دانشکده مهندسی- گروه برق قدرت

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

عنوان:

ارزیابی هوشمند و سریع امنیت استاتیکی سیستم قدرت به کمک شبکه عصبی RBF

نگارش:

داود سیدجوان

استاد راهنما:

دکتر حبیب رجبی مشهدی

استاد مشاور:

دکتر مجتبی روحانی

تابستان ۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

به نام یکتای هستی

پایان‌نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد برق – قدرت

عنوان:

ارزیابی هوشمند و سریع امنیت استاتیکی سیستم قدرت به کمک شبکه عصبی RBF

نگارش:

داود سیدجوان

استاد راهنما:

دکتر حبیب رجبی مشهدی

استاد مشاور:

دکتر مجتبی روحانی

تابستان ۱۳۹۰

اظهارنامه

اینجانب **داود سیدجوان** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد **رشته مهندسی برق- قدرت** دانشکده **مهندسی** دانشگاه فردوسی مشهد نویسنده پایان‌نامه **ارزیابی هوشمند و سریع امنیت استاتیکی سیستم قدرت به کمک شبکه عصبی RBF** تحت راهنمایی **دکتر حبیب رجبی مشهدی** متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این رساله/پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در رساله/پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه فردوسی مشهد » و یا « Ferdowsi University of Mashhad » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی رساله/پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از رساله/ پایان نامه رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این رساله/پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این رساله/پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل راز داری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ: ۱۳۹۰/۰۶/۲۰ امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در رساله/پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

صورتجلسه دفاع از پایان‌نامه کارشناسی ارشد

جلسه دفاع از پایان‌نامه آقای **داود سیدجوان** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی برق** گرایش **قدرت** در ساعت **۱۰-۱۲** روز **۱۳۹۰/۰۶/۲۰** در محل **کلاس ۱۲۱** دانشکده **مهندسی** با حضور امضا کنندگان ذیل تشکیل گردید. پس از بررسی‌های لازم، هیأت داوران پایان‌نامه نامبرده را با نمره به عدد **۱۹/۷۵**، به حروف **نوزده و هفتاد و پنج صدم** و با درجه **عالی** مورد تأیید قرار داد.

عنوان پایان‌نامه:

ارزیابی هوشمند و سریع امنیت استاتیکی سیستم قدرت به کمک شبکه عصبی RBF

هیئت داوران امضا

- **داور: دکتر محمد حسین جاویدی دشت بیاض**

  استاد گروه مهندسی برق دانشگاه فردوسی مشهد

- **داور: دکتر جواد ساده**

  دانشیار گروه مهندسی برق دانشگاه فردوسی مشهد

- **نماینده تحصیلات تکمیلی: دکتر محمد منفرد**

  استادیار گروه مهندسی برق دانشگاه فردوسی مشهد

- **استاد راهنما: دکتر حبیب رجبی مشهدی**

  دانشیار گروه مهندسی برق دانشگاه فردوسی مشهد

- **استاد مشاور: دکتر مجتبی روحانی**

  استادیار گروه مهندسی کامپیوتر دانشگاه آزاد اسلامی واحد گناباد

- **مدیر گروه: دکتر رضا لطفی**

  استادیار گروه مهندسی برق دانشگاه فردوسی مشهد

تقدیم به

دو نماد عشق و پاکی، بها و بهانه زندگیم

پدرم که

با صبر و استقامت، به من بردباری و صبوری آموخت. امیدوارم که سایه گرمش همچنان توشه راهم باشد.

مادرم که

با فداکاری و محبت، به من تحمل ناملایمات و سختی‌های زندگی را آموخت. امیدوارم که همچنان در سایه مهربانش باشم.

سپاس گزاری

حمد و سپاس بیکران خداوند یکتا را که الهام بخش علم و معرفت است. بر خود لازم می دانم از زحمات تمام کسانی که انجام این پروژه جز به مدد دانش و محبت های بی دریغ ایشان میسر نمی شد، قدردانی کنم.

از استاد ارجمندم، جناب آقای دکتر حبیب رجبی مشهدی که هم در طول دوران تحصیل و هم در مدت انجام این پروژه با صبر و حوصله فراوان مرا یاری نموده اند بسیار سپاس گزارم. از جناب آقای دکتر مجتبی روحانی که از مشاوره های ایشان در جهت ارتقای کیفیت این پایان نامه نیز بهره جستم صمیمانه سپاس گزارم. بی تردید پایان نامه حاضر بدون کمک و راهنمایی های ارزشمند این اساتید گرانقدر قابل انجام نبود.

از استادان گرانقدر جناب آقای دکتر محمد حسین جاویدی دشت بیاض و جناب آقای دکتر جواد ساده که قبول زحمت فرموده و در جلسه دفاع اینجانب شرکت فرمودند نهایت تشکر را دارم. همچنین از جناب آقای دکتر محمد منقرد بعنوان نماینده تحصیلات تکمیلی صمیمانه سپاس گزارم.

بسمه تعالی

مشخصات رساله/پایان نامه تحصیلی دانشجویان

دانشگاه فردوسی مشهد

عنوان رساله/پایان نامه:

ارزیابی هوشمند و سریع امنیت استاتیکی سیستم قدرت به کمک شبکه عصبی RBF

نام نویسنده: **داود سیدجوان**

نام استاد راهنما: **دکتر حبیب رجبی مشهدی**

نام استاد مشاور: **دکتر مجتبی روحانی**

دانشکده: **مهندسی**	گروه: **مهندسی برق**	رشته تحصیلی: **مهندسی برق- قدرت**
تاریخ تصویب: **۱۳۸۹/۱۱/۰۲**		تاریخ دفاع: **۱۳۹۰/۰۶/۲۰**
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد	دکتری	تعداد صفحات: **۱۱۱**

چکیده رساله/پایان نامه :

امروزه به دلیل افزایش اهمیت انرژی الکتریکی در زندگی بشر و نقشی که صنعت برق در اقتصاد و امنیت ملی عهده‌دار است، مطالعات قابلیت اطمینان و امنیت سیستم نسبت به گذشته مورد توجه بیشتری قرار گرفته‌اند. در بسیاری از کشورهای جهان در چند دهه اخیر، فرآیند تجدید ساختار، صنعت برق را دچار تحولات اساسی نموده است. بدیهی است کلیه مبادلات اقتصادی در فضای بازار برق تنها بر پایه یک زیر ساخت ایمن از رفتار شبکه قابل انجام می‌باشد. همچنین، وجود خاموشی‌های گسترده در چند سال اخیر و بهره‌برداری از شبکه‌های انتقال در نزدیکی ظرفیت حداکثر خطوط در برخی از سیستم‌ها، مسئله امنیت سیستم از جنبه‌های گوناگون مانند ارزیابی سریع و پایش مستمر امنیت از اهمیت مضاعفی برخوردار گشته است.

ارزیابی امنیت سیستم‌های قدرت در زمان واقعی بدلیل حجم محاسباتی بسیار بالا همواره چالش برانگیز بوده است. این پایان‌نامه به کمک شبکه عصبی تابع پایه شعاعی و شبکه موجک عصبی با هدف بهبود سرعت و دقت بالا به ارزیابی امنیت استاتیکی سیستم قدرت می‌پردازد. چارچوب بکارگرفته شده توسط شبکه عصبی پیشنهادی شامل سه مرحله: تعلیم شبکه به صورت زمان غیرواقعی، بهنگام کردن دوره‌ای داده‌ها و بکارگیری آن در زمان واقعی می‌باشد. هدف از این تحقیق، تحلیل تمامی حوادث N-1 ممکن بر روی امنیت سیستم قدرت می‌باشد. بدین منظور، برای محاسبه شدت تاثیر هر حادثه از دو شاخص عملکرد ولتاژ و توان انتقالی استفاده شده است.

در ارزیابی امنیت استاتیکی یک سیستم، اندازه‌گیری یا تخمین متغیرهای متناظر با تحلیل حالت دائمی سیستم مانند اندازه و فاز ولتاژ باس‌ها، توان انتقالی اکتیو و راکتیو و سایر متغیرهای سیستم قدرت ضروری می‌باشد. این متغیرها، که می‌توان از آن‌ها بعنوان ویژگی برای ورودی شبکه هوشمند یاد کرد، می‌توانند با افزایش ابعاد شبکه قدرت و تحلیل واقعی آن عملا موجب ناکارآمدی در ارزیابی سریع و هوشمند سیستم قدرت گردد. بدین منظور، بر مبنای تحلیل مؤلفه‌های اصلی کرنل به متغیرهایی از سیستم قدرت که دارای تاثیر بیشتری در تعیین نمودن ایمنی و یا ناایمنی شبکه قدرت می‌باشند، ضرایب وزنی بیشتری داده می‌شود.

طرح پیشنهادی این امکان را برای اپراتور سیستم قدرت فراهم می‌آورد تا با گرفتن تصمیمات زمان واقعی بتواند اقدام کنترلی مناسب را به ازای وقوع هر حادثه بکارگیرد. عملکرد روش پیشنهادی از نظر بار محاسباتی، دقت و استحکام آن نسبت به تغییرات وضعیت بهره برداری متفاوت مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بدین منظور، با استفاده ازشبکه‌های قدرت ۱۴، ۳۰ و ۱۱۸ باس IEEE، عملکرد شبکه هوشمند پیشنهادی در مقایسه با شبکه‌های عصبی مرسوم دیگر مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

کلید واژه:

۱. ارزیابی امنیت استاتیکی

۲. شاخص عملکرد

۳. شبکه عصبی تابع پایه ای شعاعی

۴. انتخاب ویژگی

امضای استاد راهنما:

تاریخ: **۱۳۹۰/۰۶/۲۰**

فهرست مطالب

فصل اول: پیشگفتار

۱-۱- مقدمه ۲
۱-۲- اهداف پایان‌نامه ۳
۱-۳- ساختار پایان‌نامه ۵

فصل دوم: مفاهیم امنیت در شبکه قدرت

۲-۱- مقدمه ۷
۲-۲- معرفی امنیت سیستم قدرت ۷
۲-۳- ارزیابی امنیت سیستم قدرت ۸
۲-۴- حالات بهره‌برداری سیستم قدرت ۹
۲-۵- اجزای امنیت در بهره‌برداری سیستم قدرت ۱۲
۲-۶- بهره‌برداری ایمن سیستم قدرت ۱۴
۲-۷- تحلیل و انتخاب حوادث ۱۵
۲-۸- شاخص عملکرد ۱۸
۲-۹- ارزیابی امنیت هوشمند سیستم قدرت ۱۹

فصل سوم: بررسی تحقیقات انجام شده

۳-۱- مقدمه ۲۲
۳-۲- مروری بر مطالعات انجام شده ۲۲
۳-۲-۱- ارزیابی امنیت برمبنای روش‌های کلاسیک ۲۲
۳-۲-۲- ارزیابی امنیت برمبنای روش‌های هوشمند ۲۶

فصل چهارم: ارزیابی امنیت استاتیکی با استفاده از شبکه‌های عصبی تابع پایه‌ای شعاعی و موجک با انتخاب ویژگی مولفه‌های اصلی کرنل

۴-۱- مقدمه ۳۷
۴-۲- ارزیابی امنیت استاتیکی ۴۰
۴-۲-۱- شاخص عملکرد ۴۰
۴-۲-۲- سطوح امنیت ۴۲
۴-۲-۳- تولید الگوهای بارگذاری متفاوت ۴۳
۴-۳- انتخاب ویژگی ۴۶
۴-۳-۱- انتخاب ویژگی بر مبنای تحلیل مولفه‌های اصلی ۴۷
۴-۳-۲- انتخاب ویژگی بر مبنای تحلیل مولفه‌های اصلی کرنل ۴۹
۴-۴- کاربرد شبکه‌های عصبی در ارزیابی امنیت استاتیکی ۵۱
۴-۴-۱- شبکه عصبی تابع پایه‌ای شعاعی پیشنهادی ۵۱

۴-۴-۲- شبکه موجک عصبی تلفیقی پیشنهادی ۶۱
۴-۵- تشریح مسئله ۶۵
۴-۶- نتایج تحلیل و انتخاب حوادث در سیستم‌های قدرت ۶۸
۴-۶-۱- سیستم قدرت ۱۴ باس نمونه IEEE ۶۸
۴-۶-۲- سیستم قدرت ۳۰ باس نمونه IEEE ۷۶
۴-۶-۳- سیستم قدرت ۱۱۸ باس نمونه IEEE ۸۳
۴-۷-کنترل پیشگیرانه با استفاده از مرز امنیتی ۸۸
۴-۷-۱- شاخص پایداری ولتاژ ۸۸
۴-۷-۲- انتخاب مشخصه‌های کلیدی سیستم قدرت ۹۰

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۵-۱- جمع‌بندی ۹۵
۵-۲- نتیجه‌گیری ۹۶
۵-۳- پیشنهادات ۹۸

ضمایم
ضمیمه الف- تولید الگوهای اولیه‌ی بار ۱۰۰
ضمیمه ب- اطلاعات مربوط به معماری شبکه‌های هوشمند مورد مقایسه ۱۰۲
ضمیمه ج- اطلاعات مربوط به سیستم قدرت تست نمونه ۱۰۴

مراجع ۱۰۶

فهرست شکل‌ها

شکل (۲-۱) : چهارچوب ساده‌ای از تحلیل امنیت سیستم قدرت ۹
شکل (۲-۲) : حالات بهره‌برداری از سیستم قدرت ۹
شکل (۲-۳) : تغییر وضعیت بهره‌برداری در سیستم قدرت ۱۰
شکل (۲-۴) : چهارچوب تحلیل امنیت با لحاظ نمودن زیر ساخت مخابرات ۱۱
شکل (۲-۵) : اجزای اصلی تحلیل و بهینه‌سازی امنیت ۱۳
شکل (۲-۶) : معرفی ناحیه ایمن بهره‌برداری و محدودیت‌های مختلف امنیتی ۱۵
شکل (۲-۷) : ارزیابی امنیت زمان واقعی با استفاده از واحد محاسباتی هوشمند ۲۰
شکل (۳-۱) : روش آزاد سازی متحدالمرکز ۲۳
شکل (۳-۲) : تقسیم‌بندی سیستم قدرت به سه ناحیه ۲۴
شکل (۳-۳) : تحلیل حوادث با استفاده از ضرایب حساسیت خطی ۲۵
شکل (۳-۴) : ساختار یک سیستم ارزیابی امنیت با استفاده از تکنولوژی هوشمند ۲۶
شکل (۳-۵) : دیاگرام مفهومی از مدل با سرپرستی و بدون سرپرستی برای نمایش و رتبه‌بندی پیش آمد ولتاژ ۲۷
شکل (۳-۶) : منحنی بار ۳۰
شکل (۴-۱) : فضای بهره‌برداری سیستم قدرت ۳۸
شکل (۴-۲) : فرآیند تقلیل فضای بهره‌برداری سیستم قدرت ۳۸
شکل (۴-۳) : توصیف کلی ارزیابی امنیت استاتیکی با استفاده از ابزار هوش مصنوعی ۳۹
شکل (۴-۴) : الگوی بار متناظر با وضعیت‌های حداکثر بارگذاری، میان‌باری و حداقل بارگذاری ۴۵
شکل (۴-۵) : اعمال روش تحلیل مولفه‌های اصلی کرنل ۴۹
شکل (۴-۶) : ساختار کلاسیک شبکه RBF ۵۲
شکل (۴-۷) : آمیخته شدن داده‌ها در ناحیه مرزی با یکدیگر و دشواری دسته‌بندی دقیق با استفاده از روش‌های کلاسیک ۵۳
شکل (۴-۸) : دسته‌بندی یک نمونه از داده‌های مصنوعی ۵۵
شکل (۴-۹) : پوشش منطقه‌ای هر نرون برمبنای حداکثر عضو ۵۷
شکل (۴-۱۰) : تغییرات تابع گوسین ۵۹
شکل (۴-۱۱) : ساختار شبکه ERBF که هر کلاس دارای نرون‌های مخصوص با دسته متناظرش می‌باشد ۶۰
شکل (۴-۱۲) : ساختار شبکه موجک عصبی تلفیقی ۶۲
شکل (۴-۱۳) : دیاگرامی از مدل تعلیم با سرپرستی برای رتبه‌بندی حوادث امنیتی ۶۵
شکل (۴-۱۴) : فلوچارت ارزیابی امنیت استاتیکی ۶۶
شکل (۴-۱۵) : متدلوژی بکارگرفته شده برای تولید داده‌های متناظر با سطوح امنیتی ۶۷
شکل (۴-۱۶) : ساختار سیستم قدرت نمونه ۱۴ باس IEEE ۶۸
شکل (۴-۱۷) : مجموع بار اکتیو و مجموع بار راکتیو در سیستم قدرت ۱۴ باس IEEE ۶۹
شکل (۴-۱۸) : سیستم قدرت ۳۰ باس IEEE ۷۷

شکل (۴-۱۹) : مجموع بار کل اکتیو و راکتیو در سیستم قدرت ۳۰ باس IEEE ۷۷
شکل (۴-۲۰) : وقوع اتفاقی حادثه بین دو باس ۱۲ و ۱۶ در سیستم قدرت ۳۰ باس IEEE ۸۰
شکل (۴-۲۱) : سیستم قدرت ۱۱۸ باس IEEE ۸۳
شکل (۴-۲۲) : وضعیت بارگذاری در سیستم قدرت نمونه ۱۱۸ باس IEEE ۸۳
شکل (۴-۲۳) : دیاگرام تک خطی از خط انتقال ۸۹
شکل (۴-۲۴) : وضعیت بارگذاری پیش‌بینی شده ۹۰
شکل (۴-۲۵) : وضعیت‌های بهره‌برداری که منجر به ناپایداری ولتاژ شده‌اند ۹۲
شکل (۴-۲۶) : تفکیک ناحیه ایمن از ناایمن با استفاده از الگوریتم ژنتیک ۹۲
شکل (۴-۲۷) : تفکیک ناحیه ایمن از ناایمن ۹۳

فهرست جداول

جدول (۳-۱) : سطوح امنیتی و شاخص امنیت ۳۰
جدول (۳-۲) : طبقه‌بندی سطوح امنیتی بر مبنای افت ولتاژ باس‌ها و اضافه بار خطوط ۳۱
جدول (۳-۳) : مقایسه بین رویکردهای کلاسیک و هوشمند در تحلیل حوادث ۳۱
جدول (۴-۱) : سطوح امنیتی برای طبقه‌بندی اضافه بارهای خطوط و شاخص اجرای ولتاژ ۴۳
جدول (۴-۲) : متغیرهای سیستم قدرت نمونه ۱۴ باس IEEE ۶۹
جدول (۴-۳) : متغیرهای انتخاب شده با استفاده از روش شاخص جداپذیری و ضریب همبستگی ۷۰
جدول (۴-۴) : متغیرهای انتخاب شده با استفاده از تکنیک فیشر ۷۰
جدول (۴-۵) : رتبه‌بندی شاخص عملکرد توان انتقالی در وضعیت‌های بارگذاری و حوادث مختلف ۷۲
جدول (۴-۶) : رتبه‌بندی شاخص عملکرد ولتاژ در وضعیت‌های بارگذاری متفاوت در سیستم قدرت ۱۴ باس استاندارد IEEE ۷۳
جدول (۴-۷) : رتبه‌بندی شاخص عملکرد ولتاژ نسبت به وقفه‌های خطوط انتقال، ژنراتورها و ترانس در سیستم قدرت ۱۴ باس IEEE ۷۴
جدول (۴-۸) : رتبه‌بندی شاخص عملکرد اضافه بار نسبت به وقفه های خطوط انتقال، ژنراتورها و ترانس در سیستم قدرت ۱۴ باس IEEE استاندارد ۷۵
جدول (۴-۹) : نتایج بدست آمده از رتبه‌بندی شدت تجاوز از محدودیت توان انتقالی برروی سیستم قدرت ۱۴ باس استاندارد IEEE ۷۶
جدول (۴-۱۰) : نتایج بدست آمده از رتبه‌بندی شدت تجاوز از محدودیت ولتاژ باس برروی سیستم قدرت ۱۴ باس استاندارد IEEE ۷۶
جدول (۴-۱۱) : متغیرهای سیستم قدرت نمونه ۳۰ باس IEEE ۷۶
جدول (۴-۱۲) : حوادث منجر به قطع بار در سیستم قدرت ۳۰ باس IEEE ۷۸
جدول (۴-۱۳) : رتبه‌بندی شاخص اجرای ولتاژ در وضعیت های بارگذاری متفاوت در سیستم قدرت ۳۰ باس استاندارد IEEE ۷۹
جدول (۴-۱۴) : رتبه‌بندی شاخص عملکرد توان انتقالی خطوط در وضعیت‌های بارگذاری متفاوت در سیستم قدرت ۳۰ باس استاندارد ۸۱
جدول (۴-۱۵) : نتایج بدست آمده از رتبه‌بندی شدت تجاوز از محدودیت ولتاژ باس برروی سیستم قدرت ۳۰ باس استاندارد IEEE ۸۱
جدول (۴-۱۶) : نتایج بدست آمده از رتبه‌بندی شدت تجاوز از محدودیت توان انتقالی برروی سیستم قدرت ۳۰ باس استاندارد IEEE ۸۲
جدول (۴-۱۷) : متغیرهای سیستم قدرت نمونه ۱۱۸ باس IEEE ۸۲
جدول (۴-۱۸) : حوادث منجر به قطع بار در سیستم قدرت ۱۱۸ باس IEEE ۸۴
جدول (۴-۱۹) : رتبه‌بندی شاخص عملکرد توان انتقالی خطوط در وضعیت‌های بارگذاری متفاوت در سیستم قدرت ۱۱۸ باس استاندارد ۸۴

جدول (۴-۲۰) : تغییرات شاخص عملکرد توان انتقالی با افزایش درجه توان ۸۵
جدول (۴-۲۱) : رتبه‌بندی شاخص عملکرد توان انتقالی خطوط در وضعیت‌های بارگذاری متفاوت به ازای افزایش ضریب توان M ۸۶
جدول (۴-۲۲) : نتایج بدست آمده از رتبه‌بندی شدت تجاوز از محدودیت ولتاژ باس برروی سیستم قدرت ۱۱۸ باس استاندارد IEEE ۸۷
جدول (۴-۲۳) : نتایج بدست آمده از رتبه‌بندی شدت تجاوز از محدودیت توان انتقالی برروی سیستم قدرت ۱۱۸باس استاندارد IEEE ۸۷
جدول (۴-۲۴) : طبقه‌بندی سطوح امنیتی بر مبنای معیار شاخص فروپاشی ولتاژ در سیستم قدرت ۳۰ باس استاندارد IEEE ۹۱
جدول (الف.۱) : بار پیک هفتگی به صورت درصدی از پیک سالانه ۱۰۰
جدول (الف.۲) : بار پیک روزانه به صورت درصدی از پیک هفتگی ۱۰۱
جدول (الف.۳) : بار پیک ساعتی به صورت درصدی از پیک روزانه ۱۰۱
جدول (ب.۱) : معماری شبکه عصبی بکار برده شده در ارزیابی امنیت استاتیکی سیستم قدرت ۱۴ باس IEEE ۱۰۲
جدول (ب.۲) : معماری شبکه عصبی بکار برده شده در ارزیابی امنیت استاتیکی سیستم قدرت ۳۰ باس IEEE ۱۰۳
جدول (ب.۳) : معماری شبکه عصبی بکار برده شده در ارزیابی امنیت استاتیکی سیستم قدرت ۱۱۸ باس IEEE ۱۰۳
جدول (ج.۱) : اطلاعات مربوط به باس سیستم قدرت ۱۴ باس IEEE ۱۰۴
جدول (ج.۲) : اطلاعات مربوط به واحدهای تولیدی سیستم قدرت ۱۴ باس IEEE ۱۰۴
جدول (ج.۳) : اطلاعات مربوط به خطوط انتقال سیستم قدرت ۱۴ باس IEEE ۱۰۵

فصل اول

پیشگفتار

۱-۱-مقدمه

کشورهای توسعه یافته در طی چند دهه‌ی گذشته به افزایش پر شتاب مصرف انرژی الکتریکی در بخش‌های صنعتی، تجاری و خانگی رو آورده‌اند. متقابلاً، شبکه‌های برق در سراسر دنیا با ساخت نیروگاه‌های متعدد و نصب هزاران کیلومتر خط توسعه داده شدند تا به انتقال و توزیع مقادیر انرژی الکتریکی جهت تامین مصرف کننده‌های خُرد بپردازند. سیستم‌های قدرت جدید به منظور افزایش قابلیت اطمینان و عملکرد اقتصادی یک سیر تکاملی را برای رسیدن به توپولوژی بهم پیوسته[1] تجربه نموده‌اند. افزایش ابعاد سیستم قدرت از یک سو و نیاز به پایش مستمر شبکه جهت بهره‌برداری ایمن از آن از سوی دیگر سبب شده است که مسئله ارزیابی امنیت سیستم با چالش‌های محاسباتی مواجه گردد. تغییر ساختار اقتصادی صنعت برق و ورود به فضای رقابتی نیز از زوایای دیگری اهمیت ارزیابی امنیت سیستم قدرت را دو چندان کرده است. بنابراین در سال‌های اخیر توسعه ابزارهای محاسباتی به منظور بهبود سرعت و دقت در ارزیابی امنیت سیستم مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. به ویژه آن که در چند سال اخیر برخی از کشورها پدیده خاموشی‌های گسترده را که خسارت‌های عظیمی را به دنبال داشته است، تجربه نموده-اند. بهره‌برداری از خطوط انتقال در نزدیکی حداکثر ظرفیت، پیر شدن بسیاری از تجهیزات سیستم‌های قدرت و آسیب‌پذیری این سیستم‌ها در برابر حملات خراب کارانه فیزیکی و سایبری نیز از جمله دیگر مواردی است که توجه محققین مسئله امنیت سیستم را جلب نموده است.

در چنین شرایطی، حوادث[2] بحرانی شامل از دست‌دادن ناگهانی یک یا چند خط انتقال، ژنراتور و یا ترکیبی از هر دو می‌تواند منجر به تجاوز از قیود امنیتی شبکه گردد و حتی حاشیه‌های پایداری را به مخاطره بیاندازد. وقوع این حوادث می‌تواند حوادث پشت‌سر هم گسترده‌ای[3] از خروج خطوط انتقال را به راه انداخته و در نهایت، منجر به فروپاشی و خاموشی بخش عظیمی از سیستم قدرت گردد. هنگامیکه یک حادثه بحرانی رخ می‌دهد، اپراتورها بدلیل کمبود زمان به منظور آگاهی از شرایط جدید، ممکن است تصمیمی را اتخاذ نمایند که در جهت ناایمن‌تر شدن سیستم عمل کند.

امنیت سیستم قدرت اغلب بوسیله‌ی شرایط محیطی مانند طوفان‌ها، رعد و برق‌ها و سایر حوادث طبیعی تهدید می‌شود. بنابراین، پیش‌بینی زمان و محل وقوع حوادث بر روی سیستم قدرت بسیار دشوار می‌باشد. با توجه به تاریخچه اتفاقات بوقوع پیوسته امنیتی، بیشترین خاموشی‌های گسترده از طریق ترکیبی از حوادث در مدت زمان اندک، بهمراه خطا در سیستم مانیتورینگ، نقص در سیستم حفاظتی، خطاهای انسانی و سایر عوامل بوقوع پیوسته

[1] - Highly Interconnected Topology
[2] -Contingency (Disturbance)
[3] - Wide Cascading Outage

است[۲]. به طور نمونه می‌توان به خاموشی که در آمریکای شمالی در ۱۴ آگوست ۲۰۰۳ رخ داد و منجر به قطع برق ۵۰ میلیون مشتری برای چندین روز گشت، اشاره کرد. این خاموشی مهم بوسیله تماس درخت با خطوط ۳۴۵ کیلوولت اتفاق افتاد که به تبع آن زیان اقتصادی زیادی را برای دولت آمریکا به همراه داشت [۳]. از اینرو، طراحی ابزارهای محاسباتی متناسب با شرایط جدید که بتوانند اپراتورهای شبکه را در تصمیم‌گیری و ارزیابی امنیت سیستم پشتیبانی نمایند، ضروری به نظر می‌رسد. خوشبختانه پیشرفت‌های اخیر در حوزه سیستم‌های هوشمند و افزایش سرعت محاسباتی رایانه‌ها شرایط را برای طراحی این ابزارها فراهم نموده است.

۱-۲- اهداف پایان‌نامه

از موضوعات مهمی که اپراتورها در بهره‌برداری زمان واقعی سیستم قدرت با آن مواجه می‌شوند، مسئله‌ی تخطی از حدود حرارتی (اضافه بار در خطوط انتقال) و تجاوز از محدوده ولتاژ باس‌ها پس از رویداد هر حادثه می‌باشد. در این پایان‌نامه قصد بر این است تا به طراحی ابزاری برای ارزیابی سریع و دقیق این دو موضوع امنیتی سیستم قدرت در شرایط وقوع حوادث ناگهانی پرداخته شود. به عبارت دیگر، هدف طراحی ابزاری محاسباتی است که بتواند درجه بحرانیت حوادثی که منجر به قرار گرفتن نقطه بهره‌برداری در ناحیه ناایمن می‌گردد را تخمین زند. بدین منظور در این پایان‌نامه، دو شبکه عصبی تابع پایه‌ای شعاعی و موجک عصبی برای ارزیابی زمان واقعی موضوعات امنیتی سیستم پیشنهاد می‌شوند. یکی از اجزای امنیت در بهره‌برداری ایمن سیستم قدرت بکارگیری کنترل پیشگیرانه است. در واقع طراحی کنترل پیشگیرانه یک جزء ضروری است که به موجب آن، امنیت سیستم قدرت حتی به ازای وقوع حوادث پرخطر حفظ می‌گردد. علاوه بر ارزیابی امنیت زمان واقعی سیستم قدرت، روش پیشنهادی به تعیین مرزهای امنیتی و پیدانمودن ناحیه ایمن برای سیستمی که می‌تواند در آن ناحیه مانور داده شود، پرداخته است. برخی سوالات اصلی که در زمینه ارزیابی امنیت بلادرنگ سیستم به کمک روش‌های هوشمند با آن مواجه هستیم عبارتند از:

۱- آیا شاخص‌ها و توابعی وجود دارند تا بتوان به کمک آن‌ها میزان درجه بحرانی بودن و نبودن یک حادثه را شناخت و به هریک از حوادث بسته به بزرگی آن‌ها مقدار مناسبی را نسبت داد؟

۲- آیا شبکه‌ی هوشمند قادر است با دقت مناسبی بر مبنای هر وضعیت بهره‌برداری و وقوع هر حادثه‌ای، درجه‌ی بحرانیت آن حادثه و سطوح امنیتی آن را ارزیابی نماید؟

۳- آیا از توانایی شبکه هوشمند با گسترده‌تر شدن سیستم قدرت و همچنین افزایش تعداد حوادث مورد ارزیابی قرار گرفته، کاسته نخواهد شد؟

۴- با توجه به اینکه شبکه هوشمند ابزاری است که بر مبنای الگوهای ورودی، استنتاج می‌نماید، آیا می‌توان الگوهای ورودی که قابلیت ارزیابی امنیت موثرتری برای شبکه هوشمند دارند را انتخاب نمود؟ و آیا گستردگی سیستم قدرت می‌تواند در تعیین بهینه این الگوها تاثیری بگذارد؟

سوالاتی که در بالا اشاره گردید، پرسش‌های اساسی در زمینه ارزیابی امنیت سیستم قدرت می‌باشند که هر روش پیشنهادی برمبنای شبکه‌های هوشمند بایستی به درستی به تک تک آن‌ها پاسخ دهد.

با توجه به اینکه رویکرد این پایان‌نامه ارزیابی امنیت استاتیکی سیستم قدرت می‌باشد، در ابتدا شاخص‌ها و توابعی که در ارزیابی امنیت سیستم قدرت استفاده می‌شوند، مورد بررسی قرار می‌گیرند. این شاخص‌ها که به کمک آن‌ها می‌توان عملکرد هر وضعیت بهره‌برداری را تخمین زد، میزانی از درجه بحرانیت حوادث اتفاقی را در هر وضعیت بهره‌برداری در بردارد.

در این پایان‌نامه، روشی جدید برای تعلیم شبکه‌های عصبی شعاعی برای مسائل طبقه‌بندی ارائه شده است. این روش بر اساس تلفیقی از چند روش ابتکاری[1] است که هدف آن انتخاب شعاع و مرکز نرون‌های لایه مخفی است به گونه‌ای که با تعداد نرون‌های حداقل بتوان به حداکثر کارآیی رسید و در عین حال الگوریتم تعلیم ساده و سریع باقی بماند. علاوه بر این، افزایش تعداد الگوهای تعلیم شبکه عصبی که با گسترده‌تر شدن سیستم‌های قدرت در ارتباط است موجب کاهش سرعت و دقت شبکه عصبی نخواهد شد. الگوریتم تعلیم یک روش تک مرحله‌ای است که همگرایی آن تضمین شده است. روش تضمین می‌کند که داده‌های آموزش با دقت ۱۰۰٪ تعلیم یابند.

در ارزیابی امنیت استاتیکی یک سیستم، اندازه‌گیری یا تخمین متغیرهای متناظر با تحلیل حالت دائمی سیستم مانند اندازه و فاز ولتاژ باس‌ها، توان انتقالی اکتیو و راکتیو خطوط، بارهای اکتیو و راکتیو و توان‌های تولیدی اکتیو و راکتیو ژنراتورها ضروری می‌باشد. تعداد این متغیرها به عنوان مثال برای شبکه قدرت ۱۴ باس IEEE مجموعا ۹۷ متغیر و برای شبکه قدرت ۳۰ باس IEEE مجموعاً ۱۹۴متغیر می‌باشد، که با توسعه شبکه قدرت مجموع این متغیرها نیز بسیار زیادترخواهد شد. این متغیرها، که می توان از آن‌ها بعنوان ویژگی برای ورودی شبکه هوشمند یاد کرد، می‌تواند با افزایش ابعاد شبکه قدرت عملا موجب ناکارآمدی در ارزیابی سریع سیستم قدرت گردد. روشی که در این پایان‌نامه برای انتخاب ویژگی[2] بکار برده می‌شود توانایی شناسایی آن دسته از متغیرهایی است که بیشترین قابلیت تفکیک‌پذیری برای شبکه هوشمند فراهم می‌کنند، را دارد و تنها این دسته از مشخصه‌ها برای تعلیم شبکه هوشمند استفاده می‌شوند. به این منظور، با این روش به متغیرهایی از سیستم قدرت که تاثیر بیشتری در تعیین نمودن ایمنی و یا ناایمنی شبکه قدرت را دارا می‌باشند، ضرایب وزنی بیشتری داده می‌شود. بنابراین، علاوه بر کاهش

[1] -Heuristic
[2] -Feature Selection

در ابعاد ورودی شبکه هوشمند، متغیرهای ورودی دارای ضرایب وزنی متفاوتی خواهند بود که این ضرایب، میزان تاثیر آن‌ها را در تعیین ایمنی و ناایمنی سیستم قدرت نشان می‌دهد. این روش بر مبنای تحلیل مؤلفه‌های اصلی[1] می‌باشد، که روشی قدرتمند در استخراج ساختارها و الگوهای موجود در داده‌ها است.

روش پیشنهادی نه تنها مشکلات امنیتی سیستم قدرت به ازای وقوع حوادث را در وضعیت بهره‌برداری زمان غیرواقعی آدرس‌دهی می‌کند، بلکه دارای قابلیت ارزیابی امنیت سیستم در وضعیت‌های بهره‌برداری که هنوز به وقوع نپیوسته‌اند نیز می‌باشد. رویکرد این پایان‌نامه انتخاب حادثه از میان مجموعه‌ای از حوادث نمی‌باشد، بلکه به کمک روش ارائه شده به تحلیل تمامی حوادث N-1 ممکن بر روی امنیت سیستم قدرت می‌پردازد. روش پیشنهادی برای ارزیابی امنیت استاتیکی سیستم‌های قدرت متفاوت با توپولوژی‌های متفاوت شامل سیستم قدرت ۱۴ باس نمونه IEEE، سیستم قدرت ۳۰ باس نمونه IEEE و سیستم قدرت ۱۱۸ باس نمونه IEEE مورد آزمایش قرار می‌گیرد و نتایج آن با چند روش هوشمند و کلاسیک دیگر مقایسه می‌گردد.

۱-۳- ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه علاوه بر فصل پیشگفتار، شامل چهار فصل دیگر می‌باشد که به شرح زیر می‌باشند:

شناخت دقیق مفاهیم امنیت سیستم جهت ارزیابی و کنترل پیشگیرانه امنیت سیستم قدرت، لازم و ضروری است. بنابراین، در فصل دوم مفاهیم فوق از جمله سطوح بهره‌برداری سیستم قدرت، روش‌های ارزیابی امنیت، انواع کنترل‌های سیستم قدرت و اصول کلی ارزیابی هوشمند امنیت سیستم قدرت تشریح خواهد شد.

در فصل سوم، مقالات معتبر علمی که در زمینه ارزیابی امنیت استاتیکی سیستم قدرت منتشر شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این فصل به تشریح مقالات مربوط به ارزیابی امنیت کلاسیک سیستم قدرت و همچنین ارزیابی امنیت سیستم به کمک رویکرد شبکه‌های هوشمند پرداخته شده است.

فصل چهارم به تشریح شاخص‌هایی که میزان درجه بحرانیت حوادث را منعکس می‌کنند، مدلسازی بار، روش انتخاب ویژگی، ساختار شبکه‌های عصبی پیشنهادی و تجزیه و تحلیل نتایج عددی پرداخته است.

در فصل پنجم، نتایج کلی حاصل از مطالعات انجام شده در بحث ارزیابی امنیت استاتیکی زمان واقعی و کنترل پیشگیرانه بیان شده است. در انتها نیز، پیشنهاداتی برای انجام مطالعات آتی در این زمینه مطرح شده است.

[1] - Principle Component Analysis

فصل دوم

مفاهیم امنیت در شبکه قدرت