مقایسه اثر دو روش کنترل مبتنی بر همواری برای STATCOM در بهبود پایداری شبکه شامل مزارع بادی مبتنی بر DFIG

حمید قائدی، دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، غضنفر شاهقلیان، دانشیار، مهناز هاشمی، استادیار

دانشکده مهندسی برق- واحد نجف‌آباد- دانشگاه آزاد اسلامی- نجف‌آباد- ایران
ghaedi.hamid@yahoo.co.uk, shahgholian@iaun.ac.ir, m.hashemi@ec.iut.ac.ir

چکیده: شبکه‌های قدرت، سیستم‌های پیچیده به‌هم پیوسته و غیرخطی هستند و هنگامی‌که تحت نفوذ منابع بادی قرار می‌گیرند، این مسئله شدیدتر خواهدبود. جبران‌سازهای سنکرون استاتیکی[1] (STATCOM) جهت بهبود تنظیم ولتاژ و برآورده نمودن کدهای شبکه، در سیستم‌های قدرت، شامل مزارع بادی مبتنی بر ژنراتور القایی تغذیه دوگانه[2] (DFIG) مورد استفاده قرار می‌گیرند.علی‌رغم ماهیت غیرخطی STATCOM، روش کنترلی مرسوم در آن‌ها، براساس کنترل‌کننده‌های خطی PI با ضرایب ثابت است که این ضرایب تضمینی برای عملکرد بهینه STATCOM نمی‌باشند. در این مقاله مقایسه‌ای میان دو روش کنترلی غیرخطی مبتنی بر همواری دیفرانسیلی برای جبران‌ساز سنکرون استاتیکی در شبکه ۹ باس WSCC شامل مزارع بادی مبتنی بر DFIG انجام گرفته و نتایج شبیه‌سازی عملکرد موثر هر دو روش را در مقایسه با روش کنترل خطی مرسوم نشان می‌دهد.

واژه های کلیدی: جبران‌ساز سنکرون استاتیکی، قابلیت گذر از کمبود ولتاژ[3] (LVRT)، کنترل مبتنی بر همواری، نظریه خطی سازی پسخورد، کنترل تطبیق‌پذیر مبتنی بر همواری

تاریخ ارسال مقاله : ۹۷/۱۲/۲۸

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۸/۰۳/۲۳

نام نویسنده‌ی مسئول: غضنفر شاهقلیان

نشانی نویسنده‌ی مسئول: دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-15]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.9.0]

۱- مقدمه

امروزه انرژی‌های تجدیدپذیر، عمدتا به دلیل افزایش پیوسته تقاضای انرژی الکتریکی، فراوانی در طبیعت، فشارهای وارده برای کاهش آلودگی سوخت‌های فسیلی و حذف وابستگی به این نوع سوخت‌ها، بسیار مورد توجه پژوهش‌گران و همچنین فعالان صنعت برق قرار گرفته‌اند [۲،۱]. در میان انواع منابع انرژی تجدیدپذیر، انرژی باد به صورت فزاینده‌ای در حال تبدیل شدن به متداول‌ترین نوع و قابل رقابت با منابع انرژی مرسوم و رایج است. انجمن انرژی‌های بادی اروپا، حداقل سهم تولید انرژی بادی از کل میزان تولید انرژی الکتریکی در کشورهای اروپایی را تا سال ۲۰۳۰ برابر ۲۵٪ هدف‌گذاری کرده‌است [۴،۳]. در سال‌های اخیر از میان انواع طرح‌های تبدیل انرژی باد، توربین‌های بادی مجهز به ژنراتور القایی دوسو تغذیه DFIG، به علت وجود مزایایی همچون ظرفیت کمتر و در نتیجه هزینه پایین‌تر مبدل الکترونیک قدرت، ثبات ولتاژ و فرکانس در عین متغیر بودن سرعت روتور، کنترل مجزای توان حقیقی و راکتیو و قابلیت کارکرد در هر چهار ناحیه مشخصه توان حقیقی-راکتیو به محبوب‌ترین و پر استفاده‌ترین طرح در صنعت انرژی بادی تبدیل شده‌اند [۶،۵]. مزارع بادی عموما به دلیل حجم بیشتر منابع بادی در نقاط دوردست و یا دور از مراکز اصلی بارها، در نقطه اتصال مشترک[۴] (PCC) به شبکه قدرت متصل شده‌اند. در این نقاط اتصال، شبکه قدرت عموما به دلیل پایین بودن ظرفیت اتصال کوتاه[۵] (SCC) و نسبت X/R، یک شبکه ضعیف تلقی می‌شود. افزایش ضریب نفوذ منابع بادی، پخش توان و میزان تقاضای توان راکتیو و در نتیجه، پایداری سیستم قدرت را به علت طبیعت و ذات ناپایدار و غیرقابل پیش‌بینی باد، دستخوش تغییر می‌کند و این اثرگذاری در شبکه‌های ضعیف، به مراتب شدیدتر است. از این‌رو بررسی اثرات به‌وجود آمده به وسیله مزارع بادی عظیم بر روی سیستم‌های قدرت، لزوم پیدا می‌کند. این تاثیرات و استانداردهای لازم برای جلوگیری از به خطر افتادن پایداری سیستم قدرت، توسط اپراتور سیستم انتقال[۶] (TSO) ، تحت عنوان کدهای شبکه، منتشر شده‌است. در این میان، برخلاف توربین‌های بادی سرعت ثابت، توربین‌های بادی مجهز به DFIG، به علت وجود مبدل الکترونیک قدرت، قادر به تولید تنظیم‌شده توان راکتیو هستند. این میزان از تولید، اگرچه برای رسیدن به ضریب توان مناسب در شرایط کارکرد عادی و همچنین پایدارسازی ولتاژ در باس PCC، کافی است ولی با توجه به ظرفیت کم مبدل، در شرایط رخداد خطا در شبکه قدرت به‌منظور برآورده کردن کدهای شبکه دیگر کافی نخواهد بود. در این شرایط بهره گرفتن از ادوات FACTS (سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف‌پذیر[۷]) مانند STATCOM برای جبران‌سازی دینامیکی توان راکتیو و حذف نوسانات ولتاژ در سیستم قدرت، می‌تواند حتی در مقایسه با پایدارساز سیستم قدرت[۸] (PSS) و تجهیزات میراکننده نوسانات قدرت[۹] (POD)، به‌علت خطی‌بودن گزینه بسیار مناسبی باشد [۸،۷]. سرعت بالاتر STATCOM در مقایسه با روش‌های قدیمی‌تر، مانند استفاده از جبران‌کننده وار استاتیکی[۱۰] (SVC) و خازن سوئیچ‌شونده مکانیکی[۱۱] (MSC)، از فرکانس کاری بسیار بالای سوئیچ‌های IGBT نشات می‌گیرد. به دلیل ذات غیرخطی STATCOM، روش‌های کنترل غیرخطی نسبت به روش‌های کنترل خطی مرسوم که مبتنی بر خطی‌سازی و استفاده از کنترل‌کننده‌های خطی PI است، سرعت پاسخ‌دهی سریع‌تر و مقاوم‌تری دارند. در میان پژوهش‌های انجام شده در این زمینه، می‌توان به پیاده‌سازی الگوریتم PSO [۹]، کنترل مد لغزشی [۱۱،۱۰]، کنترل تطبیقی [۱۲]، کنترل فازی [۱۳] و کنترل خطی‌سازی پسخورد ورودی- خروجی [۱۴] برای STATCOM اشاره کرد. مرجع [۱۵] الگوریتم‌های ژنتیک، شبکه هوش مصنوعی[۱۲] (ANN) و ANFIS را برای انتخاب بهینه ضرایب کنترل‌کننده‌های خطی PI موجود در STATCOM مورد مقایسه قرار داده‌است. روش‌های کنترل خطی و همچنین الگوریتم‌های تکاملی صرفا با مقادیر بهینه اما ثابت برای کنترل‌کننده‌های PI سعی در بهبود کارکرد STATCOM دارند.

در این مقاله، مقایسه‌ای میان روش کنترل تطبیق‌پذیر مبتنی بر همواری[۱۳] (FBAC) و روش کنترل مبتنی بر همواری به‌کمک نظریه خطی سازی پسخورد[۱۴] (FBFLC) برای STATCOM برای بهبود قابلیت گذر از کمبود ولتاژ ارائه شده‌است. اگرچه این دو روش در ساختار با یکدیگر کمی مشابهت دارند و هر دو بر پایه نظریه کنترلی همواری دیفرانسیلی هستند، لیکن روش اول با بهره‌گیری از ترم‌های تطبیق‌پذیر برای پایدارسازی سریع‌تر قانون تعقیب خطا، عملکرد دقیق‌تر و همچنین هموارتر STATCOM را به‌دنبال خواهدداشت که در بهبود قابلیت LVRT در مزارع بادی بسیار کارآمد است. برای نشان دادن کارایی این دو روش در مقایسه با روش کنترل خطی مرسوم، نتایج شبیه سازی در سیستم قدرت نمونه WSCC شامل مزارع بادی مبتنی بر DFIG ارائه شده‌است.

۲- قابلیت گذر از کمبود ولتاژ (LVRT) در توربین‌های بادی مجهز به DFIG

شناخت عملکرد توربین بادی مجهز به DFIG در طی شرایط پایدار و گذرا، نیازمند شناخت مدل ریاضی تمام اجزا آن است. در این مقاله از مدل معمول توربین بادی مجهز به DIFG شامل مدل‌سازی تمامی اجزای الکتریکی و مکانیکی که در مرجع [۱۶] آمده، استفاده شده‌است. معادلات ولتاژ ماشین DFIG در دستگاه مرجع سنکرون dq به صورت زیر است:

$$V_{dqs} = r_s i_{dqs} + \frac{\omega_s}{\omega_b}\psi_{qds} + \frac{1}{\omega_b}\frac{d}{dt}(\psi_{dqs}) \quad (۱)$$

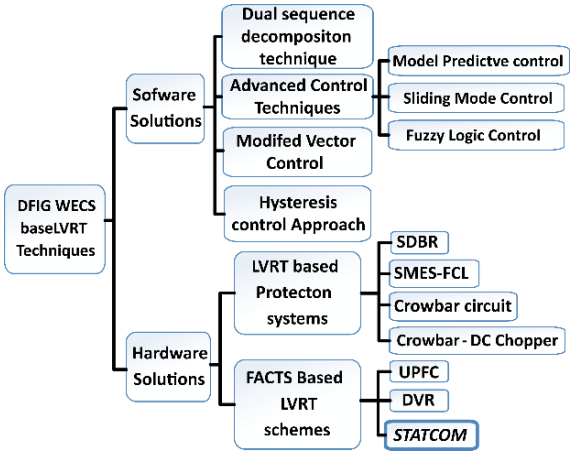
$$V_{dqr} = r_r i_{dqr} + \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_b}\psi_{qdr} + \frac{1}{\omega_b}\frac{d}{dt}(\psi_{dqr}) \quad (۲)$$

که در آن v_{dqs} و v_{dqr} مقادیر ولتاژ، i_{dqs} و i_{dqr} مقادیر جریان و ψ_{dqs} و ψ_{dqr} مقادیر شار برای استاتور و روتور در دستگاه dq، ω_s، ω_r و ω_b

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-15]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.9.0]

به‌ترتیب سرعت‌های زاویه‌ای سنکرون، مکانیکی روتور و پایه و r_s و r_r به‌ترتیب مقاومت‌های استاتور و روتور هستند. استاتور این ماشین به‌طور مستقیم و روتور آن از طریق مبدل منبع ولتاژی پشت‌به‌پشت، به شبکه قدرت متصل شده‌است. توان نامی این مبدل تقریبا با لغزش نامی DFIG (در حدود ۳۰٪ توان کل ماشین) برابر است. از نقاط ضعف DFIG نسبت به توربین‌های بادی با مبدل ظرفیت کامل، اتصال مستقیم سیم‌پیچ استاتور به شبکه قدرت است که آن‌ها را نسبت به اغتشاشات ولتاژ شبکه بسیار حساس می‌کند. در طی رخداد خطا در شبکه، ولتاژ باس PCC افت کرده و جریان شدیدی از مدار استاتور کشیده می‌شود. سیستم حفاظتی کوروبار[۱۵] برای جلوگیری از عبور جریان شدید روتور که در اثر القای جریان شدید استاتور به‌وجود آمده، فعال می‌شود و جریان روتور را بای‌پس می‌کند. در این میان، مبدل سمت روتور[۱۶] (RSC)، از مدار روتور ایزوله می‌شود و DFIG همچون یک ماشین القایی معمول شروع به جذب توان راکتیو می‌کند و این کمبود توان راکتیو، ناپایداری ولتاژ در باس PCC را تشدید خواهدکرد. از این‌رو، جبران دینامیکی توان راکتیو می‌تواند قابلیت LVRT را در یک واحد بادی بهبود بخشیده و کارکرد آن واحد را با توجه به این الزامات تعریف شده برای هر منطقه، در طی رخداد خطا تضمین کند. الزامات LVRT بخشی از کدهای شبکه هستند که مزارع بادی را برای میزان مشخصی از افت ولتاژ در یک بازه زمانی معین، ملزم به ماندن در شبکه و تزریق توان و در غیر این صورت جدا شدن از شبکه می‌کنند. در مراجع بسیاری، روش‌های مختلفی برای پیاده‌سازی LVRT در مزارع بادی معرفی شده‌است که می‌توان آن‌ها را مطابق شکل (۱): طبقه‌بندی نمود [۱۷].



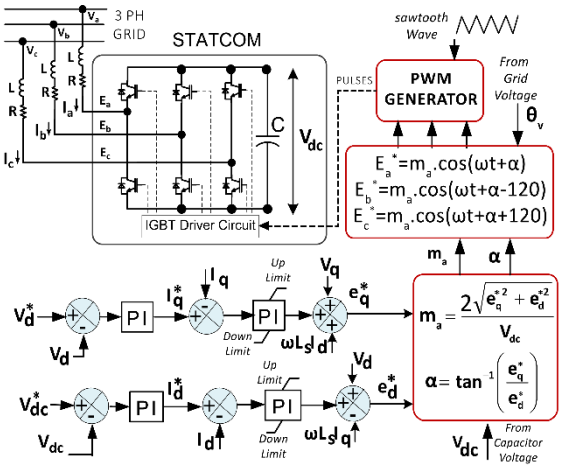
شکل (۱): طبقه‌بندی تکنیک‌های بهبود LVRT در مزارع بادی DFIG

بااین‌وجود به‌علت سخت‌گیرانه بودن الزامات LVRT و پایین بودن ظرفیت مبدل DFIG، روش‌های سخت‌افزاری عملکرد بهتری دارند. در میان این روش‌ها، به‌کار بردن ادوات FACTS همچون STATCOM، علی‌رغم هزینه‌های بالاتر، به‌علت جبران دینامیکی سریع‌تر توان راکتیو و در نتیجه بازیابی بسیار سریع ولتاژ، کنترل‌پذیری بالا در عین ساده‌تر بودن سیستم کنترلی، توانایی در حذف پدیده‌های کیفیت توانی و دقت بسیار بالا در عملکرد، رایج‌تر است [۱۸].

۳- جبران‌ساز سنکرون استاتیکی

جبران‌ساز سنکرون استاتیکی از خانواده ادوات FACTS است که به‌طور موازی به شبکه متصل شده و قادر است به کمک سوئیچ‌های الکترونیک قدرت خود و با تولید یک دسته ولتاژ سه‌فاز سنکرون با شبکه و صرفا با تغییر دامنه آن، به تولید توان راکتیو (عملکرد خازنی) و یا جذب آن (عملکرد سلفی) پرداخته و بجز مقدار ناچیزی جذب توان حقیقی برای شارژ خازن و تلفات سوئیچ‌ها، تبادل توان حقیقی با شبکه نداشته‌باشد. این ویژگی STATCOM را قادر می‌سازد تا نوسانات ولتاژ همچون کمبود ولتاژ[۱۷]، بیشبود ولتاژ[۱۸]، فلیکر ولتاژ[۱۹] و اغتشاشات ولتاژ را حذف نموده و ولتاژ باس اتصالی خود را تنظیم کند که در اثر آن پخش توان و ضریب توان، کنترل‌پذیری و درنتیجه انعطاف‌پذیری شبکه، بهبود قابل‌توجهی پیدا می‌کند [۱۹]. در STATCOMها، بیشینه توان راکتیو قابل تولید، با کاهش ولتاژ خط (در جریان ثابت) به‌صورت خطی کاهش می‌یابد (در SVCها با مجذور ولتاژ افت می‌کند). از این‌رو این تجهیز بهترین انتخاب برای جبران‌سازی توان راکتیو در مزارع بادی برای بهبود LVRT است.

STATCOM به طور معمول از یک مبدل منبع ولتاژی VSC شامل سوئیچ‌های IGBT، یک خازن ذخیره انرژی، ترانسفورماتور اتصال به شبکه و یک سیستم کنترلی تشکیل شده و از تکنیک مدولاسیون پهنای پالس PWM برای کنترل کلیدها استفاده‌می‌شود. شمای کلی STATCOM و سیستم کنترلی رایج مبتنی بر کنترل‌کننده‌های خطی PI در شکل (۲) نشان داده‌شده‌است.



شکل (۲): سیستم کنترلی خطی STATCOM مبتنی بر کنترل‌کننده‌های PI

معادلات STATCOM در دستگاه dq عبارتند از [۲۰]:

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-15]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.9.0]

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}(i_d) = \frac{v_d}{L} - \frac{e_d}{L} + \omega i_q - \frac{R}{L} i_d \\ \frac{d}{dt}(i_q) = \frac{v_q}{L} - \frac{e_q}{L} - \omega i_d - \frac{R}{L} i_q \\ \frac{d}{dt}(V_{dc}) = \frac{3}{2cV_{dc}}(v_d i_d + v_q i_q) - \frac{V_{dc}}{R_c} \end{cases} \quad (۳)$$

که در آن i_d و i_q به‌ترتیب اجزای محور d و q جریان جبران‌ساز، v_d و v_q به‌ترتیب اجزای محور d و q ولتاژ شبکه، e_d و e_q به‌ترتیب اجزای محورd و q ولتاژ ترمینال خروجی، R تلفات اهمی سیم‌پیچی ترانسفورماتور، R_c تلفات اهمی سوئیچ‌ها، L اندوکتانس ترانسفورماتور، ω سرعت زاویه‌ای سنکرون دستگاه dq، c ظرفیت خازن و V_{dc} ولتاژ خازن سمت dc هستند. همچنین در مدل میانگین STATCOM، مقادیر e_d و e_q به‌ترتیب به‌صورت زیر خواهندبود:

$$\begin{cases} e_d = \frac{1}{2} \cdot V_{dc} m_a \cos(\delta) \\ e_q = \frac{1}{2} \cdot V_{dc} m_a \sin(\delta) \end{cases} \quad (۴)$$

که در آن m_a اندیس مدولاسیون و δ جابه‌جایی فاز STATCOM در دستگاه dq هستند [۲۱].

به‌منظور کنترل مطلوب‌تر، از همان ابتدا روش‌های بسیاری برای کنترل STATCOM معرفی شدند که غالبا شامل خطی‌سازی معادلات غیرخطی STATCOM حول یک نقطه تعادل در قاب مرجع dq و بهره‌گیری از کنترل‌کننده‌های خطی PI بودند. در بسیاری از مراجع، روش‌های متنوعی برای تنظیم دقیق و هوشمندانه پارامترهای این کنترل‌کننده‌ها بیان شده‌است [۲۳،۲۲]. اما از آن‌جا که مدل میانگین STATCOM غیرخطی است و روش‌های کنترل غیرخطی عملکرد سریع‌تر، دقیق‌تر و مقاوم‌تری در مقایسه با روش‌های کنترل خطی نسبت به تغییرات سیستم دارند، به‌کارگیری این روش‌ها برای STATCOM در شبکه‌های شامل مزارع بادی، به‌منظور بهبود قابلیت LVRT سودمند خواهد بود.

۴- نظریه کنترلی همواری دیفرانسیلی

در روش کنترل مبتنی بر همواری یک سیستم مانند یک میدان دیفرانسیلی تولیدشده توسط مجموعه‌ای شامل ورودی‌ها و متغیرهای حالت دیده می‌شود. چنان‌چه مجموعه‌ای از خروجی‌های سیستم (برابر با تعداد ورودی‌ها) وجود داشته‌باشد که بتوان تمامی متغیرهای حالت و ورودی‌های کنترل را، از روی آن‌ها و مشتق‌های تا مرتبه β آن‌ها تعیین کرد؛ یا به‌طور دقیق‌تر چنان‌چه یک سیستم غیرخطی با بردار ورودی $u \in R^m$ و بردار حالت $x \in R^n$ به فرم (۵) وجود داشته‌باشد:

$$\dot{x} = f(x) + g(x) \cdot u \quad (۵)$$

چنان‌چه بردار خروجی $y \in R^m$ وجود داشته‌باشد، به‌طوری که:

$$y = h(x, u, \dot{u}, ..., u^{(r)}); \ \ Rank(h) = m \quad (۶)$$

و مقادیر ورودی را بتوان به‌صورت زیر:

$$u = \psi(y, \dot{y}, \ddot{y}, ..., y^{(\beta+1)}); \ \ Rank(\psi) = m \quad (۷)$$

و مقادیر حالت را به‌صورت زیر:

$$x = \rho(y, \dot{y}, \ddot{y}, ..., y^{(\beta)}); \ \ Rank(\rho) = n \quad (۸)$$

بازنویسی نمود، سیستم مذکور، یک سیستم هموار است و تمامی دینامیک‌های سیستم قابل بازنویسی از روی خروجی‌های هموار و مشتق‌های مرتبه بالاتر آن‌ها است و به کمک این روش کنترلی، به یک سیستم کنترل‌پذیر خطی تبدیل می‌شود [۲۴]. در معادلات بالا، β و r دو عدد مثبت هستند. از این رو چالش اصلی در سیستم‌های غیرخطی هموار، یافتن خروجی‌های هموار مناسب به‌منظور تعیین سایر متغیرهای سیستم است. در ادامه دو روش کنترلی فرعی بر پایه روش کنترلی همواری معرفی و مقایسه می‌شوند.

۴-۱- کنترل مبتنی بر همواری به کمک تئوری خطی سازی پسخورد

ایده اصلی خطی سازی پسخورد، تبدیل یک سیستم دینامیکی غیرخطی به یک سیستم خطی از طریق حذف دینامیک غیرخطی با یک فیدبک غیرخطی و بهره‌گیری از تکنیک‌های کنترل خطی است. در مرجع [۲۵] به کمک نظریه خطی‌سازی پسخورد، ابتدا مقادیر خروجی‌های هموار به طور قاعده‌مند تعیین شده‌اند. سپس با تکیه بر این اصل که تمامی سیستم‌های کنترل‌پذیر و یا سیستم‌هایی که شرایط روش کنترل خطی‌سازی پسخورد را دارند حتما هموار دیفرانسیلی خواهندبود، از روش کنترل مبتنی بر همواری، کنترل حلقه‌باز سیستم، طراحی شده‌است. با درنظر گرفتن مقادیر ورودی های کنترل و متغیرهای حالت به‌صورت زیر:

$$[u_1, u_2]^T = [m_a \cos(\delta), \ m_a \sin(\delta)]^T \quad (۹)$$

$$[x_1, x_2, x_3]^T = [i_d, i_q, V_{dc}]^T \quad (۱۰)$$

چنان چه تبدیل حالت به‌صورت زیر در نظر گرفته‌شود:

$$[z_1, z_2, z_3]^T = [\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3]^T \quad (۱۱)$$

با حل معادلات دیفرانسیلی جزئی، دو عبارت φ_1 و φ_2 به‌صورت زیر، به‌دست خواهندآمد:

$$\begin{cases} \varphi_1 = \frac{3}{4} L(x_1^2 + x_2^2) + \frac{1}{2} C x_3^2 \\ \varphi_2 = x_2 \end{cases} \quad (۱۲)$$

عبارت φ_1 برابر مجموع انرژی ذخیره شده در المان سلفی و خازنی و φ_2 جریان i_q است. در نهایت ماتریس:

$$F(x,t) = \begin{bmatrix} L_{g1} L_f \varphi_1 & L_{g2} L_f \varphi_1 \\ L_{g1} \varphi_2 & L_{g2} \varphi_2 \end{bmatrix} \quad (۱۳)$$

محاسبه شده و در نزدیکی نقطه x_0 ناتکین خواهدبود. در محاسبه ماتریس F، مشتق‌های لی با علامت L نشان داده‌شده‌اند. حال برای طراحی کنترل‌کننده حلقه‌باز، طبق آن‌چه گفته‌شد، خروجی‌های هموار برابر مقادیر $\varphi(x)$ در نظر گرفته می‌شوند:

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-15]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.9.0]

$$[\varphi_1(x),\varphi_2(x)]^T=[y_{1f},y_{2f}]^T \qquad (۱۴)$$

و مقادیر حالت از روی خروجی‌های هموار و مشتق‌های مرتبه بالاتر آن تعیین می‌شوند.در ادامه مقادیر ورودی‌های کنترل طبق تعریف، به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\begin{bmatrix}u_1\\u_2\end{bmatrix}=F(x,t)^{-1}.\begin{bmatrix}\ddot{y}_{1f}-L_f^2\varphi_1(x)\\ \dot{y}_{2f}-L_f\varphi_1(x)\end{bmatrix} \qquad (۱۵)$$

با این‌حال به‌دلیل دینامیک‌های ناشناخته و خطای مدل‌سازی و وجود اغتشاشات، می‌بایست از پسخورد حالت نیز بهره برد. در این صورت مقادیر خطای ردیابی e به‌صورت اختلاف مقادیر لحظه‌ای خروجی‌های هموار y و مقادیر مرجع برای تمامی خروجی‌های هموار y_{ref} تعریف می‌شوند. در نهایت برای قانون تعقیب خطا خواهیم داشت:

$$\begin{bmatrix}u_1\\u_2\end{bmatrix}=F^{-1}.\begin{bmatrix}-k_1e_1-k_2e_2-k_3e_3-L_f^2\varphi_1(x)+\ddot{y}_{1d}\\ -k_4e_4-k_5e_5-L_f\varphi_2(x)+\dot{y}_{2d}\end{bmatrix} \qquad (۱۶)$$

ضرایب $K=[k_1, k_2, k_3, k_4, k_5]$ می‌تواند توسط روش جایابی قطب‌ها و یا روش LQR تعیین گردد. این مقادیر به کمک روش جایابی قطب‌ها به‌صورت زیر به‌دست می‌آیند:

$K=[k_1, k_2, k_3, k_4, k_5]=[8500, 5600, 100, 2800, 150]$

این روش کنترلی مطابق بلوک دیاگرام شکل ((۳) برای STATCOM پیاده‌سازی می‌شود.

۴-۲- کنترل تطبیق‌پذیر مبتنی بر همواری

در مرجع [۲۶] روش کنترل مبتنی بر همواری دیفرانسیلی این بار به کمک ترم‌های تطبیق‌پذیر برای ضرایب قانون تعقیب خطا طراحی و معرفی شده‌است. مزیت این روش آن است که با تنظیم لحظه‌ای ضرایب چندجمله‌ای تعقیب خطا، ردیابی مقادیر مرجع در زمان کمتری اتفاق می‌افتد. درحالی که مدل‌سازی سیستم STATCOM، بردار متغیرهای حالت و ورودی‌های کنترل عینا مانند روش کنترلی پیشین است، این بار به جای مجموع انرژی ذخیره شده در المان‌های حافظه‌دار، صرفا ولتاژ خازن را به عنوان خروجی هموار در کنار جریان i_q معرفی کرده است. اگرچه کوچک بودن مقدار انرژی موجود در المان‌های سلفی در مقابل انرژی ذخیره‌شده در خازن علت این انتخاب بوده است، اما مزیت انتخاب ساده‌تر خروجی‌های هموار را در ادامه نشان خواهدداد که به ساده تر کردن روابط کنترلی در مقایسه با روش پیشین، انجامیده‌است. از این‌رو خروجی‌های هموار به صورت زیر تعیین می‌شوند:

$$[y_{1f},y_{2f}]^T=[x_2,x_3]^T=[i_q,V_{dc}]^T \qquad (۱۷)$$

در ادامه با بازنویسی مقادیر ورودی‌های کنترل از روی خروجی‌های هموار و مشتق‌های آن‌ها داریم:

$$\begin{cases}u_1=\dfrac{2}{y_2}\left(\dfrac{-2cL}{3v_d}(y_2\ddot{y}_2+\dot{y}_2^2)-\dfrac{2cR}{3v_d}y_2\dot{y}_2+\omega L\,y_1+v_d\right)\\ u_2=\dfrac{-2}{y_2}\left(\dfrac{-2\omega cL}{3v_d}y_2\dot{y}_2+L\dot{y}_1+Ry_1-v_q\right)\end{cases} \qquad (۱۸)$$

و برای متغیرهای حالت به‌سادگی خواهیم داشت:

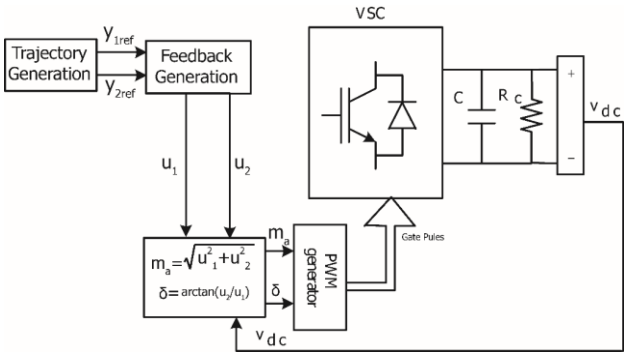
$$\begin{cases}x_1=\dfrac{2c}{3v_d}y_2\dot{y}_2\\ x_2=y_1\\ x_3=y_2\end{cases} \qquad (۱۹)$$

با تعیین مقادیر مرجع مناسب برای خروجی‌های هموار، قانون تعقیب خطا به‌صورت زیر به‌دست می‌آید. با در نظر گرفتن پارامتر خطا e به‌صورت اختلاف مقادیر مرجع y_{ref} و مقدار متغیرهای هموار y داریم:

$$\begin{cases}\dot{e}_1(t)-k_1e_1(t)=0\\ \ddot{e}_2(t)-k_3\dot{e}_2(t)-k_2e_2(t)=0\end{cases} \qquad (۲۰)$$

در ادامه ضرایب $K=[k_1,k_2,k_3]$ با توجه مقادیر خطاها و مشتق این مقادیر، به صورت دینامیکی و لحظه‌ای تعیین می‌شوند. روابط مربوط به تعیین این ضرایب در مرجع [۲۶] به‌طور کامل آورده شده‌اند. این عمل علاوه بر بهبود عملکرد کلی سیستم و پاسخ‌دهی دینامیکی و مقاوم‌تر، تضمینی بر عملکرد بهینه STATCOM در هر شبکه قدرت به دلیل استقلال ضرایب از پارامترهای سیستم قدرت است.

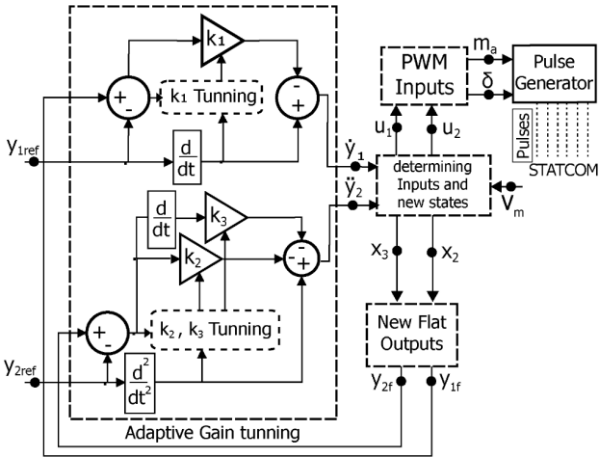
در نهایت روش کنترلی تطبیق‌پذیر مبتنی بر همواری طبق بلوک دیاگرام شکل (۴) برای STATCOM پیاده‌سازی می‌شود.



شکل (۳): بلوک دیاگرام روش کنترلی FBFLC برای STATCOM

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-15]

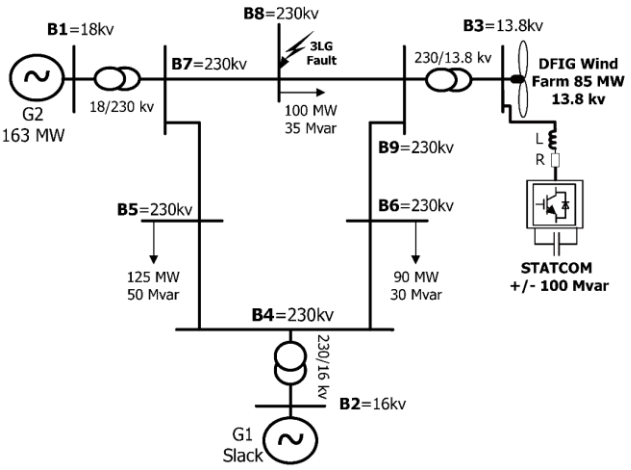
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.9.0]



شکل (۴): بلوک دیاگرام روش کنترلی FBAC برای STATCOM

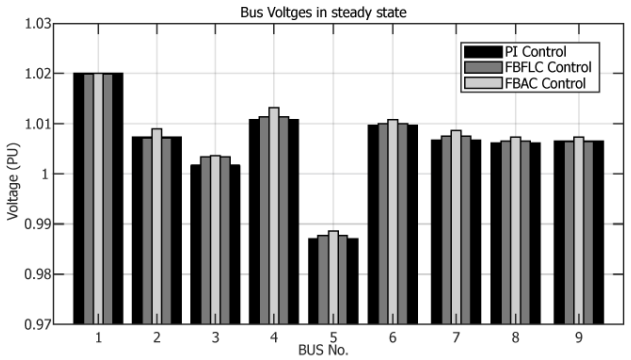
۵- نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت برای بررسی روش‌های کنترلی معرفی شده در STATCOM، سیستم قدرت WSCC نشان داده‌شده در شکل (۵) شبیه‌سازی شده‌است. شبیه‌سازی در محیط سیمولینک نرم‌افزار متلب انجام شده که شمای سیستم مدل‌شده در شکل (۷) نشان داده شده‌است. در این شبکه ۹ باسه، ۳ ژنراتور سنکرون وجود دارند که از طریق ترانسفورماتورها و خطوط انتقال، ۳ بار استاتیکی را تغذیه می‌کنند. برای شبیه‌سازی و مقایسه دو روش کنترلی ابتدا ژنراتور سنکرون باس ۳ با یک مزرعه بادی ۸۵ مگاوات مجهز به DFIG با مدار حفاظت کروبار، تعویض و برای بهبود قابلیت LVRT و همچنین پایداری شبکه از یک STATCOM با ظرفیت ۱۰۰-/+ مگاولت‌آمپر در باس DFIG استفاده شده‌است. جزئیات شبیه‌سازی در جدول (۱) آورده شده‌است. در کل بازه‌ی ۴ ثانیه‌ای شبیه‌سازی، سرعت باد به طور ثابت برابر ۱۲ متربرثانیه است. برای شبیه‌سازی خطا ابتدا یک‌بار در ثانیه اول شبیه‌سازی، یک خطای قوی سه‌فاز بدون امپدانس به زمین با ۰/۰۰۱ Ω = Rg به طول ۰/۲ ثانیه و برای شبیه‌سازی خطای تک‌فاز به زمین نیز، یک خطا با ۰/۰۰۱ Ω = =Rf و ۰/۰۰۱ Ω = Rg در باس ۸ رخ می‌دهد. هر دو شبیه‌سازی در سه وضعیت یکسان انجام می‌شود که در هر وضعیت صرفاً روش کنترلی موجود در STATCOM تغییر می‌کند.



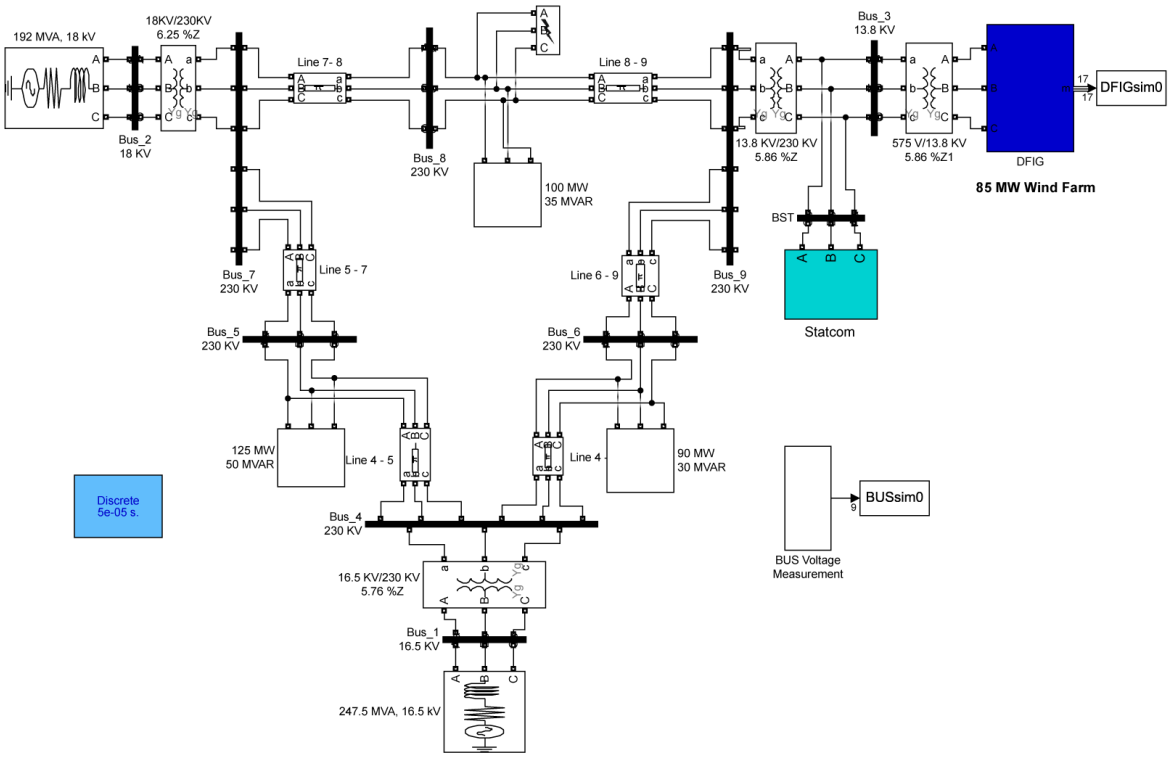
شکل (۵): سیستم شبیه‌سازی شده

نمودار ولتاژ نهایی باس‌ها برای خطای سه‌فاز پس از رسیدن به مقدار نهایی دائمی در هر سه وضعیت در شکل (۶) نشان داده شده‌است. همان‌طور که در نمودار مشخص است، ولتاژ باس‌ها به کمک STATCOM افزایش یافته است، اما در محدوده مجاز [۰/۹۵، ۱/۰۵] پریونیت باقی می‌ماند. نمودار ولتاژ تمامی باس‌ها در بازه‌ی ۲/۵ ثانیه‌ای در شکل (۷) نشان داده شده‌است. ولتاژ باس‌های ۹ گانه برای خطای تک‌فاز به زمین نیز در شکل (۱۰) نشان داده شده‌است. همچنین در نمودار ولتاژ باس ۳ (PCC)، پروفایل LVRT E.ON نشان داده‌شده‌است. در بازه خطا روش کنترلی FBAC توانسته با جبران‌سازی توان رآکتیو، سبب افزایش ولتاژ باس PCC تا ۰/۳۲ پریونیت و فاصله گرفتن آن از محدوده LVRT شود. مقایسه این اعداد نشان می‌دهد که روش FBAC و روش FBFLC در مقایسه با روش PIC به دلیل بهره‌گیری از کنترل‌کننده غیرخطی عملکرد مطلوب‌تر، و در عین حال سریع‌تری دارند. اما در ادامه مقایسه نشان می‌دهد روش FBAC در مقایسه با روش FBFLC عملکرد دقیق‌تری دارد و این مهم صرفاً به دلیل تنظیم تطبیق‌پذیر و پیوسته ضرایب قانون تعقیب خطا با توجه به شرایط لحظه‌ای شبکه قدرت، در بهینه‌ترین مقدار ممکن است. در تمامی شبیه‌سازی‌ها از سیستم حفاظتی کروبار برای حفاظت از مبدل DFIG استفاده شده‌است.

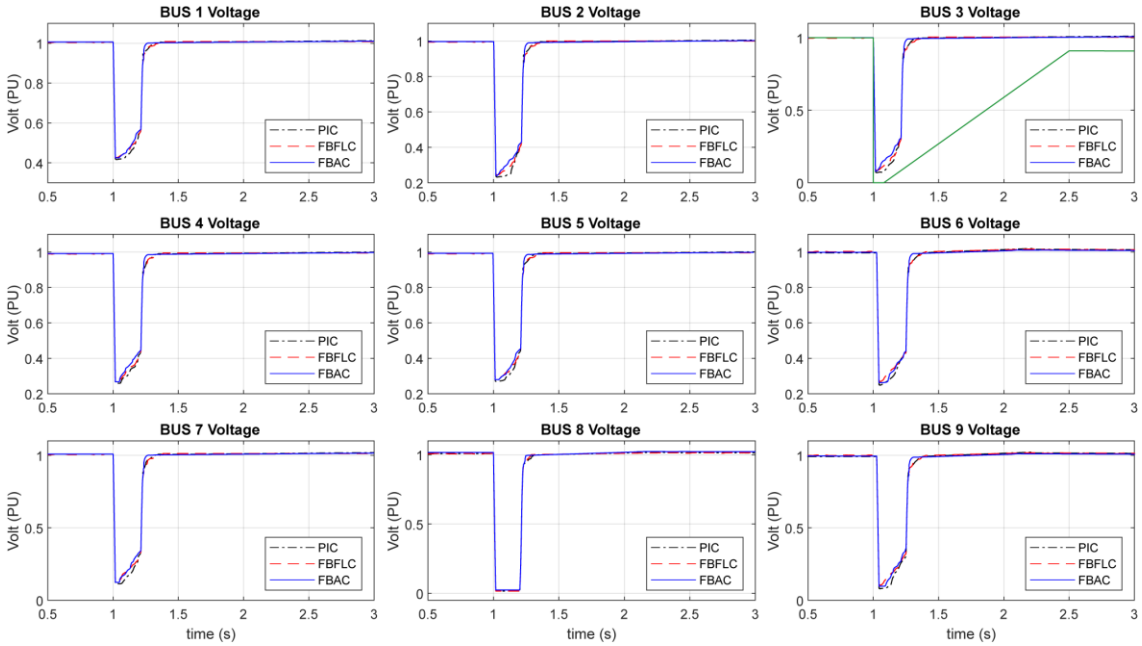


شکل (۶): نمودار ولتاژ باس‌ها بر حسب پریونیت در حالت دائمی برای خطای سه‌فاز

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-15]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.9.0]



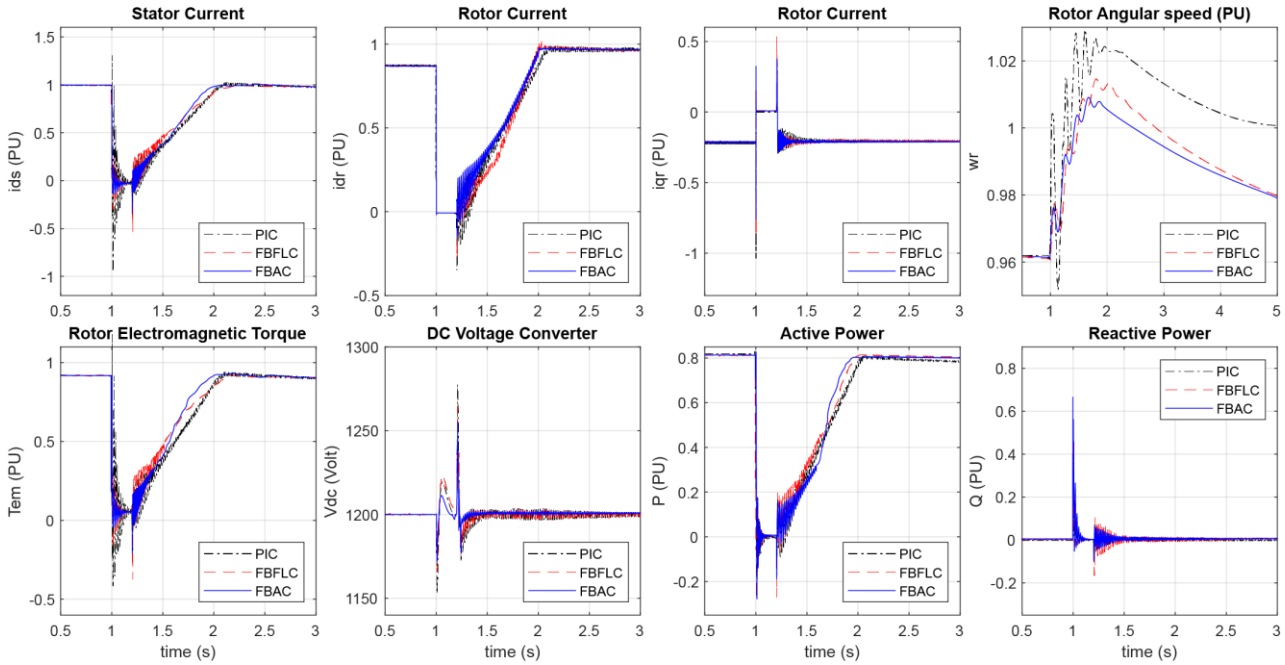
شکل (۷): شمای سیستم مورد مطالعه در محیط سیمولینک نرم‌افزار متلب



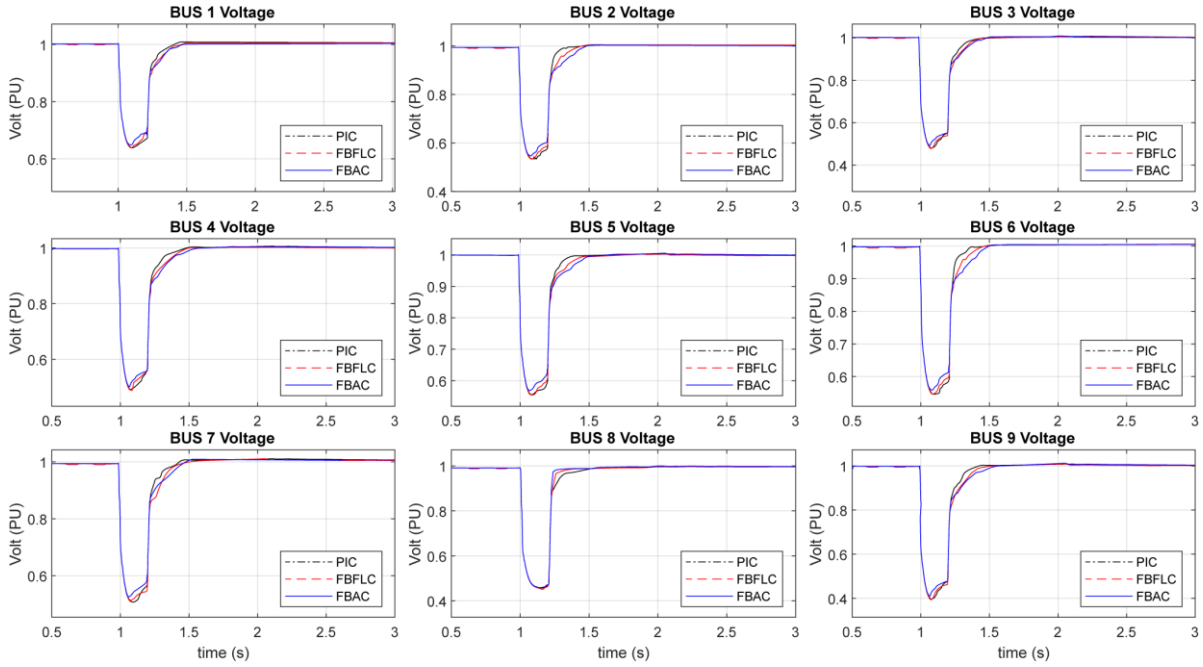
شکل (۸): نمودار ولتاژ لحظه‌ای باس‌ها بر حسب پریونیت در بازه رخداد خطای سه‌فاز و پس از حذف آن

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-15]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.9.0]



شکل (۹): نمودار پارامترهای DFIGدر بازه خطای سه‌فاز برحسب پریونیت



شکل (۱۰): نمودار ولتاژ لحظه‌ای باس‌ها در بازه رخداد خطای به‌فاز به زمین وپس از حذف آن

نمودار توان حقیقی و رآکتیو تولیدی DFIG در شکل (۹) نشان داده شده‌اند. همچنین در جدول (۲) بازه زمانی لازم برای رسیدن به ۹۵٪ مقدار دائمی نهایی پارامترهای مزرعه بادی در طی خطای سه‌فاز و پس از رفع آن مشخص شده‌است. اگرچه توان حقیقی DFIG در بازه خطا در روش PIC سریع‌تر از سایر روش‌ها ظاهر شده، اما در سایر حالت‌ها، عملکرد پرنوسان و کندی نسبت به دو روش دیگر داشته‌است. در ادامه روش FBAC به لطف ترکیب نمودن دو روش کنترلی غیرخطی اگرچه عملکردی نزدیک به روش FBFLC داشته اما همواره سریع‌تر عمل نموده و توانسته نوسانات توان حقیقی تولیدی DFIG را با جبران توان رآکتیو با سرعت بالاتری کاهش داده، تولید توان رآکتیو DFIG را به صفر برساند و پایداری مزرعه بادی شبکه را بهبود بخشد.

نمودار ولتاژ لینک dc و سرعت زاویه‌ای روتور DFIG، گشتاور الکترومغناطیسی و جریان‌های محورهای d و q استاتور و روتور نیز در شکل (۹) و مقادیر دقیق‌تر نیز در جدول (۲) آورده‌شده‌است. در این جا نیز روش FBAC با عملکردی نسبتا بهتر از روش FBALC و عملکرد کاملا بهتر از روش PIC نوسانات ولتاژ dc و سرعت زاویه‌ای

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-15]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.9.0]

روتور DFIG را کاهش دهد. همچنین عملکرد سیستم حفاظت کروبار در شکل‌های جریان‌های محور d و q روتور، توان‌های تولیدی و ولتاژ dc مبدل به‌وضوح دیده می‌شود.

جدول (۱): جزئیات سیستم شبیه‌سازی شده

System Parameters :	
Base Power (MVA)	100
Frequency (Hz)	60
DFIG Parameters :	
Number of Wind turbine	68
Nominal power each Wind Turbine (MW)	1.25
Line to Line Voltage (volt)	575
Rotor and Stator Resistance (p.u.)	$[5, 7.06]*10^{-3}$
DC-Link voltage (volt)	1200
GSC regulator gains [Kp, Ki]	[2.5, 500]
RSC regulator gains [Kp, Ki]	[0.3, 8]
DC voltage regulator gains [Kp, Ki]	$[2, 50]*10^{-3}$
STATCOM Parameters :	
Rating (MVA)	±100
Nominal voltage (volt)	$13.8*10^{3}$
DC link nominal voltage (volt)	$40*10^{3}$
DC link total capacitance (F):	$375*10^{-3}$
Vac Regulator gains (PIC) [Kp, Ki]	[5, 1000]
Vdc Regulator gains (PIC) [Kp, Ki]	$[0.1, 20]*10^{-3}$
Current Regulator gains (PIC) [Kp, Ki]	[0.3, 10]

جدول (۲): مقادیر پارامترهای DFIG در طی و پس از رفع خطای سه-فاز

	PIC	FBFLC	FBAC
i_{ds}	846	858	782
i_{dr}	928	870	841
iqr	352	341	325
ω_r	5852	5305	5102
T_{em}	970	993	898
V_{dc}	502	367	118
P_{DFIG}	781	650	569
Q_{DFIG}	400	353	358
The Values are minimum time to reach 95% of final steady state values (ms)			

۶- نتیجه‌گیری

این مقاله دو روش کنترلی غیرخطی مبتنی بر همواری دیفرانسیلی شامل روش کنترل خطی سازی پسخورد مبتنی بر همواری (FBFLC) و روش تطبیق‌پذیر مبتنی بر همواری (FBAC) را برای STATCOM معرفی و مورد مقایسه قرار می‌دهد. روش کنترل مبتنی بر همواری برای سیستم‌های هموار این ویژگی را به همراه دارد که خط مسیر تمامی متغیرهای سیستم با کنترل کردن مجموعه‌ای از متغیرهای ویژه و مشتق‌های مرتبه بالاتر آن ها تحت عنوان خروجی‌های هموار به سادگی قابل کنترل خواهدبود. اگرچه هر دو روش کنترلی معرفی شده در مقایسه با روش کنترلی خطی معمول شامل کنترل‌کننده‌های خطی PI عملکرد بسیار بهتری دارند، اما روش کنترلی FBAC به‌واسطه وجود ترم‌های تطبیق‌پذیر و سادگی در طراحی کنترل‌کننده از روش دیگر عملکرد مطلوب‌تری دارد. کارایی این دو روش کنترلی برای STATCOM در شبکه‌های قدرت شامل مزارع بادی مجهز به DFIG به‌منظور جبران‌سازی سریع‌تر توان رآکتیو و بهبود قابلیت LVRT در آن مزرعه بادی میتواند راهگشا باشد.

مراجع

[1] Shahgholian, G., "*Analysis and Simulation of Dynamic Performance for DFIG-Based Wind Farm Connected to A Distribution System*", Energy Equipment and Systems, Vol. 6, No. 2, pp. 117-130, June 2018.

[۲] شمس‌نیا، علی، حسینی، سیدحسین، دانیالی، سعید، **"مدلسازی و شبیه‌سازی اینورتر هیبرید با منابع انرژی تجدید پذیر سلول خورشیدی و توربین بادی مجهز به الگوریتم MPPT بهبودیافته"**، نشریه کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران، **سال: ۱، شماره: ۲، ص: ۸-۱۸، زمستان ۱۳۹۱.**

[3] Rather, Z.H., Chen, Z., Thøgersen, P., "*Dynamic Reactive Power Compensation of Large-Scale Wind Integrated Power System*", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 30, No.5, pp. 2516–2526, Sep. 2015.

[4] Pao, L.Y., Johnson, K.E., "*Control of wind turbines*", IEEE Control Systems Magazine, Vol. 31, No. 2, pp. 44-62, April 2011.

[5] Jafari, A., Shahgholian, G., "*Analysis and Simulation of A Sliding Mode Controller for Mechanical Part of A Doubly-Fed Induction Generator Based Wind Turbine*", IET Generation, Transmission and Distribution, Vol. 11, No. 10, pp. 2677-2688, July 2017.

[۶] صفایی، آرمان، حسینیان، سیدحسین، عسکریان ابیانه، حسین، **"بهبود قابلیت گذر از خطای توربین بادی دارای ژنراتور القایی تغذیه دوگانه در ریز شبکه"**، نشریه کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران، سال: ۶، شماره: ۱۲، ص: ۳۴-۴۵، پاییز و زمستان ۱۳۹۶.

[7] Edrah, M., Lo, K.L., Anaya-lara, O., "*Impacts of high penetration of DFIG wind turbines on rotor angle stability of power systems*", IEEE Trans. on Sustainable Energy, Vol. 6, No. 3, pp. 759–766, July 2015.

[8] Mohaghegh Montazeri, M., Xu, D., Yuwen, B., "*Improved Low Voltage Ride Through capability of wind farm using STATCOM*", Proceeding of the IEEE/IEMDC, pp. 813–818, May 2011.

[9] Mukhopadhyay, B., Mandal, R.K., "*Voltage compensation using PSO-PI controlled STATCOM in a DFIG-based grid-connected wind energy system*", International Conference on Electrical Power and Energy Systems, ICEPES 2016, pp. 88–93, May 2017.

[10] Kerrouche, K.D.E., Wang, L., Abdelkader, A., Boumediene, L., Van Den Bossche, A., "*Fractional-Order Sliding Mode Control for D-STATCOM Connected Wind Farm Based DFIG Under Voltage Unbalanced*", Arabian Journal for Science and Engineering, Vol. 44, No. 3, pp. 2265-2280, March 2019.

[11] Sun, X., Wu, W., "*A new sliding mode control of STATCOM and its effects on wind farm*", Proceedings of the IEEE/EMEIT, Vol. 6, pp. 2938–2941, Harbin, China, Sep. 2011.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-15]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.9.0]

[12] Xu, Y., Li, F., "*Adaptive PI Control of STATCOM for Voltage Regulation*", IEEE Trans on Power delivery, Vol. 29, No. 3, pp. 1002–1011, June. 2014.

[13] Hemeida, M.G., Rezk, H., Hamada, M.M., "*A comprehensive comparison of STATCOM versus SVC-based fuzzy controller for stability improvement of wind farm connected to multi-machine power system*", Electrical Engineering, Vol. 100, No. 2, pp. 935–951, May. 2017.

[14] Shahgholian, G., Izadpanahi, N., "*Improving the performance of wind turbine equipped with DFIG using STATCOM based on input-output feedback linearization controller*", Energy Equipment and Systems, Vol. 4, No.1, pp. 65–79, June 2016.

[15] Saxena, N.K., Kumar, A., "*Reactive power control in decentralized hybrid power system with STATCOM using GA, ANN and ANFIS methods*", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 83, No. , pp. 175–187, Dec. 2016.

[16] Lingling, F, Miao, Z. *Modeling and Analysis of Doubly Fed Induction Generator Wind Energy Systems*. Academic Press, 2015.

[17] Kerrouche, K.D.E., Abdelkader, M., Boumediene, L., Van Den Bossche, A.P.M., "*A comprehensive review of LVRT capability and sliding mode control of grid-connected wind-turbine-driven doubly fed induction generator*", Automatika, Vol. 57, No. 4, pp. 922–935, May. 2017.

[18] Ghorbanian, M.J., Goodarzvand, F., Pourdaryaei, A., Mahadi, W.N.L., "*Mitigating voltage sag by implementing STATCOM on DFIG-based wind farms connected to a power system*", Proceeding of the IEEE/ICE2T, pp. 131–136, Kuala Lumpur, Malaysia, Aug. 2014.

[19] Singh, B., Saha, R., Chandra, A., Al-haddad, K., "*Static synchronous compensators (STATCOM): a review*", IET Power Electronics, Vol. 2, No. , pp. 297–324, July. 2009.

[20] Hingorani, N.G., Gyugyi, L., "Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC transmission system" IEEE press 2000.

[21] Shahnia, F, Sumedha, R, Ghosh, A. *Static Compensators (STATCOMs) in Power Systems.* Springer Press 2014

[22] Wang, K., Crow, M.L., "*Power system voltage regulation via STATCOM internal nonlinear control*", IEEE Trans on Power Systems, Vol. 26, No. 3, pp. 1252–1262, Aug. 2011.

[23] Gensior A., Sira-ramírez, H., Rudolph, J., Güldner, H., "*On Some Nonlinear Current Controllers for Three-Phase Boost Rectifiers*", IEEE Trans on Industrial Electronics, Vol. 56, No. 2, pp. 360–370, Feb. 2009.

[24] Fliess, M., Levine, J., Martin, P., Rouchon, P., "*Flatness and defect of non-linear systems: Introductory theory and examples*", International Journal of Control, Vol. 61, No. 6, pp. 1327–1361, June. 1995.

[25] Song, E., Lynch, A.F., Dinavahi, V., "*Experimental validation of Nonlinear Control for a Voltage Source Converter*", IEEE Trans on Control Systems Technology, Vol. 17, No. 5, pp. 1135–1144, Sep. 2009.

[26] Xu, Y., Li, F., Jin, Z., Huang, C., "*Flatness-based adaptive control (FBAC) for STATCOM*", Electric Power Systems Research, Vol. 122, No, pp. 76–85, May. 2015.

زیرنویس‌ها

1- Static synchronous compensator
2- Doubly fed induction generator
3- Low voltage ride through
4- Point of common coupling
5- Short circuit capacity
6- Transition system operators
7- Flexible alternative current transmission systems
8- Power system stabilizer
9- Power oscillation damping
10- Static VAR compensator
11- Mechanically switched capacitor
12- Artificial neural network
13- Flatness based adaptive control
14- Flatness based feedback linearization control
15- Flat system
16- Crowbar
17- Rotor side converter
18- Voltage sag
19- Voltage swell
20- Voltage flicker

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-15]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.1.9.0]