

# استفاده از روش‌های حذف بار ترکیبی تطبیقی به منظور بهبود پایداری ولتاژ سیستم قدرت - قسمت اول: مفهوم کلی و الگوریتم‌ها

علیرضا صفاریان، مجید صنایع‌پسند و امیر پیروز قلعه

تأمین امنیت سیستم قدرت کافی نیستند و خاموشی‌های سراسری بیش از گذشته رخ می‌دهند [۱].

خاموشی‌های اخیر در اثر انواع مختلفی از ناپایداری سیستم قدرت از قبیل ناپایداری ولتاژ و ناپایداری فرکانس و ترکیب آنها رخ داده‌اند. برای مقابله با هر یک از انواع ناپایداری به صورت مستقل رله‌های خاصی در سیستم حفاظت در نظر گرفته شده است (نظیر رله‌های حذف بار فرکانسی [۲] و رله‌های حذف بار ولتاژی [۳]). یکی از نواقص اصلی الگوریتم‌های حذف بار این است که ترکیب ناپایداری‌ها را در نظر نمی‌گیرند، در حالی که در واقعیت هیچ یک از انواع ناپایداری به طور منفرد رخ نمی‌دهد به ویژه هنگامی که سیستم تحت تنش شدید و حوادث متوالی قرار گیرد [۴]. در این گونه موارد هر دسته از رله‌های حذف بار فرکانسی و ولتاژی به صورت مستقل تصمیم‌گیری می‌کنند، در حالی که این مسأله منجر به عملکرد غیر بهینه و غیر هماهنگ حذف بار در شبکه می‌شود.

ضعف روش‌های حذف بار سنتی در حوادث ترکیبی و بزرگ آشکارتر می‌گردد. حوادث ترکیبی و بزرگ که منجر به خاموشی سراسری می‌شوند، اغلب شامل خروج نیروگاه‌ها و ترانسفورماتورها و قطع خطوط ارتباطی انتقال توان در شبکه هستند. در این گونه حوادث، اغلب افت فرکانس با افت ولتاژ بانس‌ها همراه است و پایداری ولتاژ و فرکانس توأمأً به خطر می‌افتد. در دهه اخیر مشکل افت ولتاژ شبکه نقش قابل توجهی در خاموشی‌های سراسری و بزرگ سیستم‌های قدرت داشته است.

از آنجا که سرعت افت فرکانس به طور ذاتی کمتر از سرعت افت ولتاژ است، در برخی حوادث بزرگ و ترکیبی افت ولتاژ سریع و شدید در بانس‌های شبکه سبب کاهش توان اکتیو جذب‌شده توسط بارهای وابسته به ولتاژ در حین افت فرکانس می‌شود [۵]. به دلیل کاهش بار شبکه، با وجود شدت حادثه فرکانس زیاد افت نمی‌کند و مقدار بار کمتر از مقدار مورد انتظار و مورد نیاز حذف می‌گردد یا این که سرعت افت فرکانس بسیار کند می‌شود و رله‌های فرکانسی دیر عمل می‌کنند. جوابگویی رله‌های فرکانسی معمول در این شرایط می‌تواند موجب ناپایداری و خاموشی گسترده در شبکه شود. نمونه‌هایی از این رویداد در خاموشی شبکه ایتالیا و شبکه شمال شرق آمریکا مشاهده شده است [۶] و [۷]. مسأله دیگر این است که در صورت افت قابل توجه ولتاژ از مقدار نامی، نحوه و زمان عملکرد رله‌های فرکانسی دچار اختلال می‌شود، چرا که رله‌های فرکانسی، خصوصاً رله‌های الکترومکانیکی برای کار در محدوده ولتاژ نامی طراحی می‌شوند [۸]. به عنوان نمونه در خاموشی سال ۱۹۸۳ سوئد، وقوع یک حادثه شدید و در پی آن خروج متوالی خطوط انتقال توان سبب افت سریع و همزمان ولتاژ و فرکانس گردید. رله‌های حذف بار فرکانسی و ولتاژی در این شرایط هیچ عکس‌العملی نشان ندادند و خاموشی سراسری در شبکه جنوب سوئد رخ داد [۸] و [۹].

چکیده: این مقاله قسمت اول از یک مقاله دو قسمتی است که در آن چند روش حذف بار ترکیبی تطبیقی برای اصلاح روش حذف بار فرکانسی متداول به منظور بهبود پایداری سیستم قدرت و بالاخص افزایش حاشیه پایداری ولتاژ سیستم پس از وقوع حوادث شدید پیشنهاد می‌گردد. امروزه با گسترش شبکه‌های قدرت و خصوصی‌سازی و رقابتی شدن صنعت برق، حاشیه امنیت شبکه‌ها در مقابل انواع ناپایداری کاهش یافته است. در این شرایط روش‌های حفاظتی متداول خصوصاً در حوادث ترکیبی نمی‌توانند به خوبی از شبکه در برابر ناپایداری محافظت کنند. در برخی از این حوادث با وجود این که روش‌های حفاظتی متداول فرکانس سیستم را به محدوده مجاز باز می‌گردانند، نهایتاً سیستم بر اثر افت ولتاژهای شدید دچار ناپایداری ولتاژ می‌گردد. در برخی حوادث دیگر افت ولتاژ شدید باعث اختلال در عملکرد رله‌های فرکانسی می‌گردد. در این مقاله سه روش حذف بار ترکیبی تطبیقی برای مقابله با این گونه حوادث پیشنهاد شده است. این روش‌ها بر اساس اطلاعات محلی اندازه ولتاژ و فرکانس و بدون نیاز به ارتباط مخابراتی عمل می‌کنند. در الگوریتم‌های پیشنهادشده، حذف بار از نقاط با افت ولتاژ بیشتر و طولانی‌تر در حین افت فرکانس آغاز می‌گردد و سرعت، محل و مقدار حذف بار بسته به محل وقوع حادثه و وضعیت ولتاژی سیستم و نرخ افت فرکانس به طور تطبیقی تغییر می‌کند. در قسمت دوم مقاله، نتایج عددی شبیه‌سازی روش متداول و روش‌های پیشنهادی در یک شبکه بزرگ و واقعی ارائه شده و عملکرد این روش‌ها به ازای حوادث مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

کلید واژه: افت ولتاژ، حاشیه پایداری ولتاژ، حذف بار ترکیبی تطبیقی، حذف بار فرکانسی.

## ۱- مقدمه

خاموشی سراسری شبکه‌های قدرت همواره به عنوان یکی از مشکلات صنعت برق مطرح بوده است. در سال‌های اخیر به دلیل خصوصی‌سازی و رقابتی شدن صنعت برق و هزینه‌های بالای احداث تجهیزات جدید، سیستم‌های قدرت با ظرفیت رزرو و حاشیه پایداری کمتر بهره‌برداری می‌شوند. در این شرایط الگوریتم‌های سنتی طراحی شده برای حفاظت و

این مقاله در تاریخ ۲۹ دی ماه ۱۳۸۷ دریافت و در تاریخ ۱۸ مرداد ماه ۱۳۸۸ بازنگری شد. این تحقیق توسط دانشگاه تهران بر اساس قرارداد شماره ۸۱۰۱۰۶۴/۱۰۱ پشتیبانی شده است.

علیرضا صفاریان، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، کارگر شمالی تهران، (email: a.saffarian@ece.ut.ac.ir).

مجید صنایع‌پسند، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، کارگر شمالی تهران، (email: msanaye@ut.ac.ir).

امیر پیروز قلعه، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، کارگر شمالی تهران، (email: p.ghaleh@ece.ut.ac.ir).

بر اساس فرکانس اندازه‌گیری شده توسط رله انجام می‌شود. در این روش هنگام افت فرکانس، بار به‌صورت محلی و گام‌به‌گام حذف می‌شود. فرکانس و میزان حذف بار در هر پله ثابت است و به شدت حادثه و وضعیت ولتاژی شبکه بستگی ندارد. محل حذف بار در هر پله نیز ثابت است و به محل اغتشاش بستگی ندارد. در روش‌های معمول طراحی حذف بار، تنها تعداد و فرکانس پله‌های حذف بار و مقدار بار هر پله تعیین می‌گردد. محل نصب رله‌های حذف بار در این روش‌ها معمولاً با توجه به پارامترهای شبکه از قبیل ولتاژ و جریان و توان طراحی نمی‌شود و بیشتر تابع اهمیت اجتماعی و اقتصادی بار بوده و تقریباً به‌طور یکنواخت در کل شبکه پراکنده است.

طراحی سیستم حذف بار فرکانسی شامل مراحل زیر است [۱۳]:

### ۱-۲-۱ تعیین حداکثر اضافه بار محتمل

حداکثر اضافه بار محتمل نشانگر حداکثر مقدار اضافه باری است که سیستم حفاظتی حذف بار برای مقابله با آن طراحی شده است و از (۱) به‌دست می‌آید

$$L = \frac{\text{Total Load} - \text{Total Generation}}{\text{Total Generation}} \quad (1)$$

مقدار  $L$  حداکثر اضافه بار محتمل در سیستم است.

با توجه به (۱) خروج ۳۳٪ از توان تولیدی منجر به ۵۰٪ اضافه بار در سیستم می‌شود. هر چند انتخاب مقدار  $L$  در طراحی اختیاری است، تجارب عملی نشان داده است که انتخاب مقادیر بزرگ‌تر از ۵۰٪ برای  $L$  مناسب نیست و می‌تواند منجر به حذف بار اضافه در حوادث کوچک شود [۱۴].

### ۲-۱-۲ انتخاب تعداد پله‌های حذف بار

برای جلوگیری از قطع بار اضافه خصوصاً در حوادث کوچک، چند پله برای حذف بار در نظر گرفته می‌شود. کل باری که قرار است توسط الگوریتم حذف بار قطع شود بین پله‌ها تقسیم شده و در هر پله مقداری از بار سیستم قطع می‌گردد. طرح‌های دارای تعداد پله‌های حذف بار فرکانسی کمتر - که درصد بیشتری از بار را در هر پله قطع می‌کنند - هنگام وقوع اضافه بار سریع‌تر عمل می‌کنند، اما ممکن است در شرایط کم‌باری سبب حذف بار خیلی زیاد شوند و منجر به اضافه فرکانس سیستم شوند. در چنین شرایطی استفاده از پله‌های بیشتر با درصد حذف بار کمتر در هر پله بهتر است [۱۵]. البته با افزایش تعداد پله‌ها هماهنگی بین پله‌های متوالی مشکل‌تر می‌شود و واکنش کندتری در برابر حوادث بزرگ صورت می‌گیرد. تعداد بهینه و مناسب پله‌های حذف بار برای هر سیستم باید با انجام مطالعات دینامیک مشخص گردد [۱۶]. در عمل بین ۳ تا ۶ پله به‌عنوان تعداد مناسب برای پله‌ها پیشنهاد شده است [۱۷].

### ۲-۱-۳ تعیین مقدار حذف بار در هر پله

اولین گام محاسبه مقدار کل بار حذفی برای برگشت فرکانس به مقادیر بالاتر از حداقل مجاز شبکه هنگام بروز حداکثر اضافه بار محتمل است. مقدار کل بار حذفی از (۲) محاسبه می‌شود [۱۳]

$$LD = \left[ \frac{L}{L+1} - d \left( 1 - \frac{f_{\min}}{f_n} \right) \right] / \left[ 1 - d \left( 1 - \frac{f_{\min}}{f_n} \right) \right] \quad (2)$$

که در آن  $LD$  کل بار حذفی،  $L$  حداکثر اضافه بار محتمل بر حسب پریونیت،  $f_{\min}$  کمینه فرکانس قابل تحمل شبکه،  $d$  ضریب کاهش بار با افت فرکانس و  $f_n$  فرکانس نامی شبکه است.

در گام بعدی مقدار کل بار حذفی باید بین پله‌ها تقسیم شود. در صورتی که پله‌های نخست بار بیشتری قطع نمایند، طرح به‌ازای حوادثی

از سوی دیگر در برخی حوادث بزرگ و ترکیبی ممکن است رله‌های حذف بار فرکانسی، فرکانس را به حدود مقدار نامی خود بازگردانند، اما پس از آن به‌دلیل عدم تطابق محل بارهای قطع‌شده با محل‌های دارای افت ولتاژ زیاد شبکه در آستانه فروپاشی ولتاژ قرار گیرد. به‌طور کلی پس از وقوع یک حادثه محل افت ولتاژ و کمبود توان راکتیو در شبکه به محل اغتشاش وابسته است. در حالی که در حذف بار فرکانسی متداول محل‌های حذف بار از پیش تعیین شده و مستقل از محل وقوع حادثه و وضعیت ولتاژی شبکه است. حذف بار فرکانسی تنها به افت فرکانس پس از وقوع حادثه وابسته است و ابعاد ولتاژی حادثه در آن تأثیر ندارد. در روش حذف بار فرکانسی متداول، به‌علت آن که حذف بار لزوماً در منطقه‌ای که کمبود توان راکتیو و یا کاهش تولید داشته است صورت نمی‌گیرد، امکان اضافه بار خطوط انتقال و حتی ناپایداری ولتاژ پس از حذف بار وجود دارد [۱۰]. این مسأله عیناً در نوامبر ۱۹۷۸ در ایتالیا رخ داده و عامل ایجاد خاموشی سال ۱۹۷۸ ایتالیا بوده است [۱۱]. چنانچه حذف بار در نقاطی انجام شود که دچار افت ولتاژ بیشتری شده‌اند و کمبود توان راکتیو بیشتری دارند، حاشیه پایداری ولتاژ سیستم افزایش بیشتری می‌یابد. بهبود حاشیه پایداری ولتاژ می‌تواند به حفظ پایداری سیستم پس از وقوع حوادث ترکیبی شدید کمک کند.

با توجه به مطالب فوق لازم است برای مقابله با حوادث ترکیبی و شدید، تصمیم‌گیری برای حذف بار بر اساس وضعیت فرکانسی و ولتاژی سیستم انجام شود و به نوعی روش‌های حذف بار فرکانسی و ولتاژی با هم ترکیب شوند. با توجه به سرعت بیشتر افت ولتاژ نسبت به افت فرکانس، این کار می‌تواند به افزایش سرعت حذف بار در برابر حوادث شدید کمک کند.

در این مقاله چند الگوریتم برای ترکیب تطبیقی روش‌های حذف بار فرکانسی و حذف بار ولتاژی ارائه می‌گردد. در الگوریتم‌های پیشنهادشده هدف بهبود عملکرد رله‌های حذف بار و افزایش امنیت سیستم قدرت پس از وقوع حوادث بزرگ با افزایش حاشیه پایداری ولتاژ سیستم است. در روش‌های پیشنهادی، با ترکیب فرکانس و اندازه ولتاژ در محل رله، حذف بار علاوه بر فرکانس شبکه به ولتاژ باس نیز وابسته می‌گردد. در این روش‌ها بارهایی که پس از حادثه دچار افت ولتاژ بیشتر شده‌اند زودتر قطع می‌شوند. در این حالت محل و مقدار حذف بار به محل اغتشاش و ولتاژ باس‌های شبکه وابسته می‌شود. باید توجه داشت که در اینجا هدف انتخاب بهینه محل و مقدار بارهای قابل قطع از جهت اقتصادی نیست، بلکه هدف نجات شبکه در برابر حوادث بزرگ و ترکیبی است. از آنجا که الگوریتم‌های پیشنهادی تنها از فرکانس و ولتاژ اندازه‌گیری شده محلی استفاده می‌کنند، پیاده‌سازی آنها بسیار ساده‌تر از روش‌های متمرکز پیشنهادشده در گذشته است که به ارتباط مخابراتی سریع نیاز داشتند.

در قسمت دوم مقاله [۱۲]، با ارائه نتایج عددی عملکرد روش‌های حذف بار ترکیبی پیشنهادشده با یکدیگر و با روش حذف بار فرکانسی متداول مقایسه می‌گردد. برای این منظور، از مدل شبیه‌سازی شده یک شبکه واقعی و بزرگ استفاده می‌گردد و عملکرد این روش‌ها در حوادث مختلف ارزیابی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی‌ها کارایی روش‌های حذف بار ترکیبی پیشنهادی را نسبت به روش حذف بار متداول نشان می‌دهند.

## ۲- روش‌های حذف بار فرکانسی

### ۱-۲ روش حذف بار فرکانسی متداول

در روش حذف بار فرکانسی متداول تصمیم‌گیری برای حذف بار تنها

که اختلاف توان تولیدی و مصرفی بزرگ دارند عملکرد مناسبی دارد اما در حوادث کوچک منجر به حذف بار اضافه می‌شود. برعکس حالت فوق در صورتی که بار پله‌های نخست کمتر باشد، طرح حذف بار برای حوادث کوچک بهتر عمل می‌کند اما در حوادث بزرگ‌تر می‌تواند منجر به کاهش بیشتر فرکانس گردد. یک پیشنهاد مناسب می‌تواند انتخاب بار کم برای پله‌های نخست، بار زیاد برای پله‌های میانی و بار کم برای پله‌های آخر باشد [۱۸].

## ۲-۱-۴ محاسبه تنظیمات رله

پس از تعیین بار حذفی در هر پله، فرکانس قطع بار پله اول از روی منحنی مشخصه رله محاسبه می‌شود. سپس فرکانس قطع بار پله‌های بعدی با یک فاصله فرکانسی از فرکانس قطع بار پله‌های قبلی انتخاب می‌شوند. این فاصله فرکانسی به‌عنوان یک حاشیه امنیت برای اطمینان از قطع بارهای پله قبل و جبران تأخیر زمان عملکرد رله و بریکر لحاظ می‌گردد.

## ۲-۲ روش‌های حذف بار فرکانسی پیشنهادشده در مقالات

الگوریتم‌های حذف بار زیادی برای افزایش انعطاف‌پذیری سیستم حذف بار فرکانسی در مقالات ارائه شده است. در بسیاری از این روش‌ها برای تشخیص سرعت و مقدار حذف بار مورد نیاز از آهنگ تغییرات فرکانس ( $df/dt$ ) استفاده شده است [۱۸]. در [۱۹] و [۲۰] برای حوادثی که با  $df/dt$  بزرگ همراه هستند، متناسب با مقدار  $df/dt$ ، مقدار حذف بار افزایش داده شده است. در [۲۱] و [۲۲] برای این‌گونه حوادث، رله‌ها از تنظیم فرکانسی بالاتری استفاده می‌کنند.

در [۱۷] و [۲۳] تا [۲۵] استفاده از آهنگ تغییرات فرکانس و مدل تحلیلی پاسخ فرکانسی سیستم پیشنهاد شده است. در این روش با استفاده از  $df/dt$  و مدل پاسخ فرکانسی پیشنهادشده مقدار تولید از دست رفته تخمین زده می‌شود و بر این اساس، مقدار و فرکانس بهینه پله‌های حذف بار جهت بازگرداندن سیستم به شرایط قابل قبول به‌طور تطبیقی محاسبه می‌شود. از مشکلات این روش می‌توان به پیچیدگی محاسبه پارامترهای مدل و همچنین تغییرات پارامترها با تغییر نقطه کار سیستم اشاره کرد. در [۲۶] تا [۲۹] از الگوریتم‌های حذف بار متمرکز استفاده شده است. در این روش‌ها مخابره سریع پارامترهای اندازه‌گیری شده سیستم، نظیر فرکانس و آهنگ تغییرات فرکانس ژنراتورهای سیستم مورد نیاز است. پیاده‌سازی این روش‌ها در عمل ممکن است پیچیده و دشوار باشد. در روش‌های فوق غالباً تأثیر و اهمیت ولتاژ باس‌ها در مقدار و محل حذف بار فرکانسی در نظر گرفته نشده است. از این رو برخی از این روش‌ها در مقابل حوادث ترکیبی منجر به فروپاشی مقاوم نیستند.

در [۸] با شبیه‌سازی یک سیستم قدرت بزرگ و یک سیستم صنعتی، ناکارآمدی روش حذف بار فرکانسی متداول در مواجهه با حوادث بزرگ و در شرایط افت همزمان ولتاژ و فرکانس نشان داده شده است و نویسندگان مقاله در نهایت به این نتیجه رسیده‌اند که علاوه بر فرکانس می‌بایست از آهنگ تغییرات فرکانس، ولتاژ و همچنین آهنگ تغییرات ولتاژ در تصمیم‌گیری برای حذف بار استفاده کرد. در [۱۰] نسبت به ضعف ذاتی روش حذف بار فرکانسی موجود در حذف بار از محل‌های نامناسب و پیامدهای آن هشدار داده شده و روش جدیدی برای حذف بار بر اساس تغییرات ولتاژ و فرکانس به‌ویژه در نواحی اطراف ژنراتورهای خارج‌شده پیشنهاد شده است. نتیجه اعمال این روش به‌صورت کاهش بار خطوط و

بهبود سطح ولتاژهای سیستم در یک شبکه نشان داده شده است. اما شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در [۳۰] نشان می‌دهد حذف بارهای نزدیک به ژنراتور قطع‌شده لزوماً در همه شبکه‌ها باعث کاهش بار خطوط نمی‌گردد و گاهی حذف بار در نقاط دارای بیشترین فاصله از ژنراتور قطع‌شده نتیجه بهتری می‌دهد و حاشیه پایداری ولتاژ بیشتر ایجاد می‌کند. به‌علاوه روش ارائه‌شده در [۱۰] نیازمند ارتباط مخابراتی سریع برای انتقال اطلاعات مربوط مقدار تولید از دست رفته، مقدار کاهش ولتاژ باس‌ها و مقدار حذف بار محاسبه‌شده برای هر باس است.

در [۳۱] و [۳۲] از روش‌های بهینه‌سازی برای انتخاب محل و مقدار حذف بار در جهت مینیمم کردن هزینه خاموشی و توان عبوری از خطوط انتقال و متعادل کردن دامنه ولتاژ باس‌ها استفاده شده است. در [۳۱] با توجه به غیر خطی بودن تابع هدف و قیود مسئله بهینه‌سازی، از الگوریتم ژنتیک برای یافتن پاسخ بهینه استفاده شده است. در [۳۲] برای سادگی، تابع هدف و قیود آن خطی‌سازی شده‌اند.

در [۳۳] توسط نویسندگان این مقاله دو روش حذف بار ترکیبی محلی برای اولویت‌دادن به محل‌های دارای ولتاژ پایین در حذف بار فرکانسی و افزایش امنیت سیستم پس از بروز حوادث شدید پیشنهاد شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها در [۳۳] نشان می‌دهد که روش‌های پیشنهادی سبب افزایش حاشیه توان راکتیو سیستم خصوصاً در نواحی آسیب‌دیده از حادثه نسبت به روش حذف بار فرکانسی متداول می‌گردند.

## ۳- روش‌های حذف بار ترکیبی تطبیقی پیشنهادی

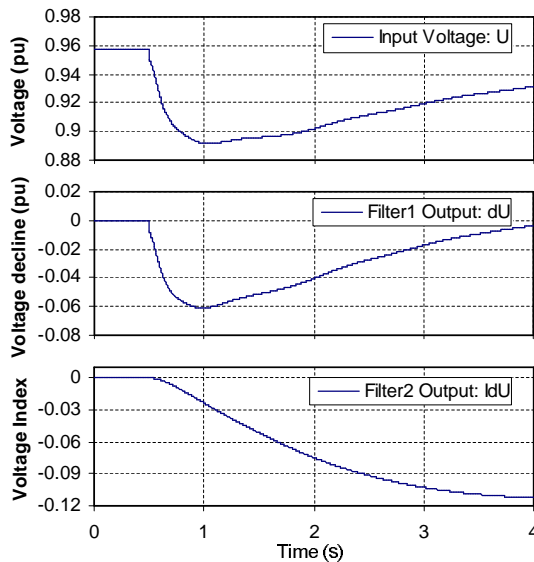
در این بخش به‌منظور بهبود الگوریتم حذف بار فرکانسی سه روش حذف بار ترکیبی تطبیقی پیشنهاد می‌گردد. در این روش‌ها هدف بهبود توأم پایداری فرکانسی و پایداری ولتاژ سیستم پس از وقوع اغتشاشات بزرگ و ترکیبی است. بهبود حاشیه پایداری ولتاژ سیستم در این روش‌ها می‌تواند از وقوع فروپاشی ولتاژ پس از بروز حوادث بزرگ جلوگیری کند. با توجه به این که در سیستم قدرت فرکانس و ولتاژ کمیت مستقلی نبوده و به یکدیگر وابسته می‌باشند، در روش‌های ترکیبی پیشنهادی به‌جای استفاده از یک روش مستقل برای رله‌های حذف بار فرکانسی و روش مستقل دیگر برای رله‌های حذف بار ولتاژی، تصمیم‌گیری برای حذف بار بر اساس ترکیب فرکانس و ولتاژ اندازه‌گیری شده در محل رله صورت می‌گیرد. در این روش‌ها محل‌های حذف بار به‌طور مستقیم یا غیر مستقیم بسته به محل اغتشاش انتخاب می‌شوند و ابعاد ولتاژی حادثه نیز در مقدار حذف بار اثر داده می‌شوند. علاوه بر این تصمیم‌گیری برای حذف بار به‌طور محلی و بر اساس کمیت‌های اندازه‌گیری شده پس از اغتشاش صورت می‌گیرد، لذا هیچ‌گونه ارتباط مخابراتی برای پیاده‌سازی این روش‌ها مورد نیاز نخواهد بود.

لازم به ذکر است که تئوری اولیه روش‌های حذف بار ترکیبی تطبیقی اول و دوم در [۳۴] مطرح شده است. در این مقاله روش‌های پیشنهادشده در [۳۴] با شیوه‌ای متفاوت و در یک قالب جدید طراحی، تکمیل و پیاده‌سازی شده و به‌صورت قابل اجرا برای سیستم‌های قدرت مختلف در آمده‌اند. علاوه بر این در این تحقیق با به‌کارگیری آهنگ تغییرات فرکانس در این قالب جدید، الگوریتمی کامل‌تر و با کارایی بیشتر ارائه می‌گردد.

### ۳-۱-۳ روش حذف بار ترکیبی خطی

#### ۳-۱-۳-۱ الگوریتم روش

در این روش در یک نمودار دوبعدی فرکانس اندازه‌گیری شده و یک



شکل 2: ولتاژ ورودی و سیگنال خروجی فیلترهای اول و دوم یک رله حذف بار ترکیبی در یک حادثه نمونه.

تمایز بیشتری می‌یابند. همچنین مطابق شکل 2 انتگرال افت ولتاژ مشابه فرکانس پس از حادثه و تا قبل از انجام حذف بار روند نزولی تقریباً یکنوا دارد، در حالی که مقدار لحظه‌ای افت ولتاژ اغلب چنین رفتاری ندارد. در نتیجه تصمیم‌گیری برای حذف بار بر اساس انتگرال افت ولتاژ آسان‌تر از مقدار لحظه‌ای افت ولتاژ است. با توجه به این مطالب از انتگرال مقدار لحظه‌ای افت ولتاژ به‌عنوان شاخص ولتاژ برای تصمیم‌گیری جهت حذف بار استفاده شده است.

### 3-1-3 معیار تصمیم‌گیری

با توجه به روند کاهشی فرکانس اندازه‌گیری شده و شاخص ولتاژ محاسبه‌شده، برای تصمیم‌گیری جهت حذف بار بر اساس ترکیب این دو کمیت می‌توان از یک رابطه کلی به‌صورت زیر استفاده نمود

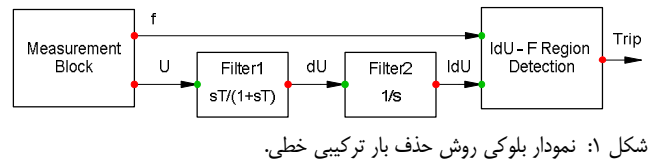
$$G(f, IdU) < 0 \quad (3)$$

در این رابطه  $f$  فرکانس اندازه‌گیری شده توسط رله،  $IdU$  شاخص ولتاژ محاسبه‌شده توسط رله و  $G$  تابع ترکیب این دو کمیت است. این شرط را می‌توان به‌صورت ناحیه زیر خط یا منحنی  $G(f, IdU) = 0$  در نمودار شاخص ولتاژ بر حسب فرکانس تعبیر نمود. برای جلوگیری از عملکرد روش ترکیبی در محدوده مجاز فرکانس (نزدیک به فرکانس نامی شبکه) شرط زیر نیز علاوه بر (3) در واحد تشخیص ناحیه عملکرد رله چک می‌گردد

$$f < f_{max} \quad (4)$$

در این رابطه  $f_{max}$  حداکثر فرکانس مجاز تنظیم‌شده برای عملکرد روش حذف بار ترکیبی است.

در روش حذف بار ترکیبی خطی از یک خط به‌عنوان معیار تصمیم‌گیری برای حذف بار در نمودار شاخص ولتاژ بر حسب فرکانس استفاده می‌شود، بنابراین در این روش تابع  $G$  در (3) یک تابع درجه یک از  $f$  و  $IdU$  است. برای فهم بهتر عملکرد این روش نمودار شاخص ولتاژ بر حسب فرکانس باس‌های مختلف یک سیستم قدرت در یک حادثه نمونه در شکل 3 نشان داده شده است. خط کج رسم‌شده در این شکل همان رابطه انتخاب‌شده برای  $G(f, IdU) = 0$  است. این خط نمودار را به دو ناحیه تقسیم می‌کند. ناحیه بالای خط حالت عادی و زیر خط محدوده عملکرد رله را نشان می‌دهد. ناحیه زیر خط به یک خط مرزی در فرکانس  $f_{max}$



شکل 1: نمودار بلوکی روش حذف بار ترکیبی خطی.

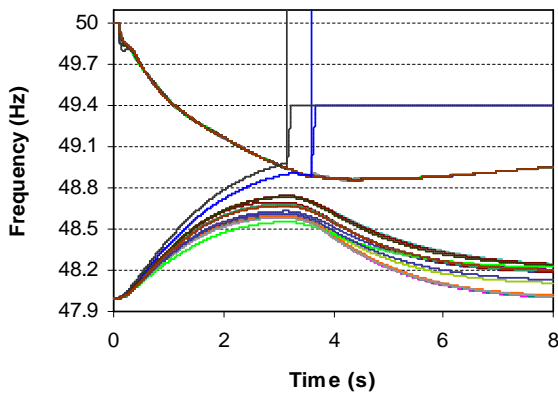
شاخص ولتاژ<sup>1</sup> محاسبه‌شده در محل رله با هم ترکیب می‌شوند و با توجه به وضعیت ترکیبی این دو متغیر تصمیم‌گیری برای حذف بار صورت می‌گیرد. در این روش از یک خط در صفحه دوعبده به‌عنوان معیار تصمیم‌گیری برای حذف بار استفاده می‌شود. برای پیاده‌سازی این روش از نمودار بلوکی مطابق شکل 1 استفاده می‌گردد. اجزای این نمودار بلوکی عبارتند از واحد اندازه‌گیری ولتاژ و فرکانس، دو فیلتر برای محاسبه شاخص ولتاژ و واحد تشخیص ناحیه عملکرد رله. واحد اندازه‌گیری با استفاده از سیگنال ولتاژ مقدار فرکانس و ولتاژ را تعیین می‌کند. خروجی‌های واحد اندازه‌گیری در این روش، مقدار پروبیت اندازه ولتاژ مؤلفه مثبت و اندازه فرکانس اندازه‌گیری شده در محل نصب رله است. از روی سیگنال ولتاژ به کمک دو فیلتر سیگنال شاخص ولتاژ  $IdU$  ساخته می‌شود. سیگنال جدید به همراه فرکانس وارد واحد تشخیص ناحیه عملکرد می‌شود تا در آنجا از روی ترکیب این دو برای حذف بار تصمیم‌گیری شود. بر این اساس خروجی منطقی Trip به‌صورت "صفر/یک" تعیین می‌گردد.

### 3-1-2 شاخص ولتاژ

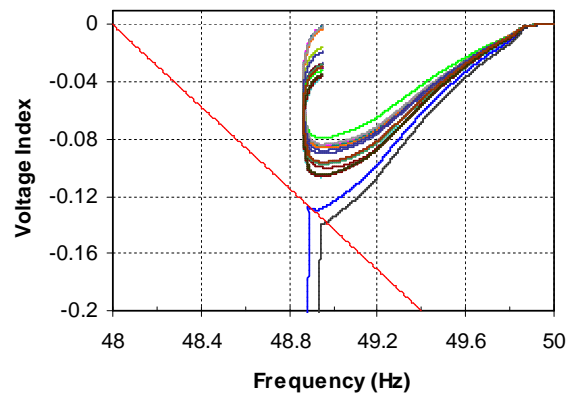
برای محاسبه شاخص ولتاژ  $IdU$ ، ابتدا سیگنال ولتاژ از یک فیلتر با تابع تبدیل  $sT/(1+sT)$  عبور می‌کند. سیگنال خروجی این فیلتر ( $dU$ ) مقدار افت ولتاژ ایجادشده در محل رله را نسبت به قبل از اغتشاش نشان می‌دهد [33]. با استفاده از ثابت زمانی در حدود 3 ثانیه خروجی این فیلتر مقدار افت ولتاژ را برای چند ثانیه پس از اغتشاش در اختیار قرار می‌دهد. با انتگرال‌گیری از مقدار لحظه‌ای افت ولتاژ توسط فیلتر دوم در رله، شاخص مورد نظر جهت تعیین وضعیت ولتاژ باس به‌دست می‌آید. در حقیقت این شاخص انتگرال مقدار لحظه‌ای افت ولتاژ محل رله پس از حادثه را نشان می‌دهد. از این شاخص به‌عنوان معیاری برای تصمیم‌گیری رله به همراه فرکانس استفاده شده است. شکل 2 عملکرد این دو فیلتر را به‌ازای یک حادثه نمونه نشان می‌دهد. در این شکل، ولتاژ ورودی و سیگنال خروجی فیلترهای اول و دوم یک رله حذف بار ترکیبی بر حسب زمان رسم شده است.

علت انتخاب شاخص ولتاژ معرفی‌شده برای تصمیم‌گیری جهت حذف بار این است که اولاً مقدار مطلق ولتاژ در نقاط مختلف شبکه کاملاً متفاوت است و به عوامل زیادی وابسته است. به‌عنوان مثال بر اثر تغییر تدریجی بار در طول شبانه‌روز و تغییر شرایط بهره‌برداری ولتاژ باس‌های مختلف سیستم به‌کندی تغییر می‌کنند. لذا پس از وقوع یک اغتشاش نیز ولتاژ باس‌های مختلف ممکن است در شرایط مختلف بهره‌برداری به مقادیر متفاوتی برسند، این در حالی است که مقدار افت ولتاژ در مدت زمان حادثه به مقدار ولتاژ باس قبل از حادثه چندان وابسته نیست و بر عکس، بستگی زیادی به شدت حادثه و فاصله از آن دارد. به عبارت دیگر استفاده از افت ولتاژ به‌جای اندازه ولتاژ تنظیم رله را ساده‌تر می‌کند. ثانیاً انتگرال‌گیری از مقدار لحظه‌ای افت ولتاژ سبب می‌شود مدت زمان افت ولتاژ نیز در تصمیم‌گیری برای حذف بار دخالت داده شود و در نقاط و در حوادثی که شرایط ولتاژ پایین تداوم بیشتری می‌یابد، حذف بار سریع‌تر صورت گیرد. به عبارت دیگر با این کار نقاط ضعیف شبکه از نقاط قوی

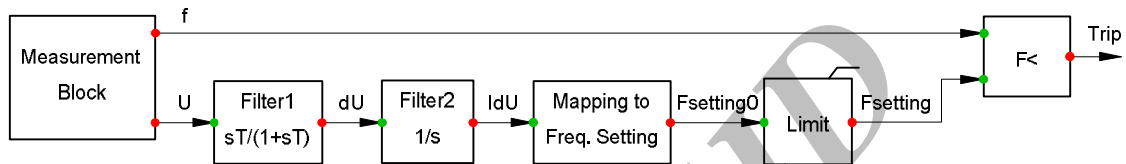
1. Voltage Index



شکل ۵: فرکانس اندازه‌گیری شده نقاط مختلف و تغییر تطبیقی تنظیم فرکانسی رله نشان داده شده در شکل ۴ برای حادثه نمونه مربوط به شکل ۳.



شکل ۳: شاخص ولتاژ بر حسب فرکانس باس‌های مختلف در روش حذف بار ترکیبی خطی برای یک حادثه نمونه.



شکل ۴: نمودار بلوکی متناظر با شیوه دوم پیاده‌سازی روش حذف بار ترکیبی خطی.

$$F_{\text{setting}} = H(\text{Id}U) \quad (5)$$

$$F_{\text{setting}} = \text{Limit}(F_{\text{setting}}, f_{\min}, f_{\max}) \quad (6)$$

$$f < F_{\text{setting}} \quad (7)$$

در این روابط تابع  $H$  تابع نگاشت شاخص ولتاژ به تنظیم فرکانسی اولیه ( $F_{\text{setting}}$ ) است.  $F_{\text{setting}}$  نیز تنظیم فرکانسی است که از محدود کردن تنظیم فرکانسی اولیه به محدوده ( $f_{\min}, f_{\max}$ ) به دست می‌آید. مقدار فرکانس اندازه‌گیری شده ( $f$ ) در نهایت با تنظیم فرکانسی به دست آمده ( $F_{\text{setting}}$ ) مقایسه می‌گردد. چنانچه فرکانس اندازه‌گیری شده ( $f$ ) بیش از زمان تحریک ۵۰ میلی‌ثانیه مقدار کمتر از تنظیم فرکانسی ( $F_{\text{setting}}$ ) داشته باشد فرمان حذف بار توسط رله صادر می‌شود. شکل ۴ نمودار بلوکی متناظر با این شیوه پیاده‌سازی روش حذف بار ترکیبی خطی را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۴ در این شیوه مشابه روش حذف بار فرکانسی متداول تصمیم‌گیری برای حذف بار توسط واحد مقایسه فرکانس گرفته می‌شود، با این تفاوت که در اینجا تنظیم فرکانسی واحد به صورت تطبیقی بر اساس مقدار شاخص ولتاژ تعیین می‌گردد. شکل ۵ فرکانس اندازه‌گیری شده نقاط مختلف و تغییر تطبیقی تنظیم فرکانسی رله نشان داده شده در شکل ۴ را برای حادثه نمونه مربوط به شکل ۳ نشان می‌دهد. در شکل ۵ فرکانس اندازه‌گیری شده بارهای قطع شده پس از جدایی از سیستم نامعتبر می‌گردد. تنظیم فرکانسی رله‌های مربوطه نیز به مقدار  $f_{\max}$  (یعنی ۴۹٫۴ هرتز) محدود شده است.

### ۳-۲ روش حذف بار ترکیبی سهموی

در روش حذف بار ترکیبی خطی به بارهایی که افت ولتاژ بیشتری دارند فرکانس‌های بالاتری برای حذف بار اختصاص داده می‌شود. لذا بارهای با افت ولتاژ بیشتر سریع‌تر قطع می‌گردند. اما مطالعات مختلف صورت‌پذیرفته نشان می‌دهند که در روش حذف بار ترکیبی خطی در صورتی که حادثه کوچک و یا متوسطی در سیستم به وقوع بپیوندد و در نتیجه پس از حادثه افت ولتاژ بارها کم باشد، فرکانس‌های حذف بار کاهش می‌یابد و حذف بار با تأخیر انجام شده و به تعویق می‌افتد. در

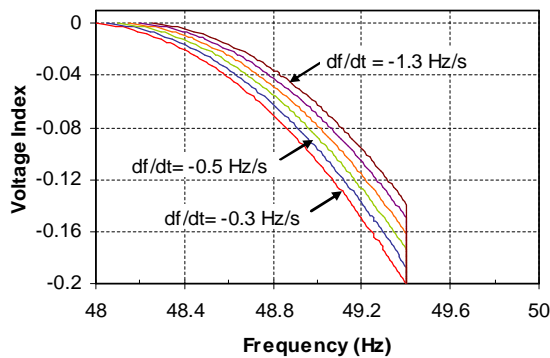
که در این شکل برابر ۴۹٫۴ هرتز می‌باشد محدود می‌گردد. واحد تشخیص ناحیه عملکرد در مدل رله، وظیفه تشخیص ورود به ناحیه قطع بار را بر عهده دارد. ورود بار به ناحیه قطع رله، پس از ۵۰ میلی‌ثانیه زمان تحریک، باعث "یک" شدن خروجی Trip در رله می‌شود.

در شکل ۳ قبل از بروز حادثه فرکانس تمامی باس‌ها حدود ۵۰ هرتز و شاخص ولتاژ آنها تقریباً صفر است (گوشه سمت راست و بالای شکل). پس از وقوع حادثه فرکانس و شاخص ولتاژ باس‌های متفاوت شروع به افت می‌کنند و به ناحیه قطع نزدیک می‌شوند. در نهایت با قطع ۲ عدد از بارهای شبکه در اثر ورود آنها به ناحیه قطع، وضعیت باس‌های دیگر بهبود پیدا می‌کند و فرکانس و ولتاژ آن باس‌ها روند افزایشی می‌گیرد. در روش‌های ترکیبی پیشنه‌ای، پس از وقوع حادثه بارهایی که افت ولتاژ بیشتری دارند اولویت قطع بالاتری داشته و زودتر از بقیه حذف می‌شوند. این بارها اغلب بارهای باس‌های ضعیف شبکه یا باس‌های نزدیک به محل حادثه هستند. بنابراین روش ترکیبی حذف بار می‌تواند حذف بار مناسب‌تری نسبت به روش حذف بار فرکانسی متداول انجام دهد.

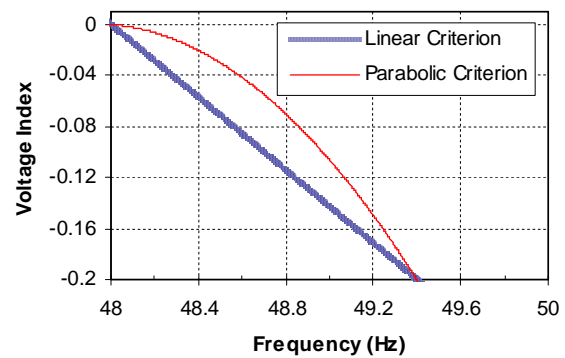
در این تحقیق با هدف نجات شبکه در برابر حوادث ترکیبی و شدید و افزایش حاشیه پایداری ولتاژ پس از بروز این‌گونه حوادث، برای تمام رله‌های حذف بار از معیار یکسان استفاده می‌گردد. اما در حالت کلی می‌توان برای لحاظ کردن اولویت اقتصادی و اجتماعی بارها در حذف بار در هر شبکه از دو یا چند خط معیار (موازی و یا متقاطع) استفاده نمود و با توجه به اهمیت بارها آنها را بین خطوط معیار تقسیم‌بندی کرد. البته با افزایش تعداد خطوط معیار هماهنگی بین خطوط در قطع بار مشکل‌تر می‌شود و از طرف دیگر حاشیه پایداری ولتاژ بهینه به دست نمی‌آید.

### ۳-۱-۴ پیاده‌سازی روش حذف بار ترکیبی خطی با استفاده از تابع نگاشت

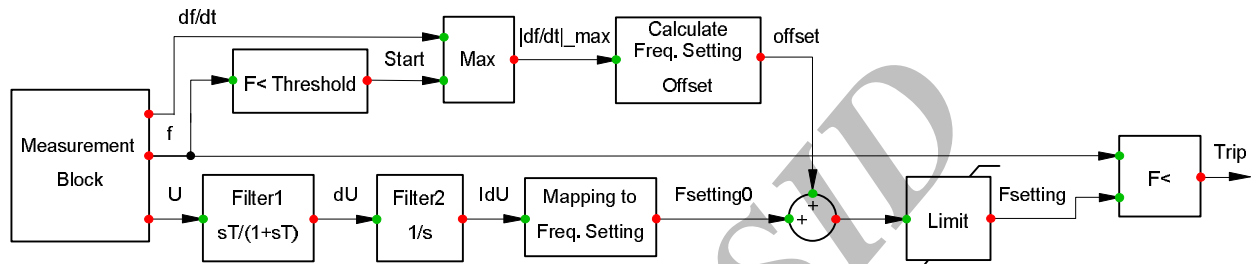
روش حذف بار ترکیبی خطی را به شیوه دیگری نیز می‌توان پیاده‌سازی نمود. در این شیوه  $G(f, \text{Id}U) = 0$  به صورت  $f = H(\text{Id}U)$  نوشته می‌شود. سپس به کمک تابع  $H$  تصمیم‌گیری برای حذف بار بر اساس روابط زیر انجام می‌شود



شکل ۷: منحنی‌های معیار نمونه مورد استفاده برای تصمیم‌گیری جهت حذف بار در روش حذف بار ترکیبی سه‌بعدی.



شکل ۶: نمونه منحنی معیار تصمیم‌گیری برای حذف بار در روش حذف بار ترکیبی سه‌بعدی در مقایسه با معیار خطی روش حذف بار ترکیبی خطی.



شکل ۸: نمودار بلوکی روش حذف بار ترکیبی سه‌بعدی.

بار برای حوادث با نرخ افت فرکانس زیاد (و افت ولتاژ کم در محل بارها) افزایش می‌یابد و در حوادث منجر به افت ولتاژ شدید نیز ضمن حفظ سرعت عملکرد روش‌های قبل، از قطع اضافی بار جلوگیری می‌شود. در این روش نیز مشابه روش‌های قبل حذف بار در نقاط با افت ولتاژ بیشتر زودتر انجام می‌شود.

شکل ۸ نمودار بلوکی مورد استفاده برای پیاده‌سازی این روش را نشان می‌دهد. بخش‌هایی از این نمودار بلوکی مشابه نمودار بلوکی نشان داده شده در شکل ۴ است. در شکل ۸ سیگنال نرخ تغییرات فرکانس  $df/dt$  برای تشخیص شدت فرکانسی حادثه و تعیین مقدار جابه‌جایی منحنی معیار به خروجی‌های واحد اندازه‌گیری در روش‌های قبل اضافه شده است. در این روش از حداکثر نرخ افت فرکانس پس از حادثه برای تعیین مقدار جابه‌جایی منحنی معیار (سیگنال Offset در نمودار بلوکی) استفاده می‌گردد. نرخ افت فرکانس در حین افت فرکانس با زمان تغییر می‌کند و با نوساناتی همراه است. این نوسانات غالباً بلافاصله پس از وقوع حادثه (خروج تولید) بیشتر است و در نقاط مختلف شبکه تفاوت بیشتری دارد. اما به تدریج با کاهش فرکانس، دامنه نوسانات نرخ تغییرات فرکانس و اختلاف نرخ افت فرکانس در نقاط مختلف شبکه کمتر می‌شود [۳۵]. علاوه بر این در لحظات اولیه پس از وقوع یک اختلال بزرگ نظیر اتصال کوتاه و یا خروج یک نیروگاه اغتشاشات قابل توجهی در سیگنال ولتاژ وجود دارد. این امر می‌تواند منجر به تخمین غیر صحیح نرخ تغییرات فرکانس شود. لیکن پس از گذشت لحظاتی سیگنال ولتاژ نوسانات کمتری را خواهد داشت [۳۶].

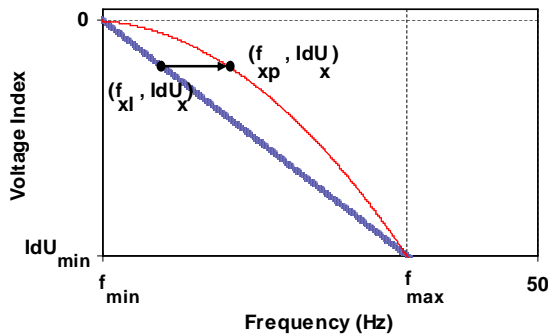
برای این که مقدار جابه‌جایی (offset) محاسبه شده در نقاط مختلف شبکه تقریباً برابر باشد واحد محاسبه حداکثر نرخ افت فرکانس در نمودار بلوکی زمانی شروع به کار می‌کند که فرکانس از یک حد معین، مثلاً از حد مجاز و ایمن شبکه، کمتر شده باشد. این کار از عملکرد اشتباه بر اثر خطای محاسبه نرخ تغییرات فرکانس - که در شرایط اتصال کوتاه و یا بلافاصله پس از خروج یک نیروگاه ممکن است رخ دهد - نیز جلوگیری می‌کند.

روش حذف بار ترکیبی سه‌بعدی این اشکال برطرف می‌گردد. در روش حذف بار ترکیبی سه‌بعدی به‌جای یک خط از یک منحنی سه‌بعدی به‌عنوان معیار تصمیم‌گیری برای حذف بار در نمودار شاخص ولتاژ بر حسب فرکانس استفاده می‌شود. با انتخاب مناسب معادله سهمی می‌توان فرکانس حذف بار را برای مقادیر کم شاخص ولتاژ نسبت به روش قبل افزایش داد. معادله این سهمی در حقیقت همان رابطه انتخاب شده برای  $G(f, IdU) = 0$  است. شکل ۶ چنین منحنی را در مقایسه با خط راست روش قبل برای تعیین ناحیه عملکرد رله نشان می‌دهد. تابع  $G$  متناظر با منحنی نشان داده شده در این شکل یک تابع درجه دو از  $f$  است.

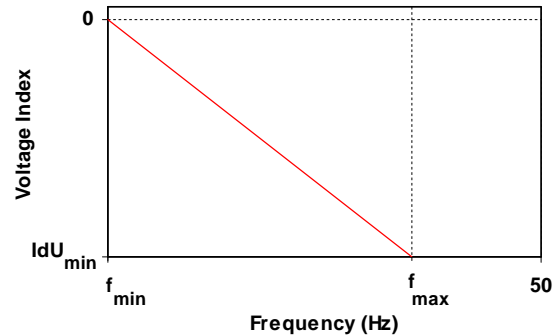
برای پیاده‌سازی این روش از هر دو شیوه پیاده‌سازی که برای روش حذف بار ترکیبی خطی معرفی شد می‌توان استفاده کرد. تنها درجه تابع  $G$  در واحد تشخیص عملکرد رله در شکل ۱ و تابع  $H$  در واحد نگاهت شاخص ولتاژ به تنظیم فرکانسی اولیه در شکل ۴ در این حالت نسبت به روش حذف بار ترکیبی خطی متفاوت خواهد بود. استفاده از روش حذف بار ترکیبی سه‌بعدی سبب بهبود سرعت حذف بار می‌شود. این بهبود به‌ویژه در حوادثی که افت ولتاژ چندان شدید نبوده و افت فرکانس غالب است بیشتر به چشم می‌خورد. در عین حال در این روش مشابه روش حذف بار ترکیبی خطی بارهای با افت ولتاژ بیشتر زودتر قطع می‌گردند.

### ۳-۳ روش حذف بار ترکیبی سه‌بعدی

اساس این روش مشابه روش حذف بار ترکیبی سه‌بعدی است، با این تفاوت که در این روش منحنی معیار برای تمام حوادث یکسان نیست و متناسب با شدت فرکانسی حادثه منحنی معیار تغییر می‌کند. در این روش از حداکثر نرخ افت فرکانس پس از حادثه برای تشخیص شدت فرکانسی حادثه استفاده می‌گردد و متناسب با مقدار این کمیت منحنی سهمی مورد استفاده در روش قبل به سمت فرکانس‌های بالاتر انتقال داده می‌شود. شکل ۷ منحنی‌های معیار نمونه مورد استفاده برای تصمیم‌گیری جهت حذف بار در این روش را نشان می‌دهد. در این روش سرعت حذف



شکل ۱۰: مشخصه سهموی معیار تصمیم‌گیری برای حذف بار در روش حذف بار ترکیبی سهموی.



شکل ۹: مشخصه خطی معیار تصمیم‌گیری برای حذف بار در روش حذف بار ترکیبی خطی.

شاخص ولتاژ در نقاط رله‌گذاری شده بر حسب فرکانس برای هر حادثه ترسیم می‌گردد.

#### ۴-۱-۴ مرحله چهارم: تعیین پارامتر $IdU_{min}$

پارامتر  $IdU_{min}$  از روی کمترین مقدار شاخص ولتاژ در فرکانس  $f_{max}$  در حوادث ولتاژی شدید تعیین می‌شود. برای تعیین این پارامتر از میان نمودارهای رسم‌شده در مرحله قبل نمودار شاخص ولتاژ بر حسب فرکانس حادثی که با بیشترین افت شاخص ولتاژ همراه بوده‌اند بررسی می‌شود و  $IdU_{min}$  برابر با کمترین مقدار شاخص ولتاژ در فرکانس  $f_{max}$  که در این نمودارها وجود دارد، در نظر گرفته می‌شود.

#### ۴-۱-۵ مرحله پنجم: تعیین پارامتر $f_{min}$

در این مرحله با تعیین پارامتر  $f_{min}$ ، به‌طور غیر مستقیم فرکانس حذف بار در حادثی که ضمن افت فرکانس با افت اندک ولتاژ بارها همراهند و نیز شیب خط معیار تصمیم‌گیری برای حذف بار در شکل ۹ تعیین می‌شود. مقدار مناسب برای این پارامتر در حدود کمترین تنظیم فرکانسی روش متداول است. در حوادث با افت ولتاژ کم، خصوصاً در شرایطی که شیب افت فرکانس زیاد باشد بالاتر بودن مقدار  $f_{min}$  به جهت افزایش فرکانس حذف بار مطلوب‌تر است. از سوی دیگر افزایش مقدار  $f_{min}$  سبب افزایش شیب خط معیار تصمیم‌گیری برای حذف بار می‌شود. هر چه شیب خط معیار بیشتر باشد، مقدار کلی حذف بار برای حوادث مختلف بیشتر می‌شود. علت این است که در این حالت پس از ورود منحنی شاخص ولتاژ بر حسب فرکانس به ناحیه زیر خط معیار در یک یا چند نقطه و انجام حذف بار در این نقاط، منحنی سایر نقاط فرصت کمتری برای دورشدن از خط معیار خواهند داشت.

#### ۴-۲ طراحی روش حذف بار ترکیبی سهموی

هدف تعیین مشخصه سهموی نشان داده شده در شکل ۱۰ می‌باشد.

#### ۴-۲-۱ مرحله اول: تعیین پارامترهای $f_{max}$ و $IdU_{min}$

پارامترهای  $f_{max}$ ،  $IdU_{min}$  و  $f_{min}$  در این مشخصه مشابه روش قبل تعیین می‌گردند. با تعیین این پارامترها مختصات دو نقطه از مشخصه سهموی مشخص می‌گردد. برای تعیین مشخصه سهموی باید مختصات یک نقطه دیگر از مشخصه یعنی  $(f_{xp}, IdU_x)$  علاوه بر پارامترهای فوق تعیین شود.

#### ۴-۲-۲ مرحله دوم: تعیین مختصات نقطه سوم روی مشخصه سهموی

همان‌طور که در بخش ۳-۲ توضیح داده شد، در این روش هدف افزایش فرکانس حذف بار نسبت به روش حذف بار ترکیبی خطی برای

بر اساس مقدار حداکثر نرخ افت فرکانس  $(|df/dt|_{max})$ ، مقدار جابه‌جایی فرکانسی منحنی معیار (offset) تعیین می‌گردد. در بخش دیگر نمودار بلوکی تنظیم فرکانسی اولیه  $(F_{setting})$  مشابه شکل ۴ از نگاهت شاخص ولتاژ محاسبه شده است. سیگنال با offset با سیگنال  $F_{setting}$  جمع می‌گردد و پس از اعمال حدود، تنظیم فرکانسی نهایی  $(F_{setting})$  به‌دست می‌آید. چنانچه فرکانس اندازه‌گیری شده  $(f)$  بیش از زمان تحریک ۵۰ میلی‌ثانیه مقدار کمتر از تنظیم فرکانسی  $(F_{setting})$  داشته باشد فرمان حذف بار توسط رله صادر می‌شود. این زمان تحریک برای خنثی کردن خطاهای احتمالی گذرا در اندازه‌گیری فرکانس، ولتاژ و نرخ تغییرات فرکانس در نظر گرفته می‌شود.

#### ۴- طراحی روش‌های حذف بار ترکیبی تطبیقی

##### ۴-۱ طراحی روش حذف بار ترکیبی خطی

هدف از طراحی روش حذف بار ترکیبی خطی به‌دست آوردن پارامترهای مشخصه خطی  $IdU-F$  نشان داده شده در شکل ۹ می‌باشد. با تعیین این پارامترها در حقیقت تابع  $G$  در (۳) (و یا تابع  $H$  در (۵)) تعیین می‌گردد. طراحی شامل ۵ مرحله زیر می‌باشد:

##### ۴-۱-۱ مرحله اول: تعیین پارامتر $f_{max}$

در این مرحله تعیین می‌شود که در حوادث بزرگ خصوصاً حوادث ولتاژی شدید (حوادثی که ضمن افت فرکانس با افت شدید ولتاژ بارها همراه هستند) حذف بار از چه فرکانسی شروع شود. این پارامتر حداکثر فرکانس مجاز برای عملکرد روش حذف بار ترکیبی را نیز به‌دست می‌دهد. برای حوادث بزرگ سعی بر این است که حذف بار هر چه سریع‌تر آغاز شود و از حداکثر مقدار ممکن برای تنظیمات فرکانسی استفاده شود. از طرفی تنظیمات فرکانسی خیلی بالا ممکن است امنیت سیستم را به مخاطره بیندازد و در شرایط اتصال کوتاه طولانی مدت سبب حذف بار توسط رله‌های حذف بار ترکیبی شود.

##### ۴-۱-۲ مرحله دوم: مدل‌سازی شبکه

در این مرحله شبکه مورد مطالعه به‌صورت گسترده و دینامیک به دقت مدل می‌شود. در این مدل‌سازی ژنراتورها به همراه AVR و گاورنر به‌صورت دینامیک در نظر گرفته می‌شوند. بارهای سیستم نیز به‌صورت دینامیک و با لحاظ کردن وابستگی به ولتاژ و فرکانس مدل‌سازی می‌شوند.

##### ۴-۱-۳ مرحله سوم: اعمال حوادث مختلف به شبکه

در این مرحله بدون در نظر گرفتن رله‌های حذف بار حوادث مختلفی شامل قطع مقادیر مختلف تولید و ترکیب آنها با خروج خطوط مهم (در اثر اتصال کوتاه) به شبکه مدل‌شده در مرحله دوم اعمال می‌شود و نمودار

تولید و ترکیب آنها با خروج خطوط مهم (در اثر اتصال کوتاه) به شبکه اعمال می‌شود. برای هر حادثه مقدار حداکثر نرخ افت فرکانس پس از کاهش فرکانس از آستانه تعیین شده در این مرحله تعیین می‌گردد. اگر فرض کنیم  $N$  حادثه به سیستم اعمال شده است، مقدار  $DF_{\min}$  و  $DF_{\max}$  از (۹) و (۱۰) محاسبه می‌شود

$$DF_{\min} = \min_{i=1}^N \left( \max \left| \frac{df}{dt} \right| \right)_i \quad (9)$$

$$DF_{\max} = \max_{i=1}^N \left( \max \left| \frac{df}{dt} \right| \right)_i \quad (10)$$

#### ۳-۳-۴- تعیین پارامتر $Offset_{\max}$

در این مرحله پارامتر  $Offset_{\max}$  در (۸) تعیین می‌شود و مشخصه جابه‌جایی فرکانسی بر حسب حداکثر نرخ افت فرکانس به دست می‌آید. برای تعیین این پارامتر ابتدا باید حادثه یا حوادثی که بیشترین مقدار نرخ افت فرکانس را داشته‌اند در روش حذف بار ترکیبی سهمی (یعنی با استفاده از مشخصه سهمی پایه و بدون اعمال جابه‌جایی فرکانسی) شبیه‌سازی شوند و متوسط فرکانس‌های حذف بار برای این حادثه یا حوادث مشخص شود. سپس مقدار پارامتر  $Offset_{\max}$  برای افزایش متوسط فرکانس‌های حذف بار در این حادثه (یا حوادث) به مقدار مطلوب تعیین می‌شود.

در تعیین مقدار پارامتر  $Offset_{\max}$  باید به دو نکته توجه نمود. اولاً مقدار این پارامتر نباید به گونه‌ای انتخاب شود که فرکانس‌های حذف بار جدید در حادثه یا حوادث اشاره شده بیش از مقدار پارامتر  $f_{\max}$  شوند چرا که در این صورت تعداد زیادی از رله‌ها در فرکانس  $f_{\max}$  با هم حذف بار خواهند کرد. ثانیاً به دلیل افزایش فرکانس حذف بار در این روش نسبت به روش قبل، تصمیم‌گیری برای حذف بار در این روش در شرایطی صورت می‌گیرد که منحنی‌های شاخص ولتاژ نقاط رله‌گذاری شده بر حسب فرکانس نسبت به روش قبل به هم نزدیک‌ترند. بنابراین مقدار حذف بار در این روش ممکن است در برخی حوادث نسبت به روش قبل بیشتر باشد. هر چه پارامتر  $Offset_{\max}$  بزرگ‌تر باشد، این امر شدت بیشتری می‌یابد.

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله سه روش حذف بار ترکیبی برای حفاظت شبکه در برابر حوادث شدید و ترکیبی پیشنهاد گردید. در این روش‌ها حذف بار از نقاط با افت ولتاژ بیشتر و طولانی‌تر در حین افت فرکانس آغاز می‌گردد و سرعت، محل و مقدار حذف بار بسته به محل وقوع حادثه و وضعیت ولتاژی سیستم و نرخ افت فرکانس به‌طور تطبیقی تغییر می‌کند. این روش‌ها مشکل عملکرد غیر بهینه و غیر هماهنگ رله‌های حذف بار ولتاژی و فرکانسی در حوادث شدید و ترکیبی را مرتفع می‌نمایند. علاوه بر این در شرایط ایجاد افت ولتاژ شدید در شبکه در حین افت فرکانس، با توجه به عملکرد کند و نامناسب الگوریتم‌های حذف بار فرکانسی متداول امکان ناپایداری سیستم وجود دارد، اما الگوریتم‌های حذف بار ترکیبی پیشنهاد شده با تسریع حذف بار در شرایط ایجاد افت ولتاژ شدید در شبکه از وقوع ناپایداری محتمل جلوگیری می‌نمایند. همچنین این الگوریتم‌ها به دلیل انتخاب محل‌های حذف بار از نقاط دارای افت ولتاژ بیشتر بر خلاف روش حذف بار فرکانسی متداول، از وقوع فروپاشی ولتاژ پس از انجام حذف بار فرکانسی جلوگیری می‌کنند و حاشیه امنیت بیشتری برای سیستم در برابر حوادث بعدی فراهم می‌کنند. نتایج عددی شبیه‌سازی این

حوادثی است که شاخص ولتاژ آنها در نقاط رله‌گذاری شده کوچک است و منحنی‌های شاخص ولتاژ بر حسب فرکانس آنها در ناحیه سمت چپ بالای نمودار با مشخصه معیار تلافی می‌کند. مختصات نقطه سوم روی مشخصه سهمی با هدف دستیابی به این مقصود تعیین می‌گردد. برای تعیین مختصات  $(f_{xp}, IdU_x)$  ابتدا بایستی این‌گونه حوادث در روش حذف بار ترکیبی خطی شبیه‌سازی شوند و متوسط فرکانس‌های حذف بار  $(f_{xl})$  و متوسط مقدار شاخص ولتاژ در این فرکانس‌های حذف بار  $(IdU_x)$  مشخص شود. سپس مقدار  $f_{xl}$  به مقدار مناسب افزایش داده می‌شود تا  $f_{xp}$  به دست آید. حال با داشتن مختصات سه نقطه از مشخصه سهمی، می‌توان معادله مشخصه مورد نظر را با برازش منحنی مناسب به دست آورد.

در تعیین  $f_{xp}$  باید توجه داشت که اگر اختلاف  $f_{xl}$  و  $f_{xp}$  زیاد باشد، اولاً ممکن است منحنی درجه ۲ مناسبی برای عبور از نقاط تعیین شده پیدا نشود و نیاز به افزایش درجه چندجمله‌ای مورد نظر باشد، ثانیاً ممکن است شیب قسمت‌های پایینی منحنی سهمی خیلی زیاد شود که در این صورت مقدار کلی حذف بار حوادث مختلف زیاد می‌شود.

#### ۳-۴ طراحی روش حذف بار ترکیبی سه‌بعدی

برای طراحی این روش دو مشخصه باید تعیین شود: ۱) مشخصه سهمی پایه و ۲) مشخصه جابه‌جایی تنظیم فرکانسی بر حسب حداکثر نرخ افت فرکانس که از (۸) به دست می‌آید

$$offset = \frac{Offset_{\max}}{(DF_{\max} - DF_{\min})} \times \left( \left| \frac{df}{dt} \right|_{\max} - DF_{\min} \right) \quad (8)$$

در این رابطه  $\left| \frac{df}{dt} \right|_{\max}$  حداکثر نرخ افت فرکانس در حادثه،  $DF_{\min}$  و  $DF_{\max}$  به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار حداکثر نرخ افت فرکانس در حوادث مختلف و  $Offset_{\max}$  حداکثر مقدار جابه‌جایی تنظیم فرکانسی می‌باشد. طراحی این روش شامل ۳ مرحله زیر است:

#### ۳-۴-۱ مرحله اول: تعیین مشخصه سهمی پایه

اولین مشخصه‌ای که باید تعیین شود، مشخصه پایه نگاهت شاخص ولتاژ به تنظیم فرکانسی اولیه (مشخصه سهمی پایه) است که مقدار جابه‌جایی (offset) برای آن صفر است. این مشخصه معیار تصمیم‌گیری برای حذف بار در حوادثی است که ضمن افت فرکانس با افت ولتاژ شدید بارها همراهند. طراحی این مشخصه به روش تشریح شده برای طراحی حذف بار ترکیبی سهمی است و می‌توان از مشخصه سهمی به دست آمده در بخش قبل برای مشخصه پایه استفاده کرد. با استفاده از این مشخصه تابع  $H$  در واحد نگاهت شاخص ولتاژ به تنظیم فرکانسی اولیه در نمودار بلوکی شکل ۸ به دست می‌آید.

#### ۳-۴-۲ مرحله دوم: تعیین کمترین و بیشترین مقدار حداکثر نرخ افت فرکانس در حوادث مختلف

در این مرحله تعیین می‌شود که کمترین و بیشترین مقدار حداکثر نرخ افت فرکانس در حوادث مختلف چقدر است. از این طریق پارامترهای  $DF_{\min}$  و  $DF_{\max}$  در (۸) تعیین می‌شوند. برای رسیدن به این هدف ابتدا باید حد (آستانه) فرکانسی شروع به کار واحد محاسبه حداکثر نرخ افت فرکانس در نمودار بلوکی شکل ۸ تعیین شود. همان‌گونه که قبلاً گفته شد، بهتر است مقدار آستانه عملکرد بیش از مقدار پارامتر  $f_{\max}$  و نزدیک به حد پایین فرکانس مجاز و ایمن شبکه باشد.

سپس مشابه مرحله سوم طراحی روش ترکیبی خطی رله‌های حذف بار در شبکه غیر فعال می‌شوند و حوادث مختلفی شامل قطع مقادیر مختلف



- shedding schemes," in *Proc. 2001 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 1, pp. 307-312, 15-19 Jul. 2001.
- [19] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw Hill, 1994.
- [20] T. Tomsic, G. Verbic, and F. Gubina, "Revision of the underfrequency load shedding scheme of the Slovenian power system," in *Proc. 2005 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, vol. 2, pp. 1782-1787, 12-16 Jun. 2005.
- [21] L. J. Shih, W. J. Lee, J. C. Gu, and Y. H. Moon, "Application of  $df/dt$  in power system protection and its implementation in microcontroller based intelligent load shedding relay," in *Proc. 1991 Industrial and Commercial Power Systems Technical Conf.*, pp. 11-17, 6-9 May 1991.
- [22] H. Seyedi, M. Sanaye-Pasand, and M. R. Dadashzadeh, "Design and simulation of an adaptive load shedding algorithm using a real network," in *Proc. 2006 IEEE Power India Conf.*, 5 pp., Apr. 2006.
- [23] Y. Halevi and D. Kottick, "Optimization of load shedding system," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 8, no. 2, pp. 207-213, Jun. 1993.
- [24] P. M. Anderson, *Power System Protection*, Ch. 20, Protection against Abnormal System Frequency, IEEE Press 1999, pp. 807-851.
- [25] D. L. H. Aik, "A general-order system frequency response model incorporating load shedding: analytic modeling and application," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 2, pp. 709-717, May 2006.
- [26] V. V. Terzija, "Adaptive underfrequency load shedding based on the magnitude of the disturbance estimation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 3, pp. 1260-1266, Aug. 2006.
- [27] Y. Liu and Y. Liu, "Aspects on power system islanding for preventing widespread blackout," in *Proc. 2006 IEEE International Conf. on Networking, Sensing, and Control*, pp. 1090-1095, Apr. 2006.
- [28] P. Cote, S. P. Cote, and M. Lacroix, "Programmable load shedding systems, Hydro Quebec experience," in *Proc. 2001 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 2, pp. 818-823, Jul. 2001.
- [29] H. M. Dola and B. H. Chowdhury, "Intentional islanding and adaptive load shedding to avoid cascading outages," in *Proc. 2006 IEEE Int. Conf. Networking, Sensing and Control*, 8 pp., Jun. 2006.
- [30] M. Sanaye-Pasand and H. Seyedi, "Centralized adaptive load shedding methods to enhance power system voltage stability margins," *IEEE Trans. Electrical and Electronic Engineering*, vol. 3, no. 6, pp. 669-679, Nov. 2008.
- [31] H. Arabian, A. Ranjbar, A. Shirani, and B. Mozafari, "SPS protection schemes for frequency stability in power networks," in *Proc. 19th Int. Power System Conf.*, 12 pp., Tehran, Iran, Nov. 2004.
- [32] B. Shi, X. Xie, and Y. Han, "WAMS-based load shedding for systems suffering power deficit," in *Proc. 2005 IEEE Transmission and Distribution Conf. & Exhibition: Asia & Pacific, Dalian, China*, 6 pp., Aug. 2005.
- [33] A. Saffarian, M. Sanaye - Pasand, and H. Asadi, "Performance investigation of new combinational load shedding schemes," in *Proc. 2008 POWERCON & IEEE Power India Conf.*, 8 pp. Oct. 2008.
- [34] A. P. Ghaleh, *A Combinational Algorithm for Load Shedding in Electrical Power Networks*, M. Sc. Thesis, School of Electrical and Computer Engineering, University of Tehran, Feb. 2008.
- [35] M. Yong, H. Shao-bin, H. Ying - duo, G. Yuan - kai, and W. Yi, "Analysis of power-frequency dynamics and designation of under frequency load shedding scheme in large scale multi - machine power systems," in *Proc. 1991 IEE Int. Conf. Advances in Power System Control, Operation and Management, Hong Kong*, pp. 871-876, Nov. 1991.
- [36] M. Karimi - Ghartemani and M. R. Iravani, "Wide-range, fast and robust estimation of power system frequency," *Electric Power Systems Research*, vol. 65, no. 2, pp. 109-117, May 2003.
- [۱۲] ع. ر. صفاریان، م. صنایع‌پسند و ا. پ. قلعه، "استفاده از روش‌های حذف بار ترکیبی تطبیقی به منظور بهبود پایداری ولتاژ سیستم قدرت - قسمت دوم: نتایج شبیه‌سازی‌ها،" *نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران*، سال ۸، شماره ۱، صص. ۲۱-۱۳، بهار ۱۳۸۹.

**علیرضا صفاریان** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق به ترتیب در سالهای ۱۳۸۲ و ۱۳۸۴ در دانشگاه صنعتی امیرکبیر به پایان رسانده است و هم‌اکنون دانشجوی دوره دکتری مهندسی برق در دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تهران می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: تحلیل پایداری سیستم‌های قدرت، حفاظت و کنترل سیستم‌های قدرت و ارزیابی کیفیت توان.

**مجید صنایع‌پسند** مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه تهران و مقطع کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق را از دانشگاه کلگری کانادا به پایان رسانده است و هم‌اکنون استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر پردیس فنی دانشگاه تهران می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند اتوماسیون سیستم‌های قدرت، حفاظت و کنترل سیستم‌های قدرت، رله‌های دیجیتال و مهندسی فشار قوی می‌باشد.

روش‌ها در قسمت دوم مقاله ارائه شده است. نتایج عددی به دست آمده نشان می‌دهند روش‌های پیشنهادشده حاشیه پایداری ولتاژ را به طور چشمگیری افزایش می‌دهند و برای حفظ پایداری سیستم پس از وقوع حوادث شدید و ترکیبی مناسب‌اند. با توجه به این که روش‌های پیشنهادی از کمیت‌های ولتاژ و فرکانس اندازه‌گیری شده توسط رله‌های حذف بار استفاده می‌نمایند و نیازی به ارتباط مخابراتی ندارند، به سادگی در شبکه‌های مختلف قابل پیاده‌سازی هستند.

## سپاس‌گزاری

نویسندگان مقاله از حمایت مالی دانشگاه تهران (قرارداد تحقیقاتی شماره ۸۱۰۱۰۶۴/۱/۰۱) قدردانی می‌نمایند.

## مراجع

- [1] M. Begovic, D. Novosel, and M. Milisavljevic, "Trends in power system protection and control," in *Proc. 32nd Hawaii Int. Conf. on System Sciences*, vol. 3, pp. 3024-3031, 5-8 Jan. 1999.
- [2] C. Concordia, L. H. Fink, and G. Poullikkas, "Load shedding on an isolated system," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 10, no. 3, pp. 1467-1472, Aug. 1995.
- [3] C. W. Taylor, "Concepts of undervoltage load shedding for voltage stability," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 7, no. 2, pp. 480-488, Apr. 1992.
- [4] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, "Definition and classification of power system stability," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 3, pp. 1387-1401, Aug. 2004.
- [5] D. Novosel, K. T. Vu, D. Hart, and E. Udren, "Practical protection and control strategies during large power-system disturbances," in *Proc. 1996 IEEE Transmission and Distribution Conf.*, pp. 560-565, 15-20 Sep. 1996.
- [6] "Interim report of the Investigation Committee on the 28 September 2003 blackout in Italy," prepared by Union for the Coordination of Transmission of Electricity, Belgium, Oct. 3, 2003.
- [7] US-Canada Power System Outage Task Force, Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations, 5 Apr. 2004.
- [8] S. Lindahl, G. Runvik, and G. Stranne, "Operational experience of load shedding and new requirements on frequency relays," in *Int. Conf. Developments in Power System Protection*, pp. 262-265, 25-27 Mar. 1997.
- [9] R. Kearslev, "Restoration in Sweden and experience gained from the blackout in 1983," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 2, no. 2, pp. 422-428, May 1987.
- [10] D. Prasetijo, W. R. Lachs, and D. Sutanto, "A new load shedding scheme for limiting underfrequency," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, no. 3, pp. 1371-1378, Aug. 1994.
- [11] W. R. Lachs, "Area - wide system protection scheme against extreme contingencies," in *Proc. of the IEEE*, vol. 93, no. 5, pp. 1004-1027, May 2005.
- [13] J. R. Jones and W. D. Kirkland, "Computer algorithm for selection of frequency relays for load shedding," *IEEE Computer Applications in Power*, vol. 1, no. 1, pp. 21-25, Jan. 1988.
- [14] "WECC coordinated off-nominal frequency load shedding and restoration plan," prepared by Underfrequency Issues Work Group of Western Electric Coordinating Council, Final report, Nov. 1997.
- [15] IEEE Guide for the Application of Protective Relays Used for Abnormal Frequency Load Shedding and Restoration, IEEE Standard C37.117-2007, Aug. 2007.
- [16] M. Nagpal, A. Moshref, Z. Shukri, J. T. Vijayan, D. Chan, and C. Henville, "Dynamic simulations optimize application of an underfrequency load shedding scheme," in *Proc. 24th Annual Western Protective Relaying Conf.*, pp. 1-8, 12-15 Oct. 1997.
- [17] P. M. Anderson and M. Mirheydar, "An adaptive method for setting underfrequency load shedding relays," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 7, no. 2, pp. 647-652, May 1992.
- [18] B. Delfino, S. Massucco, A. Morini, P. Scalera, and F. Silvestro, "Implementation and comparison of different underfrequency load

**امیر پیروز قلعه** در سال ۱۳۸۴ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی و در سال ۱۳۸۶ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه تهران دریافت نمود. ایشان از سال ۱۳۸۷ در پژوهشگاه نیرو مشغول به فعالیت می‌باشند. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: تحلیل پایداری سیستم‌های قدرت، حفاظت، کنترل و اتوماسیون سیستم‌های قدرت و مبدل‌های الکترونیک قدرت.

Archive of SID