[000]$	$-\sqrt{3}/2 \cdot V_{phase_peak} = -V_{line_peak} / 2$
$V_2[110], V_4[011], V_6[101]$	$V_{phase_peak} / \sqrt{3} = V_{line_peak} / 3$
$V_1[100], V_3[010], V_5[001]$	$V_{phase_peak} / \sqrt{3} = V_{line_peak} / 3$

۴.۲. روش پیشنهادی کاهش ولتاژ وجه مشترک با حذف بردار صفر مثبتی بر CSVM

اولین بار در [۱۸] ایده استفاده از بردار فعال به جای بردار صفر (NZSVM) مطرح شد. در این روش، به جای اعمال بردار صفر از یکی از بردارهای فعال و معکوس آن استفاده شده است. مدت زمان اعمال بردار صفر در طی پریود سوئیچ‌زنی، به چهار قسمت تقسیم می‌شود و قسمت اول آن در ابتدا، دو قسمت از آن در وسط و قسمت چهارم آن در انتهای دوره کلیدزنی اعمال می‌شود. این روش مثبتی بر تغییر بردار جریان ورودی است؛ برای مثال، اگر جریان ورودی در سکتور ۱ باشد، در حالت ۲ بردار جریان **ab** می‌باشد که می‌بایست در حالت ۱ (زمان اعمال بردار صفر) بردار جریان **cb** (که ۶۰ درجه از بردار **ab** عقب‌تر است) اعمال شود. با توجه به تقارن موجود در

در این روش، قوانین زیر به قوانین مدولاسیون بردار فضایی معمول اضافه می‌شود:

- ولتاژ فاز ورودی با کمترین مقدار لحظه‌ای (از نظر قدر مطلق) به عنوان بردار صفر انتخاب می‌شود.
- اگر $0 \leq \theta_c \leq \pi/6$ باشد، بردار صفر در وسط پریود کلیدزنی قرار می‌گیرد.
- اگر $\pi/6 \leq \theta_c \leq \pi/3$ باشد، بردار صفر در طرفین پریود کلیدزنی قرار می‌گیرد.

در جدول (۱)، حالت‌های کلی برای سوئیچ‌زنی روش ISVM نشان داده شده و در جدول (۲)، مثال‌هایی از حالت کلی آورده شده است. در این حالت، مقدار ولتاژ وجه مشترک به $\sqrt{3}/3 V_{phase_peak}$ کاهش می‌یابد.

صفر اعمال شود و در دو قسمت دیگر از زمان در یک دوره تناوب کلیدزنی باید بردار معکوس با بردار فعال قبلی اعمال شود و در قسمت چهارم نیز مجدداً بردار فعال اول اعمال شود.

برای بردار معکوس باید برداری از ولتاژ را که در جهت عکس با بردار فعال کنونی است، اعمال کرد؛ مثلاً اگر ولتاژ خروجی در سکتور یک است و در لحظه قبل از زمان صفر، بردار ولتاژ فعال [۱۰۰] باشد، آنگاه برای بردار معکوس، باید بردار ولتاژ [۰۱۱] را اعمال کرد.

با استفاده از این روش، ولتاژ وجه مشترک به مقدار $\sqrt{3}/3V_{phase-peak}$ کاهش می‌یابد که با مقدار ولتاژ وجه مشترک در روش ISVM برابر است، ولی مزیت این روش نسبت به ISVM کوچک‌تر شدن جدول حالت‌های آن و در نتیجه ساده‌تر شدن آن است. این روش دارای ۹ مرحله سوئیچ‌زنی است که نسبت به روش NZSVM تعداد مراحل کمتری دارد، در نتیجه تلفات سوئیچ‌زنی آن کاهش می‌یابد. در جدول (۷)، مثال‌هایی از حالت‌های سوئیچ‌زنی در سکتورهای مختلف ولتاژ و جریان آورده شده است.

پریود سوئیچ‌زنی، حالت ۱۱ نیز مشابه حالت ۱ می‌باشد. در حالت ۴ بردار جریان ac می‌باشد که در حالت ۵ (زمان اعمال بردار صفر) بردار جریان bc (که ۶۰ درجه از بردار ac جلوتر است) اعمال می‌شود. در جدول (۴)، حالت کلی روش NZSVM آورده شده و در جدول (۵)، مثالی از آن نشان داده شده است. با استفاده از این روش، مقدار ولتاژ مشترک به $(\sqrt{3}/3)V_{phase-peak}$ می‌رسد، ولی همان‌طور که در جدول (۴) دیده می‌شود، تعداد مراحل سوئیچ‌زنی در یک پریود سوئیچ‌زنی ۱۱ مرحله است که باعث افزایش تلفات سوئیچ‌زنی می‌شود.

در روش پیشنهادی از مدولاسیون بردار فضایی معمول استفاده شده است. در این روش، همانند NZSVM به جای اعمال بردار صفر از یکی از بردارهای فعال و معکوس آن استفاده شده است. مدت زمان بردار صفر که مطابق با جدول (۶) در یک دوره کلیدزنی اعمال می‌شود، به چهار قسمت تقسیم می‌شود. در این روش، یک قسمت از مدت زمان لازم برای اعمال بردار صفر، باید بردار فعال قبل از بردار

جدول (۴): حالت کلی سوئیچ‌زنی روش NZSVM

حالت ۱۱	حالت ۱۰	حالت ۹	حالت ۸	حالت ۷	حالت ۶	حالت ۵	حالت ۴	حالت ۳	حالت ۲	حالت ۱	جمع سکتورهای ورودی و خروجی
$d_0/4$	$d_{\gamma\alpha}/2$	$d_{\gamma\beta}/2$	$d_{\delta\beta}/2$	$d_{\delta\alpha}/2$	$d_0/2$	$d_{\delta\alpha}/2$	$d_{\delta\beta}/2$	$d_{\gamma\beta}/2$	$d_{\gamma\alpha}/2$	$d_0/4$	زوج
$d_0/4$	$d_{\gamma\beta}/2$	$d_{\gamma\alpha}/2$	$d_{\delta\alpha}/2$	$d_{\delta\beta}/2$	$d_0/2$	$d_{\delta\beta}/2$	$d_{\delta\alpha}/2$	$d_{\gamma\alpha}/2$	$d_{\gamma\beta}/2$	$d_0/4$	فرد

جدول (۵): مثال‌هایی از روش NZSVM

حالت ۱۱	حالت ۱۰	حالت ۹	حالت ۸	حالت ۷	حالت ۶	حالت ۵	حالت ۴	حالت ۳	حالت ۲	حالت ۱	سکتور ولتاژ خروجی	سکتور جریان ورودی
ABC	ABC	ABC	ABC	ABC	ABC	ABC	ABC	ABC	ABC	ABC	ولتاژ خروجی	جریان ورودی
cbb	abb	aab	aac	acc	bcc	acc	aac	aab	abb	cbb	۱	۱
aab	aac	acc	bcc	bbc	bba	bbc	bcc	acc	aac	aab	۱	۲

جدول (۶): حالت سوئیچ‌زنی روش پیشنهادی

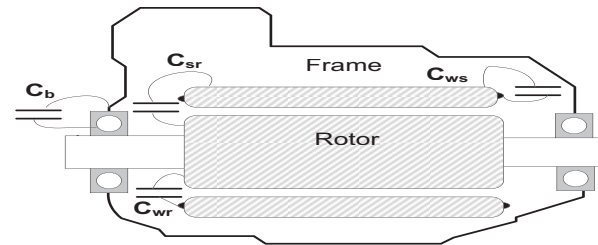
حالت ۹	حالت ۸	حالت ۷	حالت ۶	حالت ۵	حالت ۴	حالت ۳	حالت ۲	حالت ۱	جمع سکتورهای ورودی و خروجی
$d_{\gamma\alpha}/2$	$d_{\gamma\beta}/2$	$d_{\delta\beta}/2$	$d_{\delta\alpha}/2+d_0/4$	$d_0/2$	$d_{\delta\alpha}/2+d_0/4$	$d_{\delta\beta}/2$	$d_{\gamma\beta}/2$	$d_{\gamma\alpha}/2$	زوج
$d_{\gamma\beta}/2$	$d_{\gamma\alpha}/2$	$d_{\delta\alpha}/2$	$d_{\delta\beta}/2+d_0/4$	$d_0/2$	$d_{\delta\beta}/2+d_0/4$	$d_{\delta\alpha}/2$	$d_{\gamma\alpha}/2$	$d_{\gamma\beta}/2$	فرد

جدول (۷): مثال‌هایی از روش پیشنهادی

حالت ۹	حالت ۸	حالت ۷	حالت ۶	حالت ۵	حالت ۴	حالت ۳	حالت ۲	حالت ۱	سکتور ولتاژ خروجی	سکتور جریان ورودی
ABC	ABC	ABC	ABC	ABC	ABC	ABC	ABC	ABC	ولتاژ خروجی	سکتور جریان ورودی
abb	aab	aac	acc	caa	acc	aac	aab	abb	۱	۱
aac	acc	bcc	bbc	ccb	bbc	bcc	acc	aac	۱	۲
bab	aab	aac	cac	aca	cac	aac	aab	bab	۲	۱
aac	cac	cbc	bcc	ccb	bbc	cbc	cac	aac	۲	۲

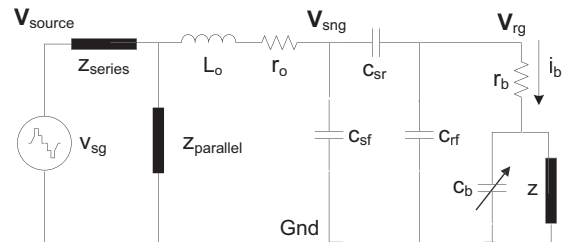
۳. مدل‌سازی جریان بیرینگ

به منظور مدل‌سازی جریان بیرینگ، از مدل مؤلفه صفر مجموعه درایو-کابل - موتور با در نظر گرفتن اثر خازن‌های پارازیتی موتور استفاده می‌شود.



شکل (۴): خازن‌های پارازیتی موتور القایی

ظرفیت‌های خازنی موتور القایی که شامل ظرفیت خازنی روتور-استاتور (C_{sr})، ظرفیت خازنی سیم‌پیچ - روتور (C_{wr})، ظرفیت خازنی سیم‌پیچ - استاتور (C_{ws}) و ظرفیت خازنی بیرینگ (C_b) ناشی از فیلم نازک روانکار می‌باشد، در شکل (۴) نشان داده شده است [۲۲]. در مدار معادل موتور شکل (۵)، تصادفی بودن میزان ضخامت فیلم نازک روانکار با عنصر غیر خطی Z ، اثر کابل و درایو با امپدانس‌های $Z_{parallel}$ ، Z_{series} ، L_o ، r_o و ولتاژ وجه مشترک با V_{sg} مدل‌سازی شده است [۲۳].

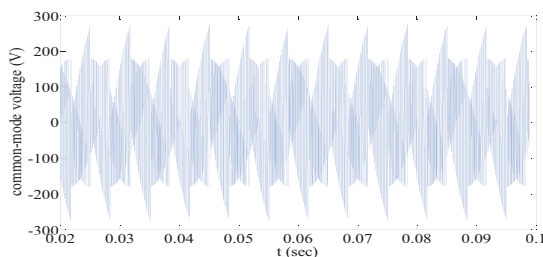


شکل (۵): مدار معادل فرکانس بالای موتور از نگاه وجه مشترک

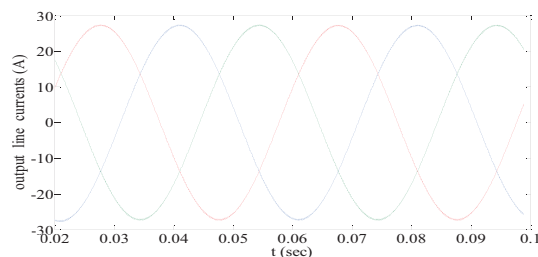
۴. نتایج شبیه‌سازی

شبیه‌سازی مدل ماتریسی غیرمستقیم شکل (۱-ب) با استفاده از نرم‌افزار ++C انجام شده است. روش‌های مدولاسیون CSVM و NZSVM با روش پیشنهادی در این مقاله مقایسه شده است و مشاهده می‌شود که با استفاده از روش پیشنهادی مقدار ولتاژ وجه مشترک که هدف اصلی استفاده از این روش می‌باشد، در مقایسه با روش CSVM کاهش یافته است.

از یک منبع سه فاز سینوسی با دامنه ۳۱۱ ولت و فرکانس ۵۰ هرتز به عنوان تغذیه مدل ماتریسی استفاده شده است. اگر از روش مدولاسیون CSVM استفاده شود، مقدار ولتاژ وجه مشترک، ۲۶۹/۳۳۴ ولت می‌شود، در حالی که اگر از روش‌های NZSVM و پیشنهادی در این مقاله استفاده شود، مقدار ولتاژ وجه مشترک به ۱۷۹/۵۵۶ ولت می‌رسد که حدود ۳۴٪ نسبت به روش قبل کاهش می‌یابد؛ به عبارت دیگر، میزان ولتاژ وجه مشترک به ۵۷٪ ولتاژ لینک dc می‌رسد. تفاوت اصلی روش پیشنهادی در این مقاله با روش مدولاسیون NZSVM در تعداد مراحل سوئیچ‌زنی است. روش پیشنهادی، ۲ مرحله کمتر سوئیچ‌زنی دارد. شبیه‌سازی برای ولتاژ مطلوب با دامنه ۲۰۰ ولت و فرکانس‌های ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ هرتز انجام شده است. شکل موج‌های ولتاژ خط خروجی، جریان خط خروجی، ولتاژ وجه مشترک و جریان بلبرینگ برای فرکانس ۵۰ هرتز در شکل (۶) نشان داده شده و منحنی جریان خط خروجی و ولتاژ وجه مشترک برای فرکانس‌های ۲۵ و ۱۰۰ هرتز در شکل‌های (۷) و (۸) آورده شده است.

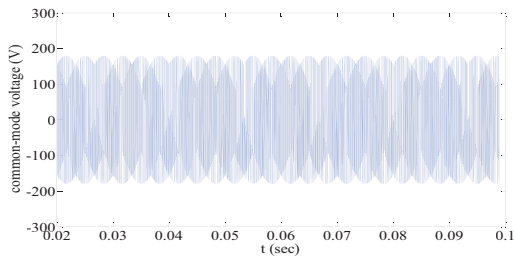


(ب)

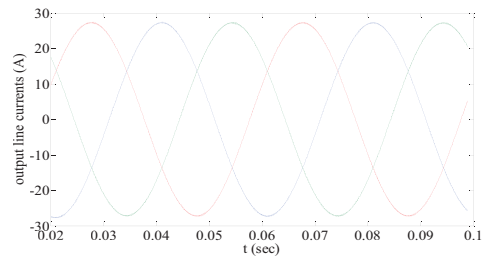


(الف)

شکل (۶): خروجی مدل ماتریسی با مدولاسیون CSVM با فرکانس خروجی ۲۵ هرتز (الف) جریان‌های خط خروجی مدل ماتریسی (ب) ولتاژ وجه مشترک

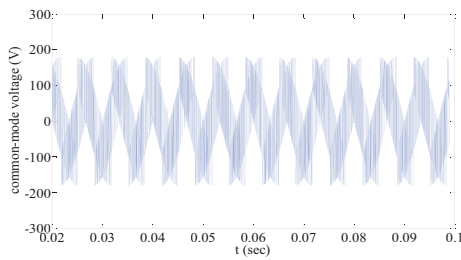


(ب)

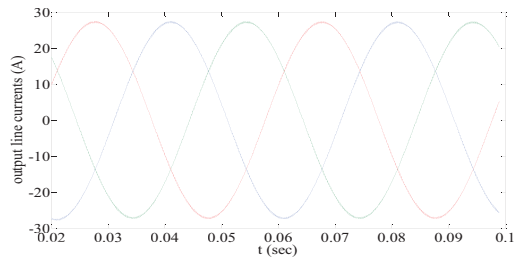


(الف)

شکل (۷): خروجی مبدل ماتریسی با مدولاسیون NZSVM با فرکانس خروجی ۲۵ هرتز
(الف) جریان‌های خط خروجی مبدل ماتریسی (ب) ولتاژ وجه مشترک

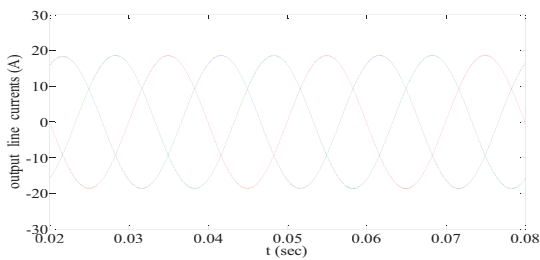


(ب)

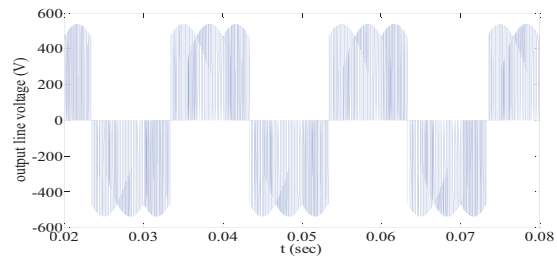


(الف)

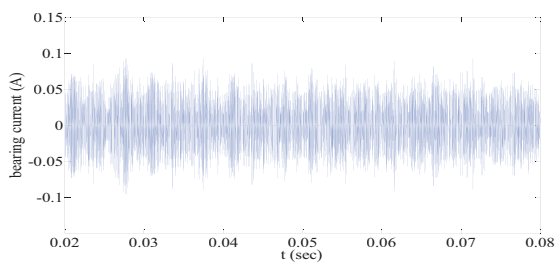
شکل (۸): خروجی مبدل ماتریسی با مدولاسیون روش پیشنهادی با فرکانس خروجی ۲۵ هرتز
(الف) جریان‌های خط خروجی مبدل ماتریسی (ب) ولتاژ وجه مشترک



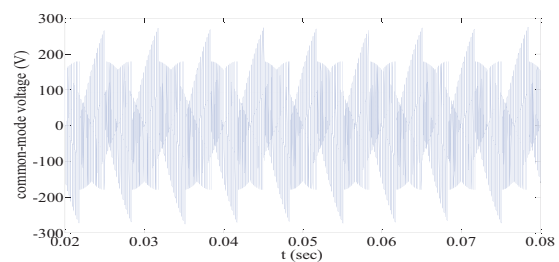
(ب)



(الف)

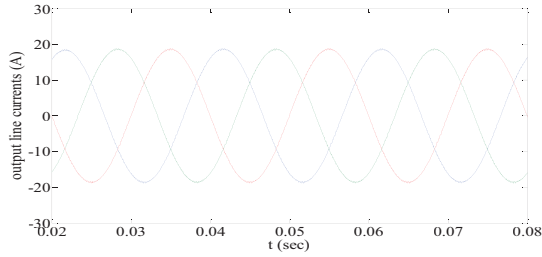


(د)

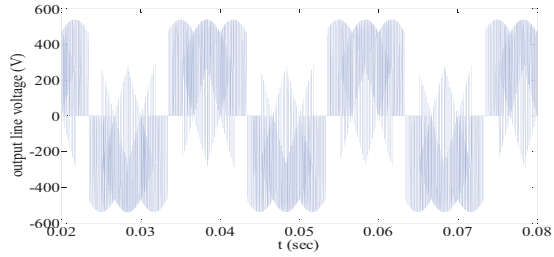


(ج)

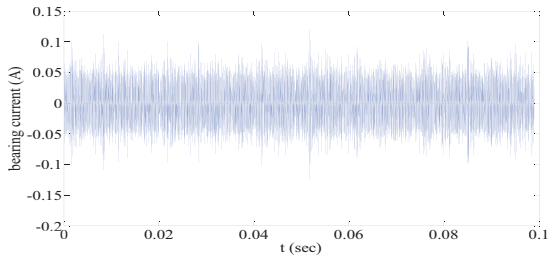
شکل (۹): خروجی مبدل ماتریسی با مدولاسیون CSVM با فرکانس خروجی ۵۰ هرتز
(الف) ولتاژ خط خروجی مبدل ماتریسی (ب) جریان‌های خط خروجی مبدل ماتریسی (ج) ولتاژ وجه مشترک (د) جریان بلبرینگ



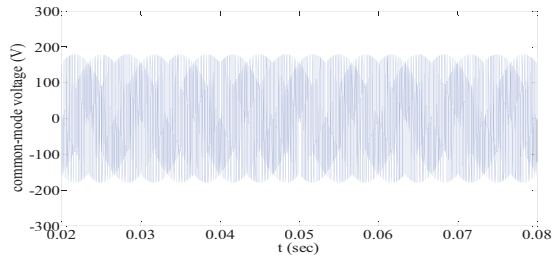
(ب)



(الف)

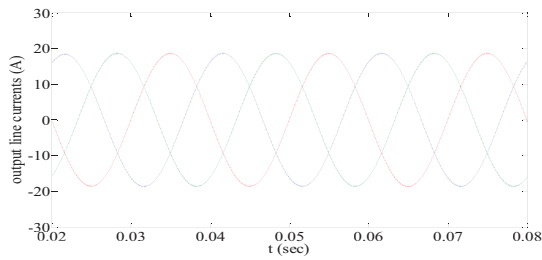


(د)

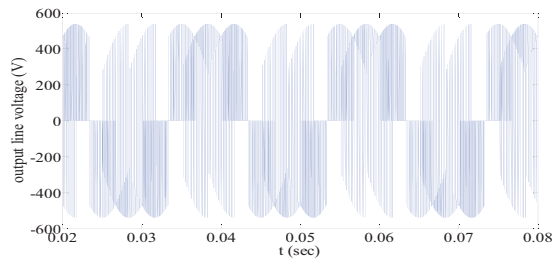


(ج)

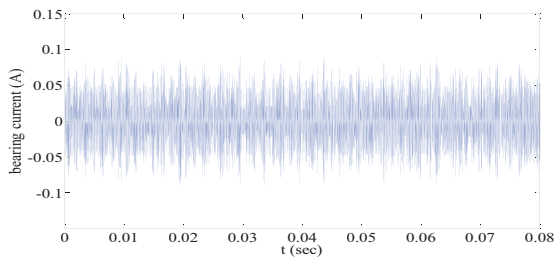
شکل (۱۰): خروجی مبدل ماتریسی با مدولاسیون NZSVM با فرکانس خروجی ۵۰ هرتز
 (الف) ولتاژ خط خروجی مبدل ماتریسی (ب) جریان‌های خط خروجی مبدل ماتریسی (ج) ولتاژ وجه مشترک (د) جریان بلبرینگ



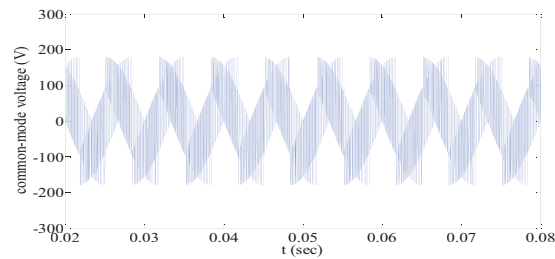
(ب)



(الف)

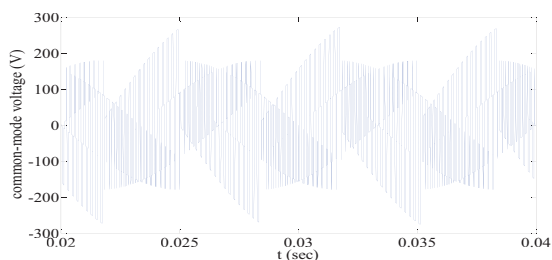


(د)

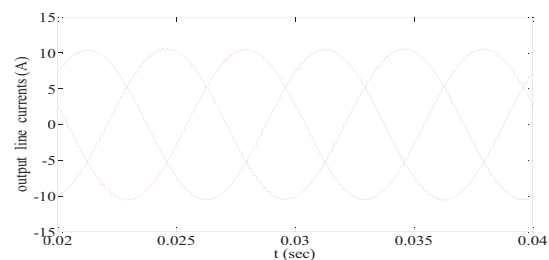


(ج)

شکل (۱۱): خروجی مبدل ماتریسی با مدولاسیون روش پیشنهادی با فرکانس خروجی ۵۰ هرتز
 (الف) ولتاژ خط خروجی مبدل ماتریسی (ب) جریان‌های خط خروجی مبدل ماتریسی (ج) ولتاژ وجه مشترک (د) جریان بلبرینگ

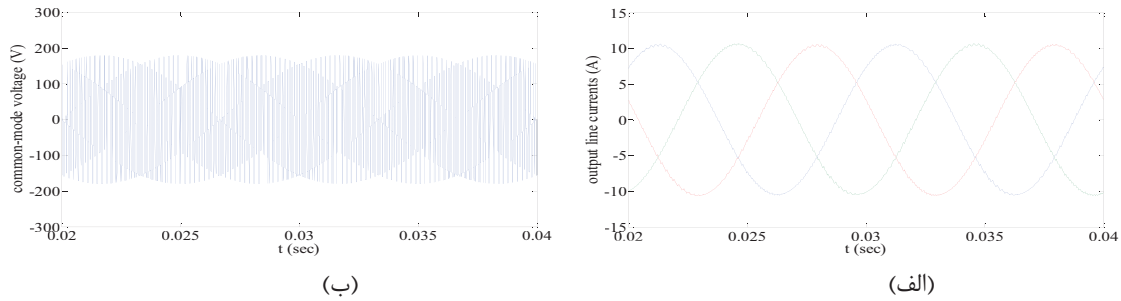


(ب)

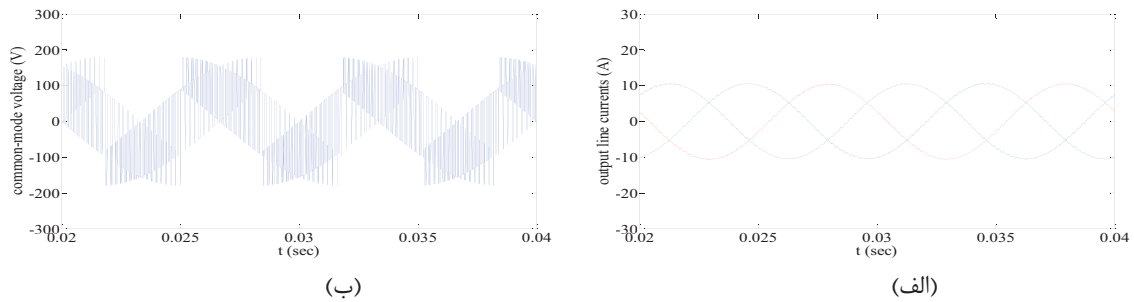


(الف)

شکل (۱۲): خروجی مبدل ماتریسی با مدولاسیون CSVM با فرکانس خروجی ۱۰۰ هرتز (الف) جریان‌های خط خروجی مبدل ماتریسی (ب) ولتاژ وجه مشترک



شکل (۱۳): خروجی مبدل ماتریسی با مدولاسیون NZSVM با فرکانس خروجی ۱۰۰ هرتز (الف) جریان‌های خط خروجی مبدل ماتریسی (ب) ولتاژ وجه مشترک



شکل (۱۴): خروجی مبدل ماتریسی با مدولاسیون روش پیشنهادی با فرکانس خروجی ۱۰۰ هرتز (الف) جریان‌های خط خروجی مبدل ماتریسی (ب) ولتاژ وجه مشترک

دارای مراحل کمتری است و تلفات سوئیچ زنی کمتری دارد. شبیه سازی برای مقایسه روش پیشنهادی و روش مدولاسیون بردار فضایی معمول صورت گرفته و ساخت مجموعه عملی این مبدل با روش پیشنهادی در دست انجام است.

سپاسگزاری

مؤلفان برخود لازم می‌دانند از حمایت‌های قطب علمی آنالیز غیرخطی، بهینه‌سازی و کنترل دانشگاه شهرکرد در انجام این تحقیق تشکر نمایند.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش جدید برای کاهش ولتاژ وجه مشترک در مبدل ماتریسی غیرمستقیم ارائه شده است. در روش پیشنهادی، از بردار معکوس به جای بردار صفر استفاده می‌شود. این روش نسبت به روش مدولاسیون بردار فضایی معمول، مقدار ولتاژ وجه مشترک را به مقدار ۳۴٪ و نسبت به اینورتر SVM کلاسیک به میزان ۵۷٪ کاهش می‌دهد. در این روش، مقدار ولتاژ وجه مشترک با روش مدولاسیون بردار فضایی بهبود یافته برابر است، ولی روش پیشنهادی دارای ساختار ساده‌تری می‌باشد. همچنین این روش نسبت به اولین روش NZSVM

مراجع

- [1] Venturini, M., "A New Sine Wave in Sine Wave out, Conversion Technique Which Eliminates Reactive Elements", Proceedings of Powercon 7, pp. 447-454, 1980.
- [2] Alesina, A., Venturini, M., "Analysis and Design of Optimum-Amplitude Nine Switch Direct AC-AC Converters", IEEE Tran. Power Electron., Vol. 4, No. 1, pp. 101-112, 1989.
- [3] Kim, S., Sul, S. K., Lipo, T. A., "AC/AC power conversion based on matrix converter topology with unidirectional switches", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 36, No. 2, pp. 139-145, 2000.
- [4] Casadei, D., Serra, G., Tani, A., Zarri, L., "Matrix converter modulation strategies: a new general approach based on space

- vector representation of the switch state", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 49, No. 2, pp. 370-381, 2002.
- [5] Wheeler, P. W., Rodriguez, J., Clare, J. C., et al, "Matrix Converters: a Technology Review", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 49, No. 2, pp. 276-288, 2002.
- [6] Casadei D., Serra G., Tani A., Zari L., "Optimal use of zero vectors for minimizing the output current distortion in matrix converters", IEEE Trans. Ind. Electron. Vol. 56, No. 2, pp. 326–336, 2009.
- [7] Kolar, J.W.; Friedli, T.; Rodriguez, J.; Wheeler, P.W., "Review of Three-Phase PWM AC-AC Converter Topologies", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 58, No. 11, pp. 4988-5006, 2011.
- [8] Wei, L., Lipo, T. A., "A novel matrix converter topology with simple commutation", Proc. Conf. Rec. IEEE IAS Annual Meeting, Vol. 3, pp. 1749–1754, 2001.
- [9] Kolar, J. W., Baumann, M., Schafmeister, F., Ertl, H., "Novel three-phase AC-DC-AC sparse matrix converter", Proc. Conf. Rec. IEEE APEC, Vol. 2, pp. 777–791, 2002.
- [10] Klumpner, C., "An indirect matrix converter with a cost effective protection and control", Conf. Rec. EPE'05, 2005, 11 p., CD-ROM.
- [11] Jussila, M., Salo, M., Tuusa, H., "Induction motor drive fed by a vector modulated indirect matrix converter", Proc. Conf. Rec. IEEE PESC, pp. 2862–2868, 2004.
- [12] Huber, L., Borojevic, D., "Space vector modulated three-phase to three-phase matrix converter with input power factor correction", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 31, pp. 1234–1245, 1995.
- [13] Nielsen, P., Blaabjerg, F., Pedersen, J. K., "Space vector modulated matrix converter with minimized number of switching and a feedforward compensation of input voltage unbalance", in Proc. PEDES'96, Vol. 2, pp. 833–839, 1996.
- [14] Cha, H. J., Enjeti, P. N., "An Approach to Reduce Common-Mode Voltage in Matrix Converter", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 39, No. 4, pp. 1151-1159, 2003.
- [15] Espina, J., Balcells, J., Arias, A., Ortega, C., "Common Mode EMI Model for a Direct Matrix Converter", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 58, No. 11, pp. 5049-5056, 2011.
- [16] Rendusara D. A., Enjeti, P. N., "An improved inverter output filter configuration reduces common and differential modes dv/dt at the motor terminals in PWM drive systems", IEEE Trans. Power Electron., Vol. 13, pp. 1135–1143, 1998.
- [17] میلی منفرد، ج.، تقی پور، ص.، «محرکه‌های الکتریکی»، ترجمه، انتشارات دانشگاه امیرکبیر، ۱۳۸۹.
- [18] Lee, H. H., Nguyen, H. M., Jung, E. H., "A study on reduction of common-mode voltage in matrix converter with unity input power factor and sinusoidal input/output waveforms", Proc. Conf. Rec. IEEE IECON, pp. 1210–1216, 2005.
- [19] Hara, H., Yamamoto, E., Higuchi, T., Yamada, K., Kang, J. K., Kume, T., "PWM methods and common-mode voltage characteristics of matrix converter-driven AC machines", Proc. Conf. Rec. IEE-Japan IPEC, pp. 552–557, 2005.
- [20] Nguyen, T. D., Lee, H. H., "Modulation Strategies to Reduce Common-Mode Voltage for Indirect Matrix Converter", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 59, No. 1, pp. 129- 139, 2012.
- [21] Vargas R., Ammann U., Rodriguez J., Pontt J., "Predictive Strategy to Control Common-Mode Voltage in Loads Fed by Matrix Converters", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 55 n. 12, pp. 4372-4380, Dec 2008.
- [22] Muetze A., "Radio Frequency Measurement Method for Detecting Bearing Currents in Induction Motors", Thesis for the degree of Doctor of Science at Lappeenranta University, May 2009.
- [23] Binder A., Muetze A., "Scaling Effects of Inverter-Induced Bearing Currents in Ac Machines", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 44, No. 3, pp. 769-776, 2008.