Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
P.P 82-89

Vol. 12/ No. 2/ Summer 2023
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

Maximum power point tracking of wind turbines using chaotic-based imperialist competition algorithm

Azam Shahabadi[1], Ali Karami-Mollaee[2], Ali Asghar Shojaei[3], Majid Hallaji[4], Javad Safehian[5]

1. Department of Electrical Engineering, Neyshabur branch, Islamic Azad University, Neyshabur, Iran
Email: sara_shahabadi@yahoo.com

2. Faculty of Electrical and Computer Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran
Email: karami @hsu.ac

3. Department of Electrical Engineering , Neyshabur branch, Islamic Azad University, Neyshabur , Iran
Email: a.shojaei@iau-neyshabur.ac.ir

4. Department of Electrical Engineering, Neyshabur branch, Islamic Azad University, Neyshabur, Iran
Email: Majid Halaji@iau.ac.ir

5. New Materials Technology and Processing Research Center, Department of Mechanical Engineering, Neyshabur Branch, Islamic Azad University, Neyshabur, Iran
Email: safehian.javad@gmail.com

ABSTRACT

Integrating large-scale wind farms with the main grid poses several challenges to operating the power utilities. One of the most important is to extract the maximum possible power in different operating conditions from the installed capacity. One of the common solutions in wind power plants equipped with doubly-feed induction generators is to control the output power of the rotor by using a proportional-integral controller. In this paper, a modified chaos-based imperialist competition algorithm is used to manage the control coefficients of twenty wind turbines (2 MW) located in a micro grid. The results show that the use of chaos theory improves the quality of convergence tracking of maximum power points during rapid changes in wind speed. In the classical proportional-integral controller, when the wind speed changes rapidly, the generated torque contains a large ripple and this controller is unable to overcome the nonlinear and ripple torque properties. This weakness increases the stress on the system and can damage the structural equipment of the generator. At the same time, the results obtained using the chaotic-based imperialist competition algorithm show that not only the ripple content is significantly reduced, but also more than 40% of its subsurface value is reduced.

Keywords: Maximum power point tracking, Imperialist competitive algorithm ,Chaos-based, Wind Turbine.

Submit date: 2022/06/14
Accepted date: 2023/06/28

Corresponding author Name: Ali Karami-Mollaee
Corresponding author address: Department of Electrical and Computer, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.2.7.8]

Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
ص.ص ۸۹-۸۲

Vol. 12 / No. 2/ Summer 2023
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

ردیابی نقطه حداکثر توان توربین‌های بادی با الگوریتم رقابت استعماری مبتنی برنظریه آشوب

نوع مطالعه: پژوهشی

اعظم سادات شاه‌ابادی[۱]، دانشجوی دکتری ، علی کرمی ملائی[۲]، دانشیار، علی اصغر شجاعی[۳]، استادیار ، مجید حلاجی[۴]، استادیار ، جواد صافحیان[۵]، استادیار

۱-گروه مهندسی برق،واحد نیشابور، دانشگاه آزاد اسلامی ، نیشابور، ایران
sara_shahabadi@yahoo.com
۲-دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران
karami@hsu.ac
۳-گروه مهندسی برق، واحد نیشابور، دانشگاه آزاد اسلامی ،نیشابور ،ایران
a.shojaei@iau-neyshabur.ac.ir
۴- گروه مهندسی برق،واحد نیشابور، دانشگاه آزاد اسلامی ، نیشابور، ایران
Majid Halaji@iau.ac.ir
۵--مرکز تحقیقات فناوری و فراورش مواد نو، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نیشابور، نیشابور، ایران
safehian.javad@gmail.com

چکیده : ادغام مزارع بادی در مقیاسی عظیم با شبکه سراسری، چالش‌های متعددی را برای بهره‌برداران سیستم قدرت به همراه دارد. یکی از مهم‌ترین موارد، استخراج حداکثر توان ممکن در شرایط کاری مختلف از ظرفیت نیروگاهی نصب شده است. یکی از راهکارهای مرسوم در نیروگاه‌های بادی مجهز به ژنراتورهای القایی از دو سو تغذیه، کنترل توان خروجی روتور به کمک بهره‌گیری از کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی است. در این مقاله از الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری اصلاح شده با نظریه آشوب برای تنظیم ضرائب کنترل‌کننده ۲۰ توربین بادی ۲ مگاواتی قرارگرفته در یک ریزشبکه استفاده شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که استفاده از نظریه اشوب، موجب بهبود کیفیت همگرایی ردگیری نقاط حداکثر توان در هنگام تغییرات سریع سرعت باد می‌گردد. در استراتژی ردیابی نقطه حداکثر توان با کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی کلاسیک، زمانی که سرعت باد از مقداری به مقداری دیگر تغییر می‌یابد، گشتاور ایجاد شده حاوی ریپل زیادی بوده و این کنترل کننده در غلبه بر خاصیت غیرخطی و ریپل گشتاور ناتوان است. این ضعف باعث افزایش استرس وارد شده به سیستم شده و می تواند باعث آسیب دیدن تجهیزات ساختاری ژنراتور گردد. در عین حال، نتایج بدست آمده با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری مبتنی بر آشوب، نشان می دهد که نه تنها محتوای ریپل به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته بلکه بیش از ۴۰٪ از مقدار زیرجهش نیز کاسته می‌شود.

واژهای کلیدی: ردیابی نقطه حداکثر توان،الگوریتم رقابت استعماری ،حل‌کننده مبتنی بر آشوب
تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۲۴
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۰۷

نام نویسنده مسئول:علی کرمی ملائی
نشانی نویسنده مسئول : دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر ، دانشگاه حکیم سبزواری ، سبزوار،ایران

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.2.7.8]

۱-مقدمه[1]

سیستم‌های تبدیل انرژی بادی از لحاظ عملیاتی به دو دسته سرعت ثابت و سرعت متغیر دسته‌بندی می‌شوند. در اوایل دوران ظهور ژنراتورهای بادی، اکثر این مزارع به ژنراتورهای القایی سرعت ثابت[2] مجهز شده بودند. عملکرد FSIG ها نسبتا ساده بوده ولی در استخراج حداکثر توان در سرعت‌های متغیر باد ناتوان هستند زیرا لغزش آنها در محدوده بسیار کوچکی قابل تغییر است. توسعه تکنولوژی، منجر به استفاده از ژنراتورهای سرعت متغیر شده است که رایج‌ترین آن‌ها، ژنراتور القایی از دو سو تغذیه[3] می‌باشد. از مزایای DFIG می‌توان به کاهش استهلاک ادوات مکانیکی سیستم، ارزانی، استحکام، ساختمان مکانیکی ساده، هزینه کم برای نگهداری، استفاده از مبدل‌هایی با توان پایین، بازده بالا، کاهش بار مکانیکی و کنترل ساده‌تر آن، توان نامی پایین ژنراتورهای القایی نسبت به القایی سنکرون، کنترل توان اکتیو و راکتیو، کنترل ولتاژ شبکه، کنترل فرکانس درحالت مستقل از شبکه، فرکانس ثابت در خروجی توربین، نوسانات کمتر در قدرت خروجی، عدم نیاز به بانک خازنی جهت تامین توان راکتیو مورد نیاز ژنراتور اشاره کرد. علاوه بر این، متغیر بودن سرعت روتور باعث عملکرد با حداکثر بازدهی در محدوده وسیع‌تری از وزش باد می‌گردد. در واقع با دفع نوسانات باد به کمک تغییر سرعت چرخش روتور، فرکانس خروجی خود را ثابت نگه داشته و با توانایی عملکرد در هر دو مد زیر سنکرون و فوق سنکرون، استخراج حداکثر توان از توربین بادی را امکان‌پذیر می‌سازد.

در این ژنراتورها از دو مبدل استفاده می‌شود. مبدل سمت شبکه[4]، تبادل توان بین لینک DC و شبکه را با تنظیم دامنه ولتاژ لینک DC کنترل می‌کند و مبدل سمت روتور[5] مسئول تنظیم توان اکتیو و راکتیو بدست آمده از DFIGها می‌باشد [۱۲]. در واقع مبدل‌های RSC و GSC مبدل‌های فرکانس متغیر منبع ولتاژی[6] هستند که بصورت پشت به پشت قرار گرفته شده و از طریق یک منبع ولتاژ DC بهم متصل شده‌اند. از آنجایی که هر دو مبدل GSC وRSC قادر به تولید و جذب توان راکتیو هستند، بنابراین DFIG می‌تواند در دو مد کنترل ولتاژ و کنترل توان راکتیو عمل کند. علاوه بر این موارد، با توجه به سرعت قابل تغییر آن‌ها و امکان کنترل مستقل سرعت-گشتاور الکترومغناطیسی، در صورت لزوم می‌توان با کنترل سرعت، انرژی جنبشی یک جرم گردان چرخ طیار را، در پریودهای زمانی بسیار کوتاه به شبکه تزریق و یا ازشبکه دریافت کرده و در جرم گردان ذخیره کرد و از این طریق به پایداری شبکه کمک شایانی کرد. در مرجع [۱] از کنترل‌کننده تناسبی- انتگرال‌گیر- مشتق‌گیر فازی برای کنترل سیستم غیرخطی زاویه گام از طریق تنظیم پارامترها به صورت خودکار بهره گرفته شده است. هدف از رویکرد ارایه شده، حفظ توان خروجی در مقادیر بالاتر از سرعت نامی باد ذکر شده است.

۲ – ردیابی نقطه حداکثر توان: مرور مقالات

۲-۱- مفاهیم اولیه

شماتیک ساختار یک توربین بادی مبتنی بر DFIG در شکل (۱) نشان داده شده است. توان مکانیکی قابل استخراج از نیروی باد از طریق رابطه (۱) قابل محاسبه است. در این رابطه، ρ چگالی هوا، R شعاع تیغه، υ سرعت باد و C_p ضریب کارآیی توربین بادی می‌باشد که تابعی از زاویه گام (β) و نرخ سرعت نوک پره (λ) (رابطه ۲) می‌باشد. Ω_t نیز معرف سرعت مکانیکی توربین می‌باشد [۲].

$$P_m = 0.5\rho.\pi.R^2.\upsilon^3.C_p(\lambda,\beta) \qquad (۱)$$

$$\lambda = \frac{\Omega_t.\mathrm{R}}{\nu} \qquad (۲)$$

گشتاور الکترومکانیکی با بکارگیری معادلات پارک به صورت رابطه (۳) قابل دست یابی است. در این رابطه، (φ) شار، (I) جریان، (M) اندوکتانس متقابل، (L_s) اندوکتانس استاتور و (p) برابر تعداد قطب‌های ماشین است.

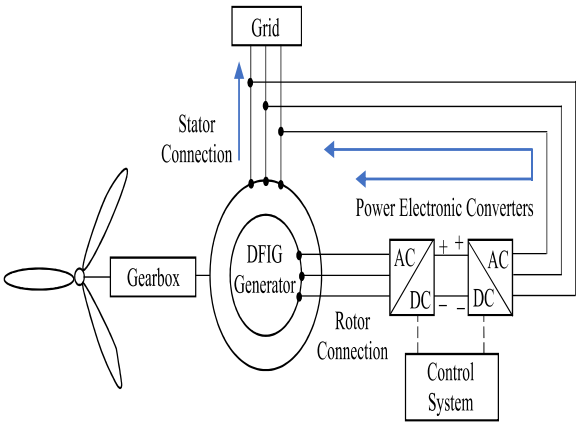
$$T_{em} = \frac{3}{2}.\frac{pM}{L_s}.\left(\varphi_{s\alpha}.I_{r\beta} - \varphi_{s\beta}.I_{r\alpha}\right) \qquad (۳)$$

برای ردیابی نقطه حداکثر توان، لازم است که سرعت توربین کنترل گردد. در این راستا، دو نوع کنترل‌کننده سرعت مستقیم و غیر مستقیم تعریف می‌گردد. در روش مستقیم ابتدا برای هر سرعتی از باد، سرعت بهینه چرخش توربین تولید شده و سپس از آن بعنوان سرعت مرجع در ردگیری استفاده می‌شود. در واقع در این روش، با اطلاع از نرخ سرعت نوک پره، سرعت چرخش بهینه قابل حصول است، ولی در روش غیرمستقیم، گشتاور الکترومغناطیسی مرجع مرتبط با منحنی حداکثر توان بعنوان مقدار مرجع در سیستم کنترلی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

[2] Fixed Speed Induction Generator(FSIG)
[3] Doubly Fed Induction Generator(DFIG)
[4] Grid Side Converter(GSC)
[5] Rotor Side Converter(RSC)
[6] Voltage Source Converter(VSC)

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.2.7.8]



شکل (۱): سیستم قدرت توربین بادی مبتنی بر DFIG [۲]

۲-۲- تکنیک نرخ سرعت نوک

در روش نرخ سرعت نوک [1]، سرعت چرخش ژنراتور به منظور حفظ TSR در مقدار بهینه خود برای استخراج توان حداکثر تحت کنترل قرار می‌گیرد. در این روش نیاز است که هم سرعت باد و هم سرعت توربین اندازه‌گیری یا تخمین زده شود. علاوه بر این، برای استخراج حداکثر توان ممکن است لازم باشد که نقطه کار بهنیه TSR هم محاسبه گردد. در مرجع [۳] از ترکیب روش‌های کنترل هیسترزیس و TSR در جهت بهبود کنترل ردیابی نقطه حداکثر توان[2] بهره گرفته شده است. از TSR برای ردیابی سریع مبتنی بر داده‌های بدست آمده از سرعت‌سنج استفاده شده، در حالی که از روش هیسترزیس برای زمانی استفاده می‌شود که داده‌ها کامل نباشند. نویسندگان مرجع [۴] یک استراتژی کنترل تطبیقی را برای DFIG ارائه کرده‌اند. در راهکار معرفی شده، بازدهی حداکثر از طریق ردیاب نرخ سرعت نوک حداکثر تخمین زده شده و دیگر نیازی به اندازه‌گیری کمیت‌های مکانیکی نیست. طبق نتایج بدست آمده در این تکنیک، نتایج مطلوبی در سرعت‌های مختلف باد از طریق اجرای چنین سیستمی قابل دست‌یابی است.

۲-۳- جستجوی تپه‌نوردی

در روش جستجوی تپه‌نوردی[3] اگر توان قبلی بدست آمده برابر $\boldsymbol{P(\omega-1)}$ فرض شود، سرعت به مقدار $\boldsymbol{\Delta\omega}$ افزایش یافته، به صورتی که قدرت جدید به $\boldsymbol{P(\omega)}$ برسد. این دو قدرت با هم مقایسه شده و اگر تفاوت مشاهده شده مثبت باشد، $\boldsymbol{\Delta\omega}$ برای رسیدن به مقدار سرعت بهینه افزایش داده شده و اگر اختلاف منفی باشد، مقدار $\boldsymbol{\Delta\omega}$ کمتر می‌گردد. این عمل از طریق تغییر در سیکل وظیفه[4] صورت می‌پذیرد. در مرجع [۵] یک الگوی HCS ارتقا یافته‌ای ارائه شده است که در آن گام اغتشاش در آغاز به اندازه کافی ثابت و بزرگ درنظرگرفته شده و مقدار آن ثابت باقی می‌ماند تا زمانی که حداکثر توان منفی گردد. زمانی که تغییرات توان خروجی منفی گردید، نه تنها جهت اغتشاش عوض شده بلکه اندازه گام نیز به مقدار نصف مقدار قبل از خود کاهش می‌یابد. این روند کاهشی باعث میرا شدن نوسان در اطراف نقطه حداکثر توان می‌گردد. بدین صورت تعداد گام‌ها به طور مطلوبی کاهش یافته به طوری که نشان داده شده با بکارگیری این رویکرد در کمتر از ۲ ثانیه می‌توان به موقعیت بهینه دست یافت.

۲-۴- اغتشاش و آشفته کردن

روش اغتشاش و آشفته کردن[5] یک تکنیک بهینه‌سازی ریاضیاتی برای جستجوی نقاط بهینه محلی در تابع مورد نظر است. از این روش به طور گسترده‌ای در سیستم‌های انرژی بادی استفاده شده تا بتوان نقاط بهره‌برداری بهینه را در سیستم‌های انرژی بادی استخراج نمود. این روش بر اساس ایجاد اغتشاش در پارامتر کنترلی به اندازه یک گام کوچک و مشاهده نتایج بدست آمده در تابع هدف مورد نظر است تا زمانی که شیب آن صفر گردد. در مرجع [۶] فلوچارت الگوریتم P&O ارائه شده به صورتی که ابتدا سرعت مرجع در آن تعریف شده، سپس توان مرجع محاسبه می‌گردد. اختلاف توان از میزان تغییر ایجاد شده بین توان محاسبه شده در لحظه جاری با توان خروجی محاسبه شده در گام قبلی بدست آمده که بر اساس آن میزان سیکل وظیفه طوری تغییر می‌یابد که توان حداکثر استخراج گردد.

۲-۵- کنترل گشتاور بهینه

در روش کنترل گشتاور بهینه[6]، طوری گشتاور ژنراتور کنترل می‌گردد که منطبق بر منحنی مرجع گشتاور بهینه گردد. در این روش، مقدار گشتاور بهینه توربین از طریق معادلات حاصل شده و سپس به کنترل کننده نقطه حداکثر توان متصل شده به توربین بادی اعمال می‌گردد. مقدار گشتاور مرجع بهینه شده از مقدار مرجع آن کاسته شده تا سیگنال کنترلی لازم به کنترل‌کننده اعمال شود. هدف از اعمال این سیگنال، حداقل‌سازی اختلاف این دو مقدار توان است. در مرجع [۷] برای یک سیستم تولید توان بادی از استراتژی OTC به منظور ردگیری نقطه حداکثر توان بهره

[1] Tip Speed Ratio(TSR)
[2] Maximum Power Point Tracking(MPPT)
[3] Hill Climbing Search(HCS)
[4] Duty Cycle(DC)
[5] Perturb & Observe(P&O)
[6] Optimal Torque Control(OTC)

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.2.7.8]

گرفته شده است. کنترل گشتاور بهینه توسط بکارگیری کنترل جریان محور d در مقدار صفر[1] تکمیل گردیده است.

۲-۶- هدایت افزایشی

در روش هدایت افزایشی[2]، نقطه حداکثر توان توسط مقایسه هدایت لحظه‌ای (I/V) با نرخ افزایش هدایت (dI/dV) تعیین می‌گردد. تکنیک INC بر اساس این واقعیت استوار است که شیب منحنی توان- ولتاژ در نقطه حداکثر توان صفر می‌باشد و از این حالت برای تعیین نقطه حداکثر توان استفاده می‌شود. در زمانی که نقطه حداکثر توان از نقطه بهره‌برداری فاصله دارد، اندازه گام جهت ردیابی سریع بزرگ بوده و هرچه که به نقطه حداکثر توان نزدیک شوند، اندازه گام کوچکتر می‌شود تا نوسان حالت ماندگار کاهش یابد. فلوچارت روش پیشنهادی در شکل (۴-۴) نشان داده شده است. در مرجع [۸] تکنیک جدیدی جهت پیاده‌سازی روش INC در یک ژنراتور مغناطیس دائم[3] ارائه شده است. برای اجرای چنین طرحی به یک مبدل DC-DC نیاز است. یکی از رایج‌ترین توپولوژی‌های مورد استفاده در جهت یکپارچه‌سازی، استفاده از مبدل پشت‌به‌پشت است. در این مرجع نشان داده شده که در شرایط حساسیت زیاد به تغییرات سرعت باد، استفاده از روش INC می‌تواند راهگشا باشد.

۲-۷- کنترل بر اساس منطق فازی

در روش هدایت روش کنترل منطق فازی[4] دارای مزیت همگرایی سریع، عدم نیاز به ورودی‌های دقیق و پایداری در مقابل تغییرات شرایط غیرخطی است. این روش معمولا از سه مرحله فازی‌سازی، مراجعه به جدول قوانین و غیرفازی‌سازی تشکیل می‌شود. در واقع FLC یک کنترل کننده تصمیم گیر مصنوعی است که در یک حلقه بسته عمل می کند. ورود یهای کنترل کننده فازی به صورت سیگنال خطا و تغییرات سیگنال خطا است. در مرجع [۹] از کنترل‌کننده FLC در جهت استخراج توان حداکثر بهره گرفته شده است. در این مقاله از اختلاف بین توان واقعی با مرجع به عنوان ورودی به کنترل‌کننده منطق فازی استفاده شده و خروجی آن نیز به یک مبدل بوست[5] وارد گردیده است. از اینورتر منبع ولتاژ [6]جهت کنترل ولتاژ dc واسط بهره گرفته شده است. جهت دست‌یابی به ردیابی مطلوب، سیکل وظیفه مبدل بوست تغییر داده می‌شود. در جدول (۱) نیز مقایسه‌ای از روش‌های بیان شده صورت پذیرفته است.

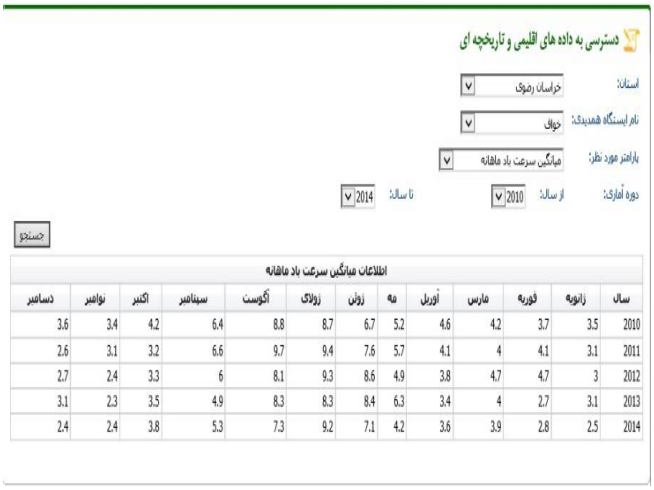
جدول(۱): مقایسه تکنیک‌های MPPT از جنبه‌های مختلف

نوع الگوریتم	میزان پیچیدگی	سرعت همگرایی	اندازه‌گیری سرعت باد	کیفیت عملکرد
TSR	اندک	سریع	بله	متوسط
OTC	اندک	سریع	خیر	متوسط
HCS	اندک	سریع	خیر	متوسط
INC	اندک	کم	خیر	متوسط
FLC	زیاد	متوسط	نامشخص	عالی

۳- مدل‌سازی مساله

۳-۱- مشخصات منطقه تحت مطالعه

شهرستان خواف با مساحت ۹۷۹۶/۷۹ کیلومتر مربع در استان خراسان رضوی و شرق کشور قرار دارد. این شهرستان از شمال و شمال شرقی به شهرستان تایباد، از شمال و شمال غربی به تربت حیدریه، از غرب به شهرستان رشتخوار و گناباد و از جنوب به شهرستان قائن در خراسان جنوبی محدود بوده و از شرق به طول ۱۲۳ کیلومتر دارای مرز مشترک با افغانستان می باشد. ارتفاع شهرستان از سطح دریا در بلندترین نقطه ۲۸۲۳ متر و در پایین ترین نقطه ۶۰۰ متر می باشد (شکل ۲). در این مطالعه داده های سرعت باد از ابتدای سال ۲۰۱۰ تا انتهای سال ۲۰۱۴ مورد مطالعه قرار گرفته است. این داده‌ها توسط نرم‌افزار windogropher تحلیل شده اند.



شکل (۲): میانگین سرعت باد بین سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۱۴

[1] Zero Direct-axis Control(ZDC)
[2] Incremental Conductance(INC)
[3] Permanent Magnet Synchronous Generator(PMSG)
[4] Fuzzy Logic Controller(FLC)
[5] Boost
[6] Voltage Source Inverter(VSI)

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.2.7.8]

۳-۲- الگوریتم رقابت استعماری

همانند بسیاری از الگوریتم‌های فراابتکاری، پیاده‌سازی این الگوریتم با تشکیل یک جمعیت اولیه آغاز می‌گردد. تعدادی از بهترین پاسخ‌ها (کشورها) در جمعیت اولیه به عنوان کشور استعمارگرو بقیه به عنوان کشورهای مستعمره انتخاب می‌گردند. تمام کشورهای مستعمره بر اساس میزان قدرت خود در بین کشورهای استعمارگر توزیع می‌گردند. قدرت یک امپراطوری با هزینه‌های آن یک تناسب معکوس دارد و هزینه هر کشور هم تابعی از N متغیر است (رابطه (4)). [۱۰-۱۱]. برای تشکیل امپراطوری‌های اولیه، لازم است که هزینه استعمارگرها نرمالیزه شود (رابطه (۵)). در ادامه قدرت هر امپراطوری توسط رابطه (۶) نرمالیزه می گردد.

$$Cost = f(country) = f(p_1, \dots, p_N) \quad (۴)$$

$$C_n = c_n - max\{c_i\} \quad (۵)$$

$$P_n = \left| \frac{C_n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} c_i} \right| \quad (۶)$$

به مرور زمان، کشورهای استعمارگر سعی می‌کنند حوزه استعماری خود را بهبود بخشند. این امر از طریق حرکت کلونی‌ها به سمت کشورهای استعمارگر صورت می‌پذیرد. برای جستجو در نقاط اطراف کشور استعمارگر، از یک عدد تصادفی جهت انحراف مسیر حرکت استفاده می‌گردد. در حین حرکت به سمت کشور استعمارگر، اگر کشور مستعمره به موقعیتی برسد که دارای هزینه کمتری نسبت به کشور استعمارگر باشد، آنگاه جایگاه آن دو کشور با هم عوض می‌شود. بعد از مدتی، همه کشورهای استعمارگر به جز پرقدرت‌ترین آن‌ها از بین رفته و همه کشورها تحت سلطه یک کشور استعمارگر در می‌آیند. در این شرایط، دیگر هیچ اختلافی نه تنها در میان مستعمره‌ها وجود نداشته بلکه بین مستعمره‌ها با استعمارگر هم اختلافی دیده نخواهد شد. در این مرحله عملکرد الگوریتم خاتمه یافته و همگرایی قابل دستیابی است.

۳-۳- حل کننده مبتنی بر آشوب

مشارکت دادن نگاشت‌های اشوبناک در ساختار اصلی الگوریتم‌های ابتکاری به این منظور صورت می‌پذیرد که روند تولید اعداد تصادفی برای ایجاد جمعیت بهبود یابد و با استفاده از قواعد حرکت آشوب‌گونه، احتمال دست‌یابی به نقطه بهینه سراسری بهبود یابد زیرا در این شرایط هر حالت فقط یک بار تکرار می‌شود. در عین حال یک چالش اساسی برای تولیدکننده های آشوب، محدود شدن عملکرد آنها است که با روش مقیاس‌دهی این مشکل رفع می‌گردد. چهار مشخصه اصلی الگوریتم‌های بهینه‌سازی مبتنی بر آشوب به صورت زیر می‌باشد:

همگرایی به نقطه بهینه سراسری: الگوریتم‌های بهینه‌سازی مبتنی بر آشوب به سمت نقطه بهینه سراسری همگرا می‌گردند زیرا هم از متغیرهای کاملا تصادفی استفاده نمی‌کنند و هم قادر هستند که تقریبا تمام ناحیه جستجو را مورد آزمایش قرار دهند.

زمان محاسباتی کم: از آن جایی که در این الگوریتم‌ها محاسبه گرادیان برای تشخیص راستای تابع هدف صورت نمی‌گیرد، زمان محاسباتی اندکی را برای رسیدن به نقطه بهینه لازم دارند.

قاعده‌پذیر نبودن: سیستم‌های مبتنی بر آشوب از هیچ قاعده خاصی تبعیت نمی‌کنند.

عدم امکان تخمین برای دراز مدت: بخاطر حساسیت سیستم‌های مبتنی بر آشوب به شرایط اولیه، امکان تخمین دقیق نتایج خروجی برای یک بازه طولانی مدت عملا امکان‌پذیر نیست بلکه فقط می‌توان در یک محدوده خاصی این تخمین را انجام داد.

۳-۴- تابع هدف

در این مقاله از تکنیک کنترل مستقیم گشتاور استفاده شده است. اصول اولیه این روش تنظیم راستای میدان شار پیوندی روتور با جریان‌ها و ولتاژهای استاتور است. مراحل کنترلی در روش مذکور در شکل (۳) نشان داده شده است. در این شرایط، قاب مرجع همراستا با شار استاتور بوده و در این حالت ارتباط بین جریان و شار با روابط (۷) تا (۸) بیان می‌گردد.

$$i_{ds}.L_s + i_{dr}.L_m = \psi_s \quad (۷)$$

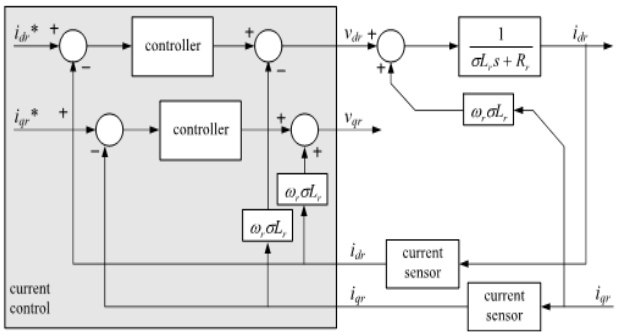
$$i_{qs}.L_s + i_{qr}.L_m = 0 \quad (۸)$$

تابع هدف مورد استفاده به صورت حداقل‌سازی میزان خطای ایجاد شده بین مقدار واقعی جریان روتور و مقدار مطلوب آن است (رابطه (۹)). مقادیر مرجع محورهای d و q جریان روتور نیز از طریق روابط (۱۰) و (۱۱) بدست می‌آیند.

در رویکرد طراحی شده، ابتدا سرعت زاویه‌ای روتور بوسیله حس‌گر محاسبه شده و همراه با میزان جریان فعلی سیم‌پیچی روتور بعنوان ورودی به سیستم کنترلی اعمال می‌شوند. در مرحله بعد با توجه به معادلات فضای حالت، مقادیر بهینه جریان روتور محاسبه می‌شود. در نهایت، با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری مبتنی بر آشوب، طوری ضرایب کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی تنظیم می‌گردد. که با تغییرات سرعت باد، شرایط عملکرد در یه بازه زمانی مناسب به حالت بهینه تنظیم شود.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.2.7.8]



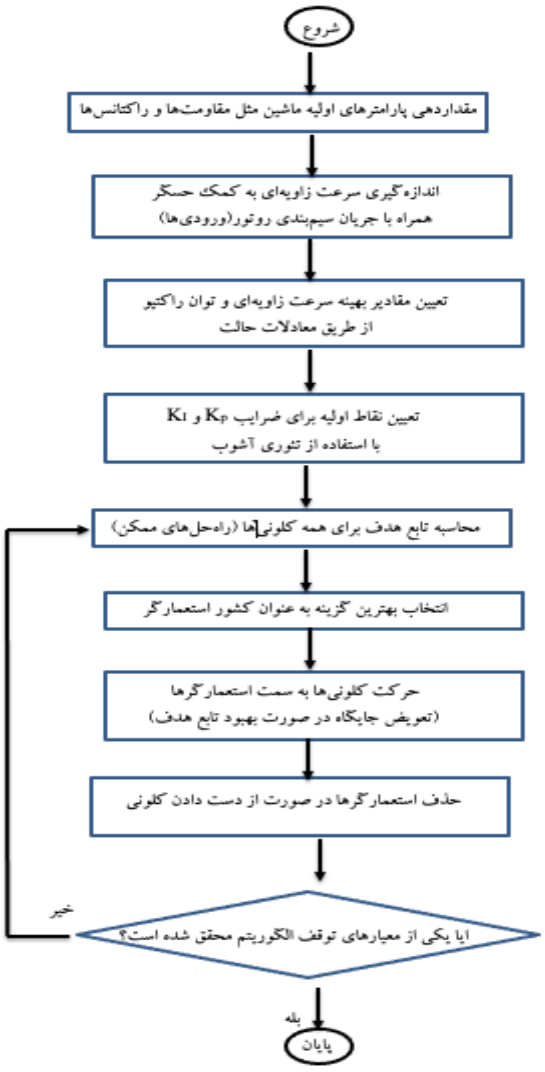
شکل(۳)- شماتیک حلقه کنترل جریان [۱۲]

الگوریتم پیشنهادی در شکل (۴) اورده شده است.

$$\min E = \int_{t_0}^{t_f} \left[(i_{dr} - i_{dr}^*)^2 + (i_{qr} - i_{qr}^*)^2 \right] \quad (۹)$$

$$i_{qr}^* = \left(k_p i_r + \frac{k_i . i_r}{S} \right) (\omega_r^* - \omega_r) \quad (۱۰)$$

$$i_{dr}^* = \left(k_p Q_s + \frac{k_i . Q_s}{S} \right) (Q_s^* - Q_s) \quad (۱۱)$$



شکل (۴) :فلوچارت الگوریتم پیشنهادی

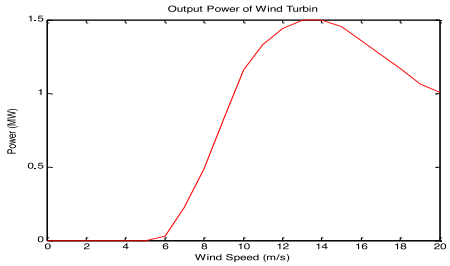
۳- ارزیابی نتایج

به منظور ارزیابی و کنترل رفتار ژنراتور از مدل فضای حالت بهره گرفته شده است که پارامترهای آن در جدول (۲) بیان شده است. شبکه مورد استفاده در محیط سیمولینک (simulink) نرم‌افزار MATLAB طراحی و پیاده‌سازی شده است. در سیستم کنترلی معرفی شده، ابتدا منحنی سرعت باد به سیستم اعمال گردیده و سپس پاسخ زمانی سیستم کنترلی در ده میلی ثانیه، به حالت ماندگار خود می‌رسد. زمان نمونه‌برداری برای کنترل‌کننده هم برابر ۲ میلی ثانیه لحاظ شده است. منحنی تغییرات توان استخراج شده از توربین بادی در سرعت‌های باد متفاوت در شکل (۵) نشان داده شده است.

جدول(۲): مقادیر پارامترهای ژنراتور DFIG

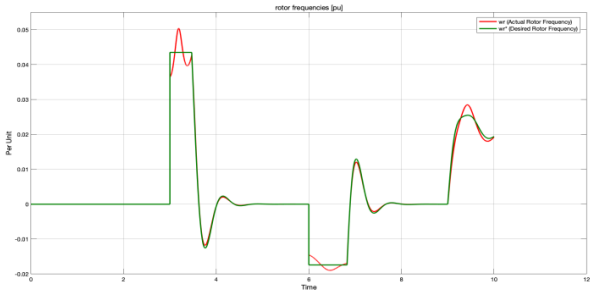
توان نامی	۲۰۰ کیلووات
مقاومت استاتور	۰/۸۰۴۳۱ اهم
اندوکتانس استاتور	۳/۷۵ میلی هانری
ضریب اصطکاک	۰/۰۰۱۱۸۹ نیوتن
جفت قطب	۳۲
اینرسی روتور	۴۸۰۰۰ کیلوگرم مترمربع

در شکل (۶) مقادیر سرعت زاویه‌ای ژنراتور در دو حالت مرجع و اندازه‌گیری شده نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، سرعت زاویه‌ای موتور در زمان بروز تغییرات در سرعت مرجع، به خوبی توانسته است که مقدار مطلوب را ردگیری نموده و در زمان مناسب به همگرایی برسد. مقدار خطای زاویه چرخش روتور نیز در شکل (۷) نشان داده شده است.

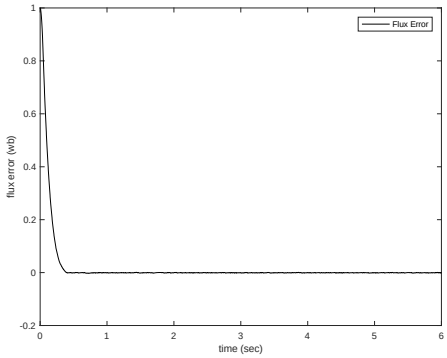


شکل(۵): منحنی توان خروجی در اثر تغییرات سرعت باد

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.2.7.8]



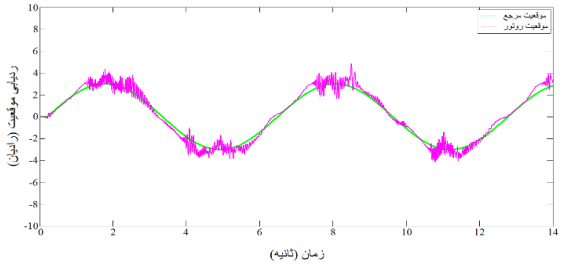
شکل (۶): مقایسه سرعت زاویه‌ای واقعی با مقدار مرجع



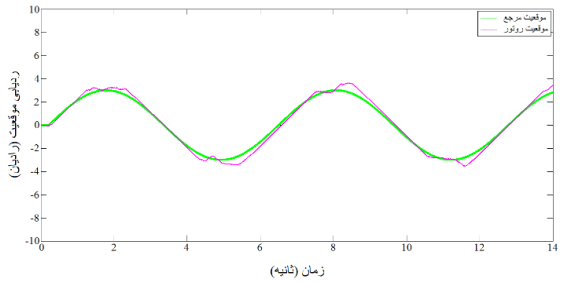
شکل (۷): خطای زاویه موقعیت روتور با مقدار مطلوب

۴- بررسی عملکرد در هنگام تغییر بار

در این شرایط، خاصیت غیرخطی تغییرات ناگهانی بار با استفاده از کنترل‌کننده تناسبی–انتگرالی مرسوم که دارای سرعت زمانی کمی می‌باشد، به آسانی قابل جبران‌سازی نیست و بدین ترتیب خروجی بهینه در هر لحظه نوسانی می‌گردد. در استراتژی طراحی شده بر مبنای نظریه آشوب، بازدهی عملکرد DFIG به طور قابل ملاحظه‌ای ارتقا می‌یابد. نتایج نشان داده شده در شکل‌های (۸) و (۹) به ترتیب بیان‌گر استفاده از روش کنترل‌کننده تناسبی–انتگرالی کلاسیک و رویکرد معرفی شده می‌باشند. در هر دو شکل خط سبزرنگ میزان موقعیت مرجع و خط قرمزرنگ موقعیت واقعی روتور را نشان می‌دهند.



شکل (۸): سرعت واقعی و مطلوب روتور با استفاده از روش کنترلی تناسبی – انتگرالی کلاسیک



شکل(۹): خطای موقعیت روتور در روش پیشنهادی

در ادامه، عملکرد پویای تکنیک‌های دریابی ارائه شده با درنظر گرفتن فراجهش سیستم کنترلی و زمان نشست بین روش های استفاده از کنترل کننده تناسبی – انتگرالی ملاسیک با رویکرد معرفی شده ارایه شده است. زمان نشست معرف زمانی است که توان کنترل‌کننده به مقدار ۹۵٪ مقدار حالت ماندگار خودش می‌رسد و زیرجهش برابر اختلاف بین توان خروجی در حالت ماندگار و حداکثر توان است که تحت تغییرات پله‌ای تابش روی می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده در جدول (۳) نشان داده‌شده است.

جدول (۳): ارزیابی کنترل پویا تحت تغییرات پله‌ای باد

روش کنترلی	زیر جهش (٪)	زمان نشست (ثانیه)
تناسبی-انتگرالی کلاسیک	۱۹/۸	۰/۳۷
تناسبی-انتگرالی اصلاح شده	۱۱/۵۲	۰/۳۲

۵-نتیجه گیری

در استراتژی ردیابی نقطه حداکثر توان با کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی کلاسیک، زمانی که سرعت باد از مقداری به مقداری دیگر تغییر می‌یابد، گشتاور ایجاد شده حاوی ریپل زیادی بوده و این کنترل کننده در غلبه بر خاصیت غیرخطی و ریپل گشتاور ناتوان است. این ضعف باعث افزایش استرس وارد شده به سیستم شده و می تواند باعث آسیب دیدن تجهیزات ساختاری ژنراتور گردد. در عین حال، با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری مبتنی بر آشوب، محتوای ریپل حداقل شده و خروجی کنترل کننده پایدارتر و دارای ثبات بهتری می گردد.

مراجع

[۱] Ali, Mustafa Mohamed Mustafa, Abdel-Raheem Youssef, G. T. Abdel-Gaber, and Ahmed Saad Ali. "Adaptive Fuzzy-PID Based Pitch Angle Control of Wind Turbine." In 2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), pp. 1110-1114. IEEE, 2018.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.2.7.8]

[۲] Marques, G. D., and Matteo F. Iacchetti. "Field-weakening control for efficiency optimization in a DFIG connected to a DC-link." *IEEE* Transactions on Industrial Electronics 63, no. 6. 3409-3419.2016.

[۳] Zhao, Haoran, Qiuwei Wu, Shuju Hu, Honghua Xu, and Claus Nygaard Rasmussen. "Review of energy storage system for wind power integration support." Applied energy 137 ،545-553.2015.

[۴] Dvijotham, Krishnamurthy, Scott Backhaus, and Misha Chertkov. "Operations-based planning for placement and sizing of energy storage in a grid with a high penetration of renewables." arXiv preprint arXiv:1107.1382 (2011).

[۵] Kulkarni, Sonali N., and Prashant Shingare. "A review on power quality challenges in renewable energy grid integration." International Journal of Current Engineering and Technology 6, no. 5: 1573-1578. 2016

[۶] Chen, Haisheng, Thang Ngoc Cong, Wei Yang, Chunqing Tan, Yongliang Li, and Yulong Ding. "Progress in electrical energy storage system: A critical review." Progress in natural science19, no. 3 ، 291-312. 2009

[۷] Wang, Di, Chuangang Ren, Anand Sivasubramaniam, Bhuvan Urgaonkar, and Hosam Fathy. "Energy storage in datacenters: what, where, and how much." In Proceedings of the 12th ACM SIGMETRICS/PERFORMANCE joint international conference on Measurement and Modeling of Computer Systems, pp. 187-198. 2012.

[۸] Govinda, Chowdary V., Sankar V. Udhay, Chairanisa Rani, Yue Wang, and K. Busawon. "A review on various MPPT techniques for wind energy conversion system." In 2018 International conference on computation of power, energy,۲۰۱۸ Information and Communication (ICCPEIC), pp. 310-326. IEEE, 2018.

[۹] Srivastava, Bipin Biharee, and Sudhanshu Tripathi. "Tracking of Maximum Power from Wind Using Fuzzy Logic Controller based on PMS." Asian Journal for Convergence in Technology (AJCT) ISSN-2350-1146 1, no. 1 (2015).

[۱۰] Atashpaz-Gargari, Esmaeil, and Caro Lucas. "Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition." In 2007 IEEE congress on evolutionary computation, pp. 4661-4667. IEEE 2007.

[۱۱] Acharya, Parash. "Small scale maximum power point tracking power converter for developing country application." (2013).

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

[۱۳] احمدی منیره، حسینی سیدحسین، فرسادی مرتضی. **"جایابی و برنامه ریزی بهره برداری بهینه ایستگاه های شارژ و دشارژ خودروهای برقی با کمک الگوریتم های فراابتکاری"**. نشریه کیفیت و بهره وری صنعت برق ایران،۱۰ (۳) :۱-۱۳، ۱۴۰۰

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.2.7.8]