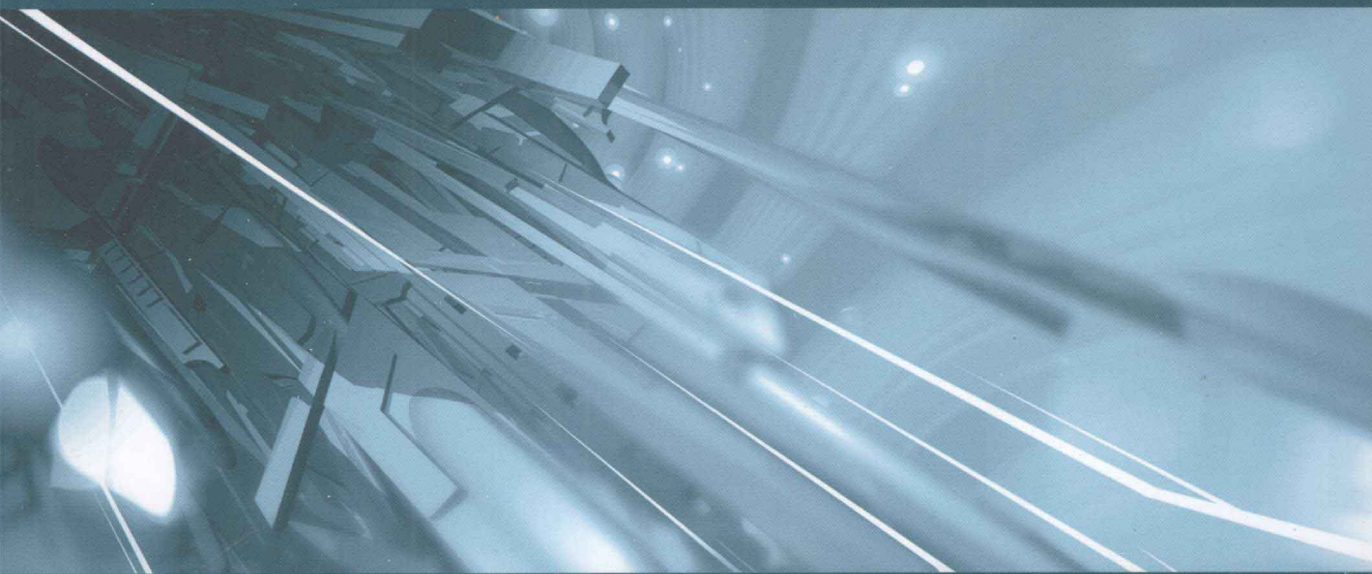




普通高等教育“十二五”规划教材



现代电力系统 继电保护原理

邵能灵 范春菊 胡 炎 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

现代电力系统 继电保护原理

邵能灵 范春菊 胡 炎 编
黄少锋 主审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。

本书系统阐述了电力系统继电保护的基本原理,各种保护方案的基本分析方法和整定原则及相关新技术。主要内容包括继电保护的基础知识,输电线路的电流保护,电网的距离保护,输电线路的纵联保护,自动重合闸,电力变压器、发电机的继电保护,母线保护,微机保护装置的硬件原理及软件实现。最后根据我国电力系统的发展情况,介绍了继电保护的特殊问题及其发展方向。

本书可作为高等院校电气工程及其相关专业的本科生、研究生的专业教材,也可供电力工业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代电力系统继电保护原理/郇能灵,范春菊,胡炎编. —北京:中国电力出版社,2011.9

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-2105-2

I. ①现… II. ①郇…②范…③胡… 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(2011)第184298号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2012年1月第一版 2012年1月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 18.25印张 441千字

定价 32.00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

本书是在教学、科研实践的基础上,为适应新世纪的教学需要而编写的。随着当前电子技术、通信技术、数字信号处理技术以及计算机技术的发展,电力系统继电保护的研究和应用得到快速发展,尤其是微机继电保护得到了广泛的应用。本书将传统继电保护原理和微机继电保护有机地结合为一体,针对电力系统的各种不同元件和不同故障,讲述继电保护基本原理和基本知识,重点体现继电保护的技术性、适用性和实践性。

本书共分为十一章,第一章概述电力系统继电保护的基本原理和要求,展望其发展趋势,第二章介绍继电保护仪用互感器的基本知识及新发展,并对电力系统故障及其相应的保护进行分类,第三、四章介绍输电线路的电流保护、电网的距离保护,第五、六章讲述输电线路的纵联保护和自动重合闸,第七~九章为电力变压器、发电机和母线的继电保护,第十章介绍微机保护装置的硬件原理和软件结构以及微机线路保护的基本算法。第十一章根据我国电力系统的发展情况,介绍了继电保护的特殊问题及其发展方向。

本书由邵能灵、范春菊和胡炎共同编写。其中第一、二、七~九章由邵能灵编写,第三、四章由范春菊编写,第五、六、十章由胡炎编写,第十一章由胡炎和邵能灵共同编写。研究生丁浩寅、罗磊、王江海和尹来宾参加了部分工作。

本书由华北电力大学黄少锋教授主审。

由于编者水平有限,加上时间仓促,书中难免会有错漏及不妥之处,敬请读者提出宝贵意见。

编 者

2011年9月



目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 电力系统继电保护的作用和分类	1
第二节 继电保护的基本原理与构成	2
第三节 电力系统继电保护的基本要求	6
第四节 继电保护技术的发展	9
习题	12
第二章 继电保护的基础知识	13
第一节 继电保护的保护区	13
第二节 继电保护用互感器	14
第三节 电子式互感器的原理及结构	22
第四节 输电线路故障及保护	25
第五节 电力变压器的故障、不正常运行类型及保护	28
第六节 发电机的故障、不正常运行类型及保护方式	30
第七节 母线故障及保护方式	32
小结	34
习题	34
第三章 输电线路的电流保护	35
第一节 单侧电源网络相间短路的电流保护	35
第二节 电网相间短路的方向性电流保护	55
第三节 中性点直接接地系统中接地短路的零序电流及方向保护	65
第四节 中性点非直接接地系统中单相接地故障的保护	74
小结	82
习题	82
第四章 电网的距离保护	88
第一节 距离保护的作用原理	88
第二节 阻抗继电器	90
第三节 阻抗继电器的实现	101
第四节 距离保护的整定计算原则及对距离保护的评价	113
第五节 影响距离保护正确工作的因素及防止方法	115
小结	129

习题	130
第五章 输电线路的纵联保护	134
第一节 概述	134
第二节 纵联保护的通道	136
第三节 光纤纵联差动保护	139
第四节 高频保护	145
小结	160
习题	160
第六章 自动重合闸	161
第一节 自动重合闸的作用和要求	161
第二节 三相自动重合闸	161
第三节 重合闸与继电保护的配合	167
第四节 单相自动重合闸	169
第五节 综合重合闸简介	177
第六节 微机保护中的重合闸逻辑举例	178
小结	184
习题	184
第七章 电力变压器的继电保护	185
第一节 变压器的纵联差动保护	185
第二节 故障分量比率差动保护原理	195
第三节 变压器的电流保护	197
第四节 变压器的接地保护	199
第五节 变压器的非电量保护	202
小结	204
习题	204
第八章 发电机的继电保护	206
第一节 发电机的差动保护	206
第二节 发电机定子单相接地保护	211
第三节 发电机负序过电流保护	217
第四节 发电机失磁保护	219
小结	228
习题	228
第九章 母线保护	230
第一节 母线电流差动保护	230
第二节 断路器失灵保护简介	236
小结	236

习题	237
第十章 微机保护基础	238
第一节 硬件原理	238
第二节 数字滤波器概述	245
第三节 基本电气量的计算	248
第四节 距离保护装置举例	255
小结	261
习题	262
第十一章 继电保护综述	263
第一节 超高压输电线路的特殊问题	263
第二节 同杆双回线路继电保护的的特殊性	266
第三节 继电保护的发展方向	271
小结	280
参考文献	282

第一章 绪 论

第一节 电力系统继电保护的作用和分类

一、电力系统的故障及不正常运行状态

电力系统在运行中,可能出现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,其中包括相间短路和接地短路。此外,还可能发生输电线路断线,旋转电机、变压器同一相绕组的匝间短路等,以及由上述几种故障组合而成的复杂故障。

电力系统中发生短路故障时,可能产生下列严重后果:

- (1) 数值较大的短路电流通过故障点时,引燃电弧,使故障设备损坏或烧毁。
- (2) 短路电流通过非故障设备时,产生发热和电动力,使其绝缘遭受到破坏或缩短设备使用年限。
- (3) 电力系统中部分地区电压值大幅度下降,将破坏用户正常工作或影响产品质量。
- (4) 破坏电力系统中各发电厂之间并联运行的稳定性,使系统发生振荡,从而使事故扩大,甚至使整个电力系统瓦解。

若电力系统中电气元件的正常工作遭到破坏,但没有发生故障,这种情况属于不正常工作状态,一般表现为电气设备或系统运行参数偏离规定允许值。例如,因负荷超过供电设备的额定值引起的电流升高称为过负荷,这是一种常见的不正常工作状态。过负荷可能造成电气元件载流部分和绝缘材料温度升高而过热,加速绝缘材料老化和损坏,并有可能发展成故障。此外,电力系统中出现的因有功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,都可能引起系统事故。事故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变坏到不能容许的程度,甚至造成人身伤亡和电气设备损坏。

系统事故的发生,除自然条件的因素(如遭受雷击等)以外,一般都是由设备制造上的缺陷、设计和安装的错误、检修质量不高或运行维护不当引起的。因此,应提高设计和运行水平,并提高制造与安装质量。这样可能大大减少事故发生的几率,但是不可能完全避免系统故障和不正常运行状态的发生,故障一旦发生,将影响其他非故障设备,甚至引起新的故障。为防止系统事故扩大,保证非故障部分仍能可靠地供电,并维持电力系统运行的稳定性,要求迅速有选择性地切除故障元件。切除故障的时间有时要求短到十分之几秒到百分之几秒。显然,在这样短的时间内,由运行人员发现故障设备并将故障设备切除是不可能的。只有借助于安装在每一个电气设备上的自动装置,即继电保护装置,才能实现。

二、继电保护装置的任务

继电保护装置是指安装在被保护元件上,反应被保护元件故障或不正常运行状态并作用于断路器跳闸或发出信号的一种自动装置。继电保护装置最初是以机电式继电器为主构成的,现代继电保护装置则已发展成以电子元件或微型计算机或可编程序控制器为主构成。“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如下:

(1) 自动、迅速、有选择性地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,并保证其他无故障元件迅速恢复正常运行。

(2) 反应电气元件不正常运行情况,并根据不正常运行情况的种类和电气元件维护条件,发出信号,由运行人员进行处理或自动地进行调整或将那些继续运行会引起事故的电气元件予以切除。反应不正常运行情况的继电保护装置允许带有一定的延时动作。

(3) 继电保护装置还可以和电力系统中的其他自动装置配合,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。

综上所述,继电保护在电力系统中的主要作用是通过预防事故或缩小事故范围来提高系统运行的可靠性。继电保护装置是电力系统中重要的组成部分,是保证电力系统安全和可靠运行的重要技术措施之一。在现代化的电力系统中,如果没有继电保护装置,那么就无法维持电力系统的正常运行。

第二节 继电保护的基本原理与构成

一、继电保护的原理

为完成继电保护的任務,首先需要正确区分电力系统正常运行与故障或不正常运行状态之间的差别,找出电力系统被保护范围内电气元件(输电线路、发电机、变压器等)发生故障或不正常运行时的特征。以电力系统发生故障或不正常运行状态前后电气物理量变化特征为基础来构成继电保护装置。电力系统发生故障后,工频电气量变化的主要特征如下:

(1) 电流增大。短路时故障点与电源之间的电气元件上的电流,将由负荷电流值增大到远超过额定负荷电流值。

(2) 电压降低。系统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均下降,且越靠近短路点,电压下降越多,短路点电压最低可降至零。

(3) 电压与电流之间的相位角发生改变。正常运行时,同相的电压与电流之间的相位角即负荷的功率因数角,一般约为 20° ;三相金属性短路时,同相电压与电流之间的相位角即阻抗角,对于架空线路,一般为 $60^\circ \sim 85^\circ$;而在反方向三相短路时,电压与电流之间相位角为 $180^\circ + (60^\circ \sim 85^\circ)$ 。

(4) 测量阻抗发生变化。测量阻抗即为测量点(保护安装处)电压与电流相量之比值,即 $Z = \dot{U} / \dot{I}$ 。以线路故障为例,正常运行时,测量阻抗为负荷阻抗;金属性短路时,测量阻抗为线路阻抗;故障后测量阻抗模值显著减小,而阻抗角增大。

(5) 出现负序和零序分量。正常运行时,系统只有正序分量;当发生不对称短路时,将出现负序分量和零序分量。

(6) 电气元件流入和流出电流的关系发生变化。对任一正常运行的电气元件,根据基尔霍夫定律,其流入电流应等于流出电流;但元件内部发生故障时,其流入电流不再等于流出电流。

利用故障时电气量的变化特征,可以构成各种作用原理的继电保护。例如,根据短路故障时电流增大,可构成过流保护和电流速断保护;根据短路故障时电压降低,可构成低电压保护和电压速断保护;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;

根据电压与电流比值的变化,可构成距离保护。

就电力系统中的任一电气元件来看,如图 1-1 中的线路 A—B,在正常运行时,在某一瞬间,负荷电流总是从一侧流入而从另一侧流出,如图 1-1 (a) 所示。如果统一规定电流的正方向都是从母线流向线路,那么,按照规定的正方向,A—B 两侧电流的大小相等,而相位相差 180° 。如图 1-1 (b) 所示,当在线路 A—B 的范围以外 (k_1) 短路时,由电源 I 所供给的短路电流 $\dot{I}'_{k1}$ 将流过线路 A—B,此时 A—B 两侧的电流仍然是大小相等、相位相反,其相位特征与正常运行时一样。如图 1-1 (c) 所示,如果短路发生在线路 A—B 的范围以内 (k_2),由于两侧电源均分别向短路点 k_2 供给短路电流 $\dot{I}'_{k2}$ 和 $\dot{I}''_{k2}$,因此,在线路 A—B 两侧的电流都是由母线流向线路,此时两个电流的大小一般都不相等,在理想情况下(两侧电动势同相位且全系统的阻抗角相等)两个电流同相位。

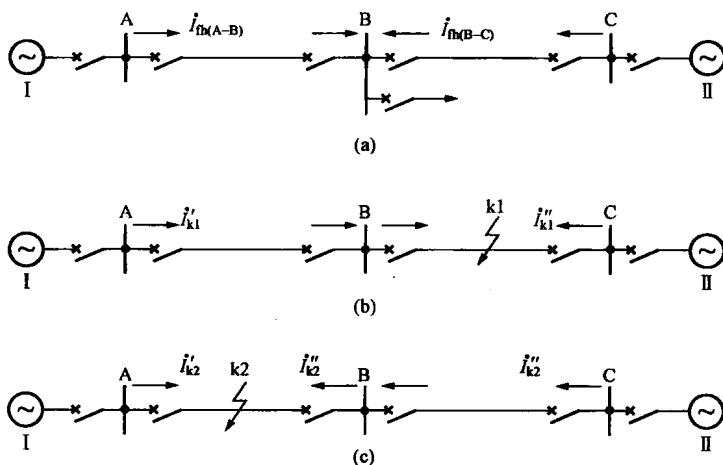


图 1-1 双侧电源网络接线

(a) 正常运行情况; (b) k_1 点短路时的电流分布; (c) k_2 点短路时的电流分布

利用每个电气元件在内部故障与外部故障(包括正常运行情况)时,两侧电流相位或功率方向的差别,可以构成各种差动原理的保护,如纵联差动保护、相差高频保护、方向高频保护等。差动原理的保护只能在被保护元件的内部故障时动作,而不反应外部故障,因而被认为具有绝对的选择性。

在按照上述原理构成各种继电保护装置时,可以使它们的参数反应于每相中的电流和电压(如相电流、相或线电压),也可以使之反应于其中的某一个对称分量(如负序、零序或正序分量)的电流和电压。在正常运行情况下,负序和零序分量不会出现;而在发生不对称接地短路时,它们都具有较大的数值;在发生不接地的不对称短路时,虽然没有零序分量,但负序分量很大。因此,利用这些序分量构成的保护装置,一般都具有良好的选择性和灵敏性,这正是这种保护装置获得广泛应用的原因。

这些继电保护既可以作为基本的继电保护元件,也可以通过它们做进一步逻辑组合,构成更为复杂的继电保护,例如,将过流保护与方向保护组合,构成方向电流保护。还可以使其反应基本参数的某次谐波分量,如发电机 3 次谐波定子单相接地保护等。上述的基本故障特征是故障或不正常运行时的稳态参数,即故障发生且稳定后得到的,以这些特征量构成的

继电保护称作稳态保护。

除了反应各种工频电气量的保护原理外，还有反应非工频电气量的保护。随着微型计算机继电保护的深入发展，各种以电力系统故障瞬时信息为故障特征的瞬态保护应运而生。如建立在小波分析基础上的输电线路行波保护，它利用小波分析捕捉故障电流行波波头在故障点和两保护安装处之间的传播时间差 Δt 来确定故障点的位置，从而确定故障是否发生在区内，保护是否应该动作。又如根据电气设备的特点实现反应非电量的保护。例如，当变压器油箱内部的绕组短路时，反应于油被分解所产生的气体而构成的瓦斯保护（也称气体保护）；反应于电动机绕组的温度升高而构成的过负荷或过热保护等。

对于反应电气元件不正常运行情况的继电保护，主要根据不正常运行情况时电压和电流变化的特征来构成。

二、继电保护的分类

继电保护装置通常有以下几种分类方法：

(1) 按所反应的物理量分类，可分为电流保护、电压保护、差动保护、瓦斯保护和零序电流保护等。

(2) 按构成保护的继电器类型分类，可分为电磁型保护、整流型保护、晶体管保护和数字型微机保护。随着电子技术和计算机技术的发展，微机保护的应用得到了飞速发展。

(3) 按被保护的对象分类，又分为发电厂、变电所电气设备的继电保护和输电线路的继电保护。前者是发电机、变压器、母线和电动机等元件的继电保护，简称为元件保护；后者是电力网及电力系统中输电线路的继电保护，简称为线路保护。

在某一设备的保护中，按继电保护所起的作用又可分为主保护、后备保护，以及为了改善保护的某些性能而专门设置的辅助保护等。主保护是满足系统稳定和设备安全要求，能以最快速度有选择地切除被保护设备和线路故障的保护。后备保护是指当主保护或断路器本身拒动时，起后备作用的保护，它允许带延时切除故障。后备保护又分远后备和近后备两种实施方式。

三、继电保护装置的构成

1. 模拟型继电保护装置

模拟型继电保护装置的构成种类很多，一般而言，它们都由测量回路、逻辑回路和执行回路三个主要部分组成。其原理框图如图 1-2 所示。测量回路的作用是测量与被保护电气元件工作状态有关物理量的变化，如电流、电压变化，以确定电力系统是否发生了短路故障或出现不正常工作状态；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，以确定保护装置是否应该动作，并向执行元件发出相应信号；执行回路的作用是执行逻辑回路的判断结果，发出切除故障的跳闸脉冲或指示不正常运行情况的信号。

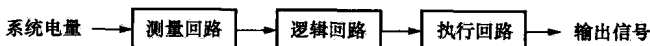


图 1-2 模拟型继电保护装置的原理框图

现以图 1-3 所示的简单的线路过电流保护装置为例，说明继电保护的组成及工作原理。

测量回路由电流互感器 TA 的二次绕组连接电流继电器 KA 组成。电流互感器的作用是

将被保护元件的大电流变成小电流，并将保护装置与高压隔离。在正常运行时，通过被保护元件的电流为负荷电流，小于电流继电器 KA 的动作电流，电流继电器不动作，其触点不闭合。当线路发生短路故障时，流经电流继电器的电流大于继电器的动作电流，电流继电器立即动作，其触点闭合，将逻辑回路中的时间继电器 KT 线圈回路接通电源，时间继电器 KT 动作，经整定时间 t_{set} 后闭合其触点，接通执行回路中的信号继电器 KS 线圈和断路器 QF 的跳闸线圈 YR 回路，使断路器 QF 跳闸，切除故障线路。同时，信号继电器 KS 动作，其触点闭合发出远方信号和就地信号，并自保持，该信号由值班人员做好记录后，手动复归。

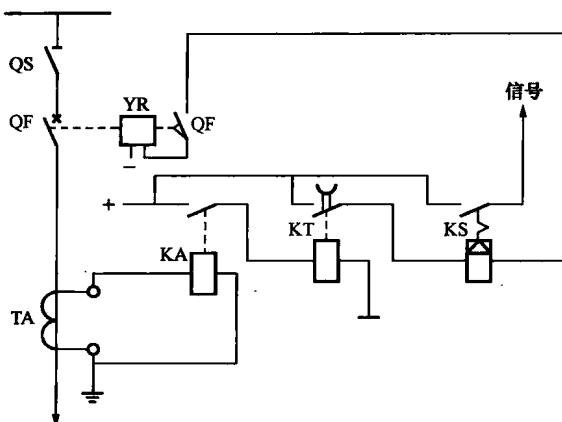


图 1-3 线路过电流保护装置单相原理接线图

2. 数字型微机继电保护装置

数字型微机继电保护装置把被保护元件输入的模拟电气量经模/数转换器 (A/D) 转换成数字量，利用计算机进行处理和判断。微机继电保护装置由硬件部分和软件部分组成。微机继电保护硬件部分原理框图如图 1-4 所示。

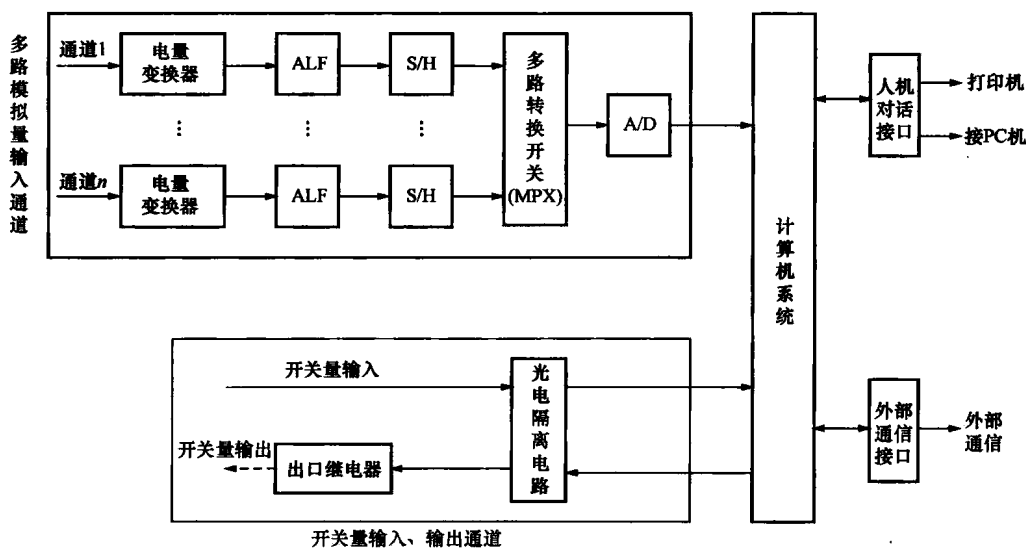


图 1-4 微机继电保护硬件部分原理框图

被保护元件的模拟量（交流电压、电流）经电流互感器 TA 和电压互感器 TV 进入到微机继电保护的模拟量输入通道。由于需要同时输入多路电压或电流（如三相电压和三相电流），因此要配置多路输入通道。在输入通道中，电量变换器将电流和电压变成适用于微机保护用的低电压量（ $\pm 5 \sim \pm 10V$ ），再由模拟低通滤波器 (ALF) 滤除直流分量、低频分量和高频分量及各种干扰波后，进入采样保持电路 (S/H)，将一个在时间上连续变化的模拟量转换为在时间上的离散量，完成对输入模拟量的采样。通过多路转换开关 (MPX) 将多

个输入电气量按输入时间前后分开,依次送到模数转换器(A/D)将模拟量转换为数字量进入计算机系统进行运算处理,判断是否发生故障,通过开关量输出通道输出,经光电隔离电路送到出口继电器发出跳闸脉冲给断路器跳闸线圈,使断路器跳闸,切除系统故障部分。

人机对话接口的作用是建立起微机型保护与使用者之间的信息联系,以便对装置进行人工操作、调试和得到反馈信息。外部通信接口的作用是提供计算机局域通信网络以及远程通信网络的信息通道。

软件部分是根据保护工作原理和动作要求编制计算程序,不同原理的保护其计算程序不同。微机保护的计算程序是根据保护工作原理的数学表达式来编制的,即计算机继电保护的算法。通过不同的算法可以实现各种保护功能。由于微机保护的動作由程序决定,易于实现某些复杂形状的动作特性;同时利用计算机的记忆功能,能够自适应系统的运行状态,保留事件记录,有利于故障后保护动作行为的分析;另外,由于采取数字运算方式处理电气量,避免了传统电气、机械元件引起的各种误差,提高了保护精度。计算机是一种可编程装置,通过更换 EPROM 芯片,可以很方便地修改程序、变换保护特性、改善保护功能,以适应运行情况变化的需要。同时,各类型保护的计算机硬件和外围设备是通用的,只要计算程序不同,就可以得到不同原理的保护,使得所需设备减少,经济性较好,且维护方便。计算机根据系统运行方式能自动改变动作的整定值,使保护具有更大的灵敏性。保护用计算机有诊断能力,不断地检查和诊断保护本身的故障,并及时处理,大大地提高了保护装置的可靠性,并能实现快速动作。计算机本身具有自检功能,可以对保护的主要部件连续不断地进行检测,能够及时发现并消除大多数随机故障,避免保护装置的误动和拒动;对于某些不能自动消除的故障也能及时报警。

微机继电保护技术的成熟与发展是近 30 年来继电保护领域最显著的进展。经过长期的研究和实践,现在人们已普遍认可了微机保护在电力系统中无可替代的优势。微机保护具有自检功能,有强大的逻辑处理能力、数值计算能力和记忆能力,并且具备很强的数字通信能力,这一切都是电磁继电器、晶体管继电器所难以匹敌的。计算机技术的进步,更高性能、更高精度的数字外围器件的采用,一直是微机继电保护不断发展的强大动力。关于微机继电保护的详细介绍参见本书第十章。

第三节 电力系统继电保护的基本要求

继电保护装置是保证电力系统安全运行的重要设备。满足电力系统安全运行的要求是继电保护发展的基本动力。选择性、速动性、灵敏性和可靠性是对继电保护的四项基本要求。这四项要求既有相辅相成、相互统一的一面,也有相互制约、相互矛盾的一面。对四项中的每一项要求都应当有度,不应片面强调某一项而忽视另一项。对四项的要求应以满足电力系统的安全运行为准则。继电保护装置在满足上述的基本要求外,还应该考虑经济性。

1. 选择性

继电保护动作的选择性是指保护装置动作时,仅将故障元件从电力系统中切除,使停电范围尽量缩小,以保证系统中的无故障部分仍能继续安全运行。故障时保护的動作失去选择性必然扩大停电范围,所以保护的选择性是必须满足的。

在图 1-5 所示的网络接线中,当 k1 点短路时,应由距短路点最近的保护 1 和 2 动作跳

闸，将故障线路切除，变电站 B 则仍可由另一条无故障的线路继续供电。而当 k_3 点短路时，保护 6 动作跳闸，切除线路 CD，此时只有变电站 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向用户供电。

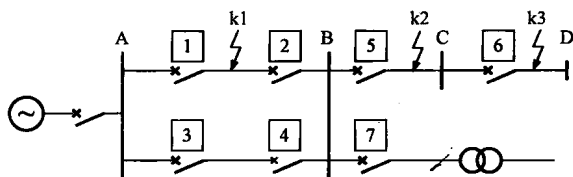


图 1-5 单侧电源网络中有选择性动作的说明

可见选择性动作的关键技术是区分。有了区分就有了选择性，也就可提高灵敏度和动作速度，但还要通过正确地整定才能最终达到目的。对保护的整定可以分为两类：一类的整定任务是区分内部与外部短路，为此必须计算短路电流。反应单侧电气量的保护必须与相邻线路的保护在灵敏度与动作时间两方面相配合，才能保证选择性。在故障时故障线路的保护必须比上一级相邻线路的保护更灵敏，动作更快，两者缺一不可。若要提高灵敏度就要延长动作时间；若要提高动作速度就要限制其灵敏度，这实际是在遵循反时限的原则。在复杂的电网中若仅采用反应单侧电气量的阶段式保护，可能出现难以配合的情况。为了不牺牲选择性和灵敏性，最好的对策是在无法配合的线路上采用有绝对选择性、能全线速动的纵联保护。

另一类的整定任务是区分正常运行与故障。这类保护灵敏度高，动作延时长。按避开负荷状态整定，不需作短路计算。需要注意的是，所谓负荷状态应是事故性的过负荷，并应保证继电器可靠返回（微机保护返回系数接近于 1，这一点影响不大），否则故障时保护启动，故障线路或设备跳闸后出现事故性过负荷时，若保护不返回就会失去选择性，甚至引起一连串的跳闸，酿成大面积停电。差动保护有绝对的选择性，但为了避开外部短路时的不平衡电流和保证内部短路时的灵敏度也需要整定。

2. 速动性

快速地切除故障可以提高电力系统的稳定性，减少用户在低电压情况下的工作时间，减小故障元件的损坏程度。因此，在发生故障时，力求保护装置能迅速动作切除故障。但对线路保护快速性的要求也并非越快越好，需要根据电力系统客观的实际需求和保护的安全性综合考虑。制造厂应当使其产品在安全基础上提高快速性，而运行部门则应根据系统的实际要求确定保护的動作延时，为此制造厂应提供動作延时可整定的产品。如我国对系统暂态稳定的计算规定，对 500kV 线路继电保护的動作时间近故障侧为 30ms，远故障侧为 50ms。

在一些情况下，电力系统允许保护装置在切除故障时带有一定的延时。因此，对继电保护速动性的具体要求，应根据电力系统的接线以及被保护设备的具体情况来确定。以下是一些必须快速切除的故障：

- (1) 根据维护系统稳定性的要求，必须快速切除高压输电线路上的故障；
- (2) 导致发电厂或重要用户的母线电压低于允许值（一般为额定电压的 70%）的故障；
- (3) 大容量的发电机、变压器及电动机内部所发生的故障；
- (4) 1~10kV 线路导线截面过小，为避免过热不允许延时切除的故障等。

故障切除的总时间等于保护装置和断路器動作时间之和。一般的快速保护的動作时间为 0.06~0.12s，最快的可达 0.01~0.04s；一般的断路器的動作时间为 0.06~0.15s，最快的可达 0.02~0.06s。

3. 灵敏性

继电保护的灵敏性,是指对于保护范围内发生故障或不正常运行状态的反应能力。满足灵敏性要求的保护装置应该是,在事先规定的保护范围内部发生故障时,不论短路点的位置在何处,短路的类型如何,以及短路是否有过渡电阻,都应灵敏感应,正常响应。保护装置的灵敏性,通常用灵敏系数来衡量,它主要取决于被保护设备和电力系统的参数以及运行方式。这个问题在以后各章节中还将分别予以讨论。

4. 可靠性

保护装置的可靠性是指在所规定的保护范围内,发生了它应该动作的故障时,它不应该拒绝动作;而在该保护不该动作的情况下,则不应误动作。因此可靠性包括可靠不拒动和可靠不误动两方面的内容。

一般来说,保护装置的元器件质量越高,接线越简单,保护装置的工作就越可靠。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。

要求保护装置既不误动,又不拒动,是两个相互对立的方面,任何提高灵敏度的措施都有造成误动的可能,而任何加闭锁防止误动的措施都有造成拒动的可能。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,当发生短路的系统中有充足的旋转备用容量、输电线路很多、各系统之间和电源与负荷之间联系紧密时,由于继电保护装置的误动作,使发电机、变压器或输电线路切除而给电力系统造成的影响可能很小。但如果发电机、变压器或输电线路故障时继电保护装置拒绝动作,将会造成设备的损坏或系统稳定的破坏,损失是很大的。在此情况下,提高保护不拒动的可靠性比提高不误动的可靠性更为重要。但在发生短路的系统中旋转备用容量很少及各系统之间和电源与负荷之间的联系比较薄弱的情况下,由于继电保护装置的误动作将发电机、变压器或输电线路切除时,将会引起对负荷供电的中断,甚至造成系统稳定的破坏,损失也是很大的。而当某一保护装置拒动时,其后备保护仍可以动作而切除故障。因此,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。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。

为了保证继电保护的可靠性,必须考虑继电保护或断路器拒绝动作的可能性,因此,除主保护(满足系统稳定性要求的时限内切除保护区内故障)外,还需要考虑后备保护和辅助保护的问题。如图 1-5 所示,当 k3 点短路时,距短路点最近的保护 6 本应动作切除故障,但如果由于某种原因,该处的继电保护或断路器拒绝动作,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 5 能动作,故障也可消除。能起保护 5 这种作用的保护称为相邻元件的后备保护。同理,保护 1 和 3 又应该作为保护 5 和 7 的后备保护。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。

在复杂的高压电网中,当实现远后备保护在技术上有困难时,也可以采用近后备保护的方式,即当本设备的主保护拒绝动作时,由本设备的另一套保护作为后备保护;当断路器拒绝动作时,由同一发电厂或变电站内的有关断路器动作,实现后备保护。为此,在每一元件上应装设单独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的,因此称它为近后备保护。可见,近后备保护是指除主保护外再装

设另一套保护作为主保护的后备,而远后备保护是指当主保护或断路器拒绝动作时,由靠近电源侧的相邻元件保护来实现后备保护作用的保护。在 35kV 以下的供配电系统中,广泛应用远后备保护,因为远后备保护在性能上比较完善。它对相邻元件的保护装置、断路器、二次回路和直流电源所引起的拒动,均能起到后备保护作用,同时,远后备保护的实现比较简单、经济,因此应优先采用。只有当远后备保护不能满足要求时,才考虑采用近后备保护的方式。

选择继电保护方式除应满足上述的要求外,还应该考虑经济条件。首先应从国民经济的整体利益出发,按被保护设备在电力系统中的作用和地位来确定保护方式,而不能只从保护装置本身的投资来考虑。这是因为保护不完善或不可靠给国民经济所造成的损失,一般都远远超过即使是最复杂的保护装置的投资。但要注意,对较为次要的数量很多的电气设备(如小容量电动机等),不应该装设过于复杂和昂贵的保护装置。

以上四项要求是分析研究继电保护性能的基础,也是贯穿本书的一个基本线索。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。继电保护的科学研究、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项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想和分析方法。

第四节 继电保护技术的发展

继电保护技术是随着电力系统的发展而发展的,它与电力系统对运行可靠性要求的不断提高密切相关。根据短路通常会伴随着电流显著增大的特征,首先出现了电流超过预定值即动作的过电流保护。熔断器就是最初出现的简单过电流保护,时至今日仍广泛应用于低压线路和用电设备。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的过电流继电器。

自 20 世纪初第一代机电型感应式过流继电器(1901 年)在电力系统应用以来,继电保护已经经历了一个多世纪的发展。在最初的 20 多年里,各种新的继电保护原理相继出现,如差动保护(1908 年)、电流方向保护(1910 年)、距离保护(1923 年)和高频保护(1927 年),这些保护原理都是通过测量故障发生后的稳态工频量来检测故障的。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路两端故障电气量的微波保护。尽管以后的研究工作不断发展和完善了电力系统的保护,但是这些保护的基本原理并没有变,都是通过测量故障后的稳态工频量来检测故障,如距离保护、电流方向保护和传统的差动保护等,至今仍然在电力系统继电保护领域中起主导作用。

随着电力系统规模的扩大,电网电压等级的提高,传统的保护方式已不能满足系统稳定性和电力设备安全性对快速切除故障的要求。在长期的研究过程中人们发现,在一般情况下,如果不考虑系统中饱和等因素的影响,电力系统可以作为一个线性系统来研究。对于突发性故障,根据叠加原理,故障后的系统可以认为是由故障前状态和故障分量叠加而成,而系统电量的故障分量中含有大量的故障信息,可以用来快速检测故障,因此,基于故障分量的继电保护原理得到广泛关注并在我国得到应用。故障分量保护一般包括行波保护和工频变

化量保护两种。早在 20 世纪 50 年代就出现了利用故障点产生的行波来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。利用工频变化量实现保护判据具有许多突出的优点。例如故障后工频变化量电流、电压不受系统电动势及负荷和过渡电阻的影响; 工频变化量继电器检测的是故障分量中的工频量, 因而对电量变换器、采样频率等没有特殊要求; 保护整定计算简便, 易于运行人员掌握。故而, 利用工频变化量实现的保护取得了良好的运行效果。现在, 由反应工频变化量的继电器构成的许多保护在电力系统中已经成功运行了多年, 如方向保护、距离保护、向量差动保护以及故障测距装置等; 在主设备的主保护中, 工频变化量保护也有许多应用, 如故障分量的差动保护、故障分量负序方向保护等。目前, 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正得到迅速地发展和广泛地应用。

纵观继电保护近 100 年的技术发展史可以看出, 虽然继电保护的基本原理早已提出, 但它总是根据电力系统发展的需要, 不断地从相关的科学技术取得的最新成果中发展和完善自身。从 20 世纪初至今, 继电保护装置使用的元器件、材料、制造工艺以及结构型式发生了巨大的变化, 促使继电保护装置在经历机电型、整流型、晶体管型和集成电路型几个阶段后, 发展到了微机继电保护阶段, 使得继电保护装置的实现技术不断进步, 性能不断提高, 功能不断完善。

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。它们都具有机械转动部件, 统称为机电型继电器。由这些继电器组成的保护装置称为机电型继电保护装置。机电型继电保护装置体积大, 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, 由于半导体技术的发展, 先后出现了采用整流器件制作的整流型继电保护装置和采用晶体管制作的晶体管型继电保护装置。这类保护装置体积小, 功率消耗小, 动作速度快, 无机械转动部分, 通称为电子型静态保护装置。20 世纪 70 年代是晶体管型继电保护装置在我国大量应用的时期, 基本满足了当时电力系统向超高压、大容量方向发展的需要。紧接着, 由于集成电路技术的发展, 出现了体积更小、功耗更低、工作更可靠的集成电路元器件 (如运算放大器), 这促使静态继电保护装置向集成电路化的方向发展。20 世纪 80 年代后期, 集成电路型继电保护装置逐步取代了晶体管型继电保护装置, 成为电子型静态继电保护装置的主要型式。

20 世纪 90 年代, 电力系统继电保护技术发展到了微机保护时代, 它是继电保护技术发展历史过程中的第四代。微机继电保护指的是以数字式计算机 (包括微型机) 为基础而构成的继电保护。它起源于 20 世纪 60 年代中后期, 是在英国、澳大利亚和美国一些学者的倡导下开始进行研究的。20 世纪 60 年代中期, 有人提出用小型计算机实现继电保护的设想, 但是由于当时计算机的价格昂贵, 同时也无法满足高速继电保护的技术要求, 因此没有在保护方面取得实际应用, 但由此开始了对计算机继电保护理论、计算方法和程序结构的大量研究, 为后来的继电保护发展奠定了理论基础。计算机技术在 20 世纪 70 年代初期和中期出现了重大突破, 大规模集成电路技术的飞速发展, 使得微型处理器和微型计算机进入了实用阶段。价格的大幅度下降, 可靠性、运算速度的大幅度提高, 促使计算机继电保护的研究出现了高潮。在 20 世纪 70 年代后期, 出现了比较完善的微机保护样机, 并投入到电力系统中试运行。20 世纪 80 年代, 微机保护在硬件结构和软件技术方面日趋成熟, 并已在一些国家推