

# روشی جدید برای بارزدایی ولتاژی با در نظر گرفتن حساسیت ولتاژ و توان راکتیو بارها

جواد مدرس، اسکندر قلی‌پور و امین خدابخشیان

بارزدایی (ولتاژی و فرکانسی) به عنوان آخرین راهکار برای حفظ پایداری و یکپارچگی سیستم قدرت مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳]. در بیشتر مطالعات مربوط به بارزدایی ولتاژی، از مطالعات استاتیک برای انجام بارزدایی استفاده شده است. در این روش‌ها، هدف پیدا کردن یک جواب قابل قبول برای معادلات پخش بار است و روش‌های بهینه‌سازی هوشمند برای کمینه کردن مقدار بارزدایی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳] تا [۵]. به دلیل این که روش‌های بهینه‌سازی هوشمند نیاز به زمان زیادی دارند از این روش‌هایی که از این الگوریتم‌ها استفاده می‌کنند برای مقابله با ناپایداری ولتاژ کوتاه‌مدت مناسب نیستند. علاوه بر این، بارزدایی‌های ولتاژی مبتنی بر مطالعات استاتیک توانایی در نظر گرفتن تأثیر تجهیزات پویا همانند موتورها و تنظیم‌کننده‌های خودکار ولتاژ را ندارند [۶]. برای در نظر گرفتن پدیده‌های دینامیک در بارزدایی ولتاژی، روش‌های مبتنی بر مطالعات دینامیکی پیشنهاد شده است [۶] تا [۸]. در روش‌های دینامیکی، اطلاعات مورد نیاز برای انجام بارزدایی می‌تواند از دو طریق شبیه‌سازی سیستم قدرت در حوزه زمان و یا سیستم‌های اندازه‌گیری گسترده<sup>۱</sup> به دست آید.

در [۹] یک روش بارزدایی ولتاژی به منظور بهینه‌سازی مقدار بارزدایی پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی از داده‌های ارسالی توسط PMUها استفاده نموده و مقدار بارزدایی را با استفاده از الگوریتم DICA<sup>۲</sup> اصلاح شده بهینه می‌کند. اگرچه روش ارائه شده در [۹] به زمان کمی نیاز دارد و سرعت همگرایی آن زیاد است اما برای ناپایداری ولتاژ کوتاه‌مدت قابل استفاده نیست. در [۱۰] بارزدایی ولتاژی با در نظر گرفتن عدم قطعیت بارها مورد بررسی قرار گرفته و از نتایج پخش بار برای کمینه کردن مقدار بارزدایی ولتاژی استفاده شده است. روش پیشنهاد شده در [۱۰] شامل یک رویکرد جدید نسبت به بارزدایی ولتاژی است اما به دلیل این که از نتایج پخش بار استفاده می‌کند، توانایی در نظر گرفتن تأثیر تجهیزات پویا را ندارد. در [۱۱] یک روش بارزدایی با استفاده از مدل‌سازی عدد صحیح ارائه شده است و در آن اهداف مختلفی همانند کمینه کردن مقدار بارزدایی، کمینه کردن تعداد بارهای قطع شده و کمینه کردن هزینه قطع بار در نظر گرفته شده است. همانند دیگر روش‌های مبتنی بر روش‌های بهینه‌سازی هوشمند، روش ارائه شده در [۱۱] نمی‌تواند برای مقابله با ناپایداری ولتاژ کوتاه‌مدت مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این، این روش اطلاعات مورد نیاز خود را از پخش بار دریافت می‌کند و نمی‌تواند تأثیر تجهیزات پویا را در فرایند بارزدایی در نظر بگیرد. در [۱۲] و [۱۳] باس‌های بار توسط تحلیل حساسیت مسیر<sup>۳</sup> که تابعی از حساسیت ولتاژ به توان اکتیو است رتبه‌بندی می‌شوند. سپس باسی که دارای بیشترین حساسیت مسیر است به عنوان باس مناسب

چکیده: بارزدایی، آخرین واکنش برای کنترل و پایداری سیستم قدرت در هنگام وقوع اغتشاش است. تعیین محل و مقدار بارزدایی از مسایلی است که همواره گریبان‌گیر بهره‌برداران سیستم قدرت بوده است. در این مقاله روش جدیدی برای تعیین باس مناسب جهت انجام بارزدایی ولتاژی پیشنهاد می‌شود. در روش پیشنهاد شده بر خلاف روش‌های پیشین از دو شاخص حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو و توان راکتیو بارها استفاده می‌شود تا باس مناسب جهت بارزدایی ولتاژی مشخص شود. در نظر گرفتن توان راکتیو بارها در فرایند تعیین باس مناسب برای بارزدایی ولتاژی باعث قطع توان راکتیو بیشتر در پله‌های ابتدایی بارزدایی ولتاژی شده و پروفیل ولتاژ بهبود می‌یابد. در نتیجه، توان اکتیو کمتری توسط بارزدایی ولتاژی قطع می‌شود. روش پیشنهادی به همراه روش مبتنی بر حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو در شبکه تست ۱۱۸ باس IEEE و شبکه ۳۹ باس New England پیاده‌سازی می‌شوند تا درستی روش پیشنهاد شده مورد بررسی قرار گیرد. نتایج حاصل نشان‌دهنده برتری روش پیشنهادی نسبت به روش حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو است.

کلیدواژه: بارزدایی ولتاژی، باس مؤثر، توان راکتیو، حساسیت ولتاژ، پایداری ولتاژ.

## ۱- مقدمه

عملکرد ایمن و اقتصادی سیستم‌های قدرت نیازمند وجود تعادل بین توان تولیدی و مصرفی و پایداری ولتاژ است. وقوع هر نوع اغتشاش در سیستم قدرت همانند خروج ژنراتور و خط، ممکن است امنیت سیستم قدرت را تحت تأثیر قرار داده و باعث وقوع ناپایداری ولتاژ شود. پایداری ولتاژ به صورت توانایی نگهداری ولتاژ حالت پایدار در همه باس‌های سیستم بعد از وقوع یک اغتشاش تعریف می‌شود و در سه بازه کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت قابل مطالعه است [۱].

برای نگهداری ولتاژ در محدوده مجاز از روش‌های پیشگیرانه و اصلاحی استفاده می‌شود. روش‌های پیشگیرانه وقتی مورد استفاده قرار می‌گیرند که سیستم قدرت در مرحله هشدار قرار دارد و هنوز وارد مرحله بحرانی نشده است. پخش دوباره توان اکتیو و راکتیو جزء روش‌های پیشگیرانه محسوب می‌شوند. اگر روش‌های پیشگیرانه نتوانند وضعیت سیستم را به وضعیت عادی برگردانند آن‌گاه روش‌های اصلاحی همانند جابه‌جایی تولید و بارزدایی فعال می‌شوند [۲]. در بین روش‌های اصلاحی،

این مقاله در تاریخ ۱۱ بهمن ماه ۱۳۹۴ دریافت و در تاریخ ۱۵ خرداد ماه ۱۳۹۵ بازنگری شد.

جواد مدرس، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، (email: j.modarresi@eng.ui.ac.ir).

اسکندر قلی‌پور، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، (email: E.gholipour@eng.ui.ac.ir).

امین خدابخشیان، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، (email: aminkh@eng.ui.ac.ir).

1. Wide Area Measurement System
2. Discrete Imperialistic Competition Algorithm
3. Trajectory Sensitivity Analysis

بارزدایی پیشنهادشده، این روش همراه با روش حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو در نرم‌افزار دیگسایلنت بر روی شبکه تست ۱۱۸ باسه IEEE و شبکه ۳۹ باسه New England پیاده‌سازی می‌شود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که روش پیشنهادشده با قطع بار در باس مناسب‌تر، توان راکتیو بیشتری را قطع می‌کند و نسبت به روش حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو نیاز به قطع توان اکتیو کمتری دارد.

## ۲- مدل‌سازی تأخیر ناشی از محاسبات و ارسال اطلاعات

در این بخش، نحوه مدل‌سازی تأخیر ناشی از محاسبات در مرکز کنترل و تأخیر ناشی از PMUها با استفاده از قابلیت DPL نرم‌افزار دیگسایلنت مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور، ابتدا برخی از ویژگی‌های کلیدی نرم‌افزار دیگسایلنت برای انجام شبیه‌سازی زمانی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

برای انجام شبیه‌سازی زمانی در نرم‌افزار دیگسایلنت، ابتدا باید علاوه بر شرایط اولیه شبکه، رویدادهای تعیین‌شده برای شبیه‌سازی زمانی مورد بررسی قرار گرفته و سپس شبیه‌سازی زمانی انجام گیرد. به عبارت دیگر، این نرم‌افزار ابتدا همه شرایط اولیه و رویدادهای تعریف‌شده در نرم‌افزار (همانند ورود و خروج تجهیزات) را بررسی کرده و سپس شروع به شبیه‌سازی زمانی می‌کند. بنابراین در صورتی که در حین انجام شبیه‌سازی زمانی، رویدادی همانند حذف بار توسط کاربر و با استفاده از DPL تعریف شود، این رویداد تا زمانی که شبیه‌سازی زمانی انجام‌شده از ابتدا شروع نشود، در شبیه‌سازی زمانی در نظر گرفته نمی‌شود. علاوه بر این تا زمانی که شبیه‌سازی زمانی انجام‌شده در نرم‌افزار دیگسایلنت از ابتدا شروع نشود، انجام شبیه‌سازی زمانی جدید از ادامه شبیه‌سازی زمانی قبلی شروع می‌شود. به طور مثال اگر شبیه‌سازی زمانی اول تا زمان  $t_1$  انجام شود و شبیه‌سازی زمانی ریست نشود، شبیه‌سازی زمانی دوم از زمان  $t_1$  تا زمان  $t_2$  که  $t_2 > t_1$  انجام خواهد شد.

با توجه به توضیحات ارائه‌شده، روش نشان داده شده در شکل ۱ برای در نظر گرفتن تأخیر ناشی از محاسبات و تأخیر ناشی از PMUها در نرم‌افزار دیگسایلنت و با استفاده از DPL مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به شکل ۱، ابتدا مدت زمان مورد نیاز برای انجام شبیه‌سازی زمانی ( $t_s$ ) تعیین شده و شرایط اولیه محاسبه می‌شوند. سپس شبیه‌سازی زمانی با شروع از زمان صفر ( $t_i = 0$ ) و با پله‌های زمانی  $\Delta t$  شروع می‌شود. روش‌های کنترلی متمرکز که در مراکز کنترل مورد استفاده قرار می‌گیرند، نیازمند یک بستر مخابراتی هستند تا اطلاعات مورد نیاز را از PMUها دریافت کنند. علاوه بر این، انجام محاسبات در مراکز دیسپاچینگ نیاز به زمان دارد و از این رو مقدار  $\Delta t$  باید برابر مدت زمان لازم برای اندازه‌گیری و انتقال اطلاعات به مرکز کنترل و انجام محاسبات در آن مرکز در نظر گرفته شود.

بعد از انجام محاسبات در مرکز کنترل، اگر نیاز به اعمال رویداد جدیدی در سیستم قدرت نباشد، شبیه‌سازی برای  $\Delta t$  بعدی انجام می‌شود. رویداد مورد نظر می‌تواند قطع یا وصل انواع تجهیزات و یا بار باشد. اگر نیاز به اعمال رویداد جدیدی باشد، ابتدا رویداد مورد نظر اعمال شده و محاسبات مربوط به شبیه‌سازی زمانی از زمان صفر شروع می‌شوند تا رویداد مورد نظر در شبیه‌سازی زمانی در نظر گرفته شود. سپس شبیه‌سازی زمانی تا زمان  $t_{i+1}$  و بدون ریست‌کردن شبیه‌سازی انجام می‌شود. اگر مدت زمان شبیه‌سازی به زمان  $t_s$  برسد، شبیه‌سازی زمانی متوقف می‌شود.

برای انجام بارزدایی ولتاژی انتخاب می‌شود. در [۱۴] باس مناسب جهت بارزدایی ولتاژی با استفاده از محاسبه حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو در باس بحرانی تعیین می‌شود. باس بحرانی باسی است که بیشترین افت ولتاژ را در اثر وقوع خطا تجربه کرده است. روش‌های مبتنی بر حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو از روش‌های بهینه‌سازی هوشمند برای کمینه‌کردن مقدار بارزدایی استفاده نمی‌کنند و می‌توانند اطلاعات مورد نیاز را علاوه بر پخش بار از شبیه‌سازی دینامیکی و PMUها دریافت کنند. بنابراین این روش‌ها توانایی مقابله با ناپایداری ولتاژ کوتاه‌مدت را دارند و می‌توانند تأثیر تجهیزات پویا را در نظر بگیرند. روش‌های مبتنی بر حساسیت ولتاژ با انتخاب بهترین باس برای بارزدایی ولتاژی سعی دارند تا مقدار بارزدایی را کاهش دهند.

در روش‌های مبتنی بر حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو، باس مناسب برای بارزدایی تنها با توجه به حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو تعیین می‌شود اما در برخی از موارد ممکن است حساسیت ولتاژ باس بحرانی نسبت به توان اکتیو دو یا چند باس تقریباً با هم یکسان باشد. در این موارد باید علاوه بر حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو از شاخص دیگری برای انتخاب مؤثرترین باس برای انجام بارزدایی ولتاژی استفاده شود تا بتوان مقدار بارزدایی را بیشتر کاهش داد. یکی از شاخص‌هایی که می‌توان بر اساس آن تصمیم‌گیری نمود، توان راکتیو بارها است زیرا هرچه تقاضای توان راکتیو در شبکه کاهش یابد، پایداری ولتاژ سیستم قدرت بهبود می‌یابد [۷] و [۱۵].

در این مقاله، یک روش جدید بر مبنای حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو و توان راکتیو بارها برای تعیین باس مناسب جهت بارزدایی ولتاژی پیشنهاد می‌شود. برای این منظور، یک معادله دوشاخه‌ای که ترکیبی وزنی از توان راکتیو بارها و حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو بارها است ارائه می‌شود. به دلیل این که در روش پیشنهادشده از روش‌های بهینه‌سازی هوشمند استفاده نمی‌شود، این روش برای مقابله با ناپایداری ولتاژ در هر سه بازه کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت مناسب است. علاوه بر این، اطلاعات مورد نیاز برای بارزدایی با استفاده از PMUها جمع‌آوری می‌شود. از این رو روش پیشنهادشده در این مقاله توانایی در نظر گرفتن تأثیر تجهیزات پویا را دارد.

روش ارائه‌شده در این مقاله، باس مناسب برای بارزدایی ولتاژی را طوری انتخاب می‌کند که در پله‌های ابتدایی بارزدایی توان راکتیو بیشتری قطع شود. با قطع توان راکتیو بیشتر توسط روش پیشنهادی، پروفیل ولتاژ بهبود یافته و توان اکتیو کمتری نسبت به روش حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو قطع می‌شود زیرا در عمل یک زمان بارزدایی بحرانی برای انجام بارزدایی وجود دارد. اگر زمان بحرانی سپری شود، مقدار بارزدایی مورد نیاز با زمان افزایش پیدا می‌کند تا زمان بحرانی نهایی نیز سپری شود. بعد از زمان بحرانی نهایی، بارزدایی تأثیری نداشته و سیستم دچار فروپاشی خواهد شد [۱۴].

روش پیشنهادی یک روش بارزدایی متمرکز است و فرض می‌شود که اطلاعات مورد نیاز برای انجام بارزدایی توسط  $PMU^1$ ها تأمین می‌شود. دریافت اطلاعات از  $PMU$ ها با تأخیر همراه است. علاوه بر این، انجام محاسبات در مرکز کنترل نیز نیازمند زمان است. برای در نظر گرفتن تأخیر ناشی از محاسبات و ارسال اطلاعات توسط  $PMU$ ها از قابلیت  $DPL^2$  نرم‌افزار دیگسایلنت استفاده می‌شود. به منظور بررسی روش

1. Phasor Measurement Unit  
2. DigSILENT Program Language

$$S_{VP} = \frac{\partial V}{\partial P} \approx \frac{\Delta V}{\Delta P} = -J_{RQV}^{-1} J_{\tau} J_{\nu}^{-1} \Delta P \quad (7)$$

#### ۴- روش پیشنهادی برای بارزدایی ولتاژی

در روش حساسیت، از حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو برای تعیین باس مناسب جهت انجام بارزدایی ولتاژی استفاده می‌شود. در روش پیشنهادی، علاوه بر شاخص حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو، توان راکتیو بارها نیز برای تعیین باس مناسب جهت بارزدایی ولتاژی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در نظر گرفتن توان راکتیو بارها باعث قطع توان راکتیو بیشتر شده و پروفیل ولتاژ بهبود می‌یابد. در نتیجه توان اکتیو کمتری برای حفظ ولتاژ در فرایند بارزدایی قطع می‌شود. برای در نظر گرفتن توان راکتیو بارها، یک معادله که تابعی وزنی از حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو و توان راکتیو بارها است پیشنهاد می‌شود. این تابع وزنی به صورت (۸) بوده و تنها برای باس‌هایی که دارای بار هستند محاسبه می‌شود

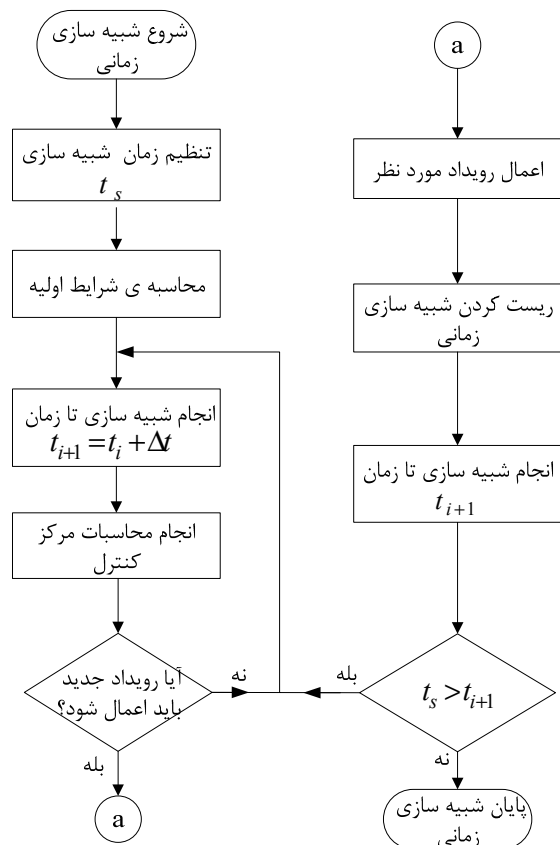
$$LBR_j = K_{\nu} \frac{S_{VPj}}{S_{VPmax}} + K_{\tau} \sin \phi_j \quad (8)$$

در (۸) اولویت قطع بار موجود در باس  $j$  ام،  $\phi_j$  زاویه ضریب توان بار موجود در باس  $j$  ام،  $S_{VPj}$  حساسیت ولتاژ باس بحرانی نسبت به توان اکتیو بار موجود در باس  $j$  ام،  $S_{VPmax}$  حداکثر حساسیت ولتاژ باس بحرانی نسبت به توان اکتیو یک بار در سیستم قدرت و  $K_{\nu}$  و  $K_{\tau}$  ضرایب وزنی هستند که به ساختار سیستم قدرت و توان راکتیو بارها بستگی دارند. باسی که بیشترین  $LBR$  را دارد مؤثرترین باس برای انجام بارزدایی ولتاژ است.

با توجه به مطالب گفته‌شده، روند بارزدایی ولتاژی پیشنهادشده به صورت شکل ۲ قابل بیان است. با توجه به این شکل، ابتدا اطلاعات مورد نیاز از سیستم قدرت دریافت شده و سپس حاشیه پایداری ولتاژ برای سیستم قدرت محاسبه می‌شود. ولتاژ باس‌ها و حاشیه پایداری ولتاژ سیستم با مقادیر آستانه ( $V_{th}$  مقدار آستانه ولتاژ و  $LM_{th}$  مقدار آستانه حاشیه پایداری ولتاژ) مقایسه می‌شوند، در صورتی که ولتاژ باس‌ها و حاشیه پایداری ولتاژ سیستم قدرت از مقادیر آستانه کمتر باشند، عملیات بارزدایی ولتاژی شروع می‌شود.

در روش پیشنهادی از دو شاخص برای فعال‌سازی بارزدایی ولتاژی استفاده می‌شود زیرا در شبکه‌هایی که درصد جبران‌سازی توان راکتیو در آنها زیاد است، تنها استفاده از دامنه ولتاژ برای بارزدایی ولتاژی شاخص مناسبی نیست و باید دامنه ولتاژها همراه با شاخص دیگری که معمولاً مربوط به پایداری ولتاژ است مورد استفاده قرار گیرد [۱۷].

بعد از فعال‌شدن بارزدایی ولتاژی، ابتدا باسی که بیشترین افت ولتاژ را در اثر وقوع خطا تجربه کرده است به عنوان باس بحرانی انتخاب می‌گردد. سپس (۸) برای تمام باس‌های بار محاسبه می‌شود. باسی که مقدار  $LBR$  آن بیشتر است بهترین باس برای انجام بارزدایی است و درصد ثابتی از توان اکتیو و راکتیو آن قطع می‌شود [۱۸] و [۱۹]. سپس اطلاعات دریافتی از PMUها در  $\Delta t$  بعدی مورد مطالعه قرار می‌گیرند تا بار جدید برای بارزدایی انتخاب گردد. هر باری که برای بارزدایی انتخاب می‌شود تنها درصد ثابتی از آن قطع می‌گردد و قطع‌شدن بیشتر یک بار منوط به انتخاب‌شدن در  $\Delta t$  های بعدی است. این روند تا زمانی که ولتاژ باس‌ها و حاشیه پایداری ولتاژ سیستم قدرت از مقادیر آستانه بیشتر گردند، ادامه می‌یابد.



شکل ۱: مدل‌سازی تأخیر ناشی از محاسبات در مرکز کنترل و تأخیر ناشی از ارسال اطلاعات در نرم‌افزار دیگسایلنت با استفاده از قابلیت DPL.

#### ۳- حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو

حساسیت ولتاژ یک باس نسبت به تغییرات توان اکتیو تزریقی در باس‌های دیگر سیستم قدرت می‌تواند توسط ماتریس ژاکوبین ارزیابی شود. ماتریس ژاکوبین در سیستم قدرت به صورت (۱) تعریف می‌شود

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{\nu} & J_{\tau} \\ J_{\tau} & J_{\nu} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (1)$$

در (۱)  $\Delta P$  و  $\Delta Q$  تغییرات توان اکتیو و راکتیو تزریقی به باس‌ها و  $\Delta \delta$  و  $\Delta V$  تغییرات دامنه ولتاژ باس‌ها و تغییرات زاویه ولتاژها هستند. با جداسازی معادلات مربوط به تغییرات توان اکتیو و راکتیو داریم

$$\Delta P = J_{\nu} \Delta \delta + J_{\tau} \Delta V \quad (2)$$

$$\Delta Q = J_{\tau} \Delta \delta + J_{\nu} \Delta V \quad (3)$$

تغییرات زاویه ولتاژها می‌تواند به صورت زیر و با استفاده از (۲) به دست آید [۱۶]

$$\Delta \delta = J_{\nu}^{-1} \Delta P - J_{\nu}^{-1} J_{\tau} \Delta V \quad (4)$$

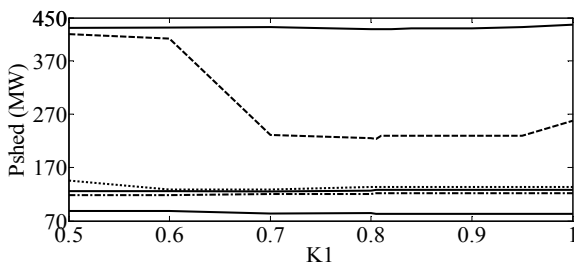
با جایگذاری (۴) در (۳) و به دست آوردن تغییرات ولتاژ بر حسب تغییرات توان اکتیو و راکتیو داریم [۱۶]

$$\Delta V = J_{RQV}^{-1} \Delta Q - J_{RQV}^{-1} J_{\tau} J_{\nu}^{-1} \Delta P \quad (5)$$

که

$$J_{RQV} = J_{\nu} - J_{\tau} J_{\nu}^{-1} J_{\tau} \quad (6)$$

با صرف نظر از تغییرات توان راکتیو، حساسیت ولتاژ نسبت به تغییرات توان اکتیو ( $S_{VP}$ ) به صورت (۷) به دست می‌آید

شکل ۳: تغییرات مقدار بارزدایی نسبت به  $K_1$ .

$\Delta t$  برابر ۱۵۰ ms در نظر گرفته می‌شود که ۵۰ ms آن مربوط به پردازش اطلاعات در مرکز کنترل است. زمان مربوط به پردازش اطلاعات می‌تواند کمتر و یا بیشتر از ۵۰ ms باشد که این موضوع به قدرت کامپیوتر استفاده‌شده در مرکز کنترل بستگی دارد. مقدار پله‌های بارزدایی در شبکه تست ۱۱۸ باسه IEEE برابر ۱۰ درصد و در شبکه ۳۹ باسه New England برابر ۵ درصد در نظر گرفته شده است. زیرا اندازه بارها در شبکه ۳۹ باسه New England بزرگ‌تر از شبکه تست ۱۱۸ باسه IEEE است.

### ۵-۱ تعیین ضرایب وزنی $K_1$ و $K_2$

مهم‌ترین موضوع در روش بارزدایی پیشنهادشده تعیین ضرایب وزنی  $K_1$  و  $K_2$  است. این ضرایب به آرایش شبکه و بارهای سیستم قدرت بستگی دارند و در صورتی که به درستی انتخاب نشوند، مقدار بارزدایی افزایش خواهد یافت. برای آن که دید بهتری در مورد نحوه تغییرات مقدار بارزدایی نسبت به تغییر  $K_1$  به دست آید در شکل ۳ این تغییرات برای شبکه تست ۱۱۸ باسه IEEE و برای ۶ سناریو نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۳ با کاهش  $K_1$  ابتدا مقدار بار قطع‌شده کاهش یافته و سپس افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر اگر مقدار  $K_1$  به درستی انتخاب شود می‌توان مقدار بارزدایی را در روش پیشنهادشده کاهش داد.

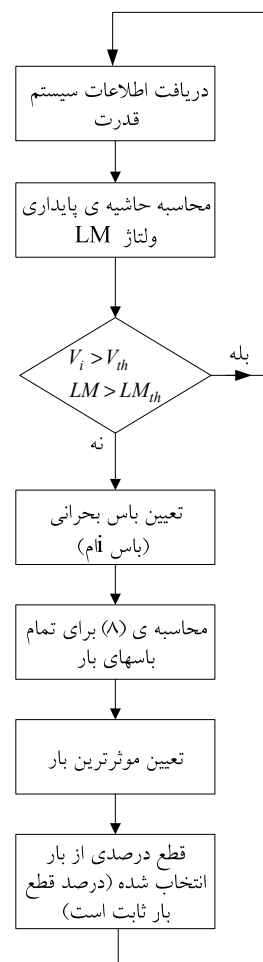
برای آن که مقدار بار قطع‌شده توسط روش پیشنهادی همیشه برابر یا کمتر از روش حساسیت ولتاژ باشد، مقدار  $K_1$  باید به اندازه کافی بزرگ انتخاب شود. اگر مقدار  $K_1$  برابر بزرگ‌ترین مقداری که از بررسی خروجی‌های مختلف به دست می‌آید انتخاب شود می‌توان اطمینان نمود که مقدار بار قطع‌شده در روش پیشنهادی همیشه کمتر و یا مساوی روش حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو خواهد بود. با توجه به تغییرات مقدار بارزدایی نسبت به تغییرات  $K_1$ ، روشی همانند آنچه در شکل ۴ نشان داده شده است برای تعیین  $K_1$  پیشنهاد می‌شود.

در این روش، خروج خطوط، ژنراتورها و ترکیبی از خروج خطوط و ژنراتورها مورد بررسی قرار می‌گیرند. در هر مورد، ابتدا مقدار  $K_1$  برابر صفر قرار داده شده و بارزدایی ولتاژی با استفاده از روش پیشنهادی انجام می‌شود. سپس مقدار  $K_1$  و بار قطع‌شده ذخیره می‌شوند. برای هر خروجی این روند تا رسیدن  $K_1$  به عدد یک تکرار می‌شود و بعد از آن بزرگ‌ترین مقدار  $K_1$  که متناسب با کمترین مقدار بارزدایی است در بردار  $K_m$  ذخیره می‌شود. بعد از بررسی کلیه خروجی‌ها، مقادیر  $K_1$  و  $K_2$  به صورت (۱۱) و (۱۲) به دست می‌آیند

$$K_1 = \max\{K_m\} \quad (11)$$

$$K_2 = 1 - K_1 \quad (12)$$

با استفاده از روش نشان داده شده در شکل ۴، مقدار  $K_1$  و  $K_2$  برای شبکه ۱۱۸ باسه به ترتیب برابر ۰/۸۰۵ و ۰/۱۹۵ و برای شبکه New England برابر ۰/۹ و ۰/۱ به دست می‌آیند.



شکل ۴: روندنمای بارزدایی پیشنهادشده.

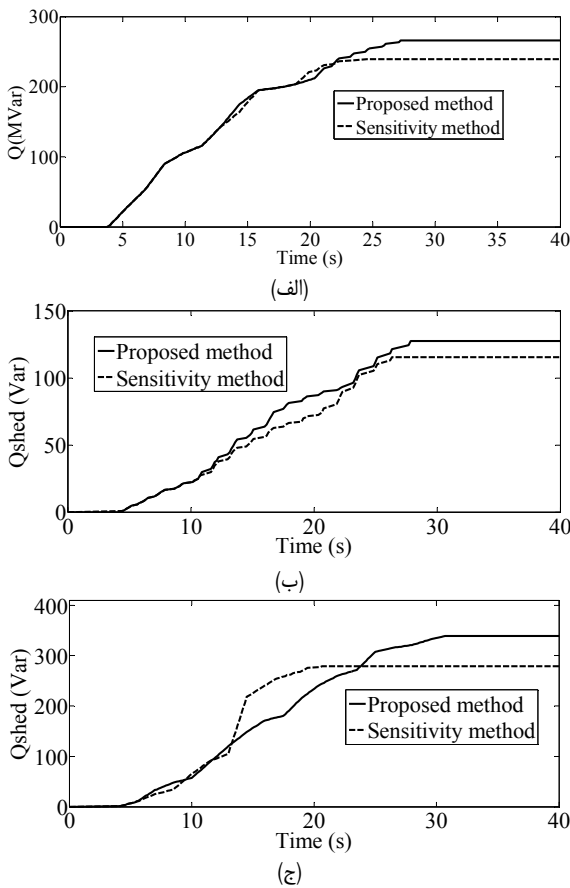
### ۵- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، عملکرد روش بارزدایی ولتاژی مبتنی بر حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو و روش پیشنهادی در شبکه ۱۱۸ باسه IEEE [۲۰] و شبکه ۳۹ باسه New England [۲۱] مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این شبکه‌ها، گاورنرها و AVRها توسط مدل‌های نوع اول IEEE مدل می‌شوند. همچنین بارها به صورت (۹) و (۱۰) مدل شده‌اند [۲۲]

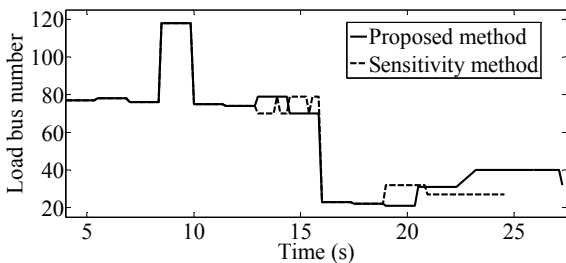
$$\frac{P}{P_c} = 0.83 - 0.73 \frac{V}{V_c} + 0.47 \left(\frac{V}{V_c}\right)^2 \quad (9)$$

$$\frac{Q}{Q_c} = 6.7 - 15.3 \frac{V}{V_c} + 9.6 \left(\frac{V}{V_c}\right)^2 \quad (10)$$

بر اساس نظر WSCC<sup>۱</sup>، یک سیستم قدرت باید حداقل دارای حاشیه امنیت ۵٪ در حالت کار عادی خود باشد [۲۳]. از طرف دیگر در بیشتر شبکه‌های برق معمولاً بارزدایی ولتاژی در ولتاژهای کمتر از ۰/۹ pu شروع می‌شود [۲۴]. بنابراین در این مقاله مقادیر  $V_{th}$  و  $LM_{th}$  به ترتیب برابر ۰/۹ و ۵٪ در نظر گرفته می‌شوند. علاوه بر این برای جلوگیری از فعال شدن بارزدایی ولتاژی در فرایند حذف خطای عادی باید بارزدایی ولتاژی با تأخیر فعال شود [۱۴]. یک مقدار نوعی برای این تأخیر می‌تواند برابر ۳ ثانیه در نظر گرفته شود [۲۴]. با توجه به استاندارد، مقدار تأخیر در ارسال و دریافت اطلاعات باید کمتر از ۱۰۰ ms باشد [۲۵]. بنابراین مقدار



شکل ۵: تغییرات توان رکتیو قطع شده در روش‌های حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو و پیشنهادی برای شبکه تست ۱۱۸ باسه IEEE، (الف) خروج خط ۸۲-۷۷ و G25، (ب) خروج خط ۶۵-۳۸ و G26 و (ج) خروج خط ۱۰۰-۹۴ و G85.

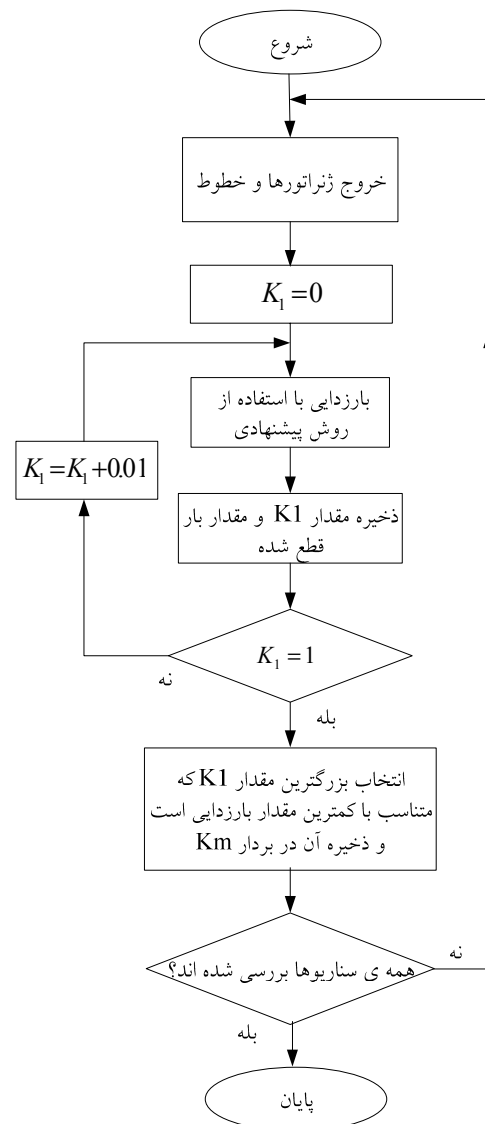


شکل ۶: بارهای انتخاب شده برای انجام بارزدایی در روش‌های بارزدایی حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو و پیشنهادی، شبکه تست ۱۱۸ باسه IEEE و خروج خط ۸۲-۷۷ و G25 و.

قطع کرده و باعث تغییر روند انتخاب بارها برای انجام بارزدایی می‌شود. این تغییر روند در جهتی است که باعث قطع توان رکتیو بیشتر در پله‌های ابتدایی بارزدایی شده و توان اکتیو قطع شده را کاهش می‌دهد. نمونه‌ای از تغییر روند انتخاب بارها برای انجام بارزدایی در شکل ۶ نشان داده شده است.

در شکل‌های ۷ و ۸، پروفیل ولتاژ باس‌ها بعد از اعمال بارزدایی ولتاژی با استفاده از روش پیشنهادی و روش حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو برای سه خروج مطالعه شده در جدول ۱ نشان داده شده است. بر اساس این شکل‌ها، روش پیشنهادی و روش حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو توانسته‌اند ولتاژ همه باس‌ها را به بالای ۰.۹ pu بازگردانند با این تفاوت که روش پیشنهادی با قطع توان اکتیو کمتری ولتاژ باس‌ها را به بالای ۰.۹ pu بازگردانده است.

در جدول ۳ فرکانس شبکه تست ۱۱۸ باسه IEEE قبل و بعد از خروج واحدها و خطوط مربوط به جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به این

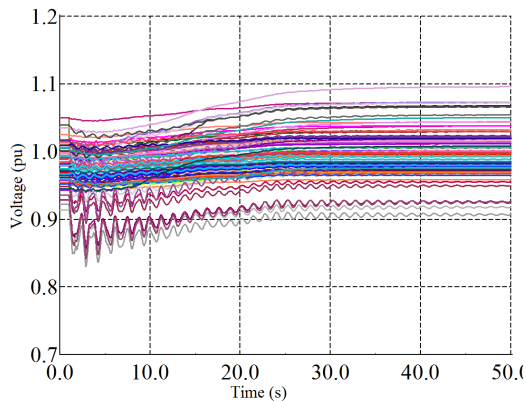


شکل ۴: روش پیشنهادی برای تعیین مقدار  $K_1$ .

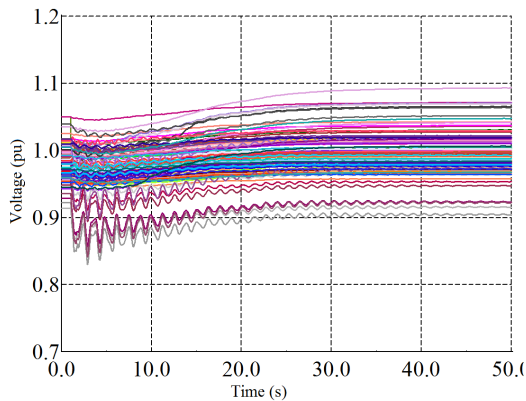
## ۲-۵ بارزدایی با استفاده از روش پیشنهادی

در این بخش، روش بارزدایی پیشنهاد شده به شبکه تست ۱۱۸ باسه IEEE و شبکه ۳۹ باسه New England اعمال شده و نتایج حاصل با نتایج به دست آمده از روش حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو مقایسه می‌شوند. در جداول ۱ و ۲ نتایج حاصل از بارزدایی با استفاده از روش حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو و روش پیشنهادی نشان داده شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در این جداول، روش پیشنهاد شده در این مقاله با انتخاب باس‌های مناسب‌تر برای قطع بار، از افت ولتاژ جلوگیری کرده و توان اکتیو کمتری را نسبت به روش حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو قطع می‌کند. دلیل عملکرد بهتر روش پیشنهاد شده در این نکته نهفته است که روش پیشنهادی با انتخاب مناسب باس‌ها برای بارزدایی ولتاژی، توان رکتیو بیشتری را قطع می‌کند و در نتیجه پروفیل ولتاژ بهبود یافته و از افت بیشتر ولتاژ جلوگیری می‌شود.

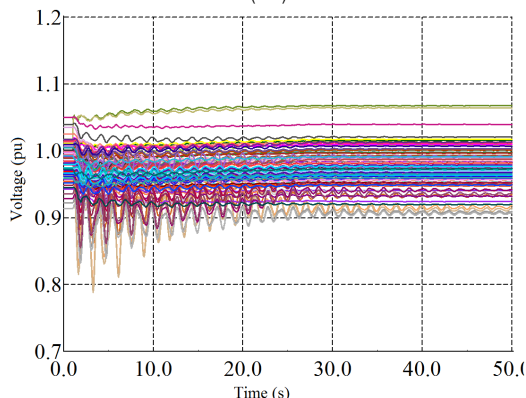
برای بررسی دقیق‌تر روش پیشنهادی، عملکرد روش پیشنهادی و روش حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو در شبکه ۱۱۸ باسه IEEE با جزئیات بیشتری مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل ۵ تغییرات توان رکتیو قطع شده در سناریوهای بررسی شده در جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، روش پیشنهادی مقدار توان رکتیو بیشتری را



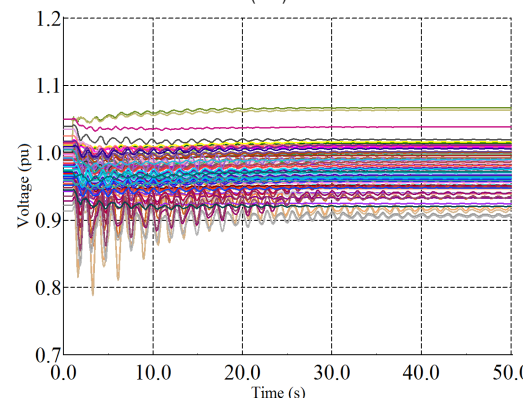
(الف)



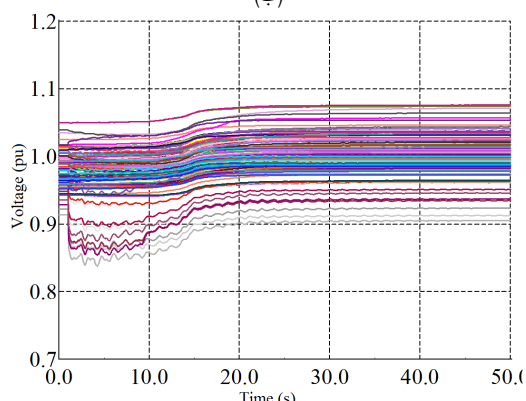
(الف)



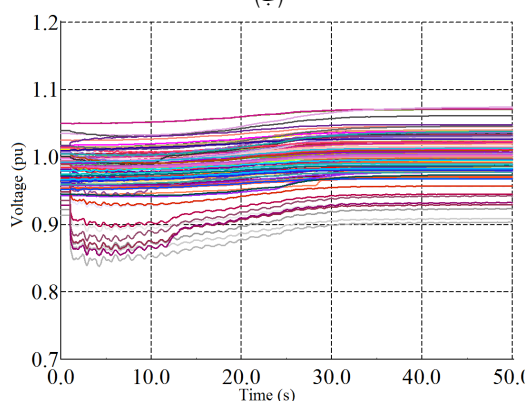
(ب)



(ب)



(ج)



(ج)

شکل ۸: پروفیل ولتاژ بعد از بارزدایی با روش حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو در شبکه ۱۱۸ باسه IEEE، (الف) خروج خط ۸۲-۷۷ و G۲۵، (ب) خروج خط ۶۵-۳۸ و G۲۶ و (ج) خروج خط ۱۰۰-۹۴ و G۸۵

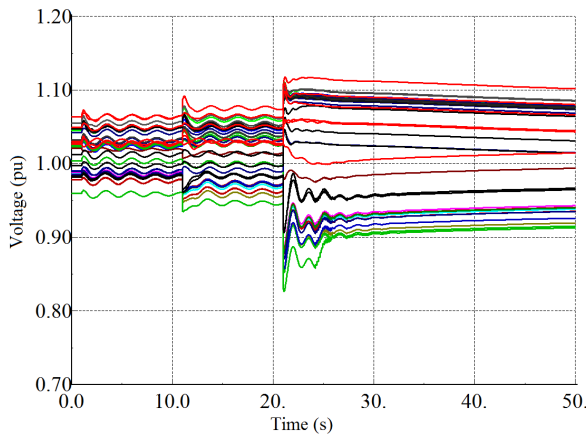
شکل ۷: پروفیل ولتاژ بعد از بارزدایی با روش پیشنهادشده در شبکه ۱۱۸ باسه IEEE، (الف) خروج خط ۸۲-۷۷ و G۲۵، (ب) خروج خط ۶۵-۳۸ و G۲۶ و (ج) خروج خط ۱۰۰-۹۴ و G۸۵

جدول ۱: بارزدایی ولتاژی با استفاده از روش پیشنهادشده و روش حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو در شبکه ۱۱۸ باسه IEEE.

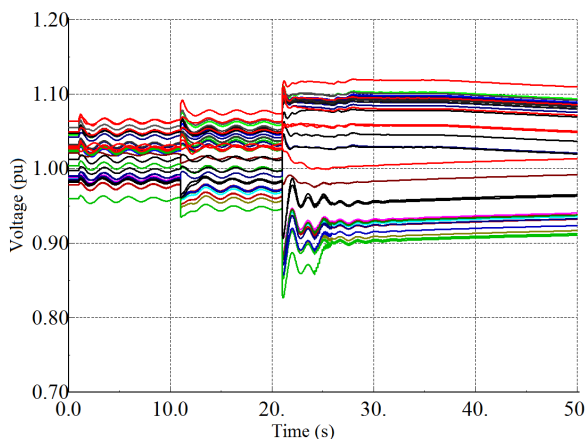
روش حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو		روش پیشنهادی		خطوط و ژنراتورهای قطع شده
Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	
۲۳۹,۰	۵۸۶,۳	۲۶۶,۱	۵۵۷,۸	خط ۸۲-۷۷ و G۲۵
۱۱۵,۶۷	۲۸۱,۴۷	۱۲۷,۶۵	۲۳۹,۳۵	خط ۶۵-۳۸ و G۲۶
۲۷۹,۰۰	۷۳۸,۵۰	۳۳۸,۵۴	۵۶۷,۱۰	خط ۱۰۰-۹۴ و G۸۵

جدول ۲: بارزدایی ولتاژی با استفاده از روش پیشنهادشده و روش حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو در شبکه ۳۹ باسه NEW ENGLAND.

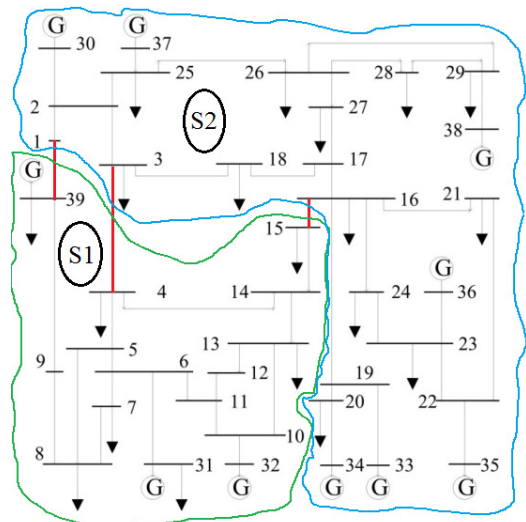
روش حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو		روش پیشنهادی		خطوط و ژنراتورهای قطع شده
Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	
۱۴۲,۲	۴۱۰,۳	۱۹۸,۲	۳۰۵,۶	خط ۱۱-۱۰ و G۲
۲۱۰,۲	۵۷۲,۲	۱۸۵,۰	۵۳۲,۶	خط ۴-۳ و G۲
۱۳۷,۵	۶۰۷,۲	۱۳۷,۵	۶۰۷,۲	خط ۲-۱ و G۱



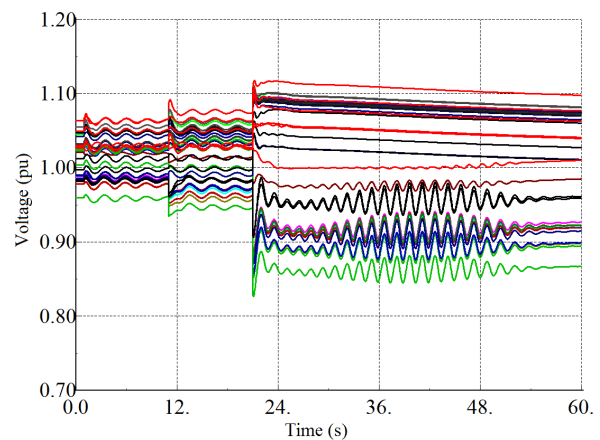
شکل ۱۱: پروفیل ولتاژ بعد از بارزدایی ولتاژی با روش پیشنهاد شده در جزیره S<sub>۱</sub>.



شکل ۱۲: پروفیل ولتاژ بعد از بارزدایی ولتاژی با روش حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو در جزیره S<sub>۱</sub>.



شکل ۹: تشکیل دو جزیره S<sub>۱</sub> و S<sub>۲</sub> در شبکه New England با خروج سه خط.



شکل ۱۰: پروفیل ولتاژ شبکه New England بعد از جزیره‌ای شدن.

جدول ۳: فرکانس شبکه ۱۱۸ باسه IEEE قبل و بعد از بارزدایی با استفاده از روش پیشنهادی و روش حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو (بر حسب Hz).

روش پیشنهادی		روش حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو		خطوط و ژنراتورهای قطع شده
قبل از بارزدایی	بعد از بارزدایی	قبل از بارزدایی	بعد از بارزدایی	
۶۰	۶۰٫۸۱	۶۰	۶۰٫۸۷	خط ۸۲-۷۷ و ۷۷-۲۵ G
۶۰	۵۹٫۷۷	۶۰	۵۹٫۸۲	خط ۶۵-۳۸ و ۳۸-۲۶ G
۶۰	۶۰٫۹۴	۶۰	۶۱٫۲۶	خط ۱۰۰-۹۴ و ۹۴-۸۵ G

جدول، فرکانس سیستم قدرت بعد از بارزدایی ولتاژی در برخی از حالت‌ها تقریباً یک هرتز با فرکانس نامی سیستم قدرت (۶۰ Hz) فاصله دارد زیرا در بارزدایی ولتاژی هدف بهبود پروفیل ولتاژ است و هیچ قیدی در مورد فرکانس در بارزدایی ولتاژی در نظر گرفته نمی‌شود. از این رو باید برای بازگرداندن فرکانس به بازه عادی سیستم قدرت بارزدایی فرکانسی فعال شود که موضوع این مقاله نیست. بارزدایی فرکانسی می‌تواند توسط رله‌های زیر فرکانس و یا روش‌های بارزدایی فرکانسی انجام شود که نمونه‌ای از روش‌های بارزدایی فرکانسی در [۲۶] تا [۲۹] ارائه شده است.

۳-۵ بررسی جزیره‌ای شدن سیستم

در برخی از حوادثی که در سیستم‌های قدرت به وقوع می‌پیوندد، ممکن است چندین تجهیز به صورت پشت سر همی از مدار خارج شوند و باعث بروز حالت جزیره‌ای در شبکه گردند. برای بررسی عملکرد روش پیشنهادی در حالت جزیره‌ای شدن، فرض می‌شود که خطوط ۳۹-۱، ۴-۳ و ۱۶-۱۵ در شبکه New England به ترتیب در زمان‌های  $t=1s$  و

در  $t=21s$  در اثر وقوع خطا از مدار خارج می‌شوند و در نتیجه، شبکه New England به دو جزیره S<sub>۱</sub> و S<sub>۲</sub> همانند شکل ۹ تقسیم می‌شود. پروفیل ولتاژ شبکه New England بعد از جزیره‌ای شدن در شکل ۱۰ آمده است. با توجه به این شکل، ولتاژ باس‌های ۱۲، ۱۵ و ۴ از جزیره S<sub>۱</sub> کمتر از ۰٫۹ pu است و بنابراین باید در جزیره S<sub>۱</sub> بارزدایی ولتاژی به منظور بازگرداندن ولتاژ باس‌ها به بالای ۰٫۹ pu انجام شود. مقدار توان اکتیو و راکتیو قطع شده به منظور بازگرداندن ولتاژ باس‌ها به بالای ۰٫۹ pu در جزیره S<sub>۱</sub> در جدول ۴ نشان داده شده است. همچنین پروفیل ولتاژ شبکه New England بعد از بارزدایی با استفاده از روش‌های پیشنهادی و حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۴ و شکل‌های ۱۱ و ۱۲، روش پیشنهاد شده با قطع توان اکتیو کمتری ولتاژ باس‌ها را به بالای ۰٫۹ pu رسانده است. باید به این نکته توجه نمود که ولتاژ همه باس‌ها در جزیره S<sub>۲</sub> بالاتر از ۰٫۹ pu است و در نتیجه نیازی به انجام بارزدایی ولتاژ در جزیره S<sub>۲</sub> نیست.

جدول ۵: فرکانس در دو جزیره  $S_1$  و  $S_2$  با و بدون بارزدایی ولتاژی.

جزیره $S_2$		جزیره $S_1$	
بدون بارزدایی ولتاژی	با بارزدایی ولتاژی	بدون بارزدایی ولتاژی	با بارزدایی ولتاژی
۶۱,۴۰	۶۱,۴۰	۵۸,۷۶	۵۷,۸۱

جدول ۴: بارزدایی ولتاژی با استفاده از روش پیشنهاد شده و روش حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو در شبکه NEW ENGLAND در حالت جزیره‌ای شدن.

روش حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو		روش پیشنهادی	
Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)
۱۰۸,۳۰	۳۸۵,۰۰	۱۳۰,۷۰	۳۳۶,۰۰

جدول ۷: شماره باس بار قطع شده، زمان قطع بار و درصد قطع بار در روش حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو.

شماره پله بارزدایی	شماره باس بار قطع شده	زمان قطع بار (s)	درصد قطع بار (%)
۱	۱۵	۲۴,۱	۵
۲	۱۵	۲۴,۲۵	۵
۳	۱۵	۲۴,۴۰	۵
۴	۱۵	۲۴,۵۵	۵
۵	۱۵	۲۴,۷۰	۵
۶	۱۵	۲۵,۳۰	۵
۷	۳	۲۵,۶۰	۵
۸	۳	۲۵,۷۵	۵
۹	۳	۲۵,۹۰	۵
۱۰	۳	۲۶,۰۵	۵
۱۱	۳	۲۷,۱۰	۵
۱۲	۳	۲۷,۲۵	۵
۱۳	۳	۲۷,۴۰	۵
۱۴	۳	۲۷,۵۵	۵
۱۵	۳	۲۷,۷۰	۵
۱۶	۳	۲۹,۰۵	۵
۱۷	۱۶	۲۹,۲۰	۵

جدول ۶: شماره باس بار قطع شده، زمان قطع بار و درصد قطع بار در روش پیشنهادی.

شماره پله بارزدایی	شماره باس بار قطع شده	زمان قطع بار (s)	درصد قطع بار (%)
۱	۱۵	۲۴,۱	۵
۲	۱۵	۲۴,۲۵	۵
۳	۱۵	۲۴,۴۰	۵
۴	۱۵	۲۴,۵۵	۵
۵	۱۵	۲۴,۷۰	۵
۶	۱۵	۲۴,۸۵	۵
۷	۱۵	۲۵,۰۰	۵
۸	۱۵	۲۵,۱۵	۵
۹	۱۵	۲۵,۳۰	۵
۱۰	۱۵	۲۵,۴۵	۵
۱۱	۱۵	۲۵,۶۰	۵
۱۲	۱۵	۲۵,۷۵	۵
۱۳	۷	۲۶,۰۵	۵
۱۴	۷	۲۷,۲۵	۵

ناشی از محاسبات در مرکز کنترل و تأخیر ناشی از ارسال اطلاعات توسط PMU، روشی در نرم‌افزار دیگسایلنت و با استفاده از قابلیت DPL ارائه شد.

## مراجع

- [1] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. C. Bose, C. N. Hatziaargyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, T. Van Cutsem, and V. Vittal, "Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 19, no. 3, pp. 1387-1401, Aug. 2004.
- [2] M. M. Hosseini-Bioki, M. Rashidinejad, and A. Abdollahi, "An implementation of particle swarm optimization to evaluate optimal under-voltage load shedding in competitive electricity markets," *J. of Power Sources*, vol. 242, pp. 122-131, Nov. 2013.
- [3] A. Ahmadi and Y. Alinejad-Beromi, "A new integer-value modeling of optimal load shedding to prevent voltage instability," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 65, pp. 210-219, Feb. 2015.
- [4] R. Kanimozhi, K. Selvi, and K. M. Balaji, "Multi-objective approach for load shedding based on voltage stability index consideration," *Alexandria Engineering J.*, vol. 53, no. 5, pp. 817-825, Dec. 2014.
- [5] L. D. Arya, P. Singh, and L. S. Titare, "Differential evolution applied for anticipatory load shedding with voltage stability considerations," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 42, no. 1, pp. 644-652, Nov. 2012.
- [6] J. Lei, Y. Li, B. Zhang, and W. Liu, "A WAMS based adaptive load shedding control strategy using a novel index of transient voltage stability," in *Proc. 33rd Chinese Control Conf., Nanjing, China*, pp. 8164-8169, Jul. 2014.
- [7] M. H. A. Hamid, H. Hashim, H. A. Rashid, and I. Z. Abidin, "Under voltage load shedding using voltage stability indices," in *Proc. IEEE*

در جدول ۵ مقدار فرکانس شبکه New England با و بدون اعمال بارزدایی ولتاژی در جزیره  $S_1$  نشان داده شده است. همان طور که در بخش قبل توضیح داده شد، برگرداندن فرکانس به بازه عادی سیستم قدرت موضوع این مقاله نیست و در نتیجه فرکانس شبکه New England در بازه مجاز قرار ندارد.

در جدول‌های ۶ و ۷ تعداد پله‌های بارزدایی، شماره باس بار قطع شده، زمان قطع بار و درصد قطع بار در روش‌های پیشنهادی و حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو نشان داده شده است. با توجه به این جداول، حداقل فاصله بین پله‌های بارزدایی در روش‌های بررسی شده برابر ۱۵۰ ms است و در هر پله از بارزدایی تنها ۵ درصد بار مورد نظر قطع می‌شود.

## ۶- نتیجه

در این مقاله یک روش بارزدایی ولتاژی جدید پیشنهاد شد. روش پیشنهاد شده بر خلاف روش‌های قبل از حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو و توان راکتیو بارها برای تعیین باس مناسب برای انجام بارزدایی ولتاژی استفاده می‌کند. علاوه بر این در روش بارزدایی پیشنهاد شده از روش‌های بهینه‌سازی هوشمند استفاده نمی‌شود و در نتیجه مدت زمان مورد نیاز برای اجرای روش پیشنهادی به اندازه کافی کم است و می‌تواند برای مقابله با ناپایداری ولتاژ کوتاه‌مدت مورد استفاده قرار گیرد. ویژگی دیگر روش پیشنهادی توانایی در نظر گرفتن تأثیر تجهیزات پویا همانند موتورها و تپ چنجرها است زیرا این روش به اندازه کافی سریع بوده و اطلاعات مورد نیاز خود را از PMUها دریافت می‌کند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که روش پیشنهاد شده توان راکتیو بیشتری را در پله‌های ابتدایی بارزدایی ولتاژی قطع کرده و نسبت به روش حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو نیاز به قطع توان اکتیو کمتری دارد. برای مدل‌سازی تأخیر



- [23] A. M. Abed, "WSCC voltage stability criteria, undervoltage load shedding strategy, and reactive power reserve monitoring methodology," in *Proc. the IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, pp. 191-197, Edmonton, Canada, Jul. 1999.
- [24] K. Mollah, M. Bahadornejad, N. K. C. Nair, and G. Ancell, "Automatic under-voltage load shedding: a systematic review," in *Proc. IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 7 pp., San Diego, California, USA, Jul. 2012.
- [25] IEEE Std.C37.118.1-2011 (Revision of IEEE Std C37.118-2005), *IEEE Standards for Synchrophasor Measurements for Power Systems*, 2011.
- [26] 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, no. 12, pp. 2124-2133, Dec. 2014.
- [27] W. Gu, *et al.*, "Adaptive decentralized under-frequency load shedding for islanded smart distribution networks," *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 5, no. 3, pp. 886-895, Apr. 2014.
- [28] J. A. Laghari, H. Mokhlis, M. Karimi, A. H. A. Bakar, and H. Mohamad, "A new under-frequency load shedding technique based on combination of fixed and random priority of loads for smart grid applications," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 30, no. 5, pp. 2507-2515, Oct. 2015.
- [29] C. P. Reddy, S. Chakrabarti, and S. C. Srivastava, "A sensitivity-based method for under-frequency load-shedding," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 29, no. 2, pp. 984-985, Nov. 2014.
- جواد مدرسی** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۹، ۱۳۹۱ و ۱۳۹۵ در دانشگاه‌های شهید مدنی آذربایجان، صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی و اصفهان به پایان رسانده است و هم‌اکنون به عنوان پژوهشگر در پژوهشگاه نیرو مشغول به فعالیت می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: بررسی پایداری ولتاژ در سیستم‌های قدرت، بارزدایی ولتاژی، کیفیت توان و فیلترهای اکتیو.
- اسکندر قلی‌پور** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۶۶، ۱۳۷۰ و ۱۳۸۲ در دانشگاه‌های صنعتی اصفهان، تهران و نانس۱ (فرانسه) به پایان رسانده است و هم‌اکنون به عنوان عضو هیأت علمی در گروه مهندسی برق دانشگاه اصفهان مشغول به فعالیت می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: کاربرد ادوات FACTS در کنترل و پایداری سیستم‌های قدرت، کیفیت توان و حالت‌های گذرا در سیستم‌های قدرت.
- امین خدابخشیان** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۶۵، ۱۳۶۷ و ۱۳۷۴ در دانشگاه‌های تهران و ولنگ استرالیا به پایان رسانده است. وی هم‌اکنون به عنوان استاد در گروه مهندسی برق دانشگاه اصفهان مشغول به فعالیت می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: پایداری و دینامیک سیستم‌های قدرت، بازیابی سیستم‌های قدرت و توزیع، منابع تولید پراکنده.
- Innovative Smart Grid Technologies-Asia, ISGT ASIA'14*, pp. 732-736, Kuala Lumpur, Malaysia, May 2014.
- [8] A. Arief, M. B. Nappu, M. Gallagher, and D. Zhao-Yang, "Under voltage load shedding utilizing trajectory sensitivity to enhance voltage stability," in *Proc. 21st Australasian Universities Power Engineering Conf.*, 6 pp., Brisbane, Australia, Sep. 2011.
- [9] A. Mahari and H. Seyedi, "A wide area synchrophasor-based load shedding scheme to prevent voltage collapse," *International J. of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 78, pp. 248-257, Jun. 2016.
- [10] I. Kaffashan and T. Amraee, "Probabilistic undervoltage load shedding using point estimate method," *IET Generation, Transmission, & Distribution*, vol. 9, no. 15, pp. 2234-2244, Nov. 2015.
- [11] A. Ahmadi and Y. Alinejad-Beromi, "A new integer-value modeling of optimal load shedding to prevent voltage instability," *International J. of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 65, pp. 210-219, Nov. 2015.
- [12] A. Arief, Z. Dong, M. B. Nappu, and M. Gallagher, "Under voltage load shedding in power systems with wind turbine-driven doubly fed induction generators," *Electric Power Systems Research*, vol. 96, pp. 91-100, Mar. 2013.
- [13] A. Arief, "Under voltage load shedding using trajectory sensitivity analysis considering dynamic loads," *Universal J. of Electrical and Electronic Engineering*, vol. 2, no. 3, pp. 118-123, Mar. 2014.
- [14] V. C. Nikolaidis and C. D. Vournas, "Design strategies for load-shedding schemes against voltage collapse in the hellenic system," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 23, no. 2, pp. 582-591, May 2008.
- [15] T. Junjie, L. Junqi, F. Ponci, and A. Monti, "Adaptive load shedding based on combined frequency and voltage stability assessment using synchrophasor measurements," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 28, no. 2, pp. 2035-2047, Mar. 2013.
- [16] L. C. P. d. Silva, V. F. d. Costa, and W. Xu, "Preliminary results of improving the modal analysis technique for voltage stability assessment," in *Proc. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, pp. 1946-1950, Seattle City, USA, Jul. 2000.
- [17] J. Sasikala and M. Ramaswamy, "Fuzzy based load shedding strategies for avoiding voltage collapse," *Applied Soft Computing*, vol. 11, no. 3, pp. 3179-3185, Apr. 2011.
- [18] Y. Wang, I. R. Pordanjani, W. Li, W. Xu, and E. Vaahedi, "Strategy to minimise the load shedding amount for voltage collapse prevention," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 5, no. 3, pp. 307-313, Mar. 2011.
- [19] Y. Xu, Z. Y. Dong, F. Luo, R. Zhang, and K. P. Wong, "Parallel-differential evolution approach for optimal event-driven load shedding against voltage collapse in power systems," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8, no. 4, pp. 651-660, Apr. 2013.
- [20] [https://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf118/pg\\_tca118bus.htm](https://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf118/pg_tca118bus.htm).
- [21] [https://www.ee.washington.edu/research/pstca/dyn30/pg\\_tcadyn30.htm](https://www.ee.washington.edu/research/pstca/dyn30/pg_tcadyn30.htm).
- [22] CIGRE Task Force 38-02-11, *Indices for Predicting Voltage Collapse Including Dynamic Phenomena*, 1994.