

بهبود پایداری سیستم‌های قدرت متصل به مزارع بادی ترکیبی با استفاده از STATCOM و شبکه‌های عصبی

زهرا قدیمی (نویسنده مسئول)^۱، علی کرمی^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق، دانشگاه گیلان- دانشکده فنی و مهندسی- رشت- گیلان- ایران zahragadimi98@gmail.com
^۲ دانشیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه گیلان- دانشکده فنی و مهندسی- رشت- گیلان- ایران karami_s@guilan.ac.ir

چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به دلیل مزایای زیاد آن‌ها شامل عدم نیاز به سوخت و عدم آسیب زدن به محیط زیست، رشد فزاینده‌ای داشته است. اما استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در سیستم‌های قدرت باعث می‌شود که این سیستم‌ها با مشکلات جدیدی روبرو شوند. در این خصوص بررسی رفتار دینامیکی سیستم‌های قدرت شامل مزارع یا توربین‌های بادی، مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است. در مزارع بادی عموماً از یکی از انواع ژنراتورهای القایی قفس سنجایی (SCIG)^۱ و یا ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه (DFIG)^۲ استفاده می‌شوند. ولی در یک مزرعه بادی ترکیبی (CWF)^۳، از هر دو نوع ژنراتور القایی استفاده می‌شود. اما باید توجه داشت که به منظور بهبود رفتار دینامیکی مزارع بادی ترکیبی، لازم است از جبران‌کننده‌هایی در سیستم استفاده شود. در میان انواع جبران‌کننده‌ها، STATCOM (جبران‌کننده سنکرون استاتیکی)^۴، بسیار پر کاربرد می‌باشد. یک STATCOM به سرعت می‌تواند با تزریق و یا جذب توان راکتیو به سیستم، ولتاژ شین متصل به خود را کنترل نماید. در این مقاله، ابتدا یک سیستم قدرت متصل به یک مزرعه بادی ترکیبی انتخاب می‌شود که در یک شین آن از یک STATCOM استفاده شده است. سپس برای میرا نمودن موثر نوسانات متغیرهای سیستم در مواجهه با خطاها، یک کنترل‌کننده تکمیلی PID^۵ در ساختار STATCOM مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین از روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)^۶ برای تعیین مقادیر بهینه ضرایب مربوط به کنترل‌کننده PID استفاده می‌شود. اما از آنجایی که تعیین ضرایب بهینه کنترل‌کننده PID با استفاده از الگوریتم PSO کار زمان‌بر است، از یک شبکه عصبی مصنوعی (ANN)^۷ هم برای تخمین بهنگام پارامترهای کنترل‌کننده مذکور در هنگام تغییر شرایط کاری سیستم، استفاده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده ارائه شده و درستی روش طرح شده تایید می‌شود. تمام شبیه‌سازی‌ها در نرم افزار MATLAB/Simulink انجام شده است.

واژه‌های کلیدی: سیستم‌های قدرت، توربین‌های بادی، ژنراتورهای القایی SCIG و DFIG، مزرعه بادی ترکیبی، STATCOM، شبکه‌های عصبی.

¹ Squirrel Cage Induction Generator (SCIG)

² Doubly-Fed Induction Generator (DFIG)

³ Combined Wind Farm (CWF)

⁴ Static Synchronous Compensator (STATCOM)

⁵ Proportional Integral Derivative (PID)

⁶ Particle Swarm Optimization (PSO)

⁷ Artificial Neural Network (ANN)

۱. مقدمه

در دو دهه گذشته، منابع انرژی تجدیدپذیر (RES)⁸ مورد توجه فزاینده‌ای قرار گرفته‌اند؛ زیرا منابع انرژی متعارف قادر به برآورده نمودن نیاز بارها به دلیل شهرنشینی و صنعتی شدن جامعه نیستند. آلودگی محیطی ناشی از منابع متعارف نیز شرکت‌های خدمات شهری را به سرمایه‌گذاری در انرژی سبز به جای سوخت‌های فسیلی سوق داده است [۱]. منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه برق ادغام شده اند تا تقاضای انرژی را برآورده کنند و بر معایب انرژی متعارف غلبه کنند. در بین منابع انرژی تجدیدپذیر، انرژی باد به دلیل نگهداری کم، هزینه جاری کمتر و نیاز به فضای نصب کمتر، نقش مهمی ایفا می کند [۲]. به طور کلی می توان توربین های بادی را به دو دسته توربین های بادی با سرعت ثابت و توربین های بادی با سرعت متغیر تقسیم بندی کرد. توربین های بادی سرعت ثابت بر مبنای ژنراتورهای القایی قفس سنجابی (SCIG) هستند؛ در حالی که توربین های بادی سرعت متغیر از ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه (DFIG) استفاده می کنند. توربین های بادی SCIG ارزان تر هستند ولی توربین های DFIG از پایداری بیشتری برخوردار می باشند. اما در یک مزرعه بادی ترکیبی (CWF) که شامل هر دو نوع توربین بادی است، از مزایای هر دو دسته توربین بادی استفاده می شود.

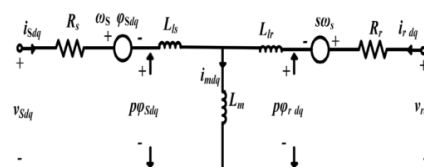
پایداری مزارع بادی تحت تأثیر تبادل توان راکتیو بین شبکه قدرت و مزارع بادی است [۴]. معمولاً در هنگام بروز اختلالات در شبکه از جبران‌کننده‌های توان راکتیو برای کنترل سطح ولتاژ و تامین توان راکتیو مورد نیاز مزرعه بادی استفاده می شود. جبران کننده سنکرون استاتیکی (STATCOM) که یکی از محبوب ترین عناصر مربوط به سیستم های انتقال AC انعطاف پذیر است، برای ارائه همزمان توان راکتیو و پشتیبانی از ولتاژ شین مزرعه بادی بسیار کاربردی است [۵].

امروزه از انرژی باد به طور گسترده ای در سیستم های قدرت استفاده می شود؛ اما این امر موجب شده است مشکلات زیادی برای سیستم شامل بهبود عملکرد مزارع بادی، کیفیت توان و نوسانات سیستم در شرایط عادی و غیرعادی پدید آید. حل این مشکلات با استفاده از روش های کنترل مرسوم دشوار و پیچیده است. با ظهور تکنیک‌های هوش محاسباتی مانند شبکه های عصبی مصنوعی (ANN)، پارامترهای کنترل‌کننده‌ها را می‌توان به سرعت تغییر داد و با توجه به شرایط کاری سیستم آن ها را تنظیم نمود [۶]. در این مقاله، از ANN برای تنظیم بهنگام پارامترهای بهینه ی یک کنترل کننده ی PID به منظور بهبود عملکرد پایداری مزرعه بادی ترکیبی، استفاده می‌شود. بعلاوه، برای تعیین مقادیر بهینه ضرایب مربوط به کنترل کننده PID و در واقع برای به دست آوردن الگوهای مورد نیاز برای آموزش شبکه های عصبی، از روش بهینه سازی ابتکاری ازدحام ذرات (PSO) استفاده می شود. تأثیر STATCOM تنظیم شده بر عملکرد مزرعه بادی ترکیبی در هنگام خطای تکفاز، دوفاز و سه فاز به طور جامع مورد بررسی قرار می گیرد. هدف اصلی، بهبود عملکرد مزرعه بادی ترکیبی با استفاده از STATCOM و شبکه عصبی مصنوعی است.

۲. مدل سازی سیستم

۲-۱- مدل سازی ژنراتور القایی

مدل‌سازی ریاضی ژنراتورهای القایی وجه اشتراک تمامی مقالاتی است که به موضوع انرژی باد می‌پردازند. محققان از آن به عنوان مقدمه ای برای کار خود استفاده می کنند. شکل ۱ مدار معادل ژنراتور القایی را نشان می دهد که در آن از نمادهای مرسوم استفاده شده است [۷].



شکل ۱ - مدار معادل ژنراتور القایی

⁸ Renewable Energy Resources (RES)

تبدیل d-q ولتاژها و جریان های روتور و استاتور ژنراتور القایی به صورت معادلات (۱) تا (۴) می باشند:

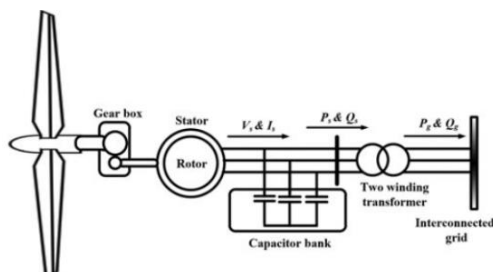
$$\begin{cases} v_{ds} = p\varphi_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} + R_s i_{ds} \\ v_{qs} = p\varphi_{qs} - \omega_s \varphi_{ds} + R_s i_{qs} \end{cases} \quad (۱)$$

$$\begin{cases} v_{dr} = p\varphi_{dr} - s\omega_s \varphi_{qr} + R_r i_{dr} \\ v_{qr} = p\varphi_{qr} - s\omega_s \varphi_{dr} + R_r i_{qr} \end{cases} \quad (۲)$$

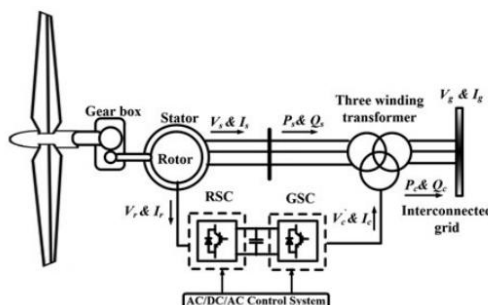
$$\begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (L_{ls} + L_m) & \cdot & L_m & \cdot \\ \cdot & (L_{ls} + L_m) & \cdot & L_m \\ L_m & \cdot & (L_{lr} + L_m) & \cdot \\ \cdot & L_m & \cdot & (L_{lr} + L_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (۳)$$

$$\begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} = \frac{1}{(L_{ls} + L_m)(L_{lr} + L_m) - L_m^2} \begin{bmatrix} (L_{lr} + L_m) & \cdot & -L_m & \cdot \\ \cdot & (L_{lr} + L_m) & \cdot & -L_m \\ -L_m & \cdot & (L_{ls} + L_m) & \cdot \\ \cdot & -L_m & \cdot & (L_{ls} + L_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} \quad (۴)$$

به طور کلی می توان ژنراتورهای القایی را به دو دسته ژنراتورهای القایی قفس سنجایی و ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه تقسیم بندی نمود. ولتاژ روتور SCIG صفر است؛ زیرا روتور اتصال کوتاه است و همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است بین روتور SCIG و شبکه ارتباطی وجود ندارد. در مقابل، در DFIG به دلیل اینکه روتور از نوع روتور سیم پیچی شده است، ولتاژ وجود دارد. همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، توان از روتور DFIG از طریق مبدل AC/DC/AC به شبکه منتقل می شود [۶].



شکل ۲ - مدار معادل ژنراتور القایی



شکل ۳ - مدار معادل ژنراتور القایی

همان طوری که ذکر شد، روتور DFIG از طریق مبدل AC/DC/AC به شبکه متصل می شود. این مبدل AC/DC/AC از دو مبدل منبع ولتاژ تشکیل شده است که توسط شین DC به یکدیگر متصل شده اند. مبدل اول از سمت روتور متصل می

شود و بنابراین مبدل سمت روتور (RSC)⁹ نامیده می شود. مبدل دوم از سمت شبکه متصل می شود و مبدل سمت شبکه (GSC)¹⁰ نامیده می شود. این ساختار DFIG امکان کنترل توان خروجی و توان راکتیو در نقطه اتصال مشترک (PCC)¹¹ با شبکه را به طور مستقل فراهم می آورد. گشتاورهای الکتریکی SCIG و DFIG به ترتیب توسط معادلات (۵) و (۶) به دست می آیند [۳].

$$T_e = \frac{rPL_m}{rL_r} (i_{qs}\varphi_{dr} - i_{ds}\varphi_{qr}) \quad (5)$$

$$T_e = \frac{rP}{r} (i_{qs}\varphi_{ds} - i_{ds}\varphi_{qs}) \quad (6)$$

۲-۲- مدل سازی توربین بادی

توان توربین های بادی کسری از کل توان ذخیره شده در باد است و می تواند به صورت روابط (۷) تا (۱۰) ارائه شود:

$$P_{wt} = \frac{1}{r} \rho A v^3 C_p \quad (7)$$

$$C_p = 0.517 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{\frac{-0.0068}{\lambda_i}} + 0.006 \quad (8)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{116} \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) \quad (9)$$

$$\lambda = \frac{\omega_r l_b}{v} \quad (10)$$

که در آن، C_p ضریب توان است و تابعی از نسبت سرعت نوک λ و زاویه شیب β می باشد. همچنین v سرعت باد، ω_r سرعت روتور، A ناحیه برخورد پره بر حسب متر مربع، l_b طول پره یا شعاع روتور و ρ چگالی هوا است که برابر با ۱/۲۲ کیلوگرم بر متر مکعب می باشد [۵].

۳-۲- مدل سازی STATCOM

STATCOM یکی از مهمترین و معروف ترین ادوات FACTS است که از آن برای بهبود پروفیل ولتاژ استفاده می شود. معنی STATCOM جبران ساز سنکرون استاتیکی است و به عنوان یک کندانسور سنکرون استاتیک شناخته می شود. در واقع یک عنصر تنظیم کننده در سیستم های قدرت AC می باشد. طراحی اصلی STATCOM بر مبنای مبدل منبع ولتاژ (VSC)^{۱۲} است.

STATCOM به منظور تنظیم ولتاژ در سیستم، به صورت موازی در نقطه اتصال خود به سیستم متصل می شود. نمودار شماتیک STATCOM و مدار معادل آن در شکل ۴ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل نشان داده شده است،

⁹ Rotor Side Converter (RSC)

¹⁰ Grid Side Converter (GSC)

¹¹ Point of Common Coupling (PCC)

¹² Voltage Source Converter (VSC)

STATCOM به صورت موازی با شین یک شبکه الکتریکی و از طریق یک ترانسفورماتور کوپلاژ متصل می شود. ترانسفورماتور کوپلاژ از طریق مبدل منبع ولتاژ (VSC) به یک شین DC متصل می شود [۶]. همان طور که در شکل ۴-ب نشان داده شده است، ولتاژ تزریقی STATCOM (V_{inj}) برای تنظیم ولتاژ شبکه (V_B) از طریق X_{Sh} که نشان دهنده راکتانس ترانسفورماتور کوپلاژ و VSC است، به شبکه منتقل می شود. توان های اکتیو و راکتیو منتقل شده را می توان به صورت زیر محاسبه کرد:

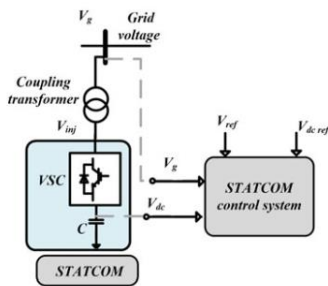
$$P = \frac{V_g V_{inj} \sin \delta}{X} \quad (11)$$

$$Q = \frac{V_g (V_g - V_{inj} \cos \delta)}{X} \quad (12)$$

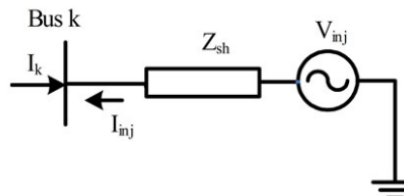
در حالت پایدار، V_{inj} توسط VSC هم فاز با V_g تولید می شود، که نشان می دهد $\delta = 0$ ، $P = 0$ و همچنین Q مطابق رابطه ی (۱۳) به شبکه منتقل می شود [۵].

$$Q = \frac{V_g (V_g - V_{inj})}{X_{Sh}} \quad (13)$$

از معادله فوق می توان نتیجه گرفت که شرایط کاری STATCOM به مقدار V_{inj} و V_g بستگی دارد. یک STATCOM وقتی V_g بزرگتر از V_{inj} باشد، توان راکتیو را از شبکه جذب می کند و زمانی که V_{inj} بزرگتر از V_g باشد، توان راکتیو را به شبکه تزریق می نماید [۴].



شکل ۴-ب - دیاگرام شماتیک STATCOM

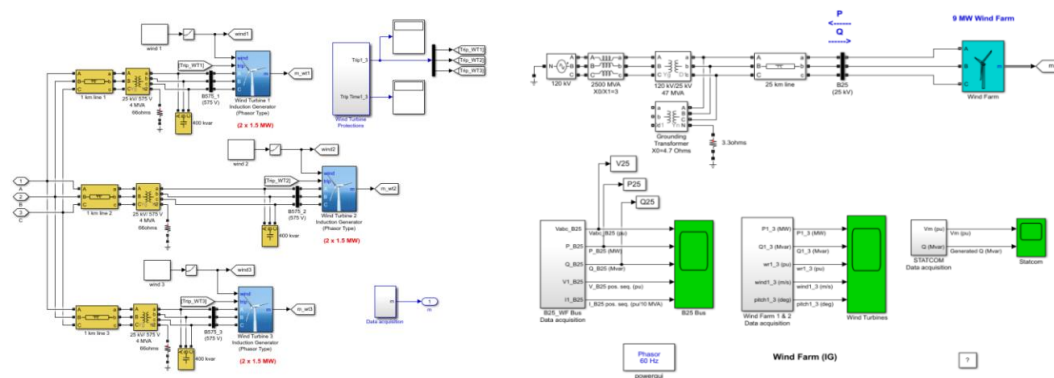


شکل ۴-الف - مدار معادل STATCOM

شکل ۴ - اساس عملکرد STATCOM

۳. اصول طراحی مزرعه بادی ترکیبی متصل به سیستم قدرت و بررسی عملکرد آن

سیستم مورد مطالعه در این مقاله از دو بخش سیستم قدرت و مزرعه بادی تشکیل شده است. برای شبیه سازی مزرعه بادی از Simulink نرم افزار Matlab استفاده می شود. برنامه ی Matlab این امکان را فراهم می آورد تا با پیاده سازی سیستم در Simulink از بلوک هایی آماده ای که در آن تعبیه شده است، به بررسی عملکرد دینامیکی سیستم در مواجه با خطاهای الکتریکی و مکانیکی و نحوه ی پایداری آن پرداخت. در این بخش ابتدا پیاده سازی سیستم قدرت متصل به مزرعه بادی شامل توربین های بادی قفسه سنجایی (SCIG) ارائه می شود و سپس با افزودن توربین های بادی دو سو تغذیه (DFIG) عملکرد سیستم را بهبود بخشیده و مزرعه بادی ترکیبی مورد مطالعه قرار گیرد.



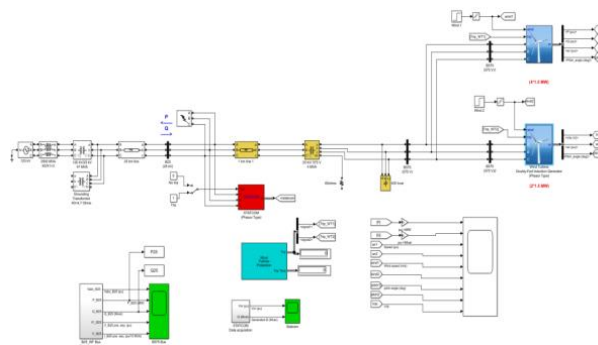
شکل ۵ - شبیه سازی سیستم قدرت متصل به مزرعه بادی ترکیبی ۹ مگاواتی شامل SCIG در Simulink

۳-۱- شبیه سازی سیستم قدرت متصل به مزرعه بادی شامل SCIG

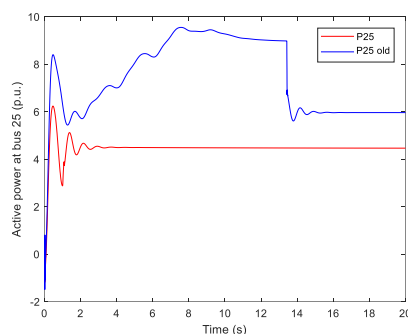
در شکل ۵ سیستم قدرت متصل به مزرعه بادی قفسه سنجایی که در Simulink مدل سازی شده، نشان داده شده است. در این شکل، برای مزرعه بادی ظرفیت ۹ مگا وات در نظر گرفته شده است.

۳-۲. شبیه سازی سیستم قدرت متصل به مزرعه بادی ترکیبی شامل SCIG و DFIG

در شکل ۶ یک سیستم قدرت متصل به یک مزرعه بادی ترکیبی نشان داده شده است. شکل موج های حالت مانای توان اکتیو خروجی در یکی از شین های سیستم و برای مزرعه بادی SCIG و مزرعه بادی ترکیبی، با هم در شکل ۷ مقایسه شده اند



شکل ۶ - شبیه سازی سیستم قدرت متصل به مزرعه بادی ترکیبی ۹ مگاواتی شامل SCIG و DFIG در Simulink



شکل ۷ - مقایسه شکل موج توان اکتیو شین ۲۵ کیلو ولتی در مزرعه بادی SCIG و مزرعه بادی ترکیبی در حالت مانا

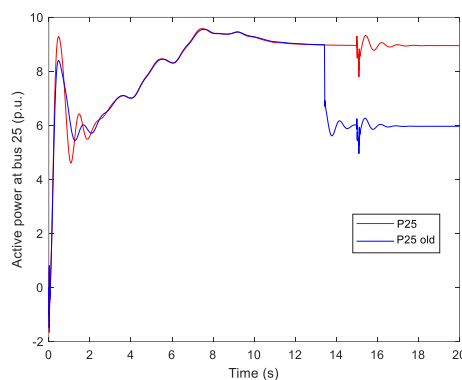
۳-۳. ضرورت استفاده از STATCOM

در سیستم مورد مطالعه این امر مورد بررسی قرار گرفت که آیا سیستم نیاز به STATCOM دارد یا خیر و اگر دارد، تحت چه شرایطی باید STATCOM وارد سیستم شود. برای پاسخ به این سوال ابتدا باید به این نکته توجه داشت که دو نوع خطا را می توان در سیستم در نظر گرفت:

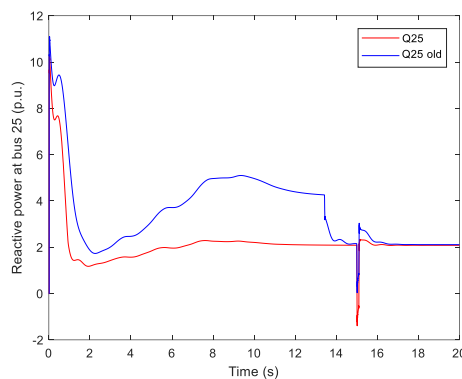
۱. خطای مکانیکی؛ که همان اغتشاش مکانیکی وارد شده بر سیستم است که در اینجا تغییرات سرعت باد به عنوان خطای مکانیکی در نظر گرفته می شود.

۲. خطای الکتریکی؛ که همان خطاهای الکتریکی تکفاز، دو فاز و سه فاز (به زمین) می باشند.

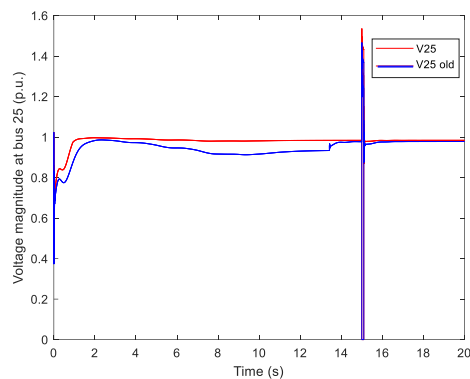
به سیستم خطای الکتریکی اعمال شد و مشاهده شد که STATCOM بر روی خطای الکتریکی تاثیر مثبت دارد اما بر روی خطای مکانیکی تاثیری ندارد. نتایج به دست آمده در شکل های ۸ تا ۱۳ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که همه خطاها در شین ۲۵ کیلو ولتی و به مدت ۰/۱ ثانیه و در ثانیه ۱۵ به سیستم اعمال شده اند.



شکل ۸ – شکل موج توان اکتیو شین ۲۵ کیلو ولت بعد از اعمال خطای تکفاز به زمین در حضور و عدم حضور STATCOM در مزرعه بادی SCIG

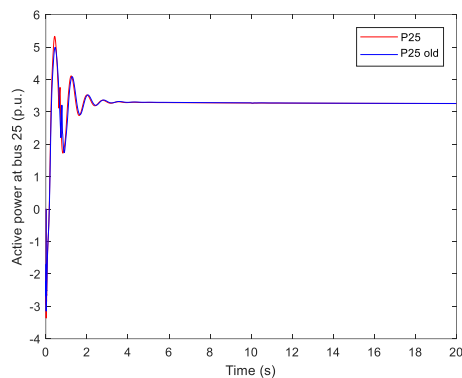


شکل ۹ – شکل موج توان راکتیو شین ۲۵ کیلو ولت بعد از اعمال خطای تکفاز به زمین در حضور و عدم حضور STATCOM در مزرعه بادی SCIG

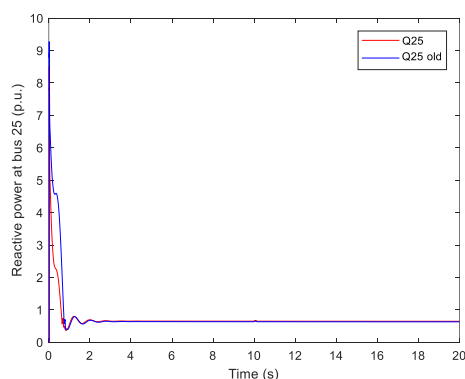


شکل ۱۰ - شکل موج ولتاژ شین ۲۵ کیلو ولت بعد از اعمال خطای تکفاز به زمین در حضور و عدم حضور STATCOM در مزرعه بادی SCIG

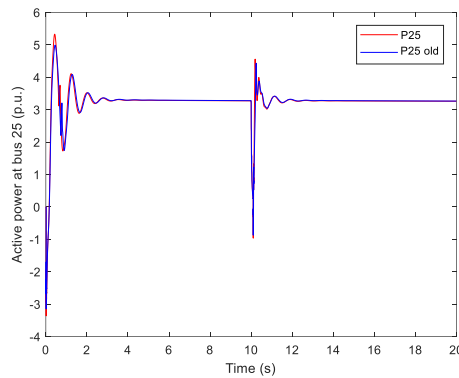
همان طور که در شکل های ۱۱ تا ۱۴ نشان داده شده است، STATCOM تاثیر زیادی برای روی عملکرد سیستم قدرت متصل به مزرعه بادی ترکیبی نداشته است. به همین دلیل برای بهبود رفتار سیستم بعد از اعمال خطا در مزرعه بادی ترکیبی از یک کنترل کننده تکمیلی برای STATCOM هم استفاده شده است که در بخش بعد تشریح می شود.



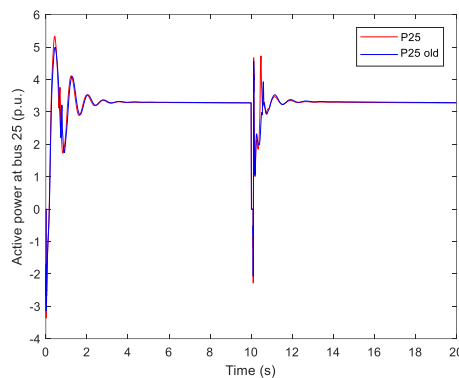
شکل ۱۱ - شکل موج توان اکتیو شین ۲۵ کیلو ولت بعد از اعمال خطای تکفاز به زمین در حضور و عدم حضور STATCOM در مزرعه بادی ترکیبی



شکل ۱۲ - شکل موج توان راکتیو شین ۲۵ کیلو ولت بعد از اعمال خطای تکفاز به زمین در حضور و عدم حضور STATCOM در مزرعه بادی ترکیبی



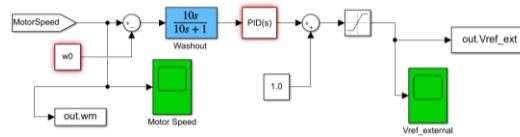
شکل ۱۳ - شکل موج توان اکتیو شین ۲۵ کیلو ولت بعد از اعمال خطای دوفاز به زمین در حضور و عدم حضور STATCOM در مزرعه بادی ترکیبی



شکل ۱۴ - شکل موج توان اکتیو شین ۲۵ کیلو ولت بعد از اعمال خطای سه فاز به زمین در حضور و عدم حضور STATCOM در مزرعه بادی ترکیبی

۳-۴. اصلاح عملکرد سیستم با افزودن یک کنترل کننده تکمیلی به STATCOM

با اضافه کردن یک کنترل کننده PID به قسمت ولتاژ مرجع (V_{ref}) مربوط به تنظیمات STATCOM، می توان عملکرد سیستم قدرت را بهبود بخشید. ساختار کلی این کنترل کننده تکمیلی در شکل ۱۵ نشان داده شده است. سیگنال ورودی این کنترل کننده تکمیلی در واقع انحراف سرعت یک موتور القایی موجود در سیستم است و این انحراف سرعت پس از عبور از یک طبقه پاکساز (Washout) وارد کنترل کننده اصلی می شود.

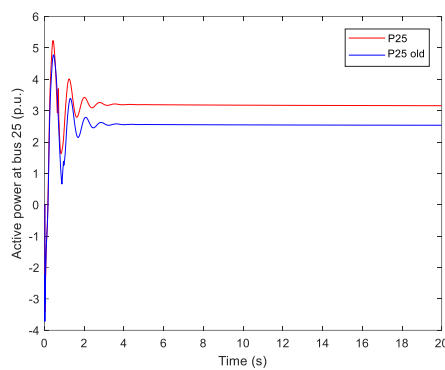


شکل ۱۵ - کنترل کننده ی PID تکمیلی برای STATCOM

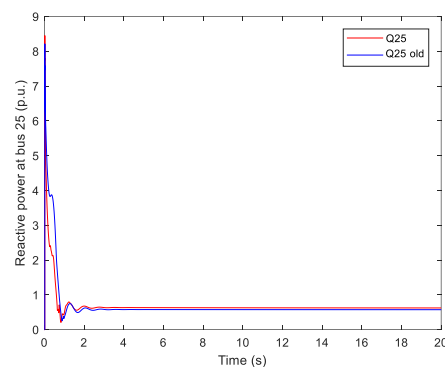
تابع تبدیل کنترل کننده اصلی PID که در شکل ۱۵ نشان داده شده است، به صورت زیر می باشد:

$$PID(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (14)$$

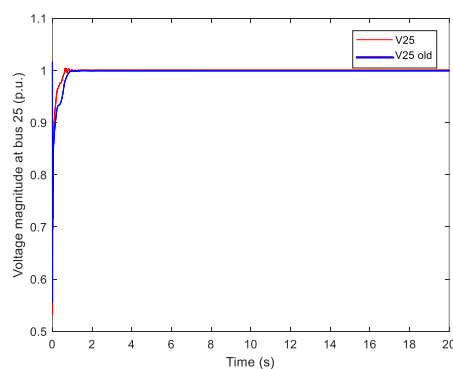
که در آن K_d و K_i ، K_p به ترتیب نشان دهنده ضرایب مربوط به جمله های تناسبی، انتگرالی و مشتقی کنترل کننده PID هستند. شکل موج های حالت مانای مزرعه بادی ترکیبی در حضور و عدم حضور کنترل کننده تکمیلی برای STATCOM، و به ازای چند مقدار دلخواه برای ضرایب کنترل کننده PID در شکل های ۱۶ تا ۱۸ نشان داده شده است.



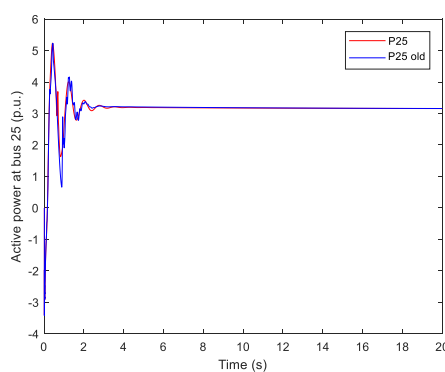
شکل ۱۶ – مقایسه شکل موج توان اکتیو شین ۲۵ کیلو ولت در مزرعه بادی ترکیبی در حضور و عدم حضور کنترل کننده PID



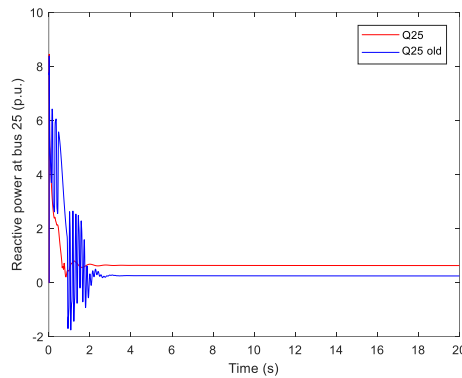
شکل ۱۷ – مقایسه شکل موج توان راکتیو شین ۲۵ کیلو ولت در مزرعه بادی ترکیبی در حضور و عدم حضور کنترل کننده PID



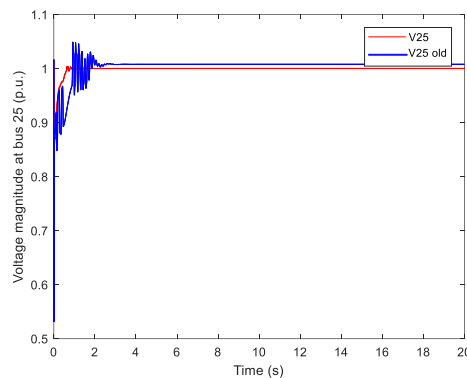
شکل ۱۸ – مقایسه شکل موج ولتاژ شین ۲۵ کیلو ولت در مزرعه بادی ترکیبی در حضور و عدم حضور کنترل کننده PID



شکل ۱۹ – مقایسه شکل موج توان اکتیو شین ۲۵ کیلو ولت در مزرعه بادی ترکیبی با $K_p=1$ و $K_i=0.5$ و $K_d=0.1$ در مقایسه با $K_p=100$ و $K_i=10$ و $K_d=1$



شکل ۲۰ – مقایسه شکل موج توان راکتیو شین ۲۵ کیلو ولت در مزرعه بادی ترکیبی با $K_p=1$ و $K_i=0/5$ و $K_d=0/1$ در مقایسه با $K_p=100$ و $K_i=10$ و $K_d=1$



شکل ۲۱ – مقایسه شکل موج ولتاژ شین ۲۵ کیلو ولت در مزرعه بادی ترکیبی با $K_p=1$ و $K_i=0/5$ و $K_d=0/1$ در مقایسه با $K_p=100$ و $K_i=10$ و $K_d=1$

نکته حائز اهمیت این است که لازم است مقادیر مناسبی برای ضرایب کنترل کننده PID در نظر گرفته شود. در شکل های ۱۹ تا ۲۱ منحنی تغییرات متغیرهای سیستم با در نظر گرفتن دو دسته از مقادیر برای ضرایب کنترل کننده PID، با هم مقایسه شده اند.

۴. تعیین ضرایب بهینه کنترل کننده PID با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO)

در این بخش از الگوریتم PSO برای به دست آوردن ضرایب بهینه کنترل کننده PID استفاده می شود. به طور خلاصه و فشرده می توان مراحل الگوریتم PSO را به صورت زیر بیان نمود:

۱. ایجاد جمعیت اولیه و ارزیابی آن.

۲. تعیین بهترین خاطره ی شخصی و بهترین خاطره ی جمعی.

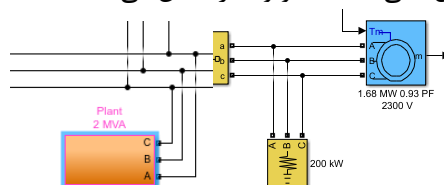
۳. به روزرسانی سرعت و موقعیت و ارزیابی پاسخ های جدید.

۴. در صورت برآورده نشدن شرایط توقف، رفتن به مرحله ۲.

۵. پایان.

شرایط توقف نیز می تواند به عنوان مثال، رسیدن به حد قابل قبولی از پاسخ و یا سپری شدن تعداد مشخصی از تکرار ها باشد. در این مقاله تابع هدف در الگوریتم PSO، مینیمم سازی نوسانات مربوط به توان های اکتیو و راکتیو به دنبال وقوع یک اغتشاش در سیستم در نظر گرفته شده و بر این اساس ضرایب بهینه کنترل کننده PID تعیین شده است.

برای به دست آوردن مقادیر بهینه ضرایب کنترل کننده PID با استفاده از الگوریتم PSO، نقاط کاری (شرایط کاری) سیستم تغییر داده شدند. به منظور تغییر شرایط کاری سیستم، دو پارامتر PLS و PLD تغییر داده شدند. که در آن PLS نشان دهند توان یک بار استاتیک و PLD نشان دهنده توان یک بار دینامیک (موتور القایی) است که در شکل ۲۲ نشان داده شده است. PLD مربوط به یک موتور القایی (آسنکرون) با قدرت نامی $1/68$ مگاوات و ضریب قدرت $0/93$ و ولتاژ خط 2300 ولت است. در مدل سازی این موتور پارامترها برابر $R_s = 0/0092$ و $X_s = 0/0717$ و $R'_r = 0/007$ و $X'_r = 0/0717$ و $L_m = 4/14$ در نظر گرفته شده است. همچنین PLS توان اکتیو یک بار استاتیک سه فاز با آرایش ستاره زمین شده و ولتاژ نامی 2300 ولت، تحت فرکانس 60 هرتز و توان نامی 200 کیلو وات را نشان می دهد.



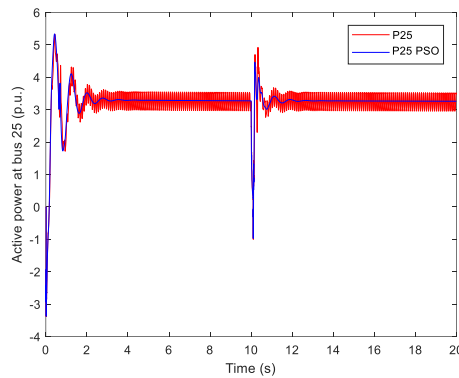
شکل ۲۲ - بلوک مربوط به PLS و PLD

در جدول ۱ چند نمونه از نتایج حاصل از الگوریتم بهینه سازی PSO که مربوط به چند مقدار مختلف برای توان بارهای استاتیک و دینامیک است، نشان داده شده است.

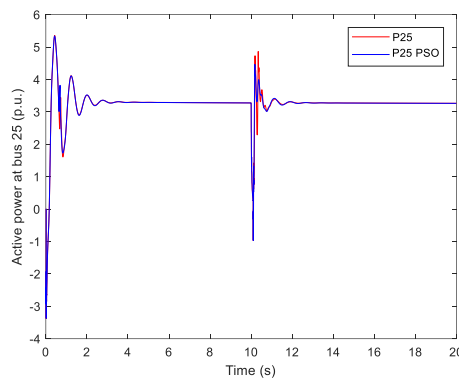
جدول ۱- چند نمونه از نتایج بهینه سازی الگوریتم PSO برای نقاط کاری مختلف

	PLS (W)	PLD (W)	ضرایب کنترل کننده PID		
			K_p	K_i	K_d
۱	۱۱۵۱۲۲۶/۳۸	۲۴۷۲۷۱۱/۷۵	۱/۶۹	۴/۰۸	۰/۱۰
۲	۹۳۹۸۸۴/۱۱	۱۹۴۳۸۵۹/۶۷	۱/۲۰	۱/۱۰	۰/۱۰
۳	۱۷۴۲۳۸/۷۹	۵۰۵۰۰۶/۷۷	۱/۰۰	۳/۸۸	۰/۱۰
۴	۳۶۰۱۰۵/۴۵	۲۳۷۷۵۴۲/۵۵	۱/۰۴	۲/۲۷	۰/۱۰
۵	۷۵۳۵۹۰/۷۵	۵۰۷۸۶۵/۸۱	۱/۰۰	۴/۴۶	۰/۱۰

در شکل های ۲۳ و ۲۴ برای یکی از شرایط کاری سیستم، منحنی تغییرات برخی متغیرهای سیستم با در نظر گرفتن ضرایب بهینه برای پارامترهای کنترل کننده PID و ضرایب غیر بهینه برای پارامترهای کنترل کننده مذکور، با هم مورد مقایسه قرار گرفته است.



شکل ۲۳ - شکل موج توان اکتیو شین ۲۵ کیلو ولت در مزرعه بادی ترکیبی با ضرایب بهینه با الگوریتم PSO در مقایسه با $K_p=15$ و $K_i=10$ و $K_d=10$ در یک نقطه کار



شکل ۲۴ - شکل موج توان اکتیو شین ۲۵ کیلو ولت در مزرعه بادی ترکیبی با ضرایب بهینه با الگوریتم PSO در مقایسه با $K_p=15$ و $K_i=10$ و $K_d=10$ در یک نقطه کار

باید توجه داشت که عملکرد کنترل کننده PID متأثر از شرایط کاری سیستم است. به عبارت دیگر، ضرایب بهینه مربوط به کنترل کننده PID که با استفاده از الگوریتم PSO و برای هر نقطه کار سیستم محاسبه می شوند، تنها می توانند رفتار دینامیکی سیستم را تحت همان نقطه کار بهبود دهند. بنابراین با تغییر شرایط کاری سیستم لازم است مجدداً پارامترهای بهینه کنترل کننده PID با استفاده از الگوریتم PSO محاسبه شوند. اما یافتن ضرایب بهینه کنترل کننده PID با استفاده از الگوریتم PSO بسیار زمان بر می باشد و بنابراین برای کاربرهای بهنگام مناسب نیست. برای غلبه بر این مشکل، در این مقاله از یک شبکه عصبی برای تخمین پارامترهای بهینه کنترل کننده PID استفاده شده است که در بخش بعد تشریح می شود.

۵. تنظیم بهنگام ضرایب کنترل کننده PID با استفاده از شبکه های عصبی

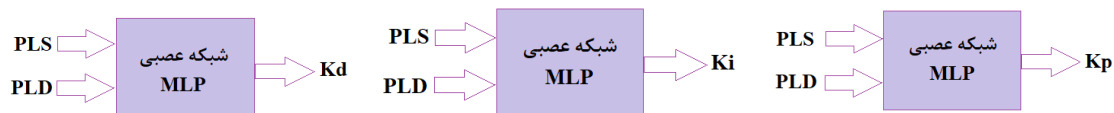
شبکه های عصبی مصنوعی یک راه حل هوشمند و کاربردی برای تخمین بهنگام پارامترهای بهینه کنترل کننده PID ارائه می نمایند. برای این منظور ابتدا با در نظر گرفتن نقاط کاری مختلف سیستم، پارامترهای بهینه ی کنترل کننده PID با استفاده از الگوریتم PSO و به صورت آفلاین تعیین می شود. سپس از پاسخ های به دست آمده به عنوان الگوهای آموزشی برای آموزش یک شبکه عصبی پرسپترون چند لایه چندلایه (MLP)¹³ استفاده می شود. شبکه عصبی آموزش دیده سپس قادر خواهد بود با تغییر شرایط کاری سیستم، به سرعت ضرایب بهینه کنترل کننده PID را تخمین بزند.

¹³ Multi-Layered Perceptron (MLP)

۵-۱. روش به دست آوردن اطلاعات آموزش دهنده شبکه عصبی

۵-۱-۱. تعیین ورودی ها و خروجی ها و نحوه ی آموزش شبکه عصبی

در این مقاله فرض شده است در سیستم شبیه سازی شده در Simulink (شکل ۶)، توان توربین های بادی ثابت است و تنها توان مربوط به دو بار (یکی بار استاتیک و دیگری بار دینامیک) تغییر می نماید. سپس با تغییر توان این بارها در یک محدوده مشخص و با استفاده از الگوریتم PSO و در نظر گرفتن یک تابع هدف برای بهینه سازی، مقادیر بهینه ضرایب کنترل کننده PID تعیین شدند. در مرحله بعد و همان طور که در شکل ۲۵ نشان داده شده است، توان بار استاتیک (PLS) و توان بار دینامیک (PLD) به عنوان ورودی های شبکه عصبی و ضرایب بهینه کنترل کننده PID (K_p و K_i و K_d) به عنوان خروجی های سه شبکه عصبی MLP در نظر گرفته شدند. علت اینکه از PLS و PLD به عنوان ورودی های شبکه عصبی استفاده شد آن است که این دو توان به طور مستقیم در سیستم در دسترس هستند. بنابراین بعد از آموزش این شبکه های عصبی، تنها با داشتن این دو توان می توان مقادیر بهینه ضرایب کنترل کننده PID را برای هر نقطه کار سیستم سریعاً و به طور بهنگام تعیین نمود. در این مقاله برای داشتن دقت بیشتر، از سه شبکه عصبی متفاوت برای تخمین سه پارامتر کنترل کننده PID استفاده شده است.



شکل ۲۵ - ورودی ها و خروجی های سه شبکه عصبی

۵-۱-۲. تولید الگوهای آموزش دهنده

همان طوری قبلاً بیان شد، در این مقاله برای آموزش بهتر و همچنین تخمین دقیق تر پارامترهای کنترل کننده PID، از سه شبکه عصبی متفاوت برای تخمین سه گین (ضریب) کنترل کننده PID استفاده شده است. مطابق شکل ۲۵، هر کدام از این شبکه های عصبی دارای دو نورون در ورودی و یک نورون در خروجی هستند. در هر یک از این سه شبکه عصبی، تنها از یک لایه مخفی با ۱۰ نرون استفاده شده است. برای آموزش این شبکه های عصبی نیز از روش آموزش سریع Levenberg-Marquardt استفاده شده است [۱۲].

برای تغییر نقاط کاری سیستم فرض شد که توان بار استاتیک PLS و توان بار دینامیک PLD هر کدام در محدوده مشخصی حول مقادیر اسمی خود، تغییر کنند. سپس با انتخاب اعداد تصادفی برای هر کدام از دو توان مذکور و در محدوده تغییرات مربوطه، یک نقطه کار تصادفی برای سیستم تولید شد. سرانجام نیز برای هر نقطه کار تصادفی تولید شده، با استفاده از الگوریتم PSO مقادیر بهینه ضرایب کنترل کننده PID به دست آمد. محدوده تغییرات بارهای سیستم و مقادیر اسمی آن ها چنین در نظر گرفته شد:

۱. بار استاتیک در محدوده ۰/۸ تا ۶/۰ برابر مقدار اسمی خود تغییر داده شد. توان اسمی بار استاتیک نیز برابر ۲۰۰ کیلووات فرض شد.

۲. بار دینامیک در محدوده ۰/۸ تا ۵/۰ برابر مقدار اسمی خود تغییر داده شد. توان اسمی بار دینامیک نیز برابر ۵۰۰ کیلووات فرض شد.

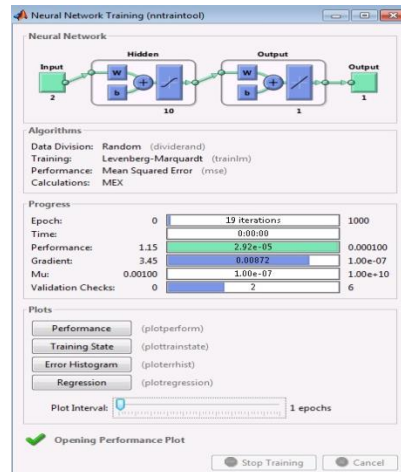
سپس توان مصرفی بار استاتیک به عدد ۱۲۰۰۰۰۰ یعنی ۶ برابر توان اسمی خود و بار دینامیک به عدد ۲۵۰۰۰۰۰ یعنی ۵ برابر توان خود تقسیم شدند تا با ورودی های کوچکتری شبکه های عصبی آموزش داده شوند. در واقع الگوهای ورودی به نوعی نرمالیزه شوند.

با استفاده از روشی که در بالا توضیح داده شد، تعداد ۶۰ الگو برای آموزش شبکه عصبی تولید شد. از آنجایی که معمولاً از ۶۰ تا ۷۰ درصد الگوها برای آموزش شبکه عصبی و ۳۰ تا ۴۰ درصد بقیه برای تست شبکه عصبی آموزش دیده استفاده می شوند،

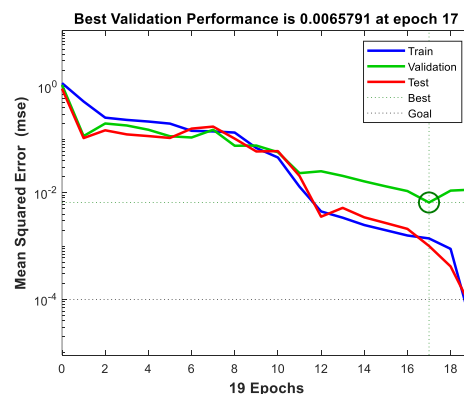
از ۴۲ الگو برای آموزش و از ۹ الگو برای جلوگیری از آموزش بیش از اندازه (همان داده های اعتبار سنجی) و از ۹ الگو باقیمانده هم برای تست شبکه عصبی آموزش دیده استفاده شد.

۵-۲. نتایج شبیه سازی

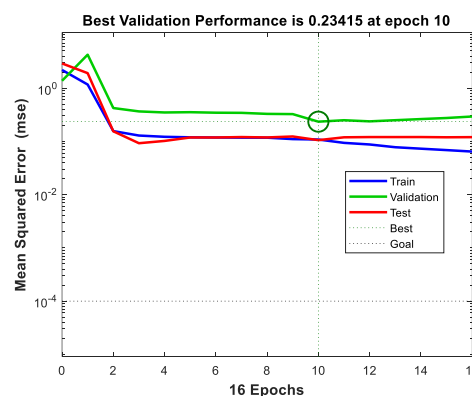
همان طور که در قبلا بیان شد، از سه شبکه عصبی برای تخمین سه گین کنترل کننده PID استفاده شد. اما الگوهای ورودی خروجی قبل از اعمال به شبکه عصبی نرمالیزه شدند تا همگی در بازه $[-1, 1]$ قرار گیرند. شکل ۲۶ فرآیند آموزش مربوط به یکی از شبکه های عصبی توسط جعبه ابزار شبکه های عصبی نرم افزار Matlab، را نشان می دهد.



شکل ۲۶ - فرآیند آموزش شبکه عصبی مربوط به گین K_p

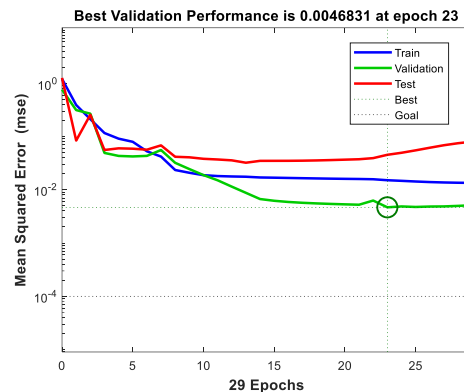


شکل ۲۷ - منحنی یادگیری شبکه عصبی مربوط به گین K_p (به روش LM)



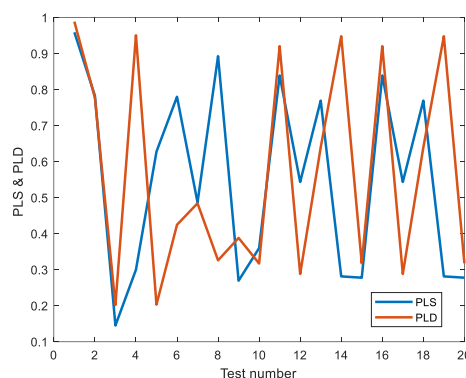
شکل ۲۸ - منحنی یادگیری شبکه عصبی مربوط به گین K_i (به روش LM)

در شکل ۲۷ منحنی یادگیری (آموزش) شبکه عصبی مربوط به گین K_p کنترل کننده PID به روش LM، نشان داده شده است. همان طوری که از این شکل دیده می شود، شبکه عصبی مورد نظر با انجام ۱۷ تکرار (Epoch) آموزش داده شده است. در شکل ۲۸ منحنی یادگیری شبکه عصبی مربوط به گین K_i نشان داده شده است. از این شکل می توان مشاهده نمود که این شبکه عصبی با گذشت ۱۰ تکرار آموزش دیده است. همچنین در شکل ۲۹ منحنی یادگیری شبکه عصبی مربوط به گین K_d نشان داده شده است. مطابق شکل مذکور، این شبکه عصبی با طی ۲۳ تکرار آموزش دیده است.

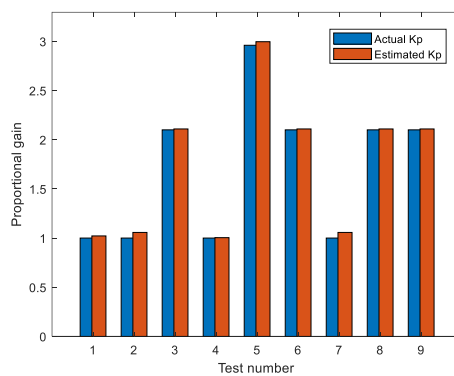


شکل ۲۹ - منحنی یادگیری شبکه عصبی مربوط به گین K_d (به روش LM)

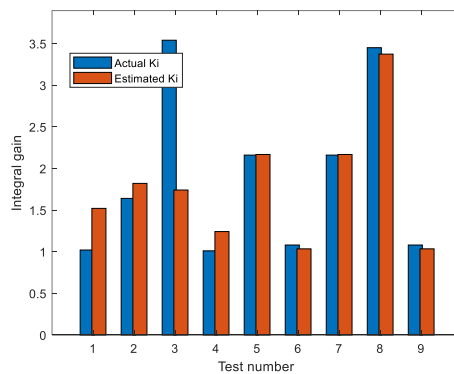
برای نمایش بهتر نحوه ی تغییر ورودی های شبکه عصبی، در شکل ۳۰ به عنوان نمونه تغییرات مربوط به ۲۰ نقطه کار سیستم نشان داده شده است. این شکل نشان می دهد ورودی های شبکه های عصبی تغییر می کنند. برای بررسی ویژگی تعمیم پذیری شبکه های عصبی آموزش دیده، عملکرد آن ها را با الگوهای تست مورد ارزیابی قرار دادیم. مقدار ریشه متوسط مربع خطا (RMSE) برای ۹ الگوی تست و متناظر با سه شبکه عصبی مربوط به تخمین ضرایب K_i ، K_p و K_d ، به ترتیب برابر ۰/۰۳۱۱، ۰/۰۶۳۱۱ و ۰/۰۳۳۰ به دست آمد. این مقادیر تایید می نمایند که شبکه های عصبی آموزش دیده قادرند با دقت خوبی ضرایب کنترل کننده PID را تخمین بزنند. برای بهتر دیدن این امر، در شکل های ۳۱ تا ۳۳ مقادیر واقعی و تخمینی هر کدام از ضرایب کنترل کننده PID، برای الگوهای تست با هم مقایسه شده اند. از این شکل ها نیز به خوبی مشاهده می شود که شبکه های عصبی طرح شده دارای دقت مناسبی هستند.



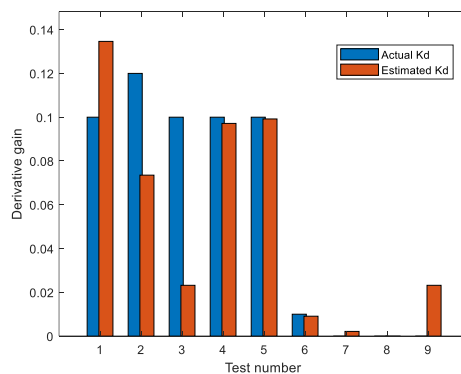
شکل ۳۰ - نحوه ی تغییر ورودی های شبکه عصبی



شکل ۳۱ - مقایسه ی مقدار واقعی و مقدار تخمین زده شده ی پارامتر K_p (با $RMSE=0.0311$)



شکل ۳۲ - مقایسه ی مقدار واقعی و مقدار تخمین زده شده ی پارامتر K_i (با $RMSE=0.06311$)



شکل ۳۳ - مقایسه ی مقدار واقعی و مقدار تخمین زده شده ی پارامتر K_d (با $RMSE=0.0330$)

۶. نتیجه گیری

در این مقاله عملکرد دینامیکی یک سیستم قدرت متصل به یک مزرعه بادی ترکیبی (CWF) به طور کامل مورد بررسی قرار گرفت. یک مزرعه بادی ترکیبی شامل هم ژنراتورهای القایی SCIG و هم ژنراتورهای القایی DFIG است و در آن از مزایای هر دو نوع ژنراتور القایی استفاده می شود. در این نوع نیروگاه های بادی، توان راکتیو تزریقی مبدل های DFIG برای جبران توان راکتیو مورد نیاز ژنراتورهای SCIG مورد استفاده قرار می گیرد. اما نتایج شبیه سازی های انجام شده نشان داد که یک مزرعه بادی ترکیبی در مواجه با انواع خطاها دارای رفتار دینامیکی مناسبی نیست. به همین دلیل از یک STATCOM هم برای جبران سازی سیستم و میرا نمودن نوسانات متغیرهای سیستم استفاده شد. از طرفی مشخص شد برای آنکه STATCOM رفتار سیستم را بهبود ببخشد، لازم است از یک کنترل کننده تکمیلی هم در ساختار STATCOM استفاده

شود. به همین منظور یک کنترل کننده تکمیلی PID هم در سیستم مورد استفاده قرار گرفت. علاوه بر آن، نتایج شبیه سازی نشان داد که برای عملکرد موفقیت آمیز کنترل کننده تکمیلی، لازم است با تغییر شرایط کاری سیستم، ضرایب این کنترل کننده با کمک یکی از روش های بهینه سازی ابتکاری مانند PSO تعیین شود. تعیین ضرایب بهینه کنترل کننده تکمیلی با استفاده از الگوریتم PSO بسیار زمان بر می باشد. به همین دلیل برای تخمین سریع و بهنگام پارامترهای کنترل کننده تکمیلی تحت شرایط کاری مختلف سیستم، از یک شبکه عصبی پرسپترون چند لایه (MLP) در این مقاله استفاده شد. نتایج حاصل از شبیه سازی عملکرد موفق کنترل کننده تکمیلی طرح شده و شبکه عصبی آموزش دیده را تایید نمود.

۷. منابع و مراجع

1. R. Sadiq, Z. Wang, C.Y. Chung, C. Zhou, and C. Wang, "A review of STATCOM control for stability enhancement of power systems with wind/PV penetration: existing research and future scope", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, Vol. 31, Issue 11, 2021.
2. J. Bhukya and V. Mahajan, "Parameter tuning of PSS and STATCOM controllers using genetic algorithm for improvement of small-signal and transient stability of power systems with wind power", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, Vol. 31, Issue 7, 2021.
3. S. Kamel, F. Jurado, A. Rashad, Y. Ibrahim, and L. Nasrat, "Performance enhancement of wind farms using tuned SSSC based on artificial neural network", *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence*, Vol. 5, pp. 118-124, 2019.
4. L. Wang and W. Huang, "Dynamic-stability enhancement and reactive power/voltage control of a large-scale wind farm using a STATCOM", *IEEE North American Power Symposium*, pp. 1-8, USA, 2010.
5. A. Rashad, S. Kamel, F. Jurado and M. Abdel-Nasser, and K. Mahmoud, "ANN-based STATCOM tuning for performance enhancement of combined wind farms", *Electric Power Components and Systems*, Vol. 47, pp. 10-26, 2019.
6. B. Wu, Y. Lang, N. Zargari, and S. Kouro, *Power conversion and control of wind energy systems*, Wiley-IEEE Press, 2011.
7. M.G. Hemeida, H. Rezk and M.M. Hamada, "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, pp. 935-951, 2018.
8. P. Jyothi, R.B.R. Prakash, and P.S. Varma, "Application of artificial intelligence to DFIG based wind farm for reactive power compensation", *International Journal of Renewable Energy Research*, Vol.10, No.2, June, 2020.
9. A. Rashad, S. Kamel, F. Jurado, and M. Abdel-Nasser, "STATCOM parameters optimization using multi-objective LAPO for enhancing the stability of combined wind farm", *Electric Power Components and Systems*, Vol. 48, pp. 1508–1522, 2020.
10. V. Kumar, A.S. Pandey, and S.K. Sinha, "Stability improvement of DFIG-based wind farm integrated power system using ANFIS controlled STATCOM", *Energies*, Vol. 13, No. 18, 2020.
11. L. Bao, L. Fan and Z. Miao, "Control Interaction of STATCOM and Type-4 Wind Turbines," *IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, Denver, CO, USA, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESGM48719.2022.9917231.
12. Z. -W. Huang, G. W. Chang, I. Li, P. -G. Wang and T. K. Nguyen, "A study of voltage ride-through capability of an Offshore wind farm during grid fault considering STATCOM

- enhancement," IEEE International Future Energy Electronics Conference (IFEEC), Taipei, Taiwan, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/IFEEC53238.2021.9661861.
13. Y. Zhang, Y. Yang, X. Chen and C. Gong, "Intelligent parameter design-based impedance optimization of STATCOM to mitigate resonance in wind farms," IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 9, No. 3, pp. 3201-3215, June 2021, doi: 10.1109/JESTPE.2020.3020434.
14. V. K. Tiwari and A. R. Gupta, "Effectiveness of STATCOM under different fault conditions near the wind farm," First IEEE International Conference on Measurement, Instrumentation, Control and Automation (ICMICA), Kurukshetra, India, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICMICA48462.2020.9242878.
15. J. L. priya and S. T. J. Christa, "Voltage stability enhancement of DFIG based wind farm during fault using STATCOM," IEEE International Conference on Advances and Developments in Electrical and Electronics Engineering (ICADEE), Coimbatore, India, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICADEE51157.2020.9368947.
16. A. Fayek et al., "STATCOM and PID controller based stability enhancement of a grid connected wind farm," International Conference on Energy and Power Engineering (ICEPE), Dhaka, Bangladesh, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/CEPE.2019.8726728.

Stability enhancement of power systems connected to combined wind farms using STATCOM and neural networks

Zahra Qadimi, Ali Karami

Masters student, Dept. of Electrical Engineering, University of Guilan, Guilan, Iran,

zahraqadimi98@gmail.com

Associate Professor, Dept. of Electrical Engineering, University of Guilan, Guilan, Iran, karami_s@guilan.ac.ir

Abstract— In recent years, The use of renewable energy has grown exponentially due to its many benefits, including no need for fuel and no harm to the environment. However, the use of renewable energy sources in power systems has caused new problems for these systems. In this regard, the study of the dynamic behavior of power systems, including farms or wind turbines, has been the focus of many researchers. In wind farms, one of the types of squirrel cage induction generators (SCIG) or double-fed induction generators (DFIG) is generally used. But both types of induction generators are used in a combined wind farm (CWF). But it should be noted that in order to improve the dynamic behavior of combined wind farms, it is necessary to use compensators in the system. STATCOM (static synchronous compensator) is widely used among the types of compensators. A STATCOM can quickly control the bus voltage connected to it by injecting or absorbing reactive power into the system. In this article, first, a power system connected to a hybrid wind farm is selected, in which a STATCOM is used in one bus. Then, a supplementary PID controller is used in the STATCOM structure to effectively dampen the fluctuations of the system variables in the face of errors. Also, the heuristic particle swarm optimization (PSO) method is used to determine the optimal values of the coefficients of the PID controller. But since determining the optimal coefficients of the PID controller using the PSO algorithm is a time-consuming task, an artificial neural network (ANN) is also used to estimate the controller parameters in time when the working conditions of the system change. The results of the performed simulations are presented and the correctness of the proposed method is confirmed. All simulations are done in MATLAB/Simulink software.

Keywords: Power systems, Wind turbine, Double-fed induction generator, Wind farm, STATCOM, Neural networks.