

کنترل فرکانس در ریز شبکه شامل توربین بادی با استفاده از DSTATCOM

محمد لشکری فشانی | دانشجوی کارشناسی، گروه برق، مؤسسه آموزش عالی آپادانا، شیراز، ایران.

نواب قائدی * | دکتری تخصصی، گروه برق، مؤسسه آموزش عالی آپادانا، شیراز، ایران.

چکیده

با افزایش روز افزون نیروگاه‌های بادی به عنوان تأمین کننده بخشی از توان برق در سراسر جهان، لزوم بهره‌گیری از مدیریت انرژی به عنوان روشی برای ارتقای راندمان و کنترل توان و فرکانس، اهمیت ویژه‌ای به خود گرفته است. یکی از الگوهای کنترل ولتاژ و فرکانس، استفاده از ادوات الکترونیک قدرت در حوزه شبکه توزیع مانند D-STATCOM می‌باشد. در واقع یک D-STATCOM می‌تواند هم برای اصلاح ضریب توان و هم متوازن کردن جریان کشیده شده از بارهای نامتعادل به کار رود. مزارع بادی نیز باید بتوانند هم به صورت متصل به شبکه و هم به صورت جزیره‌ای مورد بهره‌برداری قرار بگیرند. از این جهت، کیفیت توان در نقطه PCC باید حتماً در محدوده مجاز باشد. از آنجا که در توربین‌های بادی از ژنراتورهای DFIG به منظور تولید توان استفاده می‌شود، باید شناخت کاملی از عملکرد آن‌ها مد نظر قرار بگیرد، زیرا DFIG یک ماشین القایی روتور سیم‌پیچی شده است که روتور آن به صورت پشت‌به‌پشت به مبدل‌های الکترونیک قدرت متصل شده‌اند. مبدل‌های چهار ربعی، همزمان توان‌های حقیقی و راکتیو ورودی و خروجی به مدار روتور را کنترل می‌کنند. در این مقاله با استفاده از D-STATCOM و تبدیل qd ، یک روش بهینه برای کنترل ولتاژ، فرکانس و توان راکتیو در مزارع بادی ارائه می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: D-STATCOM، توان راکتیو، کیفیت توان، نیروگاه‌های بادی

مقدمه

در جهان هزاران توربین بادی در حال بهره‌برداری وجود دارد که ظرفیت تولیدی آن‌ها به ۹۰۴۷۳ مگاوات می‌رسد و در این میان اتحادیه اروپا ۶۵٪ از کل توان بادی جهان را تولید می‌کند. تولید برق بادی در میان دیگر روش‌های تولید انرژی الکتریکی دارای بیشترین شتاب رشد در قرن ۲۱ بوده است به‌طوری که تولید توان بادی جهان در بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۶ چهار برابر شده است. در دانمارک و اسپانیا برق بادی حدود ۱۰٪ یا بیشتر از کل تولید انرژی الکتریکی را تشکیل می‌دهد. گرچه ۸۱٪ از توان بادی تولیدشده در جهان به ایالات متحده و اتحادیه اروپا تعلق دارد اما سهم پنج کشور اول تولیدکننده برق بادی از ۷۱٪ در سال ۲۰۰۴ به ۵۵٪ در سال ۲۰۰۵ کاهش یافته است (Fernández-Guillamón et al., 2019; Gulzar et al., 2022).

از جمله کشورهایی که سرمایه‌گذاری زیادی در این زمینه انجام داده‌اند می‌توان به آلمان، اسپانیا، ایالات متحده، هند و دانمارک اشاره کرد. کشور دانمارک یکی از کشورهای برجسته در تولید تجهیزات و استفاده از توان بادی است. دولت دانمارک در دهه ۱۹۷۰ ملزم شد تا تولید انرژی الکتریکی از انرژی باد را به ۵۰٪ کل تولید برق برساند و تا به امروز برق بادی ۲۰٪ (بیشترین میزان تولید برق بادی از نظر درصد تولید) از کل تولید انرژی الکتریکی در این کشور را تشکیل می‌دهد (Obaid et al., 2019)؛ این کشور همچنین پنجمین تولیدکننده بزرگ برق بادی محسوب می‌شود (در حالی که دانمارک از نظر میزان مصرف در جهان رتبه ۵۶ را دراست). آلمان و دانمارک دو کشور پیشتاز در زمینه صادرات توربین‌های بزرگ (۶۶٪ تا ۵ مگاوات) به حساب می‌آیند (Shangguan et al., 2021).

آلمان یکی از کشورهای پیشتاز در زمینه تولید برق بادی بوده است، به‌طوری که در سال ۲۰۰۶ این کشور ۲۸٪ از کل توان بادی تولیدشده در جهان (۷/۳٪ در آلمان) را به خود اختصاص داده است. این در حالی است که آلمان برنامه دارد تا سال ۲۰۱۰ ۱۲/۵٪ از کل توان تولیدی خود را از منابع تجدیدپذیر تأمین نماید. کشور آلمان دارای حدود ۱۸۶۰۰ توربین بادی است که بیشتر آن‌ها در شمال آلمان نصب شده‌اند که در این میان سه توربین از بزرگ‌ترین توربین‌های جهان نیز وجود دارند (Bevrani et al., 2021).

در سال ۲۰۰۵ دولت اسپانیا قانونی را تصویب کرد که بر طبق آن نصب ۲۰۰۰۰ مگاوات ظرفیت بادی تا سال ۲۰۱۲ در برنامه دولت قرار گرفت. البته در سال ۲۰۰۶ یارانه‌ها و پشتیبانی دولت از ساخت این ظرفیت‌ها به ناگهان قطع شد. قابل ذکر است که در سال ۲۰۰۵ در هر دو کشور آلمان و اسپانیا، تولید انرژی الکتریکی از راه استفاده از نیروگاه‌های بادی از تولید انرژی الکتریکی به وسیله نیروگاه‌های برق آبی بیشتر بوده است.

در سال‌های اخیر، کشور ایالات متحده بیشتر از هر کشور دیگری توربین بادی به شبکه برق خود افزوده است. تولید برق بادی در ایالات متحده در بازه زمانی بین فوریه ۲۰۰۶ تا فوریه ۲۰۰۷، ۳۱/۸٪ رشد را نشان می‌دهد. ایالت تگزاس با پیشی گرفتن از کالیفرنیا اکنون بیشترین تولید برق بادی را در بین ایالت‌های مختلف این کشور دارد. تگزاس در سال ۲۰۰۹ نزدیک به ۱۷٪ برق خود را از باد به‌دست آورد و تگزاس اکنون بزرگ‌ترین مزرعه بادی جهان را با ۷۸۲ مگاوات ظرفیت در روستایی به نام راسکو در اختیار دارد (Jin et al., 2021).

توربین‌ها بادی برای راه‌اندازی و بهره‌برداری نیاز به هیچ‌گونه سوختی ندارند و در قبال تولید انرژی الکتریکی، آلودگی مستقیمی ایجاد نمی‌کنند. بهره‌برداری از این توربین‌ها دی‌اکسید کربن، دی‌اکسید گوگرد، جیوه، ذرات معلق یا هیچ‌گونه عامل آلوده‌کننده هوا تولید نمی‌کند. اما توربین‌ها بادی در مراحل ساخت از منابع مختلفی استفاده می‌کنند. در طول ساخت نیروگاه‌های بادی باید از موادی مانند فولاد، بتن، آلومینیوم و... استفاده کرد که تولید و انتقال آن‌ها نیازمند مصرف انواع سوخت‌ها است. دی‌اکسید کربن تولیدشده در این مراحل پس از حدود ۹ ماه کار کردن نیروگاه، جبران خواهد شد. نیروگاه‌های سوخت فسیلی که برای تنظیم برق تولیدی در نیروگاه‌های بادی مورد استفاده قرار

می گیرند، موجب ایجاد آلودگی خواهند شد. بعضی از اوقات به این نکته اشاره می شود که نیروگاه های بادی نمی توانند میزان دی اکسید کربن تولیدی را کاهش دهند، چرا که برق تولیدی از طریق نیروگاه بادی به دلیل نامنظم بودن، همیشه باید به وسیله یک نیروگاه سوخت فسیلی پشتیبانی شود. نیروگاه های بادی نمی توانند به طور کامل جایگزین نیروگاه های سوخت فسیلی شوند. اما با تولید انرژی الکتریکی مبنای تولیدی نیروگاه های حرارتی را کاهش داده و از تولید آنها می کاهند، که به این ترتیب میزان انتشار دی اکسید کربن کاهش می یابد (Oshnoei et al., 2021).

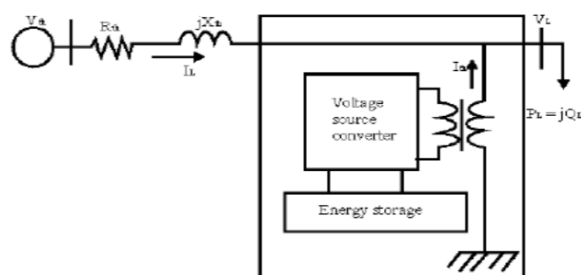
D-STATCOM

یک D-STATCOM (جبران ساز استاتیکی اغتشاشات)، که شمای آن در شکل ۱ نشان داده شده، شامل یک مبدل دو-سطحی منبع ولتاژی (VSC)، یک تجهیز ذخیره کننده انرژی dc، یک ترانسفورماتور کوپل شده که به صورت موازی به شبکه توزیع متصل شده است، می باشد. VSC ولتاژ dc دو سر تجهیز ذخیره ساز را به یک دسته از ولتاژهای خروجی ۳-فاز تبدیل می کند. این ولتاژها فاز هستند و با سیستم AC از طریق راکتانس ترانسفورماتور کوپل شده است. تنظیم مناسب فاز و دامنه ولتاژ خروجی یک D-STATCOM اجازه یک کنترل مؤثر توان اکتیو و راکتیو تبادل شده بین DSTATCOM و سیستم AC را می دهد. این ساختار به تجهیز اجازه جذب و یا تولید تولن اکتیو و راکتیو را می دهد (Kumar Khadanga et al., 2021).

VSC که به صورت موازی با سیستم AC متصل شده است، یک توپولوژی چندمنظوره را فراهم می آورد که می تواند برای سه هدف کاملاً مجزا استفاده شود:

- تنظیم ولتاژ و جبران سازی توان راکتیو
- تصحیح ضریب توان
- حذف هارمونیک های جریان.

در اینجا، چنین تجهیزاتی برای فراهم آوردن تنظیم ولتاژ با استفاده از مبدل کنترل شده غیرمستقیم به کار گرفته شده است.



شکل ۱. DSTATCOM

شکل ۱ جریان موازی تزریقی I_{sh} افت ولتاژ را با تنظیم افت ولتاژ دو سر امپدانس سیستم Z_{th} تصحیح می کند. مقدار I_{sh} می تواند با تنظیم ولتاژ خروجی مبدل تنظیم شود. جریان موازی تزریقی I_{sh} می تواند اینچنین نوشته شود:

$$I_{sh} = I_L - I_s = I_L - (V_{th} - V_L) / Z_{th} \quad (1)$$

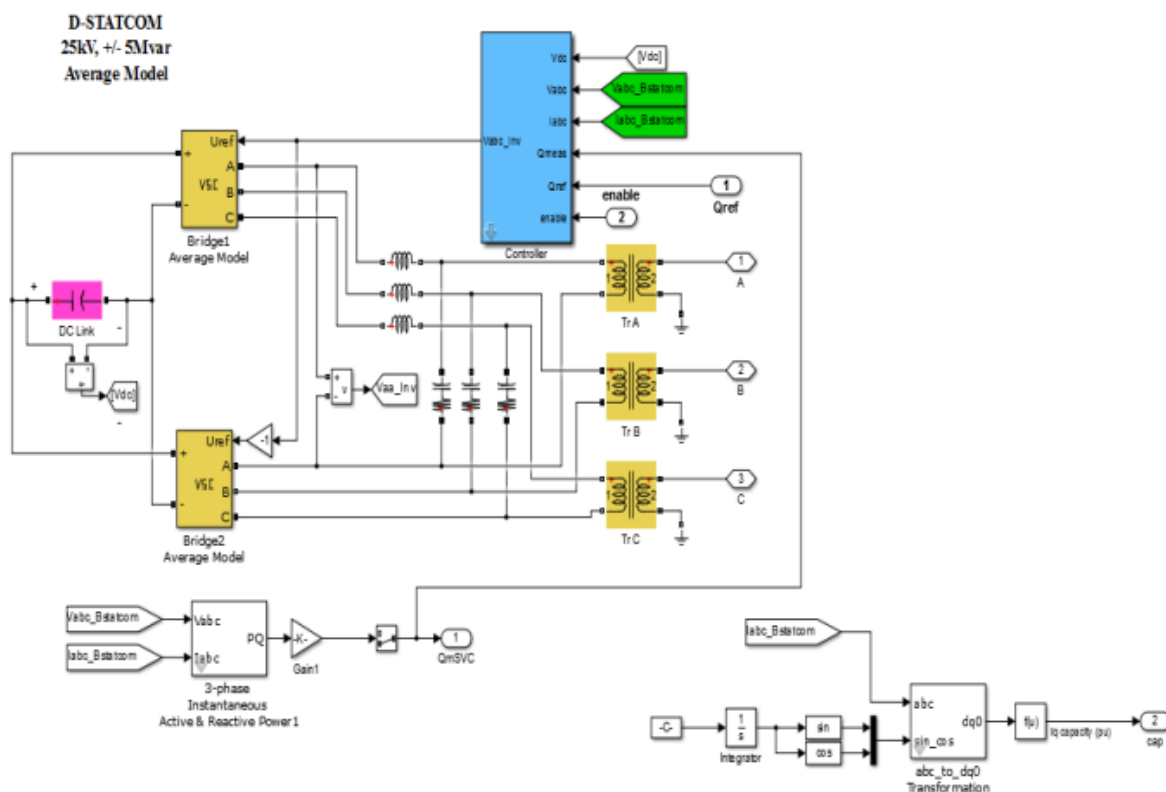
توان مختلط تزریقی D-STATCOM می تواند اینگونه بیان شود:

$$S_{sh} = V_L I_{sh}^* \quad (2)$$

این نکته نیز باید ذکر شود که تأثیر DSTATCOM در تصحیح افت ولتاژ به مقدار Z_{th} یا سطح خطای شین بار بستگی دارد. زمانی که، I_{sh} متعامد با V_L نگه داشته شود، تصحیح ولتاژ مطلوب می تواند بدون تزریق هیچ گونه توان

اکتیوی به سیستم به دست آید. از طرف دیگر، زمانی که مقدار I_{sh} مینیمم می شود، تصحیح ولتاژ یکسانی می تواند توسط مینیمم کردن توان ظاهری تزریقی به شبکه به دست آید.

جریان های منبع مرجع ۳-فاز با ولتاژهای AC ۳-فاز محاسبه می شوند (v_{ta} , v_{tb} and v_{tc}) و ولتاژ شین DC (V_{dc}) از DSTATCOM. این جریان های منبع مرجع شامل دو مؤلفه هستند، یکی در فاز (I_{spdr}) و دیگری متعامد (I_{spqr}) با ولتاژ تغذیه. طرح کنترلی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. طرح کنترلی برای DSTATCOM متصل به شبکه تغذیه

شبیه سازی

کنترل فرکانس ولتاژ، همچنین به عنوان تنظیم فرکانس یا کنترل فرکانس شناخته می شود، به فرایند حفظ فرکانس الکتریکی یک سیستم قدرت در محدوده قابل قبول اشاره دارد. در یک سیستم قدرت جریان متناوب (AC)، فرکانس تعداد سیکل ها یا نوسانات در ثانیه را نشان می دهد که معمولاً با هرتز (Hz) اندازه گیری می شود. در اکثر کشورها، فرکانس استاندارد برای برق متناوب ۵۰ هرتز یا ۶۰ هرتز بسته به منطقه است. حفظ فرکانس پایدار برای عملکرد قابل اعتماد و کارآمد سیستم های قدرت بسیار مهم است. هرگونه انحراف قابل توجه از فرکانس استاندارد می تواند منجر به مسائل مختلفی، از جمله آسیب به تجهیزات، کاهش راندمان سیستم و حتی قطع برق شود. بنابراین، سیستم های کنترل فرکانس ولتاژ برای تنظیم فرکانس و حفظ آن در محدوده های قابل قبول اجرا می شوند. هدف اولیه کنترل فرکانس ولتاژ، ایجاد تعادل بین تولید و تقاضای برق در سیستم قدرت است. هنگامی که تقاضا برای برق از ظرفیت تولید موجود بیشتر شود، فرکانس کاهش می یابد و بالعکس. مکانیسم های کنترل فرکانس ولتاژ وظیفه تنظیم توان خروجی ژنراتورها را برای مطابقت با تقاضای بار و حفظ فرکانس در سطح مورد نظر دارند. چندین مؤلفه در کنترل فرکانس ولتاژ دخیل هستند:

۱. ژنراتورها: ژنراتورهای برق، مانند نیروگاه‌های حرارتی، نیروگاه‌های برق آبی یا منابع انرژی تجدیدپذیر، نقش مهمی در کنترل فرکانس ولتاژ دارند. ژنراتورها توان خروجی خود را مطابق با تقاضای بار تنظیم می‌کنند و به تثبیت فرکانس کمک می‌کنند.

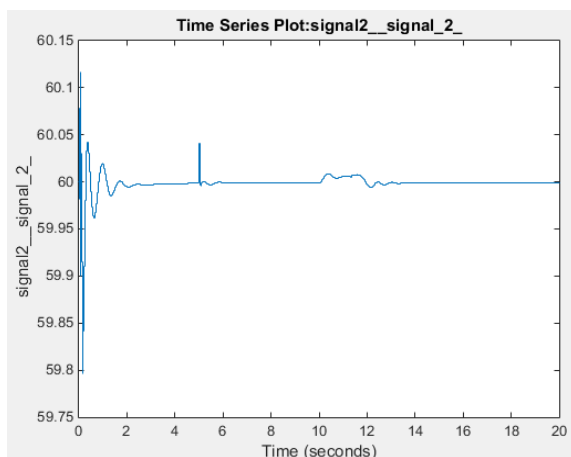
۲. کنترل تولید خودکار (AGC): سیستم‌های AGC به‌طور مداوم فرکانس را کنترل می‌کنند و بر اساس آن توان خروجی ژنراتورها را تنظیم می‌کنند. این سیستم‌ها از الگوریتم‌های کنترلی برای تنظیم خروجی ژنراتور و حفظ ثبات فرکانس استفاده می‌کنند.

۳. کنترل فرکانس بار (LFC): سیستم‌های LFC مسئول حفظ تعادل بین تولید برق و تقاضای بار هستند. آن‌ها به‌طور مداوم فرکانس را کنترل می‌کنند و توان خروجی ژنراتورها را بر اساس پاسخ سیستم به انحرافات فرکانس تنظیم می‌کنند.

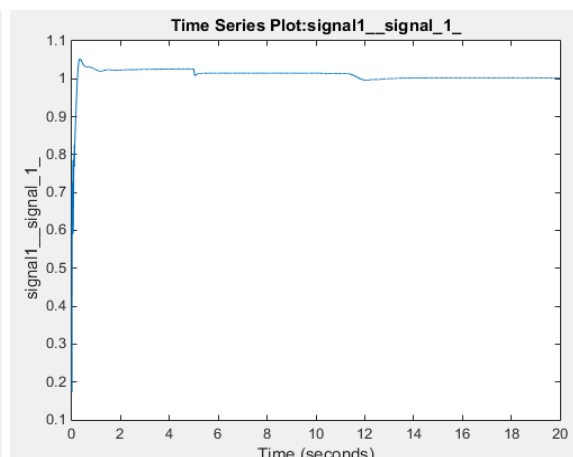
۴. سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی: سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی، مانند باتری‌ها یا نیروگاه‌های برق آبی ذخیره‌سازی پمپ‌شده، می‌توانند برای ذخیره انرژی الکتریکی اضافی زمانی که تولید بیش از تقاضای بار باشد، مورد استفاده قرار گیرند. این سیستم‌ها می‌توانند انرژی ذخیره‌شده را زمانی که تقاضا از تولید فراتر رود، آزاد کنند و به تثبیت فرکانس کمک کنند.

۵. شبکه‌های به هم پیوسته: اتصالات بین شبکه‌های برق مختلف امکان تبادل نیرو بین مناطق را فراهم می‌کند. در طول انحرافات فرکانس، شبکه‌های متصل به هم می‌توانند با به اشتراک گذاشتن یا دریافت برق در صورت نیاز، به تعادل عرضه و تقاضای برق کمک کنند.

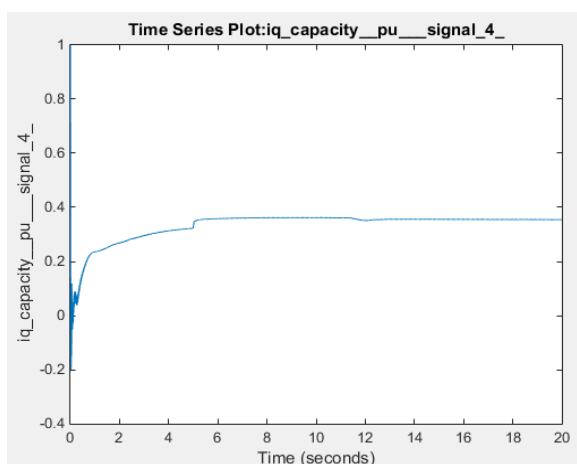
کنترل فرکانس ولتاژ یک جنبه حیاتی از عملکرد سیستم قدرت است و معمولاً توسط اپراتورهای سیستم یا اپراتورهای شبکه مدیریت می‌شود. این اپراتورها به‌طور مداوم فرکانس را کنترل می‌کنند و اقدامات لازم را برای حفظ پایداری آن انجام می‌دهند و از تأمین برق قابل اطمینان برای مصرف‌کنندگان اطمینان حاصل می‌کنند. در اینجا نتایج برای یک مورد مطالعاتی ارائه می‌شود که بار متعادل و غیرخطی است و در ضمن در مورد بار غیرخطی و غیرمتعادل نیز این مدل برقرار است.



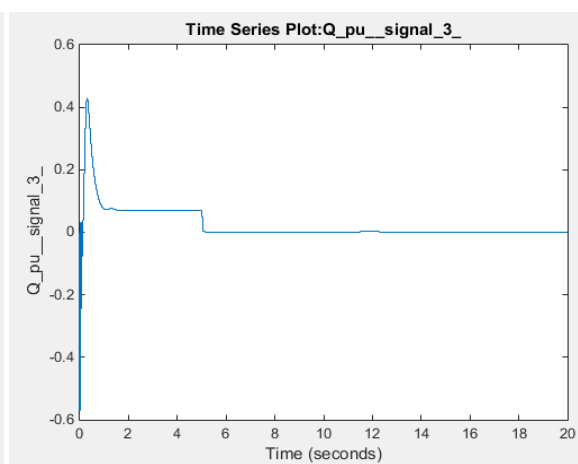
شکل ۴. فرکانس



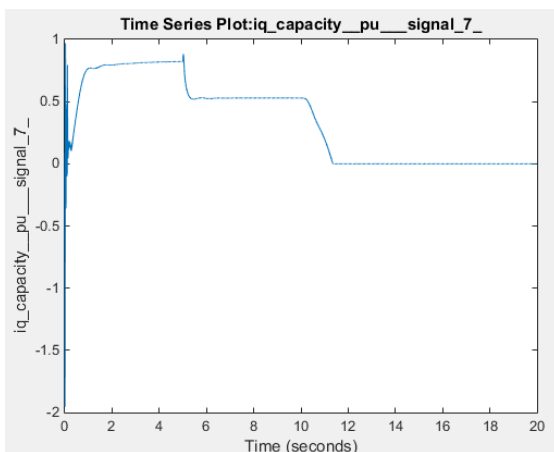
شکل ۳. ولتاژ نقطه PCC



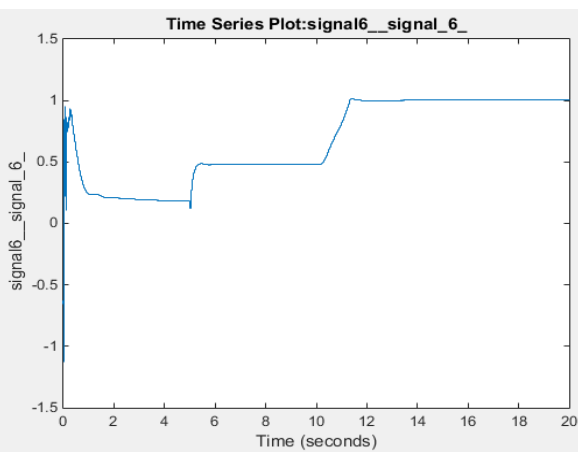
شکل ۶. جریان محور q در DFIG



شکل ۵. توان راکتیو خروجی DFIG



شکل ۸. جریان محور q در DSTATCOM



شکل ۷. توان راکتیو خروجی DSTATCOM

نتیجه گیری

خلاصه نتایج مستخرج عبارت اند از:

- سیستم DSTATCOM یک ابزار مفید برای مقابله با اغتشاشات PQ ایجاد شده در شبکه توسط DER ها می باشد.
- جبران ساز DSTATCOM، یک تجهیز منعطف است که می تواند در حالت کنترل جریان برای جبران سازی تغییرات ولتاژ عمل کند، نامتعادلی و توان راکتیو و در مورد کنترل ولتاژ به عنوان تثبیت کننده ولتاژ عمل می کند.
- آخرین ویژگی کاربرد آن را برای جبران سازی افت منبع تغذیه شبکه امکان پذیر می کند.
- نتایج شبیه سازی نشان می دهد که کارایی DSTATCOM برای بهبود ضریب توان در مکان مصرف کننده رضایت بخش است.
- الگوریتم کنترل DSTATCOM انعطاف پذیر است و مشاهده شد که قابلیت تصحیح ضریب توان به واحد را دارد و همچنین قابلیت حذف هارمونیک در جریان های منبع و فراهم کردن متعادل سازی بار. همچنین قابلیت تنظیم ولتاژ در PCC را دارد.

- الگوریتم کنترل DSTATCOM، خاصیت ذاتی فراهم آوردن یک حمایت از خود شین DC از DSTATCOM دارد.
- درک شد که سیستم DSTATCOM، THD را در جریان‌های منبع برای بارهای غیرخطی کاهش می‌دهد. بارهای غیرخطی بر اساس راکتیفایر، هارمونیک‌هایی تولید می‌کنند که توسط DSTATCOM حذف می‌شود. زمانی که بار راکتیفایر تک‌فاز متصل است، جریان‌های DSTATCOM جریان‌های بار نامتعادل را متعادل می‌کنند.

منابع

- Bevrani, H., Golpîra, H., Messina, A. R., Hatziargyriou, N., Milano, F., & Ise, T. (2021). Power system frequency control: An updated review of current solutions and new challenges. *Electric Power Systems Research*, 194, 107114.
- Fernández-Guillamón, A., Gómez-Lázaro, E., Muljadi, E., & Molina-García, Á. (2019). Power systems with high renewable energy sources: A review of inertia and frequency control strategies over time. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115, 109369.
- Gulzar, M. M., Iqbal, M., Shahzad, S., Muqet, H. A., Shahzad, M., & Hussain, M. M. (2022). Load frequency control (LFC) strategies in renewable energy-based hybrid power systems: A review. *Energies*, 15(10), 3488.
- Jin, L., He, Y., Zhang, C. K., Shanguan, X. C., Jiang, L., & Wu, M. (2021). Robust delay-dependent load frequency control of wind power system based on a novel reconstructed model. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 52(8), 7825-7836.
- Kumar Khadanga, R., Kumar, A., & Panda, S. (2021). Frequency control in hybrid distributed power systems via type-2 fuzzy PID controller. *IET Renewable Power Generation*, 15(8), 1706-1723.
- Obaid, Z. A., Cipcigan, L. M., Abraham, L., & Muhssin, M. T. (2019). Frequency control of future power systems: reviewing and evaluating challenges and new control methods. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 7(1), 9-25.
- Oshnoei, S., Oshnoei, A., Mosallanejad, A., & Haghjoo, F. (2021). Novel load frequency control scheme for an interconnected two-area power system including wind turbine generation and redox flow battery. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 130, 107033.
- Shanguan, X. C., He, Y., Zhang, C. K., Jin, L., Yao, W., Jiang, L., & Wu, M. (2021). Control performance standards-oriented event-triggered load frequency control for power systems under limited communication bandwidth. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 30(2), 860-868.