طراحی کنترل کننده میرایی برای STATCOM متصل به ژنراتور القایی از دو سو تغذیه در سیستم قدرت چند ماشینه

احسان اکبری
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران، akbari.ieee@gmail.com

تاریخ دریافت:۱۴۰۱/۹/۱۹ تاریخ پذیرش:۱۴۰۱/۱۲/۲۱

چکیده: با توجه به توسعه روز افزون صنعت برق و رشد تقاضای مصرف، استفاده از منابع انرژی‌های پاک رو به افزایش است. در این راستا استفاده از انرژی‌های بادی به عنوان یک منبع پاک و رایگان جهت تولید انرژی الکتریکی در حال گسترش روز افزون بوده و بر طبق پیش‌بینی‌ها تا سال ۲۰۳۰ میلادی ۲۰٪ کل انرژی جهان از طریق باد بدست خواهد آمد. ولی علاوه‌بر تمامی مزایای انرژی‌های بادی استفاده از آنها به صورت توربین بادی در شبکه‌های برق به منظور تامین توان مورد نیاز می‌تواند یک عامل منفی از دید پایداری در سیستم‌های قدرت محسوب شود. هدف از این مقاله بکارگیری روش کنترل پیش‌بین مبتنی بر توابع لاگر جهت بررسی پایداری سیگنال کوچک یک شبکه ترکیبی، شامل ژنراتورهای سنکرون، مزارع بادی و جبران‌ساز موازی STATCOM می‌باشد. در این روش با بکارگیری توابع لاگر، زمان محاسباتی در کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل کاهش داده شده است، به طوریکه می‌توان دقت در ردیابی سیگنال‌های کنترلی را بالا برد و پایداری سیستم را بهبود بخشید. روش مطرح شده برای کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو در مبدل سمت روتور مربوط به DFIG و نوع جبران‌ساز مورد استفاده به‌گونه‌ای انجام شده است تا با اعمال سوئیچینگ مناسب در اینورتر مربوطه بتوان عملکرد سیستم قدرت را افزایش داد. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از نرم افزار متلب در حوزه زمان مورد ارزیابی قرار گرفته است و برتری آن در راستای بهبود میرایی نوسانات سیستم قدرت به وضوح نشان داده شده است.

واژه‌های کلیدی: پایداری سیگنال کوچک، ژنراتور القایی از دو سو تغذیه، جبران‌ساز STATCOM، کنترل پیش‌بین، مبدل سمت روتور.

۱- مقدمه

از امروزه از ژنراتور القایی دو سو تغذیه به عنوان یکی از پرکاربردترین نوع توربین های بادی سرعت متغیر در صنعت استفاده می‌شود. از مزایای این توربین می‌توان به کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو، هزینه پایین مبدل‌ها و کاهش استرس توان و غیره اشاره نمود[۱]. با این حال در این ژنراتور در طی بروز خطا، به دلیل افت ولتاژ شبکه، تغذیه روتور قطع شده و باعث جذب شدید توان راکتیو و ناپایداری ولتاژ می‌شود. در این میان مساله قابلیت گذر از ولتاژ پایین (LVRT)[۱] به منظور جبران افت ولتاژ DFIG و جلوگیری از خسارت مبدل سمت روتور امری ضروری می‌باشد[۲]. بنابراین استفاده از سیستم‌های جریان متناوب انتقال انعطاف پذیر (FACTS)[۲] و روش‌های کنترل مدرن برای مبدل سمت روتور در یک DFIG نقش بسزایی در بهبود پایداری شبکه دارد [۳]. در این میان می‌توان از STATCOM به عنوان یک ابزار موازی در یک سیستم بادی اشاره نمود [۴]. علارقم تمامی مزایای DFIG ، در صورتیکه روش‌های کنترلی مناسبی برای جبران سازها و مبدل‌های یک DFIG صورت نگیرد، تحت بروز اختلالات شدید و یا عدم قطعیت‌های موجود احتمال ناپایداری سیستم دور از انتظار نخواهد بود.

روش کنترل برداری توسط کنترل کننده‌های تناسبی-انتگرالی (PI)[۳] به دلیل سادگی به طور گسترده‌ای در توربین‌های بادی مبتنی بر DFIG استفاده می‌شوند [۵]. ولی با توجه به حساسیت نوع PI نسبت به نقطه کار سیستم تحت بروز اختلالات خارجی نمی‌توانند عملکرد مناسبی داشته باشند. بنابراین در برخی مراجع از روش‌های جایگزین که قابلیت کنترل بیشتری دارند استفاده می‌شود. در برخی از روش‌های

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.5.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023

کنترل مدرن میراسازی نوسانات توان توسط ژنراتور سنکرون و هماهنگی پایدارساز سیستم قدرت [۴](PSS) با کنترل‌کننده میراساز برای DFIG، در یک سیستم قدرت چند ماشینه انجام شده است[۶]. نتایج حاصل از آن نشان می‌دهد که کنترل‌کننده پیشنهادی در DFIG نسبت PSS عملکرد بهتری دارد. به طور مشابه در مرجع [۷] میرا کردن نوسانات بین ناحیه‌ای و پیچشی توسط کنترل کننده‌های نوسان توان در DFIG نیز بررسی شده است. در این مرجع یکی از کنترل کننده‌ها بر اساس آنالیز مقادیر ویژه و دیگری بر اساس الگوریتم‌های بیهنه‌سازی طراحی شده است. نکته قابل توجه، استفاده از یک فیدبک در ساختار کنترل کننده‌های مذکور است. در مرجع [۸]، به منظور بهبود پایداری گذرای یک شبکه شامل واحد سنکرون، مزرعه بادی مبتنی بر DFIG و نیروگاه خورشیدی، از سه روش کنترلی برای مقایسه یکدیگر استفاده شده است. این روش‌ها شامل کنترل منطق فازی، کنترل غیرخطی ایستا [۵](SNC) و محدود کننده جریان خطای مقاومتی متغیر فازی [۶](VR-FCL) می‌باشند. در مقاله مذکور برای بهبود پایداری گذرا، استفاده از مقدار مناسب مقاومت در VR-FCL پیشنهاد شده است. در مرجع [۹]، برای بهبود نوسانات زیر سنکرون [۷](SSR) در DFIG از کنترل کننده مد لغزشی [۸]
(SMC) استفاده شده است. بطوریکه در آن با کنترل مبدل سمت روتور در DFIG توسط SMC نوسانات SSR بهبود یافته ضمن اینکه توان راکتیو نیز کنترل شده است. علت کنترل توان راکتیو در آن صرفا بر اساس اعمال گشتاور الکتریکی به ورودی کنترل‌کننده در مبدل سمت روتور است، که باعث بهره‌برداری مناسب می‌شود. از نقاط ضعف مرجع مذکور عدم وجود شبکه شامل ژنراتورهای سنکرون و بارهای متفاوت در یک سیستم قدرت است. در مرجع [۱۰]، از یک کنترل‌کننده تطبیقی میراساز برای STATCOM در حضور مزارع بادی استفاده شده است، که در آن کنترل‌کننده تطبیقی با کمک یک شبکه عصبی مصنوعی قادر به شناسایی پارمترهای بحرانی کل شبکه بر اساس یک تابع انتقال معادل است. از نقاط مثبت مقاله مذکور، می‌توان به مقاوم بودن کنترل‌کننده تحت تغییرات شدید وزش باد اشاره نمود. همچنین از نقاط منفی مرجع مذکور این است که به دلیل عدم وجود کنترل در RSC، در شرایط بروز خطا امکان میراسازی مناسب وجود ندارد، زیر دستخوش تغییرات توان‌های اکتیو و راکتیو در ورودی کنترل کننده‌های سمت روتور و شبکه خواهیم بود. در مرجع [۱۱]، به منظور بررسی تاثیر DFIG برای پخش توان و دینامیک سیستم، آنالیز سیگنال کوچک در حالت متصل به شبکه انجام شده است. بطوریکه در آن از کنترل‌کننده میرایی استفاده نشده است لذا در این صورت حتی با وجود شناسایی مودهای بحرانی توسط آنالیز مودال نمی‌توان برای مودهای نامیرا سیگنال‌های میراساز تولید نمود.

اخیرا از روش‌هایی مختلفی از جمله کنترل پیش‌بین[۱۲]،یاد گیری تقویتی[۱۳]، تقریب پاد[۱۴]، شکل‌دهی حلقه [۱۵]، نرم H_2/H_∞ [۱۶،۱۷]، و توابع لیاپانوف[۱۸،۱۹]، برای بهبود پایداری در سیستم‌های قدرتی که دارای واحدهای انرژی نو هستند استفاده شده است.. در مراجع [۲۰،۲۱]، طراحی کنترل‌کننده میرایی مبتنی بر سعی و خطا برای تحمل محدویت‌های ارتباطی بین حلقه‌های کنترلی استفاده شده است. از دیگر روش‌های موجود برای طراحی کنترل‌کننده‌های میرایی که با دقت بالایی می‌تواند از ویژه‌گی سیستم قدرت استفاده کند روش تخمین حالت است. اما این روش‌ها با توجه به دقت بالا، بیش از حد نیازمند مدل سیستم هستند که با بزرگ شدن سیستم قدرت منجر به درجه بالایی از افزونگی در سیستم اندازه‌گیری می‌شوند[۲۲،۲۳]. در [۲۴]، برای طراحی پارامترهای کنترل‌کننده میرایی در حضور تاخیر زمانی از یک روش جدید مبتنی بر بهینه‌سازی ازدحام ذرات ترکیبی استفاده شده است. این نوع طراحی یک روش ساده برای طراحی کنترل‌کننده‌ها محسوب می‌شود و همچنین در تاخیرهای تصادفی نمی‌تواند پاسخ مناسبی را فراهم آورد. در [۲۵] از روش یادگیری تقویتی مبتنی بر گرادیان سیاست با استفاده از شبکه های عصبی عمیق به عنوان تقریب برای طراحی کنترل‌کننده تاخیری استفاده شده است. در این روش مدل سیستم در دسترس نبوده و برای پیاده‌سازی نیاز به عملیات گسسته‌سازی وسیع برای شناسایی سیستم طراحی می‌باشد.

از مزایای کنترل پیش‌بین مدل که اخیرا در مراجع مختلف مورد چالش است می‌توان به: عدم حساسیت نسبت به تغییرات پارامترهای سیستم، پاسخ دینامیکی سریع و حذف اختلالات خارجی اشاره نمود[۲۶]. استراتژی‌های مختلفی اعم از روش‌های خطی و غیرخطی برای کنترل پیش‌بین مطرح شده است که همگی آنها متکی به مدل پیش‌بین هستند[۲۷]. بر این اساس در مرجع [۲۸]، با استفاده از MPC ولتاژ خازن لینک DC در یک DFIG کنترل شده است، که هدف از آن حفاظت مبدل سمت شبکه در DFIG در شرایط بروز بالازدگی ولتاژ بوده است. در مرجع مذکور ابتدا معادلات دینامیکی تجهیزات استخراج شده است و سپس با اندازه گیری جریان راکتیو شبکه، کنترل ولتاژ خازن لینک DC برای بهبود قابلیت گذر از خطا در DFIG انجام شده است. در مرجع [۲۹]، با کنترل سیگنال‌های کلیدزنی در مبدل سمت شبکه یک DFIG، پاسخ فرکانسی اولیه یک میکروشبکه کنترل شده است. در مرجع مذکور توان مورد نیاز برای کنترل فرکانس اولیه از سیستم ذخیره‌ساز انرژی باتری [۹](BESS) متصل به لینک DC تامین می‌شود. به طوریکه مقدار این فرکانس از طریق اندازه‌گیری‌های برخط MPC تنظیم می‌شود.

تمام اینها در حالی است که یکی از مهمترین چالش‌هایی که بر سر راه پیاده‌سازی عملی کنترل پیش‌بین وجود دارد و اعمال آن را محدود کرده است بار محاسباتی روی خط این کنترل کننده می‌باشد[۳۰]. در نتیجه در سیستم‌هایی که زمان نمونه‌برداری آنها بسیار کوچک باشد و یا دینامیک سیستم پیچیده باشد کنترل‌کننده پیش‌بین در هر گام زمانی با تعداد زیادی متغیر تصمیم‌گیری رو به رو خواهد بود و همین باعث کاهش سرعت اجرای بلادرنگ این کنترل‌کننده می‌باشد. یکی از رویکردهای بسیار مناسب برای کاهش بار محاسباتی این کنترل‌کننده

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.5.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023

استفاده از توابع لاگر در طراحی آن می‌باشد، که به عنوان[۱۰] FMPC نامیده می‌شود[۳۱]. لذا با پارامتری کردن دنباله سیگنال کنترل می‌توان به طور موثری تعداد قیود موجود در افق پیشبینی و در نتیجه تعداد پارامترهایی که در هر گام کنترل‌کننده با آن سر و کار دارد را کاهش داد و بار محاسباتی این کنترل‌کننده برای سیستمهای با ابعاد وسیع و یا دینامیک سریع را کم کرد. علاوه بر این یک عامل کاهشی نمایی در توابع لاگر وجود دارد که تضمین کننده همگرایی تفاضل سیگنال کنترل به سمت صفر، بعد از یک مدت زمان گذرا می‌باشد.

در این مقاله به منظور جبران بار محاسباتیMPC از توابع لاگر به گونه‌ای استفاده شده است که علاوه بر کاهش مدت زمان شبیه‌سازی توانایی کنترلی بیشتری در ردیابی سیگنال‌های ورودی داشته باشد. بدین منظور علاوه بر کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو RSC، یک STATCOM به صورت موازی با مزرعه بادی قرار گرفته تا علاوه بر بهبود توان راکتیو در هنگام اختلالات شدید بتوان نوسانات بین‌ناحیه‌ای را با طراحی یک کنترل‌کننده میرایی بهبود بخشید.

۲- مدل سازی سیستم قدرت

در این مقاله برای ژنراتور سنکرون از مدل دو محوری و برای سیستم تحریک AVR از نوع IEEE-۱ استفاده شده است. در این مدل از تاثیر راکتانس‌های زیرگذرا صرف‌نظر شده در حالی که تاثیر راکتانس‌های گذرا در مدل‌سازی در نظر گرفته می‌شوند [۳۲]. روابط دینامیکی مربوط به iامین ژنراتور سنکرون به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{dE'_{qi}}{dt}=\frac{1}{T'_{doi}}[-E'_{qi}+E_{fdi}+(X_{di}-X'_{di})]I_{di} \qquad (۱)$$

$$\frac{dE'_{di}}{dt}=\frac{1}{T'_{qoi}}\left[-E'_{di}-(X_{qi}-X'_{qi})I_{qi}\right] \qquad (۲)$$

$$\frac{dE_{fdi}}{dt}=\frac{-1}{T_{Ei}}[E_{fdi}(K_{Ei}+S_{Ei}(E_{fdi}))-V_{Ri}] \qquad (۳)$$

$$\frac{d\omega_i}{dt}=\frac{1}{\tau_{ji}}[T_{mi}-\left[I_{di}E'_{di}+I_{qi}E'_{qi}-(L'_{qi}-L'_{di})I_{di}I_{qi}+D_i\omega_i\right] \qquad (۴)$$

$$\frac{d\delta_i}{dt}=\omega_i-\omega_s \qquad (۵)$$

۲-۱- ژنراتور القایی از دو سو تغذیه (DFIG)

با توجه به نحوه طراحی کنترلی، نیاز به مدل مرتبه ۴ ژنراتور القایی می‌باشد. این مدل برای جریان‌های استاتور و روتور طبق روابط زیر قابل توصیف است [۳۳]:

$$\frac{di_{dsw}}{dt}=H[R_sL_{rr}i_{dsw}+((\omega_s-\omega_r).L^2_{mm}-\omega_sL_{rr}L_{ss})i_{qsw} \qquad (۶)$$
$$-R_rL_{mm}i_{drw}-\omega_rL_{rr}L_{mm}i_{qrw}+L_{mm}V_{drw}-L_{rr}V_{dsw}]$$

$$\frac{di_{qsw}}{dt}=H[(-(\omega_s-\omega_r).L^2_{mm}+\omega_sL_{rr}L_{ss})i_{dsw}+R_sL_{rr}i_{qs} \qquad (۷)$$
$$+\omega_rL_{rr}L_{mm}i_{drw}-R_rL_{mm}i_{qrw}+L_{mm}V_{qrw}-L_{rr}V_{qsw}]$$

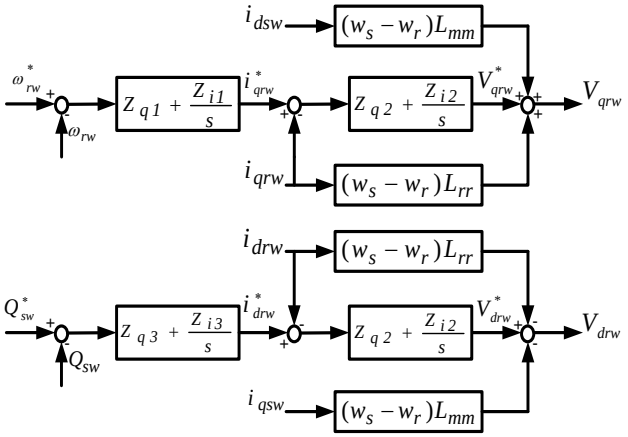
$$\frac{di_{drw}}{dt}=H[-R_sL_{mm}i_{dsw}+\omega_rL_{ss}L_{mm}i_{qsw}+R_rL_{ss}i_{drw} \qquad (۸)$$
$$+(\omega_sL^2_{mm}-(\omega_s-\omega_r).L_{SS}L_{rr})i_{qrw}-L_{ss}V_{drw}+L_{mm}V_{dsw}$$

$$\frac{di_{qrw}}{dt}=H[-\omega_rL_{ss}L_{mm}i_{dsw}-R_sL_{mm}i_{qsw} \qquad (۹)$$
$$+(-\omega_sL^2_{mm}+(\omega_s-\omega_r).L_{SS}L_{rr})i_{drw}+R_rL_{ss}i_{qrw}$$
$$-L_{ss}V_{qrw}+L_{mm}V_{qsw}]$$

در معادلات فوق $H=\omega_b.\left(L^2_{mm}-L_{ss}.L_{rr}\right)^{-1}$ است.

۲-۲- کنترل کننده مبدل سمت روتور (RSC)

مهم‌ترین وظیفه مبدل سمت روتور، کنترل توان اکتیو و راکتیو خروجی DFIG، استخراج بیشینه توان از باد و تأمین توان راکتیو مورد نیاز ژنراتور القایی می‌باشد. در این کنترل‌کننده مطابق شکل (۱) توان اکتیو توسط مولفه V_{qrw} و ولتاژ توسط مولفه V_{drw} کنترل می‌شود.



شکل(۱): بلوک دیاگرام کنترلی برای مبدل سمت روتور

۲-۳- مدل ریاضی STATCOM با سیستم ذخیره ساز انرژی

در حالت کلی از STATCOM برای جذب و یا تزریق توان راکتیو و همچنین ثابت نگه داشتن سطح ولتاژ ترمینال مورد نظر استفاده می‌شود. همچنین BESS می‌تواند برای بهبود توان اکتیو و تنظیم فرکانس در هنگام استفاده از STATCOM بکارگرفته شود. معادلات دینامیکی STATCOM/BESS[۱۱] به همراه ذخیره‌ساز انرژی باتری توسط معادلات زیر قابل بیان است [۳۴]:

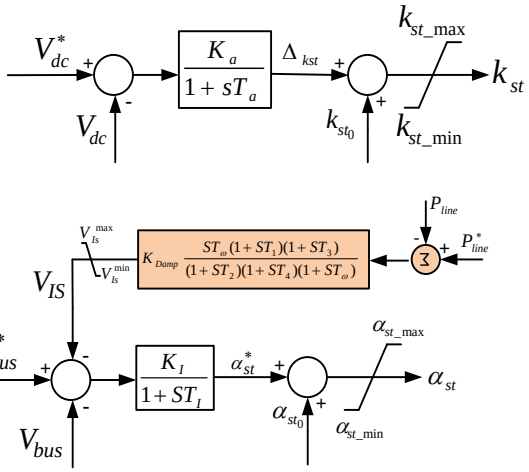
[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.5.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

$$\frac{di_{dsw}}{dt} = H[R_s L_{rr} i_{dsw} + ((\omega_s - \omega_r).L_{mm}^2 - \omega_s L_{rr} L_{ss}) i_{qsw} - R_r L_{mm} i_{drw} - \omega_r L_{rr} L_{mm} i_{qrw} + L_{mm} V_{drw} - L_{rr} V_{dsw}] \quad (۱۰)$$

$$\frac{di_{qsw}}{dt} = H[(-(\omega_s - \omega_r).L_{mm}^2 + \omega_s L_{rr} L_{ss}) i_{dsw} + R_s L_{rr} i_{qsw} + \omega_r L_{rr} L_{mm} i_{drw} - R_r L_{mm} i_{qrw} + L_{mm} V_{qrw} - L_{rr} V_{qsw}] \quad (۱۱)$$

$$\frac{di_{drw}}{dt} = H[-R_s L_{mm} i_{dsw} + \omega_r L_{ss} L_{mm} i_{qsw} + R_r L_{ss} i_{drw} + (\omega_s L_{mm}^2 - (\omega_s - \omega_r).L_{SS} L_{rr}) i_{qrw} - L_{ss} V_{drw} + L_{mm} V_{dsw}] \quad (۱۲)$$

$$\frac{di_{qrw}}{dt} = H[-\omega_r L_{ss} L_{mm} i_{dsw} - R_s L_{mm} i_{qsw} + (-\omega_s L_{mm}^2 + (\omega_s - \omega_r).L_{SS} L_{rr}) i_{drw} + R_r L_{ss} i_{qrw} - L_{ss} V_{qrw} + L_{mm} V_{qsw}] \quad (۱۳)$$



شکل (۲): بلوک دیاگرام STATCOM به همراه کنترل‌کننده میرایی

که در آن، k_{st} شاخص مدولاسیون، α_{st} زاویه آتش جبرانساز و θ_{bus} زاویه فاز ولتاژ در باس مشترک ac می‌باشد.

در شکل(۲) بلکوک دیاگرام STATCOM به همراه کنترل‌کننده میرایی در آن نشان داده شده است. در این شکل حلقه کنترل بالایی مربوط به کنترل ولتاژ dc است که با شاخص مدولاسیون (k_{st}) کنترل می‌شود. مطابق با این بلوک دیاگرام رابطه مورد نیاز برای کنترل‌کننده میرایی عبارتست از:

$$\frac{d\alpha_{st}}{dt} = \frac{1}{T_I}\left[K_I (V_{bus}^* - V_{bus} - V_{Is}) - \alpha_{st}\right] \quad (۱۴)$$

۳- کنترل پیش بین

در مسائلی که نیاز به پیش‌بینی رفتار آینده سیستم می‌باشد استفاده از کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل را می‌توان به عنوان یک ابزار و روش کنترلی قدرتمند معرفی نمود[۳۵]. بنابراین نقطه شروع حل مساله را با بیان معادلات کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل در فضای حالت به صورت زیر دنبال می‌کنیم:

$$\begin{cases} x(z+1) = F_k x(z) + G_k b(z) + H_k c(z) \\ k(z) = P_k x(z) \end{cases} \quad (۱۵)$$

انتخاب تابع هدف طوری است که خروجی‌های آینده در افق پیش‌بینی بتوانند به صورت همزمان سیگنال مرجع را به درستی ردیابی کنند و تلاش کنترلی مورد نیاز تا حد امکان کم باشد:

$$F_{fit}(r) = \sum_{z=1}^{m_a} G_z \left(k'(r+z) - k_{ref}(r+z)\right)^2 + \sum_{z=1}^{m_b} S_z \Delta b(r+z)^2 \quad (۱۶)$$

با توجه به رابطه (۱۶) بردار پیش‌بینی که برای خروجی سیستم در نظر گرفته می‌شود به صورت یک ماتریس $m_a \times 1$ تعریف می‌شود که در آن m_a افق پیش‌بینی نامیده می‌شود. علاوه بر این Δb نیز به صورت یک ماتریس $m_b \times 1$ می‌باشد که در آن m_b افق کنترلی نامیده می‌شود. علاوه براین، محدودیت‌هایی که در اجرای حل مساله با استراتژی کنترل پیش‌بین بکار گرفته می‌شوند شامل: محدودیت روی دامنه و تغییرات ورودی، محدودیت روی متغییرهای حالت، محدودیت روی متغییرهای خروجی با توجه به قیود ذکر شده رابطه زیر را می‌توان برای بیان ریاضی این محدودیت‌ها توصیف نمود:

$$\begin{cases} b_{\min} \le b(r+z) \le b_{\max}, \Delta b_{\min} \le \Delta b(r+z) \le \Delta b_{\max} \\ x_{\min} \le x(r+z) \le x_{\max}, \Delta x_{\min} \le \Delta x(r+z) \le \Delta x_{\max} \\ k_{\min} \le k(r+z) \le k_{\max}, \Delta k_{\min} \le \Delta k(r+z) \le \Delta k_{\max} \end{cases} \quad (۱۷))$$

علاوه بر این به منظور کنترل سیگنال‌های آینده در MPC از یک بردار با طول m_b که دارای عملکرد انتقال رو به جلو می‌باشد استفاده می‌شود. این ماتریس انتقال رو به جلو طبق رابطه زیر توصیف می‌شود:

$$\Delta B = \left[\Delta b(r), ..., \Delta b(r+z), ..., \Delta b(r+m_b-1)\right] \quad (۱۸)$$

یکی از رویکردهای بسیارمناسب برای کاهش بار محاسباتی استفاده از کنترل‌کننده پیش‌بین مدل تابعی می‌باشد. اساس کار در FMPC به صورتی است که برای انتخاب مسیر مناسب ترکیب خطی از ورودی‌های آینده سیستم به صورت یک و یا تعداد بیشتری تابع پایه در نظر گرفته می‌شوند. این توابع ورودی که برای مدل‌سازی مسیر ورودی انتخاب می‌شوند توابع لاگر نامیده می شوند[۳۶]. در این توابع با پارامتری کردن دنباله سیگنال کنترل می‌توان به طور موثری تعداد قیود موجود در افق پیش‌بینی و در نتیجه تعداد پارامترهایی که در هر گام کنترل‌کننده با آن سر و کار دارد را کاهش داد و بار محاسباتی این کنترل‌کننده برای سیستم‌های با ابعاد وسیع و یا دینامیک سریع را کم کرد. توابع لاگر

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.5.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

یک مجموعه از توابع گسسته با پایه‌ی متعامد هستند که تبدیل Z آن‌ها به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\Gamma_g = \frac{\sqrt{1-b^2}}{z-b}\left(\frac{z^{-1}-b}{1-bz^{-1}}\right)^{g-1}, 0 \le b \le 1 \quad (۱۹)$$

در این تبدیل b قطب شبکه است و برای اینکه این شبکه پایدار باشد مقدار b باید بین صفر تا یک باشد. اکنون می‌توان هر سیگنال کنترل ورودی با استفاده از تابع لاگر را توسط معادله زیر توصیف نمود:

$$\Delta b(r+z) \approx \sum_{g=1}^{m} a_g . f_g(z) \quad (۲۰)$$

در رابطه بالا f_g ترانهاده شبکه توابع لاگر درمعادله (۲۹) بوده و a_g بردار پارامتر نامیده می‌شود . با توجه به رابطه فوق در کاربردهای تئوری برای m معمولا مقداری کوچکتر از ۱۰ در نظر گرفته می شود و مقدار انتخاب آن به کاربر بستگی دارد. به عبارتی انتخاب مقادیر بزرگتر برای m تخمین مسیرهای ورودی برای توابع لاگر را افزایش می‌دهد. با توجه به اینکه افزایش افق پیش‌بینی منجر به بهبود و عملکرد مناسب در رفتار حلقه بسته این کنترل‌کننده می‌شود لذا در این مقاله جهت کاهش بار محاسباتی از ترکیب توابع لاگر و داده نمایی وزنی به منظور دست‌یابی به این هدف استفاده شده است . به این منظور معادلات بکار رفته در مدل کلاسیک پیش‌بین را با هدف ترکیب توابع لاگر و ضریب نمایی وزنی به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\begin{cases} \Delta\hat{B}^T = [\rho^{-0}\Delta b(r),\ldots,\rho^{-(m_b-1)}\Delta b(r+m_b-1)] \\ \hat{X}^T = \left[\rho^{-1}x(r+1),\ldots,\rho^{-m_a}x(r+m_a)\right] \\ \hat{K}^T = [\rho^{-1}k(r+1),\ldots,\rho^{-m_a}k(r+m_a)] \end{cases} \quad (۲۱)$$

در رابطه فوق از سمبل ρ برای نشان دادن تنظیم پارامترها در وزن نمایی استفاده شده است. مقدار این سمبل بزرگتر از یک انتخاب می‌شود. بنابراین معادلات جدید مدل بکار رفته در فضای حالت را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$\begin{cases} \hat{x}(r+1) = \hat{F}\hat{x}(r) + \hat{G}\Delta\hat{b}(r) \\ \hat{k}(r) = \hat{P}\hat{x}(r) \end{cases} \quad (۲۲)$$

از جایگزنی روابط زیر در معادله فوق استفاده خواهیم کرد:

$$\hat{F} = \frac{F}{\rho}, \hat{G} = \frac{G}{\rho}, \hat{P} = \frac{P}{\rho} \quad (۲۳)$$

با جایگزینی رابطه (۲۳) در معادله (۲۲) می‌توان تابع هدف جدید را به صورت زیر بیان نمود:

$$\hat{F}_{fit}(r) = \sum_{z=1}^{m_a} G_z\left(\hat{k}(r+z) - k_{ref}(r+z)\right)^2 + \sum_{z=1}^{m_b} S_z\Delta\hat{b}(r+z)^2 \quad (۲۴)$$

و برای قیدهای اعمال شده معادله (۱۷) را می‌توان به صورت زیر جایگزین نمود:

$$\begin{cases} \rho^{-Z}b_{\min} \le \hat{b}(r+z) \le \rho^{-Z}b_{\max}, \\ \rho^{-Z}\Delta b_{\min} \le \Delta\hat{b}(r+z) \le \rho^{-Z}\Delta b_{\max} \\ \rho^{-Z}x_{\min} \le \hat{x}(r+z) \le \rho^{-Z}x_{\max}, \\ \rho^{-Z}\Delta a_{\min} \le \Delta\hat{x}(r+z) \le \rho^{-Z}\Delta x_{\max} \\ \rho^{-Z}k_{\min} \le \hat{k}(r+z) \le \rho^{-Z}k_{\max}, \\ \rho^{-Z}\Delta k_{\min} \le \rho^{-Z}\Delta\hat{k}(r+z) \le \rho^{-Z}\Delta k_{\max} \end{cases} \quad (۲۵)$$

پس از حل معادله (۲۴) مسیر ورودی باید بر حسب متغیرهای استاندارد به صورت رابطه زیر بازنویسی شود:

$$\Delta B^T = \left[b^0\Delta\hat{b}(r),..,b^{(m_b-1)}\Delta\hat{b}(r+z),..,\Delta b(r+m_b-1)\right] \quad (۲۶)$$

۴- تطبیق استراتژی مطرح شده برای سیستم تحت مطالعه

با مشخص کردن معادلات دینامیکی شبکه، شامل ژنراتورهای سنکرون، نیرگاه بادی و STATCOM/BESS در فضای حالت و اعمال روند خطی‌سازی برای مدل تحت مطالعه خواهیم داشت:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU + ER \\ Y = CX + DU \end{cases} \quad (۲۷)$$

در رابطه (۲۷)، X بردار حالت سیستم، U بردار ورودی، E بردار اختلالات، و Y بردار حالت خروجی است که در این مقاله به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{cases} X = [\Delta i_{dsw}, \Delta i_{qsw}, \Delta i_{drw}, \Delta i_{qrw}, \Delta E'_D, \\ \Delta E'_Q, \Delta E_{fd_i}, \Delta\delta_i, \Delta\omega_i, \Delta i_{dst}, \Delta i_{qst}, \Delta V_{dcst}, \Delta\alpha_{st}]^T \\ U = [\Delta V_{drw}, \Delta V_{qrw}, \Delta V_{bus}, \Delta V_{Is}, \Delta V_{Ri}, \Delta T_{mi}]^T \\ Y = [\Delta i_{drw}, \Delta i_{qrw}, \Delta\alpha_{st}]^T \\ R = [\Delta V_{dsw}, \Delta V_{qsw}]^T \end{cases}$$

قیود مورد نظر جهت رسیدن به پاسخ مطلوب به صورت زیر تعریف می‌شوند:

کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو DFIG با رویکرد انتخاب سیگنال‌های مناسب برای سوئیچینگ اینورتر در مبدل سمت روتور با محدودیت ($V_{drw_min} \le V_{drw} \le V_{drw_max}$, $V_{qrw_min} \le V_{qrw} \le V_{qrw_max}$).

کنترل توان خط توسط کنترل‌کننده میرایی، به‌منظور فراهم آوردن سیگنال‌های مناسب برای سوئیچینگ اینورتر در STATCOM با در نظر گرفتن قید ($V_{Is_min} \le V_{Is} \le V_{Is_max}$).

در حالت کلی مقدار مینیمم و ماکزیمم برای قیود ورودی در تعاریف فوق برابر است با:

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.5.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023

$$\begin{bmatrix} V_{dr_min} \\ V_{qr_min} \\ V^{*}_{bus_min} \\ V_{Ri_min} \\ T_{mi_min} \\ V_{Is_min} \end{bmatrix} = 0 \le u \le 1 = \begin{bmatrix} V_{dr_max} \\ V_{qr_max} \\ V^{*}_{bus_max} \\ V_{Ri_max} \\ T_{mi_max} \\ V_{Is_max} \end{bmatrix} \quad (۲۸)$$

قیود اعمالی برای بردارهای حالت در محدوده مینیمم و ماکزیمم مقدار مجاز برابر است با:

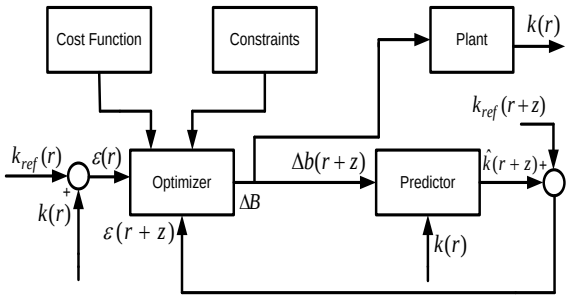
$$\begin{bmatrix} i_{dr_min} \\ i_{qr_min} \\ \alpha_{st_min} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \le x \le \begin{bmatrix} 3 \\ 7 \\ 0.7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{dr_max} \\ i_{qr_max} \\ \alpha_{st_max} \end{bmatrix} \quad (۲۹)$$

علاوه بر این، پارامترهای استراتژی کنترل پیش‌بین که در شبیه‌سازی بکار گرفته شده بصورت مقادیر m_a=200 ,ρ=1.08 ,m=7 ,b=0.24 m_b=6, تنظیم شده است. هم چنین مقدار ضرایب ماتریس‌های وزنی به ترتیب برابر $G=0.14\times I_{mb\times mb}$، $S=1\times I_{ma\times ma}$ انتخاب شده است. و زمان نمونه‌برداری برابر با ۰/۱است. نحوه به‌دست آوردن این پارامترها بر روش سعی و خطا مبتنی بوده است.

در شکل ۳، بلوک دیاگرام کنترل‌کننده MPC نشان داده شده است. لازم به ذکر است که ضرایب کنترل‌کننده‌های PI نیز از روش سعی و خطا اتخاذ شده است. در جدول (۱)، پارامترهای کنترل‌کننده STATCOM گنجانده شده است.

جدول (۱): اطلاعات مربوط به کنترل‌کننده STATCOM

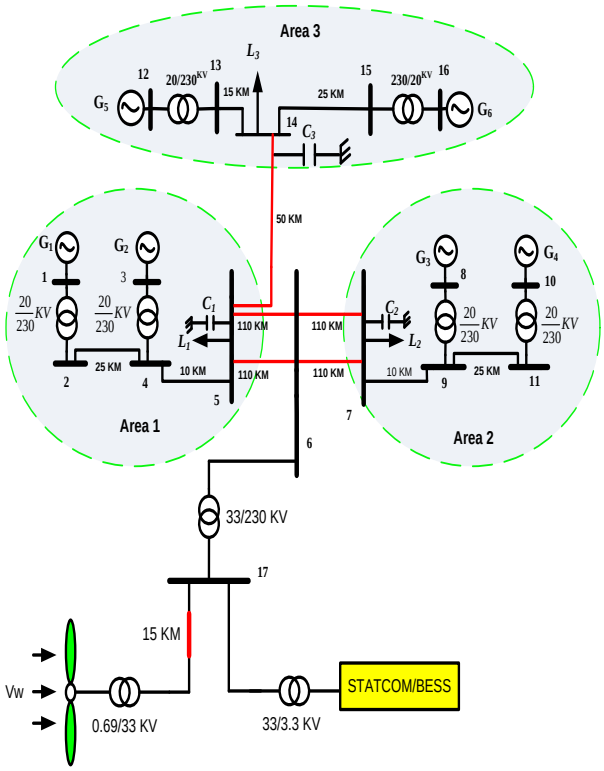
R_C (p.u)	C (F)	K_a	T_a=۰/۰۱۴
۵۰۰	۰/۰۷۴	۰/۱۴	۰/۰۱۴
T_4=۰/۳۷۷	K_{Damp}=۱/۱۴	α_{stmin} (deg)	α_{stmax} (deg)
۰/۳۷۷	۱/۱۴	۰	۴۵
T_1=۰/۲۳	T_2=۰/۷۸۹	T_w=۱	T_3
۰/۲۳	۰/۷۸۹	۱	۰/۴۹۳
k_{stmin} (deg)	k_{stmax} (deg)	V_{Ismin}	V_{Ismax}
۰	۰/۶	-۰/۱۵	۰/۱۵



شکل (۳): بلوک دیاگرام کنترل‌کننده پیش‌بین مدل

۵- نتایج و شبیه‌سازی‌ها

در این بخش به منظور اثبات و کارایی روش مطرح شده، نتایج شبیه‌سازی به روی سیستم قدرت ۶ ماشینه و سه ناحیه‌ای در شکل ۴ مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. مزرعه بادی متصل شده به باس ۶ دارای قدرت ۱۰۰ مگاوات و STATCOM دارای ظرفیت ۵۰ MVAR می‌باشد. برای مزرعه بادی از مدل ادغام شده ۲۰ توربین بادی که هر یک دارای قدرت ۵ MW هستند، استفاده شده است.



شکل (۴): بلوک دیاگرام STATCOM به همراه کنترل‌کننده میرایی

در این قسمت ابتدا نقاط کار اولیه سیستم مطابق با جدول ۲ گزارش شده است. سپس نتایج آنالیز مقدار ویژه طبق نقطه کار اولیه برای ضعیف‌ترین مودهای بحرانی بدست آمده است. بر اساس نتایج آنالیز مقدار ویژه مودهای ۲،۱γ و ۴،۳γ دارای ضعیف‌ترین نسبت میرایی به ترتیب با مقادیر مختلط $-4/8\pm803/192j$ و $-5/9\pm193/326j$ نسبت به سایر مودها هستند. این مودها به ترتیب مربوط به انحراف زاویه روتور $\Delta\delta_{13}$ و $\Delta\delta_{56}$ می‌باشد. بنابراین از این مودها جهت طراحی کنترل‌کننده میرایی برای STATCOM در سیستم قدرت 6 ماشینه استفاده شده است. لازم به ذکر است که از گزارش سایر مودها نسبت به مودهای بحرانی به دلیل کم اهمیت بودن موضوع خودداری شده است.

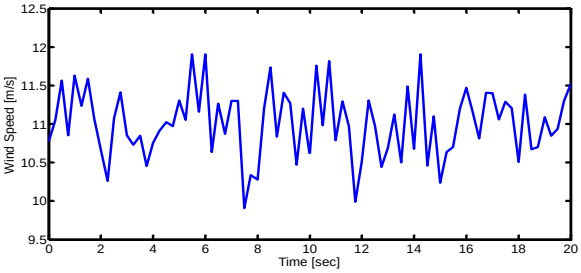
جدول (۲): نقطه کار اولیه برای مزرعه بادی

V (p.u.)	Wind Speed (m/s)	Q (MVAR)	P(MW)	ω (p.u.)
۱	۱۱	۴۸/۴۸۳	۱۰۰	۱

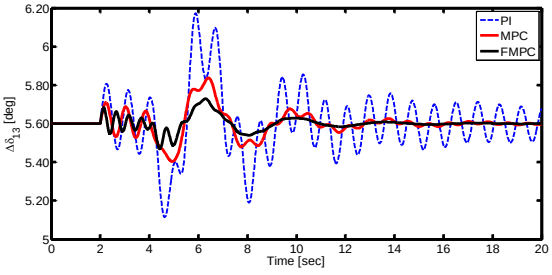
برای بررسی نتایج، خطای اتصال کوتاه سه‌فاز در زمان ۲ ثانیه به باس ۷ سیستم قدرت اعمال شده است که پس از ۰/۲ ثانیه رفع شده است. سرعت وزش باد به صورت تصادفی همانند شکل ۵-الف در نظر گرفته شده است. بر این اساس تغییرات زاویه روتور ژنراتورهای سنکرون $\Delta\delta_{13}$ و $\Delta\delta_{56}$ به ترتیب در اشکال ۵-ب و ۵-پ نشان داده شده است.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.5.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

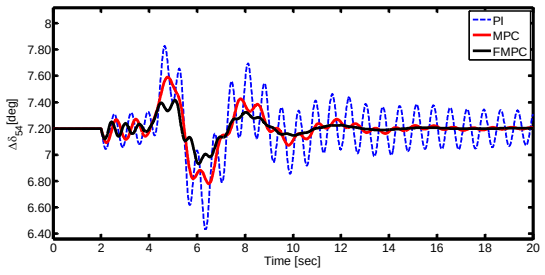
مشاهده می‌شود در شکل ۵-ت توان راکتیو STATCOM همزمان با اعمال خطا در زمان ۲ ثانیه از مقدار نامی خود منحرف شده که پس از چند سیکل نوسان توسط FMPC به خوبی به سمت میرایی مطلوب بهبود یافته است، که نسبت به نوع MPC شرایط مطلوبتری دارد. در شکل ۵-ث توان اکتیو واحد بادی به قدرت ۱۰۰ MW در لحظه اعمال اتصال کوتاه دچار انحراف شده است به طوریکه کنترل‌کننده PI قادر به حفظ میرایی در زمان ۲۰ ثانیه نبوده و نمی‌تواند شرایط مطلوب را ایجاد کند. ولی کنترل‌کننده‌های FMPC و MPC به طور مقاوم شرایط میرایی را فراهم ساخته‌اند. و در نهایت در شکل ۵-ج تغییرات ولتاژ باس مشترک (باس ۶) بین سیستم قدرت و واحد بادی تحت عنوان V_{PCC} نشان داده شده است. همانطوری که مشاهده می‌شود در تمامی اشکال کنترل‌کننده FMPC شرایط بسیار مطلوبتری نسبت به سایر کنترل‌کننده‌های مورد اشاره دارد.



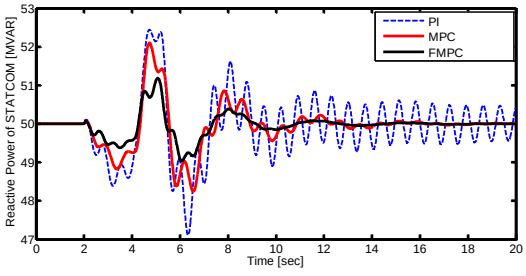
الف



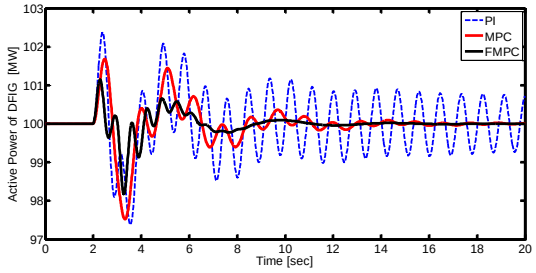
ب



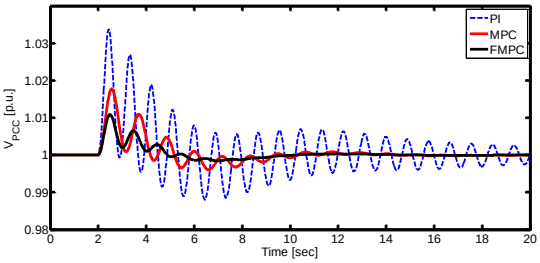
پ



ت



ث



ج

شکل (۵): پاسخ گذرای مرتبط با نتایج شبیه‌سازی

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله پایداری سیگنال کوچک یک سیستم قدرت، که ترکیبی از ژنراتورهای سنکرون، ژنراتور القایی دو سو تغذیه و STATCOM بود، توسط کنترل پیش‌بین بررسی شد. از توابع لاگر به منظور ردیابی دقیق مسیرهای ورودی و از داده نمایی وزنی برای کاهش زمان نمونه برداری در MPC استفاده شد. بنابراین ابتدا معادلات دینامیکی سیستم در قالب فضای حالت استخراج شد و از آن برای اعمال به کنترل پیش بین استفاده شد. سپس از MPC مطرح شده به گونه‌ای استفاده شد تا علاوه‌بر کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو DFIG بتوان نوسانات بین ناحیه‌ای خطوط را توسط کنترل‌کننده میرایی در STATCOM بهبود بخشید. هدف از این کار اعمال سوئیچینگ مناسب در اینورترهای RSC و STATCOM بوده است. نتایج شبیه‌سازی در سیستم قدرت ۶ ماشینه مورد ارزیابی قرار گرفت، و مشخص شد FMPC مطرح شده عملکرد مقاوم‌تری نسبت به MPC کلاسیک و PI دارد.

سپاسگزاری

در این بخش لازم است تا از راهنمایی‌ها و الطاف بی‌دریغ جناب آقای پروفسور مهرداد طرفدار حق استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تبریز تشکر و قدردانی را داشته باشم که بنده را در تهیه این مقاله یاری نمودند.

مراجع

[1] Patnaik, R.K., Dash, P.K. and Mahapatra, K. (2016), “ *Adaptive terminal sliding mode power control of DFIG based wind energy conversion system for stability*

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.5.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[17] Paternina, M. R. A., Castrillón-Franco, C., Zamora-Mendez, A., Mejia-Ruiz, G. E., Zelaya-Arrazabal, F., Correa, R. E., & Sevilla, F. R. S. (2023). *Enhancing wide-area damping controllers via data-assisted power system linear models*. Electric Power Systems Research, 217, 109085.

[18] Bento, M. E. (2020). Fixed *low-order wide-area damping controller considering time delays and power system operation uncertainties*. *IEEE Transactions on Power Systems*, *35*(5), 3918-3926.

[19] Patel, A., Roy, S., & Baldi, S. (2021). *Wide-area damping control resilience towards cyber-attacks: A dynamic loop approach*. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *12*(4), 3438-3447.

[20] Yao, W., Yan, C., Liu, X., Zhang, C. K., Jiang, L., & Wen, J. (2021). *Coordinated design of delay-dependent wide-area damping controllers considering multiple time delays*. *IET Generation, Transmission & Distribution*, *15*(13), 1996-2007.

[21] Padhy BP, Srivastava SC, Verma NK. *A wide-area damping controller considering network input and output delays and packet drop*. IEEE Transactions on Power Systems. 2016 Apr 21;32(1):166-76.

[22] Wang, Z., Pan, K., & Xu, W. (2023). *Critical cyber parameters in hybrid power systems with VSP-based virtual inertia emulation: Theoretical approach and mitigation strategy*. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, *147*, 108877.

[23] Paul, A., Kamwa, I., & Joos, G. (2018). *Centralized dynamic state estimation using a federation of extended Kalman filters with intermittent PMU data from generator terminals*. *IEEE Transactions on Power Systems*, *33*(6), 6109-6119.

[24] Paul, A., Kamwa, I., & Joos, G. (2019). *PMU signals responses-based RAS for instability mitigation through on-the fly identification and shedding of the run-away generators*. *IEEE Transactions on Power Systems*, *35*(3), 1707-1717.

[25] Bento, M. E. (2021). *A hybrid particle swarm optimization algorithm for the wide-area damping control design*. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, *18*(1), 592-599.

[26] Hashmy, Y., Yu, Z., Shi, D., & Weng, Y. (2020). *Wide-area measurement system-based low frequency oscillation damping control through reinforcement learning*. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *11*(6), 5072-5083.

[27] Alinaghizadeh Ardestani, M. and Vakili, A. (2020), "*Output feedback Controller design for HVAC system with delayed based Robust control approach. karafan scientific semi-annual*," 17(1), pp.89-99,(in persian).

[28] Qin, B., Sun, H., Ma, J., Li, W., Ding, T., Wang, Z. and Zomaya, A. Y. (2018), "*Robust H∞ Control of Doubly Fed Wind Generator via State-Dependent Riccati Equation Technique*," IEEE Transactions on Power Systems, 34(3),pp. 2390-2400.

[29] Chen, G., Zhang, L. and Cai, X. (2014), "*Optimized Control of the Doubly Fed Induction Generator System Based on input-output Linearizing Scheme*," Wind Engineering, 38(1), pp.101-108.

[30] Darabian, M., Jalilvand, A. and Azari, M. (2016), "*Power system stability enhancement in the presence of renewable energy resources and HVDC lines based on predictive control strategy*," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 80(1), pp.363-373.

[31] Wei, J., Li, C., Wu, Q., Zhou, B., Xu, D. and Huang, S. (2021), "*MPC-based DC-link voltage control for enhanced high-voltage ride-through of offshore DFIG wind turbine*, enhancement," International Transactions on Electrical Energy Systems, 26(4), pp.750-782.

[2] Ananth, D.V.N. and Kumar, G.N. (2016), "*Fault ride-through enhancement using an enhanced field oriented control technique for converters of grid connected DFIG and STATCOM for different types of faults*," ISA transactions, 62(1), pp.2-18.

[3] Sabzevari, K. (2020), "*Provide a simple model of the Comprehensive Electric Power Controller*," karafan scientific semi-annual, 17(1), pp.13-26,(in persian).

[4] Qi, J., Zhao., W. and Bian, X. (2020), "*Comparative Study of SVC and STATCOM Reactive Power Compensation for Prosumer Microgrids With DFIG-Based Wind Farm Integration*," IEEE Access, 10(8), pp.209878-209885.

[5] Pan, Y., Mei, S., Liu, F., Wei, W., Shen, C., and Hu, J. (2016), "*Admissible region of large-scale uncertain wind generation considering small-signal stability of power systems*," IEEE Transactions on Sustainable Energy, 7(4), pp.1611-1623.

[6] Morshed, M. J. and Fekih, A. (2018), "*A coordinated controller design for DFIG-based multi-machine power systems*," IEEE Systems Journal, 13(3), pp.3211-3222.

[7] Fateh, D., Birjandi, A. A. M. and Guerrero, J. M. (2020), "*Safe Sub Synchronous Oscillations Response for Large DFIG-Based Wind Farms*," IEEE Access, 25(8), 169822-169834.

[8] Hossain, M. K. and Ali, M. H. (2015), "*Transient stability augmentation of PV/DFIG/SG-based hybrid power system by nonlinear control-based variable resistive FCL*", IEEE Transactions on Sustainable Energy, 6(4), pp.1638-1649.

[9] Karunanayake, C., Ravishankar, J. and Dong, Z. Y. (2019), "*Nonlinear SSR damping controller for DFIG based wind generators interfaced to series compensated transmission systems*," IEEE Transactions on Power Systems, 35(2), pp.1156-1165.

[10] Zhang, G., Hu, W., Cao, D., Yi, J., Huang, Q., Liu, Z. and Blaabjerg, F. (2020), "*A data-driven approach for designing STATCOM additional damping controller for wind farms*," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 11(7),pp. 105620.

[11] Du, W., Wang, Y., Wang, H., Xiao, X., Wang, X. and Xie, X. (2019), "*Analytical examination on the amplifying effect of weak grid connection for the DFIGs to induce torsional sub-synchronous oscillations*," IEEE Transactions on Power Delivery, 35(4),pp. 1928-1938.

[12] Mahish, P., Pradhan, A. K., & Sinha, A. K. (2018). *Wide area predictive control of power system considering communication delay and data drops*. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, *15*(6), 3243-3253.

[13] Yao, W., Nan, J., Zhao, Y., Fang, J., Ai, X., Zuo, W., ... & Cheng, S. (2021). *Resilient wide-area damping control for inter-area oscillations to tolerate deception attacks. IEEE Transactions on Smart Grid*, *12*(5), 4238-4249.

[14] Gupta, P., Pal, A., & Vittal, V. (2021). *Coordinated Wide-Area Damping Control Using Deep Neural Networks and Reinforcement Learning*. *IEEE Transactions on Power Systems*, *37*(1), 365-376.

[15] Bhadu, M., Senroy, N., Narayan Kar, I., & Sudha, G. N. (2016). *Robust linear quadratic Gaussian-based discrete mode wide area power system damping controller*. *IET Generation, Transmission & Distribution*, *10*(6), 1470-1478.

[16] Roberson, D., & O'Brien, J. F. (2018). *Multivariable loop-shaping control design for stability augmentation and oscillation rejection in wide-area damping using HVDC*. *Electric Power Systems Research*, *157*, 238-250.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.5.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 12(6),pp. 106591.
[32] Gomez, L. A., Lourenço, L. F., Grilo, A. P., Salles, M. B. C., Meegahapola, L. and Sguarezi Filho, A. J. (2020), "*Primary Frequency Response of Microgrid Using Doubly Fed Induction Generator With Finite Control Set Model Predictive Control Plus Droop Control and Storage System*," IEEE Access, 15(8), pp.189298-189312.
[33] Chen, X. and Wu, X. (2011), "*June. Design and implementation of model predictive control algorithms for small satellite three-axis stabilization*," In 2011 IEEE International Conference on Information and Automation, pp. 666-671.
[34] Valencia-Palomo, G. and Rossiter, J.A. (2012), "*Novel programmable logic controller implementation of a predictive controller based on Laguerre functions and multiparametric solutions*," IET control theory & applications, 6(8), pp.1003-1014.
[35] Evans, M.A., Cannon, M. and Kouvaritakis, B. (2014), "*Robust MPC tower damping for variable speed wind turbines*," IEEE Transactions on Control Systems Technology, 23(1), pp.290-296.
[36] Akhmatov, V. and Knudsen, H. (2002), "*An aggregate model of a grid-connected, large-scale, offshore wind farm for power stability investigations—importance of windmill mechanical system*," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 24(9), pp.709-717.

رزومه



احسان اکبری در بروجرد متولد شده است (۱۳۶۶). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- قدرت در دانشگاه مازندران(۱۳۸۹) و کار شناسی‌ار شد مهند سی برق- قدرت را در دانشگاه علوم و فنون مازندران(۱۳۹۲) سپری کرده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه ادوات FACTS، کیفیت توان الکتریکی، الکترونیک قدرت و کاربرد آن در سیستم‌های قدرت، تولیدات پراکنده و شبکه‌های توزیع هوشمند می‌باشد و در حال حاضر مربی گروه برق دانشگاه فنی و حرفه‌ای چرخکار بروجرد می‌باشد.

زیرنویس‌ها

[1] Low-Voltage Right Through
[2] Flexible AC Transmission System
[3] Proportional–Integral
[4] Power System Stabilizer
[5] Static Nonlinear Controller
[6] Variable Resistive-Type Fault Current Limiter
[7] Sub Synchronous Resonance
[8] Sliding Mode Control
[9] Battery energy storage system
[10] Functional model predictive control
[11] STATCOM and Battery Energy Storage System

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.5.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

Design of damping controller for STATCOM connected to doubly fed induction generator in multi-machine power system

Ehsan Akbari[1]

1- Department of Electrical Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Babol, Iran, akbari.ieee@gmail.com

Abstract: Due to the ever-increasing development of the electricity industry and the growth of consumption demand, the use of clean energy sources is increasing. In this regard, the use of wind energy as a clean and free source for the production of electrical energy is expanding day by day, and according to predictions, 20% of the world's energy will be obtained through wind by 2030. But in addition to all the advantages of wind energy, using them in the form of wind turbines in power grids in order to provide the required power can be considered a negative factor from the point of view of stability in power systems. The purpose of this article is to use the predictive control method based on logger functions to check the small signal stability of a hybrid network, including synchronous generators, wind farms and parallel STATCOM compensator. In this method, by using logger functions, the computational time in model-based predictive control has been reduced, so that the accuracy of tracking control signals can be increased and the stability of the system can be improved. The proposed method for controlling the active and reactive powers in the rotor side converter related to DFIG and the type of compensator used has been done in such a way that the performance of the power system can be increased by applying appropriate switching in the corresponding inverter. The simulation results using MATLAB software have been evaluated in the time domain, and its superiority has been clearly shown in order to improve the damping of power system fluctuations.

Keywords: Small-signal stability, Doubly Fed Induction Generator, STATCOM compensator, Predictive Control, Rotor-Side Converter.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.5.3]
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023