

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

علی دریکوند*^۱، محمود جورابیانی^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، دو توپولوژی 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 جبران کننده سری سنکرون استاتیک (SSSC) و مقاومت سری ترمزی قابل کنترل (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 برابر افت ولتاژ و حاشیه 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.

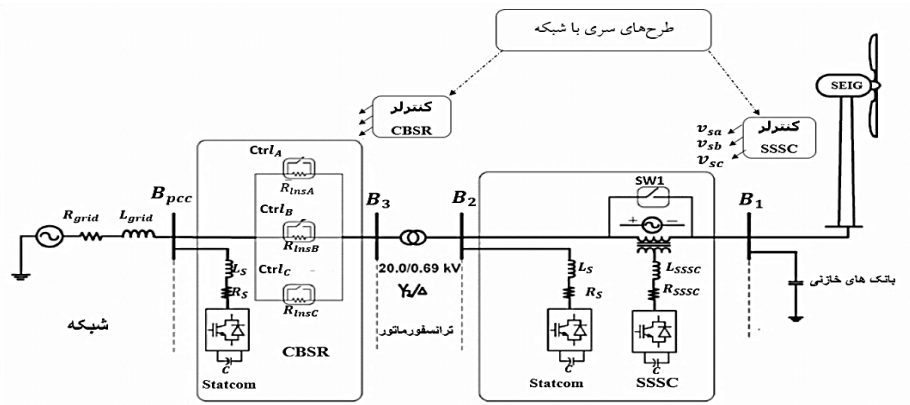
واژه‌های کلیدی: توربین‌های بادی سرعت ثابت، ژنراتور القایی خود-تحریک، جبران کننده توان راکتیو سری، مقاومت ترمزی.

۱- مقدمه

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 نسبتاً ضعیفی را در حین شرایط خطا از خود نشان داده‌اند.

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 [۳-۷].

نکته قابل توجه این است که LVRT یکی از ملزومات اصلی سیستم‌های تبدیل انرژی باد است. استانداردهای خاصی بدین



شکل (۱): شمای سیستم با طرح‌های جبران‌کننده سری

شبکه طراحی شده‌اند [۱۳]. طرح CSBR ارائه شده به دلیل پیوسته متغیر بودن و پله‌ای نبودن، نسبت به سایر طرح‌های مطالعاتی و صنعتی سودمندتر است [۱۴-۱۶].

طرح‌های ارائه شده 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 پایداری سیستم مقایسه و ارزیابی می‌شود.

۲- مدل سازی مسئله

۱-۲- 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 ۰/۶۹ 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 جذب شده توسط SEIG، به وسیله بانک‌های خازنی ثابت متصل به

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، نسبتاً 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 [۱۰-۱۲].

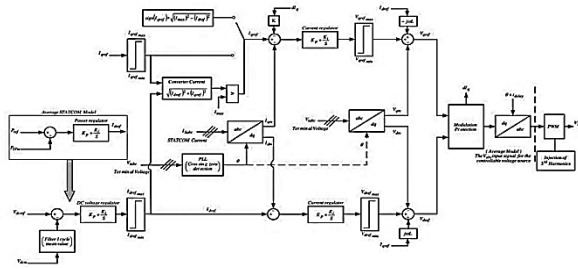
در این مقاله، جهت حل مسئله توانایی LVRT ژنراتورهای بادی مبتنی بر SEIG، دو روش مورد بررسی قرار گرفته است. این روش‌ها به منظور بهبود توانایی LVRT از توپولوژی‌های سری با شبکه استفاده می‌کنند. طرح‌های مورد بررسی براساس جدیدترین کنترل‌کننده‌ها طراحی و شبیه‌سازی شده‌اند:

۱- جبران‌کننده سری سنکرون استاتیک (SSSC) با کنترل‌های 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 قابل کنترل (CSBR) برای غلبه بر خطاهای متعادل و نامتعادل

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 کارایی بالاتر، افت ولتاژ در اندوکتانس‌های مبدل نیز به منظور کنترل سیگنال‌های ولتاژ اضافه شده‌اند.

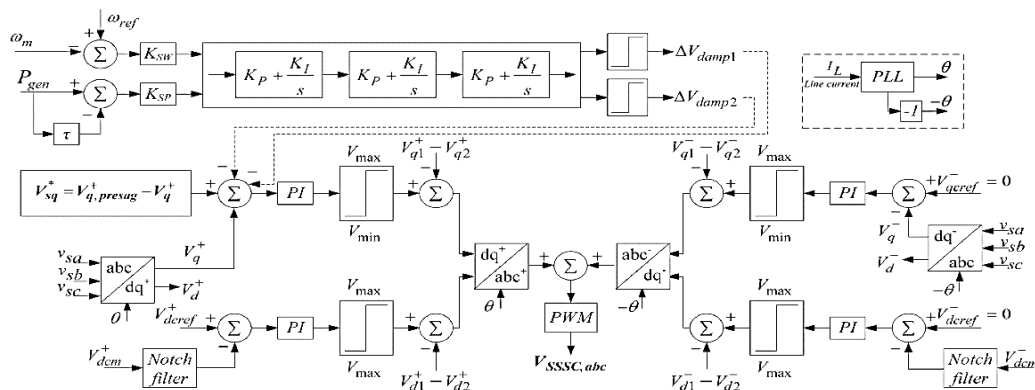


شکل (۲): مدل جریان‌کننده استاتیک سنکرون

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 $d - q$ 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 جریان‌کننده 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.

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 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 جزئی تر حذف شده است. به علاوه، کنترل ولتاژ لینک dc در این مدل با کنترل توان اکتیو STATCOM جایگزین شده است.

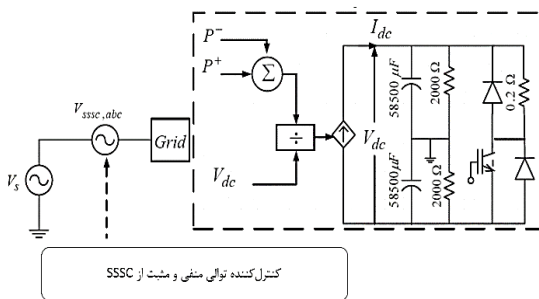
۴-۲- کنترل کننده توالی منفی

کنترل کننده 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، کنترل کننده 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 قابل کنترل $(V_{SSSC,abc})$ 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

کنترل کننده 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:

$$P_S^+ = \frac{3}{2} (V_{sd}^+ \cdot i_{sd}^+ + v_{sq}^+ \cdot i_{sq}^+) \quad (1)$$

$$P_S^- = \frac{3}{2} (V_{sd}^- \cdot i_{sd}^- + v_{sq}^- \cdot i_{sq}^-) \quad (2)$$

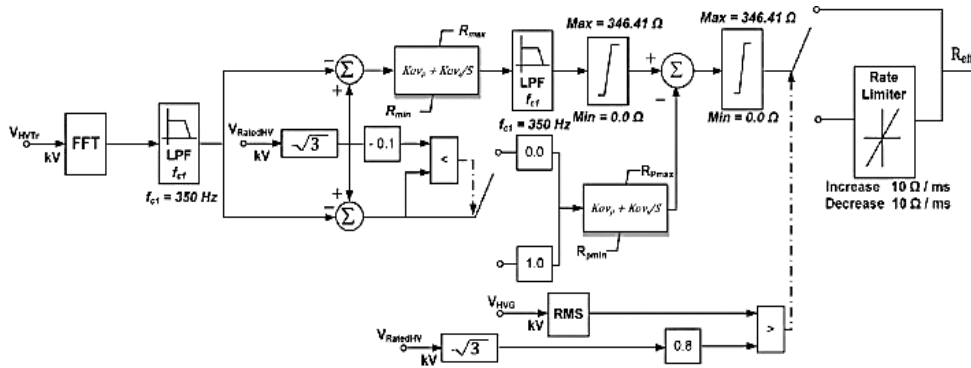
بنابراین، کلیدزنی VSC با منابع ولتاژ قابل کنترل متصل به صورت سری با توربین بادی توسط یک ترانسفورماتور کوپل سری جایگزین می‌گردد. مقدار جبران سری با توجه به اختلاف ولتاژ شبکه پیش و در حین خطا تعیین می‌گردد. همچنین توجه نمایند که ولتاژ تزریقی V_s به صورت کامل بر جریان مرجع خط عمود است.

۴-۱- کنترل کننده توالی مثبت

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

V_{d2}^+ و V_{d1}^+ 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_{d2}^- و V_{d1}^- 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.

متعاقباً، 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 که 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.



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

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 بازایی شده 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 اندازه‌گیری شده 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 $0.97 p.u.$ (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 بازایی

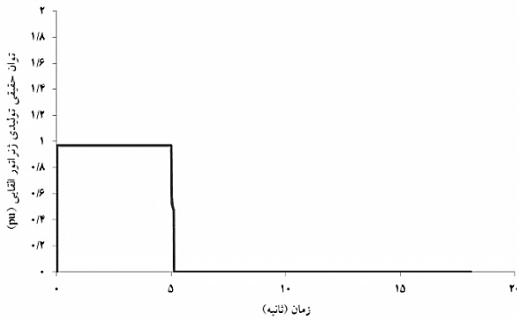
حلقه حفاظت اضافه‌ولتاژ بازایی هنگامی فعال می‌شود که دامنه ولتاژ فاز از مقدار $1.1 p.u.$ دامنه نامی خود تجاوز نماید. این حلقه با تفریق یک مقدار مقاومت حفاظتی از خروجی مقاومت موثر که از حلقه کنترل افت ولتاژ به دست آمده است، عمل می‌کند. بنابراین،

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 اندازه‌گیری شده تقسیم می‌گردد تا سیگنال جریان کنترل‌شده منبع جریان تعیین گردد. مولفه‌های فرکانس دو خطی P_d و P_q به منظور کمینه‌سازی رپل‌های 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 قابل کنترل (CSBR)

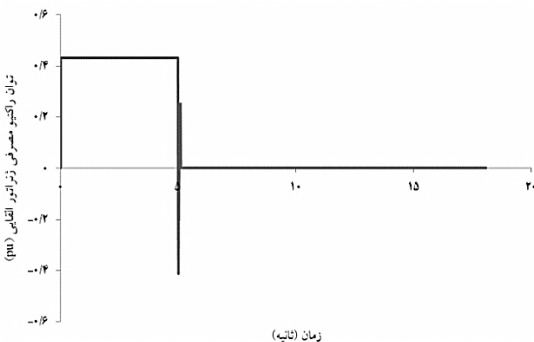
مقاومت ترمزی سری قابل کنترل به صورت یک منبع ولتاژ قابل کنترل سری عمل می‌کند. با وقوع خطا، مقاومت به صورت سری بین ژنراتور توربین بادی (WTG) و شبکه قرار می‌گیرد. در واقع، مقاومت به توان اکتیو ژنراتور اجازه تخلیه می‌دهد؛ همچنین یک افت ولتاژ ایجاد می‌کند که منجر به افزایش ولتاژ ترمینال ماشین می‌گردد. مقاومت 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 بازایی اضافه‌ولتاژ. این حلقه‌های کنترلی در شکل (۵) آورده شده‌اند.

همان‌طور که از شکل (۷) ملاحظه می‌گردد، ژنراتور القایی 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 خودتحریک را نمایش می‌دهد. ملاحظه می‌شود که به علت صفر شدن ولتاژ، بانک‌های خازنی قادر به تولید توان راکتیو برای توربین بادی نیستند در نتیجه توان راکتیو ژنراتور نیز صفر شده است.



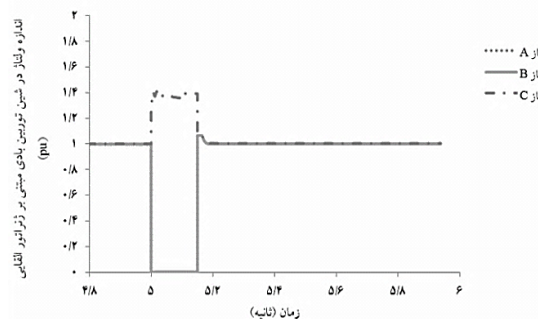
شکل (۸): توان راکتیو مصرفی توسط توربین بادی مبتنی بر ژنراتور القایی خودتحریک در اثر وقوع خطای دو فاز به زمین در ثانیه ۵.

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 بیان شده می‌توان گفت که در صورت وقوع خطای دو فاز، ژنراتور القایی دچار ناپایداری می‌گردد و نمی‌تواند به کار خود ادامه دهد.

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 ۱/۸ 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 دو فاز 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 تقریباً برابر با صفر است. ولتاژ فاز c که خطا بر روی آن انجام نشده، به علت عدم تعادل ایجادشده، افزایش یافته است.

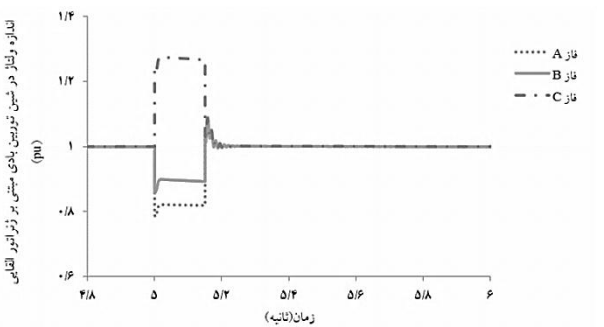


شکل (۶): ولتاژ فازهای مختلف شبکه در اثر وقوع خطای دو فاز به زمین در ثانیه ۵.

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

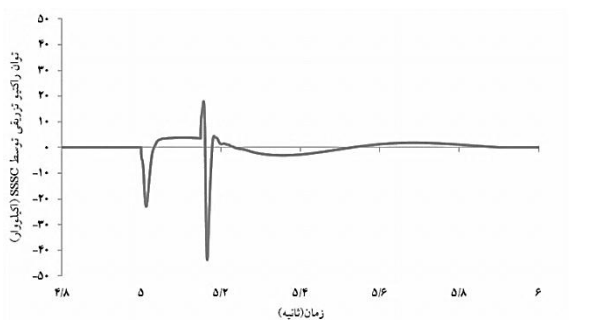
وقوع خطای دو فاز به زمین، عملکرد و قابلیت LVRT ژنراتور را تهدید و از کار ژنراتور جلوگیری نموده است. بدین منظور در این بخش، قصد داریم تا با اعمال جبران کننده سری سنکرون استاتیک به شبکه و با استفاده از مدارهای کنترلی، قابلیت LVRT را به ژنراتور باز گردانیم. در واقع هدف آن است که با حفظ ولتاژ در محدوده مناسب،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

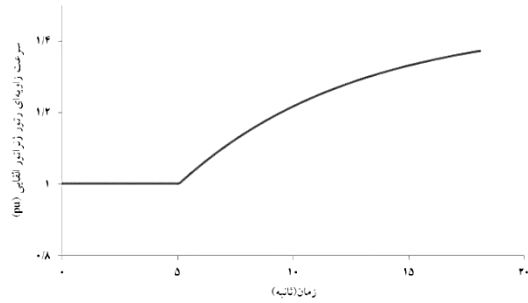


شکل (۱۲): ولتاژ لحظه‌ای rms در شین توربین بادی در اثر وقوع خطای دو فاز در ثانیه ۵ و رفع آن در ثانیه ۵/۱۵ (حالت اضافه نمودن طرح جبران کننده سری سنکرون استاتیک SSSC).

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.

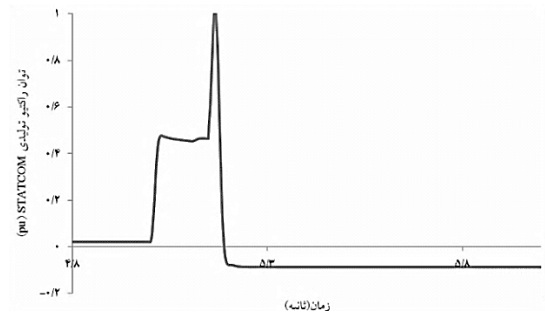


شکل (۱۳): توان راکتیو تزریقی توسط SSSC به صورت سری در اثر وقوع خطا جهت حفظ ولتاژ شین توربین بادی.



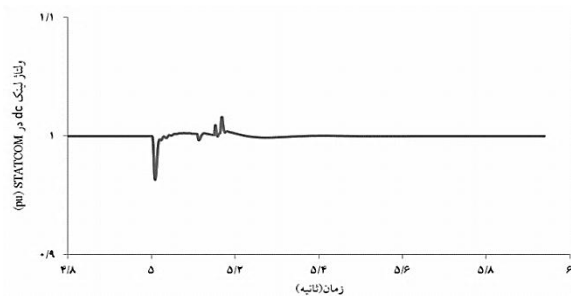
شکل (۹): سرعت زاویه‌ای رتور ژنراتور القایی خودتحریک در اثر وقوع خطای دو فاز به زمین در ثانیه ۵.

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



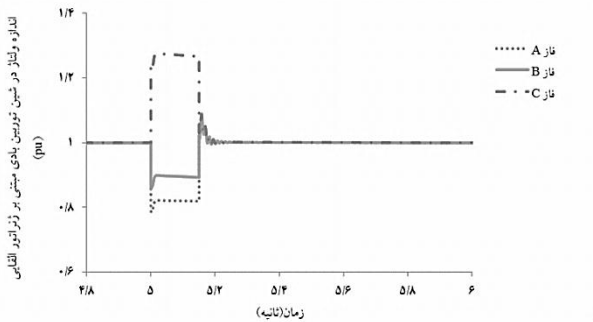
شکل (۱۰): توان راکتیو تولیدی توسط STATCOM در اثر وقوع خطای دو فاز به زمین در ثانیه ۵.

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



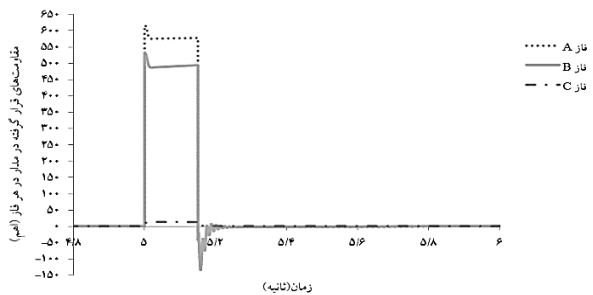
شکل (۱۱): ولتاژ لینک dc در STATCOM در اثر وقوع خطای دو فاز در ثانیه ۵.

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))

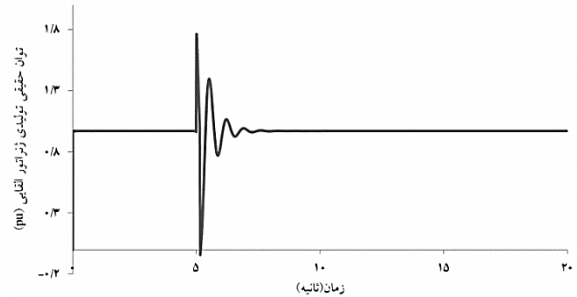
شکل (۱۷) نشان می‌دهد که چگونه با در مدار قرار گرفتن مقاومت‌های سری، حفظ ولتاژ در شین توربین بادی مبتنی بر ژنراتور القایی خودتحریک رخ داده است. همچنین مشاهده کنید که مقاومت قرارداده شده در دو فاز که خطا در آن‌ها رخ داده است، بسیار بزرگ و قابل توجه بوده و در فاز سالم، مقاومتی ناچیز قرار داده شده است.



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

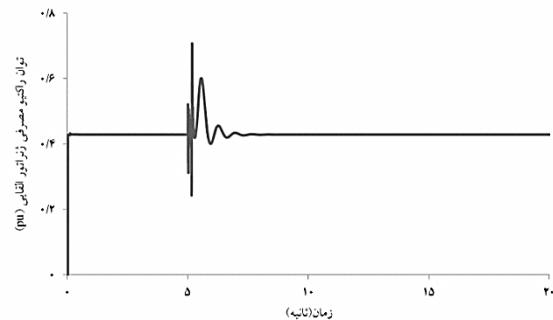
تغییرات توان راکتیو مصرفی ژنراتور در حالت وقوع خطای سه فاز در شکل (۱۸) ترسیم گردیده است. ملاحظه می‌شود که نوسانات مربوط به حالت با جبران CSBR کم‌تر شده است و پاسخ گذرای آن نسبت به حالت خطای دو فاز بهبود یافته است.

از شکل (۱۴) ملاحظه می‌شود 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 قابل کنترل

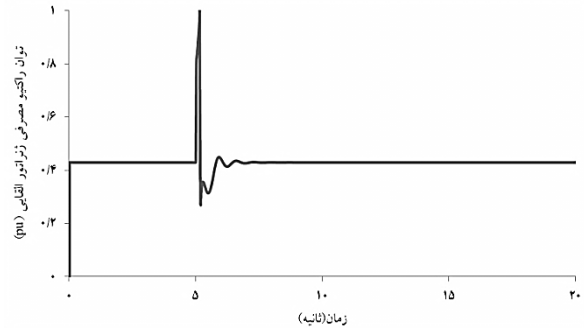
یکی دیگر از طرح‌های سری مورد استفاده در این مقاله، استفاده از مقاومت ترمزی سری قابل کنترل است. با به کار بردن این طرح نیز می‌توان همانند طرح پیشین، در شرایط وقوع خطا به حفظ ولتاژ در محدوده مناسب کمک نموده و قابلیت LVRT را برای ژنراتور القایی خودتحریک حفظ نمود.

۱۰- نتیجه گیری

در این مقاله، دو طرح سری شامل جبران کننده سری سنکرون استاتیک (SSSC) و مقاومت ترمزی سری قابل کنترل (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.

ضمیمه: پارامترهای مورد استفاده در شبیه سازی

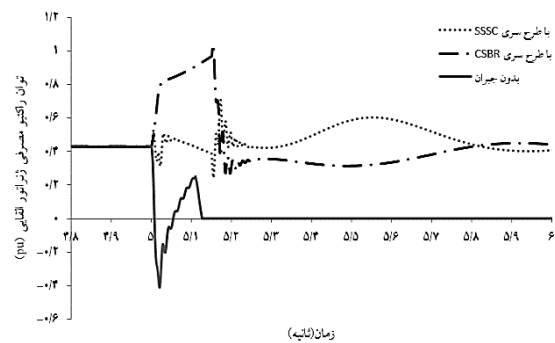
STATCOM	CSBR
ولتاژ تنظیم	$K_P=50$
$K_P=0.01$	$T_i=0.00014$
$T_i=0.007$	$R_{max}=350$
$\pm I_{qref}=1.172[VK]$	$R_{min}=0$
ولتاژ DC تنظیم	ژنراتور:
$K_P=3$	2 MW توان مجاز:
$T_i=0.025$	20 KV ولتاژ مجاز:
$\pm I_{qref}=1.172[VK]$	50 HZ فرکانس:
جریان تنظیم	شبه:
$K_P=T_i$	20 KV ولتاژ مجاز:
$T_i=0.00023$	50 HZ فرکانس:
$V_{dref max}=0.46$	SCR =10
$V_{qref max}=0.46$	X/R=8
تورماتور	بانک خازنی
2.5 MW مجاز:	7990 μF ظرفیت:
50 HZ مجاز:	(-) مثبت SSSC
SSSC (منفی)	$K_P=0.05$
$K_P=0.01$	$T_i=0.007$
$T_i=0.007$	$V_{qref}=0.46$
$V_{qref}=0.46$	$V_{dref}=0.46$
$V_{dref}=0.46$	



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.

مراجع:

- [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, and M. 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.
- [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 ride-through technique of DFIG wind turbine system using 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 self-excited 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, and M. Steurer, "Applying a STATCOM for 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.