بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده فنی
گروه برق
(گرایش قدرت)

ارزیابی دینامیکی پایداری ولتاژ در سیستم‌های قدرت به کمک روش دوشاخگی و شبکه‌های عصبی

از:

علیرضا بهمن یار

اساتید راهنما:

دکتر علی کرمی

دکتر اسماعیل فلاح

دی ماه ۱۳۹۰

تقدیم، تقدیر و تشکر

با تشکر از دکتر علی کرمی، بخاطر راهنمایی‌ها و همراهی بی دریغشان، که اگر یاری ایشان نبود، این اثر به انجام نمی‌رسید. و با تقدیر از دکتر اسماعیل فلاح، که در مقام شاگردی این دو استاد گرام، بسیار آموخته‌ام.

این نوشته را به پدر و مادرم تقدیم می‌کنم، برای عشق و همراهی آن‌ها که اگر نبود، نه نای رفتن داشتم و نه توان آموختن.

در پایان، امیدوارم که هر آنچه در دو سال گذشته آموخته‌ام، چه به عنوان یک دانشجو و چه به عنوان یک انسان، برای کشورم و برای مردمی که دوستشان دارم، سودمند واقع شود.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه

- فهرست مطالب ..... ت
- فهرست جدول‌ها ..... خ
- فهرست شکل‌ها ..... د
- چکیده فارسی ..... ش
- چکیده انگلیسی ..... ص

فصل اول: مقدمه

۱-۱- مقدمه ۲
۱-۲- هدف پایان‌نامه ۴
۱-۳- ساختار پایان‌نامه ۴

فصل دوم: مفاهیم کلی پایداری و پایداری ولتاژ

۲-۱- مقدمه‌ای بر مسئله پایداری سیستم‌های قدرت ۶
۲-۲- تقسیم‌بندی پایداری سیستم قدرت ۷
۲-۲-۱- پایداری زاویه‌ای ۸
۲-۲-۲- پایداری فرکانس ۹
۲-۲-۳- پایداری ولتاژ ۹
۲-۳- فروپاشی ولتاژ ۱۰
۲-۴- بررسی یک سیستم ساده ۱۲
۲-۴-۱- محاسبه نقطه حداکثر توان قابل انتقال ۱۴
۲-۴-۲- بحث در مورد منحنی‌های P-V و Q-V ۱۷
۲-۵- نگاهی اجمالی بر دو سناریوی ناپایداری ۱۸

فصل سوم: دوشاخگی

۳-۱- مقدمه ۲۱
۳-۲- دوشاخگی ۲۱
۳-۳- مدل سیستم قدرت برای دوشاخگی ۲۵
۳-۴- دوشاخگی نقطه زینی و فروپاشی ولتاژ ۲۵
۳-۴-۱- مثالی از یک سیستم قدرت ساده ۲۶
۳-۴-۲- مقادیر ویژه در دوشاخگی نقطه زینی ۲۹
۳-۴-۳- خواص دوشاخگی نقطه زینی ۲۹
۳-۴-۴- فضای پارامتر ۳۰
۳-۵- دوشاخگی هاپف و رفتارهای نوسانی ۳۱
۳-۵-۱- نمونه‌ای از دوشاخگی هاپف فوق بحرانی ۳۲
۳-۵-۲- مثالی از دوشاخگی هاپف زیربحرانی ۳۵
۳-۵-۳- مقایسه هاپف با تئوری خطی ۳۷
۳-۵-۴- خواص دوشاخگی هاپف ۳۷
۳-۵-۵- مدل‌سازی سیستم برای دوشاخگی هاپف ۳۷
۳-۵-۶- استفاده از دوشاخگی هاپف در سیستم قدرت ۳۸
۳-۶- پیدا کردن نقاط دوشاخگی ۳۸
۳-۶-۱- روش مستقیم ۳۹
۳-۶-۲- روش تداومی ۴۱

فصل چهارم: روش های تداومی

۴-۱- مقدمه ۴۶
۴-۲- روش تداومی بکار گرفته شده در PSAT ۴۶
۴-۲-۱- معرفی سیستم آزمون ۳۹ شینه New England ۴۸

۴-۲-۲- نتایج پخش بار تداومی در سیستم آزمون ۳۹ شینه ۴۹
۴-۳- روش‌های تداومی گوناگون ۵۲
۴-۳-۱- روش تداومی Ajjarapu-Christy ۵۲
۴-۳-۲- روش تداومی با استفاده از پیشگویی کننده سکانت ۵۴
۴-۳-۳- روش تداومی با استفاده از پیشگویی کننده لاگرانژ ۵۴
4-3-4- روش تداومی اصلاح شده PSAT ۵۶
۴-۳-۵- مقایسه روش‌های تداومی معرفی شده ۵۶
۴-۴- روش‌های پیشنهاد شده برای محاسبه آنی نقاط دوشاخگی ۵۹
۴-۴-۱- شاخص‌های فروپاشی ولتاژ ۵۹
۴-۴-۲- استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی ۶۱

فصل پنجم: شبکه های عصبی

۵-۱- مقدمه ۶۳
۵-۲- شبکه‌های عصبی بیولوژیکی ۶۴
۵-۳- ساختارهای شبکه‌های عصبی ۶۶
۵-۳-۱- شبکه‌های تک لایه ۶۶
۵-۳-۲- شبکه‌های چند لایه ۶۷
۵-۴- توابع عملکرد رایج ۶۸
۵-۵- تنظیم وزن‌ها ۷۱
۵-۶- تاریخچه شبکه‌های عصبی ۷۱
۵-۷- پرسپترون ۷۲
۵-۷-۱- محدودیت‌های شبکه تک لایه ۷۳
۵-۷-۲- پرسپترون چند لایه ۷۴

۵-۸- قانون یادگیری پرسپترون ۷۵
۵-۸-۱- الگوریتم یادگیری برای شبکه پرسپترون چند لایه ۸۰
۵-۸-۲- بهبود سرعت همگرایی روش پس انتشار ۸۳

فصل ششم: نتایج شبیه سازی

۶-۱- مقدمه ۸۵
۶-۲- استفاده از شبکه‌های عصبی برای حالت پایه سیستم ۳۹ شینه NEW ENGLAND ۸۵
۶-۲-۱- انتخاب ورودی‌های شبکه عصبی ۸۵
۶-۲-۲- تولید داده‌های آموزش و آزمون ۸۸
۶-۲-۳- نتایج شبیه‌سازی برای حالت پایه سیستم ۳۹ شینه NewEngland ۸۹
۶-۳- کاهش ورودی‌های شبکه عصبی ۹۳
۶-۳-۱- کاهش بیشتر ورودی‌ها ۹۸
۶-۴- تخمین حاشیه پایداری ولتاژ سیستم با ساختار متغیر ۱۰۲
۶-۴-۱- کاهش ورودی‌های شبکه ۱۰۷
۶-۵- آزمون تعمیم‌پذیری شبکه عصبی پیشنهادی ۱۱۰

فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهاد ها

۷-۱- نتیجه‌گیری ۱۱۳
۷-۲- پیشنهادها ۱۱۴

مراجع ۱۱۷

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۶- ۱: مقایسه مقدار واقعی و مقدار تخمین زده شده حاشیه پایداری ولتاژ برای ۲۰ الگوی تست مختلف در شبکه آموزش دیده با تمام ورودی‌ها برای حالت پایه سیستم ۳۹ شینه ۹۲

جدول ۶- ۲: شینه‌های بحرانی سیستم ۳۹ شینه ۹۹

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲- ۱: طبقه‌بندی پایداری سیستم قدرت ۸

شکل ۲- ۲: مدار تک خطی یک سیستم ساده دو شینه ۱۳

شکل ۲- ۳: رابطه بین v و θ برای یک سیستم ساده دوباس ۱۳

شکل ۲- ۴: تغییرات ولتاژ شینه بار v نسبت به p برای سیستم دو شینه ۱۳

شکل ۲- ۵: نمودارهای P-V سیستم برای مقادیر مختلف ضریب توان ۱۶

شکل ۲- ۶ : نمودارهای Q-V سیستم برای مقادیر مختلف ضریب توان ۱۶

شکل ۲- ۷: نمودارهای Q-V سیستم برای مقادیر مختلف ضریب توان ۱۷

شکل ۲- ۸: مشخصه P-V بار در برابر شبکه ۱۹

شکل ۲- ۹: نمونه سناریوهای ناپایداری ولتاژ الف) ناپایداری در اثر افزایش تدریجی بار ب) الف) ناپایداری در اثر خروج خط ۱۹

شکل ۳- ۱: حالات مختلف علامت و رفتار مقادیر ویژه براساس علامت و مقدار Tr(j) وdet(j) ۲۴

شکل ۳- ۲: شینه PV تک ماشینه در حال تغذیه بار PQ با ضریب توان ثابت ۲۶

شکل ۳- ۳: تغییرات اندازه ولتاژ بار برحسب توان آن ۲۷

شکل ۳- ۴: دیاگرام دوشاخگی برای دو متغیر حالت سیستم ۲۷

شکل ۳- ۵: فضای حالت در یک بارمتوسط ۲۸

شکل ۳- ۶: فضای حالت در نقطه دوشاخگی زینی ۲۸

شکل ۳- ۷: فضای حالت پس از نقطه دوشاخگی زینی ۲۹

شکل ۳- ۸: کاهش ولتاژ در هنگام فروپاشی در نقطه دوشاخگی زینی ۳۰

شکل ۳- ۹: فضای پارامتر زمانی که توان اکتیو مصرفی دو بار مختلف به عنوان پارامتر انتخاب شده‌اند ۳۱

شکل ۳- ۱۰: یک مسیر تکراری الف) فضای حالت ب) حوزه زمان ۳۲

شکل ۳- ۱۱: نقطه تعادل پایدار قبل از دوشاخگی هاپف فوق بحرانی الف) فضای حالت ب) حوزه زمان ۳۳

شکل ۳- ۱۲: نقطه تعادل ناپایدار و مسیر تکراری پایدار پس از دوشاخگی هاپف فوق بحرانی الف) فضای حالت ب) حوزه زمان ۳۴

شکل ۳- ۱۳: نقطه تعادل ناپایدار و مسیر تکراری پایدار پس از دوشاخگی هاپف فوق بحرانی الف) فضای حالت ب) حوزه زمان ۳۴
شکل ۳- ۱۴: نقطه تعادل پایدار و مسیر تکراری ناپایدار قبل از دوشاخگی هاپف زیر بحرانی الف) فضای حالت ب) حوزه زمان ۳۵
شکل ۳- ۱۵: نقطه تعادل پایدار و مسیر تکراری ناپایدار قبل از دوشاخگی هاپف زیر بحرانی الف) فضای حالت ب) حوزه زمان ۳۶
شکل ۳- ۱۶: نقطه تعادل ناپایدار پس از دوشاخگی هاپف زیر بحرانی الف) فضای حالت ب) حوزه زمان ۳۶
شکل ۳- ۱۷: پیشگویی، (الف) به روش مماس، (ب) به روش سکانت ۴۱
شکل ۳- ۱۸: پارامتری کردن، (الف) به روش پارامتر محلی، (ب) به روش قطع عمودی، (ج) به روش طول قوس ۴۲
شکل ۳- ۱۹: محاسبه دیاگرام دوشاخگی یک سیستم قدرت با استفاده از روش تداومی ۴۳

شکل ۴- ۱ روش تداومی به کار گرفته شده در PSAT الف) با روش پارامتری کردن قطع عمودی ب) با روش پارامتری کردن محلی ۴۸
شکل ۴- ۲ دیاگرام تک خطی سیستم آزمون ۳۹ شینه New England ۴۹
شکل ۴- ۳: منحنی‌های P-V سیستم برای شینه‌های ۳۷، ۳۳، ۱۵ و ۱۲ ۵۰
شکل ۴- ۴: میزان توان اکتیو و راکتیو تولیدی ژنراتورها در شینه‌های ۵ و ۷ و و ۹ و ۱۰ ۵۰
شکل ۴- ۵: میزان توان راکتیو تولیدی ژنراتورها در شینه‌های ۵ و ۷ و و ۹ و ۱۰ ۵۱
شکل ۴- ۶: میزان توان اکتیو مصرفی شینه‌های ۱۸ و ۲۶ و و ۲۸ و ۳۶ ۵۱
شکل ۴- ۷: میزان توان راکتیو مصرفی شینه‌های ۱۸ و ۲۶ و و ۲۸ و ۳۶ ۵۱
شکل ۴- ۸: روند روش تداومی Ajjarapu-Christy ۵۳
شکل ۴- ۹: روند روش تداومی با پیشگویی کننده سکانت ۵۴
شکل ۴- ۱۰: روند روش تداومی با پیشگویی کننده غیرخطی ۵۵
شکل ۴- ۱۱: منحنی‌های P-V بدست آمده با روش‌های تداومی گوناگون در سیستم ۳۹ شینه New England (شینه ۱۲ ام) (الف). روش Ajjarapu-Christy، (ب) روش پیشگویی سکانت، (ج) روش پیشگویی لاگرانژ، (د) روش اصلاح شده PSAT ۵۷
شکل ۴- ۱۲: زمان‌های محاسباتی روش‌های تداومی گوناگون ۵۷
شکل ۴- ۱۳: تعداد تکرارهای مورد نیاز برای اصلاح جواب پیشگویی شده در هر مرحله روش تداومی ۵۸

شکل ۴- ۱۴: زمان‌های محاسباتی روش‌های تداومی گوناگون برای بخش بالایی منحنی ۵۸

شکل ۵- ۱: یک شبکه عصبی (مصنوعی) ساده ۶۳
شکل ۵- ۲: یک شبکه عصبی (مصنوعی) ساده با یک لایه مخفی ۶۴
شکل ۵- ۳: یک نرون بیولوژیکی ۶۵
شکل ۵- ۴: شبکه عصبی تک لایه ۶۷
شکل ۵- ۵: شبکه عصبی چند لایه ۶۷
شکل ۵- ۶: تابع عملکرد همانی ۶۸
شکل ۵- ۷: تابع عملکرد پله باینری ۶۹
شکل ۵- ۸: تابع عملکرد سیگموئید باینری ۷۰
شکل ۵- ۹: تابع عملکرد سیگموئید دوقطبی ۷۰
شکل ۵- ۱۰: ساختار یک پرسپترون ۷۳
شکل ۵- ۱۱: (الف). AND دو قطبی، نمونه‌ای از مسئله تفکیک پذیر خطی (ب). XOR دو قطبی، نمونه‌ای از مسئله غیرقابل تفکیک خطی ۷۴
شکل ۵- ۱۲: شبکه پرسپترون چند لایه ۷۴
شکل ۵- ۱۳: نمایش گرافیکی الگوهای ورودی شبکه عصبی ۷۵
شکل ۵- ۱۴: حل‌های ممکن برای مثال مطرح شده ۷۶
شکل ۵- ۱۵: بردارهای وزن مربوط به مرزهای تصمیم گیری مختلف ۷۶
شکل ۵- ۱۶: مرحله اول آموزش شبکه عصبی ۷۷
شکل ۵- ۱۷: نمونه‌ای از مسائل غیرقابل حل با روش پیشنهادی ۷۷
شکل ۵- ۱۸: روند اصلاح وزن‌ها ۷۸
شکل ۵- ۱۹: روند اصلاح وزن در دومین مرحله آموزش شبکه ۷۸
شکل ۵- ۲۰: مرز جداسازی پس از آموزش شبکه ۷۹

شکل ۶- ۱: محاسبه حاشیه پایداری ولتاژ سیستم به کمک روش‌های تداومی ۸۶
شکل ۶- ۲: استفاده از شبکه‌های عصبی برای تخمین حاشیه پایداری ولتاژ سیستم ۸۷
شکل ۶- ۳: منحنی آموزش شبکه پرسپترون چندلایه با تمام ورودی‌ها برای حالت پایه سیستم ۳۹ شینه ۹۰

شکل ۶- ۴: منحنی رگرسیون شبکه عصبی آموزش دیده با تمام ورودی‌ها برای حالت پایه سیستم ۳۹ شینه..... ۹۱
شکل ۶- ۵ : مقایسه مقدار واقعی و مقدار تخمین زده شده حاشیه پایداری ولتاژ برای ۲۰ الگوی تست مختلف در شبکه آموزش دیده با تمام ورودی‌ها برای حالت پایه سیستم ۳۹ شینه..... ۹۱
شکل ۶- ۶: مقدار خطای مطلق برای ۵۰۰ الگوی تست مختلف در شبکه آموزش دیده با تمام ورودی‌ها برای حالت پایه سیستم ۳۹ شینه..... ۹۳
شکل ۶- ۷: منحنی آموزش شبکه الف) با ورودی‌های دسته $P_D_Q_G$ ب) با ورودی‌های دسته $Q_D_V_{PV}$ ج) با ورودی‌های دسته $Q_G_V_{PV}_P_{G_{Slack}}$..... ۹۵
شکل ۶- ۸: منحنی رگرسیون شبکه آموزش دیده الف) با ورودی‌های دسته $Q_G_P_D$ ب) با ورودی‌های دسته $Q_D_V_{PV}$ ج) با ورودی‌های دسته $Q_G_V_{PV}_P_{G_{Slack}}$..... ۹۵
شکل ۶- ۹: مقادیر واقعی و تخمینی حاشیه پایداری ولتاژ برای ۲۰ الگو تست مختلف الف) با ورودی‌های دسته $Q_G_P_D$ ب) با ورودی‌های دسته $Q_D_V_{PV}$ ج) با ورودی‌های دسته $Q_G_V_{PV}_P_{G_{Slack}}$..... ۹۶
شکل ۶- ۱۰: مقادیر خطای مطلق برای ۵۰۰ الگو تست الف) با ورودی‌های دسته $Q_G_P_D$ ب) با ورودی‌های دسته $Q_D_V_{PV}$ ج) با ورودی‌های دسته $Q_G_V_{PV}_P_{G_{Slack}}$..... ۹۷
شکل ۶- ۱۱: مقایسه مقادیر MAE و RMSE برای شبکه عصبی با سه دسته ورودی مختلف..... ۹۸
شکل ۶- ۱۲: ناحیه بحرانی سیستم ۳۹ شینه..... ۹۹
شکل ۶- ۱۳: منحنی آموزش شبکه عصبی با ۵ ورودی..... ۱۰۰
شکل ۶- ۱۴: منحنی رگرسیون شبکه آموزش دیده با ۵ ورودی..... ۱۰۰
شکل ۶- ۱۵: مقادیر واقعی و تخمینی حاشیه پایداری ولتاژ برای ۲۰ الگو تست مختلف در شبکه آموزش دیده با ۵ ورودی..... ۱۰۱
شکل ۶- ۱۶: مقادیر خطای مطلق برای ۵۰۰ الگوی تست مختلف در شبکه آموزش دیده با ۵ ورودی..... ۱۰۱
شکل ۶- ۱۷: مقایسه مقادیر واقعی حاشیه پایداری ولتاژ ساختارهای متفاوت سیستم با مقادیر تخمینی شبکه عصبی آموزش دیده برای ساختار پایه آن..... ۱۰۳
شکل ۶- ۱۸: خطای مطلق در تخمین حاشیه پایداری ولتاژ ساختارهای متفاوت سیستم با شبکه آموزش دیده برای ساختار پایه آن..... ۱۰۳
شکل ۶- ۱۹: مقایسه خطای تخمین شبکه عصبی برای ساختار پایه و ساختارهای متفاوت سیستم..... ۱۰۴
شکل ۶- ۲۰: روند آموزش شبکه عصبی برای ساختارهای گوناگون سیستم..... ۱۰۵

شکل ۶- ۲۱: منحنی رگرسیون شبکه آموزش دیده برای ساختارهای متفاوت سیستم..... ۱۰۵
شکل ۶- ۲۲: مقایسه مقادیر واقعی و تخمینی حاشیه پایداری ولتاژ برای شبکه آموزش دیده برای ساختارهای متفاوت سیستم..... ۱۰۶
شکل ۶- ۲۳: خطای مطلق در تخمین حاشیه پایداری ولتاژ برای شبکه آموزش دیده برای ساختارهای متفاوت آن..... ۱۰۶
شکل ۶- ۲۴: مقایسه خطای تخمین شبکه عصبی آموزش دیده برای ساختار پایه سیستم با شبکه عصبی آموزش دیده برای ساختارهای متفاوت آن..... ۱۰۷
شکل ۶- ۲۵: روند آموزش شبکه عصبی برای ساختارهای گوناگون سیستم با ورودی‌های کاهش یافته..... ۱۰۸
شکل ۶- ۲۶: منحنی رگرسیون شبکه عصبی آموزش دیده برای ساختارهای گوناگون سیستم با ورودی‌های کاهش یافته..... ۱۰۸
شکل ۶- ۲۷: مقایسه مقادیر واقعی و تخمینی حاشیه پایداری ولتاژ برای شبکه آموزش دیده برای ساختارهای متفاوت سیستم با ورودی‌های کاهش یافته..... ۱۰۹
شکل ۶- ۲۸: خطای مطلق در تخمین حاشیه پایداری ولتاژ برای شبکه آموزش دیده برای ساختارهای متفاوت آن با ورودی‌های کاهش یافته..... ۱۰۹
شکل ۶- ۲۹: مقایسه مقادیر خطا شبکه آموزش دیده با ورودی‌های کاهش یافته با مقادیر بدست آمده بوسیله شبکه عصبی آموزش دیده با تمامی‌ورودی‌ها..... ۱۱۰
شکل ۶- ۳۰- مقایسه مقادیر واقعی و تخمینی حاشیه پایداری ولتاژ در آزمون شبکه آموزش دیده برای حالت عملکرد عادی سیستم..... ۱۱۱
شکل ۶- ۳۱- خطای مطلق تخمین حاشیه پایداری ولتاژ در آزمون تعمیم پذیری شبکه آموزش دیده برای حالت عملکرد عادی..... ۱۱۱

چکیده:

ارزیابی دینامیکی پایداری ولتاژ در سیستم‌های قدرت به کمک روش دوشاخگی و شبکه‌های عصبی

علیرضا بهمن یار

امروزه سیستم‌های قدرت به دلیل محدودیت‌های اقتصادی و محیطی در نزدیکی حد انتقال خود بهره برداری می‌شوند، در چنین شرایطی ناپایداری و فروپاشی ولتاژ (Voltage Collapse) از نگرانی‌های عمده در سیستم قدرت است. این پدیده اغلب بر اثر اتفاقاتی مثل خروج آنی یک خط انتقال یا ژنراتور، افزایش بار خطوط انتقال و تأمین نشدن توان راکتیو کافی رخ می‌دهد. روش‌های بررسی مسئله پایداری ولتاژ به دو گروه استاتیکی و دینامیکی تقسیم می‌شوند. روش‌های استاتیکی نتایج مفیدی ارائه می‌نمایند، اما رفتارهای دینامیکی سیستم قدرت که نقشی قابل توجه در فروپاشی ولتاژ دارند را در نظر نمی‌گیرند. در این پروژه پایداری ولتاژ به عنوان یک پدیده دینامیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

پدیده ناپایداری ولتاژ ذاتاً پدیده‌ای غیرخطی است و نیاز به روش های آنالیز غیرخطی مانند روش دوشاخگی (Bifurcation) دارد. این روش روند حرکت سیستم به سوی ناپایداری را پیش‌بینی می‌کند و ایده اصلی آن بر مبنای بررسی سیستم در نقاط آستانه ناپایداری است. آنالیز دو شاخگی نیاز به مدل کردن سیستم با معادلاتی دارد که از دو نوع متغیر شامل متغیرهای حالت (States) و متغیرهای پارامتری (Parametrs) تشکیل شده است. متغیرهای حالت (اندازه ولتاژ، زاویه ماشین و ...) در شرایط گذرای سیستم به طور دینامیکی تغییر می کنند و متغیر های پارامتری (توان مصرفی بار و ....) تغییراتی تدریجی دارند.

مشکل اصلی روش‌های موجود بررسی پایداری دینامیکی ولتاژ آن است که نیاز به محاسبات زیادی دارند و برای کاربردهای بهنگام (Online) مناسب نیستند، به همین منظور در این پایان‌نامه برای سرعت بخشیدن به این ارزیابی از شبکه‌های عصبی(Neural Networks) استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی: پایداری ولتاژ، تئوری دوشاخگی، شبکه‌های عصبی، مدل دینامیکی سیستم

Abstract:

Power System Dynamic Voltage Stability Assessment using Bifurcation Theory and Neural Networks

AliReza Bahmanyar

Nowadays, power systems are operating closer to their limits, due to economical and environmental constraints. In this situation, voltage stability and voltage collapse are a matter of considerable concern. The main causes of voltage instability are, outage of a transmission line or generator, increasing load demand and the lack of reactive power support.

The analytical methods for voltage stability investigation are classified into static and dynamic approaches. Statical methods have shown to have promising results, but these methods does not take into account the power system dynamics that have a great influence on voltage instability. In this thesis, voltage stability is investigated as a dynamic phenomenon.

Voltage instability is a nonlinear phenomenon and thus, nonlinear analysis methods such as bifurcation theory should be employed for its analysis. This theory describes the typical ways in which power system loses its stability. In bifurcation analysis, the equations that describe the power system consist of two types of variables. State variables (voltage magnitudes, generators angles …), that change continuously with system changes and parameters (load power …), that have slow changes.

The major disadvantage of dynamical methods for voltage stability analysis is their computational time that makes them to be unsuitable for online application. In this thesis an artificial neural network is employed for investigating the voltage stability with less computational effort.

Keywords: Artificial neural networks, Bifurcation theory, Dynamic model, Voltage stability

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

امروزه سیستم‌های قدرت به عنوان یکی از مهمترین مؤلفه‌های جوامع توسعه یافته مطرح شده‌اند و هر نوع خاموشی[۱] ممکن است به نوعی منجر به فلج شدن فعالیت‌های اقتصادی و صنعتی این جوامع شود. از این رو قابلیت اطمینان[۲] و دسترس‌پذیری[۳] این سیستم‌ها یکی از دغدغه‌های اصلی اپراتورهای سیستم‌های قدرت است. قابلیت اطمینان سیستم قدرت با بررسی رفتار آن برای یک بازه زمانی معین مورد قضاوت قرار می‌گیرد. یک سیستم قدرت برای اینکه قابل اطمینان باشد باید کارکرد پایداری داشته باشد، به این دلیل، طراحی، بهره برداری و کنترل سیستم‌های قدرت تا حد زیادی تابع ملاحظات پایداری آنها است.

در سال‌های گذشته، محدودیت‌های موجود در توسعه خطوط انتقال و افزایش روز افزون تقاضا، تولیدکنندگان را مجبور به استفاده از این خطوط در نزدیکی ظرفیت آن‌ها کرده است که این مسئله منجر به ایجاد مشکلات پایداری ولتاژ شده است. با افزایش بار سیستم، مقادیر ولتاژ در سراسر سیستم به آرامی‌کاهش می‌یابند. اغلب اپراتورهای سیستم این مسئله را با استفاده از روش‌هایی مثل کلیدزنی بانک‌های خازنی و یا افزایش تولید توان راکتیو کنترل می‌کنند اما ادامه افزایش بار سیستم ممکن است در نهایت آن را به شرایطی ناپایدار برساند. این شرایط ناپایدار معمولا به صورت کاهش شدید ولتاژ شینه‌ها آشکار می‌گردد و در مقالات به عنوان فروپاشی ولتاژ[۴] شناخته می‌شود.

فروپاشی‌های ولتاژ گوناگونی در سیستم‌های قدرت در سراسر جهان رخ داده‌اند و مطالعات زیادی در سال‌های گذشته در این زمینه انجام شده است. محققان ثابت کرده‌اند که این پدیده می‌تواند در اثر از دست دادن حالت تعادل پایدار سیستم و بطور خاص به دلیل ادغام و ناپدید شدن یک نقطه تعادل پایدار و یک نقطه تعادل ناپایدار باشد. این پدیده در تئوری سیستم‌های غیر خطی به دوشاخگی نقطه زینی[۵] مشهور است.

ناپدید شدن نقطه تعادل پایدار در نقطه دوشاخگی زینی منجر به افت شدید ولتاژ سیستم شده و در نهایت به فروپاشی ولتاژ می‌انجامد. بنابراین شناسایی نقاط دوشاخگی معادل با شناسایی نقاط شرایط کاری بحرانی سیستم قدرت است.

روش‌های بررسی پایداری ولتاژ سیستم قدرت به دو دسته کلی روش های استاتیکی و روش‌های دینامیکی تقسیم می‌شوند. بیشتر روش‌های بکار رفته برای بررسی پایداری ولتاژ سیستم‌های قدرت روش‌هایی استاتیکی‌اند و مطالعات کمتری در زمینه پایداری ولتاژ دینامیکی سیستم قدرت انجام گرفته است. روش‌های استاتیکی که اغلب تکیه بر معادلات پخش بار سیستم

---

[۱] Black Out
[۲] Reliability
[۳] Availability
[۴] Voltage Collapse
[۵] Saddle Node Bifurcation

دارند، قادر به بررسی جنبه‌های گوناگونی از پایداری ولتاژ می‌باشند و سرعت مطلوبی برای ارزیابی بهنگام[۱] دارند. از سوی دیگر، پایداری ولتاژ ذاتاً یک مسئله دینامیکی است و روش‌های استاتیکی قادر به بررسی جنبه‌های دینامیکی این پدیده نیستند؛ در نتیجه نتایج بدست آمده بوسیله این روش‌ها اغلب از دقت پایینی برخوردارند. روش‌های استاتیکی قادر به مدل کردن اجزاء دینامیکی سیستم مانند ترانسفورماتورهای تغییر دهنده تپ و رگولاتورهای ولتاژ که نقش مهمی‌در بروز ناپایداری ولتاژ دارند نبوده و در زمینه پیشگویی و تحلیل ناپایداری ولتاژ نوسانی سیستم، به کلی ناکارامدند. مشکل عمده روش‌های دینامیکی حجم محاسباتی بالای این روش‌ها و در نتیجه زمان‌بر بودن آن‌هاست.

محققان روش‌های گوناگونی برای کاهش زمان محاسباتی مورد نیاز برای تخمین نقطه فروپاشی ولتاژ پیشنهاد کرده‌اند. دو روش مرسوم در این زمینه استفاده از شاخص‌ها[۲] و استفاده از شبکه عصبی می‌باشند.

از میان شاخص‌های پیشنهاد شده برای تخمین نقاط دو شاخگی، هیچکدام رفتار قابل پیش‌بینی نداشته و قادر به تخمین دقیق این نقاط نیستند، به این دلیل شبکه عصبی به عنوان مناسب‌ترین ابزار برای تعیین نقطه فروپاشی ولتاژ سیستم قدرت مطرح می‌شوند.

در سال‌های اخیر مطالعات گوناگونی در زمینه کاربرد شبکه‌های عصبی برای حل مشکلات سیستم‌های قدرت انجام شده است. این شبکه‌ها بطور موفقیت آمیزی در محاسبات پایداری گذرا[۳]، پیش‌بینی کوتاه مدت بار[۴]، مدل‌سازی ماشین‌های سنکرون و مسائل گوناگون دیگر بکار گرفته شده‌اند. این شبکه‌ها می‌توانند در حالت نابهنگام آموزش داده شوند تا بتوانند نگاشت‌های بسیار پیچیده‌ای را انجام دهند و پس از آموزش قادر خواهند بود که به طور تقریباً آنی نگاشت‌هایی مشابه را تشخیص دهند.

درسال‌های اخیر شبکه‌های عصبی برای ارزیابی بهنگام پایداری ولتاژ مورد توجه قرار گرفته است و ترکیب‌های مختلفی از شبکه‌های عصبی به این منظور بکار برده شده است، اما اغلب این روش‌ها نیاز به ویژگی‌های ورودی گوناگونی برای تخمین حد پایداری ولتاژ سیستم قدرت دارند. در این پایان‌نامه ویژگی‌های ورودی شبکه عصبی تا حد ممکن کاهش داده شده‌اند. یکی دیگر از محدودیت‌های اکثر رهیافت‌های قبلی منتشرشده براساس شبکه‌های عصبی آن است که پایداری ولتاژ را تنها برای یک آرایش سیستم تخمین می‌زدند. وقتی یک اغتشاش[۵] اتفاق می‌افتد، ساختار سیستم تغییر کرده و شبکه عصبی آموزش دیده برای ساختار اولیه سیستم، قادر به تخمین رابطه‌ی بین ورودی‌ها و خروجی برای ساختار جدید سیستم نخواهد بود. اغلب

---

[۱] Online
[۲] Indices
[۳] Transient Stability
[۴] Short Term Load Forecasting
[۵] Disturbance

مطالعاتی که در این زمینه انجام گرفته‌اند، برای هر ساختار جدید سیستم از یک شبکه عصبی اضافی استفاده کرده‌اند، که این روش با توجه به تعداد زیاد ساختارهای سیستم، راه‌حل مناسبی به نظر نمی‌رسد. در این پایان‌نامه راه حلی برای این مشکل ارائه شده است.

۱-۲- هدف پایان‌نامه

هدف از این پایان‌نامه ارائه روشی برای بررسی پایداری ولتاژ دینامیکی سیستم قدرت است که قادر به پیشگویی نقطه ناپایداری ولتاژ سیستم در شرایط کاری گوناگون باشد. تئوری دوشاخگی به عنوان یک روش ریاضی قدرتمند برای تحلیل پایداری ولتاژ سیستم و تعیین نقطه فروپاشی ولتاژ، معرفی می‌شود. روش‌های گوناگون برای پیدا کردن نقاط دوشاخگی مورد بررسی قرار می‌گیرند و سرعت محاسباتی آن‌ها مقایسه خواهند شد. شبکه‌های عصبی به عنوان ابزاری برای کاهش زمان محاسباتی مورد استفاده قرار می‌گیرند و روشی برای ارزیابی پایداری ولتاژ سیستم‌های قدرت با در نظر گرفتن ساختارچندگانه آن‌ها با استفاده از شبکه‌های عصبی ارائه می‌شود. از یک شبکه عصبی چندلایه پرسپترون(MLP) برای تخمین نقطه فروپاشی ولتاژ برای ساختارهای مختلف سیستم و همچنین شرایط کاری مختلف استفاده می‌گردد. یک مجموعه مناسب از شرایط کاری به عنوان ورودی برای شبکه عصبی استفاده می‌شود و نسبت توان مصرفی سیستم در نقطه فروپاشی ولتاژ به توان مصرفی آن در حالت پایه به عنوان خروجی شبکه خواهد بود. در ادامه داده‌های ورودی تا حد ممکن کاهش می‌یابند. کارایی روش پیشنهادی روی سیستم آزمون ۳۹ شینه New England بررسی خواهد شد.

۱-۳- ساختار پایان‌نامه

در ادامه این پایان‌نامه، در فصل دوم تعاریف مربوط به پایداری و پایداری ولتاژ ارائه می‌شود. فصل سوم به معرفی تئوری دوشاخگی و کاربرد آن اختصاص دارد. روش‌های تداومی گوناگون برای پیدا کردن نقاط دوشاخگی در فصل چهارم مقایسه شده‌اند. در فصل پنجم، شبکه‌های عصبی و ساختار شبکه‌ی عصبی پرسپترون چند لایه معرفی می‌شود و فصل ششم به معرفی روش پیشنهادی و نتایج شبیه‌سازی اختصاص داده شده است. در انتها، نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای ادامه کار، در فصل هفتم ارائه خواهد شد.

فصل دوم

مفاهیم کلی پایداری و پایداری ولتاژ