

Electric Power Technology

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI (高职高专教育)



DIANLI XITONG JIDIAN BAOHU
JI ERCI HUILU

电力系统继电保护 及二次回路

沈诗佳 主 编
张皖春 姚旭明 龙 运 副主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI (高职高专教育)



要 要 容 内

《普通高等教育“十一五”规划教材》系列
系列中，我国电力二次回路及电力系统继电保护系统由两部分组成，分别为一次回路和二次回路。

DIANLI XITONG JIDIAN BAOHU
JI ER CI HUILU

电力系统继电保护 及二次回路

主 编 沈诗佳

副主编 张皖春 姚旭明 龙 运

编 写 程 琳 曹小玲

主 审 谷水清

ISBN 978-7-309-06198-7

本书为“十一五”规划教材，可作为高等院校电气工程及其自动化专业及相关专业的教材，也可供从事电力系统继电保护工作的工程技术人员参考。

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第178475号

中国电力出版社出版

北京市三里河路9号 100044 http://jc.cepp.com.cn

印刷工业出版社印刷

北京印刷厂印刷

2007年11月第1版 2007年11月北京第1次印刷

787毫米×1092毫米 1/32开本 16.5印张 381千字

定价 23.00元



中国电力出版社

http://jc.cepp.com.cn

北京印刷厂印刷

Electric Power Technology

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材（高职高专教育）。

全书可分为两部分，即电力系统继电保护和发电厂及变电站二次回路。电力系统继电保护的内容包括电网的电流保护、电网的距离保护、电网的高频保护、电力变压器保护、发电机保护和母线保护，发电厂及变电站二次回路的内容包括操作电源、断路器的控制和信号回路、隔离开关的控制和闭锁回路、中央信号及其他信号回路、继电保护和二次回路的发展及新技术简介。每章均附有教学要求、学习指导和思考题与习题。本书充分考虑高职高专的特点，抛开繁琐的数学推导，力求理论联系实际，对主要基本概念、基本原理做简单明了的阐述，并对继电保护新技术作简单介绍。

本书可作为高职高专院校电力技术类相关专业的教材，也可作为函授教材及工程技术人员参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统继电保护及二次回路/沈诗佳主编. —北京:
中国电力出版社, 2007

普通高等教育“十一五”规划教材·高职高专教育
ISBN 978-7-5083-6198-7

I. 电… II. 沈… III. ①电力系统—继电保护—高等学校:
技术学校—教材②变电所—二次系统—高等学校:
技术学校—教材 IV. TM77 TM645.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 178475 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 11 月第一版 2007 年 11 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14.5 印张 351 千字

定价 23.60 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神，加强教材建设，确保教材质量，中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校，满足学科发展和人才培养的需求，坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

本书是根据全国电力高等职业教育教材建设指导委员会审定的教材编写大纲编写的。

本书根据高职高专教育培养目标的要求，以必需、够用为度，以讲清概念、强化应用为重点，在总结长期教学经验的基础上，将发电厂及电力系统等电力电气类专业的两门专业技术课（电力系统继电保护、发电厂及变电站二次回路）中的主要内容合并在一起。本书充分吸收同类教材的经验并充分考虑高职高专的特点，抛开繁琐的数学推导，力求理论联系实际，对主要基本概念、基本原理做简单明了的阐述，并对继电保护新技术作简单介绍。

本书每章均附有学习指导以突出各章的重点，并配备有针对性的思考题与习题。在例题和练习题的编写上，着眼现场要求，强调现场实用性，注重例题和练习题的质量和数量。

本书共分为十二章，其中第一章第一节由安徽电气工程职业技术学院曹小玲编写，第一章第二节、第八章、第九章、第十二章和附录由安徽电气工程职业技术学院程琳编写，第二章、第十章、第十一章由广西电力职业技术学院姚旭明编写，第三章、第四章由安徽电气工程职业技术学院张皖春编写，第五章由安徽电气工程职业技术学院沈诗佳编写，第六章、第七章由四川电力职业技术学院龙运编写。全书由安徽电气工程职业技术学院沈诗佳统稿。

全书承沈阳工程学院谷水清教授主审，并提出许多宝贵意见和建议，在此表示由衷感谢。

由于编者水平有限，书中难免有不当或错误之处，恳请读者批评指正。

编 者

2007年7月

目 录

前言

第一章 继电保护和二次回路的基本知识	1
第一节 继电保护的基本知识	1
第二节 二次回路的基本知识	18
思考题与习题	27
第二章 电网的电流保护	28
第一节 单侧电源电网相间短路的电流保护	28
第二节 多侧电源电网相间短路的方向性电流保护	38
第三节 中性点直接接地系统接地短路的零序电流及方向保护	44
第四节 中性点非直接接地系统单相接地故障的特点及其保护	50
思考题与习题	53
第三章 电网的距离保护	56
第一节 概述	56
第二节 阻抗继电器	57
第三节 影响距离保护正确工作的因素及防止方法	70
第四节 距离保护的整定计算原则及对距离保护的评价	77
思考题与习题	82
第四章 电网的高频保护	84
第一节 高频保护的基本概念	84
第二节 高频闭锁方向保护	87
第三节 高频闭锁距离保护	91
第四节 相差高频保护	92
思考题与习题	94
第五章 电力变压器保护	96
第一节 电力变压器的故障、不正常工作状态及其保护方式	96
第二节 变压器气体保护	97
第三节 变压器差动保护	98
第四节 变压器电流速断保护	112
第五节 变压器相间短路的后备保护及过负荷保护	113
第六节 变压器接地短路的零序后备保护	119
思考题与习题	124
第六章 发电机保护	125
第一节 发电机的故障和不正常工作状态及其保护	125
第二节 发电机的纵差保护	126
第三节 发电机定子绕组单相接地保护	129
第四节 发电机的定子绕组匝间短路保护	132
第五节 发电机励磁回路接地保护	134

第六节 发电机的后备保护	136
第七节 发电机的其他保护	140
思考题与习题	146
第七章 母线保护	147
第一节 母线故障及其保护方式	147
第二节 母线完全电流差动保护	148
第三节 电流比相式母线保护	149
第四节 双母线同时运行时的母线差动保护	150
第五节 断路器失灵保护	152
思考题与习题	154
第八章 操作电源	155
第一节 概述	155
第二节 蓄电池组直流电源系统	156
第三节 整流操作直流电源系统	160
第四节 交流不间断电源系统 (UPS)	161
第五节 直流系统的电压监视与绝缘监察	163
思考题与习题	167
第九章 断路器的控制和信号回路	168
第一节 概述	168
第二节 断路器控制回路的构成	170
第三节 灯光监视的断路器控制回路	176
第四节 音响监视的断路器控制回路	180
思考题与习题	183
第十章 隔离开关的控制和闭锁回路	184
第一节 隔离开关的控制回路	184
第二节 隔离开关的闭锁回路	186
思考题与习题	189
第十一章 中央信号及其他信号回路	190
第一节 概述	190
第二节 中央复归重复动作的事故信号系统	194
第三节 中央复归重复动作的预告信号系统	196
思考题与习题	199
第十二章 继电保护和二次回路的发展及新技术简介	200
第一节 电力系统继电保护和二次回路的发展	200
第二节 继电保护与二次回路新技术简介	204
附录一 电气常用图形符号	211
附录二 二次回路常用电气新旧文字符号对照表	217
附录三 直流二次回路编号组	220
附录四 交流二次回路标号组	221
附录五 常见小母线的文字符号及其回路标号	222
参考文献	224

第一章 继电保护和二次回路的基本知识

【教学要求】

通过本章学习了解电力系统的故障和不正常工作状态；了解继电保护的的任务；掌握对继电保护的基本要求；熟悉互感器；了解常用电磁型继电器、序分量滤波器、变换器的分类与符号；掌握一次设备、二次设备与二次回路；了解二次回路常用设备的符号；了解二次回路图及分类；了解原理接线图的特点与识绘图方法；掌握展开接线图的特点、识绘图方法；了解安装接线图的分类及其特点。

第一节 继电保护的基本知识

一、电力系统的正常工作状态、不正常工作状态和故障状态

电力系统是由生产、变换、输送、分配和消费电能的各种设备组成的联合系统。当前电力系统的特点是电能还不能大量储存，电能的生产、输送和消费是在同一时间完成的。电力系统的运行状态可以分为正常工作状态、不正常工作状态和故障状态。

1. 电力系统的正常工作状态

电力系统的正常工作状态为：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，提供合格而足够的电能以满足负荷的需求；电力系统中的发电、输电和变电设备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，而不至于产生严重的后果。

2. 电力系统的不正常工作状态

电力系统的正常工作状态遭到破坏，但未形成故障，称为电力系统的不正常工作状态(或称为异常运行状态)。最常见的不正常工作状态是电气元件的电流超过其额定值，即过负荷状态。长时间的过负荷会使电气元件的载流部分和绝缘材料的温度过高，从而加速设备的绝缘老化，或损坏设备，甚至发展成事故。此外，由于电力系统出现有功功率缺额而引起的频率降低、水轮发电机突然甩负荷引起的过电压以及电力系统振荡等，都属于不正常工作状态。

对电力系统的不正常工作状态必须通过自动或人工的方式加以消除，以使系统尽快恢复到正常工作状态。由于不正常工作状态对电力系统和电力设备造成的经济损失与运行时间的长短有关，加之引起不正常工作状态的原因复杂，一般由继电保护装置检测到不正常工作状态后发出信号，或延时切除不正常工作的电气元件。

3. 电力系统的故障状态

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而发生短路、断线等故障时，称为电力系统的故障状态。最常见同时也是最危险的故障是发生各种类型的短路。

短路包括三相短路、两相短路、两相接地短路和单相接地短路。不同类型短路发生的概率是不同的，一般单相接地短路发生的概率最高。不同类型短路产生的短路电流的大小也是不同的，一般为额定电流的几倍到几十倍。

发生短路时可能产生以下后果：

- (1) 通过故障点的很大的短路电流和所燃起的电弧，使故障元件损坏；
- (2) 短路电流通过非故障元件，由于发热和电动力的作用，使它们损坏或缩短它们的使用寿命；
- (3) 电力系统中部分地区的电压大大降低，破坏用户工作的稳定性或影响工厂产品的质量；
- (4) 破坏电力系统并列运行的稳定性，引起系统振荡，甚至使整个系统瓦解。

在电力系统中除应采取各项积极措施消除或减少发生故障的可能性以外，故障一旦发生，必须迅速而有选择性地切除故障元件，这是保证电力系统安全运行的最有效方法之一。故障和不正常工作状态，都可能在电力系统中引起事故。事故，就是指系统或其中一部分的正常工作遭到破坏，并造成对用户少送电或电能质量破坏到不能容许的地步，甚至造成人身伤亡和电气设备的损坏。

系统事故的发生，除了由于自然条件的因素以外，一般都是由于设备制造上的缺陷、设计和安装上的错误、检修质量不高或运行维护不当而引起的，还可能由于故障切除迟缓或设备被错误地切除，致使故障发展成为事故甚至引起事故的扩大。因此，只要充分发挥人的主观能动性，正确地掌握客观规律，加强对设备的维护和检修，就可以大大减少事故发生的几率，把事故消灭在发生之前。

二、继电保护装置的基本任务

继电保护装置是一种能反映电力系统中电气元件发生的故障或不正常工作状态，并动作于断路器跳闸或发出信号的一种自动装置。它的基本任务是：

- (1) 当电力系统的被保护元件发生故障时，继电保护装置应能自动、迅速、有选择地将故障元件从电力系统中切除，并保证无故障部分迅速恢复正常运行。
- (2) 当电力系统中被保护元件出现不正常工作状态时，继电保护装置应能及时反应，并根据运行维护条件，动作于发出信号、减负荷或跳闸。此时一般不要求保护迅速动作，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，以免不必要的动作和由于干扰而引起的误动作。

三、继电保护的基本原理

要完成电力系统继电保护的基本任务，继电保护装置就必须能够正确区分电力系统的正常工作状态、不正常工作状态和故障状态，必须能够正确甄别发生故障和出现异常的元件。继电保护的基本原理就是寻找电力元件在这三种运行状态下的可测参量（主要是电气量）的差异，依据这些差异就可以实现对正常工作、不正常工作 and 故障元件的正确而又快速的甄别。依据可测电气量的不同差异，就可以构成不同原理的继电保护装置。发现并正确利用能可靠区分三种运行状态的可测参量或参量的新差异，就可以形成新的继电保护原理。

目前已经发现不同运行状态下具有明显差异的电气量主要有：流过电力元件的相电流、序电流、功率及其方向；元件的运行相电压、序电压；元件的电压与电流的比值即测量阻抗；电压与电流之间的相位；故障时的突变量等。

1. 利用基本电气参数量的区别

(1) 过电流保护。反映电流增大而动作的保护称为过电流保护。如图 1-1 所示, 在正常运行时, 线路上流过由它供电的负荷电流。若在 BC 线路上发生三相短路, 则从电源到短路点 K 之间将流过短路电流 \dot{I}_K , 可以使保护 1、2 反映到这个电流, 首先由保护 2 动作于断路器 QF2 跳闸。

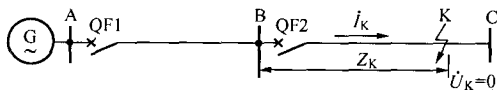


图 1-1 单侧电源线路

(2) 低电压保护。反映电压降低而动作的保护称为低电压保护。如图 1-1 所示, 正常运行时, 各母线上的电压一般都在额定电压 $\pm(5\sim 10)\%$ 范围内变化。若在 BC 线路 K 点发生三相短路时, 短路点电压降到零, 各母线上的电压都有所下降, 保护 1、2 都能反映到电压下降, 首先由保护 2 动作于断路器 QF2 跳闸。

(3) 距离保护。反映保护安装处到短路点之间的阻抗下降而动作的保护称为低阻抗保护, 也称为距离保护。如图 1-1 所示, 在正常运行时, 线路始端的电压与电流之比反映的是该线路与供电负荷的等值阻抗及负荷阻抗角 (功率因数角), 其数值一般较大, 阻抗角较小。若在 BC 线路 K 点发生短路时, BC 线路始端的电压与电流之比反映的是该测量点到短路点之间线路段的阻抗 Z_K , 其值较小, 一般正比于该线路段的距离 (长度), 阻抗角为线路阻抗角, 其值较大。

2. 利用比较两侧的电流相位 (或功率方向)

如图 1-2 所示的双侧电源线路, 若规定电流的正方向是从母线指向线路。在正常运行时, 线路 AB 两侧的电流大小相等, 相位差为 180° ; 当在线路 BC 的 K1 点发生短路故障时, 线路 AB 两侧的电流大小仍相等, 相位差仍为 180° ; 当在线路 AB 内部的 K2 点发生短路故障时, 线路 AB 两侧的短路电流大小一般不相等, 相位相同。由此可见, 若两侧电流相位 (或功率方向) 相同, 则判定为被保护线路内部故障; 若两侧电流相位 (或功率方向) 相反, 则判定为区外短路故障。利用比较被保护线路两侧电流相位 (或功率方向), 可以构成纵联差动保护、相差高频保护、方向保护等。

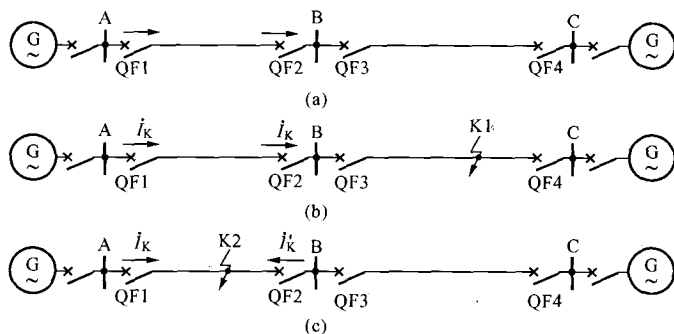


图 1-2 双侧电源线路

(a) 正常运行; (b) 外部故障; (c) 内部故障

3. 反映序分量或突变量是否出现

电力系统在对称运行时, 不存在负序和零序分量; 当发生不对称短路时, 将出现负序、零序分量; 无论是对称短路, 还是不对称短路, 正序分量都将发生突变。因此, 可以根据是否出现负序、零序分量构成负序保护和零序保护; 根据正序分量是否突变构成对称短路、不

对称短路保护。

4. 反映非电量保护

除反映上述各种电气量变化特征的保护外，还可以根据电力元件的特点实现反映非电量特征的保护。例如，当变压器油箱内部的绕组短路时，反映于变压器油受热分解所产生的气体，构成气体保护；反映绕组温度升高构成的过负荷保护等。

四、继电保护装置的组成

继电保护的构成原理虽然很多，但是在一般情况下，整套继电保护装置是由测量比较元件、逻辑判断元件和执行输出元件三部分组成的，如图 1-3 所示。



图 1-3 继电保护装置的组成方框图

1. 测量比较元件

测量比较元件测量通过被保护的电力元件的物理参量，并与给定的值进行比较，根据比较的结果，给出“是”或“非”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具有一个或多个测量比较元件。常用的测量比较元件有：被测电气量超过给定值而动作的继电器，如过电流继电器、过电压继电器等；被测电气量低于给定值而动作的欠量继电器，如低电压继电器、阻抗继电器等；被测电压、电流之间相位角满足一定值而动作的继电器，如功率方向继电器等。

2. 逻辑判断元件

逻辑判断元件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元件。

3. 执行输出元件

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

五、电力系统继电保护的配合

每一套保护都有预先严格划定的保护范围，只有在保护范围内故障，该保护才动作。为了确保故障元件能够被切除，电力系统中的每一个重要元件都必须配备至少两套保护，一套称为主保护，另一套称为后备保护，使电力系统的每一处都处在保护范围的覆盖下，系统任意点的故障都能被自动发现并切除。每一个电力元件如何配置保护、配备几套保护，以及各电力元件继电保护之间怎样配合，需要根据电力元件的重要程度及其对系统影响的重要程度等因素决定。

图 1-4 所示为一个简单电力系统各电力元件主保护的 protection 范围和配合关系示意图。

由图 1-4 可见，上下级电力元件的保护范围必须部分重叠，这样才能保证系统内任意处故障都处在保护范围内。

主保护是指在电力元件的被保护范围内任意点发生故障时，都能以最短时限（如瞬时）动作于跳闸。

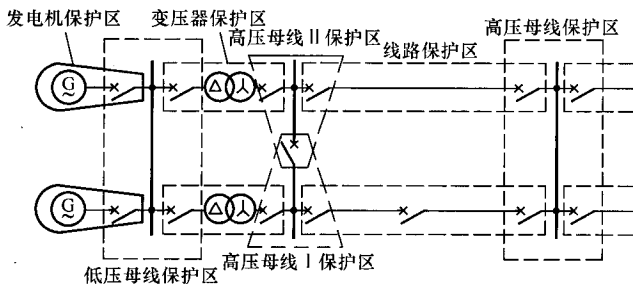


图 1-4 电力元件主保护的保护区和配合关系示意图

后备保护是指由于某种原因使故障元件保护装置或断路器拒绝动作时，由相邻元件的保护或故障元件的另一套保护动作。后备保护分为近后备保护和远后备保护。

近后备保护是指某一元件同时装设两套保护，当该元件故障时，主保护万一不动作，则由后备保护动作于跳闸。显然，当元件的断路器拒绝动作时，近后备保护不能起到后备的作用，此时必须通过装设在断路器上的失灵保护，切除该元件连接母线上的所有电源断路器。

远后备保护是指故障元件保护或断路器拒绝动作时，由上级（电源侧）元件的保护动作于跳闸。当多个电源向该元件供电时，需要在所有电源侧的上级元件处配置远后备保护。显然，远后备保护动作时，使故障影响范围扩大了。

为了最大限度地减小故障对电力系统产生的影响，应保证由主保护快速切除任何类型的故障，一般后备保护都延时动作，等待主保护确实不动作后才动作。因此，主保护与后备保护之间存在动作时间和动作灵敏度的配合。

六、对继电保护的基本要求

动作于跳闸的继电保护，在技术上一般应满足四条基本要求，即选择性、速动性、灵敏性和可靠性。

1. 选择性

选择性是指继电保护装置动作时，仅将故障元件从电力系统中切除，保证系统中非故障元件仍然能够继续安全运行，使停电范围尽量缩小。

如图 1-5 所示，当线路 L4 上 K2 点发生短路时，保护 6 动作跳开断路器 QF6，将 L4 切除，这种动作是有选择性的。若 K2 点故障，保护 5 动作将 QF5 断开，变电站 C 和 D 都将停电，这种动作是无选择性的。同样 K1 点故障时，保护 1 和保护 2 动作断开 QF1 和 QF2，将故障线路 L1 切除，这种动作也是有选择性的。若 K2 点故障，保护 6 或断路器 QF6 拒动，保护 5 动作将断路器 QF5 断开，故障切除，这种情况虽然是越级跳闸，但却尽量缩小了停电范围，限制了故障的发展，这种动作也是有选择性的。

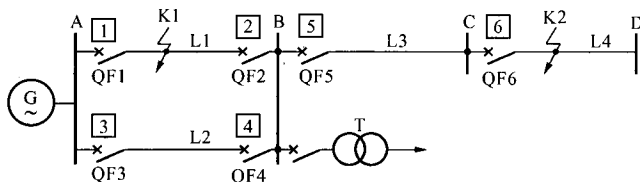


图 1-5 单侧电源网络中保护选择性动作说明图

2. 速动性

速动性是指尽可能快地切除故障，以减少设备及用户在大短路电流、低电压下的运行时间，降低设备的损坏程度，提高系统并列运行的稳定性以及自动重合闸和备用电源自动投入装置的动作成功率。

3. 灵敏性

灵敏性是指保护装置对其保护范围内发生的故障或不正常工作状态的反应能力。满足灵敏性要求的保护装置应该是在规定的保护范围内故障时，在系统任意的运行条件下，无论短路点的位置、短路的类型如何，以及短路点是否有过渡电阻，当发生短路时都能灵敏反应。灵敏性通常用灵敏系数 K_{sen} 或灵敏度来衡量。

对于反映故障时参数增大而动作的保护装置，其灵敏系数为

$$K_{sen} = \frac{\text{保护区末端金属性短路时保护安装处测量到的故障参数的最小计算值}}{\text{保护整定值}}$$

对于反映故障时参数减小而动作的保护装置，其灵敏系数为

$$K_{sen} = \frac{\text{保护区末端金属性短路时保护安装处测量到的故障参数的最大计算值}}{\text{保护整定值}}$$

在 GB 14285—1993《继电保护和安全自动装置技术规程》中，对各类保护灵敏系数的要求都作了具体规定。

4. 可靠性

可靠性是指在该保护装置规定的保护范围内发生了它应该动作的故障时，它不应该拒绝动作，而在发生任何其他该保护不应该动作的故障时，则不应该误动作。

保护装置的可靠性主要依赖于保护装置本身的质量和运行维护水平。一般说来，保护装置的组成元件质量越高、接线越简单、回路中继电器的触点数量越少，则可靠性越高。同时，精细的制造工艺、正确的调整试验、良好的运行维护以及丰富的运行经验，对于提高保护的可靠性也具有重要的作用。

保护装置的误动和拒动都会给电力系统造成严重的危害。但提高其不误动的可靠性和不拒动的可靠性的措施常常是互相矛盾的。由于电力系统的结构和负荷性质的不同，误动和拒动的危害程度也有所不同，因而提高保护装置可靠性的着重点在各种具体情况下也应有所不同。

以上四个基本要求是分析研究继电保护性能的基础。在它们之间既有矛盾的一面，又有统一的一面。可以这样说，继电保护技术是随着电力系统的发展，在不断解决保护装置应用中出现的对基本要求之间的矛盾，使之在一定条件下达到辩证统一的过程中发展起来的。因此，在本课程的学习过程中，应该注意学会按对保护基本要求的观点，去分析每种保护装置的性能。

七、电力系统继电保护工作的特点

继电保护在电力系统中的作用及其对电力系统安全连续供电的重要性，要求继电保护必须具有一定的性能、特点，因而对继电保护工作者也提出相应要求。继电保护的主要特点和对保护工作者的要求如下。

(1) 电力系统是由很多复杂的一次主设备和二次保护、控制、调节、信号等辅助设备组成的一个有机的整体。每个设备都有其特有的运行特性和故障时的工况。任一设备的故障都

将立即引起系统正常运行状态的改变和破坏,给其他设备以及整个系统造成不同程度的影响。因此,继电保护的工作牵涉到每个电气主设备和二次辅助设备。这就要求继电保护工作者对所有这些设备的工作原理、性能、参数计算和故障状态的分析等有深刻的理解,还要有广泛的生产运行知识。此外,对于整个电力系统的规划设计原则,运行方式制定的依据,电压及频率调节的理论,潮流及稳定计算的方法以及经济调度,安全控制原理和方法等都要有清楚的概念。

(2) 电力系统继电保护是一门综合性的科学,它奠基于理论电工、电机学和电力系统分析等基础理论,还与电子技术、通信技术、计算机技术和信息科学等新理论、新技术有着密切的关系。纵观继电保护技术的发展史,可以看到电力系统通信技术上的每一个重大进展都导致一种新的保护原理的出现,例如高频保护、微波保护和光纤保护等,每一种新电子元件的出现也都引起了继电保护装置的革命。由机电式继电器发展到晶体管保护装置,集成电路式保护装置和微机保护,就充分说明了这个问题。目前微机保护的普及及光纤通信和信息网络的实现正在使继电保护技术的面貌发生根本的变化。在继电保护的设计、制造和运行方面都将出现一些新的理论、新的概念和新的方法。由此可见,继电保护工作者应密切注意相邻学科中新理论、新技术、新材料的发展情况,积极而慎重地运用各种新技术成果,不断发展继电保护的理論,提高其技术水平和可靠性指标,改善保护装置的性能,以保证电力系统的安全运行。

(3) 继电保护是一门理论和实践并重的学科。为掌握继电保护装置的性能及其在电力系统故障时的动作行为,既需运用所学课程的理论知识,对系统故障情况和保护装置动作行为进行分析,还需对继电保护装置进行实验室实验,数字仿真分析,在电力系统动态模型上试验,现场人工故障试验以及在现场条件下的试运行。仅有理论分析不能认为对保护性能的了解是充分的。只有经过各种严格的试验,试验结果和理论分析基本一致,并满足预定的要求,才能在实践中采用。因此,要搞好继电保护工作不仅要善于对复杂的系统运行和保护性能问题进行理论分析,还必须掌握科学的实验技术,尤其是在现场条件下进行调试和实验的技术。

(4) 继电保护的工作稍有差错,就可能对电力系统的运行造成严重的影响,给国民经济和人民生活带来不可估量的损失。国内外几次电力系统瓦解进而导致广大地区工、农业生产瘫痪和社会秩序混乱的严重事故,常常是一个继电保护装置不正确动作引起的。因此继电保护工作者对电力系统的安全运行肩负着重大的责任,这就要求继电保护工作者具有高度的责任感、严谨细致的工作作风,在工作中树立可靠性第一的思想。此外,还要求他们有合作精神,主动配合各规划、设计和运行部门分析研究电力系统发展和运行情况,了解对继电保护的要求,以便及时采取应有的措施,确保继电保护满足电力系统安全运行的要求。

八、继电保护的发展简史

继电保护技术是随着电力系统的发展而发展起来的。电力系统中的短路不可避免,短路必然伴随着电流的增大,因而为了保护发电机免受短路电流的破坏,首先出现了反应电流超过一预定值的过电流保护。熔断器就是最早的、最简单的过电流保护。这种保护方式时至今日仍广泛应用于低压线路和用电设备。熔断器的特点是融保护装置与切断电流的装置于一体,因而最为简单。由于电力系统的发展,用电设备的功率、发电机的容量不断增大,发电厂、变电站和供电网的接线不断复杂化,电力系统中正常工作电流和短路电流都不断增大,熔断器已不能满足选择性和快速性的要求,于是出现了作用于专门的断流装置(断路器)的

过电流继电器。19世纪90年代出现了装于断路器上并直接作用于断路器的一次式（直接反应于一次短路电流）电磁型过电流继电器。20世纪初随着电力系统的发展，继电器才开始广泛应用于电力系统的保护。这个时期可认为是继电保护技术发展的开端。

1901年出现了感应型过电流继电器。1908年提出了比较被保护元件两端电流的电流差动保护原理。1910年方向性电流保护开始得到应用，在此时期也出现了将电流与电压相比较的保护原理，并导致了20世纪20年代初距离保护装置的出现。随着电力系统载波通信的发展，在1927年前后，出现了利用高压输电线上高频载波电流传送和比较输电线两端功率方向或电流相位的高频保护装置。在20世纪50年代，微波中继通信开始应用于电力系统，从而出现了利用微波传送和比较输电线两端故障电气量的微波保护。早在20世纪50年代就出现了利用故障点产生的行波实现快速继电保护的设想，经过20余年的研究，终于诞生了行波保护装置。显然，随着光纤通信在电力系统中的大量采用，利用光纤通道的继电保护必将得到广泛的应用。

以上是继电保护原理的发展过程。与此同时，构成继电保护装置的元件、材料、保护装置的结构型式和制造工艺也发生了巨大的变革。20世纪50年代以前的继电保护装置都是由电磁型、感应型或电动型继电器组成的。这些继电器都具有机械转动部件，统称为机电式继电器。由这些继电器组成的继电保护装置称为机电式保护装置。机电式继电器所采用的元件、材料、结构型式和制造工艺在近30余年来，经历了重大的改进，积累了丰富的运行经验，工作比较可靠，因而目前仍是电力系统中应用很广的保护装置。但这种保护装置体积大，消耗功率大，动作速度慢，机械转动部分和触点容易磨损或粘连，调试维护比较复杂，不能满足超高压、大容量电力系统的要求。

20世纪50年代，由于半导体晶体管的发展，开始出现了晶体管式继电保护装置。这种保护装置体积小，功率消耗小，动作速度快，无机械转动部分，称为电子式静态保护装置。晶体管保护装置易受电力系统中或外界的电磁干扰的影响而误动或损坏，当时其工作可靠性低于机电式保护装置。但经过20余年长期的研究和实践，抗干扰问题从理论上和实践上都得到了满意的解决，使晶体管继电保护装置的正确动作率达到了和机电式保护装置同样的水平。20世纪70年代是晶体管继电保护装置在我国大量采用的时期，满足了当时电力系统向超高压、大容量发展的需要。

电子工业方面集成电路技术的发展，有可能将数十个或更多晶体管集成在一个半导体芯片上，从而出现了体积更小、工作更加可靠的集成运算放大器和其他集成电路元件。这促使静态继电保护装置向集成电路化方向发展。20世纪80年代后期，标志着静态继电保护从第一代（晶体管式）向第二代（集成电路式）的过渡，20世纪90年代开始向微机保护过渡。目前，微机保护装置已取代集成电路式继电保护装置，成为静态继电保护装置的主要形式。微机保护具有巨大的计算、分析和逻辑判断能力，有存储记忆功能，因而可用以实现任何性能完善且复杂的保护原理。微机保护可连续不断地对本身的工作情况进行自检，其工作可靠性很高。此外，微机保护可用同一硬件实现不同的保护原理，这使保护装置的制造大为简化，也容易实行保护装置的标准化。微机保护除了保护功能外，还兼有故障录波，故障测距，事件顺序记录和调度计算机交换信息等辅助功能，这对简化保护的调试、事故分析和事故后的处理等都有重大意义。由于微机保护装置的巨大优越性和潜力，因而受到运行人员的欢迎，进入20世纪90年代以来，在我国得到大量应用，已成为继电保护装置的主要型式，

成为电力系统保护、控制、运行调度及事故处理的统一计算机系统的组成部分。

由于计算机网络的发展和其在电力系统中的大量采用给微机保护提供了无可估量的发展空间。微机硬件和软件功能的空前强大，变电站综合自动化和调度自动化的兴起、电力系统光纤通信网络的逐步形成使得微机保护不能也不应再是一个个孤立的、任务单一的、“消极待命”的装置，而应是积极参与、共同维护电力系统整体安全稳定运行的计算机自动控制系统的基本组成单元。因而 1993 年前后出现了测量、保护、控制和数据通信一体化的设想和研究工作。在此设想中，微机保护作为一体化装置将就近装设在室外变电站被保护设备或元件的附近，直接采取其电流和电压，将其数字化后一方面用于保护功能的计算，一方面通过计算机网络送到本站主机和系统调度。同时，微机保护不仅根据故障情况实行被保护设备的切除或自动重合，还作为自动控制系统的终端，接受调度命令实行跳、合闸等控制操作，以及故障诊断、稳定预测、安全监视、无功调节、负荷控制等监控功能。

此外，由于计算机网络提供的数据信息共享的优越性，微机保护可以占有全系统的运行数据和信息，应用自适应原理和人工智能方法使保护原理、性能和可靠性得到进一步的发展和提高，使继电保护技术沿着网络化、智能化、自适应和保护、测量、控制、数据通信一体化的方向不断前进。

继电保护是电力科学中最活跃的分支，在 20 世纪 50~90 年代的 40 年时间走过了机电式、整流式、晶体管式、集成电路式和微机式五个发展阶段。电力系统的快速发展为继电保护技术提出了艰巨的任务，电子技术、计算机技术、通信技术又为继电保护技术的发展不断注入新的活力，因此可以预计，继电保护学科必将不断发展，达到更高的理论和技术高度。

九、互感器

互感器包括电流互感器 (TA) 和电压互感器 (TV)，是一次回路和二次回路的联络元件，用于分别向测量仪表和继电器的电流线圈和电压线圈供电，正确反应电气元件的正常运行和故障情况。

互感器的作用是，将一次回路的高电压和大电流变为二次回路的低电压和小电流，使测量仪表和保护装置标准化、小型化，便于屏内安装。并将二次设备与高电压部分隔离，而且互感器二次侧均接地，保证设备和工作人员的安全。

(一) 电流互感器

1. 电流互感器的极性

目前电力系统中常用的是电磁式电流互感器。电流互感器的工作原理与变压器相似。其特点是一次绕组直接串联在一次回路中，匝数很少，所以一次绕组中的电流完全取决于被测回路的电流，与二次绕组的电流大小无关。二次绕组的额定电流一般为 5A 或 1A。二次绕组所接仪表及继电器的电流线圈的阻抗很小，所以在正常情况下，在近类似于短路状态下运行。电流互感器的额定变比为其一、二次额定电流之比，即

$$n_{TA} = \frac{I_{1N}}{I_{2N}}$$

为了便于正确接线和理论分析，电流互感器的一次和二次绕组引出端子都标有极性符号。如图 1-6 所示，一次绕组 L1 为首端、L2 为尾端；二次绕组 K1 为首端、K2 为尾端。通常用“·”符号标记

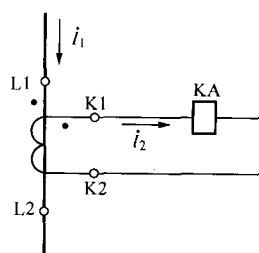


图 1-6 电流互感器的极性

在 L1、K1 或 L2、K2 上，表示它们是同极性端。常用的电流互感器极性都按减极性原则标注，即当系统一次电流从极性端流入时，电流互感器的二次电流从极性端流出。例如，设一次电流 \dot{I}_1 由首端 L1 流入，从尾端 L2 流出，那么二次电流 \dot{I}_2 就由首端 K1 流出，从尾端 K2 流入。

2. 电流互感器的误差

电流互感器的等值电路如图 1-7 所示。

由图 1-7 可见，由于励磁电流的存在，电流互感器一次折算后的电流与二次电流大小不相等，相位也不相同，说明在电流转换中将出现数值误差和相位误差。

变比误差用 ΔI 表示，则

$$\Delta I = \frac{I_2 - I'_1}{I_1} \times 100\%$$

角度误差指 \dot{I}'_1 与 \dot{I}_2 的电流相位差。

继电保护规程规定，用于保护的电流互感器，变比误差在最坏的条件下不得超过 10%；角度误差在最坏条件下不得超过 7°。

为控制误差在一定范围内，对一次电流倍数及二次负载阻抗有一定的限制。生产厂家按照试验绘制的 10% 误差曲线是指一次电流倍数 m 与最大允许负载 Z_{en} 的关系曲线，称为 10% 误差曲线，如图 1-8 所示。

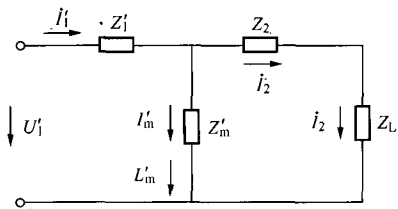


图 1-7 电流互感器的等值电路

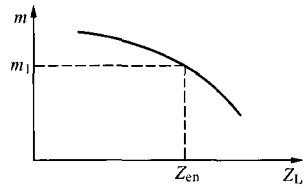


图 1-8 电流互感器的 10% 误差曲线

对于同一个电流互感器在保证其误差不超过允许值的前提下，如果二次负载阻抗较大，则允许的一次电流倍数就较小。如果二次负载阻抗较小，则允许的一次电流倍数就较大。选定保护用的电流互感器时，都要按 10% 误差曲线进行校验。如果已知电流互感器的一次电流倍数，就可以从对应的 10% 误差曲线查得允许的二次负载阻抗 Z_{en} 。只要实际的二次负载阻抗 $Z_L \leq Z_{en}$ ，误差就不会超过允许值。

3. 电流互感器的准确度级

准确度级是指在规定的二次负载范围内，一次电流为额定值时的最大误差。我国电流互感器准确度级和最大允许误差限值如表 1-1 和表 1-2 所示。

电流互感器根据使用场合不同，对电流测量的误差要求不同，因此就有不同的准确度级。测量级电流互感器（0.2 级、0.5 级、1 级）与保护级电流互感器（3~10 级，5P、10P 等，B 级供过电流保护用，D 级供差动保护用）的要求不同。对测量级电流互感器的要求是在正常工作范围内有较高的准确度，当其通过短路电流时，则希望互感器较早饱和，以使其不受短路电流损坏。对保护级电流互感器主要在系统短路情况下工作，因此在额定一次电流范围内准确度级不如测量级电流互感器的高，但对可能出现的短路电流范围内，则要求最大误差不超过 10%。

表 1-1 测量用电流互感器准确度级和最大允许误差限值

准确度级	一次电流为额定 电流的百分数	误差限值		二次负载变化范围
		变比误差±%	相位误差±(′)	
0.2	10	0.5	20	(0.25 ~ 1)S _{2N}
	20	0.35	15	
	100~120	0.2	10	
0.5	10	1	60	
	20	0.75	45	
	100~120	0.5	30	
1	10	2	120	(0.5 ~ 1)S _{2N}
	20	1.5	90	
	100~120	1	60	
3	50~120	3.0	不规定	
10	50~120	10		

表 1-2 保护用电流互感器的误差限值

准确度级	额定一次电流的误差			在额定准确限值一次电流时的复合误差 (%)
	电流误差	相位差		
	±(%)	±(′)	±(crad)	
5P	1	60	1.8	5
10P	3	—	—	10

注 相位误差是以“分”(′)或“厘弧度”(crad)表示。

(二) 电压互感器

电压互感器主要分为电磁式电压互感器和电容式电压互感器。

1. 电磁式电压互感器

电磁式电压互感器的工作原理与电力变压器相同，但容量较小。其特点是一次绕组并联在一次回路中，匝数较多，二次绕组的额定电压一般为 100V。二次绕组所接仪表及继电器的电压线圈阻抗很大，所以在正常情况下，在近于空载状态下运行。电压互感器的额定变比为其一、二次额定电压之比，即

$$n_{TV} = \frac{U_{1N}}{U_{2N}}$$

电压互感器等值电路与图 1-7 相同。由图 1-7 可见，由于电压互感器本身阻抗上的电压降，电压互感器一次折算后的电压与二次电压大小不相等，相位也不相同，说明在电压转换中将出现数值误差和相位误差。

电压互感器的电压误差为

$$\Delta U = \frac{U_2 - U'_1}{U'_1} \times 100\%$$

角度误差指 \dot{U}'_1 与 \dot{U}_2 的电压相位差。