

# متعادل سازی ولتاژ خازن های لینک DC در یک PET مبتنی بر CHB در شرایط جبران سازی عدم تعادل ولتاژ شبکه و خطای شبکه

مهدی بابایی رگنی<sup>۱</sup> رضا قندهاری<sup>۲</sup> مهدی اسدی<sup>۳</sup>

۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی- تهران- ایران  
[mbabaei@nri.ac.ir](mailto:mbabaei@nri.ac.ir)

۲- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی- تهران- ایران  
[r\\_ghandehari@sru.ac.ir](mailto:r_ghandehari@sru.ac.ir)

۳- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی اراک- اراک- ایران  
[m.asadi@arakut.ac.ir](mailto:m.asadi@arakut.ac.ir)

**چکیده:** تزریق جریان های نامتقارن توسط ترانسفورماتورهای الکترونیک قدرت به منظور بهبود عدم تعادل ولتاژ شبکه باعث نامتعادل شدن ولتاژها در خازن های DC مبدل ها و ایجاد نابرابری شارش توان های اکتیو در فازهای مختلف آن می شود. در این مقاله، ساختار کنترلی پیشنهادی با اصلاح زاویه توان بین بردارهای ولتاژ شبکه و ترانسفورماتور، شارش توان اکتیو هر فاز را بصورت مستقل کنترل می کند. تغییرات زوایای توان در فازهای مختلف توسط سیستم کنترلی پیشنهادی، جریان توالی صفری در طبقه اول ترانسفورماتور ایجاد می کند که با روابط تحلیلی مطابقت دارد. نتایج شبیه سازی در دو حالت تزریق جریان نامتعادل و وجود خطای شبکه، ایجاد عدم تعادل ولتاژ خازن های DC و شارش نامتعادل توان اکتیو در فازهای مختلف ترانسفورماتور را نشان می دهند. پس از اعمال روش کنترلی پیشنهادی همگرایی مناسبی در شارش توان ها و ولتاژ خازن ها ایجاد می شود. نتایج آزمایشگاهی نیز همگرایی این پارامترها را پس از اعمال روش ارائه شده نشان می دهند. همچنین، انطباق جریان مولفه صفر ایجاد شده توسط ساختار کنترلی پیشنهادی با مقادیر محاسبه شده از روابط تحلیلی ارائه شده، به وضوح از نتایج آزمایشگاهی قابل مشاهده است.

**واژه های کلیدی:** ترانسفورماتور الکترونیک قدرت، عدم تعادل ولتاژ، تزریق جریان، متعادل سازی ولتاژ خازن، تقسیم برابر توان ها

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.4.71

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۶/۱۶

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۸

نام نویسنده ی مسئول: رضا قندهاری

نشانی نویسنده ی مسئول: ایران، تهران، لویزان، خیابان شعبانلو، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، دانشکده مهندسی برق

## ۱- مقدمه

مبدل های چندسطحی، ساختارهای پیشرفته و پُرکاربرد هستند که می توانند یک شکل موج ولتاژ چند سطحی با دامنه، فاز و فرکانس متغیر را تولید کنند. وجود سطوح متعدد ولتاژ، اعوجاج هارمونیک کمتر و کیفیت بالاتر ولتاژ خروجی مبدل را به دنبال دارد و می تواند باعث کوچکتر شدن فیلترهای خروجی گردد. با استفاده از این ساختارها می توان به مبدل های با سطوح ولتاژ و توان بالاتر دست یافت. در دهه اخیر، استفاده از مبدل های توان بالا در کاربردهایی نظیر نیروگاه های توان بالای خورشیدی و بادی، خطوط HVDC<sup>۱</sup> و درایوهای مگاواتی به شدت افزایش یافته است [۱-۳]. با توجه به نوع کاربرد و سطح توان و ولتاژ خروجی، ساختارهای متفاوتی برای مبدل های چندسطحی ارائه شده است که هر کدام از مزایا و معایب مختلفی برخوردار هستند [۴-۶]. ترانسفورماتورهای الکترونیک قدرت (PET<sup>۲</sup>)، ترکیبی از مبدل های چندسطحی است که با هدف اصلی تغییر سطح ولتاژ در شبکه های برق کاربرد دارد. ترانسفورماتورهای الکترونیک قدرت ابتدا در سال ۱۹۶۸ معرفی شدند [۷]. تاکنون، تحقیقات بسیار زیادی روی انواع ساختارها، سیستم های کنترلی و کاربردهای آنها انجام شده است [۸-۱۲]. آنها بعنوان ترانسفورماتورهای حالت جامد (SST<sup>۳</sup>) نیز شناخته می شوند که به خاطر انعطاف پذیری بالا در کنترل و محدود سازی، کاربردهای متنوع و گوناگونی یافته اند. استفاده در منابع انرژی های تجدیدپذیر، شبکه های هوشمند و ریز شبکه ها، ادوات FACTS<sup>۴</sup>، فیلترهای اکتیو، سیستم های حمل و نقل ریلی، ایستگاه های شارژ خودرو برقی، ذخیره سازهای انرژی و شبکه توزیع از مهمترین کاربردهای PET محسوب می شوند [۱۳]. PET ها در مقایسه با ترانسفورماتورهای معمولی از قابلیت های عملکردی بسیار بیشتری برخوردارند. این قابلیت ها عمدتاً در زمینه های کنترل پذیری بالا و بهبود پارامترهای کیفیت توان می باشند. کنترل توان راکتیو و تصحیح ضریب توان، رگولاسیون ولتاژ، کاهش یا حذف هارمونیک های ولتاژ، کاهش یا حذف عدم تعادل ولتاژ، محدود کردن جریان خطا، کنترل شارش توان ها از راه دور، اتصال به سیستم ذخیره ساز انرژی و در دسترس بودن پایانه های DC از جمله این قابلیت های عملکردی می باشند [۱۴-۱۸]. انواع یک، دو و سه طبقه برای PET معرفی شده است، اما نوع سه طبقه آن، به دلیل کنترل پذیری بسیار بالای آن معمولاً جذابیت بیشتر در تحقیقات و کاربردهای صنعتی دارد [۱۹]. در بین ساختارهای موجود، مبدل های چندسطحی مبتنی بر پل H آشنایی با CHB<sup>۵</sup>، ساختاری مناسب برای ساخت PET ها محسوب می شود [۲۰]. در این مبدل ها، با سری سازی مبدل های HB می توان به سطوح ولتاژ بالاتری دست یافت. افزایش ولتاژ خروجی با تعداد سطوح بیشتر، افزایش توان و کیفیت آن را به دنبال خواهد داشت [۱۹]. طبقه اول یک PET بر مبنای CHB از سه مبدل تک فاز چند سطحی تشکیل شده که بصورت مثلث یا ستاره به یکدیگر متصل می-

شوند. یکی از مشکلات رایج در مبدل های چند سطحی بر مبنای CHB، متعادل سازی ولتاژ خازن های سلول های مختلف HB در هر فاز است. در تحقیقات انجام شده، روش های مختلفی برای متعادل سازی ولتاژ خازن های یک فاز معرفی شده است [۲۱-۲۳]. از سوی دیگر، با تزریق جریان توالی منفی مناسب می توان عدم تعادل ولتاژ نقطه PCC را کاهش داد [۲۴]. یکی از کاربردهای مهم PET ها، تزریق جریان توالی منفی به شبکه برای کاهش عدم تعادل ولتاژ شبکه قدرت در نقاط اتصال مشترک (PCC<sup>۶</sup>) می باشد. می توان ثابت کرد که تولید جریان نامتعادل در طبقه اول، تعادل ولتاژ خازن های DC در فازهای مختلف را برهم می زند. همچنین وقتی تعادل ولتاژ شبکه در اثر بروز خطا بهم می خورد، ولتاژهای لینک DC در فازهای مختلف به شدت دچار تغییرات شده و عملکرد سیستم کنترل را تحت تاثیر قرار می دهد [۲۵-۲۶]. برهم خوردن تعادل ولتاژ خازن های DC در PET باعث عدم تعادل در شارش توان اکتیو در طبقه دوم آن خواهد شد. در یک STATCOM<sup>۷</sup> این مشکل منجر به افزایش یا کاهش بیش از اندازه اندیس مدولاسیون مبدل ها شده و اعوجاج جریانی بالایی در خروجی مبدل به وجود می آورد [۲۷]. در یکی از روش های ارائه شده، با تنظیم ولتاژ خازن های فازهای مختلف یک STATCOM در مقادیر دلخواه و با اتصال ستاره، می توان به ولتاژ کلیدزنی شده متعادل با حداکثر ضریب مدولاسیون دست یافت [۲۷]. در این روش، ولتاژ مرجع خازن های DC فازهای مختلف، با استفاده از مولفه های توالی منفی و صفر ولتاژ خروجی بدست می آیند. توزیع توان اکتیو متعادل در فازها با استفاده از یک ولتاژ توالی صفر انجام می شود. مشکل این روش، نیازمندی آن به یک سیستم PLL<sup>۸</sup> دقیق با سرعت محاسبه بالا است. بنابراین پاسخ سیستم در شرایط گذرا و خطای شبکه وابسته به عملکرد PLL است. در [۱۹]، با تخمین حدودی جریان توالی صفر مناسب در یک STATCOM با اتصال مثلث، ولتاژ خازن های DC متعادل شده است. این جریان، با استفاده از تخمین توان اکتیو حاصل از جاری شدن جریان توالی صفر در هر یک از فازها محاسبه می شود. در روابط استفاده شده، اختلاف دامنه ولتاژهای فازهای مختلف شبکه در شرایط خطا در نظر گرفته نشده است. بنابراین محاسبات در شرایط عدم تعادل ولتاژ شبکه دقیق نیست. در راهکارهای دیگر نیز با تخمین یک ولتاژ توالی صفر مناسب، ولتاژ خازن های DC یک STATCOM بر مبنای CHB در شرایط خطا و عدم تعادل ولتاژ شبکه با یکدیگر برابر شده اند [۲۸-۲۹]. این روش ها نیز نیاز به محاسبه دقیق و سریع ولتاژهای توالی صفر و منفی دارد. اما در شرایط گذرا و خطا در شبکه، محاسبه دقیق و سریع ولتاژهای توالی مثبت، منفی و صفر بسیار دشوار خواهد بود. روش کنترلی که بتواند در شرایط عدم تعادل ولتاژ و تزریق جریان نامتعادل به شبکه، تعادل ولتاژ خازن های لینک DC را تضمین کند و نیازی به محاسبات دقیق و سریع توالی های ولتاژ شبکه نداشته باشد، می تواند بسیار مفید و کارا باشد. در این مقاله روشی ارائه شده است که کارایی لازم برای ایجاد تعادل در ولتاژ خازن لینک های DC

ولتاژهای AC فشار متوسط شبکه، به ولتاژهای سطح پایین تر DC که قابل تحمل برای نیمه هادی های قدرت است، تبدیل می شوند. ولتاژهای DC، با استفاده از مبدل های DC-DC ایزوله در طبقه دوم، به ولتاژ DC با سطح ولتاژ مناسب جهت تولید ولتاژ AC خروجی تبدیل می شوند. ساختار مبدل های DC-DC طبقه دوم، پل فعال دوطرفه یا DAB می باشد. این مبدل ها با استفاده از ترانسفورماتورهای فرکانس بالا، علاوه بر تبدیل سطح ولتاژ DC ورودی به ولتاژ DC خروجی مناسب برای طبقه سوم، ایزولاسیون ولتاژ را نیز انجام می دهند. همچنین قابلیت انتقال توان دو-طرفه نیز در این ساختارها وجود دارد. در طبقه خروجی نیز از یک اینورتر ۴-ساق برای تغذیه بارهای تک فاز و نامتعادل استفاده می شود.

## ۲-۲- ساختار کنترلی طبقه اول

یکی از مهمترین بخش های سیستم کنترل یک PET، کنترل طبقه اول آن است. جریان ورودی PET باید الزامات کیفیت توان مانند THD را رعایت کند. اهداف ثانویه سیستم کنترل می تواند کاهش هارمونیک و عدم تعادل ولتاژ شبکه باشد. برای تحلیل بهتر موضوع، بلوک دیاگرام تک خطی یک مبدل منبع ولتاژ متصل به شبکه به همراه دیاگرام برداری ولتاژها و جریان های آن در شکل (۲) نشان داده شده است. با توجه به این شکل و صرف نظر از مقاومت سلف، معادلات ولتاژ PET در قاب مرجع سنکرون با روابط (۱) و (۲) بیان می شوند [۲۸].

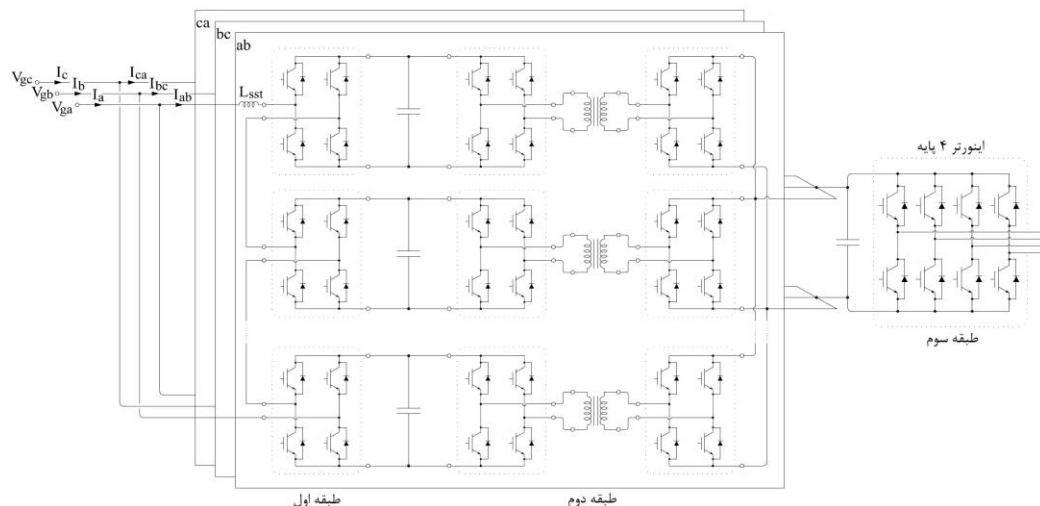
در شرایط عدم تعادل ولتاژ و نیز وضعیت بروز خطا در شبکه را دارد. با این روش، شارش توان اکتیو برابر در فازهای مختلف PET ایجاد خواهد شد. از جمله مزایای دیگر این ساختار کنترلی، استقلال در کنترل ولتاژ خازن های هر فاز با استفاده از کنترل کننده های  $PI^1$  می باشد. با این شیوه، چون نحوه کلیدزنی تمامی مبدل های طبقه دوم مشابه هم بوده و خازن سمت خروجی نیز بین مبدل های سه فاز مشترک است، با تعادل ولتاژ خازن ها، شارش توان اکتیو نیز برابر خواهد شد. نتایج شبیه سازی و آزمایشگاهی، عملکرد مناسب سیستم کنترلی در شرایط تزریق جریان نامتعادل و خطای گذرا در ولتاژ شبکه را نشان می دهند.

## ۲- ساختار PET بر مبنای مبدل های CHB

ساختار سه طبقه ای PET به دلیل انعطاف پذیری بالا، قابلیت ماژولار بودن و کنترل پذیری مناسب، ساختاری قابل قبول برای عملیاتی کردن و کاربری واقعی است که در این مقاله برای بررسی انتخاب شده است.

### ۱-۲- ساختار یک PET سه- طبقه

در طبقه اول یک PET به دلیل بالا بودن ولتاژ، از مبدل های چندسطحی استفاده می شود. مبدل CHB به دلیل سادگی ساختار و سهولت در کنترل، یک انتخاب مناسب برای این طبقه خواهد بود. شکل (۱)، ساختار یک PET سه-طبقه را نشان می دهد. شبکه ولتاژ متوسط سه سیمه بوده و سیم نول جداگانه ای وجود ندارد. بنابراین سه مبدل تک فاز طبقه اول بصورت مثلث به یکدیگر متصل می شوند.



شکل (۱): ترانسفورماتور الکترونیک قدرت سه-طبقه بر مبنای CHB

اندوکتانس فیلتر ورودی است. روابط توان های اکتیو و راکتیو نیز در قاب مرجع سنکرون عبارتند از:

$$v_{pet}^d = L_{pet} \frac{d}{dt} i_{pet}^d - \omega L_{pet} i_{pet}^q + v_g^d \quad (1)$$

$$v_{pet}^q = L_{pet} \frac{d}{dt} i_{pet}^q + \omega L_{pet} i_{pet}^d + v_g^q \quad (2)$$

که  $i_{pet}^{dq}$  ولتاژ و جریان PET،  $v_g^{dq}$  ولتاژ شبکه فشار متوسط در قاب مرجع سنکرون،  $\omega$  فرکانس زاویه ای ولتاژ شبکه و  $L_{pet}$

$$P_{pet}^{dq} = \frac{3}{2} (v_g^d i_{pet}^d + v_g^q i_{pet}^q) \quad (3)$$

$$Q_{pet}^{dq} = \frac{3}{2} (v_g^q i_{pet}^d - v_g^d i_{pet}^q) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} I_{AB} &= I^+ | e^{j\varphi} + I^- | e^{j\theta^-} \\ I_{BC} &= I^+ | e^{j\varphi} + I^- | e^{j(\theta^- - 2\pi/3)} \\ I_{CA} &= I^+ | e^{j\varphi} + I^- | e^{j(\theta^- + 2\pi/3)} \end{aligned} \quad (5)$$

که  $I^+$  و  $I^-$  به ترتیب دامنه بردارهای توالی مثبت و منفی جریان PET و نیز  $\varphi$  و  $\theta^-$  زاویه این بردارها با بردار ولتاژ فاز AB می باشند. چنانچه طبق استاندارد IEC61000-3-13 عدم تعادل ولتاژ مجاز شبکه کمتر از دو درصد در نظر گرفته شود، تأثیرگذاری اختلاف میان دامنه های ولتاژ در تعیین توان های اکتیو برای ساده سازی روابط، قابل اغماض خواهد بود. بنابراین با فرض این که دامنه ولتاژ هر فاز یک پریونیت باشد، توان های اکتیو جابجا شده در هر فاز ترانسفورماتور به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$\begin{aligned} P_{AB} &= \text{Re}(I_{AB}) = I^+ | \cos \varphi + I^- | \cos \theta^- \\ P_{BC} &= \text{Re}(I_{BC}) = I^+ | \cos \varphi + I^- | \cos(\theta^- - 2\pi/3) \\ P_{CA} &= \text{Re}(I_{CA}) = I^+ | \cos \varphi + I^- | \cos(\theta^- + 2\pi/3) \end{aligned} \quad (6)$$

همانطور که از روابط (۶) پیداست به دلیل وجود جریان توالی منفی، به ازای تمامی مقادیر  $\theta^-$ ، توان های اکتیو جابجا شده توسط فازهای مختلف با یکدیگر متفاوت هستند. این اختلاف توان اکتیو در فازهای مختلف یک STATCOM باعث برهم خوردن تعادل ولتاژ خازن های لینک DC می شود. اما در یک PET، عدم تعادل ولتاژ خازن های DC باعث برهم خوردن تعادل شارش توان اکتیو در طبقه دوم آن می شود.

#### ۴- متعادل سازی شارش توان اکتیو در فازها

برای توصیف روش پیشنهادی جهت متعادل سازی ولتاژ خازن های DC در فازهای مختلف، در این مرحله فرض می شود جریان توالی صفر با مشخصات  $I^0 \leq \theta^0$  نیز در فازهای مختلف PET وجود داشته باشد. برای تحلیل ساده تر، شکل (۴) دیگرام فازوری ولتاژها و جریان های طبقه اول PET را نشان می دهد که بر مبنای آن، توان اکتیو جابجا شده در هر فاز عبارتند از:

$$\begin{aligned} P_{AB} &= \text{Re}(I_{AB}) = I^+ | \cos \varphi + I^- | \cos \theta^- + I^0 | \cos \theta^0 \\ P_{BC} &= \text{Re}(I_{BC}) = I^+ | \cos \varphi + I^- | \cos(\theta^- - 2\pi/3) \\ &\quad + I^0 | \cos(\theta^0 + 2\pi/3) \\ P_{CA} &= \text{Re}(I_{CA}) = I^+ | \cos \varphi + I^- | \cos(\theta^- + 2\pi/3) \\ &\quad + I^0 | \cos(\theta^0 - 2\pi/3) \end{aligned} \quad (7)$$

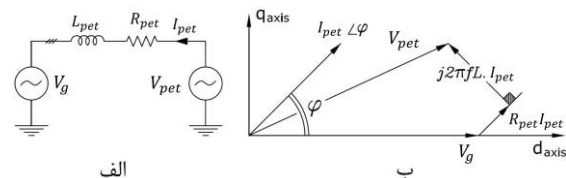
با برابر قرار دادن توان های اکتیو فوق، دو رابطه مستقل زیر بر حسب  $I^0$  و  $\theta^0$  بدست می آیند:

$$\begin{aligned} P_{AB}(I^0, \theta^0) &= P_{BC}(I^0, \theta^0) \\ P_{AB}(I^0, \theta^0) &= P_{CA}(I^0, \theta^0) \end{aligned} \quad (8)$$

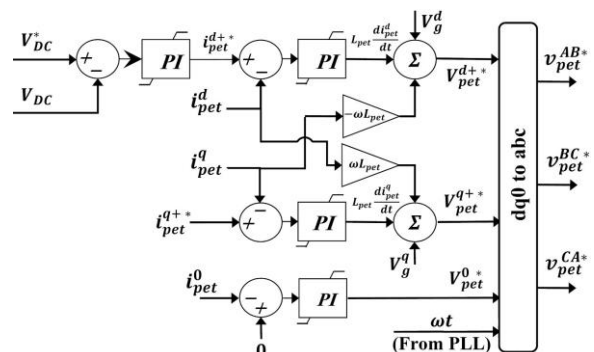
با حل روابط فوق، یک جریان توالی صفر با دامنه و فاز منحصر به فرد مطابق رابطه ۹ بدست می آید که با چرخش آن در مثلث مبدا های طبقه اول، شارش توان اکتیو در فازهای مختلف برابر خواهند شد.

$$|I^0| = |I^-|, \quad \theta^0 = \pi - \theta^- \quad (9)$$

با استفاده از یک حلقه قفل شونده فاز (PLL)، زاویه فاز مرجع بر نقطه ماکزیمم ولتاژ فاز a شبکه قفل می شود. در این صورت مولفه عمودی ولتاژ شبکه ( $V_g^q$ ) برابر صفر می شود. با توجه به روابط (۳) و (۴) مولفه مستقیم جریان  $i_{pet}^d$  جهت کنترل ولتاژ خازن های لینک DC و مولفه عمودی جریان  $i_{pet}^q$  جهت کنترل توان راکتیو مبدل استفاده می شوند. پس از محاسبه ولتاژهای مرجع اینورتر در قلاب مرجع سنکرون، با استفاده از تبدیل معکوس پارک و فرکانس زاویه ای ( $\omega$ )، مقادیر ولتاژ مرجع در قلاب ساکن بدست می آیند. مقادیر مرجع بدست آمده با استفاده از مدولاسیون پهنای پالس سینوسی (SPWM) در مبدل طبقه اول PET تولید می شود. بر این اساس، بلوک دیگرام کنترلی شکل (۳) برای کنترل طبقه اول PET استفاده می شود و ولتاژ خازن ها در هر فاز، با استفاده از روش های مناسب با یکدیگر برابر خواهند شد [۲۳-۲۱].



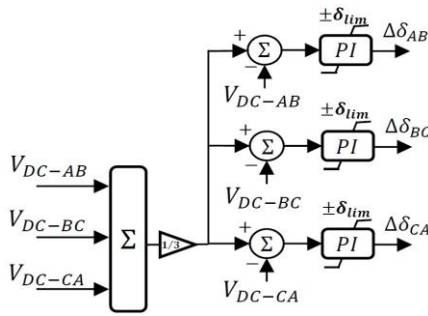
شکل (۲): مدار معادل اتصال یک PET به شبکه (الف) نمودار تک خطی (ب) دیگرام فازوری جریان و ولتاژ PET



شکل (۳): بلوک دیگرام کنترلی طبقه اول PET

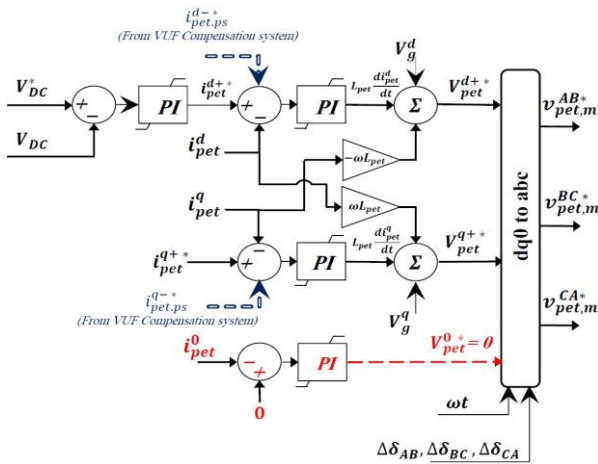
#### ۳- نامتعادلی در خازن های DC مبدل سه فاز

بارهای تک فاز و سه فاز نامتعادل، مهمترین دلایل وجود عدم تعادل ولتاژ در شبکه هستند. همچنین، بروز خطاهای اتصال کوتاه در شبکه باعث برهم خوردن گذرای تعادل ولتاژ شبکه خواهند شد. یکی از راه حل های پذیرفته شده جهت جبران سازی عدم تعادل ولتاژ شبکه، تزریق جریان توالی منفی مناسب برای کاهش ولتاژ توالی منفی ولتاژ نقطه اتصال به شبکه است. ابتدا فرض می شود جریان فازهای مبدل شامل توالی صفر نباشند. بنابراین با فرض وجود توالی منفی در جریان طبقه اول PET، می توان روابط زیر را نوشت:



شکل (۵): بلوک دیاگرام کنترلی معرفی شده جهت تولید زوایای اصلاحی بردارهای ولتاژ مرجع در متعادل سازی ولتاژ خازن ها

در واقع، ولتاژ توالی صفر مرجع ایجاد شده باعث تولید جریان توالی صفر در اتصال مثلث مبدل طبقه اول PET شده و این جریان باعث متعادل شدن ولتاژ خازن های DC در فازهای مختلف خواهد شد. برای جلوگیری از ناپایدار شدن سیستم کنترل، خروجی کنترل کننده های PI با مقادیر مناسبی محدود می شوند. بلوک دیاگرام نهایی سیستم کنترل طبقه اول PET در شکل (۶) نشان داده شده است. برای جاری شدن جریان توالی صفر در اتصال مثلث طبقه اول، بخش کنترل جریان توالی صفر مبدل غیر فعال می شود. مولفه های جریان های مرجع توالی منفی در قاب مرجع سنکرون،  $(i_{pet.ps}^{d-}$  و  $i_{pet.ps}^{q-})$ ، دارای فرکانس زاویه ای  $2\omega$  یا فرکانس ۱۰۰ هرتز هستند. این مقادیر مرجع توسط یک سیستم کنترلی مجزا که برای جبران سازی عدم تعادل ولتاژ نقطه PCC طراحی شده، تولید می شوند [۱۶].



شکل (۶): بلوک دیاگرام روش کنترلی پیشنهاد شده

## ۶- نتایج شبیه سازی و آزمایشگاهی

به منظور بررسی عملکرد و کارایی روش پیشنهادی از یک ترانسفورماتور الکترونیک قدرت آزمایشگاهی مطابق با ساختار شکل (۱) استفاده شده است. مشخصات سیستم آزمایشگاهی در جدول (۱) و تصویر نمونه آزمایشگاهی آن در شکل (۷) ارائه شده است. برای تطابق نتایج و مقایسه بهتر، مشخصات مدل شبیه سازی شده مشابه سیستم آزمایشگاهی انتخاب شده اند. در بخش شبیه سازی، دو آزمایش در نظر گرفته شده است. ابتدا یک شبکه با عدم تعادل ولتاژ حدود ۲/۶

## ۵- روش پیشنهادی در تعادل توان اکتیو PET

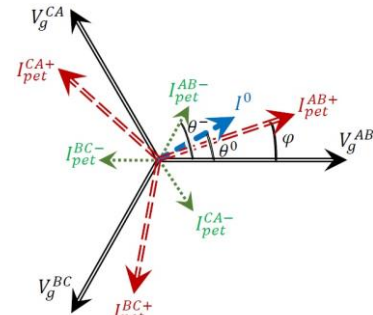
وقتی جریان PET و ولتاژ شبکه متعادل نباشند، شارش توان اکتیو در فازهای مختلف متفاوت خواهد بود. در این مقاله روشی ارائه شده است که با جابجا کردن زاویه فاز بردار ولتاژ مرجع هر فاز، مقدار توان اکتیو جابجا شده در هر فاز را متعادل می کند. رابطه شارش توان اکتیو بین دو منبع ولتاژ بصورت زیر بیان می شود:

$$P^\phi = \frac{|V_{pet}^\phi| \cdot |V_g^\phi|}{2\pi f \cdot L_{pet}} \sin \delta \quad (10)$$

که  $P^\phi$  توان اکتیو هر فاز،  $|V_{pet}^\phi|$  و  $|V_g^\phi|$  به ترتیب اندازه بردار ولتاژ فازی PET و شبکه و  $\delta$  زاویه بین این دو بردار است. بنابراین با جابجایی زاویه بین بردارهای ولتاژ فوق می توان مقدار توان اکتیو جابجا شده در هر فاز را کنترل نمود. در هر فاز، با افزایش زاویه بردارهای ولتاژ شبکه و بردار مرجع PET، توان اکتیو جابجا شده بین آن فاز با شبکه طبق رابطه (۱۰) افزایش یافته و با کاهش این زاویه، توان اکتیو جابجا شده نیز کاهش می یابد. با برابر شدن ولتاژ خازن ها در فازهای مختلف، شارش توان اکتیو نیز در طبقه دوم PET تقریباً برابر خواهند بود. شکل (۵)، بلوک دیاگرام کنترلی پیشنهاد شده را نشان می دهد. مقادیر ولتاژ خازن های DC هر فاز با میانگین ولتاژ خازن های هر سه فاز مقایسه شده و خطای حاصل وارد یک کنترل کننده PI می شود. خروجی هر کنترل کننده، مقدار جابجایی زاویه بردار مرجع ولتاژ آن فاز است. پس از بدست آمدن مقادیر زوایای اصلاح شده، در روابط تبدیل پارک معکوس بصورت زیر اعمال می گردند:

$$\begin{bmatrix} V_{AB,m}^* \\ V_{BC,m}^* \\ V_{CA,m}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\omega t - \Delta\delta_{AB}) & \cos(\omega t - \Delta\delta_{AB}) \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \Delta\delta_{BC}) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \Delta\delta_{BC}) \\ \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} - \Delta\delta_{CA}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} - \Delta\delta_{CA}) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_{pet}^{d+*} \\ V_{pet}^{q+*} \end{bmatrix} \quad (11)$$

که  $\Delta\delta_{xy}$  مقدار جابجایی اصلاح شده بردار مرجع ولتاژ فاز xy است. اگر به هر دلیلی، اعم از تزریق جریان توالی منفی توسط PET، وجود عدم تعادل ولتاژ در شبکه و یا بروز یک خطا در شبکه، یک عدم تعادل در ولتاژ خازن های DC در فازهای مختلف اتفاق بیافتد، سیستم کنترل معرفی شده در جهت اصلاح و متعادل سازی آن عمل می کند.



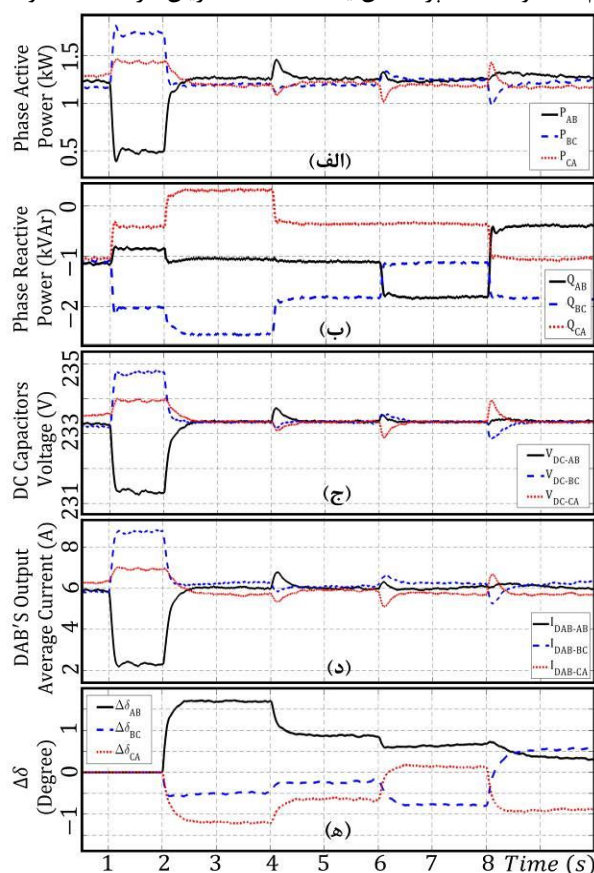
شکل (۴): دیاگرام برداری جریان های PET و ولتاژهای شبکه

در ولتاژ شبکه، توان اکتیو عبوری از مبدل های هر فاز کمی با یکدیگر متفاوت هستند. اما مقادیر فازی آنها تقریباً ۱۲۰۰ وات در هر فاز است. توان راکتیو هر فاز نیز تقریباً ۱۱۰۰ وار است که از شبکه جذب می شود. ولتاژ خازن های DC هر فاز نیز حدوداً ۲۳۳ ولت و جریان میانگین خروجی طبقه دوم در هر فاز نیز حدوداً ۶ آمپر است که با توجه به ولتاژ خازن خروجی که ۲۰۰ ولت است، هر فاز توان ۱۲۰۰ وات را منتقل می کند. در لحظه ۱ ثانیه، با نامتعادل شدن جریان ورودی PET، مطابق با روابط (۶)، توان اکتیو هر فاز دچار عدم تعادل بزرگی می شود. عدم تعادل توان اکتیو، باعث عدم تعادل در ولتاژ خازن های DC و جریان میانگین عبوری از مبدل های طبقه دوم PET می شود. می توان دید که فاز AB تنها ۵۰۰ وات و فاز BC حدود ۱۸۰۰ وات را منتقل می کند. جریان میانگین خروجی فاز AB طبقه دوم تا حدود ۲/۳ آمپر کاهش یافته است، اما جریان فاز BC تا حدود

درصد در نظر گرفته می شود. یک بار با توان ۳/۶ کیلووات در سمت خروجی PET قرار دارد که باعث تنظیم جریان  $i_{pet}^{d+*}$  در مقدار ۴/۶۲ آمپر در سیستم کنترل اصلی طبقه اول خواهد شد. همچنین، جریان  $i_{pet}^{q+*}$  برابر ۴ آمپر به عنوان مرجع جریان راکتیو PET، تنظیم شده است. ابتدا سیستم بدون تزریق جریان توالی منفی شروع به کار می کند. در لحظه ۱ ثانیه، بردار جریان توالی منفی  $I^- = 3\sqrt{2}\pi/2$  آمپر به شبکه تزریق می شود. در لحظه ۲ ثانیه، سیستم کنترل متعادلگر ولتاژ خازن های DC فعال می شود. در لحظه ۴ ثانیه، دامنه جریان توالی منفی از ۳ به ۱/۵ آمپر کاهش می یابد. در لحظات ۶ و ۸ ثانیه، زاویه بردار توالی منفی به مقادیر  $\pi/6$  و  $5\pi/6$  تغییر می کند تا عملکرد

جدول (۱): مشخصات فنی نمونه آزمایشگاهی و شبیه سازی شده

مقدار	مشخصات سیستم
۴۰۰ V	ولتاژ شبکه
۷/۵ kVA	توان نامی PET
سه طبقه	نوع PET
۷	تعداد سطوح ولتاژ مبدل طبقه اول
۳×۲۳۳ V	ولتاژ نامی خازن های DC طبقه اول
۲۰۰ V	ولتاژ نامی خازن DC طبقه سوم
۱۱۰ V	ولتاژ نامی طبقه خروجی
۲/۲ mF	ظرفیت خازن DC طبقه اول
۱۰ mF	ظرفیت خازن DC طبقه سوم
۱۰ mH	سلف اتصال به شبکه
٪ ۲/۶	عدم تعادل ولتاژ شبکه



شکل (۸): نتایج شبیه سازی در شرایط جبران سازی عدم تعادل ولتاژ شبکه: (الف) توان اکتیو عبوری در هر فاز، (ب) توان راکتیو در هر فاز، (ج) ولتاژ خازن های DC هر فاز (د) جریان میانگین خروجی طبقه دوم، (ه) تغییرات زاویه توان هر فاز جهت متعادل سازی ولتاژ خازن های DC

۹ آمپر افزایش یافته است. مطابق با شکل (۸-ب)، تعادل توان راکتیو نیز برهم خورده است. برعکس توان اکتیو، برهم خوردن تعادل توان راکتیو در فازهای مختلف، هدف اصلی تزریق جریان توالی منفی به شبکه جهت بهبود عدم تعادل شبکه است. در زمان ۲ ثانیه، با فعال



شکل (۷): نمایی از سیستم تست آزمایشگاهی

سیستم کنترل نسبت به تغییرات زاویه بردار توالی منفی جریان نیز بررسی گردد. شکل (۸-الف) و (۸-ب)، به ترتیب توان اکتیو عبوری از مبدل های فازهای مختلف و توان راکتیو مبادله شده با شبکه را نشان می دهد. شکل (۸-ج) و (۸-د)، به ترتیب تغییرات ولتاژ خازن های DC و جریان میانگین خروجی طبقه دوم در فازهای مختلف را نشان می دهد. قبل از زمان ۱ ثانیه، بخاطر وجود عدم تعادل حدود ۲/۶ درصدی

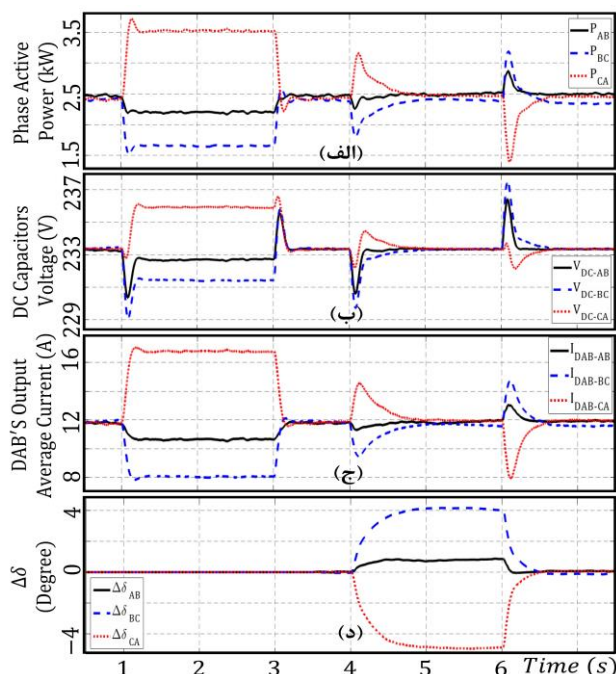
برای اثبات عملکرد سیستم کنترلی، از یک نمونه آزمایشگاهی PET با مشخصات فنی جدول (۱) استفاده شده است. نقطه کار PET مشابه نقطه کار آزمون اول در مدل شبیه سازی شده می باشد. ابتدا سیستم بدون اعمال جریان توالی منفی شروع به کار می کند. شکل (۱۰-الف) و (۱۰-ب)، به ترتیب توان اکتیو فازهای مختلف و ولتاژ خازن های DC را نشان می دهد. در لحظه  $t_1$  بردار جریان توالی منفی  $I = 3\sqrt{2}\pi/2$  به سیستم تزریق می شود. قبل از فعال سازی سیستم کنترلی، ولتاژهای DC نامتعادل هستند. بنابراین جریان میانگین خروجی طبقه دوم در فازهای مختلف با یکدیگر نابرابر خواهند شد (شکل ۱۰-ج).

جدول (۲): میزان بهبود توزیع توان و جریان در فازهای مختلف PET

توان و جریان در فازهای مختلف PET	بدون روش پیشنهادی	با روش پیشنهادی
$P_{AB}$ (W)	۵۰۰	۱۳۰۰
$P_{BC}$ (W)	۱۴۰۰	۱۲۰۰
$P_{CA}$ (W)	۱۸۰۰	۱۲۰۰
$\Delta(P_{max}-P_{min})/P_{min} \%$	۲۶۰٪	۸/۳٪
$I_{DAB-AB}$ (A)	۲/۵	۶
$I_{DAB-BC}$ (A)	۸/۵	۶/۱
$I_{DAB-CA}$ (A)	۷	۵/۹
$\Delta(I_{max}-I_{min})/I_{min} \%$	۲۴۰٪	۳/۴٪

شدن سیستم کنترل معرفی شده، زاویه توان فازهای مختلف اصلاح می شوند، به طوری که ولتاژ خازن های DC با یکدیگر برابر شوند. شکل (۸-ه)، تغییرات زاویه های توان را نشان می دهد. زاویه  $\Delta\delta_{AB}$  افزایش یافته تا توان اکتیو عبوری از فاز AB را افزایش دهد. اما زاویه  $\Delta\delta_{BC}$  جهت کاهش توان اکتیو عبوری، کاهش یافته است. با تغییر زاویه بردار توالی منفی در زمانهای ۶ و ۸ ثانیه، سیستم کنترل با تغییر مناسب زوایای توان در فازهای مختلف موجب متعادل شدن ولتاژ خازن های DC و شارش توان اکتیو در فازهای مختلف می شود. شکل (۸-ب) نشان می دهد که با متعادل شدن توان اکتیو، تغییر زیادی در مقدار توان راکتیو فازهای مختلف ایجاد نشده و بنابراین تاثیری در جبران سازی عدم تعادل ولتاژ شبکه ندارد. جدول (۲) مقادیر توان و جریان فازهای مختلف PET را هنگامی که جریان مولفه منفی  $I = 3\sqrt{2}\pi/2$  آمپر به شبکه تزریق می شود، با و بدون حضور روش کنترل پیشنهادی ارائه می کند. براساس نتایج درج شده در این جدول، بدون حضور یک الگوریتم کنترلی مناسب، با تزریق جریان مولفه منفی به شبکه، اختلاف بین بیشترین و کمترین توان عبوری از مبدل های PET به ۲۶۰٪ می رسد.

در آزمایش دیگر، فرض می شود که یک خطای گذرا در لحظه ۱ ثانیه در شبکه اتفاق افتاده که باعث ایجاد یک عدم تعادل ولتاژ به مقدار ۴۰٪ می شود و در لحظه ۳ ثانیه از بین می رود. در این حالت فرض شده که یک بار حدود ۷/۲ کیلوواتی در خروجی PET قرار دارد. تغییرات توان اکتیو فازهای مختلف در شرایط خطا در شکل (۹-الف)، نشان داده شده است. توان اکتیو فاز CA بدون فعال سازی سیستم کنترل معرفی شده از حدود ۲/۴ تا ۳/۵ کیلووات افزایش یافته است، اما توان اکتیو فاز BC، تا حدود ۱/۶ کیلووات کاهش یافته است. در این شرایط، فاز CA دچار اضافه جریان شده و سیستم حفاظت جریانی PET عمل خواهد کرد و باعث جدا شدن PET از شبکه خواهد شد. با رفع خطا، توان منتقل شده در هر فاز دوباره متعادل می شود. شکل های (۹-ب) و (۹-ج)، به ترتیب ولتاژ خازن های DC و جریان میانگین خروجی مبدل های طبقه دوم در فازهای مختلف را نشان می دهد که با نامتعادل شدن شارش توان اکتیو، دچار عدم تعادل شدید شده اند، به طوری که جریان خروجی طبقه دوم تا حدود ۱۷ آمپر (۵۰٪ بالاتر از جریان نامی) افزایش می یابد. سیستم کنترل معرفی شده در لحظه ۳/۵ ثانیه فعال شده و خطای شبکه در زمان ۴ تا ۶ ثانیه، مجدداً اعمال می گردد. شکل (۹-د) نشان می دهد که پس از وقوع مجدد خطا و فعال بودن سیستم کنترل معرفی شده، زوایای توان هر فاز با سرعت خوبی تغییر کرده و مقادیر توان اکتیو هر فاز به مقدار قبل خطا برمی گردد. کنترل کننده های PI موجود در سیستم کنترلی، با اصلاح صحیح زوایای توان، باعث تعادل شارش توان و ولتاژ خازن های DC، حتی در شرایط خطای شبکه، شده اند. بنابراین در این شرایط گذرا، نیازی به عمل کردن سیستم حفاظتی نبوده و PET به تغذیه بارهای متصل به خود ادامه می دهد.



شکل (۹): نتایج شبیه سازی در شرایط خطای شبکه: (الف) توان اکتیو عبوری در هر فاز، (ب) ولتاژ خازن های DC هر فاز (ج) جریان میانگین عبوری از مبدل طبقه دوم هر فاز، (د) تغییرات زاویه توان هر فاز جهت متعادل سازی ولتاژ خازن های DC

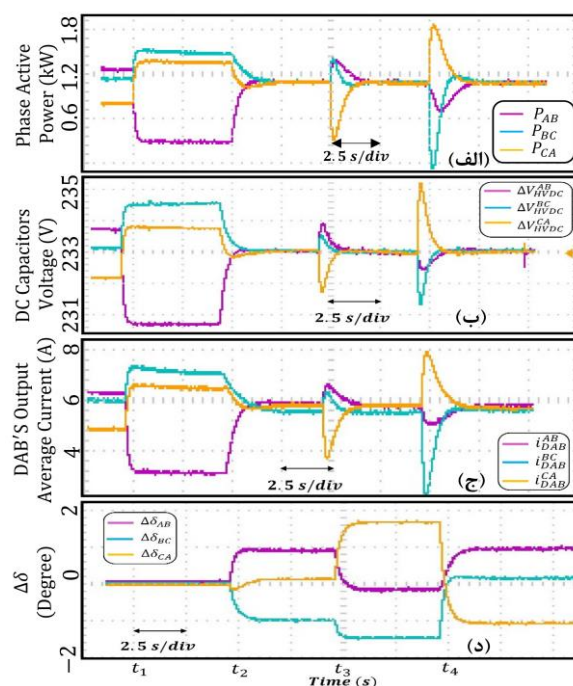
تقریباً با دامنه بردار توالی منفی برابرند. این شکل ها صحت رابطه (۹) را در شرایطی که عدم تعادل ولتاژ شبکه در گستره قابل قبول (کمتر از ۲٪) باشند را تایید می کند.

## ۷- نتیجه گیری

عدم تعادل جریان AC مبدل های متصل به شبکه مبتنی بر CHB در اثر تزریق جریان توالی منفی جهت بهبود عدم تعادل ولتاژ و همچنین خطاهای گذرا شبکه باعث برهم خوردن تعادل ولتاژ خازن های DC در فازهای مختلف می شود. عدم تساوی ولتاژ خازن های DC در ادواتی مانند STATCOM باعث کارکرد و مدولاسیون در نقاط کاری غیر بهینه شده و باعث افزایش اعوجاج جریانی می شود، اما در PET، باعث مشکل بزرگتر شارش نامساوی توان اکتیو در فازهای مختلف طبقه دوم می شود. در این مقاله روش کنترلی ارائه شده که بدون نیاز به محاسبه دقیق توالی های ولتاژ شبکه و جریان PET، با اصلاح زاویه بردارهای ولتاژ مرجع فازی، باعث تعادل کامل در ولتاژ خازن های DC و به تبع آن شارش مساوی توان اکتیو در مبدل های طبقه دوم PET می شود. نتایج شبیه سازی عملکرد مناسب سیستم کنترلی در شرایط تغییرات پله ای بردار جریان توالی منفی را نشان می دهد، به طوری که بدون این کنترل اختلاف شارش توان در کمترین و بیشترین حالت بیش از ۲۶۰٪ در شرایط تزریق جریان توالی منفی است و با فعال کردن کنترل پیشنهادی این مقدار تقریباً به صفر می رسد. نتایج آزمایشگاهی نیز همگرایی مناسب ولتاژ خازن های DC که مبین برابری توان ها در فازهای مختلف طبقه دوم PET است را تایید می کنند. بدون استفاده از این شیوه کنترلی، تزریق جریان مولفه منفی به منظور بهبود در عدم تعادل جریان های شبکه، بسیار محدود و بی تاثیر است. همچنین نتایج شبیه سازی عملکرد مناسب سیستم کنترلی پیشنهادی در شرایط خطاهای گذرای شبکه را نشان می دهد و باعث تاب آوری PET برای متصل ماندن در شبکه و ادامه سرویس دهی به بارهای متصل به آن می شود. همچنین نیازی به محاسبات پیچیده با سرعت بالا و استخراج دقیق توالی های مختلف ولتاژ شبکه، جریان PET و پارامترهای سیستم ندارد. ایده کنترلی پیشنهادی قابلیت استفاده در هر سیستم مشابهی مانند STATCOM مبتنی بر CHB و MMC را دارد.

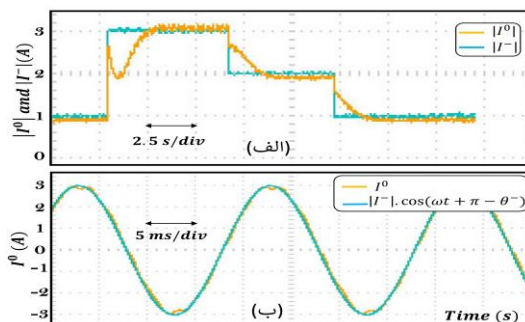
## مراجع

- [1] G. Adam, I. A. Abdelsalam, K. H. Ahmed, and B. W. Williams, "Hybrid multilevel converter with cascaded H-bridge cells for HVDC applications: Operating principle and scalability," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, pp. 65-77, 2014.
- [2] H. Choi, M. Ciobotaru, and V. G. Agelidis, "Cascaded H-bridge converter with multiphase isolated DC/DC converter for large-scale PV system," in 2014 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2014, pp. 455-461.
- [3] M. R. Nasiri, S. Farhangi, and J. Rodríguez, "Model predictive control of a multilevel CHB STATCOM in



شکل (۱۰): نتایج آزمایشگاهی در شرایط جبران سازی عدم تعادل ولتاژ شبکه: (الف) توان اکتیو هر فاز (ب) ولتاژ خازن های DC هر فاز، (ج) جریان میانگین عبوری از مبدل طبقه دوم هر فاز، (د) زوایای توان اصلاح شده

در لحظه  $t_2$  و با فعال سازی سیستم کنترلی و نیز اعمال زوایای توان اصلاحی مناسب به فازها، ولتاژهای DC کاملاً با یکدیگر برابر خواهند شد. با برابر شدن ولتاژهای DC، جریان های خروجی طبقه دوم نیز با یکدیگر تقریباً برابر می شوند. شکل (۱۰-د)، زوایای توان تولید شده جهت متعادل سازی ولتاژهای لینک DC و شارش توان را نشان می دهد. در لحظات  $t_3$  و  $t_4$ ، زاویه بردار توالی منفی به ترتیب به مقادیر  $\pi/6$  و  $5\pi/6$  تغییر می کند. نتایج نشان می دهند که سیستم کنترلی در نقاط کاری مختلف می تواند بخوبی ولتاژ خازن های DC را متعادل سازد. شکل (۱۱-الف)، عملکرد سیستم کنترلی در برابر تغییرات پله ای دامنه بردار توالی منفی را نشان می دهد. همچنین شکل (۱۱-ب)، مقادیرهای اندازه گیری شده جریان توالی صفر و جریان توالی صفر بدست آمده از رابطه (۹) را نشان می دهد. از این شکل ها پیداست که وقتی شارش توان اکتیو متعادل است، دامنه بردار جریان توالی صفر



شکل (۱۱): نتایج آزمایشگاهی در شرایط جبران سازی عدم تعادل ولتاژ شبکه: (الف) دامنه بردارهای جریان توالی منفی و صفر (ب): جریان توالی صفر اندازه گیری شده

- IECON 2015-41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2015, pp. 3081-3085.
- [19] X. Wang, J. Liu, S. Ouyang, T. Xu, F. Meng, and S. Song, "Control and experiment of an H-bridge-based three-phase three-stage modular power electronic transformer," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, pp. 2002-2011, 2015.
- [20] S. Salehahari and E. Babaei, "New coupled-inductor based multilevel inverter with extension capability," Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, vol. 15, pp. 61-71, 2019.
- [21] M. B. de Alvarenga and J. A. Pomilio, "Voltage balancing and commutation suppression in symmetrical cascade multilevel converters for power quality applications," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, pp. 5996-6003, 2014.
- [22] K. Ilves, L. Harnefors, S. Norrga, and H.-P. Nee, "Predictive sorting algorithm for modular multilevel converters minimizing the spread in the submodule capacitor voltages," IEEE Transactions on power electronics, vol. 30, pp. 440-449, 2014.
- [23] Z. Liu, B. Liu, S. Duan, and Y. Kang, "A novel DC capacitor voltage balance control method for cascade multilevel STATCOM," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, pp. 14-27, 2010.
- [24] Samimi M H, Davarpanah M. Mitigating Negative Sequence Current of Islanded Small Scale Synchronous Generator Using an Inverter-based Resource. Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers. 2018; 15 (1) :55-64.
- [25] Jia, Hongjie, Qian Xiao, and Jinwei He. "An improved grid current and DC capacitor voltage balancing method for three-terminal hybrid AC/DC microgrid." IEEE Transactions on Smart Grid 10.6 (2018): 5876-5888.
- [26] C. D. Townsend, Y. Yu, G. Konstantinou, and V. G. Agelidis, "Cascaded H-bridge multilevel PV topology for alleviation of per-phase power imbalances and reduction of second harmonic voltage ripple," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, pp. 5574-5586, 2015.
- [27] Vemuganti, Hari Priya, Dharmavarapu Sreenivasarao, and Ganjikunta Siva Kumar. "Zero-sequence voltage injected fault tolerant scheme for multiple open circuit faults in reduced switch count-based MLDCL inverter." IET Power Electronics 11.8 (2018): 1351-1364.
- [28] Y. Neyshabouri, S. K. Chaudhary, R. Teodorescu, R. Sajadi, and H. Iman-Eini, "Improving the Reactive Current Compensation Capability of Cascaded H-Bridge Based STATCOM under Unbalanced Grid Voltage," IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 8, pp. 1466-1476, 2019.
- [29] J.-J. Jung, J.-H. Lee, S.-K. Sul, G. T. Son, and Y.-H. Chung, "DC capacitor voltage balancing control for delta-connected cascaded H-bridge STATCOM considering unbalanced grid and load conditions," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 33, pp. 4726-4735, 2017.
- wind farm application using diophantine equations," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 66, pp. 1213-1223, 2018
- [4] Sarailoo A, Barakati S. "High Frequency Transformer Isolated Quasi Z-Source Cascade Multilevel Inverter" Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers. 2019; 16 (1) :119-131
- [5] L. G. Franquelo, J. Rodriguez, J. I. Leon, S. Kouro, R. Portillo, and M. A. Prats, "The age of multilevel converters arrives," IEEE industrial electronics magazine, vol. 2, pp. 28-39, 2008
- [6] J. Rodríguez, S. Bernet, B. Wu, J. O. Pontt, and S. Kouro, "Multilevel voltage-source-converter topologies for industrial medium-voltage drives," IEEE Transactions on industrial electronics, vol. 54, pp. 2930-2945, 2007.
- [7] W. McMurray, "Power converter circuits having a high frequency link," ed: Google Patents, 1970.
- [8] J. E. Huber and J. W. Kolar, "Applicability of solid-state transformers in today's and future distribution grids," IEEE Transactions on S. G., vol. 10, pp. 317-326, 2017.
- [9] A. A. Milani, M. T. A. Khan, A. Chakraborty, and I. Husain, "Equilibrium point analysis and power sharing methods for distribution systems driven by solid-state transformers," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 33, pp. 1473-1483, 2017.
- [10] S. A. Saleh, E. Ozkop, B. Alsayid, C. Richard, X. F. S. Onge, K. M. McDonald, et al., "Solid-State Transformers for Distribution Systems-Part II: Deployment Challenges," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 55, pp. 5708-5716, 2019.
- [11] S. A. Saleh, C. Richard, X. F. S. Onge, K. M. McDonald, E. Ozkop, L. Chang, et al., "Solid-State Transformers for Distribution Systems-Part I: Technology and Construction," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 55, pp. 4524-4535, 2019.
- [12] C. Tu, F. Xiao, Z. Lan, Q. Guo, and Z. Shuai, "Analysis and Control of a Novel Modular-Based Energy Router for DC Microgrid Cluster," IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 7, 2018.
- [13] X. She, A. Q. Huang, and R. Burgos, "Review of solid-state transformer technologies and their application in power distribution systems," IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics, vol. 1, 201.
- [14] A. Abu-Siada, J. Budiri, and A. F. Abdou, "Solid state transformers topologies, controllers, and applications: State-of-the-art literature review," Electronics, vol. 7, p. 298, 2018.
- [15] H. S. Krishnamoorthy, P. N. Enjeti, and J. J. Sandoval, "Solid-State Transformer for Grid Interface of High-Power Multipulse Rectifiers," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 54, pp. 5504-5511, 2017.
- [16] M. Babaei, R. Ghandehari, and M. Asadi, "Voltage Unbalance Compensation Based on Optimal Current Injection by SSTs," IEEE Transactions on Industrial Electronics, DOI: 10.1109/TIE.2020.3038098, 2020.
- [17] N. Verma, N. Singh, S. Yadav, and S. Gupta, "Reactive Power Compensation of Solid State Transformer for WECS," in 2018 2nd International Conference on Electronics, Materials Engineering & Nano-Technology (IEMENTech), 2018, pp. 1-6.
- [18] J. Wang, B. Gu, Q. Duan, C. Ma, B. Ji, and J. You, "Control strategy of solid state power electronic transformer under voltage disturbance conditions," in

## زیر نویس ها

<sup>1</sup> High Voltage DC

<sup>2</sup> Power Electronic Transformer

<sup>3</sup> Solid-State Transformer

<sup>4</sup> Flexible AC transmission system

---

<sup>5</sup> Cascaded H-Bridge

<sup>6</sup> Point of Common Point of common coupling

<sup>7</sup> Static Synchronous Compensator

<sup>8</sup> Phase-Locked Loop

<sup>9</sup> proportional-integral