

کنترل فرکانس یک ریز شبکه خودگردان در حضور توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی تغذیه دابل

غضنفر شاهقلیان^(۱) - خسرو خانی^(۲) - مجید معظمی^(۱)

(۱) استادیار - گروه برق، دانشکده مهندسی برق، واحد نجفآباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجفآباد، اصفهان، ایران

(۲) کارشناس ارشد - طراح و ناظر تاسیسات الکتریکی در سازمان نظام مهندسی ساختمان، اصفهان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۰/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۸/۲۱

خلاصه: با وجود افزایش نفوذ توربین‌های بادی، این نوع سیستم‌های تبدیل انرژی، نقشی در کنترل فرکانس ندارند و این وظیفه عمدتاً بر عهده واحدهای تولید سنتی است. توانایی توربین‌های بادی مجهز به ژنراتورهای القایی تغذیه دابل مبتنی بر ارائه توان در سرعت‌های مکانیکی مختلف و نیز امکان کاهش لحظه‌ای سرعت و در نتیجه انتشار انرژی مکانیکی ذخیره شده، امکان حمایت از واحدهای سنتی در تنظیم فرکانس سیستم را فراهم می‌کند. در این مقاله بررسی نقش سیستم‌های مبدل انرژی باد، به ویژه توربین‌های بادی سرعت متغیر مبتنی بر ژنراتور القایی تغذیه دابل در کنترل و تنظیم فرکانس با وجود ضریب نفوذ متفاوت باد در یک ریز شبکه‌ی مستقل شامل واحدهای سنتی حرارتی و غیر حرارتی ارائه شده است. دستیابی به این مهم با تنظیم مطلوب کنترل کننده‌های سرعت ژنراتور القایی تغذیه دابل در سطوح مختلف نفوذ باد امکان پذیر بوده و این امر با بهره‌گیری از تکنیک الگوریتم ازدحام ذرات صورت پذیرفته است. همچنین نفوذ بهینه سیستم تبدیل انرژی باد با در نظر گرفتن پارامترهای تغییر فرکانس در ریز شبکه‌ی مورد مطالعه، بررسی شده است.

کلمات کلیدی: ریز شبکه، کنترل فرکانس، توربین بادی مبتنی بر ژنراتور القایی تغذیه دابل، الگوریتم ازدحام ذرات.

Frequency Control in Autanamous Microgrid in the Presence of DFIG based Wind Turbine

Ghazanfar Shahgholian⁽¹⁾ - Khosro Khani⁽²⁾ - Majid Moazzami⁽¹⁾

(1) Assistant Proffesor - Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Esfahan, Iran

shahgholian47_gh@yahoo.com

majid.moazzami@gmail.com

(2) Msc. - Electrical Designer and Supervisor in Iranian Organization for Engineering Order of Building, Isfahan, Iran

khosro_khani@iran.ir

Despite their ever-increasing power injection into power grid, wind turbines play no role in frequency control. On the other hand, power network frequency is mainly adjusted by conventional power plants. DFIG-based wind turbines not only are able to produce power in various mechanical speeds, but they can also reduce speed instantaneously which, in turn, leads to mechanical energy release. Thus, they can aid conventional units in system frequency control. In this paper, the effect of wind energy conversion systems, especially variable speed DFIG-based wind turbines, in controlling and tuning of frequency is investigated when different penetration coefficients are considered in a isolated microgrid comprising of conventional thermal and non-thermal generating unit. To do this, optimal tuning of DFIG's speed controller is performed in different penetration levels using particle swarm optimization (PSO) technique. In addition, optimum penetration of wind energy conversion system is studied considering frequency change parameters in a microgrid

Index Terms: Micro grid, frequency control, DFIG based on WT, PSO algorithm.

۱- مقدمه

دابل به دلیل توانایی ارائه توان با سرعت‌های مکانیکی مختلف، توانایی کاهش لحظه‌ای سرعت و انتشار انرژی مکانیکی ذخیره شده، قادر به حمایت از ژنراتورهای سنتی در تنظیم فرکانس سیستم می‌باشند و این مهم با تنظیم مطلوب کنترل کننده‌های سرعت ژنراتور القایی تغذیه دابل با بهره‌گیری از الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) در سطوح مختلف ضریب نفوذ باد نشان داده شده است. همچنین تأثیر افزایش نفوذ تولید باد بر روی پارامترهای تغییر فرکانس ناشی از تغییر بار در ریز شبکه مورد مطالعه، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی سبب کاهش نوسانات فرکانس و توان تولیدی واحدهای سنتی، ناشی از اضافه بار و یا اغتشاش‌های وارد شده بر ریز شبکه شده است. این مهم با هر سطح نفوذ تولید باد حاصل گردیده است. همچنین کیفیت تغییرات فرکانس با وجود ضرایب نفوذ متفاوت تولید توان از باد در یک ریز شبکه یکسان نبوده و در ضریب نفوذ تقریباً ۱۵٪ الی ۲۰٪ بهترین کیفیت تغییرات فرکانس ناشی از تغییر بار ریز شبکه را خواهیم داشت.

۲- ساختار اصلی سیستم مبدل انرژی باد (WECS)

ساختار سیستم تولید انرژی الکتریکی از باد شامل سیستم‌های مکانیکی، الکترومغناطیسی و الکتریکی است. همچنین ژنراتور، مبدل‌های توان الکتریکی و ترانسفورماتور قدرت نیز از اجزاء این سیستم می‌باشد. در کل پیکربندی این سیستم‌ها به نوع ماشین الکتریکی و وجه مشترک آنها با شبکه قدرت بستگی دارد. از نقطه نظر محور چرخشی، WECS می‌تواند به دو نوع محور عمودی و افقی تقسیم‌بندی گردد. توربین‌های محور افقی از نظر سرعت به دو دسته، سرعت ثابت و سرعت متغیر طبقه‌بندی می‌شوند [۲۲-۲۴]. توربین بادی سرعت متغیر شامل توربین‌های مبتنی بر مبدل کامل، DFIG و ژنراتور القایی تغذیه یک سویه می‌گردد که هر کدام دارای مزایا و معایبی بوده و کاربردهای خاص خود را دارند. توربین بادی مبتنی بر DFIG به دلیل مزایا و قابلیت‌هایی که دارد بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. یکی از قطعاعات مهم و مشترک در کلیه ساختارهای سیستم تبدیل انرژی باد، جعبه دنده بوده که بین محور اصلی توربین بادی و ژنراتور قرار دارد. وظیفه جعبه دنده افزایش سرعت چرخش پره‌های توربین تا سرعت چرخش روتور ژنراتور، برای سرعت چرخشی ۱۰۰۰ یا ۱۵۰۰ دور در دقیقه می‌باشد.

۲-۱- توربین بادی مبتنی بر DFIG

شکل (۱) سیستم تبدیل انرژی باد سرعت متغیر مجهز به ژنراتور القایی تغذیه دابل (DFIG) و دو مبدل پشت به پشت متصل شده به ژنراتور را نشان می‌دهد. در این سیستم توربین بادی از طریق یک سیستم شفت مکانیکی به DFIG متصل گردیده است که شامل یک شفت توربین سرعت پایین و یک شفت ژنراتور سرعت بالا و یک جعبه دنده در مابین این دو شفت می‌باشد. مبدل پشت به پشت شامل مبدل

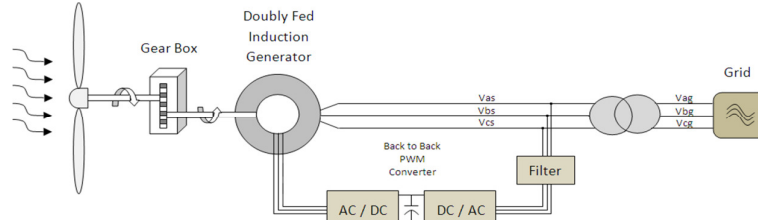
امروزه کاهش وابستگی اقتصادی به انرژی سوخت‌های فسیلی به دلیل گسترش فزاینده نیاز به انرژی، محدودیت منابع سوخت‌های فسیلی، فاجعه آلودگی زیست محیطی ناشی از سوختن مواد فسیلی، گرم شدن هوا و بروز پدیده‌ی اثر گلخانه‌ای و بسیاری عوامل دیگر، سبب رویکرد به انرژی‌های تجدیدپذیر شده است [۱]. در میان منابع تجدیدپذیر انرژی، باد یکی از امیدبخش‌ترین تکنولوژی‌هایی می‌باشد که مورد توجه قرار گرفته است و تولید برق از طریق باد به علت زیرساخت‌های خوب، رشد تکنولوژی و پایین بودن هزینه بهره‌برداری در حال زیاد شدن است [۲]. با افزایش نفوذ انرژی باد در ریز شبکه‌ها، چالش‌های جدیدی متناسب با عملکرد ریز شبکه ظاهر شده که می‌توان به پایداری، تعادل، امنیت، برنامه‌ریزی و طراحی تجاری ریز شبکه اشاره نمود. منابع بادی غیر قابل پیش‌بینی هستند، از این‌رو تجمع مطلوبی از مقادیر زیاد منابع بادی در یک ریز شبکه می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر طراحی، عملکرد و کنترل ریز شبکه داشته باشد. این موضوع به کاهش افت فرکانس مؤثر، زمانی که کنترل کننده DFIG^۱ به طور مطلوبی از روش انتگرال مجذور خطا تنظیم شده باشد، کمک می‌کند [۳]. چندین پژوهش در مورد توربین‌های بادی مبتنی بر DFIG انجام شده‌اند تا با کنترل مستقیم توان و مبدل‌ها در شرایط نامتعادلی شبکه، کارایی DFIG را بهبود بخشند [۴-۷]. در مرجع [۸] با کنترل مجزای توان اکتیو و راکتیو تنظیم اولیه جداگانه‌ای برای توان‌ها صورت پذیرفته است. مفهوم رهاسازی انرژی جنبشی توربین بادی مبتنی بر DFIG هنگامی که فرکانس سیستم قدرت برای جلوگیری از کاهش لختی سیستم، کاهش یافته را می‌توان در مرجع [۹] مشاهده نمود. در مرجع [۱۰] نشان داده شده که اگر توربین‌های بادی لختی را در مواقع کم باری شبکه فراهم نکنند، استحکام سیستم به خطر خواهد افتاد. در مقابل، اگر توربین‌های بادی بتوانند در پشتیبانی لختی سیستم مشارکت نمایند، افت فرکانس سیستم به طور قابل ملاحظه‌ای می‌تواند کاهش یابد. در مرجع [۱۱] روش کنترلی برای مشارکت مؤثر توربین‌های بادی مبتنی بر DFIG در تنظیم فرکانس سیستم پیشنهاد شده است. توربین‌های بادی سرعت متغیر توانایی کنترل فرکانس اولیه و لختی را با اعمال حلقه‌های کنترلی اضافی دارند و برای این منظور، از انرژی جنبشی ذخیره شده در لختی پنهانی پره‌های توربین استفاده می‌شود [۱۲-۱۶].

در مراجع [۱۷-۲۱] کنترل فرکانس سیستم‌های چند ناحیه‌ای در حضور ترکیبی از توربین‌های حرارتی، غیر حرارتی و یا هیدروالکتریکی با بهره‌گیری از تولید اتوماتیک واحدها، جهت به حداقل رساندن خطای تغییرات فرکانس هر ناحیه صورت پذیرفته است. در این مقاله مطالعه و بررسی نقش توربین‌های بادی سرعت متغیر به ویژه DFIG در کنترل و تنظیم فرکانس با وجود سطوح مختلف ضریب نفوذ باد در یک ریز شبکه شامل تولیدات سنتی ارائه شده است. ژنراتورهای القایی تغذیه

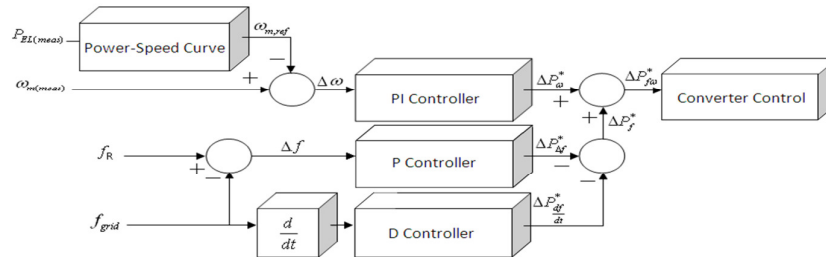
الکترونیک قدرت پشت به پشت توان تولیدی را کنترل نموده و در نتیجه امکان تعقیب حداکثر توان (MPPT) وجود دارد [۲۸]. مقدار انرژی جنبشی آزاد شده از محور توربین بادی زمانی که سرعت کاهش می‌یابد برابر است با ΔF_k که می‌تواند توسط روابط (۱) و (۲) بیان گردد.

$$F_k = \frac{1}{2} J \omega_{mech}^2 \quad (1)$$

سمت رتور و میدل سمت شبکه می‌باشد که این دو میدل از طریق یک خازن به یکدیگر متصل گردیده‌اند. از آنجائی که فقط قسمتی از توان از میدل الکترونیک قدرت عبور می‌کند و تقریباً ۲۵٪ الی ۳۰٪ توان سیستم می‌باشد، در نتیجه اندازه و هزینه میدل به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد [۲۵،۲۶]. از اشکالات این سیستم نیاز به حلقه لغزان می‌باشد که هزینه ساخت و تعمیرات این سیستم را افزایش می‌دهد [۲۷]. این نوع سیستم تبدیل انرژی باد می‌تواند نوسان توان ناشی از تغییر سرعت باد را کاهش دهد، همچنین میدل



شکل (۱): WECS با توربین بادی مجهز به DFIG
Fig. (1): WECS with DFIG based wind turbine



شکل (۲): اساس شماتیک کنترل لختی DFIG [۲۷]
Fig. (2): Principle of DFIG inertial emulation control [27]

نرخ تغییر فرکانس شبکه تطبیق می‌دهد. سیگنال کنترل اضافی حلقه کنترل لختی، با پارامترهای کنترل کننده (K_{pf}, K_{df}) متناسب است. کنترل فرکانس اولیه زمانی به وقوع می‌پیوندد که فرکانس شبکه از محدوده‌های معین تجاوز کرده باشد که در این صورت حلقه اضافه شده فعال می‌گردد. با اضافه نمودن این سیگنال (ΔP_f^*) به معادله گشتاور، گشتاور تنظیم می‌شود. زمانی که فرکانس سیستم افت پیدا می‌کند، گشتاور نقطه کار افزایش یافته و روتور کندتر شده و در نتیجه انرژی جنبشی آزاد می‌شود.

نقطه مرجع توان $(\Delta P_{f\omega}^*)$ دارای دو مولفه می‌باشد، یکی نقطه مرجع اضافه شده (ΔP_f^*) که مبتنی بر تغییرات فرکانس می‌باشد، مطابق آنچه قبلاً گفته شد و دیگری (ΔP_{ω}^*) که مبتنی بر سرعت مطلوب توربین بر حسب تابعی از سرعت باد است و مطابق روابط (۳) الی (۵) بیان می‌گردد [۱۲].

$$\Delta P_f^* = -\Delta f K_{pf} - \frac{df}{dt} K_{df} \quad (3)$$

$$\Delta F_k = F_{k0} \left(1 - \frac{\omega_{mech1}^2}{\omega_{mech0}^2} \right) \quad (2)$$

F_k بسته به سرعت باد بین صفر تا یک پریونیت تغییر می‌کند $(0 \leq E_{k0} \leq 1.0 pu = f(\text{Wind Speed}))$. همچنین ω_{mech1} نمی‌تواند کمتر از حداقل سرعت چرخشی مکانیکی توربین بادی مجهز به DFIG شود $(\omega_{mechmin} \leq \omega_{mech1})$. علاوه بر این، توان لحظه‌ای استخراج شده از توربین بادی نمی‌تواند بیش از ماکزیمم مقدار مجاز بر طبق اطلاعات کارخانه‌ای ماشین انتخاب شود $(F_{k0} + \Delta F_k \leq F_{kmax})$ [۳].

شکل (۲) کنترل کننده‌های توربین بادی مجهز به DFIG را که سعی دارد توربین را در سرعت مطلوبی جهت تولید حداکثر توان نگه دارد نشان می‌دهد. کنترل کننده نقطه کار توان، ΔP_{ω}^* را که مبتنی بر سرعت و توان الکتریکی اندازه‌گیری شده است، محاسبه می‌نماید. نقطه کار توان یک ورودی برای میدل می‌باشد که گشتاور و توان را به وسیله کنترل جریان محور d و q روتور ژنراتور کنترل می‌نماید. سیگنال کنترل اضافه شده (ΔP_f^*) نقطه کار توان را بر حسب تابعی از انحراف

در رابطه (۸)، R ضریب رگولاسیون گاورنر هنگامی که از توربین بادی استفاده شده است و ΔX تغییرات فرکانس اندازه‌گیری شده زمانی که توربین بادی به شبکه متصل است می‌باشد.

۳- مدل سیستم کنترل توربین حرارتی و غیر حرارتی

مدل دینامیکی یک توربین حرارتی در شکل (۴) و یک توربین غیر حرارتی در شکل (۵) نشان داده شده است. این مدل‌ها شامل پارامترهایی همچون ثابت‌های زمانی T_f و T_h و T_r می‌باشند. نقطه کار توان، ΔP_G^* سیگنال کنترلی ورودی گاورنر، بر اساس مجموع سیگنال مشخصه افی-توان-فرکانس و توان مرجع واحد تولید سنتی می‌باشد. توان مرجع واحد سنتی می‌تواند به منظور AGC با تولید سایر واحدها تنظیم شده باشد. ΔP_h سیگنال کنترلی برگرفته از تغییر شیر گاورنر جهت ارسال به مدل توربین می‌باشد [۳۰-۳۲].

۴- مدل دینامیکی کنترل فرکانس یک ریز شبکه به همراه

توربین بادی مبتنی بر DFIG

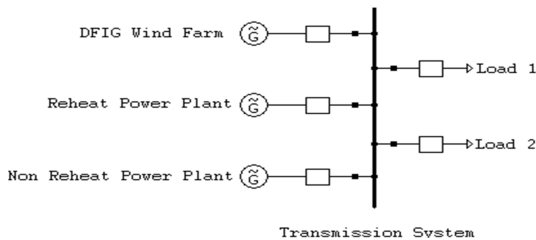
شکل (۶) سیستم قدرت و شکل (۷) بلوک دیاگرام تابع انتقال ریز شبکه‌ای که شامل ژنراتورهای سنتی و نیز DFIG جهت تنظیم فرکانس می‌باشد را نشان می‌دهد.

با تفاضل مقدار تغییر بار، ΔP_D ، از کل تولید سنتی ΔP_{G1} و ΔP_{G2} و تولید بادی ΔP_W و نیز با در نظر گرفتن رابطه (۸)، رابطه (۹) به دست خواهد آمد.

$$\Delta P_{G1} + \Delta P_{G2} + \Delta P_W - \Delta P_D = \Delta P_f \quad (9)$$

شبکه، بار و ژنراتور به صورت تابع تبدیل مرتبه اول $\frac{K_p}{1+sT_p}$ مدل گردیده است. ضرایب T_p و K_p برحسب فرکانس، ضرایب میرایی و اینرسی را می‌توان در روابط (۱۰) و (۱۱) ملاحظه نمود.

$$T_p = \frac{2H}{fD} \quad (10)$$



شکل (۶): سیستم قدرت تحت مطالعه
Fig. (6): The power system under study

$$K_p = \frac{1}{D} \quad (11)$$

(۶)

$$\Delta P_{\omega}^* = K_{oi} \int (\omega^* - \omega) dt - K_{op} (\omega^* - \omega) \quad (4)$$

$$\Delta P_{f\omega}^* = \Delta P_{\omega}^* + \Delta P_f^* \quad (5)$$

K_{df} و K_{pf} به ترتیب بهره‌های مشتقی و تناسبی کنترل کننده هستند. با در نظر گرفتن دو عبارت نقطه کار توان DFIG، ΔP_{ω}^* به طور نسبی، به کندی، نسبت به انحراف فرکانس نقطه کار توان، ΔP_f^* ، تغییر می‌یابد. از اینرو، هنگامی که در لحظه $t = 0$ اغتشاش رخ می‌دهد، ΔP_{ω}^* را صفر می‌گیریم و در نتیجه با در نظر گرفتن تغییر لحظه‌ای نقطه کار توان توسط مبدل، فرض می‌کنیم $\Delta P_{\omega} = \Delta P_{f\omega}^*$ و در نتیجه روابط (۶) و (۷) به دست خواهند آمد [۳].

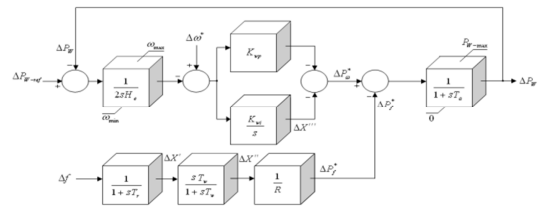
$$\Delta P_{f\omega}^* = 0 + \Delta P_f^* \quad (6)$$

$$\Delta P_{\omega} = \Delta P_{f\omega}^* = \Delta P_f^* = -\Delta f K_{pf} - \frac{df}{dt} K_{df} \quad (7)$$

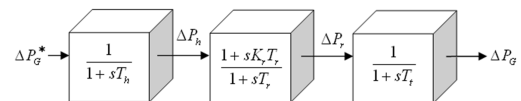
۲-۲- مدل سیستم کنترل توربین بادی مبتنی بر DFIG

شکل (۳) مدل دینامیکی DFIG را برای کنترل فرکانس نشان می‌دهد. تفاوت‌های بین مدل‌های شکل (۲) و (۳)، نقطه کار توان بر اساس تغییر فرکانس می‌باشد. در شکل (۳) توان مرجع اضافی بر اساس تغییر فرکانس با استفاده از فیلتر بالا گذر با ثابت زمانی T_w ، که به عملکرد تنظیم فرکانس اولیه تولید سنتی در حالت گذرا اشاره دارد می‌باشد.

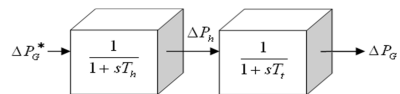
$$\Delta P_f^* = \frac{1}{R} \Delta X'' \quad (8)$$



شکل (۳): کنترل توربین بادی مبتنی بر DFIG مبتنی بر تغییرات فرکانس [۱۲]
Fig. (3): DFIG based wind turbine frequency regulation block diagram [12]



شکل (۴): مدل دینامیکی توربین حرارتی
Fig. (4): Dynamic model of reheat turbine



شکل (۵): مدل دینامیکی توربین غیر حرارتی
Fig. (5): Dynamic model of non-reheat turbine

خود و تبادل اطلاعات با سایر اعضا، به جواب بهینه خواهند رسید. هر ذره در موقعیت اولیه خود به محاسبه تابع هزینه اقدام می‌نماید. سپس با استفاده از اطلاعات خود (مقدار تابع هزینه) و نیز بهترین هزینه‌ای که سایر اعضای گروه به دست آورده‌اند به سمت دستیابی به جواب بهینه حرکت می‌نماید. با تکرار این عمل، کلیه ذرات بهترین جواب را متناسب با اهداف محاسباتی به دست خواهند آورد. در فضای جستجوی D بعدی، بهترین موقعیت فردی ذره i با $P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{iD}$ و بهترین موقعیت کل ذره با $g = (g_1, g_2, \dots, g_D)$ نمایش داده می‌شود. هر ذره، سرعت و موقعیت جدید خود در هر تکرار را مطابق روابط (۱۷) و (۱۸) به روز می‌نماید [۳۳-۳۵].

$$V_i(t+1) = \omega V_i(t) + r_1 c_1 (p_i(t) - x_i(t)) + r_2 c_2 (g_i(t) - x_i(t)) \quad (17)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + V_i(t+1) \quad (18)$$

در روابط فوق ω ضریب اینرسی، c_1 و c_2 به ترتیب ضریب یادگیری شخصی و جمعی، r_1 و r_2 عدد تصادفی مابین ۰ و ۱ می‌باشند. به منظور اهداف محاسباتی، تابع هزینه (Z)، مطابق رابطه (۱۹) معرفی گردیده است.

$$z = \frac{1}{\min \xi} \quad (19)$$

در رابطه فوق ξ ضریب میرایی سیستم می‌باشد. با حداقل نمودن تابع هدف z، این اطمینان حاصل می‌شود که میرا شدن نوسانات سیستم به طور مطلوب صورت پذیرد. در جدول (۱) تنظیمات الگوریتم PSO برای حل مسئله نشان داده شده است.

ضرایب اینرسی (ω)، یادگیری فردی (c_1) و یادگیری کل (c_2) از مرجع [۳۶] استخراج گردیده‌اند. ضرایب جمعیت و تعداد تکرار با توجه به طبیعت مسأله، به صورت تجربی به دست آمده‌اند.

شکل (۹) منحنی همگرایی تابع هزینه رابطه (۲۰) را با در نظر گرفتن ۱۵٪ نفوذ تولید باد در ریز شبکه نشان می‌دهد. جدول (۲) مقادیر بهینه کنترل کننده سرعت توربین بادی را با استفاده از تکنیک الگوریتم ازدحام ذرات و با در نظر گرفتن ضریب نفوذ متفاوت باد نشان می‌دهد.

به منظور بررسی تأثیر تولید بادی در تأمین کل تولید سیستم، شاخص درصد ضریب نفوذ α_w طبق رابطه (۲۰) تعریف می‌شود [۳].

$$\alpha_w = \frac{\text{Total Wind Product}}{\text{Total Product from Various source}} \times 100 \quad (20)$$

Table (1): Particle swarm algorithm tuning parameters

جدول (۱): پارامترهای تنظیم الگوریتم ازدحام ذرات

PSO	Population	Iteration	ω	c_1	c_2
Parameters	50	30	0.7398	1.4962	1.4962

با توجه به مدل شکل (۷) و با در نظر گرفتن روابط (۷) و (۹) الی (۱۱) داریم:

$$\left(\frac{2H}{f} + K_{df} \right) \frac{d\Delta f}{dt} = \Delta P_G + \Delta P_{G1} - \left(\frac{D}{K_{pf} + D} \right) \Delta f - \Delta P_D \quad (12)$$

مدل دینامیکی اغتشاش کوچک یک ریز شبکه شامل مدل توربین حرارتی، غیرحرارتی و توربین بادی مبتنی بر DFIG در شکل (۸) نشان داده شده است. این مدل کنترل فرکانس را پس از اغتشاش شبیه‌سازی می‌کند و شامل پارامترهای سیستم سنتی همچون ضریب میرایی بار (D)، افتی (R)، لختی (H) و ثابت‌های زمانی T_r و T_h و T_l می‌باشد. رفتار سیستم به مقادیر پارامترهای ریز شبکه و به خصوص ضرایب کنترل کننده سرعت توربین بادی (K_{wp} و K_{wi}) وابسته است.

مدل دینامیکی به فرم فضای حالت بسط یافته از نمایش مجدد تابع انتقال مطابق رابطه (۱۳) می‌باشد.

$$\frac{d\underline{X}}{dt} = \underline{A}\underline{X} + \underline{\Gamma}\underline{P} \quad (13)$$

در رابطه (۱۳)، \underline{X} بردار حالت، \underline{P} بردار اغتشاش و \underline{A} و $\underline{\Gamma}$ به ترتیب ماتریس‌های حالت و اغتشاش می‌باشند. معادله حالت (۱۳) می‌تواند به صورت روابط (۱۴) الی (۱۶) بسط یابد.

$$\underline{X} = \begin{bmatrix} \Delta P_{h1} & \Delta P_{ref1} & \Delta P_{G1} & \Delta P_{h2} & \Delta P_{ref2} & \Delta P_r & \Delta P_{G2} & \Delta f & \Delta X' & \Delta X'' & \Delta X''' & \Delta \omega & \Delta P_w \end{bmatrix}^T \quad (14)$$

$$\underline{P} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Delta P_D & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (15)$$

$$\underline{\Gamma} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (16)$$

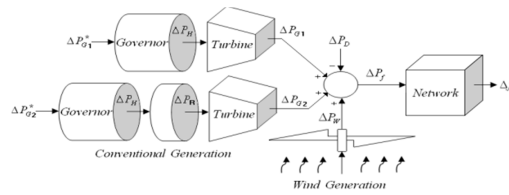
شبیه‌سازی دینامیکی با در نظر گرفتن ضرایب نفوذ متفاوت حضور DFIG در ریز شبکه و بدون آن و نیز با وجود تغییر بار شبکه انجام شده است.

۵- تنظیم مطلوب پارامترهای کنترل کننده سرعت توربین

بادی مجهز به DFIG با در نظر گرفتن ضریب نفوذ مختلف باد

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) یکی از مهم‌ترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند است که در حوزه هوش ازدحامی جای می‌گیرد. الگوریتم PSO یکی از الگوریتم‌های قدرتمند جهت بهینه‌سازی انواع مسائل پیوسته و گسسته می‌باشد. این الگوریتم بیشتر به خاطر سرعت همگرایی نسبتاً بالایی که دارد، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

با استفاده از قوانین مکانیک نیوتن، الگوریتم تجمع ذرات را می‌توان بیان نمود. در این الگوریتم هر ذره i با جرم m در فضای جستجوی D بعدی دارای جابجایی می‌باشد. جابجایی به منظور دستیابی به مقدار کمینه و یا بیشینه تابع هدف انجام می‌شود. بدین صورت که ذرات (اعضای جمعیت) در فضای جستجو با استفاده از اطلاعات شخصی



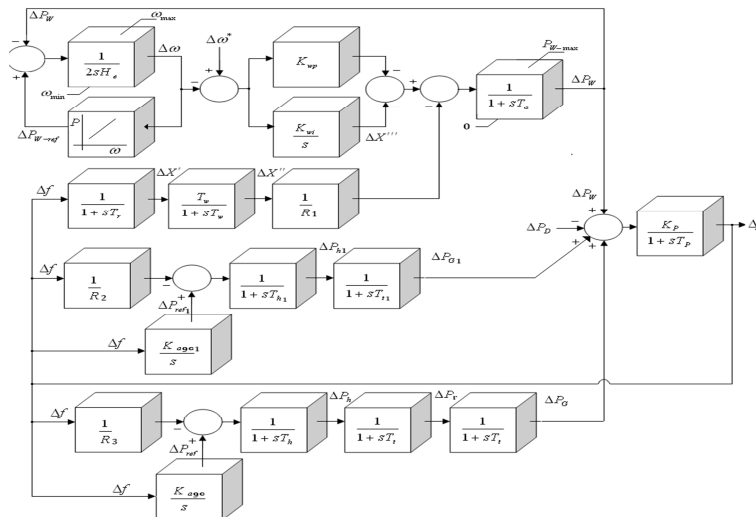
شکل (۷): مدل دینامیکی تولید یک ریز شبکه

Fig. (7): Dynamic model of a micro grid generation

Table (2): Optimal DFIG controller parameters with different wind penetration by using PSO algorithm

جدول (۲): پارامترهای بهینه کنترل کننده سرعت توربین بادی به ازای نفوذ باد متفاوت با استفاده از الگوریتم PSO

Wind Penetration	%5	%15	%25	%50
Frequency Settling Time (s)	10.197	2.918	5.818	13.891
Frequency Over Shoot (Pu)	0.0176	0.0012	0.0039	0.0224
K _{wp}	6.563	7.105	9.098	61.351
K _{wi}	5.268	0.885	0.01	0.01

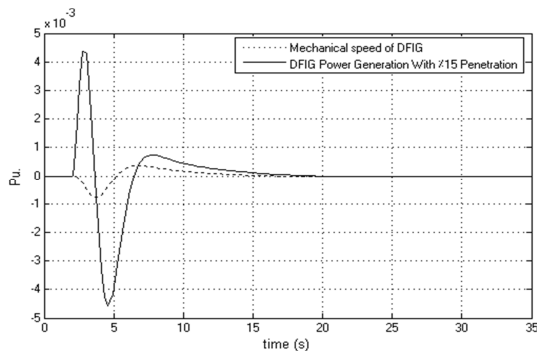


شکل (۸): مدل دینامیکی کنترل فرکانس یک ریز شبکه به همراه توربین بادی مبتنی بر DFIG

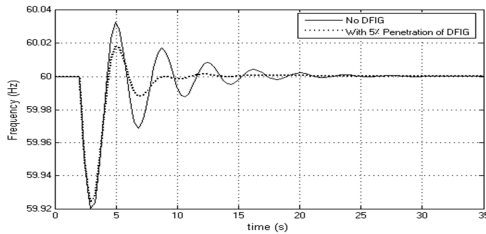
Fig. (8): Dynamic model for frequency regulation of micro grid with DFIG based wind turbine

۶- نتایج شبیه سازی

شبیه سازی‌ها با در نظر گرفتن مدل دینامیکی شکل (۷) برای ۰/۰۲ پریونیت افزایش بار با در نظر گرفتن ضرایب نفوذ متفاوت توربین بادی مبتنی بر DFIG و بدون آن در ریز شبکه مورد مطالعه انجام گرفته است. همچنین پارامترهای بهینه برای کنترل کننده‌های DFIG-WT مطابق نتایج جدول (۲) استفاده شده است. لازم به ذکر است که تأمین بار اضافی در حالت دائمی توسط ژنراتورهای سنتی صورت می‌پذیرد. تغییرات لحظه‌ای سرعت و توان تولیدی DFIG را می‌توان در شکل‌های (۹) الی (۱۱) مشاهده نمود. تغییر توان تولیدی واحدهای سنتی جهت جبران بار پله‌ای اضافه شده در شکل (۱۲) نشان داده شده است. همچنین تغییر فرکانس ریز شبکه در ضرایب نفوذ متفاوت باد در شکل‌های (۱۳) الی (۱۵) نشان داده است.

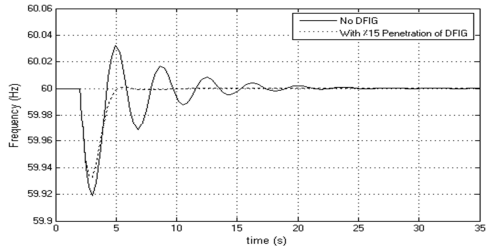


شکل (۹): تغییر سرعت و توان تولیدی DFIG با ۱۵٪ ضریب نفوذ باد
Fig. (9): DFIG mechanical speed and power generation with %15 wind penetration



شکل (۱۴): تغییرات فرکانس ریز شبکه با ضریب نفوذ باد ۵٪ و بدون آن با اغتشاش ۰/۰۲ Pu

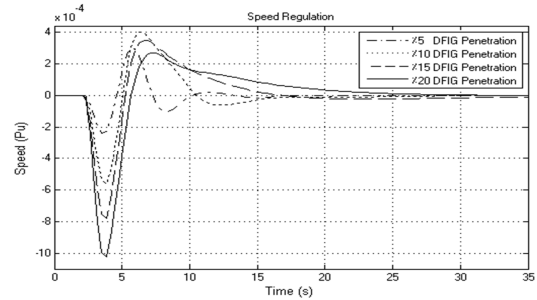
Fig. (14): Frequency response without and with DFIG with %5 wind penetration in 0.02 Pu disturbance



شکل (۱۵): تغییرات فرکانس ریز شبکه با ضریب نفوذ باد ۱۵٪ و بدون آن با اغتشاش ۰/۰۲ Pu

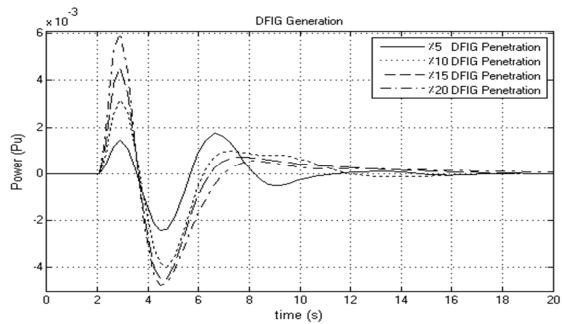
Fig. (15): Frequency response without and with DFIG with %15 wind penetration in 0.02 Pu disturbance

شکل (۹) تغییر سرعت و توان تولیدی DFIG را در لحظه بروز اغتشاش و تا رسیدن به حالت پایدار در ضریب نفوذ ۱۵٪ واحد بادی نشان می‌دهد. همانگونه که از نمودارها مشخص است به محض بروز اضافه بار در ثانیه دوم، DFIG فوراً انرژی جنبشی را از طریق کاهش سریع سرعت مکانیکی آزاد می‌نماید. از این رو توان خروجی DFIG برای مشارکت در کنترل فرکانس، افزایش می‌یابد. پس از آن جهت قرار گرفتن سرعت توربین بادی در مقدار مطلوب، توان خروجی DFIG کاهش یافته است. همان طور که از نمودار مشخص است کنترل کننده سرعت DFIG، سرعت را به مقدار مطلوب بازبایی می‌نماید و متناسب با آن، توان خروجی DFIG نیز به مقدار نامی اولیه باز می‌گردد. شکل‌های (۱۰) و (۱۱) تغییرات سرعت و توان تولیدی DFIG را در ضرایب نفوذ متفاوت تولید باد در ریز شبکه نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که با افزایش ضریب نفوذ تولید باد، امکان بهره‌گیری از انرژی آزاد شده از پره‌های توربین بادی نیز افزایش می‌یابد. شکل (۱۲) تغییرات توان واحدهای تولیدی ریز شبکه را که شامل واحد حرارتی، غیر حرارتی و بادی می‌گردد را نشان می‌دهد. همان طور که مشخص است DFIG جهت مشارکت در کنترل تولید اتوماتیک^۵ در لحظه بروز اغتشاش حضور داشته و سبب کاهش نوسانات توان تولیدی واحدهای سنتی ناشی از اضافه بار اعمال شده به ریز شبکه در حالت گذرا می‌گردد. شکل‌های (۱۳) الی (۱۵) تأثیر حضور DFIG با ضرایب نفوذ متفاوت تولید باد در ریز شبکه را بر تغییرات فرکانس نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌گردد حضور DFIG به دلیل کنترل تولید اتوماتیک در لحظه گذرا، سبب بهبود نوسانات فرکانس گردیده است.



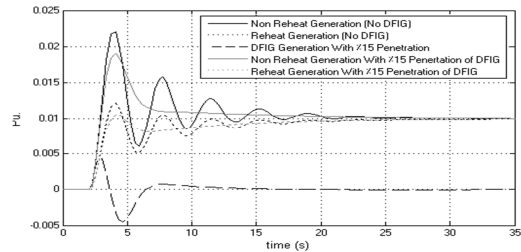
شکل (۱۰): تغییرات سرعت DFIG با ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ ضریب نفوذ باد، در ریز شبکه مورد مطالعه

Fig. (10): DFIG mechanical speed with %5, %10, %15 and %20 wind penetration



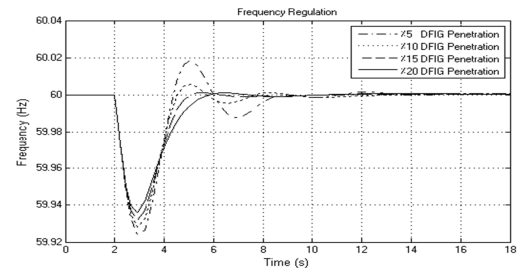
شکل (۱۱): تغییرات توان تولیدی DFIG با ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ ضریب نفوذ باد، در ریز شبکه مورد مطالعه

Fig. (11): DFIG power generation with %5, %10, %15 and %20 wind penetration



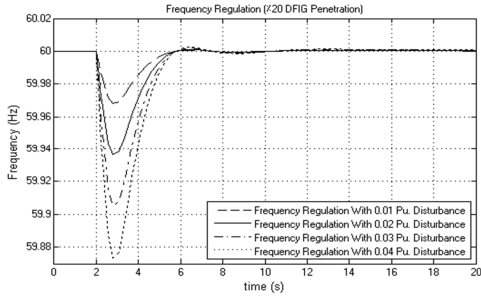
شکل (۱۲): تولید توربین حرارتی، غیر حرارتی و DFIG با ضریب نفوذ باد ۱۵٪ و بدون آن با اغتشاش ۰/۰۲ Pu

Fig. (12): Reheat and non-reheat generation without and with DFIG with %15 wind penetration in 0.02 Pu disturbance



شکل (۱۳): تغییرات فرکانس با ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ ضریب نفوذ باد، ناشی از اغتشاش ۰/۰۲ Pu در ریز شبکه مورد مطالعه

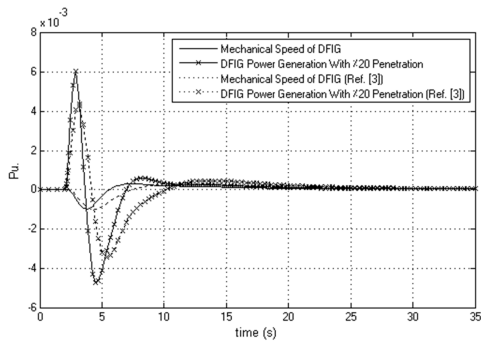
Fig. (13): Frequency response with %5, %10, %15 and %20 wind penetration in 0.02 Pu disturbance



شکل (۱۹): تغییر فرکانس ریز شبکه مورد مطالعه با ۲۰٪ ضریب نفوذ توربین بادی و اغتشاش ۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۰۳ و ۰/۰۴ پریونیت

Fig. (19): Frequency response with %20 wind penetration in 0.01, 0.02, 0.03 and 0.04 Pu disturbance

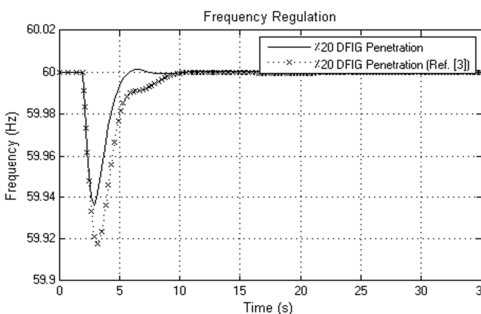
شکل‌های (۲۰) و (۲۱) نتایج حاصل از این مقاله را در مقایسه با مقاله [۳] نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود در روش ارائه شده در این مقاله با توجه به تنظیمات بهینه و تولید بیشتر DFIG مطابق شکل (۲۰)، دستیابی به اهداف محاسباتی مورد نظر، نسبت به مرجع [۳] بهبود یافته است.



شکل (۲۰): مقایسه نتایج تغییرات سرعت و توان تولیدی DFIG ناشی از

اغتشاش ۰/۰۲ پریونیت از مقاله حاضر و مرجع [۳]

Fig. (20): Comparison the results of changes in the DFIG mechanical speed and power generation in 0.02 Pu disturbance for this paper and reference [3]

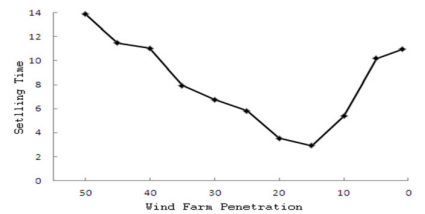


شکل (۲۱): مقایسه نتایج کنترل فرکانس ناشی از اغتشاش ۰/۰۲ پریونیت، از

مقاله حاضر و مرجع [۳]

Fig. (21): Comparison the results of changes in frequency variation in 0.02 Pu disturbance for this paper and reference [3]

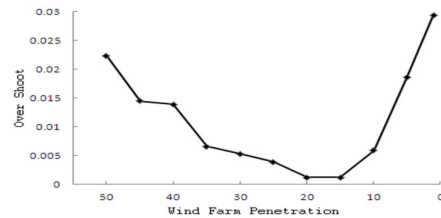
تأثیر افزایش نفوذ تولید باد در ریز شبکه بر پارامترهای نوسانات فرکانس یکسان نمی‌باشد. به گونه‌ای که با افزایش تدریجی ضریب نفوذ تولید باد تا حدود ۱۵٪ الی ۲۰٪ بهبود میزان فراجش و زمان نشست تغییرات فرکانس را شاهد هستیم. ولی با افزایش ضریب نفوذ بیش از ۲۰٪ شاهد افزایش زمان نشست و همچنین افزایش میزان فراجش تغییرات فرکانس ریز شبکه خواهیم بود که این امر می‌تواند بر کیفیت فرکانس، تأثیر منفی داشته باشد. این تغییرات را می‌توان در شکل‌های (۱۶) و (۱۷) مشاهده نمود. شکل‌های (۱۸) و (۱۹) نحوه پاسخ سیستم به تغییرات بار از ۰/۰۱ تا ۰/۰۴ پریونیت در ضرایب نفوذ ۱۵٪ و ۲۰٪ را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که عملکرد کنترلر تنظیمی در کنترل فرکانس به شکل موثری عمل نموده و میزان فراجش و زمان نشست در حد مطلوبی قرار دارد. بنابراین می‌توان گفت تنظیمات یاد شده به طور کلی در رنج تغییرات سیگنال کوچک بار (تا حدود تغییرات ۵٪ بار کل سیستم) به شکل مناسبی عمل می‌کند.



شکل (۱۶): تغییرات زمان نشست با توجه به ضریب نفوذ متفاوت باد در

اغتشاش ۰/۰۲ پریونیت

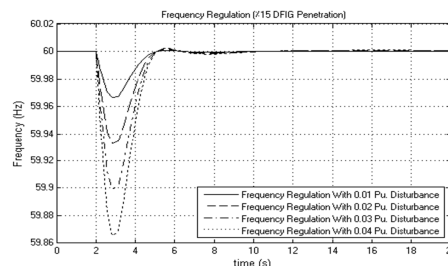
Fig. (16): Settling time variation with different wind penetration in 0.02 Pu disturbance



شکل (۱۷): تغییرات حداکثر فراجش با توجه به ضریب نفوذ متفاوت باد در

اغتشاش ۰/۰۲ پریونیت

Fig. (17): Overshoot variation with different wind penetration in 0.02 Pu disturbance



شکل (۱۸): تغییر فرکانس ریز شبکه مورد مطالعه با ۱۵٪ ضریب نفوذ توربین

بادی و اغتشاش ۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۰۳ و ۰/۰۴ پریونیت

Fig. (18): Frequency response with %15 wind penetration in 0.01, 0.02, 0.03 and 0.04 Pu disturbance

۷- نتیجه گیری

ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه با قابلیت تحویل توان در سرعت‌های مکانیکی متفاوت و توانایی کاهش سریع سرعت هنگام افت فرکانس، با آزاد نمودن انرژی مکانیکی ذخیره شده در پره‌های خود، قابلیت تنظیم فرکانس را دارند. این قابلیت با هر سطح ضریب نفوذ توربین‌های بادی قابل مشاهده می‌باشد. این مهم با بهره‌گیری از الگوریتم هوشمند ازدحام ذرات که دارای نتایج بهتری به‌منظور تعیین مقادیر بهینه کنترل‌کننده‌های سرعت توربین بادی جهت بهبود شاخص‌های مهم تغییرات فرکانس نسبت به روش‌های دیگر می‌باشد و در ریز شبکه‌ای که شامل واحدهای سنتی متفاوت می‌باشد، امکان‌پذیر گردیده است. زمانی که کنترل‌کننده سرعت توربین بادی متناسب با ضریب نفوذ مختلف باد در ریز شبکه تنظیم شده باشد، بهترین و سریعترین واکنش را به نوسانات سیگنال کنترل ورودی نشان خواهد داد که می‌توان به کاهش مطلوب فرافروش فرکانس اشاره نمود. همچنین کنترل تولید اتوماتیک در یک ریز شبکه سبب بهبود تولید اتوماتیک کلیه واحدها متناسب با توان آزاد شده از DFIG در پاسخ به اغتشاش وارد شده به ریز شبکه می‌گردد. همچنین مشاهده شد که DFIG در تامین فرکانس بعد از حالت گذرا مشارکت نداشته است و فقط کنترل اولیه فرکانس را در خلال حالت گذرا انجام می‌دهد. به عبارت دیگر عمل تنظیم فرکانس، خروجی ژنراتورهای سنتی را تنظیم می‌کند و به یک سطح عملکرد ماندگار جدید می‌رساند.

با بهره‌گیری از نتایج به دست آمده می‌توان دریافت بهترین مشخصه‌های تغییر فرکانس در ضریب نفوذ خاصی از تولید واحد بادی در هر ریز شبکه به دست می‌آید. بدین معنی که تولید کمتر و یا بیشتر انرژی از واحد بادی در ریز شبکه مورد مطالعه می‌تواند تأثیر منفی بر پارامترهای پاسخ فرکانس ریز شبکه داشته باشد و الزاماً افزایش استفاده از انرژی باد در ریز شبکه مفید نخواهد بود. به عبارت

دیگر در ضرایب نفوذ کم توربین بادی در ریز شبکه (۱٪ الی ۱۰٪) سیستم کنترل بخوبی عمل کرده و اینرسی دورانی توربین بادی را هنگام اضافه بار به خدمت گرفته و با کنترل تولید اتوماتیک به موقع سبب کنترل تغییرات فرکانس گردیده است. ولی به سبب اینرسی پایین توربین بادی به نسبت بار اضافه شده و شرایط ریز شبکه، زمان نشست و یا فرافروش فرکانس شبکه به خوبی کاهش نیافته است. در ضریب نفوذ متوسط توربین بادی در ریز شبکه (۱۵٪ الی ۲۰٪) تناسب اینرسی دورانی توربین بادی با اغتشاش صورت پذیرفته و شرایط ریز شبکه و نیز سرعت عمل سیستم کنترل توربین بادی جهت استفاده از اینرسی دورانی، سبب بهترین کنترل روی تغییرات فرکانس ناشی از اغتشاش گردیده است. اما با افزایش نفوذ توربین بادی در ریز شبکه مورد مطالعه (۲۵٪ الی ۵۰٪)، اینرسی دورانی سیستم نیز افزایش یافته و سیستم کنترل موجود نمی‌تواند AGC صحیحی برای اغتشاش صورت پذیرفته داشته باشد که نتیجه آن عدم کنترل سریع و صحیح سرعت توربین بادی بوده و در نتیجه با افزایش زمان نشست و فرافروش تغییرات فرکانس مواجه می‌شویم. جهت جلوگیری از این امر ارائه یک روش کنترلی جدید به منظور کنترل صحیح اینرسی توربین بادی و کنترل تولید اتوماتیک کلیه واحدها با هر سطح نفوذ توربین بادی بجای کنترل‌کننده سرعت و کنترل تولید اتوماتیک موجود و یا در کنار آنها لازم می‌باشد. این تحقیق جزء کارهای آتی نویسندگان می‌باشد.

پی‌نوشت

1. Doubly Fed Induction Generator
2. Particle Swarm Optimization
3. Wind Energy Conversion System
4. Maximum Power Point Tracing
5. Automatic Generation Control

References

- [1] H.G. Jeong, R.H. Seung, K.B. Lee, "An improved maximum power point tracking method for wind power systems", *Energies*, No. 5, pp. 1339-1354, 2012.
- [2] M.S. Moghaddasi, "Wind energy in Iran", *Asian Journal on Energy and Environment*, Vol. 6, No. 4, pp. 202-205, 2009.
- [3] M. Jalali, K. Bhattacharya, "Frequency regulation and AGC in isolated systems with DFIG based wind turbines", *Proceeding of the IEEE/PES, Vancouver, BC*, pp. 1-5, 21-25 Jul. 2013.
- [4] D.S. Martin, J.L. Rodriguez, "Direct power control applied to doubly fed induction generator under unbalanced grid voltage conditions", *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 23, No. 5, pp. 2328-2336, Sep. 2008.
- [5] M. Tavoosi, B. Fani, E. Adib, "Stability analysis and control of DFIG based wind turbine using FBC strategy", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, Vol. 4, No. 15, pp. 31-42, Autumn 2013 (in Persian).
- [6] P. Zhou, Y. He, D. Sun, "Improved direct power control of a DFIG based wind turbine during network unbalance", *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 24, No. 11, pp. 2465-2474, Nov. 2009.
- [7] D. Zhi, L. Xu, B.W. Williams, "Model based predictive direct power control of doubly fed induction generators", *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 25, No. 2, pp. 341-351, Feb. 2010.
- [8] A. Dendouga, R. Abdessemed, M.L. Bendaas, A. Chaiba, "Decoupled active and reactive power control of a doubly fed induction generator (DFIG)", *Proceeding of the IEEE/MED, Athens-Greece*, pp. 1-5, July 2007.
- [9] V. Rohilla, K.P.S. Parmar, S. Saini, "Optimization of AGC parameters in the restructured power system environment using GA", *International Journal of Engineering Science and Emerging Technologies*, Vol. 3, No. 2, pp. 30-40, Oct. 2012.

- [10] B.C. Rabelo, W. Hofmann, J.L.D. Silva, R.G.D. Oliveira, S.R. Silva, "Reactive power control design in doubly fed induction generators for wind turbines", *IEEE Trans. on Ind. Electronics*, Vol. 56, No. 10, pp. 4154-4162, Oct. 2009.
- [11] B. Motamed, "The effect of high penetration of wind power on primary frequency control of power systems", Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 2013.
- [12] J.M. Mauricio, A. Marano, A.G. Eeposito, J.L.M. Ramos, "Frequency regulation contribution through variable speed wind energy conversion system", *IEEE Trans. on Power System*, Vol. 24, No. 1, pp. 173-180, Feb. 2009.
- [13] M. Saleh, H. Bevrani, "Frequency regulation support by variable speed wind turbines and SMES", *Word Academy of Science Engineering and Technology*, Vol. 4, No. 5, pp. 152-156, May 2010.
- [14] Y.P. Verma, A. Kumar, "Load frequency control in deregulated power system with wind integrated system using fuzzy controller", *Front. Energy*, Vol. 7, No. 2, pp. 245-254, 2013.
- [15] M. Fooladgar, E. Rok-Rok, B. Fani, Gh. 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, winter 2015(in Persian).
- [16] P. Bhatt, S.P. Ghoshal, R. Roy, "Load frequency stabilization by coordinated control of thyristor controlled phase shifters and superconducting magnetic energy storage for three types of interconnected two area power systems", *Electrical Power and Energy System*, Vol. 32, pp. 1111-1124, 2010.
- [17] Gh. Shahgholian, Kh. Khani, M. Moazzami, "The Impact of DFIG based wind turbines in power system load frequency control with hydro turbine", *Dam and Hedroelectric Powerplant*, Vol. 1, No. 3, pp. 38-51, Winter 2015. (in Persian)
- [18] S.K. Pandey, S.R. Mohanty, N. Kishor, J.P.S. Catalao, "An advanced LMI based LQR design for load frequency control of an autonomous hybrid generation system", *DoCEIS 2013, IFIP AICT 394*, pp. 371-381, 2013.
- [19] A. Usman, B.P. Divakar, "Simulation study of load frequency control of single and two area systems", *Proceeding of the IEEE/GHTC*, pp. 214-219, Seattle, WA, Oct. 2012.
- [20] X. Yingcheng, T. Nengling, "System frequency regulation investigation in doubly fed induction generator (DFIG)", *WSEAS Trans. on Power Systems*, Vol. 7, No. 1, Jan. 2012.
- [21] Gh. Shahgholian, "PID controller design for load-frequency control in power system with hydro-turbine includes transient droop compensation", *Dam and Hedroelectric Powerplant*, Vol. 2, No. 5, pp. 50-64, 2015. (in Persian)
- [22] D. Pipalava, C. Kotwal, "Low voltage ride through capability improvement of fixed speed squirrel cage induction generator based wind farm", *International Journal of Engineering Development and Research*, pp. 94-96, 17-18 Jan. 2014.
- [23] A. Luna, F.K.A. Lima, D. Santos, R. Paul, S. Arnaltes, "Simplified modeling of a DFIG for transient studies in wind power applications", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 58, No. 1, pp. 9-20, Jan. 2011.
- [24] D.B. Parmar, C.K. Vibhakar, "Overview of different wind power technology connected to grid & modeling of wind turbine", *International Journal of Engineering Development and Research*, pp. 53-61, 17-18 Jan. 2014.
- [25] A.C. Smith, R. Todd, M. Barnes, P.J. Tavner, "Improved energy conversion for doubly fed wind generators", *IEEE Trans. on Industry Application*, Vol. 42, No. 6, pp. 1421-1428, Nov./Dec. 2006.
- [26] L. Gao, B. guan, Y. Zhou, L. Xu, "Model reference adaptive system observer based sensorless control of doubly fed induction machine", *Proceeding of the IEEE/ICEMS*, pp. 931-936, Incheon, Oct. 2010.
- [27] A. Petersson, L. Harnfors, T. Thiringer, "Evaluation of current control methods for wind turbines using doubly fed induction machine", *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 20, No. 1, pp. 227-235, Jan. 2005.
- [28] M.E. Haque, M. Negnevitsky, K.M. Muttaqi, "A novel control strategy for a variable speed wind turbine with a permanent magnet synchronous generator", *IEEE Trans. on Industry Application*, Vol. 46, No. 1, pp. 331-339, Jan./Feb. 2010.
- [29] Gh. Shahgholian, S. Yazdekhashti, P. Shafaghi, " Dynamic analysis and stability of the load frequency control in two area power system with steam turbine", *Proceeding of the IEEE/ICCEE*, pp. 40-46, Dubai, Dec. 2009.
- [30] N. Manikandan, G. Karthikeyan, "Fuzzy based load frequency control in an interconnected power system with wind turbine", *Journal of Innovative Research and Solution*, Vol. 1, No. 2, pp. 71-79, Jan. 2013.
- [31] D. Padhan, S. Majhi, "A new control scheme for PID load frequency controller of single area and multi area power system", *ISA Trans.*, Vol. 52, pp. 242-251, 2013.
- [32] J. Morren, S.W.H. de Haan, W.L. Kling, J.A. Ferreira, "Wind turbines emulating inertia and supporting primary frequency control", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 21, No. 1, pp. 433-434, Feb. 2006.
- [33] S. Pain, P. Acharjee, "Multiobjective optimization of load frequency control using PSO", *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Vol. 4, No. 7, pp. 16-22, Apr. 2014.
- [34] S.A. Taher, R. Hematti, A. Abdolalipour, S.H. Tabei, "Optimal decentralized load frequency control using HPSO algorithms in deregulated power systems", *American Journal of Applied Sciences*, Vol. 5, No. 9, pp. 1167-1174, 2008.
- [35] A.S. Jaber, A.Z. Ahmad, A.N. Abdalla, "An investigation of scaled FLC using PSO for multi area power system load frequency control", *Energy and Power Engineering*, No. 5, pp. 458-462, 2013.
- [36] R.C. Eberhart, Y. Shi, "Particle swarm optimization: developments, applications and resources", *IEEE, Proceeding of the 2001 Congress on Evolutionary Computation*, Vol. 1, pp. 81-86, 2001.