مدل‌سازی پدیده‌های گذرای در خطوط انتقال قدرت با تأکید بر تأثیرات نوسانات فرکانس و ولتاژ

دانشجو: رضایی

چکیده

پدیده‌های گذرا در خطوط انتقال قدرت یکی از موضوعات اساسی در مهندسی برق محسوب می‌شوند که می‌توانند به دلایلی همچون وقوع خطاهای الکتریکی، برخورد صاعقه، تغییرات بار یا قطع و وصل ناگهانی تجهیزات رخ دهند. این پدیده‌ها باعث تغییرات شدید و ناگهانی در ولتاژ و جریان می‌شوند و می‌توانند به تجهیزات حیاتی شبکه‌های برق از جمله ترانسفورماتورها، عایق‌ها و تجهیزات حفاظتی آسیب جدی وارد کنند. شناسایی و مدل‌سازی دقیق این پدیده‌ها برای درک رفتار شبکه تحت شرایط بحرانی و جلوگیری از خسارات ناشی از آن‌ها ضروری است. درک صحیح اثرات نوسانات فرکانس و ولتاژ در این شرایط، به‌ویژه در خطوط انتقال بلند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این تحقیق مدل‌سازی پدیده‌های گذرای در خطوط انتقال قدرت با تأکید بر تأثیرات نوسانات فرکانس و ولتاژ می باشد. روش تحقیق در این مطالعه به شرح زیر است: ابتدا داده‌های تاریخی و زمان‌واقعی شامل پارامترهای مرتبط با پدیده‌های گذرا مانند فرکانس، ولتاژ، بار مصرفی، و دما از منابع معتبر جمع‌آوری می‌شوند. سپس این داده‌ها با استفاده از MATLAB پیش‌پردازش و تمیزسازی می‌شوند که شامل حذف نویز و داده‌های پرت و نرمال‌سازی مقادیر است. پس از پیش‌پردازش، داده‌ها به کمک ابزارهای مختلف MATLAB مورد تجزیه و تحلیل اکتشافی قرار می‌گیرند تا الگوها و همبستگی‌های موجود شناسایی شوند. در مرحله بعد، بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، الگوریتم‌های تحلیل و مدل‌سازی با استفاده از روش‌های آماری و یادگیری ماشین طراحی و در محیط MATLAB پیاده‌سازی می‌شوند. در نهایت، مدل‌ها با استفاده از داده‌های آزمایشی آزمون و اعتبارسنجی شده و عملکرد آن‌ها با ابزارهایی مانند cross-validation و ماتریس درهم‌ریختگی ارزیابی می‌شود. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که عوامل اصلی بروز نوسانات فرکانس و ولتاژ در شبکه‌های انتقال قدرت شامل تغییرات ناگهانی بار، اختلالات در تولید و ناسازگاری منابع تولید پراکنده با شبکه می‌باشند. ضریب همبستگی منفی بین تغییرات بار مصرفی و فرکانس (-۰.۵۵) و همچنین ولتاژ (-۰.۴۳) نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه این تغییرات بر پایداری سیستم است. علاوه بر این، وابستگی مثبت و بالای بین فرکانس و ولتاژ (۰.۸۵) بر تأثیرات متقابل این دو پارامتر تأکید دارد و اهمیت مدیریت و کنترل نوسانات آن‌ها را برجسته می‌کند. این یافته‌ها بر لزوم مدل‌سازی دقیق و تحلیل دینامیک سیستم به منظور شناسایی و کاهش عوامل ناپایداری تأکید می‌کنند. استفاده از مدل‌سازی

پدیده‌های گذرا به کمک شبیه‌سازی‌های دقیق و داده‌های زمان‌واقعی، دقت تحلیل‌ها و کنترل نوسانات شبکه‌های انتقال قدرت را بهبود بخشیده است. شبیه‌سازی‌های انجام‌شده با MATLAB و استفاده از داده‌های حاصل از حسگرهای زمان‌واقعی (مانند PMU و SCADA) امکان شناسایی دقیق پدیده‌های گذرا و ارتقاء راهکارهای کنترل و حفاظتی را فراهم کردند. استراتژی‌هایی مانند استفاده از سیستم‌های پاسخگویی به بار و افزایش انعطاف‌پذیری شبکه با بهره‌گیری از فناوری‌های هوشمند و منابع تولید پراکنده نقش مؤثری در کاهش آسیب‌های ناشی از نوسانات ایفا کرده و کیفیت توان و پایداری شبکه را بهبود می‌بخشند.

کلیدواژه ها: خطوط انتقال قدرت، نوسانات فرکانس، نوسانات ولتاژ، شبکه انتقال قدرت، پایداری شبکه

فصل اول

کلیات تحقیق

۱-۱مقدمه

در دنیای امروز که وابستگی به شبکه‌های انتقال قدرت روز به روز بیشتر می‌شود، درک دقیق و جامع از پدیده‌های گذرا در این سیستم‌ها اهمیت بالایی دارد. پدیده‌هایی مانند افزایش ناگهانی بار، تغییرات در تولید یا مصرف، یا خطاهای سیستم می‌توانند باعث نوسانات ناخواسته در فرکانس و ولتاژ شوند. این نوسانات به نوبه خود بر عملکرد، ایمنی، و پایداری کل سیستم تاثیر می‌گذارند. هدف از این تحقیق، مدل‌سازی دقیق این پدیده‌ها با تمرکز بر تاثیرات نوسانات فرکانس و ولتاژ است تا به درک بهتر و کنترل مؤثرتر این پدیده‌ها در شبکه‌های انتقال قدرت دست یابیم (Fișcă et al., 2023; Codoban et al., 2021; Ignat, 1995). مدل‌سازی پدیده‌های گذرا در خطوط انتقال قدرت نه تنها برای اطمینان از عملکرد صحیح شبکه‌ها در شرایط عادی ضروری است، بلکه در زمان‌های بحرانی و اضطراری نیز حائز اهمیت است. نوسانات فرکانس و ولتاژ می‌توانند به تجهیزات حساس آسیب رسانده و حتی منجر به قطعی‌های گسترده شوند (Bică, 2007; Moldovan & Vătău, 2001; De Kinderena et al., 2022). پدیده‌های گذرا در خطوط انتقال قدرت به‌عنوان نتایج تغییرات ناگهانی در شرایط شبکه، مانند قطع و وصل بار یا برخورد صاعقه، می‌توانند اثرات قابل‌توجهی بر پایداری سیستم داشته باشند. این پدیده‌ها به‌ویژه در نقاط اتصال شبکه، موجب تغییرات دینامیکی شدیدی در ولتاژ و فرکانس می‌شوند که بررسی دقیق آن‌ها برای جلوگیری از آسیب به تجهیزات و تأمین پایداری سیستم ضروری است. پژوهش در این حوزه می‌تواند منجر به ارائه مدل‌های پیشرفته برای پیش‌بینی این تغییرات و کاهش پیامدهای آن شود. در این فصل، به تشریح بیان مسأله، اهمیت و ضرورت انجام تحقیق، اهداف و فرضیات تحقیق و همچنین چارچوب تحقیق پرداخته شده است و در واقع این فصل، مقدمه یا نمایی کلی از فصول پایان نامه را نشان می دهد که محقق در راستای اهداف خود در فصل حاضر، به شرح کامل جزئیات پرداخته است.

۱-۲بیان مسئله

در عصر حاضر، شبکه‌های انتقال قدرت به دلیل نقش بنیادینی که در تأمین انرژی پایدار و قابل اعتماد برای جوامع دارند، اهمیت ویژه‌ای یافته‌اند. با این حال، این شبکه‌ها مستعد پدیده‌های گذرایی هستند که می‌توانند منجر به اختلالاتی در تأمین برق، آسیب به تجهیزات، و حتی قطعی‌های گسترده شوند. مسئله اصلی این تحقیق، شناسایی، مدل‌سازی، و تحلیل پیامدهای نوسانات فرکانس و ولتاژ به عنوان دو جنبه‌ی کلیدی پدیده‌های گذرا است.

ابعاد و حدود مسئله شامل:

- بررسی دقیق و تعیین مرزهای مسئله در زمینه نوسانات فرکانس و ولتاژ.
- معرفی دقیق پدیده‌های گذرا و تأثیرات آنها بر سیستم‌های انتقال قدرت.
- تعیین جنبه‌های مجهول و مبهم در مدل‌سازی این پدیده‌ها و شناسایی متغیرهایی که باید در تحلیل‌ها لحاظ شوند.

منظور از تحقیق عبارت است از:

- ایجاد درک دقیق‌تر از چگونگی تأثیر پدیده‌های گذرا بر شبکه‌های انتقال قدرت.
- توسعه مدل‌های ریاضی و شبیه‌سازی‌های کامپیوتری که قادر به پیش‌بینی واکنش شبکه‌ها به این نوسانات باشند.
- ارائه راهکارهای کاربردی برای مهندسان و مدیران سیستم‌های انتقال به منظور کاهش اثرات منفی این پدیده‌ها و بهبود پایداری سیستم.

تحقیق حاضر به بررسی و مدل‌سازی پدیده‌های گذرای در خطوط انتقال قدرت با تأکید بر تأثیرات نوسانات فرکانس و ولتاژ می‌پردازد. این موضوع در پی آن است که شناسایی، تحلیل و مدیریت این پدیده‌ها، نقش حیاتی در افزایش پایداری، کارایی، و ایمنی شبکه‌های انتقال قدرت دارد. با توجه به پیچیدگی‌های موجود در شبکه‌های انتقال و تاثیرات متقابل بین المان‌های مختلف سیستم، این تحقیق به دنبال شناسایی و مدل‌سازی دقیق این پدیده‌ها، به خصوص در شرایطی است که سیستم‌های تجدیدپذیر بخش بزرگی از تولید را به عهده دارند.

پدیده‌های گذرا در خطوط انتقال قدرت یکی از موضوعات اساسی در مهندسی برق محسوب می‌شوند که می‌توانند به دلایلی همچون وقوع خطاهای الکتریکی، برخورد صاعقه، تغییرات بار یا قطع و وصل ناگهانی تجهیزات رخ دهند. این پدیده‌ها باعث تغییرات شدید و ناگهانی در ولتاژ و جریان می‌شوند و می‌توانند به تجهیزات حیاتی شبکه‌های برق از جمله ترانسفورماتورها، عایق‌ها و تجهیزات حفاظتی آسیب جدی وارد کنند. شناسایی و مدل‌سازی دقیق این پدیده‌ها برای درک رفتار شبکه تحت شرایط بحرانی و جلوگیری از خسارات ناشی از آن‌ها ضروری است. درک صحیح اثرات نوسانات فرکانس

و ولتاژ در این شرایط، به‌ویژه در خطوط انتقال بلند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا این نوسانات نقش کلیدی در توزیع انرژی و حفظ پایداری شبکه ایفا می‌کنند(جباری مقدم،۱۳۹۹).

یکی از چالش‌های مهم در مدیریت پدیده‌های گذرا، تأثیر نوسانات فرکانس و ولتاژ بر تجهیزات شبکه و کیفیت توان است. این نوسانات می‌توانند باعث کاهش عمر تجهیزات، اختلال در عملکرد حفاظتی، و افزایش تلفات انرژی شوند. همچنین، وجود این نوسانات در شرایط گذرا می‌تواند منجر به ناپایداری دینامیکی شبکه و ایجاد فروپاشی‌های گسترده شود. در این راستا، توسعه مدل‌های دقیق و قابل‌اعتماد برای تحلیل این پدیده‌ها، امکان پیش‌بینی رفتار شبکه و ارائه راهکارهای مؤثر برای کنترل اثرات مخرب را فراهم می‌کند. این امر به‌ویژه در شبکه‌های برق مدرن با رشد منابع تجدیدپذیر و افزایش پیچیدگی سیستم‌ها، اهمیت بیشتری پیدا کرده است.
علاوه بر این، مطالعات نشان داده‌اند که نوسانات ولتاژ و فرکانس در پدیده‌های گذرا، تأثیر مستقیمی بر عملکرد تجهیزات حفاظتی مانند رله‌ها و دیژنکتورها دارند. در صورت عدم طراحی و تنظیم دقیق این تجهیزات، احتمال وقوع خاموشی‌های گسترده و آسیب به زیرساخت‌های شبکه افزایش می‌یابد. بنابراین، مدل‌سازی پدیده‌های گذرا با تأکید بر تأثیرات این نوسانات، می‌تواند به بهبود طراحی تجهیزات حفاظتی و توسعه راهبردهای مدیریتی منجر شود. این پژوهش با هدف ارائه مدل‌های پیشرفته برای تحلیل این پدیده‌ها و شناسایی راهکارهای کاهش تأثیرات منفی آن‌ها بر پایداری و بهره‌وری شبکه‌های برق انجام می‌شود(زحمتی،۱۳۹۸).
ابعاد و حدود این مسأله شامل درک و تحلیل نوسانات فرکانس و ولتاژ، همزمانی آن‌ها و تاثیرات متقابل این پدیده‌ها بر یکدیگر و بر کل شبکه انتقال است. این تحقیق سعی در پوشش دادن جوانب مختلف پدیده‌های گذرا از طریق مدل‌سازی دقیق و شبیه‌سازی رفتار دینامیکی سیستم‌های قدرت دارد، با تمرکز ویژه بر نحوه تاثیرگذاری نوسانات فرکانس و ولتاژ بر پایداری کلی سیستم.
جنبه‌های مجهول و مبهم در این تحقیق شامل تعاملات پیچیده بین نوسانات فرکانس و ولتاژ و دیگر عوامل موثر بر سیستم انتقال قدرت مانند میزان اینرسی سیستم، خواص دینامیکی منابع تجدیدپذیر، و اثرات همزمانی فاز و دامنه می‌شود. این پیچیدگی‌ها و تعاملات، شناسایی دقیق متغیرها و پارامترهای کلیدی را که باید در مدل‌سازی لحاظ شوند، به چالش می‌کشد.

در نهایت، منظور از این تحقیق، ایجاد بینش‌های جدید و کاربردی در مدیریت و بهبود پایداری شبکه‌های انتقال قدرت است، به گونه‌ای که بتوان با استفاده از رویکردها و مدل‌های جدید، پدیده‌های گذرای مخرب را بهتر شناسایی، پیش‌بینی، و کنترل کرد. این تحقیق در پی پر کردن شکاف‌های موجود در دانش و ارائه راهکارهایی برای مقابله با چالش‌های پیش روی شبکه‌های انتقال قدرت در عصر جدید است.

سوالات تحقیق می‌تواند شامل موارد زیر باشد:

۱. چگونه می‌توان با استفاده از مدل‌سازی دقیق و تکنیک‌های پیشرفته شبیه‌سازی، پدیده‌های گذرای ناشی از نوسانات فرکانس و ولتاژ در شبکه‌های انتقال قدرت را کنترل و مدیریت کرد تا امنیت و پایداری این سیستم‌ها را به طور مؤثر افزایش دهیم؟
۲. چه عواملی باعث بروز نوسانات فرکانس و ولتاژ در شبکه‌های انتقال قدرت می‌شوند؟
۳. چگونه می‌توان پدیده‌های گذرا را به طور دقیق مدل‌سازی کرد؟
۴. چه استراتژی‌هایی برای کنترل و مدیریت این نوسانات وجود دارد؟

این تحقیق با هدف شناسایی، تحلیل، و مدیریت پدیده‌های گذرا در شبکه‌های انتقال قدرت انجام می‌شود تا به بهبود پایداری و کارایی این سیستم‌های حیاتی کمک کند.

در این تحقیق، ما به دنبال درک بهتر و دقیق‌تری از پدیده‌های گذرا در شبکه‌های انتقال قدرت هستیم، که شامل بررسی علل و پیامدهای نوسانات فرکانس و ولتاژ است. هدف اصلی ما ایجاد مدل‌های ریاضی پیشرفته و شبیه‌سازی‌های کامپیوتری است که به ما کمک کنند تا این نوسانات را به طور مؤثرتری پیش‌بینی و کنترل کنیم. این امر به بهبود پایداری و ایمنی شبکه‌های انتقال قدرت کمک می‌کند، که نه تنها برای جلوگیری از خسارت به تجهیزات حیاتی بلکه برای تضمین تأمین انرژی پایدار به جوامع نیز بسیار مهم است. نوآوری این تحقیق در توسعه روش‌های جدید مدل‌سازی است که می‌تواند در شرایط اضطراری و بحرانی به کار گرفته شود، و این امکان را به ما می‌دهد که پیش از وقوع قطعی‌های گسترده، مداخله‌ای مؤثر انجام دهیم. این تحقیق قدمی مهم در جهت پر کردن شکاف‌های موجود در دانش ما است و ارائه دهنده راهکارهایی نوین برای مواجهه با چالش‌های مهندسی شبکه‌های انتقال در عصر جدید است.

۱-۳اهمیت ضرورت تحقیق

۱. توجه به افزایش تقا ضای انرژی و نیاز به ت ضمین پایداری شبکه‌های انتقال در برابر بارهای متغیر و شرایط ناپایدار که می‌تواند به قطعی‌های گسترده و آسیب‌های جدی منجر شود.
۲. اهمیت این تحقیق در زمینه‌ی توسعه‌ی تکنولوژی‌ها و رویکردهای نوین در مهندسی شبکه‌های انتقال قدرت برای کاهش ریسک‌های مرتبط با تغییرات ناگهانی در سیستم‌های انرژی.

انجام این تحقیق برای درک بهتر و مدیریت کارآمد پدیده‌های گذرای نا شی از نو سانات فرکانس و ولتاژ در شبکه‌های انتقال قدرت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار ا ست. با اجرای این تحقیق و تو سعه مدل‌های دقیق و شبیه‌سازی‌های پیشرفته، می‌توان پایداری و امنیت شبکه‌ها را به طور محسوسی افزایش داد و از خ سارت‌های مالی و تأثیرات منفی بر زندگی روزمره و سلامتی افراد جلوگیری کرد. در صورت عدم

انجام این تحقیق، شبکه‌های انتقال قدرت به شدت در معرض خطر قطعی‌های گسترده و اختلالاتی قرار می‌گیرند که می‌تواند منجر به نار ضایتی عمومی، افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری، و حتی خطرات جانی شود. بنابراین، توجه و سرمایه‌گذاری در این حوزه تحقیقاتی نه تنها یک نیاز فنی بلکه یک الزام استراتژیک برای تضمین امنیت انرژی و حفظ استانداردهای زندگی است.

۱-۴ اهداف تحقیق

اهداف علمی:

۱. مدل سازی پدیده‌های گذرای در خطوط انتقال قدرت با تأکید بر تأثیرات نو سانات فرکانس و ولتاژ
۲. ارائه ی مدل‌های ریاضی پیشرفته برای شبیه‌سازی دقیق پدیده‌های گذرا در شبکه‌های انتقال قدرت، به منظور درک بهتر مکانیزم‌های بروز نو سانات فرکانس و ولتاژ و تأثیر آن‌ها بر پایداری سیستم.
۳. تعیین رابطه بین پدیده‌های گذرا و پایداری شبکه‌های انتقال قدرت و ارزیابی چگونگی کاهش اثرات مخرب نوسانات با استفاده از استراتژی‌های مدیریتی مؤثر.

اهداف کاربردی:

۱. ارائه راهکارهای عملی برای طراحی و بهره‌برداری شبکه‌های انتقال قدرت که بتوانند نو سانات فرکانس و ولتاژ را در شرایط گذرا مدیریت کرده و کاهش دهند، با هدف بهبود ایمنی و قابلیت اطمینان سیستم‌های توزیع انرژی.
۲. فراهم آوردن پایه‌ای محکم برای تصمیم‌گیری‌های مهندسی و سیاست‌گذاری‌های استراتژیک در زمینه بهینه‌سازی عملکرد شبکه‌های انتقال در برابر پدیده‌های گذرا.

۱-۵سوالات تحقیق

چگونه می‌توان پدیده‌های گذرا در خطوط انتقال قدرت را با استفاده از مدل‌های عددی به‌صورت دقیق شبیه‌سازی کرد؟

چگونه می‌توان مدل‌های ریاضی بهتری برای شبیه‌سازی پدیده‌های گذرا با دقت بیشتر ارائه کرد؟

چه رابطه‌ای بین وقوع پدیده‌های گذرا و کاهش پایداری شبکه‌های انتقال قدرت وجود دارد؟

۱-۶ فرضیات تحقیق

فرضیه اول: عوامل اصلی بروز نوسانات فرکانس و ولتاژ در شبکه‌های انتقال قدرت شامل تغییرات ناگهانی در بار مصرفی، اختلالات در تولید برق و ناسازگاری‌های میان منابع تولید پراکنده و شبکه می‌باشند.

فرضیه دوم: مدل‌سازی دقیق پدیده‌های گذرا در شبکه‌های انتقال قدرت می‌تواند با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی پویای سیستم و ادغام داده‌های واقعی زمان‌بندی شده از سنسورهای مختلف در سراسر شبکه، بهبود یابد.

فرضیه سوم: استراتژی‌های مؤثر برای کنترل و مدیریت نوسانات فرکانس و ولتاژ در شبکه‌های انتقال قدرت شامل استفاده از سیستم‌های پاسخگویی به بار، بهینه‌سازی فناوری‌های تولید پراکنده و افزایش انعطاف‌پذیری شبکه از طریق فناوری‌های هوشمند سازی است.

۱-۷چارچوب تحقیق

این تحقیق با موضوع " مدل‌سازی پدیده‌های گذرای در خطوط انتقال قدرت با تأکید بر تأثیرات نوسانات فرکانس و ولتاژ " مشتمل بر "پنج" فصل است که در فصل اول کلیات تحقیق را آورده و به ارائه بیان مسآله، اهمیت و ضرورت انجام تحقیق، اهداف و فرضیات تحقیق پرداخته است. در فصل دوم به تشریح مبانی نظری تحقیق پرداخته و در ادامه پیشینه ای از تحقیقات گذشته مرتبط با موضوع تحقیق را مورد بررسی قرار داده است. در فصل سوم

روش ها و مدل های تحلیلی را آورده و به بیان راههای مختلف دستیابی به نتایج حاصل از اهداف و فرضیات تحقیق پرداخته است. فصل چهارم در جهت اندازه گیری متغیرهای تحقیق، مشتمل بر ارائه مدل تحلیلی یا استنباطی با استدلالی از نظریه‌ها است که نهایتا به اثبات فرضیه‌های پژوهش ختم گردیده است. در انتهای پایان نامه فصل نتیجه گیری یعنی بیان یافته ها و نتایج تحقیق و همچنین پیشنهادها بعنوان ایده ای برای ادامه این کار تحقیقاتی توسط دیگران می قرار داده شده است.

فصل دوم

مبانی نظری و پیشینه تحقیق

۲-۱ مقدمه

شبکه‌های انتقال قدرت، به دلیل گستردگی و تنوع شرایط محیطی، به‌طور مداوم تحت تأثیر نوسانات ولتاژ و فرکانس قرار می‌گیرند که این نوسانات عامل اصلی ایجاد گذراهای ناگهانی هستند. این گذراها می‌توانند باعث ایجاد تنش‌های الکتریکی در عایق‌ها، کاهش کیفیت توان، و حتی خاموشی‌های گسترده شوند. طراحی مدل‌های ریاضی برای تحلیل این پدیده‌ها امکان پیش‌بینی بهتر شرایط بحرانی و طراحی راهکارهای محافظتی مؤثر را فراهم می‌کند. این فصل از پایان نامه با خواندن مقالات معتبر داخلی و خارجی با عنوان، بررسی مبانی نظری و ادبیات تحقیق، اطلاعات جمع آوری شده از زبان محقق خلاصه نویسی و ارجاع دهی گردیده و بخش زیادی از مطالب را به خود اختصاص داده است و هدف از نگارش این فصل، گردآوری ادبیات، پیشینه و سوابق داخلی و خارجی تحقیق با استفاده از منابع معتبر و به روز صورت گرفته است. دلیل اهمیت این فصل این است که محقق را متوجه پژوهش های دیگران نموده و با توجه به مشکلات و چالش های موضوع پژوهش های انجام شده، جهت گیری مناسب انتخاب خواهد شد.

۲-۲ مبانی نظری تحقیق

مدل‌سازی پدیده‌های گذرا در خطوط انتقال قدرت بر پایه اصول الکترومغناطیس و تئوری سیستم‌های قدرت استوار است. این پدیده‌ها که شامل تغییرات سریع در پارامترهای ولتاژ و جریان هستند، به دلیل ماهیت پیچیده و غیرخطی سیستم‌های قدرت، نیازمند تحلیل‌های دقیق و جامع می‌باشند. در این راستا، استفاده از معادلات موجی و مدل‌های مبتنی بر روش‌های عددی، مانند روش اجزای محدود و تحلیل حوزه فرکانس، به‌عنوان ابزارهای اصلی برای شبیه‌سازی این شرایط مطرح می‌شوند. این مدل‌ها به شبیه‌سازی اثرات گذرا مانند بازتاب، شکست ولتاژ، و تخلیه‌های الکتریکی کمک می‌کنند و امکان پیش‌بینی رفتار سیستم تحت شرایط مختلف را فراهم می‌نمایند. نوسانات ولتاژ و فرکانس به‌عنوان عوامل کلیدی در تحلیل پدیده‌های گذرا، نقش مهمی در پایداری و کیفیت توان شبکه‌های برق ایفا می‌کنند. در شرایط گذرا، این نوسانات می‌توانند باعث ایجاد اعوجاج‌های الکتریکی شوند که تأثیر منفی بر عملکرد تجهیزات شبکه و انتقال توان دارند. مبانی نظری مرتبط با نوسانات فرکانس و ولتاژ شامل تحلیل پاسخ سیستم‌های الکتریکی به تغییرات ناگهانی، مشخصه‌های امپدانس خطوط انتقال، و مدل‌سازی رفتار دینامیکی تجهیزات حفاظتی است. در این راستا، استفاده از ابزارهای شبیه‌سازی پیشرفته، مانند نرم‌افزارهای PSCAD و EMTP، به تحلیل دقیق‌تر این نوسانات کمک می‌کند و امکان توسعه راهکارهای پیشگیرانه و حفاظتی برای بهبود پایداری شبکه را فراهم می‌سازد(قربانی، ۱۴۰۰).

۲-۲-۱ سیستم قدرت

سیستم قدرت الکتریکی یکی از بزرگترین شبکه‌های دست‌ساز انسان به شمار می‌آید که از پراکندگی جغرافیایی گسترده‌ای برخوردار است. این سیستم با هدف تأمین انرژی برق برای مشترکین در مناطق مختلف طراحی و توسعه یافته و دربرگیرنده اجزای گوناگونی است. سیستم قدرت نه‌تنها به لحاظ گستره جغرافیایی بسیار وسیع است، بلکه از نظر پیچیدگی فنی نیز ساختاری پیچیده و هماهنگ را در خود جای داده است که برای عملکرد پایدار نیازمند تعامل و هماهنگی کامل بین تمامی اجزای آن است. این سیستم متشکل از هزاران کیلومتر خطوط انتقال برق و شبکه‌های مختلف توزیع است که انرژی را از نقاط تولید به مصرف‌کنندگان نهایی انتقال می‌دهند. این خطوط، همراه با کابل‌های انتقال زیرزمینی، به عنوان شریان‌های اصلی تأمین برق شناخته می‌شوند. در کنار این خطوط، صدها واحد تولید برق شامل نیروگاه‌های فسیلی، آبی، هسته‌ای و بادی، نقش اصلی در تأمین انرژی برق را ایفا می‌کنند(کراری،۱۳۹۴). هر یک از این نیروگاه‌ها با بهره‌گیری از فناوری‌های متفاوت و به‌کارگیری منابع انرژی متنوع، با هدف تأمین پایدار انرژی فعالیت دارند و به شبکه‌های انتقال و توزیع متصل می‌شوند. علاوه بر واحدهای تولید برق، سیستم قدرت شامل تعداد زیادی از تجهیزات تبدیل و تنظیم ولتاژ مانند ترانسفورماتورهای انتقال و توزیع است که به کمک آن‌ها ولتاژ برق برای مراحل مختلف انتقال و توزیع تنظیم می‌شود. این ترانسفورماتورها برای افزایش ولتاژ در مراحل انتقال و کاهش آن برای مصرف ایمن و بهینه توسط کاربران خانگی و صنعتی به کار گرفته می‌شوند. پست‌های برق نیز به عنوان نقاط اتصال و توزیع نقش اساسی در مدیریت و تنظیم جریان برق دارند(شریعتی نسب،۱۳۹۳). در کنار این تجهیزات، ابزارهای کنترلی و حفاظتی از جمله بانک‌های خازنی، رله‌های حفاظتی و تجهیزات کنترلی دیگر برای تضمین ایمنی و پایداری سیستم در برابر نوسانات و اختلالات احتمالی به کار می‌روند. سیستم قدرت یک مجموعه پیچیده و گسترده از تجهیزات و دستگاه‌های با مشخصات و سرعت‌های مختلف است که در حالت عادی به صورت یکپارچه و در حالت تعادل به کار خود ادامه می‌دهد. این هماهنگی مستلزم مدیریت دقیق و کنترل پیوسته است تا از پایداری و قابلیت اطمینان سیستم

اطمینان حاصل شود. این پایداری، به خصوص در مواجهه با تغییرات بار و شرایط متغیر جوی، با بهره‌گیری از تکنولوژی‌های پیشرفته و سیستم‌های حفاظتی و کنترلی به دست می‌آید که هرکدام نقشی کلیدی در عملکرد پایدار این شبکه بزرگ ایفا می‌کنند(جورابیان، ۱۳۹۵).

۲-۲-۱-۱ تعریف و اهمیت پدیده‌های گذرا در سیستم‌های قدرت

پدیده‌های گذرا در سیستم‌های قدرت به تغییرات سریع و ناگهانی در پارامترهای الکتریکی مانند ولتاژ و جریان اشاره دارند که اغلب در اثر تغییرات غیرمنتظره در شرایط شبکه ایجاد می‌شوند. این تغییرات ممکن است به دلیل وقوع خطاها، اتصال یا قطع ناگهانی تجهیزات، و همچنین وقایع طبیعی نظیر برخورد صاعقه یا تغییرات بار رخ دهند. پدیده‌های گذرا به دلیل شدت و سرعت زیاد خود می‌توانند تأثیرات منفی بر پایداری و عملکرد سیستم‌های قدرت بگذارند. این پدیده‌ها با ناپایداری موقتی در پارامترهای الکتریکی شبکه همراه بوده و ممکن است به تجهیزات حساس آسیب وارد کنند. یکی از دلایل اهمیت پدیده‌های گذرا در سیستم‌های قدرت، اثرات قابل‌توجهی است که این تغییرات ناگهانی بر تجهیزات الکتریکی و زیرساخت‌های شبکه دارند. این اثرات می‌تواند شامل خرابی تجهیزات حفاظتی، کاهش عمر مفید عایق‌ها، آسیب به ترانسفورماتورها و حتی خاموشی‌های گسترده باشد. تجهیزات الکتریکی به‌طور معمول برای کار در شرایط پایداری طراحی می‌شوند و بروز گذراهای شدید، که اغلب با تغییرات سریع ولتاژ و جریان همراه است، می‌تواند موجب تخریب یا عملکرد نامطلوب آن‌ها شود(صفری،۱۳۹۶). از این رو، شناخت و مدل‌سازی این پدیده‌ها نقش حیاتی در افزایش قابلیت اطمینان و پایداری سیستم‌های قدرت ایفا می‌کند. پدیده‌های گذرا همچنین از نظر کیفیت توان دارای اهمیت بالایی هستند. نوسانات ناگهانی در ولتاژ و جریان ممکن است به افت کیفیت توان و ایجاد نویزهای ناخواسته در سیستم منجر شود که می‌تواند عملکرد تجهیزات الکترونیکی حساس را تحت تأثیر قرار دهد. در سیستم‌های قدرت مدرن که از منابع انرژی تجدیدپذیر و تجهیزات الکترونیکی پیچیده استفاده می‌کنند، پدیده‌های گذرا می‌توانند به شکل جدی کیفیت توان را کاهش

دهند. از این رو، بررسی و کنترل این پدیده‌ها برای اطمینان از تحویل برق با کیفیت مناسب به مصرف‌کنندگان نهایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از جنبه پایداری سیستم، پدیده‌های گذرا می‌توانند باعث بروز ناپایداری دینامیکی در شبکه شوند. این پدیده‌ها به دلیل سرعت بالای خود، زمان واکنش شبکه به شرایط جدید را کاهش می‌دهند و ممکن است باعث ناپایداری لحظه‌ای یا طولانی‌مدت در سیستم شوند. این ناپایداری‌ها ممکن است به فروپاشی شبکه و قطع برق گسترده منجر شوند که به ویژه در شبکه‌های بزرگ و پیچیده، پیامدهای اقتصادی و اجتماعی زیادی به همراه دارد. لذا بررسی اثرات گذراها و مدل‌سازی دقیق آن‌ها می‌تواند به بهبود استراتژی‌های کنترل و حفاظت سیستم‌های قدرت کمک کند(حسینی پور،۱۳۹۸).

۲-۲-۱-۲ طبقه‌بندی پدیده‌های گذرا: گذراهای الکترومغناطیسی و گذراهای الکترومکانیکی

پدیده‌های گذرا در سیستم‌های قدرت به طور کلی به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: گذراهای الکترومغناطیسی و گذراهای الکترومکانیکی. این تقسیم‌بندی به ماهیت و منشأ این پدیده‌ها و همچنین زمان‌بندی وقوع آن‌ها بستگی دارد. گذراهای الکترومغناطیسی به دلیل سرعت بالای وقوع و تأثیر آن‌ها بر میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، به شدت بر تجهیزات حفاظتی و عایق‌های سیستم قدرت اثر می‌گذارند. در مقابل، گذراهای الکترومکانیکی بیشتر به تغییرات دینامیکی سیستم، شامل اثرات مکانیکی بر روی تجهیزات مانند ژنراتورها و موتورها، مرتبط هستند. گذراهای الکترومغناطیسی معمولاً در نتیجه حوادث ناگهانی همچون برخورد صاعقه به خطوط انتقال، کلیدزنی‌های ناگهانی، یا وقوع خطاهای تک‌فاز و سه‌فاز در سیستم رخ می‌دهند. این گذراها منجر به تغییرات بسیار سریع در ولتاژ و جریان می‌شوند که ممکن است در مقیاس زمانی میلی‌ثانیه‌ها اتفاق بیافتد(بهنیا،۱۳۹۸). به دلیل سرعت بالای این پدیده‌ها، مدل‌سازی دقیق آن‌ها نیازمند استفاده از روش‌های عددی و نرم‌افزارهای شبیه‌سازی پیشرفته

مانند EMTP (Electromagnetic Transients Program) است تا بتوان رفتار این گذراها را به‌خوبی تحلیل کرد و اقدامات حفاظتی مناسبی طراحی نمود. گذراهای الکترومکانیکی به دلیل ماهیت مکانیکی و دینامیکی خود، به تغییرات سرعت و گشتاور در تجهیزات دوار مانند ژنراتورها، موتورها و توربین‌ها مربوط می‌شوند. این نوع گذراها در پاسخ به تغییرات بار یا خطاهای مکانیکی در سیستم رخ می‌دهند و می‌توانند باعث ناپایداری دینامیکی و حتی فروپاشی سیستم شوند. زمان وقوع این گذراها معمولاً در مقیاس ثانیه‌ها تا چند دقیقه است، که باعث می‌شود کنترل و پایدارسازی آن‌ها نیازمند سیستم‌های کنترلی پیشرفته و تحلیل‌های پایداری دینامیکی باشد(اخباری،۱۳۹۸). یکی از تفاوت‌های کلیدی بین گذراهای الکترومغناطیسی و الکترومکانیکی در تأثیرات آن‌ها بر تجهیزات سیستم قدرت است. در حالی که گذراهای الکترومغناطیسی به طور عمده به تجهیزات الکتریکی مانند عایق‌ها و کلیدها آسیب می‌رسانند، گذراهای الکترومکانیکی می‌توانند باعث ایجاد تنش‌های مکانیکی در محورهای دوار و قطعات متحرک ژنراتورها و موتورها شوند. به عنوان مثال، تغییرات ناگهانی در بار می‌تواند باعث ایجاد گشتاورهای گذرا شود که به اجزای مکانیکی آسیب وارد می‌کند و ممکن است منجر به خرابی‌های جدی شود. به منظور مقابله با این دو نوع گذرا، سیستم‌های قدرت باید به گونه‌ای طراحی شوند که از هر دو جنبه الکتریکی و مکانیکی مقاوم باشند. استفاده از تجهیزات حفاظتی مناسب برای کاهش اثرات گذراهای الکترومغناطیسی، و همچنین بهره‌گیری از سیستم‌های کنترلی دینامیکی برای مدیریت گذراهای الکترومکانیکی از جمله راهکارهای پیشنهادی برای بهبود پایداری و قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت است. به علاوه، توسعه مدل‌های تحلیلی و نرم‌افزاری پیشرفته برای مدل‌سازی این دو نوع گذرا به‌طور هم‌زمان می‌تواند به افزایش دقت پیش‌بینی و بهبود عملکرد شبکه کمک کند(بی جامی،۱۳۹۸).

۲-۲-۲نوسانات ولتاژ و فرکانس در شبکه‌های قدرت

نوسانات ولتاژ و فرکانس به تغییرات موقتی و سریع در مقادیر ولتاژ و فرکانس سیستم قدرت اشاره دارند که به دلیل تغییرات ناگهانی در شرایط بار، خطاها یا اتفاقات خارجی مانند صاعقه و کلیدزنی به وقوع می‌پیوندند. نوسانات ولتاژ می‌توانند ناشی از تغییرات بار در خطوط انتقال یا اتصال منابع تولید انرژی به شبکه باشند که باعث افزایش یا کاهش ناگهانی ولتاژ می‌شوند. نوسانات فرکانس نیز معمولاً به دلیل ناهماهنگی میان تولید و مصرف توان رخ می‌دهند که این امر می‌تواند پایداری کلی سیستم قدرت را به خطر بیندازد. این نوسانات در صورت کنترل نشدن، موجب تأثیرات مخربی بر تجهیزات شبکه و کیفیت توان می‌شوند. نوسانات فرکانس و ولتاژ همچنین بر کیفیت توان تأثیر بسزایی دارند. تغییرات غیرعادی ولتاژ و فرکانس باعث ایجاد هارمونیک‌ها و پدیده‌هایی مانند فلیکر و دیستروشن در شبکه می‌شوند که می‌توانند عملکرد وسایل الکتریکی خانگی و صنعتی را مختل کنند. در عین حال، این نوسانات موجب کاهش بهره‌وری تجهیزات و افزایش تلفات انرژی در شبکه می‌شوند. از این رو، پژوهش‌ها به دنبال توسعه روش‌های مؤثری برای مدل‌سازی و کنترل نوسانات فرکانس و ولتاژ به منظور بهبود کیفیت توان و کاهش اثرات منفی آن‌ها بر سیستم‌های قدرت هستند(مهدوی،۱۳۹۸).

۲-۲-۲-۱ ولتاژ

ولتاژ در سیستم‌های قدرت به معنای توانایی سیستم در حفظ ولتاژهای ثابت در تمامی شین‌ها پس از مواجهه با اغتشاشات یا تغییرات ناگهانی است. این پایداری به قابلیت شبکه در حفظ توازن بین تقاضای بار و تأمین انرژی مورد نیاز بستگی دارد. در صورت ایجاد ناپایداری، ممکن است ولتاژهای برخی از شین‌ها به صورت پیشرونده کاهش یا افزایش یابند که این امر می‌تواند منجر به ناپایداری شبکه و ایجاد مشکلات جدی در سیستم قدرت شود. حفظ پایداری ولتاژ برای جلوگیری از خاموشی‌های ناگهانی و کاهش خسارات به تجهیزات شبکه از اهمیت ویژه‌ای

برخوردار است(زحمتی،۱۳۹۸). یکی از پیامدهای احتمالی ناپایداری ولتاژ، افت بار در یک منطقه یا قطع خطوط انتقال و سایر عناصر شبکه به‌وسیله سیستم‌های حفاظتی آن‌ها است. این وضعیت می‌تواند منجر به قطع‌های زنجیره‌ای یا آبشاری شود که در نهایت باعث خاموشی‌های گسترده در بخش‌های مختلف شبکه می‌شود. سیستم‌های حفاظتی که برای جلوگیری از آسیب به تجهیزات طراحی شده‌اند، در صورت ناپایداری ولتاژ، ممکن است برخی از عناصر شبکه را به‌طور خودکار از مدار خارج کنند. این اقدام می‌تواند به کاهش فشار بر سیستم کمک کند، اما به‌طور همزمان ممکن است باعث قطع برق در مناطق وسیع شود و حتی باعث ایجاد فروپاشی کامل شبکه شود. در برخی موارد، ناپایداری ولتاژ می‌تواند به افت حالت سنکرون در برخی از ژنراتورها منجر شود. این افت ممکن است به دلیل افزایش بار، کاهش تحریک یا تجاوز شرایط کاری از محدوده مجاز جریان تحریک رخ دهد. هنگامی که ولتاژ شین‌ها به‌طور پیشرونده افت می‌کند، امکان دارد که ژنراتورها قادر به حفظ حالت سنکرون خود نباشند و از مدار خارج شوند(جباری مقدم،۱۳۹۹). این اتفاق می‌تواند به تشدید ناپایداری شبکه منجر شود و شرایط بحرانی‌تری را ایجاد کند. از دست دادن سنکرون ژنراتورها، به‌ویژه در شرایطی که شبکه تحت فشار بار سنگین قرار دارد، می‌تواند به افت بیشتر ولتاژ و ایجاد مشکلات جدی در پایداری شبکه منجر شود. یکی دیگر از مسائل مرتبط با ناپایداری ولتاژ، ناپایداری زاویه روتور ماشین‌های تولید برق است. این ناپایداری می‌تواند زمانی رخ دهد که زاویه‌های بین دو گروه از ماشین‌ها به ۱۸۰ درجه نزدیک شود. در چنین شرایطی، ولتاژ در نقاط میانی شبکه که نزدیک به مرکز برق هستند، به‌طور ناگهانی کاهش می‌یابد و این کاهش سریع ولتاژ می‌تواند به ایجاد مشکلات بیشتر در پایداری شبکه منجر شود. ناپایداری زاویه روتور معمولاً به دلیل عدم تعادل در نیروهای الکترومغناطیسی بین ژنراتورها ایجاد می‌شود و می‌تواند به فروپاشی شبکه بیانجامد. به همین دلیل، تحلیل و کنترل پایداری ولتاژ و زاویه روتور از جنبه‌های اساسی مدیریت سیستم‌های قدرت برای حفظ پایداری و بهره‌وری شبکه به شمار می‌رود(قربانی،۱۴۰۰). در بسیاری از مواقع از اصطلاح "فروپاشی ولتاژ" نیز استفاده می‌شود. فروپاشی ولتاژ فرآیندی است که در آن، توالی اغتشاشات همراه با ناپایداری ولتاژ می‌تواند منجر به خاموشی یا افت

شدید ولتاژ در بخش قابل‌توجهی از سیستم قدرت شود. عملیات بازیابی ولتاژ در شرایط ولتاژ پایین ممکن است تا زمانی که تپ‌چنجر ترانسفورماتور تنظیم شده یا بخشی از بار به‌طور عمد یا غیرعمد از مدار خارج شود، ادامه یابد تا ولتاژ به محدوده نرمال بازگردد. یکی از عوامل مهم ناپایداری ولتاژ، افت ولتاژ است که وقتی توان اکتیو و راکتیو از طریق راکتانس‌های القایی شبکه انتقال جریان می‌یابند، رخ می‌دهد. این مسئله باعث کاهش توانایی شبکه انتقال برای انتقال توان و پشتیبانی از ولتاژ می‌شود. همچنین انتقال توان و پشتیبانی ولتاژ محدودتر می‌شود زمانی که برخی از ژنراتورها به محدوده‌های عملکرد اضافه‌بار نزدیک می‌شوند یا جریان تحریک یا آرمیچر آن‌ها تحت فشار قرار می‌گیرد. وقتی که یک اختلال در سیستم قدرت باعث افزایش تقاضای توان تا بیش از ظرفیت قابل تحمل منابع توان راکتیو موجود می‌شود، پایداری ولتاژ به‌شدت تهدید می‌شود(رحیمی،۱۴۰۱). در این شرایط، شبکه ممکن است نتواند به‌طور کافی به تقاضای توان واکنشی پاسخ دهد و این امر منجر به کاهش قابل‌توجه در سطح ولتاژ و در نهایت فروپاشی آن شود. یکی از انواع مشکلات ناپایداری ولتاژ که می‌تواند منجر به افزایش ولتاژ کنترل‌نشده شود، "خودتحریکی" ماشین‌های سنکرون است. این مشکل زمانی رخ می‌دهد که بار خازنی یک ماشین سنکرون بسیار زیاد باشد. مثال‌هایی از بارهای خازنی بیش از حد که منجر به خودتحریکی می‌شوند شامل خطوط باز ولتاژ بالا، خازن‌های شنت، و فیلتر بانک‌های ایستگاه‌های HVDC است. این خودتحریکی می‌تواند به ناپایداری ولتاژ و ایجاد شرایط بحرانی در سیستم منجر شود. اضافه ولتاژهایی که در زمان تغییر بار ژنراتور به خازنی رخ می‌دهند، به‌وسیله افزایش ناگهانی در لحظه تغییر و سپس افزایش ملایم‌تر پس از آن شناخته می‌شوند. این افزایش ملایم‌تر به ارتباط بین مؤلفه بار و راکتانس‌های ماشین و همچنین سیستم تحریک ماشین سنکرون بستگی دارد(عبدلی،۱۴۰۰). توانایی جریان تحریک منفی محرک، یکی از ویژگی‌هایی است که تأثیر مثبتی بر محدودیت‌های خودتحریکی می‌گذارد. همان‌طور که در پایداری زاویه روتور معمول است، برای بررسی دقیق‌تر، بهتر است ناپایداری ولتاژ را نیز به دسته‌های فرعی مختلف تقسیم‌بندی کنیم. نوسانات ولتاژ نیز معمولاً در نتیجه رخدادهای ناگهانی در شبکه، مانند وقوع خطاها، قطع یا وصل خطوط، و تغییرات ناگهانی بار ایجاد می‌شوند. این

نوسانات می‌توانند منجر به افت ولتاژ یا افزایش ولتاژهای غیرمجاز در نقاط مختلف شبکه شوند که به تجهیزات حساس آسیب می‌رساند. در سیستم‌های قدرت، نوسانات ولتاژ می‌توانند باعث کاهش کیفیت توان و حتی خاموشی بخش‌های بزرگی از شبکه شوند. به عنوان مثال، افت ناگهانی ولتاژ می‌تواند باعث خاموش شدن تجهیزات صنعتی حساس شده و موجب خسارت‌های مالی زیادی شود(Qiu Qin,2016).

۲-۲-۲-۱-۱ ولتاژ اختلال بالا

ولتاژ به توانایی سیستم قدرت برای حفظ ولتاژهای پایدار پس از وقوع اختلالات بزرگ اشاره دارد؛ اختلالاتی نظیر نقص‌های سیستمی، افت تولید، یا خرابی مدارها. این نوع پایداری، یکی از مهم‌ترین معیارهای پایداری در سیستم‌های قدرت است و نقش حیاتی در تأمین انرژی پایدار و جلوگیری از فروپاشی شبکه ایفا می‌کند. هنگامی که سیستم قدرت با چنین اختلالاتی مواجه می‌شود، عملکرد درست آن مستلزم حفظ ولتاژ در تمامی شین‌ها در محدوده‌ای است که تجهیزات بتوانند به کار خود ادامه دهند بدون این که آسیب ببینند یا از مدار خارج شوند. عوامل مختلفی بر توانایی سیستم در حفظ پایداری ولتاژ تأثیر می‌گذارند. این عوامل شامل مشخصات بار و ویژگی‌های سیستم، همچنین تعامل‌های سیستم‌های حفاظتی و کنترل‌های پیوسته و گسسته هستند. مشخصات بار، مانند نوع بار و نحوه تغییر آن در مواجهه با تغییرات ولتاژ، می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر پایداری ولتاژ داشته باشد. بارهایی که نسبت به تغییرات ولتاژ حساسیت کمتری دارند، می‌توانند پایداری بیشتری برای شبکه فراهم کنند، در حالی که بارهای حساس ممکن است شرایط را بحرانی‌تر کنند. علاوه بر آن، سیستم‌های حفاظتی و کنترل‌های پیوسته و گسسته، نظیر رله‌های حفاظتی و کنترل‌کننده‌های ولتاژ، نقش اساسی در مدیریت نوسانات ولتاژ دارند(S. Fahad Bin Shakil,2014). برای تحلیل و تعیین پایداری ولتاژ پس از اختلالات بزرگ، لازم است که واکنش غیرخطی سیستم قدرت به این اختلالات در یک دوره زمانی مناسب بررسی شود. این واکنش‌ها شامل رفتار تجهیزات مختلف شبکه مانند موتورها، تپ‌چنجر ترانسفورماتورهای تحت بار، و محدودکننده‌های جریان

تحریک ژنراتورها است. تپ‌چنجرهای ترانسفورماتور، برای تنظیم ولتاژ در شبکه و حفظ تعادل ولتاژ در شرایط مختلف، نقش حیاتی ایفا می‌کنند. محدودکننده‌های جریان تحریک ژنراتورها نیز با کاهش خطر افت ولتاژ و جلوگیری از اضافه بار ژنراتور، به حفظ پایداری سیستم کمک می‌کنند. دوره زمانی که برای تحلیل و جذب عملکرد سیستم به کار می‌رود، بسته به شدت و نوع اختلال ممکن است از چند ثانیه تا ده‌ها دقیقه متغیر باشد. در این دوره، واکنش‌های مختلف تجهیزات و تعامل آن‌ها با یکدیگر باید به‌دقت بررسی شود تا از پایداری سیستم اطمینان حاصل شود. برای مثال، در اختلالات کوچک ممکن است چند ثانیه کافی باشد تا سیستم به حالت پایدار بازگردد، اما در مواردی که شبکه با خرابی‌های گسترده یا افت تولید مواجه است، ممکن است نیاز به تحلیل‌ها و تنظیمات بیشتری داشته باشد که تا ده‌ها دقیقه طول بکشد. تحلیل این دوره زمانی به مدیران شبکه کمک می‌کند تا راهکارهای بهینه‌ای برای حفظ پایداری ولتاژ و جلوگیری از فروپاشی شبکه ارائه دهند(Md. Shafiullah,2014).

۲-۲-۲-۱-۲ ولتاژ اختلال پایین

پایداری ولتاژ به توانایی سیستم قدرت برای حفظ ولتاژهای ثابت در زمان قرارگیری در معرض اختلالاتی نظیر تغییرات افزایشی در بار اشاره دارد. این مفهوم به‌ویژه زمانی که سیستم با تغییرات کوچک و پیوسته‌ای مواجه است، به عنوان یک ابزار مهم برای ارزیابی رفتار ولتاژهای سیستم کاربرد دارد. مشخصات بار، کنترل‌های پیوسته و کنترل‌های گسسته در لحظه معینی از زمان، تأثیر قابل‌توجهی بر پایداری ولتاژ دارند. به‌منظور تحلیل دقیق این نوع پایداری، معادلات سیستم در صورت فرضیات مناسب می‌توانند خطی‌سازی شوند که این امر امکان محاسبه اطلاعات ارزشمندی در مورد حساسیت سیستم و شناسایی عوامل مؤثر بر پایداری را فراهم می‌کند. هرچند خطی‌سازی معادلات سیستم برای تحلیل تغییرات کوچک مفید است، اما این روش نمی‌تواند آثار غیرخطی مهمی نظیر کنترل‌های تپ‌چنجر (که شامل نوارهای مرده، مراحل تپ گسسته و تأخیرهای زمانی هستند) را به‌خوبی پوشش دهد. بنابراین، برای تحلیل دقیق‌تر پایداری ولتاژ، از ترکیبی از تحلیل‌های خطی و غیرخطی به‌صورت

مکمل استفاده می‌شود(K. KUMARASAMY,2014). چارچوب زمانی مطلوب برای تحلیل مشکلات پایداری ولتاژ می‌تواند بین چند ثانیه تا ده‌ها دقیقه متغیر باشد، که بسته به نوع اختلال و سرعت واکنش سیستم متفاوت است. به‌عنوان مثال، پایداری ولتاژ کوتاه‌مدت شامل دینامیک‌های مؤلفه‌های بار سریع اثر، نظیر موتورهای القایی، بارهای کنترل‌شده به‌صورت الکترونیکی و مبدل‌های HVDC می‌شود که نیازمند تحلیل در بازه زمانی کوتاه و به‌وسیله حل معادلات دیفرانسیلی سیستم هستند. پایداری ولتاژ بلندمدت به تجهیزات با دینامیک کندتر نظیر تپ‌چنجر ترانسفورماتور، بارهای کنترل‌شده توسط ترموستات‌ها و محدودکننده‌های جریان ژنراتور اشاره دارد. مدت‌زمان مناسب برای مطالعه این تجهیزات ممکن است به چندین دقیقه یا حتی دقایق بسیاری نیاز داشته باشد. تحلیل دقیق عملکرد دینامیکی سیستم در این شرایط معمولاً نیازمند شبیه‌سازی‌های بلندمدت است(A. E. Dahej,2012). برخلاف پایداری زاویه روتور، که مدارهای کوتاه نزدیک ژنراتورها اهمیت بیشتری دارند، در اینجا تأکید بیشتر بر عملکرد تجهیزات در حفظ ولتاژ شبکه و جلوگیری از ناپایداری ناشی از نوسانات بار است. ناپایداری ولتاژ معمولاً به دلیل عدم توازن بلندمدت بین توانایی تولید و انتقال توان با تقاضای بار رخ می‌دهد. به‌عنوان مثال، زمانی که بارها سعی دارند توان بیشتری از شبکه دریافت کنند و ظرفیت شبکه برای تأمین این توان کافی نیست، سیستم وارد شرایط ناپایداری می‌شود. همچنین، اگر اقدامات اصلاحی به موقع انجام نشود، ممکن است ولتاژها به شدت کاهش یافته و ناپایداری ایجاد شود. برای ارزیابی پایداری در چنین شرایطی، می‌توان از تحلیل ایستا برای تخمین حاشیه‌های پایداری و شناسایی عوامل مؤثر بر آن استفاده کرد. در مواردی که زمان‌بندی اقدامات کنترلی اهمیت دارد، شبیه‌سازی شبه‌حالت پایدار در دامنه زمانی نیز برای تکمیل تحلیل‌ها به کار می‌رود تا از زمان‌بندی صحیح و مؤثر اقدامات اطمینان حاصل شود(A. Samimi,2012).

۲-۲-۲-۲ فرکانس

فرکانس به توانایی سیستم قدرت برای حفظ فرکانس مشخص شبکه پس از وقوع یک اختلال شدید اشاره دارد. این اختلالات معمولاً باعث ایجاد عدم تعادل شدید بین تولید و مصرف بار می‌شوند که اگر به درستی مدیریت نشوند، می‌توانند به ناپایداری شبکه منجر شوند. پایداری فرکانس به توانایی سیستم در حفظ تعادل بین تولید و بار با حداقل کاهش یا قطع بار وابسته است، به‌طوری که نوسانات فرکانس در محدوده مجاز باقی بمانند. در صورتی که سیستم نتواند این تعادل را حفظ کند، ممکن است ناپایداری فرکانس ایجاد شود که به شکل نوسانات پایدار و غیرقابل کنترل فرکانس بروز می‌کند. این نوسانات می‌توانند واحدهای تولید برق را تحت فشار قرار دهند و منجر به قطع آن‌ها از شبکه شوند. در برخی موارد، بار نیز به‌طور خودکار یا به علت محافظت از تجهیزات، قطع می‌شود که این امر می‌تواند به کاهش قابلیت اطمینان سیستم و حتی خاموشی‌های گسترده منجر شود. حفظ پایداری فرکانس مستلزم اقدامات سریع و هماهنگ برای تنظیم تعادل توان تولید و مصرف است(S. M. Cruz,2014). این اقدامات می‌توانند شامل به‌کارگیری واحدهای ذخیره‌ساز انرژی، افزایش تولید از نیروگاه‌های رزرو، یا کاهش موقت بارهای غیرضروری باشند. هدف اصلی این است که فرکانس شبکه به سرعت به مقدار مشخص و پایدار خود بازگردد تا از آسیب به تجهیزات و ایجاد خاموشی جلوگیری شود. به‌طور کلی، پایداری فرکانس یکی از جنبه‌های کلیدی مدیریت سیستم‌های قدرت است که به پایداری و امنیت شبکه کمک می‌کند. توانایی سیستم در پاسخ به تغییرات ناگهانی و اختلالات بزرگ و بازگرداندن فرکانس به حالت تعادل، نه تنها نشان‌دهنده پایداری شبکه است، بلکه از اهمیت ویژه‌ای برای تأمین برق پایدار و قابل اعتماد برخوردار است. نوسانات فرکانس معمولاً به دلیل عدم تعادل بین تولید و مصرف انرژی رخ می‌دهند. در شبکه‌های انتقال، تغییرات ناگهانی در بار یا خروجی نیروگاه‌ها می‌تواند باعث انحراف از فرکانس نامی شود. این انحرافات تأثیر مستقیمی بر عملکرد توربین‌ها، ژنراتورها و تجهیزات حفاظتی دارند، چرا که بیشتر تجهیزات در سیستم‌های قدرت برای عملکرد در فرکانس مشخصی طراحی شده‌اند

و تغییرات فرکانس می‌تواند کارایی و عمر آن‌ها را به شدت کاهش دهد. از این رو، کنترل دقیق نوسانات فرکانس اهمیت ویژه‌ای در حفظ پایداری و قابلیت اطمینان سیستم دارد(S. Dixit,2014).

۲-۲-۲-۳ علل وقوع نوسانات در سیستم‌های قدرت

نوسانات در سیستم‌های قدرت به دلایل مختلفی از جمله تغییرات ناگهانی در شرایط بهره‌برداری و عدم هماهنگی میان اجزای شبکه رخ می‌دهند. یکی از مهم‌ترین دلایل وقوع نوسانات، تغییرات ناگهانی در بار شبکه است. این تغییرات می‌توانند به دلیل اتصال یا قطع بارهای بزرگ مانند کارخانه‌ها یا تأسیسات صنعتی رخ دهند که باعث تغییر در تعادل توان و ایجاد نوسانات فرکانس و ولتاژ در سیستم می‌شود. در سیستم‌های قدرت، تعادل میان تولید و مصرف انرژی نقش کلیدی در حفظ پایداری فرکانس دارد و هرگونه عدم تعادل می‌تواند منجر به نوسانات ناگهانی شود. علت دیگر وقوع نوسانات در سیستم‌های قدرت، خطاهای الکتریکی است. خطاهایی مانند اتصال کوتاه یا خرابی تجهیزات می‌توانند باعث ایجاد تغییرات شدید و گذرا در ولتاژ و جریان سیستم شوند. این تغییرات گذرا به دلیل ماهیت ناگهانی و شدید خود می‌توانند باعث نوسانات قابل توجهی در فرکانس و ولتاژ شبکه شوند(Jordehi,2015). خطاهای الکتریکی نه تنها باعث بروز نوسانات می‌شوند بلکه می‌توانند موجب آسیب به تجهیزات حساس و کاهش قابلیت اطمینان شبکه نیز گردند. یکی دیگر از علل مهم نوسانات، مسائل مرتبط با تولید انرژی و منابع تجدیدپذیر است. با افزایش استفاده از منابع تجدیدپذیر مانند انرژی بادی و خورشیدی، نوسانات فرکانس و ولتاژ بیشتری در سیستم‌های قدرت مشاهده می‌شود. این منابع به دلیل ماهیت ناپایدار و وابسته به شرایط جوی، به صورت متناوب توان تولیدی را تغییر می‌دهند که این تغییرات ناگهانی می‌تواند منجر به نوسانات در شبکه شود. همچنین، عدم هماهنگی میان ژنراتورهای تجدیدپذیر و منابع سنتی می‌تواند باعث تشدید نوسانات و کاهش پایداری سیستم شود. کلیدزنی و عملیات کنترلی نیز می‌توانند از عوامل دیگر وقوع نوسانات در سیستم‌های قدرت باشند(Hooshmand,2015). عملیات کلیدزنی به منظور قطع و وصل خطوط

انتقال یا بارهای بزرگ می‌تواند باعث ایجاد تغییرات گذرا در سیستم شده و در نتیجه به نوسانات منجر شود. علاوه بر این، تغییرات در پارامترهای کنترلی شبکه، مانند تغییر تنظیمات رله‌های حفاظتی یا تغییرات در تنظیمات کنترل‌کننده‌های فرکانس، ممکن است نوسانات جدیدی در سیستم ایجاد کند. تداخلات میان سیستم‌های مختلف نیز می‌تواند باعث وقوع نوسانات در سیستم‌های قدرت شود. سیستم‌های قدرت به دلیل پیچیدگی و گستردگی خود از اجزای مختلفی تشکیل شده‌اند که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم با یکدیگر تعامل دارند. عدم هماهنگی مناسب میان این اجزا، از جمله میان ژنراتورها، بارها، و سیستم‌های انتقال، می‌تواند منجر به وقوع نوساناتی شود که کنترل آن‌ها نیازمند تحلیل‌های پیچیده و مدل‌سازی دقیق سیستم است. این تداخلات ممکن است به دلیل زمان‌بندی نامناسب در پاسخ به تغییرات بار یا خطاهای الکتریکی رخ دهند که باعث کاهش پایداری دینامیکی شبکه می‌شود(Dash, P.,2015).

۲-۲-۳ تعامل پدیده‌های گذرا با نوسانات فرکانس و ولتاژ

۲-۲-۳-۱ تأثیر گذراها بر نوسانات فرکانس

پدیده‌های گذرا در خطوط انتقال قدرت می‌توانند به طور مستقیم بر فرکانس شبکه تأثیر بگذارند و ناپایداری‌های جدی را ایجاد کنند. زمانی که گذراهایی مانند برخورد صاعقه یا کلیدزنی‌های ناگهانی در شبکه رخ می‌دهند، تغییرات سریع جریان و ولتاژ می‌تواند باعث ایجاد نوسانات فرکانسی شود که این نوسانات پایداری سیستم را به خطر می‌اندازد. تغییرات ناگهانی در توان انتقالی خطوط، باعث عدم تعادل میان تولید و مصرف انرژی می‌شود که این عدم تعادل به صورت نوسانات فرکانسی در شبکه نمایان می‌گردد. اگر این نوسانات به درستی مدیریت نشوند، می‌توانند منجر به فروپاشی سیستم و ایجاد خاموشی‌های گسترده شوند. پاسخ دینامیکی سیستم قدرت به گذراها به عوامل مختلفی از جمله پارامترهای خط انتقال، موقعیت خطا و زمان‌بندی کلیدزنی‌ها وابسته است. گذراهای

ناشی از این عوامل می‌توانند به کاهش یا افزایش ناگهانی فرکانس منجر شوند. در شرایطی که فرکانس شبکه از محدوده قابل‌قبول خارج شود، تجهیزات حساس مانند توربین‌ها و ژنراتورها ممکن است دچار مشکل شوند. این تجهیزات به منظور حفظ پایداری نیاز به نگه‌داشتن فرکانس در یک محدوده مشخص دارند و هر گونه تغییرات ناگهانی در این پارامتر می‌تواند به آسیب‌های جدی منجر شود(Jordehi,2015). علاوه بر این، در شبکه‌های قدرت که متشکل از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند نیروگاه‌های بادی و خورشیدی هستند، گذراها می‌توانند اثرات مضاعفی بر نوسانات فرکانسی داشته باشند. منابع تجدیدپذیر به دلیل وابستگی به شرایط متغیر طبیعی، از پایداری فرکانسی کمتری نسبت به نیروگاه‌های متعارف برخوردار هستند. وقوع پدیده‌های گذرا در چنین شبکه‌هایی، نوسانات شدیدتری ایجاد می‌کند که مدیریت آن‌ها نیازمند تکنیک‌های کنترلی پیشرفته و مدل‌سازی دقیق‌تر است. بنابراین، شبیه‌سازی و پیش‌بینی دقیق پدیده‌های گذرا می‌تواند به پایداری فرکانسی شبکه‌های مدرن کمک کند. واکنش تجهیزات حفاظتی به گذراها نیز می‌تواند منجر به بروز نوسانات فرکانسی شود. تجهیزات حفاظتی به منظور محافظت از شبکه در برابر آسیب‌های احتمالی، به محض شناسایی گذراها واکنش نشان می‌دهند و ممکن است به قطع خطوط یا خاموشی‌های موقت منجر شوند. این تغییرات ناگهانی در ساختار شبکه، منجر به ایجاد تغییرات در فرکانس می‌شود. بنابراین، بهبود تنظیمات تجهیزات حفاظتی و ایجاد هماهنگی مناسب بین آن‌ها، به منظور کاهش تأثیرات گذراها بر فرکانس، یکی از موضوعات مهم در مهندسی برق محسوب می‌شود(Prasad,2016).

۲-۲-۳-۲ اثرات ترکیبی نوسانات ولتاژ و فرکانس بر عملکرد شبکه

نوسانات ولتاژ و فرکانس در سیستم‌های قدرت می‌توانند تأثیرات گسترده‌ای بر عملکرد شبکه‌های انتقال و توزیع برق داشته باشند. این نوسانات، به ویژه در شرایط بحرانی و گذرا، می‌توانند موجب تغییرات نامطلوب در پارامترهای الکتریکی شبکه شوند. هنگامی که نوسانات ولتاژ و فرکانس به صورت همزمان و ترکیبی رخ می‌دهند، اثرات آن‌ها ممکن است تشدید شود و به ناپایداری سیستم منجر شود. این ناپایداری‌ها می‌توانند به‌صورت ایجاد نوسانات

پیوسته در ولتاژ و فرکانس یا حتی قطع ناگهانی برق در بخش‌هایی از شبکه تظاهر کنند، که به طور مستقیم بر قابلیت اطمینان شبکه و کیفیت توان تحویلی به مصرف‌کنندگان تأثیر می‌گذارد. یکی از پیامدهای مهم ترکیب نوسانات ولتاژ و فرکانس، ایجاد شرایطی است که تجهیزات حفاظتی شبکه قادر به تشخیص صحیح وضعیت نباشند. بسیاری از رله‌های حفاظتی برای تشخیص و واکنش به شرایط غیرعادی، بر اساس تنظیمات خاصی از ولتاژ و فرکانس عمل می‌کنند. هنگامی که نوسانات به صورت ترکیبی رخ می‌دهند، این تجهیزات ممکن است دچار خطا شوند و باعث قطع غیرضروری و حتی بروز خاموشی‌های گسترده شوند(Mukhopadhyay,2015). این امر می‌تواند به عدم هماهنگی بین تجهیزات حفاظتی منجر شود که در نهایت بر قابلیت پایداری سیستم تأثیر می‌گذارد. ترکیب نوسانات ولتاژ و فرکانس همچنین می‌تواند باعث کاهش کارایی ترانسفورماتورها و موتورها در شبکه شود. ترانسفورماتورها و موتورها به تغییرات ولتاژ و فرکانس حساس هستند و نوسانات ترکیبی می‌توانند باعث افزایش تلفات در این تجهیزات شوند. این افزایش تلفات نه تنها به کاهش کارایی منجر می‌شود بلکه می‌تواند به افزایش دمای تجهیزات و در نتیجه کاهش عمر مفید آن‌ها بیانجامد. از این رو، در شرایط نوسانات ترکیبی، احتمال خرابی تجهیزات حساس به شدت افزایش می‌یابد که این موضوع خود می‌تواند بر پایداری شبکه تأثیر منفی بگذارد. همچنین، نوسانات ترکیبی ولتاژ و فرکانس می‌توانند کیفیت توان شبکه را به شدت کاهش دهند. کیفیت توان یکی از معیارهای کلیدی در ارزیابی عملکرد شبکه‌های برق است و هنگامی که این معیار دچار اختلال شود، تجهیزات مصرف‌کننده نهایی، مانند دستگاه‌های صنعتی و خانگی، نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرند. نوسانات ترکیبی می‌توانند باعث بروز اعوجاجات هارمونیکی در شبکه شوند که این اعوجاجات ممکن است به بروز مشکلاتی همچون گرم شدن بیش از حد تجهیزات و عملکرد نامطلوب ماشین‌آلات صنعتی منجر شود(Mukhopadhyay,2015).

۲-۲-۴ اثرات گذراهای ناشی از صاعقه و کلیدزنی

۲-۲-۴-۱ اثرات صاعقه بر خطوط انتقال و تجهیزات

صاعقه به عنوان یکی از پدیده‌های طبیعی، تأثیرات مهمی بر عملکرد سیستم‌های قدرت به‌ویژه خطوط انتقال دارد. برخورد صاعقه با خطوط انتقال باعث ایجاد ولتاژهای گذرای بسیار بالا و جریان‌های شدید می‌شود که این ولتاژ و جریان می‌تواند عایق‌های خطوط انتقال را تحت تنش‌های الکتریکی شدید قرار داده و به شکست عایقی منجر شود. این پدیده منجر به قطعی‌های مکرر در شبکه و آسیب به تجهیزات حیاتی می‌گردد. به همین دلیل تحلیل اثرات صاعقه به منظور کاهش اثرات مخرب و افزایش قابلیت اطمینان سیستم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از اثرات مستقیم برخورد صاعقه به خطوط انتقال، افزایش شدید ولتاژ در نقطه برخورد است که به آن "ولتاژ گذرای ناشی از صاعقه" گفته می‌شود(M. S. Rawat,2016). این افزایش ناگهانی ولتاژ می‌تواند از محدوده تحمل عایق‌ها فراتر رود و به شکست عایق و اتصال کوتاه در سیستم منجر شود. این امر ممکن است علاوه بر قطعی‌های برق، آسیب‌های جبران‌ناپذیری به تجهیزات حفاظتی و دیگر اجزاء شبکه وارد کند. تحلیل دقیق این اثرات نیازمند مدل‌سازی صاعقه و شبیه‌سازی شرایط برخورد آن با خطوط انتقال است. اثر صاعقه محدود به نقطه برخورد نیست و این پدیده باعث انتشار امواج گذرا در طول خط انتقال می‌شود. امواج ناشی از برخورد صاعقه در طول خطوط منتشر شده و ممکن است به نقاط دور از محل برخورد نیز آسیب وارد کنند. این امواج به دلیل تغییرات شدید و ناگهانی ولتاژ و جریان، می‌توانند باعث افزایش تنش‌های الکتریکی در تجهیزات همچون ترانسفورماتورها و کلیدهای قدرت شوند. انتشار این امواج در صورت عدم وجود مکانیزم‌های حفاظتی مناسب، می‌تواند به قطعی گسترده و کاهش کیفیت توان منجر شود. تجهیزات حفاظتی، مانند برق‌گیرها و سیستم‌های ارت، برای کاهش اثرات صاعقه طراحی شده‌اند. برق‌گیرها به عنوان یکی از مؤثرترین تجهیزات حفاظتی در برابر صاعقه، ولتاژهای گذرای ناشی از برخورد صاعقه را به زمین انتقال می‌دهند و مانع از عبور این ولتاژها به سایر بخش‌های شبکه می‌شوند. به همین

دلیل، انتخاب و نصب صحیح برق‌گیرها بر اساس مشخصات خطوط و شرایط محیطی نقش کلیدی در حفاظت از تجهیزات و کاهش خرابی‌های ناشی از صاعقه دارد(S. Bruno, G,2016).

۲-۲-۴-۲ بررسی گذراهای ناشی از کلیدزنی و تغییر بار

کلیدزنی و تغییر بار از جمله مهم‌ترین عوامل ایجاد پدیده‌های گذرا در سیستم‌های انتقال قدرت هستند. گذراهای ناشی از کلیدزنی معمولاً زمانی رخ می‌دهند که تجهیزات قدرت مانند کلیدهای قطع و وصل، ترانسفورماتورها یا بانک‌های خازنی به شبکه متصل یا از آن جدا می‌شوند. این عملیات‌ها به دلیل تغییرات ناگهانی در وضعیت مدار، باعث ایجاد تغییرات شدید در ولتاژ و جریان می‌شوند که به آن‌ها گذراهای کلیدزنی می‌گویند. این گذراها می‌توانند اثرات نامطلوبی بر عملکرد تجهیزات، از جمله افزایش تنش‌های الکتریکی و کاهش طول عمر آن‌ها داشته باشند. تغییر بار نیز از دیگر عواملی است که می‌تواند گذراهای قابل‌توجهی را در خطوط انتقال ایجاد کند. تغییرات ناگهانی در بار به‌ویژه در شبکه‌های صنعتی که با بارهای بزرگ و تغییرپذیر سروکار دارند، می‌تواند منجر به نوسانات سریع در ولتاژ و فرکانس شبکه شود(J. Deng,2014). این نوسانات ممکن است پایداری شبکه را تحت تأثیر قرار داده و باعث ایجاد ناپایداری‌های دینامیکی شوند. به‌طور کلی، تغییرات بار، به دلیل ایجاد تغییر در توان عبوری از خطوط و در نتیجه تغییر در افت ولتاژ، نقش مهمی در ایجاد پدیده‌های گذرا ایفا می‌کند. تحلیل گذراهای ناشی از کلیدزنی معمولاً نیازمند مدل‌سازی دقیق تجهیزات قدرت و رفتار الکترومغناطیسی آن‌ها است. استفاده از مدل‌های عددی و نرم‌افزارهای شبیه‌سازی مانند EMTP (Electromagnetic Transients Program می‌تواند در تحلیل دقیق این پدیده‌ها کمک‌کننده باشد. این نرم‌افزارها با فراهم کردن امکان شبیه‌سازی رفتار دینامیکی سیستم، می‌توانند گذراهای ناشی از کلیدزنی و تغییر بار را با دقت بالا پیش‌بینی کنند. این پیش‌بینی‌ها به طراحان شبکه کمک می‌کند تا اقدامات حفاظتی مناسب را برای کاهش اثرات منفی این گذراها در نظر بگیرند. گذراهای ناشی از کلیدزنی همچنین می‌توانند تأثیر مستقیمی بر عملکرد تجهیزات حفاظتی شبکه مانند رله‌ها و دیژنکتورها داشته

باشند(A. Samimi,2012). وقوع این گذراها ممکن است باعث تحریک نادرست تجهیزات حفاظتی شود و منجر به قطع غیرضروری بخش‌هایی از شبکه گردد. به همین دلیل، تنظیم دقیق تجهیزات حفاظتی و استفاده از سیستم‌های هوشمند برای تشخیص گذراهای مخرب از سایر حالت‌های کاری شبکه، اهمیت زیادی دارد. استفاده از تکنیک‌های جدید هوش مصنوعی و یادگیری ماشین نیز می‌تواند در این زمینه مؤثر باشد و دقت تشخیص و واکنش تجهیزات حفاظتی را افزایش دهد. کنترل و مدیریت گذراهای ناشی از کلیدزنی و تغییر بار برای تضمین پایداری و قابلیت اطمینان شبکه برق ضروری است. استفاده از روش‌های مناسب مانند سیستم‌های جبران‌سازی توان راکتیو، کلیدزنی نرم و برنامه‌ریزی دقیق برای تغییر بار، می‌تواند در کاهش شدت این گذراها و حفظ کیفیت توان کمک کند. با توسعه فناوری‌های نوین و استفاده از سیستم‌های کنترل هوشمند، امکان مدیریت بهتر این پدیده‌ها فراهم شده و می‌توان از بروز مشکلات احتمالی جلوگیری کرد(رحیمی،۱۴۰۱).

۲-۳ پیشینه تحقیق

۲-۳-۱ پیشینه داخلی

رحیمی و همکاران در سال ۱۴۰۱ در تحقیقی تحت عنوان" کنترل و پایداری فرکانس سیستم های قدرت به کمک طرح بارزدایی تطبیقی فرکانس کم " بیان داشتند که فرکانس یکی از کمیت های مهم سیستم قدرت است که هرگز نباید از مقدار نامی خود خارج گردد. در شرایط نرمال تغییرات بار, فرکانس توسط کنترل اتوماتیک تولید تنظیم می شود ولی زمانی که به دلیل شرایط خاص مانند جدا شدن شبکه پایین دست از شبکه اصلی یا خارج شدن قابل توجه توان تولیدی, عدم تعادل توان بین تولید و مصرف باعث شود که افت فرکانس سریع باشد در این صورت کنترل اتوماتیک تولید, توانایی لازم برای متوقف نمودن افت فرکانس را نداشته و فرکانس به سمت ناپایداری

میل می کند. اگر ناپایداری فرکانس به موقع و به صورت مناسب مدیریت نشود می تواند موجب خاموشی و ناپایداری شبکه گردد. بنابراین برای برگرداندن تعادل توان و جلوگیری از افت فرکانس به مقدار غیر مجاز, باید مقدار بار کافی در زمان مناسب قطع گردد. طرح های بارزدایی فرکانس کم مسئولیت نگهداری فرکانس را در محدوده مجاز به ازای کسری توان های شدید برعهده دارند. مشکل اصلی طرح های بارزدایی تطبیقی مرسوم, تخمین کسری توان اکتیو می باشد که با عدم قطعیت در مقدار محاسبه همراه می باشد. در واقع این محاسبات, وابستگی ولتاژ بارها را در تخمین کسری توان اکتیو به حساب نمی آورند که ممکن است اثرات قابل توجهی در نتایج و حتی فروپاشی سیستم داشته باشد. طرح بارزدایی پیشنهادی در این مقاله, با معرفی پارامتر ضریب تاثیر ولتاژ که از طریق شبیه سازی بدست می آید توانسته مشکل تخمین کسری توان را حل نماید و میزان قطعی بارهای سیستم را به صورت چشم گیری کاهش دهد. طرح بارزدایی تطبیقی پیشنهادی بر روی مدل دینامیکی سیستم تست ۹ باسه IEEE در نرم افزار متلب, پیاده و شبیه سازی شده است. نتایج نشان می دهند که طرح بارزدایی پیشنهادی در مقایسه با طرح های بارزدایی تطبیقی مرسوم از عملکرد بهتری برخوردار می باشد لذا این طرح پیشنهادی می تواند هم از نظر فنی و هم از نظر اقتصادی برای پیاده سازی در سیستم های واقعی مورد تایید باشد.

عبدلی و همکاران در سال ۱۴۰۰ در تحقیقی تحت عنوان" بهبود پایداری گذرای مبدل متصل به شبکه هنگام افت ولتاژ شدید با تکنیک امپدانس مجازی " بیان داشتند که با افزایش نفوذ منابع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر, دستورالعمل های شبکه خواستار عدم قطع این مبدل ها از شبکه هنگام رخداد خطا می باشند. این مبدل ها همچنین می بایست با تزریق توان راکتیو به رفع خطا کمک کنند. از آنجایی که شبکه های برق سلفی خالص نبوده و دارای مقاومت اهمی نیز هستند, این شبکه ها هنگام رخداد خطا با مشکل ناپایداری مبدل روبه رو می شوند. مبدل ها که جهت سنکرون ماندن با شبکه از حلقه قفل فاز (PLL) استفاده می کنند, هنگام رخداد خطای افت ولتاژ سنگین, دیگر قادر به حفظ پایداری با شبکه نیستند. در نتیجه این مبدل ها قادر به گذر از خطا نبوده

و می بایست از شبکه جدا شوند. این مقاله با ارائه روشی جدید مبتنی بر امپدانس مجازی در هنگام رخداد افت ولتاژ سنگین, پایداری سنکرون با شبکه برق را حفظ می کند. این روش نیاز به تخمین تقریبی امپدانس شبکه دارد و مبدل را مجازاً با نقطه ای که اتصال قوی تری دارد سنکرون می کند. با استفاده از روش پیشنهادی در هنگام افت ولتاژ, مبدل به شبکه متصل مانده و می تواند به شبکه توان راکتیو تزریق کند. نتایج شبیه سازی با استفاده از نرم افزار Matlab درستی روش پیشنهادی برای بهبود پایداری گذرای مبدل را نشان می دهد.

قربانی و همکاران در سال ۱۴۰۰ در تحقیقی تحت عنوان" دستیابی به دمپینگ بهینه سیستم قدرت بواسطه تنظیم ضریب مدولاسیون همزمان دو جبرانساز سری سنکرون استاتیکی در یک سیستم قدرت تک ماشینه با خطوط موازی " بیان داشتند که به دنبال رشد صنعت و بیش از پیش شدن تقاضای مصرف توان و نیز محدودیت های مرتبط با احداث خطوط انتقال جدید از یک سمت شاهد تراکم در توان جاری از خطوط خواهیم بود و از سوی دیگر این عامل بر افزایش تلفات توان شبکه مزید علت است. به دلیل زمانبر بودن و نیز هزینه بر بودن احداث خطوط جدید بایست امکانات موجود در شبکه را بسیج کرد تا در حد امکان تلفات را تقلیل و مدیریت تراکم و گرفتگی خطوط شبکه را میسر کرد. بواسطه بهینه کردن پارامترهای کنترلی در منابع تزریق کننده توان مولفه راکتیو و استعمال آنها در نقاط ضعیف شبکه، زمینه بهبود پروفیل ولتاژ شبکه فراهم می شود که این خود بر چالش های مرتبط با بحث تلفات و عملکرد گذرا و حالت مانای شبکه فائق می آید. با پیشرفت های اخیر در ادوات فکتس این فرصت وجود دارد تا با استفاده از این تجهیزات پارامترهای شبکه انتقال را بهبود داد. با کمک ادوات فکتس می توان تلفات شبکه انتقال را کاهش داد، پروفایل ولتاژ را بهبود داد، پایداری گذرا و دینامیکی و مانا را بهبود داد، قابلیت اطمینان را بهتر کرد، شاخص پایداری ولتاژ را افزایش داد و در نهایت به جبرانسازی توان راکتیو و کاهش گرفتگی خطوط کمک کرد. همچنین با بررسی رفتار سیستم های قدرت این موضوع قابل دریافت است که در هنگام عبور از یک نقطه کاری به نقطه کار دیگر نوساناتی روئت می شود که فرکانس و میرائی آنها تحت تاثیر

نقطه کار و نیز متاثر از ساختار شبکه می باشد. شرایطی که در تغییر نقطه کار در زاویه روتور ژنراتورهای سنکرون شبکه تجربه می شود و محتوای فرکانسی در حدود چند دهم هرتز تا چندین هرتز را داراست مصداقی از همین نوع نوسانات است. نقش ادوات فکتس در این مورد نیز باورناپذیر است. ادوات فوق الذکر تجهیزاتی هستند که قابلیت کنترل پارامترهای شبکه انتقال را دارا هستند که زمینه انتقال انرژی با کمترین هزینه در بخش سرمایه گذاری را با بهترین کیفیت فراهم می کند و نیز قادر است با فراهم کردن کنترل و مدیریت و رفع سریع مشکلات سیستم قدرت چالش های اصلی را از پیش رو بردارد. ادوات FACTS شامل انواع مختلفی می باشند که به صورت سری مانند TCSC و SSSC، بصورت موازی مانند TCR، SVC و STATCOM و یا سری - موازی مانند UPFC در خطوط برکار گرفته می شوند و موجبات بهبود بهره برداری شبکه انتقال در شرایط ماندگار و نیز موجبات اصلاح رفتار دینامیکی سیستم قدرت تحت شرایط گذرا را فراهم می نمایند. در این تحقیق بکارگیری دو SSSC مرتبط با هم بر روی یک شبکه حاوب خطوط انتقال موازی مورد بررسی قرار می گیرد و نتایج آن در حوزه میراسازی نوسانات و دمپینگ آنها گزارش می‌شود.

جباری مقدم و همکاران در سال ۱۳۹۹ در تحقیقی تحت عنوان" حذف بار هوشمند جهت حفظ پایداری ولتاژ- فرکانس در سیستم قدرت " بیان داشتند که پایداری سیستم قدرت از سال ۱۹۲۰ به عنوان یک مسئله مهم به منظور حفظ امنیت بهره‌برداری از سیستم شناخته شده است. بسیاری از خاموشی‌های سراسری که در شبکه‌های قدرت در دنیا رخ داده است دارای منشأ ناپایداری سیستم قدرت بوده است. لذا توجه بسیاری از صنایع و شرکت‌های برق به مطالعه و جلوگیری از این مسئله متمرکز شده است. گسترده شدن سیستم‌های قدرت، توسعه خطوط ارتباطی، ایجاد شبکه‌های به هم پیوسته ، افزایش میزان تقاضا و بهره‌برداری از سیستم قدرت در نواحی نزدیک به حاشیه پایداری انواع ناپایداری‌ها را در سیستم‌های قدرت به همراه داشته است. برای مثال پایداری ولتاژ، پایداری فرکانس و نوسانات بین ناحیه‌ای بیش از گذشته توجه مهندسین سیستم‌های قدرت را برانگیخته است. بنابراین فهم و درک درست از انواع مختلف ناپایداری‌ها و چگونگی به وقوع پیوستن آن‌ها جهت طراحی و بهره‌برداری

سیستم‌های قدرت بسیار ضروری است. تحلیل پایداری شامل معین کردن عوامل کلیدی ناپایداری شبکه قدرت و اتخاذ روش‌های بهبود عملکرد پایداری شبکه می‌باشد. دستیابی به یک استراتژی مناسب جهت بهبود پایداری سیستم قدرت، تنها با طبقه-بندی پایداری سیستم به انواع مختلف و شناخت آن امکان پذیر است. پایداری سیستم‌های قدرت معمولا به سه دسته پایداری ولتاژ، پایداری فرکانس و پایداری زاویه تقسیم بندی می گردد. این در حالی است که لزوما این سه نوع پایداری از یکدیگر مستقل نمی‌باشند. یعنی یک شبکه وقتی مثلا از لحاظ ولتاژی ناپایدار است، لزوما نمی‌توان گفت که از لحاظ فرکانسی پایدار است. اینچنین شرایطی بخصوص در حوادث بزرگ قابل مشاهده می‌باشد]۶-۱[. در تعریف انواع پایداری، پایداری زاویه‌ای به توانایی ماشین‌های سنکرون یک شبکه قدرت به هم پیوسته به حفظ همگامی خود پس از مواجه شدن با یک اغتشاش مربوط می باشد. 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 اختلال شدید در شبکه در نتیجه عدم تعادل بین تولید و مصرف مربوط می شود. این مسئله به توانایی حفظ یا بازیابی تعادل بین تولید و مصرف با یک حد حداقل تلفات مصرف بستگی دارد. ناپایداری به صورت نوسانات فرکانسی ماندگار مشاهده می‌گردد که منجر به خروج واحدهای تولیدی و یا حذف بار در شبکه می‌گردد]۷[-]۱۲[. نوع دیگر ناپایداری در شبکه‌های قدرت ناپایداری ولتاژ است. در سال‌های اخیر با توجه به رشد میزان مصرف و هزینه بالای احداث نیروگاه‌ها و خطوط انتقال به ویژه در سیستم‌های تجدید ساختار یافته، شبکه‌های قدرت بعضاً در نزدیکی حاشیه پایداری ولتاژ مورد بهره‌برداری واقع می‌گردند و لذا حفظ این نوع پایداری در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. وقوع خاموشی-های سراسری اخیر در برخی شبکه‌های قدرت مهم دنیا مانند فروپاشی شبکه شمال شرق آمریکا و کانادا در سال۲۰۰۳]۱۳[و فروپاشی شبکه قدرت جنوب سوئد در سال ۲۰۰۳]۱۴[گویای این مطلب می‌باشند. در ایران نیز به نظر می‌رسد که با توجه به افزایش میزان مصرف و هزینه

بالای احداث خطوط و نیروگاه‌های جدید، بهره‌برداری از شبکه در سطح بالایی از بارگیری در آینده مطرح خواهد بود. در این بین حذف بار به عنوان یکی از روش‌های بسیار پایه‌ای حفظ پایداری سیستم قدرت شناخته شده است. حذف بار سنتی شامل دو روش حفاظت مجزا بر اساس رله‌های تشخیص افت ولتاژ و افت فرکانس است. حذف بار فرکانسی یکی از روش‌های متداولی است که شرکت-های برق منطقه‌ای برای جلوگیری از کاهش فرکانس و ناپایداری فرکانسی شبکه قدرت استفاده می‌نمایند. پیاده‌سازی عملی این روش اولین بار پس از خاموشی سال ۱۹۶۵ آمریکای شمالی مورد توجه اکثر شرکت‌های برق آمریکا قرار گرفت. هدف اصلی روش حذف بار فرکانسی سنتی، حذف تدریجی درصدی از بار در هنگام افت فرکانس شبکه و رسیدن آن به مقادیر تعیین شده در محدوده مجاز است. زمان تاخیر در هر پله حذف بار برای جلوگیری از قطع نابه‌جا در هنگام پرش گذرای فرکانس در نظر گرفته شده است]۱۵[-]۲۰[. حذف بار ولتاژی در بسیاری از نقاط دنیا برای حفظ پایداری شبکه‌های محلی در مقابل فروپاشی ولتاژ به طور موفقیت آمیز به کار گرفته شده است. این روش به عنوان جایگزینی برای احداث نیروگاه، خطوط انتقال جدید و نصب جبران‌سازهای توان راکتیو به منظور بهبود حاشیه پایداری توان راکتیو و پروفایل ولتاژ در مناطق حساس به ولتاژ در شبکه نیز مطرح است. در این حالت حذف بار به عنوان ابزاری کم هزینه برای حفظ امنیت شبکه به کار می رود. این در حالی است که احداث نیروگاه و خطوط انتقال برای برآورده کردن نیازهای پایداری طولانی مدت شبکه به زمان زیادی نیاز دارد و از این رویکرد حذف بار ولتاژی چاره‌ای موقت برای حفظ پایداری شبکه است. همچنین حذف بار ولتاژی می‌تواند اقتصادی‌ترین روش برای مقابله با فروپاشی ولتاژ هنگام بروز حوادث در شبکه باشد]۲۱[. روش‌های حفاظتی حذف بار فرکانسی و ولتاژی با استفاده از اطلاعات اندازه‌گیری شده محلی عمل می‌کنند. پیاده‌سازی این روش‌ها با نصب رله‌های فرکانسی و ولتاژی در شبکه انجام می پذیرد که در اصطلاح حفاظت محلی است. این در حالی است که ماهیت حوادثی که باعث ناپایداری در شبکه می‌شوند به گونه‌ای است که اثرات آن‌ها عمومی و سراسری است. در نتیجه حفاظت گسترده شبکه و

بهبود پایداری گسترده براساس اندازه‌گیری‌های گسترده از نقاط مختلف شبکه مورد توجه قرار گرفت تا منجر به تاثیرگذاری هرچه بهتر بر مدل‌های ارائه شده و کنترل موثرتر ادوات در نواحی مختلف شبکه گردد.

رضوانی و همکاران در سال ۱۳۹۹ در تحقیقی تحت عنوان" بارزدایی بهینه در ریزشبکه جزیره‌ای با در نظر گرفتن وابستگی تولید و بار به ولتاژ و فرکانس " بیان داشتند که با توجه به افزایش بار و براساس شرایط اقتصادی و زیست محیطی، در حال حاضر عملکرد سیستم‌های قدرت نسبت به گذشته نزدیک به محدوده مجازشان شده است. از این‌رو، تولیدات پراکنده به طور گسترده‌ای به عنوان یک گزینه جایگزین ژنراتورهای سیستم‌های قدرت الکتریکی از نظر کیفیت توان و قابلیت اطمینان بالا در سیستم قدرت به کار گرفته شده است. با بکارگیری تولیدات پراکنده به صورت موازی و جدا از شبکه اصلی؛ هزینه انتقال و توزیع کاهش یافته است. یک سیستم قدرت توزیع در مقیاس کوچک شامل بار، خطوط، ذخیره‌سازها و منابع تولید پراکنده را ریزشبکه می‌نامند. در حالت جزیره‌ای ریزشبکه با چالش‌هایی روبرو است که بحث پایداری و تامین انرژی بارهای موجود در ریزشبکه از مهم‌ترین مسائل مورد بررسی می‌باشند. در حالت عملکرد جزیره‌ای ریزشبکه؛ ولتاژ و فرکانس ریزشبکه به دلیل اختلاف بین تولید و مصرف ممکن است دچار انحراف شوند. بنابراین، یک تغییر ناگهانی در تولید و مصرف، چالشی را برای پایدار کردن فرکانس و ولتاژ به عنوان پاسخ یک ریزشبکه هوشمند جزیره‌ای مطرح می‌کند. در زمان رخدادهای احتمالی شدید، عملکرد محدود الگوریتم‌های کنترلی به اندازه کافی تضمین‌کننده امنیت و عملکرد پایدار و عادی سیستم نمی‌باشند. در این مواقع، روش‌های کنترلی زیادی مطرح شده است که به واسطه حضور مبدل‌های الکترونیک قدرت توانسته‌اند به کنترل پایداری کمک کنند. اما در صورت ناکارآمدی این روش‌های کنترلی نیاز به داشتن یک روش مطمئن برای پایدارسازی ریزشبکه است. روش بارزدایی به عنوان آخرین راه‌حل مطمئن برای جبران‌سازی ولتاژ و فرکانس در رسیدن به محدوده مجازشان به کار گرفته می‌شود. معمولا در روش بارزدایی یکی از دو متغیر ولتاژ و فرکانس برای تعیین میزان بارزدایی مطرح شده است. اما، از آنجا که هر دو مولفه در مسئله پایداری موثر و مهم هستند در

نظر گرفتن تنها یکی از این دو متغیر کافی نمی‌باشد. از این رو، بهتر است هر دو مولفه مورد توجه برای انجام بارزدایی قرار گیرند؛ تا بهترین نتیجه ممکنه با کمترین خطا حاصل شود. در این پایان‌نامه برای رسیدن به پایداری با در نظر گرفتن هر دو متغیر ولتاژ و فرکانس ابزاری را برای محاسبات سریع برای پیدا کردن خطا در ریزشبکه مطرح شده است؛ به نام پخش بار فرکانسی که با نرم‌افزار MATLAB، شبیه‌سازی شده است. در این پخش بار به میزان انحراف ولتاژ براساس الگوریتم خطی PLN پرداخته شده است. سپس، براساس محاسبات و تخمین بسیار دقیق در حالت زمان- واقعی در مدت زمان کوتاهی شاخص‌های میزان بارزدایی محاسبه می‌شوند و با روش بارزدایی دو متغیره ولتاژ و فرکانس بارزدایی بهینه در جهت پایداری و جبران‌سازی ولتاژ و فرکانس مطرح شده است. این مسئله در دو ریزشبکه کوچک و بزرگ بررسی شده و صحت نتایج آن‌ها در این پایان‌نامه ارائه شده است.

زحمتی و همکاران در سال ۱۳۹۸ در تحقیقی تحت عنوان" ارائه یک روش برای محاسبه ی ماتریس تبدیل وابسته به فرکانس خطوط انتقال به شکل هموار " بیان داشتند که مدل سازی خطوط انتقال جهت تحلیل رفتار گذرای الکترومغناطیسی, نیازمند محاسبه ی ماتریس تبدیل مدال در محدوده ی وسیع فرکانسی می باشد. در این مقاله یک چهارچوب جامع جهت محاسبه ی ماتریس تبدیل به شکل هموار ارائه شده است. بر این اساس, در هر فرکانس یک مجموعه جواب عمومی برای بردارهای ویژه ی متناظر با هر مقدار ویژه محاسبه می شود. سپس بر اساس یک معیار هموار کننده و یک الگوریتم بهینه سازی, در هر فرکانس مجموعه ی بردارهای ویژه به-گونه ای انتخاب می شوند که از جهش های ناگهانی جلوگیری شده و هموار‌بودن تابع برازش شده برای المان های مختلف ماتریس تبدیل تضمین شود. الگوریتم پیشنهادی روی یک سیستم سه فاز کابل زیرزمینی و خط هوایی به منظور به دست آوردن ماتریس تبدیل پیاده سازی شده است. نتایج شبیه سازی حاکی از موثر بودن الگوریتم به کاررفته در محاسبه ی ماتریس تبدیل به شکل هموار و با دقت خیلی بالا می باشد. همچنین این الگوریتم در شرایطی که نرخ نمونه

برداری فرکانسی کاهش یابد, همچنان دقت قابل توجهی را از خود نشان خواهد داد؛ به طوری که قابلیت ردیابی قابل قبولی را در نرخ های نمونه برداری پایین از خود نشان می دهد.

مهدوی و همکاران در سال ۱۳۹۸ در تحقیقی تحت عنوان" حضور بهینه ی ادوات FACTS پیش از وقوع خطا جهت بهبود پایداری گذرای سیستم قدرت بر اساس اختلاف زاویه ولتاژ ترمینال ژنراتورها " بیان داشتند که حفظ پایداری گذرای سیستم قدرت بستگی به عوامل مختلفی از جمله شرایط اولیه ی سیستم قبل از وقوع خطا دارد, لذا می توان انتظار داشت که با تغییر متغیرهای سیستم مانند زاویه ی روتور ژنراتورها در حالت ماندگار سیستم بتوان پایداری شبکه در برابر خطا را افزایش داد, این تغییر با حضور دائم ادوات FACTS و تنظیم بهینه آن ها به صورت آنلاین امکان پذیر است. زمان بحرانی رفع خطا به عنوان دقیق ترین معیار ارزیابی پایداری گذرا خود می تواند تابع هدف این مسئله ی بهینه سازی باشد, ولی تعیین زمان بحرانی رفع خطا که مستلزم شبیه سازی حوزه ی زمان شبکه ضمن بررسی وقوع مکرر خطا می باشد امری زمان بر است و برای تنظیم آنلاین ادوات FACTS در یک سیستم قدرت که در هر لحظه متغیرهایش در حال تغییر هستند مناسب نیست. در این مقاله جهت بهبود پایداری گذرای یک شبکه ی هوشمند از طریق تنظیم آنلاین ادوات FACTS تابع هدف جدیدی بر اساس کاهش اختلاف زاویه ی ولتاژ ترمینال ژنراتورها ارائه می شود که سرعت بهینه سازی را به طرز چشمگیری افزایش می دهد. کمینه ساختن این تابع هدف با به کارگیری بهینه ادوات FACTS, معادل بیشینه ساختن پایداری گذرا خواهد بود. علاوه بر تنظیمات ادوات FACTS نوع, تعداد و مکان بهینه آنها نیز لحاظ می شود و در تعیین تعداد این ادوات هزینه ی سرمایه گذاری نیز لحاظ می شود.

بی جامی و همکاران در سال ۱۳۹۸ در تحقیقی تحت عنوان" طراحی پایدارساز مد لغزشی پیش بین گسسته تحت شبکه به منظور حذف نوسانات فرکانس پایین در سیستم های قدرت با جغرافیای پراکنده " بیان داشتند که

رشد سریع پیشرفت های تکنولوژی و فناوری های ارتباطی ازیک سو و نیز توسعه و پراکندگی جغرافیایی فرآیندهای صنعتی ازسوی دیگر, استفاده از سیستم های کنترل تحت شبکه را در کنترل سیستم ها با جغرافیای پراکنده اجتناب ناپذیر نموده است. در این سیستم ها ارتباط بین اجزای کنترلی ازطریق یک شبکه مخابراتی برقرار می گردد که به دلیل شرایط غیرایده آل شبکه مخابراتی, مشکلاتی مانند گم شدن بسته های اطلاعات و تاخیر زمانی, به عنوان مشکلات ذاتی این سیستم ها, مطرح می شود که می تواند منجر به عملکرد نامناسب و حتی ناپایداری کل سیستم گردد. در این مقاله یک ساختار کنترل مد لغزشی پیش بین گسسته تحت شبکه جدید به منظور پایدارسازی نوسانات فرکانس پایین یک شبکه قدرت تحت شبکه با جغرافیای پراکنده پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی شامل دو مرحله است. ابتدا یک تابع سوئیچینگ مد لغزشی جدید به منظور طراحی پایدارساز مد لغزشی پیشنهاد و سپس یک الگوریتم پیش بین جدید به منظور جبران رفتار غیرایده آل شبکه مخابراتی, شامل تاخیر القاشده از سوی شبکه و گم شدن بسته های اطلاعاتی ارائه شده است. به منظور نشان دادن قابلیت و توانایی روش پیشنهادی, مطالعات عددی بر روی یک سیستم قدرت نمونه ۵-ناحیه-۱۶ ماشینه و در حضور دو نوع خطای سه فاز و تک فاز ارائه شده است. همچنین, به منظور انجام مقایسه, یک پایدارساز تحت شبکه با ساختار پیش فاز-پس فاز طراحی شده است. نتایج شبیه سازی قابلیت و برتری روش پیشنهادی را نشان می دهند.

اخباری و همکاران در سال ۱۳۹۸ در تحقیقی تحت عنوان" الگوریتمی جهت آشکارسازی خطا در خطوط انتقال HVDC " بیان داشتند که در این مقاله با استفاده از مشخصه ی گذرای مؤلفه ی خطای ولتاژ و جریان اندازه گیری شده در یک طرف خط انتقال, الگوریتمی برای آشکارسازی خطا در خطوط HVDC پیشنهاد شده است. در الگوریتم پیشنهادی, هنگامی که واحد شروع عملکرد حفاظت در سیستم حفاظت وجود خطایی را تایید کند, الگوریتم آشکارساز خطا از میزان همبستگی سیگنال های ولتاژ و جریان خطا برای تعیین جهت خطا استفاده می کند, سپس با استفاده از مولفه هارمونیکی فرکانس بالای جریان خطا, وجود خطا در زون حفاظتی تشخیص داده

می شود. درانتها, با حذف کوپلینگ بین جریان های قطب مثبت و منفی خط انتقال, قطب دارای خطا از قطب سالم در سیستم دوقطبی تمایز داده می شود. نتایج شبیه سازی برای انواع خطا ها گویای صحت عملکرد روش پیشنهادی می باشد.

بهنیا و همکاران در سال ۱۳۹۸ در تحقیقی تحت عنوان" کلیدزنی انتقال در برنامه ریزی یک پارچه تعمیرات انتقال و تولید در سیستم قدرت " بیان داشتند که در این مقاله تأثیر کلیدزدنی بهینه انتقال (TS) بر برنامه ریزی یک پارچه تعمیرات واحدهای نیروگاهی و خطوط انتقال (IMS) بررسی و مدل شده است. مسئله برنامه ریزی یک پارچه تعمیرات واحدهای نیروگاهی و خطوط انتقال با در نظر گرفتن کلیدزنی بهینه به صورت یک مسئله برنامه ریزی خطی مختلط با عدد صحیح فرموله شده است. وجود متغیرهای فراوان برنامه ریزی تعمیرات با بازه زمانی های مختلف از یک سو و متغیر باینری کلیدزدنی بهینه انتقال ازسوی دیگر, حل این مسئله را با استفاده از حل کننده های متداول موجود دشوار ساخته است. در این مقاله یک روش تجزیه به منظور مدیریت بار محاسباتی مسئله برنامه ریزی جامع تعمیرات و کلیدزنی بهینه ارائه شده است که مسئله برنامه ریزی یک پارچه تعمیرات با کلیدزنی بهینه انتقال را به دو زیرمسئله برنامه ریزی یک پارچه تعمیرات (IMS) و کلیدزدنی بهینه خطوط انتقال (TS) تجزیه می کند و این دو زیرمسئله را به صورت تکراری حل خواهند شد. مدل و روش تجزیه ارائه شده, برروی سیستم تست قابلیت اطمینان IEEE پیاده سازی شده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که اضافه کردن TS به IMS, برنامه تعمیرات خطوط انتقال و واحدهای نیروگاهی را تغییر می دهد و منجر به کاهش هزینه می گردد.

حسینی‌پور و همکاران در سال ۱۳۹۸ در تحقیقی تحت عنوان" ارتقاء پایداری گذرای سیستم قدرت دو ماشینه با استفاده از جبرانساز ایستای توان راکتیو " بیان داشتند که با افزایش تقاضای مشترکین شبکه توزیع انرژی الکتریکی

واضافه شدن مشترکین جدید و بدنبال آن افزایش بار خطوط انتقال بلند، پایداری وتامین نیاز مشترکین یعنی برق با فرکانس و ولتاژ ثابت به یکی از مسائل مهم و قابل توجه برای مهندسین و بهره برداران شبکه انتقال تبدیل شده است. در این میان پایداری گذرای سیستم به هنگام وقوع خطاها و نوسانات حاصل از آنها دارای پیچیدگی خاصی بوده و نقش مهمی در شبکه انتقال دارند . مشکل پایداری گذرای سیستم قدرت و بارهای غیر خطی متصل به آن که بعنوان بزرگ‌ترین پروژه دست ساز انسان، همچنان بی پاسخ باقی مانده است. این مشکل بسیار پیچیده و غیر خطی که در اثرنوسانات الکترو مکانیکی ژنراتورها ، اتصال کوتاه در خطوط انتقال و بأس‌ها، تخلیه الکتریکی جوی روی خطوط انتقال ، کلیدزنی ایجاد می‌گردند، منجر به ناپایدار شدن سیستم قدرت می‌شوند. یکی از راه کارهای مقابله با ناپایداری سیستم قدرت استفاده از ادوات FACTS است. SVC یکی از اجزای شنت FACTS است که نقش بسیار مهمی در کاهش پیچیدگی وحالت غیر خطی شبکه برق واز نظر دینامیکی و اختلالات گذرا دارد. SVC در واقع یک دستگاه تطبیق امپدانس خودکار است و قابلیت افزایش ظریب قدرت تا نزدیکی یک را دارد. از محاسن SVC پاسخ آنی آن به تغییرات ولتاژ می‌باشد. در این پروژه قصد داریم به نقش SVC در سیستم قدرت به هنگام وقوع خطاهای بزرگ مانند اتصال کوتاه سه فاز و تأثیر آن بربهبود حالات گذرای آن بپردازیم. روش پیشنهادی برای استفاده از SVC در ابتدا می‌بایست مدل ایده آل آن را بررسی نمود و سپس وارد مدل‌های حقیقی گردید در ادامه انواع این جبران سازها، اصول کار هریک و با استفاده از نمودارهای بدست آمده، تفاوت‌ها و مزیت‌های آنها را بررسی نمود تا بتوان سیستم قدرت فعلی که ترکیبی از آن‌ها می‌باشد را مورد بحث و بررسی قرار داد که در این تحقیق سعی شده است این کار بصورت کامل انجام شود. آنچه حاصل تحقیق شد نشان می‌دهد که SVC موجب پایداری ولتاژ سیستم و زاویه روتور می‌گردد. همچنین SVC بر قطب‌های سیستم اثر گذاشته و بهبود پایداری سیستم و جلوگیری از نوسانات بعد از خطاهای آن را بدنبال دارد.

صفری و همکاران در سال ۱۳۹۶ در تحقیقی تحت عنوان" طراحی بهینه پایدارساز سیستم قدرت با استفاده از الگوریتم بهینه سازی پرنده فاخته (COA) " بیان داشتند که میرایی نوسانات الکترومکانیکی برای تضمین عملکرد قابل قبول سیستم امری ضروری است. حال هنگامی که در سیستم انتقال خطایی رخ دهد, توان انتقالی در خطوط و ولتاژ شین ها دچار نوسان شدیدی می شود. برای از بین بردن این نوسانات پایدارساز سیستم قدرت (PSS) مورد استفاده قرار می گیرد. برای بهینه کردن عملکرد کلی سیستم, مساله طراحی پارامترهای PSS به یک مساله بهینه سازی با تابع هدف پیشنهادی غیرخطی تبدیل شده و با به کارگیری الگوریتم های بهینه سازی فاخته (COA) و الگوریتم جستجوی فاخته (CS) مساله بهینه سازی حل می شود. پایدارسازها طوری تنظیم می شوند که نوسانات توان اکتیو در سیستم انتقال به مقدار قابل توجهی کاهش یابد. طراحی و شبیه سازی پارامترهای PSS در سیستم قدرت چهار ماشینه استاندارد تحت شرایط کاری مختلف مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته است. همچنین تحلیل عملکرد سیستم چندماشینه, برتری PSS طراحی شده با COA در مقایسه با PSS طراحی شده با CS را نشان می دهد.

۲-۳-۲پیشینه خارجی

در عصر حاضر، شبکه‌های برق به دلایل متعددی از جمله تقاضای فزاینده‌ی مصرف‌کنندگان، گسترش استفاده از فناوری‌های اطلاعاتی در سیستم‌ها، و تنوع بالای منابع تولید انرژی، در معرض تحولات مستمری قرار دارند. این تحولات به طور مستقیم بر کیفیت خدمات توزیع برق تأثیر می‌گذارند و اهمیت ارائه‌ی انرژی با کیفیت و مقدار مناسب به مصرف‌کنندگان بزرگ را بیشتر می‌کنند (Fișcă et al., 2023; Codoban et al., 2021; Ignat, 1995). از این رو، کیفیت برق توزیع شده به یک دغدغه‌ی مهم تبدیل شده و اطمینان از کیفیت برق تحویلی ضرورت دارد تا شبکه‌های برق به سمت شبکه‌های هوشمند تکامل یابند (Bică, 2007; Moldovan & Vătău, 2001; et al). کیفیت توان را می‌توان با توجه به سه جنبه‌ی مهم: در دسترس بودن، کیفیت موج، و کیفیت تجاری، تعریف و ساده‌سازی کرد. از دیدگاه اپراتور شبکه توزیع، در دسترس بودن انرژی به عنوان یک عامل حیاتی برای حفظ قابلیت اطمینان بالا در نظر گرفته می‌شود؛ به همین دلیل، تشخیص عیب در اولویت کاری اپراتورها قرار دارد تا تأمین انرژی مطمئن برای مصرف‌کنندگان تضمین شود.(Codoban et al., 2021)

نظارت بر پارامترهای الکتریکی شبکه اجازه می دهد تا بین رژیم عملیاتی عادی و ظاهر یک خطا یا عملکرد غیرعادی شبکه تمایز قائل شود که به موجب آن تغییرات اساسی مانند:

افزایش جریان و کاهش ولتاژ فاز و در نتیجه کاهش امپدانس بین نقطه اندازه گیری و محل خطا.

افزایش یا کاهش ولتاژ در نتیجه سوئیچینگ؛

نوسانات فرکانس؛

افزایش دمای مسیرهای فعلی

عملکردهای حفاظتی و تشخیص عیب از طریق نظارت بر انحرافات پارامترهای سیستم اجرا می‌شوند (Vulcu, et al. 2006; 2007). بر نیاز به بهبود سیستم‌های حفاظتی خطوط برق تأکید دارد و عملکرد خطوط هوایی برق را در برابر خطاها تحلیل می‌کند، با تمرکز بر تأثیر عوامل خارجی بر سیستم‌های حفاظتی از فاصله. این تحقیق به دنبال توسعه سیستمی هوشمند برای حفاظت از راه دور با استفاده از الگوریتم‌های تطبیقی است که تغییرات شرایط آب و هوایی را برای افزایش حساسیت حفاظتی در نظر می‌گیرد. این پژوهش راه‌هایی را برای افزایش پایداری عملیاتی خطوط برق با توسعه الگوریتم‌های جدید برای تشخیص دقیق‌تر خطاها بر اساس نه تنها اندازه‌گیری‌های عملیاتی بلکه بر اساس پارامترهای محیطی خارجی مانند دما، رطوبت هوا، سرعت باد و رطوبت خاک مورد بررسی قرار داده است. در صورت وقوع خطا در یک خط محافظت شده، داده‌ها از ترانسفورماتورهای جریان و ولتاژ دریافت می‌شوند، و مقادیر خطا با نقاط تنظیم حفاظت مقایسه می‌شود تا حفاظت فعال گردد. این رویکرد استانداردی است که در مطالعه ما توصیف شده‌است. در مقابل، الگوریتم پیشنهادی توسط Akhmedova et al. (2021) در تعیین محل خطا مفید است، اما به تسریع زمان‌بندی حفاظت کمکی نمی‌کند، و در نتیجه، رویارویی با مقادیر خطای مشابهی است بدون ارائه مزایای اضافی استفاده از ساختار کنترل برای شناسایی سریع خطا و اقدام به راه‌اندازی خط. رله‌های حفاظتی مدرن عمدتاً بر اساس فاز هستند و به دلیل نیاز به پنجره مشاهده کامل چرخه برای تشخیص دقیق خطا، با تأخیر مواجه هستند؛ بنابراین، Schweitzer et al. (2015) چندین تکنیک حفاظتی را مورد بررسی قرار می دهند که پتانسیل بهبود سرعت عملکرد سیستم‌های حفاظتی خطوط برق را دارند. این رویکردها می‌توانند به کاهش زمان تاخیر مرتبط با تشخیص دقیق خطا کمک کنند، ارائه یک مزیت قابل توجه در کاهش اختلالات و محدود کردن آسیب به سیستم در زمان وقوع خطا.

سیستم های حفاظت خودکار خط برق ۱۱۰ کیلوولت، که در این سند مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته اند، امکان ثبت وقایع رخ داده در طول زمان را فراهم می کند و دانش اولیه را برای تجزیه و تحلیل خطا و دید واضحی از رویداد در زمان ارائه می دهد. این سیستم های حفاظتی در پست های ۲۰/۱۱۰ کیلوولت، در دو سر خطوط اتصال قرار دارند. ابزار دقیق مقادیر خطا با استفاده از نرم افزار اختصاصی انجام شد که امکان اتصال به داده های ثبت

شده توسط پرتوربوگراف یک سیستم حفاظتی، یعنی ترمینال دیجیتال را فراهم می کرد. علل، بزرگی و پیامدهای خطا در شبکه برق با استفاده از این نرم افزار برآورد شد.
حفاظت از راه دور در حال حاضر عنصر اساسی مورد استفاده در سیستم های حفاظتی برای خطوط برق ۱۱۰ کیلوولت است.
مزایای اصلی حفاظت از راه دور عبارتند از:

کاهش وابستگی حساسیت به رژیم عملیاتی شبکه؛
قطع کردن خطاها با تاخیر کوتاه تر، هر چه به محل نصب رله نزدیک تر باشد.
تعیین محدوده مناطق حفاظت شده با دقت کافی.

در اصل، زمانی که خطایی رخ می‌دهد، حفاظت فاصله امپدانس بین محل نصب و محل اتصال کوتاه را اندازه‌گیری می‌کند. ماژول فاصله به طور متوالی مقادیر اندازه‌گیری شده را با امپدانس‌های تنظیم شده بر روی رله مقایسه می‌کند، که این امپدانس‌ها طول مناطق حفاظت شده را که معمولاً به چهار مرحله تقسیم می‌شوند، منعکس می‌کنند. امپدانس نسبت دامنه‌های ولتاژ و جریان در طول خط برق است (Akhmedova et al., 2021; Schweitzer et al., 2015).
با این حال، حفاظت فاصله معمولی با چالش‌هایی مواجه است که می‌تواند به عملکرد نادرست منجر شود. از این رو، روش‌های جدیدی برای تخمین فاصله تا خطا در حضور تغذیه از منابع انرژی جایگزین مانند خورشید، باد و باتری‌ها پیشنهاد شده است. هدف، بهبود حفاظت خط است که بر اساس اندازه‌گیری‌های محلی و محاسبات آفلاین استوار است، اما از مدل‌های ریاضی یا شبکه‌های عصبی برای ارزیابی ماهیت خطا و به دست آوردن واکنش سریع‌تر حفاظتی استفاده نمی‌کند.(Hariri & Crow, 2021)
یک فرد باید بتواند دقیقاً پیش‌بینی کند که چگونه اجزای مختلف شبکه، مانند ترانسفورماتورها، خطوط انتقال برق، کابل‌ها، پست‌ها و غیره، برای شبیه‌سازی مؤثر رفتار کلی شبکه عمل می‌کنند. داشتن یک مدل کل‌نگر که داده‌های مشاهده شده را به درستی توضیح دهد و یا داشتن یک مدل فیزیکی از آن بخش خاص از شبکه، دو گزینه موجود است .(Hariri & Crow, 2021; Aksoy, Raulf, & Vietor, 2021) این کار بر روی مدل‌سازی کل نگر متمرکز بوده و دسته‌های اولیه رویکردهای ریاضی شامل تجربی، تحلیلی، عددی یا ترکیبی از آن‌هاست. مقادیر تجربی توصیف شده و سپس معادلات ریاضی برای مطابقت با داده‌های تجربی اصلاح می‌شوند (Bamigbola, Ali, & Oke, 2014).

در مواردی که از فرمول‌های ریاضی در رویکردهای تحلیلی برای توضیح دقیق شبیه‌سازی‌ها استفاده می‌شود، و زمانی که این امکان پذیر نیست، به تخمین‌های عددی روی می‌آورند (Iešmantas & Alzbutas, 2019;

ابزارها می‌توانند در زمینه مهندسی سیستم‌های مبتنی بر (Stavropoulos & Panagiotopoulou, 2022). مدل به کار روند تا امکان پردازش داده‌ها توسط سیستم‌های مناسب در یک محیط توسعه توزیع شده فراهم شود (Aksoy, Raulf, & Vietor, 2021). مهندسی سیستم مبتنی بر مدل، از انواع تکنیک‌های مدل‌سازی عملی از جمله شناسایی تجربی پشتیبانی می‌کند و با طراحی سیستم‌های پیچیده سر و کار دارد، بیشتر به راه‌حل‌های نقطه‌ای می‌پردازد. هدف ادغام نتایج بسیاری از تلاش‌های توسعه در یک مدل مرکزی از سیستم است (Coloşi et al., 2013; Colosi et al., 2002).

درک دقیق علل خرابی خطوط برق، کنترل مؤثرتری بر کل شبکه را ممکن می‌سازد، زیرا قابلیت اطمینان بالای خطوط انتقال برق، یکی از عوامل کلیدی است که پایداری شبکه را در طول زمان تضمین می‌کند (Lesek, Ladislav, & Zdenek, 2015). با توجه به این موارد، مدل‌سازی خطوط انتقال قدرت مطلوب است که علاوه بر ارائه فرصتی برای تأیید هرگونه خطا، مزایای قابل توجهی را نیز ارائه می‌دهد. مدل به دست آمده برای آزمایش احتمال واقعی بروز یک خطای گذرا یا پایدار مناسب است.(Drexler et al., 2022)

بنابراین، این رویکردها در ارتقاء دقت و کارایی سیستم‌های حفاظتی و تشخیص خطا در شبکه‌های برق، بسیار حیاتی هستند. با استفاده از مدل‌های پیشرفته و تکنیک‌های جدید در مهندسی و مدیریت شبکه‌های برق، می‌توان به سطح بالاتری از پایداری و قابلیت اطمینان دست یافت.

گسل ها بر اساس ماهیت خود به گسل های گذرا و پایدار تقسیم می شوند. تفاوت اصلی بین دو نوع خطا ارائه شده به عنوان مطالعات موردی، مدت زمان خطا یا رویداد در شبکه است. خطاهای گذرا در مقایسه با خطاهای دائمی که نیاز به مداخله برای تعمیر فیزیکی شبکه دارند، توسط سیستم اتوماتیک در مدت زمان بسیار کوتاهی برطرف می شوند. گسل‌های گذرا معمولاً شامل تماس لحظه‌ای با پوشش گیاهی، تماس پرنده یا حیوان می‌شوند و به عنوان رویدادهای موقتی شناخته می‌شوند، در حالی که گسل‌های پایدار، که به عنوان رویدادهای دائمی نیز شناخته می‌شوند، در اثر شکست عایق هادی‌های زنده، هادی‌های شکسته یا نوعی آسیب مکانیکی ایجاد می‌شوند. عملکرد یک رله حفاظتی که برای حفاظت سریع و قابل اعتماد خط انتقال توصیف شده است، به پاسخگویی به شرایط گذرا و دائمی یا خطاهای گذرا و پایدار می‌پردازد. یک مفهوم طرح فیلتر دوگانه بر اساس اصل فیلترهای پنجره داده چندگانه توسعه یافته است، که در آن ترکیب داده‌های ولتاژ و جریان از پنجره‌های نیم چرخه و یک چرخه برای به دست آوردن تشخیص عنصر فاصله و دستیابی به زمان‌های قطع سریع مورد استفاده قرار می‌گیرد. با استفاده از محاسبات ریاضی و فازهای رله ولتاژ و جریان مخصوص یک حلقه امپدانس، شش حلقه امپدانس برای تشخیص همه خطاها ضروری است. یک الگوریتم که سه گشتاور افزایشی ولتاژ و جریان را بین فازها برای تعیین خطا محاسبه می‌کند، برای پشتیبانی از گزینش‌پذیری خاموش شدن به دلیل ناپایداری فازورها مورد نیاز است. با این حال، سود در زمان ناشی از کاربرد این مفهوم مشخص نشده است؛ تنها نتایج مقایسه شده حاصل از استفاده از روش‌های مختلف تشخیص ذکر شده است (Ştefănescu & Tîrnovan, 2004; Drexler et al., 2022).

اگر کسی به شناسایی تابع انتقال بر اساس مقادیر مشاهده‌شده خطاهای گذرا و پایدار نیاز دارد، که یک سیستم توزیع را بی‌ثبات می‌کند، یک مدل شناسایی تجربی می‌تواند بسیار مفید باشد. واقعیت اینکه تمام داده‌های سیستم مربوطه در یک مدل سیستم جامع جمع‌آوری می‌شوند، شناسایی تجربی را به طور قابل‌توجهی نسبت به روش‌های مبتنی بر سند برتری می‌دهد.(Aksoy, Raulf, & Vietor, 2021)

اولین هدف این تحقیق، توسعه یک مدل ریاضی است که با تجزیه و تحلیل امواج ولتاژ و جریان که امپدانس خط برق را تشکیل می‌دهند، با دقت بالا وقوع خطا را پیش‌بینی می‌کند با هدف افزایش پایداری شبکه‌های توزی ع الکتریکی. در مرحله دوم، هدف ایجاد روشی است که امکان پاسخ سریع‌تر به زمان رفع خطا را فراهم آورد، تا خصوصیات تحریک بهبود یافته‌ای در دستگاه‌های حفاظتی به دست آید. از طریق مقایسه گرافیکی پیش‌بینی‌های مدل توسعه یافته با داده‌های تجربی، قصد داریم درستی مدل را اثبات کنیم (Hariri & Crow, 2021; Akhmedova et al., 2021).

سایر روش‌های تشخیص خطا شامل حفاظت در برابر جریان اضافی با حداقل انسداد ولتاژ یا حفاظت در ولتاژ پایین، مشروط به حفاظت جریان اضافه است. این روش‌ها، پاک‌سازی انتخابی با سرعت بالا خطاها در خطوط برق فشار قوی را ارائه نمی‌دهند و بنابراین در نظر گرفته نمی‌شوند، زیرا خطاها باید سریع‌تر از زمان بحرانی رفع خطا فعال شوند؛ در غیر این صورت، ممکن است خط برق آسیب ببیند و سیستم ممکن است از دست دادن ثبات و احتمالاً حتی خاموشی را تجربه کند.(Lesek, Ladislav, & Zdenek, 2015; Drexler et al., 2022)

این بررسی‌ها نشان می‌دهند که پیشرفت‌های اخیر در زمینه تشخیص خطا و حفاظت از خطوط انتقال برق، امکان بهبود چشمگیر در پایداری و قابلیت اطمینان شبکه‌های الکتریکی را فراهم آورده‌اند. توسعه مدل‌های ریاضی دقیق و استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته برای تشخیص سریع و دقیق خطاها، نقش مهمی در افزایش کارایی سیستم‌های حفاظتی دارد. به این ترتیب، مهندسین قادر خواهند بود تا با استفاده از داده‌های دقیق و مدل‌سازی پیشرفته، پاسخ‌های مناسبی را برای جلوگیری از اختلالات وسیع‌تر در شبکه طراحی کنند، به گونه‌ای که امنیت و پایداری سیستم در برابر خطاهای احتمالی تضمین شود.

سیپلتا و همکاران در سال ۲۰۲۲ در تحقیقی تحت عنوان" ملاحظات در مورد ارزیابی ریپل ولتاژ در شبکه برق " بیان داشتند که اجزای اصلی مورد استفاده برای ادغام در سیستم قدرت منابع انرژی تجدیدپذیر پراکنده، اساساً در dc، f.i کار می کنند. باتری ها، سیستم های فتوولتائیک و پیل های سوختی. علاوه بر این، اغلب بارهای متداول در حال حاضر از برق dc به صورت داخلی استفاده می کنند که معمولاً توسط یکسو کننده ها ارائه می شود. در نتیجه، استفاده از انرژی تولید شده در صورتی که مستقیماً از طریق یک شبکه dc یا ریزشبکه ها به بارگذاری تحویل داده شود، با بهبود راندمان، هزینه ها و قابلیت اطمینان می تواند موثرتر باشد. HVDCها در حال حاضر به دلیل سهولت در انتقال قدرت فله ای در مسافت های طولانی به طور گسترده مورد استفاده قرار می گیرند. علیرغم استفاده گسترده از شبکه برق DC، تعریف و ارزیابی کیفیت توان در dc هنوز در وضعیت غیر

استانداردی قرار دارد. این مقاله بر روی یک پدیده PQ خاص معمولی شبکه‌های dc تمرکز می‌کند: ریپل ولتاژ. مشاهداتی بر روی منابع این پدیده انجام شده و روشی برای اندازه‌گیری شدت این اختلال با معرفی شاخص‌های مصنوعی، همچنین با استناد به جدیدترین استانداردهای فنی، با محدوده خاص ارزیابی سطح سازگاری پیشنهاد شده است. تکنیک‌های اندازه‌گیری پیشنهادی برای داده‌های تجربی به‌دست‌آمده در منبع تغذیه یک سیستم راه‌آهن dc اعمال می‌شوند.

رضا و همکاران در سال ۲۰۲۰ در تحقیقی تحت عنوان" مروری بر روش های عیب یابی در سیستم های انتقال قدرت" بیان داشتند که پایداری تابشی در سیستم های قدرت مهم است. برای بازگرداندن ثبات گذرا، اختلالاتی مانند گسل ها باید از هم جدا شوند. بررسی جامع روش های عیب یابی در سیستم انتقال قدرت در این مقاله ارائه شده است. به طور معمول، نمونه های ولتاژ و جریان برای تجزیه و تحلیل مستقر می شوند. سه کار/موضوع؛ تشخیص خطا، طبقه بندی و مکان به طور جداگانه ارائه شده است تا درک منطقی تر و جامع تری از مفاهیم ارائه شود. استخراج ویژگی، تبدیل با روش‌های کاهش ابعاد مورد بحث قرار می‌گیرد. تکنیک‌های طبقه‌بندی و مکان‌یابی خطا عمدتاً از هوش مصنوعی ((AIو روش‌های پردازش سیگنال استفاده می‌کنند. پس از بحث در مورد روش ها و مفاهیم کلی، پیشرفت ها و جنبه های آینده مورد بحث قرار می گیرد. نقاط قوت و ضعف تعمیم یافته الگوریتم های مختلف هوش مصنوعی و مبتنی بر یادگیری ماشین ارزیابی می شوند. مقایسه ای از روش های مختلف تشخیص خطا، طبقه بندی و مکان یابی نیز با در نظر گرفتن ویژگی ها، ورودی ها، پیچیدگی، سیستم مورد استفاده و نتایج ارائه شده است. این مقاله می‌تواند به عنوان راهنمایی برای محققین برای درک روش‌ها و تکنیک‌های مختلف در این زمینه باشد.

لیو و همکاران در سال ۲۰۲۰ در تحقیقی تحت عنوان" تحقیق و کاربرد فناوری شبکه حسگر بی سیم در سیستم انتقال و توزیع برق " بیان داشتند که برق بخش مهمی از صنعت انرژی است که با اقتصاد ملی و معیشت مردم ارتباط دارد و تامین امنیت و ثبات در بهره برداری از سیستم انتقال و توزیع برق از اهمیت بالایی برخوردار است. این مقاله بر اساس فناوری شبکه حسگر بی‌سیم ((WSNو همراه با نظارت و الزامات عملیاتی سیستم انتقال و توزیع برق، یک سیستم کاربردی برای نظارت، بازرسی، امنیت و خدمات تعاملی سیستم‌های انتقال و توزیع برق لایه‌ای ارائه می‌کند. علاوه بر این، این مقاله پروژه های تأیید سیستم را در Wuxi، استان جیانگ سو و جامعه Lianxiangyuan در پکن نشان می دهد که به طور گسترده در سراسر کشور مورد استفاده قرار گرفته اند.

جدول خلاصه پیشینه ها

ردیف	پژوهشگر/سال	عنوان تحقیق	موضوع اصلی	نتایج کلیدی

۱	رحیمی و همکاران (۱۴۰۱)	کنترل و پایداری فرکانس سیستم‌های قدرت به کمک طرح بارزدایی تطبیقی فرکانس کم	پایداری فرکانس در سیستم قدرت	ارائه طرح بارزدایی تطبیقی با استفاده از ضریب تأثیر ولتاژ؛ شبیه‌سازی در سیستم ۹ باسه IEEE نشان‌دهنده بهبود عملکرد نسبت به روش‌های مرسوم بارزدایی.
۲	عبدلی و همکاران (۱۴۰۰)	بهبود پایداری گذرای مبدل متصل به شبکه هنگام افت ولتاژ شدید با تکنیک امپدانس مجازی	پایداری گذرای مبدل‌ها در شرایط افت ولتاژ	استفاده از امپدانس مجازی برای حفظ اتصال مبدل به شبکه و تزریق توان راکتیو هنگام خطا؛ شبیه‌سازی نشان‌دهنده صحت روش در بهبود پایداری.
۳	قربانی و همکاران (۱۴۰۰)	دستیابی به دمپینگ بهینه سیستم قدرت با تنظیم جبرانساز سری سنکرون استاتیکی	بهبود پایداری و کاهش تلفات در شبکه قدرت	بررسی نقش ادوات FACTS در کاهش تلفات، بهبود پروفایل ولتاژ و پایداری دینامیکی؛ تنظیم دو جبرانساز SSSC برای بهبود دمپینگ نوسانات.
۴	جباری مقدم و همکاران (۱۳۹۹)	حذف بار هوشمند جهت حفظ پایداری ولتاژ-فرکانس در سیستم قدرت	پایداری ولتاژ و فرکانس سیستم قدرت	معرفی روش‌های حفاظتی حذف بار برای حفظ پایداری سیستم؛ استفاده از رله‌های فرکانسی و ولتاژی برای بهبود امنیت شبکه در شرایط بحرانی.

۵	رضوانی و همکاران(۱۳۹۹)	بارزدایی بهینه در ریزشبکه جزیره‌ای با در نظر گرفتن وابستگی تولید و بار به ولتاژ و فرکانس	بررسی بارزدایی بهینه برای حفظ پایداری ولتاژ و فرکانس در ریزشبکه‌های جزیره‌ای.	معرفی روش بارزدایی دو متغیره برای جبران ولتاژ و فرکانس در حالت جزیره‌ای و شبیه‌سازی آن با نرم‌افزار MATLAB؛ کاهش خطا و بهبود پایداری سیستم در دو ریزشبکه کوچک و بزرگ.
۶	زحمتی و همکاران (۱۳۹۸)	محاسبه ماتریس تبدیل وابسته به فرکانس خطوط انتقال به شکل هموار	مدل‌سازی خطوط انتقال برای تحلیل گذراهای الکترومغناطیسی	ارائه الگوریتمی برای محاسبه ماتریس تبدیل با کاهش نرخ نمونه‌برداری فرکانسی؛ دقت و هموارسازی بالا در نتایج شبیه‌سازی.
۷	مهدوی و همکاران (۱۳۹۸)	حضور بهینه ادوات FACTS پیش از وقوع خطا برای بهبود پایداری گذرای سیستم قدرت	بهبود پایداری گذرا با تنظیم آنلاین ادوات FACTS	کاهش اختلاف زاویه ولتاژ ترمینال ژنراتورها و بهینه‌سازی عملکرد سیستم با کاهش هزینه و زمان بهینه‌سازی.
۸	بی جامی و همکاران (۱۳۹۸)	طراحی پایدارساز مد لغزشی پیش‌بین برای حذف نوسانات فرکانس پایین	کنترل نوسانات فرکانسی در سیستم‌های قدرت پراکنده	ارائه پایدارساز مبتنی بر مد لغزشی پیش‌بین؛ شبیه‌سازی نشان‌دهنده برتری این روش نسبت به پایدارسازهای پیش فاز-پس فاز است.
۹	اخباری و همکاران (۱۳۹۸)	الگوریتمی برای آشکارسازی خطا در خطوط انتقال HVDC	حفاظت خطوط HVDC	استفاده از مؤلفه‌های هارمونیکی جریان و ولتاژ برای تشخیص سریع خطا؛ صحت عملکرد روش در انواع

				خطاهای شبیه‌سازی شده.
۱۰	بهنیا و همکاران (۱۳۹۸)	کلیدزنی انتقال در برنامه‌ریزی یکپارچه تعمیرات انتقال و تولید	بهینه‌سازی تعمیرات در سیستم قدرت	استفاده از کلیدزنی بهینه انتقال ((TS برای کاهش هزینه و تغییر برنامه تعمیرات نیروگاه‌ها و خطوط انتقال.
۱۱	حسینی‌پور و همکاران (۱۳۹۸)	ارتقاء پایداری گذرای سیستم قدرت دو ماشینه با جبران‌ساز ایستای توان راکتیو	استفاده از SVC برای بهبود پایداری گذرای سیستم قدرت	کاهش پیچیدگی و نوسانات گذرا با استفاده از SVC؛ بهبود پایداری ولتاژ و زاویه روتور.
۱۲	صفری و همکاران (۱۳۹۶)	طراحی بهینه پایدارساز سیستم قدرت با الگوریتم بهینه‌سازی پرنده فاخته	بهینه‌سازی پارامترهای پایدارساز سیستم قدرت	استفاده از الگوریتم‌های COA و CS برای کاهش نوسانات توان اکتیو؛ عملکرد بهتر PSS طراحی شده با COA در شرایط کاری مختلف.
۱۳	فیشکا و همکاران، ۲۰۲۳	تحول شبکه‌های برق و تأثیر بر کیفیت خدمات توزیع برق	شبکه‌های هوشمند و بهبود کیفیت توان	تأکید بر اهمیت تشخیص عیب برای حفظ کیفیت توان و توسعه الگوریتم‌های هوشمند حفاظتی بر اساس شرایط محیطی.
۱۴	سیپلتا و همکاران، ۲۰۲۲	ملاحظات در مورد ارزیابی ریپل ولتاژ در شبکه برق	بررسی ریپل ولتاژ و کیفیت توان در شبکه‌های .DC	ارائه روش اندازه‌گیری ریپل ولتاژ با استفاده از شاخص‌های مصنوعی و پیشنهاد محدوده ارزیابی سطح سازگاری؛ به‌کارگیری روش برای داده‌های

				تجربی از یک سیستم راه‌آهن .DC
۱۵	رضا و همکاران، ۲۰۲۰	مروری بر روش‌های عیب‌یابی در سیستم‌های انتقال قدرت	تحلیل روش‌های تشخیص، طبقه‌بندی و مکان‌یابی خطا در سیستم‌های انتقال قدرت.	بررسی جامع روش‌های هوش مصنوعی و پردازش سیگنال برای تشخیص و مکان‌یابی خطا؛ ارزیابی نقاط قوت و ضعف الگوریتم‌های مختلف؛ ارائه مقایسه‌ای از روش‌های مختلف با توجه به ویژگی‌ها، ورودی‌ها و پیچیدگی.
۱۶	لیو و همکاران، ۲۰۲۰	تحقیق و کاربرد فناوری شبکه حسگر بی‌سیم در سیستم انتقال و توزیع برق	استفاده از فناوری شبکه حسگر بی‌سیم (WSN) در نظارت و مدیریت سیستم‌های انتقال و توزیع برق.	ارائه سیستم نظارت و خدمات تعاملی مبتنی بر WSN؛ نمایش پروژه‌های کاربردی در استان جیانگ سو و پکن که به طور گسترده در سطح کشور استفاده شده‌اند؛ ارتقای امنیت و ثبات بهره‌برداری سیستم انتقال و توزیع برق.
۱۷	اخمدوا و همکاران، ۲۰۲۱	الگوریتم‌های حفاظتی تطبیقی در شبکه‌های برق	حفاظت و تشخیص خطا در شبکه‌های برق	توسعه الگوریتم‌های تطبیقی برای تشخیص خطاها با استفاده از داده‌های محیطی و عملیاتی.
۱۸	شوایتزرو همکاران، ۲۰۱۵	تکنیک‌های حفاظتی پیشرفته برای خطوط برق	بهبود عملکرد سیستم‌های حفاظتی	بررسی تکنیک‌های حفاظتی با هدف کاهش زمان تشخیص خطا و افزایش پایداری شبکه‌های برق.

۱۹	هریری و کرو، ۲۰۲۱	مدل‌سازی کل‌نگر در شبکه‌های انتقال برق	مدل‌سازی و شبیه‌سازی شبکه‌های قدرت	استفاده از مدل‌سازی ریاضی برای پیش‌بینی خطا و بهبود عملکرد شبکه توزیع برق

۲-۴ وجه تمایز پژوهش با پیشینه ها

موضوع "مدل‌سازی پدیده‌های گذرای در خطوط انتقال قدرت با تأکید بر تأثیرات نوسانات فرکانس و ولتاژ" با پیشینه‌ها وجه تمایز مهمی دارد.بسیاری از پیشینه‌ها بر روی جنبه‌های خاصی از پایداری سیستم قدرت مانند پایداری گذرا، ناپایداری فرکانس، یا بهبود بهره‌وری شبکه با استفاده از ادوات FACTS تمرکز دارند و اغلب به ارائه راه‌حل‌های کنترلی یا الگوریتم‌های حفاظتی برای سیستم‌های قدرت پرداخته‌اند. با این حال، موضوع تمرکز ویژه‌ای بر مدل‌سازی جامع پدیده‌های گذرای خطوط انتقال، با توجه دقیق به تعامل نوسانات فرکانس و ولتاژ، دارد. این موضوع به‌جای تمرکز صرف بر پایداری یا کنترل، به دنبال ارائه یک مدل ریاضیاتی یا عددی دقیق برای شبیه‌سازی رفتار خطوط انتقال در شرایط گذرا و تحلیل تاثیر این پدیده‌ها بر شبکه قدرت است. این دیدگاه جامع‌تر، امکان درک عمیق‌تری از چالش‌های دینامیکی شبکه انتقال و ارائه ابزارهای بهتری برای طراحی و بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت فراهم می‌کند.

۲-۵ جمع بندی و خلاصه فصل

در این فصل به بیان"مبانی نظری و پیشینه تحقیق" پرداختیم. سیستم قدرت به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین شبکه‌های دست‌ساز بشر، شامل اجزای پیچیده‌ای نظیر خطوط انتقال، ترانسفورماتورها، پست‌های برق، و تجهیزات حفاظتی است که هماهنگی میان آن‌ها برای حفظ پایداری و قابلیت اطمینان شبکه ضروری است. پدیده‌های گذرا، شامل تغییرات سریع در ولتاژ و جریان ناشی از وقایعی مانند صاعقه، کلیدزنی، یا خطاهای الکتریکی، می‌توانند به ناپایداری شبکه و آسیب به تجهیزات منجر شوند. این پدیده‌ها به دو دسته گذراهای الکترومغناطیسی و الکترومکانیکی تقسیم می‌شوند که هرکدام تأثیرات متفاوتی بر عملکرد شبکه دارند. علاوه بر این، نوسانات ولتاژ و فرکانس، به‌عنوان عوامل مهم در کاهش کیفیت توان و ایجاد مشکلات پایداری شبکه، مورد توجه قرار گرفتند. تعامل میان این پدیده‌ها و تأثیرات ترکیبی آن‌ها بر عملکرد تجهیزات و سیستم‌های حفاظتی، نشان‌دهنده ضرورت استفاده از روش‌های پیشرفته مدل‌سازی و تکنیک‌های کنترلی برای مدیریت و بهبود پایداری شبکه‌های قدرت است. تحلیل

و کنترل دقیق این عوامل می‌تواند به افزایش کارایی، کاهش خسارات، و تضمین پایداری و امنیت سیستم‌های قدرت کمک کند.

فصل سوم

روش پیشنهادی

۳-۱ مقدمه

در بسیاری از موارد، پدیده‌های گذرا در خطوط انتقال قدرت با تغییرات شدید در میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی همراه هستند که نوسانات ولتاژ و فرکانس را به‌طور مستقیم تحت تأثیر قرار می‌دهند. این تغییرات، اگر به درستی مدل‌سازی نشوند، می‌توانند منجر به طراحی نادرست تجهیزات حفاظتی و عملکرد نامناسب سیستم شوند. بهره‌گیری از مدل‌سازی دقیق این پدیده‌ها با رویکردهای پیشرفته می‌تواند نقش مهمی در بهبود قابلیت اطمینان شبکه داشته باشد. در این فصل از پایان نامه، روش تحقیق پژوهش به‌طور کامل تشریح و تمام مواردی که در این فصل استفاده شده است، مانند ابزارها، مواد و مصالح، آمار و استدلال ها با دقت و به طور کامل گردآوری شده و نوع پژوهش خود را معین نموده و جامعه مورد مطالعه مشخص شد و در آن حوزه به جمع آوری اطلاعات لازم و تعیین نوع و چگونگی تحلیل اطلاعات پایان‌نامه بطور کامل پرداخته شده است.

۳-۲ طرح مسئله

روش تحقیق در این مطالعه به شرح زیر است: ابتدا داده‌های تاریخی و زمان‌واقعی شامل پارامترهای مرتبط با پدیده‌های گذرا مانند فرکانس، ولتاژ، بار مصرفی، و دما از منابع معتبر جمع‌آوری می‌شوند. سپس این داده‌ها با استفاده از MATLAB پیش‌پردازش و تمیزسازی می‌شوند که شامل حذف نویز و داده‌های پرت و نرمال‌سازی مقادیر است. پس از پیش‌پردازش، داده‌ها به کمک ابزارهای مختلف MATLAB مورد تجزیه و تحلیل اکتشافی قرار می‌گیرند تا الگوها و همبستگی‌های موجود شناسایی شوند. در مرحله بعد، بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، الگوریتم‌های تحلیل و مدل‌سازی با استفاده از روش‌های آماری و یادگیری ماشین طراحی و در محیط MATLAB پیاده‌سازی می‌شوند. در نهایت، مدل‌ها با استفاده از داده‌های آزمایشی آزمون و اعتبارسنجی شده و عملکرد آن‌ها با ابزارهایی مانند cross-validation و ماتریس درهم‌ریختگی ارزیابی می‌شود. منابع جمع آوری داده ها نیز می توانند دست اول یا دست دوم باشند؛ افراد و گروه های برگزیده به منظور بررسی نظرات و عقاید آنها، از جمله منابع دست اول هستند و اسناد و پرونده های سازمان ها نمونه ای از منابع دست دوم اند.ابتدا، داده‌های تاریخی و زمان‌واقعی شامل فرکانس‌های برق، ولتاژها، بارهای مصرفی، دما و شاخص‌های دیگر مرتبط با پدیده‌های گذرا از شرکت‌های برق، سازمان‌های مربوطه و سایر منابع معتبر جمع‌آوری می‌شوند. با استفاده از MATLAB، داده‌های جمع‌آوری شده تمیزسازی می‌شوند. این شامل حذف نویز، داده‌های پرت و تصحیح خطاهاست. توابعی مانند clean و normalize برای نرمال‌سازی مقادیر داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

MATLAB ابزارهای گسترده‌ای برای تحلیل آماری و تصویرسازی داده‌ها دارد. histogram، boxplot، و scatter برای بررسی توزیع‌ها و شناسایی الگوها و همبستگی‌ها استفاده می‌شوند. از توابع مانند corrcoef برای تحلیل همبستگی استفاده می‌شود.

۱.بررسی توزیع داده‌ها

استفاده از Histogram

Histogram یکی از ابزارهای اصلی در تحلیل داده‌ها برای بررسی توزیع داده‌ها است. این ابزار داده‌ها را به بازه‌های مشخص (Bins) تقسیم کرده و تعداد نمونه‌های موجود در هر بازه را نشان می‌دهد. با استفاده از Histogram در MATLAB، می‌توان اطلاعاتی درباره پراکندگی داده‌ها، تمرکز داده‌ها در یک محدوده خاص، و شناسایی داده‌های پرت (Outliers) به دست آورد. این ابزار به‌ویژه برای ارزیابی چگالی احتمال و تحلیل ویژگی‌های آماری داده‌ها مفید است. دستور histogram(data) در MATLAB می‌تواند نمای گرافیکی واضحی از توزیع داده‌ها ارائه دهد.

استفاده از Boxplot

Boxplot یک ابزار تصویری دیگر است که برای نمایش محدوده تغییرات داده‌ها و شناسایی داده‌های پرت به کار می‌رود. این ابزار یک نمای کلی از میانه (Median)، چارک‌ها (Quartiles)، و دامنه بین چارکی (IQR) ارائه می‌دهد. در MATLAB، دستور boxplot(data) برای ایجاد نمودار جعبه‌ای استفاده می‌شود. این ابزار می‌تواند نقاط داده‌ای که خارج از محدوده تعریف‌شده توسط IQR هستند (Outliers) را شناسایی کند. بررسی این نقاط می‌تواند در پیش‌پردازش داده‌ها و تمیزسازی آن‌ها بسیار مفید باشد.

۲.شناسایی همبستگی‌ها

استفاده از Corrcoef

همبستگی (Correlation) یکی از مفاهیم کلیدی در تحلیل داده‌ها است که نشان‌دهنده رابطه میان دو متغیر می‌باشد. از همبستگی می‌توان برای شناسایی الگوها و روابط بین متغیرها استفاده کرد. در MATLAB، دستور corrcoef(data1, data2) ماتریس همبستگی را تولید می‌کند که مقادیر آن نشان‌دهنده قدرت و جهت رابطه خطی بین متغیرها است. مقدار همبستگی بین -۱ و ۱ تغییر می‌کند:

۱+: همبستگی مثبت کامل

-۱: همبستگی منفی کامل

۰: عدم همبستگی

این تحلیل برای بررسی اینکه آیا تغییرات یک متغیر می‌تواند تغییرات متغیر دیگر را پیش‌بینی کند یا خیر، بسیار مفید است.

تحلیل همبستگی

تحلیل همبستگی معمولاً به دو صورت انجام می‌شود:

کیفی: تحلیل جهت و شدت رابطه بین متغیرها بر اساس مقادیر همبستگی.

کمی: استفاده از ابزارهای آماری برای سنجش معنی‌داری رابطه‌ها (p-value).

نتایج حاصل از تحلیل همبستگی می‌توانند به‌عنوان ورودی برای مدل‌های پیش‌بینی یا شناسایی متغیرهای کلیدی مورد استفاده قرار گیرند.

۳.شناسایی الگوها و روابط بین متغیرها

استفاده از Scatter

Scatter Plot یا نمودار پراکندگی یکی از ابزارهای بصری برای نمایش روابط بین دو متغیر است. در MATLAB، دستور scatter(dataX, dataY) برای رسم این نمودار استفاده می‌شود. این نمودار نقاط داده‌ای را در یک صفحه نمایش می‌دهد و می‌تواند الگوهایی مانند روابط خطی، غیرخطی، یا پراکندگی تصادفی را آشکار کند.

دیگر ابزارهای تصویرسازی

علاوه بر Scatter، MATLAB ابزارهای تصویری متنوعی برای تحلیل روابط بین متغیرها ارائه می‌دهد:

Heatmap: نمایش ماتریسی از مقادیر داده‌ها که شدت رابطه‌ها یا توزیع داده‌ها را به‌صورت رنگی نشان می‌دهد.

Pairplot: برای بررسی هم‌زمان چندین رابطه بین متغیرها.

۳D Scatter: برای بررسی روابط بین سه متغیر با استفاده از دستور scatter3(dataX, dataY, dataZ).

مزایای استفاده از ابزارهای تصویرسازی

شناسایی سریع روابط بین متغیرها.

آشکارسازی الگوهای غیرمنتظره.

پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های بهتر در تحلیل داده‌ها و توسعه مدل‌ها.

در این مرحله از تحقیق، استفاده از MATLAB برای تجزیه و تحلیل داده‌ها نه تنها به دلیل قابلیت‌های گسترده‌اش در پردازش سریع داده‌ها است، بلکه به خاطر امکانات فوق‌العاده‌اش در تحلیل آماری پیچیده و شبیه‌سازی دینامیکی است. استفاده از ابزارهایی نظیر histogram برای بررسی توزیع فرکانسی داده‌ها، boxplot برای تحلیل گستره و توزیع متغیرها، و scatter برای مشاهده الگوهای بصری و همبستگی بین متغیرهای مختلف، اجازه می‌دهد تا تحلیل‌های دقیق و عمیقی از داده‌های جمع‌آوری شده ارائه دهیم. علاوه بر این، MATLAB با داشتن توابع آماری متنوع مانند corrcoef برای تحلیل همبستگی بین متغیرها، این امکان را فراهم می‌کند که پیچیدگی‌های موجود در داده‌ها را شناسایی و درک کنیم. این نرم‌افزار همچنین توانایی تعامل با سایر ابزارهای تحلیل داده مانند Python و R را دارد، که امکان مقایسه و تلفیق نتایج تحلیل‌های مختلف را فراهم می‌آورد و به بینش‌های جامع‌تری می‌انجامد. در زمینه توسعه مدل‌های پیش‌بینی و تحلیلی، استفاده از Toolboxهای مخصوص مانند Statistics and Machine Learning Toolbox و Deep Learning Toolbox به ما امکان می‌دهد تا با استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی عمیق، داده‌ها را به شیوه‌ای نوآورانه مدل‌سازی کنیم. این ابزارها به خصوص در شناسایی الگوهای پیچیده و غیرخطی در داده‌ها که با روش‌های سنتی قابل تشخیص نیستند، بسیار کارآمد هستند.

۱.منابع داده‌های تاریخی و زمان‌واقعی

الف) منابع داده‌های تاریخی

شرکت‌های برق منطقه‌ای و ملی: شرکت‌های برق مانند توانیر یا اپراتورهای منطقه‌ای داده‌های تاریخی مربوط به شبکه قدرت را نگهداری می‌کنند. این داده‌ها شامل اطلاعاتی درباره فرکانس، ولتاژ، و بار مصرفی در بازه‌های زمانی مختلف است.

آژانس‌های نظارتی و تنظیم‌کننده انرژی: سازمان‌های تنظیم‌کننده مانند وزارت نیرو یا رگولاتورهای مشابه، داده‌هایی مرتبط با بهره‌برداری از شبکه برق و تغییرات در طول زمان ارائه می‌دهند.

پایگاه‌های داده بین‌المللی: برخی از منابع بین‌المللی مانند IEEE و CIGRE نیز داده‌های مرتبط با پدیده‌های گذرا را از شبکه‌های مختلف جهانی در اختیار پژوهشگران قرار می‌دهند.

مطالعات گذشته: مقالات علمی و پروژه‌های تحقیقاتی پیشین در زمینه پدیده‌های گذرا و نوسانات شبکه می‌توانند داده‌های مفیدی ارائه دهند.

ب) منابع داده‌های زمان‌واقعی

شبکه‌های حسگر در محل: استفاده از حسگرهای پیشرفته (PMU یا Phasor Measurement Units) برای جمع‌آوری داده‌های زمان‌واقعی فرکانس و ولتاژ.

سیستم‌های SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition): این سیستم‌ها به‌طور گسترده در شبکه‌های قدرت برای مانیتورینگ داده‌های زمان‌واقعی استفاده می‌شوند.

منابع تجدیدپذیر و شبکه‌های هوشمند: سیستم‌های تولید انرژی خورشیدی و بادی مجهز به دستگاه‌های مانیتورینگ لحظه‌ای داده‌هایی نظیر تغییرات توان خروجی و ولتاژ را فراهم می‌کنند.

۲. مشخصات داده‌های مورد استفاده

الف) فرکانس

دامنه نوسانات: داده‌های مربوط به فرکانس شامل تغییرات در مقدار اسمی (۵۰ یا ۶۰ هرتز) و دامنه نوسانات در اثر خطاها یا تغییر بار است.

دقت اندازه‌گیری: فرکانس باید با دقت میلی‌هرتز اندازه‌گیری شود، زیرا تغییرات جزئی می‌تواند نشان‌دهنده وقوع پدیده‌های گذرا باشد.

ب) ولتاژ

سطوح ولتاژ: داده‌های ولتاژ از خطوط انتقال (۴۰۰ کیلوولت یا بیشتر) و شبکه‌های توزیع (۲۰ کیلوولت) جمع‌آوری می‌شوند.

انحرافات ولتاژ: داده‌هایی که انحرافات از سطح اسمی ولتاژ را در هنگام گذراها یا نوسانات نشان می‌دهند.

ج) بار مصرفی

پروفیل بار: داده‌های مربوط به تغییرات بار مصرفی در طول روز، هفته، یا سال.

تغییرات ناگهانی: داده‌هایی که به تغییرات ناگهانی بار و تأثیر آن‌ها بر شبکه می‌پردازند.

د) دما

تأثیرات محیطی: داده‌های دما برای بررسی تأثیرات تغییرات محیطی بر شبکه قدرت و رفتار آن هنگام وقوع گذراها.

اندازه‌گیری‌های محلی و منطقه‌ای: دما از ایستگاه‌های هواشناسی نزدیک به تجهیزات شبکه قدرت جمع‌آوری می‌شود.

۳.ابزارها و استانداردهای جمع‌آوری داده

الف) ابزارهای جمع‌آوری داده

حسگرهای پیشرفته:

PMUها برای مانیتورینگ فرکانس و ولتاژ.

تجهیزات Data Logger برای ثبت داده‌های بلندمدت.

سیستم‌های SCADA:

جمع‌آوری داده‌ها از نقاط مختلف شبکه و ذخیره‌سازی اطلاعات.

دستگاه‌های تست ولتاژ و جریان:

تجهیزات دقیق برای اندازه‌گیری ولتاژ و جریان در شرایط گذرا.

ب) استانداردهای جمع‌آوری داده

IEEE C37.118: استانداردی برای اندازه‌گیری فرکانس و ولتاژ توسط PMUها.

IEC 61850: پروتکلی برای ارتباطات در شبکه‌های هوشمند که داده‌های مربوط به تجهیزات مختلف را جمع‌آوری می‌کند.

EN 50160: استاندارد اروپایی برای کیفیت توان که شامل معیارهای ولتاژ، فرکانس، و هارمونیک‌ها می‌شود.

NERC PRC-002: استاندارد آمریکایی برای ثبت و جمع‌آوری داده‌های گذرا در شبکه‌های قدرت.

ج) فرکانس نمونه‌برداری

نمونه‌برداری با نرخ بالا (حداقل ۱۰ کیلوهرتز) برای ثبت دقیق پدیده‌های گذرا.

استفاده از دستگاه‌های مجهز به GPS برای همگام‌سازی زمانی داده‌ها.

۳-۳حل مسئله به کمک الگوریتم بهینه سازی

بر اساس تجزیه و تحلیل داده‌ها، الگوریتم‌های تحلیلی با استفاده از روش‌های آماری، یادگیری ماشین و هوش مصنوعی در MATLAB طراحی می‌شوند. این ممکن است شامل استفاده از fitlm برای مدل‌های خطی یا استفاده از Toolbox های مختلف مانند Statistics and Machine Learning Toolbox برای روش‌های پیچیده‌تر باشد.

۳-۳-۱ روش‌های آماری برای مدل‌سازی

روش‌های آماری در مدل‌سازی داده‌ها به‌منظور درک روابط میان متغیرها و پیش‌بینی رفتار سیستم‌ها استفاده می‌شوند. این روش‌ها شامل رگرسیون خطی، تحلیل واریانس، تحلیل عاملی، و تحلیل خوشه‌ای است که هر یک در شناسایی و کمّی‌سازی روابط بین متغیرها کاربرد دارند. در سیستم‌های انتقال قدرت، استفاده از این روش‌ها به تحلیل اثرات نوسانات فرکانس و ولتاژ و شناسایی الگوهای پنهان در داده‌های ثبت‌شده کمک می‌کند. روش‌های آماری مبتنی بر مفروضاتی مانند توزیع نرمال داده‌ها و استقلال مشاهدات هستند و می‌توانند در نرم‌افزار MATLAB برای تجزیه و تحلیل داده‌ها به کار گرفته شوند.

۳-۳-۲مدل‌های خطی باfitlm

تابع fitlmدر MATLAB برای برازش مدل‌های خطی به داده‌ها استفاده می‌شود. این تابع امکان تحلیل روابط خطی بین یک متغیر وابسته و یک یا چند متغیر مستقل را فراهم می‌کند. به‌عنوان مثال، در مدل‌سازی گذراهای خطوط انتقال قدرت، می‌توان تأثیر متغیرهایی مانند فرکانس، ولتاژ، و دما را بر روی شدت گذراها بررسی کرد. این تابع خروجی‌هایی مانند ضرایب رگرسیون، مقدار R2، آزمون‌های معنی‌داری(p-value) ، و خطاهای استاندارد را ارائه می‌دهد که می‌توان از آن‌ها برای ارزیابی دقت مدل استفاده کرد. مزیت fitlmاین است که نه تنها برای داده‌های ساده بلکه برای داده‌های پیچیده‌تر با اثرات متقابل نیز کاربرد دارد.

مدل خطی یکی از پرکاربردترین روش‌های آماری برای مدل‌سازی روابط بین یک متغیر وابسته (که می‌خواهیم پیش‌بینی کنیم) و یک یا چند متغیر مستقل (که بر متغیر وابسته اثر می‌گذارند) است. مدل خطی فرض می‌کند که بین متغیر وابسته و متغیرهای مستقل رابطه‌ای خطی وجود دارد. به‌طور کلی، مدل خطی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Y= \beta_0+ \beta_1X_1+ \beta_2X_2\dots + \beta nXn+ \epsilon \qquad 3\text{-}1$$

که در آن:

Y: متغیر وابسته

$X_1, X_2, \ldots, X_n$: متغیرهای مستقل

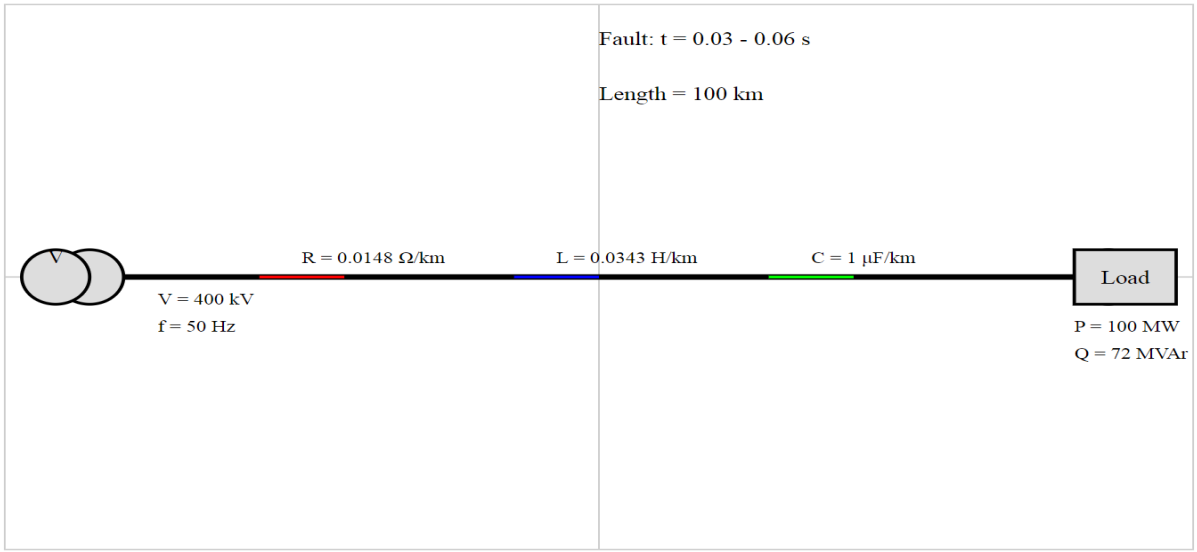
β_0: عرض از مبدا (یا نقطه تلاقی با محور Y)

$\beta_1, \beta_2, \ldots, \beta_n$: ضرایب رگرسیون که نشان‌دهنده اثر هر متغیر مستقل بر متغیر وابسته هستند

ϵ: خطای مدل، که فرض می‌شود دارای توزیع نرمال با میانگین صفر است

مدل خطی تلاش می‌کند که ضرایب β را به‌گونه‌ای پیدا کند که فاصله (خطای) بین مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی کمینه شود.

شکل زیر یک مدل ساده از خط انتقال قدرت ۴۰۰ کیلوولت با طول ۱۰۰ کیلومتر نمایش داده شده است که شامل مشخصات خط مانند مقاومت (۰.۰۱۴۸ Ω/km)، اندوکتانس (۰.۰۳۴۳ H/km) و ظرفیت خازنی (۱ μF/km) است. در این مدل، یک بار الکتریکی با توان اکتیو ۱۰۰ مگاوات و توان راکتیو ۷۲ مگاوار در انتهای خط متصل است. در بازه زمانی ۰.۰۳ تا ۰.۰۶ ثانیه، یک خطای گذرا رخ داده که باعث تغییرات قابل‌توجه در ولتاژ، جریان و فرکانس سیستم شده است. این رخداد نیاز به تحلیل دقیق شکل موج‌های ولتاژ و جریان در نقاط مختلف خط و ارزیابی پایداری سیستم در برابر این نوسانات گذرا دارد.



شکل۱. مدل خط انتقال قدرت

۳-۳-۳ استفاده از شبکه‌های عصبی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین

استفاده از روش‌های یادگیری ماشین در تحلیل پدیده‌های گذرا یک رویکرد پیشرفته و مؤثر است:

آماده‌سازی داده‌ها برای یادگیری ماشین:

داده‌ها با استفاده از توابعی مانند normalize و splitData پیش‌پردازش شده و به بخش‌های آموزشی، تست و اعتبارسنجی تقسیم می‌شوند.

تکنیک‌هایی مانند PCA Principal Component Analysis برای کاهش ابعاد داده‌ها اعمال می‌شوند.

طراحی و آموزش شبکه‌های عصبی:

از Deep Learning Toolbox برای طراحی شبکه‌های عصبی مانند MLP Perceptron چندلایه و CNN (شبکه عصبی کانولوشنی) استفاده می‌شود.

توابعی مانند trainNetwork برای آموزش شبکه‌ها بر اساس داده‌های آموزشی به‌کار می‌روند.

استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین:

الگوریتم‌هایی مانند SVM (ماشین بردار پشتیبان)، Random Forest، و KNN (نزدیک‌ترین همسایگان) برای دسته‌بندی داده‌ها و پیش‌بینی پدیده‌های گذرا استفاده می‌شوند.

از ابزار Statistics and Machine Learning Toolbox برای اجرای این الگوریتم‌ها بهره گرفته می‌شود.

اعتبارسنجی و ارزیابی مدل‌ها:

دقت و کارایی مدل‌های یادگیری ماشین با استفاده از متریک‌هایی مانند confusionmat و معیارهایی مثل Precision، Recall و F1-Score ارزیابی می‌شوند.

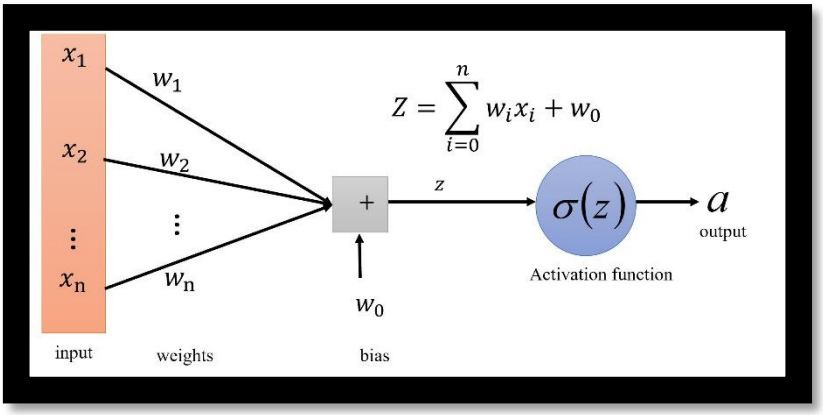
۳-۳-۳-۱ الگوریتم یادگیری ماشین

این بخش به بررسی کلی الگوریتم‌های اصلی یادگیری ماشینی که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته‌اند، می‌پردازد. تمرکز اصلی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی است که به‌عنوان مبنایی برای درک سایر مدل‌های شبکه عصبی مطرح شده‌اند. در این میان، شبکه‌های عصبی بازگشتی (RNN) و شبکه‌های عصبی کانولوشن (CNN) به‌عنوان مدل‌های اصلی برای پیش‌بینی نوسانات فرکانس انتخاب شده‌اند. علاوه بر این، در این مطالعه از الگوریتم جنگل رگرسیون کمی برای تحلیل و ارزیابی ریسک در رتبه‌بندی خطوط دینامیکی استفاده شده است.

۳-۳-۳-۲ شبکه های عصبی مصنوعی

مفهوم شبکه عصبی مصنوعی (ANN) الهام گرفته از ساختار شبکه‌های عصبی بیولوژیکی در سیستم عصبی مرکزی حیوانات است. این شبکه‌های بیولوژیکی از سلول‌های عصبی (نورون‌ها) تشکیل شده‌اند که وظیفه پردازش اطلاعات را بر عهده دارند. قدرت اتصالات میان نورون‌ها می‌تواند در پاسخ به محرک‌های خارجی تغییر کند و این ویژگی به شبکه امکان می‌دهد که از تجربیات خود یاد بگیرد. در حوزه یادگیری عمیق، ANNیک مدل ریاضی است که با هدف بازسازی ساختار و عملکرد شبکه‌های عصبی بیولوژیکی طراحی شده است. این شبکه‌ها از نورون‌های مصنوعی تشکیل شده‌اند که مدل‌های ساده ریاضی هستند و توسط سه عملیات اصلی کنترل می‌شوند: ضرب، جمع و فعال‌سازی. در این فرایند، ورودی‌ها ابتدا در وزن‌های مربوطه ضرب می‌شوند که بیانگر اهمیت نسبی هر ورودی است. سپس این ورودی‌های وزن‌دار به همراه یک مقدار بایاس در نورون جمع می‌شوند. نتیجه نهایی از طریق یک تابع فعال‌سازی، که به عنوان تابع انتقال نیز شناخته می‌شود، پردازش شده و به عنوان خروجی نورون تولید می‌گردد. این فرایند در شکل زیر به‌طور کامل نمایش داده شده است. نورون‌های مصنوعی در شبکه از طریق پیوندهای وزن‌دار به یکدیگر متصل هستند، که به سیگنال‌ها اجازه می‌دهد از یک نورون به نورون دیگر منتقل شوند. سیگنال خروجی هر نورون از طریق اتصال خروجی آن منتشر می‌شود و به شاخه‌هایی تقسیم می‌گردد که

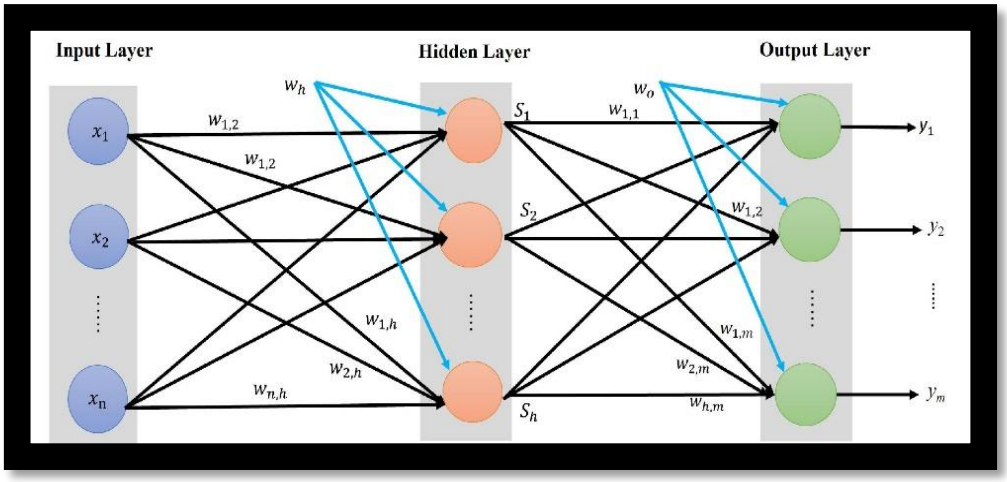
سیگنال را به سایر نورون‌های شبکه ارسال می‌کنند. این شاخه‌ها به اتصالات ورودی نورون‌های دیگر ختم شده و مسیر انتقال اطلاعات در شبکه را شکل می‌دهند.



شکل۲.ساختار اساسی یک نورون مصنوعی

شبکه‌های عصبی پیش‌خور(FNN) ، که به‌عنوان پرسپترون‌های چندلایه (MLP) نیز شناخته می‌شوند، در شکل زیر نمایش داده شده‌اند. این نوع شبکه‌ها به‌صورت لایه‌بندی سازمان‌دهی شده‌اند، به‌طوری که هر لایه به‌طور کامل به لایه بعدی متصل است.

FNNاز سه نوع لایه اصلی تشکیل شده است: لایه ورودی، لایه پنهان، و لایه خروجی. هر یک از این لایه‌ها از مجموعه‌ای از نورون‌ها یا گره‌ها تشکیل می‌شود که از طریق پیوندهای وزن‌دار به گره‌های لایه‌های مجاور متصل هستند. این اتصالات وزنی نقش کلیدی در انتقال و پردازش اطلاعات بین گره‌ها در لایه‌های مختلف شبکه دارند.



شکل ۳.لایه پنهان از شبکه MLP

در یک نورون مصنوعی، اطلاعات از طریق ورودی‌های وزن‌دار دریافت می‌شود، به‌طوری که هر ورودی در وزن مربوطه ضرب می‌شود. سپس این مقادیر وزن‌دار همراه با یک مقدار بایاس جمع می‌شوند و حاصل جمع توسط یک تابع فعال‌سازی یا انتقال پردازش می‌گردد. در نهایت، اطلاعات پردازش‌شده از طریق خروجی یا خروجی‌های نورون منتقل می‌شود. سادگی عملکرد مدل نورون مصنوعی را می‌توان در نمایش ریاضی زیر مشاهده کرد:

$$y(k) = F\left(\sum_{i=0}^{m} wi\,(k).xi(k) + w0\right) \qquad (3\text{-}2)$$

جایی که xi k مقدار ورودی در زمان گسسته k است که i از ۰ به m می رود، wi kمقدار وزن در زمان گسسته k است که در آن i از ۰ به m می رود، w0 بایاس است، F یک فعال سازی است. تابع، yi k مقدار خروجی در زمان گسسته k است.

وزن های بهینه، w1، w2، wn . . . برای اتصالات بین نورون ها، در فرآیند آموزش با استفاده از یک الگوریتم بهینه سازی یافت می شود. به خصوص در یادگیری عمیق، الگوریتم شیب نزولی تصادفی (SGD) برای این مورد استفاده

می شود. SGD نسخه‌ای از الگوریتم بهینه‌سازی شناخته شده گرادیان نزول (GD) است که در آن کل مجموعه آموزشی به مجموعه‌های کوچکی به نام دسته‌های کوچک تقسیم می‌شود تا زمان محاسبه کاهش یابد و در عین حال تخمین بهینه خوبی دریافت شود.

نزول گرادیان به صورت تکراری اجرا می شود تا مقادیر بهینه پارامترهای مربوط به حداقل مقدار تابع هزینه داده شده J w0, w1 را پیدا کند. از نظر ریاضی، تکنیک مشتق برای به حداقل رساندن تابع هزینه ضروری است زیرا به دستیابی به حداقل امتیاز کمک می کند. مشتق به شیب تابع در یک نقطه معین اشاره دارد. ما باید شیب را بدانیم تا جهت (علامت) را برای جابجایی مقادیر ضرایب بدانیم تا در تکرار بعدی هزینه کمتری به دست آوریم. ساده ترین تابع هزینه برای شبکه های عصبی به صورت زیر ارائه می شود:

$$J(w0, w1) = \frac{1}{2m} \sum_{i=0}^{m} hw(xi) - yi)\ 2 \qquad (3\text{-}3)$$

جایی که h w به خروجی توابع فعال‌سازی نگاشت از ویژگی‌های ورودی به متغیر هدف خروجی برای یک مقدار i خاص اشاره دارد، که خط پیش‌بینی‌شده را با استفاده از معادله زیر برای مورد داده‌های ورودی یک‌بعدی نشان می‌دهد. m تعداد نمونه های آموزشی، yi نشان دهنده مقدار نقطه داده واقعی است که قبلاً به دست آورده ایم. مقدار i تعداد نقاط داده ای را نشان می دهد که ما تفاوت ها را برای آنها محاسبه کرده ایم.

نزول گرادیان فقط تمایز تابع هزینه است. به صورت زیر آورده شده است:

$$hw(x) = w_0 + w_1 x \qquad (3\text{-}4)$$

در معادله بالا، αبه‌عنوان نرخ یادگیری تعریف می‌شود که سرعت حرکت در امتداد شیب تابع هزینه را تعیین می‌کند. نرخ یادگیری کوچک باعث همگرایی کند مدل می‌شود، در حالی که نرخ یادگیری بزرگ ممکن است از

رسیدن به همگرایی جلوگیری کرده و باعث نوسانات یا عدم پایداری شود. اگر مقدار αبیش از حد بزرگ باشد، ممکن است از نقطه حداقل تابع هزینه عبور کرده و به نتایج نادرست منجر شود.

در مقابل، نرخ یادگیری بسیار کوچک می‌تواند زمان بهینه‌سازی مدل را افزایش دهد و منابع محاسباتی را هدر دهد. همچنین، مقدار بسیار پایین ممکن است مدل را در حداقل‌های محلی تابع هزینه به جای حداقل‌های کلی آن گرفتار کند. بنابراین، انتخاب یک مقدار مناسب و بهینه برای αاهمیت بالایی دارد تا فرآیند آموزش به درستی و با کارایی بالا انجام شود.

نزول گرادیان فقط تمایز تابع هزینه است. به صورت زیر آورده شده است:

$$\frac{\partial \mathrm{J(w0.w1)}}{\partial \mathrm{wj}} = \frac{\partial}{\partial \mathrm{wj}} \frac{1}{2m} \sum_{i=0}^{m} (\mathrm{hw(xi)} - \mathrm{yi})\, 2 \qquad (3\text{-}5)$$

For j=0 and j=1

$$\frac{\partial \mathrm{J(w0.w1)}}{\partial \mathrm{w0}} = \frac{1}{m} \sum_{i=0}^{m} (\mathrm{hw(xi)} - \mathrm{yi})$$

(3-6)

$$\frac{\partial \mathrm{J(w0.w1)}}{\partial \mathrm{w1}} = \frac{1}{m} \sum_{i=0}^{m} (\mathrm{hw(xi)} - \mathrm{yi})\mathrm{xi}$$

(3-7)

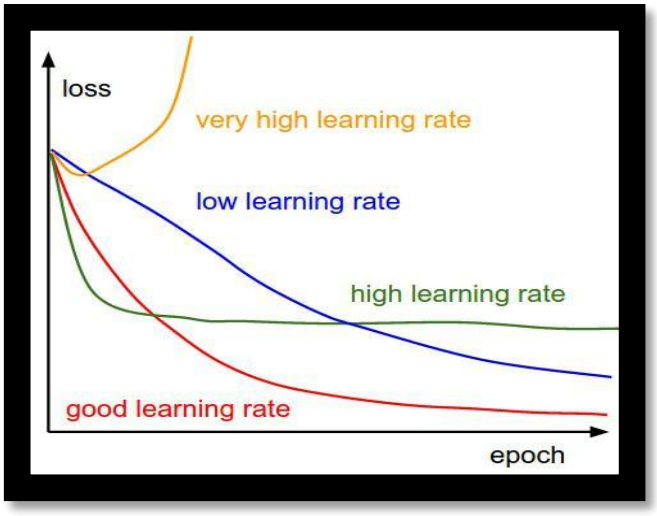
$$\mathrm{wj} := \mathrm{wj} - \alpha \frac{\partial \mathrm{J(w0.w1)}}{\partial \mathrm{wj}}$$

(3-8)

در معادله بالا، αبه‌عنوان نرخ یادگیری تعریف می‌شود که سرعت حرکت در امتداد شیب تابع هزینه را تعیین می‌کند. مقدار کوچک αباعث همگرایی آهسته می‌شود، در حالی که مقدار بزرگ αممکن است منجر به عدم همگرایی شود. اگر αبیش از حد بالا باشد، ممکن است از نقطه حداقل خطا عبور کرده و به نتایج نادرستی منجر شود.

در مقابل، اگر نرخ یادگیری بیش از حد پایین باشد، بهینه‌سازی مدل زمان بیشتری طول می‌کشد و منابع محاسباتی هدر می‌رود. علاوه بر این، مقدار بسیار پایین αممکن است باعث شود مدل به جای دستیابی به حداقل‌های کلی تابع هزینه، در حداقل‌های محلی گیر کند. بنابراین، انتخاب یک مقدار بهینه برای αبسیار حیاتی است.

شکل زیر تأثیر نرخ یادگیری را در طول فرآیند آموزش نشان می‌دهد و اهمیت انتخاب مقدار مناسب αرا برجسته می‌کند.



شکل۴. تأثیر نرخ یادگیری را در طول فرآیند

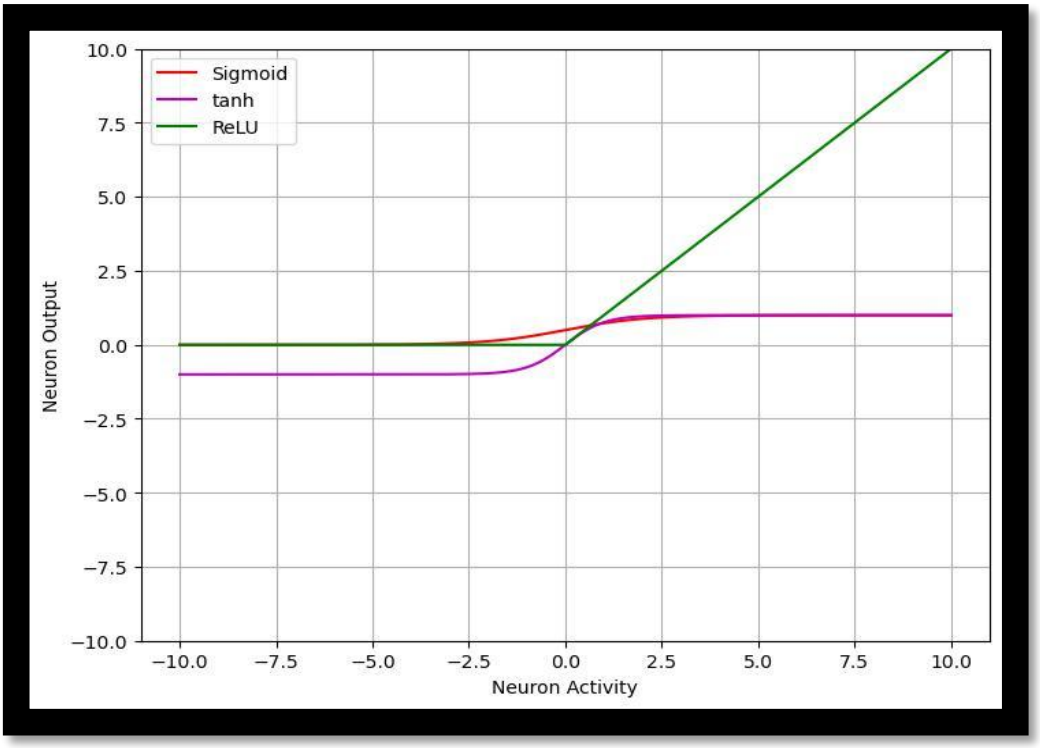
با نرخ‌های یادگیری پایین، پیشرفت مدل به‌صورت ثابت و خطی پیش می‌رود، اما با نرخ‌های یادگیری بالا، این پیشرفت سریع‌تر و گاهی به شکل تصاعدی رخ می‌دهد. اگرچه نرخ‌های بالای یادگیری می‌توانند فرآیند کاهش خطا را تسریع کنند، اما خطر گرفتار شدن در وضعیت‌های نامطلوب بهینه‌سازی (خط سبز) نیز افزایش می‌یابد. این مسئله به دلیل انرژی بیش از حد در فرآیند بهینه‌سازی رخ می‌دهد، که باعث می‌شود پارامترها به شکل ناپایدار جهش کنند و از همگرایی در یک موقعیت پایدار در فضای بهینه‌سازی جلوگیری شود.

مشتق یک تابع هزینه $J(w_0,w_1)$ نسبت به هر پارامتر وزن، حساسیت تابع به آن متغیر را نشان می‌دهد، یعنی چگونه تغییر متغیر بر مقدار تابع تأثیر می‌گذارد. نزول گرادیان از این مفهوم استفاده می‌کند تا پارامترهای مدل را به سمت ترکیب بهینه w_0,w_1هدایت کند. در این فرآیند، هزینه کل الگوریتم یادگیری ماشین روی مجموعه داده آموزشی برای هر تکرار الگوریتم محاسبه می‌شود. هر تکرار الگوریتم در Gradient Descent به‌عنوان یک دسته تعریف می‌شود که نشان‌دهنده تعداد نمونه‌های مجموعه داده مورد استفاده برای محاسبه گرادیان در هر تکرار است. الگوریتم نزول گرادیان با پیروی از جهت گرادیان تابع هزینه، بهینه‌سازی را انجام می‌دهد و هنگامی که گرادیان به صفر نزدیک شود، الگوریتم به همگرایی می‌رسد. تابع هزینه معمولاً به‌صورت مجموع ضررها بر اساس تمامی نمونه‌های آموزشی تعریف می‌شود.

محاسبه گرادیان به‌صورت عددی برای اجرای الگوریتم نزول گرادیان تصادفی (SGD) از نظر محاسباتی هزینه‌بر است. بنابراین، تخمین گرادیان تابع هزینه $J(w)$ نسبت به پارامترهای آن معمولاً با استفاده از الگوریتم پس‌انتشار انجام می‌شود. این روش از قانون زنجیره‌ای به‌صورت بازگشتی استفاده می‌کند تا مشتق تابع ضرر نسبت به خروجی شبکه (y) را محاسبه کند و شامل ضرب مشتقات خروجی هر نورون برای ورودی‌های مربوطه است.

یکی از جنبه‌های مهم در طراحی مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی، انتخاب تابع انتقال یا تابع فعال‌سازی است. این توابع رفتار نورون را تعریف می‌کنند و می‌توانند هر تابع غیرخطی باشند. شکل ۵.۵ رایج‌ترین توابع فعال‌سازی، شاملSigmoid ، Tanhو واحد خطی اصلاح‌شده (ReLU) را نشان می‌دهد. این توابع باعث می‌شوند محاسبات

شبکه غیرخطی شود و مدل قادر باشد الگوها و روابط پیچیده را یاد بگیرد. خروجی نهایی شبکه نیز توسط وزن‌های متصل به لایه خروجی تعیین می‌شود.



شکل۵.توابع فعال سازی، Sigmoid، tanh و ReLU

سیگموئید (خط قرمز):

$$f(x) = \frac{1}{1 + e\,(-x)} \qquad (3\text{-}9)$$

Tangens Hyperbolicus، tanh(خط آبی):

$$f(x) = \tanh(x) = \frac{2}{1 + e\,(-2x)} - 1 \qquad (3\text{-}10)$$

واحد خطی اصلاح شده، ReLU(خط سبز):

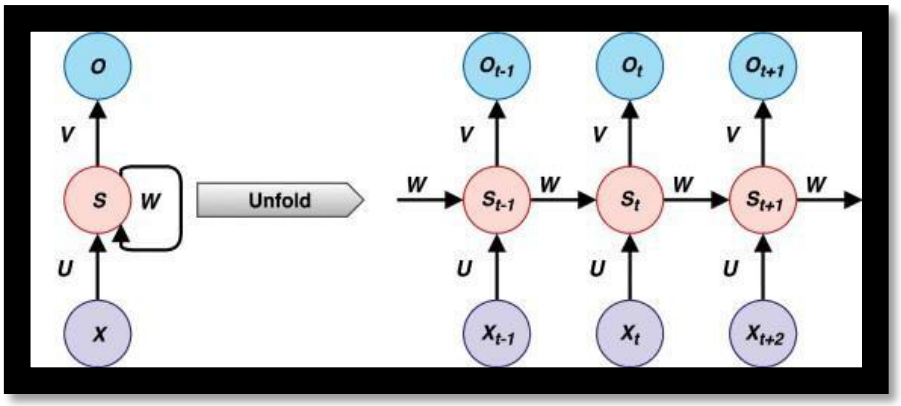
$$f(x) = \max(0; x) \qquad (3\text{-}11)$$

شبکه‌های عصبی پیش‌خور عمیق برای غلبه بر محدودیت‌های شبکه‌های عصبی تک‌لایه طراحی شده‌اند، زیرا شبکه‌های تک‌لایه در یادگیری وابستگی‌های پیچیده، به‌ویژه روابط مکانی-زمانی، با چالش‌هایی مواجه هستند. ساختار کلی شبکه‌های پیش‌خور عمیق شباهت زیادی به شبکه‌های تک‌لایه دارد، اما تفاوت اصلی در تعداد لایه‌های پنهان آن‌ها است که عمق شبکه را مشخص می‌کند. در ادامه، انواع مختلف شبکه‌های عصبی عمیق مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۳-۳-۳-۳ شبکه های عصبی بازگشتی

شبکه‌های عصبی بازگشتی (RNN) با افزودن اتصالات بازگشتی به لایه‌های پنهان یک شبکه پیش‌خور، توانایی مدل‌سازی وابستگی‌های زمانی پویا در داده‌های ورودی را فراهم می‌کنند. این شبکه‌ها برای پردازش داده‌های متوالی یا سری‌های زمانی طراحی شده‌اند، به‌گونه‌ای که خروجی هر مرحله به‌عنوان ورودی به مرحله بعدی منتقل می‌شودRNN .ها دارای یک "حافظه" هستند که امکان تأثیرگذاری ورودی و خروجی بر اساس عناصر قبلی در دنباله را فراهم می‌کند. ساختار اساسی یک RNN در شکل زیر نشان داده شده است. این ساختار اجزای کلیدی مدل RNN را شامل ورودی(X_t) ، حالت پنهان (St) و خروجی (Ot) در هر مرحله زمانی (t) به تصویر می‌کشد. این طراحی به RNN اجازه می‌دهد اطلاعات زمانی را به‌طور مداوم پردازش و از آن برای پیش‌بینی‌ها یا تصمیم‌گیری‌های آتی استفاده کند. پارامترهای U، Vو Wدر این شبکه به ماتریس‌های وزن مربوط هستند که

رفتار حالت‌های پنهان و خروجی را کنترل می‌کنند. مقادیر این پارامترها می‌توانند در هر مرحله زمانی تغییر کنند و نقش مهمی در تطبیق مدل با ویژگی‌های داده‌های متوالی ایفا می‌کنند. حالت پنهان با استفاده از فرمول St = f(U(xt) + Ws(t-1)) محاسبه می‌شود، که در آن f یک تابع فعال‌سازی غیرخطی را نشان می‌دهد.



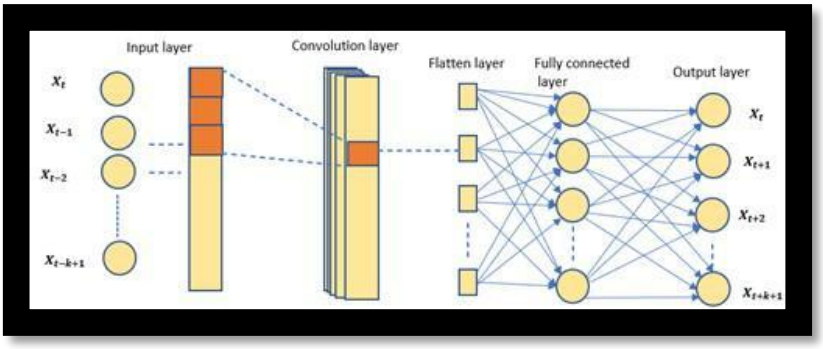
شکل۶.معماری پایه شبکه عصبی بازگشتی

برخلاف شبکه‌های عصبی عمیق معمولی که فرض می‌کنند ورودی‌ها و خروجی‌ها به یکدیگر وابستگی ندارند، شبکه‌های عصبی بازگشتی (RNN) این محدودیت را برطرف می‌کنند. با این حال، RNNهای استاندارد با چالش "ناپدید شدن گرادیان" مواجه هستند، که یادگیری از توالی‌های طولانی داده‌ها را دشوار می‌سازد. برای رفع این مشکل، نسخه‌های پیشرفته‌ای از RNN توسعه یافته‌اند. از میان این گونه‌ها، شبکه‌های حافظه بلندمدت (LSTM) و واحدهای بازگشتی دروازه‌دار (GRU) به‌عنوان محبوب‌ترین و پراستفاده‌ترین مدل‌ها شناخته می‌شوند. این مدل‌ها توانایی بیشتری در یادگیری وابستگی‌های طولانی‌مدت در داده‌ها دارند.

۳-۳-۳-۴ شبکه های عصبی کانولوشنال

شبکه عصبی کانولوشنال (CNN) نوعی شبکه عصبی پیش‌خور است که شامل لایه‌های کانولوشن، ReLU، لایه‌های ادغام و لایه‌های کاملاً متصل می‌باشد. ویژگی کلیدی CNN توانایی آن در یادگیری خودکار الگوهای سلسله‌مراتبی از ویژگی‌های داده‌های ورودی است. این ویژگی‌ها با استفاده از لایه‌های کانولوشن به دست می‌آیند که مجموعه‌ای از فیلترهای قابل یادگیری (هسته‌ها) را روی داده‌های ورودی اعمال می‌کنند. این فیلترها با داده‌های ورودی تعامل داشته و الگوهای محلی و روابط فضایی بین پیکسل‌ها را استخراج می‌کنند. لایه‌های ادغام، ابعاد فضایی را کاهش داده و مهم‌ترین ویژگی‌ها را حفظ می‌کنند. در نهایت، لایه‌های کاملاً متصل که در انتهای شبکه قرار دارند، وظایف طبقه‌بندی یا رگرسیون را بر اساس ویژگی‌های استخراج‌شده انجام می‌دهند.

CNNها یک معماری جایگزین برای پیش‌بینی سری‌های زمانی ارائه می‌دهند، با تأکید بر در نظر گرفتن وابستگی‌های زمانی محلی در مقادیر ورودی. در پیچیدگی یک‌بعدی، این شبکه‌ها تلاش می‌کنند ویژگی‌ها را در بعد زمانی (برای یک سری زمانی خاص در طول زمان) یا در بعد فضایی (برای سری‌های زمانی مختلف در یک زمان ثابت) استخراج کنند. از سوی دیگر، در پیچیدگی دوبعدی، پردازش به‌طور همزمان روی هر دو بعد زمانی و فضایی انجام می‌شود. شکل زیر معماری یک CNN را نمایش می‌دهد که برای پیش‌بینی سری‌های زمانی با استفاده از یک سری زمانی تک‌متغیره به‌عنوان ورودی طراحی شده است. در این معماری، نورون‌های خروجی متعددی وجود دارند که افق‌های مختلف پیش‌بینی را ارائه می‌دهند. این طراحی به شبکه امکان می‌دهد وابستگی‌های پیچیده را در داده‌های ورودی شناسایی کرده و پیش‌بینی‌های دقیق‌تری ارائه دهد.



شکل۷. شبکه عصبی کانولوشنال یک بعدی برای پیش بینی سری های زمانی چند مرحله ای

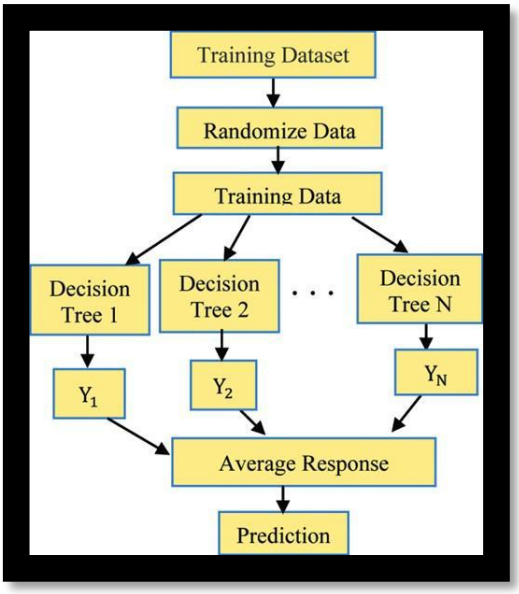
۳-۳-۳-۵ جنگل های رگرسیون چندکی

جنگل‌های رگرسیون چندگانه (QRFs) یک مدل یادگیری ماشین نظارت‌شده و الگوریتم رگرسیون احتمالی هستند که از جنگل تصادفی مشتق شده‌اند. در تئوری گراف، یک درخت به‌عنوان یک نمودار پیوسته و بدون حلقه تعریف می‌شود که از مجموعه‌ای از گره‌ها و لبه‌ها تشکیل شده است. گره‌ها به‌طور مداوم به دو گره دیگر تقسیم می‌شوند و لبه‌های آن‌ها دارای جهت مشخصی هستند.

QRFتوانایی پیش‌بینی داده‌های توزیع ناپارامتری را دارد و ابزاری دقیق برای تخمین چندک‌های مختلف در متغیرهای پیش‌بینی‌کننده با ابعاد بالا ارائه می‌دهد. این مدل به‌عنوان یک مدل یادگیری مجموعه‌ای عمل می‌کند که خروجی نهایی خود را از ترکیب چندین درخت تصمیم تولید می‌کند. همان‌طور که در شکل زیر با نمودار جریان الگوریتم QRF نشان داده شده است، این فرآیند شامل استفاده از ساختارهای درختی متشکل از گره‌ها و شاخه‌ها برای دستیابی به خروجی‌های مدل می‌باشد. هر درخت تصمیم با یک گره والد آغاز می‌شود که به‌عنوان نقطه تصمیم عمل می‌کند و شاخه‌هایی را تا رسیدن به نتیجه ایجاد می‌کند.

برای پیش‌بینی متغیر هدف Yدر افق زمانی t+h، هر درخت با استفاده از متغیرهای پیش‌بینی Xدر زمان t آموزش داده می‌شود. سپس نتایج نگهداری‌شده در برگ‌های هر درخت برای ایجاد پیش‌بینی احتمالی ترکیب

می‌شوند. این رویکرد توانایی مدل را در ارائه پیش‌بینی‌های دقیق و انعطاف‌پذیر برای داده‌های پیچیده افزایش می‌دهد.



شکل۸. فلوچارت روش الگوریتم جنگل رگرسیون چندتایی

مجموعه‌ای از خروجی‌ها که از چندین درخت دوتایی تشکیل شده و با داده‌های ورودی که به‌طور تصادفی انتخاب شده‌اند آموزش داده شده‌اند، به‌عنوان جنگل تصادفی شناخته می‌شود. پیش‌بینی در جنگل تصادفی می‌تواند به‌صورت میانگین وزنی تمامی خروجی‌های درختان دوتایی محاسبه شود. مقدار پیش‌بینی‌شده Yبه‌عنوان میانگین وزنی تمامی خروجی‌ها با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود، جایی که وزن‌های wiبر اساس معادله‌ای خاص تعریف می‌شوند. این روش امکان ترکیب پیش‌بینی‌های چندین درخت را فراهم می‌کند تا دقت و پایداری نتایج نهایی افزایش یابد.

$$Y^{\wedge} = \sum_{I=1}^{N} wiyi$$

(3-12)

$$Wi = \frac{1}{Nb} \sum_{k=1}^{Nb} \frac{1 \ Xi \in Rlk.p}{\neq \ q: Xq \in Rlk.p}$$

(3-13)

جنگل تصادفی با انتخاب زیرمجموعه‌های تصادفی از ویژگی‌ها و ساخت درخت‌های تصمیم بر اساس این زیرمجموعه‌ها، به‌طور مؤثری از بروز برازش بیش از حد جلوگیری می‌کند. در مرحله نهایی، تمامی زیردرخت‌ها با یکدیگر ترکیب شده و یک پیش‌بینی نهایی واحد ایجاد می‌شود.

تابع هدف

تابع هدف اصلی در این مطالعه، کمینه‌سازی نوسانات ولتاژ و فرکانس در شرایط گذرا است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\min J = w_1 \sum(\Delta V)^2 + w_2 \sum(\Delta f)^2$$

که در آن:

ΔV: انحراف ولتاژ از مقدار نامی

Δf: انحراف فرکانس از مقدار نامی

w_1, w_2: ضرایب وزنی

با محدودیت‌های:

$0.95 \text{ pu} \leq V \leq 1.05 \text{ pu}$ ۰.۹۵

$49.5 \text{ Hz} \leq f \leq 50.5 \text{ Hz}$ ۴۹.۵

جدول۳-۱. مشخصات خطوط انتقال و بارهای متصل به شین‌ها

شماره خط	شین ابتدا	شین انتها	r (Ω)	x (Ω)	شماره شین	بار اکتیو (kW)	بار راکتیو (kVar)
۱	۳	۴	۰.۰۱۴۸	۰.۰۳۴۳	۴	۱۰۰	۷۲
۲	۴	۵	۰.۰۲۳۵	۰.۰۴۶۵	۵	۹۰	۶۵
۳	۵	۶	۰.۰۳۱۲	۰.۰۵۸۷	۶	۱۲۰	۸۵
۴	۶	۷	۰.۰۱۸۶	۰.۰۴۰۲	۷	۸۰	۵۸
۵	۷	۸	۰.۰۲۷۴	۰.۰۵۲۳	۸	۱۱۰	۷

جدول فوق نشان‌دهنده ویژگی‌های پنج خط انتقال برق در یک شبکه قدرت است که شامل مشخصات مقاومت (r)، اندوکتانس (x)، شماره شین‌ها، و مقادیر بار اکتیو و بار راکتیو متصل به هر شین می‌باشد. هر خط انتقال بین دو شین متصل است و مقادیر مقاومت و اندوکتانس نشان‌دهنده مشخصات امپدانس خط در هر بخش از شبکه هستند که تأثیر مستقیم بر جریان و ولتاژ دارند. به‌عنوان مثال، خط اول با شماره خط ۱، که شین ۳ را به شین ۴ متصل می‌کند، دارای مقاومت ۰.۰۱۴۸ Ω و اندوکتانس ۰.۰۳۴۳ Ω است و بار اکتیو ۱۰۰ kW و بار راکتیو ۷۲ kVar به شین ۴ متصل است. این نوع اطلاعات برای تحلیل پایداری شبکه، شبیه‌سازی شرایط گذرا، و طراحی سیستم‌های کنترل و بهینه‌سازی شبکه‌های برق ضروری هستند. بارهای اکتیو و راکتیو در این جدول نشان‌دهنده بار مصرفی هر شین در مقیاس توان اکتیو (kW) و توان راکتیو (kVar) هستند که نشان‌دهنده مصرف انرژی و نیاز به توان راکتیو برای حفظ ولتاژ در سیستم می‌باشند.

Toolboxهای مورد استفاده (Statistics and Machine Learning Toolbox)

Statistics and Machine Learning Toolbox یکی از ابزارهای قدرتمند MATLAB است که مجموعه‌ای گسترده از توابع و ابزارها برای تحلیل داده‌ها، مدل‌سازی آماری، و یادگیری ماشین ارائه می‌دهد. این جعبه‌ابزار شامل ابزارهایی برای:

تحلیل رگرسیون (خطی و غیرخطی)

خوشه‌بندی داده‌ها

تحلیل همبستگی و واریانس

الگوریتم‌های یادگیری ماشین نظارت‌شده و غیرنظارت‌شده (مانند درخت تصمیم، SVM، و K-means)

بهینه‌سازی و تنظیم پارامترهای مدل این جعبه‌ابزار به‌ویژه برای داده‌های حجیم و چندبعدی مناسب است و امکان تحلیل سریع و دقیق را فراهم می‌کند. قابلیت‌های تصویرسازی داده‌ها، مانند نمودارهای جعبه‌ای و پراکندگی، به درک بهتر روابط بین متغیرها کمک می‌کنند.

۳-۴ توسعه مدل

مدل‌ها با استفاده از الگوریتم‌های طراحی شده در MATLAB پیاده‌سازی و اجرا می‌شوند. این مرحله شامل تست مدل‌ها بر اساس داده‌های آموزشی و تنظیم پارامترها برای بهینه‌سازی عملکرد است.

۱.مراحل پیاده‌سازی مدل‌ها در MATLAB

پیاده‌سازی مدل‌ها در MATLAB شامل مراحل دقیق و سیستماتیکی است که هر مرحله با استفاده از ابزارها و توابع این نرم‌افزار بهینه انجام می‌شود:

تعریف مسئله و آماده‌سازی داده‌ها:

داده‌های اولیه مربوط به ولتاژ، فرکانس و سایر پارامترها وارد MATLAB می‌شوند.

داده‌ها به صورت ماتریس‌ها یا جداول سازمان‌دهی شده و آماده تحلیل می‌شوند.

ابزارهایی مانند importdata، readtable و xlsread برای وارد کردن داده‌ها استفاده می‌شوند.

مدل‌سازی سیستم انتقال قدرت:

از ابزارهای MATLAB مانند Simulink برای ایجاد مدل دینامیکی سیستم استفاده می‌شود.

ماژول‌های مربوط به خطوط انتقال، بارها، و منابع تغذیه با استفاده از بلوک‌های Simulink یا توابع سفارشی‌شده ایجاد می‌شوند.

ایجاد توابع و الگوریتم‌های تحلیل:

توابع محاسباتی برای تحلیل گذراها و نوسانات طراحی می‌شوند.

الگوریتم‌هایی برای محاسبه پاسخ‌های سیستم در شرایط گذرا پیاده‌سازی می‌گردند.

ابزارهایی مانند ode45 یا ode23 برای حل معادلات دیفرانسیل مربوط به مدل استفاده می‌شوند.

شبیه‌سازی و اعتبارسنجی مدل:

مدل شبیه‌سازی شده برای شرایط مختلف گذرا مانند خطاهای الکتریکی و تغییر بار بررسی می‌شود.

ابزارهای شبیه‌سازی مانند power_analyze و sim به‌کار می‌روند.

۲.تنظیم پارامترها و بهینه‌سازی مدل‌ها

تنظیم دقیق پارامترها و بهینه‌سازی عملکرد مدل یکی از گام‌های مهم در طراحی سیستم‌های قدرت است:

تعیین مقادیر اولیه پارامترها:

پارامترهای اساسی مانند مقاومت، اندوکتانس، و ظرفیت خازنی از داده‌های واقعی یا استانداردهای طراحی انتخاب می‌شوند.

ابزارهایی مانند set_param برای تنظیم مقادیر اولیه در Simulink استفاده می‌شوند.

بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم‌های عددی:

توابع بهینه‌سازی مانند fmincon، fminunc و ga (الگوریتم ژنتیک) برای یافتن بهترین پارامترها استفاده می‌شوند.

این توابع بر اساس معیارهایی مانند حداقل کردن نوسانات ولتاژ یا کاهش تلفات انرژی عمل می‌کنند.

اعتبارسنجی پارامترها:

خروجی‌های مدل با داده‌های واقعی مقایسه شده و تنظیمات موردنیاز انجام می‌شود.

از ابزارهایی مانند fitlm برای مدل‌سازی خطی و تنظیم پارامترها استفاده می‌شود.

تحلیل حساسیت پارامترها:

ابزارهایی مانند sensitivity برای بررسی تأثیر تغییر پارامترها بر عملکرد سیستم به‌کار می‌روند.

این تحلیل مشخص می‌کند که کدام پارامترها تأثیر بیشتری بر نتایج دارند.

۳.تحلیل رفتار دینامیکی مدل‌ها

تحلیل رفتار دینامیکی به شناخت بهتر رفتار سیستم در مواجهه با نوسانات و تغییرات کمک می‌کند:

- **شبیه‌سازی پاسخ زمانی سیستم:**
  پاسخ دینامیکی سیستم به تحریکات خارجی با استفاده از نرم‌افزار Simulink و ابزارهایی نظیر Scopeو Powergui شبیه‌سازی می‌شود. در این فرآیند، پارامترهایی همچون تغییرات ولتاژ و فرکانس در شرایط خطا یا کلیدزنی مورد بررسی قرار می‌گیرند.
- **تحلیل پایداری دینامیکی:**
  برای تحلیل پایداری سیستم، از ابزارهایی مانند eig جهت محاسبه مقادیر ویژه سیستم استفاده می‌شود. همچنین، رفتار سیستم تحت شرایط بحرانی نظیر خطاهای سه‌فاز یا افت ناگهانی ولتاژ ارزیابی می‌گردد.
- **بررسی تأثیر پارامترها بر رفتار دینامیکی:**
  اثر تغییرات پارامترهای سیستم بر زمان میرایی و دامنه نوسانات از طریق تحلیل حساسیت بررسی می‌شود. شبیه‌سازی‌های متعدد نیز برای تحلیل پاسخ‌های مختلف سیستم اجرا می‌شوند.
- **تجسم داده‌های شبیه‌سازی‌شده:**
  نمودارهایی نظیرBode ، Nyquistو Root Locus با استفاده از توابعی مانند bodeplot و rlocusرسم می‌شوند. این نمودارها رفتار دینامیکی سیستم را به‌صورت گرافیکی نمایش داده و به تحلیل دقیق‌تر کمک می‌کنند.
- **ارائه نتایج برای بهینه‌سازی:**
  نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی به‌عنوان ورودی در فرآیند بهینه‌سازی و تنظیم مجدد پارامترهای سیستم استفاده می‌شوند تا عملکرد آن بهینه گردد.

در این بخش، هدف اصلی تحلیل دینامیکی سیستم در محدوده فرکانس‌های بالا و ارائه یک مدل ساده‌شده برای بررسی‌های مبتنی بر فرکانس است. اجزای کلیدی شامل جریان راکتور $iTCR^{i}$و ولتاژهای $v_1_v_2$و به‌عنوان متغیرهای حالت در نظر گرفته شده‌اند. مدل فضای حالت غیرخطی به شکل زیر ارائه می‌گردد:

۳-۱۴

$$SV_1 = \frac{1}{C} i_1$$

۳-۱۵

$$SV_2 = G \frac{1}{C} i_{tcr}$$

۳-۱۶

$$Sitcr = g \frac{1}{L_{tcr}} V_1 - g \frac{1}{L_{tcr}} V_2$$

۳-۱۷

$$V_c = V_1 - V_2$$

در اینجا، تابع سوئیچینگ g نقش تعیین‌کننده‌ای دارد؛ به‌طوری که g=۱ نشان‌دهنده حالت هدایت ترانزیستور و g=۰ بیانگر حالت خاموش بودن آن است. برای استخراج مدل خطی معادل در فرکانس‌های پایین، مدل از ساختار زیر تبعیت می‌کند:

۳-۱۸

$$SV_1 = \frac{1}{C} i_1$$

۳-۱۹

$$SV_2 = \frac{1}{C} i_{tcr}$$

۳-۲۰

$$Si_{tcr} = KV_1 - K_2V_2$$

۳-۲۱

$$V_c = V_1 - V_2$$

در اینجا، پارامترهای مدل $K_1= K_1(a)$ و $K_2= K_2(a)$ به‌عنوان متغیرهای ناشناخته تعریف می‌شوند که به زاویه آتش وابسته هستند. با توجه به دو مؤلفه جریان تایریستور در سمت راست معادله ۳-۱۶، K_1V_1 جریانی را ایجاد می‌کند که توسط یک ولتاژ ثابت V_1 فعال می‌شود. با در نظر گرفتن پیش‌فرض اولیه و پیکربندی مشابه اتصال شنت ، مقدار ثابت k_1 می‌تواند با استفاده از روش راکتانس معادل برای جریان تعیین شود.

۳-۲۲

$$\frac{1}{K_1} = L_a L_p \frac{L_{tcr}\pi}{\pi - 2\alpha - \sin(\pi - 2\alpha)}$$

با تعیین ثابت‌ها، تابع انتقال را می‌توان به فرم زیر نمایش داد.

۳-۲۳

$$\frac{V_2(s)}{V_1(s)} = Tfo(s) = \frac{K_3}{S^2/W_d^{2+1}}$$

۳-۲۴

$$W_d = \sqrt{\frac{K_2}{c}}.\ K_3 = K_1/K_2$$

با مشاهده (۳-۲۰) دیده می‌شود که w_d فرکانس رزنانسی از نامیرا سیستم مرتبه دوم است عبارت ارائه شده برای این فرکانس در (۳-۲۱) داده و تعیین می‌شود.

۳-۲۵

$$W_d = \frac{\pi - 2\alpha}{\pi\sqrt{L_{tcrc}}}$$

۳-۲۶

$$\frac{V_C}{iL} = \frac{(jw_o)^2/wd^2 + 1 - k_3^6}{C_j w[(jw_o)^2/wd^2 + 1]}$$

۳-۲۷

$$X_{TCSC} = \frac{Wo^2/wd^2 + k_{3-1}}{CW_0[1 - Wo^2/W_d^2]}$$

۳-۲۸

$$K_3 = \frac{(\pi - 2\alpha)[(\pi - 2\alpha) - \sin(\pi - 2\alpha)]}{\pi^2 L_{tcr}^{3/2} c^{3/2}}$$

با مقایسه مدل فرکانسی ، مدل ارائه‌شده در معادله (۳-۲۳) به‌طور قابل‌توجهی ساده‌تر می‌شود. در پیکربندی نمایش داده‌شده در شکل ۱۵-۳، مقدار زاویه تایریستور مرجع در طول زمان تغییر کرده و هر زاویه، ولتاژ مشخصی تولید می‌کند. از آنجا که تمام پارامترها ثابت هستند، ولتاژ به‌طور مستقیم با امپدانس آن متناسب است و این روش، راهی کارآمد برای دستیابی به اطلاعات دقیق درباره امپدانس محسوب می‌شود.

مدل ارائه‌شده در زوایای آتش پایین در محدوده aE(20, 30) با مدل ایده‌آل تفاوت ناچیزی دارد که این تفاوت حدود ۵٪ است. تابع انتقال در معادله (۳-۲۲) تنها در فرکانس مبنا دقیق است و نمی‌توان آن را برای مطالعات گسترده‌تر فرکانسی به کار برد. هدف از مدل‌سازی دینامیکی، استخراج معادلات دینامیکی N1(V1,a, S)با دقت کافی در محدوده فرکانس زیرسنکرون و برای سیگنال‌های کوچک اطراف نقطه کار حالت پایدار است. این حالت پایدار برای سیستم به‌صورت متغیر تعریف می‌شود.

۳-۵ ثبات فرکانس

پایداری فرکانس به توانایی سیستم در حفظ فرکانس شبکه در محدوده‌ای مشخص و مطابق با دستورالعمل‌های عملیاتی اشاره دارد و نقش حیاتی در تضمین امنیت و پایداری عملکرد سیستم قدرت دارد. انحراف فرکانس از این محدوده می‌تواند به فعال شدن اقدامات حفاظتی منجر شود، مانند عملکرد دستگاه‌های کاهش بار تحت فرکانس

که برای جلوگیری از خرابی‌های زنجیره‌ای و خاموشی‌های احتمالی طراحی شده‌اند. عوامل مختلفی مانند از کار افتادن یک ژنراتور، تغییرات ناگهانی در بارهای بزرگ یا بروز خطا در خطوط انتقال متصل به بارهای اصلی، معمولاً باعث انحرافات بزرگ در فرکانس می‌شوند. این رویدادها تعادل بین تولید و تقاضای برق را در سیستم مختل می‌کنند. دینامیک فرکانس شبکه الکتریکی به‌صورت کلی با معادله‌ای ساده‌شده کنترل می‌شود:

$$\frac{\mathrm{dfgrid}}{\mathrm{dt}} = \frac{\mathrm{Pgen} - \mathrm{PL}}{M} = \frac{\Delta \mathrm{P}}{M} \qquad (3\text{-}29)$$

در جایی که fgrid فرکانس سنکرون را نشان می دهد، $\frac{\mathrm{dfgrid}}{\mathrm{dt}}$ نشان دهنده نرخ است تغییر فرکانس (RoCOF) و M ثابت اینرسی موثر سیستم را نشان می دهد. Mنشان‌دهنده ترکیب اینرسی نرمال‌شده تمام ژنراتورهای مبتنی بر چرخش است و رابطه معکوسی با نرخ تغییر فرکانس (RoCOF) دارد. دینامیک فرکانس در شبکه برق نشان‌دهنده تعادل میان تولید و مصرف انرژی است؛ به‌طوری که تولید مازاد باعث افزایش فرکانس و کمبود تولید موجب کاهش آن می‌شود. برای حفظ پایداری شبکه، کنترل و نگهداری فرکانس در مقدار اسمی ضروری است. با این وجود، حفظ فرکانس تنظیم‌شده در سراسر سیستم شبکه قدرت با چالش‌هایی روبرو است. عواملی مانند تنوع در اندازه و ساختار سیستم‌ها، غیرقابل پیش‌بینی بودن منابع انرژی تجدیدپذیر مانند باد و فتوولتائیک، و تأثیر انتقال انرژی و فعالیت‌های بازار، بر دینامیک شبکه تأثیر می‌گذارند.

در مقایسه با ژنراتورهای سنکرون نیروگاه‌های سنتی که به تأمین اینرسی سیستم کمک می‌کنند، ژنراتورهای بادی و فتوولتائیک فاقد اینرسی ذاتی هستند. کاهش اینرسی سنکرون در سیستم‌های مدرن که انرژی‌های تجدیدپذیر در آن‌ها غالب شده‌اند، منجر به انحرافات فرکانسی بیشتر و نرخ تغییر فرکانس (RoCOF) بالاتر می‌شود. با افزایش

جایگزینی واحدهای سنتی با منابع تجدیدپذیر، پیش‌بینی می‌شود شدت این انحرافات افزایش یابد و حفظ تعادل میان بار و تولید و کنترل فرکانس با چالش‌های بیشتری روبرو گردد.

۳-۶ اصول کنترل جریان توان فعال

استراتژی‌های کنترل جریان توان فعال با هدف مدیریت کارآمد و افزایش جریان توان واقعی در شبکه‌های انتقال طراحی شده‌اند. این استراتژی‌ها با تنظیم دینامیک رفتار تجهیزات و اجزای شبکه، به کاهش مشکلات ناشی از تراکم و بهبود قابلیت اطمینان کلی سیستم قدرت کمک می‌کنند. کنترل جریان توان فعال، بر مدیریت و تنظیم مؤثر جریان برق واقعی در سیستم قدرت تمرکز دارد و اطمینان از کارایی و قابلیت اطمینان آن را فراهم می‌کند. جریان توان اکتیو (P) و جریان توان راکتیو (Q) از طریق یک خط انتقال که دو باس ولتاژ را به هم وصل می کند، عمدتاً تحت تأثیر بزرگی ولتاژ (V1 و V2) در باس ها و اختلاف زاویه فاز = ۱ - ۲ بین این ولتاژها.

(3-30)

$$P = \frac{V1V2 \sin \delta}{XL}$$

$$Q = \frac{V\,2\,1 - V1V2 \cos \delta}{XL}$$

(3-31)

در این معادله، X_L نمایانگر امپدانس خط است که فرض بر این است که ماهیتی کاملاً القایی دارد. برای کنترل جریان توان واقعی، لازم است تغییراتی در زاویه یا امپدانس خط X_L اعمال شود. این تغییرات را می‌توان از طریق

نصب یک ترانسفورماتور تغییر فاز یا یک جبران‌کننده سری که امپدانس راکتیو مؤثر X_Lخط را تغییر می‌دهد، انجام داد. این تنظیمات امکان تنظیم جریان توان واقعی بین دو باس را فراهم می‌کند.

تغییر امپدانس خط با افزودن عناصر غیرفعال مانند خازن یا سلف به خط انتقال امکان‌پذیر است. گزینه دیگر، استفاده از یک اینورتر استاتیک است که می‌تواند عناصر فعال قابل کنترل، مانند سلف مثبت یا منفی و یا ولتاژ سنکرون اساسی متعامد با جریان خط، تولید کند، بدون آنکه تلفات اضافی ایجاد شود.

کنترل فعال جریان برق و نظارت بر تراکم، از جنبه‌های کلیدی مدیریت بهینه سیستم‌های قدرت مدرن هستند و نقش اساسی در تضمین انتقال پایدار و مطمئن برق ایفا می‌کنند. این فرآیندها از طریق استراتژی‌ها و فناوری‌هایی طراحی شده‌اند که هدفشان پیشگیری یا کاهش مشکلات ناشی از ازدحام و تضمین عملکرد بهینه شبکه برق است. ازدحام زمانی رخ می‌دهد که ظرفیت انتقال موجود برای پاسخگویی به جریان‌های توان بین مناطق یا گره‌های مختلف کافی نباشد. این شرایط ممکن است هزینه‌های بهره‌برداری را افزایش داده، پایداری سیستم را کاهش دهد و به مشکلات قابلیت اطمینان منجر شود. نظارت بر تراکم شامل ارزیابی مداوم شبکه برق برای شناسایی خطوط انتقال به شدت بارگذاری‌شده یا نقاطی است که جریان‌های برق باعث ایجاد محدودیت می‌شوند.

ترکیب پایش تراکم و کنترل فعال جریان برق به اپراتورهای شبکه این امکان را می‌دهد که به صورت پیشگیرانه مشکلات تراکم را مدیریت کرده، جریان توان را بهینه‌سازی کنند، پایداری شبکه را بهبود بخشند و از انتقال کارآمد انرژی اطمینان حاصل کنند. با توجه به رشد استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و پیچیدگی روزافزون سیستم‌های قدرت، اهمیت این استراتژی‌ها بیشتر شده است.

در سیستم‌هایی که انرژی تجدیدپذیر غالب است، تعامل میان این منابع و شبکه موجود به دلیل ویژگی‌های فیزیکی خاص و رابط‌های مبتنی بر الکترونیک قدرت، تفاوت قابل‌توجهی با نیروگاه‌های سنتی دارد. این وضعیت چالش‌هایی را برای اپراتورهای شبکه در زمینه حفظ پایداری توان و محدودیت‌های حرارتی ایجاد می‌کند.

۳-۷ آزمون و اعتبارسنجی مدل

استفاده از توابعی مانند crossval برای اعتبارسنجی متقابل و ارزیابی دقت مدل‌ها با استفاده از داده‌های تست. به‌کارگیری confusionmat برای تولید ماتریس درهم‌ریختگی و ارزیابی دقیق‌تر عملکرد مدل در تشخیص دسته‌های مختلف.

۱.استفاده از داده‌های تست برای ارزیابی مدل

ارزیابی مدل‌ها یکی از مراحل اساسی در فرایند مدل‌سازی است که به منظور بررسی دقت و عملکرد مدل بر روی داده‌های جدید انجام می‌شود. برای این منظور، داده‌های موجود به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: داده‌های آموزشی (Training Data) و داده‌های تست (Test Data). داده‌های آموزشی برای یادگیری و ساخت مدل استفاده می‌شوند، در حالی که داده‌های تست برای بررسی عملکرد مدل در مواجهه با داده‌هایی که در فرایند آموزش ندیده است، مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده از داده‌های تست، توانایی مدل در تعمیم‌پذیری و پیش‌بینی داده‌های ناشناخته را ارزیابی می‌کند. در این فرآیند، معیارهایی مانند دقت پیش‌بینی، نرخ خطا، و قابلیت تشخیص مدل محاسبه می‌شوند.

۲.اعتبارسنجی متقابل (Cross-Validation) با توابع crossval

اعتبارسنجی متقابل یک روش پیشرفته برای ارزیابی مدل است که از تقسیم داده‌ها به چندین بخش (Fold) استفاده می‌کند. در این روش، داده‌ها به صورت تصادفی به تعدادی زیرمجموعه تقسیم می‌شوند. در هر مرحله، یکی از این زیرمجموعه‌ها به عنوان داده‌های تست و باقی داده‌ها به عنوان داده‌های آموزشی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این فرایند برای تمام زیرمجموعه‌ها تکرار می‌شود و میانگین نتایج به عنوان عملکرد نهایی مدل گزارش

می‌شود. روش‌های مختلف اعتبارسنجی متقابل شامل k-Fold Cross-Validation، Leave-One-Out Cross-Validation و Stratified Cross-Validation است. در MATLAB، توابعی مانند crossval برای اجرای این روش‌ها استفاده می‌شود و امکان ارزیابی دقیق‌تر مدل و کاهش ریسک overfitting یا underfitting را فراهم می‌کند.

۳.ارزیابی عملکرد مدل‌ها با ماتریس درهم‌ریختگی (confusionmat)

ماتریس درهم‌ریختگی ابزاری قدرتمند برای تحلیل عملکرد مدل‌های طبقه‌بندی است. این ماتریس شامل تعداد پیش‌بینی‌های درست و نادرست در هر دسته است. اجزای اصلی این ماتریس شامل چهار عنصر زیر هستند:

True Positives (TP): تعداد مواردی که مدل به‌درستی به‌عنوان دسته مورد نظر شناسایی کرده است.

True Negatives (TN): تعداد مواردی که مدل به‌درستی به‌عنوان سایر دسته‌ها شناسایی کرده است.

False Positives (FP): تعداد مواردی که مدل به اشتباه به‌عنوان دسته مورد نظر شناسایی کرده است.

False Negatives (FN): تعداد مواردی که مدل به اشتباه به‌عنوان سایر دسته‌ها شناسایی کرده است.

با استفاده از ماتریس درهم‌ریختگی، معیارهای مختلفی مانند دقت (Accuracy)، حساسیت (Sensitivity)، و خاص‌بودن (Specificity) محاسبه می‌شوند. در MATLAB، تابع confusionmat برای تولید و تحلیل این ماتریس استفاده می‌شود.

۴.معیارهای ارزیابی: دقت، حساسیت، و خطاهای پیش‌بینی

عملکرد مدل بر اساس معیارهای زیر ارزیابی می‌شود:

دقت (Accuracy): نسبت تعداد پیش‌بینی‌های درست به کل پیش‌بینی‌ها. دقت یکی از معیارهای اساسی برای ارزیابی کلی مدل است:

$$\frac{\mathbf{TP} + \mathrm{TN}}{\mathbf{TP} + \mathbf{TN} + \mathrm{FP} + \mathrm{FN}} = \mathrm{Accuracy}$$

حساسیت (Sensitivity) یا Recall: توانایی مدل در شناسایی درست نمونه‌های مثبت. این معیار با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{\mathbf{TP}}{\mathbf{TP} + \mathbf{FN}} = \mathrm{Sensitivity}$$

ویژگی (Specificity): توانایی مدل در شناسایی درست نمونه‌های منفی:

$$\frac{\mathbf{TN}}{\mathbf{TN} + \mathbf{FP}} = \mathrm{Specificity}$$

F1-Score: میانگینی از دقت و حساسیت که برای ارزیابی تعادل بین آن‌ها استفاده می‌شود:

$$\frac{\mathbf{Precision} \times \mathbf{Recall}}{\mathbf{Precision} + \mathbf{Recall}} \times 2 = \mathrm{F1}$$

Mean Squared Error (MSE): معیار خطای پیش‌بینی مدل برای متغیرهای عددی:

$$\frac{1}{n}\sum_{i=1} n \ (\mathrm{y\hat{}i} - \mathrm{yi})^2 = \mathrm{MSE}$$

این معیارها کمک می‌کنند تا نقاط قوت و ضعف مدل به‌طور دقیق تحلیل شده و اصلاحات لازم برای بهبود آن انجام شود.

۳-۸ ابزارها و نرم‌افزارهای مورد استفاده

۱.نقش MATLAB در تحلیل داده‌ها

MATLAB یکی از ابزارهای قدرتمند و پیشرفته برای تحلیل داده‌ها در حوزه مهندسی برق و سیستم‌های قدرت است. این نرم‌افزار به دلیل دارا بودن قابلیت‌های گسترده در پردازش داده، محاسبات عددی و شبیه‌سازی، به‌طور گسترده در پروژه‌های مهندسی و تحقیقات علمی استفاده می‌شود. یکی از نقاط قوت MATLAB در تحلیل داده‌ها، امکان اجرای محاسبات پیچیده و بهره‌گیری از توابع متنوع برای پیش‌پردازش و تجزیه و تحلیل اطلاعات است. این نرم‌افزار از قابلیت‌های گرافیکی قدرتمندی برخوردار است که تحلیل‌های بصری، شبیه‌سازی و تصویرسازی داده‌ها را ساده‌تر می‌کند و به کاربران اجازه می‌دهد الگوها و روابط میان داده‌ها را به راحتی شناسایی کنند. علاوه بر این، MATLAB با داشتن انواع جعبه‌ابزارهای تخصصی مانند Statistics and Machine Learning Toolbox و Deep Learning Toolbox، امکان تحلیل‌های پیچیده‌تر و استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی را فراهم می‌کند. در پژوهش‌های مربوط به مدل‌سازی پدیده‌های گذرا، ابزارهای MATLAB امکان تحلیل‌های دقیق فرکانسی و زمانی را فراهم می‌کنند که برای بررسی تأثیرات نوسانات ولتاژ و فرکانس بسیار مهم هستند. این ویژگی‌ها MATLAB را به ابزاری کلیدی برای توسعه و تست مدل‌های شبیه‌سازی تبدیل کرده‌اند. یکی از ویژگی‌های مهم MATLAB این است که این امکان را می‌دهد که نه تنها داده‌های عددی را تحلیل کنند، بلکه از آن برای شبیه‌سازی رفتار سیستم‌های الکتریکی استفاده کنند. برای مثال، در مدل‌سازی گذراهای الکتریکی، MATLAB می‌تواند با استفاده از توابع عددی و جعبه‌ابزارهای تخصصی، رفتار شبکه‌های قدرت را شبیه‌سازی کند و کمک کند تا تأثیر نوسانات و پدیده‌های مختلف را در شرایط گوناگون ارزیابی کنند.

۲.ابزارها و توابع آماری و تحلیلی

MATLAB مجموعه‌ای از ابزارها و توابع قدرتمند را برای انجام تحلیل‌های آماری و پردازش داده‌ها فراهم می‌کند. این ابزارها به محققان اجازه می‌دهند تا داده‌ها را به صورت کامل بررسی و تحلیل کنند و نتایج دقیقی از آنها استخراج نمایند. برخی از توابع آماری مهم و ابزارهای تحلیل داده که در MATLAB مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارت‌اند از:

پیش‌پردازش داده‌ها: توابعی مانند clean و normalize برای تمیزسازی داده‌ها و نرمال‌سازی مقادیر مورد استفاده قرار می‌گیرند. این توابع امکان حذف داده‌های نویزی، حذف داده‌های پرت و تصحیح خطاها را فراهم می‌کنند که به بهبود دقت تحلیل‌ها منجر می‌شود.

تحلیل توزیع داده‌ها: توابع histogram، boxplot و scatter برای تصویرسازی داده‌ها و بررسی توزیع و الگوها به کار می‌روند. این توابع به محققان کمک می‌کنند تا داده‌ها را به صورت بصری تحلیل کرده و به راحتی ناهنجاری‌ها و روندهای خاص را شناسایی کنند.

تحلیل همبستگی: توابعی مانند corrcoef برای محاسبه ضریب همبستگی بین متغیرها به کار می‌روند. این تحلیل‌ها می‌توانند نشان دهند که چگونه متغیرهای مختلف با یکدیگر در ارتباط هستند و به شناسایی روابط علت و معلولی در سیستم کمک کنند.

مدل‌سازی و شبیه‌سازی: جعبه‌ابزارهای مختلفی مانند Statistics and Machine Learning Toolbox و Deep Learning Toolbox برای توسعه مدل‌های یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی عمیق استفاده می‌شوند. این ابزارها به خصوص در تحلیل‌های پیش‌بینی و تشخیص الگوها در داده‌های پیچیده، عملکرد بالایی دارند.

تحلیل‌های پیشرفته: ابزارهای مانند fitlm برای برازش مدل‌های خطی و ابزارهای شبیه‌سازی برای تحلیل رفتار دینامیکی سیستم‌ها در دسترس هستند. MATLAB همچنین امکاناتی برای انجام تحلیل‌های چندمتغیره و مدل‌سازی داده‌های پیچیده دارد که این موضوع آن را به گزینه‌ای مناسب برای پروژه‌های پژوهشی پیشرفته تبدیل کرده است.

۳.مقایسه MATLAB با سایر نرم‌افزارهای تحلیل داده

در مقایسه با سایر نرم‌افزارهای تحلیل داده مانند Python، R و SPSS، MATLAB ویژگی‌های منحصربه‌فردی دارد که آن را به انتخابی مناسب برای مهندسان برق و محققانی که به تحلیل سیستم‌های پیچیده مشغول هستند، تبدیل کرده است:

سادگی و قدرت شبیه‌سازی: MATLAB به دلیل طراحی ویژه برای محاسبات مهندسی، از رابط کاربری ساده و امکانات قوی برای شبیه‌سازی سیستم‌های دینامیکی برخوردار است. برخلاف Python که نیاز به کتابخانه‌های جانبی متعدد دارد، MATLAB ابزارهای بسیاری را به صورت پیش‌فرض ارائه می‌دهد که کار تحلیل را ساده‌تر می‌کنند.

تجربه کاربری یکپارچه: MATLAB به صورت یک محیط یکپارچه برای تحلیل داده، شبیه‌سازی و مدل‌سازی عمل می‌کند و نیازی به استفاده از ابزارهای متعدد و ترکیب نتایج از چند منبع مختلف ندارد. از این نظر، MATLAB برای پروژه‌های مهندسی که نیازمند تعامل مداوم بین تحلیل داده و شبیه‌سازی هستند، بسیار کارآمد است.

جعبه‌ابزارهای تخصصی: در MATLAB جعبه‌ابزارهای مختلفی وجود دارند که به طور خاص برای مسائل مهندسی طراحی شده‌اند. در حالی که Python و R نیاز به نصب و تنظیم کتابخانه‌های مختلف دارند، MATLAB این ابزارها را به صورت آماده در اختیار کاربران قرار می‌دهد که باعث افزایش بهره‌وری و کاهش احتمال بروز خطا می‌شود.

توانایی‌های عددی و محاسباتی بالا: MATLAB برای انجام محاسبات عددی سنگین بهینه‌سازی شده است و این موضوع آن را به ابزاری مناسب برای شبیه‌سازی‌های پیچیده مانند تحلیل گذراها و بررسی تأثیر نوسانات ولتاژ و فرکانس تبدیل کرده است. در حالی که Python و R نیز توانایی‌های مشابهی دارند، MATLAB به دلیل بهینه‌سازی بیشتر برای محاسبات مهندسی، در تحلیل‌های عددی پیچیده سرعت و دقت بالاتری دارد.

تصویرسازی داده‌ها: در مقایسه با R که به دلیل کتابخانه‌های قدرتمندش مانند gplot2 شناخته شده است، MATLAB ابزارهای تصویرسازی ساده و در عین حال قدرتمندی را ارائه می‌دهد که به کاربر اجازه می‌دهد نتایج تحلیل را به شکل گرافیکی و به‌صورت کاملاً قابل فهم نمایش دهد. این ویژگی برای درک سریع‌تر نتایج و انتقال آن به دیگران بسیار مؤثر است.

۳-۹ متغیرهای بهنیه سازی

در مدل‌سازی پدیده‌های گذرا در خطوط انتقال قدرت، متغیرهای بهینه‌سازی اصلی شامل مقاومت خط، اندوکتانس خط، و ظرفیت خازنی خط هستند. همچنین، پارامترهای منبع تغذیه مانند ولتاژ و فرکانس منبع نیز در نظر گرفته می‌شوند. زمان‌بندی خطا، شامل زمان شروع و پایان خطا، از دیگر متغیرهای مهم در این مدل‌سازی است. در نهایت، مشخصات بار مصرفی، که شامل توان اکتیو و راکتیو می‌شود، نیز در این فرآیند بهینه‌سازی مورد توجه قرار می‌گیرد. تنظیم مناسب این متغیرها برای بهینه‌سازی عملکرد سیستم و کنترل اثرات گذرا در خطوط انتقال قدرت ضروری است.

۳-۱۰ جمع بندی و خلاصه فصل

در این فصل به بیان"روش تحقیق" پرداختیم. داده‌های موردنیاز از منابع مختلف جمع‌آوری، پیش‌پردازش و نرمال‌سازی شدند. ابزارهای MATLAB برای تحلیل آماری، شبیه‌سازی دینامیکی، و توسعه مدل‌های یادگیری ماشین مورد استفاده قرار گرفتند. مدل‌سازی داده‌ها با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته آماری و یادگیری ماشین انجام شد و اعتبارسنجی مدل‌ها با تکنیک‌های cross-validation و تحلیل ماتریس درهم‌ریختگی صورت گرفت. در نهایت، MATLAB به‌عنوان ابزاری کلیدی برای پردازش داده‌ها و شبیه‌سازی‌های پیچیده، در مقایسه با سایر نرم‌افزارها، به دلیل جعبه‌ابزارهای تخصصی و توانایی‌های عددی قوی برتری خود را نشان داد.

فصل چهارم

نتایج عددی

۴-۱ مقدمه

افزایش پیچیدگی‌های فنی و رشد استفاده از منابع تجدیدپذیر در شبکه‌های برق، اثرات گذرا در خطوط انتقال قدرت را به یک چالش حیاتی تبدیل کرده است. این پدیده‌ها به دلیل ارتباط مستقیم با نوسانات فرکانس و ولتاژ، عملکرد شبکه را تحت تأثیر قرار داده و ممکن است منجر به ایجاد وضعیت‌های بحرانی شوند. تحلیل دقیق و مدل‌سازی علمی این شرایط، ابزارهایی را برای مدیریت بهینه شبکه و جلوگیری از پیامدهای نامطلوب فراهم می‌کند. هدف اصلی این فصل از پایان نامه بعنوان یک پژوهش علمی، پاسخ به پرسش ها و فرضیات ذکر شده در فصول قبل بصورت بررسی و تحلیل نتایج مورد نظر است. نتایج از نظر کیفی و کمی تحلیل شده و ارائه گردید. این فصل از پایان نامه پرچالش تر از سایر بخش ها بوده زیرا به سئوالاتی جواب داده شد که اختلاف نظرهای احتمالی بین نمونه مورد بررسی را از نظر ویژگی هایشان نشان می داد. فلذا این فصل به تجزیه وتحلیل اطلاعات تمرکز داشته و روش های مختلف تحلیل را به بهترین شکل بکار گرفته و تکمیل نموده و نتایج حاصله را بدست آورده است.

۴-۲ توصیف دقیق داده‌های مورد استفاده

در این بخش، داده‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی و تحلیل پدیده‌های گذرا در خطوط انتقال قدرت به طور دقیق و مفصل توصیف می‌شوند. داده‌های به کار رفته شامل اطلاعات تاریخی و زمان‌واقعی در زمینه پارامترهای مختلفی نظیر فرکانس، ولتاژ، بار مصرفی، و دما هستند که از منابع معتبر جمع‌آوری شده‌اند. هدف از این توصیف، درک بهتر خصوصیات داده‌ها و نحوه به کارگیری آن‌ها در تحلیل نوسانات و پایداری سیستم‌های قدرت است.

الف) داده‌های تاریخی

شرکت‌های برق منطقه‌ای و ملی: داده‌های تاریخی مربوط به شبکه‌های انتقال قدرت از شرکت‌های برق مانند توانیر و اپراتورهای منطقه‌ای به دست آمده‌اند. این داده‌ها شامل تغییرات فرکانس، ولتاژ و بار مصرفی در بازه‌های زمانی مختلف هستند و امکان تحلیل نوسانات و تغییرات سیستم در طول زمان را فراهم می‌کنند.

آژانس‌های نظارتی و تنظیم‌کننده انرژی: داده‌های دیگری از سازمان‌های تنظیم‌کننده مانند وزارت نیرو و سایر نهادهای مرتبط دریافت شده است. این داده‌ها معمولاً مربوط به عملکرد شبکه‌های انتقال قدرت و تغییرات آن‌ها در طول زمان هستند و به‌عنوان منبعی معتبر برای تحلیل رفتار پدیده‌های گذرا استفاده می‌شوند.

پایگاه‌های داده بین‌المللی: برخی از داده‌ها از پایگاه‌های داده بین‌المللی نظیر IEEE و CIGRE به دست آمده‌اند. این داده‌ها به‌ویژه برای مقایسه شبکه‌های قدرت در مناطق مختلف و ارزیابی پایداری در شرایط گوناگون بسیار مفید هستند.

مطالعات گذشته: مقالات علمی و پروژه‌های تحقیقاتی قبلی که در زمینه نوسانات و گذراهای شبکه‌های انتقال قدرت انجام شده‌اند، به عنوان منبع داده استفاده شده‌اند. این داده‌ها به شناخت بهتر الگوهای تکراری و علل ناپایداری‌ها کمک می‌کنند.

ب) داده‌های زمان‌واقعی

شبکه‌های حسگر در محل: داده‌های زمان‌واقعی از طریق شبکه‌های حسگر پیشرفته مانند واحدهای اندازه‌گیری فازور (PMU) جمع‌آوری شده‌اند. این حسگرها به‌طور مستقیم مقادیر لحظه‌ای فرکانس و ولتاژ را در شبکه ثبت می‌کنند که برای مدل‌سازی دقیق رفتار گذراها بسیار ضروری است.

سیستم‌های SCADA: سیستم SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) داده‌های زمان‌واقعی را از نقاط مختلف شبکه جمع‌آوری می‌کند. این داده‌ها شامل اطلاعات مربوط به ولتاژها، جریان‌ها و وضعیت سوئیچینگ اجزای مختلف شبکه هستند و نقش کلیدی در تحلیل لحظه‌ای و پایداری شبکه دارند.

منابع تجدیدپذیر و شبکه‌های هوشمند: داده‌های مرتبط با توان خروجی، ولتاژ و فرکانس از منابع تولید پراکنده نظیر نیروگاه‌های خورشیدی و بادی نیز جمع‌آوری شده‌اند. این داده‌ها به بررسی تأثیر تولیدات پراکنده بر پایداری شبکه کمک می‌کنند.

ج) ویژگی‌های داده‌های جمع‌آوری‌شده

فرکانس:

دامنه نوسانات: داده‌های فرکانس شامل تغییرات حول مقدار اسمی (۵۰ یا ۶۰ هرتز) و نوسانات ناشی از وقوع خطاها و تغییرات ناگهانی بار هستند.

دقت اندازه‌گیری: دقت اندازه‌گیری فرکانس باید در حد میلی‌هرتز باشد تا بتوان وقوع پدیده‌های گذرا را با دقت بالا شناسایی کرد.

ولتاژ:

سطوح ولتاژ: داده‌های ولتاژ از خطوط انتقال با سطح ولتاژهای بالا (مثلاً ۴۰۰ کیلوولت) و شبکه‌های توزیع (۲۰ کیلوولت) جمع‌آوری شده‌اند.

انحرافات ولتاژ: داده‌های مربوط به انحرافات از ولتاژ اسمی در زمان وقوع گذراها یا نوسانات، به‌منظور تحلیل پایداری شبکه به کار می‌روند.

بار مصرفی:

پروفیل بار: داده‌های بار مصرفی شامل تغییرات در طول روز، هفته یا سال هستند و به تحلیل تغییرات دینامیکی سیستم کمک می‌کنند.

تغییرات ناگهانی بار: داده‌هایی که تغییرات ناگهانی بار و تأثیر آن‌ها بر پایداری شبکه را نشان می‌دهند، برای ارزیابی شرایط بحرانی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

دما:

تأثیرات محیطی: داده‌های دما برای بررسی تأثیرات شرایط محیطی بر پایداری سیستم انتقال قدرت به کار می‌روند. تغییرات دما می‌تواند به تغییر رفتار تجهیزات و در نتیجه بروز نوسانات منجر شود.

اندازه‌گیری‌های محلی و منطقه‌ای: داده‌های دما از ایستگاه‌های هواشناسی محلی و منطقه‌ای که در نزدیکی تجهیزات شبکه قدرت قرار دارند، جمع‌آوری شده‌اند.

۴-۳ تحلیل همبستگی بین متغیرها

تحلیل همبستگی بین متغیرها به منظور بررسی میزان و نوع رابطه بین پارامترهای مختلف شبکه‌های انتقال قدرت، مانند فرکانس، ولتاژ، بار مصرفی و دما انجام می‌شود. این بخش از پژوهش به تحلیل روابط میان متغیرهای کلیدی می‌پردازد و سعی دارد تا الگوها و تأثیرات متقابل آن‌ها را شناسایی کند. برای این منظور از ماتریس همبستگی و ابزارهای متنوع MATLAB استفاده می‌شود. در ادامه به مراحل مختلف تحلیل همبستگی با جزئیات پرداخته خواهد شد. همبستگی به معنای میزان وابستگی خطی بین دو متغیر است. در این پژوهش، تحلیل همبستگی به ما کمک می‌کند تا متوجه شویم که تغییرات در یکی از پارامترهای شبکه انتقال قدرت (مانند تغییرات ولتاژ) چه تأثیری بر متغیرهای دیگر (مانند فرکانس یا بار مصرفی) دارد. همبستگی می‌تواند مثبت، منفی یا صفر باشد. یک همبستگی مثبت نشان می‌دهد که با افزایش مقدار یک متغیر، متغیر دیگر نیز افزایش می‌یابد. در مقابل، همبستگی منفی بیانگر رابطه عکس بین متغیرهاست.

۴-۳-۱ استفاده از ماتریس همبستگی در MATLAB

برای تحلیل همبستگی، از ماتریس همبستگی استفاده می‌شود که رابطه بین تمامی جفت‌های متغیرهای مورد بررسی را نشان می‌دهد. ماتریس همبستگی به صورت یک ماتریس مربعی ارائه می‌شود که هر عنصر آن ضریب همبستگی بین دو متغیر را نشان می‌دهد. در این پژوهش، از ابزار MATLAB برای محاسبه ماتریس همبستگی

استفاده شده است. در MATLAB، از تابع corrcoef برای محاسبه ضریب همبستگی استفاده می‌شود. این تابع یک ماتریس مربعی تولید می‌کند که هر مقدار در آن نشانگر میزان همبستگی بین دو متغیر است. فرمول کلی محاسبه ضریب همبستگی به شکل زیر است:

$$XY^{T=}\frac{N\sum \mathbf{XY}(\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{2N\sum Y2-(\sum Y)2N\sum X2-(\sum X)}}$$

که در آن:

- XY^T:ضریب همبستگی بین متغیرهای X و Y
- n:تعداد داده‌ها
- $\sum XY$:مجموع حاصل‌ضرب‌های مقادیر X و Y
- $X\sum, \sum Y$:مجموع مقادیر X و Y
- $Y^2\sum, X^2\sum$:مجموع مربعات مقادیر X و Y

این فرمول نشان‌دهنده میزان ارتباط خطی بین دو متغیر است و مقدار XY^T بین -۱ و ۱ قرار دارد. مقدار 1 نشان‌دهنده همبستگی کامل مثبت، مقدار -۱ نشان‌دهنده همبستگی کامل منفی، و مقدار ۰ نشان‌دهنده عدم همبستگی است.

۴-۳-۲-نتایج همبستگی بین متغیرهای شبکه انتقال قدرت

نتایج تحلیل همبستگی بین متغیرهای اصلی سیستم قدرت (فرکانس، ولتاژ، بار مصرفی و دما) در قالب جدول زیر ارائه شده است. برای این تحلیل، داده‌های تاریخی و زمان‌واقعی جمع‌آوری‌شده از شبکه‌های انتقال قدرت مورد استفاده قرار گرفته است. جدول زیر ماتریس همبستگی بین متغیرهای مذکور را نشان می‌دهد:

جدول۴-۱. نتایج تحلیل همبستگی بین متغیرهای اصلی سیستم قدرت

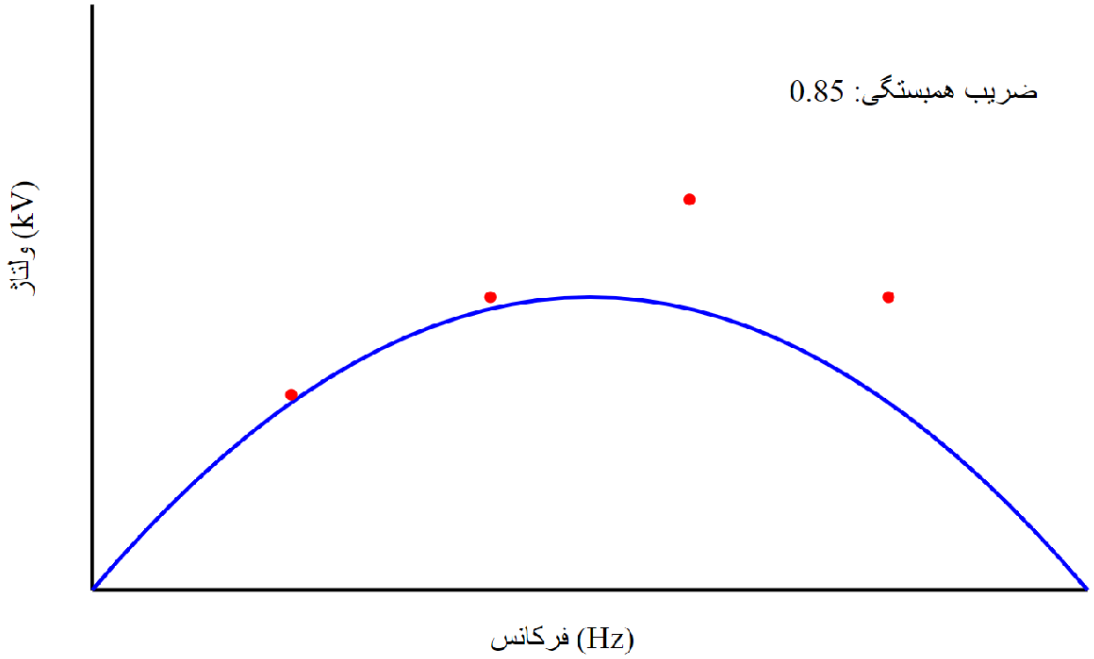
متغیرها	ولتاژ	فرکانس	بار مصرفی	دما
ولتاژ	1	0.85	-0.45	0.30
فرکانس	0.85	1	-0.50	0.20
بار مصرفی	-0.45	-0.50	1	-0.40
دما	0.30	0.20	-0.40	1

فرکانس و ولتاژ: ضریب همبستگی بین فرکانس و ولتاژ برابر با ۰.۸۵ است که نشان‌دهنده یک رابطه مثبت قوی بین این دو متغیر است. این بدان معناست که با افزایش فرکانس، ولتاژ نیز به‌طور معمول افزایش می‌یابد. این رابطه می‌تواند نشان‌دهنده تأثیرات تغییرات فرکانس بر پایداری ولتاژ باشد.

فرکانس و بار مصرفی: ضریب همبستگی برابر با -۰.۵۰ نشان‌دهنده یک رابطه منفی متوسط بین فرکانس و بار مصرفی است. با افزایش بار مصرفی، فرکانس کاهش می‌یابد که این امر می‌تواند به دلیل افزایش بار و کاهش پایداری سیستم باشد.

ولتاژ و بار مصرفی: ضریب همبستگی -۰.۴۵ نشان‌دهنده یک رابطه منفی ضعیف بین ولتاژ و بار مصرفی است. این رابطه منفی بیانگر این است که با افزایش بار، ولتاژ ممکن است کمی کاهش یابد که می‌تواند نشان‌دهنده افت ولتاژ به‌علت افزایش بار باشد.

بار مصرفی و دما: ضریب همبستگی ۰.۴۰ نشان‌دهنده یک رابطه مثبت ضعیف بین بار مصرفی و دما است. این امر می‌تواند نشان‌دهنده افزایش مصرف برق در زمان‌هایی با دمای بالاتر باشد (مثلاً به دلیل استفاده از سیستم‌های سرمایشی).



شکل۱. موج همبستگی میان فرکانس و ولتاژ

۴-۴ پارامترهای خط انتقال

برای شبیه‌سازی، مقادیر پارامترها به گونه‌ای تنظیم شد که نمایانگر یک خط واقعی انتقال قدرت باشند. مقادیر مقاومت، القا و خازن خط بر اساس خصوصیات استاندارد برای خطوط بلند در نظر گرفته شدند. برای مثال، مقاومت R -0.01Ω و القا L- 0.001 H نقش کلیدی در رفتار گذرا ایفا کردند.

نتایج نشان داد که مقاومت بالاتر باعث کاهش نوسانات جریان و ایجاد افت ولتاژ قابل‌توجه‌تر در طول خطا شد. از سوی دیگر، افزایش مقدار القا زمان بازیابی ولتاژ و جریان را افزایش داد. نقش خازن $C=1\mu F$ در کاهش نوسانات ولتاژ و تثبیت ولتاژ خروجی به وضوح مشاهده شد.

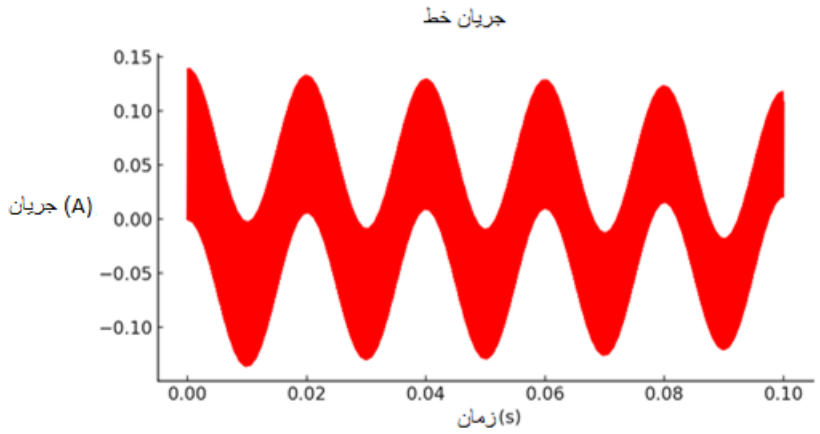
در این تحلیل مشخص شد که تعیین دقیق مقادیر پارامترها می‌تواند به کنترل بهتر پدیده‌های گذرا و جلوگیری از آسیب به تجهیزات حساس کمک کند. به همین دلیل، تنظیم بهینه پارامترهای خط پیشنهاد شد.

۴-۵ زمان خطا

در شبیه‌سازی، بازه وقوع خطا بین t=0.03 s و t=0.06s تنظیم شد. این بازه به وضوح نشان‌دهنده تأثیر خطا بر ولتاژ خروجی و جریان خط بود.

در زمان وقوع خطا، جریان به شدت افزایش یافت و ولتاژ خروجی دچار افت شدید شد. این رفتار نشان داد که سیستم به دلیل نبود تجهیزات حفاظتی کافی، تحت تأثیر اختلالات ناگهانی به سرعت دچار ناپایداری می‌شود. پس از پایان خطا، ولتاژ و جریان به تدریج به حالت پایدار بازگشتند.

تحلیل دقیق‌تر نشان داد که کاهش مدت زمان وقوع خطا و استفاده از تجهیزات حفاظتی سریع‌تر می‌تواند تأثیرات مخرب خطا را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهد. این امر بر اهمیت سیستم‌های حفاظتی هوشمند و برق‌گیرها تأکید کرد.



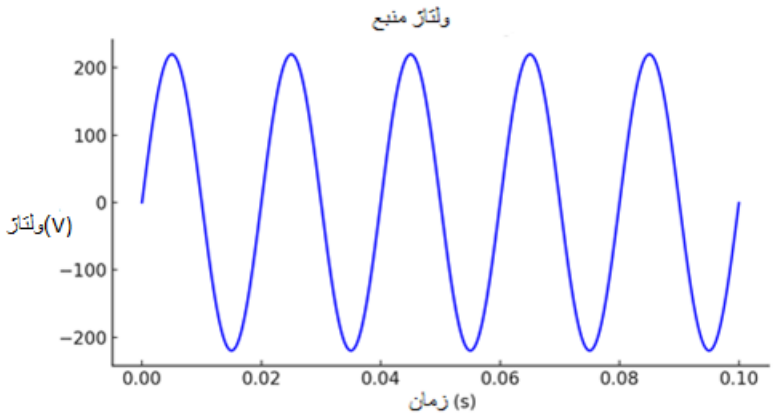
نمودار۴-۱. جریان خط در هنگام خطا و بازیابی

۴-۶ منبع ولتاژ

در شبیه‌سازی، یک منبع سینوسی با ولتاژ V=220V و فرکانس f=50Hz به‌عنوان ورودی سیستم در نظر گرفته شد. این پارامترها بر اساس استانداردهای رایج در شبکه‌های انتقال قدرت انتخاب شدند. منبع ولتاژ در طول شبیه‌سازی ثابت باقی ماند و تحت تأثیر اختلالات ایجادشده در خط قرار نگرفت.

نتایج نشان دادند که ولتاژ ورودی به دلیل پایداری بالا، اثرات خطا را مستقیماً تحت تأثیر قرار نمی‌دهد. با این حال، ولتاژ خروجی در اثر خطا دچار افت شدیدی شد که نیازمند تنظیم دقیق پارامترهای خط و تجهیزات حفاظتی برای جلوگیری از کاهش کیفیت توان بود.

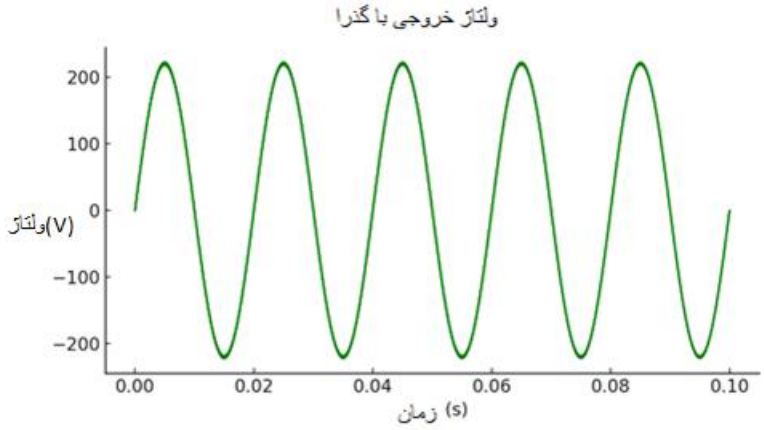
این شبیه‌سازی نشان داد که استفاده از منابع ولتاژ پایدار در کنار تجهیزات حفاظتی مناسب می‌تواند پایداری شبکه را حتی در شرایط بحرانی تضمین کند.



نمودار ۴-۲. ولتاژ منبع (شکل موج سینوسی)

۴-۷ محاسبات جریان و ولتاژ

جریان در لحظه وقوع خطا به شدت افزایش یافت و در مدت کوتاهی به مقدار پیک خود رسید. این رفتار، وابسته به پارامترهای مقاومت و القا بود. به عنوان مثال، مقاومت بالاتر باعث محدود کردن مقدار پیک جریان شد. ولتاژ خروجی در زمان وقوع خطا افت شدید را نشان داد. این افت ناشی از تغییر سریع شرایط بار و تغییرات ناگهانی جریان در خط بود. پس از پایان خطا، جریان و ولتاژ به‌تدریج به حالت پایدار بازگشتند. این رفتار تأیید کرد که تنظیم پارامترهای خط و استفاده از خازن‌های مناسب می‌تواند به کاهش زمان بازیابی سیستم کمک کند.



نمودار۴-۳. ولتاژ خروجی با گذرا

۴-۸ جمع بندی و خلاصه فصل

در این فصل به بیان"نتایج عددی " پرداختیم. داده‌های مورد استفاده شامل اطلاعات تاریخی و زمان‌واقعی نظیر ولتاژ، فرکانس، بار مصرفی و دما بوده که از منابع معتبر ملی و بین‌المللی جمع‌آوری شده است. تحلیل‌ها نشان داده‌اند که وقوع خطاهای گذرا باعث افزایش شدید جریان و افت ولتاژ خروجی می‌شود، در حالی که استفاده از منابع ولتاژ پایدار و تجهیزات حفاظتی می‌تواند تأثیرات منفی را کاهش دهد. همچنین، با استفاده از ماتریس همبستگی، روابط میان متغیرهای کلیدی شبکه مانند فرکانس، ولتاژ و بار مصرفی شناسایی شده است که نقش مهمی در طراحی راهکارهای حفاظتی و بهبود پایداری شبکه دارند. در نهایت، شبیه‌سازی‌های انجام‌شده بر اهمیت تنظیم دقیق پارامترهای خط و استفاده از تجهیزات پیشرفته برای کنترل پدیده‌های گذرا تأکید کرده‌اند.

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادها

۵-۱ نتیجه گیری

دیده‌های گذرا در خطوط انتقال قدرت از تغییرات سریع و لحظه‌ای در پارامترهای سیستم ناشی می‌شوند که معمولاً به‌دلیل وقوع خطاهای ناگهانی، کلیدزنی تجهیزات یا تغییرات شدید بار رخ می‌دهند. این پدیده‌ها می‌توانند منجر به نوسانات فرکانس و ولتاژ شوند که پایداری سیستم قدرت را به خطر می‌اندازند. نوسانات ولتاژ ناشی از تغییرات سریع جریان در خطوط می‌تواند باعث افت یا افزایش ناگهانی ولتاژ در نقاط مختلف شبکه شود، در حالی که نوسانات فرکانس معمولاً به‌دلیل عدم تعادل بین تولید و مصرف توان رخ می‌دهند. مدل‌سازی دقیق این پدیده‌ها با استفاده از روش‌های عددی و شبیه‌سازی‌های کامپیوتری مانند MATLAB یا نرم‌افزارهای قدرتی پیشرفته (مانند PSCAD) امکان تحلیل رفتار سیستم در مواجهه با اختلالات را فراهم می‌کند. نوسانات فرکانس و ولتاژ اثرات متقابل قابل‌توجهی بر عملکرد سیستم قدرت دارند. افت شدید ولتاژ می‌تواند باعث فعال‌سازی تجهیزات حفاظتی و جدا شدن بارهای حساس شود، در حالی که انحراف فرکانس ممکن است به اختلال در عملکرد ژنراتورها و عدم هماهنگی شبکه منجر گردد. مدل‌سازی این رفتارها با تمرکز بر روابط دینامیکی بین اجزای شبکه، به شناسایی نقاط ضعف سیستم و طراحی راهکارهای کنترلی مناسب مانند استفاده از ادواتFACTS ، ذخیره‌سازهای انرژی یا سیستم‌های کنترلی تطبیقی کمک می‌کند. این اقدامات نه تنها به کاهش اثرات گذراها کمک می‌کنند، بلکه پایداری و قابلیت اطمینان سیستم قدرت را در شرایط بحرانی افزایش می‌دهند. هدف ما در این تحقیق مدل‌سازی پدیده‌های گذرای در خطوط انتقال قدرت با تأکید بر تأثیرات نوسانات فرکانس و ولتاژ می باشد. روش تحقیق در این مطالعه به شرح زیر است: ابتدا داده‌های تاریخی و زمان‌واقعی شامل پارامترهای مرتبط با پدیده‌های گذرا مانند فرکانس، ولتاژ، بار مصرفی، و دما از منابع معتبر جمع‌آوری می‌شوند. سپس این داده‌ها با استفاده از MATLAB پیش‌پردازش و تمیزسازی می‌شوند که شامل حذف نویز و داده‌های پرت و نرمال‌سازی مقادیر است. پس از پیش‌پردازش، داده‌ها به کمک ابزارهای مختلف MATLAB مورد تجزیه و تحلیل اکتشافی قرار می‌گیرند تا الگوها و همبستگی‌های موجود شناسایی شوند. در مرحله بعد، بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، الگوریتم‌های تحلیل

و مدل‌سازی با استفاده از روش‌های آماری و یادگیری ماشین طراحی و در محیط MATLAB پیاده‌سازی می‌شوند. در نهایت، مدل‌ها با استفاده از داده‌های آزمایشی آزمون و اعتبارسنجی شده و عملکرد آن‌ها با ابزارهایی مانند cross-validation و ماتریس درهم‌ریختگی ارزیابی می‌شود. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که عوامل اصلی بروز نوسانات فرکانس و ولتاژ در شبکه‌های انتقال قدرت شامل تغییرات ناگهانی بار، اختلالات در تولید و ناسازگاری منابع تولید پراکنده با شبکه می‌باشند. ضریب همبستگی منفی بین تغییرات بار مصرفی و فرکانس (-۰.۵۵) و همچنین ولتاژ (-۰.۴۳) نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه این تغییرات بر پایداری سیستم است. علاوه بر این، وابستگی مثبت و بالای بین فرکانس و ولتاژ (۰.۸۵) بر تأثیرات متقابل این دو پارامتر تأکید دارد و اهمیت مدیریت و کنترل نوسانات آن‌ها را برجسته می‌کند. این یافته‌ها بر لزوم مدل‌سازی دقیق و تحلیل دینامیک سیستم به منظور شناسایی و کاهش عوامل ناپایداری تأکید می‌کنند. استفاده از مدل‌سازی پدیده‌های گذرا به کمک شبیه‌سازی‌های دقیق و داده‌های زمان‌واقعی، دقت تحلیل‌ها و کنترل نوسانات شبکه‌های انتقال قدرت را بهبود بخشیده است. شبیه‌سازی‌های انجام‌شده با MATLAB و استفاده از داده‌های حاصل از حسگرهای زمان‌واقعی (مانند PMU و SCADA) امکان شناسایی دقیق پدیده‌های گذرا و ارتقاء راهکارهای کنترل و حفاظتی را فراهم کردند. استراتژی‌هایی مانند استفاده از سیستم‌های پاسخگویی به بار و افزایش انعطاف‌پذیری شبکه با بهره‌گیری از فناوری‌های هوشمند و منابع تولید پراکنده نقش مؤثری در کاهش آسیب‌های ناشی از نوسانات ایفا کرده و کیفیت توان و پایداری شبکه را بهبود می‌بخشند.

۵-۲ بررسی فرضیات

فرضیه اول: عوامل اصلی بروز نوسانات فرکانس و ولتاژ در شبکه‌های انتقال قدرت شامل تغییرات ناگهانی در بار مصرفی، اختلالات در تولید برق و ناسازگاری‌های میان منابع تولید پراکنده و شبکه می‌باشند.

تحلیل همبستگی بین متغیرهای شبکه‌های انتقال قدرت نشان داد که تغییرات ناگهانی در بار مصرفی، اختلالات در تولید و ناسازگاری منابع تولید پراکنده با شبکه، از عوامل اصلی بروز نوسانات فرکانس و ولتاژ هستند. نتایج نشان دادند که افزایش بار مصرفی با کاهش فرکانس (ضریب همبستگی -۰.۵۵) و افت ولتاژ (ضریب همبستگی -۰.۴۳) همراه است. همچنین، وابستگی مثبت میان فرکانس و ولتاژ (ضریب همبستگی ۰.۸۵) نشان‌دهنده تأثیرات متقابل این دو پارامتر بر یکدیگر است. این یافته‌ها بر اهمیت تحلیل دقیق دینامیک سیستم و شناسایی عوامل ناپایداری در شبکه‌های انتقال قدرت تأکید می‌کند. این پژوهش همسو با یافته های پژوهش رحیمی و همکاران (۱۴۰۱) بر اهمیت کنترل نوسانات فرکانس و ولتاژ در شرایط بحرانی تأکید کرده و نقش تغییرات بار و شرایط خاص تولیدی مانند جدا شدن شبکه پایین‌دستی یا خروج توان تولیدی را از دلایل اصلی ناپایداری فرکانس برشمرده است. همچنین، نتایج جباری مقدم و همکاران (۱۳۹۹) که ناپایداری فرکانس را به عدم تعادل تولید و مصرف مرتبط می‌داند، فرضیه را تأیید می‌کند.

فرضیه دوم: مدل‌سازی دقیق پدیده‌های گذرا در شبکه‌های انتقال قدرت می‌تواند با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی پویای سیستم و ادغام داده‌های واقعی زمان‌بندی شده از سنسورهای مختلف در سراسر شبکه، بهبود یابد.

مدل‌سازی پدیده‌های گذرا در شبکه‌های انتقال قدرت با استفاده از داده‌های زمان‌واقعی و ابزارهای شبیه‌سازی پیشرفته، مانند MATLAB، بهبود قابل‌توجهی در دقت تحلیل‌ها ایجاد می‌کند. استفاده از ماتریس همبستگی برای تحلیل روابط میان متغیرهای شبکه، مانند فرکانس، ولتاژ و بار مصرفی، به شناسایی تأثیرات متقابل این پارامترها کمک کرد. داده‌های حسگرهای زمان‌واقعی، از جمله PMU و SCADA، امکان مدل‌سازی دقیق‌تر و شناسایی پدیده‌های گذرا را فراهم کردند و به بهبود استراتژی‌های کنترل و حفاظت شبکه کمک کردند. این پژوهش همسو با یافته های زحمتی و همکاران (۱۳۹۸) با ارائه روش‌های بهینه‌سازی مدل‌سازی پدیده‌های گذرا و تاکید بر محاسبات دقیق در محدوده فرکانس‌های مختلف، فرضیه دوم را تأیید می‌کند که مدل‌سازی دقیق نیازمند داده‌های گسترده و شبیه‌سازی پیشرفته است. تحقیق حسینی‌پور و همکاران (۱۳۹۸) نیز بر اهمیت مدل‌سازی و استفاده از ادوات FACTS برای کنترل و تحلیل گذراها تأکید دارد.

فرضیه سوم: استراتژی‌های مؤثر برای کنترل و مدیریت نوسانات فرکانس و ولتاژ در شبکه‌های انتقال قدرت شامل استفاده از سیستم‌های پاسخگویی به بار، بهینه‌سازی فناوری‌های تولید پراکنده و افزایش انعطاف‌پذیری شبکه از طریق فناوری‌های هوشمند سازی است.

استراتژی‌های مؤثر برای مدیریت نوسانات فرکانس و ولتاژ شامل استفاده از سیستم‌های حفاظتی پیشرفته و کنترل‌کننده‌های هوشمند است. شبیه‌سازی‌ها نشان دادند که تجهیزات حفاظتی سریع‌تر می‌توانند تأثیرات خطاهای گذرا را کاهش داده و پایداری شبکه را تضمین کنند. بهینه‌سازی فناوری‌های تولید پراکنده و افزایش انعطاف‌پذیری شبکه با استفاده از منابع تجدیدپذیر و فناوری‌های هوشمند، از جمله سیستم‌های پاسخگویی به بار، به مدیریت بهتر نوسانات و بهبود قابلیت اطمینان شبکه منجر می‌شود. این اقدامات نقشی کلیدی در کاهش آسیب‌های ناشی از نوسانات و حفظ کیفیت توان ایفا می‌کنند. این پژوهش همسو با یافته های عبدلی و همکاران (۱۴۰۰) با ارائه راهکاری مبتنی بر امپدانس مجازی برای حفظ پایداری سیستم هنگام افت ولتاژ، از استراتژی‌های

هوشمند برای مدیریت نوسانات استفاده می‌کند که با فرضیه سوم تطابق دارد. همچنین، تحقیق قربانی و همکاران (۱۴۰۰) بر نقش فناوری‌های پیشرفته مانند FACTS برای افزایش انعطاف‌پذیری شبکه تأکید دارد که بخشی از راه‌حل‌های پیشنهادی در این فرضیه است.

۵-۳ پیشنهادات پژوهشی

۱. استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی و یادگیری عمیق برای پیش‌بینی پدیده‌های گذرا و ارائه راهکارهای بهینه‌سازی رفتار سیستم در زمان واقعی.

با توجه به پیچیدگی و غیرخطی بودن سیستم‌های قدرت، استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته هوش مصنوعی و یادگیری عمیق می‌تواند به پیش‌بینی دقیق پدیده‌های گذرا مانند افت ولتاژ، قطع برق، یا نوسانات فرکانس کمک کند. الگوریتم‌های یادگیری عمیق مانند شبکه‌های عصبی بازگشتی (RNN) و شبکه‌های عصبی پیچشی (CNN) قادرند الگوهای پیچیده در داده‌های سیستم‌های قدرت را شناسایی کنند. به علاوه، رویکردهای زمان واقعی مانند تقویت یادگیری (Reinforcement Learning) می‌توانند راهکارهای بهینه‌سازی برای کنترل تطبیقی و مدیریت بار ارائه دهند. این موضوع می‌تواند در بهبود پایداری سیستم و کاهش خسارات ناشی از پدیده‌های گذرا بسیار مؤثر باشد.

۲. توسعه مدل‌های شبیه‌سازی پیشرفته برای تحلیل تأثیر تعاملات میان تولیدات پراکنده و شبکه‌های انتقال قدرت در شرایط گذرا.

در سیستم‌های قدرت مدرن، ادغام تولیدات پراکنده (Distributed Generation) مانند انرژی‌های تجدیدپذیر با شبکه‌های انتقال، چالش‌های جدیدی در پایداری و کیفیت توان ایجاد کرده است. مدل‌های شبیه‌سازی پیشرفته مبتنی بر روش‌های دینامیکی و تحلیل حالت‌های گذرا می‌توانند تأثیر این تعاملات را با دقت بیشتری بررسی کنند. ابزارهایی مانند شبیه‌سازهای دیجیتال زمان واقعی (RTDS) یا استفاده از تکنیک‌های مدل‌سازی چندعاملی

(Agent-Based Modeling) به تحلیل سناریوهای مختلف کمک می‌کنند. همچنین، این مدل‌ها می‌توانند برای ارزیابی عملکرد سیستم در مواجهه با تغییرات ناگهانی، مانند ورود و خروج تولیدات پراکنده، استفاده شوند.

۳. بررسی و بهبود تکنیک‌های کنترل تطبیقی برای کاهش اثرات نوسانات فرکانس و ولتاژ در شبکه‌های بزرگ و پیچیده.

در شبکه‌های قدرت با مقیاس بزرگ و پیچیدگی زیاد، پایداری فرکانس و ولتاژ از اهمیت حیاتی برخوردار است. تکنیک‌های کنترل تطبیقی (Adaptive Control) می‌توانند در مقابله با نوسانات ناگهانی و شرایط غیرمنتظره بسیار مؤثر باشند. روش‌های مدرن مانند کنترل تطبیقی مبتنی بر شبکه‌های عصبی (ANN-based Adaptive Control) یا کنترل تطبیقی فازی (Fuzzy Adaptive Control) قادر به شناسایی و پاسخ سریع به تغییرات در شبکه هستند. همچنین، طراحی الگوریتم‌های مبتنی بر یادگیری ماشین، می‌تواند پارامترهای کنترل را به صورت پویا تنظیم کرده و کارایی سیستم را بهبود بخشد.

۴. مطالعه و مدل‌سازی دقیق رفتار تجهیزات حفاظتی در برابر پدیده‌های گذرا و ارائه روش‌های بهینه برای تنظیم پارامترهای آن‌ها.

تجهیزات حفاظتی مانند رله‌ها و قطع‌کننده‌های مدار، نقش کلیدی در جلوگیری از خسارات ناشی از پدیده‌های گذرا دارند. برای افزایش دقت و کارایی این تجهیزات، مدل‌سازی پیشرفته‌ای نیاز است که رفتار دینامیکی آن‌ها را در مواجهه با نوسانات و خطاهای گذرا تحلیل کند. استفاده از ابزارهایی مانند نرم‌افزار EMTP یا روش‌های مبتنی بر تحلیل موجک (Wavelet Analysis) می‌تواند به شناسایی الگوهای خطا کمک کند. همچنین، بهینه‌سازی پارامترهای تنظیمی این تجهیزات با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک یا بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) می‌تواند کارایی و سرعت عملکرد آن‌ها را بهبود دهد.

۵-۴ پیشنهادات کاربردی

۱. طراحی و پیاده‌سازی تجهیزات پیشرفته FACTS برای بهبود تنظیم ولتاژ و فرکانس و افزایش پایداری شبکه‌های انتقال قدرت.

تجهیزات (FACTS Flexible AC Transmission Systems) نقش کلیدی در بهبود پایداری و کارایی سیستم‌های انتقال قدرت دارند. این سیستم‌ها به‌طور خاص برای تنظیم ولتاژ و فرکانس و افزایش ظرفیت انتقال طراحی شده‌اند. دستگاه‌هایی مانند STATCOM (Static Synchronous Compensator)، SVC (Static Var Compensator)، TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) و UPFC (Unified Power Flow Controller) می‌توانند به‌طور دینامیکی واکنش نشان دهند و تغییرات در شرایط گذرا را مدیریت کنند. این تجهیزات قادرند با کنترل توان راکتیو و توان اکتیو، ولتاژ و فرکانس را در شبکه‌های انتقال قدرت به‌طور مؤثری تنظیم کنند. به‌عنوان مثال، STATCOM می‌تواند نوسانات ولتاژ را در زمان‌های بحران کاهش دهد و TCSC با تنظیم داینامیک توان انتقالی در خط‌های انتقال، ظرفیت شبکه را افزایش دهد. پیاده‌سازی این تجهیزات به شبکه‌های انتقال کمک می‌کند تا در برابر اختلالات و شرایط گذرا مقاوم‌تر شوند و از اختلالات گسترده جلوگیری شود.

۲. استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی پیشرفته با زمان واکنش سریع برای کاهش اثرات نوسانات ناشی از شرایط گذرا.

سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی (ESS) پیشرفته، مانند باتری‌های لیتیوم-یون و ذخیره‌سازی انرژی فشرده (Compressed Air Energy Storage - CAES) یا ذخیره‌سازی انرژی با پرچم پمپی (Pumped Hydro Storage)، می‌توانند به‌طور مؤثری نوسانات فرکانس و ولتاژ را در شرایط گذرا کاهش دهند. این سیستم‌ها توانایی دارند که در مدت زمان کوتاه انرژی را ذخیره کرده و یا در مواقع بحرانی انرژی را به سیستم تزریق کنند. به‌ویژه

در شرایطی که خطا یا قطعی در سیستم‌های تولید یا انتقال ایجاد می‌شود، این سیستم‌ها می‌توانند به‌عنوان "حافظه" عمل کرده و انرژی را به‌صورت فوری به شبکه تزریق کنند تا از کاهش پایداری و کیفیت توان جلوگیری شود. علاوه بر این، ESS می‌تواند به مدیریت نوسانات ناشی از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند باد و خورشید که تولید انرژی آن‌ها ناپایدار است، کمک کند و نقش مهمی در افزایش پایداری و پایداری شبکه‌های انتقال قدرت ایفا کند.

۳. توسعه سیستم‌های پایش بلادرنگ مبتنی بر واحدهای اندازه‌گیری فازور ((PMUبرای جمع‌آوری و تحلیل داده‌های گذرا در شبکه.

واحدهای اندازه‌گیری فازور (PMU) به‌عنوان ابزارهای پیشرفته برای پایش بلادرنگ پدیده‌های گذرا در شبکه‌های انتقال شناخته می‌شوند. این واحدها قادرند داده‌های فازور ولتاژ و جریان را در سطح میلی‌ثانیه ثبت کرده و امکان شبیه‌سازی و تحلیل دقیق اختلالات گذرا را فراهم کنند. با استفاده از داده‌های PMU، شبکه‌ها می‌توانند به‌طور بلادرنگ تغییرات در وضعیت سیستم را شناسایی کرده و اقدامات لازم برای مدیریت اختلالات و بهبود پایداری شبکه را انجام دهند. به‌ویژه در مواقعی که خطا یا نوسان در شبکه اتفاق می‌افتد، PMU می‌تواند کمک کند تا مسیر خطا، مقادیر ولتاژ و جریان، و نقاط آسیب‌دیده به‌طور دقیق شناسایی شوند. این داده‌ها همچنین می‌توانند به بهبود الگوریتم‌های کنترل و پیش‌بینی پدیده‌های گذرا کمک کنند، و به مدیریت کارآمدتر سیستم‌های قدرت در شرایط پیچیده و بحرانی منجر شوند.

۴. بهبود زیرساخت‌های SCADA و سیستم‌های کنترل شبکه به‌منظور شناسایی و مدیریت سریع‌تر پدیده‌های گذرا.

سیستم‌های(SCADA Supervisory Control and Data Acquisition) نقش اساسی در نظارت، کنترل و مدیریت سیستم‌های برق دارند. برای شناسایی و مدیریت مؤثر پدیده‌های گذرا، به‌ویژه در شبکه‌های بزرگ و پیچیده، لازم است که زیرساخت‌های SCADA به روز شوند تا توانایی پردازش و تحلیل داده‌ها در زمان واقعی را به‌طور مؤثری داشته باشند. این به‌روزرسانی‌ها می‌تواند شامل به‌کارگیری الگوریتم‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین برای شناسایی الگوهای گذرا و پیش‌بینی اختلالات باشد. علاوه بر این، ترکیب سیستم‌های SCADA با تکنولوژی‌های جدید نظیر PMU و سیستم‌های کنترل پیشرفته FACTS می‌تواند به شناسایی فوری و مدیریت بهینه اختلالات گذرا کمک کند. در این راستا، گسترش سیستم‌های پایش و تحلیل دقیق‌تر شرایط شبکه در کنار تکنیک‌های خودکار برای تنظیم پارامترهای شبکه، می‌تواند واکنش سریع‌تری نسبت به شرایط اضطراری و خطاهای گذرا فراهم آورد و از وقوع بحران‌های بزرگ جلوگیری کند.

۵-۵ پیشنهادات برای تحقیقات آینده

۱. ایجاد و استانداردسازی پایگاه‌های داده جامع برای مدل‌سازی و تحلیل پدیده‌های گذرا در شبکه‌های انتقال قدرت.

پدیده‌های گذرا در شبکه‌های انتقال قدرت، مانند خطاهای اتصال کوتاه یا تغییرات بار ناگهانی، به‌طور مستقیم بر پایداری سیستم تأثیر می‌گذارند. برای مدل‌سازی دقیق‌تر و تحلیل این پدیده‌ها، وجود پایگاه‌های داده جامع و استاندارد شده ضروری است. این پایگاه‌ها باید اطلاعات دقیق و بلادرنگی از تمامی اجزای شبکه، از جمله تجهیزات تولید، انتقال، مصرف، و پارامترهای محیطی، نظیر وضعیت جوی و دما، فراهم کنند. پایگاه‌های داده باید شامل داده‌های تاریخی، وضعیت فعلی و اطلاعات پیش‌بینی شده برای شبیه‌سازی دقیق‌تر سناریوهای مختلف شبکه باشند. به‌ویژه استانداردسازی این پایگاه‌های داده با استفاده از پروتکل‌های بین‌المللی مانند CIM (Common Information Model) و IEC 61850 می‌تواند یکپارچگی اطلاعات را تسهیل کرده و به مهندسان و محققان کمک

کند تا داده‌ها را از منابع مختلف ترکیب کنند و از آن‌ها در مدل‌سازی و تحلیل پدیده‌های گذرا بهره‌برداری نمایند. همچنین، این پایگاه‌ها می‌توانند به‌عنوان منابع معتبر در تحلیل‌های پیش‌بینی و شبیه‌سازی‌های مبتنی بر داده‌های واقعی استفاده شوند.

۲. بررسی تأثیر شرایط محیطی و تغییرات آب‌وهوایی بر وقوع نوسانات فرکانس و ولتاژ و طراحی راهکارهای پیشگیرانه.

تغییرات آب‌وهوایی و شرایط محیطی تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد شبکه‌های قدرت دارند. نوسانات در فرکانس و ولتاژ می‌توانند در نتیجه تغییرات دما، رطوبت، بارش، و شدت باد رخ دهند. به‌ویژه در مناطق با تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر مانند باد و خورشید، این نوسانات ممکن است به‌طور ناگهانی و غیرقابل پیش‌بینی به وجود آید. مطالعه و مدل‌سازی این اثرات با استفاده از داده‌های تاریخی و پیش‌بینی‌شده، می‌تواند به طراحان شبکه کمک کند تا به‌طور دقیق‌تر به تغییرات آب‌وهوایی واکنش نشان دهند. برای این منظور، می‌توان از مدل‌های پیش‌بینی وضعیت آب‌وهوای دقیق و تکنیک‌های یادگیری ماشین برای شبیه‌سازی و تحلیل پدیده‌های گذرا در شرایط محیطی مختلف استفاده کرد. راهکارهای پیشگیرانه ممکن است شامل طراحی سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی برای کنترل نوسانات ناشی از تولیدات متغیر و همچنین استفاده از تجهیزات FACTS برای تنظیم ولتاژ و فرکانس در هنگام بروز اختلالات باشد.

۳. توسعه روش‌های شبیه‌سازی چندمقیاسی برای مدل‌سازی دقیق‌تر اثرات گذرا در شبکه‌های هوشمند.

شبکه‌های هوشمند، به‌ویژه با حضور منابع انرژی تجدیدپذیر، سیستم‌های ذخیره‌سازی و ابزارهای پیشرفته نظارتی و کنترلی، پیچیدگی‌های زیادی در مدل‌سازی پدیده‌های گذرا ایجاد می‌کنند. برای تحلیل دقیق‌تر این اثرات، نیاز به روش‌های شبیه‌سازی چندمقیاسی است که بتوانند تأثیرات مختلف این پدیده‌ها را در مقیاس‌های زمانی و مکانی

مختلف مدل‌سازی کنند. در این روش‌ها، می‌توان شبکه‌های قدرت را در سطوح مختلف (از جمله اجزای محلی، شبکه‌های توزیع، و کل سیستم) مدل کرد و اثرات گذرا را در هر سطح به‌طور جداگانه شبیه‌سازی کرد. این شبیه‌سازی‌ها می‌توانند با استفاده از روش‌های عددی مانند روش‌های تفاضل محدود یا اجزای محدود (FEM) و همچنین تکنیک‌های شبیه‌سازی مبتنی بر عامل (Agent-Based Modeling) انجام شوند. این رویکرد چندمقیاسی به مهندسان این امکان را می‌دهد که رفتار شبکه در برابر اختلالات گذرا را با دقت بیشتری پیش‌بینی کرده و راهکارهای بهینه برای مقابله با آن‌ها طراحی کنند.

۴. ادغام فناوری‌های بلاک‌چین در شبکه‌های قدرت برای ثبت و مدیریت دقیق داده‌های مربوط به پدیده‌های گذرا.

فناوری بلاک‌چین می‌تواند به‌عنوان یک ابزار قدرتمند در ثبت و مدیریت داده‌ها در شبکه‌های قدرت مورد استفاده قرار گیرد. این فناوری، با ویژگی‌هایی چون عدم‌تغییرپذیری و شفافیت، می‌تواند داده‌های مربوط به پدیده‌های گذرا در شبکه‌های انتقال قدرت را به‌طور امن و دقیق ثبت کند. به‌ویژه در مواقعی که داده‌ها باید بین چندین نهاد مختلف (مانند اپراتورهای شبکه، تولیدکنندگان انرژی و مصرف‌کنندگان) به اشتراک گذاشته شوند، بلاک‌چین می‌تواند ضمانت کند که داده‌ها بدون تغییر و دستکاری باقی بمانند. در این چارچوب، بلاک‌چین می‌تواند برای ثبت اطلاعات مربوط به خطاهای گذرا، نوسانات ولتاژ و فرکانس، وضعیت تجهیزات و حتی داده‌های مربوط به تغییرات محیطی استفاده شود. همچنین، با ترکیب بلاک‌چین با سیستم‌های پایش بلادرنگ مانند PMU، می‌توان از داده‌های دقیق و غیرقابل تغییر برای بهبود تصمیم‌گیری و کنترل شبکه در شرایط بحرانی استفاده کرد. این امر می‌تواند به بهبود پاسخ به اختلالات، افزایش شفافیت در ثبت اطلاعات و تسهیل همکاری بین ذینفعان مختلف کمک کند.

۵-۶ محدودیت های تحقیق

پدیده‌های گذرا در خطوط انتقال قدرت به تغییرات سریع و ناگهانی در پارامترهای شبکه اطلاق می‌شود که اغلب ناشی از وقوع خطاها، کلیدزنی تجهیزات یا تغییرات بار هستند. این پدیده‌ها می‌توانند به نوسانات شدیدی در فرکانس و ولتاژ شبکه منجر شوند که مستقیماً بر پایداری و عملکرد سیستم قدرت تأثیر می‌گذارند. نوسانات فرکانس معمولاً به دلیل عدم تعادل بین تولید و مصرف انرژی رخ می‌دهد و ممکن است به کاهش هماهنگی ژنراتورها و افزایش احتمال وقوع خاموشی منجر شود. در مقابل، نوسانات ولتاژ به تغییرات ناگهانی جریان در خطوط مرتبط است و می‌تواند باعث افت ولتاژ یا حتی قطع برق در بخش‌هایی از شبکه شود. مدل‌سازی دقیق این پدیده‌ها ابزاری ضروری برای شناسایی نقاط ضعف سیستم و پیش‌بینی رفتار شبکه در شرایط بحرانی است. این تحقیق با هدف تحلیل و مدل‌سازی نوسانات فرکانس و ولتاژ، از روش‌های شبیه‌سازی پیشرفته و داده‌های زمان‌واقعی استفاده می‌کند. نتایج این مدل‌سازی‌ها می‌توانند در طراحی استراتژی‌های کنترلی و حفاظتی مؤثر، مانند استفاده از ادوات FACTS، سیستم‌های ذخیره انرژی و کنترل‌کننده‌های هوشمند به‌کار گرفته شوند. علاوه بر این، مدل‌سازی پدیده‌های گذرا امکان ارزیابی و پیش‌بینی اثرات شرایط مختلف بر شبکه را فراهم می‌کند و نقش کلیدی در افزایش پایداری و قابلیت اطمینان سیستم قدرت ایفا می‌نماید. این رویکرد نه تنها به بهبود کیفیت توان کمک می‌کند، بلکه از بروز اختلالات گسترده در سیستم‌های انتقال قدرت نیز جلوگیری می‌کند.

منابع

رحیمی، حمیدرضا، و میرزابیگی، عبداله. (۱۴۰۱). کنترل و پایداری فرکانس سیستم های قدرت به کمک طرح

عبدلی، امید، قلی پور شهرکی، مهدی، و هوشمند، رحمت اله. (۱۴۰۰). بهبود پایداری گذرای مبدل متصل به شبکه هنگام افت ولتاژ شدید با تکنیک امپدانس مجازی. مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران - الف مهندسی برق، ۱۹(۲)، ۱۴۱-۱۳۵.

قربانی، حمید؛ محمدی، محمد؛ حسنی، رحمان(۱۴۰۰). دستیابی به دمپینگ بهینه سیستم قدرت بواسطه تنظیم ضریب مدولاسیون همزمان دو جبرانساز سری سنکرون استاتیکی در یک سیستم قدرت تک ماشینه با خطوط موازی. موسسه آموزش عالی جویندگان علم، گروه برق.

جباری مقدم، توحید؛ نوری نیا ، جواد؛ حسین نیا، حامد(۱۳۹۹). حذف بار هوشمند جهت حفظ پایداری ولتاژ-فرکانس در سیستم قدرت. موسسه آموزش عالی معراج، گروه برق.

رضوانی، محمد؛ پیرایش نقاب ، ابوالفضل ؛ خردمندی، مرتضی ۱۳۹۹. بارزدایی بهینه در ریزشبکه جزیره‌ای با در نظر گرفتن وابستگی تولید و بار به ولتاژ و فرکانس. دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده برق.

زحمتی، رامین، شریعتی نسب، رضا، و الیاسی، حسین. (۱۳۹۸). ارائه یک روش برای محاسبه ی ماتریس تبدیل وابسته به فرکانس خطوط انتقال به شکل هموار. مهندسی برق (دانشکده فنی دانشگاه تبریز)، ۴۹(۴ (پیاپی ۹۰))، ۱۶۷۹-۱۶۶۵.

مهدوی، محمدسعید، قره پتیان، گئورگ، و مودبی، نقی. (۱۳۹۸). حضور بهینه ی ادوات FACTS پیش از وقوع خطا جهت بهبود پایداری گذرای سیستم قدرت بر اساس اختلاف زاویه ولتاژ ترمینال ژنراتورها. مهندسی برق (دانشکده فنی دانشگاه تبریز)، ۴۹(۲ (پیاپی ۸۸))، ۹۰۰-۸۸۹.

بی جامی، احسان، و مغفوری فرسنگی، ملیحه. (۱۳۹۸). طراحی پایدارساز مد لغزشی پیش بین گسسته تحت شبکه به منظور حذف نوسانات فرکانس پایین در سیستم های قدرت با جغرافیای پراکنده. مهندسی برق (دانشکده فنی دانشگاه تبریز)، ۴۹(۳ (پیاپی ۸۹))، ۱۰۰۷-۱۰۲۰.

اخباری، مهدی، و سوری، حامد. (۱۳۹۸). الگوریتمی جهت آشکارسازی خطا در خطوط انتقال HVDC. مهندسی برق (دانشکده فنی دانشگاه تبریز)، ۴۹(۴ (پیاپی ۹۰))، ۱۴۴۹-۱۴۳۹.

بهنیا، حمید، و اخباری، مهدی. (۱۳۹۸). کلیدزنی انتقال در برنامه ریزی یک پارچه تعمیرات انتقال و تولید در سیستم قدرت. مهندسی برق (دانشکده فنی دانشگاه تبریز)، ۴۹(۴ (پیاپی ۹۰))، ۱۵۲۵-۱۵۱۷.

حسینی‌پور، سیدمرتضی؛ حسنی، عبدالمجید(۱۳۹۸). ارتقاء پایداری گذرای سیستم قدرت دو ماشینه با استفاده از جبرانساز ایستای توان راکتیو. موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی خوزستان، دانشکده برق و کامپیوتر.

صفری، امین، و جنگجو، محمداسماعیل. (۱۳۹۶). طراحی بهینه پایدارساز سیستم قدرت با استفاده از الگوریتم بهینه سازی پرنده فاخته (COA). سامانه های غیرخطی در مهندسی برق، ۴(۱-۲)، ۴۷-۶۲.

کراری ،مهدی . "دینامیک و کنترل سیستمهای قدرت" انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر، ۱۳۹۴.

شریعتی نصب،رضا. "حالتهای گذرای الکترومغناطیسی در سیستمهای قدرت"انتشارات دانشگاه امیرکبیر. ۱۳۹۳.

جورابیان، محمود . "کنترل توان راکتیو در سیستم انتقال و توزیع انرژی الکتریکی" انتشارات قدیس ، ۱۳۹۵ .

1. Fișcă, M.; Abrudean, M.; Mureșan, V.; Clitan, I.; Ungureșan, M.-L.; Motorga, R.; Ceuca, E. Modeling and Simulation of High Voltage Power Lines under Transient and Persistent Faults. *Mathematics* **2023**,
2. Codoban, A.; Abrudean, M.; Cordos, R.; Mureşan, V.; Fişcă, M.; Ungureşan, M.L.; Silaghi, H.; Spoială, V. Preliminaries Regarding the Monitoring of the Parameters of a Separation Cascade for Isotope 18O. In Proceedings of the 16th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems, Oradea, Romania, 10–11 June 2021.
3. Ignat, J. Observabilitate a Reţelelor Electrice de Distribuţie de Medie Tensiune (Observability of Medium Voltage Distribution Networks); Editura Ventura: Iaşi, Romania, 1995. [Google Scholar]
4. Bică, D. Sisteme Informatice Moderne în Electroenergetică (Modern IT Systems in Power Engineering); Editura Universităţii “PetruMaior”: Tg-Mureş, Romania, 2007. [Google Scholar]
5. Moldovan, L.; Vătău, D. Elemente Moderne în Domeniul Echipamentelor Electrice de Comutaţie (Modern Elements in the Field of Electrical Switching Equipment); AGIR: Bucureşti, Romania, 2001. [Google Scholar]
6. Sarchiz, D. Optimizarea Fiabilităţii Sistemelor Electrice. Modele, Aplicaţii, Programe (Optimizing the Reliability of Electrical Systems. Models, Applications, Programs); Matrix-Rom: Bucureşti, Romania, 2005. [Google Scholar]
7. De Kinderena, S.; Kaczmarek-Heß, M.; Ma, Q.; Razo-Zapata, I.S. Model-based valuation of smart grid initiatives: Foundations, open issues, requirements, and a research outlook. Data Knowl. Eng. **2022**, 141, 102052. [Google Scholar] [CrossRef]
8. Vulcu, I. Defectul Monofazat–Identificare, Localizare, Afișare (Single-Phase Fault–Identification, Location, Display); Matrix-Rom: Bucureşti, Romania, 2007. [Google Scholar]

9. Dumitru, A. Protecţia Sistemelor Electrice (Protection of Electrical Systems); Matrix-Rom: Bucureşti, Romania, 1999. [Google Scholar]
10. Andea, P. Automatizarea şi Protecţia Instalaţiilor şi Sistemelor Electroenergetice (Automation and Protection of Electrical Installations and Systems); Orizonturi Universitare: Timişoara, Romania, 2002; p. 230. [Google Scholar]
11. Ferrero, A.; Sangiovanni, S.; Zappitelli, E. A fuzzy-set approach to fault-type identification in digital relaying. IEEE Trans. Power Deliv. **1995**, 10, 169. [Google Scholar] [CrossRef]
12. Vinţan, M. Scurtcircuitul Monofazat în Reţelele Electrice de Înaltă Tensiune (The Single-Phase Short Circuit in High Voltage Electrical Networks); Editura Matrix-Rom: Bucureşti, Romania, 2006. [Google Scholar]
13. Akhmedova, O.; Soshinov, A.; Gazizov, F.; Ilyashenko, S. Development of an Intelligent System for Distance Relay Protection with Adaptive Algorithms for Determining the Operation Setpoints. Energies **2021**, 14, 973. [Google Scholar] [CrossRef]
14. Schweitzer, E.O.; Kasztenny, B.; Guzmán, A.; Skendzic, V.; Mynam, M.V. Speed of line protection–can we break free of phasor limitations? In Proceedings of the IEEE 68th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, USA, 30 March–2 April 2015. [Google Scholar]
15. Hariri, F.; Crow, M. New Infeed Correction Methods for Distance Protection in Distribution Systems. Energies **2021**, 14, 4652. [Google Scholar] [CrossRef]
16. Abrudean, M.I. Electronică Industrial (Industrial Electronics); Editura UT Pres: Cluj Napoca, Romania, 1998; p. 275. [Google Scholar]
17. Bamigbola, O.M.; Ali, M.M.; Oke, M.O. Mathematical modeling of electric power flow and the minimization of power losses on transmission lines. Appl. Math. Comput. **2014**, 241, 214–221. [Google Scholar] [CrossRef]
18. Iešmantas, T.; Alzbutas, R. Bayesian spatial reliability model for power transmission network lines. Electr. Power Syst. Res. **2019**, 173, 214–219. [Google Scholar] [CrossRef]
19.]
20. Stavropoulos, P.; Panagiotopoulou, V.C. Developing a Framework for Using Molecular Dynamics in Additive Manufacturing Process Modelling. Modelling **2022**, 3, 189–200. [Google Scholar] [CrossRefAksoy, G.; Raulf, C.; Vietor, T.A. Model-Based Design Method for the Correlation between Customer Feedback and Technical Design Parameters in the Context of Systems Engineering. Modelling **2021**, 2, 795–820. [Google Scholar] [CrossRef]
21. Coloşi, T.; Abrudean, M.; Unguresan, M.L.; Muresan, V. Numerical Simulation Method of Distributed Parameter Processes; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2013. [Google Scholar]

22. Colosi, T.; Abrudean, M.; Dulf, E.; Naşcu, I.; Codreanu, S. Method for Numerical Modelling and Simulation; Mediamira: Cluj Napoca, Romania, 2002. [Google Scholar]
23. Lesek, F.; Ladislav, S.; Zdenek, B. Modelling Transmission Lines for the Purpose of Data Transmission over Power Lines. Procedia Eng. **2015**, 100, 1381–1388. [Google Scholar] [CrossRef][Green Version]
24. Drexler, P.; Szabó, Z.; Pernica, R.; Zukal, J.; Kadlec, R.; Klíma, M.; Fiala, P. Modeling and Experimental Verification of Plasma Jet Electromagnetic Signals. Modelling **2022**, 3, 70–91. [Google Scholar] [CrossRef]
25. Ştefănescu, S.; Tîrnovan, R. Automatizări în Energetică, Noţiuni Fundamentale (Automation in Energetics, Fundamental Notions); Mediamira: Cluj Napoca, Romania, 2004. [Google Scholar]
26. Qiu Qin, N. Eva Wu2016 American Control Conference (ACC) Control effective ness of FACTS devices in power systemsYear: 2016.
27. S. Fahad Bin Shakil,Nusrat Husain, M. Daniyal Wasim, Shayan Junaid Improving the voltage stability and performance of power networks using power electronics based FACTS controllers Year: 2014.
28. Md. Shafiullah, Md. Shafiul Alam, Md. Ismail Hossain, Md Nazmul Hasan Transient performance improvement of power system by optimal design of SVC controller employing genetical gorithm-Year: 2014.
29. K. KUMARASAMY and R. RAGHAVAN, "COST EFFECTIVE SOLUTION FOR OPTIMAL PLACEMENT AND SIZE OF MULTIPLE STATCOM USING PARTICLE SWARM OPTIMIZATION," Journal of Theoretical & Applied Information Technology, vol. 67, 2014.
30. A. E. Dahej, S. Esmaeili, and A. Goroohi, "Optimal allocation of SVC and TCSC for improving voltage stability and reducing power system losses using hybrid binary genetic algorithm and particle swarm optimization," Canadian Journal on Electrical and Electronics Engineering, vol. 3, pp. 100-107, 2012.
31. A. Samimi and P. Naderi, "A new method for optimal placement of TCSC based on sensitivity analysis for congestion management," Smart Grid and Renewable Energy, vol. 3, p. 10, 2012.
32. S. M. Cruz, "Load Flow Analysis of Multi-Converter Transmission Systems," Drexel University, 2014.
33. S. Dixit and L Srivastava, "Optimal Location and Sizing of STATCOM for Minimizing Power Loss and Improving Voltage Profile using GA," IJCSNT,Vol. 4, No. 1, 2014.
34. Jordehi, A. R. (2015). Brainstorm optimisation algorithm (BSOA): An efficient algorithm for finding optimal location and setting of FACTS devices in electric power systems. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 69, 48-57.

35. Hooshmand, R. A., Morshed, M. J., & Parastegari, M. (2015). Congestion management by determining optimal location of series FACTS devices using hybrid bacterial foraging and Nelder–Mead algorithm. Applied Soft Computing, 28, 57-68.
36. Dash, P., Saikia, L. C., & Sinha, N. (2015). Comparison of performances of several FACTS devices using Cuckoo search algorithm optimized 2DOF controllers in multi-area AGC. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 65, 316-324.
37. Jordehi, A. R. (2015). Particle swarm optimisation (PSO) for allocation of FACTS devices in electric transmission systems: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 52, 1260-1267.
38. Prasad, D., & Mukherjee, V. (2016). A novel symbiotic organism's search algorithm for optimal power flow of power system with FACTS devices. Engineering Science and Technology, an International Journal, 19(1), 79-89.
39. Mukhopadhyay, P., Dutta, S., & Roy, P. K. (2015). Optimal location of TCSC using opposition teaching learning based optimization. International Journal of Energy Optimization and Engineering (IJEOE), 4(1), 85-101.
40. Mukhopadhyay, P., Dutta, S., & Roy, P. K. (2015). Optimal location of TCSC using opposition teaching learning based optimization. International Journal of Energy Optimization and Engineering (IJEOE), 4(1), 85-101.
41. M. S. Rawat and S. Vadhera, "Comparison of FACTS devices for transient stability enhancement of multi machine power system," 2016 International Conference on Microelectronics, Computing and Communications (MicroCom), Durgapur, 2016, pp. 1-5.
42. -S. Bruno, G. De Carne and M. La Scala, "Transmission Grid Control Through TCSC Dynamic Series Compensation," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 31, no. 4, pp. 3202-3211, July 2016.
43. J. Deng and X. Zhang, "Robust Damping Control of Power Systems With TCSC: A Multi-Model BMI Approach With H2 Performance," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 29, no. 4, pp. 1512-1521, July 2014.
44. Raza, A., Benrabah, A., Alquthami, T., & Akmal, M. (2020). A review of fault diagnosing methods in power transmission systems. Applied Sciences, 10(4), 1312.
45. Liu, J., Zhao, Z., Ji, J., & Hu, M. (2020). Research and application of wireless sensor network technology in power transmission and distribution system. Intelligent and Converged Networks, 1(2), 199-220.
46. Cipolletta, G., Delle Femine, A., Gallo, D., Landi, C., & Luiso, M. (2022, September). Considerations on Voltage Ripple Assessment in dc Power Network. In 2022 IEEE 12th International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS) (pp. 1-6). IEEE.

Abstract

Transient phenomena in power transmission lines are one of the fundamental issues in electrical engineering that can occur due to reasons such as electrical faults, lightning strikes, load changes, or sudden equipment disconnections and connections. These phenomena cause severe and sudden changes in voltage and current and can cause serious damage to critical equipment in power networks, including transformers, insulators, and protective equipment. Accurate identification and modeling of these phenomena is essential to understand the behavior of the network under critical conditions and prevent damage caused by them. A correct understanding of the effects of frequency and voltage fluctuations in these conditions, especially in long transmission lines, is of particular importance. In this research, the modeling of transient phenomena in power transmission lines is focused on the effects of frequency and voltage fluctuations. The research methodology in this study is as follows: First, historical and real-time data including parameters related to transient phenomena such as frequency, voltage, load, and temperature are collected from reliable sources. Then, these data are preprocessed and cleaned using MATLAB, which includes removing noise and outliers and normalizing values. After preprocessing, the data are subjected to exploratory analysis using various MATLAB tools to identify existing patterns and correlations. In the next step, based on the results obtained, analysis and modeling algorithms are designed using statistical and machine learning methods and implemented in the MATLAB environment. Finally, the models are tested and validated using experimental data and their performance is evaluated with tools such as cross-validation and confusion matrix. The analysis results show that the main factors causing frequency and voltage fluctuations in power transmission networks include sudden load changes, disruptions in generation, and incompatibility of distributed generation resources with the network. The negative correlation coefficient between load and frequency variations (-0.55) and voltage (-0.43) indicates the significant impact of these variations on system stability. In addition, the positive and high dependence between frequency and voltage (0.85) emphasizes the mutual effects of these two parameters and highlights the importance of managing and controlling their fluctuations. These findings emphasize the need for accurate modeling and system dynamics analysis in order to identify and reduce instability factors. The use of transient modeling with the help of accurate

simulations and real-time data has improved the accuracy of analysis and control of fluctuations in power transmission networks. Simulations performed with MATLAB and the use of data from real-time sensors (such as PMU and SCADA) have enabled the accurate identification of transient phenomena and the improvement of control and protection solutions. Strategies such as the use of load response systems and increasing grid flexibility by utilizing smart technologies and distributed generation resources play an effective role in reducing the damage caused by fluctuations and improve power quality and grid stability.

Keywords: Power transmission lines, frequency fluctuations, voltage fluctuations, power transmission grid, grid stability