

电气化铁道系列规划教材



继电保护基础

JIDIAN BAOHU JICHU

柯志敏 索娜 主编



北京交通大学出版社
<http://press.bjtu.edu.cn>

电气化铁道系列规划教材

继电保护基础

柯志敏 索 娜 主 编

北京交通大学出版社

• 北京 •

内 容 简 介

本教材分为上、下两篇，上篇为电网继电保护基础，主要介绍电力系统继电保护基础知识、输电线路的电流和电压保护、电网的距离保护和微机继电保护等基础理论；下篇为牵引供电系统继电保护，主要介绍电气化铁道牵引供电系统的牵引网保护、牵引变压器保护、并联电容器补偿装置的保护、自动装置及城市轨道交通直流牵引供电系统继电保护等理论内容及应用实例。

本教材可作为高等院校电气化铁道专业、城市轨道交通专业等的教学用书，也可作为电气化铁道和城市轨道交通行业从事继电保护运行、维护人员的参考用书。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

继电保护基础/柯志敏，索娜主编. —北京：北京交通大学出版社，2009.10
(电气化铁道系列规划教材)

ISBN 978-7-81123-771-9

I. 继… II. ①柯… ②索… III. 继电保护-高等学校-教材 IV. TM77

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 163858 号

责任编辑：张利军

出版发行：北京交通大学出版社

电话：010-51686414

北京海淀区高粱桥斜街 44 号

邮编：100044

印刷者：北京瑞达方舟印务有限公司

经 销：全国新华书店

开 本：185×260 印张：17.75 字数：460 千字

版 次：2010 年 2 月第 1 版 2010 年 2 月第 1 次印刷

书 号：ISBN 978-7-81123-771-9/TM·23

印 数：1~3 000 册 定价：28.00 元

本书如有质量问题，请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评，我们表示欢迎和感谢。
投诉电话：010-51686043，51686008；传真：010-62225406；E-mail：press@bjtu.edu.cn。

前 言

继电保护装置是电气化铁道、城市轨道交通供电系统装备中的重要组成部分。为适应高等院校及职业技术教育教学发展的需求,根据现阶段牵引供电系统继电保护应用的技术装备的实际情况,特编写了本教材。

本教材结合我国电气化铁道继电保护装置的实际技术发展情况,较全面地介绍了以下9个方面的知识:(1)继电保护的作用、原理、要求及电磁型继电器等基础知识;(2)输电线路相间短路的电流保护与电压保护、接地短路的电流保护、双侧电源的方向性电流保护等保护装置建立的相关原理、整定计算、接线等理论知识;(3)输电线路距离保护的原理、阻抗元件、整定计算及如何提高距离保护工作可靠性等理论知识;(4)微机保护装置的基本原理、构成、保护算法、抗干扰等理论知识;(5)牵引网馈线的保护方式、牵引网的距离保护、利用牵引负荷特点构建的牵引网保护及牵引网微机保护装置等知识;(6)牵引变压器的保护方式、纵联差动保护、非电气量保护、变压器后备保护及变压器微机保护装置等知识;(7)牵引供电系统并联电容器补偿装置的保护方式、电容器电流类保护、电容器电压类保护及微机保护装置等知识;(8)自动重合闸装置、牵引网故障测距及备用电源自投入装置的作用、要求及构成原理等理论知识;(9)城市轨道交通直流牵引供电系统相关的各种重要电气设备的继电保护基础理论。

本教材可作为高等院校电气化铁道专业、城市轨道交通专业等的教学用书,也可作为电气化铁道和城市轨道交通行业从事继电保护运行、维护的人员的参考用书。

本教材由柯志敏、索娜主编,具体编写分工是:第1、7章由郭丽娜编写,第2章的2.1节由王海编写,第2章的第2.2、2.3、2.4节和第6章由索娜编写,第3、5章由柯志敏编写,第4、9章由李学武编写,第8章由吴风雷编写。本教材在编写过程中得到了电气化铁道运行供电部门、继电保护产品研发部门技术人员的大力支持,在此一并表示衷心的感谢。

编 者
2010年2月

本书主要符号说明

表一 电气设备元件文字符号

符 号	名 称	符 号	名 称
ARD	自动重合闸装置	G	发电机
APD	备用电源自投装置	T	变压器
PD	保护装置	QF	断路器
VT	晶体三极管	Y	断路器跳闸线圈
U	半导体整流桥	M	电动机
C	电容器	UV	电压变换器
$k, k_1, k_2, \dots$	故障点	TX	电抗变换器
VD	二极管	UA	电流变换器
VS	稳压管	TA	电流互感器
K	继电器	TV	电压互感器

表二 电压类符号

符 号	说 明	符 号	说 明
E_A, E_B, E_C	系统等效电源或发电机的三相电势	U_{A1}, U_{B1}, U_{C1}	保护安装处的正序电压
U_A, U_B, U_C	系统中任一母线或保护安装处的三相电压	U_{A2}, U_{B2}, U_{C2}	保护安装处的负序电压
U_{kA}, U_{kB}, U_{kC}	故障点的三相电压	U_{A0}, U_{B0}, U_{C0}	保护安装处的零序电压
U_{k1}, U_{k2}, U_{k0}	故障点的正、负、零序电压	U_N	额定电压
U_{ub}	不平衡电压		

表三 电流类符号

符 号	说 明	符 号	说 明
I_A, I_B, I_C	三相电流	$I_{L,max}$	最大负荷电流
I_1, I_2, I_0	正、负、零序电流	I_k	短路电流
I_{kA}, I_{kB}, I_{kC}	故障点的三相短路电流	$I_{k,max}$	最大短路电流
I_{A1}, I_{B1}, I_{C1}	三相中的正序电流	$I_{k,min}$	最小短路电流
I_{A2}, I_{B2}, I_{C2}	三相中的负序电流	I_N	额定电流
I_{A0}, I_{B0}, I_{C0}	三相中的零序电流	$I_{N,T}$	变压器的额定电流
I_{k1}, I_{k2}, I_{k0}	故障点的正、负、零序电流	I_{ub}	不平衡电流
I_L	负荷电流	I_E	励磁电流

表四 阻抗类符号

符 号	说 明	符 号	说 明	符 号	说 明
X	电抗	Z_L	导线-地阻抗	Z_G	发电机阻抗
$Z=R+jX$	阻抗	Z_Σ	总阻抗	R_g	接地电阻
Z_1	线路阻抗	$Z_{1\Sigma}, Z_{2\Sigma}, Z_{0\Sigma}$	正、负、零序综合阻抗	R	电阻
Z_M	互感阻抗	$Z_{G,\min}$	最小负荷阻抗	R_{tr}	过渡电阻
Z_S	系统阻抗	Z_T	变压器阻抗		

表五 保护装置及继电器的有关参数

符 号	说 明	符 号	说 明
I_{act}	保护装置的启动电流	$U_{K, re}$	继电器的返回电压
I_{re}	保护装置的返回电流	U_{set}	继电器的整定电压
U_{act}	保护装置的启动电压	$Z_{K, act}$	继电器的启动阻抗
U_{re}	保护装置的返回电压	$Z_{K, re}$	继电器的返回阻抗
Z_{act}	保护装置的启动阻抗	Z_{set}	继电器的整定阻抗
Z_{re}	保护装置的返回阻抗	I_K	加入继电器的电流
$I_{K, act}$	继电器的启动电流	U_K	加入继电器的电压
$I_{K, re}$	继电器的返回电流	Z_K	继电器的测量阻抗
I_{set}	继电器的整定电流	t	保护装置的动作时限
$U_{K, act}$	继电器的启动电压	t_{set}	保护装置的整定时限

表六 常用系数

符 号	说 明	符 号	说 明	符 号	说 明
K_{rel}	可靠系数	K_{bra}	分支系数	K_{met}	配合系数
K_{sen}	灵敏系数	K_k	故障类型系数	K_{Ms}	电动机自启动系数
K_{re}	返回系数	K_{aper}	非周期分量影响系数	K_1, K_2, K_3	比例常数
K_c	接线系数	K_{ss}	同型系数		

目 录

上篇 电网继电保护基础

1 继电保护基础知识	3
1.1 继电保护概述	3
1.1.1 继电保护的定义与作用	3
1.1.2 继电保护的基本原理与组成	4
1.1.3 继电保护的发展简史	5
1.2 继电保护装置的分类及基本要求	6
1.2.1 继电保护装置的分类	6
1.2.2 继电保护装置的基本要求	6
1.3 电磁型继电器	9
1.3.1 继电器的定义及分类	9
1.3.2 电磁型继电器的结构及原理	10
1.3.3' 动作电流、返回电流与返回系数	12
1.4 常用的电磁型继电器	13
1.4.1 DL-30 系列电流继电器	13
1.4.2 DY-30 系列电压继电器	15
1.4.3 DS-30 系列时间继电器	17
1.4.4 DZB-10B 系列中间继电器	20
1.4.5 DX-30 系列信号继电器	21
2 输电线路的电流和电压保护	24
2.1 单侧电源电网相间短路的电流保护	24
2.1.1 瞬时电流速断保护	24
2.1.2 限时电流速断保护	26
2.1.3 定时限过电流保护	29
2.1.4 电流保护的接线方式	32
2.1.5 阶段式电流保护	34
2.2 双侧电源电网相间短路的方向性电流保护	36
2.2.1 方向性电流保护概述	36

2.2.2	功率方向继电器	39
2.2.3	LG-10 型系列整流型功率方向继电器	42
2.2.4	功率方向继电器的接线方式	49
2.2.5	对方向性电流保护的评价	51
2.3	中性点直接接地电网中接地短路的零序电流保护	51
2.3.1	接地短路零序分量的特点	52
2.3.2	零序分量过滤器	53
2.3.3	零序电流保护	56
2.4	电网的电压保护	59
2.4.1	电压速断保护	60
2.4.2	电流闭锁的电压速断保护	61
2.4.3	低电压启动过电流保护	62
3	电网的距离保护	64
3.1	距离保护概述	64
3.1.1	距离保护的定义	64
3.1.2	阻抗的测量	65
3.1.3	距离保护的时限特性	66
3.1.4	距离保护的优点	66
3.1.5	距离保护的组成	67
3.2	阻抗继电器	67
3.2.1	阻抗继电器的分类	67
3.2.2	整流型方向阻抗继电器	68
3.3	距离保护的接线与整定计算	71
3.3.1	距离保护的接线方式	71
3.3.2	距离保护的整定计算	73
3.4	影响距离保护正确工作的因素及防止措施	75
3.4.1	线路分支对距离保护的影响	75
3.4.2	短路点过渡电阻对距离保护的影响	77
3.4.3	电压互感器回路断线对距离保护的影响	79
3.4.4	电力系统振荡对距离保护的影响	81
4	微机继电保护	88
4.1	微机继电保护概述	88
4.1.1	计算机在继电保护领域中的应用和发展概况	88
4.1.2	微机继电保护与传统继电保护的对比分析	88
4.1.3	微机继电保护装置的特点	89
4.2	微机保护的硬件构成原理	90
4.2.1	微机保护的硬件组成	90

4.2.2	数据采集系统	91
4.2.3	CPU 主系统	98
4.2.4	开关量输入输出电路	98
4.3	微机保护的特征量算法	100
4.3.1	数字滤波	100
4.3.2	正弦函数算法	101
4.3.3	傅里叶算法	104
4.3.4	解微分方程算法	107
4.4	微机保护装置的软件构成	108
4.4.1	接口软件	109
4.4.2	保护软件	109
4.4.3	中断服务程序	109
4.4.4	程序流程的基本结构	109
4.4.5	电流保护流程举例	111
4.5	提高微机保护可靠性的措施	114
4.5.1	干扰和干扰源	115
4.5.2	微机保护装置的硬件抗干扰措施	118
4.5.3	微机保护装置的软件抗干扰措施	121
4.6	微机保护技术的发展趋势	124
4.6.1	高速数据处理芯片的应用	124
4.6.2	微机保护的网络化	124
4.6.3	保护、控制、测量、信号、数据通信一体化	125
4.6.4	继电保护的智能化	125

下篇 牵引供电系统继电保护

5	牵引网保护	131
5.1	交流牵引网及牵引负荷的特点	131
5.1.1	交流牵引网的特点	131
5.1.2	交流牵引负荷的特点	132
5.2	牵引网的距离保护	134
5.2.1	阻抗元件动作特性的选择	134
5.2.2	四边形特性的构成原理	134
5.2.3	四边形特性方向阻抗继电器的优缺点	138
5.2.4	四边形特性方向阻抗继电器的整定	140
5.2.5	自适应距离保护	141
5.3	利用牵引负荷特点构建的牵引网保护	142
5.3.1	牵引负荷中谐波分量的利用	142
5.3.2	利用牵引网中的电流增量构建的保护	143
5.3.3	利用牵引网中电流的持续时间构建的保护	145

5.4	牵引网馈线保护的建立	146
5.4.1	牵引网馈线保护的种类及作用	146
5.4.2	直供方式下牵引网的保护方式	148
5.4.3	AT 供电方式下牵引网阻抗的特性	153
5.5	牵引网馈线微机保护装置	156
5.5.1	WKH-892 的硬件结构及作用	157
5.5.2	WKH-892 的功能与特点	159
5.5.3	WKH-892 的主要技术指标	161
5.5.4	WKH-892 的保护原理	163
6	牵引变压器保护	167
6.1	牵引变压器的保护方式	167
6.1.1	牵引变压器的类型及接线	167
6.1.2	牵引变压器的运行工作状态	169
6.1.3	牵引变压器的保护	170
6.2	牵引变压器的纵联差动保护	171
6.2.1	纵联差动保护概述	171
6.2.2	纵联差动保护的接线方式	173
6.2.3	不平衡电流产生的原因及消除	175
6.2.4	比率制动的纵联差动保护	179
6.2.5	差动速断保护	182
6.2.6	变压器纵联差动保护励磁涌流的识别方法	183
6.3	牵引变压器的非电气量保护	184
6.3.1	非电气量保护的形式	184
6.3.2	非电气量保护的实现	186
6.4	牵引变压器的后备保护	186
6.4.1	变压器相间短路的后备保护及过负荷保护	186
6.4.2	变压器接地短路的后备保护	189
6.5	牵引变压器的微机保护装置	191
6.5.1	装置的硬件结构与作用	191
6.5.2	装置的功能与特点	192
6.5.3	装置的技术指标	193
6.5.4	装置的保护配置与原理	194
7	并联电容器补偿装置的保护	202
7.1	并补装置的故障及其保护的装设原则	202
7.1.1	并补装置的故障	202
7.1.2	并补装置保护的装设原则	202
7.2	并补装置的电流保护	204

7.2.1	电流速断保护	204
7.2.2	过电流保护	204
7.2.3	谐波过电流保护	205
7.2.4	差电流保护	205
7.3	并补装置的电压保护与桥式差电流保护	206
7.3.1	电压保护	206
7.3.2	桥式差电流保护	209
7.4	串联电容补偿装置的保护	211
7.4.1	防御牵引网短路电流引起过电压的保护	211
7.4.2	电容器组内部故障的保护	213
7.5	牵引供电系统并补装置的微机保护装置	214
7.5.1	WBB-892 的功能	214
7.5.2	WBB-892 的技术参数	214
7.5.3	WBB-892 的保护应用	215
7.5.4	WBB-892 的应用接线	218
8	自动装置	220
8.1	自动重合闸装置	220
8.1.1	自动重合闸概述	220
8.1.2	自动重合闸的基本要求及类型	221
8.1.3	单侧电源线路的三相一次自动重合闸	223
8.1.4	双侧电源线路的三相一次自动重合闸	224
8.1.5	重合闸动作时限的选择原则	226
8.1.6	自动重合闸装置与继电保护的配合	227
8.2	牵引网故障测距装置	229
8.2.1	故障测距的意义	229
8.2.2	电气化铁道牵引网测距的方法	229
8.2.3	电气化铁道微机故障测距装置	231
8.3	备用电源自动投入装置	234
8.3.1	备用电源自动投入装置的要求	234
8.3.2	备用电源自动投入的基本原理	235
8.3.3	微机型 APD 装置	237
9	城市轨道交通直流牵引供电系统继电保护	247
9.1	城市轨道交通直流牵引供电系统继电保护装置的配置情况	247
9.1.1	进出线电缆	247
9.1.2	整流机组	247
9.1.3	直流牵引网	248
9.2	整流机组继电保护	248

9.3 直流牵引供电系统继电保护	250
9.3.1 大电流脱扣保护	250
9.3.2 电流上升率及电流增量保护 (DDL 保护)	251
9.3.3 定时限过流保护	254
9.3.4 电压类保护	256
9.3.5 接触网热保护	257
9.4 框架类保护	258
9.4.1 轨道过电压保护	258
9.4.2 正极接地保护 (框架泄露保护)	260
9.5 直流馈线的控制功能及自动装置	261
9.5.1 分合闸操作	261
9.5.2 联跳	261
9.5.3 线路测试系统	263
9.5.4 自动重合闸	264
 附录 A 常用继电器线圈、接点及逻辑电路的名称和图形	 267
 附录 B 短路保护的最小灵敏系数	 269
 参考文献	 271

上篇

电网继电保护基础

1 继电保护基础知识

本章内容是学习继电保护的基础理论，分别介绍继电保护的定义、作用、基本原理、组成、分类和要求；继电器的定义与分类，电磁型继电器的结构组成、结构类型与工作原理；常用电磁型电流、电压、时间、中间、信号继电器的用途、结构与原理、技术参数及使用维护等基础理论知识。

1.1 继电保护概述

1.1.1 继电保护的定义与作用

电力系统在运行中，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发生各种形式的短路，如相间短路、接地短路等。

在电气设备发生短路故障时，可能产生以下的后果。

- (1) 流经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) 短路电流流经非故障电气元件时，由于发热和电动力的作用，引起它们的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。

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运行状态。例如，因负荷超过电气设备的额定值而引起的电流升高（一般又称过负荷），就是一种最常见的不正常运行状态。由于过负荷，使元件载流部分和绝缘材料的温度不断升高，加速绝缘的老化和损坏，就可能发展成故障。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。

故障和不正常运行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变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（如遭受雷击等）以外，一般都是由于设备制造上的缺陷、设计和安装的错误、检修质量不高或运行维护不当而引起的。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。

1. 继电保护的定义

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。

切除故障的时间常常要求小到十分之几甚至百分之几秒，实践证明只有在每个电气元件上装设继电保护装置才有可能满足这个要求。

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。

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。

在电子式静态保护装置和微机保护装置出现以后，虽然传统的继电器元件已被电子元件或计算机所代替，但仍沿用此名称。

2. 继电保护的作用

在电力系统中，继电保护装置的基本任务（作用）如下。

(1) 当电力系统中的电气设备发生短路故障时，能自动、迅速、有选择性地将被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，保证其他无故障部分迅速恢复正常运行。

(2) 当电力系统中的电气设备出现不正常运行状态时，并根据运行维护的条件（例如有无经常值班人员），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，而是根据当时电力系统和元件的危害程度规定一定的延时，以免误动作。

1.1.2 继电保护的基本原理与组成

1. 继电保护的基本原理

现以最简单的过电流保护装置为例来说明继电保护的组成和基本工作原理。

在图 1-1 所示的输电线路过电流保护装置的原理接线图中，电流继电器 KA 的线圈接于被保护线路电流互感器 TA 的二次回路，这就是保护的测量回路，它监视被保护线路的运行状态，测量线路中电流的大小。在正常运行情况下，线路中通过负荷电流时，电流继电器 KA 不动作；当被保护线路发生短路故障，流入电流继电器 KA 线圈回路的电流大于继电器的动作电流时，电流继电器立即动作，其接点闭合，接通逻辑回路中时间继电器 KT 的线圈回路，时间继电器启动并经延时后接点闭合，接通执行回路中的信号继电器 KS 和断路器 QF 跳闸线圈 Y 回路，使断路器 QF 跳闸，切除故障。

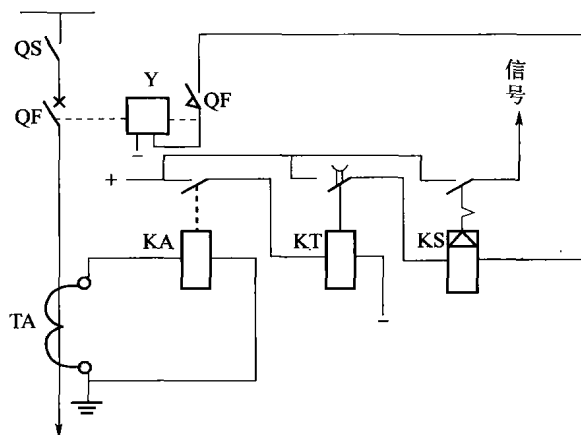


图 1-1 线路过电流保护装置单相原理接线图

可见,这种继电保护装置的核心是电流继电器,它通过电流互感器受电,经常测量着线路电流值的变化,并与整定值进行比较,一旦超过整定值就动作,向断路器跳闸机构送出跳闸命令,同时发出继电保护动作信号。

2. 继电保护的组成

继电保护装置虽然多种多样,但其组成可概括地表示为图 1-2,主要都包括三个部分:测量部分、逻辑部分和执行部分。

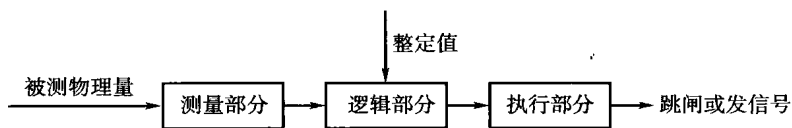


图 1-2 继电保护装置的组成

3. 继电保护各组成部分的作用

继电保护装置中各组成部分的作用如下。

(1) 测量部分。将电流互感器、电压互感器二次侧的电流、电压或其他被测物理量进行适当变换,提供逻辑部分所需要的输入量。

(2) 逻辑部分。例如,利用电流继电器、阻抗继电器等元件完成被测物理量与整定值的比较,当被测量符合整定值条件时,逻辑部分输出保护动作指令。

(3) 执行部分。完成对逻辑部分所输出的保护动作指令的执行,实现一定控制要求的直流电路,经过它去接通所需要的跳闸电路和信号电路。

1.1.3 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。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)的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。随着光纤通信在电力系统的大量采用,利用光纤通道的继电保护必将广泛得以应用。

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 年代前,继电保护原理主要以机电式保护装置为主。20 世纪 50 年代后,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,晶体管式保护装置的抗干扰问题从理论和实际都得到了满意的解决。20 世纪 70 年代,晶体管保护在我国被大量采用。20 世纪 80 年代后期,静态