

کنترل نیروگاه بادی مجهز به ژنراتور القائی دو تغذیه‌ای، پس از وقوع خطا در شبکه

سیدمحمد مدنی^۱، عمادالدین صارمیان^۲، کامران شفافی^۳

۱- دانشگاه صنعتی اصفهان، madani104@yahoo.com

۲- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، emadsaremiamelec@yahoo.com

۳- شرکت مخابرات استان لرستان، shafafi_kamran@yahoo.com

چکیده

استفاده از نیروگاه‌های بادی با اتصال به شبکه، روزبه‌روز در حال افزایش است. یکی از مشکلات در شبکه‌های قدرت، وقوع خطا است. مهم‌ترین مسئله، بهبود پایداری سیستم بعد از رفع خطا است، همچنین یکی از مشکلات احتمالی اتصال منابع انرژی نو، از قبیل نیروگاه‌های بادی به شبکه جدا شدن از شبکه (جزیره شدن) بر اثر خطا است. در این شرایط عدم تناسب بین توان تولیدی و توان مورد نیاز بار در بخش جدا شده سیستم، موجب دور شدن ولتاژ و فرکانس از مقدار مطلوب می‌شود. در شرایط اضافه توان (کاهش توان بار) نیز، باعث شتابگیری روتور می‌شود و به خاطر دلایل مذکور باید ژنراتورها خاموش شوند. در این مقاله نیروگاه بادی مجهز به ژنراتور القائی دو تغذیه‌ای، جهت دستیابی به پایداری بیشتر و بازیابی سریعتر ولتاژ در نزدیکی مقدار یک پریونیت، برای عملکرد پیوسته پس از خطا، کنترل شده است. کارآیی کنترل کانورتر سمت شبکه و روتور در ژنراتور القائی دو تغذیه‌ای، با اثر جبران‌کننده استاتیکی سنکرون، پس از خطای اتصال کوتاه سه‌فاز، مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش توان نامی کانورتر سمت شبکه در ژنراتور به همان اندازه توان نامی جبران‌کننده، رگولاسیون ولتاژ بهتری در شرایط کار عادی خواهیم داشت و همچنین پس از وقوع خطا پایداری بیشتر و بازیابی سریع‌تر ولتاژ بدست می‌آید. همچنین کنترل مناسبی برای ژنراتور القائی دو تغذیه‌ای در نیروگاه بادی ارائه می‌شود تا نیروگاه بتواند در شرایط جدا شدن از شبکه (جزیره شدن) با فرکانس و ولتاژ مطلوب بار محلی را تغذیه نماید. کارآیی کنترل مورد نظر در شرایط جزیره شدن، بررسی شده است و نتایج شبیه‌سازی توانایی استراتژی کنترل را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی

ژنراتور القایی دو تغذیه‌ای، جزیره شدن، کنترل زاویه گام، بازیابی ولتاژ، جبران‌کننده استاتیکی سنکرون توزیع.

۱- مقدمه

تأثیر آنها در کل سیستم می‌شود، بنابراین به‌عنوان مثال بررسی پایداری نیروگاه‌های بادی متصل به شبکه و قابلیت‌های کنترلی آنها لازم به‌نظر می‌رسد.

استفاده از ژنراتورهای القایی در سیستم‌های تبدیل انرژی باد در

افزوده شدن انرژی‌های تجدیدپذیر به شبکه‌های قدرت به‌طور قابل توجهی روبه‌رشد است. از میان گزینه‌های مختلف، انرژی بادی، منتخب‌ترین گزینه برای تولید انرژی الکتریکی در سال‌های آینده است. افزایش نیروگاه‌های بادی در شبکه‌های قدرت موجب افزایش

حال افزایش است، که این به دلیل ارزانی، استحکام و نیاز کم به نگهداری است [9]. در مقایسه با ژنراتورهای القایی مرسوم، DFIG به خاطر وجود کنترل کانورترها، چندین مزیت به شرح زیر دارد [1]:

(۱) قابلیت کارآئی دینامیکی در رنج‌های سرعت زیر سنکرون و فوق سنکرون.

(۲) ظرفیت تولید توان اکتیو فرکانس ثابت .

(۳) کنترل مجزای توان اکتیو و راکتیو تولیدی.

(۴) پایین‌تر بودن توان نامی کانورترهای مورد استفاده.

(۵) قابلیت کنترل توان راکتیو و در نتیجه ولتاژ.

ژنراتور القایی دوتغذیه‌ای به این نکته اشاره دارد، که ولتاژ استاتور از شبکه اعمال شده و ولتاژ روتور به وسیله کانورترهای قدرت اعمال می‌شود، این سیستم اجازه بهره برداری در یک رنج تغییر سرعت وسیع را می‌دهد. کانورتر اختلاف بین سرعت مکانیکی و الکتریکی را به وسیله تزریق جریان روتور با یک فرکانس متغییر جبران کرده است [2].

باتوجه به مزایای مذکور، در این مقاله DFIG در نیروگاه بادی مورد بررسی قرار گرفته است.

گسترش نیروگاه‌های بادی متصل به شبکه موجب نگرانی‌هایی در مورد ضعف آنها در اغتشاشات منجر به تقعر ولتاژ شده است. پاسخ ژنراتورهای نیروگاه بادی به تقعر ولتاژ می‌تواند اثر وسیعی بر پایداری سیستم بگذارد و به همین علت در تحقیقات اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در پاسخ به خطای شبکه ممکن است یک تقعر ولتاژ مشاهده شود که می‌تواند بیش از زمان خطا به طول بیانجامد و موجب افزایش جریان استاتور به بیش از مقدار نامی و در نتیجه افزایش جریان روتور و آسیب دیدن کانورترها شود [6]. توان راکتیو مبادله شده بین DFIG و شبکه برابر با توان راکتیو استاتور است، زیرا کانورتر سمت شبکه با توان راکتیو خنثی در نظر گرفته می‌شود.

سیستم کانورتر در ابتدا جهت انتقال توان اکتیو بین روتور و شبکه قدرت استفاده می‌شود [1]. در مرجع [4] کنترل ولتاژ نیروگاه بادی مجهز به ژنراتور القایی دوتغذیه‌ای را توسط کنترل کانورترهای سمت روتور و استاتور برای تعیین توان راکتیو ژنراتور و جریان راکتیو کانورتر سمت استاتور انجام داده و عملکرد کنترل را تحت شرایط خطای اتصال کوتاه با نسبت‌های $\frac{R}{X}$ (نسبت مقاومت به راکتانس خط) متفاوت بررسی نموده‌اند. در مرجع [13] از DSTATCOM برای بهبود عملکرد ژنراتور القایی دوتغذیه‌ای پس از وقوع خطا استفاده شده است. در مرجع [10] برای ژنراتور القایی قفسه‌سنجایی در شرایط خطا از DSTATCOM در دو مد کنترل ولتاژ و کنترل ضریب توان استفاده شده است که نتایج، برتری مد کنترل ولتاژ را برای بهبود پایداری ولتاژ در این حالت نشان می‌دهد.

در بخشی از مقاله، هدف افزایش تعداد سیکل‌های مجاز خطا و بازیابی سریعتر ولتاژ باس ژنراتور پس از خطا در مقدار دقیق $I(pu)$ است. برای بهبود پایداری ولتاژ در این مقاله از کنترل ولتاژ از طریق هر دو کانورتر سمت روتور و شبکه استفاده شده و همچنین اثرگذاری DSTATCOM (جبران‌کننده استاتیکی سنکرون توزیع) بر بازیابی سریع و کنترل ولتاژ در این شرایط، مشاهده و مقایسه می‌شود.

در صورتی که بخشی از شبکه، که به علت خطا از قسمت‌های دیگر جدا شده (از نظر الکتریکی ایزوله شده)، به کار خود ادامه دهد، اصطلاحاً به آن جزیره شدن (ISLANDING) گفته می‌شود در این حالت در بخش جدا شده که تا قبل از جزیره شدن با شبکه تبادل توان اکتیو و راکتیو داشته است، عدم تناسب بین توان تولیدی و مصرفی به وجود خواهد آمد که به احتمال قوی‌تر توان تولیدی بیش از توان مصرفی خواهد بود، علت این امر آن است که هر چند اتصال به شبکه قوی‌تر کنترل ولتاژ و فرکانس نیروگاه توزیع را آسان‌تر می‌نماید، اما علت اتصال این نیروگاه‌ها انتقال توان مازاد بر مصرف محلی این نیروگاه‌ها به شبکه سراسری است.

در صورتی که با نقصان توان مواجه باشیم یعنی توان مصرفی بیش از توان تولیدی در بخش جدا شده سیستم باشد می‌توانیم با استفاده از باتری و کنترل مناسب خاموش نمودن ژنراتورها را البته به مدت محدود (بسته به ظرفیت باتری) به تعویق بیندازیم [12]. اضافه توان اکتیو در سیستم موجب افزایش فرکانس و نقصان توان باعث افت فرکانس می‌شود. همین‌طور ولتاژ در باس بار با میزان توان راکتیو در سیستم متناسب است، به طوری که افزایش و یا کاهش توان راکتیو در سیستم موجب افزایش و یا کاهش ولتاژ در باس می‌شود.

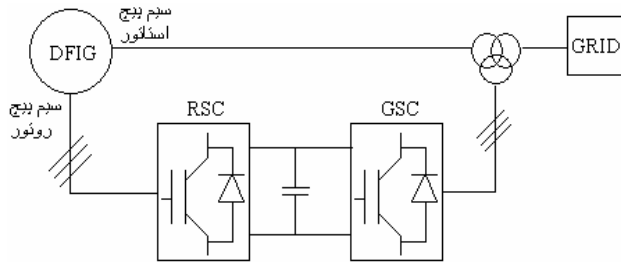
در شرایط عملکرد عادی در DFIG ما از طریق کانورتر سمت شبکه می‌توانیم به طور مستقل از هم توان اکتیو و راکتیو مورد نیاز در سیستم را کنترل نماییم و همچنین از طریق کنترل کانورتر سمت بار می‌توانیم ولتاژ لینک DC را کنترل کرده و با تزریق ویا جذب مقداری توان راکتیو ضریب توان واحد را در سیستم تضمین نماییم. اما در شرایط ISLANDING به دلیل ارتباط توان اکتیو و فرکانس می‌توان با کنترل توان اکتیو گرفته شده از ماشین فرکانس را کنترل کرده و با استفاده از کنترل توان راکتیو توسط هر دو کانورترها ولتاژ باس بار را کنترل کنیم.

گفته شد که در حالت محتمل‌تر، توان تولیدی بیش از توان مصرفی خواهد بود در این حالت ما باید با کنترل روی بخش‌های مکانیکی و گشتاور مکانیکی میزان توان باد منتقل شده به قسمت‌های مکانیکی و ماشین را کاهش داده و از شتاب‌گیری روتور در این وضعیت جلوگیری کنیم. در مرجع [12] در شرایط جزیره شدن برای ژنراتور القایی دوتغذیه‌ای از باتری در لینک DC استفاده شده و برای

دست آمده است [1].

۱-۲- مدل ژنراتور

در شکل (۱) شمای یک DFIG را مشاهده می کنید:



شکل ۱- مدل DFIG

مدل دینامیکی DFIG در قاب مرجع سنکرون و به صورت دو فاز

d-q توسط معادلات (۵) - (۱۶) بیان می گردد [5]:

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega \lambda_{qs} \quad (5)$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + \omega \lambda_{ds} \quad (6)$$

$$V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \lambda_{qr} \quad (7)$$

$$V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\lambda_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \lambda_{dr} \quad (8)$$

$$\lambda_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (9)$$

$$\lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (10)$$

$$\lambda_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \quad (11)$$

$$\lambda_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (12)$$

در این معادلات $L_s = L_{ls} + L_m$ و $L_r = L_{lr} + L_m$

در شکل (۲) کانورترهای سمت روتور و استاتور را می بینیم.

توان اکتیو انتقالی از طریق روتور و استاتور از روابط (۱۳) و (۱۴) و

توان راکتیو از روابط (۱۵) و (۱۶) محاسبه می شوند.

$$P_s = V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs} \quad (13)$$

$$P_r = V_{dr} i_{dr} + V_{qr} i_{qr} \quad (14)$$

$$Q_s = V_{qs} i_{ds} - V_{ds} i_{qs} \quad (15)$$

$$Q_r = V_{qr} i_{dr} - V_{dr} i_{qr} \quad (16)$$

$$P_g = V_{dg} i_{dg} + V_{qg} i_{qg} \quad (17)$$

$$P_{DC} = V_{DC} i_{DC} = -C V_{DC} \frac{dV_{DC}}{dt} \quad (18)$$

$$P_r = P_g + P_{DC} \quad (19)$$

تنظیم فرکانس از بار متغییر فرضی استفاده شده است و کنترل ولتاژ روی کانورتر سمت بار انجام گرفته است.

در این مقاله کنترل شرایط ISLANDING برای یک سیستم نمونه متصل به شبکه با نیروگاه بادی مجهز به ژنراتور القایی دوتغذیه ای (DFIG)، بررسی می شود، در حالی که در این مقاله به جای استفاده از بار متغییر فرضی از یک استراتژی جدید در کنترل زاویه گام (pitch control) استفاده شده و همین طور از باتری در لینک DC استفاده نشده و کنترل فرکانس به کنترل توان اکتیو توسط کانورتر سمت روتور اضافه می شود. نتایج به دست آمده از شبیه سازی نشان می دهد که نیروگاه بادی می تواند پس از وقوع خطا و حادث شدن ISLANDING بدون نیاز به خاموش شدن، بار محلی را با ولتاژ و فرکانس مطلوب تغذیه نماید.

در بخش (۲-۱)، معادلات توربین بادی آورده شده است، در بخش (۲-۲) مدل ژنراتور تشریح شده است، در بخش های (۳-۱) و (۳-۲) و (۳-۳) و (۳-۴) و (۴-۳) و (۵-۳) به ترتیب، سیستم نمونه، PITCH CONTROL، استراتژی کنترل DFIG و DSTATCOM و نتایج شبیه سازی، در قالب بخش پایداری ولتاژ پس از خطا، بیان شده اند و در بخش های (۱-۴)، (۲-۴)، (۳-۴) و (۴-۴)، به ترتیب، سیستم نمونه، PITCH CONTROL، استراتژی کنترل DFIG و نتایج شبیه سازی برای بخش ISLANDING آورده می شود. و در نهایت در بخش (۵) جمع بندی انجام می شود. شبیه سازی ها با استفاده از نرم افزار MATLAB انجام شده است.

۱-۱- توربین بادی

معادلات توربین بادی به شکل زیر است:

$$P_M = \frac{1}{2} \rho_{Air} V^3 \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

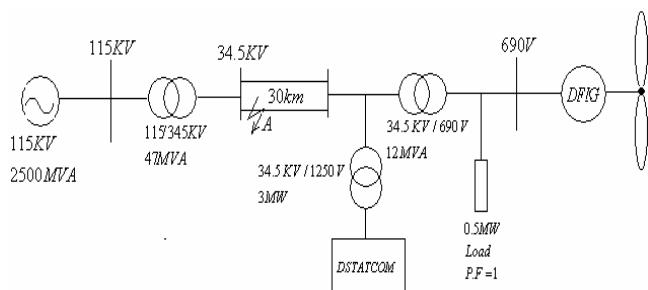
$$P_M = \omega_M T_M \quad (2)$$

$$C_p = \frac{P_M}{P_V} \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{\omega_M R}{V} \quad (4)$$

P_M توان مکانیکی توربین، ρ_{Air} چگالی هوا، V سرعت باد، ω_M سرعت چرخش توربین β زاویه تیغه توربین بادی، T_M گشتاور مکانیکی و R شعاع توربین است. منحنی ضریب توان (C_p)، برای یک پیک سرعت معین و همچنین مشخصه $\lambda = \frac{\omega_M R}{V}$ ، توسط سازنده داده می شوند. قابل ذکر است که ضریب C_p نباید از حد بالای تئوری آن ($C_p^{MAX} = 16/27 \approx 0.59$) تجاوز کند که اصطلاحاً این مقدار را حد Betz می نامند و برای عملکرد حالت دائمی توربین های بادی به

است. نمایش نیروگاه باد ($6 \times 1.5 MW$) به صورت مجتمع در یک مدل ماشین DFIG آمده است. مقادیر نامی و پایه در جدول (۱) داده شده‌اند. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود برای بررسی کارایی گذرای مدل، در $\frac{1}{60}$ s در باس $34.5 KV$ خطای سه فاز رخ داده و در $\frac{10}{60}$ s برطرف می‌گردد (زمان خطا ۹ سیکل است). خطای سه فاز اتصال به زمین، برای آزمون کارایی کنترل در نقطه A (در باس KV ۳۴،۵)، قرار داده شده است. کنترل DSTATCOM بکار رفته در مد کنترل ولتاژ است.



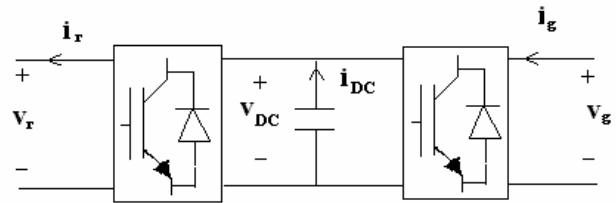
شکل ۴- مدل تک خطی سیستم

جدول ۱- مقادیر پارامترهای DFIG در مدل شکل (۴)

مقادیر	متغیرها
10 MVA	توان پایه
690 V	ولتاژ پایه ترمینال ژنراتور
60 Hz	فرکانس پایه
1200 rpm	سرعت چرخشی پایه در سمت ژنراتور
1.2 pu	سرعت نامی ژنراتور
11 m/sec	سرعت نامی باد
1200 V	ولتاژ DC نامی
0.3 pu	مقدار نامی کانورترها

۲-۲- کنترل PITCH

شکل (۵) کنترل سرعت روی زاویه تیغه توربین (pitch control) را نشان می‌دهد. به طوری که می‌بینیم خطای سرعت پس از عبور از کنترل کننده PI زاویه β را می‌سازد، سرعت اضافه موجب افزایش زاویه کاهش نیروی گرفته شده از باد و در نتیجه کاهش سرعت توربین و روتور می‌شود.



شکل ۲- کانورترهای DFIG

برای انتقال کامل توان از شبکه به روتور، طبق روابط (۱۸) و (۱۹) باید داشته باشیم:

$$P_{DC} = 0 \Rightarrow P_g = P_r$$

و همین‌طور رابطه (۲۰) بین توان الکتریکی روتور و استاتور وجود دارد:

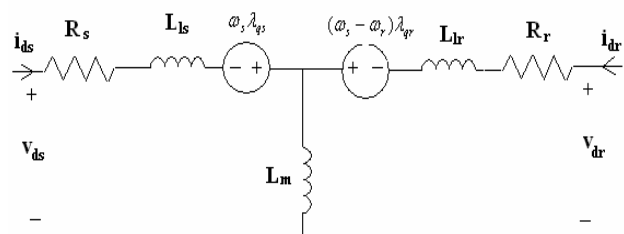
$$P_r = -SP_s \quad (20)$$

S در اینجا لغزش است.

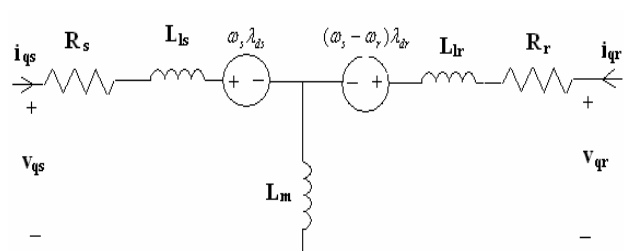
و گشتاور الکترومکانیکی نیز از رابطه (۲۱) به دست می‌آید:

$$T_{em} = \lambda_{qs} i_{ds} - \lambda_{ds} i_{qs} \quad (21)$$

شکل های (۳- الف) و (۳- ب)، مدار معادل d و q ژنراتور را در دستگاه مرجع سنکرون نشان می‌دهند.



شکل ۳- الف - مدار معادل d

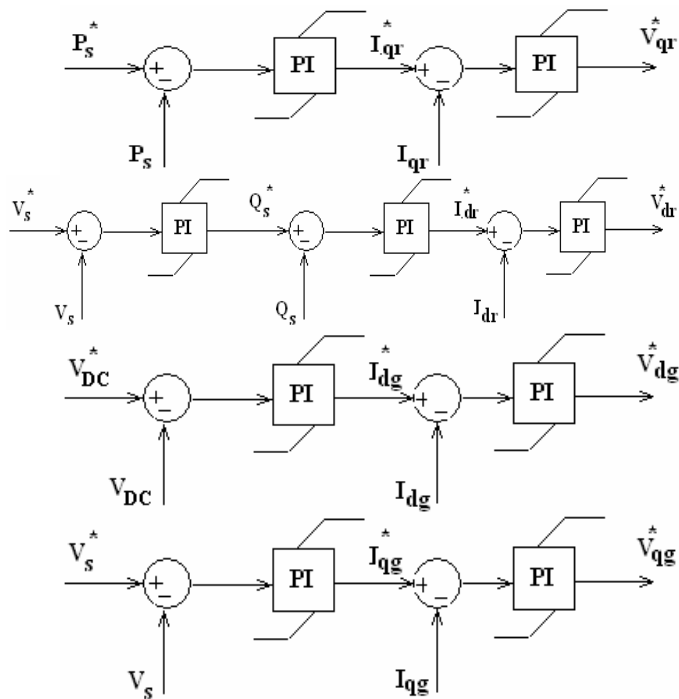


شکل ۳- ب - مدار معادل q

۲- پایداری ولتاژ

۲-۱- سیستم نمونه

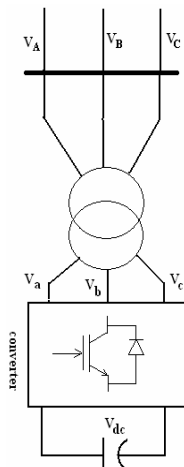
نیروگاه تحت مطالعه، همان‌گونه که در شکل (۴) به صورت دیاگرام تک خطی مشاهده می‌فرمایید به شبکه انتقال متصل شده



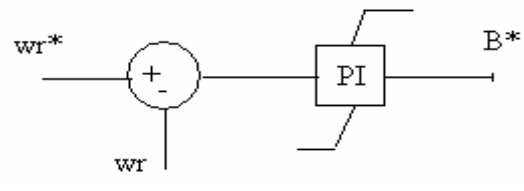
شکل ۶- دیاگرام کنترلی کانورتورها

۲-۴- کنترل DSTATCOM

همان‌طور که در شکل (۷) به صورت شماتیک می‌بینیم، DSTATCOM (جبران‌کننده استاتیکی سنکرون توزیع) شامل یک کانورتور سه فاز بوده و از طریق یک ترانسفورماتور به شبکه توزیع متصل می‌شود. این آرایش برای DSTATCOM قابلیت جذب و یا تزریق مقداری توان راکتیو قابل کنترل را فراهم می‌آورد، لذا می‌توان از آن برای کنترل ولتاژ یا ضریب توان و همچنین رفع هارمونیک جریان استفاده کرد [10].



شکل ۷- DSTATCOM



شکل ۵- کنترل سرعت

۲-۳- کنترل DFIG

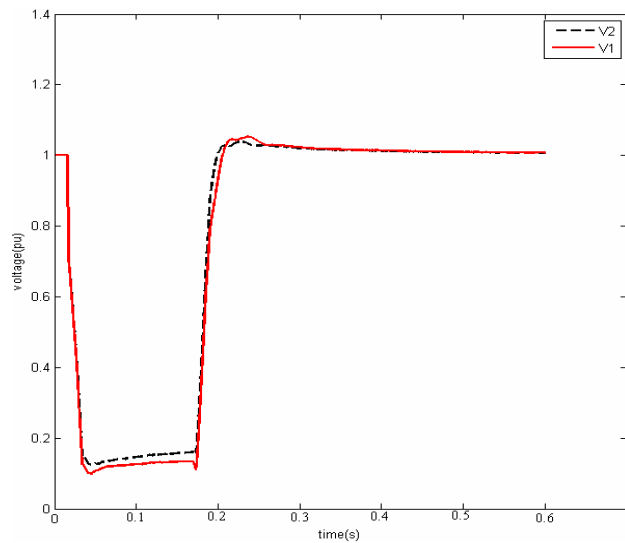
در RSC (کانورتور سمت روتور)، کمیت‌های ماشین در قاب مرجع هم‌جهت با شار روتور در نظر گرفته شده اند، بنابراین محور d در جهت ماکزیمم شار روتور قرار دارد، در این شرایط با صرف نظر کردن از مقاومت سیم‌پیچی ماشین $V_d = 0$ و $V_q = V_r$ خواهد بود، لذا با استفاده از روابط (۱۴) و (۱۶)، به ترتیب i_{dr} و i_{qr} ، توان راکتیو و اکتیو را کنترل می‌کنند.

در شرایطی که نیازی به کنترل ولتاژ نداریم (در شرایط اتصال به شبکه قدرت قوی)، توان راکتیو در همان رنج ضریب توان تغییر کرده و در مواقعی که تمامی جریان مغناطیس کننده از روتور جذب می‌شود، توان راکتیو، خنثی ($Q_S = 0$) خواهد بود [4].

در اینجا GSC (کانورتور سمت شبکه)، در قاب مرجع هم‌جهت با بردار ولتاژ ac عمل می‌کند. بنابراین به ترتیب اجزا جریان محورهای d و q، توان اکتیو و راکتیو را می‌سازند. در شرایطی که جریان i_d باقی ماندن ولتاژ لینک dc را در مقدار $I(pu)$ تضمین می‌کند، i_q می‌تواند با تنظیم توان راکتیو ولتاژ ترمینال ac را کنترل کند. اصولاً GSC برای انتقال ماکزیمم توان لغزش، زمانی که توربین در پائین‌تر از توان نامی‌اش کار می‌کند در نظر گرفته شده است، بنابراین در شرایط عادی کار توربین، می‌توان از ظرفیت موجود جریان راکتیو آن سود برد [4].

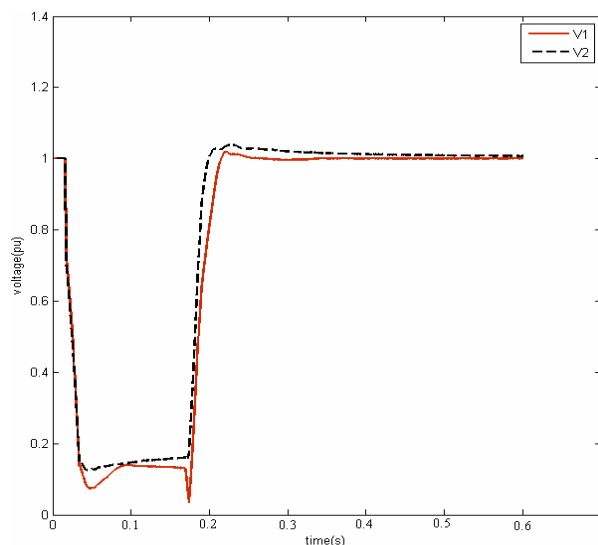
زمانی که DFIG به شبکه ضعیف متصل است، بسته به مشخصات نوسان ولتاژ، DFIG می‌تواند مقداری توان راکتیو را برای کنترل ولتاژ، جذب و یا تولید کند [1]. کنترل داخلی و خارجی بکار رفته، در شکل (۶) آورده شده است.

در شبیه سازی‌های گذشته اکثراً مقدار توان راکتیو قابل تنظیم محدود گردیده است حال آن که، طی مدت زمانی که ژنراتور توان اکتیو کمی به شبکه تزریق می‌نماید رنج تنظیم توان راکتیو برای کنترل ولتاژ می‌تواند وسیع‌تر باشد.



شکل ۱۰- نمودار V1، ولتاژ باس ژنراتور، نمودار V2، ولتاژ باس ژنراتور با افزایش توان کانورتر سمت شبکه

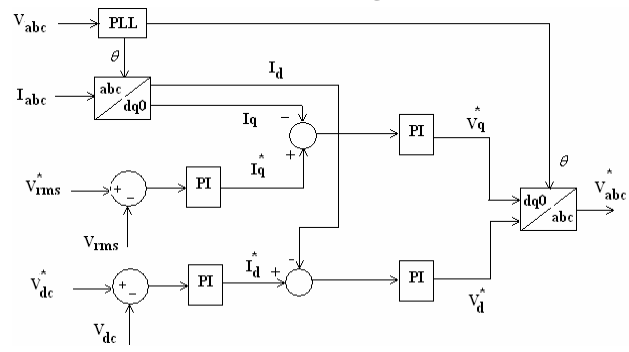
در شکل (۱۱)، پاسخ ولتاژ در شرایط اتصال کوتاه سه فاز، نشان داده می‌شود. در این نمودار کنترل ولتاژ توسط DSTATCOM و توسط کنترل کانورتر سمت شبکه DFIG با هم مقایسه شده اند. به طوری که ملاحظه می‌شود با کنترل مناسب DFIG پایداری ولتاژ بهبود یافته و بازیابی ولتاژ سریع‌تر است.



شکل ۱۱- نمودار V1، ولتاژ با حضور DSTATCOM و نمودار V2 با کنترل ولتاژ کانورترهای DFIG

در شکل (۱۲) پاسخ ولتاژ، بدون هیچ‌گونه کنترل ولتاژ، با DSTATCOM و با کنترل ولتاژ توسط کانورتر سمت شبکه، به ترتیب نمایش داده شده است.

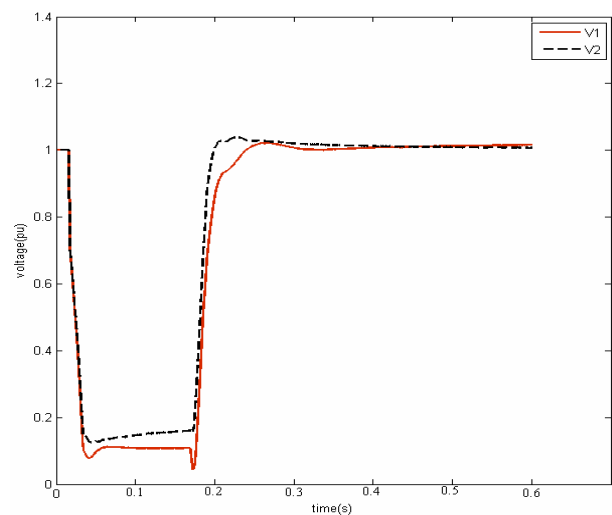
در این مقاله از DSTATCOM در حالت کنترل ولتاژ استفاده شده است. در شکل (۸)، بلوک کنترلی DSTATCOM را که در قاب مرجع گردان d-q (به دلیل دقت بیشتر نسبت به مرجع ساکن) ساخته شده است، مشاهده می‌کنید [10].



شکل ۸- بلوک کنترل DSTATCOM

۲-۵- نتایج شبیه‌سازی

در شکل (۹) پاسخ تقعر ولتاژ نیروگاه به خطا، بدون کنترل ولتاژ در DFIG نشان داده می‌شود، سپس با افزوده شدن ۰٫۳ مقدار توان نامی ژنراتور (که برابر با توان نامی DSTATCOM است) به کانورتر سمت شبکه و کنترل ولتاژ توسط کانورترها نتیجه حاصل نمودار نشان داده شده است.



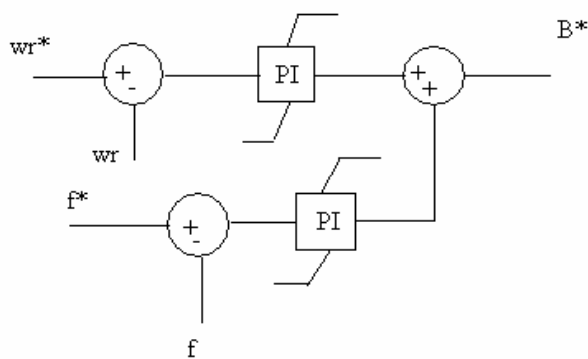
شکل ۹- نمودارهای V1 و V2، پاسخ ولتاژ به خطای شبکه به ترتیب بدون کنترل ولتاژ و با کنترل ولتاژ در DFIG

در شکل (۱۰)، نمودار ولتاژ با کنترل کانورترها، با و بدون افزایش مقدار توان نامی کانورتر سمت شبکه، همان‌گونه که مشاهده می‌شود افزایش مقدار توان نامی کانورتر موجب بهبود پایداری می‌شود.

بنابراین در کنترل ارائه شده پس از کنترل سرعت در شرایط ISLANDING کنترل فرکانس نیز به کنترل زاویه تیغه (PITCH CONTROL) اضافه می‌گردد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌کنید با افزایش فرکانس از مقدار مرجع بر زاویه β به دست آمده از خطای سرعت افزوده شده و در نتیجه توان منتقل شده از باد به توربین کاهش یافته و توان تولیدی ژنراتور کاهش می‌یابد تا زمانی که فرکانس و سرعت به مقدار مرجعشان برسند.

جدول ۲- مقادیر پارامترهای DFIG در مدل شکل (۱۳)

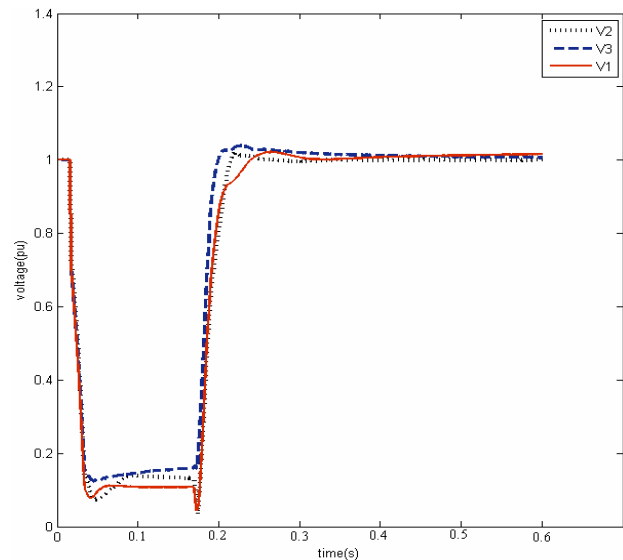
مقادیر	متغیرها
10 MVA	توان پایه
690 V	ولتاژ پایه ترمینال ژنراتور
60 Hz	فرکانس پایه
1200 rpm	سرعت چرخشی پایه در سمت ژنراتور
1.2 pu	سرعت نامی ژنراتور
11 m/sec	سرعت نامی باد
1200 V	ولتاژ DC نامی
0.5 pu	مقدار نامی کانورترها



شکل ۱۴- دیاگرام کنترلی زاویه تیغه توربین

۳-۳- کنترل DFIG

در RSC (کانورتر سمت روتور)، کمیت‌های ماشین در قالب مرجع همجهت با شار روتور در نظر گرفته شده‌اند، بنابراین محور d در جهت ماکزیمم شار روتور قرار دارد، در این شرایط با صرف‌نظر کردن از مقاومت سیم‌پیچی ماشین $V_d = 0$ و $V_q = V_r$ خواهد بود، لذا به ترتیب i_{dr} و i_{qr} ، توان راکتیو و اکتیو را کنترل می‌کنند. در شرایطی که نیازی به کنترل ولتاژ نداریم (در شرایط اتصال به شبکه قدرت قوی)، توان راکتیو در همان رنج ضریب توان تغییر کرده و در مواقعی که تمامی جریان مغناطیس کننده از روتور جذب می‌شود، توان

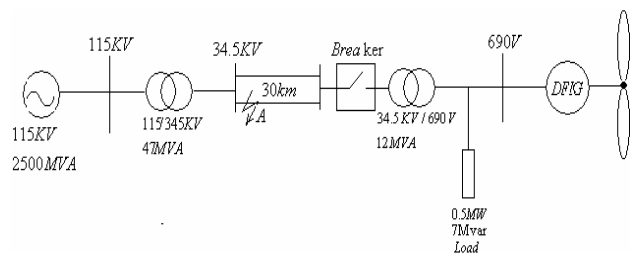


شکل ۱۲- نمودار V1 ولتاژ بدون هیچ‌گونه کنترل ولتاژ، V2 با حضور DSTATCOM و V3 با کنترل ولتاژ کانورترها

۳- ISLANDING

۳-۱- سیستم نمونه

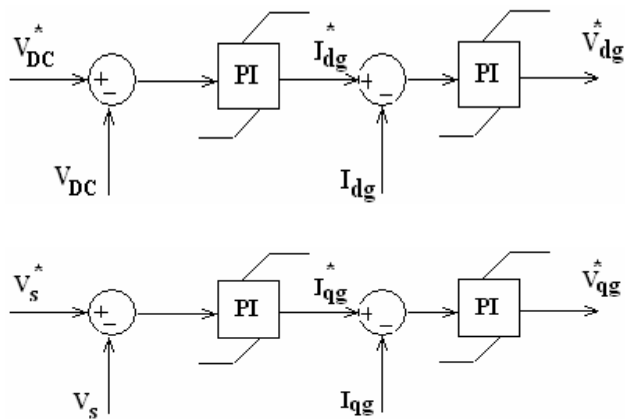
نیروگاه تحت مطالعه، همان‌گونه که در شکل (۱۳) به صورت دیاگرام تک خطی مشاهده می‌فرمایید به شبکه انتقال متصل شده است. نمایش نیروگاه باد ($6 \times 1.5 MW$) به صورت مجتمع در یک مدل ماشین DFIG آمده است. مقادیر نامی و پایه در جدول (۱) داده شده‌اند. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود برای بررسی کارایی گذرای مدل، در $\frac{1}{60}s$ در باس $34.5 KV$ خطای سه فاز رخ داده و نیروگاه بادی توسط بریکر از شبکه جدا می‌گردد.



شکل ۱۳- مدل تک خطی سیستم

۳-۲- کنترل PITCH

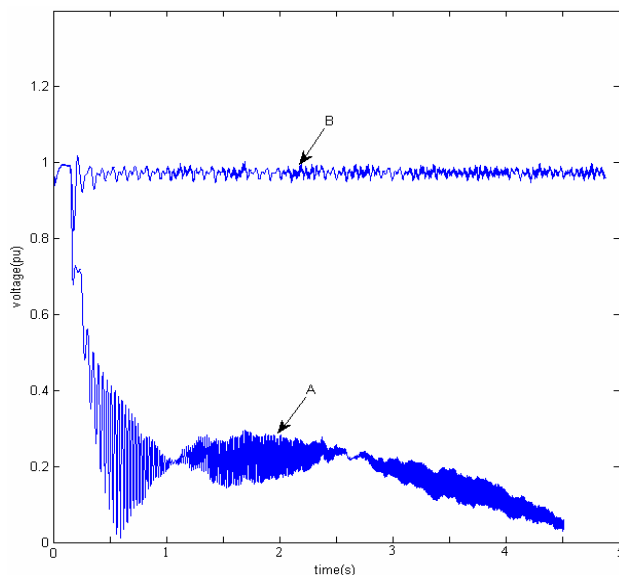
شکل (۱۴) کنترل سرعت و فرکانس روی زاویه تیغه توربین (pitch control) را نشان می‌دهد. در شرایط ISLANDING در صورتی که توان تولیدی در سیستم بیش از توان مصرفی باشد روتور ژنراتور القایی شتاب می‌گیرد و در نتیجه فرکانس نیز بالا خواهد رفت.



شکل ۱۶- دیاگرام کنترلی کانورترها

۳-۴- نتایج شبیه‌سازی

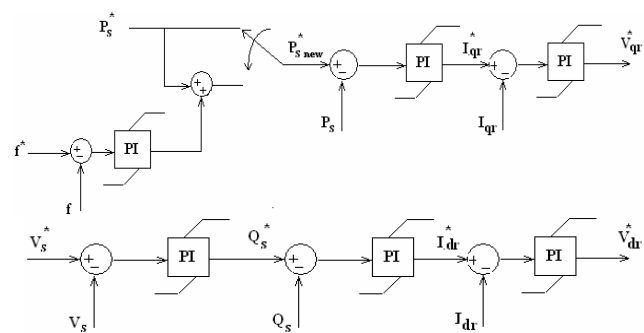
در شکل (۱۷)، ولتاژ باس بار را در شرایط ISLANDING بدون کنترل و با کنترل مناسب مشاهده می‌کنید، که به حدود یک در واحد رسیده است.



شکل ۱۷- نمودار A، ولتاژ بدون استفاده از کنترل مناسب شرایط ISLANDING، و نمودار B، ولتاژ با استفاده از کنترل مناسب

در شکل (۱۸)، فرکانس را در شرایط ISLANDING بدون هرگونه کنترل فرکانس و همین‌طور با کنترل فرکانس روی زاویه تیغه توربین و توان اکتیو مرجع ژنراتور مشاهده می‌فرمایید.

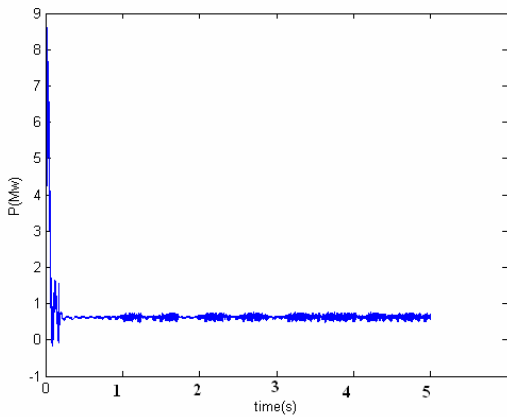
راکتیو خنثی ($Q_S = 0$) خواهد بود [4] در شبیه‌سازی‌های گذشته اکثراً مقدار توان راکتیو قابل تنظیم محدود گردیده است حال آن که، طی مدت زمانی که ژنراتور توان اکتیو کمی به شبکه تزریق می‌نماید رنج تنظیم توان راکتیو برای کنترل ولتاژ می‌تواند وسیع‌تر باشد. همان‌گونه که در شکل (۱۵) مشاهده می‌فرمایید، در اینجا به دلیل رابطه بین فرکانس و توان ما برای کنترل فرکانس در حالت ISLANDING، توان اکتیو را کنترل می‌کنیم، به این صورت که فرکانس اندازه‌گیری شده سیستم را از فرکانس مرجع که در اینجا 60 Hz است کم کرده و خطای آن را از توان مرجع کم می‌کنیم با این کار با انحراف فرکانس توان اکتیو مرجع تا حدی که فرکانس را به مقدار مرجعش برگرداند کم و یا زیاد می‌گردد.



شکل ۱۵- دیاگرام کنترلی کانورترها

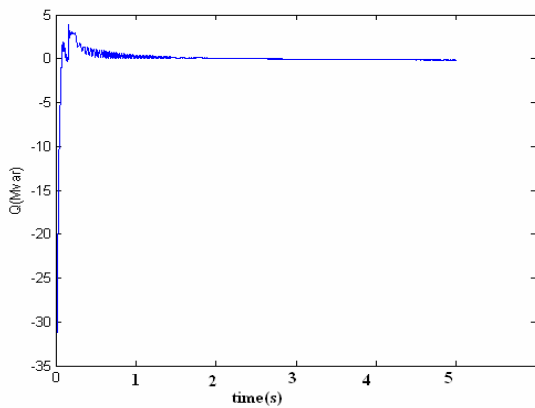
در اینجا GSC (کانورتر سمت شبکه)، در قاب مرجع هم‌جهت با بردار ولتاژ ac عمل می‌کند. بنابراین به ترتیب اجزا جریان محورهای d و q، توان اکتیو و راکتیو را می‌سازند. در شرایطی که جریان i_d باقی ماندن ولتاژ لینک dc را در مقدار $1(pu)$ تضمین می‌کند، i_q می‌تواند با تنظیم توان راکتیو ولتاژ ترمینال ac را کنترل کند. اصولاً GSC برای انتقال ماگزیمم توان لغزش، زمانی که توربین در پائین‌تر از توان نامی اش کار می‌کند در نظر گرفته شده است، بنابراین در شرایط عادی کار توربین، می‌توان از ظرفیت موجود جریان راکتیو آن سود برد [4]. زمانی که DFIG از شبکه جدا می‌شود، کانورتر سمت شبکه شبیه DSTATCOM عمل کرده و می‌تواند با تزریق توان راکتیو به سیستم پایداری ولتاژ را افزایش دهد.

کنترل داخلی و خارجی به کاررفته برای GSC، در شکل (۱۶) آورده شده است.



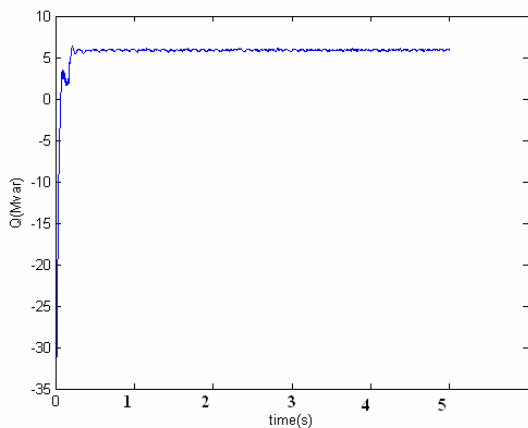
شکل ۲۱- توان اکتیو ISLANDING با تغییر استراتژی کنترل

شکل (۲۲)، توان راکتیو تولید شده توسط ژنراتور را نشان می‌دهد.

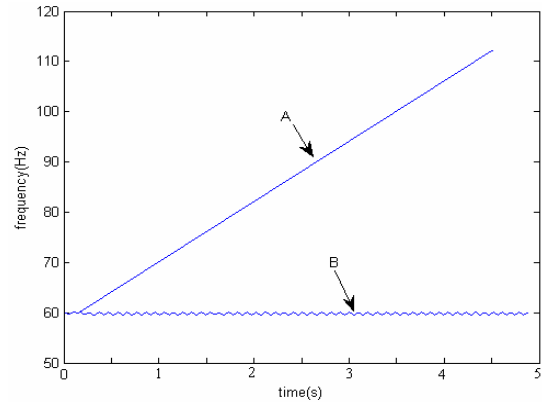


شکل ۲۲- توان راکتیو ISLANDING بدون تغییر استراتژی کنترل

در شکل (۲۳)، توان راکتیو تولید شده توسط ژنراتور را با کنترل مناسب برای ISLANDING، مشاهده می‌کنید.

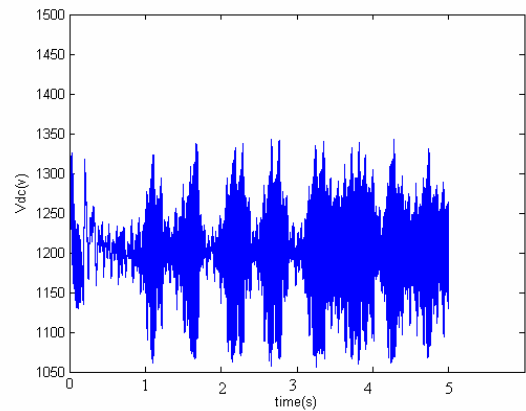


شکل ۲۳- توان راکتیو ISLANDING با تغییر استراتژی کنترل



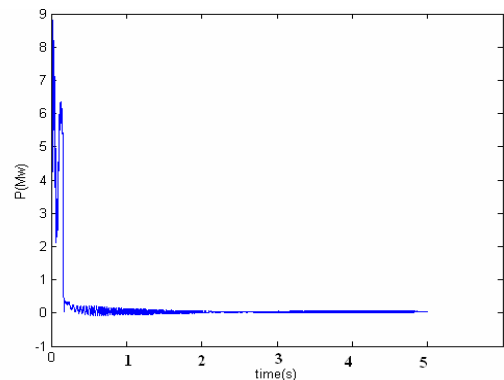
شکل ۱۸- نمودار A، فرکانس بدون استفاده از کنترل مناسب شرایط ISLANDING، و نمودار B، فرکانس با استفاده از کنترل مناسب

در شکل (۱۹)، ولتاژ لینک DC را مشاهده می‌کنید که حول مقدار نامی باقی مانده است.



شکل ۱۹- ولتاژ لینک DC

در شکل (۲۰) توان اکتیو تولید شده توسط ژنراتور دیده می‌شود.



شکل ۲۰- توان اکتیو ISLANDING بدون تغییر استراتژی کنترل

در شکل (۲۱) توان اکتیو تولید شده توسط ژنراتور با کنترل مناسب برای ISLANDING، دیده می‌شود.

۴- نتیجه گیری

در مرجع [13] از Dstatcom برای بهبود عملکرد ژنراتور القایی دوتغذیه‌ای پس از وقوع خطا استفاده شده است، در حالی که در این مقاله با ادغام Dstatcom در کانورتر سمت شبکه یعنی افزودن ظرفیتی معادل ظرفیت Dstatcom به کانورتر، می‌توان به نتایج بهتر در شرایط عادی و خطا دست یافت. همان‌گونه که از نتایج برداشت می‌شود، در بخش (۳) به جای استفاده از DSTATCOM در شبکه با حضور DFIG، می‌توان بر مقدار نامی توان کانورتر سمت شبکه افزود، که با این کار همان رگولاسیون ولتاژ را در شرایط کار عادی داریم، زیرا باقیمانده ظرفیت کانورتر می‌تواند برای تبادل توان راکتیو با سیستم استفاده شود، همچنین در هنگام بروز خطا این کانورتر و لینک DC، مشابه DSTATCOM عمل کرده و در بازایی سریع‌تر و پایداری بیشتر به شبکه کمک می‌کند.

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در اکثر موارد ISLANDING، در مورد DFIG می‌توان با استفاده از کنترل مناسب بر روی بخش‌های مکانیکی و الکتریکی، بدون خارج نمودن نیروگاه از مدار به تغذیه بار محلی با ولتاژ و فرکانس مطلوب، ادامه داد و تنها در حالتی نادر که نیروگاه حتی توان تغذیه بار محلی را هم ندارد، پس از چند ثانیه یا حتی چند سیکل ناچار به خارج نمودن ژنراتور می‌شویم. در مرجع [12] در شرایط جزیره شدن برای ژنراتور القایی دوتغذیه‌ای از باتری در لینک DC استفاده شده و برای تنظیم فرکانس از بار متغییر فرضی استفاده شده است و کنترل ولتاژ روی کانورتر سمت بار انجام گرفته است. در حالی که در این مقاله با کنترل ولتاژ توسط کنترل جریان راکتیو کانورتر سمت بار و همین‌طور توسط کنترل توان راکتیو تولیدی ژنراتور از طریق کنترل کانورتر سمت روتور به کنترل ولتاژ بهتر می‌رسیم و همین‌طور با استفاده از کنترل زاویه گام (PITCH CONTROL) به جای بار متغییر فرضی و بدون استفاده از باتری، نتایج نشان می‌دهند که ISLANDING در سیستم نمونه مورد نظر کنترل شده است.

۵- مراجع

- [4] Mustafa Kayıkci,¹ and Jovica V. Milanović; **“Reactive Power Control Strategies for DFIG-Based PlantsA”**, IEEE TRANS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 22, NO. 2, JUNE 2007.
- [5] Ming Yin, Gengyin Li, Ming Zhou, Guoping Liu, Chengyong Zhao; **“Study on the Control of DFIG and Its Responses to Grid Disturbances”**, IEEE 2006
- [6] A.H. Kasem, E.F. El-Saadany, H.H. El-Tamaly M.A.A. Wahab; **“An improved fault ride-through strategy for doubly fed induction generator-based wind turbines”**, Published in IET Renewable Power Generation Received on 14th September 2007.
- [7] Dawei Zhi, and Lie Xu; **“Direct Power Control of DFIG With Constant Switching Frequency and Improved Transient Performance”**, IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 22, NO. 1, MARCH 2007
- [8] Lie Xu, and Yi Wang **“Dynamic Modeling and Control of DFIG-Based Wind Turbines Under Unbalanced Network Conditions”**. IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 22, NO. 1, FEBRUARY 2007
- [9] Woei-Luen Chen, and Yuan-Yih Hsu; **“Controller Design for an Induction Generator Driven by a Variable-Speed Wind Turbine”**, IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 21, NO. 3, SEPTEMBER 2006
- [10] Walimir Freitas, Andre Morelato, Wilsun Xu AND Fujio Sato; **“Impacts of AC Generators and DSTATCOM Devices on the Dynamic Performance of Distribution Systems”**, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 20, NO. 2, APRIL 2005
- [11] F.D. Kanellos N.D. Hatzargyriou; **“Control of variable speed wind turbines equipped with synchronous or doubly fed induction generators supplying islanded power systems”**, Published in IET Renewable Power Generation Received on 28th February 2008.
- [12] M. Aktarujjaman, M.A. Kashem, M. Negnevitsky, and G. Ledwich; **“Control Stabilisation of an Islanded System with DFIG Wind Turbine”**, First International Power and Energy Conference PECon 2006.
- [13] W. Qiao, G. K. Venayagamoorthy, and R. G. Harley; **“Real-Time Implementation of a STATCOM on a Wind Farm Equipped with Doubly Fed Induction Generators”**, IEEE 2006.
- [1] V. Akhmatov; **“Analysis of dynamic behaviour of electric power systems with large amount of wind power”**, Ph.D. thesis, Electric Power Engineering, Orsted-DTU, Tech. Univ. Denmark, Kgs. Lyngby, 2003.
- [2] T. Ackermann, Ed., *Wind Power in Power Systems*. New York: Wiley, 2005.
- [3] Feng Wu, Xiao-Ping Zhang and Keith Godfrey, and Ping Ju; **“Modeling and Control of Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator”**, IEEE 2006.