

21 世纪电力系统及其自动化规划教材

电力系统继电保护

杨正理 黄其新 王士政 编著



21 世纪电力系统及其自动化规划教材

电力系统继电保护

杨正理 黄其新 王士政 编著



机械工业出版社

本书首先介绍了电力系统继电保护常规保护及微机保护的基本概念,构成常规保护的电气设备基本知识,这是后续学习所必需的基础;接着重点阐述了输电线路相间短路的电流电压保护、方向电流保护、接地保护、距离保护的基本构成原理,以及原理接线图整定原则,使读者对输电线路的各种保护有全面的了解;然后介绍了部分电力系统元件的继电保护,如电力变压器、发电机、母线、电动机和电容器的继电保护原理以及输电线路自动重合闸的工作原理,以便提高读者对继电保护的应用与设计技能。

本书的最大特色是内容从简单到复杂,层次分明。在重点阐述电力系统继电保护基本原理与运行特性分析的基本方法的同时,还对继电保护装置的构成原理以及继电保护技术的最新发展作了必要的介绍。书中内容尽可能地与继电保护相关规定接口,并结合适当的举例以加强其实践性。

本书可作为普通高等学校“电气工程及其自动化”专业本科教学的教材,也可供从事继电保护工作的科技人员参考。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作教材的老师发邮件到 jinaemp@163.com 索取,或登录 www.cmpbook.com 下载。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统继电保护/杨正理,黄其新,王士政编著.

—北京:机械工业出版社,2015.8

21世纪电力系统及其自动化规划教材

ISBN 978-7-111-50379-8

I. ①电… II. ①杨…②黄…③王… 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183752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:吉玲 责任编辑:吉玲 韩静 刘丽敏

封面设计:路恩中 责任校对:李锦莉 刘秀丽

责任印制:刘岚

北京京丰印刷厂印刷

2015年8月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·18.5印张·457千字

标准书号:ISBN 978-7-111-50379-8

定价:39.00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

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com



前言

近年来,随着国民经济的快速增长,我国电力工业得到了持续迅速的发展,发电机装机容量和发电量已跃居世界第二位。随着大机组、超高压电网的不断建设,大量的新设备、新技术、新工艺的广泛应用,对电力系统继电保护的性能和作用均提出了新的、更高的要求。因此培养更多掌握现代电力系统继电保护技术的专门人才和提高现有电力行业从业人员的素质,是电气工程及其自动化专业人才培养所面临的迫切任务。

在本书编写过程中,作者对同类教材在高等学校的应用效果进行了大量的调研工作,认为在确保教材质量的前提下,教材的内容应该按学生层次、院校的人才培养定位来编写,才能满足学科发展和人才培养的需求,同时深感一本好的教材对于指导学生学好该门课程是十分重要的。

本书首先阐述了电力系统继电保护的基本原理与运行特性分析的基本方法,使学生掌握继电保护的基础知识和构成原理,为学生后期理解各种继电保护构成方法及原理打下良好的基础;然后,从构成继电保护的基本元件开始,逐一对各种继电保护装置进行了介绍,通过原理图分析、继电保护整定计算等内容对各种继电保护进行分类分析,使学生分类了解各种继电保护的特点和构成方法,以便于理解;最后,介绍了继电保护领域的新技术、新发展,为学生进一步深入学习和研究打下一定基础。本书的特点是内容叙述系统性、逻辑性强,接近工程实际;分析深入浅出、重点突出、条理清楚,具有教师便于讲授,学生易于学习、理解和掌握的特点。本书对构成电力系统各部分元件的继电保护装置与构成原理都有涉及,学科反映全面,体现了实用性和先进性。

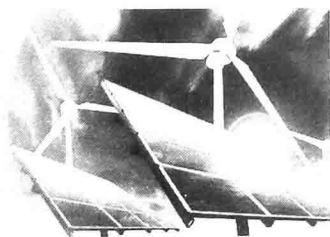
电气工程及其自动化专业是一个涉及范围很广的专业,全国有几百所高校开设了这个专业。本书主要作为电气工程及其自动化专业的本科教材,也适用于农业电气自动化、建筑电气自动化、电气自动化技术、热能与动力工程等相近专业。希望本书的出版能对相关专业的师生有所帮助。

本书的第八至第十一章由黄其新编写,其余各章由杨正理和王士政编写。

由于电力系统继电保护技术发展迅速,编著者水平和能力有限,教材不可能完全跟上技术发展的步伐,有些技术可能未涉及,或者某些内容可能会出现错误与不足,敬请读者见谅,并希望读者批评指正。

编著者

目 录



前言

第一章 绪论 1

第一节 电力系统继电保护的概念与作用 1

第二节 对继电保护装置的基本要求 2

第三节 继电保护的基本原理、构成及
分类 5

第四节 继电保护技术的发展概况 7

复习思考题 8

第二章 继电保护的基本知识 9

第一节 互感器 9

第二节 变换器 16

第三节 对称分量滤过器 19

第四节 常用继电器的构成和动作原理 24

复习思考题 39

第三章 输电线路相间短路的电流、 电压保护 40

第一节 无时限电流速断保护 40

第二节 带时限电流速断保护 45

第三节 定时限过电流保护 48

第四节 三段式电流保护装置 51

第五节 反时限过电流保护 58

第六节 电流、电压联锁速断保护 60

第七节 电流、电压保护的评价与应用 63

复习思考题 63

第四章 输电线路相间短路的方向 电流保护 66

第一节 方向电流保护的工作原理 66

第二节 功率方向继电器 69

第三节 功率方向继电器的接线方式 74

第四节 非故障相电流的影响和按相
起动 77

第五节 方向电流保护的整定计算 80

复习思考题 82

第五章 输电线路的接地保护 83

第一节 电网中性点的接地方式及保护
特点 83

第二节 大接地电流系统发生接地短路时
零序分量的特点 84

第三节 大接地电流系统的零序电流
保护 86

第四节 大接地电流系统的零序方向电流
保护 91

第五节 中性点不接地电网的单相接地
保护 95

第六节 中性点经消弧线圈接地电网的单相
接地保护 100

复习思考题 103

第六章 输电线路的距离保护 104

第一节 距离保护的基本原理 104

第二节 单相式阻抗继电器的动作特性及
构成原理 107

第三节 阻抗继电器的接线形式 116

第四节 影响距离保护正确动作的因素 120

第五节 距离保护的整定计算 132

第六节 距离保护的评价和应用 138

复习思考题 139

第七章 输电线路的纵联保护 141

第一节 纵联保护的基本原理和纵差
保护 141

第二节 高频保护概述 150

第三节 高频闭锁方向保护 152

第四节 高频闭锁距离保护 159

第五节 其他纵联保护简介 161

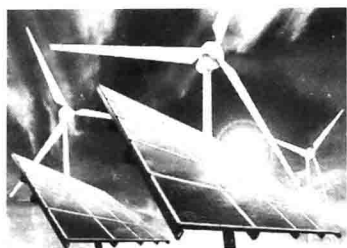
复习思考题 165

第八章 同步发电机的继电保护 166

第一节 同步发电机的故障、不正常运行
状态及保护方式 166

第二节 发电机的纵联差动保护 168

第三节	发电机定子绕组匝间短路保护	173	第三节	双母线同时运行时的母线差动 保护	244
第四节	发电机定子绕组单相接地保护	179	第四节	比率制动式母线差动保护	248
第五节	发电机励磁回路的接地保护	186	第五节	断路器失灵保护	250
第六节	发电机的失磁保护	190	复习思考题		251
第七节	发电机相间短路的后备保护及过 负荷保护	197	第十一章 电动机和电容器组的 保护		252
第八节	发电机的其他保护	203	第一节	电动机的故障、不正常运行 状态和保护方式	252
第九节	发电机-变压器组的保护	206	第二节	电动机的相间短路保护、单相接地 保护及过负荷保护	253
复习思考题		207	第三节	电动机的欠电压保护	257
第九章 电力变压器的保护		209	第四节	同步电动机的保护	260
第一节	电力变压器的故障、异常工作状态 及保护方式	209	第五节	电力电容器的保护	262
第二节	变压器的纵联差动保护	210	复习思考题		266
第三节	变压器的瓦斯保护	224	第十二章 输电线路的自动重合闸		267
第四节	变压器的电流速断保护	226	第一节	概述	267
第五节	变压器相间短路的后备保护和过 负荷保护	226	第二节	单侧电源线路的三相一次自动 重合闸	269
第六节	变压器的零序保护	232	第三节	自动重合闸与继电保护的配合	277
第七节	变压器的过励磁保护	235	第四节	综合自动重合闸	279
第八节	变压器的其他保护	236	复习思考题		283
复习思考题		236	附录		284
第十章 母线保护		238	参考文献		290
第一节	母线故障及相应的保护方式	238			
第二节	母线电流差动保护	239			



第一章

绪论

第一节 电力系统继电保护的概念与作用

一、电力系统故障及不正常运行状态

电力系统是由发电厂、变电所、输电线路和各种用电负荷等电力设施所构成的整体。这里的电力设施是一个常用术语，它泛指电力系统中的各种在电气上可独立看待的电气设备、线路、器具等。电力系统在运行中，可能受到外界的影响，如雷击、鸟害、大风和其他自然因素，以及内部原因，如设备绝缘损坏、老化和安装、设计、调试、误操作等因素引起的各种故障和不正常工作状态。最常见且最危险的故障是各种形式的短路。电力系统中发生短路故障可能引起下列严重的后果：

- (1) 故障点通过很大的短路电流。此电流引燃的电弧使电气设备损坏或烧毁。
- (2) 短路电流通过非故障元件时，产生热和电动力效应，可能使电气元件损坏或使用寿命大大缩短。
- (3) 造成电力系统内部网络供电电压大大降低，使正常生产遭到破坏，影响用户用电。
- (4) 破坏电力系统的稳定运行，引起系统振荡，甚至使整个系统瓦解，造成大面积停电。

电力系统的正常工作状态被破坏，但还没有发生短路故障时，这种情况属于不正常工作状态。例如，电气设备的过负荷，过负荷是指设备的负荷超过其额定值而引起电流升高的现象。这是最常见的一种不正常工作状态。过负荷会引起元件载流部分和绝缘材料的温度不断升高而加速设备绝缘的老化和损坏，可能发展成为故障。不正常工作状态还可能使电能质量下降，影响一些重要部门的正常用电。另外，电力系统振荡、有功功率不足引起的频率下降都属于不正常运行状态。

电力系统故障以及不正常运行状态引发故障都会造成电力系统事故。事故是指电力设备发生损坏或者引起的人身伤亡及财产损失。系统事故的发生，一般都是由于电气设备制造上的缺陷、设计和安装的错误、检修质量不高以及运行维护不当造成的。因此，需要提高设计、制造水平，加强设备维修，提高运行质量，严格执行各项规章制度。这样就可以大大减少事故，防患于未然。

除应采取积极措施尽可能消除系统发生故障的可能性外，还应该注意其他方面，如故障一旦发生，则应尽快地将故障设备切除，保证无故障设备的正常运行，力求缩小事故范围。因为电力系统各设备之间都是相互联系的，某一设备发生故障，瞬间内就会影响整个系统的其他部分，所以切除故障设备的时间必须是很短的，有时甚至要求短到百分之几秒，即几个

周波。显然,在这样短暂的时间内,由值班人员手动切除故障设备是不可能的,这就要靠安装在各个电气设备上具有保护作用的自动装置,即继电保护装置来完成这个任务。

二、电力系统继电保护的基本任务

继电保护装置,是指装设于整个电力系统的各个元件上,能在指定区域内快速准确地对电气元件发生的各种故障或不正常运行状态做出响应,并在规定的时限内动作,使断路器跳闸或发出信号的一种反事故自动装置。由于最初的继电保护装置是由机电式继电器为主构成的,故称为继电保护装置。现代继电保护装置已发展成为由电子元器件或微型计算机为主构成的,但仍沿用此名称。目前,继电保护一词泛指继电保护技术或由各种继电保护装置组成的继电保护系统。

继电保护装置的基本任务是:

(1) 自动、迅速、有选择性地故障元件从电力系统中切除,并最大限度地保证其他无故障部分的正常运行不受影响。

(2) 能对电气元件的不正常运行状态做出反应,并根据运行维护规范发出告警信号,或自动减负荷,或延时跳闸,使系统运行人员根据告警的种类采取相应的措施进行处理,避免引起更大的系统故障。

(3) 可以和电力系统中其他自动装置如自动重合闸装置相配合,在条件允许时,可采取预定措施,尽快地恢复供电和设备运行,从而提高电力系统运行的可靠性。

综上所述,继电保护是一种电力系统安全保障技术,而继电保护装置是一种电力系统的反事故自动装置。在电力系统正常运行时,继电保护装置不动作,而只是实时地严密监视电力系统及其元件的运行状态。一旦发生故障或不正常运行状态,继电保护装置将迅速动作,实现故障隔离并发出告警,保障电力系统安全。因此,继电保护装置又被形象化地称为电力系统的“保护神”。它对保障系统安全运行、保证电能质量、防止故障扩大和事故发生,都有极其重要的作用。

第二节 对继电保护装置的基本要求

继电保护装置为了实现它的基本任务,必须在技术上满足选择性、速动性、灵敏性和可靠性四个基本要求。对作用于断路器跳闸的继电保护装置,应同时满足这四个基本要求;对作用于信号即只反映不正常运行情况的继电保护装置,这四个基本要求中有些要求如速动性可以降低。现将四个基本要求分述如下。

一、选择性

继电保护装置的选择性是指继电保护装置动作时,仅将发生故障的电气元件从电力系统中切除,使系统中非故障部分继续运行,尽量缩小停电范围。如果近故障点的继电保护装置或断路器因故障拒绝动作而不能断开故障元件时,则由相邻的继电保护动作将故障切除。

图 1-1 所示的单侧电源网络中,母线 A、B、C、D 代表相应变电所,断路器 $QF_1 \sim QF_8$ 都装有继电保护装置 $P_1 \sim P_8$ 。

当线路 WL_3 上的 K_3 点发生短路故障时,应由保护装置 P_4 动作,使断路器 QF_4 跳闸,

其他断路器不动作，只将故障线路 WL_3 切除，这时电网中的其他线路仍正常供电。当保护装置 P_4 失灵或者断路器 QF_4 拒动时，则由其相邻的保护装置 P_3 将断路器 QF_3 断开，此时虽然多切除了部分线路，但保证了电网中大多数线路的正常运行。保护装置 P_3 起着后备保护的作用，这种情况下保护装置 P_3 的动作也是有选择性的动作。后备保护的必要性在于：如果故障元件的保护系统或断路器拒动，就在后备保护的作用下，迅速切除故障。虽然扩大了一些停电范围，但如果没有后备保护，则此故障设备无法自动切除，必将造成更严重的后果。这种有选择性地切除故障元件，使电网中出现故障时，停电的范围大大减小，称为继电保护装置的选择性。

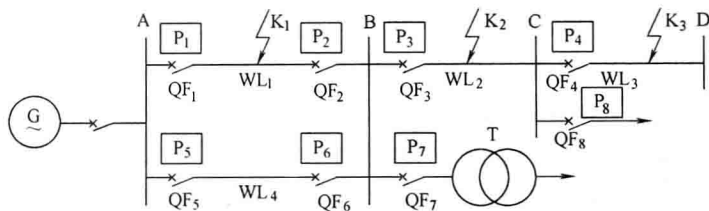


图 1-1 用于说明继电保护选择性的单侧电源网络

又如 WL_1 上的 K_1 点发生故障时，应由保护装置 P_1 和 P_2 同时动作，使断路器 QF_1 和 QF_2 跳闸，切除故障线路，而变电所 B 仍可由线路 WL_4 继续供电。总之，要求继电保护装置有选择性地动作，是提高电力系统供电可靠性的基本条件；保护装置无选择性地动作，又没有采取措施（如自动重合闸）予以纠正，是不允许的。

二、速动性

电力系统元件发生短路故障时，快速切除故障能减轻故障元件的损坏程度，减小对用户工作的影响，提高电力系统的稳定性。例如，系统发生短路时，电压大为降低，短路点附近用户的电动机转矩因供电电压降低而降低，若迟缓切除短路元件，电动机将因无法拖动生产机械而停止转动，用户的正常生产将受影响；若快速切除短路元件，系统电压将很快得以恢复，电动机很容易自动起动并迅速恢复正常运行，从而大大减小对用户正常生产的影响。另外，短路时，故障元件本身将通过很大的短路电流，由于电动力和热效应的作用，元件也将遭到严重损坏。短路电流流过元件的时间越长，损坏也越严重，所以快速切除短路故障，便能减轻电气元件的损坏程度，防止短路故障的进一步扩大。再则，快速切除短路元件，使短路点易于去游离，可以提高自动重合闸的成功率。因此，应根据具体情况，对继电保护装置的快速性提出合理要求。

故障切除时间，是指从发生故障起到断路器跳闸灭弧为止的这段时间。它等于继电保护装置动作时间与断路器跳闸时间（包括灭弧时间）之和。所以快速切除故障除保护装置动作要快外，还要求采用能快速动作的断路器。现代高压电网中，保护装置的最小动作时间约为 $0.02 \sim 0.03s$ ；断路器的最小动作时间约为 $0.05 \sim 0.06s$ 。应该指出，要求这样短的时间切除故障，将使保护装置复杂化。因此，在确定保护装置切除故障的时间时，必须从系统的结构、被保护元件的重要性和工作条件等具体情况出发，进行技术经济比较后予以确定。一般对不同结构和不同电压等级的电网，切除故障的最小时间应有不同的要求。其中，保护装

置的动作时间，对于 400 ~ 500kV 级电网约为 0.02 ~ 0.04s；对于 220 ~ 330kV 的电网约为 0.04 ~ 0.1s；对于 110kV 的电网约为 0.1 ~ 0.7s；而配电网络故障切除的最小时间还可更长一些，其主要取决于不允许长时间电压降低的用户，一般约为 0.5 ~ 1.0s。所有上述情况，对远处的故障允许以较长的时间切除。

由于速动性与选择性在一般情况下是难以同时满足的，为兼顾两者，一般只能允许继电保护装置带有一定的延时而切除故障。但有些故障不仅要满足选择性的要求，同时又要求快速切除故障。例如：

- (1) 为保证系统稳定性，必须快速切除高压输电线路上的故障。
- (2) 发电厂或重要用户的母线电压低于允许值（一般为 0.7 倍额定电压）的故障。
- (3) 大容量电机、变压器内部发生的故障。
- (4) 1 ~ 10kV 线路导线截面积过小，不允许延时切除的故障。

对于反映不正常运行情况的继电保护装置，一般不要求快速动作，而应按照选择性的要求，带延时地发出信号。

三、灵敏性

所谓继电保护装置的灵敏性，是指电气设备或线路在被保护范围内发生短路故障或不正常运行情况时，保护装置的反映能力。能满足灵敏性要求的继电保护装置，在规定的保护范围内出现故障时，不论短路点的位置和短路的性质如何，继电保护装置都能正确反映。

继电保护装置的灵敏性用灵敏系数来衡量。灵敏系数表示为

- (1) 对于反映故障参数增加（如过电流）的保护装置：
- $$K_{sen} = \frac{\text{保护范围末端发生金属性短路时故障参数的最小计算值}}{\text{保护装置动作参数的整定值}}$$

- (2) 对于反映故障参数降低（如欠电压）的保护装置：
- $$K_{sen} = \frac{\text{保护装置动作参数的整定值}}{\text{保护范围末端发生金属性短路时故障参数的最大计算值}}$$

故障参数如电流、电压和阻抗等的计算，应根据实际可能的最不利的运行方式和故障类型来进行。对不同作用的保护装置及不同的被保护设备和线路，所要求的灵敏系数不同，它们的数值在《继电保护和安全自动装置技术规程》中都有规定。一般对主保护装置要求灵敏系数不小于 1.5 ~ 2；对后备保护装置则要求不小于 1.2 ~ 1.5。

四、可靠性

继电保护装置的可靠性是指在其规定的保护范围内发生它应该动作的故障时，它不应该拒绝动作；而在任何该保护不应该动作的情况下，则不应该误动作，即“不拒动也不误动”。

继电保护装置的误动和拒动都会给电力系统造成严重的危害。但采取克服其误动和拒动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。例如，当系统中有充足的旋转备用容量、输电线路很多、各系统之间以及电源与负荷之间联系很紧密时，若继电保护装置发生误动使某发电机、变压器或输电线路切除，给电力系统造成的影响

可能不大；但若发电机、变压器或输电线路发生故障时继电保护装置发生拒动，会引起设备的损坏或系统稳定性的破坏，造成巨大的损失，则在此情况下，提高继电保护装置不拒动的可靠性比提高不误动的可靠性更为重要。反之，当系统中旋转备用容量很少，以及各系统之间和电源与负荷之间的联系比较薄弱时，继电保护装置发生误动使某发电机、变压器或输电线路切除，会引起对负荷供电的中断或系统稳定性的破坏，造成巨大的损失；而当某一保护装置拒动时，其后备保护仍可以切除故障，则在这种情况下，提高保护装置不误动的可靠性比提高其不拒动的可靠性更为重要。由此可见，提高保护装置的可靠性应根据电力系统和负荷的具体情况采取适当的措施。

继电保护装置不能可靠工作的主要原因是安装调试质量不高、运行维护不当、继电器质量差以及设计不合理等。为了提高保护装置工作的可靠性，必须注意以下几个方面：

- (1) 保护装置应该采用质量高、动作可靠的继电器和元器件。
- (2) 保护装置的接线应尽可能地简化，尽量减少继电器及串联触点数。
- (3) 提高保护装置的安装和调试质量，并加强经常性的维护管理。

另外，就一个确定的保护装置在一个确定的系统中运行而言，在继电保护装置的整定计算中往往用可靠系数来校核是否满足可靠性要求，可靠系数通常记为 K_{rel} 。在国家或行业制定的继电保护装置运行整定规程中，对各类保护可靠系数 K_{rel} 的要求都作了具体规定。

以上四个基本要求是分析研究继电保护装置性能的基础，也是贯穿全课程的一个基本线索。在它们之间，既有矛盾的一面，又有在一定条件下统一的一面。选择性是关键，可靠性是基础，在满足灵敏性的条件下应保证继电保护装置的速动性。继电保护装置的科学研究、设计、制造和运行的绝大部分工作也是围绕着如何处理好这四个基本要求之间的辩证统一关系而进行的，在学习这门课程时，应注意学习和运用这样的思考及分析方法。

第三节 继电保护的基本原理、构成及分类

一、继电保护的基本原理

继电保护为了完成其所担负的任务，要求它能正确区分电力系统的正常运动状态、故障状态或不正常运行状态。因此，需根据电力系统发生故障或不正常运行状态前后的电气或物理量变化的特征为基础来构成继电保护装置。

电力系统发生短路故障时，工频电气量变化的主要特征如下：

(1) 电流增大。短路时，流过故障点与电源之间的电气元件中的电流将增大，大大超过正常运行时的负荷电流。

(2) 电压降低。当发生相间短路或接地短路故障时，系统各点的相间电压或相电压值将降低，且越靠近短路点的电压越低，短路点的电压为零。

(3) 测量阻抗发生变化。测量阻抗为保护安装处电压与电流相量的比值，即 $Z = \dot{U}/\dot{I}$ 。以输电线路发生短路故障为例，正常运行时，测量阻抗为负荷阻抗；短路故障时，测量阻抗为线路阻抗，故障后比故障前的测量阻抗的模值显著减小，而阻抗角增大。

(4) 电气元件流入和流出电流的关系发生变化。对于任一正常的电气元件，根据基尔霍夫定律，其流入电流应等于流出电流，但当元件内部发生故障时，其流入电流不再等于流

出电流。

(5) 电流与电压之间的相位角发生改变。正常运行时，电流与电压之间的相位角是负荷的功率因数角，一般约为 20° ；系统发生三相短路时，电流与电压之间的相位角是由线路的阻抗角决定的，一般为 $60^\circ \sim 85^\circ$ 。

(6) 不对称短路时，出现相序分量电流和电压。正常运行时，系统中只存在正序分量，但发生不对称短路故障时，则会出现负序分量和零序分量。

利用发生短路故障时电气量的变化，便可构成各种原理的继电保护。例如，根据短路故障时电流的增大，可构成过电流保护或电流速断保护；根据短路故障时电压的降低，可构成欠电压保护或电压速断保护；根据短路故障时电流与电压之间相角的变化，可构成功率方向保护；根据短路故障时测量阻抗的变化，可构成距离保护；根据短路故障时被保护元件两端电流相位和大小的变化，可构成差动保护；高频保护则是利用高频通道来传递线路两端电流相位、大小和短路功率方向信号的一种保护；根据不对称短路故障时出现的电流、电压的相序分量，可构成零序电流保护和负序电流保护及零序和负序功率方向保护等。

此外，除了上述反映工频电气量变化的保护外，还有反映非工频电气量变化的保护（如超高压输电线路的行波保护）和反映非电气量变化的电力变压器的瓦斯保护等。

对于反映电气设备的不正常运行情况的继电保护主要是根据不正常运行情况时电流或电压变化的特征来构成的。

二、继电保护装置的构成

无论是模拟型还是微机型继电保护装置，都由三部分构成：测量回路、逻辑回路和执行回路。其构成原理框图如图 1-2 所示。

1. 测量回路

测量回路的作用是测量与被保护元件有关的电气量或物理量的变化，如电流、电压的变化，以确定



图 1-2 继电保护装置的构成原理框图

电力系统是否发生了短路故障或出现不正常运行状态。测量得到的电气量值或物理量值与整定值进行比较，以确定继电保护装置是否应该启动。

2. 逻辑回路

逻辑回路的作用是根据测量回路输出量的大小、性质、输出的逻辑状态、出现的顺序或它们的组合，使保护装置按一定的逻辑及时序关系工作，最后确定继电保护装置是否应该使断路器跳闸或发出信号，并将有关命令传送到执行回路。

3. 执行回路

执行回路是接收逻辑回路来的判断结果，然后驱动跳闸回路或信号回路，动作于断路器的跳闸或发出不正常运行信号。

现以过电流保护为例，说明继电保护的构成及工作原理。如图 1-3 所示，电流继电器 KA 的线圈接于电流互感器 TA 的二次侧，构成了保护装置的测量回路。电

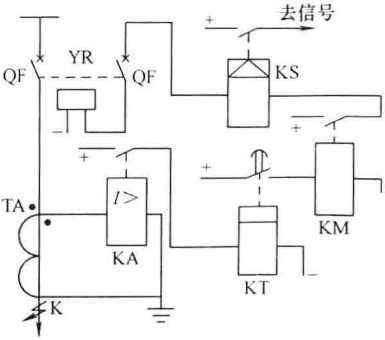


图 1-3 过电流保护原理接线图

力系统正常运行时, 流过 KA 的电流小于其整定值而不动作, 所以保护装置也不启动, 处于待命状态。当系统发生短路故障时, 如 K 点短路时, 此时流过 KA 的电流大于其整定值而动作, 启动保护装置。图中时间继电器 KT 构成保护的逻辑回路, KA 动作后给 KT 的线圈加电, KT 的延时闭合触点经过预先整定的时间后闭合。图中的中间继电器 KM 构成保护的执行回路。KT 的触点由于容量较小不能直接用于跳闸, 而是经过 KM 的触点进行跳闸工作, 是继电保护的执行回路, 串联于跳闸回路的信号继电器 KS, 在保护跳闸时, 同时发出保护跳闸信号。

三、继电保护装置的分类

继电保护装置的分类方法有很多, 以下是几种常用的分类方法:

- (1) 按保护对象不同分类: 有发电机保护、变压器保护、电动机保护、电容器保护等。
- (2) 按动作结果不同分类: 有动作于断路器跳闸的短路故障保护和动作于发信号的不正常运行保护两大类。其中, 短路故障保护的种类又有以下几种:
 - 1) 按反映故障类型的不同, 有相间短路保护、接地短路保护及匝间短路保护等。
 - 2) 按其功能的不同, 有主保护、后备保护及辅助保护。后备保护又有远后备保护与近后备保护之分。主保护是指当被保护设备发生故障时, 用于快速切除故障的保护。后备保护是指当主保护或断路器拒动时, 用于切除故障的其他保护。其中, 在主保护拒动时, 由同一设备上的其他保护来实现切除故障的, 称为近后备保护; 而当主保护或断路器拒动时, 由相邻设备上的保护来实现切除故障的, 则称为远后备保护。辅助保护是指为克服主保护某些性能的不足而增设的简单保护。有关规程规定, 作用于断路器跳闸的短路保护, 应配置有主保护和后备保护, 必要时再增设辅助保护。
- (3) 按保护基本工作原理不同分类: 有反映稳态量的常规保护和反映暂态量的新原理保护两大类。其中, 根据所反映的参数不同, 常规保护有过电流保护、欠电压保护、方向电流保护、负序保护、阻抗保护、差动保护、高频保护及瓦斯保护等; 新原理保护有高频变化量保护和行波保护等。
- (4) 按保护动作原理不同分类: 有机电型保护、整流型保护、晶体管型保护、集成电路型保护及微机型保护等。实际上, 继电保护的動作原理也表明了继电保护技术发展的进程, 目前通常把微机保护之前的保护称为传统保护或模拟保护, 与此相对应, 微机保护还可称为数字保护。
- (5) 按保护反映参数增大或减小进行分类: 有过量保护和欠量保护两大类。

第四节 继电保护技术的发展概况

电力系统的继电保护技术是随着电力系统的发展和不断适应电力系统发展的要求而发展的。最早的继电保护是熔断器, 当电气设备或供电线路发生短路时, 由于短路电流较大, 熔断器的熔体被熔断, 因而可将故障切除。随着发电设备容量和供电范围的扩大, 在许多情况下, 单纯用熔断器不能满足选择性和灵敏性的要求, 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(直接反映于一次短路电流)的电磁型过电流继电器。20 世纪初, 随着电力系统的发展

展,继电器才开始广泛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。

20 世纪初,随着供电容量的增加和供电范围的扩大、电压的提高,柱上油断路器直接动作式的过电流保护的灵敏性和选择性都不能满足要求。1901 年出现了利用感应型电流继电器构成的过电流保护。1908 年出现了电流差动保护。

随着电力系统的进一步发展和对用户供电可靠性的提高,出现了各发电厂之间并列运行和双回路供电线路,也出现了环形电网。这时电流保护不能满足要求,于是在 1911 年出现了方向电流保护,1920 年又出现了距离保护。随着电力系统的进一步扩大、输电电压的继续提高、长距离输电线路的出现及电力系统并列运行的稳定性,对继电保护动作的快速性提出了更高的要求,要求在输电线路任何一点发生短路故障时,继电保护都能瞬时动作,而距离保护不能满足这一要求,在 1927 ~ 1928 年间开始采用了高频保护。为了提高保护的灵敏度,先后采用了反映相序分量的继电保护,如零序电流保护、零序和负序分量的高频保护等。

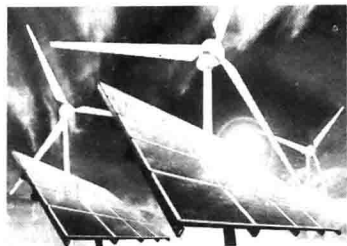
采用感应型和电磁型继电保护,基本上满足了 100MW 以下中小型发电机组、母线和 220kV 以下电网对继电保护的要求。由于这些保护有体积大、消耗功率多和动作速度慢的缺点,所以,普遍重视新型继电器和保护装置的研究。在 20 世纪 60 年代初期我国便开始研制晶体管型、整流型继电器和保护装置,取得显著的成果,并逐步以此取代了感应型、电磁型的继电器和保护装置。

自 20 世纪 50 年代以来相继出现了 200MW、600MW 及更大功率发电机组和 330kV、500kV 及以上电压的超高压远距离输电线路。因此,大功率发电机组和超高压输电线路的继电保护成为继电保护技术发展的重要课题。国内外的继电保护设计研究工作者为此做出了努力和贡献。20 世纪 70 年代初期,我国研究的 330kV 晶体管型高压输电线路成套继电保护装置投入运行,200MW 和 300MW 大容量发电机组晶体管型和整流型成套继电保护装置也在国产机组中应用,随后 500kV 超高压输电线路和 600MW 大容量发电机组成套保护装置的研制也取得了成果。与此同时,国外也发展了用于超高压输电线路的微波保护和反映非工频电气量新原理的行波保护,以满足现代超高压巨型电力系统对继电保护提出的要求。

20 世纪 70 年代以来,随着电子计算机技术的发展,特别是微型计算机和微处理器的应用,计算机继电保护的研究已取得了显著的成果。目前,国内外已研制出各种类型的计算机继电保护装置,并已取得了很多的运行经验。可以预料,计算机继电保护在电力系统中的应用将成为继电保护发展的主要方向。

复习思考题

- 1-1 试简述电力系统最常见的故障类型及不正常的工作状态,分析产生的原因及后果。
- 1-2 继电保护的任务是什么?
- 1-3 简述电力系统发生短路故障时的基本特征。
- 1-4 试述继电保护装置的基本构成及各构成元件的作用。
- 1-5 电力系统对继电保护的基本要求是什么?简单解释各项基本要求的内涵。
- 1-6 什么是继电保护的主保护,远、近后备保护和辅助保护?



第二章

继电保护的基本知识

第一节 互 感 器

一、电流互感器

电流互感器（TA）是变压器的一种特殊形式，其工作原理与变压器相同。电流互感器的一次绕组与高压电网一次回路串联，流过的电流大，因而线径粗，匝数少，实际应用电流互感器的一次绕组只有一匝；二次侧接继电保护装置或测量仪器，二次绕组流过的电流小，因而线径细，匝数多。电流互感器的作用就是将高压设备中的大电流变换成 5A 或 1A 的小电流，以供继电保护装置或测量仪表使用。

按变压器原理来说，电流互感器相当于一个升压降流变压器，其二次侧会出现很高的电压，会危及二次绕组绝缘及人身安全，因此电流互感器在运行中，二次绕组不允许开路。

电流互感器的二次绕组在运行时必须接地，这是为了防止当一、二次绕组击穿后，在二次绕组会出现同一次绕组一样的高电压，危及人身安全。

（一）电流互感器的极性

当电流互感器应用到方向继电保护中时，必须明确电流互感器的极性，从而确定流入继电保护装置的电流方向，只有极性连接正确时，保护才能正确动作；否则，由于极性不正确，会造成继电保护误动作。

电流互感器的极性取决于其一、二次绕组的绕向，一旦一、二次绕组同极性端子选定后，其一、二次电流方向便可以确定，即当给定了一次电流的方向时，就能根据极性确定二次绕组的电流方向。在工程实际中，电流互感器的极性都按减极性原则进行标注，同极性的端子以“·”表示。如图 2-1 所示，当电流从电流互感器的一、二次绕组同极性端子流入时，它们在铁心中所产生的磁通方向是一致的。简单地说，就是当一次电流 i_1 从同极性端子“·”流入时，电流互感器的二次电流 i_2 从二次绕组的同极性端子“·”流出。这样的标注方法比较直观，就好像一次电流 i_1 直接流入到电流继电器一样，同时，也便于对电流互感器的二次电路进行分析。

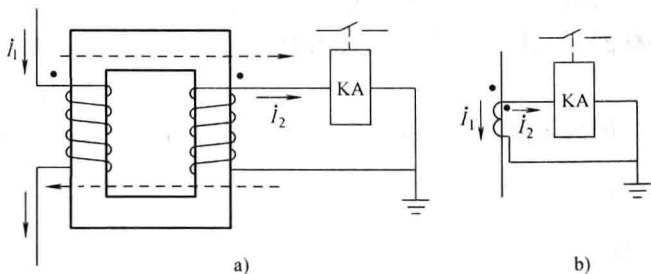


图 2-1 电流互感器的极性标注方法

a) 原理图 b) 示意图

电流互感器的极性一般由生产厂商在出厂时就标注好了，但在实际工程中，无论安装或

检修后，投运前都要检验电流互感器的极性，以校核电流互感器的极性标注是否正确。

(二) 电流互感器的误差

互感器利用电磁感应原理，将一次侧的高电压、大电流按比例变换成二次侧的低电压、小电流，以供二次侧的继电保护或测量设备使用，与变压器一样，需要有个电流在铁心中建立交链一、二次绕组的主磁通 $\dot{\Phi}$ ，这个电流称为励磁电流。励磁电流只流过互感器的一次侧，虽然其数值一般很小，但由于它的存在，使得互感器一次电压 $\dot{U}_1$ 或一次电流 $\dot{I}_1$ 归算成二次电压 $\dot{U}_2$ 或二次电流 $\dot{I}_2$ 时，不等于实际二次电压 $\dot{U}_2$ 或实际二次电流 $\dot{I}_2$ ，因而出现了误差。显然，当互感器的误差过大时，其二次电压或二次电流无法真实反映一次系统的真实情况，从而导致二次设备产生错误或误差。因此，必须把互感器的误差限制在允许的范围之内。

下面以电流互感器为例来分析其误差特点。如图 2-2 所示，分别为电流互感器的原理接线图、等效电路及相量关系。其中， Z'_1 和 Z'_e 分别为归算到二次侧的一次绕组漏阻抗和励磁阻抗， Z_2 和 Z_L 分别为二次绕组漏阻抗和负荷阻抗； $\dot{I}'_1$ 和 $\dot{I}'_e$ 分别为归算到二次侧的一次电流和励磁电流， $\dot{I}_2$ 和 $\dot{U}_2$ 分别为电流互感器真实的二次电流和二次电压。

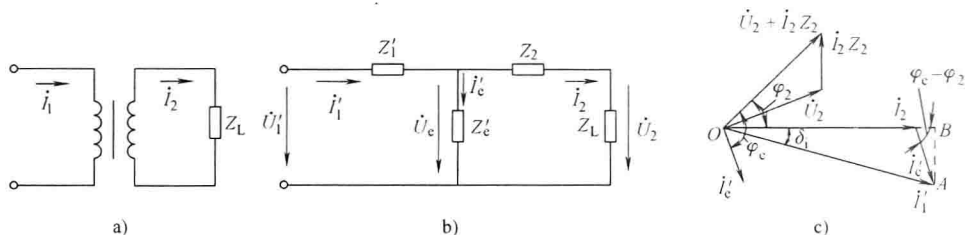


图 2-2 电流互感器的原理接线图、等效电路和相量关系

a) 原理接线图 b) 等效电路 c) 相量关系

电流互感器的电流比误差（简称比差，用 ε_i 表示）为归算到二次侧的一次电流 $\dot{I}'_1$ 与二次电流 $\dot{I}_2$ 有效值的数量差与 $\dot{I}'_1$ 有效值之比，即

$$\varepsilon_i = \frac{I_2 - I'_1}{I'_1} \times 100\% = \frac{I'_1 - I_2}{I'_1} \times 100\% \quad (2-1)$$

由相量图明显可见，电流互感器归算到二次侧的一次电流 $\dot{I}'_1$ 与二次电流 $\dot{I}_2$ 的相位是不一样的。它们之间的差值称为电流互感器的角度误差（简称角差，用 δ_i 表示），即

$$\delta_i = \arg(\dot{I}_2 / \dot{I}'_1) \quad (2-2)$$

因为 δ_i 值很小，所以电流互感器的比差和角差可分别近似写成

$$\varepsilon_i \approx - \frac{I'_e \cos(\varphi_e - \varphi_2)}{I'_1} \times 100\% \quad (2-3)$$

$$\delta_i \approx \arcsin \frac{I'_e \sin(\varphi_e - \varphi_2)}{I'_1} \quad (2-4)$$

由式 (2-3) 和式 (2-4) 可知，电流比误差和角度误差产生的主要原因是存在着励磁电流，励磁电流的大小与励磁阻抗 Z'_e 、二次负荷 ($Z_2 + Z_L$) 的大小和性质等因素有关。

根据二次设备对电流互感器最大允许误差要求的不同，电流互感器有不同的准确度级。准确度级是指在规定的二次负荷范围内，一次电流为其额定值的最大误差。电流互感器的准

准确度级与最大允许误差的对应关系见表 2-1。

表 2-1 不同准确度级的电流互感器的最大误差

准确度级	额定电流时,规定的最大误差	
	电流比误差(%)	角度误差/(′)
0.2	±0.2	10
0.3	±0.3	30
1	±1	60
3	±3	不规范
5	±5	不规范

(三) 电流互感器的 10% 误差曲线

为了保证继电保护装置可靠无误地工作,用于保护的电流互感器的电流比误差不允许超过 10%, 角度误差不允许超过 7%。选择电流互感器时根据其 10% 误差曲线进行计算。

由电流互感器的原理可知,电力系统正常运行时,流过电流互感器的一次电流较小,铁心不饱和,其励磁电流*i_e*很小,一次电流和二次电流呈线性关系变化,在一定的二次负荷下,其关系曲线如图 2-3 所示。图中曲线 1 为理想的电流互感器电流曲线,电流比 *n_{TA}* 是一个常数,有 *n_{TA}* = *I₁* / *I₂*。当电力系统发生短路故障时,流过电流互感器的一次电流很大,铁心迅速饱和,励磁电流增大,相应的电流互感器的误差也增大,其一、二次电流不再保持线性关系,如图 2-3 曲线 2 所示。当一次电流增大到 *I_{1b}* 时,电流互感器工作在关系曲线 2 的弯曲点上,若此时二次电流偏离理想电流为 10%, 则对应的一次电流 *I_{1b}* 称为电流互感器的饱和电流。*I_{1b}* 与电流互感器的一次额定电流 *I_{1N}* 之比称为饱和电流倍数,用 *m₁₀* 表示,即 *m₁₀* = *I_{1b}* / *I_{1N}*。

当电流互感器的二次负荷增大而电流保持不变时,一次电流增大,相应的励磁电流增大,误差也会增大,这就是说,电流互感器的误差与二次负荷的大小有关。通常所说的电流互感器的误差曲线是指在一定的误差时,电流互感器的饱和电流倍数 *m₁₀*, 即 10% 误差时的一次电流倍数与二次负荷阻抗 *Z_L* 的关系曲线。制造厂商对于各种型号的电流互感器,都提供了相应的 10% 误差曲线,其形状如图 2-4 所示。曲线的纵坐标为 10% 误差时的一次电流倍数 *m₁₀*, 横坐标为二次负荷阻抗 *Z_L*。继电保护装置用电流互感器必须根据 10% 误差曲线来选择、校验。

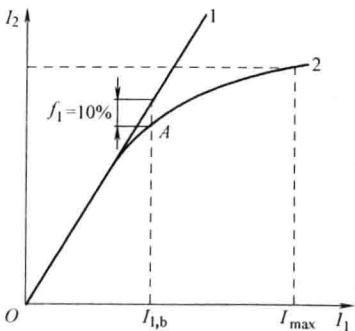


图 2-3 电流互感器一、二次电流关系

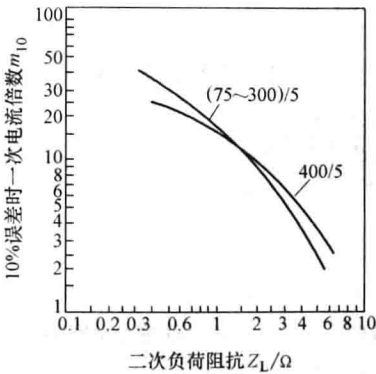


图 2-4 电流互感器 10% 误差时的一次电流倍数曲线