Journal of **N**ovel **R**esearches on **S**mart **P**ower **S**ystems - Vol. 13 - No. 3 – Autumn 2024
P-ISSN: 2322-2468, E-ISSN: 2981-0272, https://jeps.dezful.iau.ir/

Research article

Improving the Dynamic Response and Passing the Low Voltage of Wind Turbines by Using a Combined System to Improve the Quality of Power

Shayan Naderi[1], ***Master's student in power engineering***, **Ali Reza Tavakoli**[2,*], ***Assistant professor***
[1] Department of Electrical Engineering, Ahvaz branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran
[2,*] Department of Electrical Engineering, Ahvaz branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

Abstarct:
Induction generator based wind turbines are very vulnerable to malnutrition, especially in low power, during grid side faults. In most studies, a finger is used to protect the rotor - side converter during network faults. New networks require wind turbines that can stay connected in fault conditions and provide the requested capacity. In this paper, a new control system based on ounding fault current has been introduced to protect the two mal nourished induction generator - based wind turbines and the bounding generator - based wind turbine during grid - side faults. The proposed limiting is used on the DC side of the rotor - side converter.the mentioned system solves the problems and eliminates the following problems in the system. The proposed restriction has no significant effect on overall network performance during normal operation. Whenever a fault occurs, whether symmetric or asymmetric, it not only limits the over current of the rotor but also prevents the acceleration of the rotor speed and limits high torque fluctuations even during the zero grid voltage, the simulation results confirm the limiting performance in protecting the wind turbine in grid fault conditions.

Keywords: PMSG – DFIG - Network Errors-Srfcl.

Received: 14 Jun. 2024
Revised: 11 Aug. 2024
Accepted: 12 Oct. 2024

*** Corresponding Author:** Dr. Ali Reza Tavakoli

Citation: Sh. Naderi, A. R. Tavakoli, “Improving the Dynamic Response and Passing the Low Voltage of Wind Turbines by Using a Combined System to Improve the Quality of Power”, Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 13, no. 3, pp. 31-52, November 2024 (in Persian).

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.82362/jeps.2024.3.505]

مقاله پژوهشی

بهبود پاسخ دینامیکی و گذر از ولتاژ پایین توربین های بادی با استفاده از سیستم ترکیبی بهبود دهنده کیفیت توان ومحدودساز جریان خطا

شایان نادری[۱]،دانشجوی کارشناسی ارشد، علی‌رضا توکلی[۲،*]، استادیار

۱-گروه مهندسی برق، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران،nadarishayan@yahoo.com
*۲-گروه مهندسی برق، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران،aa.tavakoli@iau.ac.ir

چکیده :

توربین‌های بادی مبتنی بر ژنراتور القایی از دو سو تغذیه (DFIG) به خصوص در توان کم، در حین خطاهای سمت شبکه بسیار آسیب‌پذیر هستند. در اکثر تحقیقات از یک کروبار برای حفاظت از مبدل سمت روتور در حین خطاهای شبکه استفاده می‌شود . شبکه‌های جدید نیازمند توربین‌های بادی هستند که بتوانند در شرایط خطا متصل مانده و تامین ظرفیت تقاضا شده را به عهده بگیرند. در این مقاله یک سیستم حفاظتی جدید مبتنی بر محدودکننده جریان خطای مقاومتی با قابلیت سوئیچینگ برای محافظت از توربین‌های بادی مبتنی بر ژنراتور القایی از دو سو تغذیه و توربین بادی مبتنی بر ژنراتور سنکرون در حین خطاهای سمت شبکه معرفی کرده است. محدود کننده پیشنهادی در سمت DC مبدل سمت روتور استفاده می‌شود. سیستم مذکور مشکلات کروبار را حل می‌کند و عوارض بعدی را در سیستم حذف می‌کند. محدودکننده‌ی پیشنهادی هیچ تاثیر قابل توجهی بر عملکرد کلی شبکه در حین عملکرد نرمال ندارد. هر زمان که خطا، خواه متقارن یا نامتقارن، رخ دهد، نه تنها جریان اضافی روتور را محدود می‌کند، بلکه از شتاب سرعت روتور جلوگیری می‌کند و نوسانات گشتاور بالا را حتی در هنگام ولتاژ شبکه صفر محدود می‌کند، نتایج شبیه سازی در نرم‌افزار متلب مدل‌سازی و عملکرد محدودکننده را در حفاظت از توربین بادی در شرایط خطای شبکه تایید می‌کند.

کلمات کلیدی: PMSG، DFIG، خطاهای شبکه، محدودکننده جریان خطای مقاومتی با قابلیت سوئیچینگ (SRFCL)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۲/۲۵
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۵/۲۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۷/۲۱

* **نام نویسنده مسئول:** دکتر علیرضا توکلی
نشانی نویسنده مسئول: اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، گروه مهندسی برق.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2024.3.505]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 3- Autumn 2024

۱-مقدمه

با توجه به اینکه درصد زیادی از انرژی مورد استفاده ، از سوخت های فسیلی تأمین می شود و با توجه به اتمام این منابع، آلودگی هوا و روند رو به رشد مصرف انرژی که تا سال ۲۰۳۰ طبق پیش بینی ها دردنیا دو برابر خواهد شد، نیاز به جایگزینی سوختهای فسیلی بیش از پیش احساس میشود.[۱]

ژنراتور القایی دوسو تغذیه و ژنراتورسنکرون مغناطیس دائم به عنوان دو ژنراتوری هستند که توانسته‌اند در حیطه انرژی پایدار توجه فوق‌العاده‌ای را به خود جلب کنند. با توجه به مزایای راندمان بالای تبدیل انرژی و قابلیت کنترل سریع، سیستم‌های تبدیل انرژی بادی مبتنی بر دو ژنراتور القائی دو سو تغذیه و سنکرون مغناطیس دائم تقریبا نیمی از سهم متعادل را درحیطه ژنراتور بادی به خود اختصاص دادند. متاسفانه، دو مشکل عمده هنوز هم در حیطه این دو نوع ژنراتور وجود دارد که می‌توان به ضعف قابلیت گذر از ولتاژ پایین و خروجی بی‌ثبات توان تولیدی اشاره کرد. [۴-۲]

در طی بروز خطا در شبکه نیروی محرکه الکتریکی جانب روتور مربوط به ژنراتور القائی از دو سو تغذیه و ولتاژ لینک جریان مستقیم ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم بسیار فراتر از حداکثر مقدار مجاز می‌باشند که همین مساله باعث می‌شود که این دو ژنراتور نتواند استانداردهای شبکه را تامین نموده و باید از شبکه قطع شوند.در این مقاله هدف بهبود پارامتری های دینامیکی شبکه(ولتاژو گشاتور) و بهبود نتایج تحقیقات قبلی درحین خطا می‌باشد[۶-۵]

ژنراتور های القائی دوسو تغذیه به‌دلیل ویژگی‌های ممتاز مانند راندمان بالا و کار در سرعت های متغیر و قابلیت اطمینان بالا، دارای کاربردهای فراوانی بوده و مورد مطالعات بسیاری قرار گرفته‌اند.در جدول (۱) سوابق مربوط به حفاظت از توربین بادی های مبتنی بر DFIG را با روش‌های مختلف ارائه شده است. [۱۱-۷]

در این مقاله شبکه مورد مطالعه شامل شبکه متصل به توربین بادی مبتنی بر ژنراتور القایی از دو سو تغذیه از یک طرف و توربین بادی مبتنی بر ژنراتر سنکرون از سوی دیگر به همراه یک محدود کننده جریان خطای مقاومتی می‌باشد. [۵]

محدود کننده جریان خطا بلافاصله بعد از وقوع خطا در مدار قرار می گیرد و توانایی دارد تا تمام جریان های اضافی را که بزرگتر از جریان شبکه باشند با زمان پاسخگویی حداکثر نیم سیکل محدود کند.[۱۵-۱۲]. از اهداف این مقاله می‌توان به گذر از ولتاژ پایین(LVRT) در شرایط خطاهای متقارن و نامتقارن اشاره کرد.

ساختار این مقاله بدین شرح می‌باشد که در ابتدا مروری بر مطالعات گذشته و فعالیت های صورت گرفته در خصوص انواع مختلف محدود کننده های جریان خطا و مقایسه ای میان دستاور های حاصل شده در مطالعات پیشین و روش پیشنهادی این پژوهش صورت گرفته است . در ادامه تشریح ساختار هر دو مبدل در حالت های عادی و پس از وقوع خطا و همچنین نحوه‌ی قرار گیری محدود کننده در شبکه تشریح شده است .در انتها سناریوهای شبیه‌سازی توضیح داده شده و نتایج شبیه‌سازی مورد تحلیل قرار گرفته و مقایسه‌ای میان نتایج حاصل شده از مدل پیشنهادی و مدل شبکه‌ی اولیه تحت مطالعه مشخص شده است.

این تجهیزات در حالت عادی مقاومت کمی در برابر عبور جریان از خود نشان می‌دهند، اما بلافصله پس از وقوع اتصال کوتاه در لحظات شروع اولیه افزایش جریان مقاومت آن‌ها به یکباره زیاد شده و از بالا رفتن جریان اتصال کوتاه جلوگیری می‌کنند. این تجهیزات پس از هر بار عملکرد باید قابل بازیابی بوده و در حالت ماندگار سیستم باعث ایجاد اضافه ولتاژ و یا تزریق هارمونیک به سیستم نشوند. یکی از دلایل استفاده از محدود کننده جریان خطای مقاومتی در این تحقیق ، بهبود کیفیت توان با کاهش افت ولتاژ در زمان وقوع خطا اتصال کوتاه و کاهش حداثر گشتاور الکتریکی و میکانیکی ژنراتور ها و بهبود پایداری سیستم قدرت می‌باشد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.82362/jeps.2024.3.505]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 3- Autumn 2024

Table (1): The article has been reviewed

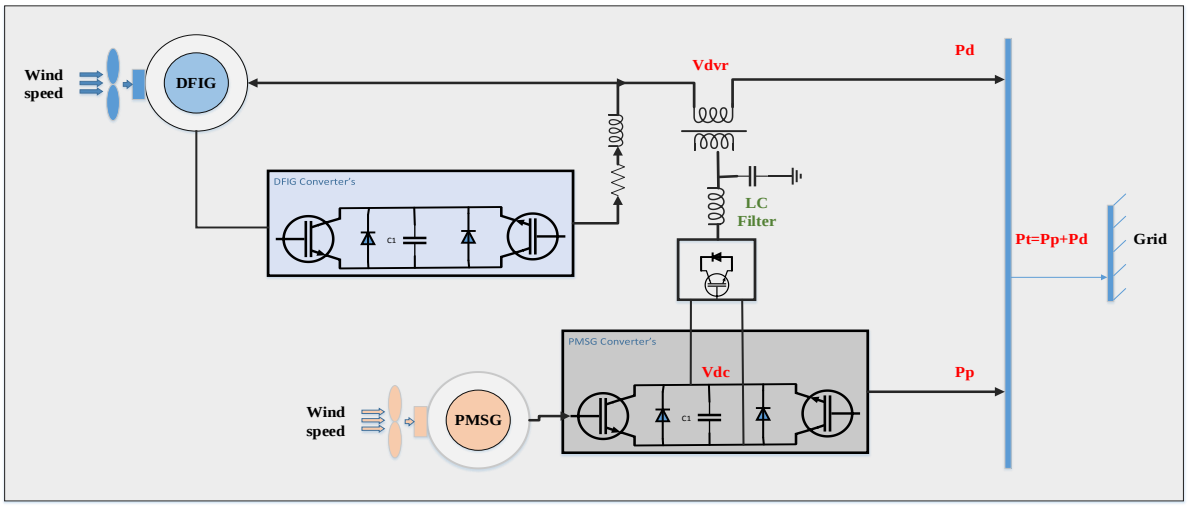
جدول۱-مقایسه مقالات مرور شده

معایب مرجع مذکور	مزایای مرجع مذکور	سال انتشار	شماره مرجع
از معایب مرجع مذکور میتوان به افزایش ریپل منفی جریان الکترومغناطیسی رتور اشاره کرد .	از مزایای مرجع مذکور تضعیف جریان بیش از حد الکترومغناطیسی رتور و افزایش ضریب اطمینان مبدل سمت رتور میباشد .	۲۰۱۷	[۱۳]
یکی از معایب طرح مذکور این میباشد که توانایی پایدار سازی کامل ولتاژ سمت مصرف کننده شبکه را دارا نمیباشد.	یکی از مزایای مرجع مذکور این است که میتواند در شرایط نرمال شبکه جریان را مدیریت کند .	۲۰۲۳	[۱۵]
از معایب محدود کننده مبتنی بر هسته آلیاژ آمورف میتوان به ضعف در توانایی رفع نوسانات مربوط به توان اکتیو اشاره کرد.	از مزایای مرجع مذکور میتوان به کاهش نوسانات در ولتاژ موثر سمت مصرف کننده شبکه اشاره کرد .	۲۰۲۱	[۱۱]
یکی از نقاط ضعف مرجع مذکور عدم توانایی در کاهش نوسانات جریان رتور میباشد .	یکی از نقاط قوت مرجع مذکور توانایی محسوس در کاهش نوسانت ولتاژ استاتور می باشد .	۲۰۲۲	[۳]
از نقاط ضعف شبکه بادی تحت کنترل مغناطیس زدائی میتوان به عدم توانایی در رفع نوسانات دامنه جریان رتور اشاره کرد.	یکی از مزایای مرجع پیشنهادی توانایی در پایدار سازی چشمگیر ولتاژ باس dc می باشد که میتوان به وضوح آن را مشاهده کرد .	۲۰۲۰	[۱۰]
از نقاط ضعف مرجع مذکور میتوان به کاهش تاثیراتTCSC در پارامتر ولتاژ اشاره کرد .	از مزایای مرجع مذکور میتوان به جایابی صحیح ادوات فکت در جهت کاهش اعوجاجات شبکه اشاره کرد.	۲۰۱۷	[۱۸]
از نقاط ضعف مرجع مذکور میتوان به عدم کاهش اعوجاجات در پارامتر ولتاژ روتور اشاره کرد	از مزایای مرجع مذکور میتوان به کاهش نوسانات در تمامی پارامتر های دینامیکی شبکه اشاره کرد	۲۰۱۵	[۱۹]

۲-مدل‌سازی DFIG و PMSG در شبکه

۲-۱-بررسی رفتار DGIG-WECS تحت خطای شبکه

ساختار DFIG-WECS در شکل (۱) نشان داده شده که عمدتاً از یک توربین بادی و یک مبدل پشت به پشت تشکیل شده است. سیم پیچ های استاتور DFIG مستقیماً به شبکه متصل می‌شوند ، در حالی که سیم‌پیچ‌های روتور با مبدل پشت به پشت حاوی مبدل سمت روتور RSCو مبدل سمت شبکه GSC متصل می‌شوند. RSC مسئولیت توان خروجی سیم‌پیچ‌های استاتور را بر عهده می‌گیرد در حالی که GSC مسئول حفظ ولتاژ باس DFIG DC و متعادل کردن ضریب توان کل است. برای تشریح رفتارهای سیستم تحت خطای شبکه، یک مدل ریاضی مورد نیاز است. با فرض اینکه همه بردارها به قاب مرجع سمت استاتور ارجاع می‌شوند، معادلات ولتاژ و شار DFIG-WECS تحت مدل αβ را می‌توان به صورت زیر بیان کرد [۶]:



شکل (۱)- ساختار DFIG-WECS

Figure(1): DFIG-WECS structure

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.82362/jeps.2024.3.505]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 3- Autumn 2024

$$\begin{cases} V_{s\alpha\beta} = R_s I_{s\alpha\beta} + d\psi_{s\alpha\beta}/d_t \\ V_{r\alpha\beta} = R_r I_{r\alpha\beta} + d\psi_{r\alpha\beta}/d_t - j\omega_r \psi_{r\alpha\beta} \end{cases} \quad (۱)$$

$$\begin{cases} \psi_{s\alpha\beta} = L_s I_{s\alpha\beta} + L_m I_{s\alpha\beta} \\ \psi_{r\alpha\beta} = L_m I_{s\alpha\beta} + L_m I_{s\alpha\beta} \end{cases} \quad (۲)$$

که در آن V، I، ω و ψ به ترتیب نشان دهنده بردارهای ولتاژ، جریان، فرکانس زاویه و شار است. R و L به ترتیب مقاومت و اندوکتانس هستند. زیرنویس s، r به ترتیب سمت استاتور و سمت روتور را نشان می‌دهد. Lm اندوکتانس متقابل است. با توجه به (۱) و (۲)، ولتاژ روتور پویا را می توان با جبران شار روتور به صورت زیر بازنویسی کرد [۱۶]:

$$V_{r\alpha\beta} = (R_r - j\omega_r L_r) I_{r\alpha\beta} + \sigma L_r \frac{d}{dt} I_{r\alpha\beta} + \frac{L_m}{L_s}\left(V_{s\alpha\beta} - R_S I_{s\alpha\beta} - j\omega_r \psi_{s\alpha\beta}\right) \quad (۳)$$

که $\sigma = 1 - L_m^2/L_s L_r$ میباشد با نادیده گرفتن مولفه توالی منفی و افت ولتاژ مقاومت استاتور در حالی که با فرض صفر بودن فاز اولیه Vsαβ، شار استاتور در مدل αβ را می توان به صورت بیان کرد.

$$\psi_{s\alpha\beta} = \frac{V_S}{j\omega_s} e^{j\omega_s t} = -j\psi_s e^{j\omega_s t} \quad (۴)$$

با جایگزینی (3) به (4)، بردار فضایی ولتاژ روتور در مدل αβ را می‌توان به صورت زیر بدست آورد:

$$V_{r\alpha\beta} = (R_r - j\omega_r L_r) I_{r\alpha\beta} + \sigma L_r \frac{d}{dt} I_{r\alpha\beta} + \frac{L_m}{L_s}\left(S V_s e^{j\omega_s t} - R_S I_{s\alpha\beta}\right) \quad (۵)$$

با فرض اینکه یک خطای متقارن در t = 0 رخ دهد، دامنه ولتاژ استاتور را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$V_{r\alpha\beta}(t) = \begin{cases} V_s e^{j\omega_s t} & , t < 0 \\ (1-p) V_s e^{j\omega_s t} & , t > 0 \end{cases} \quad (۶)$$

دینامیک EMF روتور که در قاب استاتور و روتور تحت خطای متقارن اشاره دارد با توجه به اینکه wslip=ws-wr,s=(ws-wr)/ws، به صورت زیر فرمول بندی می‌شود:

$$V_{s\alpha\beta} = \begin{cases} V_{s+} e^{j\omega_s t} & , t < 0 \\ (1-p) V_{s+} e^{j\omega_s t} + V_{s-} e^{-j\omega_s t} & , t > 0 \end{cases} \quad (۷)$$

$$\psi_{s\alpha\beta} = \begin{cases} \frac{V_{s+} e^{j\omega_s t}}{j\omega_s} e^{j\omega_s t} & , t < 0 \\ \frac{(1-p) V_{s+}}{j\omega_s} e^{j\omega_s t} + \frac{V_{s-}}{-j\omega_s} e^{-j\omega_s t} & , t > 0 \end{cases} \quad (۸)$$

$$E^r_{r\alpha\beta} = \frac{L_m}{L_s}\left[s(1-p) V_{s+} e^{\omega_{slip} t} - (1-s)(p V_{s+} + V_{s-}) e^{-j\omega_r t} e^{-t/\tau_s} + (2-s) V_{s-} e^{-j(2-s)\omega_s t}\right] \quad (۹)$$

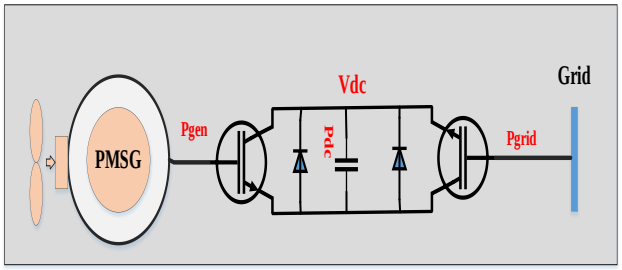
معادله (۹) نشان می دهد که EMF روتور دارای سه جزء است :

از آنجایی که s معمولاً از ۰,۲- تا ۰,۲ متغیر است، طبق رابطه(9) دامنه مولفه های دوم و سوم Er2 وEr3 به ترتیب با Vs+*p(1-s) و Vs-*p(2-s) نشان داده می شوند ، به این معنی که EMF گذرای روتور بسیار بزرگتر از آن در عملکرد عادی است. EMF بیش از حد منجر به نوسانات گشتاور و جریان روتور می‌شود که در نتیجه آسیب شدیدی به گیربکس و مبدل سمت رتور وارد می کند.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2024.3.505]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 3- Autumn 2024

۲-۲-بررسی رفتار PMSG-WECS تحت خطای شبکه

ساختار PMSG-WECS در شکل (۲) نشان داده شده است. برای اتصال PMSG به شبکه بالادست از یک مبدل پشت به پشت حاوی مبدل سمت ماشین MSC و مبدل سمت بار LSC استفاده می شود. مهمترین پارامتر برای PMSG ولتاژ باس DC می باشد. برای تجزیه و تحلیل رفتارهای ولتاژ باس DC یک مدل انتقال توان در شکل ۲ آورده شده است.



شکل(۲)- ساختار PMSG-WECS

Figure (2): Structure of PMSG-WECS

مطابق شکل ۲، معادله جریان توان در سیستم PMSG را می توان به صورت زیر بدست آورد:

$$P_{gen} - P_{grid} = P_{dc} \quad (۱۰)$$

که در آن Pgen توان ورودی تولید شده از WT است.Pgrid توان خروجی میباشد که به شبکه برق تزریق می شود. Pdc توان باس DC وVDC ولتاژ باس DC است. در شرایط عادی، Pgen تقریباً برابر با Pgrid و Vdc که تقریبا برابر با یک ثابت است. در طول خطای شبکه، Pgrid تا افت ولتاژ کاهش می‌یابد و در نتیجه مقدار توان نامتعادل ΔPdc ایجاد می‌شود که معادله (۱۰) از این رو می تواند به صورت زیر به تغییر پیدا کند [۱۷]:

$$P_{gen} - P_{grid} = P_{dc} + \Delta P_{dc} = V_{dc} C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (۱۱)$$

Cdc خازن باس DC است. با توجه به معادله (۱۱)، کمیت توان نامتعادل منجر به تجمع انرژی در باس DC می شود که منجر به افزایش ولتاژ باس DC و جریان اضافی LSC می شود.

۳-۳-کنترلر سیستم DVR

وظیفه DVR تزریق یک جبران ولتاژ سری در هنگام خطای شبکه است. برای جبران دقیق ولتاژ ترمینال DFIG تحت خطای نامتقارن، یک کنترل دوگانه برای تنظیم اجزای توالی مثبت و منفی سیگنال های ولتاژ معرفی شده است. روش استخراج مولفه های مثبت و منفی بردارهای درخواستی را می توان با توجه به معادلات زیر نتیجه گرفت [۲۰]:

$$\begin{cases} F_{\alpha\beta} = F_{dq}^{+} e^{j\omega_g t} \\ F_{\alpha\beta} = F_{dq}^{-} e^{-j\omega_g t} \end{cases} \quad (۱۲)$$

$$\begin{cases} F_{dq}^{+} = F_{dq+}^{+} + F_{dq-}^{+} = F_{dq+}^{+} + F_{dq-}^{-} e^{-j2\omega_g t} \\ F_{dq}^{-} = F_{dq-}^{-} + F_{dq+}^{-} = F_{dq-}^{-} + F_{dq+}^{+} e^{j2\omega_g t} \end{cases} \quad (۱۳)$$

ولتاژ تزریق DVR مورد نیاز را می توان از تفاوت بین سیگنال های مرجع و واقعی ولتاژ ترمینال DFIG بدست آورد:

$$\begin{cases} V_{fd}^{*} = L_{dvr} \frac{dI_{fd}^{*}}{dt} - \omega_s L_{vdr} I_{fq}^{*} + V_{dvrd}^{*} \\ V_{fq}^{*} = L_{dvr} \frac{dI_{fq}^{*}}{dt} - \omega_s L_{vdr} I_{fd}^{*} + V_{dvrq}^{*} \end{cases} \quad (۱۴)$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOI: 10.82362/jeps.2024.3.505]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 3- Autumn 2024

$$\begin{cases} I_{fd}^{*} = C_{dvr}\dfrac{dV_{dvrd}^{*}}{dt} - \omega_s C_{vdr} V_{dvrq}^{*} + I_{dvrd}^{*} \\ I_{fq}^{*} = C_{dvr}\dfrac{dV_{dvrq}^{*}}{dt} - \omega_s C_{vdr} V_{dvrd}^{*} + I_{dvrq}^{*} \end{cases} \quad (۱۵)$$

با توجه به (۱۴) و (۱۵)، کل حلقه کنترل که سیگنال های مرجع ولتاژ تولید شده مبدل V*fd و V*fq را استخراج می کند را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\begin{cases} V_{fd}^{*} = \left(K_{p3} + K_{i3}\dfrac{1}{s}\right)\left(I_{fd}^{*} - I_{fd}\right) - \omega_s L_{vdr} I_{fq}^{*} V_{vrd}^{*} \\ V_{fq}^{*} = \left(K_{p4} + K_{i4}\dfrac{1}{s}\right)\left(I_{fq}^{*} - I_{fq}\right) + \omega_s L_{vdr} I_{fd}^{*} \quad rq \end{cases} \quad (۱۶)$$

$$\begin{cases} I_{fd}^{*} = \left(K_{p1} + K_{i1}\dfrac{1}{s}\right)\left(V_{dvrd}^{*} - V_{dvrd}\right) - \omega_s C_{vdr} V_{dvrq}^{*} + I_{dvrd}^{*} \\ I_{fq}^{*} = \left(K_{p2} + K_{i2}\dfrac{1}{s}\right)\left(V_{dvrq}^{*} - V_{dvrq}\right) + \omega_s C_{vdr} V_{dvrd}^{*} + I_{dvrq}^{*} \end{cases} \quad (۱۷)$$

۳-۴-کنترل کننده کانورتر سمت PMSG

مبدل سمت خط برای میراسازی کل توان خروجی DFIG و PMSG طراحی شده است. سیگنال ورودی محور d LSC تفاوت بین سیگنال واقعی Pt و سیگنال مرجع P*t است. سیگنال واقعی را می توان بر اساس ولتاژ شبکه Vg، Id جریان خروجی DFIG و جریان خروجی PMSG به شرح زیر استخراج کرد:

$$P_t = P_p + P_d = -Re\left[\frac{3}{2}V_g\hat{I}_p\right] - Re\left[\frac{3}{2}V_g\hat{I}_d\right] \quad (۱۸)$$

بر این اساس سیگنال مرجع را می توان به صورت زیر استخراج کرد:

$$P_t^{*} = -Re\left[\frac{3}{2}V_g\left(\hat{I}_p^{*} + \hat{I}_d^{*}\right)\right] = \frac{3}{2}\begin{bmatrix} V_{gd+}^{+} & V_{gq+}^{+} & V_{gd-}^{-} & V_{gq-}^{-} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_{pd+}^{*+} + I_{dd+}^{*+} \\ I_{pq+}^{*+} + I_{dq+}^{*+} \\ I_{pd-}^{*-} + I_{dd-}^{*-} \\ I_{pq-}^{*-} + I_{dq-}^{*-} \end{bmatrix} \quad (۱۹)$$

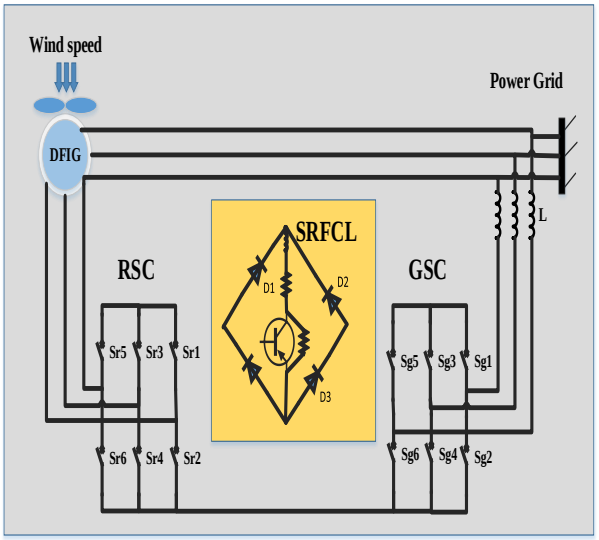
در شرایط عادی، هیچ مولفه توالی منفی جریان شبکه وجود ندارد. علاوه بر این، با توجه به کنترل ضریب توان واحد سیگنال کنترل qaxis، مولفه های محور q از Ip و Id تقریبا برابر با صفر هستند. سپس سیگنال مرجع P*t را می توان به صورت زیر ساده کرد:

$$P_t^{*} \approx V_{gd+}^{+}\left(I_{pd+}^{*+} + I_{dd+}^{*+}\right) \quad (۲۰)$$

۴-۵-مدل سازی محدود کننده ی جریان خطای‌مقاومتیSRFCL

با توجه به شکل ۳ برای بهبود قابلیت گذر از ولتاژ پایین در طول خطاهای شبکه محدود کننده جریان RSC بین خازن لینکDC و RSC متصل می شود . [۱۸]

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2024.3.505]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 3- Autumn 2024



شکل(۳) -نحوه قرار گیری بلوک محدود کننده جریان خطای مقاومتیSRFCL

Figure (3): How to set the SRFCL fault current limiting block

جبران کننده ی مقاومتی پیشنهادی از سه بخش اصلی تشکیل شده است:

۱. یکسو کننده پل دیودی که شامل دیود های D1تا D4 می باشد.در نیم سیکل مثبت جریان از دیود های D1وD3 عبور می کند و در نیم سیکل منفی جریان از دیودهای D2و D4 .

۲. یک آهنربای غیر رسانا که با یک مقاومت rd ویک اندوکتانسLd نشان داده می شود . با انتخاب مقدار مناسب برای Ld، می توان به یک جریان DC تقریبا ثابت از طریق اندوکتانس DC دست یافت. هنگامی که خطا در سیستم قدرت رخ می دهد، اندوکتانس DC مانع از ایجاد انحراف در لحظه اولیه خطا می شود. اگر خطا برای مدت طولانی طول بکشد، جریان از طریق اندوکتانس DC افزایش خواهد یافت.

۳. اتصال موازی یک نیمه هادی کاملا قابل کنترل مانند IGBTیا IGCT و یک مقاومت تخلیه rp که با لینک dcموازی می شود. مقاومت rp برای مصرف توان اکتیو اضافی ژنراتور در طول خطا و جهت ایجاد تعادلی بین توان اکتیو ورودی به توربین و توان خروجی از ژنراتور در طول خطا استفاده می‌شود .به این ترتیب، جریان اضافی گذرا روتور در زمان وقوع خطا به لطف SRFCLبه طور موثر محدود می شود در شکل ۳، اندوکتانس DC تأثیر قابل توجهی بر عملکرد عادی DFIG ندارد. اما، هنگامی که یک خطا رخ می دهد اندوکتانس DC به طور موثر di/dt آغاز شده در اولین لحظات خطا را سرکوب می کند (که در سیکل اول به طور قابل توجهی بالاتر است) و همچنین جریان اضافه روتور را با موفقیت در طول دوره خطا محدود می کند. لازم به ذکر است که جریان پیوند(idc) ، یک جریان DC دوره ای است و مقدار آن به پالس های سوئیچینگ RSC و جریان های روتور بستگی دارد.

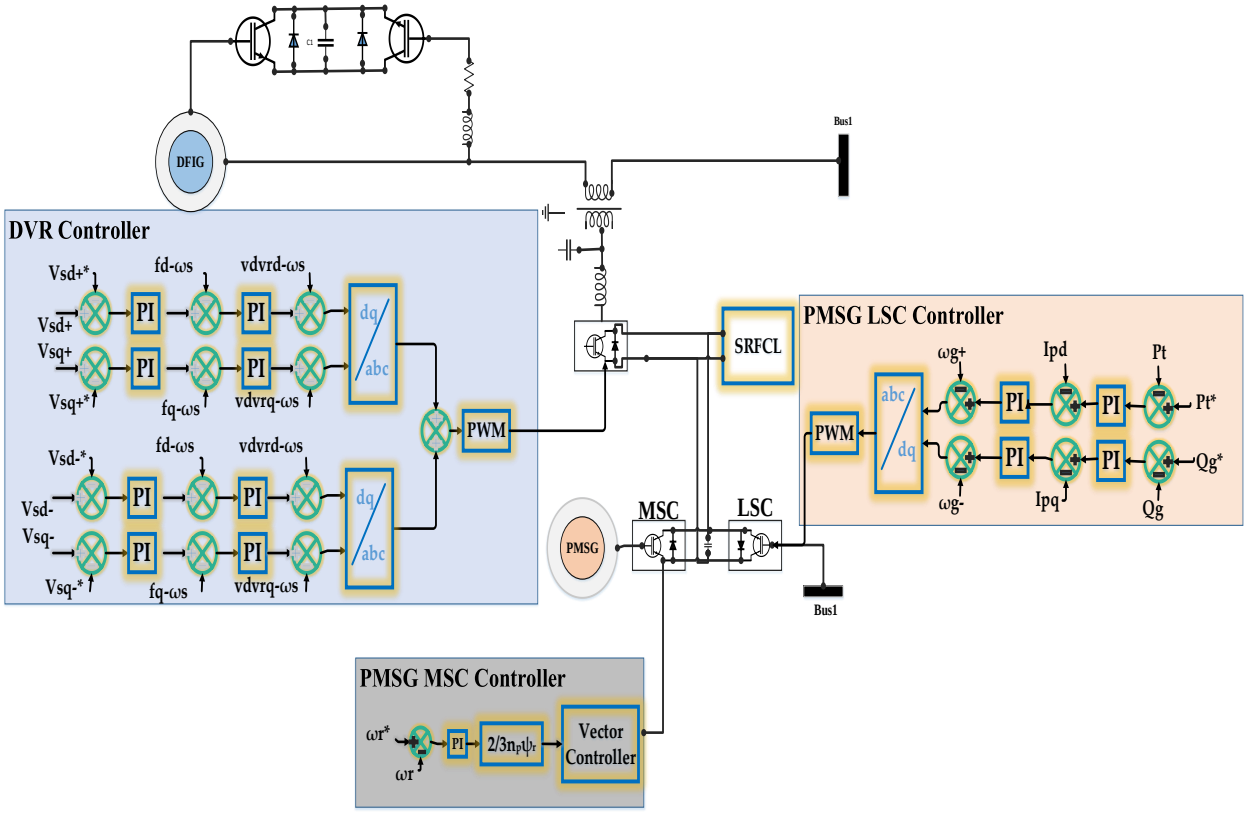
در شکل ۳، استفاده از یک اندوکتانس بدون پل یکسو کننده به صورت سری با RSC باعث افت ولتاژ به دلیل Ldi=dt در سراسر اندوکتانس در پیوند DC می شود و در نتیجه، عملکرد عادی مبدل را مختل می کند .مبدل های متصل به dfig برای حل این مشکل و ارائه مسیر DC برای جریان القایی(id) DC ، از پل دیودی یکسو کننده که در شکل ۳ نشان داده شده است، استفاده می شود به طور کلی، با اعمال SRFCL پیشنهادی، DFIGمی‌تواند در طول خطا از افت ولتاژ جلوگیری کند.

۴-شبیه سازی و نتایج

در این بخش به منظور تایید روش پیشنهادی SRFCL برای حفاظت از شبکه متصل به WT-PMSG و WT-DFIG در حین خطاهای سه فاز ،دو فاز و تکفاز به زمین و همچنین خروج توربین ها از خط شبیه سازی هایی مطابق شکل (۴) در محیط سیمولینک مدلسازی و اجرا شد . سپس نتایج مربوط به بهبود پارامتر های دینامکی شبکه تحت خطاهای متفاوت و میزان تاثیر

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2024.3.505]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 3- Autumn 2024

طرح پیشنهادی بر کاهش ریپل در زمان اعمال خطا بررسی و نمودارهای مربوطه ترسیم و تفسیر خواهند شد .
در جدول ۲ مقادیر پارامتر های دو توربین بادی مبتنی بر ژنراتور القایی از دو سو تغذیه و توربین بادی مبتنی بر ژنراتور سنکرون را ارائه کردیم .



شکل(۴) – دیاگرام خطی سیستم پیشنهادی با کنترلر های مربوط

Figure (4): Linear diagram of the proposed system with related controllers

Table 2: Specifications of the studied system

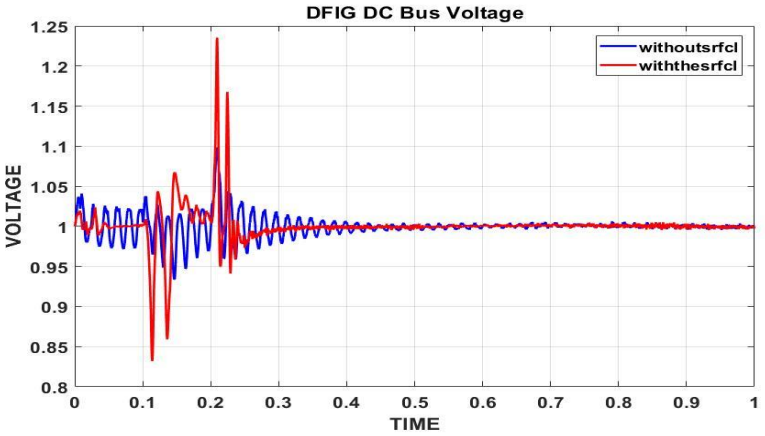
جدول ۲ مشخصات سیستم مورد مطالعه

DFIG		PMSG	
توان نامی ژنراتور	۵,۱MW	توان نامی	۵,۱ MW
ولتاژ موثر استاتور	۹۷۵KV	ولتاژ استاتور	۶۹۰ولت
ولتاژ موثر رتور	۱۳۷۵KV	سرعت باد	۸m/s
فرکانس ژنراتور	۶۰Hz	تعداد قطب	۴۸
تعداد قطب های ژنراتور	۳	مقاومت استاتور ژنراتور	۰,۰۰۱Pu
سرعت باد	۸m/s	شار آهنربای دائمی	۰,۰۰۹Pu
مقاومت استاتور	۰,۰۰۷	ظرفیت لینک dc	۵۰μF
مقاومت رتور	۰,۰۰۵		
اندوکتانس استاتور	۰,۱۷۱		
اندوکتانس رتور	۰,۱۶۵		
ظرفیت لینک dc	۱۰μf		

[DOI: 10.82362/jeps.2024.3.505] Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 3- Autumn 2024 [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

۱-۴-عملکرد سیستم تحت شرایط خطای سه فاز

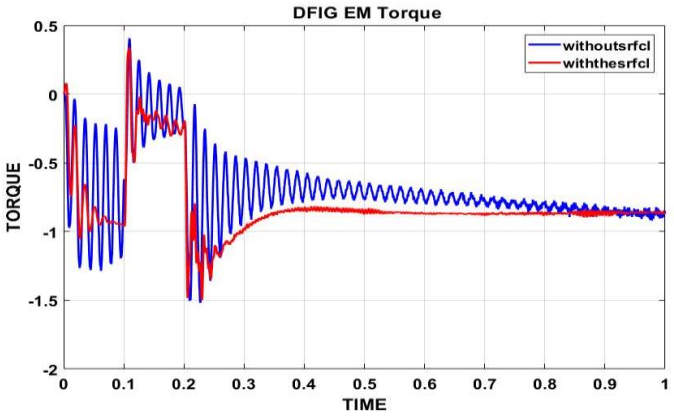
به منظور بررسی نحوه حفاظت SRFCL پیشنهادی در شبکه پیشنهادی خطای سه فاز به زمین در ثانیه ۰,۱ الی ۰,۲در محل اتصال به باس بار شبکه بالا دست در نظر میگیریم .



شکل(۵) -ولتاژ لینک dc ژنراتور القائی دو سو تغذیه تحت خطای سه فاز تحت خطای سه فاز در محل اتصال به باس بار بالا دست

Figure (5): voltage of the dc link of the two-way induction generator under three-phase fault under three-phase fault at the point of connection to the upper load bus

با توجه به شکل(۵) در زمان اعمال خطا مشاهده می شود که محدود کننده جریان خطا در زمان قبل و بعد از اعمال خطا به خوبی توانسته اعوجاج های شبکه را کاهش داده. در شرایط بدون حفاظت مذکور اعوجاج های گشتاور در ۰,۵ ثانیه کاهش پیدا کرده اند ولی زمانی که محدود کننده در شبکه فعال باشد مشاهده می شود که اعوجاج ها در زمان ۰,۲۵ کاهش پیدا کرده اند و ولتاژ لینک dc ژنراتور در زمان کوتاه تری به پایداری رسیده است . پارامتری که تاثیر مستقیم در ولتاژ لینک dcدارد ظرفیت خازن لینک می‌باشد.



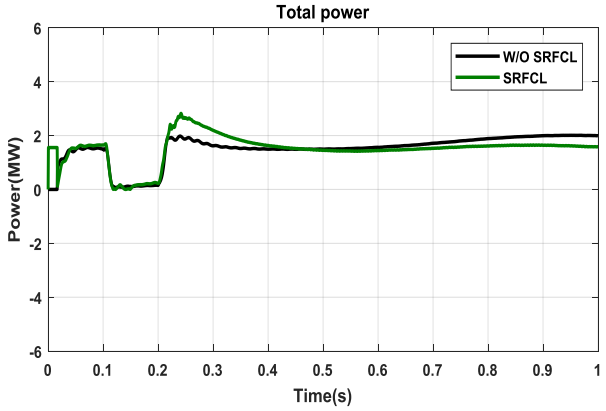
شکل(۶)- گشتاور ژنراتور القائی دو سو تغذیه تحت خطای سه فاز در محل اتصال به باس بار بالا دست

Figure (6): Torque of double-fed induction generator under three-phase fault at the point of connection to the upper load bus

با توجه شکل (۶) ژنراتورهای القایی با اعمال یک گشتاور خارجی به روتور برای چرخاندن سریع‌تر آن نسبت به سرعت سنکرون، گشتاور مکانیکی را به برق تبدیل می‌کنند. با این حال افزایش نامحدود گشتاور به افزایش نامحدود تولید برق منجر نمی‌شود. با افزایش گشتاور از صفر تا مقدار گشتاور شکست ، سرعت به صورت تقریبا خطی زیاد می‌شود. با رسیدن سرعت چرخش روتور به سرعت نامی (به عنوان مثال ۳۰۰۰ دور بر دقیقه) گشتاور نیز به میزان نامی خود می‌رسد. گشتاور شکست بیشینه مقدار

[DOI: 10.82362/jeps.2024.3.505] Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 3- Autumn 2024 [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

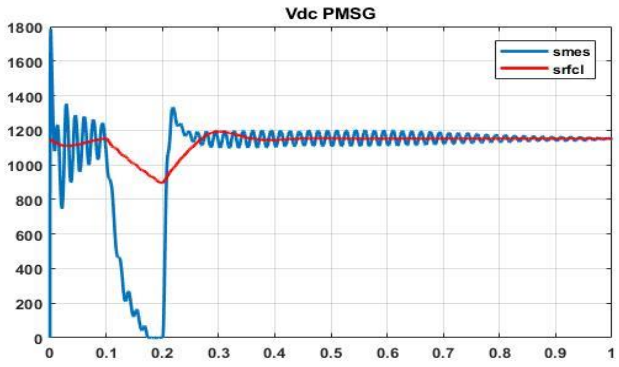
گشتاور ژنراتور است. در حالت ایده آل، ژنراتورهای القایی بهترین کارکرد را در ناحیه پایدار بین شرایط بدون بار و ناحیه بیشینه گشتاور دارند . با توجه به شکل فوق در زمانی که خطای سه فاز در محل اتصال به باس بار بالادست رخ دهد گشتاور ژنراتور القائی بدون حضور محدود کننده شرایط نوسانی را سپری می کند ولی زمانی که محدود کننده وارد شبکه می شود گشتاور به خوبی به پایداری می رسد .



شکل (۷) -توان کل شبکه تحت شرایط رخ دادن خطای سه فاز تحت خطای سه فاز در محل اتصال به باس بار بالا دست

Figure (7): The power of the entire network under the conditions of three-phase fault occurrence under the three-phase fault at the connection point to the bus load is high

با توجه شکل (۷) لازم به ذکر است که انتخاب اندازه ژنراتور در محاسبه توان دستگاه از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. برای درک این جمله باید بدانید که اندازه یعنی توان دستگاه و منظور از توان میزان بار الکتریکی می‌باشد که در نهایت دستگاه آن را تولید می‌کند. در نتیجه خروجی دستگاه برابر با نیازی می‌باشد که کاربر از دستگاه خود انتظار دارد .

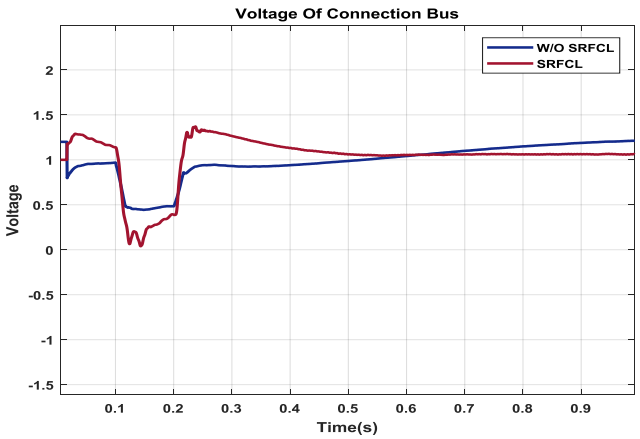


شکل (۸)-ولتاژ لینک dc ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم تغذیه تحت خطای سه فاز در محل اتصال به باس بار بالا دست

Figure (8): dc link voltage of permanent magnet synchronous generator under three-phase fault at the point of connection to the upper load bus

با توجه به شکل (۸) یکی از اهداف این پژوهش بهبود پارامتر لینک dc می‌باشد که با توجه به شکل فوق این امر به خوبی محقق گردیده است. منحنی قرمز رنگ مربوط مربوط به زمانی می‌باشد که محدود کننده وارد مدار شده که مشاهده می‌شود به خوبی ولتاژ لینکdc را به پایداری رسانده است .

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2024.3.505]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 3- Autumn 2024



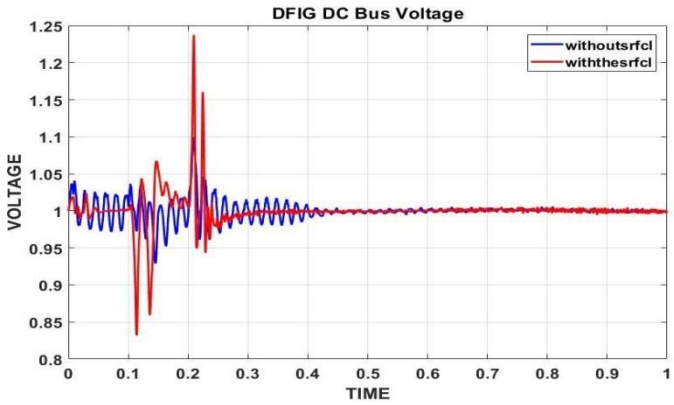
شکل (۹)- ولتاژ محل اتصال به باس بالا دست تغذیه تحت خطای سه فاز در محل اتصال به باس بار بالا دست

Figure (9): The voltage of the connection point to the upper hand power supply under a three-phase fault in the connection point to the upper hand load bus

با توجه به شکل (۹) کمبود توان راکتیو در زمان تولید نیروگاه های بادی باعث افزایش تلفات و تاثیرات منفی روی پایداری سیستم ومشکلاتی نظیر کمبود ولتاژ و ناپایداری ولتاژ برای شبکه های ضعیف متصل به نیروگاه های بادی بزرگ را ایجاد می کنند.زمانی که تغییرات زیاد بار روی فیدر توزیع متصل وجود داشته باشد تنظیم ولتاژ در شبکه، رابطه مستقیم با کنترل توان راکتیو دارد. با توجه به اتصال نیروگاه بادی به شبکه انتقال، این انتظار از نیروگاه های بادی وجود دارد که به اندازه ژنراتورهای سنکرون دارای قابلیتهای کنترل توان راکتیو باشند .

۴-۲-عملکرد سیستم تحت شرایط خطای دو فاز

در این حالت سناریو قبل را با خطای دو فاز انجام دادیم با توجه به شکل (۱۰) مشاهده می شود که که ولتاژ لینک dc ژنراتور القائی در زمان رخ دادن خطای دو فاز در شرایطی که محدود کننده در شبکه فعال نباشد به خوبی پایدار می شود و شبکه ی بهبود دهنده کیفیت توان به خوبی از عهده پایدار سازی ولتاژ لینک ژنراتور القائی بدون استفاده از محدود کننده ی جریان خطا بر می آید.

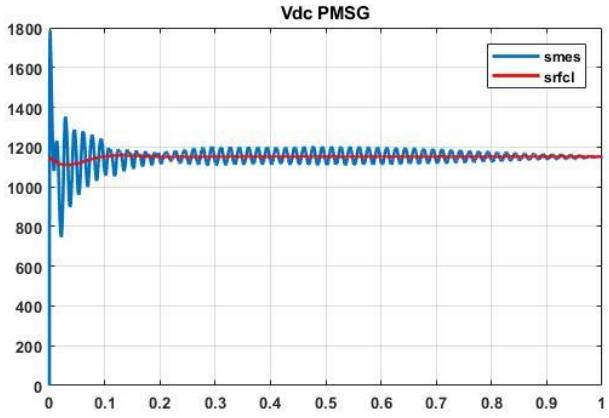


شکل (۱۰)-ولتاژ لینک dcژنراتور القائی دو سو تغذیه تحت خطای دو فاز

Figure (10): DC link voltage of two-side induction generator under two-phase fault

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

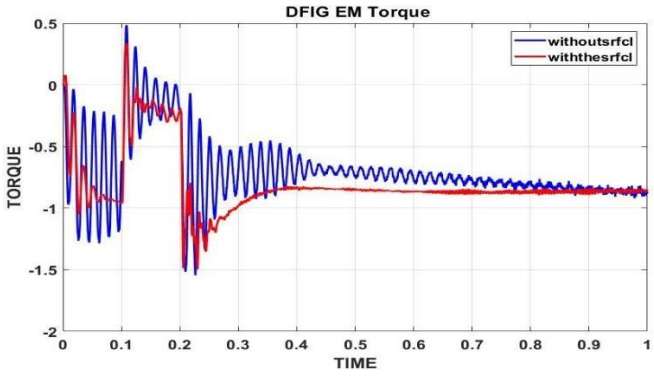
[DOI: 10.82362/jeps.2024.3.505]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 3- Autumn 2024



شکل (۱۱)-ولتاژ لینکdcژنراتور سنکرون مغناطیس دائم تحت شرایط رخ دادن خطای دو فاز

Figure (11): DC link voltage of permanent magnet synchronous generator under two phase fault conditions

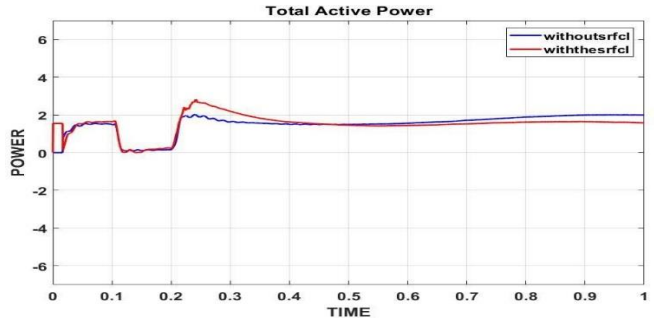
با توجه به شکل (۱۱) مشاهده می شود که ولتاژ لینکdcژنراتور سنکرون مغناطیس دائم در شرایط خطای دوفاز در زمانی که شبکه بدون حفاظت محدود کننده باشد، دچار افت ولتاژ شده است ولی در شرایطی که محدود کننده در شبکه فعال باشد مشاهده می شود که افت ولتاژ به طور محسوسی کاهش داشته و ولتاژ لینک dc به پایداری خوبی رسیده است .



شکل (۱۲)-گشتاور ژنراتور القائی دو سو تغذیه تحت خطای دو فاز

Figure (12): Torque of two-side induction generator under two-phase fault

با توجه به شکل (۱۲) مشاهده می شود که محدود کننده در زمان اعمال خطای دو فاز تاثیر زیادی بر گشتاور ژنراتور القائی دو سو تغذیه میگذارد و علاوه بر اینکه نوسانات را در زمان شروع نمودار به خوبی کنترل می کند با عث می شود که پس از طی کردن ۰,۲۵ ثانیه گشتاور به پایداری برسد.

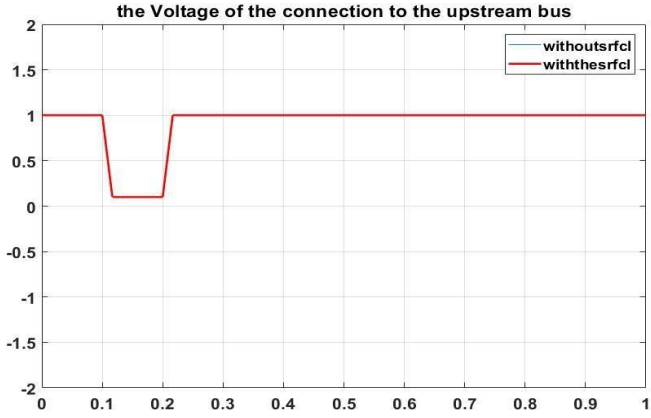


شکل (۱۳)- توان کل شبکه تحت شرایط رخ دادن خطای دو فاز

Figure (13): The power of the whole network under the conditions of occurrence of two-phase fault

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2024.3.505]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 3- Autumn 2024

با توجه به شکل (۱۳) مشاهده می شود که در زمان رخ دادن خطای دو فاز در شرایطی که محدود کننده در شبکه فعال نباشد سیستم بهبود دهنده کیفیت توان به خوبی از عهده پایداری سازی توان اکتیو بر می آید . با توجه به شکل فوق میتوان مشاهده کرد در زمان ورود محدود کننده به شبکه توان اکیتو دچار اعواج و نوسان بسیار کمی می شود که تاثیر زیادی بر کارکرد پایدار شبکه نمیگذارد .



شکل (۱۴)- ولتاژ محل اتصال به باس بالادست تحت شرایط خطای دو فاز

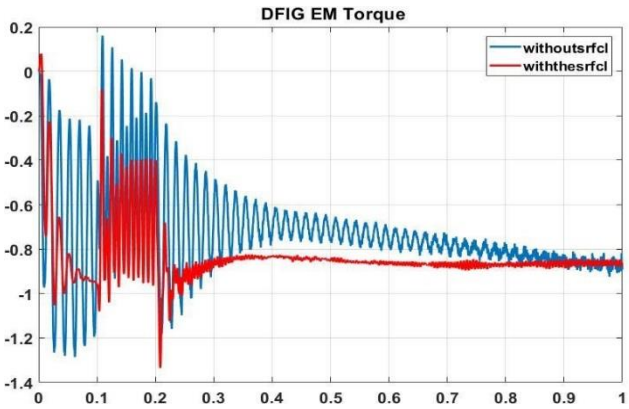
Figure (14): The voltage of the connection point to the upstream bus under two-phase fault conditions

با توجه به شکل (۱۴) مشاهده می شود در زمان اعمال خطای دو فاز در محل باس اتصال به باس بار بالادست در زمانی که بهبود دهنده کیفیت توان در شبکه فعال باشد ولتاز در زمان ۰,۱تا ۰,۲ ثانیه که خطا اعمال می شود در حد 1pu افت می‌کندو پس از گذشت این زمان به پایداری کامل می رسد .

با توجه به شکل فوق مشاهده می شود که که زمانی که محدود کننده در شبکه فعال باشد بر روی ولتاژ باس اتصال به باس بالادست هیچ گونه تاثیری نمیگذارد و هر دو نمودار به طور کامل بر یکدیگر منطبق شده اند.

۴-۳-تشریح عملکرد سیستم تحت شرایط خطای تکفاز :

در این حالت نیز نحوه عملکرد سیستم SRFCL پیشنهادی را حین خطای تکفاز به زمین مورد بررسی قرار میدهیم. با توجه به شکل (۱۵) مشاهده می شود که گشتاور ژنراتور القائی در زمان رخ دادن خطای تکفاز که در زمان ۰,۱تا۰,۲ثانیه می باشد در شرایطی که محدود کننده در شبکه فعال نباشد گشتاور بسیار نوسانی میباشد که پس از طی کردن ۱ثانیه هم به پایداری نمی رسد ولی با توجه به بررسی های انجام شده می توان به این نتیجه رسید که گشتاور ژنراتور القائی در زمان حضور محدود کننده در شبکه در زمان ۱ثانیه به خوبی به پایداری می رسد و در زمان اعمال خطا هم۰,۱تا۰,۲ دچار نوسان بسیار کم تری می شود .



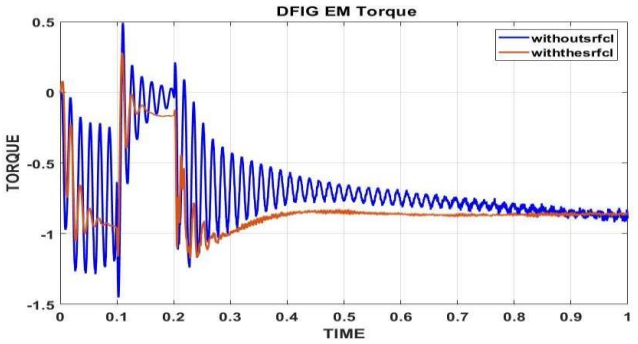
شکل (۱۵)- گشتاور ژنراتور القائی از دو سوتغذیه تحت خطای تکفاز

Figure (15): The torque of induction generator from two power supplies under phase one fault

[DOI: 10.82362/jeps.2024.3.505] [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 3- Autumn 2024

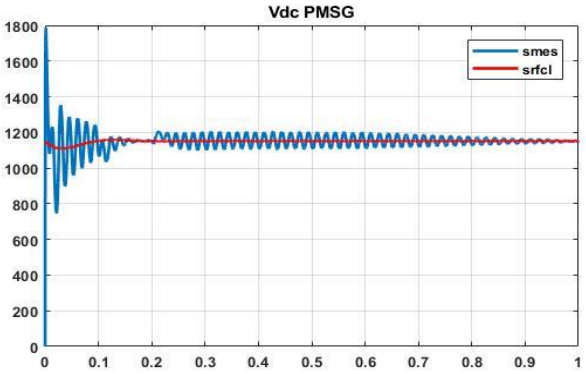
۴-۴-تشریح شرایط خطای سه فاز در شرایطی که خطای سه فاز قبل از ژنراتور القائی رخ دهد

در این حالت فرض میکنیم خطای سه فاز قبل از ژنراتور القایی رخ دهد .با توجه به شکل (۱۶) مشاهده می شود در شرایطی که خطا نزدیک به ژنراتور القائی دو سو تغذیه باشد و در شرایطی که حفاظت مذکور در شبکه فعال نباشد گشتاور پس از ۰,۷ به پایداری می رسد و درزمان اعمال خطا دچار نوسان شدید می شود ولی در شرایطی که محدود کننده در شبکه فعال باشد گشتاور پس از ۰,۴ به پایداری می رسد و در زمان اعمال خطا دچار نوسان کمتری می شود.



شکل (۱۶)-گشتاور ژنراتور القائی تحت شرایط رخ دادن خطای سه فاز قبل از ژنراتور القائی

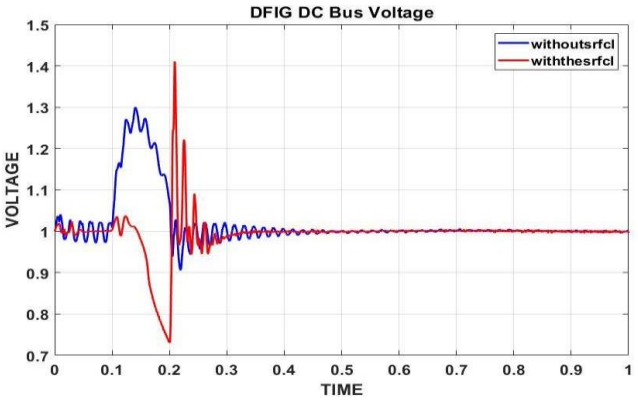
Figure (16): The torque of the induction generator under the conditions of occurrence of a three-phase fault before the induction generator



شکل(۱۷) -ولتاژ لینکdc ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم تحت شرایط رخ دادن خطای سه فاز قبل از ژنراتور القائی

Figure (17): DC link voltage of permanent magnet synchronous generator under the condition of occurrence of three-phase fault before the induction generator

با توجه به شکل (۱۷) مشاهده می شود در شرایطی که خطا نزدیک به ژنراتور القائی باشد و محدود کننده در شبکه فعال نباشد در زمان رخ دادن خطا ولتاژ لینک dc به اندازه 1pu افت می کند ولی در زمان استفاده از محدود کننده ولتاژ لینک dc کاملا پایدار می شود .

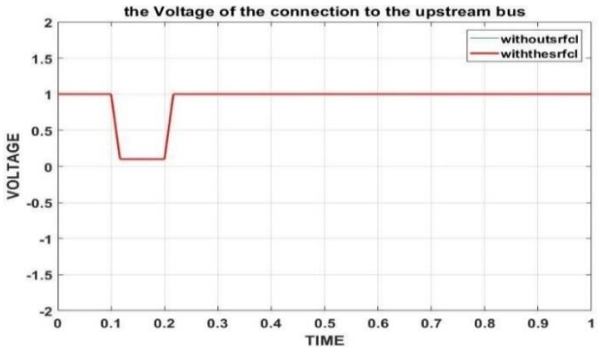


شکل (۱۸) -ولتاژ لینک dc ژنراتور القائی تحت شرایط رخ دادن خطای سه فاز قبل از ژنراتور القائی

Figure (18): DC link voltage of the induction generator under the conditions of occurrence of a three-phase fault before the induction generator

[DOI: 10.82362/jeps.2024.3.505] [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 3- Autumn 2024

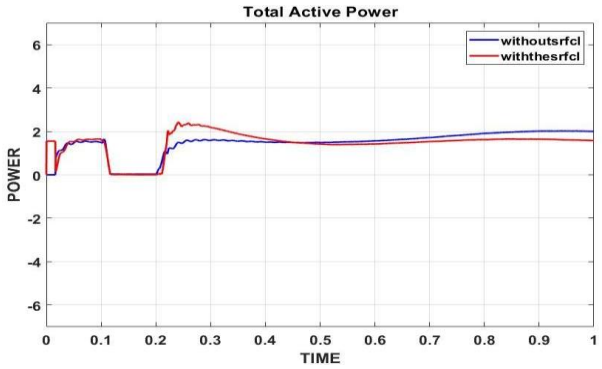
با توجه به شکل (۱۸) مشاهده می شود که در زمانی که خطای سه فاز قبل از ژنراتور القائی رخ دهد ،در زمان شروع نمودار که از ۰ ثانیه میباشد تا رسیدن به۰,۴ ثانیه ولتاژ لینک dc ژنراتور القائی نوسانی میباشد و پس از طی کردن این زمان به پایداری می رسد ولی در شرایطی که محدود کننده در شبکه فعال باشد ولتاژ لینک dc پس از ۰,۳ ثانیه به پایداری می رسد.



شکل (۱۹)-ولتاژ محل اتصال به باس بالا دست تحت خطای سه فاز قبل از ژنراتور القائی

Figure (19): The voltage of the connection point to the upper arm under the three-phase fault before the induction generator

در شکل (۱۹) مشاهده می شود که در شرایط رخ دادن خطا قبل از ژنراتور القائی دو سو تغذیه محدود کننده تاثیری را بر روی ولتاژ محل اتصال به باس بالا دست نمیگذارد و هر دو تا منحنی بر روی یکدیگر منطبق می شوند.



شکل (۲۰)-توان کل شبکه تحت خطای سه فاز قبل از ژنراتور القائی

Figure (20): The power of the whole network under a three-phase fault before the induction generator

در شکل (۲۰) مشاهده می شود که توان کل شبکه در شرایطی که خطای سه فاز قبل از ژنراتور dfigرخ دهد و محدود کننده در شبکه فعال باشد تاثیر زیادی را بابت بهبود توان کل نمیگذارد و فقط به 1puنزدیک تر می شود.

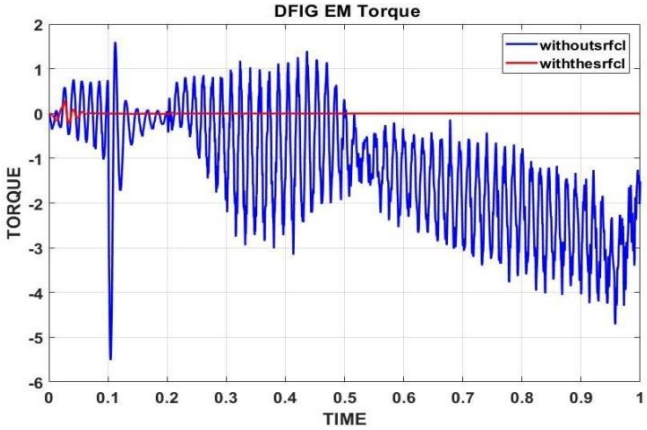
۴-۵-تشریح شرایط خطای باز شدن خط بعد از ژنراتور القائی دو سو تغذیه

این نوع خطا به دلیل وقوع خطا در یک یا چند هادی رخ می‌دهد. رایج‌ترین عوامل این نوع خطاها، خطاهای کابل‌ها و خطوط هوایی، و خطای یک یا چند فاز از مدارشکن‌ها و نیز ذوب شدن یک فیوز یا هادی در یک یا چند فاز است. خطاهای مدار باز، خطای سری نیز نامیده می‌شوند. این نوع خطاها، جز خطای سه‌فاز،نامتقارن یا نامتعادل هستند.از علل ایجاد خطای مدار باز، می‌توان به هادی‌های شکسته و عملکرد نادرست مدارشکن در یک فاز یا بیشتر از آن اشاره کرد. این نوع خطا، اثرات زیر را در پی خواهد داشت:

- عملکرد غیرعادی سیستم
- خطر برای اشخاص و حیوانات
- فرا رفتن ولتاژ از مقادیر نامی در بخش‌هایی از شبکه که خود موجب خطای عایق و وقوع خطای اتصال کوتاه می‌شود.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2024.3.505]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 3- Autumn 2024

اگرچه خطاهای مدار باز ممکن است نسبت به خطاهای اتصال کوتاه زمان بیشتری طول بکشند، اما باید آن‌ها را در سریع‌ترین زمان ممکن حذف کرد تا از آسیب‌های بزرگ‌تر جلوگیری شود.



شکل (۲۱)-گشتاور ژنراتور القائی در زمان باز شدن خط بعد از ژنراتور القائی دو سو تغذیه

Figure (21): The torque of the induction generator at the time of opening the line after the double feeding induction generator

با توجه به شکل(۲۱) مشاهده می شود در شرایطی که سه فاز خط بعد از ژنراتور القائی باز شود و محدود کننده در شبکه فعال نباشد ، گشتاور شدیدا نوسانی می شود ولی در شرایطی که محدود کننده در شبکه فعال شود نوسان گشتاور به خوبی از بین می رود .

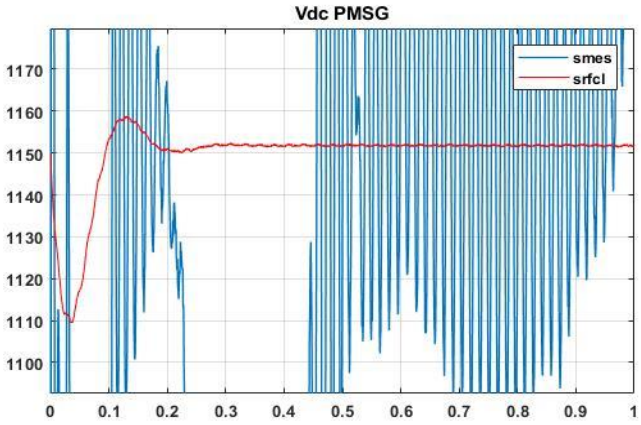


شکل (۲۲)-توان کل در زمان باز شدن خط بعد از ژنراتور القائی دو سو تغذیه

Figure (22): The total power at the time of opening the line after the double feeding induction generator

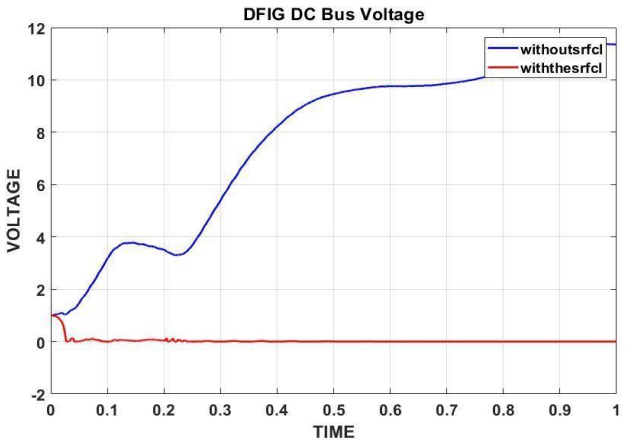
شکل (۲۲) نشان می‌دهد که در شرایطی که محدود کننده در شبکه فعال نباشد توان کل به شدت ناپایدار می‌شود ، ولی در شرایطی که محدود کننده فعال باشد توان کل کاملا میرا و پایدار می شود. مطابق شکل (۲۳) مشاهده می شود در شرایطی که خط مجاور ژنراتور القائی باز شود تاثیر محسوسی بر ولتاژ لینک dc ژنراتور سنکرون میگذارد . در شرایطی که محدود کننده در شبکه فعال نباشد ولتاژ لینک dc ناپایدار می شود ولی در شرایطی که محدود کننده در شبکه فعال باشد نوسان ولتاژ لینک dc از بین می رود .

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2024.3.505]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 3- Autumn 2024



شکل(۲۳)-ولتاژ لینک dcژنراتور سنکرون مغناطیس دائم در شرایط باز شدن خط بعد از ژنراتور القائی

Figure (23): dc link voltage of permanent magnet synchronous generator in the condition of opening the line after the induction generator

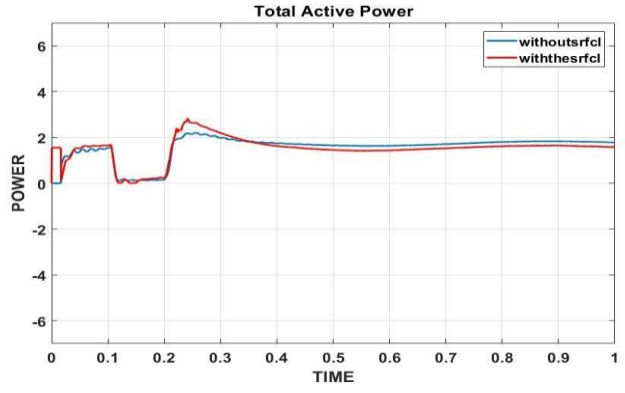


شکل(۲۴)-ولتاژ لینک dc ژنراتور القائی در شرایط باز شدن خط بعد از ژنراتور القائی

Figure (24): DC link voltage of the induction generator in the condition of opening the line after the induction generator

با توجه به شکل (۲۴) مشاهده می شود در شرایطی که خط مجاور ژنراتور القائی باز شود و محدود کننده در شبکه فعال نباشد تاثیر محسوسی بر ولتاژ لینک dc ژنراتور القائی دو سو تغذیه میگذارد و به شدت ناپایدار می شود. ولی در شرایطی که محدود کننده در شبکه فعال شود ولتاژ لینکdc پایدار می شود.

۴-۶- تشریح شرایط باز شدن خط بعد از ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم

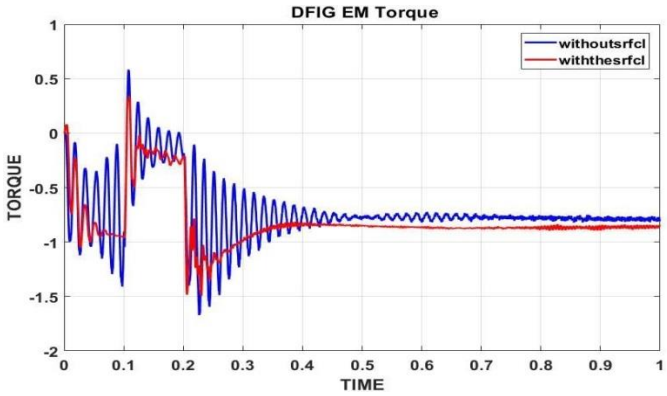


شکل (۲۵) -توان‌کل در زمان باز شدن خط سمت ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم

Figure (25): total power at the time of opening the permanent magnet synchronous generator side line

[DOI: 10.82362/jeps.2024.3.505] [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 3- Autumn 2024

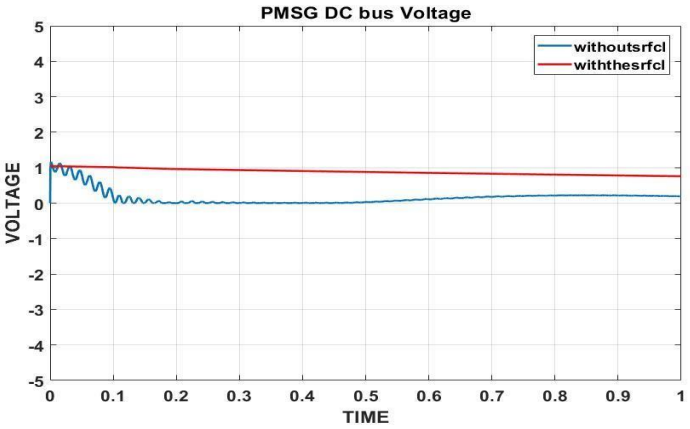
با توجه به شکل (۲۵) مشاهده می شود که توان کل شبکه در زمان باز شدن خط سمت ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم در زمان اعمال خطا دچار نوسان می شود ولی در شرایطی که محدود کننده در شبکه فعال باشد زمان نوسان خطا کاهش می یابد .



شکل (۲۶) -گشتاور ژنراتور القائی در زمان باز شدن خط سمت ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم

Figure (26): The torque of the induction generator at the time of opening the line of the permanent magnet synchronous generator

با توجه به شکل (۲۶) مشاهده می شود که در زمان باز شدن خط سمت ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم و در زمانی که محدود کننده در شبکه فعال نباشد گشتاور در زمان 1s به پایداری می رسد ولی در زمانی که محدود کننده در شبکه فعال باشد گشتاور پس از 0.4s به پایداری می رسد و در زمان اعمال خطا نوسان کمتری را گشتاور تجربه می کند .

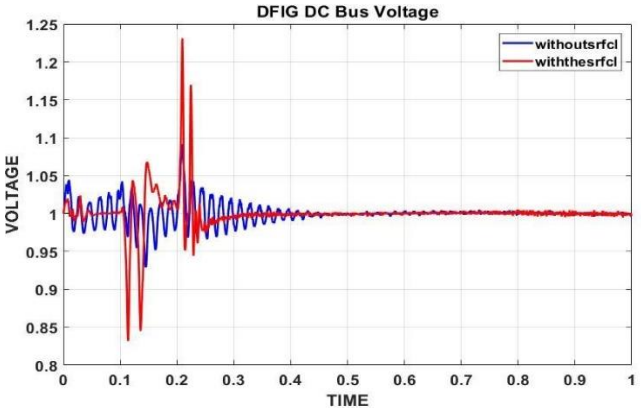


شکل (۲۷) -ولتاژ لینک dcژنراتور سنکرون مغناطیس دائم در زمان باز شدن خط مجاور ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم

Figure (27): dc link voltage of the permanent magnet synchronous generator at the time of opening the line adjacent to the permanent magnet synchronous generator

با توجه به شکل (۲۷) در زمانی که خط سمت ژنراتور سنکرون باز شود و محدود کننده در شبکه فعال نباشد ولتاژ لینک dcبه شدت نوسانی می شود به مقدار 1pu نمی رسد ولی در شرایطی که محدود کننده در شبکه فعال شود ولتاژ لینک dc کاملا پایدار می شود و به مقدار 1pu نزدیک تر می شود

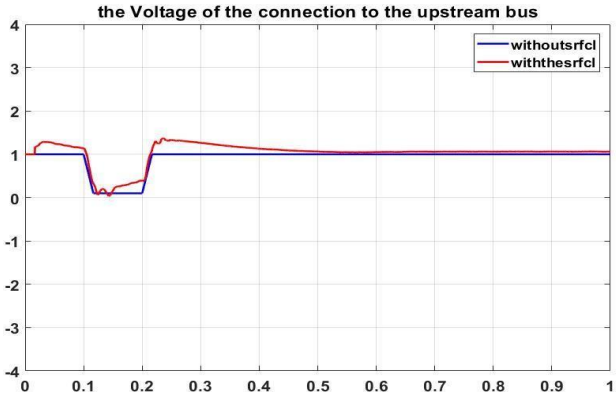
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2024.3.505]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 3- Autumn 2024



شکل (۲۸) ولتاژ لینک dc ژنراتور القائئ دو سو تغذیه در زمان باز شدن خط مجاور ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم

Figure (28): dc link voltage of the two-side inductive generator at the time of opening the line adjacent to the permanent magnet synchronous generator

با توجه به شکل(۲۸) در شرایطی که سه فاز خط انتقال بنا به دلیلی مجاور ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم باز شود تاثیر زیادی بر روی گشتاور ژنراتور القائی دو سو تغذیه نمیگذارد . با توجه به شرایط مذکور محدود کننده ی جریان خطا تاثیر خود را بر روی پایداری گشتاور ژنراتور القائی دو سو تغذیه می‌گذارد و پس از طی کردن۰۲.ثانیه به پایداری می‌رسد .



شکل (۲۹) -ولتاژ محل اتصال به باس بالا دست در زمان باز شدن خط مجاور ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم

Figure (29): The voltage of the connection point to the upper arm during the opening of the line adjacent to the permanent magnet synchronous generator

با توجه به شکل (۲۹) مشاهده می شود که در زمانی که خط مجاور ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم باز شود محدود کننده تاثیری منفی بر ولتاژ محل اتصال به باس بالا دست میگذارد و باعث افزایش نوسان در زمان رخ دادن خطا می شود ولی این نوسان به قدری کم میباشد که تاثیر چشمگیری بر روند کار شبکه نمی‌گذارد و ولتاژ در 1pu به پایداری می رسد .

۵-نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مقاله، روش بهبود پارامتر های دینامیکی شبکه ی بادی مبتنی بر ژنراتورهای القائی دو سو تغذیه و سنکرون مغناطیس دائم تحت اعمال خطا های مختلف مورد بررسی قرار می گیرد . هدف کاهش نوسانات در شبکه ی قدرت متصل به نیروگاه بادی است که بتواند در زمان اعمال خطاهای مختلف مانند خطای باز شدن یک خط قیود حاکم بر شبکه را در نظر بگیرد . بر اساس طرح پیشنهادی در این مقاله نتایج زیر حاصل شده است .

الف . گذر از ولتاژ پایین در شبکه ی قدرت متصل به نیروگاه بادی با ادغام محدود کننده ی جریان خطا و سیستم بهبود دهنده ی کیفیت توان. بهره بردارهای سیستم انتقال استانداردهایی را در قالب ملزومات کد شبکه تعیین کرده اند که با توجه به آن مزارع بادی باید در شرایط اغتشاشات نظیر اتصال کوتاه و افت ولتاژ به شبکه متصل بمانند که این قضیه قابلیت گذر از خطای

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2024.3.505]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 3- Autumn 2024

ولتاز پایین توربین بادی نامیده شده است که یکی از اهداف اصلی این پژوهش می‌باشد.

ب . تشریح شبکه پس از اعمال خطا در زمانی که محدود کننده جریان خطای مقاومتی وارد شبکه می شود.

در این مقاله ابتدا محدودسازهای جریان خطا و کاربرد و مزیتهای آنها را معرفی کردیم، سپس یک مدل محدودساز جریان خطا ابررسانایی یا srfcl از نوع مقاومتی برای محدودسازی جریان خطا ، افزایش کیفیت توان و حذف نوسانات ولتاژ و جلوگیری از افت ولتاژ را ارائه دادیم . با توجه به بررسی های صورت گرفته بر روی تحقیقات پیشین مشخص شد تا به حال از شبکه ای که شامل بهبود دهنده کیفیت توان و بازیاب دینامیکی ولتاژ و محدود کننده ی جریان خطا باشد استفاده نشده است که در این پژوهش نتایج استفاده از ان ها به طور دقیق تحت خطاهای متفاوت بررسی شده است . با توجه به بررسی های صورت گرفته مشخص گردید که پارامتر های دینامیکی شبکه در شرایط ادغام کردن بهبود دهنده کیفیت توان به همراه محدود کننده جریان خطا بهبود خوبی یافته اند .

پ . بررسی تاثیر نوع خطای رخ داده در شبکه ی مبتنی بر سیستم های بادی

با توجه به بررسی های انجام شده در شبکه تحت مطالعه میتوان به این نتیجه رسید که اگر خطا بدین شکل باشد که سه فاز خط بنا به دلایلی مانند شرایط جوی نامناسب باز شود تاثیر شدیدی در پارامتر های دینامیکی مانند گشتاور ژنراتور القائی دو سو تغذیه میگذارد . با توجه به نتایج بدست آمده میتوان مشاهده کرد در زمانی که محدود کننده در شبکه فعال باشد به خوبی پارامتر های دینامیکی را بهبود می بخشد .

ت . بررسی مکان اعمال خطا در شبکه مبتنی بر سیستم های بادی

با توجه به بررسی های انجام شده در شبکه ی مبتنی بر سیستم های بادی میتوان بدین نتیجه رسید که اگر مکان اعمال خطا نزدیک به ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم باشد تاثیر زیادی بر روی پارامتر های دینامیکی شبکه نمیگذارد. اگر خطای رخ داده نزدیک به ژنراتور القائی باشد پارامتر های دینامیکی را به شدت نوسانی می کند که تحت همین شرایط هم محدود کننده تاثیر بسزایی بر روی بهبود پارامتر های دینامیکی میگذارد.

س . بررسی کارکرد شبکه ی بهبود دهنده کیفیت توان به همراه محدود کننده جریان خطا نسبت به کارهای انجام شده در مطالعات قبلی از میان انواع روش های مختلف جهت گذر از ولتاژ پایین در بحث پایداری گذرای سیستم ، عملکرد بهتری نسبت به سایر روش ها دارد .

References

مراجع

[1]. Chunhua Liu, Member, IEEE, K. T. Chau, Senior Member, IEEE, and Xiaodong Zhang,Student Member, IEEE , An Efficient Wind-Photovoltaic Hybrid Generation ,IEEE RANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 57, NO. 3, MARCH 2010

[2].Wei Qiao, Member, IEEE, Ronald G. Harley, Fellow, IEEE and Ganesh Kumar Venayagamoorthy, Senior Member, IEEE, " Coordinated Reactive Power Control of a Large Wind Farm and a STATCOM Using Heuristic Dynamic Programming ", IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 24, NO. 2, JUNE 2009.

[3].Zahra Rafiee, Rasool Heydari,Member, IEEE, Mansour Rafiee , Mohammad Reza Aghamohammadi , and Frede Blaabjerg "Enhancement of the LVRT Capability for DFIG-Based Wind Farms Based on Short-Circuit Capacity",IEEE SYSTEMS JOURNAL, VOL. 16, NO. 2, JUNE 2022.

[4].Mohammadreza Fakhari Moghaddam Arani, Student Member, IEEE, and Yasser Abdel-Rady I. Mohamed, Senior Member, IEEE. ASSESSMENT and enhancement of fault -scale pmsg-based wind power generatorperformance undr faults, 2016.

[5].Jian xun jin ,ruo huan yang , combined low voltage ride through and pwer something control for dfig/pmsg hybrid wind energy conversion system employing a smes-based ac-dc unified power quality conditioner , Electrical Power and Energy Systems 128 (2021) 106733.

[6].Amin Jalilian, Seyed Behzad Naderi , Michael Negnevitsky , Mehrdad Tarafdar Hagh, Kashem M. Muttaqi, Low voltage ride-through enhancement of DFIG-based wind turbine using DC link switchable resistive type fault current limiter", Electrical Power and Energy Systems 86 (2017) 104-119.

[7].M. M. Islam, Member, IEEE, K. M. Muttaqi, Senior Member, IEEE, D. Sutanto, Senior Member, IEEE , A Saturated Amorphous Alloy Core Based Smart Fault Current Limiter for Improving the Low Voltage Ride

[DOI: 10.82362/jeps.2024.3.505] Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 3- Autumn 2024 [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

Through Capability of Distributed Generation Units 2020 IEEE Industry Applications SocietyAnnualMeeting|978-1-7281-7192-0/20/$31.00©2020IEEE|DOI:
[8].Department of Electrical Engineering, Kerman Branch, Islamic Azad University, Kerman, Iran , Designing of wide-area damping controller for stability improvement in a large-scale power system in presence of wind farms and SMES compensator , Electrical Power and Energy Systems 119 (2020) 105936 .
[9].M.A. Chowdhury a, G.M. Shafiullah b,*,S.M. Ferdous b b Schoolof Engineering and Energy, Murdoch University,WA6150, Australia .Low voltage ride-through augmentation of DFIG wind turbines by simultaneous control of back-to-back converter using partial feedback linearization technique , Electrical Power and Energy Systems 153 (2023) 109394 .
[10].Reza Hemmati, Hossien Faraji, Narges Yavari Beigvand,"Multi abjective control scheme on dfig wind turbine integrated with energy storage system and facts devices: steady-state and transient operation improvement Electrical Power and Energy Systems 135 (2022) 107519.
[11]. Md. Minarul Islam, Member, IEEE, K. M. Muttaqi, Senior Member, IEEE, and Danny Sutanto, Senior Member, IEEE," A Novel Saturated Amorphous Alloy Core Based Fault Current Limiter for Improving the Low Voltage Ride Through Capability of Doubly-fed Induction Generator Based Wind Turbines", IET Power Electronics, School of Electrical, Computer and Telecommunications
Engineering, Faculty of Engineering and Information Sciences
[12]. M. Firouzi, G. B. Gharehpetian, Senior Member, IEEE "LVRT Performance Enhancement of Wind Farms by Capacitive Bridge-Type Fault Current Limiter (CBFCL) ", DOI 10.1109/TSTE.2017.2771321
[13].Wenyong Guo, Member, IEEE, Liye Xiao, Shaotao Dai, Yuanhe Li, Xi Xu, Weiwei Zhou, and Luo Li , LVRT Capability Enhancement of DFIG with Switch Type Fault Current Limiter , IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS2017.
[14]. Hossein Shahbabaei Kartijkolaiea, Masoud Radmehra,x, Mehdi Firouzi , LVRT capability enhancement of DFIG-based wind farms by using capacitive DC reactor-type fault current limiter , Electrical Power and Energy Systems 102 (2018) 287-295 .
[15]. Mohsen Ghorbani a, Mehdi Firouzi b,*, Babak Mozafari c, Farzad Golshan " Power flow management and lvrt enhancement by using multi-fuctional capacitive bridge-type fault current limiter in dfig system Electrical Power and Energy Systems 148 (2023) 108810 .
10.1109/IAS44978.2020.9334710
[16].Pazouki, Elham , De Abreu-Garcia, Jose Alexis , Sozer, Yilmaz, "Short circuit fault diagnosis for interleaved DC-DC converter using DC-link current emulator", Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), IEEE,pp. 230-236, 2017.
[17].Mohammadreza Fakhari Moghaddam Arani, Student Member, IEEE, and Yasser Abdel-Rady I. Mohamed, Senior Member, IEEE. ASSESSMENT and enhancement of fault -scale pmsg-based wind power generatorperformance undr faults, 2016.
[18].Kenneth E. Okedu, Student Member, IEEE, S.M. Muyeen, Member, IEEE, Rion Takahashi, Member,"Wind farm fault ride through using dfig with new protection scheme", IEEE and junji tamura, Vol. 28, Issue8,pp. 3860-3869, 2012..
[18].M. Kenan Doö s¸og˘ lu ١, Enhancement of Dynamic Modeling for LVRT Capability in DFIG-Based Wind Turbines , Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering (2020).
[19] Amir Bagheran Shaerbaf1, Ali Asghar Shojaei2, Mehdi Ameli. Finding the location and amount of FACTS devices in the power system including the wind farm to improve system parameter, Scientific-specialized journal of modern research in electricity-sixth year-second issue-autumn and winter 2017.
[20] Ehsan Akbari. Realization of LVRT requirement in DFIG wind turbine connected to power grid with DVR based on MMCC-DSCC multilevel model. Scientific-Specialized Journal of Modern Research in Electricity - Year 4 - Issue 2 - Fall-Winter 20.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOI: 10.82362/jeps.2024.3.505]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 3- Autumn 2024