

ارائه یک طرح حذف بار ترکیبی متمرکز اقتصادی برای خودترمیمی سیستم قدرت

حسین محمدزاده شورا به^۱، کارشناس ارشد؛ علیرضا صفاریان^۲، استادیار؛ محمود جورابیان^۳، استاد

۱- گروه برق - دانشکده مهندسی - دانشگاه شهید چمران اهواز - اهواز - ایران - mohamadzade_hosein@yahoo.com

۲- گروه برق - دانشکده مهندسی - دانشگاه شهید چمران اهواز - اهواز - ایران - a.saffarian@scu.ac.ir

۳- گروه برق - دانشکده مهندسی - دانشگاه شهید چمران اهواز - اهواز - ایران - mjoorabian@scu.ac.ir

چکیده: وقوع خاموشی‌های متعدد در سال‌های اخیر به یکی از مهم‌ترین مشکلات سیستم‌های قدرت تبدیل شده است. این موضوع سبب ارائه طرح‌های حذف بار مختلفی شده است. در میان این طرح‌ها، طرح‌های حذف بار ترکیبی ولتاژی-فرکانسی عملکرد بهتر و مطمئن‌تری در برابر حوادث بزرگ و ترکیبی دارند، چراکه در این حوادث معمولاً پایداری ولتاژ و پایداری فرکانس سیستم به‌طور همزمان به خطر می‌افتد. از سوی دیگر، توجه‌پذیری اقتصادی یکی از مهم‌ترین معیارهای سنجش کارایی هر طرح صنعتی است. بر این اساس، در این مقاله یک الگوریتم حذف بار متمرکز ترکیبی تطبیقی برای خودترمیمی سیستم قدرت ارائه می‌گردد که ضمن حفظ پایداری ولتاژ و فرکانس سیستم، هزینه‌های اقتصادی حذف بار و مقدار توان بار حذف شده را کمینه می‌کند. در این الگوریتم با محاسبه شاخص پایداری ولتاژ شین‌ها به‌صورت برخط و ترکیب آن با قیمت بارها، دو معیار برای رده‌بندی و انتخاب بارهای مناسب جهت حذف بار معرفی می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده روی شبکه استاندارد ۳۹ شینه New England نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم پیشنهادی سبب کاهش هزینه اقتصادی حذف بار و بهبود فرکانس ماندگار سیستم و حاشیه پایداری ولتاژ شین‌ها پس از حادثه در مقایسه با روش‌های حذف بار پیشین می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: خاموشی سراسری، حذف بار متمرکز، حذف بار ترکیبی ولتاژی-فرکانسی، هزینه‌های حذف بار، شاخص پایداری ولتاژ VSRI.

Presentation of An Economical Centralized Combinational Load Shedding Scheme for Self-healing of Power System

H. Mohammadzadeh-Shourabeh¹, MSc., A. R. Saffarian², Assistant Professor, M. Joorabian³, Professor

1- Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, Email: mohamadzade_hosein@yahoo.com

2- Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran, Email: a.saffarian@scu.ac.ir

3- Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran, Email: mjoorabian@scu.ac.ir

Abstract: In recent years, several catastrophic power blackouts have occurred worldwide. The blackout has become a common concern in many power systems. To prevent widespread blackouts, various load shedding schemes have been suggested in the literature. Among these schemes, combinational voltage-frequency load shedding schemes have better technical performance against severe and combinational events, since in such events the voltage stability and frequency stability of the system are usually jeopardized simultaneously. On the other hand, the cost-effectiveness is one of the most important performance measures of any industrial scheme. Therefore, in this paper an adaptive combinational centralized load shedding algorithm is proposed for self-healing of the power systems in which the economic cost of load shedding and the amount of load shed power are minimized while the voltage and frequency stability of the system are kept. In this algorithm, two criteria are developed for selection of appropriate loads for load shedding based on the combination of the online voltage stability indices of busbars and the load prices. The simulation results obtained for the standard New England 39-bus test system show that the proposed algorithm reduces the economical cost of the load shedding and improves the steady state system frequency as well as the voltage stability margin of the buses compared to the previously proposed load shedding methods.

Keywords: Blackout, centralized load shedding, combinational voltage- frequency load shedding, load shedding cost, voltage stability risk index.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۱۷

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۲۹ و ۱۳۹۵/۱۱/۰۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۱/۱۵

نام نویسنده مسئول: علیرضا صفاریان

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اهواز - بلوار گلستان - دانشگاه شهید چمران اهواز - دانشکده مهندسی - گروه برق

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر با خصوصی شدن صنعت برق و با توجه به محدودیت‌های اقتصادی موجود در سر راه توسعه زیرساخت‌های صنعت برق، استفاده بهینه از ظرفیت‌های موجود مورد توجه شرکت‌های برق قرار گرفته است. در نتیجه، سیستم‌های قدرت با ذخیره و حاشیه پایداری کمتر بهره‌برداری می‌شوند؛ بنابراین حاشیه امنیت شبکه‌ها در مقابل انواع ناپایداری‌ها کاهش یافته است. این مسئله تأثیر خود را به صورت خاموشی‌های سراسری متعدد، که در سال‌های اخیر در نقاط مختلف دنیا اتفاق افتاده، نشان داده است. به عنوان مثال می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- خاموشی ۴ نوامبر ۲۰۰۶ شبکه اروپا (UCTE)^(۱) که علت آن بهره‌برداری نامطمئن از شبکه و ناکارآمدی سیستم حذف بار فرکانسی بوده است [۱].
- حادثه ۲۳ سپتامبر ۲۰۰۴ که شبکه‌های جنوب سوئد و شرق دانمارک که بر اثر برنامه‌ریزی نامناسب تعمیرات برخی خطوط دچار ناپایداری ولتاژ شده‌اند و در نهایت خاموشی سراسری رخ داده است [۲].
- حوادث ۳۰ و ۳۱ جولای ۲۰۱۲ در هند که در آن خروج‌های پشت‌سرهم خطوط، تریپ واحدهای ژنراتوری، افت فرکانس و ولتاژ در مناطق شمال غربی، افزایش فرکانس در مناطق غربی شبکه و در نهایت خاموشی سراسری رخ داده است [۳].
- بررسی این خاموشی‌های سراسری نشان می‌دهد که دلایل متعددی از قبیل پرباری خطوط، افت فرکانس، ناپایداری ولتاژ، عملکرد اشتباه سیستم‌های حفاظتی و ... در آن‌ها نقش داشته‌اند.
- مطالعات نشان می‌دهد که به هنگام وقوع برخی حوادث بزرگ و پشت‌سرهم (مانند خروج ژنراتورها یا خطوط) هم تعادل توان اکتیو و هم تعادل توان راکتیو بین تولیدکننده‌ها و مصرف‌کننده‌ها از دست می‌رود و این موضوع سبب ناپایداری فرکانس و کاهش شدید ولتاژ می‌شود. به همین دلیل روش‌های حذف بار ولتاژی (۲UVLS) و فرکانسی (۳UFSL) که به ترتیب فقط پایداری فرکانس و فقط پایداری ولتاژ را در نظر می‌گیرند، به صورت جداگانه قادر به حفظ امنیت سیستم قدرت نمی‌باشند و بهتر است که در چنین مواقعی از یک طرح حذف بار ترکیبی استفاده گردد [۴].

در سال‌های اخیر مطالعات مختلفی در زمینه روش‌های حذف بار انجام شده است که به طور نمونه می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- در [۵] با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO)^(۲) و منحنی P-V یک روش UVLS غیرمتمرکز بهینه‌سازی شده است، اما در این روش، پایداری فرکانس سیستم و هزینه‌های حذف بار در نظر گرفته نشده است.
- در [۶، ۷] دو روش حذف بار فرکانسی تطبیقی برای شبکه‌های جزیره شده شامل ژنراتورهای توزیع (DG)^(۳) ارائه شده و رده‌بندی

بارها برای حذف بار بر اساس ارزش اقتصادی آن‌ها انجام شده است. اما در این روش‌ها پایداری ولتاژ سیستم در نظر گرفته نشده و مکان‌های حذف بار بدون توجه به وضعیت ولتاژی شین‌ها انتخاب شده است.

- در [۸] یک طرح حذف بار ترکیبی متمرکز با استفاده از روش‌های حادثه‌محوری و پاسخ‌محوری ارائه شده است. یکی از شاخص‌های مورد استفاده در این طرح، دامنه ولتاژ بارها پس از حادثه است که شاخص ضعیفی از ناپایداری ولتاژ می‌باشد. شاخص دیگر، حاشیه پایداری Q-V بارها است که به دلیل طولانی بودن زمان محاسبه آن، پیش از حادثه محاسبه می‌شود و لذا تأثیر محل و شدت حادثه بر وضعیت سیستم در این شاخص در نظر گرفته نمی‌شود. همچنین در روش پاسخ‌محوری ارائه‌شده در این مرجع برای جبران اثر کاهش توان بارها پس از حادثه به دلیل افت ولتاژ شین‌ها، توان از دست رفته تخمین زده شده در ضریب ثابت ۱/۰۵ ضرب شده است. با توجه به متغیر بودن اثر حوادث بر ولتاژ بارها، این ضریب ثابت خود خطایی در محاسبه مقدار حذف بار مورد نیاز برای حوادث مختلف می‌تواند ایجاد نماید.
- در [۹] یک طرح حذف بار ترکیبی متمرکز با استفاده از شاخص خطر پایداری ولتاژ (VSRI)^(۴) معرفی شده است، اما در این طرح نیز هزینه‌های حذف بار در اولویت‌بندی بارها لحاظ نشده است. همچنین همانند مرجع [۷] خطای ناشی از ضریب ثابت ۱/۰۵ در آن وجود دارد.
- در [۱۰] یک روش حذف بار غیرمتمرکز ترکیبی برای مقابله با وقوع حوادث پی‌درپی ارائه شده است. در این روش رده‌بندی بارها بر اساس مقدار افت ولتاژ نسبت به لحظه قبل از وقوع حادثه انجام شده و تنظیم فرکانسی هر پله حذف بار بر این اساس تعیین شده است. در این روش ممکن است به هنگام نوسان‌های شدید ولتاژ، تعیین تنظیم فرکانسی مناسب مقدور نباشد و سبب عملکرد اشتباه رله شود. همچنین، در این روش امکان انجام حذف بار به میزان کمتر یا بیش‌تر از مقدار مورد نیاز به دلیل غیرمتمرکز بودن طرح وجود دارد.
- در [۱۱] یک طرح برای میراسازی نوسانات بین ناحیه‌ای با استفاده از قطع برخی ژنراتورها و بارها و منطبق بر منطق فازی ارائه شده است. مشکل این طرح این است که هیچ اشاره‌ای به نحوه حذف بار نشده است.
- یکی از مهم‌ترین مشکلات طرح‌های پیشین این است که به طور معمول هزینه‌های مربوط به خاموشی بارها را در نظر نگرفته‌اند و این فاکتور مهم در انتخاب مکان مناسب جهت حذف بار لحاظ نشده است. در این مقاله یک روش حذف بار متمرکز، ترکیبی و تطبیقی با استفاده از شاخص پایداری ولتاژ VSRI به منظور بهبود همزمان حاشیه پایداری ولتاژ، پایداری فرکانس و کاهش هزینه‌های حذف بار ارائه می‌گردد. در ادامه، ابتدا شاخص پایداری ولتاژ VSRI، هزینه‌های حذف بار و الگوریتم

که پارامتر Δt معرف فاصله موجود در قانون انتگرال ذورنقه می باشد که در اینجا $\Delta t = 1 \text{ sec}$ در نظر گرفته شده است [۱۲].

۲-۲- حد پایداری دینامیکی ولتاژ

با استفاده از شاخص VSRI می توان یک ارزیابی مناسب در مورد پایداری ولتاژ در یک بازه زمانی خاص به دست آورد؛ به عبارت دیگر اگر در انتهای یک بازه زمانی خاص، t_{set} ، کمترین مقدار منفی VSRI کل سیستم، $VSRI_{min}$ ، از یک مقدار آستانه مشخص، $VSRI_{th}$ ، کم تر باشد $(VSRI_{min} < VSRI_{th})$ ، ولتاژ سیستم به سمت ناپایداری می رود و حذف بار باید انجام گردد. اما در صورتی که $VSRI_{min} > VSRI_{th}$ باشد، ولتاژ سیستم پایدار می باشد. مقدار مناسب برای t_{set} برابر کوتاه ترین مدت زمانی است که منحنی های VSRI شین ها پس از رخداد خطا، به مقادیر تقریباً ثابت جدید می رسند. به طور کلی، $VSRI_{th}$ و t_{set} به ویژگی های سیستم مانند مقدار و نوع جبران سازی توان راکتیو، مشخصه بار و ... بستگی دارند و در این مقاله بر اساس مطالعات شبیه سازی انجام شده بر روی شبکه مورد بررسی و نیز مقادیر به دست آمده برای این پارامتر در [۹]، $t_{set} = 5 \text{ sec}$ و $VSRI_{th} = -0.2 \text{ pu}$ در نظر گرفته می شود.

۳- هزینه حذف بار

با یک تقریب مناسب قیمت کل هر بار در هر ساعت را می توان به صورت یک تابع درجه دو از توان مصرف شده توسط آن بار تعریف نمود [۱۳]. به منظور پیرویت ($p.u.$) کردن این تابع، می توان مقدار بیشترین قیمت بین تمام بارها را به عنوان مبدا در نظر گرفت (روابط (۶) و (۷)).

$$cost_j = a' + b' \cdot P_j + \frac{c'}{2} \cdot P_j^2; (\$/h) \quad (6)$$

$$COST_j = \frac{cost_j}{cost_{max}}; (p.u.) \quad (7)$$

که $cost_j$ قیمت کل بار j ام بر حسب $\$/h$ ، P_j کل توان بار j ام بر حسب MW، $COST_{max}$ بیشترین قیمت بین تمام بارها بر حسب $\$/h$ و $cost_j$ قیمت کل بار j ام بر حسب p.u. است. مقادیر ضرایب a' ، b' و c' در جدول پ-۱ بخش پیوست آمده است [۱۳].

۴- الگوریتم پیشنهادی

این الگوریتم با فرض در دسترس بودن ولتاژ شین های دارای بار در سطح انتقال با استفاده از PMU ها و بر پایه سیستم کنترل و نمایش پهنای گسترده (WAMCS) قابل پیاده سازی می باشد. در این الگوریتم، ابتدا توان تولیدی از دست رفته به روش حادثه محوری تخمین زده می شود. برای این منظور، توان تولیدی ژنراتورها و توان عبوری از خطوط رابط مهم شبکه و تخمین بار کل سیستم هر چند دقیقه یکبار در سیستم کنترل ثبت می گردند و بر اساس این مقادیر، هر بار مقدار P_{LA} محاسبه می گردد. بیشترین مقدار عدم تعادل توان اکتیو می باشد که به ازای آن فرکانس مرکز اینرسی سیستم کم تر از 58 Hz در سیستم با فرکانس استاندارد 60 Hz (کم تر از 4 Hz در سیستم با فرکانس استاندارد 50 Hz) نشود.

پیشنهادی معرفی می شود، سپس نتایج حاصل از شبیه سازی الگوریتم پیشنهادی روی شبکه نمونه مورد آزمایش آورده شده است.

۲- ارزیابی پایداری ولتاژ شین های سیستم

به طور معمول ناپایداری ولتاژ در ابتدا به صورت افت ولتاژ اندک و در پی آن افت سریع ولتاژ در نقطه فروپاشی ولتاژ نمایان می گردد. اندازه و شیب تغییرات ولتاژ به دلیل وجود نوسانات ولتاژ و کمبود زمان برای جلوگیری از فروپاشی ولتاژ در هنگام کاهش شدید ولتاژ نمی توانند معیار مناسبی برای آشکارسازی ناپایداری ولتاژ باشد. در واقع استفاده از یک مقدار آستانه اندازه ولتاژ برای بررسی ناپایداری ولتاژ ممکن است سبب نتیجه گیری اشتباه و فروپاشی سیستم شود؛ لذا باید به دنبال یک معیار پایداری ولتاژ بود که قبل از فروپاشی ولتاژ، خطر فروپاشی را احساس کرده و نقاط ضعیف سیستم را مشخص کرده و انجام اقدامات کنترلی لازم مانند حذف بار را ممکن سازد [۱۲]. بدین منظور، در ادامه شاخص پایداری ولتاژ VSRI معرفی می گردد.

۲-۱- معیار پایداری ولتاژ VSRI

شاخص پایداری ولتاژ VSRI با استفاده از مقدار مؤثر ولتاژ شین ها به دست می آید و وضعیت پایداری ولتاژ هر یک از شین های سیستم را به صورت برخط^۲ مشخص می کند [۹، ۱۲]. از آنجا که این شاخص بر اساس انتگرال افت ولتاژ شین ها می باشد، لذا شدت و زمان افت ولتاژ هر شین در تعیین وضعیت ولتاژی آن شین تأثیر می گذارد و این موضوع به انتخاب مکان مناسب حذف بار کمک می نماید. اگر مقادیر ولتاژ یک شین بار خاص که توسط یک واحد اندازه گیری فازور (PMU)، با نرخ نمونه برداری 30 frame/sec برای سیستم 60 Hz (یا نرخ نمونه برداری 25 frame/sec برای سیستم 50 Hz) اندازه گیری شده اند به صورت $y = [y_1, y_2, y_3, \dots, y_M]^T$ باشد؛ مراحل محاسبه VSRI به صورت زیر می باشد:

الف) محاسبه مقدار متوسط ولتاژ شین های دارای بار در j -امین نمونه ولتاژ (v_j) از N نمونه موجود اندازه گیری شده توسط PMU (در اینجا فرض می شود که $N=60$ باشد) به صورت روابط (۱) و (۲).

$$v_j = \sum_{k=1}^j \frac{y_k}{j}; j=1, 2, 3, \dots, N \quad (1)$$

$$v_j = \sum_{k=j-N+1}^j \frac{y_k}{N}; j=N+1, N+2, \dots, M \quad (2)$$

ب) محاسبه درصد اختلاف d_j بین مقادیر نمونه های اندازه گیری شده ولتاژ v_j و مقدار متوسط محاسبه شده v_j ، با استفاده از رابطه (۳).

$$d_j = \frac{v_j - v_j}{v_j} \times 100; j=1, 2, 3, \dots, M \quad (3)$$

پ) محاسبه معیار VSRI در j امین نمونه موجود بر اساس روابط (۴) و (۵).

$$VSRI_j = \sum_{k=1}^j \frac{d_k + d_{k-1}}{2j} \times \Delta t; j=1, 2, 3, \dots, N \quad (4)$$

$$VSRI_j = \sum_{k=1}^j \frac{d_k + d_{k-1}}{2N} \times \Delta t; j=N+1, N+2, \dots, M \quad (5)$$

(به طور مثال در محدوده ۵۸Hz تا ۵۹/۵Hz در سیستم ۶۰Hz)، اپراتورهای شبکه می‌توانند با اجرای فرامین حذف بار دستی یا با استفاده از رله‌های حذف بار فرکانسی ساده دارای تأخیر زمانی زیاد یا با تغییر تنظیمات نیروگاه‌ها و یا با وارد کردن واحدهای تولیدی جدید، فرکانس سیستم را به محدوده کار عادی برگردانند.

برای تعیین مقدار P_{LD} بدین صورت عمل می‌گردد که با تغییر ΔP مربوط به خروج هر ژنراتور یا خط در مدل گسترده و دقیق سیستم مورد مطالعه، کم‌ترین مقدار ΔP که به ازای آن فرکانس به ۵۸Hz، در سیستم ۶۰Hz (یا ۴۸Hz در سیستم ۵۰Hz) برسد، به دست می‌آید که این مقدار همان P_{LD} خواهد بود. لازم به ذکر است که در برخی مراجع نظیر [۹] برای محاسبه P_{LD} از مدل مرتبه پایین پاسخ فرکانسی سیستم (مدل SFR^۱ [۱۶]) استفاده می‌گردد که در آن اثر موقعیت و فاصله ژنراتور یا خط خارج شده بر ولتاژ شین‌های سیستم و وابستگی توان مصرفی بارهای سیستم به تغییرات ولتاژ ایجاد شده لحاظ نمی‌گردد.

پس از تعیین مقدار ΔP ، با توجه به نوع حادثه، اقدامات اصلاحی متفاوتی انجام می‌شود که در ادامه تشریح می‌گردند.

۴-۲- تعیین مکان و مقدار حذف بار

۴-۲-۱- حادثه نوع اول

این دسته شامل حوادثی می‌شود که در آن‌ها $\Delta P > P_{LD}$ است. از آنجاکه شین دارای افت ولتاژ بیش‌تر و هزینه حذف بار کم‌تر، اولویت بیش‌تری برای حذف بار دارد، لذا می‌توان این دو ویژگی را به صورت (۸) با همدیگر ترکیب نمود. در این نوع حوادث ابتدا بارها بر اساس (۸) رده‌بندی می‌شوند. سپس، قطع بارها به ترتیب از بیش‌ترین به کم‌ترین مقدار ΔV_j^{equal} در فرکانس $f_{set} = 59.5\text{Hz}$ در سیستم ۶۰Hz، $f_{set} = 49.5\text{Hz}$ در سیستم ۵۰Hz، انجام می‌گردد به طوری که کل توان حذف بار برابر با مقدار توانی شود که از (۹) به دست می‌آید.

$$\Delta V_j^{equal} = A \times \Delta V_j + B \times (1 - \text{COST}_j) \quad (8)$$

$$P_{shed1} = (\Delta P - P_{LD}) \quad (9)$$

که ΔV_j افت ولتاژ در شین بار z ام نسبت به قبل از وقوع حادثه بر حسب pu، ΔV_j^{equal} عبارتی است که ترکیب افت ولتاژ و قیمت کل بار z ام را مشخص می‌کند. A و B ضرایب ثابتی هستند که به ترتیب اهمیت افت ولتاژ و قیمت کل بار z ام را در تعیین مکان حذف بار، مشخص می‌کنند و در اینجا برابر با یک می‌باشند.

پس از گذشتن زمانی معادل t_{set} از اولین مرحله حذف بار، وضعیت پایداری ولتاژ سیستم بر اساس سنجش VSRI ارزیابی می‌گردد؛ بدین صورت که در زمان t_{set} ثانیه پس از اولین مرحله حذف بار، اگر $VSRI_{min} < VSRI_{th}$ باشد، برای جلوگیری از ناپایداری مرحله بعدی حذف بار انجام می‌گردد. برای این منظور، پس از رده‌بندی بارها بر اساس رابطه (۱۰)، مقداری بار بر اساس رابطه (۱۱) به ترتیب از بیش‌ترین به کم‌ترین مقدار $VSRI_j^{equal}$ قطع می‌گردد.

پس از هر حادثه، سیگنال خروج ژنراتورها و خطوط رابط شبکه بدون وقفه به مرکز کنترل سیستم ارسال می‌گردد و در آنجا بر اساس مقدار توان ثبت‌شده آن‌ها قبل از حادثه، مقدار عدم تعادل توان اکتیو ناشی از وقوع حادثه تخمین زده می‌شود. به طور مثال اگر یک ژنراتور با توان اکتیو تولیدی P_g از سیستم خارج شود، مقدار عدم تعادل توان اکتیو برابر با P_g است. در این الگوریتم، بر اساس مقدار عدم تعادل توان اکتیو، حوادث به دو دسته تقسیم شده و مقدار توانی که باید حذف شود، محاسبه می‌شود؛ سپس با استفاده از شاخص VSRI، افت ولتاژ و هزینه حذف بار، شین‌های مناسب برای حذف بار انتخاب می‌شوند. در ادامه جزئیات الگوریتم پیشنهادی بیان می‌گردند.

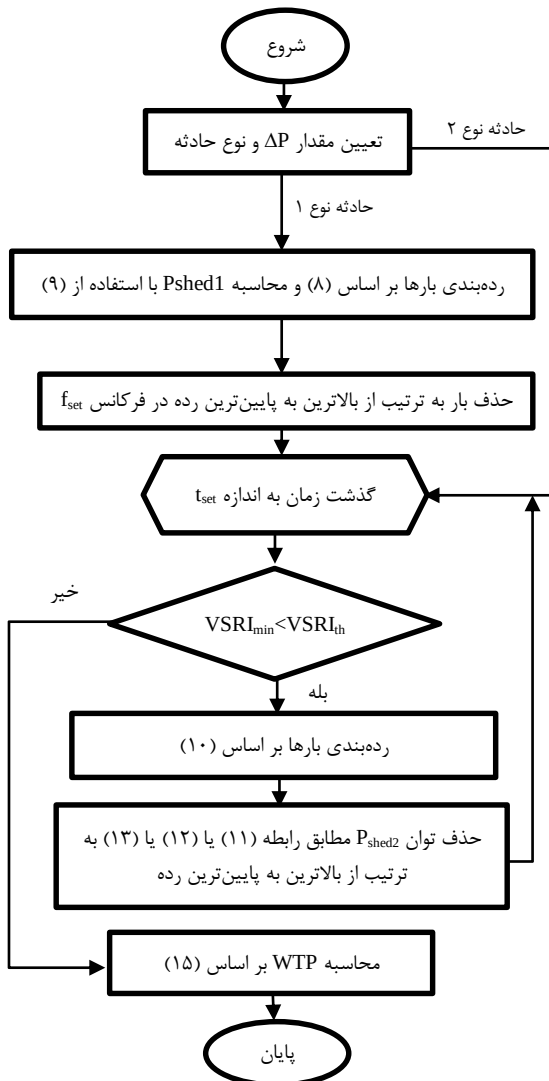
۴-۱- تعیین نوع حادثه

با مقایسه مقدار توان اکتیو از دست رفته، ΔP ، با بیش‌ترین مقدار مجاز عدم تعادل توان اکتیو تولیدی و مصرفی، P_{LD} ، می‌توان حوادث را به دو دسته نوع اول و نوع دوم تقسیم نمود. در صورتی که $P_{LD} < \Delta P$ باشد، حادثه از نوع اول است و حذف بار از فرکانس ۵۹/۵Hz (در سیستم ۶۰ هرتز) آغاز می‌شود. در غیر این صورت، به ازای حادثه رخ داده فرکانس سیستم کم‌تر از فرکانس آستانه مورد استفاده در تعیین P_{LD} نمی‌شود و در عمل، گاورنرهای ژنراتورها با استفاده از ذخیره چرخان شبکه، تولید ژنراتورها را افزایش می‌دهند و فرکانس را به سمت محدوده کار عادی می‌برند.

همان‌گونه که بیان شد، P_{LD} به ازای فرکانس آستانه ۵۸ هرتز (در سیستم ۶۰ هرتز) تعیین می‌شود. این فرکانس، بر این مبنا انتخاب شده است که سیستم حذف بار باید طوری طراحی شود که تا قبل از رسیدن فرکانس به ۹۵٪ فرکانس نامی سیستم عمل نماید و فرکانس سیستم را به محدوده عادی آن یا مقادیر نزدیک به آن بازگرداند [۱۴، ۱۵]. در غیر این صورت، ممکن است حفاظت فرکانسی ژنراتورها عمل کنند و در اثر خروج ژنراتورها خاموشی در ناحیه‌ای وسیع رخ دهد. چنانچه این فرکانس آستانه خیلی بالا انتخاب شود، (مثلاً ۵۹/۵Hz در یک سیستم ۶۰Hz)، از ذخیره چرخان و قابلیت افزایش توان تولیدی توسط گاورنر ژنراتورها به منظور بازیابی فرکانس هیچ استفاده‌ای نمی‌شود و به‌ازای هر حادثه، برای بازگرداندن فرکانس به محدوده کار عادی باید حذف بار زیاد در سیستم انجام شود. این حد مجاز فرکانس در مراجع [۹، ۱۶] به ترتیب برابر ۵۸Hz و ۵۷Hz در یک سیستم ۶۰Hz و در [۹، ۱۷] به ترتیب برابر ۴۸Hz و ۴۹/۲Hz در یک سیستم ۵۰Hz در نظر گرفته شده است.

لازم به توضیح است که پس از اجرای طرح حذف بار و نجات شبکه از ناپایداری و یا پس از یک حادثه که نیازمند انجام حذف بار نیست، گاورنرهای ژنراتورهای شبکه با استفاده از ذخیره چرخان شبکه، تولید ژنراتورها را افزایش می‌دهند و فرکانس را به سمت محدوده کار عادی می‌برند. در صورتی که فرکانس به محدوده کار عادی باز نگردد و در محدوده مجاز اما خارج از محدوده کار عادی سیستم تثبیت شود

تفاوت که معیار انتخاب مکان مناسب جهت حذف بار در این حالت هم وضعیت پایداری ولتاژ شین‌ها و هم قیمت بارها خواهد بود. برای دسته چهارم، با توجه به اینکه خطر ناپایداری فرکانس یا ناپایداری ولتاژ وجود ندارد، بدون ایجاد هزینه حذف بار، فرکانس و ولتاژ شین‌های شبکه توسط سیستم‌های کنترلی کنترل می‌شوند.



شکل ۱: فلوچارت الگوریتم پیشنهادی

۵- معیارهای ارزیابی عملکرد طرح حذف بار

برای ارزیابی عملکرد طرح حذف بار لازم است شاخص‌های مهمی مانند حاشیه پایداری استاتیکی ولتاژ سیستم پس از حذف بار، مقدار توان حذف شده از سیستم، هزینه‌های حذف بار و فرکانس ماندگار سیستم پس از حادثه بررسی شود.

حاشیه پایداری استاتیکی ولتاژ شبکه به فاصله نقطه کار فعلی سیستم قدرت تا مرز ناپایداری ولتاژ گفته می‌شود. برای تعیین این حاشیه پایداری از منحنی‌های P-V و Q-V استفاده می‌شود. در [۱۸] یک روش برای محاسبه حاشیه پایداری ولتاژ با استفاده از منحنی‌های P-V ارائه شده است، اما مشکل این روش این است که برای بارهای

$$VSRI_j^{equal} = C \times VSRI_j + D \times (1 - COST_j) \quad (10)$$

$$P_{shed2} = (P_{LD} - P_{Lsub_crit}) \quad (11)$$

که P_{Lsub_crit} بیش‌ترین مقدار توان حادثه‌ای می‌باشد که به ازای آن فرکانس مرکز اینرسی سیستم کمتر از ۵۹Hz در سیستم با فرکانس استاندارد ۶۰Hz، (کمتر از ۴۹Hz در سیستم با فرکانس استاندارد ۵۰Hz) نشود. همچنین $VSRI_j$ ، $VSRI_j^{equal}$ در شین بار زام پس از وقوع حادثه می‌باشد. $VSRI_j^{equal}$ عبارتی است که ترکیب $VSRI$ و قیمت کل بار زام را مشخص می‌کند. C و D ضرایب ثابتی هستند که به ترتیب اهمیت شاخص $VSRI$ و قیمت کل بار زام را در تعیین مکان حذف بار، مشخص می‌کنند و در اینجا برابر با یک می‌باشند.

لازم به ذکر است که در صورت نیاز مجدد سیستم به حذف بار، مراحل بعدی حذف بار نیز با بررسی شرط $VSRI_{min} < VSRI_{th}$ و پس از تأخیر زمانی t_{set} به همین صورت انجام می‌گردد.

۴-۲-۲- حادثه نوع دوم

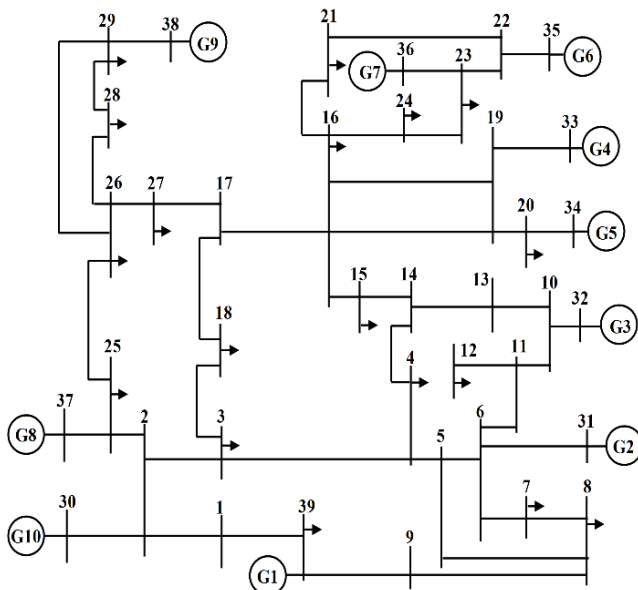
این دسته شامل حوادثی می‌شود که در آن‌ها $0 < \Delta P < P_{LD}$ است. از آنجاکه در این نوع حوادث مقدار عدم تعادل توان حقیقی خیلی زیاد نیست، بنابراین نیاز به حذف بار بر اساس افت فرکانس پس از وقوع حادثه نمی‌باشد و در صورت نیاز، حذف بار فقط بر اساس معیار $VSRI$ انجام می‌گردد؛ بدین صورت که پس از گذر زمانی معادل t_{set} از لحظه وقوع حادثه، اگر $VSRI_{min} < VSRI_{th}$ باشد، ابتدا بارها بر اساس (۱۰) از بیش‌ترین به کم‌ترین مقدار $VSRI_j^{equal}$ رده‌بندی می‌شوند. سپس، حذف بار از رده بالا به پایین به اندازه توانی که از روابط (۱۲) یا (۱۳) به دست می‌آید، انجام می‌گردد.

$$P_{shed2} = (\Delta P_L - P_{Lsub_crit}); \Delta P > P_{Lsub_crit} \quad (12)$$

$$P_{shed2} = 0.5\Delta P; \Delta P < P_{Lsub_crit} \quad (13)$$

در شکل ۱ فلوچارت مربوط به الگوریتم پیشنهادی آمده است. چنانچه حوادث را به چهار دسته تقسیم کنیم که منجر به وقوع (۱) ناپایداری فرکانس به تنهایی، (۲) ناپایداری ولتاژ به تنهایی، (۳) ناپایداری همزمان فرکانس و ولتاژ یا (۴) هیچ‌یک از ناپایداری‌های فرکانس یا ولتاژ (حوادث کوچک) می‌شوند، الگوریتم پیشنهادی برای همه این چهار حالت به خوبی عمل می‌نماید. بر اساس فلوچارت، دسته اول از نوع حادثه اول است چرا که $\Delta P > P_{LD}$ خواهد بود و بر اساس روابط (۸) و (۱۰)، معیار انتخاب مکان مناسب جهت حذف بار در این حالت عمدتاً قیمت بارها خواهد بود و حذف بار در فرکانس $f_{set} = 59/59$ Hz در سیستم ۵۹/۵۹ Hz انجام می‌گردد. دسته دوم از نوع حادثه دوم است و از آنجاکه در این حالت فرکانس دچار افت زیاد و سریع نمی‌شود، در t_{set} ثانیه پس از لحظه وقوع حادثه، حذف بار به ترتیب از بارهای دارای بیش‌ترین مقدار $VSRI_j^{equal}$ انجام می‌شوند که در آن هم وضعیت پایداری ولتاژ شین‌ها و هم قیمت بارها لحاظ شده است. در صورت تأمین نشدن پایداری ولتاژ سیستم، مرحله بعدی حذف بار اجرا می‌شود. برای دسته سوم، مشابه دسته اول عمل می‌شود با این

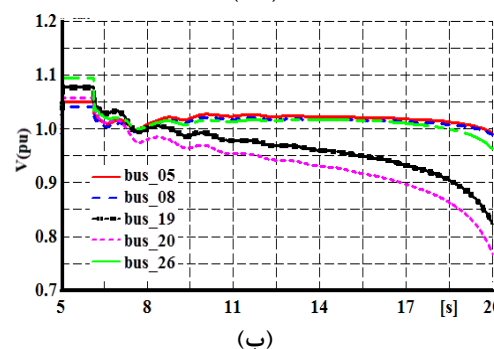
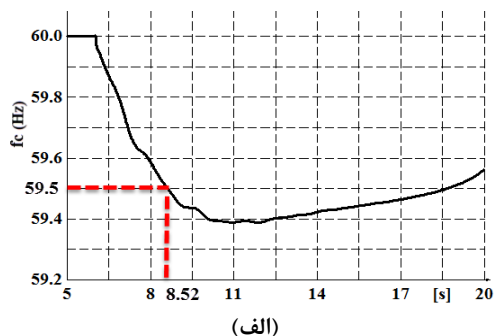
ثابت، جریان ثابت و امپدانس ثابت می‌باشد، اما در حالت کلی مقدار a بین 0.5 تا $1/8$ و مقدار b بین $1/5$ تا 6 می‌باشد [۱۵].



شکل ۲: شبکه ۳۹ شینه New England [۱۰]

۶-۱- نتایج شبیه‌سازی حادثه نوع اول

توان تولیدی ژنراتور G9 برابر با ۸۳۰ MW است و با خروج آن حادثه نوع اول رخ می‌دهد. در شکل ۳ نتایج شبیه‌سازی خروج این ژنراتور در $t=6/1$ sec بدون انجام حذف بار نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۳ دیده می‌شود، بدون انجام حذف بار ابتدا فرکانس مرکز اینرسی سیستم کاهش می‌یابد، اما در ادامه، سیستم دچار فروپاشی ولتاژ می‌شود.



توان ثابت کارایی مناسب دارد. همچنین استفاده از تقریب معادله درجه دوم باعث ایجاد خطا در محاسبات می‌گردد. حاشیه اطمینان پایداری استاتیکی ولتاژ سیستم در نقطه کار فعلی، با توان اکتیو بارگذاری P_0 از رابطه (۱۴) برحسب درصد محاسبه می‌گردد.

$$SM = \left(\frac{P_{\max} - P_0}{P_{\max}} \right) \times 100 \quad (14)$$

که در آن $P_{\max}$ حد بارگذاری سیستم می‌باشد [۱۵]. به‌منظور محاسبه مقدار هزینه کل توان حذف‌شده، می‌توان از رابطه (۱۵) استفاده نمود. این مقدار برابر با هزینه‌ای است که بارها برای جلوگیری از خاموشی تمایل به پرداخت (WTP) دارند.

$$WTP = \sum_j WTP_j = \sum_j [a' + b' \cdot P_{shedj} + \frac{c'}{2} \cdot P_{shedj}^2]; (\$/h) \quad (15)$$

که P_{shedj} مقدار توان حذف شده از بار j ام، WTP_j هزینه آن بخش از توان بار j ام می‌باشد که حذف شده است و ضرایب a' ، b' و c' همان ضرائب موجود در (۶) می‌باشند. شایان ذکر است که از آنجاکه برای بار j ام ممکن است $P_{shedj} < P_j$ باشد، لذا ممکن است که مقدار WTP_j کمتر از $COST_j$ باشد. به عبارت دیگر $COST_j$ مقدار قیمت کل بار j ام در لحظه حذف بار است ولی WTP_j هزینه آن بخش از بار j ام است که حذف شده است.

۶- نتایج شبیه‌سازی

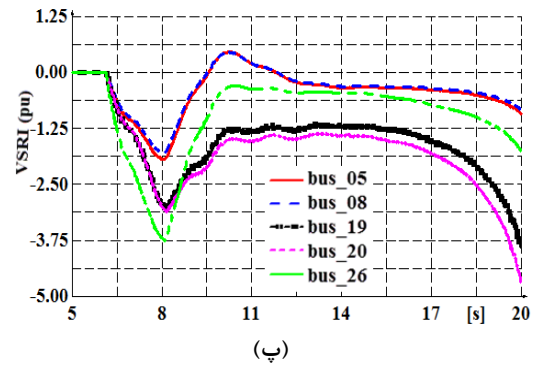
به‌منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، شبکه ۳۹ شینه استاندارد New England (شکل ۲) در نرم‌افزار DigSILENT Power Factory [۱۹] مدل‌سازی شده و الگوریتم پیشنهادی با استفاده از زبان برنامه‌نویسی MATLAB این نرم‌افزار، روی این شبکه پیاده‌سازی شده است. در این شبکه مجموع کل توان بارها $P_{\text{total}} = 6097.1$ MW، $t_{\text{set}} = 5$ sec، $P_{\text{sub_crit}} = 360$ MW و $P_{\text{LA}} = 720$ MW می‌باشد. همچنین مجموع تأخیر زمانی مربوط به مدار شکن‌ها و انتقال داده از شین‌ها به مرکز کنترل و بالعکس برابر با 0.2 sec فرض می‌گردد. شایان ذکر است که در این شبکه از مدل IEEE1 برای گاورنر توربوژنراتورها، مدل IEEE-DC1A برای تنظیم‌کننده خود کار ولتاژ (AVR) ژنراتورها و مدل PSS-CONV برای پایداری‌سازهای سیستم قدرت استفاده شده است. همچنین جهت مقایسه نتایج طرح پیشنهادی با طرح ارائه شده در [۹]، مشابه این مرجع، بارهای موجود در شین‌های ۳ و ۱۸ با استفاده از مدل دینامیک موتور القایی به‌صورت بارهای موتوری مدل‌سازی شده‌اند و برای سایر بارها با استفاده از مدل استاتیک بار، وابستگی توان اکتیو و راکتیو به فرکانس و ولتاژ به‌صورت روابط (۱۶) و (۱۷) در نظر گرفته شده است [۱۵، ۱۹].

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^a (1 + K_{pf} \Delta f) \quad (16)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^a (1 + K_{qf} \Delta f) \quad (17)$$

که K_{pf} ، K_{qf} و a و b به ترتیب ضرایب و پارامترهای تعیین‌کننده وابستگی توان اکتیو و راکتیو به فرکانس و ولتاژ می‌باشند. اگر پارامترهای a و b برابر با صفر، یک یا دو باشند، مدل بار به ترتیب توان

نمی‌گردد و مقدار و مکان حذف بار به صورت از پیش تعیین شده می‌باشد. طرح حذف بار فرکانسی سنتی برای شبکه ۳۹ شینه New England در [۲۰] طراحی شده و تنظیمات آن در جدول پ-۲ در بخش پیوست ارائه گردیده است. در این طرح، اولین و آخرین پله حذف بار بر اساس طرح حذف بار توصیه شده در [۲۱] به ترتیب در فرکانس‌های ۵۹/۵۹ Hz و ۵۸/۵۸ Hz در نظر گرفته شده است. همچنین، بر اساس شبیه‌سازی‌های انجام شده در [۲۲]، استفاده از پله‌های حذف بار با مقدار بار حذفی برابر در این شبکه نتیجه بهتری دارد که این مسئله در جدول پ-۲ لحاظ شده است.



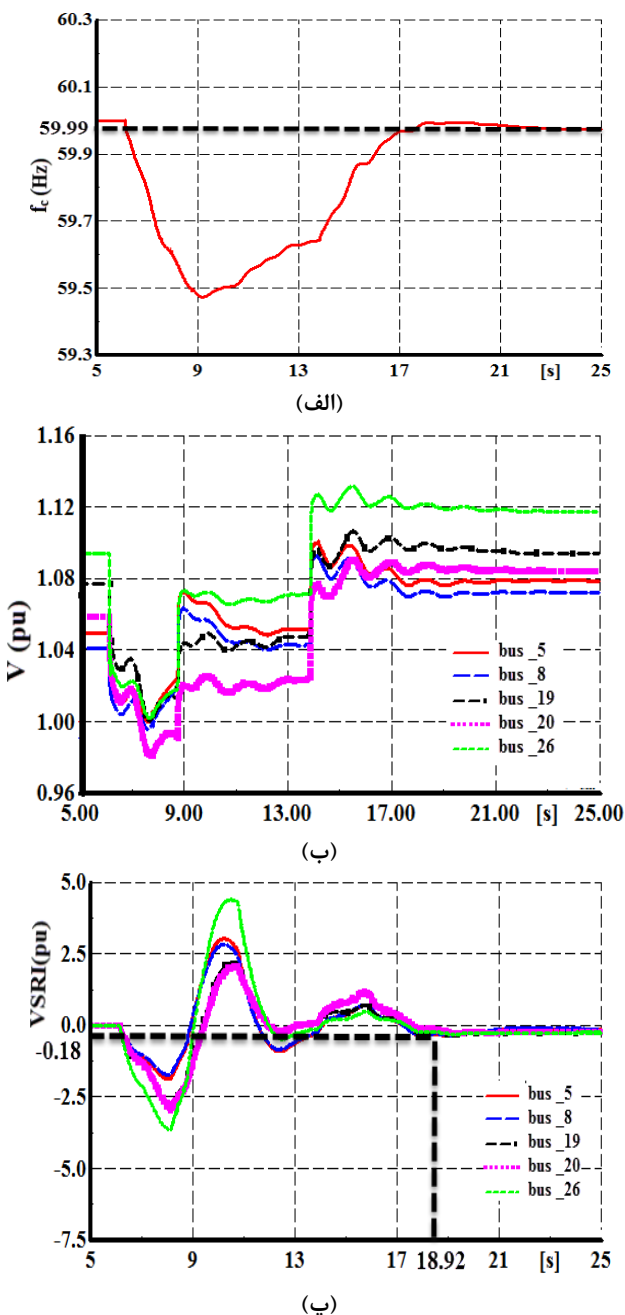
شکل ۳: الف) فرکانس مرکز اینرسی، ب) ولتاژ و پ) VSRI برخی شین‌ها بدون حذف بار در حادثه نوع اول

تغییرات فرکانس مرکز اینرسی سیستم، ولتاژ و VSRI برخی شین‌ها در شرایط اجرای طرح حذف بار پیشنهادی، در شکل ۴ آمده است. از آنجا که خطا از نوع اول است، در لحظه $t = 8/52 \text{ sec}$ که فرکانس به $f_{set} = 59/5 \text{ Hz}$ می‌رسد مطابق رابطه (۹) مقدار توان ۱۱۰ MW حذف بار در سیستم انجام می‌شود. این حذف بار بر اساس رده‌بندی انجام شده با استفاده از رابطه (۸) صورت می‌گیرد. لازم به ذکر است که به دلیل تأخیر زمانی انتقال داده و مدار شکن‌ها حذف بار در $t = 8/72 \text{ sec}$ انجام می‌گردد. با گذشت زمان t_{set} پس از اولین مرحله حذف بار $t = 72/8 + 5 = 77 \text{ sec}$ و بررسی شاخص VSRI (شکل ۴-پ)، پیدا است که $VSRI_{min} < VSRI_{th}$ است. بنابراین مطابق رابطه (۱۱) نیاز به حذف ۳۶۰ MW در $t = 2/0 + 72/13 = 77/13 \text{ sec}$ می‌باشد. این حذف بار بر اساس رده‌بندی انجام شده با استفاده از رابطه (۱۰) صورت می‌گیرد. همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود، اجرای الگوریتم حذف بار پیشنهادی سبب بازیابی پایداری فرکانس و پایداری ولتاژ سیستم شده است. توان اکتیو و هزینه مربوط به مرحله اول و دوم حذف بار به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ آمده است.

پس از انجام حذف بارهای لازم و پایدار شدن سیستم، با استفاده از منحنی‌های P-V مربوط به حادثه نوع اول که در شکل ۵ آمده است، می‌توان حاشیه پایداری سیستم را تعیین نمود. از آنجا که مجموع توان اکتیو بارها قبل از حذف بار برابر با ۶۰۹۷/۱ MW و مجموع توان حذف شده برابر با ۴۷۰ MW می‌باشد، در نتیجه مجموع توان بارها در حالت پایدار سیستم برابر با ۵۶۲۷/۱ MW است. با توجه به شکل ۵ پیدا است که $MW34/6919 = P_{max}$ است. در نتیجه بر اساس رابطه (۱۴) $SM = 18/67\%$ می‌باشد.

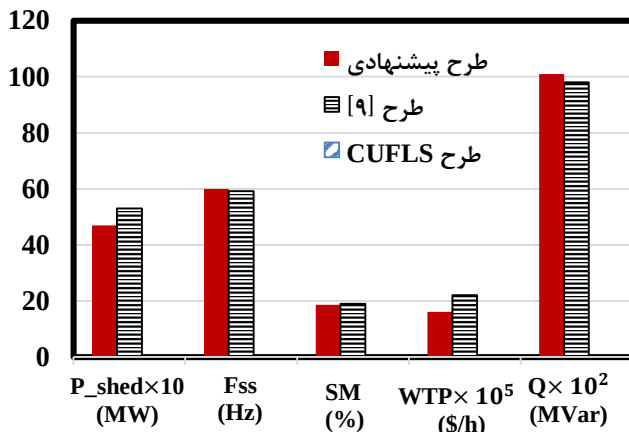
۶-۲- مقایسه نتایج طرح پیشنهادی با نتایج طرح‌های پیشین در حادثه نوع اول

به منظور بررسی کارایی طرح پیشنهادی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی این طرح با نتایج طرح حذف بار ترکیبی ارائه شده در [۹] و طرح حذف بار فرکانسی سنتی (CUFLS)^{۱۵} مقایسه می‌گردد. در طرح CUFLS، حذف بار بر اساس ترکیب و وضعیت فرکانسی و ولتاژی سیستم انجام



شکل ۴: الف) فرکانس مرکز اینرسی، ب) ولتاژ و پ) VSRI برخی شین‌ها پس از حذف بار در حادثه نوع اول

فرکانس مرکز اینرسی سیستم، ولتاژ و VSRI برخی شین‌ها برای این حادثه بدون انجام حذف بار آمده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، پس از خروج این ژنراتور فرکانس کاهش می‌یابد، اما از ۵۹/۵Hz کمتر نمی‌شود. اما در ادامه در مدت ۱۴ ثانیه پس از حادثه فروپاشی ولتاژ رخ می‌دهد. بنابراین، انجام حذف بار برای این حادثه ضروری است.



شکل ۶: مقایسه نتایج طرح پیشنهادی با طرح‌های پیشین در حادثه نوع اول

جدول ۳: مقایسه عملکرد طرح‌های حذف بار در حادثه نوع اول

نام طرح	P_{shed} (MW)	WTP (\$/h)	F_{ss} (Hz)	SM (%)
طرح پیشنهادی	۴۷۰	۱۶۱۲۴۰/۱۳۴	۵۹/۹۹	۱۸/۶۷
طرح [۹]	۵۳۰	۲۲۰۹۰۹۵	۵۹/۲	۱۸/۹۷
طرح CUFLS [۲۰]	.	.	---	xxx

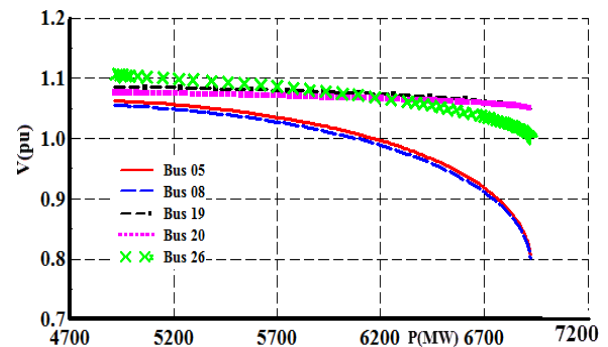
xxx شبکه چهار فروپاشی ولتاژ می‌شود.

جدول ۴: مقایسه حاشیه توان راکتیو شین‌ها در حادثه نوع اول

شماره شین	Q_{min} (MVar)		
	طرح پیشنهادی	طرح [۹]	طرح CUFLS [۲۰]
۵	۲۰۲۷/۶۸	۱۹۴۲/۸	xxx
۸	۱۶۰۱/۸	۱۵۳۰/۳	xxx
۱۹	۳۱۶۵/۷۲	۳۰۳۱/۴۵	xxx
۲۰	۲۳۶۷/۵۲	۲۳۹۶/۶	xxx
۲۶	۱۰۰۸/۴	۹۰۲/۶	xxx
جمع	۱۰۱۷۱/۱۲	۹۸۰۳/۷۵	xxx

xxx شبکه چهار فروپاشی ولتاژ می‌شود.

از آنجاکه در این حالت حادثه از نوع دوم می‌باشد، بنابراین حذف بار در فرکانس $f_{set}=59/5\text{Hz}$ نیاز نیست و پس از گذشتن زمان $t_{set}=\Delta\text{sec}$ بعد از لحظه وقوع حادثه $(t=1/1\text{sec})$ بررسی شرط $VSRI_{min} < VSRI_{th}$ می‌دهد که نیاز به حذف بار ۲۷۲ MW بر



شکل ۵: منحنی P-V پس از حذف بار در حادثه نوع اول

جدول ۱: توان اکتیو و هزینه مرحله اول حذف بار در حادثه نوع اول

شماره شین	P_{shed} (MW)	WTP (\$/h)
۱۲	۷/۳۱	۱۸۶۴۹/۶۷
۳۱	۹/۰۹	۲۳۳۴۴/۷
۲۶	۹۳/۶	۲۹۶۵۲۴/۸

جدول ۲: توان اکتیو و هزینه مرحله دوم حذف بار در حادثه نوع اول

شماره شین	P_{shed} (MW)	WTP (\$/h)
۲۸	۲۰۰	۷۴۰۰۰۰
۲۶	۳۸/۸۶	۱۱۲۸۵۰/۰۲
۷	۱۲۱/۸	۴۲۱۰۳۲/۱۵

در جدول‌های ۳ و ۴ به ترتیب مقادیر معیارهای ارزیابی عملکرد و کمینه توان راکتیو برخی شین‌ها برای این سه طرح ارائه شده است. با توجه به جدول ۳ پیداست که طرح پیشنهادی با حذف توان کمتر و انتخاب مکان‌های حذف بار مناسب، سبب افزایش فرکانس ماندگار و ۲۷٪ کاهش هزینه حذف بار نسبت به طرح [۹] می‌گردد. در عین حال، حاشیه پایداری توان اکتیو تغییر زیادی نکرده است. با توجه به شکل ۳-الف در حادثه خروج ژنراتور G9 فرکانس سیستم به حد فرکانسی اولین پله حذف بار نمی‌رسد و در نتیجه هیچ باری حذف نمی‌شود. لذا سیستم دچار فروپاشی ولتاژ می‌گردد. لذا طرح CUFLS قادر به حفظ پایداری شبکه در این حادثه نیست.

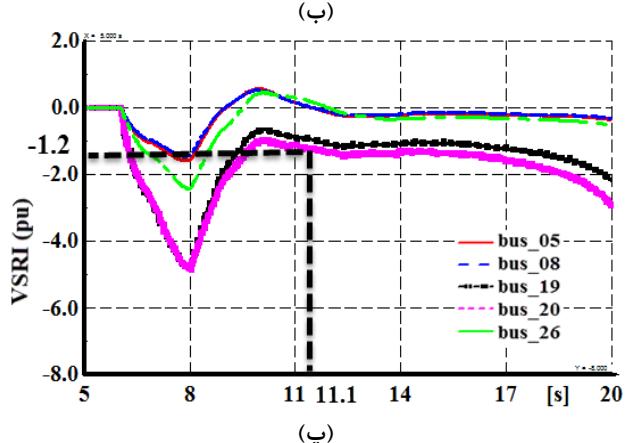
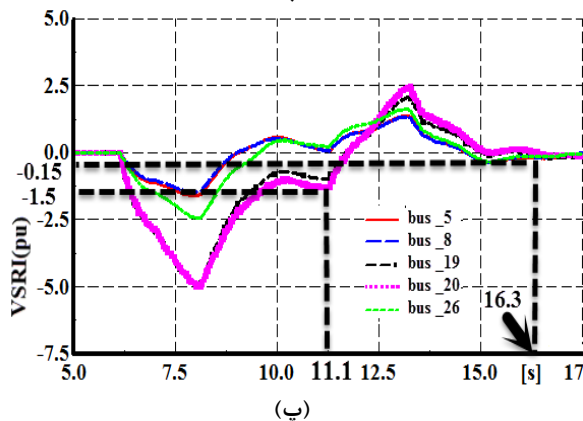
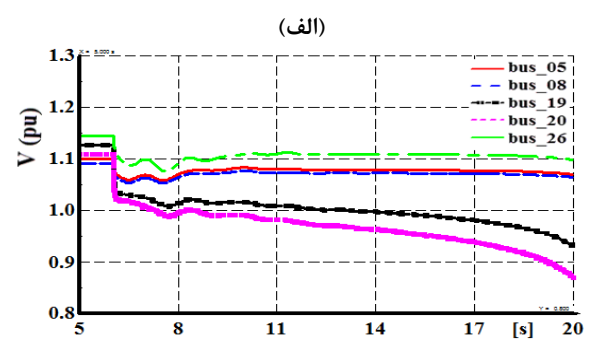
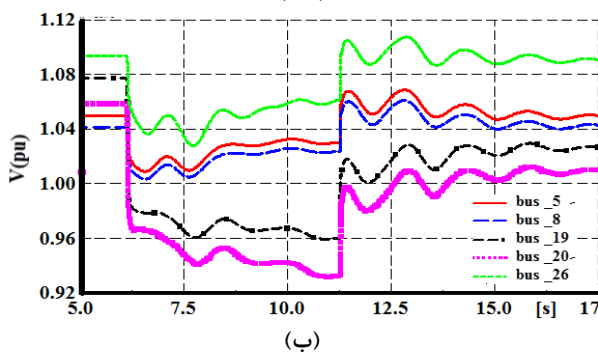
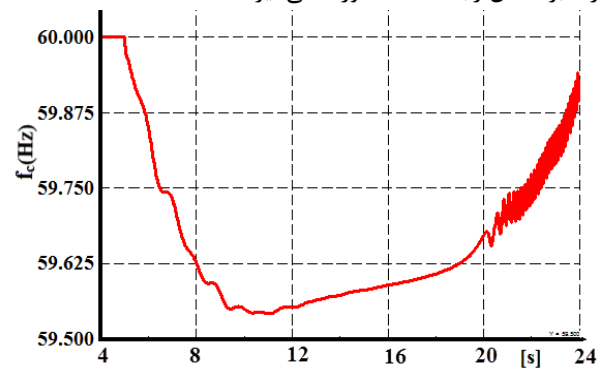
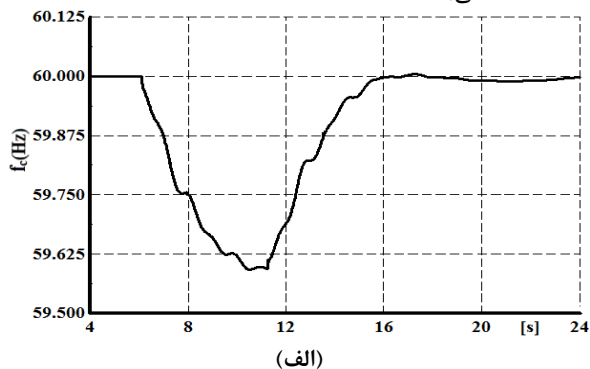
جدول ۴ نیز نشان می‌دهد که با استفاده از روش پیشنهادی حاشیه توان راکتیو شین‌ها بیش‌تر می‌گردد و این موضوع نشان‌گر برتری طرح پیشنهادی نسبت به سایر طرح‌ها می‌باشد. به منظور درک بهتر، این مقایسه به صورت نمودار میله‌ای در شکل ۶ آمده است. همان‌طور که در شکل ۶ پیداست مقدار توان حذف بار و WTP مربوط به طرح CUFLS صفر است.

۳-۶ نتایج شبیه‌سازی حادثه نوع دوم

توان تولیدی ژنراتور G4 برابر با ۶۳۲ MW است. با خروج این ژنراتور در $t=6/1\text{sec}$ یک حادثه نوع دوم ایجاد می‌گردد. در شکل ۷ منحنی‌های

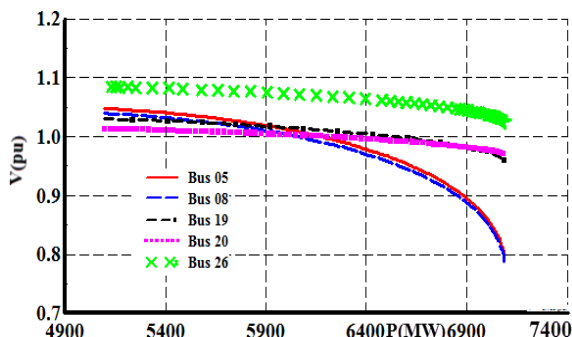
اساس رابطه (۱۲) در $t = 3/11 \text{ sec}$ وجود دارد. در این حالت رده‌بندی بارها بر اساس رابطه (۱۰) صورت می‌گیرد.

پیدا ست که $P_{\max} = 70.79/3 \text{ MW}$ است. در نتیجه بر اساس رابطه (۱۴) $SM = 1.17/1$ می‌باشد.



شکل ۸: الف) فرکانس مرکز اینرسی، ب) ولتاژ و پ) VSRI برخی شین‌ها پس از حذف بار در حادثه نوع دوم

شکل ۷: الف) فرکانس مرکز اینرسی، ب) ولتاژ و پ) VSRI برخی شین‌ها بدون حذف بار در حادثه نوع دوم

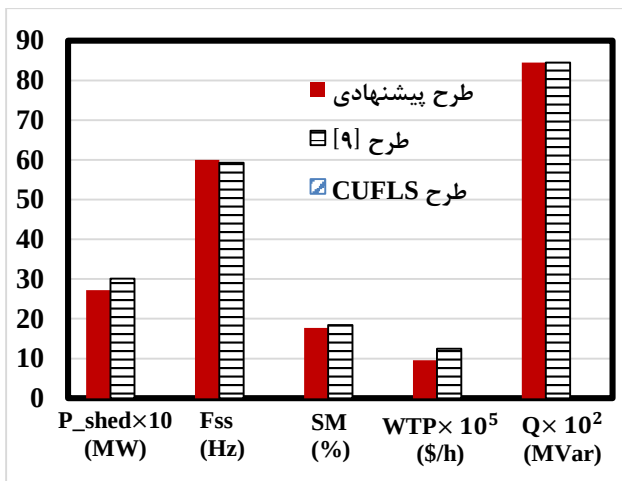


شکل ۹: منحنی P-V پس از حذف بار در حادثه نوع دوم
جدول ۵: توان اکتیو و هزینه حذف بار در حادثه نوع دوم

شماره شین	P_{shed} (MW)	WTP (\$/h)
-----------	------------------------	------------

در شکل ۸ منحنی‌های فرکانس مرکز اینرسی سیستم، ولتاژ و VSRI برخی شین‌ها برای این حادثه پس از حذف بار آمده است. با توجه به شکل ۸- پ پیداست که با گذشت زمان $t_{\text{set}} = 5 \text{ sec}$ از زمان اولین حذف بار (یعنی در $t = 16/3 \text{ sec}$)، $VSRI_{\min} > VSRI_{\text{th}}$ می‌باشد و نیازی به حذف بار مجدد نیست. در جدول ۵ محل، مقدار توان اکتیو بار حذف شده و هزینه حذف بار برای این حادثه آمده است.

پس از حذف بارهای لازم و پایدار شدن سیستم، با استفاده از منحنی‌های P-V مربوط به حادثه نوع دوم که در شکل ۹ آمده است، می‌توان حاشیه پایداری سیستم را تعیین نمود. در این حالت مجموع توان بار حذف شده برابر با 272 MW و کل توان بار در حالت پایدار سیستم پس از حذف بار برابر با $5825/1 \text{ MW}$ است. با توجه به شکل ۹



شکل ۱۰: مقایسه نتایج طرح پیشنهادی با طرح‌های پیشین در

حادثه نوع دوم

جدول ۶: مقایسه عملکرد طرح‌های حذف بار در حادثه نوع دوم

نام طرح	P_{shed} (MW)	WTP (\$/h)	F_{ss} (Hz)	SM (%)
طرح پیشنهادی	۲۷۲	۹۵۹۸۷۳/۰۶	۶۰	۱۷/۷۱
طرح [۹]	۳۰۱	۱۲۴۲۷۵۳/۷۵	۵۹/۳	۱۸/۴۱
طرح CUFLS [۲۰]	.	.	---	xxx

xxx شبکه دچار فروپاشی ولتاژ می‌شود.

جدول ۷: مقایسه حاشیه توان راکتیو شین‌ها در حادثه نوع دوم

شماره شین	Q_{min} (MVar)		
	طرح پیشنهادی	طرح [۹]	طرح CUFLS [۲۰]
۵	۲۰۲۳/۳۴	۱۹۳۷/۵	xxx
۸	۱۵۹۲/۱	۱۵۲۸/۸	xxx
۱۹	۱۵۰۳/۱	۱۵۳۳/۱	xxx
۲۰	۱۸۰۹	۱۸۶۶/۴	xxx
۲۶	۱۵۲۰/۹	۱۵۸۵/۷	xxx
جمع	۸۴۴۸/۴۴	۸۴۵۱/۵	xxx

xxx شبکه دچار فروپاشی ولتاژ می‌شود.

۶-۶- بررسی اثر مدل بار بر عملکرد طرح پیشنهادی

در این بخش، به منظور بررسی عملکرد طرح پیشنهادی در شرایط افزایش درصد بارهای موتور در سیستم، بار موجود در هر کدام از شین‌ها به صورت ۴۰٪ بار موتوری و ۶۰٪ بار استاتیکی در نظر گرفته می‌شود. به طور نمونه، نتایج حاصل از شبیه‌سازی خروج ژنراتور G9 در $t=1\text{sec}$ برای شرایط ۴۰٪ بار موتوری در کلیه شین‌ها بدون انجام حذف بار در شکل ۱۱ آمده است. مقایسه شکل ۱۱ و نتایج حاصل از خروج ژنراتور G9 بدون حذف بار در بخش ۶-۱ نسخه مقاله نشان می‌دهد که با افزایش درصد بارهای موتور در کل سیستم، زمان فروپاشی سیستم کمتر می‌شود. در این حالت بدون انجام حذف بار، فاصله زمانی تا زمان فروپاشی ولتاژ، از حدود ۱۴ ثانیه به ۸/۵ ثانیه کاهش یافته است.

۶-۴- مقایسه نتایج طرح پیشنهادی با نتایج طرح‌های پیشین

در حادثه نوع دوم

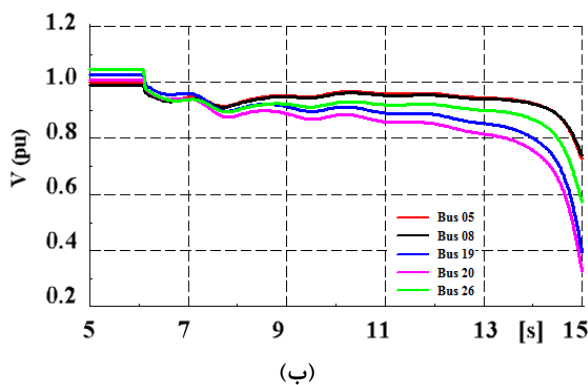
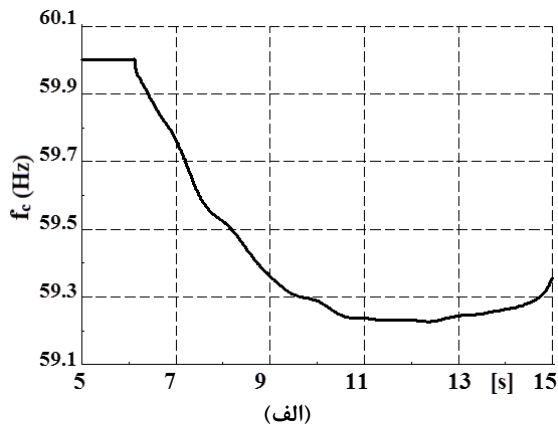
به منظور بررسی کارایی طرح پیشنهادی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی این طرح برای حادثه نوع دوم با نتایج به‌دست‌آمده با استفاده از طرح [۹] و طرح حذف بار فرکانسی سنتی (CUFLS) در جدول‌های ۶ و ۷ مقایسه شده است. در این دو جدول به ترتیب مقادیر معیارهای ارزیابی عملکرد و کمینه توان راکتیو برخی شین‌ها برای این سه طرح ارائه شده است.

با توجه به جدول ۶، طرح پیشنهادی با انتخاب مناسب مکان‌های حذف بار برای این حادثه، حذف بار کم‌تری انجام داده و منجر به فرکانس ماندگار بالاتری شده است. همچنین، در طرح پیشنهادی هزینه‌های اقتصادی حذف بار برای این حادثه ۲۲/۷۶٪ کم‌تر از طرح [۹] شده است. در عین حال، حاشیه پایداری اکتیو تغییر زیادی نکرده است. با توجه به شکل ۷-الف در حادثه خروج ژنراتور G4 فرکانس سیستم به حد فرکانسی اولین پله حذف بار نمی‌رسد و در نتیجه هیچ باری حذف نمی‌شود. لذا سیستم دچار فروپاشی ولتاژ می‌گردد. لذا طرح CUFLS قادر به حفظ پایداری شبکه در این حادثه نیست. لازم به توضیح است که در حوادث دیگر ممکن است حذف بار توسط روش CUFLS انجام شود، اما از آنجاکه مقدار و مکان حذف بار در آن به صورت ثابت و مستقل از شرایط ولتاژی سیستم است، ممکن است پس از حذف بار، حاشیه پایداری ولتاژ بسیار کمی برای شبکه ایجاد نماید. نتایج عملکرد روش CUFLS برای حوادث دیگر در شبکه ۳۹ شینه New England در [۲۰] نشان داده شده است و این مطلب را تأیید می‌نماید.

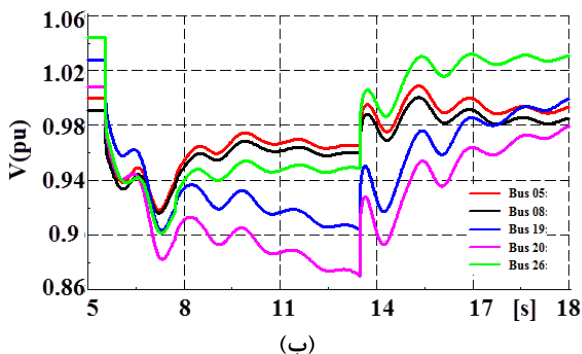
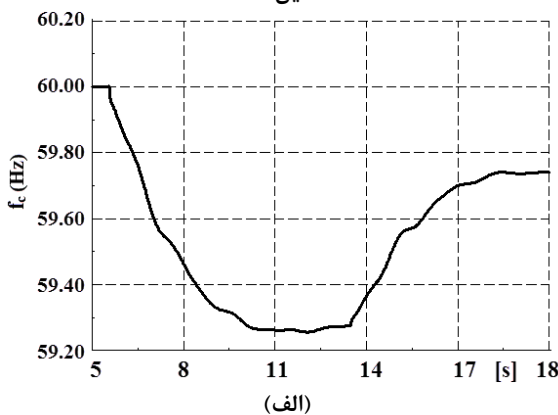
جدول ۷ نیز نشان می‌دهد که حاشیه پایداری توان راکتیو شین‌های ضعیف سیستم برای این حادثه در مجموع برای طرح پیشنهادی و طرح [۹] تقریباً برابر است. این مقایسه به صورت نمودار میله‌ای در شکل ۱۰ آمده است. همان‌طور که در شکل ۱۰ پیداست مقدار توان حذف بار و WTP مربوط به طرح CUFLS صفر است.

۶-۵- نتایج شبیه‌سازی طرح پیشنهادی برای حوادث دیگر

در ادامه نتایج حاصل از شبیه‌سازی طرح پیشنهادی برای مقابله وقوع حوادث مختلف دیگر به صورت خلاصه در جدول ۸ آمده است. با توجه به جدول ۸، طرح پیشنهادی به هنگام وقوع حوادث مختلف کارایی مناسب را داشته و برای همه حوادث از ناپایداری فرکانس و ولتاژ سیستم جلوگیری کرده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، طرح پیشنهادی برای این حوادث متنوع هم فرکانس سیستم را به مقدار ماندگار مطلوب رسانده است و هم حاشیه پایداری ولتاژ مناسبی فراهم ساخته است. لذا، روش مناسبی برای خودترمیمی سیستم قدرت می‌باشد.



شکل ۱۱: الف) فرکانس مرکز اینرسی و ب) ولتاژ برخی شین‌ها بدون حذف بار در حادثه خروج G9 برای حالت ۴۰٪ بار موتور در تمام شین‌ها



شکل ۱۲: الف) فرکانس مرکز اینرسی و ب) ولتاژ برخی شین‌ها با اجرای طرح حذف بار پیشنهادی در حادثه خروج G9 برای حالت ۴۰٪ بار موتور در تمام شین‌ها

جدول ۸: مقایسه نتایج طرح پیشنهادی برای مقابله با حوادث مختلف

حادثه	ΔP (MW)	P_{shed} (MW)	WTP (\$/h)	F_{ss} (Hz)	SM (%)
خروج G3	۶۵۰	۲۹۰	۹۵۱۲۸۳	۵۹/۹۴	۱۸/۶۲
خروج خط ۱۹-۱۶	۵۰۵	۱۴۶	۶۷۵۲۳۱	۵۹/۸۵	۱۸/۵۹
خروج G3 و خط ۴-۳	۶۵۰	۵۸۰	۲۰۷۱۳۸۰	۵۹/۹۸	۲۴/۱۴
خروج G8 و G10	۷۹۰	۴۲۰	۱۴۳۲۱۲۸	۵۹/۸۸	۲۲/۱۱
خروج G3 و G10	۹۰۰	۵۴۰	۱۹۴۸۱۲۳	۵۹/۹	۲۳/۱۲

شکل ۱۲ نتایج اجرای طرح حذف بار پیشنهادی برای حادثه فوق در حالت ۴۰٪ بار موتور در کلیه شین‌ها را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در $t=8/1 \text{ sec}$ که فرکانس به $59/5 \text{ Hz}$ می‌رسد با تأخیر $0/2 \text{ sec}$ مقدار 110 MW حذف می‌شود. در ادامه پس از $t_{set}=5 \text{ sec}$ و با تأخیر $0/2 \text{ sec}$ (در $t=13/5 \text{ sec}$) مقدار 360 MW حذف می‌شود. با توجه به شکل ۱۲ پیداست که الگوریتم پیشنهادی در این حالت نیز قادر به حفظ پایداری سیستم شده و فرکانس در $59/7 \text{ Hz}$ ماندگار می‌شود.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک طرح حذف بار ترکیبی فرکانسی-ولتاژی متمرکز ارائه گردید که در آن انتخاب شین‌های مناسب جهت حذف بار، بر اساس شاخص پایداری ولتاژ شین‌ها (شاخص VSRI) و هزینه اقتصادی حذف بار انجام می‌شود. این انتخاب مناسب سبب کاهش هزینه‌های اقتصادی حذف بار و بهبود فرکانس ماندگار و حاشیه پایداری ولتاژ سیستم پس از حادثه می‌گردد. در طرح پیشنهادی برای محاسبه مقدار عدم تعادل توان اکتیو ناشی از وقوع حادثه، از روش حائهمحوری استفاده شده است و محاسبه شاخص‌های پایداری ولتاژ شین‌ها به صورت برخط و بر اساس دریافت اطلاعات از طریق واحدهای اندازه‌گیری فازور (PMU) صورت می‌گیرد. بررسی نتایج شبیه‌سازی نشان داد استفاده از الگوریتم پیشنهادی سبب حفظ پایداری ولتاژ و فرکانس سیستم پس از حادثه می‌گردد. همچنین، طرح پیشنهادی در مقایسه با طرح‌های حذف بار پیشین سبب کاهش هزینه اقتصادی حذف بار و افزایش فرکانس ماندگار سیستم و حاشیه پایداری ولتاژ شین‌ها پس از حادثه می‌گردد و بر اساس نتایج ارائه‌شده برای حوادث متنوع و در شرایط افزایش بار موتور سیستم نیز، به‌خوبی عمل می‌نماید.

سپاس‌گزاری

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

مراجع

- [15] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, Edited by Neal J. Balu and M. G. Lauby., Vol. 7, New York: McGraw-hill, 1994.
- [16] P. M. Anderson and M. Mirheydar, "An adaptive method for setting under frequency load shedding relays," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.7, no. 2, pp. 647-655, 1992.
- [17] H. Seyedi and M. Sanaye-Pasand, "New centralized adaptive load-shedding algorithms to mitigate power system blackouts," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 3, no. 1, pp. 99-114, 2009.
- [۱۸] فرید کربلایی، شهریار عباسی و حسین صابری، «محاسبه سریع و دقیق حاشیه پایداری ولتاژ با تقریب منحنی PV»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۴، شماره ۳، صفحات ۳۳-۴۰، ۱۳۹۳.
- [19] DigSILENT GmbH. *DigSILENT PowerFactory Version 15.1, User Manual*, 2014.
- [20] A. Saffarian and M. Sanaye-Pasand, "New local adaptive load shedding methods to mitigate power system blackouts," *Journal of Electric Power Components and Systems*, vol. 40, no. 3, pp. 348-368, 2012.
- [21] Underfrequency Issues Work Group of Western Electric Coordinating Council, *WECC coordinated off-nominal frequency load shedding and restoration plan, final report*, Nov. 1997.
- [22] M. Parniani and A. Nasri, "SCADA based under frequency load shedding integrated with rate of frequency decline," in *Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Montreal, Que., 2006.
- [1] Ch. Li, Y. Sun and X. Chen. "Analysis of the blackout in Europe on November 4, 2006," in *Proceedings of International Power Engineering Conference*, pp. 939-944, 2007.
- [2] Elkraft System. *Power failure in eastern Denmark and southern Sweden on 23 September 2003, Final report on the course of events*, <http://www.elkraft-system.dk>.
- [3] M. Vaiman, P. Hines, J. Jiang, S. Norris, M. Papic, A. Pitto, Y. Wang and G. Zweigle, "Mitigation and prevention of cascading outages: methodologies and practical applications," in *Proceedings of IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1-5, 2013.
- [4] A. Saffarian and M. Sanaye-Pasand. "Enhancement of power system stability using adaptive combinational load shedding methods," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 3, pp. 1010-1020, 2011.
- [5] T. Amraee, A. M. Ranjbar, B. Mozafari and N. Sadati, "An enhanced under-voltage load-shedding scheme to provide voltage stability," *Electric power systems research*, vol. 77, no. 8, pp.1038-1046, 2007.
- [6] P. Mahat, Z. Chen and B. Bak-Jensen, "Underfrequency load shedding for an islanded distribution system with distributed generators," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.25, no. 2 pp. 911-918, 2010.
- [7] W. Gu, W. Liu, C. Shen and Z. Wu, "Multi-stage underfrequency load shedding for islanded microgrid with equivalent inertia constant analysis," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 46, pp. 36-39, 2013.
- [8] 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, no. 6, pp. 669-679, 2008.
- [9] K. Seethalekshmi, S. N. Singh and S. C. Srivastava, "A synchrophasor assisted frequency and voltage stability based load shedding scheme for self-healing of power system," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, no. 2, pp. 221-230, 2011.
- [10] B. Hoseinzadeh, F. M. F. Da Silva and C. Leth Bak, "Adaptive tuning of frequency thresholds using voltage drop data in decentralized load shedding," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 4, pp. 2055-2062, 2015.
- [۱۱] سعید تیمورزاده، فرخ امینی‌فر و مجید صنایع‌پسند، «میراسازی نوسانات بین‌ناحیه‌ای: طرح گسترده هماهنگی حذف بار و تولید مبتنی بر منطق Fuzzy»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۷، شماره ۱، صفحات ۳۹-۴۸، ۱۳۹۳.

پیوست

جدول پ-۱: ضرایب مربوط به هزینه حذف بار [۱۳]

نوع بار	P(MW)	$a' (\$/h)$	$b' (\$/MW.h)$	$c' (\$/MW^2.h)$
L1	≤ 10	۰/۰	۲۵۰۰	۱۵
L2	≤ 20	۰/۰	۲۲۰۰	۱۲/۵
L3	≤ 30	۰/۰	۲۲۰۰	۱۰
L4	≤ 40	۰/۰	۲۲۰۰	۱۰
L5	≤ 50	۰/۰	۳۰۰۰	۱۵
L6	≤ 60	۰/۰	۲۵۰۰	۱۵
L7	≤ 75	۰/۰	۲۵۰۰	۱۰
L8	≤ 100	۰/۰	۲۵۰۰	۷
L9	≤ 125	۰/۰	۲۵۰۰	۱۰/۵
L10	≤ 200	۰/۰	۲۷۰۰	۱۰
L11	> 200	۰/۰	۳۰۰۰	۷/۵

جدول پ-۲: تنظیمات فرکانسی روش حذف بار فرکانسی سنتی [۲۰]

شماره پله	فرکانس تنظیمی	مقدار بار حذفی (MW)
۱	۵۹/۱	۴۸۰
۲	۵۸/۸	۴۸۰
۳	۵۸/۵	۴۸۰
۴	۵۸/۲	۴۸۰

زیرنویس‌ها

^a Per Unit^{۱۰} Wide Area Monitoring and Control System^{۱۱} System Frequency Response Model^{۱۲} Willingness To Pay^{۱۳} DigSILENT Simulation Language^{۱۴} Automatic Voltage Regulator^{۱۵} Conventional Under Frequency Load Shedding^۱ Union for the Coordination of Transmission of Electricity^۲ Under Voltage Load Shedding^۳ Under Frequency Load Shedding^۴ Particle Swarm Optimization^۵ Distributed Generator^۶ Voltage Stability Risk Index^۷ Online^۸ Phasor Measurement Unit