



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 14, No. 3, 2023
Research Paper

New Load Shedding Method for Dealing with Critical Conditions of Smart Network Caused by Fault-Induced Delayed Voltage Recovery

Mahdi Ghotbi-Maleki¹, Reza Mohammadi Chabanloo², Hamid Javadi^{3*}

¹ Dept. of Electrical Engineering, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran

² Dept. of Electrical Engineering, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran

³ Dept. of E.E. of SBU, and Monenco Iran Consulting Engineers, Tehran, Iran

Abstract:

The phenomenon of Fault-Induced Delayed Voltage Recovery (FIDVR) appears in networks with high penetration of induction motor loads because the increase in requested reactive powers of motor loads after clearing the fault prevents the rapid return of the bus voltage to the pre-fault level. Load shedding is one of the effective ways to deal with the FIDVR phenomenon, which causes the amount of demand to approach the production of reactive power. In this paper, a wide-area load-shedding method is presented, which performs based on network conditions and loads. Since the introduced indicators for determining the locations and amounts of loads to be shed are based on the values of bus voltages, loads currents, and network impedance matrix; therefore, the proposed method can effectively shed the loads and deal effectively with FIDVR. The voltage estimation process is an important tool to predict the voltages at future moments and is defined based on the modified Gauss-Seidel load flow and the three-order model of the induction motor. This tool enables the proposed method to understand the effect of applying load shedding on voltage recovery and prevents the application of unnecessary ones.

Keywords: Fault-induced delayed voltage recovery, Gauss-Seidel load flow, load shedding, voltage estimation, smart grid.



This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<https://doi.org/10.22108/ISEE.2023.135471.1589>

روش جدید حذف بار برای مقابله با شرایط بحرانی در شبکه هوشمند حاصل از وقوع

پدیده بازیابی تأخیری ولتاژ ناشی از خطا

مهدی قطبی ملکی^۱، رضا محمدی چنبلو^{۲*}، حمید جوادی^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

m_ghotbi@sbu.ac.ir

۲- استادیار دانشکده مهندسی برق قدرت، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

re_mohammadi@sbu.ac.ir

۳- دانشیار دانشکده مهندسی برق قدرت، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران- شرکت مهندسی مشاور

مونکو ایران، تهران، ایران

h2javadi@gmail.com

چکیده: پدیده بازیابی تأخیری ولتاژ ناشی از خطا (FIDVR) در شبکه‌هایی با ضریب نفوذ بالای بارهای موتوری پدیدار می‌شود؛ زیرا افزایش توان راکتیو درخواستی بارهای موتوری بعد از رفع خطا از بازیابی سریع ولتاژها جلوگیری می‌کند. حذف بار یکی از روش‌های مؤثر مقابله با پدیده FIDVR است که سبب نزدیک شدن میزان تقاضا به تولید توان راکتیو می‌شود. در این مقاله یک روش ناحیه گسترده ارائه می‌شود که براساس شرایط شبکه و بارها اقدام به حذف بار می‌کند. با توجه به اینکه شاخص‌های معرفی شده برای مشخص کردن مکان و مقدار حذف بار از ولتاژ شین‌ها، جریان بارها و درایه‌های ماتریس امیدانسی شبکه تشکیل شده‌اند؛ بنابراین، روش پیشنهادی قادر به حذف مؤثر بارها است. پروسه تخمین ولتاژ ابزار مهمی است که در روش پیشنهادی از آن بهره گرفته می‌شود و بر پایه پخش بار گوس-سایدل تعمیم یافته و مدل درجه سه موتور القائی تعریف شده است. این ابزار، روش پیشنهادی را قادر می‌سازد تأثیر حذف بارهای پیشنهادی بر میزان بازیابی ولتاژ شین‌ها را متوجه بشود و از اعمال موارد غیرضروری جلوگیری کند. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده خطای زیر ۲ درصد در پروسه تخمین ولتاژ و همچنین، کاهش ۱۷ درصدی مقدار بار قابل حذف نسبت به روش‌های مرسوم است.

واژه‌های کلیدی: بازیابی تأخیری ولتاژ ناشی از خطا، پخش بار گوس-سایدل، حذف بار، تخمین ولتاژ، شبکه هوشمند.

۱- مقدمه

پدیده‌های جدید، بازیابی تأخیری ولتاژ ناشی از خطا است که به صورت یک کاهش ولتاژ در شبکه انتقال برای چندین ثانیه بعد از رخداد خطا، ناشی از وجود مقدار زیادی از بارهای موتور القائی در سطح شبکه توزیع، تعریف می‌شود. اگر در شبکه‌ای با ضریب نفوذ بالای بار موتوری، خطایی رخ دهد، ولتاژ شین‌ها در حین وقوع خطا کاهش می‌یابند. با رفع خطا، انتظار این هست که شبکه در سریع‌ترین زمان به حالت قبل از خطا برگردد؛ ولی به دلیل کاهش سرعت موتور و در نتیجه، افزایش نسبت راکتانس به مقاومت روتور

به دلیل گسترش روزافزون شبکه قدرت، این شبکه در معرض پدیده‌های جدید قرار می‌گیرد. یکی از این

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۱/۱۴

نام نویسنده مسئول: رضا محمدی چنبلو

نشانی نویسنده مسئول: ایران، تهران، دانشگاه شهید بهشتی، گروه مهندسی برق قدرت

ذخیره‌ساز انرژی و نصب منابع تولید توان راکتیو (CB5)، SVC6 و STATCOM7)، درصدد افزایش توانایی شبکه در تأمین توان راکتیو درخواستی بارهای موتوری در طول FIDVR هستند. تزریق توان راکتیو از جانب DGها در حین وقوع FIDVR، سبب کاهش شدت این پدیده می‌شود [۱۱، ۱۲] و مقدار این توان تزریق‌شده نیز از طریق قوانین خبره [۱۳]، افت ولتاژ-توان راکتیو [۱۴] و مسئله بهینه‌سازی [۱۵] تعیین می‌شود. تجهیزات ذخیره‌ساز انرژی نیز قابلیت تزریق توان راکتیو در حین FIDVR برای کاهش شدت این پدیده را دارند [۱۶]. برای استفاده از SVC، CB و STATCOM، به‌عنوان منبع تزریق توان راکتیو در بحث مقابله با FIDVR، در ابتدا باید مکان و اندازه نصب این تجهیزات مشخص شود. یک طرح کنترل ولتاژ غیر وابسته به مدل‌های دینامیکی نیز در [۱۷] معرفی شده که توانایی کنترل منابع تزریق توان راکتیو در حین وقوع FIDVR را دارا است. به‌کارگیری روش‌های طرف شبکه هزینه‌برند و همچنین، این روش‌ها امکان به‌کارگیری در تمام شبکه‌ها را ندارند.

برای متعادل‌سازی بین تولید و مصرف توان راکتیو در حین وقوع FIDVR، به‌جای افزایش تزریق توان راکتیو به شبکه می‌توان مصرف توان راکتیو را از طریق حذف بار کاهش داد. رله‌های UVLS8 حفاظت معمول نصب‌شده در شبکه‌ها در مقابل افت ولتاژند؛ اما مطالعات نشان داده‌اند که این حفاظت توانایی مقابله مؤثر با پدیده FIDVR را ندارد؛ به همین دلیل، برخی محققان درصدد ارتقای این حفاظت برآمده‌اند. در [۱۸] پیشنهاد شده است رله‌های UVLS علاوه بر پایش مقدار ولتاژ، تغییرات ولتاژ را نیز اندازه‌گیری کنند تا این رله‌ها قادر باشند ولتاژ در لحظات آینده را از طریق یک خط راست تخمین بزنند. اگر ولتاژ تخمین زده شده در لحظه بحرانی کمتر از ولتاژ بحرانی بود، حذف بار اعمال می‌شود. نویسندگان در [۱۹] پیشنهاد می‌دهند رله‌های UVLS مجهز به کنترل‌کننده فازی شوند تا عملکردشان در هنگام وقوع FIDVR بهبود پیدا کند. ورودی این کنترل‌کننده، اندازه و زمان بازیابی ولتاژ و خروجی آن نیز

در طول خطا، جریان راکتیو مورد تقاضای موتور افزایش می‌یابد. افزایش تقاضا برای جریان راکتیو، اجازه نمی‌دهد ولتاژ به‌سرعت به حالت قبل از خطای خود برگردد و حتی ممکن هست به فروپاشی ولتاژ منجر شود. این پدیده به اسم بازیابی تأخیری ولتاژ ناشی از خطا یا FIDVR نامیده شده است.

تاکنون تحقیقات مختلفی درخصوص پایداری کوتاه‌مدت ولتاژ در شبکه‌های قدرت صورت گرفته و روش‌های مختلفی از جمله نصب منابع تولید پراکنده [۱]، نصب بانک‌های خازنی [۲] و به‌کارگیری ادوات FACT2 [۳] برای حفظ این پایداری پیشنهاد شده است؛ با این حال، در [۴] نشان داده شده است که وقوع خطایی در شبکه‌ای با ضریب نفوذ بالای بارهای موتوری می‌تواند شبکه را به سمت ناپایداری ولتاژ برده؛ از این رو، توجه به ماهیت پدیده FIDVR و تحقیق درخصوص شناسایی و مقابله با این پدیده ضروری هست.

هدف تحقیقات ابتدایی درباره پدیده FIDVR، کمی‌سازی این پدیده براساس شاخص‌های مختلف نظیر ترکیب مقدار بار و قدرت اتصال کوتاه هر شین [۵]، توابع آنژیومی و دیورژانس چگالی ولتاژ [۶]، تغییرات ولتاژ در حین وقوع FIDVR [۷] بودند. شاخص معرفی‌شده بر پایه تغییرات ولتاژ با استفاده از داده‌های دریافتی از جانب PMU3ها محاسبه می‌شود و سپس در الگوریتم یادگیری ماشین برای تشخیص شدت FIDVR استفاده می‌شود. استفاده از پخش بار زمانی ایده‌ای است که در [۸] برای ساخت مجدد داده‌های مخدوش در مطالعه FIDVR مطرح شده است. برای مدل‌سازی بار موتوری در مطالعات FIDVR نیز در [۹] از مدلی دینامیکی بر پایه تابع شبه انرژی لیپانوف و در [۱۰] از مدلی تجمیعی دربرگیرنده پارامترهای حالت توقف موتور بهره گرفته شده است.

پس از مطالعات اولیه درخصوص FIDVR، نحوه مقابله با این پدیده در دو دسته کلی روش‌های طرف بار و روش‌های طرف شبکه بررسی شده است. روش‌های طرف شبکه مانند به‌کارگیری DGها، استفاده از تجهیزات

یابد؛ بنابراین، در این مقاله ابزاری برای تخمین ولتاژ شین‌ها براساس پخش بار گوس-سایدل و مدل درجه سه موتور القائی ارائه می‌شود. وجود این ابزار کمک‌کننده به مقابله سریع‌تر با FIDVR است. با توجه به اینکه هم شرایط شبکه و هم شرایط بارها بر شدت FIDVR تأثیرگذارند، ساختار روش حذف بار پیشنهادی طوری طراحی شده است که از پارامترهای شبکه و بارها برای مشخص کردن مکان و مقدار حذف بار بهره برده شود. نوآوری‌های برجسته این مقاله به شرح زیرند:

ارائه یک سازوکار جدید و دقیق تخمین ولتاژ
تعمیم پخش بار گاوس-سایدل برای استفاده در فرآیند تخمین ولتاژ پیشنهادی؛
استفاده از مدل درجه سه بارهای موتور القایی در مطالعات FIDVR؛

پیشنهاد یک استراتژی جدید حذف بار برای مشخص کردن مکان و مقدار بارهای قابل حذف با به‌کارگیری هم‌زمان پارامترهای شبکه و بارها.
ساختار مقاله به شرح زیر است: ابزار تخمین ولتاژ پیشنهادی در بخش ۲ ارائه شده است. بخش ۳ مختص روش حذف بار پیشنهادی است و نتایج پیاده‌سازی این روش در بخش ۴ ذکر شده‌اند. بخش ۵ نیز به جمع‌بندی اختصاص دارد.

۲- پروسه تخمین ولتاژ

اگر ابزاری برای تخمین ولتاژ شین‌ها در لحظات آینده در دسترس باشد، به‌وسیله آن می‌توان شین‌های درگیر FIDVR بحرانی را مشخص کرد و همچنین، صحت حذف بارهای پیشنهادی را ارزیابی داد. ابزار مدنظر، از به کار بردن مدل درجه سه موتور القائی در پخش بار گوس-سایدل برای استفاده در شرایط گذرا حاصل می‌شود.

۲-۱- مدل درجه سه موتور القائی

نحوه نشان‌دادن موتور القائی براساس مدل درجه سه،

مقدار بار قابل حذف در لحظه کنونی و تأخیر موردنیاز تا لحظه حذف بار بعدی تعریف شده است. حفاظت UVLS در [۲۰] طوری بهبود داده شده که این رله با استفاده از شاخص لغزش نسبی که نسبت لغزش موتور به لغزش بحرانی است، توانایی تشخیص عملکرد بارهای موتوری در ناحیه پایدار و ناپایدار را داشته باشد.

پایش توان اکتیو و راکتیو بارهای هر شین برای تشخیص توقف بارهای موتوری [۲۱] و پایش بخش موهومی ادیتانس دیده‌شده از ابتدای فیدرها [۲۲] از جمله روش‌های دیگر حذف بار محلی است که برای مقابله با FIDVRهای بحرانی مورد تحقیق قرار گرفته‌اند. حذف بار در [۲۲] به کمک شاخص حاشیه پایداری DGهای سنکرون و شاخص سرعت‌گیری مجدد بارهای موتوری انجام می‌پذیرد. در صورتی که شبکه مورد مطالعه مجهز به PMU باشد، امکان پیاده‌سازی طرح‌های متمرکز برای مقابله با FIDVR نیز وجود دارد. با توجه به اینکه حذف بار از یک شین روی بازبایی ولتاژ شین‌های دیگر نیز تأثیر می‌گذارد، بررسی تمام شین‌های شبکه به صورت هم‌زمان نتیجه بهتری نسبت به بررسی جداگانه شین‌ها خواهد داشت. در طرح حذف بار متمرکز مطرح‌شده در [۲۳] از تغییرات انرژی جنبشی بارهای موتوری برای تشخیص مکان و اندازه حذف بار کمک گرفته می‌شود. در این مرجع نشان داده شده است که تغییرات انرژی جنبشی رابطه مستقیمی با نامتعادلی تولید و مصرف توان دارد. روش تحلیل مسیر یا به عبارتی مطالعه تأثیر تغییر در یکی از پارامترهای سیستم روی عملکرد دینامیکی سیستم ابزاری هست که در [۲۴] برای تعیین مکان و مقدار حذف بار استفاده شده است.

روش‌های پیشین حذف بار نمی‌توانند تأثیر حذف بار پیشنهادی خودشان را بر بازبایی ولتاژ شین‌ها پیش‌بینی کنند پس این روش‌ها نمی‌توانند اطمینان حاصل کنند حذف بار اعمالی توانایی مقابله مؤثر با FIDVR را داشته باشد؛ به همین سبب، نیاز به پایش مستمر ولتاژ شین‌ها در طول FIDVR دارند. مقابله سریع‌تر با FIDVR سبب می‌شود ایمنی شبکه در مقابل تأثیرات منفی تنش‌های ولتاژی افزایش

برحسب سرعت روتور است، با کمک $\omega_r = (1 - s_M)\omega_s$ به صورت رابطه (۳-الف) ساده سازی و برحسب لغزش موتور بازنویسی می شود. c, b, a, T_{mec0}, A, B و C ضرایب ثابت گشتاور مکانیکی هستند و ضرایب جدید گشتاور مکانیکی برحسب ضرایب قبلی، در رابطه (۳-ب) لیست شده اند. گشتاور الکتریکی طبق رابطه (۴) با توان حقیقی تحویل شده به روتور مرتبط است که با جایگذاری رابطه (۲-الف)، این گشتاور تبدیل به رابطه ای برحسب ولتاژ داخلی و ولتاژ ترمینال های موتور می شود. با جایگذاری گشتاورهای مکانیکی و الکتریکی تغییر شکل یافته در سطر سوم رابطه (۱)، رابطه (۵) که نشان دهنده نحوه تغییرات لغزش موتور برحسب ولتاژ داخلی، ولتاژ ترمینال ها و خود لغزش موتور هست حاصل می شود.

$$T_{mec} = T_{mec0}(a\omega_r^2 + b\omega_r + c) \Rightarrow \quad (3-f)$$

$$T_{mec} = As_M^2 + Bs_M + C \quad (3-b)$$

$$A = T_{mec0}a\omega_s^2$$

$$B = -T_{mec0}(2a\omega_s^2 + b\omega_s) \quad (3-b)$$

$$C = T_{mec0}(a\omega_s^2 + b\omega_s + c)$$

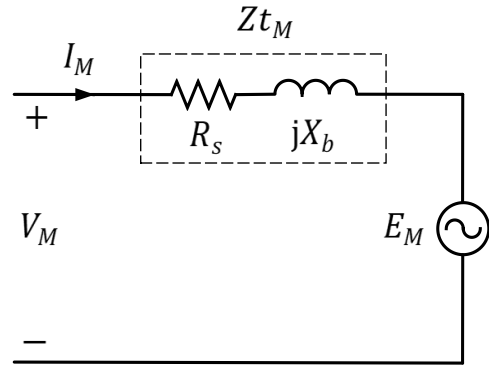
$$T_{elc} = \frac{3}{\omega_s} Re\langle E_M I_M^* \rangle \quad (4)$$

$$= \frac{3}{\omega_s} Re\left\langle \frac{E_M V_M^* - |E_M|^2}{Zt_M^*} \right\rangle$$

$$\omega_s J_M \frac{d}{dt} s_M = (As_M^2 + Bs_M + C) - \frac{3}{\omega_s} Re\left\langle \frac{E_M V_M^* - |E_M|^2}{Zt_M^*} \right\rangle \quad (5)$$

با اعمال $E_M = E_{M,d} + jE_{M,q}$ و $I_M = I_{M,d} + jI_{M,q}$ و جایگذاری رابطه (۲-الف) در دو سطر اول رابطه (۱)، این روابط تبدیل به رابطه (۶) می شوند. با گسسته سازی دو رابطه (۵) و (۶) با استفاده از $\frac{d}{dt} s_M = \frac{s_M(t+\Delta t) - s_M(t)}{\Delta t}$ و $\frac{d}{dt} E_M = \frac{E_M(t+\Delta t) - E_M(t)}{\Delta t}$ سازوکاری برای تخمین متغیرهای مدل درجه سه یعنی ولتاژ داخلی و لغزش موتور در لحظه بعد حاصل می شود. در بخش بعدی پروسه ای معرفی می شود که با استفاده از مقادیر E_M و s_M در لحظه بعدی بتوان ولتاژ شین ها در لحظه $t + \Delta t$ را محاسبه کرد

همانند شکل ۱ به صورت یک امپدانس متشکل از مقاومت اهمی استاتور و راکتانس روتور قفل شده همراه با یک منبع ولتاژ داخلی هست که جایگزین بخش روتور شده است.



شکل (۱): مدل درجه سه موتور القایی

متغیرهای حالت مدل درجه سه شامل مؤلفه های d و q ولتاژ داخلی و همچنین، سرعت روتور هستند و تغییراتشان به صورت رابطه (۱) بیان می شوند. پارامترهای به کاررفته در رابطه (۱) در روابط (۲) لیست شده اند [۲۵].

$$\begin{cases} \tau_r \frac{d}{dt} E_{M,d} = -E_{M,d} + \tau_r \omega_s s_M E_{M,q} - (X_o - X_b) I_{M,q} \\ \tau_r \frac{d}{dt} E_{M,q} = -E_{M,q} - \tau_r \omega_s s_M E_{M,d} + (X_o - X_b) I_{M,d} \\ J_M \frac{d}{dt} \omega_r = T_{elc} - T_{mec} \end{cases} \quad (1)$$

$$I_M = \frac{V_M - E_M}{Zt_M} \quad (2-f)$$

$$Zt_M = R_s + jX_b \quad (2-b)$$

در این روابط، E_M, V_M, I_M و T_{elc} و T_{mec} به ترتیب نشان دهنده ولتاژ تک فاز داخلی، ولتاژ تک فاز ترمینال، جریان ورودی، گشتاور الکتریکی سه فاز و گشتاور مکانیکی سه فاز موتور هستند. $s_M, \omega_r, \omega_s, \tau_r, J_M$ هم نشان دهنده لغزش موتور، سرعت روتور، سرعت میدان دوار استاتور، ثابت زمانی گذرای روتور و ثابت اینرسی موتور هستند. R_s مقاومت اهمی استاتور، و X_b, X_o به ترتیب راکتانس روتور مدار باز، راکتانس روتور قفل شده و امپدانس گذرای موتور هستند.

در ادامه، گشتاور مکانیکی که رابطه ای درجه دوم

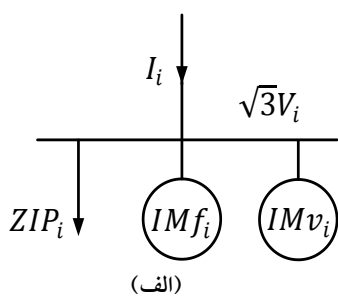
$$\tau_r \frac{d}{dt} E_M = j \frac{X_o - X_b}{Z t_M} V_M - \left(1 + j \left(\tau_r \omega_s S_M + \frac{X_o - X_b}{Z t_M} \right) \right) E_M \quad (6)$$

$$\begin{cases} E_M(t + \Delta t) = \frac{\Delta t}{\tau_r} \left[j \frac{X_o - X_b}{Z t_M} V_M(t) - \left(\left(1 - \frac{\tau_r}{\Delta t} \right) + j \left(\tau_r \omega_s S_M(t) + \frac{X_o - X_b}{Z t_M} \right) \right) E_M(t) \right] \\ S_M(t + \Delta t) = \frac{\Delta t}{\omega_s J_M} \left[\left(A_{S_M}(t)^2 + \left(\frac{\omega_s J_M}{\Delta t} + B \right) S_M(t) + C \right) - \frac{3}{\omega_s} Re \left(\frac{E_M(t) V_M(t)^* - |E_M(t)|^2}{Z t_M^*} \right) \right] \end{cases} \quad (7)$$

۲-۲- تعمیم پخش بار گوس - سایدل

تغییرات متغیرهای حالت بارهای موتور روی ولتاژها در هر لحظه، از طریق S_i در الگوریتم گوس-سایدل تأثیر خواهند گذاشت. بارهای در نظر گرفته شده بارهای استفاده شده در این مقاله طبق شکل ۲-الف) متشکل از یک بار استاتیکی و دو بار موتوری گشتاور ثابت و گشتاور متغیر هست. توان ظاهری بار استاتیکی ZIP^q از رابطه (۱۰) به دست می‌آید که در این رابطه، $\alpha_p, \beta_p, \gamma_p, P_{ZIP0}, Q_{ZIP0}$ ، $\alpha_q, \beta_q, \gamma_q$ ضرایب ثابت و V_0 ولتاژ نامی بار استاتیکی هستند.

توان ظاهری بارهای موتوری از طریق ضرب ولتاژ در مزدوج جریان بارهای موتوری IMf_i^* و IMv_i^{**} طبق رابطه (۱۱) به دست می‌آید که جریان بارهای موتوری از طریق شکل ۲-ب) محاسبه می‌شود. $S_i^{(k-1)}$ در رابطه (۱۲) حاصل جمع دو توان ظاهری بار استاتیکی و بار دینامیکی است که در رابطه (۹) جایگزین می‌شود. در رابطه (۱۱)، اگر از متغیرهای حالت بارهای موتوری در لحظه بعد استفاده شود، پخش بار تعمیم یافته گوس-سایدل ولتاژ شین‌ها برای لحظه $t + \Delta t$ را تخمین خواهد زد.



مدل‌سازی FIDVR نیازمند داشتن سازوکاری برای تخمین ولتاژ شین‌های شبکه براساس متغیرهای بارهای موتوری است. پخش بار گوس-سایدل به‌عنوان این سازوکار در نظر گرفته شده است که از طریق آن می‌توان ولتاژ شین‌ها در حالت ماندگار را به دست آورد. در پخش بار گوس-سایدل، ولتاژها در تکرار (k) با استفاده از رابطه (۸-الف) محاسبه می‌شوند و طبق رابطه (۸-ب)، اگر اختلاف ولتاژها در دو تکرار متوالی $(k-1)$ و (k) کمتر از ϵ باشد، تکرار متوقف می‌شود.

$$V_i^{(k)} = \frac{1}{Y_{i,i}} \left[\left(\frac{S_i}{V_i^{(k-1)}} \right)^* - \sum_{\substack{h=1 \\ h \neq i}}^N Y_{i,h} V_h^{(k-1)} \right] \quad (8-الف)$$

$$|V_i^{(k)} - V_i^{(k-1)}| \leq \epsilon \quad i = 1, \dots, N \quad (8-ب)$$

در این روابط، V_i و S_i به ترتیب ولتاژ فاز به زمین شین i و توان تک‌فاز بار تغذیه شده از این شین هستند؛ $Y_{i,i}$ نیز درایه (i, i) ماتریس admittانس شبکه است. پارامتر N هم بیان‌کننده تعداد شین‌های شبکه است.

نکته شایان توجه اینکه این پخش بار در شرایط گذرا استفاده خواهد شد و در چنین شرایطی نمی‌توان تغذیه شده از هر شین را مقداری ثابت در نظر گرفت. تعمیم پخش بار گوس-سایدل طبق رابطه (۹) شامل این ویژگی هست که توان‌های تغذیه شده از هر شین در هر تکرار، مقادیر ثابتی ندارند و متغیر در نظر گرفته می‌شوند. اگر ولتاژهای محاسبه شده براساس توان‌های متغیر، شرایط توقف تکرار را فراهم کردند، مقادیر حاصل به‌عنوان ولتاژهای تخمین زده شده در لحظه $t + \Delta t$ در نظر گرفته می‌شوند. در ادامه نحوه محاسبه توان متغیر ذکر شده است.

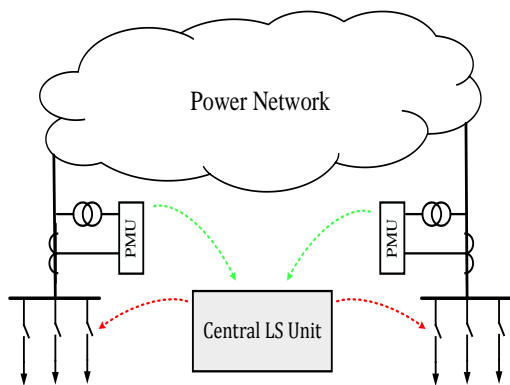
$$V_i^{(k)} = \frac{1}{Y_{i,i}} \left[\left(\frac{S_i^{(k-1)}}{V_i^{(k-1)}} \right)^* - \sum_{\substack{h=1 \\ h \neq i}}^N Y_{i,h} V_h^{(k-1)} \right] \quad (9)$$

روش جدید حذف بار برای مقابله با شرایط بحرانی در شبکه هوشمند حاصل از وقوع پدیده بازیابی تأخیری ولتاژ ناشی از خطا

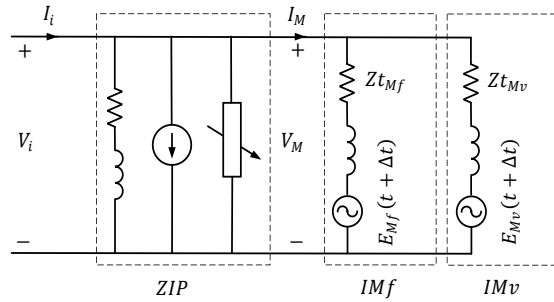
۳- طرح پیشنهادی حذف بار

در طرح حذف بار پیشنهادی، مقادیر اندازه‌گیری شده ولتاژ شین‌ها و جریان بارها در هر لحظه از زمان توسط PMUها برای سیستم مرکزی ارسال می‌شوند. در شرایط عادی بهره‌برداری شبکه، سیستم مرکزی با بهره‌گیری از مقادیر دریافت‌شده و روش‌های تخمین پارامترهای بار، بارهای تغذیه‌شده از هر شین را در قالب بارهای استاتیکی و دینامیکی مدل می‌کند. در صورتی که مقادیر ولتاژ و جریان ارسال‌شده به سیستم مرکزی از طریق PMUها، وقوع و رفع خطایی را در شبکه نمایان کنند، سیستم مرکزی با بهره‌گیری از مطالب بخش ۲ اقدام به تخمین ولتاژ شین‌ها در لحظات آینده خواهد کرد و در صورت نیاز فرمان قطع بار به کلیدهای موجود در شبکه برای مقابله با FIDVRهای بحرانی ارسال خواهد کرد. ارتباطات مخابراتی تعریف‌شده در این تحقیق، در شکل ۳ آمده‌اند.

ذکر این نکته ضروری است که ابزار تخمین ولتاژ استفاده‌شده در سیستم مرکزی، تنها به چندین داده از ولتاژها و جریان‌ها بعد از رفع خطا به‌عنوان ورودی پروسه تخمین ولتاژ نیاز دارد و نیازی به پایش مستمر شبکه در حین وقوع FIDVR وجود ندارد. پس از ارائه ساختار کلی روش پیشنهادی، هدف در ادامه مشخص کردن سه مورد مهم در بحث حذف بار یعنی مکان، مقدار و زمان حذف بار است.



شکل (۳): ارتباطات مخابراتی طرح حذف بار ناحیه گسترده پیشنهادی



(ب)

شکل (۲): اجزای بار استفاده‌شده در این پژوهش، (الف) دیاگرام تک‌خطی، (ب) دیاگرام فازی

$$\begin{aligned}
 S_{ZIP,i}^{(k-1)} &= P_{ZIP,i}^{(k-1)} + jQ_{ZIP,i}^{(k-1)} \\
 P_{ZIP,i}^{(k-1)} &= P_{ZIP0,i} \left[\alpha_{p,i} \left(\frac{V_i^{(k-1)}}{V_{0,i}} \right)^2 + \beta_{p,i} \left(\frac{V_i^{(k-1)}}{V_{0,i}} \right) + \gamma_{p,i} \right] \\
 Q_{ZIP,i}^{(k-1)} &= Q_{ZIP0,i} \left[\alpha_{q,i} \left(\frac{V_i^{(k-1)}}{V_{0,i}} \right)^2 + \beta_{q,i} \left(\frac{V_i^{(k-1)}}{V_{0,i}} \right) + \gamma_{q,i} \right]
 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
 S_{IM,i}^{(k-1)} &= V_i^{(k-1)} I_{M,i}^{(k-1)*} \\
 I_{M,i}^{(k-1)*} &= \frac{V_i^{(k-1)} - E_{Mf,i}(t + \Delta t)}{Z_{tMf,i}} + \frac{V_i^{(k-1)} - E_{Mv,i}(t + \Delta t)}{Z_{tMv,i}}
 \end{aligned} \quad (11)$$

$$S_i^{(k-1)} = S_{ZIP,i}^{(k-1)} + S_{IM,i}^{(k-1)} \quad (12)$$

درخور ذکر است مقادیر اولیه موردنیاز برای شروع به کار پخش بار گوس-سایدل و در نتیجه شروع به کار پروسه تخمین ولتاژ با استفاده از روش‌های تخمین پارامترهای بار محاسبه می‌شوند. این روش‌ها، پارامترهای بار را در شرایط عادی شبکه استخراج می‌کنند تا در صورت وقوع FIDVR این مقادیر در پروسه تخمین ولتاژ استفاده شوند.

$$V^{aLS} = ZI^{aLS} \rightarrow \begin{bmatrix} V_1^{aLS} \\ \vdots \\ V_N^{aLS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \dots & Z_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{N1} & \dots & Z_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1^{aLS} \\ \vdots \\ I_N^{aLS} \end{bmatrix} \quad (۱۴-ب)$$

$$V^{aLS} - V^{bLS} = Z(I^{aLS} - I^{bLS}) \rightarrow \Delta V = Z\Delta I \quad (۱۵)$$

از طریق $\Delta V = Z\Delta I$ می توان به این نکته رسید که تغییرات جریان حاصل از حذف بار روی کدام شین می تواند سبب بیشترین تغییرات ولتاژ در شین CF شود. حساسیت تغییرات ولتاژ شین CF نسبت به تغییرات جریان بار شین i $\left(\frac{\Delta V_{CF}}{\Delta I_i}\right)$ برابر با پارامتر $|Z_{CF,i}|$ است؛ اما نباید شینی که بیشترین مقدار $|Z_{CF,i}|$ را داشته باشد، به عنوان مکان حذف بار انتخاب شود. امکان دارد آن شین دارای ضریب نفوذ بالای بار موتوری نباشد و حذف بار از آن شین سبب کاهش شدت FIDVR شین CF نخواهد شود؛ بنابراین، باید عامل به وجود آورنده FIDVR یعنی افزایش توان درخواستی بارهای موتوری نیز در انتخاب مکان تأثیرگذار باشد؛ به همین دلیل، شاخص تعیین مکان حذف بار، ترکیبی از پارامترهای شبکه و پارامترهای بار طبق رابطه (۱۶) تعریف می شود.

$$loc = \max_{i=1,\dots,N} \left(\frac{|S_{IM,i}|}{\sum_{h=1}^N |S_{IM,h}|} |Z_{CF,i}| \right) \quad (۱۶)$$

بعد از تعیین مکان حذف بار، رابطه $\Delta V = Z\Delta I$ به صورت رابطه (۱۷-الف) نوشته می شود و این رابطه نشان دهنده میزان تغییر ولتاژ شین CF در صورت تغییر در جریان بار شین loc هست. هدف، رسیدن به شرایطی هست که با تغییر جریان بار شین loc ، ولتاژ شین CF به ولتاژ بحرانی برسد؛ به همین دلیل، V_{CF}^{aLS} با V_{crt} طبق رابطه (۱۷-ب) جایگزین می شود.

$$|V_{CF}^{aLS} - V_{CF}^{bLS}| = |Z_{CF,loc}| |I_{loc}^{aLS} - I_{loc}^{bLS}| \quad (۱۷-الف)$$

$$|V_{crt} - V_{CF}^{bLS}| = |Z_{CF,loc}| |I_{loc}^{aLS} - I_{loc}^{bLS}| \quad (۱۷-ب)$$

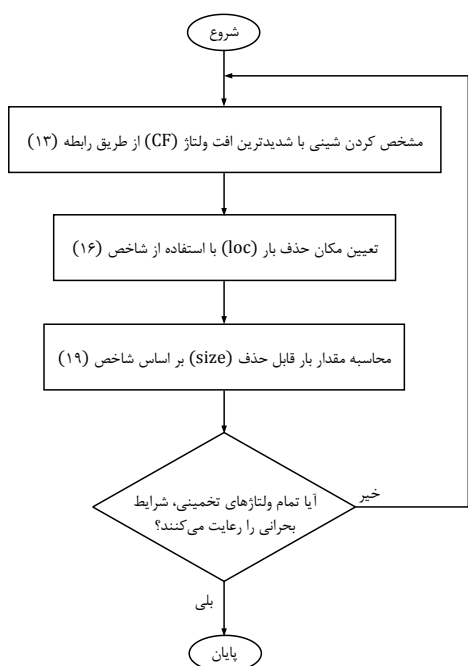
۳-۱- تعیین مکان و اندازه حذف بار

با توجه به معرفی پروسه‌ای برای تخمین ولتاژ، ولتاژ شین‌ها در لحظات آینده در دسترس‌اند؛ بنابراین، می توان شین‌هایی که در زمان بحرانی t_{crt} ، ولتاژی کمتر از ولتاژ بحرانی V_{crt} دارند را با نام شین‌های درگیر FIDVR بحرانی مشخص کرد. هدف از حذف بار، بازگرداندن ولتاژ این شین‌ها به مقداری بیشتر از V_{crt} در زمانی کمتر یا مساوی با t_{crt} است. بدین منظور، در ابتدا شینی که بیشترین افت ولتاژ را تجربه می کند، به عنوان FIDVR بحرانی (Critical FIDVR) از طریق رابطه (۱۳) مشخص می شود.

$$CF = \max_{i=1,\dots,N} (V_{crt} - |V_{est,i}(t_{crt})|) \quad (۱۳)$$

در ادامه باید مشخص شود حذف بار از کدام شین بیشترین تأثیر را روی بازیابی ولتاژ شین CF دارد. به این منظور، از ماتریس امیدانس شبکه و رابطه ماتریسی $V = ZI$ در لحظه قبل و بعد از حذف بار طبق روابط (۱۴-الف) و (۱۴-ب) بهره گرفته می شود. پارامترها در لحظه قبل و بعد از اعمال حذف بار به ترتیب با اندیس‌های bLS و aLS مشخص شده‌اند با تفریق این دو رابطه، رابطه‌ای بین تغییرات ولتاژ و تغییرات جریان همانند رابطه (۱۵) حاصل می شود. توجه به این نکته ضروری است که بارهای شبکه در قالب منابع جریانی در ماتریس I گنجانده شده‌اند؛ بنابراین، درایه‌های ماتریس امیدانس شبکه Z از امیدانس خطوط و ژنراتورها حاصل شده‌اند و تغییرات دینامیکی بارها تغییری در مقادیر ماتریس به وجود نمی آورند.

$$V^{bLS} = ZI^{bLS} \rightarrow \begin{bmatrix} V_1^{bLS} \\ \vdots \\ V_N^{bLS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \dots & Z_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{N1} & \dots & Z_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1^{bLS} \\ \vdots \\ I_N^{bLS} \end{bmatrix} \quad (۱۴-الف)$$



شکل (۴): فلوجارت روش پیشنهادی حذف بار

باید توجه داشت در صورت رخداد خطایی در شبکه که به وجود آمدن پدیده FIDVR یکی از نتایج آن است، رله‌های حفاظت اصلی خطوط، خط دچار خطا را از شبکه خارج می‌کنند. با خروج خط دچار خطا از شبکه، ساختار شبکه و به طبع آن، ماتریس امپدانس شبکه نیز تغییر خواهد کرد. برای اینکه سیستم مرکزی در شکل ۳ بتواند تغییر ساختار را تشخیص دهد، نیاز است وضعیت کلیدهای قدرت نیز از طریق ارتباط مخابراتی برای سیستم مرکزی ارسال شود. واحد مرکزی پس از تشخیص خروج خطی با امپدانس Z_l بین شین‌های k و h می‌تواند از طریق رابطه (۲۰)، درایه i و j ماتریس امپدانس شبکه را به‌روزرسانی کند. نیازی به به‌روزرسانی تمام درایه‌های ماتریس امپدانس شبکه نیست؛ بلکه درایه‌هایی باید به‌روزرسانی شوند که در روابط (۱۶) و (۱۹) استفاده خواهند شد.

$$Z_{ij}^{new} = Z_{ij}^{old} + \frac{(Z_{ih} - Z_{ik})(Z_{hj} - Z_{kj})}{Z_{kk} + Z_{hh} - 2Z_{kh} - Z_l} \quad (20)$$

۳-۲- تعیین زمان حذف بار

روش پیشنهادی باید قبل از زمان بحرانی تعیین شده براساس حفاظت UV^{12} مرسوم، حذف بار را اعمال کند.

با توجه به اینکه V_{crt} یک مقدار حقیقی هست و دارای زاویه نیست، برای پیشبرد روابط، V_{CF}^{bLS} هم‌فاز با هم در نظر گرفته می‌شوند. با توجه به اینکه زاویه جریان بار شین loc بعد از حذف بار نیز مشخص نیست، این ساده‌سازی به جریان بارها نیز اعمال می‌شود و رابطه (۱۸) حاصل می‌شود. با اعمال تغییرات به رابطه (۱۸)، مقدار قابل حذف از طریق رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود. این مقدار بار قابل حذف وابسته به ولتاژ قبل از خطای شین CF و جریان قبل از خطای شین loc و همچنین، اندازه امپدانس $Z_{CF,loc}$ هست.

$$V_{crt} - |V_{CF}^{bLS}| = |Z_{CF,loc}| (|I_{loc}^{bLS}| - |I_{loc}^{aLS}|) \quad (18)$$

$$size(\%) = \left(1 - \frac{|I_{loc}^{aLS}|}{|I_{loc}^{bLS}|}\right) \times 100$$

$$= \frac{V_{crt} - |V_{CF}^{bLS}|}{|Z_{CF,loc}| |I_{loc}^{bLS}|} \times 100 \quad (19)$$

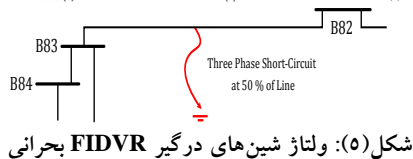
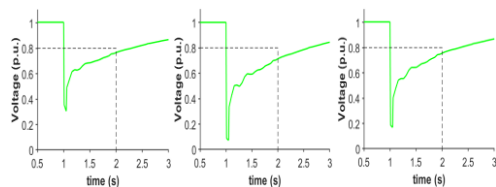
شکل ۴ نشان‌دهنده مراحل پیاده‌سازی حذف بار پیشنهادی است. در ابتدا نیاز هست بحرانی‌ترین شین از نظر شدت FIDVR شناسایی شود. در ادامه، مکان اعمال حذف بار از طریق شاخص (۱۶) بر پایه پارامترهای بارها و شبکه به دست می‌آید. مکان حذف بار تعیین شده بیشترین تأثیر روی بازیابی ولتاژ شین بحرانی را خواهد داشت. در نهایت مقدار بار قابل حذف نیز از طریق پارامترهای بارها و شبکه همانند رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود. با توجه به اینکه محاسبات در راستای بازیابی سریع‌تر ولتاژ یک شین بود، نیاز هست محاسبات به‌صورت تکرارپذیر اجرا شوند و تکرارها تا جایی ادامه پیدا کنند که ولتاژ همه شین‌ها در زمان بحرانی بیشتر از ولتاژ بحرانی شوند.

- ۰/۷ ثانیه بعد از وقوع خطا: پله دوم حذف بار؛
- ۰/۹ ثانیه بعد از وقوع خطا: پله سوم حذف بار؛
- ۱ ثانیه بعد از وقوع خطا: زمان بحرانی عملکرد رله‌های UV.

۴- شبیه‌سازی روش پیشنهادی در شبکه نمونه

در این بخش، کارایی روش پیشنهادی در زمینه پروسه تخمین ولتاژ و حذف بار روی شبکه ۱۱۸ شین IEEE بررسی می‌شود. این شبکه دارای سطوح ولتاژ ۱۳۸ kV و ۳۴۵ kV است و ۲۷۰۰ MVA بار با ترکیب ۶۰٪ بار موتوری و ۴۰٪ بار استاتیک را تغذیه می‌کند. زمان و مقدار ولتاژ بحرانی به ترتیب ۱ s بعد از وقوع خطا و ۰/۸ pu در نظر گرفته شده‌اند. ۳ لحظه در زمان‌های ۰/۵ s، ۰/۷ s و ۰/۹ s بعد از وقوع خطا نیز لحظات حذف بار در نظر گرفته شده‌اند.

با رخداد خطای ۳ فاز در ۵۰ درصد خط واصل بین شین‌های ۸۲ و ۸۳ در لحظه ۱ s، رله‌های دیستانس دوسر خط، خطا را در زون ۱ خود حس می‌کنند و خط را با تأخیر ۰/۵ s از شبکه قطع می‌کنند. افت ولتاژ به وجود آمده در این مدت، سبب افت سرعت بارهای موتوری و افزایش تقاضای توان راکتیو توسط آنها در بعد از رفع خطا می‌شود که در نهایت پدیده بازیابی تأخیری ولتاژ به وجود می‌آید. از میان شین‌هایی که ولتاژشان افت می‌کنند، شین‌های ۸۲، ۸۳ و ۸۴ دچار FIDVR بحرانی می‌شوند و ولتاژشان در ۱ s بعد از رفع خطا مقداری کمتر از ۰/۸ pu پیدا می‌کنند. ولتاژ این شین‌هایی که نیازمند اعمال حذف بار برای بازیابی سریع‌تر ولتاژند، در شکل ۵ نشان داده شده‌اند.



همچنین، روش پیشنهادی قبل از عملکرد حفاظت دیستانس نیز نمی‌تواند حذف بار انجام دهد؛ بنابراین، زمان فعالیت روش پیشنهادی محدود به حفاظت‌های دیستانس و UV خواهد بود. به دو روش، لحظات حذف بار مشخص می‌شود: (الف) اعمال حذف بار در زمانی که محاسبات روش پیشنهادی به پایان برسد، (ب) اعمال حذف بار در لحظات از قبل تعیین شده بدون توجه به اتمام یافتن یا نیافتن محاسبات. زمان اتمام محاسبات رابطه مستقیمی با قدرت پروسسور استفاده شده در سیستم مرکزی دارد؛ بنابراین، اگر پروسسور ضعیفی به کار گرفته شود مزیت حذف بار سریع در لحظات آغازین پدیده FIDVR از دست خواهد رفت. از دست رفتن این مزیت منجر به افزایش مقدار بار قابل حذف برای مقابله با FIDVR‌های بحرانی می‌شود؛ بنابراین، بهتر است لحظاتی ثابت برای اعمال حذف بار تعیین شوند. در صورت رسیدن زمان واقعی به این لحظات از پیش تعیین شده، حذف بارهای محاسبه شده تا آن لحظه به شبکه اعمال می‌شوند و بقیه محاسبات حذف بار با فرض اعمال در لحظه ثابت بعدی ادامه پیدا می‌کند.

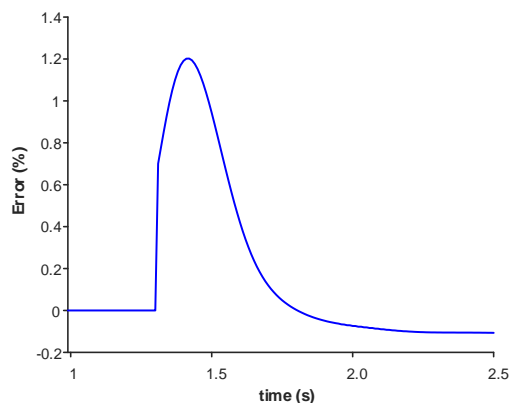
تعداد لحظات حذف بار نیز منشعب از موضوع حذف بار در لحظات اولیه FIDVR است و دست‌کم باید دو لحظه در نظر گرفته شود. هرچه قدر تعداد لحظات حذف بار افزایش یابد، حذف بارهای محاسبه شده سریع‌تر اعمال خواهند شد؛ اما باید توجه داشت طرح پیشنهادی باید قابلیت پیاده‌سازی در حالت واقعی را نیز داشته باشد و نمی‌توان در فواصل زمانی کم، دستور حذف بار صادر کرد؛ بنابراین، تعریف ۳ تا ۴ لحظه برای حذف بار ایده مناسبی است. پیشنهاد می‌شود زمان و ولتاژ بحرانی در طرح حذف بار جدید برابر با تنظیمات رله‌های UV در نظر گرفته شوند تا طرح حذف بار جدید، ولتاژ را طوری بازیابی کند که FIDVR سبب عملکرد رله‌های UV موجود در سطح شبکه نشود. زمان‌های ذکر شده در ادامه با فرض ۳ لحظه حذف بار تعیین شده‌اند:

- ۰/۲۵ ثانیه بعد از وقوع خطا: انتظار برای عملکرد زون ۱ و ۲ رله‌های دیستانس؛
- ۰/۳ ثانیه بعد از وقوع خطا: شروع پروسه تخمین ولتاژ؛
- ۰/۵ ثانیه بعد از وقوع خطا: پله اول حذف بار؛

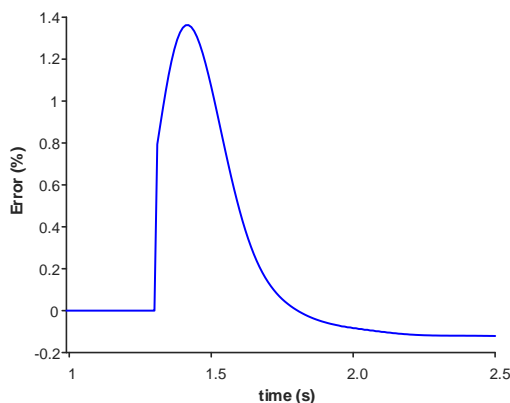
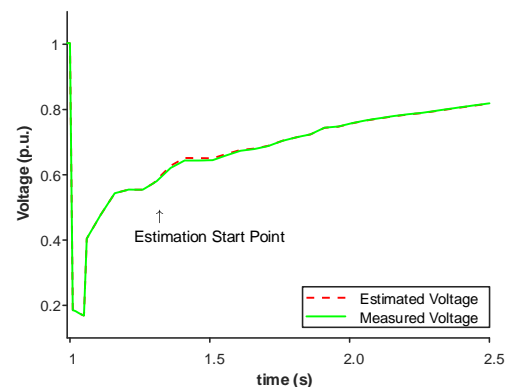
روش جدید حذف بار برای مقابله با شرایط بحرانی در شبکه هوشمند حاصل از وقوع پدیده بازیابی تأخیری ولتاژ ناشی از خطا

شین منتخب از طریق رابطه (۱۶) برای حذف بار انتخاب می‌کند. با حذف ۴۲ درصد از بار شین ۸۳ در تکرار اول که با استفاده از رابطه (۱۹) به دست آمده است، ولتاژ شین ۸۲ نشان داده شده در شکل ۷-الف) از حالت بحرانی خارج می‌شود. شایان ذکر است FIDVR شین ۸۴ نیز در تکرار اول غیر بحرانی می‌شود. با اعمال فرضی نتایج تکرار اول و تخمین ولتاژ بعد از حذف بار مشخص می‌شود که شین ۸۳ در شرایط بحرانی باقی مانده است و نیاز به تکرار روش پیشنهادی وجود دارد. نتیجه تکرار دوم، حذف ۲۱ درصد از بار شین ۸۳ است که براساس شکل ۷-ب)، تکرار دوم هم سبب خروج ولتاژ شین ۸۳ از حالت بحرانی نمی‌شود. با حذف ۱۴ درصد از شین ۸۳ در تکرار سوم، FIDVR در تمام شین‌های شبکه از حالت بحرانی خارج می‌شوند.

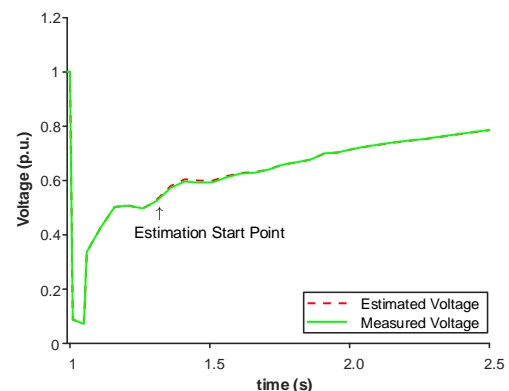
شکل ۶ نشان‌دهنده دقت تخمین ولتاژ توسط پروسه پیشنهادی در بخش ۲ هست. پروسه تخمین ولتاژ، $0.3/s$ بعد از وقوع خطا و پس از عملکرد رله‌های دیستانس شروع به تخمین ولتاژ می‌کند. با توجه به شکل ۶، این پروسه توانسته است ولتاژ شین‌های دو سر خط خطادار را با خطایی کمتر از $1/5$ درصد تخمین بزند. از شکل مذکور این نتیجه حاصل می‌شود که روش تخمین ولتاژ پیشنهادی که حاصل تعمیم پخش بار گوس-سایدل برای شرایط بحرانی و استفاده از مدل درجه سه موتورهای القائی برای شرایط گذرا بود، قابلیت استفاده به‌عنوان روشی برای پیش‌بینی ولتاژ در حین وقوع پدیده FIDVR را دارا است. با توجه به جدول ۱، روش حذف بار پیشنهادی در ابتدا شین ۸۳ از طریق رابطه (۱۳) را به‌عنوان CF و همچنین،



(الف)



(ب)



شکل (۶): مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده ولتاژ (منحنی سمت راست) و همچنین، اختلاف بین این دو مقدار (منحنی سمت

چپ)، (الف) شین ۸۲، (ب) شین ۸۳

جدول (۱): نتایج روش پیشنهادی حذف بار

تکرار	FIDVR بحرانی قبل از حذف بار	شین CF	شین loc	درصد بارهای قابل حذف (%)		
				شین ۸۲	شین ۸۳	شین ۸۴
۱	۸۲ ۸۳ ۸۴	۸۳	۸۳	۰	۴۲	۰
۲	۸۳	۸۳	۸۳	۰	۲۱	۰
۳	۸۳	۸۳	۸۳	۰	۱۴	۰
جمع						
				۰	۷۷	۰

در ادامه، عملکرد روش پیشنهادی با باقی روش‌های موجود حذف بار برای مقابله با FIDVR مقایسه شده‌اند. در صورتی که استراتژی حذف بار به کار گرفته نشود، رله‌های UV در زمان بحرانی، ۱۲۹ MVA را از مدار خارج می‌کنند. برای کاهش مقدار بار قطع شده و رفع تداخل FIDVR با عملکرد رله‌های UV از روش‌های مختلف حذف بار استفاده می‌شود. با توجه به جدول ۲، روش [۱۸] که از شیب ولتاژ برای تشخیص بحرانی بودن FIDVR استفاده می‌کند، پیشنهاد حذف ۲۴ MVA بار را می‌دهد؛ اما به دلیل استفاده از مقادیر از پیش تعیین شده برای حذف بار، این روش توانایی برطرف کردن شرایط بحرانی را ندارد روش [۲۳] از شاخصی بر پایه انرژی جنبشی بارهای موتوری برای حذف بار کمک می‌گیرد و پیشنهاد حذف ۴۰ MVA بار را می‌دهد. در نقطه مقابل، روش پیشنهادی توانایی مقابله با FIDVR با حذف مقدار کمتری از بارها را دارد. همچنین، در صورت به‌کارگیری روش پیشنهادی، نیازی به حذف بار از تمام شین‌های درگیر FIDVR بحرانی وجود ندارد و تنها با حذف بار از شین ۸۳ می‌توان به هدف مدنظر رسید. حذف بار در لحظات اولیه وقوع FIDVR سبب می‌شود ایمنی شبکه بالا رود و شبکه کمتر در معرض تنش ولتاژی قرار بگیرد. نتایج گویا هستند که تعداد لحظات حذف بار در روش پیشنهادی کمتر از روش‌های دیگر است و روش پیشنهادی سریع‌تر می‌تواند با FIDVR بحرانی مقابله کند.

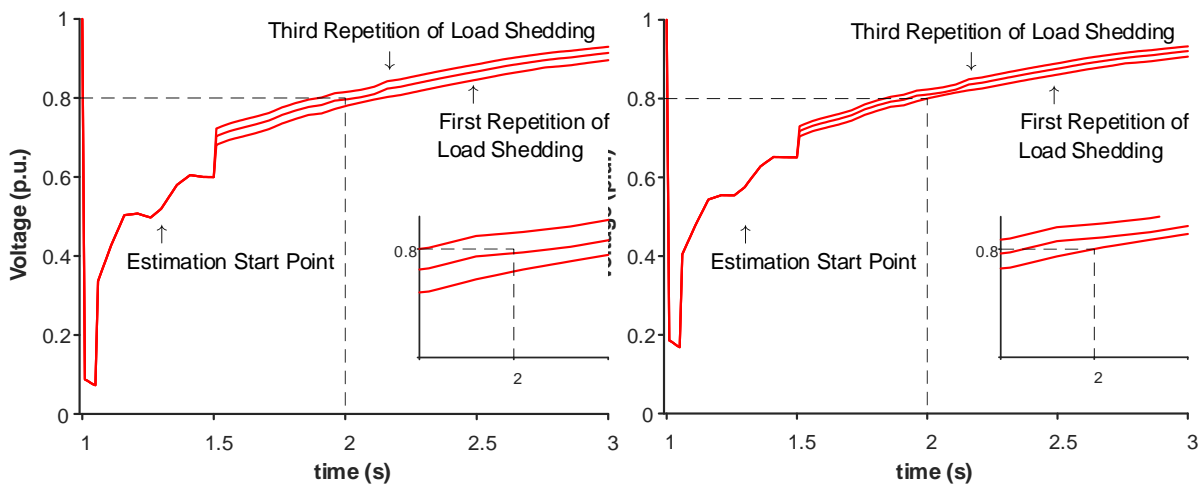
نحوه بازیابی ولتاژ بعد از اعمال حذف بارهای به‌دست‌آمده از طریق روش‌های مختلف در شکل ۹ نشان داده شده‌اند. مشخص است روش [۱۸] نتوانسته است ولتاژ شین ۸۳ را به مقداری بیشتر از ولتاژ بحرانی در زمان بحرانی برساند؛ اما روش [۲۳] و روش پیشنهادی در این تحقیق موفق به بازیابی سریع‌تر ولتاژ به نحوی شده‌اند که از

با تجمیع نتایج سه تکرار مشخص می‌شود روش ارائه‌شده، حذف ۷۷ درصد از بار شین ۸۳ را پیشنهاد داده است. شکل ۸ نشان‌دهنده این موضوع است که اعمال حذف بار محاسبه‌شده به شبکه در نرم‌افزار قدرت هم FIDVR بحرانی شین‌های بحرانی را رفع می‌کند؛ بنابراین، پروسه تخمین ولتاژ و پروسه تعیین مکان و اندازه حذف بار کارایی مناسبی دارند. سه تکرار مدنظر تا قبل از لحظه اول حذف بار به اتمام می‌رسند؛ چون زمان محاسبات در هر تکرار ۰/۰۱ s است. به عبارت دیگر، روش پیشنهادی توانایی اتمام محاسبات در ۳۰ ms را دارا است؛ با اینکه زمان مجاز برای این امر ۲۰۰ ms (از لحظه شروع محاسبات تا اولین لحظه اعمال حذف بار) در نظر گرفته شده است. با توجه به این نکته انتظار می‌رود روش پیشنهادی در شرایط واقعی و در حضور تأخیرهای حاصل از ارتباطات مخابراتی و تغییرات مکانیکی نیز عملکرد مطلوبی داشته باشد.

مشاهده شد تمام نتایج روش پیشنهادی در لحظه اول به شبکه اعمال می‌شوند و نیازی به حذف بار در لحظات دوم و سوم نیست. باید توجه شود اعمال کردن یا نکردن حذف بار در لحظات دوم و سوم بستگی به نوع، مکان و مدت وقوع خطا ندارد؛ بلکه وابسته به قدرت پروسسور استفاده‌شده در سیستم مرکزی است. اگر پروسسور ضعیفی برای انجام محاسبات در نظر گرفته شود، طبیعتاً زمان محاسبات افزایش خواهد یافت و امکان دارد تمام محاسبات، مابین لحظه شروع تخمین (۰/۳ s) بعد از وقوع خطا) و اولین لحظه حذف بار (۰/۵ s) بعد از وقوع خطا) به اتمام نرسد. در چنین شرایطی نیاز به حذف بار در لحظات دوم و سوم نیز وجود خواهد داشت. پروسسور استفاده‌شده برای استخراج نتایج، پروسسور متوسط Intel Core i5 با فرکانس ۲/۵ GHz و در کنار رم ۸ GB بوده است.

دو لحظه اقدام به حذف بار می‌کند؛ بنابراین، انتظار می‌رود مقدار باری که برای قطع از شبکه محاسبه می‌کند، بیشتر از مقدار باری باشد که در لحظات ابتدایی وقوع FIDVR می‌توان از شبکه حذف کرد. همچنین، حذف سریع‌تر بار سبب می‌شود خود شبکه بخشی از بازیابی ولتاژ را انجام دهد و نیازی نباشد تمام بازیابی مورد انتظار از طریق حذف بار صورت پذیرد

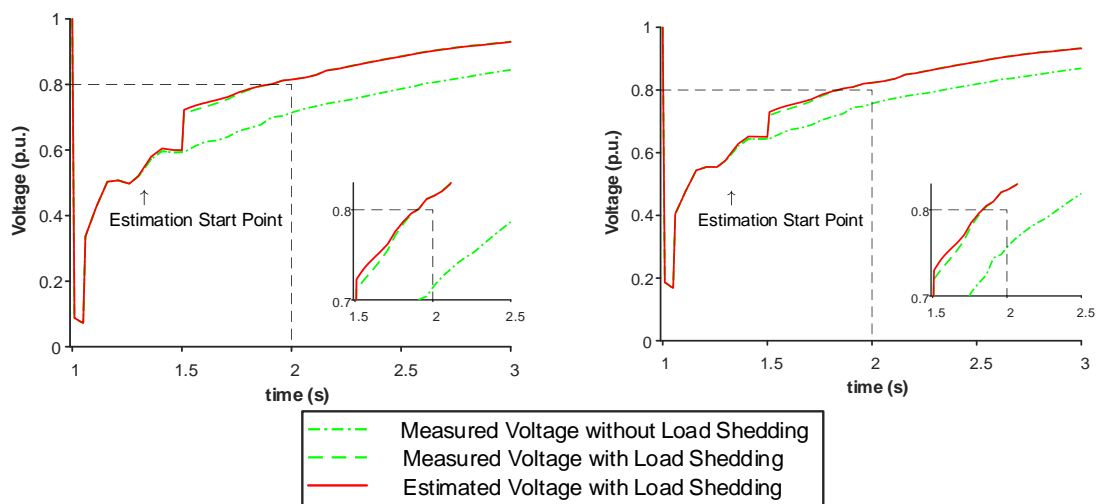
عملکرد رله‌های UV در حین وقوع FIDVR جلوگیری شود. روش [۲۳] حذف مقدار بار بیشتری نسبت به روش پیشنهادی برای مقابله با FIDVRهای بحرانی پیشنهاد داده است؛ اما نکته حائز اهمیت اینکه بازیابی بهتر ولتاژها بعد از اعمال نتایج روش پیشنهادی نسبت به بازیابی حاصل از روش [۲۳] است. دلیل این موضوع مرتبط با اعمال سریع‌تر حذف بار در روش پیشنهادی است. روش [۲۳] در



(ب)

(الف)

شکل (۷): ولتاژهای تخمین زده شده در پروسه حذف بار، (الف) شین ۸۲، (ب) شین ۸۳



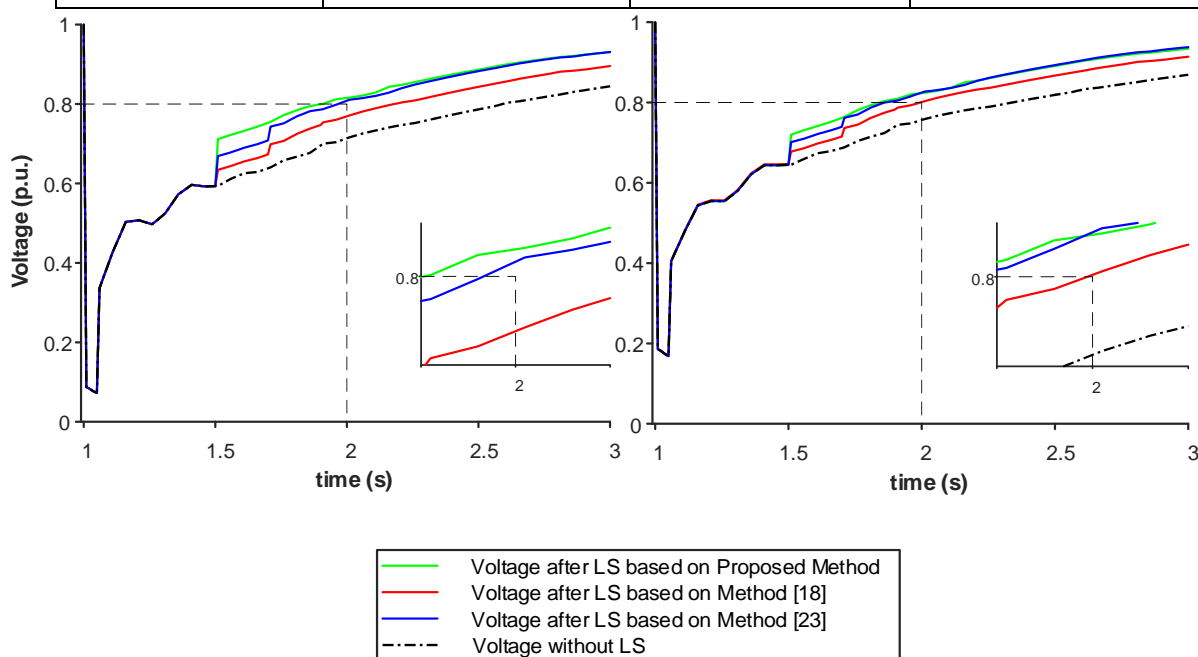
(ب)

(الف)

شکل (۸): مقایسه ولتاژهای اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده بعد از حذف بار، (الف) شین ۸۲، (ب) شین ۸۳

جدول (۲): مقایسه نتایج روش پیشنهادی با روش‌های موجود

بارهای قابل حذف از هر شین (%)									
روش پیشنهادی			روش انرژی جنبشی [۲۳]			روش شیب ولتاژ [۱۸]			
۸۴	۸۳	۸۲	۸۴	۸۳	۸۲	۸۴	۸۳	۸۲	
-	۷۷	-	۱۹	۲۴	۲۲	۱۰	۱۰	۱۰	لحظه اول حذف بار
-	-	-	-	۲۸	-	-	۱۰	۱۰	لحظه دوم حذف بار
-	-	-	-	-	-	-	۵	-	لحظه سوم حذف بار
-	-	-	-	-	-	-	-	-	لحظه بحرانی
۳۳ MVA			۴۰ MVA			۲۴ MVA			جمع بارهای قابل حذف
-			-			۸۳			شین‌های بحرانی باقیمانده



(ب)

(الف)

شکل (۹): مقایسه بازیابی ولتاژ در صورت اعمال حذف بار روش‌های مرسوم و روش پیشنهادی، (الف) شین ۸۲، (ب) شین ۸۳

۵- نتیجه‌گیری

شین‌ها را نداشتند؛ اما روش پیشنهادی به سبب بهره‌گیری از ابزار تخمین ولتاژ این توانایی را کسب کرده است. پروسه تخمین ولتاژ با تعمیم دادن پخش بار گوس-سایدل و استفاده از مدل درجه سه موتور القائی در این پخش بار حاصل شده است.

نتایج شبیه‌سازی بیان‌کننده عملکرد پذیرفتنی پروسه تخمین ولتاژ در پیش‌بینی تأثیر حذف بار روی بازیابی ولتاژ شین‌ها با خطای کمتر از ۲ درصد است. همچنین، به دلیل استفاده هم‌زمان از پارامترهای شبکه و بارها در مشخص کردن مکان و مقدار حذف بار، روش پیشنهادی به نتایج بهتری از نظر مقدار بار و تعداد شین‌های حذف بار نسبت به روش‌های پیشین رسیده است؛ به طوری که میزان

در این مقاله حذف بار ناحیه گسترده برای مقابله با FIDVRهای بحرانی ارائه شد. شدت FIDVR وابسته به پارامترهای شبکه و بارها است؛ اما روش‌های پیشین تنها از پارامترهای شبکه مانند تغییرات ولتاژ یا از پارامترهای بارها مانند انرژی جنبشی بارهای موتوری به‌طور مجزا برای حذف بار استفاده می‌کردند. به همین دلیل، در روش پیشنهادی سعی شده است این نقیصه برطرف شود و شرایط شبکه و بارها به‌طور هم‌زمان در شاخص‌های معرفی‌شده برای مشخص کردن مکان و مقدار حذف بار به کار گرفته شوند. روش‌های پیشین توانایی متوجه شدن میزان تأثیرگذاری حذف بار پیشنهادی‌شان روی بازیابی ولتاژ

- Series Power Flow Framework for the Analysis of FIDVR Using Linear Regression”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume: 33, Issue: 6, Pages: 2946-2955, 2018.
- [9] H. Zheng, C. L. DeMarco, “A new dynamic performance model of motor stalling and FIDVR for smart grid monitoring/planning”, *IEEE Transaction on Smart Grid*, Volume: 7, Issue: 4, Pages: 1989-1996, 2016.
- [10] E. Hajipour, H. Saber, N. Farzin, M. R. Karimi, S. M. Hashemi, A. Agheli, H. Ayoubzadeh, “An Improved Aggregated Model of Residential Air Conditioners for FIDVR Studies”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume: 35, Issue: 2, Pages: 909-919, 2020.
- [11] A. Boričić, J. L. R. Torres, M. Popov, “Fundamental study on the influence of dynamic load and distributed energy resources on power system short-term voltage stability”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume: 131, Number: 107141, 2021.
- [12] D. Ramasubramanian, P. Mitra, P. Dattaray, M. Bello, J. C. Boemer, A. Gaikwad, “Analyzing impact of DER on FIDVR - comparison of EMT simulation of a combined transmission and distribution grid with aggregated positive sequence models”, *Electric Power Systems Research*, Volume: 201, Number: 107543, 2021.
- [13] M. Islam, N. Mithulananthan, and M. J. Hossain, “Dynamic voltage support by TL-PV systems to mitigate short-term voltage instability in residential DN”, *IEEE Transaction on Power system*, Volume: 33, Issue: 4, Pages: 4360-4370, 2018.
- [14] W. Wang, F. de León, “Quantitative Evaluation of DER Smart Inverters for the Mitigation of FIDVR in Distribution Systems”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume: 35, Issue: 1, Pages: 420-429, 2020.
- [15] K. Kawabe, Y. Ota, A. Yokoyama, and K. Tanaka “Novel dynamic voltage support capability of photovoltaic systems for improvement of short term voltage stability in power systems”, *IEEE Transaction on Power system*, Volume: 32, Issue: 3, Pages: 1796-1804, 2017.
- [16] B. Park, M. M. Olama “Mitigation of Motor Stalling and FIDVR via Energy Storage Systems with Signal Temporal Logic”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume: 36, Issue: 2, Pages: 1164-1174, 2021.
- [17] B. Park, M. M. Olama, “A Model-Free Voltage Control Approach to Mitigate Motor
- بار پیشنهادی برای حذف بار ۱۷ درصد کمتر از روش شناخته شده مرسوم است.
- ## ۶- تشکر و قدردانی
- نویسندگان کمال تشکر از صندوق حمایت از پژوهشگران (INSF) بخاطر پشتیبانی مالی از این تحقیق براساس قرارداد شماره ۹۸۰۰۲۹۸۵ را دارند.
- ## مراجع
- [1] M. Maghfoori, M. Zare, E. Bijami, K. Nekooei, M. Attari, S. Khaleghi, M. Mahmoodabadi, "Placement of distributed generation using Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO) in south of Kerman", Vol.5, No. 3, PP. 81-108, 2014.
- [2] M. Mokhtari, M. Gholipour, R. Hooshmand, A. Marefat, "Voltage and reactive power control in distribution networks in capacitors and OLTC coordination using fuzzy logic", Vol. 13, No. 4, PP. 45-60, 2022.
- [3] Sh. Midavoodi, E. Gholipour, S. M. Madani, "Reactive Power Planning Using Optimal Placement & Control of DSTATCOM in a DG Integrated Industrial System", Vol. 8, No. 3, Pages: 59-74, 2017.
- [4] M. Lashgari, S. M. Shahrtash, "Concurrent Prediction of Transient and Short-term Voltage Instability in Power Systems Employing Intelligent Wide Area Measurement System", Vol. 12, No. 3, PP.1-18, 2021.
- [5] S. M. Halpin, R. A. Jones, L. Y. Taylor, “The MVA-Volt index: a screening tool for predicting fault induced low voltage problems on bulk transmission systems”, *IEEE Transaction on Power system*, Volume: 23, Issue: 3, Pages: 1205-1210, 2008.
- [6] M. Paramasivam, S. Dasgupta, U. Vaidya, V. Ajjarapu, “Entropy-based metric for characterization of delayed voltage recovery”, *IEEE Transaction on Power system*, Volume: 30, Issue: 5, Pages: 2460-2468, 2015.
- [7] Y. Zhang, Y. Xu, Z. Y. Dong, and R. Zhang, “A hierarchical self-adaptive data-analytics method for real-time power system short-term voltage stability assessment”, *IEEE Transaction on Industrial Informatics*, Volume: 15, Issue: 1, pages: 74-84, 2019.
- [8] W. Wang, M. Diaz-Aguiló, K. B. Mak, F. de León, D. Czarkowski, R. E. Uosef, “Time

- [22] R. Bekhradian, M. Sanaye-Pasand, M. Davarpanah, "Innovative Load Shedding Scheme to Restore Synchronous Generator Based Microgrids during FIDVR", *IEEE Transactions on Smart Grid*, July 2022.
- [23] H. Bai, and V. Ajjarapu, "A novel online load shedding strategy for mitigating fault induced delayed voltage recovery", *IEEE Transaction on Power system*, Volume: 26, Issue: 1, Pages: 294-304, 2011.
- [24] Q. Li, Y. Xu, C. Ren, "A Hierarchical Data-Driven Method for Event-based Load Shedding Against Fault-Induced Delayed Voltage Recovery in Power Systems", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Volume: 17, Issue: 1, Pages: 699-709, 2021.
- [25] H. Yang, W. Zhang, J. Chen, L. Wang, "PMU-based voltage stability prediction using least square support vector machine with online learning", *Electric Power Systems Research*, Volume: 160, Pages: 234-242, 2018.
- Stalling and FIDVR for Smart Grids", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Volume: 12, Issue: 1, Pages: 67-78, 2021.
- [18] S. M. Halpin, K. A. Harley, R. A. Jones, and L. Y. Taylor, "Slope-Permissive Under-Voltage Load Shed Relay for Delayed Voltage Recovery Mitigation", *IEEE Transaction on Power system*, Volume: 23, Issue: 3, Pages: 1211-1216, 2008.
- [19] H. Yang, N. Li, Z. Sun, D. Huang, D. Yang, G. Cai, "Real-Time Adaptive UVLS by Optimized Fuzzy Controllers for Short-Term Voltage Stability Control", *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume: 37, Issue: 2, pages: 1449-1460, 2022.
- [20] A. H. Mohammadi, M. Abedini, M. Sanaye-Pasand, "Novel Relative Slip Based Under-Voltage Load Shedding Protection Scheme to Mitigate FIDVR", *IEEE Transactions on Power Delivery*, June 2022.
- [21] A. Mahari, and H. Seyedi, "A fast online load shedding method for mitigating FIDVR based on novel stability index", *21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*. Iran, 2013.

¹ Fault-Induced Delayed Voltage Recovery

² Flexible AC Transmission System

³ Phasor Measurement Unit

⁴ Distributed Generation

⁵ Capacitor Bank

⁶ Static VAR Compensator

⁷ Static Synchronous Compensator

⁸ Under-Voltage Load Shedding

⁹ Constant Impedance(Z)-Current(I)-Power(P) load

¹⁰ Fixed-torque Induction Motor

¹¹ Variable-torque Induction Motor

¹² Under-Voltage

