

کاهش ولتاژ مد مشترک در مبدل ماتریسی غیر مستقیم

به کمک مدولاسیون SVM بهبود یافته

ناصر محمدی

دانشکده مهندسی - گروه برق

دانشگاه فردوسی

مشهد، ایران

رضا قاضی

دانشکده مهندسی - گروه برق

دانشگاه فردوسی

مشهد، ایران

۱. مقدمه

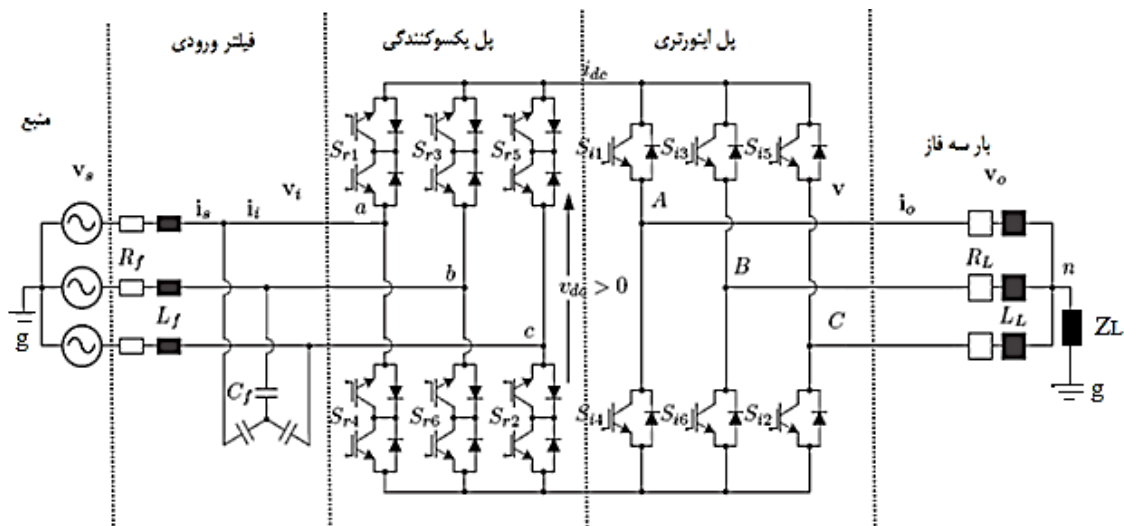
مبدل‌های ماتریسی^۱ سه فاز قادر به تولید خروجی ac سه فاز با دامنه و فرکانس متغی از منبع تغذی ac سه فاز هستند. این مبدل‌ها از توجه زنجی برخوردار هستند چرا که شکل موج‌های ورودی و خروجی سنجوسی و امکان انتقال توان دو طرفه را فراهم می‌کنند. همچنین مبدل‌های MC از قابلیت اطمینان بیشتر، طول عمر بالا و طراحی فشرده‌تر بدلی حذف خازن‌های الکترولیتی^۲ مزایای دیگری دارند. برخوردار هستند. توپولوژی مبدل‌های MC به دو دسته ای مبدل ماتریسی مستقیم و مبدل ماتریسی غیر مستقیم^۳ قابل تقسیم بندی هستند [۱]. توپولوژی مبدل IMC شامل آرای ای از سوئیچ‌های قدرت شعی به توپولوژی مبدل پشت به پشت، یکسوکننده / لیک dc/انورتر است. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است مدار

چکیده — در این مقاله کاهش ولتاژ مد مشترک به وسیله اصلاح مدولاسیون SVM در مبدل ماتریسی غیر مستقیم مورد مطالعه قرار گرفته شده است. چگونگی انتخاب بردارهای فعال مناسب و آرایش صحیح توالی سوئیچ زنی در پل اینورتری و یکسوکنندگی در مبدل IMC توصیف می‌شود. با روش SVM پیشنهادی پیک ولتاژ مد مشترک در مبدل IMC بدون هیچ تجهیزات اضافه ای به شکل قابل توجه ای کاهش می‌یابد. همچنین به کمک روش پیشنهادی THD ولتاژ خط به خط خروجی نیز کاهش می‌یابد. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که روش SVM پیشنهادی موجب بهبود شکل موج‌های ورودی و خروجی و کاهش ولتاژ مد مشترک در مبدل IMC خواهد شد.

واژه‌های کلیدی — مبدل ماتریسی غیر مستقیم، ولتاژ مد مشترک،

مدولاسیون فضای برداری

-
- 1- Matrix Converter
 - 2- Indirect Matrix Converter



شکل ۱: شمای ساده از مبدل ماتریسی غیر مستقیم

مد مشترک در مبدل IMC پیشنهاد شده است. روش اول در این مقاله از ولتاژ ورودی خط به خط ماکزیمم و میانی برای تولید ولتاژ لینک dc استفاده می کند و در پل اینورتری نیز از چهار بردار فعال جهت تولید بردار ولتاژ مرجع خروجی کمک می گیرد. در این روش نسبت انتقال ولتاژ ماکزیمم بدون تغییر و همان 0.866 باقی می ماند. اما این روش دارای نواقصی از قبیل THD بالای ولتاژ خروجی خط به خط و تلفات سوئیچینگ بالا در پل اینورتری است. روش دوم از کمترین مقدار ولتاژ خط به خط ورودی و مقدار میانی آن برای تولید ولتاژ لینک dc استفاده می کند، همچنین بردارهای صفر را نیز در مدولاسیون پل اینورتری در نظر می گیرد. مزیت این روش عملکرد بالا در ولتاژ خروجی است. اما ماکزیمم نسبت انتقال ولتاژ به مقدار 0.5 کاهش می یابد [۲].

در [۲] کاهش ولتاژ مد مشترک مبدل IMC در نسبت انتقال ولتاژ بالا به منظور رفع معایب روش های پیشنهادی [۱۲] ارائه شده است. این روش براساس بهبود دقت ترکیب بردارهای فعال جهت تشکیل بردار ولتاژ مرجع خروجی است. در این روش بردار مرجع خروجی تنها به کمک سه بردار فعال تشکیل می شود. اما این روش تنها برای نسبت انتقال ولتاژهای که مقدار آن بالای 0.577 است کاربرد دارد، جدای از اینکه به محاسبات پیچیده ای جهت انجام مدولاسیون نیاز دارد.

به منظور رفع معایب روش های ارائه شده در [۲، ۱۲]، این مقاله روش SVM جدیدی براساس اصلاح سوئیچینگ در پل های یکسوکنندگی و اینورتری ارائه می کند. در پل یکسوکنندگی ولتاژ لینک dc براساس کمترین مقدار ولتاژ خط به خط ورودی و ولتاژ میانی آن تولید می شود. در پل اینورتری نیز استفاده از بردارهای صفر جهت تشکیل بردار مرجع خروجی

قدرت مبدل IMC شامل پل یکسوکنندگی و پل اینورتری است. پل یکسوکنندگی شامل ۶ سوئیچ دو طرفه است در حالی که پل اینورتری از ۶ سوئیچ یک طرفه تشکیل شده است [۲، ۳]. مبدل IMC قادر به تولید شکل موج های ورودی و خروجی مشابه با عملکرد مبدل DMC است، همچنین توپولوژی از مزایای زی نفع برخوردار می باشد:

- ۱- این توپولوژی امکان کموتاسیون ساده تر و استفاده از مدارهای مهارکننده ای جهت حفاظت در برابر اضافه ولتاژ را فراهم می کند [۲].
- ۲- امکان کاهش تعداد سوئیچ های قدرت در پل یکسوکنندگی وجود دارد [۲، ۴].
- ۳- امکان بهبود و اصلاح توپولوژی مبدل براساس کاربردهای خاص وجود دارد [۲]؛ برای مثال بهبود عملکرد خروجی [۵]، تغذیه بار نامتعادل سه فاز [۶]، درایو بارهای سه فاز چند گانه [۷]، افزایش نسبت انتقال ولتاژ به بیش از $86/6$ درصد و ... [۸].

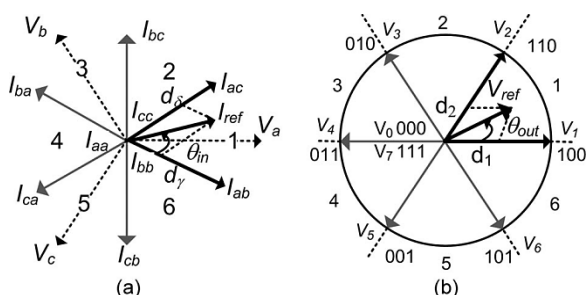
استفاده از استراتژی مدولاسیون مناسب باعث کاهش ولتاژ مد مشترک (CMV) در مبدل های قدرت خواهد شد [۹]. تاکنون تعدادی مقاله کاهش CMV در توپولوژی مبدل های MC با بکار بردن تکنیک های مدولاسیون مناسب را پیشنهاد داده اند. اما، این تحقیقات بر روی مبدل DMC تاکید داشته اند. در تعداد محدودی از مقالات تحقیقات پیرامون کاهش CMV در توپولوژی مبدل IMC را می توان یافت [۲، ۱۰، ۱۲]. اولین روش مدولاسیون برای مبدل IMC روش SVM استاندارد است که در [۳، ۱۱] ارائه شده است. اما کاهش CMV در این تحقیقات در نظر گرفته نشده است. روش SVM استاندارد پیک ولتاژ مد مشترکی برابر با دامنه ولتاژ فاز ورودی ایجاد می کند. در [۱۲] دو روش مدولاسیونی جهت کاهش ولتاژ

$$I_i = \begin{bmatrix} S_{r1} - S_{r4} \\ S_{r3} - S_{r6} \\ S_{r5} - S_{r2} \end{bmatrix} I_{dc} \quad (2)$$

دیگرام فضای برداری پل اینورتری همانطور که در شکل ۲- (b) نشان داده شده است از ۶ بردار فعال با موقعیت ثابت و دو بردار صفر تشکیل می شوند. هر بردار ولتاژ خروجی ترکیب حالت های سوئیچینگ پل اینورتری مطابق جدول ۲ را نشان می دهد. ورودی و خروجی های هر مرحله به وسیله حالت های کلید زنی آن مرحله به هم مرتبط می شوند. برای پل اینورتری این روابط شامل جریان های خروجی و ولتاژ لینک dc به عنوان ورودی و جریان لینک dc، i_{dc} و ولتاژ خروجی به عنوان خروجی های پل اینورتری خواهند بود. که در معادلات زیر بیان شده اند:

$$I_{dc} = [S_{i1} \quad S_{i3} \quad S_{i5}] I_o \quad (3)$$

$$V_o = \begin{bmatrix} S_{i1} - S_{i4} \\ S_{i3} - S_{i6} \\ S_{i5} - S_{i2} \end{bmatrix} V_{dc} \quad (4)$$



شکل ۲: دیگرام فضای برداری در روش SVM استاندارد (a) پل یکسوکنندگی و (b) پل اینورتری

جدول ۱: سوئیچینگ مجاز پل یکسوکنندگی و ولتاژ لحظه ای لینک dc

| ولتاژ لحظه ای لینک dc | سوئیچ های فعال | حالت های کلید زنی پل یکسوکنندگی ($S_{r14}, S_{r36}, S_{r52}$) | سکتور جریان ورودی |
|-----------------------|------------------|---|-------------------|
| V_{ac} | S_{r1}, S_{r2} | 1 0 -1 | 1 |
| V_{ab} | S_{r1}, S_{r6} | 1 -1 0 | 2 |
| V_{bc} | S_{r3}, S_{r2} | 0 1 -1 | 3 |
| V_{ba} | S_{r3}, S_{r4} | -1 1 0 | 4 |
| V_{cb} | S_{r5}, S_{r6} | 0 -1 1 | 5 |
| V_{ca} | S_{r5}, S_{r4} | -1 0 1 | 6 |

حذف و بردارهای فعال معکوس جایگزین آنها می شود. در مقاله پیش رو ابتدا آنالیز CMV و مرور روش های مدولاسیونی قبلی برای مبدل IMC ارائه می شود. سپس، روش SVM پیشنهادی ارائه شده و تاثیر روش پیشنهادی بر عملکرد ورودی و خروجی و ولتاژ مد مشترک تولیدی مورد بحث قرار می گیرد. در نهایت نتایج شبیه سازی جهت تصدیق تاثیر گذاری روش ارائه می شود.

۲. آنالیز ولتاژ مد مشترک و مرور روش های قبلی SVM برای مبدل IMC

۲.۱. فضای برداری مبدل IMC و آنالیز CMV

توپولوژی مبدل IMC همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است از دو پل تشکیل شده است؛ پل یکسوکنندگی و پل اینورتری [۱۳]. نقش پل یکسوکنندگی تولید ولتاژ لینک dc مثبت و ایجاد جریان ورودی و سوسری در سمت منبع است. ولتاژهای فاز خروجی با دامنه و فرکانس متغی به وسیله کنترل پل اینورتری تولید می شود. هر دو روش SVM استاندارد و روش SVM کاهنده ای ولتاژ مد مشترک متداول براساس آنالیز بردارهای فضای جریان ورودی و ولتاژ خروجی هستند. کنترل پل یکسوکنندگی براساس بردار جریان ورودی مرجع است در حالی که برای پل اینورتری کنترل براساس بردار ولتاژ خروجی مرجع است. استراتژی مدولاسیونی سوئیچینگ پل یکسوکنندگی و اینورتری مستقل از هم هستند.

دیگرام بردار فضایی پل یکسوکنندگی شامل ۶ بردار جریان فعال و ۳ بردار جریان صفر است. بردارهای فعال همانطور که در شکل ۲- (a) نشان داده شده است، فضای برداری را به ۶ سکتور تقسیم می کنند. هر بردار فعال جریان چگونگی اتصال ولتاژ فازهای ورودی به ترمینال های لینک dc نشان می دهند [۲]. بردارهای فعال جریان و حالت های سوئیچینگ متناظر آنها برای پل یکسوکنندگی در جدول ۱ نشان داده شده است. در مدل ریاضی پل یکسوکنندگی ولتاژ فازهای ورودی و جریان ورودی لینک dc به عنوان ورودی و ولتاژ لینک dc، V_{dc} و جریان های ورودی به عنوان خروجی خواهند بود:

$$V_{dc} = [S_{r1} - S_{r4} \quad S_{r3} - S_{r6} \quad S_{r5} - S_{r2}] V_i \quad (1)$$

که در آن v_a, v_b, v_c و v_c مقادیر لحظه ای ولتاژ سه فاز ورودی هستند که به شکل زیر در نظر گرفته می شوند:

$$\begin{aligned} v_a &= V_i \cos(\omega_i t) \\ v_b &= V_i \cos(\omega_i t - 2\pi/3) \\ v_c &= V_i \cos(\omega_i t + 2\pi/3) \end{aligned} \quad (10)$$

که در آن V_i و ω_i به ترتیب دامنه و فرکانس ولتاژ سه فاز ورودی هستند. مقدار پیک ولتاژ مد مشترک متناسب با حالت های سوئیچینگ پل اینورتری و بردارهای فعال ولتاژ خروجی در جدول ۲ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود استفاده از بردار صفر در پل اینورتری موجب می شود تا پیک ولتاژ CMV به مقدار دامنه فاز ورودی برسد.

۲.۲. روش SVM/استاندارد برای مبدل IMC

مدولاسیون SVM استاندارد در مقالات قبل ارائه شده است [۶-۱۲]. در پل یکسوکنندگی بردار جریان مرجع ورودی با ترکیب دو بردار فعال تشکیل می شود [۱۵]. اگر همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است فرض شود که بردار جریان مرجع در سکتور ۱ قرار دارد؛ این بردار I_{ref} با استفاده از ترکیب دو بردار فعال کناری در این سکتور تشکیل می شود [۱۲]. با فرض ضریب توان واحد در سمت ورودی جریان های ورودی به شکل زیر خواهند بود:

$$\begin{aligned} i_a &= I_i \cos(\omega_i t) \\ i_b &= I_i \cos(\omega_i t - 2\pi/3) \\ i_c &= I_i \cos(\omega_i t + 2\pi/3) \end{aligned} \quad (11)$$

بنابراین در سکتور ۱ سوئیچ بالائی فاز a روشن و سوئیچ پایینی فازهای b و c به عنوان مدولاتور بوده و ولتاژ لینک dc را تولید می کنند. لذا جریان سه فاز ورودی به شکل زیر تعیین می شوند:

$$\begin{aligned} i_a &= (d_{ab} + d_{ac})i_{dc} \\ i_b &= -d_{ab}i_{dc} \\ i_c &= -d_{ac}i_{dc} \end{aligned} \quad (12)$$

که در آن i_{dc} جریان لینک dc ، d_{ab} و d_{ac} سیکل وظیفه های بردارهای فعال در پل یکسوکنندگی خواهند بود که به شکل زیر محاسبه می شوند:

جدول ۲: سوئیچینگ مجاز پل اینورتری و ولتاژ لحظه ای مد مشترک

| سکتور ولتاژ خروجی | حالت های کلید زنی پل اینورتری (S_{i1}, S_{i3}, S_{i5}) | سوئیچ های فعال | ولتاژ لحظه ای مد مشترک |
|-------------------|--|--------------------------|------------------------|
| 0 | 1 1 1 | S_{i1}, S_{i3}, S_{i5} | V_{dc} |
| 1 | 1 1 -1 | S_{i1}, S_{i3}, S_{i2} | $V_{dc}/3$ |
| 2 | 1 -1 1 | S_{i1}, S_{i6}, S_{i5} | $V_{dc}/3$ |
| 3 | 1 -1 -1 | S_{i1}, S_{i6}, S_{i2} | $-V_{dc}/3$ |
| 4 | -1 1 1 | S_{i4}, S_{i3}, S_{i5} | $V_{dc}/3$ |
| 5 | -1 1 -1 | S_{i4}, S_{i3}, S_{i2} | $-V_{dc}/3$ |
| 6 | -1 -1 1 | S_{i4}, S_{i6}, S_{i5} | $-V_{dc}/3$ |
| 7 | -1 -1 -1 | S_{i4}, S_{i6}, S_{i2} | $-V_{dc}$ |

ولتاژ مد مشترک در مبدل های MC به عنوان ولتاژ بین نقطه ختی بار و نقطه زمین منبع تعریف می شود [۱۴]. مطابق شکل ۱ که مبدل IMC یک بار سه فاز متعادل را تغذیه می کند، امیدانس نشستی بین نقطه ختی بار n و نقطه زمین g به وسیله Z_L نشان داده شده است. بنابراین رابطه ای ولتاژ مد مشترک به کمک معادلات زیر بدست می آید:

$$v_{Ag} = v_{ng} + R_A i_A + L_A \frac{di_A}{dt} \quad (5)$$

$$v_{Bg} = v_{ng} + R_B i_B + L_B \frac{di_B}{dt} \quad (6)$$

$$v_{Cg} = v_{ng} + R_C i_C + L_C \frac{di_C}{dt} \quad (7)$$

که در آن v_{Ag}, v_{Bg}, v_{Cg} ولتاژ های سه فاز خروجی نسبت به نقطه زمین و i_A, i_B, i_C به ترتیب جریان های سه فاز خروجی هستند. از آنجایی که بار سه فاز متعادل است، رابطه ای CMV به شکل زیر قابل استنتاج است:

$$v_{ng} = \frac{1}{3}(v_{Ag} + v_{Bg} + v_{Cg}) \quad (8)$$

مقدار ولتاژ مد مشترک به حالت های سوئیچینگ پل یکسوکنندگی و اینورتری و مقدار ولتاژ ورودی بستگی دارد [۱۲]. با جایگزینی توابع سوئیچینگ یکسوکنندگی و اینورتری رابطه ولتاژ مد مشترک به صورت زیر بدست می آید:

$$\begin{aligned} v_{ng} &= \frac{1}{3}(v_a S_{r1} + v_b S_{r3} + v_c S_{r5})(S_{i1} + S_{i3} + S_{i5}) \\ &+ \frac{1}{3}(v_a S_{r4} + v_b S_{r6} + v_c S_{r2})(S_{i2} + S_{i4} + S_{i6}) \end{aligned} \quad (9)$$

$$d_1 = \sqrt{3} \frac{|V_{ref}|}{\bar{V}_{dc}} \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta_{out}\right) \quad (18)$$

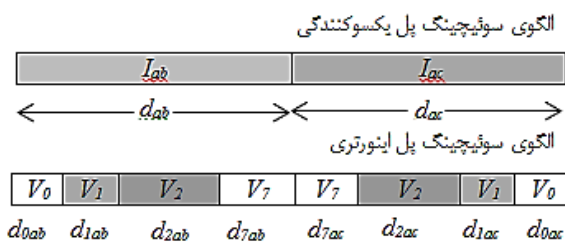
$$d_2 = \sqrt{3} \frac{|V_{ref}|}{\bar{V}_{dc}} \sin(\theta_{out}) \quad (19)$$

که در آن θ_{out} زاویه فاز بین بردار مرجع خروجی و بردار فعال سمت راست در سکتور مربوطه و V_{ref} مقدار فاز ولتاژ خروجی مطلوب است. در روش SVM استاندارد از دو بردار صفر برای کامل شدن مدت زمان نمونه گیری کنترل استفاده می شود. سیکل وظیفه این بردارهای صفر به شکل زیر تعیین می شود:

$$d_0 = d_7 = \frac{1}{2}(1 - d_1 - d_2) \quad (20)$$

از آنجایی که ولتاژ لینک dc دارای دو مقدار از ولتاژ خط به خط ورودی است، الگوی سوئیچینگ پل اینورتری بایستی مطابق شکل ۳ به دو گروه تقسیم شود. از همین رو سیکل وظیفه هر بردار فعال در پل اینورتری مطابق روابط زیر از ضرب سیکل وظیفه پل های اینورتری و یکسوکنندگی بدست می آیند:

$$\begin{aligned} d_{0ab} &= d_0 \cdot d_{ab}; d_{1ab} = d_1 \cdot d_{ab}; d_{2ab} = d_2 \cdot d_{ab}; d_{7ab} = d_7 \cdot d_{ab} \\ d_{0ac} &= d_0 \cdot d_{ac}; d_{1ac} = d_1 \cdot d_{ac}; d_{2ac} = d_2 \cdot d_{ac}; d_{7ac} = d_7 \cdot d_{ac} \end{aligned} \quad (21)$$



شکل ۳: توالی سوئیچینگ در پل های یکسوکنندگی و اینورتری در روش SVM استاندارد

۲.۳. روش کاهش ولتاژ CMV-SVM متداول برای

مبدل IMC

در روش SVM کاهش ولتاژ مد مشترک متداول برای مبدل ماتریسی غیر مستقیم در کل بازه ای نسبت انتقال ولتاژ، در الگوی سوئیچینگ پل اینورتری از هیچ بردار صفری استفاده نمی شود. در این روش، مطابق شکل ۴-(b) بردار ولتاژ مرجع خروجی به کمک گروهی از چهار بردار فعال

$$\begin{aligned} d_\gamma &= m_l \sin(\pi/3 - \theta_{in}) \\ d_\delta &= m_l \sin(\theta_{in}) \end{aligned} \quad (13)$$

که در آن m_l اندیس مدولاسیون پل یکسوکنندگی و θ_{in} زاویه بین بردار مرجع و بردار فعال کناری سمت راست در سکتور مربوطه است. اما در مدولاسیون پل یکسوکنندگی بردارهای صفر در نظر گرفته نمی شوند، لذا اندیس مدولاسیون این پل مقدار واحد است. از همین رو در توالی سوئیچینگ پل یکسوکنندگی تنها دو بردار فعال کناری در نظر گرفته می شود. بنابراین سیکل وظیفه ای بردارهای فعال به شکل زیر در نظر گرفته می شوند:

$$d_{ab} = \frac{d_\gamma}{d_\delta + d_\gamma} \quad (14)$$

$$d_{ac} = \frac{d_\delta}{d_\delta + d_\gamma} \quad (15)$$

مقدار میانگین ولتاژ لینک dc نیز برابر خواهد بود با:

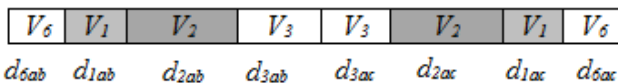
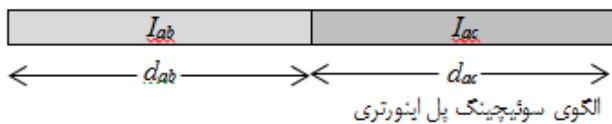
$$\bar{V}_{dc} = d_{ab}v_{ab} + d_{ac}v_{ac} = \frac{3V_i}{2|\cos(\omega_1 t)|} \quad (16)$$

مقدار میانگین ولتاژ لینک dc با فرکانس ۶ برابر فرکانس ورودی تغییر می کند. که مقدار ماکزیمم و مینیمم آن نیز برابر خواهد بود با:

$$\begin{aligned} \bar{V}_{dc(\min)} &= 3V_1/2 \\ \bar{V}_{dc(\max)} &= \sqrt{3}V_1 \end{aligned} \quad (17)$$

متعاقباً ولتاژهای خروجی سینوسی با دامنه و فرکانس متغیر به وسیله کنترل پل اینورتری تشکیل می شوند. بدون از دست دادن کلیت مطلب اگر مطابق شکل ۲-(b) فرض شود که ولتاژ خروجی مرجع در سکتور یک قرار دارد، ولتاژ مرجع خروجی به وسیله ترکیب دو بردار فعال کناری V_1 و V_2 تشکیل می گردد. جهت محاسبه سیکل وظیفه بردارهای فعال در پل اینورتری لازم است تا از متوسط ولتاژ لینک dc در سکتور مربوطه استفاده شود. لذا سیکل وظیفه دو بردار فعال در سکتور ۱ به صورت زیر تعیین می شوند:

الگوی سوئیچینگ پل یکسوکنندگی



شکل ۵: توالی سوئیچینگ در پل های یکسوکنندگی و اینورتری در روش کاهش ولتاژ CMV-SVM متداول

۳. روش بهبود یافته مدولاسیون SVM جهت

کاهش CMV در مبدل IMC و آنالیز روش

۳.۱. روش SVM پیشنهادی

مقدار بچک ولتاژ مد مشترک در شرایطی که بردارهای صفر در پل اینورتری اعمال شوند برابر مقدار دامنه ولتاژ فاز ورودی خواهد بود. بچک این ولتاژ می تواند به کمک روش CMV-SVM و تنها با اعمال بردارهای فعال جهت تولید بردار ولتاژ مرجع خروجی در پل اینورتری تا ۴۲ درصد کاهش یابد [۱۶]. در روش جدید این SVM تغیر در نحوه ای کنترل و سوئیچینگ پل های اینورتری و یکسوکنندگی براساس کاهش ولتاژ CMV است. برای این منظور در پل یکسوکنندگی جهت تولید ولتاژ لینک dc از ولتاژهای خط به خط و کمترین مقدار مثبت ولتاژ فازهای ورودی استفاده می شود. در پل اینورتری نیز در الگوی سوئیچینگ آن بردارهای صفر حذف و تنها از بردارهای فعال جهت تشکیل بردار مرجع خروجی استفاده می شود.

• پل یکسوکنندگی: شکل ۶- (a) فضای برداری چگونگی تولید

جریان مرجع ورودی به کمک دو بردار فعال کناری با سیکل وظیفه های زیر نشان می دهد:

$$d_\gamma = m_l \sin(2\pi/3 - \theta_{in}) \quad (26)$$

$$d_\delta = m_l \sin(\theta_{in})$$

بردارهای صفر در مدولاسیون پل یکسوکنندگی حذف شده اند. لذا سیکل وظیفه ای اصلاح شده بردارهای فعال پل یکسوکنندگی به شکل زیر خواهند بود:

تشکیل می شود. بنابراین اگر فرض شود که بردار ولتاژ مرجع خروجی در سکتور ۱ قرار دارد، بردار مرجع از گروه بردارهای فعال V_1, V_2, V_3 و V_6 تشکیل می شود. سیکل وظیفه های d_1, d_2, d_3 و d_6 از چهار بردار فعال مطابق زیر تعیین می شوند:

$$d_1 = \sqrt{3} \frac{V_o}{V_{dc}} \sin\left(\frac{\pi}{3} - \alpha_o\right) \quad (22)$$

$$d_2 = \sqrt{3} \frac{V_o}{V_{dc}} \sin(\alpha_o) \quad (23)$$

$$d_3 = d_6 = \frac{1}{2}(1 - d_1 - d_2) \quad (24)$$

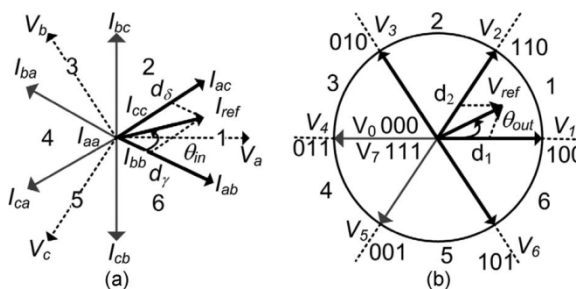
مشابه آنالیز روش SVM استاندارد، سیکل وظیفه کلی چهار بردار فعال

پل اینورتری در هر حالت سوئیچینگ پل یکسوکنندگی به وسیله ضرب سیکل وظیفه های پل اینورتری و پل یکسوکنندگی مطابق زیر بدست می آیند:

$$\begin{aligned} d_{1ab} &= d_1 \cdot d_{ab}; d_{2ab} = d_2 \cdot d_{ab}; d_{3ab} = d_3 \cdot d_{ab}; d_{6ab} = d_6 \cdot d_{ab} \\ d_{1ac} &= d_1 \cdot d_{ac}; d_{2ac} = d_2 \cdot d_{ac}; d_{3ac} = d_3 \cdot d_{ac}; d_{6ac} = d_6 \cdot d_{ac} \end{aligned} \quad (25)$$

شکل ۵ الگوی سوئیچینگ پل های اینورتری و یکسوکنندگی در روش

کاهش ولتاژ CMV-SVM برای حالتی که هر دو بردار جریان مرجع ورودی و ولتاژ مرجع خروجی در سکتور یک قرار داشته باشند را نشان می دهد. به کمک این روش پیک ولتاژ مد مشترک در مقایسه با روش SVM استاندارد تا ۴۲ درصد کاهش می یابد.



شکل ۴: دیاگرام فضای برداری (a) پل یکسوکنندگی و (b) پل اینورتری در روش کاهش ولتاژ CMV-SVM متداول

$$d_1 = \sqrt{3} \frac{|V_{ref}|}{\bar{V}_{dc}} \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta_{out}\right) \quad (32)$$

$$d_2 = \sqrt{3} \frac{|V_{ref}|}{\bar{V}_{dc}} \sin(\theta_{out}) \quad (33)$$

$$d_3 = d_6 = \frac{1}{2}(1 - d_1 - d_2) \quad (34)$$

برای استفاده کامل از ولتاژهای خط به خط ورودی v_{bc} و v_{ab} در ولتاژ لینک dc، سیکل وظیفه چهار بردار فعال در پل اینورتری نسبت به مقدار سیکل وظیفه در پل یکسوکنندگی d_{bc} و d_{ab} محاسبه می شوند:

$$d_{1ab} = \sqrt{3} \frac{|V_{ref}|}{\bar{V}_{dc}} \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta_{out}\right) d_{ab} \quad (35)$$

$$d_{2ab} = \sqrt{3} \frac{|V_{ref}|}{\bar{V}_{dc}} \sin(\theta_{out}) d_{ab} \quad (36)$$

$$d_{3ab} = d_{6ab} = \frac{1}{2}(1 - d_1 - d_2) d_{ab} \quad (37)$$

$$d_{1bc} = \sqrt{3} \frac{|V_{ref}|}{\bar{V}_{dc}} \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta_{out}\right) d_{bc} \quad (38)$$

$$d_{2bc} = \sqrt{3} \frac{|V_{ref}|}{\bar{V}_{dc}} \sin(\theta_{out}) d_{bc} \quad (39)$$

$$d_{3bc} = d_{6bc} = \frac{1}{2}(1 - d_1 - d_2) d_{bc} \quad (40)$$

شکل ۷ حالت های سوئیچینگ پل یکسوکنندگی و اینورتری را با فرض اینکه پل یکسوکنندگی در سکتور ۱ عمل می کند و بردار ولتاژ مرجع خروجی در پل اینورتری نیز در سکتور ۱ قرار دارد را نشان می دهد. در این حالت ولتاژ لینک dc دارای دو سطح مختلف v_{bc} و v_{ab} است. ولتاژ ورودی مثبت میانی به قطب مثبت لینک dc و قطب منفی لینک dc براساس حالت سوئیچینگ مشخص می شود. بردارهای فضایی ولتاژ در پل اینورتری به شکل توالی سوئیچینگ دو طرفه $V_6 - V_1 - V_2 - V_3 - V_3 - V_2 - V_1 - V_6$ با طرف های غیر مشابه آرایش می یابند، چرا که هر طرف از توالی سوئیچینگ در سطح متفاوتی از ولتاژ لینک dc اعمال می شوند.

$$d_{ab} = \frac{d_\gamma}{d_\delta + d_\gamma} \quad (27)$$

$$d_{bc} = \frac{d_\delta}{d_\delta + d_\gamma} \quad (28)$$

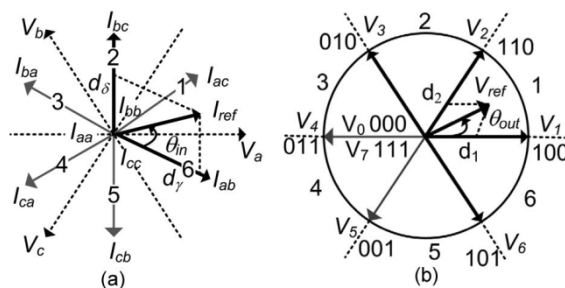
بنابراین متوسط ولتاژ لینک dc در هر دوره ای نمونه گیری عبارت است از:

$$\bar{V}_{dc} = d_{ab} v_{ab} + d_{bc} v_{bc} \quad (29)$$

که مقدار ماکزیمم و مینیمم متوسط ولتاژ لینک dc برابر خواهد بود با:

$$\bar{V}_{dc(\min)} = \sqrt{3} V_1 / 2 \quad (30)$$

$$\bar{V}_{dc(\max)} = V_1$$

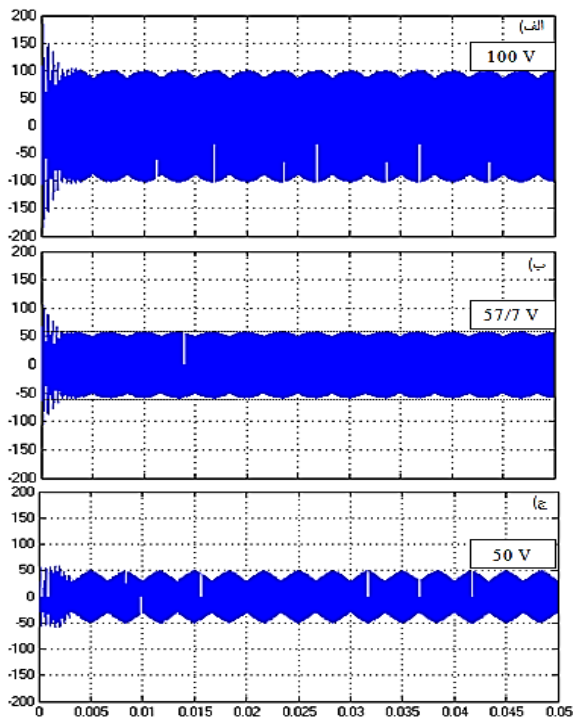


شکل ۶: دیاگرام فضای برداری (a) پل یکسوکنندگی و (b) پل اینورتری در روش SVM بهبود یافته

• پل اینورتری: در الگوی سوئیچینگ این پل بردار ولتاژ خروجی مرجع به وسیله گروهی از ۴ بردار فعال تشکیل می شود. این چهار بردار فعال دو بردار فعال نزدیک به بردار مرجع در هر سکتور و بردارهای فعال کناری آنهاست. همانطور که در شکل ۶-(b) نشان داده شده است، بردار ولتاژ خروجی مرجع در سکتور ۱ از دو بردار نزدیک V_1 و V_2 و دو بردار کناری آنها یعنی بردارهای فعال V_3 و V_6 تشکیل می شود. سیکل وظیفه هر بردار مطابق رابطه زیر محاسبه می شود:

$$V_{ref} = d_1 V_1 + d_2 V_2 + d_3 V_3 + d_6 V_6 \quad (31)$$

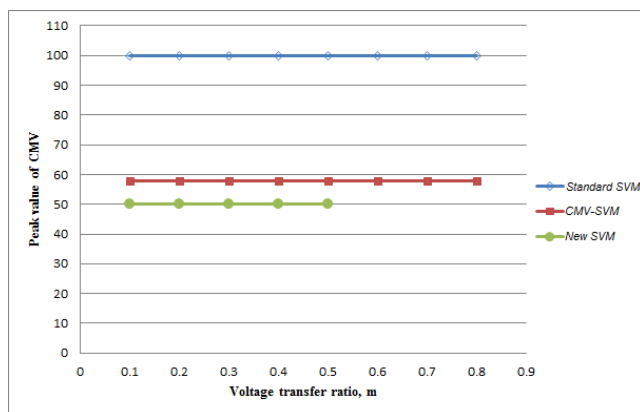
براساس رابطه ای فوق سیکل وظیفه ها عبارت خواهد بود از:



شکل ۸: شکل موج ولتاژ مد مشترک تولیدی در $f_0 = 30\text{Hz}$ و $m = 0.4$

الف) SVM استاندارد، ب) CMV-SVM و ج) SVM پیشنهادی

بر اساس رابطه ای ۹ مقدار پیک ولتاژ مد مشترک به مقدار ولتاژ ورودی و حالت های سوئیچینگ پل های اینورتری و یکسوکنندگی بستگی دارد. ولتاژ و فرکانس خروجی مطلوب روی پیک این ولتاژ تأثیری ندارد. بر اساس قواعد عملی برای انتخاب آرایش نحوه ای سوئیچینگ در سه روشی که توضیح داده شد، مقدار پیک CMV می تواند مورد بررسی قرار گیرد. شکل ۹ مقدار پیک ولتاژ مد مشترک تولیدی متناسب با فرکانس خروجی را برای هر سه روش مذکور خلاصه و نشان می دهد



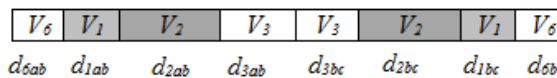
شکل ۹: مقایسه پیک ولتاژ مد مشترک تولیدی در روش های SVM

شکل های ۱۰ و ۱۱ جریان ها و ولتاژ های سمت ورودی و خروجی در نسبت انتقال ولتاژ $m = 0.4$ و فرکانس خروجی $f_0 = 30\text{Hz}$ برای

الگوی سوئیچینگ پل یکسوکنندگی



الگوی سوئیچینگ پل اینورتری



شکل ۷: توالی سوئیچینگ در پل های یکسوکنندگی و اینورتری در روش

SVM بهبود یافته

۴. نتایج شبیه سازی

به منظور بررسی صحت عملکرد روش اصلاح شده SVM

پیشنهادی در این مقاله، مبدل ماتریسی مستقیم در نرم افزار Matlab/Simulink شبیه سازی شده است. پارامترهای سیستم مبدل ماتریسی مستقیم شبیه سازی شده عبارتند از:

(۱) منبع ولتاژ سه فاز $100\text{V}/50\text{ Hz}$ (ولتاژهای فاز)

(۲) فیلتر ورودی: $R_f = 0.2\ \Omega$, $L_f = 130\ \mu\text{H}$, $C_f = 40\ \mu\text{F}$

(۳) بار RL سه فاز: $R_L = 20\ \Omega$, $L_L = 10\ \text{mH}$

(۴) فرکانس خروجی: $f_0 = 30\ \text{Hz}$

(۵) فرکانس نمونه برداری PWM: $10\ \text{kHz}$

شکل ۸ - الف شکل موج ولتاژ مد مشترک مبدل IMC برای شرایطی که روش SVM استاندارد به مبدل اعمال می شود را نشان می دهد. همانطور که مشخص است مقدار پیک CMV برابر $100\ \text{V}$ و برابر با دامنه ولتاژ فاز ورودی است. شکل های ۸ - ب و ۸ - ج ولتاژ مد مشترک تولیدی در مبدل IMC برای حالتی که از مدولاسیون های کاهش ولتاژ CMV-SVM و روش SVM جدید استفاده می شود را به ترتیب نشان می دهند. همانطور که نشان داده شده است در روش CMV-SVM پیک ولتاژ مد مشترک از $100\ \text{V}$ به $57/7\ \text{V}$ کاهش می یابد، که متناسب با $1/\sqrt{3}$ برابر دامنه ولتاژ فاز ورودی است. اما همانطور که در شکل ۸ - ج نشان داده شده است کاهش ولتاژ مد مشترک در روش SVM پیشنهادی برابر مقدار $50\ \text{V}$ است و مقدار پیک CMV به $50\ \text{V}$ کاهش می یابد که متناسب با $1/2$ دامنه ولتاژ فاز ورودی است. بنابراین برتری روش SVM جدید در راستای کاهش پیک ولتاژ مد مشترک در مبدل ماتریسی غیر مستقیم به وضوح مورد تصدیق قرار می گیرد و کاهش ولتاژ 50% درصدی برآورده شده است.

بنابراین روش SVM جدید پیشنهادی ضمن کاهش قابل توجه در ولتاژ مد مشترک، عملکرد مطلوب در مبدل IMC را نیز برآورده می کند.

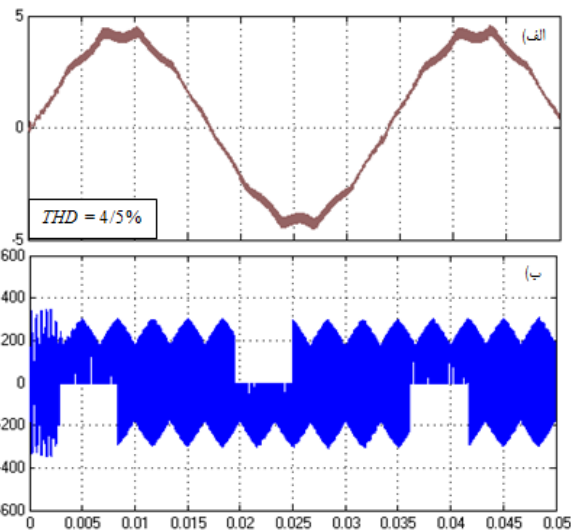
۵. نتیجه گیری

در این مقاله، رابطه ای بین ولتاژ مد مشترک و حالت های سوئیچینگ مبدل IMC به طور واضح توضیح و استراتژی مدولاسیونی SVM اصلاح شده ای جهت کاهش ولتاژ مد مشترک پیشنهاد داده شد. به کمک روش پیشنهادی نشان داده شد که مقدار پیک CMV بدون تاخیر پذیری از نسبت انتقال ولتاژ و فرکانس خروجی مبدل IMC تا ۵۰ درصد کاهش می یابد. حالت های سوئیچینگ پل انجورتری و پل یکسوکنندگی بر روی مقدار CMV تاخیرگذار هستند؛ از هم پل رو در پل یکسوکنندگی از کمترین مقدار مثبت ولتاژ فاز ورودی و ولتاژ مطلق آن جهت تولید ولتاژ لینک dc استفاده می شود. در پل انجورتری با حذف بردارهای صفر، از چهار بردار فعال برای تولید ولتاژ مرجع خروجی استفاده شد. اما لازم به ذکر است که روش SVM پیشنهادی تنها برای نسبت انتقال ولتاژهای کمتر از ۰/۵ قابل اعمال است. برای کل نسبت انتقال ولتاژ استفاده از روش SVM پیشنهادی برای نسبت انتقال ولتاژهای کمتر از ۰/۵ و روش کاهش ولتاژ CMV-SVM متداول براساس نسبت انتقال ولتاژهای بالاتر از ۰/۵ قابل توجهی است.

منابع

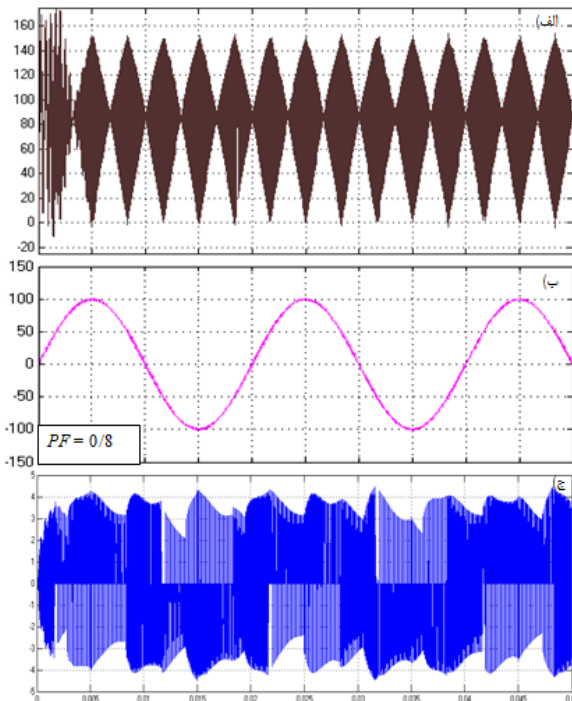
- [1] J.W. Kolar, T. Friedli, J. Rodriguez and P.W. Wheeler, "Review of Three-Phase PWM AC-AC Converter Topologies," *IEEE Trans. Ind. Electro.*, vol.58, no.11, pp.4988-5006, Nov. 2011.
- [2] T. D. Nguyen, H. Lee, "A New SVM Method for an Indirect Matrix Converter with Common-Mode Voltage Reduction," *IEEE Trans. Ind. Electro.*, vol.59, no.1, Jan.2014
- [3] M. Rivera, J. Rodriguez, B. Wu, J.R. Espinoza, and C.A. Rojas, "Current Control for an Indirect Matrix Converter With Filter Resonance Mitigation," *IEEE Trans. on Ind. Electro.*, vol.59, no.1, pp.71-79, Jan. 2012.
- [4] J.W. Kolar, F. Schafmeister, S.D. Round and H. Ertl, "Novel Three-Phase AC-AC Sparse Matrix Converters," *IEEE Trans. Power Electro.*, vol.22, no.5, pp.1649-1661, Sept. 2007.
- [5] Poh Chiang Loh, F. Blaabjerg, Feng Gao, A. Baby and D.A.C. Tan, "Pulsewidth Modulation of Neutral-Point-Clamped Indirect Matrix Converter," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol.44, no.6, pp.1805-1814, Nov.-Dec. 2008.
- [6] Yao Sun, Mei Su, Xing Li, Hui Wang and Weihua Gui, "Indirect Four-Leg Matrix Converter Based on Robust Adaptive Back-Stepping Control," *IEEE Trans. Ind. Electro.*, vol.58, no.9, pp.4288-4298, Sept. 2011.
- [7] R. Pena, R. Cardenas, E. Reyes, J. Clare and P. Wheeler, "Control of a Doubly Fed Induction Generator via an Indirect Matrix Converter With Changing DC Voltage," *IEEE Trans. Ind. Electro.*, vol.58, no.10, pp.4664-4674, Oct. 2011.
- [8] T. Wijekoon, C. Klumpner, P. Zanchetta and P.W. Wheeler, "Implementation of a Hybrid AC-AC Direct Power Converter With Unity Voltage Transfer," *IEEE Trans. Power Electro.*, vol.23, no.4, pp.1918-1926, July 2008.

روش SVM پیشنهادی اعمالی به IMC را نشان می دهد. همانطور که در شکل ۱۰ دیده می شود جریان خروجی سینوسی با مقدار THD قابل قبول ۴/۵ درصد به کمک روش SVM پیشنهادی قابل دستیابی است. در شکل ۱۱ نیز همانطور که نشان داده شده است ضریب توان معادل ۰/۸ در ورودی و ولتاژ لینک dc نیز کاملاً مثبت تولید شده است.



شکل ۱۰: شکل موج های خروجی مبدل IMC برای $f_0=30$ و $m=0.4$

(الف) جریان خروجی و (ب) ولتاژ خروجی



شکل ۱۱: شکل موج های ورودی مبدل IMC برای $f_0=30$ و $m=0.4$

(الف) ولتاژ لینک dc، (ب) ولتاژ ورودی مبدل و (ج) جریان ورودی مبدل

- [9] Han Ju Cha, P.N. Enjeti, "An approach to reduce common-mode voltage in matrix converter," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol.39, no.4, pp. 1151-1159, July-Aug. 2003.
- [10] R. Vargas, U. Ammann, J. Rodriguez and J. Pontt, "Predictive Strategy to Control Common-Mode Voltage in Loads Fed by Matrix Converters," *IEEE Trans. Ind. Electro.*, vol.55, no.12, pp.4372-4380, Dec. 2008
- [11] M. Jussila, H. Tuusa, "Comparison of Simple Control Strategies of Space-Vector Modulated Indirect Matrix Converter Under Distorted Supply Voltage," *IEEE Trans. Power Electro.*, vol.22, no.1, pp.139-148, Jan. 2007.
- [12] T.D. Nguyen, H.H. Lee, "Modulation Strategies to Reduce Common-Mode Voltage for Indirect Matrix Converters," *IEEE Trans. Ind. Electro.*, vol.59, no.1, pp.129-140, Jan. 2012.
- [13] M. Rivera J. Rodriguez, J. Espinoza , *et al.*, "Two Predictive Control Techniques for Output Voltage Control and Improvement of the Source Currents in an Indirect Matrix Converter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 36, pp. 432-513, Feb. 2014.
- [14] F. Bradaschia, M.C. Cavalcanti, E. Ibarra, F. Neves, and E. Bueno, "Generalized pulse-width-modulation to reduce common-mode voltage in matrix converters," in *Proc. ECCE 2009*, vol., no., pp.3274-3281.
- [15] Meng Yeong Lee, P. Wheeler and C. Klumpner, "Space-Vector Modulated Multilevel Matrix Converter," *IEEE Trans. Ind. Electro.*, vol.57, no.10, pp.3385-3394, Oct. 2010.
- [16] R. Un, A.M. Hava, "A Near State PWM Method With Reduced Switching Frequency And Reduced Common Mode Voltage For Three-Phase Voltage Source Inverters," in *Proc. IEMDC '07* vol.1, no., pp.235-240, 3-5 May 2007.