کاربرد جبران‌کننده سری سنکرون استاتیک و مقاومت سری ترمزی به منظور بهبود عملکرد گذر از خطای توربین‌های بادی سرعت ثابت

علی دریکوند*[۱]، محمود جورابیان[۲]

*۱- دانشجو،گروه برق، دانشکده برق ، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، Ali_barghk@yahoo.com
۲- استاد، گروه برق، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، دزفول ، ایران mjoorabian@yahoo.com

تاریخ دریافت:۹۴/۰۹/۰۴ تاریخ پذیرش:۹۴/۱۰/۰۱

چکیده: در این مقاله، دوتوپولوژی واسط سری با شبکه‌های قدرت به منظور بهبود قابلیت ایستادگی در برابر افت ولتاژ در توربین‌های بادی مبتنی بر ژنراتورهای القایی خود-تحریک شبیه‌سازی و مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.دو طرح مورد استفاده شامل جبران‌کننده سری سنکرون استاتیک(SSSC) و مقاومت سری ترمزی قابل‌کنترل(CSBR) پیاده‌سازی شده‌اند. سیستم تست شبیه سازی شده یک توربین بادی متصل به شبکه قدرت الکتریکی با و بدون حضور طرح‌های سری مذکور است. توانایی بالقوه این طرح‌ها با استفاده از قاب‌های مرجع توالی مثبت و منفی در پاسخ به رفتارهای خطاهای متقارن و نامتقارن ارزیابی گردیده‌اند. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از نرم افزار متلب، کارایی طرح‌های مورد استفاده را در بهبود قابلیت ایستادگی در برابرافت ولتاژ وحاشیه پایداری را در اثر وقوع خطاهای شدید متقارن و نامتقارن نشان داده‌اند. این طرح‌ها رفع سریع و موفق عواقب اغتشاش ولتاژ را نشان می‌دهد.همچنین به توربین‌ها کمک می‌کند در زمان خطا به شبکه متصل باقی بمانند.

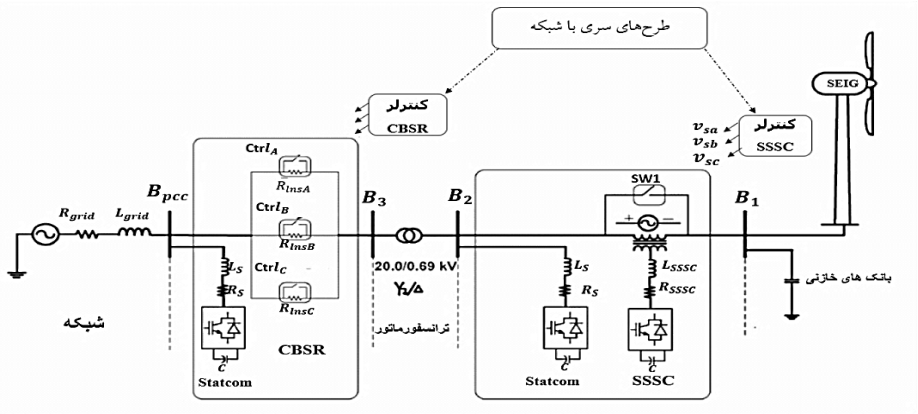
واژه‌های کلیدی: توربین‌های بادی سرعت ثابت، ژنراتور القایی خود-تحریک، جبران‌کننده توان راکتیو سری، مقاومت ترمزی.

۱-مقدمه

ادغام مزارع بادی بزرگ در سیستم‌های قدرت چالش‌های بسیاری را در ارتباط با بهره‌برداری و امنیت سیستم ایجاد می‌کند. پاسخ ولتاژ، قابلیت ایستادگی در برابر افت ولتاژ در توربین‌های بادی (LVRT) و ناپایداری شبکه منابع پراکنده از مهم‌ترین دغدغه‌های اپراتورهای سیستم انتقال است[۱،۲]. به علت افزایش نصب مزارع بادی، دغدغه شرکت‌های برق از مسائل کیفیت توان به مسائل بالقوه ناپایداری تبدیل شده است[۷-۳].

نکته قابل توجه این است که LVRT یکی از ملزومات اصلی سیستم‌های تبدیل انرژی باد است. استانداردهای خاصی بدین منظور برای سیستم‌های مبتنی بر انرژی باد در نظر گرفته شده است. در سال‌های اخیر، تکنولوژی‌های توربین بادی سرعت متغیر بازار جهانی را در دست گرفته‌اند[۸]. عملکرد LVRT یکی از دغدغه‌های اصلی سازندگان توربین‌های بادی و اپراتورهای سیستم انتقال می‌باشد. ژنراتور القایی خودتحریک (SEIG) مبتنی بر توربین‌های بادی عملکرد نسبتا ضعیفی را در حین شرایط خطا از خود نشان داده‌اند.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1392.2.2.5.6]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 2-No. 2- summer 2013



شکل(۱): شمای سیستم با طرح‌های جبران‌کننده سری

پشتیبانی LVRT برای توربین بادی مبتنی بر SEIG را می‌توان از تکنیک‌های نظیر کنترل پره، جبران توان راکتیو، یا مقاومت‌های ترمزی به دست آورد[۹].

نرخ تغییر زاویه پره به واسطه مکانیزم عملکرد محدود است و لذا کنترل زاویه پره هم در حین خطا و هم پس از بازیابی، نسبتا آهسته خواهد بود و ممکن است با برخی از استانداردهای شبکه نیز تناقض داشته باشد. هدف از روش‌های جبران توان راکتیو، تغذیه توان راکتیو به منظور اطمینان از بازیابی سریع ولتاژ است. بدین علت، نصب تجهیزات اضافی مانند جبران‌کننده سنکرون استاتیک (STATCOM) یا جبران‌کننده توان راکتیو استاتیک (SVC) در ترمینال توربین بادی یا در پست (در حالت وجود پارک‌های بادی) برای ارائه پشتیبانی ولتاژ لازم، جهت تحقق ملزومات LVRT ضروری است[۱۲-۱۰].

در این مقاله، جهت حل مسئله توانایی LVRT ژنراتورهای بادی مبتنی بر SEIG، دو روش مورد بررسی قرار گرفته است. این روش‌ها به منظور بهبود توانایی LVRT از توپولوژی‌های سری با شبکه استفاده می‌کنند. طرح‌های مورد بررسی براساس جدیدترین کنترل‌کننده‌ها طراحی و شبیه‌سازی شده‌اند:

۱- جبران‌کننده سری سنکرون استاتیک (SSSC) با کنترلرهای ولتاژ توالی مثبت و توالی منفی با حلقه‌های کنترلی میراکننده؛

۲- طرح مقاومت ترمزی سری با کنترل فاز.

الگوریتم کنترلی SSSC و مقاومت ترمزی سری قابل‌کنترل (CSBR) برای غلبه بر خطاهای متعادل و نامتعادل شبکه طراحی شده‌اند[۱۳]. طرح CSBR ارائه‌شده به دلیل پیوسته متغیر بودن و پله‌ای نبودن، نسبت به سایر طرح‌های مطالعاتی و صنعتی سودمندتر است[۱۶-۱۴].

طرح‌های ارائه‌شده به صورت افزایش‌دهنده ولتاژ عمل می‌کنند به صورتی که در حین خطا، به ترتیب ولتاژ خروجی و افت ولتاژ در حالت‌های SSSC و CSBR، به ولتاژ لحظه‌ای شبکه اضافه می‌گردد. بنابراین، ولتاژ استاتور SEIG برای خطاهای متقارن و نامتقارن شبکه، ثابت نگه داشته می‌شوند. لذا، خطاهای شبکه کار ژنراتور را دچار وقفه نمی‌کند. در این تحقیق، عملکرد دو طرح پیشنهادی از نقطه نظر پاسخ گذرا، خروج توان و پایدارای سیستم مقایسه و ارزیابی می‌شود.

۲- مدل‌سازی مسئله

۲-۱- پارک بادی مبتنی بر SEIG

شکل (۱)، مدل سیستم مورد بررسی را نشان می‌دهد. پارامترهای کنترلی و پارامترهای سیستم در جداول آورده شده‌اند. در هر حالت، یکی از طرح‌های سری با شبکه می‌توانند متصل باشند:

۱- طرح SSSC به صورت مستقیم سری با توربین بادی WTG در ولتاژ نامی ۶۹/ . کیلوولت

۲- طرح CSBR به صورت سری در طرف ولتاژ متوسط ترانسفورماتور.

هریک از طرح‌های SSSC یا CSBR برای ارائه جبران کامل سری به اندازه یک پریونیت در مدار قرار می‌گیرند. توان راکتیو جذب‌شده توسط SEIG، به وسیله بانک‌های خازنی ثابت متصل به

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1392.2.2.5.6]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 2-No. 2- summer 2013

هر توربین بادی جبران می‌شود. بقیه جبران به منظور حفظ ولتاژ باس V_{BPCC} نزدیک به یک پریونیت از طریق STATCOM تامین می‌شود که دارای تنظیم دروپ ۳٪ محلی است. توجه کنید که STATCOM به منظور جبران جریان راکتیو شبکه در حین خطا به تبعیت از استانداردها و ملزومات شبکه برای LVRT در مدار قرار گرفته است.

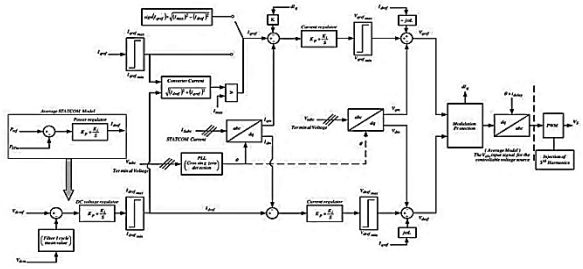
۲-۲- مدل ژنراتور القایی خودتحریک

برای ژنراتور القایی خودتحریک شکل (۱)، یک مدل دینامیکی قاب ساکن $d-q$ در مرجع [۷] و [۱۷] به کار رفته است.

۳- مدل جبران‌کننده استاتیک سنکرون (STATCOM)

شکل (۲)،جبران‌کننده سنکرون استاتیک برای تولید یا جذب توان راکتیو به وسیله کنترل دامنه ولتاژ لینک dc و ولتاژ ac استفاده می‌گردد. این در حالی است که زاویه δ را بسیار کوچک نگه می‌دارد تا به منظور جبران تلفات ترانسفورماتور کوپل و کلیدزنی‌ها به توان اکتیو اجازه عبور دهد. مدل ریاضی توان‌های اکتیو و راکتیو STATCOM در مرجع [۷] توصیف شده‌اند. در این تحقیق از مدل گذرای متوسط برای انجام مطالعات سیستم شامل کنترل توان اکتیو و راکتیو استفاده شده است. در این مدل متوسط، مبدل کلیدزنی در مدل جزئی با یک منبع ولتاژ قابل کنترل جایگزین شده است. خروجی سه فاز تبدیل پارک به صورت مستقیم به عنوان سیگنال ورودی مبدل استفاده شده است. بدین صورت، مدولاسیون پهنای باند (PWM)، یک مدل جزئی و تزریق هارمونیک سوم در مقایسه با یک مدل جزئی‌تر حذف شده است. به علاوه، کنترل ولتاژ لینک dc در این مدل با کنترل توان اکتیو STATCOM جایگزین شده است.

جریان در دو حلقه کنترلی جریان مستقیم و عمودی به ترتیب برای کنترل تبادل توان اکتیو و راکتیو بین مبدل و سیستم ac مجزا شده است. خروجی تنظیم‌کننده‌های جریان، در واقع، سیگنال‌های ولتاژ V_d و V_q هستند که به سیگنال‌های تغذیه ولتاژ ترمینال سه فاز تبدیل پارک اضافه شده‌اند. برای دستیابی به کارآیی بالاتر، افت ولتاژ در اندوکتانس‌های مبدل نیز به منظور کنترل سیگنال‌های ولتاژ اضافه شده‌اند.

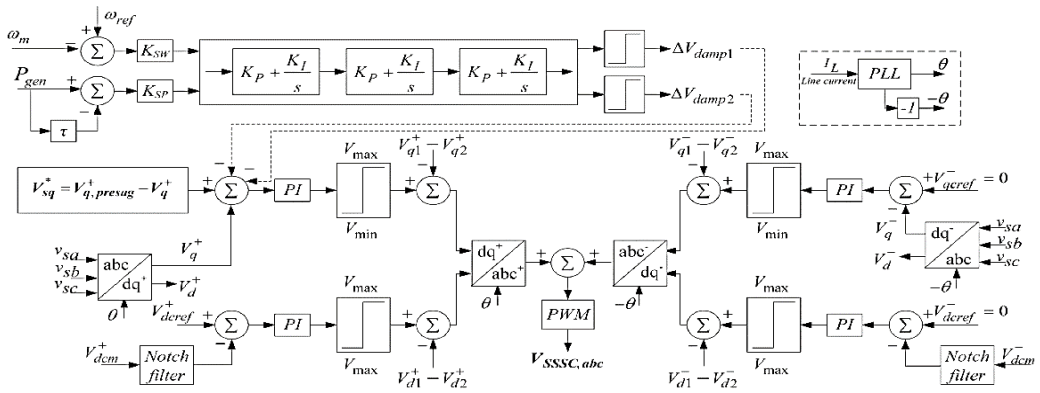


شکل(۲):مدل جبران‌کننده استاتیک سنکرون

به عنوان حلقه کنترل بیرونی STATCOM از کنترل ولتاژ اولیه (PVC) به منظور تعیین جریان عمودی مرجع STATCOM استفاده شده است. در نهایت، ولتاژهای کنترلی عمودی و مستقیم از قاب مرجع $\boldsymbol{d-q}$ به ولتاژهای سه فاز که به عنوان منابع ولتاژ قابل کنترل مدل شده‌اند، تبدیل می‌گردند.

۴-جبران‌کننده سری سنکرون استاتیک (SSSC)

هدف جبران‌کننده سری سنکرون استاتیک، حفظ ولتاژ استاتور توربین بادی مبتنی بر ژنراتور القایی خودتحریک (SEIG) در شرایط خطاست. لذا، حالت گذرای جریان ژنراتور حتی در طی شرایط خطای شبکه نیز کاهش می‌یابد. مدل متوسط جبران‌کننده سری سنکرون استاتیک برای انجام مطالعات پیشنهادی مناسب است.



شکل(۳): کنترل‌کننده SSSC در قاب‌های مرجع توالی منفی و مثبت مرتبط با حلقه‌های کنترل میرایی.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1392.2.2.5.6]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 2-No. 2- summer 2013

بنابران، کلیدزنی VSC با منابع ولتاژ قابل کنترل متصل به صورت سری با توربین بادی توسط یک ترانسفورماتور کوپل سری جایگزین می‌گردد. مقدار جبران سری با توجه به اختلاف ولتاژ شبکه پیش و در حین خطا تعیین می‌گردد. همچنین توجه نمایید که ولتاژ تزریقی $\mathbf{V_s}$ به صورت کامل بر جریان مرجع خط عمود است.

۴-۱- کنترل‌کننده توالی مثبت

شکل(۲)، برای کنترل‌کننده توالی $+ve$ براساس تشخیص ولتاژهای توالی مثبت V_{sq}^{+} و V_{sd}^{+} توسعه داده شده‌اند.خروجی بلوک PLL، زاویه فاز سنکرون‌شوندگی θ را تشخیص می‌دهد که برای تبدیل مولفه‌های محور عمودی و محور مستقیم $+ve$ جریان و ولتاژ سه فاز ac به کار می‌رود.

V_{d1}^{+} و V_{d2}^{+} به ترتیب مولفه‌های ولتاژ مستقیم توالی مثبت در باس $B1$ و باس $B2$ می‌باشند. همچنین V_{q1}^{+} و V_{q2}^{+} مولفه‌های ولتاژ عمودی توالی مثبت به ترتیب در باس $B1$ و باس $B2$ هستند. به علاوه، V_{d1}^{-} و V_{d2}^{-} به ترتیب مولفه‌های ولتاژ مستقیم توالی منفی در باس $B1$ و باس $B2$ و سیگنال‌های V_{q1}^{-} و V_{q2}^{-} مولفه‌های ولتاژ عمودی توالی منفی به ترتیب در باس $B1$ و باس $B2$ می‌باشند. ذکر این نکته نیز ضروری است که V_{dcm}^{+} و V_{dcm}^{-} به ترتیب ولتاژهای لینک dc بدون ریپل و با ریپل هستند. افت ولتاژ عمودی توالی $+ve$ (یعنی $V_{q1}^{+}-V_{q2}^{+}$) نسبت به جریان خط در دو سر راکتانس پراکندگی ترانسفورماتور کوپل به عنوان یک ورودی برای تنظیم‌کننده ولتاژ به کار می‌رود. ولتاژ عمودی توالی $+ve$ مرجع به عنوان اختلاف بین ولتاژهای پیش از خطا و پس از خطا در نظر گرفته شده و با ولتاژ عمودی توالی $+ve$ در دو سر ترانسفورماتور سری مقایسه می‌شود.

متعاقبا، تنظیم‌کننده ولتاژ مولفه‌های عمودی توالی $+ve$ ولتاژ مبدل را تعیین می‌کنند. مولفه مستقیم ولتاژ مبدل برای حفظ ولتاژ ثابت لینک dc خازن به کار می‌رود. ولتاژ مرجع لینک dc با مولفه توالی $+ve$ ولتاژ dc گه تبادل توان اکتیو بین طرف‌های ac و dc جبران‌کننده سری سنکرون را کنترل می‌کند، مقایسه می‌گردد.هر دو مولفه عمودی و مستقیم $+ve$ ولتاژ مبدل برای تعیین V_{sabc}^{+} به کار می‌روند. لذا با این کار، ولتاژ سری عمودی تزریقی براساس ولتاژ عمودی تزریقی مورد نظر V_{qref}^{+} کنترل می‌گردد. به علاوه، سیگنال‌های کنترل میرایی دوگان که توسط حلقه‌های کنترل میرایی کمکی تعیین می‌شوند، در شکل (۳) مشخص شده‌اند.

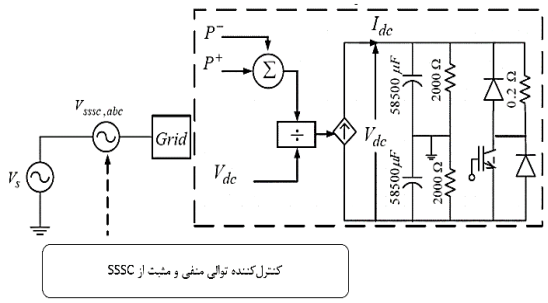
۴-۲- کنترل‌کننده توالی منفی

کنترل‌کننده توالی منفی برای کنترل افت ولتاژ در حالت نامتعادل به کار می‌رود. این موضوع بدین علت است که کنترل توالی مثبت فقط می‌تواند افت ولتاژ متعادل را جبران کند. در حالت وقوع خطاهای نامتقارن شبکه، کنترل‌کننده ولتاژ مجزای توالی منفی با در نظر گرفتن کنترل ولتاژهای عمودی و مستقیم توالی $-ve$ پیاده‌سازی می‌گردند. ولتاژهای عمودی توالی منفی در دو سر ترانسفورماتور سری با استفاده از تنظیم‌کننده‌های ولتاژ در مقدار صفر تنظیم می‌گردند تا ولتاژ عمودی توالی $-ve$ جبران‌کننده سری سنکرون استاتیک تعیین گردد. ولتاژ مرجع ریپل لینک dc برابر با صفر قرار داده شده است و با مولفه توالی منفی ولتاژ dc برای تعیین ولتاژ مستقیم توالی $-ve$ مقایسه می‌گردد.

ولتاژهای کنترلی dq توالی $-ve$ به V_{abc}^{-} تبدیل می‌شوند. توجه کنید که این تبدیل در $(-\theta)$ انجام می‌گیرد. پس از آن، این سیگنال به (V_{abc}^{-}) اضافه می‌گردد تا سیگنال ولتاژ تزریقی قابل‌کنترل $(V_{sssc,abc})$ مطابق با شکل (۲) به دست آید.

۴-۳- مدار معادل لینک DC

مدار dc جبران‌کننده سری سنکرون استاتیک براساس اصول تعادل توان مطابق با شکل (۴) کنترل شده و پیاده‌سازی می‌گردد.



شکل(۴): مدار معادل لینک DC

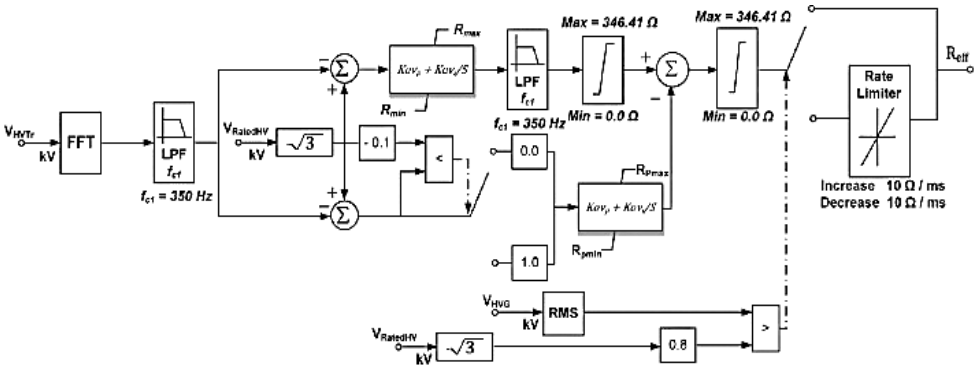
کنترل‌کننده دینامیکی لینک dc خازن، توان‌های اکتیو توالی‌های $+ve$ و $-ve$ را برای حفظ ولتاژ لینک dc در ولتاژ مطلوب در نظر می‌گیرد.

معادلات توان اکتیو توالی منفی و مثبت به صورت زیر خواهند بود:

$$P_S^{+}=\frac{3}{2}\left(V_{Sd}^{+}.i_{Sd}^{+}+v_{Sq}^{+}.i_{Sq}^{+}\right) \quad (۱)$$

$$P_S^{-}=\frac{3}{2}\left(V_{Sd}^{-}.i_{Sd}^{-}+v_{Sq}^{-}.i_{Sq}^{-}\right) \quad (۲)$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1392.2.2.5.6]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 2-No. 2- summer 2013



شکل(۵): طرح کنترلی مقاومت ترمزی سری قابل‌کنترل (CSBR) در هر فاز.

توان dc برابر است با توان لحظه‌ای ac که مجموع توان‌های لحظه‌ای توالی‌های $+ve$ و $-ve$ بوده عبارتست از $P_S = P_S^+ + P_S^-$. بنابراین، توان منتج بر ولتاژ dc اندازه‌گیری‌شده تقسیم می‌گردد تا سیگنال جریان کنترل‌شده منبع جریان تعیین گردد. مولفه‌های فرکانس دو خطی P_d و P_q به منظور کمینه‌سازی ریپل‌های ولتاژ dc با استفاده از فیلترهای شکاف، فیلتر می‌گردند. بنابراین، لینک dc خازن براساس تنظیم‌کننده‌های ولتاژ dc توالی $+ve$ و $-ve$ در ولتاژ ثابت نگه داشته می‌شود.

۵-مقاومت ترمزی سری قابل‌کنترل (CSBR)

مقاومت ترمزی سری قابل‌کنترل به صورت یک منبع ولتاژ قابل‌کنترل سری عمل می‌کند. با وقوع خطا، مقاومت به صورت سری بین ژنراتور توربین بادی (WTG) و شبکه قرار می‌گیرد. در واقع، مقاومت به توان اکتیو ژنراتور اجازه تخلیه می‌دهد؛ همچنین یک افت ولتاژ ایجاد می‌کند که منجر به افزایش ولتاژ ترمینال ماشین می‌گردد. مقاومت موثر ساختار CSBR براساس جریان مجاز به عبور از طریق R_{max} در هر فاز تعیین می‌گردد. مقدار R_{max} به گونه‌ای قرار داده می‌شود که به ساختار CSBR اجازه دهد تا شدیدترین خطاها را برای پارامترهای داده‌شده شبکه به طور موفق میرا نماید. مقاومت موثر از طریق محاسبه نسبت جریان مجاز به عبور از مقاومت به جریان مجاز به عبور از کلید بای‌پس موازی به دست می‌آید. ساختار کنترل‌کننده CSBR برای هر فاز براساس دو حلقه کنترلی است: ۱) حلقه کنترلی افت ولتاژ و ۲) حلقه حفاظتی بازیابی اضافه‌ولتاژ. این حلقه‌های کنترلی در شکل (۵) آورده شده‌اند.

هر دو حلقه مبتنی بر تکنیک کنترلی تناسبی-انتگرالی (PI) هستند.

کاربرد حلقه‌های دوگان ضروری است، زیرا در صورتی که فقط یک حلقه افت ولتاژ داشته باشیم، اضافه‌ولتاژ بازیابی‌شده ممکن است به حدود خیلی بالا نزدیک شود که منجر به عملکرد همزمان سیستم حفاظتی می‌شود. هر دو حلقه توسط یک خطای محاسبه‌شده به صورت اختلاف بین مقادیر نامی و اندازه‌گیری‌شده دامنه ولتاژ فاز تغذیه می‌شوند. دامنه ولتاژ فاز با استفاده از تبدیل فوریه سریع بهدست آمده و خروجی آن با به کار بردن یک فیلتر پایین‌گذر با فرکانس مشخصه (f_{c1}) فیلتر می‌شود.

۵-۱- حلقه کنترل افت ولتاژ

حلقه افت ولتاژ همواره فعال است. انتگرال‌گیرهای حلقه کنترلی افت ولتاژ در هنگام رسیدن به مقدار ۰/۹۷ $p.u.$ (در جهت رو به افزایش) دامنه ولتاژ نامی هر فاز، راه‌اندازی می‌گردند. خروجی کنترل‌کننده PI با استفاده از یک فیلتر پایین‌گذر با فرکانس مشخصه (f_{c1}) فیلتر می‌شود. مقدار حداکثر مقاومت موثر نمی‌تواند از مقدار مقاومت سری R_{max} تجاوز نماید. همچنین توجه کنید که حداقل مقدار برای مقاومت، صفر است.

۵-۲- حلقه حفاظت اضافه‌ولتاژ بازیابی

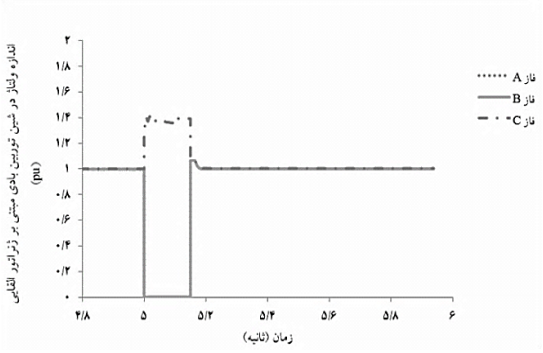
حلقه حفاظت اضافه‌ولتاژ بازیابی هنگامی فعال می‌شود که دامنه ولتاژ فاز از مقدار ۱/۱ $p.u.$ دامنه نامی خود تجاوز نماید. این حلقه با تفریق یک مقدار مقاومت حفاظتی از خروجی مقاومت موثر که از حلقه کنترل افت ولتاژ به دست آمده است، عمل می‌کند. بنابراین،

[DOR: 20.1001.1.23222468.1392.2.2.5.6]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 2-No. 2- summer 2013
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

مقدار آن و همچنین ولتاژ افزایش‌یافته آن به دلیل افت ولتاژ که حتی پس از رفع خطا نیز باقی می‌ماند را کاهش می‌دهد. مقاومت موثر کل بین مقادیر صفر و R_{max} که بیانگر مقاومت نامی این ساختار سری است، محدود می‌گردد. به منظور بازیابی آرام و پایدار، مقاومت موثر کل در برابر یک محدودکننده نرخ قرار گرفته است تا از تغییر ناگهانی در مقدار آن جلوگیری به عمل آورد. محدودکننده نرخ زمانی فعال می‌شود که مقدار rms سه فاز V_{HVG} (ولتاژ لحظه‌ای ولتاژ در سمت شبکه مقاومت) از مقدار ۸/. پریونیت در جهت افزایشی عبور کند. برخلاف روش‌های رایج تشخیص عدم تعادل، در این طرح، از تبدیل‌های dq به منظور به دست آوردن ورودی کنترل‌کننده‌ها استفاده نشده است و به جای آن؛ دامنه‌های ولتاژ فاز (قاب abc) به کار رفته است.

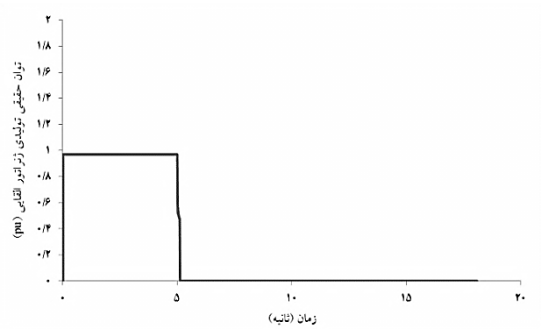
۶-وضعیت وقوع خطای دوفاز به زمین بدون در نظر گرفتن طرح‌های سری

این خطا بر روی فازهای a و b در ثانیه ۵ رخ می‌دهد. در اثر این خطا با توجه به افت شدید ولتاژ، ژنراتور نمی‌تواند به تزریق توان اکتیو به شبکه ادامه دهد. شکل(۶)، ولتاژ لحظه‌ای پریونیت شین توربین بادی مبتنی بر ژنراتور القایی خودتحریک را در اثر وقوع خطای دو فاز نمایش می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که در حین خطا، ولتاژ دو فاز a و b دچار افت بسیار شدید شده و تقریبا برابر با صفر است. ولتاژ فاز c که خطا بر روی آن انجام نشده، به علت عدم تعادل ایجادشده، افزایش یافته است.



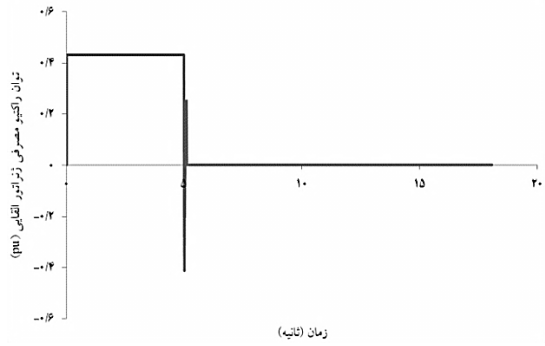
شکل (۶): ولتاژ فازهای مختلف شبکه در اثر وقوع خطای دو فاز به زمین در ثانیه ۵.

همان‌طور که از شکل (۷) ملاحظه می‌گردد، ژنراتور القای خودتحریک نتوانسته است به تزریق توان اکتیو به شبکه ادامه دهد. در واقع این موضوع به دلیل عملکرد سیستم حفاظتی ژنراتور می‌باشد که با توجه به افت شدید ولتاژ و احتمال آسیب رسیدن به آن از ادامه کار ژنراتور جلوگیری نموده است.



شکل (۷): توان اکتیو مصرفی توسط توربین بادی مبتنی بر ژنراتور القایی خودتحریک در اثر وقوع خطای دو فاز به زمین در ثانیه ۵.

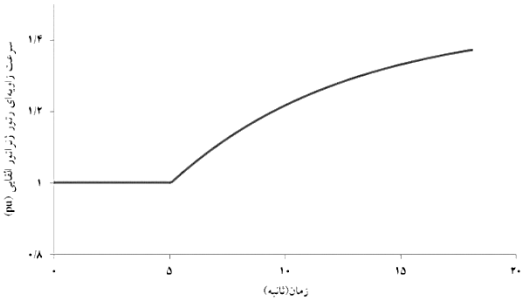
شکل (۸)، توان راکتیو مصرفی ژنراتور القایی خود تحریک را نمایش می‌دهد. ملاحظه می‌شود که به علت صفر شدن ولتاژ، بانک های خازنی قادر به تولید توان راکتیو برای توربین بادی نیستند در نتیجه توان راکتیو ژنراتور نیز صفر شده است.



شکل (۸): توان راکتیو مصرفی توسط توربین بادی مبتنی بر ژنراتور القایی خودتحریک در اثر وقوع خطای دو فاز به زمین در ثانیه ۵.

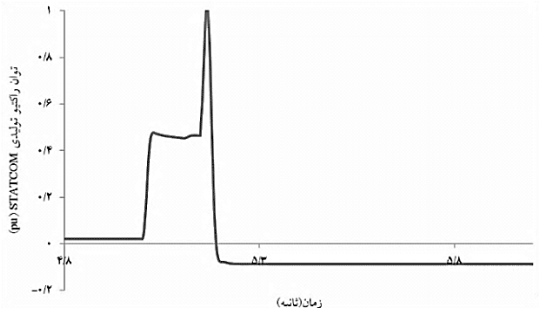
در شکل (۹)، سرعت زاویه‌ای رتور به نمایش درآمده است. ملاحظه کنید که سرعت ژنراتور همواره در حال افزایش است و ممکن است به تجهیزات رتور آسیب وارد گردد. این موضوع یکی از دلایل سیستم حفاظتی برای جلوگیری از کار ژنراتور است. بنابراین با توصیفات بیان‌شده می‌توان گفت که در صورت وقوع خطای دو فاز، ژنراتور القایی دچار ناپایداری می‌گردد و نمی‌تواند به کار خود ادامه دهد.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1392.2.2.5.6]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 2-No. 2- summer 2013
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]



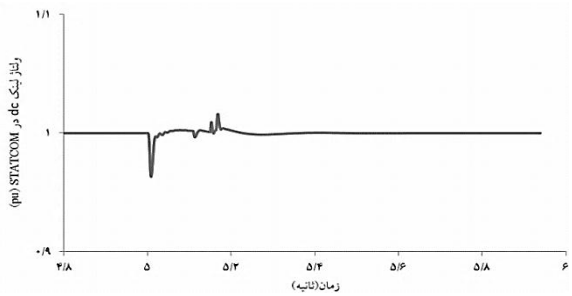
شکل(۹): سرعت زاویه‌ای رتور ژنراتور القایی خودتحریک در اثر وقوع خطای دو فاز به زمین در ثانیه ۵.

علیرغم وجود STATCOM در شبکه، این تجهیز نتوانسته است با تزریق توان راکتیو کافی به شبکه از افت شدید ولتاژ و توقف عملکردژنراتور القایی خودتحریک جلوگیری نماید.شکل (۱۰)، توان راکتیو تولیدی توسط STATCOM را در حین خطا نمایش می‌دهد.



شکل(۱۰): توان راکتیو تولیدی توسط STATCOM در اثر وقوع خطای دو فاز به زمین در ثانیه ۵.

همچنین در شکل (۱۱)، ولتاژ لینک dc در STATCOM به نمایش در آمده است. جبران کننده سنکرون استاتیکی توانسته است ولتاژ لینک dc خود را حفظ نماید. هرچند به دلیل ابعاد کوچک، نتوانسته است به تثبیت ولتاژ شبکه کمک نماید.

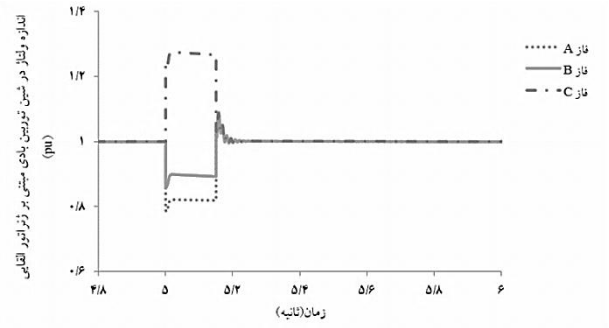


شکل(۱۱): ولتاژ لینک dc در STATCOM در اثر وقوع خطای دو فاز در ثانیه ۵.

۷-وضعیت وقوع خطا با در نظر گرفتن جبران‌کننده سری سنکرون استاتیک

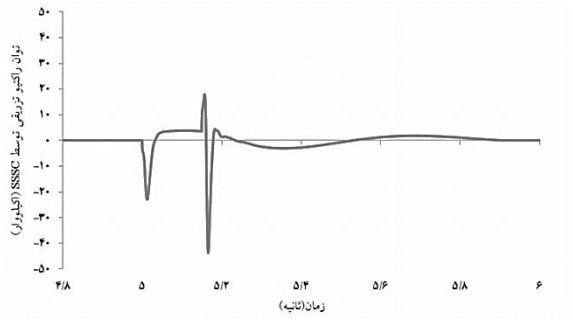
وقوع خطای دو فاز به زمین، عملکرد و قابلیت LVRT ژنراتور را تهدید و از کار ژنراتور جلوگیری نموده است. بدین منظور در این بخش، قصد داریم تا با اعمال جبران‌کننده سری سنکرون استاتیک به شبکه و با استفاده از مدارهای کنترلی، قابلیت LVRT را به ژنراتور باز گردانیم. در واقع هدف آن است که با حفظ ولتاژ در محدوده مناسب، ژنراتور بتواند به کار خود ادامه دهد.

در شکل (۱۲)، مقدار rms ولتاژ لحظه‌ای فازهای مختلف در اثر وقوع خطای دو فاز ترسیم شده است. ملاحظه نمایید که چگونه ولتاژ فازهای مختلف حفظ گردیده است تا ژنراتور القایی خودتحریک بتواند به کار خود ادامه دهد. این موضوع کارآمدی طرح سری مورد استفاده (SSSC) را اثبات می‌نماید.



شکل (۱۲):ولتاژ لحظه‌ای rms در شین توربین بادی در اثر وقوع خطای دو فاز در ثانیه ۵ و رفع آن در ثانیه ۵/۱۵ (حالت اضافه نمودن طرح جبران‌کننده سری سنکرون استاتیک SSSC).

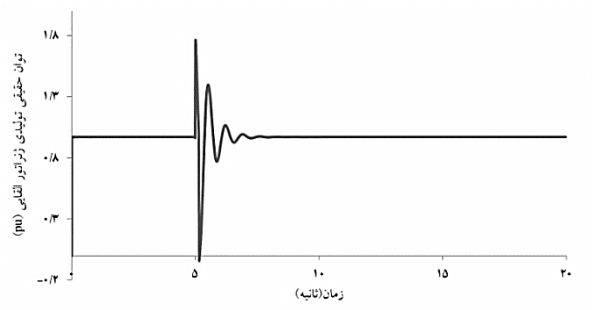
شکل (۱۳)، توان راکتیو تزریقی SSSC به عنوان یک تجهیز سری با مدار را به تصویر کشیده است. ملاحظه کنید که SSSC توانسته است.با تزریق ولتاژ سری در مدار، ولتاژ شین توربین بادی را در مقدار مناسب حفظ نموده و از نوسانات جلوگیری به عمل آورد.



شکل(۱۳): توان راکتیو تزریقی توسط SSSC به صورت سری در اثر وقوع خطا جهت حفظ ولتاژ شین توربین بادی.

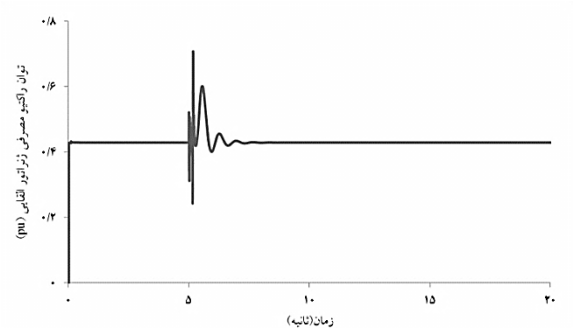
[DOR: 20.1001.1.23222468.1392.2.2.5.6]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 2-No. 2- summer 2013
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

از شکل (۱۴) ملاحظه می شود که عملکرد SSSC توانسته است موجب گردد که ژنراتور القایی خودتحریک به تزریق توان اکتیو به شبکه ادامه دهد.



شکل (۱۴): توان اکتیو تولیدی توسط توربین بادی مبتنی بر ژنراتور القایی خودتحریک در اثر وقوع خطای دو فاز در ثانیه ۵ و رفع آن در ثانیه ۵/۱۵(حالت وجود طرح سری **SSSC**).

شکل (۱۵)، نیز نشان می‌دهد که توان راکتیو مصرفی ژنراتور با توجه به تزریق توان راکتیو توسط SSSC پس از نوساناتی کوتاه به مقدار حالت دائمی خود رسیده و ثبیت شده است.

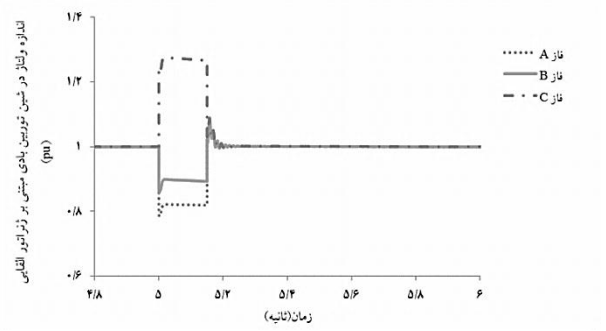


شکل(۱۵): توان اکتیو تولیدی توسط توربین بادی مبتنی بر ژنراتور القایی خودتحریک در اثر وقوع خطای دو فاز در ثانیه ۵ و رفع آن در ثانیه ۵/۱۵(حالت وجود طرح سری SSSC).

۸-وضعیت وقوع خطا با در نظر گرفتن مقاومت ترمزی سری قابل‌کنترل

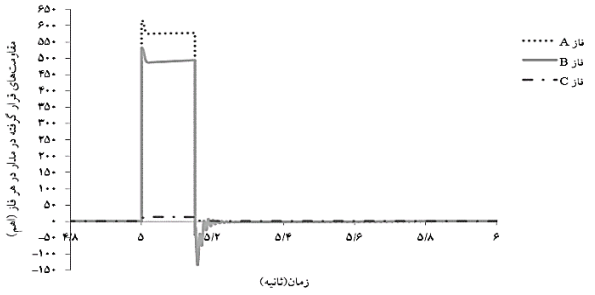
یکی دیگر از طرح‌های سری مورد استفاده در این مقاله، استفاده از مقاومت ترمزی سری قابل‌کنترل است. با به کار بردن این طرح نیز می‌توان همانند طرح پیشین، در شرایط وقوع خطا به حفظ ولتاژ در محدوده مناسب کمک نموده و قابلیت LVRT را برای ژنراتور القایی خودتحریک حفظ نمود.

در شکل (۱۶)، مقدار rms ولتاژ لحظه‌ای شین توربین بادی مبتنی بر ژنراتور القایی خودتحریک در حین وقوع خطا به تصویر درآمده است. ملاحظه کنید که در اثر وقوع خطای دو فاز، ولتاژ دو فاز کاهش یافته و ولتاژ فاز دیگر به دلیل عدم تعادل، افزایش یافته است.



شکل (۱۶): مقدار rms ولتاژ لحظه‌ای شین توربین بادی مبتنی بر ژنراتور القایی خودتحریک در اثر وقوع خطای دو فاز در ثانیه ۵ و رفع آن در ثانیه ۵/۱۵ (حالت وجود طرح سری(CSBR))

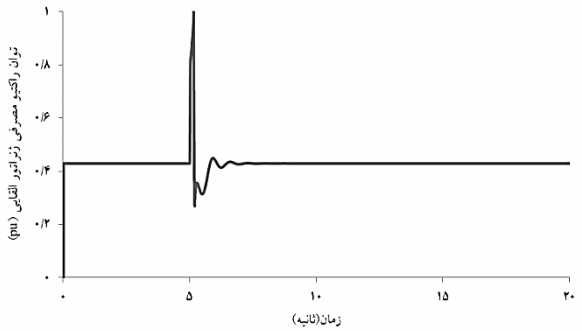
شکل (۱۷) نشان می دهد که چگونه با در مدار قرار گرفتن مقاومت‌های سری، حفظ ولتاژ در شین توربین بادی مبتنی بر ژنراتور القایی خودتحریک رخ داده است. همچنین مشاهده کنید که مقاومت قرارداده‌شده در دو فازی که خطا در آن‌ها رخ داده است، بسیار بزرگ و قابل توجه بوده و در فاز سالم، مقاومتی ناچیز قرار داده شده است.



شکل (۱۷): مقاومت قرارداده‌شده در مدار در فازهای مختلف در اثر وقوع خطای دو فاز در ثانیه ۵ و رفع آن در ثانیه۵/۱۵.

تغییرات توان راکتیو مصرفی ژنراتور در حالت وقوع خطای سه فاز در شکل (۱۸)ترسیم گردیده است. ملاحظه می‌شود که نوسانات مربوط به حالت با جبران CSBR کم‌تر شده است و پاسخ گذرای آن نسبت به حالت خطای دو فاز بهبود یافته است.

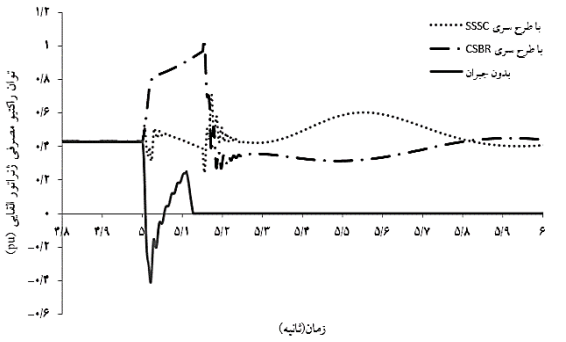
[DOR: 20.1001.1.23222468.1392.2.2.5.6]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 2-No. 2- summer 2013
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]



شکل (۱۸): توان راکتیو ژنراتور القایی در اثر وقوع خطای دو فاز در ثانیه ۵ و رفع آن در ثانیه ۵/۱۵ (حالت وجود طرح سری (CSBR).

۹-مقایسه طرح‌های سری مور استفاده

از بخش‌های قبلی ملاحظه گردید که در صورت وقوع خطای دو فاز و در حالت عدم استفاده از طرح‌های جبران سری، ژنراتور القایی خودتحریک مجبور به توقف کار و خاموشی می‌گردد. همچنین طرح‌های سری SSSC و CSBR می‌توانند مانع از بروز این مشکل شوند. شکل (۱۹)، مقایسه‌ای بین توان اکتیو تولیدی ژنراتور در شرایط وقوع خطا در حالات بدون جبران، با جبران SSSC و با جبران CSBR انجام داده است. بر طبق این شکل، دامنه و زمان نوسانات برای طرح سری SSSC نسبت به طرح سری CSBR شدیدتر است. طرح سری CSBR دارای نوسانات کم‌تر بوده و سریع‌تر نیز این نوسانات میرا می‌شوند.



شکل(۱۹): تغییرات توان راکتیو مصرفی ژنراتور القایی خود تحریک در شرایط وقوع خطای دو فاز در حالات بدون جبران، با جبران سری SSSC و با جبران سری CSBR.

۱۰- نتیجه گیری

در این مقاله، دو طرح سری شامل جبران‌کننده سری سنکرون استاتیک (SSSC) و مقاومت ترمزی سری قابل‌کنترل (CSBR) به منظور حفظ قابلیت ایستادگی در برابر افت ولتاژ (LVRT) در ژنراتور القایی خودتحریک پیشنهاد گردیده است. در صورت افت شدید ولتاژ در این ژنراتورها برای آسیب نرسیدن به آن‌ها، سیستم‌های حفاظتی موجود، ژنراتور را از مدار خارج می‌نمایند. لذا باید با طرح‌های مناسبی ولتاژ ژنراتور را در محدوده مناسب حفظ نموده تا ژنراتور بتواند به تزریق توان اکتیو به شبکه ادامه دهد. نتایج نشان دادند که این دو طرح می‌توانند به صورت کارآمد به حفظ ولتاژ شین توربین بادی مبتنی بر ژنراتور القایی خودتحریک کمک نموده و موجب بهبود قابلیت LVRT ژنراتور بشوند. با قرار دادن این طرح‌های سری در مدار از خاموشی ژنراتور در حین وقوع خطا جلوگیری به عمل می‌آید. هر چند هر دو طرح مذکور در بهبود قابلیت LVRT موثر واقع شدند، اما پاسخ‌های گذرای متفاوتی از خود ارائه دادند. لذا، مقایسه پاسخ‌های گذرا می‌تواند منجر به انتخاب طرح برتر شود. بنابراین در ادامه کار، مقایسه‌ای بین پارامترهای پاسخ گذرای دو طرح سری مورد استفاده انجام شد و طرح CSBR نسبت به طرح SSSC از برتری نسبی برخوردار بود.

ضمینه:پارامترهای مورد استفاده در شبیه سازی

STATCOM	CSBR
ولتاژ تنظیم	K_P=50
K_P=0.01	T_i=0.00014
T_i=0.007	R_{max}=350
$\pm I_{qref}$=1.172[VK]	R_{min}=0
DCولتاژ تنظیم	ژنراتور:
K_P=3	2 MWتوان مجاز:
T_i=0.025	20 KVولتاژ مجاز:
$\pm I_{qref}$=1.172[VK]	50HZفرکانس:
جریان تنظیم	شبکه:
$K_P=T_i$	20 KVولتاژ مجاز:
T_i=0.00023	50 HZفرکانس
$V_{dref\ max}$=0.46	SCR =10
$V_{qref\ max}$=0.46	X/R=8
ورماتور:	بانک خازنی
2.5MW مجاز:	7990µFظرفیت:
50 HZ مجاز:	SSSC(مثبت)
SSSC(منفی)	K_P=0.05
K_P=0.01	T_i=0.007
T_i=0.007	V_{qref} =0.46
V_{qref} =0.46	V_{dref} =0.46
V_{dref} =0.46	

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1392.2.2.5.6]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 2-No. 2- summer 2013

مراجع:

[1] A. D. Hansen, G. Michalke, P. Sørensen, T. Lund, and F. Iov, "Coordinated voltage control of DFIG wind turbines in uninterrupted operation during grid faults," *Wind Energy*, vol. 10, pp. 51–68, Aug. 2006.

[2] A. O. Ibrahim, T. H. Nguyen, D. C. Lee, and S. C. Kim, "A fault ridethrough technique of DFIG wind turbine systemusing dynamic voltage restorers," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 26, no. 3, pp. 871–882,Sep. 2011.

[3] Z. Chen and E. Spooner, "Grid power quality with variable speed wind turbines," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 16, no. 2, pp. 148–154, Jun. 2001.

[4] L. Holdsworth, X. G. Wu, J. B. Ekanayake, and N. Jenkins, "Direct solution method for initializing doubly fed induction wind turbine in power system dynamic models," *Proc. Inst. Elect. Eng. Gen.,Transm.,Distrib.*, vol. 150, no. 3, pp. 334–342, May 2003.

[5] M. S. El-Moursi, G. Joos, and C. Abbey, "A secondary voltage control strategy for transmission level interconnection of wind generation," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, no. 3, pp. 1178–1190, May 2008.

[6] M. ElMoursi, G. Joos, and C. Abbey, "High-performance voltage control scheme for wind park integration," *IET Renew. Power Gen.*, vol.1, no. 3, pp. 151–159, Sep. 2007.

[7] M. S. El-Moursi, "Fault ride through capability enhancement for selfexcited induction generator-based wind parks by installing fault current limiters," *IET Renew. Power Gen.*, vol. 5, no. 4, pp. 269–280, Jul. 2011.

[8] Y. Wang and L. Xu, "Coordinated control of DFIG and FSIG-based wind farms under unbalanced grid conditions," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 25, no. 1, pp. 367–377, Jan. 2010.

[9] A. C. Fault, "Ride-through of wind farms using series dynamic braking resistors," Ph.D. dissertation, School Elect., Electron. Comput. Eng.,Power Electron., Drives Mach. Group, Newcastle Univ., Newcastle,Australia, 2008.

[10] L. Qi, J. Langston, andM. Steurer, "Applying a STATCOMfor stability improvement to an existing wind farm with fixed-speed induction generators,"presented at the IEEE Power Energy Soc. Gen. Meeting —Convers. Del. Elect. Energy 21st Century, Pittsburgh, PA, USA, Jul.2008.

[11] P. J. F. Marques and J. A. Pec as Lopes, "Impact of the use of FACTS to increase robustness of operation in grids with large scale wind integration,"presented at the Nordic Wind Power Conf., Espoo, Finland,May 22–23, 2006.

[12] H. M. EL-Helw and S. B. Tennakoon, "Evaluation of the suitability of a fixed speed wind turbine for large scale wind farms considering the new UK grid code," *Renew. Energy*, vol. 33, no. 1, pp. 1–12, Jan. 2008.

[13] M. S. El-Moursi and A. M. Sharaf, "Voltage stabilization and reactive compensation using decoupled controllers for the STATCOM and SSSC," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 4, pp. 1985–1997, Nov.2005.

[14] F. Lorenz, and, Vestas Wind Syst. A/S (DK),, Flensburg, DE, USA,"Circuit arrangement and methods for use in a wind energy installation,"U.S. Patent 7 102 247, Sep. 5, 2006.

[15] L. Gertmar, H. Christensen, E. Nielsen, and L. Wraae, "New method and hardware for grid-connection of wind turbines and parks," presented at the Nordic Wind Power Conf., Espoo, Finland,May 2006.

[16] H. C. Christensen, L. Gertmar, S. Lindahl, J. Mantere, E. K. Nielsen,L.-E.Wraae, and ,ABB Res. Ltd., Zurich, Switzerland, "Electric power network," U.S. Patent 7 447 568, Nov. 4, 2008.

[17] D. Seyoum, C. Grantham, andM. F. Rahman, "The dynamic characteristics of an isolated self-excited induction generator driven by a wind turbine," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 39, no. 4, pp. 936–944, Jul./Aug.2003.

[18] G. B. Chung and J. H. Choi, "Application of fuzzy PI control algorithm as stator power controller of double-fed induction machine in power generation systems," *J. Power Electron.*, vol. 9, no. 1, pp. 109–116 2009.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1392.2.2.5.6]
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 2-No. 2- summer 2013