

# روشی جدید برای بهبود قابلیت عبور از افت ولتاژ ژنراتور القایی دو سو تغذیه با استفاده از محدود کننده جریان خطای ابر رسانای مقاومتی

محمدرضا سلطانیپور<sup>۱</sup> حمید رادمنش<sup>۲</sup> داود یوسفیان<sup>۳</sup>

۱- استاد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری- تهران- ایران

[soltanpour@ssau.ac.ir](mailto:soltanpour@ssau.ac.ir)

۲- دانشیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری- تهران- ایران

[Radmanesh@ssau.ac.ir](mailto:Radmanesh@ssau.ac.ir)

۳- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر - تهران- ایران

[dyoosefian@aut.ac.ir](mailto:dyoosefian@aut.ac.ir)

**چکیده:** امروزه استفاده از ژنراتور القایی دو سو تغذیه در پارک‌های بادی به دلیل مزایای متعددی از جمله قابلیت عملکرد در محدوده وسیعی از سرعت باد، کنترل بهینه و قیمت مناسب روز به روز در حال افزایش می‌باشد. از طرف دیگر اما در شرایط وقوع افت ولتاژ در ترمینال‌های ژنراتور القایی دو سو تغذیه، ممکن است جریان شدیدی در مبدل‌های الکترونیک قدرت این ژنراتور جاری گردد. لذا به منظور جلوگیری از آسیب دیدن این مبدل‌ها، ژنراتور مذکور از شبکه قطع می‌گردد. برای جلوگیری از این چنین حوادثی در این مقاله الزامات عبور از افت ولتاژ مزارع بادی بهبود داده شده است. طبق این الزامات، پارک‌های بادی باید بتوانند تا مدت زمان مشخصی افت ولتاژ در پایانه خود را تحمل کرده و به شبکه متصل باقی بمانند. در این مقاله، تابع هدف جدیدی به منظور بدست آوردن امیدانس بهینه محدود کننده جریان خطای ابر رسانا برای بهبود ولتاژ ترمینال ژنراتور القایی دو سو تغذیه در شرایط وقوع افت ولتاژ پیشنهاد شده است. روش پیشنهاد شده در محیط MATLAB/Simulink شبیه سازی شده است. با این نتایج، بهبودی قابل توجه قابلیت عبور از افت ولتاژ مزارع بادی متصل به ژنراتور القایی دو سو تغذیه با استفاده از روش پیشنهاد شده نشان داده شده است.

**واژه‌های کلیدی:** قابلیت عبور از افت ولتاژ- ژنراتور القایی دوسو تغذیه- محدود کننده جریان خطای ابر رسانا- بهینه سازی

**نوع مقاله:** پژوهشی

**DOI: 10.52547/jiaeee.19.4.153**

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۲

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۳/۸

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمدرضا سلطانیپور

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - بزرگراه شهید سعیدی - خیابان دانشگاه هوایی - دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری -

دانشکده‌ی برق

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، انرژی باد در دو حوزه ظرفیت و تکنولوژی رشد سریعی داشته است. تا سال ۲۰۱۷ میلادی ظرفیت جهانی مزارع بادی به بیش از ۵۶۵ گیگاوات رسیده است و پیش بینی شده است که تا پایان سال ۲۰۲۱ این رقم به بیش از ۸۰۰ گیگاوات خواهد رسید. علت این رشد سریع را می‌توان مسائل زیست محیطی و همچنین بروز تکنولوژی‌های جدید و اقتصادی شدن کاربرد اینگونه منابع تولید پراکنده بیان کرد [۱-۳].

در میان تکنولوژی‌ها متعدد مورد استفاده در نیروگاه‌های بادی، ژنراتور القایی دو سو تغذیه (DFIG)<sup>۱</sup> یکی از تکنولوژی‌های غالب مورد استفاده می‌باشد [۴]. این ژنراتور دارای مزایایی همچون قیمت مناسب، کنترل بهینه، آلودگی صوتی و وزن کمتر و عملکرد در محدوده وسیعی از سرعت باد می‌باشد. در DFIG دو نوع مبدل به کار می‌رود که عبارتند از مبدل سمت روتور (RSC)<sup>۲</sup> و مبدل سمت شبکه (GSC)<sup>۳</sup>. مبدل سمت روتور حد اکثر توان را از طریق سرعت روتور کنترل می‌کند و مبدل سمت شبکه توان اکتیو و راکتیو تولیدی ژنراتور را کنترل کرده و همچنین ولتاژ لینک DC را ثابت نگه می‌دارد [۵].

در کنار مزایایی که برای DFIG بیان گردید، این ژنراتور با چالش‌هایی نیز مواجه است. مهمترین مشکل استفاده از ژنراتور القایی دو سو تغذیه را می‌توان حساسیت شدید آن نسبت به اغتشاشات شبکه مانند افت ولتاژ بیان نمود. علت این حساسیت این است استاتور آن مستقیماً به شبکه متصل می‌شود [۶]. از طرف دیگر به دلیل توسعه نفوذ مزارع بادی در سطح شبکه برق، اخیراً بهره‌برداری شبکه الزاماتی تحت عنوان الزامات عبور از افت ولتاژ (LVRT)<sup>۴</sup> را تعریف کرده‌اند که مزارع بادی را ملزم می‌کند تحت شرایط افت ولتاژ تا مدت مشخصی که وابسته به شدت افت ولتاژ می‌باشد، به شبکه متصل باقی بمانند [۷].

در مقالات، راه حل‌های مختلفی برای بهبود الزامات LVRT ارائه شده است. این روش‌ها را می‌توان در دو دسته تقسیم بندی کرد که عبارتند از روش‌های بر پایه دستگاه‌های خارجی و روش‌های بر پایه اصلاح سیستم کنترل داخلی.

در روش‌هایی که از ادوات سخت افزاری استفاده می‌کنند، در [۸] استفاده از کرویاب همراه با یک مدار سری R-L به منظور متصل نگه داشتن RSC به سیم پیچی روتور در شرایط خطای اتصال کوتاه پیشنهاد شده است. اما این روش ممکن است موجب جذب توان راکتیو گردد چرا که ژنراتور القایی دو سو تغذیه را تبدیل به موتور القایی می‌کند. استفاده همزمان از محدود کننده جریان خطای ابر رسانا (SFCL)<sup>۵</sup> و ذخیره ساز انرژی مغناطیسی ابر رسانا (SMES)<sup>۶</sup> در [۹] ارائه شده است که به ترتیب به روتور و لینک DC متصل شده‌اند. در این روش، SFCL دامنه جریان خطا را کاهش داده است و باعث بهبود ولتاژ ترمینال گردیده است. همچنین، ولتاژ لینک DC نیز توسط SMES فراهم گردیده است. اما به کارگیری SMES موجب افزایش

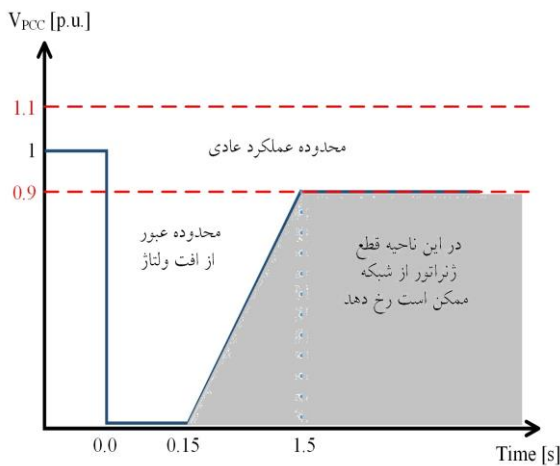
هزینه می‌گردد. در [۱۰] به کارگیری SFCL مقاومتی پیشنهاد شده است. در این روش، مدار معادل SFCL مورد بحث قرار گرفته است. لازم به ذکر است که در این نوع از SFCL ها مشکل ایجاد تلفات توان و اضافه حرارت وجود دارد به همین دلیل به دست آوردن امیدانس بهینه آن امری ضروری است. اتصال سری SFCL با سیم پیچی روتور در [۱۱] پیشنهاد شده است و مدل SFCL و DFIG به عنوان یک واحد الکتریکی- ابرسانایی یکپارچه سازی شده است. مرجع [۱۲] با پیشنهاد SFCL اندوکتیو روشی ارائه داده است که در شرایط عادی نقش فیلتر و در شرایط وقوع خطا نقش محدود کننده جریان را ایفا می‌کند. اما این نوع از FCL ها ابعادی در حدود ۴ برابر بیشتر از نوع مقاومتی دارند. نوع دیگری از محدود کننده جریان خطا به نام switch-type در [۱۳] پیشنهاد شده است. این دستگاه با محدود کردن جریان خطا، از شدت افت ولتاژ می‌کاهد. لازم به ذکر است که این نوع محدود کننده‌های جریان خطا علاوه بر ساختار پیچیده‌ای که دارند، نیازمند کنترلی غیر خطی نیز هستند. به کارگیری یک STATCOM<sup>۷</sup> که از ترانزیستورهای قدرت و خازن‌های شناور کمتری برخوردار است به منظور کمتر کردن تلفات کلید زنی و بهبود قابلیت گذر از افت ولتاژ در [۱۴] پیشنهاد شده است که این روش قادر به بهبودی الزامات مذکور در شرایط افت ولتاژ شدید نمی‌باشد. به طور کلی STATCOM دستگاهی است که در شرایط وقوع خطا، توان راکتیو به شبکه تزریق می‌کند. اما این دستگاه با مشکلاتی مانند محدودیت در جریان تزریقی و هزینه بالا همراه است [۱۵]. مرجع [۱۶] ساختار جدیدی برای بهبود قابلیت LVRT در توربین‌های بادی بر پایه ژنراتور القایی سرعت ثابت پیشنهاد داده است. این ساختار که در مجموع از ۱۰ کلید نیمه هادی تشکیل شده است، قادر است در پاسخ به شرایط گذرای شبکه در حین خطا هم جبران سازی سری و هم جبران سازی موازی را فراهم آورد.

در بخش روش‌های اصلاح سیستم کنترلی، در [۱۷] کنترلی غیر خطی با استفاده از کنترل فازی برای بهبود الزامات عبور از افت ولتاژ ارائه شده است. روش کنترل پیشگو<sup>۸</sup> به منظور کنترل مستقیم جریان روتور و استاتور در مقابل نوسان شار استاتور در [۱۸] پیشنهاد شده است. در این روش شار گذرای استاتور در کنترل پیشگوی جریان و در شرایط گذر از افت ولتاژ گنجانده شده است. کنترلر جدیدی برای مزارع بادی بر پایه DFIG در [۱۹] ارائه شده است که با استفاده از ساختاری جدید، ولتاژ استاتور را در حین خطاهای متقارن و نامتقارن تنظیم می‌کند. همچنین کنترلر ارائه شده در [۲۰] در حین خطاهای نامتقارن از اضافه جریان در مبدل سمت روتور DFIG جلوگیری می‌کند. لازم به ذکر است که روش‌های اصلاح سیستم کنترل معمولاً با مشکلاتی مانند پیچیدگی، هزینه، خطر نوسان، مصرف توان و اشباع سیستم کنترل همراه هستند.

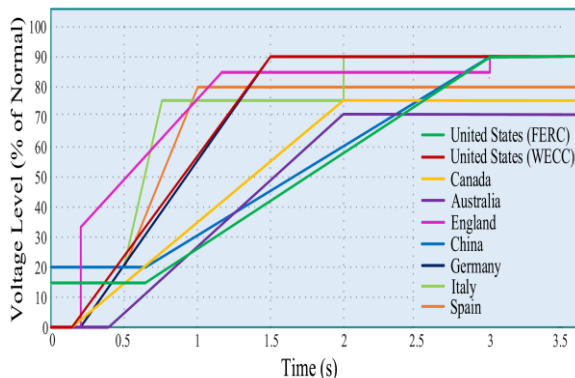
در روش‌های سخت افزاری، استفاده از SFCL مقاومتی روشی جذاب می‌باشد. اما، از آنجایی که این روش ممکن است با هزینه و

باید برای مدت زمان مشخصی متصل به شبکه باقی بماند که این مدت وابسته به شدت افت ولتاژ در نقطه اتصال مشترک (PCC) می‌باشد. به عبارت دیگر، DFIG ممکن است در ناحیه خاکستری رنگ از شبکه قطع شود و خارج از آن اجازه قطع شدن از شبکه را نخواهد داشت [۲۲]. به عنوان مثال، در شرایط وقوع افت ولتاژ ۱۰۰ درصدی، ژنراتور مذکور به مدت ۱۵۰ میلی ثانیه به شبکه متصل باقی می‌ماند و پس از این زمان امکان قطع شدن آن از شبکه وجود دارد. در شکل (۲) الزامات LVRT کشورهای مختلف نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود، زمان در نظر گرفته شده برای هر ولتاژ در کشورهای مختلف متفاوت می‌باشد که این امر ناشی از دلایلی مانند مشخصات سیستم قدرت هر یک و سیاست‌های بهره‌مندی از نیروگاه‌های بادی آن‌ها می‌باشد. لازم به ذکر است که در این مقاله الزامات کشور آلمان به عنوان مرجع در نظر گرفته شده است.

طبق این مشخصه واضح است که اگر دامنه ولتاژ PCC در حین خطا بهبود داده شود، مدت زمان اتصال DFIG به شبکه نیز افزایش می‌یابد و به عبارت دیگر موجب بهبودی الزامات LVRT می‌گردد. این امر از طریق به کارگیری محدود کننده جریان خطا امکان پذیر است که معادلات و توضیحات آن در قسمت‌های بعدی بررسی شده است.



شکل (۱): الزامات LVRT کشور آلمان [۲۲]



شکل (۲): مشخصه LVRT کشورهای مختلف [۲۳]

تلفات بالایی همراه باشد، بدست آوردن امپدانس بهینه آن امری ضروری است.

در این مقاله تابع هدف و قید جدیدی برای بدست آوردن مقدار بهینه مقاومت SFCL با هدف بهبود الزامات عبور از افت ولتاژ پیشنهاد شده است. این روش قادر است کمترین مقدار امپدانس SFCL که برای حفظ ولتاژ ترمینال DFIG در محدوده مجاز الزامات LVRT مورد نیاز است را بدست آورد. به این ترتیب، با بدست آوردن حداقل مقدار مقاومت SFCL مورد نیاز، از وقوع افت ولتاژ شدید در ترمینال DFIG در شرایط خطا جلوگیری به عمل آمده است. لذا در شرایط خطا، نیروگاه بادی قادر به متصل باقی ماندن به شبکه می‌باشد و از قطع بی‌مورد آن از شبکه جلوگیری به عمل آمده است. این امر موجب تقویت و حمایت از نسل بعدی شبکه‌های برق که دارای سطح نفوذ بالای مزارع بادی خواهند بود، می‌شود.

ادامه این مقاله به شرح زیر است. در بخش ۲، خطر قطع بی‌مورد DFIG در شرایط افت ولتاژ و به دلیل برآورده نشدن الزامات عبور از افت ولتاژ بیان شده است. در بخش ۳ ابتدا معادلات و مدل DFIG همچنین کنترل کننده‌های مبدل‌های سمت روتور و شبکه آن ارائه گردیده است. سپس مدل SFCL مقاومتی استفاده شده در این مقاله و توابع و نحوه عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفته است. تابع هدف و قیود پیشنهادی به منظور محاسبه مقاومت بهینه SFCL با در نظر گرفتن الزامات عبور از افت ولتاژ در بخش ۴ بیان گردیده است. بخش ۵ شامل نتایج شبیه سازی و مقایسه‌ها می‌باشد و نتیجه گیری در بخش ۶ آورده شده است.

## ۲- شرح مسئله

وقوع خطای اتصال کوتاه در قسمتی از شبکه توزیع ممکن است موجب بروز افت ولتاژ در ترمینال DFIG گردد. در نتیجه این افت ولتاژ، توان اکتیو DFIG کاهش می‌یابد که موجب وقوع اضافه جریان در استاتور و روتور آن می‌شود. از آنجایی که مبدل‌های الکترونیک قدرت DFIG ظرفیت کمی دارند (حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد توان نامی ژنراتور)، ممکن است قادر به تحمل این اضافه جریان‌ها نباشند. بنابراین مبدل‌ها به منظور جلوگیری از آسیب دیدن قفل خواهند شد و DFIG از شبکه قطع می‌شود. همچنین در چنین شرایطی، اضافه ولتاژی در لینک DC رخ می‌دهد که می‌تواند موجب آسیب دیدن خازن لینک DC گردد [۲۱].

بنابراین مشخص است که در یک شبکه با نفوذ بالای مزارع بادی، قطع شدن DFIG از شبکه به منظور جلوگیری از آسیب دیدن مبدل‌های الکترونیک قدرت آن در شرایط افت ولتاژ، موجب از دست دادن بی‌مورد ظرفیت بالایی از تولید می‌گردد. لذا به منظور جلوگیری از وقوع چنین حوادثی، اخیراً الزامات LVRT در استانداردهای شبکه تعریف شده است. در شکل ۱ الزامات مربوط به کشور آلمان نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود، طبق این الزامات، ژنراتور

### ۳- مدل سازی DFİG و SFCL

در این بخش ابتدا معادلات، مدار معادل و کنترل کننده های مبدل های ژنراتور القایی دو سو تغذیه مورد بررسی قرار گرفته است. سپس مدار معادل و مشخصه SFCL مقاومتی مورد استفاده، ارائه گردیده است.

#### ۳-۱- مدل سازی ژنراتور القایی دوسو تغذیه

رفتار DFİG که از یک ژنراتور القایی، RSC و GSC تشکیل شده است با معادلات زیر مدل شده است [۲۴].

$$\frac{d\lambda_{ds}}{dt} = \omega_b \cdot (R_s \cdot i_{ds} + \omega_e \cdot \lambda_{qs} + v_{ds}) \quad (۱)$$

$$\frac{d\lambda_{qs}}{dt} = \omega_b \cdot (R_s \cdot i_{qs} - \omega_e \cdot \lambda_{ds} + v_{qs}) \quad (۲)$$

$$\frac{d\lambda_{dr}}{dt} = \omega_b \cdot (R_r \cdot i_{dr} + \omega_e \cdot \lambda_{qr} + v_{dr}) \quad (۳)$$

$$\frac{d\lambda_{qr}}{dt} = \omega_b \cdot (R_r \cdot i_{qr} - \omega_e \cdot \lambda_{dr} + v_{qr}) \quad (۴)$$

که  $\omega_b$  سرعت زاویه ای،  $\omega_e$  سرعت زاویه ای الکتریکی استاتور و  $\lambda$  شار ناشی می باشد. همچنین پارامترهای استاتور و روتور با S و r نشان داده شده اند. از آنجایی که ماشین های دوار از طریق مجموعه ای از مدارهای سه فاز که به صورت مغناطیسی به یکدیگر کوپل شده اند مدل می شوند و این معادلات بسیار پیچیده هستند، تحلیل دینامیک رفتار آن ها پیچیده است. لذا به منظور دستیابی به روشی کارآمد برای تحلیل و کنترل ماشین های دوار مانند DFİG، مولفه های سه فاز از طریق تبدیل پارک به محورهای d و q منتقل شده اند.

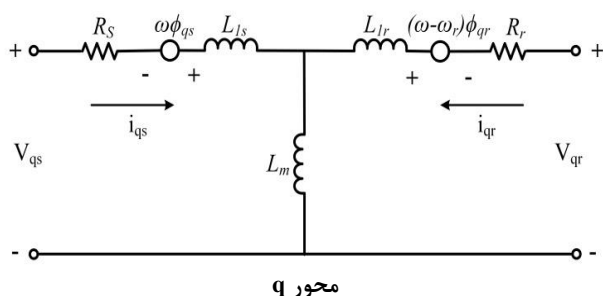
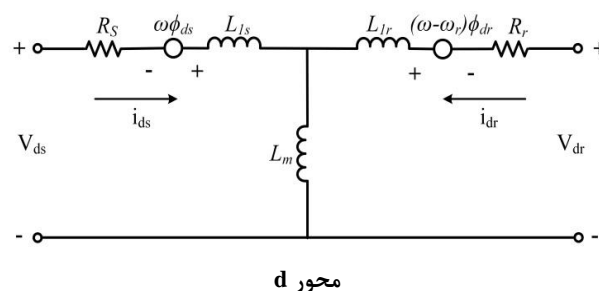
توان اکتیو و راکتیو DFİG با معادلات زیر محاسبه می شود و همچنین شکل (۳) مدار معادل DFİG را در محور d-q نشان می دهد.

(۵)

(۶)

$$P_s = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs}$$

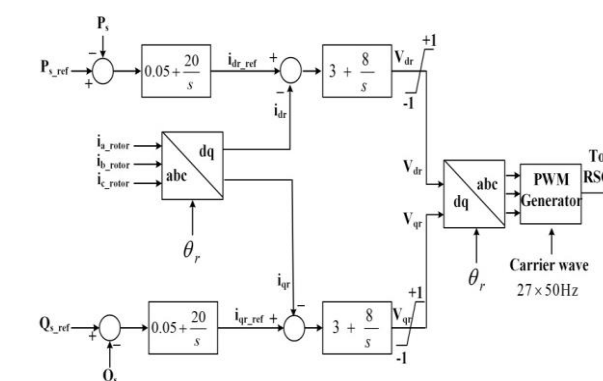
$$Q_s = v_{ds} i_{qs} - v_{qs} i_{ds}$$



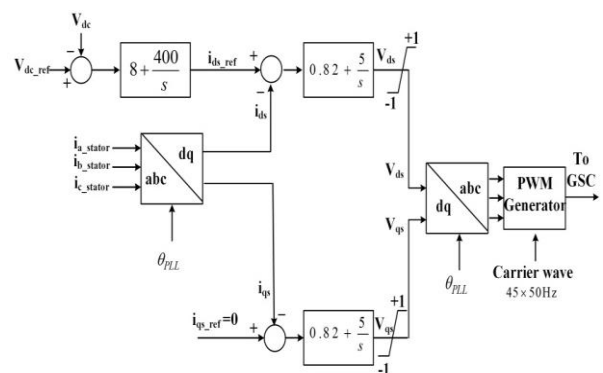
شکل (۳): مدار معادل DFİG در محور d-q

کنترل کننده مبدل سمت روتور (RSC) در شکل (۴) نشان داده شده است. این کنترل کننده به منظور کنترل توان اکتیو و راکتیو ترمینال استاتور DFİG به کار گرفته شده است [۲۵]. در اینجا RSC یک مبدل الکترونیک قدرت ۶ پالس ۲ سطحی تمام پل می باشد که ولتاژ لینک DC را به ولتاژ ac تبدیل می کند و به روتور متصل می گردد. در این مقاله روش کنترل برداری به منظور کنترل RSC و GSC به کار گرفته شده است [۲۵].

کنترل کننده مبدل سمت شبکه (GSC) در شکل (۵) نشان داده شده است. ورودی های این کنترل کننده ولتاژ لینک DC و توان راکتیو خط روتور می باشند و هدف از طراحی آن تنظیم کردن ولتاژ لینک DC و تزریق توان راکتیو به شبکه می باشد. از آنجایی که مبدل سمت شبکه در مدار روتور همیشه توان راکتیو را در مقدار صفر کنترل می کند، ملاحظه می شود که در کنترل کننده آن، مقدار  $i_{qs\_ref}$  برابر صفر تنظیم شده است [۲۵].



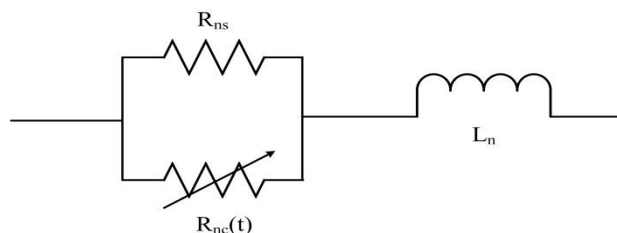
شکل (۴): کنترل کننده RSC



شکل (۵): کنترل کننده GS

## ۳-۲- مدل سازی SFCL مقاومتی

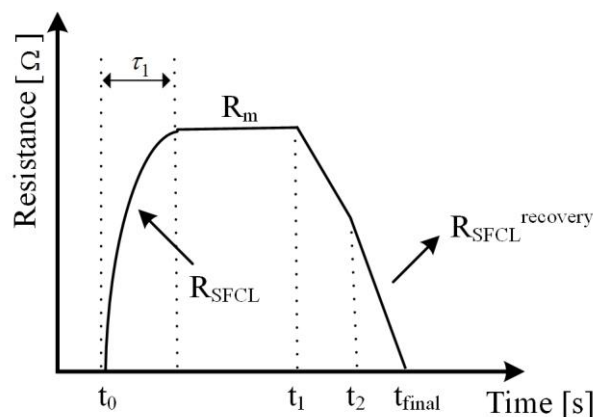
با استفاده از قابلیت محدود سازی سریع SFCL می توان دامنه جریان خطا را محدود کرد. در شکل (۶) ساختار یک واحد از SFCL مقاومتی نشان داده شده است. در این ساختار  $R_{ns}$  و  $R_{nc}(t)$  که به صورت موازی به هم متصل شده اند، به ترتیب مقاومت تثبیت کننده و ابر رسانای n امین واحد نامیده می شوند. به علاوه،  $L_n$  اندوکتانس هسته n امین واحد می باشد که n تعداد واحدهای متصل شده به هم می باشد [۲۶].



شکل (۶): ساختار یک واحد از SFCL مقاومتی

از آنجایی که در عملکرد شرایط پایدار  $R_{nc}(t)$  برابر صفر می باشد، علی رغم اینکه  $R_{ns}$  مخالف صفر می باشد ولی مقاومت معادل شاخه موازی صفر می شود. در حین خطای اتصال کوتاه، مقدار  $R_{nc}(t)$  با یک مشخصه متغیر با زمان افزایش می یابد که به این رفتار فرونشاندن گفته می شود. به منظور جلوگیری از تلفات توان در شرایط عملکرد عادی، مقدار  $L_n$  بایستی بسیار کوچک باشد که برابر صفر در نظر گرفته می شود.

مشخصه یک SFCL مقاومتی در شکل (۷) نشان داده شده است. در شرایط عادی، امپدانس SFCL برابر صفر می باشد و در لحظه  $t = t_0$  وضعیت فرونشاندن فعال می شود و امپدانس SFCL طبق (۷) به صورت نمایی افزایش می یابد. در این رابطه  $R_m$  مقاومت نهایی (حداکثر مقاومت) و  $\tau_1$  ثابت زمانی هر سیکل می باشد که در این مقاله برابر ۱ میلی ثانیه در نظر گرفته شده است.



شکل (۷): مشخصه SFCL مقاومتی

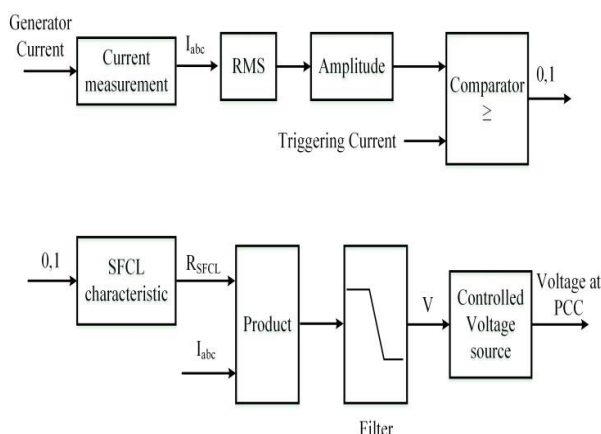
(۷)

$$R_{SFCL}(t) = R_m (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}})$$

به منظور مدلسازی بازه زمانی بازبایی SFCL که بلافاصله پس از رفع خطا آغاز می گردد، لازم است مطابق رابطه (۸) مشخصه ای دو قسمتی در نظر گرفته شود [۲، ۲۷، ۲۸]. به عبارت دیگر، هنگامی که SFCL شروع به بازبایی به سمت حالت ابر رسانایی می کند، حرارت انباشته شده در مدت زمان محدود سازی جریان منجر به افزایش دما می شود و باعث بروز تمایل مقاومت SFCL به نوسان می گردد و به این فرایند قسمت اول مرحله بازبایی گفته می شود. پس از اینکه حرارت از بین می رود، کاهش دما موجب می شود که مقاومت SFCL تمایل بیشتری برای صفر شدن پیدا کند که این امر قسمت دوم مشخصه را شکل می دهد. بنابراین رفتار گذرای SFCL در وضعیت بازبایی با معادله زیر قابل مدلسازی می باشد.

$$R_{SFCL}^{recovery}(t) = \begin{cases} m_1(t-t_1)+b_1 & t_1 \leq t \leq t_2 \\ m_2(t-t_2)+b_2 & t_2 \leq t \leq t_{final} \end{cases} \quad (8)$$

شکل (۸) شماتیک ساختار SFCL طراحی شده در محیط MATLAB/Simulink را نشان می دهد که نحوه عملکرد آن به این ترتیب است که ابتدا، جریان ژنراتور اندازه گیری شده ( $I_{abc}$ ) و مقدار RMS آن با جریان فعال سازی ( $I_{fault\_ref}$ ) مقایسه شده است. سپس، اگر جریان RMS بیشتر از مقدار  $I_{fault\_ref}$  باشد، سیگنال ۱ به بلوک SFCL ارسال شده و در غیر این صورت سیگنال صفر ارسال شده است. در شرایطی که سیگنال ۱ ارسال شده باشد، SFCL شروع به عملکرد می کند. سپس با استفاده از جریان ژنراتور و مقاومت SFCL، ولتاژ معادل محاسبه و برای منبع ولتاژ کنترل شده ارسال شده و به نقطه PCC تزریق گردیده است. در صورتی که سیگنال صفر ارسال گردد، آنگاه SFCL در وضعیت ابر رسانایی قرار داشته و ولتاژ معادل آن نیز صفر می باشد.



شکل (۸): شماتیک ساختار SFCL توسعه داده شده در نرم افزار

MATLAB/Simulink



## ۴- روش پیشنهادی

به طور کلی افزایش در امیدانس SFCL ممکن است موجب عملکرد بهتری در مواردی مانند حفظ ولتاژ PCC در محدوده مجاز، جلوگیری از اضافه ولتاژ در خازن لینک DC و کاهش بیشتر گشتاور الکترومغناطیسی گردد. اما افزایش بیش از حد مقاومت SFCL پیشنهاد نمی‌شود. به عبارت دیگر، هنگامی که بهبود عملکرد DFIG به محدوده‌های قابل قبول وارد شود، هر گونه افزایش بیشتر در مقاومت SFCL به معنی تحمیل هزینه و تلفات انرژی بیشتر خواهد بود. علاوه بر این، برآورده شدن تضمینی الزامات LVRT و نه لزوماً بهبود آن، نیازمند حفظ ولتاژ نقطه PCC در محدوده عملکرد عادی که در شکل (۱) نشان داده شده است می‌باشد. به همین دلیل در این بخش تابع هدف و قید جدیدی به منظور محاسبه مقاومت بهینه SFCL با در نظر گرفتن الزامات LVRT ارائه شده است.

اولین هدف بهینه‌سازی بصورت تلفات انرژی SFCL در حین خطا تعریف شده است که عبارت است از:

$$E_{SFCL} = \int_{t_0}^{t_1} i^2(t) R_m (1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}) dt \quad (9)$$

که در این رابطه  $i(t)$  جریان عبوری از SFCL و  $\Delta t = t_1 - t_0$  مدت زمان وقوع خطا می‌باشد و  $E_{SFCL}$  انرژی تلف شده در SFCL می‌باشد.

با استفاده از دینامیک خازن لینک DC [۲۹]، دومین هدف بهینه‌سازی به صورت انرژی جنبشی لینک DC در DFIG و در حین خطا انتخاب شده است که معادله آن عبارت است از:

$$E_{DC-link} = \int_{t_0}^{t_1} \left[ C V_c(t) \frac{dV_c(t)}{dt} + \frac{V_c^2(t)}{R_{loss}} \right] dt \quad (10)$$

که در این رابطه،  $E_{DC-link}$  انرژی جنبشی در خازن لینک DC، خازن لینک DC برابر  $C$ ،  $V_c(t)$  ولتاژ آن در حین خطا و  $R_{loss}$  مقاومت معادل مبدل‌ها می‌باشد.

حال تابع هدف و قیود پیشنهادی عبارت است از:

$$\text{Minimize } E_{SFCL} + E_{DC-link} \quad (11)$$

Subject to:

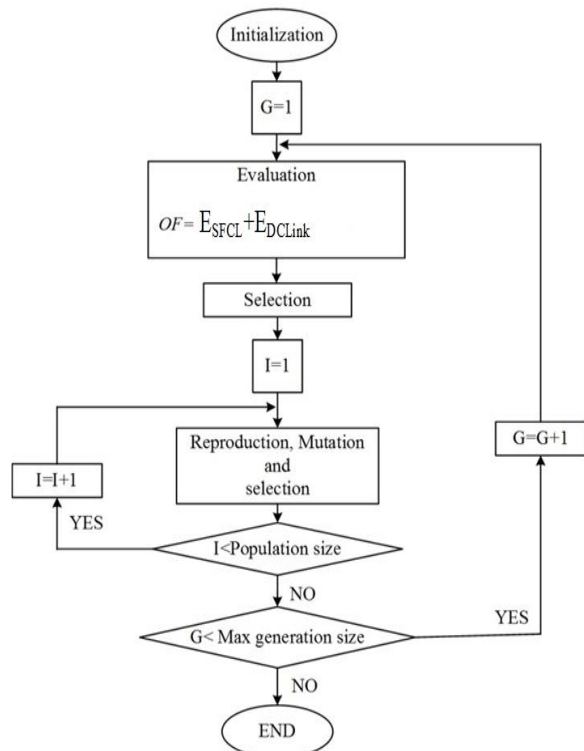
$$0.01 \Omega \leq R_l \leq 2 \Omega$$

$$0.9 \leq V_{PCC}(pu) \leq 1$$

$$1150V \leq V_c \leq 1450V$$

همانطور که ملاحظه می‌شود، در این تابع هدف علاوه بر در نظر گرفتن مدل دقیق SFCL، قید جدیدی مربوط به ولتاژ نقطه PCC در نظر گرفته شده است. محدوده این قید از الزامات LVRT کشور آلمان مطابق شکل (۱) انتخاب شده است. با در نظر گرفتن این قید مهم، حداقل امیدانس SFCL مورد نیاز به منظور برآورده شدن الزامات LVRT و در نتیجه تضمین عملکرد بدون قطعی مزارع بادی در حین خطا قابل محاسبه می‌باشد.

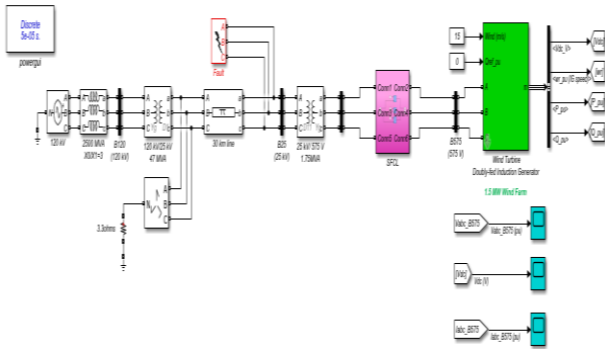
تابع هدف پیشنهادی با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شده است [۳۰، ۳۱]. در شکل (۹) فلوچارت روش بهینه‌سازی پیشنهاد شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک نشان داده شده است. این الگوریتم با مقدار دهی اولیه آغاز می‌شود. در این مرحله با تولید تصادفی چندین مجموعه از امیدانس SFCL، اولین استخر کروموزوم تولید می‌شود. تمامی مجموعه امیدانس‌های تولید شده تمامی قیود ارائه شده در (۹) را برآورده می‌کنند. در این روش، اندازه جمعیت برابر تعداد مجموعه‌های امیدانس SFCL می‌باشد. همچنین، شمارنده نسل برابر  $G$  می‌باشد و فرایند زمانی تمام می‌شود که  $G$  برابر با اندازه جمعیت گردد. سپس، در مرحله ارزیابی، تابع هدف پیشنهادی محاسبه می‌شود تا کیفیت هر کروموزوم مشخص شود. والدینی که مقادیر بهینه‌تری برای تابع هدف تولید کنند باید انتخاب شده و شانس بقای بیشتری داشته باشند که این فرایند در مرحله انتخاب رخ می‌دهد. لازم به ذکر است که تعداد نسل‌ها بر اساس اندازه جمعیت و پیچیدگی سیستم تغییر می‌کند و فرایند پس از تعداد نسل مشخصی به پایان می‌رسد. همچنین در این الگوریتم شمارنده اندازه جمعیت با  $I$  نشان داده شده است.



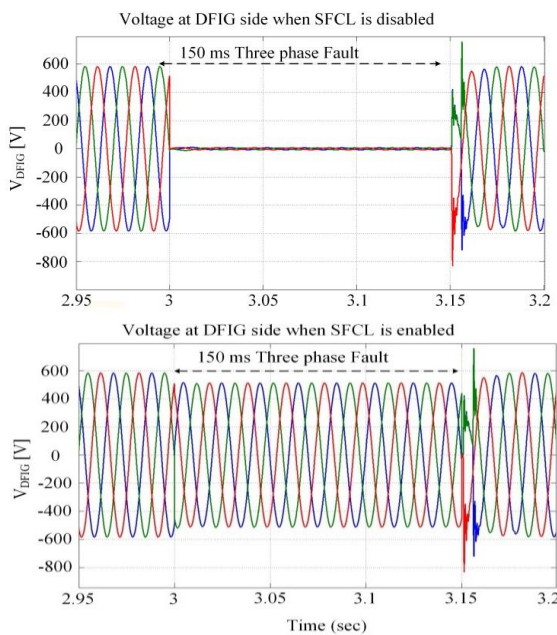
شکل (۹): فلوچارت روش پیشنهادی

## ۵- نتایج شبیه‌سازی

شکل (۱۰) ساختار یک توربین بادی متصل به DFIG با ولتاژ نامی ۵۷۵ ولت و ظرفیت ۱.۵ MW را نشان می‌دهد. در شکل (۱۱) مدل شبکه مورد مطالعه شبیه‌سازی شده در محیط MATLAB/Simulink نشان داده شده است. با در نظر



شکل (۱۱): مدل شبکه پیشنهادی در محیط MATLAB/Simulink در حضور SFCL



شکل (۱۲): مقایسه ولتاژ سمت DFIG بدون SFCL و با حضور SFCL

در شکل (۱۳) اضافه ولتاژ خازن لینک DC در حین وقوع خطای سه فاز نشان داده شده است. ولتاژ لینک DC در این شبیه سازی برابر ۱۱۵۰ ولت در نظر گرفته شده است و طبق شکل ۱۳ (الف) در شرایط خطای سه فاز، وقوع افت ولتاژ شدید در ترمینال DFIG موجب جاری شدن توان به سمت لینک DC گردیده است که این امر موجب افزایش ولتاژ آن به بیش از ۲٫۴ کیلوولت شده است. در حالی که طبق شکل ۱۳ (ب)، با استفاده از روش پیشنهادی این مقاله، اضافه ولتاژ این خازن در حین خطا به شکل محسوسی کم شده است و در محدوده قابل اطمینان LVRT حاصل شده است.

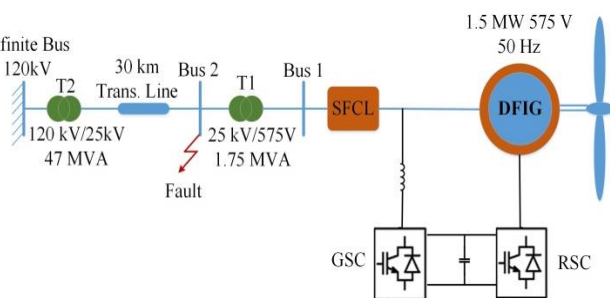
شکل (۱۴) تاثیر SFCL را بر محدود سازی جریان نشان می دهد. در شکل ۱۴ (الف) رفتار جریان استاتور را در حین خطای سه فاز در باس ۲ و بدون وجود SFCL نشان می دهد. در فاز a جریان به مقدار حداکثر ۴٫۷ پریونیت می رسد. همچنین در فاز b اولین قله با مقدار ۳٫۹ پریونیت برابر شده است. این مقدار برای فاز c برابر ۳٫۷ پریونیت

گرفتن خطای سه فاز گذرا در باس ۲، تابع هدف پیشنهادی این مقاله با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای این شبکه حل شده است و مقدار بهینه  $R_m$  بدست آمده است. مقادیر مربوط به DFIG و SFCL در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱): اطلاعات DFIG و مقادیر بهینه SFCL

مقادیر DFIG	
توان نامی	۱/۵ MW
ولتاژ نامی	۵۷۵ V
فرکانس	۵۰ Hz
ولتاژ لینک DC	۱۱۵۰ V
اندوکتانس متقابل	۲/۹۳۲ mH
مقاومت استاتور	۲/۲۴ mΩ
اندوکتانس پراکندگی استاتور	۰/۱۷۳ mH
مقاومت روتور	۱/۵۹ mΩ
اندوکتانس پراکندگی روتور	۰/۱۵۸ mH
مقادیر بهینه SFCL	
$R_m-OPTIMAL$	۰/۲۲ Ω
$E_{SFCL}$	۴/۵۸۷ Mj

به منظور ارزیابی اثربخشی روش پیشنهادی برای بهبود الزامات LVRT، ولتاژ سه فاز سمت DFIG در شکل (۱۲) نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود، در شرایط خطای سه فاز، افت ولتاژ شدیدی قابل مشاهده است. در این شرایط DFIG قادر به تحمل افت ولتاژ نخواهد بود و از شبکه قطع می شود که نتیجه آن بروز مشکل در پایداری شبکه های با نفوذ بالای مزارع بادی خواهد بود. بر اساس همان شکل، روش پیشنهادی با به کارگیری SFCL ولتاژ سمت ژنراتور را بهبود داده است. با در نظر گرفتن الزامات LVRT، کاملاً واضح است که در این شرایط DFIG به شبکه متصل خواهد ماند چرا که ولتاژ ترمینال آن در حد قابل قبول باقی مانده است. به عبارت دیگر، از آنجایی که SFCL با محدود کردن جریان خطا موجب بهبود ولتاژ ترمینال DFIG به مقدار ۵۱۹ ولت در حین خطا شده است، طبق الزامات LVRT و برای افت ولتاژ کمتر از ۱ پریونیت، DFIG قادر به متصل باقی ماندن به شبکه شده است و از قطع غیر ضروری آن در این شرایط جلوگیری به عمل آمده است.



شکل (۱۰): ساختار DFIG متصل به توربین بادی مجهز به SFCL

جدول (۲): مقایسه ویژگی‌های مختلف روش پیشنهادی با روش‌های

مرسوم				
انحراف از LVRT	محاسبه امیدانس بهینه	پیچیدگی	هزینه	روش
بله	خیر	کم	زیاد	[۹]
بله	خیر	کم	زیاد	[۲۶]
بله	بله	زیاد	کم	[۱۰]
بله	خیر	کم	زیاد	[۲۴]
خیر	بله	زیاد	کم	روش پیشنهادی

در جدول (۲) چند ویژگی اصلی روش پیشنهادی این مقاله با روش‌های مرسوم مقایسه شده است که در ادامه هر یک مورد بررسی قرار گرفته است.

**هزینه:** همان طور که گفته شد، روش پیشنهادی قادر به محاسبه امیدانس بهینه SFCL برای بهبود الزامات LVRT می‌باشد و همچنین برخلاف [۹] و [۲۴] در این روش از استفاده همزمان SFCL و SMES نیز استفاده نشده است. به همین دلیل این روش در دسته روش‌های با هزینه کم قرار گرفته است.

**پیچیدگی:** مرجع [۱۰] علاوه بر به کار گیری SFCL نیازمند کنترلی غیرخطی برای مبدل سمت روتور می‌باشد که موجب افزایش پیچیدگی آن گردیده است. روش پیشنهادی این مقاله نیز به دلیل پیچیده بودن تابع هدف و نیاز به حل آن توسط الگوریتم ژنتیک در دسته روش‌های پیچیده قرار گرفته است.

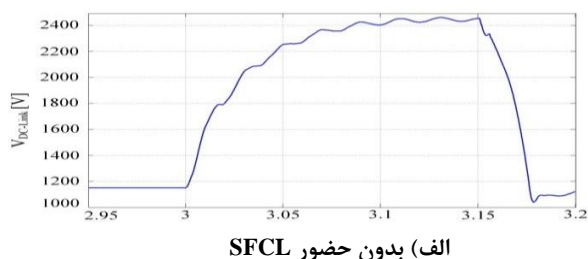
**محاسبه امیدانس بهینه:** همان طور که ملاحظه می‌شود در برخی از روش‌های قبلی امیدانس SFCL از طریق آزمون و خطا بدست آورده شده است در حالی که روش پیشنهادی این مقاله قادر به محاسبه امیدانس بهینه SFCL و با در نظر گرفتن الزامات LVRT می‌باشد.

**انحراف از الزامات LVRT:** از آنجایی که در روش‌های قبلی در حین طراحی و محاسبه امیدانس SFCL از ولتاژ نقطه PCC بازخوردی گرفته نشده است، موارد متعددی وجود دارد که در این روش‌ها الزامات LVRT برآورده نشده است و به عبارتی نقطه کار در حین خطا در زیر منحنی LVRT قرار گرفته است که این حالت در این مقاله به نام انحراف از الزامات مذکور تعریف شده است. همان طور که قبلاً اشاره شد در چنین شرایطی قطع DFIG از شبکه به منظور جلوگیری از آسیب دیدن آن ممکن است رخ دهد. اما در روش پیشنهادی این مقاله با توجه به قید ولتاژ PCC که در تابع هدف در نظر گرفته شد، از وقوع چنین حادثه‌ای جلوگیری شده است.

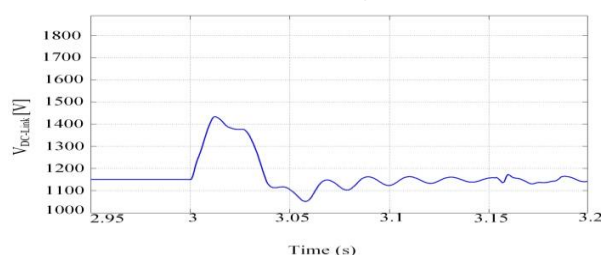
## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله، محدود کننده جریان خطای ابر رسانای مقاومتی به عنوان راه حلی قدرتمند برای بهبود الزامات عبور از افت ولتاژ ژنراتور

می‌باشد. لازم به ذکر است تفاوت میزان این اضافه جریان‌ها ناشی از وضعیت هر فاز در لحظه وقوع خطا می‌باشد. در شکل ۱۴ (ب) وضعیت جریان استاتور با حضور SFCL نشان داده شده است و ملاحظه می‌شود که نسبت به حالت قبل به شکل قابل ملاحظه‌ای محدود شده است.

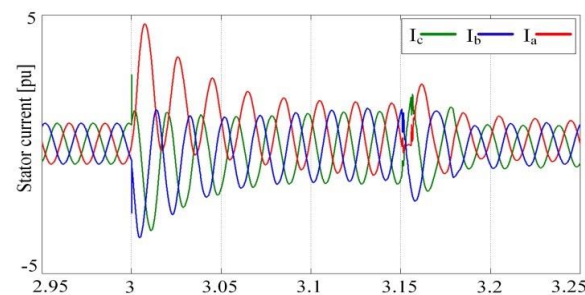


الف) بدون حضور SFCL

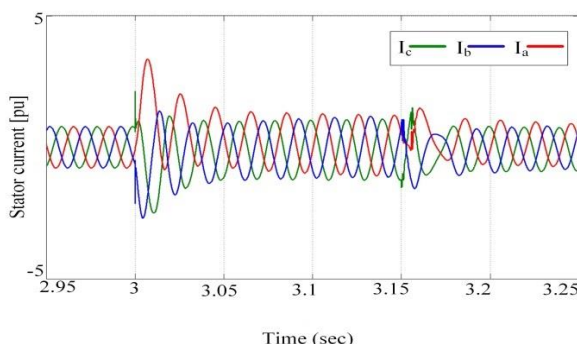


ب) در حضور SFCL

شکل (۱۳): ولتاژ لینک DC ژنراتور در حین خطای سه فاز



الف) بدون حضور SFCL



ب) در حضور SFCL

شکل (۱۴): رفتار جریان استاتور ژنراتور در حین خطای سه فاز



- [10] Z.-X. Zheng, C.-J. Huang, R.-H. Yang, X.-Y. Xiao, and C.-S. Li, "A low voltage ride through scheme for DFIG-based wind farm with SFCL and RSC control," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 29, pp. 1-5, 2019.
- [11] Z.-C. Zou, X.-Y. Xiao, Y.-F. Liu, Y. Zhang, and Y.-H. Wang, "Integrated protection of DFIG-based wind turbine with a resistive-type SFCL under symmetrical and asymmetrical faults," *IEEE transactions on applied superconductivity*, vol. 26, pp. 1-5, 2016.
- [12] K.-J. Du, X.-Y. Xiao, Y. Wang, Z.-X. Zheng, and C.-S. Li, "Enhancing Fault Ride-Through Capability of DFIG-Based Wind Turbines Using Inductive SFCL With Coordinated Control," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 29, pp. 1-6, 2018.
- [13] R. Asghar, F. Rehman, Z. Ullah, A. Aman, K. Iqbal, and A. A. Nawaz, "Modified switch type fault current limiter for low-voltage ride-through enhancement and reactive power support of DFIG-WT under grid faults," *IET Renewable Power Generation*, 2020.
- [14] Y.-C. Su and P.-T. Cheng, "Development of a Hybrid Cascaded Converter based STATCOM with Reduced Switching Losses and Improved Fault Ride Through Capability," *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020.
- [15] E. Hashemzadeh, M. Khederzadeh, and M. R. Aghamohammadi, "An Adaptive Controller for D-STATCOM under Parametric Uncertainties in Output Filter and Load Variations. *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*," vol. 17, pp. 17-25, 2020.
- [16] A. M. Rauf, V. Khadkikar, and M. S. El Moursi, "A new fault ride-through (FRT) topology for induction generator based wind energy conversion systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, pp. 1129-1137, 2019.
- [17] C. Kim and W. Kim, "Coordinated Fuzzy-Based Low-Voltage Ride-Through Control for PMSG Wind Turbines and Energy Storage Systems," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 105874-105885, 2020.
- [18] S. Li, J. Huang, and T. Sun, "Analytical LVRT analysis of doubly fed induction generator with MPC-based DSCC/DRCC," *IET Renewable Power Generation*, vol. 13, pp. 2462-2471, 2019.
- [19] N. Jabbour, E. Tsioumas, C. Mademlis, and E. Solomin, "A Highly Effective Fault-Ride-Through Strategy for a Wind Energy Conversion System With a Doubly Fed Induction Generator," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, pp. 8154-8164, 2020.
- [20] L. Chen, B. Zhang, and X. Fan, "Asymmetrical Fault Ride-Through Control Strategy for Rotor-Side Converter of DFIG," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 35, pp. 1046-1053, 2019.
- [21] X. Zhou, Y. Tang, and J. Shi, "Enhancing LVRT capability of DFIG-based wind turbine systems with SMES series in the rotor side," *International Journal of Rotating Machinery*, vol. 2017, 2017.
- [22] H. Margossian, G. Deconinck, and J. Sachau, "Distribution network protection considering grid code requirements for distributed generation," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 9, pp. 1377-1381, 2015.
- [23] M. Tarafdar Hagh and T. Khalili, "A review of fault ride through of PV and wind renewable energies in grid codes," *International Journal of Energy Research*, vol. 43, pp. 1342-1356, 2019.

القایی دو سو تغذیه ارائه گردید. سپس تابع هدف جدیدی به منظور به دست آوردن مقاومت بهینه آن پیشنهاد شد. همچنین، مدلسازی جامعی برای محدود کننده جریان خطای ابر رسانا و ژنراتور القایی دو سو تغذیه ارائه و در محیط نرم افزار متلب شبیه سازی شد. نتایج شبیه سازی نشان داد که این روش قادر است اضافه ولتاژ خازن لینک DC و همچنین شدت افت ولتاژ ترمینال ژنراتور را کاهش دهد. لذا روش پیشنهادی ابزاری کارآمد در بهبود الزامات عبور از افت ولتاژ می باشد. نتیجه این امر جلوگیری از قطع ناخواسته توربین بادی از شبکه در صورت وقوع خطای اتصال کوتاه در بخشی از شبکه و لذا حفظ پایداری آن می باشد.

## مراجع

- [1] C. Kang, Z. Chen, N. Zhang, O. Gomis-Bellmunt, M. Barnes, J. Yan, et al., "Guest editorial for the special section on enabling very high penetration renewable energy integration into future power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, pp. 3223-3226, 2018.
- [2] L. Chen, H. Chen, Z. Shu, G. Zhang, T. Xia, and L. Ren, "Comparison of inductive and resistive SFCL to robustness improvement of a VSC-HVDC system with wind plants against DC fault," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, pp. 1-8, 2016.
- [3] حضوری، محمدامین، عباسپور، علی، ف. فیروزآباد، محمود، et al, "کمینه سازی کاهش اجباری توان تولیدی مزارع بادی با بهره گیری از یک راهکار کوتاه مدت ابتکاری بر مبنای بازیخشی واحدهای فسیلی," *نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران*, vol. 13, pp. 1-10, 2016.
- [4] خسروی، مسعود، ح. ع. آبادی، محمود، and جوادی، "بهینه سازی ژنراتور القایی تغذیه دوگانه توسط روش اجزای محدود جهت بهبود عملکرد توربین بادی سرعت متغیر," *نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران*, vol. 15, pp. 103-112, 2018.
- [5] S. Soued, H. Ramadan, and M. Becherif, "Effect of Doubly Fed Induction Generator on Transient Stability Analysis under Fault Conditions," *Energy Procedia*, vol. 162, pp. 315-324, 2019.
- [6] A. Azizpour, M. Hosseini, and M. S. Moghaddam, "Enhancement fault ride-through capability of DFIG by using resistive and inductive SFCLs," *Switzerland Research Park Journal*, vol. 103, pp. 878-883, 2014.
- [7] M. E. Elshiekh, D.-E. A. Mansour, and A. M. Azmy, "Improving fault ride-through capability of DFIG-based wind turbine using superconducting fault current limiter," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 23, pp. 5601204-5601204, 2012.
- [8] J. Justo and R. Bansal, "Parallel RL configuration crowbar with series RL circuit protection for LVRT strategy of DFIG under transient-state," *Electric Power Systems Research*, vol. 154, pp. 299-310, 2018.
- [9] L. Chen, G. Li, H. Chen, Y. Tao, X. Tian, X. Liu, et al., "Combined Use of a Resistive SFCL and DC-link Regulation of a SMES for FRT Enhancement of a DFIG Wind Turbine Under Different Faults," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 29, pp. 1-8, 2018.

- [24] X.-Y. Xiao, R.-H. Yang, X.-Y. Chen, and Z.-X. Zheng, "Integrated DFIG protection with a modified SMES-FCL under symmetrical and asymmetrical faults", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 28, pp. 1-6, 2018.
- [25] J. Mohammadi, S. Vaez-Zadeh, S. Afsharnia, and E. Daryabeigi, "A combined vector and direct power control for DFIG-based wind turbines," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 5, pp. 767-775, 2014.
- [26] M. Sarwar, B. Hussain, A. Hussain, and M. Abubakar, "Improvement of Fault Ride Through Capability of DFIG-based Wind Turbine Systems Using Superconducting Fault Current Limiter," in 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia), 2019, pp. 4019-4024.
- [27] J.-F. Moon, S.-H. Lim, J.-C. Kim, and S.-Y. Yun, "Assessment of the impact of SFCL on voltage sags in power distribution system," IEEE transactions on applied superconductivity, vol. 21, pp. 2161-2164, 2010.
- [28] W.-S. Moon, J.-N. Won, J.-S. Huh, and J.-C. Kim, "A study on the application of a superconducting fault current limiter for energy storage protection in a power distribution system," IEEE transactions on applied superconductivity, vol. 23, pp. 5603-5604, 2013.
- [29] M. Rahimi and M. Parniani, "Grid-fault ride-through analysis and control of wind turbines with doubly fed induction generators," Electric Power Systems Research, vol. 80, pp. 184-195, 2010.

[۳۰] کلانتری، محمد، سهرابی، and ر. کنعان، "الگوریتم بهینه سازی ترکیبی با استفاده از الگوریتم ژنتیک و جستجوی ابرکروی مبتنی بر نظریه آشوب"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، vol. 16, pp. 147-155, 2019.

[۳۱] ع. ایبانه، شریفیان، هدا، م. چینلو، and رضوی، "روشی نو در بدست آوردن کمترین نقاط شکست به کمک الگوریتم ژنتیک"، مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران، vol. 8, pp. 45-58, 2011.

## زیر نویس ها

<sup>1</sup>Doubly Fed Induction Generator

<sup>2</sup> Rotor side Converter

<sup>3</sup> Grid Side Converter

<sup>4</sup> Low Voltage Ride Through

<sup>5</sup> Superconducting Fault Current Limiter

<sup>6</sup> Superconducting Magnetic Energy Storage

<sup>7</sup> Static synchronous Compensator

<sup>8</sup>Model Predictive Control

<sup>9</sup>Point of Common Coupling