معرفی یک روش جدید برای تخمین به هنگام ناپایداری ولتاژ در شبکه های قدرت بر مبنای حفاظت گسترده شبکه

حامد اسدی، مجید صنایع پسند، مهدی داورپناه
قطب علمی کنترل و پردازش هوشمند- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- پردیس دانشکده های فنی- دانشگاه تهران
تهران- ایران

چکیده: در این مقاله ضمن بررسی رفتار بارهای دینامیکی سیستم قدرت در برابر اغتشاشات ولتاژی، مدلسازی دینامیکی شبکه خراسان شامل مدلسازی ژنراتور، AVR، گاورنر، محدود کننده جریان تحریک و بارهای دینامیکی، ارائه شده و رفتار شبکه در ۲ اغتشاش بزرگ و یک ناپایداری بلند مدت ولتاژ نوعی، بررسی می گردد. سپس روش جدید VCI برای تخمین به هنگام وضعیت ناپایداری ولتاژ در شبکه های قدرت ارائه شده و بر روی شبکه خراسان شبیه سازی می گردد.

واژه های کلیدی: مدلسازی دینامیکی، .P.M.U، مدل دینامیکی بار، فروپاشی ولتاژ گذرا، فروپاشی ولتاژ بلند مدت، تخمین به هنگام ناپایداری ولتاژ

Introducing a Novel Method for Real Time Estimation of Power System Voltage Instability Based on Wide Area Protection

Hamed Asadi, Majid Sanaye-Pasand, Mahdi Davarpanah

School of Electrical & Computer Engineering, College of Engineering
University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract :

In this paper, the behavior of dynamic loads of a power system against voltage disturbances is investigated. Then a real electric grid, Khorasan electric grid in North-East of Iran, is modeled by dynamic model of generators, AVRs, governors, field current limiting systems and electric loads. The paper is continued by introducing a novel method, called VCI, for real time voltage instability detection. Mentioned method is simulated on Khorasan electric grid and results are analyzed.

Keywords: Dynamic modeling, P.M.U., Dynamic load modeling, Transient voltage collapse, Longer term voltage collapse, Real time voltage instability estimation

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

۱- مقدمه

افزایش بیش از پیش تقاضای مصرف برق از یک طرف و هزینه بالای احداث نیروگاها و خطوط انتقال و همچنین استفاده از سیستم های کنترلی و حفاظتی پیشرفته، بهره برداران سیستم های قدرت را بر آن داشت تا حداکثر استفاده را از ظرفیت انتقال خطوط موجود به عمل آوردند.

در شرایط جدید، پایداری ولتاژ به عنوان یکی از محدودیتهای اصلی در انتقال توان به مصرف کننده می باشد که بایستی در مرحله طراحی و بهره برداری به آن توجه شود [۱]. زمانی این موضوع عمدتا با سیستم های ضعیف و خطوط طولانی مرتبط بود، اما اکنون در نتیجه بار گذاری شدیدتر خطوط، در شبکه های بسیار توسعه یافته نیز بایستی این مساله مورد مطالعه قرار گیرد [۲]. وقوع فروپاشیهای گسترده در شبکه های اروپا و آمریکا در سالهای اخیر در اثر همین پدیده خود شاهد این مدعاست [۳] و [۴]. لذا لزوم بررسی و شناخت بیشتر روی این پدیده و علائم آن و تدوین الگوریتمهای مناسب برای تشخیص این پدیده و جلوگیری از آن ضروری به نظر می رسد. روشهای مورد استفاده باید با به کار گیری پارامترهای شبکه نظیر ولتاژ، جریان و توپولوژی شبکه به طور مداوم و پیاپی وضعیت شبکه را به لحاظ حاشیه پایداری مشخص کنند.

بیشتر روشهایی که تا امروز برای تحلیل پایداری ولتاژ به کار برده شده‌اند بر مبنای تحلیلهای استاتیکی و استفاده از ماتریس ژاکوبین سیستم قدرت بوده‌اند. در واقع با به‌کارگیری ضرایب حساسیت بدست آمده از ماتریس ژاکوبین و رفتار مقادیر ویژه آن میزان حاشیه پایداری ولتاژ سیستم بدست می‌آید. یک اشکال مهم این تحلیلها، حجم زیاد و پیچیدگی محاسبات آنهاست [۵]. برای یک سیستم قدرت بزرگ، ابعاد ماتریس ژاکوبین بسیار بزرگ شده و محاسبات مربوط به مقادیر ویژه و ضرایب حساسیت آن، بسیار زیاد خواهد بود. از طرفی برای محاسبهٔ ماتریس ژاکوبین سیستم قدرت در هر لحظه، نیاز به فازور ولتاژ هر باس در هر لحظه و توپولوژی شبکه می‌باشد. برای اجرای به هنگام این روشها، لازم است این اطلاعات به صورت on-line از طریق واحدهای اندازه‌گیری فازور[1] که در هر باس شبکه نصب هستند و با استفاده از ارتباط مخابراتی، به مرکز کنترل ارسال شود. در شبکه‌های بزرگ، ارسال این اطلاعات برای محاسبات on-line با توجه به فواصل زیاد و حجم زیاد اطلاعات با تأخیر زیادی همراه بوده و امکان پذیر نیست.

دلایل فوق‌الذکر، سبب شده‌اند که متخصصان پایداری ولتاژ، به سمت معیارهای مختلف تخمین حاشیه پایداری ولتاژ به صورت همزمان با بهره‌برداری از سیستم قدرت، پیش بروند. این روشها، عمدتاً بر مبنای اندازه‌گیریهای فازورهای ولتاژ و جریان به صورت محلی هستند [۵]، [۶] و [۷]. لیکن تفاوت این روشها با روشهای مبتنی بر ماتریس ژاکوبین این است که حجم اطلاعاتی که در این روشها از طریق ارتباط مخابراتی منتقل می گردد بسیار پایین است و با توجه به اینکه از محیطهای مخابراتی سریع مانند فیبر نوری استفاده کرده و نیاز به محاسبات سریع و ساده‌ای دارند، کار برد همزمان آنها برای تعیین نواحی نزدیک به ناپایداری ولتاژ و حفاظت شبکه‌ای سیستم قدرت در برابر فروپاشی ولتاژ چه در حالت گذرا و چه در حالت بلندمدت، میسر می باشد.

در این مقاله پس از مدلسازی دینامیکی شبکه خراسان یک روش جدید برای تخمین به هنگام حاشیه پایداری ولتاژ معرفی و پیاده سازی می گردد.

۲- انتخاب شبکه مورد مطالعه

یکی از اهداف این مقاله، شبیه سازی و مطالعه بر روی یک شبکه قدرت واقعی بوده است. شبکه برق منطقه ای خراسان با ۸۶ باس، ۱۱ واحد نیروگاهی، ۷ خط ۴۰۰ کیلوولت و ۱۱۶ خط ۱۳۲ کیلوولت به دلایل ذیل جهت مطالعه انتخاب شده است:

- در شبکه قدرت خراسان که از نظر وسعت بزرگترین برق منطقه‌ای ایران محسوب می‌گردد، به لحاظ طولانی بودن فواصل و چگالی بار کم از خطوط ۱۳۲ کیلوولت و ۴۰۰ کیلوولت برای انتقال قدرت استفاده شده است. طول خطوط ۱۳۲ کیلوولت بعضاً به ۱۴۰ کیلومتر هم می‌رسد.
- این شبکه در حال حاضر تنها از طریق خط ۲۷۰ کیلومتری ۴۰۰ کیلوولت علی‌آباد - اسفراین به شبکه سراسری متصل است.
- به دلیل تراکم بار در ناحیه شمال غرب خراسان بیش از ۹۰ درصد نیروگاههای برق منطقه‌ای خراسان در این ناحیه، متمرکز بوده و برای انتقال توان به نواحی دیگر از خطوط طولانی ۴۰۰ و ۱۳۲ کیلوولت استفاده شده است.

دلایل فوق، سبب شده‌اند که شبکه قدرت خراسان با وجود آنکه تنها ۱۰ درصد بار کل شبکه قدرت ایران را دارا می‌باشد، در برخی نواحی و بعضاً در کل شبکه به لحاظ پایداری ولتاژ، آسیب پذیر باشد. در نتیجه، این شبکه جهت مطالعه معیارهای مختلف پایداری ولتاژ و پیاده سازی روشهای مختلف پیش بینی فروپاشی ولتاژ انتخاب گردیده است.

در مدلسازی استاتیکی شبکه قدرت خراسان موارد ذیل مورد توجه قرار گرفته‌اند:

- با توجه به آنکه نیروگاه آبی در این شبکه موجود نمی‌باشد، لذا لازم است یک نیروگاه گازی به عنوان باس مبنا، انتخاب گردد. در این راستا، واحدهای گازی نیروگاه نیشابور، به عنوان مبنا انتخاب شده است. این نیروگاه، نیروگاهی جدید و سریع بوده و در حالت بهره‌برداری واقعی از شبکه خراسان، در صورت قطع بودن خط علی‌آباد - اسفراین، این نیروگاه مبنا می‌باشد.

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.4- No.2- Fall and Winter 2007

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

- مطابق با پخش بار واقعی شبکه در فصول بهار و تابستان سال ۸۵، خط ۴۰۰ کیلوولت علی‌آباد – اسفراین در هر دو حالت در مدار بوده و در حالت بار پیک خراسان در تابستان ۸۵، باری معادل ۶۰ مگاوات از شبکه ایران به شبکه خراسان منتقل می کرده است. بنابراین دراین مقاله ضمن در مدار قرار دادن خط مذکور، تولید نیروگاههای خراسان طوری تنظیم گردیده که توان انتقالی از این خط معادل مقدار واقعی تابستان ۸۵، یعنی ۶۰ مگاوات باشد.

- با توجه به ملاحظات پایداری نوسانی شبکه خراسان، در شرایط بهره برداری واقعی شبکه حد ماکزیمم انتقال توان خط ۴۰۰ کیلوولت علی‌آباد – اسفراین برابر ۳۰۰ مگاوات است. لذا شبکه ایران در این مطالعه با یک ژنراتور با توان ماکزیمم ۳۰۰ و مینیمم ۳۰۰- مگاوات و با دروپ بالا مدل شده است.

- پخش بار بین ژنراتورها بر اساس دروپ آنها پیرامون نقطه کاری معین شده برای هر ژنراتور انجام می گردد. با توجه به محدودیت ژنراتور شبکه ایران در حالت وصل بودن خط علی‌آباد – اسفراین، ابتدا این ژنراتور با توجه به دروپ بالای آن به تغییرات شبکه پاسخ داده و پس از آنکه به حدود استاتیکی تولید خود رسید، واحدهای گازی نیروگاه نیشابور به عنوان ژنراتور مبنا، کمبود و یا اضافهٔ تولید شبکه را جبران می نمایند.

به منظور مدلسازی خطوط انتقال و ترانسفورماتورها، از مدل π استفاده شده است.

لازم به ذکر است کل ظرفیت نصب شده در این شبکه تا سال ۱۳۸۵ حدود ۲۷۰۰ مگاوات و ۱۸۰۰ مگاوار و کل بار پیک تا همین سال حدود ۲۳۰۰ مگاوات و ۹۰۰ مگاوار می باشد.

۳- مدلسازی دینامیکی شبکه خراسان

در این مقاله به منظور مطالعات پایداری گذرا و بلندمدت شبکه قدرت خراسان، ضمن مدلسازی کامل ژنراتورها، مدل مؤثرترین ادوات تأثیرگذار در شبکه خراسان شامل AVR و گاورنر ژنراتورها، مدل محدودکنندهٔ تحریک ژنراتورها و مدلهای دینامیکی بار مورد مطالعه قرار گرفته است. در ادامه به تفصیل به این بررسی این مدلها می‌پردازیم. نرم افزار مورد استفاده، نرم افزار Digsilent Power Factory 13.1 می باشد [۸].

برای مدلسازی ژنراتور از مدل مرتبه ۸ ژنراتور استفاده شده که شامل مدل مرتبه ۶ الکتریکی با در نظر گرفتن کلیه امپدانسهای گذرا و زیر گذرا و مدل مرتبه ۲ مکانیکی است. پارامترهای دینامیکی سیستم تا حد امکان مقادیر واقعی شبکه هستند و در جایی که مقادیر واقعی در اختیار نبوده اند از مقادیر نوعی استفاده شده است.

برای مدلسازی AVR ژنراتورهای شبکهٔ خراسان، با توجه به در دست نبودن اطلاعات واقعی، از مدل استاندارد IEEE-DC1A استفاده شده است.

با توجه به در اختیار نداشتن اطلاعات واقعی توربین و گاورنرهای شبکه خراسان، از دو مدل استاندارد GAST برای توربین‌های گازی و IEEE-G1 برای توربین‌های بخاری که در کتابخانه نرم‌افزار Digsilent موجود می‌باشند، استفاده شده است [۸].

برای مدلسازی محدودکننده تحریک ژنراتورها از مدل شکل (۱) از مرجع [۹] استفاده شده است. در شرایط طبیعی، چنانچه جریان تحریک از مقدار ماکزیمم تنظیم شده (مثلاً ۱۰۵ درصد جریان تحریک نامی) کمتر باشد، از طریق دو مسیر ۱ و ۲، انتگرال‌گیر به سمت حد پایین آن (A-) سوق داده می شود. در این صورت ولتاژ اضافه شده به ورودی مرجع AVR، صفر خواهد بود. اگر جریان تحریک بالاتر از حد تنظیم باشد، مسیر ۲، انتگرالگیر را به یک مقدار مثبت سوق داده و لذا یک سیگنال ولتاژ مثبت از ولتاژ ورودی مرجع AVR، کم شده و در نتیجه خروجی AVR که همان ولتاژ تحریک کنندهٔ ژنراتور است، کاهش می‌یابد و لذا جریان تحریک را به زیر مقدار حد تنظیم برمی‌گرداند.

برای یک افزایش پله‌ای جریان تحریک نسبت به حد تنظیم ۱۰۵ درصد، زمان لازم برای عمل محدود کنندهٔ جریان برابر خواهد بود با:

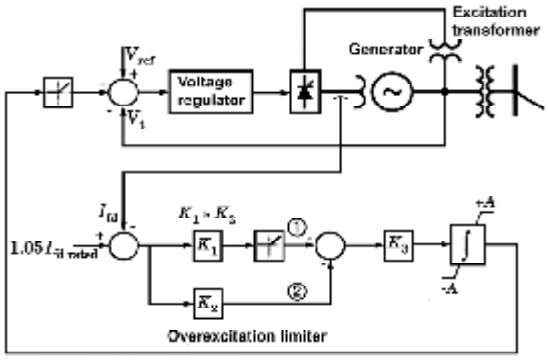
$$t = \frac{A}{k_2 k_3 (I_{fd} - 1.05 I_{fd\ rated})} \qquad (۱)$$

پارامترهای k_1، k_2 و k_3 طوری تنظیم شده اند که این زمان مطابق منحنی اضافه بار ـ زمان شکل (۲) باشد. این منحنی مربوط به استاندارد ANSI C50.13-1972 می‌باشد [۲]. بدین ترتیب تحریک ژنراتور، مشابه ژنراتورهای واقعی به گونه ای شبیه سازی شده است که بتوان مثلاً به مدت ۲ دقیقه جریان تحریک را از مقدار نامی حدود ۲۰ درصد افزایش داد.

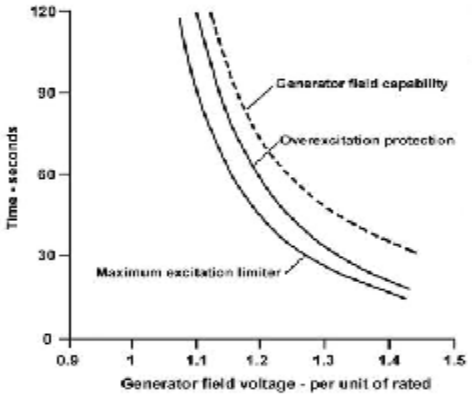
در مدلسازی بار، بررسی رفتار موتورهای القایی در ولتاژهای پایین، در مطالعات پایداری ولتاژ، بسیار حائز اهمیت است. شکل (۳) مدار معادل یک موتور القایی را نشان می دهد.با توجه به این مدار معادل به دنبال بروز یک اغتشاش،موتور در ابتدا به صورت امپدانس ثابت کار می‌کند. چرا که لغزش به طور آنی نمی‌تواند تغییر کند. این مسأله به خاطر لختی موتور و بار می‌باشد. این بار امپدانسی به تغییرات پله‌ای ولتاژ، به سرعت پاسخ می‌دهد و لذا توان اکتیو و راکتیو موتور در ابتدا، به سرعت کم می‌شود. در ادامه با توجه به مشخصهٔ گشتاور ـ سرعت مطابق شکل (۴) که برای یک موتور نمونه نشان داده شده است، سرعت موتور کم و به دنبال آن لغزش موتور زیاد می‌گردد. مسیر حرکت نقطه کار ماشین در این شکل نشان داده شده است. با توجه به مدار معادل موتور القایی، نسبت X/R دیده شده از سر ترمینال موتور به دلیل کاهش R_r/s زیاد شده و توان راکتیو موتور شروع به افزایش می‌کند. از طرفی بسته به اینکه مشخصه بار مطابق شکل (۴) ثابت یا متغیر باشد، گشتاور مکانیکی با

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

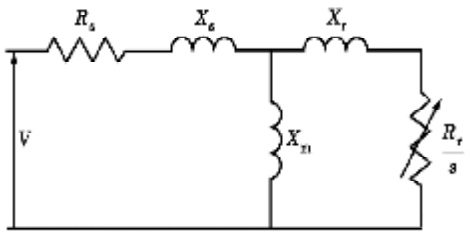
کاهش سرعت می‌تواند ثابت باشد یا کاهش پیدا نماید. در هر دوی این حالتها، توان مکانیکی با توجه به رابطهٔ $P_m = T_w w_m$ کاهش یافته و به دنبال آن توان اکتیو شبکه به مقداری کمتر از مقدار نامی، کاهش می‌یابد.



شکل ۱- مدل محدود کننده جریان تحریک ژنراتور

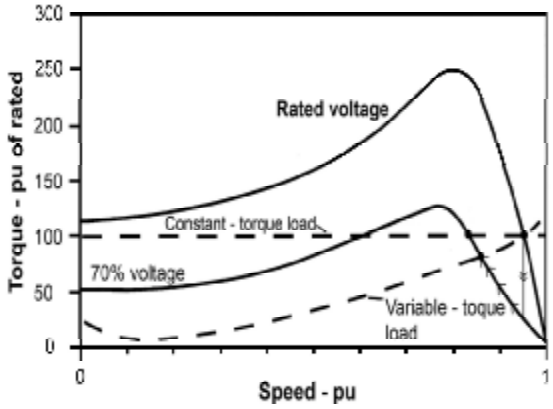


شکل ۲- منحنی اضافه بار ـ زمان برای تحریک ژنراتور



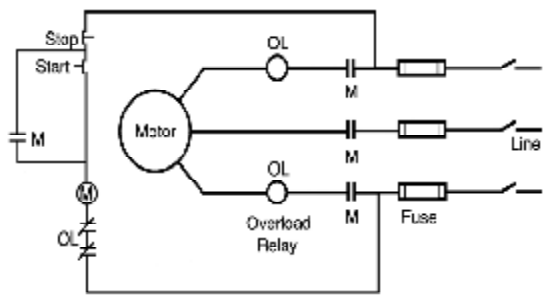
شکل ۳- مدار معادل یک موتور القایی

با کاهش بیشتر ولتاژ، مقدار گشتاور ماکزیمم در مشخصه گشتاور ـ سرعت کم‌کم به زیر مشخصهٔ بار آمده و لذا موتور نقطهٔ کار خود را در قسمت پایدار کاری موتور از دست می‌دهد. در این حالت سرعت به سمت صفر رفته و موتور می‌ایستد یا در سرعت بسیار پایین و ثابتی در قسمت شیب-مثبت مشخصه گشتاور ـ سرعت کار می‌کند. این قسمت، نقطه کار پایدار موتور نیست. چرا که با کوچکترین اغتشاش، موتور این نقطهٔ کار خود را از دست می‌دهد و می‌ایستد. به هر حال موتور در این حالت مجدداً شکل امپدانس ثابت پیدا کرده و توان راکتیو آن با کاهش بیشتر ولتاژ مجدداً کاهش می‌یابد تا سرانجام موتور از شبکه جدا گردد. پس توان اکتیو موتورهای القایی در برابر کاهش ولتاژ، همواره کم می‌شود و توان راکتیو آنها، ابتدا کم، سپس زیاد می‌شود و با کاهش بیشتر ولتاژ و از دست رفتن نقطهٔ کار پایدار موتور، مجدداً کم می‌گردد.



شکل ۴- منحنی گشتاور -سرعت یک موتور القایی نمونه و مشخصه های بار مکانیکی

در شبکه‌های قدرت، غیر از موتورهای بزرگ که با کلیدهای قدرت به شبکه وصل می‌گردند، بیشتر موتورها بوسیلهٔ کنتاکتور و فیوز به شبکه متصل می‌شوند. شکل (۵) مدار اتصال این موتورها به شبکه را نشان می‌دهد. در نظر گرفتن رفتار کنتاکتورها در ولتاژهای پایین نیز بسیار اهمیت دارد. معمولاً زمانی که ولتاژ فاز به فاز ترمینال موتورها، به ۳۰ تا ۶۰ درصد مقدار نامی رسید، رله عملگر M، تریپ داده و کنتاکتور باز می‌شود. زمان باز شدن کنتاکتور مابین یک سیکل تا ۱۰ سیکل می‌باشد [۲]. این مطلب در خصوص دو کنتاکتور ۲۲۰ ولتی در آزمایشگاه ماشین‌های الکتریکی دانشکدهٔ مهندسی برق مورد تست قرار گرفت. مشاهده شد که در ولتاژهای زیر ۱۱۰-۱۰۰ ولت، هر دو کنتاکتور، باز شدند.



Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.4- No.2- Fall and Winter 2007

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

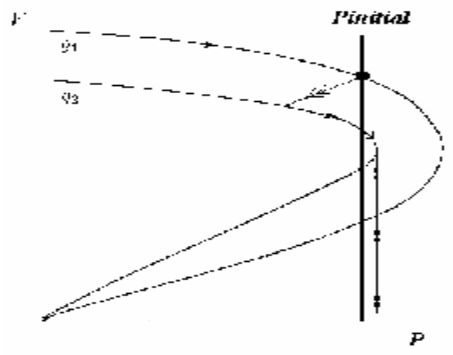
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

شکل ۵- یک نمونه مدار اتصال یک موتور القایی به شبکه از طریق کنتاکتور

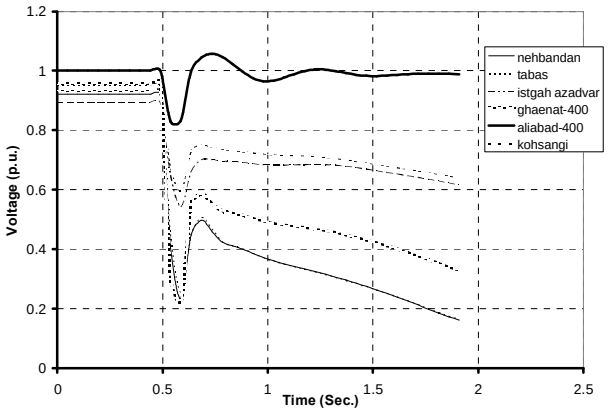
فروپاشی عملکرد موتورها معمولاً در ولتاژهای مابین ۵۰ تا ۷۰ درصد ولتاژ نامی بسته به مشخصهٔ موتور، می‌تواند رخ دهد. در آزمایشگاه ماشین‌های الکتریکی دانشکدهٔ مهندسی برق به ازای شرایط مختلف گشتاور ثابت و توان ثابت، ولتاژ موتور کاهش داده شده و دیده شد که در شرایط بار نامی، معمولاً ولتاژهای زیر ۶۰ درصد و در شرایط نصف بار ولتاژهای زیر ۵۰ درصد، موتور را به سمت فروپاشی می‌برند. لذا قبل از آنکه موتور توسط حفاظتهای خود، از مدار جدا گردد، می‌تواند شبکه را در ولتاژهای پایین آزار داده و از این جهت مدلسازی آن در مطالعات دینامیک و حتی مطالعات استاتیک پایداری ولتاژ بسیار اهمیت دارد؛ اگر چه این مسأله برای مطالعات استاتیک متداول نیست که شاید به خاطر پیچیدگی زیاد آن باشد.

برای مدلسازی بارهای شبکهٔ خراسان، مدلسازی عمومی استاتیکی - دینامیکی (تک موتوره) به کار گرفته شده است. سهم عمده بارهای سیستم قدرت بر اساس بررسیهای انجام شده مربوط به بارهای موتوری است که در موتورهای صنعتی، یخچال و فریزر، سیستمهای تهویه هوا، سیستمهای گرمایشی با سرمایشی و لوازم شستشو-اعم از ماشین ظرفشویی و یا لباس شویی، خلاصه می شوند [۲]. سایر اجزای بار را به طور عمده بارهای امپدانسی در بر می گیرند. بارهای روشنایی- به جز لامپهای تخلیه ای و فلورسنت- بخش عمده بارهای امپدانسی را شامل می شوند. در این مقاله برای بخش استاتیکی از مدل امپدانس ثابت استفاده شده است.

سهم دینامیکی بارهای خراسان با یک موتور القایی تلفیقی در هر باس مدل شده است. نحوهٔ مدلسازی تلفیقی موتورهای القایی و همچنین مدلسازی تلفیقی بارهای استاتیکی شبکهٔ خراسان، به طور کامل در مرجع [۱۰] بیان شده است.



شکل ۶- فروپاشی ولتاژ گذرا در یک اغتشاش بزرگ نوعی



شکل ۷- ولتاژ برخی از باسهای خراسان در حادثه شماره ۱

۴- شبیه سازی ناپایداری ولتاژ گذرا بر روی شبکه خراسان

در این بخش ناپایداری ولتاژ گذرا در شبکه خراسان از طریق اعمال ۲ اغتشاش مطابق جدول (۱) انجام می گیرد. معیار انتخاب این اغتشاشات حاشیه پایداری استاتیک به دست آمده از رسم منحنیهای P-V این شبکه، در شرایط قبل و بعد از اغتشاش می باشد. برای توضیح این مطلب لازم است به شکل (۶) توجه گردد. g_1 منحنی P-V قبل از حادثه و g_2 منحنی بعد از حادثه است. بلافاصله پس از حادثه به دلیل رفتار بارهای وابسته به ولتاژ و بارهای دینامیکی، توان و ولتاژ شبکه به یکباره کم می شود [۱۱]. سپس شبکه برای بازیابی توان بارهای خود حول نقطه کار - توان $P_{Initial}$- نوسان می کند. چنانچه حاشیه پایداری استاتیک در منحنی g_2 ناکافی باشد- همچون حادثه شماره ۱ از جدول (۱)- در حین نوسانات شبکه حول نقطه کار $P_{Initial}$ شبکه به بینی منحنی یعنی نقطه ماکزیمم توان انتقالی رسیده و دچار فروپاشی ولتاژ می گردد. در حادثه شماره ۲، حاشیه پایداری در منحنی بعد از اغتشاش بیشتر از حادثه شماره ۱ بوده و شانس پایداری ولتاژ شبکه بیشتر می باشد. شکلهای (۷) و (۸)، ولتاژ برخی از باسهای شبکه را در این ۲ حادثه بزرگ اعمال شده نشان می دهند. فروپاشی ولتاژ در حادثه شماره ۱ در کمتر از ۲ ثانیه و پایداری سیستم در حادثه شماره ۲ پس از طی نوسانات سیستم، قابل مشاهده است.

۵- شبیه سازی ناپایداری ولتاژ بلند مدت بر روی شبکه خراسان

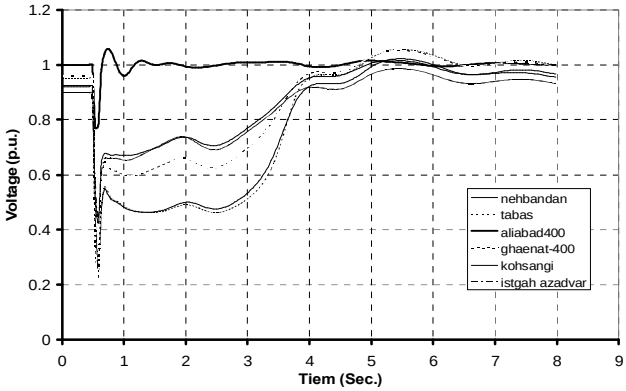
برای مطالعه ناپایداری ولتاژ بلند مدت، با توجه به عدم امکان شبیه‌سازی بلند مدت شبکه خراسان با بارهای دینامیکی به دلیل حجم بسیار بالای محاسبات معادلات دیفرانسیل و زمان بسیار زیاد آن، شبیه‌سازی

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers – Vo1.4- No.2- Fall and Winter 2007

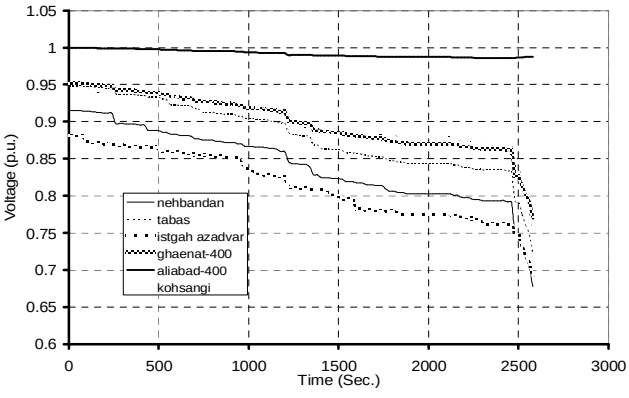
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

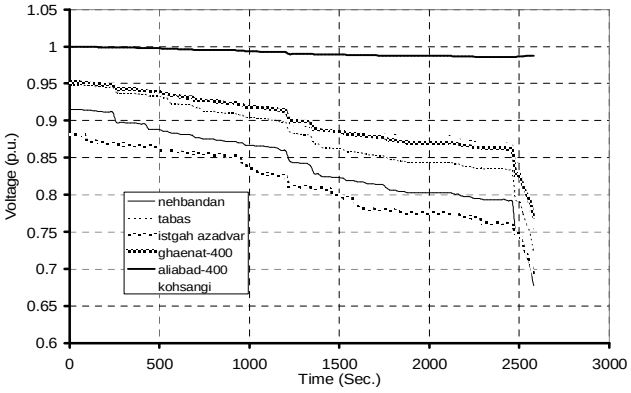
دینامیکی در حوزهٔ زمان با استفاده از مدل استاتیکی بار شامل ترکیب مدل امپدانس ثابت و مدل توان ثابت انجام شده است. در شرایطی که ۲ واحد نیروگاه گازی شریعتی در مدار نیستند، در بازهٔ زمانی صفر تا ۴۵ دقیقه، در هر ۳۰ ثانیه یکی از بارهای شبکه خراسان را به میزان ۲۰ تا ۳۰ درصد با حفظ ضریب قدرت اضافه می‌کنیم. در دقیقه ۲۰، ژنراتور واحد بخاری نیروگاه شریعتی از مدار خارج می گردد. در اثر افزایش بار، حاشیه اطمینان پایداری ولتاژ شبکه کم شده و در زمان ۴۱ دقیقه و ۲۰ ثانیه، ترانسفورماتور ۴۰۰/۱۳۲ کیلوولت تربت جام بر اثر اضافه بار تریپ می دهد. در نهایت در در دقیقه ۴۳، شبکه دچار فروپاشی کامل ولتاژ می گردد. شکل (۹) ولتاژ برخی از باسهای شبکه و شکل (۱۰) توان راکتیو تولیدی برخی از ژنراتورهای مهم را نشان می‌دهند. محدود شدن توان راکتیو ژنراتورها در شکل (۱۰) مشخص است. در شکل (۹) باس علی آباد، متصل به شبکه ایران است که ولتاژ آن به دلیل قوی بودن شبکه ایران پایدار مانده است.



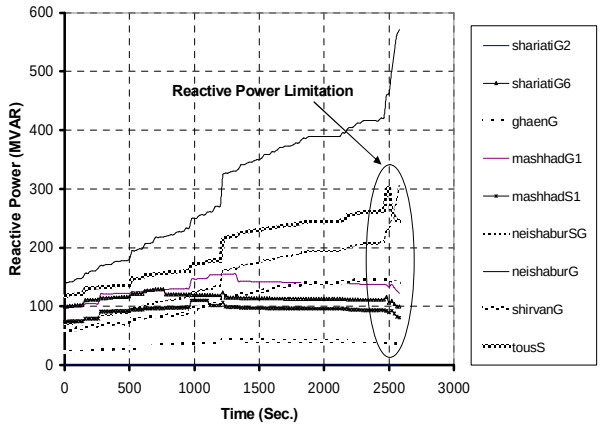
شکل ۸ - ولتاژ برخی از باسهای خراسان در حادثه شماره۲



شکل ۹- ولتاژ برخی از باسهای خراسان در ناپایداری بلند مدت ولتاژ



شکل ۹- ولتاژ برخی از باسهای خراسان در ناپایداری بلند مدت ولتاژ



شکل ۱۰- توان راکتیو ژنراتورهای شبکه خراسان در ناپایداری بلند مدت ولتاژ

۶- تخمین به هنگام ناپایداری ولتاژ

همچنان که در مقدمه این مقاله بیان شد، در سالهای اخیر روشهای متعددی بر اساس اندازه گیری فازورهای محلی ولتاژ و جریان برای تخمین ناپایداری ولتاژ همزمان با بهره برداری از شبکه ارائه شده است.

معیار VCPI معرفی شده توسط مرجع [۱۲] دارای مقدار نزدیک به ۱ در نقطه فروپاشی ولتاژ و مقدار نزدیک به صفردر حالت پایداری ولتاژ صفر می باشد. این روش در مرجع [۱۲] تنها برای افزایش توان راکتیو برخی از باسهای شبکه در حالت off-line پیاده سازی شده است. در واقع الگویی مشابه آنچه که در رسم منحنیهای V-Q در نظر گرفته می شود مورد تست قرار گرفته که الگوی واقعی یک شبکه قدرت نمی باشد. در واقع روش ارائه شده بیشتر در محاسبات Off-Line برای تعیین حاشیه استاتیکی توان راکتیو باس نتیجه قابل توجه دارد و در بهره برداری واقعی شبکه از مقدار مطلق آن نمی توان تخمین قابل توجهی برای وضعیت ناپایداری ولتاژ در باسهای مختلف شبکه ارائه داد.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

مرجع [۶] معیار VSI را معرفی کرده که برای حالت پایداری ولتاژ عدد بزرگی است و در نقطه فروپاشی ولتاژ به عدد ۱ می رسد. در این روش با استفاده از فازورهای ولتاژ و جریان در محل هر شین بار شبکه در هر لحظه، مدار معادل تونن دیده شده از محل آن باس تخمین زده می شود. VSI برابر نسبت فازور ولتاژ شین بار مورد نظر به تفاضل فازور های ولتاژ شین بار و شین مدار معادل تونن است. مشکل این روش آن است که تخمین پارامتر های مدار معادل با تأخیر و در برخی موارد همچون حوادث بزرگ با نوسانات توان شبکه، دچار خطا شده که گاه در تصمیم گیریهای حفاظتی مشکل ایجاد می کند.

مرجع [۵] معیار SDC را معرفی نموده است که دارای مقدار ۱ یا بالاتر در حالت پایدار و مقدار صفر در نقطه فروپاشی ولتاژ است. این معیار از آنجا به دست آمده که در نقطه فروپاشی ولتاژ هر تغییر توان ظاهری در ابتدای یک خط انتقال به مصرف خود خط رسیده و در انتهای خط تغییر توان ظاهری برابر صفر است. این روش هر چند از نظر ریاضی صحیح است ولی به ترتیبی که توسط مرجع [۵] بیان شده است قابل پیاده سازی بر روی یک شبکه قدرت به صورت به هنگام نیست و نرخ نمونه برداری از ولتاژها و جریانهای شبکه در صحت عملکرد آن بسیار مؤثر است. چناچه با تنظیمات مشخص امکان اجرای آن برای ناپایداری بلند مدت ولتاژ فراهم گردد در حوادث بزرگ قطعاً با مشکل روبر می گردد. لازم به ذکر است که در مرجع [۵] هیچ شبیه سازی زمانی ارائه نشده و افزایش توان برخی از باسها یا کل شبکه در حالت off-line مشابه آنچه که در منحنیهای P-V استفاده می شود، مورد توجه قرار گرفته است.

روشهای دیگری نیز که در مراجع [۱۳] و [۱۴] پیشنهاد شده اند، نیز مطالعه و در شبکه خراسان مورد پیاده سازی قرار گرفته اند. این روشها برای تشخیص وضعیت پایداری ولتاژ خط به کار رفته و در شبیه سازیها روشهای مناسبی به نظر آمدند لیکن شناخت دقیق نواحی ناپایدار از روی آنها برای بهره بردار ممکن است چندان ساده نباشد.

در این مقاله با مطالعه روشهای اشاره شده و روشهای تحلیل استاتیک - همچون تحلیل مدال- روشی جدید ارائه شده است که با به کار گیری امکانات مخابراتی بتواند تخمین مناسبی برای حاشیه پایداری ولتاژ شبکه در نواحی مختلف بار ارائه کند. بخش (۵-۱) و (۵-۲) به معرفی و پیاده سازی این روش بر روی شبکه خراسان می پردازد.

جدول ۱- حوادث شبیه سازی شده بر روی شبکه خراسان

شماره	حادثه	توان اکتیو انتقالی خط (مگاوات)	توان راکتیو انتقالی خط (مگاوار)	حاشیه پایداری ولتاژ استاتیکی شبکه قبل از خروج خط (درصد)	حاشیه پایداری ولتاژ استاتیکی شبکه بعد از خروج خط (درصد)
۱	خروج خط ۴۰۰ کیلوولت نیشابور- شادمهر در حالت در مدار نبودن نیروگاه توس	۳۵۱	۴۱	۷/۵۶	۰/۶۸
۲	خروج خط ۴۰۰ کیلوولت نیشابور- توس بر اثر خطا در حالت در مدار نبودن نیروگاه شریعتی	۳۴۶	۲۲	۷/۹۵	۳/۴۷

۷- معرفی روش تخمین به هنگام VCI

معیار VCI نسبت تفاضل بردار ولتاژ ضعیف ترین باس هر ناحیه به تفاضل آن از بردارهای ولتاژ نزدیکترین باس قوی به آن ناحیه از بارمی‌باشد. با توجه به اینکه ناپایداری ولتاژ اغلب به صورت ناحیه ایست، در این روش،شبکه‌های بزرگ را به چندین ناحیه کوچکتر بار تقسیم‌بندی می‌کنیم. در انتخاب نواحی بار سه نکته را بایستی لحاظ نمود:

الف) میزان تمرکز بار در هر ناحیه

ب) طول خطوط ارتباطی بین نواحی به لحاظ انتخاب مدیای مخابراتی

ج) تعداد باسهای هر ناحیه. این عدد بسته به حجم محاسبات و سرعت آنها دارد و هر چه کمتر باشد، پیاده‌سازی این روش ساده‌تر و عملی‌تر خواهد بود.

سپس در هر ناحیه بار، تحلیل مدال همزمان با بهره‌برداری از شبکه در دوره‌های زمانی تعریف شده که برای جمع آوری اطلاعات و محاسبات مدال کافی باشد، صورت می‌گیرد [۱]. برای مثال در هر چند دقیقه، این تحلیل برای هر ناحیه از بار، انجام می‌گیرد. مرکز انجام این محاسبات، مرکز کنترل ولتاژ هر ناحیه است که می‌تواند یکی از پستهای مهم هر ناحیه باشد. در این صورت انتقال اطلاعات فازورهای ولتاژ و توپولوژی هر ناحیه به مرکز کنترل ولتاژ آن ناحیه، به دلیل تعداد باسهای کم و فواصل کوچک، امکان‌پذیر و سریع خواهد بود. در هر دورهٔ زمانی چند دقیقه‌ای، تحلیل مدال بر روی نواحی کوچک انجام گرفته، مقادیر ویژه و به دنبال آن باسهای بحرانی آن ناحیه در آن دوره مشخص می‌گردد.

نزدیکترین باس قوی به یک ناحیه بار، می تواند نزدیکترین باس ژنراتوری و نزدیکترین باسی باشد که دارای سطح اتصال کوتاه زیادی در مقایسه با باسهای آن ناحیه است. این باس به عنوان مرجع ولتاژ هر ناحیه شناخته

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers – Vol.4- No.2- Fall and Winter 2007
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

می گردد. در شبکه های کوچک می توان این باس را برای همه نواحی یکسان در نظر گرفت. لیکن در شبکه های بزرگ، به دلیل محدودیتهای مخابراتی و تأخیر زیادتر انتقال داده ها در فواصل

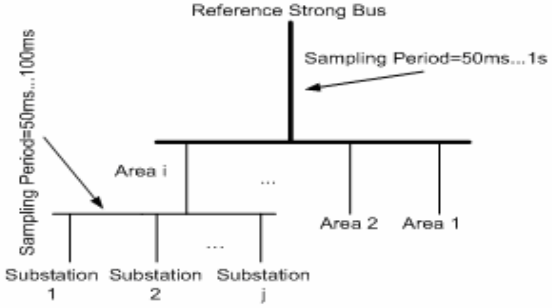
زیاد، مناسب است که برای نواحی مختلف باس مرجع را نزدیک به آن نواحی را در نظر گرفت. در این حالت ممکن است باس مرجع برای دو یا چند ناحیه مشترک باشد.

با توجه به موارد فوق، معیار VCI را برای هر ناحیه می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود:

$$VCI_{k,i} = \left| \frac{V_{k,i}}{V_{k,i} - V_{SBk,i}} \right| \qquad (۲)$$

که $V_{k,i}$، فازور ولتاژ ضعیف‌ترین باس ناحیه iام در هر لحظه و $V_{SB,k,i}$، فازور ولتاژ نزدیکترین باس قوی به ناحیه iام در هر لحظه می‌باشد. با توجه به آنکه تحلیل مدال درهر دورهٔ چند دقیقه‌ای در هر ناحیه، انجام می‌شود، لذا بحرانی‌ترین باس ناحیه در هر بازهٔ چند دقیقه‌ای تعیین می‌گردد. در طول این بازه، فازور این باس با دوره ۵۰ میلی ثانیه یا بالاتر نمونه برداری شده و در محاسبات به هنگام، وارد خواهد شد. چنانچه برای این باس در این فاصله چند دقیقه‌ای، حادثه‌ای پیش بیاید، در این صورت باس دوم بحرانی، جایگزین آن خواهد شد. به این ترتیب در هر ناحیه و در هر دوره مثلاً یک دقیقه ای، تنها اطلاعات فازور یک باس در هر ۵۰ میلی ثانیه یا بالاتر به مرکز کنترل آن ناحیه ارسال می گردد. با توجه به این نکته و همچنین سرعت بالای انتقال محیطهای مخابراتی موجود و فواصل کم در هر ناحیه، پیاده سازی این طرح کاملاً عملی خواهد بود.

مقدار $VCI_{k,i}$ در شرایط نزدیک به ناپایداری ولتاژ، به عدد یک نزدیک می‌گردد و می تواند معیار تشخیص حاشیه پایداری ولتاژ هر ناحیه قرار گیرد.



شکل ۱۱- ساختار مخابراتی پیشنهادی در روش VCI

با توجه به توضیحات داده شده، در این روش دو مرحله ارسال اطلاعات در طول شبکه وجود دارد:

الف) ارسال اطلاعات فازوری هر پست بحرانی به مرکز کنترل ولتاژ هر ناحیه در هر پریود نمونه برداری. این مرحله چون به صورت ناحیه ای و در ابعاد کوچک، ساده و عملی خواهد بود. گام نمونه برداری بسته به تأخیر مدیای مخابراتی و سرعت نمونه برداری .P.M.U ها از ۵۰ میلی ثانیه به بالا می تواند باشد.

ب) ارسال اطلاعات فازور ولتاژ باس مرجع هر ناحیه به مرکز کنترل ولتاژ هر ناحیه در هر پریود نمونه‌برداری که نیاز به محیط مخابراتی سریع با سرعت انتقال داده بالا دارد. بسته به سرعت محیط مخابراتی و طول مسیرهای انتقال داده ها، پریود نمونه برداری می تواند از ۵۰ میلی ثانیه تا ۱ ثانیه باشد.

شکل (۱۱) این ساختار انتقال اطلاعات را نشان می دهد. در این شکل فرض شده که باس قوی مرجع تمامی نواحی یک باس است. در صورت تفاوت این باس برای نواحی مختلف، ساختاری مشابه ولی مختص هر ناحیه خواهیم داشت.

اگر نرخ نمونه برداری فازور ولتاژ باس قوی و ارسال آن به هر ناحیه ۵۰۰ میلی ثانیه در نظر گرفته شود و نرخ نمونه برداری فازور ولتاژ از باسهای هر ناحیه و ارسال آن به مرکز کنترل آن ناحیه ۵۰ میلی ثانیه باشد، در این صورت برای هر ۱۰ نمونه فازور ولتاژ ناحیه ای، یک نمونه فازور ولتاژ قوی ترین باس شبکه، به کار گرفته می شود. درشکل (۱۳) فلوچارت الگوریتم VCI با در نظر گرفتن این نرخ های نمونه برداری رسم شده است.

۷-۱- شبیه‌سازی روش تخمین به هنگام VCI بر روی شبکه خراسان

برای پیاده سازی این روش شبکه خراسان را به ۶ ناحیه بار مطابق شکل (۱۲) تقسیم بندی می کنیم. در ضمیمه مقاله، باسهای مربوط به هر ناحیه نشان داده شده اند. لازم به ذکر است که این اطلاعات، مربوط به پیشبینی بار سال ۸۵ می باشند. در این تقسیم بندی، سه نکته اشاره شده در بخش (۶-۱) لحاظ گردیده شده است. در این شبیه سازیها باس قوی مرجع برای تمامی نواحی، باس شبکه ایران یا همان باس علی آباد در نظر گرفته شده است.

شکل (۱۴) نتایج پیاده سازی این روش را برای ناپایداری بلند مدت ولتاژ نشان می دهد. کاهش مقدار VCI در ۶ ناحیه نشان داده شده در شکل (۱۴)، حرکت سیستم به سمت فروپاشی ولتاژ را نشان می دهد. نواحی ۱ و ۲ مطابق این شکل دارای حاشیه پایداری نسبت به سایر نواحی هستند که این مطلب با توجه به نتایج تحلیل مدال که بر روی کل شبکه خراسان و در حالت off-line و با توجه به اطلاعات موجود انجام گرفته،

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

مورد انتظار بود. باس مرجع در این شبیه سازیها برای کل شبکه خراسان باس ۴۰۰ کیلوولت علی آباد در نظر گرفته شده است.

شکل(۱۵) رفتار VCI نواحی ۶ گانه بار، فروپاشی ولتاژ شبکه را در حوادث ۱ نشان می دهد. پایداری شبکه خراسان پس از حادثه شماره ۲ و پشت سر گذاشتن نوسانات توان، در رفتار VCI نواحی ۶ گانه در شکل (۱۶) قابل مشاهده است. در تنظیم الگوریتمهای حفاظتی بر اساس VCI نیز باید به نوسانات توان گذرای شبکه برای جلوگیری عملکرد نا به جای حفاظتی، توجه داشت.

مزیت این روش، دقت بالای آن در نشان دادن حاشیه پایداری ولتاژ نواحی بار شبکه همزمان با بهره برداری می باشد و با توجه به عملکرد ناحیه ای آن، درک درست و ساده ای از وضعیت پایداری ولتاژ در نواحی بار مختلف نشان می دهد که به بهره برداری از شبکه در حاشیه ولتاژ مناسب کمک می کند.

۸ - نتیجه گیری

در این مقاله ضمن بررسی رفتار بارهای دینامیکی در ولتاژهای پایین و در تغییرات پله ای ولتاژ، به مدلسازی دینامیکی شبکه خراسان برای مطالعات پایداری ولتاژ گذرا و بلند مدت، پرداخته شد. سپس دو حادثه بزرگ که در یکی شبکه دچار ناپایداری گذرای ولتاژ شد و در دیگری شبکه پایدار گردید، بررسی و شبیه سازی شد.

پس از مرور برخی روشهای تخمین به هنگام ناپایداری ولتاژ که در سالهای اخیر ارائه شده است، یک روش جدید با معیار VCI معرفی شد و شبیه سازی آن بر روی شبکه خراسان ارائه گردید. روش VCI به دلیل استفاده از تحلیل مدال در هر ناحیه و مقایسه فازور ولتاژ بحرانیترین باس هر ناحیه با فازور ولتاژ یکی از قویترین باسهای شبکه که به آن ناحیه نزدیک است، در شناخت نواحی بحرانی هم، روش توانایی است. نیاز این روش به محیط مخابراتی سریع با توجه به پیشرفت روزافزون این ادوات در سیستمهای قدرت و امکان پیاده سازی آنها در سیستمهای انتقال و فوق توزیع در آینده ای نه چندان دور برآورده خواهد شد.

به طور کلی مشکل عمده مشترک روشهای تخمین به هنگام ناپایداری ولتاژ که برخی از مهمترین نمونه های آن در این مقاله مرور شد، عملکرد آنها در شرایط نوسانات توان پس از حوادث بزرگ در سیستمهای قدرت می باشد. روش VCI هممی تواند در برخی حالات با این مشکل مواجه شود. در شبیه سازیهای انجام گرفته بر روی شبکه خراسان دیده شد که در برخی ار حوادث که شبکه شرایط پایدار خود را به دست می آورد، الگوریتمهای حفاظتی در بازه زمانی زیر ۱۰ ثانیه پس از حادثه می توانند با عملکرد خود وضعیت شبکه را تحت تأثیر قرار دهند. به نظر می رسد برای جلوگیری از عملکرد نا به جای این الگوریتمها باید از پارامترهای شبکه کمک گرفت. مثلاً روشهای تخمین زاویه که امروزه در حفاظت شبکه ای سیستمهای قدرت در برابر نوسانات زاویه ای شبکه پیشنهاد شده اند، استفاده نمود.

مراجع

[1] P. Kundur, Power System Stability and Control. New York: McGraw-Hill, 1994.

[2] C. W. Taylor, *Power System Voltage* StabilityNew York: McGraw-Hill, 1994

[3] U.S.-Canada Power System Outage Task Force. (2004) Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Cause Recommendations. [Online]. Available: http://www.nerc.com

[4] S. Larsson and E. Ek, "TheBlackout in Southern Sweden and Eastern Denmark, September 23, 2003," in Proc. IEEE PES General Meeting, Denver, CO, 2004.

[5] G. Vrbic and Gubina," A New Concept of Voltage-Collapse Protection Based on Local Phasors," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 2, pp. 576-581, April, 2004

[6] B. Milŏsević, M. Begović , " Voltage-Stability Protection and Control using a Wide-Area Network of Phasor Measurements" IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 18, No.1, pp. 121-126, Feb. 2003.

[7] K.Vu, M. Begović, D. Novosel, M. M. Saha, "Use of Local Measurements to Estimate Voltage-Stability Margin," in IEEE Transaction on Power System, Vol. 14, No. 3, pp 1029-1034, August 1999.

[8]User's Guide of DIgSILENT 13.1 software, DIgSILENT company, German

[9] "Modeling of Voltage CIGRE Task Force 38-02-10, Collapse Including Dynamic Phenomena," 1993

[۱۰] محمدرضا داداش زاده طاهونچی، "مدلسازی دینامیکی سیستمهای قدرت برای ارزیابی الکوریتمهای حذف بار،" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، اسفند ۸۳.

[11]IEEE/PES, Power System Stability Subcommittee Special Publication, "Voltage Stability Assessment: Concepts, Practices and Tools," August 2002.

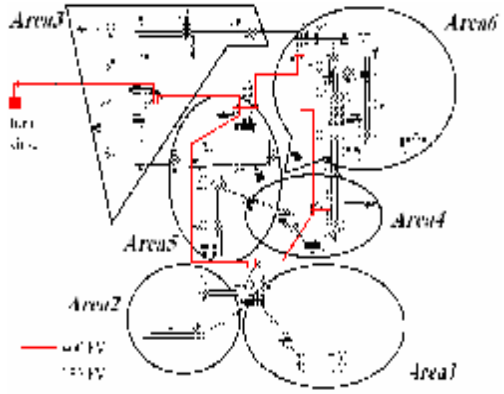
[12]M.S. Sachdev, "A Technique for Real Time Detection of Voltage Collapse in Power System" 2004, DPSP, Netherland.

[13]I. Musirin, T.A. Rahman, "On-Line voltage stability based contingency ranking using fast voltage stability index (FVSI)," IEEE/PES Transmission and Distribution Conference, vol. 2, pp. 1118-1123, October 2002.

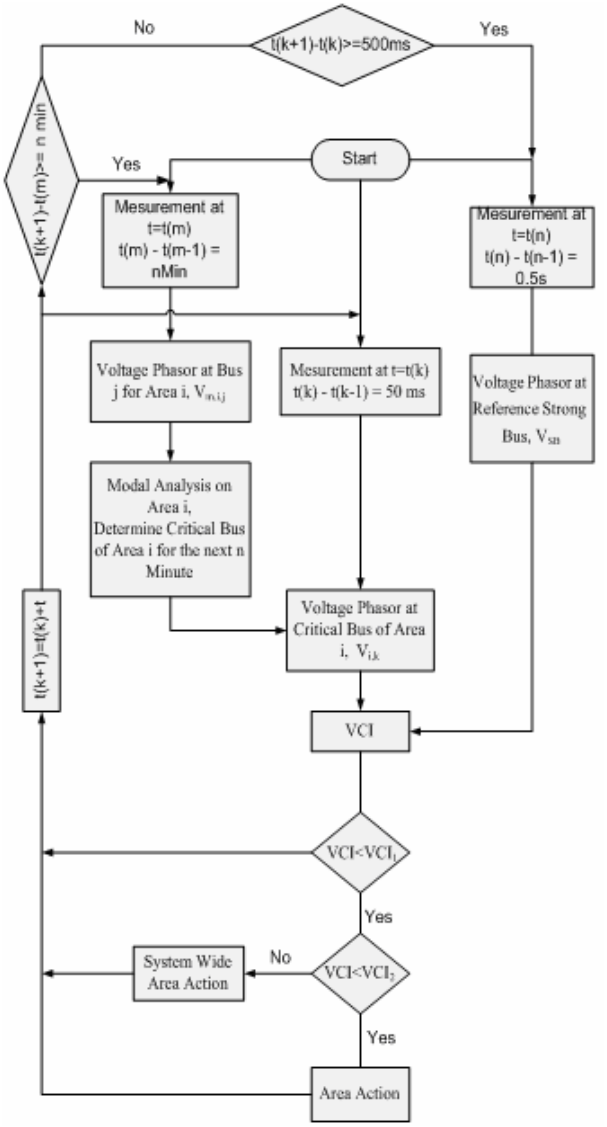
[14] M. Larsson, C. Rehtanz and J. Bertsch, "Real Time Voltage Stability Assessment of Transmission Corridors, ",IFAC Power Plants and Power Systems, 2003.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

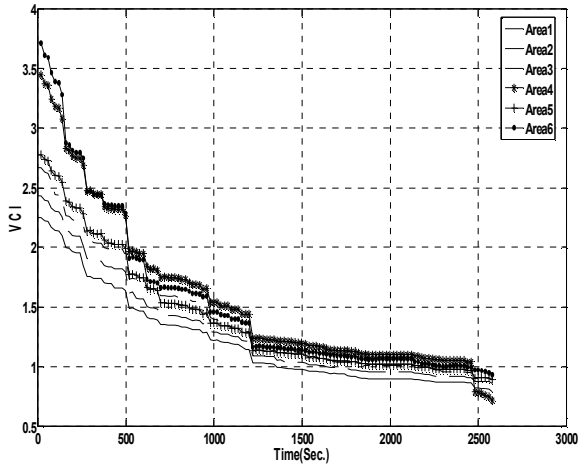
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



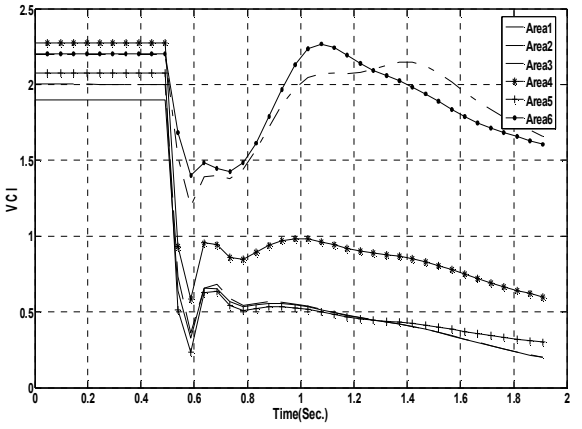
شکل ۱۲- تقسیم بندی شبکه خراسان به ۶ ناحیه بار در روش VCI



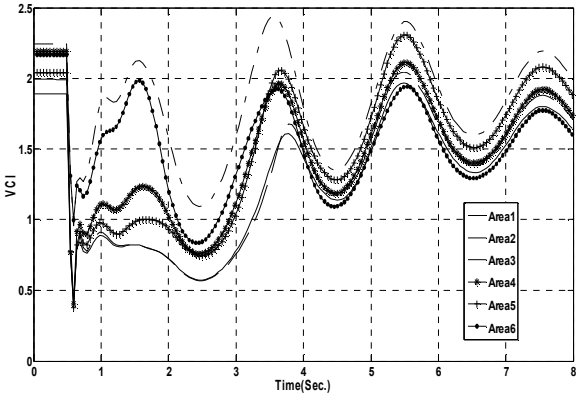
شکل ۱۳- فلوچارت الگوریتم VCI



شکل ۱۴- شبیه سازی VCI در حادثه ناپایداری بلند مدت ولتاژ



شکل ۱۵- شبیه سازی VCI در حادثه اغتشاش بزرگ شماره ۱



شکل ۱۶- شبیه سازی VCI در حادثه اغتشاش بزرگ شماره ۲

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

ضمیمه

Area	Bus Name	Active Load (MW)	Reactive Load (MW)	Area	Bus Name	Active Load (MW)	Reactive Load (MW)
1	birjand	42.33	17.2	5	feizabad	42.33	3.97
	nehbandan	9.26	6.12		kashmar	14.55	2.65
	sarbishe	6.61	2.65		abousaed	17.2	7.94
	sedeh	8.07	2.65		attar	67	15
	asadabad	10.76	0		bardskn	74.07	14.55
	sahlabad	7.94	0		beihagh	29.1	6.61
	ghaen	20	0		dolatabad	17.2	3.97
2	bushruye	9.26	3.97		fldkhsn	90	40
	ferdos	13.23	2.65		neishabour	25	18
	sarayan	6.61	2.65		rashtkhr	31.74	7.94
	tabas	18.52	2.65		sahel	21.16	0
	hajiabad	13.23	2.64		salehabad	9.26	4.48
	gonabad	37.04	17.2		sltnabad	27.78	9.26
3	bjnurd	46.29	18.52		trbathydarieh	51.59	13.23
	dargaz	18.52	7.94	6	sangbast	13.35	4.092
	dashtjvn	37.04	13.24		gholaman	5.29	2.56
	davarzan	13.23	3.97		ghuchan	60.84	30.42
	ghazi	21.16	6.61		golbahar	39.68	19.21
	istghazd	9.26	4.48		golshahr	17.2	8.33
	jajarm	37.04	10.58		khajerabi6	170	118
	jlgrkh	23.81	2.65		kohsangi63	105	20
	mchnelec	17.2	6.61		mashhad	120	90
	sabzvar	64.81	13.23		mehrgan	37.04	13.23
	simnbjn	10.58	3.97		nmyshgh	44.97	26.45
4	fariman	46.29	11.9		pardis	58.2	26.45
	khaf	22.49	1.32		sarakhs	29.1	13.23
	kheirabad	30.42	7.94		shariati63	150	130
	solat	18.28	6.26		shirvan	5.29	2.56
	taybad	29.1	9.26		toosG	19.84	9.605
	trbtjam	64.81	11.9		tous63	230	0
	sangan	3.97	1.92				

زیرنویس‌ها

[1] **PMU**: **P**hasor **M**easurement **U**nit

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com