

تحلیل و بهبود قابلیت ایستادگی توربین بادی با ژنراتور القایی دو سو تغذیه در برابر افتادگی نامتقارن ولتاژ

محسن رحیمی

استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

mrahimi@kashanu.ac.ir

چکیده: توربین-ژنراتورهای بادی با ژنراتور القایی دو سو تغذیه (DFIG) نسبت به افتادگی ولتاژ پایانه بسیار حساس‌اند. زیرا افت ولتاژهای عمیق پایانه ژنراتور باعث القای ولتاژهای بزرگ در سیم‌پیچ‌های روتور و در نتیجه، عبور جریان‌های گذرای شدید از روتور و مبدل الکترونیک قدرت آن می‌شود. با افزایش ضریب نفوذ توربین‌های بادی در شبکه لازم است که توربین-ژنراتورهای بادی در حین خطا متصل به شبکه باقی بمانند و در بهبود پایداری شبکه نقش ایفا کنند. در این مقاله، یک روش ترکیبی برای بهبود قابلیت ایستادگی توربین-ژنراتور القایی دو سو تغذیه در برابر خطای نامتقارن پیشنهاد می‌شود. این روش با استفاده از کنترل مبدل روتور و با اضافه کردن مقاومت میراکننده استاتور محقق می‌گردد. هدف از روش پیشنهادی، کاهش پیک پاسخ گذرا در لحظات وقوع و رفع خطا، بهبود میرایی نوسانات گذرای با فرکانس شبکه و حذف یا محدود کردن نوسانات نامیرای توالی منفی با دو برابر فرکانس شبکه است. در نهایت، کارایی روش‌های پیشنهادی به وسیله شبیه‌سازی آزموده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: توربین-ژنراتور بادی القایی دو سو تغذیه، قابلیت ایستادگی در برابر افتادگی ولتاژ.

1. مقدمه

در بین ساختارهای متنوع توربین-ژنراتورهای بادی، یکی از ساختارهای پذیرفته شده و بسیار مطرح در صنعت، توربین بادی با ژنراتور القایی دو سو تغذیه¹ است. شمای کلی این نوع توربین در شکل (1) آمده است. ژنراتور آن یک ژنراتور القایی روتور سیم پیچی شده است که سیم پیچی روتور به وسیله یک مبدل الکترونیک قدرت به صورت سینوسی متناوب² تغذیه می شود. مبدل الکترونیک قدرت، خود از دو مبدل تشکیل شده است: یکی مبدل سمت روتور³ و دیگری مبدل سمت شبکه⁴. این دو مبدل مستقل از هم کنترل می شوند. وظیفه مبدل سمت روتور، کنترل توان حقیقی و راکتیوی است که ژنراتور با شبکه مبادله می کند. مبدل طرف شبکه، ولتاژ خازن سمت dc را کنترل می کند. همچنین می تواند برای تزریق توان راکتیو و کنترل ولتاژ نیز به کار رود. اخیراً با توجه به افزایش ضریب نفوذ و روند رو به رشد استفاده از توربین-ژنراتورهای DFIG در شبکه قدرت، موضوع پایدار نگاه داشتن و حفظ اتصال این ژنراتورها به شبکه، در هنگام وقوع خطاها و افتادگی های ولتاژ، از اهمیت زیادی برخوردار شده است. در این مقاله، به مطالعه، تحلیل و بهبود قابلیت ایستادگی توربین-ژنراتور DFIG در برابر افتادگی نامتقارن ولتاژ شبکه پرداخته می شود.

عبارت ایستادگی در برابر افتادگی ولتاژ⁵ (LVRT) در واقع عبارت است از حفظ اتصال توربین-ژنراتور بادی به شبکه در صورت بروز افتادگی ولتاژ در پایانه استاتور [1]. این عبارت بیشتر درباره توربین های سرعت متغیر که دارای مبدل الکترونیک قدرت اند، به کار می رود. البته در تعداد کمی از مقالات از عبارت ایستادگی در برابر افتادگی ولتاژ برای بحث پایداری گذرای توربین-ژنراتور سرعت ثابت و تبیین عملکرد آن بعد از رفع خطا استفاده شده است [2].

توربین-ژنراتورهای سرعت متغیر DFIG نسبت به افتادگی ولتاژ پایانه بسیار حساس اند؛ زیرا افت ولتاژهای عمیق پایانه ژنراتور باعث القای ولتاژهای ضد محرکه بزرگ در سیم پیچ های روتور می شود. این امر نیز منجر به عبور جریان های گذرای شدید از روتور و مبدل الکترونیک قدرت مربوط، افزایش ولتاژ خازن سمت dc و ایجاد گشتاورهای گذرای شدید روی شفت توربین-ژنراتور می شود. مبدل های الکترونیک قدرت به کاررفته در توربین های سرعت متغیر، نسبت به جریان های هجومی گذرنده از آنها در شرایط گذرا آسیب پذیرند.

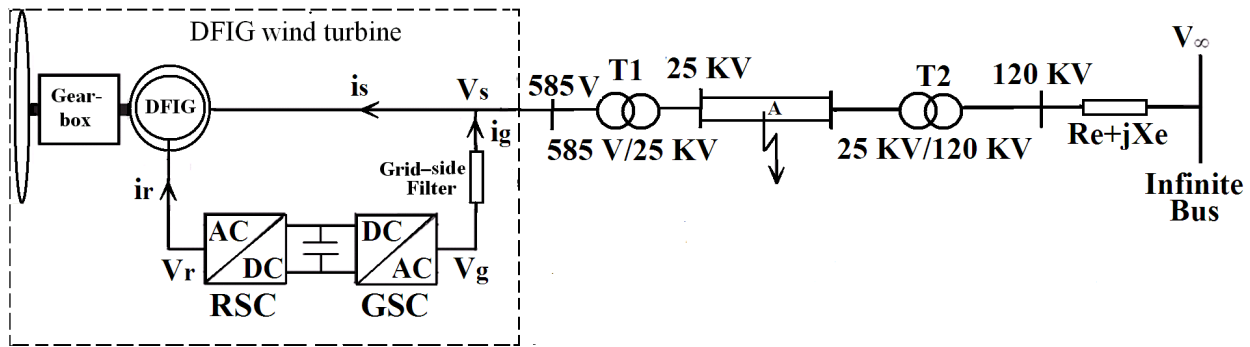
بنابراین، لازم است که گذراهای تحمیل شده به مبدل الکترونیک قدرت به حداقل مقدار برسد تا توربین-ژنراتور بادی بتواند در حین و بعد از رفع خطا، به شبکه متصل باقی بماند و در پایداری شبکه نقش ایفا کند. درصد بالایی از مقالات که به بحث بهبود قابلیت ایستادگی DFIG در برابر افتادگی ولتاژ می پردازند، عمدتاً خطاهای متقارن را دربرمی گیرند [3-6] و کمتر به خطاهای نامتقارن پرداخته اند. در افتادگی های نامتقارن ولتاژ، مسئله مهم، مقدار ماکزیمم پاسخ گذرای ژنراتور و به خصوص قله جریان روتور⁶ در هنگام وقوع خطاست که باید محدود گردد.

دسته بزرگی از خطاهایی که در شبکه قدرت به وقوع می پیوندد، از نوع خطاهای نامتقارن است. افتادگی های نامتقارن ولتاژ به لحاظ شدت تأثیر گذرا بر پاسخ گذرا در لحظه وقوع خطا خفیف تر از افتادگی های متقارن ولتاژند. اما به دلیل وجود مؤلفه توالی منفی ولتاژ، در تمام مدت خطا نوساناتی با فرکانس دو برابر فرکانس شبکه در پاسخ گذرای ژنراتور ظاهر می گردد که می تواند نامطلوب باشد. گشتاورهای نوسانی و تغییرات ولتاژ خازن سمت dc که به واسطه عدم تعادل ولتاژ ژنراتور ایجاد می شود، باعث ایجاد اثرات نامطلوب بر روی قسمت های مکانیکی و خازن خازن سمت dc می شود [7]. به علاوه عدم تعادل ولتاژ شبکه باعث گرم شدن سیم پیچی های ماشین و نوسان توان خروجی ژنراتور می شود [8].

در مراجع [9-13] به مدل سازی، استخراج روابط توان، گشتاور، کنترل DFIG در حالت ماندگار و در وضعیتی که ولتاژ شبکه دارای عدم تعادل کوچک باشد، پرداخته اند. در حالت عدم تعادل ولتاژ با کنترل جریان های توالی مثبت مبدل های سمت روتور و سمت شبکه می توان توان حقیقی / راکتیو و ولتاژ خازن را کنترل کرد. در صورتی که با کنترل جریان های توالی منفی مبدل ها، می توان برخی اثرات نامطلوب را که عدم تعادل ولتاژ شبکه بر عملکرد ژنراتور می گذارد، حذف کرد. در مراجع [9-11] با استفاده از کنترل جریان توالی منفی روتور تلاش شده است که یکی از اهداف زیر برآورده شود: حذف مؤلفه توالی منفی جریان استاتور،⁷ حذف مؤلفه توالی منفی جریان روتور، حذف رپل⁸ گشتاور ناشی از توالی منفی یا حذف رپل توان خروجی ژنراتور با فرکانس دو برابر فرکانس شبکه. در مراجع [12 و 13] با استفاده از کنترل هم زمان جریان های توالی منفی مبدل های روتور و شبکه، رپل توالی منفی گشتاور الکترومکانیکی و توان خروجی ژنراتور حذف می شود.

1. Doubly-fed Induction Generator (DFIG)
2. AC
3. Rotor-side Converter (RSC)
4. Grid-side Converter (GSC)
5. Low Voltage Ride-through (LVRT)

6. Rotor
7. Stator
8. Ripple



شکل (1): سیستم توربین-ژنراتورهای DFIG تحت مطالعه متصل به شین بی نهایت

ایستادگی توربین-ژنراتور القایی دو سو تغذیه در برابر خطای نامتقارن پیشنهاد می‌شود. این روش با استفاده از کنترل مبدل روتور و با اضافه کردن مقاومت میراکننده استاتور محقق می‌شود. با استفاده از روش پیشنهادی، پیک پاسخ گذرا در لحظات وقوع و رفع خطا کاهش می‌یابد و میرایی نوسانات گذرای با فرکانس شبکه بهبود داده می‌شود. به علاوه روش پیشنهادی باعث حذف یا کاهش نوسانات نامیرای توالی منفی با دو برابر فرکانس شبکه می‌شود. مزیت راهکار پیشنهادی نسبت به حفاظت مرسوم Crowbar این است که با وقوع خطا مبدل سمت روتور و کنترل‌های آن غیرفعال نمی‌شود. این حفاظت نیاز به سخت‌افزار مقاومتی دارد و در مقایسه با روش‌هایی که به سخت‌افزار اکتیو و کانورتر سری نیاز دارند، ارزان‌تر و ساده‌تر است. به علاوه روش‌هایی که فقط مبتنی بر کنترل هستند، در برابر خطاهای شدید پاسخ مناسبی ندارند، لیکن روش پیشنهادی با ترکیب کنترل و سخت‌افزار پسیو² پاسخ به مراتب بهتری دارد.

2. روابط توربین-ژنراتور DFIG در شرایط عدم تعادل ولتاژ شبکه

قبل از پرداختن به معادلات حاکم بر سیستم و تحلیل رفتار ژنراتور فرضیات و تعاریف زیر بیان می‌شود.

فرضیات: در نوشتن معادلات ژنراتور و تحلیل‌های انجام گرفته، جهات مثبت جریان‌های سیم‌پیچ‌های روتور و استاتور به طرف داخل ماشین فرض می‌شود. همچنین، تمام روابط در حوزه یکایی (پریونیت³) بیان می‌شود مگر آنکه صریحاً ذکر گردد.

تعاریف:

1. دستگاه dq توالی مثبت (دستگاه dq^p): دستگاهی است چرخان (در خلاف جهت عقربه ساعت) با محورهای d^p و q^p و

مراجع [9-13] اگرچه به کنترل DFIG در شرایط عدم تعادل ولتاژ اختصاص دارد، لیکن به بحث خطای نامتعادل و بهبود گذر از خطای ژنراتور نمی‌پردازد؛ بلکه به کنترل ژنراتور در شرایطی که در حالت ماندگار، ولتاژ شبکه یا ولتاژ استاتور دارای درصد عدم تعادل کوچکی باشد، می‌پردازد. روش‌های این مقالات به‌زای درصد‌های عدم تعادل کوچک کارایی دارند و در شرایط عدم تعادل بزرگ به دلیل نیاز به تلاش کنترلی بزرگ و محدودیت در ظرفیت کانورتر¹ عملکرد مناسبی ندارند. در مراجع [14 و 15] به ارائه راهکار جهت بهبود قابلیت ایستادگی DFIG در برابر خطاهای نامتقارن پرداخته شده است. در مرجع [14] با استفاده از جبران سری ولتاژ ترمینال ژنراتور به وسیله مبدل سری، قابلیت گذر از خطای ژنراتور در برابر افتادگی نامتقارن ولتاژ بهبود می‌یابد. این روش مؤثر و کارآمد است، ولی به دلیل نیاز به مبدل الکترونیک قدرت سری با استاتور، روشی گران‌قیمت و پیچیده است. همچنین مرجع [15] به کنترل مبدل‌های روتور و شبکه برای حذف نوسانات گشتاور و ولتاژ خازن (ناشی از مؤلفه توالی منفی) در هنگام افتادگی ولتاژ ژنراتور می‌پردازد. لیکن این روش تنها در برابر افتادگی‌های کوچک ولتاژ عملکرد مؤثر دارد و در برابر افتادگی‌های شدید ولتاژ، به دلیل اینکه تنها متکی به کنترل است، کارایی مناسبی ندارد.

در مرجع [16] توسط نویسنده یک روش نوین ترکیبی برای بهبود قابلیت ایستادگی توربین-ژنراتور القایی دو سو تغذیه در برابر خطای نامتقارن پیشنهاد شده که به وسیله کنترل مبدل روتور و با استفاده از ایده مقاومت میراکننده استاتور نامتقارن محقق می‌شود و به کمک آن، به کلی، عدم تعادل ولتاژ استاتور برطرف می‌گردد. روش کنترلی در مرجع [16] اگرچه کارآمد است، ولی پیچیده‌تر و گران‌قیمت‌تر بوده و به محاسبات زیاد نیاز دارد.

در مقاله حاضر، ضمن تحلیل رفتار توربین-ژنراتور DFIG در برابر افتادگی نامتقارن ولتاژ، یک روش ترکیبی برای بهبود قابلیت

2. Passive
3. Per Unit

1. Converter

که T_{e0} گشتاور متوسط و $T_{e-\cos 2}$ و $T_{e-\sin 2}$ دامنه گشتاورهای نوسانی با فرکانس $2\omega_b$ است و از روابط زیر به دست می آید:

$$T_{e0} = \frac{L_m}{L_s} (\psi_{sq}^+ i_{rd}^+ - \psi_{sd}^+ i_{rq}^+ + \psi_{sq}^- i_{rd}^- - \psi_{sd}^- i_{rq}^-) \quad (6)$$

$$T_{e-\cos 2} = \frac{L_m}{L_s} (\psi_{sq}^+ i_{rd}^- - \psi_{sd}^+ i_{rq}^- + \psi_{sq}^- i_{rd}^+ - \psi_{sd}^- i_{rq}^+) \quad (7)$$

$$T_{e-\sin 2} = \frac{L_m}{L_s} (\psi_{sd}^+ i_{rd}^- + \psi_{sq}^+ i_{rq}^- - \psi_{sd}^- i_{rd}^+ - \psi_{sq}^- i_{rq}^+) \quad (8)$$

که ψ^+ و ψ^- به ترتیب، مؤلفه‌های توالی مثبت و منفی شار استاتور است.

3. تحلیل رفتار DFIG در حین خطای نامتقارن

در حالت ماندگار، اگر f^+ و f^- فازورهای مربوط به مؤلفه‌های توالی مثبت و منفی متغیرهای الکتریکی ژنراتور باشد، می توان نشان داد که مقدار متغیر f در دستگاه ساکن استاتور (دستگاه $\alpha\beta$) عبارت است از:

$$f_{\alpha\beta}(t) = f^+ e^{j\omega_b t} + f^- e^{-j\omega_b t} \quad (9)$$

به عبارت دیگر، متغیرهای الکتریکی در دستگاه استاتور دارای فرکانس $\pm\omega_b$ بوده و f^+ و f^- بردارهای ثابت‌اند. همچنین می توان متغیرهای الکتریکی ژنراتور را در دستگاه مرجع سنکرون توالی مثبت به فرم زیر نوشت:

$$f_{dq}^p = f^+ + f^- e^{-j2\omega_b t} \quad (10)$$

عبارت f_{dq}^p در رابطه فوق شامل دو مؤلفه است: یکی مؤلفه dc (f^+)، که در واقع همان مؤلفه توالی مثبت است و دیگری، مؤلفه ac (f^-)، که در واقع همان مؤلفه توالی مثبت است و دیگری، مؤلفه ac (f^-)، که در واقع ناشی از مؤلفه توالی منفی (f^-) است؛ بنابراین، در حالت ماندگار در دستگاه توالی مثبت، مؤلفه توالی مثبت به صورت dc و مؤلفه توالی منفی به صورت ac با فرکانس $2\omega_b$ ظاهر می شود. به همین ترتیب، در دستگاه توالی منفی در حالت ماندگار، مؤلفه توالی منفی به صورت dc و مؤلفه توالی مثبت به صورت ac با فرکانس $2\omega_b$ ظاهر می شود؛ یعنی

$$f_{dq}^n = f^+ e^{j2\omega_b t} + f^- \quad (11)$$

بنابراین، در حالت ماندگار، همه مقادیر توالی مثبت (توالی منفی) شار، ولتاژ، جریان روتور و استاتور در دستگاه سنکرون توالی مثبت (توالی منفی) مقادیر dc بوده و مشتقات آن برابر صفر است. با توجه به روابط (1) و (2) و صرف نظر از مقاومت استاتور و با در نظر گرفتن $\omega_s = 1 pu$ ، می توان روابط زیر را بین مؤلفه‌های توالی مثبت و منفی ولتاژ و شار استاتور در حالت ماندگار نوشت:

سرعت زاویه‌ای ω_b (سرعت سنکرون الکتریکی). این دستگاه در واقع همان دستگاه dq سنکرون بوده و در حالت عادی، معادلات ماشین در این دستگاه بیان می شود.

2. دستگاه dq توالی منفی (دستگاه dq^n): دستگاهی است چرخان با محورهای d^n و q^n که سرعت زاویه‌ای $-\omega_b$ دارد. برخلاف دستگاه توالی مثبت، این دستگاه در جهت عقربه ساعت می چرخد. معادلات دینامیکی حاکم بر ماشین در سیستم مرجع سنکرون توسط نویسنده در مرجع [17] آمده است. با تعمیم این معادلات، روابط ولتاژ استاتور و روتور در دستگاه‌های سنکرون توالی مثبت و منفی، به صورت زیر بیان می شود. بالانویس p و n به ترتیب، نشان‌دهنده متغیرها در دستگاه‌های توالی مثبت و منفی است.

$$v_{sdq}^p = R_s i_{sdq}^p + j \omega_s \psi_{sdq}^p + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{sdq}^p}{dt} \quad (1)$$

$$v_{sdq}^n = R_s i_{sdq}^n - j \omega_s \psi_{sdq}^n + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{sdq}^n}{dt} \quad (2)$$

$$v_{rdq}^p = R_r' i_{rdq}^p + \frac{L_r'}{\omega_b} \frac{di_{rdq}^p}{dt} + j \omega_2 L_r' i_{rdq}^p + e_{dq}^p \quad (3)$$

$$e_{dq}^p = \frac{L_m}{L_s} (v_{sdq}^p - \frac{R_s}{L_s} \psi_{sdq}^p - j \omega_r \psi_{sdq}^p) \quad (4)$$

$$v_{rdq}^n = R_r' i_{rdq}^n + \frac{L_r'}{\omega_b} \frac{di_{rdq}^n}{dt} - j (\omega_s + \omega_r) L_r' i_{rdq}^n + e_{dq}^n \quad (4)$$

$$e_{dq}^n = \frac{L_m}{L_s} (v_{sdq}^n - \frac{R_s}{L_s} \psi_{sdq}^n - j \omega_r \psi_{sdq}^n)$$

که v ، ψ ، i به ترتیب، متغیرهای ولتاژ، شار و جریان بوده و زیرنویس‌های s و r به ترتیب، نماینده استاتور و روتور است. همچنین، R_s مقاومت اهمی استاتور، ω_b فرکانس زاویه‌ای پایه، ω_s فرکانس زاویه‌ای استاتور، ω_r سرعت الکتریکی چرخش روتور و ω_2 فرکانس لغزش است. به علاوه R_r' و L_r' مقاومت و اندوکتانس گذرای روتور بوده و e_d و e_q (روابط (3) و (4)) مؤلفه‌های dq ولتاژهای ضد محرکه روتور است که تابعی از ولتاژ و شار استاتور بوده و در واقع، اثر دینامیک استاتور را بر روی روتور منعکس می کنند. درباره ولتاژهای ضد محرکه و اثرات آن بر عملکرد ژنراتور در حالت خطای متعادل، به تفصیل در مراجع [4-5] بحث شده است. همچنین، رابطه گشتاور الکترومکانیکی ماشین را در شرایط عدم تعادل می توان چنین نوشت [9]:

$$T_e(t) = T_{e0} + T_{e-\cos 2} \cos(2\omega_b t) + T_{e-\sin 2} \sin(2\omega_b t) \quad (5)$$

گذرای شار استاتور در دستگاه توالی مثبت می‌نامیم) یک عبارت نوسانی میرا با فرکانس شبکه بوده و ناشی از پاسخ طبیعی دینامیک استاتور در برابر افتادگی ولتاژ است. این مؤلفه از تغییر آنی شار در لحظه وقوع خطا جلوگیری می‌کند. هر کدام از مؤلفه‌های ذکر شده شار استاتور باعث القای ولتاژهای ضد محرکه در روتور می‌شوند.

با توجه به مرجع [16] ولتاژ ضد محرکه روتور در حین خطا دارای سه مؤلفه است: مؤلفه اول یا مؤلفه ماندگار توالی مثبت که مقدار آن کوچک بوده و متناسب با حاصل ضرب لغزش در ولتاژ استاتور است. مؤلفه دوم یا مؤلفه نوسانی نامیرای ناشی از توالی منفی ولتاژ شبکه که بسته به درصد عدم تعادل ولتاژ می‌تواند باعث ایجاد نوسانات قابل ملاحظه گشتاور، ولتاژ خازن و... گردد. مؤلفه سوم یا مؤلفه گذرا به صورت نوسانی میرا بوده و می‌تواند در لحظات ابتدایی وقوع خطا دارای اندازه قابل ملاحظه‌ای گردد و در نتیجه، باعث عبور جریان‌های گذرای بزرگ از روتور شود.

4. بهبود قابلیت ایستادگی DFIG در برابر خطای

نامتقارن

در این بخش، یک روش ترکیبی برای بهبود قابلیت گذر از خطای DFIG در برابر خطای نامتقارن پیشنهاد می‌شود که تأکید آن بر کاهش پیک و افزایش میرایی نوسانات پاسخ گذرای DFIG (مثل جریان روتور، گشتاور الکترومکانیکی، توان لحظه‌ای روتور و ولتاژ ضد محرکه) است. این روش با استفاده از کنترل مبدل روتور و با اضافه کردن مقاومت میراکننده استاتور (SDR) محقق می‌شود. ساختار و مزایای مقاومت میراکننده استاتور در بهبود قابلیت گذر از خطای DFIG در برابر خطاهای متقارن، به تفصیل در مراجع [3-4] توسط نویسندگان توضیح داده شده است که در ادامه، مختصراً به آن اشاره می‌شود. مقاومت میراکننده استاتور (SDR) همان‌طور که در شکل (2) نشان داده شده، به‌طور سری با سیم‌پیچ استاتور قرار گرفته و از یک مقاومت اهمی سه فاز به‌همراه کلیدهای IGBT کنار گذر دوطرفه تشکیل می‌شود. این حفاظت گذر از خطا در حالت عادی غیر فعال بوده و مقاومت‌های سری نقشی ایفا نمی‌کنند.

در صورت وقوع خطا کلیدهای کنار گذر غیرفعال شده و مقاومت‌های سری در مدار قرار می‌گیرند. در این شرایط، مقاومت معادل استاتور افزایش یافته و برابر $R_{s_{eq}} = R_s + R_{SDR}$ می‌شود.

$$v_{s0}^+ \cong j \omega_s \psi_{s0}^+ = j \psi_{s0}^+ \quad (12)$$

$$v_{s0}^- \cong -j \omega_s \psi_{s0}^- = -j \psi_{s0}^- \quad (13)$$

که v_s^+ و ψ_s^+ مؤلفه‌های توالی مثبت ولتاژ و شار استاتور و v_s^- و ψ_s^- مؤلفه‌های توالی منفی ولتاژ و شار استاتور است. در روابط فوق، بالانویس p (نشان‌دهنده دستگاه توالی مثبت (منفی)) و بالانویس $-$ نشان‌دهنده مؤلفه توالی مثبت (منفی) است.

به همین ترتیب، با توجه به روابط (10) و (11) و با جایگذاری روابط (12) و (13) در روابط (3) و (4)، مؤلفه‌های توالی مثبت و منفی ولتاژ ضد محرکه در دستگاه توالی مثبت و منفی در حالت ماندگار عبارت است از:

$$e_{dq0}^+ \cong \frac{L_m}{L_s} (j s_0 \psi_{sdq0}^+) \cong \frac{L_m}{L_s} (s_0 v_{sdq0}^+) \quad (14)$$

$$e_{dq0}^- = -\frac{L_m}{L_s} j (2 - s_0) \psi_{sdq0}^- = \frac{L_m}{L_s} (2 - s_0) v_{sdq0}^- \quad (15)$$

$s_0 = \omega_2 = \omega_s - \omega_r$ ، در روابط (14) و (15) لغزش ژنراتور در نقطه کار است. در رابطه (14) مؤلفه توالی مثبت ولتاژ ضد محرکه روتور وابسته به لغزش و مؤلفه توالی مثبت ولتاژ استاتور است. با توجه به کوچکی لغزش، این ولتاژ در شرایط ماندگار نسبتاً کوچک و کمتر از 0/3 پریونیت است. مؤلفه توالی منفی ولتاژ ضد محرکه در رابطه (15) وابسته به مؤلفه توالی منفی ولتاژ و عبارت $(2 - s_0)$ است. عبارت $(2 - s_0)$ برای بازه تغییرات لغزش $-0.3 \leq s_0 \leq 0.3$ در بازه $1/7 - 2/3$ تغییر می‌کند. در شرایطی که اندازه مؤلفه توالی منفی ولتاژ کوچک باشد (کمتر از 2 در صد)، مقدار ولتاژ ضد محرکه بزرگ نخواهد بود. اما در شرایطی که خطای نامتقارن رخ دهد، مقدار مؤلفه توالی منفی ولتاژ بزرگ خواهد شد و با توجه به بزرگی عبارت $(2 - s_0)$ اندازه ولتاژ ضد محرکه ممکن است بیش از حد بزرگ شود؛ برای مثال، اگر لغزش ژنراتور 0/25- و اندازه مؤلفه توالی منفی ولتاژ 20 درصد باشد، بزرگی مؤلفه توالی منفی ولتاژ برابر با 0/45 پریونیت می‌شود.

در مرجع [16] توسط نویسندگان به استخراج روابط گذرای شار استاتور و ولتاژ ضد محرکه روتور در حین خطای نامتعادل پرداخته شده که با توجه به آن، پاسخ گذرای شار استاتور در حین خطا شامل 3 مؤلفه است. مؤلفه اول (ψ_{s2}^+) که یک مؤلفه dc بوده و در واقع، مؤلفه ماندگار توالی مثبت شار در حین خطاست. مؤلفه دوم ($\psi_{s2}^- e^{-j2\omega_b t}$) یک مؤلفه نوسانی نامیرا با فرکانس دو برابر فرکانس شبکه بوده و ناشی از مؤلفه توالی منفی ولتاژ و شار استاتور است. مؤلفه سوم یا مؤلفه گذرا که آن را با ψ_{fs2}^p نشان داده (و آن را مؤلفه

1.4. کنترل مبدل روتور در دستگاه توالی مثبت

پیش از وقوع خطا ولتاژ شبکه و ژنراتور متعادل و فاقد مؤلفه توالی منفی است. در این حالت، مبدل روتور در مود کنترل توان حقیقی/راکتیو قرار داشته و در دستگاه توالی مثبت کنترل می‌شود. با وقوع خطای نامتقارن و فعال شدن حفاظت‌های SDR سه فاز، برای لحظات ابتدایی بعد از وقوع خطا (100 میلی ثانیه) مبدل روتور را در دستگاه توالی مثبت و در مود میرایی فعال شار کنترل می‌کنیم تا نوسانات پاسخ گذرا به سرعت میرا گردد. سپس کنترل مبدل روتور را به دستگاه‌های توالی مثبت و منفی منتقل می‌کنیم. هدف از کنترل در دستگاه توالی مثبت، تنظیم توان حقیقی و راکتیو و هدف از کنترل مبدل در دستگاه توالی منفی، حذف یا کاهش نوسانات با فرکانس دو برابر شبکه از گشتاور الکترومکانیکی ژنراتور یا جریان روتور است.

با توجه به مرجع [18] ارتباط تنگاتنگی بین میرایی شار استاتور و میرایی پاسخ گذرای DFIG وجود دارد. پس بهبود میرایی شار استاتور از زمان نشست و نوسانات پاسخ گذرای ژنراتور می‌کاهد. بنابراین، برای بهبود میرایی پاسخ گذرای ژنراتور و استخراج مؤلفه مرجع جریان روتور در دستگاه توالی مثبت، از سیگنال کمکی مانند شار استاتور استفاده می‌شود. انتخاب جریان مرجع روتور در دستگاه توالی مثبت به فرم زیر، باعث بهبود میرایی دینامیک استاتور می‌شود.

$$\mathbf{i}_{rdq-ref}^p = -k_{flux-damper} (\psi_s^p - \psi_{s0}^p) \quad (16)$$

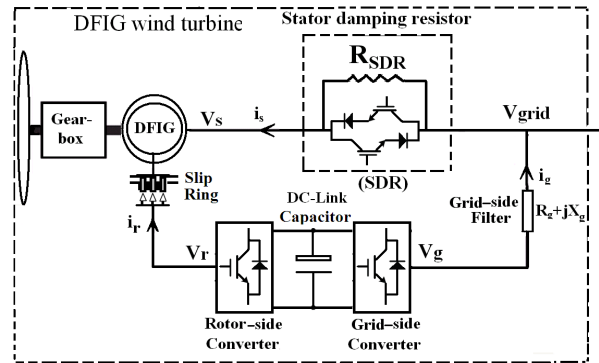
که در آن، مقدار ماندگار شار استاتور در حین خطا در دستگاه توالی مثبت است. در حالت خطای نامتقارن، ثابت و متناسب با ولتاژ استاتور است؛ اما در حالت خطای نامتقارن، ψ_{s0}^p شامل یک جمله ثابت متنظر با مؤلفه توالی مثبت شار و یک جمله با فرکانس $2\omega_b$ متنظر با مؤلفه توالی منفی شار است. همچنین، بردار شار در حین خطا در دستگاه توالی مثبت است.

اگر شار استاتور در دستگاه توالی مثبت را از یک فیلتر میان‌گذر با فرکانس $2\omega_b$ عبور دهیم، مؤلفه با فرکانس دو برابر حذف شده و خروجی را که شامل مؤلفه توالی مثبت و مؤلفه گذراست، با $\psi_{s-notch}^p$ نشان می‌دهیم. همچنین، اگر ψ_{s0}^p را از فیلتر میان‌گذر با فرکانس $2\omega_b$ عبور دهیم، مؤلفه با فرکانس دو برابر حذف شده و خروجی تنها شامل مؤلفه توالی مثبت ψ_{s2}^+ است.

می‌توان نشان داد که عبارت $(\psi_s^p - \psi_{s0}^p)$ در رابطه (16) با عبارت $(\psi_{s-notch}^p - \psi_{s2}^+)$ برابر است. بنابراین، رابطه (16) را می‌توان به فرم زیر نیز نوشت:

$$\mathbf{i}_{rdq-ref}^p = -k_{flux-damper} (\psi_{s-notch}^p - \psi_{s2}^+) \quad (17)$$

محاسبه عبارت ثابت ψ_{s2}^+ در رابطه (17) ساده‌تر از عبارت متغیر



شکل (2): توربین ژنراتور DFIG با مقاومت میراکننده استاتور

حفاظت SDR قابلیت گذر از خطای DFIG را به نحو بسیار

مؤثری بهبود می‌بخشد. دلایل این امر عبارت‌اند از:

1. با فعال شدن SDR و افزایش مقاومت معادل استاتور، میرایی مدهای استاتور و در نتیجه، میرایی پاسخ گذرای DFIG بهبود می‌یابد. این مطلب در مرجع [3] نشان داده شده است.

2. با فعال شدن SDR و افزایش مقاومت معادل استاتور، مقاومت گذرای روتور R_r' ، $R_r' = R_r + \left(\frac{L_m}{L_s}\right)^2 R_{s0}$ ، افزایش یافته و در نتیجه جریان گذرای روتور محدود می‌شود.

3. با فعال شدن SDR و قرارگرفتن مقاومت‌های میراکننده به‌طور سری با استاتور، افت ولتاژ کمتری در هنگام وقوع خطا به پایانه ژنراتور تحمیل می‌شود؛ بنابراین، افتادگی ولتاژ پایانه ژنراتور با فعال شدن SDR کاهش یافته و از شدت گذراهای ژنراتور کاسته می‌شود.

هدف از روش ترکیبی، کاهش پیک پاسخ گذرا در لحظات وقوع و رفع خطا، بهبود میرایی نوسانات گذرای با فرکانس شبکه و حذف یا محدود کردن نوسانات نامیرای با دو برابر فرکانس شبکه است. روش کار به این صورت است که با وقوع خطای نامتقارن، حفاظت‌های SDR هر سه فاز را فعال می‌کنیم. برای لحظات ابتدایی بعد از وقوع خطا (100 میلی ثانیه) مبدل روتور را در دستگاه توالی مثبت و در مود میرایی فعال شار کنترل می‌کنیم تا نوسانات پاسخ گذرا به سرعت میرا گردد. سپس کنترل مبدل روتور را به دستگاه‌های توالی مثبت و منفی منتقل می‌کنیم؛ به‌طوری‌که در دستگاه توالی مثبت به تنظیم توان حقیقی و راکتیو می‌پردازیم و در دستگاه توالی منفی، نوسانات پاسخ ژنراتور ناشی از مؤلفه‌های توالی منفی را محدود می‌کنیم.

با زمان ψ_{s0}^p در رابطه (16) است.

$$i_{rd-ref}^n = \left(\frac{\psi_{sd}^+ \psi_{sd}^- - \psi_{sq}^+ \psi_{sq}^-}{(\psi_{sd}^+)^2 + (\psi_{sq}^+)^2} \right) i_{rd}^+ + \left(\frac{\psi_{sd}^+ \psi_{sq}^- + \psi_{sq}^+ \psi_{sd}^-}{(\psi_{sd}^+)^2 + (\psi_{sq}^+)^2} \right) i_{rq}^+ \quad (18)$$

$$i_{rq-ref}^n = \left(\frac{\psi_{sd}^+ \psi_{sq}^- + \psi_{sq}^+ \psi_{sd}^-}{(\psi_{sd}^+)^2 + (\psi_{sq}^+)^2} \right) i_{rd}^+ + \left(\frac{\psi_{sq}^+ \psi_{sq}^- - \psi_{sd}^+ \psi_{sd}^-}{(\psi_{sd}^+)^2 + (\psi_{sq}^+)^2} \right) i_{rq}^+$$

شکل‌های (3) و (4) به ترتیب، کنترل جریان روتور را در شرایط عادی و در حین خطای نامتقارن در دستگاه توالی مثبت و منفی نشان می‌دهد. در شرایط نرمال، جریان‌های مرجع توالی منفی برابر با صفر قرار داده می‌شود.

2.2.4. محدودکردن جریان توالی منفی روتور

در بخش قبل (بخش 1.2.4)، کنترل مبدل روتور در دستگاه توالی منفی ارائه شد که هدف آن حذف نوسانات با فرکانس دو برابر از گشتاور الکترومکانیکی ژنراتور بود. اما همان‌گونه که در شبیه‌سازی‌ها ملاحظه خواهد شد، حذف نوسانات توالی منفی گشتاور به‌ازای خطاهای با محتوای توالی منفی بالا به‌دلیل نیاز به مبدل روتور با ظرفیت بزرگ همیشه امکان‌پذیر نیست.

برای این منظور، در این بخش پیشنهاد می‌شود که به‌جای حذف مؤلفه‌های توالی منفی گشتاور، نوسانات توالی منفی جریان روتور را محدود کنیم. با توجه به رابطه (4) ارتباط بین مؤلفه‌های توالی منفی ولتاژ، جریان و ولتاژ ضد محرکه روتور در حالت ماندگار، به‌صورت روابط (19) و (20) بیان می‌شود.

2.4. کنترل مبدل روتور در دستگاه توالی منفی

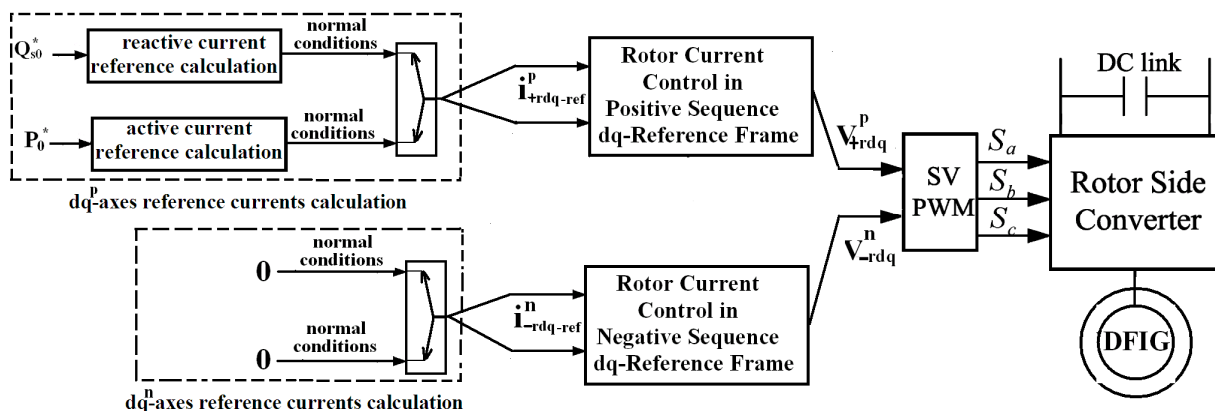
برای کنترل مبدل روتور در دستگاه توالی منفی، رویکردهای مختلفی می‌توان اتخاذ کرد. یک رویکرد حذف مؤلفه‌های گشتاور ژنراتور ناشی از توالی منفی (متناظر با فرکانس $2\omega_b$) است. رویکرد دیگر، محدودکردن جریان توالی منفی روتور است. در ادامه، به تحلیل جزئی‌تر هر کدام از روش‌های ذکرشده پرداخته می‌شود.

1.2.4. حذف کامل مؤلفه‌های گشتاور نوسانی ناشی از توالی

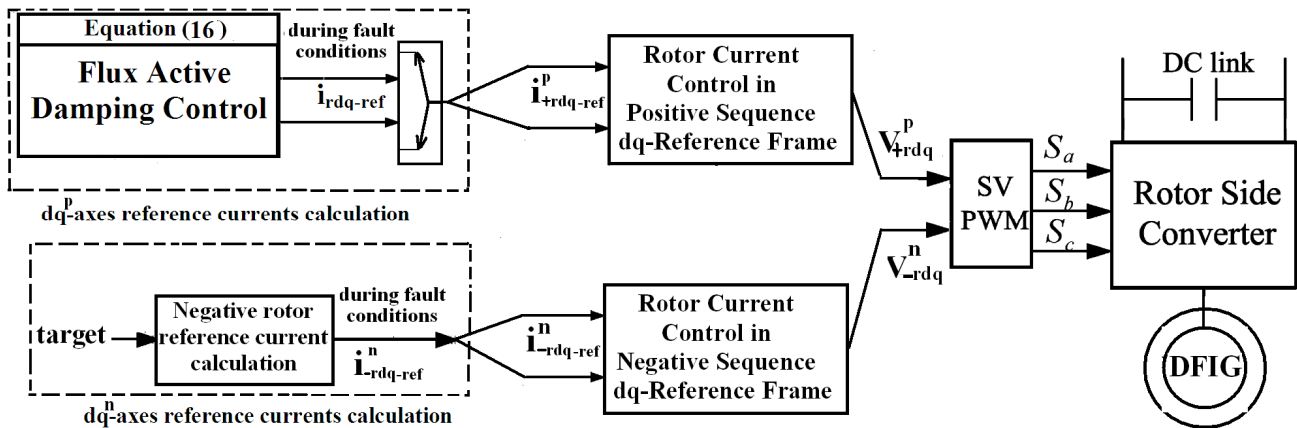
منفی

در این قسمت، مؤلفه‌های مرجع توالی منفی جریان روتور را به‌گونه‌ای تعیین می‌کنیم که مؤلفه‌های گشتاور ژنراتور متناظر با فرکانس $2\omega_b$ برابر صفر گردد. از آنجاکه مؤلفه توالی منفی در دستگاه توالی منفی به‌صورت dc است، کنترل مؤلفه توالی منفی جریان روتور در دستگاه توالی منفی با کنترل‌کننده PI انجام می‌گیرد. برای این منظور، مؤلفه‌های i_{rd}^- و i_{rq}^- باید به‌گونه‌ای باشند که $T_{e-\sin 2}$ و $T_{e-\cos 2}$ در روابط (7) و (8) برابر با صفر باشد. با این فرض، اگر مؤلفه‌های مرجع جریان روتور در دستگاه توالی منفی به فرم زیر (رابطه 18)) انتخاب گردد و حلقه کنترل جریان روتور نیز به‌اندازه کافی سریع باشد، آنگاه نوسانات گشتاور با فرکانس $2\omega_b$ حذف می‌گردد.

با جای‌گذاری مؤلفه‌های توالی مثبت و منفی شار استاتور بر حسب ولتاژ استاتور ($\psi_s^+ \approx \frac{v_s^+}{j\omega_s}$ و $\psi_s^- \approx \frac{v_s^-}{-j\omega_s}$) می‌توان رابطه (18) را برحسب مؤلفه‌های توالی مثبت و منفی ولتاژ استاتور نوشت.



شکل (3): کنترل جریان روتور در شرایط عادی و نرمال در دستگاه‌های توالی مثبت و منفی



شکل (4): کنترل جریان روتور در حین خطا در دستگاه‌های توالی مثبت و منفی

مؤلفه توالی منفی ولتاژ 0/2 پریونیت است. در این شرایط، برای حذف مؤلفه‌های توالی منفی گشتاور و ولتاژ خازن، نیازمند مبدل با ظرفیت بیشتر از 0/5 پریونیت هستیم. بنابراین، حذف مؤلفه‌های توالی منفی گشتاور برای مواقعی که محتوای توالی منفی ولتاژ ژنراتور بالا نباشد، می‌تواند مفید باشد.

سیستم تحت مطالعه در شکل (1) نشان داده شده و پارامترهای آن نیز در پیوست آمده است. شکل‌های (5-9) پاسخ‌های جریان روتور و گشتاور الکترومکانیکی را برای خطای تک‌فاز به زمین با افتادگی 30 درصد نشان می‌دهد. خطا در زمان $t = 1.2 \text{ sec}$ شروع شده و به مدت 600 میلی‌ثانیه طول می‌کشد. در این شرایط، محتوای توالی منفی ولتاژ ژنراتور برابر با 10 درصد است. در شکل (5)، از کنترل گذر از خطای پیشنهادی (شامل SDR و کنترل پیشنهادی مبدل روتور ارائه شده در بخش‌های (1.4) و (1.2.4)) استفاده می‌شود، در صورتی که در شکل (7)، هیچ حفاظت گذر از خطایی فعال نمی‌شود. در شکل (7)، نوسانات شدید جریان روتور و گشتاور به واسطه وجود مؤلفه توالی منفی ولتاژ در تمام مدت طول خطا وجود دارد. در شکل (8)، تنها حفاظت SDR فعال است که نتایج آن کاهش دامنه نوسات است، ولی همچنان نوسانات گشتاور به دلیل وجود مؤلفه توالی منفی، در تمام طول خطا وجود دارد.

در شکل (9)، تنها کنترل پیشنهادی مبدل روتور فعال است. این امر منجر به کاهش قابل ملاحظه نوسانات گشتاور در مقایسه با شکل‌های (7) و (8) می‌شود. پاسخ شکل‌های (5) و (9) به دلیل اینکه در هر دو کنترل پیشنهادی فعال است، تا حدود زیادی مشابه است. فقط به دلیل عدم وجود SDR در شکل (9) پیک پاسخ گذرا اندکی بیشتر است.

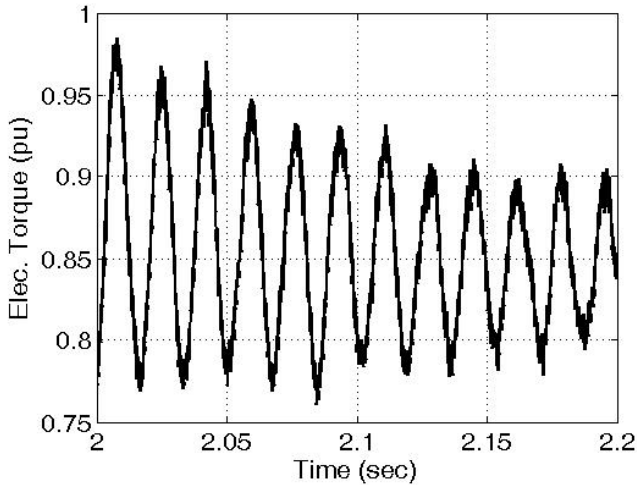
$$v_{rdq}^- = R_r' i_{rdq}^- - j(\omega_s + \omega_r) L_r' i_{rdq}^- + e_{dq}^- \quad (19)$$

$$e_{dq}^- = \frac{L_m}{L_s} (v_{sdq}^- - \frac{R_s}{L_s} \psi_{sdq}^- - j\omega_r \psi_{sdq}^-) \quad (20)$$

اگر در حین خطا ولتاژهای کنترلی روتور در دستگاه توالی منفی (v_{rdq}^-) را برابر با e_{dq}^- انتخاب کنیم، در این صورت، ولتاژهای روتور در برابر ولتاژهای ضد محرکه توالی منفی قرار گرفته و با وجود مقاومت SDR سری با استاتور، دامنه جریان توالی منفی روتور محدود می‌شود. در بخش بعد، به شبیه‌سازی و مقایسه روش‌های پیشنهادی پرداخته می‌شود.

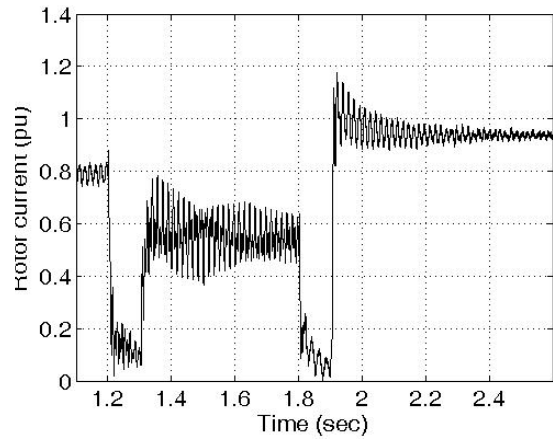
5. مطالعات شبیه‌سازی

در این قسمت، قابلیت روش‌های ارائه شده در بخش (4) را برای بهبود قابلیت ایستادگی DFIG در برابر خطاهای نامتقارن بررسی می‌کنیم. با توجه به شبیه‌سازی‌ها مقاومت میراکننده استاتور قادر است که پیک جریان و گشتاور ژنراتور را در لحظات وقوع و رفع خطا محدود کند. اما اگر محتوای توالی منفی ولتاژ ژنراتور از یک حد معین بزرگ‌تر باشد، مبدل روتور با ظرفیت معمول (حدود 0/4 پریونیت) قابلیت حذف نوسانات گشتاور و ولتاژ خازن را که به واسطه مؤلفه توالی منفی ظاهر می‌شود، نخواهد داشت. مؤلفه توالی منفی ولتاژ ضد محرکه در رابطه (20) وابسته به مؤلفه توالی منفی شار و عبارت $(2-s_0)$ است. در شرایطی که اندازه مؤلفه توالی منفی ولتاژ کوچک باشد، مقدار ولتاژ ضد محرکه بزرگ نخواهد بود. اما در شرایطی که خطای نامتقارن با دامنه عمیق رخ دهد، مقدار مؤلفه توالی منفی ولتاژ بزرگ خواهد شد و با توجه به بزرگی عبارت $(2-s_0)$ اندازه ولتاژ ضد محرکه ممکن است بیش از حد بزرگ شود. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که برای خطای تک‌فاز به زمین با افتادگی 60 درصد ولتاژ پایانه ژنراتور، دامنه

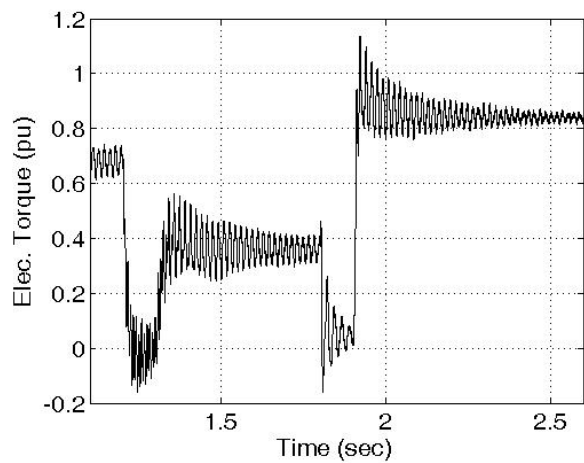


(ب)

شکل (6): پاسخ گشتاور DFIG با حفاظت پیشنهادی در برابر 30 درصد افتادگی ولتاژ فاز a ژنراتور الف. گشتاور ماشین در حین خطا؛ ب. گشتاور ماشین بعد از رفع خطا

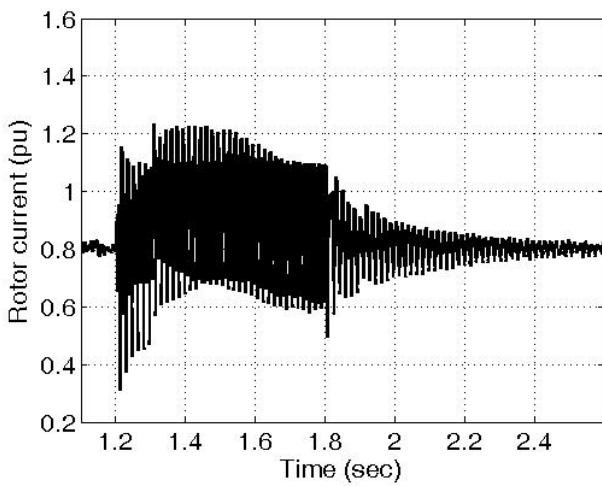


(الف)

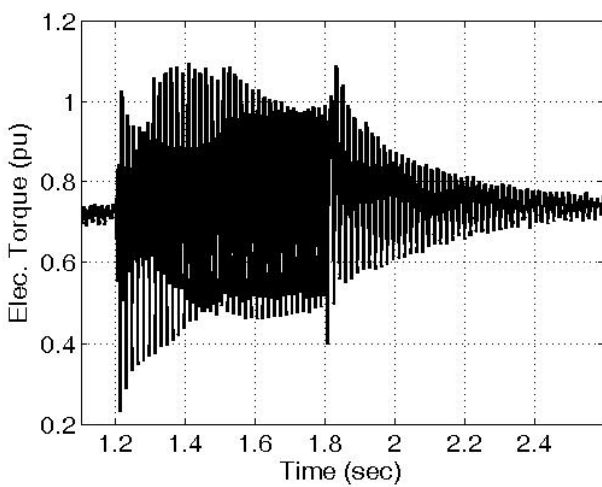


(ب)

شکل (5): DFIG با حفاظت پیشنهادی در برابر 30 درصد افتادگی ولتاژ فاز a ژنراتور الف. جریان روتور؛ ب. گشتاور الکترومکانیکی

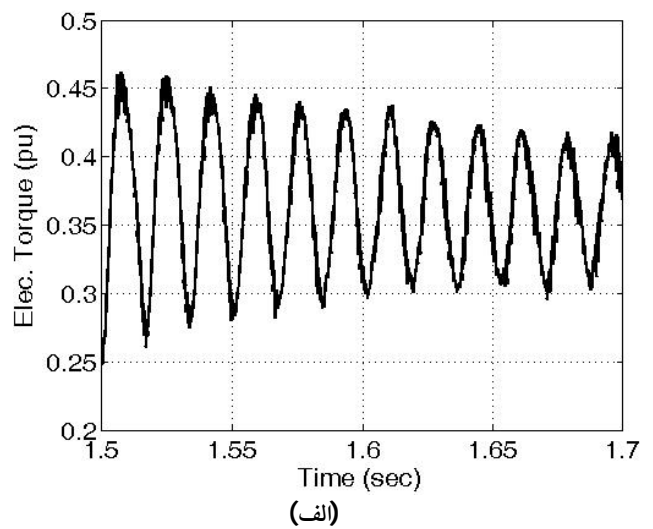


(الف)

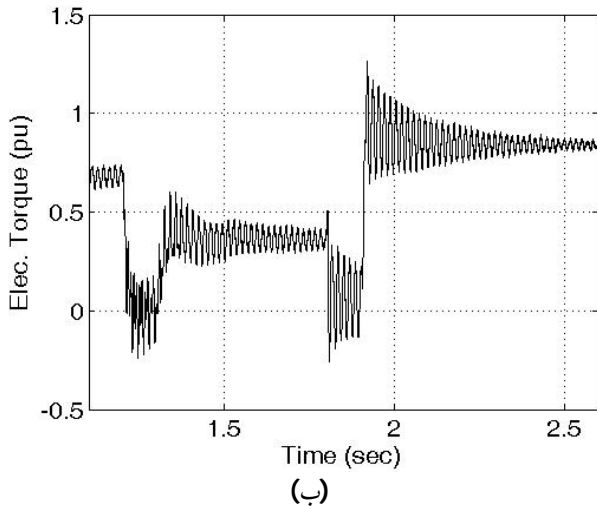


(ب)

شکل (7): DFIG در حالت بدون حفاظت در برابر 30 درصد افتادگی ولتاژ فاز a ژنراتور الف. جریان روتور؛ ب. گشتاور الکترومکانیکی



(الف)



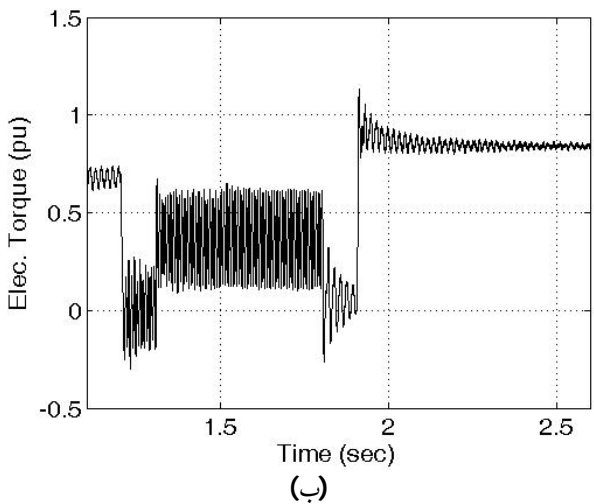
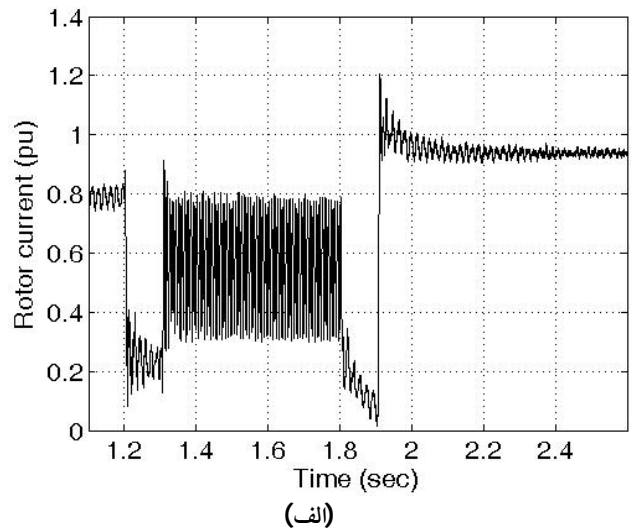
شکل (9): DFIG در حالت فقط کنترل پیشنهادی بدون SDR در برابر 30 درصد افتادگی ولتاژ فاز a ژنراتور الف. جریان روتور؛ ب. گشتاور الکترومکانیکی

لذا روشن است که روش‌های پیشنهادی، به‌خوبی نوسان‌های ناشی از مؤلفه توالی منفی گشتاور را حذف می‌کنند و قابلیت گذر از خطای DFIG را به‌نحو بسیار خوبی بهبود می‌دهند. عیب این روش نیاز به مبدل روتور با ظرفیت بزرگ و بیش از حد معمول (سه‌ازای خطاهای بزرگ) است.

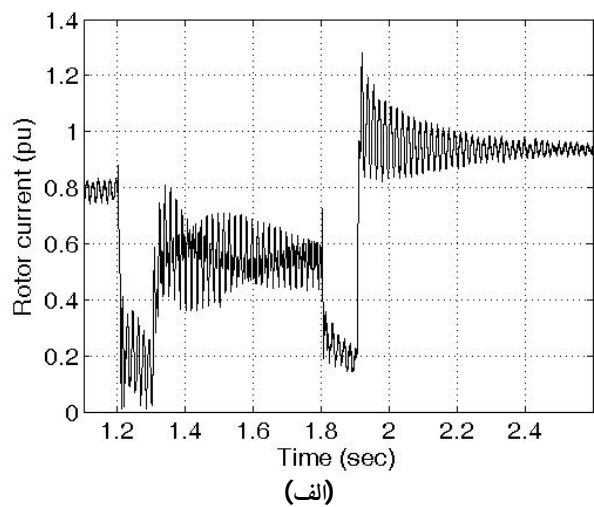
شکل‌های (10-12) پاسخ‌های جریان روتور و گشتاور الکترومکانیکی را برای خطای تک‌فاز به زمین با افتادگی 80 درصد نشان می‌دهد. خطا در زمان $t = 1.2 \text{ sec}$ شروع شده و به‌مدت 600 میلی ثانیه طول می‌کشد. در این شرایط، محتوای توالی منفی ولتاژ ژنراتور برابر با 26 درصد است.

در شکل (10)، از کنترل گذر از خطای پیشنهادی (شامل SDR و روش‌های پیشنهادی در بخش‌های (1.4) و (1.2.4) استفاده می‌شود، در صورتی‌که در شکل (11) از کنترل گذر از خطای پیشنهادی (شامل SDR و روش‌های پیشنهادی در بخش‌های (1.4) و (2.2.4) استفاده می‌شود. به‌عبارت دیگر در شکل (10)، روش پیشنهادی با رویکرد حذف مؤلفه توالی منفی گشتاور اعمال می‌شود و در شکل (11) روش پیشنهادی با رویکرد محدود کردن جریان توالی منفی روتور اعمال می‌شود. در شکل (12) پاسخ جریان روتور و گشتاور نشان داده شده در صورتی که هیچ حفاظت گذر از خطایی فعال نیست.

از مقایسه شکل‌های (10) و (11) روشن است که هر دو رویکرد کنترلی مبدل روتور در دستگاه توالی منفی (یعنی حذف مؤلفه توالی منفی گشتاور یا محدود کردن جریان توالی منفی روتور) جریان روتور

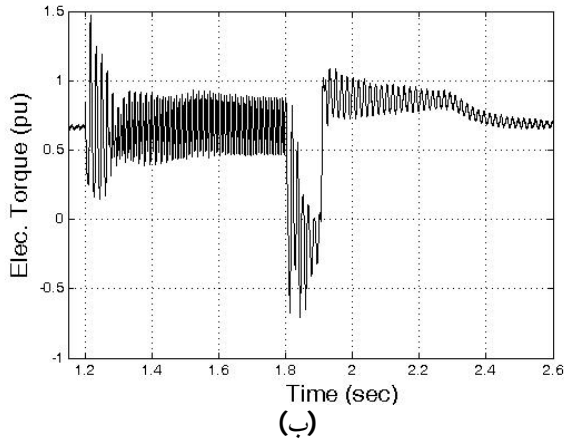


شکل (8): DFIG در حالت فقط حفاظت SDR در برابر 30 درصد افتادگی ولتاژ فاز a ژنراتور الف. جریان روتور؛ ب. گشتاور الکترومکانیکی

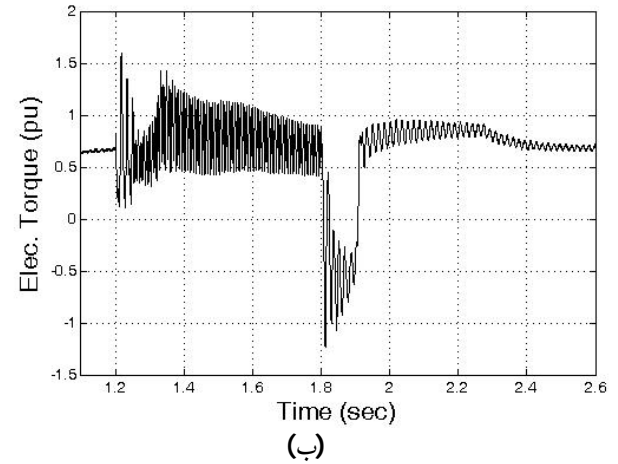
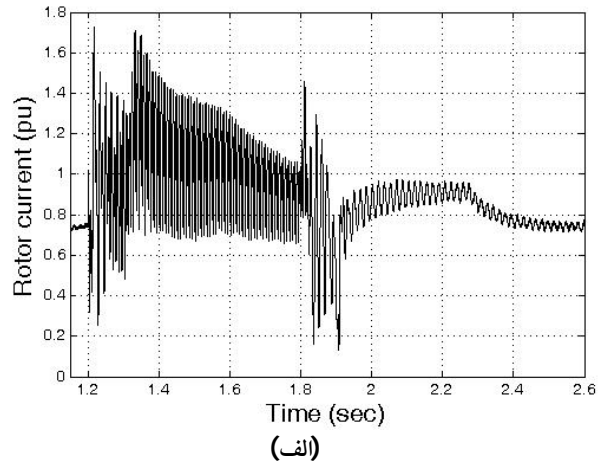


شکل (9): DFIG در حالت فقط کنترل پیشنهادی بدون SDR در برابر 30 درصد افتادگی ولتاژ فاز a ژنراتور الف. جریان روتور؛ ب. گشتاور الکترومکانیکی

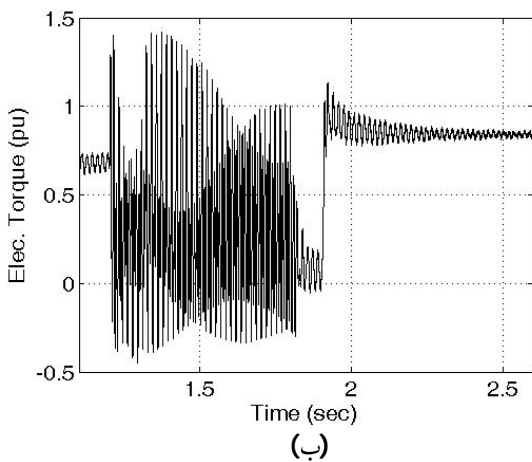
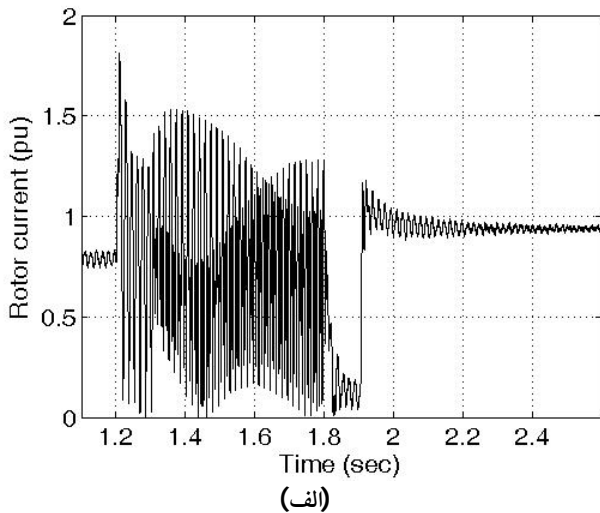
را به زیر 2 پریونیت (یعنی حد مجاز در مواقع گذرا) محدود می کنند. اما رویکرد دوم یعنی کاهش مؤلفه توالی منفی جریان روتور عملکرد بهتری دارد.



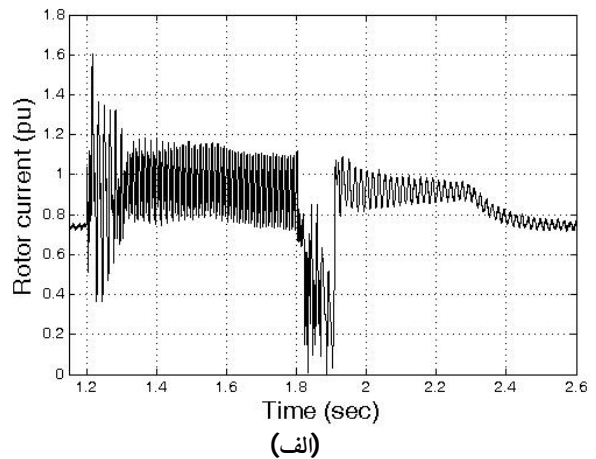
شکل (11): پاسخ های DFIG با کنترل گذر از خطای پیشنهادی (شامل SDR و روش های پیشنهادی بخش های (1.4) و (2.2.4)) با رویکرد محدود کردن جریان توالی منفی روتور در برابر 80 درصد افتادگی ولتاژ فاز a ژنراتور الف. جریان روتور؛ ب. گشتاور الکترومکانیکی



شکل (10): پاسخ های DFIG با کنترل گذر از خطای پیشنهادی (شامل SDR و روش های پیشنهادی در بخش های (1.4) و (1.2.4)) با رویکرد حذف مؤلفه های توالی منفی گشتاور در برابر 80 درصد افتادگی ولتاژ فاز a ژنراتور الف. جریان روتور؛ ب. گشتاور الکترومکانیکی



شکل (12): DFIG در حالت بدون حفاظت در برابر 80 درصد افتادگی ولتاژ فاز a ژنراتور الف. جریان روتور؛ ب. گشتاور الکترومکانیکی



نوسانات گشتاور نیز در مقایسه با شکل (13-الف) بیشتر است.

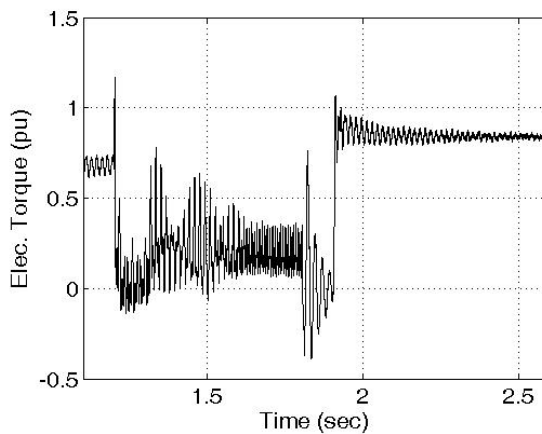
6. نتیجه گیری

در این مقاله، یک روش ترکیبی برای بهبود قابلیت گذر از خطای DFIG در برابر خطای نامتقارن پیشنهاد شد. این روش با استفاده از کنترل مبدل روتور و با اضافه کردن مقاومت میراکنده استاتور (SDR) محقق گردید. هدف از روش ترکیبی، کاهش پیک پاسخ گذرا در لحظات وقوع و رفع خطا، بهبود میرایی نوسانات گذرای با فرکانس شبکه و حذف یا محدود کردن نوسانات نامیرای با دو برابر فرکانس شبکه بود. روش کار به این صورت بود که با وقوع خطای نامتقارن، حفاظت‌های SDR هر سه فاز را فعال کردیم. برای لحظات ابتدایی بعد از وقوع خطا مبدل روتور در دستگاه توالی مثبت و در مود میرایی فعال شار کنترل شد تا نوسانات پاسخ گذرا به سرعت میرا گردد. سپس کنترل مبدل روتور به دستگاه‌های توالی مثبت و منفی منتقل شد. به طوری که در دستگاه توالی مثبت به تنظیم توان حقیقی و راکتیو پرداخته شد و در دستگاه توالی منفی، نوسانات پاسخ ژنراتور ناشی از مؤلفه‌های توالی منفی محدود گردید.

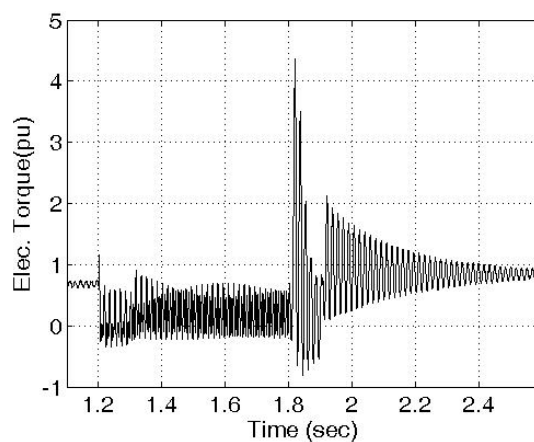
برای کنترل مبدل روتور در دستگاه توالی منفی، رویکردهای مختلفی اتخاذ شد. یک رویکرد حذف مؤلفه‌های گشتاور ژنراتور ناشی از توالی منفی (متناظر با فرکانس $2\omega_b$) بود. اما همان‌گونه که در شبیه‌سازی‌ها ملاحظه شد، حذف نوسانات توالی منفی گشتاور به‌ازای خطاهای با محتوای توالی منفی بالا به دلیل نیاز به مبدل روتور با ظرفیت بزرگ همیشه امکان‌پذیر نیست. رویکرد دیگر این بود که به جای حذف مؤلفه‌های توالی منفی گشتاور، نوسانات توالی منفی جریان روتور محدود شود. شبیه‌سازی‌ها نشان داد که رویکرد دوم یعنی کاهش مؤلفه توالی منفی جریان روتور دارای عملکرد بهتری است.

ضمایم

پارامترهای توربین-ژنراتور DFIG معادل 10 مگاوات آمپر - 9 مگاوات تحت مطالعه (تشکیل شده از 6 توربین-ژنراتور DFIG-1/5 مگاوات)، 585 ولت و 60 هرتز در مبنای 10 مگاوات-آمپر عبارت است از:



(الف)



(ب)

شکل (13): پاسخ گشتاور الکترومکانیکی در برابر خطای دو فاز به زمین با افتادگی 80 درصد الف. با کنترل گذر از خطای پیشنهادی (شامل SDR و روش‌های پیشنهادی در بخش‌های (1.4) و (1.2.4)) با رویکرد محدود کردن جریان توالی منفی روتور؛ ب. بدون هیچ‌گونه حفاظت گذر از خطا

در شکل (12) که هیچ‌گونه حفاظت گذر از خطایی فعال نیست، دامنه نوسانات ناشی از مؤلفه توالی منفی ولتاژ بسیار زیاد است.

شکل (13) پاسخ گشتاور الکترومکانیکی را برای خطای دو فاز به زمین با افتادگی 80 درصد نشان می‌دهد. خطا در زمان $t = 1.2 \text{ sec}$ شروع شده و به مدت 600 میلی‌ثانیه طول می‌کشد. در این شرایط، محتوای توالی منفی ولتاژ ژنراتور برابر با 26 درصد است.

در شکل (13-الف) از کنترل گذر از خطای پیشنهادی (شامل SDR و روش‌های پیشنهادی در بخش‌های (1.4) و (1.2.4)) استفاده می‌شود، در صورتی که در شکل (13-ب) هیچ حفاظت گذر از خطایی فعال نیست. در شکل (13-ب)، به دلیل عدم وجود حفاظت گذر از خطا، پیک گشتاور در لحظات گذرا به مقدار بسیار بزرگ 4 پریونیت می‌رسد.

$L_m = 2.9 pu$	اندوکتانس مغناطیس‌کننده ماشین	$R_g + jX_g = 0.003 + j 0.3 pu$	امپدانس فیلتر سمت شبکه
$H_g = 0.75 sec$	ثابت اینرسی ژنراتور	$\omega_b = 2\pi \times 60 = 377 rad / sec$	فرکانس زاویه‌ای پایه
$H_t = 4.3 sec$	ثابت اینرسی توربین	$R_s = 0.00706 pu$	مقاومت اهمی استاتور
$k_s = 0.6 pu / elec. rad$	ثابت فنری معادل شفت	$R_r = 0.005 pu$	مقاومت اهمی روتور
$D_{ig} = 1.2 pu$	میرایی معادل شفت	$L_s = 3.07 pu$	اندوکتانس استاتور
		$L_r = 3.056 pu$	اندوکتانس روتور

مراجع

- [1] Mullane, A., Lightbody, G., Yacamini, R., "Wind-turbine fault ride-through enhancement", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 20, No. 4, 2005, pp. 1929–1937.
- [2] Causebrook, A., Atkinson, D., Jack, A.G., "Fault ride-through of large wind farms using series dynamic braking resistors", IEEE Trans Power Sys., Vol. 22, No. 3, 2007, pp. 966-975.
- [3] Rahimi, M., Parniani, M., "Coordinated control approaches for low-voltage ride-through enhancement in wind turbines with doubly fed induction generators", IEEE Trans Energy Convers., Vol. 25, No. 3, 2010, pp. 873-883.
- [4] Rahimi, M., Parniani, M., "Efficient control scheme of wind turbines with doubly-fed induction generators for low voltage ride-through capability enhancement", IET Renew. Power Gener., Vol. 4, No. 3, 2010, pp. 242–252.
- [5] Rahimi, M., Parniani, M., "Grid-fault ride-through analysis and control of wind turbines with doubly fed induction generators", Electric Power Systems Research, Vol. 80, 2010, pp. 184–195.
- [6] Xiang, D., Ran, Li., Tavner, P. J., and Yang, S., "Control of a doubly fed induction generator in a wind turbine during grid fault ride-through", IEEE Trans. Energy Convers., vol. 21, 2006, pp. 652–662.
- [7] Zhou, Y., Bauer, P., Ferreira, J. A., Pierik, J., "Operation of grid-connected DFIG under unbalanced grid voltage condition", IEEE Trans. Energy Convers., Vol. 24, No. 1, 2009, pp. 240-246.
- [8] Wang, Y., Xu, L., Williams, B.W., "Improved operation of DFIG and FSIG-based wind farms during network unbalance", Power and Energy Society General Meeting, 2008.
- [9] Xu, L., Wang, Y., "Dynamic modeling and control of DFIG-based wind turbines under unbalanced network conditions", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 22, No. 1, 2007, pp. 314-323.
- [10] Hu, J., He, Y., "Modeling and enhanced control of DFIG under unbalanced grid voltage conditions", Electric Power Systems Research, Vol. 79, No. 2, 2009, pp. 273-281.
- [11] Hu, J., He, Y., Xu, L., "Improved rotor current control of wind turbine driven doubly-fed induction generators during network voltage unbalance", Electric Power Systems Research, vol. 80, no. 7, 2010, pp. 847-856.
- [12] Xu, L., "Coordinated control of DFIG's rotor and grid side converters during network unbalance", IEEE Trans. Power Elec., Vol. 23, No. 3, 2008, pp. 1041-1049.
- [13] Hu, J., He, Y., Xu, L., Williams, B.W., "Improved control of DFIG systems during network unbalance using PI-R current regulator", IEEE Trans. Industrial Elec., Vol. 56, No. 2, 2009, pp. 439-449.
- [14] Flannery, P., Venkataramanan, G., "Unbalanced voltage sag ride-through of a doubly fed induction generator wind turbine with series grid side converter", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 45, no. 5, 2009, pp. 1879–1887.
- [15] G-Bellmunt O., J-Ferre, A., Sumper, A., B-Jane, J., "Ride-through control of a doubly fed induction generator under unbalanced voltage sags", IEEE Trans. Energy Convers., Vol. 23, No. 4, 2008, pp. 1036-1044.
- [16] Rahimi, M., Parniani, M., "Low Voltage Ride-Through Capability Improvement of DFIG-based Wind Turbines under Unbalanced Voltage Dips", Electrical Power and Energy Systems, vol. 60, 2014, pp. 82-95.
- [17] Rahimi, M., Parniani, M., "Dynamic behavior analysis of doubly-fed induction generator wind turbines – The influence of rotor and speed controller parameters",

29 تحلیل و بهبود قابلیت ایستادگی توربین بادی با ژنراتور القایی دو سو تغذیه در برابر افتادگی نامتقارن ولتاژ

Electrical Power and Energy Systems, Vol. 32, 2010, pp. 464–477.

[18] Rahimi, M., Parniani, M., "*Transient performance*

improvement of wind turbines with doubly fed induction generators using nonlinear control strategy", IEEE Trans Energy Convers., vol. 25, no. 2, Jun. 2010, pp. 514-525.