

بسم الله الرحمن الرحيم

# حفاظت سیستم های قدرت

تألیف : دکتر صادق جمالی

جمالی، صادق، ۱۳۳۵ -

حفاظت سیستم های قدرت / تألیف صادق جمالی. - تهران: دانشگاه علم و صنعت ایران، مرکز انتشارات، ۱۳۸۴.

ل، ۴۲۹ ص.: مصور، جدول، نمودار. - (مرکز انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران؛ شماره ۴۲۲)

ISBN : 964-454-490-0 : ۳۲۰۰۰ ریال

فهرست نویسی بر اساس اطلاعات فیبا.

۱. برق - سیستمها - حفاظت. ۲. برق، نیرو - انتقال. ۳. رله های محافظ.  
الف. دانشگاه علم و صنعت ایران. مرکز انتشارات.  
ب. عنوان.

۶۲۱/۳۱۷

TK ۱۰۰۵/ج ۸ ح ۷  
۱۳۸۴

م ۸۴-۱۷۰۶۸

کتابخانه ملی ایران

• مرکز انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران - تهران - نارمک صندوق پستی ۱۶۳-۱۶۷۶۵

تلفن: ۷۴۵۱۱۸۶ - دور نویس: ۷۴۵۱۱۸۶

• فروشگاه شماره ۱: میدان انقلاب - خیابان شهید میری جاوید (اردیبهشت) - پلاک ۱۸۲

تلفن: ۶۴۶۶۹۰۰

• پست الکترونیک: [Publication@sun.iust.ac.ir](mailto:Publication@sun.iust.ac.ir)



دانشگاه علم و صنعت ایران

نام کتاب: حفاظت سیستم های قدرت

تألیف: دکتر صادق جمالی

چاپ اول: ۱۳۸۴

شمارگان: ۲۰۰۰ جلد

قیمت: ۳۲۰۰۰ ریال

شماره انتشارات: ۴۲۲

لیتوگرافی، چاپ و صحافی: مرکز انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران

\* حق چاپ برای دانشگاه علم و صنعت ایران محفوظ است.

## فهرست

### عنوان

### صفحه

#### فصل اول: سیستم‌های قدرت و اهمیت حفاظت آنها

- |     |                               |   |
|-----|-------------------------------|---|
| ۱-۱ | مقدمه                         | ۱ |
| ۲-۱ | شرکت‌های برق و مصرف کنندگان   | ۲ |
| ۳-۱ | کیفیت انرژی الکتریکی          | ۳ |
| ۴-۱ | قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت | ۶ |
| ۵-۱ | استانداردها                   | ۸ |
| ۶-۱ | حفاظت سیستم‌های قدرت          | ۹ |

#### فصل دوم: اصول اساسی در حفاظت سیستم‌های قدرت

- |     |                  |    |
|-----|------------------|----|
| ۱-۲ | مقدمه            | ۱۳ |
| ۲-۲ | تجهیزات حفاظتی   | ۱۵ |
| ۳-۲ | قابلیت اطمینان   | ۱۹ |
| ۴-۲ | قابلیت انتخابگری | ۲۱ |
| ۵-۲ | نواحی حفاظتی     | ۲۲ |
| ۶-۲ | پایداری          | ۲۳ |
| ۷-۲ | سرعت             | ۲۴ |

|    |                           |
|----|---------------------------|
| ۲۵ | ۸-۲ حساسیت                |
| ۲۵ | ۹-۲ حفاظت اولیه و پشتیبان |
| ۲۷ | ۱۰-۲ تجهیزات خروجی رله    |
| ۲۷ | ۱-۱۰-۲ سیستم‌های کنتاکت   |
| ۲۹ | ۲-۱۰-۲ نمایشگرهای عملکرد  |
| ۲۹ | ۱۱-۲ مدارهای تریپ         |
| ۳۰ | ۱۲-۲ نظارت مدار تریپ      |

### فصل سوم: محاسبات اتصال کوتاه

|    |                                                                 |
|----|-----------------------------------------------------------------|
| ۳۵ | ۱-۳ مقدمه                                                       |
| ۳۶ | ۲-۳ مؤلفه‌های متقارن در یک شبکه سه‌فاز                          |
| ۳۸ | ۱-۲-۳ شبکه توالی مثبت                                           |
| ۳۸ | ۲-۲-۳ شبکه توالی منفی                                           |
| ۳۹ | ۳-۲-۳ شبکه توالی صفر                                            |
| ۳۹ | ۳-۳ روابط و اتصالات شبکه در مورد انواع اتصال کوتاه‌ها           |
| ۴۰ | ۱-۳-۳ اتصال کوتاه تک‌فاز به زمین                                |
| ۴۰ | ۲-۳-۳ اتصال کوتاه دوفاز به هم                                   |
| ۴۱ | ۳-۳-۳ اتصال کوتاه دوفاز به زمین                                 |
| ۴۳ | ۴-۳-۳ خطای سه‌فاز                                               |
| ۴۴ | ۴-۳ توزیع جریان و ولتاژ در یک شبکه در اثر یک اتصال کوتاه        |
| ۴۴ | ۱-۴-۳ توزیع جریان                                               |
| ۴۷ | ۲-۴-۳ توزیع ولتاژ                                               |
| ۴۹ | ۵-۳ اثر زمین کردن سیستم بر روی مؤلفه توالی صفر                  |
| ۴۹ | ۱-۵-۳ جریان و ولتاژ باقیمانده‌ای                                |
| ۵۰ | ۲-۵-۳ نسبت $\bar{Z}_0/\bar{Z}_1$ سیستم                          |
| ۵۲ | ۳-۵-۳ تغییر مقادیر باقیمانده‌ای                                 |
| ۵۲ | ۱-۳-۵-۳ سیستم دارای نول ایزوله و مقاومت خطای صفر                |
| ۵۴ | ۲-۳-۵-۳ سیستم دارای مقاومت در نول و مقاومت خطای صفر             |
| ۵۵ | ۳-۳-۵-۳ سیستم دارای نول مستقیماً زمین شده و مقاومت خطای غیر صفر |

## فصل چهارم: ترانسفورماتورهای ولتاژ و جریان

|    |                                                            |
|----|------------------------------------------------------------|
| ۵۹ | ۱-۴ مقدمه                                                  |
| ۶۰ | ۲-۴ ترانسفورماتور ولتاژ                                    |
| ۶۱ | ۱-۲-۴ خطاها                                                |
| ۶۱ | ۲-۲-۴ ضرایب ولتاژ                                          |
| ۶۲ | ۳-۲-۴ سیم‌های رابط در ثانویه                               |
| ۶۳ | ۴-۲-۴ ترانسفورماتور ولتاژ با تقسیم‌کننده خازنی             |
| ۶۵ | ۵-۲-۴ ترانسفورماتور ولتاژ متوالی                           |
| ۶۶ | ۳-۴ ترانسفورماتور جریان                                    |
| ۶۷ | ۱-۳-۴ خطاهای ترانسفورماتور جریان                           |
| ۶۸ | ۲-۳-۴ جبران‌سازی حلقه‌ای                                   |
| ۶۸ | ۳-۳-۴ خطای ترکیبی                                          |
| ۶۹ | ۴-۳-۴ جریان حد دقت ترانسفورماتورهای جریان حفاظتی           |
| ۷۰ | ۵-۳-۴ ترانسفورماتورهای جریان کلاس PX                       |
| ۷۳ | ۶-۳-۴ ترکیبات مختلف سیم‌پیچ و انواع ترانسفورماتورهای جریان |
| ۷۴ | ۷-۳-۴ ملاحظات کاربردی در مورد ترانسفورماتورهای جریان       |
| ۷۶ | ۸-۳-۴ پاسخ گذاری جریان اولیه                               |
| ۷۷ | ۱-۸-۳-۴ حالت گذرای جریان اولیه                             |
| ۸۰ | ۲-۸-۳-۴ شرایط عملی                                         |
| ۸۳ | ۱۱-۳-۴ هارمونیک در دوره گذرا                               |
| ۸۳ | ۱۲-۳-۴ سیم‌پیچ‌های آزمون                                   |
| ۸۴ | ۴-۴ ترانسفورماتورهای جریان و ولتاژ جدید                    |
| ۸۴ | ۱-۴-۴ ترانسفورماتورهای جریان و ولتاژ نوری                  |
| ۸۵ | ۱-۱-۴-۴ مفاهیم حسگر نوری                                   |
| ۸۷ | ۲-۱-۴-۴ ترانسدیوسرهای هیبرید                               |
| ۸۷ | ۳-۱-۴-۴ ترانسدیوسرهای کاملاً نوری                          |
| ۸۹ | ۲-۴-۴ سیستم‌های حسگر دیگر                                  |
| ۸۹ | ۱-۲-۴-۴ ترانسفورماتور جریان با شار صفر                     |
| ۹۰ | ۲-۲-۴-۴ حسگر هیبرید مغناطیسی - نوری                        |
| ۹۰ | ۳-۲-۴-۴ سیم‌پیچ‌های روگوسکی                                |

## فصل پنجم: فیوزها

|     |                                               |
|-----|-----------------------------------------------|
| ۹۵  | ۱-۵ مقدمه                                     |
| ۹۹  | ۲-۵ توزیع درجه حرارت در المان فیوزی           |
| ۱۰۰ | ۳-۵ جریان نامی و حداقل جریان فیوزی            |
| ۱۰۱ | ۴-۵ منحنی های مشخصه زمان - جریان فیوز         |
| ۱۰۴ | ۵-۵ معادلات حرارتی فیوز                       |
| ۱۱۲ | ۶-۵ پدیده برقراری قوس                         |
| ۱۱۴ | ۷-۵ ولتاژ قوس حداکثر                          |
| ۱۱۷ | ۸-۵ اثر M                                     |
| ۱۱۷ | ۹-۵ فیوزهای محدودکننده جریان                  |
| ۱۲۱ | ۱-۹-۵ $E_R$ حداکثر در                         |
| ۱۲۱ | ۲-۹-۵ $E_S$ حداکثر در                         |
| ۱۲۱ | ۳-۹-۵ $E_A$ حداکثر در                         |
| ۱۲۳ | ۱۰-۵ فیوزهای غیرمحدودکننده جریان              |
| ۱۲۲ | ۱-۱۰-۵ فیوز نوع قابل سیم بندی مجدد            |
| ۱۲۴ | ۲-۱۰-۵ فیوز نوع دفعی                          |
| ۱۲۵ | ۳-۱۰-۵ فیوز پر شده با مایع                    |
| ۱۲۵ | ۱۱-۵ فیوز ولتاژ پایین برای مصارف صنعتی        |
| ۱۲۷ | ۱-۱۱-۵ شرایط آزمون                            |
| ۱۲۷ | ۲-۱۱-۵ تمایز                                  |
| ۱۲۸ | ۳-۱۱-۵ حفاظت موتور                            |
| ۱۳۰ | ۱۲-۵ فیوزهای ولتاژ بالا                       |
| ۱۳۰ | ۱-۱۲-۵ شرایط آزمون                            |
| ۱۳۰ | ۲-۱۲-۵ فیوزهای ولتاژ بالای موتور              |
| ۱۳۱ | ۱۳-۵ حفاظت ترانسفورماتورهای توزیع             |
| ۱۳۲ | ۱-۱۳-۵ قابلیت تحمل جریان هجومی مغناطیس کنندگی |
| ۱۳۲ | ۲-۱۳-۵ قابلیت تحمل اضافه بار                  |
| ۱۳۲ | ۳-۱۳-۵ قابلیت تحمل جریان های ضربه ای          |
| ۱۳۲ | ۴-۱۳-۵ رفع سریع جریان خطا                     |
| ۱۳۳ | ۵-۱۳-۵ تمایز با حفاظت طرف ثانویه              |

|     |                                                       |
|-----|-------------------------------------------------------|
| ۱۳۴ | ۱۴-۵ فیوزهای ترانسفورماتورهای ولتاژ                   |
| ۱۳۴ | ۱۶-۵ تمایز بین فیوزها                                 |
| ۱۳۷ | ۱۷-۵ تمایز بین فیوزهای فشار قوی و فشار ضعیف و مدارشکن |

## فصل ششم: رله‌های حفاظتی

|     |                                                  |
|-----|--------------------------------------------------|
| ۱۴۵ | ۱-۶ مقدمه                                        |
| ۱۴۶ | ۲-۶ انواع اصلی رله‌ها                            |
| ۱۴۷ | ۳-۶ رله‌های الکترومکانیکی                        |
| ۱۴۷ | ۱-۳-۶ انواع اندازه‌گیری                          |
| ۱۴۷ | ۱-۱-۳-۶ اندازه‌گیری مقدار کمیت‌ها                |
| ۱۴۸ | ۲-۱-۳-۶ اندازه‌گیری حاصل ضرب                     |
| ۱۴۸ | ۳-۱-۳-۶ اندازه‌گیری نسبت                         |
| ۱۴۹ | ۲-۳-۶ رله آرمیچر جذبی                            |
| ۱۵۲ | ۱-۲-۳-۶ رله‌های AC                               |
| ۱۵۲ | ۲-۲-۳-۶ رله‌های با سرعت عملکرد بالا              |
| ۱۵۲ | ۳-۲-۳-۶ رله‌های سولنوئیدی                        |
| ۱۵۳ | ۳-۳-۶ رله‌های کوئل متحرک                         |
| ۱۵۵ | ۴-۳-۶ رله‌های القایی                             |
| ۱۵۷ | ۵-۳-۶ رله‌های القایی با قطب سایه‌دار             |
| ۱۶۰ | ۶-۳-۶ کاربرد رله‌های القایی در حفاظت اضافه جریان |
| ۱۶۱ | ۱-۶-۳-۶ رله‌های زمان کاهشی                       |
| ۱۶۲ | ۲-۶-۳-۶ منحنی مشخصه عملکردی                      |
| ۱۶۳ | ۳-۶-۳-۶ حداقل عملکرد معین                        |
| ۱۶۳ | ۴-۶-۳-۶ منحنی مشخصه‌های دیگر                     |
| ۱۶۵ | ۵-۶-۳-۶ رله‌های توان و جهتی                      |
| ۱۶۵ | ۴-۶ رله‌های حرارتی                               |
| ۱۶۸ | ۵-۶ رله‌های مختلف دیگر                           |
| ۱۶۸ | ۱-۵-۶ رله موتوری                                 |
| ۱۶۸ | ۲-۵-۶ رله‌های مکانیکی                            |
| ۱۶۹ | ۳-۵-۶ رله‌های اندازه‌گیری درجه حرارت             |

|     |                                               |
|-----|-----------------------------------------------|
| ۱۷۰ | ۴-۵-۶ رله‌های تأخیر زمانی                     |
| ۱۷۰ | ۶-۶ رله‌های استاتیکی                          |
| ۱۷۱ | ۱-۶-۶ مدارهای پایه رله‌های استاتیکی           |
| ۱۷۲ | ۱-۶-۶ زمان سنج                                |
| ۱۷۲ | ۲-۶-۶ آشکارساز سطح                            |
| ۱۷۳ | ۳-۶-۶ آشکارساز پلارینه                        |
| ۱۷۴ | ۴-۶-۶ مقایسه گر فاز                           |
| ۱۷۴ | ۵-۶-۶ مدار انتگرال گیر                        |
| ۱۷۶ | ۷-۶ رله‌های دیجیتال                           |
| ۱۷۹ | ۸-۶ رله‌های عددی                              |
| ۱۸۱ | ۱-۸-۶ معماری سخت افزاری                       |
| ۱۸۵ | ۲-۸-۶ نرم افزار رله                           |
| ۱۸۶ | ۳-۸-۶ نرم افزار کاربردی                       |
| ۱۸۷ | ۹-۶ قابلیت‌های دیگر رله‌های عددی              |
| ۱۸۷ | ۱-۹-۶ نمایش مقادیر اندازه گیری شده            |
| ۱۸۸ | ۲-۹-۶ نظارت بر ترانسفورماتورهای ولتاژ و جریان |
| ۱۸۸ | ۳-۹-۶ کنترل، تخمین حالت، پایش وضعیت مدار شکن  |
| ۱۸۹ | ۴-۹-۶ ثبات اغتشاش                             |
| ۱۸۹ | ۵-۹-۶ سنکرون کردن                             |
| ۱۹۰ | ۶-۹-۶ منطق قابل برنامه ریزی                   |
| ۱۹۰ | ۷-۹-۶ فراهم آوردن گروه‌های تنظیمات            |
| ۱۹۱ | ۸-۹-۶ نتیجه گیری                              |

## فصل هفتم: حفاظت اضافه جریان

|     |                                                             |
|-----|-------------------------------------------------------------|
| ۱۹۵ | ۱-۷ مقدمه                                                   |
| ۱۹۶ | ۲-۷ انواع متداول سیستم‌های حفاظت اضافه جریان                |
| ۱۹۶ | ۳-۷ سیستم‌های حفاظت اضافه جریان و خطای زمین                 |
| ۱۹۸ | ۱-۳-۷ هماهنگی بر اساس جریان                                 |
| ۲۰۱ | ۲-۳-۷ هماهنگی بر اساس تنظیم زمانی                           |
| ۲۰۱ | ۳-۳-۷ هماهنگی بر اساس زمان و جریان، یا حفاظت اضافه جریان با |



|     |                                                                         |
|-----|-------------------------------------------------------------------------|
|     | مشخصه زمان کاهشی                                                        |
| ۲۰۳ | ۴-۷ حاشیه درجه‌بندی یا فاصله زمانی هماهنگی                              |
| ۲۰۳ | ۱-۴-۷ هماهنگی فیوز و رله اضافه جریان                                    |
| ۲۰۴ | ۲-۴-۷ هماهنگی رله‌های اضافه جریان با یکدیگر                             |
| ۲۰۵ | ۳-۴-۷ فاصله زمانی هماهنگی کلی توصیه شده                                 |
| ۲۰۷ | ۵-۷ رله‌های اضافه جریان با مشخصه زمان کاهشی                             |
| ۲۱۲ | ۶-۷ هماهنگی رله‌های با مشخصه زمان کاهشی                                 |
| ۲۱۷ | ۷-۷ ترکیب رله‌های زمان کاهشی با رله‌های قطع آنی                         |
| ۲۱۹ | ۸-۷ حفاظت خطای زمین                                                     |
| ۲۲۰ | ۱-۸-۷ نحوه اتصال رله‌های خطای زمین و اضافه جریان                        |
| ۲۲۰ | ۲-۸-۷ تنظیم مؤثر رله‌های اتصال زمین                                     |
| ۲۲۴ | ۳-۸-۷ تنظیم زمانی رله‌های خطای زمین                                     |
| ۲۲۴ | ۴-۸-۷ حفاظت خطای زمین حساس                                              |
| ۲۲۶ | ۹-۷ رله‌های اضافه جریان جهتی                                            |
| ۲۲۷ | ۱-۹-۷ اتصالات رله                                                       |
| ۲۲۷ | ۲-۹-۷ گشتاور حداکثر رله                                                 |
| ۲۲۸ | ۳-۹-۷ اتصال $30^\circ$ با زاویه حداکثر گشتاور صفر درجه                  |
| ۲۲۹ | ۴-۹-۷ اتصال $60^\circ$ با زاویه حداکثر گشتاور صفر درجه                  |
| ۲۲۹ | ۵-۹-۷ اتصال $90^\circ$                                                  |
| ۲۳۰ | ۱-۵-۹-۷ مشخصه $30^\circ$ - $90^\circ$ با زاویه حداکثر گشتاور $30^\circ$ |
| ۲۳۰ | ۲-۵-۹-۷ مشخصه $45^\circ$ - $90^\circ$ با زاویه حداکثر گشتاور $45^\circ$ |
| ۲۳۲ | ۱۰-۷ حفاظت خطوط موازی                                                   |
| ۲۳۲ | ۱۱-۷ حفاظت شبکه‌های حلقوی                                               |
| ۲۳۴ | ۱۲-۷ رله خطای زمین جهتی                                                 |
|     | فصل هشتم: حفاظت دیستانس                                                 |
| ۲۴۳ | ۱-۸ مقدمه                                                               |
| ۲۴۴ | ۲-۸ اصول رله‌های دیستانس                                                |
| ۲۴۶ | ۳-۸ انواع مشخصه‌های رله‌های دیستانس                                     |
| ۲۴۷ | ۱-۳-۸ رله امیدانسی                                                      |

|     |                                                                   |
|-----|-------------------------------------------------------------------|
| ۲۵۱ | ۸-۳-۲ رله جهت                                                     |
| ۲۵۲ | ۸-۳-۳ رله راکتانیسی                                               |
| ۲۵۲ | ۸-۳-۴ رله مهو                                                     |
| ۲۵۳ | ۸-۳-۵ رله مهو کاملاً قطبی شده                                     |
| ۲۵۵ | ۸-۳-۶ رله‌های با مشخصه‌های لنزی                                   |
| ۲۵۵ | ۸-۳-۷ رله‌ها با مشخصه‌های چندضلعی                                 |
| ۲۵۶ | ۸-۳-۸ رله‌های با مشخصه‌های ترکیبی                                 |
| ۲۵۷ | ۸-۴ مقایسه گرهای فاز                                              |
| ۲۵۹ | ۸-۴-۱ مقایسه گر بلوک پالس سوزنی                                   |
| ۲۶۰ | ۸-۴-۲ مقایسه گر بلوک آنی                                          |
| ۲۶۳ | ۸-۴-۳ مقایسه گر بلوک متوسط گیر                                    |
| ۲۶۵ | ۸-۵ نواحی حفاظتی، تنظیم رسایش و زمان عملکرد رله‌های دیستانس       |
| ۲۶۹ | ۸-۶ کاربرد رله                                                    |
| ۲۷۰ | ۸-۶-۱ خطاهای فازی                                                 |
| ۲۷۲ | ۸-۶-۲ خطاهای زمین                                                 |
| ۲۷۳ | ۸-۷ اثر مقاومت قوس بر روی حفاظت دیستانس                           |
| ۲۷۶ | ۸-۸ پیشروی بار                                                    |
| ۲۷۷ | ۸-۹ نوسان توان                                                    |
| ۲۸۱ | ۸-۱۰ عملکرد رله                                                   |
| ۲۸۱ | ۸-۱۱ رابطه بین ولتاژ رله و نسبت $Z_S/Z_L$                         |
| ۲۸۵ | ۸-۱۲ تعیین حداقل ولتاژ جهت اندازه‌گیری دقیق امپدانس در نقطه رسایش |
| ۲۸۶ | ۸-۱۳ حداقل ولتاژ در محل رله                                       |
| ۲۸۶ | ۸-۱۴ تنظیم رله                                                    |
| ۲۸۷ | ۸-۱۵ حداقل طول خط                                                 |
| ۲۸۸ | ۸-۱۶ زیررسی                                                       |
| ۲۸۹ | ۸-۱۷ فرارسی                                                       |
| ۲۹۰ | ۸-۱۸ محدودیت‌های رسایش در جلو                                     |

## فصل نهم: حفاظت تفاضلی

### ۱-۹ مقدمه

|     |                                                    |
|-----|----------------------------------------------------|
| ۲۹۶ | ۲-۹ اصول عملکرد حفاظت تفاضلی                       |
| ۲۹۷ | ۳-۹ رله امپدانس بالا                               |
| ۳۰۰ | ۴-۹ رله‌ها                                         |
| ۳۰۱ | ۵-۹ کاربرد و تنظیمات                               |
| ۳۰۱ | ۱-۵-۹ تنظیم ولتاژی                                 |
| ۳۰۲ | ۲-۵-۹ ولتاژ نقطه زانوی ترانسفورماتور جریان         |
| ۳۰۲ | ۳-۵-۹ تنظیم مؤثر                                   |
| ۳۰۳ | ۴-۵-۹ مثالی از حفاظت تفاضلی موتور                  |
| ۳۰۴ | ۶-۹ اتصال باقیمانده‌ای                             |
| ۳۰۵ | ۷-۹ حفاظت تفاضلی گرایش‌دار                         |
| ۳۰۸ | ۸-۹ سیستم‌های تفاضلی ولتاژ تعادلی                  |
| ۳۱۰ | ۱-۸-۹ حد پایداری سیستم ولتاژ تعادلی                |
| ۳۱۱ | ۲-۸-۹ گرایش                                        |
| ۳۱۱ | ۹-۹ حفاظت تفاضلی دیجیتالی                          |
|     | <b>فصل دهم: حفاظت باس‌بار</b>                      |
| ۳۱۳ | ۱-۱۰ مقدمه                                         |
| ۳۱۵ | ۲-۱۰ خطاهای باس‌بار                                |
| ۳۱۷ | ۳-۱۰ نیازمندی‌های حفاظت باس‌بار                    |
| ۳۱۷ | ۱-۳-۱۰ سرعت                                        |
| ۳۱۷ | ۲-۳-۱۰ پایداری                                     |
| ۳۲۰ | ۴-۱۰ انواع سیستم‌های حفاظتی باس‌بار                |
| ۳۲۰ | ۱-۴-۱۰ حفاظت سیستم قدرت                            |
| ۳۲۱ | ۵-۱۰ حفاظت اتصال بدنه                              |
| ۳۲۴ | ۶-۱۰ حفاظت تفاضلی                                  |
| ۳۲۴ | ۱-۶-۱۰ اصول حفاظتی                                 |
| ۳۲۵ | ۲-۶-۱۰ طرح تجمعی                                   |
| ۳۲۸ | ۳-۶-۱۰ حفاظت تفاضلی باس‌های قسمت‌بندی شده و دوتایی |
| ۳۲۹ | ۷-۱۰ حفاظت تفاضلی امپدانس بالا                     |
| ۳۲۹ | ۱-۷-۱۰ پایداری                                     |

|     |                                                       |
|-----|-------------------------------------------------------|
| ۳۳۳ | ۱۰-۷-۲ تنظیم مؤثر یا جریان عمل کننده اولیه            |
| ۳۳۵ | ۱۰-۷-۳ خصوصیت واریسی                                  |
| ۳۳۶ | ۱۰-۷-۴ نظارت مدارهای ثانویه ترانسفورماتورهای جریان    |
| ۳۳۶ | ۱۰-۷-۵ تعیین مسیر اتصالات ترانسفورماتورهای جریان      |
| ۳۳۸ | ۱۰-۷-۶ خلاصه‌ای از تجربیات عملی                       |
| ۳۴۱ | ۱۰-۸ طرح‌های حفاظت تفاضلی امپدانس بالای باس بار نمونه |
| ۳۴۱ | ۱۰-۸-۱ تمایز و واریسی امپدانس بالا                    |
| ۳۴۲ | ۱۰-۸-۲ تمایز اضافه جریان و چک‌کنندگی امپدانس بالا     |
| ۳۴۳ | ۱۰-۹ محاسبات نمونه برای طرح‌های تفاضلی امپدانس بالا   |
| ۲۴۳ | ۱۰-۹-۱ مثالی از خطای فاز به زمین                      |

## فصل یازدهم: حفاظت ترانسفورماتور

|     |                                                       |
|-----|-------------------------------------------------------|
| ۳۵۱ | ۱۱-۱ مقدمه                                            |
| ۳۵۲ | ۱۱-۲ خطاهای مطرح در مورد ترانسفورماتورها              |
| ۳۵۴ | ۱۱-۳ حفاظت تفاضلی                                     |
| ۳۵۵ | ۱۱-۴ جریان هجومی مغناطیس‌کنندگی                       |
| ۳۶۰ | ۱۱-۵ تغییر تپ                                         |
| ۳۶۲ | ۱۱-۶ سیستم‌های گرایش‌دار                              |
| ۳۶۲ | ۱۱-۷ سیستم‌های گرایش‌دار با سرعت بالا                 |
| ۳۶۴ | ۱۱-۸ حفاظت خطای زمین                                  |
| ۳۶۵ | ۱۱-۸-۱ سیم‌پیچ ستاره زمین شده از طریق مقاومت          |
| ۳۶۶ | ۱۱-۸-۲ سیم‌پیچ ستاره زمین شده به صورت مستقیم          |
| ۳۶۷ | ۱۱-۸-۳ سیم‌پیچ مثلث                                   |
| ۳۶۷ | ۱۱-۹ حفاظت سیم‌پیچ ستاره زمین شده                     |
| ۳۶۸ | ۱۱-۹-۱ حفاظت خطای زمین محدود شده                      |
| ۳۶۹ | ۱۱-۱۰ حفاظت سیم‌پیچ‌های مثلث                          |
| ۳۷۰ | ۱۱-۱۱ حفاظت ترکیبی تفاضلی و خطای زمین محدود شده       |
| ۳۷۲ | ۱۱-۱۱-۱ حفاظت ترکیبی در حضور ترانسفورماتور زمین‌کننده |
| ۳۷۴ | ۱۱-۱۲ حفاظت ترانسفورماتور زمین                        |
| ۳۷۵ | ۱۱-۱۳ حفاظت اتوترانسفورماتور                          |

|     |                                           |
|-----|-------------------------------------------|
| ۳۷۶ | ۱۴-۱۱ حفاظت اضافه شار                     |
| ۳۷۷ | ۱۵-۱۱ رله بوخهلتز                         |
| ۳۸۰ | ۱۶-۱۱ حفاظت اضافه جریان                   |
| ۳۸۰ | ۱۱-۱۶-۱ فیوز                              |
| ۳۸۱ | ۱۱-۱۶-۲ رله‌های اضافه جریان               |
| ۳۸۳ | ۱۱-۱۶-۳ حفاظت اضافه جریان با عنصر قطع آنی |
| ۳۸۴ | ۱۷-۱۱ حفاظت اضافه بار                     |
| ۳۸۵ | ۱۱-۱۷-۱ انتگرال گیر درجه حرارت - زمان     |

### فصل دوازدهم: حفاظت ژنراتور

|     |                                               |
|-----|-----------------------------------------------|
| ۳۹۱ | ۱-۱۲ مقدمه                                    |
| ۳۹۳ | ۱۲-۲ زمین کردن ژنراتور و خطاهای زمین          |
| ۳۹۶ | ۱۲-۳ حفاظت خطای زمین                          |
| ۳۹۷ | ۱۲-۴ حفاظت استاتور                            |
| ۳۹۹ | ۱۲-۵ حفاظت خطای زمین روتور                    |
| ۴۰۰ | ۱۲-۵-۱ روش پتانسیومتری                        |
| ۴۰۱ | ۱۲-۵-۲ روش تزریق AC                           |
| ۴۰۲ | ۱۲-۵-۳ روش تزریق DC                           |
| ۴۰۳ | ۱۲-۶ شرایط بهره‌برداری نامطلوب                |
| ۴۰۳ | ۱۲-۶-۱ بارگذاری نامتعادل                      |
| ۴۰۵ | ۱۲-۶-۲ حفاظت در برابر مؤلفه توالی منفی        |
| ۴۱۱ | ۱۲-۷ حفاظت اضافه جریان                        |
| ۴۱۴ | ۱۲-۷-۱ حفاظت اضافه جریان کنترل شده توسط ولتاژ |
| ۴۱۴ | ۱۲-۷-۲ حفاظت اضافه جریان با بازدارنگی ولتاژی  |
| ۴۱۵ | ۱۲-۸ اضافه بار                                |
| ۴۱۶ | ۱۲-۹ قطع تحریک                                |
| ۴۱۷ | ۱۲-۱۰ اضافه ولتاژ                             |
| ۴۱۷ | ۱۲-۱۰-۱ اضافه ولتاژ گذرا                      |
| ۴۱۸ | ۱۲-۱۰-۲ اضافه ولتاژهای فرکانس قدرت            |
| ۴۱۸ | ۱۲-۱۱ حفاظت در برابر خطاهای مکانیکی           |

|     |                                              |
|-----|----------------------------------------------|
| ۴۱۹ | ۱۲-۱۱-۱ از کار افتادن محرک اولیه             |
| ۴۲۰ | ۱۲-۱۱-۲ اضافه سرعت                           |
| ۴۲۰ | ۱۲-۱۲ طرح حفاظتی کامل                        |
| ۴۲۱ | ۱۲-۱۲-۱ حفاظت مجموعه ژنراتور - ترانسفورماتور |
| ۴۲۳ | ۱۲-۱۲-۲ ترانسفورماتورهای واحد                |
| ۴۲۴ | ۱۲-۱۳ بهره‌برداری موازی                      |
| ۴۳۱ | مراجع                                        |

## پیش‌گفتار مؤلف

تصویر پشت جلد نمایی از قلعه دماوند و منطقه حفاظت شده لار در بخش لاریجان را نمایش می‌دهد که شاید در نظر اول سنجیتی را با حفاظت سیستم‌های قدرت نشان ندهد، هر چند که مؤلف خود از طرف والدین به این بخش از میهن منتسب می‌باشد. بر خلاف نظر غالب که حرفه مهندسی را مترادف با فرمول‌های خشک ریاضی و ابزار و تجهیزات بی‌روح می‌دانند، در سال‌های اخیر مفاهیم انسانی و زیست‌محیطی با این حرفه درآمیخته است. در طول میلیون‌سالی که از عمر کره زمین به شکل کنونی آن می‌گذرد، موجودات بسیاری بر روی این کره خاکی سازگار با آن و در توازن با قوانین طبیعت نسل خود را برای زمان‌های طولانی حفظ نمودند. متأسفانه در دو‌یست سال گذشته و پس از انقلاب صنعتی، افزایش رفاه و بهبود کیفیت زندگی جوامع بشری همراه با تخریب شدید منابع طبیعی بوده است. در صورت ادامه یافتن این روند، تصور آینده خوب و روشن برای نسل‌های بعدی دور از واقعیت خواهد بود. شاید جهت درک ژرفای مسائل زیست‌محیطی ذکر همین نکته کافی باشد که انرژی فسیلی مورد استفاده در طول یک سال در جهان، حاصل پانصد هزار سال کار طبیعت است. انرژی الکتریکی به عنوان پاک‌ترین و انعطاف‌پذیرترین شکل انرژی، عامل اصلی رفاه موجود در جوامع بشری است. با توجه به گران‌قیمت بودن نسبی این نوع انرژی و محدود بودن حامل‌های انرژی اولیه جهت تولید آن، لازم است که سهم نسل‌های بعد از منابع انرژی موجود در نظر گرفته شود. مفهوم جدیدی که در حال حاضر در مسائل طراحی و بهره‌برداری مهندسی مطرح گردیده است، موضوع تداوم، Sustainability، می‌باشد. به عنوان مثال، لازم است که روند تولید و مصرف انرژی الکتریکی به گونه‌ای تنظیم گردد که به ازای زمان‌های نامتناهی آینده، میان آنها توازن برقرار باشد. در این راستا حفاظت سیستم‌های قدرت بدون در نظر گرفتن حفاظت محیط زیست نمی‌تواند کامل باشد، هر چند که به استناد آیه شریفه خداوند خود بهترین حفاظت‌کنندگان است.

حاصل چندین سال تدریس حفاظت سیستم‌های قدرت جزوه‌ای شد که در سال ۱۳۸۰ بر اساس آن قرارداد تألیف این کتاب با دانشگاه علم و صنعت ایران منعقد گردید. وسواس در انتخاب و ویرایش مطالب کتاب منجر به تأخیر در چاپ آن گردید، که این تأخیر خود سبب خیر شد به گونه‌ای

که متن کتاب مطابق با آخرین دستاوردهای علمی و صنعتی در این زمینه به روز گردید. در مورد انتخاب مطالب این کتاب شاید ذکر چند جمله ادامه کفایت کند. فناوری دیجیتال در دو دهه اخیر ساختار تجهیزات حفاظتی را بسیار متحول نموده است، ولیکن با این وجود اصول حاکم بر حفاظت سیستم‌های قدرت تقریباً ثابت باقی مانده‌اند. این کتاب ضمن تشریح اصول حفاظتی و مبانی علمی روش‌های مختلف حفاظتی، به بیان مطالبی در مورد مسائل عملی و بهره‌برداری این تجهیزات، شامل نحوه تنظیم آنها، نیز پرداخته است. با توجه به این امر، این کتاب می‌تواند از یک سو به عنوان یک کتاب درسی، مطابق با سرفصل‌های تعریف شده وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، توسط دانشجویان مورد استفاده قرار گیرد، و از سوی دیگر به عنوان مرجع برای مهندسين حفاظت سیستم‌های قدرت در صنعت مطرح باشد. البته ناگفته نماند که وسعت مطالب در گستره مبحث حفاظت سیستم‌های قدرت به اندازه‌ای وسیع است که هیچ کتابی به تنهایی در این زمینه جامع و کامل نخواهد بود.

از خوش اقبالی دانشجویی نصیب من گردید که نماد سخت‌کوشی و صداقت در کار است. آقای مهندس حسین شاطری، که در حال حاضر دانشجوی دوره دکتری در آزمایشگاه تحقیقاتی اتوماسیون و حفاظت شبکه‌های الکتریکی اینجانب می‌باشد، در واقع عامل اصلی به مطبوعه طبع رسیدن این کتاب است. علاوه بر ویرایش و تهیه بخش‌هایی از کتاب، ایشان کلیه شکل‌ها را شخصاً رسم و یا تصحیح نمودند و تایپ متن را نیز خود انجام دادند. اکثر تمرین‌های اضافه شده به انتهای فصل‌ها نیز حاصل کار ایشان می‌باشد. در هر حال اجر معنوی این کتاب، شاید بیش از اینجانب، به ایشان تعلق دارد، هر چند که جهت رعایت حق معلمی این اجازه را دادند که تنها نام اینجانب بر روی جلد باشد. اطمینان دارم که در آینده تألیفات و ترجمه‌های ارزشمندی در زمینه مهندسی برق از ایشان پدید خواهد آمد.

در این جا لازم است که از آقای مهندس حمید سرداری و آقای مهندس سید عبدالله موسوی به دلیل ویرایش نسخه نهایی کتاب تشکر کنم. با توجه به آن که بسیاری از زمان‌هایی را که برای تهیه این کتاب صرف نمودم از اوقات فراغت اینجانب بود، باید از سازگاری همسر و بردباری دختر کوچکم تشکر نمایم. دعا‌های مادرم را همیشه عامل موفقیت خود در زندگی می‌دانم، هر چند که نتوانستم ذره‌ای از دین خود را به او ادا نمایم.

واضح است که این کتاب منفعت مادی برای اینجانب به همراه نداشته است، با این وجود در صورت فراهم شدن رضایت خاطر عزیزانی از مطالعه این کتاب، امید است که این امر باعث شادی



روح پدرم گردد. در صورتی که ایشان پس از اتمام تحصیلاتم در غرب مرا ملزم به بازگشت به وطن نمی نمودند، شاید از نظر مادی و اعتبار علمی جهانی در این زمینه از وضعیت بهتری برخوردار بودم، ولیکن عشق به وطن را از او آموختم. او که پس از غروب آفتاب ایران در روز ۲۸ مرداد ۱۳۳۲ شب را گریست. روحش شاد.

صادق جمالی

مرداد ۱۳۸۴