

پیش‌گیری از ناپایداری ولتاژ با استفاده از حساسیت و شبیه‌سازی‌های متوالی

حبیب‌اله رؤفی

مصطفی شریف‌زاده

گروه مطالعات سیستم

پژوهشگاه نیرو

تهران، ایران

mostafa.a.sharifzadeh@gmail.com

hraoufi@nri.ac.ir

واژه‌های کلیدی — پایداری ولتاژ؛ تحلیل شبه‌حالت‌ماندگار (QSS)؛
تحلیل حساسیت؛ پیش‌بینی ناپایداری ولتاژ؛ پیش‌گیری از ناپایداری ولتاژ؛

۱. مقدمه

مسئله پایداری ولتاژ در سالیان اخیر به شدت مورد توجه قرار گرفته است. یکی از دلایل این امر، تمایل به استفاده حداکثری از ظرفیت شبکه‌های انتقال موجود، به علت هزینه بالای گسترش شبکه‌های انتقال و احداث خطوط جدید و همچنین محدودیت‌های زیست‌محیطی می‌باشد. پایداری ولتاژ عبارت است از توانایی سیستم قدرت برای حفظ ولتاژ ماندگار در همه شینه‌های سیستم بعد از وقوع یک اغتشاش نسبت به شرایط اولیه عملکرد آن. این مسئله به توانایی حفظ یا بازیابی توازن میان تقاضای بار و تغذیه بار بستگی دارد. ناپایداری ولتاژ می‌تواند به صورت افت پیش‌رونده ولتاژ برخی از شینه‌های سیستم رخ دهد که باعث از دست رفتن بار در یک ناحیه از سیستم قدرت یا قطع خطوط انتقال یا سایر ادوات سیستم توسط عناصر حفاظتی آنها می‌شود و این مسئله، می‌تواند به خروج پی‌درپی سایر ادوات تولید و انتقال قدرت، منجر گردد. فروپاشی ولتاژ، شامل افت ناگهانی و مخرب ولتاژ بوده و عمدتاً در مرحله نهایی یک سناریوی ناپایداری رخ می‌دهد؛ هرچند لزوماً هر ناپایداری به فروپاشی منجر نمی‌گردد. عامل اصلی وقوع ناپایداری ولتاژ، تلاش دینامیک‌های برخی بارها (مانند بارهای دارای موتور القایی، تپ‌چنجر زیر بار و بارهای ترموستاتی) برای بازیابی توان مصرفی خارج از حد قابل تأمین توسط سیستم‌های تولید و انتقال می‌باشد. در طی فرآیند بازیابی بار، تمایل سیستم به افزایش بار و تأمین آن می‌تواند

چکیده — به علت عدم توازن بین رشد مصرف برق و توسعه نیروگاه‌ها و شبکه انتقال، سیستم‌های قدرت امروزی در نزدیکی حدود خود بهره‌برداری می‌شوند و در نتیجه به شدت در معرض آسیب‌های ناشی از ناپایداری ولتاژ قرار دارند. برای جلوگیری از بروز این آسیب‌ها، لازم است ناپایداری ولتاژ قبل از وقوع آن پیش‌بینی شود تا بتوان اقدامات لازم برای مقابله با آن را قبل از وقوع انجام داد. در این مقاله، روشی برای پیش‌گیری از ناپایداری ولتاژ ارائه شده که ابتدا برای پیش‌بینی ناپایداری ولتاژ از تحلیل شبه‌حالت‌ماندگار (QSS) و تحلیل حساسیت استفاده می‌کند و سپس، مقابله با ناپایداری ولتاژ را در چهار سطح انجام می‌دهد. این چهار سطح به ترتیب عبارتند از قفل کردن تپ‌چنجرهای بحرانی، جبران‌سازی موزی، تنظیم ولتاژ ژنراتورها و حذف بار. در سطح اول، با شناسایی و قفل کردن تپ‌چنجرهای بحرانی با ناپایداری مقابله می‌شود. در سطح‌های دوم تا چهارم، از یک پله تغییر در کمیت مورد نظر در آن سطح و تکرار شبیه‌سازی به منظور ارزیابی تأثیر آن استفاده می‌شود. در صورت به بن‌بست رسیدن اقدامات یک سطح، اقدامات سطح بعدی مدنظر قرار می‌گیرند. هدف از اقدامات فوق، از بین بردن ناپایداری ولتاژ پیش‌بینی شده است و هر زمان این امر تحقق یابد، اقدامات یادشده متوقف خواهند شد. نتایج شبیه‌سازی این روش با استفاده از دو شبکه نمونه ۵ شینه و ۳۲ شینه بررسی شده است که نشان‌دهنده عملکرد موفق این روش است.

چهار دسته کلی روش‌های بر پایه مقدار ولتاژ، روش‌های بر پایه بردارهای ویژه، روش‌های بر پایه حساسیت و روش‌های بر پایه کنترل پیش‌بین مدل تقسیم کرد:

سیستم را تا مرز ناپایداری پیش ببرد. سایر عوامل، مانند عدم تأمین تقاضای توان راکتیو، عامل اصلی ناپایداری ولتاژ نیستند و جزء نتایج جنبی آن محسوب می‌شوند [۱-۳].

امروزه توجه به سمت سیستم‌هایی که بتوانند وقوع ناپایداری ولتاژ محتمل را به‌طور بلادرنگ پیش‌بینی نمایند افزایش یافته است. یکی از کارکردهای مهم این سیستم‌ها، پیش‌بینی ناپایداری پس از وقوع حوادث می‌باشد؛ زیرا در حالت عادی سیستم طوری برنامه‌ریزی می‌شود که در افزایش‌های بار تدریجی، با حاشیه مناسب پایدار بماند. مسأله پیش‌بینی ناپایداری ولتاژ و روش‌های معمول برای حل آن به تفصیل در [۴-۶] مورد بررسی قرار گرفته است. هدف یک سیستم پیش‌بینی ناپایداری ولتاژ آن است که وضعیت یک شبکه از نظر وقوع ناپایداری ولتاژ در آینده، با استفاده از داده‌های فعلی بررسی و پیش‌بینی گردد. در واقع، این سیستم مشخص می‌کند آیا شبکه با وضعیت موجود در ادامه پایدار خواهد ماند یا در اثر عملکرد دینامیک‌های مختلف در آن نهایتاً ناپایدار خواهد شد. در [۷] روشی برای پیش‌بینی ناپایداری ولتاژ ارائه شده که در [۴-۶] نیز مورد استفاده گرفته و در ادامه این مقاله نیز معرفی می‌شود.

پیش‌بینی ناپایداری ولتاژ گام آغازین در مقابله با وقوع آن می‌باشد. مسأله اصلی آن است که چگونه می‌توان با انجام مؤثرترین اقدامات از وقوع ناپایداری ولتاژ پیش‌بینی شده جلوگیری نمود. از آنجا که ناپایداری ولتاژ ارتباط تنگاتنگی با توان راکتیو دارد، کنترل توان راکتیو در شبکه کمک مؤثری به بهبود آن خواهد نمود. ابزارهای کنترل توان راکتیو را در حالت کلی می‌توان به چهار دسته تقسیم کرد. این دسته‌ها عبارتند از کنترل توان راکتیو توسط تپ‌چنجرهای زیر بار، جبران‌سازی خازنی، تنظیم ولتاژ ژنراتورها و حذف بار. انتخاب این که کدام ابزار کنترلی جهت جلوگیری از ناپایداری انتخاب گردد، بستگی به مشخصات شبکه، امکان ارتباطات مخابراتی و تجربه بهره‌برداران شبکه دارد. عموماً بهره‌برداران مطابق تجربه خود و دستورالعمل‌هایی که با شبیه‌سازی‌های نابهنگام به‌دست آمده‌اند، نسبت به جبران‌سازی خازنی و حذف بار در شرایط اضطراری اقدام می‌نمایند. حجم اقدامات کنترلی در این حالت عموماً غیر بهینه است. با استفاده از سیستم‌های پیش‌بینی به‌هنگام، مانند سیستم پیش‌بینی مورد نظر در این مقاله، می‌توان با توجه به شرایط سیستم تصمیم‌گیری نموده و اقدامات مناسب‌تری انجام داد [۴].

در مورد هر ابزار کنترل توان راکتیو، جهت انتخاب نقاط مناسب برای کنترل نیز روش‌های مختلفی ارائه شده است. این روش‌ها را می‌توان به

(۱) روش‌های بر پایه مقدار ولتاژ: مرجع [۸] از نحوه تغییر مقدار ولتاژ برای شناسایی تپ‌چنجرهای بحرانی و قفل کردن آنها استفاده کرده است. در [۹] مروری بر روش‌های حذف بار بر مبنای مقدار ولتاژ صورت گرفته است.

(۲) روش‌های بر پایه بردارهای ویژه: در [۱۰] تشخیص نقاط مناسب برای جبران‌سازی خازنی با استفاده از بردار تانژانت در حد بارگذاری (بردار ویژه راست نظیر مقدار ویژه صفر ماتریس ژاکوبین) انجام شده است. در [۱۱] از بردار ویژه راست و در [۱۲] از بردار ویژه چپ نظیر مقدار ویژه صفر ماتریس ژاکوبین برای انجام حذف بار استفاده شده است.

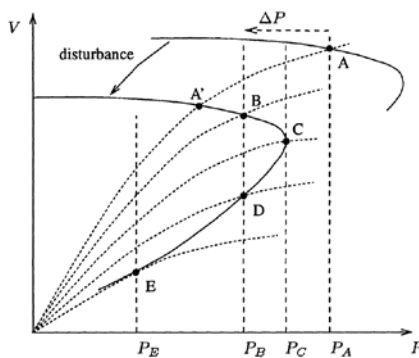
(۳) روش‌های بر پایه حساسیت: در [۳] نقاط مناسب برای جبران‌سازی خازنی با استفاده از حساسیت توان راکتیو به ولتاژ و مقادیر خازن‌ها با شبیه‌سازی‌های مختلف انتخاب شده‌اند. در [۱۳] جایابی محل مناسب خازن‌ها با استفاده از حساسیت ولتاژ شینه‌های مختلف نسبت به تزریق توان راکتیو در یک شینه انجام شده است. در [۱۴] جایابی محل مناسب خازن‌ها با استفاده از حساسیت توان راکتیو کل ژنراتورها نسبت به توان راکتیو بار در شینه‌های مختلف انجام شده است. روش‌های یادشده هر چند در پیدا کردن بهترین راه برای رسیدن به هدف خود موفق می‌باشند، لیکن این هدف نه خود ناپایداری ولتاژ که ولتاژ سیستم است. در حقیقت، این روش‌ها جهت جلوگیری از ناپایداری، از بهبود علائم ناپایداری استفاده کرده‌اند. به این منظور، در برخی مراجع از حساسیت حد بارگذاری سیستم نسبت به انواع پارامترها برای انجام جبران‌سازی موازی [۱۵] و جبران‌سازی موازی و حذف بار [۱۶-۱۸] استفاده شده است. این روش‌ها نیازمند بردار جهت افزایش بار می‌باشند که در کاربردهای به‌هنگام مشخص نیست. در [۱۹] از حساسیت کوچکترین مقدار تکین ماتریس ژاکوبین نسبت به پارامترها استفاده شده است.

(۴) روش‌های بر پایه کنترل پیش‌بین مدل: در [۲۰-۲۱] از یک کنترل‌کننده پیش‌بین مدل برای کنترل تپ‌چنجر، تنظیم ولتاژ ژنراتورها و حذف بار استفاده شده است.

در این مقاله، روشی برای مقابله با ناپایداری ولتاژ ارائه شده است که ابزارهای چهارگانه کنترل توان راکتیو را به ترتیب اولویت در چهار سطح به کار می‌گیرد. مبنای این روش، استفاده از قفل کردن تپ‌چنجرهای بحرانی با

مرحله اول روش با انجام تحلیل QSS، مقادیر کمیت‌های سیستم در طول بازه زمانی مورد مطالعه به دست می‌آیند.

شاخص حساسیت مورد نیاز در این روش بر مبنای تفاوت بین "حدبارگذاری سیستم" و "نقطه دوشاخگی" تعریف می‌شود. شکل ۱ منحنی PV سیستم قبل و بعد وقوع یک حادثه را نشان می‌دهد. در این شکل، نقطه C "حد بارگذاری سیستم" است که نقطه ناپایداری مدل سیستم با بارهای توان ثابت می‌باشد. نقطه E نیز "نقطه دوشاخگی" است که از آن به بعد معادلات دینامیکی سیستم پاسخ نخواهند داشت. بین نقاط C و E، اگرچه سیستم ناپایدار نیست؛ اما می‌توان گفت که وارد فاز ابتدایی ناپایداری شده است و با عبور از نقطه E، سیستم وارد فاز نهایی ناپایداری می‌شود. در این فاز، سیستم با دینامیک‌های گذرا و بلندمدت دیگر پایدار نمی‌باشد. این فاز نهایی می‌تواند شامل فروپاشی ولتاژ و یا از دست رفتن نقطه تعادل دینامیک‌های گذرا (همانند از دست رفتن سنکرونیزم واحدها با یکدیگر)، باشد. اگرچه وارد شدن به فاز ابتدایی ناپایداری لزوماً منجر به وارد شدن سیستم به فاز نهایی ناپایداری نمی‌شود؛ ولی در این حالت سیستم از نظر پایداری ولتاژ در شرایط خطرناکی قرار دارد که رسیدگی به وضعیت آن ضرورت دارد. بنابراین، شاخص حساسیت یادشده به گونه‌ای تعریف می‌شود که به جای تشخیص گذر از نقطه دوشاخگی سیستم (ورود به فاز نهایی ناپایداری)، گذر از حد بارگذاری سیستم (ورود به فاز ابتدایی ناپایداری) را تشخیص دهد.



شکل ۱: تفاوت حد بارگذاری سیستم و نقطه دوشاخگی [۱]

شاخص حساسیت به صورت حساسیت توان راکتیو تولیدی کل ژنراتورها به بار راکتیو هریک از شینه‌های بار و طبق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$S_{Q_{gq}} = -\varphi_q^T (\varphi_z^T)^{-1} \nabla_z Q_g \quad (2)$$

استفاده از نحوه تغییر ولتاژ و انجام جبران‌سازی خازنی، تنظیم ولتاژ ژنراتورها و حذف بار به صورت پله‌ای و با استفاده از حساسیت است. هر نوع تغییر پیشنهادی در سیستم اعمال شده و تأثیر آن بر از بین بردن ناپایداری ولتاژ با شبیه‌سازی سیستم بررسی می‌شود و در صورت کافی نبودن تغییر (باقی ماندن ناپایداری ولتاژ)، تغییر مناسب بعدی انجام می‌شود. بنابراین، روش پیشنهادی مبتنی بر انجام تغییرات متوالی در سیستم و شبیه‌سازی متوالی تأثیر آنها است.

۲. پیش‌بینی ناپایداری ولتاژ با استفاده از تحلیل

QSS

روش مورد نظر در این مقاله برای پیش‌بینی ناپایداری ولتاژ به طور تفصیلی در [۴-۶] ارائه شده است. این روش دارای دو مرحله است. در مرحله اول، شبیه‌سازی زمانی رفتار آینده سیستم در دوره مورد مطالعه با استفاده از تحلیل QSS انجام می‌شود و در مرحله دوم، با محاسبه یک شاخص حساسیت مناسب به ازای هریک از لحظات دوره مورد مطالعه و بررسی تغییرات آن، وضعیت سیستم در طول دوره مورد مطالعه از نظر پایداری یا ناپایداری مشخص می‌شود.

در مطالعات ناپایداری ولتاژ بلندمدت، بازه زمانی مطالعات بزرگ بوده و لذا دینامیک‌های کند سیستم فرصت عملکرد پیدا مینمایند. جهت کاهش حجم محاسبات، میتوان فرض نمود پاسخ زمانی دینامیک‌های تند سیستم بسیار سریع می‌باشد و بنابراین، در هر لحظه متغیرهای مرتبط با آن در معادلات دیفرانسیل سیستم در حالت تعادل قرار دارد. در واقع، در این معادلات متغیرهای حالت سیستم به دو دسته کند و تند تقسیم می‌شوند و از مشتق متغیرهای حالت کند صرف‌نظر می‌شود. این فرض سبب ساده‌سازی معادلات و افزایش سرعت محاسبات می‌گردد. با این فرض، معادلات شبه‌حالت‌ماندگار سیستم (QSS^Q) به‌دست می‌آید. معادلات QSS سیستم را می‌توان به صورت رابطه زیر بیان کرد:

$$\Phi(z, s) = 0 \quad (1)$$

که در آن Z متغیرهای حالت سیستم و S پارامترهای آن را نشان می‌دهند. شایان ذکر است متغیرهای کند سیستم در این حالت همگی دارای دینامیک گسسته هستند و لذا در رابطه (۱) هیچ مشتقی دیده نمی‌شود. تحلیل سیستم با شبیه‌سازی زمانی معادلات QSS را تحلیل QSS می‌نامند. بنابراین، در

¹ Quasi Steady State

تأثیر این عملکرد بر ولتاژ بررسی می‌شود. با تشخیص تپ‌چنجرهای بحرانی، این تپ‌چنجرها قفل می‌شوند و شبیه‌سازی سیستم در حالت جدید انجام خواهد شد. اگر اقدامات صورت گرفته در این سطح نتوانست از ناپایداری ولتاژ جلوگیری کند، با حفظ اقدامات این سطح از اقدامات سطح ۲ استفاده می‌شود.

سطح ۲: در این سطح از جبران‌سازی خازنی برای مقابله با ناپایداری ولتاژ استفاده می‌شود. فرض می‌شود که در شینه‌های معینی از شبکه خازن قرار دارد و توان رکتیو نامی هر خازن در چند پله با تعداد و اندازه مشخص می‌تواند تغییر کند. در این صورت، مطابق با [۱۴] از شاخص حساسیت $S_{Q_{gg}}$ برای تشخیص محل مناسب برای جبران‌سازی استفاده می‌شود. هر محلی که قدرمطلق این شاخص در آن بیشتر باشد به عنوان محل مناسب انتخاب می‌شود. پس از شناسایی محل مناسب، خازن در این محل به میزان یک پله تغییر کرده و شبیه‌سازی مجدداً انجام می‌شود. در صورت باقی ماندن ناپایداری ولتاژ، مجدداً با استفاده از شاخص حساسیت نسبت به انتخاب محل مناسب و بررسی تأثیر جبران‌سازی در آن محل اقدام می‌شود. هر زمان که ناپایداری ولتاژ از بین رفت، جبران‌سازی خازنی متوقف خواهد شد. اگر اقدامات صورت گرفته در این سطح نتوانست از ناپایداری ولتاژ جلوگیری کند، با حفظ اقدامات سطح‌های ۱ و ۲ از اقدامات سطح ۳ استفاده می‌شود.

سطح ۳: در این سطح از تنظیم ولتاژ ژنراتورها برای مقابله با ناپایداری ولتاژ استفاده می‌شود. فرض می‌شود که امکان تنظیم ولتاژ تعدادی از ژنراتورها وجود دارد و ولتاژ هر ژنراتور می‌تواند در پله‌های کوچکی تغییر کند. واضح است که در عمل ولتاژ ژنراتور به طور پیوسته تغییر می‌کند و در نظر گرفتن پله برای تغییرات آن نوعی تقریب است که با کوچک‌تر شدن پله‌ها به واقعیت نزدیک می‌شود. در این سطح از شاخص حساسیت جدیدی به نام $S_{Q_{gVset}}$ استفاده می‌شود که طبق رابطه ۳ تعریف می‌شود:

که در آن q بار رکتیو شینه‌های بار، ϕ_q و ϕ_z به ترتیب مشتق معادلات (ژاکوبین) نسبت به بار رکتیو هر یک از شینه‌ها و متغیرهای حالت، $\nabla_z Q_g$ گرادیان معادلات بیان‌کننده Q_g نسبت به متغیرهای حالت و T علامت ترانهاده هستند. این حساسیت (و در حالت کلی حساسیت هر تابعی از متغیرها نسبت به پارامترها)، در نقطه دوشاخگی بی‌نهایت شده و تغییر علامت می‌دهد. در ناپایداری ناشی از رسیدن به حدود سیستم، حساسیت‌ها بی‌نهایت نخواهند شد، لیکن با توجه به تغییر علامت آنها می‌توان رسیدن به ناپایداری را تشخیص داد. حال اگر در محاسبه شاخص حساسیت، در محاسبه ژاکوبین‌ها از مدل بار توان ثابت استفاده شود، در این صورت به جای تشخیص عبور از نقطه دوشاخگی سیستم، عبور از حد بارگذاری سیستم تشخیص داده خواهد شد. بنابراین، در مرحله دوم روش، شاخص حساسیت $S_{Q_{gg}}$ برای کلیه شینه‌های بار در هر یک از لحظات دوره مورد مطالعه محاسبه می‌شود و با بررسی تغییر علامت آن، می‌توان رسیدن به ناپایداری ولتاژ را تشخیص داد.

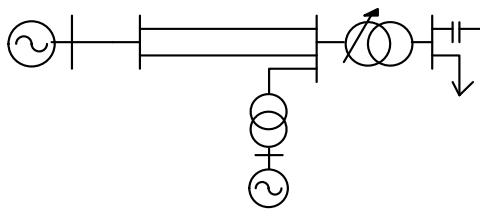
۳. مقابله با ناپایداری ولتاژ با استفاده از حساسیت

و شبیه‌سازی‌های متوالی

در این مقاله، روشی برای مقابله با ناپایداری ولتاژ پیش‌بینی شده ارائه شده است که از ابزارهای کنترل توان رکتیو در چهار سطح استفاده می‌کند. سطح اول دارای بالاترین اولویت و سطح چهارم دارای پایین‌ترین اولویت است. در واقع، اگر با استفاده از ابزارهای کنترلی مربوط به یک سطح، ناپایداری ولتاژ پیش‌بینی نشد، نیازی به استفاده از ابزارهای واقع در سطح با اولویت پایین‌تر نخواهد بود. همچنین، در یک سطح به محض آن که ناپایداری ولتاژ پیش‌بینی نشد، اقدامات کنترلی متوقف می‌شوند و اقدامات کنترلی دیگری انجام نخواهند شد؛ بلکه اقدامات کنترلی که تا این مرحله اجرا شده و باعث از بین رفتن ناپایداری ولتاژ شده‌اند به عنوان تنظیمات مورد نیاز جهت پیش‌گیری از ناپایداری ولتاژ معرفی می‌شوند. در ادامه، نحوه مقابله با ناپایداری ولتاژ در هر یک از سطوح چهارگانه ارائه می‌شود.

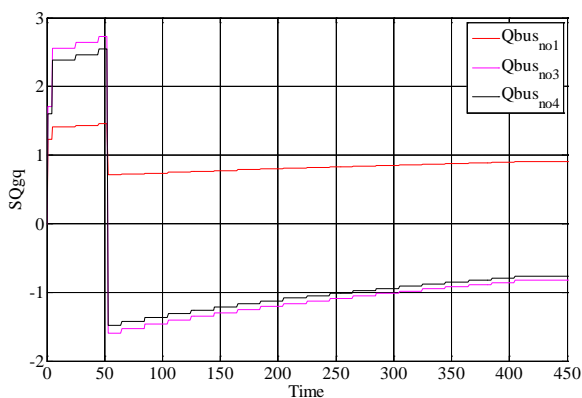
سطح ۱: در این سطح از کنترل تپ‌چنجرها برای مقابله با ناپایداری ولتاژ استفاده می‌شود. طبق [۸]، در صورتی که با عملکرد تپ، ولتاژ سمت کنترل به‌جای افزایش، کاهش یابد، حتماً عبور از نقطه حد بارگذاری پیشتر اتفاق افتاده است. لذا در این مقاله از این معیار جهت شناسایی تپ‌چنجرهای بحرانی استفاده شده است. در این روش، با شناسایی تپ‌چنجرهای بحرانی، عملکرد این تپ‌چنجرها قفل می‌شود. با هر بار عملکرد تپ‌چنجر، نحوه

تغذیه می‌شود. ترانسفورماتور بین شینه‌های ۳ و ۴، با تغییر تپ ولتاژ شینه ۳ را ثابت نگه می‌دارد.



شکل ۲: نمودار تک‌خطی شبکه نمونه ۵ شینه [۱]

در این سیستم، فرض می‌شود یکی از خطوط بین شینه‌های ۱ و ۴ در لحظه ۵ ثانیه قطع شود و محدودساز جریان تحریک ژنراتور شینه ۲ روشن باشد. شایان ذکر است ژنراتور شینه ۵ مدل شبکه خارجی است و لذا فاقد محدودساز جریان تحریک می‌باشد. نمودار شاخص حساسیت $S_{Q_{gg}}$ بر حسب زمان در شکل ۳ نمایش داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، در لحظه ۵۳ ثانیه شاخص حساسیت تغییر علامت داده و ناپایداری ولتاژ پیش‌بینی می‌شود. این ناپایداری در اثر عملکرد محدودساز تحریک ژنراتور در لحظه ۵۳ ثانیه رخ می‌دهد و سیستم وارد فاز نهایی ناپایداری نشده است.



شکل ۳: نمودار شاخص حساسیت بر حسب زمان در شبکه نمونه ۵ شینه

فرض می‌شود که در این شبکه امکان قفل کردن تپ‌چنجرهای بحرانی وجود داشته باشد و در هر یک شینه‌های ۳ و ۴ به میزان ۴۰۰ مگاوار خازن در قالب پله‌های ۱۰۰ مگاوار در دسترس باشد. در این حالت در سطح ۱، با قفل کردن تپ‌چنجرهای بحرانی، ناپایداری ولتاژ همچنان وجود دارد. در سطح ۲، به میزان ۲۰۰ مگاوار خازن در طی دو پله در شینه ۳ قرار می‌گیرد که مطابق با شکل ۴ منجر به پایدار شدن سیستم می‌گردد.

حال فرض می‌شود که جبران‌سازی موازی تنها در شینه ۳ و در قالب یک پله ۱۰۰ مگاوار باشد و در عوض امکان حذف بار در شینه ۳ در ۴ پله ۱۰ درصدی وجود داشته باشد. در این حالت در سطح ۱، با قفل کردن

و بررسی تأثیر تغییر ولتاژ تنظیمی ژنراتور در آن محل اقدام می‌شود. هر زمان که ناپایداری ولتاژ از بین رفت، تنظیم ولتاژ ژنراتورها متوقف خواهد شد. اگر اقدامات صورت گرفته در این سطح نتوانست از ناپایداری ولتاژ جلوگیری کند، با حفظ اقدامات سطح‌های ۱ تا ۳ از اقدامات سطح ۴ استفاده می‌شود.

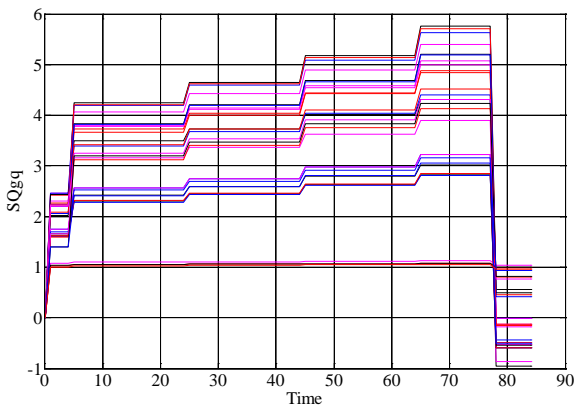
سطح ۴: در این سطح از حذف بار برای مقابله با ناپایداری ولتاژ استفاده می‌شود. فرض می‌شود که حذف بار می‌تواند در شینه‌های معینی از شبکه و در چند پله با تعداد و اندازه مشخص انجام شود. در این صورت، مطابق با [۱۴] از شاخص حساسیت $S_{Q_{gg}}$ برای تشخیص محل مناسب برای حذف بار استفاده می‌شود. هر محلی که قدرمطلق این شاخص در آن بیشتر باشد به عنوان محل مناسب انتخاب می‌شود. پس از شناسایی محل مناسب، یک پله حذف بار در این محل انجام شده و شبیه‌سازی مجدداً انجام می‌شود. در صورت باقی ماندن ناپایداری ولتاژ، مجدداً با استفاده از شاخص حساسیت نسبت به انتخاب محل مناسب و بررسی تأثیر حذف بار در آن محل اقدام می‌شود. هر زمان که ناپایداری ولتاژ از بین رفت، حذف بار متوقف خواهد شد. اگر اقدامات صورت گرفته در این سطح نتوانست از ناپایداری ولتاژ جلوگیری کند، پیش‌گیری از ناپایداری ولتاژ با استفاده از ابزارهای کنترلی چهارگانه امکان‌پذیر نخواهد بود.

شایان ذکر است که در هر یک از سطح‌های ۲ تا ۴، به دلیل غیرخطی بودن سیستم، محل مناسب برای انجام تغییر در یک مرحله لزوماً با مراحل قبل یا بعد از آن یکسان نخواهد بود. روش ارائه‌شده در این مقاله، از طریق ترکیب کردن حساسیت با شبیه‌سازی سیستم قدرت، عیب بزرگ روش‌های حساسیتی را، که خطی‌سازی حول یک نقطه و عدم لحاظ نمودن تغییر هر پارامتر بر دینامیک‌ها و یا سایر پارامترها می‌باشد، برطرف می‌سازد. همچنین، این روش ترتیب زمانی عملکرد دینامیک‌های سیستم را در هنگام مقابله با ناپایداری ولتاژ در نظر می‌گیرد.

۴. نتایج شبیه‌سازی

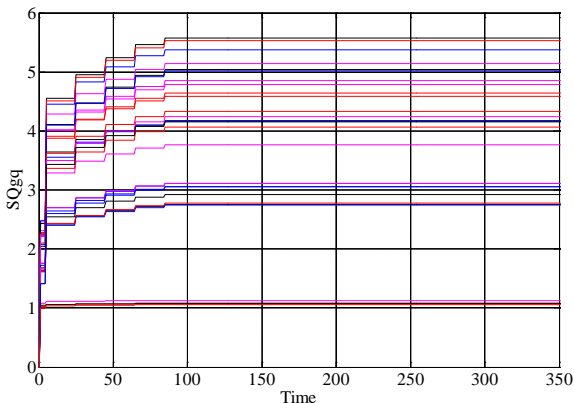
در این بخش، با استفاده از دو شبکه نمونه، عملکرد روش ارائه‌شده در بخش قبل در مقابله با ناپایداری ولتاژ پیش‌بینی‌شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. شبکه اول، یک شبکه ۵ شینه است که نمودار تک‌خطی آن در شکل ۲ نشان داده شده و مشخصات آن در [۱] ذکر شده است. این شبکه شامل یک بار است که توسط یک شبکه خارجی دوردست و یک ژنراتور محلی

تحریک ژنراتور در لحظه ۷۸ ثانیه رخ می‌دهد. از لحظه ۸۵ ثانیه به بعد، معادلات نیز واگرا می‌شوند و ادامه شبیه‌سازی امکان‌پذیر نیست. در این حالت، سیستم وارد فاز ناپایداری خواهد شد.



شکل ۶: نمودار شاخص حساسیت بر حسب زمان در شبکه نمونه ۳۲

فرض می‌شود که در هر یک از شینه‌های ۱۸، ۱۹، ۲۳، ۲۵، ۲۶ و ۲۷ به میزان ۱۰۰ مگاوار خازن در قالب یک پله وجود داشته باشد. در این حالت، در سطح ۲ به میزان ۱۰۰ مگاوار خازن به ترتیب در شینه‌های ۲۷، ۲۶، ۲۵ و ۲۳ قرار داده می‌شود که مطابق با شکل ۷ منجر به پایدار شدن سیستم می‌شود.

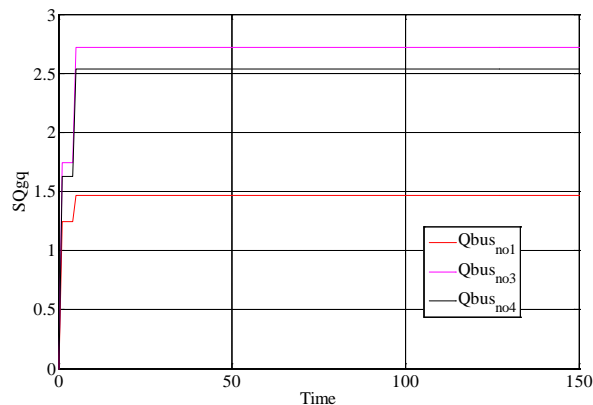


شکل ۷: نمودار شاخص حساسیت بر حسب زمان پس از جبران‌سازی موازی

در شبکه نمونه ۳۲

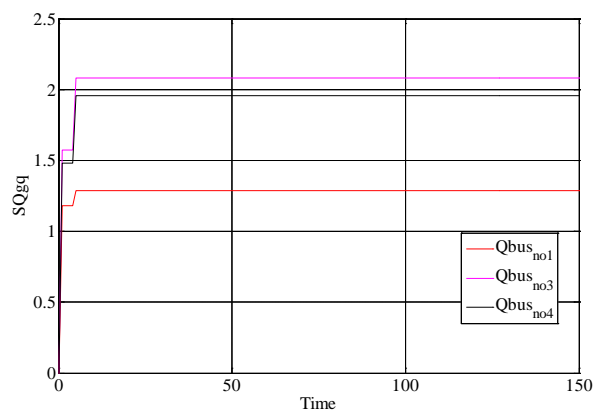
حال فرض می‌شود که تنها در شینه‌های ۲۶ و ۲۷ به میزان ۱۰۰ مگاوار خازن در قالب یک پله وجود داشته باشد و علاوه بر آن، امکان افزایش ولتاژ ژنراتور شینه ۱۶ تا ۱.۲۵ پریونیت در قالب پله‌های ۰.۰۵ پریونیتی وجود داشته باشد. در این حالت، در سطح ۲ به میزان ۱۰۰ مگاوار خازن به ترتیب در شینه‌های ۲۷ و ۲۶ قرار داده می‌شود و همچنان ناپایداری ولتاژ وجود دارد. در سطح ۳، ولتاژ ژنراتور شینه ۱۶ که در ابتدا برابر ۱.۱۲ پریونیت

تپ‌چنجرهای بحرانی، ناپایداری ولتاژ همچنان وجود دارد. در سطح ۲، به میزان ۱۰۰ مگاوار خازن در شینه ۳ قرار می‌گیرد و همچنان ناپایداری ولتاژ وجود دارد. در سطح ۴، یک پله حذف بار ۱۰ درصدی در شینه ۳ انجام می‌شود که مطابق با شکل ۵ منجر به پایدار شدن سیستم می‌گردد.



شکل ۴: نمودار شاخص حساسیت بر حسب زمان پس از قفل تپ‌چنجرهای

بحرانی و جبران‌سازی موازی در شبکه نمونه ۵



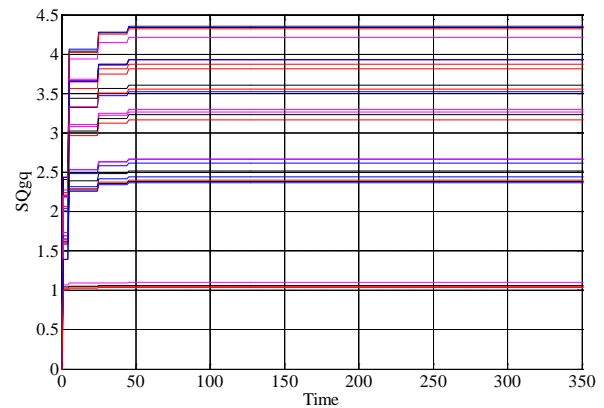
شکل ۵: نمودار شاخص حساسیت بر حسب زمان پس از قفل تپ‌چنجرهای

بحرانی، جبران‌سازی موازی و حذف بار در شبکه نمونه ۵

شبکه دوم، یک شبکه نمونه ۳۲ شینه است که نمودار تک‌خطی و سایر مشخصات آن در [۵] ذکر شده است. این شبکه دارای ۴ ژنراتور، ۱۹ بار، ۸ ترانسفورماتور با تپ ثابت و ۷ ترانسفورماتور با تپ متغیر است. در این شبکه، فرض می‌شود ژنراتور شینه ۱۶ از ابتدا خارج از مدار باشد، خطوط بین شینه‌های ۱۸ و ۲۹ و شینه‌های ۲۵ و ۲۷ در لحظه ۵ ثانیه قطع شوند و تپ‌چنجرها روشن باشند. نمودار شاخص حساسیت S_{Qgg} بر حسب زمان برای همه شینه‌های بار در شکل ۶ نمایش داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، در لحظه ۷۸ ثانیه شاخص حساسیت تغییر علامت داده و ناپایداری ولتاژ پیش‌بینی می‌شود. این ناپایداری در اثر عملکرد محدودساز

- [2] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajarapu, G. Andersson, A. Bose, C. Canizares, N. Atziargyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, T. Van Cutsem, and V. Vittal, "Definition and classification of power system stability: IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 19, No. 3, pp. 1387-1401, Aug. 2004.
- [3] C. W. Taylor, "Power system voltage stability", New York, McGraw-Hill, 1994.
- [۴] "بررسی روش‌های پیش‌بینی ناپایداری ولتاژ در شبکه به کمک پایش تغییرات ولتاژ و روش‌های مقابله با ناپایداری استاتیک ولتاژ بر اساس کنترل‌های توان راکتیو و انتخاب روش مناسب"، گروه پژوهشی مطالعات سیستم پژوهشگاه نیرو، آبان ۱۳۹۰.
- [۵] "پایاده‌سازی الگوریتم پیش‌بینی ناپایداری ولتاژ و مقابله با ناپایداری استاتیک بر اساس کنترل‌های توان راکتیو"، گروه پژوهشی مطالعات سیستم پژوهشگاه نیرو، آبان ۱۳۹۰.
- [۶] مصطفی شریف‌زاده و حبیب‌اله رؤفی، "پیش‌بینی ناپایداری ولتاژ با استفاده از تحلیل QSS و تحلیل حساسیت"، بیست و هشتمین کنفرانس بین‌المللی برق، آبان ۱۳۹۱.
- [7] T. Van. Cutsem and R. Mailhot, "Validation of a fast voltage stability analysis method on the Hydro-Quebec system", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 12, No. 1, pp. 282-292, Feb. 1997.
- [8] C. D. Vournas and T. Van Cutsem, "Local Identification of Voltage Emergency Situations", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 23, No. 3, pp 1239-1248, Aug 2008.
- [9] V.C. Nikolaidis and C. D. Vournas, "Design strategies for load-shedding schemes against voltage collapse in the Hellenic system", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 23, No. 2, pp 582-591, May 2008.
- [10] V. Ajarapu, "Computational Techniques for Voltage Stability Assessment and Control", Springer, 2006.
- [11] B. Lee and V. Ajarapu, "Invariant subspace parametric sensitivity of structure preserving power system models", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 11, No. 2, pp. 845-850, May 1996.
- [12] Z. Feng, V. Ajarapu, and D.J. Maratukulam, "A practical Minimum Load Shedding Strategy to Mitigate Voltage Collapse", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 13, No. 4, pp. 1285-1291, Nov. 1998.
- [13] B. Sapkota and V. Vittal, "Dynamic Var planning in a large power system using trajectory sensitivities", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 25, No. 1, pp. 461-469, Feb. 2010.
- [14] M. Glavic and T. V. Cutsem, "Wide-Area Detection of Voltage Instability from Synchronized Phasor Measurement. Part I: Principle", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 24, No. 3, pp. 1408-1416, Aug. 2009.
- [15] H. Liu, L. Jin, J. D. McCalley, R. Kumar, V. Ahharapu and N. Elia, "Planning reconfigurable reactive control for voltage stability limited power systems", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 24, No. 2, pp. 1029-1038, May 2009.
- [16] F. Capitanescu and T. Van Cutsem, "Preventive control of voltage security margins: A multi contingency sensitivity based approach", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, July 2002.
- [17] T. Van Cutsem, Y. Jacquemart, J.-N. Marquet, and P. Pruvot, "A Comprehensive Analysis of Mid-term Voltage Stability", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 10, No. 3, pp. 1173-1182, Aug. 1995.
- [18] Q. Wu, D. H. Popovic, D. J. Hill and C. J. Parker, "Voltage security enhancement via coordinated control", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 16, No. 1, pp. 127-135, Feb. 2001.
- [19] A. Berizzi, P. Bresesti, P. Marannino, G. P. Granelli and M. Montagna, "System area operating margin assessment and security enhancement against voltage collapse", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 11, No. 3, pp. 1451-1462, Aug. 1996.
- [20] J. Y. Wen, Q. H. Wu, T. S. J. Cheng and J. Fitch, "Optimal coordinated voltage control for power system voltage stability", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 19, No. 2, pp. 1115-1122, May 2004.
- [21] M. Larsson and D. Karlsson, "Coordinated system protection scheme against voltage collapse using heuristic search and predictive control", IEEE Trans. Power Syst., Vol. 18, No. 3, pp. 1001-1006, Aug. 2003.

است با یک پله تغییر به ۱.۱۷ پریونیت می‌رسد که مطابق با شکل ۸ منجر به پایدار شدن سیستم می‌شود.



شکل ۸: نمودار شاخص حساسیت بر حسب زمان پس از جبران‌سازی موازی و تنظیم ولتاژ ژنراتور در شبکه نمونه ۳۲ شینه

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، روشی برای پیش‌گیری از ناپایداری ولتاژ ارائه شد. در این روش، مقابله با ناپایداری در چهار سطح ۱ تا ۴ انجام می‌گیرد که به ترتیب شامل قفل کردن تپ‌چنجرهای بحرانی، جبران‌سازی موازی، تنظیم ولتاژ ژنراتورها و حذف بار هستند. در سطح ۱، در صورتی که با عملکرد تپ‌چنجر، ولتاژ سمت کنترل به جای افزایش کاهش یابد، آن تپ‌چنجر بحرانی تشخیص داده شده و قفل می‌شود و شبیه‌سازی QSS با قفل شدن تپ‌چنجرهای بحرانی انجام می‌شود. در سطح‌های ۲ تا ۴، ابتدا با استفاده از شاخص حساسیت محل مناسب برای انجام تغییر انتخاب شده و سپس یک پله تغییر (جبران‌سازی خازنی، تغییر ولتاژ تنظیمی یا حذف بار) انجام شده و تأثیر آن با شبیه‌سازی QSS بررسی می‌شود. در یک سطح، هر زمان اقدامات کنترلی انجام شده منجر به از بین رفتن ناپایداری ولتاژ پیش‌بینی شده شد، اقدامات کنترلی متوقف می‌شوند. همچنین، اگر اقدامات مربوط به یک سطح کافی نبود، از اقدامات سطح با اولویت پایین‌تر استفاده می‌شود. در این روش، سطح ۱ دارای بالاترین اولویت است و سطح‌های ۲ تا ۴ پس از آن قرار دارند. ویژگی مهم روش ارائه‌شده در این مقاله، ترکیب کردن حساسیت با شبیه‌سازی QSS سیستم قدرت و لحاظ کردن ترتیب زمانی عملکرد دینامیک‌های سیستم در هنگام مقابله با ناپایداری ولتاژ است.

منابع

- [1] T. Van Cutsem and C. Vournas, "Voltage stability of electric power systems", Boston, Kluwer Academic Publishers, 1998.