

یک طرح حذف بار ترکیبی غیر متمرکز بهینه با استفاده از شاخص پایداری ولتاژ L برای خود ترمیمی سیستم قدرت

میلااد ربیعی

علیرضا صفاریان

گروه برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

چکیده

در حوادث و اغتشاشات بزرگ که در سیستم قدرت رخ می‌دهند، کمبود توان اکتیو معمولاً با کمبود توان راکتیو همراه می‌شود. بنابراین، پایداری فرکانس و ولتاژ به طور همزمان به خطر می‌افتد. روش‌های حذف بار سنتی که تنها وضعیت فرکانس یا ولتاژ شبکه قدرت را در نظر می‌گیرند، در بعضی حوادث بزرگ و ترکیبی قادر به جلوگیری از ناپایداری نیستند. روش‌های قبلی حذف بار ترکیبی که حذف بار را با در نظر گرفتن همزمان وضعیت ولتاژی و فرکانسی سیستم انجام می‌دهند، نیز بدون توجه به ابعاد اقتصادی سیستم را نجات می‌دهند. در این مقاله، یک روش حذف بار ترکیبی جدید ارائه می‌گردد که تنظیمات بهینه را هم از لحاظ حفظ پایداری ولتاژ و فرکانس و هم از جهت اقتصادی برای رله‌های حذف بار انتخاب می‌کند. وضعیت پایداری ولتاژ توسط شاخص استاندارد محلی L ارزیابی می‌گردد و رله‌ها از مقادیر محلی ولتاژ، فرکانس و جریان استفاده می‌کنند. روش ارائه شده، سرعت، مکان و مقدار حذف بار بهینه را به صورت اتوماتیک و تطبیق‌پذیر با شرایط افت ولتاژ و فرکانس تعیین می‌کند. عملکرد این روش به ازای حوادث مختلف در یک شبکه‌ی واقعی شبیه‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی، عملکرد بهتر روش پیشنهادی را نسبت به روش‌های سنتی و ترکیبی قبلی نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: حذف بار ترکیبی، شاخص پایداری ولتاژ، حذف بار فرکانسی، افت ولتاژ

۱- مقدمه

در اختلالات بزرگ سیستم، از جمله خروج ژنراتورها و اتصال کوتاه در خطوط انتقال که منجر به خروج‌های پی در پی می‌شود، عدم تعادل در توان اکتیو و راکتیو باعث ناپایداری ولتاژ و فرکانس می‌گردد. بنابراین، خطر خاموشی کل سیستم قدرت وجود خواهد داشت [۳]. حذف بار آخرین ابزار موثر در حفظ پایداری سیستم قدرت است. به طور متداول، رله‌های حذف بار فرکانسی و ولتاژی به طور مستقل استفاده می‌شوند [۴ و ۵]. از بزرگ‌ترین ضعف‌های روش متداول در حذف بار، عملکرد اشتباه در مقابل حوادث ترکیبی است. این

با گسترش شبکه‌های قدرت و خصوصی‌سازی و رقابتی شدن صنعت برق، سیستم‌های قدرت در حاشیه‌ی پایداری پایینی بهره‌برداری می‌شوند. در این وضعیت، استفاده از روش‌های سنتی برای حفاظت و کنترل سیستم جوابگو نیست [۱]. وقوع بسیاری از خاموشی‌های بزرگ در اثر ناپایداری سیستم قدرت اهمیت این موضوع را اثبات می‌کند [۲].

ارائه شده در این اولویت حذف بار به نقاطی داده می‌شود که در آن نقاط (۱) فرکانس از مقدار تنظیمی از پیش تعیین شده کمتر شود و (۲) بار، افت ولتاژی بیشتر از مقدار تنظیمی از پیش تعیین شده را در مدت زمانی بیشتر تجربه کند.

در این روش، برای دستیابی به تنظیمات بهینه در حاشیه پایداری، تنظیمات مختلفی در یک حلقه‌ی بهینه‌ساز برای رله‌ها مورد آزمایش قرار می‌گیرد. در هر مرحله مجموعه مقادیر تنظیمی مورد آزمایش از طریق برنامه‌نویسی نرم‌افزار DPL) DIGSILENT (به رله داده می‌شود و شاخص پایداری ولتاژ L همراه با وضعیت فرکانس به ازای حوادث مختلف ارزیابی می‌شود و نهایتاً تنظیمات بهینه برای رله به دست می‌آید. با استفاده از این روش، پاسخ طرح حذف بار در برابر حوادث مختلف به صورت تطبیقی تغییر می‌کند. الگوریتم ارائه شده، از سیگنال‌های محلی ولتاژ و فرکانس استفاده می‌کند. بنابراین، اجرای این روش، نسبت به روش متمرکز که نیاز به ارتباط مخابراتی دارند بسیار ساده‌تر است [۱۳-۱۵].

روش جدید ارائه شده بر روی مدل شبکه خراسان شبیه‌سازی شده و عملکرد آن، با روش متداول و دیگر روش‌های ترکیبی مقایسه گردیده است. برای این منظور، از مدل دینامیکی و گسترده‌ی شبکه‌ی واقعی استفاده شده است، تا نتایج واقعی و دقیق حاصل گردد. نتایج عددی، موفق و بهتر الگوریتم پیشنهادی را نسبت به روش‌های قبلی نشان می‌دهد.

۲- مرور روش‌های ارائه شده در گذشته

در [۱۶-۱۸] تحقیقاتی درباره‌ی رله‌های حذف بار فرکانسی برای بهبود بخشیدن به روش حذف بار متداول صورت گرفته است. در این مراجع فقط اطلاعات فرکانس برای تصمیم‌گیری در خصوص حذف بار استفاده شده است. بسیاری از الگوریتم‌ها میزان تغییرات فرکانس (df/dt) را برای تعیین سرعت و میزان حذف بار استفاده کرده‌اند [۲۱ و ۲۲]. در [۲۳ و ۲۴] یک پیشرفت در این زمینه حاصل شد که مدلسازی بارهای وابسته به ولتاژ را برای تخمین عدم تعادل توان اکتیو در طرح حذف بار فرکانسی مورد نظر قرار داد. در [۲۵ و ۲۴، ۲۸] روش حذف بار ترکیبی ارائه گردید که در این روش، حذف بار فرکانسی با در نظر گرفتن اطلاعات اندازه‌ی ولتاژ باسها صورت می‌گیرد. روش‌هایی که در [۱۹ و ۱۳] استفاده شده است، بر اساس الگوریتم حذف بار متمرکز است که پیچیدگی و نیاز به ارتباط مخابراتی از

حوادث پی در پی همچنین ممکن است به خاطر عملکرد اشتباه سیستم حفاظتی رخ دهد، و نهایتاً باعث فروپاشی سیستم گردد. این مسئله در سیستم‌های تحت فشار پررنگ‌تر است [۶]. از دیگر معایب روش حذف بار فرکانسی متداول، حذف مقدار مشخصی از بارهاست وقتی که فرکانس اندازه‌گیری شده از آستانه معین شده برای رله، تجاوز می‌کند.

این نوع قوانین، انعطاف‌پذیری در حذف بار را برای انواع ناپایداری‌ها کم می‌کند [۷]. در چنین شرایطی، ناپایداری فرکانس و ولتاژ نمی‌تواند مستقل از هم باشد. ناپایداری ولتاژ دلیل عمده‌ی چندین خاموشی دهه‌ی اخیر بوده است [۸]. سرعت کاهش فرکانس به طور ذاتی کمتر از سرعت افت ولتاژ است. بنابراین برای اتفاقات ترکیبی، افت سریع و شدید ولتاژهای سیستم باعث کاهش توان در بارهای وابسته به ولتاژ می‌شود و همزمان فرکانس کاهش پیدا می‌کند [۹]. چون عملکرد رله‌های حذف بار فرکانسی سنتی به تنظیمات از پیش تعیین شده برای آنها و فرکانس اندازه‌گیری شده توسط آنها وابسته است، وقوع چنین شرایطی باعث تصمیم‌گیری اشتباه این رله درباره‌ی میزان حذف بار می‌شود. همچنین رله‌های حذف بار فرکانسی در این شرایط ممکن است به دلیل کاهش سرعت افت فرکانس، دیرتر عمل کنند. به عنوان مثال، این پدیده در خاموشی سراسری ایتالیا و شمال آمریکا در سال ۲۰۰۳ مشاهده شده است [۱۰ و ۱۱]. مسئله دیگر، عملکرد اشتباه رله‌های الکترومکانیکی در مواقعی است که ولتاژ به طور قابل توجهی از مقدار نامی کمتر شود. مثلاً، در خاموشی سال ۱۹۸۳ در سوئد، وقوع یک سری از اتفاقات و در نتیجه‌ی آن تریپ‌های متوالی خطوط باعث شد افت خیلی سریع در فرکانس و ولتاژ رخ دهد. رله‌های حذف بار فرکانسی در این شرایط عمل نکرد و خاموشی کامل سراسر جنوب سوئد را فراگرفت [۱۲]. اگرچه، مکان وقوع حادثه در محل ایجاد افت ولتاژ و تقاضای توان راکتیو موثر است، اما طرح حذف بار فرکانسی مستقل از محل وقوع حادثه عمل می‌کند. بنابراین، حذف بار ممکن است در نواحی غیر ضروری صورت گیرد. خاموشی ایتالیا در نوامبر ۱۹۸۷ کاملاً بر همین اساس رخ داد.

برخلاف عملکرد مستقل رله‌های حذف بار فرکانسی و ولتاژی در طرح متداول، روش حذف بار ترکیبی این دو نوع حذف بار را ترکیب می‌کند. هدف الگوریتم ارائه شده در این مقاله، ایجاد حاشیه پایداری مطمئن در ولتاژ و فرکانس توسط طرح حذف بار بهینه و تطبیقی است. در الگوریتم

۳-۱- شاخص ارزیابی پایداری ولتاژ L

به خوبی مشخص است که ناپایداری ولتاژ و فروپاشی ولتاژ، آسیب بزرگی به سیستم وارد می‌کند. ویژگی شاخص پایداری ولتاژ L این است که، روش سریع و ساده‌ای ارائه دهد به طوری که می‌توان آن را به صورت بر خط به سیستم اعمال کرد و حاشیه‌ی پایداری ولتاژ را تخمین زد. برای تشخیص میزان پایداری ولتاژ یک سیستم، اغلب به تستها و سناریوهای زیادی احتیاج است. دستیابی به این هدف، بر اساس آنالیز حالت استاتیکی ممکن است و در مراجع روش‌های استاتیکی مختلفی ارائه شده است [۲۶]. در بعضی از مراجع از منحنی‌های Q-V در باس بارها برای تخمین ناپایداری ولتاژ استفاده شده است [۲۷]. مشکل این روش این است که به دلیل تمرکز در تعداد محدودی از باس‌ها نمی‌تواند به طور جامع وضعیت پایداری ولتاژ را ارزیابی کند. شاخص پایداری ولتاژ L به خوبی می‌تواند وضعیت استاتیکی و دینامیکی را به طور همزمان در نظر بگیرد.

برای محاسبه شاخص L برای یک سیستم n شینه ابتدا دو دسته شین باید از هم مجزا شوند. یکی باس‌های PQ که همان باس‌های بار هستند، و دیگری باس‌های ژنراتوری که به صورت PV یا اسلک می‌باشند. سیستم انتقال خطی بوده و می‌توان از ماتریس هیبرید H برای نمایش آن استفاده نمود:

$$\begin{bmatrix} V_L \\ I_G \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} I_L \\ V_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{LL} & F_{LG} \\ K_{GL} & Y_{GG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_G \end{bmatrix} \quad (1)$$

در رابطه‌ی (۱) I^G, V^G, I^L, V^L به ترتیب بردار ولتاژ بار، جریان بار، ولتاژ ژنراتورها و جریان ژنراتورها است و $Z_{LL}, K_{GL}, F_{LG}, Y_{GG}$ زیر بخش‌های ماتریس هیبرید H می‌باشند. ماتریس H از ماتریس ادمیتانس سیستم به دست می‌آید. از طرف دیگر برای مصرف‌کننده j ام (عضو α_L) با ولتاژ V_j و جریان I_j و توان ظاهری S_j داریم:

$$V_j = \sum_{i \in \alpha_L} Z_{ji} I_i + \sum_{i \in \alpha_G} F_{ji} V_i \quad (2)$$

رابطه (۲) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$V_j^2 + V_{0j} \cdot V_j^* = \frac{S_j^{+*}}{Y_{jj}^+} \quad (3)$$

که در این رابطه:

$$V_{0j} = - \sum_{i \in \alpha_G} F_{ji} V_i \quad (4)$$

$$Y_{jj}^+ = \frac{1}{Z_{jj}} \quad (5)$$

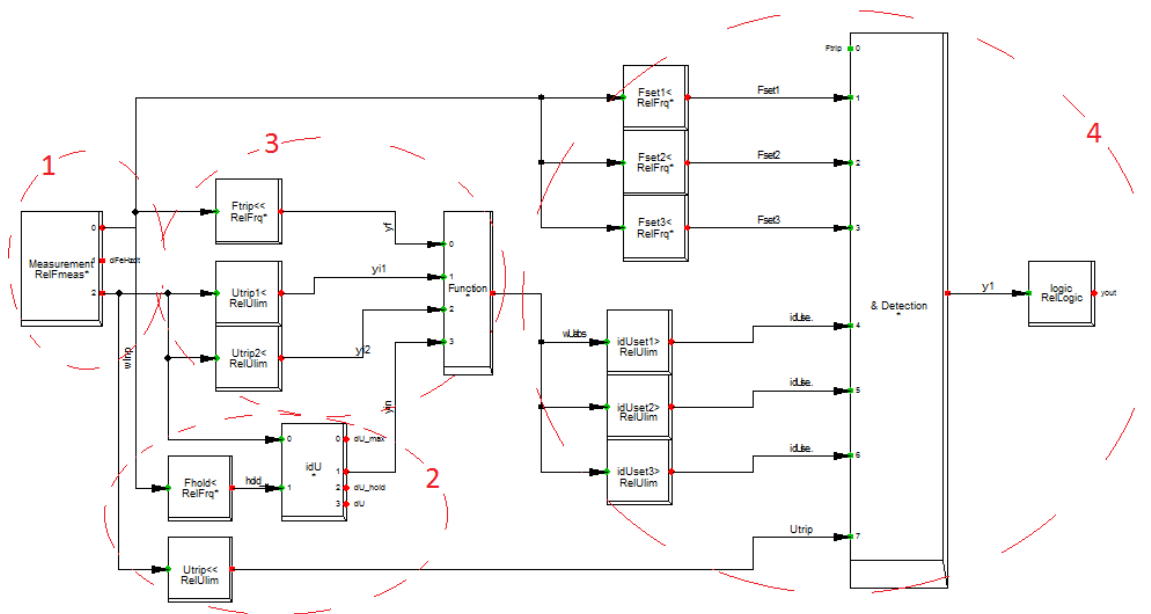
ویژگی‌های این روش‌ها است. اغلب این روش‌ها آن‌چنان مطمئن در مقابل اتفاقات ترکیبی و ناپایداری‌ها عمل نمی‌کنند و دلیل آن عدم توجه به وضعیت ولتاژ و وابستگی به مکان خطاست.

در [۲۶]، اثر تغییرات ولتاژ را در مدل پاسخ فرکانسی سیستم در نظر گرفته شده است. برای این منظور، واحدهای اندازه‌گیری فازور (PMUs) استفاده شده است. اما عملیاتی شدن این روش کمی مشکل است [۷].

در [۲۸] سه الگوریتم مختلف برای انجام حذف بار ترکیبی غیر متمرکز ارائه شده است که در آنها حذف بار ترکیبی با اولویت‌بخشی به بارهای دارای افت ولتاژ زیاد در مدت زمان طولانی انجام می‌شود. نشان داده شده است که این الگوریتم‌ها مطمئن تر از دیگر روش‌های متداول عمل می‌کنند، در این مقاله، روش ارائه شده در [۲۸] با در نظر گرفتن: (۱) منحنی عملکرد بهینه برای رله‌های حذف بار (۲) استفاده از یک شاخص استاندارد برای ارزیابی پایداری ولتاژ ارتقا داده شده است.

۳- روش حذف بار ترکیبی پیشنهادی

در این مقاله به منظور اصلاح عملکرد طرح متداول حذف بار فرکانسی و همچنین بهبود دیگر روش‌های ترکیبی، روش حذف بار ترکیبی بهینه شده ارائه می‌گردد. روش ارائه شده نه تنها حاشیه پایداری مطمئن برای فرکانس و ولتاژ پس از حوادث مختلف ایجاد می‌کند، بلکه مقدار حذف بار را در شبکه به حداقل می‌رساند. با توجه به اینکه تغییرات فرکانس با اندازه‌ی ولتاژ بی‌ارتباط نیست، منطقی است که به جای مستقل در نظر گرفتن فرکانس و ولتاژ ترکیب وضعیت آنها مورد توجه قرار گیرد. در این راستا، مکان و اندازه‌ی حذف بار با مقدار ولتاژ باس‌ها در روش ارائه شده مرتبط است. در روش ارائه شده، از رله‌های دیجیتال استفاده می‌گردد و از مقادیر محلی ولتاژ و فرکانس جهت تصمیم‌گیری برای حذف بار استفاده می‌گردد، به این ترتیب نیازی به ارتباط مخابراتی نیست. در الگوریتم پیشنهادی، علاوه بر در نظر گرفتن حاشیه پایداری ولتاژ امن، میزان حذف بار بهینه از لحاظ اقتصادی مورد توجه قرار گرفته است. در ادامه ابتدا شاخص پایداری ولتاژ مورد استفاده تشریح می‌گردد. سپس اجزای دیگرام رله حذف بار ترکیبی پیشنهادی و الگوریتم تنظیم این رله‌ها ارائه می‌گردد.



شکل ۱: ساختار کلی رله پیشنهادی

که توسط ۲ دو فیلتر مشتق‌گیر و انتگرال‌گیر این شاخص را محاسبه می‌کند. نقش بخش سوم در سرعت بخشیدن به تغییرات (IdU) است. در واقع، توسط ضریبی شیب شاخص را در شرایط وقوع خطاهای بزرگ افزایش می‌دهد. در بخش آخر، تصمیم‌گیری برای حذف بار بر اساس مکان هندسی IdU بر حسب فرکانس و مقایسه آن با معیار حذف بار بهینه‌ی از پیش تعیین شده صورت می‌گیرد و در صورت لزوم دستور قطع بار صادر می‌شود.

۳-۲-۲ محاسبه شاخص ولتاژ (بخش دوم رله)

بر اساس روش ارائه شده در [۲۹]، برای بدست آوردن شاخص IdU از ۲ فیلتر مشتق‌گیر و انتگرال‌گیر استفاده می‌شود (شکل ۲). سیگنال dU میزان کاهش ولتاژ در محل رله نسبت به قبل از حادثه را نشان می‌دهد. مقدار افت ولتاژ در مدت زمان وقوع حادثه با استفاده از ثابت زمانی ۳ ثانیه اندازه‌گیری می‌شود. به کمک این سیگنال، شدت و محل حادثه سریع‌تر تشخیص داده می‌شود، اما حذف بار از نقاطی که در آنها برای شرایط ولتاژ پایین که مدت زمان بیشتری طول می‌کشد باید با حساسیت بالاتری صورت گیرد. بنابراین، سیگنال IdU در تصمیم‌گیری رله برای حذف بار استفاده می‌شود. به دلیل تغییرات خیلی نزدیک به هم شاخص IdU در محل باس‌ها، گاهی ممکن است رله‌ها بیشتر از مقدار مورد نیاز حذف بار کنند. برای حل این مشکل، ایده‌ی قسمت سوم رله به کار گرفته می‌شود.

در روابط فوق V_{0j} نشان‌دهنده ژنراتور معادل است، که مشارکت تمامی ژنراتور ها را نشان می‌دهد. S_j^+ از دو جز تشکیل می‌شود:

$$S_j^+ = S_j + S_j^{corr} \quad (۶)$$

$$S_j^{corr} = \left(\sum_{\substack{i \in \alpha_L \\ i \neq j}} \frac{Z_{ji}^*}{Z_{jj}^*} \cdot \frac{S_i}{V_i} \right) \cdot V_j \quad (۷)$$

واضح است که ولتاژ باس V_j تحت تاثیر توان مصرفی همان باس S_j است. بر اساس معادلات قبلی می‌توان نوشت:

$$L_j = \left| 1 + \frac{V_{0j}}{V_j} \right| = \left| \frac{S_j^+}{Y_{jj}^* \cdot V_j^2} \right| \quad (۸)$$

$$L = \max_{j \in \alpha_L} \{L_j\} = \max_{j \in \alpha_L} \left| 1 - \frac{\sum_{i \in \alpha_G} F_{ji} V_i}{V_j} \right| \quad (۹)$$

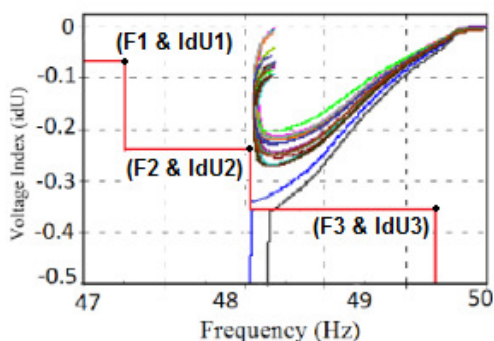
اساس ارزیابی مقدار این شاخص به این ترتیب است: اگر $L < 1$ باشد شرایط پایدار سیستم را از لحاظ ولتاژی بیان می‌کند.

اگر $L \geq 1$ باشد شرایط ولتاژی سیستم ناپایدار است و وضعیت فروپاشی ولتاژ را نشان می‌دهد. هر چه مقدار L به صفر نزدیک‌تر باشد، پایداری ولتاژ بیشتر را نشان می‌دهد.

۳-۲-۳ ساختار رله ی حذف بار ترکیبی بهینه شده

۳-۲-۳-۱ الگوریتم

شکل ۱ بلوک دیاگرام کلی رله‌ی حذف بار ترکیبی بهینه شده را نشان می‌دهد که متشکل از ۴ بخش است. بخش اول فرکانس و ولتاژ باس محل رله را اندازه‌گیری می‌کند. بخش دوم وظیفه‌ی محاسبه‌ی شاخص وضعیت ولتاژ (IdU) را دارد



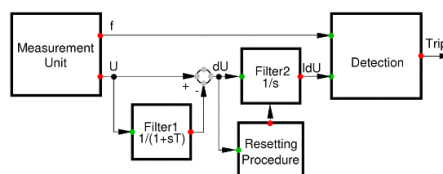
شکل ۴: شاخص L بر حسب فرکانس و مکان هندسی عملکرد رله

شرایط نرمال آغاز می‌شود. پس از رخ دادن حادثه شاخص ولتاژ و فرکانس شروع به کاهش می‌کنند و به سمت خط حذف بار حرکت می‌کنند. با این روش بارهایی که افت ولتاژ بیشتری در مدت زمان طولانی تری دارند سریع‌تر به خط حذف بار نزدیک شده و حذف بار از آن نقاط صورت می‌گیرد.

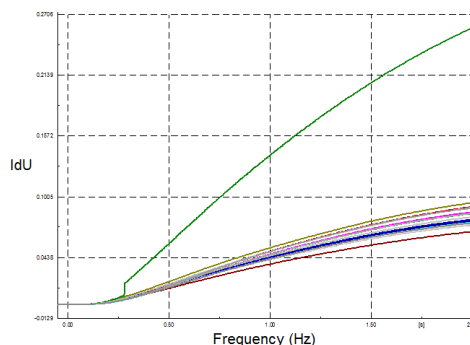
۳-۳- الگوریتم بهینه‌سازی

همان طور که در شکل ۴ مشخص است، مرز ناحیه عملکرد رله‌ها بر اساس ۶ متغیر $F1, IdU1, F2, IdU2, F3, IdU3$ تعیین می‌شود. هدف الگوریتم بهینه‌سازی این است که مقدار این ۶ متغیر را طوری تعیین کند که حذف بار به صورت بهینه انجام شود. در این مطالعه، الگوریتم بهینه‌سازی با کد نویسی به زبان برنامه‌نویسی نرم‌افزار DIGSILENT (DPL) در این نرم‌افزار پیاده‌سازی شده است. کدها به صورت مستقیم با بلوک‌های موجود در ساختار رله‌ها در ارتباط هستند.

شکل ۵ فلوچارت بهینه‌سازی را نشان می‌دهد. ابتدا برای ۶ متغیر بهینه شونده بازه تغییرات در نظر گرفته می‌شود و مقدار متغیرها در بازه‌های مربوطه تغییر داده می‌شوند و خط معیار حذف بار ترکیبی در رله‌ها بر اساس مقادیر در نظر گرفته شده تنظیم می‌گردد. سپس در الگوریتم، دستور شبیه‌سازی انواع مختلفی از خطا داده می‌شود عملکرد طرح حذف بار ترکیبی تنظیم شده در مقابل این خطاها توسط شاخص پایدار ولتاژ، میزان حذف بار، کمینه و میانگین فرکانس و اندازه‌ی ولتاژ نهایی باس‌ها بررسی می‌شود. تابع هدف بهینه‌سازی، برابر مجموع شاخص پایداری اندازه‌گیری شده و مقدار حذف بار است که باید مینیمم شود. وضعیت فرکانس میانگین و اندازه‌ی ولتاژ در تک تک باس‌ها به عنوان قید در نظر گرفته می‌شوند.



شکل ۲: بلوک دیاگرام محاسبه ی IdU بر اساس مرجع [۲۸].



شکل ۳: مثالی از تغییر شیب IdU برای حذف بار سریع‌تر

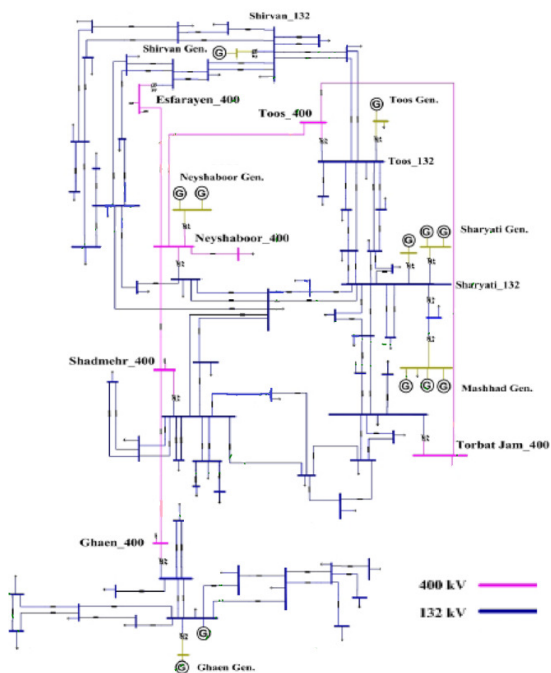
۳-۲-۳- تغییر شیب IdU (بخش سوم رله)

نقش اصلی این قسمت، این است که ابتدا میزان فرکانس و ولتاژ را ارزیابی کند و برای حوادث با شدت تغییرات فرکانس و ولتاژ زیاد حذف بار را سریع‌تر انجام دهد. این بخش اگر مقدار ولتاژ و فرکانس از مقادیر تعیین شده در رله بیشتر افت کند، در سطح اول، شیب تغییرات IdU را ۳۰٪ زیاد می‌کند و در سطح دوم اگر افت زیادتر باشد شیب را تا ۸۰٪ افزایش می‌دهد. در نتیجه وقتی بعضی از باس‌ها شرایط بدتری دارند، در مقایسه با باس‌هایی که با افت کمتری روبرو هستند، زودتر برای حذف بار انتخاب می‌شوند. به عنوان نمونه در شکل ۳ شیب تغییرات IdU برای یکی از باس‌ها عوض شده و حذف بار از این باس سریعتر انجام شده است. بنابراین، امکان حذف بار کمتر و غیر ضروری فراهم می‌شود.

۳-۲-۴- تصمیم‌گیری برای حذف بار ترکیبی (بخش

چهارم رله)

شکل ۴ تغییرات مکان هندسی $F-IdU$ رله‌ها پس از حادثه را به همراه خط معیار حذف بار ترکیبی نشان می‌دهد. وقتی مکان هندسی $F-IdU$ یک رله به ناحیه زیر سمت چپ خط معیار برسد، دستور تریپ صادر می‌شود. در این شکل تغییر روند حرکت مکان هندسی $F-IdU$ باس‌ها پس از انجام حذف بار از دو محل قابل مشاهده است. نقطه‌ی حرکت مکان هندسی $F-IdU$ رله‌ها از گوشه سمت راست بالای شکل در



شکل ۶: نمودار تک خطی شبکه خراسان

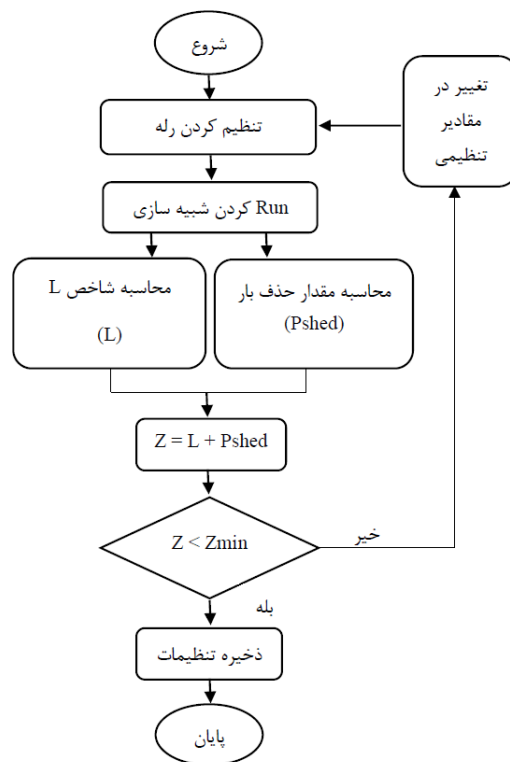
جدول ۱: تنظیمات فرکانس و مقدار حذف بار برای هر پله

مقدار بار حذفی (مگاوات)	فرکانس تنظیمی (هرتز)	شماره پله
۱۵۹	۴۹/۲	۱
۱۸۶	۴۹/۰	۲
۲۰۴	۴۸/۷	۳
۱۹۶	۴۸/۴	۴

مرتبه‌ی سوم از موتور القایی معادل و مدل بار EPRI به ترتیب استفاده شده است. مدل EPRI یک مدل استاتیکی است و می‌تواند وابستگی توان مصرفی بار به ولتاژ و فرکانس را به طور مناسبی مدل کند [۲۸].

۴-۳- طراحی روش UFLS سنتی

به عنوان یک روش پایه، طرح متداول UFLS برای خراسان با استفاده از روش توصیف شده در [۲۸] طراحی شده است. جدول ۱، میزان حذف بار و تنظیمات فرکانس در پله‌های مختلف روش سنتی را نشان می‌دهد. زمان تاخیر رله‌های فرکانسی و بریکرها ۱۰۰ میلی‌ثانیه در نظر گرفته شده است. انتخاب بارهایی که باید در این طرح حذف شوند، طبق محل رله‌های حذف بار واقعی در سیستم است. این مکان‌ها در شبکه پراکنده‌اند.



شکل ۵: فلوچارت بهینه‌سازی

۴-۴- شبیه‌سازی در یک شبکه‌ی بزرگ

۴-۱- سیستم مورد تست

عملکرد روش حذف بار ترکیبی بهینه شده با شبیه‌سازی بر روی شبکه شمال شرق ایران (شبکه‌ی خراسان) تست می‌شود. این شبکه شامل ۷۵ باس با ولتاژهای ۱۳۲kV و ۴۰۰kV با ۲۷۰۰MW تولید و ۳۸۰MW رزور چرخان در پیک بار خود است (شکل ۶). توان نیروگاه‌های اصلی این شبکه که در شمال آن واقع شده‌اند توسط خطوط نسبتاً طولانی به بخش‌های دوردست انتقال پیدا می‌کند. بنابراین این شبکه مستعد ناپایداری ولتاژ و فرکانس است و برای بررسی روش ارائه شده بسیار مطلوب می‌باشد.

۴-۲- مدلسازی سیستم

در این مطالعه از مدل مرتبه‌ی ۸ برای سیستم ژنراتور استفاده شده و مدل تنظیم کننده اتوماتیک (AVR) و گاورنر از مدل‌های استاندارد IEEE هستند [۲۸] و [۲۹]. همچنین، از یک مدل ترکیبی از بار استفاده شده است که رفتار بار را به خوبی مدل می‌کند. این مدل، ترکیبی از بار استاتیکی و دینامیکی موتور است. بخش‌های دینامیکی و استاتیکی بارها در هر باس به ترتیب با استفاده از مدل

جدول ۲: حوادث در نظر گرفته شده در شبکه خراسان و حاشیه توان اکتیو شبکه پس از وقوع آنها

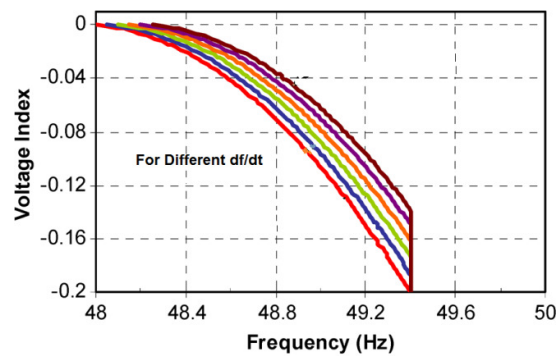
شماره حادثه	شرح حادثه	حاشیه توان اکتیو (%)
۱	خروج نیروگاه توس ۵۷۲ مگاوات	۹
۲	خروج نیروگاه طوس پس از اتصال و خروج خط طوس - تربت جام	۶/۲
۳	خروج نیروگاه طوس هنگام در مدار نبودن خط طوس - تربت جام	۶/۲
۴	خروج نیروگاه طوس پس از اتصال و خروج خط طوس - نیشابور	۰
۵	خروج نیروگاه طوس هنگام در مدار نبودن خط طوس - نیشابور	۰
۶	خروج نیروگاه طوس هنگام در مدار نبودن خط نیشابور - شادمهر	۰
۷	خروج نیروگاه واحدهای مشهد (۲۳۷ مگاوات) ۱/۲ ثانیه بعد از نیروگاه شریعتی (۴۲۴ مگاوات)	۰
۸	خروج نیروگاه نیشابور پس از اتصال و خروج خط طوس - نیشابور	۴/۶
۹	خروج نیروگاه نیشابور هنگام در مدار نبودن خط طوس - نیشابور	۰/۸
۱۰	خروج نیروگاه نیشابور هنگام در مدار نبودن خط طوس - نیشابور	۰/۸
۱۱	خروج نیروگاه نیشابور پس از اتصال و خروج خط نیشابور - شادمهر	۰
۱۲	خروج نیروگاه نیشابور هنگام در مدار نبودن خط نیشابور - شادمهر	۰

می‌شوند و در ادامه ۴۰۰ میلی ثانیه بعد از زمان خروج خط، نیروگاه خارج می‌شود.

برای مقایسه عملکرد روش علاوه بر این دو شاخص ولتاژی، فرکانس کمینه سیستم و مقدار حذف بار برحسب MW برای تمامی خطاها بررسی و مقایسه می‌گردد. نتایج عددی بدست آمده در شکل‌های ۸ (الف) تا (د) نشان داده شده است.

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش متداول، نمی‌تواند شرایط کامل سیستم را به خوبی در نظر بگیرد و در نتیجه عملکرد بسیار نامناسبی در بعضی از خطاها دارد. در روش حذف بار ترکیبی سه بعدی، اگر چه عملکرد رله‌ها برای حفظ شبکه مناسب است، اما به دلیل غیر بهینه بودن روش، گاهی حذف بار اضافه و غیر بهینه انجام می‌دهد.

برخلاف روش سنتی که در بعضی از خطاها از ناپایداری جلوگیری نمی‌کند، روش‌های حذف بار 3-D و ترکیبی بهینه شده، همواره حاشیه توان اکتیو قابل قبولی فراهم می‌سازند. اما، روش ارائه شده سطح بالاتری از حاشیه‌ی توان اکتیو فراهم می‌سازد. علت عملکرد بهتر این روش، انجام حذف بار



شکل ۷: منحنی عملکرد رله 3-D [۲۸].

۴-۴- طراحی روش حذف بار ترکیبی سه بعدی

در این مطالعه، روش حذف بار ترکیبی سه بعدی (3-D) که در [۲۸] معرفی و تست شده است، به عنوان یک روش مینا برای مقایسه با روش پیشنهاد شده شبیه‌سازی شده است. محل قرارگیری رله‌ها همان جایی هستند که رله‌های سنتی قرار می‌گیرند. شکل ۷ منحنی عملکرد رله‌ها در این روش را نشان می‌دهد.

۴-۵- طراحی روش حذف بار ترکیبی منطقی بهینه

بر اساس الگوریتم توصیف شده در بخش ۳-۳، روش حذف بار ترکیبی بهینه پیشنهادی برای شبکه خراسان به صورت بهینه تنظیم و طراحی گردید. در این الگوریتم، بازه‌ی جستجوی مقادیر برای فرکانس بین ۴۷ هرتز و ۵۰ هرتز و برای شاخص ولتاژ از ۰ تا ۰/۵ در نظر گرفته شد. بر این اساس، برای رله‌های ترکیبی پیشنهادی مقادیر بهینه F1، IdU3، IdU2، IdU1، F3، F2، 47.3Hz، 48.6Hz، 49.7Hz، 0.08، -0.23 و -0.43 بدست آمده است.

۵- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، عملکرد سه روش UFLS سنتی حذف بار ترکیبی سه بعدی و روش ترکیبی بهینه شده پیشنهادی در شبکه خراسان مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای بررسی وضعیت ولتاژ شبکه قبل و بعد از اعمال هر روش حذف بار، دو شاخص L و حاشیه‌ی توان اکتیو محاسبه شده‌اند. حاشیه‌ی توان اکتیو شبکه‌ی خراسان برای حادثه‌های جدول ۲ بدون هیچ حذف باری با استفاده از آنالیز PV محاسبه شده و در این جدول آمده است [۲۸]. خطاهای ترکیبی در جدول ۲ که شامل خطای اتصال کوتاه هستند از نوع خطای تک فاز به زمین در وسط خط انتقال بوده و در مدت زمان ۱۰۰ میلی ثانیه پس از جدا شدن خط انتقال از مدار برطرف

به طور کلی، روش حذف بار ترکیبی بهینه پیشنهادی بهترین عملکرد را در مقایسه با دیگر روش‌ها دارد. حذف بار کمتر و حاشیه‌ی پایداری مناسب‌تر به دلیل استفاده از شاخص پایداری ولتاژ L در الگوریتم بهینه‌سازی این روش با دیگر روش‌هاست.

۶- نتیجه گیری

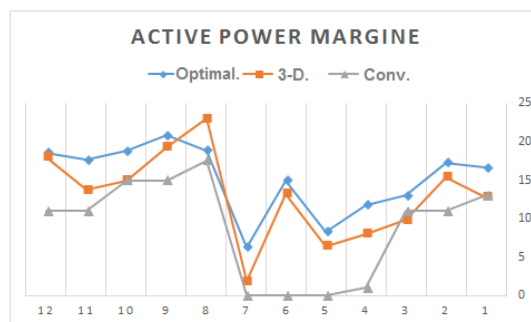
در این مقاله، یک روش حذف بار ترکیبی غیرمتمرکز و بهینه شده با این هدف ارائه شد که در مقابل خطاهای شدید ترکیبی شبکه را حفظ کند. در طرح ارائه شده، تنظیمات رله‌های حذف بار در شبکه شبیه‌سازی شده توسط یک برنامه تغییر داده می‌شود تا بهترین تنظیمات برای انواع حادثه‌ها توسط الگوریتم بهینه‌سازی به دست آید. این تنظیمات با هدف بهینه‌سازی شاخص پایداری ولتاژ L ، کمینه فرکانس و مقدار حذف بار صورت می‌گیرد. عملکرد ولتاژ این روش به ازای حوادث مختلف با روش حذف بار UFLS سنتی و بهترین روش حذف بار ترکیبی ارائه شده در [۲۸] مقایسه گردید. طبق نتایج شبیه‌سازی، روش متداول حاشیه‌ی پایداری ولتاژ قابل قبولی تامین نمی‌کند، در نتیجه در حوادث شدید و ترکیبی شبکه دچار فروپاشی می‌شود. در روش ارائه شده نه تنها سیستم قدرت در شرایط پایدار بهره‌برداری می‌شود، بلکه حاشیه پایداری بهتری نسبت به دیگر روش‌های ترکیبی ارائه می‌دهد، به طوری که مقدار حذف بار و سرعت آن بهینه است. در مقایسه با روش‌های حذف بار ترکیبی قبلی روش ارائه شده دارای ساختار ساده تری برای رله است، بسیار ساده تنظیم می‌شود، ابعاد اقتصادی حذف بار را در نظر می‌گیرد و از شاخص پایداری ولتاژ L برای تعیین تنظیمات بهینه برای رله استفاده می‌کند. این روش به دلیل استفاده از اندازه‌گیری محلی نیازمند ارتباط مخابراتی نیست و در هر شبکه‌ای قابل استفاده است.

تقدیر و تشکر

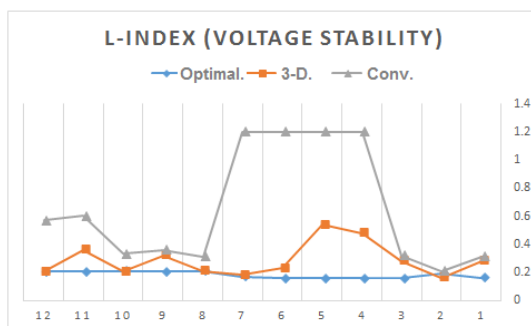
هزینه اجرای این طرح از محل اعتبارات پژوهانه واحد پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز (طرح شماره ۷۹۶) تامین شده است. بدین وسیله از این واحد پژوهشی تقدیر و تشکر می‌شود.

مراجع

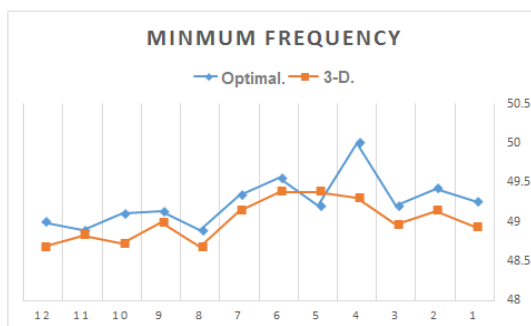
- [1] M. Begovic, D. Novosel, and M. Milisavljevic, "Trends in power system protection and control," Decision Support Syst., vol. 30, no. 3, pp. 269-278, Jan. 2001.
- [2] G. S. Vassell, "Northeast blackout of 1965," IEEE Power Engineering Review, pp. 4-8, Jan. 1991.



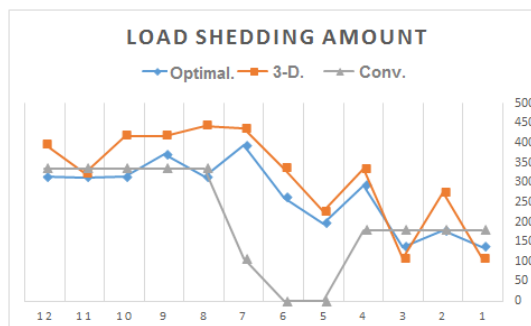
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۸: مقایسه عملکرد روش‌های حذف بار به ازای حوادث مختلف (الف) حاشیه توان اکتیو، (ب) شاخص پایداری ولتاژ L ، (ج) کمینه فرکانس و (د) میزان حذف بار

بهینه در مکان و زمان مناسب با در نظر گرفتن وضعیت ولتاژی شبکه است. در این شرایط، پس از حذف بار سیستم هرگز در معرض ناپایداری ولتاژ نیست.

- [16] P. M. Anderson and M. Mirheydar, "An adaptive method for setting underfrequency load shedding relays," IEEE Trans. Power Syst., vol. 7, no. 2, pp. 647–655, May 1992.
- [17] 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.
- [18] H. Seyedi and M. Sanaye-Pasand, "Design of new load shedding special protection schemes for a double area power system," Amer. J. Appl. Sci., vol. 6, no. 2, pp. 317–327, 2009.
- [19] U. Rudez and R. Mihalic, "Monitoring the first frequency derivative to improve adaptive underfrequency load-shedding schemes," IEEE Trans. Power Syst., vol. 26, no. 2, pp. 839–846, May 2011.
- [20] U. Rudez and R. Mihalic, "Analysis of underfrequency load shedding using a frequency gradient," IEEE Trans. Power Del., vol. 26, no. 2, pp. 565–575, Apr. 2011.
- [21] H. Seyedi and M. Sanaye-Pasand, "New centralised adaptive load shedding algorithms to mitigate power system blackouts," IET Gen., Transm., Distrib., vol. 3, no. 1, pp. 99–114, Jan. 2009.
- [22] K. Mollah and N. C.-K. Nair, "Coordinated strategy for under-voltage and under-frequency load shedding," in Proc. 2010 20th Australasian Universities Power Engineering Conf., Dec. 2010, pp. 1–6.
- [23] A. Li and Z. Cai, "A method for frequency dynamics analysis and load shedding assessment based on the trajectory of power system simulation," in Proc. 3rd Int. Conf. Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies Nanjing, China, Apr. 2008, pp. 1335–1339.
- [24] A.G. Phadke and J. S. Thorp, Synchronized Phasor Measurements and Their Applications. New York, NY, USA: Springer, 2008.
- [25] A. Saffarian, M. Sanaye-Pasand, and H. Asadi, "Performance investigation of new combinational load shedding schemes," in Proc. 2008 POWERCON & IEEE Power India Conf., New Delhi, India, Oct. 2008.
- [26] J. A. Diaz de Leon , and C. W. Taylor. "Understanding and Solving Short-Term Voltage Stability Problems," Proceedings of IEEE/PES 2002 Summer Meeting..
- [27] G. M. Huang, and L. Zhao, *Measurement based Voltage Stability Monitoring of Power system*, Department of Electrical Engineering. Texas A & M University College Station, [Online]. Available: <http://www.pserc.wisc.edu/documents/publications/papers/>
- [28] A. Saffarian and M. Sanaye-Pasand, "Enhancement of Power System Stability Using Adaptive Combinational Load Shedding Methods", IEEE Trans. Power Syst., vol. 26, no. 3, pp. 1010–1020, 2010.
- [29] "DIgSILENT PowerFactory V13, User Manual," DIgSILENT GmbH, 2005.
- [3] P. Kundur et al., IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, "Definition and classification of power system stability," IEEE Trans. Power Systems, vol. 19, no. 3, pp. 1387–1401, Aug. 2004.
- [4] C.W Taylor, "Concepts of undervoltage load shedding for voltage stability", IEEE Trans. Power Deliv., 1992, 7, (2), pp. 480–488
- [5] C., Concordia, L.H Fink... , G Poullikkas.: "Load shedding on an isolated system", IEEE Trans. Power Syst., 1995, 10, (3), pp. 1467–1472
- [6] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, "Definition and classification of power system stability," IEEE Trans. Power Syst., vol. 19, no. 2, May 2004
- [7] Junjie Tang, Junqi Liu, Ferdinanda Ponci, and Antonello Monti, "Adaptive Load Shedding Based on Combined Frequency and Voltage Stability Assessment Using Synchronphasor Measurements" IEEE Trans. Power Syst., vol. 28, no. 2, 2013
- [8] C. J. Mozina, "Undervoltage load shedding—Part 2," Electric Energy T&D Mag., pp. 26–32, Jul.–Aug. 2006.
- [9] 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., Los Angeles, CA, Sep. 1996, pp. 560–565.
- [10] Interim Report of the Investigation Committee on the 28 September 2003 Blackout in Italy, Union for the Coordination of Transmission of Electricity, Belgium, Oct. 3, 2003. [Online]. Available: http://www.pserc.wisc.edu/Resources.htm#Resources_Italy.htm.
- [11] Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations, U.S.-Canada Power System Outage Task Force, Apr. 5, 2004. [Online]. Available: http://www.pserc.wisc.edu/Resources.htm#Resources_NENA.htm.
- [12] 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.
- [13] P. Cote, S. P. Cote, and M. Lacroix, "Programmable load shedding systems, Hydro Quebec experience," in Proc. 2001 IEEE Power Eng. Soc. Summer Meeting, Vancouver, BC, Canada, Jul. 2001, vol. 2, pp. 818–823.
- [14] J. Jung, C. C. Liu, S. L. Tanimoto, and V. Vittal, "Adaptation in load shedding under vulnerable operating conditions," IEEE Trans. Power Syst., vol. 17, no. 4, Nov. 2002
- [15] B. Delfino, S. Massucco, A. Morini, P. Scalera, and F. Silvestro, "Implementation and comparison of different underfrequency load shedding schemes," in Proc. 2001 IEEE Power Eng. Soc. Summer Meeting, vol. 1, Vancouver, BC, Canada, Jul. 2001.