بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه بیرجند

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت

ارائه یک طرح جامع حفاظتی برای خطوط انتقال قدرت در برابر ضربات مستقیم صاعقه با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی

مجتبی رسولی

استاد راهنما:

دکتر رضا شریعتی نسب

تابستان ۱۳۹۳

تأییدیه هیات داوران

(برای پایان‌نامه)

یک نسخه اصل فرم مربوطه

تقدیم به

روح پاک پدرم که عالمانه به من آموخت چگونه در عرصه زندگی، ایستادگی را تجربه نمایم

و تقدیم به

مادرم، دریای بی کران فداکاری و عشق که وجودم برایش همه رنج بود و وجودش برایم همه مهر

تشکر و قدردانی

نهال را باران باید

تا بشوید غبار نشسته بر برگهایش

و سیرابش کند از آب حیات...

و آفتاب باید

تا بتاباند نیرو را و محکم کند

شاخه های تازه روییده را...

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند.

بدون شک جایگاه و منزلت استاد، اجّل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه ی او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگاریم؛ اما از آنجایی که تجلیل از استاد، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تامین می کند و سلامت امانت هایی را که به دستش سپرده اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه

از مادر عزیزم... این برترین استاد زندگی... که همواره بر کوتاهی و درشتی من، قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلت هایم گذشته و در تمام عرصه های زندگی یار و یاوری بی چشم داشت برای من بوده است؛ از صمیم قلب تشکر می نمایم و خاک پایش را برای تمام عمر سرمه چشمانم قرار می دهم...

از استاد با کمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر شریعتی نسب که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند؛ کمال تشکر و قدردانی را دارم...

باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید...

چکیده

صاعقه یکی از مهم‌ترین پدیده‌های جوی است که هرساله به‌دلیل برخورد به خطوط انتقال باعث بروز خاموشی در شبکه قدرت می‌شود. اهمیت عدم قطعی شبکه از دیدگاه شرکت‌های برق منجر شده است که مطالعات بسیاری پیرامون موضوع صاعقه و اثرات آن بروی شبکه انتقال انجام گیرد؛ اما متأسفانه تاکنون یک طرح جامع حفاظتی در برابر ضربات مستقیم صاعقه برای خطوط انتقال ارائه نشده است. در این پایان‌نامه برای اولین بار سعی بر آن شده است که با ارائه یک طرح جامع حفاظتی و درعین‌حال کاربردی، بهترین گزینه‌های حفاظتی در برابر ضربات صاعقه به بهره‌بردار ارائه شود. بدین منظور ابتدا با استفاده از روش مونت‌کارلو پارامترهای اصلی صاعقه تولید شده است، سپس برای اولین بار با طراحی یک مدل الکتروهندسی جامع، مکان دقیق برخورد ضربات غیرعمودی صاعقه بروی خطوط انتقال مشخص شده است. در ادامه با ارائه یک روش جدید، فرآیند مدل‌سازی منبع جریان صاعقه بهبود یافته است. در این مرحله با استفاده از زبان برنامه‌نویسی فرترن و تکنیک‌های مدل‌سازی، تمامی اجزای شبکه مطابق با استانداردها و مدل‌های معتبر علمی در محیط نرم‌افزار ATP شبیه‌سازی شده است. سپس با تعریف سناریوهای حفاظتی مختلف و لینک کردن دو نرم‌افزار ATP و MATLAB با یکدیگر، تنش‌های ولتاژی و نرخ قطعی شبکه براثر اعمال صاعقه‌های تولیدی به هرکدام از سناریوهای حفاظتی محاسبه می‌شود. در مرحله بعد با توجه به شاخص‌های فنی و اقتصادی مهم از منظر بهره‌بردار، برای نخستین بار یک تابع چندهدفه بر روی خروجی‌های شبکه طراحی گردیده است. در این تابع تمامی عوامل تأثیرگذار بر روی شاخص‌های نرخ قطعی، هزینه و عمر تجهیزات لحاظ شده است. در انتها برای حل مسئله چندهدفه فوق، از الگوریتم NSGA-II به‌عنوان یکی از کارآمدترین روش‌ها برای حل مسائل چندهدفه گسسته استفاده شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده این موضوع است که روش کلی استفاده شده در این رساله با ارائه چندین طرح حفاظتی متفاوت و درعین‌حال برتر به بهره‌بردار، یک دید کلی از طرح‌های بهینه را برای وی ایجاد می‌کند؛ درنتیجه با توجه به اهمیت بیشتر هرکدام از توابع هدف، می‌تواند بهترین طرح حفاظتی را انتخاب کند.

کلیدواژه‌ها: الگوریتم NSGA-II، بهینه‌سازی چندهدفه، ضربات غیرعمودی صاعقه، مدل الکتروهندسی جامع.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست علایم و نشانه‌ها ..... و

فهرست جدول‌ها ..... ز

فهرست شکل‌ها ..... ط

فصل ۱- مقدمه ۱

۱-۱- پیشگفتار ۱

۱-۲- سوابق تحقیق ۲

۱-۳- روش پیشنهادی در این پایان‌نامه ۴

۱-۴- مروری بر پایان‌نامه ۵

فصل ۲- مفاهیم اساسی مورد نیاز ۷

۲-۱- مقدمه ۷

۲-۲- صاعقه و نحوه پیدایش آن ۸

۲-۲-۱- پارامترهای اصلی در بیان شکل موج صاعقه ۹

۲-۲-۲- توزیع آماری پارامترهای صاعقه ۱۰

۲-۲-۲-۱- ضریب همبستگی پارامترهای صاعقه ۱۱

۲-۲-۲-۲- مقادیر استاندارد برای پارامترهای آماری جریان اولین ضربه منفی ۱۱

۲-۳- کرونیک ۱۲

۲-۳-۱- سطح کرونیک ۱۲

۲-۳-۱-۱- سطح کرونیک روزانه ۱۲

۲-۳-۱-۲- سطح کرونیک ساعتی ۱۲

۲-۳-۲- منحنی ایزوکرونیک ۱۲

۲-۴- استقامت عایقی ۱۴

۲-۴-۱- استقامت عایقی پایه موج کلیدزنی(BSL) ۱۴

۲-۴-۲- استقامت عایقی پایه موج صاعقه (BIL) ۱۴

۲-۴-۳- ولتاژ شکست بحرانی (CFO) ۱۵

۲-۴-۳-۱- شرایط جوی استاندارد ۱۶

۲-۴-۳-۲- تأثیر تغییر شرایط استاندارد بر CFO ۱۶
۲-۵- راه‌کارهای حفاظتی در برابر ضربات صاعقه ۱۸
۲-۵-۱- سیم گارد ۱۹
۲-۵-۲- برقگیر ۱۹
۲-۵-۳- کاهش مقاومت پای دکل ۱۹
۲-۶- تخلیه‌های ناشی از اصابت صاعقه ۱۹
۲-۶-۱- تخلیه الکتریکی ناشی از برخورد مستقیم صاعقه به هادی فاز ۲۰
۲-۶-۲- تخلیه الکتریکی ناشی از برخورد مستقیم صاعقه به گارد ۲۰
۲-۶-۳- تخلیه الکتریکی ناشی از برخورد صاعقه به شبکه انتقال ۲۱
۲-۷- تنش‌های ولتاژی و توابع ریسک ۲۱
۲-۸- شبیه‌سازی مونت‌کارلو ۲۳
فصل ۳- ضربات غیرعمودی صاعقه ۲۶
۳-۱- مقدمه ۲۶
۳-۲- فاصله برخورد ۲۷
۳-۳- ناحیه برخورد احتمالی ۲۹
۳-۴- مدل الکتروهندسی ۲۹
۳-۴-۱- محاسبه D_c و D_g ۳۱
۳-۴-۲- جریان هم‌پوشانی I_{max} ۳۲
۳-۵- ضربات غیرعمودی صاعقه ۳۳
۳-۶- تعیین مکان برخورد ضربات غیرعمودی صاعقه ۳۴
۳-۷- سناریوی اول : وجود سیم گارد ۳۵
۳-۷-۱- جریان‌های کمتر از I_{max} در حضور سیم گارد ۳۵
۳-۷-۱-۱- حالت اول: $\mathbf{y} \le (S_g/2 + D_g)$ ۳۶
۳-۷-۱-۲- حالت دوم: $(S_g/2 + D_g) < \mathbf{y} \le (S_g/2 + D_g + D_C)$ ۳۷
۳-۷-۱-۳- حالت سوم: $\mathbf{y} > (S_g/2 + D_g + D_C)$ ۳۹
۳-۷-۲- جریان‌های بیشتر از I_{max} در حضور سیم گارد ۴۰
۳-۷-۲-۱- حالت اول : $\mathbf{y} \le \left(S_g/2 + D_g'\right)$ ۴۱
۳-۷-۲-۲- حالت دوم: $\mathbf{y} > \left(S_g/2 + D_g'\right)$ ۴۳
۳-۸- عدم وجود سیم گارد ۴۴

۳-۸-۱- مدل الکتروهندسی طراحی شده برای دکل ۴۴
۳-۸-۱-۱- حالت اول: $\mathbf{y} < (S_{ph} + R_{tower})$ ۴۶
۳-۸-۱-۲- حالت دوم: $\mathbf{y} \geq (S_{ph} + R_{tower})$ ۴۷
۳-۸-۲- مدل الکتروهندسی طراحی شده برای فاز ۴۷
۳-۸-۲-۱- مدل اول : $y < (S_{ph}/2)$ ۴۸
۳-۸-۲-۲- حالت دوم: $(S_{ph}/2) \leq y < ((S_{ph}/2) + D_{ph})$ ۵۰
۳-۸-۲-۳- حالت سوم : $y \geq ((S_{ph}/2) + D_{ph})$ ۵۱
۳-۹- نتیجه‌گیری و فلوچارت کلی مدل الکتروهندسی ارائه‌شده ۵۳

فصل ۴- نحوه شبیه‌سازی شبکه نمونه در نرم‌افزار ATP ۵۵

۴-۱- مقدمه ۵۵
۴-۲- منبع جریان صاعقه ۵۵
۴-۳- مدل سیستم مقاومت پای دکل ۵۹
۴-۴- مدل دکل ۶۰
۴-۵- مدل زنجیره مقره ۶۱
۴-۶- مدل سازی برقگیر ۶۳
۴-۷- محاسبه تنشهای انرژی ایجادشده بروی برقگیر ۶۶
۴-۸- مشخصات شبکه تحت مطالعه ۶۷
۴-۹- سناریوهای حفاظتی تعریف شده ۶۹
۴-۹-۱- سناریوی اول: وجود سیم گارد - عدم وجود برقگیر ۶۹
۴-۹-۲- سناریوی دوم: وجود سیم گارد - وجود برقگیر ۶۹
۴-۹-۳- سناریوی سوم: عدم وجود سیم گارد – عدم وجود برقگیر ۷۰
۴-۹-۴- سناریوی چهارم: عدم وجود سیم گارد –وجود برقگیر ۷۰
۴-۱۰- نتیجه‌گیری ۷۱

فصل ۵- تابع هدف و الگوریتم مورد استفاده ۷۲

۵-۱- مقدمه ۷۲
۵-۲- تابع هدف ۷۲
۵-۲-۱- شاخص نرخ قطعی ۷۲
۵-۲-۲- شاخص اقتصادی ۷۴
۵-۲-۲-۱- هزینه سرمایه‌گذاری ۷۴

۵-۲-۲-۲- هزینه قطعی ۷۵
۵-۲-۲-۳- هزینه های جزئی ۷۷
۵-۲-۳- شاخص عمر ۷۷
۵-۲-۳-۱- دسته اول: عدم حضور برقگیر ۷۸
۵-۲-۳-۲- دسته دوم: حضور برقگیر ۷۸
۵-۳- الگوریتم NSGA-II ۸۰
۵-۳-۱- الگوریتم مرتب‌سازی غیر مغلوب (NS) ۸۲
۵-۳-۲- فاصله ازدحامی ۸۴
۵-۳-۳- روند کلی اجرای الگوریتم NSGA-II ۸۵
۵-۳-۳-۱- تقاطع ۸۶
۵-۳-۳-۲- جهش ۸۷
۵-۴- نتیجه‌گیری کلی ۸۸
فصل ۶- نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام‌گرفته ۸۹
۶-۱- مقدمه ۸۹
۶-۲- تولید پارامترهای اصلی صاعقه ۸۹
۶-۳- زاویه برخورد ۹۱
۶-۴- مکان نهایی برخورد صاعقه (برخورد به گارد، دکل و سیم فاز) ۹۳
۶-۴-۱- حضور سیم گارد ۹۴
۶-۴-۱-۱- فواصل برخورد به هادی و زمین ۹۴
۶-۴-۱-۲- مشخصات صاعقه‌های برخوردی به فاز، گارد و زمین ۹۵
۶-۴-۲- عدم حضور سیم گارد ۹۸
۶-۵- تغییرات CFO ۱۰۲
۶-۶- اضافه ولتاژها و نرخ قطعی‌ها ۱۰۵
۶-۷- ریسک عایقی ۱۱۴
۶-۸- نتایج حاصل از پیاده‌سازی تابع هدف در الگوریتم NSGA-II ۱۱۷
۶-۸-۱- حالت اول ۱۲۰
۶-۸-۲- حالت دوم ۱۲۰
فصل ۷- نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۱۲۱
۷-۱- نتیجه‌گیری ۱۲۱

۷-۲- پیشنهادها ۱۲۴

ضمیمه أ –نحوه مدل‌سازی مقاومت پای دکل با استفاده از زبان فرترن و تکنیک‌های مدل‌سازی..... ۱۲۵

ضمیمه ب –مدل‌سازی انجام‌شده برای مدل LPM با استفاده از زبان فرترن و تکنیک‌های مدل‌سازی ... ۱۲۶

ضمیمه ج – شبیه سازی برقگیر PEXLIMQ در ATP..... ۱۲۷

ضمیمه د – مدل‌سازی بلوک محاسبه کننده انرژی برقگیر با استفاده از زبان فرترن و تکنیک‌های مدل‌سازی..... ۱۲۸

فهرست مراجع..... ۱۲۹

واژه نامه فارسی به انگلیسی..... ۱۳۲

واژه‌نامه انگلیسی به فارسی..... ۱۳۶

فهرست علایم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
Basic Lightning Impulse Insulation Level	BIL
Basic Switching Impulse Insulation Level	BSL
Critical Flashover Voltage	CFO
Electro Geometric Model	EGM
Shielding Failure	SF
Back Flashover	BF
Induced Flashover	IF
Shielding Failure Rate	SFR
Shielding Failure Flashover Rate	SFFOR
Back Flashover Rate	BFR
Lightning Flashover Rate	LFOR
Standard CFO	CFO_S
Non-Standard CFO	CFO_A

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۲-۱ : مقادیر استاندارد برای پارامترهای صاعقه. ۱۱

جدول ۲-۲ : اطلاعات مرتبط با منحنی ایزوکرونیک ایران. ۱۳

جدول ۲-۳ : پارامترهای m و w برحسب G_0 [۲۳]. ۱۷

جدول ۲-۴ : روابط پیشنهادی برای محاسبه میانگین و انحراف معیار تابع توزیع پارامترهای δ و δH_c [۱۷]. ۱۸

جدول ۳-۱ : روابط پیشنهادی برای فاصله برخورد. ۲۸

جدول ۴-۱ : مقادیر بدست آمده از روش پیشنهادی برای شکل موج استاندارد. ۵۷

جدول ۴-۲: مشخصه غیرخطی برای A_0 و A_1 . ..... ۶۴

جدول ۴-۳: مشخصات اصلی برقگیر استفاده شده. ۶۵

جدول ۴-۴: مقادیر اولیه محاسبه‌شده برای المان‌های مدل IEEE ۶۶

جدول ۴-۶: مشخصات فیزیکی هادی‌ها. ۶۷

جدول ۴-۵: مشخصات نواحی موردنظر. ۶۸

جدول ۵-۱: مقادیر N_g برای نواحی شبکه موردنظر (شکل ۴-۷). ۷۴

جدول ۵-۲: توان عبوری از خطوط در شرایط عادی. ۷۵

جدول ۵-۳: متوسط مدت‌زمان خاموشی برای نواحی شبکه. ۷۶

جدول ۶-۱: مشخصات به‌دست‌آمده برای فواصل برخورد به هادی و زمین. ۹۵

جدول ۶-۲: مشخصات صاعقه‌های برخوردی به شبکه انتقال در حضور سیم گارد. ۹۵

جدول ۶-۳: مشخصات صاعقه‌های برخوردی به شبکه انتقال در عدم حضور سیم گارد. ۹۹

جدول ۶-۴: میانگین تغییرات طول عایقی زنجیره مقره برای هر ناحیه. ۱۰۴

جدول ۶-۵: مشخصات اضافه‌ولتاژهای ایجادشده بروی فاز A و C در سناریوی اول حفاظتی(حضور سیم گارد-عدم حضور برقگیر) ۱۰۷

جدول ۶-۶: مشخصات اضافه‌ولتاژهای ایجادشده بروی فاز A و C در سناریوی دوم حفاظتی (حضور سیم گارد- حضور برقگیر). ۱۰۸

جدول ۶-۷: مشخصات اضافه‌ولتاژهای ایجاد شده بروی فاز A و C در سناریوی سوم حفاظتی (عدم حضور سیم گارد-عدم حضور برقگیر). ۱۰۹

جدول ۶-۸: مشخصات اضافه‌ولتاژهای ایجاد شده بروی فاز A و C در سناریوی چهارم حفاظتی (عدم حضور سیم گارد- حضور برقگیر). ۱۱۰

جدول ۶-۹: نرخ قطعی‌های به وجود آمده بر روی نواحی مختلف شبکه در سناریوهای اول و دوم حفاظتی. ۱۱۱

جدول ۶-۱۰: نرخ قطعی‌های به وجود آمده بر روی نواحی مختلف شبکه در سناریوهای سوم و چهارم حفاظتی. ۱۱۲

جدول ۶-۱۱: ریسک عایقی تجهیزات فاز A و C در صورت استفاده از سناریوی اول حفاظتی. ۱۱۵

جدول ۶-۱۲: ریسک عایقی برقگیر فاز A و C در صورت استفاده از سناریوی دوم حفاظتی. ۱۱۵
جدول ۶-۱۳: ریسک عایقی تجهیزات فاز A و C در صورت استفاده از سناریوی سوم حفاظتی. ۱۱۶
جدول ۶-۱۴: ریسک عایقی برقگیر فاز A و C در صورت استفاده از سناریوی چهارم حفاظتی. ۱۱۶
جدول ۶-۱۵: مقادیر توابع هدف برای تعدادی از کروموزوم‌های نامغلوب. ۱۱۹
جدول ۶-۱۶: مشخصات کروموزوم‌های بهینه در حالت اول ۱۲۰
جدول ۶-۱۷: مشخصات توابع هدف کروموزوم ۱۷ .....۱۲۱

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱ : تصویری گرافیکی از نحوه بروز صاعقه و تخلیه بار الکتریکی. ۸
شکل ۲-۲ : شکل موج جریان صاعقه برای یک موج نمونه. ۹
شکل ۲-۳ : منحنی ایزوکرونیک کره زمین. ۱۳
شکل ۲-۴ : منحنی ایزوکرونیک ایران [۲۱]. ۱۳
شکل ۲-۵ : منحنی استقامت عایقی. ۱۵
شکل ۲-۶ : منحنی احتمال شکست ۲۲
شکل ۲-۷ : توابع توزیع و چگالی احتمال استقامت تجهیزات و اضافه ولتاژها در شبکه و مقدار ریسک .۲۳
شکل ۳-۱: مفهوم فاصله برخورد [۳۳]. ۲۷
شکل ۳-۲: ناحیه برخورد احتمالی. ۲۹
شکل ۳-۳: تیپ دکل شبکه موردنظر. ۳۰
شکل ۳-۴: مدل الکتروهندسی اولیه. ۳۰
شکل ۳-۵: افزایش جریان صاعقه به مقدار I_{max} و صفر شدن مقدار D_c [۳۹]. ۳۲
شکل ۳-۶ : منحنی توزیع زاویه برخورد برای مقادیر مختلف m [۱۱]. ۳۴
شکل ۳-۷ : تصویر سه بعدی از فضای ایجاد شده بروی خطوط انتقال برای جریان های کمتر از جریان هم‌پوشانی در حضور سیم گارد. ۳۵
شکل ۳-۸ : مدل الکتروهندسی طراحی‌شده برای حالت اول- جریان‌های کمتر از جریان هم‌پوشانی. ۳۶
شکل ۳-۹ : مدل الکتروهندسی طراحی‌شده برای حالت دوم- جریان‌های کمتر از جریان هم‌پوشانی. ... ۳۸
شکل ۳-۱۰ : مدل الکتروهندسی طراحی‌شده برای حالت سوم- جریان‌های کمتر از جریان هم‌پوشانی. ۳۹
شکل ۳-۱۱: تصویر سه بعدی از فضای ایجاد شده بروی خطوط انتقال برای جریان های کمتر از جریان هم‌پوشانی در حضور سیم گارد. .. ۴۱
شکل ۳-۱۲ : مدل الکتروهندسی طراحی‌شده برای حالت اول- جریان‌های بزرگ‌تر از جریان هم‌پوشانی. ۴۲
شکل ۳-۱۳ : مدل الکتروهندسی طراحی‌شده برای حالت دوم- جریان‌های بزرگ‌تر از جریان هم‌پوشانی..... ۴۳
شکل ۳-۱۴: نمای شماتیکی از قسمت بالای دکل تحت مطالعه برای طراحی ناحیه برخورد به دکل..... ۴۵
شکل ۳-۱۵: تصویر سه بعدی از فضای برخورد ایجاد شده بروی دکل‌ها و فازها - عدم حضور گارد..... ۴۵
شکل ۳-۱۶: تصویر سه بعدی از فضای ایجاد شده بروی خطوط انتقال در عدم حضور سیم گارد. ۴۸
شکل ۳-۱۷ : حالت اول از مدل الکتروهندسی طراحی شده برای تشخیص اصابت احتمالی به فاز..... ۴۹

شکل ۳-۱۸ : حالت دوم از مدل الکتروهندسی طراحی‌شده برای تشخیص اصابت احتمالی به فاز. ۵۱
شکل ۳-۱۹ : حالت سوم از مدل الکتروهندسی طراحی شده برای تشخیص اصابت احتمالی به فاز..... ۵۲
شکل ۳-۲۰: فلوچارت کلی مدل الکتروهندسی طراحی‌شده..... ۵۴
شکل۴-۱: شکل موج خروجی از منبع جریان صاعقه با روش پیشنهادی و هیلدر..... ۵۸
شکل۴-۲: مدل چندطبقه برای یک دکل نمونه..... ۶۰
شکل۴-۳: شعاع و ارتفاع معادل برای دکل ۶۱
شکل ۴-۴: شماتیک ظاهری مدل LPM ۶۲
شکل ۴-۵: مدل مداری استفاده شده برای برقگیر ۶۳
شکل ۴-۶: شمای فیزیکی از برقگیر PEXLIM Q ۶۵
شکل ۴-۷: شبکه انتقال تحت آزمایش ۶۷
شکل ۴-۸: نحوه قرارگیری برقگیر PEXLIM Q و سیم گارد..... ۷۰
شکل ۵-۱: تصویر ماهواره‌ای از شبکه انتقال تحت مطالعه..... ۷۶
شکل ۵-۲: نمودار تفهیمی پیرامون موضوع غلبه..... ۸۲
شکل ۵-۳: شماتیکی از رتبه‌بندی اعضای کل جمعیت با استفاده از الگوریتم NS..... ۸۳
شکل ۵-۴: مفهوم فاصله ازدحامی برای عضوی مانند i..... ۸۴
شکل ۵-۵: فلوچارت الگوریتم NSGA-II ۸۵
شکل ۵-۶: ترکیب دونقطه‌ای..... ۸۶
شکل ۵-۷: مکانیسم ادغام، مرتب سازی و انتخاب جمعیت جدید در NSGA-II..... ۸۷
شکل ۶-۱: فراوانی مقادیر به‌دست‌آمده برای جریان پیک با استفاده از روش مونت‌کارلو..... ۹۰
شکل ۶-۲: فراوانی مقادیر به‌دست‌آمده برای زمان پیشانی با استفاده از روش مونت‌کارلو..... ۹۰
شکل ۶-۳: فراوانی مقادیر به‌دست‌آمده برای زمان پشت موج با استفاده از روش مونت‌کارلو..... ۹۱
شکل ۶-۴: فراوانی مقادیر به‌دست‌آمده برای زاویه برخورد..... ۹۲
شکل ۶-۵: فراوانی نقاط انتخابی در مختصات X..... ۹۳
شکل ۶-۶: فراوانی نقاط انتخابی در مختصات Y..... ۹۳
شکل ۶-۷: فراوانی مقادیر به‌دست‌آمده برای فاصله برخورد به هادی..... ۹۴
شکل ۶-۸: فراوانی مقادیر به‌دست‌آمده برای فاصله برخورد به زمین..... ۹۵
شکل ۶-۹: فراوانی توزیع I_p برای ضربات برخوردی به فاز A..... ۹۷
شکل ۶-۱۰: فراوانی توزیع I_p برای ضربات برخوردی به فاز C..... ۹۷

شکل ۶-۱۱: فراوانی توزیع I_p برای ضربات برخوردی به گارد ۱. ..... ۹۷
شکل ۶-۱۲: فراوانی توزیع I_p برای ضربات برخوردی به گارد ۲. ..... ۹۸
شکل ۶-۱۳: فراوانی توزیع I_p برای ضربات برخوردی به زمین. ۹۸
شکل ۶-۱۴: فراوانی مقادیر بدست آمده برای فاصله برخورد به دکل. ۹۹
شکل ۶-۱۵: فراوانی توزیع I_p برای ضربات برخوردی به فاز A. ۱۰۱
شکل ۶-۱۶: فراوانی توزیع I_p برای ضربات برخوردی به فاز B. ۱۰۱
شکل ۶-۱۷: فراوانی توزیع I_p برای ضربات برخوردی به فاز C. ۱۰۱
شکل ۶-۱۸: فراوانی توزیع I_p برای ضربات برخوردی به دکل. ۱۰۲
شکل ۶-۱۹: فراوانی توزیع I_p برای ضربات برخوردی به زمین. ۱۰۲
شکل ۶-۲۰: مقادیر میانگین CFO غیراستاندارد برای کلیه نواحی شبکه تحت مطالعه. ۱۰۳
شکل ۶-۲۱: فراوانی CFO های تولیدی برای ناحیه ۱ با استفاده از توزیع ویبال. ۱۰۴
شکل ۶-۲۲: فراوانی مقاومت‌های تولیدی برای ناحیه ۱ با استفاده از توزیع نرمال. ۱۰۵
شکل ۶-۲۳: توزیع تجمعی اضافه‌ولتاژهای صاعقه(سناریوی سوم-ناحیه اول). ۱۱۴
شکل ۶-۲۴: تصویری سه‌بعدی از جبهه پارتو به‌دست‌آمده به‌وسیله الگوریتم NSGA-II ۱۱۸
شکل ۶-۲۵ : طرح حفاظتی پیشنهاد شده توسط کروموزوم ۷۳ برای تمام نواحی شبکه ۱۱۸
شکل ۶-۲۶ : طرح حفاظتی پیشنهادی مرتبط با کروموزوم‌های برتر حالت اول ۱۲۰
شکل ۶-۲۷ : طرح پیشنهادی کروموزوم ۱۷ ..... ۱۲۱

فصل ۱– مقدمه

۱–۱– پیشگفتار

از زمان کشف انرژی الکتریکی تا به امروز، اهمیت برق در زندگی بشر روزبه‌روز در حال افزایش است. امروزه بیش از هر زمان دیگری وابستگی انسان به این انرژی به‌دلیل رشد سریع و صنایعی که تماماً وابسته به برق هستند، بسیار محسوس شده است؛ به‌نحوی‌که می‌توان آن را به‌عنوان یکی از ارکان اصلی زندگی جوامع بشری دانست. با توجه به این موضوع که سهم زیادی از انرژی الکتریکی موردنیاز، توسط نیروگاه‌های بزرگ تولید می‌شود و همچنین به‌دلیل مشکلات فنی و اقتصادی، فاصله بین منابع تولیدی نیرو با بارهای موردنظر زیاد بوده که درنتیجه برای انتقال برق تولیدی، مبحث سیستم‌های انتقال به وجود می‌آید. به‌دلیل گستردگی و طولانی‌بودن شبکه‌های انتقال در شرایط جغرافیای متفاوت، تأثیرپذیری این خطوط از خطرات ناشی از پدیده‌های جوی و محیطی بسیار زیاد می‌باشد. یکی از مهم‌ترین پدیده‌های جوی که تأثیر زیادی بر کارکرد شبکه قدرت دارد، صاعقه[۱] است. درصورتی‌که هماهنگی عایقی و حفاظتی[۲] شبکه به‌درستی طراحی نشده باشد، با برخورد صاعقه به سیستم انتقال و ایجاد اضافه‌ولتاژهای گذرا[۳] بر روی خط، اتصال کوتاه[۴] رخداده و به‌تبع آن قطعی‌های بلندمدت و کوتاه‌مدت ایجاد می‌شود. اهمیت ذکرشده در تقاضای انرژی الکتریکی توسط مصرف‌کنندگان از یک‌سو، و بالا بردن قابلیت اطمینان[۵] انرژی تحویلی توسط شرکت‌های برق و رسیدن به منافع اقتصادی از سوی دیگر، باعث افزایش توجه به موضوع صاعقه و راه‌کارهای کاهش خرابی ناشی از برخورد آن، گردیده است. یکی از راه‌کارهای مهم در این زمینه، بهبود عملکرد سیستم انتقال است که تنها با طراحی یک شبکه هماهنگ از نظر تجهیزات حفاظتی و عایقی، با در نظر گرفتن تمامی پارامترهای فنی و اقتصادی، به دست می آید.

به‌طورکلی به‌منظور بهبود هماهنگی عایقی و کاهش قطعی‌های ناشی از برخورد صاعقه، باید دامنه اضافه‌ولتاژهای ایجادشده بروی شبکه کاهش پیدا کند که درنتیجه‌ی این امر، کاهش ریسک عایقی[۶] و بالا رفتن قابلیت اطمینان حاصل می‌شود. یکی از گزینه‌های حفاظتی متداول در جهت کاهش اضافه‌ولتاژهای

---

[1] Lightning
[2] Insulation and Protection Coordination
[3] Transient Overvoltages
[4] Short Circuit
[5] Reliability
[6] Risk of Insulation

ناشی از برخورد صاعقه استفاده از سیم گارد[1] است؛ اما بااین‌وجود احتمال خرابی عایقی ناشی از تخلیه برگشتی[2] در مناطق با امپدانس زمین بالا بسیار محتمل است. حال‌آنکه باوجود سیم گارد احتمال برخورد صاعقه به فاز هم وجود دارد که درنتیجه آن، در اکثر موارد به قطعی شبکه منجر می‌شود. بنابراین نصب برقگیر[3] و کاهش مقاومت پای دکل[4]، بهترین گزینه‌های حفاظتی در جهت کنترل اضافه‌ولتاژهای ناشی از صاعقه و افزایش قابلیت اطمینان شبکه است.

از طرفی برای بررسی تأثیر صاعقه بر روی خط و ایجاد هماهنگی حفاظتی موردنظر، نیاز به مدل‌سازی دقیق رفتار تمامی المان‌های مؤثر در این مبحث بسیار ضروری است. ضربات غیرعمودی[5] صاعقه، یکی از مهم‌ترین موارد این طراحی می‌باشد که تاکنون به‌طور دقیق به آن پرداخته نشده است. مضاف بر آن‌که تغییرات استقامت عایقی زنجیره مقره متناسب با شرایط جغرافیایی، تغییرات غیرخطی مقاومت زمین در برابر جریان‌های صاعقه، اهمیت شارش توان در خطوط، مدت‌زمان رفع قطعی در مباحث اقتصادی و همچنین محدودیت‌های سرمایه‌گذاری، تماماً مواردی است که باید در یک طرح جامع حفاظتی لحاظ شود. به‌دلیل گستردگی و پیچیدگی موارد فوق، تاکنون در هیچ‌یک از مقالات معتبر علمی به بررسی موارد ذکرشده در قالب یک طرح جامع حفاظتی دقیق در برابر ضربات غیرعمودی صاعقه پرداخته نشده است. لذا در این پایان‌نامه برای اولین بار سعی بر آن شده که با لحاظ کردن تمامی المان‌های تأثیرگذار در طراحی موردنظر، یک طرح جامع حفاظتی برای خطوط انتقال قدرت در برابر ضربات مستقیم صاعقه با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی[6] حاصل شود.

۱-۲- سوابق تحقیق

ارائه یک طرح جامع حفاظتی در برابر ضربات غیرعمودی صاعقه موضوعی است که در هیچ‌کدام از مقالات و پژوهش‌های انجام‌گرفته تاکنون به آن پرداخته نشده است، اما تحقیقات متداولی در مورد پیش‌نیازهای طراحی یک سیستم حفاظتی صورت گرفته است؛ به‌نحوی‌که در مراجع [۱] و [۲] به بررسی رفتار آماری پارامترهای صاعقه پرداخته‌شده است. در این مراجع با انجام آزمایش‌ها و تحقیقات گسترده، توزیع آماری مرتبط با هرکدام از پارامترهای اصلی صاعقه به‌دست‌آمده است. در [۳]، [۴]، [۵]، [۶]، [۷]

[1] Sheild Wire
[2] Back Flashover
[3] Arrester
[4] Footing Resistance
[5] Non-vertical Strokes
[6] Economic Indices

و [۸] به ارزیابی احتمالاتی اضافه‌ولتاژهای ایجادشده بروی شبکه قدرت براثر برخورد ضربات عمودی صاعقه پرداخته شده است. در این مقالات با استفاده از روش آماری مونت‌کارلو[۱] پارامترهای اصلی صاعقه تولید شده است و با بهره‌گیری از روابط تحلیلی[۲]، اضافه‌ولتاژهای به وجود آمده محاسبه شده است. با توجه به این موضوع که روش‌های تحلیلی مبتنی بر حل معادلات با روش انتگرال‌گیری است، دقت آن‌ها به‌مراتب از نرم‌افزارهای بررسی حالات گذرا کمتر است درنتیجه استفاده از معادلات تحلیلی موجب بروز خطای زیادی در محاسبات می‌گردد. در مرجع [۹] برای اولین بار مبحث غیرعمودی بودن ضربات صاعقه مطرح گردید و با ارائه یک تابع چگالی متغیر، رفتاری آماری زاویه برخورد[۳] صاعقه نسبت به سطح به دست آمد. در [۱۰] و [۱۱] یک مدل الکتروهندسی[۴] اولیه برای تشخیص مکان اصابت ضربات غیرعمودی صاعقه ارائه‌شده و با پیاده‌سازی یک شبکه نمونه فشارقوی در نرم‌افزار EMTP/ATP[۵]، به محاسبه نرخ قطعی‌های ناشی از برخورد صاعقه[۶] پرداخته‌شده است. مدل الکتروهندسی بکار گرفته‌شده نه‌تنها به‌دلیل عدم توانایی در شناسایی تعداد ضربات برخوردی بر روی هرکدام از سیم‌های گارد ناقص است، بلکه فقط یک بخش کوچکی از حالات ممکن در مبحث تشخیص مکان برخورد ضربات غیرعمودی را پوشش می‌دهد. در [۱۲] به بررسی احتمالاتی مکان بهینه‌ی برق‌گیرها در شبکه انتقال پرداخته شده است. در این مقاله با استفاده از یک روش احتمالاتی، شکست‌های مرتبط با ضربات صاعقه محاسبه شده است. از طرفی با به‌کارگیری یک شبکه عصبی، نرخ تخلیه الکتریکی ناشی از کلیدزنی[۷] تخمین زده شده است. نتایج به‌دست‌آمده در این مقاله به‌دلیل استفاده از فرضیه عمودی بودن ضربات صاعقه و همچنین لحاظ نکردن تغییرات استقامت عایقی در محاسبات، دارای خطای زیادی است. در[۱۳]، به ارزیابی آماری شکست‌های مرتبط با ضربات عمودی صاعقه، برای بهینه‌سازی مکان برقگیر و درنتیجه کاهش ریسک خطای شبکه و بهبود قابلیت اطمینان پرداخته است. تابع هدف[۸] استفاده شده در این مقاله به‌دلیل ترکیب شاخص‌های فنی و اقتصادی با یکدیگر به صورت دقیق طراحی نشده است و لذا نتایج مورد نظر از دیدگاه بهره بردار را ارائه نمی‌دهد.

---

[1] Monte Carlo Method
[2] Analytical Methods
[3] Stroke Angle
[4] Electrogeometric Model
[5] Electro Magnetic Transient Program
[6] Lightning Flashover Rate
[7] Switching Surge Flashover Rate
[8] Objective Function