

کنترل فرکانس ریزش شبکه با بارزدایی و باردهی هوشمند بی درنگ،

در حضور توربین بادی

حبیب عموشاهی^۱، حبیب اله اعلمی^{۲*}

۱- مربی دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان ۲- استادیار دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۹۲/۰۹/۱۲، پذیرش: ۹۳/۰۹/۱۰)

چکیده

تأمین امنیت انرژی در شرایط بحرانی که از شاخص‌های مهم پدافند غیرعامل است، موجب استفاده از انرژی‌های نو و افزایش ضریب نفوذ منابع تولید پراکنده در پایگاه‌ها و مراکز استراتژیک نظامی شده است. در هنگام قطع برق شبکه سراسری، حفظ پایداری این ریزش‌بکه‌ها اهمیت فراوانی دارد. برای کنترل فرکانس در ریزش‌بکه‌های جزیره شده، می‌بایست تعادل تولید و مصرف همواره برقرار شود. در این مقاله برای برقراری تعادل تولید و مصرف در کوتاه مدت، از بارزدایی هوشمند بی‌درنگ استفاده شده است. زیرا به علت عدم قطعیت تولید، نبود توان رزرو، اینرسی کم و نوسانات فرکانس ناشی از منابع انرژی‌های نو در ریزش‌بکه، کنترل فرکانس با روش‌های مرسوم امکان‌پذیر نیست. به منظور راستی‌آزمایی الگوریتم پیشنهادی، مدل بر روی یک شبکه واقعی به وسیله نرم‌افزار متلب با حالت‌های بحرانی افزایش بار و کاهش تولید شبیه‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی، نشان دهنده کارایی روش پیشنهادی است.

کلید واژه‌ها: بارزدایی هوشمند، ریزش‌بکه، توربین بادی، پدافند غیر عامل.

Online Smart Load Shedding in Micro Grid in Presence of Wind Turbine

H. Amooshahi, H. A. Aalami*

Imam Hossein University

(Received: 03/12/2013; Accepted: 01/12/2014)

Abstract

The benefits of renewable energy have led to the increased penetration of Distributed Generators (DG) not only in the military sites, but have also increased the availability of continuous supply of electrical energy even in the critical conditions. During the national grid supply interruption, the stability of these systems (micro grid) is essential. In order to maintain frequency stability of these isolated micro grids, a balance between generation and consumption has to be always maintained. It is customary to use energy saving devices to maintain balance by increasing generation in the short runs, where large frequency deviation results in load shedding. In this paper, usage of interruptible/curtailable loads to maintain the balance is proposed. It is a specific load that has been reduced to control the frequency. Simulation of the proposed method has been run on the model of a real network which has verified the results and its effectiveness.

Keywords: Smart Load Shedding, Micro Grid, Wind Turbine, Passive Defence.

* Corresponding Author E-mail: h_aalami@yahoo.com

۱. مقدمه

یکی از اقداماتی که در زمان جنگ توسط دشمن انجام می‌شود، تخریب زیرساخت‌های حیاتی و گسترده از جمله ایجاد اختلال در برق‌رسانی به محیط‌های حساس و مهم مانند سایت‌های استقرار نیروهای مسلح است. در نتیجه بروز خاموشی‌های گسترده و طولانی مدت در سایت‌های فرماندهی نیروهای مسلح، ارتباط یگان‌ها و عملیات لجستیکی و تدارکات مختل می‌شود. از سوی دیگر برای پادگان‌های دور افتاده مسئله تأمین انرژی الکتریکی برای مصارف نظامی و یا رفاهی، حائز اهمیت است. بنابراین، استفاده از منابع انرژی ترکیبی^۱ از قبیل منابع تولید پراکنده سنتی، منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر بادی و خورشیدی برای پایگاه‌های نظامی حساس رواج یافته است تا اینکه بتوان تغذیه پایدار^۲ سایت‌های فوق را در شرایط بحران تضمین کرده و شاخص پدافند غیرعامل را افزایش داد. به طور نمونه، ارتش آمریکا در افغانستان با مشکل تهاجم القاعده به کاروان‌های سوخت‌رسانی برای پایگاه‌های خود مواجه شده که به منظور گذر از این بحران به سمت سایت‌های هیبریدی شامل انرژی‌های نو گام برداشته و در این زمینه سرمایه‌گذاری هنگفتی کرده است [۱].

سایت‌های هیبرید متشکل از چند نوع منبع تولید انرژی برای تولید توان به صورت محلی و در سطح ولتاژ توزیع می‌باشد. از این رو یک پایگاه نظامی به صورت ریزشبه^۳ درآمده و مباحث جدیدی در زمینه مدیریت، کنترل و حفاظت آن‌ها باید بررسی شود. وجود عدم قطعیت در تولید و لزوم حفظ قابلیت اطمینان باعث افزایش ادوات پایش و کنترل شده و یک پایگاه به صورت ریزشبه هوشمند^۴ طراحی می‌شود [۲].

در ریزشبه جزیره شده کنترل فرکانس بسیار با اهمیت است. استانداردهای موجود در این زمینه از جمله IEEE 1547 روز به روز کامل تر شده و روش‌های جدیدی به منظور بهره‌برداری از ریزشبه‌ها در زمان قطع برق شبکه سراسری ارائه می‌شود [۳]. در ریزشبه‌ها به دلیل وجود عدم قطعیت در منابع انرژی از جمله بادی و خورشیدی، برنامه‌ریزی سمت بار اهمیت زیادی دارد. مدیریت سمت تقاضا^۵ شامل جابه‌جایی بار، باردهی، شکل‌دهی بار و بارزدایی است. در ریزشبه هوشمند جزیره شده و با سطح توان پایین، می‌توان بحث بارزدایی و شکل‌دهی بار را با هم ترکیب کرده و با عنوان بارزدایی هوشمند مطرح ساخت که به صورت بی‌درنگ^۶ عمل می‌کند [۴]. ریزشبه مورد مطالعه یک سایت نظامی است که کنترل بارهای آن در اختیار مدیر/فرمانده سایت است. بار الکتریکی در این نوع ریزشبه به دو دسته ضروری و غیر ضروری (می‌تواند به مدت

طولانی قطع باشد) تقسیم می‌شود. در شرایط جنگی، یک سایت نظامی دارای بارهای ضروری از جمله تغذیه دستگاه‌های ارتباطی، رادارها، شارژر باتری‌ها و کلیه ادواتی است که می‌بایست به طور مداوم فعال باشند و خاموش شدن آن‌ها موجب اختلال در انجام عملیات نظامی می‌شود. بارزدایی در سامانه‌های قدرت با روش‌های گوناگونی از جمله استفاده از شبکه‌های عصبی و فازی انجام می‌شود [۵].

برای بارزدایی در ریزشبه‌ها می‌بایست به ویژگی‌های خاص آن‌ها و منابع انرژی نو توجه ویژه داشت. عدم قطعیت تولید و نبود توان رزرو، اینرسی کم و نوسانات فرکانس ناشی از منابع انرژی نو در ریزشبه، کنترل فرکانس را دشوارتر می‌کند [۶ و ۷]. استفاده از روش‌های مرسوم تولید پراکنده سنتی مانند آنچه که در [۷-۳] ذکر شده با مشکل مواجه است و بارزدایی هوشمند بی‌درنگ به منظور کنترل فرکانس در ریزشبه‌های شامل منابع انرژی‌های نوین ضروریست [۸].

در این مقاله، شرایط آفند دشمن این‌گونه در نظر گرفته شده که به علت حمله نظامی دشمن، ارتباط سامانه الکتریکی سایت نظامی با شبکه سراسری برق قطع می‌شود. در نگاه اول، به هنگام قطع ارتباط سامانه الکتریکی سایت نظامی با شبکه سراسری، انرژی الکتریکی مورد نیاز سایت نظامی توسط منابع داخلی یعنی دیزل ژنراتور و توربین باد تأمین می‌شود. به این ترتیب یک سایت تولید برق هیبریدی وجود دارد که در کنار منبع تغذیه سنتی از منبع انرژی نوین نیز سود می‌برد و این امر باعث افزایش قابلیت اطمینان در تدوam برق‌رسانی و در نتیجه بهبود شاخص‌های پدافند غیرعامل (مانند امنیت تأمین انرژی) می‌شود.

ریزشبه‌ای که برای سایت‌های نظامی در شرایط اضطراری طراحی می‌شود می‌بایست دارای شاخص‌های پدافند غیرعامل بسیار بالایی باشد. بدین منظور علاوه بر حفظ تدوام برق‌رسانی لازم است ساده‌ترین سبک کنترل و مدیریت در آن دیده شود چرا که در شرایط بحرانی دسترسی به نیروی متخصص برای مدیریت سامانه دشوار است. حال در صورت استفاده از توربین بادی در کنار دیزل ژنراتور، برای ایجاد تعادل بین تولید و مصرف و در نتیجه کنترل و تثبیت فرکانس می‌بایست راهکار مناسبی انتخاب شود.

ادوات ذخیره کننده انرژی از جمله باتری‌ها، چرخ طیار و ابرخازن‌ها به منظور افزایش اینرسی ریزشبه و دفع نوسانات فرکانس استفاده می‌شوند. اما می‌بایست به هزینه احداث و مسائل نگهداری آن توجه داشت. ساده‌ترین و در دسترس‌ترین این ادوات باتری‌ها هستند که آن‌ها نیز با احتساب سامانه واسط الکترونیک قدرت برای مدیریت شارژ و دشارژ آن‌ها، پیچیده به نظر می‌رسند.

ادوات ذخیره کننده انرژی با تزریق یا جذب انرژی در هنگام عدم تعادل تولید و مصرف، نوسانات فرکانس را رفع می‌کنند. در شرایط اضطراری که عدم تعادل تولید و مصرف شدیدتر شود، به ناچار می‌بایست بارزدایی انجام گیرد. در صورتی که بتوان عدم تعادل تولید و مصرف را با تغییر بی‌درنگ در میزان مصرف کنترل کرد، دیگر

¹ Hybrid

² Sustainable

³ Micro Grid

⁴ Smart Grid

⁵ Demand Side Management

⁶ Online

اغتشاش در تعادل توان در نظر گرفته می‌شود [۷]. به این ترتیب میزان توان کل عدم متعادل برای N ژنراتور و اینرسی سامانه و فرکانس سامانه با رابطه (۱) معرفی می‌شود.

$$\Delta P_{total} = \sum_{i=1}^N \Delta P_i = \sum_{i=1}^N \frac{2H_i}{f_n} \cdot \frac{df_i}{dt} = \frac{2Hec}{f_n} \cdot \frac{dfec}{dt} \quad (1)$$

که در آن،

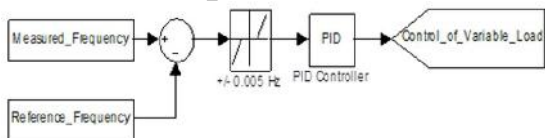
$$Hec = \sum_{i=1}^N H_i$$

$$fec = \frac{\sum_{i=1}^N H_i f_i}{\sum_{i=1}^N H_i}$$

به طوری که، ΔP_i میزان توان عدم متعادل بین بار و تولید، N تعداد ژنراتور، Hec ثابت اینرسی معادل سامانه و fec فرکانس معادل سامانه است.

در ریزشبه‌ها به دو دلیل نمی‌توان از رابطه فوق استفاده کرد. اول اینکه به دلیل استفاده از منابع انرژی نوین، میزان اینرسی ریزشبه به سادگی قابل محاسبه نبوده و همچنین در برخی از منابع مقدار اینرسی متغیر بوده و متناسب با سطح تولید توان است [۱۰ و ۱۱]. دوم اینکه، معیار df/dt به ویژه برای سامانه‌هایی که دارای نیروگاه بادی می‌باشد قابل استفاده نیست [۳، ۶ و ۸]. بنابراین برای بارزدایی در ریزشبه مورد مطالعه پیشنهاد می‌شود از معیار فرکانس (f) استفاده شود.

بلوک دیاگرام روش پیشنهادی در شکل (۱) نشان داده شده است. همچنین در شکل (۲) روندنمای الگوریتم بارزدایی پیشنهادی ارائه شده است. در این الگوریتم فرکانس ریزشبه اندازه‌گیری شده و سپس با مقدار مرجع مقایسه می‌شود. در صورتی که میزان انحراف فرکانس بیش از مقدار مجاز باشد، با استفاده از یک کنترل‌کننده PID، به کنترل‌کننده محلی بار، دستور تغییر پله‌های بار داده می‌شود. این الگوریتم به طور بی‌درنگ در ریزشبه عمل خواهد کرد.



شکل ۱. بلوک دیاگرام الگوریتم پیشنهادی

۳. مدل‌سازی توربین بادی

برای داشتن درک درستی از انرژی جنبشی باد، توده‌ای از سیال (هوا) به صورت استوانه را در نظر گرفته که در شکل (۳) نشان داده شده است. باد دارای سرعت V می‌باشد. انرژی جنبشی سیال یا یک جسم با جرمی برابر M و سرعت V را می‌توان از رابطه (۲) به دست آورد.

نیازی به وجود ادوات ذخیره کننده انرژی نیز نیست. این روش ساده و ارزان بوده و امکان استفاده از آن در ایران نیز وجود دارد. در این مقاله ریزشبه مورد نظر فاقد ادوات ذخیره کننده انرژی بوده و برای ایجاد تعادل بین تولید و مصرف از بارهای قابل کاهش/قطع^۱ استفاده می‌شود. برخی از بارهای تجمعی که خود از گروهی از بارهای کوچک تشکیل شده‌اند، این قابلیت را دارند که مقدار آن‌ها را به طور پله‌های کوچک تغییر داد. به طور مثال شارژ یک‌طرفه باتری‌ها یا موتورهای الکتریکی که برای مصارف خنک کننده یا گرم کننده استفاده می‌شوند از این قابلیت برخوردارند [۹]. بنابراین با استفاده از یک کنترل کننده ساده می‌توان به محض تغییر فرکانس، میزان بار را تغییر داد. در این صورت، مشکلات ناشی از عدم قطعیت تولید و همچنین تغییر ناگهانی بارهای موجود، کنترل می‌شود.

ادامه مقاله به شرح ذیل سازماندهی شده است. در قسمت دوم مقاله به تشریح روش پیشنهادی پرداخته شده است. در بخش سوم مدل‌سازی توربین باد انجام شده و بخش چهارم به معرفی شبکه واقعی مورد مطالعه و شبیه‌سازی سامانه و تحلیل نتایج می‌پردازد. در نهایت نتیجه‌گیری مقاله در بخش پنجم و مراجع در بخش ششم ارائه شده است.

۲. روش پیشنهادی

در بررسی ریزشبه‌ها می‌بایست به تفاوت آن‌ها با سامانه‌های قدرت سنتی توجه داشت. پاره‌ای از مسائل در ریزشبه‌ها با سامانه‌های قدرت سنتی تفاوت‌های مهمی دارد. در مباحث دینامیک و پایداری سامانه این تفاوت‌ها بسیار تأثیرگذار است. در زمینه کنترل و تثبیت فرکانس در ریزشبه‌ها می‌بایست به نکاتی توجه داشت:

الف- عدم قطعیت تولید انرژی بادی و خورشیدی

ب- اینرسی کم ریزشبه

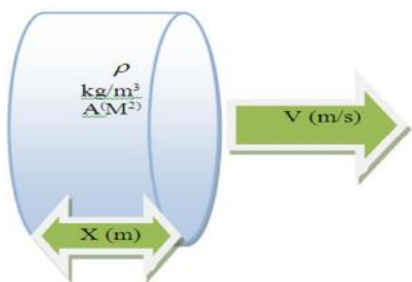
ج- فاصله الکتریکی کوتاه بین منبع تولید و مصرف کننده

د- نوسانات فرکانس، ناشی از منابع انرژی نوین مانند توربین بادی

با توجه به تفاوت‌های ذکر شده، در ریزشبه‌ها میرایی نوسانات کاهش یافته و نوسانات اجزای مختلف دچار تداخل می‌شوند. به همین دلیل، معیارهایی که در سامانه‌های قدرت سنتی مناسب هستند در ریزشبه‌ها می‌توانند مضر باشند [۶].

در این مقاله پیشنهاد شده که برای ایجاد تعادل بین تولید و مصرف در ریزشبه، بارزدایی بی‌درنگ به طور پله‌ای روی بارهای قابل کنترل انجام بگیرد. بدین منظور می‌بایست معیاری برای تشخیص عدم تعادل تولید و مصرف انتخاب کرد. در سامانه‌های قدرت سنتی، ابتدا معادله نوسان ژنراتور معرفی شده و اختلاف بین توان الکتریکی تولیدی و توان مکانیکی توربین به عنوان میزان

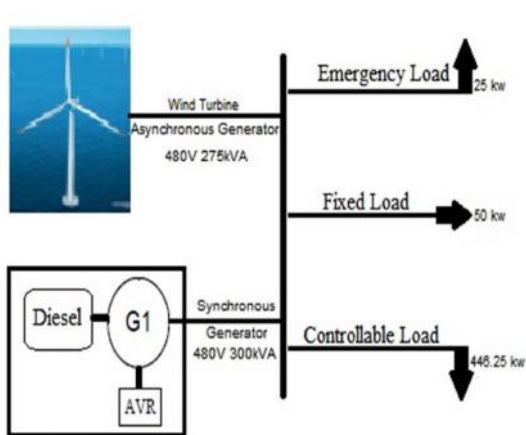
^۱ Interruptible/Curtailable Loads



شکل ۳. توده‌ای از سیال هوا با چگالی وزنی مخصوص ρ ، طولی برابر با x و سطح مقطع A .

۴. شبیه‌سازی و تحلیل نتایج در شرایط آفند

شکل (۴) ساختار یک ریزشبه ۴۸۰ ولت با دو منبع تولید پراکنده را نشان می‌دهد. سامانه مورد مطالعه شامل یک دیزل ژنراتور سنکرون ۳۰۰ کیلوولت آمپر و یک توربین بادی ۲۷۵ کیلوولت آمپر با ژنراتور القایی می‌باشد.



شکل ۴. شماتیک شبکه تحت مطالعه

بار این ریزشبه به صورت سه گروه بار تجمیع شده در نظر گرفته شده است، یک بار ثابت ۵۰ کیلووات و یک بار قابل کنترل ۴۴۶/۲۵ کیلووات و یک بار اضطراری ۲۵ کیلووات که در هنگام وضعیت عادی در شبکه نبوده و به عنوان بار ناگهانی به مدار اضافه می‌شود. این ریزشبه واقعی بوده و در یکی از جزایر آلاسکا مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۲].

شرایط آفند دشمن اینگونه اعمال شده است که ارتباط سامانه الکتریکی سایت نظامی با شبکه سراسری برق قطع شده و سامانه مورد نظر ایزوله شود. در این شرایط نیز بدترین شرایط لحاظ شده، به این ترتیب که توان تولیدی دیزل ژنراتور صفر بوده و از آن به عنوان کندانسور سنکرون استفاده شده است. به منظور بررسی روش پیشنهادی، سامانه معرفی شده در قسمت ۴ شبیه‌سازی شده است. میزان انحراف مجاز فرکانس برای آستانه بارزدایی و همچنین میزان پله‌های بار متغیر می‌بایست متناسب با یکدیگر انتخاب شوند، به

$$E_{wind} = \frac{1}{2} M V^2 \quad (2)$$

با فرض وجود سیالی با چگالی وزنی ρ در طولی برابر با x و سطح مقطع A جرم توده سیال به صورت رابطه (۳) خواهد شد.

$$M = \rho A x \quad (3)$$

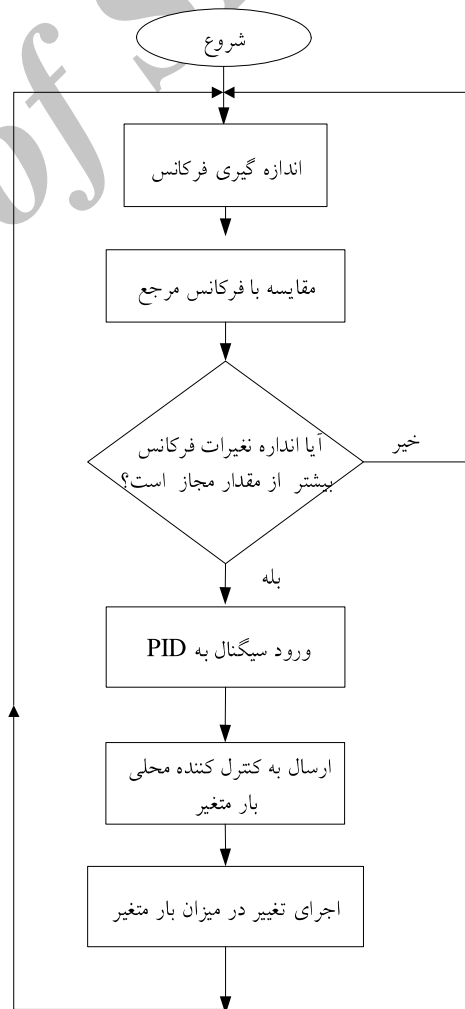
با جای گذاری روابط فوق رابطه (۴) به دست می‌آید.

$$E_{wind} = \frac{1}{2} \rho A x V^2 \quad (4)$$

با مشتق گرفتن از رابطه (۴)، میزان توان لحظه‌ای توده سیال هوا به دست می‌آید.

$$P_{wind} = \frac{dE_{wind}}{dt} = \frac{1}{2} \rho A \left(\frac{dx}{dt} \right) V^2 = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (5)$$

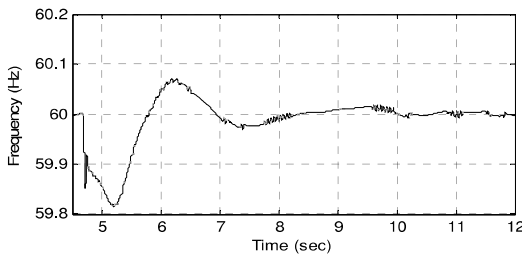
توربین‌های بادی نمی‌توانند تمام توان سیال باد را جذب کنند و راندمان حداکثر آن‌ها محدود به مقداری به نام حد بتز^۱ که برابر ۵۹/۳ درصد کل توان باد است، محدود می‌شود. برای مدل‌سازی دیزل ژنراتور (و کنترل‌های آن) و ژنراتور القایی از مراجع [۳ و ۷] استفاده شده است.



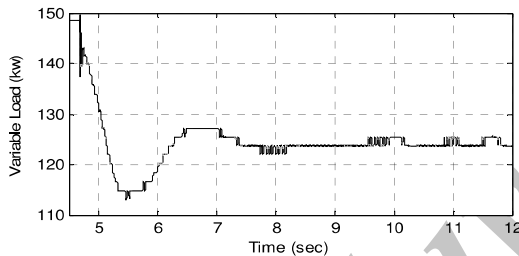
شکل ۲. روندنمای الگوریتم پیشنهادی

¹ Betz Limit

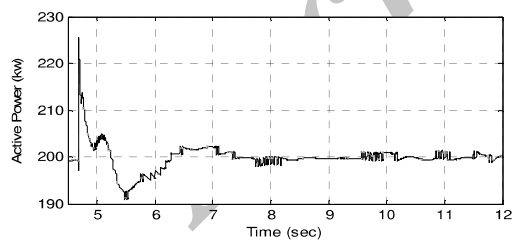
روندنامی شکل (۲) به طور مداوم بار را کاهش داده و آن را به صورت پله پله از مدار خارج می‌کند تا در ثانیه ۵/۵ جلوی افت فرکانس گرفته شده و فرکانس شروع به افزایش می‌کند. در این حالت می‌توان به تدریج دوباره بارهای مورد نیاز را وارد شبکه کرد تا مطابق شکل (۶) بار نهایی به همان مقدار اولیه ۱۲۵ کیلووات برسد (معادل ۲۵ کیلوواتی که وارد شبکه شده است از بارهای غیر ضرور کاسته می‌شود) و همان‌طور که در شکل (۵) دیده می‌شود فرکانس ریز شبکه به مقدار اولیه خود یعنی ۶۰ هرتز رسیده و تثبیت می‌گردد. بنابراین در شرایط آفند، سامانه طراحی شده قابلیت پایداری را داشته و به عملکرد خود ادامه داده است.



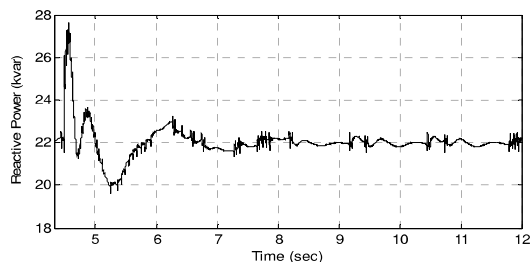
شکل ۴. فرکانس ریز شبکه با ورود ناگهانی بار ۲۵ کیلوواتی در ثانیه ۴/۵ ام



شکل ۵. میزان بار قابل کنترل ریز شبکه، با ورود ناگهانی بار ۲۵ کیلوواتی در ثانیه ۴/۵ ام



شکل ۶. توان اکتیو تولیدی توربین بادی در ریز شبکه، با ورود ناگهانی بار ۲۵ کیلوواتی در ثانیه ۴/۵ ام



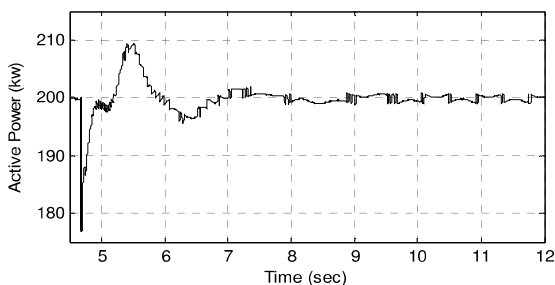
شکل ۷. توان راکتیو کندانسور سنکرون (دیزل ژنراتور)، با ورود ناگهانی بار ۲۵ کیلوواتی در ثانیه ۴/۵ ام

طوری که تأخیر عملکرد الگوریتم پیشنهادی باعث ناپایداری سامانه نگردد. براین مبنا پله‌های بار متغیر را حدود ۱/۷۵ کیلووات در نظر گرفته و آستانه بارزدایی ۰/۰۰۵ هرتز تعیین شده است. این مقادیر با توجه به ایمنی سامانه مورد نظر و با روش تجربی آنالیز پایداری گذرای سامانه به دست آورده شده است [۶ و ۱۳]. لازم به ذکر است در این سامانه محدودیتی در مورد بار متغیر و میزان پله‌های آن در نظر گرفته نشده است ولی بدیهی است که در عمل، میزان پله‌های قابل تغییر دارای محدودیت‌های متناسب با بار خواهد بود. پس از طراحی مقادیر پله‌ها و آستانه بارزدایی، دو نوع اغتشاش در سامانه اعمال شده و نتایج آن بررسی می‌شود. تغییر ناگهانی بار و تغییر ناگهانی تولید (سرعت باد) به عنوان اغتشاش در نظر گرفته شده است.

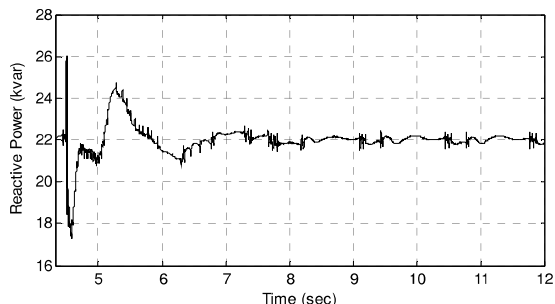
۴-۱. تغییر ناگهانی بار (ورود و خروج بار)

در این قسمت به منظور بررسی بارزدایی پیشنهادی و نشان دادن توانایی تثبیت فرکانس و پایدار نگه داشتن ریز شبکه و توربین بادی، ورود و خروج ناگهانی بار شبیه‌سازی شده است.

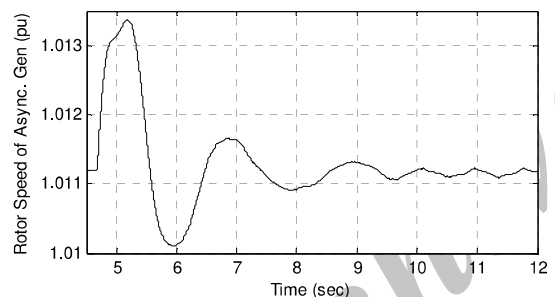
در ابتدا باری به میزان ۲۵ کیلووات در ثانیه ۴/۵ ام، وارد ریز شبکه شده که باعث بر هم خوردن تعادل تولید و مصرف می‌شود. از آنجایی که میزان تولید توسط توربین بادی قابل افزایش نیست و با توجه به محدودیت افزایش تولید توسط دیزل ژنراتور (محدودیت سوخت)، به اجبار می‌بایست بارزدایی صورت پذیرد. بنابراین با تجاوز انحراف فرکانس از میزان تعیین شده، کنترل کننده PID فرمان حذف پله‌های بار را به کنترل کننده محلی بار قابل کنترل ارسال می‌کند. در شکل‌های (۵-۹) به ترتیب فرکانس ریز شبکه، میزان بار متغیر، توان اکتیو تولیدی توربین بادی، توان راکتیو کندانسور سنکرون (دیزل ژنراتور) و سرعت رتور ژنراتور القایی توربین بادی آورده شده است. مطابق شکل‌های (۵ و ۶) مشاهده می‌شود در لحظه ورود بار اضطراری به ریز شبکه، فرکانس تا حدود ۵۹/۹ هرتز رسیده که بارزدایی هوشمند اجرا شده و پس از آن به آرامی با کاهش بار قابل کنترل، فرکانس به میزان مجاز بازمی‌یابی شده است. در نهایت پس از طی حالت گذرا، میزان بار قابل کنترل ۲۵ کیلووات کاهش یافته و بدین صورت ورود بار اضطراری را جبران کرده است. در شکل (۷) نیز توان تولیدی توربین بادی پس از طی نوسان ناشی از عدم تعادل تولید و مصرف، در میزان ۲۰۰ کیلووات ثابت مانده است. مطابق با شکل (۸) توان راکتیو نیز توسط حلقه AVR دیزل ژنراتور که به صورت کندانسور سنکرون عمل می‌کند کنترل شده است. همچنین سرعت رتور ژنراتور القایی نیروگاه بادی، بعد از ورود بار اضطراری به ریز شبکه، پس از طی حالت گذرای ۶ ثانیه‌ای پایدار مانده است. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود پس از ورود بار ۲۵ کیلووات اضطراری، فرکانس ریز شبکه افت کرده و پس از حدود یک ثانیه (ثانیه ۵/۵) به پایین‌تر مقدار خود یعنی تقریباً به ۵۹/۸ هرتز می‌رسد. در مدت این یک ثانیه سامانه کنترل طراحی شده برای ریز شبکه (مطابق



شکل ۱۲. تغییرات توان اکتیو تولیدی توربین بادی در ریزشبهه، با خروج ناگهانی بار ۲۵ کیلوواتی در ثانیه ۴/۵ ام



شکل ۱۳. توان راکتیو کندانسور سنکرون (دیزل ژنراتور)، با خروج ناگهانی بار ۲۵ کیلوواتی در ثانیه ۴/۵ ام

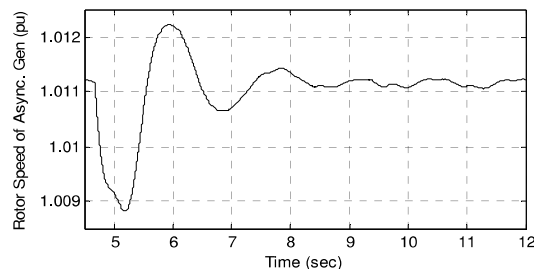


شکل ۱۴. تغییرات سرعت رتور ژنراتور القایی، با خروج ناگهانی بار ۲۵ کیلوواتی در ثانیه ۴/۵ ام

۴-۲. تغییر ناگهانی تولید (کاهش و افزایش سرعت باد)

در این بخش از مقاله فرض می‌شود در ثانیه ۲ ام سرعت باد از میزان ۱۰ متر بر ثانیه به ۹ متر بر ثانیه کاهش یافته و دوباره در ثانیه ۷ ام به میزان ۱۰ متر بر ثانیه بازمی‌گردد. همچنین توان تولیدی دیزل ژنراتور صفر بوده و از آن به عنوان کندانسور سنکرون استفاده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های (۱۹-۱۵) به ترتیب فرکانس ریزشبهه، میزان بار متغیر، توان اکتیو تولیدی توربین بادی، توان راکتیو کندانسور سنکرون (دیزل ژنراتور) و سرعت رتور ژنراتور القایی نیروگاه بادی آورده شده است.

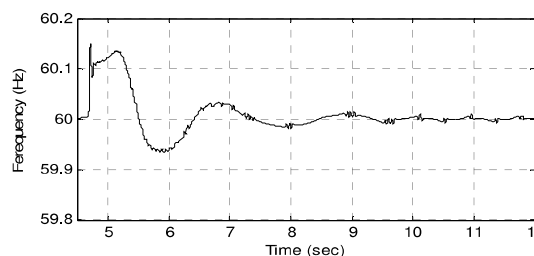
در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود که با افت فرکانس و تجاوز از محدوده تعیین شده، بارزدایی روی بار قابل کنترل اجرا شده و اغتشاش ناشی از تغییر سرعت باد را خنثی کرده است. مطابق شکل‌های (۱۶) و (۱۷)، توان تولیدی توربین بادی به دلیل کاهش سرعت باد



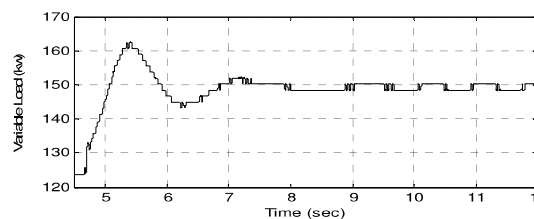
شکل ۹. سرعت رتور ژنراتور القایی، با ورود ناگهانی بار ۲۵ کیلوواتی در ثانیه ۴/۵ ام

به منظور نشان دادن پایداری ریزشبهه در حضور سامانه کنترل پیشنهاد شده، باری به میزان ۲۵ کیلووات در ثانیه ۴/۵ ام از ریزشبهه خارج شده که نتایج آن در شکل‌های (۱۴-۱۰) آورده شده است. با خارج شدن بار به طور ناگهانی تعادل تولید و مصرف برهم می‌خورد اما این بار میزان تولید بیشتر از میزان مصرف است. در هر صورت مطابق با الگوریتم پیشنهادی (روندنمای شکل (۲)) با تجاوز انحراف فرکانس، فرمان افزایش بار قابل کنترل صادر می‌شود.

در شکل‌های (۱۴-۱۰) به ترتیب فرکانس ریزشبهه، میزان بار متغیر، توان اکتیو تولیدی توربین بادی، توان راکتیو کندانسور سنکرون (دیزل ژنراتور) و سرعت رتور ژنراتور القایی توربین بادی آورده شده است. مشاهده می‌شود که با خروج بار در لحظه ۴/۵ ام، فرکانس و همچنین سرعت رتور توربین بادی افزایش یافته است که پس از افزایش میزان بار قابل کنترل و طی شدن زمان گذرا، فرکانس و سرعت رتور به میزان پایدار خود برگشته است. در دو شکل (۸) و (۱۳) توان راکتیو توسط حلقه AVR در میزان ۲۲ کیلو وار ثابت مانده است چراکه بار وارد شده و یا خارج شده به صورت اهمی خالص بوده و میزان توان راکتیو مصرفی بارها و یا ژنراتور القایی توربین بادی تغییری نداشته است. بدین ترتیب بار قابل کنترل با جریان بار خارج شده، پایداری توربین بادی و در نتیجه تدوام برق‌رسانی در شرایط آفند را تضمین کرده است.

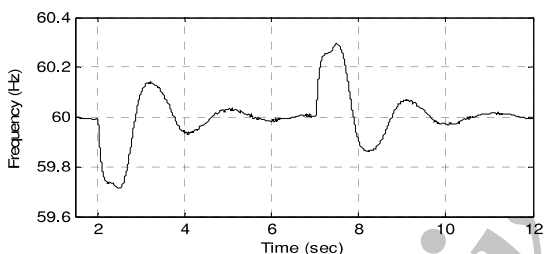


شکل ۱۰. فرکانس ریزشبهه، با خروج ناگهانی بار ۲۵ کیلوواتی در ثانیه ۴/۵ ام

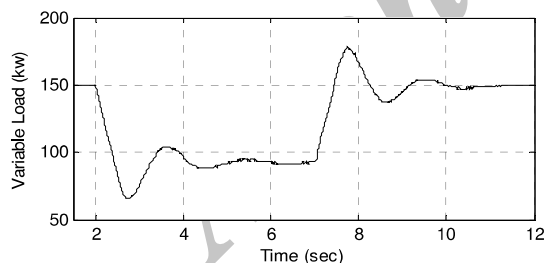


شکل ۱۱. افزایش بار قابل کنترل ریزشبهه به منظور تثبیت فرکانس با خروج ناگهانی بار ۲۵ کیلوواتی در ثانیه ۴/۵ ام

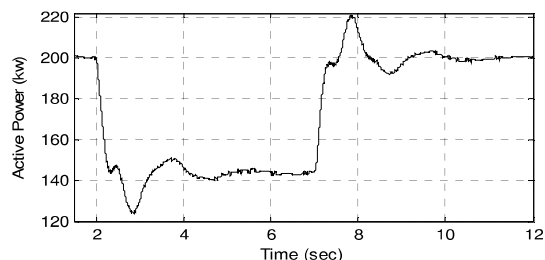
مطابق با جدول (۱)، پله اول بار زدایی در استاندارد UCTE در فرکانس ۴۹ هرتز فعال می‌شود که انحراف فرکانس از مقدار نامی ۲ درصد است. در سناریوهای مختلف شبیه سازی شده با روش پیشنهادی فرکانس ریزشیکه (شکل‌های (۵)، (۱۰) و (۱۵)) از محدوده ۵۹/۷ تا ۶۰/۳ تجاوز نکرده است. بنابراین انحراف فرکانس از مقدار نامی در روش پیشنهادی ۰/۵ درصد می‌باشد. همچنین روش پیشنهادی مؤلفین این تحقیق، در مقایسه با روش مرجع شماره [۷] نیز عملکرد بهتری در بازیابی فرکانس و پایدار نگه‌داشتن ریزشیکه دارد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که بارزدایی/باردهی هوشمند بی‌درنگ پیشنهادی برای ریزشیکه هوشمند، علاوه بر حفظ پایداری فرکانس ریزشیکه بدون حضور ادوات ذخیره کننده انرژی، توانسته است پایداری توربین بادی و ریزشیکه را با یک کنترل کننده ساده حفظ کند. همچنین با استفاده از دیزل ژنراتور به عنوان کندانسور سنکرون، میزان توان راکتیو سامانه به صورت پایدار تأمین شده است. این تحقیق و ارائه روش کنترلی پیشنهادی، توانایی ریزشیکه‌ها در تغذیه انرژی الکتریکی سایت‌های نظامی ایزوله شده در شرایط آفند دشمن و یا سایت‌های نظامی دور از دسترس را تأیید می‌کند.



شکل ۱۵. فرکانس ریزشیکه، با کاهش سرعت باد در ثانیه ۲ ام از میزان ۱۰ به ۹ متر بر ثانیه به مدت ۵ ثانیه



شکل ۱۶. میزان بار قابل کنترل ریزشیکه، با کاهش سرعت باد در ثانیه ۲ ام از میزان ۱۰ به ۹ متر بر ثانیه به مدت ۵ ثانیه



شکل ۱۷. توان اکتیو تولیدی توربین بادی در ریزشیکه، با کاهش سرعت باد در ثانیه ۲ ام از میزان ۱۰ به ۹ متر بر ثانیه به مدت ۵ ثانیه

به حدود ۱۴۰ کیلووات افت کرده که پس از انجام بارزدایی روی بار قابل کنترل، افت تولید با برنامه کاهش مصرف جبران شده است. البته همان‌طور که در شکل (۱۶) مشاهده می‌شود در این حالت مقدار بارزدایی حدود ۸۵ کیلووات است تا افت تولید به وجود آمده جبران و شبکه بازیابی شود. در حین حالت گذرا با توجه به افزایش فرکانس و احیا شبکه به تدریج میزان بار کاهش یافته، تقلیل می‌یابد تا در نهایت به حدود ۶۰ کیلووات می‌رسد. مطابق با کاهش سرعت باد، میزان توان راکتیو مصرفی ژنراتور القایی توربین بادی کاهش می‌یابد. مطابق شکل (۱۸)، حلقه AVR دیزل ژنراتور که نقش کندانسور سنکرون را به عهده دارد، توانسته است توان راکتیو را مطابق نیاز سامانه تأمین کرده و از مقدار ۲۲ کیلو وار به حدود ۱۲ کیلو وار کاهش یافته است. در شکل (۱۹)، پس از افت سرعت باد، سرعت شفت ژنراتور القایی توربین بادی نیز از میزان ۱/۰۱۵ به ۱/۰۰۸ پروینت کاهش یافته و دوباره پس از بازگشت سرعت باد به میزان قبلی خود، شفت رتور سرعت گرفته است. بدیهی است در صورت کاهش بیشتر سرعت باد چنانچه برنامه کاهش بارهای قابل کاهش/قطع برای مقدار بیشتری از بارها صورت پذیرد، پایداری شبکه محفوظ خواهد ماند.

در این شبیه‌سازی افزایش مقدار تولید (افزایش سرعت باد) نیز مورد مطالعه قرار گرفته و پیاده‌سازی شده است. همان‌طور که در شکل‌های (۱۹-۱۵) مشاهده می‌شود در ثانیه ۷ ام افزایش سرعت باد از ۹ متر بر ثانیه به ۱۰ متر بر ثانیه رخ داده است. برای مواجهه با ناپداری شبکه (ناشی از افزایش فرکانس)، دوباره مطابق روندنامی شکل (۲) سامانه کنترل به تدریج بار را به صورت پله‌ای افزایش داده و وارد مدار می‌کند تا از دور گرفتن ژنراتور و به تبع آن از افزایش فرکانس جلوگیری نماید. روند افزایش بار مشابه روند کاهش آن در ثانیه دوم است (ابتدای همین بخش). شکل‌های (۱۹-۱۵) نشان می‌دهند که از وقوع حادثه تا پایدار شدن مجدد شبکه کمتر از ۵ ثانیه به طول می‌انجامد.

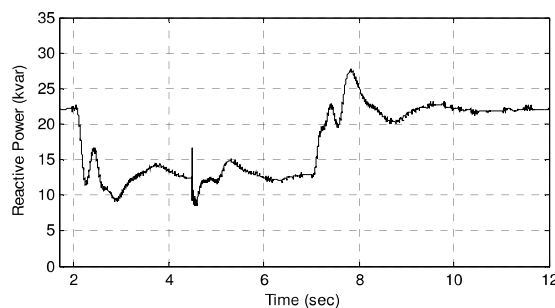
در ادامه به منظور صحت سنجی روش بارزدایی پیشنهادی، نتایج حاصله با روش سنتی مطابق با استاندارد UCTE^۱ مقایسه می‌شود. مشخصات استاندارد UCTE در جدول (۱) آورده شده است [۳]. برطبق این استاندارد در طرح‌های حذف بار سنتی، در چند مرحله بار سامانه به صورت تدریجی کاسته می‌شود، به نحوی که فرکانس شبکه به مقدار مجاز بازیابی شود. فرکانس آغاز حذف بار، میزان حذف بار و فرکانس عملکرد هر پله و درصد کلی حذف بار به مشخصات شبکه وابسته و برای هر سامانه قدرت مقداری متفاوت است ولی برای یک شبکه مشخص این مقادیر ثابت بوده و نسبت به سناریوهای مختلف انعطاف‌پذیری ندارد [۳]. بنابراین در ریزشیکه‌ها با توجه به سطح توان و اینرسی کم و همچنین عدم قطعیت تولید انرژی‌های تجدیدپذیر، روش‌های سنتی مناسب نخواهند بود [۱۴].

^۹ Union for the Coordination of the Transmission of Electricity

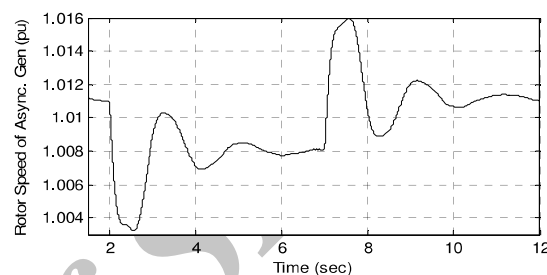
نرم‌افزار متلب نشان می‌دهد که روش پیشنهادی قادر به بازیابی فرکانس ریزش‌بکه در حالت‌های بحرانی افزایش بار یا کاهش تولید می‌باشد که پایداری ریزش‌بکه و تداوم برق‌رسانی در شرایط آفند دشمن را تضمین می‌کند.

۶. مراجع

- [1] Online Available at: www.cleanenergyauthority.com/solar-energy-news/military-using-solar-in-afghanistan-101510/2013.
- [2] Chowdhury, S.; Chowdhury, S. P.; Crossley, P. "Micro Grids and Active Distribution Network"; The Institution of Engineering and Technology (IET): London, 2009.
- [3] Aalami, H. A.; Ramezani, H. "Presentation of a New Algorithm for the Operation of DG Resources in Electrical Interconnection Grids over the Critical Conditions"; J. of Passive Defense Sci. and Tech. 3, 2012, 231-241 (In Persian).
- [4] IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources into Electric Power Systems, IEEE Std. 1547.6, 2011.
- [5] Haidar, A. M. A.; Mohamed, A.; Hussein, A. "Vulnerability Control of Large Scale Interconnected Power System Using Neuron-Fuzzy Load Shedding Approach"; Expert Systems with Applications 2010, 37, 3171-3176.
- [6] Saffarian, A.; Sanaye-Pasand, M. "Enhancement of Power System Stability Using Adaptive Combinational Load Shedding Methods"; IEEE Trans. Power Syst. 2011, 26, 1010-1020.
- [7] Amooshahi, H.; Hooshmand, R.; khodabakhshian, A.; Moazami, M. "A New Algorithm for Optimal Frequency Load Shedding on Micro Grids with Wind Turbines"; J. of Intelligent Syst. in Electrical Engineering 2012, 3, 25-40.
- [8] Terzija, V.; Kayikci, M.; Cal, D. "Power Imbalance Estimation Distribution Networks with Renewable Energy Resources"; In Proc. of the Conference and Exhibition on Electric Distribution 2009, 1-4.
- [9] Bevrani, H.; Ledwich, G.; Ford, J. J. "On the Use of df/dt in Power System Emergency Control"; In Proc. of the Power Syst. Conf. and Exposition 2009, 1-6.
- [10] Hassan, R.; Abdallah, M.; Radman, G.; Marco, F.; Hammer, S.; Wigington, J.; Givens, J.; Hislop, D.; Short, J.; Carroll, S. "Under-Frequency Load Shedding: Towards a Smarter Smart House with a Consumer Level Controller"; In Proc. of the Southeastcon 2011, 73-78.
- [11] Terzija, V. "Adaptive Underfrequency Load Shedding Based on the Magnitude of the Disturbance Estimation"; IEEE Trans. on Power Syst. 2006, 21, 1260-1266.
- [12] Littler, T.; Fox, B.; Flynn, D. "Measurement-Based Estimation of Wind Farm Inertia"; In Proc. of the Power Tech. Conf. 2005, 1-5.
- [13] Online available at: <http://energy-alaska.wikidot.com/saint-paul-island-wind>, 2013.
- [14] Chen, C. S.; Hsu, C. T.; Lin, Y. J.; Chuang, H. J.; Ju, Y. J. "Design of Tie Line Tripping and Load Shedding Scheme for Distribution Microgrid System with Wind Power Generation"; In Proc. of the Industry Applications Society Annual Meeting 2009, 1-6.



شکل ۱۸. توان راکتیو کندانسور سنکرون (دیزل ژنراتور)، با کاهش سرعت باد در ثانیه ۲ ام از میزان ۱۰ به ۹ متر بر ثانیه به مدت ۵ ثانیه



شکل ۱۹. سرعت رتور ژنراتور القایی، با کاهش سرعت باد در ثانیه ۲ ام از میزان ۱۰ به ۹ متر بر ثانیه به مدت ۵ ثانیه

جدول ۱. روش سنتی بار زدایی بر اساس استاندارد UCTE

مرحله حذف بار	فرکانس سطح عملکرد (Hz)	حذف بار %	تأخیر در قطع (ثانیه)
پله اول	۴۹	۱۲/۵	۰/۰۳
پله دوم	۴۸/۷	۱۲/۵	۰/۰۳
پله سوم	۴۸/۴	۱۷	۰/۰۳

۵. نتیجه‌گیری

ایجاد ریزش‌بکه هوشمند در پایگاه‌های نظامی، باعث بهبود امنیت تأمین انرژی که از شاخص‌های مهم پدافند غیرعامل است، خواهد شد. بر این اساس، در این مقاله روشی جدید برای کنترل و تثبیت فرکانس در شرایط آفند دشمن که ارتباط ریزش‌بکه سایت نظامی با شبکه سراسری قطع شده، ارائه شده است. بدین منظور با تغییر میزان مصرف برخی بارها، تعادل تولید و مصرف برقرار می‌شود. با توجه به تفاوت‌های میان سامانه‌های قدرت سنتی با ریزش‌بکه‌ها، روش‌های مرسوم کارساز نیست، بنابراین در این مقاله به منظور حفظ پایداری شبکه استفاده از معیار فرکانس پیشنهاد شده است. یک کنترل کننده PID، میزان تغییر پله‌های بار را بر مبنای فرکانس اندازه‌گیری شده تعیین می‌کند. نتایج شبیه‌سازی در