



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

DIANLIWANG JIDIANBAOHU YUANLI

电力网继电保护原理

孙国凯 田有文 主 编

葛廷友 滕颖辉 副主编



中国电力出版社

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



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

TM77/40

2008

DIANLIWANG JIDIANBAOHU YUANLI

电力网继电保护原理

主 编	孙国凯	田有文
副主编	葛廷友	滕颖辉
编 写	张执超	刘振宇
主 审	苑 舜	王增平



中国电力出版社

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

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

全书共分八章，主要内容包括电力网继电保护的基本概念，电网的电流保护、距离保护、差动保护、高频保护，自动重合闸，电力变压器的继电保护和微机保护。每章末附有复习思考题与习题。本书注重电力系统故障的理论分析，着重阐述了继电保护的基本原理，力求重点突出，理论结合实际；同时反映了近年来继电保护的一些新技术成就。

本书可作为电气工程及其自动化专业和农业电气化与自动化专业的本科教材，也可作为高职高专相关专业的教材和工程技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力网继电保护原理/孙国凯，田有文主编. —北京：中国电力出版社，2008

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 6812 - 2

I. 电… II. ①孙…②田… III. 电力系统—继电保护—高等学校—教材 IV. TM77

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 029342 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>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 4 月第一版 2008 年 4 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 10.5 印张 254 千字

定价 16.80 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

本书是根据教育部下达的普通高等教育“十一五”国家级规划教材选题，经申报、教育部组织专家评审、教育部批准编写的，适用于普通高等学校“电气工程及其自动化”、“农业电气化与自动化”专业的本科教材，也可作为高职高专相关专业的教材和电力、电气工程技术人员的参考用书。该书的内容符合教育部关于《高等学校农业工程类本科专业发展战略研究与专业规范》的要求，并按照全国高等农业院校电学科教材审定的教学大纲进行编写。

在教材编写过程中，编者总结和吸收了个别院校教育教学改革的有益经验，注重加强电力系统故障的理论分析，着重阐述了继电保护的基本原理，力求重点突出，理论结合实际；同时反映了近年来继电保护的一些新技术成就。本书例题、习题丰富，图形、文字符号均采用最新的国家标准。本教材参考学时为 50 学时。

本书的第二、七章由孙国凯编写，第三、八章由田有文编写，第五章由葛廷友编写，第六章由滕颖辉编写，第四章由张执超编写，第一章由刘振宇编写。全书由孙国凯统稿，由教授级高工苑舜、教授王增平担任主审，他们在审阅过程中提出了许多宝贵的意见，在此深表感谢。

由于编者水平和经验有限，书中难免存在疏漏和不足之处，恳请读者批评指正。

编者

2008 年 1 月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 继电保护的任务和作用	1
第二节 继电保护的基本原理和保护装置的组成	2
第三节 对继电保护的基本要求	3
第四节 继电保护的发展简史	5
复习思考题与习题	7
第二章 电网的电流保护	8
第一节 继电保护装置的基本元件和电路	8
第二节 单侧电源电网相间短路的电流保护	16
第三节 多侧电源电网相间短路的方向性电流保护	31
第四节 中性点直接接地电网中接地短路的零序电流及方向保护	36
第五节 中性点非直接接地电网中单相接地故障的零序电压、电流及方向保护	42
复习思考题与习题	46
第三章 电网的距离保护	48
第一节 距离保护的基本原理	48
第二节 阻抗继电器	50
第三节 阻抗继电器的接线方式	64
第四节 影响距离保护正确工作的因素及采取的防止措施	67
第五节 距离保护的整定计算	75
复习思考题与习题	80
第四章 电网的差动保护	83
第一节 电网的纵联差动保护	83
第二节 平行线路横联差动方向保护	85
复习思考题与习题	88
第五章 电网高频保护	89
第一节 高频保护的基本概念	89
第二节 高频闭锁方向保护	91
第三节 高频闭锁距离保护	93
第四节 相差高频保护	94
复习思考题与习题	98
第六章 自动重合闸	99
第一节 自动重合闸的作用及要求	99
第二节 单侧电源线路的三相一次自动重合闸	100

第三节	双侧电源线路的三相一次重合闸	104
第四节	自动重合闸与继电保护的配合	106
第五节	重合器与分段器	107
	复习思考题与习题	110
第七章	电力变压器的继电保护	111
第一节	电力变压器保护概述	111
第二节	变压器的瓦斯保护	111
第三节	变压器的电流速断保护	113
第四节	变压器纵联差动保护	114
第五节	变压器相间短路的电流和电压保护	130
第六节	变压器的零序电流保护	134
	复习思考题与习题	136
第八章	微机保护	138
第一节	微机保护系统简介	138
第二节	微机保护装置的硬件系统	140
第三节	微机保护的算法	144
第四节	微机保护装置的软件构成	152
第五节	提高微机保护可靠性的措施	158
	复习思考题与习题	161
	参考文献	162

第一章 绪 论

第一节 继电保护的任務和作用

一、电力系统故障和不正常运行状态及引起的后果

由发电机、变压器、输电线路及负荷所组成的整体称为电力系统。变压器和输电线路构成电力网。电力网在运行中可能发生各种故障和不正常运行状态,最常见同时也是最危险的故障是各种类型的短路。发生短路时可能产生以下后果:

- (1) 数值较大的短路电流通过故障点时,产生电弧,使故障设备损坏或烧毁;
- (2) 短路电流通过非故障元件时,电气设备的载流部分和绝缘材料的温度超过允许值而不断升高,造成载流导体熔断或加速绝缘老化和损坏,从而可能发展成为故障;
- (3) 电力系统中部分地区的电压大大下降,破坏用户工作的稳定性或影响产品的质量;
- (4) 破坏系统并列运行的稳定性,引起系统振荡,甚至导致整个系统瓦解。

最常见的不正常运行状态是过负荷,即电气设备的负荷电流超过其额定值。在过负荷时,电气设备的载流部分和绝缘材料过度发热,从而使绝缘加速老化,甚至损坏,引起故障。此外,系统中出现功率缺额而引起的频率降低,发电机突然甩负荷而产生的过电压,以及电力系统发生振荡等,都属于不正常运行状态。电力系统中发生不正常运行状态和故障时,都可能引起系统全部或部分正常运行遭到破坏,造成对用户的停止供电或少供电,甚至造成人身伤亡和电气设备的损坏。

二、继电保护装置及其任务

系统事故的发生,除了自然因素(如雷击、架空线路倒杆等)外,一般都是由于设备制造上的缺陷、设计和安装的不当、检修质量不高或运行维护不力而引起的。在电力系统中,除应采取各项积极措施消除或减少事故发生的可能性外,还应做到设备或输电线路一旦发生故障时,能尽快地将故障设备或线路切除,保证非故障部分继续安全运行,缩小事故影响范围。由于电能的生产、传输、分配和使用同时完成,各设备之间都有电或磁的联系,所以,当某一设备或线路发生短路故障时,在很短的时间就影响到整个电力系统的其他部分,为此要求切除故障设备或输电线路的时间必须很短,通常切除故障的时间小到十分之几秒至百分之几秒。显然,要在这样短的时间内由运行人员及时发现并手动将故障切除是不可能的。因此,只有借助于装设在每个电气设备或线路上的自动装置,即继电保护装置才能实现。这种装置到目前为止,有一部分仍然由单个继电器或继电器与其附属设备的组合构成,故称为继电保护装置。在电子式静态保护装置和数字式保护装置出现以后,虽然继电器多已被电子元件或计算机取代,但仍沿用此名称。在电力部门常用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。继电保护装置一词则指各种具体的装置。

继电保护装置就是指能反应电力系统中电气元件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。它的基本任务是:

- (1) 自动、迅速、有选择性地將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, 保证无故障部分迅速恢复正常运行。

(2) 反应电气元件的不正常运行状态, 并根据运行维护的条件(如有、无经常值班人员)而动作于信号, 以便值班员及时处理, 或由装置自动进行调整, 或将那些继续运行就会引起损坏或发展成为事故的电气设备予以切除。

(3) 继电保护装置还可以与电力系统中的其他自动化装置配合, 在条件允许时, 采取预定措施, 缩短事故停电时间, 尽快恢复供电, 从而提高电力系统运行的可靠性。

第二节 继电保护的基本原理和保护装置的组成

一、继电保护的基本原理

为了完成继电保护所担负的任务, 继电保护装置必须具有正确区分被保护元件是处于正常运行状态还是发生了故障, 是保护区内故障还是区外故障的功能。保护装置要实现这一功能, 需要根据电力系统发生故障前后电气物理量变化的特征为基础来构成。继电保护的原理就是以被保护线路或设备故障前后某些突变的物理量为信息量, 当突变量达到一定值时, 启动逻辑控制环节, 发出相应的跳闸脉冲或信号。

电力系统发生故障后, 工频电气量变化的主要特征及可以构成的保护如下:

(1) 电流增大。短路时故障点与电源之间的电气设备和输电线路上的电流将由负荷电流增大至大大超过负荷电流。

(2) 电压降低。当发生相间短路和接地短路故障时, 系统各点的相间电压或相电压值下降, 且越靠近短路点, 电压越低。

(3) 电流与电压之间的相位角改变。正常运行时电流与电压间的相位角是负荷的功率因数角, 一般约为 20° ; 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 $60^\circ \sim 85^\circ$; 而在保护反方向三相短路时, 电流与电压之间的相位角则是 $180^\circ + (60^\circ \sim 85^\circ)$ 。

(4) 测量阻抗发生变化。测量阻抗即测量点(保护安装处)电压与电流之比值。正常运行时, 测量阻抗为负荷阻抗; 金属性短路时, 测量阻抗转变为线路阻抗, 故障后测量阻抗显著减小, 而阻抗角增大。

不对称短路时, 出现相序分量, 如两相及单相接地短路时, 出现负序电流和负序电压分量; 单相接地时, 出现负序、零序电流和电压分量。这些分量在正常运行时是不出现的。

利用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; 根据短路故障时电压的降低, 可构成电压保护; 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; 根据电压与电流比值的变化, 可构成距离保护; 根据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; 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、负序电流保护和负序功率方向保护; 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。

此外, 除了上述反应工频电气量的保护外, 还有反应非工频电气量的保护, 如超高压输电线路的行波保护、电力变压器的瓦斯保护及反应电动机绕组温度升高的过负荷或过热保

护等。

二、继电保护装置的组成

继电保护装置的种类虽然很多，但是一般均由三个部分组成，即测量部分、逻辑部分和执行部分，其原理框图如图 1-1 所示。

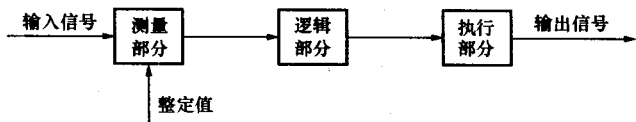


图 1-1 继电保护装置原理框图

测量部分的作用是测量与被保护电气设备或线路工作状态有关的物理量的变化，如电流、电压等的变化，以确定电力系统是否发生了短路故障或出现不正常运行情况；逻辑回路的作用是当电力系统发生故障时，根据测量回路的输出信号，进行逻辑判断，以确定保护是否应该动作，并向执行元件发出相应的信号；执行回路的作用是根据逻辑回路的判断，发出切除故障的跳闸脉冲或指示不正常情况的信号。

电力系统的继电保护根据被保护对象不同，分为发电厂、变电站电气设备的继电保护和输电线路的继电保护。前者是指发电机、变压器、母线和电动机等元件的继电保护，简称为元件保护；后者是指电力网及电力系统中输电线路的继电保护，简称线路保护。

按作用的不同，继电保护又可分为主保护、后备保护和辅助保护。主保护是指被保护元件内部发生各种短路故障时，能满足系统稳定及设备安全要求的、有选择地切除被保护设备或线路故障的保护。后备保护是指当主保护或断路器拒绝动作时，用以将故障切除的保护。后备保护可分为远后备和近后备保护两种。远后备是指主保护或断路器拒绝时，由相邻元件的保护部分实现的后备；近后备是指当主保护拒绝动作时，由本元件的另一套保护来实现的后备，当断路器拒绝动作时，由断路器失灵保护实现后备。辅助保护是指为了补充主保护和后备保护的不足而增设的简单保护。

继电保护装置需有操作电源供给保护回路，断路器跳、合闸及信号等二次回路。按性质的不同，操作电源可以分为直流操作电源和交流操作电源。通常在发电厂和变电站中，继电保护的操作电源由蓄电池直流系统供电，而蓄电池是一种独立电源，最大的优点是工作可靠，但缺点是投资较大、维护麻烦。交流操作电源的优点是投资少、维护简便，但缺点是可靠性差。因此，交流操作电源的继电保护适合于小型变电所使用。

第三节 对继电保护的基本要求

为了使继电保护装置能及时、正确地完成它所担负的任务，对保护装置有四个基本要求，即选择性、速动性、灵敏性和可靠性。

一、选择性

选择性是指当电力系统中的设备或线路发生故障时，其继电保护仅将故障的设备或线路从电力系统中切除，尽量减小停电面积，以保证系统中的无故障部分仍能继续安全运行。如图 1-2 所示电网，当 d1 点发生短路故障时，应由故障线路上的保护 P1 和 P2 动作，将故障

线路 WL1 切除, 这时变电所 B 仍可由非故障线路 WL2 继续供电。当 d2 点发生短路故障时, 应由线路的保护 P6 动作, 使断路器 QF6 跳闸, 将故障线路 WL4 切除, 这时只有变电所 D 停电。由此可见, 继电保护有选择性地动作可将停电范围限制到最小, 甚至可以做到不中断对用户的供电。

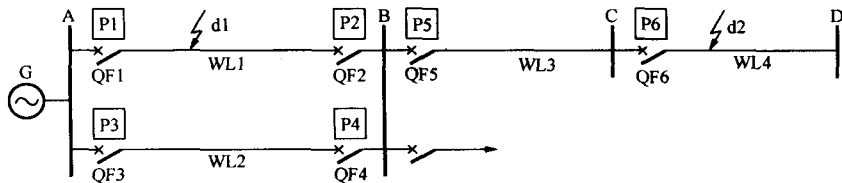


图 1-2 继电保护选择性动作说明图

在要求保护动作有选择性的同时, 还必须考虑保护或断路器有拒动的可能性, 因而就需要考虑后备保护的问题。如图 1-2 所示, 当 d2 点发生短路故障时, 距短路点最近的保护 P6 应动作切除故障, 但由于某种原因, 该处的保护或断路器拒动, 故障便不能消除, 此时如其前面一条线路 (靠近电源侧) 的保护 P5 动作, 故障也可消除。此时保护 P5 所起的作用就称为相邻元件的后备保护。同理, 保护 P1 和 P3 又应该作为保护 P5 和 P7 的后备保护。由于按以上方式构成的后备保护是在远处实现的, 因此又称为远后备保护。

一般情况下, 远后备保护动作切除故障时将使停电范围扩大。

在复杂的高压电网中, 当实现远后备保护有困难时, 也可采用近后备保护的方式。即当本元件的主保护拒绝动作时, 由本元件的另一套保护作为后备保护; 当断路器拒绝动作时, 由同一变电所内的有关断路器动作, 实现后备。为此, 在每一个元件上都应装设简单的主保护和后备保护, 并装设必要的断路器失灵保护。由于这种后备保护作用是在主保护安装处实现, 因此称为近后备保护。

应当指出, 远后备保护的性能是比较完善的, 它对相邻元件的保护装置、断路器、二次回路和直流电源引起的拒绝动作, 均能起到后备作用, 同时实现简单、经济, 因此, 在电压较低的线路上应优先采用, 只有当远后备不能满足灵敏度和速动性的要求时, 才考虑采用近后备的方式。

二、速动性

速动性是指继电保护装置应能尽快地切除故障, 以减少设备及用户在大电流、低电压情况下运行的时间, 降低设备的损坏程度, 提高系统并列运行的稳定性。动作迅速而又能满足选择性要求的保护装置, 一般结构都比较复杂, 价格昂贵, 对大量的中、低压电力设备, 不一定都采用高速动作的保护。对保护速动性的要求应根据电力系统的接线和被保护设备的具体情况, 经技术经济比较后确定。一般必须快速切除的故障有:

- (1) 使发电厂或重要用户的母线电压低于有效值 (一般为 0.7 倍额定电压) 的故障。
- (2) 大容量的发电机、变压器和电动机内部故障。
- (3) 中、低压线路导线截面过小, 为避免过热不允许延时切除的故障。
- (4) 可能危及人身安全、对通信系统或铁路信号造成强烈干扰的故障。

在高压电网中, 继电保护快速性往往成为维持电力系统的暂态稳定性的决定性因素, 故障切除愈快, 暂态稳定极限 (维持故障切除后系统的稳定性所允许的故障前输送功率) 愈高, 愈能发挥电网的输电效能。

故障切除时间包括保护装置和断路器动作时间。一般快速保护的动作为 $0.04 \sim 0.08\text{s}$ ，最快的可达 $0.01 \sim 0.04\text{s}$ ；一般断路器的跳闸时间为 $0.06 \sim 0.15\text{s}$ ，最快的可达 $0.02 \sim 0.06\text{s}$ 。

但应指出，要求保护切除故障达到最小时间并不是在任何情况下都是合理的，必须根据技术条件来确定。实际上，对不同电压等级和不同结构的电网，切除故障的最小时间有不同的要求。例如，对于 $35 \sim 60\text{kV}$ 配电网络，一般为 $0.5 \sim 0.7\text{s}$ ； $110 \sim 330\text{kV}$ 高压电网，约为 $0.15 \sim 0.3\text{s}$ ； 500kV 及以上超高压电网，约为 $0.1 \sim 0.12\text{s}$ 。目前国产的继电保护装置，在一般情况下，完全可以满足上述电网对快速切除故障的要求。

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

三、灵敏性

灵敏性是指电气设备或线路在被保护范围内发生故障或不正常运行情况时，保护装置的反应能力。能满足灵敏性要求的继电保护，在规定的范围内故障时，不论短路点的位置和短路的类型如何，以及短路点是否有过渡电阻，都能正确反应动作。保护装置的灵敏性用灵敏系数来衡量。灵敏系数越大，则保护的灵敏度就越高，反之就越低。关于灵敏系数的求取方法，将在第二章详细介绍。

四、可靠性

可靠性包括安全性和信赖性，是对继电保护最根本的要求。所谓安全性是要求继电保护在不需它动作时可靠不动作，即不发生误动。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，即不拒动。如不满足可靠性的要求，则保护装置本身便成为扩大事故或直接造成事故的根源。因此，可靠性是对继电保护装置的最根本要求。

对于一个确定的保护装置在一个确定的系统中运行而言，在继电保护的整定计算中用可靠系数来校核保护装置是否满足可靠性的要求。国家或行业制定的继电保护运行整定计算规程中，对各类保护的可靠性系数都作了具体规定。

以上四个基本要求是设计、配置和维护继电保护的依据，又是分析、评价继电保护的基础。这四个基本要求之间是相互联系的，但往往又存在着矛盾，因此，在实际工作中，要根据电网的结构和用户的性质，辩证地进行统一。

第四节 继电保护的发展简史

继电保护技术是随着电力系统和自动化技术的发展而发展起来的。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在广泛使用。1890年后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器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年方向电流保护开始得到应用，在此时期也出现了将电流与电压比较的保护原理，并导致了1920年后距离保护装置

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。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、保护装置的结构形式和制造工艺也发生了巨大的变革,经历了机电式保护装置、静态保护装置和数字式保护装置三个发展阶段。

20世纪50年代,随着晶体管的发展,出现了晶体管保护装置。这种保护装置体积小、动作速度快、无机械转动部分,经过20余年的研究与实践,晶体管保护装置的抗干扰问题从理论和实际都得到了满意地解决。20世纪70年代,晶体管保护在我国被大量采用。随着集成电路的发展,可以将许多晶体管集成在一块芯片上,从而出现了体积更小、工作更可靠的集成电路保护。20世纪80年代后期,静态继电保护装置由晶体管向集成电路过渡,成为静态继电保护的主要形式。早在20世纪60年代末,有人就提出了用小型计算机实现继电保护的设想,但当时小型计算机价格昂贵,难以实际采用,由此开始了对继电保护计算机算法的大量研究,这为后来微型计算机保护的发展奠定了理论基础。随着微处理器技术的快速发展和价格的急剧下降,在20世纪70年代后期,便出现了性能比较完善的微机保护样机并投入运行。20世纪80年代微机保护在硬件和软件技术方面已趋成熟,进入90年代,微机保护已在我国大量应用,主运算器由8位机、16位机发展到目前的32位机;数据转换与处理器件由A/D转换器、压频转换器(VFC),发展到数字信号处理器(DSP)。这种由计算机技术构成的继电保护称为数字式继电保护。这种保护可用相同的硬件实现不同原理的保护,使制造大为简化,生产标准化、批量化,硬件可靠性高;具有强大的存储、记忆和运算功能,可以实现复杂原理的保护,为新原理保护的发展提供了实现条件。除了实现保护功能外,还可兼有故障录波、故障测距、事件顺序记录和保护管理中心计算机及调度自动化系统通信等功能,这对于保护的运行管理、电网事故分析及事故后的处理等均有重要意义。另外,它可以不断地对本身的硬件和软件进行自检,发现装置的异常情况并通知运行维护中心。

网络的发展及其电力系统中的大量采用,给微机保护提供了很大的发展空间。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该再是一个孤立的、任务单一的、“消极待命”的装置,而应该是积极参与、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的基本组成单元。微机保护不仅要能实现被保护设备的切除或自动重合,还可作为自动控制系统的终端,接收调度命令实现跳、合闸等操作,以及故障诊断、稳定预测、安全监视、无功调节、负荷控制等功能。

此外,由于计算机网络提供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、数据通信于一体的方向不断发展。

复习思考题与习题

- 1-1 什么是故障和不正常运行状态？它们之间有何不同？又有何联系？
- 1-2 什么是主保护和后备保护？远后备保护和近后备保护有什么区别和特点？
- 1-3 继电保护装置的任务及其基本要求是什么？
- 1-4 电力系统如果没有配备完善的继电保护系统，想象一下会出现什么后果？
- 1-5 继电保护装置通过哪些主要环节完成预定的保护功能？各环节的作用是什么？
- 1-6 结合“电力系统分析”课程知识，说明加快继电保护的动作时间为什么可以提高电力系统的稳定性。

第二章 电网的电流保护

电网正常运行时，输电线路流过正常的负荷电流，母线电压约为额定电压。当输电线路发生短路时，故障相电流增大。根据这一特征，可以构成反应故障时电流增大而动作的电流保护。

本章根据电网相间短路及单相接地故障的特征，主要介绍单侧电源网络相间短路保护的三段式电流保护和多侧电源网络相间短路保护的方向电流保护，以及电网单相接地故障的零序电流保护，重点介绍这些保护的工作原理、保护装置的整定计算和接线方式。

第一节 继电保护装置的基本元件和电路

一、电磁型继电器

电磁型继电器在 60 (35) kV 及以下电网的电力线路和电气设备继电保护装置中大量地被采用，电流继电器是实现电流保护的基本元件。电磁型继电器的基本结构型式有螺管线圈式、吸引衔铁式和转动舌片式三种，如图 2-1 所示。

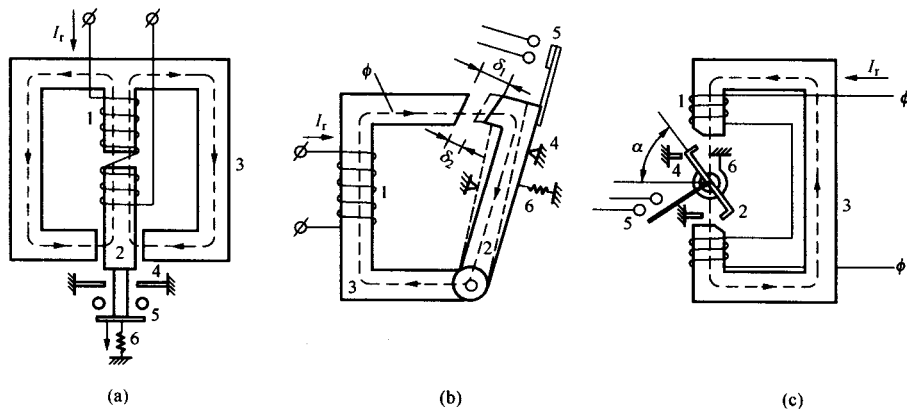


图 2-1 电磁型继电器的原理结构

(a) 螺管线圈式；(b) 吸引衔铁式；(c) 转动舌片式

1—线圈；2—可动衔铁；3—电磁铁；4—止挡；5—触点；6—弹簧

电流继电器在电流保护中用作测量和起动元件，它是反应电流超过某一整定值而动作的继电器。电磁型继电器是利用电磁原理进行工作的，现以吸引衔铁式结构的继电器为例进行分析，如图 2-2 所示。

首先分析使继电器触点接通的力矩（即动作力矩）。在线圈 1 中通以电流 I_r ，则产生与其成正比的磁通 ϕ ，即 $\phi \propto \frac{I_r}{\delta}$ （注： $\phi = \frac{W_r I_r}{R_m}$ ， $R_m = \frac{\delta}{\mu_0 S}$ ），通过由铁心、空气隙和可动舌片组成的磁路，使舌片磁化与铁心的磁极产生电磁吸力，其大小与 ϕ^2 成正比。这样，由电磁吸引力作用到舌片上的电磁转矩 M_e 可表示为

$$M_e = K_1 \phi^2 = K_2 \frac{I_r^2}{\delta^2} \quad (2-1)$$

式中 K_1, K_2 ——比例常数；

δ ——电磁铁与可动铁心之间的气隙。

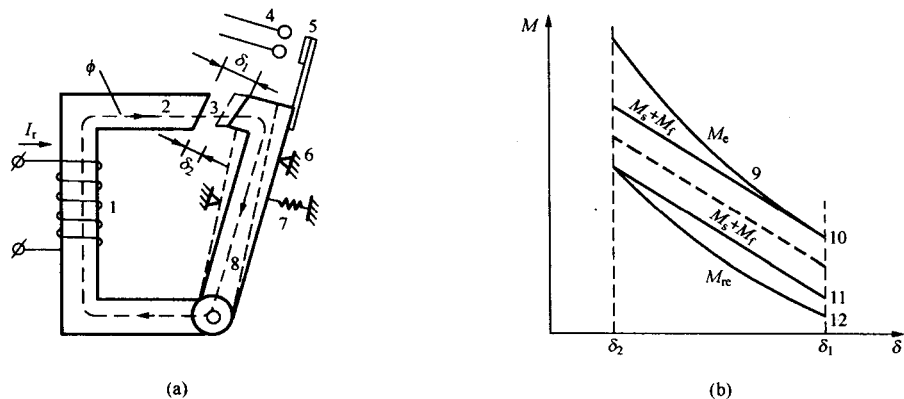


图 2-2 电磁型电流继电器的原理结构和转矩曲线

(a) 原理结构；(b) 转矩曲线

1—线圈；2—铁心；3—空气隙；4—固定触点；5—可动触点；

6—止档；7—弹簧；8—可动衔铁；9—起动电磁转矩；10—起动时的反作用转矩；

11—返回时的反作用转矩；12—返回时的电磁转矩

其次分析使继电器触点闭合的阻力矩。正常工作情况下，线圈中流入负荷电流，继电器不工作，这是由于弹簧对应于空气隙长度 δ_1 产生一初始力矩 M_{s1} 。由于弹簧的张力与伸长量成正比，因此，当空气隙长度由 δ_1 减小到 δ_2 时，弹簧产生的反抗力矩为

$$M_s = M_{s1} + K_3 (\delta_1 - \delta_2)$$

式中 K_3 ——比例常数。

另外，在可动舌片转动的过程中，还必须克服摩擦力矩 M_f ，其值可以认为是不随 δ 变化的一个常数。因此，阻碍继电器动作的全部机械反抗力矩为

$$M_s + M_f$$

1. 继电器动作的条件

为使继电器动作，必须增大电流 I_r ，以增大电磁转矩 M_e ，使其满足关系式

$$M_e \geq M_s + M_f$$

这是继电器能够动作的条件。

2. 动作电流

能够满足上述条件，使继电器动作的最小电流值 I_r ，称为继电器的动作电流（起动电流），记作 $I_{op.r}$ 。对应此时的电磁转矩为

$$M_e = K_2 \frac{I_{op.r}^2}{\delta^2}$$

在图 2-2 (b) 中表示出了可动舌片由 δ_1 减小到 δ_2 时，电磁转矩 M_e 和机械反抗力矩 ($M_s + M_f$) 与 δ 的关系曲线。前者以 δ 的平方关系变化，后者按比例关系变化，分别为曲线 9 和曲线 10。由此可知，在触点闭合的 δ_2 位置，将出现一个剩余力矩 ΔM ，即电磁转矩

与反力矩的差值，它对触点的可靠接触是有好处的。

3. 继电器的返回条件

继电器动作后，当 I_r 减小时，继电器在弹簧的作用下将返回。为使继电器返回，弹簧的作用力矩 M_s 必须大于电磁力矩 M_e 及摩擦力矩 M_f 之和，即

$$M_s \geq M_e + M_f \text{ 或 } M_e \leq M_s - M_f$$

这就是继电器能够返回的条件。

4. 返回电流

满足上述条件，使继电器返回原位的最大电流值称为继电器的返回电流，记为 $I_{re.r}$ 。对应此时的电磁转矩为

$$M_{re} = K_2 (I_{re.r} / \delta)^2 \quad (2-2)$$

在返回过程中，转矩 M_{re} 和 $(M_s - M_f)$ 与 δ 的关系如图 2-2 (b) 的曲线 11 和曲线 12。

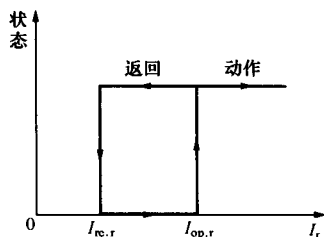


图 2-3 继电器的“继电特性”

由前所述，当 $I_r < I_{op.r}$ 时，继电器不动作，而当 $I_r \geq I_{op.r}$ 时，继电器迅速动作，触点闭合；当减小 I_r 使 $I_r \leq I_{re.r}$ 时，继电器又立即返回原位，触点打开。继电器的起动和返回特性称为“继电特性”，如图 2-3 所示。

5. 返回系数

返回电流与动作电流的比值称为继电器的返回系数，可表示为

$$K_{re} = \frac{I_{re.r}}{I_{op.r}}$$

由图 2-2 (b) 可看出， $M_{re} < M_{op.r}$ ，两者之差与剩余力矩 ΔM 和摩擦力矩 M_f 有关，所以返回系数恒小于 1（一切过量动作的继电器都如此）。在实际应用中，要求有较高的返回系数，一般取 0.85~0.9。返回系数越大，则保护装置的灵敏度越高，但过大的返回系数会使继电器触点闭合不够可靠。

提高返回系数的措施：采用坚硬的轴承以减小摩擦力矩 M_f ；改善磁路结构以减小剩余力矩 ΔM 。

6. 动作电流的调整方法

- (1) 改善继电器线圈的匝数；
- (2) 改变弹簧的张力；
- (3) 改变初始空气隙长度。

吸引衔铁式结构的继电器一般被用作中间继电器，如 DZ-10 系列。螺管线圈式结构的继电器多被用作时间继电器，如 DS-100 系列。

二、晶体管型继电器

晶体管型继电器的功能是由晶体管开关电路完成的。下面仅介绍晶体管型电流继电器和晶体管型时间继电器。

1. 晶体管型电流继电器

晶体管型电流继电器由电压形成回路（电流变换器 UA 将输入电流变换成与之成正比的电压）、整流比较回路及执行回路（单稳态触发器）构成。其原理接线如图 2-4 所示。

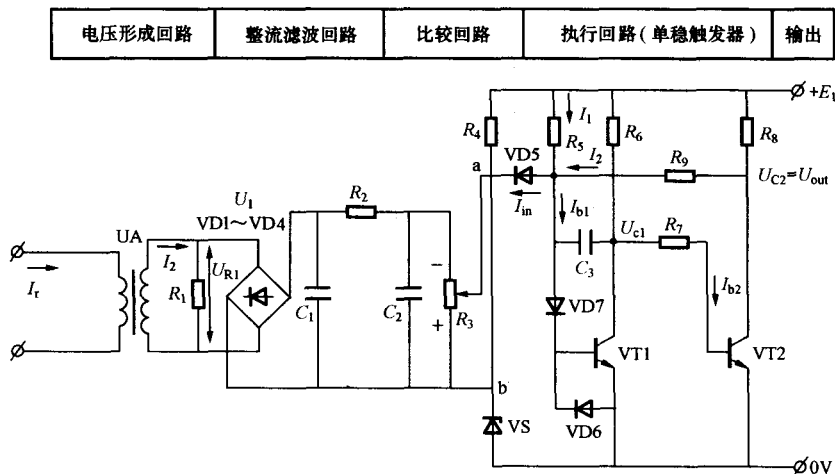


图 2-4 晶体管型电流继电器的原理接线图

(1) 正常工作时：电流变换器的输入电流小于继电器的动作电流， $U_{R3} \approx 0$ ，晶体管 VT1 因正向偏置而导通，VT2 完全截止。输出电压 U_{sc} 接近于 $+E_1$ ，对应于继电器不动作状态。

(2) 起动时：当输入继电器的电流大于继电器的动作电流时， U_{R3} 增大，a 点电位降低，致使 VD5 导通，VT1 截止，其集电极电位升高，使晶体管 VT2 导通，输出电压 U_{sc} 降至 $0.1 \sim 0.3V$ ，继电器处于动作状态。当继电器的输入电流减小至返回电流时， U_{R3} 减小，a 点电位增高，使 VD5 截止，VT1 重新导通，触发器翻转，继电器返回，继电器的返回电流小于继电器的动作电流，其返回系数小于 1。

2. 晶体管型时间继电器

晶体管型时间继电器由两个三极管及阻容延时电路组成。其原理接线如图 2-5 所示。

在正常情况下，VT3 饱和导通，电容器 C 被短接，电容器 C 上的电压为 VT3 集电极与发射极之间的饱和压降 U_{ces1} 和二极管 VD8 的正向压降 U_D 之和，即

$$U_{CD} = U_D + U_{ces1} \approx 0.6 + 0.2 = 0.8(V)$$

其值小于稳压管 VS9 的方向击穿电压，VT4 截止，输出电压 U_{sc} 近于 $0V$ ，表示继电器延时输出，延时时间 t 的计算式为

$$t = R_2 C \ln \frac{E_C - U_{CD}}{E_C - U_{VS}} \quad (2-3)$$

式中 U_{CD} ——电容器 C 上的起始电压；

E_C ——电源电势；

U_{VS} ——稳压管反向击穿电压。

由式 (2-3) 可见，改变继电器的延时 t 可调节电阻 R_2 或电容 C 的值。一般采用调节 R_2 的值来改变时间继电器的延时 t 。

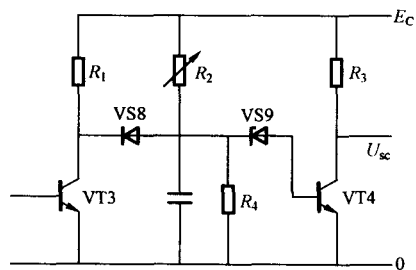


图 2-5 晶体管时间继电器原理接线图