

شناسایی پست‌های مستعد پدیده بازیابی تأخیری ولتاژ ناشی از خطا در شبکه‌های برق گسترده

نیما فرزین^۱ احسان حاجی پور^۲ علی عاقلی^۳ سید محمد هاشمی^۴

۱- دکتری - دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی شریف - تهران - ایران

nimafarzin65@gmail.com

۲- استادیار - دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی شریف - تهران - ایران

e_hajipour@sharif.edu

۳- شرکت مدیریت شبکه برق ایران

agheli@igmc.ir

۴- شرکت مدیریت شبکه برق ایران

hashemi4@igmc.ir

چکیده: بر اثر رشد چشمگیر استفاده از کولرهای گازی خانگی در شبکه برق ایران، پدیده بازیابی تأخیری ولتاژ ناشی از خطا (FIDVR) به یکی از عوامل مستعد در ناپایداری ولتاژ شبکه کشور تبدیل شده است. شناسایی پرریسک‌ترین پست‌های کشور از لحاظ احتمال وقوع FIDVR و تخمین شدت آسیب‌های احتمالی آن، برای محدود کردن اثرات این پدیده بسیار حیاتی است. این مقاله با بررسی پدیده‌های FIDVR واقعی رخ داده در شبکه برق ایران، نشان می‌دهد که علاوه بر آرایش شبکه و قدرت تامین توان راکتیو، دمای محیط و نرخ استفاده از کولرهای گازی نیز در شناسایی پست‌های مستعد بسیار موثرند. این مقاله ضمن معرفی ضریب افزایش بار و ضریب افت ولتاژ موثر، شاخص جدیدی به نام MVA-Volt بهبودیافته را تعریف می‌کند که به کمک آن می‌توان در خطرترین پست‌های انتقال کشور را شناسایی نمود. از مهم‌ترین ویژگی‌های شاخص پیشنهادی این است که اگر چه FIDVR ذاتاً یک پدیده گذرای دینامیکی است، اما برای تعیین این شاخص تنها مطالعات حالت ماندگار شبکه کافی است. در این مقاله، از شبیه‌سازی دقیق دینامیکی شبکه انتقال استان کرمان جهت تایید عملکرد این شاخص استفاده شده است. سپس، از این شاخص برای تعیین پست‌های مستعد در کشور بهره برده شده است. مقایسه پست‌های تعیین‌شده توسط روش پیشنهادی با حوادث حقیقی FIDVR گزارش شده در کشور نشان می‌دهد که شاخص پیشنهادی عملکردی موثر و قابل اطمینان دارد.

واژه‌های کلیدی: پدیده بازیابی تأخیری ولتاژ ناشی از خطا، توقف موتورها، دمای محیط، کولر گازی خانگی.

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.20.2.1

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۲

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۱۶

نام نویسنده مسئول: دکتر احسان حاجی‌پور

نشانی نویسنده مسئول: تهران - خیابان آزادی دانشگاه صنعتی شریف - دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

گاهی بر اثر وقوع خطا در شبکه، علیرغم رفع سریع خطا، ولتاژ شبکه برای چندین ثانیه افت کرده و بازیابی نمی‌شود؛ به این پدیده بازیابی تأخیری ولتاژ ناشی از خطا^۱ (FIDVR) گفته می‌شود [۱]. در سال‌های اخیر، FIDVR به عنوان یکی از دلایل اصلی ناپایداری کوتاه مدت ولتاژ شبکه، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده است [۲-۳]. عامل اصلی وقوع این پدیده، توقف^۲ موتورهای القایی تک فاز در کولرهای گازی خانگی شناخته شده است [۴-۵]. وجود گازهای خنک کننده پرفشار در کمپرسور این موتورها در کنار اینرسی ذاتی کوچک آن‌ها، منجر می‌شود که کولرهای گازی با مواجه شدن با افت ولتاژهای شدید، سریعاً به حالت روتور قفل شده منتقل شوند [۶-۸]. یک موتور روتور قفل شده توان حقیقی و راکتیو زیادی از شبکه می‌کشد که خود می‌تواند منجر به افت ولتاژ در پست‌های مجاور شود؛ این افت ولتاژ می‌تواند به نوبه خود باعث توقف کولرهای گازی در پست‌های مجاور شود. این توقف زنجیروار کولرهای گازی می‌تواند باعث ناپایداری ولتاژ شبکه و حتی خاموشی سراسری شود [۹-۱۱].

در مقالات مختلف [۱۲-۱۹] روش‌های مختلفی برای جلوگیری از بروز پدیده FIDVR و یا محدود کردن آسیب‌های آن پیشنهاد شده است، مانند: نصب واحد نیروگاهی جدید، نصب یا جایابی بهینه منابع توان راکتیو دینامیکی، استفاده از حفاظت ویژه برای محدود کردن گسترش FIDVR، استفاده از محافظ‌های افت ولتاژ در کنار کولرهای گازی خانگی و تعویض کولرهای گازی نصب شده با کولرهای گازی اینورتری.

تمامی روش‌های مذکور می‌توانند از گسترده شدن پدیده FIDVR جلوگیری کنند، اما موثر واقع شدن آن‌ها کاملاً به محل نصب و پیاده سازی این روش‌ها بستگی دارد [۱، ۲]. از این رو برای انتخاب کم‌هزینه‌ترین روش، اولین گام تعیین پست‌هایی در شبکه است که بیش‌تر در معرض پدیده FIDVR قرار دارند. در یک شبکه کوچک، می‌توان با پیاده سازی یک مجموعه شبیه سازی دینامیکی دقیق و کامل، بهترین پست‌ها را برای اجرای روش‌های کاهش FIDVR انتخاب کرد. اما مشکلات شبیه‌سازی دینامیکی در یک شبکه گسترده واقعی، بسیار زیاد است. عملاً پیاده سازی مجموعه‌ای از شبیه سازی‌های دینامیکی دقیق و کامل که بتواند انواع مختلف خطا در محل‌های مختلف با سطح ولتاژهای متفاوت و همچنین آرایش شبکه و مدل دینامیکی بارهای گوناگون را در نظر بگیرد، غیر منطقی و حتی غیرممکن است. علاوه بر این، تعیین پارامترهای دینامیکی بارها در تک تک پست‌های یک شبکه گسترده، نیاز به صرف هزینه و زمان زیاد دارد.

اگر چه مقالات متعددی در زمینه مدل‌سازی FIDVR [۲۰-۲۱] و پیشگیری از آن [۱۲-۱۹] چاپ شده است، اما در زمینه شناسایی پست‌های مستعد این پدیده، مقالات چندانی مشاهده نمی‌شود. از

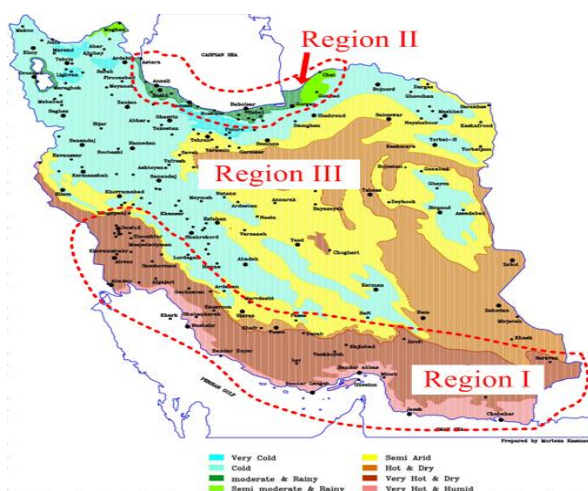
مهم‌ترین مقالات در این زمینه، می‌توان به مقاله هاپلین [۲۲] اشاره کرد که دو شاخص حالت ماندگار (MVA-Volt و Strength) را برای تعیین پست‌های در معرض خطر FIDVR معرفی کرده است. اما نتایجی که از اعمال این شاخص‌ها در شبکه سراسری برق ایران به دست آمد، چندان با پدیده‌های ثبت شده واقعی تطابق نداشتند.

با مطالعه و تجزیه و تحلیل پدیده‌های واقعی FIDVR ثبت شده، این مقاله نشان می‌دهد که علاوه بر آرایش شبکه و توانایی تامین توان راکتیو در آن، عواملی مانند دمای محیط و میزان استفاده از کولرهای گازی نیز جهت شناسایی پست‌های حساس از نظر FIDVR بسیار تاثیر گذار هستند. از این رو، این مقاله با اعمال دو اصلاح ضروری (ضریب افزایش بار و ضریب افت ولتاژ موثر) شاخص MVA-Volt بهبود یافته را بازتعریف می‌کند که به کمک آن می‌توان پست‌های مستعد FIDVR را در یک شبکه گسترده تعیین کرد. در ادامه نشان داده می‌شود که شاخص پیشنهادی به خوبی پریسک‌ترین پست‌های شبکه ایران را تعیین کرده و نتایج به دست آمده از آن، با حوادث گزارش شده توسط بهره برداران شبکه تطابق بسیار خوبی دارد.

۲- تنوع آب و هوایی و توزیع پدیده‌های FIDVR

ثبت شده در شبکه سراسری برق ایران

گسترده‌ی عرض جغرافیایی کشور ایران و ویژگی‌های بومی و طبیعی آن باعث شده است که از تنوع آب و هوایی گوناگونی مطابق شکل (۱) برخوردار باشد [۲۳]. در سال‌های اخیر، چندین پدیده FIDVR شدید در شبکه سراسری برق ایران گزارش شده است که در شکل (۲) نشان داده شده‌اند. پس از جمع آوری داده‌های بسیار از شرکت‌های برق منطقه‌ای در سراسر کشور و مطالعه حوادث ثبت شده، این مقاله پیشنهاد می‌دهد که شبکه سراسری برق ایران و هر شبکه گسترده دیگری را می‌توان از لحاظ خطر پدیده FIDVR مطابق شکل (۱) به سه منطقه مجزا تقسیم کرد:



شکل (۱): منطقه بندی اقلیمی ایران [۲۳] و تقسیم منطقه‌ها بر اساس شدت FIDVR ثبت شده.

در شکل (۱) نشان دهنده مناطق با خطر متوسط از نظر FIDVR است.

(۳) منطقه ۳ بدون پدیده FIDVR: در سایر نواحی در ایران هنوز گزارشی از وقوع پدیده FIDVR ثبت نشده است. در نتیجه منطقه ۳ در شکل (۱) نشان دهنده منطقه کم خطر از نظر FIDVR است.

برای تعیین این که در هر نقطه از شبکه چه کسری از بار مربوط به کولرهای گازی است، نیاز به یک مطالعه جامع است. با این وجود، اختلاف بین پیک بار زمستان با پیک بار تابستان می تواند معیار خوبی برای تخمین میزان استفاده از بارهای سرمایشی باشد [24]. زیرا که پیک مصرف بار در شبکه برق ایران، در طول فصل تابستان و با روی کار آمدن بارهای سرمایشی اتفاق می افتد. شکل (۲) درصد بارهای سرمایشی استان های مختلف نسبت به کل بار مصرفی آن استان را نشان می دهد. چنانچه توزیع بارهای کولر گازی را متناسب با میزان بار سرمایشی هر استان فرض کنید، همان طور که در شکل (۲) مشاهده می شود، تنوع آب و هوایی باعث شده است که درصد استفاده از کولرهای گازی در مناطق مختلف با یکدیگر تفاوت چشمگیری داشته باشد. به طور مثال، در سواحل شمالی کشور اگر چه دمای هوا خنک تر از مناطق میانی کشور است، اما به دلیل رطوبت بسیار زیاد هوا، کولرهای گازی بسیار پرکاربردتر هستند.

مقایسه شکل (۱) و (۲) نشان می دهد که محل FIDVR گزارش شده تطابق خوبی با وضعیت آب و هوایی و نرخ استفاده از کولرهای گازی دارد. در نتیجه، به نظر می رسد که می بایست علاوه بر آرایش شبکه و قدرت تامین توان راکتیو در آن، عواملی مانند وضعیت آب و هوایی و میزان استفاده از کولرهای گازی نیز برای تعیین پستهای در خطر FIDVR در نظر گرفته شود.

۳- عوامل موثر در شاخص غربالگری

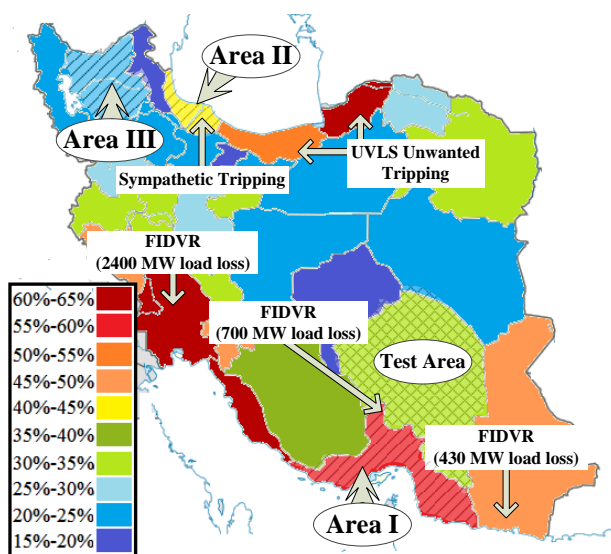
رتبه بندی پست ها از نظر خطر FIDVR در یک شبکه برق گسترده با عرض جغرافیایی وسیع و با تنوع آب و هوایی گوناگون کار بسیار سختی است. با توجه به ویژگی های ذاتی کولرهای گازی و بررسی پدیده های FIDVR ثبت شده، می توان مهم ترین عواملی که در شدت پدیده FIDVR تاثیر می گذارند را در سه دسته زیر خلاصه کرد: الف) آرایش شبکه و قدرت تامین توان راکتیو در آن، ب) میزان استفاده از کولرهای گازی و ج) دمای محیط.

عامل اول در [22] کاملاً شرح داده شده است و در این مقاله به صورت مختصر به آن اشاره خواهد شد. اما دو عامل دیگر در زیربخش های بعدی به صورت کامل توضیح داده خواهند شد.

۳-۱- آرایش شبکه و قدرت تامین توان راکتیو در آن

پدیده FIDVR بر اثر افت ولتاژ اعمالی به کولرهای گازی به وجود می آید. در نتیجه، اگر بر اثر بروز خطا، تعداد پست های بیش تری با افت ولتاژ مواجه شوند، تعداد کولرهای گازی که در معرض توقف قرار می-

(۱) منطقه اول با پدیده های FIDVR شدید: در این منطقه پدیده های FIDVR بسیاری گزارش شده است که همگی منجر به قطع بار قابل توجهی شده اند. بازیابی با تاخیر ولتاژ در این حوادث معمولاً بیش از ۲ ثانیه به طول می انجامد و تاثیرات آن تا سطح انتقال (۲۳۰) کیلو ولت و بالاتر نیز گسترده می شود. در همه این حوادث، منطقه بسیار بزرگی از شبکه تحت تاثیر این پدیده قرار گرفته و در اغلب آن ها بازیابی تاخیری ولتاژ منجر به عملکرد ناخواسته رله های حذف بار ناشی از افت ولتاژ (UVLS) شده است. مطابق شکل (۱) این منطقه شامل مناطق ساحلی جنوبی کشور می شود. در شکل (۲) نیز مشاهده می شود که سه عدد از شدیدترین پدیده های FIDVR در ایران در این منطقه رخ داده اند. منطقه ۱ در شکل (۱) نشان دهنده مناطق با خطر FIDVR بالا است.



شکل (۲): درصد استفاده از کولر گازی نسبت به کل بار مصرفی و حوادث ثبت شده مرتبط با FIDVR در مناطق مختلف ایران

(۲) منطقه دوم با عملکردهای ناخواسته رله UVLS: در این منطقه پدیده FIDVR گسترده ای گزارش نشده است. اما در سال های اخیر، نشانه هایی از FIDVR در مقیاس کوچک مشاهده شده است مثلاً چندین مورد عملکرد ناخواسته رله UVLS در این منطقه ثبت شده است. در اغلب گزارش های مربوط به خطا در این منطقه، مشاهده می شود که به صورت ناخواسته، حذف بار گام اول توسط رله UVLS در یکی از پست های مجاور خطا صورت گرفته است. در این منطقه پدیده های FIDVR به صورت محلی رخ می دهد و بازیابی با تاخیر ولتاژ کمتر از ۲ ثانیه ولی بیش از ۱ ثانیه به طول می انجامد که باعث می شود تنها حذف بار گام اول در رله UVLS فعال شود. علاوه بر این، همان طور که در شکل (۲) مشاهده می شود، در منطقه استان گیلان، تعداد زیادی عملکرد ناخواسته رله های اضافه جریان در سطح ۲۰ کیلوولت بر اثر خطای خارج از زون حفاظتی گزارش شده است. به این نوع عملکرد اشتباه، اصطلاحاً قطع سمپاتیک اطلاق می گردد. منطقه ۲

شکل (۲) مشاهده می‌شود، شدیدترین پدیده‌های FIDVR گزارش شده در ایران، همگی در نواحی گرم و شرجی اتفاق افتاده‌اند.

۴- شاخص غربالگری پیشنهادی

در این بخش، در ابتدا دو شاخص $MVA-Volt$ و $Strength$ معرفی می‌شوند؛ سپس این شاخص‌ها به گونه‌ای بازتعریف و اصلاح می‌شوند که تاثیر دو عامل دما و نرخ استفاده از کولر گازی نیز در آن‌ها اعمال شود.

۴-۱- شاخص‌های $MVA-Volt$ و $Strength$

وقتی خطایی روی یک پست اتفاق بیفتد، پست‌های مجاور نیز کمابیش با یک افت ولتاژ مواجه می‌شوند. هر چه این افت ولتاژ بیش‌تر باشد، احتمال توقف کولرهای گازی در این پست‌ها نیز بیش‌تر می‌شود. با توجه به این توضیحات، پارامتر $MVA-Volt$ در هر پست (به عنوان مثال پس شماره j) به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود [24]:

$$(MVA-Volt)_j = \sum_{i=1}^N \left[(V_i^{nom} - V_i^{sag}) \times D_i^{(\beta)} \times S_i \right] \quad (1)$$

که در آن، ولتاژ پریونیت شده در پست i ، در حالت عادی با V_i^{nom} و در زمان وجود خطا در پست j با V_i^{sag} نشان داده شده است. تعداد کل پست‌های شبکه با N و بار پست i بر حسب MVA نیز با S_i نشان داده شده است. در رابطه (۱)، $D_i^{(\beta)}$ یک مقدار باینری (۰ یا ۱) است تا از تاثیرات نویز مربوط به پست‌هایی که هنگام خطا با افت ولتاژ کمی مواجه شدند، جلوگیری شود و به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود:

$$D_i^{(\beta)} = \begin{cases} 0 & (V_i^{nom} - V_i^{sag}) < \beta \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

که β یک مقدار ثابت برای کلیه پست‌های شبکه است. برای اندازه گیری قدرت تامین ولتاژهای بار در شبکه، پارامتر دیگری به نام $Strength$ به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود:

$$(Strength)_j = \sum_{i=1}^N (V_i^{nom} - V_i^{sag}) \times D_i^{(\beta)} \times SCC_i \times \frac{S_i}{S_{Load}} \quad (3)$$

که در آن SCC_i قدرت اتصال کوتاه پست i بر حسب MVA و S_{Load} مجموع بارهای شبکه است. اگر خطایی در پست j اتفاق بیفتد، هر چه j ($MVA-Volt$) بزرگ‌تر و j ($Strength$) کوچک‌تر باشد، FIDVR شدیدتری بر اثر این خطا در شبکه رخ می‌دهد.

این شاخص‌ها را می‌توان برای تعیین پرخطرترین پست‌ها از نظر FIDVR استفاده کرد. اما همان‌طور که در مقدمه گفته شد، در یک شبکه گسترده مقیاس بزرگ، نتایج این شاخص‌ها با مشاهدات تجربی مطابقت چندانی ندارند. در بخش‌های بعدی شرح داده می‌شود که چطور می‌توان عملکرد این شاخص‌ها را بهبود داد.

گیرند، بیش‌تر شده و متعاقباً پدیده FIDVR شدیدتری اتفاق می‌افتد [25]. این که پس از وقوع یک خطا در شبکه، میزان افت ولتاژ پست‌های مجاور به چه صورت توزیع خواهد شد به آرایش شبکه بستگی دارد.

از سوی دیگر، توانایی شبکه برای تامین توان راکتیو مورد نیاز کولرهای گازی متوقف شده، عامل تعیین کننده‌ای در سرعت بازیابی ولتاژ است. در نتیجه برای پیش‌بینی شدت پدیده FIDVR، باید قدرت شبکه در نزدیکی پستی که با افت ولتاژ مواجه شده را نیز در نظر گرفت.

در مطالعات مراجع پیشین، تنها دو عامل فوق به عنوان عوامل موثر در شناسایی پست‌های مستعد FIDVR در نظر گرفته می‌شدند و درصد استفاده از کولرهای گازی در کلیه پست‌ها یکسان فرض می‌شد. اما همان‌طور که در شکل (۲) نیز مشاهده می‌شود، در شبکه گسترده-ای مانند شبکه سراسری برق ایران، انتخاب یک عدد یکسان به عنوان درصد استفاده از کولر گازی برای کلیه پست‌ها غیرمنطقی است.

۳-۲- نرخ استفاده از کولرهای گازی

بدیهی است که ناحیه‌ای که تعداد کولرهای گازی بیش‌تری دارد، بیش‌تر در معرض خطر FIDVR باشد. اما نرخ استفاده از کولرگازی در هر ناحیه، مستقیماً وابسته به شرایط اقلیمی آن ناحیه است. مثلاً مصرف‌کنندگان خانگی در ایران، بسته به شرایط اقلیمی، از دو نوع وسیله سرمایشی (کولرهای آبی یا کولرهای گازی) استفاده می‌کنند. با توجه به کم‌مصرف بودن و هزینه برق کم‌تر کولرهای آبی، این کولرها در مناطق خشک میانی کشور بیش‌تر کاربرد دارند. در حالی که کولرهای آبی در نواحی شرجی، قابل استفاده نیستند. در نتیجه همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، در نواحی خنک‌تر ولی با رطوبت هوای بیش‌تر (سواحل شمالی کشور) نرخ استفاده از کولرهای گازی بسیار بیش‌تر از نواحی گرم و خشک (مرکز کشور) است.

۳-۳- دمای محیط

دمای محیط مستقیماً بر ولتاژ توقف کولرهای گازی تاثیر دارد. با توجه به نحوه عملکرد کولرهای گازی، دمای محیط بیش‌تر منجر به افزایش گشتاور اعمال شده به موتور می‌شود. در این حالت، موتور با افت ولتاژ کم‌تر نیز متوقف می‌شود. آزمون‌های آزمایشگاهی به صورت عملی نشان می‌دهند که افزایش دمای محیط منجر به افزایش ولتاژ توقف می‌شود [26]. در نتیجه، با فرض این که دو ناحیه که نرخ استفاده از کولرهای گازی یکسانی دارند، دچار خطای یکسانی شوند، پدیده FIDVR می‌تواند تنها در ناحیه گرم‌تر اتفاق بیفتد.

به طور خلاصه می‌توان گفت که افزایش رطوبت مستقیماً باعث رشد نرخ استفاده از کولرهای گازی می‌شود و افزایش دمای محیط احتمال توقف آن‌ها را بیش‌تر می‌کند. از این رو همان‌طور که در

۴-۲- مدل سازی تاثیر بار پس از خطا و نرخ استفاده از کولرهای گازی

با وقوع یک خطای شدید در شبکه، برخی پستهای شبکه با افت ولتاژ شدیدی روبرو خواهند شد. این افت ولتاژ حتی برای مدت بسیار کوتاه، باعث تغییر میزان بار آن پست برای مدتی طولانی می شود. مثلاً بخشی از بار بلافاصله قطع می شود و بخشی مانند کولرهای گازی، قفل شده و تا چندین برابر بار نامی مصرف می کنند. از آن جایی که قدرت شبکه در تامین میزان بار پس از خطا تعیین کننده شدت پدیده FIDVR است، برای تعیین شدت این پدیده درست تر آن است که میزان بار پس از وقوع خطای شدید در هر پست، در محاسبات لحاظ شوند. در ادامه شرح داده می شود که چگونه میزان بار پس از خطا را می توان از مقدار بار پیش از خطا تخمین زد. همچنین اهمیت نرخ استفاده از کولرهای گازی در هر پست نشان داده می شود.

در این مقاله، بار هر پست به سه دسته بار متمایز شامل بار استاتیکی (S^{static})، کولرهای گازی (S^{RAC}) و بار الکترونیکی (S^{elec}) تقسیم می گردد [27]. هر نوع از این بارها در برابر افت ولتاژ رفتار متفاوتی دارند. بارهای استاتیکی نظیر بار روشنایی قبل از خطا و بعد از رفع خطا بدون تغییر باقی می ماند. بارهای الکترونیکی نظیر رایانه ها، تلویزیون و موتورهای با درایو اینورتری، اغلب حفاظت افت ولتاژ دارند که در هنگام افت ولتاژ شدید، سریع آن ها را خاموش و از شبکه جدا می کند. اما یک کولر گازی متوقف شده در مدت زمانی که پدیده FIDVR در شبکه وجود دارد، مانند یک امپدانس ثابت در شبکه عمل می کند [28]. این امپدانس ثابت به صورت یک راکتانس (X_{stall}) و یک مقاومت (R_{stall}) سری مدل می شوند که معمولاً به ترتیب برابر مقدار یک شده 0.124 و 0.114 هستند [29]. در ولتاژ نامی، کولر گازی متوقف شده توان ظاهری بسیار بزرگی از شبکه می کشد که طبق رابطه (۴) تقریباً $5/9$ برابر حالت عملکرد عادی آن است:

$$S_{stall}^{RAC} = \frac{V^2 \times S^{RAC}}{\sqrt{R_{stall}^2 + X_{stall}^2}} = \frac{1^2}{\sqrt{0.124^2 + 0.114^2}} S^{RAC} = 5.9 S^{RAC} \quad (4)$$

با در نظر گرفتن ویژگی انواع بارهای تعریف شده، پس از وقوع یک افت ولتاژ شدید در شبکه، ضریب افزایش بار در پست i (α_i) را می توان به صورت رابطه (۵) تعریف کرد:

$$\alpha_i = \frac{S_i^{AF}}{S_i} = \frac{S_i^{static} + 5.9 S_i^{RAC}}{S_i^{static} + S_i^{RAC} + S_i^{elec}} \quad (5)$$

که در آن S_i و S_i^{AF} به ترتیب نشان دهنده بار پست i قبل از وقوع خطا و پس از رفع آن است. باید توجه داشت که S_i^{AF} مقدار بار در بدترین حالت است که در آن بازیابی ولتاژ پست تا مقدار نامی آن صورت گرفته است، اما هنوز حفاظت حرارتی کولرهای گازی عمل نکرده و بیشترین بار از شبکه کشیده می شود.

طبق رابطه (۵) هر چه درصد بار کولری بیش تر باشد، α_i بزرگ تر می شود؛ در حالی که اگر درصد بار الکترونیکی بیش تر شود، α_i کوچک تر می شود. در نتیجه α_i در نواحی گرم و شرجی بزرگ و در نواحی مرکزی کشور کوچک است.

در این مقاله پیشنهاد می شود که به جای استفاده از بار هر پست پیش از خطا (S_i) در رابطه (۱) از مقدار بار پس از خطا ($S_i^{AF} = \alpha_i S_i$) استفاده شود. با این اصلاح، هم تاثیر نرخ استفاده از کولر گازی در پستهای متفاوت در محاسبه شاخص $MVA-Volt$ لحاظ خواهد شد و هم به کمک ضریب افزایش بار، تاثیر کولرهای گازی متوقف شده نیز در آن لحاظ می شود. در واقع، پس از رفع خطا، با افزایش بار پست، بازیابی ولتاژ کندتر می شود. استفاده از ضریب افزایش بار α_i به خوبی این مفهوم را مدل سازی می کند که کولرهای گازی متوقف شده، توان بزرگی از شبکه می کشند و منجر به تاخیر در بازیابی ولتاژ می شوند. ضرب شدن بار کولرگازی در $5/9$ (طبق رابطه (۴)) در محاسبه شاخص $MVA-Volt$ اهمیت این بار را نسبت به بارهای استاتیکی و الکترونیکی نشان می دهد.

باید توجه داشت که مقدار α_i در پستهای مختلف متفاوت است. بارهای صنعتی بزرگ اغلب شامل موتورهای بزرگ با درایوهای فرکانس متغیر یا موتورهای و کولرهای خنک کننده سه فاز دارای حفاظت افت ولتاژ هستند. از این رو بخش بزرگی از این بارها از نوع بارهای الکترونیکی هستند و در نتیجه مقدار α_i در بارهای صنعتی کوچک است. اما بخش بزرگی از بارهای خانگی و تجاری، خصوصاً در پیک بار تابستان، شامل کولرهای گازی تکفاز است؛ از این رو مقدار α_i در بارهای خانگی و تجاری بزرگ است. به عبارتی دیگر، α_i نشان دهنده مدل بار و درصد استفاده از کولرهای گازی است که با یک بررسی و مطالعه تکمیلی می توان آن را تعیین کرد.

۴-۳- مدل سازی تاثیر دمای محیط

با افزایش دمای محیط ولتاژ توقف کولرهای گازی افزایش می یابد [29]. برای مثال، به ازای دمای محیط 25 درجه سانتی گراد، ولتاژ توقف برابر 60% ولتاژ نامی است. اما در دمای محیط 40 درجه سانتی گراد، این ولتاژ برابر $82/5\%$ ولتاژ نامی می شود و در نتیجه کولرهای گازی بسیار راحت تر دچار پدیده توقف می شوند. از این رو می توان گفت که شدت پدیده FIDVR رابطه مستقیمی با دمای محیط دارد.

در این مقاله، برای اعمال تاثیر دمای محیط، پیشنهاد می شود که پارامتر جدیدی به نام ضریب افت ولتاژ موثر $\beta(T_i)$ به رابطه (۱) اضافه شود. مرجع [22] از یک مقدار ثابت β استفاده کرده است تا تاثیرات نویزها را کم کند. اما در این مقاله، برای مدل کردن افزایش ولتاژ توقف به دلیل افزایش دما، پیشنهاد می شود که از متغیر $\beta(T_i)$ استفاده گردد که برای هر پستی، بسته به دمای آن متفاوت است. همان طور که در رابطه (۲) مشاهده می شود، اگر افت ولتاژ

در این مقاله، نرخ استفاده از کولرگازی در هر نقطه، از روی تفاوت پیک بار زمستان و تابستان تعیین شده است. در مطالعات بار انجام شده نیز درصد بارهای الکترونیکی برای بارهای غیر صنعتی و صنعتی به ترتیب برابر ۲۰٪ و ۷۵٪ انتخاب شدند. دمای هر نقطه نیز بر اساس داده‌های آماری ایستگاه‌های هواشناسی هر ناحیه محاسبه شده‌اند.

۵-۱- صحت سنجی عملکرد شاخص پیشنهادی

اگر چه کلیه شاخص‌های تعریف شده در این مقاله بر اساس مطالعات حالت ماندگار به دست می‌آیند؛ اما جهت تایید عملکرد این شاخص‌ها می‌بایست به شبیه‌سازی دقیق دینامیکی روی آورد. اما به دلیل مشکلات شبیه‌سازی‌های دینامیکی که پیش‌تر گفته شد، این شبیه‌سازی‌ها محدود به ناحیه کوچکی از شبکه می‌شوند. بدین منظور ناحیه Test Area در شکل (۲)، انتخاب شده است که در آن یک پدیده FIDVR واقعی توسط PMU‌های نصب شده در شبکه ثبت شده است [20]. جزییات نحوه‌ی دقیق مدل‌سازی دینامیکی بار موضوع این مقاله نیست ولی به طور کلی در این مطالعه، تمام بارهای این ناحیه بر اساس مدل بار دینامیکی تشریح شده در [27] ساخته شده‌اند. از آن جایی که پدیده FIDVR ساخته شده توسط شبیه‌سازی، با پدیده FIDVR واقعی ثبت شده، به خوبی مطابقت داشت، مدل بار دینامیکی استفاده شده و پارامترهای تخمین زده شده آن، مورد تایید قرار گرفت. پس از تایید مدل دینامیکی بار، تعداد زیادی شبیه‌سازی دینامیکی انجام شده است تا عملکرد شاخص پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گیرد. اما برای اینکه بتوان بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌های دینامیکی، خطرناک‌ترین پست‌ها را از نظر FIDVR تشخیص داد، بایستی معیاری وابسته به زمان تعریف نمود که بین یک پدیده FIDVR شدید و بازیابی طبیعی ولتاژ تفاوت قابل شود. در این مقاله معیار دینامیکی FSC_j^* که تعیین کننده شدت پدیده FIDVR است، طبق رابطه (۸) تعریف شده است.

$$FSC_j = \sum_{i=1}^{N_f} \left(\int_{t_c}^{T_r} S_i \times (V_i(t) - 0.9) dt \right) \quad (8)$$

که در آن FSC_j معیار شدت FIDVR ناشی از وقوع خطا در پست j است، $V_i(t)$ نشان دهنده ولتاژ یک پست i و S_i بار متصل شده به پست i بر حسب MVA است. همچنین N_f تعداد پست‌هایی است که با پدیده FIDVR مواجه شدند. در این تعریف، اگر ولتاژ پستی یک ثانیه پس از خطا تا مقدار ۹۰٪ ولتاژ نامی بازیابی نشد، فرض شده است که آن پست با پدیده FIDVR مواجه شده است. در این رابطه t_c زمان رفع شدن خطا و T_r زمانی است که ولتاژ به مقداری بیشتر از ۹۰٪ ولتاژ نامی بازیابی شده است.

بدین منظور، در تک تک پست‌های ناحیه Tested Area خطای سه فاز مشابهی با مقاومت ناچیز قرار داده می‌شود و ۲۰۰ میلی ثانیه

از β کمتر بود، مقدار D_i^β صفر می‌شود؛ و این به معنای آن است که احتمال توقف کولرهای گازی در این افت ولتاژ وجود ندارد و می‌توان این بار را از محاسبات MVA-Volt حذف کرد. در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد که ولتاژ توقف ۸۲/۵٪ است، β را می‌توان برابر با مقدار ۱۷/۵٪ در نظر گرفت. اما هر چه دما کمتر می‌شود مقدار β افزایش می‌یابد.

یک رابطه خطی بین دمای محیط و ولتاژ توقف کولرهای گازی وجود دارد [28] که طبق آن به ازای هر درجه سانتی‌گراد افزایش دما، ولتاژ توقف به اندازه ۳/۶ ولت افزایش می‌یابد. از این رو ارتباط بین دمای محیط (T) و ضریب افت ولتاژ موثر (β) به ازای ولتاژ نامی ۲۴۰ ولت به صورت رابطه (۶) تعریف می‌شود:

$$\beta(T_i) = 1 - \left(0.6 + \frac{3.6}{240} \times (T_i - 25) \right) \quad (6)$$

$$= 0.775 - 0.015 \times T_i$$

در این مقاله T_i برابر با متوسط دمای حداکثر روزانه در گرم‌ترین ماه سال در نظر گرفته می‌شود. در نهایت پس از مدل کردن تاثیر نرخ استفاده از کولرهای گازی و دمای محیط، شاخص MVA-Volt بهبود یافته بازتعریف می‌شود که به صورت رابطه (۷) محاسبه می‌شود:

$$(MVA-Volt)_j = \sum_{i=1}^N \left[(V_i^{nom} - V_i^{sag}) \times D_i^{\beta(T_i)} \times \alpha_i \times S_i \right] \quad (7)$$

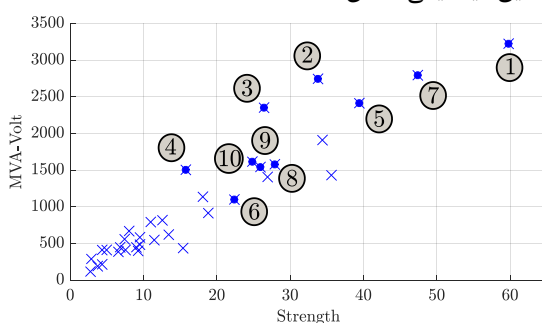
در واقع رابطه (۷) بهبود یافته رابطه (۱) [24] است که در آن دو پارامتر α_i و $D_i^{\beta(T_i)}$ اضافه شده‌اند تا به ترتیب تاثیر نوع بار و تاثیر دمای محیط در محاسبات لحاظ گردد.

از آن جایی که شاخص Strength نشان دهنده قدرت تامین توان راکتیو شبکه است، بیش‌تر به آرایش شبکه و منابع تولید توان موجود در شبکه وابسته است و مستقل از نرخ استفاده از کولرهای گازی و دمای محیط است. صحت این مساله، بعد از شبیه‌سازی‌های متعدد نیز مشخص شد و مشاهده شد که شاخص Strength به دست آمده از رابطه (۳) [22] عملکرد بسیار خوبی دارد و بر خلاف شاخص MVA-Volt نیاز به اصلاح جدیدی ندارد.

۵- ارزیابی عملکرد شاخص پیشنهادی

در این بخش، عملکرد شاخص پیشنهادی در شبکه سراسری برق ایران با ۸۳۲۶ پست در سطح انتقال و فوق توزیع (۶۳، ۱۳۲، ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت) سنجیده می‌شود. بدیهی است که با توجه به تعداد زیاد نقاط بار (۳۴۱۳) و عدم وجود یک مدل بار دینامیکی تایید شده، امکان پیاده‌سازی یک مجموعه کامل از شبیه‌سازی‌ها با مدل دینامیکی دقیق بار وجود ندارد؛ در نتیجه، صرفاً جهت تایید عملکرد این شاخص، یک شبیه‌سازی دقیق دینامیکی در یک ناحیه کوچک پیاده‌سازی می‌گردد. پس از تایید عملکرد این شاخص، مطالعات برای کل شبکه برق ایران تعمیم داده می‌شود.

- پست ۳ که از نظر شاخص Strength تقریباً برابر با پست های ۹ و ۱۰ است ولی مقدار شاخص MVA-Volt آن از این پست ها بیش تر است، باید پدیده FIDVR شدیدتری تجربه کند که نتایج شبیه سازی دینامیکی نیز تایید کننده آن است.
- با توجه به توضیحات بالا به طور کلی می توان گفت پست های ۱-۷-۲-۳-۴ با توجه به این که بر روی سطح پرتو قرار گرفته اند، پیش بینی می شود که نسبت به سایر پست ها بیش تر در معرض پدیده FIDVR شدیدتر قرار بگیرند.
- در مورد مقایسه پست های ۲ و ۳ و ۴ با یکدیگر از طریق مطالعات استاتیکی نتیجه خاصی نمی توان گرفت زیرا پستی که شاخص MVA-Volt بزرگتری دارد، شاخص Strength بزرگتری نیز دارد و مقایسه آن ها تنها از طریق شبیه سازی دقیق دینامیکی ممکن است



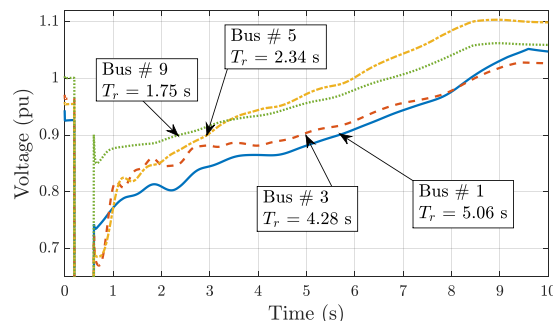
شکل (۴): شاخص MVA-Volt و Strength و رتبه بندی آن ها بر اساس معیار FSC حاصل شده از شبیه سازی های دقیق دینامیکی

۵-۲- عملکرد شاخص در ناحیه های کوچک

اگر چه در بخش ۵-۱ به کمک شبیه سازی های دقیق دینامیکی عملکرد این شاخص ها مورد تایید قرار گرفتند، اما عموماً با توجه به این که پدیده FIDVR واقعی در بسیاری از نواحی کشور ایران رویت نشده اند و در نتیجه، پارامترهای مربوط به مدل دینامیکی بار قابل استخراج نیست، عملاً شبیه سازی های دینامیکی برای سایر نقاط کشور قابل پیاده سازی نخواهد بود. از این رو، برای صحت سنجی بیشتر عملکرد شاخص های پیشنهادی، به مقایسه نتایج مطالعات حالت ماندگار انجام شده در دو استان مختلف کشور پرداخته می شود. در این زیر بخش، عملکرد شاخص های پیشنهادی در ناحیه I (استان هرمزگان) و ناحیه III (استان آذربایجان شرقی) که در شکل (۲) نشان داده شده اند، مقایسه شده است. پدیده های FIDVR گزارش شده نشان می دهند که ناحیه I در شمار پریسک ترین نواحی از نظر بروز پدیده FIDVR است، در حالی که هنوز هیچ پدیده FIDVR از ناحیه III گزارش نشده است. در نتیجه انتظار می رود که شاخص های پیشنهادی، پست های ناحیه I را در مقایسه با پست های ناحیه III پریسک تر تشخیص دهد.

ناحیه I آب و هوایی گرم و شرجی دارد که نرخ استفاده از کولرهای گازی در آن ۵۷٪ ($\alpha = 3.59$ و $T = 41^\circ C$) است؛ در

بعد این خطا رفع می شود. سپس بر اساس معیار FSC کلیه پست ها رتبه بندی شده اند. شکل (۳)، ولتاژ مربوط به شدیدترین پدیده های FIDVR در این ناحیه را از نظر معیار FSC نشان می دهد؛ مشاهده می شود معیار FSC به خوبی توانسته است ملاکی برای تعیین شدت پدیده FIDVR در ناحیه کوچک باشد.



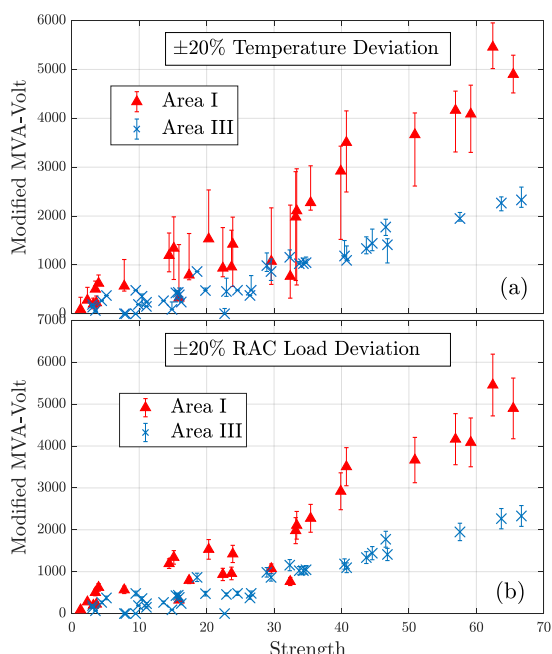
شکل (۳): بازیابی ولتاژ پس از خطا در پست هایی که طبق معیار FSC منجر به شدیدترین FIDVR می شوند

شکل (۴)، شاخص MVA-Volt و Strength پیشنهادی کلیه پست های این ناحیه را نشان می دهد. همچنین، پست هایی که طبق معیار FSC شدیدترین FIDVR را تجربه می کنند، به ترتیب شدت با شماره های ۱ تا ۱۰ نشان داده شده اند. همان طور که در بخش ۴-۱ توضیح داده شد و مطابق شکل (۴)، بدیهی است که دو شاخص MVA-Volt و Strength دقیقاً پست های پریسک را به ترتیب اولویت بندی نمی کنند؛ اما با این وجود، به کمک این شاخص ها محتمل ترین پست ها برای بروز پدیده FIDVR قابل شناسایی هستند. به طور کلی، از آن جایی که پستی با MVA-Volt بزرگ تر (مرز پرتو) شکل (۴) نشان دهنده پست های پریسک از نظر FIDVR هستند. مقایسه نتایج شاخص های استاتیکی پیشنهاد شده با رتبه بندی پست ها از طریق نتایج شبیه سازی های دقیق دینامیکی (FSC) نشان می دهد که شاخص های MVA-Volt و Strength پیشنهادی برای شناسایی پست های در معرض خطر قابل اعتماد هستند. به عبارتی دیگر، اگر چه این شاخص ها تنها با مطالعات حالت ماندگار شبکه تعیین می شوند، از آن ها می توان برای شناسایی پست های پریسک در یک شبکه گسترده نیز استفاده کرد.

در واقع با دانستن این که پستی با MVA-Volt بزرگ تر و Strength کوچک تر، FIDVR شدیدتری تجربه می کند، بدون نیاز به شبیه سازی های دینامیکی و با نگاه به نتایج مطالعات استاتیکی می توان گفت:

- پست ۴ که از نظر شاخص MVA-Volt تقریباً برابر با پست های ۸ و ۹ و ۱۰ است ولی مقدار Strength آن از این پست ها کمتر است، باید پدیده FIDVR شدیدتری تجربه کند. به طور مشابه پست ۳ از پست ۵ و همچنین پست ۲ از پست ۷، FIDVR شدیدتری تجربه می کنند.

های حساس به FIDVR بوده است. در شکل (۶) نیز، میزان بار کولر گازی در شینه های تحت بررسی برای ناحیه I در محدوده ۴۵،۶٪ و ۶۸،۴٪ و برای ناحیه III در محدوده ۱۶،۶٪ تا ۲۵٪ در نظر گرفته شده است. همان طور که از شکل (۶) پیداست، هر چند خطای تخمین در پارامترهای دمای بیشینه و میزان بار کولر گازی می تواند نقاط مربوطه به هر شینه را جابه جا کند، اما این تغییرات منجر نمی گردد که به اشتباه پستهای ناحیه III به عنوان پستهای مستعد پدیده FIDVR تشخیص داده شود. لذا می توان نتیجه گرفت که شاخص های پیشنهادی تا حد قابل قبولی در برابر خطای تخمین پارامترهای ورودی خود مقاوم هستند و می توانند پستهای حساس به پدیده FIDVR را به خوبی تفکیک نمایند.



شکل (۶): شاخص های اصلاح شده $MVA-Volt$ و $Strength$ برای ناحیه I و ناحیه III (الف) با فرض $\pm 20\%$ خطا در تخمین دمای بیشینه محیط، (ب) با فرض $\pm 20\%$ خطا در تخمین میزان بار کولر گازی

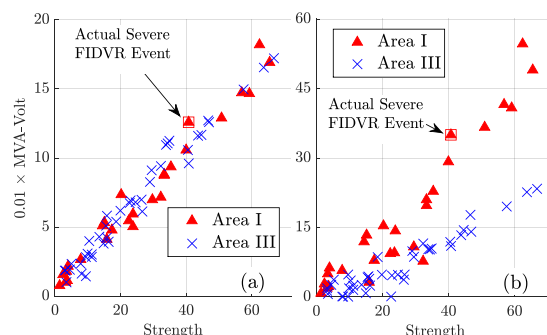
۵-۳- عملکرد شاخص پیشنهادی در شبکه برق سراسری ایران

پیش از این گفته شد که از نظر شدت پدیده های FIDVR مشاهده شده در کشور، می توان ایران را به سه منطقه مجزا تقسیم کرد، شکل (۷) (الف) شاخص های $MVA-Volt$ و $Strength$ را برای کلیه پستهای شبکه انتقال (۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت)، پیش از لحاظ کردن تاثیر دمای محیط و نرخ استفاده از کولر گازی نشان می دهد. مشاهده می شود که سه منطقه فوق الذکر قابل تفکیک شدن از یکدیگر نبوده و در نتیجه، شاخص های [۲۲] در مطالعات کشور ایران، چندان قابل اطمینان نیستند. اما شکل (۷) (ب) شاخص های پیشنهادی در این مقاله را برای همان پست ها نشان می دهد. مشاهده می شود که منطقه های ۱ و ۳

حالی که ناحیه III خشک تر و خنک تر بوده و نرخ استفاده از کولرهای گازی در آن $20/8\%$ ($\alpha = 1.82$ و $T = 27^\circ C$) است. در نتیجه در محاسبات شاخص های پیشنهادی به ترتیب برای ناحیه I و III می بایست از مقادیر $D^{0.16}$ و $D^{0.37}$ استفاده کرد.

شکل (۵) (الف) شاخص های $MVA-Volt$ و $Strength$ را پیش از لحاظ کردن تاثیر دمای محیط و نرخ استفاده از کولر گازی نشان می دهد [۱۹]. مشاهده می شود که این شاخص ها نشان می دهند که از لحاظ خطر FIDVR هر دو ناحیه تقریباً یکسان هستند. در حالی که طبق مشاهدات واقعی و پدیده های گزارش شده، ناحیه I بسیار پرخطر و ناحیه III کم خطر است.

شکل (۵) (ب) نتایج همان مطالعات را به ازای استفاده از شاخص های پیشنهادی، نشان می دهد. مشاهده می شود که شاخص پیشنهادی به خوبی این دو ناحیه را از هم جدا می کند. مطابق این شکل، پست های ناحیه I بسیار پرریسک تر از پست های ناحیه III هستند. مقایسه شکل های (۵) (الف) و (۵) (ب) نشان می دهد که همان طور که پیشتر تشریح شد، برای تعیین پست های پرریسک، بایستی تاثیر نرخ استفاده از کولرهای گازی و دمای محیط نیز لحاظ شوند.



شکل (۵): شاخص های $MVA-Volt$ و $Strength$ برای ناحیه I و ناحیه III (الف) پیش از اصلاح [۲۲]، (ب) پس از لحاظ کردن تاثیر دمای محیط و نرخ استفاده از کولر گازی

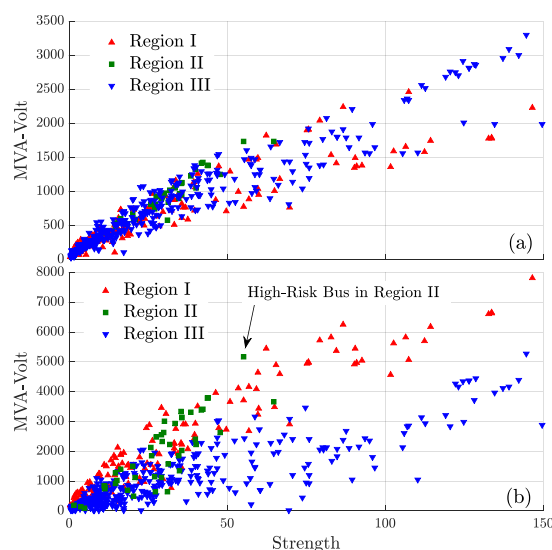
همان طور که از معادله (۷) پیداست، مقدار شاخص $MVA-Volt$ تابعی از دمای محیط و میزان بار کولر گازی شینه تحت بررسی می باشد. لذا مطالعات شکل (۵) می تواند از خطا در تخمین این پارامترها متأثر گردد. لذا پیاده سازی مطالعات آنالیز حساسیت جهت بررسی تاثیر این خطا در تخمین پارامترها بر روی خروجی مطالعات غربالگری لازم است. بدین منظور، در شکل (۶) فرض شده است که دمای بیشینه محیط و میزان بار کولر گازی در دو ناحیه I و III با $\pm 20\%$ خطا تخمین زده شده باشد و نتایج مطالعات غربالگری گزارش شده است. در شکل (۶) (الف)، فرض شده است که دمای بیشینه محیط در ناحیه I در محدوده $T = [32.8^\circ C, 49.2^\circ C]$ و در ناحیه III در محدوده $T = [21.6^\circ C, 32.4^\circ C]$ تغییر داده شده است و نواحی تغییر مقدار $MVA-Volt$ برای هر شینه در این شکل ترسیم شده است. دقت گردد که بازه تغییرات دما بسیار بزرگ در نظر گرفته شده است (بالاخص برای حد بالای دما در ناحیه I). هدف از این کار، نشان دادن تاثیر کم خطا در تخمین دمای بیشینه بر روی استخراج پست-

شناسایی شده با پدیده‌های واقعی ثبت شده در کشور ایران، نشان داده شد که نتایج این شاخص موثر و قابل اطمینان هستند.

مراجع

- [1] NERC Transmission Issues Subcommittee and System Protection and Control Subcommittee, A technical reference paper fault-induced delayed voltage recovery, June 2009.
- [2] W. Wang, M. Diaz-Aguilo, K. B. Mak, F. de Leon, D. Czarkowski, and R. Uosef, "Time series power flow framework for the analysis of FIDVR using linear regression", IEEE Trans. Power Del., vol. 33, pp. 2946–2955, Dec. 2018.
- [3] J. D. Ashkezari, M. E. H. Golshan and A. Mirzaei, "Secured Zone 3 Operation Against Fault Induced Delayed Voltage Recovery Event," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 37, no. 1, pp. 507-516, Feb. 2022.
- [4] A. Matavalam and V. Ajarapu, "PMU-based monitoring and mitigation of delayed voltage recovery using admittances", IEEE Trans. Power Sys., vol. 34, pp. 4451–4463, Nov. 2019.
- [5] B. Park and M. M. Olama, "A Model-Free Voltage Control Approach to Mitigate Motor Stalling and FIDVR for Smart Grids," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 12, no. 1, pp. 67-78, Jan. 2021.
- [6] D. J. Pinznand and D. G. Colome, "Fault-induced delayed voltage recovery assessment based on dynamic voltage indices", in 2018 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition - Latin America (T&D-LA), Lima, 2018.
- [7] P. Irminger et al., "Air conditioning stall phenomenon - testing, model development, and simulation", in PES T&D 2012, Orlando, FL, 2012.
- [8] B. Park and M. M. Olama, "Mitigation of Motor Stalling and FIDVR via Energy Storage Systems With Signal Temporal Logic," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 36, no. 2, pp. 1164-1174, March 2021.
- [9] B. Sapkota and V. Vittal, "Dynamic VAR planning in a large power system using trajectory sensitivities", IEEE Trans. Power Sys., vol. 25, pp. 461–469, Feb. 2010.
- [10] H. Zheng and C. DeMarco, "A new dynamic performance model of motor stalling and FIDVR for smart grid monitoring/planning", IEEE Trans. Smart Grid, vol. 7, pp. 1989–1996, July 2016.
- [11] W. Huang and K. Sun, "Optimization of SVC settings to improve post-fault voltage recovery and angular stability," in Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. 7, no. 3, pp. 491-499, May 2019.
- [12] رحیمی پور بهیانی میلاد، امینی محمدعلی، جلیلیان علیرضا، "بازآرایی شبکه توزیع به منظور بهبود فروافتادگی ولتاژ با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات گسسته"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۱۹ (۱): ۲۰۱-۲۱۱، ۱۴۰۱.
- [13] حجتی نجف آبادی ابراهیم، برکاتی سید مسعود، توکلی افشار سعید، "تعیین بهینه تولید و مکان و اندازه بهینه ادوات FACTS به منظور حذف تراکم خطوط"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۱۲ (۱): ۱۳۸-۱۲۵، ۱۳۹۴.
- [14] S. Kolluri et al., "Application of SVC in energy to address FIDVR problem", in 2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), Denver, CO, 2018.

کاملاً از یکدیگر جدا شده‌اند و منطقه ۲ در حد فاصل بین آن‌ها قرار گرفته است.



شکل (۷): شاخص‌های $MVA-Volt$ و $Strength$ در شبکه برق

سراسری ایران (الف) پیش از اصلاح [۲۲]، (ب) پس از لحاظ کردن تاثیر دمای محیط و نرخ استفاده از کولر گازی

مقایسه شکل ۷ (الف) و ۷ (ب) نشان می‌دهد که شاخص‌های پیشنهادی، خصوصاً در مطالعات شبکه‌های گسترده، به وضوح عملکرد بهتری نسبت به شاخص‌های قبلی دارند. علاوه بر این مشاهده می‌گردد که پست‌های پرریسکی که توسط شاخص‌های پیشنهادی تعیین شده‌اند با پدیده‌های واقعی FIDVR گزارش شده مطابقت بسیار خوبی دارند.

۶- نتیجه گیری

این مقاله شاخص $MVA-Volt$ بهبود یافته را به منظور تعیین پست‌های پرریسک از نظر شدت FIDVR معرفی کرده است که در آن تاثیرات دمای محیط و نرخ استفاده از کولرهای گازی نیز در نظر گرفته شده است. برای تعیین این شاخص، ابتدا به کمک یک مطالعه بار اولیه، سهم هر نوع بار (استاتیکی، الکترونیکی و یا کولرهای گازی) در هر پست تخمین زده می‌شود. سپس بر اساس دمای محیط، افت ولتاژ مورد نیاز برای توقف کولرهای گازی محاسبه شده و در محاسبات شاخص پیشنهادی لحاظ می‌شود.

از مهم‌ترین ویژگی‌های شاخص پیشنهادی، این است که برای تعیین پست‌های پرریسک از نظر FIDVR، تنها نیاز به انجام مطالعات حالت ماندگار شبکه است. در نتیجه، در شبکه‌هایی که تاکنون موفق به ثبت این پدیده نشده‌اند یا داده‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی دینامیکی بار را ندارند، می‌توان از این شاخص به خوبی استفاده کرد. صحت عملکرد این شاخص نیز به کمک شبیه سازی دقیق دینامیکی در یک ناحیه کوچک تایید شد. سپس با مقایسه پست‌های پرریسک

- [15] A. Tahboub, M. E. Moursi, W. Woon, and J. Kirtley, "Multiobjective dynamic VAR planning strategy with different shunt compensation technologies", *IEEE Trans. Power Sys.*, vol. 33, pp. 2429–2439, May 2018.
- [16] W. Wang, M. Zou, and W. Shum, "Challenges to supplying large induction motor loads in a long radial transmission system", in 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Denver, CO, 2015.
- [17] J. Glidewell and M. Patel, "Effect of high speed reclosing on fault induced delayed voltage recovery", in 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, 2012.
- [18] Q. Li, Y. Xu and C. Ren, "A Hierarchical Data-Driven Method for Event-Based Load Shedding Against Fault-Induced Delayed Voltage Recovery in Power Systems," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 17, no. 1, pp. 699-709, Jan. 2021.
- [19] W. Wang and F. de León, "Quantitative Evaluation of DER Smart Inverters for the Mitigation of FIDVR in Distribution Systems," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 35, no. 1, pp. 420-429, Feb. 2020.
- [20] E. Hajipour et al., "An improved aggregated model of residential air conditioners for FIDVR studies", *IEEE Trans. Power Sys.*, vol. 35, March 2020, pp. 3287–3297.
- [21] K. Zhang, H. Zhu, and S. Guo, "Dependency analysis and improved parameter estimation for dynamic composite load modeling", *IEEE Trans. Power Sys.*, vol. 32, pp. 3287–3297, July 2017.
- [22] S. Halpin, R. Jones, and L. Taylor, "The MVA-Volt index: A screening tool for predicting fault-induced low voltage problems on bulk transmission systems", *IEEE Trans. Power Sys.*, vol. 23, pp. 1205–1210, Aug. 2008.
- [23] M. Kasmayi, Climatic classification of Iran for housing and urban design. <https://www.climatestotravel.com/climate/iran>.
- [24] R. Bravo and S. Robles, 2013 FIDVR events analysis on valley distribution circuits, DER Laboratory at Southern California Edison, Dec.2013.
- [25] A. Meliopoulos, G. Cokkinides, and G. Stefopoulos, "Voltage stability and voltage recovery: Load dynamics and dynamic VAR sources", in 2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, Atlanta, GA, 2006.
- [26] A. Gaikwad et al., "Results of residential air conditioner testing in WECC", in 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, Pittsburgh, PA, 2008.
- [27] WECC dynamic composite load model (CMPLDW) specifications, Western Electricity Coordination Council, Jan. 2015. <http://home.engineering.iastate.edu>.
- [28] Y. Liu, V. Vittal, J. Undrill, and J. Eto, "Transient model of airconditioner compressor single phase induction motor," *IEEE Trans. Power Sys.*, vol. 28, pp. 4528–4536, Nov. 2013.
- [29] R. Bravo, J. Wen, D. Kosterev, B. Price, and R. Yinger, WECC air conditioner motor model test report. <https://www.wecc.biz>.

زیرنویس‌ها

¹ Fault Induced Delayed Voltage Recovery

² Stall

³ Under Voltage Load Shedding

⁴ FIDVR Severity Criteria

⁵ Pareto Frontier

