به نام آن که جان را فکرت آموخت

آنالیز پیشرفتهٔ خطای اتصال کوتاه

بررسی مباحث ویژه با استفاده از نرم‌افزار دیگسایلنت (پاورفکتوری)

تالیف

مهندس محسن خالقی

امید توری

مقدمه

هدف از نگارش این کتاب، ایجاد یک مرجع مطالعاتی برای مباحث پیشرفته و کتابی با رویکـرد حـل مسائل با اعداد و ارقام واقعی برای مهندسین برق شاغل در عرصه‌ی صنعت، تکنولوژی و شبکه‌هـای الکتریکی می‌باشد. اگرچه می‌توان به جرات اذعان نمـود کـه مطالـب و اطلاعـات موجـود در کتـاب می‌تواند نگرش مهندسی مطلوب در مبحث خطای اتصال‌کوتاه برای دانشجویان مقطـع کارشناسـی، کارشناسـی ارشد و دکتـرای مهندسی برق (گرایش الکتروتکنیک/ فشارقوی / شبکه‌های الکتریکی/ ماشین‌های الکتریکی / کیفیت توان) ایجاد نماید. یکی از دغدغه‌هـای اصـلی نگارنـده همـواره ایـن موضوع بوده است که متاسفانه اکثر فارغ‌التحصیلان مهندسی برق (گرایش قدرت)، در تمامی سـطوح تحصیلی در انجام محاسبات اتصال‌کوتاه الکتریکی از توانمندی لازم برخوردار نبوده و گاهـاً از انجـام این محاسبات واهمه دارند. از طرفی دیگر نیز روش‌هایی کـه تـاکنون ارائـه شـده اسـت بـه دلایـل مختلفی (از جمله سختی روش در انجام محاسـبات، طـولانی بـودن، محـدود بـودن روش و غیـره) مناسب نبوده و کارایی لازم را ندارند بگونه‌ای که نمی‌تـوان بـه صـورت دسـتی و سـریع محاسـبات سرانگشتی را انجام داد. در این اثر سعی بر آن است که با بیان متودلوژی تحلیل و با ارائه روش‌هـای آسان یک محاسب بتواند اندازه‌ی خطای اتصالی را به راحتی تخمـین بزنـد. رهیافـت دیگـر در ایـن کتاب آنالیز اتصال‌کوتاه با کمک نرم‌افزار پاورفکتوری[1] (دیگسایلنت نسخه/ ورژن ۲۰۱۹) بـوده کـه از جمله معتبرترین و قوی‌ترین نرم‌افزارهای حال حاضر در دنیا در زمینه‌ی تحلیل شبکه‌های الکتریکـی می‌باشد. یکی از اولویّت‌های اصلی و اساسی در این کتاب، شـبیه‌سـازی، مدلسـازی و تحلیـل دقیـق خطاها با استفاده از محیط نرم‌افزار یاد شده بر اساس شکل موج‌هـا و داده‌هـای ثبـت شـده‌ی زمـان حقیقی توسط ثبّات‌ها و فالت ریکوردرهای رله‌های دیستانس در شبکه‌ی انتقال واقعـی مـی‌باشـد. بـا مطالعه‌ی کامل این اثر، خوانندگان محترم به یک تسلط کامل و نگرش جامع در مبحث اتصال‌کوتـاه دست خواهند یافت، چرا که در این مجموعه سعی بر ارائه و نشر راه‌حل‌های تسریع یافته و پیشـرفته مطابق با آخرین پژوهش‌های معتبر منتشر شده در دنیا می‌باشد، بگونه‌ای که مـی‌تـوان محاسـبات را حتی به صورت ذهنی هم انجام داد. مطالب جانبی درخصوص مباحث ویژه‌ایی مانند آنالیز اغتشاشـات

1. DIgSILENT Power Factory- DIgSILENT provides a leading integrated power system analysis software package covering the full range of standard and highly sophisticated applications. DIgSILENT GmbH, established by Martin Schmieg in 1985, has evolved to an international first class producer of power system analysis software "Made in Germany".

کیفیت‌توان[1] همچون بیشبود (فراز) و کمبود ولتاژ (فرود) و مباحث پیشرفته‌ای مانند آنالیز حالت‌های گذرا[2] با ذکر مسائل واقعی نیز بررسی شده است. در کنار تمام مسائل مطرح شده، اهتمام لازم بر استفاده از استانداردهای معتبر کشورهای غربی همچون ایالات متحده‌ی آمریکا، فرانسه و آلمان (همچون استاندارد[3] IEC و VDE) نیز بوده است. بمنظور سهولت در انجام محاسبات از روش‌های آنالیز ماتریسی و تبدیل لاپلاس در بخش‌های مختلف کتاب استفاده شده است. در این اثر نحوه‌ی انتخاب بریکر ژنراتوری[4] (GCB) در قالب یک فصل به طور مفصل برای علاقه‌مندان و پژوهشگران و طراحان پلنت‌های صنعتی همچون نیروگاه‌های تولید انرژی الکتریکی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. مانند اکثر منابع مطالعاتی که تاکنون برای بحث مهم اتصال‌کوتاه تهیه شده است تمرکز اصلی در این نگارش نیز بر شبکه‌های جریان متناوب (AC) بوده است. سعی شده است تا حد امکان، کمبود در سایر منابع مطالعاتی را جبران نموده و همچنین بخشی از اثر بر روی مفاهیم اتصال‌کوتاه در شبکه‌های جریان مستقیم (DC) متمرکز گردد. یکی از نقاط قوّت اصلی این کتاب انجام مطالعات حالت‌های گذرای ولتاژ بازگشتی بریکرها در زمان رخداد خطای اتصالی می‌باشد و سعی بر ارائه راهکارهایی در کاهش این ولتاژ استقرار خطرناک و مخرّب برای مدارشکن‌ها نیز لحاظ شده است. در این رهیافت خطای اتصال‌کوتاه و رفتار سیستم اِرتینگ در شبکه‌هایی با آرایش اِرتینگ مختلف بررسی شده است. در این راستا بایستی مهندسین طراحِ پلنت‌های صنعتی، طراحان اَدوات و تجهیزات الکتریکی، طراحان ماشین‌های الکتریکی و پژوهشگران رسته‌ی مهندسی به جایگاه و اهمیت مطالعات مربوط به اتصال‌کوتاه در شبکه‌های الکتریکی از منظر اقتصادی و از منظر حفاظت از جان در برابر تبعات آرک فلش برای پرسنل و سایر افراد توجه ویژه‌ای داشته باشند. چرا که تسلّط بر مباحث مرتبط با خطای اتصال‌کوتاه (اغتشاش ناشی از خطای اتصالی) موجب می‌شود زیان و صدمات کمتری بر تجهیزات شبکه و پرسنل بهره‌بردار وارد آید. این کتاب ماحصل تلاش‌های شبانه‌روزی نویسنده در راستای انجام مطالعات علمی و کسب تجارب فنّی در دفتر فنی انتقال شبکه (معاونت بهره‌برداری شرکت برق منطقه‌ای زنجان) بوده و سعی بر آن است تا قدمی هر چند کوچک، در راه ارتقاء دانش فنی و شغلی رسته‌ی مطالعات سیستم قدرت در صنعت برق کشور برداشته شود. نگارنده از تمامی اساتید که با تلمّذ از ایشان و خواندن آثار ماندگار متخصصین این حوزه مفاهیم بنیادی را از آنها فرا گرفته‌اند، صمیمانه از ایشان تشکر و قدردانی می‌نماید. اُمید است دانشجویان گرامی، اساتید ارجمند، صنعتگران عزیز، پژوهشگران محترم و علاقه‌مند به مقوله‌ی مطالعات سیستم از نگاه مهندسی به موضوع نگریسته و نقصان‌ها و اشتباهات را بدیده منّت چشم‌پوشی نمایند و موارد لازم را از طریق آدرس‌های الکترونیکی متذکر شده و از رهنمودهای لازم

1. Power Quality Analysis (PQA) -Disturbance Analysis-Fault Analysis
2. Transient Analysis (TA)
3. IEC60909/Short-Circuit Currents in Three-Phase A.C. Systems - Part 0: Calculation of Currents
4. Generator Circuit Breaker (GCB)

دریغ نفرمایند. نویسنده‌ی مسئول، سپاسگزار خواهد بود تا اشـتباهات و نواقصـات را بـا توصـیه افـراد متخصص خیرخواه داده و نقادان اهل فن، اصلاح نماید.

همچنین شایان ذکر است از زحمات آقای مهندس کامران سلیمی نصر مدیرعامل شرکت تدبیرسازان فناوری انرژی آپادانا نمایندگی کمپانی دیگسایلنت در ایران تشکر ویژه نمود گفتنی است در راسـتای تحقق این پژوهش از نسخه‌ی اصلی نرم‌افزار ثبت شده بـه نـام دانشـگاه سراسـری زنجـان اسـتفاده شده است.

مهندس محسن خالقی
عضو انجمن فارغ‌التحصیلان
دانشگاه صنعتی شریف
Moh_khaleghi@alum.sharif.edu
مهـندس اُمیـد توری
عضـو انجمن فارغ‌التحصیـلان
دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پُلی‌تکنیک)
Omid.touri@aut.ac.ir
زنجـان – بهـــار ۱۳۹۹/ آوریل۲۰۲۰

فهرست مطالب

فصل ۱ آشنایی با انواع روش‌های محاسبات اتصال‌کوتاه (مبتنی بر استانداردهای کشور فرانسه و IEC 60909) ۱

۱.۱ مفاهیم پایه و اساسی درخصوص خطای اتصال‌کوتاه ۷
۲.۱ محاسبات I_{sc} مبتنی بر استانداردهای معتبر ۱۷
۳.۱ روش‌های ارائه شده در این سند ۱۸
۴.۱ فرضیات اساسی ۱۹
۵.۱ جریان خطای اتصال‌کوتاه و وابستگی آن به تیپ اتصال‌کوتاه ۲۰
۶.۱ تعیین امپدانس اتصال‌کوتاه‌های مختلف ۲۲
۷.۱ امپدانس اتصال‌کوتاه ماشین‌های الکتریکی دوّار ۳۰
۱.۷.۱ ژنراتورهای سینکرون ۳۰
۲.۷.۱ موتورهای آسنکرون ۳۳
۸.۱ روابط بین امپدانس در سطوح ولتاژ مختلف ۳۵
۱.۸.۱ محاسبه امپدانس نسبی ۳۶
۲.۸.۱ جریان برگشتی و تغذیه‌شده از طرف موتورهای‌الکتریکی درلحظه رخداد خطا ۴۷
۹.۱ محاسبه مقادیر Isc در یک شبکه شعاعی با استفاده از مولفه‌های متقارن ۴۵
۱.۹.۱ مولفه‌های (همنه‌های) متقارن شاهکار آقای چارلز فُورتسکیو ۴۶
۱۰.۱ محاسبات اتصال‌کوتاه مطابق IEC 60909 ۴۹
۱.۱۰.۱ تأثیر فاصله محل خطا از ژنراتور ۵۱
۲.۱۰.۱ عوامل تصحیح امپدانس ۵۲
۱۱.۱ محاسبات سایر مولفه‌های جریان اتصال‌کوتاه از روی جریان I''_k ۵۵
۱۲.۱ پیوست یک ۶۵
۱۳.۱ پیوست دو ۶۸

فصل ۲ یک روش آسان برای انجام محاسبات اتصال‌کوتاه با استفاده از روش مگاولت آمپر (روش ABC) ۷۱

۱.۲ مزایای روش MVA نسبت به روش پریونیت ۸۵

۱.۱.۲ روش نخست (استفاده از روش اُهمیک) ۸۷
۲.۱.۲ روش دوم (استفاده از روش پریونیت بر مبنای توان پایه ۵۰۰ مگاولت آمپر) ۸۸
۳.۱.۲ روش سوم (استفاده از روش مگاولت آمپر) ۸۸
۴.۱.۲ روش چهارم (استفاده از نتایج شبیه‌سازی کامپیوتری) ۸۹
۲.۲ آنالیز خطای تک‌فاز به زمین با استفاده از روش MVA ۹۶
۳.۲ آنالیز کمبود ولتاژ (فرود ولتاژ) و تخمین آن در شبکه‌های صنعتی در حین راه‌اندازی الکتروموتورها ۱۰۰

فصل ۳ آنالیز ماتریسی بر پایه‌ی روش MVA برای انجام مطالعات اتصال‌کوتاه در شبکه‌های الکتریکی ۱۰۷

۱.۳ فرامین تبدیل ۱۰۹
۲.۳ ژنراتورها، موتورهای سنکرون، موتورهای القایی، ترانسفورماتورها ۱۱۰
۳.۳ ارتباط میان روش MVA و روش پریونیت کردن ۱۱۰
۴.۳ حل مسئله به کمک برنامه‌ی کامپیوتری ۱۱۶
۵.۳ نتیجه‌گیری ۱۱۸

فصل ۴ بررسی تاثیر زمین‌شدگی نقطه‌ی نوترال بر روی جریان اتصال‌کوتاه تک‌فاز ۱۱۹

۱.۴ سیستم قدرت با تکنیک ارتینگ امپدانس کم ۱۲۲
۲.۴ زمین کردن شبکه‌های الکتریکی با رویکرد محدودنمودن جریان اتصالی ۱۲۸
۳.۴ شبکه‌های الکتریکی با نوترال ایزوله شده ۱۲۹
۴.۴ شبکه الکتریکی با ارتینگ رزونانسی (سیم‌پیچ پترسون) ۱۴۳
۱.۴.۴ محاسبه میزان جابجا شدن اندازه‌ی ولتاژ (تغییرات ولتاژ نقطه‌ی نوترال) ۱۴۷
۲.۴.۴ تنظیم سیم‌پیچ پترسون ۱۵۱
۵.۴ زمین‌کردن نقطه‌ی نوترال سمت ولتاژ زیاد یا سمت ولتاژ کم در ترانسفورماتورها ۱۵۴

فصل ۵ نقش مقاومت نقطه‌ی نوترال در ترانسفورماتورهای کُمپکت ۱۶۱

۱.۵ طرح و شماتیک شبکه‌ی مورد مطالعه ۱۶۳
۲.۵ انواع مقاومت نوترال از نظر متریال ۱۶۵
۳.۵ مفروضات لازم جهت انجام آنالیز شبکه ۱۶۵

۱.۳.۵ فرضیه اول ۱۶۵
۲.۳.۵ فرضیه دوم ۱۶۶
۳.۳.۵ فرضیه سوم ۱۶۷
۴.۳.۵ فرضیه چهارم ۱۶۸
۴.۵ شبیه‌سازی و نتایج حاصل از آن ۱۶۹
۱.۴.۵ نتایج بدست آمده از آنالیز بیشبود و کمبود ۱۶۹
۲.۴.۵ نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی حالت‌های گذرا و ولتاژ برگشتی (بازگشتی– استقرار) گذرا ۱۷۱
۶.۵ پیوست ۱: انواع زمین شدن نقطه نوترال ترانسفورماتورها در شبکه‌ی قدرت ۱۸۰
۷.۵ منابع ۱۸۱

فصل ۶ تخمین قابلیت کلید مدارشکن ژنراتور در برابر خطای اتصال‌کوتاه تریپل (تامین شده توسط ژنراتور) ۱۸۳

۱.۶ ظرفیت قطع اتصال‌کوتاه GCB ۱۸۶
۲.۶ تغذیه خطای اتصالی از طریق ژنراتور الکتریکی ۱۸۷
۳.۶ تعریف شاخص نامتقارنی ۱۸۹
۴.۶ دستیابی به جریان صفر (عبور سیگنال جریان خطا از نقطه‌ی صفر) ۲۲۷
۵.۶ نتیجه‌گیری ۲۲۸
۶.۶ پیوست ۱ ۲۲۹
۷.۶ پیوست ۲ ۲۳۲
۸.۶ پیوست ۳ ۲۳۴
۹.۶ پیوست ۴ ۲۳۹
۱۰.۶ پیوست ۵: کاتالوگ ژنراتورهای الکتریکی از سازندگان معتبر ۲۴۲
۱۱.۶ مراجع ۲۴۵

فصل ۷ آنالیز اتصال‌کوتاه و بررسی تأثیرات آن بر ولتاژ شبکه و ولتاژ بازگشتی گذرا در مدارشکن‌ها ۲۴۷

۱.۷ آنالیز بیشبود ولتاژ (فراز/Swell) و کمبود ولتاژ (فرود/Dip-Sag) ۲۴۸
۲.۷ تخمین قابلیت کلید مدارشکن ۴۰۰ کیلوولت در برابر خطای اتصال‌کوتاهِ تریپل در نزدیکی نیروگاه تولید انرژی الکتریکی ۳۱۹

۳.۷ نتیجه‌گیری و راهکار پیشنهادی ۳۲۸
۴.۷ نتیجه‌گیری و راهکار پیشنهادی ۳۵۱
۵.۷ پیوست ۱ ۳۵۴

فصل ۸ آنالیز خطا و محاسبه‌ی ولتاژ بدنه‌ی برج‌های انتقال انرژی الکتریکی در هنگام رخداد خطای اتصالی تک‌فاز به زمین ۳۵۵

۱.۸ تاثیر خطای اتصالی بر روی برج‌ها در خطوط هوایی ۳۵۷
۲.۸ نتیجه‌گیری ۳۶۹

فصل ۹ تخمین جریان‌های اتصال‌کوتاه در شبکه‌های جریان مستقیم DC ۳۲۱

۱.۹ محاسبات انرژی تابشی ناشی از بروز پدیده‌ی جرقه‌ی الکتریکی به روش رالف اچ لی (Lee) ۳۸۶
۲.۹ نحوه‌ی محاسبه‌ی انرژی تابشی ناشی از جرقه الکتریکی ۳۹۰
۳.۹ مرور و بررسی انواع توپولوژی کلیدهای مدارشکن جریان مستقیم ولتاژ زیاد ۳۹۲
۴.۹ بررسی اجمالی کلیدهای مدارشکن ولتاژ زیاد جریان مستقیم ۳۹۷
۵.۹ انواع توپولوژی مختلف در کلیدهای مدارشکن جریان مستقیم ولتاژ زیاد ۳۹۸
۶.۹ مقایسه توپولوژی‌های مختلف کلید مدارشکن جریان مستقیم ۴۰۸
۷.۹ نتیجه‌گیری و توصیه‌های فنی ۴۱۰
۸.۹ منابع ۴۱۱

فصل ۱۰ جریان‌های مگاآمپری پالسی شکل ۴۱۵

۱.۱۰ مشخصات و طراحی اجزاء CZP ۴۱۹
۲.۱۰ نتایج آزمایش ۴۲۱
۳.۱۰ اندازه‌گیری جریان تخلیه ۴۲۲
۴.۱۰ اندوکتانس و مقاومت کلی سیستم CZP ۴۲۳
۱.۴.۱۰ اندوکتانس پلاسما ۴۲۴
۲.۴.۱۰ اندازه‌گیری‌های جریان پلاسما ۴۲۴
۵.۱۰ نتیجه‌گیری ۴۲۷
۶.۱۰ پیوست ۱ ۴۲۸
۱.۶.۱۰ سلول مغناطیسی ۴۲۸

۲.۶.۱۰ مشکل اساسی ۴۲۹
۳.۶.۱۰ توکوماک‌های پیشرفته ۴۲۹
۴.۶.۱۰ گرمایش اهمی با استفاده از مود جریان القایی ۴۲۹
۵.۶.۱۰ فشرده‌سازی مغناطیسی ۴۳۰
۷.۱۰ مراجع ۴۳۰
مراجع ۴۳۳