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

فرزان رشیدی/ 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 این‌رو 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 درنتیجه 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 نرم افزار 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.**

[Downloaded from kiaeee.ir on 2025-08-01]

۱- مقدمه

در شـرایط کارکرد نرمال سیسـتم‌های قدرت، توان تولیدی توسـط ژنراتورها برابر با توان مصرفی بارها و تلفات شـبکه اسـت. در صورت بـروز یک پیشـامد در شـبکه، تعادل بیـن توان تولیـدی و مصرفی به‌هم‌خورده و در صورت کمبود تولید، فرکانس شـبکه به سرعت افت می‌کند. بسـته به شـدت اغتشاش و پیشـامد رخداده، افت فرکانس شـبکه می‌تواند باعث اختلال در عملکرد تمام اجزای سیستم قدرت به‌خصـوص ژنراتورهـا و توربین‌های بخار شـده و در نهایت منجر به فروپاشـی کل شـبکه شـود[۱]. در صورتی‌که اغتشـاش و پیشامد رخداده شـدید نباشـد، گاورنر تغییرات فرکانس را اندازه‌گیری کرده و با تغییـر توان مکانیکی ورودی، تـوان الکتریکی خروجی را تنظیم و بـا افت فرکانس مقابله می‌کند. در صـورت افزایش ناگهانی بار، بار اضافه شـده به شبکه توسـط ذخیره چرخان جبران می‌شود. ذخیره چرخان در واقع بخشـی از ظرفیت ژنراتورهای متصل به شبکه است که استفاده نشده است. حال چنانچه تمام ژنراتورهای متصل به شبکه در بیشـترین ظرفیت نامی‌خود کار کنند ذخیره چرخان شـبکه صفر شـده و گاورنـر نمی‌تواند اضافه بار شـبکه را جبران کـرده و از افت فرکانس جلوگیری کند. در پیشامدها و اغتشاشات شدیدتر مثل قطع ژنراتـور و یا قطع خطوط ارتباطی مهم شـبکه، عدم تعادل بین توان مکانیکی و مصرف بوجود آمده و افت فرکانس بسـیار سـریع و شدید خواهد بود و برای جبران آن به گاورنرهایی با پاسـخ سریع نیاز است. برای جلوگیری از افت فرکانس و فروپاشـی شـبکه ناشـی از حوادث و اغتشاشـات شـدید و ناگهانی، ابزارها و اقدامات اصلاحی گوناگونی وجود دارد که ساده‌ترین، سریع‌ترین و موثرترین آن‌ها، حذف خودکار بخشـی از بار شـبکه (بارزدایی) اسـت[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.

فرکانـس آغـاز حذف، میزان حـذف بار و فرکانس در هـر مرحله، از مشـخصات مهم طرح بارزدایی فرکانسی اسـت که با توجه به میزان حساسیت تجهیزات سیستم (به‌خصوص توربین‌های بخار) به تغییرات فرکانس و نیز با توجه به مشـخصات و ساختار شبکه باید طرح شود. همچنین بارزدایی فرکانسـی باید بـا در نظر گرفتن دینامیک توربین و ژنراتورهـای سیسـتم به‌گونه‌ای صورت گیرد که در برابر نوسـانات طبیعی فرکانس، فعال نشـده و در عین حال از حساسیت کافی برای حفظ شبکه برخوردار باشد[۳].

روش‌های مختلفی برای بارزدایی فرکانسـی معرفی شـده اسـت 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 فرکانسـی که از قبل بـر روی تعداد معینی از فیدرهای سیسـتم نصب شده‌اند، در چندین مرحله و با تاخیرهای زمانی ثابت، مقادیر مشـخصی از بار سیستم را به‌نحوی قطع می‌کنند که فرکانس شبکه هرگز به مرز خطرآفرین 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 فرکانسـی، شـاخص نرخ تغییرات فرکانس $(\frac{df}{dt})$ را اضافه نموده‌اند تا برای اندازه‌گیری شـدت 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 شـاخص کمکی در طرح بارزدایی فرکانسـی متداول، بیشتر به‌منظور مشـخص کردن بزرگی اغتشاش و تشـخیص آن از نوسانات طبیعی سیستم قدرت صورت می‌گیرد[۵]، ولی به دلایلی همچون پیچیدگی محاسـبه دقیق $(\frac{df}{dt})$، همچنین زمان‌بر بودن محاسـبه مقدار مشتق فرکانس با اسـتفاده از پردازشگرها و روش‌های فیلتر کردن موجود در رله‌های دیجیتالی از دیدگاه سیسـتم قدرت، در حال حاضر این‌گونه طرح‌ها نمی‌تواند جنبه کاربردی و عملی داشـته باشـند[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 اسـتفاده از نرخ تغییرات فرکانس و مدل پاسـخ فرکانسـی سیسـتم، مقدار بار حذف شـده مورد نیاز جهت بازگرداندن سیستم به شـرایط مطلوب محاسبه شده اسـت. یکی از مشکلات این روش، پیچیدگی محاسـبه مشـخصه‌های 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 ژنراتورهـای سیسـتم. هرچند نتایج حاصل از شبیه‌سـازی‌ها نشـان می‌دهند الگوریتم حذف بار متمرکز پیشنهادی می‌تواند در هنگام بروز حوادث متوسـط 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 مواجه 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 اسـت. هرچند بر اساس نتایج عددی ارایه شـده در مقاله بیان شده، روش پیشـنهادی منجر به کاهش بار خطوط و بهبـود پروفیل ولتاژ سیسـتم شده است. با این حال نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام شده در[۱۰] نشان می‌دهند بارزدایی در نواحی نزدیک به ژنراتورهای قطع شـده، بر حسـب لزوم منجـر به کاهش بار کل خطوط شـبکه نمی‌شـود و بعضـا حذف بار در نقـاط دارای بیشـترین فاصله از این ژنراتورها می‌تواند منجر به ایجاد حاشیه پایداری بیشتری برای شبکه شود.

در[۱۱] برای پیشـامدهای بسـیار شـدید که با نرخ تغییرات بسیار بزرگ فرکانس مواجهه هسـتند، پیشنهاد شـده است که از مشخصه $\frac{df}{dt}$ f برای تعیین مقدار بارزدایی استفاده شود. در حالی‌که در [۱۲] برای حوادثی که با $\frac{df}{dt}$ بزرگ همراه هسـتند علاوه بر پیشنهاد حذف بار متناسـب با مقدار مشـتق فرکانس، تاکید شـده است که رله‌ها از تنظیمات فرکانسی بالاتری استفاده کنند تا بارزدایی با مشکل مواجه نشود.

در[۱۳] اسـتفاده از آهنگ تغییرات فرکانس به نحوی پیشنهاد شده اسـت که زمان عملکرد رله‌های فرکانسـی تابعی از $(\frac{df}{dt})$ باشد. نتایج شبیه‌سازی‌های ارایه 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] نیـز مقایسـه‌ای بیـن روش بارزدایـی فرکانسـی متداول با روش مبتنـی بر نـرخ تغییرات فرکانس $(\frac{df}{dt})$ جهت قطع بار بیشـتر در پیشـامدهای شـدید انجام شـده اسـت. نتایج عـددی حاصل از شبیه‌سـازی‌ها حاکی از آن اسـت که برای حوادث بزرگ استفاده از روش مبتنی بر نرخ تغییرات فرکانس می‌تواند مانع از فروپاشی شبکه شود.

در[۱۵] از یـک روش ترکیبی برای حفاظت سیسـتم قدرت در برابر

[Downloaded from kiaeee.ir on 2025-08-01]

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 درنتیجه 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 زیرخط 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 درنتیجه 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 درنتیجه 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 به‌ازای 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 تمامی‌پیشامدهای پیش‌بینی شده در شبکه انجام می‌شود، در حالی‌که 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 اصلا 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 درنتیجه جلوگیری از عملکرد رله‌ها در برابر نوسانات طبیعی سیستم می‌باشد. مضاف بر این، طرح پیشنهادی از حساسیت کافی برای حفظ پایداری شبکه نیز برخوردار

[Downloaded from kiaeee.ir on 2025-08-01]

است.

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

در ابتدا باید مشخص شود که به‌ازای چه مقدار عدم‌تعادل (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 عدم‌تعادل بین توان مکانیکی و مصرفی از فروپاشی کامل شبکه جلوگیری کند. با این‌حال طراحی بارزدایی زیر فرکانس به‌ازای عدم‌تعادل 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:

$$imbalance = \frac{P_{mech} - P_{load}}{P_{load}} \qquad (۱)$$

مثلا 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 عدم‌تعادل برابر ۳۰ درصد خواهد بود یا اینکه بخواهیم بارزدایی زیر فرکانس را برای قطع دو یا چند نیروگاه که ۴۵درصد از بار شبکه را تامین می‌کنند طراحی کنیم مقدار عدم‌تعادل 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 تاثیرات مخرب زیاد است (مثلا 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 عدم‌تعادل 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 عدم‌تعادل 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 معمولا 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]:

$$\frac{\Delta P_{load}}{P_{load\,0}} = d \cdot \frac{\Delta f}{f_0} \qquad (۲)$$

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 عدم‌تعادل 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]:

$$TLS = \frac{imbalance - d(1 - \frac{f_{critical}}{50})}{1 - d(1 - \frac{f_{critical}}{50})} \qquad (۳)$$

با توجه به رابطه فوق چنانچه بخواهیم به‌ازای ۵۰ درصد عدم‌تعادل بین توان مکانیکی و مصرف (imbalance=0.5) در شبکه‌ای با d=1.2 و $f_{critical}$ = 47.5Hz 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 معمولا 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 حالی‌که 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

[Downloaded from kiaeee.ir on 2025-08-01]

اســتفاده کرد. بدین‌ترتیب، فرکانس بارزدایی مراحل چهار، ســه، دو و یــک، بــه ترتیب برابــر ۴۸,۴ هرتز، ۴۸,۷ هرتــز، ۴۹ هرتز و ۴۹,۳ هرتز خواهد شــد. 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 شــده این است که اطمینان حاصل شــود که فرکانس شبکه در هیچ شــرایطی به فرکانس بحرانی و یا کمتر از آن افت نمی‌کند چرا که در صورت کاهش فرکانس شبکه به فرکانس بحرانی، حفاظت ژنراتورهای شــبکه باعث قطع ژنراتورها شــده و عدم‌تعادل بیــن توان مکانیکی و مصرف را بیشتر خواهد کرد.

بــرای تعیین تاخیر زمانــی هر مرحله، باید در نظر داشــت که تاخیر زمانی طولانی ممکن اســت باعث نوســانات تــوان و تاخیر در بازیابی فرکانس شبکه شود. به‌همین دلیل بارزدایی بدون تاخیر در مقایسه با بارزدایی با تاخیر زمانی مناسب‌تر است.

برای درک بهتر موضوع یک پست که دارای ۱۰ فیدر است را در نظر می‌گیریــم و فــرض می‌کنیم بار هر فیدر ۲ مــگاوات بوده و در طرح بارزدایی زیر فرکانس لازم باشــد که ۵۰ درصد از بار این پســت در ۵ مرحله به‌شرح زیر قطع شود:

فیدر نخســت در فرکانس ۴۹,۳هرتز، فیدر دوم در فرکانس ۴۹هرتز، فیــدر ســوم در فرکانــس ۴۸,۷هرتــز، فیــدر چهــارم در فرکانــس ۴۸,۴هرتــز و فیــدر پنجــم در فرکانــس ۴۸هرتز. چنانچه شــدت پیشامد به‌صورتی باشــد که فرکانس به ۴۸,۹ هرتز افت کند رله‌های فرکانســی فیــدر نخســت و دوم بــا فاصله بســیار کمــی از یکدیگر (در حــد چند میلی‌ثانیه که بســتگی به نرخ افــت فرکانس دارد) این افــت فرکانس را حس کرده و باید فیدر نخســت و دوم را قطع کنند. چــون تاخیر زمانی بین این دو مرحله خیلی کم در نظر گرفته شــده اســت (بدون تاخیــر زمانی)، این دو فیدر تقریبــا هم‌زمان یا با فاصله زمانی بســیار کمی از هــم (در حد چند میلی ثانیه) قطع می‌شــوند. بنابراین چنانچه پیشــامد به قدری شــدید باشــد که فرکانس از حد تنظیم رله‌های زیرفرکانسی کمتر شود این رله‌ها فعال شده و مستقل از ســایر رله‌ها وقتی کــه تاخیر زمانی آن‌ها کــه معمولا در حد صفر تا چند صد میلی‌ثانیه اســت ســپری شــد فیدرهای مربوطه را قطع می‌کنند. منظور از تاخیر زمانی در اینجا تاخیر زمانی است که توسط کاربر در رله اعمال می‌شــود و مســتقل از زمان پردازش رله و ارسال سیگنال به بریکرها است. بنابراین در شبیه‌سازی‌ها، باید تاخیر زمانی عملکــرد 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 اســتراتژیک و مهــم را تغذیه می‌کنند را باید از طرح بارزدایی خارج کرد تا تغذیه پیوســته و مداوم آن‌ها دچار اشکال نشــود. همچنین باید بار فیدرهای انتخاب شــده بــرای بارزدایی زیر فرکانس را در فصول مختلف ســال بررســی نمود تا اطمینان حاصل شــود که تغییرات بار فیدرهای شــبکه در فصول مختلف سال، باعث تغییــرات قابل ملاحظه‌ای در کل بار مورد نیاز برای بارزدایی شــبکه نمی‌شوند.

۳- بررســی طــرح بارزدایــی بــا اســتفاده از نــرم افزارهای شبیه‌سازی شبکه‌های قدرت

برای اطمینان از موثر بودن طرح بارزدایی زیر فرکانس پیشنهادی، باید آن را به کمک شبیه‌ســازی‌های حوزه زمان ارزیابی کرد. بدین منظور شــبکه مورد مطالعه باید با دقت مناســبی مدل شــده و از مدل‌های مناســب بار، سیستم تحریک ژنراتور، گاورنر، پایدارساز سیستم قدرت و غیره بهره گرفت[۱].

۴- طراحــی بارزدایــی زیر فرکانس مبتنی بــر 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 می شود.

سیســتم مورد مطالعه، شــبکه تولید و انتقال جنوب شرق ایران است که ناحیه بســیار وسیعی از ایران را پوشش می‌دهد. شکل (۱) نمودار تک‌خطی این شــبکه را نشان می‌دهد. در این شبکه فرض شده است که ۴۰ درصد بار شــبکه به‌دلیل اســتفاده وسیع از کولرهای گازی در فصل تابستان بصورت موتور القایی بوده و ۶۰ درصد بقیه به‌صورت بار وابســته به ولتاژ و فرکانس است. سایر اجزای شــبکه نظیر ژنراتورها به‌همراه سیستم تحریک، گاورنر، پایدارساز سیستم قدرت و غیره نیز به‌نحو مناسبی مدل شده‌اند.

در طرح بارزدایی زیر فرکانس برای شــبکه جنوب شــرق، هدف این اســت که به ازای ۵۰ درصد عدم‌تعــادل بین توان مکانیکی و مصرفی، از فروپاشــی کامل شبکه جلوگیری گردد. فرکانس بحرانی شبکه برابر ۴۷,۵ هرتز و ضریب کاهش بار به‌دلیل افت فرکانس برابر ۱,۲ در نظر گرفته شده است. با استفاده از مراحل یک تا پنج بیان شده در بخش دو، طرح ارایه شده بصورت جدول (۱) خواهد بود.

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

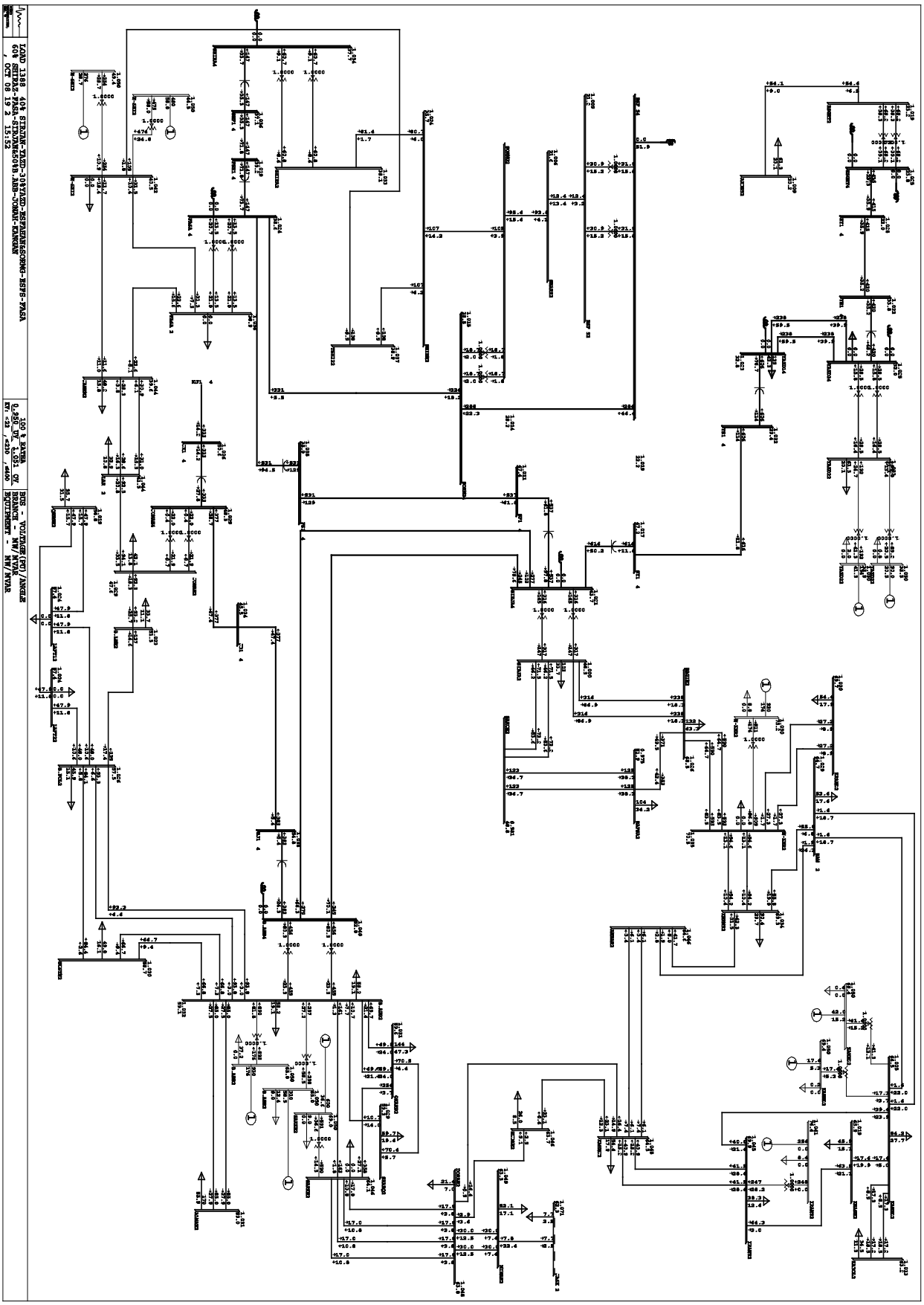
Stage	Frequency Threshold (Hz)	Percentage of Shed Load
1	49.3	9.4
2	49	9.4
3	48.7	9.4
4	48.4	9.4
5	48.1	9.4

با توجه به این جدول مشــخص اســت که بارزدایــی زیر فرکانس در ۵ مرحلــه انجــام شــده و در هر مرحلــه ۹,۴ درصد بار اولیه شــبکه قطع می‌شــود تا از فروپاشــی کامل شــبکه به‌ازای بیشینه ۵۰ درصد عــدم تعادل بین تــوان مکانیکی و مصرفی جلوگیری شــود. فرکانس مراحل یک تا پنج نیز با توجه به معیار بیان شده در بخش دو برابر با ۴۹,۳، ۴۹، ۴۸,۷، ۴۸,۴ و ۴۸,۱ هرتــز خواهد بود. جدول (۲) نتیجه شبیه‌ســازی 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

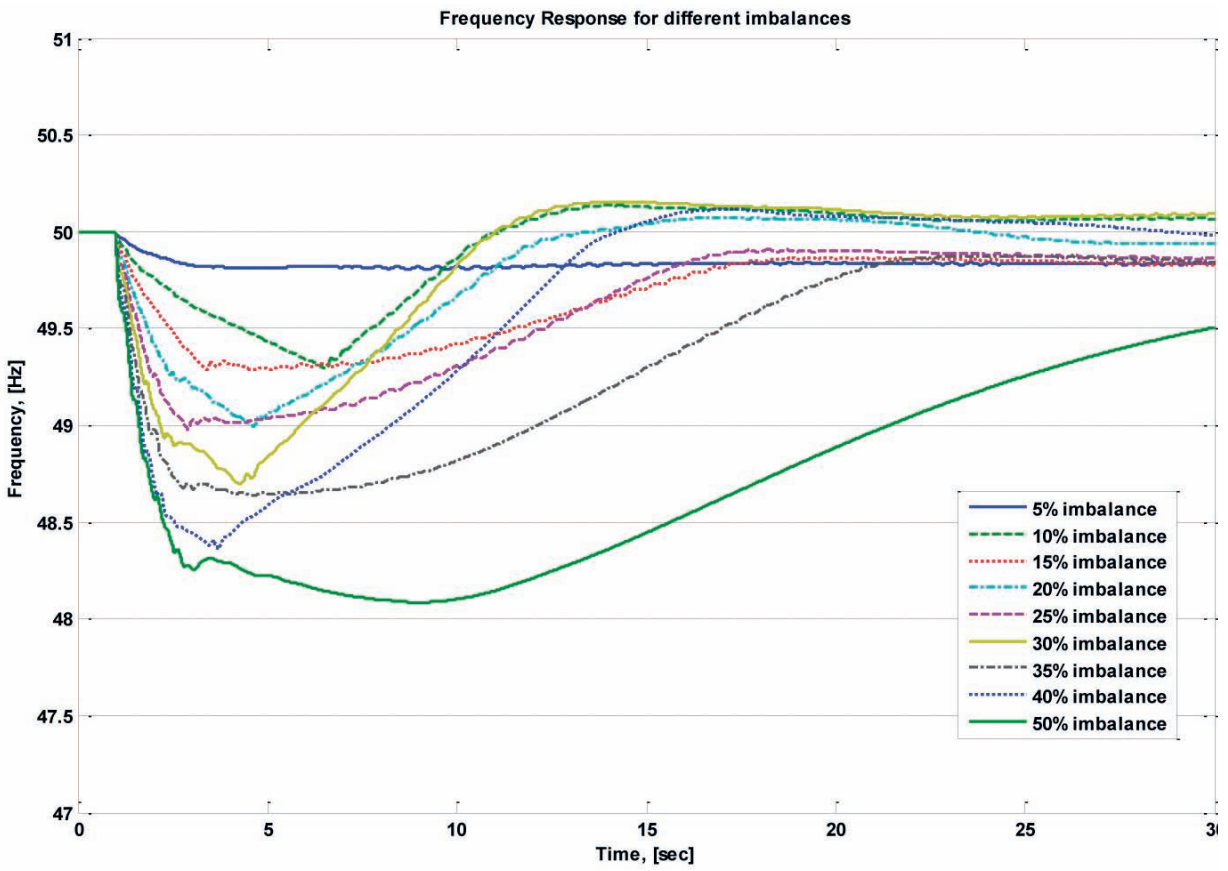
Imbalance%	Activated Stage
5	NIL
10	Stage 1
15	Stage 1
20	Stage 2
25	Stage 2
30	Stage 3
35	Stage 3
40	Stage 4
50	Stage 5

[Downloaded from kiaeee.ir on 2025-08-01]

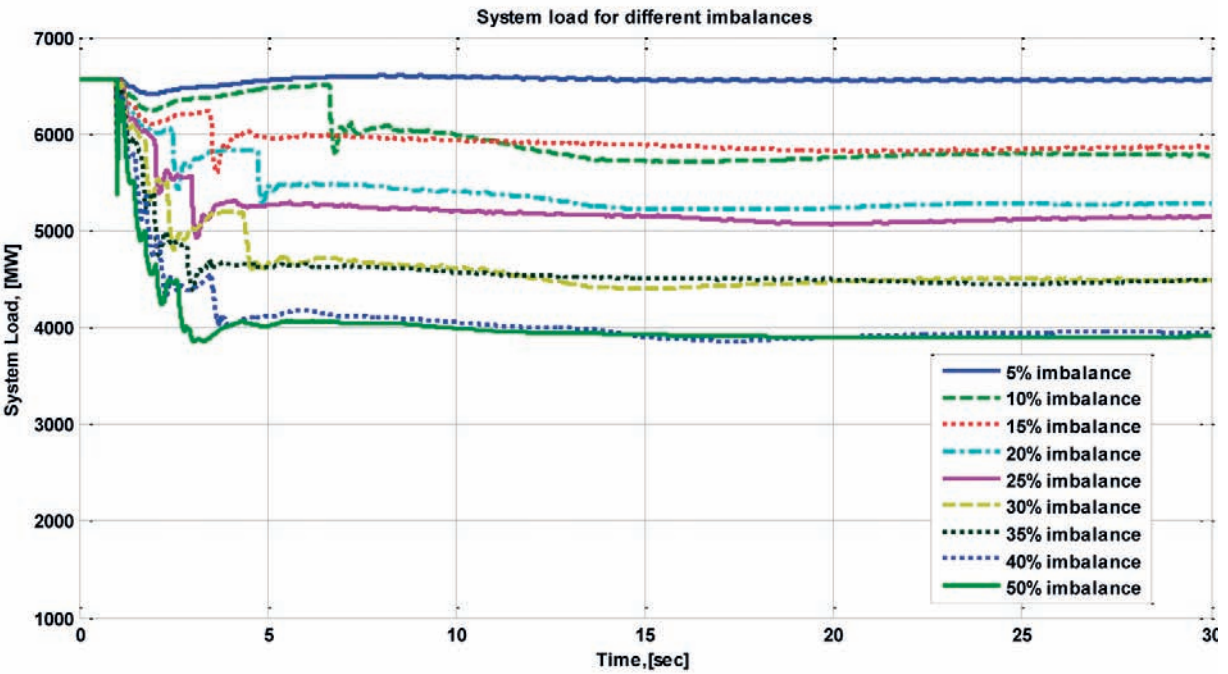


شکل ۱: نمودار تک خطی شبکه جنوب شرق (مربوط به سال ۱۳۸۸)

[Downloaded from kiaeee.ir on 2025-08-01]



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



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

[Downloaded from kiaeee.ir on 2025-08-01]

با توجه به این جدول، به ازای ۵ درصد عدم‌تعادل بین توان مکانیکی و مصـرف، هیچ یـک از مراحل پنج‌گانه بارزدایی زیـر فرکانس فعال نشـده و بدون قطع بـار، فرکانس به محدوده مجاز بـر می‌گردد و یا بـه‌ازای ۲۵ درصد عدم تعادل، برای جلوگیری از فروپاشـی شـبکه، مرحله دو طرح بارزدایی فعال شـده و حدود ۱۸٫۸ درصد بار شـبکه قطع شـده و پس از آن، فرکانس بـه محدوده مجاز خود برمی‌گردد. در شـکل‌های (۲) و (۳) به ترتیب، نمودار فرکانس و بار شبکه به‌ازای عـدم تعادل‌های مختلف بین بار و تولید نشـان داده شـده اسـت. با توجه به این شـکل‌ها مشخص اسـت که طرح بارزدایی زیر فرکانس طراحی شده به خوبی توانسـته است از فروپاشی کامل شبکه به‌ازای پیشامدهای سبک، متوسط و شدید جلوگیری کند.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقالـه روش قدم به قدم طرح بارزدایی زیر فرکانس برای یک شبکه قدرت بزرگ به‌هم پیوسته ارایه شده و بر روی یک شبکه واقعی نیز تست شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که این طرح قادر است به ازای حداکثـر تا ۵۰ درصد عدم‌تعادل بین توان مکانیکی و مصرف، از فروپاشـی 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 CICED 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 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," IEEJ 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.

***

[Downloaded from kiaeee.ir on 2025-08-01]