

حذف بار فرکانسی چندمرحله‌ای در سیستم توزیع جزیره‌شده

مهرنوش وطنی^۱، تورج امرائی^۲، بابک مظفری^۳، علیمحمد رنجبر^{۴*}

^۱ دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی برق، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

m-vatani@iaufb.ac.ir

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

amraee@kntu.ac.ir

^۳ دانشیار دانشکده مهندسی برق، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

mozafari@srbiau.ac.ir

^۴ استاد دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

amranjbar@sharif.edu

چکیده: جدا شدن ریزشبكة از شبکه سراسری می‌تواند منجر به تغییرات زیادی در فرکانس شود. روش حذف بار فرکانسی یک روش مناسب برای کنترل افت فرکانس، از طریق حذف میزان مشخصی از بار است. در این مقاله نیز به منظور کنترل فرکانس ریزشبكة جزیره‌شده از رله حذف بار فرکانسی استفاده می‌شود. منابع تولید پراکنده در ریزشبكة، به رله‌های تشخیص جزیره‌ای (مانند رله نرخ تغییرات فرکانسی) مجهزند. زمانی که ریزشبكة از شبکه سراسری جدا می‌شود، منابع تولید پراکنده موجود در ریزشبكة با فعال شدن رله‌های حفاظت ضد جزیره‌ای از مدار خارج می‌شوند. در این مقاله، برای پیشگیری از صدور فرمان قطع به منابع تولید پراکنده، از قید نرخ تغییرات فرکانسی استفاده می‌شود. به منظور تعیین پاسخ فرکانسی سیستم، معادله نوسان گسسته می‌شود. از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی میزان بار قابل حذف در ریزشبكة استفاده شده است. روش پیشنهادی روی سیستم توزیع ۳۴ باس مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: رله حذف بار فرکانسی، نرخ تغییرات فرکانس، الگوریتم ژنتیک، ریزشبكة جزیره‌شده.

۱. مقدمه

یک ریزشبه، سیستم قدرت کوچک شامل بار و منابع تولید پراکنده است که می‌تواند به موازات سیستم توزیع یا به صورت سیستم جزیره‌شده عمل کند [۱]. جزیره‌ای شدن ریزشبه به تغییرات پارامترها از جمله ولتاژ و فرکانس در سمت مصرف‌کننده منجر می‌شود. به طور کل در رویارویی با مسئله جزیره‌ای شدن دو دیدگاه وجود دارد: در دیدگاه اول به این پدیده از دید منفی نگریسته می‌شود و به آن جزیره‌ای شدن ناخواسته یا غیر عمدی می‌گویند، ولی دیدگاه دوم این پدیده را یک فرصت تلقی کرده است و به آن جزیره‌ای شدن خود خواسته یا عمدی می‌گویند.

در دیدگاه اول، براساس استاندارد IEEE STD 1547-2003 بعد از جزیره‌شدن باید منابع تولید پراکنده قطع شوند. در این دیدگاه، مفهوم حفاظت ضد جزیره‌ای مطرح می‌شود که وظیفه آن مقابله با ایجاد این پدیده است. بنابراین باید رله‌های نصب‌شده، ناحیه عدم تشخیص کوچک و تشخیص درستی داشته باشند. همچنین منابع تولید پراکنده از مدار خارج شوند [۲]. در دیدگاه دوم که اخیراً به آن توجه شده است، توان موردنیاز بارهای درون جزیره تا حد امکان توسط منابع تولید پراکنده تأمین می‌شوند. در واقع در این دیدگاه می‌توان به پدیده تشخیص جزیره به عنوان یک فرصت نگریست و قابلیت اطمینان بار را افزایش داد. در هر دو دیدگاه فوق، تشخیص حالت جزیره‌ای اهمیت دارد و باید رله‌های تشخیص جزیره در ریزشبه نصب شده باشند.

فرایند بهره‌برداری از ریزشبه جزیره‌شده یک فرایند پیچیده چندوجهی است. در حالت کارکرد جزیره‌ای، ریزشبه باید توانایی کنترل فرکانس و ولتاژ را داشته باشد. تمرکز این مقاله فقط روی حفظ تعادل توان به منظور کنترل فرکانس است.

در مواقع بهره‌برداری نرمال ریزشبه، فرکانس توسط کنترل خودکار تولید تنظیم می‌شود. اما هنگام قطع ریزشبه از شبکه برق اصلی، کنترل خودکار تولید قادر به جبران افت فرکانس نخواهد بود. این امر می‌تواند از طریق یک الگوریتم هوشمند حذف بار محقق شود. این رله، بار سیستم را تا اندازه‌ای که فرکانس را به مقدار نامی‌اش برگرداند، حذف می‌کند. سه روش کلی برای حذف بار مشخص شده است [۳]: روش سنتی، روش نیمه‌وقتی، روش وقتی. در مرجع [۴] از رله حذف بار فرکانسی^۱ در ریزشبه استفاده شده است که در آن میزان بار حذف شده و کمترین مقدار فرکانس با استفاده از الگوریتم ژنتیک^۲ به ترتیب حداقل و حداکثر می‌شوند. در مرجع [۵] رله حذف بار فرکانسی در سیستم

قدرت براساس برنامه‌ریزی خطی ارائه شده است. تابع هدف میزان متوسط بار قابل حذف در برابر خروج تصادفی تولید است. حذف بار وقتی با در نظر گرفتن پاسخ فرکانسی سیستم در مرجع [۶] آورده شده است. زمانی که سیستم در معرض اغتشاش قرار می‌گیرد، فرکانس و نرخ تغییرات فرکانس^۳ تغییر خواهند کرد. بنابراین از پاسخ فرکانسی برای تخمین عدم تعادل بین تولید و مصرف استفاده می‌شود، سپس میزان بار لازم به منظور پایداری فرکانس در سیستم حذف می‌شود. در مرجع [۷] از حذف بار وقتی استفاده شده که در آن، تابع هدف حداقل کردن جریمه پرداختی حذف بار، توسط بهره‌برداران منابع تولید پراکنده است. روش‌های متفاوت حذف بار فرکانسی و همچنین مزایا و معایب هر روش در مرجع [۸] آورده شده است. در مرجع [۹] از روشی دوگانه برای تشخیص جزیره و همچنین از حذف بار براساس اولویت به منظور برقراری تعادل توان در جزیره تشکیل شده استفاده شده است. به این ترتیب، پایداری فرکانس و ولتاژ در قسمت جزیره‌شده برقرار می‌شود. از دو پارامتر نسبت حساسیت توان اکتیو به ولتاژ و توان راکتیو به فرکانس برای تشخیص جزیره استفاده می‌شود.

در مرجع [۱۰] روشی برای حذف بار ارائه شده است که برای تشخیص جزیره فرض بر آن است که سیستم توزیع مجهز به تکنولوژی شبکه هوشمند است. وسایل کنترلی و نظارتی قابل اطمینان و ادوات مخابراتی اطلاعات را سریع ارسال می‌کنند. برای حذف بار فرکانسی از ترکیب روش‌های هوشمند و وقتی^۴ استفاده شده است.

در این مقاله، استفاده از رله حذف بار فرکانسی در سیستم توزیع شامل منابع تولید پراکنده سنکرون^۵ پیشنهاد شده است. برای جلوگیری از خاموشی در ریزشبه، رله حذف بار باید بر مبنای یک پارامتر مؤثر عمل کند. روش‌های گوناگونی در شناسایی جزیره‌ای شدن ریزشبه وجود دارد [۱۱]. در این میان، رله نرخ تغییرات فرکانسی عملکرد مناسبی در تشخیص عدم تعادل توان بین تولید و مصرف در ریزشبه دارد. در این مقاله، از قید نرخ تغییرات فرکانسی، برای لحاظ کردن شرایط جزیره‌ای شدن ریزشبه استفاده می‌شود. هدف از افزودن محدودیت فوق این است که با توجه به مقدار df/dt مقادیر آستانه فرکانس در رله حذف بار فرکانسی طوری تنظیم شود که قبل از خروج منابع تولید پراکنده، این رله فعال شود و با حذف میزان مشخصی از بار از ناپایداری فرکانس در ریزشبه جزیره‌شده جلوگیری کند. در الگوریتم پیشنهاد شده، هدف بهبود عملکرد رله حذف بار فرکانسی و افزایش قابلیت اطمینان پس از وقوع پدیده جزیره‌ای شدن است.

3. Rate Of Change Of Frequency: ROCOF

4. Adaptive

5. Synchronous

1. Under Frequency Load Shedding: UFLS

2. Genetic

$$\Delta p_{r,n} = \Delta p_{r,n-1} + \frac{\Delta t}{T} \left(-\frac{\Delta f_n}{R} - \Delta p_{r,n-1} \right) \quad (6)$$

شرایط اولیه در روابط (۴) و (۵) صفر است؛ زیرا قبل از وقوع اغتشاش هیچ گونه انحراف فرکانس و تنظیم اولیه ای برای فرکانس وجود ندارد.

۲.۲. محدودیت های رله پیشنهادی

به منظور پیشگیری از خاموشی و داشتن حذف بار بهینه در سیستم توزیع جزیره شده، تعدادی قیود نامساوی در مسئله بهینه سازی در نظر گرفته می شود.

- محدودیت نرخ تغییرات فرکانسی: همان طور که گفته شد، هدف از انجام این تحقیق، جلوگیری از قطع منابع تولید پراکنده به دلیل تغییرات فرکانس ناشی از جزیره ای شدن شبکه توزیع است. به منظور حفظ منابع تولید پراکنده در ریزشبکه و بهبود قابلیت اطمینان بارها، محدودیت نرخ تغییرات فرکانس اعمال می شود. به نوعی به رله حذف بار فرکانسی کمک می شود تا وضعیت جزیره ای شدن را تشخیص دهد. اگر نرخ تغییرات فرکانس از مقدار آستانه خود (۱/۲ هرتز بر ثانیه) در مدت زمان مشخص و از پیش تعیین شده (۱۰۰ میلی ثانیه) بیشتر شود، الگوریتم حذف بار تشخیص می دهد که ریزشبکه در حال جدا شدن از شبکه سراسری است. مقدار مؤثر نرخ تغییرات فرکانس با تعیین مقدار متوسط طی پنج سیکل محاسبه می شود [۱۳].

$$\frac{df}{dt} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \frac{\Delta f_i}{\Delta t_i} \quad (7)$$

که Δf_i تغییرات فرکانس در یک سیکل است، Δt_i طول یک دوره تناوب است. مقدار نرخ تغییرات فرکانس در هر پنج سیکل به روز می شود. بنابراین قید نامساوی نرخ تغییرات فرکانسی به صورت زیر مدل می شود:

$$\frac{df}{dt} \leq \frac{df}{dt}_{Th} \quad (8)$$

- محدودیت حذف بار: میزان بار قابل حذف در سیستم محدود است. این محدودیت را می توان با نامساوی زیر نوشت:

$$\sum_s \Delta p_{sh,s} \leq p_{sh,max} \quad (9)$$

همچنین مقدار بار حذف شده در هر مرحله باید مطابق رابطه زیر باشد:

$$\Delta p_{sh,s} \leq p_{sh,s}^{Th} \quad (10)$$

- محدودیت فرکانس حالت ماندگار: زمانی که سیستم به حالت ماندگار می رسد، باید تغییرات فرکانس در محدوده قابل قبول قرار گیرد. این محدودیت با رابطه زیر نشان داده می شود:

در بخش ۲ از این مقاله، مبانی روش پیشنهادی و فرمول بندی مسئله حذف بار فرکانسی و نیز توضیحات کامل قید نرخ تغییرات فرکانسی آورده شده است. در بخش ۳، از الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی میزان بار قابل حذف در ریزشبکه استفاده شده است. در بخش ۴، روند کلی روش پیشنهادی نشان داده شده است. در بخش ۵، نتایج شبیه سازی ارائه شده است. در نهایت، این مقاله در بخش ۶ نتیجه گیری شده است.

۲. مبانی روش پیشنهادی

در این بخش، مسئله حذف بار فرکانسی فرمول بندی می شود. در ابتدا معادله نوسان گسسته شده منابع تولید پراکنده [۵] توصیف می شود. سپس تابع هدف و محدودیت های بهره برداری مربوط به رله حذف بار ارائه می شود.

۱.۲. فرم گسسته معادله نوسان

هر منبع تولید پراکنده سنکرون در سیستم توزیع پاسخ فرکانسی مربوط به خود را در برابر اغتشاشات دارد. بنابراین در سیستمی که شامل چندین منابع تولید پراکنده است، معادله نوسان برای هر منبع به طور جداگانه نوشته می شود؛ اگرچه طبق یک فرض متداول، می توان گفت تمام ژنراتورها در یک فرکانس واحد نوسان خواهند کرد. با لحاظ کردن این تقریب در پاسخ فرکانسی سیستم، معادله نوسان برای یک ماشین به صورت زیر نوشته می شود [۱۲]:

$$\frac{d\Delta f(t)}{dt} = \frac{f_0}{2H} (\Delta p_r(t) - \Delta p_g(t) + \Delta p_{sh}(t) - K_D \Delta f(t)) \quad (1)$$

تنظیم فرکانس از طریق گاورنر^۱ با رابطه زیر بیان می شود:

$$\frac{d\Delta p_r(t)}{dt} = \frac{1}{T} (-\Delta p_r(t) - \frac{\Delta f(t)}{R}) \quad (2)$$

روابط (۱) و (۲) در بازه زمانی Δt به صورت زیر توصیف می شوند:

$$\Delta p_{r,n} = \Delta p_r(n \cdot \Delta t), \Delta p_{sh,n} = \Delta p_{sh}(n \cdot \Delta t), \Delta f_n = \Delta f(n \cdot \Delta t) \quad (3)$$

با اعمال روش اویلر^۲ به روابط (۱) و (۲)، فرم گسسته این روابط در بازه زمانی Δt به صورت زیر نوشته می شود:

$$\Delta f_n = \Delta f_{n-1} + h_{n-1} \cdot \Delta t \quad (4)$$

که ضریب ثابت h از رابطه زیر به دست می آید:

$$h_n = \frac{1}{2H} (\Delta p_{r,n} - \Delta p_g + \Delta p_{sh,n} - K_D \Delta f_n) \quad (5)$$

فرم گسسته رابطه (۲) به صورت زیر است:

حذف بار فرکانسی چند مرحله‌ای در سیستم توزیع جزیره‌شده ۵

در انتخاب جمعیت برتر از طبیعت برگرفته شده است. بدین معنی که در دنیای واقعی، همواره نسلی پابرجا می‌ماند و به حیات ادامه می‌دهد که از قابلیت و توانایی بالاتری نسبت به سایر موجودات مشابه خود برخوردار باشد.

الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله، مجموعه بزرگی از راه‌حل‌های ممکن را تولید می‌کند. هر کدام از این راه‌حل‌ها با یک تابع برازندگی ارزیابی می‌شود. سپس تعدادی از بهترین راه‌حل‌ها باعث تولید راه‌حل‌های جدیدی می‌شوند. بدین ترتیب فضای جستجو در جهتی تکامل پیدا می‌کند که به راه‌حل مطلوب برسد. مجموعه‌ای از کروموزم‌ها که جمعیت نامیده می‌شود، در هر مرحله از الگوریتم تولید می‌شوند. در هر تکرار با استفاده از تابع برازندگی، میزان سازگاری کروموزم‌ها با محیط ارزیابی می‌شود. در واقع توسط این تابع، هر کروموزم رمزگشایی شده و به آن یک معیار و مقدار برازندگی نسبت داده می‌شود. آنگاه با استفاده از کروموزم‌های نسل جاری و استفاده از سه عملگر ژنتیکی (تقاطع، جهش و تولید مجدد)، نسل جدید تولید می‌شود.

۴. ساختار روش پیشنهادی

عملکرد رله حذف بار فرکانسی پیشنهادی در شکل (۱) نشان داده شده است. با گسسته‌سازی معادله نوسان، پاسخ فرکانسی برحسب زمان به دست می‌آید که فرکانس و نرخ تغییرات فرکانس توسط آن محاسبه می‌شود. اگر نرخ تغییرات فرکانس بیشتر از مقادیر آستانه مشخص شده باشد، آنگاه جزیره تشخیص داده می‌شود. زمانی که تمامی قیود برآورده شد، رله حذف بار فرکانسی عمل می‌کند و مقداری از بار را حذف می‌کند.

۵. نتایج شبیه‌سازی

سیستم مورد مطالعه در این مقاله، شبکه توزیع استاندارد ۳۴ باس [۱۵] متصل به شبکه سراسری مطابق شکل (۲) است. که در آن ۸ منبع تولید پراکنده و ۲۵ بار وجود دارد (۷۴ مگاوات و ۱۰ مگاوار). ریزشکه از طریق نقطه اتصال مشترک^۱ به شبکه سراسری وصل است. عدم تعادل توان بین ریزشکه و شبکه سراسری اغتشاش نامیده می‌شود. توان مبنای تمامی واحدها ۱۰ مگاوات آمپر، ثابت اینرسی ۳ ثانیه و افت گاورنر ۰/۰۴ هرتر است.

۱.۵. تشخیص جزیره توسط رله روکوف

زمانی که ریزشکه به موازات شبکه توزیع کار می‌کند، دامنه ولتاژ و فرکانس توسط شبکه بالادست کنترل می‌شود و هنگامی که کلید قدرت

$$59.5 \leq f_N \leq 60.5 \quad (11)$$

تنظیمات فرکانسی در هر مرحله از حذف بار: تنظیمات فرکانسی در حوادث مختلف، متفاوت است. در این مرحله مشخص می‌شود به‌ازای هر حادثه‌ای از چه تنظیمات فرکانسی استفاده شود. الگوریتم حذف بار فرکانسی در هر مرحله از حذف بار، بهترین مقدار را برای تنظیمات فرکانس (f_s) مشخص می‌کند. زمانی که فرکانس سیستم کمتر از f_s شود، تایمر فعال می‌شود. اگر زمان اندازه‌گیری شده توسط تایمر از مقدار تنظیمات آن فراتر رود، متغیر دودویی u_{sn} یک می‌شود. بنابراین قید فرکانس به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$f_n \leq f_s \quad (12)$$

گرچه باید برای تنظیمات فرکانس در هر مرحله نیز محدودیتی تعریف کرد.

$$59.5 \leq f_N \leq 60.5 \quad (13)$$

به‌منظور جلوگیری از تداخل در عملکرد رله در گام‌های فرکانسی مختلف، باید فاصله بین تنظیمات فرکانسی در هر مرحله، حداقل Δf_{min} باشد، بنابراین محدودیت زیر اعمال شود:

$$f_s - f_{s+1} \geq \Delta f_{min} \quad (14)$$

که معمولاً Δf_{min} در ریزشکه ۰/۲ هرتر [۴] است.

محدودیت حداقل فرکانس: برای حداقل فرکانس قابل قبول در ریزشکه محدودیت زیر تعریف می‌شود:

$$f_n \geq f_{min} \quad (15)$$

۳.۲. تابع هدف

رله حذف بار فرکانسی با حذف حداقل مقدار بار از سیستم توزیع جزیره‌شده در برابر خاموشی محافظت می‌کند. بنابراین تابع هدف میزان بار قابل حذف در سیستم را حداقل می‌کند. تابع هدف به‌صورت زیر است:

$$\min \sum_k \sum_s (u_{sn}^k \cdot \Delta p_{sh,s}^k) \cdot C_k \quad (16)$$

که در رابطه قبل، C_k بیانگر ضریب اهمیت بارهای شبکه است. در این مقاله فرض شده که تمامی بارها ضریب اهمیت یکسانی دارند.

۳. الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک [۱۴] یک روش جستجوی سراسری به حساب می‌آید که در آن، یادگیری بر پایه تکامل بیولوژیکی است و روش عملکرد آن

اصلی باز می شود (CB)، ریزشبه از حالت اتصال به شبکه به حالت جزیره ای تبدیل می شود.

باس^۱ PCC در ثانیه یکم باز می شود و همچنان تا پایان زمان شبیه سازی باز می ماند. سیستم مورد مطالعه در نرم افزار DIGSILENT Power factory 14.1 پیاده سازی و شبیه سازی شده است. منابع تولید پراکنده قبل از جزیره ای شدن ریزشبه در مد ضریب توان و بعد از تشکیل جزیره در مد کنترل ولتاژ عمل می کنند. همچنین این منابع به دلیل مجهز بودن به گاورنر در کنترل فرکانس ریزشبه مشارکت دارند. شبیه سازی در شرایط جزیره ای (باز شدن کلید قدرت CB) در دو حالت عدم تعادل توان ۷/۵ درصد (حضور تمام منابع تولید پراکنده) و عدم تعادل توان ۳۰ درصد (مشارکت ۵ منبع تولید پراکنده) انجام شده است. در شکل های (۴) و (۵)، مسیر فرکانس و نرخ تغییرات فرکانس نشان داده شده است. در جزیره ای شدن با عدم تعادل توان ۷/۵ درصد مقدار df/dt عدد کوچکی است و رله روکوف فعال نمی شود. جزیره ای شدن با عدم تعادل توان ۳۰ درصد منجر به df/dt بزرگی می شود. بنابراین رله روکوف قادر به تشخیص جزیره در چنین شرایط عدم تعادل توان است و در صورت فعال شدن رله های حذف بار فرکانسی، قسمتی از بار ریزشبه به منظور برقراری تعادل بین تولید و مصرف حذف می شود. با برقراری تعادل بین تولید و مصرف می توان از ریزشبه جزیره شده بهره برداری کرد.

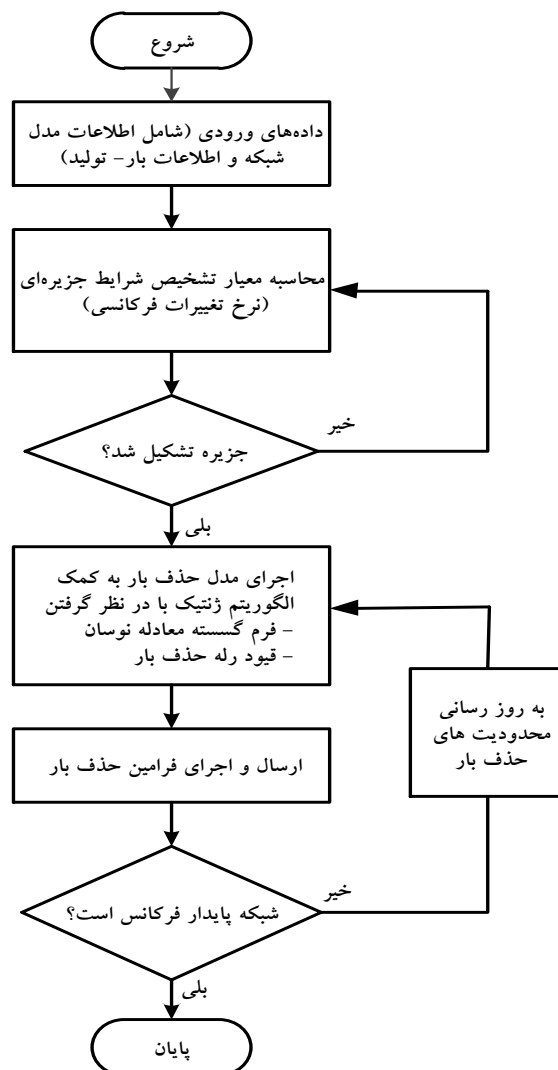
۲.۵. پیاده سازی طرح پیشنهادی حذف بار

در این طرح، جزیره ای شدن با سه مقدار مختلف عدم تعادل توان به سیستم مورد مطالعه اعمال شده است. در طرح حذف بار پیشنهادی عدم تعادل توان به صورت زیر به دست می آید:

$$\Delta P_g = \frac{2 * \sum_{j=1}^{N_g} H_j}{f} \cdot \frac{df}{dt} \quad (17)$$

که در رابطه فوق، H_j ثابت اینرسی منبع تولید پراکنده j ام است.

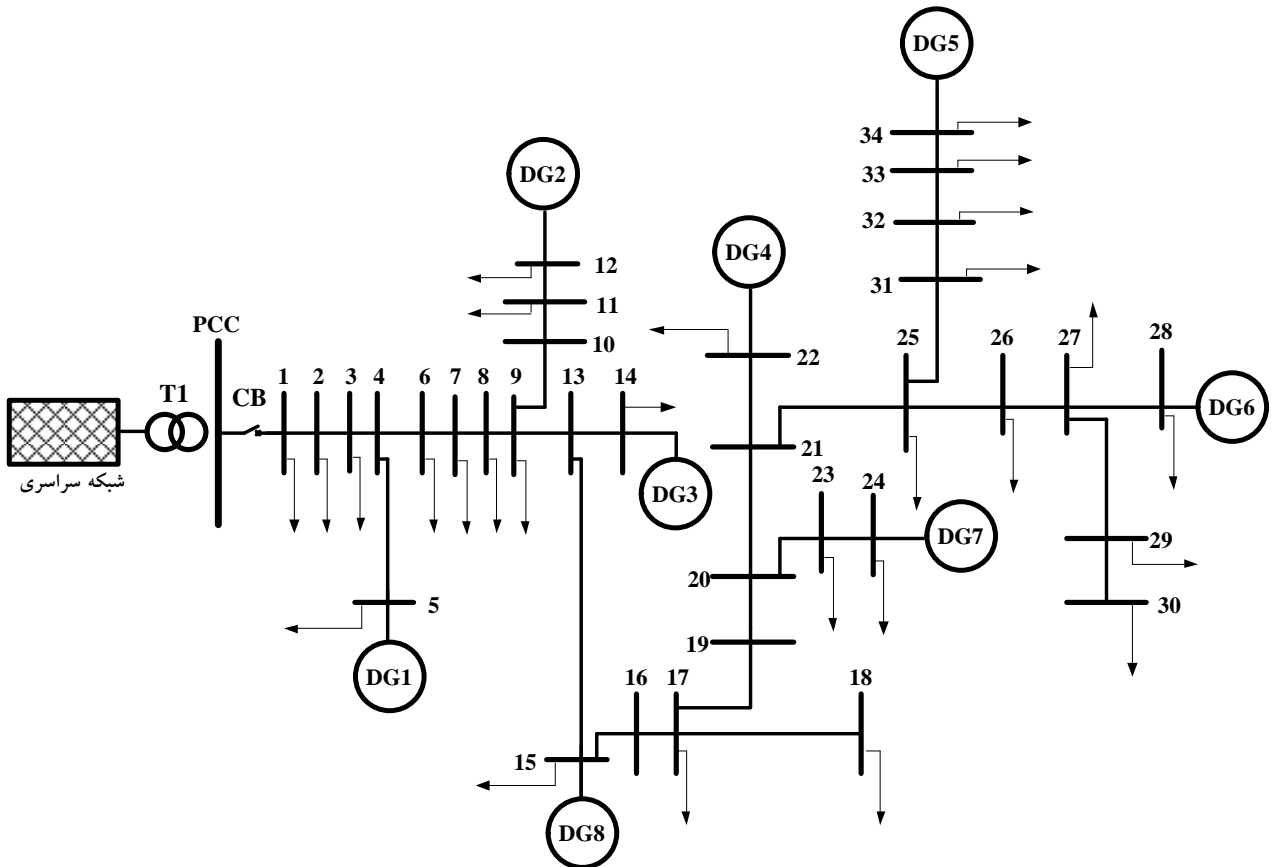
به طور کل، اغتشاشات به سه دسته محتمل اغتشاشات کوچک، متوسط و بزرگ تقسیم شده اند که به ترتیب متناظر با سه سناریو کم باری (۲۰ درصد)، میان باری (۳۰ درصد) و پیک بار (۴۰ درصد) است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که به ازای هر حادثه ای از چه تنظیم فرکانسی استفاده شود. همچنین می توان رله را با توجه به نتایج به دست آمده از شبیه سازی بدترین سناریو (پیک بار) تنظیم و در وضعیت بهره برداری عادی از آن استفاده کرد. در جزیره تشکیل شده با عدم تعادل توان ۲۰ درصد شش منبع تولید پراکنده، در اغتشاش ۳۰ درصد پنج منبع تولید پراکنده و در اغتشاش ۴۰ درصد چهار منبع تولید پراکنده در مدار مشارکت دارند.



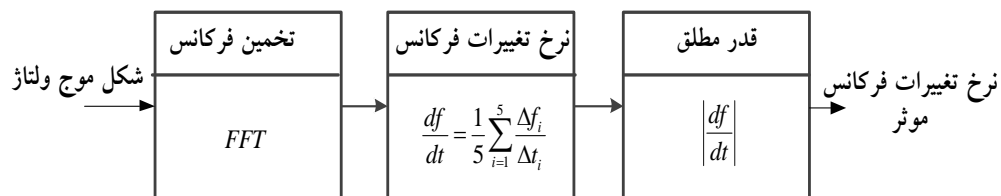
شکل (۱): روندنمای روش حذف بار فرکانسی پیشنهادی

بعد از وقوع وضعیت جزیره ای، متغیرهای الکتریکی مانند ولتاژ، جریان و فرکانس در سمت ترمینال منبع تولید پراکنده تغییر می کنند. بنابراین با اندازه گیری پارامترهای مناسب، می توان جزیره ای شدن را تشخیص داد. هنگامی که عدم تعادل توان در سیستم جزیره ای شده کوچک باشد، فرکانس به آرامی تغییر می کند، از رله روکوف (ROCOF) برای سرعت بخشیدن به تشخیص جزیره ای شدن استفاده می شود [۱۱]. بلوک رله نرخ تغییرات فرکانس در شکل (۴) آورده شده است.

شبیه سازی زمانی به سیستم شکل (۲) اعمال می شود. با توجه به اینکه کل زمان شبیه سازی ۲ ثانیه است، کلید قدرت (CB) موجود در



شکل (۲): سیستم توزیع استاندارد ۳۴ باس IEEE

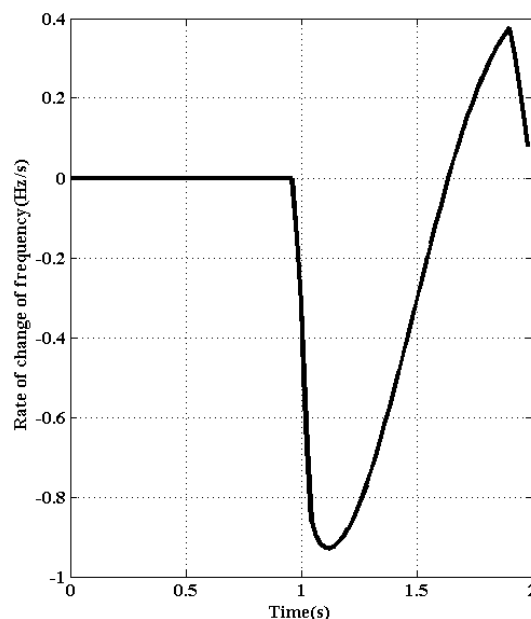
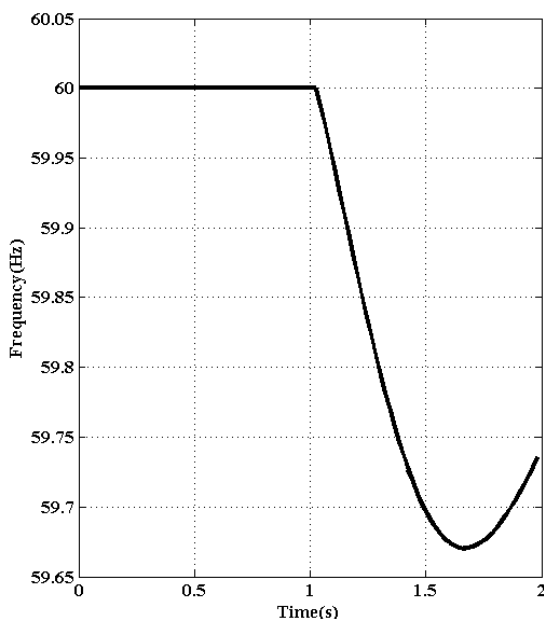


شکل (۳): بلوک رله نرخ تغییرات فرکانسی

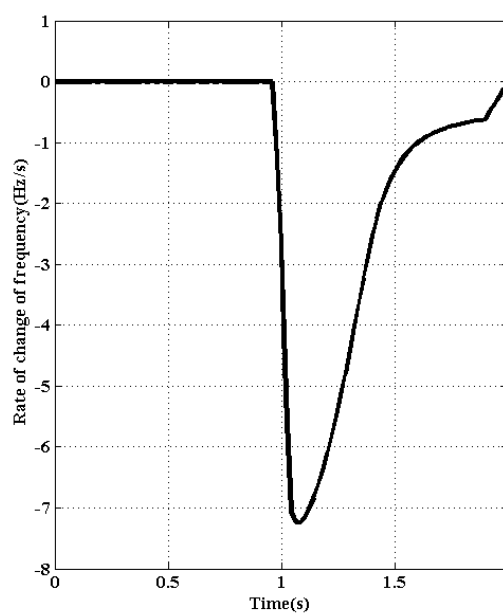
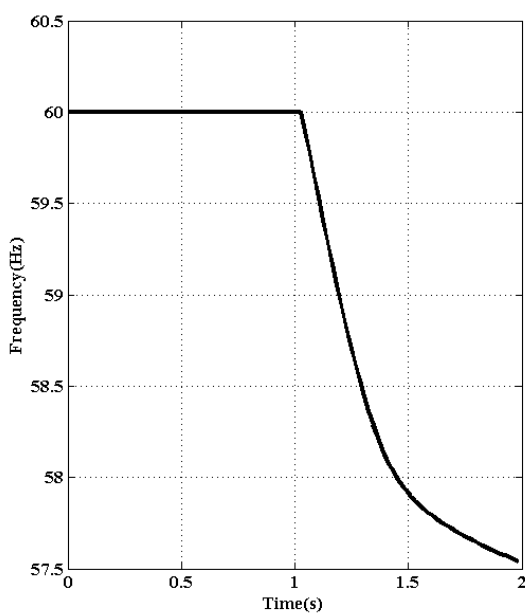
فرکانس حالت ماندگار از رنج مجاز آن تخطی نمی‌کند. مقدار آستانه برای نرخ تغییرات فرکانس ۱/۲ هرتز در نظر گرفته شده است. پارامتر df/dt به میزان عدم تعادل توان اکتیو در سیستم جزیره‌شده بستگی دارد. مشاهده می‌شود که در اغتشاش ۲۰٪ تمامی قیود و محدودیت‌ها برآورده می‌شوند (زمانی که عدم تعادل توان کم است محدودیت نرخ تغییرات فرکانس از مقدار آستانه خود تخطی نمی‌کند). بنابراین رله حذف بار فرکانسی در این اغتشاش فعال نمی‌شود. در عدم تعادل ۳۰٪ و ۴۰٪، به دلیل برآورده نشدن قیود رله حذف بار فرکانسی عمل می‌کند. اغتشاش ۲۰٪ معادل عدم تعادل توان ۱۶ مگاوات، ۳۰٪ معادل ۲۴ مگاوات و ۴۰٪ معادل ۳۲ مگاوات است.

شکل (۶) پاسخ فرکانسی سیستم مورد نظر را در شرایط جزیره‌ای بدون عملکرد رله حذف بار نشان می‌دهد. در اغتشاش با ۲۰٪ عدم تعادل توان، فرکانس حالت ماندگار ۵۹/۶ هرتز است که این مقدار در رنج قابل قبول (بنا بر قیود حاکم بر مسئله) قرار دارد. در اغتشاش‌های ۳۰٪ و ۴۰٪، فرکانس حالت ماندگار از مقادیر آستانه خود تخطی می‌کند. بنابراین به منظور حفظ فرکانس در محدوده مشخص باید تعدادی از بارها حذف شوند. این شبیه‌سازی از ثابت زمانی ۵ ثانیه برای گاورنر و از زمان ۰/۰۵ ثانیه برای سائز هر مرحله استفاده کرده است. سه مرحله برای حذف بار در نظر گرفته شده است.

شکل (۷) پاسخ فرکانسی سیستم را با در نظر گرفتن حذف بار برای سه اغتشاش فوق نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که



شکل (۴): مسیر فرکانس و نرخ تغییرات فرکانس در وضعیت جزیره‌ای با عدم تعادل توان ۷/۵ درصد



شکل (۵): مسیر فرکانس و نرخ تغییرات فرکانس در وضعیت جزیره‌ای با عدم تعادل توان ۳۰ درصد

در صورتی که قید تشخیص روکوف یا همان محدودیت نرخ تغییرات فرکانسی را در مسئله حذف بار فرکانسی در نظر نگیریم، رله‌های تشخیص جزیره که در سیستم توزیع وجود دارند فعال می‌شوند و تمامی منابع تولید پراکنده را از مدار خارج می‌کنند، در نتیجه تمامی مصرف‌کننده‌ها بی‌برق می‌شوند و هیچ باری در سیستم توزیع تغذیه نمی‌شود.

در مقایسه این روش با روش ارائه‌شده در مرجع [۱۰] باتوجه به زمان مربوط به تبادل اطلاعات، محاسبات و زمان عملکرد کلید تشخیص شرایط جزیره‌ای و سپس فعال شدن رله‌های حذف بار فرکانسی منجر

جدول (۱) میزان بار حذف شده در هر مرحله را برای سه اغتشاش فوق‌نشان می‌دهد. الگوریتم پیشنهاد شده برای تنظیم کردن رله حذف بار فرکانسی به صورت off-line بکار می‌رود.

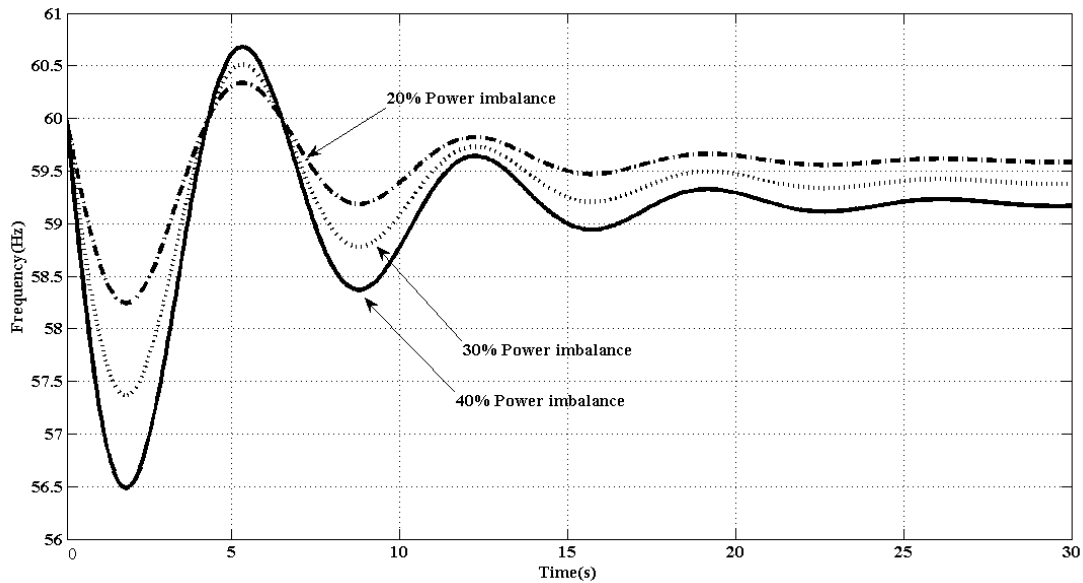
جدول (۱): تنظیمات رله حذف بار فرکانسی

اندازه اغتشاش	تنظیمات فرکانس					
	۱ گام	۲ گام	۳ گام	۱ گام	۲ گام	میزان بار حذف شده (مگاوات)
۲۰٪	-	-	-	صفر	صفر	صفر
۳۰٪	۵۸/۹۵	۵۸/۸۳	۵۸/۷۰	۱/۰۵۱	۳/۵۷	۱۴
۴۰٪	۵۸/۹۱	۵۸/۸۱	۵۸/۷۱	۱/۰۹	۳/۲۵	۱۸/۴

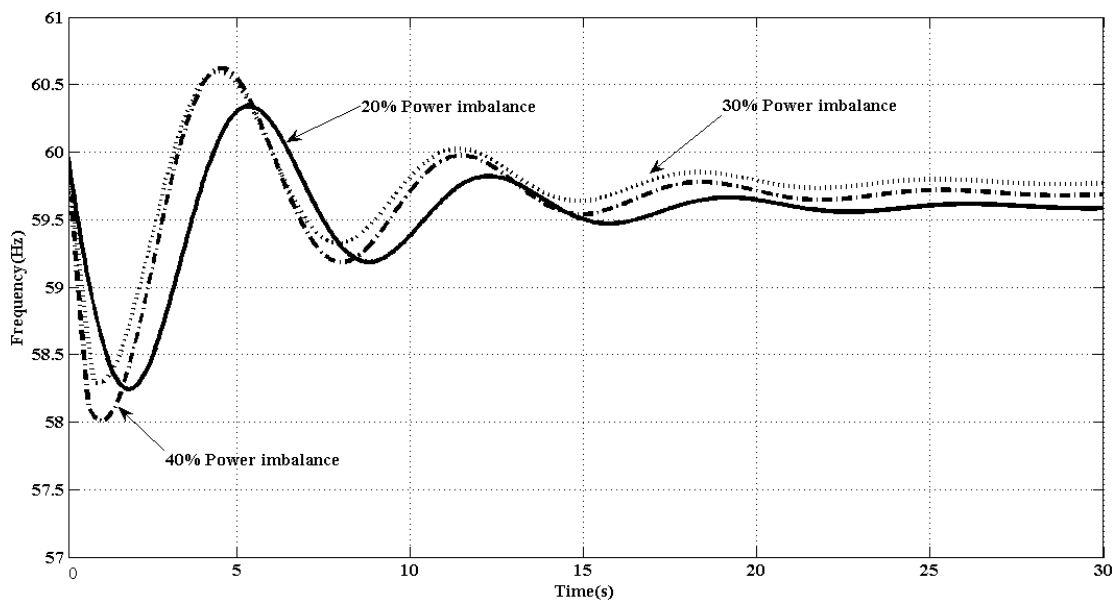
حذف بار فرکانسی چندمرحله‌ای در سیستم توزیع جزیره‌شده ۹

تشخیص جزیره (۱۰۰ میلی ثانیه) و صدور فرمان به رله حذف بار فرکانسی صرف می‌شود.

به طولانی‌تر شدن زمان برقراری تعادل بین تولید و مصرف در ریزشبکه خواهد شد. در طرح پیشنهادی به دلیل اینکه تشخیص جزیره به صورت قید در مسئله حذف بار در نظر گرفته شده، زمان کوتاهی برای عملکرد



شکل (۶): پاسخ فرکانسی ریزشبکه جزیره‌شده در سه اغتشاش مختلف بدون در نظر گرفتن رله حذف بار فرکانسی



شکل (۷): پاسخ فرکانسی ریزشبکه جزیره‌شده در سه اغتشاش مختلف با در نظر گرفتن رله حذف بار فرکانسی

پیشنهادی تعدادی از بارهای ریزشبکه را در گام‌های مختلف حذف می‌کند. روش پیشنهادی از الگوریتم ژنتیک به منظور یافتن تنظیمات رله UFLS^۱ استفاده کرده است. این روش در سیستم توزیع ۳۴ باس IEEE اجرا شده است تا اینکه نشان دهد رله حذف بار فرکانسی پیشنهادی عملکرد صحیحی در شرایط جزیره‌ای شدن دارد.

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله، رله حذف بار فرکانسی که شامل محدودیت نرخ تغییرات فرکانسی است، ارائه شد. افزودن این قید، به برقراری تعادل بین تولید و مصرف و پایداری فرکانس در ریزشبکه کمک می‌کند. همچنین این محدودیت مانع از قطع منابع تولید پراکنده حاضر در ریزشبکه می‌شود. برای پایداری فرکانس در ریزشبکه جزیره‌شده، رله حذف بار فرکانسی

فهرست علائم

N_g : حداکثر تعداد منابع تولید پراکنده	f : فرکانس سیستم
متغیر دودویی	f_0 : فرکانس نامی
U_{sn} : متغیر دودویی مربوط به تنظیمات فرکانس	Δf : تغییرات فرکانس از مقدار نامی
اندیس‌ها	ΔP_g : اغتشاش ناشی از جزیره‌ای شدن (عدم تعادل توان)
Th : مقدار آستانه	ΔP_r : تنظیم فرکانس توسط گاورنر
n : مراحل زمانی شبیه‌سازی	H : ثابت اینرسی
s : تعداد مراحل شبیه‌سازی	K_D : ضریب میرایی بار
i : سیکل فرکانسی	R : دروپ گاورنر
N : آخرین زمان شبیه‌سازی	T : ثابت زمانی
k : تعداد بارهای قابل حذف در شبکه	df/dt : نرخ تغییرات فرکانس
j : تعداد منابع تولید پراکنده	$P_{sh,max}$: حداکثر میزان بار قابل حذف

مراجع

- [1] Glover, J. Duncan. "Power Systems Analysis and Design", PWS Publishing Co., 1987.
- [2] Basso, T. S., DeBlasio, R. "IEEE 1547 Series of Standards: Interconnection Issues", Power Electronics, IEEE Transactions, Vol. 19, No. 5, pp. 1159-1162, 2004.
- [3] Delfino, B., Massucco, S., Morini, A., Scalera, P., Silvestro, F., "Implementation and Comparison of Different Under Frequency Load-shedding Schemes", In Power Engineering Society Summer Meeting, No. 1, pp. 307-312, 2001.
- [4] Hong, Y.Y., Wei, S.F "Multiobjective Underfrequency Load Shedding in An Autonomous System Using Hierarchical Genetic Algorithms", Power Delivery, IEEE Transactions, Vol. 25, No. 3, pp. 1355-1362, 2010.
- [5] Ceja-Gomez, F., Qadri, S. S., Galiana, F. D. "Under-Frequency Load Shedding Via Integer Programming", Power Systems, IEEE Transactions, Vol.27, No. 3, pp. 1387-1394, 2012.
- [6] Anderson, Philip, M., Mirheydar, M., "A Low-order System Frequency Response Model", Power Systems, IEEE Transactions , Vol. 5, No. 3 ,pp. 720-729, 1990.
- [7] Mokari-Bolhasan, A., Seyedi, H., Mohammadi-Ivatloo, B. Abapour, S., Ghasemzadeh, S., "Modified Centralized ROCOF Based Load Shedding Scheme in an Islanded Distribution Network", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 62, pp. 806-815, 2014.
- [8] Seyedi, H., Sanaye-Pasand, M. "New Centralised Adaptive Load-shedding Algorithms to Mitigate Power System Blackouts", Generation, Transmission & Distribution, IET, Vol. 3, No. 1, pp. 99-114, 2009.
- [9] Narayanan, K., Siddiqui, S. A., Fozdar, M. "Hybrid Islanding Detection Method and Priority-based Load Shedding for Distribution Networks in The Presence of DG Units", IET Generation, Transmission & Distribution , Vol. 11, No. 3, pp. 586-595, 2017.
- [10] Karimi, M., H. Mohamad, H. Mokhlis, and A. H. A. Bakar. "Under-Frequency Load Shedding Scheme for Islanded Distribution Network Connected with Mini Hydro", International Journal of Electrical Power & Energy Systems 42, No. 1, pp. 127-138, 2012.
- [11] Vatani, M., Amraee, T., Ranjbar, A. M., Mozafari, B. "Relay Logic for Islanding Detection in Active Distribution Systems", Generation, Transmission & Distribution, IET, Vol. 9, No. 12, pp. 1254-1263, 2015.
- [12] Kundur, P. (Power System Stability and Control), Edited by Balu, N. J., Lauby, M. G. (Eds.), New York: McGraw-hill, 1994.
- [13] Ten, C. F., Crossley, P. A. "Evaluation of ROCOF Relay Performances on Networks with Distributed Generation", In Developments in Power System Protection, DPSP, IET 9th International Conference on, pp. 523-528, 2008.
- [14] Gen, M., Cheng, R., "Genetic Algorithm and Engineering Optimization", John Wiley and Sons, New York, 2000.
- [15] Samui, A., Samantaray, S. R., "Assessment of ROCPAD

۱۱ حذف بار فرکانسی چندمرحله‌ای در سیستم توزیع جزیره‌شده

Relay for Islanding Detection in Distributed Generation,
Smart Grid, IEEE Transactions on, Vol. 2, No. 2, pp. 391-398, 2011.