تحقق نیاز LVRT در توربین بادی DFIG متصل به شبکه قدرت به کمک DVR مبتنی بر مبدل چند سطحی MMCC-DSCC

احسان اکبری [*۱]

*۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران، akbari.ieee@gmail.com

چکیده : امروزه بهره‌برداری از ژنراتور دو سو تغذیه در نیروگاه‌های بادی در حال گسترش می‌باشد، علت این امر راندمان بالای آن-ها نسبت به سایر ژنراتورها و انعطاف پذیری شان در کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو می‌باشد. یکی از مهم‌ترین موضوعات در توربین-های بادی مجهز به ژنراتور القایی دو سو تغذیه (DFIG)، قابلیت عبور از ولتاژ پایین (LVRT) در هنگام وقوع خطا یا افت ولتاژ ناگهانی شبکه می‌باشد. نیاز LVRT به منظور عبور از ولتاژ پایین و متصل ماندن واحد تولیدی به شبکه، در هنگام هر نوع خطا مطرح می‌شود. در طی بروز خطا در شبکه الکتریکی، جریان سیم‌پیچی‌های استاتور افزایش می‌یابد و به دلیل تزویج مغناطیسی میان سیم‌پیچی‌های روتور و استاتور این جریان در سیم‌پیچ‌های روتور و مبدل الکترونیک قدرت طرف روتور نیز ظاهر می‌گردد و منجر به آسیب دیدن سیم‌پیچ‌های روتور و مبدل طرف روتور و از مدار خارج شدن DFIG می‌شود، در نتیجه باید با اعمال روش-هایی مانع از صدمه دیدن مدار روتور و مبدل آن و خروج DFIG از شبکه شد. در این مقاله به منظور بهبود قابلیت عبور از ولتاژ پایین توربین بادی مجهز به DFIG از بازیاب دینامیکی ولتاژ (DVR) مبتنی بر اینورتر چند سطحی مدولار شده با اتصال آبشاری بر پایه ساختار نیم سلولی با اتصال ستاره دوبل (MMCC-DSCC) استفاده شده است. با جبران‌سازی افت ولتاژ توسط DVR پیشنهادی، امکان عملکرد عادی DFIG در حین وقوع خطا (افت ولتاژ) فراهم می‌شود. با توجه به عملکرد DFIG در شرایط خطا مقدار ولتاژ تزریقی توسط DVR بسیار حائز اهمیت بوده زیرا افزایش بیش از حد ولتاژ، عملکرد سیستم را تحت تاثیر قرار می‌دهد. به منظور رفع این مشکل و افزایش قابلیت پایدار ماندن پس از وقوع خطا، از سیستم کنترل تناسبی-انتگرالی (PI) استفاده شده است و جهت کاهش هارمونیک‌های ولتاژ تزریقی DVR از اینورتر چند سطحی (MMCC-DSCC) در ساختار DVR بهره گرفته‌ایم. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها در محیط نرم‌افزاری MATLAB/SIMULINK نشان می‌دهد که DVR پیشنهادی تاثیر بسیار خوبی در بهبود LVRT توربین بادی مجهز به DFIG دارد.

کلمات کلیدی: افت ولتاژ، بازیاب دینامیکی ولتاژ، توربین بادی مبتنی بر DFIG، قابلیت عبور از ولتاژ پایین (LVRT)، اینورتر MMCC-DSCC.

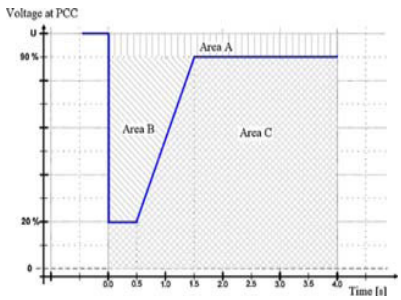
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 4 -No. 1- autumn 2015 & winter 2016

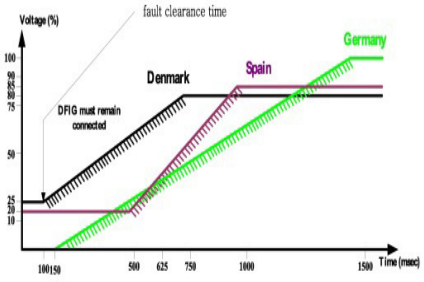
[DOR: 20.1001.1.23222468.1394.4.2.3.8]

۱- مقدمه

امروزه با اهمیت یافتن مسائل زیست محیطی و افزایش قیمت جهانی نفت در یک صد سال اخیر، بکارگیری انرژی بادی به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع انرژی‌های نو به‌طور قابل ملاحظه‌ای در حال گسترش بوده و مطالعات مربوط به آن‌ها اهمیت و وسعت قابل توجهی یافته است. در میان انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی باد بخاطر مسائل اقتصادی و پاک بودن بیشتر مورد توجه قرار گرفته است، به‌گونه‌ای که انتظار می‌رود تا سال ۲۰۲۰، ۲۰ درصد انرژی کل جهان از انرژی باد تامین گردد در نتیجه مطالعه در مورد اتصال این توربین‌ها به شبکه قدرت بسیار با اهمیت است[۱]. با گسترش ضریب نفوذ توربین‌های بادی در سیستم‌های قدرت، بسیاری از کشورها نظام‌نامه (Grid Code) مخصوص به خود را دارند که بر نحوه اتصال توربین بادی به شبکه نظارت می‌کند. تمامی نظام‌نامه-های مخصوص توربین بادی، شامل الزاماتی مانند؛ قابلیت عبور از ولتاژ پایین (LVRT)، کنترل ولتاژ، کنترل فرکانس و الزامات حفاظتی است که می‌توان به کد معرفی شده توسط استاندارد FERC اشاره کرد. الزام LVRT عبارت است از حفظ اتصال توربین بادی به شبکه در صورت بروز خطا و افت ولتاژ در پایانه استاتور DFIG مطابق منحنی LVRT که اولین بار توسط E.On Netz در سال ۲۰۰۵ معرفی شد[۲] و بر طبق آن مطابق شکل (۱) در هنگام وقوع خطا و افت ولتاژ، اگر اندازه ولتاژ در نقطه اتصال نیروگاه بادی به شبکه در ناحیه B قرار گیرد نیروگاه بادی متصل به سیستم بدون قطعی و به‌صورت پایدار باقی می‌ماند. در صورتی که اندازه ولتاژ در ناحیه C واقع شود نیروگاه بادی اجازه قطع از شبکه را خواهد داشت. مطابق این منحنی نیروگاه بادی باید افت ولتاژ ۰/۲ پریونیت برای مدت ۰/۵ ثانیه را تحمل کرده و به دنبال آن ولتاژ در مدت ۱ ثانیه تا ۰/۹ پریونیت بازیابی شود. الزامات LVRT برای کدهای شبکه کشورهای مختلف در شکل (۲) آورده شده است[۱].



شکل (۱): الزامات LVRT برای یک کد شبکه نمونه



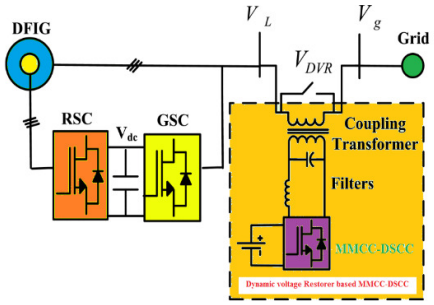
شکل (۲): الزامات LVRT برای کد شبکه کشورهای مختلف

به‌طور کلی، توربین‌های بادی مورد استفاده در نیروگاه-های بادی به دو دسته: توربین بادی سرعت ثابت و توربین بادی سرعت متغیر تقسیم می‌گردند. ژنراتورهای القایی بخاطر هزینه نگهداری کم و فاقد جاروبک بودن و ساختار ساده و مزایای دیگر بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سال ۲۰۰۴ حدود ۶۰ درصد فروش بازار جهانی مختص به فروش ژنراتورهای بادی سرعت متغیر بوده است. در طی چند سال اخیر استفاده از توربین‌های بادی مجهز به ژنراتورهای القایی از دو سو تغذیه (DFIG) به دلیل عملکرد در سرعت‌های متغیر، راندمان بالا، تنظیم بهتر متغیرهای شبکه و کنترل جداگانه توان اکتیو و راکتیو افزایش یافته است. مطابق شکل ۳ ژنراتور القایی دو سو تغذیه (DFIG) یک ژنراتور القایی رتور سیم‌پیچی شده است که استاتور آن به طور مستقیم و رتور آن از طریق دو مبدل الکترونیک قدرت پشت به پشت به شبکه متصل شده است. مبدل سمت رتور (RSC) یک اینورتر منبع ولتاژ کنترل شونده با جریان است که با کنترل آن می‌توان گشتاور و توان راکتیو ژنراتور را به طور مستقل از هم کنترل کرد و مبدل سمت شبکه (GSC) نیز یک مبدل منبع ولتاژ PWM است که وظیفه آن انتقال توان اکتیو باس DC و ثابت نگه‌داشتن ولتاژ آن است. ظرفیت این مبدل‌ها برای کنترل کامل ژنراتور حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد ظرفیت کل DFIG می‌باشد که این دو مبدل از طریق یک خازن لینک DC به صورت پشت به پشت به هم وصل شده‌اند. ژنراتور القایی دو سو تغذیه به دلیل اتصال مستقیم استاتور به شبکه در برابر اختلالات شبکه بسیار حساس است. هنگام وقوع اتصال کوتاه (خطا) در سیستم قدرت حتی اگر از محل توربین بادی دور باشد، باعث ایجاد افت ولتاژ در نقطه اتصال توربین بادی به سیستم قدرت (PCC) می‌گردد و در نتیجه جریان در سیم‌پیچ‌های استاتور افزایش می‌یابد و به دلیل تزویج مغناطیسی میان سیم‌پیچ‌های روتور و استاتور این جریان در سیم‌پیچ‌های روتور و مبدل طرف روتور نیز ظاهر می‌شود و منجر به آسیب دیدن آن و از مدار خارج شدن DFIG می‌گردد[۲].

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

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 4 -No. 1- autumn 2015 & winter 2016

[DOR: 20.1001.1.23222468.1394.4.2.3.8]



شکل (۳): توربین بادی مجهز به DFIG

پژوهش‌های بسیاری تا کنون در بهبود LVRT انجام شده است، در مرجع [۲] به بررسی بهبود LVRT با استفاده از SVC پرداخته شده است. در مرجع [۶] STATCOM به عنوان جبران‌ساز برای بهبود LVRT پیشنهاد شده است. مرجع [۸] از مقاومت Crowbar جهت بهبود LVRT بهره گرفته است. استفاده از بازیاب دینامیکی ولتاژ معمولی (اینورتر دوسطحی) در مرجع [۷] جهت بهبود LVRT پیشنهاد شده است. به طور کلی ادوات FACTS سری که توانایی تزریق ولتاژ سری را دارند، کارایی مناسب‌تری در بهبود قابلیت عبور از ولتاژ پایین توربین‌های بادی مجهز به DFIG از خود نشان می‌دهند. در صورتی که شبکه قوی باشد، اگر با تجهیزات موازی نظیر STATCOM بخواهیم این قابلیت را افزایش دهیم نیاز است از ادوات با ظرفیت بیشتری استفاده شود، ولی در خصوص ادوات سری می‌توان با ظرفیت کمتری به خواسته مشابه دست یافت. در این مقاله از بازیاب دینامیکی ولتاژ (DVR) مبتنی بر اینورتر چند سطحی مدولار شده با اتصال آبشاری (MMCC-DSCC) به عنوان یکی از ادوات FACTS برای بهبود قابلیت LVRT توربین بادی مجهز به DFIG استفاده شده است. مزیت بازیاب دینامیکی ولتاژ پیشنهادی کاهش ظرفیت، کاهش هارمونیک ولتاژ تزریقی به شبکه، کاربرد در سطوح ولتاژ بالا، افزایش قابلیت اطمینان، کاهش اندازه و هزینه نسبت به ادوات موازی، عدم نیاز به هرگونه حفاظت خارجی و قابلیت کاربرد برای توربین بادی از قبل نصب شده که قابلیت LVRT کافی را تدارک ندیده‌اند، می‌باشد. در قسمت دوم این مقاله، به بیان اصول عملکرد توربین بادی مجهز به DFIG می‌پردازیم. در قسمت سوم، ساختار اینورتر چند سطحی مدولار شده با اتصال آبشاری بر پایه ساختار نیم سلولی با اتصال ستاره دوبل (MMCC-DSCC) و نحوه کلیدزنی مدولاسیون پهنای پالس تغییر فاز یافته اصلاح شده (MPSPWM) در آن بیان می‌شود. در قسمت چهارم، بازیاب دینامیکی ولتاژ (DVR) مبتنی بر اینورتر نه سطحی مدولار شده با تصال آبشاری (MMCC-DSCC) و روش کنترلی تناسبی- انتگرالی (PI) تشریح خواهد شد. در انتها نیز جهت تایید مباحث تئوری ارائه شده در قسمت‌های قبل و نمایش کارایی DVR پیشنهادی در بهبود قابلیت گذر از ولتاژ پایین توربین‌های بادی مجهز به DFIG، یک توربین بادی مجهز به DFIG متصل به شبکه در نظر گرفته شده و قابلیت LVRT یکبار بدون حضور DVR پیشنهادی و یکبار با حضور DVR پیشنهادی در محیط نرم-افزاری MATLAB/SIMULINK شبیه‌سازی شده است، سپس نتایج شبیه‌سازی در دو حالت با هم مقایسه شده و در آخر هم به نتیجه‌گیری پرداخته می‌شود.

۲- توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی دوسو تغذیه

مدار معادل DFIG در قاب مرجع dq سنکرون در شکل (۴) نشان داده شده است. معادلات شار، جریان و ولتاژ به صورت زیر بیان می‌شود[۷]:

$$V_{ds} = R_r I_{ds} + \frac{d}{dt}\varphi_{ds} - \omega_s \omega_{qs}$$
$$V_{qs} = R_r I_{qs} + \frac{d}{dt}\varphi_{qs} - \omega_s \omega_{ds} \quad (۱)$$

$$V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt}\varphi_{dr} - (\omega_s - \omega_{g-elec})\varphi_{qr}$$
$$V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt}\varphi_{qr} - (\omega_s - \omega_{g-elec})\varphi_{dr} \quad (۲)$$

در معادله‌های (۱) و (۲) V_{ds} و V_{qs} ولتاژهای رتور و استاتور محور dq، I_{dr} و I_{qr} جریان رتور، R_r و R_s به ترتیب مقاومت‌های روتور و استاتور محور dq، ω_s فرکانس زاویه‌ای منبع، ω_{g-elec} فرکانس زاویه‌ای روتور و φ_{dqr} و φ_{dqs} به ترتیب شارهای پیوندی روتور و استاتور می‌باشند.

$$\varphi_{ds} = L_s I_{ds} + L_m I_{dr}$$
$$\varphi_{qs} = L_s I_{qs} + L_m I_{qr} \quad (۳)$$

$$\varphi_{qr} = L_r I_{qr} + L_m I_{qs}$$
$$\varphi_{dr} = L_r I_{dr} + L_m I_{ds} \quad (۴)$$

در معادله‌های (۳) و (۴) منظور از L_m اندوکتانس مغناطیس کنندگی و L_r و L_s به ترتیب اندوکتانس‌های روتور و استاتور می‌باشند. با استفاده از کنترل راستای شار استاتور، توان اکتیو استاتور یا گشتاور ژنراتور توسط جریان محور q روتور توسط معادله (۵) کنترل می‌شود.

$$P_s = \frac{3}{2}(V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs}) = -\frac{3}{2}.\frac{L_m}{L_s} V_{qs} I_{qr} \quad (۵)$$

از طرفی، توان راکتیو استاتور با جریان مولفه محور d روتور با کمک رابطه (۶) کنترل می‌شود:

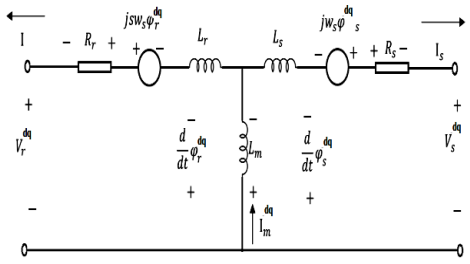
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 4 -No. 1- autumn 2015 & winter 2016

[DOR: 20.1001.1.23222468.1394.4.2.3.8]

$$Q_s = \frac{3}{2}(V_{qs}I_{ds} + V_{ds}I_{qs}) = -\frac{3}{2}\cdot\frac{L_m}{L_s}V_{qs}(I_{ms} - I_{dr}) \qquad (۶)$$

I_{ms} جریان مغناطیس کنندگی است.

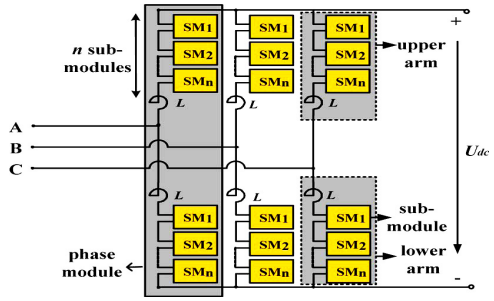


شکل (۴): مدل DFIG در قاب مرجع سنکرون dq

در شرایط عملکرد عادی، توان راکتیو خروجی سیستم قدرت بادی، در مقدار صفر برای داشتن ضریب توان واحد تنظیم می-شود. زمانی که RSC برای کنترل توان اکتیو و تغذیه توان راکتیو مغناطیس کنندگی استفاده می‌شود، مبدل GSC ولتاژ لینک DC خازنی را ثابت نگه می‌دارد. به محض وقوع خطا و افت ولتاژ در شبکه استراتژی کنترلی تغییر وضعیت می‌دهد. در این حالت، مبدل GSC توان راکتیو را برای تنظیم ولتاژ پایانه تولید می‌کند. در هنگام افت ولتاژ زیاد، GSC نمی‌تواند توان راکتیو بیشتری برای جبران‌سازی افت ولتاژ تولید کند زیرا به ماکزیمم توان مجاز خود رسیده است. لذا، RSC برای کمک به GSC در تولید توان راکتیو فعال خواهد شد. بلوک کنترل کننده، توان راکتیو مطلوب را محاسبه کرده و مقدار تولید نشده را RSC از طریق تغییر سیگنال مرجع توان راکتیو کنترل کننده DFIG فرمان می‌دهد.

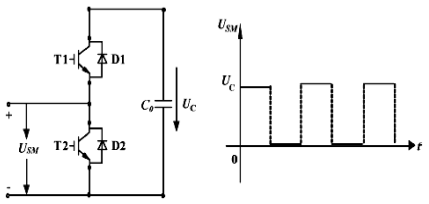
۳- ساختار مبدل MMCC-DSCC

اینورتر چند سطحی با ساختار مدولار شده و اتصال آبشاری بر پایه سلول تمام پل با اتصال ستاره دوبل (MMCC-DSCC) در سال ۲۰۰۳ توسط Akagi و Marquartdt پیشنهاد شد[۳]. MMCC توپولوژی جدیدی از اینورترهای چند سطحی کسکاد (Cascade) هستند که به ترانسفورماتور چند پالسه نیاز ندارند. در این توپولوژی (DSCC) با استفاده از اتصال سری سلول‌ها و خازن‌های dc می‌توان ولتاژ و جریان خروجی را مدیریت نمود. این توپولوژی می‌تواند ولتاژ بالایی بدون افزایش پیچیدگی مدار تولید نماید. شکل (۵) ساختار اینورتر نه سطحی MMCC-DSCC را نشان می‌دهد[۴].



شکل (۵) : ساختار اینورتر MMCC-DSCC

این دسته از اینورترها، دارای سلول‌هایی با اتصال نیم پل (دو کلید و یک خازن) و به صورت دوبل در هر فاز می‌باشند که در نهایت هر سه فاز اینورتر با اتصال ستاره به یکدیگر متصل شده-اند. شکل (۶) ساختار سلول بکار رفته در این اینورتر را نشان می‌دهد.



شکل (۶): ساختار سلول بکار رفته در اینورتر MMCC-DSCC

اینورترهای چند سطحی MMCC دارای مزایایی به شرح زیر می‌باشند[۵]:

۱) اینورتر MMCC بر خلاف اینورترهای کلمپ دیود و خازن شناور می‌تواند سطوح ولتاژ بالایی تولید کند بدون اینکه نیاز به خازن و دیود مسدود کننده اضافی در سیستم باشد و این امر سبب حذف فیلتر و راکتور سلفی می‌گردد.

۲) توانایی عملکرد اینورتر در تمام ضریب قدرت-ها $(0,\pm 1)$

۳) راندمان و قابلیت اطمینان بالا

۴) ساختار مدولار شده و انعطاف‌پذیر (Modular)

۵) تنش ولتاژی (dv/dt)

عیب این اینورتر کنترل نسبتا مشکل تعادل ولتاژ خازن‌ها در هر سلول می‌باشد که با انتخاب سیستم کنترلی و مدولاسیون مناسب تا حد بسیار زیادی بهبود می‌یابد.

۳-۱- محاسبات ولتاژ خروجی اینورتر MMCC-DSCC

با توجه به ساختار ارائه شده در شکل (۷) داریم[۴]:

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

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 4 -No. 1- autumn 2015 & winter 2016

[DOR: 20.1001.1.23222468.1394.4.2.3.8]

$$\frac{U_{dc}}{2} - m_u U_u - R i_u - L\frac{di_u}{dt} = U_0 \quad (۷)$$

$$-\frac{U_{dc}}{2} - m_L U_L - R i_L - L\frac{di_L}{dt} = U_0 \quad (۸)$$

R و L به ترتیب مقاومت و اندوکتانس هر فاز، i_L و i_u جریان بازوهای بالا و پایین، U_L و U_u ولتاژ بازوهای بالا و پایین اینورتر پیشنهادی هستند و U_{dc} ولتاژ DC و U_o ولتاژ خروجی مبدل می‌باشد. ولتاژ خازن سلول‌ها برابر:

$$C\frac{dU_u}{dt} = m_u i_u \quad (۹)$$

$$C\frac{dU_L}{dt} = -m_L i_L \quad (۱۰)$$

C ظرفیت خازنی کل در سلول‌های بالایی و پایینی اینورتر است. جریان خروجی مجموع جریان‌های بازوی بالا و پایین اینورتر می‌باشد:

$$i_0 = i_u + i_L \quad (۱۱)$$

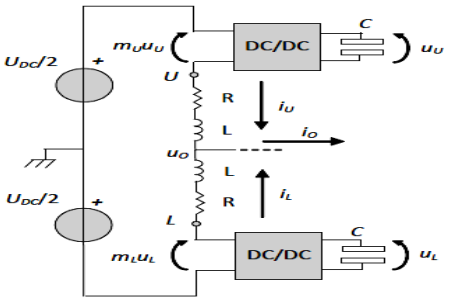
در نهایت معادله خروجی را این چنین می‌توان نوشت:

$$L_q\frac{di_0}{dt} + R_g i_0 = U_0 - U_g \quad (۱۲)$$

که L_g و R_g به ترتیب اندوکتانس و مقاومت خط AC اینورتر و U_g ولتاژ شبکه می‌باشد. اگر افت ولتاژ روی اندوکتانس L و مقاومت R را کوچک فرض کنیم، آنگاه ولتاژ خروجی اینورتر تقریبا برابر است با:

$$U_0 \cong \frac{m_L U_L - m_u U_u}{2} \quad (۱۳)$$

این معادله ارتباط ولتاژ خروجی اینورتر را با شاخص مدولاسیون m_L و m_u نشان می‌دهد.



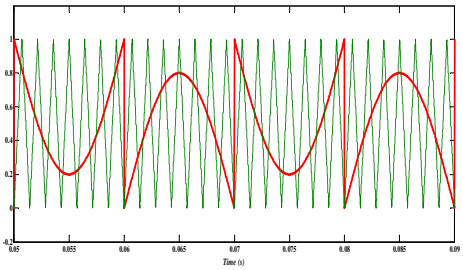
شکل (۷): ساختار تک‌فاز MMCC-DSCC

۲-۳- روش مدولاسیون و کنترل اینورتر MMCC-DSCC

به طور کلی یک اینورتر چند سطحی با m سطح ولتاژ به (m-1) موج حامل مثلثی نیاز دارد. در مدولاسیون شیفت فاز با چند موج حامل، تمامی موج‌های حامل مثلثی دارای فرکانس و دامنه پیک - پیک یکسان هستند ولی بین هر دو موج حامل مجاور اختلاف فازی به اندازه رابطه (۱۴) وجود دارد:

$$\phi_{cr} = \frac{360}{(m-1)} \quad (۱۴)$$

سیگنال مدولاسیون معمولاً یک موج سینوسی سه فاز با دامنه و فرکانس قابل تنظیم است. سیگنالهای گیت از مقایسه موج مدولاسیون با موج‌های حامل ایجاد می‌شود[۵]. شکل (۸) اصول مدولاسیون بیان شده را برای اینورتر پیشنهادی در محیط MATLAM نشان می‌دهد.



شکل (۸): مدولاسیون MPSPWM برای اینورتر MMCC-DSCC در MATLAB

در این حالت به شش موج مثلثی با اختلاف فاز ۶۰ درجه بین هر دو موج مثلثی مجاور و یک موج با ۱۸۰ درجه اختلاف و مدوله شده نیاز داریم. شاخص مدولاسیون فرکانس و دامنه در این حالت به ترتیب برابر:

$$m_f = \frac{f_{cr}}{(\pi - \theta_m) f_m}$$
$$m_a = \frac{2\hat{\pi} V_{mA}}{\hat{V}_{cr}}(\theta_m - \varphi_{cr}) \quad (۱۵)$$

که f_{cr} و f_m و θ_m به ترتیب فرکانس موج‌های حامل و مدولاسیون و زاویه موج مدوله بوده $\hat{V}_{mA}$ و $\hat{V}_{cr}$ به ترتیب مقادیر پیک و دامنه هستند. شاخص مدولاسیون دامنه در واقع بیان کننده میزان استفاده از باس DC می‌باشد و پارامتر تأثیر گذاری در کیفیت شکل موج خروجی به شمار می‌آید. در این اینورتر به دلیل اینکه IGBT ها در نیم سلول‌های مختلف بطور همزمان کلید نمی‌شوند دامنه تغییرات گام ولتاژ در طول مدت کلیدزنی فقط مقدار E است. این مسئله منجر به کاهش مقدار dv/dt و همچنین کاهش پدیده تداخل الکترومغناطیسی (EMI) می‌گردد. رابطه (۱۶) ارتباط بین فرکانس کلیدزنی اینورتر و فرکانس کلیدزنی عنصر را با مدولاسیون پهنای پالس تغیر فاز یافته اصلاح شده نشان می‌دهد.

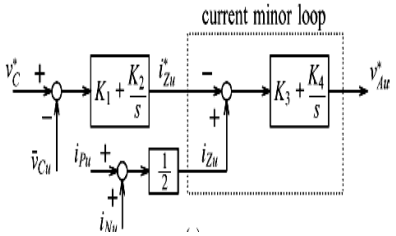
$$f_{sw,inv} = (m-1)(2\pi/\theta_m - \varphi_{cr}) f_{sw,dev} \quad (۱۶)$$

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

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 4 -No. 1- autumn 2015 & winter 2016

[DOR: 20.1001.1.23222468.1394.4.2.3.8]

با توجه به ساختار اینورتر MMCC-DSCC، متعادل کردن ولتاژ خازن‌های DC توسط الگوریتم کنترلی بیان شده در شکل (۹) انجام گرفته است.



شکل (۹): روش کنترل و متعدل‌سازی ولتاژ خازن هر سلول

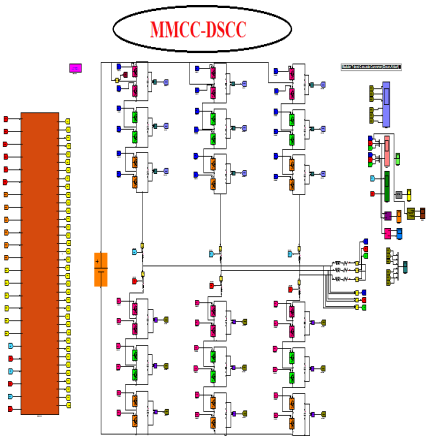
جریان گردشی در هر فاز برابر:

$$i_{zu} = i_{Pu} - \frac{i_u}{2} \qquad (۱۷)$$

$$i_{zu} = i_{Nu} + \frac{i_u}{2}$$

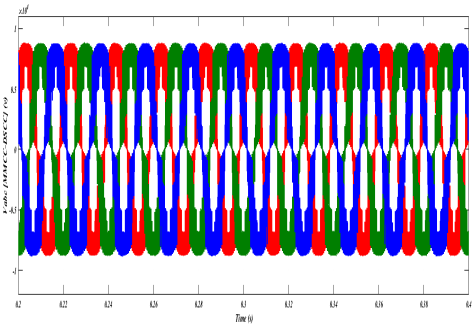
$$\Rightarrow i_{zu} = \frac{1}{2}(i_{Pu} + i_{Nu}) \qquad (۱۸)$$

شکل (۱۰) ساختار اینورتر MMCC-DSCC را در محیط نرم-افزاری MATLAB/SIMULINK نشان می‌دهد.



شکل (۱۰): ساختار MMCC-DSCC در MATLAB

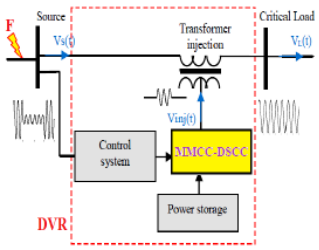
شکل (۱۱) ولتاژ سه فاز خروجی اینـورتر MMCC-DSCC را نشان می‌دهد.



شکل (۱۱): ولتاژ خروجی اینورتر MMCC-DSCC

۴- بازیاب دینامیکی ولتاژ (DVR)

DVR یکی از ادوات Custom Power بوده که به صورت سری در شبکه توزیع متصل می‌گردد و هنگام بروز افت ولتاژ در سیستم توزیع، با تزریق ولتاژ سه‌فاز به تثبیت دامنه ولتاژ، فاز و فرکانس سیستم کمک می‌کند. اساس عملکرد DVR، تزریق ولتاژ مورد نیاز در مواقع بروز اختلال ولتاژ برای جبران‌سازی آن می‌باشد[۹]. بطور کلی عملکرد DVR را می-تواند به دو حالت تقسیم‌بندی نمود: standby mode و injection mode . در حالت اول در صورت بروز یا عدم بروز اغتشاشات ولتاژ، ولتاژ کوچکی جهت پوشش کمبود ولتاژ ناشی از تلفات راکتانس ترانسفورماتور تزریق می‌شود. در حالت دوم به محض آشکار شدن اغتشاش ولتاژ، DVR به تزریق ولتاژ به بار حساس مورد نظر می‌پردازد. مدار DVR شامل ۵ جزء اصلی می‌باشد که در شکل (۱۲) مشخص شده است:



شکل (۱۲): مدار شماتیکی DVR

۱) ترانسفورماتور تزریق سری که سیم‌پیچ اولیه آن به منبع مبدل ولتاژ و سیم‌پیچ ثانویه آن به شبکه متصل است.

۲) مبدل منبع ولتاژ، که در این مقاله جهت کاهش هارمونیک ولتاژ خروجی اینورتر و کاهش اندازه فیلتر خروجی از اینورتر نه سطحی مدولار شده با اتصال آبشاری بر پایه ساختار نیم سلولی با اتصال ستاره دوبل (MMCC-DSCC) به دلایل زیادی از جمله ولتاژ خروجی با اعوجاج هارمونیکی بسیار کم، نرخ تغییرات ولتاژ بسیار کم، استرس ولتاژ محدود بر روی سوئیچ‌ها و قابلیت اطمینان بالا نسبت به اینورتر دو سطحی معمولی استفاده شده است.

۳) منبع ذخیره‌ساز انرژی که می‌تواند باتری‌ها، بانک‌های خازنی، SMES، چرخ‌گردان و منابع انرژی تجدیدپذیر باشد که برای تامین سطح ولتاژ لازم و توان اکتیو به منظور جبران‌سازی ولتاژ استفاده می‌شود.

۴) فیلتر پسیو که در سمت فشارقوی نصب شده تا هارمونیک‌های کلیدزنی را کاهش دهد، در این مقاله به دلیل استفاده از اینورتر چند سطحی به جای اینورتر دو سطحی

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

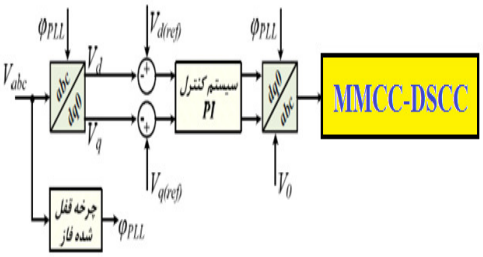
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 4 -No. 1- autumn 2015 & winter 2016

[DOR: 20.1001.1.23222468.1394.4.2.3.8]

معمولی سایز فیلتر بسیار کاهش یافته که این امر سبب کاهش اندازه DVR و هزینه نهایی آن می‌گردد.

۵) استراتژی کنترل، نقش مهمی در عملکرد DVR ایفا می‌کند. در واقع در این استراتژی با تخمین اندازه و زاویه ولتاژ، اغتشاش ولتاژ آشکار گردیده و به تبع آن ولتاژ مرجع و تزریقی تعیین می‌گردد.

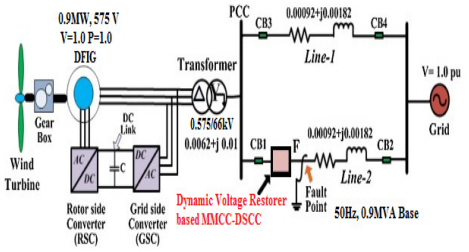
هدف سیستم کنترل ارسال سیگنال‌های مطلوب به DVR برای بالا بردن ولتاژ پایانه‌های استاتور و در نتیجه بالا بردن گشتاور الکترومغناطیسی، پس از رفع خطا می‌باشد. ورودی کنترلر سیگنال خطای دریافتی از اختلاف ولتاژ مرجع و مقدار موثر ولتاژ استاتور ژنراتور است. این سیگنال به فرایند کنترلر PI وارد می‌شود و این سیستم با تنظیم زاویه آتش مناسب برای گیت‌های اینورتر، سیگنال خطا را به صفر نزدیک می‌کند[۷]. در این مقاله، برای انتقال ولتاژها و جریان‌ها به چارچوب مرجع از تبدیل $abc/dq0$ استفاده شده است. در شرایط متعادل مقادیر $V_d = 1$ و $V_q = 0$ پریونیت بوده و در صورت بروز خطا یا افت ولتاژ تغییر خواهد کرد، در نتیجه با مقایسه این ولتاژها با ولتاژهای مرجع سیستم متعادل، می‌توان وقوع افت ولتاژ در سیستم را تشخیص داد و سیگنال خطا را پس از عبور از کنترلر PI برای تعیین استراتژی کلیدزنی مطلوب آماده کرد. شکل (۱۳) شماتیک سیستم کنترل PI را نشان می‌دهد.



شکل (۱۳): بلوک دیاگرام سیستم کنترل PI

۵- نتایج شبیه سازی

در این مقاله، جهت تحلیل عملکرد DVR پیشنهادی در بهبود LVRT توربین بادی مجهز به DFIG از سیستمی که در شکل ۱۴ نشان داده شده استفاده گردیده است. پارامترهای DFIG در جدول ۱ آورده شده است. شبیه‌سازی‌ها در محیط نرم‌افزاری MATLAB/SIMULINK در دو حالت؛ یک حالت بدون DVR پیشنهادی و حالت دیگر با DVR پیشنهادی با توجه به الزامات کد شبکه شکل (۱) انجام شده است.



شکل (۱۴): سیستم مورد مطالعه

جدول (۱): پارامترهای DFIG

توان نامی	۰.۹ MW	اندوکتانس رتور	۰.۰۹۵۵ pu
ولتاژ نامی استاتور	۵۷۵ V	اندوکتانس مغناطیس کنندگی	۲.۹ pu
فرکانس	۵۰ HZ	ثابت اینرسی	۵.۰۴ s
مقاومت استاتور	۰.۰۰۴۸۸ pu	ضریب اصطکاک	۰.۰۱۲S
مقاومت رتور	۰.۰۰۵۴۹ pu	سرعت باد	۱۰ m/s
اندوکتانس استاتور	۰.۰۹۲۴ pu	ولتاژ لینک DC	۱۱۵۰ V

۵-۱- عملکرد DFIG در شرایط افت ولتاژ بدون حضور DVR پیشنهادی

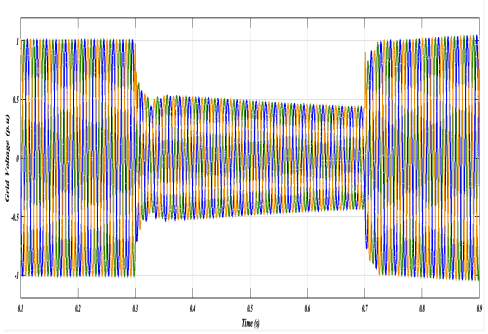
برای اثبات عملکرد مطلوب DVR پیشنهادی در بهبود LVRT توربین بادی مجهز به DFIG یک خطای افت ولتاژ سه‌فاز متقارن با عمق ۰/۵ پریونیت به مدت ۰/۴ ثانیه طبق کد شبکه شکل ۱ در محل اتصال DFIG به شبکه اعمال شده است. رفتار سیستم در بازه زمانی ۰/۱ ثانیه تا ۰/۹ ثانیه با وقوع کمبود ولتاژ سه‌فاز متقارن در بازه زمانی ۰/۳ ثانیه تا ۰/۷ ثانیه مورد مطالعه قرار گرفته است. شکل (۱۵) عملکرد سیستم در شرایط افت ولتاژ سه‌فاز متقارن را بدون حضور DVR پیشنهادی نشان می‌دهد. سرعت زاویه‌ای رتور به شدت افزایش یافته است و ولتاژ خازن لینک DC و گشتاور الکترومغناطیسی و مکانیکی دچار تغییرات شدیدی شده‌اند. این شرایط می‌تواند به سیستم مکانیکی و مبدل الکترونیک قدرت سمت روتور RSC صدمه بزند. توان راکتیو (موهومی) از شبکه کشیده می‌شود، که در عمل می‌تواند موجب اغتشاش در ولتاژ شبکه شود و در استانداردهای جدید (IEEE-1547) قابل قبول نیست. توان اکتیو (حقیقی) تزریقی به شبکه در این حالت به شدت کاهش یافته است و جریان‌های استاتور و روتور در زمان وقوع

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

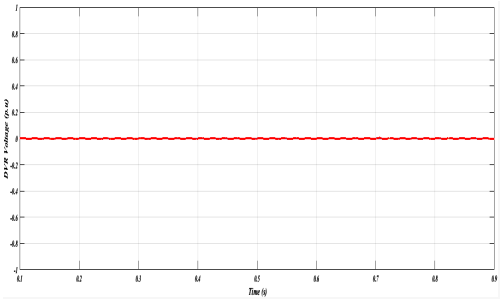
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 4 -No. 1- autumn 2015 & winter 2016

[DOR: 20.1001.1.23222468.1394.4.2.3.8]

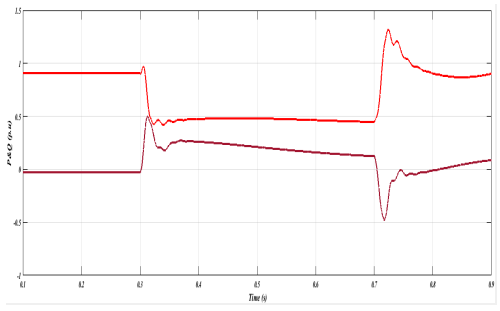
افت ولتاژ سه‌فاز متقارن به شدت افزایش یافته‌اند. در صورت عدم جبران‌سازی، DFIG الزامات LVRT را ارضاء نمی‌کند و عملکرد نامطلوبی خواهد داشت، که این امر سبب جدا شدن آن از شبکه می‌گردد. بنابراین جهت جلوگیری از چنین رویدادی در شبکه، در این مقاله از بازیاب دینامیکی ولتاژ (DVR) مبتنی بر اینورتر نه سطحی مدولار شده با اتصال آبشاری بر پایه ساختار نیم سلولی با اتصال ستاره دوبل (MMCC-DSCC) با روش کنترلی PI بهره‌گرفته‌ایم که در ادامه با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی عملکرد مطلوب DVR پیشنهادی در بهبود LVRT توربین بادی مجهز به DFIG اثبات می‌گردد



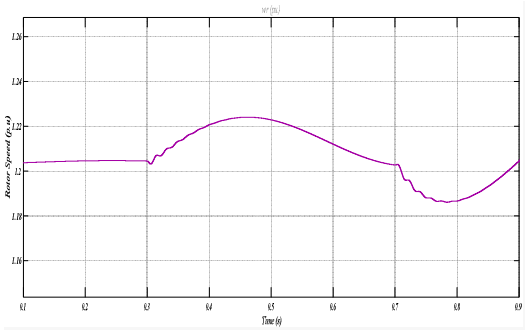
(الف)



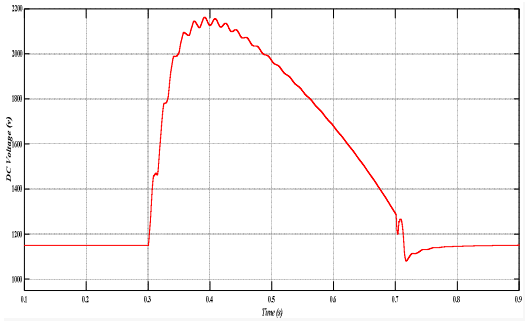
(ب)



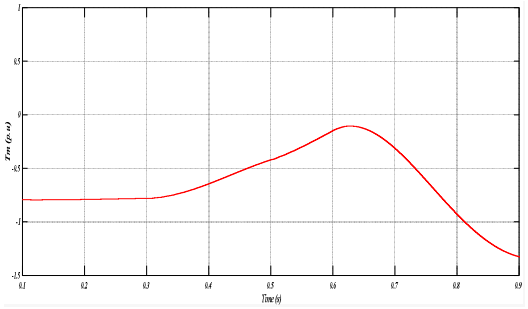
(ج)



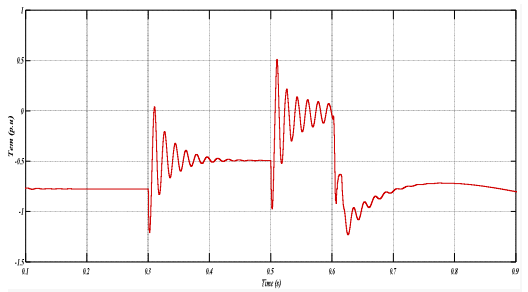
(د)



(ذ)



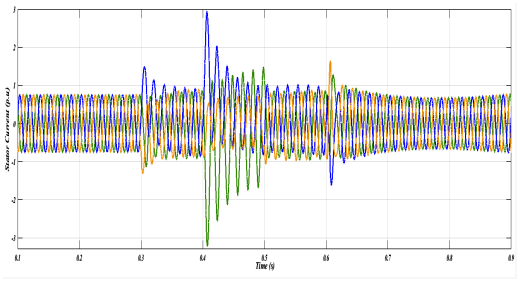
(ر)



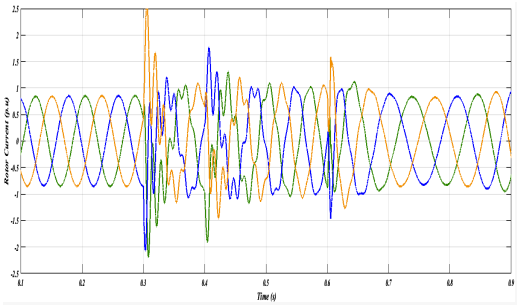
(ز)

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

[DOR: 20.1001.1.23222468.1394.4.2.3.8]



(ژ)

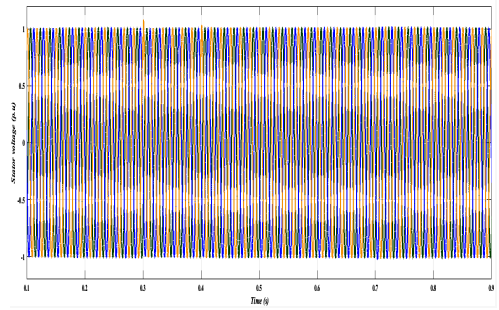


(س)

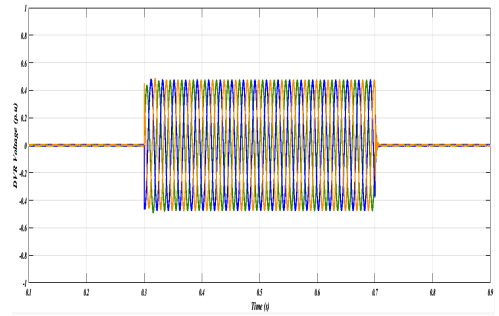
شکل (۱۵): عملکرد DFIG در شرایط افت ولتاژ سه‌فاز متقارن بدون حضور DVR پیشنهادی (الف): ولتاژ ترمینال DFIG، (ب): ولتاژ تزریقی DVR پیشنهادی، (ج): توان اکتیو و راکتیو DFIG، (د): سرعت زاویه‌ای روتور، (ذ):ولتاژ لینک DC، (ر): گشتاور مکانیکی، (ز): گشتاور الکترومغناطیسی، (ژ): جریان‌های سه-فاز استاتور، (س): جریان‌های سه‌فاز روتور .

۲-۵- عملکرد DFIG در شرایط افت ولتاژ با حضور DVR پیشنهادی

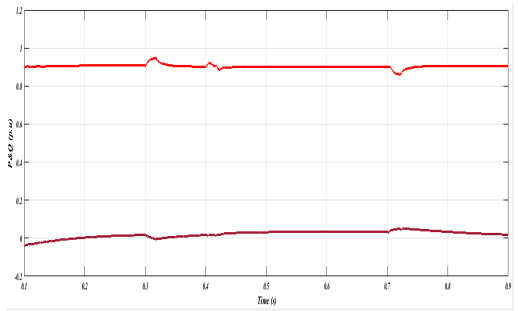
شکل (۱۶) عملکرد سیستم را در شرایط افت ولتاژ سه‌فاز متقارن با عمق ۰/۵ پریونیت در حضور DVR پیشنهادی نشان می‌دهد. DVR پیشنهادی بلافاصله بعد از تشخیص خطا شروع به تولید ولتاژ جبران‌سازی می‌کند در نتیجه ولتاژ استاتور در مقدار نامی حفظ می‌گردد. سرعت زاویه‌ای روتور روند عادی را دنبال می‌کند و تغییر قابل ملاحظه‌ای در ولتاژ خازن لینک DC مشاهده نشده است. در این حالت توان راکتیو (موهومی) همچنان به شبکه تزریق شده که می‌تواند از ولتاژ شبکه پشتیبانی کند. گشتاور الکترومغناطیسی دچار نوسان نبوده و گشتاور مکانیکی نیز فاقد تغییرات می‌باشد، در جریان‌های استاتور و رتور ریپل بسیار جزئی مشاهده می‌شود که قابل چشم‌پوشی می‌باشد. همانطور که از نتایج مشاهده می‌گردد DVR پیشنهادی توانسته به نحو مطلوبی قابلیت گذر از ولتاژ پایین (LVRT) توربین بادی مجهز به DFIG را بهبود ببخشد به گونه‌ای که در طی وقوع خطا، DFIG به عملکرد عادی خود ادامه دهد.



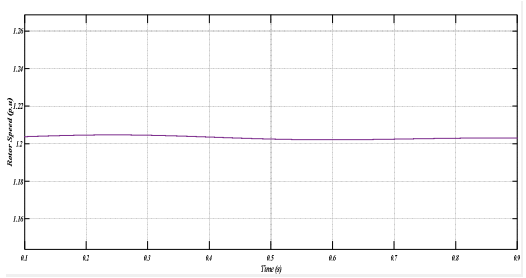
(الف)



(ب)



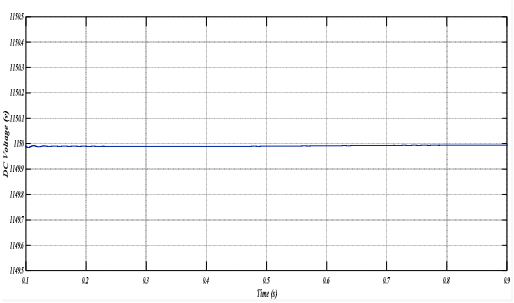
(ج)



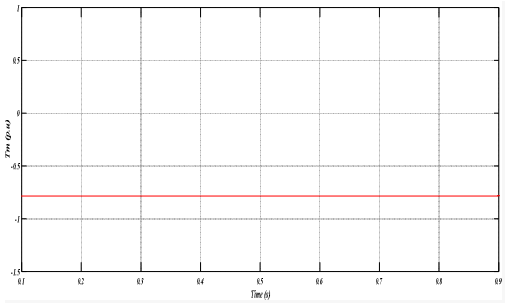
(د)

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

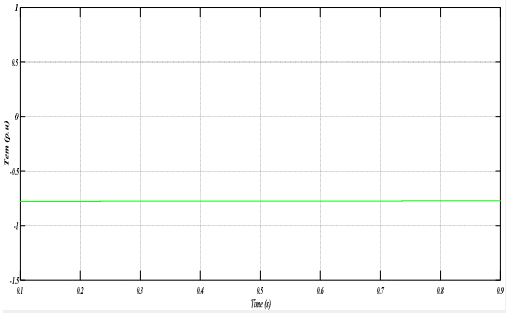
[DOR: 20.1001.1.23222468.1394.4.2.3.8]



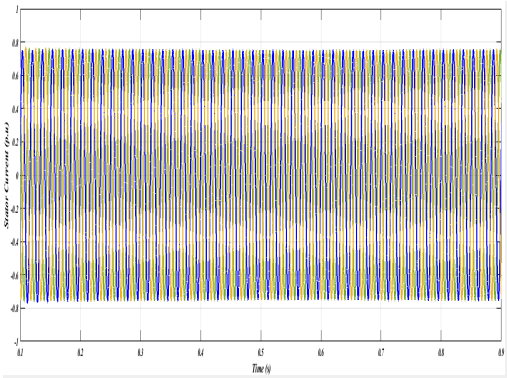
(ذ)



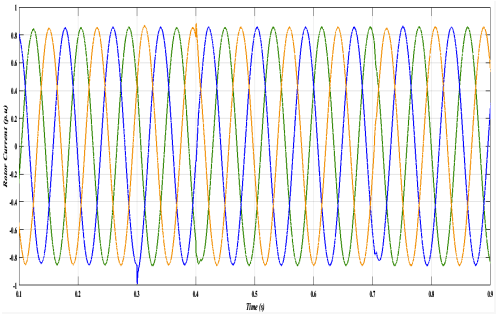
(ر)



(ز)



(ژ)



(س)

شکل (۱۶): عملکرد DFIG در شرایط افت ولتاژ سه‌فاز متقارن با حضور DVR پیشنهادی (الف): ولتاژ ترمینال DFIG، (ب): ولتاژ تزریقی DVR پیشنهادی، (ج): ولتاژ استاتور DFIG، (د): توان اکتیو و راکتیو تزریقی DVR پیشنهادی، (ذ):توان اکتیو و راکتیو DFIG، (ر): سرعت زاویه‌ای روتور، (ز): ولتاژ لینک DC، (ژ): گشتاور مکانیکی، (س): گشتاور الکترومغناطیسی، (ش): جریان‌های سه‌فاز استاتور، (ص): جریان‌های سه‌فاز روتور

۶- نتیجه گیری

هدف از این مقاله بهبود قابلیت گذر از ولتاژ پایین (LVRT) توربین بادی مجهز به DFIG با استفاده از بازیاب دینامیکی ولتاژ مبتنی بر اینورتر نه سطحی مدولار شده با اتصال آبشاری بر پایه ساختار نیم سلولی با اتصال ستاره دوبل (MMCC-DSCC) و دستیابی به پروفیل ولتاژ الزام LVRT بر اساس کد شبکه شکل (۱) می‌باشد. ابتدا مشاهده شد که سیستم توربین بادی مجهز به DFIG بدون استفاده از جبران‌ساز قادر به تامین الزامات LVRT مورد نظر نیست. در نتیجه لازم است جبران-سازی به سیستم اضافه شود، در این مقاله DVR مبتنی بر MMCC-DSCC به عنوان جبران‌ساز ولتاژ پیشنهاد شده است. به دلیل استفاده از اینورتر با ساختار چند سطحی، ولتاژ خروجی اعوجاج هارمونیکی بسیار کمی داشته که این امر سبب کاهش سایز فیلتر خروجی و همچنین افزایش قابلیت کاربرد در سطوح ولتاژ بالا و کاهش هزینه نهایی DVR می‌شود. برای کنترل ولتاژ تزریقی به سیستم از روش کنترلی تناسبی-انتگرالی در DVR استفاده شده است. این سیستم کنترلی پس از دریافت سیگنال خطای ولتاژ، سیگنال مطلوب را برای DVR پیشنهادی ارسال می‌کند تا DVR بهترین حالت ولتاژ را برای جبران‌سازی و بهبود LVRT سیستم تزریق کند. همانطور که از نتایج شبیه‌سازی مشاهده می‌شود به محض اتصال DVR پیشنهادی به سیستم الزامات LVRT توربین بادی مجهز به DFIG فراهم شد و DFIG توانست در طی وقوع خطا همچنان به عملکرد عادی خود ادامه دهد بدون اینکه از شبکه جدا شود، این امر عملکرد مطلوب DVR پیشنهادی را در بهبود قابلیت

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

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 4 -No. 1- autumn 2015 & winter 2016

[DOR: 20.1001.1.23222468.1394.4.2.3.8]

گذر از ولتاژ پایین (LVRT) توربین بادی مجهز به DFIG نشان می‌دهد.

۷- مراجع

[1] Tsili, M. and Papthanassiou, S. (2009),"A Review of Grid Code Technical Requirements for Wind Farms,"IET Renew.Power. Gener, Vol. 3 , No. 4, pp 328–336.

[2] Baqi, O. and Nasrt, A. (2012)," A dynamic LVRT solution for doubly fed induction generators,"IEEE Trans Power Electron, Vol. 7 , No. 2, pp 1045–1053.

[3] H, Fujita. and M. Hagiwara, and H. Akagi. (2012),"Power flow analysis and dccapacitor voltage regulation for the MMCC-DSCC,"IEEJ Transaction on Industry Application, Vol. 132 , No. 6, pp 659–665.

[4] H, Akagi. (2011),"Classification, terminology, and application of the modular multilevel cascade converter (MMCC),"IEEE Trans. Power Electron, Vol. 26 , No. 11, pp 3119–3130.

[5] H, Akagi, M. Hagiwara (2011),"control and analysis of the modular multilevel cascade converter based on double-star chopper-cells (MMCC-DSCC),"IEEE Trans. Power Electron, Vol. 26 , No. 6, pp 1649–1658.

[6] Christian, W. and Fabin, G. (2013),"STATCOM to allow LVRT for a DFIG Wind Turbine,"IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 23 , No. 13, pp 1185–1194.

[7] C. Wessels, F. Gebhardt. (2014) " Fault Ride-Through of a DFIG Wind Turbine Using a Dynamic Voltage Restorer During Symmetrical and Asymmetrical Grid Faults," IEEE Trans. Power Electron, Vol. 32, No. 5, pp. 3456-3463.

[8] . Joshi, M. and Pota, R. (2013),"Nonlinear control of the doubly fed induction generator in wind power systems,"IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 25 , No. 1, pp 876–885.

[9] Ibrahim, T.Nguyen, D.Lee, S. Kim. (2014), "A Fault Ride-Through Technique of DFIG Wind Turbine Systems Using Dynamic Voltage Restorers," IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 26, No. 3, pp 3454-3463.

رزومه



احسان اکبری در بروجرد متولد شده است (۱۳۶۶). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- قدرت از دانشگاه مازندران(۱۳۸۹)، کارشناسی‌ارشد مهندسی برق- قدرت از دانشگاه علوم و فنون مازندران(۱۳۹۲) سپری کرده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه ادوات FACTS، کیفیت توان الکتریکی، الکترونیک قدرت و کاربرد آن در سیستم‌های قدرت و تولیدات پراکنده می‌باشد.

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

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 4 -No. 1- autumn 2015 & winter 2016

[DOR: 20.1001.1.23222468.1394.4.2.3.8]

Realization of LVRT requirement in DFIG wind turbine connected to power grid using of DVR based MMCC-DSCC

Ehsan Akbari[1]

[1] Department of Electrical Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Babol, Iran.

Abstract

Today, the use of a Doubly-Fed Induction Generator in wind farms is expanding, due to their high efficiency compared to other generators and their flexibility in controlling active and reactive power. One of the most important topics in wind turbines is the DFIG, Low-Voltage Ride-Through (LVRT), in the event of an fault, or a sudden voltage sag across the grid. The requirement for Low-Voltage Ride-Through to cross the low voltage and to connect the unit to the grid is considered when any fault occurs. During the electrical grid fault, the current of the stator windings increases. Because of the magnetic coupling between the rotor and stator routers, this current also appears in the rotor coil rotors and the electronic converter on the rotor's side. Causing damage to the rotor's and rotor's coils and the DFIG's outgoing circuit, thus preventing damage to the rotor circuit and its converter and the DFIG output from the network Became. In this paper, in order to improve the Low-Voltage Ride-Through, a DFIG-equipped wind turbine has been utilized from a Dynamic Voltage Restorer (DVR) based on a modular multi-level inverter Modular Multilevel Cascade Converter Double-Star Chopper -Cells MMCC-DSCC cascade connection. By compensating for the voltage sag by the proposed DVR, the normal operation of the DFIG during an error (voltage sag) is provided. Due to the DFIG performance in fault situations, the value of the injected voltage by the DVR is very important because over-voltage rise affects system performance. In order to solve this problem and increase the stability of stay after failure, a proportional-integral control system (PI) has been used. In order to reduce DVR injection voltage harmonics, a multi-level inverter (MMCC-DSCC) is used in the DVR structure. Let's go the results obtained from simulations in the MATLAB / SIMULINK software environment indicate that the proposed DVR has a very good effect on improving the LVRT turbine with DFIG.

[*]**Corresponding author:** akbari.ieee@gmail.com

Keywords: Dynamic Voltage Restorer, DFIG, LVRT, MMCC-DSCC, Voltage Sag.

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

[DOR: 20.1001.1.23222468.1394.4.2.3.8]

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 4 -No. 1- autumn 2015 & winter 2016