

یک روش جدید تشخیص جزیره‌ای شدن اکتیو در سیستم‌های ریزشبکه با استفاده از تزریق جریان توالی منفی

مجید معظمی^۱، استادیار؛ رحمت‌الله هوشمند^۲، استاد؛ امین خدابخشیان^۳، دانشیار؛ عبدالرضا بهوندی^۴، دانشجوی دکتری

۱- دانشکده مهندسی برق - واحد نجف‌آباد - دانشگاه آزاد اسلامی - نجف‌آباد - ایران - m_moazzami@pel.iaun.ac.ir

۲، ۳ و ۴- گروه برق - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران

hooshmand_r@eng.ui.ac.ir, aminkh@eng.ui.ac.ir, rezabehvandi@gmail.com

چکیده: مهم‌ترین نیازهای حفاظتی برای ریزشبکه‌های متصل به شبکه تشخیص شرایط جزیره و حفاظت برای مقابله با شرایط جزیره است. در این مقاله یک روش جدید برای تشخیص شرایط جزیره برای یک ریزشبکه استاندارد مجهز به منابع تولیدی انرژی نو مختلف شامل توربین بادی با ژنراتور القایی از دوسوتغذیه (DFIG)، CHP^۱ و سلول‌های فتوولتائیک ارائه شده است. در این روش سیستم‌های کنترلی DFIG، CHP و سلول‌های فتوولتائیک مدل‌سازی شده‌اند. کنترل سلول‌های فتوولتائیک برای ردیابی نقطه حداکثر توان (MPPT) بوده است. در این مقاله، روش جدیدی در تشخیص شرایط جزیره بر مبنای تزریق جریان اغتشاش به سیستم از طریق محور q یا محور متعامد کنترلر میدل سمت شبکه DFIG ارائه شده است. با اعمال روش پیشنهادی، تغییرات فرکانس ولتاژ استاتور توربین بادی به‌عنوان شاخص تشخیص شرایط جزیره در نظر گرفته می‌شود. در این روش ولتاژ استاتور به‌عنوان سیگنال تشخیص شرایط جزیره به یک مدار منطقی داده می‌شود و سپس فرکانس سیستم موردبررسی قرار می‌گیرد و در صورتی که فرکانس از بازه $(60/1 - 59/9)$ هرتز خارج شود این شرایط به‌عنوان شرایط وقوع جزیره تشخیص داده می‌شود. روش پیشنهادی قادر است شرایط جزیره را نسبت به حالت‌های گذرا تشخیص دهد که این امر منجر به کاهش قابل‌توجه نواحی تشخیص داده‌نشده (NDZ) می‌شود. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار PSCAD/EMTDC عملکرد مؤثر روش پیشنهادی را در تشخیص شرایط جزیره در یک ریزشبکه استاندارد نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: ریزشبکه، تشخیص شرایط جزیره، NDZ، توربین بادی.

A New Active Islanding Detection Method for Microgrids by using Negative Sequence Current Injection

M. Moazzami¹, Assistant Professor; R. A. Hooshmand², Professor; A. Khodabakhshian³, Associate Professor; A.R. Behvandi⁴, PhD Student

1- Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran
Email: m_moazzami@pel.iaun.ac.ir

2,3,4- Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran,
Emails: hooshmand_r@eng.ui.ac.ir, aminkh@eng.ui.ac.ir, rezabehvandi@gmail.com

Abstract: The most important security requirements for the microgrid connected to the network are islanding detection and protection for anti-islanding. In this paper, a new method is presented for islanding detection in a standard microgrid that equipped with wind turbine with double feed induction generator (DFIG), combined heat and power (CHP) and photovoltaic cells (PV) systems. In This method, all control systems of DFIG, CHP and PV cells are modeled. The PV control system is worked for maximum power point tracking (MPPT) of PV system. In this paper, a new method for islanding detection method based on disturbance current injection into the system through the quadrate axis (q -axis) of the DFIG grid side converter is presented. Frequency variation of the wind turbine stator voltage is selected as an index for islanding detection. In this method, wind turbine stator voltage that is index of islanding detection, is fed to a logic circuit and then the frequency of system is evaluated and if frequency violate from threshold (59.9-60.1) Hz, this condition is detected as islanding condition. The proposed method is able to detect islanding condition from transient condition. This capability leads to significant reduction of non detection zone (NDZ) areas. Simulation results using PSCAD/EMTDC software show the effectiveness of the proposed method in islanding detection in a standard microgrid.

Keywords: Microgrid, islanding detection, non detection zone (NDZ), doubly fed induction generation (DFIG).

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۰۸/۰۵

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۳/۱۲/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۲/۲۷

نام نویسنده مسئول: رحمت‌الله هوشمند

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اصفهان - خیابان هزار جریب - دانشگاه اصفهان - دانشکده فنی و مهندسی - گروه برق.

۱- مقدمه

ریزشبکه‌ها که به‌عنوان واحدهای کوچک ولتاژ پایین به‌منظور تأمین بارهای الکتریکی و حرارتی برای محله‌های حومه شهر، دانشگاه و مکان تجاری یا صنعتی طراحی شده‌اند، اساساً یک شبکه توزیع اکتیو هستند. این ریزشبکه‌ها مولدهای پراکنده و بارهای مختلف در سطح ولتاژ توزیع را به‌هم متصل می‌کنند [۱].

مهم‌ترین نیازهای حفاظتی برای ریزشبکه‌های متصل به شبکه تشخیص شرایط جزیره و حفاظت برای مقابله با شرایط جزیره است. با توجه به استاندارد IEEE Std. 1547.1، شرایط جزیره در مولدهای پراکنده یک پدیده الکتریکی است و هنگامی رخ می‌دهد که توان تزریقی شبکه سراسری، بنا به دلایل مختلف متوقف شود و مولدهای پراکنده قسمتی از بار یا کل بار را تغذیه می‌کند [۲-۳]. شرایط جزیره به دو صورت برنامه‌ریزی شده (تعمدی) و ناخواسته ناشی از حوادث طبیعی و خطاهای انسانی اتفاق می‌افتد که در شرایط جزیره ناخواسته مشکلات متعددی برای ریزشبکه رخ می‌دهد [۴-۵].

قابلیت اعتماد شیوه‌های تشخیص جزیره و کارایی شیوه‌های جلوگیری از جزیره معمولاً با توجه به شرایط NDZ ارزیابی می‌شود. نواحی تشخیص داده‌نشده، به بازه‌ای برحسب اختلاف بین توان تأمین‌شده به‌وسیله اینورتر مولد پراکنده و توان مصرف‌شده به‌وسیله بار گفته می‌شود که در این بازه، شیوه تشخیص جزیره اینورتر در تشخیص صحیح حالت جزیره شکست می‌خورد [۶-۸ و ۳-۴].

روش‌های تشخیص جزیره به دو دسته محلی و از راه‌دور تقسیم می‌شوند. در روش‌های از راه‌دور بهره‌بردار یا اپراتور شبکه، اطلاعات جزیره و رله‌های کنترل را به‌طور مستقیم مشاهده می‌کند. روش‌های از راه‌دور اگرچه دارای قابلیت اطمینان بالایی می‌باشند ولی هزینه‌های بالای پیاده‌سازی و پیچیدگی تکنیک‌های به‌کاررفته ازجمله موانع استفاده از این روش‌های از راه‌دور ارتباط محور است [۹-۱۲ و ۷ و ۲].

روش‌های محلی از اطلاعات و کمیت‌های موجود در خروجی واحد تولید پراکنده استفاده می‌کنند. مزیت بزرگ روش‌های محلی نسبت به روش‌های از راه‌دور، هزینه اجرایی کمتر و پیاده‌سازی نسبتاً آسان‌تر است [۱۳-۱۲ و ۹ و ۲]. روش‌های تشخیص محلی به دو دسته روش‌های پسیو و اکتیو دسته‌بندی می‌شوند. روش‌های پسیو با استفاده از اندازه‌گیری پارامترهای شبکه عمل می‌کنند. این روش‌ها در عملکرد منابع پراکنده و ریزشبکه اختلالی ایجاد نمی‌کنند. حدود مجازی برای این اندازه‌گیری‌ها تنظیم می‌شود و هنگامی که این مقادیر اندازه‌گیری شده از حدود مجاز خارج می‌شوند، رله‌های حفاظتی قطع ریزشبکه از شبکه اصلی عمل می‌کنند. تعیین محدوده مجاز پارامترها یکی از قسمت‌های چالش‌برانگیز در این روش‌ها است [۲ و ۷]. تغییرات ولتاژ، نرخ تغییرات فرکانس و نرخ تغییرات توان و همچنین تغییر فرکانس و اندازه‌گیری تغییرات امپدانس ازجمله روش‌های تشخیص جزیره پسیو می‌باشند [۱۰-۱۲]. روش‌های اکتیو از سیگنال‌های تزریقی، فیدبک مثبت و اغتشاشات کنترل‌شده به‌منظور فراهم‌سازی شاخص‌های

تشخیص جزیره استفاده می‌کنند. البته تزریق اغتشاش در شرایط عملکرد عادی بر روی پارامترهای شبکه تأثیر چندانی ندارد اما در شرایط جزیره به علت عدم وجود شبکه اصلی، این اغتشاشات موجب تجاوز پارامترها از حدود مجاز شده و وقوع جزیره تشخیص داده می‌شود. ازجمله شیوه‌های اکتیو می‌توان به روش مبتنی بر تغییرات ولتاژ و جابجایی توان راکتیو، تزریق اعوجاجات ولتاژ [۱۲]، اختلاف فرکانس اکتیو (AFD) [۸]، شیفت فرکانس سندیا (SFS) [۹]، اندازه‌گیری امپدانس فرکانس بالای شبکه [۱۴ و ۱۵] و شیفت فرکانس حالت لغزش (SMS) [۱۰] اشاره کرد [۱۶ و ۱۷]. در [۱۴] یک روش اکتیو تشخیص جزیره‌ای شدن بر مبنای اندازه‌گیری امپدانس فرکانس بالای شبکه به‌وسیله تزریق یک ولتاژ فرکانس بالا توسط هر یک از اینورترهای منبع ولتاژ سیستم، پیشنهاد شده است. این روش دارای سرعت و دقت مناسبی بوده ولی افت کیفیت توان در ریزشبکه چشمگیر است. همچنین در مورد تداخل سیگنال‌های تزریقی اینورترها نیز بحثی صورت نگرفته است. در [۱۵] روشی برای تشخیص جزیره‌ای شدن در ریزشبکه‌هایی با چندین اینورتر متصل شده به‌صورت موازی بر مبنای تزریق سیگنال فرکانس بالا ارائه شده است. در این روش، اینورتر Master یک سیگنال فرکانس بالا که توسط باقی‌مانده اینورترها (Slaves) استفاده می‌شود تزریق می‌کند. با این وجود درباره NDZ این روش به‌درستی بحث نشده است. همچنین در مورد خطاهای اینورتر Master و چگونگی انتخاب اینورتر Master جدید بعد از اینکه اینورتر Master قبلی دچار خطا می‌شود توضیحی داده نشده است.

روش‌های تشخیص شیفت فرکانس حالت لغزش، اختلاف فرکانسی اکتیو و شیفت فرکانس سندیا به‌منظور ناپایدار کردن اینورتر PV و تشخیص شرایط جزیره هنگامی که شبکه سراسری حضور ندارد، از فیدبک مثبت استفاده می‌کند. سه پارامتر دامنه ولتاژ، فرکانس و فاز می‌توانند توسط فیدبک مثبت به کار گرفته شوند. در این روش‌ها با شیفت فرکانس به خارج از حدود مجاز، به‌وسیله رله‌های افزایش/کاهش فرکانس می‌توان وقوع جزیره را تشخیص داد. پیاده‌سازی نسبتاً آسان، NDZ کمتر نسبت به روش‌های پسیو و موازنه بین کارایی این روش و کیفیت توان خروجی و شرایط گذرا، از مزایای این روش‌ها است. در مرجع [۱۷] روش‌های فیدبک مثبت برای سیستم‌های چند اینورتری بسط داده شده است. در این مرجع نشان داده شده است که در روش اختلاف فرکانس، فرکانس در سیستم‌های چند اینورتری بدتر می‌شود [۱۸]. در [۱۶] نشان داده شده است که در سیستم دو اینورتری روش‌های SMS و SFS دارای کارایی بهتری نسبت به روش AFD می‌باشند. در [۱۹] که برای تشخیص شرایط جزیره از روش شیفت ولتاژ سندیا استفاده شده است، دامنه ولتاژ به‌عنوان یک فیدبک مثبت برای جریان مرجع در سیستم کنترل اینورتر عمل می‌کند.

روش شیفت ولتاژ سندیا، حالت بهبودیافته روش فیدبک مثبت است. تفاوت اساسی این روش با روش تشخیص بر مبنای فیدبک، عدم تحت تأثیر قرار گرفتن با توجه به تغییر توان خروجی است. در [۲۰] یک

تغییرات فرکانس ولتاژ استاتور توربین بادی است. در این روش، تشخیص شرایط جزیره، یک روش اکتیو است که بر مبنای تزریق سیگنال جریان اغتشاش از طریق محور q و با استفاده از کنترلر سمت شبکه DFIG عمل می‌کند. برای بررسی توانایی روش پیشنهادی، شرایط مختلفی که منجر به جزیره شدن می‌شوند، شرایط گذرای ناشی از راه‌اندازی موتور القایی و اتصال کوتاه مطالعه می‌شود. برای شبیه‌سازی سیستم تحت مطالعه از نرم‌افزار PSCAD/EMTDC استفاده شده است.

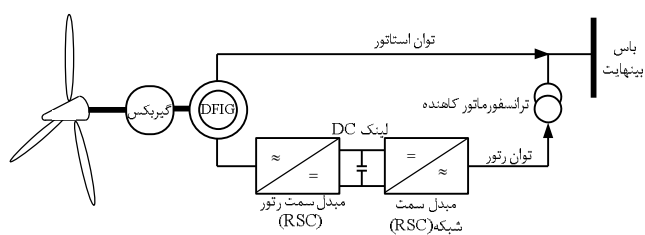
در بخش دوم نحوه مدل‌سازی و کنترل DFIG، سیستم فتوولتائیک و CHP به‌طور مختصر بیان می‌شود. در بخش سوم روش پیشنهادی برای تشخیص شرایط جزیره که بر اساس تزریق جریان از طریق کنترلر مبدل سمت شبکه DFIG است، ارائه می‌شود. در ادامه این بخش، تغییرات در کنترلرهای منابع پراکنده به‌ویژه DFIG در روند بهره‌برداری از ریزشبه در شرایط مختلف کاری تشریح خواهد شد. در بخش چهارم، نتایج شبیه‌سازی عملکرد روش پیشنهادی ارائه می‌شود و در نهایت در بخش پنجم نتیجه حاصل از این مطالعه بیان می‌شود.

۲- مدل‌سازی و ساختار کنترلی منابع تولید پراکنده

DFIG شامل سه بخش اصلی است: ژنراتور القایی از دوسوتغذیه، مبدل Back to Back و کنترلرهای مناسب. در این بخش به مدل‌سازی ژنراتور پرداخته می‌شود. در این مدل‌سازی سعی شده است که ساده‌سازی به‌گونه‌ای انجام گیرد که با حفظ دقت لازم از دید شبکه و ژنراتور، سرعت محاسبات افزایش یافته و قابلیت استفاده مدل در کنار سایر عناصر شبکه بزرگ موجود باشد.

۲-۱- مدل ژنراتور القایی از دو سو تغذیه

ساختار ژنراتور القایی از دوسوتغذیه در شکل ۱ نشان داده شده است.



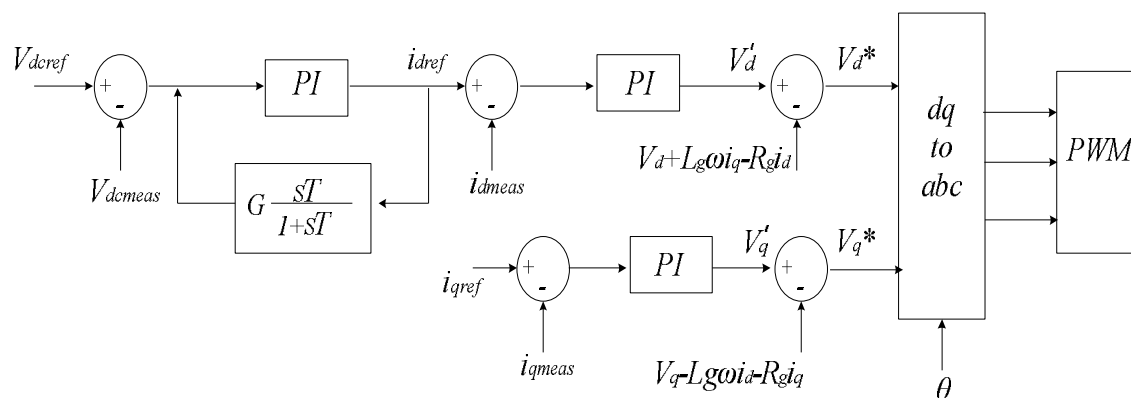
شکل ۱: ساختار ژنراتور القایی از دوسوتغذیه در شرایط اتصال به باس بی‌نیهایت

ژنراتور القایی را همانند یک ژنراتور القایی سیم‌بندی شده که ولتاژ سیم‌بندی روتور صفر نیست، مدل می‌کنیم. بدین منظور از فضای دو محوری پارک استفاده کرده و معادلات ماشین در دو محور d و q ارائه می‌شوند. در مدل‌سازی ژنراتور با صرف نظر کردن از شرایط گذرای ژنراتور و تغییرات شار دوربرثانیه معادلات ماشین به‌صورت زیر نوشته می‌شوند [۹ و ۱۸]:

روش تشخیص جزیره تطبیقی با استفاده از روش شیفت فرکانسی سندیا فازی ارائه شده است. در این روش، پارامترهای بار به‌صورت بهنگام تخمین زده می‌شود و پارامترهای شیفت فرکانسی سندیا به‌طور بهینه برای حذف ناحیه عدم تشخیص با استفاده از روش تخمین فازی پارامتر بار وفق داده می‌شود. ضعف روش شیفت فرکانسی سندیا پیاده‌سازی مشکل آن و کاهش کیفیت توان خروجی به‌خصوص در مورد اینورترهای سامانه‌های فتوولتائیک است.

یکی دیگر از روش‌های تشخیص جزیره که در مرجع [۲۱] نشان داده شده است، روش تشخیص جزیره بر مبنای تزریق اغتشاش از طریق جریان محور d یا q اینورتر است. اغتشاش تزریق شده در شرایط اتصال شبکه سراسری، تأثیری بر روی شبکه ندارد ولی در حالت عملکرد جزیره‌ای، سیگنال اغتشاش وارد بار می‌شود و در نتیجه ولتاژ نقطه تزویج مشترک (PCC) دچار تغییر می‌شود که با استفاده از تغییر ولتاژ موردنظر می‌توان شرایط جزیره را تشخیص داد [۲۱]. در مرجع [۳] تزریق اغتشاش از طریق جریان توالی منفی اینورتر صورت گرفته است. در این روش‌ها، به دلیل عدم استفاده از فیدبک مثبت، بحث ناپایداری وجود ندارد. در [۲۲] یک روش تشخیص جزیره‌ای شدن اکتیو بر اساس میانگین تغییرات مقدار مطلق فرکانس ارائه شده است. در این ساختار از یک کنترلر جریان محور q کلاسیک برای کنترل اینورتر متصل به باس بی‌نیهایت استفاده شده است. نویسندگان در مرجع [۲۲] معتقدند روش ارائه شده دارای NDZ قابل قبول در شرایط مختلف کاری سیستم ساده DG متصل به باس بی‌نیهایت بوده و میزان کاهش پارامترهای کیفیت توان کمتر از مقدار استاندارد بوده است. در مرجع [۷]، روش تشخیص جزیره با تزریق جریان توالی منفی برای شرایطی که بار نامتعادل است، بسط داده شده است. در مرجع [۷] ثابت شده است که روش مبتنی بر اندازه‌گیری مقادیر امیدانس توالی‌ها نسبت به دیگر روش‌های تشخیص جزیره با تزریق اغتشاش دارای NDZ کم‌تری است.

در اکثر مراجعی که تاکنون برای تشخیص شرایط جزیره ارائه شده است، روش‌های تشخیص پیشنهادی بر روی یک شبکه ساده که شامل یک باس بی‌نیهایت، یک منبع پراکنده و بار RLC است، پیاده‌سازی شده است و صحت عملکرد این روش‌ها در ریزشبه‌های واقعی و بزرگ‌تر اثبات نشده است. معمولاً مبدل پراکنده توسط یک مبدل اینورتری مدل‌سازی می‌شود که این مدل‌سازی برای منابع پراکنده مختلف مانند DFIG، CHP و سلول‌های PV یکسان نیست [۹-۵ و ۳]. مدل‌سازی منابع پراکنده مختلف و تأثیر سیستم‌های کنترلی آن‌ها در یک شبکه واقعی باید به دقت بر روی عملکرد روش تشخیص جزیره بررسی شود. در این مقاله، روش پیشنهادی تشخیص شرایط جزیره برای یک ریزشبه استاندارد مجهز به منابع تولیدی مختلف شامل DFIG که با استفاده از کنترل برداری کنترل می‌شود، CHP و سیستم فتوولتائیک ارائه شده است. کنترل سلول‌های فتوولتائیک برای ردیابی نقطه حداکثر توان (MPPT) بوده است. عملکرد روش پیشنهادی بر مبنای



شکل ۲: کنترل مبدل سمت شبکه

۲-۳-۲- کنترل برداری DFİG

با توجه به شکل ۱، کنترل برداری DFİG شامل دو بخش اصلی کنترل مبدل سمت شبکه (GSC) و مبدل سمت روتور (RSC) است.

۲-۳-۲-۱- کنترل GSC

مبدل سمت شبکه از یک طرف به لینک DC و از طرف دیگر به شبکه متصل است.

هدف استفاده از مبدل سمت شبکه ثابت نگه داشتن ولتاژ لینک DC است. این امر با کنترل مؤلفه‌های d و q جریان صورت می‌گیرد. شکل ۲ دیاگرام کنترل مبدل سمت شبکه را نشان می‌دهد.

در این کنترلر، ولتاژ اندازه‌گیری‌شده لینک DC از مقدار ولتاژ مرجع لینک DC (V_{dcref}) کم می‌شود و این مقدار وارد کنترلر PI شده و خروجی کنترل‌کننده به‌عنوان مرجع مؤلفه d جریان در نظر گرفته می‌شود. اختلاف این جریان با جریان اندازه‌گیری‌شده (i_{dmeas}) به‌عنوان ورودی وارد کنترل‌کننده جریان می‌شود و خروجی این کنترل‌کننده ولتاژ مرجع کمکی (V_d') است. ولتاژ واقعی از رابطه (۸) به دست می‌آید [۲۵ و ۲۶]:

$$V_d^* = V_d + L_g \omega i_q - R_g i_d - V_d' \quad (۸)$$

اندیس g بیانگر پارامترهای ترانسفورمر سمت شبکه که پس از مبدل سمت شبکه قرار می‌گیرد، است.

مؤلفه q در جهت ولتاژ استاتور تنظیم می‌شود. بدین منظور i_{qref} در مقدار صفر تنظیم می‌شود. اختلاف بین جریان مؤلفه q و جریان اندازه‌گیری‌شده ($i_{qmeas} - i_{qref}$) به‌عنوان ورودی کنترل‌کننده PI در نظر گرفته می‌شود. خروجی این کنترل‌کننده به‌عنوان ولتاژ مرجع کمکی (V_q') است. از رابطه (۹) برای به دست آوردن ولتاژ واقعی استفاده می‌شود [۲۵ و ۲۶].

$$V_q^* = V_q + L_g \omega i_d - R_g i_q - V_q' \quad (۹)$$

$$V_{ds} = -R_s i_{ds} - \omega_s \Psi_{qs} \quad (۱)$$

$$V_{qs} = -R_s i_{qs} + s \omega_s \Psi_{ds} \quad (۲)$$

$$V_{dr} = -R_r i_{dr} - s \omega_s \Psi_{qr} \quad (۳)$$

$$V_{qr} = -R_r i_{qr} + s \omega_s \Psi_{dr} \quad (۴)$$

در این معادلات V ولتاژ ترمینال ماشین برحسب ولت، R مقاومت سیم‌پیچ‌ها برحسب اهم، i جریان فازها برحسب آمپر، ω_s فرکانس الکتریکی استاتور برحسب (rad/s)، Ψ شار نشتی سیم‌پیچ‌ها برحسب وبر و s لغزش ماشین است. معادلات شار نشتی در مراجع [۲۳ و ۲۴] به‌طور کامل ذکر شده است.

با استفاده از معادلات فوق و مراجع [۹ و ۲۳ و ۲۴] توان اکتیو و راکتیو DFİG را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} P &= V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs} + V_{dr} i_{dr} + V_{qr} i_{qr} \\ Q &= V_{qs} i_{ds} - V_{ds} i_{qs} + V_{qr} i_{dr} - V_{dr} i_{qr} \end{aligned} \quad (۵)$$

معادلات مکانیکی حاکم بر ماشین به‌صورت زیر بیان می‌شوند [۹]:

$$\begin{aligned} T_e &= \Psi_{dr} i_{dr} + \Psi_{qr} i_{qr} \\ \frac{d\omega_m}{dt} &= \frac{1}{2H} (T_m - T_e) \end{aligned} \quad (۶)$$

۲-۲- مدل‌سازی توربین بادی

در یک توربین بادی معادلات توان و گشتاور برای توربین بادی به‌صورت زیر بیان می‌شوند [۲۴]:

$$\begin{aligned} P &= \left(\frac{\rho}{2} \right) C_p(\lambda, \theta) A V^3 \\ T_m &= \frac{P}{\omega} \end{aligned} \quad (۷)$$

که ρ چگالی هوا (1.22 kg/m^3)، A سطح انحنای پره برحسب مترمربع، C_p ضریب عملکرد بهره روتور توربین، V سرعت باد (m/s)، ω سرعت روتور توربین بادی، λ نرخ سرعت نوک پره و θ زاویه پره برحسب درجه می‌باشند.

۲-۳-۲- کنترل RSC

مبدل سمت روتور به منظور کنترل توان خروجی به شبکه به کار می رود. توان های اکتیو و راکتیو به عنوان ورودی های کنترل کننده مبدل سمت روتور استفاده می شود. شکل ۳ دیاگرام کنترل مبدل سمت روتور را نشان می دهد.

به منظور تنظیم مؤلفه q ، ولتاژ اینورتر از مؤلفه جریان (i_{qref}) با استفاده از توان اکتیو به دست می آید. به منظور به دست آوردن مؤلفه جریان ابتدا گشتاور را از توان حقیقی به دست آورده و سپس جریان را از گشتاور به دست می آوریم. روابط زیر چگونگی به دست آوردن جریان از توان حقیقی را نشان می دهد [۲۶]:

$$T_e = \frac{P_m - P_{loss}}{\omega_r} \quad (10)$$

$$i_{qr} = \frac{T_e}{|\Psi_s| \cdot \frac{L_m}{L_s}} \quad (11)$$

در این روابط ابتدا گشتاور مکانیکی با استفاده از رابطه توان معادله (۱۰) به دست آمده و سپس جریان مبنای مؤلفه q (i_{qref}) با استفاده از رابطه گشتاور (۱۱) به دست می آید. اختلاف بین جریان مؤلفه q مرجع و جریان اندازه گیری شده ($i_{qmeas} - i_{qref}$) ورودی کنترل کننده PI خواهد بود. خروجی کنترل کننده ولتاژ مرجع کمکی (V_q') است که با استفاده از آن در رابطه (۱۲) ولتاژ مؤلفه q اینورتر ساخته می شود [۲۳].

$$V_q^* = R_r i_{qr} + L_r \omega i_{dr} + L_m \omega_r i_{ds} + V_q' \quad (12)$$

جریان مرجع مؤلفه d با استفاده از توان لحظه ای راکتیو به دست می آید. در اینجا مؤلفه d ولتاژ مرجع اینورتر با استفاده از رابطه زیر به دست می آید [۲۶]:

$$V_d^* = R_r i_{dr} - L_r \omega i_{qr} - L_m \omega_r i_{qs} + V_d' \quad (13)$$

در این رابطه (V_d') ولتاژ مرجع کمکی است که از خروجی کنترل کننده PI جریان به دست می آید. مؤلفه d جریان نیز خروجی کنترل کننده توان راکتیو است که ورودی آن اختلاف توان راکتیو مرجع و توان راکتیو اندازه گیری شده ($Q_{ref} - Q_{meas}$) است.

۲-۴-۲- مدل سازی و کنترل سیستم فتوولتائیک

در این مطالعه برای مدل سازی و کنترل اینورتر سیستم فتوولتائیک از مدل و روش کنترلی ارائه شده در مراجع [۳ و ۲۱ و ۲۷ و ۲۸] استفاده شده که در ادامه توضیح داده شده است.

۲-۴-۱- مدل سازی سیستم

یک سیستم فتوولتائیک شامل سلول های خورشیدی، مبدل DC-DC جهت تثبیت و افزایش ولتاژ و مبدل DC-AC جهت اتصال سیستم به شبکه است. برای هر دو مبدل سیستم کنترلی وجود دارد. مدل اجزای

این سیستم در ادامه بیان می شود.

۲-۴-۲- مدل سلول خورشیدی

مشخصه V-I سلول خورشیدی با صرف نظر از مقاومت موازی مدل، توسط معادله زیر تعیین می شود:

$$V = \frac{AKT}{q} \ln\left(\frac{I - I_{ph} - I_{sat}}{I_{sat}}\right) - r_s I \quad (14)$$

در رابطه (۱۴)، I_{ph} تابع جریان تولید شده از دما و تابش خورشید است. I_{sat} نشانگر جریان اشباع معکوس است که تابع دما است. Q بار الکتریکی، A فاکتور ایده آل بودن اتصال $p-n$ ، K ثابت بولتزمن، T دما بر حسب درجه کلوین و r_s مقاومت سری می باشند. جریان تولید شده و جریان اشباع معکوس می توانند به صورت زیر بیان شوند:

$$I_{ph} = [I_{scr} - K_1(T - T_r)]s \quad (15)$$

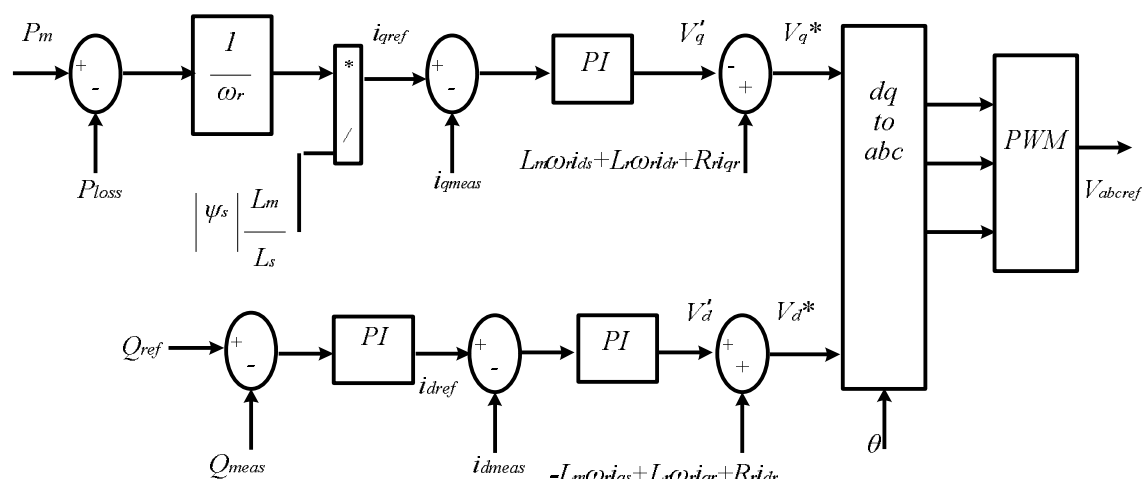
$$I_{sat} = I_{rr} \left(\frac{T}{T_r}\right)^3 \exp\left(\frac{qE_g}{k} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)\right) \quad (16)$$

در رابطه (۱۵)، T_r دمای مرجع، E_g انرژی شکاف باند نیمه رسانا، I_{scr} جریان اتصال کوتاه در دمای مرجع، K_1 ضریب دمای جریان اتصال کوتاه، S میزان تابش خورشید در واحد سطح و I_{rr} جریان معکوس در دمای مرجع است.

بهینه سازی تولید انرژی در یک سیستم فتوولتائیک به منظور عملکرد سلول های PV در جهت نقطه ماکزیمم توان متناظر با ماکزیمم بازده، ضروری است. از آنجایی که نقطه ماکزیمم توان بر اساس تابش و دمای سلول تغییر می کند، مناسب ترین روش برای ردیابی نقطه حداکثر توان باید به کار گرفته شود که به عنوان ردیابی ماکزیمم توان شناخته می شود. یکی از روش های آسان و کم هزینه برای MPPT روش اختلال و مشاهده (P&O) است. وقتی که شرایط جوی ثابت است و یا به آهستگی تغییر می کند، روش P&O در حوالی نقطه ماکزیمم توان نوسان می کند. اما وقتی که شرایط جوی به سرعت تغییر می کند، این روش در ردیابی نقطه ماکزیمم توان موفق نیست و مقدار زیادی از انرژی در دسترس را هدر می دهد. برای رفع این مشکل در این مقاله، یک روش P&O تطبیقی برای کنترل سلول فتوولتائیک استفاده شده است. به منظور یافتن مقدار تحلیلی ولتاژ در سمت نقطه حداکثر توان، لازم است نشان داده شود که مشتق توان که تابعی از جریان بوده صفر است وقتی که مشتق توان تابع ولتاژ صفر است. بنابراین از رابطه (۱۴)، MPP می تواند با معادله زیر ردیابی شود:

$$\frac{AKT}{q} \ln\left(\frac{I - I_{ph} - I_{sat}}{I_{sat}}\right) + I \left(\frac{AKT}{q} \frac{1}{I - I_{ph} - I_{sat}} - 2r_s \right) = 0 \quad (17)$$

اگر تابش خورشید و دما اندازه گیری شوند، حل عددی معادله بالا مقدار تئوری ولتاژ کار بهینه را می دهد. خطای ناشی از مدل و



شکل ۳: کنترل مبدل سمت روتور

ایده آل بهترین تابع باید به سیستم اجازه دهد که در جهت نقطه بیشترین توان در کمترین زمان ممکن عمل کند [۲۸].

۲-۴-۴-۲- تعیین تابع میزان تغییرات

همانطور که اشاره شد در حالت ایده آل بهترین تابع باید به سیستم اجازه دهد که در کمترین زمان ممکن در جهت نقطه حداکثر توان کار کند. اگر مبدل تأخیر ایجاد نکند، بهترین گزینه تابع خطی است که در حالت خاص به صورت زیر بیان می شود:

$$f(V_M - V) = |V_M - V| \quad (19)$$

در این رابطه V ولتاژ آرایه فتوولتائیک و V_M ولتاژ نقطه ماکزیمم توان است. اما با توجه به اینکه عملاً مبدل و تنظیم کننده آن، یک تأخیر ایجاد می کنند، بنابراین، یک تابع غیرخطی نیاز است تا پاسخ دینامیکی سریع تر را تضمین نماید. از آنجایی که تابع نمایی در مقادیر متغیر بزرگ دارای مقدار زیادی است و در مقادیر کم به شدت کاهش می یابد، می تواند به عنوان یک تابع مناسب انتخاب شود. از طرف دیگر تابع نمایی در سمت چپ مشخصه (جایی که ولتاژ عملیاتی کمتر از بیشینه آن است) نیز افزایشی است، لذا موجب ناپایداری در سمت راست می شود. بنابراین تابع f به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

$$f(V_M - V) = \begin{cases} \exp\left(\frac{V_M - V}{3}\right) & \text{if } V < V_M \\ 0 & \text{if } V > V_M \end{cases} \quad (20)$$

محدوده تغییر ولتاژ ΔV_{min} به اندازه ۰/۱ در نظر گرفته می شود که این مقدار برای تضمین یک پایداری خوب به اندازه کافی کوچک است. در هر صورت، با انتخاب تابع (۲۰)، این روش در یک محدوده مناسب در حدود بیشینه واقعی به خوبی و بدون اشکال کار می کند [۲۸]. کلیه اطلاعات مورد استفاده برای سیستم فتوولتائیک در این مطالعه در ضمیمه آورده شده است.

پارامتر خیلی مهم نیست زیرا نقطه کار توسط روش P&O تنظیم خواهد شد. در عوض، دانستن ولتاژ بهینه تئوری (V_M) برای تطبیق اختلال ولتاژ استفاده شده است.

$$\Delta V = f(V_M - V) + \Delta V_{min} \quad (18)$$

در این رابطه، f یک تابع مثبت است و مقدار آن وقتی که $V = V_M$ باشد، صفر است. در واقع برای $\Delta V_{min} = 0$ روش P&O باید در بیشینه تئوری بدون رسیدن به مقدار واقعی آن متوقف شود [۲۸].

۲-۴-۳- مبدل الکترونیک قدرت

به منظور اجرای روش MPPT از مبدل DC-DC نوع Cuk به دلیل تلفات کمتر و کلیدهای با قیمت کمتر استفاده شده است. تغییر ولتاژ و جریان خروجی مبدل توسط کنترل پارامتر بازه کاری مبدل (Duty Cycle) انجام می شود. در این مقاله از یک مبدل منبع ولتاژ (VSC) که با استفاده از مدولاسیون PWM کنترل می شود استفاده شده است. سایر اطلاعات لازم در پیوست های مقاله آورده شده است.

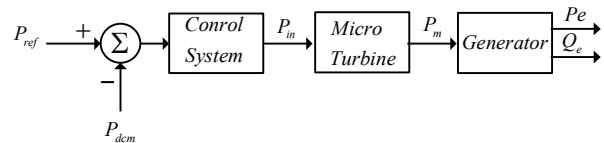
۲-۴-۴- روش MPPT مورد استفاده

۲-۴-۱- اصول کلی

در روش اختلال و مشاهده معمولی، در هر پله مقداری ثابت به بازه کاری اضافه یا کم می شود تا به نقطه حداکثر توان برسیم. در این روش هنگامی که از نقطه حداکثر توان دور باشیم سرعت رسیدن به نقطه حداکثر توان کم بوده و هنگامی که به نقطه حداکثر نزدیک می شویم به علت تغییرات ثابت در بازه کاری نوسان ایجاد می شود. در روش پیشنهاد شده برای تعیین مقدار پله افزایشی یا کاهششی، از یک تابع استفاده می شود که مقدار این تابع وقتی که نقطه کار دور از مقدار ماکزیمم تخمین زده شده است، زیاد است. در حالی که در نزدیکی مقدار ماکزیمم تخمین زده شده، مقدار تابع مزبور بسیار کم است. در تعیین این تابع شیب مشخصه پنل های PV در گذر از سمت چپ به راست نقطه حداکثر توان کاملاً متفاوت است. بنابراین تابع در ناحیه های مختلف مشخصه با روابط متفاوت در نظر گرفته می شود. در حالت

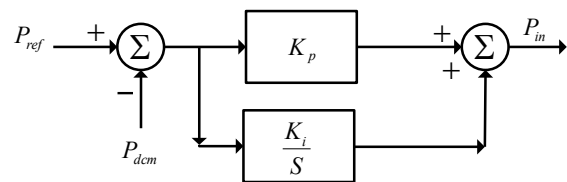
۵-۲- مدل سازی و کنترل CHP

در این مطالعه از مدل GAST برای مدل سازی میکروتوربین CHP استفاده شده است. در این مدل، CHP شامل یک میکروتوربین است که به یک ژنراتور سنکرون متصل شده است. بلوک دیاگرام ساده شده برای مدل میکروتوربین در شکل ۴ نشان داده شده است.



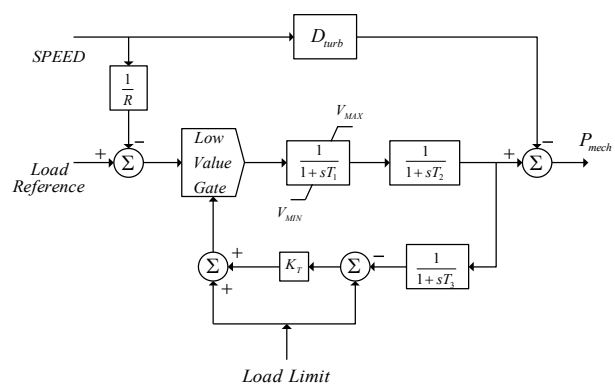
شکل ۴: مدل میکروتوربین [۱]

در این مدل، تأکید اصلی بر روی کنترل توان اکتیو است و بدین منظور از یک کنترلر PI استفاده شده است. توان اکتیو کنترل شده به میکروتوربین اعمال می شود. این ساختار در شکل ۵ نشان داده شده است. در این مدل P_{in} توان اکتیو کنترل شده است که به میکروتوربین اعمال می شود. P_{dcm} توان درخواستی بار، P_{ref} توان مرجع، K_p مقدار ثابت تناسبی کنترلر PI و K_i مقدار ثابت انتگرال کنترلر PI است.



شکل ۵: مدل کنترلر میکروتوربین [۱]

مدل توربین استاندارد GAST که برای توربین سیستم مورد مطالعه به کار می رود، در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶: ساختار مدل توربین استاندارد GAST [۱]

اطلاعات مورد استفاده برای مدل سازی و کنترل CHP در این مطالعه در ضمیمه آورده شده است.

۳- روش پیشنهادی تشخیص شرایط جزیره

در این بخش، روش پیشنهادی برای تشخیص شرایط جزیره در ریزشبهک ارائه خواهد شد. این روش تشخیص جزیره یک روش اکتیو است که بر اساس تزریق اغتشاش و مشاهده سیگنال های شاخص مورد نظر در روش پیشنهادی، تشخیص شرایط جزیره صورت می گیرد. در ادامه این بخش نشان داده خواهد شد که با استفاده از روش تشخیص شرایط جزیره و با تغییر مناسب در کنترلرهای توربین بادی، ریزشبهک قادر به حفظ پایداری و عملکرد مناسب در شرایط مختلف کاری ریزشبهک بدون خاموشی DFIG است.

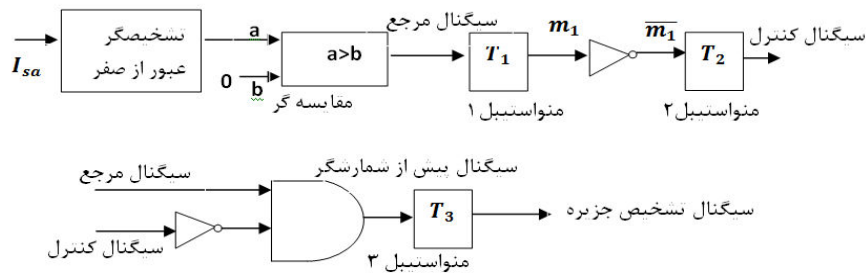
۳-۱- ساختار روش پیشنهادی تشخیص شرایط جزیره

در روش پیشنهادی برای تشخیص شرایط جزیره، از تزریق جریان از طریق محور q استفاده می شود. این روش یک روش تشخیص جزیره اکتیو است. در این روش با تزریق اغتشاش مناسب و اندازه گیری فرکانس ولتاژ استاتور DFIG، شرایط جزیره تشخیص داده می شود. روش های تشخیص اکتیو در مقایسه با روش های تشخیص پسیو دارای کمتری است ولی در مقابل این تزریق اغتشاش باعث کم شدن کیفیت توان می شود. بنابراین این تزریق اغتشاش باید به مقدار مناسبی باشد که باعث ناپایداری یا کاهش نامطلوب کیفیت توان نشود.

در روش پیشنهادی سیگنال اغتشاش (i_{dist}) با فرکانسی غیر از فرکانس شبکه سراسری (۶۰ Hz) و با دامنه ای برابر ۰/۱ جریان مرجع مؤلفه d استاتور به شبکه سراسری تزریق می شود. سیگنال اغتشاش به صورت زیر تعریف می شود:

$$i_{dist} = i_d \cos(\omega_d t) = i_d \cos(2\pi f_d t) \quad (21)$$

این سیگنال اغتشاش از طریق محور q و با استفاده از کنترلر سمت شبکه DFIG به شبکه سراسری تزریق می شود. در ادامه ولتاژ استاتور ژنراتور القایی به عنوان سیگنال شاخص تشخیص جزیره به یک تشخیص دهنده عبور از صفر مطابق شکل ۷، داده می شود. با مقایسه خروجی تشخیص دهنده عبور از صفر با مقدار صفر، هنگام عبور از صفر از سیکل مثبت به سیکل منفی خروجی سیستم تشخیص عبور از صفر یک می شود. باید توجه داشت که عبور از صفر از سیکل مثبت به منفی محاسبه نمی شود. خروجی این مقایسه گر به عنوان سیگنال مرجع به یک منواستیبیل با $T_1 = 16/693$ می شود و به یک منواستیبیل دیگر با $56/1$ میلی ثانیه داده می شود که متناظر با فرکانس ۶۰/۱ هرتز است. خروجی این منواستیبیل معکوس $T_2 = 55$ میکروثانیه داده می شود که مطابق با $\Delta f = 0/2$ هرتز است. خروجی دومین منواستیبیل سیگنال کنترل را تشکیل می دهد. مقادیر T_1 و T_2 طوری تنظیم می شوند که هنگامی که فرکانس از محدوده ۶۰/۱-۵۹/۹ خارج می شود انحراف را تشخیص می دهند.



شکل ۷: دیاگرام روش تشخیص جزیره پیشنهادی

توان- فرکانس است که در ژنراتور سنکرون به طور معمول استفاده می شود. در این مورد، به منظور تغییر در توان اکتیو تزریقی به وسیله DFIG در هنگام اعوجاج فرکانس سیستم، از تنظیم دروپ R استفاده می شود. در این ساختار افزایش توان اکتیو متناسب با تغییرات فرکانس سیستم است و به صورت زیر تعریف می شود:

$$P_{injected} = P_{ref} - \frac{1}{R} (\omega_{sys} - \omega_{ref}) \quad (22)$$

$P_{injected}$ ، توان تزریقی توسط DFIG

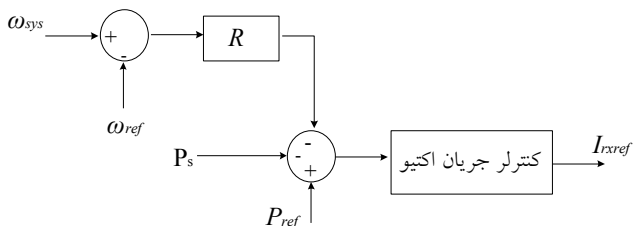
P_{ref} ، توان مرجع DFIG

R ، دروپ

ω_{sys} ، سرعت زاویه ای باس DFIG

ω_{ref} ، سرعت زاویه ای مرجع

این توان اکتیو تولید شده به نقطه عملکرد جدید DFIG نیاز دارد. بنابراین کنترل فرکانس اولیه به حلقه کنترلی توان اکتیو در مبدل سمت روتور اعمال می شود. باید توجه داشت که این ویژگی (کنترل فرکانس اولیه) فقط در شرایط عملکرد حالت جزیره اعمال می شود. ω_{sys} از باس DFIG متصل به شبکه و با استفاده از حلقه قفل فاز به دست می آید. این حلقه کنترلی اضافه شده در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸: حلقه کنترلی توان برای کنترل فرکانس اولیه در DFIG در حالت عملکرد جزیره

۲-۲-۳- کنترل توان راکتیو و تنظیم ولتاژ خروجی

توربین بادی سرعت متغیر با DFIG توانایی کنترل ولتاژ خروجی خود را دارد. این توانایی برای عملکرد در حالت جزیره یک ویژگی مهم محسوب می شود. با این ویژگی، توربین بادی می تواند در مدیریت توان راکتیو شرکت کند و ولتاژ ریزش به شبکه را تنظیم کند. کنترلر ولتاژ خروجی در اینجا توسعه می یابد. در عملکرد متصل به شبکه هنگامی که از مقاومت

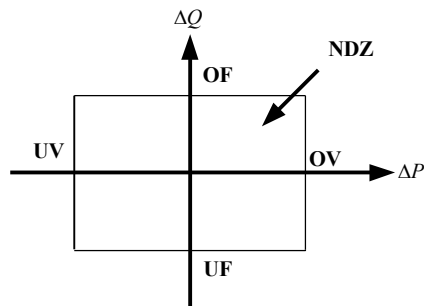
سیگنال مرجع و کنترل به وسیله مدار منطقی شکل ۷، کنترل می شود. هنگامی که سیگنال مرجع مدار تشخیص عبور از صفر سیکل منفی به مثبت را تشخیص می دهد برابر یک است، اگر سیگنال کنترل یک باشد یعنی فرکانس در محدوده مجاز $59/9-60/1$ هرتز قرار دارد. بنابراین اگر سیگنال مرجع برابر یک باشد و سیگنال کنترل صفر باشد یعنی فرکانس از حدود مجاز خودش خارج شده است و در نتیجه با دادن خروجی مدار منطقی دو سیگنال مرجع و کنترل به یک منواسنبیل می توان با یک تأخیر قابل قبول شرایط جزیره را از دیگر شرایط مانند راه اندازی موتور القایی و کلیدزنی بار متمایز کرد و تشخیص داد.

۲-۳- عملکرد ریزش به شبکه در شرایط جزیره

در عملکرد جزیره، به منظور بهبود دینامیک سیستم و میرا کردن نوسانات توان گذرای خروجی در جایی که شبکه بی نهایت در دسترس نیست، استراتژی کنترل توان اکتیو/راکتیو انعطاف پذیر و سریع لازم است. در این شرایط، منبع CHP که به سیستم گاورنر و تحریک مجهز است، با استفاده از سیستم تحریک، ولتاژ را در مقدار یک پریونیت تنظیم می کند. همچنین با استفاده از سیستم گاورنر که بر مبنای رابطه توان اکتیو- فرکانس است، اعوجاجات در سرعت ژنراتور را کنترل می کند. همچنین DFIG با اعمال کنترل فرکانس اولیه و تنظیم ولتاژ خروجی از جریان های محور dq روتور، به حالت کنترل در شرایط جزیره تغییر مد می دهد.

۲-۳-۱- کنترل فرکانس اولیه

توربین های بادی به منظور کسب توان از باد کنترل می شوند. بنابراین تیغه های توربین در این نوع واحدهای تولید پراکنده، اینرسی قابل توجهی دارند. انرژی جنبشی ذخیره شده این امکان را به توربین بادی می دهد که برای دوره کوتاهی کنترل فرکانس اولیه را پشتیبانی کند. یکی از ویژگی های توربین های بادی سرعت متغیر این است که برخلاف توربین های گازی و حرارتی می توانند به طور لحظه ای توان خود را افزایش بدهند [۱۷]. این ویژگی به خصوص برای سیستم های ریزش به هنگامی که به عملکرد حالت جزیره می روند یک ویژگی مهم است. کنترل فرکانس اولیه که در شکل ۸ نشان داده شده است، به حلقه کنترل توان اکتیو در مبدل سمت روتور که در شکل ۳ نشان داده شده است، اضافه می شود. این کنترل فرکانس مشابه با حلقه کنترل



شکل ۱۰: ناحیه عدم تشخیص سیستم تشخیص جزیره

برای ایجاد امکان مقایسه عملکرد این روش با روش‌های دیگر، اختلاف توان تولیدی و مصرفی نرمالیزه شده است [۲۹]. اختلاف توان اکتیو نسبی $\overline{\Delta P}$ به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\overline{\Delta P} = \frac{|\Delta P|}{\sum_{DGsof Island} P_{Rated}^i} \quad (24)$$

که نسبت اختلاف توان اکتیو تولیدی و مصرفی به مجموع توان نامی تمامی مولدهای داخل جزیره است. با حالتی مشابه می‌توان اختلاف توان اکتیو نسبی را نیز به صورت زیر تعریف نمود:

$$\overline{\Delta Q} = \frac{|\Delta Q|}{\sum_{DGsof Island} P_{Rated}^i} \quad (25)$$

برای ایجاد تعادل بین تولید و مصرف درون جزیره مقادیر مختلف بارگذاری سیستم موردبررسی قرار می‌گیرد.

۴- نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی

در این بخش، روش پیشنهادی برای تشخیص شرایط جزیره در سیستم مورد مطالعه که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، شبیه‌سازی شده و عملکرد آن در شرایط مختلف مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

۴-۱- معرفی سیستم تحت مطالعه

در شکل ۱۱ ساختار یک شبکه توزیع فشار متوسط دارای چندین منبع تولید پراکنده را نشان می‌دهد که از سوی انجمن بین‌المللی (CIGRE) به عنوان شبکه تست برای بررسی اتصال منابع پراکنده معرفی شده است [۳۰]. ولتاژ نامی شبکه فشار متوسط ۲۰ کیلوولت است که از طریق پست فوق توزیع ۱۱۰ کیلوولت تغذیه می‌شود. بار رخ دادن یک خطا در سیستم و باز شدن کلیدهای اصلی، ریزش شبکه به صورت مستقل از سیستم و یا اصطلاحاً به صورت جزیره‌ای به کار خود ادامه خواهد داد. همچنین دو کلید در نزدیکی باس‌های شماره ۱۴ و ۸ تعبیه شده که در حالت عادی باز بوده و با بستن آن‌ها می‌توان سیستم توزیع با ساختار حلقوی را نیز موردبررسی قرار داد.

ساختار ریزش شبکه استاندارد که در این مقاله ارائه شده است دارای سه واحد تولید پراکنده توربین بادی با DFIG، فتوولتائیک و CHP است.

استاتور ژنراتور القایی صرف نظر می‌شود، توان راکتیو به مانند شکل ۳ مستقیماً اعمال می‌شود. می‌توان نشان داد که رابطه بین توان راکتیو تولید شده و جریان مؤلفه d روتور (i_{rxref}) به صورت زیر بیان می‌شود [۲۳]:

$$Q_s = -\frac{L_m}{L_{ss}}(i_{rxref} + i_{dr,gen}) - \frac{V_{sq}^2}{\omega_s L_{ss}} \quad (23)$$

که در این رابطه:

Q_s ، توان راکتیو استاتور

L_{ss} ، اندوکتانس استاتور

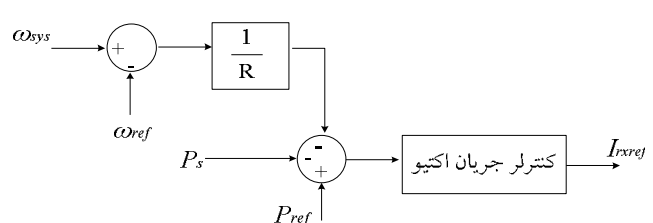
L_m ، اندوکتانس متقابل استاتور

V_{sq} ، ولتاژ محور q استاتور

ω_s ، سرعت زاویه‌ای نامی سیستم

i_{rxref} ، به عنوان جریان مؤلفه d روتور توان راکتیو مغناطیس کنندگی ژنراتور القایی را تعیین می‌کند و همچنین $i_{dr,gen}$ مبادله توان بین شبکه سراسری با ژنراتور القایی را مشخص می‌کند.

روند کنترل برداری DFIG با کنترلر جریان در سمت روتور در مرجع [۱۸] به طور مبسوط توضیح داده شده است. در شرایط اتصال به شبکه با استفاده از جریان i_{rxref} ، توان راکتیو DFIG تعیین می‌شود. برای عملکرد در شرایط جزیره و تنظیم ولتاژ، یک حلقه کنترلی مشابه شکل ۹ به کنترلر جریان مؤلفه i_{rxref} اضافه می‌شود. با استفاده از این حلقه کنترلی توان راکتیو توربین بادی مدیریت می‌شود.

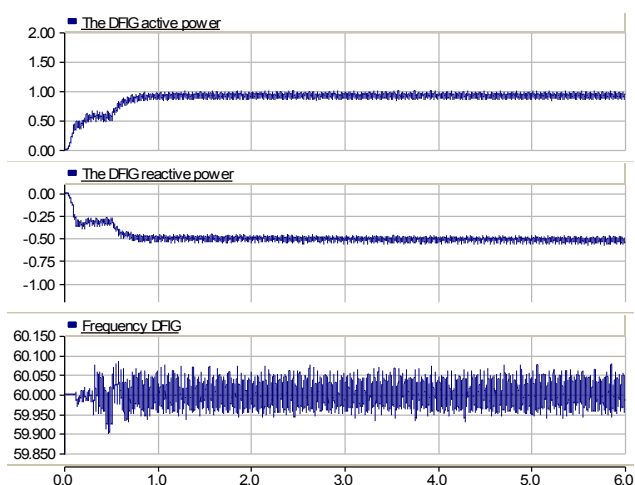


شکل ۹: کنترلر ولتاژ DFIG در حالت عملکرد جزیره

۳-۳- مطالعه NDZ

به طور کلی، ناحیه عدم تشخیص به ناحیه‌ای اطلاق می‌شود که اگر توان اکتیو و راکتیو مبادله شده بین جزیره و شبکه در لحظه‌ای پیش از جزیره‌ای شدن در آن محدوده قرار داشته باشد الگوریتم قادر به تشخیص آن نیست. اگر توان اکتیو و راکتیو مبادله شده با شبکه در لحظه پیش از جزیره‌ای شدن، ΔP و ΔQ باشد، ناحیه عدم تشخیص را می‌توان در صفحه شکل ۱۰ نمایش داد. پارامترهای UV/OV نشانگر مرزهای عملکرد رله‌های کاهش/افزایش ولتاژ و پارامترهای UF/OF نشانگر مرزهای عملکرد رله‌های کاهش/افزایش فرکانس می‌باشند.

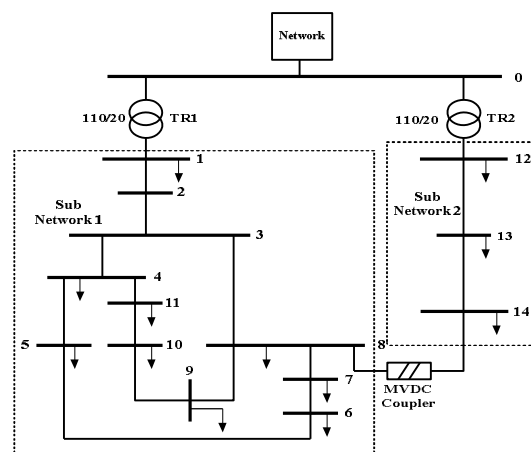
در شرایط عملکرد عادی، مقدار بار اکتیو و راکتیو در ریزشبه به ترتیب برابر با $P_{load} = 2/821 \text{ MW}$ و $Q_{load} = 1/148 \text{ MVar}$ است. در این شرایط، مقدار توان اکتیو تأمین‌شده از طرف شبکه سراسری، DFIG، CHP و سیستم فتوولتائیک به ترتیب برابر با $P_{grid} = 0/55 \text{ MW}$ ، $P_{DFIG} = 0/9 \text{ MW}$ ، $P_{CHP} = 1/2 \text{ MW}$ و $P_{PV} = 0/25 \text{ MW}$ خواهد بود. مقادیر توان‌های اکتیو و راکتیو به ترتیب برحسب مگاوات و مگاوار و فرکانس DFIG برحسب هرتز، در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در این شرایط مقدار توان راکتیو تأمین‌شده توسط شبکه سراسری و منابع تولیدی ریزشبه به ترتیب برابر با $Q_{grid} = 1/6 \text{ MVar}$ ، $Q_{DFIG} = -0/5 \text{ MVar}$ ، $Q_{CHP} = 0/8 \text{ MVar}$ است. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود فرکانس DFIG با وجود نوساناتی که دارد، در محدوده مجاز (۵۹/۹-۶۰/۱) هرتز قرار دارد.



شکل ۱۳: توان اکتیو، توان راکتیو و فرکانس DFIG در شرایط عملکرد عادی

۴-۲-۲- شرایط عملکرد جزیره‌ای سیستم

در این بخش عملکرد سیستم در لحظه‌ای که اتصال ریزشبه از شبکه سراسری به‌صورت برنامه‌ریزی‌شده یا ناخواسته قطع می‌شود و سیستم ریزشبه در شرایط جزیره‌ای قرار می‌گیرد، موردبررسی قرار خواهد گرفت. در این شبیه‌سازی برای تشخیص شرایط جزیره، فرض می‌کنیم که به‌صورت برنامه‌ریزی‌شده یا ناخواسته، کلید اصلی (که شبکه سراسری را به ریزشبه متصل می‌کند) در زمان $t=3\text{s}$ قطع می‌شود. بنابراین بعد از قطع کلید اصلی، ریزشبه از شبکه سراسری جدا شده و بنابراین در شرایط عملکرد جزیره قرار می‌گیرد. در شرایط اتصال ریزشبه به شبکه سراسری، کنترل ولتاژ و فرکانس توسط شبکه سراسری صورت می‌گیرد. در شرایط جزیره، شبکه سراسری کنترل خود بر روی ولتاژ و فرکانس شبکه را از دست می‌دهد. بنابراین در شرایط جزیره به‌منظور کنترل ولتاژ و فرکانس نیاز به تغییر در کنترل‌های



شکل ۱۱: سیستم مورد مطالعه [۳۰]

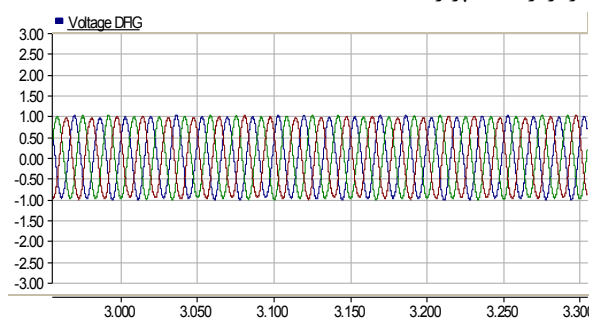
پارامترهای خطوط و بارهای شبکه استاندارد، توربین بادی با ژنراتور القایی، سیستم تولید فتوولتائیک و CHP در ضمیمه آورده شده است. برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار PSCAD/EMTDC استفاده شده است. شرایط جزیره، کلیدزنی بار و راه‌اندازی موتور برای موارد مختلف شبیه‌سازی در زمان $t=3\text{s}$ رخ می‌دهد. در این شبیه‌سازی، شکل موج‌های ولتاژ PCC، جریان بار، توان اکتیو و راکتیو بار، فرکانس سیستم و سیگنال تشخیص جزیره موردبررسی قرار خواهند گرفت. دلیل ارزیابی شکل موج‌های بار، نشان دادن عملکرد مطلوب این شیوه برای مصرف‌کنندگان سطح توزیع از نظر بررسی شرایط کیفیت توان است.

۴-۲-۲- نتایج شبیه‌سازی

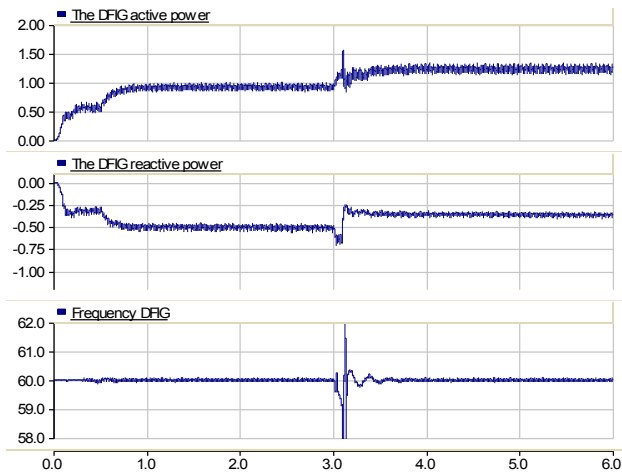
در این بخش به‌منظور نشان دادن کارایی روش پیشنهادی شبیه‌سازی این سیستم در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC آورده شده است. بدین منظور، نتایج شبیه‌سازی شرایط عملکرد عادی سیستم، شرایط وقوع جزیره، شرایط استارت موتور القایی و وقوع اتصال کوتاه در ریزشبه موردبررسی قرار خواهند گرفت.

۴-۲-۱- شرایط عملکرد عادی سیستم

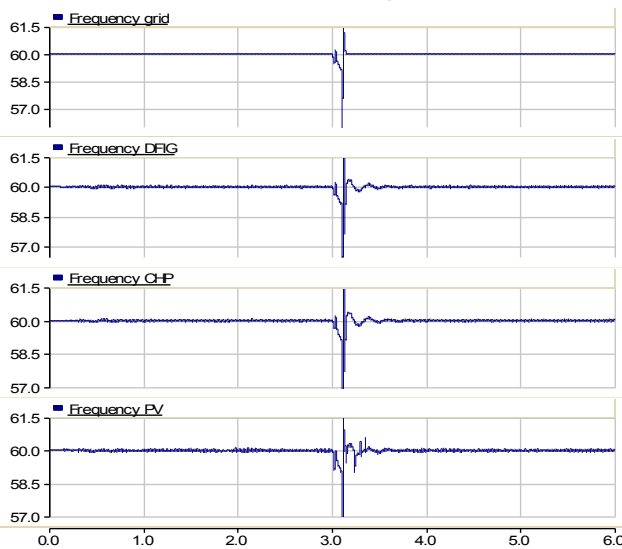
شکل ۱۲ ولتاژ استاتور DFIG را برحسب پریونیت در شرایط عملکرد عادی سیستم نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار ولتاژ برابر با یک پریونیت است.



شکل ۱۲: ولتاژ استاتور DFIG برحسب پریونیت در شرایط عملکرد عادی ریزشبه



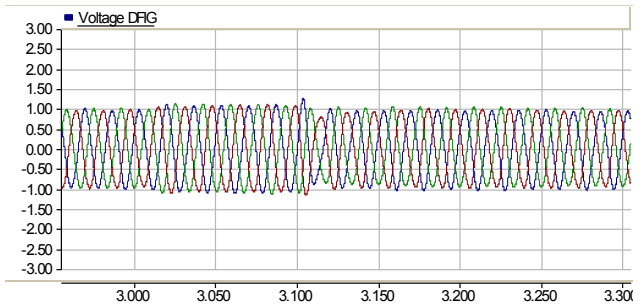
شکل ۱۵: توان اکتیو، راکتیو و فرکانس DFIG در لحظه قطع ریزشکه از شبکه سراسری و ادامه عملکرد در شرایط جزیره



شکل ۱۶: فرکانس شبکه سراسری، باس های DFIG، CHP و فتوولتائیک در لحظه قطع ریزشکه از شبکه سراسری و ادامه عملکرد در شرایط جزیره

تغییرات فرکانس ولتاژ باس استاتور DFIG به عنوان شاخص تشخیص شرایط جزیره محسوب می شود. مطابق با شکل ۱۷ در شرایطی که اتصال ریزشکه از شبکه سراسری قطع می شود، نوسانات توان منجر به این می شود که فرکانس ولتاژ DFIG از حدود مجاز خود خارج شده و در نتیجه سیستم تشخیص شرایط جزیره در حدود ۶۵ میلی ثانیه پس از قطع اتصال ریزشکه از شبکه سراسری، شرایط جزیره را تشخیص دهد. مطابق با این تشخیص و پس از حدود ۱۰۰ میلی ثانیه پس از شرایط جزیره، نوسانات فرکانس در محدوده مجاز (۵۹/۹-۶۰/۱) هرتز قرار می گیرند که این بازایی فرکانس ناشی از تغییر کنترلرهای ریزشکه برای کنترل فرکانس، تنظیم ولتاژ ریزشکه می باشند.

ریزشکه، مطابق روند ارائه شده در بخش ۳-۲-۳ است. شکل ۱۴ ولتاژ استاتور DFIG را بر حسب پریونیت نشان می دهد. در لحظه $t = 3 \text{ sec}$ شبکه سراسری به علت شرایط جزیره بر روی مقدار ولتاژ ریزشکه کنترلی ندارد و بنابراین در این لحظه مقادیر ولتاژ باس استاتور DFIG دچار اعوجاج می شود.

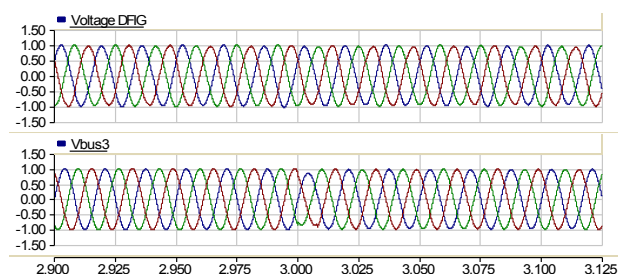


شکل ۱۴: ولتاژ استاتور DFIG در لحظه قطع ریزشکه از شبکه سراسری و ادامه عملکرد در شرایط جزیره

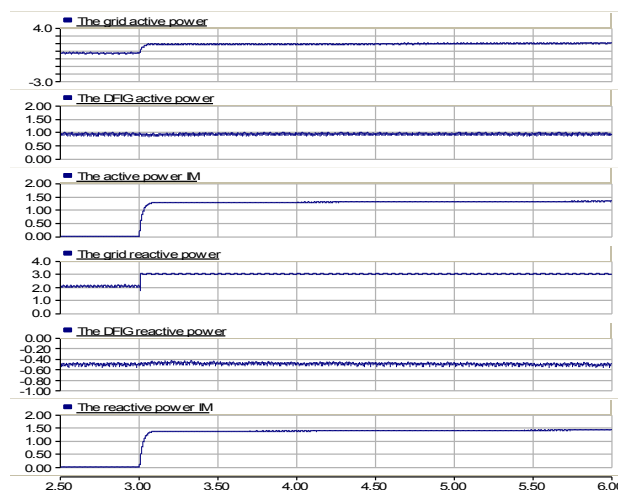
تغییرات کنترلی مولدهای تولید پراکنده ریزشکه در شرایط جزیره، باعث می شود که بعد از حدود ۱۰۰ میلی ثانیه از وقوع شرایط جزیره، مقدار ولتاژ باس استاتور ژنراتور القایی از دو سو تغذیه در مقدار یک پریونیت تنظیم شوند.

شکل ۱۵ توان اکتیو DFIG را بر حسب مگاوات قبل و بعد از شرایط جزیره نشان می دهد. در شرایط بعد از جزیره، توان شبکه سراسری صفر شده و توان اکتیو منابع تولیدی ریزشکه تغییر چندانی ندارند. تأمین بار ریزشکه توسط این منابع، باعث نوسان در فرکانس ریزشکه می شود. بنابراین با تغییر کنترلرهای ریزشکه، توان اکتیو DFIG و CHP هر کدام به مقدار 0.3 MW افزایش می یابند. توان سیستم فتوولتائیک که بخش کمی از توان اکتیو بار را تأمین می کند به دلیل اینکه در حداکثر مقدار تولید خود، کار می کند؛ تغییر چندانی ندارد. در شکل ۱۵ توان راکتیو DFIG نیز بر حسب مگاوار نشان داده شده است. در شرایط عملکرد جزیره، توان راکتیو شبکه سراسری صفر می شود و همچنین توان راکتیو DFIG و CHP به ترتیب برابر با $Q_{CHP} = -0.5 \text{ MVar}$ و $Q_{DFIG} = -0.36 \text{ MVar}$ می گردد. توان راکتیو مورد نیاز ریزشکه توسط بانک خازنی جبران گر که در باس DFIG قرار داده شده است و همچنین تغییر مناسب در کنترلر ریزشکه به ویژه در کنترلر DFIG، جبران می شود.

در لحظه ای که شرایط جزیره رخ می دهد، فرکانس باس DFIG دچار نوسان می شود. بنابراین هنگامی که فرکانس از محدوده مجاز (۵۹/۹-۶۰/۱) هرتز خارج می شود، روش پیشنهادی این نوسان فرکانس را تشخیص می دهد. نوسان فرکانس باس DFIG بر حسب هرتز در شکل ۱۶ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود فرکانس در زمان $t = 3/1 \text{ sec}$ در محدوده مجاز قرار می گیرد.

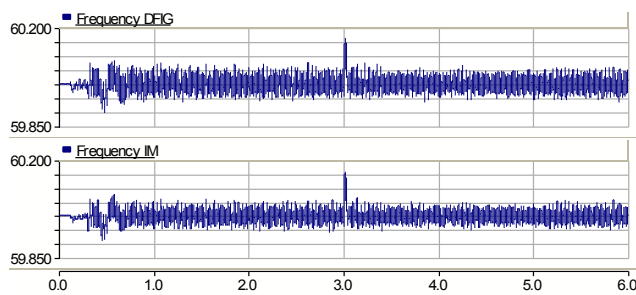


شکل ۱۸: ولتاژ استاتور DFİG و موتورهای القایی برحسب کیلوولت در شرایط استارت موتورهای القایی متصل به باس ۳

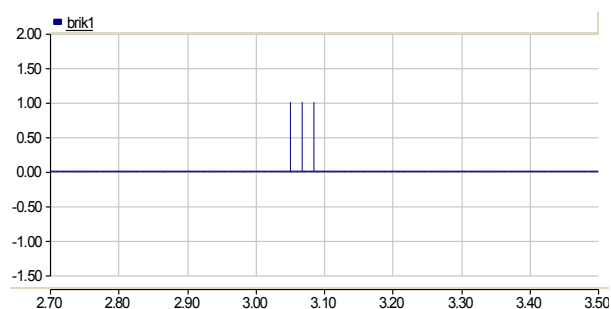


شکل ۱۹: توان اکتیو و راکتیو شبکه سراسری، DFİG و موتورهای القایی در شرایط استارت موتورهای القایی متصل به باس ۳

شکل ۲۰ فرکانس باس ۳ که موتور القایی به آن متصل است را در شرایط استارت موتورهای القایی نشان می‌دهد. به دلیل حضور شبکه سراسری و کنترل فرکانسی که این شبکه سراسری به‌عنوان باس مرجع دارد، سیستم ریزشبه در این شرایط نوسان فرکانس کم‌تری را تحمل می‌کند. همان‌طور که در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود در لحظه استارت موتورهای القایی، فرکانس باس ۳ دچار نوسان می‌شود و مقدار آن از ۶۰/۱ هرتز فراتر می‌رود. شکل ۲۱ تشخیص‌گر شرایط جزیره را نشان می‌دهد. همان‌طور که گفته شد روش پیشنهادی نباید شرایط استارت موتورهای القایی را به‌عنوان شرایط جزیره، تشخیص دهد. بنابراین مطابق با شکل ۲۱ با وجود استارت موتور و نوسان گذرای فرکانس، روش پیشنهادی به‌طور مطلوب عمل کرده و این شرایط را به‌عنوان شرایط جزیره تشخیص نمی‌دهد.



شکل ۲۰: فرکانس DFİG و موتورهای القایی برحسب هرتز در شرایط استارت موتورهای القایی متصل به باس ۳



شکل ۱۷: سیگنال تشخیص شرایط جزیره در لحظه قطع ریزشبه از شبکه سراسری و ادامه عملکرد در شرایط جزیره

۴-۲-۳- عملکرد سیستم در شرایط استارت موتور القایی

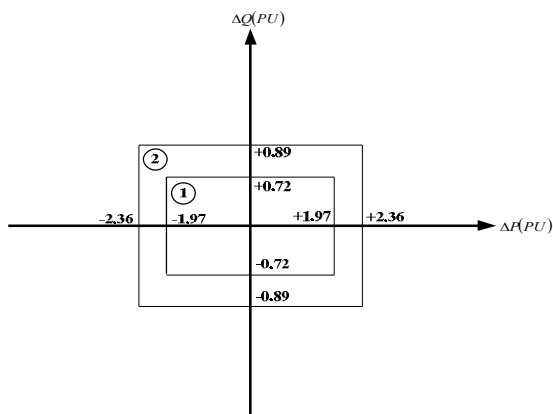
در برخی از شرایط گذرا که در ریزشبه اتفاق می‌افتد، اتصال بین ریزشبه و شبکه سراسری قطع نمی‌شود و بنابراین ریزشبه در شرایط جزیره قرار نمی‌گیرد. به همین دلیل یکی از معیارهای مهم برای اثبات عملکرد مناسب روش تشخیص شرایط جزیره، تمایزی است که روش بین این نوع حالت‌های گذرا و شرایط جزیره قائل می‌شود. یکی از این شرایط، استارت موتور القایی است. در این مطالعه چهار موتور القایی هرکدام با توان ظاهری $S = 0.475 \text{ MVA}$ و ولتاژ مؤثر خط به خط $V_{L-L} = 0.4 \text{ KV}$ به‌وسیله چهار ترانسفورماتور $0.4 / 20 \text{ KV}$ به باس ۳ ریزشبه استاندارد متصل شده است. این موتورهای القایی در زمان $t = 3 \text{ sec}$ شروع به کار می‌کنند. در این لحظه همان‌طور که در شکل ۱۸ نشان داده شده است، به علت استارت موتورهای القایی، ولتاژ باس ۳ که موتورهای القایی با استفاده از ترانسفورماتورها به آن متصل است دچار یک نوسان گذرا می‌شود و پس از حدود ۶۰ میلی‌ثانیه به عملکرد عادی خود باز می‌گردد.

در شکل ۱۹ توان‌های اکتیو و راکتیو شبکه سراسری، موتور القایی، DFİG نشان داده شده است. در این شکل، کلیه مقادیر توان‌های اکتیو برحسب مگاوات و توان‌های راکتیو برحسب مگاوار است. توان موتورهای القایی پس از استارت آن‌ها برابر با $P_{IM} = 1/27 \text{ MW}$ است. این مقدار توان اکتیو مصرفی موتور القایی توسط شبکه سراسری (که به‌عنوان باس مرجع محسوب می‌شود) تأمین خواهد شد. بنابراین مطابق با شکل ۱۹ توان اکتیو شبکه پس از استارت موتور القایی به اندازه توان اکتیو مصرفی آن افزایش می‌یابد ولی توان اکتیو منابع تولیدی ریزشبه در همان مقدار عملکرد عادی خود باقی می‌ماند.

در این شرایط همانند توان اکتیو، توان راکتیو مصرفی موتور القایی نیز افزایش می‌یابد و این توان راکتیو مصرفی موتور القایی توسط شبکه سراسری بدون اینکه در توان منابع تولیدی ریزشبه تغییری حاصل شود، تأمین خواهد شد. توان راکتیو موتور القایی برابر با $Q_{IM} = 1/2$ مگاوار است. بنابراین مقدار توان شبکه سراسری نیز به همین مقدار افزایش می‌یابد.

۴-۲-۵- بررسی NDZ روش پیشنهادی

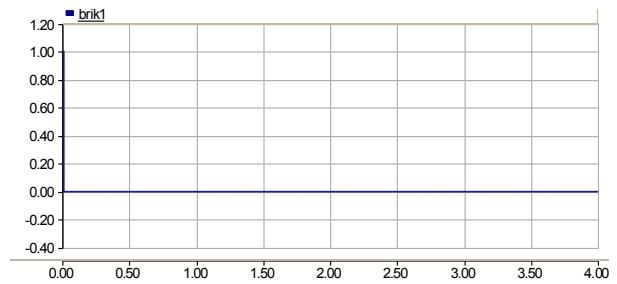
در ادامه، جهت نشان دادن توانایی روش پیشنهادی، عملکرد این روش با روش مرجع [۳] مقایسه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از مطالعات افزایش بار ریزشکه می توان ناحیه عدم تشخیص روش ارائه شده را به دست آورد. شکل ۲۴ نشان می دهد که مرزهای ایجاد NDZ برای روش پیشنهادی برای ΔP برابر $1/97$ پریونیت و برای ΔQ برابر $0/72$ پریونیت است. از شکل ۲۴ مشاهده می شود که مقدار NDZ روش [۳] برای سیستم تحت مطالعه برای ΔP برابر $2/36$ پریونیت و برای ΔQ برابر $0/89$ پریونیت است. این نتایج نشانگر بهبود و کاهش NDZ روش پیشنهادی در مقایسه با روش مرجع [۳] است.



شکل ۲۴: ناحیه عدم تشخیص سیستم تشخیص جزیره
۱: روش پیشنهادی، ۲: روش مرجع [۳]

۵- نتیجه گیری

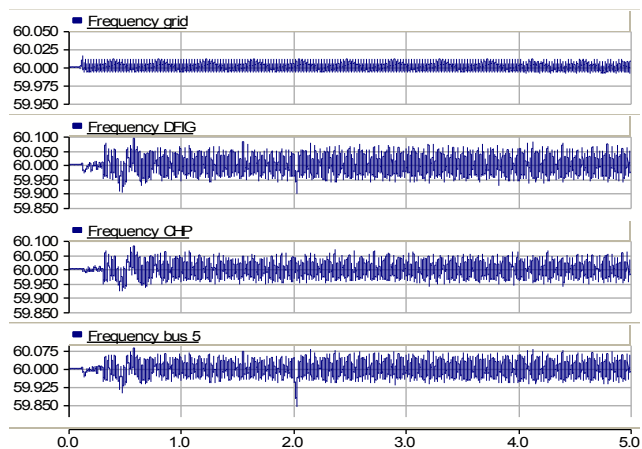
در این مقاله یک روش تشخیص جزیره اکتیو برای ریزشکه بر اساس تزریق جریان اغتشاش از طریق کنترلر مبدل سمت شبکه DFIG ارائه شده است. در روش پیشنهادی تغییرات فرکانس ولتاژ استاتور DFIG به عنوان شاخص تشخیص شرایط جزیره در نظر گرفته می شود. در این مقاله مدل سازی دینامیکی منابع تولیدی و سیستم کنترلی آن ها، عملکرد ریزشکه در شرایط نزدیک به واقعی بررسی و شبیه سازی شده است. برای این که ریزشکه بتواند در شرایط جزیره به عملکرد مطلوب خود ادامه دهد و بارهای ریزشکه را تأمین کند نیاز است که در کنترلرهای موجود در ریزشکه تغییراتی ایجاد شود. نتایج شبیه سازی اثبات می کنند که در شرایط جزیره با اعمال تغییرات پیشنهادی، ریزشکه دارای شرایط عملکرد مطلوبی است و با تقسیم بندی تولید توان بین منابع تولیدی، بار مصرفی در ریزشکه تأمین می شود. عملکرد صحیح روش پیشنهادی در شرایط گذرای راه اندازی موتور القایی و اتصال کوتاه در ریزشکه و تمایز بین این حالت های گذرا با شرایط جزیره با توجه به نتایج شبیه سازی اثبات شده است. این نتایج نشان می دهد روش پیشنهادی دارای NDZ مناسب جهت تشخیص شرایط جزیره در یک ریزشکه شامل انواع مولدهای تولید پراکنده است.



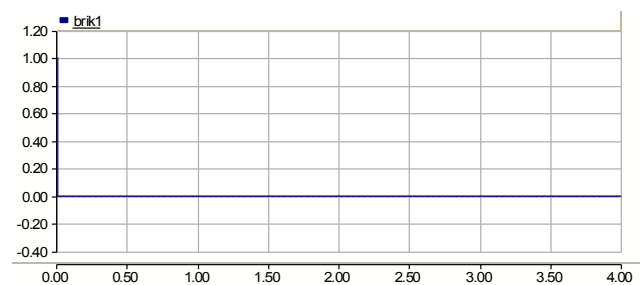
شکل ۲۱: سیگنال تشخیص شرایط جزیره در شرایط استارت موتور القایی متصل به باس ۳

۴-۲-۴- شرایط وقوع اتصال کوتاه

در این قسمت جهت بررسی صحت روش پیشنهادی در شرایط وقوع اتصال کوتاه در ریزشکه، سناریوی اتصال کوتاه در خط ۴-۵ در نزدیکی باس ۴ مورد بررسی قرار گرفته است. اتصال کوتاه در ثانیه سوم رخ داده و بعد از ۳ سیکل برطرف می شود. شکل ۲۲ نحوه تغییرات فرکانس در باس های مختلف شبکه را بر حسب هرتز نشان می دهد. همان طور که در شکل ۲۳ نشان داده شده است، روش پیشنهادی به درستی عمل کرده و شرایط وقوع اتصال کوتاه داخل ریزشکه را به عنوان شرایط جزیره تشخیص نمی دهد. این امر بیانگر توانایی روش پیشنهادی در تمایز شرایط جزیره نسبت به خطاهای حالت گذرا است.



شکل ۲۲: فرکانس شبکه سراسری، CHP، DFIG، فتوولتائیک و باس ۵ در شرایط اتصال کوتاه در خط (۴-۵) ریزشکه



شکل ۲۳: سیگنال تشخیص شرایط جزیره در شرایط اتصال کوتاه و قطع خط (۴-۵) ریزشکه

- [17] H.H. Zeineldin, and S. Conti, "Sandia frequency shift parameter selection for multi-inverter systems to eliminate non-detection zone," *IET Renewable Power Generation*, vol. 5, no 2, pp. 175-183, 2011.
- [18] L.A.C. Lopes, and Y. Zhang, "Islanding detection assessment of multi inverter systems with active frequency drifting methods," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no 1, pp. 480-186, 2008.
- [19] S. Kim, J. Hong, H. Choi, and J. Kim, "Voltage shift acceleration control for anti-islanding of distributed generation inverters," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no 4, pp. 2223-2234, 2011.
- [20] H. Vahedi, and M. Karrari, "Adaptive fuzzy sandia frequency-shift method for islanding protection of inverter-based distributed generation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 1, pp 84-92, 2013.
- [21] G. Hernández-González, and R. Iravani, "Current injection for active islanding detection of electronically-interfaced distributed resources," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no 3, pp. 1698-1705, 2006.
- [22] P. Gupta, R.S. Bhatia, and D.K. Jain, "Average absolute frequency deviation value based active islanding detection technique," *IEEE Transactions on Smart Grids*, vol. 8, no. 1, pp. 26-35, 2015.
- [23] Y. Lei, A. Mullane, G. Lightbody, and R. Yacamini, "Modeling of the wind turbine with a doubly fed induction generator for grid integration studies," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, no. 1, pp. 257-264, 2006.
- [24] N. Senthil Kumar, and J. Gokulakrishnan, "Impact of FACTS controllers on the stability of power systems connected with doubly fed induction generators," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 33, no. 5, pp. 1172-1184, 2011.
- [25] P. Vas, *Sensorless Vector and Direct Torque Control*, Oxford University Press, 1998.
- [26] H. Karimi, A. Sheikholeslami, H. Livani, and N. Norouzi, "Fault ride through capability improvement of wind farms using doubly fed induction generation," *International Universities Power engineering Conference*, pp. 1-5, 2008.
- [27] R. Teodorescu, M. Liserre, and P. Rodriguez, *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*, John Wiley and Sons, 2011.
- [28] L. Piegari, and R. Rizzo, "Adaptive perturb and observe algorithm for photovoltaic maximum power point tracking," *IET Renewable Power Generation*, vol. 4, no. 4, pp. 317-328, 2010.
- [29] D. Bejmert, and T.S. Sidhu, "Investigation into islanding detection with capacitor insertion-based method," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 6, pp. 2485-2492, 2014.
- [30] K. Rudion, A. Orths, Z.A. Styczynski, and K. Strunz, "Design of benchmark of medium voltage distribution network for investigation of DG integration," *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 1-6, 2006.
- [1] S. Chowdhury, S.P. Chowdhury, and P. Crossley, *Microgrids and Active Distribution Networks*, IETRE Series - The Institution of Engineering and Technology, 2009.
- [2] J.C. Ho, K.J. Chua, and S.K. Chou, "Performance study of a microturbine system for cogeneration application," *Renewable Energy*, vol. 29, no. 7, pp. 1121-1133, 2004.
- [3] H. Karimi, A. Yazdani, and R. Iravani, "Negative-sequence current injection for fast islanding detection of a distributed resource unit," *IEEE Transaction on Power Electronics*, vol. 23, no. 1, pp. 298-307, 2008.
- [4] P.B. Eriksen, and *et al.*, "System operation with high wind penetration," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 3, no. 6, pp. 65-74, 2005.
- [5] H. Vahedi, R. Noroozian, A. Jalilvand, and G.B. Gharehpetian, "A new method for islanding detection of inverter-based generation using DC-link voltage control," *IEEE Transaction Power on Delivery*, vol. 26, no. 2, pp. 1176-1186, 2011.
- [6] W. Chiang, H. Jou, J. Wu, K. Wu, and Y. Feng, "Active islanding detection method for the grid-connected photovoltaic generation system," *Electric Power Systems Research*, vol. 80, no 4, pp. 372-379, 2010.
- [7] B. Bahrani, H. Karimi, and R. Iravani, "Nondetection zone assessment of an active islanding detection method and its experimental evaluation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 2, pp. 217-225, 2011.
- [8] H.H. Zeineldin, and M.M.A. Salama, "Impact of load frequency dependence on the NDZ and performance of the SFS islanding detection method," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 1, pp. 139-146, 2011.
- [9] D. Velasco, C. Trujillo, G. Garcera, and E. Figueres, "An active anti-islanding method based on phase-PLL perturbation," *IEEE Transaction on Power Electronics*, vol. 26, no. 4, pp. 1056-1066, 2011.
- [10] D. Velasco, C.L. Trujillo, G. Garcera, and E. Figueres, "Review of anti-islanding techniques in distributed generators," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no 6, pp. 1608-1614, 2010.
- [11] P. Mahat, C. Zhe, and B. Bak-Jensen, "Review of islanding detection methods for distributed generation," *Third International Conference on Electric Utility deregulation and Restructuring and Power Technologies*, pp. 2743-2748, 2008.
- [12] A.M. Massoud, K.H. Ahmed, S.J. Finney, and B.W. Williams, "Harmonic distortion based island detection technique for inverter-based distributed generation," *IET Renewable Power Generation*, vol. 3, no. 4, pp. 493-507, 2009.
- [13] H.H. Zeineldin, and J.L. Kirtley, "A simple technique for islanding detection with negligible nondetection zone," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no 2, pp. 779-786, 2009.
- [14] D.D. Reigosa, F. Briz, C.B. Charro, P. García, and J.M. Guerrero, "Active islanding detection using high-frequency signal injection," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 48, no. 5, pp 1588-1597, 2012.
- [15] D. Reigosa, F. Briz, C. Blanco, P. García, and J.M. Guerrero, "Active islanding detection for multiple parallel-connected inverter-based distributed generators using high-frequency signal injection," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 3, pp 1192-1197, 2014.
- [16] E.J. Estébanez, V.M. Moreno, A. Pigazo, M. Liserre, and A.D. Aquila, "Performance evaluation of active islanding-detection algorithms in distributed-generation photovoltaic systems: two inverters case," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 4, pp. 1185-1193, 2011.

پیوست‌ها

۱- پارامترهای ژنراتور القایی از دو سو تغذیه

نام پارامتر	مقدار	نام پارامتر	مقدار
R_r	$\cdot/0.0607 \text{ pu}$	L_{Lr}	$\cdot/4 \text{ kV}$
L_{lr}	$\cdot/11 \text{ p.u}$	S	$1/5 \text{ MVA}$
L_{lm}	$4/362 \text{ p.u}$	R_s	$\cdot/0.054 \text{ p.u}$
H	$\cdot/363 \text{ s}$	L_{ls}	$\cdot/102 \text{ p.u}$

۸- مقادیر پارامترهای خطوط متصل بین باس ها در ریزشکبه استاندارد

شماره باس	شماره باس	R (Ω/km)	X (Ω/km)	C (nF/km)	L (km)
۱	۲	۰/۵۷۹	۰/۳۶۷	۱۵۸/۸۸	۲/۸۲
۲	۳	۰/۱۶۴	۰/۱۱۳	۶۶۰/۸	۴/۴۲
۳	۴	۰/۲۶۲	۰/۱۲۱	۶۴۸۰	۰/۶۱
۴	۵	۰/۳۵۴	۰/۱۲۹	۶۵۴۰	۰/۵۶
۵	۶	۰/۳۳۶	۰/۱۲۶	۵۴۸۸	۱/۵۴
۶	۷	۰/۲۵۶	۰/۱۱۳	۳۷۶۰	۰/۲۴
۷	۸	۰/۲۹۴	۰/۱۲۳	۵۶۰۰	۱/۶۷
۸	۹	۰/۳۳۹	۰/۱۱۳	۴۳۶۸	۰/۳۲
۹	۱۰	۰/۳۹۹	۰/۱۳۳	۴۸۳۲	۰/۷۷
۱۰	۱۱	۰/۳۶۷	۰/۱۳۳	۴۵۶۰	۰/۳۳
۱۱	۴	۰/۴۲۳	۰/۱۳۴	۴۹۶۰	۰/۴۹
۳	۸	۰/۱۷۲	۰/۱۱۵	۶۵۷۶	۱/۳
۱۲	۱۳	۰/۳۳۷	۰/۳۵۸	۱۶۲/۸۸	۴/۸۹
۱۳	۱۴	۰/۲۰۲	۰/۱۲۲	۴۷۸۴	۲/۹۹
۱۴	۸	۰/۲۲	۰/۱۳۴۲	۵۲۶۵/۳۹	۲/۷۲

۹ - حداکثر بار هر باس ریزشکبه تحت مطالعه ($S_{base} = 1\text{MW}$)

شماره باس	توان اکتیو (pu)	شماره باس	توان اکتیو (pu)	توان راکتیو (pu)	شماره توان راکتیو (pu)
۱	۰/۲۶۷	۰/۰۵۵	۸	۰/۲۵۴	۰/۱۲
۳	۰/۲۵	۰/۱۰۴	۹	۰/۳۴۴	۰/۲۱۴
۴	۰/۲۲۹	۰/۱۴۲	۱۰	۰/۱۱۱	۰/۰۲۷
۵	۰/۱۳۳	۰/۰۲۷	۱۱	۰/۲۲	۰/۰۵۶
۶	۰/۲۵	۰/۱۰۴	۱۲	۰/۴	۰/۰۹۴
۷	۰/۰۷۷	۰/۰۴۸	۱۳	۰/۰۳۲	۰/۰۲

زیرنویس ها

^۱ Doubly-fed induction generator

^۲ Combined heat and power

^۳ Maximum power point tracking

^۴ Non detection zone

^۵ Active frequency difference

^۶ Sendiya frequency shift

^۷ Sleep frequency shift

^۸ Point of common coupling

^۹ Grid side converter

^{۱۰} Rotor side converter

^{۱۱} Perturb and observe

^{۱۲} Voltage source converter

۲- پارامترهای لینک DC

مقدار	نام پارامتر
$500 \mu F$	$C_{dc-link}$

۳- پارامترهای سمت شبکه ژنراتور القایی از دو سو تغذیه

مقدار	نام پارامتر
0.094 p.u.	R_g
0.05 p.u.	L_G

۴- پارامترهای CHP

مقدار	نام پارامتر	مقدار	نام پارامتر
$6/55 \text{ s}$	T'_{do}	0.39 s	T''_{do}
0.99117 p.u.	X_d	0.18426 p.u.	X'_d
0.224 p.u.	X'_q	0.108 p.u.	X''_q
0.052 p.u.	R_a	$13/8 \text{ kV}$	$V_{L-L,rms}$
0.071 s	T''_{qo}	0.85 s	T'_{qo}
0.68 p.u.	X_q	0.108 p.u.	X''_d
		$1/0.4 \text{ s}$	H

۵- پارامترهای سیستم فتوولتائیک

مقدار	نام پارامتر
$2500 \mu F$	C_f
0.4 kV	V_{dc}
1800 Hz	f_c
$1/5 \Omega$	R_f
0.0015 H	L_f

۶- ظرفیت تولید منابع تولیدی متصل به باس های ریزشکبه استاندارد

شماره باس	نوع DG	P_{max} (kW)
۱۱	Photovoltaic	۲۵۰
۷	Wind Turbine	۱۲۰۰
۹	CHP Diesel	۱۶۰۰

۷- پارامترهای موتور القایی

مقدار	نام پارامتر
0.0613 p.u.	L_{ls}
1 p.u.	R_s
0.4 kV	$V_{L-L,rms}$
0.475 MVA	S
0.15 s	H
1 p.u.	L_{lm}
0.0613 p.u.	L_{lr}
0.1 pu	R_r