

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

卓越工程能力培养与工程教育专业认证系列规划教材（电气工程及其自动化、自动化专业）

电力系统继电保护

卢继平 沈智健 编

Relay Protection
of Power Systems



点出版物出版规划项目

卓越工程能力培养与工程教育专业认证系列规划教材
(电气工程及其自动化、自动化专业)

电力系统继电保护

卢继平 沈智健 编



机械工业出版社

本书着重介绍电力系统继电保护的基本原理、分析方法和工程应用过程。第1章为绪论,第2~5章分别介绍了电力系统输电线路相间故障保护、接地故障保护、距离保护和纵联保护,第6章介绍了自动重合闸,第7~9章介绍了元件保护,包括变压器保护、发电机保护和母线保护,第10章介绍了计算机保护的软硬件基础。每章后有习题及思考题。

本书可作为高等院校电气工程及其自动化专业的本科生教学用书,也可供本专业的专科学学生、研究生以及从事电力系统继电保护工作的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统继电保护/卢继平,沈智健编. —北京:机械工业出版社,2019.6

“十三五”国家重点出版物出版规划项目 卓越工程能力培养与工程教育专业认证系列规划教材. 电气工程及其自动化、自动化专业

ISBN 978-7-111-62544-5

I. ①电… II. ①卢… ②沈… 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(2019)第 072566 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 刘丽敏

责任校对:樊钟英 封面设计:鞠 杨

责任印制:郜 敏

河北鑫兆源印刷有限公司印刷

2019 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm • 15 印张 • 371 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-62544-5

定价:39.80 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

客服电话:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

010-88379833

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-68326294

金书网:www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
卓越工程能力培养与工程教育专业认证系列规划教材
(电气工程及其自动化、自动化专业)
编审委员会

主任委员

郑南宇 中国工程院院士, 西安交通大学教授, 中国工程教育专业认证协会电子信息与电气工程类专业认证分委员会 主任委员

副主任委员

汪樾生 中国工程院院士, 浙江大学教授
胡敏强 东南大学教授, 教育部高等学校电气类专业教学指导委员会 主任委员
周东华 清华大学教授, 教育部高等学校自动化类专业教学指导委员会 主任委员
赵光宙 浙江大学教授, 中国机械工业教育协会自动化学科教学委员会 主任委员
章 兢 湖南大学教授, 中国工程教育专业认证协会电子信息与电气工程类专业认证分委员会 副主任委员
刘进军 西安交通大学教授, 教育部高等学校电气类专业教学指导委员会 副主任委员
戈宝军 哈尔滨理工大学教授, 教育部高等学校电气类专业教学指导委员会 副主任委员
吴晓蓓 南京理工大学教授, 教育部高等学校自动化类专业教学指导委员会 副主任委员
刘 丁 西安理工大学教授, 教育部高等学校自动化类专业教学指导委员会 副主任委员
廖瑞金 重庆大学教授, 教育部高等学校电气类专业教学指导委员会 副主任委员
尹项根 华中科技大学教授, 教育部高等学校电气类专业教学指导委员会 副主任委员
李少远 上海交通大学教授, 教育部高等学校自动化类专业教学指导委员会 副主任委员
林 松 机械工业出版社 编审 副社长

委员 (按姓氏笔画排序)

于海生	青岛大学教授	王 平	重庆邮电大学教授
王 超	天津大学教授	王再英	西安科技大学教授
王志华	中国电工技术学会 教授级高级工程师	王明彦	哈尔滨工业大学教授
王美玲	北京理工大学教授	王保家	机械工业出版社 编审
艾 欣	华北电力大学教授	韦 钢	上海电力学院教授
吴在军	东南大学教授	李 炜	兰州理工大学教授
吴美平	国防科技大学教授	吴成东	东北大学教授
汪贵平	长安大学教授	谷 宇	北京科技大学教授
张 涛	清华大学教授	宋建成	太原理工大学教授
张恒旭	山东大学教授	张卫平	北方工业大学教授
黄云志	合肥工业大学教授	张晓华	大连理工大学教授
穆 钢	东北电力大学教授	蔡述庭	广东工业大学教授
		鞠 平	河海大学教授

序

工程教育在我国高等教育中占有重要地位，高素质工程科技人才是支撑产业转型升级、实施国家重大发展战略的重要保障。当前，世界范围内新一轮科技革命和产业变革加速进行，以新技术、新业态、新产业、新模式为特点的新经济蓬勃发展，迫切需要培养、造就一大批多样化、创新型卓越工程科技人才。目前，我国高等工程教育规模世界第一。我国工科本科在校生约占我国本科在校生总数的 1/3，近年来我国每年工科本科毕业生占世界总数的 1/3 以上。如何保证和提高高等工程教育质量，如何适应国家战略需求和企业需要，一直受到教育界、工程界和社会各方面的关注。多年以来，我国一直致力于提高高等教育的质量，组织并实施了多项重大工程，包括卓越工程师教育培养计划(以下简称卓越计划)、工程教育专业认证和新工科建设等。

卓越计划的主要任务是探索建立高校与行业企业联合培养人才的新机制，创新工程教育人才培养模式，建设高水平工程教育教师队伍，扩大工程教育的对外开放。计划实施以来，各相关部门建立了协同育人机制。卓越计划要求试点专业要大力改革课程体系和教学形式，依据卓越计划培养标准，遵循工程的集成与创新特征，以强化工程实践能力、工程设计能力与工程创新能力为核心，重构课程体系和教学内容；加强跨专业、跨学科的复合型人才培养；着力推动基于问题的学习、基于项目的学习、基于案例的学习等多种研究性学习方法，加强学生创新能力训练，“真刀真枪”做毕业设计。卓越计划实施以来，培养了一批获得行业认可、具备很好的国际视野和创新能力、适应经济社会发展需要的各类型高质量人才，教育培养模式改革创新取得突破，教师队伍建设初见成效，为卓越计划的后续实施和最终目标的达成奠定了坚实基础。各高校以卓越计划为突破口，逐渐形成各具特色的人才培养模式。

2016 年 6 月 2 日，我国正式成为工程教育“华盛顿协议”第 18 个成员国，标志着我国工程教育真正融入世界工程教育，人才培养质量开始与其他成员国达到了实质等效，同时，也为以后我国参加国际工程师认证奠定了基础，为我国工程师走向世界创造了条件。专业认证把以学生为中心、以产出为导向和持续改进作为三大基本理念，与传统的内容驱动、重视投入的教育形成了鲜明对比，是一种教育范式的革新。通过专业认证，把先进的教育理念引入了我国工程教育，有力地推动了我国工程教育专业教学改革，逐步引导我国高等工程教育实现从课程导向向产出导向转变、从以教师为中心向以学生为中心转变、从质量监控向持续改进转变。

在实施卓越计划和开展工程教育专业认证的过程中，许多高校的电气工程及其自动化、自动化专业结合自身的办学特色，引入先进的教育理念，在专业建设、人才培养模式、教学内容、教学方法、课程建设等方面积极开展教学改革，取得了较好的效果，建设了一大批优质课程。为了将这些优秀的教学改革经验和教学内容推广给广大高校，中国工程教育专业认证协会电子信息与电气工程类专业认证分委员会、教育部高等学校电气类专业教学指导委员会、教育部高等学校自动化类专业教学指导委员会、中国机械工业教育协会自动化学科教学委员会、中国机械工业教育协会电气工程及其自动化学科教学委员会联合组织规划了“卓越工程能力培养与工程教育专业认证系列规划教材(电气工程及其自动化、自动化专业)”。本套

教材通过国家新闻出版广电总局的评审，入选了“十三五”国家重点图书。本套教材密切联系行业 and 市场需求，以学生工程能力培养为主线，以教育培养优秀工程师为目标，突出对学生工程理念、工程思维和工程能力的培养。本套教材在广泛吸纳相关学校在“卓越工程师教育培养计划”实施和工程教育专业认证过程中的经验和成果的基础上，针对目前同类教材存在的内容滞后、与工程脱节等问题，紧密结合工程应用和行业企业需求，突出实际工程案例，强化学生工程能力的教育培养，积极进行教材内容、结构、体系和展现形式的改革。

经过全体教材编审委员会委员和编者的努力，本套教材陆续跟读者见面了。由于时间紧迫，各校相关专业教学改革推进的程度不同，本套教材还存在许多问题。希望各位老师对本套教材多提宝贵意见，以使教材内容不断完善提高。也希望通过本套教材在高校的推广使用，促进我国高等工程教育教学质量的提高，为实现高等教育的内涵式发展贡献一份力量。

卓越工程能力培养与工程教育专业认证系列规划教材
(电气工程及其自动化、自动化专业)
编审委员会

前 言

本书是在参阅诸多已出版的《电力系统继电保护》教材和多个厂家继电保护产品资料的基础上编写而成的。重点介绍电力系统继电保护的基本原理和应用方法。由于目前在电力系统中广泛使用的是计算机（微机）继电保护，其继电保护的大部分功能是由计算机软件实现的，但考虑到叙述方便和照顾习惯，在进行继电保护功能等方面的介绍时，还是沿用了许多传统的继电保护词汇。书中不区分是用硬件（模拟式）还是用计算机软件来实现的这些继电保护功能。考虑到目前学生对计算机的知识较为熟悉，本书中重点讲述了利用计算机（微机）实现保护的相关软硬件技术。实际工程应用中需要综合考虑继电保护的可靠性、经济性等方面的因素，确定继电保护的实现方式。

电力系统是由众多不同原理、不同结构的设备组成的规模庞大的复杂系统，继电保护设备是保障电力系统安全稳定运行的关键设备之一，其基本原理是利用被保护设备在正常运行时与故障发生时的电气量的差异而设计实现的保护方案。因此本书对各种保护的论述，基本按照被保护设备的故障特征分析、保护算法原理、实现方式、整定计算、动作行为影响因素的顺序进行。在实际教学中，可以根据学时的不同进行内容的选择和详略安排。

参考已有教材，按照继电保护装置的研究方法和论证过程，本书对第2章中的功率继电器的相关内容进行了较大的改动，这些修改有利于学生更容易掌握和理解功率继电器的基本原理和应用方法。

书中第1~6章、第10章由重庆大学卢继平编写，第7~9章由重庆大学沈智健编写。全书由卢继平负责统编与定稿。

在本书编写过程中，许多同学和朋友提供了诸多帮助，包括提供资料及文字编辑等，在此一并表示感谢。对参考文献的作者和编者，也表示衷心的感谢！

由于编写人员的技术水平和经验的局限，书中难免有缺点和错误，恳请读者批评指正。

编 者

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 电力系统的运行状态	1
1.2 继电保护的作用和任务	2
1.3 继电保护的基本原理和构成	3
1.3.1 继电保护的基本原理	3
1.3.2 保护装置的构成	4
1.4 对继电保护的性要求	5
1.5 继电保护技术发展简介	6
习题及思考题	8
第 2 章 输电线路相间故障的保护	9
2.1 线路的阶段式电流保护方案	9
2.1.1 无时限电流速断保护 (I 段)	9
2.1.2 限时电流速断保护 (II 段)	13
2.1.3 定时限过电流保护 (III 段)	16
2.1.4 三段式电流保护的应用	19
2.1.5 反时限过电流保护	21
2.2 电流保护的接线方式	23
2.2.1 电流保护接线方式的分类	23
2.2.2 两种接线方式的应用	27
2.3 电网相间短路的方向性电流保护	27
2.3.1 方向性电流保护的基本原理	27
2.3.2 功率方向继电器的工作原理	29
2.3.3 相间短路功率方向继电器的接线 方式	32
2.3.4 双侧电源网络中电流保护整定的 特点	35
2.3.5 对方向性电流保护的评价	37
习题及思考题	38

第 3 章 输电线路接地故障的保护	40
3.1 电网接地故障种类及保护方法	40
3.2 大电流接地系统中接地故障的零序 保护	44
3.2.1 零序分量的特点及测量方法	44
3.2.2 线路的阶段式零序电流保护 方案	47
3.2.3 方向性零序电流保护	51
3.2.4 零序反时限过电流保护	52
3.3 小电流接地系统中单相接地故障的 保护	53
3.3.1 中性点不直接接地系统中单相接地 故障的特点	53
3.3.2 中性点经消弧线圈接地系统中单相 接地故障的特点	56
3.3.3 中性点不接地系统中的单相接地 保护	58
习题及思考题	58
第 4 章 输电线路的距离(阻抗)保护	60
4.1 距离保护的基本原理	60
4.1.1 基本工作原理	60
4.1.2 距离保护的主要组成元件	60
4.2 阻抗继电器的参数和动作特性	61
4.2.1 阻抗继电器的基本原则	62
4.2.2 对接线方式的基本要求	63
4.2.3 利用复数平面分析圆或直线特性 阻抗继电器	66
4.2.4 具有四边形特性的阻抗继电器	74
4.2.5 正序电压极化的阻抗继电器	76
4.3 线路的阶段式距离保护方案	82

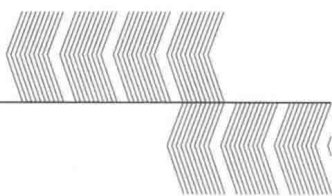
4.3.1	距离保护的整定计算原则	82	5.4.1	输电线路短路时两端功率方向的特征	122
4.3.2	对距离保护的评价	85	5.4.2	方向纵联保护的方向元件	123
4.4	距离保护的振荡闭锁	85	5.4.3	闭锁式方向纵联保护	124
4.4.1	电力系统振荡对距离保护的 影响	85	5.5	闭锁式距离纵联保护和零序纵联保护	126
4.4.2	振荡闭锁的实现	91	5.5.1	距离纵联保护的原理与特点	127
4.5	过渡电阻对距离保护的影响	95	5.5.2	闭锁式距离纵联保护的 动作范围和时限	128
4.6	工频故障分量距离保护的 基本原理和特性	98	5.5.3	闭锁式零序方向纵联保护	128
4.6.1	工频故障分量的概念	98	5.6	保护的远跳与远传	129
4.6.2	故障信息的提取及其特点	100	5.6.1	远跳	129
4.6.3	工频故障分量距离元件的 基本原理	101	5.6.2	远传	130
4.6.4	工频故障分量距离元件的 动作特性	102		习题及思考题	130
4.6.5	工频故障分量距离保护的 特点及应用	104	第 6 章	电力系统自动重合闸	131
	习题及思考题	104	6.1	自动重合闸的作用、基本 要求及分类	131
第 5 章	输电线路的纵联保护	106	6.1.1	自动重合闸的作用	131
5.1	基本原理与类别	106	6.1.2	对自动重合闸的基本 要求	132
5.2	线路两侧信息的传输	107	6.1.3	自动重合闸的分类	132
5.2.1	光纤通道	107	6.2	输电线路的三相一次 重合闸	133
5.2.2	电力线载波通道	109	6.2.1	单侧电源线路的三相 一次重合闸	133
5.2.3	微波通道	112	6.2.2	双侧电源线路的检同 期三相一次自动重合 闸	134
5.2.4	导引线通道	113	6.2.3	重合闸时限的整定 原则	137
5.3	纵联电流差动保护	113	6.2.4	自动重合闸与继电保 护的配合	140
5.3.1	输电线路纵联电流差 动保护的工作原理	113	6.3	高压输电线路的单相 自动重合闸	142
5.3.2	输电线路纵联电流差 动保护特性分析	114	6.3.1	单相自动重合闸与保 护的配合关系	142
5.3.3	纵联电流差动保护的 常用算法	116	6.3.2	单相自动重合闸的 特点	143
5.3.4	影响纵联电流差动保 护正确动作的因素	118	6.4	高压输电线路的综合 重合闸简介	144
5.3.5	两侧电流的同步测量	120		习题及思考题	145
5.4	闭锁式方向纵联保护	122	第 7 章	变压器保护	146
			7.1	变压器的故障和非正 常状态	146
			7.1.1	变压器的故障	146
			7.1.2	变压器的非正常状态	146

7.2 变压器纵联差动保护	146	8.4.2 三次谐波零序电压保护	169
7.2.1 基本原理	146	8.5 负序过电流保护	170
7.2.2 不平衡电流	148	8.5.1 发电机承受负序电流的能力	170
7.2.3 励磁涌流及防止方法	149	8.5.2 负序过电流保护的构成	171
7.2.4 纵联差动保护的整定原则	151	8.6 发电机失磁保护	172
7.2.5 比率制动式纵联差动保护	152	8.6.1 失磁运行状态特征	172
7.2.6 差动电流速断保护	154	8.6.2 失磁后机端测量阻抗	173
7.2.7 零序电流差动保护	154	8.6.3 失磁保护的构成	175
7.3 变压器气体保护	155	8.7 发电机失步保护	177
7.4 变压器相间短路的后备保护	156	8.7.1 发电机的振荡状态	177
7.4.1 过电流保护	156	8.7.2 三阻抗元件失步保护	178
7.4.2 低电压过电流保护	157	8.7.3 遮断器原理失步保护	179
7.4.3 复合电压过电流保护	158	8.8 发电机励磁回路接地保护	181
7.4.4 三绕组变压器的过电流保护	159	8.8.1 励磁回路接地故障概述	181
7.5 变压器接地短路的后备保护	160	8.8.2 励磁回路接地保护	181
7.5.1 零序电流保护	160	习题及思考题	183
7.5.2 零序电压保护	161	第9章 母线保护	184
7.6 变压器过励磁保护	162	9.1 母线故障和保护方式	184
7.7 变压器保护的基本配置	162	9.2 单母线电流差动保护	185
习题及思考题	163	9.2.1 完全电流差动保护	185
第8章 发电机保护	164	9.2.2 不完全电流差动保护	186
8.1 发电机的故障和非正常状态	164	9.2.3 比率制动特性的电流差动保护	186
8.2 定子绕组相间短路保护	164	9.2.4 电压差动保护	187
8.2.1 纵联差动保护的基本原理和 不平衡电流	164	9.3 电流相位比较式母线保护	188
8.2.2 比率制动式纵联差动保护	165	9.4 双母线的保护	188
8.2.3 不完全纵联差动保护	165	9.4.1 完全电流差动保护	188
8.3 定子绕组匝间短路保护	166	9.4.2 母联电流比相式保护	190
8.3.1 横联差动保护基本原理	166	9.5 一个半断路器接线的母线保护	191
8.3.2 单元件横联差动保护	166	9.6 母线保护的特殊问题	192
8.3.3 裂相横联差动保护	167	9.7 断路器失灵保护	193
8.3.4 转子二次谐波电流保护	167	习题及思考题	194
8.3.5 定子纵向零序电压保护	167	第10章 数字式继电保护的基本原理	196
8.4 定子绕组单相接地保护	168	10.1 数字式继电保护装置的基本结构	196
8.4.1 基波零序电压保护	168	10.1.1 模拟量输入系统	197
		10.1.2 开关量输入输出系统	208

10.1.3	微型机主系统	209	10.3.1	数字式保护装置软件的基本 功能	224
10.2	数字式保护算法	211	10.3.2	系统主程序流程	224
10.2.1	正弦函数模型算法	211	10.3.3	中断服务程序流程	226
10.2.2	傅里叶级数算法	216	习题及思考题	229	
10.2.3	$R-L$ 模型算法	218	参考文献	230	
10.2.4	移相算法及序分量算法	220			
10.2.5	最小二乘算法	222			
10.3	数字式保护软件的基本流程	224			

第1章

绪论



1.1 电力系统的运行状态

电力系统承担着向广大用户提供优质稳定电能的任务，面对千变万化的运行环境，电力系统会呈现不同的运行状态。电力系统运行状态是指系统在不同运行条件(如负荷水平、出力配置、系统接线、故障等)下，系统与设备的工作状况。根据不同的运行条件，可以将电力系统的运行状态分为正常状态、不正常状态和故障状态。电力系统运行控制的目的是通过自动的和人工的控制，使系统尽快摆脱不正常状态和故障状态，能够长时间在正常状态下运行。

1. 正常状态

在正常状态下运行的电力系统，能以足够的电功率满足负荷对电能的需求；电力系统中各发电、输电和用电设备均在规定的长期安全工作限额内运行；电力系统中各母线电压和频率均在允许的偏差范围内，提供合格的电能。一般在正常状态下的电力系统，其发电、输电和变电设备还保持一定的备用容量，能满足负荷随机变化的需要，同时在保证安全的条件下，可以实现经济运行；能承受常见的干扰(如部分设备的正常和故障操作)，从一个正常状态或不正常状态或故障状态，通过预定的控制，连续变化到另一个正常状态，避免产生有害的后果。

2. 不正常状态

电力系统不正常运行状态是指系统的正常工作受到干扰，使运行参数偏离正常值。例如，因负荷潮流超过电力设备的额定上限造成的电流升高(又称为过负荷)，系统中出现功率缺额而引起的频率降低，发电机突然甩负荷引起的发电机频率升高，中性点不接地系统和非有效接地系统中的单相接地引起的非接地相对地电压的升高，以及电力系统发生振荡等，都属于不正常运行状态。

3. 故障状态

电力系统的所有一次设备在运行过程中，由于外力、绝缘老化、过电压、误操作、设计制造缺陷等原因，都会发生如短路、断线等故障。最常见同时也是最危险的故障是发生各种类型的短路，比如三相短路、两相短路、两相接地短路和单相接地短路。在发生短路时可能产生以下后果：

(1)通过故障点产生很大的短路电流及所燃起的电弧会损坏故障元件及设备，甚至导致火灾或爆炸等更严重后果。

(2)从电源到短路点间流过的短路电流引起的发热和电动力，将造成在该路径中非故障元件和设备的损坏。

- (3) 靠近故障点的部分地区电压大幅下降，使用户的正常工作的遭到破坏或影响产品质量。
- (4) 破坏电力系统中各发电厂之间并列运行的稳定性，引起系统振荡，甚至使系统瓦解、崩溃。

不正常运行状态和故障状态都可能在电力系统中引起事故。事故是指电力系统或其中一部分的正常工作的遭到破坏，并造成对用户少送电或电能质量变坏到不能允许的地步，甚至造成人身伤亡和电气设备损坏的事件。

1.2 继电保护的作用和任务

随着自动化技术的发展，电力系统的正常运行、故障期间以及故障后的恢复过程中，许多控制操作日趋高度自动化。这些控制操作的技术与装备大致可分为两大类：其一是为保证电力系统正常运行的经济性和电能质量的自动化技术与装备，主要进行电能生产过程的连续自动调节，动作速度相对迟缓，调节稳定性高，把整个电力系统或其中的一部分作为调节对象，这就是通常理解的“电力系统自动化(控制)”；其二是当电网或电力设备发生故障，或出现影响安全运行的异常情况时，能够自动切除故障设备和消除异常情况的技术与装备，其特点是动作速度快，其性质是非调节性的，这就是通常理解的“电力系统继电保护与安全自动装置”。

为了在故障后迅速恢复电力系统的正常运行，或尽快消除运行中的异常情况，以防止大面积的停电和保证对重要用户的连续供电，常采用以下的自动化措施，如输电线路自动重合闸、备用电源自动投入、低电压切负荷、按频率自动减负荷、电气制动、振荡解列以及为维持系统的暂态稳定而配备的稳定性紧急控制系统，完成这些任务的自动装置统称为电网安全自动装置。

电力系统中的发电机、变压器、输电线路、母线以及用电设备，一旦发生故障，迅速而有选择性地切除故障设备，既能保护电力设备免遭损坏，又能提高电力系统运行的稳定性，是保证电力系统及其设备安全运行最有效的方法之一。切除故障的时间通常要求小到几十毫秒到几百毫秒，实践证明，只有装设在每个电力元件上的继电保护装置，才有可能完成这个任务，继电保护装置(Relay Protection)，就是指能反应电力系统中电气设备发生故障或不正常运行状态，并动作于断路器跳闸或发出信号的一种自动装置。

电力系统继电保护(Power System Protection)泛指继电保护技术和由各种继电保护装置组成的继电保护系统，包括继电保护的原理设计、配置、整定、调试等技术，也包括由获取电量信息的电压、电流互感器二次回路，经过继电保护装置到断路器跳闸线圈的一整套具体设备，如果需要利用通信手段传送信息，还包括通信设备。

电力系统继电保护的基本任务是：

- (1) 自动、迅速、有选择性地切除故障元件从电力系统中，使故障元件损坏程度尽可能降低，保证系统中非故障部分迅速恢复正常运行。
- (2) 反应电力设备的不正常运行状态，并根据运行维护条件，而动作于发出信号或跳闸。此时一般不要求迅速动作，而是根据对电力系统及其元件的危害程度规定一定的延时，以免短暂的运行波动造成不必要的保护动作跳闸，同时避免干扰引起的保护误动。

1.3 继电保护的基本原理和构成

1.3.1 继电保护的基本原理

1. 继电器的原理和特性

继电器的基本原理是：当输入信号达到某一定值或由某一定值突跳到零时，继电器就动作，使被控制回路通断，如触点打开、闭合或电平由高变低等，能使其输出的被控制量发生预计的状态变化，从而实现对被控制电路“通”“断”控制的作用。

继电器的继电特性是指继电器的输入量和输出量在整个变化过程中的相互关系。对于电流继电器，其继电特性如图 1.1 所示。

动作电流 ($I_{op.r}$)：能使继电器动作的最小电流值。当继电器的输入电流 $I_r < I_{op.r}$ 时，继电器不动作；而当 $I_r \geq I_{op.r}$ 时，继电器能够突然迅速地动作。动作后，当保持 $I_r > I_{op.r}$ 时，继电器保持动作后状态。

返回电流 ($I_{re.r}$)：能使继电器返回原位的最大电流值。当电流减小到 $I_r \leq I_{re.r}$ 时，继电器能立即返回原位。无论启动和返回，继电器的动作都是明确干脆的，它不可能停留在某个中间位置。这种特性称为“继电特性”。

返回系数：即继电器的返回电流与动作电流的比值。可表示为：

$$K_{re} = \frac{I_{re.r}}{I_{op.r}} \quad (1.1)$$

显然，反映电气量增长而动作的继电器(如电流继电器)的 K_{re} 小于 1，称过量继电器；而反映电气量降低而动作的继电器(如低电压继电器)，其 K_{re} 必大于 1，称欠量继电器。在实际应用中，常常要求电流继电器有较高的返回系数，如 0.8~0.9。

2. 继电保护装置的分类

继电保护装置要起到反事故的自动装置的作用，必须正确的区分“正常”与“不正常”运行状态、被保护元件的“外部故障”与“内部故障”，以实现继电保护的功能。依据反映的物理量不同，保护装置可以构成下述各种原理的保护：

(1) 反映电气量的保护

电力系统发生故障时，通常伴有电流增大、电压降低以及电流与电压的比值(阻抗)和它们之间的相位角改变等现象。通过检测被保护对象的相关电气量，比较发生故障或不正常运行时这些电气量与正常运行时的差别，从而构成各种不同原理的继电保护装置。例如，反映电流增大构成过电流保护；反映电压降低(或升高)构成低电压(或过电压)保护；反映电流与电压间的相位角变化构成功率方向保护；反映电压与电流的比值构成距离保护。除此以外，还可根据在被保护元件内部和外部短路时，被保护元件两端电流相位或功率方向的差别，分

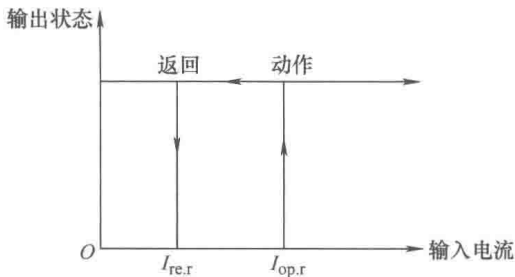


图 1.1 继电器的继电特性

别构成差动保护、方向保护等。同理，由于序分量保护灵敏度高，构成的保护也得到了广泛应用。

(2) 反映非电气量的保护

如反应温度、压力、流量等非电气量变化的可以构成反映非电气量特征的保护。例如，当变压器油箱内部的绕组短路时，反应于变压器油受热分解所产生的气体，构成气体保护(俗称瓦斯保护)；反应于电动机绕组温度的升高而构成的过热保护等。

1.3.2 保护装置的构成

常规的继电保护装置，一般包括测量部分、逻辑部分和执行部分，如图 1.2 所示。

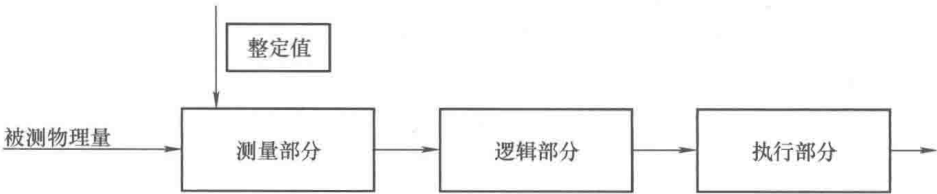


图 1.2 继电保护装置原理框图

1. 测量比较元件

在电力系统继电保护回路中，使用的继电器按输入信号的性质可分为电量继电器(如电流继电器、电压继电器、功率继电器、阻抗继电器等)和非电量继电器(如温度继电器、压力继电器、速度继电器、气体继电器等)两类；按工作原理可分为电磁式、感应式、电动式、电子式(如晶体管型)、整流式、热式(利用电流热效应的原理)、数字式等；按输出形式可分为有触点式和无触点式；按用途可分为控制继电器(用于自动控制电路中)和保护继电器(用于继电保护电路中)。保护继电器按其在继电保护装置中的功能，可分为主继电器(如电流继电器、电压继电器、阻抗继电器等)和辅助继电器(如时间继电器、信号继电器、中间继电器等)。

测量比较元件用于测量被保护电力设备的物理参量，并与整定值进行比较，根据比较的结果，给出“是”“非”或“0”“1”性质的一组逻辑信号，从而判断保护装置是否应该启动。根据需要，继电保护装置往往有一个或多个测量比较元件。常用的测量比较元件有：被测电气量超过整定值动作的过量继电器，如过电流继电器、过电压继电器、高周波继电器等；被测电气量低于给定值动作的欠量继电器，如低电压继电器、阻抗继电器、低周波继电器等；被测电压、电流之间相位角满足一定值而动作的功率方向继电器等。

2. 逻辑判断元件

逻辑判断元件是根据测量比较元件输出逻辑信号的性质、先后顺序、持续时间等，使保护装置按一定的逻辑关系判定故障的类型和范围，最后确定是否应该使断路器跳闸、发出信号或不动作，并将对应的指令传给执行输出部分。

3. 执行输出元件

执行输出元件根据逻辑判断部分传来的指令，发出跳开断路器的跳闸脉冲及相应的动作信息、发出警报等。

需要说明的是，在微机保护中，电流、电压以及故障距离的测量和计算功能是由软件算

法实现的。这时传统意义上的“继电器”或“元件”已不存在，但为了叙述方便，仍然把实现这些功能算法的软件模块称为继电器或元件。

1.4 对继电保护的性能要求

动作于跳闸的继电保护，在技术上一般应满足以下四个基本要求：

(1) 可靠性

可靠性包括安全性和信赖性，是对继电保护性能的最根本要求。所谓安全性，是要求继电保护在不需它动作时不动作，即不发生误动作。所谓信赖性，是要求继电保护在规定的保护范围内发生了应该动作的故障时可靠动作，即不发生拒绝动作。

可靠性取决于保护装置本身的设计、制造、安装、运行维护等因素。一般来说，保护装置的组成元件质量越好、接线越简单、回路继电器的触点和接插件数越少，保护装置就越可靠。同时，保护装置恰当的配置与选用、正确的安装与调试、良好的运行维护，对于提高保护的可靠性也具有重要的作用。

为保证可靠性，宜选用性能满足要求、原理尽可能简单的保护方案，应采用由可靠的硬件和软件构成的装置，并应具有必要的自动检测、闭锁、告警等措施，以及便于整定、调试和运行维护。

(2) 选择性

选择性的基本含义是保护装置动作时仅将故障从电力系统中切除，使停电范围尽量减小，以保证系统中非故障部分继续安全运行，如图 1.3 所示。

当 k_3 发生故障时，则应由保护装置 4 动作切除 4QF，仅使本线路停电，停电范围最小，其余非故障部分可继续运行，这就是有选择性的动作。若 k_1 点发生故障，

应由保护装置 1 和 2 动作，断路器 1QF、2QF 跳闸以切除故障线路，也满足选择性的要求。若此时断路器 5QF 或 6QF 也跳闸，则扩大了电网停电范围，这种情况就属于非选择性动作。

但是，当 k_3 点发生短路，如果保护 4 或断路器 4QF 由于某种原因拒绝动作，而由保护 3 动作使断路器 3QF 跳闸，从而切除故障线路 BC，也是有选择性的。此时，虽然切除了一部分非故障线路，但在 4QF 或保护 4 拒动的情况下，达到了尽可能缩小停电范围的目的。因此，把它称为下一段线路保护或断路器拒动的“后备”保护。

为保证选择性，对相邻设备和线路有配合要求的保护和同一保护内有配合要求的两元件（如起动与跳闸元件、闭锁与动作元件），其灵敏系数及动作时间应相互配合。

对每个被保护设备（或称元件）上装设着分别起主保护和后备保护作用的独立的两套保护。“就近”实现后备，不依靠相邻的上一个元件的保护，称“近后备”保护。断路器拒动则由本站装设的断路器失灵保护（也称近后备接线）动作切除连接在该段母线上的其他断路器。

在远处实现的“后备”称远后备。显然，远后备保护的功能比较完备，它对相邻元件的保护装置、断路器二次回路和故障所引起的拒动都能起到后备作用，同时它比较简单、经济。

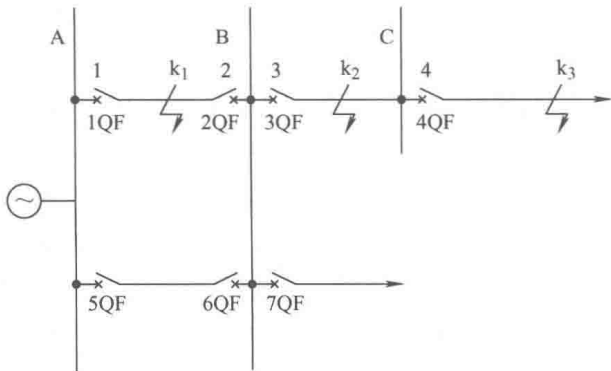


图 1.3 保护选择性说明图

因此，远后备宜优先采用。只有当远后备保护不能满足灵敏度要求时，再考虑采用“近后备”的方式。

辅助保护为补充主保护某种保护性能的不足(如方向性元件的电压死区)或加速切除某部分故障而装设的简单保护(如无时限电流速断)。

(3) 速动性

速动性是指继电保护装置应以尽可能快的速度断开故障元件。这样就能降低故障设备的损坏程度，减少用户在低电压情况下的工作时间，提高电力系统运行的稳定性，缩小故障波及范围，提高自动重合闸和备用电源或备用设备自动投入的效果等。

快速切除故障，可提高发电厂并列运行的稳定性。如图 1.4 所示，若 A 厂母线附近 k 点发生三相短路时，A 厂母线会因其电压大大下降而卸去母线上的负荷，但发电厂调速系统来不及作相应调整，则 A 厂发电机转速必然升高。此时，B 厂母线还有较高残余电压，故 B 厂卸去的负荷不多，发电机转速变化较小。这样，A、B 两厂的发电机就产生转速差而失去同步。若切除故障时间短，则转差小，很容易恢复同步运行；若切除故障时间长，则两厂容易发生失步解列(联络线断开)。

故障切除时间等于保护装置和断路器动作时间之和。目前保护动作速度最快的约为 $0.01\sim0.02\text{s}$ ，加上快速断路器的动作时间，可在 $0.04\sim0.06\text{s}$ 以内切除故障。

应考虑不同电网对故障切除时间的具体要求和经济性、运行维护水平等条件，以便确定合理的保护动作时间。

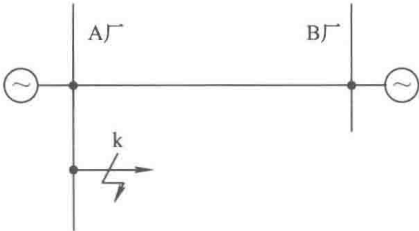


图 1.4 电力系统并列运行示意图

(4) 灵敏性

保护装置对其保护范围内的故障或不正常运行状态的反应能力称为灵敏性(灵敏度)。

灵敏性常用灵敏系数来衡量。它是在确定了保护装置测量元件的动作值后，按最不利的运行方式、故障类型、保护范围内的指定点发生故障进行校验，并满足相关的标准。它主要取决于被保护元件和电力系统的参数和运行方式。

对继电保护装置的四项基本要求是分析研究继电保护的基础，也是贯穿全书的主线，必须反复地深刻领会。要注意的是在实践中，这四项基本要求之间往往有矛盾的一面，需要综合考虑。

1.5 继电保护技术发展简介

电力系统继电保护技术是伴随着电力系统的发展壮大而同步发展的，在电力系统的正常运行中起着至关重要的作用。

熔断器是最早出现的简单过电流保护，19 世纪初，熔断器被广泛应用于电力系统的保护，被认为是继电保护技术发展的开端。时至今日仍广泛应用于低压线路和用电设备。由于电力行业的发展，用电设备功率、发电机的容量不断增大，发电厂、变电所和供电网的接线不断变化，电力系统中正常工作电流和短路电流都不断增大，单纯的熔断器保护早已无法满足要求。电力系统的发展对电力系统继电保护不断提出新的要求。电子技术、计算机技术和通信技术的不断进步也为继电保护技术的发展提供了新的可能性，并注入了新的活力。继电保护技术的发展大致可分为以下四个阶段：