

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

حمید قائدی، دانشآموخته کارشناسی ارشد، غضنفر شاهقلیان، دانشیار، مهندز هاشمی، استادیار

دانشکده مهندسی برق - واحد نجف آباد - دانشگاه آزاد اسلامی - نجف آباد - ایران

ghaedi.hamid@yahoo.co.uk, shahgholian@iaun.ac.ir, m.hashemi@ec.iut.ac.ir

چکیده: شبکه‌های قدرت، سیستم‌های پیچیده بهم پیوسته و غیرخطی هستند و هنگامی که تحت نفوذ منابع بادی قرار می‌گیرند، این مسئله شدیدتر خواهد بود. جبران‌سازهای سنکرون استاتیکی^۱ (STATCOM) جهت بهبود تنظیم ولتاژ و برآورده نمودن کدهای شبکه، در سیستم‌های قدرت، شامل مزارع بادی مبتنی بر ژنراتور القایی تغذیه دوگانه^۲ (DFIG) مورد استفاده قرار می‌گیرند. علی‌رغم ماهیت غیرخطی STATCOM، روش کنترلی مرسوم در آن‌ها، براساس کننده‌های 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.

واژه‌های کلیدی: جبران‌ساز سنکرون استاتیکی، قابلیت گذر از کمبود ولتاژ^۳ (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 نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۱- مقدمه

بالاتر STATCOM در مقایسه با روش‌های قدیمی‌تر، مانند استفاده از جبران‌کننده وار استاتیکی^۱ (SVC) و خازن سوئیچ‌شونده مکانیکی^۲ (MSC)، از فرکанс 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 مدل‌لغزشی [۱۱، ۱۰]، کنترل تطبیقی [۱۲]، کنترل فازی [۱۳] و کنترل خطی-سازی پسخورد ورودی-خروجی [۱۴] برای STATCOM اشاره کرد. مرجع [۱۵] الگوریتم‌های ژنتیک، شبکه هوش مصنوعی^۳ (ANN) و ANFIS را برای انتخاب بهینه ضرایب کنترل‌کننده‌های خطی PI موجود در STATCOM مورد مقایسه قرار داده است. روش‌های کنترل خطی و همچنین الگوریتم‌های تکاملی صرفاً 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^۴ (FBAC) و روش کنترل مبتنی بر همواری به‌کمک نظریه خطی سازی پسخورد^۵ (FBFLC) برای STATCOM برای بهبود قابلیت گذر از کمودول ولتاژ ارائه شده است. 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 تعییب خط، عملکرد دقیق‌تر و همچنین هموارتر STATCOM را به دنبال خواهد داشت 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 شده است.

۲- قابلیت گذر از کمودول 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 DFIG شامل مدل‌سازی تمامی اجزای الکتریکی و مکانیکی که در مرجع [۱۶] آمده، استفاده شده است. معادلات ولتاژ ماشین DFIG در دستگاه مرجع سنکرونون dq به صورت زیر است:

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

$$V_{dqr} = r_i i_{dqr} + \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_b} \psi_{qdr} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d}{dt} (\psi_{dqr}) \quad (2)$$

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 و ω_r و

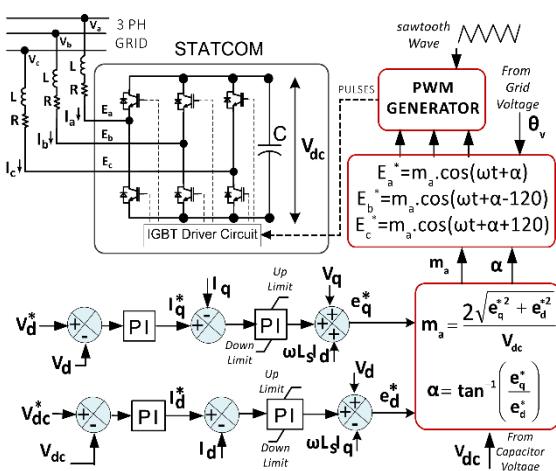
امروزه انرژی‌های تجدیدپذیر، عمدتاً به دلیل افزایش پیوسته تقاضای انرژی الکتریکی، فراوانی در طبیعت، فشارهای واردہ برای کاهش آلودگی سوخت‌های فسیلی و حذف وابستگی به این نوع سوخت‌ها، بسیار مورد توجه پژوهش‌گران و همچنین فعلان صنعت برق قرار گرفته‌اند [۲، ۱]. در میان انواع منابع انرژی تجدیدپذیر، انرژی باد به صورت فزاینده‌ای در حال تبدیل شدن به متداول‌ترین نوع و قبل رقابت با منابع انرژی مرسوم و رایج است. انجمان انرژی‌های بادی اروپا، حداقل سهم تولید انرژی بادی از کل میزان تولید انرژی الکتریکی در کشورهای اروپایی را تا سال ۲۰۳۰ برابر ۲۵٪ هدف‌گذاری کرده است [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 مجازی توان حقیقی و راکتیو و قابلیت کارکرد در هر چهار ناحیه مشخصه توان حقیقی-راکتیو به محبوب‌ترین و پر استفاده-ترین طرح در صنعت انرژی بادی تبدیل شده‌اند [۶، ۵]. مزارع بادی عموماً به دلیل حجم بیشتر منابع بادی در نقاط دوردست و یا دور از مراکز اصلی بارها، در نقطه اتصال مشترک^۶ (PCC) به شبکه قدرت متصل شده‌اند. در این نقاط اتصال، شبکه قدرت عموماً به دلیل پایین بودن ظرفیت اتصال کوتاه^۷ (SCC) و نسبت R/X، یک شبکه ضعیف تلقی می‌شود. افزایش ضربی 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 بوجود 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^۸ (TSO)، تحت عنوان کدهای شبکه، منتشر شده است. 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 ضربی 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 خطأ در شبکه قدرت به منظور برآورده کردن کدهای شبکه دیگر کافی نخواهد بود. در این شرایط بهره گرفتن از ادوات FACTS (سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف‌پذیر)^۹ مانند STATCOM برای جبران سازی 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)، به علت خطی بودن گرینه بسیار مناسبی باشد [۸، ۷]. سرعت

سريع‌تر توان راکتیو و در نتیجه بازیابی بسیار سريع ولتاژ، کنترل پذیری 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 و لتاژ سه‌فاز سنکرون با شبکه و صرفاً 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 نداشته باشد. این ویژگی STATCOM را قادر می‌سازد تا نوسانات ولتاژ همچون کمبود ولتاژ^{۱۷}، بیشیود ولتاژ^{۱۸}، فلیکر ولتاژ^{۱۹} و اختشاشات ولتاژ را حذف نموده و ولتاژ ماس اتصالی خود را تنظیم کند که در اثر آن پخش توان و ضربت توان، کنترل‌پذیری و درنتیجه انعطاف‌پذیری شبکه، بهبود قابل توجهی پیدا می‌کند [۱۹]. در این‌ها، بیشینه توان راکتیو قابل تولید، با کاهش ولتاژ خط (در جریان ثابت) به صورت خطی کاهش می‌یابد (در SVC‌ها با محدود ولتاژ افت می‌کند). از این‌رو این تجهیز بهترین انتخاب برای جبران‌سازی توان راکتیو در مزارع بادی برای بهبود LVRT است.

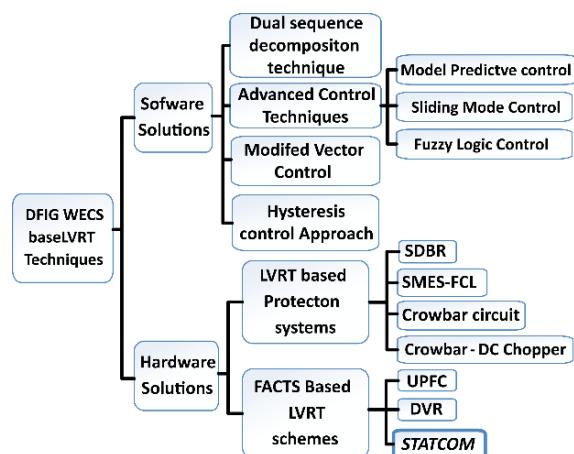
VSC به طور معمول از یک مبدل منبع ولتاژی STATCOM شامل سوئیچ‌های IGBT، یک خازن ذخیره انرژی، ترانسفورماتور اتصال به شبکه و یک سیستم کنترلی تشکیل شده و از تکنیک مدولاسیون پهنه‌ای پالس PWM برای کنترل کلیدها استفاده می‌شود. شمای کلی STATCOM و سیستم کنترلی رایج مبتنی بر کنترل-کننده‌های خطی PI در شکل (۲) نشان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



شکل (۲): سیستم کنترلی خطی STATCOM مبتنی بر کنترل-کننده‌های PI

معادلات STATCOM در دستگاه dq عبارتند از [۲۰]:

به ترتیب سرعت‌های زاویه‌ای سنکرون، مکانیکی روتور و پایه و r_r و r_s به ترتیب مقاومت‌های استاتور و روتور هستند. استاتور این ماشین به طور مستقیم و روتور آن از طریق مبدل منبع ولتاژی پشت‌به‌پشت، به شبکه قدرت متصل شده است. توان نامی این مبدل تقریباً 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 سیم پیچ استاتور به شبکه قدرت است که آن‌ها را نسبت به اختشاشات ولتاژ شبکه بسیار حساس می‌کند. در طی رخداد خط‌لا 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 به وجود آمده، فعال می‌شود و جریان روتور را با پس 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 تشید خواهد کرد. 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 خط‌لا 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 شده است که می‌توان آن‌ها را مطابق شکل (۱) طبقه‌بندی نمود [۱۷].



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

با این وجود بهعلت سختگیرانه بودن الزامات LVRT و پایین بودن ظرفیت مبدل، روش‌های سختافزاری عملکرد بهتری دارند. در میان این روش‌ها، به کار بردن ادوات FACTS همچون STATCOM، علی‌رغم هزینه‌های بالاتر، بهعلت جبران دینامیکی

$$u = \psi(y, \dot{y}, \ddot{y}, \dots, y^{(\beta+1)}); \text{ Rank}(\psi) = m \quad (7)$$

و مقادیر حالت را به صورت زیر:

$$x = \rho(y, \dot{y}, \ddot{y}, \dots, y^{(\beta)}); \text{ Rank}(\rho) = n \quad (8)$$

بازنويسي نمود، سيسitem مذکور، يك سيسitem هموار است و تمامی ديناميک‌های سيسitem قابل بازنويسي از روی خروجي‌های هموار و مشتق‌های مرتبه بالاتر آن‌ها است و به کمک اين روش کنترلي، به يك سيسitem کنترل پذير خطی تبديل می‌شود [۲۴]. در معادلات بالا، β و r دو عدد مثبت هستند. از اين رو چالش اصلی در سيسitem‌های غيرخطی هموار، يافتن خروجي‌های هموار مناسب بهمنظور تعبيين ساير متغيرهای سيسitem است. در ادامه دو روش کنترلي فرعی بر پایه روش کنترلي همواري معرفی و مقایسه می‌شوند.

۱-۴ - کنترل مبتنی بر همواري به کمک تئوري خطی سازی پسخورد

ايده اصلی خطی سازی پسخورد، تبديل يك سيسitem ديناميکي غيرخطی به يك سيسitem خطی از طریق حذف ديناميک غيرخطی با يك فيديبک غيرخطی و بهره‌گيري از تکنيک‌های کنترل خطی است. در مرجع [۲۵] به کمک نظریه خطی سازی پسخورد، ابتدا مقادیر خروجي‌های هموار به طور قاعده‌مند تعبيين شده‌اند. سپس با تکيه بر اين اصل که تمامی سيسitem‌های کنترل پذير و يا سيسitem‌هایي که شرایط روش کنترل خطی سازی پسخورد را دارند حتیما هموار دифرانسيلى خواهد بود، از روش کنترل مبتنی بر همواري، کنترل حلقه‌باز سيسitem، طراحی شده است. با درنظر گرفتن مقادير ورودي های کنترل و متغيرهای حالت به صورت زير:

$$[u_1, u_2]^T = [m_a \cos(\delta), m_a \sin(\delta)]^T \quad (9)$$

$$[x_1, x_2, x_3]^T = [i_d, i_q, V_{dc}]^T \quad (10)$$

چنان‌چه تبديل حالت به صورت زير در نظر گرفته شود:

$$[z_1, z_2, z_3]^T = [\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3]^T \quad (11)$$

با حل معادلات ديفرانسيلى جزئی، دو عبارت φ_1 و φ_2 به صورت زير، به دست خواهد آمد:

$$\begin{cases} \varphi_1 = \frac{3}{4} L(x_1^2 + x_2^2) + \frac{1}{2} C x_3^2 \\ \varphi_2 = x_2 \end{cases} \quad (12)$$

عبارت φ_1 برای مجموع انرژی ذخیره شده در المان سلفی و خازنی و φ_2 جريان i_q است. در نهايیت ماترييس:

$$F(x, t) = \begin{bmatrix} L_{g1} L_f \varphi_1 & L_{g2} L_f \varphi_1 \\ L_{g1} \varphi_2 & L_{g2} \varphi_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

محاسبه شده و در نزديکی نقطه x_0 ناتكين خواهد بود. در محاسبه ماترييس F ، مشتق‌های لی با علامت L نشان داده شده‌اند. حال برای طراحی کنترل کننده حلقه‌باز، طبق آن‌چه گفته شد، خروجي‌های هموار برابر مقادير (φ) در نظر گرفته می‌شوند:

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

که در آن i_d و i_q به ترتیب اجزای محور d و q جريان ساز، v_d و v_q به ترتیب اجزای محور d و q ولتاژ شبکه، e_d و e_q به ترتیب اجزای محور d 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 مقادير e_d و e_q به ترتیب به صورت زیر خواهند بود:

$$\begin{cases} e_d = \frac{1}{2} \cdot V_{dc} m_a \cos(\delta) \\ e_q = \frac{1}{2} \cdot V_{dc} m_a \sin(\delta) \end{cases} \quad (4)$$

که در آن m_a انديس مدولاسيون و δ جابه‌جايی فاز در STATCOM در دستگاه dq هستند [۲۱].

بهمنظور کنترل مطلوب‌تر، از همان ابتدا روش‌های بسياری برای کنترل STATCOM معرفی شدند که غالبا شامل خطی‌سازی معادلات غيرخطی STATCOM حول يك نقطه تعادل در قاب مرجع dq بهره‌گيري از کنترل کننده‌های خطی PI بودند. در بسياری از مراجع، روش‌های متنوعی برای تنظيم دقیق و هوشمندانه پارامترهای اين کنترل کننده‌ها بیان شده است [۲۲، ۲۳]. اما از آن‌جا که مدل میانگین STATCOM غيرخطی است و روش‌های کنترل غيرخطی عملکرد سریع‌تر، دقیق‌تر و مقاوم‌تری در مقایسه با روش‌های کنترل خطی نسبت به تغیيرات سيسitem دارند، به کارگيري اين روش‌ها در شبکه‌های شامل مزارع بادی، بهمنظور بهبود قابلیت LVRT سودمند خواهد بود.

۴ - نظریه کنترلی همواری دیفرانسیلی

در روش کنترل مبتنی بر همواري يك سيسitem مانند يك میدان دیفرانسیلی تولیدشده توسط مجموعه‌ای شامل ورودی‌ها و متغيرهای حالت دیده می‌شود. چنان‌چه مجموعه‌ای از خروجي‌های سيسitem (برابر با تعداد ورودی‌ها) وجود داشته باشد که بتوان تمامی متغيرهای حالت و ورودی‌های کنترل را، از روی آن‌ها و مشتق‌های تا مرتبه β آن‌ها تعبيين کرد؛ يا به طور دقیق‌تر چنان‌چه يك سيسitem غيرخطی با بردار ورودی $u \in R^m$ و بردار حالت $x \in R^n$ به فرم (۵) وجود داشته باشد:

$$\dot{x} = f(x) + g(x) \cdot u \quad (5)$$

چنان‌چه بردار خروجي $y \in R^m$ وجود داشته باشد، بطوری که:

$$y = h(x, u, \dot{u}, \dots, u^{(r)}); \text{ Rank}(h) = m \quad (6)$$

و مقادير ورودی را بتوان به صورت زير:

$$\begin{cases} u_1 = \frac{2}{y_2} \left(\frac{-2cL}{3v_d} (y_2 \ddot{y}_2 + \dot{y}_2^2) - \frac{2cR}{3v_d} y_2 \dot{y}_2 + \omega L y_1 + v_d \right) \\ u_2 = \frac{-2}{y_2} \left(\frac{-2\omega c L}{3v_d} y_2 \dot{y}_2 + L \dot{y}_1 + R y_1 - v_q \right) \end{cases} \quad (18)$$

و برای متغیرهای حالت به سادگی خواهیم داشت:

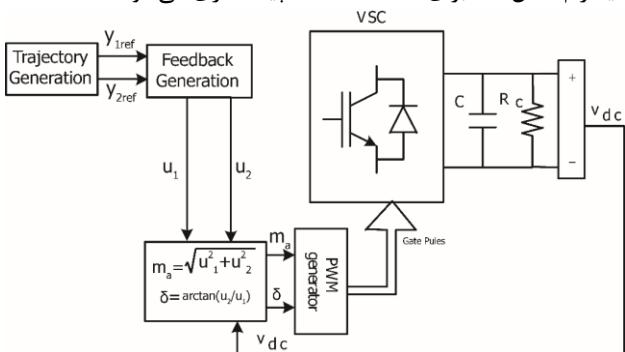
$$\begin{cases} x_1 = \frac{2c}{3v_d} y_2 \dot{y}_2 \\ x_2 = y_1 \\ x_3 = y_2 \end{cases} \quad (19)$$

با تعیین مقادیر مرجع مناسب برای خروجی‌های هموار، قانون تعییب خطابه صورت زیر به دست می‌آید. با در نظر گرفتن پارامتر خطابه e داریم:

$$\begin{cases} \dot{e}_1(t) - k_1 e_1(t) = 0 \\ \dot{e}_2(t) - k_3 \dot{e}_2(t) - k_2 e_2(t) = 0 \end{cases} \quad (20)$$

در ادامه ضرایب $K = [k_1, k_2, k_3]$ با توجه مقادیر خطابها و مشتق این مقادیر، به صورت دینامیکی و لحظه‌ای تعیین می‌شوند. روابط مربوط به تعیین این ضرایب در مرجع [۲۶] به طور کامل آورده شده‌اند. این عمل علاوه بر بهبود عملکرد کلی سیستم و پاسخ‌دهی دینامیکی و مقاومت، 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 بلوك دیاگرام شکل (۴) برای STATCOM پیاده‌سازی می‌شود.



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

$$[\varphi_1(x), \varphi_2(x)]^T = [y_{1f}, y_{2f}]^T \quad (14)$$

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

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = F(x, t)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{y}_{1f} - L_f^2 \varphi_1(x) \\ \dot{y}_{2f} - L_f \varphi_1(x) \end{bmatrix} \quad (15)$$

با این حال به دلیل دینامیک‌های ناشناخته و خطابه مدل‌سازی وجود اغتشاشات، می‌بایست از پسخورد حالت نیز بهره برد. در این صورت مقادیر خطابه رديابی به صورت اختلاف مقادیر لحظه‌ای خروجی‌های هموار y و مقادیر مرجع برای تمامی خروجی‌های هموار y_{ref} تعریف می‌شوند. در نهایت برای قانون تعییب خطابه خواهیم داشت:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = F^{-1} \cdot \begin{bmatrix} -k_1 e_1 - k_2 e_2 - k_3 e_3 - L_f^2 \varphi_1(x) + \ddot{y}_{1d} \\ -k_4 e_4 - k_5 e_5 - L_f \varphi_2(x) + \dot{y}_{2d} \end{bmatrix} \quad (16)$$

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 به صورت زیر به دست می‌آینند:

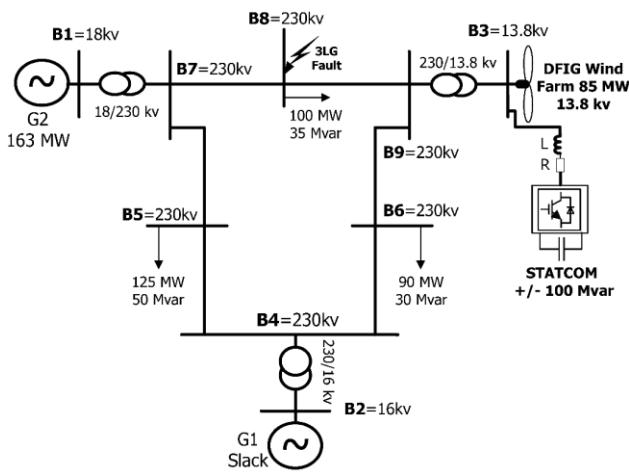
$K = [k_1, k_2, k_3, k_4, k_5] = [8500, 5600, 100, 2800, 150]$ این روش کنترلی مطابق بلوك دیاگرام شکل (۳) برای STATCOM پیاده‌سازی می‌شود.

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 تعییب خطاب طراحی و معرفی شده‌است. مزیت این روش آن است که با تنظیم لحظه‌ای ضرایب چندجمله‌ای تعییب خطاب، رديابی مقادیر مرجع در زمان کمتری اتفاق می‌افتد. در حالی که مدل‌سازی سیستم STATCOM بردار مغایرها حالت و ورودی‌های کنترل عیناً مانند روش کنترل پیشین است، این بار به جای مجموع انرژی ذخیره شده در المان‌های حافظه‌دار، صرفاً 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 ذخیره شده در خازن علت این انتخاب بوده است، اما مزیت انتخاب ساده‌تر خروجی‌های هموار را در ادامه نشان خواهد داد که به ساده‌تر کردن روابط کنترلی در مقایسه با روش پیشین، انجام‌یده است. از این‌رو خروجی‌های هموار به صورت زیر تعیین می‌شوند:

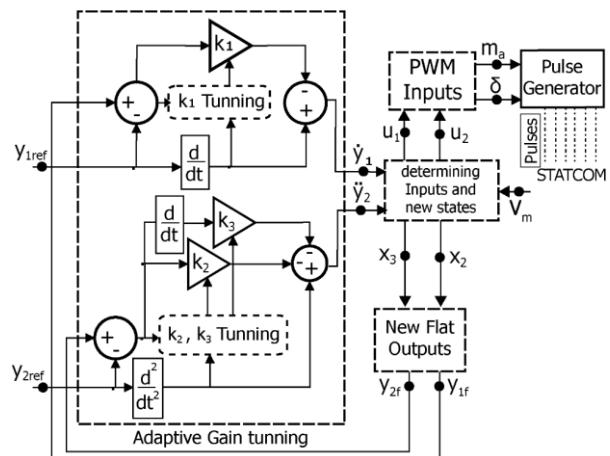
$$[y_{1f}, y_{2f}]^T = [x_2, x_3]^T = [i_q, V_{dc}]^T \quad (17)$$

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



شکل (۵): سیستم شبیه‌سازی شده

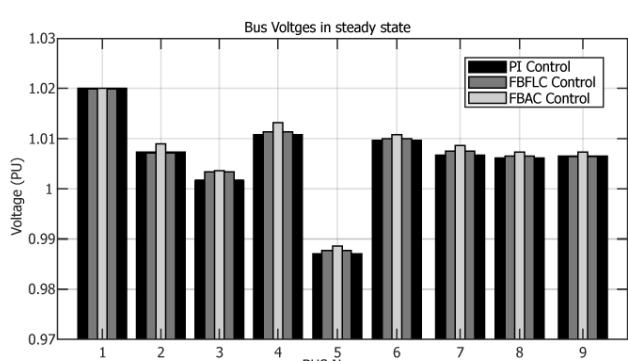
نمودار ولتاژ نهایی باس‌ها برای خطای سه‌فاز پس از رسیدن به مقدار نهایی دائمی در هر سه وضعیت در شکل (۶) نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودار مشخص است، ولتاژ باس‌ها به کمک STATCOM افزایش یافته است، اما در محدوده مجاز [۰/۹۵، ۱/۰۵] پریونیت باقی می‌ماند. نمودار ولتاژ تمامی باس‌ها در بازه‌ی ۲/۵ ثانیه‌ای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



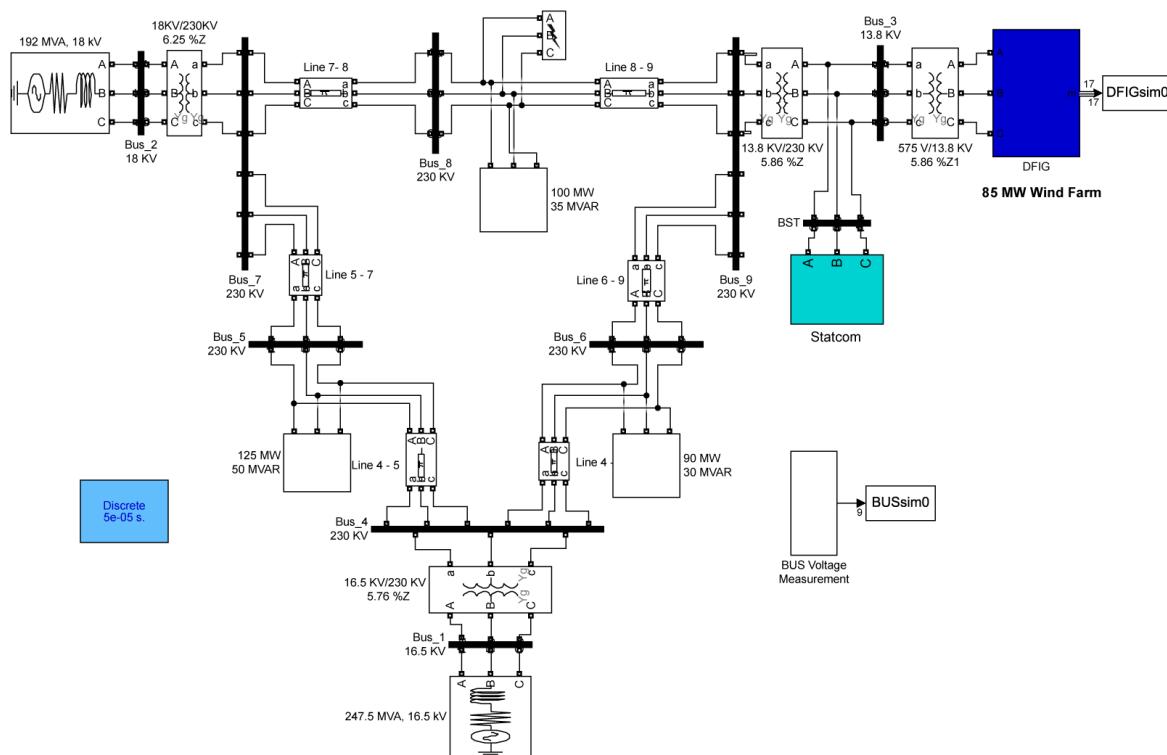
شکل (۴): بلک دیاگرام روش کنترلی FBAC برای STATCOM

۵- نتایج شبیه‌سازی

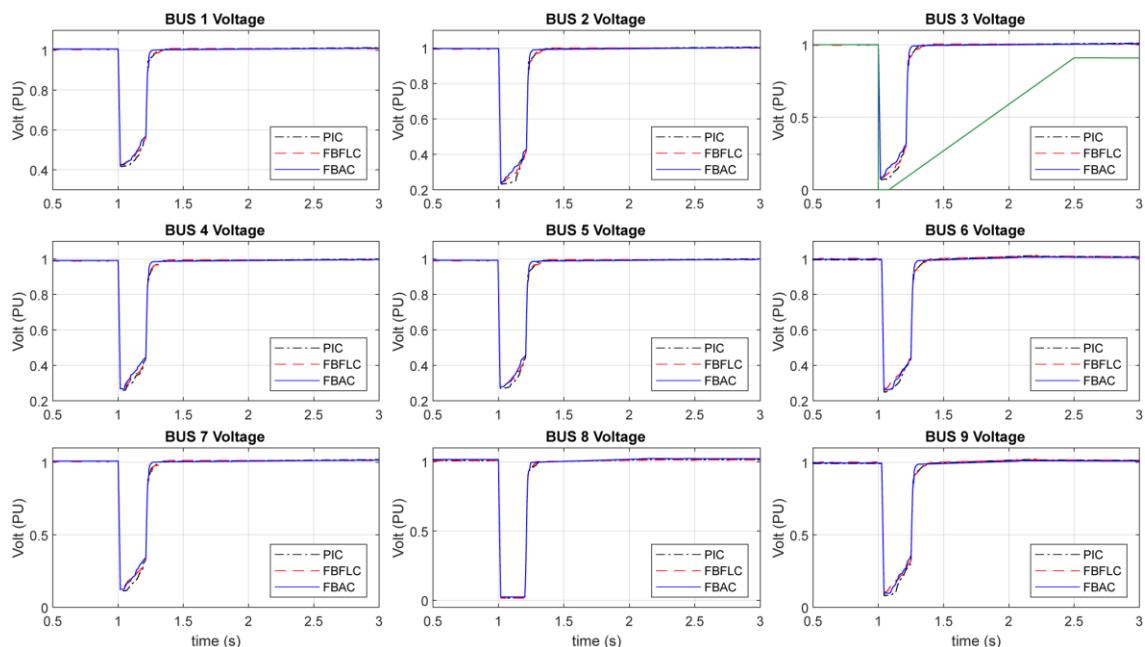
در این قسمت برای بررسی روش‌های کنترلی معرفی شده در SWSCC، سیستم قدرت STATCOM نشان داده شده در شکل (۵) شبیه‌سازی شده است. شبیه‌سازی در محیط سیمولینک نرم‌افزار متلب انجام شده که شمای سیستم مدل شده در شکل (۷) نشان داده شده است. در این شبکه ۹ باس، ۳ ژنراتور سنکرون وجود دارند که از طریق ترانسفورماتورها و خطوط انتقال، ۳ بار استاتیکی را تعذیب 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 کروپل، تعویض و برای بهبود قابلیت LVRT و همچنین پایداری شبکه از یک STATCOM با ظرفیت ۱۰۰ مگاوات آمپر در باس ۱-۰/۰۰۱+/- می‌گذرد. استفاده شده است. جزئیات شبیه‌سازی در جدول (۱) آورده شده است. در کل بازه‌ی ۴ ثانیه‌ای شبیه‌سازی، سرعت باد به طور ثابت برابر ۱۲ متر بر ثانیه است. برای شبیه‌سازی خطای ابتدا یکبار در ثانیه اول شبیه‌سازی، یک خطای قوی سه‌فاز بدون امپدانس به زمین با $\Omega = ۰/۰۰۱$ به طول $R_g = ۰/۰۰۱ \Omega$ و $R_f = ۰/۰۰۱ \Omega$ 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.



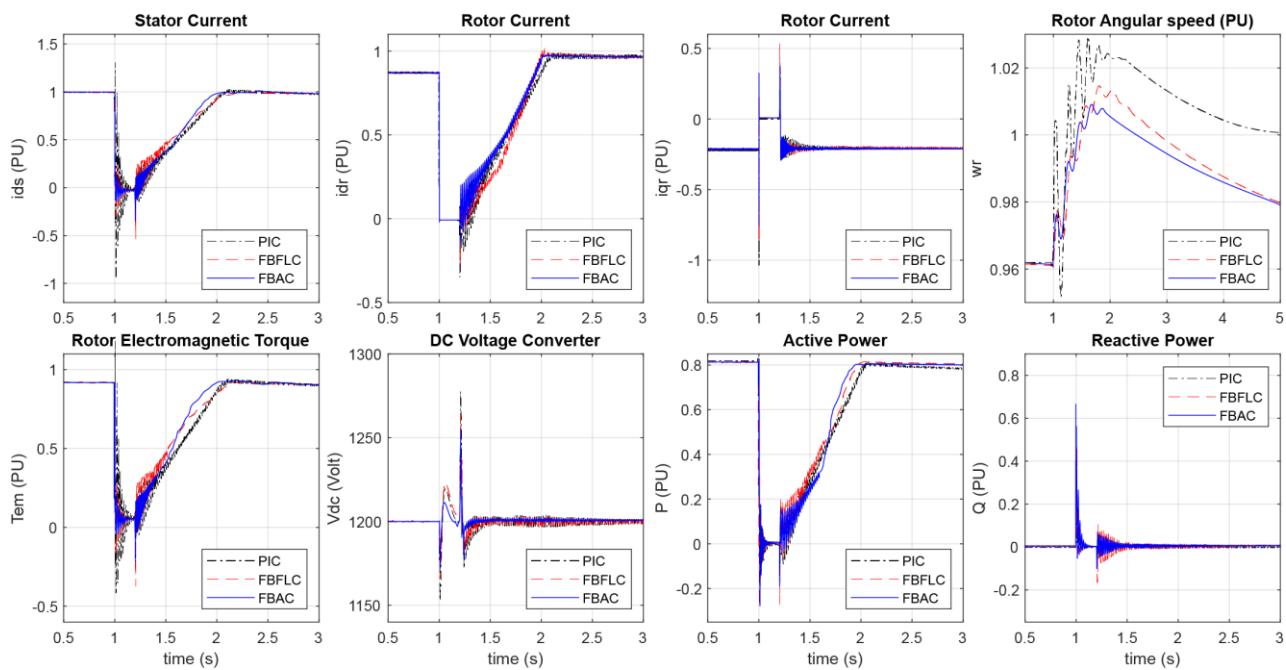
شکل (۶): نمودار ولتاژ باس‌ها بر حسب پریونیت در حالت دائمی برای خطای سه‌فاز



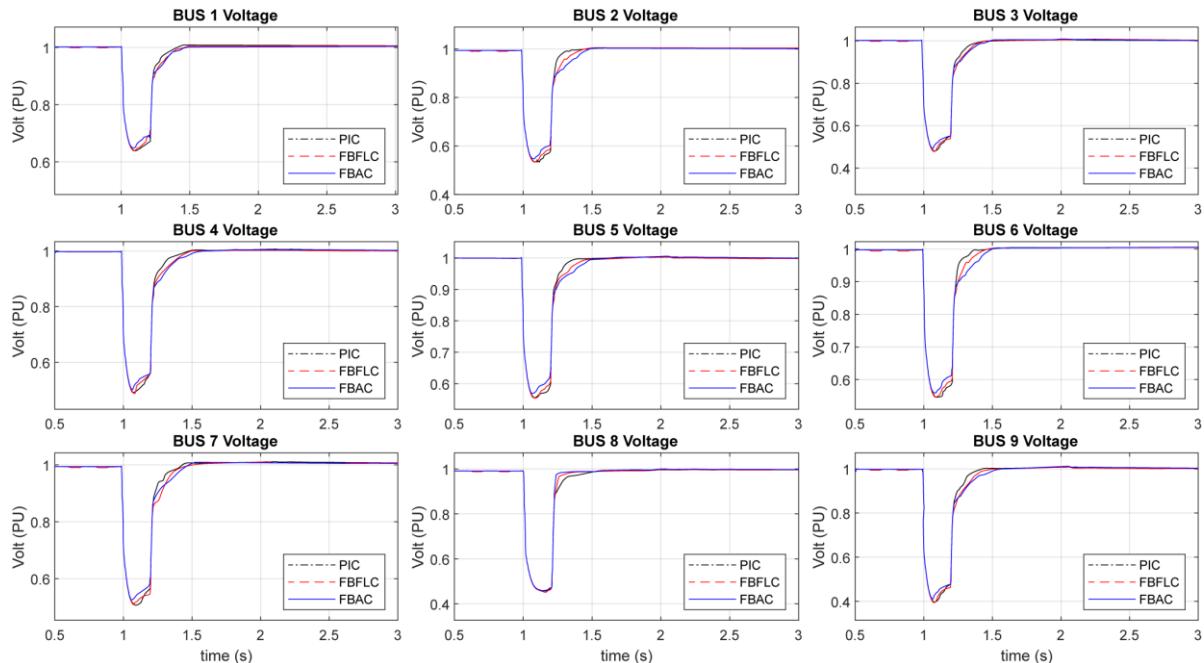
شکل (۷): شمای سیستم مورد مطالعه در محیط سیمولینک نرم‌افزار متلب



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



شکل (۹): نمودار پارامترهای در بازه خطای سه‌فاز بر حسب پریونیت



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

نموده و توانسته نوسانات توان حقيقی 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) آورده شده است. در اینجا نیز روش FBAC با عملکردی نسبتاً بهتر از روش PIC و FBFLC و عملکرد کاملاً بهتر از روش FBFLC داشته اما همواره سریع‌تر عمل

نمودار توان حقيقی و رآکتیو تولیدی DFIG در شکل (۹) نشان داده شده‌اند. همچنین در جدول (۲) بازه زمانی لازم برای رسیدن به ۹۵٪ مقدار دائمی پارامترهای مزرعه بادی در طی خطای سه‌فاز و پس از رفع آن مشخص شده است. اگرچه توان حقيقی DFIG در بازه خطای DFIG سریع‌تر از سایر روش‌ها ظاهر شده، اما در سایر حالات، در روش PIC عملکرد پرنوسان و کندی نسبت به دو روش دیگر داشته است. در ادامه عملکرد FBAC به لطف ترکیب نمودن دو روش کنترلی غیرخطی اگرچه نزدیک به روش FBFLC داشته اما همواره سریع‌تر عمل

کنترلی FBAC به واسطه وجود ترم‌های تطبیق‌پذیر و سادگی در طراحی کنترل کننده از روش دیگر عملکرد مطلوب‌تری دارد. کارایی این دو روش کنترلی برای STATCOM در شبکه‌های قدرت شامل مزارع بادی مجهز به DFIG به منظور جبران‌سازی سریع‌تر توان راکتیو 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.
- [٢] شمس‌نیا، علی، حسینی، سیدحسین، دانیالی، سعید، "مدلسازی و شبیه‌سازی اینورتور 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: ۱۸-۸، 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.
- [٦] صفائی، 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: ۴۵-۳۴، 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.

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 خواهد بود. اگرچه هر دو روش کنترلی معرفی شده در مقایسه با روش کنترلی خطی معمول شامل کنترل کننده‌های خطی PI عملکرد بسیار بهتری دارند، اما روش

- 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

- [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