

ارائه الگوریتمی نوین به منظور بهره‌برداری از منابع تولید پراکنده در هنگام بروز بحران در شبکه سراسری برق

حبیب اله اعلمی^{۱*}، هادی رضوانی ورزنده^۲

۱- استادیار دانشگاه جامع امام حسین (ع)، ۲- کارشناس ارشد دانشگاه صنعت آب و برق

(دریافت: ۹۱/۰۱/۲۱، پذیرش: ۹۱/۰۹/۱۱)

چکیده

به علت احتمال بروز ناپایداری در شبکه، طبق استانداردهای بین‌المللی، بهره‌برداری از منابع تولید پراکنده در هنگام بروز بحران در شبکه سراسری برق مجاز نیست. قانون فوق، اجرای پدافند غیرعامل در سیستم‌های قدرت را غیرممکن می‌سازد. این مقاله الگوریتم جدیدی به منظور بهره‌برداری از ریزشبکه‌هایی که دارای مولدهای تولید پراکنده از نوع ژنراتور سنکرون با توربین گازی هستند را ارائه می‌کند. دو روش حذف بار سنتی و هوشمند با استفاده از فرکانس و مشتق فرکانس، شبیه‌سازی شده است. همچنین با توجه به شرایط بار و تولید، ابزارهای حذف بار و تغییر مد گاورنرهای مولدهای فوق به منظور برقراری پایداری ریزشبکه به کار رفته‌اند. علاوه بر این، تعقیب تغییرات بار شبکه توسط مولدها نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. الگوریتم پیشنهادی بر روی شبکه واقعی و در فضای نرم‌افزار DigSILENT شبیه‌سازی شده است. نتیجه‌ها نشان می‌دهد با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، می‌توان از ریزشبکه در شرایط بحران بهره‌برداری کرد.

کلیدواژه‌ها: پدافند غیرعامل، تولید پراکنده، ریزشبکه، ژنراتور سنکرون با توربین گازی.

Presentation of a New Algorithm for the Operation of DG Resources in Electrical Interconnection Grids over the Critical Conditions

H. A. Aalami^{*}, H. Ramezani

Imam Hossein University

(Received: 09/04/2012; Accepted: 01/12/2012)

Abstract

Based on the IEEE standards, distributed generation (DG) resources should not be operated over the critical situations in the interconnection power grid, because of the network instability considerations. These standards are severe restrictions for passive defense implementation in the power systems. In this paper, a new algorithm for employment of the micro grids equipped with the Gas Turbine Synchronous Generators (GTSG) is proposed. In an islanded distributed network, consumption and generation in the micro grids have a vital role. In this paper, two different types of load shedding methods, namely, traditional and intelligent methods are simulated considering frequency and derivative of the frequency in the system. Furthermore, according to the load and generation situations, "load shedding" and "changing the mode of the GTSG governors" are used as two different tools to prepare a robust stability in the system. Load following service is another subject which is studied in this paper. The proposed model has been applied to the load profile of an actual system using DigSILENT software. The results show that over the critical conditions, operation of the DGs in the islanded mode is possible and reliable.

Keywords: Distribution Generation, Gas Turbine Synchronous Generator (GTSG), Micro Grid, Passive Defense.

* Corresponding Author Email: haalami@ihu.ac.ir

۱. مقدمه

نوینی را پیشنهاد می‌کند. تشکیل حالت جزیره‌ای برنامه‌ریزی شده می‌تواند سطح قابلیت اطمینان مشترکان را بهبود بخشد و از خاموشی مراکز حساس نظامی جلوگیری کند [۴]. در این مقاله با ارائه الگوریتمی نوین امکان بهره‌برداری از منابع تولید پراکنده در هنگام بروز بحران در شبکه برق سراسری فراهم آمده است. همچنین با ایجاد تغییرات در بار ریزشبهه مانند ورود یا خروج یک بار بزرگ عکس‌العمل مولدهای تولید پراکنده به تغییرات بار مورد مطالعه قرار گرفته است.

ادامه مقاله به‌صورت ذیل سازماندهی شده است: در بخش دوم، حالت‌های مختلف ریزشبهه از دیدگاه میزان بار و تولید تقسیم‌بندی و براساس آن الگوریتم پیشنهادی ارائه شده است. بخش سوم به مدل‌سازی سیستم‌های کنترلی ژنراتورهای سنکرون با توربین گازی^۵ اختصاص یافته است. بخش چهارم در مورد روش‌های سنتی و نوین حذف بار^۶ توضیح می‌دهد. بخش پنجم مطالعات عددی و بخش ششم ششم نتیجه‌گیری را بیان می‌کند.

۲. الگوریتم پیشنهادی

منابع تولید پراکنده و استفاده از آنان در سیستم‌های قدرت و نحوه اتصال/انفصال آنان به/از شبکه سراسری برق از دغدغه‌های مهم محققان صنعت برق بوده و می‌باشد. مراجع [۷-۵] انواع منابع تولید پراکنده، مزایا، کاربردها، مکان بهینه نصب، فناوری‌ها و مشکلات رایج آنان را بیان کرده‌اند. در مراجع [۱۰-۸] انواع روش‌های تشخیص جزیره‌ای شدن شبکه در حضور منابع تولید پراکنده، نحوه کارکرد و تأثیر اختلالات در حین بهره‌برداری جزیره‌ای بررسی شده است. مراجع فوق روش‌های مختلف حذف بار برای بهره‌برداری از شبکه در حالت جزیره‌ای شدن را پیشنهاد می‌کنند، اما این روش‌ها فقط می‌توانند افت ولتاژ را جبران کنند و از تنظیم فرکانس و تثبیت آن در مقدار نامی عاجزند. در این بخش پس از ذکر مقدمه‌ای کوتاه، الگوریتم پیشنهادی که هم افت ولتاژ و هم افت فرکانس شبکه در حالت جزیره‌ای را به صفر می‌رساند، بیان می‌شود.

در حالت کلی دو وضعیت متفاوت برای میزان بار و تولید در یک ریزشبهه امکان‌پذیر است. وجه تمایز این دو حالت در کمبود تولید زیاد ریزشبهه و در نتیجه وقوع ناپایداری است، یعنی در زمانی که ریزشبهه ایجاد شده دارای بار بسیار بیشتری نسبت به توانایی تولید مولدها باشد، به‌طور مسلم ریزشبهه ناپایدار خواهد شد ولی در تمامی موارد دیگر که شامل حالت‌هایی است که اختلاف بار و تولید در ریزشبهه کم می‌باشد (در این حالت میزان اختلاف مهم است که باید مقدار کمی باشد و بیشتر یا کمتر بودن تولید نسبت به مصرف اهمیت چندانی ندارد) و یا تولید ریزشبهه به مقدار زیادی از بار بیشتر باشد، در این دو حالت ریزشبهه ایجاد شده ناپایدار نمی‌شود و می‌توان با استفاده از الگوهای مناسب از ریزشبهه استفاده کرد.

ریزشبهه^۱ عبارت است از یک سیستم توزیع با انواع مختلف منابع تولید پراکنده^۲ (سلول‌های خورشیدی، توربین‌های بادی، پیل‌های سوختی، میکروتوربین‌ها، باتری‌ها و ...) که مجموعه‌ای از بارهای الکتریکی خانگی، تجاری، صنعتی و یا ترکیبی از آنها را تغذیه می‌کند [۱]. به‌دلایلی هم‌چون امنیت و ریسک فروپاشی شبکه، از بهره‌برداری از این مولدها در هنگام قطع شبکه سراسری و ایجاد حالت جزیره‌ای^۳ جلوگیری به‌عمل می‌آید. تجربه نشان داده است که در بسیاری از جنگ‌ها، خطوط انتقال برق از جمله اولین تأسیساتی هستند که مورد آسیب قرار می‌گیرند، به‌گونه‌ای که خاموشی و قطعی برق در زمره اولین و متداول‌ترین پیامدهای جنگ قرار دارد. احداث مولدهای تولید پراکنده در مجاورت سایت‌های حساس نظامی، به‌دلیل استقلال از خطوط انتقال توان، این مراکز را از خطر خاموشی در مواقع بحرانی نجات خواهد داد و بدین صورت می‌توان شاخص‌های پدافند غیرعامل^۴ را در این قرارگاه‌ها افزایش داد. بنابراین ارائه راهکارهای اجرایی به‌منظور بهره‌برداری از منابع تولید پراکنده (مولدهای مقیاس کوچک) در حالت ریزشبهه برای تغذیه بارهای حساس و استراتژیک، بسیار حیاتی و حائز اهمیت است. پس باید تدابیری اندیشید تا در صورت ایجاد یک ریزشبهه به‌صورت عمدی یا اتفاقی، مولدهای مقیاس کوچک قادر باشند علاوه بر حفظ پایداری خود، بارهای موجود آن ریزشبهه را تأمین کنند.

به‌منظور حفظ امنیت و سلامت بارهای شبکه، برطبق استاندارد بین‌المللی IEEE 1547, 2003 [۲] و همچنین براساس دستورالعمل اتصال مولدهای مقیاس کوچک به شبکه توزیع برق وزارت نیرو [۳]. در صورتی که شبکه برق اصلی دچار مشکل شود و جزیره‌ای در شبکه ایجاد گردد، تمامی مولدهای تولید پراکنده باید حداکثر بعد از ۲ ثانیه قطع شوند. در این صورت چنان‌چه بارهای مهم و حیاتی در آن جزیره وجود داشته باشند، خاموش خواهند شد. این موضوع فعالیت مراکز حساس فرماندهی و کنترل را مختل خواهد کرد، ولی چنان‌چه از خاموش کردن منابع تولید پراکنده با استفاده از تدابیری هم‌چون الگوریتم پیشنهادی در این مقاله جلوگیری به‌عمل آید، می‌توان به بهره‌برداری از ریزشبهه ایجاد شده پرداخت و شاخص‌های قابلیت اطمینان و پدافند غیرعامل را بهبود داد. براساس استانداردهای موجود، به‌علت عدم اعتماد به توانایی مولدهای تولید پراکنده در حفظ پایداری شبکه، در حال حاضر بهره‌برداری از فیدر در حالت جزیره‌ای توسط شرکت‌های برق مجاز نیست و بعد از وقوع یک خطا، واحد تولید پراکنده مجبور است قطع شود و تا زمان رفع خطا در حالت قطع باقی بماند. این مقاله، برای اینکه در حالت جزیره‌ای واحدهای تولید پراکنده قادر به تغذیه بار ناحیه جزیره بوده و بتوانند ولتاژ و فرکانس را در محدوده قابل قبول نگه‌دارند، روش

¹ Micro Grid

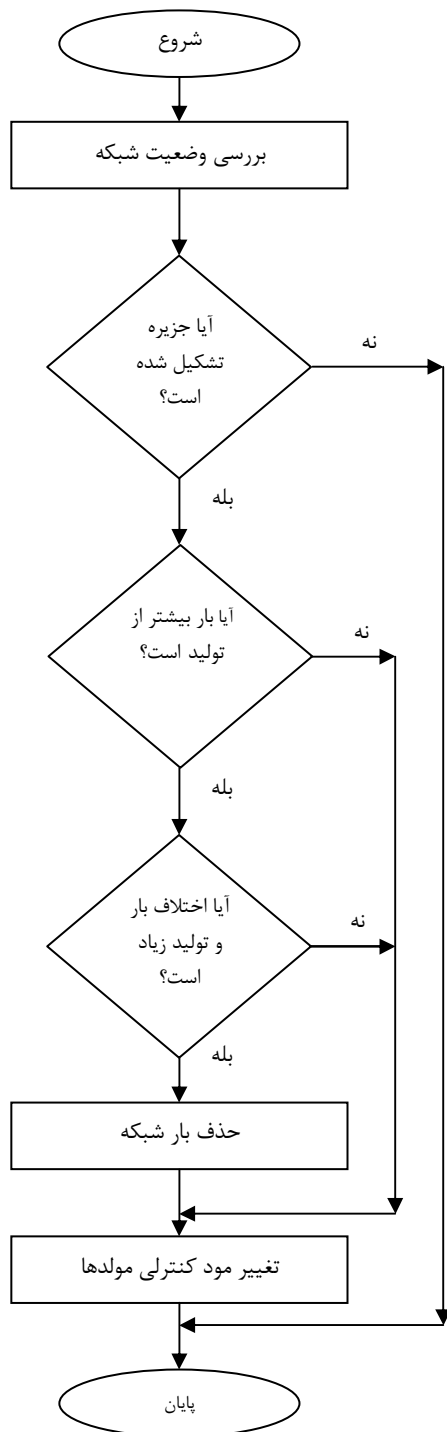
² Distributer Generation Resources

³ Islanding

⁴ Passive Defence

⁵ Gas Turbine Synchronous Generator (GTSG)

⁶ Load Shedding



شکل ۱. الگوریتم بهره‌برداری از ریزشبه

به‌صورت کلی این سیستم کنترلی می‌تواند در دو مود اصلی کار کند که عبارت است از:

۱- مود کنترل ولتاژ

۲- مود کنترل ضریب توان

در مود کنترل ولتاژ تغییرات توان راکتیو تولیدی ژنراتور وابستگی به میزان توان اکتیو تولیدی واحد ندارد و به میزانی تغییر پیدا می‌کند که ولتاژ به میزان ۱ پریونیت در پایانه ژنراتور تنظیم شود ولی در مود کنترل ضریب توان این تغییرات توان راکتیو به میزان توان اکتیو تولیدی واحد نیز وابسته می‌شود و دارای محدودیت است. بنابراین در

حالت‌های مختلف ریزشبه را می‌توان به‌صورت زیر دسته‌بندی کرد:

۱- حالتی که ریزشبه ایجاد شده بار بسیار بیشتری نسبت به میزان تولید مولدهای تولید پراکنده داشته باشد.

۲- حالتی که ریزشبه ایجاد شده دارای اختلاف بار و تولید کمی باشد و یا تولید بیشتری نسبت به بار داشته باشد.

در حالت اول که ریزشبه ایجاد شده دارای کمبود تولید زیادی بوده و بروز جزیره منجر به ناپایداری ریزشبه می‌شود، بایست از چندین راهکار جهت بهره‌برداری ایمن از ریزشبه و ایجاد شرایط پایدار استفاده کرد، این اقدامات شامل حذف بار و سپس تغییر مد کنترلی مولدهای تولید پراکنده است. در صورتی که حالت دوم ریزشبه ایجاد شود و اختلاف بار و تولید کم باشد و یا تولید نسبت به بار بیشتر باشد، تنها کافی است که مود کنترلی مولدهای تولید پراکنده تغییر کند تا شرایط بهره‌برداری نرمال در ریزشبه ایجاد شود. به‌طور معمول گاورنرهای مولدهای تولید پراکنده با توربین‌گازی در حالت کار موازی با شبکه سراسری در مود توان ثابت و یا دروپ ثابت قرار می‌گیرند تا در کنترل فرکانس درگیر نشوند. بنابراین در هنگام ایجاد جزیره، برای تنظیم تولید مولدها و برقراری تعادل بین تولید و مصرف باید مود عملکردی آنها به حالت ایزوترونس^۱ تغییر یابد. الگوریتم ارائه شده جهت بهره‌برداری از ریزشبه مطابق شکل (۱) است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، انجام هم‌زمان حذف بار و تغییر مود کنترلی گاورنرها به حالت ایزوترونس، به‌منظور بهره‌برداری مطمئن از ریزشبه‌ها است. نتیجه‌های شبیه‌سازی کامپیوتری با نرم‌افزار DIGSILENT که در فصل‌های بعد ارائه شده است، این موضوع را تأیید می‌کند.

۳. مدل‌سازی سیستم‌های کنترلی ژنراتورهای سنکرون با توربین‌گازی

سیستم‌های کنترلی نصب شده بر روی این تجهیزات در دو دسته اصلی خلاصه می‌شود:

۱- سیستم‌های کنترل ولتاژ (AVR)^۲

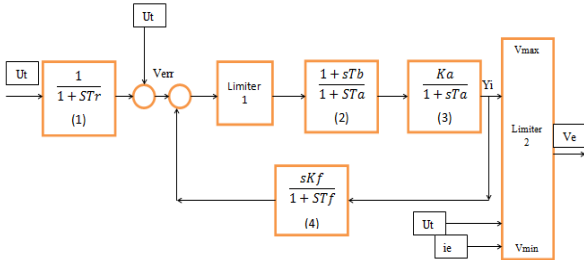
۲- سیستم‌های کنترل فرکانس (Governor)

سیستم کنترل ولتاژ وظیفه تنظیم ولتاژ پایانه ژنراتور با استفاده از جریان تحریک را بر عهده دارد. این مجموعه تحت عنوان سیستم تحریک ژنراتور نیز معروف است که با توجه به مقدار مرجع ۱ پریونیت برای ولتاژ پایانه ژنراتور، به‌گونه‌ای جریان تحریک ژنراتور تغییر داده می‌شود که با تغییر توان راکتیو تولیدی ژنراتور، اندازه ولتاژ در پایانه ژنراتور بر روی مقدار ۱ پریونیت ثابت باقی بماند. این سیستم‌ها با توجه به استانداردهای مختلف، گوناگونی و توانایی‌های مختلفی را دارند.

¹ Isochronous

² Automatic Voltage Regulator

می‌شود. از طرفی سیستم سوخت^۳ به صورت یک سیستم تأخیری مرتبه اول^۴ با ثابت زمانی T2 (PT1) مدل شده است و برای پیاده‌سازی سیستم کنترل حرارتی نیز به همین ترتیب از یک سیستم تأخیری مرتبه اول با ثابت زمانی T3 استفاده شده است.

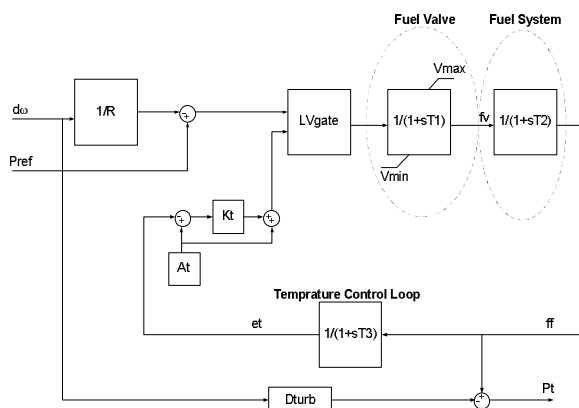


شکل ۲. بلوک دیاگرام کنترلی سیستم تحریک IEEE Type GT1

جدول ۱. مقادیر و تعریف پارامترهای استفاده شده در سیستم تحریک

IEEE Type GT1

پارامتر	مقدار
Tr, Measurement Delay [s]	۰
Tb, Filter Delay Time [s]	۱
Tc, Filter Derivative Time Constant [s]	۱
Ka, Controller Gain [pu]	۱۵۰
Ta, Controller Time Constant [s]	۰/۰۲
Kc, Exciter Current Compensation Factor [pu]	۰
Kf, Stabilization Path Gain [pu]	۰/۰۱
Tf, Stabilization Path Delay Time [s]	۰/۱۵
Vimin, Controller Minimum Input [pu]	-۳
Vrmin, Controller Minimum Output [pu]	-۷
Vimax, Controller Maximum Input [pu]	۳
Vrmax, Controller Maximum Output [pu]	۷



شکل ۳. بلوک دیاگرام کنترلی گاورنر مدل GAST

At, Kt, D_turb ضریب‌های بهره ثابتی هستند که به ترتیب At برای مدل‌سازی محدوده دمای محیط، Kt برای مدل‌سازی ضریب توربین و D_turb برای مدل‌سازی ضریب تلفات اصطکاکی توربین ارائه شده‌اند. استفاده از این مدل گاورنر در حالت جزیره، اگرچه نوسانات

غالب موارد از سیستم‌های تحریک در مود کنترل ولتاژ استفاده می‌شود که دارای پاسخ‌گویی بهتری است. با توجه به شبکه تحت مطالعه سیستم تحریک نصب شده بر روی ژنراتورهای مولد تولید پراکنده از نوع سیستم تحریک مدل IEEE GT1 [۱۱] است که در مود کنترل ولتاژ کار می‌کند. بلوک دیاگرام این سیستم کنترلی مطابق شکل (۲) است.

همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، این سیستم با چهار بلوک اصلی و دو محدودگر مدل شده است. ورودی‌های آن ولتاژ پایانه ژنراتور (ut) و جریان تحریک ژنراتور (ie) و خروجی آن ولتاژ تحریک ژنراتور (ve) است. بلوک شماره (۱) مدل‌کننده تأخیر از نوع مرتبه اول بوده که دارای تأخیر زمانی Tr است. بلوک شماره (۲) معرف یک عملگر پیش‌فاز-پس‌فاز است. بلوک شماره (۳) مدل‌کننده تأخیر مرتبه اول با ضریب بهره ثابت است. بلوک شماره (۴) نیز مدل‌کننده مشتق‌گیر پس‌فاز مرتبه اول با ضریب بهره است.

مقادیر پارامترهای به‌کار برده شده در جدول (۱) ارائه شده است. گاورنرها به صورت کلی در سه مود اصلی فعالیت دارند که عبارت است از:

- مود توان ثابت (Fixed Power Control)

- مود دروپ (Droop Control)

- مود سرعت ثابت (Isochronous mode control)

منظور از مود توان ثابت این است که توان تولیدی ژنراتور از تغییرات فرکانس تأثیر نمی‌پذیرد و همواره در نقطه کاری مشخصی کار می‌کند. این موضوع به منزله غیر فعال بودن گاورنر نیز هست. در این حالت توان تولیدی ژنراتور همواره در یک نقطه کاری مشخص ثابت است و در برابر تغییرات فرکانس از خود عکس‌العملی نشان نمی‌دهد. از این نوع ژنراتورها در سیستم‌هایی استفاده می‌شود که سهمی در کنترل فرکانس ندارند.

تغییرات در توان خروجی نوع دیگری از گاورنرها به واسطه تغییرات فرکانس توسط مشخصه دروپ واحد صورت می‌گیرد. از گاورنرهای مرسوم می‌توان گفت که دارای مود کنترل دروپ هستند و بر روی ژنراتورها با توربین گازی نصب می‌شوند، می‌توان مدل GAST را نام برد. بلوک دیاگرام این مدل مطابق شکل (۳) است. همان‌طور که در شکل (۳) دیده می‌شود این سیستم کنترلی دارای دو ورودی به ترتیب Pref، d_omega است و در نهایت دارای یک خروجی pt است. سیگنال d_omega معرف تغییرات پریونیت سرعت و Pref توان مرجعی است که از دریچه سوخت خارج می‌شود و pt توان خروجی توربین می‌باشد.

در بلوک مربوط به مود کنترلی دروپ، تغییرات سرعت ژنراتور به تغییرات توان اکتیو ژنراتور تبدیل می‌شود. از طرفی بلوک LVgate میان دو ورودی خود مقدار کمتر را به خروجی ارسال می‌کند. دریچه سوخت^۱ توربین گازی به صورت یک محدودگر پس‌فاز مرتبه اول^۲ مدل شده است که خروجی این بلوک بین Vmax و Vmin محدود

³ Fuel System

⁴ First Order Delay

¹ Fuel Valve

² Limited First Order Lag

می‌توان به صورت محلی یا براساس اطلاعات شبکه سراسری عمل کرد. تغییر فرکانس نتیجه مستقیم عدم تعادل توان اکتیو در سیستم است. بنابراین هرگونه اضافه بار حقیقی و یا کاهش تولید در شبکه، خود را به صورت افت فرکانس نشان می‌دهد. به علاوه فرکانس تمام نقاط شبکه طی دوره اضافه بار به طور تقریباً با هم برابر است و هرگونه تغییر فرکانسی به سرعت در شبکه منتشر می‌شود. از این رو بسیار مناسب است که از شاخص مشتق فرکانس (df/dt) جهت تشخیص اضافه بار استفاده کنیم. روش‌های حذف بار فرکانسی شامل روش سنتی و روش نوین است. طرح‌های نوین حذف بار برخلاف طرح سنتی علاوه بر مقدار فرکانس از مشتق فرکانس نیز استفاده می‌کنند. در این مقاله روش‌های حذف بار فرکانسی سنتی و هوشمند براساس پارامتر df/dt مورد بررسی قرار گرفته است [۱۴].

۴-۱. حذف بار سنتی

در این مقاله جهت حذف بار سنتی از استاندارد UCTE^۳ اروپا مطابق جدول (۳) استفاده شده است. برطبق این استاندارد در طرح‌های حذف بار سنتی، بر روی تعداد معینی از خطوط ورودی به شبکه‌های سیستم، رله‌های فرکانسی نصب می‌شود. این رله‌ها با مشاهده کمتر شدن فرکانس از حد معینی که توسط مدیریت شبکه تعیین می‌شود، در طی چند پله دستور قطع به کلید فیدهای مختلف ارسال می‌کنند. بدین ترتیب در چند مرحله بار سیستم به صورت تدریجی کاسته می‌شود، به نحوی که فرکانس شبکه به مقدار مجاز باز 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 سیستم قدرت مقداری متفاوت است. بدین منظور باید رفتار فرکانس در سیستم قدرت را به ازای اضافه بار یا کاهش تولید بررسی کرد. در جدول (۳) بارهای L1، L2 و L3 مجموعه‌ای از بارهای نشان داده شده در شکل (۶) هستند که به ترتیب برابر ۰/۹۳ و ۰/۹۳ و ۱/۲۷ مگاوات می‌باشند.

جدول ۳. روش سنتی بار زدایی بر اساس استاندارد UCTE

مرحله حذف بار	فرکانس سطح عملکرد (Hz)	حذف بار (%)	اندازه بار مورد نظر برای حذف در شبکه (MW)	نام بار مورد نظر برای حذف	در قطع (ثانیه)
پله اول	۴۹	۱۲/۵	۰/۹۳	L1	۰/۰۳
پله دوم	۴۸/۷	۱۲/۵	۰/۹۳	L2	۰/۰۳
پله سوم	۴۸/۴	۱۷	۱/۲۷	L3	۰/۰۳

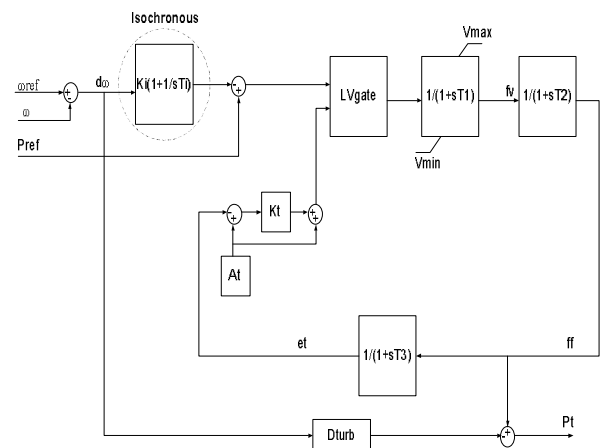
۴-۲. حذف بار هوشمند

در روش حذف بار هوشمند همانند روش سنتی، بار زدایی به چند پله تقسیم شده که هر پله در فرکانس معینی با تأخیر مشخص عمل می‌کند، با این تفاوت که میزان بار قطع شده در هر پله علاوه بر میزان

فرکانس را از بین می‌برد، ولی مقدار ماندگار فرکانس را به مقدار نامی ۵۰ هرتز نمی‌رساند، بدین منظور از گاورنرهایی با مود ایزوترانس استفاده می‌شود که انحراف فرکانس با مقدار نامی را به صفر می‌رساند. برای ایجاد این مود عملکردی بر روی گاورنرهای مدل GAST باید سیستم کنترلی مطابق شکل (۴) را تعبیه کرد. مطابق این بلوک دیاگرام در هر لحظه اختلاف سرعت ژنراتور با سرعت نامی وارد بلوک ایزوترانس (Isochronous) می‌شود و با عملکرد سیستم درجه سوخت و توربین به گونه‌ای توان مکانیکی ورودی ژنراتور تغییر می‌یابد که فرکانس در مقدار نامی ثابت شود. مقادیر پارامترهای به کار برده شده در این سیستم که در جدول (۲) نشان داده شده است، مانند جدول (۱) بوده و تنها دارای دو پارامتر اضافی با عنوان‌های ضریب بهره کنترلر^۱ (K_i) و ثابت تأخیر زمانی^۲ (T_i) است [۱۳-۱۲].

جدول ۲. مقادیر و تعریف پارامترهای استفاده شده در سیستم گاورنر GAST

مقدار	پارامتر
۰/۰۵	R, Speed Droop [pu]
۰/۰۵	T1, Controller Time Constant [s]
۰/۱	T2, Actuator Time Constant [s]
۱۰/۲	T3, Compressor Time Constant [s]
۰/۹۰۹	At, Ambient Temperature Time Constant [pu]
۲	Kt, Turbine Factor [pu]
۰	Dturb, Frictional Losses Factor [pu]
۰	Vmin, Controller Minimum Output [pu]
۱	Vmax, Controller Maximum Output [pu]
۴۰	Ki, Isochronous Controller Gain [pu]
۱	Ti, Isochronous Controller Time Constant [s]



شکل ۴. بلوک دیاگرام کنترلی گاورنر مدل GAST در مود ایزوترانس

۴-۳. روش‌های حذف بار

اساس اعمال این روش‌ها بر مبنای تشخیص لزوم حذف بار در شبکه با استفاده از متغیرهای سیستم (ولتاژ و فرکانس) و یا بر مبنای وقوع رخداد (نظیر خروج خط یا ژنراتور) است. برای تشخیص این موضوع

^۱ Isochronous Controller Gain [pu]

^۲ Isochronous Controller Time Constant [s]

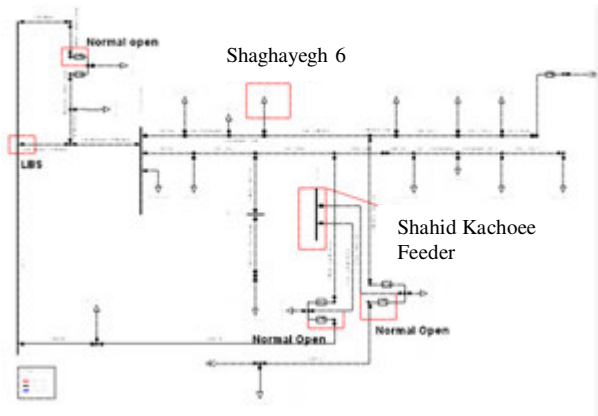
^۳ Union for the Coordination of the Transmission of Electricity

صورت است [۱۶]. درحالی‌که در طرح حذف بار فرکانسی با استفاده از فرکانس و مشتق فرکانس df/dt چنانچه فرکانس به مقدار معینی (از نظر اختلاف با فرکانس مرجع) برسد درصد حذف بار برای رخدادهای مختلف با توجه به شیب افت فرکانس، متفاوت است، یعنی هرچه شیب افت فرکانس بیشتر باشد، درصد حذف بار بیشتر می‌شود [۱۷].

۵. مطالعات عددی

۵-۱. شبیه‌سازی

برای پیاده‌سازی الگوریتم‌های پیشنهادی، شبکه توزیع پست شهید کجویی کرج مورد استفاده قرار گرفت. در فیدر غریب زاده این پست مطابق شکل (۶) و در قسمت دیگر این شبکه مطابق شکل (۷)، چهار واحد مولد تولید پراکنده ۱ مگاواتی از نوع ژنراتور سنکرون با توربین گازی تعبیه و شبیه‌سازی شد، درحالی‌که میزان بار این فیدر ۷ مگاوات است (این واحدهای تولید پراکنده، هم‌اکنون در حال نصب در این منطقه هستند).



شکل ۶. نمای فیدر غریب زاده شبکه توزیع پست شهید کجویی کرج در نرم‌افزار Dig SILENT

الگوریتم ارائه شده در محیط نرم‌افزار DigSILENT و در حالت‌های مختلف بار و تولید ریزشبه، شبیه‌سازی شده است و با بروز جزیره در ثانیه ۱ شبیه‌سازی پارامترهای فرکانس، زاویه روتور ژنراتورها، توان اکتیو و راکتیو تولیدی و احدها و امپدانس رویت شده از سمت مولدها نمایش داده شده است.

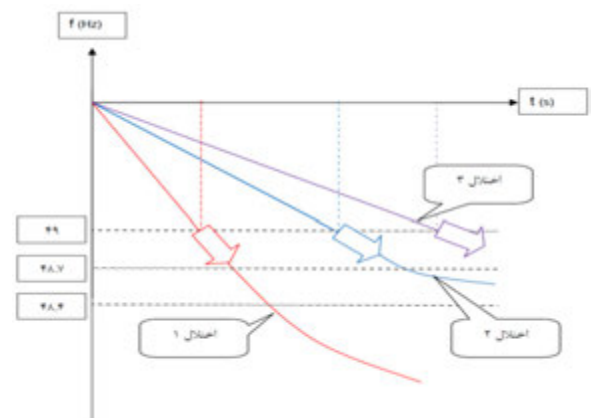
ابتدا در حالت اول بهره‌برداری از ریزشبه که بار به مراتب از تولید بیشتر است، الگوریتم پیشنهادی با اتخاذ دو الگوریتم حذف بار مطابق شکل‌های (۸) و (۹) پیاده‌سازی و شبیه‌سازی شده است.

در حالت دوم بهره‌برداری از ریزشبه یا تولید از بار بیشتر است یا اختلاف بار و تولید اندک است. در این حالت نیز الگوریتم پیشنهادی بر روی شبکه تحت مطالعه پیاده‌سازی شده و نتیجه‌ها در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) به تصویر کشیده شده است.

با توجه به شکل‌های (۸-۹) دیده می‌شود که در هنگام استفاده از حذف بار هوشمند و سنتی به ترتیب فرکانس در کمترین حالت خود به $۴۸/۴۳۶$ و $۴۸/۰۴۵$ هرتز می‌رسد و پس از نوساناتی در

افت فرکانس به میزان مشتق فرکانس نسبت به زمان نیز وابسته است. این طرح نسبت به طرح سنتی دارای این مزیت است که اگر میزان اضافه بار در شبکه زیاد باشد، در نتیجه میزان تغییرات فرکانس نسبت به زمان زیاد بوده و بهتر است بار بیشتری نسبت به حالت اضافه بار کم، حذف شود و در نتیجه با توجه به اینکه حذف بار مناسب‌تری در هر پله انجام می‌گیرد، فرکانس سیستم کمتر افت کرده و احتمال ناپایداری سیستم کمتر می‌شود (شکل ۵).

برای پیاده‌سازی طرح حذف بار با استفاده از فرکانس و مشتق فرکانس بایست شرایط شبکه تحت مطالعه در حالت بروز رویداد اضافه بار/کاهش تولید را بررسی کرد [۱۵]، با تحلیل تغییرات مشتق منحنی فرکانس در فرکانس‌های ۴۹ و $۴۸/۷$ و $۴۸/۴$ جدول حذف بار با استفاده از مشتق فرکانس به صورت جدول (۴) استخراج می‌شود. در روش حذف بار سنتی چنانچه فرکانس به مقدار معینی (از نظر اختلاف با فرکانس مرجع) برسد، لازم است درصد معینی از کل بار سیستم حذف شود و دیگر مهم نیست که آیا افت فرکانس به‌خاطر بروز چه نوع اختلالی ایجاد شده است و شیب افت فرکانس به چه

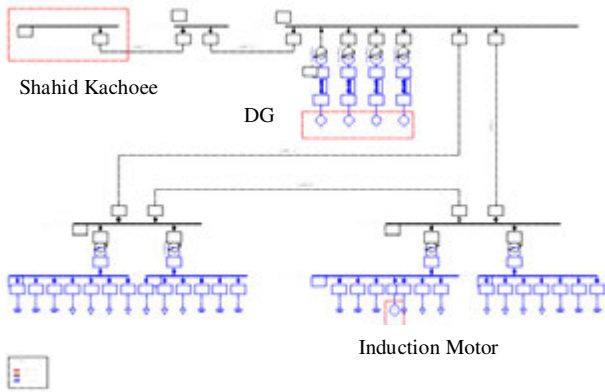


شکل ۵. منحنی فرکانس-زمان و مقایسه بزرگی اختلالات بر مبنای شاخص مشتق منحنی فرکانس

جدول ۴. روش حذف بار با استفاده از شاخص فرکانس و شاخص مشتق فرکانس

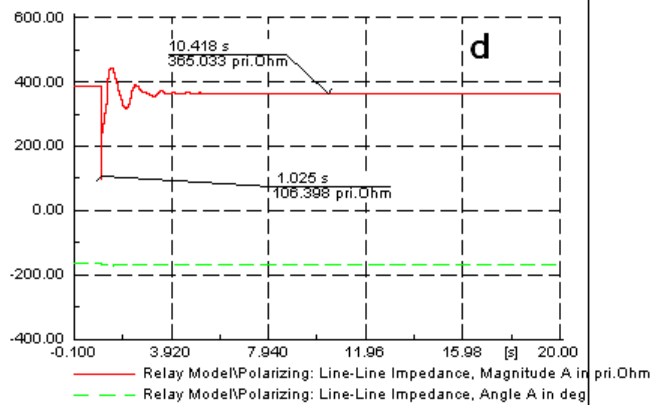
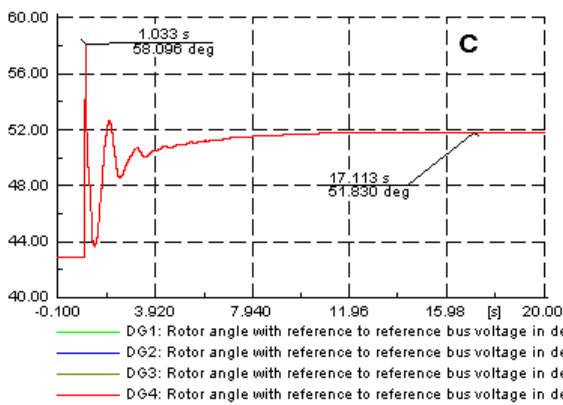
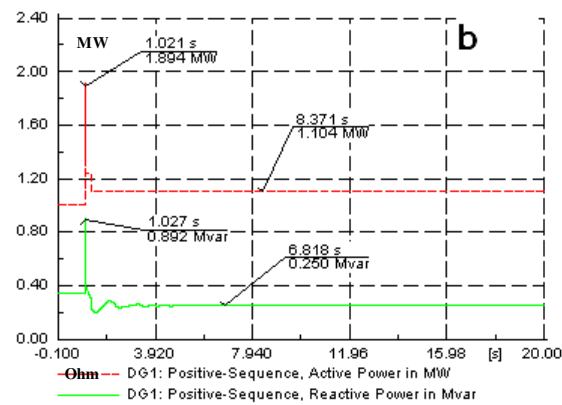
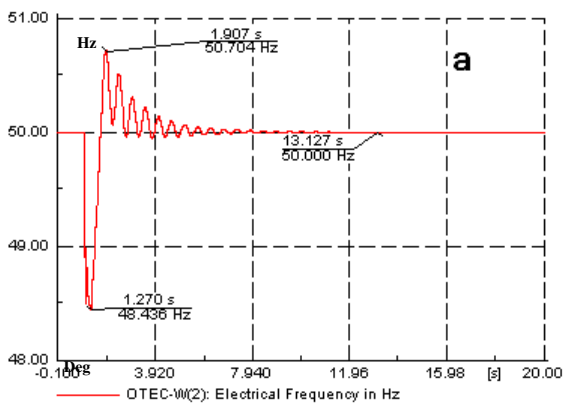
مرحله حذف بار	فرکانس عملکرد	فرکانس مشتق	درصد حذف بار شبکه (MW)	بار مورد نظر (ثانیه)	پله حذف بار
پله اول	۴۹	$s \leq -12$	$۱۷/۳$	$۱/۲۹$	۰/۰۳
		$s > -12$	۱۶	$۱/۱۹$	
پله دوم	$۴۸/۷$	$s > -10$	۷	$۰/۵۲$	۰/۰۳
		$-12 \leq s \leq -10$	۹	$۰/۶۷$	
پله سوم	$۴۸/۴$	$s \leq -12$	$۱۷/۳$	$۱/۲۹$	۰/۰۳
		$s > -10$	۷	$۰/۵۲$	
		$-12 \leq s \leq -10$	۹	$۰/۶۷$	
			$۱۷/۳$	$۱/۲۹$	۰/۰۳

مولدها نسبت به حالت بحرانی کاسته شده، امیدانس از دیدگاه مولدها افزوده و از ناحیه بحرانی خارج می‌شود.

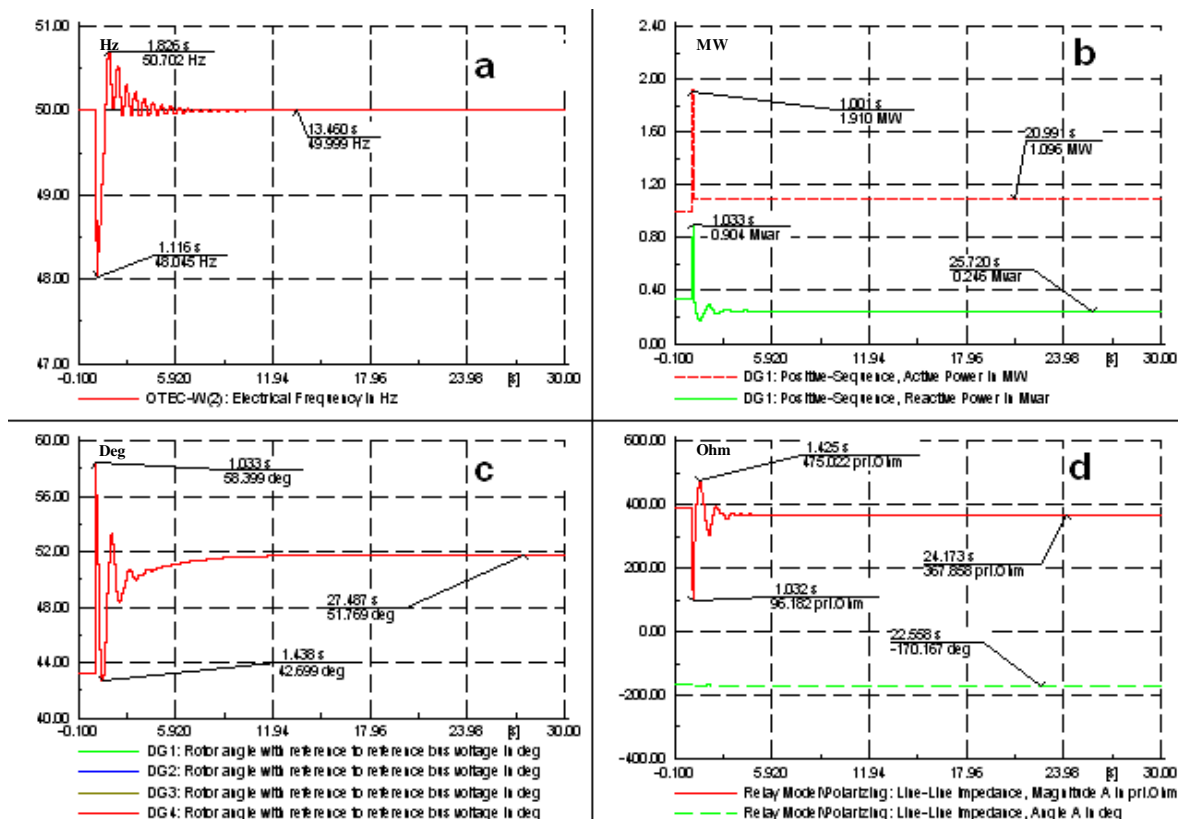


شکل ۷. نمای شبکه مولدهای مقیاس کوچک پست شهید کجویی کرج در نرم‌افزار Dig SILENT

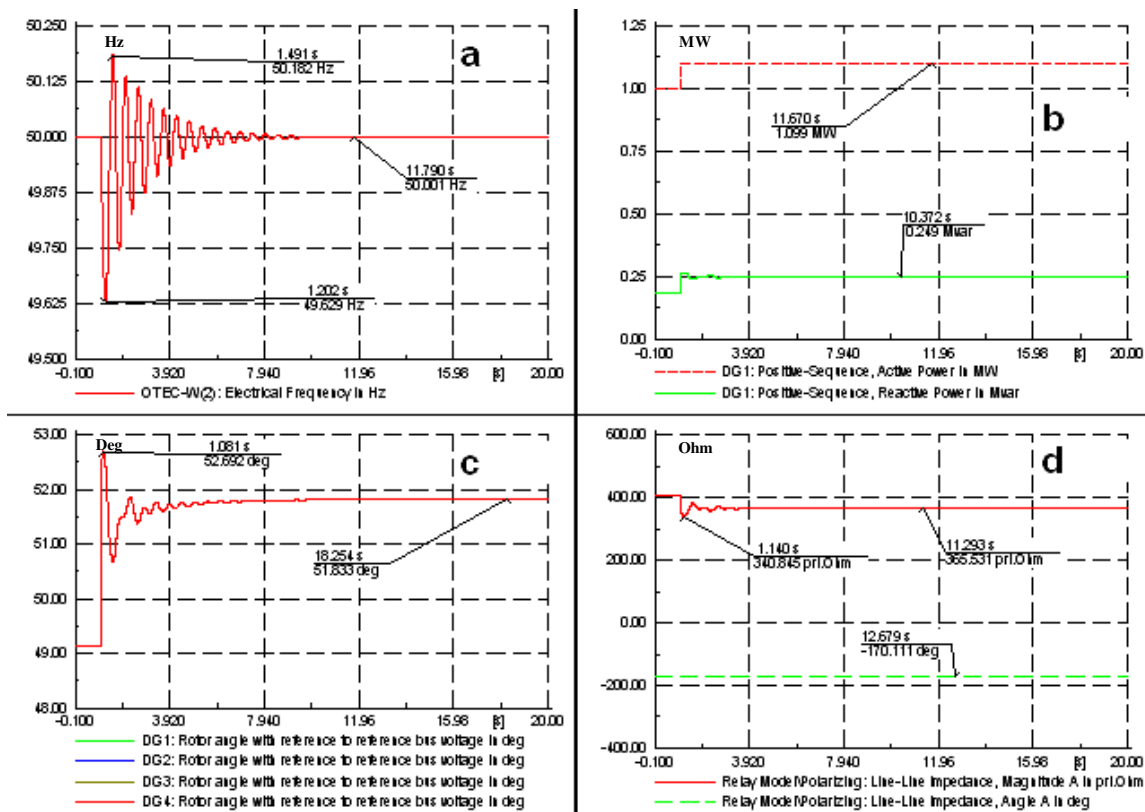
حدود ۵۰ هرتز ثابت می‌شود که این نتیجه‌ها علاوه بر اینکه بیانگر پایداری فرکانسی است، نشان‌دهنده برتری روش حذف بار هوشمند نسبت به حذف بار سنتی نیز هست. از طرفی تأثیر تعویض مود گاورنر از دروپ کنترل به ایزوترانس در ثابت شدن فرکانس در مقدار ۵۰ هرتز در شکل‌های (a-۸) و (a-۹) دیده می‌شود. از سویی در شکل (b-۸) و (b-۹) دیده می‌شود که با پیاده‌سازی این الگوریتم مولدها دچار ناپایداری و خروج از شبکه نشده‌اند و بعد از حالت گذرا به میزان ثابتی از تولید رسیده‌اند. پایداری زاویه‌ای مولدها نیز در شکل (c-۸) و (c-۹) واضح است. از طرفی مطابق شکل‌های (d-۸) و (d-۹) دیده می‌شود در لحظه‌ای که جزیره ایجاد می‌شود. به دلیل زیاد بودن بار نسبت به تولید به شدت جریان کشیده شده از مولدها افزایش می‌یابد، در نتیجه امیدانس دیده شده از سمت مولدها کاسته می‌شود. بعد از پیاده‌سازی الگوریتم مورد نظر تعادل بار و تولید و پایداری در ریزشبکه برقرار می‌شود. بنابراین جریان کشیده شده از



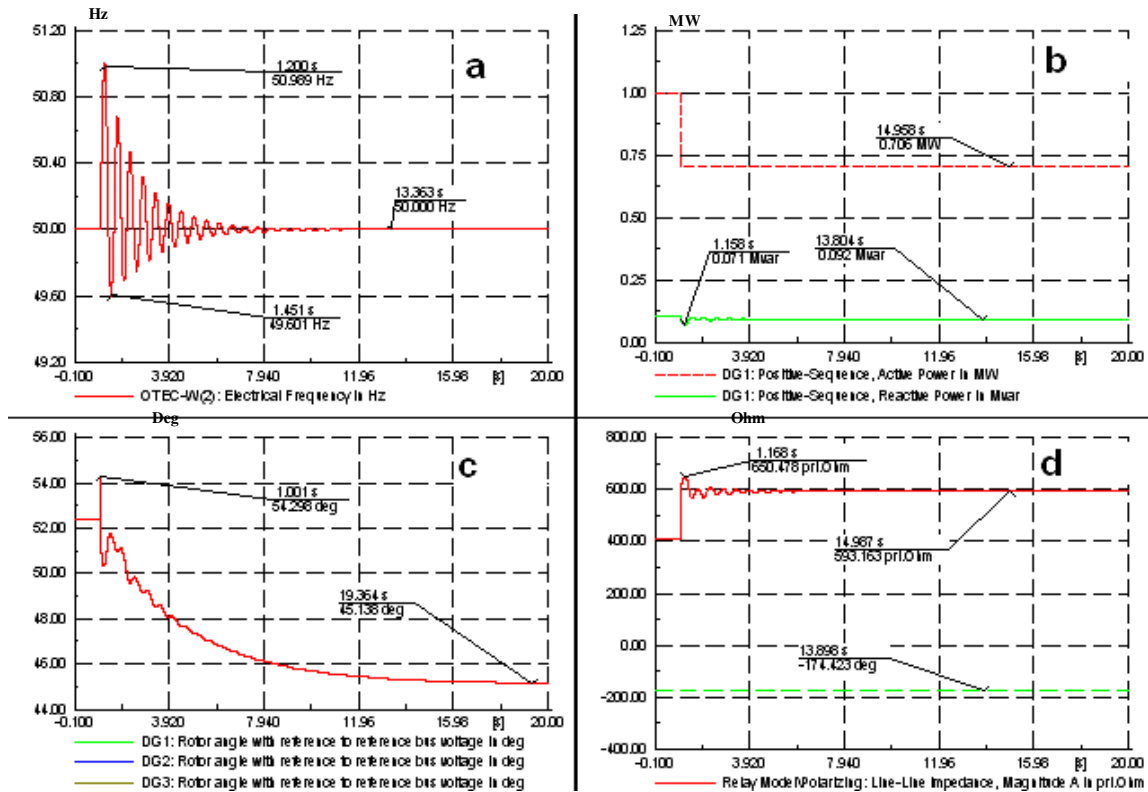
شکل ۸. تغییرات متغیرهای سیستم در صورت پیاده‌سازی الگوریتم حذف بار هوشمند در حالت اول بهره‌برداری (a) تغییرات فرکانس، (b) تغییرات توان اکتیو و راکتیو تولیدی DG1، (c) تغییرات زاویه روتور DGها، (d) تغییرات اندازه امیدانس و زاویه امیدانس



شکل ۹. تغییرات متغیرهای سیستم در صورت پیاده‌سازی الگوریتم حذف بار سنتی در حالت اول بهره‌برداری

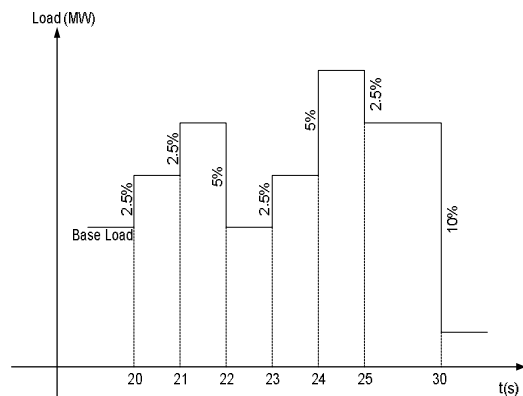


شکل ۱۰. تغییرات متغیرهای سیستم در صورت پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی در حالت دوم بهره‌برداری و در حالتی که بار به میزانی کمی از تولید بیشتر باشد



شکل ۱۱. تغییرات متغیرهای سیستم در صورت پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی در حالت ۲ بهره‌برداری و در حالتی که بار از تولید کمتر باشد

نتیجه‌ها در شکل (۱۳) به تصویر کشیده شده است. با پیاده‌سازی این روند تغییرات بار در ریزشبهه ایجاد شده، کمیت‌های مختلف ریزشبهه به‌صورت شکل (۱۳) تغییر خواهند کرد. همان‌طور که در شکل (b-۱۳) مشاهده می‌شود، مولدهای تولید پراکنده رفتار بار را به‌خوبی پیروی می‌کنند و میزان تولید آنها، متناسب با تغییرات بار تنظیم می‌شود. از طرفی تغییرات بار به اندازه‌ای است که نوسانات فرکانسی سیستم در شکل (a-۱۳) در بازه مجاز بوده و با گذشتن حالات گذرا، در مقدار ثابت ۵۰ هرتز تثبیت می‌شود. از طرفی شکل (c-۱۳) نشان می‌دهد که تعقیب بار توسط مولدها منجر به ناپایداری زاویه‌ای در مولدها نمی‌گردد. شکل (d-۱۳) نیز کاهش ناگهانی امپدانس به دلیل افزایش ناگهانی بار را در زمان اولیه، نشان می‌دهد.



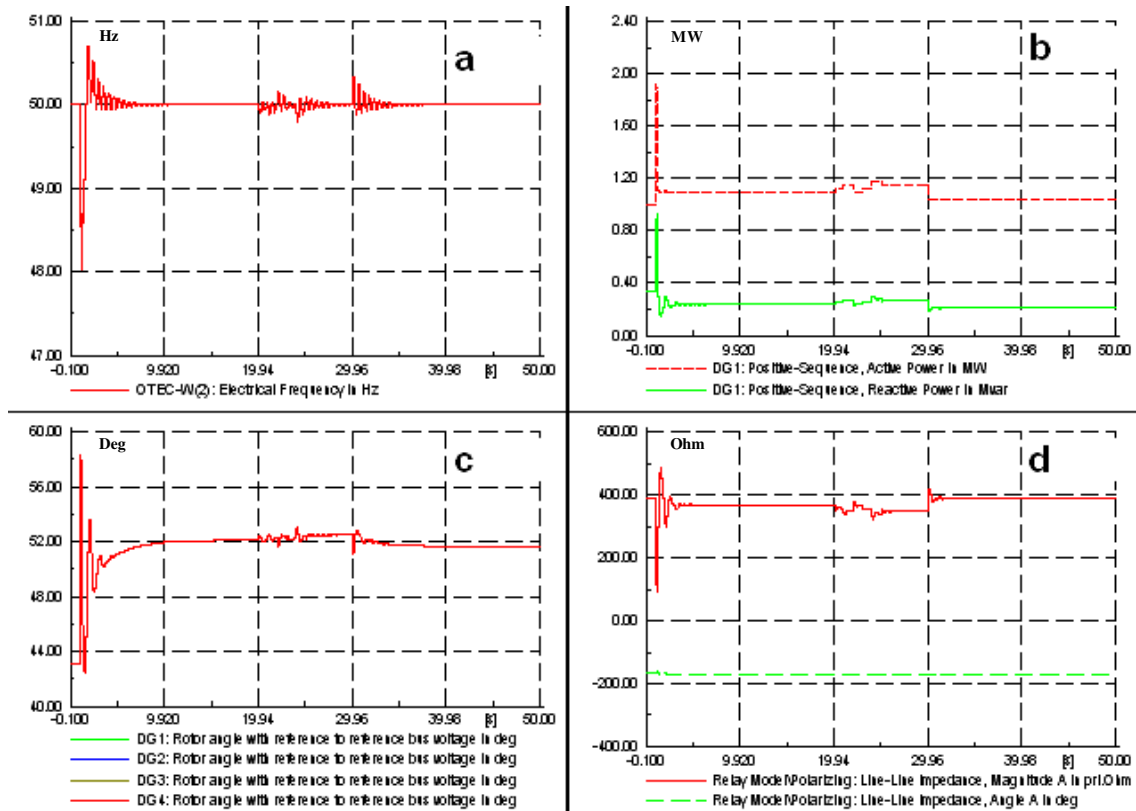
شکل ۱۲. الگوی تغییرات بار موجود در ریزشبهه.

در حالت دوم بهره‌برداری از ریزشبهه، یا تولید از بار بیشتر است یا اختلاف بار و تولید اندک است. که در هر دو صورت تغییر مود گاورنرها کفایت می‌کند. در حالت دوم بهره‌برداری، همان‌طور که در شکل (a-۱۰) و (a-۱۱) دیده می‌شود، فرکانس در مقدری کمتر یا بیشتر از ۵۰ هرتز تثبیت نمی‌شود، بلکه بعد از حدود ۱۲ ثانیه به مقدار ۵۰ هرتز همگرا می‌شود. این رفتار ناشی از تغییر مود گاورنر ژنراتورها از حالت دروپ کنترل به ایزوترانس است. از طرفی در شکل (b-۱۰) و (b-۱۱) نیز دیده می‌شود که با پیاده‌سازی این الگوریتم واحدها دچار ناپایداری و خروج از شبکه نشده‌اند و بعد از حالت گذرا به میزان ثابتی از تولید رسیده‌اند. پایداری زاویه‌ای مولدها نیز در شکل (c-۱۰) و (c-۱۱) نشان داده شده است. از طرفی مطابق شکل (d-۱۰) دیده می‌شود در لحظه‌ای که جزیره ایجاد می‌شود، امپدانس دیده شده از سمت مولدها کاسته شده است، درحالی‌که امپدانس در شکل (d-۱۱) به دلیل زیادتر بودن تولید نسبت به بار افزوده می‌شود.

۲-۵. تعقیب بار^۱

بعد از بررسی تأثیر مثبت الگوریتم پیشنهادی در تمامی حالت‌های بهره‌برداری از ریزشبهه، در این مرحله لازم است پاسخ مولدهای تولید پراکنده در برابر رخداد‌های طبیعی شبکه از جمله تغییرات بار ریزشبهه بررسی شود [۲۱-۱۸]. به‌منظور مطالعه موضوع فوق تغییرات باری مطابق شکل (۱۲) فرض شده و پاسخ مولدها و پارامترهای مورد نیاز سیستم، شبیه‌سازی و استخراج می‌شود.

^۱ Load Following



شکل ۱۳. تغییرات متغیرهای سیستم در هنگام تعقیب الگوی بار

۶. نتیجه‌گیری

براساس استانداردهای موجود، به علت عدم اعتماد به توانایی مولدهای تولید پراکنده در حفظ پایداری شبکه، در حال حاضر بهره‌برداری از مولدهای فوق در حالت جزیره‌ای توسط شرکت‌های برق مجاز نیست و بعد از وقوع یک خطا، واحد تولید پراکنده مجبور است قطع شود و تا زمان رفع خطا در حالت قطع باقی بماند. قانون فوق اجرای عملیات پدافند غیرعامل را ناممکن می‌سازد. این مقاله، برای اینکه در حالت جزیره‌ای واحدهای تولید پراکنده قادر به تغذیه بار ناحیه جزیره بوده و بتوانند ولتاژ و فرکانس را در محدوده قابل قبول نگه دارند، روش نوینی را ارائه کرد. همان‌طور که مشاهده شد، با اعمال هم‌زمان روش حذف بار هوشمند و تغییر مود کنترلی گاورنرها از حالت دروپ ثابت به حالت ایزوترانس، مولدهای گازی مجهز به ژنراتور سنکرون موفق به حفظ پایداری ریزشکبه شدند و توانستند افت ولتاژ را تأمین و فرکانس شبکه را در مقدار نامی حفظ کنند. شبیه‌سازی الگوریتم پیشنهادی بر روی یک شبکه واقعی، به‌وضوح پایداری فرکانسی در ریزشکبه ایجاد شده و پایداری زاویه‌ای مولدها را نشان داد. در نتیجه یکی از مهم‌ترین اهداف استفاده از مولدهای تولید پراکنده که انجام مانورهای پدافند غیرعامل و افزایش قابلیت اطمینان سیستم است، با پیاده‌سازی این الگوریتم تحقق یافت. با اجرای این الگوریتم دیگر نیازی به خاموش کردن مولدهای تولید پراکنده نیست. علاوه بر این با بررسی رفتار شبکه در مقابل تغییرات پله‌ای بار، مشخص شد که با تغییر مد گاورنرها به مد ایزوترانس و حذف بار، ریزشکبه‌ای ایجاد

می‌شود که مولدها به‌خوبی نسبت به تغییرات بار عکس‌العمل نشان می‌دهند.

۷. مراجع

- [1] Smallwood, C. L. "Distributed Generating in Autonomous and No Autonomous Micro Grids"; Rural Elect. Power Conf. 2002, D1-D6.
- [2] "Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems"; IEEE Std. 1547, 2003.
- [3] "Instruction for Interconnection the Small-Scale Generations with Distributed Networks"; Monen Co., Tavanir Co. 2009, 1, 74 (In Persian).
- [4] Chui, F. T.; Peter, A. "Control of Multiple Distributed Generator for Intentional Islanding"; IET-CIRED Seminar, Smart Grid for Distribution, Frankfurt 2008, 1-4.
- [5] Zeineldin, H.; El-Saadany, E.; Salama, M. M. "Intentional Islanding of Distributed Generation"; IEEE PES Generation Meeting 2005, 2, 1496-1502.
- [6] Yee, S. K.; Milanovic, J. V.; Hughes, F. M. "Overview and Comparative Analysis of Gas Turbine Models for System Stability Studies"; IEEE Trans. on Power Sys. 2008, 23, 108-118.
- [7] Yong, M.; Shao-bin, H.; Ying-due, H.; Yung-kai, G.; Yi, W. "Analysis of Power-Frequency Dynamics and Designation of Under Frequency Load Shedding Scheme in Large Scale Multi Machine Power Systems"; IEE Int. Conf. on Advance Power Sys. Control 1991, 871-876.
- [8] Jones, J. R.; Kirkland, W. D. "Computer Algorithm for Selection of Frequency Relays for Load Shedding"; IEEE Computer Appl. in Power 1988, 21-25.
- [9] Kundur, P. "Power System Stability and Control"; New York, McGraw-Hill, 1994.

- [17] Mahat, P.; Chen, Z.; Bak-Jensen, B. "Gas Turbine Control for Islanding Operation of Distribution Systems"; Power & Energy Soc. General Meeting, PES '09, IEEE 2009, 1 – 7.
- [18] Jones, J. R.; Kirkland, W. D. "Computer Algorithm for Selection of Frequency Relays for Load Shedding"; IEEE Computer Appl. in Power 1988, 21-25.
- [19] Anderson, P. M.; Mirheydar, M. "A Low-Order System Frequency Response Model"; IEEE Trans. Power Sys. 1990, 5, 720-729.
- [20] Anderson, P. M. "An Adaptive Method for Setting Under Frequency Load Shedding Relays"; IEEE Trans. Power Sys. 1992, 7, 647-655.
- [21] Delfino, B.; Massucco, S.; Morini, A.; Scalera, P.; Silvestro, F. "Implementation and Comparison of Different Under Frequency Load-Shedding Schemes"; IEEE Summer Meeting 2001, 1, 307-312.
- [10] Zhang, L.; Zhong, J. "UFLS Design by Using f and Integrating df/dt "; Power Sys. Conf. and Exposition, PSCE, IEEE PES, Atlanta, GA 2006, 840 – 1844.
- [11] Qiu, B. "Next Generation Information Communication Infrastructure and Case Studies for Future Power Systems"; Ph.D. thesis, Virginia Polytechnic Institute, 2002.
- [12] "IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies"; IEEE Press, 1992.
- [13] "Program Operation Manual"; Power System Simulator - PSS/E, Power Tech., Inc., New York, USA.
- [14] Nagpal, M.; Moshref, A.; Morison, G. K.; Kundur, P. "Experience with Testing and Modeling of Gas Turbines"; IEEE PES Winter Meeting 2001, 2, 652–656.
- [15] Andersson, D.; Elmersson, P.; Juntti, A.; Gajic, Z.; Karlsson, D.; Fabiano, L. "Intelligent Load Shedding to Counteract Power System Instability"; Transmission and Distribution Conf. and Exposition, Latin America, IEEE/PES 2004, 570 – 574.
- [16] Mahat, P. "Underfrequency Load Shedding for an Islanded Distribution System with Distributed Generators"; IEEE Trans. on Power Delivery, 2006, 25, 911-918.