



普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十二五”规划教材

**Power System
Relaying Protection**

电力系统 继电保护

第2版

◎ 韩 笑 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育电气工程与自动化（应用型）“十二五”规划教材

电力系统继电保护

第2版

主 编 韩 笑
副主编 隆贤林
参 编 李 斌 宋丽群



机械工业出版社

本书以实际工作所需的专业知识和技术为着眼点,在适度的基础知识与理论体系下,介绍电力系统实用继电保护技术,同时介绍实用继电保护装置的使用、二次接线及测试方法。

全书共十章。第1章对电力系统继电保护作一般概述,给出了继电保护的定义、任务、评价方法、保护对象,说明了电力系统对于继电保护的基本要求。第2章为基础知识,主要对电力系统故障分析与继电保护的联系、互感器与继电保护的关系、继电器基础知识等进行了说明。第3章为35kV及以下电压等级的线路保护,主要对阶段式电流保护、反时限过电流保护、方向电流保护等进行了说明。第4章为110kV输电线路保护,主要内容为零序方向电流保护与距离保护。第5章为220kV及以上电压等级输电线路保护,主要内容为纵联保护。第6章为输电线路自动重合闸,主要内容为三相一次重合闸及综合重合闸。第7章为变压器保护,主要内容为变压器主保护与后备保护的介绍。第8章为发电机保护,介绍了纵差动保护、匝间短路保护、定子接地保护、失磁保护等发电机专用保护的原理。第9章为母线保护,主要内容为母线差动保护与失灵保护。第10章为继电保护装置与实现,重点介绍典型继电保护的工程应用案例及相应的整定及测试方面的知识。

本书可作为应用型本科院校电气工程及其自动化专业及相近专业的教材,也可作为自学、培训教材,同时可供从事继电保护的工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统继电保护/韩笑主编. —2版. —北京:机械工业出版社, 2015.5

普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-49631-1

I. ①电… II. ①韩… III. ①电力系统-继电保护-高等学校-教材
IV. ①TM77

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第049153号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:王雅新 责任编辑:王雅新 张利萍

责任校对:陈越 封面设计:张静

责任印制:李洋

三河市宏达印刷有限公司印刷

2015年5月第2版第1次印刷

184mm×260mm·17.75印张·438千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-49631-1

定价:38.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

普通高等教育电气工程与自动化（应用型）“十二五”规划教材

编审委员会委员名单

主任委员：刘国荣

副主任委员：

张德江	梁景凯	张元	袁德成	焦斌
吕进	胡国文	刘启中	汤天浩	黄家善
钱平	王保家			

委员（按姓氏笔画排序）：

丁元明	马修水	王再英	王军	叶树江
孙晓云	朱一纶	张立臣	李先允	李秀娟
李海富	杨宁	陈志新	周渊深	尚丽萍
罗文广	罗印升	罗兵	范立南	娄国焕
赵巧娥	项新建	徐建英	郭伟	高亮
韩成浩	蔡子亮	樊立萍	穆向阳	

第2版前言

《电力系统继电保护》教材第1版出版已近四年，教材使用过程中收到读者的许多意见与建议。广大读者对于本教材突出应用型特色，强调对知识的理解、实践及在工程上的应用等优点加以肯定的同时，也提出了突出培养定位、加强教材应用性、完善教材结构、扩展教材内容等有益的意见与建议。

目前，从事电力系统继电保护专业以传统类型为主体的同质性本科人才已近饱和。而能够对电力系统继电保护事故及异常问题等进行，处理解决实际工程问题的人员较为紧缺。因此，在原有的应用型本科教学的基础上，应更加重视本科学生对于电力系统继电保护方面的高水平应用能力的培养，适应电力行业的经济转型、产业升级、企业技术创新的新型需求。

根据这个思路，对于原教材的编写思路进行了一些改进。首先是调整培养定位、改革教材内容，定位于基础扎实、工作适应性强、有发展潜力的工程型电力人才培养模式。对原教材中的新型继电保护内容加以更新，加入新技术应用，保护系统设计、实用案例分析、新型装置原理介绍等新技术应用内容。其次是融合教学资源、扩展教材功能。遵循继电保护技术发展的历史，强调叙述的系统性、逻辑性和严密性，与大学本科电工理论基础、电机学、电子学、电力系统分析等课程教材相衔接，系统地、由浅入深地介绍和论述了电力系统继电保护的基本理论和应用基础。再次是强化高级应用、促进项目教学。在保障电力系统继电保护的基本理论和应用基础教学的基础上，在教材中增加继电保护测试技术、继电保护常见问题处理、继电保护工程设计等高级工程应用类及技术创新类项目教学的任务及指导内容。

本版教材共分为十章，相对于第1版，删除原变电站自动化一章、电网微机保护及应用案例一章。对第1章绪论进行了扩充，将原第2章改为基础知识，将原第3章内容分为第3、4、5章。第6章为新增内容，主要介绍自动重合闸。将原第5章重新编写，改为第7章变压器保护，第8章为发电机保护，第9章为母线保护。原第7章与第4章内容改编为第10章继电保护装置与实现。

总体方案按总授课学时为64学时，课外128学时设计，在教材内容上充实了继电保护的基础知识及相关内容。并与故障分析知识、电气设备相关知识进行合理的衔接，突出专业基础知识在继电保护中的应用。重点对元件保护知识加以合理的整合与扩充，在元件保护原理、接线与整定内容中增加相应工程应用案例。

韩笑编写第1、2、7、8章，隆贤林编写第3、4、5章，宋丽群编写第6章，李斌编写第9、10章。韩笑任主编并负责全书统稿。

限于水平与精力，书中肯定会存在诸多疏漏，敬请各位读者不吝赐教。

编者

第1版前言

在开放和互联的信息模式基础上,建设坚强智能电网,实现发电、输电、供电、用电、客户售电、电网分级调度、综合服务等电力产业全流程的智能化、信息化、分级化互动管理已成为当前及近阶段的首要任务。社会对电气工程及其自动化科技工作者的需求量呈上升态势。电力系统继电保护课程作为支撑电气工程学科专业的主干课程,具有特殊的重要地位。学习过电力系统继电保护课程,掌握相应的继电保护工程技术应用能力的毕业生或专业技术人员受到了电力系统和电力设备的运行和控制部门、电气控制设备的制造和使用部门的广泛欢迎。

继电保护伴随着电力系统而生,继电保护原理及继电保护装置的应用,是电力系统实用技术的重要环节。继电保护技术的应用繁杂广泛,随着现代科技的飞速发展,继电保护在更新自身技术的基础上与现代的微机、通信技术相结合,使继电保护系统日趋先进。无论是继电保护装置还是继电保护系统,都蕴含着严谨而又富有创新的科学哲理,同时也折射出现代技术发展的光芒。可以说继电保护是一门艺术,而掌握继电保护知识也绝非易事。

本着坚持“基本理论适度、注重工程应用”的基本原则,在理论教学环节及实践教学环节中引入新型教育教学理念,根据新理念重新组织教学内容并编写本规划教材。在编写过程中特别注意了以实用继电保护为出发点,不搞理论研究,避免复杂的整定计算,避免繁琐的推导过程,多讲最基本原理及用法,多讲实用问题。同时紧紧围绕“二次系统”、“继电保护系统”进行组织,对实用的保护装置加以介绍;始终以继电保护的哲理为“魂”,在介绍保护原理、整定、接线、案例分析的同时,强化读者对继电保护核心、基础理念的理解,强化对继电保护原理所体现出的哲理的理解。教材的组织并未脱离继电保护的发展历史,对于传统的电磁型继电器、整流型继电保护装置都保留有部分内容,并借此讲述继电保护的最基本原理。

全书共七章,依次为:绪论、互感器及变换器、电网保护原理、电网微机保护及应用实例、元件保护原理、变电站自动化、继电保护装置实验与测试。

本书由南京工程学院韩笑编写第1、7章;宋丽群编写第2章;李斌编写第3章;隆贤林编写4、5章;北京林业大学李胜编写第6章。韩笑任主编并负责全书统稿。

本书由上海电力学院高亮教授主审,他在百忙之中对书稿进行了仔细审阅,并提出了许多宝贵意见,在此表示诚挚的感谢!

参与本书编写工作的还有昆山供电公司的戈祥麟、朱正风。本书编写过程中,参阅了国内外许多公司的有关技术资料,并得到广大从事继保工作同仁的支持。在此一并向他们表示感谢!

书中错误疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正,联系地址:南京市江宁科学园弘景大道1#,南京工程学院电力工程学院(211167)。E-mail:hxslqc@jlonline.com。

编 者

下标符号说明

下标	英语	含义	下标应用举例
1	Positive Sequence	正序	z_1 线路单位长度正序阻抗
2	Negative Sequence	负序	I_2 负序电流
0	Zero Sequence	零序	I_0 零序电流
act	action	起动	I_{act} 起动电流
aper	aperiodic	非周期的	K_{aper} 非周期分量系数
B	Base	基准	S_B 标准（基准）容量
bra	branch	分支	K_{bra} 分支系数
C	Capacitor	电容	X_C 电容电抗
d	difference	差动	I_d 差动电流
F	Fault	故障	$\dot{I}_F$ 故障电流
G	Generator	发电机	$I_{N.G}$ 发电机额定电流
g	grounding	接地	R_g 接地电阻
L	Line	线路	Z_L 线路阻抗
L	Inductance (Lenz)	电感	X_L 电感电抗（ X 用于和线路阻抗相区分）
Lo	Load	负荷	I_{Lo} 负荷电流
Lo	Load	负荷	Z_{Lo} 负荷阻抗
m	measuring	测量	$\dot{U}_m$ 、 $\dot{I}_m$ （输入保护装置的）测量电压、电流
max	maximum	最大的	$I_{F.max}$ 最大故障电流
min	minimum	最小的	$I_{F.min}$ 最小故障电流
Ms	Motor start	电动机自起动	K_{Ms} 电动机自起动系数
N	Nominal	额定的	U_N 额定电压
n	neutral	中性点	R_n 中性点接地电阻
op	operation	动作	I_{op} 、 Z_{op} 动作电流、动作阻抗
P	Polarization	极化	U_p 极化电压
rel	reliable	可靠的	K_{rel} 可靠系数
res	reset	制动	K_{res} 制动系数
re	reset	返回	I_{re} 返回电流

(续)

下标	英语	含义	下标应用举例
S	System	系统	$X_{S, \min}$ 系统最小阻抗
sen	sensitive	灵敏性	K_{sen} 灵敏系数
set	setting	整定	Z_{set} 整定阻抗
ss	same style	同型	K_{ss} 同型系数
T	Transformer	变压器	$I_{N, T}$ 变压器额定电流
unb	unbalance	不平衡	I_{unb} 不平衡电流

目 录

第2版前言	
第1版前言	
下标符号说明	
第1章 绪论	1
1.1 从“Relay”到“Protective Relay”	1
1.2 继电保护的概念及任务	4
1.3 对继电保护的基本要求	6
1.3.1 可靠性	6
1.3.2 选择性	7
1.3.3 速动性	8
1.3.4 灵敏性	9
1.3.5 对保护“四性”的小结	9
1.3.6 简单性	9
1.3.7 经济性	10
1.3.8 小结	11
1.4 继电保护运行评价	11
1.4.1 继电保护综合评价体系	11
1.4.2 继电保护动作记录与评价	12
1.5 保护对象与保护区域	12
1.6 继电保护必备知识	13
1.6.1 电气主接线图	14
1.6.2 等效阻抗及阻抗图	14
1.6.3 电力系统的基本参数	14
1.6.4 已有保护及所存在的问题	14
1.6.5 影响保护正确动作的因素	14
1.6.6 保护对象认知	15
1.6.7 故障分析知识	15
1.6.8 电气量极值	15
1.6.9 互感器相关信息	15
1.6.10 未来扩建	15
1.7 继电保护技术的发展	16
本章小结	19
习题与思考题	19
第2章 基础知识	20
2.1 电力系统故障分析	20
2.1.1 标幺值及电力系统元件参数计算	20
2.1.2 对称分量法	22
2.1.3 各序阻抗网络的构成	24
2.1.4 横向短路的简便计算方法	27
2.2 互感器	30
2.2.1 电流互感器	30
2.2.2 电压互感器	38
2.3 继电器	44
2.3.1 继电保护常用术语	44
2.3.2 继电器的分类	45
2.3.3 继电保护常用电气文字符号	46
2.3.4 电磁型继电器简介	49
本章小结	50
习题与思考题	50
第3章 35kV及以下电压等级线路保护	53
3.1 配电线路相间短路电流、电压保护	53
3.1.1 无时限电流速断保护	54
3.1.2 限时电流速断保护	57
3.1.3 定时限过电流保护	59
3.1.4 反时限电流保护	61
3.1.5 电流保护接线方式	63
3.1.6 电流电压联锁速断保护	65
3.1.7 阶段式电流保护	66
3.1.8 评价与小结	68
3.2 方向电流保护	69
3.2.1 工作原理	69
3.2.2 功率方向元件	70
3.2.3 90°接线方式	72
3.2.4 应用实例	76
3.2.5 评价与小结	78
3.3 单相接地保护	78
3.3.1 传统的保护方式	78
3.3.2 保护遇到的难题	79
3.3.3 配电网新型接地保护示例	80
3.3.4 评价与小结	81
本章小结	81
习题与思考题	82
第4章 110kV输电线路保护	84

4.1 零序电气量的取得及电气量分析	84	5.4 工频变化量原理在高压线路保护中的 应用	127
4.1.1 电气量取得	84	5.4.1 电压电流分析	127
4.1.2 电气量分析	84	5.4.2 方向元件原理	129
4.2 阶段式零序电流保护	87	5.4.3 阻抗继电器原理	130
4.2.1 零序电流速断保护	87	5.5 保护配置的说明	132
4.2.2 零序电流限时速断保护	89	5.6 电网保护配置总结	133
4.2.3 零序过电流保护	89	5.6.1 主保护与后备保护	133
4.3 零序功率方向元件	90	5.6.2 电网保护的配置	134
4.3.1 传统的零序功率方向继电器	90	本章小结	134
4.3.2 微机型零序功率方向元件	91	习题与思考题	135
4.4 零序电流保护应用实例	91	第6章 输电线路自动重合闸	136
4.5 距离保护基本原理	93	6.1 重合闸的作用、分类及基本要求	136
4.6 阻抗元件	95	6.2 110kV 及以下电压等级线路三相 自动重合闸	137
4.6.1 阻抗继电器基本原理与分类	95	6.2.1 检无压、检同步重合闸基本 原理	137
4.6.2 单相式圆特性阻抗继电器	96	6.2.2 检无压、检同步重合闸动作 逻辑	139
4.6.3 直线特性阻抗继电器	97	6.2.3 同步检定原理	141
4.6.4 传统阻抗继电器的实现	99	6.2.4 参数整定	142
4.6.5 阻抗继电器的精确工作电流	99	6.3 220kV 及以上电压等级线路综合 自动重合闸	144
4.6.6 方向阻抗继电器的死区问题	100	6.3.1 功能逻辑	144
4.6.7 阻抗继电器的接线方式	100	6.3.2 参数整定	148
4.6.8 实用方向阻抗元件	102	6.4 重合闸相关问题	148
4.7 距离保护整定	104	6.4.1 自动重合闸与继电保护的配合	148
4.7.1 助增电流与汲出电流	104	6.4.2 分相跳闸逻辑	150
4.7.2 阶段式距离保护整定	105	6.4.3 非全相运行对零序方向电流 保护的影响	152
4.8 影响距离保护正确动作的因素及 对策	107	6.4.4 非全相运行对距离保护的影响	154
4.8.1 振荡闭锁	107	6.4.5 非全相运行对线路纵联保护的 影响	154
4.8.2 电压回路断线闭锁	109	6.4.6 自适应重合闸概述	155
4.8.3 过渡电阻	110	本章小结	155
本章小结	112	习题与思考题	156
习题与思考题	113	第7章 变压器保护	157
第5章 220kV 及以上电压等级输电线路 保护	115	7.1 变压器继电保护配置	157
5.1 纵联保护概述	115	7.1.1 变压器的故障及不正常工作 状态	157
5.1.1 全线速动保护与双端测量原理	115	7.1.2 主保护配置	158
5.1.2 纵联保护分类	117	7.1.3 后备保护配置	158
5.1.3 纵联保护通道	117	7.2 瓦斯保护	159
5.2 分相电流差动纵联保护	121		
5.2.1 导引线保护	121		
5.2.2 光纤分相电流差动保护	122		
5.3 方向比较式纵联保护	124		
5.3.1 纵联方向保护工作原理	124		
5.3.2 纵联方向保护基本原则	125		

7.2.1 瓦斯保护简介	159	8.2.5 逻辑框图	196
7.2.2 气体继电器的工作原理	159	8.3 发电机定子绕组匝间短路保护	197
7.3 纵联差动保护基本原理简介	160	8.3.1 概述	197
7.4 励磁涌流分析与对策	162	8.3.2 单元件横差式匝间短路保护	198
7.4.1 励磁电流与励磁涌流	162	8.3.3 裂相横差保护式匝间短路保护	199
7.4.2 相应对策	164	8.3.4 反应转子回路二次谐波电流的 匝间短路保护	200
7.5 差动保护的相位补偿与数值补偿	165	8.3.5 纵向零序电压式匝间短路保护	201
7.5.1 外转角	166	8.4 发电机定子绕组的单相接地保护	202
7.5.2 内转角	168	8.4.1 定子绕组单相接地的特点	202
7.5.3 数值补偿方法	170	8.4.2 基波零序电压式定子接地保护	203
7.6 比率制动	171	8.4.3 双频式 100% 保护区定子接地 保护	204
7.6.1 其他不平衡电流分析	171	8.4.4 附加电源的定子接地保护	205
7.6.2 比率制动特性	173	8.5 发电机过电流与过负荷保护	206
7.6.3 比率制动特性的改进	175	8.5.1 相间短路后备保护特点	206
7.7 差动保护整定	177	8.5.2 对称过电流（过负荷）保护	206
7.7.1 比率制动特性相关参数整定	177	8.5.3 负序过电流（过负荷）保护	208
7.7.2 其他参数整定	178	8.6 励磁回路接地保护	209
7.8 变压器相间短路的后备保护及过负荷 保护	178	8.6.1 概述	209
7.8.1 过电流保护	179	8.6.2 定期检测装置与励磁回路 一点接地保护	210
7.8.2 复合电压起动过电流保护	180	8.6.3 励磁回路两点接地保护	210
7.8.3 负序过电流保护	182	8.7 同步发电机失磁保护	211
7.8.4 过负荷保护	183	8.7.1 概述	211
7.8.5 阻抗保护	183	8.7.2 失磁过程中的阻抗变化	211
7.8.6 跳闸方案与方向元件的配置	184	8.7.3 失磁保护的主要判据及整定	213
7.9 变压器接地短路的后备保护	184	本章小结	214
7.9.1 中性点直接接地变压器的零序 电流保护	185	习题与思考题	215
7.9.2 中性点非直接接地变压器的 零序电流电压保护	186	第9章 母线保护	217
本章小结	187	9.1 母线保护配置原则	217
习题与思考题	189	9.1.1 母线故障范围	217
第8章 发电机保护	190	9.1.2 母线故障后保护动作行为	217
8.1 发电机的故障和不正常工作状态及 其保护配置	190	9.1.3 利用线路保护切除母线故障	217
8.1.1 故障与不正常工作状态	190	9.1.4 专用母线保护	217
8.1.2 保护配置	190	9.2 母线保护原理	218
8.1.3 保护的動作行为	192	9.3 双母线保护特点与配置	220
8.2 发电机的纵差保护	193	9.3.1 双母线保护选择性	220
8.2.1 保护构成原理	193	9.3.2 选择故障母线方法	220
8.2.2 发电机变压器组差动保护配置	194	9.4 断路器失灵保护简介	221
8.2.3 比率制动式纵联差动保护	194	本章小结	222
8.2.4 标积制动式纵联差动保护	196	习题与思考题	223
		第10章 继电保护装置与实现	224

10.1 微机保护硬件组成	224	测试	244
10.2 10 ~ 35kV 线路保护测控装置应用		10.4.3 典型 220kV 输电线路一次接线	
案例	226	简介	245
10.2.1 典型保护测控一体化装置		10.4.4 主要相关二次设备联系	246
简介	226	10.4.5 第一套保护柜	246
10.2.2 典型保护测控一体化装置		10.4.6 第二套保护柜	249
测试	227	10.4.7 测控柜	250
10.2.3 保护装置的组屏方式	229	10.4.8 其他户内设备	251
10.2.4 装置应用于 10kV 馈线整定		10.4.9 220kV 线路保护相关二次部分	
案例	230	简介	252
10.3 110kV 线路保护测控装置应用		10.4.10 装置应用于 220kV 线路的整定	
案例	233	案例	256
10.3.1 典型 110kV 输电线路保护装置		10.5 110kV 变压器保护实例	258
简介	233	10.5.1 典型 110kV 变压器保护装置	
10.3.2 典型 110kV 输电线路距离保护		简介	259
测试	234	10.5.2 典型 110kV 变压器差动保护	
10.3.3 110kV 线路保护相关二次部分		测试	261
简介	239	10.5.3 变压器保护相关二次部分	
10.3.4 装置应用于 110kV 线路的整定		简介	263
案例	240	10.5.4 装置应用于 110kV 主变压器的	
10.4 220kV 线路保护实例	244	整定案例	266
10.4.1 典型 220kV 输电线路保护装置		本章小结	268
简介	244	习题与思考题	270
10.4.2 典型 220kV 输电线路主保护		参考文献	272

第 1 章 绪 论

向广大电力用户提供优质而连续的能源供给服务，是电力系统的首要任务。当故障或异常发生时，借助于继电保护，可将故障的影响最小化，尽可能地缩短停电时间，保障电力系统的安全稳定运行。那么“继电”一词从何而来，继电保护如何构成？它的作用是什么？对它的要求又是什么呢？本章将解答这些问题。

1.1 从“Relay”到“Protective Relay”

“继电保护”常被翻译为“Protective Relay”。其中的“Relay”一词被翻译为“继电”或“继电器”，有些令人费解。“Relay”一词起源于驿站马车作为一种交通工具的古代，“Relay”就是更换疲惫马匹的站点，“Relay”的意思就是“驿马”、“接替人员”，引申的含意为“接替”。在中文中，“继”字的繁体为“繼”，意思是把断了的丝续上，“继，续也”（许慎《说文解字》）。

国际电工和电子工程学会（Institute of Electrical and Electronic Engineers, IEEE）对于“Relay”一词的定义为：“一种能对于输入条件做出响应，并能在特定的条件被满足时，通过相应的电气控制回路做出触点接触动作或类似的突然变化的一种电气装置。”其输入的条件通常是电气量，也有可能是机械、热力或其他量值或量值的结合，而限位开关或类似的装置不属于“Relay”。“Relay”离我们很近，在生活中涉及的许多电气设备中，如冰箱、洗衣机、空调器、交通信号灯、电梯和微波炉等都有它的身影。

本书着重讨论的电力系统继电保护，是一种服务于电力系统的“Protective Relay”，IEEE 对它的定义为：“一种能检测线路或电气设备故障，或反应电力系统异常或危险状态的“Relay”，并能进行相应的控制回路操作。”

简要地回顾“继电保护”的最初发展历史，有助于我们进一步理解其含义。第一个完整的电力系统（由发电机、电缆、熔丝、电表及负荷组成）是由托马斯·爱迪生（Thomas Edison）在纽约城历史上有名的皮埃尔大街站（Pearl Street Station）建成并于 1882 年 9 月投入运行，这只是一个直流电系统，供电半径也只有 1.5km，负荷全部为白炽灯。爱迪生和他的公司就提出了在其供电照明系统中使用铅制熔丝熔断器的方法。铅制熔丝俗称“保险丝”，当故障引起供电线路电流过大时，熔丝被熔断以切断故障电流，达到保护设备不受损坏的目的。在建国后很长一段时间内，“保险丝”在国内仍广泛被采用，目前多被低压断路器所替代。这也反映在电力发展的初期，对保护的要求只是很简单的切断故障电流。从另一方面可以说明：自有电力系统以来，就有保护。1904 年，克罗特拉（Kortler）提出了具有延时自动恢复功能熔断器。这项技术今天被广泛应用于中、高压电网，也就是我们今天常常提到的“自动重合闸”或“重合闸”。随着输电线路的增多，并入电网电机数量的增加，电力系统变得越来越复杂，熔丝已不能满足保护需求。采用熔丝熔断来保护的方法还不能被称为“继电保护”。

由继电器构成的继电保护是在断路器设备被发明之后才出现的,这种开关设备能熄灭故障电弧和承受故障条件下引起的短路电流。1892年布朗(Brown)提出了油断路器。断路器代替了熔断器完成切断故障电流的任务。断路器发明之初,采用绝缘油为绝缘介质以消除切断短路电流时所产生的电弧。相应的跳闸驱动装置,多设计为自带保护功能,可直接反应于流过断路器的电流,也可直接反应于油的温度(过电流时,油温会异常升高),但其直接与高压部分相连,使用多有不便。

历史上具有保护功能的继电器是由美国GE公司的史迪威(Lewis B. Stillwell)于1900年发明的,其采用的是电流反时限基本原理,也可称为反时限电流继电器,目前这种继电器仍在使用。故障电流存在时,继电器可通过相应设备(如安装于断路器中的电流互感器)采集故障电流信息,通过一系列的继电器及相应设备,向断路器发出命令,由断路器切断故障电流。由于继电器无法直接输入一次系统大的故障电流,必须通过电流互感器获得相应的二次电流。这样,也就有了“一次(Primary)”与“二次(Secondary)”的区分。相比而言,电流继电器只需要采集电流互感器二次侧的电流,通过一只或几只继电器与断路器原有的跳闸驱动装置相连,即可实现跳闸,其优越性非常明显。

不难看出,继电保护就通过一系列传递信息和命令的“Relay”来实现保护目的,因此其技术的核心在于反映信息的传递的“继”,而不能简单地被理解为“由继电器构成的保护”。“继电”在台湾被称为“电驿”。曾有人提出,在数字式保护流行的当代,传统意义上的继电器已很少见,“继电保护”应改称为“保护”。这是不恰当的言论,因为“Protective Relay”中,“Relay”是主体,是核心。

保证高质量的连续供电,是电力系统的主要任务之一。当出现电力系统无法承受的某种状态时,应力求平息它,并尽可能地缩短停电的时间。电力系统在运行过程中,无可避免地会遭受诸如电源突然消失、电压突然升高、电压突然下降、设备故障、自然灾害事件、外力破坏、人为误操作等情况。而这些情况的大部分将导致故障或异常的发生,如相间短路及单相接地。

其中,可导致短路的自然灾害事件主要包括雷害、大风、洪水、冰雪、地震、倒树、飞行物、动物接触及污闪等。外力破坏主要包括车辆触碰导线或带电设备、挖断地下电缆、人为破坏等。人们尽可能地去避免这些事件的发生,或者减少事件的危害性,但这些问题又是无法杜绝的。

随着电网建设快速发展,电网结构不断加强,各级电网电气联系日益紧密,电网安全稳定运行可靠性逐步提高。而另一方面,受到全球大环境的影响,暴雪、洪水、地震等极端灾害的频度和强度比以往明显增加,对电网的危害越来越大。如2008年,在我国南方发生的罕见的雨雪冰冻灾害和汶川“5.12”地震灾害都给局部电网造成了巨大的影响。良好的运行管理及设备维护工作是防止故障及相应停电的重要手段,如改善电网的结构及运行方式、提高输电线路的避雷水平及防污闪能力、适时修剪输电线路下的树木、防止线路外力破坏、提高人员素质等。

在电力系统中,自然灾害及设备故障造成的故障占较大比例。而架空输电线路又最易遭受自然灾害,如雷击可造成单相接地,大风时导线舞动也能造成相间短路或接地,空气严重污染地区的输电线路出现污闪等。据不完全统计,在110kV及以上电压等级输电线路中,单相接地故障的概率约占所有故障的90%以上,瞬时故障的概率约占所有故障次数的90%

以上。而雷击线路导致跳闸占总跳闸次数的 50% 及以上。在 110kV 以下电压等级配电网中, 因导线与树木接触、雷害、配电变压器过负荷、高压熔断器爆裂、电缆损坏、绝缘子损坏、导线断线等都有可能引发故障, 因此在配电网中, 单相接地故障的概率约占所有故障的 20% ~ 30%, 而瞬时故障的概率约占所有故障次数的 60% ~ 70%。由此可见, 电网中瞬时性故障仍占有较大比例, 只要故障切除的时间足够短, 这些故障将不会演变为永久性故障, 也不会对电力系统造成更大的伤害。针对输电线路上所发生的瞬时性故障, 可通过继电保护先切断电源与故障点的联系, 待故障点电弧消失, 空气去游离后, 通过自动重合闸装置重新合上断路器, 恢复正常运行状态。这样将大大地提高供电可靠性。一般而言, 从瞬时故障发生, 到自动重合闸重合成功的时间能控制在 3 ~ 5s 以内。在某些瞬时故障发生后, 自动重合闸也可能动作不成功, 调度及运行人员根据情况采用强行送电或通过查线未发现异常后试送成功, 此时的停电时间则可能是几分钟到几小时不等。

从另一方面, 并不是电力系统中所有的故障或异常状态, 都将使系统的某些电气量值产生明显的变化。而这些量值可用于区分电力系统处于可承受还是不可承受的状态。这些变化量包括: 电流量的增加、电压的升高或降低, 功率因数或相位角的变化, 功率方向、电流方向、测量阻抗及频率和温度的变化, 物理位移、压力、绝缘水平的变化等。换句话说, 并不是所有的量值变化都需要继电保护动作。如某电力系统失去同步, 发生振荡时, 流过受振荡影响的输电线路的电流将会呈周期性的较大变化。在我国, 一般认为电力系统能够躲过并平息振荡。因此要求线路继电保护装置对于振荡保持闭锁。而上述线路如发生短路或接地故障, 相应电流也将发生突变, 这就要求保护装置能够可靠动作。

故障无法预测, 只有通过继电保护装置, 快速、灵敏地反应于故障或异常工作状态, 才能有效地保障电力系统的安全。同时, 在电力系统处于可承受的状态时, 即使某些电气量值发生变化, 也应能防止继电保护动作, 破坏供电的连续性。因此, 继电保护是一种科学, 是一项技能, 更是一门艺术。如何设计不同的继电保护“判据”, 以区分电力系统处于可承受还是不可承受状态, 将贯穿于本书的始终。

结合前面所述, 我们必须深刻认识到: 对于继电保护而言, 用于判断是否发生故障, 是否需要动作的“时间窗口”是非常狭窄的。同时, 在这个“时间窗口”内, 电气量值又常常含有非周期分量或高频分量等“噪声”干扰。某些严重故障发生后, 要求保护在几个毫秒内做出反应, 更不允许存在确认、复核的附加时间。这就要求继电保护装置在一个非常短的时间内对系统是否发生故障, 故障的性质及严重程度、系统是否能够躲过或承受, 是否需要动作出口跳闸等一系列问题做出准确的判断。进一步地, 如果选择出口跳闸, 继电保护还需要考虑如何快速地、有选择性地切除故障区域以减少停电损失及对系统的影响。

一旦继电保护发生拒绝动作或误动作等错误行为, 势必给电力系统造成停电范围或时间扩大、电气设备损坏加重甚至系统失去稳定性等严重的影响。这就要求从事继电保护装置设计与制造, 继电保护配置与整定, 现场安装与测试, 日常运行维护等工作的相关人员都要保持认真、细致、谨慎的工作作风, 认真做好继电保护不正确动作行为的预防工作。

金无足赤, 继电保护也不例外。为减少继电保护中隐患对系统的影响, 在某些保护装置或保护系统中, 采用并行动作的方法, 即针对某一故障, 采用多套继电保护装置同时加以反应, 在此基础上, 加以综合判断。上述保护装置或保护系统可能存在于同一安装位置, 也可能存在于同一变电站中或位于其他变电站中。当多套继电保护可以反应同一故障时, 这些保

护必须采取相应的配合策略,即由主保护首先动作于本保护区内的故障,其他保护做好后备,一旦需要,再按约定好的顺序动作。对于保护配置及保护功能而言,适当的冗余是必需的。然而,过度冗余又提高了继电保护发生误动的可能性,冗余不足又提高了继电保护发生拒动的可能性。这就要求继电保护工作者从系统的需求实际出发,因地制宜,合理地冗余程度进行论证与选择,并根据运行情况不断优化。

1.2 继电保护的概念及任务

图 1-1 示出了一条馈线(配电网中直接由电源母线分配出去的一条配电线路)的继电

保护系统,由图可见当馈线上发生故障时,流过线路的电流由负荷电流突然上升为故障电流,需要借助于继电保护装置跳开断路器使故障点失去能量来源以切除该故障。保护装置的测量元件经电压互感器、电流互感器不间断地测量母线电压及线路电流等信息,保护装置的逻辑

元件进一步判断出故障确实存在,通过执行元件向断路器操动机构发出跳闸命令,后者执行跳闸操作,跳开断路器的三相主触头,切断故障点与电源之间的联系,从而保障了被保护线路不受故障危害,同时也保障了系统安全稳定运行。相对于该继电保护系统而言,该馈线属于其保护对象。

继电保护设备主要经历了电磁型、晶体管型、集成电路型、微机型等几个发展阶段,以馈线保护为例,其最初的保护装置均采用电磁型,目前在世界上仍被许多国家广泛采用。直到 20 世纪 90 年代初,我国的馈线保护装置多用电磁继电器组成。目前,我国的馈线保护装置大多采用微机型保护装置,相对电磁型装置而言,其最明显的区别是需要将输入的电流流量等模拟量信号转化为数字量形式,再做进一步的处理。无论其形式如何变化,其保护装置的组成、基本原理及相关原则从本质上并未发生改变。

断路器、电压互感器及电流互感器并不属于继电保护的范畴,但与继电保护系统密不可分。保护装置提供了感受故障的“大脑”,但作为一个弱电元件,它不可能亲自完成故障隔离任务。而断路器等用于切断强电回路的元件,能够完成故障隔离,但断路器本身并没有故障判断功能。这样,继电保护与断路器两者取长补短,协同合作完成故障区域及故障设备隔离的任务。失去了断路器的继电保护系统,只能在故障时发出告警信号,别无用途;而失去了继电保护的断路器,也只能通过人工操作使得回路或设备带电。按操动方式来区分,断路器可分为三相操动断路器及分相操动断路器,对于三相操动断路器而言,其断路器操动机构是唯一的。无论被保护线路或设备发生何种故障需要跳闸时,其三相都是同时跳闸,即便是被保护设备发生单相故障,也是如此。在 220kV 及以上电压等级的电力系统中,发生相间故障的概率相对于发生单相接地故障的概率是非常低的,而单相接地故障又多是瞬时性故障。在某些系统中,当线路发生单相接地时,只需要跳开线路故障相两端或单端的该相断路器,其他两相保持不变。经一个较短延时后,重新合上故障相断路器,这样将减少故障对于

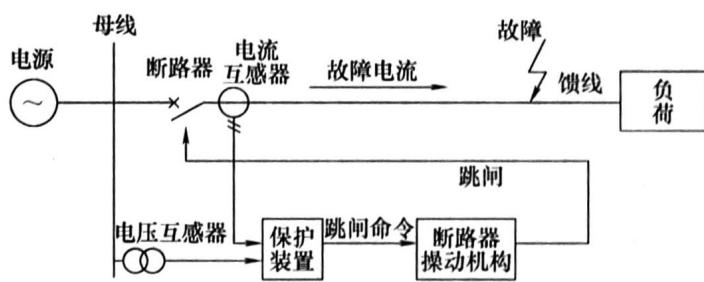


图 1-1 继电保护基本组成示意图

系统的冲击,更有利于系统的稳定。因此,在我国 220kV 及以上电压等级的线路上,多采用分相操动断路器,每相断路器均采用独立的断路器操动机构,可以实施单相跳闸。当然,采用分相跳闸后,增加了继电保护与断路器配合的复杂性,也就有可能出现需要单相或三相跳闸的情况下,某一相或多相断路器无法跳闸的情况。这种情况称为断路器失灵。当这种情况发生时,又需要通过其他后备保护跳开所有与故障点相连的电源。在我国,110kV 及以下电压等级断路器多采用三相操动,而 220kV 及以上电压等级断路器多采用分相操动,操动方式不同,与保护相关的断路器控制电路的设计方案也存在很大的差别,因此需在保护设计时加以重视。

另一方面,电压互感器及电流互感器对于继电保护也非常重要,继电保护存在之初,电流互感器多采用环形绕组并安装于断路器外壳上部的瓷绝缘子下方的箱体内部,其一次绕组与断路器连接紧密且共用绝缘介质。随着电压等级的升高及保护技术的发展,出现了独立设置的电流互感器。安装于另外的瓷绝缘子串内。在现场,这两种电流互感器的安装方式都有可能存在,在同一个断路器的两侧,都有可能存在电流互感器,其安装位置以及一次极性端的朝向也变化多端。对于保护装置而言,如何采取电流互感器的电流以实现合理可行的保护功能,需要进行科学的论证。同样,电压互感器也有三相式与单相式之分,保护装置取得三相电压及零序电压方式也有区分,值得加以重视。

纵观电力系统继电保护,根据不同的应用需求、不同的产品特性以及不同的产品发展阶段,继电保护系统的具体技术方案的设计及外在特性千差万别。但无论怎样,保护的基本组成都应包含测量部分、逻辑部分及执行部分。图 1-2 示出了继电保护装置的组成框图,由图可见,为保证继电保护装置的正确动作,保护装置必须输入被保护对象(如馈线)的有关电气量(如电压、电流),经过测量比较及相应的逻辑判断,最终确定保护

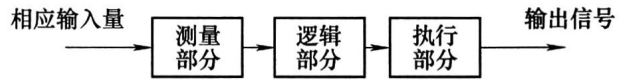


图 1-2 继电保护装置的组成框图

装置是否应该使断路器跳闸或发出告警信号,并通过执行部分完成保护装置所担负的任务(跳闸或告警信号)。

综上所述,电力系统继电保护泛指继电保护技术和由各种继电保护装置构成的继电保护系统。继电保护装置可定义为在电力系统发生故障或不正常工作状态时,动作于断路器跳闸或发出告警信号的一种安全自动装置。一个保护系统包括一个或多个保护装置,变换器、接线、跳闸回路及辅助电源,有时还有通信系统。根据保护系统的原理,它可以包括被保护区的一端或所有各端,但保护系统不包括断路器及互感器。一个保护装置是一个保护系统的组成部分,而保护继电器有可能独立构成某一保护装置,也可能是某一保护装置的组成部分。继电保护装置本身需要通过电流互感器、电压互感器采集电流量、电压量信息,并与断路器配合实现跳闸,因此继电保护装置本身只是继电保护系统的一个重要组成部分,其他相关设备以及相互之间的联系(也称为“二次回路”)对于继电保护系统也至关重要。与继电保护装置相关的技术主要包括涉及继电保护装置本身的原理设计、配置与整定、调试等技术。

继电保护的基本任务是:

(1) 切除故障元件 自动、迅速、有选择性地将故障元件从电力系统中切除,使故障元件免于继续遭到破坏,保证其他无故障部分迅速恢复正常运行。

(2) 反映不正常运行状态 反映电气元件的不正常工作状态,并根据运行维护的条件,