

Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology Vol. 16/ No. 63/ Autumn 2025 P-ISSN: 2322-3871, E-ISSN: 2345-5594, http://sanad.iau.ir/journal/jipet

Doi: 10.71666/jipet.2025.998284

Research Article

## Fast Frequency Support by Wind Farms Using Frequency Deviation Parameter and Rotor Torque Limit of Doubly Fed Induction Generator

## Seyed Abdul Rahman Ahmadnezhad, Ph.D. Student, Ramtin Sadeghi, Assistant Professor, Bahador Fani, Associate Professor

Department of Electrical Engineering- Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran ahmadnezhad.rahman@gmail.com, r.sadeghi@khuisf.ac.ir, b.fani@pel.iaun.ac.ir

### Abstract

Considering the penetration of renewable energy sources and wind turbines in power systems, the importance of these sources in maintaining and helping to control the frequency to increase the rare frequency level will be very meaningful and necessary. This paper proposes a design for supporting the system frequency and eliminating the second drop in frequency as well as restoring the speed of the wind rotor turbine based on the double-fed induction generator (DFIG). In this design, as soon as the disturbance detected, the power reference increased intelligently and as a function of the two parameters of the system frequency, changes and the wind turbine rotor speed based on the torque limit. Then, through these two parameters, to force the rotor speed to converge to a stable operating range, the power reference reduced until the electrical power is less than the mechanical power in a gentle slope and not a step, and finally leads to a quick recovery of the rotor speed. Another advantage of proposed scheme is that the characteristic properties of MPPT maintained throughout the frequency support, which helps to better improve the frequency of the system in case of changes in wind speed. The proposed scheme simulated based on the test system in MATLAB software. The simulation results show that the proposed scheme is able to improve the system frequency without causing a second dip and restore the rotor speed well and quickly.

**Keywords**: Doubly fed induction generator, second frequency dip, temporary frequency support, wind turbine, frequency control.

Received: 11 June 2023 Revised: 15 August 2023 Accepted: 23 September 2023

Corresponding Author: Dr. Ramtin Sadeghi

Citation: S.A.R. Ahmadnezhad, R. Sadeghi, B. Fani,, "Fast frequency support by wind farms using frequency deviation parameter and rotor torque limit of doubly fed induction generator", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 16, no. 63, pp. 109-126, September 2025 (in Persian).

Doi: 10.71666/jipet.2025.998284

مقاله پژوهشی

# پشتیبانی سریع فرکانس توسط مزارع باد با استفاده از پارامتر انحراف فرکانس و حد گشتاور روتور ژنراتور القایی دوسو تغذیه

سيدعبدالرحمان احمدنژاد، دانشجوی دکتری، رامتين صادقی، استاديار، بهادر فانی، دانشيار

دانشکده مهندسی برق- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران ahmadnezhad.rahman@gmail.com, r.sadeghi@khuisf.ac.ir, b.fani@pel.iaun.ac.ir

چکیده: با توجه به نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر و توربینهای باد در سیستمهای قدرت، اهمیت این منابع در حفظ و کمک به کنترل فرکانس برای افزایش سطح حداقل فرکانس (FN) در شرایط گذرای سیستم بسیار معنادار و لازم خواهد بود. این مقاله برای پشتیبانی فرکانس سیستم و حذف افت دوم فرکانس و همچنین بازیابی سرعت روتور توربین باد مبتنی بر ژنراتور القایی دوسو تغذیه (DFIG) یک طرح پیشنهاد میکند. در این طرح به محض تشخیص اختلال، مرجع توان به صورت خودکار و تابعی از دو پارامتر تغییرات فرکانس سیستم و سرعت روتور توربین باد مبتنی بر حد گشتاور افزایش می ابد و سپس با همین دو پارامتر برای وادار کردن سرعت روتور به همگرا شدن به یک محدوده عملیاتی پایدار، مرجع توان کاهش می یابد تا جائی که توان الکتریکی از توان مکانیکی به صورت شیب ملایم و نه پلهای کمتر شده و منجر به بازیابی سریع سرعت روتور می گردد و سرعت باد به بهبود بهتر فرکانس سیستم کمک کند. نتایج شبیهسازی در نرمافزار متلب بر اساس سیستم آزمون نشان می دهد طرح پیشنهادی به خوبی توانسته است فرکانس سیستم کمک کند. نتایج شبیهسازی در نرمافزار متلب بر اساس سیستم آزمون نشان می دهد خوبی و سریع بازیابی کند.

كلمات كليدى: افت دوم فركانس، پشتيبانى موقت فركانس، توربين باد، ژنراتور القايى دوسو تغذيه، كنترل فركانس.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۳/۲۱ تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۵/۲۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۷/۱

**نام نویسندهی مسئول:** دکتر رامتین صادقی **نشانی نویسندهی مسئول:** اصفهان- خیابان جی شرقی- ارغوانیه- بلوار دانشگاه- دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوراسگان

#### ۱– مقدمه

از آنجایی که حفظ فرکانس سیستم قدرت در محدوده مناسب تحت شرایط مختلف اهمیت حیاتی دارد، پایداری فرکانس با افزایش نفوذ توان باد<sup>ر</sup> در سیستمهای قدرت به یک موضوع تحقیقاتی مهم تبدیل شده است [۱،۲].

در شبکههای برق سنتی، در هنگام اختلال در تولید توان الکتریکی یا مصرف شبکه، ژنراتورهای سنکرون موجود در سیستم ذاتا از طریق آزاد کردن انرژی جنبشی ذخیره شده در جرمهای دوار<sup>۲</sup>، توان الکتریکی و اینرسی مورد نیاز سیستم را تامین کرده و به این حالت پاسخ اینرسی گویند. پاسخ اینرسی یک اثر تثبیت کننده بر فرکانس شبکه دارد و از این طریق به بازگردندان فرکانس به مقدار مجاز کمک میکنند. اما با افزایش سطح نفوذ نیروی باد در سیستمهای قدرت بهدلیل استفاده از مبدل الکترونیک قدرت، سرعت چرخشی توربین از فرکانس شبکه<sup>۳</sup> جدا میشود و باعث پاسخ اینرسی کمتر و بدنبال آن اینرسی کل سیستم قدرت و سطح حداقل فرکانس<sup>\*</sup> (FN) کاهش مییابد. شکل (۱) محدودههای عملیاتی<sup>۵</sup> جهت بازیابی فرکانس و تاثیر اینرسی بر فرکانس سیستم را نشان میدهد. با این حال، روتور یک توربین بادی سرعت متغیر به اندازه یک ژنراتور با اتصال مستقیم به شبکه، انرژی جنبشی دارد که میتوان آن را محاسبه و در شرایط اختلال در شبکه از آن استفاده و مزرعه باد در طول اختلالات شبکه کمک کرد [۳،۴]. بنابراین مهمترین الزامات فنی از قبیل تنظیم توان اکتیو و راکتیو و رفتار مزرعه باد در طول اختلالات شبکه قابل توجه میگردد [۵]. با توجه به این که ژنراتورهای توربین بادی<sup>4</sup> (BTW) سرعت متغیر در حالت ردیابی نقطه بیشینه توان<sup>7</sup> (MPT) به کار گرفته میشوند تا بتوانند حداکثر انرژی را از باد استخراج کنند. به این در حالت ردیابی نقطه بیشینه توان<sup>7</sup> (MPT) به کار گرفته میشوند تا بتوانند حداکثر انرژی را از باد استخراج کنند. به این در حالت ردیابی نقطه بیشینه توان<sup>7</sup> (MPT) به کار گرفته میشوند تا بتوانند حداکثر انرژی را از باد استخراج کنند. به این در حالت ردیابی نقطه بیشینه توان<sup>7</sup> (MPT) به کار گرفته میشوند تا بتوانند حداکثر انرژی را از باد استخراج کنند. به این در حالت ردیابی نقطه بیشینه توان (MPT) جرم دوار را آزاد نکرده و کمکی به بهبود فرکانس شبکه نخواه می می و میار رفع در حالت ردیابی داند ژنراتورهای توربین باد در پشتیبانی کوتاه مدت فرکانس شبکه زوشهایی پیشنهاد شده است توان ناشی از انرژی جنبشی<sup>۸</sup> (KE) بر موله را آزاد نکرده و کمکی به بهبود فرکانس شبکه روشهایی پیشنهاد شده است (یزیا باد سازی دادن ژنراتورهای توربین باد در پشتیبانی کوتاه مدت فرکانس شبکه روشهایی کرد.

در ژنراتورهای توربین بادی سرعت متغیر هنگامی که سرعت باد از مقدار نامی بیشتر باشد بدون هیچ طرح کنترلی اضافی، انرژی جنبشی توربین برای پشتیبانی موقت فرکانس استخراج می شود ولی زمانی که سرعت باد از مقدار نامی کمتر باشد با توجه به این که در این ناحیه توربینهای باد در حالت کنترلی ردیابی نقطه بیشینه توان به کار گرفته می شوند تا حداکثر انرژی را از باد استخراج بكنند، چالش برانگیز خواهد بود. برای حالتی كه سرعت باد كمتر از سرعت نامی باشد تحقیقات و استراتژیها به دو دسته هستند. در گروه اول، توربینهای باد سرعت متغیر در شرایط بدون بار کار میکنند تا مقداری حاشیه توان اکتیو داشته باشند و در مواقع پشتیبانی موقت فرکانس<sup>۰</sup> (TFS) سیستم بتوان از آن استفاده کرد [۸،۹]. اگرچه این روشها باعث ذخیره توان الکتریکی و پشتیبانی مناسب فرکانس در هنگام نیاز هستند ولی در شرایط بهرهبرداری عادی، بدون بار کارکردن توربین بادی ضررهای مالی برای صاحبان مزارع بادی را به همراه خواهد داشت که مطلوب نیست. در گروه دوم، در سرعتهای باد کمتر از مقدار نامی، توربینهای باد از طریق حالت کنترل ردیابی نقطه بیشینه توان، بیشترین مقدار توان را از باد استخراج کرده و بار را تامین میکنند. بنابراین هیچ ضرری در درآمد و کارایی مزارع باد در شرایط بهرهبرداری عادی ندارند و در شرایط بروز اختلال نیز با آزاد کردن انرژی جنبشی ذخیره شده در جرمهای دوار، شبکه را در طول یک رویداد فرکانسی برای مدت کوتاهی پشتیبانی میکنند. اما سطح حمایتی که میتوان ارائه کرد کمتر از گروه اول است و با توجه به اینکه در لحظه پشتیبانی فرکانس از حالت کنترلی ردیابی حداکثر توان خارج میگردند چالشهایی را به همراه خواهد داشت. در زمان وقوع اختلال در تولید شبکه و هنگامیکه توربین باد بخواهد از فرکانس شبکه پشتیبانی موقت بکند مقدار مرجع توان از حالت کنترلی حداکثر توان خارج می گردد و یک توان جدید اضافی<sup>۱۰</sup> که با (<sup>۸</sup>) تعریف شده است و بیان کننده مقدار انرژی جنبشی قابل آزاد شدن است، به عنوان مرجع توان قرار مي گيرد. لذا سرعت روتور متناظر با اين توان جديد اضافي، كاهش خواهد يافت. پس از چند ثانیه که پشتیبانی فرکانس شبکه به پایان میرسد بایستی این مقدار توان اضافه شده صفر گردد و متناظر با آن سرعت روتور افزایش یابد تا به نقطه عملکرد اولیه در حالت ردیابی حداکثر توان و به قبل از وقوع اختلال بازگردد [۱۰،۱۱]. چالشهای موجود این است که اگر مقدار مرجع توان جدید اضافی خیلی زیاد باشد، باعث افت بیش از حد سرعت روتور توربین می گردد و فرآیند بازیابی سرعت روتور را دچار چالش می کند لذا باید فرآیند بازیابی سرعت روتور در مدت زمان بیشتری

صورت گیرد چرا که اگر در مدت زمان کوتاهتری سرعت روتور به نقطه اولیه بازگردد منجر به افت دومی در فرکانس شبکه خواهد شد و اگر مقدار مرجع توان جدید اضافی کمتری در نظر گرفته شود منجر به پشتیبانی کمتری از فرکانس شبکه خواهد شد و قادر نخواهد بود که فرکانس را در سطح بالاتری حفظ کند [۱۲]. برای رفع چالشهای ذکر شده و پشتیبانی موقت از فرکانس سیستم توسط توربینهای باد، نویسندگان پیشنهاداتی را ارائه دادهاند. در مرجع [۱۳] یک طرح کنترل اینرسی پایدار با استفاده از بهرههای تطبیقی برای مزارع باد مبتنی بر ژنراتور القایی دوسو تغذیه ( (DFIG) پیشنهاد می کند و طرح خود را با طرحهای مزارع باد کوچک و بزرگ با بهره ثابت مقایسه میکند و موثر بودن طرح خود در بهبود سطح حداقل فرکانس را اثبات مي كند اما نحوه بازيابي سرعت روتور را ذكر نمي كند. در مرجع [۱۴] تنظيم فركانس در مزرعه باد با استفاده از اينرسي متغير با زمان و کنترلهای افتی صورت می گیرد و بهرهها براساس زمان واکنش فرکانس مورد نظر تعیین می شوند. در مرجعهای [۱۵] و [۱۶] نیز طرحهای پیشنهادی بر اساس طراحی بهره برای حلقههای کنترلی اضافی نرخ تغییر فرکانس برای اطمینان از عملکرد پایدار توربینهای باد متمرکز شدهاند ولی در طرحهای ذکر شده استراتژی بازیابی سرعت روتور و همچنین بهبود سطح حداقل فرکانس نزدیک به فرکانس نشست تحت سرعتهای باد بالا و متوسط ذکر نشده است و یا بازیابی سرعت روتور در مدت زمان خیلی طولانی تر اتفاق می افتد. گروه دیگری از مقالات بر بازیابی سرعت روتور تمرکز کردهاند بطوریکه بازیابی سرعت روتور سریع و در بازه زمانی ۳۰ تا ۲۰ ثانیه اتفاق میافتد ولی چالش اصلی آنها در لحظه شروع بازیابی و جلوگیری از ایجاد افت دوم در فرکانس سیستم است. در مرجع [۱۲] برای تشخیص لحظه افت دوم فرکانس<sup>۱۲</sup> (FSD) از نرخ تغییرات توان اکتیو و نرخ تغییرات سرعت روتور استفاده شده و برای جلوگیری از کاهش ناگهانی توان اکتیو پس از اتمام دوره پشتیبانی فرکانس از روش مربع استفاده شده و پارامترهای این روش از منحنی ردیابی نقطه بیشینه توان تعیین میشوند. در مرجع [۱۷] یک مشخصه افتی متغیر با زمان جهت تبادل هموار توان الکتریکی بین توربینهای باد و شبکه پیشنهاد شده و برای کاهش افت دوم فرکانس هنگام بازیابی سرعت روتور و برگشت به منحنی ردیابی نقطه بیشینه توان، توربینهای مزرعه باد را دستهبندی کرده و بازیابی سرعت توربینها را به صورت تک مرحله و چند مرحلهای طبق مشخصه افتی بررسی کرده است و نشان داده است که بازیابی سرعت توربینهای دستهبندی شده با فواصل زمانی معین باعث کاهش افت دوم در فرکانس شده است. در مرجع [۱۸] برای پشتیبانی موقت از فرکانس، یک مرجع توان ثابت جدید و از پیش تعیین شده اعمال می گردد و با توجه به سطح نفوذ قدرت باد<sup>۱۳</sup> (WPPL) باید تنظیم گردد. در این طرح برای بازیابی سرعت روتور و برگشت به نقطه کار منحنى بيشينه توان به محض برابر شدن توان الكتريكي با توان مكانيكي از طريق اعمال يك بازه زماني اين كار صورت مي-گیرد. چالش این طرح این است که اگر بازه زمانی کوچک باشد بازیابی سرعت روتور، سریع خواهد بود ولی میتواند باعث افت فرکانس دوم تشدید آن گردد. و اگر بازه زمانی بزرگ انتخاب گردد افت دوم فرکانس خیلی کوچک را تضمین میکند اما بازیابی سرعت روتور خیلی کند و طولانی خواهد شد. در مرجع [۱۹] یک طرح مبتنی بر حد گشتاور<sup>۱۴</sup> در توربینهای باد مبتنی بر ژنراتور القایی دوسو تغذیه را پیشنهاد میکند که میتواند مقدار زیادی انرژی جنبشی را برای بهبود فرکانس آزاد کند. سپس توان به صورت خطی با کاهش سرعت روتور کاهش مییابد. در این طرح برای بازیابی سرعت روتور پس از اتمام دوره پشتیبانی فرکانس، مرجع توان جدید به صورت یک پله کوچک ۰/۰۳ پریونیتی سوئیچ شده و در مقدار کمتر از توان مکانیکی قرار می گیرد که باعث ایجاد یک افت دوم فرکانس کوچک می گردد و این مرجع جدید تا زمانی که به منحنی ردیابی بیشینه توان برسد حفظ میشود. با توجه به مقالههای مطرح شده و تجزیه و تحلیل بالا، این مقاله یک طرح پشتیبانی فرکانس را ارائه کرده است که مزایای هر دو گروه مقالههای فوق را دارد. بنابراین طرح پیشنهادی با توجه به حد بالای گشتاور روتور میتواند مقدار انرژی جنبشی زیادی را آزاد کرده و به فرکانس سیستم کمک بکند و در عین حال از عملکرد پایدار توربین بادی در سرعتهای متغیر باد، سطوح مختلف نفوذ نیروی باد و بازیابی سریع سرعت روتور به نقاط عملیاتی منحنی ردیابی بیشینه توان بدون ایجاد افت دومی در فرکانس سیستم اطمینان حاصل کند. با استفاده از یک بهره تطبیقی و ضرب در حلقه کنترلی تغییرات فرکانس میتوان سرعتهای مختلف باد و سطوح مختلف نفوذ باد را پوشش داد. از طرفی طراحی و محاسبه مقدار انرژی جنبشی قابل آزاد شدن جهت پشتیبانی موقت فرکانس سیستم، تابعی از دو پارامتر تغییرات فرکانس سیستم و سرعت روتور توربین باد مبتنی بر بیشینه گشتاور است.



شکل (۱): فرکانس شبکه و محدودههای عملیاتی مختلف [۲۰،۲۱] Figure (1): System frequency and different operating ranges [20,21]

سپس با همین دو پارامتر برای وادار کردن سرعت روتور به همگرا شدن به یک محدوده عملیاتی پایدار، مرجع توان کاهش می یابد تا جائی که توان الکتریکی از توان مکانیکی با یک شیب نرم و نه پلهای کمتر شده و منجر به بازیابی سریع سرعت روتور می گردد. برای پشتیبانی از فرکانس سیستم مرجع توان جدید و اضافی به خود مشخصه ردیابی بیشینه توان اضافه می شود. لذا می گردد. برای پشتیبانی موقت از فرکانس سیستم، مزایای مشخصه ردیابی نقطه بیشینه توان حفظ می گردد و در صورت تغییر در سرعت باز فرکانس ز فرکانس سیستم، مزایای مشخصه ردیابی نقطه بیشینه توان حفظ می گردد و در صورت تغییر در سرعت باد به پایداری و بهبود بیشتر سیستم، مزایای مشخصه ردیابی نقطه بیشینه توان حفظ می گردد و در صورت رد طول فرآیند پشتیبانی موقت از فرکانس سیستم، مزایای مشخصه ردیابی نقطه بیشینه توان حفظ می گردد و در صورت تغییر در سرعت باد به پایداری و بهبود بیشتر سیستم کمک می کند و نهایتا با صفر شدن مقدار توان اضافی تنها مشخصه ردیابی نقطه بیشینه از و رگشت به نقطه کار عادی توربینهای باد، سریع و بدون ایجاد افت دوم در فرکانس خواهد ماند. بنابراین اتمام پشتیبانی از فرکانس و برگشت به نقطه کار عادی توربینهای باد، سریع و بدون ایجاد افت دوم در فرکانس خواهد بود. بهطور کلی، همه تکنیکهای اینرسی و کنترل فرکانس برای ایزای ای اولیه<sup>3</sup> ( CP) شکل (۱) قرار می گیرند تا زمان کافی برای افزایش درصد گاورنر و تنظیم سوخت سایر ژنراتورهای سنکرون موجود در سیستم و به دنبال آن افزایش توان اکتیو فراهم شود. لذا باز گرداندن فرکانس به مقدار اولیه پیش از رویداد به ژنراتورهای سنکرون شبکه و حلقههای کنترلی ثانویه و برای افزایش توان اکتیو فراهم شود. لذا باز گرداندن فرکانس به مقدار اولیه پیش از رویداد به ژنراتورهای سنکرون شبکه و حلقههای کنترلی ثانویه و نوانی اورند و نهایه بستگی دارد که مورد بحث این مقاله نیست. بخش های دیگر مقاله به این ترتیب است، بخش دوم مدلسازی توربین باد فرای ژنراتور القایی اختصاص دارد. در بخش چهارم به بررسی عملکرد طرح پیشنهادی می پردازد و نهایتا بخش و کنترل ژنراتور القایی القایی اختصاص دارد. در بخش چهارم به بررسی عملکرد طرح پیشنهادی می پردازد و نهایتا بخش به به می و نتیجه گیری درباره طرح پیشنهادی می پردازد.

### ۲- مدلسازی توربین باد و کنترل ژنراتور القایی دو سو تغذیه

شکل (۲) پیکربندی یک ژنراتور القایی دوسو تغذیه و کنترل کنندههای آن که شامل دو کنترل کننده الکتریکی مبدل سمت شکل (۲) پیکربندی یک ژنراتور القایی دوسو تغذیه و کنترل کننده مکانیکی زاویه گام پره توربین را نشان می دهد. کنترل کننده شبکه<sup>۱۷</sup> (GSC) و مبدل سمت روتور<sup>۸۱</sup> (RSC) و یک کنترل کننده مکانیکی زاویه گام پره توربین را نشان می دهد. کنترل کننده مبدل سمت روتور جهت کنترل توان راکتیو تزریق شده به یک سیستم قدرت و تنظیم سرعت روتور ژنراتور القایی دوسو تغذیه مبدل سمت می دهد. کنترل کننده مکانیکی زاویه گام پره توربین را نشان می دهد. کنترل کننده مبدل سمت روتور جهت کنترل توان راکتیو تزریق شده به یک سیستم قدرت و تنظیم سرعت روتور ژنراتور القایی دوسو تغذیه برای جذب بیشینه توان و حفظ ولتاژ و فرکانس خروجی استاتور در مقدار ثابت است و کنترل کننده مبدل سمت شبکه بر کنترل ولتاژ لینک DC تمرکز دارد [۲۲]. پارامترها و متغیرهای کنترل ژنراتور القایی دوسو تغذیه به کار رفته در شکل (۲)، در جدول (۱) معرفی شدهاند.



سکل (۱): پیکربندی عمومی ژنرانور الفایی دوسو تعدید Figure (2): General configuration of DFIG

Table (1): F	Parameters	s and varia	ables
و متغيرها	ارامترها و	دول (۱): پ	جد

نماد	پارامتر
$v_s$ , $v_g$	ولتاژ اندازه گیری شده سمت استاتور و روتور
$i_r, i_g$	جریان اندازه گیری شده سمت شبکه و روتور
$\mathbf{i_{rd}}^{*}, \mathbf{i_{rq}}^{*}$	جریانهای مرجع روتور در مختصات dq
${\rm I_{gd}}^{*}$ , ${i_{gq}}^{*}$	جریانهای مرجع سمت شبکه در مختصات dq
β	زاویه گام پرههای توربین
$V_{dc,}{V_{dc}}^*$	ولتاژ لینک dc اندازه گیری شده و ولتاژ لینک dc مرجع
Q*	توان راكتيو مرجع

به این ترتیب همان طور که در مرجعهای [۲۳] و [۲۴] مطرح شده است، P<sub>m</sub> توان مکانیکی جذب شده توسط توربین بادی، به شرح ذیل خواهد بود:

$$P_{\rm m} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_{\rm w}^3 c_{\rm p} \left( \lambda, \beta \right)$$

$$(1)$$

$$V_{\rm m} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_{\rm w}^3 c_{\rm p} \left( \lambda, \beta \right)$$

$$(1)$$

$$V_{\rm m} = C_{\rm p} \left( \lambda, \alpha \right)^{1/3} \left( \lambda, \alpha \right)$$

$$c_{p}(\lambda,\beta) = 0.645 \times \left(0.00912\lambda + \frac{-5 - 0.4(2.5 + \beta) + 116\lambda_{i}}{e^{2i\lambda_{i}}}\right)$$
(7)

$$\lambda_{i} = \frac{1}{\lambda + 0.08(2.5 + \beta)} - \frac{1}{1 + (2.5 + \beta)^{3}}$$
(7)

سیستم شفت توربین بادی ژنراتور القایی دوسو تغذیه به صورت یکپارچه و یا به صورت دو شفت سرعت بالا و سرعت پایین که توسط جعبه دنده به هم اتصال داده شدهاند، است. در این مقاله برای نشان دادن دینامیک مکانیکی بین توربین و ژنراتور، از مدل شفت دو جرمی در مرجع [۲۷] استفاده شده است. دینامیک بین گشتاور مکانیکی Tm و گشتاور شفت کم سرعت Jl از رابطه (۴) تعیین می گردد که در آن Jt ممان اینرسی توربین و w سرعت روتور توربین را نشان می دهد:

$$J_{t} \frac{d\omega_{t}}{dt} = T_{m} - T_{ls}$$
(f)

دینامیک بین گشتاور شفت سرعت بالا T<sub>hs</sub> او گشتاور الکترومغناطیسی ژنراتور T<sub>em</sub> به صورت زیر بیان می شود:  
(۵)  
$$J_g \frac{d\omega_r}{dt} = T_{hs} - T_{em}$$
  
 $J_g a doi اینرسی ژنراتور القایی و w سرعت روتور ژنراتور القایی هستند. Tls ممان اینرسی ژنراتور القایی و w سرعت آورد:(۶)(۶)که در آن K، B، او  $H_s$  ( $\theta_t - \theta_{ls}$ ) + B( $\omega_t - \omega_{ls}$ )  
که در آن K، B، او  $H_s$  ( $\theta_t - \theta_{ls}$ ) + B( $\omega_t - \omega_{ls}$ )  
(۶)  
 $L_g = K(\theta_t - \theta_{ls}) + B(\omega_t - \omega_{ls})$   
(۲)  
 $N = \frac{T_{ls}}{T_{hs}} = \frac{\omega_r}{\omega_{ls}}$$ 

تنظیم سرعت روتور ژنراتور القایی دوسو تغذیه برای جذب بیشینه توان P<sub>MPPT</sub> با رابطه (۸) نشان داده شده است [۲۴،۲۸]:  $P_{MPPT} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 (\frac{\omega_r R}{\lambda_r})^3 c_{p,max} = k_g \omega_r^3$ (۸)

که در این مقاله،  $C_{P,max}$  حداکثر مقدار  $C_P$  برای  $\beta$  برابر صفر درجه است و در مقدار ۵/۰ تنظیم شده است.  $C_{P,max}$  مقدار بهینه  $\lambda$  است و در مقدار مقدار مقدار ۵/۰ تنظیم شده است. افزایش سریع و بیش از حد توان خروجی ممکن است منجر به تنشیم مکانیکی یک توربین باد شود. برای جلوگیری از این امر، حد توان و حد گشتاور به ترتیب در مقدار ۱/۱ و ۱/۰۷ پریونیت تنظیم شده است [۱۹].

٣- طرح پیشنهادی پشتیبانی موقت فرکانس سیستم توسط مزارع باد مبتنی بر ژنراتور القایی دوسو تغذیه wr برای پشتیبانی موقت فرکانس، طرح یک که با schemel مشخص شده است مقدار مرجع توان جدید اضافی را در دامنه wr ورای پستیبانی موقت فرکانس، طرح یک که با ent مشخص شده است مقدار مرجع توان جدید اضافی را در دامنه wr تعریف می کند. پس از تشخیص یک رویداد همان طور که در شکل (۳) نشان داده شده است. مقدار توان آزاد شده توربین از P<sub>1</sub>
 که روی منحنی ردیابی نقطه بیشینه توان و در واقع حداکثر توان استخراج شده از باد است به (wime) افزایش می بابد که توان ناشی از حداکثر گشتاور، بیشترین انرژی جنبشی آزاد می گردد توان ناشی از حداکثر گشتاور در wime به حداکثر گشتاور، بیشترین انرژی جنبشی آزاد می گردد بنابراین به طور قابل توجهی سطح حداقل فرکانس را می تواند به بود بخشد. پس از آن مقدار توان آزاد شده توربین مطابق رابطه بنابراین به طور قابل توجهی سطح حداقل فرکانس را می تواند به می سرعت روتور، توان الکتریکی را مجبور می کند تا در (۹) و با توجه به عداکثر که سرعت روتور، توان الکتریکی را مجبور می کرد

$$P_{\text{TFS}} = \frac{P_{\text{Tlim}} \left(\omega_0\right) - P_{\text{MPPT}} \left(\omega_{\text{min}}\right)}{\omega_0 - \omega_{\text{min}}} \left(\omega_r - \omega_{\text{min}}\right) + P_{\text{MPPT}} \left(\omega_{\text{min}}\right)$$
(9)

که در آن  $P_{TFS}$  مقدار توان آزاد شده توربین باد برای پشتیبانی موقت فرکانس، ( $m_{min}$ ) مقدار توان قابل استحصال از منحنی ردیابی نقطه بیشینه توان در حداقل سرعت روتور است. در این طرح هنگامی که سرعت روتور به  $\omega_c$  همگرا گردد، همان طور که در شکل (۳) دیده می شود فوراً مقدار ثابت ۲۰۳۳ پریونیت از مرجع  $\omega_{CO}$  کاهش داده می شود تا شروع به بازیابی r $\omega$  کند. این مقدار مرجع جدید تا زمانی که P<sub>TFS</sub> به منحنی ردیابی نقطه بیشینه توان برسد حفظ می شود. در نقطه D که در شکل (۳) مشخص شده است، مجددا مرجع توان به منحنی ردیابی نقطه بیشینه توان برمی گردد و سپس سرعت روتور به  $\omega_0$  بازگردانده می شود. چالش این طرح در این است که طول دوره کاهش سرعت روتور برای سرعت اولیه  $\omega_0$  در سرعتهای به  $\omega_0$  بازگردانده می شود. چالش این طرح در این است که طول دوره کاهش سرعت روتور برای سرعت اولیه  $\omega_0$  در سرعتهای باد متوسط و پایین، نرخ تغییرات توان (از نقطه B تا نقطه C) ممکن است مقدار زیادی داشته باشد. بنابراین می تواند باعث ایجاد یک افت قابل توجه و با تاخیر در فرکانس شود. دلیل این کار به شرح زیر است [1۸]

$$\frac{dP_{\text{TFS}}}{dt} = \frac{dP_{\text{TFS}}}{d\omega_{\text{r}}} \times \frac{d\omega_{\text{r}}}{dt}$$
(1.)

dP<sub>TFS</sub>/dt به شیب قسمت BC در شکل (۳) اشاره دارد، dwr/dt متناسب با طول قسمت AB در شکل (۳) است. همانطور که در شکلهای (۳) و (۴) ملاحظه میگردد با کاهش سرعت اولیه، نقطه B در امتداد خط حد توان P<sub>Tlim</sub> به سمت چپ حرکت میکند، اما مقدار بیشینه توان در حداقل سرعت روتور ثابت باقی میماند.



شکل (۴): مشخصات توان و محدودیتهای مدل ژنراتور القایی دوسو تغذیه Figure (4): Power specifications and limitations of the DFIG model

در نتیجه، نرخ dP<sub>TFS</sub>/do افزایش مییابد. علاوه بر این، dωr/dt در نقطه B برای سرعت اولیه کوچک، بیشتر از سرعت اولیه بزرگ است یعنی نرخ تغییرات سرعت هرچقدر سرعت اولیه ωω به سمت چپ شکل حرکت کند بیشتر است. بنابراین dP<sub>TFS</sub>/dt در نقطه B که حداکثر نرخ کاهش<sup>77</sup> در طول دوره کاهش سرعت است برای سرعتهای اولیه کوچک بسیار بیشتر از سرعت-های اولیه بزرگ است. در نتیجه یک dP<sub>TFS</sub>/dt بزرگ برای مدت طولانی تری باقی میماند. بنابراین، سایر ژنراتورهای سنکرون موجود در سیستم قدرت باید توان بیشتری را در مدت زمان بیشتری برای جبران کاهش توان خروجی یک ژنراتور القایی دوسو فرکانس با تاخیر اما قابل توجه در سیستم قدرت میشود. این نوع کنترل مزرعه باد بیشتر کاهش مییابد و باعث یک افت فرکانس با تاخیر اما قابل توجه در سیستم قدرت میشود. این پدیده برای نفوذ بیشتر مزارع باد شدیدتر میشود. برای جلوگیری از این امر، طرح پیشنهادی به سادگی در هنگام پشتیبانی از فرکانس سیستم، توان مرجع (P<sub>TFS</sub>) که با ضریب انحراف فرکانس تعدیل شده است را مطابق با رابطه (۱۱) پیشنهاد میکند. در اینصورت بلافاصله پس از شناسایی یک رویداد در مرجع توان یک مقدار اضافی P<sub>TF</sub> میشود که ترکیبی از سرعت روتور و مقدار اختلاف فرکانس آل می میاد در یک بهره تطبیقی که سرعت روتور و سطح نفوذهای مختلف باد در آن در نظر گرفته شده است ضرب میگردد. این کار در یک بهره تطبیقی که سرعت روتور و سطح نفوذهای مختلف باد در آن در نظر گرفته شده است ضرب میگردد. این کار باعث میگردد توان اضافی ایجاد شده به طور یکنواخت نسبت به سرعت اولیه روتور و با توجه به مقادیر مختلف نفوذ باد افزایش

که در آن fnom فرکانس نامی و fsys فرکانس اندازه گیری سیستم است. بنابراین با توجه به مشخصه ردیابی نقطه بیشینه توان موجود در شکل (۳)، مقدار توان اضافی که با مرجع توان جمع می گردد برای سرعتهای نزدیک به حداقل، کمتر خواهد بود. لذا جلوگیری از افت دوم در فرکانس سیستم تضمین خواهد شد. از طرفی برای بازیابی سرعت روتور، بر خلاف طرح شماره یک، توان خروجی به صورت آنی کاهش نمییابد بلکه به صورت نرم و با شیب ملایم این کار صورت می گیرد. زیرا کاهش آنی خروجی بیش از ۲۰/۳ پریونیت باعث افت دومی در فرکانس سیستم میشود و در نتیجه بر تثبیت فرکانس تأثیر منفی می-گذارد. با توجه به اینکه سرعت روتور سطح انرژی قابل استحصال در یک توربین باد را نشان میدهد، با کاهش می ابد و توان طی زمان پشتیبانی از فرکانس سیستم، مرجع توان جدید که شامل جملات سرعت روتور است، به تدریج کاهش می یابد و توان

 $\Delta P = (f_{nom} - f_{sys}) \times Adaptive gain \times P_{TES}$ 

الکتریکی خروجی از توربین باد را کاهش داده و مجبور به پیروی از توان مکانیکی می کند تا جایی که توان الکتریکی خروجی توربین باد با توان مکانیکی ورودی برابر گردد. بنابراین در این نقطه عملیاتی همان طور که در شکل (۵) نشان داده شده است توان الکتریکی خروجی توربین باد کمتر از توان با کنترل ردیابی نقطه بیشینه توان خواهد بود. توضیحات فوق به این معنی است که در طول پشتیبانی از فرکانس، مرجع توان با کاهش سرعت روتور از نقطه A به نقطه C کاهش می یابد. این امر باعث می شود که توان الکتریکی توربین باد به طور خودکار در امتداد منحنی DB کاهش یافته و در نقطه B که مقدار کمی پایین تر از نقطه A کنترل ردیابی نقطه بیشینه توان است، تثبیت شود.

شکل (۵) نحوه پشتیبانی از فرکانس در طرح پیشنهادی را نشان میدهد. فاصله بین نقاط عملیاتی BC برابر با اثر بهره تطبیقی و انحراف فرکانس است و همچنین استفاده از فرکانس به عنوان ورودی بازخورد می تواند طراحی پشتیبانی از فرکانس را سادهتر کند و بهطور خودکار با رویدادهای مختلف فرکانس و شرایط سیستم سازگار شود. ضمن اینکه استفاده از پارامترهای دارای سرعت روتور، هم باعث می گردد که توربین باد به طور خودکار و هموار بین نقاط عملیات منحنی ردیابی نقطه بیشینه توان و عمليات يشتيباني فركانس جابهجا شود و از طرفي مزاياي كنترل منحني رديابي نقطه بيشينه توان را به همراه خواهد داشت که می تواند تغییرات سرعت باد را در طول کنترل فرکانس تطبیق دهد و در واقع در طول مدت پشتیبانی موقت از فرکانس سیستم از حالت منحنی ردیابی نقطه بیشینه توان خارج نخواهد شد و تنها یک مرجع توان اضافی با آن جمع خواهد شد و با گذشت زمان و کوچک شدن انحراف فرکانس تا به صفر رسیدن آن باعث می گردد که مرجع توان با شیب نرم و ملایم کاهش یابد. بنابراین توان الکتریکی خروجی را بهصورت تدریجی و هموار در یک مقدار کمتر از توان مکانیکی ورودی توربین باد قرار میدهد و باعث شروع بازیابی سرعت روتور می گردد. با افزایش سرعت روتور توان نیز افزایش می یابد در حالی که با افزایش فركانس نامی، Δf نهایتا به صفر می سد. صفر شدن Δf باعث حذف جمله اول رابطه P<sub>TFS</sub> می گردد و فقط جمله K<sub>g</sub>@r<sup>3</sup> مربوط به منحنی ردیابی بیشینه توان باقی خواهد ماند که عملا در این لحظه پشتیبانی از فرکانس به پایان رسیده و مقدار توان اضافی موجود در مرجع نیز صفر شده است. بنابراین در این لحظه توربین باد در حالت ردیابی نقطه بیشینه توان و نقطه قبل از وقوع رویداد کار می کند. طرح پیشنهادی علاوه بر بهبود سطح حداقل فرکانس، برای همه سرعتهای مختلف باد و سطوح نفوذ بالا، متوسط و پایین، میتواند بازیابی نرم و سریع سرعت روتور را بدون ایجاد افت دومی در فرکانس، تضمین کند. بنابراین کنترل-کننده پیشنهادی به شکل (۶) خواهد بود.







1-۳- نحوه عملكرد بهره تطبيقي

بهره تطبیقی متاثر از اختلاف فرکانس، سرعت روتور و مقادیر مختلف WPPL است که بهصورت رابطه (۱۲) تعریف شده است.  $\Delta f ext{loop} = ext{adaptive gain k}(\omega_r, WPPL) \times \Delta f = (\omega_0^n - \omega_{rmin}^n) + \Delta f$  (۱۲)  $\Delta s$  در آن n عددی است که با WPPL رابطه عکس دارد و مطابق شکل (۷) مشخص می گردد.  $\Delta f$  نیز مقدار انحراف فرکانس سیستم از مقدار نامی است. X بهره تطبیقی است. بهره تطبیقی شامل مقادیر سطوح مختلف نفوذ باد و با در نظر گرفتن سرعت نامی باد و وجود عامل سرعت روتور برای دستیابی به بهبود FN تحت سرعتهای مختلف نفوذ باد و با در نظر گرفتن سرعت سطح نفود باد را می توان با استفاده از توابع خطی یا غیرخطی بر اساس مقادیر گسسته نفوذ باد حاصل از شبیه سازی به دست آورد که در این مقاله از رابطه فوق استفاده شده و در هر شبیه سازی، سطح نفوذ باد ثابت است و مقدار آن در یک رویداد فرکانس تغییر نخواهد کرد و بدترین رویداد فرکانس تحت سرعت باد نامی شبیه سازی می شود تا بهترین اثر را بر سطح حداقل فرکانس بگذارد و آن را تا نزدیکی فرکانس نشست افزایش و بهبود بخشد.

با افزایش سطح نفوذ باد، مقدار n کاهش می یابد در غیر این صورت ممکن است یک FN با تاخیر رخ دهد. دلیل این امر آن است که توربینهای باد برای جبران سریع خروجی کم ژنراتورهای سنکرون و حفظ فرکانس در چند ثانیه اول یک رویداد فرکانس استفاده می شوند، بنابراین در یک سطح نفوذ باد بالاتر تعداد کل توربینهای باد بیشتر خواهد بود و خروجی سریع انرژی مورد نیاز از هر توربین باد کمتر خواهد بود. بنابراین با افزایش سطح نفوذ باد مقدار ΔP کاهش خواهد یافت و مقدار n که وابسته به سطح نفوذ باد است کاهش می یابد. از طرفی عامل سرعت روتور ۲۵ همان طور که در شکل (۸) دیده می شود نشان می دهد که در سرعت باد بالاتر، نسبت تولید توان از توربین باد به کل تولید توان یک سیستم بیشتر است و باعث می شود نشان می دهد که در سرعت باد بالاتر، نسبت تولید توان از توربین باد به کل تولید توان یک سیستم بیشتر است و باعث می شود نرخ اضافی و انرژی جنبشی بیشتری آزاد می شود که برای بهبود سریع FN، به بازده بیشتری نیاز دارد. هنگامی که سرعت باد به متوسط کاهش می یابد، مقدار انرژی جنبشی کمتری در روتور ذخیره می شود، بنابراین یک افزایش کمتری در توان اضافی مورصط کاهش می یابد، مقدار انرژی جنبشی کمتری در روتور نخیره می شود، بنابراین یک افزایش کمتری در توان اضافی مورصط کاهش می یابد، مقدار انرژی جنبشی کمتری در روتور ذخیره می شود، بنابراین یک افزایش کمتری در توان اضافی مورت افزایش متوالی، از کاهش بیش از حد سرعت روتور باوگیری شود. دین کار کمک می کند تا حتی در صورت وقوع رویداد فرکانس متوالی، از کاهش بیش از حد سرعت روتور جلوگیری شود. نکته دیگر آن که در طی مدت زمان پشتیبانی فرکانس در مورت افزایش یا کاهش سرعت باد به صورت خواه راین تغییرات اعمال خواهند شد و به این طریق پایداری توربین باد در طی فرآیند پشتیبانی از فرکانس تضمین خواهد شد. شکلهای (Y) و (۸) مقاد شد و به این طریق پایداری توربین تاثیر م





# ۴- بررسی عملکرد طرح پیشنهادی

۱–۴– سیستم آزمون

برای بررسی عملکرد و تست طرح پیشنهادی از یک سیستم تست که در شکل (۹) دیده می شود، استفاده شده است. شبیه-سازی سیستم آزمون طرح پیشنهادی در نرمافزار متلب انجام شده است. سیستم آزمون از یک مزرعه باد و از ۶ ژنراتور سنکرون، بار استاتیکی با ۷۳ مگاوار و ۲۲۰ مگاوات و بارهای موتوری که با موتور آسنکرون ۳۳۰ مگاوات مشخص شدهاند، تشکیل شده است. ژنراتورهای سنکرون ۱ و ۲ با ظرفیت ۱۵۰ مگاولت آمپر، ژنراتورهای سنکرون ۳ و ۴ با ظرفیت ۲۰۰ مگاوولت آمپر و ژنراتورهای سنکرون ۵ و ۶ با ظرفیت ۱۰۰ مگاولت آمپر هستند. ثابت زمانی اینرسی و مشخصات ژنراتورهای سنکرون همانطور که در مرجع [۱۹] آمده تنظیم شده است. سایر پارامترهای مربوط به توربین بادی و ژنراتور القایی دوسو تغذیه (DFIG) مورد نیاز برای شبیهسازی در جدول شماره (۲) آمده است.

۲-۴- حالتهای مختلف شبیهسازی

این بخش به بررسی عملکرد طرح پیشنهادی تحت شرایط و سناریوهای مختلف نفوذ و سرعت باد میپردازد و در مجموع چهار حالت متفاوت به شرح ذیل مورد بررسی قرار میگیرند. حالت اول: نفوذ باد برابر با ۲۰ درصد و سرعت باد ۱۲ متر بر ثانیه حالت دوم: نفوذ باد برابر با ۲۰ درصد و سرعت باد ۱۱ متر بر ثانیه



Figure (9): The test system

Table (2): Specifications of a DFIG wind turbine جدول (۲): مشخصات یک عدد توربین باد ژنراتور القایی دوسو تغذیه

مقادير	پارامترهای توربین باد و ژنراتور القایی دوسو تغذیه
۱/۵ مگاولت–آمپر	ظرفیت نامی ژنراتور
۵۷۵/۰کیلوولت	ولتاژ استاتور
۶۰ هر تز	فركانس نامى
۰/۲۳ پريونيت/ ۱۶ ۰/۰ پريونيت	مقاومت استاتور /روتور
۱۸/۰ پر بونبت/ ۱۶/۰ پر بونیت	اندوكتانس نشتى استاتور/روتور
۲/۹ پريونيت	اندوكتانس مغناطيسي
۴/۳۲	ثابت اينرسي توربين
• /۶٨٣	ثابت اينرسى ژنراتور القايى دوسو تغديه
۳۰متربر ثانیه/۱۲متربر ثانیه/۴متربر ثانیه	حداکثر سرعت/سرعت قطع/سرعت شروع MPPT
•/• )	ثابت زمانی گام پرہ
۱/۲ پريونيت / ۲/۰ پريونيت	حداكثر/حداقل سرعت روتور

حالت سوم: نفوذ باد برابر با ۵۰ درصد و سرعت باد ۱۲ متر بر ثانیه حالت چهارم: نفوذ باد برابر با ۵۰ درصد و سرعت باد ۱۱ متر بر ثانیه شبیهسازی شرایط فوق در سیستم آزمون شکل (۹) به نحوی است که در حالتهای اول و دوم با خارج شدن ژنراتور سنکرون شماره ۴ در ثانیه ۴۰ عملکرد مزرعه باد مورد تحلیل و بررسی قرار میگیرد و برای حالتهای ۳ و ۴ در ثانیه ۵۰ ژنراتور به مگاواتی شماره ۴ از مدار خارج میگردد و عملکرد مزرعه باد مورد تحلیل و بررسی قرار میگیرد و برای مالتهای ۲ می می د ذیل آمده است.

حالت اول- نفوذ باد برابر با ۲۰ درصد و سرعت باد ۱۲ متر بر ثانیه: در حالت اول با مقدار نفوذ باد ۲۰ درصد و سرعت باد ۱۲ متر بر ثانیه، در ثانیه ۴۰ بخشی از تولید از مدار خارج شده است و پشتیبانی از فرکانس توسط مزرعه باد شروع شده است. نتایج شبیهسازی حالت اول توان تولیدی مزرعه باد، سرعت روتور و فرکانس سیستم به ترتیب در شکلهای (۱۰)، (۱۱) و (۱۱) آمده است. انرژی قابل آزاد شدن در طرح پیشنهادی به مقدار ۲۲۸ درصد کمتر از طرح یک است و ΔΔ طرح پیشنهادی به مقدار ۲۲۸ درصد کمتر از طرح یک است و ΔΔ طرح پیشنهادی (۱۲) آمده است. انرژی قابل آزاد شدن در طرح پیشنهادی به مقدار ۲۲۸ «رسو کمتر از طرح یک است و ΔΔ طرح پیشنهادی طرح پیشنهادی به مقدار ۲۲۸ «رسو کمتر از طرح یک است و ΔΔ طرح پیشنهادی طرح پیشنهادی و عیشنهادی باد برا با ۲۹۴۴ « یک سخ با این وجود ۲۸ در (۲۱) مده است. انرژی قابل آزاد شدن در طرح پیشنهادی به مقدار ۲۲۸ « بریونیت است اما با این وجود ۲۸ در طرح پیشنهادی طرح پیشنهادی وضعیت است اما با این وجود ۲۸ در طرح پیشنهادی طرح پیشنهادی وضعیت است و بهطور قابل توجهی کمتر از Δ طرح یک که برابر با ۲۹۴۴ « یک ده است. در طرح پیشنهادی طرح پیشنهادی طرح پیشنهادی وضعیت است اما با این وجود ۲۰ در مرح پیشنهادی وضعیت است و به اندازه ۲۰۱۰ « در نام و مرد یک در شرع با ۲۸ مرد با ۲۸ مرد بر عرب آله مرد یک دوم است. در طرح پیشنهادی مراح این می طرح یک می تواند و سرعت باد ۲۰۱۰ « در نام و بید نوان باد می طرح یک می باز با ۲۸ مرد یک در زاتورهای سنگرون فرصت بیشتری برای جبران تقاضای مازاد نسبت به طرح یک محتر باشد. این افزایش زمان سب می شود ژنراتورهای سنگرون فرصت بیشتری برای جبران تقاضای مازاد نسبت به طرح یک سرعت روتور تا ۲۸۶ پریونیت کاهش یافته است ولی در طرح پیشنهادی با کهش کمتری نسبت به طرح یک مواجه نمده است. در طرح یک سرعت روتور تا ۲۸۶ پریونیت کاهش یافته است ولی در طرح پیشنهادی حداقل سرع شروع شده است. از طرفی بازیابی شده است. در طرح یک در تر گرفته و تا ۲۸۶ پریونیت کاهش یافته و در ثانیه ۲۹ بازیابی سرعت روتور شروع شده است. از طرفی بازیابی سرعت روتور به و در بار گانی کار می ولی در مرح پیشنهادی حدان ای مروع تروتو مرد مردی بازیابی سرعت روتور مود ورد. باز طرح یک می ولی می مرد تر مرد و غیر پلهای و در مدت زمان حدود ۵ ثانیه کاهش توان الخر می مرونان از طرفی در می می ورد. مر می ول د





شکل (۱۱): سرعت رو تور در حالت اول Figure (11): The rotor speed of wind turbine in case 1



Figure (12): System frequency in case1

ضمنا با مراجعه به شکل (۱۰) ملاحظه می گردد که در طرح پیشنهادی در تمام مدت آزاد شدن انرژی جنبشی توربین باد و پشتیبانی از فرکانس و همچنین مرحله بازیابی سرعت روتور اثر MPPT حفظ شده و تغییرات سرعت باد مستقیما بر روی توان خروجی توربین باد اثر میگذارد و هیچ لحظهای توربین باد خارج از حالت MPPT کار نمی کند برخلاف طرح یک که در طی فرآیند پشتیبانی موقت فرکانس از حالت MPPT خارج می گردد.

حالت دوم- نفوذ باد برابر با ۲۰ درصد و سرعت باد ۱۱ متر بر ثانیه: در حالت دوم مقدار نفوذ باد تغییر نکرده و فقط سرعت باد کمتر شده است. در این حالت خاصیت MPPT بیشتر خود را نمایان خواهد کرد زیرا در حالتی که سرعت باد بیشتر باشد توربین باد با سرعت نامی خود کار میکند و توان قابل استحصال از توربین ثابت و در حداکثر مقدار خود است ولی برای سرعتهای کمتر از سرعت نامی توربین باد طبق منحنی MPPT کار میکند. بنابراین در ثانیه ۴۰ که لحظه قطع بخشی از تولید و پشتیبانی از فرکانس است، طرح پیشنهادی به اندازه یک مگاوات از طرح یک کمتر است و ΔΔ مربوط به طرح پیشنهادی برابر با ۲۶۱/۱۰ پریونیت و کمتر از طرح یک که برابر با ۱۳۳۷/۰ پریونیت است. مشاهده میشود که سطح حداقل فرکانس در هر دو برابر و تا ۸/۸۱ هرتز کاهش یافته است. شکلهای (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) نتایج شبیهسازی حالت دوم هستند. کاهش یافته و برافصله شروع به افزایش میکند. دلیل این اتفاق کاهش اثر ΔΓ و از ثانیه ۶۳ تائنیه ۶۷) با شیب کند کاهش یافته و بلافاصله شروع به افزایش میکند. دلیل این اتفاق کاهش اثر ΔΓ و افزایش اثر می در عالیه ۲۹







با افزایش سرعت توان الکتریکی افزایش یافته و Δf کوچکتر میشود تا جایی که صفر می گردد و P<sub>TFS</sub> را صفر می کند و تنها اثر و خاصیت MPPT باقی خواهد ماند. بنابراین بدون انجام سوئیچینگ، پشتیبانی از فرکانس همراه با MPPT صورت خواهد گرفت و این از مزیتهای طرح پیشنهادی نسبت به کلیه طرحهای مرسوم و طرح یک است.ا ز شکل (۱۴) ملاحظه می گردد که سرعت روتور در طرح پیشنهادی تا مقدار ۰/۹۲۴۸ پریونیت در ثانیه ۶۳ کاهش یافته و در مدت زمان کمتری به مقدار اولیه خود بازمی گردد و نشان از عملکرد بهتر طرح پیشنهادی در مقایسه با طرح یک که حداقل سرعت روتور در ثانیه ۵۸ تا

حالت سوم-نفوذ باد برابر با ۵۰ درصد و سرعت باد ۱۲ متر بر ثانیه: در این حالت سرعت باد ثابت مانده است ولی نفوذ باد افزایش یافته است که طبق نمودار n مربوط به بهره تطبیقی، افزایش نفوذ باد به منزله کاهش n و در نتیجه مقدار Δ کمتر خواهد بود. پس در طرح پیشنهادی Δ مقدار کمتری نسبت به حالتهای اول و دوم خواهد بود. در این حالت برای طرح پیشنهادی مقدار Δ برابر با ۲۰/۹ پریونیت و نسبت به طرح یک که ۱۳۳۲ پریونیت است به مقدار قابل توجهی کمتر است. شکلهای (۱۶)، (۱۷) و (۱۸) نتایج شبیهسازی حالت سوم هستند. در ثانیه ۵۰ بخشی از تولید از مدار خارج میشود لذا طرح پیشنهادی در جهت پشتیبانی فرکانس با توجه به Δ مقدار انرژی جنبشی که آزاد میگردد به میزان ۵۰/۰ درصد که برابر با ۳ مگاوات کمتر از طرح یک است ولی همانطور که در شکل (۱۸) ملاحظه میشود FN در هر دو طرح پیشنهادی و طرح یک با هم برابر و مقدار ۲۹/۷ هرتز است. همچنین از شکل (۱۷) ملاحظه می شود که علاوه بر کاهش نرم و با شیب کند توان الکتریکی جهت بازیابی سرعت روتور، مقدار توان الکتریکی کاهش یافته نسبت به طرح یک کمتر است و این توان، ۵/۵ مگاوات در مدت ۴ ثانیه کاهش می یابد که تاثیر کمتری بر ژنراتورهای سنکرون میگذارد در صورتی که در طرح یک کاهش توان الکتریکی برابر با ۶/۹ مگاوات و به صورت یک پله است. این مقدار توان ۶/۹ مگاواتی در واقع بار مضاعفی بر ژنراتورهای سنکرون در حال جبران تولید از دست رفته در زمان پشتیبانی فرکانس است. در شکل (۱۷) ملاحظه میگردد که علاوه بر کاهش نرم و با شیب کند توان و در مدت ۴ ثانیه کاهش می یابد که تاثیر کمتری بر ژنراتورهای سنکرون میگذارد در صورتی که در طرح یک کاهش توان و در مایت برابر با ۶/۹ مگاوات و به صورت یک پله است. این مقدار توان ۶/۹ مگاواتی در واقع بار مضاعفی بر ژنراتورهای سنکرون در حال جبران تولید از دست رفته در زمان پشتیبانی فرکانس است. در شکل (۱۷) ملاحظه میگردد که سرعی می وتور در طرح پیشنهادی در ثانیه ۶۶ به مداقل مقدار حداقل خود و از ۱۹/۹ مگاواتی در واقع بار مضاعفی بر مرح یک سرعت روتور در ثانیه ۶۸ به حداقل مقدار خواقل خود و از ۱۹/۹ می میابد لذا زمان بازیابی طرح پیشنهادی کمتر از طرح یک است.

حالت چهارم- نفوذ باد برابر با ۵۰ درصد و سرعت باد ۱۱ متر بر ثانیه: بهطور کلی و مطابق شکلهای (۷) و (۸) مربوط به مقدار نفوذ نیروی باد و سرعت باد که قبلا بحث آنها آمده است، چنانچه مقدار نفوذ نیروی باد بیشتر گردد متناظر با آن مقدار Δ کمتر می گردد و چنانچه مقدار سرعت باد کمتر شود متناظر با آن مقدار ΔΩ باز هم کمتر می گردد و نیز چنانچه هردو شرایط سرعت باد و مقدار LPD همزمان کم شوند مقدار ΔΩ باز هم نسبت به دو حالت قبل کمتر می گردد. شکلهای (۱۹)، (۲۰) و (۲۱) نتایج شبیه سازی حالت چهارم هستند.

لذا با این توضیحات و با توجه به این که مقدار نفوذ نسبت به حالت سوم ثابت مانده ولی مقدار سرعت باد نسبت به حالت سوم بیشتر شده است. بنابراین مقدار ΔP از حالت سوم بیشتر خواهد بود. در این حالت با خروج بخشی از تولید از مدار در ثانیه ۵۰ طرح پشتیبانی موقت فرکانس با توجه به نرخ تغییرات در فرکانس سریعا فعال می گردد. ΔP برای طرح پیشنهادی برابر است با ۰/۱۰۰۷ پریونیت که نسبت به طرح یک با مقدار ۱۱۱۱ پریونیت کمتر است. همان طور که در شکل های (۱۹) و (۲۱) نشان داده شده است مقدار توان تولیدی در طرح پیشنهادی به اندازه ۱/۴ درصد کمتر از طرح یک است که باعث افزایش FN به-اندازه ۲۰/۰ هرتز شده است. بنابراین بهبود عملکرد طرح پیشنهادی نسبت به طرح یک را نشان میدهد. در شکل (۲۰) نیز مشاهده می گردد که حداقل سرعت روتور در طرح پیشنهادی در زمان ۲۶ ثانیه از ۱ تا ۲۹/۰ پریونیت کاهش داشته است در صورتیکه در طرح یک مقدار حداقل سرعت روتور در ثانیه ۶۳ و تا ۱۹۲۱ پریونیت کاهش می ابد بنابراین زمان بازیابی سرعت روتور در طرح پیشنهادی نسبت به طرح یک کمتر است. برای مقایسه بهتر و دقیق تر، نتایج شبیه سازی برای حالتهای مختلف طرح پیشنهادی در جدول (۳) آمده است.







Figure (21): System frequency in case 4

Table (3): Simulation results for proposed scheme جدول (۳): نتایج شبیهسازی برای طرح پیشنهادی

سطح نفوذ باد (درصد)	سرعت باد (متر بر ثانیه)	تعداد توربين باد	تولید مزرعه باد (مگاوات)	حداکثر تولید (مگاوات)	مقدار توان افزایشی (پریونیت)	بهبود سطح حداقل فرکانس (هر تز)
۲۰	١٢	٧٩	٩٨	١١٨	•/5954	۰/۰۴
۲۰	11	٩٣	۱۰۰	١١٩	٠/١٢۶١	•/• ۵
۵۰	١٢	١٧٨	۲۲۰	250	٠/٠٩۴	•/• ۵
۵۰	11	7.4	۲۲۰	۲۴۹	٠/•٩٠	٠/٠٩

Table (4): Comparison of FN for the 4 case in proposed scheme with other scheme جدول (۴): مقایسه سطح حداقل فرکانس برای ۴ حالت در طرح پیشنهادی و سایر طرحها

روش اجرایی	حالت اول (هر تز)	حالت دوم (هر تز)	حالت سوم (هر تز)	حالت چهارم (هر تز)
طرح پیشنهادی	۵٩/٨٢	۵٩/٨١	۵٩/٢۴	۵٩/٧٢
طرح یک	۵٩/٨١	۵٩/٨١	۵٩/٧٢	۵٩/٧٢
الگوريتم رديابي نقطه بيشينه توان	۵٩/۷۸	۵٩/٧۶	۵٩/۶٩	۵٩/۶۳

جدول (۴) مقایسه حالتهای مختلف بهبود سطح حداقل فرکانس در طرح پیشنهادی با سایر طرحها ا ست که نشان ده نده بهبود فرکانس در طرح پیشنهادی است.

# ۵- نتیجهگیری

در این مقاله یک طرح پشتیبانی موقت فرکانس ارائه شد که با استفاده از دو پارامتر اختلاف فرکانس اندازه گیری شده با فرکانس نامی (Δf) و سرعت روتور (ω) هم مزیت طرحهایی را دارد که بیشترین انرژی جنبشی را در توربینهای باد آزاد می-کنند و باعث افزایش قابل توجه سطح حداقل فرکانس می گردد و هم بازیابی سرعت روتور را سریع، با شیب کند و بدون ایجاد افت دوم در فرکانس انجام میدهد. این مزیت به دلیل استفاده از پارامتر انحراف فرکانس و وجود بهره تطبیقی با مقادیر مختلف نفوذ توان باد MPPL و سرعتهای مختلف باد حاصل می گردد و هم به دلیل اینکه در طی مدت زمان پشتیبانی از فرکانس، مزایای مشخصه MPPT حفظ شده و تغییرات در سرعت باد به صورت مستقیم بر عملکرد توربین باد اثر گذاشته و به بهبود وضعیت فرکانس کمک میکند. استفاده از ضریب Δf و سرعت روتور باعث می گردد که نرخ کاهش تولید توان باد کمتر و در مدت زمان بیشتری صورت بگیرد و این یعنی فرصت بیشتری در اختیار ژنراتورهای سنکرون قرار می گیرد تا تقاضای مازاد توان را جبران و به بهبود فرکانس سیستم کمک کنند. حالتهای مختلف نفوذ باد در سرعتهای مختلف باد شبیهسازی شد و نتایج شبیهسازی عملکرد خوب طرح پیشنهادی در بازیابی سریع w<sub>r</sub> را نشان میدهد. همچنین نتایج شبیهسازی نشان میدهد طرح پیشنهادی، FN که معرف حداقل مقدار فرکانس در شرایط گذرای وقوع خطا است را در سطح بالاتری نسبت به دو طرح دیگر حفظ کرده و توانسته است به تثبیت فرکانس کمک بکند.

# سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از رساله دوره دکتری در دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان) است. نویسندگان بر خود لازم میدانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از همکاران حوزه پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی و داوران محترم که ما را در انجام و ارتقای کیفی این مقاله یاری نمودهاند، اعلام نمایند.

#### References

#### مراجع

- H.R. Chamorro, F.R.S. Sevilla, F. Gonzalez-Longatt, K. Rouzbehi, H. Chavez, V.K. Sood, "Innovative primary frequency control in lowinertia power systems based on wide-area RoCoF sharing", IET Energy Systems Integration, vol. 2, no. 2, pp. 151-160, June 2020 (doi: 10.1049/iet-esi.2020.0001).
- [2] N. Al-Masood, M. N. H. Shazon, S.R. Deeba, S.R. Modak, "A frequency and voltage stability-based load shedding technique for low inertia power systems", IEEE Access. vol. 9, May 2021 (doi: 10.1109/AC-CESS.2021.3084457).
- [3] J.V. Vyver, J.D.M. Kooning, B. Meersman, L. Vandevelde, T.L. Vandoorn, "Droop control as an alternative inertial response strategy for the synthetic inertia on wind turbines", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 31, no. 2, pp. 1129–1138, Mar. 2016 (doi: 10.1109/TPWRS.2015.2417758)
- [4] M.M. Kabsha, Z.H. Rather, "A New Control Scheme for Fast Frequency Support from HVDC connected offshore wind farm in low inertia system", IEEE Trans. on Sustainable Energy, vol. 11, no. 3, pp. 1829-1837, July 2020 (doi: 10.1109/TSTE.2019.2942541).
- [5] M. Tsili, S. Papathanassiou, "A review of grid code technical requirements for wind farms", IET Renewable Power Generation, vol. 3, no. 3, pp. 308–332, Sept. 2009 (doi: 10.1049/iet-rpg.2008.0070).
- [6] M. Debouza, A. Al-durra, "Grid ancillary services from doubly fed induction generator based wind energy conversion system: A review", IEEE Access, vol. 7, pp. 7067–7081, Dec. 2018 (doi: 10.1109/ACCESS.2018.2890168).
- [7] M. Mehrabankhomartash, M. Saeedifard, A. Yazdani, "Adjustable wind farm frequency support through multi-terminal HVDC grids", IEEE Trans. on Sustainable Energy, vol. 12, no. 2, April 2021 (doi: 10.110-9/TSTE.2021.3049762).
- [8] R.G. Almeida, J.A.P. Lopes, "Participation of doubly fed induction wind generators in system frequency regulation", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 22, no. 3, pp. 944–950, Aug. 2007 (doi: 10.1109/TPW-RS.2007.901096).
- [9] G. Ramtharan, J.B. Ekanayake, N. Jenkins, "Frequency support from doubly fed induction generator wind turbines", IET Renewable Power Generation, vol. 1, no. 1, pp. 3–9, Mar. 2007 (doi: 10.1049/iet-rpg: 2006-0019).
- [10] J. Morren, S.W.H. Haan, W.L. Kling, J.A. Ferreira, "Wind turbines emulating inertia and supporting primary frequency control", IEEE Trans. on Power System, vol. 21, no. 1, pp. 433–434, Feb. 2006 (doi: 10.1109/TPWRS.2005.861956).
- [11] P.K. Keung, P. Li, H. Banakar, B.T. Ooi, "Kinetic energy of wind-turbine generators for system frequency support", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 24, no. 1, pp. 279–287, Feb. 2009 (doi: 10.1109/TPWRS.2-008.2004827).
- [12] K. Liu, Y. Qu, H.M. Kim, H. Song, "Avoiding frequency second dip in power unreserved control during wind power rotational speed recovery", IEEE Trans. on Power Systems., vol. 33, no. 3, pp. 3097–3106, May 2018 (doi: 10.1109/TPWRS.2017.2761897).
- [13] J. Lee, G. Jang, E. Muljadi, F. Blaabjerg, Z. Chen, Y. Cheol Kang, "Stable short-term frequency support using adaptive gains for a DFIG-based wind power plant", IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 31, no. 3, pp. 1068–1079, Sept. 2016 (doi: 10.1109/TEC.2016.2532366).

- [14] Y.K. Wu, W.H. Yang, Y.L. Hu, P.Q. Dzung, "Frequency regulation at a wind farm using time-varying inertia and droop controls", Proceeding of the IEEE/IAS, pp. 1–9, Niagara Falls, ON, Canada, May 2018 (doi: 10.1109/ICPS.2018.8369978).
- [15] M. Hwang, E. Muljadi, G. Jang, Y.C. Kang, "Disturbance-adaptive short-term frequency support of a DFIG associated with the variable gain based on the ROCOF and rotor speed", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 32, no. 3, pp. 1873–1881, May 2017 (doi: 10.1109/TPWRS.2016.2592535).
- [16] X. Zhao, Y. Xue, X.P. Zhang, "Fast frequency support from wind turbine systems by arresting frequency nadir close to settling frequency", IEEE Open Access Journal of Power and Energy, vol. 7, pp. 191–202, May 2020 (doi: 10.1109/OAJPE.2020.2996949).
- [17] M. Garmroodi, G. Verbic, D. J. Hill, "Frequency support from wind turbine generators with a time-variable droop characteristic", IEEE Trans. on Sustainable Energy, vol. 9, no. 2, pp. 676–684, April 2018 (doi: 10.1109/TSTE.2017.2754522).
- [18] D. Yang, J. Kim, Y. Cheol Kang, E. Muljadi, N. Zhang, J. Hong, S.H. Song, T. Zheng, "Temporary frequency support of a DFIG for high wind power penetration", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 33, no. 3, pp. 3428–3437, May 2018 (doi: 10.1109/TPWRS.2018.2810841).
- [19] M. Kang, K. Kim, E. Muljadi, J.W. Park, Y.C. Kang, "Frequency control support of a doubly-fed induction generator based on the torque limit", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 31, no. 6, pp. 4575–4583, Nov. 2016 (doi: 10.1109/TPWRS.2015.2514240).
- [20] M.Č. Bošković, T.B. Šekara, M.R. Rapaić, "Novel tuning rules for PIDC and PID load frequency controllers considering robustness and sensitivity to measurement noise", Electrical Power and Energy Systems, vol. 114, Article Number: 105416, Jan. 2020 (doi: 10.1016/j.ijepes.2019.105416).
- [21] T. Ujjwol, S. Dipesh, M. Manisha, P.B. Bishnu, M.H. Timothy, T. Reinaldo, "Virtual inertia: Current trends and future directions", Applied. Sciences. vol. 7, no. 7, June 2017 (doi: 10.3390/app7070654).
- [22] M. Hong, H. Xin, W. Liu, Q. Xu, T. Zheng, D. Gan, "Critical short circuit ratio analysis on DFIG wind farm with vector power control and synchronized control", Journal of Electrical Engineering and Technology, vol. 11, no. 2, pp. 320–328, Mar. 2016 (doi: 10.5370/JEET.2016.11.2.320).
- [23] M.R. Moradian, A. Soltani-Mohammadi, "A new control system for a dual stator-winding cage rotor induction generator in direct grid connected condition with maximum power point tracking of wind turbine", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 9, no. 35, pp. 3-10, Nov. 2019 (dor: 20.1001.1.23223871.1397.9.35.1.4).
- [24] D. Bustan, H. Moodi, "Adaptive interval type-2 fuzzy controller for variable-speed wind turbine", Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. 10, no. 2, pp. 524–530, Mar. 2022 (doi: 10.35833/MPC-E.2019.000374).
- [25] M. Fooladgar, E. Rok-Rok, B. Fani, G. Shahgholian, "Evaluation of the trajectory sensitivity analysis of the DFIG control parameters in response to changes in wind speed and the line impedance connection to the grid DFIG", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 5, no. 20, pp. 37-54, March 2015 (dor: 20.1001.1.23223871.1393.5.20.4.9).
- [26] K. Khani, G. Shahgholian, B. Fani, M. Moazzami, M. Mahdavian, M. Janghorbani, "A comparsion of different structures in wind energy conversion systems", Proceeding of the IEEE/ECTICON, Phuket, Thailand, pp. 58-61, June 2017 (doi: 10.1109/ECTICon.2017.8096172).
- [27] B. Boukhezzar, H. Siguerdidjane, "Nonlinear control of a variabl-speed wind turbine using a two-mass model", IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 26, no. 1, pp. 149–162, Mar. 2011 (doi: 10.1109/TEC.201-0.2090155)
- [28] L. Guo, M. Yin, C. Cai, Y. Xie, Y. Zou, "Optimal decreased torque gain control for maximum wind energy extraction under varying wind speed", Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. 11, no. 3, pp. 853–862, May. 2023 (doi: 10.35833/MPCE.2021.000274).

2. Rotating masses

- 4. Frequency nadir (FN)
- 5. Operating ranges

7. Maximum power point tracking (MPPT)

- 9. Temporary frequency support (TFS)
- 10. Power additional

<sup>1.</sup> Wind power penetration

<sup>3.</sup> Grid frequency

<sup>6.</sup> Wind turbine generator (WTG)

<sup>8.</sup> Kinect energy (KE)

- 11. Doubly fed induction generator (DFIG)
- 12. Frequency second dip (FSD)
- 13. Wind power penetration level (WPPL)
- 14. Torque limit
- 15. Inertia response (IR)
- 16. Primary control (PC)
- 17. Grid Side converter (GSC)
- 18. Rotor Side converter (RSC)
- 19. Air density
- 20. Power coefficient
- 21. Tip speed ratio
- 22. Turbine blade pitch angle
- 23. Maximum reduction rate
- 24. Rate of change of frequency (ROCOF)