

یک تکنیک مدولاسیون جایگزین برای مدولاسیون SVM متداول: کاهش حجم محاسبات

محمد توسلی^۱، محمد توکلی بینا^۲، مسعود علی اکبر گلکار^۳

^۱ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی برق، گروه قدرت، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، tavasoli@ee.kntu.ac.ir

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی برق، گروه قدرت، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، tavakoli_bina@ieee.org

^۳ استاد، دانشکده مهندسی برق، گروه قدرت، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، golkar@eetd.kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۰/۴/۵، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۰/۶/۲۷)

چکیده: SVM یک تکنیک مدولاسیون شناخته شده برای مبدل های قدرت با توان متوسط و ولتاژ بالا می باشد. باید توجه داشت که تمام فرآیند مدولاسیون برای هدف پیاده سازی می تواند زمان بر باشد که علت آن یافتن موقعیت بردار مرجع به علاوه اجرای محاسبات ضروری برای مدولاسیون می باشد. علاوه بر آن با افزایش تعداد سطوح در مبدل های چند سطحی، زمان این محاسبات برای SVM های متداول افزایش می یابد. این مقاله یک تکنیک مدولاسیون را که بر روی دو ولتاژ خط مستقل، متمرکز می شود، معرفی می کند به نحوی که به طور مستقیم از ولتاژهای خط در فرآیند یافتن بردارهای سوئیچینگ و نسبت وظیفه های آنها استفاده می کند. مدولاسیون پیشنهادی نه تنها سریع و ساده می باشد بلکه به فرآیند جایابی بردار مرجع که برای مدولاسیون SVM متداول دارای نقش حیاتی است، احتیاجی ندارد. با ارائه دو مثال صحت روش ارائه شده با استفاده از نرم افزار MATLAB مورد بررسی قرار می گیرد.

کلمات کلیدی: مدولاسیون SVM، تکنیک جایابی بردار مرجع، مدولاسیون تک فاز، مدولاسیون چند سطحی

A Comprehensive Alternative for the Conventional SVM: Reduction Computation Cost

Mohammad Tavasoli, Mohammad Tavakoli Bina, Masoud Ali Akbar Golkar

Abstract: The SVM is the well known technique for power converters with medium power and high voltage. However, the whole modulating procedure could be time-consuming for implementation purposes because of seeking the location of the reference vector in addition to performing so many necessary computations. Furthermore, computational cost for conventional SVM rises when level numbers of the multilevel converters increases. This paper proposes a modulation technique that directly concentrates on a three-phase system, engaging two independent line voltages in the procedure of finding switching states and their duty ratios. Interestingly, the proposed method is not only simple and fast, but also nearly eliminates the procedure of positioning the reference vector for multilevel converters that is vital for the conventional SVM. Through examples and simulations, the validity of the proposed method in modulation process is demonstrated.

Keywords: SVM modulation, positioning technique of reference vector, single-phase modulation, multilevel modulat

مبدل های چند سطحی مزایای قابل توجهی در کاربردهای توان متوسط و ولتاژ بالا دارند [۱]. در مقایسه با ادوات دو سطحی، از اتصالات سری

۱- مقدمه

سیگنال مرجع می باشد. این روش به علت حجم کم محاسبات، برای پیاده سازی، ساده و سریع می باشد. به علاوه سه IDM مستقل در [۶] برای پیاده سازی یک تکنیک مدولاسیون سه فاز سریع و ساده برای مبدل های چند سطحی بکار گرفته شده است.

با این حال در روش ارائه شده در [۶] می توان نشان داد که حداقل ولتاژ سمت DC به منظور تولید ولتاژ مرجع در سمت AC نسبت به تکنیک SVM متداول بیشتر است. این سطح ولتاژ بیشتر در سمت DC به نوبه خود باعث افزایش THD تکنیک مدولاسیون می شود. به علاوه این روش، ایده ای برای تولید بردارهای افزوده ارائه نمی کند.

یک الگوریتم SVM سریع در [۷] پیشنهاد شده که بر خلاف روش های گفته شده به جای استفاده از ولتاژهای فاز برای تولید سیگنال های مرجع سه فاز از ولتاژهای خط مرجع به طور مستقیم برای دستیابی به بردارهای سوئیچینگ استفاده می کند. در این الگوریتم ولتاژهای خط با استفاده از یک تبدیل ماتریسی تبدیل به بردار ولتاژ $V_{ref}(g,h)$ می شوند. سپس با استفاده از مولفه های بردار $V_{ref}(g,h)$ و جزء صحیح آن ها، بردارهای سوئیچینگ مجاور بردار مرجع و نسبت و وظیفه آنها محاسبه می شوند. مشکل عمده این روش این است که از دنباله بردارهای سوئیچینگ غیر بهینه استفاده می کند [۸].

این مقاله، روشی برای حذف جایابی بردار مرجع در مدولاسیون SVM و دسترسی مستقیم به بردارهای سوئیچینگ و نسبت و وظیفه آنها پیشنهاد می کند به طوری که نتایج روش ارائه شده منطبق بر نتایج روش SVM متداول می باشد.

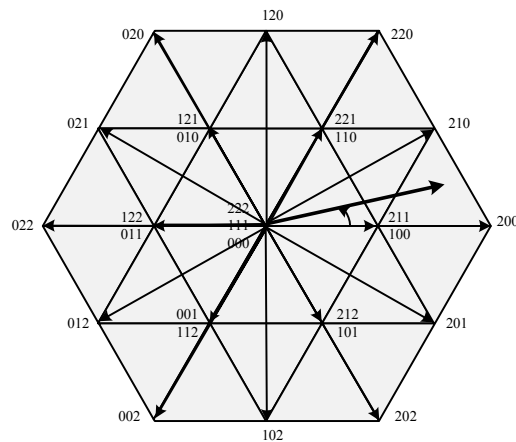
۲- تکنیک مدولاسیون پیشنهادی

بر خلاف روش SVM متداول، روش پیشنهادی به دنبال پیاده سازی ولتاژهای خط مستقل در سمت AC مبدل است که دارای کارکردی معادل روش SVM متداول می باشد. برای پیاده سازی روش ارائه شده ابتدا بردار مرجع خط مبدل تولید می شود، سپس با استفاده از این بردار، بردارهای سوئیچینگ مجاور بردار مرجع در فضای روش ارائه شده تعیین می شوند و نسبت و وظیفه بردارها با توجه به رابطه ولت-ثانه بدست می آیند. روش پیشنهادی با دنبال کردن ۴ گام در ادامه آورده شده است.

گام ۱) تولید بردار مرجع

شکل ۲ یک مبدل Diode Clamp سه سطحی را نشان می دهد. با توجه به این شکل، می توان ولتاژهای خط E_{ac} و E_{bc} ، تولید شده در سمت AC را بر حسب توابع سوئیچینگ فازها، برای یک مبدل N سطحی به صورت رابطه (۱) بیان کرد.

سوئیچ ها پرهیز می شود و کیفیت ولتاژ خروجی بهبود می یابد. در این رابطه پیچیدگی استراتژی مدولاسیون و نیز تعداد سوئیچ ها در این مبدل ها افزایش یافته است [۲]. روش متداول در پیاده سازی PWM دیجیتالی، تکنیک SVM است. SVM متداول از تبدیل موسوم به $\alpha\beta$ برای پیاده سازی یک ولتاژ مرجع در سمت AC مبدل های الکترونیک قدرت استفاده می کند. بردارهای سوئیچینگ و بردار مرجع انتقال یافته برای یافتن نسبت و وظیفه ها به منظور ساخت بردار مرجع مقایسه می شوند. شکل ۱ دیاگرام یک SVM سه سطحی را نشان می دهد که شامل ۵ بردار حالت فعال، دو بردار افزوده و سه بردار سه صفر برای هر یک ششم می باشد. بردار ولتاژ مرجع به وسیله این بردارهای سوئیچینگ (حالت های سوئیچینگ) قابل تحلیل می باشد.



شکل ۱: نمایش SVM سه سطحی

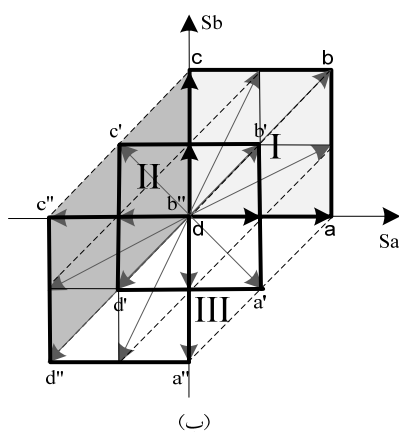
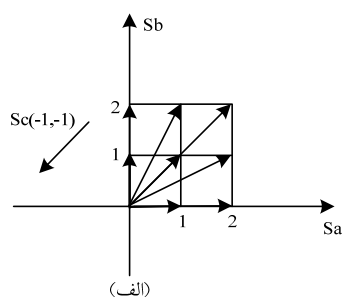
باید توجه داشت که تمام فرآیند مدولاسیون برای هدف پیاده سازی می تواند زمان بر باشد که علت آن یافتن موقعیت بردار مرجع به علاوه اجرای محاسبات ضروری برای مدولاسیون، محدودیت های مدولاتور از جهت ماکزیم پهنای باند کنترلر و فرکانس سوئیچینگ می باشد. علاوه بر آن با افزایش تعداد سطوح در مبدل های چند سطحی، زمان محاسبات در SVM متداول افزایش می یابد. به هر حال کاهش در زمان پروسه مدولاتور باعث بهره برداری بهتر از مزیت های مبدل چند سطحی می شود [۳]، [۴]. با کاهش زمان محاسبات مدولاسیون، می توان زمان نمونه برداری را کاهش و کیفیت ولتاژ خروجی را افزایش داد.

یک تکنیک جایابی سریع اما پیچیده در [۳] برای یافتن موقعیت بردار مرجع در میان مثلث های موجود در داخل دیاگرام SVM معرفی شده است. این مقاله برای یک مبدل n سطحی، یک ماتریس مختلط $1 \times (n-1)^2$ به منظور جایابی انتهای بردار مرجع پیشنهاد می کند، به طوری که شماره سطری از ماتریس مختلط که دارای قسمت حقیقی و موهومی منفی باشد، برابر شماره مثلث مورد نظر در فضای SVM است. در [۵] مدولاتور تک فاز IDM که می تواند در مبدل های چند سطحی تک فاز به کار گرفته شود، استفاده شده است. این روش بر مبنای متوسط گیری از نزدیکترین سطوح ولتاژ به ولتاژ مرجع برای تولید

دیاگرام شش ضلعی نامنتظم LVV که معادل نمودار شش ضلعی منتظم SVM متداول می‌باشد، با استفاده از روش عنوان شده، بدست آمد. باید توجه داشت که می‌توان یک تناظر یک به یک بین اجزاء این دو دیاگرام برقرار کرد.

$$\frac{2}{v_{dc}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_a \\ s_b \\ s_c \end{bmatrix} \quad (۳)$$

در شکل ۴ وضعیت‌های سوئیچینگ مربوط به یک مبدل چهار سطحی با تعمیم روش ارائه شده، رسم شده است.



شکل ۳: تعیین فضای حالت‌های سوئیچینگ الف) مکان هندسی حالت‌های سوئیچینگ (S_a, S_b) ب) مکان هندسی حالت‌های سوئیچینگ (S_a, S_b, S_c) در فضای دو بعدی

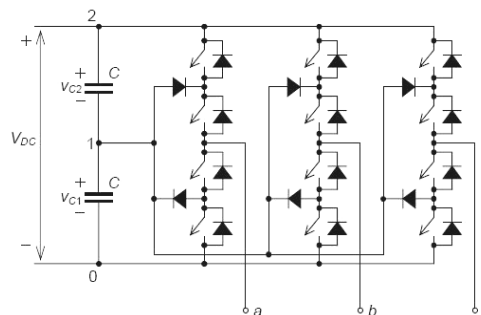
گام ۳) تشخیص ناحیه مربوط به بردار مرجع

شکل ۳-ب به سه ناحیه I و II و III تقسیم شده است، به طوری که هر ناحیه به وسیله شرایط جدول ۱ تعیین می‌شود. با توجه به جدول ۱ و معادله (۲) مشخص می‌شود که اندیس متغیرهای روابط مربوط به نواحی، به صورت دوره ای تکرار می‌شوند، این بدین معناست که می‌توان معادلات و بردارها را تنها در یک ناحیه مشخص کرد و با استفاده از یک تبدیل دوره ای به سایر نواحی تعمیم داد. از این رو، محاسبات

$$\begin{bmatrix} E_{ac} \\ E_{bc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_a - E_c \\ E_b - E_c \end{bmatrix} = \frac{v_{dc}}{N-1} \begin{bmatrix} s_a - s_c \\ s_b - s_c \end{bmatrix} = \frac{v_{dc}}{N-1} \begin{bmatrix} s_{ac} \\ s_{bc} \end{bmatrix} \quad (۱)$$

$s_x = \{0, 1, \dots, N-1\} \quad x = a, b, c$

در معادله (۱) مجموع ولتاژ خازن‌های سمت DC می‌باشد که ولتاژ هر کدام $\frac{v_{dc}}{N-1}$ فرض شده است. با توجه به شکل ۲ منظور از نسبت دادن اعداد ۰، ۱، ... و N-1 به تابع سوئیچینگ هر فاز، اتصال خروجی هر فاز به گره متناظر با آن عدد می‌باشد.



شکل ۲: مبدل Diode Clamp سه سطحی

در ادامه برای توضیح روش پیشنهادی، N را برابر ۳ در نظر می‌گیریم در این صورت $s_x = \{0, 1, 2\}$ خواهد بود. برای نمایش بردارهای سوئیچینگ در این حالت، معادله (۱) را به صورت معادله (۲) بازنویسی می‌شود.

$$\frac{2}{v_{dc}} \begin{bmatrix} E_a - E_c \\ E_b - E_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_a \\ s_b \end{bmatrix} - s_c \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (۲)$$

گام ۲) تولید فضای LVV

برای پیاده سازی ولتاژ مرجع در سمت AC با استفاده از حالت‌های سوئیچینگ، ابتدا باید فضای برداری را که می‌توان با استفاده از رابطه (۲) در نظر گرفت، تحلیل کنیم. بدین منظور ابتدا مکان هندسی نقاط $\begin{bmatrix} s_a \\ s_b \end{bmatrix}$ با توجه حوزه مقادیر توابع سوئیچینگ s_a و s_b در نظر گرفته شده که به صورت یک مربع می‌باشد و در شکل ۳-الف آورده شده است. سپس این نقاط را با بردار $s_c \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \end{bmatrix}$ در صفحه منتقل می‌کنیم. دو مربع $a''b''c''d''$ و $a'b'c'd'$ در شکل ۳-ب، نمایش انتقال مکان هندسی نقاط $\begin{bmatrix} s_a \\ s_b \end{bmatrix}$ می‌باشند. شکل حاصل نمایش فضای برداری ولتاژهای خط مبدل (LVV) با در نظر گرفتن حالت‌های سوئیچینگ فازها می‌باشد. بردارهای سوئیچینگ فضای LVV متناظر با بردارهای فضای SVM متداول می‌باشند، علت این امر آن است که روش پیشنهادی همانند روش متداول SVM از یک نگاهت خطی استفاده می‌کند که در معادله (۳) آورده شده است. بدین ترتیب

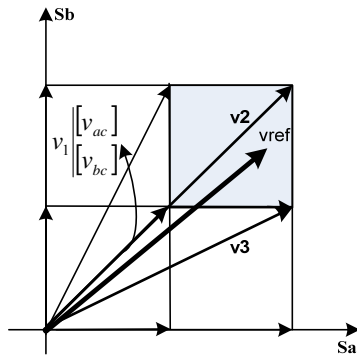
$$\frac{2}{v_{dc}} \begin{bmatrix} E_{a,ref} - E_{c,ref} \\ E_{b,ref} - E_{c,ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{ac1} \\ s_{bc1} \end{bmatrix} D_1 + \begin{bmatrix} s_{ac2} \\ s_{bc2} \end{bmatrix} D_2 + \begin{bmatrix} s_{ac3} \\ s_{bc3} \end{bmatrix} D_3 = v_1 D_1 + v_2 D_2 + v_3 D_3 \quad (۴)$$

$$\begin{bmatrix} s_{ac} \\ s_{bc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_a - s_c \\ s_b - s_c \end{bmatrix} \quad D_i = \frac{T_i}{T_s}; i=1,2,3$$

در رابطه (۴)، D_i نسبت وظیفه بردار سوئیچینگ v_i می باشد. متغیرهای v_{ac} و v_{bc} نیز به صورت زیر تعریف می شوند.

$$\begin{bmatrix} v_{ac} \\ v_{bc} \end{bmatrix} = \frac{2}{v_{dc}} \begin{bmatrix} E_{a,ref} - E_{c,ref} \\ E_{b,ref} - E_{c,ref} \end{bmatrix} \quad (۵)$$

اگر بردار مرجع در ناحیه I فرض شود، نوک این بردار در یک مربع کوچکتر، محصور می شود که در شکل ۵ به صورت سایه دار نشان داده شده است. معادله (۶) مختصات نقاط انتهایی قطر اصلی مربع کوچکتر را که متناظر با بردارهای سوئیچینگ می باشند، بیان می کند. [X] نماد جزء صحیح X می باشد)



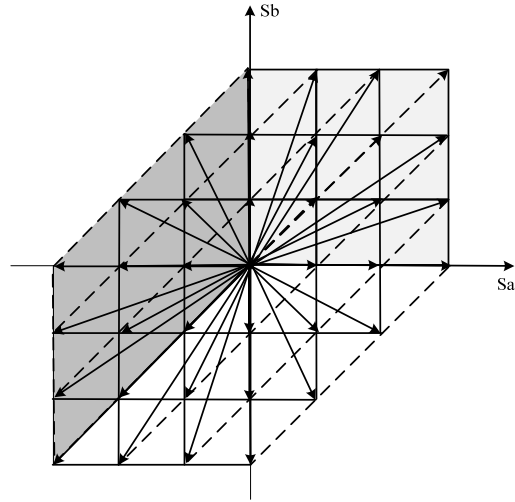
شکل ۵: نمایش بردار مرجع در ناحیه I به همراه بردارهای سوئیچینگ مجاور و نسبت وظیفه های آنها

$$v_1 \begin{bmatrix} [v_{ac}] \\ [v_{bc}] \end{bmatrix} + 1 \quad v_2 \begin{bmatrix} [v_{ac}] \\ [v_{bc}] \end{bmatrix} + 1 \quad (۶)$$

باید توجه کرد که برای ساخت بردار مرجع از بردارهای مجاور و نزدیکتر استفاده می شود. به منظور یافتن بردار سوم، با استفاده متغیر Sign موقعیت بردار مرجع نسبت به قطر اصلی مربع مشخص می شود. در معادله (۸) به کمک این متغیر، مختصات بردار سوئیچینگ سوم آورده شده است. با استفاده از بردارهای سوئیچینگ محاسبه شده و رابطه ولت-ثانیه، در معادله (۹) نسبت های وظیفه بردارهای سوئیچینگ محاسبه می شوند.

$$sign = v_{ac} - [v_{ac}] - (v_{bc} - [v_{bc}]) \quad (۷)$$

تماماً در ناحیه I انجام می شوند و در آخر به ناحیه اولیه خود منتقل می شوند. این تبدیلات دوره ای در جدول ۲ آمده است.



شکل ۴: فضای LVV چهار سطحی

جدول ۱: شرایط مرزهای هر ناحیه

ناحیه	شرایط	
I	$E_{ac} \geq 0$	$E_{bc} \geq 0$
II	$E_{ba} \geq 0$	$E_{ca} \geq 0$
III	$E_{cb} \geq 0$	$E_{ab} \geq 0$

جدول ۲: تبدیلات دوره ای مربوط به تبدیل نواحی II و III به ناحیه I

ناحیه	تبدیل		
II	$a \rightarrow c$	$b \rightarrow a$	$c \rightarrow b$
III	$a \rightarrow b$	$b \rightarrow c$	$c \rightarrow a$

در ادامه فرض می شود بردار مرجع در ناحیه I قرار دارد. پس از انجام محاسبات، باید از تبدیلات معکوس جدول ۳ برای تصحیح مولفه های بردارهای سوئیچینگ، استفاده کرد.

جدول ۳: تبدیلات دوره ای معکوس

ناحیه	تبدیلات معکوس		
II	$a \rightarrow b$	$b \rightarrow c$	$c \rightarrow a$
III	$a \rightarrow c$	$b \rightarrow a$	$c \rightarrow b$

گام ۴) محاسبه بردارهای سوئیچینگ و نسبت وظیفه آنها

برای پیاده سازی ولتاژ مرجع از معادله (۴) که بیان کننده برابری ولت-ثانیه سیگنال های سمت DC و AC میدل است، استفاده می شود. برای برقراری این رابطه، همانند روش SVM از سه بردار سوئیچینگ مجاور بردار مرجع استفاده شده است.

یکی از دو بردار تابع سوئیچینگ $\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ یا $\begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix}$ باشد. با مقایسه شکل

های ۲ و ۳-می توان بردارهای افزوده متناظر با هر بردار را در نمودار LVV دست یافت. با توجه به مختصات بردارهای توابع سوئیچینگ در شکل ۲، مشخص می شود که با اضافه کردن اعداد صحیح در محدوده مجاز به مولفه های بردار S_{abc} که در معادله (۱۰) معرفی شده اند، می توان به سایر بردارهای افزوده متناظر با آن بردارها دست یافت. در معادله (۱۱) بردار F به منظور محاسبه محدوده مجاز برای اضافه کردن اعداد صحیح به بردار S_{abc} به منظور بدست آوردن بردارهای افزوده مربوط یک بردار سوئیچینگ تعریف شده است.

$$F = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N-1-[v_{ac}] \\ N-1-[v_{bc}] \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$F_{\min} = \min\{F_1, F_2\} \quad k \in \{0, 1, \dots, F_{\min}\}$$

$$S_{abc, Redundant} = S_{abc} + k \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

به وسیله مولفه های پارامتر F می توان حداکثر مقداری را که می توان به مولفه های بردار S_{abc} به منظور محاسبه بردارهای افزوده اضافه کرد، بدست آورد.

۴- نتایج شبیه سازی

با استفاده از شبیه ساز MATLAB، روش پیشنهادی برای تولید یک سه فاز متعادل در خروجی مبدل های سه سطحی و پنج سطحی با فرکانس مدولاتور ۱/۵kHz، فرکانس ۵۰Hz و اندیس مدولاسیون ۰/۹۵ بکار گرفته می شود. شکل ۶ نمودار متغیرهای $\begin{bmatrix} v_{ac} \\ v_{bc} \end{bmatrix}$ که در معادله (۱۳) معرفی شده، در فضای LVV نشان می دهد.

$$\begin{bmatrix} v_{ac} \\ v_{bc} \end{bmatrix} = \frac{2v_m}{v_{dc}} \begin{bmatrix} \cos(\omega_0 t) - \cos(\omega_0 t + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega_0 t - \frac{2\pi}{3}) - \cos(\omega_0 t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$v_m = 0.95 \times 220 = 209(v)$$

مشاهده می شود که در این فضا مکان هندسی بردار مرجع سه فاز متعادل در یک سیکل منبع، به صورت بیضی است، در صورتی که با استفاده از تبدیل $\alpha\beta$ مکان هندسی سه فاز متعادل به شکل یک دایره می باشد. این تفاوت به علت استفاده از نگاشت های متفاوت است.

$$v_3 = \begin{cases} \begin{bmatrix} [v_{ac}] + 1 \\ [v_{bc}] \end{bmatrix} & \text{if } Sign \geq 0 \\ \begin{bmatrix} [v_{ac}] \\ [v_{bc}] + 1 \end{bmatrix} & \text{if } Sign < 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \begin{cases} D_1 = 1 - (v_{ac} - [v_{ac}]) \\ D_2 = v_{bc} - [v_{bc}] \end{cases} & \text{if } Sign \geq 0 \\ \begin{cases} D_1 = v_{ac} - [v_{ac}] \\ D_2 = 1 - (v_{bc} - [v_{bc}]) \end{cases} & \text{if } Sign < 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$D_3 = |Sign|$$

حال با توجه به بردارهای سوئیچینگ بدست آمده در فضای LVV به محاسبه توابع سوئیچینگ فازها می پردازیم. با دقت در شکل ۳-ب می توان به سادگی دریافت که در ناحیه I می توان تابع S_c را برابر صفر فرض کرد. با این فرض توابع سوئیچینگ فازها برای سه بردار سوئیچینگ S_{abc} به صورت معادله (۱۰) بیان می شوند.

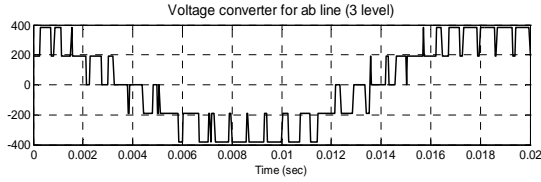
$$S_{abc1} = \begin{cases} s_{a1} \\ s_{b1} \\ s_{c1} \end{cases} = \begin{cases} [v_{ac}] \\ [v_{bc}] \\ 0 \end{cases} \quad S_{abc2} = \begin{cases} [v_{ac}] + 1 \\ [v_{bc}] + 1 \\ 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$S_{abc3} = \begin{cases} [v_{ac}] + 1 \\ [v_{bc}] \\ 0 \end{cases} \quad \text{or} \quad S_{abc3} = \begin{cases} [v_{ac}] \\ [v_{bc}] + 1 \\ 0 \end{cases}$$

انتخاب توابع سوئیچینگ و نسبت وظیفه آنها با استفاده از روش پیشنهادی با نتایج حاصل از روش های متداول SVM، یکسان است که در بخش شبیه سازی با ارائه مثال هایی به این موضوع پرداخته می شود. از مزایای روش پیشنهادی، سرعت بالای اجراء، حجم محاسبات کم و تعمیم پذیری آسان آن به مبدل های چند سطحی می باشد، به طوری که با افزایش تعداد سطوح، حجم محاسبات مدولاتور ثابت می ماند. لازم به ذکر است به علت در نظر گرفتن مناسب متغیرها در این روش، بردارهای محاسبه شده برای پیاده سازی بردار مرجع، حداقل کلیدزنی لازم را فراهم می کنند، به طوری که همیشه یک فاز در هر بازه سوئیچینگ دارای تابع سوئیچینگ ثابت می باشد.

۳- بردارهای افزوده

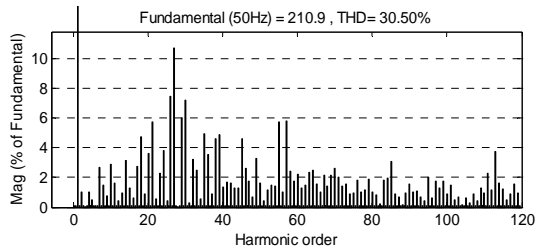
بردارهای افزوده، بردارهای سوئیچینگ متفاوتی هستند که ولتاژهای خط یکسان ولی با مولفه صفر متفاوت در خروجی مبدل تولید می کنند. به علاوه این بردارها دارای ولتاژ فاز یکسانی نیز در خروجی مبدل سه فاز می باشند. به عنوان مثال در شکل ۳-ب، بردار $\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$ می تواند نتیجه



(ب)

شکل ۸: ولتاژ خط ab مبدل سه سطحی الف) ولتاژ مرجع ب) ولتاژ مبدل

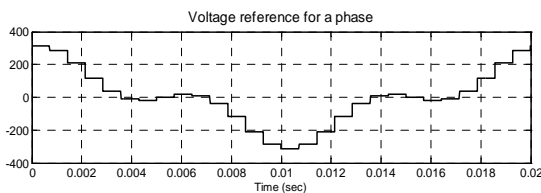
در ادامه سیگنال مرجع دیگری که شامل هارمونی سوم فرکانس اصلی می‌باشد، در نظر گرفته شده که در معادله (۱۴) آمده است. قابل ذکر است این هارمونی به گونه‌ای به مولفه اصلی ولتاژ مرجع اضافه شده که توالی صفر ولتاژ، صفر باقی بماند. علت این امر آن است که در ولتاژ خروجی مبدل سه ساق، مولفه توالی صفر تولید نمی‌شود.



شکل ۹: درصد نسبی هارمونیک های ولتاژ فاز نسبت به فرکانس اصلی برای مبدل سه سطحی

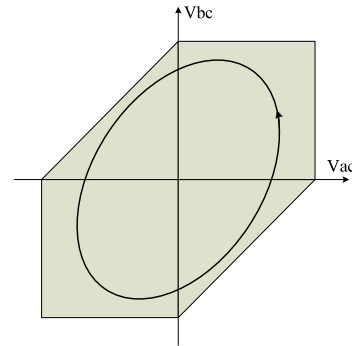
$$\begin{bmatrix} E_{a,ref} \\ E_{b,ref} \\ E_{c,ref} \end{bmatrix} = v_m \begin{bmatrix} \cos(\omega_0 t) + 0.5 \cos(3\omega_0 t) \\ \cos(\omega_0 t - \frac{2\pi}{3}) + 0.5 \cos(3\omega_0 t - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega_0 t + \frac{2\pi}{3}) + 0.5 \cos(3\omega_0 t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (14)$$

شکل ۱۰-الف و ب و شکل ۱۱-الف و ب به ترتیب ولتاژ فاز a و ولتاژ خط خروجی یک مبدل پنج سطحی به همراه سیگنال مرجعشان را برای ولتاژ مرجع معادله (۱۴) نشان می دهند.

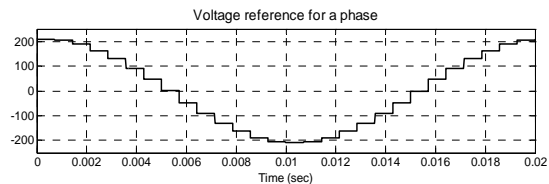


(الف)

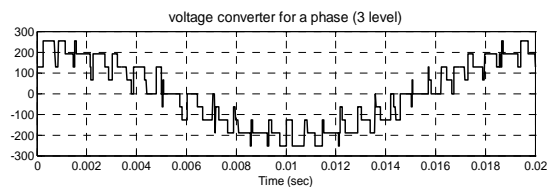
شکل ۷-الف و ب و شکل ۸-الف و ب به ترتیب ولتاژ فاز a و ولتاژ خط خروجی یک مبدل سه سطحی به همراه سیگنال مرجع شان را نشان می دهند. در شکل ۹ درصد نسبی هارمونیک های ولتاژ فاز نسبت به فرکانس اصلی برای مبدل سه سطحی، آورده شده است به طوری که دامنه مولفه اصلی ولتاژ فاز برابر ۲۱۱ ولت و THD سیگنال خروجی ۳۰/۵٪ می‌باشد. در این حالت مدولاتور دارای طیفی فرکانسی مناسبی بوده و سیگنال مرجع را با تغییرات عرض پالس خروجی به طور قابل قبولی دنبال کرده است. قابل ذکر است که THD خروجی مدولاسیون SVM نسبت به مدولاسیون های دیگر کمتر می‌باشد، از این رو THD سیگنال خروجی روش ارائه شده همانند SVM متداول پایین است.



شکل ۶: نمودار مکان هندسی بردار $\begin{bmatrix} V_{ac} \\ V_{bc} \end{bmatrix}$ برای تولید یک سه فاز متعادل

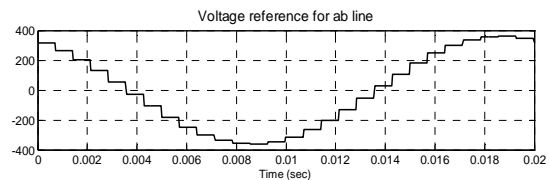


(الف)

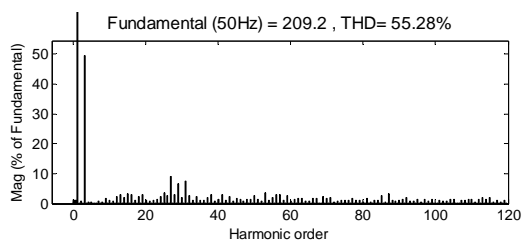


(ب)

شکل ۷: ولتاژ فاز a مبدل سه سطحی الف) ولتاژ مرجع ب) ولتاژ مبدل



(الف)



شکل ۱۲: درصد نسبی هارمونیک های ولتاژ فاز نسبت به فرکانس اصلی برای مبدل پنج سطحی

تکنیک SVM دو بعدی متداول دنباله سوئیچینگ متشکل از S_1 ، S_2 و S_3 را تعیین می کند که یکی از آنها یک بردار افزوده است و D_1 ، D_2 و D_3 به ترتیب نسبت های وظیفه آنها می باشند.

$$s_1, s_2, s_3 = 100/211, 200, 210 \quad (16)$$

$$D_1 = 0.227 \quad D_2 = 0.157 \quad D_3 = 0.616$$

به طور مشابه این مثال می تواند به تکنیک مدولاسیون پیشنهادی اعمال شود. در معادله (۱۷) ولتاژهای نرمالیزه شده V_{bc} و V_{ac} محاسبه شده اند. با توجه به اینکه این دو ولتاژ مثبت هستند، بردار مرجع در ناحیه I قرار دارد و نیازی به انتقال بردار مرجع نمی باشد.

$$\begin{bmatrix} v_{ac} \\ v_{bc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.773 \\ 0.6165 \end{bmatrix} v_{dc} \quad (17)$$

بردارهای V_1 ، V_2 و V_3 و نیز نسبت های وظیفه آنها با استفاده از متغیر Sign، در معادله (۱۸) تعیین شده اند.

$$v_1, v_2 = 10, 21 \quad (18)$$

$$sign = 0.1565 \quad v_3 = 20$$

$$D_1 = 0.227 \quad D_2 = 0.6165 \quad D_3 = 0.1565$$

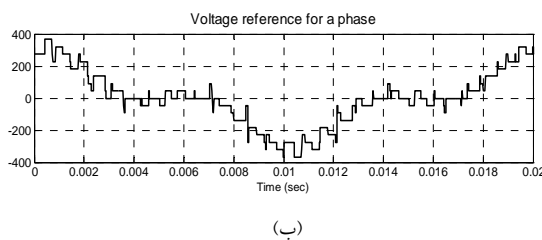
در نتیجه می توان بردارهای سوئیچینگ مربوط به فاز و همچنین بردار افزوده را با توجه به الگوریتم روش پیشنهادی محاسبه کرد.

$$s_{abc1}, s_{abc2}, s_{abc3} = 100/211, 210, 200 \quad (19)$$

با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می شود عملکرد روش پیشنهادی و مدولاسیون SVM متداول مشابه می باشند و نتایج یکسانی به دست می دهند. اختلاف ناچیز موجود بین روابط به دست آمده ناشی از تقریب به کار گرفته شده می باشد.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله یک روش مستقیم و سریع برای محاسبه بردارهای سوئیچینگ و نسبت های وظیفه آنها با استفاده از ولتاژهای خط مستقل ارائه گردید. این روش مستقل از تعداد سطوح مبدل چند سطحی است و با افزایش سطوح، حجم محاسبات مدولاتور ثابت می ماند. همچنین

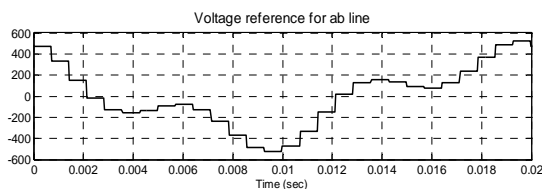


شکل ۱۰: ولتاژ فاز a مبدل پنج سطحی برای مرجع دوم (الف) ولتاژ مرجع (ب) ولتاژ مبدل

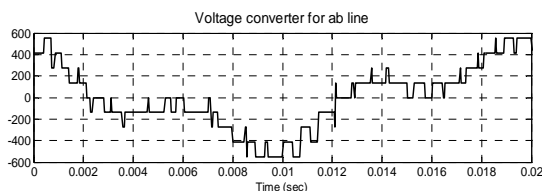
شکل ۱۲ طیف فرکانسی ولتاژ فاز خروجی مبدل پنج سطحی را برای ولتاژ مرجع دوم نشان می دهد در این شکل هارمونیک های نزدیک به مضارب فرکانس سوئیچینگ دامنه قابل توجهی نسبت به سایر هارمونیک های اعوجاجی دارند که می توان با تنظیم فیلترهای پایین گذر اثر آنها را در خروجی مبدل کاهش داد. با توجه به این طیف ملاحظه می شود که ولتاژ فاز مبدل، دامنه هارمونی های موج مرجع را با دقت خوبی در خروجی مبدل تولید کرده است.

برای بررسی بیشتر به بیان یک مثال عددی می پردازیم. ولتاژهای خط مرجع یک مبدل سه فاز در یک لحظه خاص، در معادله (۱۵) داده شده است [۷].

$$\begin{bmatrix} v_{ab} \\ v_{bc} \\ v_{ca} \end{bmatrix} = 1.8 v_{dc} \begin{bmatrix} 0.643 \\ 0.342 \\ -0.985 \end{bmatrix} \quad (15)$$



(الف)



(ب)

شکل ۱۱: ولتاژ خط ab مبدل پنج سطحی برای مرجع دوم (الف) ولتاژ مرجع (ب) ولتاژ مبدل

- theory and DSP-implementation”, IET Electr. Power Appl., 2007, 1, (6), pp. 915–925.
- [4] Lai, J.S., and Peng, F.Z.; “Multilevel converters—a new breed of power converters”, IEEE Trans. Ind. Appl., 1996, 32, (3), pp. 509–517
- [5] Jin-seok Oh, Sun Ho Jin, Jong-Ho Lee.; “Fast Space vector Modoulation without NTV Identification for Multilevel Inverters”, 2007 Second IEEE Conference On Industrial Electronics and Application.
- [6] Jose I. Leon, Sergio Vazquez, Juan A. Sanchez, Ramon Portillo, Leopoldo G. Franquelo, Juan M. Carrasco and Eugenio Dominguez; “Conventional Space-Vector Modulation Techniques Versus the Single-Phase Modulator for Multilevel Converters”, IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 57, No. 7, July 2010.
- [7] Nikola Celanovic, Dushan Boroyevich.; “A Fast Space-Vector Modulation Algorithm for Multilevel Three-Phase Converters”, IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. 37, No. 2, March/April 2001
- [8] J. Pou, P. Rodríguez, D. Boroyevich, R. Pindado, and I. Candela, H.; “Efficient Space-Vector Modulation Algorithm for Multilevel Converters with Low Switching Frequencies in the Devices”, IEEE Trans. Ind., 2005, pp. 1582-1588
- دنباله سوئیچینگ به دست آمده توسط روش پیشنهادی از نظر تعداد سوئیچینگ در هر سیکل بهینه می‌باشد. به علاوه بردارهای افزوده به سادگی با بکارگیری روش ارائه شده قابل محاسبه‌اند. از مزایای این روش می‌توان به استفاده از حداقل فرکانس سوئیچینگ و در نتیجه کاهش تلفات سوئیچینگ، حداکثر بهره‌برداری از لینک DC و قابلیت تعمیم آن به سطوح بالاتر اشاره کرد. با ارائه شبیه سازی روش پیشنهادی بر روی مبدل های سه سطحی و پنج سطحی و مشاهده نتایج مربوط به ولتاژ خروجی مبدل و همچنین طیف هارمونیک مربوط به آن، صحت روش پیشنهادی بررسی شده است. در آخر با ارائه یک مثال عددی و مقایسه نتایج آن با مقالات پیشین، انطباق این روش با نتایج این مقالات مشاهده شد.

مراجع

- [1] Lai, J.S., and Peng, F.Z.; “Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications”, IEEE Trans. Ind. Electron., 2002, 49, pp. 724–738
- [2] Marchesoni, M., and Tenca, P.; “Theoretical and practical limits in multilevel MPC inverters with passive front ends”, 9th European Power Electronics and Applications (EPE’01), Graz, Austria, September 2001, pp. p.1–p.12
- [3] M. Tavakoli Bina.; “Generalized direct positioning approach for multilevel space vector modulation: