



高等院校电气工程及其自动化专业系列教材

Electrical Engineering

电力系统 继电保护

刘学军 编著



附赠电子教案

[http:// www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

21 世纪高等院校电气工程及其自动化专业系列教材

电力系统继电保护

刘学军 编著

机械工业出版社

本书着重阐述继电保护的基本原理与运行特性分析的基本方法,并介绍了继电保护新技术和新发展,对微机继电保护作了较深入的介绍和分析。

本书共分10章。包括第1章绪论,第2章电网的电流、电压保护,第3章电网的距离保护,第4章输电线路的差动保护和高频保护,第5章自动重合闸,第6章电力变压器的保护,第7章发电机的保护,第8章母线保护,第9章电动机和电力电容器的保护,第10章微机继电保护基础。

本书可作为“电力系统及其自动化”、“电气工程及其自动化”专业的本科教材,还可供从事继电保护工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统继电保护/刘学军编著. —北京:机械工业出版社, 2011. 8

21 世纪高等院校电气工程及其自动化专业系列教材
ISBN 978 - 7 - 111 - 34370 - 7

I. ①电… II. ①刘… 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 103058 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: 郝建伟 责任编辑: 郝建伟 王 荣

版式设计: 霍永明 责任校对: 申春香

责任印制: 乔 宇

三河市国英印务有限公司印刷

2011 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 24.5 印张 · 619 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 34370 - 7

定价: 45.00 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

社服务中心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销 售 一 部: (010) 68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销 售 二 部: (010) 88379649

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

当前,电力系统发展迅速,对继电保护技术提出越来越高的要求。电子技术、计算机技术和通信技术的飞速发展和应用,使继电保护技术发生了革命性的变化。为了适应继电保护技术发展的需要,保持继电保护学科的完整性和先进性,读者急需理论性强、内容先进,且又接近工程实际的实用教材。为满足该专业本科教学需要,编者在总结多年的教学经验和教科研成果的基础上编写了本书。

本书是21世纪高等院校电气工程及其自动化专业系列教材。本书的编写遵循继电保护技术发展的历史,较全面地讲述了电力系统继电保护技术,着重阐述继电保护的基本原理与运行特性分析的基本方法,对各种继电保护装置做了系统分析,对微机保护原理、特点、软硬件构成和实际应用也进行较深入的介绍和分析,并介绍了继电保护的新技术、新发展。

本书共分10章,包括绪论、电网的电流、电压保护、电网的距离保护、输电线路的差动保护和高频保护、自动重合闸、电力变压器的保护、发电机的保护、母线保护、电动机和电力电容器的保护和微机继电保护基础等内容。

本书内容叙述系统性、逻辑性强,接近工程实际,分析深入浅出,重点突出,说理清楚,列举了丰富的例题和提供大量的习题,具备易于讲授、便于自学理解和掌握的特点。

鉴于当前各高校在教学改革实践中,对继电保护课程的内容深度要求不同,授课学时不同,各高校可以根据实际的教学课时数,适当减少内容使用。

本书由北华大学电气信息工程学院刘学军教授编写。在本书编写过程中,参考、引用了国内外许多专家、学者的著作文献,马凤君女士参与了本书的插图绘制和文字录入工作,刘畅、杜洋和吕欣参与了本书部分章节的编写工作,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平和实践经验有限,书中难免存在错误和不足,敬请读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 绪论 1

1.1 继电保护的作用 1

1.1.1 电力系统的故障和不正常运行 状态及引起的后果 1

1.1.2 继电保护的任务 2

1.2 对继电保护的基本要求 2

1.3 继电保护的工作原理、分类及构成 5

1.3.1 继电保护的工作原理 5

1.3.2 继电保护装置的构成及分类 6

1.4 继电保护的发展简史 8

思考题与习题 10

第2章 电网的电流、电压保护 11

2.1 单侧电源网络的相间短路电流、 电压保护 11

2.1.1 电流保护用的互感器和变换器 11

2.1.2 电流保护用的继电器 22

2.1.3 无时限电流速断保护 31

2.1.4 带时限的电流速断保护 37

2.1.5 定时限过电流保护 39

2.1.6 三段式电流保护装置 41

2.1.7 反时限过电流保护 45

2.1.8 电流、电压保护的评价和应用 48

2.2 电网相间短路的方向性电流保护 49

2.2.1 方向性电流保护的基本原理 49

2.2.2 相间短路保护中功率方向继电器的 接线方式 54

2.2.3 非故障相电流的影响和按相 启动 56

2.2.4 方向过电流保护的整定计算 57

2.2.5 对电网相间短路方向性电流保护的 评价 60

2.3 电网的接地保护 62

2.3.1 中性点直接接地电网的零序电流 保护及零序方向电流保护 62

2.3.2 中性点非直接接地电网的接地 保护 72

2.3.3 中性点经消弧线圈接地的单相接地

保护 79

2.3.4 对电网接地保护的评价和应用 82

思考题与习题 83

第3章 电网的距离保护 88

3.1 距离保护的作用及基本原理 88

3.1.1 距离保护的基本原理 88

3.1.2 距离保护的时限特性 88

3.1.3 三段式距离保护的原理框图 89

3.2 单相式阻抗继电器的动作特性及构成 原理 90

3.2.1 阻抗继电器的分类 91

3.2.2 阻抗继电器的构成 92

3.2.3 利用复平面分析阻抗继电器的动作 特性 93

3.2.4 阻抗继电器的幅值比较回路和相位 比较回路 104

3.2.5 方向阻抗继电器的插入电压和极化 电压 107

3.2.6 阻抗继电器的精确工作电流 111

3.3 阻抗继电器的接线方式 112

3.3.1 对接线方式的基本要求 112

3.3.2 反映相间短路故障的阻抗继电器的 接线方式 112

3.3.3 反映接地故障的阻抗继电器的 接线方式 116

3.4 影响距离保护正确动作的因素 118

3.4.1 短路点过渡电阻对距离保护的 影响 118

3.4.2 电力系统振荡对距离保护的 影响 121

3.4.3 分支电流的影响 131

3.4.4 距离保护电压回路断线对距离 保护的影响 132

3.5 距离保护的整定计算 134

3.5.1 距离保护各段的整定计算 134

3.5.2 振荡闭锁元件的整定 137

3.5.3 阻抗继电器动作阻抗 $Z_{op,r}$ 的计算及 整定方法 138

3.5.4 阻抗继电器的精确工作电流的 校验	138
3.5.5 距离保护整定计算举例	138
3.6 多相补偿式阻抗继电器	143
3.6.1 相间短路多相补偿阻抗继电器 ...	143
3.6.2 接地短路多相补偿阻抗继电器 ...	145
3.7 自适应距离保护的基本原理	148
3.8 对距离保护的评价及应用范围	149
思考题与习题	149
第4章 输电线路的差动保护和高频 保护	152
4.1 输电线的导引线纵联差动保护	152
4.1.1 纵联差动保护原理	152
4.1.2 不平衡电流	153
4.1.3 环流法接线纵联差动保护的整定 计算	155
4.1.4 影响输电导线引线纵联差动保护 正确动作的因素	155
4.2 平行线路的横联方向差动保护	156
4.2.1 横联方向差动保护的工作原理 ...	156
4.2.2 横联差动保护的相继动作区和 死区	158
4.2.3 横联差动保护的整定计算	159
4.2.4 横联差动保护装置接线图	161
4.2.5 横联差动保护的优、缺点及应用 范围	162
4.3 平行线路的电流平衡保护	162
4.3.1 电流平衡保护的工作原理	162
4.3.2 电流平衡继电器	163
4.3.3 对电流平衡保护的评价	164
4.4 电网的高频保护	164
4.4.1 高频保护的原理及分类	164
4.4.2 高频通道	165
4.4.3 高频通道的损耗和裕度	167
4.5 高频闭锁方向保护	169
4.5.1 高频闭锁方向保护的工作原理 ...	169
4.5.2 高频闭锁方向保护的启动方式 ...	170
4.5.3 负序功率高频闭锁方向保护	173
4.6 高频闭锁距离保护和零序保护	174
4.7 电流相差高频保护	177
4.7.1 相差高频保护的基本工作原理 ...	177
4.7.2 相差高频保护的构成	179
4.7.3 启动元件	180

4.7.4 比相元件	180
4.7.5 分析比相元件的工作情况	182
4.7.6 相差保护的相位特性和相继 动作区	183
4.7.7 相差高频保护原理框图举例	186
4.8 对相差高频保护的评价	188
4.9 微波保护	189
思考题与习题	190
第5章 自动重合闸	192
5.1 自动重合闸的作用及基本要求	192
5.1.1 自动重合闸的作用	192
5.1.2 对自动重合闸的基本要求	193
5.1.3 自动重合闸的分类和配置原则 ...	193
5.2 单侧电源线路三相一次自动重合闸 ...	195
5.2.1 电磁型三相一次自动重合闸装置的 工作原理	195
5.2.2 自动重合闸装置与继电保护的 配合	198
5.2.3 三相一次自动重合闸的工作原理 框图	200
5.2.4 单端电源线路自动重合闸的整定 计算	200
5.3 双侧电源线路三相一次自动重合闸 ...	201
5.3.1 双侧电源线路自动重合闸的 特点	201
5.3.2 双侧电源输电线路重合闸的主要 方式	202
5.3.3 具有同步检定和无电压检定的 重合闸	203
5.4 单相自动重合闸与综合自动重合闸 ...	205
5.4.1 单相自动重合闸	206
5.4.2 综合自动重合闸	209
5.5 输电线路的自适应单相重合闸	211
5.5.1 单相重合闸期间断开相的工频电压 分布	211
5.5.2 暂时性与永久性故障的区分	212
思考题与习题	212
第6章 电力变压器的保护	214
6.1 电力变压器的故障类型、不正常工作 状态及其相应保护方式	214
6.2 变压器的气体保护	216
6.3 变压器的电流速断保护	218
6.3.1 变压器电流速断保护的工作原理	

及接线	218	匝间短路保护	258
6.3.2 变压器电流速断保护的整定		7.3.3 定子绕组零序电压原理的匝间短路	
计算	219	保护	258
6.4 变压器的纵联差动保护	219	7.4 发电机定子单相接地保护	259
6.4.1 变压器纵联差动保护的基本		7.4.1 反应基波零序电压的接地保护	260
原理	219	7.4.2 利用零序电流及零序电压构成的	
6.4.2 不平衡电流产生的原因及减小		定子绕组单相接地保护	262
措施	220	7.4.3 利用三次谐波电压构成 100% 定子	
6.4.3 变压器励磁涌流及其抑制措施	224	绕组单相接地保护	264
6.4.4 BCH—2 型差动继电器构成的		7.5 发电机励磁回路接地保护	266
纵联差动保护	225	7.5.1 励磁回路一点接地保护	266
6.4.5 采用带磁制动特性的差动继电器		7.5.2 励磁回路两点接地保护	270
构成的差动保护	231	7.6 发电机的失磁保护	272
6.5 变压器相间短路的后备保护及过负荷		7.6.1 发电机失磁的原因及其影响	272
保护	238	7.6.2 电机失磁后的机端测量阻抗	273
6.5.1 过电流保护	239	7.6.3 失磁保护的主要判据	276
6.5.2 低电压启动的过电流保护	239	7.6.4 失磁保护的辅助判据	276
6.5.3 复合电压启动的过电流保护	240	7.6.5 失磁保护的构成方式	277
6.5.4 负序电流及单相式低电压启动的		7.6.6 发电机失磁保护的整定计算	278
过电流保护	242	7.7 发电机相间短路后备保护及过负荷	
6.5.5 变压器的过负荷保护	242	保护	281
6.5.6 相间短路后备保护的配置原则	243	7.7.1 过电流保护	281
6.6 变压器的零序保护	243	7.7.2 复合电压启动的过电流保护	281
6.6.1 中性点直接接地变压器的零序		7.7.3 负序电流单相式低电压启动过	
电流保护	244	电流保护	283
6.6.2 中性点可能接地或不接地变压器的		7.7.4 负序反时限过电流保护	285
零序保护	245	7.7.5 过负荷保护	286
6.7 变压器的过励磁保护	247	7.8 发电机的其他保护	288
6.7.1 变压器的过励磁及其危害	247	7.8.1 逆功率保护	288
6.7.2 变压器的过励磁保护	248	7.8.2 低频保护	288
思考题与习题	248	7.8.3 非全相运行保护	289
第 7 章 发电机的保护	250	7.8.4 过电压保护	289
7.1 发电机的故障类型、不正常工作状态		7.8.5 过励磁保护	290
及其保护方式	250	7.8.6 失步保护	291
7.1.1 发电机的故障类型及不正常运行		7.9 发电机—变压器组保护	291
状态	250	7.9.1 发电机—变压器组保护的特点	291
7.1.2 发电机的保护措施	251	7.9.2 发电机—变压器组保护接线图	
7.2 发电机纵联差动保护	252	举例	292
7.2.1 用 DCD—2 型继电器构成的发电机		思考题与习题	296
纵联差动保护	252	第 8 章 母线保护	297
7.2.2 具有比率制动特性的差动保护	254	8.1 母线的故障及保护方式	297
7.3 发电机定子绕组匝间短路保护	256	8.1.1 母线的故障	297
7.3.1 单继电器式横联差动保护	256	8.1.2 母线的保护方式	297
7.3.2 反映转子回路二次谐波电流原理的		8.2 母线电流差动保护	298

8.2.1 母线电流差动保护的基本原理	298	保护和单相接地保护	323
8.2.2 单母线完全电流差动保护	299	思考题与习题	324
8.2.3 高阻抗母线差动保护	300	第10章 微机继电保护基础	326
8.2.4 具有比率制动特性的母线电流差 动保护	301	10.1 微机继电保护概述	326
8.2.5 电流比相式母线保护	302	10.1.1 微机继电保护的发展概况	326
8.3 双母线同时运行时的母线差动保护	306	10.1.2 微机保护的特点	326
8.3.1 元件固定连接的双母线完全电流 差动保护	306	10.2 微机继电保护装置的硬件原理	327
8.3.2 母联电流相位比较式母线差动 保护	308	10.2.1 数据采集系统	328
8.4 断路器失灵保护	310	10.2.2 微机保护装置的 CPU 主系统	336
思考题与习题	311	10.2.3 开关量输入/输出回路	338
第9章 电动机和电力电容器的保护	312	10.2.4 人机接口电路及其他电路	340
9.1 电动机的故障、不正常工作状态及其 保护方式	312	10.3 数字滤波器	341
9.2 厂用电机的保护	312	10.3.1 数字滤波器的基本概念	341
9.2.1 纵联差动保护	312	10.3.2 几种基本的数字滤波器	343
9.2.2 电流速断保护及过负荷保护	313	10.4 微机继电保护的算法	346
9.2.3 电动机单相接地保护	314	10.5 微机保护的软件原理	360
9.2.4 电动机的低电压保护	315	10.5.1 高频保护的主程序	361
9.3 同步电动机的保护	317	10.5.2 中断服务程序	363
9.3.1 过负荷保护	317	10.5.3 故障处理程序	365
9.3.2 非同步冲击保护	317	10.6 提高微机继电保护可靠性的措施	367
9.3.3 失步保护	318	10.6.1 干扰来源及传播途径	368
9.4 失磁保护	319	10.6.2 干扰形式及干扰对微机保护装置的 影响	369
9.5 电力电容器的保护	319	10.6.3 微机保护装置抑制干扰的基本 措施	370
9.5.1 并联电容器组的主要故障及其 保护方式	319	10.6.4 抗干扰措施的具体实施方法	371
9.5.2 电容器组与断路器之间连线短路 故障的电流保护	320	思考题与习题	372
9.5.3 电容器组的横联差动保护	321	附录	373
9.5.4 中性线的电流平衡保护	322	附录 A 常用文字符号	373
9.5.5 电容器组的过电压保护、低电压		附录 B 常用图形符号	375
		附录 C 常用继电器的技术数据	376
		附录 D 短路保护的最小灵敏系数	380
		参考文献	382

第 1 章 绪 论

1.1 继电保护的作用

1.1.1 电力系统的故障和不正常运行状态及引起的后果

电力系统的运行状态根据运行条件可以分为正常运行状态、不正常运行状态和故障状态。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、变压器同一相线圈的匝间短路等，以及上述几种故障组合成的复杂故障。

电力系统中发生短路故障时，可能产生以下严重后果：

- 1) 数值较大的短路电流通过故障点时，引燃电弧，使故障元件损坏或烧毁；
- 2) 短路电流通过非故障元件时，产生发热和电动力，使其绝缘遭受到破坏或缩短元件使用年限；
- 3) 电力系统中部分地区电压值大幅度下降，破坏电能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，引起系统振荡，甚至使整个电力系统瓦解。

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，因负荷超过供电设备的额定值引起的电流升高，称为过负荷，就是一种常见的不正常运行状态。在过负荷时，使电气元件载流部分和绝缘材料温度升高而过热，加速绝缘老化和损坏，并有可能发展成故障。此外，系统中出现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地步，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，力争把事故消灭在发生之前。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，故障量将以近似于光速影响其他非故障设备，甚至引起新的故障。为了防止系统事故扩大，保证非故障部分仍能可靠供电，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甚至百分之几秒，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。

1.1.2 继电保护的任务

1. 继电保护装置

继电保护装置是指安装在被保护元件上，反映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。由于继电保护装置最初是由机电式继电器为主构成的，故称为继电保护装置。尽管现代继电保护装置已发展成由电子元件或以微型计算机为主或以可编程序控制器为主构成的，但仍沿用此名称。故“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。

2. 继电保护装置的基本任务

继电保护装置的基本任务是：

(1) 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并保证其他无故障元件迅速恢复正常运行。

(2) 反映电气元件的不正常运行状态，根据运行维护的条件（如有无值班人员），而动作于发出信号、减负荷或跳闸。此时一般不要求保护迅速动作，而是根据对电力系统及其元件危害程度规定一定的延时，以免不必要的动作和由于干扰而引起误动作。

(3) 继电保护装置还可以和电力系统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，从而提高了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的可靠运行。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运行、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，就无法维持电力系统的正常运行。

1.2 对继电保护的基本要求

动作于跳闸的继电保护，在技术上一应满足四条基本要求，即选择性、速动性、灵敏性和可靠性，现分别说明如下。

1. 选择性

选择性是指继电保护装置动作时，仅将故障元件从电力系统中切除，保证系统中非故障元件仍然继续运行，尽量缩小停电范围。

图 1-1 所示单侧电源网络，母线 A、B、C、D 代表相应变电所，断路器 1QF ~ 7QF 都装有继电保护装置。

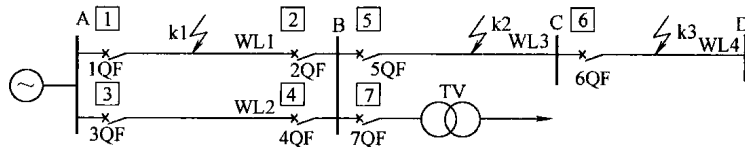


图 1-1 单侧电源网络中有选择性动作的说明

当 k3 点短路时，应由距短路点 k3 最近的保护装置 6 动作，6QF 跳闸，将故障线路 WL4 切除，变电所 D 停电。当 k1 点发生短路时，保护装置 1 和 2 动作，1QF 和 2QF 跳闸，切除

故障线路 WL1，变电所 B 仍可由线路 WL2 继续供电，由此可见，继电保护有选择性的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。

对继电保护动作有选择性的要求，同时还必须考虑继电保护装置或断路器由于自身故障失灵等原因而拒绝动作（简称拒动）的可能性，因而需要考虑后备保护的问题。如图 1-1 所示，当 k3 点短路时，应由继电保护装置 6 动作，将故障线路 WL4 切除，但由于某种原因，保护装置 6 拒动，可由保护装置 5 动作，将故障切除。保护装置 5 的这种作用称为相邻元件的后备保护，按上述方式构成的后备保护在远处实现，故又称为远后备保护。同理，保护装置 1~4 作为保护装置 5 的远后备保护。

一般地，把反映被保护元件严重故障、快速动作于跳闸的保护装置称为主保护，而把在主保护系统失效时作备用的保护装置称为后备保护。在复杂高压电力系统中，实现远后备保护有困难时，可采用近后备保护方式，即当本元件的主保护拒动时，由本元件另一套保护装置作为后备保护。当断路器拒绝动作时，由同一发电厂或变电所内有关断路器动作，实现后备保护。为此，在每一元件上装设单独的主保护和后备保护，并装设设备的断路器失灵保护。由于这种后备保护作用是在保护安装处实现，故又称它为近后备保护。由于远后备保护是一种完善的后备保护方式，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动，均能起到后备保护作用，同时它的实现简单、经济，因此应优先采用。只有当远后备保护不能满足时，才考虑采用近后备保护方式。

2. 速动性

快速地切除故障可以提高电力系统并列运行的稳定性，减少用户在电压降低的情况下的工作时间，以及降低故障元件的损坏程度。因此，在发生故障时，应力求保护装置能迅速动作，切除故障。

动作迅速而同时又能满足选择性要求的保护装置，一般结构都比较复杂，价格也比较昂贵。在一些情况下，允许保护装置带有一定时限切除故障的元件。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元件的具体情况来确定，下面列举一些必须快速切除的故障；

- 1) 根据维持系统稳定的要求，必须快速切除高压输电线路上的故障；
- 2) 使发电厂或重要用户的母线低于允许值（一般为额定电压的 70%）的故障；
- 3) 大容量的发电机、变压器以及电动机内部发生的故障；
- 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；
- 5) 可能危及人身安全，对通信系统或铁路号志系统有强烈电磁干扰的故障等。

故障切除的总时间等于保护装置和断路器动作时间之和。一般快速保护的动作时间为 0.06~0.12s，最快的可达 0.02~0.04s；一般断路器的动作时间为 0.06~0.15s，最快的有 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、短路的类型如何，以及短路点是否有过渡电阻，都能敏锐感觉、正确反应。保护装置的灵敏性通常用灵敏系数 K_{sen} 来衡量，它决定于被保护元件和电力系统的参数和运行方式。在《继电保护和安全自动装置技术规程》（GB/T 14285—2006）中，对各类保护的灵敏系数的要求都作了具体规定（参见附录 D）。关于灵敏系数这个问题在以后各章中将

分别进行讨论。

4. 可靠性

保护装置的可靠性是指在其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，而在任何其他该保护不应该动作的情况下，则不应该错误动作。

继电保护装置误动作和拒动都会给电力系统造成严重的危害，但提高其不误动作和不拒动的可靠性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重点在各种情况下有所不同。例如，当系统中有充足的旋转备用容量（热备用），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作使某发电机、变压器或输电线路切除，给电力系统造成的影响可能不大；但如果发电机、变压器或输电线路故障时继电保护装置拒动，将会造成设备损坏或破坏系统稳定运行，造成巨大损失。在此情况下，提高继电保护不拒动的可靠性比提高不误动的可靠性更加重要。反之，系统旋转备用容量较少，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、变压器或某输电线路切除，将会引起对负荷供电的中断，甚至造成系统稳定性的破坏，造成巨大的损失；而当某一保护装置拒动时，其后备保护仍可以动作，切除故障。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要根据电力系统和负荷的具体情况采取适当的对策。

许多学者称不误动的可靠性为“安全性”（security），称不拒动和不会非选择动作的可靠性为“可信赖性”（reliability）。安全性和可信赖性属于可靠性的两个方面。为提高可信赖性，可采用二中取一的双重化方案，但此方案降低了安全性。为同时提高可信赖性和安全性（例如大容量发电机组的保护），可采用三中取二的双重化方案或双倍的二中取一双重化方案。

可靠性主要针对保护装置本身的质量和运行维护水平而言，一般来说，保护装置的组成元件的质量越高，接线越简单，回路中继电器的触点数量越少，保护装置的可靠性就越高。同时，正确的设计和整定计算，保证安装、调整试验的质量，提高运行维护水平，对于提高保护装置的可靠性也具有重要作用。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是否满足可靠性的要求。在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。

以上四条基本要求是分析研究继电保护性能的基础，也是贯穿全书的一条基本线索。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是围绕着如何处理好这四条基本要求之间的辩证统一关系而进行的。在学习本书时应注意学习和运用这样的分析方法。

选择继电保护方式时除应满足上述四条基本要求，还应考虑经济条件。应从国民经济的整体利益出发，按被保护元件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投资考虑，因为保护不完善或不可靠而给国民经济造成的损失，一般都超过最复杂的保护装置的投资。但要注意，对较为次要的数量多的电气元件（如小容量电动机等），则不应装设过于复杂和昂贵的保护装置。

1.3 继电保护的工作原理、分类及构成

1.3.1 继电保护的工作原理

为了完成继电保护所担负的任务，要求它能正确区分电力系统正常运行状态与故障状态或不正常运行状态，可根据电力系统发生故障或不正常运行状态前后的电气物理量变化特征构成继电保护装置。

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远超过额定负荷电流。

(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，电压与电流之间的相位角为 $180^\circ + (60^\circ \sim 85^\circ)$ 。

(4) 测量阻抗发生变化

测量阻抗即为测量点（保护安装处）电压与电流相量的比值，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，可构成过电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；根据故障时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；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出现的相序分量，可构成灵敏的序分量保护。这些继电保护既可作为基本的继电保护元件，也可通过它们作进一步的逻辑组合，构成更为复杂的继电保护，例如，将过电流保护与方向保护组合，构成方向电流保护。

此外，除了反映各种工频电气量的保护外，还有反映非工频电气量的保护，如超高压输电线的行波保护和反映非电气量的电力变压器的瓦斯保护、过热保护等。

对于反映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。

1.3.2 继电保护装置的构成及分类

电力系统继电保护是从电力系统自动化中独立出来的，因此，继电保护实际上是一种自动控制装置，按控制过程信号性质的不同可分为模拟型和数字型两大类。20 世纪 70 年代前应用的常规继电保护装置都属于模拟型的。20 世纪 70 年代后发展的微机继电保护则属于数字型的。这两类继电保护装置的基本原理是相同的，但实现方法及构成却有很大不同。模拟型继电保护装置又分为机电型继电保护装置和静态型继电保护装置。

1. 继电保护装置的分类

(1) 机电型继电保护装置

该保护装置由若干个不同功能的机电型继电器组成。机电型继电器基于电磁力或电磁感应作用产生机械动作的原理制成，只要加入某种物理量或加入的物理量达到某个规定数值时，它就会动作，即其常开接点闭合，常闭接点断开，输出信号。每个继电器都由感受元件、比较元件和执行元件三个主要部分组成。感受元件用来测量控制量（如电压、电流等）的变化，并以某种形式传送到比较元件；比较元件将接收到的控制量与整定值进行比较，并将比较结果的信号送到执行元件；执行元件执行继电器动作输出信号的任务。继电器按动作原理可分为电磁型、感应型和整流型等；按反映的物理量可分为电流、电压、功率方向、阻抗继电器等；按继电器在保护装置中的作用可分为主继电器（如电流、电压、阻抗继电器等）和辅助继电器（如中间继电器、时间继电器和信号继电器等）。由于这些继电器都具有机械可动部分和接点，故称它们为机电型继电器。由这类继电器组成的保护装置称为机电型继电保护装置。

(2) 静态型继电保护装置

该装置是应用晶体管或集成电路等电子元件实现的，由若干个不同功能的回路（如测量、比较或比相、触发、延时、逻辑和输出回路）相连组成，具有体积小、重量轻、消耗功率小、灵敏性高、动作快和不怕振动，可实现无触点等优点。

2. 继电保护装置的构成

(1) 模拟型继电保护装置

这种保护装置种类很多，就一般而言，它们都是由测量部分、逻辑部分和执行部分三个主要部分组成。其原理框图如图 1-2 所示。



图 1-2 模拟型继电保护装置原理框图

测量部分是测量从被保护对象输入的有关电气量，并与给定的整定值进行比较，根据比较结果，给出“是”、“非”；“大于”、“不大于”；等于“0”或“1”性质的一组逻辑信号，从而判断保护是否应该启动。

逻辑部分是根据测量部分各输出量的大小、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关系工作，然后确定是否应该使断路器跳闸或发出信号，并将有关命令传给执行部分。继电保护中常用的逻辑回路有“或”、“与”、“否”、“延时启动”、“延时返回”以及“记忆”等回路。

执行部分是根据逻辑部分传递的信号，最后完成保护装置所担负的任务。如故障时，动

作跳闸；异常运行时，发出信号；正常运行时，不应动作。

现以图 1-3 所示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，电流继电器不应动作，其触点不应闭合。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} 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。

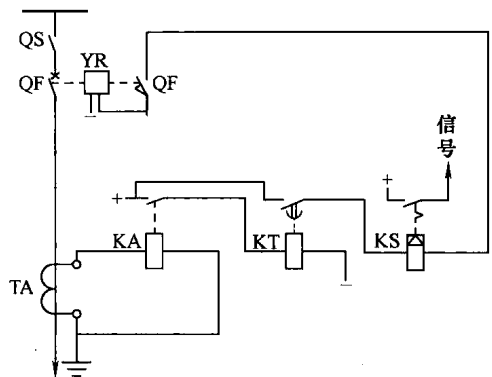


图 1-3 简单的线路过电流保护装置

(2) 数字型的微机继电保护

这种保护装置是把被保护元件输入的模拟电气量经模/数转换器 (A/D) 变换成数字量，利用微机进行处理和判断。微机继电保护装置由硬件部分和软件部分组成。微机继电保护硬件结构原理框图如图 1-4 所示。

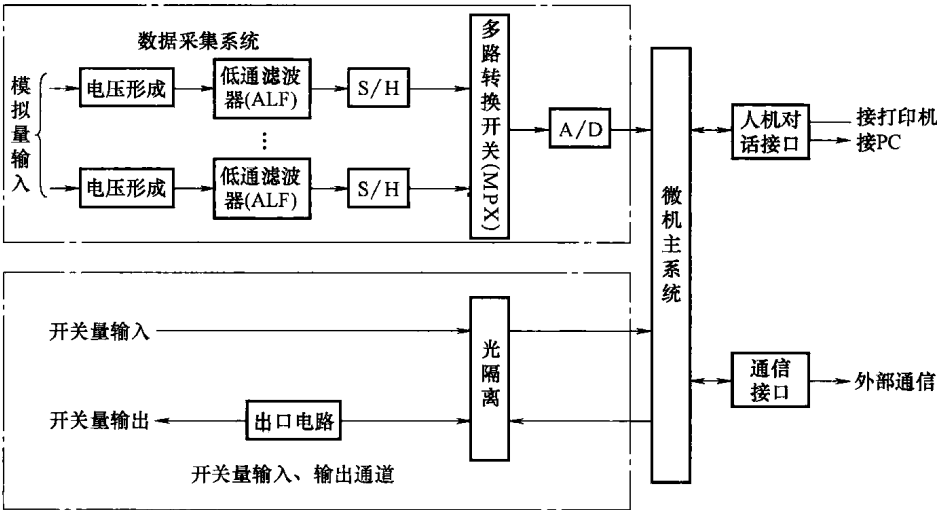


图 1-4 微机继电保护硬件结构原理框图

微机保护的硬件一般包括以下三大部分：

1) 数据采集系统（或称为模拟量输入系统） 它包括电压形成、模拟滤波、采样保持 (S/H)、多路转换开关 (MPX) 以及模/数 (A/D) 转换等功能块，完成将模拟输入量准确地转换为数字量。

2) 微机主系统 它包括微处理器 (MPU)、只读存储器 (ROM) 或闪存内存单元 (FLASH)、随机存取存储器 (RAM)、定时器、并行接口及串行接口等。微型机执行编制好

的程序，对数据采集系统输入 RAM 区的原始数据进行分析、处理，完成各种保护的测量、逻辑和控制功能。

3) 开关量（或数字量）输入/输出系统 开关量（或数字量）输入/输出系统由微机的并行接口（PIA 或 PIO）、光隔离器件及有触点的中间继电器等组成，以完成各种保护出口的跳闸、信号、外部触点输入、人机对话及通信等功能。

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 $\pm (5 \sim 10V)$ ，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（A/D）转换器，将模拟量转换为数字量进入计算机系统运算处理，判断是否发生故障，通过开关量输出通道，经光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 YR，使断路器跳闸，切除系统故障部分。

人机接口部件的作用是建立起微型机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。外部通信接口部件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模型即数学表达式来编制的。这种数学模型称为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。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，而且计算机根据系统运行方式改变能自动改变动作的整定值，使保护具有更大的灵敏性。保护用计算机有自诊断能力，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，并能实现快速动作的要求。

电力系统的继电保护根据被保护对象的不同，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；后者是指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。

按作用不同，继电保护又可分为主保护、后备保护和辅助保护。

继电保护装置需要有操作电源供给保护回路、断路器合闸及信号等二次回路，按操作电源性质的不同，可分为直流操作电源和交流操作电源。在发电厂和变电所中继电保护的操作电源是由蓄电池直流系统供电。交流操作电源的继电保护只适用于中小型变电所。

1.4 继电保护的发展简史

电力系统继电保护技术是随着电力系统的发展而发展起来的。电力系统的短路故障是不可避免的。短路故障点通过很大的短路电流和所燃起的电弧，使故障元件损坏。为了保护电气元件免受短路的破坏，最初出现了反应电流超过一定预定值的过电流保护。熔断器就是最早出现的最简单的过电流保护。这种保护时至今日仍被广泛应用于低压线路和用电设备上。熔断器的特点是融保护装置与切断电流的装置于一体，因而最简单。由于电力系统的发展，发电机容量不断增大，发电厂、变电所和供电网络的接线不断复杂化，使电力系统正常工作

电流和短路电流都不断增大，单纯采用熔断器保护就难以实现选择性和快速性要求，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差动保护原理。1910 年方向性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 20 世纪 90 年代初距离保护的出现。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或相位的高频保护装置。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两端故障电气量的微波保护。早在 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被大量采用，利用光纤通道的继电保护必将得到广泛的应用。

与此同时，构成继电保护装置的元件、材料、保护装置的结构型式和制造工艺也发生了巨大的变革。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。这些继电器统称为机电式继电器。由这些继电器组成的继电保护装置称为机电式保护装置。这种保护装置工作可靠，目前电力系统中仍应用这种装置。但这种装置体积大，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 年代初由于半导体晶体管的发展，开始出现了晶体管式继电保护装置，又称之为电子式静态保护装置。20 世纪 70 年代是晶体管继电保护装置在我国大量采用的时期，满足了当时电力系统向超高压大容量方向发展的需要。20 世纪 80 年代后期是静态继电保护从第一代（晶体管式）向第二代（集成电路式）发展的过渡期。目前后者已成为静态继电保护装置的主要形式。在 20 世纪 60 年代末有人提出用小型计算机实现继电保护的设想，由此开始了对继电保护计算机算法的大量研究，对后来微型计算机式继电保护（简称微机保护）的发展奠定了理论基础。20 世纪 70 年代后半期比较完善的微机保护样机开始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已趋于成熟并已在一些国家推广应用，这就是第三代的静态继电保护装置。微机保护装置具有巨大的优越性和潜力，因而受到运行人员的欢迎。进入 20 世纪 90 年代，它在我国得到了大量的应用并成为继电保护装置的主要形式，可以说微机保护代表着电力系统继电保护的未來，将成为未来电力系统保护、控制、运行调度及事故处理的统一计算机系统的组成部分。

在 20 世纪 50 年代至 90 年代的 40 年时间中，继电保护经历了机电式、整流式、晶体管式、集成电路式和微机式五个发展阶段。随着计算机网络的发展和在电力系统中大量采用，以及变电站综合自动化和调度自动化的兴起和电力系统光纤通信网络的形成，为继电保护技术的发展提供了可靠的条件。

此外，由于计算机网络提供的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、控制和数据通信一体化的方向不断前进。