

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۴/۳۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۸/۲۴

بررسی رفتار گذرای ژنراتور القایی دوسو تغذیه متصل به سیستم قدرت در هنگام بروز خطا در شبکه

محمد رجبی نسب^۱، حمید یعقوبی^{۲*}

^۱ کارشناس ارشد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

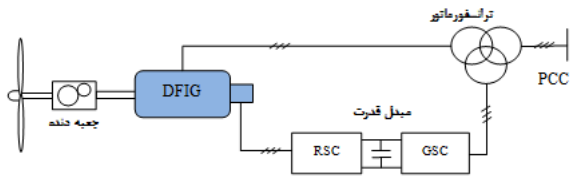
mrajabinasab@semnan.ac.ir

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

yaghobi@semnan.ac.ir

چکیده: با افزایش روزافزون سهم مزارع بادی در تأمین برق شبکه‌های قدرت، اهمیت بررسی رفتار گذرای ژنراتورهای مورد استفاده در نیروگاه‌های بادی، در هنگام بروز خطا یا اغتشاشات شدید شبکه، بیش از پیش احساس می‌شود. در این میان، بررسی رفتار ژنراتور القایی دوسو تغذیه به‌عنوان متداول‌ترین ژنراتور در صنعت تولید برق بادی اهمیت ویژه‌ای دارد. در این مقاله، ابتدا مدل ریاضی سیستم توربین-ژنراتور بادی متصل به شبکه قدرت به‌منظور تحلیل دقیق شرایط خطا به کار گرفته شده است. این مدل ریاضی شامل یک مدل مرتبه پنجم از ماشین القایی روتور سیم‌پیچی شده به‌همراه مدل دومحوری توربین است. در گام بعدی، ژنراتور القایی دوسو تغذیه متصل به شبکه قدرت در نرم‌افزار MATLAB/Simulink شبیه‌سازی و با اعمال خطاهای مختلف در شبکه، چگونگی پاسخ ژنراتور به این اغتشاشات شدید بررسی شده است. در نهایت نیز نقش عوامل و پارامترهای مختلف سیستم توربین-ژنراتور بر پایداری ماشین و قابلیت گذر از خطای آن مورد مطالعه قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: ژنراتور القایی دوسو تغذیه، توربین بادی، خطاهای شبکه، پایداری گذرا.



شکل (۱): ساختار کلی سیستم توربین-ژنراتور بادی مجهز به ژنراتور القایی دوسو تغذیه [۱]

یکی از موضوعات مهم برای تولید انرژی برق مستمر و باکیفیت، توجه به پایدار ماندن سیستم قدرت هنگام بروز خطا یا اغتشاشات مختلف در شبکه است. یکی از بحث‌های مهم در حوزه پایداری سیستم‌ها، بررسی رفتار گذرای آن‌ها در هنگام وقوع این خطاها یا اغتشاشات شدید است. در گذشته، عموم مطالعات در این حوزه به بررسی پایداری گذرای ژنراتورهای سنکرون معطوف بوده است؛ برای مثال در مراجع [۵ و ۶] پایداری گذرای ژنراتور سنکرون با استفاده از سرعت و شتاب زاویه‌ای، اندازه‌گیری شده از شار پیوندی و توان خروجی ماشین مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در مراجع بسیاری، با استفاده از روش کلاسیک سطوح برابر پایداری گذرای ژنراتور سنکرون آنالیز شده است [۷-۱۰]. اما در سال‌های اخیر، با افزایش سهم مزارع بادی در تأمین برق شبکه و همچنین به علت تفاوت مشخصه‌های دینامیک ژنراتور القایی دوسو تغذیه و ژنراتور سنکرون، نیاز به بررسی دقیق رفتار گذرای ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه در هنگام افت ولتاژ شبکه بیش‌ازپیش احساس می‌شود تا بدین وسیله بتوان با درک صحیح از رفتار ژنراتور و اتخاذ راهکارهای مناسب و دقیق، مزارع بادی را در برابر خطاهای شدید شبکه محافظت کرد و به دنبال آن پایداری شبکه قدرت را بهبود بخشید [۱۱]. به‌طور کلی، ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه همچون سایر ژنراتورهای متصل به شبکه قدرت، نسبت به خطاهای شبکه، حساسیت نسبتاً بالایی دارند. از همین رو، این ژنراتورها نیازمند مدارات حفاظتی خاصی هستند تا آن‌ها را در برابر خطاهای شبکه محافظت کند. در سال‌های اخیر، مدارات حفاظتی مختلفی در این رابطه معرفی شده‌اند که مدار حفاظتی کروبار^۷ از جمله معروف‌ترین آن‌هاست. هنگام بروز اغتشاشات شبکه، مدار کروبار فعال شده و سیم‌پیچ‌های روتور و مبدل قدرت را در برابر اضافه ولتاژ و جریان‌های شدید محافظت می‌کند. با فعال شدن مدار کروبار، رژیم کاری ژنراتور القایی دوسو تغذیه به ژنراتور القایی قفس سنجایی تغییر می‌کند؛ این امر می‌تواند بر رفتار گذرای ژنراتور و مؤلفه‌هایی همچون سرعت و زمان بحرانی رفع خطا که از

۱. مقدمه

امروزه به‌علت کاهش منابع انرژی تجدیدناپذیر، افزایش گازهای گلخانه‌ای و دمای کره زمین در اثر استفاده از سوخت‌های فسیلی، اهمیت منابع انرژی تجدیدپذیر بیش از هر زمان دیگری مشخص شده است. در میان منابع مختلف انرژی تجدیدپذیر، انرژی بادی به‌علت مزایایی همچون در دسترس بودن، پاک و ارزان بودن، بیشترین سرعت رشد و توسعه را در جهان دارد [۱]. به‌طور کلی نیروگاه‌های بادی از ژنراتورهای گوناگونی برای تبدیل انرژی باد به الکتریسیته استفاده می‌کنند، اما در این بین، ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه (DFIG^۱) به‌علت ساختار ویژه و مزایای فراوان، از جمله کنترل مجزای توان اکتیو و راکتیو، بهبود کیفیت توان، توانایی ثابت نگه داشتن فرکانس خروجی با وجود کار در سرعت‌های مختلف باد، تنش مکانیکی کمتر نسبت به ژنراتورهای القایی سرعت ثابت (FSIG^۲) و همچنین استفاده از مبدل الکترونیک قدرت کوچک‌تر و ارزان‌تر نسبت به سایر ژنراتورها، به‌عنوان متداول‌ترین فناوری در صنعت تولید برق بادی شناخته می‌شوند [۲ و ۳].

ژنراتور القایی دوسو تغذیه در واقع یک ماشین روتور سیم‌پیچی شده است که سیم‌بندی‌های استاتور آن به‌صورت مستقیم، و سیم‌بندی‌های روتور آن از طریق یک مبدل قدرت فرکانس متغیر (VFC^۳) به شبکه متصل‌اند. مبدل قدرت وظیفه کنترل مجزای توان اکتیو و راکتیو، ثابت نگه داشتن فرکانس خروجی ژنراتور در لغزش‌های نسبتاً زیاد (حدود ± 0.3 سرعت نامی) و تثبیت ولتاژ خروجی را دارد. این مبدل عموماً از نوع پشت‌به‌پشت^۴ بوده و از دو بخش اصلی موسوم به مبدل سمت روتور (RSC^۵) و مبدل سمت شبکه (GSC^۶) تشکیل شده است. این دو بخش توسط خازن لینک DC به یکدیگر متصل‌اند. وظیفه این خازن کاهش ریبیل ولتاژ است [۲ و ۴]. شکل (۱) شمای کلی یک توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی دوسو تغذیه را نشان می‌دهد [۱]. شایان ذکر است که در این مقاله از روش کنترل برداری برای کنترل مبدل‌های سمت روتور و شبکه استفاده شده است.

1. Doubly-fed Induction Generator
2. Fixed-Speed Induction Generator
3. Variable-Frequency Converter
4. Back-to-Back Converter
5. Rotor Side Converter
6. Grid Side Converter

7. Crowbar Protection Circuit

روتور در راستای محورهای d و q به صورت زیر بیان می شود [۱۲] و [۱۳]:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{qr} \\ \lambda_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{lr} + L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_{lr} + L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad (1)$$

که λ معرف شار پیوندی، L_{ls} ، L_{lr} ، L_m به ترتیب بیانگر اندوکتانس های نشتی استاتور، روتور و اندوکتانس مغناطیس کننده در سمت استاتور هستند. i نیز نماد جریان است. اندیس های s و r به ترتیب معرف متغیرهای استاتور و روتور و اندیس های q و d به ترتیب به معنای متغیرها در راستای دو محور q و d هستند. گفتنی است که این شیوه اندیس گذاری در سایر روابط مطرح شده در این مقاله نیز رعایت شده است. بالانویس پریم در متغیرهای روتور، نشانگر انتقال این پارامترها از سمت روتور به استاتور است. رابطه (۲) بیانگر این نسبت تبدیل هاست:

$$L_m = \frac{3}{2} L_{ss} = \frac{3}{2} \frac{N_s}{N_r} L_{sr} = \frac{3}{2} \left(\frac{N_s}{N_r} \right)^2 L_{rr} \quad (2)$$

در این رابطه، N تعداد دور سیم پیچی است. L_{rr} و L_{ss} به ترتیب معرف اندوکتانس خودی استاتور و روتور هستند و L_{sr} نیز معرف اندوکتانس متقابل بین استاتور و روتور است. معمولاً برای کنترل مجزای توان اکتیو و راکتیو از روش کنترل برداری شار استاتور (SFOC) استفاده می شود [۱۴]. در این روش، محور d دستگاه مرجع سنکرون هم جهت با شار پیوندی استاتور تعریف می شود، بدین ترتیب داریم:

$$\lambda_{qs}^e = 0 \quad (3)$$

بالانویس e در این رابطه نشان دهنده نوع دستگاه مرجع انتخابی یعنی دستگاه مرجع سنکرون است.

استفاده از روش SFOC این نکته را در ذهن تداعی می کند که مؤلفه های ولتاژی محورهای d و q را نمی توان به عنوان متغیرهای کنترلی مستقل در نظر گرفت. از همین رو پیاده سازی روش کنترل برداری برای مبدل قدرت پشت به پشت نیازمند ترم های جداکننده ولتاژ است [۱۵]. بنا به نکات و روابط ریاضی یادشده، مدار معادل ماشین القایی روتورسیم پیچی شده به صورت شکل (۲) خواهد بود [۱۲]. پارامترهای $v_{dr,dec}^e$ و $v_{qr,dec}^e$ در این شکل، همان ترم های جداکننده ولتاژ در راستای دو محور q و d هستند. V_r و V_s به ترتیب، مقاومت سیم پیچ های هر فاز استاتور و روتور را نشان می دهند.

مشخصه های مهم در بررسی مرز پایداری ژنراتورهای متصل به شبکه هستند، اثر بگذارد. عموم مطالعات در زمینه ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه متصل به شبکه قدرت درباره ارائه روش های بهبود قابلیت گذر از خطای (FRT) آن هستند [۲ و ۱۱]. برخی دیگر از مقالات نیز به بررسی رفتار ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه در هنگام بروز خطا در شبکه قدرت و حتی مقایسه نحوه پاسخ آن با سایر تکنولوژی های مورد استفاده در مزارع بادی، بدون در نظر گرفتن نقش مدارات حفاظتی ژنراتور القایی دوسو تغذیه می پردازند [۴ و ۱۲]. در مرجع [۴] از شاخص پایداری گذرا که بر مبنای تابع انرژی گذرا محاسبه می شود، برای تعیین و مقایسه مرز پایداری ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه با ژنراتورهای القایی قفس سنجابی و ژنراتورهای سنکرون استفاده می گردد؛ اما در این مقاله، مطالعات جامع و مفصلی درباره تأثیر مدارات حفاظتی ژنراتور القایی دوسو تغذیه همچون مدار کروبار بر روی پایداری گذرای آن صورت نگرفته است.

با توجه به توضیحات بالا، اولین گام برای درک صحیح از رفتار دینامیک ژنراتور القایی دوسو تغذیه، در اختیار داشتن یک مدل ریاضی دقیق از آن است. لذا در بخش اول این مقاله، از یک مدل مرتبه پنج از این ژنراتور به همراه مدل دومحوری توربین به منظور مطالعه جامع و دقیق رفتار ژنراتور القایی دوسو تغذیه و نحوه پاسخ پارامترهای مختلف آن به اغتشاشات شبکه استفاده شده است. همچنین در این بخش، مدل مناسبی از مبدل قدرت که متشکل از مبدل های سمت شبکه و روتور می باشد، نیز مورد استفاده قرار گرفته است. در بخش بعد، به کمک شبیه سازی ژنراتور القایی دوسو تغذیه متصل به شبکه قدرت در نرم افزار MATLAB/Simulink و اعمال خطای مختلف در شبکه، چگونگی پاسخ این ژنراتور به اغتشاشات شدید بررسی شده است. در بخش آخر نیز نقش عوامل و پارامترهای مختلف سیستم توربین-ژنراتور متصل به مدار حفاظتی کروبار، بر پایداری و قابلیت گذر از خطای ژنراتور مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲. مدل ریاضی ژنراتور القایی دوسو تغذیه

در بخش پیش رو، مدل سیستم توربین-ژنراتور بادی برای مطالعات پایداری گذرا طرح شده است.

۱.۲. مدل ماشین القایی روتورسیم پیچی شده

اگر یک ماشین القایی روتورسیم پیچی شده در شرایط عملکرد متعادل در نظر گرفته شود، رابطه مربوط به شار پیوندی استاتور و

$$V_{dr}^e = v_i' P_m g_{dr}^e \quad (۸)$$

$$v_i' = \frac{2}{\pi} v_i \quad (۹)$$

$$\frac{\pi}{3} i_i' = P_m (i_{qr}^e g_{qr}^e + i_{dr}^e g_{dr}^e) \quad (۱۰)$$

$$i_i' = \frac{\pi}{3} i_i \quad (۱۱)$$

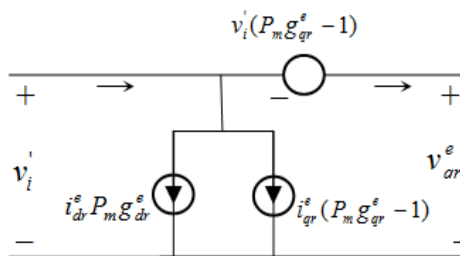
$$v_i' i_i' = v_{qr}^e i_{qr}^e + v_{dr}^e i_{dr}^e \quad (۱۲)$$

در این روابط، قطار پالس PWM است. v_i و i_i ولتاژ و جریان لحظه‌ای ورودی مبدل قدرت را بیان می‌کنند. متغیرهای g_{qr}^e و g_{dr}^e نیز به ترتیب توابع کلیدزنی در راستای محورهای q و d هستند که می‌توان آن‌ها را به صورت بسط فوریه بیان کرد [۱۴]:

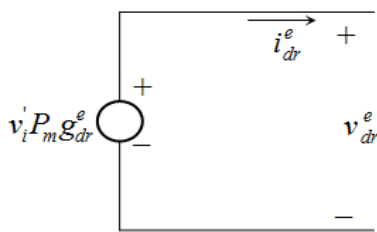
$$g_{qr}^e = 1 + \frac{2}{35} \cos 6(\omega_s - \omega_r)t - \frac{2}{143} \cos 12(\omega_s - \omega_r)t + \dots \quad (۱۳)$$

$$g_{dr}^e = \frac{12}{35} \sin 6(\omega_s - \omega_r)t - \frac{2}{143} \sin 12(\omega_s - \omega_r)t + \dots \quad (۱۴)$$

جایی که ω_s و ω_r معرف سرعت زاویه الکتریکی سنکرون و محور روتور هستند. معادلات (۷-۱۲) در واقع متغیرهای v_i و i_i را به مختصات d - q منتقل می‌کنند. بدین ترتیب مدار معادل مبدل سمت روتور در دستگاه مرجع سنکرون مطابق شکل (۳) خواهد بود [۱۲].



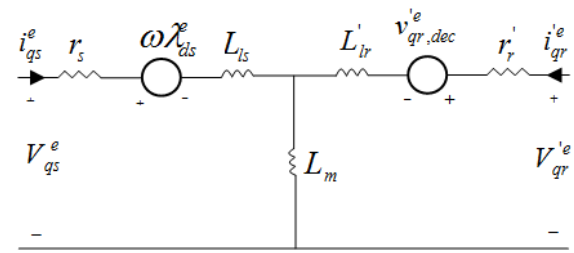
(الف)



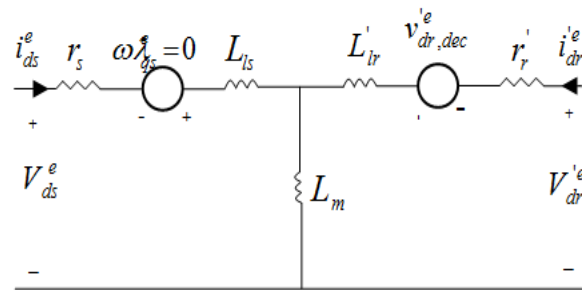
(ب)

شکل (۳): مدار معادل مبدل سمت روتور در دستگاه مرجع سنکرون؛ (الف) مدار معادل در راستای محور q (ب) مدار معادل در راستای محور d [۱۲]

نماد V نیز بیانگر ولتاژ است.



(الف)



(ب)

شکل (۲): مدار معادل ماشین القایی روتور سیم‌پیچی شده سه فاز در دستگاه مرجع سنکرون؛ (الف) مدار معادل ژنراتور در راستای محور q (ب) مدار معادل ژنراتور در راستای محور d [۱۲]

گشتاور الکترومغناطیسی (T_e)، توان اکتیو (P_s) و راکتیو (Q_s) ژنراتور در ترمینال استاتور آن نیز به کمک روابط زیر محاسبه می‌شوند [۱۶]:

$$T_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s} \frac{v_s}{\omega_s} i_{qr}^e \quad (۴)$$

$$P_s = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} v_s i_{qr}^e \quad (۵)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} v_s \left(\frac{L_m}{L_s} i_{dr}^e - \frac{v_s}{\omega_s L_s} \right) \quad (۶)$$

در رابطه (۴)، p تعداد جفت قطب‌هاست.

۲.۲. مدل‌سازی مبدل قدرت پشت‌به‌پشت

هنگام مدل‌سازی مبدل‌های قدرت، بهترین کار برای تسهیل در محاسبات، انتقال پارامترهای مبدل به همان دستگاه مرجع ماشین الکتریکی است [۱۲ و ۱۵]؛ به عبارت دیگر می‌توان از دستگاه مرجع سنکرون برای مدل‌سازی متغیرهای مبدل قدرت نیز بهره گرفت. این امر می‌تواند هنگام کار با معادلات پیچیده بسیار سودمند باشد. مدل کردن مبدل قدرت در راستای دو محور d و q در قاب روتور با تعریف دو تابع کلیدزنی قابل بیان است:

$$V_{qr}^e = v_i' P_m g_{qr}^e \quad (۷)$$

بین دو مبدل از طریق این خازن صورت می‌گیرد. برای یافتن معادلات حاکم بر خازن لینک DC و با صرف نظر از هارمونیک‌های ناشی از کلیدزنی و تلفات مبدل داریم [۱۷]:

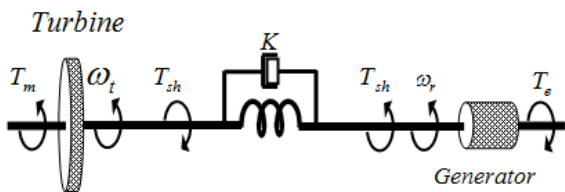
$$C \frac{dE}{dt} = i_{os} - i_{or} = i_{dc} \quad (۱۹)$$

که در آن C و E به ترتیب ظرفیت و ولتاژ دو سر خازن و i_{or} و i_{os} نیز جریان GSC و RSC هستند.

بدین ترتیب توان لحظه‌ای لینک DC به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_c = E i_{dc} = EC \frac{dE}{dt} = P_{gsc} - P_{rsc} \quad (۲۰)$$

عبارت‌های P_c ، P_{gsc} و P_{rsc} به ترتیب توان خازن لینک DC، توان مبدل سمت شبکه و سمت روتور هستند. در حالت عادی، ولتاژ لینک DC ثابت است اما هرگونه تغییر در i_{os} و P_{rsc} می‌تواند ولتاژ لینک DC را به‌طور ناگهانی تغییر دهد [۱۸].



شکل (۶): مدل مکانیکی سیستم توربین-ژنراتور [۱۹]

۳.۲. مدل مکانیکی محور توربین

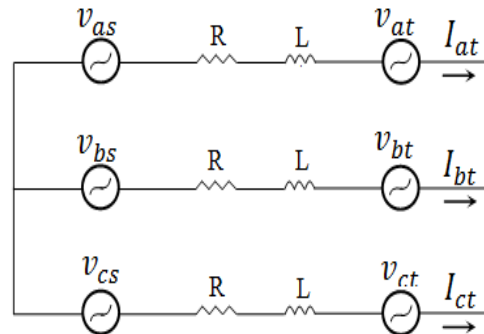
به‌طور کلی، محققین مدل‌های مکانیکی مختلفی از سیستم محور ژنراتور القایی دوسو تغذیه ارائه کرده‌اند [۱۲]. اما به‌دلیل وجود جعبه‌دنده بین توربین و ژنراتور و همچنین دقت قابل قبول مدل دوماحوری^۱ در مدل‌سازی رفتار سیستم، استفاده از این مدل برای بررسی رفتار گذرای سیستم توربین-ژنراتور امری متداول است. شکل (۶) نشان‌دهنده مدل مکانیکی دوماحوری سیستم توربین-ژنراتور است [۱۹]. در این مدل، سه معادله دیفرانسیل به توصیف رفتار مکانیکی محور توربین می‌پردازند:

$$D\omega_t = \frac{1}{2H_t} (T_m - k\theta - \zeta_t \omega_t) \quad (۲۱)$$

$$D\omega_r = \frac{1}{2H_g} (k\theta - \zeta_g \omega_r - T_e) \quad (۲۲)$$

$$D\theta = \omega_s (\omega_t - \omega_r) \quad (۲۳)$$

در معادلات بالا H_t و H_g به ترتیب ثوابت اینرسی محور



شکل (۴): شمای کلی مبدل سمت شبکه [۱۲ و ۱۳]

شمای کلی مبدل سمت شبکه در دستگاه abc در شکل (۴) نمایش داده شده است. حال اگر متغیرها را به دستگاه مرجع سنکرون منتقل کنیم، معادلات حاکم بر این قسمت به صورت مقابل به دست می‌آیند [۱۲ و ۱۳]:

$$v_{qs}^e = R i_{qs}^e + L D i_{qs}^e - \omega_e L i_{ds}^e + v_{qt}^e \quad (۱۵)$$

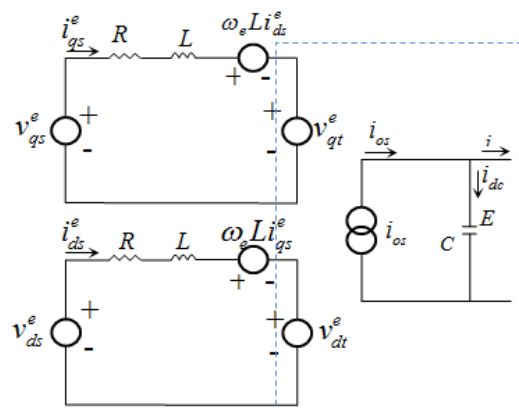
$$v_{ds}^e = R i_{ds}^e + L D i_{ds}^e - \omega_e L i_{qs}^e + v_{dt}^e \quad (۱۶)$$

در این رابطه، D نماد عملگر مشتق است. علاوه بر این، ولتاژ مبدل به صورت زیر نیز قابل بیان است:

$$v_{qs}^e = 2v_t p_m g_{qs}^e / \pi \quad (۱۷)$$

$$v_{ds}^e = 2v_t p_m g_{ds}^e / \pi \quad (۱۸)$$

متغیر v_t در اینجا بیانگر ولتاژ فاز ترمینال‌های مبدل سمت شبکه است. بدین ترتیب مدار معادل مبدل سمت شبکه به صورت شکل (۵) پیشنهاد می‌شود. نکته قابل توجه این است که با جایگزینی ω_e به جای ترم $(\omega_s - \omega_r)$ در معادلات (۱۳-۱۴)، توابع کلیدزنی برای مبدل سمت شبکه نیز قابل بازتعریف هستند. ω_e سرعت زاویه الکتریکی شبکه است.



شکل (۵): مدار معادل مبدل سمت شبکه در دستگاه مرجع سنکرون [۱۲]

در مبدل قدرت پشت‌به‌پشت، مبدل‌های سمت روتور و شبکه به‌وسیله خازن لینک DC به هم متصل‌اند و تبادل توان الکتریکی

الکترومغناطیسی کاهش شدیدتری را تجربه می‌کند. این افت بیشتر گشتاور الکترومغناطیسی به معنای اختلاف بیشتر آن با گشتاور مکانیکی ورودی است (شکل ۸-ب)؛ این امر می‌تواند منجر به بروز نوسانات شدیدتر روتور و افزایش احتمال ناپایداری شود (شکل ۸-ج). بنابراین با وجود اینکه احتمال وقوع خطاهای متقارن در شبکه کم است، در این شبیه‌سازی بیشتر از خطای سه‌فاز به‌عنوان عامل اغتشاش در شبکه استفاده شده است.

ژنراتور القایی دوسو تغذیه تحریک مستقل ندارد و همان طور که پیش‌تر ذکر شد، تحریک آن از طریق مبدل پشت‌به‌پشت متصل به شبکه فراهم می‌شود. به همین علت، میدان مغناطیسی فاصله‌ی هوایی ژنراتور به ولتاژ شبکه وابسته است؛ از این رو وقتی خطایی در شبکه رخ می‌دهد، جریان خطوط به سمت نقطه‌ی خطا سرازیر شده و ولتاژ پایانه‌های ژنراتور افت می‌کند (شکل ۸-الف) و به دنبال آن، میدان مغناطیسی فاصله‌ی هوایی به سرعت به صفر میل کرده و ماشین مغناطیس‌زدا^۱ می‌شود.

با توجه به معادله (۵)، بین توان اکتیو ژنراتور در سمت استاتور و ولتاژ پایانه‌های آن رابطه مستقیم وجود دارد. بدین ترتیب با کاهش ولتاژ در پایانه‌های ژنراتور، توان اکتیو نیز کاهش می‌یابد. شکل (۸-د) نیز مبنای این موضوع است.

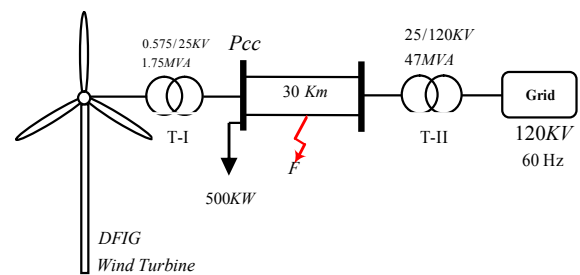
همان‌طور که در شکل (۸-ه) نشان داده شده، توان راکتیو ژنراتور پیش از وقوع خطا صفر است. لذا حاصل عبارت $(L_m/L_s i_{dr} - v_s/\omega_s L_s)$ در رابطه (۶) برابر با صفر خواهد بود. حال همان‌طور که در رابطه (۶) مشخص است، با وقوع خطا در شبکه و افت ولتاژ پایانه‌های ژنراتور ترم دوم معادله $(L_m/L_s i_{dr} - v_s/\omega_s L_s)$ کوچک شده و لذا حاصل کل رابطه بزرگ‌تر از صفر خواهد بود که به معنای افزایش توان راکتیو در هنگام وقوع خطاست [۱۶]. شکل (۸-ه) نیز گویای این نحوه تغییرات توان راکتیو است.

همان‌طور که بیان شد، میدان مغناطیسی فاصله‌ی هوایی ژنراتور القایی دوسو تغذیه در لحظه وقوع خطا به شدت کاهش می‌یابد. این اتفاق موجب هجوم جریان‌های شدید در سیم‌پیچی‌ها و مبدل سمت روتور می‌شود (شکل ۸-و). اگر این جریان‌های هجومی از مقدار معینی فراتر روند (حدود ۱۴۰ تا ۲۰۰٪ جریان نامی) می‌تواند با ایجاد تنش‌های حرارتی، به سیم‌پیچی‌ها و کلیدهای نیمه‌هادی مبدل سمت روتور آسیب بزنند [۲۲].

توربین و ژنراتور هستند. ζ_g ، ζ_r و ω_r نیز به ترتیب ضریب میرایی توربین، ژنراتور و سرعت توربین هستند. T_m گشتاور مکانیکی و k نیز سختی محور است.

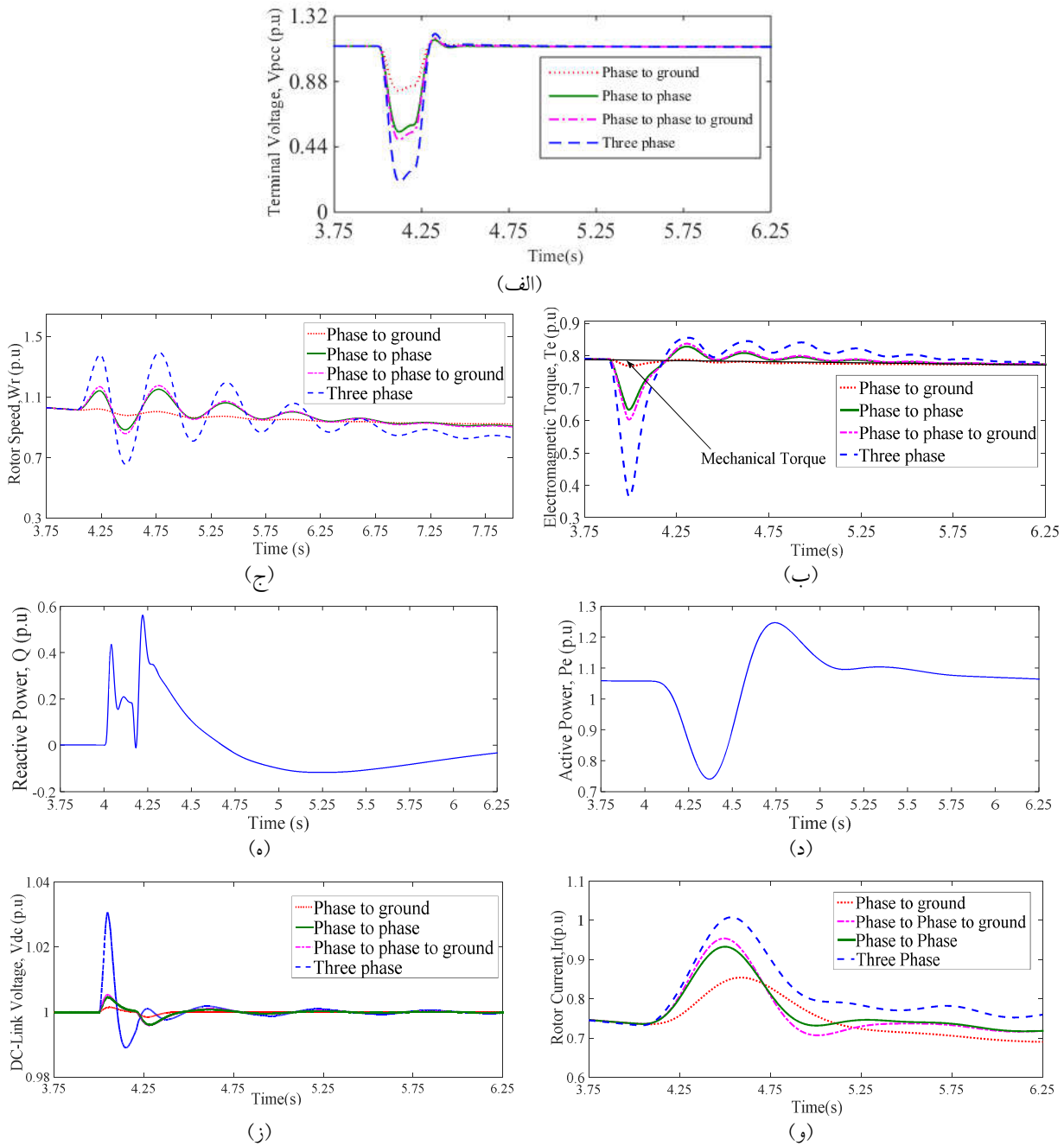
۳. تحلیل دینامیک ژنراتور القایی دوسو تغذیه

در این بخش، به بررسی رفتار ژنراتور القایی دوسو تغذیه و چگونگی پاسخ آن به اغتشاشات شدید شبکه پرداخته شده است. برای این منظور، ابتدا شبکه‌ی آزمون متشکل از توربین بادی را که از طریق دو خط ۲۵ کیلوولتی به طول ۳۰ کیلومتر به شبکه قدرت متصل شده‌اند، در نرم‌افزار MATLAB/Simulink شبیه‌سازی می‌کنیم.



شکل (۷): دیاگرام تک خطی سیستم آزمون [۲۰]

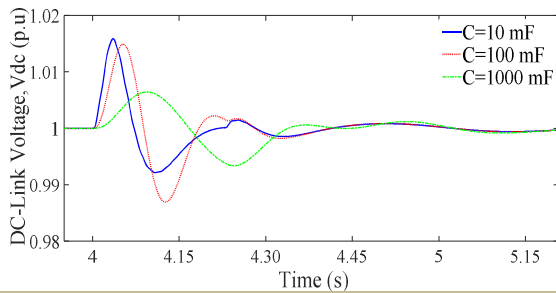
شکل (۷) بیانگر ساختار کلی سیستم مدنظر است [۲۰]. پارامترهای اصلی سیستم توربین-ژنراتور در جدول (۱) واقع در بخش ضمایم معرفی شده است. در ادامه، با اعمال خطای مختلف در لحظه $t = 4^{sec}$ و در میانه یکی از خطوط، رفتار دینامیک ژنراتور و چگونگی تغییرات پارامترهای مختلف آن در هنگام وقوع افت ولتاژهای شدید شبکه مورد بررسی قرار می‌گیرد. شایان ذکر است که سرعت باد از زمان وقوع خطا تا لحظه پاکسازی ($t = 4.2^{sec}$) ثابت فرض شده است. قبل از آغاز این مبحث لازم است که توضیحی درباره خطاهای متقارن و نامتقارن در شبکه ارائه گردد. خطاهای متقارن نسبت به خطاهای نامتقارن شدیدتر هستند. دلیل آن هم ایجاد جریان‌های هجومی شدیدتر در سیم‌پیچی و مبدل سمت روتور و همچنین افزایش شدیدتر ولتاژ لینک DC است [۱۶-۲۱]. در ادامه، جزئیات بیشتر از نقش این دو متغیر در پایداری گذرای ژنراتور القایی دوسو تغذیه ارائه می‌شود. از طرف دیگر، همان‌طور که در شکل (۸-الف) نشان داده شده است، در هنگام وقوع خطاهای متقارن مانند خطای سه‌فاز در شبکه قدرت، ولتاژ در ترمینال‌های استاتور ماشین القایی دوسو تغذیه، افت محسوس‌تری دارد. بدین ترتیب، درحالی‌که گشتاور مکانیکی ثابت باقی مانده است، طبق رابطه (۴)، گشتاور



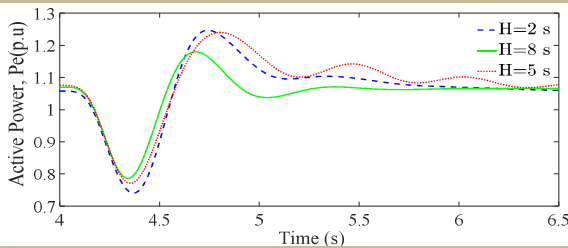
شکل (۸): پاسخ گذرای ژنراتور القایی دوسو تغذیه به وقوع خطای مختلف در شبکه. (الف) ولتاژ ترمینال استاتور (ب) گشتاور الکترومغناطیسی (ج) سرعت زاویه‌ای روتور (د) توان اکتیو (ه) توان راکتیو (و) جریان روتور (ز) ولتاژ لینک DC

صورت ماندگاری شرایط خطا ولتاژ لینک DC افزایش خواهد یافت (شکل ۸-ز). بدیهی است که اگر این افزایش ولتاژ بیش از حد معینی باشد (حدود ۱۳۵٪ ولتاژ نامی خازن) می‌تواند به خازن لینک DC آسیب برساند [۱۶ و ۲۲]. همان‌طور که در شکل (۸-ز) ملاحظه می‌شود، بیشترین افزایش ولتاژ لینک DC با مقدار $0.031^{p.u.}$ مربوط به لحظه وقوع خطای سه‌فاز در شبکه است. از سوی دیگر، کمترین افزایش ولتاژ لینک DC با

با مراجعه به شکل (۸-و) مشاهده می‌شود که شدیدترین جریان‌های هجومی در سیم‌پیچی‌ها و مبدل سمت روتور در هنگام وقوع خطای سه‌فاز در شبکه قدرت ایجاد می‌گردند که این نشان‌دهنده افزایش احتمال آسیب ژنراتور در هنگام بروز خطاهای متقارن است. از طرف دیگر، هنگام افت ولتاژ ترمینال استاتور توان مبدل سمت شبکه نیز کاهش یافته و تبادل توان از طریق خازن لینک DC نیز محدود می‌شود [۱۲]. در نتیجه، بنا به رابطه (۲۰) در



شکل (۹): تأثیر افزایش ظرفیت خازن بر ولتاژ لینک DC در هنگام وقوع خطا



شکل (۱۰): تأثیر افزایش ثابت اینرسی بر پایداری گذرا

۲.۴. نقش خازن لینک DC

بر اساس مسائل مطرح شده در بخش قبل، افزایش ولتاژ لینک DC در هنگام بروز خطا می تواند به سیستم توربین-ژنراتور بادی آسیب برساند و مانع از تداوم عملکرد آن پس از پاک سازی خطا شود. شکل (۹) بیانگر تأثیر ظرفیت خازن لینک DC بر این افزایش ولتاژ است. در این شبیه سازی، ظرفیت خازن به ترتیب ۱۰ میلی فاراد، ۱۰۰ میلی فاراد و ۱۰۰۰ میلی فاراد انتخاب شده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که هرچه ظرفیت خازن بیشتر باشد، افزایش ولتاژ کمتر خواهد بود. این مسئله طبق رابطه (۲۰) نیز قابل تأیید است. لذا می توان گفت که با توجه به ملاحظات عملی، هرچه ظرفیت خازن بزرگ تر انتخاب شود، احتمال آسیب دیدن سیستم توربین-ژنراتور کمتر می شود و به دنبال آن، قابلیت گذر از خطای آن افزایش می یابد.

۳.۴. تأثیر ثابت اینرسی

یکی از نکاتی که در بررسی پایداری گذرای انواع ژنراتورهای مورد استفاده در مزارع بادی وجود دارد، ثابت اینرسی نسبتاً پایین آنهاست. این امر باعث می شود که در هنگام وقوع اغتشاشات شدید در شبکه و بر هم خوردن تعادل توان مکانیکی و الکتریکی به سرعت شتاب بگیرند که این خود یک عامل منفی در پایداری گذراست [۲۱]. برای بررسی تأثیر ثابت اینرسی بر پایداری گذرای ژنراتور، شبیه سازی برای سه ثابت اینرسی مختلف انجام گرفته است (شکل ۱۰). شایان است که هر یک از ثوابت اینرسی نشان داده شده

مقدار $0.001^{p.u.}$ در صورت وقوع خطای تک فاز به زمین رخ می دهد. ولتاژ لینک DC در اثر وقوع خطای دوفاز و دوفاز به زمین نیز به ترتیب مقادیر $0.004^{p.u.}$ و $0.005^{p.u.}$ را تجربه خواهد کرد.

بنا به نکات مطرح شده درباره ولتاژ لینک DC و جریان روتور، افزایش ناگهانی و بیش از حد آنها می تواند با صدمه زدن به ژنراتور و مبدل قدرت، عملکرد آنها را پس از وقوع خطا به مخاطره بیندازد [۱۲ و ۲۲]. لذا برای افزایش قابلیت گذر از خطای ژنراتور و تضمین عملکرد آن در ناحیه ایمن (SOA)، باید از روش ها و سیستم های حفاظتی مناسب بهره گرفت [۲۲].

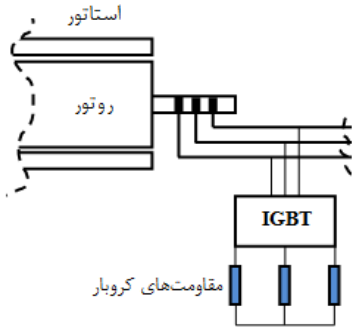
۴. بررسی نقش عوامل مختلف بر قابلیت گذر از خطای ژنراتور القایی دوسو تغذیه

در این بخش، چگونگی تأثیر عوامل مختلف مانند فناوری مورد استفاده برای کنترل مبدل قدرت، ظرفیت خازن لینک DC، ثابت اینرسی توربین و ژنراتور، سیستم حفاظت ژنراتور و سرعت روتور پیش از وقوع خطا بر رفتار دینامیک DFIG بررسی می شود.

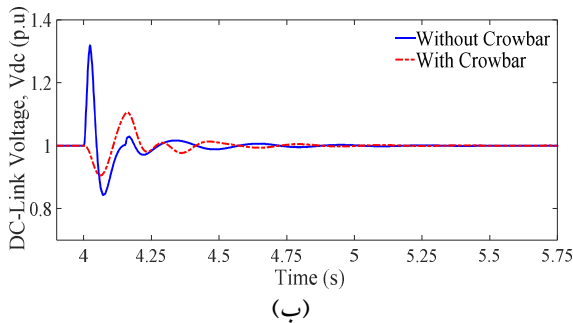
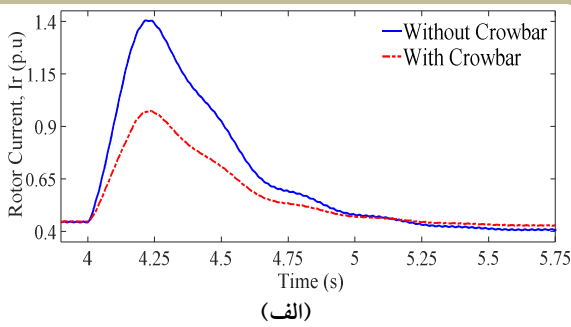
۱.۴. نقش سیستم کنترل

در بخش اول مقاله به وظایف مبدل قدرت و تأثیر آن بر عملکرد ژنراتور القایی دوسو تغذیه اشاره شد. حال در این قسمت، نقش سیستم کنترل مبدل قدرت در بازگشت ژنراتور به شرایط پایدار پس از وقوع خطا بررسی می شود. همان طور که در شکل (۸) نشان داده شده، پس از پاک سازی خطا در $t = 4.2^{sec}$ به علت وجود سیستم کنترل، در مدت کوتاهی ولتاژ ترمینال ژنراتور بازیابی شده، گشتاور الکترومغناطیسی و توان اکتیو افزایش یافته و به دنبال آن، سرعت روتور نیز پس از چند نوسان ثابت می شود و بدین ترتیب ژنراتور در زمان کوتاهی به شرایط اولیه خود بازمی گردد. بنابراین می توان گفت یکی از وظایف مهم بخش کنترل مبدل قدرت، کمک و تسریع در بازیابی شرایط پایدار ژنراتور پس از وقوع خطاست [۱۲ و ۱۶]. به همین علت در سال های اخیر، ارائه روش های نوین برای کنترل مبدل قدرت و به دنبال آن، بهبود قابلیت گذر از خطای ژنراتور، توجه محققان این حوزه را به خود جلب کرده است. مرجع [۲۲] به بررسی برخی از این روش ها پرداخته است.

بحرانی عبور کند، ژنراتور القایی دوسو تغذیه ناپایدار خواهد شد و لذا باید از شبکه قدرت جدا شود. منظور از زمان بحرانی رفع خطا، بیشترین بازه زمانی ممکن برای ماندگاری خطا در سیستم قدرت است، به طوری که ژنراتور القایی دوسو تغذیه بتواند پس از رفع خطا، پایداری خود را حفظ کرده و سرعت روتور آن از سرعت بحرانی عبور نکند.



شکل (۱۱): ساختار کلی سیستم حفاظتی کروب‌بار متصل به ژنراتور القایی دوسو تغذیه [۲۰]



شکل (۱۲): نقش مدار کروب‌بار در بهبود پایداری گذرای DFIG (الف) جریان روتور (ب) ولتاژ لینک DC

نقاط تلاقی منحنی گشتاور الکتریکی با خط حاصل از گشتاور مکانیکی در شکل (۱۳-الف) نقاط A و B نام گذاری می‌شود. نقطه A پایدار و نقطه B ناپایدار است. حال اگر خطای اتصال کوتاه در شبکه رخ دهد، مطابق شکل (۱۳-ب) گشتاور الکتریکی صفر می‌گردد و نقطه کار ژنراتور به B منتقل می‌شود و توربین شتاب می‌گیرد. اگر خطا قبل از رسیدن روتور به سرعت بحرانی و عبور از نقطه تعادل ناپایدار (نقطه B در شکل ۱۳-الف) برطرف

در شکل (۱۰)، برابر مجموع ثابت‌های محور ژنراتور و توربین هستند. طبق نتایج حاصل از شبیه‌سازی هرچه ثابت اینرسی بیشتر باشد، دامنه نوسان توان کمتر بوده و لذا روتور آرام‌تر شتاب می‌گیرد. این بدان معناست که افزایش ثابت اینرسی موجب افزایش زمان بحرانی رفع خطا و بهبود پایداری گذرای ژنراتور می‌شود.

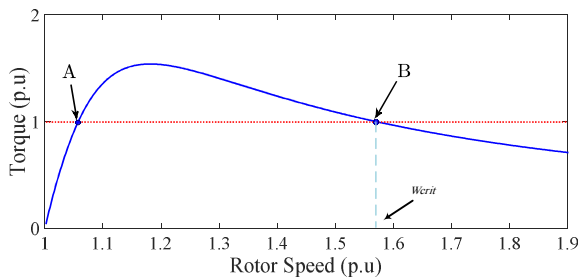
۴.۴. نقش مقاومت کروب‌بار

به‌طور کلی، ژنراتور القایی دوسو تغذیه حساسیت زیادی نسبت به اغتشاشات شبکه دارد. به همین دلیل، به مدارات حفاظتی برای محافظت مبدل قدرت و سیم‌پیچی روتور در برابر افزایش بیش از حد ولتاژ و جریان روتور نیاز دارد. مدار کروب‌بار شناخته‌شده‌ترین مدار سیستم‌های حفاظتی است [۲۲]. این مدار شامل یک مجموعه مقاومت است که از طریق تعدادی کلید الکترونیک قدرت به حلقه‌های لغزان روتور متصل شده‌اند تا در زمان لازم مبدل سمت روتور را از مدار خارج کنند. شکل (۱۱) نمای کلی این مدار را نشان می‌دهد. زمانی که مقاومت‌های کروب‌بار متصل‌اند، در مسیر سیم‌پیچ‌های روتور قرار گرفته و آن‌ها را اتصال کوتاه می‌کنند. بدین ترتیب مبدل قدرت نیز از مدار خارج می‌شود تا بدان آسیبی نرسد. در چنین حالتی، رژیم کاری ژنراتور به‌طور موقت از ژنراتور القایی دوسو تغذیه به ژنراتور القایی معمولی تغییر می‌کند.

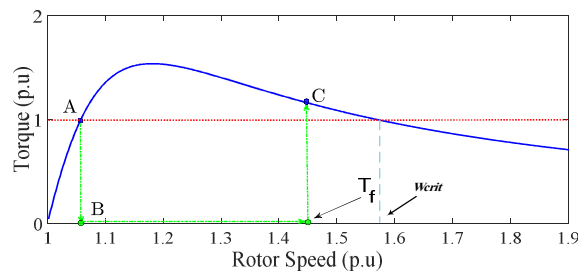
همان‌طور که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود، خروج مبدل قدرت از مدار و افزایش مقاومت روتور توسط مقاومت‌های کروب‌بار موجب کاهش جریان روتور از $1.42^{p.u.}$ به $0.97^{p.u.}$ شده است. از طرف دیگر، ولتاژ لینک DC نیز از مقدار $1.36^{p.u.}$ به $1.12^{p.u.}$ رسیده است که این نشان از بهبود قابلیت گذر از خطای ژنراتور دارد.

نکته مهم دیگر این است که وقتی مدار کروب‌بار فعال می‌شود و مبدل قدرت را از مدار خارج می‌کند، دیگر امکان کنترل توان راکتیو وجود نخواهد داشت؛ این مسئله منجر به نوسانات شدید گشتاور الکترومغناطیسی شده و لذا احتمال ناپایداری سیستم افزایش می‌یابد [۲۰، ۲۳ و ۲۴]. این موضوع را می‌توان به‌کمک منحنی گشتاور-سرعت ژنراتور بهتر درک کرد.

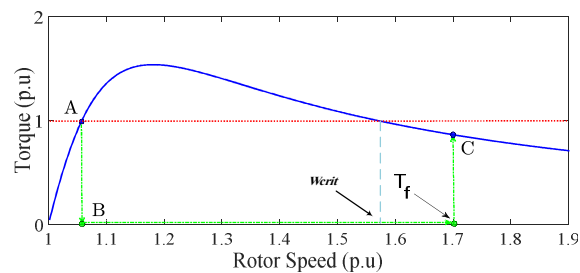
پیش از آغاز این بحث، لازم است که دو مفهوم سرعت بحرانی و زمان بحرانی رفع خطا در ژنراتور القایی دوسو تغذیه توضیح داده شوند. منظور از سرعت بحرانی رفع خطا (نقطه w_{crit} در شکل ۱۳-الف)، حداکثر سرعت مجاز روتور در هنگام بروز اغتشاشات در شبکه است، به طوری که پس از پاک‌سازی خطا ژنراتور بتواند به نقطه تعادل پایدار بازگردد. در صورتی که سرعت روتور از سرعت



(الف)

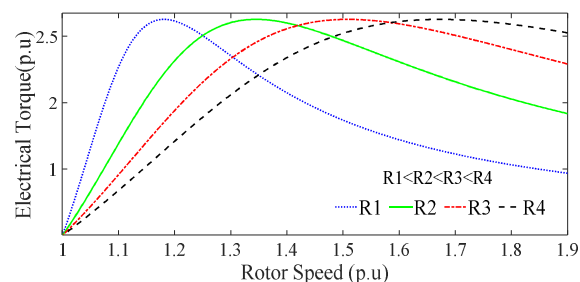


(ب)

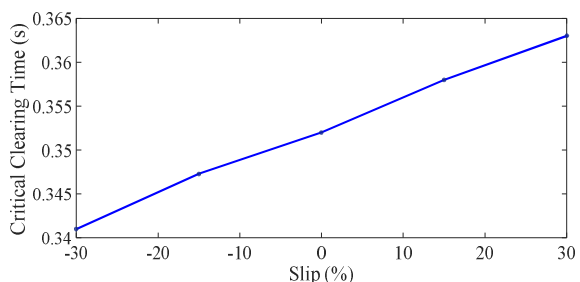


(ج)

شکل (۱۳): عملکرد ژنراتور القایی دوسو تغذیه در حین خطا. (الف) منحنی گشتاور_سرعت (ب) عملکرد پایدار (ج) عملکرد ناپایدار



شکل (۱۴): نقش افزایش مقاومت کربار بر منحنی گشتاور_سرعت ژنراتور القایی دوسو تغذیه



شکل (۱۵): نرخ تغییرات زمان بحرانی رفع خطا برحسب لغزش‌های مختلف ژنراتور القایی دوسو تغذیه

شود، گشتاور الکتریکی مجدد افزایش می‌یابد و به نقطه C می‌رسد. در این وضعیت، چون گشتاور الکتریکی از گشتاور مکانیکی بزرگ‌تر است، سرعت ژنراتور کاهش می‌یابد و نقطه کار به طرف نقطه پایدار A برمی‌گردد. لذا ژنراتور پایداری خود را حفظ می‌کند. در حالت دیگر، اگر زمان ماندگاری خطا بیشتر از زمان بحرانی رفع خطا باشد و پس از رسیدن به محل تلاقی منحنی‌های گشتاور الکتریکی و مکانیکی (نقطه B در شکل ۱۳- الف) برطرف گردد، مطابق شکل (۱۳- ج)، گشتاور الکتریکی پس از افزایش به نقطه C می‌رسد. اما چون در این حالت گشتاور الکتریکی کمتر از گشتاور مکانیکی است، ژنراتور شتاب گرفته و به سمت ناپایداری می‌رود.

حال با توجه به اینکه فعال شدن مدار کربار موجب افزایش مقاومت روتور می‌گردد، بدین ترتیب قله منحنی گشتاور_سرعت از مبدأ مختصات دور می‌شود و لذا نقطه ناپایدار B در شکل (۱۳- الف) نیز از محور عمودی فاصله می‌گیرد. بنابراین سرعت بحرانی و زمان بحرانی رفع خطا افزایش می‌یابد که این امر مهمی در بهبود پایداری ژنراتور است [۲۵]. این موضوع در شکل (۱۴) قابل مشاهده است.

۵.۴. تأثیر لغزش

در تمام شبیه‌سازی‌های گذشته، سرعت ژنراتور القایی دوسو تغذیه ثابت و برابر سرعت نامی در نظر گرفته شده بود. اما از آنجا که عموماً در طول روز سرعت باد برابر با سرعت نامی نیست، روتور ژنراتور القایی دوسو تغذیه همیشه با کمی لغزش نسبت به سرعت سنکرون دوران می‌کند. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، بسته به شرایط عملکردی ژنراتور در حالت فوق سنکرون و یا زیر سنکرون، محدوده لغزش برای ژنراتور القایی دوسو تغذیه حدود ± 0.3 تعریف می‌شود. شکل (۱۵) نشان‌دهنده تأثیر لغزش بر زمان بحرانی رفع خطا در ژنراتور القایی دوسو تغذیه است.

در این شبیه‌سازی با اعمال سرعت‌های مختلف باد، زمان بحرانی رفع خطا به‌زای لغزش‌های گوناگون به دست آمده است [۱۲ و ۲۱]. بر اساس این نمودار، شیب منحنی به‌زای هر ۵٪ لغزش شفت حدود ۳/۳٪ می‌باشد که این به معنای تأثیر نسبتاً بالای لغزش بر پایداری ژنراتور القایی دوسو تغذیه است. البته این مسئله با توجه به بازه لغزش این نوع ژنراتور، دور از انتظار نیست.

۵. نتیجه گیری

خطا تأثیر مستقیمی بر پایداری گذرای ژنراتور و قابلیت گذر از خطای آن دارند.

ضمائم

جدول (۱): پارامترهای توربین بادی متصل به شبکه قدرت		
واحد	مقادیر	پارامترها
MW	۱/۵	توان نامی
m/s	۱۱	سرعت نامی
m/s	۳۰	سرعت قطع بالا
m/s	۶	سرعت قطع پایین
v	۵۷۵	ولتاژ نامی
Hz	۶۰	فرکانس
-	۳	تعداد جفت قطبها
p.u	۰/۰۲۳	R_s
p.u	۰/۰۱۶	R_r
p.u	۰/۱۸	L_{ls}
p.u	۰/۱۶	L_{lr}
p.u	۲/۹	L_m

در این مقاله، یک مدل مرتبه پنج از ژنراتور القایی دوسو تغذیه متصل به شبکه قدرت به همراه مدل دوجوری توربین، برای بررسی رفتار گذرای ماشین استفاده شده است. با اعمال خطاهای مختلف در شبکه، رفتار دینامیک ژنراتور القایی دوسو تغذیه در حین خطا بررسی شده است. بر این اساس، وقتی خطای شدیدی در شبکه رخ می‌دهد، ولتاژ لینک DC و جریان روتور به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابند. این افزایش شدید می‌تواند با صدمه زدن به ژنراتور و مبدل قدرت مانع از عملکرد توربین بادی پس از رفع خطا شود. البته برای عملکرد مناسب ژنراتور در طی اغتشاشات بزرگ، بحث پایداری ماشین و زمان بحرانی رفع خطا نیز مطرح است. لذا در این مقاله به نقش و اثر پارامترهای مختلف ژنراتور القایی دوسو تغذیه در بهبود پایداری و قابلیت گذر از شرایط بحرانی آن پرداخته شده است. با توجه به بررسی‌های انجام‌شده، عواملی همچون فناوری به‌کاررفته در سیستم کنترل مبدل قدرت، ظرفیت خازن لینک DC، ثابت اینرسی سیستم توربین-ژنراتور، مدار حفاظتی کرویبار (متداول‌ترین روش حفاظت ژنراتور القایی دوسو تغذیه) و لغزش ژنراتور پیش از وقوع

مراجع

- [۱] کتابی، عباس، یزدخواستی، علی، «کنترل توان اکتیو و راکتیو یک توربین بادی با ژنراتور دوسو تغذیه (DFIG) توسط روش کنترلی تک‌سیکلی»، نشریه علمی پژوهشی مدیریت انرژی، دوره ۱، شماره ۲، صفحه ۱۰-۲، ۱۳۹۰.
- [2] Alsmadi, Y.M. and et al., "Detailed Investigation and Performance Improvement of the Dynamic Behavior of Grid-Connected DFIG Based Wind Turbines under LVRT Conditions", IEEE Transactions on Industry Applications, May 2018.
- [3] Ngamroo, I., "Review of DFIG wind turbine impact on power system dynamic performances", IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2017.
- [4] Chowdhury, M. A., Hosseinzadeh, N., Shen, W. X. and Pota, H. R., "Comparative study on fault responses of synchronous generators and wind turbine generators using transient stability index based on transient energy function", Electrical Power and Energy Systems, 51, pp.145-152, 2013.
- [5] Yaghoobi, H., "Out-of-step protection of generator using analysis of angular velocity and acceleration data measured from magnetic flux", Electric Power Systems Research 132, pp.10-21, 2016.
- [۶] یعقوبی، حمید، «حفاظت از سنکرونیزم ژنراتور سنکرون در شبکه قدرت چندماشینه با استفاده از متغیر محلی»، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۵۱، صفحه ۷-۷، زمستان ۱۳۹۶.
- [7] Alinezhad, B. and Karegar, H.K., "Out-of-step protection based on Equal Area Criterion", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 32, No. 2, pp. 968 – 977, March 2017.
- [8] Ariff, M. A. M. and Pal, B. C., "Adaptive Protection and Control in the Power System for Wide-Area Blackout Prevention", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 31, No. 4, pp. 1815-1825, August 2016.
- [9] Paudyal, S., Ramakrishna, G. and Sachdev, S., "Application of equal area criterion conditions in the time domain for out-of-step protection", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, No. 2, pp. 600-609, 2010.
- [10] Shrestha B., Gokaraju R. and Sachdev M., "Out-of-Step Protection Using State-Plane Trajectories Analysis", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 28, No. 2, pp. 1083-1093, April 2013.
- [11] Hossain M. J., Pota H. R., Mahmud M. A. and Ramos R. A., "Investigation of the Impacts of Large-Scale Wind Power Penetration on the Angle and Voltage Stability of Power Systems", IEEE Systems Journal, Vol. 16, No.1, pp. 76-84, 2012.
- [12] Badrzadeh B. and Salman S. K., "Critical Clearing Time of Doubly Fed Induction Generator", IEEE Russia Power Tech Conference, June 2005.
- [13] Mehdipour, C., Hajizadeh, A., Mehdipour, I.,

- "Dynamic modeling and control of DFIG-based wind turbines under balanced network conditions", *Electrical Power and Energy Systems* 83, pp. 560–569, 2016.
- [14] Herberta, G.M., Iniyamb, S., Sreevalsanc, E. and Rajapandiand S., "A review of wind energy technologies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11, pp. 1117–1145, 2007.
- [15] Salman, S.K. and Badrzadeh, B., "New Approach for modeling Doubly-Fed Induction Generator for grid-connection studies", presented at the 8th European Wind Energy Conference and Exhibition, London, 2004.
- [16] Sun, T., Chen, Z. and Blaabjerg, F., "Transient Stability of DFIG Wind Turbines at an External Short-circuit Fault", Vol. 8, pp. 345–360, 2005.
- [17] Pena, R., Clare, J.C. and Asher, G.M., "Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation", *IEE Proceedings on Electric Power Applications*, Vol. 143, No.3, pp. 231-241, May 1996.
- [18] Yao, J., Li, H., Liao, Y. and Chen, Z., "An Improved Control Strategy of Limiting the DC-Link Voltage Fluctuation for a Doubly-Fed Induction Wind Generator", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 23, pp. 1205-1213, 2008.
- [19] Munoz, J. and Canizares C., "Comparative Stability Analysis of DFIG Based Wind Farms and Conventional Synchronous Generators", *Power System Conference and Exposition*, March 2011.
- [20] Duong, M., Nguyen, H., Le, K., phan T. and Mussetta M., "Simulation and Performance Analysis of a LVRT and Damping Control Scheme for DFIG wind Turbine", *IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies*, 2016.
- [21] Chowdhury, M. A., Shen, W. X., Hosseinzadeh, N. and Pota, H. R., "Quantitative Assessment and Comparison of Fault Responses for Synchronous Generator and Wind Turbine Generators Based on Modified Transient Energy Function", *IET Renewable Power Generation*, Vol. 8, No. 5, pp. 474-483, 2014.
- [22] Jackson, J., Francis M. and Jin J., "Doubly-fed induction generator based wind turbines: A comprehensive review of fault ride-through strategies", *Renewable and Sustainable Energy Rev* 45, pp. 447–467, 2015.
- [23] Lima, J. R., Damm, G., Benchaib, A. and Nobile, E., "Stability Criterion for the maximum clearing time of a DFIG: an equal area criterion's equivalent for induction generators", *18th European Conference on Power Electronics and Applications*, Karlsruhe, 2016.
- [24] Grilo, A. P., Mota, A. A., Mota, T. M., Freitas, W., "An Analytical Method for Analysis of Large-Disturbance Stability of Induction Generators", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 22, No. 4, pp. 1861-1869, November 2007.
- [25] Michalke, G., Anca D. and Hartkopf, T., "Dynamic behavior of a DFIG wind turbine subjected to power system faults", *Proceedings of European Wind Energy Conference*, Brussels, 2008.