

# مبانی حفاظت سیستم‌های قدرت

همراه با مدل‌سازی و مثال‌های کاربردی در محیط نرم‌افزار DIgSILENT  
PowerFactory

تالیف:

دکتر حمید خوشخو

دانشیار دانشگاه صنعتی سهند

www.ketab.ir

انتشارات دانشگاه صنعتی سهند

|                         |                                                                                                                                                        |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| سرشناسه                 | خوشخو، حمید، ۱۳۶۲-                                                                                                                                     |
| عنوان و نام پدیدآور     | مبانی حفاظت سیستم‌های قدرت همراه با مدل‌سازی و مثال‌های کاربردی در محیط نرم‌افزار DigSILENT PowerFactory / تألیف حمید خوشخو؛ ویراستار علمی رضا اسلامی. |
| مشخصات نشر              | تبریز: دانشگاه صنعتی سهند، ۱۴۰۱.                                                                                                                       |
| مشخصات ظاهری            | [۳]، ۵، ۵۸۴ ص.؛ مصور (بخشی رنگی)، نمودار؛ ۲۲ × ۲۹ س.م.                                                                                                 |
| شابک                    | ۹۷۸-۹۶۴-۶۲۱۹-۸۴-۷                                                                                                                                      |
| وضعیت فهرست نویسی       | فیبا                                                                                                                                                   |
| یادداشت                 | کتابنامه.                                                                                                                                              |
| موضوع                   | برق - سیستم‌ها - حفاظت - نرم‌افزار<br>Electric power systems -- Protection -- Software                                                                 |
| موضوع                   | نرم‌افزار دیگسیلنت<br>Digilent (Computer software)                                                                                                     |
| موضوع                   | برق - سیستم‌ها - شبیه‌سازی کامپیوتری<br>Electric power systems-- Computer simulation                                                                   |
| شناسه افزوده            | اسلامی، رضا، ۱۳۶۸-، ویراستار                                                                                                                           |
| شناسه افزوده            | دانشگاه صنعتی سهند                                                                                                                                     |
| رده بندی کنگره          | TK۱۰۰۵                                                                                                                                                 |
| رده بندی دیویی          | ۶۲۱/۳۱۷                                                                                                                                                |
| شماره کتایشناسی ملی     | ۸۷۸۵۱۲۸                                                                                                                                                |
| اطلاعات رگورد کتابشناسی | فیبا                                                                                                                                                   |



دانشگاه صنعتی سهند

نام کتاب: مبانی حفاظت سیستم‌های قدرت همراه با مدل سازی و مثال های کاربردی در محیط نرم افزار DigSILENT Power Factory

تألیف: دکتر حمید خوشخو

ویراستار علمی: دکتر رضا اسلامی

ناشر: انتشارات دانشگاه صنعتی سهند

نوبت چاپ: اول، سال ۱۴۰۱

تیراژ: ۲۰۰ نسخه

تعداد صفحه و قطع: ۵۹۸ صفحه، رحلی

لیتوگرافی: چاردیز

چاپ: اعظم

شابک: ۹۷۸-۹۶۴-۶۲۱۹-۸۴-۷

قیمت: ۱۹۰۰۰۰ تومان

حق چاپ برای دانشگاه صنعتی سهند محفوظ است.

تبریز - شهر جدید سهند - دانشگاه صنعتی سهند - انتشارات دانشگاه صنعتی سهند - تلفن: ۰۴۱۳۳۴۵۹۳۱۶

مراکز پخش:

تبریز، شهر جدید سهند، دانشگاه صنعتی سهند - انتشارات دانشگاه - تلفن: ۰۴۱۳۳۴۴۲۸۳۴-۰۴۱۳۳۴۵۹۳۱۶

تبریز-خیابان امام - فلکه دانشگاه - ابتدای خیابان دانشگاه کتابفروشی علامه - تلفن: ۳۳۳۴۱۶۶۹

تبریز- آبرسان - خیابان امام خمینی روبروی مخابرات - زیرزمین بانک سرمایه انتشارات فروش - تلفن: ۰۴۱۳۳۳۶۲۹۲۹

تهران - میدان انقلاب - خیابان کارگر جنوبی - بین خیابان روانمهر و وحید نظری - بن بست گشتاسب - پلاک ۸ موسسه پخش کتابیران - تلفن: ۰۲۱۶۶۴۸۳۵۴۵

تهران، خیابان انقلاب، خیابان قدس، خیابان بزرگمهر، پلاک ۸۷ همکف - نشر کتاب دانشگاهی - تلفن: ۰۲۱۶۶۴۱۸۵۸۶

## پیشگفتار مولف

هدف از طراحی و ساخت سیستم‌های قدرت فراهم آوردن امکان ارائه انرژی الکتریکی به مصرف‌کنندگان و بهبود کیفیت زندگی آنها است. با این حال، به دلیل وابستگی شدید زندگی‌های امروزی به این انرژی، هرگونه اختلال و عدم امکان ارائه این انرژی منجر به مشکلات قابل توجه اجتماعی و اقتصادی می‌شود. از اینرو لازم است که سیستم‌های قدرت ضمن عملکرد پایدار، بتوانند در مقابل حوادث رخ داده در این شبکه‌ها تاب‌آوری مناسبی از خود نشان دهند. علاوه بر این، ساخت و در برخی موارد جابجایی و تعمیر تجهیزات سیستم‌های قدرت هزینه قابل توجهی نیاز دارد و لازم است در مقابل وقوع حوادث پیش‌بینی نشده (مانند وقوع اتصال کوتاه که معمولاً منجر به عبور جریان‌های بسیار بزرگ از شبکه و آسیب رسیدن به تجهیزات می‌شود) اقدامات لازم صورت گیرد تا در شرایط وقوع چنین حوادثی بهترین واکنش برای مقابله با آن اجرا شود.

از اینرو سیستم حفاظتی در شبکه‌های قدرت مورد استفاده قرار می‌گیرد تا در شرایط مورد نیاز، با انجام اقدامات مناسب مانع از آسیب رسیدن به تجهیزات شبکه شود و امکان تامین توان مورد نیاز بارها در شرایط قابل قبول را فراهم کند. سیستم حفاظتی از مجموعه‌ای از رله‌ها تشکیل شده که در بخش‌های مختلف شبکه نصب می‌شوند و هر یک، بخشی از شبکه (مانند نیروگاه، خط انتقال، پست و ...) را محافظت می‌کند. در حال حاضر، معمولاً هر یک رله‌هایی که توسط شرکت‌های سازنده رله، مانند Siemens و ABB، در دنیا ساخته و در اختیار مصرف‌کنندگان قرار می‌گیرد چندین حفاظت را انجام می‌دهند. به عنوان مثال رله 7UM62 شرکت زیمنس که برای حفاظت از ژنراتورها و موتورهای قابل استفاده است، حفاظت‌هایی مانند حفاظت از تجهیز در مقابل افت/افزایش بیش از حد ولتاژ/فرکانس، حفاظت از تجهیز در مقابل عبور جریان‌های بیش از حد، حفاظت از تجهیز در مقابل عملکرد نامتعادل و ... را انجام می‌دهد. بر این اساس، مهندسین رلیاژ وظیفه دارند که در این رله‌ها، برای هر حفاظت، تنظیمات مناسب را تعیین کنند تا اگر بر اثر وقوع شرایط غیر عادی (نظیر وقوع اتصال کوتاه) پارامتر مورد نظر (مثلاً جریان) از محدوده قابل قبول فراتر رفت، با ارسال فرمان قطع از رله به کلیدها، تجهیز مورد نظر از شبکه جدا شود و بدین ترتیب مانع از عملکرد نامناسب و آسیب رسیدن به تجهیزات شبکه شد.

آنچه که در این میان اهمیت بسزایی دارد، تنظیم مناسب رله‌های حفاظتی است به گونه‌ای که اولاً در شرایط مورد نیاز رله فرمان قطع تجهیز از شبکه را صادر کند و همچنین، در شرایط غیر ضروری، چنین فرمانی توسط رله صادر نشود. به بیان دیگر عدم ارسال فرمان قطع مورد نیاز (مثلاً در شرایطی که اتصال کوتاهی در یک تجهیز رخ داده و انتظار می‌رود که رله فرمان قطع را به کلیدها ارسال کند و آن تجهیز از شبکه جدا شود) و همچنین ارسال اشتباه فرمان قطع از رله به کلید (در شرایطی که خطایی در سیستم رخ نداده است و انتظار می‌رود که رله فرمان قطع را به کلید ارسال نکند) منجر به واکنش نامناسب سیستم حفاظتی می‌شود که ممکن است بر پایداری سیستم قدرت تأثیر نامطلوب داشته باشد و منجر به خسارت‌های اقتصادی قابل توجه شود.

## فهرست مطالب

|          |                                                                |       |
|----------|----------------------------------------------------------------|-------|
| ۱.....   | حفاظت اضافه‌جریان غیرجهتدار                                    | فصل ۱ |
| ۱.....   | مقدمه                                                          | ۱-۱   |
| ۳.....   | اصول عملکرد رله اضافه‌جریان                                    | ۲-۱   |
| ۳.....   | مشخصه‌های استفاده شده در رله اضافه‌جریان                       | ۱-۲-۱ |
| ۹.....   | هماهنگی حفاظتی مابین رله‌های اضافه‌جریان                       | ۲-۲-۱ |
| ۱۷.....  | رله‌های اضافه‌جریان وابسته به ولتاژ                            | ۳-۲-۱ |
| ۱۹.....  | هماهنگی حفاظتی مابین رله اضافه‌جریان و فیوز                    | ۴-۲-۱ |
| ۱۹.....  | نحوه عملکرد رله‌های اضافه‌جریان در برابر خطاهای فاز و زمین     | ۵-۲-۱ |
| ۲۲.....  | چند مثال از نحوه تنظیم رله‌های اضافه‌جریان                     | ۳-۱   |
| ۲۲.....  | مثال ۱: تنظیم رله اضافه‌جریان زمین در یک شبکه شعاعی ساده       | ۱-۳-۱ |
| ۲۵.....  | مثال ۲: تنظیم رله اضافه‌جریان فاز در یک شبکه نمونه             | ۲-۳-۱ |
| ۳۶.....  | مثال ۳: تنظیم رله اضافه‌جریان فاز در یک شبکه نمونه             | ۳-۳-۱ |
| ۴۶.....  | مثال ۴: تنظیم رله اضافه‌جریان در یک واحد نیروگاهی              | ۴-۳-۱ |
| ۴۸.....  | شیه‌سازی رله اضافه‌جریان SPAJ 140C در PowerFactory             | ۴-۱   |
| ۴۸.....  | رله اضافه‌جریان SPAJ 140 C                                     | ۱-۴-۱ |
| ۵۰.....  | ساختار رله اضافه‌جریان SPAJ 140C در PowerFactory               | ۲-۴-۱ |
| ۷۳.....  | مثال ۵: نحوه ایجاد و تنظیم رله اضافه‌جریان در PowerFactory     | ۳-۴-۱ |
| ۹۶.....  | مثال ۶: تنظیم رله اضافه‌جریان در PowerFactory                  | ۴-۴-۱ |
| ۱۰۵..... | شیه‌سازی عملکرد رله اضافه‌جریان در تحلیل پخش بار و اتصال کوتاه | ۵-۴-۱ |
| ۱۱۶..... | ویرایش مشخصات گرافیکی صفحه I-t                                 | ۶-۴-۱ |
| ۱۴۹..... | عملکرد رله اضافه‌جریان در شیه‌سازی زمانی                       | ۷-۴-۱ |
| ۱۵۹..... | مراجع                                                          | ۵-۱   |
| ۱۶۱..... | حفاظت اضافه‌جریان جهتدار                                       | فصل ۲ |
| ۱۶۱..... | مقدمه                                                          | ۱-۲   |
| ۱۶۴..... | کاربرد و اصول تنظیم رله‌های اضافه‌جریان جهتدار                 | ۲-۲   |

|     |                                                                          |       |
|-----|--------------------------------------------------------------------------|-------|
| ۱۶۹ | مثال ۱: تنظیم رله اضافه‌جریان زمین در یک شبکه حلقوی                      | ۱-۲-۲ |
| ۱۷۴ | اصول عملکرد رله‌های اضافه‌جریان جهتدار                                   | ۳-۲   |
| ۱۷۷ | تشخیص جهت جریان در رله‌های اضافه‌جریان جهتدار سه‌فاز                     | ۱-۳-۲ |
| ۱۸۱ | شیبه‌سازی رله اضافه‌جریان جهتدار در PowerFactory                         | ۴-۲   |
| ۱۸۱ | ساختار یک نمونه رله اضافه‌جریان جهتدار فاز در PowerFactory               | ۱-۴-۲ |
| ۲۰۹ | تحلیل عملکرد یک نمونه رله اضافه‌جریان جهتدار فاز در PowerFactory         | ۲-۴-۲ |
| ۲۱۳ | عملکرد رله اضافه‌جریان جهتدار فاز به ازاء سیگنال‌های پلاریزاسیون مختلف   | ۳-۴-۲ |
| ۲۲۶ | نحوه ایجاد و تنظیم رله اضافه‌جریان جهتدار فاز در PowerFactory            | ۴-۴-۲ |
| ۲۳۸ | عملکرد رله اضافه‌جریان جهتدار فاز در شیبه‌سازی زمانی RMS                 | ۵-۴-۲ |
| ۲۴۳ | عملکرد رله اضافه‌جریان جهتدار فاز در شیبه‌سازی زمانی EMT                 | ۶-۴-۲ |
| ۲۴۵ | بررسی تاثیر Voltage Memory بر رفتار رله اضافه‌جریان جهتدار               | ۷-۴-۲ |
| ۲۴۹ | ساختار یک نمونه رله اضافه‌جریان جهتدار زمین در PowerFactory              | ۸-۴-۲ |
| ۲۶۳ | عملکرد رله اضافه‌جریان جهتدار زمین در شیبه‌سازی استاتیک                  | ۹-۴-۲ |
| ۲۶۶ | مراجع                                                                    | ۵-۲   |
| ۲۶۷ | حفاظت دیستانس                                                            | فصل ۳ |
| ۲۶۷ | مقدمه                                                                    | ۱-۳   |
| ۲۶۸ | اصول عملکرد رله‌های دیستانس                                              | ۲-۳   |
| ۲۶۸ | روش متداول محاسبه امپدانس مابین رله و محل اتصال کوتاه در رله‌های دیستانس | ۱-۲-۳ |
| ۲۸۱ | نحوه تنظیم و رعایت هماهنگی حفاظتی مابین رله‌های دیستانس                  | ۲-۲-۳ |
| ۲۸۹ | عوامل تاثیرگذار بر عملکرد رله دیستانس                                    | ۳-۲-۳ |
| ۲۹۷ | مشخصه‌های استفاده شده در رله دیستانس                                     | ۴-۲-۳ |
| ۳۱۵ | چند مثال از نحوه تنظیم رله‌های دیستانس                                   | ۳-۳   |
| ۳۱۶ | مثال ۲: تنظیم رله دیستانس در یک شبکه ساده                                | ۱-۳-۳ |
| ۳۱۸ | مثال ۳: تنظیم رله دیستانس در یک شبکه با خطوط موازی                       | ۲-۳-۳ |
| ۳۲۰ | مثال ۴: تنظیم رله دیستانس در یک شبکه با انشعاب میانی                     | ۳-۳-۳ |
| ۳۲۱ | مثال ۵: تنظیم رله دیستانس در یک واحد نیروگاهی                            | ۴-۳-۳ |

|     |                                                                         |       |
|-----|-------------------------------------------------------------------------|-------|
| ۳۲۳ | شبیه‌سازی رله دیستانس در PowerFactory                                   | ۴-۳   |
| ۳۲۳ | ساختار یک نمونه رله دیستانس در PowerFactory                             | ۱-۴-۳ |
| ۳۵۳ | نحوه ایجاد و تنظیم رله دیستانس در PowerFactory                          | ۲-۴-۳ |
| ۳۶۶ | تنظیم مشخصه R-X رله دیستانس در PowerFactory                             | ۳-۴-۳ |
| ۳۶۹ | عملکرد رله دیستانس در شبیه‌سازی استاتیکی                                | ۴-۴-۳ |
| ۳۸۳ | عملکرد رله دیستانس در شبیه‌سازی زمانی RMS                               | ۵-۴-۳ |
| ۳۹۰ | عملکرد رله دیستانس در شبیه‌سازی زمانی EMT                               | ۶-۴-۳ |
| ۳۹۵ | عملکرد رله دیستانس در خطوط دو مداره                                     | ۷-۴-۳ |
| ۴۰۳ | مراجع                                                                   | ۵-۳   |
| ۴۰۵ | حفاظت دیفرانسیل                                                         | فصل ۴ |
| ۴۰۵ | اصول عملکرد حفاظت دیفرانسیل                                             | ۱-۴   |
| ۴۰۶ | حفاظت دیفرانسیلی ترانسفورماتورها                                        | ۲-۴   |
| ۴۰۶ | تأثیر نسبت تبدیل و تنظیم‌کننده ولتاژ ترانسفورماتورها بر حفاظت دیفرانسیل | ۱-۲-۴ |
| ۴۰۸ | تأثیر خطای CT ها بر عملکرد حفاظت دیفرانسیل                              | ۲-۲-۴ |
| ۴۱۰ | تأثیر اشباع CT ها بر حفاظت دیفرانسیل                                    | ۳-۲-۴ |
| ۴۱۲ | تأثیر گروه‌برداری ترانسفورماتورها بر حفاظت دیفرانسیل                    | ۴-۲-۴ |
| ۴۲۰ | تأثیر جریان هجومی ترانسفورماتورها بر حفاظت دیفرانسیل                    | ۵-۲-۴ |
| ۴۲۵ | حفاظت دیفرانسیلی ژنراتورها و موتورها                                    | ۳-۴   |
| ۴۲۸ | حفاظت دیفرانسیلی شین‌ها                                                 | ۴-۴   |
| ۴۲۹ | حفاظت دیفرانسیل متمرکز                                                  | ۱-۴-۴ |
| ۴۳۳ | حفاظت دیفرانسیل غیر متمرکز                                              | ۲-۴-۴ |
| ۴۳۴ | حفاظت دیفرانسیل امپدانس زیاد                                            | ۳-۴-۴ |
| ۴۳۶ | حفاظت محدود به اتصال زمین در ترانسفورماتورها و ژنراتورها                | ۵-۴   |
| ۴۳۸ | حفاظت محدود به اتصال زمین برای سیم‌پیچی ستاره                           | ۱-۵-۴ |
| ۴۳۹ | حفاظت محدود به اتصال زمین برای سیم‌پیچی مثلث                            | ۲-۵-۴ |
| ۴۳۹ | شبیه‌سازی حفاظت دیفرانسیل ترانسفورماتور در PowerFactory                 | ۶-۴   |

|     |                                    |       |
|-----|------------------------------------|-------|
| ۴۴۲ | .....PowerFactory در دیفرانسیل     | ۱-۶-۴ |
| ۴۵۸ | .....PowerFactory در ترانسفورماتور | ۲-۶-۴ |
| ۴۶۹ | .....شیبه‌سازی استاتیکی            | ۳-۶-۴ |
| ۴۷۲ | .....EMT و RMS                     | ۴-۶-۴ |
| ۴۷۷ | .....PowerFactory در شین           | ۷-۴   |
| ۴۷۷ | .....PowerFactory در شین           | ۱-۷-۴ |
| ۴۸۲ | .....شیبه‌سازی استاتیکی            | ۲-۷-۴ |
| ۴۸۵ | .....EMT                           | ۳-۷-۴ |
| ۴۸۶ | .....مراجع                         | ۸-۴   |
| ۴۸۷ | .....پیوست                         | فصل ۵ |
| ۴۸۷ | .....PowerFactory نرم‌افزار        | ۱-۵   |
| ۴۸۹ | .....PowerFactory                  | ۱-۱-۵ |
| ۴۹۱ | .....بخش بار                       | ۲-۱-۵ |
| ۴۹۵ | .....(استاتیک)                     | ۳-۱-۵ |
| ۴۹۷ | .....(RMS و یا EMT)                | ۴-۱-۵ |
| ۵۰۶ | .....CT جریان                      | ۲-۵   |
| ۵۰۶ | .....CT دقت                        | ۱-۲-۵ |
| ۵۰۸ | .....اندازه‌گیری                   | ۲-۲-۵ |
| ۵۰۹ | .....انتخاب CT حفاظتی مناسب        | ۳-۲-۵ |
| ۵۱۲ | .....رفتار CT در حالت اشباع        | ۴-۲-۵ |
| ۵۱۴ | .....(کابل‌ها)                     | ۳-۵   |
| ۵۱۴ | .....ترانسفورماتور                 | ۱-۳-۵ |
| ۵۲۱ | .....موتور                         | ۲-۳-۵ |
| ۵۲۲ | .....کابل‌ها و هادی‌ها             | ۳-۳-۵ |
| ۵۲۶ | .....محاسبه فازور                  | ۴-۵   |
| ۵۲۶ | .....فیلتر تصحیح تداخل فرکانسی     | ۱-۴-۵ |

|     |                                                                                |        |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------|--------|
| ۵۲۸ | ..... محاسبه فازور به کمک DFT                                                  | ۲-۴-۵  |
| ۵۳۲ | ..... Half cycle DFT محاسبه فازور به کمک                                       | ۳-۴-۵  |
| ۵۳۲ | ..... Cosine Filter محاسبه فازور به کمک                                        | ۴-۴-۵  |
| ۵۳۳ | ..... محاسبه فازور به کمک مقادیر لحظه‌ای                                       | ۵-۴-۵  |
| ۵۳۵ | ..... پیوست پنجم: تاثیر سیم‌بندی ترانسفورماتور بر جریان اتصال کوتاه            | ۵-۵    |
| ۵۳۵ | ..... تاثیر اتصال کوتاه دوفاز و سه فاز در حضور ترانسفورماتور $\Delta Y$        | ۱-۵-۵  |
| ۵۳۷ | ..... بررسی ضرایب در نظر گرفته شده برای جابجایی منحنی آسیب‌پذیری ترانسفورماتور | ۲-۵-۵  |
| ۵۴۰ | ..... پیوست ششم: روش‌های تعیین سیگنال پلاریزاسیون برای رله‌های فازی            | ۶-۵    |
| ۵۴۵ | ..... پیوست هفتم: نحوه رسم سیگنال‌های پلاریزاسیون                              | ۷-۵    |
| ۵۵۲ | ..... پیوست هشتم: تاثیر القاء متقابل در خطوط موازی بر عملکرد رله دیستانس       | ۸-۵    |
| ۵۵۹ | ..... تاثیر محل اتصال کوتاه بر افزایش و یا کاهش برد رله دیستانس                | ۱-۸-۵  |
| ۵۶۱ | ..... تاثیر القاء متقابل بر عدم پوشش خط اصلی توسط زون ۲                        | ۲-۸-۵  |
| ۵۶۲ | ..... تاثیر القاء متقابل بر تداخل عملکرد زون ۱ رله‌های دیستانس                 | ۳-۸-۵  |
| ۵۶۲ | ..... تاثیر زمین شدن یکی از مدارها در یک خط دو مداره بر افزایش برد رله         | ۴-۸-۵  |
| ۵۶۳ | ..... روش‌های بهبود حفاظت دیستانس در خطوط دو مداره                             | ۵-۸-۵  |
| ۵۶۷ | ..... پیوست نهم: محاسبه امپدانس در رله‌های دیستانس سری TSA                     | ۹-۵    |
| ۵۶۷ | ..... محاسبه امپدانس در شرایط وقوع خطای زمین                                   | ۱-۹-۵  |
| ۵۷۰ | ..... محاسبه امپدانس در شرایط وقوع خطای فاز                                    | ۲-۹-۵  |
| ۵۷۲ | ..... پیوست دهم: تاثیر نوسان توان بر عملکرد رله‌های دیستانس                    | ۱۰-۵   |
| ۵۷۲ | ..... نوسان توان پایدار و ناپایدار                                             | ۱-۱۰-۵ |
| ۵۷۴ | ..... امپدانس اندازه‌گیری شده توسط رله دیستانس در شرایط نوسان توان             | ۲-۱۰-۵ |
| ۵۷۶ | ..... مثال ۱: امپدانس اندازه‌گیری شده توسط رله دیستانس در شرایط نوسان توان     | ۳-۱۰-۵ |
| ۵۸۰ | ..... تشخیص نوسان توان در رله‌های دیستانس                                      | ۴-۱۰-۵ |
| ۵۸۲ | ..... مثال ۲: تنظیم واحد تشخیص نوسان توان در رله نیروگاهی 7UM62                | ۵-۱۰-۵ |
| ۵۸۴ | ..... مراجع                                                                    | ۱۱-۵   |