

حذف جریان مؤلفه منفی ژنراتور سنکرون مقیاس کوچک در حالت کارکرد جزیره‌ای به کمک مولد با واسط اینورتری

محمد حامد صمیمی **مهندی داورپناه**

۱- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران- تهران - ایران
m.h.samimi@ut.ac.ir

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران
m.davarpanah@ut.ac.ir

چکیده: یکی از ویژگی‌های ذاتی شبکه‌های توزیع، عدم تعادل بار است که در ریزشبکه جزیره‌ای، باعث عبور جریان مؤلفه منفی از ژنراتور سنکرون شده و افزایش دمای استاتاتور و بهویژه روتور آن را به دنبال دارد. در چنین شرایطی ممکن است نتوان ژنراتور سنکرون را در نزدیکی نقطه کار نامی بهره‌برداری کرد. برای حل مشکل مذکور، در این مقاله پیشنهاد شده است که از یک اینورتر منبع ولتاژ، به صورت موازی با ژنراتور سنکرون استفاده شود. در این روش، مؤلفه منفی توان راکتیو موجود در ریزشبکه اندازه‌گیری شده و کنترل کننده‌های تشديدي در فضای $\alpha\beta\gamma$ ، ولتاژ خروجی اینورتر را به گونه‌ای تغییر می‌دهند که با تولید جریان مؤلفه منفی، ولتاژ دو سر ژنراتور سنکرون را تا حد امکان متعادل کند. مطالعات انجام‌شده در این مقاله نشان می‌دهد که در روش پیشنهادی، مولد اینورتری قادر است به سرعت و به نحو موثری عدم تعادل بار در شبکه توزیع را جبران نماید. بنابراین جریان خروجی ژنراتور سنکرون نیز تا حد مطلوبی متعادل شده و درنتیجه احتیاجی به محدود کردن توان خروجی ژنراتور سنکرون، برای تحمل جریان مؤلفه منفی توسط آن نیست. ضمناً نیاز به افزایش ظرفیت ژنراتور سنکرون برای کار در شرایط بار نامتعادل نیز مرتفع می‌شود. بنابراین، می‌توان از ژنراتورهای سنکرون نیز در حالت عدم تعادل بار در ریزشبکه‌های جزیره‌ای استفاده نمود.

کلمات کلیدی: اینورتر منبع ولتاژ، جبران نامتعادلی بار، ریزشبکه، ژنراتور سنکرون مقیاس کوچک، کارکرد جزیره‌ای

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۲/۲۷

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱/۲۸

نام نویسنده‌ی مسئول: مهندی داورپناه

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - خیابان کارگر شمالی - بالاتر از تقاطع جلال آل احمد - پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران -

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر



۱- مقدمه

[۷]. بنابراین نمی‌توان از ژنراتور سنکرون در ریزشبکه‌ای استفاده نمود که بار آن بهشدت نامتعادل است.

جبران عدم تعادل ولتاژ معمولاً توسط فیلترهای فعال سری و با تزریق ولتاژ مؤلفه منفی به صورت سری با خط انجام می‌شود [۸]. برخی روش‌ها نیز بر پایه جبران‌سازی موازی استوار است [۹، ۱۰] که در آن، جبران‌سازی توسط متعادل کردن جریان خط انجام می‌شود. در این روش‌ها در حالت‌های شدید عدم تعادل بار، جریان تزریقی فیلتر فعال می‌تواند بسیار بالا باشد و گاهی لازم است از مقدار نامی فیلتر فراتر رود تا جبران سازی مطلوب حاصل شود. در [۱۱] روشی پیشنهاد شده است که در آن تعادل ولتاژ توسط دو فیلتر یکی با اتصال موازی و دیگری به صورت سری انجام می‌شود. در این روش، فیلتر موازی توان اکتیو و راکتیو را کنترل می‌کند و فیلتر سری جریان خطوط را متعادل می‌کند، اما در این روش به دو اینورتر نیاز است که هزینه را افزایش می‌دهد. مرجع [۱۲] از یک اینورتر به منظور کنترل مؤلفه منفی توان راکتیو استفاده می‌کند اما روش کنترلی به صورتی است که بایستی مصالحه‌ای بین تعادل ولتاژ و تنظیم ولتاژ انجام شود.

یک روش دیگر برای حل این مشکل، اتصال مولد سنکرون به ریزشبکه از طریق واسطه اینورتری است [۱۳] که مزایای متعددی از قبیل موارد زیر دارد:

- عبور جریان مؤلفه مثبت از ژنراتور سنکرون، حتی در حالت عدم تعادل شدید بار در ریزشبکه، و درنتیجه حل مشکل اضافه دمای ناشی از جریان مؤلفه منفی
- دینامیک سریع اینورتر (بهویزه در تأمین توان راکتیو بار) [۷]
- بهبود برخی شاخص‌های کیفیت توان نظیر فرورفتگی ولتاژ [۱۴]
- محدود کردن مشارکت مولد در جریان اتصال کوتاه ریزشبکه که در حالت کارکرد متصصل به شبکه بالادست، اهمیت زیادی دارد [۴]

ولی با این کار، لازم است اینورتری تهیه شود که توان نامی آن برابر یا بزرگتر از توان نامی ظاهری مولد سنکرون باشد که هزینه زیادی را در پی دارد. به علاوه مولد اینورتری معمولاً باعث کاهش برخی شاخص‌های کیفیت توان، مثلاً به دلیل تزریق هارمونیک‌های ولتاژ و جریان به شبکه می‌شود. از این‌رو، فقط اتصال مستقیم مولد سنکرون با موتور پیستونی به شبکه توزیع، در کشور موردو توجه قرار گرفته است. درنتیجه بایستی در وضعیت موجود شبکه ایران، روش مناسبی برای تأمین جریان مؤلفه منفی بار ارائه شود.

نکته قابل توجه این است که ژنراتور سنکرون قابلیت تحمل مقدار نسبتاً کمی از جریان مؤلفه منفی را دارد. این در حالی است که یک مبدل اینورتری قادر است تا ظرفیت نامی خود، جریان مؤلفه منفی به شبکه تزریق کند [۱۵]. از این‌رو با به کارگیری یک مبدل اینورتری که ظرفیت آن مناسب با جریان مؤلفه منفی معمول در شبکه باشد، می‌توان ژنراتور سنکرون را در نقطه کار نامی بهره‌برداری کرد. از سوی دیگر، معمولاً عدم تعادل بار در شبکه، بخش کوچکی از جریان است و

افزایش قابلیت اطمینان در تغذیه بارهای الکتریکی یکی از الزامات شبکه‌های برق امروزی تلقی می‌شود. استفاده از منابع تولید پراکنده علاوه بر سایر مزایا از نظر بهبود قابلیت اطمینان شبکه نیز اهمیت زیادی دارد، بهنحوی که می‌توان حتی در صورت از دست رفتن شبکه اصلی، بخشی از بار موجود در ریزشبکه و یا تمام آن را در حالت جزیره‌ای تغذیه کرد [۱۶].

به هنگام قطع اتصال از شبکه سراسری و یا برقی در شبکه، می‌توان کلید محل مشترک اتصال (PCC) را باز نموده و یک ریزشبکه جزیره‌ای مشتمل بر بارهای الکتریکی و مولدهای مقیاس کوچک تشکیل داد. در این ریزشبکه باید کنترل ولتاژ و فرانس توسعه مولدهای مقیاس کوچک صورت پذیرد. نکته قابل توجه این است که بار شبکه توزیع ذاتاً نامتعادل بوده و درنتیجه جریان عبوری از مولدها و همچنین ولتاژ دو سر مولدها، مقداری مؤلفه منفی خواهد داشت [۳]. در بسیاری از کشورها، از منابع منابع تولید پراکنده نظیر مولدهای بادی و خورشیدی به عنوان منابع تولید پراکنده استفاده می‌شود. در این مولدها معمولاً یک واسطه اینورتری برای اتصال مولد به شبکه توزیع به کار گرفته می‌شود [۴]. به عنوان نمونه در توربین بادی نوع ۴، از یک مبدل AC/DC/AC (شامل یک سوساز AC/DC و اینورتر DC/AC) برای اتصال ژنراتور سنکرون توربین بادی به شبکه توزیع استفاده می‌شود [۴، ۵]. اینورتر DC/AC به تهایی (حتی در صورت قطع بدن محرک اولیه متصل به یک سوساز) قادر به تأمین توان راکتیو بار است. ضمناً در صورت به کارگیری کنترل کننده مناسب برای اینورتر، می‌توان توان راکتیو موردنیاز در هر فاز را به طور مستقل تأمین نمود و حتی تقسیم توان و جریان‌های هارمونیک را به نحو مطلوبی بین چند مولد با واسطه اینورتری انجام داد [۶].

تأمین توان اکتیو بار توسط اینورتر، باعث افت ولتاژ بس DC می‌شود. بنابراین با کنترل ولتاژ بس DC توسط یک سوساز متصل به محرک اولیه، می‌توان توان اکتیو بار را توسط اینورتر تأمین نمود. نکته قابل توجه این است که با به کارگیری سیستم کنترلی مناسب در اینورتر، می‌توان مؤلفه مثبت و منفی جریان اکتیو بار را نیز توسط اینورتر تأمین نمود. در این حالت، توان عبوری از محرک اولیه کاملاً متعادل بوده و مؤلفه منفی در آن وجود ندارد.

عمده مولدهای مقیاس کوچک متصل به شبکه توزیع ایران از نوع ژنراتورهای سنکرون با محرک اولیه از نوع موتور پیستونی (احتراق داخلی) هستند که همه این مولدها به صورت مستقیم و بدون واسطه اینورتری به شبکه توزیع متصل شده‌اند. بنابراین در صورت نامتعادل بودن بار ریزشبکه جزیره‌ای، جریان مؤلفه منفی از سیم پیچ استاتور ژنراتور سنکرون عبور می‌نماید. این جریان باعث تولید میدان گردان چپ‌گرد توسط استاتور می‌شود که برخلاف میدان گردان روتور است و درنتیجه می‌تواند باعث ایجاد اضافه دما در روتور ژنراتور سنکرون شود.

در صورت عبور جریان بار متعادل از ژنراتور سنکرون، فقط میدان گردان راست گرد توسط سیم پیچ سه فاز استاتور تولید می شود که سرعت و جهت آن، برابر با میدان گردان روتور است. در چنین حالتی، میدان متغیر با زمان از هسته روتور عبور نمی کند و درنتیجه تلفات فوکو و هیسترزیس در هسته روتور ایجاد نمی شود. از این رو هسته روتور در ماشین های سنکرون معمولاً به صورت مورق ساخته نمی شود.

میدان مغناطیسی گردان ناشی از جریان مؤلفه منفی عبوری از سیم پیچ استاتور، خلاف جهت چرخش روتور است که به آن میدان گردان چپ گرد گفته می شود. از آنجاکه سرعت نسبی روتور نسبت به میدان گردان چپ گرد، دو برابر سرعت روتور است، جریان گردابی با فرکانس معادل با دو برابر مقدار فرکانس شبکه در هسته روتور القاء می شود. در این حالت تلفات فوکو در هسته و همچنین سیم پیچ روتور به شدت افزایش یافته و باعث افزایش شدید دمای روتور می شود [۷].

در این شرایط ژنراتور سنکرون به صورت طولانی مدت قادر به ادامه کار نیست و باایستی پیش از افزایش دمای روتور از مقدار مجاز، ژنراتور را از مدار خارج نمود. به همین منظور در مراجع مختلف توصیه شده است که در صورت احتمال وجود بار نامتناصر در شبکه از رله عدم تعادل استفاده شود [۱۶، ۱۷]. این رله جریان مؤلفه منفی را اندازه می گیرد و بر اساس مشخصه عملکرد مرتبه، ژنراتور را از مدار خارج می کند. مشخصه عملکرد متداول برای واحد عدم تعادل جریان حفاظت ژنراتور در رابطه (۱) نشان داده شده است. [۱۷]

$$t = \frac{K_1}{\left(\frac{I_2}{I_{gn}} \right)^2 - K_2^2} \quad (1)$$

در این رابطه K_1 ضریب تأخیر، I_2 مقدار جریان مؤلفه منفی هارمونیک اصلی، I_{gn} جریان نامی ژنراتور است. ضمناً K_2 مقدار تنظیم جریان حد عملکرد رله (برحسب پریونیت) است که در ژنراتورهای مختلف برابر با ۵٪ تا ۱۰٪ جریان نامی ژنراتور در نظر گرفته می شود. به ازای جریان مؤلفه منفی کمتر از K_2 ، گرمای ایجاد شده ناشی از تلفات جریان گردابی در روتور توسط سیستم خنک کننده ژنراتور دفع می شود و درنتیجه دمای هسته و سیم پیچی روتور از حد مجاز تجاوز نمی کند. در جریان مؤلفه منفی بیش از K_2 مقدار گرمای تولید شده در روتور بیش از گرمایی دفع شده توسط سیستم خنک کننده ژنراتور است و دمای روتور افزایش پیدا می کند. در صورت ادامه این فرآیند، گرمایی تولید شده شروع به انباسته شدن کرده و سبب اضافه دمای روتور می شود. از سوی دیگر ضریب K_1 به ظرفیت حرارتی ژنراتور و نوع خنک سازی آن بستگی دارد. هر چه ظرفیت حرارتی روتور بیشتر باشد به ازای یک مقدار گرمای تولید شده ناشی از عدم تعادل جریان، اضافه دمای روتور کمتر خواهد بود و درنتیجه ژنراتور مدت زمان بیشتری می تواند جریان نامتعادل را تحمل کند. بنابراین هر چه ظرفیت حرارتی روتور بزرگ تر باشد زمان عملکرد رله افزایش می یابد. در این حالت باایستی از ضریب K_1 بزرگ تری استفاده شود. برای ژنراتورهایی که به صورت طبیعی خنک

درنتیجه به کمک یک مولد اینورتری با توان به مرتب کمتر از ژنراتور سنکرون می توان تعادل ولتاژ در شبکه را تأمین کرد.

روش ارائه شده در این مقاله تغییر مستقیم ولتاژ مرجع برای جبران سازی را ارائه می کند که برخلاف مقاولات قابلی، در فضای ساکن آن انجام می شود و در نتیجه سیستم کنترلی بهتر می تواند عدم تعادل را مرتفع سازد. در این مقاله عملکرد اینورتر در کنار یک ژنراتور سنکرون با هدف امکان ادامه کار ژنراتور مد نظر بوده است و نشان داده شده که اینورتر هم در تامین توان مشارکت می کند و هم ولتاژ شبکه را متعادل می کند. ضمناً برای پیاده سازی روش پیشنهادی، تنها به یک مولد اینورتری با توان به مرتاب کمتر از ژنراتور سنکرون احتیاج است که می تواند واسطه اینورتری بكاررفته در مولدهای خورشیدی یا بادی باشد.

در این مولد اینورتری از کنترل کننده مناسبی استفاده شده است که توسط آن بتوان جریان مؤلفه منفی مورد نیاز شبکه را تأمین نموده و عدم تعادل ولتاژ در شبکه را جبران کرد. با این روش، کافی است که ژنراتور سنکرون جریان مؤلفه منفی مثبت مورد نیاز شبکه را تأمین نموده و در صورت نیاز، در مرز مقدار مجاز جریان مؤلفه منفی، کار کند. به این ترتیب مشکل اضافه دمای روتور نیز برطرف شده و نیازی به خروج ناخواسته مولد یا کاهش توان آن به دلیل جریان مؤلفه منفی بار نامتعادل نیست. به علاوه سیستم کنترل به کاررفته در شبکه موردمطالعه به گونه ای طراحی و پیاده سازی شده است که در صورت وجود چندین واسطه اینورتری در نقاط مختلف ریز شبکه، بدون نیاز به لینک مخابراتی، اینورترها قادر به جبران عدم تعادل بار و تقسیم متناسب آن باشند [۲].

در این مقاله ابتدا در مورد تحمل ژنراتور سنکرون در مقابل جریان نامتعادل و تنظیمات رله جریان مؤلفه منفی که برای حفاظت ژنراتور لازم است بحث می شود. سپس ساختار اینورتر و کنترل کننده معرفی شده و قسمت های مختلف آن مورد مطالعه قرار می گیرد. بخش های مختلف سیستم کنترل به تفکیک معرفی شده و نیازمندی و نقش هر قسمت تبیین می شود. سپس نحوه طراحی پارامترهای کنترل کننده، به طور خلاصه توضیح داده می شود. پس از طراحی کنترل کننده، عملکرد سیستم مورد مطالعه در حالت وجود عدم تعادل بار در ریز شبکه مورد بررسی قرار می گیرد.

۲- تحمل جریان نامتعادل در ژنراتور سنکرون

عدم تعادل جریان می تواند به استاتور و به ویژه به روتور یک ژنراتور سنکرون آسیب بزند. عدم تعادل جریان سبب توزیع غیرمساوی جریان در سیم پیچی سه فاز استاتور شده و می تواند منجر به اضافه جریان در یکی از فازها شود. درنتیجه سیم پیچی آن فاز متتحمل اضافه دمایی خواهد شد. از این رو لازم است که یک رله به صورت مجزا استاتور را در برابر اضافه بار و جریان نامتعادل حفاظت کند.

فضای $\alpha\beta\gamma$ و با کنترل کننده‌های تشیدی سیستم کنترلی مقاومتی حاصل می‌شود [۲۰].

برای انتقال از فضای $dq0$ به $\alpha\beta\gamma$ می‌توان از تبدیل کلارک استفاده کرد [۱۸]. در سیستم نشان داده شده در شکل (۲) سیم نول وجود ندارد، درنتیجه سیستم قادر جریان مؤلفه صفر است. اگر در یک سیستم، مؤلفه صفر وجود نداشته باشد در فضای $\alpha\beta\gamma$ مؤلفه γ صفر می‌شود. بنابراین جریان فقط دارای مؤلفه α و β خواهد بود. از سوی دیگر به دلیل عدم امکان جاری شدن مؤلفه صفر جریان، مؤلفه صفر ولتاژ نیز قادر اهمیت است و درنتیجه طراحی فقط برای مبنای α و β انجام شده است. ماتریس‌های تبدیل استفاده شده به صورت زیر

می‌باشند:

$$x_{\alpha\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \times x_{abc}. \quad (2)$$

$$x_{abc} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \times x_{\alpha\beta}. \quad (3)$$

سیستم کنترلی نشان داده شده در شکل (۲) دارای قسمت‌های مختلفی است که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۳- محاسبه توان

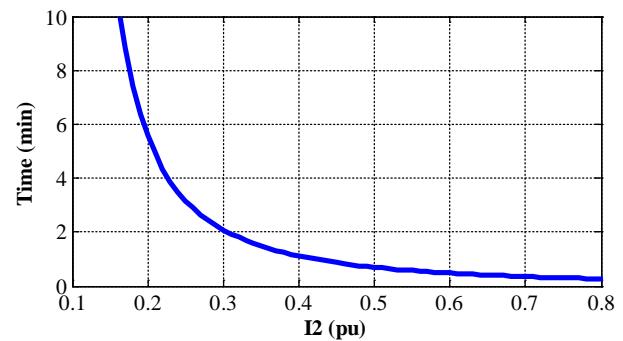
در سیستم کنترلی، جریان و ولتاژ خروجی اینورتر در محل اتصال به شبکه اندازه‌گیری می‌شود و توان‌های مختلف بر اساس آن محاسبه می‌شود. ابتدا جریان‌ها از سه‌فاز به حوزه $\alpha\beta\gamma$ منتقل می‌شود. سپس در این حوزه مؤلفه‌های مثبت و منفی جریان و ولتاژ در هر یک از محورهای α و β جدا می‌شود و مؤلفه‌های توالی مثبت و منفی به صورت بالادرنگ محاسبه می‌شوند [۲۱، ۲۲]. بنابراین مشکل روش‌هایی نظری الگوریتم فوریه که در آن محاسبه مؤلفه‌های توالی مثبت و منفی نیازمند در نظر گرفتن تأخیر زمانی حدود یک سیکل است، وجود ندارد. پس از استخراج مؤلفه‌های مثبت و منفی می‌توان توان اکتیو و راکتیو را بر اساس آن محاسبه کرد. رابطه کلی برای p و q در محیط $\alpha\beta\gamma$ به صورت زیر است:

$$p = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta \quad (4)$$

$$q = v_\alpha i_\beta - v_\beta i_\alpha \quad (5)$$

می‌شوند، مقدار K_1 عدد بزرگی است اما برای ژنراتورهای بزرگ که از آب یا هیدروژن برای خنکسازی استفاده می‌شود، این عدد معمولاً کوچک است. ضریب K_1 برای ژنراتورهای سنکرون مقیاس کوچک مقداری در حدود ۱۰ دارد.

شکل (۱) منحنی عملکرد رله عدم تعادل بار را به ازای مقدارهای معمول داده شده در بالا نشان می‌دهد. در صورتی که مؤلفه منفی جریان کشیده شده از ژنراتور از حد عملکرد رله بیشتر شود، با گذشت زمانی که در منحنی شکل (۱) مشخص شده است، رله فرمان قطع را صادر کرده و ژنراتور را حفاظت می‌کند. از این‌رو ژنراتور بیش از مدت زمان کوتاهی، قادر به عبور جریان نامتعادل نیست.

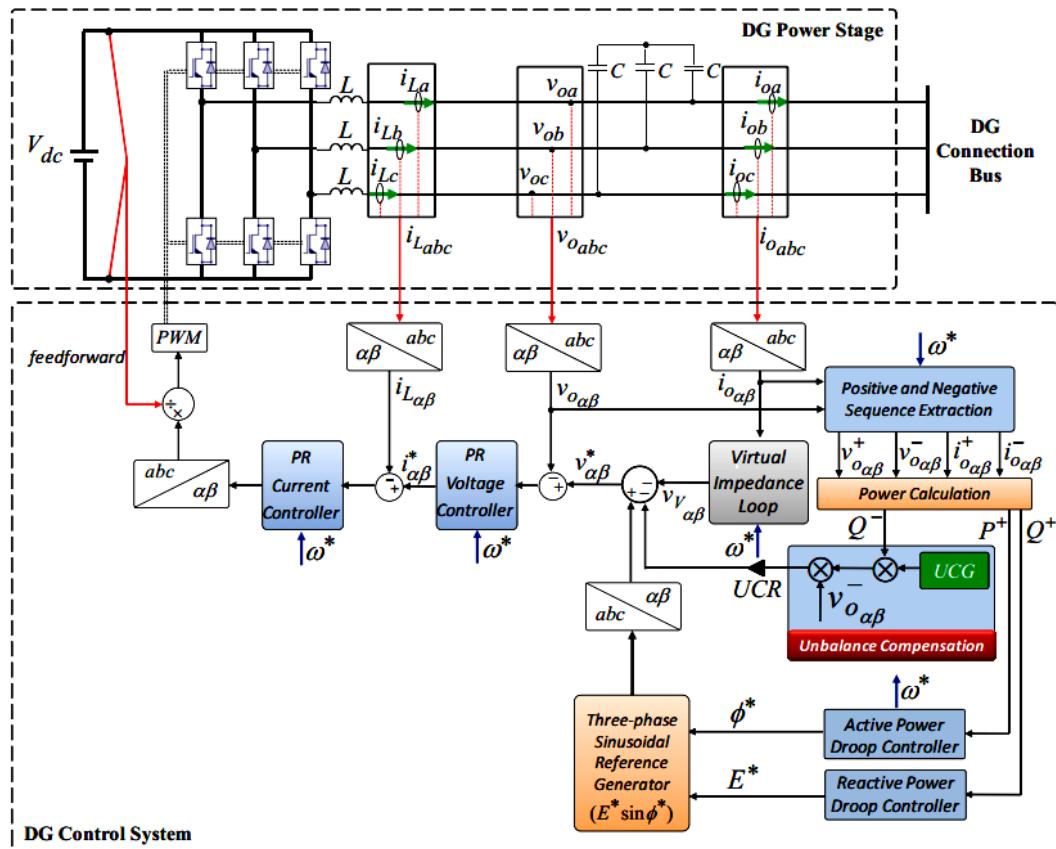


شکل (۱): منحنی جریان-زمان عملکرد رله عدم تعادل جریان ژنراتور به منظور افزایش کارایی ژنراتور سنکرون مقیاس کوچک و جلوگیری از خروج آن به دلیل عبور جریان مؤلفه منفی بزرگ، در این مقاله توصیه شده است که در شبکه توزیع با بار نامقابله از مولد اینورتری نیز به همراه ژنراتور سنکرون استفاده شود تا در تأمین جریان مؤلفه منفی سیستم مشارکت نماید. در ادامه به معرفی مولد اینورتری و سیستم کنترلی مربوطه به منظور تحقق این هدف، پرداخته می‌شود.

۳- اینورتر و کنترل کننده

شکل (۲) نحوه اتصال اینورتر منبع ولتاژ به شبکه جزیره‌ای را نشان می‌دهد [۱۸]. در خروجی اینورتر از یک فیلتر LC با فرکانس قطع تقریبی 350 Hz استفاده شده است که هارمونیک‌های ولتاژ را میرا می‌کند. باس DC اینورتر به یک باتری متصل شده است که قابلیت شارژ و دشارژ دارد.

شکل (۲) همچنین سیستم کنترلی اینورتر را نشان می‌دهد. در اینجا سیستم کنترل در فضای $\alpha\beta\gamma$ پیاده‌سازی شده است. سیستم $dq0$ دارای دو محور است که بر روی استاتور قرار دارد و برخلاف فضای $\alpha\beta\gamma$ این محورها ثابت هستند. درنتیجه تصویر یک سیستم سه‌فاز در این دو محور یک سیستم دوفاز است، یعنی یک ولتاژ سینوسی و یک ولتاژ کسینوسی. کنترل در فضای $dq0$ نیز قابل انجام است [۱۹] اما در



شکل (۲): نحوه اتصال اینورتر به شبکه و سیستم کنترل آن

سرعت بالای اینورتر و سیستم کنترل آن سبب می‌شود تا کنترل کننده حتی به اغتشاشات سریع در شبکه که لزومی به دخالت منبع ندارد، پاسخ دهد. برای حل این مشکل می‌توان از یک فیلتر در خروجی استفاده نمود. تأخیر ناشی از این فیلتر باعث ایجاد یک اینرسی مجازی برای اینورتر می‌شود. این اینرسی سبب می‌شود که اینورتر به چنین اغتشاشات سریعی در شبکه پاسخ ندهد [۲۳]. در این مقاله از چنین فیلتر پایین گذری استفاده می‌شود که تابع تبدیل آن در رابطه (۶) نشان داده شده است.

$$LPF(s) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \quad (6)$$

در این مقاله مقدار ω_c برابر 0.1 Rad/sec قرار داده شده است اما تا چندین رادیان بر ثانیه نیز می‌تواند افزایش پیدا کند.

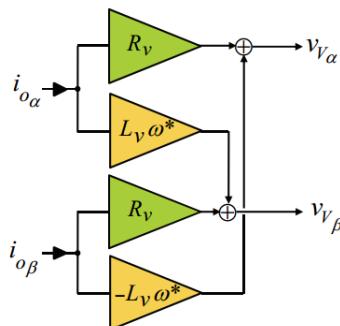
۲-۳- کنترل توان اکتیو و راکتیو

مولد اینورتری موردنبررسی در این مقاله بر اساس کنترل توان اکتیو و راکتیو مؤلفه مثبت عمل می‌کند و بر اساس آن، مرجع اصلی ولتاژ خروجی اینورتر تولید شود.

فیلتر خروجی اینورتر هارمونیک‌های ولتاژ و جریان را به طور کامل حذف نمی‌کند و لذا مقادیر به دست آمده در حوزه $\alpha\beta\gamma$ دارای نوسانات اضافی است که به صورت ریپل با فرکانس دو برابر در شکل موج توان اکتیو و راکتیو تخمینی، دیده می‌شود. وجود این ریپل‌ها سیستم کنترل را دچار مشکل می‌کند لذا نیاز به یک فیلتر پایین‌گذر است تا فقط مقدار اصلی توان‌ها به خروجی منتقل شود. روش دیگر برای حذف ریپل توان اکتیو و راکتیو در مواجهه با ولتاژ و یا جریان مؤلفه منفی سیستم این است که توان مؤلفه مثبت و منفی به طور مجزا محاسبه شود. برای محاسبه توان اکتیو و راکتیو مؤلفه مثبت می‌توان بجای ولتاژها و جریان‌های نشان داده شده در رابطه (۴) و (۵)، از مؤلفه‌های مثبت آن‌ها در حوزه $\alpha\beta\gamma$ استفاده نمود. ضمناً به طریق مشابه، بایستی توان اکتیو و راکتیو مؤلفه منفی را نیز محاسبه نمود. با این روش، توان‌های به دست آمده به صورت یک مقدار DC در آمده و نیازی به استفاده از فیلتر پایین‌گذر وجود ندارد. کاربرد توان‌های مؤلفه مثبت و منفی به صورت زیر است. توان اکتیو و راکتیو مؤلفه مثبت در منطقه کنترلی افت فرکانس و ولتاژ مورد استفاده قرار می‌گیرد در حالی که از توان راکتیو مؤلفه منفی محاسبه شده، به منظور جبران سازی مؤلفه منفی جریان بار شبکه توسط مبدل اینورتری استفاده می‌شود.

خطوط را کاهش می‌دهد. بعلاوه راکتانس سلفی دیده شده از ترمینال اینورتر را در سیستم کنترلی حلقه بسته افزایش می‌دهد. در این حالت توان اکتیو عمدها به اختلاف زاویه ولتاژها E و V وابسته بوده و توان راکتیو غالباً به اختلاف دامنه این ولتاژها بستگی پیدا می‌کند. بنابراین می‌توان توان اکتیو و راکتیو خروجی اینورتر را به صورت مستقل کنترل نمود.

شکل (۳) حلقه امپدانس مجازی را نشان می‌دهد. مقادیر R_v و L_v بیانگر مقاومت و سلف مجازی هستند که در مرحله طراحی کنترل کننده باید تعیین شود.



شکل (۳): حلقه امپدانس مجازی [۱]

۳-۴- جبران عدم تعادل ولتاژ

همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، پس از تولید مرجع ولتاژ خروجی اینورتر، دو مقدار از آن کسر می‌شود و سپس خروجی آن به کنترل کننده داده می‌شود. یکی از این مقادیر، خروجی حلقه امپدانس مجازی است و دیگری مربوط به قسمت جبران عدم تعادل ولتاژ است.

در قسمت جبران عدم تعادل ولتاژ، یک بهره با نام UCG در توان راکتیو مؤلفه منفی ضرب شده است که بهمنظور بهبود پایداری سیستم کنترلی مورد استفاده قرار می‌گیرد و مقدار آن در هنگام طراحی سیستم کنترل با روش مکان هندسی ریشه‌ها تعیین می‌شود. هر چه مقدار آن بزرگ‌تر باشد مقدار مؤلفه منفی کمتری در سیستم باقی خواهد ماند، اما از سوی دیگر انتخاب مقادیر بزرگ سبب افزایش ناپایداری سیستم می‌شود و درنتیجه باید مصالحه‌ای برای انتخاب آن صورت گیرد.

درصورتی که چند اینورتر در سیستم بکار رود، بهتر است که کلیه اینورترها در جبران عدم تعادل ولتاژ سیستم مشارکت نمایند. روش متداول برای تحقق این نیازمندی، ایجاد ارتباط بین مبدل‌های اینورتری با کمک بستر مخابراتی مناسب است [۲۵]. در این مقاله از روش محلی برای تقسیم توان مؤلفه منفی بار بین اینورترها استفاده شده است تا نیازمندی به بستر مخابرات مرتفع شود [۲].

درصورتی که ولتاژ خروجی اینورتر قبل از فیلتر برابر φ و ولتاژ محل اتصال به شبکه برابر $0V$ در نظر گرفته شود، می‌توان رابطه توان اکتیو و راکتیو تزییقی به شبکه را بر حسب امپدانس فیلتر نوشت. با فرض اینکه امپدانس خروجی اینورتر تقریباً سلفی و برابر X باشد، رابطه زیر برقرار است:

$$P^+ = 3 \frac{E.V}{X} \sin \varphi, \quad (7)$$

$$Q^+ = 3 \frac{E.V \cos \varphi - V^2}{X}. \quad (8)$$

در عمل زاویه φ معمولاً مقدار کوچکی دارد، لذا می‌توان فرض کرد که $\sin \varphi = \varphi$ و $\cos \varphi = 1$ است. در این صورت می‌توان P و Q را بر اساس روابط زیر تعیین نمود:

$$P^+ = 3 \frac{E.V}{X} \varphi, \quad (9)$$

$$Q^+ = 3 \frac{V}{X} (E - V). \quad (10)$$

برای اینورتر مورد بررسی، کنترل توان اکتیو و راکتیو از طریق کنترل افت انجام می‌شود. برای کنترل افت فرکانس و ولتاژ به ترتیب از رابطه (۱۱) و (۱۲) استفاده شده است.

$$\phi^* = \phi_0 - (m_p P^+ + m_I \int P^+ dt), \quad (11)$$

$$E^* = E_0 - n_p Q^+. \quad (12)$$

در روابط فوق E_0 دامنه ولتاژ نامی و $\phi_0 = \int \omega_0 dt = \omega_0 t$ زاویه فاز نامی است که در آن ω_0 سرعت زاویه‌ای نامی می‌باشد. m_I ، m_p و n_p به ترتیب ضرایب تنسیوی و مشتقه‌گیر توان اکتیو و ضریب تنسیوی و توان راکتیو می‌باشند. E^* و ϕ^* به ترتیب مراجع دامنه و زاویه هستند. به عبارت دیگر، مطابق شکل (۲) با استفاده از E^* و ϕ^* یک مرجع سده‌فاز ساخته شده و سپس به حوزه $a\beta\gamma$ منتقل می‌گردد.

۳-۳- حلقه امپدانس مجازی

عملکرد کنترل کننده افت به امپدانس خروجی اینورتر و امپدانس خط وابسته است و این در حالی است که امپدانس خروجی اینورتر متغیر است. مشکل دیگر در کنترل کننده، کم بودن میرایی سیستم است که برای افزایش آن می‌توان یک مقاومت واقعی به سیستم اضافه کرد، ولی افزودن مقاومت به سیستم با تلفات اضافی همراه است.

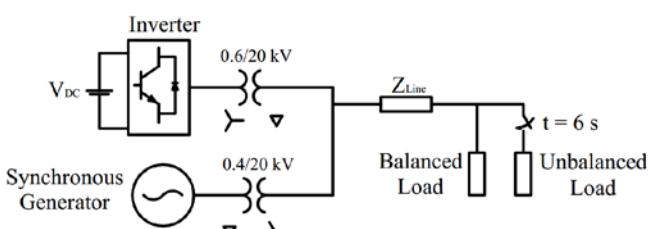
با کمک حلقه امپدانس مجازی، از یک سو می‌توان بدون افزایش تلفات، مقدار میرایی سیستم را افزایش داد [۲۶] و از سوی دیگر با ایجاد یک سلف مجازی می‌توان امپدانس خروجی اینورتر را ثابت کرد. به عبارت دیگر، حلقه امپدانس مجازی تأثیر عدم مقاینه امپدانس‌های

طراحی کنترل کننده بر اساس سیستم حلقه بسته معادل انجام می‌شود که در این سیستم، مقدار مطلوب ولتاژ و فاز به ورودی داده می‌شود و کنترل کننده‌ها به گونه‌ای طراحی می‌شود که خروجی سیستم، ورودی آن را دنبال نماید. برای این منظور تابع تبدیل سیستم که خروجی را به ورودی مرتبط می‌کند، در دیاگرام bode ترسیم می‌شود. سپس ضرایب کنترل کننده‌های تشیدیدی به صورتی انتخاب می‌شوند که ولتاژ خروجی برابر با مقدار مرجع در فرکانس ۵۰ Hz شود. برای این کار مقدار تابع تبدیل در دیاگرام bode و در فرکانس ۵۰ Hz باید دارای مقدار دامنه ۱ و فاز صفر باشد. در این فرکانس مقدار امپدانس نیز باید به گونه‌ای تنظیم شود که برای سیستم مطلوب باشد. توسط این روش می‌توان پارامترهای کنترل کننده‌ها و حلقه امپدانس مجازی را تعیین کرد.

تا این مرحله، قسمت جبران عدم تعادل ولتاژ نادیده گرفته شده است. برای تعیین مقدار UCG نیز می‌توان تحلیل سیگنال کوچک سیستم را انجام داد و از روی تابع تبدیل سیگنال کوچک، قطب‌ها را تعیین کرد. مقدار UCG باید به گونه‌ای انتخاب شود که مقدار مؤلفه منفی به زیر مقدار مطلوب کاهش یابد و از سوی دیگر باعث ناپایداری سیستم نشود. برای جزئیات بیشتر طراحی کنترل کننده می‌توان به مرجع [۱۸] مراجعه کرد.

۴- شبیه‌سازی سیستم مورد مطالعه

شکل (۴) تصویر سیستم شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. این سیستم مشتمل بر یک مولد اینورتری است که از طریق یک ترانسفورماتور با ژنراتور سنکرون موازی شده است. سپس هر دو منبع از طریق یک خط به دو بار متصل شده‌اند. یکی از بارها متقارن و همیشه در مدار است. بار دوم یک بار نامتقارن است که دارای مقاومت ۱۰۰ اهم بوده و بین دو فاز متصل شده است و در لحظه برابر ۶ s وارد مدار می‌شود. در این سیستم ظرفیت اینورتر برابر ظرفیت ژنراتور سنکرون در نظر گرفته شده است. سیستم کنترل اینورتر به صورت کنترل P با افت فرکانسی و کنترل Q با افت ولتاژی است. ضمناً ژنراتور سنکرون در وضعیت کنترول ولتاژ و کنترل فرکانس قرار دارد.



شکل (۴): سیستم شبیه‌سازی شده

شکل (۵) ساختار کنترل کننده فرکانس را در ژنراتور سنکرون نشان می‌دهد. کنترل سیستم صفر شدن خطای پیش از آن می‌شود. درنتیجه در صورت کفايت توان نامی ژنراتور، مقدار فرکانس شبکه همواره توسط ژنراتور سنکرون برابر با مقدار نامی تنظیم خواهد شد.

۵- کنترل کننده تشیدیدی

ولتاژهای مرجع محاسبه شده در مرحله قبل با ولتاژهای اندازه‌گیری شده مقایسه می‌شوند تا مقدار خطای آن‌ها تعیین شده و به یک کنترل کننده تشیدیدی وارد شوند. خروجی کنترل کننده تشیدیدی به عنوان سیگنال مرجع برای جریان اینورتر در نظر گرفته شده است. پس از کسر آن از جریان خروجی اینورتر، خطای مربوطه محاسبه شده و به کنترل کننده تشیدیدی دیگری داده می‌شود. خروجی این کنترل کننده به عنوان ولتاژهای مرجع برای تولید سیگنال‌های PWM مربوط به کلیدهای الکترونیک قدرت مورد استفاده قرار می‌گیرد.

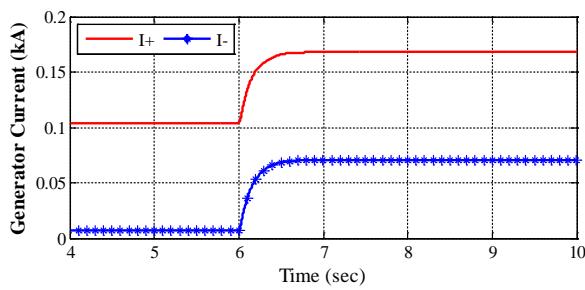
کنترل کننده تشیدیدی به صورت رابطه (۱۳) پیدا شده است. در این رابطه k_p ثابت تناسی و k_r ثابت تشیدید و ω^* مقدار فرکانس زاویه‌ای سیستم است که توسط کنترل کننده افت تولید می‌شود.

$$G(s) = k_p + \frac{k_r s}{s^2 + (\omega^*)^2}, \quad (13)$$

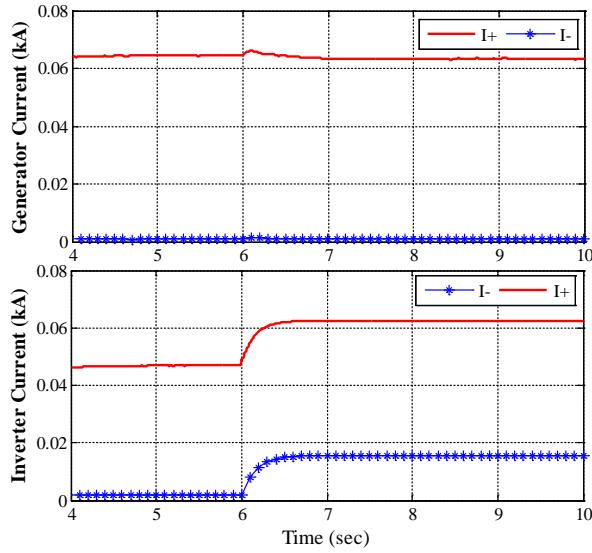
جدول (۱) پارامترهای الکتریکی و کنترلی سیستم شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. برای طراحی سیستم کنترل و محاسبه این مقادیر ابتدا لازم است تا مدل ریاضی بخش‌های مختلف سیستم (نظیر اینورتر و فیلتر آنالوگ) استخراج شده و سیستم حلقه بسته به صورت یک بلوک دیاگرام نمایش داده شود تا بتوان بر اساس آن، تابع تبدیل سیستم حلقه بسته را استخراج نمود. در این رابطه، فیلتر آنالوگ با استفاده از تبدیل لاپلاس به فضای معادل تبدیل شده و اینورتر با صرف نظر از تأخیر آن به صورت مقدار ثابت برابر ۱ مدل شده است. ورودی سیستم حلقه بسته معادل، ولتاژ مرجع ساخته شده $v_{\alpha\beta\gamma}^*$ و خروجی آن، $v_{o\alpha\beta\gamma}$ (ولتاژ خروجی اینورتر) است. ضمناً از پارامتر $i_{o\alpha\beta\gamma}$ (جریان خروجی اینورتر) نیز به عنوان فیدبک استفاده شده است. درنتیجه معادله سیستم را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد. یک بخش ولتاژ خروجی را به ولتاژ مرجع مرتبط می‌کند که تابع تبدیل سیستم است. قسمت دیگر ولتاژ خروجی را به جریان خروجی مرتبط می‌کند و معادل امپدانس خروجی سیستم است.

جدول (۱): مشخصات الکتریکی و کنترلی سیستم شبیه‌سازی شده

Power Controllers					Virtual Impedance			
m_p	m_I	n_p	E_0	ω_0	$R_v(\Omega)$	$L_v(mH)$		
0.0001	0.001	0.18	330	$2\pi.50$	1	8		
Voltage Controller		Current Controller			Unbalance Compensator			
k_{pv}	k_{rv}	k_{pI}	k_{rI}	UCG				
0.35	25	0.7	500	1.5				
Electrical System Parameters								
$V_{DC}(V)$	$L(mH)$	$C(\mu F)$	$L_{line}(mH)$	$Z_{Load}(\Omega)$				
650	1.8	250	360	100k				



شکل (۶) مؤلفه‌های جریان خروجی ژنراتور بدون اینورتر منبع ولتاژ



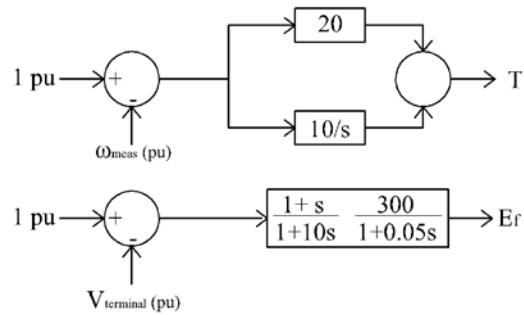
شکل (۷) شکل موج جریان خروجی ژنراتور سنکرون و اینورتر

درنتیجه بر مبنای ترکیب ژنراتور سنکرون و مولد با واسط اینورتری بر اساس کنترل کننده پیشنهادی، نه تنها در صورت وجود عدم تقاضا بار شبکه نیازی به قطع بار یا خروج ناخواسته ژنراتور سنکرون نیست، بلکه مولد سنکرون و همچنین مولد اینورتری هر یک قادرند تا حد توان نامی خود توان به شبکه تزریق نمایند. درنتیجه استفاده بهینه از مولدهای موجود در شبکه به عمل می آید.

شکل (۸) جریان سه‌فاز کشیده‌شده از اینورتر را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است پس از وارد شدن بار نامتقارن، جریان اینورتر نیز از حالت نامتقارن خارج شده است تا عدم تعادل ولتاژ را در شبکه جبران کند. نکته قابل توجه این است که توان تزریقی به شبکه توسط مبدل اینورتری توسط یک منبع ولتاژ dc تأمین می‌شود که نامتقارن شدن جریان ac به آن تأثیر محسوسی ندارد. به عبارت دیگر در این روش، منبع ولتاژ dc (که می‌تواند بیانگر سلول خورشیدی، باتری و غیره باشد) قادر است در حداکثر توان خود کار نماید. البته در این شرایط باستی جریان نامی کلیدهای الکترونیکی بکار رفته در مبدل اینورتری به اندازه مناسبی انتخاب شود تا بتوان جریان بار نامتقارن را تأمین نمود.

شکل (۹) ولتاژ سه‌فاز خروجی اینورتر را به همراه مؤلفه‌های مثبت و منفی آن نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است

خروجی این کنترل کننده مقدار گشتاور مکانیکی است که به مدل ژنراتور سنکرون داده شده است. در این شکل سیستم کنترل ولتاژ ژنراتور سنکرون نیز نشان داده شده است. عملکرد این سیستم به نحوی است که در حالت ماندگار، ولتاژ خروجی ژنراتور را برابر با مقدار نامی تنظیم می‌نماید.



شکل (۵): سیستم کنترلی فرکانس و ولتاژ در ژنراتور سنکرون

لازم به ذکر است که شبیه‌سازی شبکه مورد مطالعه در نرم‌افزار PSCAD-EMTDC انجام شده است. ضمناً برای شبیه‌سازی ژنراتور سنکرون از مدل Synchronous Machine با مرتبه هفت استفاده شده است. ژنراتور سنکرون دارای ولتاژ نامی $V = 400$ و توان نامی 100 kW است که تقریباً برابر با توان نامی اینورتر است. در ابتدا شبکه فوق بدون اینورتر شبیه‌سازی شده است. شکل (۶) تصویر جریان‌های مؤلفه مثبت و منفی خروجی ژنراتور را نشان می‌دهد. پیش از ورود بار نامتقارن به مدار یعنی در زمان $t = 6 \text{ s}$ ژنراتور فقط جریان مؤلفه مثبت به شبکه تزریق می‌کند و جریان مؤلفه منفی تقریباً برابر با صفر است. پس از ورود بار نامتقارن به مدار، دامنه جریان مؤلفه مثبت و منفی تزریق شده توسط ژنراتور افزایش می‌یابد. افزایش دامنه جریان‌ها به حدی است که توان اکتیو بار جدید تأمین شود. دامنه جریان مؤلفه منفی در این حالت حدود $4, 400 \text{ p.u.}$ پریونیت است. درنتیجه مطابق مشخصه رله عدم تعادل جریان (شکل ۱)، ژنراتور تنها حدود یک دقیقه قادر به ادامه کار است. به عبارت دیگر بار نامتقارن نمی‌تواند به صورت طولانی‌مدت توسط ژنراتور سنکرون تغذیه شود.

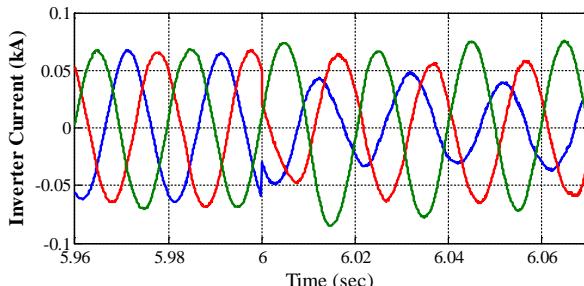
درصورتی که اینورتر نیز به شبکه فوق متصل شود مؤلفه‌های جریان خروجی اینورتر و ژنراتور سنکرون به صورت شکل (۷) خواهد بود. همان‌طور که دیده می‌شود پیش از ورود بار نامتقارن، ژنراتور سنکرون و اینورتر در تأمین جریان مؤلفه مثبت تزریقی به شبکه، مشارکت می‌نمایند. پس از ورود بار نامتقارن، اینورتر جریان مؤلفه منفی را به شبکه تزریق نماید و لذا جریان مؤلفه منفی ژنراتور سنکرون همچنان تزدیک صفر باقی می‌ماند. بنابراین عدم تعادل ولتاژ در شبکه نیز جبران می‌شود. از آنجاکه به دلیل متعادل شدن ولتاژ ترمینال ژنراتور سنکرون، جریان عبوری از آن تقریباً به طور کامل حاوی مؤلفه مثبت است، ژنراتور می‌تواند به صورت طولانی‌مدت به کار خود ادامه داده و توان نامی را به شبکه تزریق نماید.

شبکه تزریق نماید. از طرف دیگر، در صورتی که جریان نامی کلیدهای الکترونیک قدرت اینورتر به درستی انتخاب شود، مولد اینورتری نیز قادر است حداکثر توانی که از طریق لینک dc منقل می‌شود را به شبکه تحویل دهد. بنابراین بر اساس روش پیشنهادی در این مقاله، استفاده بهینه‌ای از هر دو مولد موجود در شبکه به عمل می‌آید.

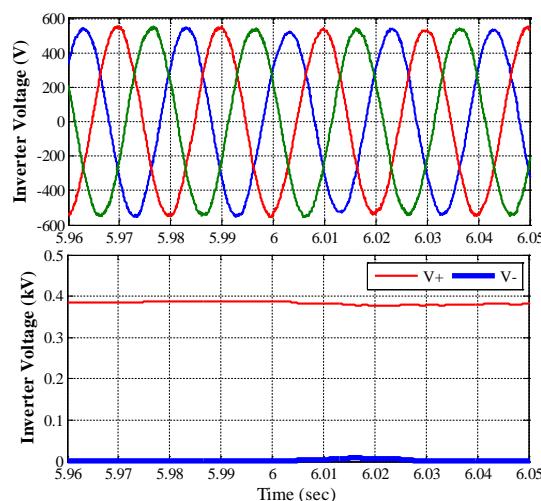
مراجع

- [1] عبادله کامیاب و جواد ساده، "تعیین ناحیه غیرقابل تشخیص و تشخیص جزیره‌ای شدن تطبیقی واحدهای تولید پراکنده اینورتری جریان ثابت"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، فصل نامه علمی پژوهشی، سال سیزدهم، شماره سوم، صفحه ۱۹ تا ۲۶، پائیز ۹۵
- [2] M. Savaghebi, J. M. Guerrero, A. Jalilian, and J. C. Vasquez, "Secondary control for voltage unbalance compensation in an islanded microgrid," *IEEE International Conference on Smart Grid Communications*, 2011, pp. 499-504.
- [3] M. Z. Kamh and R. Iravani, "Unbalanced model and power-flow analysis of microgrids and active distribution systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, pp. 2851-2858, 2010.
- [4] S. Chowdhury and P. Crossley, *Microgrids and active distribution networks*: The Institution of Engineering and Technology, 2009.
- [5] G. M. Masters, *Renewable and efficient electric power systems*: John Wiley & Sons, 2013.
- [6] ایمان لرزاده، حسین عسگریان ابیانه و مهدی ثوابقی، "کنترل سلسه مراتبی برای تسهیم دقیق توان راکتیو و جریان‌های هارمونیکی در ریزشبکه‌های جزیره‌ای بر اساس کنترل جریان چرخشی لحظه‌ای"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، فصل نامه علمی پژوهشی، سال سیزدهم، شماره سوم، صفحه ۵۷ تا ۷۲، پائیز ۹۵.
- [7] N. Mohan and T. M. Undeland, *Power electronics: converters, applications, and design*: John Wiley & Sons, 2007.
- [8] F. Barrero, S. Martínez, F. Yeves, F. Mur, and P. Martínez, "Universal and reconfigurable to UPS active power filter for line conditioning," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no. 1, pp. 283-290, 2003.
- [9] B. Singh, and J. Solanki, "An implementation of an adaptive control algorithm for a three-phase shunt active filter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 8, pp. 2811-2820, 2009.
- [10] S. George, and V. Agarwal, "A DSP based optimal algorithm for shunt active filter under nonsinusoidal supply and unbalanced load conditions," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, no. 2, pp. 593-601, 2007.
- [11] S. A. O. Da Silva, P. F. D. Garcia, P. C. Cortizo, and P. F. Seixas, "A three-phase line-interactive UPS system implementation with series parallel active power-line conditioning capabilities," *IEEE Transactions on Industrial Applications*, vol. 38, no. 6, pp. 1581-1590, 2002.
- [12] P. T. Cheng, C. Chen, T. L. Lee, and S. Y. Kuo, "A cooperative imbalance compensation method for

اینورتر با تزریق جریان مؤلفه منفی و به کمک سیستم کنترلی پیشنهادی، قادر است ولتاژ را به صورت متقارن حفظ کند به نحوی که به محض ورود بار نامتقارن، ولتاژ مؤلفه منفی ناشی از آن سریعاً جبران می‌شود.



شکل (۸) شکل موج جریان سه‌فاز خروجی اینورتر



شکل (۹): شکل موج ولتاژ سه‌فاز خروجی اینورتر و مؤلفه‌های متقارن مربوطه

۴- نتیجه‌گیری

ژنراتورهای سنکرون متصل به ریزشبکه جزیره‌ای در تأمین جریان بزرگ مؤلفه منفی ناشی از بارهای تک‌فاز موجود در شبکه، با مشکل اضافه دما مواجه می‌شوند. در چنین حالتی برای جلوگیری از آسیب به ژنراتور معمولاً از رله عدم تعادل جریان استفاده شده و ژنراتور را از مدار خارج می‌نمایند. در این مقاله پیشنهاد شده است که برای تغذیه ریزشبکه جزیره‌ای، از ترکیب ژنراتور سنکرون و مولد اینورتری استفاده شود. کنترل کننده مولد اینورتری به نحوی طراحی شده است که قادر باشد، کل جریان مؤلفه منفی مورد نیاز شبکه را تأمین نماید تا فقط جریان مؤلفه مثبت از ژنراتور سنکرون عبور نماید. مطالعات مبتنی بر شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در حضور بار نامتقارن، کل جریان مؤلفه منفی مورد نیاز، توسط اینورتر تأمین شده و ژنراتور سنکرون فقط وظیفه تأمین جریان مؤلفه مثبت را بر عهده دارد. بنابراین بدون عملکرد رله تشخیص جریان مؤلفه منفی و همچنین بدون ایجاد اضافه دمای ناشی از جریان مؤلفه منفی، ژنراتور سنکرون قادر است توان نامی را به

³ Droop

- distributed-generation interface converters," *IEEE Transactions on Industrial Applications*, vol. 45, no. 2, pp. 805-815, 2009.
- [13] Y. Li, D. M. Vilathgamuwa, and P. C. Loh, "Microgrid power quality enhancement using a three-phase four-wire grid-interfacing compensator," *IEEE Transactions on Industrial Applications*, vol. 41, no. 6, pp. 1707-1719, 2005.
- [14] H. Fujita and H. Akagi, "The unified power quality conditioner: the integration of series and shunt-active filters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 13, pp. 315-322, 1998.
- [15] S. Dasgupta, S. N. Mohan, S. K. Sahoo, and S. K. Panda, "Application of four-switch-based three-phase grid-connected inverter to connect renewable energy source to a generalized unbalanced microgrid system," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, pp. 1204-1215, 2013.
- [16] C. Mozina, "Coordinating generator protection with transmission protection and generator control—NERC standards and pending requirements," *63rd Annual Conference for Protective Relay Engineers*, 2010, pp. 1-12.
- [17] "IEEE Application Guide for IEEE Std 1547™, IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems," 2009.
- [18] M. Savaghebi, A. Jalilian, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "Autonomous voltage unbalance compensation in an islanded droop-controlled microgrid," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, pp. 1390-1402, 2013.
- [19] R. Majumder, "Reactive power compensation in single-phase operation of microgrid," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, pp. 1403-1416, 2013.
- [20] R. Teodorescu, F. Blaabjerg, M. Liserre, and P. C. Loh, "Proportional-resonant controllers and filters for grid-connected voltage-source converters," *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, vol. 153, pp. 750-762, 2006.
- [21] P. Rodriguez, A. V. Timbus, R. Teodorescu, M. Liserre, and F. Blaabjerg, "Flexible active power control of distributed power generation systems during grid faults," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, pp. 2583-2592, 2007.
- [22] M. Ciobotaru, R. Teodorescu, and F. Blaabjerg, "A new single-phase PLL structure based on second order generalized integrator," *37th IEEE Conference on Power Electronics Specialists*, 2006, pp. 1-6.
- [23] E. Barklund, N. Pogaku, M. Prodanovic, C. Hernandez-Aramburu, and T. C. Green, "Energy management in autonomous microgrid using stability-constrained droop control of inverters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, pp. 2346-2352, 2008.
- [24] J. M. Guerrero, J. Matas, L. G. de Vicuña, M. Castilla, and J. Miret, "Decentralized control for parallel operation of distributed generation inverters using resistive output impedance," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, pp. 994-1004, 2007.
- [25] M. Hamzeh, H. Karimi, and H. Mokhtari, "A new control strategy for a multi-bus MV microgrid under unbalanced conditions," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, pp. 2225-2232, 2012.

زیرنویس‌ها

¹ Unbalance (I_2 current) relay² Clarke transform