

## بازیاب دینامیکی ولتاژ بر پایه مبدل‌های ماتریسی

ابراهیم بابائی، استادیار، محمد فرهادی کنگرلو، دانشجوی کارشناسی ارشد

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تبریز- تبریز- ایران

farhadi87@ms.tabrizu.ac.ir و e-babaei@tabrizu.ac.ir

**چکیده:** در این مقاله، ساختار جدیدی برای DVRها ارائه می‌شود. ساختار پیشنهادی مبتنی بر مبدل‌های ماتریسی است. مبدل‌های ماتریسی می‌توانند تبدیل ac-ac را بدون نیاز به لینک dc انجام دهند. بنابراین استفاده از این مبدل‌ها، راه حل مناسبی برای حذف لینک dc موجود در ساختارهای کلاسیک DVRها می‌باشد. در ساختار پیشنهادی، از سه مبدل ماتریسی مستقل سه فاز به تک فاز ساخته شده با ۶ یا ۸ کلید دو طرفه، استفاده شده است. با انتخاب ۶ یا ۸ کلید قدرت برای مبدل‌های ماتریسی، محدوده جبران‌سازی DVR تغییر پیدا می‌کند. به دلیل استقلال در عمل کرد مبدل‌های ماتریسی به کار برده شده، DVR پیشنهادی می‌تواند برای جبران کم‌بود و بیش‌بود ولتاژ هم در حالت متعادل و هم در حالت نامتعادل به کار رود. به دلیل این که ساختار پیشنهادی DVR مبتنی بر مبدل‌های ماتریسی است و با توجه به این که در مبدل‌های ماتریسی لینک dc وجود ندارد، سرعت پاسخ‌دهی DVR افزایش و اندازه فیزیکی آن کاهش می‌یابد. ضمناً به دلیل عدم وجود لینک dc، امکان ارائه DVR پیشنهادی به صورت یک بسته فراهم می‌شود. یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های DVR پیشنهادی توانایی برای بازیابی ولتاژ در سیستم‌هایی با اعوجاج ولتاژ شدید است. توجه به این نکته نیز ضروری است که به دلیل حذف لینک dc در ساختار پیشنهادی و تامین انرژی به صورت مستقیم از شبکه، امکان جبران اغتشاشات ولتاژ دائمی فراهم می‌شود. نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی در محیط PSCAD/EMTDC توانایی‌های DVR پیشنهادی را اثبات می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** DVR، کم‌بود ولتاژ، بیش‌بود ولتاژ، مبدل ماتریسی.

## Dynamic Voltage Restorer Based on Matrix Converters

E. Babaei and M. Farhadi Kangarlu

Faculty of Electrical and Computer Eng., University of Tabriz, Tabriz, Iran

**Abstract:** In this paper, a new topology based on matrix converter (MC) is proposed for dynamic voltage restorer (DVR). Matrix converters convert ac to ac with no dc link. So, using this type of converters is an acceptable way to eliminate dc link in conventional DVRs. Three independent three-phase to single-phase MCs with 6 or 8 bi-directional power switches are used in the proposed topology. The range of the DVR's correct operation varies selecting 6 or 8 number of bi-directional power switches in matrix converters. As a result, the proposed DVR structure can be used to restore load voltage in both balanced and unbalanced voltage sag and swell conditions. Due to the fact that the proposed topology is based on matrix converters and considering that the matrix converters do not have dc link, the speed of the proposed DVR increases and in return decreases the size of DVR, due to the dc link elimination. The proposed DVR can be presented as a package. Also, one of the most important capabilities of the proposed DVR is the voltage restoring in extremely distorted networks. It is worth noting that the proposed topology would not face any problem in long time compensation due to the fact that it provides the required energy directly through the grid. The experimental results as well as simulation results in PSCAD/EMTDC environment show the capabilities of the proposed topology.

**Keywords:** DVR, Voltage sag, Voltage swell, Matrix converter.

## ۱- مقدمه

امروزه یکی از مهم‌ترین مشکلات در صنعت برق، مسئله کیفیت توان برای بارهای حساس است. بارهای حساس مانند کامپیوترها، درایوهای سرعت متغیر<sup>۱</sup> و تجهیزات الکترونیکی نیاز به منابع تغذیه با کیفیت بالا دارند [۱-۲].

یکی از مسائل مهم در ارتباط با کیفیت توان، "کم‌بود ولتاژ"<sup>۲</sup> و "بیش‌بود ولتاژ"<sup>۳</sup> است [۳]. کم‌بود ولتاژ طبق استاندارد IEEE 1159-1995، به صورت کاهش در مقدار موثر ولتاژ از 10% تا 90% مقدار نامی، در طول مدت 0.5 سیکل تا 1 دقیقه است. کم‌بود ولتاژ اغلب ناشی از عیب در سیستم قدرت و یا راه‌اندازی موتورهای القایی بزرگ می‌باشد [۱]. بیش‌بود ولتاژ به صورت افزایش در مقدار موثر ولتاژ بین 1.1 تا 1.8 پریونیت در فرکانس قدرت و در مدت زمان 0.5 سیکل تا 1 دقیقه، تعریف می‌شود. بیش‌بود ولتاژ هم مانند کم‌بود ولتاژ با عیب در سیستم قدرت در ارتباط است ولی به اندازه کم‌بود ولتاژ رایج نیست. خارج کردن بارهای بزرگ سلفی از شبکه و برق‌دار کردن بانک‌های خازنی بزرگ از دلایل بیش‌بود ولتاژ هستند [۴].

سیستم بازیاب دینامیکی ولتاژ (DVR)<sup>۴</sup>، وسیله‌ای مبتنی بر الکترونیک قدرت است که بار حساس را از اغتشاشات ولتاژ طرف منبع حفظ می‌کند [۵]. DVR را می‌توان به عنوان یک منبع ولتاژ خارجی با دامنه، فرکانس و فاز قابل کنترل در نظر گرفت که توسط ترانسفورماتور تزریق به صورت سری به شبکه وصل می‌شود.

در مراجع مختلف ساختارهای متفاوت، استراتژی‌های کنترلی گوناگون و کاربردهای متنوع برای DVR ارائه شده است [۶-۹]. ساختارهای غالب ارائه شده برای DVR مبتنی بر لینک dc هستند. این ساختارها را می‌توان بر اساس چگونگی تامین انرژی مورد نیاز جبران‌سازی به دو نوع تقسیم کرد. در نوع اول این ساختارها، انرژی مورد نیاز برای جبران‌سازی از خود شبکه اصلی گرفته می‌شود. در این ساختارها معمولاً بیش از یک طبقه مبدل الکترونیک قدرت به کار می‌رود به این صورت که نخست ولتاژ ac شبکه توسط یک یکسوساز (وصل شده به طرف بار و یا منبع) به ولتاژ dc تبدیل می‌شود و بعد از آن ولتاژ dc توسط یک اینورتر به ولتاژ ac با دامنه، زاویه فاز و فرکانس قابل کنترل تبدیل می‌شود. سپس، ولتاژ خروجی اینورتر توسط یک ترانسفورماتور سری به شبکه تزریق می‌شود. در نوع دوم این ساختارها، انرژی مورد نیاز برای جبران‌سازی از یک المان ذخیره‌کننده انرژی جانبی تامین می‌شود. به این صورت که در مواقعی که شبکه در حالت عادی است، انرژی در یک عنصر ذخیره‌کننده ذخیره شده و در مواقع لازم استفاده می‌شود. این انرژی ذخیره شده محدود می‌باشد و بنابراین بازه‌ی زمانی جبران‌سازی کوتاه خواهد بود. ذخیره‌کننده‌های انرژی و هم‌چنین خازن‌های لینک dc که در ساختارهای مرسوم DVRها استفاده می‌شوند، منجر به قیمت بالا، افزایش حجم و وزن این ساختارها می‌شود. علاوه بر آن کنترل انرژی ذخیره شده در مواقع عیب، دشوار

می‌باشد. اینورتری که در ساختارهای مرسوم DVRها استفاده می‌شود، می‌تواند هم دو سطحی و هم چند سطحی باشد. ساختارهای مختلفی برای DVRها بر مبنای مبدل‌های چند سطحی ارائه شده است [۵]. ۱۰-۱۵]. DVRهای مبتنی بر مبدل‌های چند سطحی، قابلیت کار در ولتاژها و توان‌های بالاتری را دارند. هم‌چنین این ساختارها مشخصه‌ی هارمونیک خوبی دارند. با وجود این مزایا، این ساختارها معایبی نیز دارند. در این ساختارها، تعداد المان‌های مدار افزایش می‌یابد و فراهم کردن منابع dc ایزوله شده از هم، هزینه‌ی زیادی دارد. علاوه بر آن، کنترل ولتاژ لینک‌های dc ایزوله شده در سطح ایده‌آل مشکل است و اگر این ولتاژها در سطح مطلوب باقی نمانند، هارمونیک‌های ناشناخته در خروجی ایجاد خواهد شد.

در مقابل ساختارهای مبتنی بر لینک dc، توجه کم‌تری به ساختارهایی شده است که در آن‌ها لینک dc و عنصر ذخیره‌کننده انرژی وجود نداشته باشد. در [۱۶] فیلتر اکتیو سری با استفاده از یک مبدل تک فاز ac/ac و یک سیستم UPS برای جبران کم‌بود ولتاژ ارائه شده است. در [۱۷] ساختاری برای DVR تک فاز ارائه شده است که از مبدل مستقیم ac/ac استفاده کرده و به این ترتیب نیازی به لینک dc ندارد. محدوده جبران‌سازی کم‌بود و بیش‌بود ولتاژ توسط این ساختار به ترتیب برابر با 25% و 50% است. در [۱۸] نیز تنظیم‌کننده‌ی ولتاژی ارائه شده است که از تبدیل مستقیم ac/ac استفاده کرده و قادر به جبران کم‌بود ولتاژ است. این ساختار قادر به جبران انواع دیگر اغتشاشات ولتاژ نیست و هم‌چنین با توجه به این که استراتژی کنترلی به کار برده شده بر اساس اندازه‌گیری و محاسبات مقدار موثر است و با توجه به این که برای محاسبه مقدار موثر حداقل یک نیم سیکل زمان نیاز است بنابراین حداقل در یک نیم سیکل اول و نیم سیکل آخر اغتشاش، امکان جبران‌سازی وجود نخواهد داشت. در مرجع [۱۹] یک ساختار ZESC<sup>۵</sup> معرفی شده است که بدون استفاده از خازن قادر به جبران کم‌بود ولتاژهای سه فاز متقارن و نامتقارن می‌باشد. این ساختار قادر به جبران بیش‌بود ولتاژ نبوده و هم‌چنین امکان جبران هارمونیک‌ها و فلیکر ولتاژ توسط آن بررسی نشده است. در [۲۰] نیز ساختاری برای DVR سه فاز ارائه شده است که از مبدل ماتریسی غیرمستقیم استفاده کرده است. این ساختار نیاز به ذخیره‌کننده انرژی چرخ طیار داشته و امکان جبران کم‌بود ولتاژ نامتقارن، بیش‌بود و هارمونیک‌های ولتاژ در آن بررسی نشده است.

در این مقاله، ساختار جدیدی برای DVR ارائه می‌شود که در آن لینک dc وجود ندارد. برای حذف المان ذخیره‌کننده انرژی، باید از تبدیلی استفاده شود، که بتواند تبدیل ac-ac را مستقیماً و بدون استفاده از لینک dc انجام دهد. مبدل ماتریسی چنین ویژگی را دارد. این مبدل برخلاف سیستم‌های کلاسیک یک‌سوکننده-اینورتری، نیاز به عنصرهای ذخیره‌کننده انرژی برای انجام تبدیل ac/ac ندارد. به

در روابط فوق، اندیس‌های S، L و D به ترتیب برای بار، منبع و DVR استفاده شده‌اند. هم چنین، برای نمایش فازهای اول، دوم و سوم به ترتیب از اندیس‌های a، b و c استفاده شده است.

وقتی منبع، ولتاژ نامی خود را تولید می‌کند، مبدل‌های ماتریسی ولتاژی تولید نمی‌کنند. بنابراین ولتاژ بار برابر با ولتاژ منبع خواهد شد. وقتی ولتاژ منبع کم‌بود یا بیش‌بود داشته باشد، مبدل‌های ماتریسی با توجه به مقدار کم‌بود و یا بیش‌بود ولتاژ، ولتاژ تزریقی مورد نیاز را تولید کرده و توسط ترانسفورماتورها به شبکه تزریق می‌کنند. اگر شبکه کم‌بود ولتاژ داشته باشد، ولتاژ تولیدی DVR با ولتاژ منبع هم پلاریته بوده و اگر شبکه بیش‌بود ولتاژ داشته باشد، DVR ولتاژی با پلاریته مخالف با ولتاژ منبع تولید خواهد کرد. به این ترتیب، این سیستم قادر خواهد بود هم کم‌بود و هم بیش‌بود ولتاژ را جبران کند. در نتیجه، می‌توان در دو سر بار، ولتاژی با دامنه‌ی ثابت فراهم کرد. با توجه به معادله (۱) و استقلال عمل‌کرد مبدل‌های ماتریسی، می‌توان کم‌بود و بیش‌بود نامتعادل را جبران کرد. همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شد، ساختار پیشنهادی DVR مبتنی بر سه مبدل ماتریسی سه فاز به تک فاز است. هر یک از این مبدل‌ها به طور جداگانه از سه فاز منبع تغذیه شده و ولتاژ خروجی هر کدام از آن‌ها به وسیله یک ترانسفورماتور تک فاز به شبکه تزریق می‌شود. ساختار و کنترل مبدل‌ها به صورت کاملاً مستقل از یکدیگر است. برای مثال، یکی از مبدل‌ها می‌تواند هیچ ولتاژی را تولید نکند، دیگری ولتاژ نامی و یا هر مقدار دیگری را (در محدوده مشخص) تولید کند. بنابراین، مبدل‌های فازهای مختلف DVR پیشنهادی هیچ وابستگی به هم ندارند و به این ترتیب امکان جبران کم‌بود/بیش‌بود ولتاژ نامتعادل و هم‌چنین اغتشاشات شدید ولتاژ فراهم می‌شود. توجه به این نکته حائز اهمیت است که در صورت استفاده از یک مبدل ماتریسی سه فاز به سه فاز به جای سه مبدل ماتریسی سه فاز به تک فاز، امکان استقلال کامل فازها از نظر ولتاژ خروجی وجود ندارد و در حالی که نامتعادلی زیاد باشد نمی‌توان ولتاژ مطلوب جبران‌سازی را در فازهای مختلف تولید کرد. علاوه بر این، در این صورت تولید ولتاژ مطلوب از یک منبع کاملاً اغتشاش یافته و هارمونیک وجود ندارد و بنابراین در صورت استفاده از یک مبدل ماتریسی سه فاز به سه فاز، امکان جبران هارمونیک‌های ولتاژ و نامتعادلی‌های شدید وجود نخواهد داشت. استقلال فازهای مختلف DVR از یکدیگر علاوه بر مزایای فوق، باعث می‌شود تا سیستم کنترلی نیز ساده شود چرا که سیستم کنترلی به جای یکپارچه بودن (که پیچیدگی بیش‌تری دارد) به سه زیر بخش مشابه تقسیم شده است که در نتیجه باعث سادگی سیستم کنترلی خواهد شد. هم چنان که شکل (۱) نشان می‌دهد، در ساختار پیشنهادی انرژی مورد نیاز DVR مستقیماً از طریق شبکه تامین می‌شود. بنابراین، برخلاف سیستم‌های کلاسیک که انرژی مورد نیاز خود را از طریق یک عنصر ذخیره‌کننده انرژی که محدودیت انرژی دارند، ساختار پیشنهادی قادر

همین دلیل این مبدل‌ها دارای قابلیت طراحی به صورت یک‌پارچه، پاسخ سریع و اندازه کوچک هستند.

در این مقاله، ابتدا مدار قدرت ساختار پیشنهادی DVR به طور کامل تشریح شده و سپس روش کنترلی مربوط به آن توضیح داده خواهد شد. هم چنین، محدوده‌ای از کم‌بود و یا بیش‌بود ولتاژ را که DVR در آن محدوده می‌تواند آن‌ها را به طور کامل جبران نماید، مورد بررسی قرار خواهد گرفت. نتایج آزمایشگاهی و هم چنین شبیه‌سازی‌ها توسط نرم‌افزار PSCAD، توانایی ساختار پیشنهادی را در جبران کم‌بود و بیش‌بود ولتاژ و هم چنین جبران اغتشاشات شدید ولتاژ، تأیید می‌کند.

## ۲- ساختار پیشنهادی برای DVRها

مدار قدرت DVR پیشنهادی در شکل (۱) نشان داده شده است. در این ساختار، برای حذف لینک dc از سه مبدل ماتریسی سه فاز به تک فاز استفاده شده است. مبدل‌های ماتریسی استفاده شده به صورت مستقیم به منبع وصل شده و ولتاژ تولیدی آن‌ها پس از عبور از یک فیلتر LC، توسط سه ترانسفورماتور تک فاز مجدداً به شبکه تزریق می‌شود. این ترانسفورماتورها، از اتصال کوتاه شدن فازها جلوگیری می‌کنند چرا که مبدل‌های ماتریسی، ورودی‌ها را مستقیماً به خروجی‌ها وصل می‌کنند. هم چنین، با تغییر نسبت تبدیل این ترانسفورماتورها می‌توان محدوده‌ی عمل‌کرد صحیح DVR را تغییر داد. فیلتر LC استفاده شده در خروجی مبدل‌ها برای حذف هارمونیک‌های فرکانس‌های بالای تولید شده در اثر کلیدزنی می‌باشد. اندازه عنصرهای فیلتر خروجی ارتباط مستقیمی با هارمونیک‌های ایجاد شده ناشی از روش کنترلی استفاده شده داشته و عموماً مستقل از ساختار مبدل استفاده شده است. هر چقدر هارمونیک‌های تولید شده دور از فرکانس اصلی قرار گیرد اندازه عنصرهای مورد نیاز برای فیلتر کوچک‌تر خواهد شد. روش کنترلی استفاده شده برای مبدل‌های استفاده شده در ساختار DVR پیشنهادی از نوع تکنیک PWM است. یکی از ویژگی‌های مهم این نوع تکنیک‌های کلیدزنی، تولید هارمونیک در اطراف و مضارب صحیحی از فرکانس کلیدزنی می‌باشد. به عبارت دیگر، هارمونیک‌های ایجاد شده در این نوع از تکنیک‌های کلیدزنی از مرتبه  $mf_s + \Delta f$  می‌باشد که در آن،  $m = 1, 2, 3, \dots$ ،  $f_s$  فرکانس کلیدزنی و  $\Delta f$  تابعی از  $f_i$  (فرکانس ورودی مبدل) و  $f_o$  (فرکانس خروجی مبدل) است. با انتخاب فرکانس کلیدزنی به اندازه کافی بالا، هارمونیک‌های تولید شده به مراتب از فرکانس اصلی (شبکه) دور شده و در نتیجه اندازه عنصرهای مورد نیاز برای فیلتر کاهش قابل توجهی خواهد داشت [۲۱-۲۶].

روابط ولتاژ دو سر بار با توجه به شکل (۱) به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} v_{L,a}(t) &= v_{S,a}(t) + v_{D,a}(t) \\ v_{L,b}(t) &= v_{S,b}(t) + v_{D,b}(t) \\ v_{L,c}(t) &= v_{S,c}(t) + v_{D,c}(t) \end{aligned} \quad (۱)$$

جدول (۱): مدهای مختلف مجاز برای مبدل ماتریسی سه فاز به تک فاز با ۶ کلید قدرت

mode	ON switches	$v_{o, Mode}$	$i_o$
1	$S_1 \ \& \ S_4$	$v_a - v_b$	$i_{i1}$
2	$S_3 \ \& \ S_6$	$v_b - v_c$	$i_{i2}$
3	$S_2 \ \& \ S_5$	$v_c - v_a$	$i_{i3}$
4	$S_2 \ \& \ S_3$	$v_b - v_a$	$i_{i2}$
5	$S_4 \ \& \ S_5$	$v_c - v_b$	$i_{i3}$
6	$S_1 \ \& \ S_6$	$v_a - v_c$	$i_{i1}$
7	$(S_1 \ \& \ S_2) \ \text{OR} \ (S_3 \ \& \ S_4) \ \text{OR} \ (S_5 \ \& \ S_6)$	0	$i_o$

جدول (۲): مدهای مختلف مجاز برای مبدل ماتریسی سه فاز به تک فاز با ۸ کلید قدرت

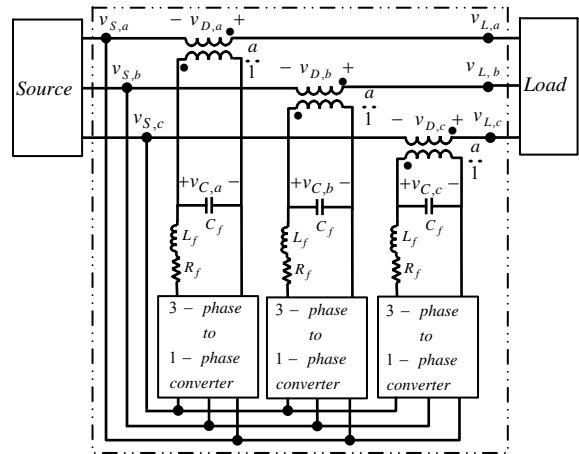
mode	ON switches	$v_{o, Mode}$	$i_o$
1	$S_1 \ \& \ S_4$	$v_a - v_b$	$i_{i1}$
2	$S_3 \ \& \ S_6$	$v_b - v_c$	$i_{i2}$
3	$S_2 \ \& \ S_5$	$v_c - v_a$	$i_{i3}$
4	$S_2 \ \& \ S_3$	$v_b - v_a$	$i_{i2}$
5	$S_4 \ \& \ S_5$	$v_c - v_b$	$i_{i3}$
6	$S_1 \ \& \ S_6$	$v_a - v_c$	$i_{i1}$
7	$S_1 \ \& \ S_8$	$v_a$	$i_{i1}$
8	$S_3 \ \& \ S_8$	$v_b$	$i_{i2}$
9	$S_5 \ \& \ S_8$	$v_c$	$i_{i3}$
10	$S_2 \ \& \ S_7$	$-v_a$	$-i_{i1}$
11	$S_4 \ \& \ S_7$	$-v_b$	$-i_{i2}$
12	$S_6 \ \& \ S_7$	$-v_c$	$-i_{i3}$
13	$(S_1 \ \& \ S_2) \ \text{OR} \ (S_3 \ \& \ S_4) \ \text{OR} \ (S_5 \ \& \ S_6) \ \text{OR} \ (S_7 \ \& \ S_8)$	0	$i_o$

با توجه به تعداد کلیدهای استفاده شده در هر مبدل ماتریسی، عیب عمده DVR پیشنهادی این است که تعداد کلیدهای قدرت مورد نیاز بیشتر است. ولی باید توجه داشت که امروزه با پیشرفت تکنولوژی این مورد چندان عیب محسوب نمی‌شود، چرا که نیمه‌هادی‌هایی با توان بالا، قیمت پایین و با راه‌اندازی آسان، قابل دسترسی هستند. توجه شود که به دلیل حذف لینک dc، امکان ارائه DVR پیشنهادی به صورت یک بسته فراهم می‌شود.

### ۳- استراتژی کنترلی

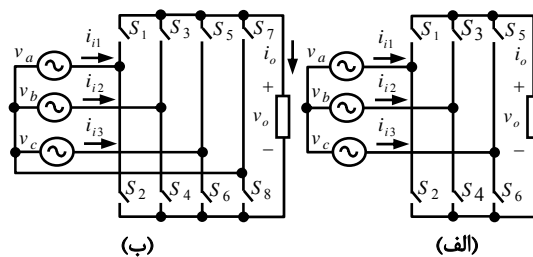
به طور کلی سه استراتژی پایه برای کنترل DVR وجود دارند که عبارتند از: روش قبل از کمبود (pre-sag)، روش هم فاز (in-phase) و روش کمترین انرژی (energy minimized). در این مقاله از روش قبل از کمبود برای کنترل DVR استفاده شده است. مزیت این روش این است که علاوه بر دامنه ولتاژ، می‌تواند زاویه فاز آن را نیز جبران

خواهد بود که اغتشاشات طولانی مدت را به راحتی جبران نماید. مبدل‌های ماتریسی سه فاز به تک فاز استفاده شده می‌توانند با ۶ یا ۸ کلید قدرت ساخته شوند. کلیدهای استفاده شده باید توانایی مسدود کردن ولتاژ با هر پلاریته و عبور جریان دو طرفه را داشته باشند. روش‌های مختلفی برای ساخت چنین کلیدهایی وجود دارند [۲۷]. در این مقاله، ساختار امیتر مشترک برای این کلیدها استفاده شده است.

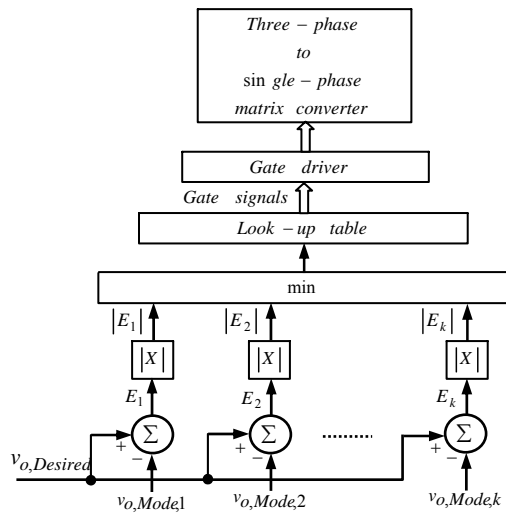


شکل (۱): مدار قدرت DVR پیشنهادی

یک مبدل ماتریسی با ۶ کلید قدرت دو طرفه در شکل (۲-الف) نشان داده شده است. این مبدل می‌تواند ۶۴ مد مختلف را ایجاد نماید. با توجه به این که در مبدل‌های ماتریسی باید از اتصال کوتاهی در سمت ورودی و هم چنین مدار بازی در سمت بار جلوگیری شود، این تعداد از مدها به ۷ حالت مجاز کاهش داده می‌شود. به عبارت دیگر، در خروجی این مبدل می‌توان ۷ سطح مختلف ولتاژ مطابق جدول (۱) تولید کرد. هم چنان که این جدول نشان می‌دهد بیشینه دامنه ولتاژ خروجی لحظه‌ای به  $\sqrt{3}$  برابر بیشینه دامنه ولتاژ ورودی محدود می‌شود. روش دوم ساخت مبدل‌های ماتریسی سه فاز به تک فاز استفاده از ۸ کلید قدرت دو طرفه مطابق شکل (۲-ب) می‌باشد. یک مبدل ماتریسی با ۸ کلید قدرت، می‌تواند ۱۲۸ مد مختلف را ایجاد نماید. برای جلوگیری از اتصال کوتاهی در سمت منبع و مدار بازی در سمت بار، این تعداد از مدها به ۱۳ حالت مجاز مطابق جدول (۲) کاهش داده می‌شود [۲۸].



شکل (۲): مدار قدرت مبدل ماتریسی سه فاز به تک فاز، (الف) با استفاده از ۶ کلید قدرت، (ب) با استفاده از ۸ کلید قدرت



شکل (۳): بلوک دیاگرام مدار کنترلی مبدل ماتریسی سه فاز به تک فاز

در این روش کنترلی، ولتاژهای خروجی در مدهای کاری مختلف مبدل ماتریسی با خروجی مورد انتظار مقایسه شده و برای هر مد کاری، تفاضل آن‌ها محاسبه شده (خطا) و بعد از محاسبه قدرمطلق خطاها، خطای حداقل توسط بلوک min تشخیص داده می‌شود. سپس، با توجه به این که وضعیت کلیدها در مدهای کاری مختلف از قبل در جدول Look-up Table ذخیره شده است با توجه به مد انتخاب شده توسط بلوک min، فرمان‌های روشن و خاموش شدن کلیدها از جدول Look-up Table انتخاب شده و توسط مدارات راه‌انداز به مبدل ماتریسی اعمال می‌شوند. نحوه عمل‌کرد جدول Look-up Table به صورت زیر است:

$$IF (\min |E_1|, |E_2|, \dots, |E_k|) = |E_1|$$

THEN The switches in Mode 1 will be ON

$$IF (\min |E_1|, |E_2|, \dots, |E_k|) = |E_2|$$

THEN The switches in Mode 2 will be ON

:

$$IF (\min |E_1|, |E_2|, \dots, |E_k|) = |E_k|$$

THEN The switches in Mode k will be ON

یکی دیگر از مزایای این روش کنترلی، کاهش تعداد کلیدزنی‌ها است. همچنین با این راهبرد، فشار  $dv/dt$  روی کلیدهای قدرت به شدت کاهش یافته و امکان استفاده از نیمه‌هادی‌های با سرعت پایین‌تر و در نتیجه قیمت کم‌تر در ساخت کلیدهای دو طرفه مورد نیاز مبدل‌های ماتریسی فراهم می‌شود.

کند. به عبارت دیگر، هنگامی که کم‌بود/بیش‌بود ولتاژ همراه با تغییر فاز باشد ولتاژ تزریقی DVR با ولتاژ منبع هم‌فاز نخواهد بود و زاویه فاز و دامنه ولتاژ تزریقی طوری خواهد بود که علاوه بر دامنه ولتاژ، زاویه فاز آن نیز جبران شود. واضح است که در این روش دامنه ولتاژ تزریقی بیش‌تر خواهد شد. در روش هم‌فاز، هر چند که دامنه ولتاژ جبران می‌شود، ولی اگر کم‌بود/بیش‌بود ولتاژ همراه با پرش زاویه فاز باشد، زاویه فاز در طرف بار جبران نخواهد شد. در عوض، این روش کم‌ترین دامنه ولتاژ را برای جبران‌سازی لازم دارد. روش کم‌ترین انرژی هر چند که قابل اعمال به ساختار پیشنهادی می‌باشد، ولی مزیتی ندارد؛ چرا که در ساختار پیشنهادی انرژی از یک عنصر ذخیره‌کننده جانبی تامین نمی‌شود تا برای صرفه‌جویی در حجم و اندازه آن، از روش کم‌ترین انرژی استفاده شود.

راهبرد استفاده شده در این مقاله برای کنترل مبدل‌های ماتریسی، روش پیشنهادی در مرجع [۲۹] می‌باشد. این روش، بر پایه‌ی حداقل خطا بین ولتاژ خروجی مورد انتظار و ولتاژ تولید شده می‌باشد. شکل (۳) بلوک دیاگرام مدار کنترلی یکی از مبدل‌های ماتریسی استفاده شده در ساختار پیشنهادی DVR را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، از یک سیستم کنترل حلقه باز استفاده شده است. سرعت این روش هر چند ممکن است به اندازه سیستم کنترل حلقه بسته نباشد، ولی این روش بسیار ساده بوده و مشکل تنظیم پارامترهای کنترلی را ندارد. بدیهی است که می‌توان از سیستم‌های کنترلی حلقه بسته برای بهبود پاسخ DVR استفاده کرد. ولی، با توجه به امکانات موجود، ممکن است پیاده‌سازی آن در عمل پرهزینه و مشکل باشد. توجه به این نکته بسیار مهم است که در یک DVR، هدف کنترل ولتاژ به صورت مستقیم می‌باشد و بنابراین استفاده از سیستم کنترلی حلقه باز، به خصوص در مواردی که امپدانس سری فیلتر و اندوکتانس نشستی ترانسفورماتور تزریق به طور قابل ملاحظه‌ای کم‌تر از امپدانس بار باشد، مشکلی از نظر سرعت و دقت پاسخ‌دهی به وجود نمی‌آورد.

در استراتژی کنترلی استفاده شده، برای مدهای کاری مختلف مبدل‌های ماتریسی، خطای بین ولتاژهای خروجی مورد انتظار و تولیدی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$E_i(t) = v_{o,Desired}(t) - v_{o,Mode,i}(t) \quad i = 1, 2, \dots \quad (2)$$

در معادله (۲)، ولتاژ خروجی هر کدام از مبدل‌های سه فاز به تک فاز در مد نام می‌باشد که طبق جداول ۱ و ۲ می‌باشد. این جداول برای یکی از فازهای نوعی مبدل می‌باشد. با توجه به این که سه مبدل سه فاز به تک فاز مستقل برای سه فاز استفاده شده است، جداول کلیدزنی ۱ و ۲ برای حالت نامتعادل نیز کاملاً صادق می‌باشد.

که در آن،  $V_{Sm}$ ، دامنه ولتاژ منبع در حالت کارکرد عادی بوده و برابر با دامنه ولتاژ بار است که ثابت در نظر گرفته می‌شود ( $V_{Lm} = V_{Sm}$ ). کمبود ولتاژ را می‌توان با استفاده از معادلات (۳)-(۵) به صورت زیر نوشت:

$$x = \frac{a \cdot q}{1 + a \cdot q} \quad (۶)$$

در رابطه فوق،  $x$ ، کمبود ولتاژ برحسب پریونیت است. با توجه به این که محدوده  $q$  به صورت  $q_{\min} \leq q \leq q_{\max}$ ، محدوده عمل کرد صحیح DVR در حالت کمبود ولتاژ به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{a \cdot q_{\min}}{1 + a \cdot q_{\min}} \leq x \leq \frac{a \cdot q_{\max}}{1 + a \cdot q_{\max}} \quad (۷)$$

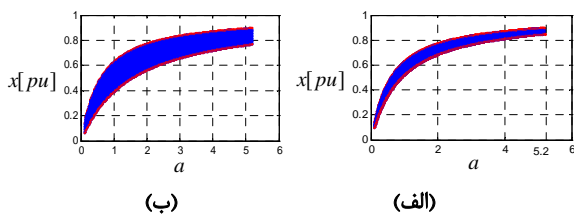
برای مبدل ماتریسی با ۶ کلید قدرت،  $q_{\min}$  و  $q_{\max}$  به ترتیب ۱.۱ و  $\sqrt{3}$  می‌باشد. بنابراین محدوده عمل کرد صحیح DVR ساخته شده با این نوع مبدل در حالت کمبود ولتاژ به صورت زیر در می‌آید:

$$\frac{1.1a}{1 + 1.1a} \leq x \leq \frac{\sqrt{3}a}{1 + \sqrt{3}a} \quad (۸)$$

این محدوده، برای DVR ساخته شده با مبدل‌های ماتریسی سه فاز به تک فاز با ۸ کلید قدرت به صورت زیر در می‌آید:

$$\frac{0.65a}{1 + 0.65a} \leq x \leq \frac{\sqrt{3}a}{1 + \sqrt{3}a} \quad (۹)$$

شکل (۴) محدوده عمل کرد صحیح DVR را در حالت کمبود ولتاژ برحسب تغییرات نسبت تبدیل ترانسفورماتور تزریق نشان می‌دهد. هم‌چنان که این شکل نشان می‌دهد به ازای نسبت تبدیل‌های مختلف برای ترانسفورماتور، حداقل و حداکثر کمبود ولتاژی که DVR قادر است آن را جبران نماید، تغییر می‌کند. هم‌چنین این شکل نشان می‌دهد که برای جبران کمبود ولتاژ با دامنه زیادتر باید ترانسفورماتور با نسبت تبدیل بیش‌تر به کار برود. باید توجه کرد که محدوده عمل کرد صحیح DVR به ازای نسبت تبدیل‌های مختلف برای ترانسفورماتورها، در حالتی که DVR از مبدل‌های ماتریسی با ۸ کلید قدرت ساخته شود بیش‌تر از حالتی خواهد بود که اگر از مبدل‌های ماتریسی با ۶ کلید قدرت در ساخت DVR استفاده شود.



شکل (۴): محدوده عمل کرد صحیح DVR در حالت کمبود ولتاژ برحسب تغییرات نسبت تبدیل ترانسفورماتورها، (الف) با ۶ کلید، (ب) با ۸ کلید

#### ۴- بررسی محدوده عمل کرد صحیح DVR پیشنهادی

اگر ضریب بهره ولتاژ مبدل ماتریسی معلوم باشد، می‌توان محدوده عمل کرد مطلوب DVR را محاسبه نمود. منظور از محدوده عمل کرد صحیح DVR، محدوده‌ای از تغییرات ولتاژ منبع است که DVR در آن محدوده با خطای مشخصی قادر به جبران تغییرات ولتاژ منبع می‌باشد.

ضریب بهره مبدل ماتریسی ( $q$ ) را می‌توان نسبت دامنه ولتاژ خروجی مبدل به دامنه ولتاژ ورودی مبدل تعریف کرد. ضریب بهره ولتاژ مبدل‌های ماتریسی سه فاز به تک فاز بستگی به ساختار و روش کنترلی آن دارد. برای مبدل‌های ماتریسی با ۶ کلید قدرت و با روش کنترلی پیشنهادی، ضریب بهره بین  $q = 1.1$  تا  $q = \sqrt{3}$  می‌باشد. این محدوده برای مبدل‌های ماتریسی سه فاز به تک فاز با ۸ کلید قدرت برابر  $0.65 \leq q \leq \sqrt{3}$  می‌باشد [۲۸].

در حالت عادی، ولتاژ دو سر بار باید با ولتاژ منبع برابر باشد. هم‌چنین، در حالت کمبود و یا بیش‌بود ولتاژ نیز باید دامنه ولتاژ دو سر بار ثابت و برابر  $V_{Lm}$  باشد. به عبارت دیگر، DVR باید قادر به جبران تغییرات ولتاژ شبکه در محدوده مجاز باشد. محدوده عمل کرد صحیح DVR، در دو حالت کمبود و بیش‌بود ولتاژ متفاوت خواهد بود. دلیل این مسئله، تفاوت در دامنه ولتاژ ورودی مبدل‌های ماتریسی در دو حالت کمبود و یا بیش‌بود ولتاژ می‌باشد. چرا که محدوده ولتاژ خروجی مبدل‌های ماتریسی، با فرض یک نسبت تبدیل ثابت برای ترانسفورماتورهای تزریق، به دامنه ولتاژ ورودی بستگی دارد. در ادامه، محدوده عمل کرد صحیح DVR، در دو حالت کمبود و بیش‌بود ولتاژ مورد بررسی قرار می‌گیرد.

#### ۴-۱- حالت کمبود ولتاژ

فرض می‌شود محدوده عمل کرد صحیح مبدل ماتریسی به صورت  $q_{\min} \leq q \leq q_{\max}$  می‌باشد. با توجه به شکل (۱) می‌توان نوشت:

$$V_{Lm} = V'_{Sm} + a \cdot V_{cm} \quad (۳)$$

$$q = \frac{V_{cm}}{V'_{Sm}} \quad (۴)$$

در روابط فوق،  $V_{cm}$ ،  $V'_{Sm}$  و  $a$  به ترتیب دامنه ولتاژ خروجی مبدل، دامنه ولتاژ منبع در هنگام کمبود و یا بیش‌بود ولتاژ و نسبت تبدیل ترانسفورماتور تزریق می‌باشند.

کمبود ولتاژ نسبی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$x = \frac{V_{Sm} - V'_{Sm}}{V_{Sm}} \quad (۵)$$

## ۴-۲- حالت بیش‌بود ولتاژ

در حالت بیش‌بود ولتاژ، ولتاژ خروجی DVR باید پلاریته‌ای مخالف با پلاریته ولتاژ منبع داشته باشد. بنابراین با توجه به مدار شکل (۱) رابطه‌ی زیر حاصل می‌شود:

$$V_{Lm} = V'_{Sm} - a \cdot V_{cm} \quad (10)$$

بیش‌بود ولتاژ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$x = \frac{V'_{Sm} - V_{Sm}}{V_{Sm}} \quad (11)$$

بیش‌بود ولتاژ را می‌توان با استفاده از معادلات (۴) و (۱۰)-(۱۱) به صورت زیر نوشت:

$$x = \frac{a \cdot q}{1 - a \cdot q} \quad a \neq \frac{1}{q} \quad (12)$$

در رابطه فوق،  $x$ ، بیش‌بود ولتاژ برحسب پریونیت است. در این رابطه، نسبت تبدیل ترانسفورماتور نمی‌تواند برابر با  $\frac{1}{q}$  انتخاب شود چرا که

با انتخاب  $a = \frac{1}{q}$  صرف نظر از مقدار بیش‌بود ولتاژ، ولتاژ تولیدی

DVR با ولتاژ منبع هم اندازه بوده و چون در حالت بیش‌بود ولتاژ، DVR ولتاژی مخالف با پلاریته منبع تولید می‌کند در نتیجه ولتاژ دو سر بار صفر خواهد شد. با توجه به محدوده  $q$ ، محدوده عمل‌کرد صحیح DVR، در حالت بیش‌بود ولتاژ به صورت زیر به دست می‌آید:

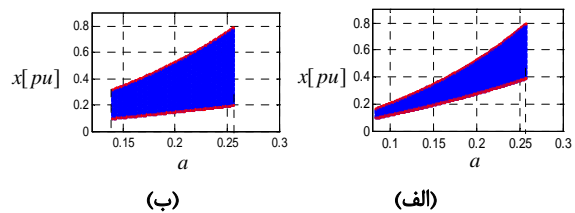
$$\frac{aq_{\min}}{1 - aq_{\min}} \leq x \leq \frac{aq_{\max}}{1 - aq_{\max}} \quad \text{و} \quad a \neq \frac{1}{q_{\min}} \quad \text{and} \quad a \neq \frac{1}{q_{\max}} \quad (13)$$

این محدوده برای DVRهای ساخته شده از مبدل‌های ماتریسی سه فاز به تک فاز با ۶ و ۸ کلید قدرت به ترتیب به صورت روابط (۱۴) و (۱۵) خلاصه می‌شود:

$$\frac{1.1a}{1 - 1.1a} \leq x \leq \frac{\sqrt{3}a}{1 - \sqrt{3}a} \quad \text{و} \quad a \neq \frac{1}{1.1} \quad \text{and} \quad a \neq \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (14)$$

$$\frac{0.65a}{1 - 0.65a} \leq x \leq \frac{\sqrt{3}a}{1 - \sqrt{3}a} \quad \text{و} \quad a \neq \frac{1}{0.65} \quad \text{and} \quad a \neq \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (15)$$

شکل (۵) محدوده‌ی عمل‌کرد صحیح DVR را برحسب تغییرات نسبت تبدیل ترانسفورماتورها در حالت بیش‌بود ولتاژ نشان می‌دهد.



شکل (۵): محدوده‌ی عمل‌کرد صحیح DVR در حالت بیش‌بود ولتاژ برحسب تغییرات نسبت تبدیل ترانسفورماتورها، (الف) با ۶ کلید، (ب) با ۸ کلید

## ۵- نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت، برای نمایش قابلیت و توانایی DVR پیشنهادی در تثبیت ولتاژ دو سر بار، نتایج شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار PSCAD ارائه می‌گردد. با توجه به این که در ساختار DVR پیشنهادی از سه مبدل ماتریسی سه فاز به تک فاز مستقل استفاده شده است، مبدل‌های ماتریسی استفاده شده می‌توانند ضریب بهره‌های متفاوت داشته باشند. از این خاصیت می‌توان برای جبران کم‌بود یا بیش‌بود ولتاژ در حالت نامتعادلی بهره جست. برای نمایش این قابلیت، نتایج شبیه‌سازی‌ها در هر دو حالت کم‌بود و بیش‌بود ولتاژ، هم به صورت متعادل و هم به صورت نامتعادل ارائه خواهد شد. شرایط شبیه‌سازی برای هر دو ساختار مبتنی بر مبدل ماتریسی با ۶ یا ۸ کلید قدرت یکسان در نظر گرفته شده است تا بهتر بتوان نتایج را با هم مقایسه کرد. پارامترهای سیستم شبیه‌سازی شده در جدول (۳) خلاصه شده است.

جدول (۳): پارامترهای سیستم

Source	Injection transformer	Load	Filter
$V_{Sm} = 220\sqrt{2} = 1^{pu}$ $f_s = 50\text{Hz}$	$a = 0.25$ $R_t = 0.01\Omega$ $L_t = 0.75\text{mH}$	$R_L = 40\Omega$ $L_L = 55\text{mH}$	$L_f = 5\text{mH}$ $C_f = 11\mu\text{F}$ $R_f = 0.08\Omega$

## ۵-۱- شرایط متعادل

در این حالت فرض بر این است که منبع متعادل بوده و مقادیر ولتاژ فازهای مختلف آن به یک اندازه تغییر می‌کند. شکل‌های (۶) و (۷) به ترتیب نتایج شبیه‌سازی را تحت این حالت برای DVR مبتنی بر مبدل ماتریسی با ۶ و ۸ کلید قدرت نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل‌ها نشان داده است، منبع هیچ‌گونه اغتشاش ولتاژ در بازه‌ی زمانی ۰ تا ۰/۰۲ ثانیه ندارد و بنابراین DVR ولتاژی تولید نمی‌کند و در نتیجه ولتاژ بار با ولتاژ منبع برابر است. در زمان ۰/۰۲ تا ۰/۰۶ ثانیه، ولتاژ منبع به ۰/۷ پریونیت کاهش می‌یابد. در این بازه زمانی DVR ولتاژ لازم را با توجه به مقدار کم‌بود ولتاژ تولید کرده و به شبکه تزریق می‌کند به طوری که ولتاژ بار در سطح مطلوبی باقی می‌ماند. بین ۰/۰۶ تا ۰/۰۸ ثانیه ولتاژ منبع دوباره به حالت عادی خود برمی‌گردد و DVR دوباره ولتاژی را تولید نمی‌کند. در بازه‌ی زمانی بین ۰/۰۸ تا ۰/۱۲ ثانیه، ۰/۴ پریونیت بیش‌بود ولتاژ در منبع اتفاق می‌افتد. در این بازه‌ی زمانی DVR با تولید و تزریق ولتاژ با دامنه لازم و با پلاریته مخالف با پلاریته ولتاژ منبع، باعث کاهش ولتاژ به سطح مطلوب شده و ولتاژ تثبیت شده‌ای را برای بار فراهم می‌نماید.

جبران نموده و ولتاژ مطلوبی را برای بار حساس فراهم نماید. شکل‌های (۸) و (۹) نتایج شبیه‌سازی را به ترتیب برای DVR مبتنی بر مبدل‌های ماتریسی با ۶ و ۸ کلید قدرت تحت شرایط نامتعادل و اغتشاش یافته نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل‌ها مشخص است، ولتاژ منبع هیچ کم‌بود و بیش‌بودی در بازه‌ی زمانی ۰ تا ۰/۱ پر یونیت ثانیه ندارد و در نتیجه DVR در این بازه‌ی زمانی غیرفعال بوده و ولتاژ بار برابر با ولتاژ منبع می‌باشد. بین ۰/۱ تا ۰/۴ ثانیه، ۰/۳ پر یونیت کم‌بود ولتاژ فقط در فاز c اتفاق می‌افتد در حالی که دو فاز دیگر در حالت عادی قرار دارند. بین ۰/۴ تا ۰/۷ ثانیه، ۰/۳ پر یونیت کم‌بود ولتاژ فازهای a و b اتفاق می‌افتد در حالی که ولتاژ فاز c در حالت عادی قرار داشته و برابر ۱ پر یونیت است. در بازه‌ی زمانی ۰/۷ تا ۰/۱ ثانیه، ۰/۴ پر یونیت بیش‌بود ولتاژ در فاز a اتفاق می‌افتد و دو فاز دیگر در حالت عادی قرار دارند. در بازه‌ی زمانی بعدی (۰/۱ تا ۰/۱۳ ثانیه)، ۰/۴ پر یونیت در فازهای b و c اتفاق می‌افتد. در بازه‌ی زمانی بین ۰/۱۳ تا ۰/۱۸ ثانیه ولتاژ منبع شدیداً اغتشاش یافته بوده و مطابق معادله (۱۶) می‌باشد.

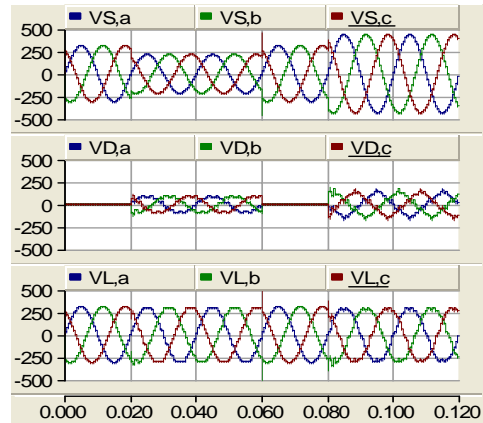
$$v_{S,a} = 1.14V_{S,m} \sin(\omega_S t) + 0.55V_{S,m} \sin(3\omega_S t)$$

$$v_{S,b} = V_{S,m} \sin(\omega_S t - \frac{2\pi}{3}) + 0.45V_{S,m} \sin(2\omega_S t) \quad (16)$$

$$v_{S,c} = 0.91V_{S,m} \sin(\omega_S t + \frac{2\pi}{3}) + 0.41V_{S,m} \sin(5\omega_S t)$$

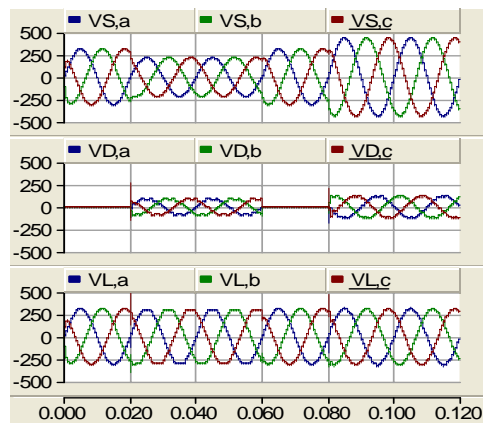
همان‌طور که شکل‌های حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهند، در همه‌ی حالت‌های غیرعادی فوق، DVR چنان ولتاژی را در فازهای مختلف تولید می‌کند که در نهایت ولتاژ تثبیت شده و مطلوبی برای بار حساس فراهم شود، حتی اگر ولتاژ منبع کاملاً اغتشاش یافته باشد. لازم به یادآوری است که روش پیشنهادی جزو روش‌های منحصر به فردی است که قادر به تثبیت ولتاژ دو سر بار حتی در صورتی که ولتاژ منبع به شدت اغتشاش یافته و هارمونیک‌دار است، می‌باشد.

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، یکی از مزایای روش کنترلی به کار رفته این است که تعداد کلیدزنی‌ها در یک سیکل از ولتاژ خروجی بسیار کم‌تر است. برای اثبات این موضوع پالس‌های گیت یکی از کلیدهای DVR مبتنی بر مبدل ماتریسی با ۸ کلید قدرت در شکل (۱۰-الف) نشان داده شده است. هرچند که بدترین شرایط (شرایط شدیداً اغتشاش یافته) برای نشان دادن پالس‌های گیت انتخاب شده است، ولی تعداد دفعات کلیدزنی‌ها در یک سیکل از ولتاژ خروجی از ۱۵ تجاوز نمی‌کند و در نتیجه با این‌که تعداد کلیدها زیاد است، ولی تعداد کلیدزنی‌های هر یک از این کلیدها کم است. بنابراین، هم تلفات کلیدزنی کم خواهد بود و هم این‌که می‌توان از کلیدهای فرکانس پایین استفاده کرد که به کاهش قیمت سیستم منجر خواهد شد. ولتاژ دو سر کلید مذکور نیز در شکل (۱۰-ب) نشان داده شده است. با



شکل (۶): عمل کرد DVR مبتنی بر مبدل‌های ماتریسی با ۶ کلید قدرت در شرایط متعادل

با مقایسه شکل (۶) با شکل (۷)، می‌توان مشاهده کرد که کیفیت شکل موج‌های ولتاژ در شکل (۷) بهتر از شکل موج‌های ولتاژ در شکل (۶) می‌باشد. درصد THD<sup>۵</sup> ولتاژ دو سر بار در شکل (۶) برای فاز اول خروجی (فاز a) در شرایط کم‌بود و بیش‌بود ولتاژ به ترتیب برابر با ۳/۸ و ۶/۵ است. در حالی‌که، مقادیر متناظر برای شکل (۷) به ترتیب برابر ۲/۷ و ۱/۹۸ می‌باشد که کاهش چشم‌گیری را در مقدار THD نشان می‌دهد. (برای محاسبه THD هارمونیک‌های ولتاژ تا مرتبه ۳۱ در نظر گرفته شده است). این یکی از مزایای ساختار مبتنی بر مبدل‌های ماتریسی با ۸ کلید قدرت در مقایسه با ساختار مبتنی بر مبدل‌های ماتریسی با ۶ کلید قدرت می‌باشد. دلیل این تفاوت این است که مبدل ماتریسی با ۸ کلید قدرت، همان‌طور که جدول (۲) نشان می‌دهد، تعداد سطوح ولتاژ مجاز بیش‌تری نسبت به مبدل ماتریسی با ۶ کلید قدرت (جدول ۱) دارد.



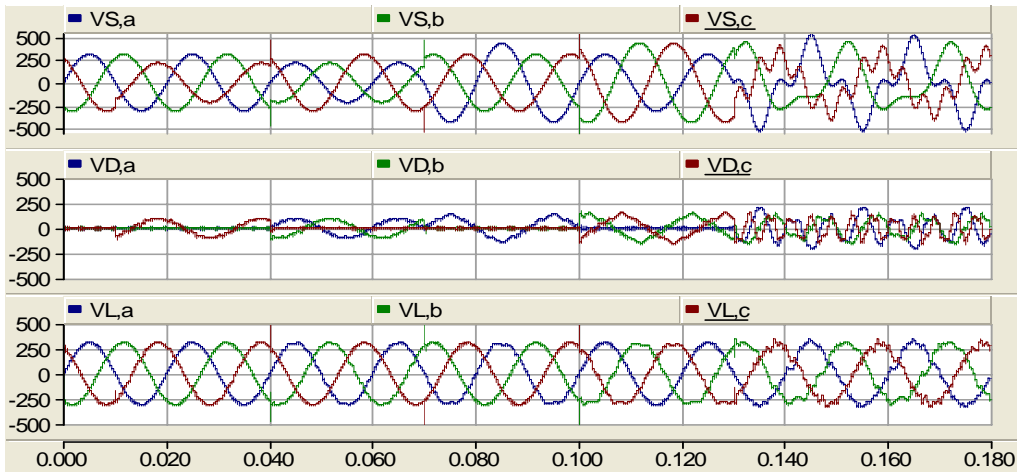
شکل (۷): عمل کرد DVR مبتنی بر مبدل‌های ماتریسی با ۸ کلید قدرت در شرایط متعادل

## ۵-۲- حالت نامتعادل و اغتشاش یافته

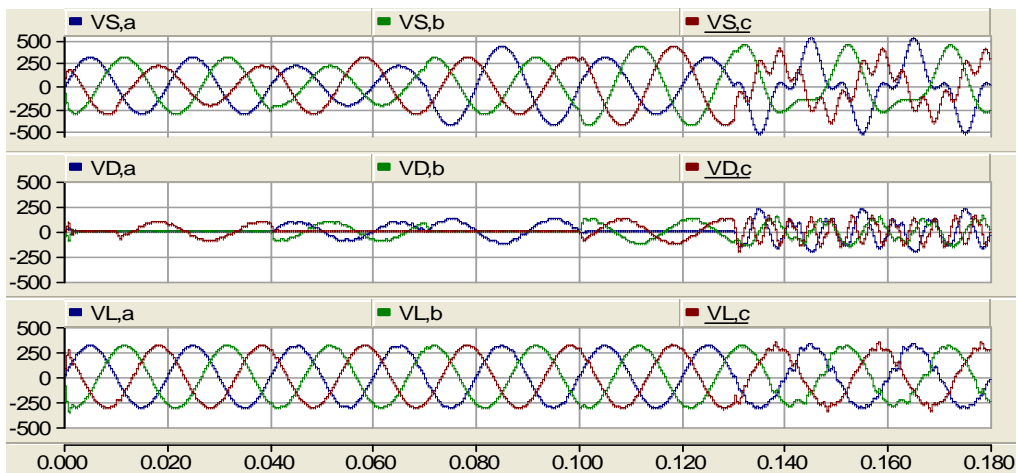
همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، DVR پیشنهادی قادر است ولتاژ را در حالت‌های کم‌بود و بیش‌بود نامتعادل و اغتشاشات شدید نیز به خوبی



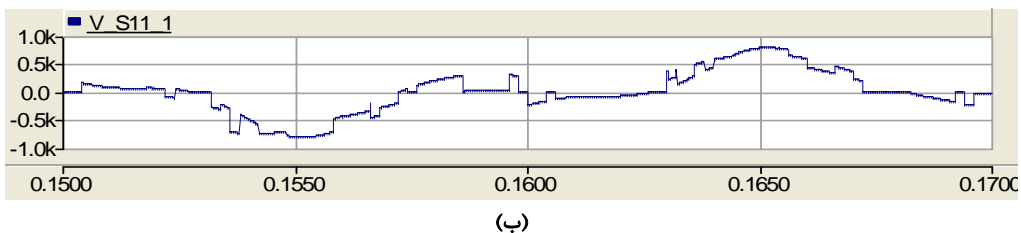
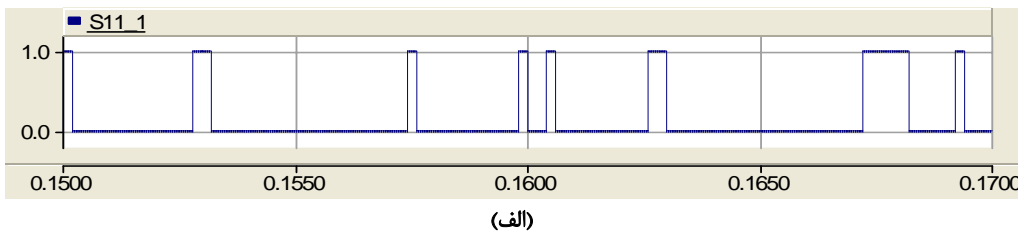
توجه به این شکل، ولتاژ دو سر این کلید پرش‌های کم‌تری داشته و فشار  $dv/dt$  روی کلید کم‌تر است. همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شد، بدترین شرایط از نظر کلیدزنی و فشار روی کلیدها برای این نمونه‌برداری انتخاب شده است. در تمام حالات دیگر، هم تعداد دفعات کلیدزنی‌ها و هم فشار روی کلیدها کم‌تر از حالت نشان داده شده است.



شکل (۸): عمل‌کرد DVR مبتنی بر مبدل‌های ماتریس با ۶ کلید قدرت در حالت نامتعادل و اغتشاش یافته



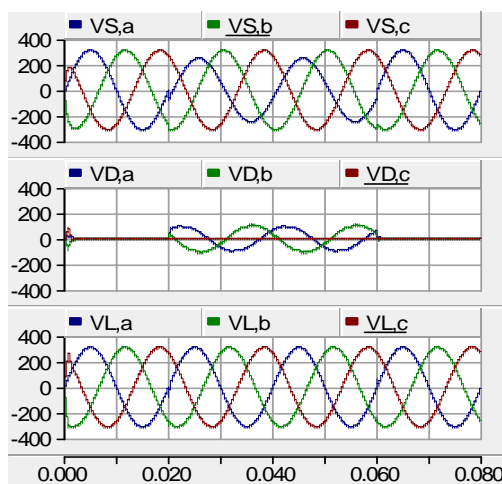
شکل (۹): عمل‌کرد DVR مبتنی بر مبدل‌های ماتریس با ۸ کلید قدرت در حالت نامتعادل و اغتشاش یافته



شکل (۱۰): (الف) نمودار پالس گیت، (ب) ولتاژ دو سر برای یک کلید نمونه DVR مبتنی بر مبدل ماتریسی با ۸ کلید قدرت در حالت شدیداً اغتشاش یافته (بدترین حالت)

دو طرفه استفاده شده است (شکل (۱۳)). که در صورت وصل بودن کلید  $S_{11}$ ، ولتاژ در حالت عادی قرار داشته و برابر ۱ پریونیت می‌باشد و اگر کلید  $S_{12}$  وصل شود ۰/۲ پریونیت کم‌بود ولتاژ اتفاق می‌افتد. بدیهی است که دو کلید مذکور نباید هم‌زمان روشن شوند. میکروکنترلر کننده 89C52 ساخت شرکت ATMEL برای تولید الگوی کلیدزنی طبق روش کنترلی پیشنهادی استفاده شده است. در همه‌ی اندازه‌گیری‌ها از پروب 1:100 استفاده شده است.

شکل (۱۴) نتایج آزمایشگاهی را برای فاز اول خروجی نشان می‌دهد. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، ۰/۲ پریونیت کم‌بود ولتاژ، طول سه سیکل اتفاق می‌افتد. در حالت عادی و بدون کم‌بود ولتاژ، DVR ولتاژی را تولید نمی‌کند ولی در موقع کم‌بود ولتاژ، DVR ولتاژی را با دامنه و پلاریته مناسب تولید کرده و به شبکه تزریق می‌کند به طوری که ولتاژ تثبیت شده‌ای برای بار حاصل می‌شود. هم‌چنان که شکل (۱۴-ب) نشان می‌دهد، ولتاژ خروجی مبدل ماتریسی قبل از عبور از فیلتر به صورت تکه‌های نمونه‌برداری شده از ولتاژهای ورودی بوده و بعد از عبور از فیلتر و حذف هارمونیک‌های مرتبه بالا به صورت یک شکل موج تقریباً سینوسی در می‌آید. ولتاژ تزریقی DVR (خروجی ثانویه ترانسفورماتور تزریق) در شکل (۱۴-ج) نشان داده شده است. هم‌چنان که این شکل نشان می‌دهد، کیفیت شکل موج ولتاژ تزریقی نسبت به ولتاژ اولیه ترانسفورماتور تزریق، بهبود قابل ملاحظه‌ای یافته است چرا که خود ترانسفورماتور به صورت فیلتر پایین‌گذر عمل کرده و در نتیجه باعث حذف بیش‌تر هارمونیک‌های مرتبه بالا شده است. ولتاژ دو سر بار در شکل (۱۴-د) نشان داده شده است. هم‌چنان که این شکل نشان می‌دهد، ولتاژ دو سر بار در تمامی بازه‌های زمانی تقریباً ثابت و به صورت سینوسی می‌باشد.



شکل (۱۱): جبران کم‌بود ولتاژ نامتعادل همراه با تغییر فاز با استفاده از ساختار پیشنهادی

مقاله [۱۷] یک ساختار تک فاز معرفی کرده است که در آن از مبدل ac/ac مستقیم استفاده شده است. مبدل مربوط به هر فاز در این ساختار فقط از فاز متناظر منبع تغذیه می‌شود بنابراین در مواقعی که تغییر فاز (و یا نامتعادلی فاز) در منبع وجود داشته باشد، این ساختار (و تمام ساختارهایی که مبتنی بر مبدل‌های مستقیم تک فاز هستند) قادر نخواهد بود که زاویه فاز را تصحیح کرده و ولتاژ سه فاز متعادل برای بارهای سه فاز تحویل دهد که برای بسیاری از بارهای سه فاز، متعادل بودن ولتاژ سه فاز ضروری می‌باشد. این در حالی است که DVR پیشنهادی می‌تواند نه تنها نامتعادلی معمولی بلکه نامتعادلی همراه با هارمونیک را نیز جبران کند. باید توجه کرد که در DVR پیشنهادی از مبدل‌های ماتریسی سه فاز به تک فاز استفاده شده است در حالی که در [۱۷] از مبدل‌های تک فاز استفاده شده است. بنابراین، ساختار پیشنهادی تعمیم ساختار ارائه شده در [۱۷] به سیستم‌های سه فاز نمی‌باشد.

شبیه‌سازی دیگری برای حالت کم‌بود ولتاژ نامتعادل همراه با شیفت فاز انجام شده است. این حالت شبیه‌سازی هم برای ساختار ارائه شده در [۱۷] توسعه داده شده به سیستم سه فاز و هم برای ساختار پیشنهادی انجام شده است تا مقایسه بهتری بین آن‌ها انجام گیرد. در این حالت فرض شده است که در زمان بین ۰/۰۲ تا ۰/۰۶ ثانیه، ۰/۲ پریونیت کم‌بود ولتاژ فقط در فاز اول رخ می‌دهد. ضمناً زاویه فاز اول به جای ۰ درجه، در طول کم‌بود ولتاژ ۱۵- درجه می‌شود (۱۵ درجه پرش فاز) و زاویه فاز دوم به جای ۱۲۰- درجه در طول کم‌بود ولتاژ ۱۰۰- درجه می‌شود (۲۰ درجه شیفت فاز). شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نتایج شبیه‌سازی را تحت این شرایط به ترتیب برای ساختار پیشنهادی و ساختار ارائه شده در [۱۷] (توسعه داده شده به سیستم سه فاز) نشان می‌دهند. همان‌طور که در این شکل‌ها کاملاً مشخص است، ساختار پیشنهادی توانسته است علاوه بر جبران دامنه ولتاژ، شیفت فاز را نیز جبران نموده و ولتاژ سه فاز متعادل تحویل بار دهد در حالی که ساختار ارائه شده در [۱۷] نتوانسته است زوایای فاز را جبران کند و بنابراین ولتاژ سه فاز تحویل داده شده به بار نامتعادل می‌باشد که برای بسیاری از بارهای سه فاز قابل قبول نیست.

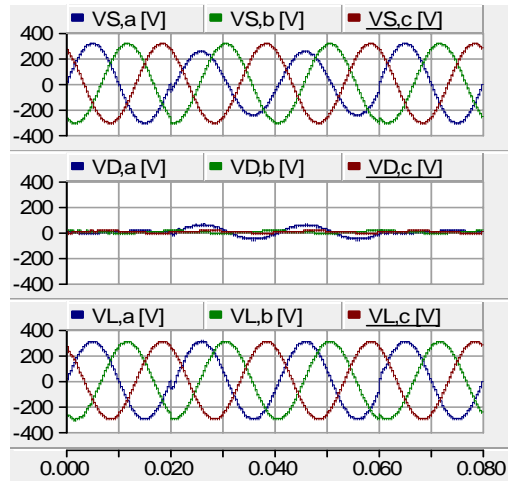
## ۶- نتایج آزمایشگاهی

برای اثبات قابلیت کاربرد DVR پیشنهادی در عمل، یک نمونه‌ی آزمایشگاهی از آن ساخته شده و آزمایش شد. نمونه‌ی آزمایشگاهی بر اساس ساختار مبتنی بر مبدل‌های ماتریسی با ۸ کلید قدرت (مطابق شکل (۲-ب)) و برای یک فاز خروجی می‌باشد. IGBT‌های نمونه آزمایشگاهی از نوع BUP306D با دیودهای موازی-معکوس داخلی و با مقادیر نامی جریان و ولتاژ به ترتیب 20A و 1200V می‌باشند. برای ایجاد کم‌بود ولتاژ در عمل، یک ترانسفورماتور دارای دو تپ و دو کلید

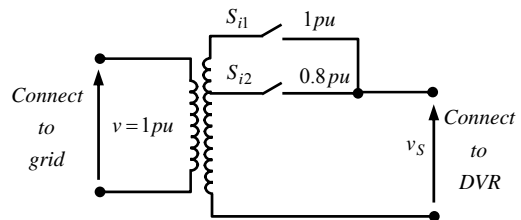
است. در ساختار پیشنهادی، از ۳ مبدل ماتریسی سه فاز به تک فاز مستقل استفاده شده است. به دلیل استقلال در عمل کرد و کنترل مبدل‌های ماتریسی، این مبدل‌ها می‌توانند ضریب بهره‌های متفاوت داشته باشند، در نتیجه می‌توان از ساختار پیشنهادی برای تثبیت ولتاژ دو سر بار در حالت کم‌بود و یا بیش‌بود ولتاژ هم در حالت متعادل و هم در حالت نامتعادل استفاده کرد. هم چنین یکی از مهم‌ترین مزایای ساختار پیشنهادی، بازیابی ولتاژ تحت شرایط شدیداً اغتشاش یافته است. بسته به این که مبدل‌های ماتریسی استفاده شده از ۶ یا ۸ کلید قدرت ساخته شده باشد، محدوده عمل کرد صحیح DVR متفاوت خواهد بود. در صورتی که از مبدل‌های ماتریسی با ۸ کلید قدرت استفاده شود علاوه بر افزایش محدوده عمل کرد صحیح DVR، کیفیت شکل موج ولتاژ دو سر بار، بهبود قابل ملاحظه‌ای خواهد کرد. نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی توانایی‌های DVR پیشنهادی را در تثبیت ولتاژ به خوبی نشان داد.

### مراجع

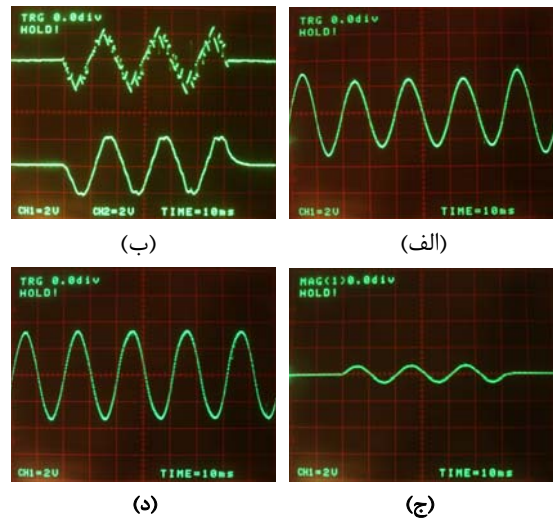
- [1] P. T. Nguyen and T. K. Saha, "Dynamic voltage restorer against balanced and unbalanced voltage sags: modelling and simulation," IEEE PES General Meeting, vol. 1, pp. 639-644, June 2004.
- [2] H. Awad, "Control of static series compensator for mitigation of power quality problems," Ph.D. Thesis, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 2004.
- [3] J. Praveen, P. Bishnu, M.S. Venkateshwarlu and H.V. Makthal, "Review of dynamic voltage restorer for power quality improvement," 30<sup>th</sup> Ann. Conf. of the IEEE IES, Busan, Korea, November 2004, pp. 749-752.
- [4] P. Boonchiam and N. Mithulananthan, "Understanding of dynamic voltage restorers through MATLAB simulation," Thammasat Int. J. Sc. Tech., vol. 11, no. 3, July/September 2006.
- [5] H. K. Al-Hadidi, A. M. Gole and D. A. Jacobson, "A novel configuration for a cascade inverter-based dynamic voltage restorer with reduced energy storage requirements," IEEE Trans. Power Del., vol. 23, no. 2, pp. 881-888, Apr. 2008.
- [6] J.G Nielsen, F. Blaabjerg, "A detailed comparison of system topologies for dynamic voltage restorers," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 41, no. 5, pp. 1272-1280, September/October 2005.
- [7] E. Babaei and M. Farhadi Kangarlu, "A new topology for dynamic voltage restorers without dc link," in Proc. ISIEA, 2009, Malaysia, pp.1009-1014.
- [8] C. Zhan, V. K. Ramachadaramurthy, A. Arulampalam, C. Fitzer, S. Kromlidis, M. Barns and N. Jenkins, "Dynamic voltage restorer based on voltage space vector PWM control," IEEE



شکل (۱۲): جبران کم‌بود ولتاژ نامتعادل همراه با تغییر فاز با استفاده از ساختار ارائه شده در [۱۷] توسعه داده شده به سیستم سه فاز



شکل (۱۳): مدار آزمایشگاهی استفاده شده برای ایجاد کم‌بود ولتاژ



شکل (۱۴): نتایج آزمایشگاهی، (الف) ولتاژ منبع  $(v_{S,a})$ ، (ب) ولتاژ خروجی مبدل ماتریسی قبل (شکل بالا) و بعد (شکل پایین) از فیلتر  $(v_{C,a})$ ، (ج) ولتاژ DVR  $(v_{D,a})$ ، (د) ولتاژ بار  $(v_{L,a})$

### ۷- نتیجه گیری

در این مقاله، ساختار جدیدی برای DVR پیشنهاد شد. در ساختار پیشنهادی، جهت حذف لینک dc، از مبدل‌های ماتریسی استفاده شده

- [21] E. Babaei, S.H. Hosseini, and G.B. Gharehpetian, "Reduction of THD and low order harmonics with symmetrical output current for single-phase ac/ac matrix converters," Elsevier J. of Electrical Power and Energy Systems, vol. 32, no. 3, pp. 225-235, March 2010.
- [22] P. Wheeler and D. Grant, "Optimised input filter design and low-loss switching techniques for a practical matrix converter," IEE Proc.-Electr. Power Appl., vol. 144, no. 1, pp. 53-60, Jan. 1997.
- [23] A. Alesina and M.G.B. Venturini, "Solid-state power conversion: A Fourier analysis approach to generalized transformer synthesis," IEEE Trans. Circ. Syst., vol. CAS-28, no. 4, Apr. 1981.
- [24] A. Alesina, and M.G.B. Venturini, "Analysis and Design of Optimum-Amplitude Nine-Switch Direct AC-AC Converters," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 4 No. 1, pp. 101-112, Jan. 1989.
- [25] P.W. Wheeler, H. Zhang and D.A. Grant, "A Theoretical and practical consideration of optimized input filter design for a low loss matrix converter," IEE Power Electronics and Variable-Speed Drives, pp. 363-367, 1994.
- [26] S. Ferreira Pinto and J. Fernando Silva, "Input filter design for sliding mode controlled matrix converters," in Proc. PESC, 2001, vol.2, pp. 648-653.
- [27] C. Klumpner and F. Blaabjerg, "Using reverse blocking IGBTs in power converters for adjustable speed drives," IEEE Trans. Ind. Appl. vol. 42, no. 3, pp. 807-816, May/June 2006.
- [28] E. Babaei, A. Aghagolzadeh, S.H. Hosseini and S. Khanmohammadi, "A new structure for three-phase to single-phase AC/AC matrix converters," in Proc. ICECS, 2003, United Arab Emirates, vol. 1, pp. 36-39, 2003
- [29] S. Khanmohammadi, A. Aghagolzadeh, S.H. Hosseini and E. Babaei, "A new algorithm for three-phase to single-phase AC/AC matrix converters," in Proc. ICECS, 2003, United Arab Emirates, vol. 3, pp. 1121-1124, 2003.
- [9] J. G. Nielsen, F. Blaabjerg and N. Mohan, "Control strategies for dynamic voltage restorer compensating voltage sags with phase jumps," in Proc. IEEE APEC'01, vol.2, pp. 1267-1273, 2001.
- [10] P. Chiang, D M. Vilathgamuwa, S. K. Tang and H. L. Long, "Multilevel dynamic voltage restorer," IEEE Power Electron. Lett., vol. 2, no. 4, pp. 125-130, Dec. 2004.
- [11] E. Babaei, S.H. Hosseini, G.B. Gharehpetian, M. Tarafdar Haque and M. Sabahi, "Reduction of dc voltage sources and switches in asymmetrical multilevel converters using a novel topology," Elsevier J. of Electric Power Systems Research, vol. 77, no. 8, pp. 1073-1085, Jun. 2007.
- [12] P. Roncero-Sanchez and E. Acha, "Dynamic voltage restorer based on flying capacitor multilevel converters operated by repetitive control," IEEE Tran. Power Del. vol. 24, no. 2, pp. 951-960, Apr. 2009.
- [13] P. Boonchiam, N. Mithulananthan, "Diode-clamped multilevel voltage source converter based on medium voltage DVR," Int. J. of Electrical Power and Energy Systems Eng., vol. 1, no. 2, pp. 62-67, Spring 2008.
- [14] A. Khoshkbar Sadigh, E. Babaei, S. H. Hosseini and M. Farasat "Dynamic voltage restorer based on stacked multicell converter," in Proc. ISIEA, 2009, Malaysia, pp.419-424.
- [15] B. Wang, G. Venkataramanan and M. Illindala, "Operation and control of a dynamic voltage restorer using transformer coupled H-bridge converters," IEEE Trans. Power Electron., vol. 19, no. 1, pp. 1053-1061, July 2006.
- [16] V. B. Bhavaraju and P. Enjeti, "A fast active power filter to correct line voltage sags," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 41, no. 3, pp. 333-338, Jun. 1994.
- [17] J. Pérez, V. Cárdenas, L. Morán and C. Núñez, "Single-phase ac-ac converter operating as a dynamic voltage restorer (DVR)," in Proc. IECON, 2006, pp. 1938-1943.
- [18] S.M. Hietpas and M. Naden, "Automatic voltage regulator using an ac voltage-voltage converter," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 36, no. 1, pp. 33-38, Jan./Feb. 2000.
- [19] A. Prasai and D.M. Divan, "Zero-energy sag correctors-optimizing dynamic voltage restorers for industrial applications," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 44, no. 6, pp. 1777-1784, Nov./Dec. 2008.
- [20] B. Wang and G. Venkataramanan, "Dynamic voltage restorer utilizing a matrix converter and flywheel energy storage," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 45, no. 1, pp. 222-231, Jan/Feb. 2009.

### زیر نویس ها

- 
- 1- Variable Speed Drive
  - 2- Voltage Sag
  - 3- Voltage Swell
  - 4- Dynamic Voltage Restorer (DVR)
  - 5- Zero-Energy Sag Corrector
  - 6- Total Harmonic Distortion