



Technovations in Electrical Engineering & Green Energy System

Research Article

(2022) 1(3):75-90

Optimizing the Control of DFIG Based Wind Turbines Using Sensitivity Analysis and Particle Swarm Optimization Method

Meysam Jaberolansar¹, *MSC Student*, Mohammad Mahdi Rezaei¹, *Assistant Professor*, Hamed Khodadadi¹, *Assistant Professor*, Seyed Mohammad Madani², *Associated Professor*

¹Department of Electrical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr, Isfahan, Iran
²Faculty of Electrical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Abstract:

One of the key issues in the optimal operation of doubly fed induction generator (DFIG)-based wind turbines is the optimization of relatively large control parameters that exist in these systems. However, the main problem is the high number of control parameters and the nonlinearity of the model of these systems, which makes solving the optimization problem very time-consuming and divergent in some cases. In this article, in order to optimize the control parameters, a method based on particle swarm optimization (PSO) is proposed. In this method, after linearization of the system model, the eigenvalues of the system are extracted as a function of the control parameters. By examining the sensitivity of eigenvalues to control parameters, more sensitive parameters are identified and optimized based on the PSO method. The performance of the proposed method has been investigated through simulation in the MATLAB software environment.

Keywords: Wind Turbines, Doubly Fed Induction Generators (DFIG), Optimization, Particle Swarm Optimization (PSO), Sensitivity Analysis

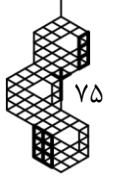
Received: 30 April 2022

Revised: 5 July 2022

Accepted: 31 August 2022

Corresponding Author: Dr. Mohammad Mahdi Rezaei, mm.rezaei@iaukhsh.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/TEEGES.2022.1963760.1025>





مقاله پژوهشی

فناوری های نوین در مهندسی برق و سیستم انرژی سبز

بهینه سازی کنترل توربین های بادی مبتنی بر ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه با استفاده از آنالیز حساسیت و بر اساس روش بهینه سازی تجمع ذرات

میثم جابر الانصار^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد، محمدمهدی رضایی^۱، استادیار، حامد خدادادی^۱، استادیار، سیدمحمد مدنی^۲، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، اصفهان، ایران

۲- دانشکده مهندسی برق، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده: یکی از مسائل کلیدی در بهره برداری بهینه از توربین های بادی مبتنی بر ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه (DFIG)، بهینه سازی پارامترهای کنترلی نسبتا زیادی است که در این سیستم ها وجود دارند. اما، مشکل اصلی تعداد بالای پارامترهای کنترلی و غیرخطی بودن مدل این سیستم ها است که حل مساله بهینه سازی را بسیار زمانبر و در برخی موارد واگرا می کند. در این مقاله، بمنظور بهینه سازی پارامترهای کنترلی یک روش مبتنی بر بهینه سازی تجمع ذرات (PSO) پیشنهاد شده است. در این روش، پس از خطی سازی مدل سیستم، مقادیر ویژه سیستم بصورت تابعی از پارامترهای کنترلی مورد بررسی قرار می گیرند. با بررسی حساسیت مقادیر ویژه به پارامترهای کنترلی، پارامترهای حساسیت برانگیزتر شناسایی می شوند و بر اساس روش PSO مورد بهینه سازی قرار می گیرند. صحت و کارایی روش پیشنهادی از طریق شبیه سازی در محیط نرم افزار MATLAB مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه های کلیدی: توربین های بادی، ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه (DFIG)، بهینه سازی، بهینه سازی تجمع ذرات (PSO)، آنالیز حساسیت

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۱۰

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۰۹

نویسنده مسئول: دکتر محمدمهدی رضایی، mm.rezaei@iaukhsh.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/TEEGES.2022.1963760.1025>



دولت ها در سراسر جهان تلاش های زیادی برای استفاده از انرژی های تجدیدپذیر، مانند انرژی باد، انرژی خورشیدی، برق آبی و غیره، انجام میدهند تا از نگرانی های بوجود آمده در مورد آلودگی زیست محیطی و کمبود انرژی بکاهند [۱]. در این بین، آمارها نشان می دهند که نقش انرژی بادی با توجه به با بهبود تکنیک ها، کاهش هزینه ها رشد سریع تری داشته است [۲]. در بین انواع توپولوژی های سرعت ثابت و سرعت متغیر، سیستم های تبدیل انرژی باد مبتنی بر ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه (DFIG) به دلیل مزایای زیادی از جمله قابلیت کنترل توان راکتیو، نیاز به مبدل های الکترونیک قدرت کم ظرفیت، رلندمان بالاتر، و غیره، به طور گسترده تری مورد توجه قرار گرفته اند [۳].

با افزایش مداوم نفوذ انرژی بادی، نگرانی هایی در خصوص موضوع کیفیت برق و مشکل پایداری ناشی از اتصال برق بادی ایجاد شده است [۴]. در DFIG متصل به شبکه، پاسخ گذرا و پایداری تا حد زیادی تحت تأثیر عواملی مانند غیر خطی بودن مدل، دینامیک های مدل نشده و بروز اغتشاشات مختلف در سیستم های قدرت است [۳]. از اینرو، در نظر گرفتن تأثیر توربینهای بادی در برنامه ریزی و بهره برداری از سیستم قدرت اجتناب ناپذیر به نظر می رسد [۵، ۶].

روش های کنترل متعددی برای سیستم های تبدیل انرژی باد مبتنی بر DFIG ارائه شده است، که می توان آنها را به روش های کنترل غیر خطی، روشهای کنترل خطی و روش های مبتنی بر هوش مصنوعی دسته بندی نمود [۳]. اما، طراحی کنترل کننده های غیرخطی پیچیدگی های خاص خودش را دارد و پیاده سازی عملی آن با چالش هایی مانند عدم قطعیت های پارامتری روبرو است [۷]. عملکرد مناسب روش های مبتنی بر هوش مصنوعی مانند منطق فازی، شبکه های عصبی و سیستم فازی عصبی تطبیقی نیز تا حد بسیار زیادی به تجربه طراح وابستگی دارند [۸-۱۰]. بنابراین، روش های خطی کلاسیک بویژه روش کنترل برداری مبتنی بر کنترل کننده PI همچنان از پذیرفته شدن بیشتری در صنعت برخوردار هستند [۱۱-۱۳].

در روش کنترل برداری، مبدل سمت روتور (RSC) وظیفه تنظیم توان اکتیو و راکتیو تبدالی با شبکه را بر عهده دارد و وظیفه تنظیم ولتاژ لینک DC بر عهده مبدل سمت شبکه (GSC) است [۱۴-۱۸]. در [۱۶-۱۷]، سرعت روتور و توان راکتیو خروجی استاتور و در [۱۸]، توان اکتیو و دامنه ولتاژ خروجی استاتور توسط مبدل سمت روتور کنترل می شود. مبدل سمت شبکه نیز در [۱۶-۱۸] وظیفه کنترل ولتاژ لینک DC و همچنین نگه داشتن جریان محور q در مقدار صفر را بر عهده دارد. در این مقاله، توان های اکتیو و راکتیو خروجی استاتور توسط مبدل سمت روتور بطور مستقیم کنترل می شود و مبدل سمت شبکه نیز بطور غیر مستقیم، توان های اکتیو و راکتیو تبدالی با شبکه را کنترل می کند. با توجه به اینکه یکی از مشکلات ژنراتورهای القایی توان راکتیو تبدالی آنها با شبکه است، روش پیشنهادی در این مقاله میتواند با حذف توان های راکتیو تبدالی با شبکه از سمت استاتور و همچنین مبدل سمت شبکه، باعث بهبود کیفیت توان سیستم شود.

در روش کنترل برداری، هر یک از این مبدل ها توسط حلقه های کنترلی آبشاری مبتنی بر روش PI کنترل می شوند. اما، کارایی سیستم های تبدیل انرژی باد مبتنی بر DFIG کنترل شده به این روش وابستگی زیادی به ضرایب کنترل کننده PI دارد. تنها هنگامی می توان انتظار عملکرد مناسبی از این سیستم های کنترلی داشت که ضرایب کنترل کننده PI بهینه و بطور مناسبی انتخاب شده باشند. روش های بهینه سازی متعددی مانند بهینه سازی ازدحام ذرات، روش جستجوی باکتری، الگوریتم ژنتیک و جستجوی گرانشی برای انتخاب بهینه ضرایب کنترلی ارائه شده اند [۲۱-۱۷]. اما، ضرایبی که باید تنظیم شوند تعداد نسبتا بالایی دارند و انتخاب بهینه آنها چالش هایی را در زمینه زمان محاسبات، دقت نتایج و همگرایی فرایند بهینه سازی ایجاد می کند. در [۱۸]، بمنظور کاهش تعداد ضرایب کنترلی، روشی مبتنی بر آنالیز حساسیت ارائه شده است که در آن، جابجایی مقادیر ویژه سیستم نسبت به نقطه کار حالت ماندگار بعنوان معیاری برای حساسیت این مقادیر به پارامترهای کنترلی در نظر گرفته شده است. اما جابجایی مقادیر ویژه می تواند در همه جهت های صفحه اعداد مختلط بوجود آید و لزوما نمی تواند معیار مناسبی برای بهبود حاشیه پایداری باشد.

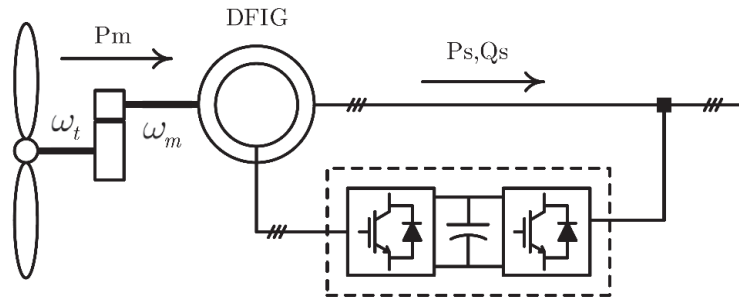
در این مقاله، یک روش مبتنی بر PSO برای تنظیم بهینه ضرایب کنترل کننده های PI یک سیستم تبدیل انرژی باد مبتنی بر DFIG ارائه شده است. در این روش، ابتدا معادلات سیستم استخراج و خطی سازی می شوند. سپس، با استفاده از ماتریس کنترل، مقادیر ویژه سیستم بصورت تابعی از ضرایب کنترلی محاسبه می شوند. پس از آن، بر اساس ضریب میرایی مقادیر ویژه، آنالیز حساسیت انجام می شود و تأثیر گذار ترین ضرایب کنترلی تعیین می گردند. استفاده از تغییرات ضریب میرایی بعنوان معیاری برای آنالیز



حساسیت، نسبت به جابجایی مقادیر ویژه، معیار بهتری برای بهبود حاشیه پایداری است. در نهایت، با استفاده از روش PSO، مقادیر بهینه ضرایب کنترلی تعیین می شوند. نوآوری این مقاله، استفاده از آنالیز حساسیت مبتنی بر ضریب میرایی برای کاهش ابعاد مساله بهینه سازی است که موجب کاهش زمان محاسبات، افزایش دقت نتایج و جلوگیری از واگرایی می گردد. کارایی روش پیشنهادی از طریق شبیه سازی در نرم افزار MATLAB مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مدل سازی سیستم تحت مطالعه

در این مقاله یک سیستم تبدیل انرژی بادی مبتنی بر DFIG، مطابق شکل (۱) مورد مطالعه قرار گرفته است [۳]. این سیستم شامل یک توربین بادی است که محور آن از طریق یک جعبه دنده به محور یک ژنراتور القایی دوسوتغذیه متصل شده است. در حالی که روتور این ژنراتور از طریق مبدل های پشت به پشت تغذیه می شود، استاتور به طور مستقیم به شبکه متصل شده است. مبدل های پشت به پشت، از یک اینورتر سمت شبکه و یک اینورتر سمت روتور تشکیل شده است که سمت DC آنها از طریق یک خازن لینک DC به یکدیگر متصل شده اند. مبدل سمت روتور مستقیماً به روتور متصل است، اما مبدل سمت شبکه از طریق یک ترانسفورمر سه فاز به شبکه اتصال یافته است. ترانسفورمر مذکور، علاوه بر کاهش سطح ولتاژ، می تواند به عنوان یک فیلتر L، موجب کاهش هارمونیک های جریان مبدل سمت شبکه شود. شبکه اصلی نیز به صورت یک شین بینهایت مدل شده است. در ادامه به مدل سازی دینامیکی اجزای سیستم تحت مطالعه پرداخته شده است.



شکل (۱)، شمای کلی یک سیستم تبدیل انرژی بادی مبتنی بر DFIG

۱-۲- توربین بادی

گشتاور مکانیکی خروجی توربین بادی را می توان توسط رابطه زیر بیان کرد [۷]:

$$T_m = \frac{\rho \pi C_p(\lambda, \beta) R_b^2 V_w^3}{2 \omega_t} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{\omega_t R_b}{V_w} \quad (2)$$

که در آن، ρ ، C_p ، λ ، β ، R_b ، ω_t و V_w به ترتیب چگالی هوا، ضریب توان، نسبت سرعت نوک، زاویه پیچ پره ها، شعاع توربین، سرعت زاویه ای محور توربین و سرعت باد هستند. به طور کلی ضریب توان C_p نسبت توان استحصال شده به توان باد است، که تابعی از نسبت سرعت نوک و زاویه ی پره ها می باشد و می توان آن را به صورت زیر بیان کرد:

$$C_p = \frac{1}{2} \left(\frac{R_b C_f}{\lambda} - 0.022\beta - 2 \right) e^{-\frac{0.225 R_b C_f}{\lambda}} \quad (3)$$

که در آن C_f یک ثلثت مربوط به طراحی پره ها می باشد. توان توربین از طریق یک جعبه دنده به ژنراتور منتقل میشود. معادلات دینامیکی بخش مکانیکی ژنراتور، محور ها و توربین را می توان بصورت زیر نوشت [۷]:

$$\frac{d\omega_t}{dt} = \frac{1}{2H_t} (T_m - T_{sh}) \quad (4)$$

$$\frac{d\theta_t}{dt} = [\omega_t - (1 - S_r)\omega_s] \omega_{sb} \quad (5)$$

$$\frac{ds_r}{dt} = -\frac{1}{2H_g} (T_e + T_{sh}) \quad (6)$$

$$T_{sh} = K_{sh}\theta_t + D_{sh}\frac{d\theta_t}{dt} \quad (7)$$

که در آن T_e و $T_m, T_{sh}, D_{sh}, K_{sh}, \theta_t, S_r, H_g, H_t$ به ترتیب، ثلثت اینرسی توربین و ژنراتور، لغزش، زاویه پیچش محور، ضریب سختی و ضریب میرایی محور، گشتاورهای محور مکانیکی و الکترومکانیکی ژنراتور می باشد. ω_{sb} نیز مقدار سرعت سنکرون بر حسب rad/s است.

۲-۲- ژنراتور القایی دوسو تغذیه (DFIG)

با تعریف ولتاژهای گذرای محورهای dq بصورت زیر:

$$E'_d = -\left(\omega_s \frac{L_m}{L_{rr}} \psi_{qr}\right) \quad (8)$$

$$E'_q = \left(\omega_s \frac{L_m}{L_{rr}} \psi_{dr}\right) \quad (9)$$

می توان ژنراتور القایی DFIG را بصورت زیر مدل کرد [۷]:

$$\frac{X'_s}{\omega_s} \frac{di_{ds}}{dt} = v_{ds} - \left[R_s + \frac{X_s - X'_s}{\omega_s T'_0} \right] i_{ds} - (1 - S_r) E'_d - \frac{L_m}{L_{rr}} v_{dr} + \frac{1}{\omega_s T'_0} E'_q + X'_s i_{qs} \quad (10)$$

$$\frac{X'_s}{\omega_s} \frac{di_{qs}}{dt} = v_{qs} - \left[R_s + \frac{X_s - X'_s}{\omega_s T'_0} \right] i_{qs} - (1 - S_r) E'_q - \frac{L_m}{L_{rr}} v_{qr} - \frac{1}{\omega_s T'_0} E'_d - X'_s i_{ds} \quad (11)$$

$$\frac{dE'_d}{dt} = s_r \omega_s E'_q - \omega_s \frac{L_m}{L_{rr}} v_{qr} - \frac{1}{T'_0} [E'_d + (X_s - X'_s) i_{qs}] \quad (12)$$

$$\frac{dE'_q}{dt} = -s_r \omega_s E'_d + \omega_s \frac{L_m}{L_{rr}} v_{dr} - \frac{1}{T'_0} [E'_q - (X_s - X'_s) i_{ds}] \quad (13)$$

که در آن، $E'_d, E'_q, \psi_{qr}, \psi_{dr}, i_{qs}, i_{ds}, v_{qr}, v_{dr}, v_{qs}, v_{ds}, R_r, R_s, L_{ss}, L_{rr}, L_m$ ، شارهای دومحوری روتور، جریان های دومحوری استاتور، اندوکتانس های مغناطیس کننده متقابل، خودی روتور و خودی استاتور، مقاومت های استاتور و روتور و ولتاژهای دومحوری استاتور و روتور می باشند.

۲-۳- مبدل سمت روتور

مبدل سمت روتور چنان کنترل می شود که توان های اکتیو و راکتیو خروجی استاتور مقدار مرجع خود را دنبال می کنند. مقدار مرجع توان راکتیو خروجی استاتور صفر در نظر گرفته شده است تا بهبود ضریب توان سیستم تبدیل انرژی را به دنبال داشته باشد. مقدار مرجع توان اکتیو نیز با توجه به سرعت باد چنان تعیین می شود که توربین بادی همواره نقطه حداکثر توان خود را دنبال کند. بر

اساس مقادیر مرجع توان های اکتیو و راکتیو خروجی استاتور P_{sref} و Q_{sref} ، می توان جریان های مرجع دوماحوری روتور را با استفاده از کنترل کننده های PI، تعیین کرد:

$$\frac{dx_1}{dt} = P_{sref} + P_s \quad (14)$$

$$i_{drref} = K_{p1}(P_{sref} + P_s) + K_{i1}x_1 \quad (15)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = i_{dref} - i_{dr} = K_{p1}(P_{sref} + P_s) + K_{i1}x_1 - i_{dr} \quad (16)$$

$$\frac{dx_3}{dt} = Q_{sref} - Q_s \quad (17)$$

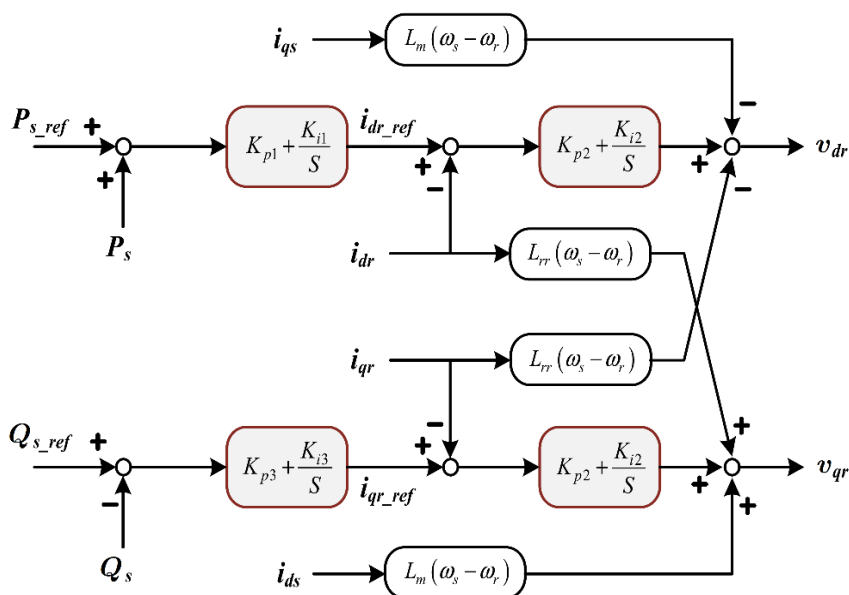
$$i_{qrref} = K_{p3}(Q_{sref} - Q_s) + K_{i3}x_3 \quad (18)$$

$$\frac{dx_4}{dt} = i_{qrref} - i_{qr} = K_{p3}(Q_{sref} - Q_s) + K_{i3}x_3 - i_{qr} \quad (19)$$

$$v_{dr} = K_{p2}(i_{drref} - i_{dr}) + K_{i2}x_4 - s_r \omega_s L_m i_{qs} - s_r \omega_s L_{rr} i_{dr} \quad (20)$$

$$v_{qr} = K_{p2}(i_{qrref} - i_{qr}) + K_{i2}x_2 + s_r \omega_s L_m i_{ds} + s_r \omega_s L_{rr} i_{qr} \quad (21)$$

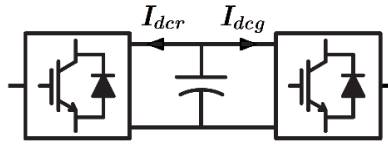
که در آن i_{qrref} ، i_{drref} ، جریان های مرجع دوماحوری روتور و K_{p1} ، K_{i1} ، K_{p2} ، K_{i2} ، K_{p3} ، K_{i3} ضرایب کنترل کننده های PI به ترتیب مربوط به کنترل توان اکتیو، کنترل توان راکتیو و کنترل جریان های دو محوری روتور می باشند. ساختار این کنترل کننده ها در شکل (۲) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، حلقه های بیرونی کنترلی مربوط به کنترل کننده های توان می باشند که خروجی آن ها جریان های مرجع روتور است. حلقه های درونی کنترلی نیز ولتاژهای روتور را چنان تعیین می کنند که جریان های دوماحوری روتور مقادیر مرجع خود را دنبال کنند.



شکل (۲)، نمودار بلوکی کنترل کننده سمت رتور

۲-۴- لینک DC

شکل (۳)، مبدل های پشت به پشت به همراه خازن لینک DC بین آن ها را نشان می دهد.



شکل (۳)، مبدل پشت به پشت به همراه خازن لینک DC

اگر از مدل متوسط اینورتر در هر دو مبدل استفاده شود، می توان جریان های لینک DC در سمت روتور و شبکه I_{dcr} و I_{dcg} را به صورت زیر بدست آورد:

$$I_{dcr} = \frac{v_{dr}i_{dr} + v_{qr}i_{qr}}{V_{dc}} \quad (22)$$

$$I_{dcg} = \frac{v_{dg}i_{dg} + v_{qg}i_{qg}}{V_{dc}} \quad (23)$$

بنابراین معادله دینامیکی ولتاژ لینک DC را می توان به صورت زیر نوشت:

$$C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} = -(I_{dcr} + I_{dcg}) \quad (24)$$

در روابط (۲۲) تا (۲۴)، v_{dg} ، v_{qg} ، i_{dg} و i_{qg} به ترتیب ظرفیت خازن لینک DC، ولتاژهای دوماحوری خروجی مبدل سمت شبکه و جریان های دوماحوری مبدل سمت شبکه می باشند.

۲-۵- مبدل سمت شبکه

مبدل سمت شبکه مانند هر اینورتر سه فاز از دو درجه آزادی برخوردار است. در این مقاله توان های اکتیو و راکتیو خروجی مبدل سمت شبکه بطور غیر مستقیم کنترل می شود. مقدار مرجع توان راکتیو این مبدل صفر در نظر گرفته می شود تا باعث شود در مجموع توان راکتیو این سیستم تبدیل انرژی به صفر برسد و باعث رسیدن ضریب توان مجموع به مقدار واحد گردد. اما مقدار مرجع توان اکتیو را چنان باید تعیین کرد که ولتاژ لینک DC ثابت باقی بماند. از این رو ابتدا با استفاده از یک کنترل کننده PI، ولتاژ لینک DC کنترل می شود که خروجی آن مقدار مرجع توان اکتیو مبدل سمت شبکه خواهد بود:

$$\frac{dx_5}{dt} = v_{dcref} - v_{dc} \quad (25)$$

$$P_{gref} = -K_{ppg}(v_{dcref} - v_{dc}) - K_{ipg}x_5 \quad (26)$$

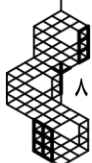
معادلات دینامیکی مبدل سمت شبکه عبارتند از:

$$\frac{di_{dg}}{dt} = \frac{1}{L_g} (v_{dg} - P_g i_g - v_{ds}) \quad (27)$$

$$\frac{di_{qg}}{dt} = \frac{1}{L_g} (v_{qg} - P_g i_g - v_{qs}) \quad (28)$$

سپس با استفاده از روابط توان های اکتیو و راکتیو مبدل سمت شبکه:

$$P_g = v_{dg}i_{dg} + v_{qg}i_{qg} \quad (29)$$



$$Q_g = v_{qg} i_{dg} - v_{dg} i_{qg} \quad (30)$$

مقادیر مرجع جریان های دومحوری مبدل سمت شبکه تعیین می شوند:

$$i_{dgref} = \frac{v_{dg} P_{gref} + v_{qg} Q_{gref}}{(v_{dg}^2 + v_{qg}^2)} = \frac{v_{dg} P_{gref}}{(v_{dg}^2 + v_{qg}^2)} \quad (31)$$

$$i_{qgref} = \frac{v_{dg} P_{gref} + v_{qg} Q_{gref}}{(v_{dg}^2 + v_{qg}^2)} = \frac{v_{qg} P_{gref}}{(v_{dg}^2 + v_{qg}^2)} \quad (32)$$

اکنون می توان با استفاده دو کنترل کننده PI ولتاژهای اینورتر سمت شبکه را چنان تعیین کرد که جریان های مبدل مذکور مقادیر مرجع خود را دنبال کنند:

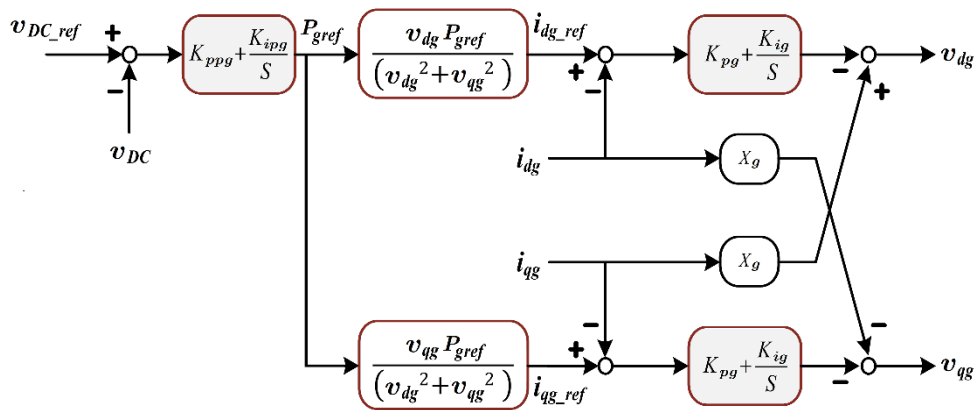
$$\frac{dx_6}{dt} = i_{dgref} - i_{dg} \quad (33)$$

$$\frac{dx_7}{dt} = i_{qgref} - i_{qg} \quad (34)$$

$$v_{dgref} = K_{pg}(i_{dgref} - i_{dg}) + K_{ig}x_6 + \omega_s L_g i_{qg} \quad (35)$$

$$v_{qgref} = K_{pg}(i_{qgref} - i_{qg}) + K_{ig}x_7 - \omega_s L_g i_{dg} \quad (36)$$

که در آن K_{ig} ، K_{pg} ، L_g به ترتیب اندوکتانس خروجی مبدل سمت شبکه (شامل لندوکتانس ترانسفورمر و فیلتر خروجی) و پارامترهای کنترل کننده های PI مبدل سمت شبکه می باشند. ساختار این کنترل کننده ها در شکل (۴) نشان داده شده است. در این مقاله کلیه محاسبات بر حسب پریونیت انجام شده است، بنابراین ترانسفورماتور نیز می تواند تنها بر اساس اندوکتانس آن مدل سازی شود.



شکل (۴)، بلوک دیاگرام کنترل کننده سمت شبکه

۶-۲- کنترل زاویه پیچ پره ها:

هدف اصلی از کنترل زاویه پیچ پره ها، اطمینان از حفظ توان خروجی توربین در محدوده مجاز در سرعت بیش از سرعت نامی و همچنین حداکثر کردن مقدار توان خروجی در بازه جذب حداکثر توان است. بدین منظور، زاویه پیچ را می توان بر حسب گشتاور و سرعت توربین و با استفاده از یک کنترل کننده PI به صورت زیر تعیین کرد:

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{K_{p4}}{2H_t} (T_m - T_{sh}) + K_{i4}(\omega_{tn} - \omega_t) \quad (37)$$

که در آن ω_{tn} ، سرعت نامی توربین در سرعت نامی باد است.

۳- بهینه سازی پارامترهای کنترلی

۱-۳- تشکیل معادلات حالت کل سیستم

بررسی معادلات (۱) تا (۳۷) نشان می دهد که مدل حلقه بسته سیستم مورد مطالعه شامل مجموعه ای از معادلات دیفرانسیل غیر خطی است که می توان آنها را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, u, z) \quad (38)$$

$$y = g(x, u, z) \quad (39)$$

که در آن x, u, y و z به ترتیب بردار حالت، بردار ورودی، بردار خروجی، بردار پارامترهای کنترلی سیستم می باشند:

$$X = [\omega_v, \theta_v, \beta, S_r, i_{ds}, i_{qs}, E'_d, E'_q, v_{dc}, i_{dg}, i_{qg}, X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7] \quad (40)$$

$$u = [v_{ds}, v_{qs}, v_{\omega}] \quad (41)$$

$$y = [P_s, Q_s, P_g, Q_g, S_r] \quad (42)$$

$$z = [K_{p1}, K_{i1}, K_{p2}, K_{i2}, K_{p3}, K_{i3}, K_{ppg}, K_{ipg}, K_{pg}, K_{ig}, K_{p4}, K_{i4}] \quad (43)$$

۲-۳- تعیین نقطه کار حالت ماندگار سیستم:

به منظور تعیین نقطه کار حالت دائمی سیستم می توان مشتق متغیرهای حالت در رابطه (۳۸) برابر با صفر قرار داد و با حل دستگاه معادلات غیر خطی چند متغیره زیر، نقطه کار حالت ماندگار را تعیین نمود:

$$f(x, u, z) = 0 \quad (44)$$

شایان ذکر است در معادله (۴۴) بجای پارامترهای کنترلی، مقادیری که با سعی و خطا و مشابه با مراجع به دست آمده بودند را می توان جایگذاری نمود. علاوه بر این به منظور اطمینان از صحت مقادیر نقطه کار، شبیه سازی حوزه زمان نیز انجام شده و صحت نقطه کار حالت مانا مورد تایید قرار گرفته است.

۳-۳- خطی سازی معادلات غیر خطی حول نقطه کار

بر اساس مقادیر نقطه کار حالت ماندگار می توان معادلات غیر خطی سیستم را حول نقطه کار خطی کرد و ماتریس حالت و ماتریس کنترل سیستم را بدست آورد:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu \quad (45)$$

که در آن :

$$A_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial x_j} |_{x_0, u_0} = \frac{\partial f_i(x, u)}{\partial x_j} |_{x_0, u_0} \quad (46)$$





$$B_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial u_j} \Big|_{x_0, u_0} = \frac{\partial f_i(x, u)}{\partial u_j} \Big|_{x_0, u_0} \quad (47)$$

درایه های ماتریس های A و B می باشند. با تعیین ماتریس حالت A، می توان مقادیر ویژه سیستم را براساس حل رابطه زیر بدست آورد:

$$|\lambda I - A| = 0 \quad (48)$$

که در آن، I ماتریس همانی و λ مقادیر ویژه سیستم می باشند. از آنجا که مقادیر پارامترهای کنترلی سیستم، تاثیری بر مقادیر نقطه کار حالت ماندگار ندارند، ماتریس A را می توان تنها تابعی از پارامترهای سیستم و ورودی ها در نظر گرفت. از طرفی، ولتاژهای دو محوری سیستم توسط شین بینهایت دیکته می شوند و از این رو می توان گفت در یک سرعت باد مشخص، ماتریس A تنها تابعی از پارامترهای کنترلی است:

$$A = A(z) \quad (49)$$

۳-۴- آنالیز حساسیت

در این مقاله، با استفاده از آنالیز حساسیت، تاثیرگذارترین پارامترها تعیین شده اند تا بتوان در مرحله بعد با انتخاب بهینه آنها، پایداری سیگنال کوچک سیستم را بهبود بخشید. در این مقاله از کمیت ضریب میرایی برای آنالیز حساسیت استفاده شده است. اگر $\lambda = -\sigma \pm j\omega$ یک مقدار ویژه باشد، $\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}}$ ضریب میرایی متناظر با مقدار ویژه λ است. به منظور بررسی اثر پارامترهای کنترلی بر میرایی سیستم، به ازای هر پارامتر کنترلی، سه بار مقادیر ویژه و ضرایب میرایی یک سیستم محاسبه شده است، یکبار به ازای مقدار نامی پارامتر، یکبار به ازای ۱۰٪ افزایش و یکبار به ازای ۱۰٪ کاهش پارامتر مورد نظر، بردار ضرایب میرایی بدست آمده به ازای ۱۰٪ کاهش از بردار ضرایب میرایی حاصل از ۱۰٪ افزایش کاسته شده است و مقادیر حاصل از آن، درایه به درایه به بردار ضرایب میرایی حاصل از مقدار نامی تقسیم شده است. بنابراین می توان میزان حساسیت ضرایب میرایی به پارامتر کنترلی زام را بصورت زیر بدست آورد:

$$S_{kj} = \frac{\partial \zeta_k}{\partial z_j} = \frac{\zeta_k |z_j + 0.1z_j - \zeta_k |z_j - 0.1z_j|}{\zeta_k |z_j|} \quad (50)$$

که در آن S_{kj} اندیس حساسیت مقدار ویژه kام به پارامتر کنترلی زام است. بنابراین می توان از بین ۱۲ پارامتر کنترلی ارائه شده در (۴۳)، تاثیرگذارترین پارامترها بر میرایی سیستم را تعیین و برای بهینه سازی انتخاب نمود.

۳-۵- بهینه سازی با استفاده از الگوریتم PSO

پس از تعیین اثرگذارترین پارامترهای کنترلی بر میرایی سیستم، می توان با انتخاب بهینه سازی مقادیر این پارامترها، پایداری سیگنال کوچک سیستم را بهبود داد. در این مقاله از الگوریتم PSO مرسوم استفاده شده است. تابع هزینه این الگوریتم:

$$F_{cost} = \sum_{k=1}^n (1 + \zeta_k) = n + \sum_{k=1}^n \zeta_k \quad (51)$$

در نظر گرفته شده است، که در آن n تعداد متغیرهای حالت سیستم است. اگر ضریب میرایی kام یعنی ζ_k برابر ۱- باشد، اثر آن در تابع هزینه در نظر گرفته نمی شود. اما اگر مقداری بیشتر از ۱- داشته باشد مقدار آن لحاظ می شود، هر چه مقدار F_{cost} کمتر باشد نشان می دهد که میرایی سیستم بهتر شده است. در بهترین حالت، تمام قطب های سیستم حقیقی و منفی می باشند که ضریب میرایی همه آن ها ۱- و بنابراین مقدار F_{cost} صفر خواهد بود.



۴- ارائه و تحلیل نتایج

در این فصل ابتدا به ازای مقادیر نامی پارامترها، سیستم تحت مطالعه تحت بررسی قرار می‌گیرد و نقطه کار حالت ماندگار سیستم محاسبه می‌شود. پس از آن با تغییر مقادیر کنترلی به ازای $+10\%$ و -10% سیستم مورد مطالعه سه بار شبیه سازی شده و مقادیر ویژه سیستم مورد محاسبه قرار می‌گیرد. بر اساس تغییرات ضریب میرایی مقادیر ویژه، آنالیز حساسیت صورت گرفته و تاثیرگذارترین پارامترهای کنترلی تعیین می‌شوند. در گام بعدی، به ازای شرایط نامی، پارامترهای کنترلی مذکور با استفاده از روش تجمع ذرات PSO بهینه سازی می‌شوند.

۴-۱- تعیین نقطه کار سیستم

به منظور تعیین نقطه کار سیستم، تمامی پارامترها در مقدار نامی در نظر گرفته می‌شوند و به جای پارامترهای کنترلی ذکر شده در رابطه (۴۳) نیز مقادیر بدست آمده از روش سعی و خطا و بعضاً مشابه مراجع قبلی جایگذاری می‌شود. در جدول (۱) مقادیر پارامترهای استفاده شده در تعیین نقطه کار سیستم ارائه شده است.

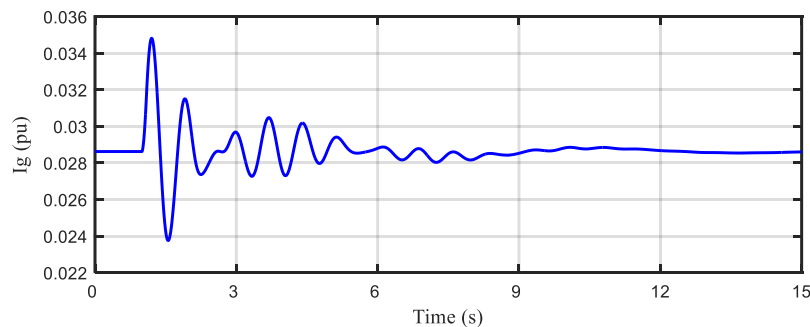
باحل دستگاه معادلات بدست آمده از رابطه (۴۴) می‌توان مقادیر حالت ماندگار متغیرهای سیستم را به ازای پارامترهای جدول (۱) بدست آورد. این مقادیر در جدول (۲) ارائه شده است. شایان ذکر است به منظور حل دستگاه معادلات غیر خطی و چند متغیره (۴۴) از تابع `fsolve` نرم افزار `MATLAB` استفاده شده است.

جدول (۱)، مقادیر پارامترهای سیستم مورد مطالعه

۲.۵، ۱۲۰	K_{p1}, K_{i1}	۱۲۰۰ v	ولتاژ لینک DC	۱.۵ MW	توان نامی، S_n
۲.۵، ۲۵	K_{p2}, K_{i2}	۰.۰۱ F	خازن لینک DC	۵۷۵ v	ولتاژ نامی سیستم، V_n
۲.۵، ۱۲۰	K_{p3}, K_{i3}	۰.۰۵ pu	مقاومت فیلتر	۰.۰۰۷۰۶ pu	مقاومت استاتور، R_s
۲.۵، ۲۵	K_{p4}, K_{i4}	۰.۵۵ pu	اندوکتانس فیلتر	۰.۱۷۱ pu	اندوکتانس روتور، L_r
۰.۰۱، ۰.۴	K_{ppg}, K_{ipg}	$۱۱.۵ \frac{m}{s}$	سرعت باد نامی	۰.۰۰۵ pu	مقاومت روتور، R_r
۱.۵، ۱۲۰	K_{pg}, K_{ig}	$۱.۲۲۵ \frac{kg}{m^3}$	چگالی هوا	۰.۱۵۶ pu	اندوکتانس روتور، L_r
۱۰	K_{sh}	۳۰ m	شعاع پره ها	۲.۹ pu	اندوکتانس مغناطیس کننده، L_m
۳.۱۴	D_{sh}	۰.۵	ثابت اینرسی، H_g	۶	تعداد قطب ها

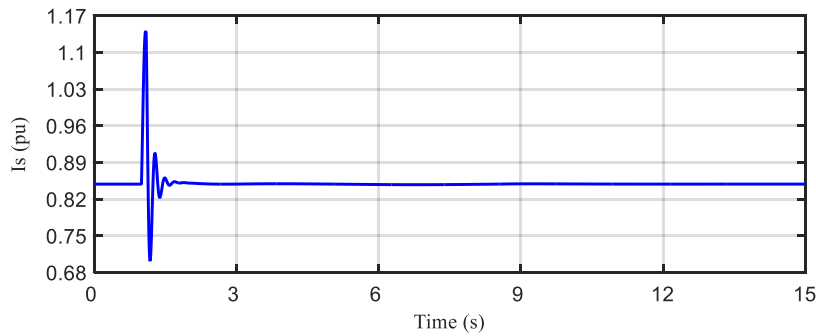
جدول (۲)، مقادیر حالت ماندگار متغیرهای سیستم مورد مطالعه

صحت نتایج بدست آمده در حالت ماندگار، از طریق شبیه سازی دینامیکی در حوزه زمان مورد بررسی قرار گرفته است. در شبیه سازی دینامیکی انجام شده، در حالی که سیستم در حالت ماندگار ارائه شده در جدول (۲) قرار دارد و پارامترهای سیستم مقادیر جدول (۱) را به خود اختصاص داده اند، در لحظه $t = 1s$ ولتاژ سیستم بطور ناگهانی از مقدار نامی $1 pu$ به مقدار $0.8 pu$ کاهش می‌یابد و پس از $0.1s$ در لحظه $t = 1.1s$ به مقدار نامی خود باز می‌گردد. شکل های (۵) و (۶) نمودار اندازه تغییرات جریان خروجی استاتور و جریان خروجی مبدل سمت شبکه را نشان می‌دهد.



شکل (۵)، نمودار اندازه تغییرات جریان خروجی شبکه



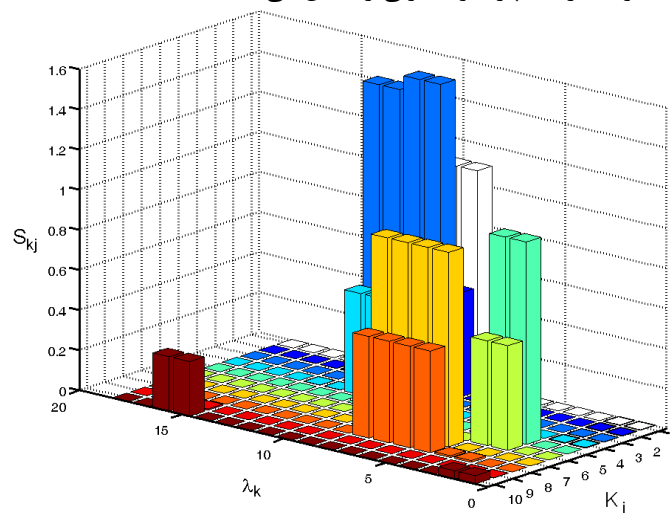


شکل (۶)، نمودار اندازه تغییرات جریان خروجی مبدل سمت استاتور

همانطور که مشاهده می شود، پس از اغتشاش وارد شده به سیستم در اثر افت ناگهانی ولتاژ شبکه، دو مرتبه جریان های مذکور به مقادیر نامی خود بازگشته اند.

۴-۲- آنالیز حساسیت مقادیر ویژه سیستم

مطابق مطالب ارائه شده در بخش ۳-۳، با خطی سازی معادلات حالت سیستم حول نقطه کار می توان ماتریس حالت A را تعیین و بر اساس آن، مقادیر ویژه سیستم را با استفاده از رابطه (۴۸) محاسبه نمود. در این مقاله از کمیت ضریب میرایی برای آنالیز حساسیت استفاده شده است. اگر $\lambda = -\sigma \pm j\omega$ یکی از مقادیر ویژه سیستم باشد، $\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}}$ ضریب میرایی متناظر با مقدار ویژه λ می باشد. به منظور انجام آنالیز حساسیت و تعیین اثرگذارترین پارامترهای کنترلی بر ضریب میرایی مقادیر ویژه، محاسبات مقادیر ویژه و ضریب میرایی آنها سه بار انجام شده است. الف) به ازای مقادیر نامی پارامترهای کنترلی، ب) به ازای ۱۰٪ بیش از مقادیر نامی پارامترهای کنترلی و ج) به ازای ۱۰٪ کمتر از مقادیر نامی پارامترهای کنترلی. شایان ذکر است، با تغییر هر یک از پارامترها، مابقی پارامترها در مقدار نامی خود باقی می مانند تا بتوان اثر هر یک از پارامترهای مذکور را بصورت جداگانه بررسی کرد. علاوه بر این به دلیل مشابهت کنترل کننده ها $K_{i3} = K_{i1}$ و $K_{p3} = K_{p1}$ در نظر گرفته شده اند. بنابراین از بین پارامترهای کنترلی رابطه (۴۳)، آنالیز حساسیت بر حسب پارامترهای $[K_{p1}, K_{i1}, K_{p2}, K_{i2}, K_{ppg}, K_{ipg}, K_{pg}, K_{ig}, K_{p4}, K_{i4}]$ انجام شده است. شکل (۷) نمودار میله ای حساسیت مقادیر ویژه سیستم مورد مطالعه به هریک از ۱۰ پارامتر کنترلی را نشان می دهد.



شکل (۷)، نمودار میله ای حساسیت مقادیر ویژه سیستم

داده های این شکل در جدول (۳) نیز ارائه شده است. همانطور که مشاهده می شود، مقادیر ویژه به بعضی از پارامترها حساسیت بیشتری دارند و به بعضی دیگر حساسیت کمتری نشان می دهند.

جمع مقادیر S_{kj} بدست آمده از رابطه (۵۰) به ازای هریک از پارامترهای کنترلی، می تواند یک اندیس حساسیت برای پارامترهای مذکور بوجود آورد:

$$S_j = \sum_{k=1}^n S_{kj} \quad (52)$$

که در آن n تعداد مقادیر ویژه سیستم و S_j اندیس حساسیت مربوط به پارامتر کنترلی j ام می باشد. سطر آخر جدول (۳)، مقادیر S_j را نشان می دهد. بررسی این مقادیر نشان می دهد که پارامترهای کنترلی K_{i4} و K_{p4} مربوط به دینامیک کنترل زاویه پیچ حساسیت به مراتب کمتری را در مقادیر ویژه به همراه دارند و بنابراین می توان مقادیر آن ها را ثابت در نظر گرفت و مقادیر ۸ پارامتر کنترلی باقیمانده را بصورت بهینه تعیین کرد.

۳-۴- بهینه سازی پارامترهای کنترلی با استفاده از الگوریتم هجوم ذرات (PSO)

در این بخش بر اساس مقدار سرعت باد نامی، پارامترهای کنترلی سیستم با استفاده از الگوریتم PSO بهینه سازی شده اند. در فرآیند بهینه سازی، تعداد تکرار ۱۰۰۰، جمعیت اولیه ۸۰، $C_1=1$ ، $C_2=1$ ، $\omega_{max}=1$ ، $\omega_{min}=0/9$ در نظر گرفته شده اند. در الگوریتم PSO مورد استفاده قرار گرفته در این مقاله از روابط زیر استفاده شده است:

$$[x] = [x] + [V] \quad (53)$$

$$[V] = \omega [V] + C_1 * rand_1 * [P_{best} - x] + C_2 * rand_2 * [g_{best} - x] \quad (54)$$

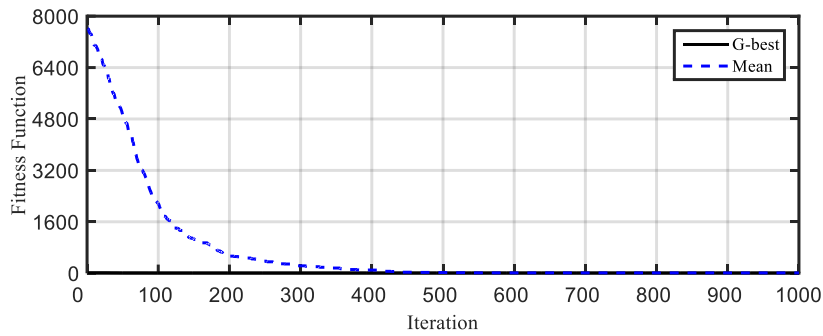
$$\omega = \omega_{max} - \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{K} k \quad (55)$$

جدول (۳)، مقدار حساسیت هر یک از مقادیر ویژه به مقادیر کنترلی

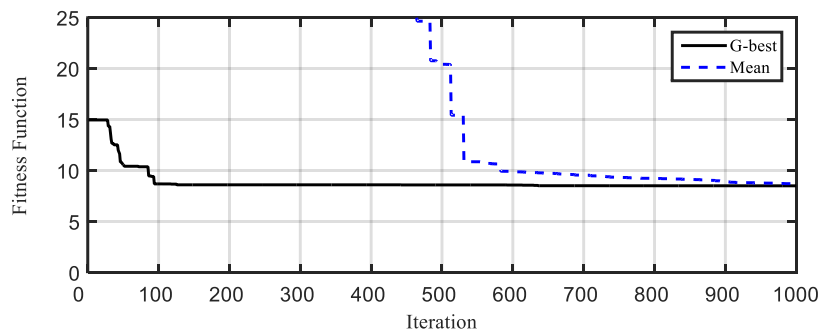
	Kp1	Ki1	Kp2	Ki2	Kppg	Kipg	Kpg	Kig	Kp4	Ki4
λ_1	۰.۰۰۲۵۱۶	۰.۰۰۲۸۳۹	۰.۰۰۱۵۲۴	۰.۰۰۳۴۶۷	.	.	.	.	۰.۰۰۱۱۱۷	۰.۰۴۰۹۷۷
λ_2	۰.۰۰۲۵۱۶	۰.۰۰۲۸۳۹	۰.۰۰۱۵۲۴	۰.۰۰۳۴۶۷	.	.	.	.	۰.۰۰۱۱۱۷	۰.۰۴۰۹۷۷
λ_3	.	.	.	.	۱.۰۰۸۴۲۸	۰.۵۲۱۳۵۳	۰.۰۰۰۰۲۴	۰.۰۰۸۶۶۲	.	.
λ_4	.	.	.	.	۱.۰۰۸۴۲۸	۰.۵۲۱۳۵۳	۰.۰۰۰۰۲۴	۰.۰۰۸۶۶۲	.	.
λ_5	.	.	.	.	۰.۰۰۰۲۰۸	۰.۰۰۰۰۳۴	۰.۹۶۷۹۰۱	۰.۵۰۶۰۰۸	.	.
λ_6	.	.	.	.	۰.۰۰۰۲۰۸	۰.۰۰۰۰۳۴	۰.۹۶۷۹۰۱	۰.۵۰۶۰۰۸	.	.
λ_7	.	.	.	.	۰.۰۰۰۱۳۲	۰.۰۰۰۰۱۴	۰.۹۶۷۸۲۸	۰.۵۰۶۰۱۵	.	.
λ_8	.	.	.	.	۰.۰۰۰۱۳۲	۰.۰۰۰۰۱۴	۰.۹۶۷۸۲۸	۰.۵۰۶۰۱۵	.	.
λ_9	۱.۰۹۹۴۵۴	۰.۵۱۸۳۰۶	۱.۵۸۹۳۲۱	۰.۵۱۶۶۷۱	.	.	.	.	.	.
λ_{10}	۱.۰۹۹۴۵۴	۰.۵۱۸۳۰۶	۱.۵۸۹۳۲۱	۰.۵۱۶۶۷۱	.	.	.	.	.	.
λ_{11}	۱.۰۵۴۰۴۴	۰.۵۱۳۱۰۷	۱.۵۱۵۵۳۶	۰.۵۰۴۵۸۶	.	.	.	.	.	.
λ_{12}	۱.۰۵۴۰۴۴	۰.۵۱۳۱۰۷	۱.۵۱۵۵۳۶	۰.۵۰۴۵۸۶	.	.	.	.	.	.
λ_{13}	۰.۰۰۰۱۷۵	۰.۰۰۲۲۸۴	۰.۰۰۰۱۵۷	۰.۰۰۱۱۷۵	.	.	.	.	۰.۰۰۰۰۴۱	۰.۰۰۰۱۴۷
λ_{14}	۰.۰۰۰۱۷۵	۰.۰۰۲۲۸۴	۰.۰۰۰۱۵۷	۰.۰۰۱۱۷۵	.	.	.	.	۰.۰۰۰۰۴۱	۰.۰۰۰۱۴۷
λ_{15}	۰.۰۰۰۰۰۱	۰.۰۰۰۵۵۸	.	.	.	.	.	.	۰.۰۰۶۷۹	۰.۲۷۱۹۹۵
λ_{16}	۰.۰۰۰۰۰۱	۰.۰۰۰۵۵۸	.	.	.	.	.	.	۰.۰۰۶۷۹	۰.۲۷۱۹۹۵
λ_{17}	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
λ_{18}	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
جمع	۴.۳۱۲۳۸	۲.۰۷۴۱۹	۶.۲۱۳۰۸	۲.۰۵۱۸	۲.۰۱۷۵۴	۱.۰۴۲۸	۳.۸۷۱۵۱	۲.۰۴۱۳۷	۰.۰۱۵۹	۰.۶۲۶۲۴



که در آن $[x]$ و $[v]$ بردارهای مربوط به موقعیت و سرعت ذرات، K تعداد کل تکرارها، k شمارنده تکرار و $rand_1$ و $rand_2$ اعداد تصادفی بین ۰ تا ۱ می باشند. مقادیر مربوط به جمعیت اولیه نیز اعداد تصادفی بین ۰ تا ۵۰۰ در نظر گرفته شده اند. شکل های (۸) و (۹) فرایند بهینه سازی پارامترها را نشان می دهد:



شکل (۸)، نمودار بهینه شده پارامترها



شکل (۹)، نمودار بهینه شده پارامترها

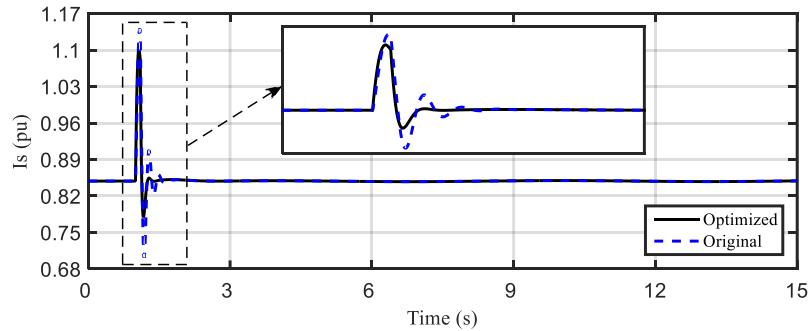
در این شکل ها تغییرات مقدار بهینه سراسری G_{best} و مقدار متوسط تابع هدف به ازای کل جمعیت ذرات نشان داده شده است. در فرآیند بهینه سازی، در شرایطی که قطب ها به سمت راست محور اعداد موهومی منتقل شوند، مقدار تابع هدف در یک ضریب جریمه ضرب می شود. به همین دلیل مقدار متوسط تابع هدف در شکل (۸) از یک مقدار بسیار بزرگ شروع شده است و به مرور کاهش یافته است. نمودار بزرگ نمایی شده شکل (۸) در شکل (۹) نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، مقدار بهینه سراسری طی فرایند بهینه سازی کاهش یافته و تقریباً بعد از ۲۰۰ تکرار به یک مقدار حداقل رسیده است. مقدار متوسط تابع هدف نیز در نهایت به بهینه سراسری همگرا شده است که نشان می دهد الگوریتم بهینه سازی کارآیی مناسبی دارد. مقادیر بهینه پارامترهای کنترلی در جدول (۴) نشان داده شده اند.

جدول (۴)، مقادیر بهینه پارامترهای کنترلی

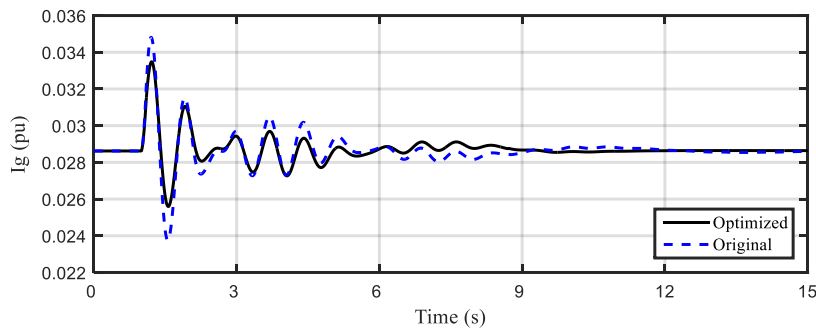
K_{p1}	K_{i1}	K_{p2}	K_{i2}	K_{ppg}	K_{ipg}	K_{pg}	K_{ig}
۵.۱۱۵	۱۱۷.۳۶	۲۶۲۵	۲۶.۳۱	۰.۰۰۲۳	۰.۰۴۱	۱.۵۴	۱۱۶.۹

نمودار تغییرات اندازه جریان های خروجی استاتور و جدول سمت شبکه، پس از بهینه سازی پارامترهای کنترلی در شکل های (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود بهینه سازی پارامترهای کنترلی موجب کاهش دامنه نوسانات و افزایش میرایی سیستم و بطور کلی موجب بهبود پایداری شده است.





شکل (۱۰)، جریان استاتور پس از بهینه سازی



شکل (۱۱)، جریان شبکه پس از بهینه سازی

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، به منظور بهبود پایداری سیگنال کوچک یک سیستم تبدیل انرژی باد مبتنی بر ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه، یک روش بهینه سازی برای تنظیم پارامترهای کنترلی ارائه شده است. در روش پیشنهادی، ابتدا معادلات حالت سیستم مورد مطالعه در حوزه زمان استخراج شده و سپس با بدست آوردن نقطه کار حالت ماندگار، معادلات مذکور خطی سازی شده است. پس از آن، مقادیر ویژه سیستم، بصورت تابعی از پارامترهای کنترلی، مورد محاسبه قرار گرفته است. در این مقاله، بمنظور کاهش ابعاد مساله و کاهش زمان بهینه سازی، اثرگذارترین پارامترهای کنترلی با استفاده از آنالیز حساسیت تعیین شده است. پارامترهای مهم تر و تاثیرگذارتر با استفاده از روش PSO در شرایط سرعت باد نامی بهینه سازی شده اند. بررسی نتایج شبیه سازی نشان می دهد روش پیشنهادی توانسته است با تنظیم مناسب اثرگذارترین پارامترهای کنترلی، پایداری سیگنال کوچک را بهبود داده و سرعت میرایی نوسانات سیستم در مقابل اغتشاشات را کاهش دهد.

مراجع

- [1] A. Gatto. "The energy futures we want: A research and policy agenda for energy transitions." *Energy Research & Social Science*, vol. 89, pp. 102639, 2022, doi: 10.1016/j.erss.2022.102639
- [2] M. Nazir, A. Mahdi, M. Bilal, H. Sohail, N. Ali, and H. Iqbal. "Environmental impact and pollution-related challenges of renewable wind energy paradigm—a review." *Science of the Total Environment*, vol. 683, pp. 436-444, 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.274
- [3] M. M. Rezaei. "A nonlinear maximum power point tracking technique for DFIG-based wind energy conversion systems." *Engineering science and technology, an international journal*, vol. 21, no. 5, pp. 901-908, 2018, doi: 10.1016/j.jestech.2018.07.005
- [4] R. Liu, J. Yao, X. Wang, P. Sun, J. Pei, and J. Hu. "Dynamic stability analysis and improved LVRT schemes of DFIG-based wind turbines during a symmetrical fault in a weak grid." *IEEE transactions on power electronics*, vol. 35, no. 1, pp. 303-318, 2019, doi: 10.1109/TPEL.2019.2911346



- [5] A. Sotoudeh, J. Soltani, and M. M. Rezaei. "A Robust Control for SCIG-Based Wind Energy Conversion Systems Based on Nonlinear Control Methods." *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, vol. 32, no. 3, pp. 735-746, 2021, doi: 10.1007/s40313-021-00705-0
- [6] M. Koivisto, K. Das, F. Guo, P. Sørensen, E. Nuño, N. Cutululis, and P. Maule. "Using time series simulation tools for assessing the effects of variable renewable energy generation on power and energy systems." *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, vol. 8, no. 3, pp. e329, 2019, doi: 10.1002/wene.329
- [7] A. Tummala, H. Alluri, and P. V. Ramanarao. "Optimal control of DFIG wind energy system in multi-machine power system using advanced differential evolution." *IETE Journal of Research*, vol. 66, no. 1, pp. 91-102, 2020, doi: 10.1080/03772063.2018.1466732
- [8] T. Chien, Y. Huang, and Y. Hsu. "Neural Network-Based Supplementary Frequency Controller for a DFIG Wind Farm." *Energies*, vol. 13, no. 20, pp. 5320, 2020, doi: 10.3390/en13205320
- [9] Y. Bostani, S. Jalilzadeh, S. Mobayen, T. Rojsiraphisal, and A. Bartoszewicz. "Damping of Subsynchronous Resonance in Utility DFIG-Based Wind Farms Using Wide-Area Fuzzy Control Approach." *Energies*, vol. 15, no. 5, pp. 1787, 2022, doi: 10.3390/en15051787
- [10] V. Kumar, A. Pandey, and S. Sinha. "Stability improvement of DFIG-based wind farm integrated power system using ANFIS controlled STATCOM." *Energies*, vol. 13, no. 18, pp. 4707, 2020, doi: 10.3390/en13184707
- [11] H. Benbouhenni, and N. Bizon. "Advanced direct vector control method for optimizing the operation of a double-powered induction generator-based dual-rotor wind turbine system." *Mathematics*, vol. 9, no. 19, pp. 2403, 2021, doi: 10.3390/math9192403
- [12] H. Benbouhenni. "Comparative Study between Different Vector Control Methods Applied to DFIG Wind Turbines." *Majlesi Journal of Energy Management*, vol. 10, no. 2, pp. 31-39, 2021.
- [13] B. Kumar, K. Sandhu, and R. Sharma. "Comparative analysis of control schemes for dfig-based wind energy system." *Journal of the Institution of Engineer*, vol. 2, pp. 1-20, 2021, doi: 10.1007/s40031-021-00660-z
- [14] H. Fakhræe, M. Babaei, M. Alizadeh, and M. Tabrizian. "Direct slip angle control for rotor side converter of standalone DFIG-DC system." *IET Renewable Power Generation*, vol. 16, no. 11, pp. 12538, 2022, doi: 10.1049/rpg2.12538
- [15] H. Ali, N. Kamal, and G. Elbasuony. "Two-Level Grid-Side Converter-Based STATCOM and Shunt Active Power Filter of Variable-Speed DFIG Wind Turbine-Based WECS Using SVM for Terminal Voltage." *International Journal of Service Science, Management, Engineering, and Technology*, vol. 12, no. 2, pp. 169-202, 2021, doi: 10.4018/IJSSMET.2021030110
- [16] A. Jafari, and Gh. Shahgholian. "Analysis and simulation of a sliding mode controller for mechanical part of a doubly-fed induction generator-based wind turbine." *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no. 10, pp. 2677-2688, 2017, doi: 10.1049/iet-gtd.2016.1969.
- [17] M. Zamanifar, B. Fani, M. E. H. Golshan, and H. R. Karshenas. "Dynamic modeling and optimal control of DFIG wind energy systems using DFT and NSGA-II." *Electric Power Systems Research*, vol. 108, pp. 50-58, 2014, doi: 10.1016/j.epsr.2013.10.021.
- [18] T. Yufei, P. Ju, H. He, Chuan Qin, and Feng Wu. "Optimized control of DFIG-based wind generation using sensitivity analysis and particle swarm optimization." *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 1, pp. 509-520, 2013, doi: 10.1109/TSG.2013.2237795.
- [19] E. Chetouani, Y. Errami, A. Obbadi, and S. Sahnoun. "Optimal tuning of PI controllers using adaptive particle swarm optimization for doubly-fed induction generator connected to the grid during a voltage dip." *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 10, no. 5, pp. 2367-2376, 2021, doi: 10.11591/eei.v10i5.2843
- [20] H. Bakir, A. Merabet, R. Dhar, and A. Kulaksiz. "Bacteria foraging optimisation algorithm based optimal control for doubly-fed induction generator wind energy system." *IET Renewable Power Generation*, vol. 14, no. 11, pp. 1850-1859, 2020, doi: 10.1049/iet-rpg.2020.0172
- [21] O. Bharti, K. Sarita, A. Vardhan, A. Vardhan, and R. Saket. "Controller design for DFIG-based WT using gravitational search algorithm for wind power generation." *IET Renewable Power Generation*, vol. 15, no. 9, pp. 1956-1967, 2021, doi: 10.1049/rpg2.12118

