

روشی جدید جهت تحلیل دینامیکی سیستم‌های قدرت چندماشینه شامل خطوط HVDC حین خطاهای متقارن و نامتقارن

امین سامان‌فر^۱ محمودرضا شاکرمی^۲ جعفر سلطانی زمانی^۳ اسماعیل رک رک^۴

۱- استادیار- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه لرستان - لرستان - ایران

a.samanfar@khoiau.ac.ir

۲- دانشیار- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه لرستان - لرستان - ایران

Shakarami.mr@lu.ac.ir

۳- استاد- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه آزاد واحد خمینی شهر - اصفهان - ایران

jsoltani@iaukhsh.ac.ir

۴- دانشیار- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه لرستان - لرستان - ایران

Rokrok.e@lu.ac.ir

چکیده: در این مقاله، روشی جدید برای مدل‌سازی دینامیکی سیستم‌های قدرت چندماشینه شامل خطوط HVDC هنگام وقوع خطاهای متقارن و نامتقارن پیشنهاد شده است. در روش پیشنهادی، از شبکه‌های توالی مبتنی بر فازورهای فضایی، جهت مدل‌سازی شبکه قدرت حین خطا استفاده شده است. در شبکه‌های توالی، ژنراتورهای سنکرون و خطوط HVDC توسط فازورهای فضایی جریان تزریقی و بارهای شبکه به صورت امپدانس‌های ثابت مدل می‌شوند. در هر گام زمانی شبیه‌سازی، پس از حل معادلات گره شبکه‌های توالی، جریان خطا و ولتاژهای توالی ترمینال ژنراتورها در دستگاه سنکرون بدست می‌آیند. سپس برای هر ژنراتور، با انتقال این ولتاژها به دستگاه مرجع روتور آن، معادلات دینامیکی ژنراتور حل می‌شوند. با حل معادلات دینامیکی ژنراتورها و خطوط HVDC، مقادیر جدید متغیرهای حالت و فازورهای فضایی جریان تزریقی این تجهیزات در شبکه‌های توالی مختلف محاسبه شده و گام‌های بعدی شبیه‌سازی انجام می‌شود. نتایج شبیه‌سازی یک شبکه تک ماشین متصل به شین بی‌نهایت و یک شبکه ۳۳ شینه IEEE شامل یک خط HVDC با روش پیشنهادی و نرم‌افزار EMTP برای یک خطای تک‌فاز به زمین و یک خطای پارگی دوفاز مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها حاکی از قابل اعتماد بودن روش پیشنهادی است.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی دینامیکی سیستم‌های قدرت، خطاهای متقارن، خطاهای نامتقارن، فازورهای فضایی و شبکه‌های توالی، خطوط HVDC

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.18.2.67

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۲۰

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۱۱

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمودرضا شاکرمی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - لرستان - ۵ کیلومتر جاده خرم‌آباد - تهران - دانشگاه لرستان - دانشکده فنی و مهندسی

۱- مقدمه

شبکه‌های قدرت بزرگ از جمله سیستم‌های فنی بسیار گسترده به حساب می‌آیند. این گستردگی آنها را در معرض حوادث محیطی قرار داده و احتمال وقوع خطا را در آنها بالا می‌برد. تحلیل دینامیکی شبکه‌های قدرت هنگام وقوع خطا، برای محاسبه مقادیر ولتاژها و جریان‌ها شبکه قدرت در شرایط بهره‌برداری غیرنرمال، بسیار حائز اهمیت است. زیرا، نتایج آن در محاسبه پارامترهای عناصر شبکه و تنظیم تجهیزات حفاظتی تاثیر بسزایی دارد [۱].

روش‌های مختلفی در منابع علمی برای تحلیل دینامیکی شبکه‌های قدرت هنگام وقوع خطا مطرح شده‌اند و برخی از این روش‌ها در قالب نرم‌افزارهایی به صنعت برق معرفی شده‌اند. این روش‌ها به دو دسته اصلی زیر تقسیم می‌شوند: ۱- روش‌های مبتنی بر انتگرال‌گیری عددی [۲-۶]، ۲- روش‌های فازوری [۷-۲۱]. ویژگی مهم روش‌های عددی دقت بالاتر آنهاست در حالیکه روش‌های فازوری دارای سهولت بکارگیری و سرعت بالاتر می‌باشند.

روش‌های انتگرال‌گیری عددی به طور معمول در نرم‌افزارهای شبیه‌ساز گذراهای الکترومغناطیسی نظیر EMTF [۲]، PSCAD [۳] و SIMPOW Instantaneous value model [۴] بکار گرفته می‌شوند. در این روش‌ها، از متغیرهای لحظه‌ای شبکه استفاده می‌شود و امکان مدل‌سازی دقیق همه تجهیزات شبکه (از جمله: ادوات FACTS و خطوط HVDC) در دستگاه سه‌فاز ABC وجود دارد [۵، ۶]. اما، این روش‌ها در مدل‌سازی دینامیکی شبکه‌های قدرت بزرگ حین خطا با محدودیت‌هایی روبرو هستند که عبارتند از: افزایش پیچیدگی مدل‌سازی با بزرگ شدن ابعاد شبکه؛ نیاز به گام زمانی شبیه‌سازی کوتاه (افزایش زمان شبیه‌سازی) جهت حل دقیق معادلات عددی در حوزه زمان؛ عدم ایجاد بینشی مناسب راجع به حساسیت‌های سیستم برای کمک به طراحی کنترل‌کننده مناسب یا طرح تدابیر حفاظتی ویژه.

روش‌های فازوری به صورت‌های مختلف در منابع برای تحلیل دینامیکی شبکه‌های قدرت به کار گرفته شده‌اند. در مراجع [۷، ۸]، مدل‌سازی سیستم‌های قدرت در دستگاه سه‌فاز ABC در باند فرکانسی پایه (مدل شبه حالت ماندگار) انجام شده است. در روش مذکور، متغیرهای حقیقی باند فرکانس نامی سیستم، به متغیرهای مختلط باند پایه تبدیل می‌شوند. دقت این روش برای تحلیل دینامیکی خطاهای متقارن در شبکه، مشابه روش‌های انتگرال‌گیری عددی است، با این تفاوت که به دلیل تغییرات کندتر متغیرهای باند پایه نسبت به متغیرهای اصلی، سرعت بالاتری دارد (به دلیل امکان انتخاب گام زمانی شبیه‌سازی بزرگتر). اما، محدودیت اصلی این روش، لزوم تمرکز محتوای فرکانسی مقادیر لحظه‌ای متغیرهای شبکه در اطراف فرکانس اصلی سیستم است. لذا، در مطالعه خطاهای نامتقارن که فرکانس‌های صفر و دو برابر فرکانس اصلی سیستم هم ظاهر می‌شوند، این روش کارایی خود را از دست می‌دهد.

شکل دیگر روش‌های فازوری در مدل‌سازی سیستم‌های قدرت، تبدیل DQ0 است [۹-۱۱]. در این تبدیل، متغیرهای ABC شبکه به دستگاه مرجع متعامد با باند فرکانسی پایه انتقال می‌یابند. با توجه به اینکه روش DQ0 نتیجه یک تبدیل است و نه یک تقریب، دقت آن بالاست. چنانچه شبکه در حالت متعادل باشد، کارایی روش DQ0 بالاست. در این حالت، شبکه تنها در حالت توالی مثبت شبیه‌سازی می‌شود و چون تغییرات متغیرهای الکتریکی توالی مثبت انتقال داده شده به دستگاه مرجع DQ0، کندتر از مقادیر لحظه‌ای در دستگاه ABC هستند، لذا در دستگاه DQ0، شبیه‌سازی‌ها می‌توانند با گام‌های بزرگتری صورت پذیرند که منجر به بالا رفتن سرعت شبیه‌سازی‌ها می‌گردد. اما، چنانچه سیستم در وضعیت نامتعادلی قرار گیرد، مولفه‌های توالی منفی و صفر نیز با فرکانس‌های ω_s و $2\omega_s$ در سیستم ظاهر می‌شوند. لذا، برای مطالعه شبکه در حالت نامتعادلی، لازم است گام‌های زمانی شبیه‌سازی را به اندازه کافی کوچک در نظر گرفت. این امر، باعث از دست رفتن مزیت بالا بودن سرعت روش می‌گردد. از طرفی، محدودیت دیگر روش DQ0، عدم استقلال اندوکتانس‌های ژنراتور سنکرون از موقعیت زاویه‌ای روتور به دلیل وجود مولفه‌های توالی منفی و صفر در حالت نامتعادلی است.

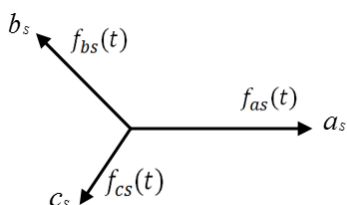
از دیرباز، شبکه‌های توالی مبتنی بر فازورها در تحلیل دینامیکی شبکه‌های قدرت بکار گرفته شده‌اند. این روش معمولاً با تقریب‌هایی همراه بوده است که از آن جمله می‌توان به صرفنظر کردن از گذراهای استاتور و دینامیک‌های شبکه توالی منفی اشاره نمود. در مرجع [۱۲] با هدف فائق آمدن بر این محدودیت‌ها، راه حلی پیشنهاد شده است. اگرچه با روش گفته شده در این مرجع، گذراهای استاتور در مطالعات دینامیکی شبکه در نظر گرفته می‌شوند، اما روش ارائه شده با کاستی‌هایی همراه است. در این مرجع، از روشی تقریبی برای تخمین گشتاور ماشین سنکرون در توالی منفی استفاده شده است. همچنین، در حل معادلات توالی منفی از معادلات سیم‌پیچ‌های روتور صرفنظر شده است و این سیم‌پیچ‌ها توسط تلفات مقاومتی، مدل‌سازی شده‌اند. لذا، از هارمونیک دوم جریان تولید شده در سیم‌پیچ‌های روتور حین خطاهای نامتقارن موازی، صرفنظر شده است. علاوه بر تقریب‌هایی که در مرجع فوق در نظر گرفته شده، سیستماتیک نبودن روش ارائه شده باعث دشواری آن در عمل می‌شود.

از جمله روش‌های مبتنی بر فازور، فازورهای دینامیکی هستند که از سال ۲۰۰۰ در حوزه تحلیل شبکه‌های قدرت معرفی شده است [۱] و [۱۳-۱۶]. ایده فازورهای دینامیکی، برای تقریب سیستم‌های با مقادیر شبه پریودیک است. فازورهای دینامیکی، مجموعه‌ای از ضرایب فوریه متغیر با زمان هستند که دارای تغییرات کند اما با قابلیت انعکاس نسبتاً دقیق رفتار سیستم می‌باشند.

روش فازورهای دینامیکی به طور موفقیت آمیزی برای تحلیل خطاهای متقارن و نامتقارن ژنراتورهای سنکرون بزرگ [۱۷]، ماشین‌های القایی [۱۸، ۱۹]، ژنراتورهای چند فازه متناوب [۲۰]، تحلیل

۲- مفاهیم پایه روش پیشنهادی

مفهوم فازورهای فضایی، برای تحلیل دینامیکی شبکه‌های قدرت در مواجهه با خطاهای متقارن و همزمان بکار گرفته شده است [۲۲، ۲۳]. در این بخش، با توسعه مفهوم فازورهای فضایی به شبکه‌های توالی، سعی در ارائه روشی برای تحلیل دینامیکی سیستم‌های قدرت حین خطاهای نامتقارن سری و موازی شده است. شکل (۱)، یک سیستم سه‌فاز نامتعادل را در حالت کلی نمایش می‌دهد.



شکل (۱): فرم کلی یک سیستم سه‌فاز نامتعادل

در این شکل، f ، می‌تواند هر یک از متغیرهای سه‌فاز شبکه از جمله ولتاژ، جریان باشد. روابط زیر، سیستم شکل (۱) را توصیف می‌کنند:

$$f_{as}(t) = \sqrt{2} f_{am}(t) \cos(\omega_e t + \theta_a(0)), \quad (1)$$

$$f_{bs}(t) = \sqrt{2} f_{bm}(t) \cos(\omega_e t + \theta_b(0) - \frac{2\pi}{3}), \quad (2)$$

$$f_{cs}(t) = \sqrt{2} f_{cm}(t) \cos(\omega_e t + \theta_c(0) + \frac{2\pi}{3}), \quad (3)$$

که در آن f_{am} ، f_{bm} و f_{cm} ، دامنه‌های متغیر با زمان ولتاژ یا جریان-های سه‌فاز سیستم هستند و ω_e ، سرعت زاویه‌ای سنکرون سیستم قدرت است. برای سیستم فوق، فازور فضایی ($F_s(t)$) در دستگاه مرجع ساکن به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۴]:

$$F_s(t) = \frac{2}{3} (f_{as}(t) + \alpha f_{bs}(t) + \alpha^2 f_{cs}(t)) \quad (4)$$

که در آن $\alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ است. در شرایط متعادل که

$$f_{am}(t) = f_{bm}(t) = f_{cm}(t) = f_m(t)$$

$$\theta_a(0) = \theta_b(0) = \theta_c(0) = 0 \quad (5)$$

رابطه (۴) به صورت زیر خواهد بود:

$$F_s(t) = \sqrt{2} f_m(t) e^{j\omega_e t} \quad (6)$$

رابطه (۶)، نشان می‌دهد که در شبکه‌های متعادل، فازور فضایی سیستم سه‌فاز در دستگاه مرجع ساکن، با فازور زمانی فاز 'as' متناسب است. ضریب تناسب، $\sqrt{2}$ است. لذا، با ضرب جمله $\sqrt{2} e^{j\omega_e t}$ در طرفین معادلات فازوری شبکه‌های متعادل که معمولاً بر اساس فاز 'as' بیان می‌شوند، معادلاتی بر اساس فازورهای فضایی در دستگاه مرجع ساکن به دست خواهد آمد. واضح است که در تبدیل فوق، ماتریس‌های امپدانس و ادمیتانس شبکه بدون تغییر باقی می‌ماند.

خطاهای متقارن و نامتقارن در سیستم‌های قدرت [۱، ۲۱]، بررسی رفتار دینامیکی TCSC [۱۳]، بکار گرفته شده است.

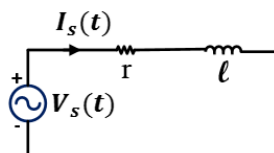
علی‌رغم قابلیت‌های فراوان روش فازورهای دینامیکی، بکارگیری این روش برای تحلیل دینامیکی شبکه‌های قدرت بزرگ، حین خطاها و به ویژه خطاهای نامتقارن شامل محدودیت‌هایی است که عبارتند از: ۱- در این روش، جهت مدل‌سازی خطاهای نامتقارن، ابتدا شبکه در دستگاه سه‌فاز ABC مدل می‌شود که منجر به افزایش متغیرهای حالت، افزایش زمان شبیه‌سازی‌ها و پیچیدگی مدل‌سازی با این روش می‌گردد. این محدودیت، زمانی که شبکه بزرگ و دقت شبیه‌سازی بالایی نیز مد نظر است (افزایش تعداد هارمونیک‌های مورد مطالعه)، قابل اغماض نیست. ۲- با توجه به اینکه در روش فازورهای دینامیکی، به طور معمول، تعدادی از هارمونیک‌ها (هارمونیک‌های ۱ تا ۵) برای مطالعه شبکه انتخاب می‌شوند و امکان مطالعه همه هارمونیک‌های شبکه وجود ندارد، نتایج این روش تقریبی است.

با توجه به آنچه که در بالا گفته شد، روش‌های مبتنی بر انتگرال-گیری عددی و روش‌های مبتنی بر فازور با محدودیت‌هایی در تحلیل دینامیکی شبکه‌های قدرت (به ویژه شبکه‌های با ابعاد بزرگ) در مواجهه با خطاهای نامتقارن روبرو هستند. لذا، در این تحقیق با بکارگیری مفهوم فازورهای فضایی در شبکه‌های توالی و استفاده از تکنیکی ابتکاری در تفکیک جریان‌های توالی خروجی ژنراتورها، سعی شده است روشی برای تحلیل دینامیکی شبکه‌های قدرت ارائه گردد که ضمن داشتن دقتی نزدیک به روش‌های انتگرال عددی از سادگی روش‌های فازوری نیز برخوردار باشد. نوآوری‌های اصلی این تحقیق عبارتند از:

- به کارگیری تئوری فازورهای فضایی در شبکه‌های توالی برای نخستین بار در مطالعه دینامیک شبکه‌های قدرت حین خطاهای نامتقارن سری و موازی.
- غلبه بر محدودیت‌های روش‌های مبتنی بر شبکه‌های توالی در تحلیل دینامیکی شبکه‌های قدرت با فراهم ساختن امکان مدل-سازی دینامیک‌های شبکه‌های توالی و همچنین دینامیک‌های کامل استاتور و روتور در مواجهه با ولتاژهای توالی مختلف.
- ساده‌تر بودن روش نسبت به روش‌های موجود (روش‌های انتگرال عددی و فازورهای دینامیکی)، به دلیل استفاده از عملیات جبری-ماتریسی در محاسبات شبکه به جای حل معادلات عددی و یا محاسبات هارمونیک.
- عدم افزایش پیچیدگی مدل‌سازی با بزرگ شدن ابعاد شبکه، بر خلاف روش‌های عددی و فازورهای دینامیکی.
- سیستماتیک بودن روش و قابلیت توسعه آسان آن برای مطالعه خطاهای همزمان یا متوالی.

با استفاده از رابطه (۱۰)، نتیجه انتقال معادله (۱۱)، به دستگاه مرجع سنکرون به صورت زیر خواهد بود:

$$V(t) = r.I(t) + j\omega_e L.I(t) + l \frac{dI(t)}{dt} \quad (12)$$



شکل (۳): مدل فازور فضایی شکل (۲) در دستگاه مرجع ساکن

معادله فازورهای فضایی شبه حالت ماندگار شبکه فوق با صرفنظر کردن از جمله آخر معادله (۱۲)، به صورت زیر خواهد بود:

$$V(t) = r.I(t) + j\omega_e L.I(t) \quad (13)$$

در صورتی که از جمله آخر معادله (۱۲) صرفنظر نگردد، نتیجه آن معادله شبکه بر اساس فازورهای فضایی سریع خواهد بود. معادله (۱۳) نشان می‌دهد که محاسبات شبکه بر اساس فازورهای فضایی شبه حالت ماندگار از محاسبات جبری فازورها تبعیت می‌کند. لذا، در محاسبات شبکه می‌توان از معادلات ماتریسی امپدانس یا ادمیتانس شبکه استفاده نمود. این امر، انجام محاسبات را ساده کرده و از برتری‌های روش پیشنهادی بر روش‌های انتگرال عددی و فازورهای دینامیکی در تحلیل دینامیکی شبکه‌های قدرت است.

۳- مدل سازی تجهیزات شبکه

در روش پیشنهادی، ژنراتورهای سنکرون و خطوط HVDC به صورت مدل منبع جریانی در نظر گرفته می‌شوند. این طریقه مدل سازی ژنراتورها و خطوط HVDC، در سیستماتیک کردن روش تاثیر بسزایی دارد. در این مقاله، بارهای شبکه به صورت امپدانس ثابت فرض شده‌اند و از مدل π ، برای مدل سازی خطوط انتقال استفاده شده است. ترانسفورماتورهای قدرت نیز با مقامت و راکتانس نشی معادل سیم-پیچ‌های اولیه و ثانویه مدل سازی گردیده‌اند. همچنین، در روش پیشنهادی، امپدانس خطا نیز در تحلیل دینامیکی شبکه، لحاظ می‌گردد. در ادامه به نحوه مدل سازی ژنراتورهای سنکرون و خطوط HVDC در روش پیشنهادی پرداخته می‌شود.

۳-۱- مدل سازی ژنراتورهای سنکرون

از آنجا که روش پیشنهادی از ترکیب شبکه‌های توالی، در تحلیل دینامیکی شبکه‌های قدرت حین خطا استفاده می‌کند، لازم است تا مقدار جریان تزریقی ژنراتورهای سنکرون در شبکه‌های توالی به طور جداگانه مشخص گردد. به این ترتیب، در شبکه‌های توالی مثبت و منفی، هر ژنراتور سنکرون توسط یک منبع جریان مدل می‌شود. مقدار جریان تزریقی هر منبع جریان، در واقع فازور فضایی معادل جریان‌های سه فاز توالی مربوطه است (روابط (۷)-(۹)). شکل (۴)، مدل منبع

مانند. روابط (۷) تا (۹)، متغیرهای سه فاز شبکه‌های توالی مختلف را بر اساس فازورهای فضایی بیان می‌کنند.

$$F_s^+(t) = \frac{2}{3} (f_{as}^+(t) + \alpha f_{bs}^+(t) + \alpha^2 f_{cs}^+(t)) \quad (7)$$

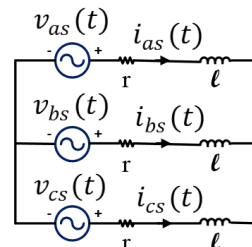
$$F_s^-(t) = \frac{2}{3} (f_{as}^-(t) + \alpha f_{bs}^-(t) + \alpha^2 f_{cs}^-(t)) \quad (8)$$

$$F_s^0(t) = \frac{1}{3} (f_{as}(t) + f_{bs}(t) + f_{cs}(t)) \quad (9)$$

در روابط (۷) تا (۹)، اندیس‌های (+)، (-) و (0) به ترتیب معرف مولفه‌های توالی مثبت، منفی و صفر هستند. در شبکه توالی مثبت، ولتاژها و جریان‌های شاخه‌ها بر اساس فازور فضایی $F_s^+(t)$ بیان می‌شوند. به طور مشابه، ولتاژها و جریان‌های شاخه‌ها در شبکه‌های توالی منفی و صفر نیز به ترتیب بر اساس فازورهای فضایی $F_s^-(t)$ و $F_s^0(t)$ بیان می‌شوند. معادلات ماتریسی گره در شبکه‌های توالی، معمولاً بر اساس فاز 'as' بیان می‌شوند. برای بیان معادلات ماتریسی گره بر اساس فازورهای فضایی در این شبکه‌ها، لازم است مقادیر مبنای ولتاژ و جریان در این شبکه‌ها با ضریب $\sqrt{2}$ افزایش یابند. در این صورت، ماتریس‌های امپدانس و ادمیتانس شبکه‌های توالی ثابت باقی می‌مانند. لازم به ذکر است که فازورهای فضایی توصیف شده در روابط (۷) تا (۹)، بردارهایی در دستگاه مرجع ساکن هستند که برای انتقال آنها به دستگاه مرجع سنکرون، از تبدیل زیر استفاده می‌شود [۲۵]:

$$F(t) = F_s(t) e^{j\omega_e t} \quad (10)$$

که در آن، $F(t)$ ، بردار فازور فضایی در دستگاه مرجع سنکرون است. در این مقاله از فازورهای فضایی شبه حالت ماندگار برای تحلیل دینامیکی شبکه‌ها، استفاده شده است. لذا، در اینجا برای نشان دادن تفاوت بین فازورهای فضایی سریع و فازورهای فضایی شبه حالت ماندگار، به ذکر مثال ساده‌ای پرداخته می‌شود. شکل (۲)، یک شبکه سه فاز متعادل را نشان می‌دهد. در حالت کلی این شبکه می‌تواند هر شبکه متعادلی، از جمله شبکه‌های توالی مثبت، منفی و یا صفر باشد. شکل (۳)، مدل شبکه شکل (۲) را بر اساس فازورهای فضایی در دستگاه مرجع ساکن، نشان می‌دهد. در این شکل، $V_s(t)$ و $I_s(t)$ ، به ترتیب فازورهای فضایی ولتاژ و جریان در دستگاه مرجع ساکن هستند.



شکل (۲): فرم کلی یک شبکه سه فاز متعادل

بر اساس این شکل، می‌توان نوشت:

$$V_s(t) = r.I_s(t) + l \frac{dI_s(t)}{dt} \quad (11)$$

$$\dot{\psi}_{kd} = -\omega_e r_{kd} i_{kd} \quad (21)$$

$$\dot{\psi}_q = -\omega_e \omega \psi_d + \omega_e v_q + \omega_e r_s i_q \quad (22)$$

$$\dot{\psi}_{kq1} = -\omega_e r_{kq1} i_{kq1} \quad (23)$$

$$\dot{\psi}_{kq2} = -\omega_e r_{kq2} i_{kq2} \quad (24)$$

متغیرهای حالت فوق، شامل شارهای پیوندی و ولتاژ ورودی سیستم تحریک ژنراتور سنکرون می‌باشند [۲۶]. برای حل معادلات

دیفرانسیل فوق، بایستی ولتاژهای ترمینال V_t^+ و V_t^- ، به دستگاه مرجع روتور انتقال یابند. روابط (۲۰) و (۲۱) چگونگی این انتقال را نشان می‌دهند:

$$V_t^{r+} = V_t^+ e^{-j\delta} \quad (25)$$

$$V_t^{r-} = V_t^- e^{-j(2\omega_e t + \delta)} \quad (26)$$

در این روابط V_t^{r+} و V_t^{r-} به ترتیب فازورهای فضایی ولتاژهای توالی مثبت و منفی ترمینال ژنراتور سنکرون در دستگاه مرجع روتور می‌باشند. معادلات (۱۷)–(۲۴) ابتدا به ازای مجموع ولتاژهای V_t^{r+} و V_t^{r-} حل می‌شوند. به عبارتی دیگر در این معادلات:

$$v_d = v_d^+ + v_d^- \quad (27)$$

$$v_q = v_q^+ + v_q^- \quad (28)$$

و سپس متغیرهای حالت ماشین سنکرون بروزسانی می‌شوند. در این حالت جریان خروجی ژنراتور از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$i = L^{-1} \psi \quad (29)$$

که در آن:

$$i = \begin{bmatrix} i_d & i_f & i_{kd} & i_q & i_{kq1} & i_{kq2} \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$L = \begin{bmatrix} \bar{L}_d & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & \bar{L}_q \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$\psi = [\psi_d \quad \psi_f \quad \psi_{kd} \quad \psi_q \quad \psi_{kq1} \quad \psi_{kq2}]^T \quad (32)$$

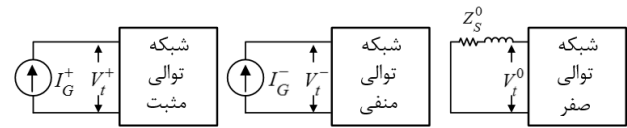
$$\bar{L}_q = \begin{bmatrix} -L_q & L_{aq} & L_{aq} \\ -L_{aq} & L_{kq1} & L_{aq} \\ -L_{aq} & L_{aq} & L_{kq2} \end{bmatrix}, \quad \bar{L}_d = \begin{bmatrix} -L_d & L_{ad} & L_{ad} \\ -L_{ad} & L_f & L_{ad} \\ -L_{ad} & L_{ad} & L_{kd} \end{bmatrix} \quad (33)$$

سپس، فازور فضایی جریان I_G^r ، به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$I_G^r = i_q - j i_d \quad (34)$$

از آنجا که جریان I_G^r ، به ازای مجموع ولتاژهای V_t^{r+} و V_t^{r-} حاصل شده است، لذا، این جریان شامل مولفه‌های توالی مثبت و منفی

جریانی ژنراتور سنکرون را در شبکه‌های توالی مختلف نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، ژنراتور سنکرون در شبکه‌های توالی مثبت و منفی به صورت منابع جریان تزریق شده، مدل گردیده است.



شکل (۴): مدل ژنراتور سنکرون در شبکه‌های توالی مختلف

اما، در شبکه توالی صفر، ژنراتور سنکرون تنها توسط امپدانس سیم‌پیچ استاتور مدل می‌گردد. زیرا، ولتاژهای توالی صفر ترمینال ژنراتور سنکرون، نیروی محرکه الکترومغناطیسی القایی ایجاد نمی‌کنند. چگونگی استخراج مدل منبع جریانی ژنراتورهای سنکرون، برای تحقق روش پیشنهادی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

در وضعیتی که ولتاژهای سه فاز ترمینال ماشین سنکرون نامتعادل باشند، فازور فضایی این ولتاژها به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$V_t = V_t^+ + V_t^- + V_t^0 \quad (14)$$

که در آن V_t فازور فضایی ولتاژهای نامتعادل سه فاز ترمینال ماشین سنکرون و V_t^+ ، V_t^- و V_t^0 به ترتیب فازور فضایی ولتاژهای سه فاز توالی‌های مثبت، منفی و صفر ترمینال ماشین سنکرون هستند. این ولتاژها در دستگاه مرجع سنکرون بوده که برای حل معادلات دینامیکی ماشین می‌بایست با استفاده از تبدیل‌های زیر به دستگاه مرجع روتور ماشین انتقال یابند:

$$V_t^{r+} = V_t^+ e^{-j\delta} = v_q^+ - j v_d^+ \quad (15)$$

$$V_t^{r-} = V_t^- e^{-j(2\omega_e t + \delta)} = v_q^- - j v_d^- \quad (16)$$

در این روابط، δ زاویه بین محورهای متعامد دستگاههای مرجع سنکرون و روتور و ω_e سرعت زاویه‌ای سنکرون است. V_t^{r+} و V_t^{r-} به ترتیب فازور فضایی ولتاژهای سه فاز توالی‌های مثبت و منفی ترمینال ماشین سنکرون در دستگاه روتور می‌باشند. واضح است که در حل معادلات دینامیکی ماشین سنکرون بکار گرفته نمی‌شود. مجموعه معادلات دینامیکی مرتبه کامل ماشین سنکرون در دستگاه مرجع روتور عبارتند از [۲۶]:

$$\dot{\delta} = \omega - \omega_e \quad (17)$$

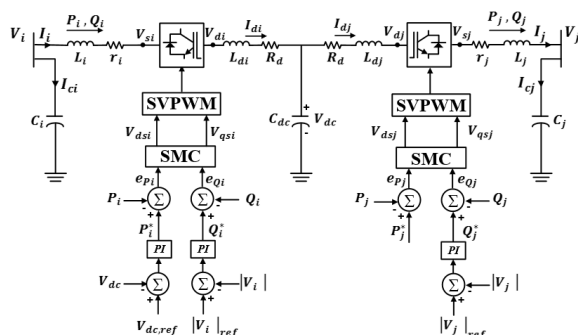
$$\dot{\omega} = \frac{\omega_e}{2H} (T_m - T_e - D.(\omega - \omega_e)) \quad (18)$$

$$\dot{\psi}_d = \omega_e \omega \psi_q + \omega_e v_d + \omega_e r_s i_d \quad (19)$$

$$\dot{\psi}_f = \omega_e v_f - \omega_e r_f i_f \quad (20)$$

$$V_{si} = v_{qsi} - j.v_{dsi}, \quad I_{ci} = i_{cq} - j.i_{cd} \quad (39)$$

در طراحی کنترل‌کننده‌های سمت فرستنده خط HVDC، متغیرهای i_{qi} و i_{di} به عنوان متغیرهای حالت و توان‌های اکتیو (P_i) و راکتیو (Q_i) تزریقی از شین i به خط HVDC به عنوان خروجی‌های کنترل‌کننده در نظر گرفته شده‌اند. در شکل (۵)، P_i^* و Q_i^* مقادیر مرجع توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی از شین فرستنده به خط HVDC می‌باشند. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، مقدار P_i^* از خروجی یک کنترل‌کننده PI حاصل می‌شود که وظیفه کنترل ولتاژ لینک DC (V_{dc}) را بر عهده دارد.



شکل (۵): مدل گسترده خط HVDC

همچنین، مقدار Q_i^* از خروجی یک کنترل‌کننده PI بدست می‌آید که وظیفه کنترل دامنه ولتاژ شین i را بر عهده دارد. برای مبدل سمت گیرنده HVDC هم کنترل‌کننده‌های مشابهی طراحی شده است. متغیرهای حالت این کنترل‌کننده‌ها مولفه مستقیم (i_{dj}) و متعامد (i_{qj}) جریان تزریقی به شین j (I_j) می‌باشند و توان‌های اکتیو (P_j) و راکتیو (Q_j) تزریقی به شین j نیز به عنوان خروجی‌های کنترل‌کننده‌ها در نظر گرفته شده‌اند. در شکل (۵)، P_j^* و Q_j^* مقادیر مرجع توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی به شین گیرنده (شین j) از خط HVDC می‌باشند. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، مقدار P_j^* به صورت دلخواه تعیین می‌گردد (با در نظر گرفتن محدودیت توان انتقالی از لینک DC) و مقدار Q_j^* از خروجی یک کنترل‌کننده PI بدست می‌آید که وظیفه کنترل دامنه ولتاژ شین j را بر عهده دارد. معادلات دینامیکی خط واصل شین i به ورودی مبدل فرستنده خط HVDC عبارتند از:

$$\dot{v}_{qi} = \frac{1}{C_i} (i_{cq} - C_i \cdot \omega_e \cdot v_{di}) \quad (40)$$

$$\dot{v}_{di} = \frac{1}{C_i} (i_{cd} + C_i \cdot \omega_e \cdot v_{qi}) \quad (41)$$

$$\dot{i}_{qi} = \frac{1}{L_i} (-r_i \cdot i_{qi} - l_i \cdot \omega_e \cdot i_{di} + v_{qsi} - v_{qi}) \quad (42)$$

جریان خروجی ژنراتور است. به منظور تجزیه این جریان، به مولفه‌های توالی مثبت و منفی، معادلات دیفرانسیل ژنراتور سنکرون (معادلات (۱۹)-(۲۴))، به ازای ولتاژ V_i^{r+} نیز حل و مقادیر متغیرهای حالت ماشین سنکرون محاسبه می‌گردند. سپس، با استفاده از این مقادیر متغیرهای حالت، فازور فضایی I_G^{r+} بدست می‌آید. I_G^{r+} فازور فضایی جریان خروجی ژنراتور در شبکه توالی مثبت است، چون این جریان به ازای ولتاژ توالی مثبت V_i^{r+} بدست آمده است. در انتها، با استفاده از رابطه (۳۵)، می‌توان فازور فضایی جریان‌های توالی منفی خروجی ژنراتور را محاسبه نمود:

$$I_G^{r-} = I_G^r - I_G^{r+} \quad (35)$$

به این ترتیب، فازورهای فضایی جریان‌های توالی مثبت و منفی ژنراتورها محاسبه می‌شوند. در رابطه (۳۵)، بالانویس "r" نشانگر این است که جریان‌های فوق در دستگاه مرجع روتور هستند. لذا برای بکار گرفتن آنها در محاسبات شبکه، این جریان‌ها بایستی به دستگاه مرجع سنکرون انتقال یابند. روابط (۳۶) و (۳۷)، با استفاده از تبدیل نمایشی دستگاه‌های مرجع، این انتقال را انجام می‌دهند.

$$I_G^+ = I_G^{r+} e^{j\delta} \quad (36)$$

$$I_G^- = I_G^{r-} e^{j(2\omega_e t + \delta)} \quad (37)$$

که در این رابطه، I_G^+ و I_G^- فازورهای فضایی جریان‌های توالی ژنراتور در دستگاه مرجع سنکرون هستند. با محاسبه I_G^+ و I_G^- ، مدل منبع جریانی ژنراتور سنکرون در شکل (۴) محقق می‌گردد.

۳-۲- مدل سازی خطوط HVDC

در این مطالعه فرض شده است که شبکه دارای یک خط HVDC باشد. در شکل (۵) مدل گسترده یک خط HVDC به همراه کنترل‌های مربوطه به نمایش گذاشته شده است. مبدل‌های طرفین خط از نوع مبدل‌های ولتاژ دوسطحی در نظر گرفته شده‌اند. سویچینگ این مبدل‌ها بر اساس مدولاسیون عرض پالس بردار فضایی (SVPWM) صورت می‌گیرد [۲۷]. کنترل‌کننده‌های اصلی این مبدل‌ها بر اساس تئوری مود لغزشی طراحی شده و تعدادی کنترل‌کننده انتگرال-تناسبی (PI) نیز برای تنظیم متغیرهای ورودی به کنترل‌کننده‌های مود لغزشی در نظر گرفته شده است [۲۸].

با توجه به شکل (۵)، شین‌های i و j به ترتیب شین‌های گیرنده و فرستنده خط HVDC هستند. ولتاژ و جریان شین فرستنده (V_i و I_i)، ولتاژ مبدل HVDC در سمت فرستنده (V_{si}) و جریان خازن فیلتر در سمت فرستنده (I_{ci}) به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$V_i = v_{qi} - j.v_{di}, \quad I_i = i_{qi} - j.i_{di} \quad (38)$$

شبکه توالی منفی این خطوط تنها با جریان بخش خازنی فیلترها مدل می‌شوند. این خطوط در شبکه توالی صفر مشارکتی نخواهند داشت.

۴- روش پیشنهادی

در این بخش، به معرفی روش پیشنهادی برای تحلیل دینامیکی شبکه‌های قدرت در مواجهه با خطاهای سری و موازی، پرداخته می‌شود.

۴-۱- خطاهای موازی

روش ارائه شده، امکان مطالعه دینامیک شبکه‌های قدرت را حین وقوع خطاهای متقارن و نامتقارن موازی شامل: اتصال یک فاز به زمین، اتصال دو فاز به هم، اتصال دو فاز به زمین، اتصال سه فاز به زمین فراهم می‌آورد.

در روش پیشنهادی، نقطه کار شبکه پیش از وقوع خطا تعیین می‌گردد. با وقوع خطا در شبکه، یک شین مجازی در محل خطا در نظر گرفته شده و ماتریس‌های امپدانس شبکه‌های توالی با در نظر گرفتن شین مجازی تشکیل می‌شوند. در شبکه‌های توالی، ژنراتورهای سنکرون و خطوط HVDC توسط فازورهای فضایی منبع جریانی مدل می‌شوند. سپس، با بکارگیری روش‌های معادل‌سازی شبکه‌ها (روش تونن)، مدار معادل شبکه‌های توالی از دید شین مجازی (محل خطا) بدست می‌آید. متناسب با نوع خطا، شبکه‌های توالی در محل خطا اتصال می‌یابند و مولفه‌های توالی جریان خطا محاسبه می‌گردند. با مشخص شدن مولفه‌های توالی جریان خطا، شبکه‌های توالی را جدا کرده و هر مولفه از جریان خطا، به شین مجازی در شبکه توالی مربوطه تزریق می‌گردد. به عنوان مثال، مولفه مثبت جریان خطا به شین مجازی در شبکه توالی مثبت تزریق می‌شود. پس از تزریق جریان خطا به یک شبکه توالی، معادلات ماتریسی امپدانس شبکه‌های توالی، مطابق روابط زیر حل می‌شوند:

$$V^+ = Z^+ . I^+ \quad (49)$$

$$V^- = Z^- . I^- \quad (50)$$

$$V^0 = Z^0 . I^0 \quad (51)$$

که در این روابط، بالانویس‌های (+)، (-) و (0)، به ترتیب توالی‌های مثبت، منفی و صفر را نشان می‌دهند. در این روابط، V ، بردار ولتاژ شینه‌های شبکه توالی، Z ، ماتریس امپدانس شبکه توالی و I ، بردار جریان تزریقی به شینه‌های شبکه توالی است که شامل جریان خطا نیز می‌باشد.

با حل معادلات (۴۹)-(۵۱)، ولتاژهای توالی شینه‌های شبکه به دست می‌آیند. این ولتاژها در دستگاه مرجع سنکرون هستند. برای حل معادلات دینامیکی ژنراتورهای سنکرون، بایستی ولتاژهای توالی مثبت و منفی ترمینال هر ژنراتور طبق روابط (۲۵) و (۲۶) به دستگاه مرجع روتور انتقال یابند.

$$\dot{i}_{di} = \frac{1}{l_i} (-r_i . i_{di} + l_i . \omega_e . i_{qi} + v_{dsi} - v_{di}) \quad (43)$$

در روابط فوق r_i و l_i به ترتیب مقاومت و اندوکتانس معادل خط و ω_e سرعت زاویه‌ای سنکرون شبکه است. سمت گیرنده خط HVDC نیز معادلات دینامیکی مشابهی دارد. با توجه به شکل (۵) معادلات دینامیکی لینک DC را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$V_{di} = V_{dc} + R_d . I_{di} + L_{di} \frac{dI_{di}}{dt} \quad (44)$$

$$V_{dj} = V_{dc} - R_d . I_{dj} - L_{dj} \frac{dI_{dj}}{dt} \quad (45)$$

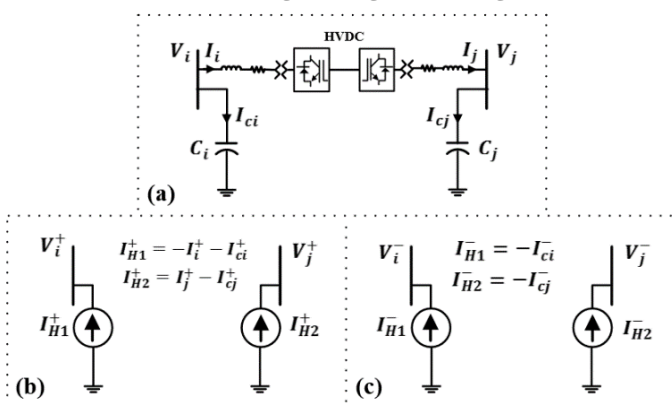
$$C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = I_{di} - I_{dj} \quad (46)$$

در روابط فوق مقادیر جریان‌های I_{di} و I_{dj} در هر گام زمانی از شبیه‌سازی از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$I_{di} = \frac{P_i}{V_{di}} \quad (47)$$

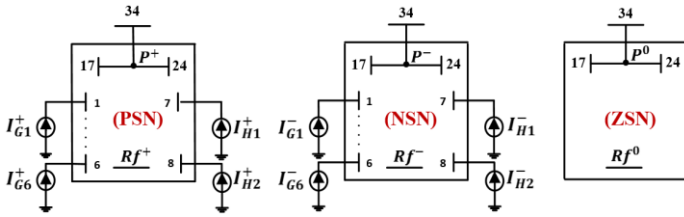
$$I_{dj} = \frac{P_o}{V_{dj}} \quad (48)$$

که در آن، P_i ، توان اکتیو ورودی به مبدل سمت فرستنده HVDC و P_o ، توان اکتیو خروجی از مبدل سمت گیرنده HVDC می‌باشند. خطوط HVDC در شبکه‌های قدرت مدرن دارای مبدل‌های با ظرفیت بسیار بالا هستند. بنابراین، این مبدل‌ها دارای سرعت پایینی بوده و نمی‌توانند عکس‌العمل سریعی در دوره زمانی کوتاه خطا داشته باشند. لذا، در این مطالعه فرض شده است که حین خطا، مبدل‌های این خطوط همانند منابع جریان ثابتی در شبکه توالی مثبت عمل می‌نمایند. شکل (۶) مدل شماتیک یک خط HVDC و مدار معادل آن را در شبکه‌های توالی مثبت و منفی نشان می‌دهد.



شکل (۶): مدل HVDC (a) شماتیک (b) در شبکه توالی مثبت (c) در شبکه توالی منفی

نکته قابل توجه این است که مشارکت خطوط HVDC در شبکه توالی مثبت شامل مجموع جریان‌های مبدل‌ها و خازن‌های فیلتر است و در



شکل (۸): شبکه‌های توالی سیستم شکل (۷)

ماتریس‌های امپدانس شبکه‌های توالی مثبت، منفی و صفر با عناوین Z^+ ، Z^- و Z^0 تشکیل می‌شوند. ابعاد این ماتریس‌ها در مثال فوق 34×34 است. نوع خطا، نحوه اتصال شبکه‌های توالی را در نقطه 'P' تعیین می‌کند. قبل از اتصال شبکه‌های توالی به هم، مدار معادل تونن آنها از دید نقطه 'P' بدست می‌آید. امپدانس‌های تونن دیده شده از دید نقطه 'P' در شبکه‌های توالی، از ماتریس‌های امپدانس به ترتیب زیر قابل محاسبه است:

$$z_{th}^+ = Z^+(34, 34) \quad (52)$$

$$z_{th}^- = Z^-(34, 34) \quad (53)$$

$$z_{th}^0 = Z^0(34, 34) \quad (54)$$

مقدار منابع ولتاژ معادل تونن دیده شده از نقطه 'P' در شبکه‌های توالی با ولتاژ مدار باز شینه ۳۴ در شبکه‌های توالی یکسان است. در این راستا، بردارهای جریان در شبکه‌های توالی مثبت و منفی به صورت زیر تشکیل می‌شوند:

$$I_{34 \times 1}^+ = [I_{G1}^+ \dots I_{G6}^+ I_{H1}^+ I_{H2}^+ 0_{1 \times 26}]^T \quad (55)$$

$$I_{34 \times 1}^- = [I_{G1}^- \dots I_{G6}^- I_{H1}^- I_{H2}^- 0_{1 \times 26}]^T \quad (56)$$

که در این روابط، I_G ها، فازورهای فضایی جریان ژنراتورها در دستگاه مرجع سنکرون و I_H ها، فازورهای فضایی جریان ترمینال‌های طرفین خط HVDC هستند.

با جایگزینی رابطه (۵۵) در (۴۹) و (۵۶) در (۵۰)، ولتاژ شینه‌ها در شبکه‌های توالی بدست می‌آیند. به این ترتیب، مقادیر منابع معادل تونن دیده شده از نقطه 'P' در شبکه‌های توالی مثبت و منفی عبارتند از:

$$E_{th}^+ = \frac{V^+(34, 1)}{\sqrt{2}} \quad (57)$$

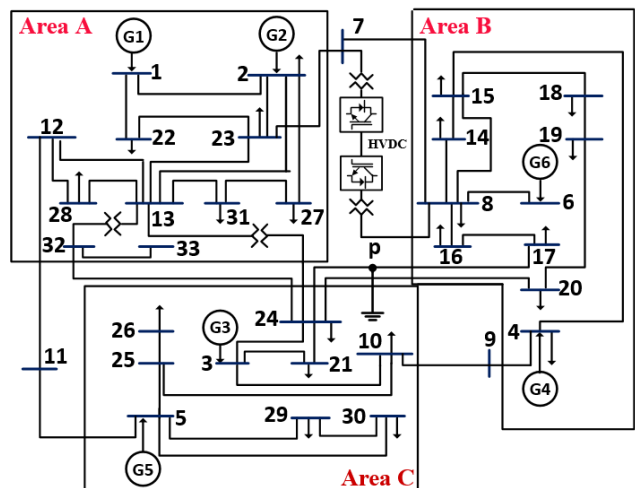
$$E_{th}^- = \frac{V^-(34, 1)}{\sqrt{2}} \quad (58)$$

شکل (۹)، مدار معادل تونن شبکه‌های توالی را از دید نقطه 'P' نشان می‌دهد.

پس از حل معادلات دینامیکی ژنراتورها و خطوط HVDC، جریان‌های توالی ژنراتورهای سنکرون در دستگاه مرجع روتور و جریان‌های توالی خطوط HVDC در دستگاه مرجع سنکرون محاسبه شده و با استفاده از روابط (۳۶) و (۳۷) جریان‌های توالی ژنراتورهای سنکرون به دستگاه مرجع سنکرون انتقال می‌یابند. در اینجا یک گام شبیه‌سازی پایان می‌یابد و گام بعدی شبیه‌سازی، با تزریق جریان ژنراتورها به شبکه‌های توالی مثبت و منفی و محاسبه جریان خطا و تزریق این جریان به شبکه‌های توالی، ادامه می‌یابد.

روند شبیه‌سازی فوق تا زمان برچیده شدن خطا ادامه دارد. با عمل کردن تجهیزات حفاظتی و حذف خطا، شبکه در وضعیت متعادل قرار می‌گیرد. با رفع خطا، شبکه متعادل شده و تنها از شبکه توالی مثبت برای تحلیل دینامیکی آن استفاده می‌گردد. در این دوره زمانی، شرایط اولیه متغیرهای حالت شبکه از مقادیر آنها در پایان دوره خطا به دست می‌آیند.

در اینجا، برای روشن تر شدن روش پیشنهادی، به ذکر یک مثال پرداخته می‌شود. شکل (۷)، شبکه استاندارد ۳۳ شینه IEEE را که شامل یک خط HVDC بین شین‌های ۷ و ۸ است، نمایش می‌دهد.



شکل (۷): شبکه استاندارد ۳۳-شینه IEEE با یک خط HVDC

این شبکه شامل سه ناحیه، ۳۳ شین و ۶ ژنراتور سنکرون است. پیش از وقوع خطا، نقطه کار شبکه محاسبه می‌گردد. با وقوع خطا در نقطه فرضی 'P' (بین شین‌های ۱۷ و ۲۴)، یک شین مجازی در این نقطه با شماره ۳۴ در نظر گرفته می‌شود. شکل (۸)، شبکه‌های توالی سیستم شکل (۷) را نشان می‌دهد. در این شکل، عبارت‌های PSN، NSN و ZSN به ترتیب نشانگر شبکه‌های توالی مثبت، منفی و صفر هستند.

ترمینال ژنراتورها در شبکه‌های توالی مختلف بدست می‌آید. این ولتاژها، در دستگاه مرجع سنکرون بوده که برای حل معادلات دینامیکی ژنراتورها بایستی طبق روابط (۲۵) و (۲۶) به دستگاه مرجع روتور انتقال یابند. پس از حل معادلات دینامیکی ژنراتورها، متغیرهای حالت ژنراتورها برورسانی شده و جریان تولیدی آنها به تفکیک مولفه-های توالی محاسبه می‌گردند.

در اینجا ذکر یک نکته لازم است و آن این است که در این تحقیق، ژنراتور متصل به شین ۱ به عنوان اسلک و با ولتاژ $V_1^+ = 1 \angle 0$ در نظر گرفته شده است. لذا، در هر گام از شبیه‌سازی، با معلوم بودن جریان تولیدی سایر ژنراتورها، جریان تولیدی ژنراتور اسلک (I_{G1}^+)، به راحتی از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$V_1^+ = z_{11} I_{G1}^+ + z_{12} I_{G2}^+ + \dots + z_{16} I_{G6}^+ \quad (62)$$

که در رابطه فوق، z_{ij} ، مولفه سطر i ام و ستون j ام ماتریس امیدانس شبکه توالی مثبت است. مقدار I_{G1}^- از رابطه‌ای مشابه رابطه (۶۲) در شبکه توالی منفی و با ولتاژ $V_1^- = 0$ حاصل می‌شود. به این ترتیب، مراحل شبیه‌سازی خطاهای موازی با روش پیشنهادی، در یک گام زمانی، به پایان می‌رسد. شبیه‌سازی سایر خطاهای موازی (دو فاز به زمین، دو فاز به هم و سه‌فاز)، از روندی مشابه آنچه که در بالا برای خطای تکفاز به زمین توضیح داده شد، قابل انجام است با این تفاوت که نحوه اتصال شبکه‌های توالی (شکل (۱۰))، مطابق نوع خطا تغییر می‌کند. در ادامه، به چگونگی شبیه‌سازی خطاهای سری، با روش پیشنهادی پرداخته می‌شود.

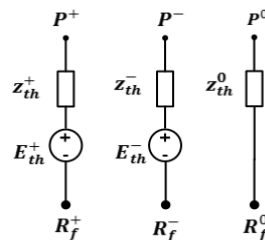
۲-۴ - خطاهای سری

خطاهای سری (پارگی یک یا دو هادی از یک خط انتقال)، معمولاً در شرایط جوی غیرنرمال طوفانی یا بادی و یا در اثر عملکرد مکانیکی ناقص مدارشکن‌های سیستم قدرت، رخ می‌دهند.

با فرض وقوع یک خطای سری در نقطه فرضی 'P' در شکل (۷)، دو شین مجازی با نام‌های 'P1' و 'P2'، به طور جداگانه در محل پارگی خط در نظر گرفته می‌شود. مانند آنچه در بخش خطاهای موازی گفته شد، ابتدا، ماتریس‌های امیدانس شبکه‌های توالی محاسبه می‌گردند. سپس، مدار معادل تونن شبکه‌های توالی، دیده شده از دو سر شین‌های 'P1' و 'P2' بدست می‌آید. امیدانس معادل دیده شده بین سرهای 'P1' و 'P2' در شبکه‌های توالی مختلف از روابط زیر بدست می‌آیند [۲۹]:

$$z_{p_1 p_2}^+ = \frac{-(z^+)^2}{z_{th,mm}^+ - z^+} \quad (63)$$

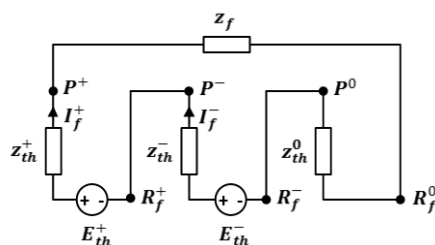
$$z_{p_1 p_2}^- = \frac{-(z^-)^2}{z_{th,mm}^- - z^-} \quad (64)$$



شکل (۹): مدار معادل شبکه‌های توالی شکل (۸) از نقطه 'P'

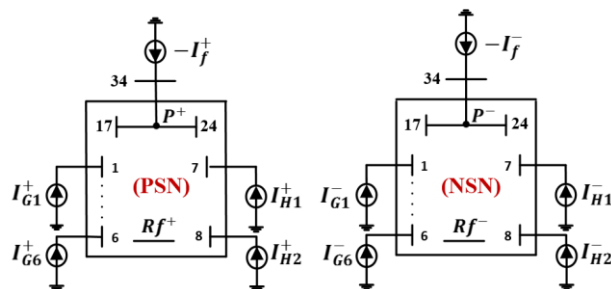
جهت محاسبه مولفه‌های توالی جریان خطا، مدار معادل شبکه‌های توالی در نقطه 'P' اتصال می‌یابند. شکل (۱۰)، نحوه اتصال مدار معادل شبکه‌های توالی را برای یک خطای تکفاز به زمین نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱۰)، مولفه‌های توالی جریان خطا به صورت زیر قابل محاسبه هستند:

$$I_f^+ = I_f^- = I_f^0 = \frac{E_{th}^+ + E_{th}^-}{(z_{th}^+ + z_{th}^- + z_{th}^0 + z_f)} \quad (59)$$



شکل (۱۰): اتصال شبکه‌های توالی برای یک خطای تکفاز به زمین

در رابطه فوق، I_f ، جریان خطا و z_f امیدانس خطاست. با محاسبه مولفه‌های توالی جریان خطا، هر مولفه جریان خطا به صورت یک منبع جریان تزریقی، به شین 'P' در شبکه توالی مربوطه تزریق می‌شود. شکل (۱۱)، چگونگی مدل‌سازی جریان خطا را در شبکه‌های توالی مثبت و منفی نشان می‌دهد.



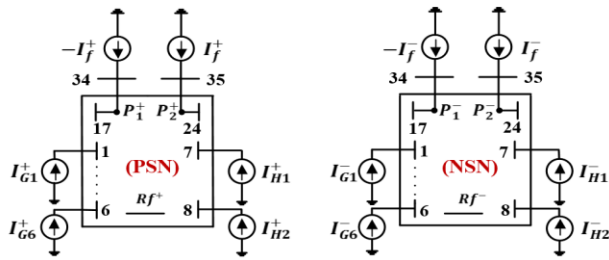
شکل (۱۱): مدل‌سازی جریان خطا در شبکه‌های توالی

جریان خطا در بردار جریان شبکه‌های توالی مثبت و منفی، به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$I_{34 \times 1}^+ = [I_{G1}^+ \dots I_{G6}^+ I_{H1}^+ I_{H2}^+ 0_{1 \times 25} - I_f^+]^T \quad (60)$$

$$I_{34 \times 1}^- = [I_{G1}^- \dots I_{G6}^- I_{H1}^- I_{H2}^- 0_{1 \times 25} - I_f^-]^T \quad (61)$$

با جایگزینی رابطه (۶۰) در (۴۹) و رابطه (۶۱) در (۵۰)، ولتاژ شینه‌ها در شبکه‌های توالی بدست می‌آیند. به این ترتیب، ولتاژ



شکل (۱۲): مدل سازی جریان خطا در شبکه‌های توالی (خطاهای سری)

$$I_{35 \times 1}^+ = [I_{G1}^+ \dots I_{G6}^+ I_{H1}^+ I_{H2}^+ 0_{1 \times 25} - I_f^+ I_f^+]^T \quad (70)$$

$$I_{35 \times 1}^- = [I_{G1}^- \dots I_{G6}^- I_{H1}^- I_{H2}^- 0_{1 \times 25} - I_f^- I_f^-]^T \quad (71)$$

با جایگذاری روابط فوق در روابط (۴۹) و (۵۰)، و حل معادلات ماتریسی شبکه، ولتاژ ترمینال ژنراتورها و خط HVDC در شبکه‌های توالی مختلف بدست می‌آید. این ولتاژها، در دستگاه مرجع سنکرون بوده که برای حل معادلات دینامیکی ژنراتورها بایستی طبق روابط (۲۵) و (۲۶) به دستگاه مرجع روتور انتقال یابند. پس از حل معادلات دینامیکی ژنراتورها و خط HVDC، متغیرهای حالت این تجهیزات بروزسانی شده و جریان خروجی آنها به تفکیک مولفه‌های توالی محاسبه می‌گردند. به این ترتیب، مراحل شبیه‌سازی خطاهای سری با روش پیشنهادی، در یک گام زمانی، به پایان می‌رسد. با روش پیشنهادی، شبیه‌سازی هر دو نوع خطای سری (پارگی یک فاز و پارگی دو فاز)، امکان‌پذیر بوده و تنها اختلاف آنها در نحوه اتصال شبکه‌های توالی است.

۴-۳- الگوریتم روش پیشنهادی

در بخش‌های ۱-۴ و ۲-۴، روند شبیه‌سازی دینامیکی شبکه‌های قدرت در مواجهه با خطاهای سری و موازی شرح داده شد. در این بخش، الگوریتم روش پیشنهادی ارائه می‌گردد. در روش پیشنهادی، معادلات سیستم قدرت به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند که عبارتند از: ۱- معادلات جبری ماتریسی گره شبکه‌های توالی سیستم قدرت؛ ۲- معادلات دینامیکی مدل کامل ماشین‌های سنکرون و خط HVDC. جهت حل همزمان این معادلات، گام زمانی 10^{-4} ثانیه در نظر گرفته شده که معادل با فرکانس نمونه‌برداری ۱۰ کیلوهرتز است.

معادلات دیفرانسیلی ماشین‌های سنکرون و خط HVDC بر اساس روش حل عددی رانگ-کوتا مرتبه ۴ که در محیط برنامه‌نویسی MATLAB نوشته شده، حل می‌گردند. با حل این معادلات و مشخص شدن مقادیر متغیرهای حالت ماشین‌های سنکرون و خط HVDC، مولفه‌های توالی جریان‌های خروجی این تجهیزات محاسبه می‌شوند. با مشخص شدن این جریان‌ها و تزریق آنها در شبکه‌های توالی، معادلات ماتریسی گره این شبکه‌ها حل و ولتاژ ترمینال ژنراتورها در شبکه‌های توالی مختلف بدست می‌آید و در گام بعدی حل

$$z_{p_1 p_2}^0 = \frac{-(z^0)^2}{z_{th, mn}^0 - z^0} \quad (65)$$

که در این روابط، z ، امپدانس خطی است که خطا روی آن اتفاق افتاده و $z_{th, mn}$ ، امپدانس معادل دیده شده از دو سر شین‌های m و n (شین‌های دو طرف خط محل خطا)، می‌باشد. در این روابط، بالانویس-های $(+)$ ، $(-)$ و (0) ، توالی‌های مثبت، منفی و صفر را نشان می‌دهند. $z_{th, mn}^+$ از رابطه (۶۶) قابل محاسبه است:

$$z_{th, mn}^+ = z_{mn}^+ - z_{nn}^+ - 2z_{mn}^+ \quad (66)$$

با استفاده از روابطی مشابه (۶۶)، $z_{th, mn}^0$ و $z_{th, mn}^-$ در شبکه‌های توالی منفی و صفر قابل محاسبه هستند.

بر اساس نوع خطای سری، مدارهای معادل شبکه‌های توالی در نقاط 'P1' و 'P2'، اتصال می‌یابند و مولفه‌های جریان خطا محاسبه می‌شوند. به عنوان مثال، برای یک خطای پارگی دو فاز در نقطه 'P' در شکل (۷)، جریان‌های توالی خطا، به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$I_f^+ = I_f^- = I_f^0 = \frac{E_{th, p_1 p_2}^+ + E_{th, p_1 p_2}^-}{(z_{p_1 p_2}^+ + z_{p_1 p_2}^- + z_{p_1 p_2}^0)} \quad (67)$$

در رابطه (۶۷)، $E_{th, p_1 p_2}^+$ و $E_{th, p_1 p_2}^-$ ، به ترتیب مقادیر منابع ولتاژ معادل تونن دیده شده از سرهای 'P1' و 'P2' در شبکه‌های توالی مثبت و منفی هستند. برای مثال شکل (۷)، مقادیر این منابع از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

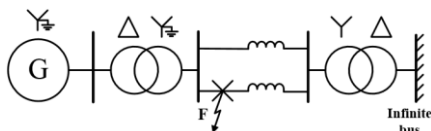
$$E_{th, p_1 p_2}^+ = \frac{V^+(34, 1)}{\sqrt{2}} - \frac{V^+(35, 1)}{\sqrt{2}} \quad (68)$$

$$E_{th, p_1 p_2}^- = \frac{V^-(34, 1)}{\sqrt{2}} - \frac{V^-(35, 1)}{\sqrt{2}} \quad (69)$$

که در این روابط، $V(34, 1)$ و $V(35, 1)$ ولتاژ مدار باز شین‌های ۳۴ و ۳۵ هستند. مولفه‌های جریان خطا به صورت منابع جریان به شبکه‌های توالی مربوطه در نقاط 'P1' و 'P2' تزریق می‌شوند. شکل (۱۲)، مولفه‌های جریان خطا را به صورت منابع جریان تزریق شده به شبکه‌های توالی مثبت و منفی، نشان می‌دهد. مولفه‌های توالی جریان خطا در بردارهای جریان شبکه‌های توالی، به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

۵-۱- سیستم تک ماشین متصل به شین بی‌نهایت

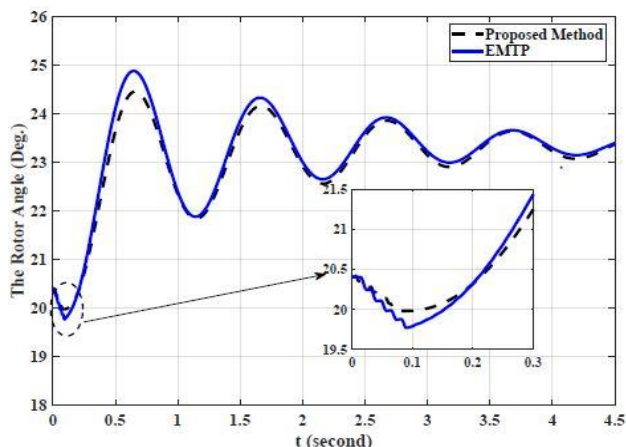
شبکه مورد مطالعه در این حالت، یک سیستم قدرت تک ماشین متصل به شین بی‌نهایت است. شکل (۱۳)، دیاگرام تک خطی سیستم قدرت مربوطه را نشان می‌دهد. اطلاعات کامل شبکه و ژنراتور آن در مرجع [۳۰، مثال ۴-۱۳]، آمده است. هدف این مطالعه، بررسی دقت نتایج تحلیل دینامیکی یک شبکه با روش پیشنهادی است.



شکل (۱۳): دیاگرام تک خطی شبکه تک ماشین متصل به شین بی-نهایت

در این مطالعه، از مدل کامل ژنراتور سنکرون با دو سیم‌پیچ میراساز روی محور q ، و یک سیم‌پیچ میراساز روی محور d ، استفاده شده است. ولتاژ سیستم تحریک ژنراتور ثابت و با کنترل دستی فرض شده است. در این سناریو، فرض بر این است که پیش از زمان $t=0$ s، شبکه در حالت ماندگار است. نقطه کار این شبکه با روش نیوتن-رافسون بدست آمده و مقادیر متغیرهای حالت ژنراتور محاسبه شده‌اند. در زمان $t=0$ s، یک خطای تکفاز به زمین با امپدانس صفر ($Z_f=0$)، در نقطه F اتفاق می‌افتد و در $t=79/3$ ms، با عمل کردن تجهیزات حفاظتی دو طرف خط خطادار، این خط از مدار خارج شده و شبکه بدون این خط به شرایط ماندگار جدید می‌رسد.

نتایج تحلیل دینامیکی این شبکه با روش پیشنهادی و نرم‌افزار EMTP بدست آمده است. نرم‌افزار EMTP از مجموعه نرم‌افزارهای استاندارد شبیه‌ساز در حوزه زمان انتخاب شده است که توانایی تحلیل دینامیکی دقیق سیستم‌های قدرت در حالت سه‌فاز را دارد. شکل (۱۴)، نتایج شبیه‌سازی‌ها را برای زاویه روتور ژنراتور سنکرون نشان می‌دهد.



شکل (۱۴): تغییرات زاویه روتور ژنراتور سنکرون سیستم تک‌ماشین در خطای تکفاز به زمین

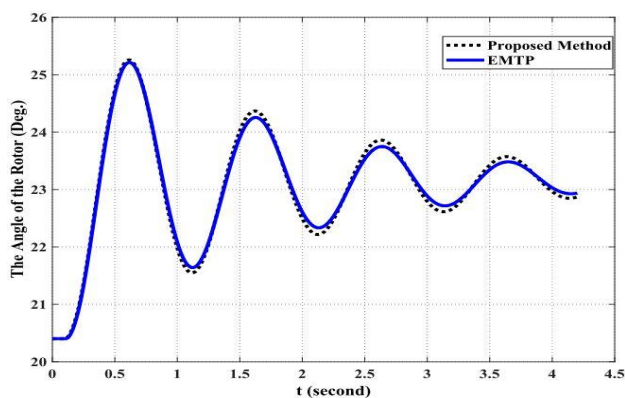
معادلات دینامیکی ماشین‌های سنکرون و خط HVDC بکار گرفته می‌شوند. مراحل گام به گام الگوریتم روش پیشنهادی برای تحلیل دینامیکی شبکه‌های قدرت حین خطا به صورت زیر است:

۱. حل معادلات پخش بار شبکه برای محاسبه نقطه کار سیستم قدرت، ماشین‌های سنکرون و خط HVDC.
۲. تشکیل ماتریس‌های ادمیتانس شبکه‌های توالی.
۳. وارد کردن نوع و محل خطا.
۴. ترمیم ماتریس‌های ادمیتانس شبکه‌های توالی برای در نظر گرفتن شینه (برای خطاهای موازی) یا شینه‌های (برای خطاهای سری) محل وقوع خطا.
۵. تزریق جریان ژنراتورها و HVDC به شینه‌های مرتبط در شبکه‌های توالی (تذکر: حین خطا، جریان هر ژنراتور دارای دو مولفه توالی مثبت و منفی است و مقدار مولفه منفی در گام اول شبیه‌سازی صفر است).
۶. محاسبه مدار معادل تونن شبکه قدرت از دید شینه (برای خطاهای موازی) یا شینه‌های (برای خطاهای سری) محل وقوع خطا و محاسبه مولفه‌های توالی جریان خطا.
۷. تفکیک شبکه‌های توالی و تزریق مولفه‌های توالی جریان ژنراتورها، جریان‌های طرفین خط HVDC و جریان خطا به شینه‌های مربوطه در این شبکه‌ها (شکل‌های (۱۱) و (۱۲)).
۸. حل معادلات ماتریسی گره شبکه‌های توالی برای محاسبه مولفه‌های توالی ولتاژ ترمینال ژنراتورها و خط HVDC (معادلات (۴۹) و (۵۰)).
۹. انتقال مولفه‌های توالی ولتاژ ترمینال هر ژنراتور به دستگاه روتور آن (معادلات (۲۵) و (۲۶)) و حل معادلات دینامیکی کامل ژنراتور در این دستگاه و همچنین حل معادلات دینامیکی خط HVDC.
۱۰. بروزرسانی مقادیر متغیرهای حالت ژنراتورهای سنکرون و خط HVDC و محاسبه مولفه‌های توالی جریان خروجی آنها بر اساس مقادیر جدید متغیرهای حالت این تجهیزات. انتقال مولفه‌های توالی جریان ژنراتورها به دستگاه مرجع سنکرون (معادلات (۳۶) و (۳۷)).
۱۱. در صورت رفع خطا نتایج چاپ شود و در غیر این‌صورت بازگشت به مرحله ۵.

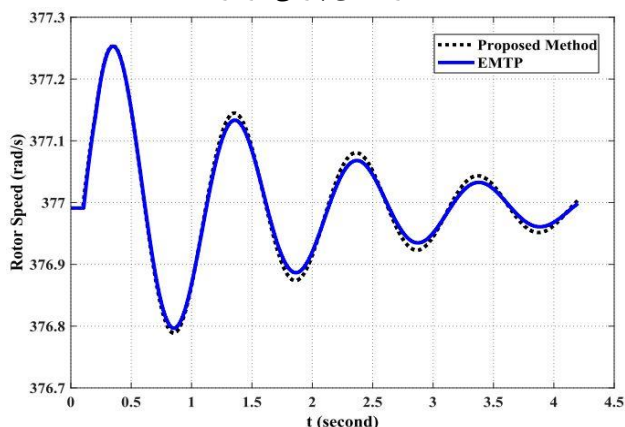
۵- نتایج شبیه‌سازی

بر اساس روش پیشنهادی، نرم‌افزاری در محیط برنامه‌نویسی MATLAB روی یک لپ‌تاپ Core(TM)2 Due، ۳GHz، ۲/۵۳GB و FUJITSU و ۴ گیگا بایت حافظه با دسترسی تصادفی، طراحی و نوشته شده است. در این نرم‌افزار، نقطه کار سیستم قدرت با پخش بار به روش نیوتن-رافسون بدست می‌آید. با استفاده از نقطه کار سیستم قدرت، مقادیر اولیه متغیرهای حالت ماشین‌ها، محاسبه می‌شوند. سپس، شبیه‌سازی دینامیکی شبکه در مواجهه با خطا، با روش گفته شده در بخش ۴ و با گام زمانی 10^{-4} ثانیه، انجام می‌شود.

در ادامه، نتایج شبیه‌سازی‌ها برای یک سیستم تک‌ماشین و یک سیستم چندماشین در مواجهه با خطاهای سری و موازی ارائه شده‌اند.



شکل (۱۶): تغییرات زاویه روتور ژنراتور سنکرون سیستم تک‌ماشینه در خطای پارگی دوفاز



شکل (۱۷): تغییرات سرعت زاویه‌ای روتور ژنراتور سنکرون سیستم تک‌ماشینه در خطای پارگی دوفاز

مقدار شاخص خطای جذر میانگین مربع‌ها برای روش پیشنهادی نسبت به نتایج نرم‌افزار EMTP در شکل‌های (۱۶) و (۱۷) به ترتیب ۰/۰۵۵۱ و ۰/۰۳۶۳ است. به این ترتیب، نتایج شبیه‌سازی این سناریو با روش پیشنهادی هم‌پوشانی مناسبی با نتایج مشابه در نرم‌افزار EMTP دارند. لذا، روش پیشنهادی دارای دقت مناسب جهت تحلیل دینامیکی سیستم تک‌ماشینه در سناریوهای فوق است. در مطالعات فوق، مدت زمان انجام شبیه‌سازی‌ها با روش پیشنهادی نسبت به زمان مشابه در نرم‌افزار EMTP، حدود ۵۰ درصد کمتر بوده است. اما، بهینه‌سازی زمان شبیه‌سازی‌ها نیازمند الگوریتم‌های اجرایی ویژه‌تری است که می‌تواند در گام‌های بعدی این تحقیق انجام شود.

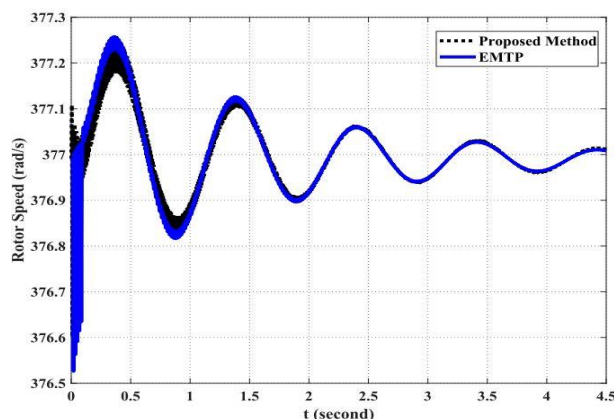
۵-۲- تحلیل دینامیکی خطاهای موازی و سری در

سیستم قدرت ۳۳ شینه IEEE

شکل (۷)، شبکه ۳۳ شینه استاندارد IEEE شامل یک خط HVDC را نشان می‌دهد. اطلاعات پخش بار این شبکه، در وب سایت IEEE و اطلاعات دینامیکی ماشین‌های آن در پیوست ۱ آمده است. در این مطالعه، مدل مرتبه کامل ماشین‌های سنکرون با دو سیم‌پیچ میراساز روی محور q و یک سیم‌پیچ میراساز روی محور d ، در نظر گرفته شده است [۲۶]. پیش از زمان $t=0$ s، شبکه در حالت ماندگار فرض شده و

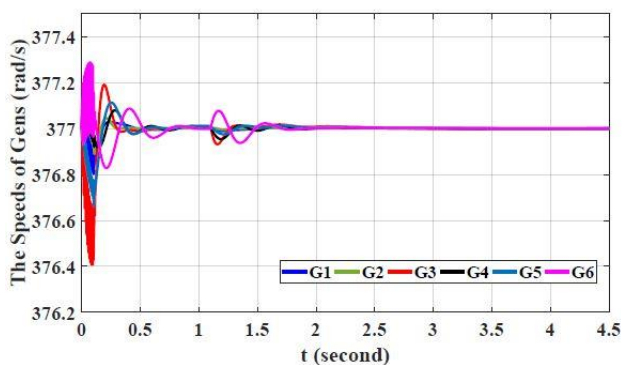
همانطور که در این شکل نشان داده شده است، نتایج شبیه‌سازی برای زاویه روتور ماشین سنکرون با روش پیشنهادی و نرم‌افزار EMTP دارای هم‌پوشانی مناسبی است. جهت سنجش دقت نتایج از شاخص خطای جذر میانگین مربع‌ها (RMSE: Root Mean Square Error) استفاده شده است. در محاسبه این شاخص، خروجی حاصل از نرم‌افزار EMTP به عنوان مرجع در نظر گرفته شده و خطای نتایج حاصل از روش پیشنهادی نسبت به این مرجع سنجیده شده است. مقدار این شاخص برای روش پیشنهادی در شکل (۱۴) ۰/۱۱۸۷ بوده است. به این ترتیب، در سناریوی فوق روش پیشنهادی دارای دقت نتایج مناسبی است. در شکل (۱۵)، نتایج شبیه‌سازی برای سرعت مکانیکی ژنراتور به نمایش گذاشته شده است.

مقدار شاخص خطای جذر میانگین مربع‌ها برای روش پیشنهادی در شکل (۱۵)، ۰/۰۲۵۱ است که نشان دهنده هم‌پوشانی خوب بین نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی و نرم‌افزار EMTP می‌باشد.

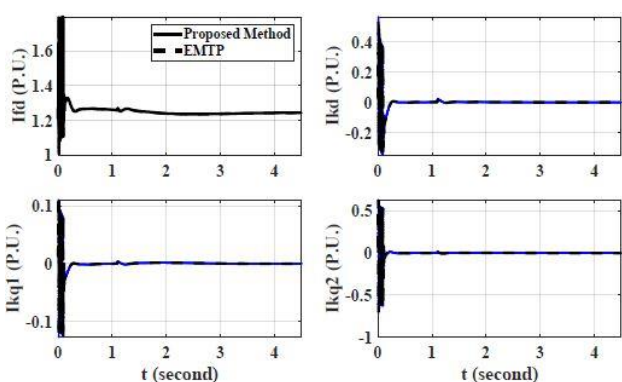


شکل (۱۵): تغییرات سرعت زاویه‌ای مکانیکی ژنراتور سنکرون سیستم تک‌ماشینه در خطای تک‌فاز به زمین

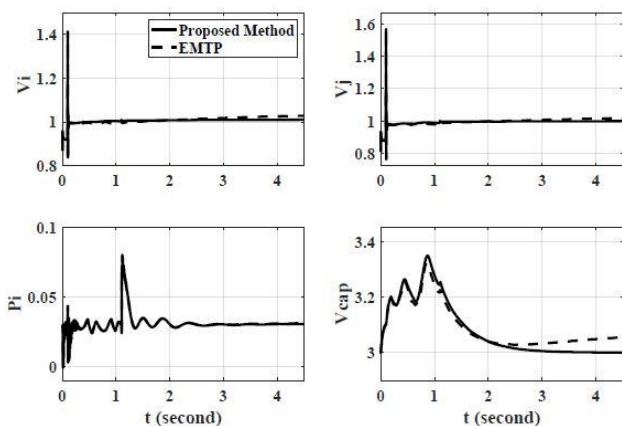
در ادامه، مطالعه دیگری با هدف ارزیابی دقت روش پیشنهادی در تحلیل دینامیکی خطاهای سری، انجام شده است. در این مطالعه، به تحلیل دینامیکی شبکه شکل (۱۳)، در مواجهه با یک خطای پارگی دو فاز در نقطه F ، پرداخته شده است. فرض شده که شبکه قبل از زمان $t=0$ s در حالت ماندگار است. لذا، نقطه کار شبکه محاسبه و مقادیر متغیرهای حالت ژنراتورها بدست می‌آیند. در زمان $t=0$ s، یک خطای پارگی دو فاز در نقطه F اتفاق می‌افتد و در $t=79/3$ ms، با عمل کردن تجهیزات حفاظتی دو طرف خط خطادار، این خط از مدار خارج شده و شبکه بدون این خط به شرایط ماندگار جدید می‌رسد. نتایج تحلیل دینامیکی شبکه در شرایط فوق با روش پیشنهادی و نرم‌افزار EMTP بدست آمده است. شکل‌های (۱۶) و (۱۷)، به ترتیب نتایج شبیه‌سازی‌ها را برای زاویه و سرعت روتور ژنراتور سنکرون نشان می‌دهند.



شکل (۱۹): تغییرات سرعت زاویه‌ای روتور ژنراتورهای سنکرون سیستم ۳۳ شینه در خطای تکفاز به زمین



شکل (۲۰): تغییرات جریان سیم‌پیچ‌های میراکننده و تحریک ژنراتور سنکرون ۳ در سیستم ۳۳ شینه در خطای تکفاز به زمین



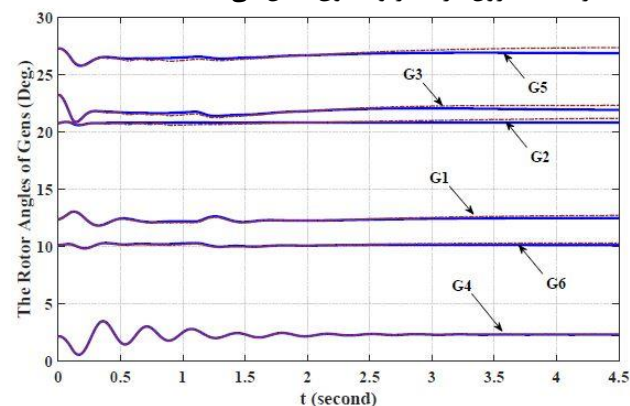
شکل (۲۱): شکل موج‌های مربوط به خط HVDC در سیستم ۳۳ شینه در خطای تکفاز به زمین

در شکل (۲۰)، جریان سیم‌پیچ‌های میراکننده و میدان ژنراتور سنکرون ۳، به نمایش گذاشته شده است. شکل (۲۰)، قابلیت مدل‌سازی گذراهای سیم‌پیچ‌های میراکننده و میدان ژنراتور را با روش پیشنهادی نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، هنگام بروز خطا، جریان‌های گذرای در سیم‌پیچ‌های میراکننده

پخش بار شبکه با روش نیوتن رافسون انجام شده است. مقدار اولیه متغیرهای حالت ژنراتورهای سنکرون با استفاده از نتایج پخش بار و معادلات دینامیکی ماشین در حالت ماندگار محاسبه شده‌اند. فرض شده است که در $t=0$ ، یک خطای نامتقارن در وسط خط واصل شین-های ۱۷ و ۲۴ رخ می‌دهد.

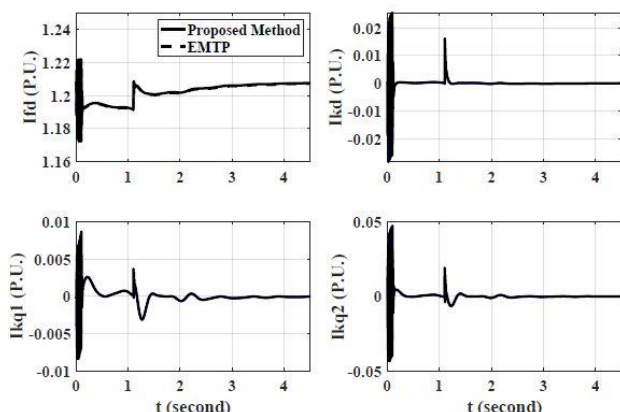
با وقوع خطا، یک (یا دو) شین مجازی در محل وقوع خطا در نظر گرفته شده و ماتریس‌های ادمیتانس و امپدانس شبکه‌های توالی محاسبه می‌گردند. سپس، بردارهای توالی جریان تزریقی به شینه‌ها در شبکه‌های توالی مثبت و منفی مشخص می‌شوند. لازم به ذکر است که بردار جریان در شبکه توالی مثبت در لحظه وقوع خطا با بردار جریان تزریقی ژنراتورها و خط HVDC پیش از وقوع خطا (حالت ماندگار) یکسان بوده و بردار جریان توالی منفی صفر است. سایر مراحل تحلیل دینامیکی شبکه حین خطا، مطابق روش پیشنهادی در بخش ۴، انجام گرفته است. با فرض عمل کردن تجهیزات حفاظتی در زمان $t=0/1$ ، خط فوق از مدار خارج شده و پس از رفع عیب در مدت زمان ۱ ثانیه در $t=1/1$ ، خط فوق مجدداً در مدار قرار می‌گیرد. تحلیل دینامیکی شبکه برای خطاهای تکفاز به زمین و پارگی دو فاز با روش پیشنهادی و نرم‌افزار EMTP انجام و نتایج مقایسه شده است.

خطای تکفاز به زمین: شکل (۱۸)، نتایج شبیه‌سازی زاویه روتور ژنراتورهای سنکرون را در مواجهه با خطای تکفاز به زمین با روش پیشنهادی و نرم‌افزار EMTP نشان می‌دهد. مقایسه نتایج در شکل (۱۸) حاکی از هم‌پوشانی خوب نتایج روش پیشنهادی با نرم‌افزار EMTP است. مقدار شاخص خطای جذر میانگین مربع‌ها برای نتایج روش پیشنهادی در مقایسه با نتایج نرم‌افزار EMTP به طور میانگین $0/13$ بوده است. اینجا، فرض شده است که ژنراتورهای سنکرون به پایدارسازهای سیستم قدرت (PSS)، مجهز هستند. همانطور که در این شکل‌ها دیده می‌شود، پس از برطرف شدن خطا و در مدار گرفتن مجدد خط، نقطه کار شبکه به شرایط پیش از خطا برمی‌گردد. شکل (۱۹) نتایج سرعت زاویه‌ای ژنراتورهای سنکرون و بازگشت ژنراتورها را به شرایط سنکرون در سناریوی فوق نشان می‌دهد.



شکل (۱۸): تغییرات زاویه روتور ژنراتورهای سنکرون سیستم ۳۳ شینه در خطای تکفاز به زمین (خطوط پیوسته: روش پیشنهادی - خطوط گسسته: EMTP)

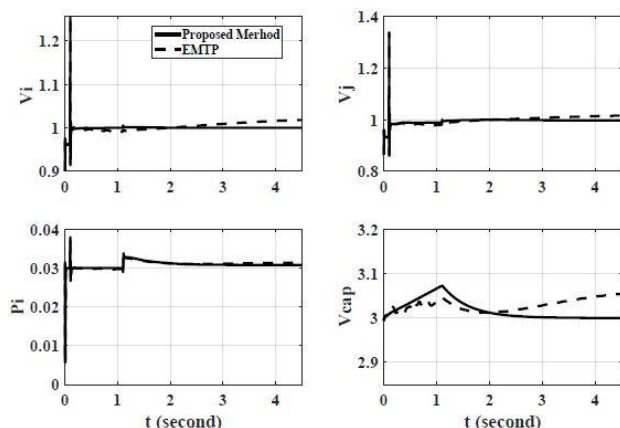
میراکننده و میدان ژنراتور سنکرون ۳، در مواجهه با خطای پارگی دوفاز، به نمایش گذاشته شده است.



شکل (۲۴): تغییرات جریان سیم‌پیچ‌های میراکننده و تحریک ژنراتور سنکرون ۳ در سیستم ۳۳ شینه در خطای پارگی دوفاز

تغییرات جریان کمتر در سیم‌پیچ‌های میراکننده در شکل (۲۴) نسبت به مقادیر مشابه در شکل (۲۰)، نشانگر شدت کمتر اثر خطای پارگی دوفاز نسبت به خطای تکفاز به زمین است.

شکل (۲۵)، نتایج شکل موج‌های مرتبط به HVDC را در این سناریو نشان می‌دهد که در آن هم‌پوشانی مناسب نتایج روش پیشنهادی و نرم‌افزار EMTP مشهود است.



شکل (۲۵): شکل موج‌های مربوط به خط HVDC در سیستم ۳۳ شینه در خطای پارگی دوفاز

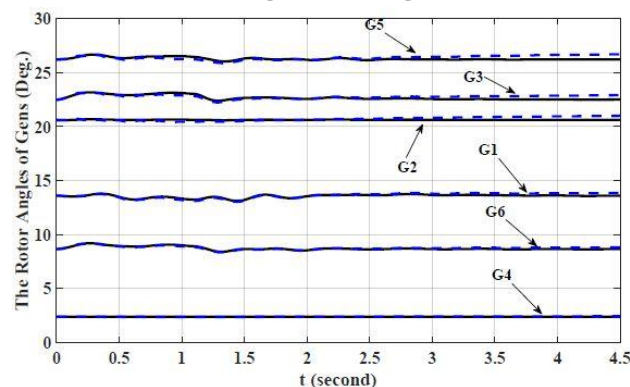
۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، با بکارگیری مفهوم فازورهای فضایی در شبکه‌های توالی و استفاده از تکنیکی ابتکاری در تفکیک جریان‌های توالی خروجی ژنراتورها، بر محدودیت‌های روش‌های مبتنی بر شبکه‌های توالی در تحلیل دینامیکی شبکه‌های قدرت غلبه شده است. با استفاده از روش پیشنهادی، امکان مدل‌سازی کامل ماشین سنکرون و مطالعه دینامیک‌های شبکه‌های توالی در مواجهه با خطاهای نامتقارن موازی و

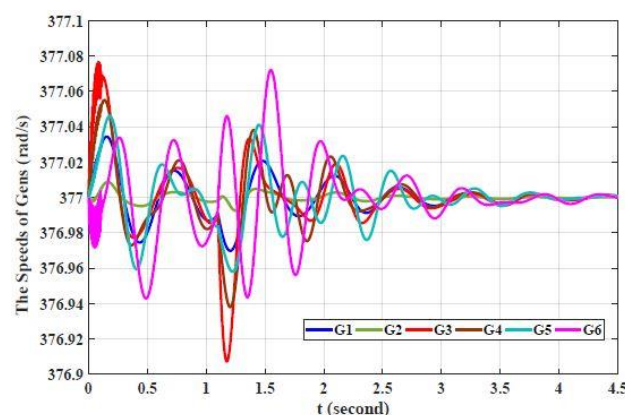
به وجود می‌آید و با برطرف شدن خطا مقدار این جریان‌ها به صفر می‌رسد.

شکل (۲۱) تعدادی از شکل موج‌های مرتبط با HVDC را به نمایش گذاشته است. این موج‌ها شامل دامنه ولتاژهای شین‌های طرفین خط HVDC (V_i و V_j)، توان اکتیو (P_i) عبوری از این خط و ولتاژ خط DC (V_{cap}) می‌باشند. همه متغیرها بر حسب پریونیت می‌باشند. خطوط پیوسته نتایج بدست آمده با روش پیشنهادی و خطوط چین نتایج بدست آمده با نرم‌افزار EMTP همانطور را نشان می‌دهند. این شکل حاکی از صحت نتایج بدست آمده با روش پیشنهادی است.

خطای پارگی دوفاز: شکل‌های (۲۲) و (۲۳)، به ترتیب نتایج شبیه‌سازی‌ها برای زاویه و سرعت زاویه‌ای روتور ژنراتورهای سنکرون را در مواجهه با خطای پارگی دوفاز نشان می‌دهند.



شکل (۲۲): تغییرات زاویه روتور ژنراتورهای سنکرون سیستم ۳۳ شینه در خطای پارگی دوفاز (خطوط پیوسته: روش پیشنهادی - خطوط گسسته: EMTP)



شکل (۲۳): تغییرات سرعت زاویه‌ای روتور ژنراتورهای سنکرون سیستم ۳۳ شینه در خطای پارگی دوفاز

مقایسه این شکل‌ها با شکل‌های مشابه در حالت خطای تکفاز به زمین (شکل‌های (۱۸) و (۱۹))، نشان می‌دهد که خطای تکفاز به زمین نسبت به خطای پارگی دوفاز باعث انحراف بیشتر نقطه کار ژنراتورها می‌شود. این موضوع از قبل هم قابل پیش‌بینی بود و حاکی از نتایج قابل اعتماد روش پیشنهادی است. در شکل (۲۴)، جریان سیم‌پیچ‌های

جدول پ-۲، شامل مقادیر پارامترهای دینامیکی ماشین‌های سنکرون شبکه‌ی استاندارد ۳۳ شینه‌ی IEEE می‌باشد. اطلاعات پخش بار این شبکه نیز در وب سایت IEEE موجود است.

مراجع

- [1] A. M. Stankovic, T. Aydin, "Analysis of asymmetrical faults in power systems using dynamic phasors," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 15, no. 3, pp. 1062–1068, 2000.
- H. W. Dommel, "Digital computer solution of electromagnetic transients in single-and multiphase networks," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-88, no. 4, pp. 388-399, 1969.
- PSCAD manual, Manitoba HVDC Research Center, Available at: <http://www.pscad.com>.
- [2] E. Johansson, Detail description of synchronous machine models used in SIMPOW, Master's Thesis, Dept. Elect. Eng., Royal Inst. Technology Stockholm, Sweden, 2002.
- Plexim, PLECS user manual-high-speed simulations of electrical and power electronic circuits under MATLAB/SIMULINK, <http://www.plexim.com>, 2007.
- M. A. Hannan, K. W. Chan, "Modern power systems transient studies using dynamic phasor models," IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON 2004), pp. 1469-1473, Singapore, 21-24 November 2004.
- S. Henschel, Analysis of electromagnetic under electromechanical power system transients with dynamic phasors, Ph.D. Dissertation, University of British Columbia, 1999.
- V. Venkatasubramanian, "Tools for dynamic analysis of the general large power system using time-varying phasors," International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 16, no. 6, pp. 365-376, 1994.
- [3] P. Kundur, N. J. Balu, and M. G. Lauby, Power System Stability and Control, The EPRI Power System Engineering Series, New York: McGraw-Hill, 1994.
- [۱۰] رضا همتی، حمید رضا کوفیگر و محمد عطایی، کنترل کننده تطبیقی مدل مرجع بهبود یافته نرمالیزه شده برای UPFC، مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال ۱۲، شماره ۱، صفحات ۱۳۹-۱۵۳، بهار و تابستان ۱۳۹۴.
- [۱۱] عبدالله یونسی، حسین شایقی، عادل اکبری مجد و یاشار هاشمی، طراحی پایدار ساز PSS3B بر اساس الگوریتم KH و Q-Learning برای میراسازی نوسانات فرکانس پایین سیستم قدرت تک‌ماشینه، مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال ۱۴، شماره ۳، صفحات ۶۹-۷۷، پاییز ۱۳۹۶.
- [12] S. Saha and M. Aldeen, "Dynamic modeling of power systems experiencing faults in transmission/distribution networks," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 30, no. 5, pp. 2349–2363, 2015.
- [13] P. Mattavelli, G. C. Verghese, and A. M. Stankovic, "Phasor dynamics of thyristor-controlled series capacitor systems," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 12, no. 3, pp. 1259–1267, 1997.
- [14] P. C. Stefanov and A. M. Stankovic, "Modeling of UPFC operation under unbalanced conditions with dynamic phasors," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 17, no. 2, pp. 395–403, 2002.
- [15] T. Yang, S. Bozhko, J. Mark, L. Peucedic, G. Asher and C. I. Hill, "Dynamic phasor modeling of multi-generator variable frequency electrical power systems," IEEE

سری فراهم آمده است. در این روش، اندوکتانس‌های ژنراتور سنکرون در مواجهه با فرکانس‌های ω_e و $2\omega_e$ (ناشی از ولتاژهای توالی منفی و صفر ترمینال ماشین)، دیگر تابعی از موقعیت زاویه‌ای روتور نیستند. نتایج شبیه‌سازی‌ها برتری دقت روش پیشنهادی نسبت به روش‌های حل در حوزه فازوری را نشان می‌دهند.

برتری‌های ویژه روش پیشنهادی نسبت به روش‌های موجود عبارتند از: ۱- سهولت بکارگیری و تعمیم آن به تحلیل دینامیکی شبکه‌های قدرت با ابعاد بزرگ در مواجهه با انواع خطاها؛ ۲- نظر به اینکه، در این روش ژنراتورهای سنکرون به صورت منابع جریان مدل می‌شوند، لذا می‌توان به راحتی سایر تجهیزات کنترلی سیستم قدرت نظیر ادوات FACTS و HVDC را به صورت منابع جریان مدل کرد و رفتار سیستم قدرت مجهز به این ادوات را در مواجهه با انواع خطاها تحلیل دینامیکی نمود؛ ۳- همچنین، سیستماتیک بودن روش پیشنهادی، امکان تحلیل دینامیکی شبکه‌های قدرت را در مواجهه با خطاهای همزمان یا متوالی فراهم می‌آورد؛ ۴- ایجاد بینشی بهتر راجع به دینامیک‌های شبکه در مواجهه با خطاهای نامتقارن که می‌تواند منجر به طراحی کنترل‌کننده‌های پایدار ساز کامل‌تری گردد.

پیوست ۱

اطلاعات شبکه‌های مورد مطالعه

الف - شبکه تک‌ماشینه متصل به شین بی‌نهایت [۳۰]

جدول پ-۱ شامل مقادیر راکتانس‌های خطوط انتقال و ترانسفورماتورهای شبکه‌ی تک‌ماشینه متصل به شین بی‌نهایت است. مقادیر این پارامترها در مبنای ۱۰۰ مگاوات آمپر (توان ظاهری مینا) و ۲۰ کیلو ولت (ولتاژ مینا) می‌باشند.

جدول پ-۱: مقادیر راکتانس خطوط و ترانسفورماتورهای شبکه تک‌ماشینه

پارامتر تجهیز	X0	X1
ترانسفورماتور متصل به ماشین	۰/۱۵	۰/۱۵
ترانسفورماتور متصل به شین بی‌نهایت	۰/۱	۰/۱
خط ۱	۱/۸	۰/۶
خط ۲	۱/۸	۰/۶

در شبکه‌ی فوق، مقادیر پارامترهای دینامیکی ماشین سنکرون به صورت زیر هستند:

$$X_d = 1/11, X_q = 1/76, X'_d = 0/3, X'_q = 0/65,$$

$$X''_d = 0/25, X''_q = 0/25, X_0 = 0/4, X_2 = 0/25,$$

$$R_d = 0/03, R_2 = 0/63, R_0 = 0/05, T_{do} = 8 \text{ s}$$

$$T'_{qo} = 1 \text{ s}, T''_{do} = 0/3 \text{ s}, T''_{qo} = 0/7 \text{ s}, H = 3/5, K_D = 0/$$

ب- شبکه استاندارد ۳۳ شینه IEEE

جدول پ- (۲): مقادیر پارامترهای دینامیکی ماشین‌های سنکرون

شبکه استاندارد ۳۳ شینه IEEE

ژنراتور پارامتر	G1	G2	G3	G4	G5	G6
<i>MVA</i>	۱۶۰	۷۵	۷۵	۸۶	۷۵	۸۶
<i>Xls</i>	۰/۱۱	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۱۴	۰/۰۷	۰/۱۴
<i>Xd</i>	۱/۷۰	۱/۰۵	۱/۰۵	۱/۰۵	۱/۰۵	۱/۰۵
<i>X'd</i>	۰/۲۴۵	۰/۱۸۵	۰/۱۸۵	۰/۳۲۰	۰/۱۸۵	۰/۳۲۰
<i>X''d</i>	۰/۱۸۵	۰/۱۳۰	۰/۱۳۰	۰/۲۵۸	۰/۱۳۰	۰/۲۵۸
<i>T'do</i>	۵/۹۰	۶/۱۰	۶/۱۰	۴/۰	۶/۱۰	۴/۰
<i>T''do</i>	۰/۰۳۳	۰/۰۳۸	۰/۰۳۸	۰/۰۵۱	۰/۰۳۸	۰/۰۵۱
<i>Xq</i>	۱/۶۴	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۳۰۶	۰/۹۸	۰/۳۰۶
<i>X'q</i>	۰/۳۸۰	۰/۳۶۰	۰/۳۶۰	۰/۶۷۰	۰/۳۶۰	۰/۶۷۰
<i>X''q</i>	۰/۱۸۵	۰/۱۳۰	۰/۱۳۰	۰/۶۷۰	۰/۱۳۰	۰/۶۷۰
<i>T'qo</i>	۱/۵۰	۰/۳۰	۰/۳۰	-	۰/۳۰	-
<i>T''qo</i>	۰/۲۱۸	۰/۰۹۹	۰/۰۹۹	۰/۰۳۳	۰/۰۹۹	۰/۰۳۳
<i>KA</i>	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
<i>TA</i>	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰

- Transactions on Power Systems, vol. 31, no. 1, pp. 563-571, 2016.
- [16] S. Chandrasekar and R. Gokaraju, "Dynamic phasor modeling of type 3 DFIG wind generators (including SSCI phenomenon) for short-circuit calculations," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 30, no. 2, pp. 887-897, 2015.
- [17] A. M. Stankovic, B. C. Lesieutre, and T. Aydin, "Applications of generalized averaging to synchronous and induction machines," Presented at the 28th North American Power Symp. M.I.T, Cambridge, MA, USA, Nov. 1996.
- [18] T. Demiray, F. Milano, and G. Andersson, "Dynamic phasor modeling of the doubly-fed induction generator under unbalanced conditions," in Proc. IEEE Power Tech, Lausanne, Switzerland, pp. 1049-1054, 2007.
- [19] A. M. Stankovic, B. C. Lesieutre, and T. Aydin, "Modeling and analysis of single-phase induction machines with dynamic phasors," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 14, no. 1, pp. 9-14, 1999.
- [20] A. M. Stankovic, S. R. Sanders, and T. Aydin, "Dynamic phasors in modeling and analysis of unbalanced polyphase ac machines," IEEE Transactions on Energy Conversions, vol. 17, no. 1, pp. 107-113, 2002.
- [21] T. Demiray, Simulation of power system dynamics using dynamic phasor models, Ph.D. Dissertation, Swiss Fed. Inst. Technol., Zurich, Switzerland, 2008.
- [22] Sh. Shojaeian, J. Soltani, and Gh. Arab Markadeh, "Damping of low frequency oscillations of multi-machine multi-UPFC power systems, based on adaptive input-output feedback linearization control," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 27, no. 4, pp. 1831-1840, 2012.
- [23] M. R. Shakarami, A. Samanfar, J. Soltani, and E. Rokrok, "Dynamic Analysis of Multi-machine Power Systems Facing Symmetrical and Asymmetrical Simultaneous Faults," Iran J Sci Technol Trans Electr Eng vol. 43, pp. 461-474, 2019.
- [24] Peter Vas, Vector control of AC machines, Clarendon Press, 1990.
- [25] P. C. Krause and C. H. Thomas, "Simulation of symmetrical induction machinery," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 84, no. 11, pp. 1038-1053, 1965.
- [26] P. C. Krause, Analysis of electric machine, McGraw-Hill, New York 1986.
- [27] B. Wang, J. J. Cathey, DSP-controlled, space-vector PWM, current source converter for STATCOM application, Electric Power System Research, vol. 67, pp. 123-131, 2003.
- [۲۸] امین سامان‌فر، محمود رضا شاکرمی، جعفر سلطانی زمانی و اسماعیل رک رک، بهبود پایداری گذرا و دینامیکی شبکه‌های مدرن قدرت شامل ادوات FACTS و خطوط HVDC در مواجهه با خطاهای متقارن و نامتقارن سری و موازی، پایان‌نامه برای اخذ درجه دکتری، دانشگاه لرستان، لرستان، صفحات ۸۵-۱۰۳، بهمن ۱۳۹۷.
- [29] J. J. Grainger, W. D. Stevenson, Power system analysis, New York, McGraw-Hill, 1994.
- [30] P. Kundur, Power system stability and control, McGraw-Hill, 1994.