دسترسی به نقطه بیشینه توان ماکزیمم در سیستم توربین بادی متصل به ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم با استفاده از الگوریتم هوشمند

هادی سفیدگر [۱]، سید اصغر غلامیان [۲]، عبدالرضا شیخ الاسلامی [۳]

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۵/۲۸

چکیده:

برای استحصال حداکثر توان از باد در سیستم تبدیل انرژی بادی، به علت طبیعت غیرخطی این سیستم، بکارگیری سیستم ردیاب نقطه حداکثر توان امری ضروری است. این سیستم کنترلی، نقطه کار توربین بادی را به گونه‌ایی تعیین می‌کند که سرعت رتور در نقطه بهینه خود قرار گرفته و توربین ماکزیمم توان بیشینه خود را تولید می‌کند. جهت ردیابی نقطه حداکثر توان در سیستم بادی، تکنیک‌های مختلف زیادی استفاده شده‌اند که بیشتر این روشها بر اساس منحنی حداکثر توان توربین و پروفایل سرعت باد کار می‌کنند. در این مقاله، راهبرد جدید ردیابی نقطه حداکثر توان برای سیستم بادی سرعت متغیر با ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم ارائه شده است. این راهبرد پیشنهادی بر اساس منطق فازی کار می‌کند و مستقل از مشخصات توربین و ژنراتور می‌باشد. این سیستم کنترلی جهت کاهش هزینه و افزایش قابلیت اطمینان سیستم، فاقد هرگونه حسگر مکانیکی می‌باشد. کنترل کننده پیشنهادی با کنترل مناسب مبدل DC/DC بوست به ازای سرعتهای مختلف باد، سیستم را وادار به عملکرد در نقطه حداکثر توان می‌نماید.

کلمات کلیدی:

الگوریتم هوشمند، توربین بادی، ردیاب نقطه بیشینه توان، ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم

۱) دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل (نویسنده مسئول) jsefidgar@gmail.com
۲) استادیار گروه مهندسی برق قدرت، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل gholamian@nit.ac.ir
۳) دانشیار گروه مهندسی برق قدرت، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

مقدمه

امروزه به علت کاهش منابع سوخت‌های فسیلی و افزایش آلودگی ناشی از آن، تمایل به استفاده از منابع غیرفسیلی و تجدیدپذیر جهت تولید الکتریسیته افزایش یافته است. منابع تجدیدپذیر مختلفی نظیر انرژی باد، خورشید، زمین گرمایی و... برای این منظور معرفی شده‌اند که در حال حاضر انرژی باد از سایر موارد مورد بیشترین توجه قرار گرفته است [۱۱].

پس از به وجود آمدن فکر استفاده از توربین‌های بادی جهت تولید الکتریسیته، مدل‌های مختلفی پیشنهاد گردید که همچنان در حال تکامل و پیچیده‌تر شدن می‌باشند. مدل‌های ابتدایی قابلیت کنترل کمتری داشتند ولی با پیشرفت فناوری و به کاربردن روش‌های جدید، این قابلیت افزایش یافت و برق تولیدی با کیفیت بیشتری ارائه شد. توربین‌های بکار رفته در نیروگاه‌های بادی در دو حالت، با سرعت متغیر و با سرعت ثابت مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند [۳۰]. امروزه در بکارگیری توربین‌های با سرعت متغیر و اتصال مستقیم ژنراتور به توربین، پیشرفت‌های فراوانی شده است به طوری که توربین بادی با سرعت متغیر ضمن ایجاد نوسانات توان و فشار مکانیکی کمتر، توان خروجی را حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد نسبت به توربین سرعت ثابت افزایش می‌دهد، ضمن اینکه مزیتهای واقعی این سیستم در مقایسه با سیستم سرعت ثابت زمانی که روش‌های کنترلی جهت به دست آوردن حداکثر توان توربین به کار گرفته شوند، مشخص‌تر نیز می‌شود. در چنین سیستمی بیشتر از ژنراتورهای سنکرون مغناطیس دائم (PMSG)[1] به دلیل حذف جعبه دنده و استفاده در سرعتهای مختلف باد استفاده می‌شود [۲].

برای ردیابی نقطه بیشینه توان (MPPT)[2] در توربین‌های بادی به ازای سرعتهای مختلف باد، بایستی سرعت توربین در محدوده وسیعی قابل تغییر باشد. برای اجازه عملکرد توربین در این حالت، ما نیاز به جداسازی مراحل تولید توان الکتریکی از مصرف الکتریکی داریم که برای انجام این کار ولتاژ سه فاز خروجی ژنراتور بایستی یکسو شده و ولتاژ باس DC تنظیم شود [۱۶]. از طرفی دیگر، با توجه به مشخصه توان- سرعت توربین، به ازای یک سرعت باد مشخص، توربین تنها در یک سرعت خاص رتور می‌تواند حداکثر توان خود را تولید کند، به طوری که اگر بار مستقیما به ژنراتور متصل باشد، تنها در صورتی که اندازه بار ثابت و همچنین سرعت رتور در مقدار بهینه خود قرار داشته باشد، بیشترین توان از توربین دریافت می‌شود. بنابراین، با توجه به مشخصه توربین در شرایط استاندارد (سرعت باد نامی)، تنها به ازای یک بار خاص می‌توان از توربین حداکثر توان را دریافت کرد. اما این در حالی است که نقطه بیشینه توان با تغییر شرایط محیطی تغییر می‌کند. لذا برای دریافت توان بیشینه باید اندازه بار نیز تغییر کند که این امر عملا امکان‌پذیر نمی‌باشد. برای غلبه بر این مشکل، یک بخش واسط در نظر گرفته می‌شود تا به وسیله آن به ازای بار ثابت و شرایط محیطی متفاوت از بیشترین

1) Permanent Magnet Synchronous Generator
2) Maximum Power Point Tracking

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

ظرفیت توربین بهره‌برداری شود. این بخش واسط یک ردیاب نقطه بیشینه توان است که شامل یک مبدل DC/DC به همراه بخش کنترل است و غالبا در بین یکسوساز و مصرف‌کننده الکتریکی قرار می‌گیرد [۴- ۱۲].

سیستم کنترلی ردیاب نقطه بیشینه توان با روش‌ها و الگوریتم‌های مختلفی انجام می‌گیرد که از مهمترین آنها می‌توان کنترل نسبت سرعت نوک پره (TSR)، کنترل گشتاور بهینه [۱](OT) [۲۷]، فیدبک سیگنال توان [۲] (PSF) [۱۳] و روش جستجوگر نقطه ماکزیمم [۳](SC) [۶] نام برد.

روش‌های کنترلی TSR و OT و PSF به علت وابسته بودن به مشخصات توربین و ژنراتور و همچنین به دلیل وجود سنسورهای مکانیکی، روش‌های پرهزینه‌ایی هستند که جهت استفاده در توربین‌های بادی با توان کم، مقرون بصرفه نمی‌باشند [۱-۲۵-۲۸]. از این‌رو، در توربین‌های با توان پایین، اکثر راهبردهای بکار رفته به روش جستجوگر نقطه ماکزیمم است. روش کنترلی جستجوگر نقطه ماکزیمم (SC)، برخلاف روش‌های فوق، مستقل از مشخصات توربین و ژنراتور بوده و جهت کاهش هزینه و افزایش قابلیت اطمینان سیستم، فاقد هرگونه حسگر مکانیکی نیز می‌باشد [۲۰]. این روش کنترلی با الگوریتم‌های مختلفی انجام می‌گیرد که از مهمترین این الگوریتم‌ها، منطق فازی [۴](FLC)، روش جستجوی آشوب و مشاهده [۵](P&O)، روش جستجوی تپه نوردی [۶](HCS) ، روش [۷]GRA، روش فیلتر شکافدار تطبیقی (ANF) هستند که در این مقاله برخی از این الگوریتم‌ها به طور مختصر بیان شده‌اند.

ساختار سیستم تبدیل انرژی بادی

همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، مهمترین اجزای سیستم تبدیل انرژی بادی جدا از شبکه عبارتند از: توربین بادی، ژنراتور، یکسوساز، مبدل DC/DC و واحد کنترل که وظیفه مدیریت استحصال توان را بر عهده دارد.



شکل۱) ساختمان سیستم تبدیل انرژی باد جدا از شبکه

1) Optimal Torque
2) Power Signal Feedback
3) Search Control
4) Fuzzy Logic Controller
5) Perturbation And Observation
6) Hill Climbing Searching
7) Grey Relation Analysis

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

مدل‌سازی توربین بادی

اگر از اصطکاک روتور صرف نظر شود، مشخصات مکانیکی توربین می‌تواند توسط روابط زیر بیان شوند [۸-۱۷-۱۸]:

$$T_m - T_{Load} = J\frac{d\mu}{dt} \quad (۱)$$

$$P_m - P_{Load} = J\mu\frac{d\mu}{dt} \quad (۲)$$

$$P_m = 0.5 \times C_p(\text{a}, \quad) \times \circ \times A \times V^3 \quad (۳)$$

$T_m(N.m)$ گشتاور مکانیکی توربین، $T_{Load}(N.m)$ گشتاور بار، J اینرسی کل سیستم بادی، $\omega(rad/s)$ سرعت زاویه‌ای رتور، P_m توان مکانیکی روتور، $V(m/s)$ سرعت باد، $A(m^2)$ سطح جاروب پره‌ی توربین، $\rho(kg/m^3)$ چگالی هوا، C_p ضریب توان توربین، λ نسبت سرعت نوک پره و β زاویه پیچ پره توربین می‌باشند. نسبت توان مکانیکی ایجاد شده در رتور توربین به توان اولیه باد را ضریب توان توربین گویند که یک رابطه غیرخطی نسبت به سرعت نوک پره و زاویه پیچ پره دارد. این رابطه به صورت فرم کلی زیر بیان می‌شود [۷]:

$$C_p(\text{a}, \quad) = C_1 \times [C_2\frac{1}{\text{a}_i} - C_3 \quad - C_4] \times e^{-C_5\frac{1}{\text{a}_i}} + C_6\text{a} \quad (۴)$$

ضرایب C_1 تا C_6 برای توربین‌های مختلف می‌توانند متفاوت باشند و پارامتر λ_i به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{1}{\text{a}_i} = \frac{1}{\text{a} + 0.08} - \frac{0.035}{1 + \quad^3} \quad (۵)$$

حداکثر مقدار C_p به صورت نظری، برابر با ۰/۵۹۳ است ولی در عمل می‌تواند بین ۰/۴ تا ۰/۴۵ باشد. این مسئله به نام محدودیت بتز[1] معروف است. نسبت سرعت نوک پره توربین (λ) به صورت زیر تعریف می‌گردد که در این رابطه، $R_m(m)$ حداکثر شعاع رتور می‌باشد.

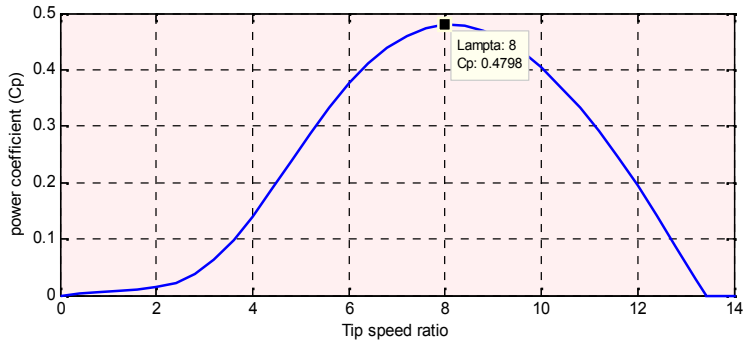
$$\text{a} = \frac{R_m\mu}{V} \quad (۶)$$

در مشخصه توربین بادی، مهمترین پارامتر که تعیین کننده توان خروجی توربین بادی است و از رابطه (۴) به دست می‌آید، منحنی C_p است که در شکل (۲) بر حسب نسبت سرعت نوک پره و به ازای زاویه پیچ پره برابر صفر، برای توربین

1) Betz

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

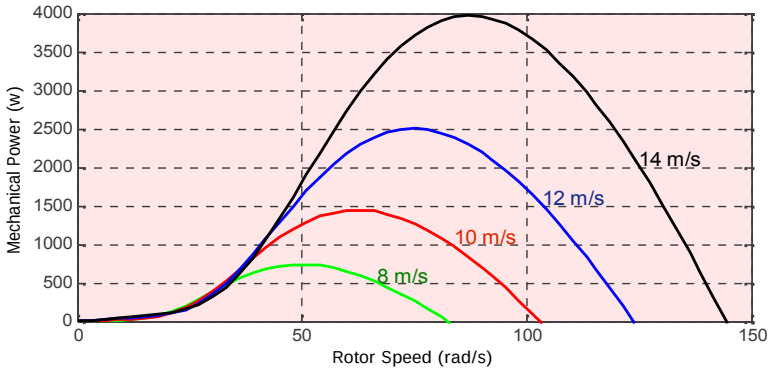
مورد مطالعه، نشان داده شده است.



شکل۲) مشخصه‌ی C_p –λ توربین بادی

مفهوم ردیابی نقطه بیشینه توان ماکزیمم (MPPT)

با توجه به رابطه (۳)، مهمترین پارامتر توربین بادی جهت دستیابی به نقطه بیشینه توان ماکزیمم (MPPT)، منحنی C_p است به طوری که حداکثر توان خروجی توربین بادی زمانی اتفاق می‌افتد که C_p حداکثر باشد. این مقدار بهینه C_p با توجه به ثابت بودن β، در مقادیر مختلفی از λ اتفاق می‌افتد. به ازای سرعت باد مشخص، مقدار بهینه‌ای برای سرعت روتور وجود دارد که توان گرفته شده از باد را حداکثر می‌کند. بنابراین، اگر سرعت باد ثابت در نظر گرفته شود، مقدار C_p تنها به سرعت روتور توربین بادی بستگی خواهد داشت. از این رو، با کنترل سرعت روتور، توان خروجی توربین کنترل می‌شود. تکنیک ردیابی نقطه بیشینه توان بیانگر همین امر است. در واقع این تکنیک با توجه به شکل (۳) راجع به این موضوع بحث می‌کند که نقطه کار توربین بادی (P_m,ω_m) چگونه باشد تا اینکه بیشترین توان از توربین دریافت گردد[۳۰].



شکل۳) مشخصه توان - سرعت توربین بادی نوعی به ازای سرعت باد مختلف

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

کنترل‌کننده جستجوگر نقطه ماکزیمم (SC)

روش کنترلی جستجوگر نقطه ماکزیمم مستقل از مشخصات توربین و ژنراتور بوده و به علت عدم وجود حسگر مکانیکی، روشی کم هزینه و دارای قابلیت اطمینان بالا می‌باشد. در این روش، با تغییراتی که در ولتاژ لینک DC و یا در چرخه کار صورت می‌گیرد، نقطه ماکزیمم توربین به طور پیوسته ردیابی می‌شود. یعنی در این روش به جای اختلال در بخش مکانیکی سیستم، در بخش الکتریکی سیستم اختلال ایجاد می‌گردد. این روش با الگوریتم‌های مختلفی نظیر روش جستجوی تپه صعود (HCS)، آشوب و مشاهده(P&O)، فازی، شبکه عصبی و... انجام می‌گیرد.

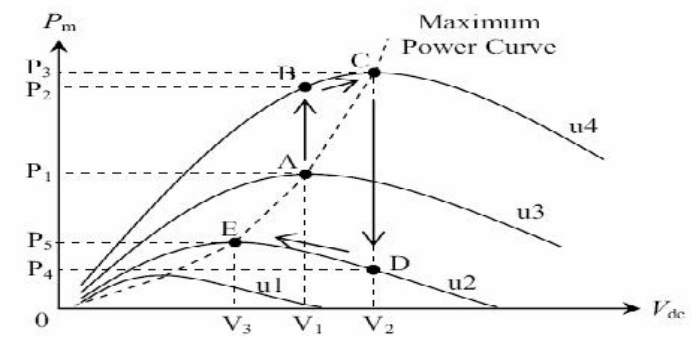
روش جستجوی تپه صعود (HCS)

روش جستجوی تپه صعود (HCS)، یک تکنیک بهینه سازی ریاضی است که برای جستجوی نقطه بهینه محلی یک تابع استفاده می‌شود. این روش کنترلی، یک روش ساده و مستقل از مشخصات سیستم است که جهت کنترل MPPT برای سیستم‌های انرژی خورشیدی بخوبی کار می‌کند، ولی در سیستم‌های توربین بادی با چالش‌هایی نظیر تغییرات سریع سرعت باد و اینرسی سنگین توربین مواجه است [۲۳-۳۱]. روش HCS دارای مشکلاتی در انتخاب مقداردهی اولیه و اندازه گام[1] می‌باشد. همچنین این روش تحت تاثیر ظرفیت خازن خروجی مبدل است، به طوری که هر چه ظرفیت خازنی بیشتر باشد، باعث کاهش سرعت پاسخ‌دهی سیستم می‌گردد [۱۹]. یکی دیگر از اشکال عمده که می‌تواند منجر به شکست فرایند ردیابی نقطه بهینه شود، عدم تمایز بین تفاوت توان ناشی از تغییر در باد با توانی است که ناشی از تغییر در اغتشاش قبلی می‌باشد [۱۵].

شکل (۴) مجموعه‌ای از منحنی‌های P_m-V_{dc} را به همراه تمام نقاط بهینه‌ایی که منجر به منحنی حداکثر توان می‌شود، نشان می‌دهد. به منظور استخراج حداکثر توان از باد، ولتاژ V_{dc} بهینه در زمان واقعی با استفاده از روش HCS جستجو می‌شود. اصول اولیه روش HCS این است: اگر افزایش قبلی V_{dc} منجر به افزایش P_m شود، آنگاه جستجوی V_{dc}^* همچنان در همان جهت ادامه می‌یابد، در غیر این صورت، جستجو در جهت عکس آن ادامه می‌یابد. افزایش P_m به وسیله توان لینک DC، تقریبی است و سیستم زمانی به تعادل می‌رسد که P_{dc} تقریبا برابر با P_m و اثر اینرسی توربین به حداقل رسیده باشد.

1) Step-Size

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]



شکل ٤) روش کنترلی HCS [۳]

کنترل‌کننده آشوب و مشاهده (P&O)

روش آشفتن و مشاهده (P&O) نیز همانند روش HCS یک تکنیک بهینه سازی است که برای جستجوی نقطه بهینه محلی یک تابع استفاده می‌شود. این تکنیک به طور گسترده‌ای در سیستم‌های انرژی باد استفاده می‌شود تا با تعیین نقطه کار بهینه، ماکزیمم توان سیستم انرژی بادی را استخراج کند. این روش مبتنی بر آشفتن یک متغیر کنترل در اندازه گام کوچک و مشاهده نتیجه تغییرات در تابع هدف است تا اینکه شیب صفر گردد. این سیستم‌های کنترلی در گذشته به صورت مکانیکی طراحی شده بودند، یعنی اختلالی در سرعت چرخشی رتور ایجاد و توان مکانیکی توربین مشاهده و دستورات لازم صادر می‌گردید در حالی که امروزه تحت نظارت توان خروجی ژنراتور، اختلالی در ولتاژ ورودی اینورتر [۳۱] یا یکی از متغیرهای مبدل که عبارتند از چرخه کاری (D) [۲۲-۲۹]، جریان خروجی (I_{in}) [۲۱] یا ولتاژ ورودی (V_{in}) [۱۴] ایجاد می‌کنند، یعنی به جای اختلال در بخش مکانیکی سیستم، در بخش الکتریکی سیستم اختلال ایجاد می‌گردد. چون در اندازه‌گیری توان الکتریکی، حسگرهای مکانیکی مورد نیاز نیست، این سیستم‌ها قابل اطمینان‌تر و کم هزینه‌تر می باشند.

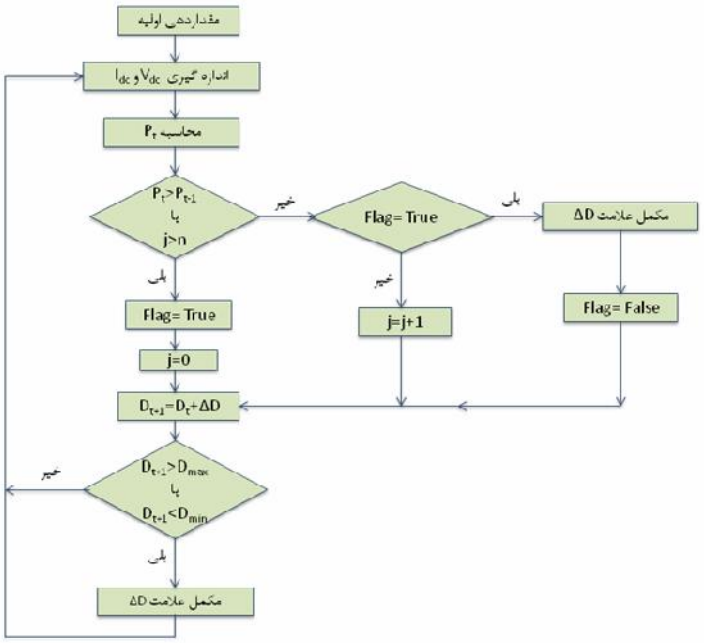
روش P&O هیچ نیازی به اطلاعات قبلی از منحنی مشخصه توربین بادی ندارد. لذا این روش مستقل، ساده و قابل انعطاف نیز می‌باشد. با این حال، اگر روشP&O جهت رسیدن به نقطه ماکزیمم توان تحت تغییرات سریع باد برای توربین‌های بادی با اینرسی بزرگ و متوسط استفاده شود، با مشکل مواجه خواهد شد. علاوه بر این، انتخاب یک اندازه گام مناسب کار آسانی نیست، هر چند اندازه گام بزرگتر به معنای پاسخ‌دهی سریع‌تر و نوسانات بیشتر در اطراف نقطه اوج می‌باشد، ولی باعث کاهش راندمان می‌شود. از طرف دیگر، اندازه گام کوچکتر راندمان را بهبود می‌بخشد، اما سرعت همگرایی را کاهش می‌دهد [۵-۹-۱۵]. علاوه بر این، مقدار دهی اولیه از پارامترهای قابل توجهی است که بر عملکرد سیستم تاثیر می‌گذارد [۲۶].

شکل (۵) الگوریتم P&O پیشنهادی را نشان می‌دهد. در مدل پیشنهای، ابتدا V_{dc} و I_{dc} اندازه‌گیری می‌شوند و توان

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

در لحظه t (P_t) محاسبه می‌گردد. توان P_t با مقدار قبلی‌اش P_{t-1} مقایسه می‌گردد. اگر $P_{t-1}<P_t$ باشد، آنگاه مسیر جست و جوی سیکل کاری صحیح بوده و ΔD بدون تغییر باقی می‌ماند. در غیر این صورت، مسیر جست و جوی سیکل کاری معکوس می‌گردد. پس از هر یک از دو حالت، مقدار ΔD به سیکل کاری قبلی D_t اضافه می‌گردد و سیکل کاری جدید D_{t+1} شکل می‌گیرد. اگر مقدار سیکل کاری جدید D_{t+1} ، خارج از بازه سیکل کاری باشد، علامت ΔD تغییر می‌کند. در غیر این صورت، ΔD بدون تغییر می‌ماند و این ΔD جدید در سیکل بعدی قرار می‌گیرد و فرایند از ابتدا تکرار می‌شود.

الگوریتم کلی P&O [۱۰]، ممکن است علامت ΔD را به عنوان نتیجه‌ایی از کاهش توان ثبت شده بدرستی تغییر دهد، اما در عین حال، هنگامی که فرایند P&O به سرعت تکرار می‌شود، به علت کند بودن پاسخ دینامیکی سیستم ممکن است تاثیری از این تغییر علامت در افزایش توان ناموفق باشد. در نتیجه، این تغیر علامت نادرست ΔD دوباره در سیکل بعدی قرار می‌گیرد که موجب سردرگمی سیستم می‌گردد. در الگوریتم پیشنهادی، یک flag را اضافه کردیم که مانع از تغییر علامت ΔD قبل از افزایش واقعی توان می‌شود. با توجه به حضور flag، نقص فوق در الگوریتم پیشنهادی خنثی شده است. علاوه بر این، یک شمارنده J به برنامه اضافه شده است تا اطمینان حاصل گردد که سیستم در مسیر یک حلقه گرفتار نشده است. بنابراین، اگر علامت D پس از N سیکل تکرار از کاهش توان خروجی بدون تغییر باقی بماند، مفهومش این است که flag "درست" است و اجازه می‌دهد که علامت D صرفنظر از اندازه گیری توان کامل گردد.

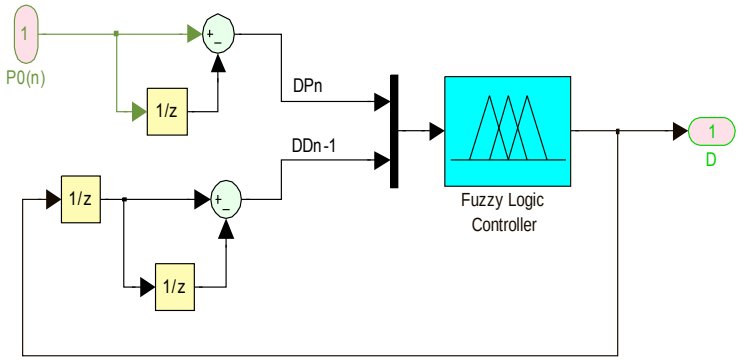


شکل ۵) الگوریتم آشوب و مشاهده (P&O) پیشنهادی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

کنترل‌کننده فازی جهت ردیابی نقطه بیشینه توان

در گذشته برای کنترل‌کننده‌های فازی معمولا تغییرات توان و تغییرات سرعت را به عنوان ورودی‌های کنترل‌کننده فازی در نظر می‌گرفتند که به دلیل وجود حسگرهای مکانیکی، امروزه کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. امروزه تغییرات توان و تغییرات ولتاژ و یا تغییرات سیکل کاری که همگی قسمتی از بخش الکتریکی سیستم می‌باشند، به عنوان ورودی کنترلر فازی استفاده می‌شوند. در مدل پیشنهادی این مقاله، سیستم کنترل فازی جایگزین سیستم کنترلی P&O ذکر شده در بخش قبل شده و نتایج با هم مقایسه شده است. در روش پیشنهادی، از توان خروجی (P_t) نمونه گیری شده و به کنترلر فرستاده می‌شود. کنترلر اطلاعات دریافتی را به زبان فازی نوشته و به سیستم فازی که دو ورودی برای آن لحاظ شده است، می‌دهد شکل (۶) بلوک دیاگرام این کنترل کننده را نشان می‌دهد.



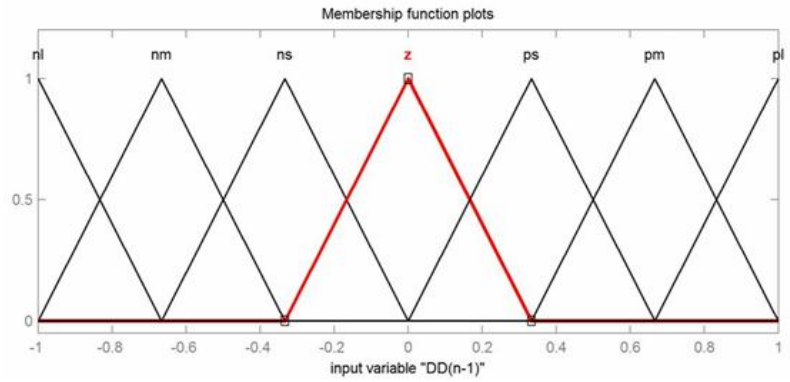
شکل ٦) بلوک دیاگرام کنترلر فازی

شکل‌های (۷) و (۸)، توابع عضویت کنترل‌کننده فازی پیشنهادی برای دو ورودی و خروجی که به صورت منفی بزرگ (nl)، منفی متوسط (nm)، منفی کوچک (ns)، صفر (z)، مثبت کوچک (ps)، مثبت متوسط (pm)، مثبت بزرگ (pl) و خروجی کنترلر (سیکل کاری) نیز به صورت خیلی کوچک (vs)، کوچک متوسط (ms)، زیر میانگین (bav)، میانگین (av)، بالای میانگین (aav)، بزرگ متوسط (ml) و خیلی بزرگ (vl) نامگذاری شده‌اند و جدول (۱) قوانین فازی آن را نشان می‌دهد.

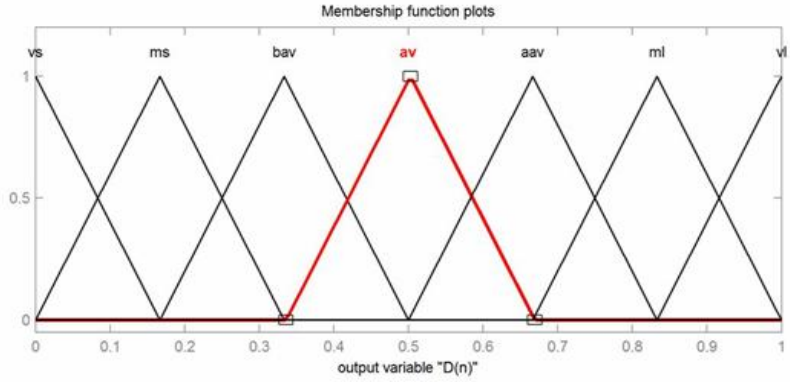
$$\Delta P_n = P_n - P_{n-1} \qquad (۷)$$

$$\Delta D_n^i = D_{n-1}^o - D_{n-2}^o$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]



شکل ۷) توابع عضویت برای ورودی های aP ، aD^i



شکل ۸) تابع عضویت برای خروجی D^o

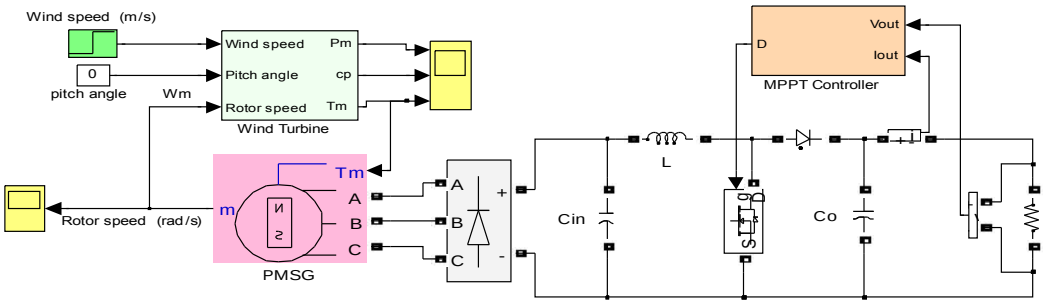
جدول ۱) قواعد فازی

ΔD^i_n	ΔP_n						
	nl	nm	ns	z	ps	pm	pl
nl	vl	vl	ml	bav	ms	vs	vs
nm	vl	ml	aav	bav	bav	ms	vs
ns	ml	aav	aav	av	bav	bav	vs
z	vs	ms	bav	av	aav	ml	vl
ps	ms	bav	bav	av	aav	aav	ml
pm	vs	ms	bav	aav	aav	ml	vl
pl	vs	vs	ms	ml	ml	vl	Vl

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

شبیه سازی

به منظور تائید عملکرد روش پیشنهادی، یک سیستم تبدیل انرژی بادی جدا از شبکه با استفاده از نرم‌افزار MATLAB شبیه سازی و نتایج حاصل از آن در این بخش ارائه شده است. سیستم تبدیل انرژی بادی پیشنهادی شامل توربین بادی، ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم، یکسوساز تمام موج دیودی، کنترل‌کننده نقطه بیشینه توان(MPPT)، مبدل DC/DC بوست به همراه مصرف‌کننده اهمی و مدولاتور پهنای پالس است. شکل (۹) ساختار اصلی سیستم تبدیل انرژی بادی جدا از شبکه و جدول (۲) مشخصات توربین و ژنراتور مورد استفاده در این شبیه سازی را نشان می‌دهد.



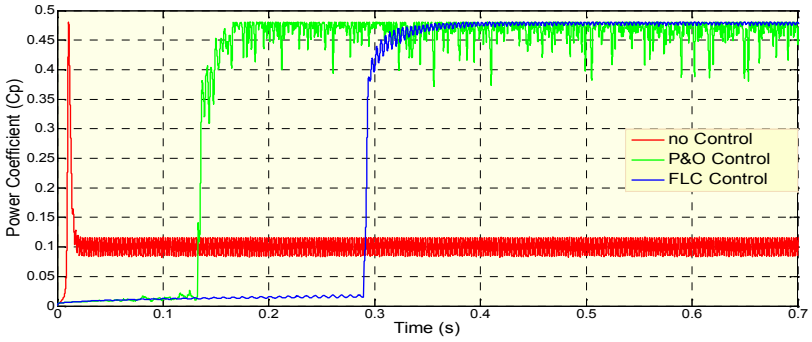
شکل ۹) ساختمان سیستم تبدیل انرژی باد جدا از شبکه برای شبیه‌سازی

جدول ۲) مشخصات توربین بادی و ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم (PMSG)

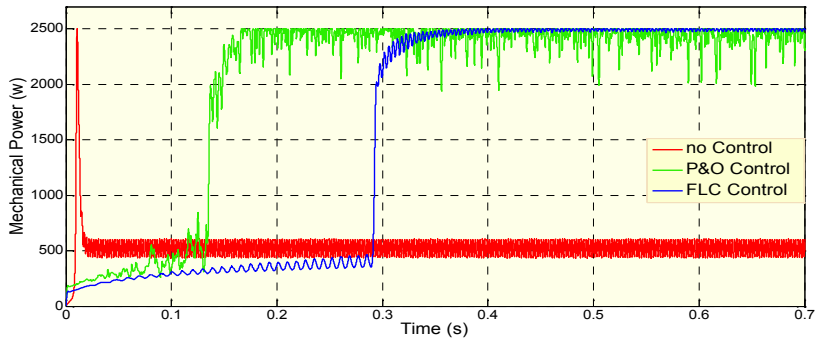
	پارامتر	مقدار	واحد
توربین بادی	توان نامی	۲/۵	kw
	سرعت باد نامی	۱۲	m/s
	قطر رتور	۲/۶	m
	حداکثر ضریب توان	۰/۴۸	-
ژنراتور (PMSG)	توان نامی	۳	kw
	مقاومت استاتور	۳/۳۵	Ω
	اندوکتانس استاتور L_d, L_q	۰/۴۳۵	mH
	تعداد قطب	۴	-

در این بخش جهت عملکرد صحیح سیستم کنترلی، شبیه سازی در دو حالت مختلف تحت شرایط استاندارد و همچنین تحت شرایط متغیر سرعت باد مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا سیستم در شرایط سرعت باد نامی توربین (۱۲ متر بر ثانیه) لحاظ شده است. منحنی توان خروجی و ضریب توان توربین تحت شرایط سرعت باد نامی با استفاده از سیستم‌های کنترلی فازی و آشوب و مشاهده پیشنهادی و همچنین بدون کنترل کننده به ترتیب در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]



شکل ۱۰) منحنی ضریب توان توربین بادی در شرایط سرعت باد نامی (۱۲ متر بر ثانیه)

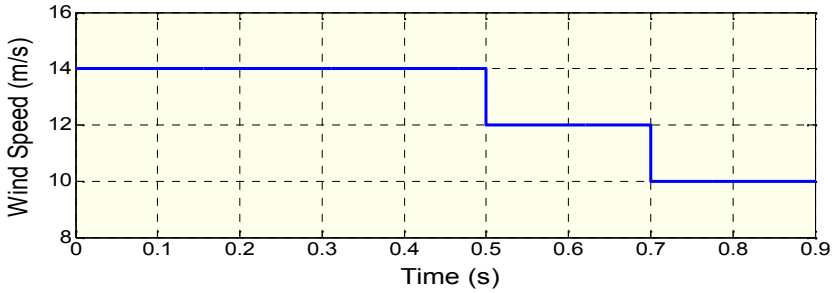


شکل ۱۱) منحنی توان خروجی توربین بادی در شرایط سرعت باد نامی (۱۲ متر بر ثانیه)

همان طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌گردد، سیستم بدون کنترل کننده دارای ضریب توان بسیار پایینی است که نتیجه این ضریب توان پایین، توان خروجی بسیار پایینی می‌باشد که در شکل (۱۱) نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که توربین در شرایط باد نامی تنها می‌تواند حدود ۲۰٪ حداکثر توان خود را در حالت پایدار تولید کند که باعث راندمان بسیار پایین این سیستم می‌شود. اما با استفاده از سیستم کنترلی ردیاب نقطه بیشینه توان، منحنی ضریب توان توربین از مقدار ۰/۱ به مقدار حداکثر خود یعنی ۰/۴۸ بسیار نزدیک شده است، به طوری که با استفاده از سیستم کنترلی آشوب و مشاهده این مقدار بین ۰/۳۸ تا ۰/۴۸ در حال نوسان می‌باشد که باعث افزایش بسیار زیاد توان خروجی سیستم گردیده است. ولی بخش اصلی شبیه سازی سیستم کنترلی این سیستم، سیستم کنترل فازی می‌باشد، به طوری که مشاهده می‌گردد، منحنی ضریب توان را به مقدار حداکثر خود (۰/۴۸) رسانده و همچنین دارای نوسان بسیار کمی در مقدار حداکثر می‌باشد که نتیجه این ضریب توان، توان خروجی بالای توربین می‌باشد که در شرایط سرعت باد نامی، حداکثر توان توربین را که همان توان نامی توربین است، تولید کرده است.

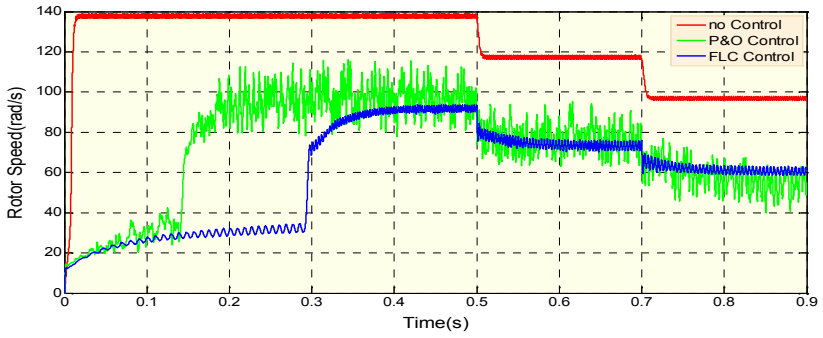
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

در بخش دوم شبیه‌سازی با لحاظ نمودن شرایط متغیر سرعت باد، سیستم مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل از آن در این بخش نشان داده شده است. مطابق شکل (۱۲) فرض می‌شود که سرعت باد از ۱۴ متر بر ثانیه به ۱۲ متر بر ثانیه و سپس به ۱۰ متر بر ثانیه تغییر وضعیت می‌دهد.



شکل ۱۲) منحنی تغییرات سرعت باد

همان طور که در بخش‌های قبل گفته شده است، سرعت بهینه رتور در سرعتهای مختلف باد متفاوت است و از آنجایی که برای هر سرعت باد مشخص، تنها یک سرعت بهینه رتور وجود دارد که سبب حداکثر توان توربین می‌گردد، بنابراین با تغییر سرعت باد، سرعت رتور نیز باید تغییر کند و در حالت بهینه جدید خود قرار گیرد.

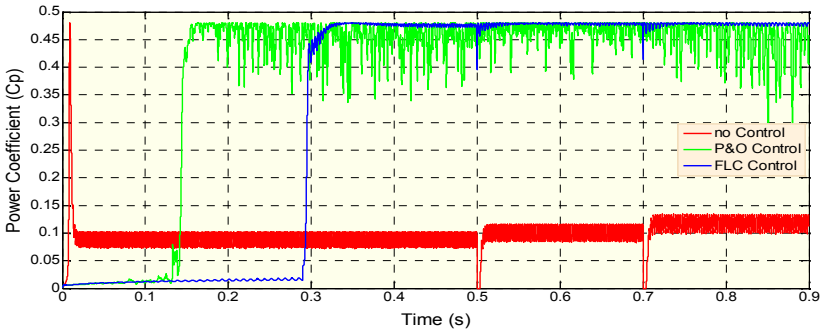


شکل ۱۳) منحنی تغییرات سرعت رتور در شرایط مختلف سرعت باد

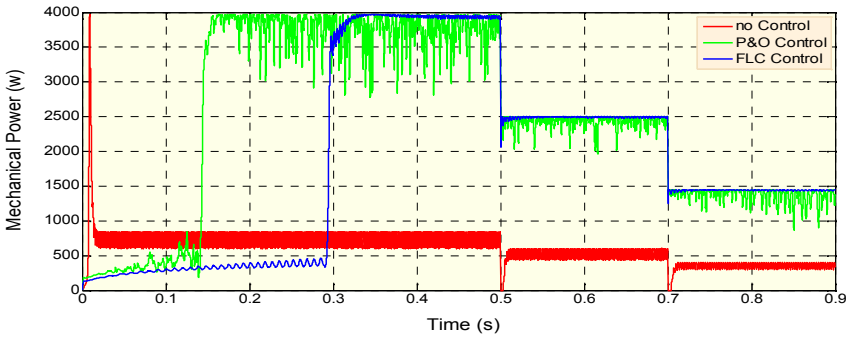
شکل (۱۳) همین مطلب را به وضوح نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌گردد که با تغییر سرعت باد، سیستم کنترلی با کلیدزنی مناسب در مبدل DC-DC بوست، بلافاصله سرعت رتور را تغییر می‌دهد تا اینکه در نقطه بهینه جدید خود قرار گیرد. شکل (۱۴) نتیجه حاصل از تغییر سرعت رتور می‌باشد. این شکل منحنی ضریب توان توربین را در شرایط مختلف باد نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌گردد که با تغییر سرعت باد، سرعت رتور بلافاصله تغییر کرده و سبب شده است که منحنی ضریب توان توربین در مقدار ماکزیمم خود همچنان ثابت قرار گیرد که نتیجه این تغییرات سرعت رتور و منحنی ضریب توان، منحنی توان خروجی توربین است که در شکل (۱۵) نشان داده شده است. در این شکل

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

می‌توان مشاهده کرد که سیستم تبدیل انرژی باد پیشنهادی قادر است که در هر گستره سرعت باد، حداکثر توان خود را با حداقل نوسان تولید کند.



شکل ١٤) منحنی ضریب توان توربین بادی در شرایط مختلف سرعت باد



شکل ١٥) منحنی توان خروجی توربین بادی در شرایط مختلف سرعت باد

در جدول (۳) نوسانات ضریب توان و نوسانات توان خروجی توربین بادی در حالت پایداری تحت شرایط محیطی مورد نظر بیان شده است.

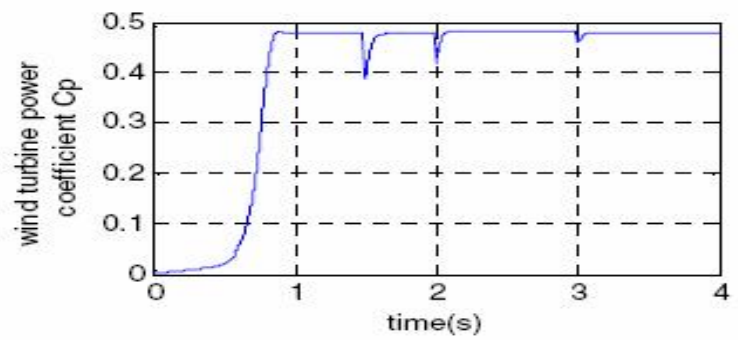
جدول ۳) نوسانات ضریب توان و توان خروجی در حالت پایدار

		V=10 m/s	V=12 m/s	V=14 m/s
نوسانات ضریب توان	آشوب و مشاهده	۰/۱	۰/۱۳	۰/۱۵
	فازی پیشنهادی	**۰/۰۰۲**	**۰/۰۰۱۵**	**۰/۰۰۲٤**
نوسانات توان خروجی(وات)	آشوب و مشاهده	۲۰۰	۵۰۰	۱۰۰۰
	فازی پیشنهادی	**۱۰**	**۸**	**۲۰**

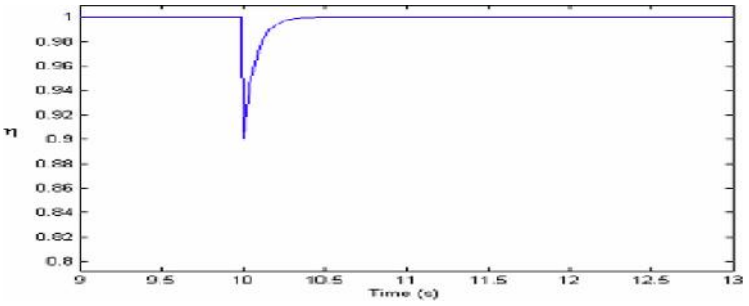
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

به منظور تأکید بر صحت روش پیشنهاد شده در این مقاله و تأیید نتایج حاصل از شبیه‌سازی، این روش با نتایج ارائه شده در مرجع مذکور مقایسه شده است.

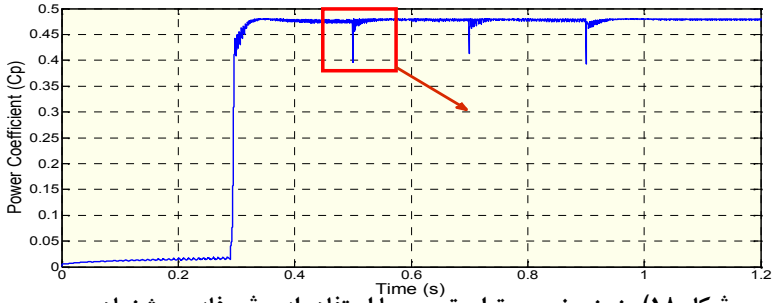
در مرجع [۷] از روش کنترل GRA و در مرجع [۲] از روش کنترلی ANFIS (روش ترکیبی مدل فازی و شبکه عصبی) جهت دستیابی به نقطه بیشینه توان استفاده شده است. شکل‌های (۱۶) و (۱۷) منحنی‌های ضریب توان توربین بادی را با استفاده از روش‌های کنترلی GRA و ANFIS نشان می‌دهد. اما در شکل (۱۸) ضریب توان توربین بادی با استفاده از کنترل‌کننده فازی پیشنهادی تحت همان تغییر سرعت باد مشاهده می‌گردد.



شکل ۱۶) منحنی ضریب توان توربین با استفاده از روش GRA [۷]



شکل ۱۷) منحنی ضریب توان توربین بر حسب پریونیت با استفاده از روش ANFIS [۲]



شکل ۱۸) منحنی ضریب توان توربین با استفاده از روش فازی پیشنهادی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

همان طور که در شکل‌های (۱۶) و (۱۷) ملاحظه می‌شود، پس از تغییر سرعت باد، منحنی ضریب توان حاصل از روش کنترلی GRA با تاخیری حدود ۰/۲ ثانیه و منحنی ضریب توان حاصل از روش کنترلی ANFIS با تاخیری حدود ۰/۳ ثانیه به حالت بهینه خود بر می‌گردد. اما این در حالی است که منحنی ضریب توان حاصل از روش کنترل فازی پیشنهادی که در شکل (۱۸) نشان داده شده است با زمان کمتر از ۰/۰۱۵ ثانیه به مقدار ماکزیمم خود بر می‌گردد. جدول (۴) مقایسه این سه روش را نشان می‌دهد.

جدول ٤) مقایسه مدت زمان لازم جهت خیزش منحنی Cp برای سه روش

۰/۲ ثانیه	GRA [7]
۰/۳ ثانیه	ANFIS [2]
۰/۰۱۵ ثانیه	**پیشنهادیFLC**

این مطلب بیانگر آن است که کنترل‌کننده پیشنهادی می‌تواند جایگزین مناسبی برای الگوریتم‌های کنترلی ارائه شده در مراجع مذکور باشد.

نتیجه گیری

در این مقاله، تکنیک هوشمند کنترل فازی و آشوب و مشاهده جهت دستیابی نقطه بیشینه توان به منظور بهبود نوسانات ضریب توان و توان خروجی و افزایش سرعت پاسخ سیستم تحت تغییرات شرایط جوی که منجر به افزایش راندمان سیستم توربین بادی می‌گردد، ارائه شده است. این روشها کاملا مستقل از مشخصات توربین و ژنراتور می‌باشند. در این روشها تنها از ولتاژ و جریان بار نمونه گیری می‌شود و فاقد هرگونه حسگر مکانیکی است که این خود سبب کاهش هزینه و افزایش قابلیت سیستم شده است. از دیگر مزایای این روشها نسبت به روشهای مشابه، عکس العمل سریع این کنترلرها در برابر تغییرات سرعت باد می باشد.

نتایج شبیه سازی نشان داد که با استفاده از روش فازی پیشنهادی نوسانات ضریب توان و توان در حالت پایدار نسبت به کنترل‌کننده آشوب و مشاهده به طور چشمگیری کاهش یافته است. در واقع، در شرایط استاندارد کنترل‌کننده فازی پیشنهادی نسبت به کنترل‌کننده آشوب و مشاهده، نوسانات توان خروجی را به اندازه ۶۲٪ بهبود بخشیده است. این نتایج همچنین نشان داده‌اند که عملکرد کنترل‌کننده فازی در لحظات تغییر سرعت باد، بسیار سریعتر از روش‌های کنترل‌کننده آشوب و مشاهده و روش GRA و روش ANFIS است که در نتیجه، باعث افزایش سیستم می‌شود.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

منابع

[1] Abdullah M.A, Yatim A.H.M, Tan C.W, Saidur R. 2012. "A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems," Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, 3220– 3227.

[2] A. Meharrar; M. Tioursi, M. Hatti, A. Boudghène Stambouli. 2011," A variable speed wind generator maximum power tracking based on adaptative neuro-fuzzy inference system". Expert Systems with Applications 38. 7659–7664.

[3] A. M. Knight, and G. E. Peters, 2005. ‘‘Simple Wind Energy Controller for an Expanded Operating Range”, IEEE Transaction on Energy Conversion, vol. 20, no. 2, pp.459- 466.

[4] Aryuanto Soetedjo, Abraham Lomi, Widodo Puji Mulayanto. 2011. " Modeling of Wind Energy System with MPPT Control," International Conference on Electrical Engineering and Informatics, Bandung, Indonesia.

[5] Ching-Tsai P, Yu-Ling J. 2010. 'A novel sensorless MPPT controller for a high-efficiency microscale wind power generation system'. IEEE Transactions on Energy Conversion;25:207–16.

[6] C. Pan and Y. Juan, 2009. “Novel Sensorless MPPT Controller for a High-Efficiency Microscale Wind Power Generation System,” IEEE Trans. Energy Conversion. Vol 24, pp. 1-10.

[7] Dong Liu Zhensheng Wu Hui Wang Tianjian Wang. 2010. " MPPT Control Strategy for Off-grid Wind Power System ". 2nd IEEE International Symposium On Power Electronics.

[8] Heier S. 1998. “Grid integration of wind energy conversion systems,”*John Wiley& Sons Ltd*.

[9] Hong M-K, Lee H-H. 2010 . "Adaptive maximum power point tracking algorithm for variable speed wind power systems". In: Proceedings of the 2010 international conference on life system modeling and intelligent computing, and 2010 international conference on Intelligent computing for sustainable energy and environment. p. 380–8.

[10] J. Usaola and P. Ledesma, 2001. “Dynamic incidence of wind turbines in networks with high wind penetration,” in Proc. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vancouver, Canada, vol. 2, pp. 755-760.

[11] K. Methaprayoon, C. Yingvivatanapong, W. J. Lee, and J. R. Liao, 2007, "An Integration of ANN Wind Power Estimation Into Unit Commitment Considering the Forecasting Uncertainty," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 43, no. 6, pp. 1441-1448.

[12] Kuo-Yuan Lo, Yaow-Ming Chen, and Yung-Ruei Chang,. 2011 ' MPPT Battery Charger for Stand-Alone Wind Power System'. IEEE transactions on power electronics, vol. 26, no. 6.

[13] K. Tan and S. Islam, 2004. “Optimum control strategies in energy conversion of PMSG wind turbine system without mechanical sensors,” IEEE Trans. Energy Convers., vol. 19, no. 2, pp. 392–399.

[14] Kesraoui M, Korichi N, Belkadi A.2011. 'Maximum power point tracker of wind energy conversion system'. Renewable Energy;36:2655–62.

[15] Kazmi SMR, Goto H, Hai-Jiao G, Ichinokura O. 2011. "A novel algorithm for fast and efficient speed-sensorless maximum power point tracking in wind energy conversion systems." IEEE Transactions on Industrial Electronics;58:29–36.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]

[16] L. Holdsworth, X. G. Wu, J. B. Ekanayake and N. Jenkins, 2003. “Comparison of fixed speed and doubly-fed induction wind turbines during power system disturbances,” IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., vol. 150, no. 3, pp. 343-352.

[17] Li Hui ,He Bei. 2008 .“Control Strategy of Maximizing The Wind Energy For Wind Turbines With a DFIG,” *Acta Energiae Solaris Sinica*, 29(7). 763.

[18] Liu Qihui, He Yikang, Zhao Rende. 2003. “The maxima windenergy tracing control of avariable-speed constantfrequency wind-power generation system,” *Automation of Electric Power Systems*: 62-67.

[19] Liu X, Lopes LAC. 2005. "An improved perturbation and observation maximum power point tracking algorithm for PV arrays". In: IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference. p. Vol. 3.

[20] Maher Azzouz, Abdel-latif Elshafei, and Hasan Emara, " Maximum-Power Tracking of Wind Energy Conversion Systems Based on Fuzzy Algorithms", 2010 IEEE International Symposium on Intelligent Control. Yokohama, Japan.

[21] Neammanee B, Sirisumranukul S, Chatratana S. 2006." Control performance analysis of feed forward and maximum peak power tracking for small-and mediumsized fixed pitch wind turbines". In: 9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision. ICARCV . p. 1–7.

[22] Patsios C, Chaniotis A, Rotas M, Kladas AG. 2009." A comparison of maximum power- point tracking control techniques for low-power variable-speed wind generators". 8th International Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems & Electric Drives Joint Symposium. ELECTROMOTION:1–6.

[23] Q. Wang, L. Chang, 1999. “An independent maximum power extraction strategy for wind energy conversion systems,” Proceedings of the 1999 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Edmonton, Canada, Vol. 2, pp:1142-1147.

[24] Quincy W, Liuchen C. 2004. "An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter-based variable speed wind turbine systems". IEEE Transactions on Power Electronics.

[25] Raza Kazmi SM, Goto H, Hai-Jiao G, Ichinokura O. 2010.' Review and critical analysis of the research papers published till date on maximum power point tracking in wind energy conversion system'. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE).. p. 4075–82.

[26] Raza K, Goto H, Hai-Jiao G, Ichinokura O. 2008. "A novel algorithm for fast and efficient maximum power point tracking of wind energy conversion systems". In: 18th International Conference on Electrical Machines. p. 1–6.

[27] S.Morimoto, H. Nakayama, M. Sanada, andY. Takeda, 2005. “Sensorless output maximization control for variablespeed wind generation system using IPMSG,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 41, no. 1, pp. 60–67.

[28] Thongam JS, Ouhrouche M. 2011.' MPPT control methods in wind energy conversion systems'. In: Carriveau R, editor. Fundamental and advanced topics in wind power.

[29] Tiang TL, Ishak D. 2012." Novel MPPT control in permanent magnet synchronous generator system for battery energy storage". Applied Mechanics and Materials:5179–83.

[30] Y. Lei, A. Mullan, G. Lightbody, and R. Yacamini, 2006, “Modeling of the wind turbine with a doubly fed induction generator for grid integration studies,” IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 21, no. 1, pp. 257-264.

[31] Z. Chen, E. Spooner, 2003.“Current source thyristor inverter and its active compensation system,” IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution, Vol. 150, No. 4, pp: 447-454.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-17]