



مطالعات بارزدایی زیر فرکانس برای یک شبکه قدرت بزرگ به هم پیوسته به کمک شبیه‌سازی‌های دینامیکی

Farzan Rashidi / استادیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه هرمزگان / rashidi @ hormozgan.ac.ir

چکیده

مصرف روزافزون انرژی الکتریکی به همراه مسایل اقتصادی و زیست محیطی ناشی از گسترش سیستم‌های قدرت، سبب شده است که شبکه‌های قدرت با بیشترین ظرفیت و بسیار نزدیک به حاشیه پایداری خود مورد بهره‌برداری قرار گیرند. این امر موجب کاهش حاشیه امنیت سیستم‌های قدرت در مقابل انواع ناپایداری‌ها شده و احتمال فروپاشی شبکه را در اثر بروز حوادث مختلف تقویت نموده است. از این رو حفاظت از شبکه‌های قدرت برای حفظ پایداری در مقابله با پیشامدهای مختلف از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. یکی از موارد ناپایداری سیستم‌های قدرت که می‌تواند منجر به فروپاشی‌های متعدد شبکه نیز گردد، برهم خوردن ناگهانی تعادل بین توان اکتیو تولیدی و مصرفی و در نتیجه فروپاشی فرکانسی شبکه می‌باشد. در این میان طرح حفاظتی حذف بار برای مقابله با ناپایداری فرکانسی می‌تواند ابزاری موثر و کارآمد برای جلوگیری از بروز چنین حوادثی باشد. در این مقاله، یک روش کاربردی مبتنی بر افت فرکانس، برای تعیین مقدار بارزدایی زیر فرکانس می‌شود. سپس به کمک نرم‌افزار PSS/E عملکرد آن بر روی شبکه جنوب شرق ایران شبیه‌سازی شده و به کمک نرم‌افزار MATLAB داده‌های حاصل از شبیه‌سازی، آنالیز خواهد شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که طرح پیشنهادی می‌تواند به نحو بسیار موثری از فروپاشی کامل شبکه در صورت بروز حوادث ترکیبی و اغتشاشات ساده، متوسط و شدید جلوگیری کند.

کلمات کلیدی: بارزدایی زیر فرکانس، افت فرکانس، عدم تعادل بین توان مکانیکی و مصرف، شبکه قدرت، حاشیه پایداری

Under Frequency Load Shedding Studies of a Large Interconnected Power Grid Based on Dynamics Simulations

Farzan Rashidi / Faculty of Engineering, University of Hormozgan, Bandar-Abbas, Iran/ rashidi@hormozgan.ac.ir

ABSTRACT

The increasing consumption of electrical energy along with economic and environmental issues arising from the development of power systems cause to operation of power networks with full capacity and close to stability margin. This would reduce the safety margin against various instabilities and possible collapse of power system in the network. The protection of power systems to maintain stability in the face of various events is very important. One of the instability of power systems, which can lead to network collapses, the sudden disruption of the balance between production and consumption that is leads to collapse of the grid frequency. Among, load shedding can be an effective way to prevent the frequency instability. In this paper is proposed a practical approach based on the frequency drop to determine total load shedding (TLS). The performance of proposed method is implemented on Iran South East network using PSS/E and the obtained data are analyzed by MATLAB software. The simulation results show that the proposed scheme could be a very effective way to prevent the network collapse in case of simple, moderate and severe disturbances.

Keywords: Under frequency load shedding, stability margin, frequency drop and imbalance.

مشخص کردن بزرگی اغتشاش و تشخیص آن از نوسانات طبیعی سیستم قدرت صورت می‌گیرد [۵]، ولی به دلایلی همچون پیچیدگی محاسبه دقیق ($\frac{df}{dt}$)، همچنین زمان بر بودن محاسبه مقدار مشتق فرکانس با استفاده از پردازشگرها و روش‌های فیلتر کردن موجود در رله‌های دیجیتال از دیدگاه سیستم قدرت، در حال حاضر این‌گونه طرح‌ها نمی‌تواند جنبه کاربردی و عملی داشته باشند [۶]. در ادامه بدون توجه به جنبه‌های کاربردی روش‌های بارزدایی مبتنی بر مشتق فرکانس، تعدادی از آن‌ها مورد بررسی قرار داده شده‌اند.

در [۷] با استفاده از نرخ تغییرات فرکانس و مدل پاسخ فرکانسی سیستم، مقدار بار حذف شده مورد نیاز جهت بازگرداندن سیستم به شرایط مطلوب محاسبه شده است. یکی از مشکلات این روش، پیچیدگی محاسبه مشخصه‌های مدل و همچنین تغییرات آن‌ها با تغییر نقطه کار سیستم می‌باشد. در [۸] استفاده از الگوریتم حذف بار متمرکز برای بارزدایی فرکانسی پیشنهاد شده است. پارامترهای مورد نیاز الگوریتم بیان شده عبارتند از فرکانس و آهنگ تغییرات فرکانس ژنراتورهای سیستم. هرچند نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند الگوریتم حذف بار متمرکز پیشنهادی می‌تواند در هنگام بروز حوادث متوسط و شدید، با حذف بار از نقاط ضعیف سیستم حاشیه پایداری ولتاژ بیشتری را برای شبکه فراهم نماید ولی با توجه به اینکه در روش بالا تاثیر و اهمیت ولتاژ باس‌ها در مقدار و محل بارزدایی در نظر گرفته نشده است، از این‌رو این طرح نمی‌تواند یک طرح مقاوم در مواجهه با حوادث ترکیبی که منجر به فروپاشی شبکه می‌شوند، باشد. در [۹] روش جدیدی برای بارزدایی بر اساس تغییرات فرکانس و ولتاژ به‌ویژه در نواحی اطراف ژنراتورهای خارج شده از شبکه پیشنهاد شده است. هرچند بر اساس نتایج عددی ارائه شده در مقاله بیان شده، روش پیشنهادی منجر به کاهش بار خطوط و بهبود پروفیل ولتاژ سیستم شده است. با این حال نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام شده در [۱۰] نشان می‌دهند بارزدایی در نواحی نزدیک به ژنراتورهای قطع شده، بر حسب لزوم منجر به کاهش بار کل خطوط شبکه نمی‌شود و بعضاً حذف بار در نقاط دارای بیشترین فاصله از این ژنراتورها می‌تواند منجر به ایجاد حاشیه پایداری بیشتری برای شبکه شود.

در [۱۱] برای پیشامدهای بسیار شدید که با نرخ تغییرات بسیار بزرگ فرکانس مواجه هستند، پیشنهاد شده است که از مشخصه $\frac{df}{dt}$ برای تعیین مقدار بارزدایی استفاده شود. در حالی که در [۱۲] برای حوادثی که با $\frac{df}{dt}$ بزرگ همراه هستند علاوه بر پیشنهاد حذف بار متناسب با مقدار مشتق فرکانس، تاکید شده است که رله‌ها از تنظیمات فرکانسی بالاتری استفاده کنند تا بارزدایی با مشکل مواجه نشود.

در [۱۳] استفاده از آهنگ تغییرات فرکانس به نحوی پیشنهاد شده است که زمان عملکرد رله‌های فرکانسی تابعی از ($\frac{df}{dt}$) باشد. نتایج شبیه‌سازی‌های ارائه شده نشان می‌دهد که چنانچه فقط زمان تاخیر تابعی از نرخ تغییرات فرکانس باشد، این روش تفاوت چندانی با روش حذف بار متداول نخواهد داشت.

در [۱۴] نیز مقایسه‌ای بین روش بارزدایی فرکانسی متداول با روش مبتنی بر نرخ تغییرات فرکانس ($\frac{df}{dt}$) جهت قطع بار بیشتر در پیشامدهای شدید انجام شده است. نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی‌ها حاکی از آن است که برای حوادث بزرگ استفاده از روش مبتنی بر نرخ تغییرات فرکانس می‌تواند مانع از فروپاشی شبکه شود.

در [۱۵] از یک روش ترکیبی برای حفاظت سیستم قدرت در برابر

در شرایط کارکرد نرمال سیستم‌های قدرت، توان تولیدی توسط ژنراتورها برابر با توان مصرفی بارها و تلفات شبکه است. در صورت بروز یک پیشامد در شبکه، تعادل بین توان تولیدی و مصرفی به هم خورده و در صورت کمبود تولید، فرکانس شبکه به سرعت افت می‌کند. بسته به شدت اغتشاش و پیشامد رخ داده، افت فرکانس شبکه می‌تواند باعث اختلال در عملکرد تمام اجزای سیستم قدرت به خصوص ژنراتورها و توربین‌های بخار شده و در نهایت منجر به فروپاشی کل شبکه شود [۱]. در صورتی که اغتشاش و پیشامد رخ داده شدید نباشد، گاورنر تغییرات فرکانس را اندازه‌گیری کرده و با تغییر توان مکانیکی ورودی، توان الکتریکی خروجی را تنظیم و با افت فرکانس مقابله می‌کند. در صورت افزایش ناگهانی بار، بار اضافه شده به شبکه توسط ذخیره چرخان جبران می‌شود. ذخیره چرخان در واقع بخشی از ظرفیت ژنراتورهای متصل به شبکه است که استفاده نشده است. حال چنانچه تمام ژنراتورهای متصل به شبکه در بیشترین ظرفیت نامی خود کار کنند ذخیره چرخان شبکه صفر شده و گاورنر نمی‌تواند اضافه بار شبکه را جبران کرده و از افت فرکانس جلوگیری کند. در پیشامدها و اغتشاشات شدیدتر مثل قطع ژنراتور و یا قطع خطوط ارتباطی مهم شبکه، عدم تعادل بین توان مکانیکی و مصرف بوجود آمده و افت فرکانس بسیار سریع و شدید خواهد بود و برای جبران آن به گاورنرهایی با پاسخ سریع نیاز است. برای جلوگیری از افت فرکانس و فروپاشی شبکه ناشی از حوادث و اغتشاشات شدید و ناگهانی، ابزارها و اقدامات اصلاحی گوناگونی وجود دارد که ساده‌ترین، سریع‌ترین و موثرترین آن‌ها، حذف خودکار بخشی از بار شبکه (بارزدایی) است [۲]. پس از اینکه با بارزدایی زیرفرکانس، از فروپاشی شبکه جلوگیری شد و فرکانس شبکه کنترل گردید، بارهای قطع شده را می‌توان به تدریج به شبکه متصل کرد. فرکانس آغاز حذف، میزان حذف بار و فرکانس در هر مرحله، از مشخصات مهم طرح بارزدایی فرکانسی است که با توجه به میزان حساسیت تجهیزات سیستم (به خصوص توربین‌های بخار) به تغییرات فرکانس و نیز با توجه به مشخصات و ساختار شبکه باید طرح شود. همچنین بارزدایی فرکانسی باید با در نظر گرفتن دینامیک توربین و ژنراتورهای سیستم به‌گونه‌ای صورت گیرد که در برابر نوسانات طبیعی فرکانس، فعال نشده و در عین حال از حساسیت کافی برای حفظ شبکه برخوردار باشد [۳].

روش‌های مختلفی برای بارزدایی فرکانسی معرفی شده است که مرسوم‌ترین آن‌ها روش حذف بار متداول است. در این طرح هرگاه در اثر خروج یک یا چند نیروگاه، فرکانس شبکه بیشتر از حد معینی افت کند، رله‌های فرکانسی که از قبل بر روی تعداد معینی از فیدرهای سیستم نصب شده‌اند، در چندین مرحله و با تاخیرهای زمانی ثابت، مقادیر مشخصی از بار سیستم را به‌نحوی قطع می‌کنند که فرکانس شبکه هرگز به مرز خطر آفرین نرسد [۴].

برای افزایش انعطاف‌پذیری روش بارزدایی فرکانسی متداول، بسیاری از مقالات علاوه بر فرکانس شبکه از نرخ افت فرکانس نیز به‌عنوان یک معیار در تصمیم‌گیری میزان بارزدایی استفاده کرده‌اند. به‌عبارت دیگر به روش معمولی بارزدایی فرکانسی، شاخص نرخ تغییرات فرکانس ($\frac{df}{dt}$) را اضافه نموده‌اند تا برای اندازه‌گیری شدت اغتشاش در لحظه بروز آن استفاده کنند. سپس با روش‌های متفاوتی، آستانه فرکانسی، تعداد مراحل، فرکانس هر مرحله و تاخیر زمانی آن مرحله را مشخص کرده‌اند. هرچند لحاظ کردن نرخ تغییرات فرکانس ($\frac{df}{dt}$) به‌عنوان یک شاخص کمکی در طرح بارزدایی فرکانسی متداول، بیشتر به‌منظور

حوادث کوچک و بزرگ استفاده شده است. طرح بارزدایی ارایه شده در مقاله بیان شده، ترکیبی از روش‌های متمرکز و پخش شده می‌باشد. بدین معنی که برای حوادث کوچک که $(\frac{df}{dt})$ آن‌ها کوچک می‌باشد، استفاده از روش حذف بار متداول پیشنهاد شده و برای حوادث بزرگ که $(\frac{df}{dt})$ آن‌ها از حد مشخصی بیشتر می‌باشد یک سیستم متمرکز طراحی شده که از یک طرف مانع از عملکرد رله‌های حذف بار متداول شده و از طرف دیگر خود الگوریتم به‌طور مستقل بارهایی را از شبکه به‌گونه‌ای قطع می‌کند که مقدار آن‌ها بیشتر از روش متداول باشد. از اشکالات این روش علاوه بر محاسبه مشخصه‌های شبکه با یک روش به نسبت پیچیده، لزوم انجام دوباره این محاسبات به هنگام تغییرات ساختار شبکه و یا گسترش آن است. در [۱۶] برای جلوگیری از ناپایداری ولتاژ و فروپاشی شبکه در نواحی آسیب دیده تحت حوادث و اغتشاشات شدید، از یک روش ترکیبی حذف بار برای اولویت دادن به مکان‌های دارای ولتاژ پایین‌تر استفاده شده و نتیجه آن با طرح حذف بار متداول مقایسه شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان‌دهنده آن است که روش معرفی شده می‌تواند حاشیه توان راکتیو سیستم را افزایش داده و در نتیجه از فروپاشی شبکه جلوگیری نماید. در [۱۷] با هدف نجات شبکه در برابر حوادث ترکیبی و شدید و بهبود توام پایداری فرکانسی و ولتاژی سیستم پس از بروز این‌گونه حوادث، از یک روش حذف بار ترکیبی خطی استفاده شده است. در روش پیشنهادی به‌جای استفاده از یک روش مستقل برای رله‌های حذف بار فرکانسی و روش مستقل دیگر برای رله‌های حذف بار ولتاژی، با استفاده از یک نمودار دوبعدی فرکانس-شاخص ولتاژ، مقادیر فرکانس با شاخص ولتاژ در محل رله ترکیب شده، سپس با توجه به وضعیت ترکیبی از یک خط به‌عنوان معیار تصمیم‌گیری برای حذف بار در نمودار شاخص ولتاژ بر حسب فرکانس استفاده می‌شود. این خط نمودار را به دو ناحیه تقسیم می‌کند که ناحیه بالای خط حالت عادی و ناحیه زیر خط محدوده عملکرد رله را نشان می‌دهد. سپس مکان‌های حذف بار بسته به محل وقوع اغتشاش و ابعاد ولتاژی آن تعیین می‌شوند.

با توجه به اینکه روش پیشنهادی در [۱۷]، به بارهایی که افت ولتاژ بیشتری دارند، فرکانس‌های بالاتری برای بارزدایی اختصاص می‌دهد و در نتیجه سریع‌تر نیز قطع می‌شوند، از این‌رو در مواقع بروز حوادث متوسط یا کوچک که پس از وقوع حادثه افت ولتاژ بارها کم است، فرکانس‌های حذف بار کاهش یافته و بارزدایی با تاخیر انجام می‌شود که این خود می‌تواند منجر به ناپایداری بیشتر شبکه شود. برای رفع مشکل بیان‌شده پیشنهاد شده است در نمودار دو بعدی شاخص ولتاژ بر حسب فرکانس، به‌جای یک خط از یک منحنی سهموی به‌عنوان معیار تصمیم‌گیری حذف بار استفاده شود [۱۸]. هر چند استفاده از منحنی سهموی به‌جای خط، می‌تواند در هنگام بروز حوادثی که افت ولتاژ چندان شدید نبوده و افت فرکانس غالب است، باعث بهبود سرعت بارزدایی شود، ولی انتخاب مناسب معادله سهمی می‌تواند کارایی این روش را با چالش‌هایی همراه سازد.

در تعدادی دیگر از مقالات نیز از روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر حاشیه پایداری استاتیک شبکه، جهت تعیین محل و مقدار بارزدایی استفاده شده است. در این‌گونه روش‌ها، مکان‌های حذف بار و محل‌های نصب رله‌های فرکانسی با توجه به حاشیه پایداری استاتیکی توان راکتیو شبکه در مناطق مختلف آن پس از وقوع پیشامد و قطع بار، بهینه می‌شود. هدف از انجام این کار نیز بهبود شاخص‌های پایداری ولتاژ شبکه است تا با قطع بار در مکان‌های مناسب از بروز اضافه بار در خطوط انتقال و در نتیجه ناپایداری شبکه جلوگیری

شود [۱۹]. در بهینه‌سازی محل حذف بار، تابع هدف می‌تواند شامل هزینه قطع بار، تعادل ولتاژ و حاشیه پایداری استاتیک شبکه پس از حذف بار و یا تعادل شبکه و توان عبوری از خطوط آن باشد. این ملاحظات کمک می‌کند که بارهای با اولویت بالاتر دیرتر قطع شوند و یا محل حذف بار به‌گونه‌ای باشد که به‌زای حوادث مختلف، پس از حذف بار، پخش بار استاتیک شبکه دارای شرایط متعادلی از نظر ولتاژ باس‌ها و توان خطوط ارتباطی باشد. مزیت بهینه‌سازی مکان حذف بار برای کل حوادث آن است که از نصب پراکنده رله‌ها در کل شبکه جلوگیری می‌کند [۲۰]. اشکال عمده طرح‌های بیان شده نیز آن است که بهینه‌سازی محل‌های رله‌گذاری فقط یکبار و برای تمامی پیشامدهای پیش‌بینی شده در شبکه انجام می‌شود، در حالی که مکان‌های مناسب قطع بار در حوادث مختلف متفاوت بوده و از این‌رو محل‌های بدست آمده از این الگوریتم‌ها بهترین مکان حذف بار برای هر حادثه نمی‌باشد [۲۱].

از آنجا که در روش‌های بارزدایی مبتنی بر بهینه‌سازی حاشیه پایداری شبکه، تابع هدف و قیود مساله بیشتر غیرخطی هستند، در بسیاری از مقالات از الگوریتم‌های هوشمند بهینه‌سازی مانند الگوریتم ژنتیک [۲۱]، الگوریتم مورچگان [۲۲] و الگوریتم پرندگان [۲۳] جهت تعیین محل بارزدایی استفاده شده است. در تعدادی دیگر از مقالات نیز برای ساده‌سازی مساله بهینه‌سازی از روش‌های خطی‌سازی تابع هدف و قیود استفاده کرده‌اند [۲۴].

با توجه به اینکه طرح‌ها و به‌خصوص رله‌هایی که بتوانند ایده‌ها و معیارهای بیان شده در مراجع بالا را استفاده کنند یا اصلاً ساخته نشده‌اند و یا اینکه به‌صورت صنعتی در دسترس نمی‌باشند، در این مقاله از روش معمول بارزدایی مبتنی بر افت فرکانس برای جلوگیری از فروپاشی کامل شبکه جنوب شرق ایران در صورت بروز هرگونه اغتشاشی استفاده شده است. از مزایای روش پیشنهادی علاوه بر کاربردی بودن آن، قابلیت جلوگیری از فروپاشی کامل شبکه‌های بزرگ به‌هم پیوسته در هنگام مواجهه با حوادث ترکیبی و اغتشاشات ساده، متوسط و شدید می‌باشد.

در بخش دو، روش پیشنهادی بارزدایی زیر فرکانس مبتنی بر افت فرکانس بیان شده است. در بخش چهار نیز چگونگی پیاده‌سازی طرح پیشنهادی بر روی شبکه جنوب شرق ایران ارایه شده و در بخش پنج نیز با انجام شبیه‌سازی‌هایی کارایی طرح پیشنهادی، مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- روش قدم به قدم طراحی بارزدایی زیر فرکانس مبتنی بر افت فرکانس

بارزدایی زیر فرکانسی یکی از معمول‌ترین روش‌هایی است که برای جلوگیری از افت فرکانس و ناپایداری سیستم پس از اغتشاش‌هایی که منجر به عدم تعادل بین توان مکانیکی و مصرف می‌شوند بکار می‌رود.

فرکانس آغاز حذف، میزان حذف بار و فرکانس در هر مرحله و درصد کلی حذف بار وابسته به مشخصات شبکه بوده و برای هر سیستم قدرت مقداری متفاوت است. از طرفی دیگر به‌دلیل ماهیت دینامیک بار، همیشه شاهد نوسان در فرکانس شبکه خواهیم بود. در ادامه روش قدم به قدم طراحی بارزدایی زیر فرکانس برای یک شبکه قدرت بزرگ و به‌هم پیوسته ارایه می‌شود. از مزایای این روش، لحاظ کردن دینامیک توربین و ژنراتورهای شبکه و در نتیجه جلوگیری از عملکرد رله‌ها در برابر نوسانات طبیعی سیستم می‌باشد. مضاف بر این، طرح پیشنهادی از حساسیت کافی برای حفظ پایداری شبکه نیز برخوردار

است.

$$\frac{\Delta P_{load}}{P_{load0}} = d \cdot \frac{\Delta f}{f_0} \quad (2)$$

به‌عنوان مثال، $d=1.2$ به این معنی است که یک درصد تغییر در فرکانس باعث ۱.۲ درصد تغییر در بار شبکه خواهد شد. با توجه به اینکه در نظر نگرفتن این پارامتر به هنگام طراحی بارزدایی زیر فرکانس باعث بارزدایی بیش از حد نیاز (اضافه بارزدایی) خواهد شد، در نظر گرفتن این پارامتر در محاسبه مقدار بارزدایی ضروری است. برای اینکه فرکانس شبکه به‌ازای عدم تعادل بین توان مکانیکی و مصرف مشخص شده در قدم نخست (imbalance)، به کمتر از فرکانس بحرانی ($f_{critical}$) افت نکند، مقدار بارزدایی مورد نیاز باید از رابطه زیر محاسبه شود [۹]:

$$TLS = \frac{imbalance - d(1 - \frac{f_{critical}}{50})}{1 - d(1 - \frac{f_{critical}}{50})} \quad (3)$$

با توجه به رابطه فوق چنانچه بخواهیم به‌ازای ۵۰ درصد عدم تعادل بین توان مکانیکی و مصرف (imbalance=0.5) در شبکه‌ای با $f_{critical} = 47.5\text{Hz}$ و $d=1.2$ از فروپاشی کامل شبکه جلوگیری کنیم باید ۴۶/۸۱ درصد بار شبکه را به‌صورت خودکار قطع کنیم (TLS=0.4681).

۲-۳- قدم سوم: تعیین تعداد مراحل قطع بار و مقدار باری که در هر مرحله باید قطع شود

تمام مقدار بارزدایی محاسبه شده در قدم دوم را می‌توان در یک مرحله و به‌صورت یکجا انجام داد. عیب این کار این است که به‌ازای اغتشاشات و پیشامدهای سبک، بارزدایی انجام شده بیش از مقدار مورد نیاز خواهد شد (اضافه بارزدایی رخ خواهد داد). به همین دلیل لازم است که بارزدایی مورد نیاز در چندین مرحله انجام شود. از طرف دیگر، چنانچه تعداد مراحل بارزدایی خیلی زیاد باشد ممکن است به‌ازای اغتشاشات و پیشامدهای شدید، بازیابی فرکانس به کندی انجام شده و پایداری شبکه به مخاطره افتد. برای جلوگیری از اضافه بارزدایی و همچنین به مخاطره افتادن پایداری شبکه معمولاً بارزدایی در ۳ تا ۶ مرحله انجام می‌شود [۱۵].

مقدار بارزدایی مورد نیاز در هر مرحله به تعداد مراحل بارزدایی و کل بارزدایی مورد نیاز (TLS) بستگی دارد. بارزدایی کم در مراحل اولیه و زیادتر در مراحل بعدی برای اغتشاشات و پیشامدهای سبک مناسب بوده در حالی که بارزدایی زیاد در مراحل اولیه و کم‌تر در مراحل بعدی برای اغتشاشات و پیشامدهای شدید مناسب‌تر است. روش میانه این است که بارزدایی مورد نیاز به‌صورت یکسان بین تمام مراحل تقسیم شود. به‌عنوان مثال چنانچه تعداد مراحل بارزدایی ۵ مرحله و کل بارزدایی مورد نیاز ۴۶،۸۱ درصد باشد، در هر مرحله ۹،۳۶ درصد از بار شبکه به‌صورت خودکار قطع شود.

۲-۴- قدم چهارم: تعیین فرکانس و تاخیر زمانی هر مرحله از بارزدایی

فرکانسی را که در هر مرحله، بارزدایی باید در آن انجام شود می‌توان با توجه به تعداد مراحل بارزدایی و فرکانس بحرانی شبکه مشخص کرد. به‌عنوان مثال چنانچه تعداد مراحل بارزدایی ۵ و فرکانس بحرانی شبکه ۴۷،۵ هرتز باشد با در نظر گرفتن ۰،۶ هرتز به‌عنوان حاشیه اطمینان بین فرکانس بحرانی و فرکانس مرحله پنجم، فرکانس بارزدایی مرحله پنجم برابر ۴۸،۱ هرتز خواهد شد. برای مراحل بعدی بارزدایی می‌توان از فرکانس ۰،۳ هرتز به‌عنوان حاشیه اطمینان

۲-۱- قدم نخست: تعیین بیشترین مقدار عدم تعادل بین توان مکانیکی و مصرف

در ابتدا باید مشخص شود که به‌ازای چه مقدار عدم تعادل (imbalance) بین توان مکانیکی و مصرف مایل هستیم که از فروپاشی کامل شبکه جلوگیری کنیم. از نظر تئوری، طرح بارزدایی زیر فرکانس را می‌توان به‌گونه‌ای ارایه کرد که به‌ازای هر مقدار عدم تعادل بین توان مکانیکی و مصرفی از فروپاشی کامل شبکه جلوگیری کند. با این حال طراحی بارزدایی زیر فرکانس به‌ازای عدم تعادل بیش از ۵۰ درصد بین توان مکانیکی و مصرف، از نظر عملی توصیه نمی‌شود چرا که ممکن است به‌ازای اغتشاشات و پیشامدهای کوچک، بارزدایی انجام شده بیش از مقدار مورد نیاز شده و علاوه بر اینکه مقدار انرژی تغذیه نشده را افزایش می‌دهد، ممکن است باعث افزایش فرکانس شبکه و در نتیجه صدمه به سایر ژنراتورها شود [۱۴]. به‌طور معمول جلوگیری از فروپاشی شبکه به‌ازای عدم تعادل ۳۳ تا ۵۰ درصد، مقدار مناسبی است. عدم تعادل بین توان مکانیکی و مصرف از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$imbalance = \frac{P_{mech} - P_{load}}{P_{load}} \quad (1)$$

مثلاً چنانچه بخواهیم به‌کمک بارزدایی زیر فرکانس از فروپاشی کامل شبکه در صورت قطع کامل نیروگاهی که ۳۰ درصد از بار شبکه را تامین می‌کند جلوگیری کنیم مقدار عدم تعادل برابر ۳۰ درصد خواهد بود یا اینکه بخواهیم بارزدایی زیر فرکانس را برای قطع دو یا چند نیروگاه که ۴۵ درصد از بار شبکه را تامین می‌کنند طراحی کنیم مقدار عدم تعادل برابر ۵۰ درصد خواهد شد. لازم به‌ذکر است که هر چند ممکن است قطع کامل یک یا چند نیروگاه یک پیشامد محتمل نباشد ولی باید دقت کرد که بارزدایی زیر فرکانس یک سیستم دفاعی در برابر پیشامدهای با احتمال کم و تأثیرات مخرب زیاد است (مثلاً قطع کامل یک نیروگاه گازی به‌دلیل قطع ناگهانی سیستم گازرسانی به نیروگاه).

۲-۲- قدم دوم: محاسبه مقدار باری که باید به‌صورت خودکار قطع شود تا از فروپاشی کامل شبکه جلوگیری گردد

در این مرحله مقدار باری را که باید به‌صورت خودکار قطع شود تا از فروپاشی کامل شبکه به‌دلیل عدم تعادل بین توان مکانیکی و مصرفی جلوگیری شود باید محاسبه کرد. به‌دلیل کمبود تولید در شبکه، فرکانس شبکه افت کرده و چنانچه افت فرکانس زیاد باشد و به زیر فرکانس بحرانی ($f_{critical}$) برسد، رله‌های حفاظتی ژنراتور باعث قطع ژنراتورهای شبکه شده تا از صدمه به آن‌ها جلوگیری گردد. این موضوع خود عدم تعادل بین توان مکانیکی و مصرفی را افزایش داده و فروپاشی شبکه را محتمل‌تر می‌کند. برای جلوگیری از این امر، مقدار بارزدایی انجام شده باید به‌گونه‌ای باشد که فرکانس شبکه همواره بزرگ‌تر از فرکانس بحرانی شود. فرکانس بحرانی در شبکه‌های مختلف متفاوت بوده و به تنظیمات رله‌های زیر فرکانس ژنراتورها بستگی دارد مقدار این فرکانس برای شبکه‌های ۵۰ هرتز معمولاً ۴۷،۵ هرتز است.

به‌دلیل رفتار دینامیکی موتورهای القایی، توان اکتیو مصرفی این موتورها با افت فرکانس کاهش می‌یابد. ضریب کاهش بار شبکه به‌دلیل افت فرکانس (d) وابستگی بین بار و فرکانس را مشخص کرده و به‌صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود [۱۱]:

شبکه مورد مطالعه باید با دقت مناسبی مدل شده و از مدل‌های مناسب بار، سیستم تحریک ژنراتور، گاورنر، پایدارساز سیستم قدرت و غیره بهره گرفت [۱].

۴- طراحی بارزدایی زیر فرکانس مبتنی بر افت فرکانس برای یک شبکه واقعی

با توجه به مطالب بیان شده در گام دوم، در این بخش، طرح بارزدایی زیر فرکانس بر روی یک شبکه واقعی شبکه پیاده‌سازی می‌شود. سیستم مورد مطالعه، شبکه تولید و انتقال جنوب شرق ایران است که ناحیه بسیار وسیعی از ایران را پوشش می‌دهد. شکل (۱) نمودار تک‌خطی این شبکه را نشان می‌دهد. در این شبکه فرض شده است که ۴۰ درصد بار شبکه به دلیل استفاده وسیع از کولرهای گازی در فصل تابستان بصورت موتور القایی بوده و ۶۰ درصد بقیه به صورت بار وابسته به ولتاژ و فرکانس است. سایر اجزای شبکه نظیر ژنراتورها به همراه سیستم تحریک، گاورنر، پایدارساز سیستم قدرت و غیره نیز به نحو مناسبی مدل شده‌اند.

در طرح بارزدایی زیر فرکانس برای شبکه جنوب شرق، هدف این است که به ازای ۵۰ درصد عدم تعادل بین توان مکانیکی و مصرفی، از فروپاشی کامل شبکه جلوگیری گردد. فرکانس بحرانی شبکه برابر ۴۷٫۵ هرتز و ضریب کاهش بار به دلیل افت فرکانس برابر ۱٫۲ در نظر گرفته شده است. با استفاده از مراحل یک تا پنج بیان شده در بخش دو، طرح ارائه شده بصورت جدول (۱) خواهد بود.

جدول ۱: طرح پیشنهادی بارزدایی فرکانس مبتنی بر افت فرکانس برای شبکه جنوب شرق

Stage	Frequency Threshold (Hz)	Percentage of Shed Load
1	49.3	9.4
2	49	9.4
3	48.7	9.4
4	48.4	9.4
5	48.1	9.4

با توجه به این جدول مشخص است که بارزدایی زیر فرکانس در ۵ مرحله انجام شده و در هر مرحله ۹٫۴ درصد بار اولیه شبکه قطع می‌شود تا از فروپاشی کامل شبکه به‌ازای بیشینه ۵۰ درصد عدم تعادل بین توان مکانیکی و مصرفی جلوگیری شود. فرکانس مراحل یک تا پنج نیز با توجه به معیار بیان شده در بخش دو برابر با ۴۹٫۳، ۴۸٫۷، ۴۸٫۴، ۴۸٫۱ و ۴۸٫۰ هرتز خواهد بود. جدول (۲) نتیجه شبیه‌سازی شبکه را به‌ازای پیشامدها و اغتشاشات سبک، متوسط و شدید نشان می‌دهد.

جدول ۲: بارزدایی‌های انجام شده به‌ازای عدم تعادل‌های گوناگون بین توان مکانیکی و مصرفی

Imbalance%	Activated Stage
5	NIL
10	Stage 1
15	Stage 1
20	Stage 2
25	Stage 2
30	Stage 3
35	Stage 3
40	Stage 4
50	Stage 5

استفاده کرد. بدین ترتیب، فرکانس بارزدایی مراحل چهار، سه، دو و یک، به ترتیب برابر ۴۸٫۴ هرتز، ۴۸٫۷ هرتز، ۴۹ هرتز و ۴۹٫۳ هرتز خواهد شد. دلیل اینکه حاشیه اطمینان بین فرکانس بارزدایی مرحله پنجم و فرکانس بحرانی شبکه (یعنی ۰٫۶ هرتز) بیش از فاصله اطمینان بین مراحل مختلف بارزدایی (یعنی ۰٫۳ هرتز) در نظر گرفته شده این است که اطمینان حاصل شود که فرکانس شبکه در هیچ شرایطی به فرکانس بحرانی و یا کمتر از آن افت نمی‌کند چرا که در صورت کاهش فرکانس شبکه به فرکانس بحرانی، حفاظت ژنراتورهای شبکه باعث قطع ژنراتورها شده و عدم تعادل بین توان مکانیکی و مصرف را بیشتر خواهد کرد.

برای تعیین تأخیر زمانی هر مرحله، باید در نظر داشت که تأخیر زمانی طولانی ممکن است باعث نوسانات توان و تأخیر در بازیابی فرکانس شبکه شود. به همین دلیل بارزدایی بدون تأخیر در مقایسه با بارزدایی با تأخیر زمانی مناسب‌تر است.

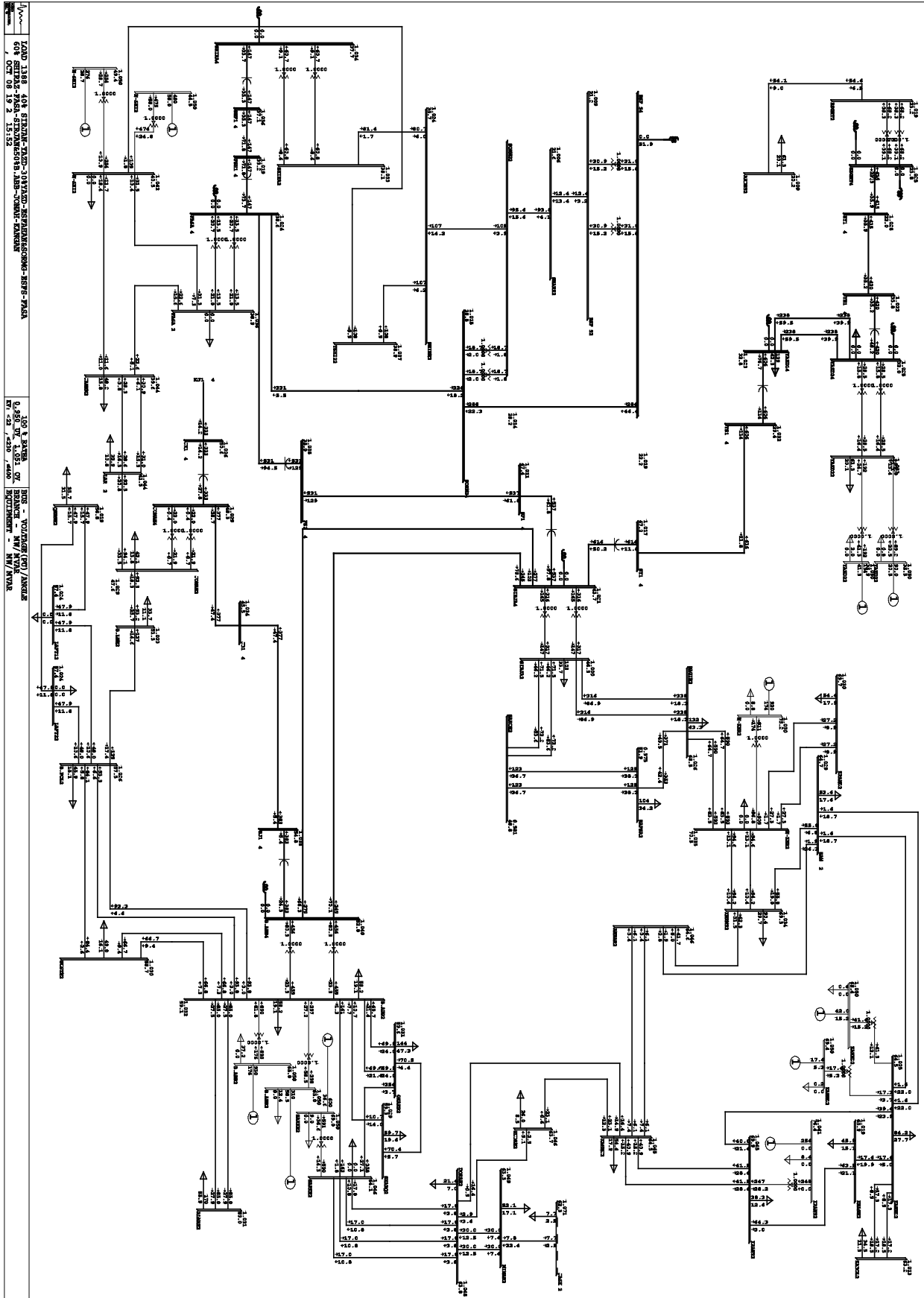
برای درک بهتر موضوع یک پست که دارای ۱۰ فیدر است را در نظر می‌گیریم و فرض می‌کنیم بار هر فیدر ۲ مگاوات بوده و در طرح بارزدایی زیر فرکانس لازم باشد که ۵۰ درصد از بار این پست در ۵ مرحله به شرح زیر قطع شود:

فیدر نخست در فرکانس ۴۹٫۳ هرتز، فیدر دوم در فرکانس ۴۹ هرتز، فیدر سوم در فرکانس ۴۸٫۷ هرتز، فیدر چهارم در فرکانس ۴۸٫۴ هرتز و فیدر پنجم در فرکانس ۴۸ هرتز. چنانچه شدت پیشامد به‌صورتی باشد که فرکانس به ۴۸٫۹ هرتز افت کند رله‌های فرکانسی فیدر نخست و دوم با فاصله بسیار کمی از یکدیگر (در حد چند میلی‌ثانیه که بستگی به نرخ افت فرکانس دارد) این افت فرکانس را حس کرده و باید فیدر نخست و دوم را قطع کنند. چون تأخیر زمانی بین این دو مرحله خیلی کم در نظر گرفته شده است (بدون تأخیر زمانی)، این دو فیدر تقریباً هم‌زمان یا با فاصله زمانی بسیار کمی از هم (در حد چند میلی‌ثانیه) قطع می‌شوند. بنابراین چنانچه پیشامد به قدری شدید باشد که فرکانس از حد تنظیم رله‌های زیرفرکانسی کمتر شود این رله‌ها فعال شده و مستقل از سایر رله‌ها وقتی که تأخیر زمانی آن‌ها که معمولاً در حد صفر تا چند صد میلی‌ثانیه است سبزی شد فیدرهای مربوطه را قطع می‌کنند. منظور از تأخیر زمانی در اینجا تأخیر زمانی است که توسط کاربر در رله اعمال می‌شود و مستقل از زمان پردازش رله و ارسال سیگنال به بریکرها است. بنابراین در شبیه‌سازی‌ها، باید تأخیر زمانی عملکرد بریکر و زمان مورد نیاز برای تصمیم‌گیری رله در نظر گرفته شود [۱۷].

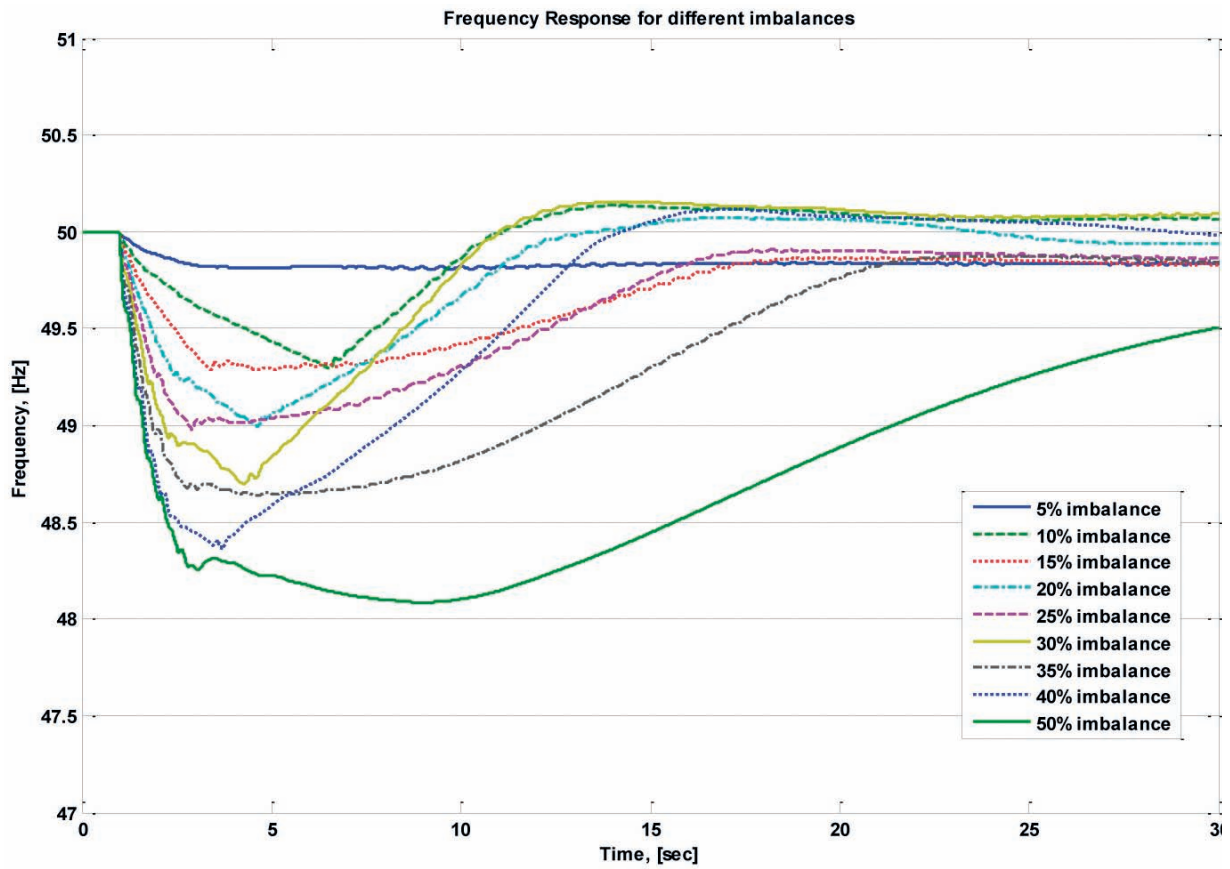
۲-۵- قدم پنجم: توزیع بارزدایی بر روی پست‌ها و فیدرهای شبکه
بارزدایی مورد نیاز باید بر روی پست‌ها و فیدرهای شبکه، توزیع شود. فیدرهایی که بارهای استراتژیک و مهم را تغذیه می‌کنند را باید از طرح بارزدایی خارج کرد تا تغذیه پیوسته و مداوم آن‌ها دچار اشکال نشود. همچنین باید بار فیدرهای انتخاب شده برای بارزدایی زیر فرکانس را در فصول مختلف سال بررسی نمود تا اطمینان حاصل شود که تغییرات بار فیدرهای شبکه در فصول مختلف سال، باعث تغییرات قابل ملاحظه‌ای در کل بار مورد نیاز برای بارزدایی شبکه نمی‌شوند.

۳- بررسی طرح بارزدایی با استفاده از نرم افزارهای شبیه‌سازی شبکه‌های قدرت

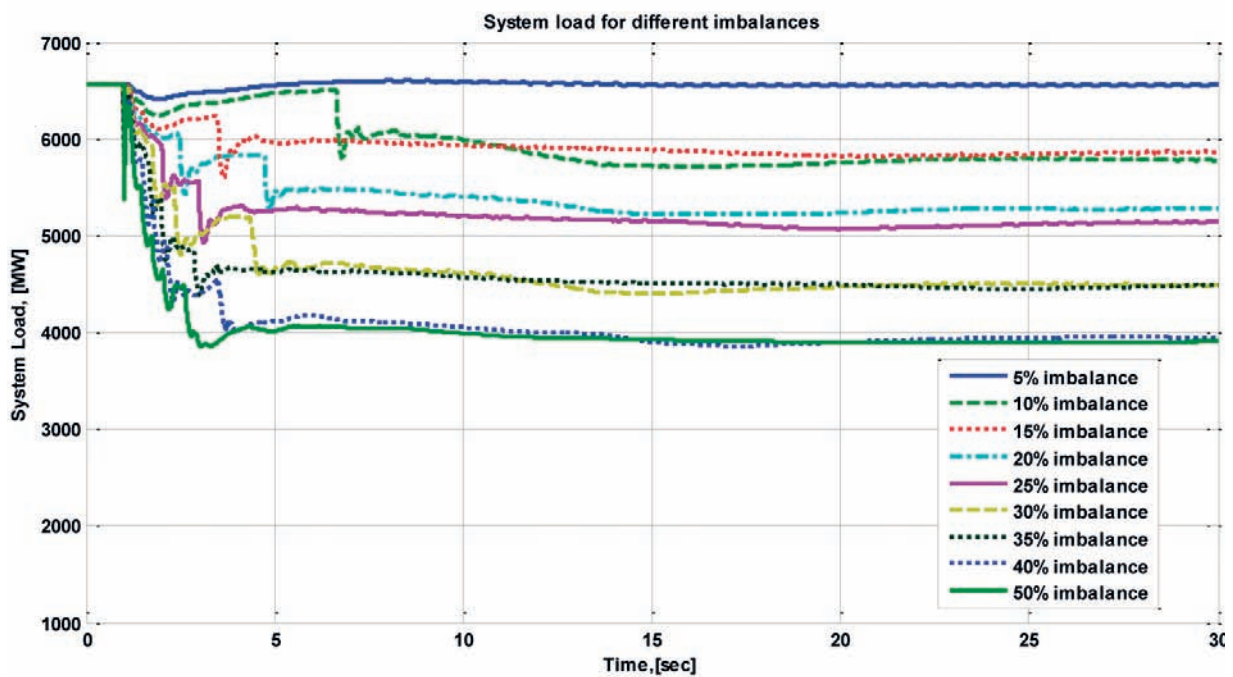
برای اطمینان از موثر بودن طرح بارزدایی زیر فرکانس پیشنهادی، باید آن را به کمک شبیه‌سازی‌های حوزه زمان ارزیابی کرد. بدین منظور



شکل ۱: نمودار تک خطی شبکه جنوب شرق (مربوط به سال ۱۳۸۸)



شکل ۲: نمودار فرکانس شبکه به ازای عدم تعادل‌های مختلف بین تولید و مصرف



شکل ۳: نمودار بار شبکه به ازای عدم تعادل‌های مختلف بین تولید و مصرف

- islanded smart distribution networks," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 5, pp. 886-895, 2014.
- [11] U. Sultana, A. B. Khairuddin, M. Aman, A. Mokhtar, and N. Zareen, "A review of optimum DG placement based on minimization of power losses and voltage stability enhancement of distribution system," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 63, pp. 363-378, 2016.
- [12] T. Jiang, L. Bai, H. Jia, H. Yuan, and F. Li, "Identification of voltage stability critical injection region in bulk power systems based on the relative gain of voltage coupling," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 10, pp. 1495-1503, 2016.
- [13] M. Abedini, M. Sanaye-Pasand, and S. Azizi, "Adaptive load shedding scheme to preserve the power system stability following large disturbances," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 8, pp. 2124-2133, 2014.
- [14] G. Isazadeh, A. Khodabakhshian, and E. Gholipour, "New intelligent controlled islanding scheme in large interconnected power systems," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 9, pp. 2686-2696, 2015.
- [15] M. Sanaye Pasand and H. Seyedi, "Centralized adaptive load shedding methods to enhance power system voltage stability margins," IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, vol. 3, pp. 669-679, 2008.
- [16] P. Le Roux and R. Bansal, "Transient Stability by means of Generator Tripping, Under Frequency Load Shedding and a Hybrid Control Scheme," International Journal of Emerging Electric Power Systems, vol. 19, 2018.
- [17] H. Seyedi and M. Sanaye-Pasand, "New centralised adaptive load-shedding algorithms to mitigate power system blackouts," IET generation, transmission & distribution, vol. 3, pp. 99-114, 2009.
- [18] G. Verbic and F. Gubina, "A new concept of voltage-collapse protection based on local phasors," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, pp. 576-581, 2004.
- [19] K. Mehrabi, S. Afsharnia, and S. Golshannavaz, "Toward a wide-area load shedding scheme: Adaptive determination of frequency threshold and shed load values," International Transactions on Electrical Energy Systems, vol. 28, p. e2470, 2018.
- [20] J. Jallad, S. Mekhilef, H. Mokhlis, and J. A. Laghari, "Improved UFLS with consideration of power deficit during shedding process and flexible load selection," IET Renewable Power Generation, vol. 12, pp. 565-575, 2018.
- [21] Y.-Y. Hong and S.-F. Wei, "Multiobjective underfrequency load shedding in an autonomous system using hierarchical genetic algorithms," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, pp. 1355-1362, 2010.
- [22] W. Nakawiro and I. Erlich, "Optimal load shedding for voltage stability enhancement by ant colony optimization," in Intelligent System Applications to Power Systems, 2009. ISAP'09. 15th International Conference on, 2009, pp. 1-6.
- [23] G. Isazadeh, R.-A. Hooshmand, and A. Khodabakhshian, "Modeling and optimization of an adaptive dynamic load shedding using the ANFIS-PSO algorithm," Simulation, vol. 88, pp. 181-196, 2012.
- [24] T. Shekari, F. Aminifar, and M. Sanaye-Pasand, "An analytical adaptive load shedding scheme against severe combinational disturbances," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 31, pp. 4135-4143, 2016.

با توجه به این جدول، به ازای ۵ درصد عدم تعادل بین توان مکانیکی و مصرف، هیچ یک از مراحل پنج‌گانه بارزدایی زیر فرکانس فعال نشده و بدون قطع بار، فرکانس به محدوده مجاز بر می‌گردد و یا به‌ازای ۲۵ درصد عدم تعادل، برای جلوگیری از فروپاشی شبکه، مرحله دو طرح بارزدایی فعال شده و حدود ۱۸٫۸ درصد بار شبکه قطع شده و پس از آن، فرکانس به محدوده مجاز خود برمی‌گردد. در شکل‌های (۲) و (۳) به ترتیب، نمودار فرکانس و بار شبکه به‌ازای عدم تعادل‌های مختلف بین بار و تولید نشان داده شده است. با توجه به این شکل‌ها مشخص است که طرح بارزدایی زیر فرکانس طراحی شده به خوبی توانسته است از فروپاشی کامل شبکه به‌ازای پیشامدهای سبک، متوسط و شدید جلوگیری کند.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله روش قدم به قدم طرح بارزدایی زیر فرکانس برای یک شبکه قدرت بزرگ به‌هم پیوسته ارائه شده و بر روی یک شبکه واقعی نیز تست شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که این طرح قادر است به ازای حداکثر تا ۵۰ درصد عدم تعادل بین توان مکانیکی و مصرف، از فروپاشی کل شبکه جلوگیری کرده و به‌عنوان یک طرح دفاعی موثر در صورت بروز حوادث و پیشامدهای ناخواسته مد نظر قرار گیرد.

۶- مراجع

- [1] A. Kulkarni, W. Gao, and J. Ning, "Study of power system load shedding scheme based on dynamic simulation," in Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010 IEEE PES, 2010, pp. 1-7.
- [2] N. Sapari, H. Mokhlis, J. A. Laghari, A. Bakar, and M. Dahalan, "Application of load shedding schemes for distribution network connected with distributed generation: A review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 82, pp. 858-867, 2018.
- [3] X. Shan and T. Zhe, "A load shedding method based on the power vacancy sensitivity analysis," in CIGRE 2010 Proceedings, ed, 2010.
- [4] J. Wang, H. Zhang, and Y. Zhou, "Intelligent under frequency and under voltage load shedding method based on the active participation of smart appliances," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 8, pp. 353-361, 2017.
- [5] N. M. Sapari, H. B. MOKHLIS, J. A. Laghari, A. B. AB HALIM, H. Mohamad, and M. R. M. Dahalan, "Load shedding scheme based on frequency and voltage stability for an islanding operation of a distribution network connected to mini-hydro generation," Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, vol. 25, pp. 1852-1863, 2017.
- [6] M. Marzband, M. M. Moghaddam, M. F. Akorede, and G. Khomeyrani, "Adaptive load shedding scheme for frequency stability enhancement in microgrids," Electric Power Systems Research, vol. 140, pp. 78-86, 2016.
- [7] B. Delfino, S. Massucco, A. Morini, P. Scalera, and F. Silvestro, "Implementation and comparison of different under frequency load-shedding schemes," in Power Engineering Society Summer Meeting, 2001, 2001, pp. 307-312.
- [8] T. Shekari, A. Gholami, F. Aminifar, and M. Sanaye-Pasand, "An adaptive wide-area load shedding scheme incorporating power system real-time limitations," IEEE Systems Journal, vol. 12, pp. 759-76, 2018.
- [9] H. Seyedi, M. Sanaye-Pasand, and M. Dadashzadeh, "Design and simulation of an adaptive load shedding algorithm using a real network," in Power India Conference, 2006 IEEE, 2006, p. 5 pp.
- [10] W. Gu, W. Liu, J. Zhu, B. Zhao, Z. Wu, Z. Luo, et al., "Adaptive decentralized under-frequency load shedding for