



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
职业教育电力技术类专业教学用书

电力系统继电保护 及自动装置 (第二版)

李火元 等 编著



中国电力出版社

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



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
 职业教育电力技术类专业教学用书

内 容 要 点

电力系统继电保护 及自动装置 (第二版)

编著 李火元 李 斌 张志锋
 谌详维 陆焕运
 主审 杨利水 李丽娇

中国标准书号 (CIP) 数据: 2009.09.01

中国电力出版社

北京市东城区东直门内大街165号

邮政编码 100044

电话 010-57048888

网址 www.cepp.com.cn

2009年10月第1版 2009年10月第1次印刷

ISBN 978-7-5083-8513-0

定价 38.00元

举报电话 010-57048888

本书为《电力系统继电保护及自动装置》系列教材之一

本书可作为电力系统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及自动装置工作的工程技术人员参考



中国电力出版社

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

内 容 提 要

本书为教育部职业教育与成人教育司推荐教材。

全书共分九章，主要内容包括输电线路的阶段式继电保护、输电线路的全线速动保护、微机型继电保护及自动装置基础知识、电力系统自动控制装置、输电线路微机保护装置、电力系统主设备的继电保护原理、发电机变压器组微机型继电保护装置、电力系统无功功率自动调节装置和微机型故障录波器。书后附有中性点非直接接地系统的接地保护。

本书可作为高职高专电力技术类各专业的教材，也可供从事继电保护及自动装置有关工作的工程技术人员使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统继电保护及自动装置/李火元等编著. —2版.

北京: 中国电力出版社, 2009

教育部职业教育与成人教育司推荐教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 8513 - 6

I. 电… II. 李… III. ①电力系统—继电保护—高等学校: 技术学校—教材②电力系统—继电自动装置—高等学校: 技术学校—教材 IV. TM77

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 023994 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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2006年4月第一版

2009年4月第二版 2009年4月北京第九次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 21.5印张 424千字

定价 28.00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

本书自 2006 年 4 月出版发行以来，已印刷了 8 次。首先对第一版中的错漏之处给读者带来的不便表示歉意。本版编者将以更加审慎的态度撰写与组稿，尽所能提高质量，回报广大读者。

继电保护及自动装置的微机化，使得广大的继电保护工作者改变了设计思想，更新了继电保护装置的运行维护观念。学校的继电保护教学必须根据继电保护技术的发展建立新的体系，继电保护的教学内容必须重新整合，那些已经过时的内容要坚决删除；重、难点必须重新确认。如传统内容中接线方式是职业技术学校继电保护课程教学中重点的重点。而微机保护的接线，只要将电流、电压按正确的相序接入就行了，没有以前那么复杂。重、难点的转移，要求继电保护课程必须在教学结构上重新编排。

结合电力职业教育特点和电力系统继电保护及自动装置自身技术的发展，第二版在第一章中增加了整定继电保护定值时的电力系统运行方式的选择；第二章中增加了光纤差动和允许式高频保护的内容。根据目前电力系统中自动重合闸和备用电源自动投入装置已完全微机化的现实，本版对这两节的内容进行了改写，删除了 90° 接线方式和整流型功率继电器、平行线路整流型电流平衡继电器。

虽然编者有写好本书的主观愿望，但限于水平，书中的错漏之处在所难免，恳请读者批评指正。

编著者

2009 年 2 月 8 日

第一版前言

本书为教育部职业教育与成人教育司推荐教材，是根据教育部审定的电力技术类专业主干课程的教学大纲编写而成的，并列入教育部《2004~2007年职业教育教材开发编写计划》。本书经中国电力教育协会和中国电力出版社组织专家评审，又列为全国电力职业教育规划教材，作为职业教育电力技术类专业教学用书。

本书体现了职业教育的性质、任务和培养目标；符合职业教育的课程教学基本要求和有关岗位要求和技术等级要求；具有思想性、科学性、适合国情的先进性和教学适应性；符合职业教育的特点和规律，具有明显的职业教育特色；符合国家有关部门颁发的技术质量标准。本书既可以作为学历教育教学用书，也可作为职业资格和岗位技能培训教材。

一本既能反映当代继电保护及自动装置技术水平，又便于教与学的继电保护及自动装置教科书，是目前高职、高专电类专业师生和从事此类工作的工程技术人员所迫切需要的。但由于继电保护及自动装置技术随计算机技术、通信技术的发展而发展得太快，要帮助人们实现这一愿望难度太大。

其一：与其他技术不同，继电保护及自动装置的新技术不能完全取代“老”技术。小型水、火电厂和配电变电站仍在大量使用电磁型继电保护和自动装置，例如 BCH—2 差动继电器、采用电磁型继电器组装的备用电源自动投入装置等；在配电线路上仍在普遍采用电磁型三相一次重合闸；在中型发电机和变压器上仍在广泛采用晶体管型比例制动原理的差动保护；主网和新建的由大机组和大型变压器构成的发电厂和变电站的继电保护和自动装置已完全微机化。除此以外，在少量的发电机、变压器和输电线路上还有采用集成电路保护的；另外，智能型继电保护及自动装置的雏形已经形成且有试运行的装置；还有计算机理论上可以实现各种原理的继电保护及自动装置。因此，以各种原理采用不同技术实现的继电保护及自动装置层出不穷，无法统计，这就使得本教材在内容的取舍与组合编排上显得尤为重要。

其二：教育、教学改革对本课程提出了新要求。高职、高专正在进行学制改革的试点工作，学制改革的趋向是二年制。学制的缩短，要求教学内容必须调整，课程必须重新整合。微型继电保护和自动装置的输入信号预处理和硬件电路基本相同，是便于整合的最好内容。整合的目的是为了减少不必要的重复，减少篇幅，腾出空间，即用一本书完成两本书所要介绍的内容，字数受限制，这就对文字处理提出了更高的要求。

其三：高职、高专的办学目标是培养高级应用型人才。作为高等教育的一部分，一定深度的理论作基础是必须的；作为应用型人才，要求掌握和应用现代继电保护和自动装置又是必然的，这又给本教材在理论和实践的结合点上出了难题。

虽然有这样那样的困难和顾虑，书中还是力求将近年来继电保护及自动装置领域的新原

理、新技术用通俗的文字介绍给读者；为了处理好理论与实践的结合问题，本教材组织内容的出发点是“理论为装置（含继电保护装置和自动装置，下同）服务，装置以应用为主”。考虑到电磁型和整流型保护装置还在广泛使用这一现实，且电磁型和整流型保护装置能帮助初学者很好地理解继电保护及自动装置的基本原理，所以，在讲述继电保护及自动装置基本原理时以电磁型和整流型装置为重点。由于晶体管型和集成电路型装置已基本被微型装置取代，因此，较复杂的装置以微型为主，如微型线路保护装置、微型发一变组保护、微型自动并列装置、微型自动调节励磁装置、微型故障录波装置等。书中还介绍了工频变化量继电保护原理等新技术。

全书共分九章，由李火元主编，李斌副主编，杨利水、李丽娇主审。第三章和第四章的第一节由张志锋编写，第四章的其他各节和第八章由李斌编写，第六章的第三节、第九章和附录由陆焕运编写，第六章的其他各节和第七章由谌祥维编写，其余部分由李火元编写并统稿。杨利水、李丽娇同志在审阅过程中提出了不少宝贵意见，在此深表谢意。

由于编者水平所限，书中的错漏之处恳请读者批评指正。

编 者

目 录

前言	
第一版前言	
绪论	1
第一章 输电线路的阶段式继电保护	6
第一节 阶段式继电保护基本原理	6
第二节 阶段式电流保护	9
第三节 阶段式零序电流保护	20
第四节 阶段式距离保护	24
第五节 方向问题的提出及解决方法	29
复习思考题	37
第二章 输电线路的全线速动保护	40
第一节 线路的差动保护	40
第二节 高频保护的基本原理	49
第三节 高频闭锁方向保护	54
第四节 允许式高频保护	58
第五节 相差高频保护	59
复习思考题	61
第三章 微机型继电保护及自动装置基础知识	63
第一节 微机继电保护及自动装置输入信号的预处理	63
第二节 微机型继电保护及自动装置的基本算法与数字滤波	70
复习思考题	76
第四章 电力系统自动控制装置	77
第一节 输电线路的自动重合闸	77
第二节 按频率自动减负荷装置	90
第三节 备用电源自动投入装置 AAT	96
第四节 自动并列装置	98
复习思考题	110
第五章 输电线路微机保护装置	112
第一节 微机型阻抗保护的 特性分析及算法	112
第二节 工频变化量测量元件	125

第三节	零序方向保护的算法及特性分析	129
第四节	微机保护装置举例	132
	复习思考题	153
第六章	电力系统主设备的继电保护原理	155
第一节	变压器保护	155
第二节	同步发电机保护	167
第三节	母线保护	179
	复习思考题	192
第七章	发电机变压器组微机继电保护装置	194
第一节	发变组微机保护的硬件结构	194
第二节	发变组微机保护的软件结构	194
第三节	发变组微机保护的配置原则及框图	197
第四节	发变组微机保护原理	200
	复习思考题	216
第八章	电力系统无功功率自动调节装置	218
第一节	同步发电机自动调节励磁装置	218
第二节	电压、无功综合控制装置	255
	复习思考题	258
第九章	微机型故障录波器	260
附录	中性点非直接接地系统的接地保护	267

绪 论

一、电力系统继电保护及自动装置的作用与任务

电力系统继电保护及自动装置（以下简称继电保护及自动装置）是电力系统安全、稳定运行的可靠保证。

电力系统是发（发电机）、供（变压器、线路）、用电的总称。电力系统由于受自然的（如雷击、风灾等）、人为的（如设备制造上的缺陷、误操作等）因素影响，不可避免地会发生各种形式的短路故障（以下简称故障）和不正常工作状态。故障和不正常工作状态，都可能在电力系统中引起事故。事故是指系统或其中的一部分正常工作遭破坏，造成对用户的少送电或人身伤亡和设备损坏。前者称为停电事故，后者称为人身和设备事故。

为了减轻故障和不正常工作状态造成的影响，继电保护的任务是：当电力系统出现故障时，给控制主设备（如输电线路、发电机、变压器等）的断路器发出跳闸信号，将发生故障的主设备从系统中切除，保证无故障部分继续运行；当电力系统出现不正常工作状态时继电保护发出信号，运行人员根据继电保护发出的信号对不正常工作状态进行处理，防止不正常工作状态发展成故障而造成事故。例如：某变压器过载了，运行人员就应相应的减轻该变压器的负载，使该变压器恢复正常运行。

电能的生产（发电）、输送、分配、使用是同时进行的，从电源到负载是一个紧密连接的且分布十分广泛的大系统。因此，对电能质量及电力系统运行有极严格的要求。运行中出现的问题，若处理不及时或处理不正确都会影响电力系统的正常运行，甚至造成大面积停电；局部发生的故障，如处理不当，会影响整个电力系统。随着发电机单机容量及电力系统容量的不断扩大，对运行水平的要求越来越高。只有借助自动装置的帮助，才能达到现代电力系统要求的运行水平。自动装置的任务是：

(1) 配合继电保护提高供电的可靠性（如自动重合闸、备用电源自动投入等装置）。

(2) 保证电能质量，提高系统经济运行水平，减轻运行人员的劳动强度（如自动调节装置、低频减载装置、自动并列装置等）。

(3) 自动记录故障过程，有利于分析处理事故（如故障录波器等）。

二、对继电保护的四项基本要求

继电保护装置的功能，就是将检测到的电气量与整定值或设定的边界进行比较，在越过整定值或边界时就动作。这里的越过有两层含义：对于反应被测量的量增加而动作的保护装置，是指测量的量大于整定值或越过边界到界外；对于反应被测量的量降低而动作的保护装置，是指测量的量小于整定值或越过边界进入界内。

继电保护装置的功能可用一个等效的自动化开关来描述，其逻辑框图如图 0-1 所示。

被保护的设备正常运行时，输入量不会越过整定值或边界，自动化开关是打开的，没有输出量，保护装置不动作；当被保护设备发生故障或出现不正常工作状态时，输入量就会越过整

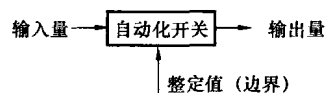


图 0-1 继电保护装置功能等效逻辑框图

定值或边界，自动化开关自动闭合，有输出量及保护装置动作。

在继电保护技术中，将继电保护装置的自动化开关特性，称为继电特性，即当控制量（输入量）变化到某一定值（整定值或边界）时被控量（输出量）发生突变。因此，凡能实现继电特性的技术，均可引用到继电保护技术中来，如电磁技术、电子技术、集成电路技术、微机技术等。这样就构成了电磁型、电子型、集成电路型、微机型等不同技术实现的继电保护装置。

继电保护装置一般由三个部分组成，即测量部分、逻辑部分和执行部分，其原理框图如图 0-2 所示。

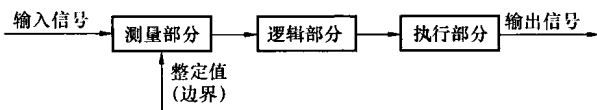


图 0-2 继电保护装置原理框图

从被保护设备来的输入信号通过测量部分形成有关量，与给定的整定值或设定的边界进行比较，判断出保护是否启动；逻辑部分根据测量部分输出量的大小、性质、出现的顺序或他们的组合，

按规定的逻辑关系工作，确定是否将断路器跳闸或发出信号，并将命令转送给执行部分；执行部分根据逻辑部分转送的信号，完成保护装置的任务。如果被保护的设备发生故障，动作于断路器跳闸；如果被保护的设备处在不正常状态，就发出相应的信号。继电保护装置工作的好坏用四个基本要求来衡量。

1. 可靠性

电力系统正常运行时，继电保护装置应可靠不动作；当被保护设备发生故障或不正常工作状态时，继电保护装置应可靠动作。前者称作安全性，如果电力系统正常运行时继电保护装置动作了，误发信号或误将某设备切除，非但未起到保护作用，反而由于误动作造成了电力系统的不安全；后者称作可依赖性，如果被保护设备发生故障或出现不正常工作状态时，继电保护装置拒绝动作，就没有起到保护作用，该保护不可依赖。由此可见，继电保护必须满足可靠性的要求。

2. 迅速性

迅速性又可称作快速性，是指继电保护装置的動作速度。理论上讲，继电保护装置的動作速度越快越好；但是实际应用中，为防止干扰信号造成保护装置的误动作及保证保护间的相互配合，继电保护不得不人为地设置一动作时限。

目前继电保护的動作速度完全能满足电力系统的要求。最快的继电保护装置的動作时间约为 5ms。

3. 选择性

选择性是指：电力系统出现故障时，继电保护装置发出跳闸命令仅将故障设备切除，使停电范围尽可能减小，保证无故障部分继续运行。如图 0-3 中 k1 点故障，断路器 QF1 和 QF2 的保护动作，切除发生在线路 L1 上的故障，保证无故障部分继续运行。

在图 0-3 中 k3 点故障时，根据选择性的要求应该由断路器 QF6 切除故障，若出现 QF6 上的继电保护装置拒动或者是断路器自身拒动，由 QF5 切除 k3 点故障，这是很必要的，称断路器 QF5 是断路器 QF6 的后备，他们的

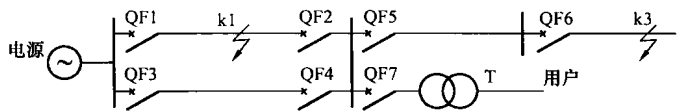


图 0-3 选择性说明图

继电保护装置也是如此。这样停电范围虽然有所扩大，但故障总是被切除了。

4. 灵敏性

灵敏性指的是继电保护装置反应故障的能力。灵敏性一般用灵敏系数 k_{sen} 来衡量，不同的继电保护装置对灵敏系数的要求也不相同，校验灵敏性的方法也不一样，这将在以后各具体的继电保护装置中分析。

以上四个基本要求，贯穿整个继电保护内容的始终。要注意四个基本要求间的矛盾与统一，例如强调快速性时，可能会影响到可靠性和选择性；强调选择性时可能会影响到快速性。可以想像：同时满足四个基本要求的继电保护装置，其造价一定昂贵。所以，对具体的被保护对象，装设怎样的继电保护装置，在满足技术条件的同时还要分析其经济性。

对各种自动装置的基本要求，将在各有关单元介绍。

继电保护及自动装置发展到今天，它的构成原理已形成了两种逻辑，即布线逻辑和数字逻辑。布线逻辑的继电保护装置和自动装置（以下简称装置），其功能靠接线来完成，不同原理的装置其接线也不同（及硬件不相同）；数字逻辑装置的功能由计算（程序）来完成，不同原理的装置计算方法（程序）不相同，但硬件基本相同。布线逻辑的装置要实现一种完善的特性（如四边形阻抗边界），接线将十分复杂，有些边界还不可能实现。数字逻辑装置的原理是由计算（程序）来实现的，因此，可实现特性完善的装置。

三、继电保护及自动装置的现状与发展

1. 继电保护及自动装置的现状

继电保护及自动装置是一门新学科，从形成概念到现在刚过百年。但其技术确有飞速发展，从初期的机电型发展到今天的微机型，经历了四代的更新。与其他技术不同的是新技术不能完全取代“老”技术；电力系统中运行的继电保护及自动装置可以说是“四世同堂”。形成这一特点的原因可用表 0-1 说明。继电保护及自动装置的这些技术特点，给从事继电保护工作的工程技术人员提出了很高的要求。

表 0-1 不同类型的继电保护及自动装置性能比较

保护类型	优 点	缺点及存在的问题
机电型 (1901 年发明)	简单、可靠、价廉、技术成熟、耐浪涌性强	动作速度慢，不易实现复杂的装置
晶体管型 (1960 年发明)	动作速度较快，可以实现复杂的装置，比较经济，易于掌握	抗干扰能力差，元器件多，易发生特性变化和元件损坏
集成电路型 (1970 年发明)	动作速度快，易实现较为复杂的装置，有自检功能	元器件较多，接线复杂，抗干扰能力差，价格高
微机型 (1972 年发明)	动作速度快，易实现复杂的装置，自检功能完善，有很好的附加功能，调试方便	技术跨度大，厂家对软件保密，用户检修难度大

目前，各种原理采用不同技术实现的继电保护及自动装置层出不穷，无法统计。小型水、火电厂和配电变电站仍在大量使用电磁型继电保护和自动装置，如 BCH-2 型差动继电器、采用电磁型继电器组装的备用电源自动投入装置等。在配电线路上仍在普遍采用电磁型三相一次重合闸。在中型发电机和变压器上仍在广泛采用晶体管型比例制动原理的差动保护。主网和新建的由大机组和大型变压器构成的发电厂和变电站的继电保护和自动装置已完

全微机化。除此之外，少量的发电机、变压器和输电线路还有采用集成电路保护的。另外，智能型继电保护及自动装置的雏形已经形成且有试运行的装置，还有计算机理论上可以实现各种原理的继电保护及自动装置。所以，从原理层面来分类更是繁多。这些都给从事继电保护工作的工程技术人员掌握继电保护现代技术增加了难度。

2. 继电保护及自动装置技术未来趋势是向计算机化、网络化、一体化发展

继电保护及自动装置的微机化是不可逆转的发展趋势。电力系统对继电保护及自动装置的要求不断提高，除了装置本身的基本功能外，还应具有大容量故障信息和数据的长期存放空间、快速的数据处理功能、强大的通信能力，具有与其他继电保护及自动装置和调度联网共享信息和网络资源的能力。

计算机网络作为信息和数据通信工具已成为信息时代的技术支柱。要保证系统的安全稳定运行，这就要求各个继电保护及自动装置共享全系统的运行和故障信息的数据，各个继电保护及自动装置在分析这些信息和数据的基础上协调动作，确保系统的安全稳定运行。显然，实现这种功能的基本条件是将全系统继电保护及自动装置用计算机网络连接起来，亦即实现继电保护及自动装置的网络化。这在当前的技术条件下是完全可能的。

在实现继电保护及自动装置的计算机化和网络化的条件下，继电保护及自动装置可从网上获取电力系统运行和故障的任何信息和数据，也可将自身所获得的信息和数据传送给网络控制中心或任一终端。因此，每个继电保护及自动装置不但可完成自身的基本功能，而且在无故障正常运行情况下还可完成测量、控制、数据通信功能，亦即实现保护、控制、测量、数据通信一体化。

3. GPS 技术应用与继电保护及自动装置

GPS (Global Positioning System) 技术被广泛应用于军事、电力、交通等领域，在电力系统中的应用也显示出独特优势以及应用前景。在电力系统继电保护及自动装置中，应用 GPS 技术将使传统的自动监视和控制功能得到进一步提高。使原来不可能做到的控制和测量精度，以及故障分析，装置实验、特殊参数的采集都可以在 GPS 条件下得以实现。GPS 除了本身可用于全球定位功能外，另一个显著的特点就是精确的时间传递，电力系统可以利用 GPS 的这个特点，使电力系统继电保护及自动装置能够在 $1\mu\text{s}$ 的分辨率下进行电网统一时钟和同步采集，以实现各种动态测量。

统一电力系统的时钟。GPS 接收机在任何时刻都能在同一时刻接收到同一个信号，其误差不超过国际标准时间 $1\mu\text{s}$ ，因此可以很方便地实现全国电力系统时间的真正统一。与传统方法相比，具有精度高（微秒级）、范围广、不需要通信联络、不受地理和气候条件限制等优点，是理想的统一的全网时钟的首选方案。

同步采样。继电保护及自动装置都需要对测控对象进行采样，不仅需要本地信息，而且还需要远方信息，这些信息要求是同步采集，同时将采集结果进行比较处理，不用 GPS 是很难解决这个问题。由于 GPS 有许多优点，故障定位、线路的电流纵差动保护、保护装置的试验以及相量测量等的应用，都可以利用它得到很好的解决。比如，当输电线路发生故障时，故障点将产生向线路两端以光速运行的行波。如果能在同一时间基准下记录两端接受到的行波的时刻，则很容易确定出故障的位置，这就是行波故障测距。数字式纵差电流保护在实现上有两大困难；一是通信问题，二是线路两端电流的同步采样。前者可以利用光纤数字通信，后者可利用 GPS 很好地解决。由于保护装置安装在不同的站端，因此需要一种同

步装置来完成试验信号的同步输入，GPS 可以很好地解决上述时间同步问题。相量测量的准确性是比相式保护装置能否正确工作的关键。相量测量就是同步采样直接测量电网中的各种母线电压和相位。GPS 可以准确测量不同电站母线电压之间的相位关系。

四、学习继电保护及自动装置时应注意的几个问题

学习继电保护及自动装置要注意学习方法，应在学完电工基础、电机学、电子技术、微机原理、发电厂变电站电气设备、电力系统等课程的基础上进行学习。在对继电保护及自动装置进行理论（基本原理、工作原理、工作特性等）分析时，首先应分析被保护或被控制的主设备（如发电机、变压器、输电线路等）的特点，特别是要分析他们在不正常工作状态和故障情况时的特征，找出特征量或被控量；接着分析判别这些特征量或被控量的继电器或自动装置；再分析继电保护及自动装置的工作原理、工作特性。要掌握继电保护及自动装置这门技术，实训操作是必不可少的。在进行实训操作时，要充分模拟主设备不正常状态和故障情况，观察装置的动作情况，记录动作特性（特别是外特性），结合理论知识分析动作的正确性。

继电保护及自动装置课程的理论性、实践性都很强。初学者感觉起点高，难入门。但入门之后，就会发现该课程逻辑推理严密、系统性强、层次分明、前后知识关联，越学越有趣。所以初学者要知难而进，掌握了学习方法，深入到理论和实践中，就会发现继电保护及自动装置内部世界的“精彩”之处，就会自觉地克服学习中的困难，掌握继电保护及自动装置这门技术。

学习本课程，难点在两个方面：其一是“层次”问题。例如，要求仅有小学文化程度的人去解微分方程，无论多么简单的微分方程他都无法求解，因为他的知识没有达到解微分方程这个层次。其二是“繁”及复杂。为了快速切除故障，继电保护的动作时间以毫秒记。因此，对电磁暂态方面的知识要求较高。但在电机学、电力系统等课程中，对暂态方面的知识介绍有限，在学习继电保护和自动装置时往往不够用，这就需要在学本课程之外适当地补充相关知识。对于这类“层次”问题的难题，将概念搞清即可，没有必要追求理论推导的完整性。学习继电保护及自动装置感到“繁”是每一个初学者的“通病”。要解决“繁”的问题，应从目的出发，结合对每一种装置的基本要求去衡量这些装置是否达到设定目标。在分析过程中可采用“积木”式的分析方法，将一个复杂的大问题（总装置）化为若干小问题进行分析，加上多观察、多动手，难题也容易解决。对于那些结构十分复杂的装置（如微机保护的硬件电路、自动并列装置等），初学时，可将它的内部结构看成一个“黑匣子”，先搞清楚它的外特性，学会使用，有必要时再去研究其内部结构。

输电线路的阶段式继电保护

工作环境决定了输电线路是电力系统中最易发生故障的部分。输电线路故障与正常运行情况相比最明显的特征是：在线路首端测得的电气量要发生各种变化，如电流会增加、电压会降低、阻抗的幅值会变小、复角会变大；如果是非对称故障，还会出现较大的负序和零序分量；如果线路的两端接有电源（含等效电源），线路输送功率的方向还有可能改变。为了保证电力系统的安全稳定运行，借助输电线路故障时电气量变化的特征，可以装设各种不同原理的继电保护装置，将故障线路切除，保证无故障部分继续运行。输电线路应用最为广泛的继电保护方式是阶段式继电保护装置。

第一节 阶段式继电保护基本原理

输电线路为什么要采用阶段式保护，简单的回答是为满足“四个基本要求”。具体分析可从两方面理解：一是测量误差，即被保护线路故障时保护测得的故障量会出现误差；二是为防止线路故障时主保护及 I、II 段保护由于某种原因拒动，而增设后备保护及第 III 段保护。

阶段式保护要解决的问题主要是配合问题，即保护范围的配合、动作时间的配合和整定值（边界）的配合。

一、各段保护间保护范围和动作时间的配合

设在图 1-1 所示的系统中采用阶段式继电保护，以断路器 QF1 上的保护为分析对象。

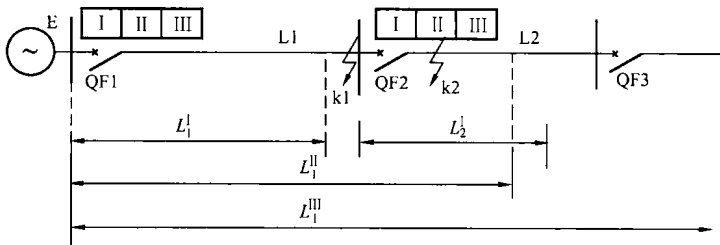


图 1-1 阶段式继电保护保护范围的配合说明图

注：I II III 分别表示第 I 段、第 II 段和第 III 段保护；

L_1^I 、 L_1^{II} 、 L_1^{III} 分别为线路 L1 的第 I 段、第 II 段和第 III 段保护的保护区；

L_2^I 为 L2 第 I 段保护的保护区。

第 I 段保护又称为瞬时速断保护，其保护范围被限制在被保护线路全长的 85% 以内。理想情况下：保护范围内故障，保护动作，瞬时切除故障；保护区外故障，保护有选择的不动作。下面讨论为什么不能让第 I 段保护的保护区更长一点，甚至保护线路的全长。

根据选择性的要求，下级线路故障，应由下级线路的继电保护装置动作将故障切除；若上级线路第 I 段保护的保护区为线路的全长，则在下级线路的首端发生故障时，由于测量误差，上级线路的第 I 段保护有可能与下级线路的第 I 段保护同时动作，这样，上级线路的第 I 段保护就失去了选择性；为了满足选择性，第 I 段保护就不能保护线路的全长，即必须缩短保护区。缩短的保护区，理论上应该视测量误差的大小而定。从保护线路的角度出发，在保证选择性的前提

下，缩短的保护范围应该越短越好；根据工程统计，缩短的保护范围一般为线路全长的15%，即第Ⅰ段保护的保护区为线路全长的85%就能满足要求。

第Ⅱ段保护又称作带时限速断保护。第Ⅱ段保护的作用是保护第Ⅰ段保护不到的部分，即第Ⅱ段保护必须保护线路的全长。由上述分析可知，要保护线路的全长，由于测量误差的存在，第Ⅱ段的保护范围必然会延伸到下级线路。这样，上级线路的第Ⅱ段保护就要考虑与下级线路上的保护配合。首先考虑与下级的第Ⅰ段保护配合，即上级第Ⅱ段的保护范围不能超过下级第Ⅰ段的保护范围；一般在下级第Ⅰ段保护范围的基础上再缩短15%。为了满足选择性，第Ⅱ段保护必须带时限；如果不带时限，当故障发生在下级线路上时，上级的第Ⅱ段就有可能同下级的第Ⅰ段同时动作。从快速性的要求出发，保护带的时限应尽可能短，但必须保证：在下级第Ⅰ段保护范围内发生故障时，下级第Ⅰ段保护动作，将故障切除，故障切除后，上级的第Ⅱ段有足够的返回时间，用公式表示为

$$t^{\text{II}} = t^{\text{I}} + \Delta t \quad (1-1)$$

式中 t^{II} ——第Ⅱ段保护的动作时间；

t^{I} ——第Ⅰ段的固有动作时间，约为零；

Δt ——时间级差，我国取0.5s。

当上级的第Ⅱ段保护的保护区或灵敏度满足不了要求时，可考虑与下级的第Ⅱ段配合，即上级第Ⅱ段的保护区不能超过下级第Ⅱ段的保护区；一般在下级第Ⅱ段保护区的基础上再缩短15%，其动作时间为

$$t_{\text{上级}}^{\text{II}} = t_{\text{下级}}^{\text{II}} + \Delta t \quad (1-2)$$

第Ⅲ段保护是后备保护，后备分近后备和远后备。近后备是作本断路器上其他保护的后备；远后备是作下级断路器上所有保护的后备和下级断路器的后备，即当下级的保护或断路器由于某种原因拒动时，上级的后备保护动作，将故障切除。第Ⅲ段保护由于要作下级的后备保护，因此，它的保护区应该包括下级线路的全长。为了满足选择性，第Ⅲ段保护必须带延时，即

$$t_{\text{上级}}^{\text{III}} = t_{\text{下级}}^{\text{III}} + \Delta t \quad (1-3)$$

式中 $t_{\text{下级}}^{\text{III}}$ ——下级母线上各被保护设备中最长的第Ⅲ段保护动作时间。

【例1-1】 已知条件如图1-2所示，整定QF1、QF3第Ⅲ段保护动作时间。

$$\begin{aligned} \text{解：} \quad t_3^{\text{III}} &= t_4^{\text{III}} + \Delta t \\ &= 1\text{s} + 0.5\text{s} = 1.5\text{s} \\ t_1^{\text{III}} &= t_3^{\text{III}} + \Delta t \\ &= 1.5\text{s} + 0.5\text{s} = 2\text{s} \end{aligned}$$

由于上级第Ⅲ段保护动作的时间，总是比下级母线上各被保

护设备中最长的第Ⅲ段保护动作时间还要长 Δt ，将 Δt 看成一个阶梯，这种时限特性被称作阶梯时限特性。

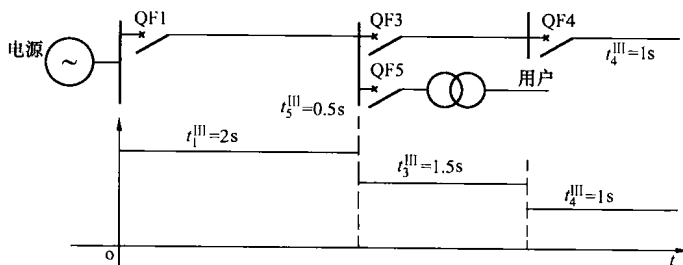


图1-2 例1-1图

二、各段保护间整定值（边界）的配合

各种保护的保护区，实际上是由保护的整定值来决定的。保护之间的保护区配合，由整定值的配合来实现。

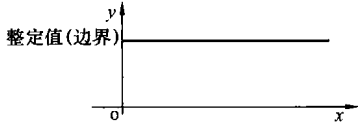


图 1-3 动作量为标量的继电保护装置动作边界图

保护的原理是反应测量量减小而动作的，则测量量小于或等于整定值时保护动作，测量量大于整定值时保护不动作。由于保护的动作条件包含了整定值，所以，整定值又被称为动作值。

复杂的保护装置，整定值是一个或几个矢量，其动作边界表示在复坐标平面上为直线、圆或其他几何图形，如图 1-4 所示。

对于反应测量量增加而动作的保护，边界外为保护的保护区；对于反应测量量减小而动作的保护，边界内为保护的保护区。

2. 各段保护间整定值（边界）的配合

设 D^I 、 D^{II} 、 D^{III} 分别为第 I 段、第 II 段和第 III 段保护的整定值，同一断路器上反应测量量增加而动作的保护

$$D^I > D^{II} > D^{III} \quad (1-4)$$

反应测量量减小而动作的保护

$$D^I < D^{II} < D^{III} \quad (1-5)$$

当上级保护的保护区伸到了下级时，上级保护的整定值必须与下级保护的整定值进行配合，即

$$D_{\text{上级}} = K_{\text{mat}} D_{\text{下级}} \quad (1-6)$$

式中 $D_{\text{上级}}$ —— 上级保护的整定值；

K_{mat} —— 配合系数，反应测量量增加而动作的保护， $K_{\text{mat}} > 1$ ，一般取 1.1~1.2；反应测量量减小而动作的保护 $K_{\text{mat}} < 1$ ，一般取 0.9~0.85；

$D_{\text{下级}}$ —— 下级需要与上级配合保护的整定值。

作为特例，式 (1-6) 不适合阻抗第 II 段保护。上级第 II 段阻抗保护与下级第 I 段配合的关系式

$$D_{\text{上级}}^{II} < Z_{\text{上级线路}} + K_{\text{bra. min}} D_{\text{下级}} \quad (1-7)$$

式中 $Z_{\text{上级线路}}$ —— 上级线路的阻抗；

$K_{\text{bra. min}}$ —— 最小分支系数，类似 K_{mat} 。

1. 整定值（边界）的一般概念

简单的保护装置，整定值是一个标量，其动作边界表示在直角坐标平面上为一根直线，如图 1-3 所示。

整定值是保护动作与不动作的分界线（边界）。如果保护的原理是反应测量量增加而动作的，则测量量大于或等于整定值时保护动作，测量量小于整定值时保护不动作。如果

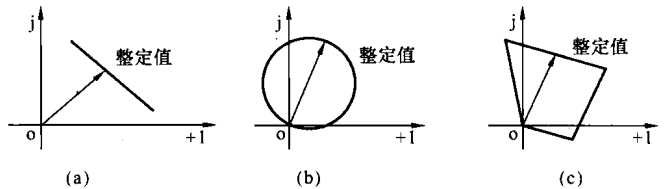


图 1-4 动作量为矢量的继电保护装置动作边界图

(a) 直线边界；(b) 圆特性边界；(c) 多边形边界

第二节 阶段式电流保护

一、阶段式电流保护的构成原理

线路正常运行时流过的是负荷电流；发生故障时，电源向故障点提供比负荷电流大很多的短路电流，系统的正常运行遭到破坏，利用线路短路故障时电流增大的特点，构成阶段式电流保护，将故障切除，保证系统非故障部分的正常运行。阶段式电流保护的逻辑框图如图 1-5 所示。

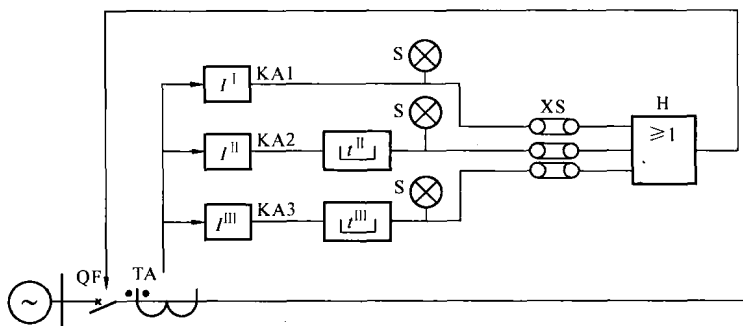


图 1-5 阶段式电流保护的逻辑框图

TA—电流互感器；KA1、KA2、KA3—I、II、III 段电流保护的电流测量元件；S—信号元件；XS—连接片，投退各段保护； t^II 、 t^III —II、III 保护时限元件的时限；H—出口跳闸元件

阶段式电流保护的工作流程如图 1-6 所示。

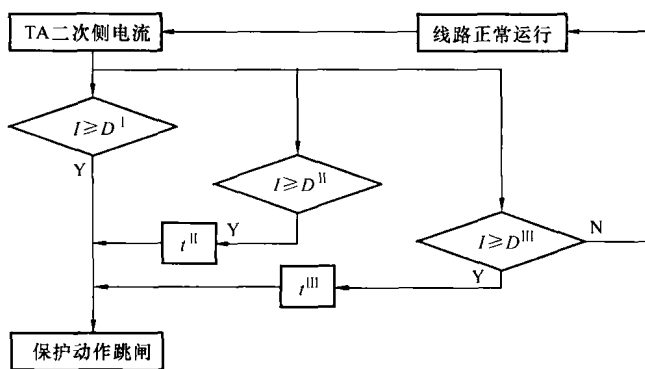


图 1-6 阶段式电流保护的工作流程

下面以电磁型阶段式电流保护为例，讨论各元件的作用及构成原理。

1. 电流互感器

(1) 电流互感器的极性和一、二次电气量的正方向。为简化继电保护的分析，继电保护用电流互感器的极性及一、二次电气量正方向的规定如图 1-7 所示。互感器一次侧电流从正极性端子流入时，二次侧电流从正极性端子流出；当一次电流从反极性端子流入时，二次电流也从反极性端子流出。一、二次侧电流同相位。

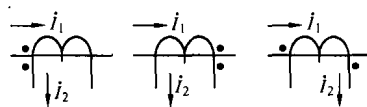


图 1-7 电流互感器的极性及一、二次电气量正方向

(2) 电流互感器的 10% 误差曲线。短路故障时通入电