بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)

دانشکده برق

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت

افزایش پایداری ولتاژ سیستم‌های قدرت با بکارگیری واحدهای PMU با استفاده از شبکه‌های عصبی

تهیه‌کننده:

سید حسین فاطمی نژاد

استاد راهنما:

دکتر محمد تقی عاملی

خرداد ۱۳۹۱

دانشگاه صنعت آب و برق(شهید عباسپور)

دانشکده برق

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت آقای سید حسین فاطمی نژاد

تحت عنوان:

افزایش پایداری ولتاژ سیستم‌های قدرت با بکارگیری واحدهای PMU با استفاده از شبکه‌های عصبی

در تاریخ ۱۳۹۱/۰۳/۲۲ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه جناب آقای دکتر عاملی .....

۲- استاد داور داخلی پایان‌نامه جناب آقای دکتر آقامحمدی .....

۳- استاد داور مدعو پایان‌نامه جناب آقای دکتر تفرشی .....

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده برق

«تعهد اصالت اثر»

اینجانب «سید حسین فاطمی نژاد» تأیید می‌کنم که مطالب مندرج در این پایان نامه ماحصل کار پژوهشی اینجانب بوده و به پژوهش دیگران که در این نوشته از آن استفاده شده، مطابق مقررات ارجاع گردیده است.

این پایان نامه قبلاً برای هیچ مدرک هم سطح و یا بالاتر ارائه نشده و کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور) می باشد.

سید حسین فاطمی نژاد

تقدیم به:

روح پاک برادرم

کسی که بزرگترین دلخوشی این دنیای من بود.

تقدیر و تشکر:

بر خودم لازم می‌دانم که از استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر محمد تقی عالمی که در طول این دوره بنده را با راهنمایی‌ها، لبخند و علی‌الخصوص برخورد بسیار خوبشان یاری کردند، تشکر کنم. بی‌شک بدون یاری ایشان پیمودن این مسیر برای بنده کاری بسیار سخت و طاقت فرسا می‌شود. همچنین از جناب آقای دکتر آقامحمدی بابت همه درس‌هایی که دورادور از ایشان یاد گرفته‌ام، با تمام وجود تشکر می‌کنم. بی‌تردید ایشان الگویی نمونه برای این بنده در ادامه زندگی خواهند بود.

چکیده:

در سال‌های اخیر مسئله‌ی پایداری ولتاژ به دلایل زیادی از جمله رشد سریع بار و محدودیت‌های اقتصادی و زیست محیطی به یکی از مهم‌ترین نگرانی‌های بهره‌برداران سیستم تبدیل شده است. از یک طرف به دلیل مسائل اقتصادی، باید بیشترین استفاده از ظرفیت خطوط انتقال صورت پذیرد؛ و از طرف دیگر با توجه به خطر ناپایداری، باید یک حاشیه‌ی امنیت مناسب تا نقطه‌ی ناپایداری وجود داشته باشد.

در این پروژه الگوریتمی جهت ارزیابی و بهبود بهنگام پایداری ولتاژ با استفاده از شبکه‌های عصبی ارائه می‌شود. به صورت کلی الگوریتم به دو بخش نابهنگام و بهنگام تقسیم می‌شود. ابتدا ارزیابی پایداری ولتاژ برای حالت‌های کاری مختلف به صورت نابهنگام انجام می‌شود. جهت ارزیابی پایداری از شاخص حد امنیت ولتاژ استفاده شده و نقاط کار بدست آمده با توجه به دستورالعمل WSCC[1] به دو دسته‌ی ایمن و غیر ایمن تقسیم‌بندی می‌شوند. سپس با تغییر الگوی تولیدی ژنراتورها و در صورت لزوم حذف بار با استفاده از روش آنالیز حساسیت، حاشیه امنیت ولتاژ نقاط کاری که برچسب غیر ایمن خورده‌اند به مرز ایمن برگردانده می‌شوند. در ادامه مقادیر محاسبه شده برای ولتاژ باس‌ها، جریان خطوط و توان تولیدی ژنراتورها در نقاط کار مختلف به همراه عملیات کنترلی و پیشگیرانه‌ی لازم جهت برگرداندن حاشیه امنیت ولتاژِ نقاط کار غیر ایمن به مرز ایمن، بانک داده را تشکیل می‌دهد. سپس شبکه عصبی بر روی بانک داده بدست آمده آموزش داده می‌شود. با استفاده از شبکه عصبی به عنوان تخمین‌گر عملیات کنترلی و پیشگیرانه لازم، در واقع این شبکه جایگزین محاسبات سنگین، تکراری و غیرخطی روش آنالیز حساسیت می‌شود. محاسبه تغییرات لازم با استفاده از روش آنالیز حساسیت فرایندی زمان‌بر بوده و محاسبه آن به صورت بهنگام در سیستم‌های قدرت بزرگ امکان‌پذیر نیست. شبکه عصبی با ایجاد نگاشتی مناسب مابین ورودی‌ها و خروجی از فرایند تکراری محاسبات سنگین عددی جلوگیری می‌کند. در مرحله بهنگام با توجه به اطلاعاتی که توسط واحدهای اندازه‌گیری فازور بدست می‌آید، شبکه‌ی عصبی عملیات کنترلی لازم جهت برگرداندن شبکه به وضعیت مناسب ولتاژی را تخمین می‌زند. در این راستا فرض می‌شود که اطلاعات ورودی مورد نیاز شبکه‌ی عصبی به منظور اجرای الگوریتم مورد نظر با دقت و سرعت لازم توسط واحدهای اندازه‌گیری فازور (PMUs[2]) در دسترس می‌باشد. این واحدها با در اختیار قرار دادن هم‌زمان فازورهای شبکه، رویت‌پذیری بهنگام سیستم را امکان‌پذیر می‌کنند. در انتها نیز طرح ارائه شده جهت بهبود حاشیه امنیت ولتاژ بر روی شبکه ۳۹ باسه مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

[1] Western Systems Coordinating Council
[2] Phasor Measurement Units

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

۱ مقدمه ۱

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ ضرورت استفاده از واحدهای اندازه‌گیری فازور ۷

۱-۳ ضرورت انجام پروژه ۸

۲ مروری بر تحقیقات انجام شده ۱۱

۲-۱ مروری بر کارهای انجام شده ۱۲

۲-۲ کاستی‌های سیستم‌های کنترلی و حفاظتی کنونی ۲۰

۳ مفاهیم اساسی پایداری ولتاژ و شبکه‌های عصبی ۲۲

۳-۱ تعریف پایداری ولتاژ ۲۳

۳-۲ مقیاس‌های زمانی و مکانیزم‌های ناپایداری ولتاژ ۲۶

۳-۲-۱ سناریوی ناپایداری ولتاژ کوتاه مدت ۲۶

۳-۲-۲ سناریوی ناپایداری ولتاژ میان مدت ۲۸

۳-۲-۳ سناریوی ناپایداری ولتاژ بلند مدت ۲۸

۳-۳ مفهوم پایداری ولتاژ برای یک سیستم ساده دو باسه ۳۰

۳-۴ راهکارهای مقابله با ناپایداری ولتاژ ۳۳

۳-۵ انواع طرح‌های کنترل پایداری ولتاژ ۳۴

۳-۶ مکانیزم بازیافت بارهای وابسته به ولتاژ ۳۵

۳-۶-۱ مدلسازی استاتیکی بار ۳۶

۳-۶-۲ بازیافت بار ۳۷

۳-۶-۳ مدل پیشنهادی برای موتورهای القایی در حالت کار دائم ۳۸

۳-۷ شبکه‌های عصبی ۴۰
۳-۷-۱ شبکه‌های عصبی پرسپترون ۴۱
۳-۷-۲ شبکه عصبی پرسپترون چند لایه ۴۲

۴ مروری بر واحدهای اندازه‌گیری فازور و روش‌های ارزیابی پایداری ولتاژ ۴۴
۴-۱ واحدهای اندازه‌گیری فازور ۴۵
۴-۱-۱ مزایای واحدهای اندازه‌گیری فازور ۴۶
۴-۱-۲ کاربردهای واحدهای اندازه‌گیری فازور ۴۷
۴-۱-۳ اهمیت استفاده از PMU در بررسی پایداری ولتاژ شبکه ۴۷
۴-۲ روش‌های کلاسیک بررسی پایداری ولتاژ ۴۸
۴-۲-۱ تحلیل استاتیکی پایداری ولتاژ ۴۹
۴-۲-۱-۱ منحنی‌های P-V ۴۹
۴-۲-۱-۲ منحنی‌های V-Q ۵۰
۴-۲-۱-۳ تحلیل مدال ۵۱
۴-۲-۳ تحلیل دینامیکی پایداری ولتاژ ۵۱
۴-۳ روش‌های تخمین بهنگام ناپایداری ولتاژ ۵۳
۴-۳-۱ شاخص تخمین VCPI ۵۳
۴-۳-۲ شاخص تخمین VSI ۵۵
۴-۳-۳ شاخص تخمین LPTM ۵۶
۴-۳-۴ شاخص تخمین FVSI ۵۸
۴-۳-۵ شاخص تخمین SDC ۶۰
۴-۳-۶ شاخص تخمین L ۶۱
۴-۴ شاخص مورد استفاده برای ارزیابی پایداری ولتاژ در منحنی P-V ۶۳

۵ الگوریتم پیشنهادی به منظور بهبود حاشیه امنیت ولتاژ ۶۷
۵-۱ مقدمه ۶۸
۵-۲ الگوریتم ارائه شده جهت بهبود پایداری سیستم‌های قدرت ۶۹

۶ شبیه‌سازی و نتایج عددی ۷۷

۶-۱ نتایج عددی ۷۸

۶-۱-۱ بررسی تأثیر ورودی‌های مختلف بر دقت الگوریتم پیشنهادی ۸۱

۶-۱-۲ شبکه عصبی استفاده شده ۸۴

۶-۱-۳ بررسی دقت شبکه‌ی عصبی اول در محاسبه حاشیه امنیت ولتاژ (VSM) ۸۶

۶-۱-۴ بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی در بهبود حاشیه امنیت ولتاژ (VSM) ۸۷

۶-۱-۵ کارایی الگوریتم پیشنهادی در بهبود پروفیل ولتاژ ۹۲

۶-۱-۶ کارایی الگوریتم پیشنهادی جهت حذف بار با در نظر گرفتن اولویت‌بندی بارها ۹۴

۶-۲ نتیجه‌گیری ۹۷

۷ نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات ۹۸

۷-۱ نتیجه‌گیری ۹۹

۷-۲ پیشنهاد ادامه کار ۱۰۰

فهرست مراجع ۱۰۲

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱: طبقه بندی پایداری در سیستم‌های قدرت ۳
شکل ۳-۱: پدیده پایداری ولتاژ و پاسخ‌های زمانی ۲۶
شکل ۳-۲: تغییرات ولتاژ و فرکانس در خاموشی سراسری جنوب فلوریدا ۲۷
شکل ۳-۳: سیستم دو باسه ۳۰
شکل ۳-۴: مدار معادل سیستم شکل ۳-۳ ..... ۳۰
شکل ۳-۵: حوزه وجود حل مسئله پخش بار ۳۲
شکل ۳-۶: ولتاژ به عنوان تابعی از توان حقیقی و راکتیو ۳۲
شکل ۳-۷: مشخصه‌های حالت دائم موتور با گشتاور ثابت ۳۸
شکل ۳-۸: یک مشخصه نمونه‌ی توان راکتیو مصرفی حالت دائم موتور و منحنی تخمینی آن ۳۹
شکل ۳-۹: نمایش شبکه عصبی پرسپترون ۴۱
شکل ۳-۱۰: یک شبکه پرسپترون سه لایه نمونه ۴۲
شکل ۴-۱: منحنی‌های نرمال شده P-V برای شبکه با بار توان ثابت و خط راکتانسی ۵۰
شکل ۴-۲: منحنی‌های نرمال شده‌ی q-v برای شبکه با بار توان ثابت و خط راکتانسی ۵۰
شکل ۴-۳: روند فروپاشی ولتاژ به دنبال یک اغتشاش بزرگ ۵۲
شکل ۴-۴: مدار معادل دو باسه در محل هر بار ۵۵
شکل ۴-۵: مدار معادل یک خط انتقال ۵۶
شکل ۴-۶: سیستم ساده شده با خط انتقال معادل شده π ۶۲
شکل ۴-۷: نمودار P-V ۶۳
شکل ۴-۸: منحنی P-V و ناحیه ایمن ولتاژ در عملکرد عادی سیستم و سطح استرس A ۶۵
شکل ۵-۱: الگوریتم پیشنهادی به منظور بهبود حاشیه امنیت ولتاژ ۷۰
شکل ۵-۲: ورودی و خروجی شبکه‌ی عصبی اول ۷۳
شکل ۵-۳: ورودی و خروجی شبکه‌ی عصبی دوم ۷۳
شکل ۵-۴: داده‌هایی که به منظور آموزش شبکه عصبی استفاده می‌شوند ۷۴
شکل ۶-۱: دیاگرام تک خطی شبکه ۳۹ باسه IEEE و نواحی در نظر گرفته شده ۷۸

شکل ۶-۲: دقت شبکه عصبی در تخمین مقادیر تغییر الگوی تولیدی ژنراتورها و مقدار حذف بار به ازای ورودی‌های مختلف ۸۴
شکل ۶-۳: مقدار خطای تخمینی VSM بر حسب تعداد نرون‌ها برای داده‌های تست ۸۵
شکل ۶-۴: دقت شبکه عصبی در تخمین حاشیه امنیت ولتاژ ۸۷
شکل ۶-۵: دقت الگوریتم پیشنهادی در تخمین مقدار تغییر الگوی تولید ژنراتورها و مقدار حذف بار ۹۱
شکل ۶-۶: حاشیه امنیت ولتاژ الف) قبل از اعمال الگوریتم ب) بعد از اعمال الگوریتم ۹۱
شکل ۶-۷: پروفیل ولتاژ قبل و بعد از الگوریتم پیشنهادی برای سناریوی شماره۱ ..... ۹۲
شکل ۶-۸: پروفیل ولتاژ قبل و بعد از الگوریتم پیشنهادی برای سناریوی شماره۲ ..... ۹۳
شکل ۶-۹: پروفیل ولتاژ قبل و بعد از الگوریتم پیشنهادی برای سناریوی شماره۳ ..... ۹۳
شکل ۶-۱۰: دقت شبکه عصبی در تخمین مقدار حذف بار با در نظر گرفتن اولویت‌بندی بارها ۹۶
شکل ۶-۱۱: دقت شبکه عصبی در برآورد هزینه حذف بار با در نظر گرفتن اولویت‌بندی بارها ۹۶

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۳-۱: اقدامات قابل انجام در مقابل ناپایداری ولتاژ ۳۳
جدول ۴-۱: معیار ارزیابی امنیت ولتاژ طبق دستورالعمل WSCC ۶۵
جدول ۵-۱: متغیرهای مورد استفاده به عنوان ورودی شبکه عصبی ۷۵
جدول ۶-۱: باس‌های قرار گرفته در نواحی تعریف شده برای شبکه ۳۹ باسه IEEE ۷۹
جدول ۶-۲: الگوهای تغییر بار و تولید در نظر گرفته شده برای شبکه ۳۹ باسه IEEE ۸۰
جدول ۶-۳: خطوطی از شبکه که خروج آنها در نظر گرفته شده ۸۰
جدول ۶-۴: ارزیابی دقت شبکه عصبی دوم بر اساس متغیرهای ورودی‌های مختلف ۸۲
جدول ۶-۵: ارزیابی دقت شبکه عصبی اول بر اساس متغیرهای ورودی مختلف ۸۴
جدول ۶-۶: حاشیه امنیت محاسبه شده با روش پخش بار تداومی و شبکه عصبی برای داده‌های تست ۸۶
جدول ۶-۷: VSM محاسبه شده با روش پخش بار تداومی و شبکه عصبی برای داده‌های حذف شده از مسیر آموزش ۸۷
جدول۶-۸: بهبود حاشیه امنیت ولتاژ با استفاده از شبکه عصبی برای داده‌های آموزش ۸۸
جدول ۶-۹: حذف بار محاسبه شده با استفاده از آنالیز حساسیت و الگوریتم پیشنهادی ۸۸
جدول ۶-۱۰: جابجایی تولید محاسبه شده با استفاده از آنالیز حساسیت و الگوریتم پیشنهادی ۸۹
جدول۶-۱۱: بهبود حاشیه امنیت ولتاژ با استفاده از شبکه عصبی برای داده‌های تست ۸۹
جدول ۶-۱۲: حذف بار محاسبه شده با استفاده از آنالیز حساسیت و الگوریتم پیشنهادی ۹۰
جدول ۶-۱۳: جابجایی تولید محاسبه شده با استفاده از آنالیز حساسیت و الگوریتم پیشنهادی ۹۰
جدول ۶-۱۴: سناریوهای در نظر گرفته شده جهت نمایش پروفیل ولتاژ ۹۲
جدول ۶-۱۵: ضرایب هزینه‌ی در نظر گرفته شده برای بارها ۹۴
جدول ۶-۱۶: مقایسه مقدار حذف بار لازم با در نظر گرفتن اولویت‌بندی و بدون در نظر گرفتن اولویت‌بندی بارها ۹۵
جدول ۶-۱۷: مقایسه هزینه حذف بار با در نظر گرفتن اولویت‌بندی و بدون در نظر گرفتن اولویت‌بندی بارها ۹۵

فصل اول:

مقدمه

۱-۱ مقدمه

ارزیابی و مطالعه پایداری سیستم‌های قدرت از دیر باز و از زمانی که نخستین سیستم‌های قدرت مورد بهره‌برداری قرار گرفتند مورد توجه بوده و مطالعات و تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده و یا در حال انجام است. طراحی، برنامه‌ریزی، بهره‌برداری و حفاظت سیستم به طور مستقیم یا غیر مستقیم متأثر از پایداری و یا ناپایداری سیستم در صورت بروز اغتشاش است. امروزه سیستم‌های قدرت مدرن دنیا با توجه به محدودیت‌های اقتصادی و زیست محیطی به استفاده بهینه از سیستم‌های انتقال و تولید خود روی آورده‌اند و این امر سبب شده است تا سیستم‌ها در شرایطی نزدیک به مرز ناپایداری مورد بهره‌برداری قرار گیرند، در نتیجه احتمال وجود ناپایداری به عنوان یکی از نگرانی‌های عمده بهره‌برداران سیستم قدرت مطرح شده است [۱].

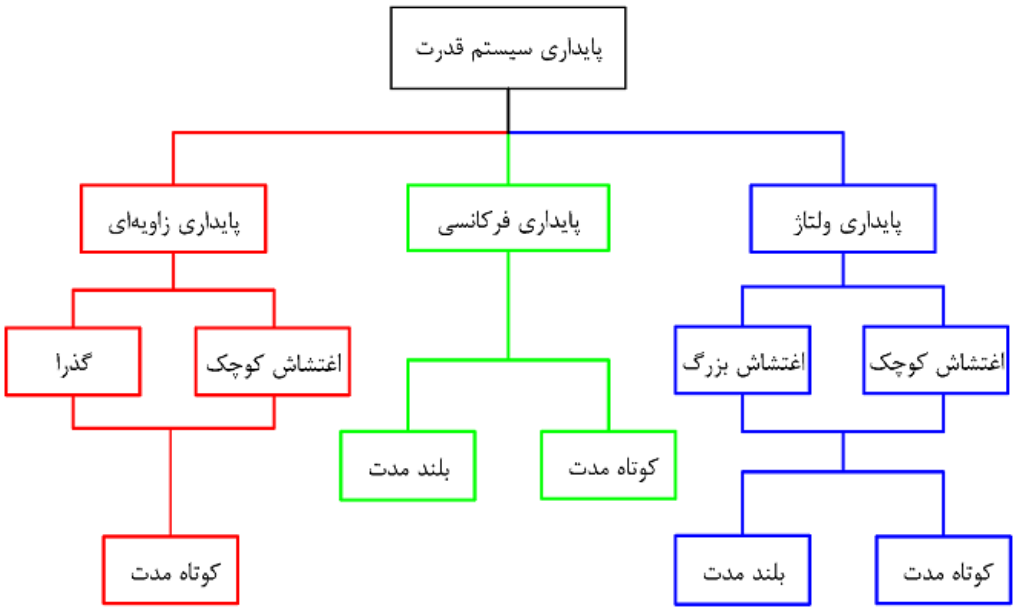
با وجود اینکه خاموشی‌های گسترده شبکه برق در سراسر جهان همواره اتفاق افتاده است، ولی تعداد زیاد این خاموشی‌ها در سال‌های اخیر نشان دهنده این است که شبکه‌های قدرت کنونی بسیار ضعیف و شکننده هستند. از جمله دلایل عمده قابل تأمل در خصوص ضعیف شدن سیستم‌های قدرت می‌توان به سرمایه‌گذاری کم در بخش تولید و انتقال، تجدید ساختار سیستم‌های قدرت و قوانین مرتبط با آن که هنوز کارآمد نیستند و همچنین بهره‌برداری سنگین از شبکه اشاره نمود [۲].

تحلیل پایداری شامل معین کردن عوامل مهمی است که سبب ناپایداری شبکه قدرت می‌شوند. اتخاذ روش‌های بهبود عملکرد پایدار شبکه نیز تنها با طبقه‌بندی پایداری سیستم به انواع مناسب آن امکان-پذیر است. بر اساس آخرین دستاوردهای علمی که در مرجع [۳] ارائه شده است، طبقه‌بندی پایداری سیستم قدرت با توجه به موارد زیر به صورت شکل (۱-۱) انجام گرفته است:

۱- طبیعت فیزیکی ناپایداری با معین کردن متغیرهای اصلی سیستم که ناپایداری در آن‌ها قابل مشاهده شدن است.

۲- ابعاد اغتشاش‌های مورد توجه در سیستم‌های قدرت که روش‌ها و پیش‌بینی‌های پایداری شبکه را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

۳- ادوات، عملیات کنترلی، حفاظتی و بازه‌ی زمانی که در هر شکل ناپایداری بایستی مورد توجه قرار گیرند.



شکل ۱-۱: طبقه بندی پایداری در سیستم‌های قدرت.

پایداری زاویه‌ای به توانایی ماشین‌های سنکرون یک شبکه قدرت به هم پیوسته به حفظ همگامی خود پس از مواجه شدن با یک اغتشاش مربوط می‌باشد. این مسأله به توانایی حفظ یا بازیابی تعادل بین گشتاور الکترومغناطیسی و گشتاور مکانیکی هر یک از ماشین‌های سنکرون بستگی دارد. ناپایداری به صورت افزایش نوسانات زاویه بار برخی از ژنراتورها بوده که به ناهمگامی آن‌ها با سایر ژنراتورهای شبکه منجر می‌گردد.

پایداری فرکانسی به توانایی یک سیستم قدرت در حفظ فرکانس ماندگار به دنبال یک اخلال شدید در شبکه و در نتیجه عدم تعادل بین تولید و مصرف مربوط می‌شود. این مسئله به توانایی حفظ یا بازیابی

تعادل بین تولید و مصرف بستگی دارد. ناپایداری به صورت نوسانات فرکانسی ماندگار می‌تواند مشاهده شود که منجر به تریپ واحدهای تولیدی و یا بار در شبکه می‌گردد.

نوع دیگر پایداری در شبکه‌های قدرت پایداری ولتاژ است. پایداری ولتاژ عبارت است از، توانایی سیستم قدرت برای حفظ ولتاژ ماندگار قابل قبول در تمام باس‌های سیستم در شرایط عملکرد عادی و پس از اینکه تحت یک اختلال قرار گرفت. زمانی که وقوع اختلال، افزایش تقاضای بار و یا تغییر در وضعیت سیستم، باعث افت فزاینده و غیر قابل کنترل در ولتاژ گردد، سیستم وارد حالت ناپایداری ولتاژ می‌شود. همان‌طور که در شکل (۱-۱) نشان داده شده است، پایداری ولتاژ به دو صورت پایداری ولتاژ در حضور اغتشاش کوچک و پایداری ولتاژ در حضور اغتشاش بزرگ مطرح است که هر یک در دو بازه زمانی کوتاه مدت و بلند مدت مورد ارزیابی قرار می‌گیرند [۳].

عوامل متعددی در بروز ناپایداری ولتاژ نقش دارند ولی این پدیده اغلب به دنبال افزایش پیوسته بار سیستم قدرت و یا وقوع پیشامد و در نتیجه کمبود توان راکتیو در شبکه قدرت که ناشی از محدودیت سیستم انتقال و یا تولید است، اتفاق می‌افتد. مشکل اصلی، افت ولتاژی است که به هنگام عبور توان راکتیو و اکتیو از راکتانس‌های خطوط انتقال ایجاد می‌شود.

به طور کلی صرف‌نظر از اینکه پدیده‌های فروپاشی ماهیتاً از چه نوعی باشند می‌توان به طور مشترک دلایل زیر را در رخداد آن‌ها سهیم دانست [۴ و ۵]:

- بارگذاری سنگین روی سیستم و هم‌زمان، در مدار نبودن یک خط یا ژنراتور به دلیل مسائل نگهداری.
- برون رفت خطوط به دلیل رخداد خطا یا کارکرد نادرست سیستم حفاظتی و در نتیجه بیش-باری روی سایر خطوط و تجهیزات.
- کمبود رزرو اکتیو و راکتیو با سرعت پاسخ کافی.

- ناتوانی بهره‌بردار در کنترل و مهار خاموشی و نیز سیستم SCADA[1] در فراهم نمودن داده‌های درست و بهنگام.
- نبود زمان کافی جهت تصمیم‌گیری و اجرای سازوکارهای بازگرداننده.
- نبود سیستم‌های کنترل و حفاظت هماهنگ.

تا کنون تحقیقات متنوع و زیادی جهت ارائه اصول شبیه‌سازی سیستم قدرت در مطالعات پایداری ولتاژ و روش‌های کنترل سیستم به منظور ممانعت از بروز ناپایداری انجام شده است. اکثر این تحقیقات بر مبنای روش‌های آنالیز ریاضی بوده و به دو دسته روش‌های تحلیل استاتیک و دینامیک تفکیکی می-شوند.

روش‌های استاتیک مطالعه پایداری ولتاژ سیستم قدرت نظیر استفاده از منحنی‌های P-V، Q-V، تحلیل مدال و ضرایب حساسیت Q-V سال‌های متوالی است که مورد استفاده قرار دارند. ارزیابی پایداری ولتاژ با استفاده از روش‌های استاتیک معمولاً بر اساس فاصله تا نقطه ناپایداری سنجیده می‌شود.

در شبیه‌سازی دینامیک سیستم قدرت جهت مطالعات پایداری ولتاژ عملکرد تجهیزات سیستم نظیر سیستم‌های کنترلی و حفاظتی با دقت زیادی مدل شده و به این دلیل می‌تواند به عنوان معیاری جهت راستی آزمایی نتایج به دست آمده از مطالعات استاتیک مورد استفاده قرار گیرد. زیرا روش‌های استاتیک با فرض کند بودن دینامیک ناپایداری ولتاژ قابل استفاده هستند و در مواردی که ناپایداری ولتاژ دارای دینامیک سریع باشد، روش‌های استاتیک ارزیابی پایداری ولتاژ قابل استناد نخواهد بود. با این وجود در صورتی که نقطه کار سیستم به اندازه کافی از نقطه بحرانی فروپاشی ولتاژ دور باشد، به عبارت دیگر سیستم دارای حد پایداری مناسب ولتاژ باشد، نتایج به دست آمده از تحلیل استاتیک سیستم قدرت قابل قبول بوده و شبیه‌سازی دینامیک فقط در مورد مواردی که سیستم قدرت تحت استرس شدید قرار داشته و حد پایداری ولتاژ آن کوچک است، ضروری خواهد بود [۶].

[1] Supervisory Control and Data Acquisition

اکثر روش‌های ارائه شده جهت ارزیابی پایداری ولتاژ در مراجع به صورت offline بوده و توجه کمی در مورد روش‌های بهنگام به عمل آمده است. ارزیابی بهنگام پایداری ولتاژ به منظور اتخاذ عملیات پیشگیرانه و کنترل مناسب جهت مقابله با ناپایداری امری لازم و ضروری است.

روش‌های بهنگام معرفی شده تا کنون بر این اساس عمل می‌نمایند که در نقطه فروپاشی مقدار شاخص معرفی شده به یک مقدار معین می‌رسد. اما هیچ کدام از این شاخص‌ها معیار مناسبی از فاصله تا ناپایداری به دست نمی‌دهند. به همین دلیل استاندارد و یا دستورالعمل جامعی جهت ارزیابی امنیت ولتاژ که با فاصله تا ناپایداری ارتباط تنگاتنگ دارد، در استفاده از روش‌های به هنگام موجود، ارائه نشده است. علاوه بر این آشنا نبودن اپراتورهای سیستم با شاخص‌های بهنگام ارائه شده، دلیل دیگری بر عدم استفاده گسترده از این شاخص‌ها در ارزیابی امنیت ولتاژ سیستم قدرت محسوب می‌شود. شناخته شده-ترین شاخص جهت تعیین فاصله تا ناپایداری و ارزیابی پایداری ولتاژ سیستم قدرت تحت عنوان حد پایداری ولتاژ (VSM[1]) بوده که بر حسب مگاوات، مگاوار و یا درصد بیان می‌شود. این شاخص متناسب با الگوهای مختلف تغییر بار و بار کل سیستم تغییر می‌کند، و با توجه به این امر، حد پایداری ولتاژ به عنوان شاخصی با مقبولیت عام در بین اپراتورها و برنامه‌ریزان سیستم قدرت مطرح بوده و مورد استفاده فراوان قرار دارد. با این وجود محاسبه‌ی VSM فرایندی زمان‌بر بوده و تعیین بهنگام این شاخص در سیستم‌های قدرت بزرگ امکان‌پذیر نیست. بنابراین برای ارائه روش بهنگام ارزیابی پایداری ولتاژ بر اساس شاخص VSM به ناچار باید از روش‌های هوشمند داده کاوی استفاده کارد. از جمله این روش‌های هوشمند، استفاده از روش‌های مبتنی بر شبکه عصبی[2] را می‌توان نام برد.

در این پروژه به منظور بهبود حاشیه امنیت سیستم، روشی بر مبنای دسته‌بندی توسط شبکه عصبی طبق دستورالعمل WSCC[3] ارائه شده است؛ در ادامه تصمیم‌گیری مناسب با توجه به این معیار جهت بهبود حاشیه امنیت ولتاژ با استفاده از تغییر الگوی تولید واحدهای ژنراتوری و در صورت لزوم حذف بار،

[1] Voltage Stability Margin
[2] Neural Network
[3] Western Systems Coordinating Council

صورت می‌گیرد. در ابتدا برای نقاط کار مختلف حد پایداری ولتاژ با استفاده از روش پخش بار تداومی محاسبه شده و نقاط کار بدست آمده با توجه به دستورالعمل WSCC به صورت ایمن و غیر ایمن برچسب گذاری می‌شود. سپس با تغییر الگوی تولیدی ژنراتورها و در صورت لزوم حذف بار، با استفاده از روش آنالیز حساسیت، حاشیه امنیت ولتاژ نقاط کاری که طبق دستورالعمل بالا برچسب غیر ایمن خورده‌اند به مرز ایمن برگردانده می‌شوند. مقادیر محاسبه شده برای ولتاژ باس‌ها، جریان خطوط و توان اکتیو و راکتیو تولیدی واحدهای ژنراتوری در نقاط کار مختلف به همراه عملیات کنترلی مناسب جهت برگرداندن حاشیه امنیت ولتاژِ حالت‌های کاری مشکل‌ساز به مرز ایمن، بانک داده را تشکیل می‌دهد. سپس شبکه عصبی بر روی بانک داده بدست آمده آموزش داده می‌شود. در نهایت در مرحله بهنگام با استفاده از اطلاعات بدست آمده از واحدهای PMU عملکرد شبکه عصبی به منظور اتخاذ اعمال کنترلی لازم جهت بهبود حاشیه امنیت ولتاژ بررسی می‌شود. در این راستا فرض می‌شود که اطلاعات ورودی مورد نیاز شبکه‌ی عصبی به منظور اجرای الگوریتم مورد نظر با دقت و سرعت لازم توسط واحدهای PMU در دسترس می‌باشد.

۱-۲ ضرورت استفاده از واحدهای اندازه‌گیری فازور

با توجه به خاموشی‌های سراسری در سال‌های اخیر می‌توان دریافت که سیستم پایش کنونی و برنامه‌های جانبی آن برای بهره‌برداری ایمن و قابل اطمینان شبکه کافی نیستند. از آنجایی که سیستم SCADA فقط می‌تواند اطلاعات حالت ماندگار شبکه را با دقت نمونه‌برداری پایین، سرعت کم و به صورت غیر همزمان در اختیار قرار دهد، نمی‌توان حالت‌های دینامیکی شبکه را با استفاده از آنها پایش کرد. از این رو تا زمانی که کارکرد سیستم قدرت بر پایه داده‌های ارسالی SCADA باشد نمی‌توان ایمنی آن را در برابر پیشامدهای گوناگون تضمین کرد. اما با استفاده از واحدهای اندازه‌گیری فازور و در نتیجه در اختیار داشتن اطلاعات همزمان، سریع و با دقت بالاتری از شبکه، می‌توان این کسری سیستم‌های SCADA را جبران کرد.