بازیاب دینامیکی ولتاژ بر پایه اینورتر چند سطحی مدولار ترکیبی جهت جبران‌سازی کمبود، بیشبود و فلیکر ولتاژ در شبکه‌های توزیع نیروی برق

احسان اکبری*[۱]

*۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران. e.akbari1987@yahoo.com

چکیده: در این مقاله، ساختار جدیدی از بازیاب دینامیکی ولتاژ (DVR) مبتنی بر اینورتر چندسطحی مدولار ترکیبی (M^3I) ارائه شده است که توانایی جبران‌سازی کمبود، بیشبود و فلیکر ولتاژ را برای بارهای حساس دارد. اینورتر چندسطحی مدولار ترکیبی در مقایسه با ساختارهای مشابه از تعداد IGBT و مدار راه‌انداز کم‌تری تشکیل شده است. همچنین به دلیل پایین بودن تعداد منابع DC ورودی و نبود خازن الکترولیت در ساختار اینورتر مذکور، کنترل این اینورتر برای تولید ولتاژ مطلوب ساده می‌باشد. این اینورتر از سه اینورتر تمام پل تک‌فاز، یک اینورتر تمام‌پل سه‌فاز و سلول‌های کمکی برای افزایش تعداد سطوح ولتاژ خطبه‌خط تشکیل شده است. همچنین این اینورتر قادر به تولید تعداد سطوح ولتاژ خروجی بالاتر و اعوجاج هارمونیکی کمتری است که این ویژگی سبب عملی شدن این ساختار در جبران‌ساز کیفیت توان شبکه‌های توزیع نیروی برق گردیده است. روش کلیدزنی کنترل نزدیک‌ترین سطح NLC در اینورتر پیشنهادی جهت ایجاد شکل موج مطلوب استفاده می‌گردد. روش کنترلی پیش از خطا (Per-Sag) برای کنترل DVR پیشنهادی انتخاب شده و از روش قاب مرجع سنکرون جهت آشکارسازی آنی نوسانات ولتاژ شبکه بهره‌گرفته‌ایم. برای بررسی و تأیید کارایی DVR پیشنهادی، شبیه‌سازی‌های لازم در محیط نرم‌افزاری MATLAB/SIMULINK انجام شده و نتایج آن حاکی از دقت و عملکرد مطلوب DVR پیشنهادی در جبران‌سازی کمبود، بیشبود و فلیکر ولتاژ شبکه‌های توزیع نیروی برق می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: اینورتر چندسطحی مدولار، بازیاب دینامیکی ولتاژ، بیشبود ولتاژ، فلیکر ولتاژ، کمبود ولتاژ، کلیدزنی NLC .

۱- مقدمه

امروزه یکی از مسائل مهم در صنعت برق، مسئله کیفیت توان برای بارهای حساس است. بارهای حساس مانند کامپیوترها، کنترل کننده‌های منطقی قابل برنامه‌ریزی(PLC)، درایوهای سرعت متغیر(VSD) و ... اغلب منابع تغذیه باکیفیت بالا لازم دارند. اغتشاشات کیفیت توان موارد مختلفی مانند، کمبود و بیشبود ولتاژ، وقفه، شیفت فاز، هارمونیک و شرایط گذرا است. یکی از مسائل مهم در ارتباط باکیفیت توان، کمبود ولتاژ(Voltage sag)، بیشبود ولتاژ(Voltage swell) و فلیکر ولتاژ (Voltage flicker) است. کمبود ولتاژ طبق استاندارد IEEE 1159-1995، به صورت کاهش در مقدار مؤثر ولتاژ از ۱۰٪ تا ۹۰٪ مقدار نامی، در طول مدت ۰/۵ سیکل تا ۱ دقیقه است. یک مطالعه کیفیت توان که اخیراً انجام شده است، نشان می‌دهد که ۹۲٪ از کل اغتشاشات در سیستم قدرت از کمبود ولتاژ ناشی می‌شود [۱]. کمبود ولتاژ می‌تواند موجب خسارت دیدن تولید، از دست دادن تولید، هزینه‌های راه‌اندازی مجدد و خطر از کارافتادگی، گردد. راه‌اندازی موتورهای القایی بزرگ، برق دار کردن ترانسفورماتور، عیب‌های زمین و عیب‌های اتصال کوتاه موجب کمبود ولتاژ می‌شود. بیشبود ولتاژ به صورت افزایش در مقدار مؤثر ولتاژ بین ۱/۱ و ۱/۸ پریونیت در فرکانس قدرت و در مدت زمان ۰/۵ سیکل تا ۱ دقیقه، تعریف می‌شود. خارج کردن بارهای بزرگ سلفی از شبکه و برق دار کردن بانک‌های خازنی بزرگ از دلایل بیشبود ولتاژ است. بر اساس

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 5 -No. 1- spring & summer 2016

[DOR: 20.1001.1.23222468.1395.5.1.4.4]

استاندارد IEC 61000-4-15 نوسانات ولتاژ در طیف فرکانسی ۱ تا ۳۵ هرتز می‌تواند باعث تولید فلیکر ولتاژ شود[۳]. از جمله منابع تولید فلیکر می‌توان کوره قوس الکتریکی، ماشین‌های ذوب فلزات، توربین-های بادی، ژنراتورهای تولید کننده برق از موج دریا، راه‌اندازی موتورهای القایی و مبدل‌های فرکانسی را نام برد. این پدیده می‌تواند باعث آزردگی چشم به عنوان فاکتور انسانی و همچنین اختلال در تجهیزات حساس الکتریکی مانند دستگاه‌های پزشکی و مخابراتی به عنوان فاکتور صنعتی گردد. با توجه به استفاده از تجهیزات حساس در طرح‌های صنعتی مدرن نظیر فرآیندهای کنترل، PLC، درایوهای تنظیم سرعت و روبات‌ها، دیگر پدیده‌های کمبود ولتاژ و فلیکر ولتاژ در شبکه‌های توزیع نیروی برق قابل تحمل نبوده و روش‌های مختلفی جهت کاهش آن بکار گرفته شده است. روش‌های مرسوم در این زمینه شامل استفاده از بانک‌های خازنی، احداث فیدرهای جدید موازی و نصب منابع تغذیه غیرقابل قطع (UPS) می‌باشد، لیکن در سال‌های اخیر با توجه به پیشرفت صنایع نیمه‌هادی استفاده از جبران‌سازهایی بر پایه مبدل‌های منبع ولتاژ و جریان مورد توجه کارشناسان صنعت برق قرار گرفته است. این تجهیزات موسوم به ادوات انعطاف‌پذیر سیستم‌های انتقال (FACTS) بوده و توانایی جبران‌سازی سریع، بلادرنگ و قابل کنترل را دارا می‌باشند[۲]. مجموعه ادوات FACTS که در سیستم‌های توزیع جهت بهبود کیفیت توان مورد استفاده قرار می‌گیرند، ادوات Custom Power نامیده می‌شوند. یک نوع از این جبران‌کننده‌ها که بر پایه ادوات الکترونیک قدرت عمل کرده و برای بهبود مشکلات کیفیت توان مورد استفاده قرار می‌گیرد، بازیاب دینامیکی ولتاژ (DVR) می‌باشد. این جبران‌ساز یکی از ادوات Custom Power محسوب می‌شود که جهت جبران‌سازی و بهبود مشکلات کیفیت توان در سطح ولتاژ توزیع مورد استفاده قرار می‌گیرد. این جبران‌ساز به صورت سه‌فاز و سری، نزدیک بارهای حساس سیستم توزیع نصب می‌گردد و سبب حفاظت از بارهای حساس در مقابل اختلالات کیفیت توان می‌شود. DVR[1] اساساً یک منبع ولتاژ کنترل شده است که بین شین تغذیه و بارهای حساس نصب می‌گردد. 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 واقع در هنگام نوسان ولتاژ، DVR که بصورت سری در سیستم قدرت قرار می‌گیرد با تزریق ولتاژ می‌تواند ولتاژ مطلوب را برای بارهای حساس تولید کند، که این در واقع کارکرد اصلی DVR است. این تجهیز توانایی تولید یا جذب مستقل توان راکتیو قابل کنترل واقعی و ولتاژ خروجی AC که بصورت سری به فیدر توزیع متصل است را دارد. به طور کلی DVR شامل اجزاء زیر است[۲].

اینورتر منبع ولتاژ (VSI)

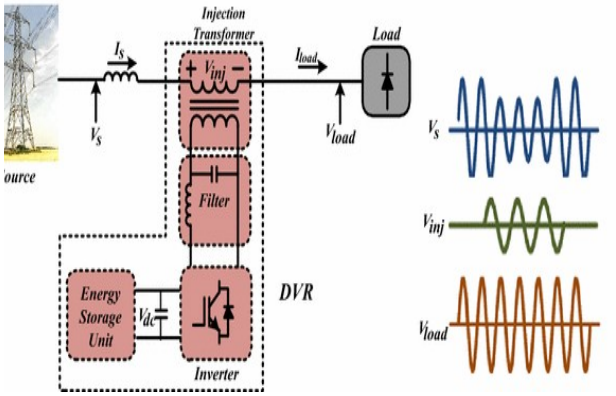
المان ذخیره ساز انرژی (ESS)

فیلتر هارمونیک

ترانسفورماتور تزریق سری

استراتژی کنترلی

شکل (۱) مدار شماتیکی DVR را نشان می‌دهد.



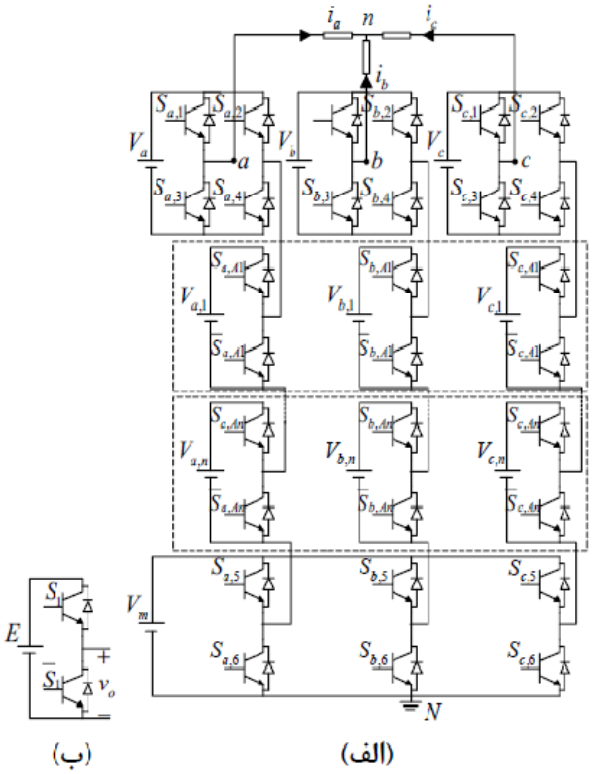
شکل (۱): مدار شماتیکی DVR

اینورترهای منبع ولتاژ (VSI) با توجه به ولتاژ خروجی مناسب در DVRها استفاده می‌شوند. این اینورترها که معمولاً دو سطحی می‌باشند، دارای معایب عمده‌ای از جمله ولتاژ خروجی با اعوجاج هارمونیکی بالا، نرخ تغییرات ولتاژ نسبتاً زیاد و تلفات کلیدزنی بالا می‌باشد [۴]. از این رو به فیلترهای LC بزرگی در ترمینال خروجی اینورتر نیاز است که این فیلتر بزرگ سبب افزایش هزینه و حجم DVR می‌گردد. برای غلبه بر این مشکل استفاده از اینورترهای منبع ولتاژ چند سطحی پیشنهاد می‌گردد. DVRهای مبتنی بر مبدل‌های چندسطحی، قابلیت کار در ولتاژها و توان‌های بالاتری را دارند و همچنین این ساختارها مشخصه‌ی هارمونیکی خوبی دارند. این دسته از اینورترها به دلیل تولید ولتاژ خروجی با اعوجاج هارمونیکی بسیار کم (THD%پایین)، فشار ولتاژ محدود بر روی ادوات کلیدزنی، قابلیت اطمینان بالا، دست یابی به سطوح بالایی از ولتاژ (MV)، کارکرد در ولتاژ و توان بالا و نرخ تغییرات ولتاژ (dv/dt)بسیار کم ، در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند [۵]. در این مقاله، جبران‌سازی کمبود، بیشبود و فلیکر ولتاژ در شبکه توزیع نیروی برق توسط DVR مبتنی بر اینورتر چندسطحی مدولار ترکیبی M^3I [2] مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار گرفته است. در ادامه اینورتر منبع ولتاژ چند سطحی پیشنهادی (M^3I) تشریح شده و روش کلیدزنی کنترل نزدیک‌ترین سطح (NLC)[3] برای کنترل ولتاژ پیشنهاد شده است. سپس روش کنترلی پیش از خطا و قاب مرجع سنکرون تشریح گردیده و در نهایت عملکرد DVR در شرایط کمبود، بیشبود و فلیکر ولتاژ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی در نرم افزار متلب درستی عملکرد سیستم را نشان می‌دهد.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1395.5.1.4.4]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 5 -No. 1- spring & summer 2016
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

۲- معرفی ساختار اینورتر چند سطحی مدولار ترکیبی

مفهوم اینورتر چند سطحی ابتدا در سال ۱۹۷۵ مطرح شد [۵]. اینورتر چندسطحی یک سیستم الکترونیک قدرت می‌باشد که از چندین منبع DC، ولتاژ مطلوب چندسطحی تولید می‌کند. اینورترهای چندسطحی، شامل آرایه‌ای از کلیدهای نیمه‌هادی قدرت و منابع ولتاژخازنی یا منابع DC مستقل می‌باشند. کموتاسیون کلیدها باعث می‌شود ولتاژ خازن‌ها یا منابع DC مستقل با هم جمع شده و در خروجی اینورتر، مقادیر ولتاژ بالایی به‌دست آید، در حالیکه ولتاژ نامی کلید قدرت به مراتب کم‌تر از مجموع ولتاژ لینک‌های DC می‌باشد. مهم‌ترین ویژگی‌های اینورترهای چندسطحی عبارت‌اند از: تولید ولتاژ خروجی با اعوجاج بسیار کم، ایجاد ولتاژ خروجی در سطوح بالاتر، کاهش تنش کلیدهای نیمه‌هادی، توانایی عملکرد در فرکانس کلیدزنی کم‌تر نسبت به اینورترهای دوسطحی. اینورترهای چندسطحی را می‌توان در دو گروه اینورترهایی متشکل از سلول‌های پایه مشابه و اینورترهایی متشکل از سلول‌های پایه مختلف (هیبریدی) دسته‌بندی کرد[۸]. همچنین هر یک از دو گروه ذکرشده را می‌توان به دو گروه اینورترهای چندسطحی با منابع DC ورودی با اندازه برابر و اینورترهای چندسطحی با منابع DC ورودی با اندازه نابرابر تقسیم کرد. اینورترهای چندسطحی به سه نوع دسته‌بندی می‌شوند: مهار دیودی یا نول مهارشده، خازن شناور، پل‌های متوالی با منابع DC مستقل. پس از آن با جایگزینی خازن به‌جای منبع DC، نوع دیگری از اینورتر چندسطحی ارائه گردید که تعداد منبع DC مستقل را کاهش می‌داد. در پژوهش‌های انجام شده، تولید سطوح ولتاژ بیش‌تر توسط تجهیزات کم‌تر همواره مورد توجه محققین قرار داشته است. در سال‌های اخیر برای کاهش هر چه بیشتر عناصر سازنده و منابع ایزوله DC، اینورترهای چندسطحی از ساختارهای هیبریدی (ترکیبی) استفاده می‌شود. در این مقاله اینورتر چندسطحی مدولار ترکیبی پیشنهاد می‌شود. در این ساختار خازن الکترولیت وجود ندارد در نتیجه مشکلات و معایب مربوط به خازن‌های الکترولیت نیز در این ساختار وجود ندارد. ساختار پیشنهادی دارای تعداد کم عناصر سازنده از جمله IGBT و مدار راه‌انداز می‌باشد و برای تولید ولتاژ چندسطحی با تعداد سطوح بالا به تعداد کم منابع DC ایزوله نیاز دارد[۶]. به دلیل چندسطحی بودن اینورتر M^3I تنش ولتاژ کلیدها در مقایسه با اینورترهای دوسطحی کاهش یافته است. این اینورتر برای کاربردهای توان و ولتاژ متوسط و بالا مناسب خواهد بود. لذا اینورتر چندسطحی پیشنهادی را می‌توان در درایو موتورها و ادوات Custom Power و مبدل‌های واسط بین انرژی‌های نو با شبکه بکار برد. که در این مقاله، کاربرد آن در بازیاب دینامیکی ولتاژ (DVR) مورد برررسی قرار می‌گیرد. در شکل (۲) الف ساختار کلی اینورتر چندسطحی مدولار ترکیبی (M^3I) نشان داده شده است. این ساختار از نوع اینورتر ترکیبی (Mixed) می‌باشد که هدف از این ساختار کاهش تعداد ادوات الکترونیک قدرت برای تولید ولتاژ سه‌فاز چندسطحی است.



شکل (۲): الف) ساختار اینورتر چندسطحی مدولار ترکیبی ب) ساختار سلول کمکی

همان‌طور که در شکل (۲) الف مشاهده می‌شود، قسمت اصلی اینورتر پیشنهادی متشکل از سه اینورتر تک‌فاز تمام‌پل و یک اینورتر تمام‌پل سه‌فاز است. برای بالا بردن تعداد سطوح تولیدی از طبقات کمکی که یک اینورتر نیم‌پل است مطابق شکل (۲) الف استفاده شده است. ساختار سلول کمکی در شکل (۲) ب نشان داده شده است. هر سلول کمکی از یک عدد منبع DC و دو عدد کلید قدرت تشکیل شده است، در نتیجه این سلول ساده بوده و کنترل آن برای تولید ولتاژ دلخواه و همچنین ترکیب آن با سایر سلول‌ها آسان می‌باشد، همچنین به دلیل اینکه در این سلول برای تولید ولتاژ در هر لحظه فقط یک کلید آن در مسیر جریان قرار دارد، لذا تلفات آن نیز کم خواهد بود. این سلول قادر به تولید دو سطح ولتاژ 0 و E می‌باشد. به دلیل جلوگیری از اتصال کوتاه شدن منبع DC ورودی، دو کلید S_1 و $\overline{S_1}$ نباید به‌طور هم‌زمان هدایت کنند، لذا این دو کلید به حالت مکمل هم هدایت می‌کنند. در جدول (۱) کلیدزنی مربوط به سلول کمکی نشان داده شده است.

هر طبقه کمکی متشکل از شش کلید قدرت و سه منبع DC می‌باشد. در این ساختار، n تعداد طبقات کمکی می‌باشد. نوع ساختار اینورتر چندسطحی مدولار ترکیبی این امکان را به وجود می‌آورد که مقدار منابع ورودی به‌صورت نابرابر انتخاب شود.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 5 -No. 1- spring & summer 2016
[DOR: 20.1001.1.23222468.1395.5.1.4.4]

جدول (۱): حالات کلیدزنی سلول کمکی در اینورتر M^3I

حالات	وضعیت کلیدها		V_o
	S_1	$\overline{S_1}$	
۱	ON	OFF	E
۲	OFF	ON	0

به همین دلیل این اینورتر جزء زیر مجموعه اینورترهای چندسطحی با منابع DC ورودی نابرابر محسوب می‌شود [۶]. در این ساختار ولتاژ خطبه‌خط طبق رابطه (۱) به‌دست می‌آید.

$$\begin{bmatrix} v_{ab} \\ v_{bc} \\ v_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_{aN} \\ v_{bN} \\ v_{cN} \end{bmatrix} \quad (۱)$$

در رابطه (۱)، v_{aN} ، v_{bN} و v_{cN} به ترتیب ولتاژ خروجی مربوط به شاخه (Pole) a ، b و c می‌باشد. همچنین v_{ab}، v_{bc} و v_{ca} به ترتیب ولتاژ خطبه‌خط بین فاز a و b، فاز b و c و فاز c و a می‌باشند. در این ساختار، مطابق رابطه (۱) با تفریق ولتاژ هر شاخه با ولتاژ شاخه مجاور سطوح منفی ولتاژ خطبه‌خط نیز تولید می‌گردد. برای تولید بیشینه تعداد سطوح ولتاژ توسط اینورتر پیشنهادی، ولتاژ ورودی اینورترهای تمام‌پل تک‌فاز مربوط به هر شاخه مطابق رابطه (۲) انتخاب می‌شود.

$$V_a = V_b = V_c = E \quad (۲)$$

اگر تعداد سلول‌های کمکی برابر صفر باشد، ولتاژ ورودی اینورتر تمام‌پل سه‌فاز (V_m) به‌صورت رابطه (۳) خواهد بود.

$$V_m = 3E \quad (۳)$$

با توجه به ولتاژ اینورتر تمام‌پل تک‌فاز، ولتاژ سلول‌های کمکی به‌صورت رابطه (۴) انتخاب می‌شود.

$$V_{a,j} = V_{b,j} = V_{c,j} = 3 \times 2^{j-1} E \quad (۴)$$
$$j = 1, 2, 3, \ldots, n$$

$V_{a,j}$، $V_{b,j}$ و $V_{c,j}$ به ترتیب ولتاژ منابع DC سلول کمکی j ام شاخه‌های a، b و c هستند. در نهایت ولتاژ مربوط به اینورتر تمام‌پل سه‌فاز به‌صورت رابطه (۵) انتخاب می‌شود.

$$V_m = 3 \times 2^n E \quad (۵)$$

با توجه به مقادیر انتخاب شده برای منابع DC ورودی این اینورتر سه‌فاز قادر به تولید تمام سطوح ولتاژ منفی و مثبت می‌باشد. بیشینه ولتاژ هر شاخه در این اینورتر برای هر سه شاخه با هم برابر و طبق رابطه (۶) می‌باشد:

$$\begin{aligned} V_{aN,\max} &= V_{bN,\max} = V_{cN,\max} \\ &= V_a + \sum_{j=1}^{n} 3 \times 2^{j-1} E + 3 \times 2^n E \\ &= E\left(1 + 3 + 3 \times 2 + \ldots + 3 \times 2^{n-1} + 3 \times 2^n\right) \\ &= \left(1 + 3\left(2^{n+1} - 1\right)\right) E \end{aligned} \quad (۶)$$

تعداد سطوح تولیدی توسط هر شاخه $\left(N_{Level,p}\right)$ برابر با رابطه (۷) است.

$$\begin{aligned} N_{level,p} &= \frac{V_{aN,\max}}{E} + 2 \\ &= \left(1 + 3\left(2^{n+1} - 1\right)\right) + 2 \\ &= 3 \times 2^{n+1} \end{aligned} \quad (۷)$$

حالات کلیدزنی در جدول (۲) برای شاخه a آمده است.

جدول (۲): حالات کلیدزنی اینورتر چندسطحی مدولار ترکیبی بدون طبقه کمکی $(n = 0)$

حالت	وضعیت کلیدها						v_{bc}
	$S_{a,1}$	$S_{a,2}$	$S_{a,3}$	$S_{a,4}$	$S_{a,5}$	$S_{a,6}$	
۱	۰	۱	۱	۰	۰	۱	$-E$
۲	۱	۱	۰	۰	۰	۱	0
۳	۰	۰	۱	۱	۰	۱	0
۴	۱	۰	۰	۱	۰	۱	E
۵	۰	۱	۱	۰	۱	۰	$2E$
۶	۱	۱	۰	۰	۱	۰	$3E$
۷	۰	۰	۱	۱	۱	۰	$3E$
۸	۱	۰	۰	۱	۱	۰	$4E$

اگر در ساختار اینورتر مذکور از یک طبقه کمکی استفاده شود، هر شاخه قادر به تولید ولتاژ با سطوح $-E$ الی $10E$ با پله‌های E می‌باشد که در جدول (۳) برای شاخه a نشان داده شده است.

در جدول (۲) و (۳) اعداد ۰ و ۱ به ترتیب نشان‌دهنده عدم هدایت یا هدایت کلید مربوطه می‌باشد. همچنین نحوه کلیدزنی مربوط به شاخه b و c همانند شاخه a می‌باشد، فقط با تفاوت اینکه کلیدزنی آن‌ها با اختلاف فاز ۱۲۰- و ۲۴۰- درجه نسبت به شاخه a صورت می‌گیرد. همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود برای تولید سطح ولتاژ صفر و همچنین سطوح ولتاژ مضارب سه، حالات افزونی در اینورتر چندسطحی مدولار ترکیبی (M^3I) وجود دارد که موجب افزایش قابلیت اطمینان اینورتر پیشنهادی می‌شود.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1395.5.1.4.4]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 5 -No. 1- spring & summer 2016
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

جدول (۳): حالات کلیدزنی اینورتر چندسطحی مدولار ترکیبی با یک طبقه کمکی $(n=1)$

حالت	$S_{a,1}$								$V_{a,o}$
	$S_{a,1}$	$S_{a,2}$	$S_{a,3}$	$S_{a,4}$	$S_{a,5}$	$S_{a,6}$	$S_{a,A1}$	$\overline{S_{a,A1}}$	
۱	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۱	$-E$
۲	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰
۳	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰
۴	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۱	E
۵	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۰	$2E$
۶	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۰	$3E$
۷	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۰	$3E$
۸	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۱	۰	$4E$
۹	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	$5E$
۱۰	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۰	$6E$
۱۱	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۰	$6E$
۱۲	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۰	$7E$
۱۳	۰	۱	۱	۰	۱	۰	۱	۰	$8E$
۱۴	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۰	$9E$
۱۵	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۱	۰	$9E$
۱۶	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۰	$10E$

بیشینه ولتاژ خطبه‌خط تولیدی در این اینورتر به صورت رابطه (۸) می‌باشد.

$$\begin{aligned} V_{ab,\max} &= V_{bc,\max} = V_{ca,\max} \\ &= V_{aN,\max} + E = \left(1+3\left(2^{n+1}-1\right)\right)E + E \\ &= \left(2+3\left(2^{n+1}-1\right)\right)E \end{aligned} \qquad (۸)$$

رابطه تعداد سطوح ولتاژ هر شاخه با تعداد سطوح ولتاژ خطبه‌خط $\left(N_{level,L-L}\right)$ مطابق رابطه (۹) می‌باشد.

$$N_{level,L-L} = 2N_{level,p} - 1 \qquad (۹)$$

در نتیجه تعداد ولتاژ خطبه‌خط این اینورتر طبق رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} N_{level,L-L} &= 2\times\left(3\times 2^{n+1}\right)-1 \\ &= 3\times 2^{n+2}-1 \end{aligned} \qquad (۱۰)$$

تعداد IGBTها $\left(N_{IGBT}\right)$، تعداد مدار راه‌انداز $\left(N_{driver}\right)$ و تعداد کلیدهای قدرت $\left(N_{switch}\right)$ با هم برابر هستند و به‌صورت رابطه (۱۱) محاسبه می‌شوند.

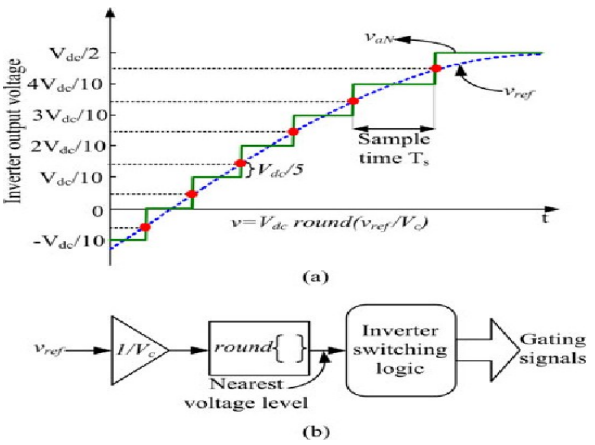
$$N_{IGBT} = N_{driver} = N_{switch} = 18+6n \qquad (۱۱)$$

تعداد منابع DC ورودی اینورتر M^3I طبق رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود.

$$N_{source} = 4+3n \qquad (۱۲)$$

۳- کلیدزنی NLC

روش کلیدزنی نزدیک‌ترین سطح (NLC) در [۷] یک روش مناسب و با حجم محاسباتی کم و سرعت بالا است. در اینورترهای چندسطحی تعداد سطوح زیاد است و به دنبال آن محاسبه معادلات برای استخراج زوایای کلیدزنی در برخی روش‌ها، پیچیده و در برخی اوقات غیرممکن می‌گردد. از این‌رو در اینورترهایی با تعداد سطوح خروجی زیاد، از روش کلیدزنی کنترل نزدیک‌ترین سطح (NLC) جهت ایجاد شکل موج مطلوب استفاده می‌گردد. از مزایای این روش کنترلی، کاهش تعداد کلیدزنی‌ها، کاهش فشار dv/dt روی کلیدهای قدرت و امکان استفاده از نیمه‌هادی‌هایی با سرعت پایین‌تر و در نتیجه کاهش قیمت نهایی مبدل می‌توان نام برد. شکل (۳) این روش کلیدزنی را شرح می‌دهد. به‌صورتی که پردازشگر از یک نقطه از ولتاژ مرجع $\left(V_{ref}\right)$ نمونه‌برداری می‌کند، سپس این مقدار را به نزدیک‌ترین سطح ولتاژ $\left(V_{aN}\right)$ گرد خواهد نمود. هر سطح بر اساس جدول کلیدزنی خود، وضعیت کلیدها را تغییر داده تا سطح مورد نظر در خروجی اینورتر تولید شود (شکل ۳ (ب)). نمونه‌برداری برای هر دوره نمونه‌برداری $\left(T_S\right)$ تکرار می‌شود.

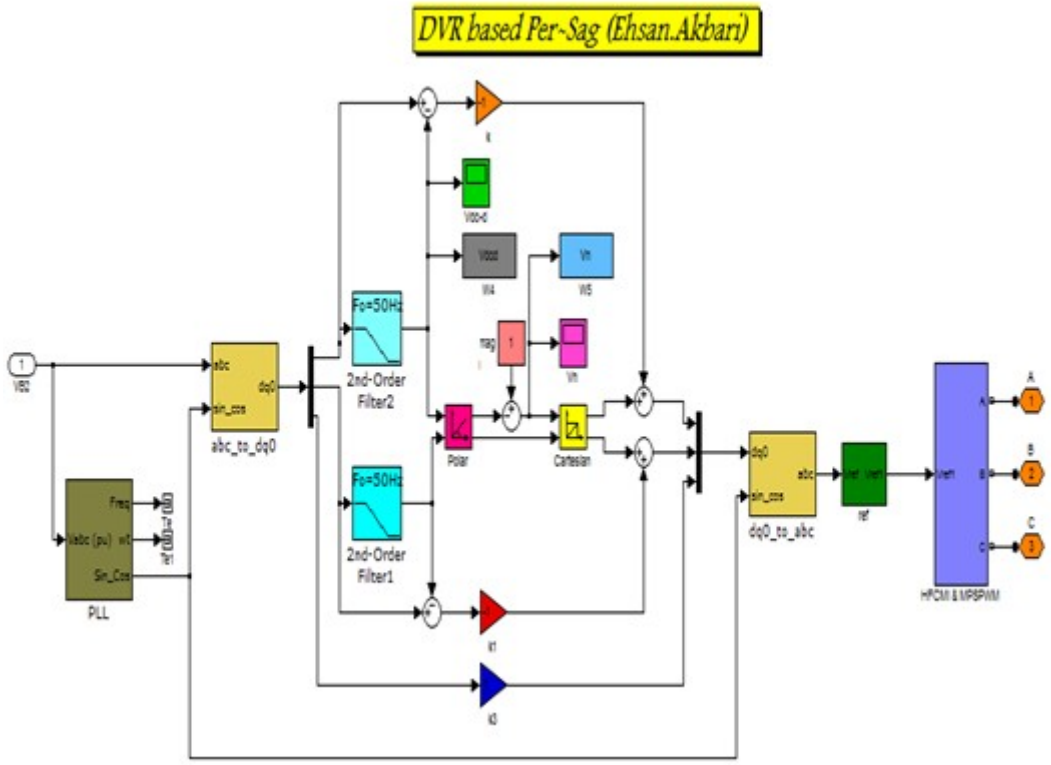


شکل (۳): روش NLC الف) شکل موج، ب) الگوریتم کنترل

۴- استراتژی کنترلی مورد استفاده در DVR

استراتژی کنترل، نقش مهمی در عملکرد DVR ایفا می‌کند. در واقع در این استراتژی با تخمین اندازه و زاویه ولتاژ، اغتشاشات ولتاژ آشکار گردیده و به تبع آن ولتاژهای مرجع و تزریقی تعیین می‌گردد. همچنین در این استراتژی روش جبران‌سازی که معمولاً به سه روش پیش از خطا (Per-Sag)، هم فاز (In-Phase) و حداقل انرژی (Min-Energy) صورت می‌گیرد، مشخص می‌گردد. سرعت و دقت الگوی تخمین و ردیابی ولتاژ بکار رفته در استراتژی کنترل بطور مستقیم بر سرعت پاسخ و دقت جبران‌سازی تأثیر می‌گذارد [۱۰]. در این تحقیق

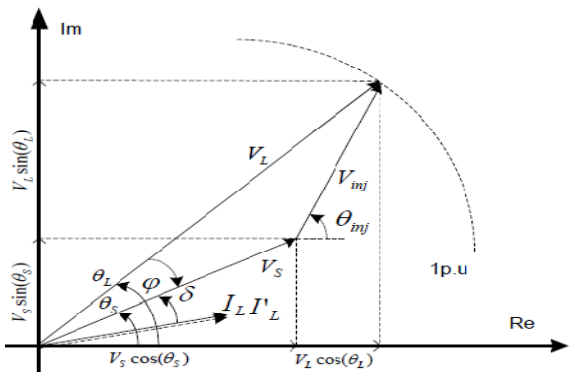
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 5 -No. 1- spring & summer 2016
[DOR: 20.1001.1.23222468.1395.5.1.4.4]



شکل (۴): روش کنترل Per- sag در محیط MATLAB

از روش قاب مرجع سنکرون (SRF) برای تخمین آنی مؤلفه‌های متقارن ولتاژ شبکه استفاده شده است که قادر است بطور دقیق و سریع مؤلفه‌های متقارن ولتاژ را استخراج نماید. همچنین از روش جبران‌سازی پیش از خطا (Per-sag) در DVR پیشنهادی استفاده شده است. شکل (۴) بلوک دیاگرام روش کنترلی بکار رفته در این مقاله را در محیط MATLAB/Simulink نشان می‌دهد.

در شکل (۵) دیاگرام فازوری استراتژی کنترلی مورد استفاده جهت کنترل DVR پیشنهادی آورده شده است. همان طور که در شکل (۵) دیده می‌شود در این استراتژی، DVR به نحوی به جبران‌سازی می‌پردازد که ولتاژ بار بعد از جبران‌سازی با DVR هم از نظر اندازه و هم از نظر فاز همانند قبل از اختلال باشد. این استراتژی برای بارهای حساس به فاز ولتاژ مفید است [۱۰].



شکل(۵): دیاگرام فازوری استراتژی کنترلی پیش از خطا (Per-Sag)

با توجه به دیاگرام برداری شکل (۵)، اندازه و زاویه ولتاژ تزریقی DVR به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\overline{V_{inj}} = \overline{V_L} - \overline{V_S} \qquad (۱۳)$$

$$V_{inj} = (V_{LX} + jV_{LY}) - (V_{SX} + jV_{SY})$$

$$V_{inj} = (V_{LX} - V_{SX}) + j(V_{LY} - V_{SY})$$

که در آن

$$V_{LX} = V_L Cos\theta_L \qquad V_{SX} = V_S Cos\theta_S \qquad (۱۴)$$

$$V_{LY} = V_L Sin\theta_L \qquad V_{SY} = V_S Sin\theta_S$$

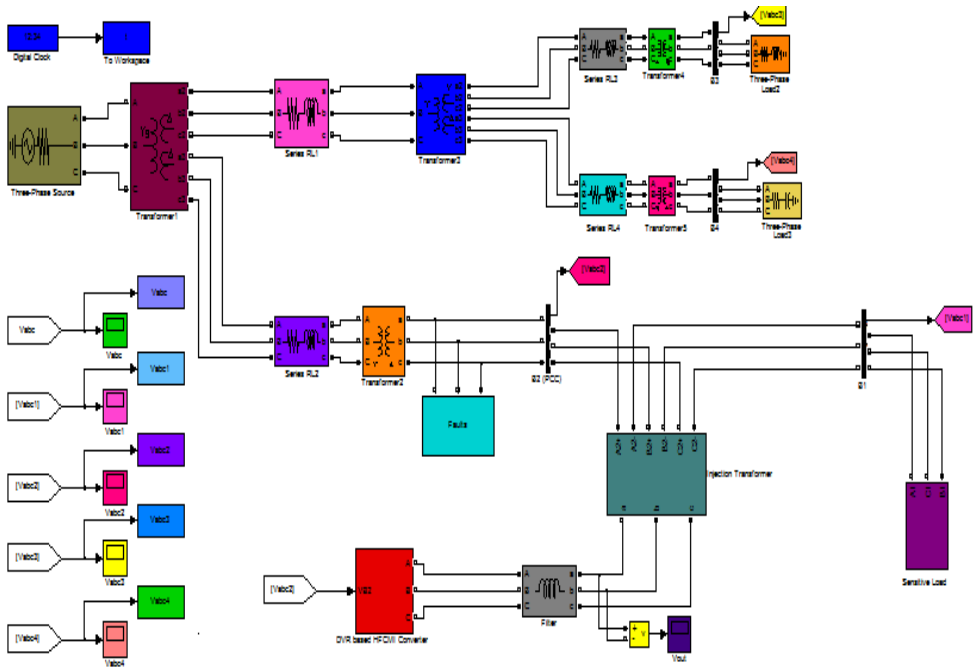
$$|V_{inj}| = \sqrt{(V_{LX} - V_{SX})^2 + (V_{SY} - V_{LY})^2} \qquad (۱۵)$$

$$\angle V_{inj} = \theta_{inj} = \tan^{-1}\left(\frac{V_{SY} - V_{LY}}{V_{SX} - V_{LX}}\right)$$

۵- نتایج و شبیه‌سازی‌ها

در این قسمت عملکرد DVR پیشنهادی برای جبران‌سازی کمبود، بیشبود و فلیکر ولتاژ در یک شبکه توزیع نمونه توسط نرم افزار MATLAB/SIMULINK شبیه‌سازی شده است. شکل (۶) ساختار سیستم توزیع مورد مطالعه را در محیط MATLAB/SIMULINK نشان می‌دهد.

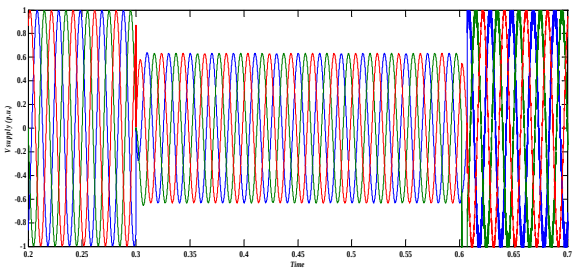
[DOR: 20.1001.1.23222468.1395.5.1.4.4]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 5 -No. 1- spring & summer 2016
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]



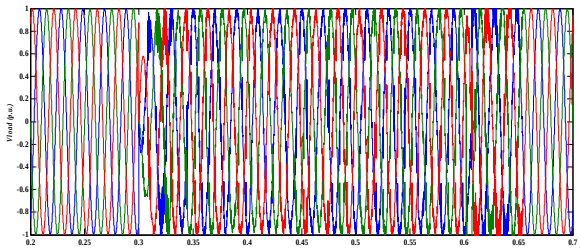
شکل (۶): ساختار سیستم توزیع مورد مطالعه در محیط MATLAB

۵-۱- شبیه‌سازی DVR پیشنهادی در حضور کمبود ولتاژ

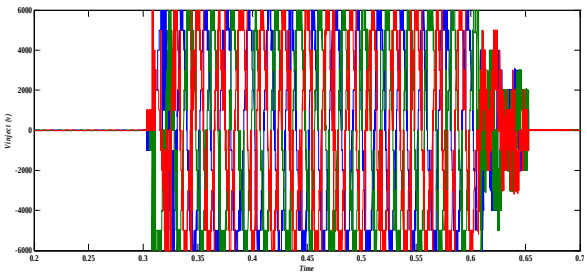
در شکل (۷) کمبود ولتاژ سه فاز به اندازه ۰/۴ پریونیت در ولتاژ منبع در اثر خطای اتصال کوتاه سه فاز با امپدانس خطای 0.3Ω رخ داده است که DVR پیشنهادی با استراتژی پیش از خطا به جبران‌سازی پرداخته است. ولتاژ بار در شکل (۸) بیانگر این موضوع می‌باشد. در شکل (۹) ولتاژ تزریقی توسط DVR پیشنهادی نشان داده شده است. در شکل (۱۰) تحلیل طیف هارمونیکی ولتاژ تزریقی توسط DVR پیشنهادی در جبران‌سازی کمبود ولتاژ نشان داده شده است.



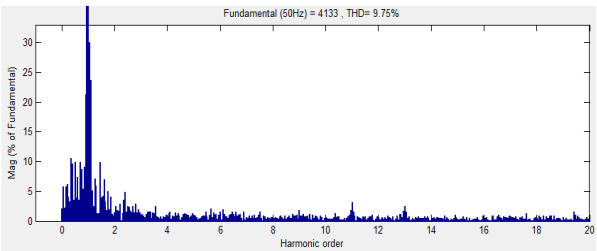
شکل (۷): کمبود ولتاژ سه فاز ۰/۴ پریونیت در طرف منبع (PCC)



شکل (۸): ولتاژ بار جبران‌سازی شده توسط DVR پیشنهادی



شکل (۹): ولتاژ تزریقی توسط DVR پیشنهادی



شکل (۱۰): تحلیل طیف هارمونیکی ولتاژ تزریقی توسط DVR پیشنهادی

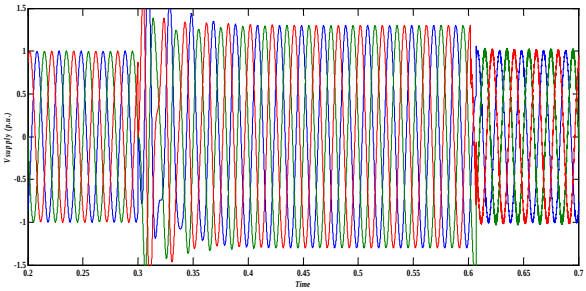
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 5 -No. 1- spring & summer 2016

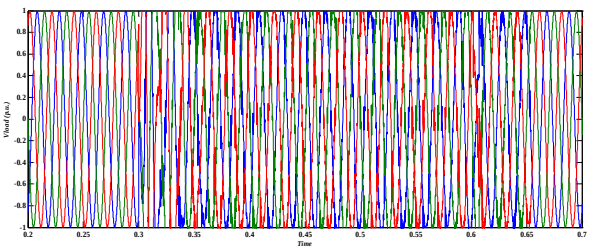
[DOR: 20.1001.1.23222468.1395.5.1.4.4]

۵-۲- شبیه‌سازی DVR پیشنهادی در حضور بیشبود ولتاژ

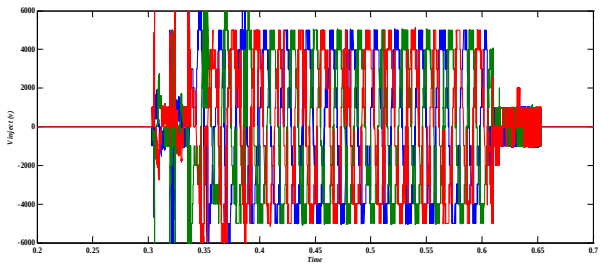
در شکل (۱۱) بیشبود ولتاژ سه فاز به اندازه ۰/۳ پریونیت در ولتاژ منبع در اثر اتصال بانک خازنی سه فاز با ظرفیت ۱۰۰مگاوار رخ داده است که DVR پیشنهادی با استراتژی پیش از خطا به جبران‌سازی پرداخته است. ولتاژ بار در شکل (۱۲) بیانگر این موضوع می‌باشد. در شکل (۱۳) ولتاژ تزریقی توسط DVR پیشنهادی نشان داده شده است. در شکل(۱۴) تحلیل طیف هارمونیکی ولتاژ تزریقی توسط DVR پیشنهادی در جبران‌سازی بیشبود ولتاژ نشان داده شده است.



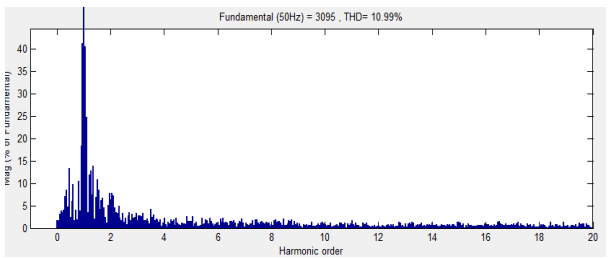
شکل (۱۱): بیشبود ولتاژ سه فاز ۰/۳ پریونیت در طرف منبع (PCC)



شکل (۱۲): ولتاژ بار جبران‌سازی شده توسط DVR پیشنهادی



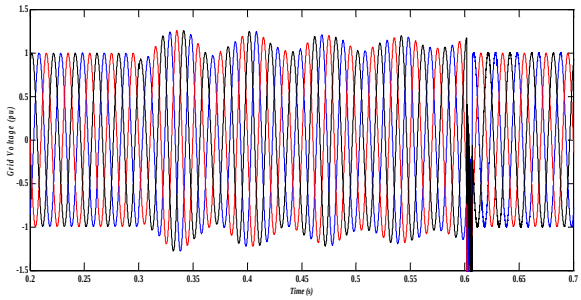
شکل (۱۳): ولتاژ تزریقی توسط DVR پیشنهادی



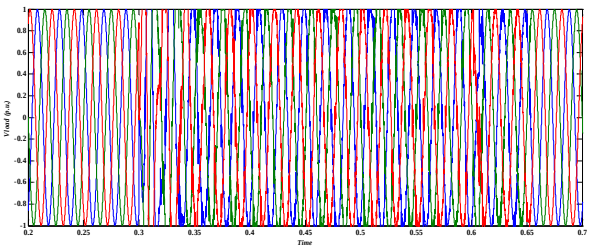
شکل (۱۴): تحلیل طیف هارمونیکی ولتاژ تزریقی توسط DVR پیشنهادی

۵-۳- شبیه‌سازی DVR پیشنهادی در حضور فلیکر ولتاژ

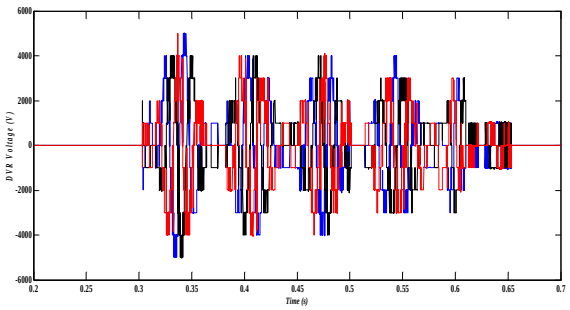
در شکل (۱۵) فلیکر ولتاژ سه فاز در ولتاژ منبع در اثر راه‌اندازی موتور القائی که در مرجع[۳] ارائه شده رخ داده است که DVR پیشنهادی با استراتژی پیش از خطا به جبران‌سازی پرداخته است. ولتاژ بار در شکل (۱۶) بیانگر این موضوع می‌باشد. در شکل (۱۷) ولتاژ تزریقی توسط DVR نشان داده شده است. در شکل (۱۸) تحلیل طیف هارمونیکی ولتاژ تزریقی توسط DVR در جبران‌سازی فلیکر ولتاژ نشان داده شده است.



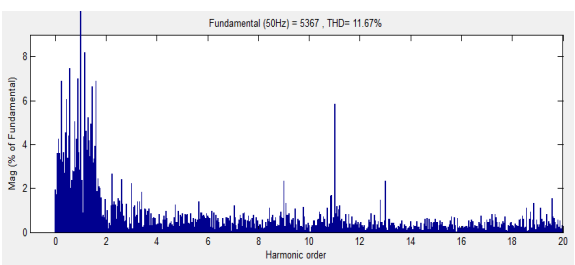
شکل (۱۵): فلیکر ولتاژ سه فاز در طرف منبع (PCC)



شکل (۱۶): ولتاژ بار جبران‌سازی شده توسط DVR پیشنهادی



شکل (۱۷): ولتاژ تزریقی توسط DVR پیشنهادی



شکل (۱۸): تحلیل طیف هارمونیکی ولتاژ تزریقی توسط DVR پیشنهادی

[DOR: 20.1001.1.23222468.1395.5.1.4.4]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 5 -No. 1- spring & summer 2016
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک بازیاب دینامیکی ولتاژ بر پایه اینورتر چندسطحی مدولار ترکیبی (M^3I) ارائه شد. در این ساختار با افزایش تعداد سلول‌های کمکی، تعداد سطوح ولتاژ هر شاخه و در نتیجه تعداد سطوح ولتاژ خط‌به‌خط افزایش می‌یابد. در ساختار پیشنهادی نبود خازن‌های الکترولیت، تعداد کم سوئیچ‌های IGBT و مدار راه‌انداز موجب ساده شدن ساختار اینورتر و روش کنترلی آن شده است. با توجه به نتایج ناشی از عملکرد DVR پیشنهادی در شبکه مورد تست در حضور کمبود، بیشبود و فلیکر ولتاژ می‌توان گفت که DVR پیشنهادی دارای عملکرد مطلوب‌تری در جبران‌سازی کمبود، بیشبود و فلیکر ولتاژ بارهای حساس می‌باشد و این برتری ناشی از به‌کارگیری اینورتر چند سطحی مدولار ترکیبی می‌باشد. همچنین مشاهده گردید که با استفاده از اینورتر چند سطحی مدولار ترکیبی اعوجاج هارمونیکی کل (%THD)، ولتاژ تزریقی توسط DVR تا حد مطلوبی کاهش داده شد که این امر سبب کاهش اندازه فیلتر هارمونیکی و در نتیجه کاهش هزینه نهایی DVR خواهد شد.

مراجع

[1] J.D. J.D. Barros and J.F. Silva, "*Multilevel optimal predictive dynamic voltage restorer*," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 57, no. 8, pp. 2747-2760, Aug. 2012.

[2] E. Akbari, A. Sheikholeslami and j. Rouhi, "*operation DVR based Modular Multilevel Cascade Converter based on Double-star Chopper-cells (MMCC-DSCC) for Compensation Voltage sag and swell in Power Distribution Grids*, Majlesi Journal of Mechatronic Systems (MJMS), Vol. 4, NO. 1, pp. 39-47, March 2015.

[3] A. Elnady and M. Salama, "*Unified approch for mitigating voltage sag and flicker using the D-STATCOM*" IEEE Trans. power Delivery, Vol. 20, No. 2, pp. 2614-2625, Nov 2012.

[4] S. P. Gautam and L. Kumar, "*Hybrid topology of symmetrical multilevel inverter using less number of devices*" IEEE Trans. Power Electron, Vol. 8, No. 11, pp. 3135-3145, Jan 2015.

[5] K. Gupta and A. Ranjan, "*Multilevel inverter topologies with reduced device count a review*" IEEE Trans. Power Electron, Vol. 31, No. 1, pp. 234-247, July2016.

[6] C. Silva and L. Cordova, "*Implementation and control of a hybrid multilevel converter with floting DC links for current waveform improvement*" IEEE Trans. Ind. Electron, Vol. 58, No. 6, pp. 1421-1432, May 2014.

[7] P. M. Meshram, V. B. Borghate and F. Nugater "*A simplified nearest level control (NLC) voltage balancing method for modular multilevel converter (MMC)*" IEEE Trans. Power Electron, Vol. 30, No. 1, pp. 450-462, Aug 2015.

[8] K. K. Gupta, S. B. Jain and A.alesina "*Topology for multilevel inverter to attain maximum number of levels from given DC sources*" IET Power Electronics, Vol. 5, Issue. 4, pp. 435-446, Aug 2012.

[9] A. Mokhberdoran and A. Ajami, "*Symmetric and asymetric desing and implementation of new cascaded multilevel inverter topology*" IEEE Trans. Power Electron, Vol. 29, No. 12, pp. 6712-6724, Aug 2016.

[10] A. M. Rufe and V. H. Khadkikar, "*An enhanced voltage sag compensation scheme for dynamic Voltage Restorer*" IEEE Trans. Ind. Electronic, Vol. 62, No. 5, pp. 2683-2692, May 2015.

رزومه



احسان اکبری در بروجرد متولد شده است (۱۳۶۶). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- قدرت در دانشگاه مازندران (۱۳۸۹)، کارشناسی‌ارشد مهندسی برق- قدرت در دانشگاه علوم و فنون مازندران (۱۳۹۲) سپری کرده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه ادوات FACTS، کیفیت توان الکتریکی، الکترونیک قدرت و کاربرد آن در سیستم‌های قدرت، تولیدات پراکنده و شبکه‌های توزیع هوشمند می‌باشد.

زیرنویس‌ها

[1] Dynamic Voltage Restorer
[2] Mixed Modular Multi-level Inverter
[3] Nearest Level Control

[DOR: 20.1001.1.23222468.1395.5.1.4.4]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 5 -No. 1- spring & summer 2016
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

Dynamic Voltage Restorer based on Mixed Modular Multi-level Inverter for compensation voltage sag, swell and flicker in power distribution grids

Ehsan Akbari[1]

[1] Department of Electrical Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Babol, Iran.

Abstract

In this paper, a new structure of Dynamic Voltage Restorer (DVR) based on a mixed modular multi-level inverter (M^3I) is proposed, which is capable of compensating for voltage sag, swell and flickers for sensitive loads. The mixed modular multi-level inverter is made up of fewer IGBTs and less circuitry than similar structures. Due to the low number of DC inputs and the lack of electrolyte capacitors in the inverter structure, the control of this inverter is simple to produce the desired voltage. This inverter is made up of three inverters, a single-phase bridge, a triple-inverters, and auxiliary cells to increase the number of line-to-line voltage levels. The inverter also has the ability to produce a number of higher output voltage levels and less harmonic distortion, which makes this structure possible in the power quality compensation grid. The switching method of controlling the closest NLC level in the proposed inverter is used to create the desired waveform. The pre-sag control method was used to control the proposed DVR and use the synchronous reference frame (SRF) method to anomalous detection of grid voltage fluctuations. To investigate and validate the proposed DVR performance, simulations are carried out in the MATLAB / SIMULINK software environment, and the results indicate that the proposed DVR is desirable for optimum performance and performance in voltage sag, swell, and flicker of the power distribution grids.

[*]**Corresponding author:** e.akbari1987@yahoo.com

Keywords: Dynamic Voltage Restorer (DVR), Mixed Modular Multi-level Inverter, Voltage sag, Voltage swell, Voltage flicker, NLC control.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1395.5.1.4.4]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 5 -No. 1- spring & summer 2016