



普通高等教育“十五”国家级规划教材

# 电力系统继电保护

Power System Protective Relaying

张保会 尹项根 主编



中国电力出版社

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

## 内 容 提 要

本书为普通高等教育“十五”国家级规划教材，主要介绍电力系统继电保护的工作原理、实现技术及解决继电保护问题的基本思想方法。

本书的多数章节采用故障特征分析→基本原理→实现技术→相关知识四个层次的叙述方法，讲解常用的继电保护理论与技术。全书共九章，第1章绪论，第2、3章介绍电网的阶段式电流、距离保护，第4、5章介绍输电线路的纵联保护和重合闸，第6、7、8章分别介绍电力变压器、发电机和母线等集中参数元件的保护，最后第9章介绍数字式保护的硬、软件基本知识。

本书作为“电气工程及其自动化”、“电气工程与自动化”专业本科教材，还可以作为研究生、继电保护工作者的参考书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统继电保护/张保会,尹项根主编. —北京:  
中国电力出版社, 2005

普通高等教育“十五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5083-3189-8

I. 电... II. ①张... ②尹... 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 (2005) 第 020096 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>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2005 年 5 月第一版 2007 年 2 月北京第五次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19.75 印张 459 千字

印数 15001—18000 册 定价 29.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

## 前 言

本书是根据教育部下达的普通高等教育“十五”国家级规划教材选题(080677),经主编申报、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”、“电气工程与自动化”专业本科教材,也可作为相关专业研究生的教学参考书,还可以作为继电保护工作者的参考书。

本教材曾列入1995年原电力工业部电力工程类教学指导委员会的第四轮教材“重编”计划,1996年本主编写出编写大纲,并经当时的继电保护教学指导小组讨论修改,后因电力工业部撤销,原教学指导委员会随之停止活动,本教材编写中断。这本教材继承了1996年编写大纲的合理部分,吸取了《电力系统继电保护原理》(天津大学贺家李教授等主编)前三版教材的教学经验,结合近20年来继电保护的原理发展和数字式保护工业现场的实际情况,反映多年教学改革的成果和科学研究成果,重新编写而成。在此对参与以上工作的各位老师深表谢意!

本教材尝试多所高校联合、国内外联合的编写模式,试图编写出符合更多高校教学实际并能与国际教材风格相近的电力系统继电保护课程教材。为使学生高效、清晰地理解继电保护的基本原理、常用技术和分析方法,本书以如下显著特点贯穿始终:

(1) 原理叙述的层次渐进化:每种继电保护原理讲解前总是先以故障特征分析开始,寻找不同运行状态间的差异。讲解利用某种差异构成的保护原理,其他的差异留给读者去思考 and 挖掘新的可能原理,引导开放式思维。

(2) 原理和技术的现代化:随着数字和通信技术的发展,过去曾经广泛使用的电磁型、整流型保护很多已被数字式保护所取代,纵联保护由电力线载波通信已发展到数字光纤通信,主要介绍当前还在使用的继电保护实现技术及其发展变化,教材中的原理框图多以功能框图表述,不局限于某种实现手段。技术手段变化的同时又促进了新原理的发展,部分已经应用的保护新原理也部分被介绍。

(3) 多学时和少学时的通用化: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,授课学时数不统一。本书的多数章节在编写中贯彻故障特征分析→基本原理→实现技术→相关知识四个层次,根据学时数可选讲前几个层次,也可选讲某些章的所有层次,做到各取所需。

(4) 技术用语的国际化:为提高学生国际交流的能力并顺利阅读国外教材,继电保护的专业技术用语标准化、国际化,并以英文标注。

本书的第1、2、5章由西安交通大学张保会教授编写,第3章由山东大学潘贞存教授编写,第4章由西安交通大学索南加乐教授编写,第6章由浙江大学何奔腾教授编写,第7、8章由东南大学陆于平教授编写,第9章由华中科技大学尹项根教授编写,英文目录由

Zhiqian. BO (薄志谦) 博士翻译。张保会教授、尹项根教授担任主编，分别重点负责前五章和后四章的统稿工作。本书由著名、资深教授贺家李先生、陈德树先生担任主审，在审阅过程中提出了很多极有价值的意见和建议，对两位先生的不吝赐教深表谢忱！

本教材同时列入西安交通大学“十五”规划本科生系列教材并受到资助，同时受到中国电力出版社的资助，在此一并感谢！

限于编者的水平和经验，书中难免有不当或错误之处，恳请读者批评指正。

编 者

2004 年 11 月



前言

<b>1 绪论</b> .....	1
1.1 电力系统的正常工作状态、不正常工作状态和故障状态 .....	1
1.2 继电保护的基本原理及其组成 .....	5
1.3 对继电保护的基本要求 .....	9
1.4 继电保护发展简史 .....	12
习题及思考题 .....	13
<b>2 电网的电流保护</b> .....	15
2.1 单侧电源网络相间短路的电流保护 .....	15
2.2 双侧电源网络相间短路的方向性电流保护 .....	35
2.3 中性点直接接地系统中接地短路的零序电流及方向保护 .....	46
2.4 中性点非直接接地系统中单相接地故障的保护 .....	55
习题及思考题 .....	62
<b>3 电网距离保护</b> .....	67
3.1 距离保护的基本原理与构成 .....	67
3.2 阻抗继电器及其动作特性 .....	74
3.3 阻抗继电器的实现方法 .....	83
3.4 距离保护的整定计算与对距离保护的评价 .....	99
3.5 距离保护的振荡闭锁 .....	106
3.6 故障类型判别和故障选相 .....	113
3.7 距离保护特殊问题的分析 .....	114
3.8 工频故障分量距离保护 .....	120
习题及思考题 .....	125
<b>4 输电线路纵联保护</b> .....	128
4.1 输电线路纵联保护概述 .....	128
4.2 输电线路纵联保护两侧信息的交换 .....	132
4.3 方向比较式纵联保护 .....	139
4.4 纵联电流差动保护 .....	146
习题及思考题 .....	158
<b>5 自动重合闸</b> .....	160

5.1	自动重合闸的作用及对它的基本要求	160
5.2	输电线路的三相一次自动重合闸	162
5.3	高压输电线路的单相自动重合闸	172
5.4	高压输电线路的综合重合闸简介	176
	习题及思考题	177
<b>6</b>	<b>电力变压器保护</b>	<b>178</b>
6.1	电力变压器的故障类型和不正常工作状态	178
6.2	变压器纵差动保护	178
6.3	变压器的励磁涌流及鉴别方法	190
6.4	变压器相间短路的后备保护	197
6.5	变压器接地短路的后备保护	201
6.6	变压器零序电流差动保护	205
6.7	变压器保护配置原则	206
	习题及思考题	208
<b>7</b>	<b>发电机保护</b>	<b>210</b>
7.1	发电机的故障、不正常运行状态及其保护方式	210
7.2	发电机定子绕组短路故障的保护	211
7.3	发电机定子绕组单相接地保护	219
7.4	发电机负序电流保护	224
7.5	发电机的失磁保护	228
7.6	发电机的失步保护	235
7.7	发电机励磁回路接地保护	237
	习题及思考题	240
<b>8</b>	<b>母线保护</b>	<b>242</b>
8.1	母线故障和装设母线保护基本原则	242
8.2	母线差动保护基本原理	243
8.3	母线保护的的特殊问题及其对策	251
8.4	断路器失灵保护简介	253
	习题及思考题	254
<b>9</b>	<b>数字式继电保护技术基础</b>	<b>256</b>
9.1	数字式保护装置硬件原理概述	256
9.2	数字式保护的数据采集与数字滤波	263
9.3	数字式保护的的特征量算法	273
9.4	数字式保护的基本动作判据的算法	287
9.5	数字式保护装置的软件构成	294
	习题及思考题	306
	参考文献	309

# 1 绪 论

## INTRODUCTION

### 1.1 电力系统的正常工作状态、不正常工作状态和故障状态 (Power System Normal, Abnormal and Fault Condition)

#### 1.1.1 正常工作状态 (Standard of Normal Operating Condition)

电力系统是电能生产、变换、输送、分配和使用的各种电力设备按照一定的技术与经济要求有机组成的一个联合系统。一般将电能通过的设备称为电力系统的一次设备，如发电机、变压器、断路器、母线、输电线路、补偿电容器、电动机及其他用电设备等。对一次设备的运行状态进行监视、测量、控制和保护的装置，称为电力系统的二次设备。当前电能一般还不能大容量的存储，生产、输送和消费是在同一时间完成的。因此，电能的生产量应每时每刻与电能的消费量保持平衡，并满足质量要求。由于一年内夏、冬季的负荷较春、秋季的大，一星期内工作日的负荷较休息日的大，一天内的负荷也有高峰与低谷之分，电力系统中的某些设备，随时都有因绝缘材料的老化、制造中的缺陷、自然灾害等原因出现故障而退出运行。为满足时刻变化的负荷用电需求和电力设备安全运行的要求，致使电力系统的运行状态随时都在变化。

电力系统运行状态指电力系统在不同运行条件（如负荷水平、出力配置、系统接线、故障等）下的系统与设备的工作状况。电力系统的运行条件一般可用三组方程式描述，一组微分方程式用来描述系统元件及其控制的动态规律（略），两组代数方程式则分别构成电力系统正常运行的等式和不等式约束条件。

等式约束条件是由电能性质本身决定的，即系统发出的有功功率和无功功率应在任一时刻与系统中随机变化的负荷功率（包括传输损耗）相等，即

$$\sum P_{Gi} - \sum P_{Lj} - \sum \Delta P_s = 0 \quad (1.1)$$

$$\sum Q_{Gi} - \sum Q_{Lj} - \sum \Delta Q_s = 0 \quad (1.2)$$

式中  $P_{Gi}$ 、 $Q_{Gi}$ ——分别为  $i$  个发电机或其他电源设备发出的有功和无功功率；

$P_{Lj}$ 、 $Q_{Lj}$ ——分别为  $j$  个负荷使用的有功功率和无功功率；

$\Delta P_s$ 、 $\Delta Q_s$ ——分别为电力系统中各种有功功率和无功功率损耗。

不等式约束条件涉及供电质量和电力设备安全运行的某些参数，它们应处于安全运行的范围（上限及下限）内，例如

$$\left. \begin{aligned} S_k &\leq S_{k, \max} \\ U_{i, \min} &\leq U_i \leq U_{i, \max} \\ I_{ij} &\leq I_{ij, \max} \\ f_{\min} &\leq f \leq f_{\max} \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

式中  $S_k$ 、 $S_{k, \max}$ ——分别为发电机、变压器或用电设备的功率及其上限；

$U_i$ 、 $U_{i, \max}$ 、 $U_{i, \min}$ ——分别为母线电压及其上、下限；

$I_{ij}$ 、 $I_{ij, \max}$ ——分别为输、配电线路中的电流及其上限；

$f$ 、 $f_{\max}$ 、 $f_{\min}$ ——分别为系统频率及其上、下限。

根据不同的运行条件，可以将电力系统的运行状态分为正常状态、不正常状态和故障状态。电力系统运行控制的目的是通过自动的和人工的控制，使电力系统尽快摆脱不正常状态和故障状态，能够长时间在正常状态下运行。

在正常状态下运行的电力系统，所有的等式和不等式约束条件均满足，表明电力系统以足够的电功率满足负荷对电能的需求；电力系统中各发电、输电和用电设备均在规定的长期安全工作限额内运行；电力系统中各母线电压和频率均在允许的偏差范围内，提供合格的电能。一般在正常状态下的电力系统，其发电、输电和变电设备还保持一定的备用容量，能满足负荷随机变化的需要，同时在保证安全的条件下，可以实现经济运行；能承受常见的干扰（如部分设备的正常和故障操作），从一个正常状态和不正常状态、故障状态通过预定的控制连续变化到另一个正常状态，而不致于进一步产生有害的后果。

### 1.1.2 常见的不正常工作状态及其危害 (Frequently Occurred Abnormal Operating Conditions and Its Threats to the Power Systemt)

所有的等式约束条件均满足，部分的不等式约束条件不满足但又不是故障的电力系统工作状态，称为不正常运行状态。例如，因负荷潮流超过电力设备的额定上限造成的电流升高（又称为过负荷），系统中出现功率缺额而引起的频率降低，发电机突然甩负荷引起的发电机频率升高，中性点不接地系统和非有效接地系统中的单相接地引起的非接地相对地电压的升高，以及电力系统发生振荡等，都属于不正常运行状态。

电流超过额定值引起的过负荷，使电力设备的载流部分和绝缘材料的温度超过散热条件的允许值而不断升高，造成载流导体的熔断或加速绝缘材料的老化和损坏，可能发展成故障。电压的升高有可能超过绝缘介质的耐压水平，造成绝缘击穿，酿成短路；照明设备的寿命将明显缩短，例如白炽灯在电压长期升高+10%时寿命将缩短一半；变压器和电动机由于铁芯饱和，损耗和温升都将增加。电压过低时，对于占负荷比重最大的异步电动机转差增大，转速降低，绕组中电流增大，温升增加，寿命缩短；转速的降低致使其拖动的发电厂用机械（如风机、泵等）出力将减小，影响到锅炉、汽轮机和发电机的出力；用户的电热设备，将因电压的降低而减少发热量，使产品产量和质量下降。另外，电压的过大偏移还会引起电力系统无功潮流的改变，增加有功损耗等，不利于系统的经济、安全运行。电力系统中的发电和用电设备，都是按照额定频率设计和制造的，只有在额定频率附近运行时，才能发



挥最好效能。对用户的不利影响主要有：频率变化引起异步电动机转速变化，由此驱动的纺织造纸等机械制造的产品质量受到影响，甚至出现残次品；电动机转速和功率的降低，导致传动机械的出力降低；工业和国防部门使用的测量、控制等电子设备将因频率的波动而影响其准确性和工作性能，甚至无法工作。对发电厂和电力系统的主要影响有：频率下降时，汽轮机叶片的振动变大，当频率由额定的 50Hz 降低至 45Hz 附近时，某些汽轮机叶片还可能发生共振而断裂；由异步电动机驱动的火力发电厂厂用机械（如风机、磨煤机和水泵等）的出力降低，导致发电机出力下降，使系统频率进一步下降，特别当频率下降到 47~48Hz 以下时，将在几分钟内使火力发电厂的正常工作受到破坏，从而引发频率崩溃；系统频率降低时，异步电动机和变压器的励磁电流增加，所消耗的无功功率增加，引起电压下降，如果原来系统的电压就较低，还可能引发电压崩溃。

因此必须识别电力系统的不正常工作状态，通过自动和人工的方式消除这种不正常现象，使系统尽快恢复到正常运行状态。由于不正常工作状态对电力系统和电力设备造成的经济损失与运行时间的长短有关，加之引起不正常工作状态的原因复杂，一般由继电保护装置检测到不正常状态后发出信号，或延时切除不正常工作的元件。

### 1.1.3 故障状态及其危害 (State of Fault and Its Threats)

电力系统的所有一次设备在运行过程中由于外力、绝缘老化、过电压、误操作、设计制造缺陷等原因会发生例如短路、断线等故障。最常见同时也是最危险的故障是发生各种类型的短路。在发生短路时可能产生以下后果：

- (1) 通过短路点的很大短路电流和所燃起的电弧，使故障元件损坏。
- (2) 短路电流通过非故障元件，由于发热和电动力的作用，引起它们的损坏或缩短使用寿命。
- (3) 电力系统中部分地区的电压大大降低，使大量的电力用户的正常工作遭到破坏或产生废品。
- (4) 破坏电力系统中各发电厂之间并列运行的稳定性，引起系统振荡，甚至使系统瓦解。

各种类型的短路包括三相短路、两相短路、两相短路接地和单相接地短路。不同类型短路发生的概率是不同的，不同类型短路电流的大小也不同，一般为额定电流的几倍到几十倍。大量的现场统计数据表明，在高压电网中，单相接地短路次数占有短路次数的 85% 以上。2002 年我国 220kV 电网共有输电线路 3884 条，线路总长度 150026km，共发生故障 1487 次，故障率为 0.99 次/（100km·年）。表 1.1 给出 2002 年 220kV 电网输电线路各种类型故障发生的次数和百分比。

表 1.1 2002 年我国 220kV 电网输电线路故障统计表

故障类型	三相短路	两相短路	两相短路接地	单相接地短路	其他故障
故障次数	17	28	91	1319	32
故障百分比	1.14%	1.88%	6.12%	88.7%	2.16%

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，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允许的地步，甚至造成人身伤亡和电气设备损坏的事件。事故的发生，除了由于自然的因素（如遭受雷击、架空线倒杆等）以外，可能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，还可能由于故障切除迟缓或设备被错误地切除，致使故障发展成为事故甚至引起事故的扩大。

#### 1.1.4 继电保护的作用 (Functions of Relay Protection)

随着自动化技术的发展，电力系统的正常运行、故障期间以及故障后的恢复过程中，许多控制操作日趋高度自动化。这些控制操作的技术与装备大致可分为两大类：其一是为保证电力系统正常运行的经济性和电能质量的自动化技术与装备，主要进行电能生产过程的连续自动调节，动作速度相对迟缓，调节稳定性高，把整个电力系统或其中的一部分作为调节对象，这就是通常理解的“电力系统自动化（控制）”。其二是当电网或电力设备发生故障，或出现影响安全运行的异常情况时，自动切除故障设备和消除异常情况的技术与装备，其特点是动作速度快，其性质是非调节性的，这就是通常理解的“电力系统继电保护与安全自动装置”。

为了在故障后迅速恢复电力系统的正常运行，或尽快消除运行中的异常情况，以防止大面积的停电和保证对重要用户的连续供电，常采用以下的自动化措施，如输电线路自动重合闸、备用电源自动投入、低电压切负荷、按频率自动减负荷、电气制动、振荡解列以及为维持系统的暂态稳定而配备的稳定性紧急控制系统，完成这些任务的自动装置统称为电网安全自动装置。

电力系统中的发电机、变压器、输电线路、母线以及用电设备，一旦发生故障，迅速而有选择性地切除故障设备，既能保护电力设备免遭损坏，又能提高电力系统运行的稳定性，是保证电力系统及其设备安全运行最有效的方法之一。切除故障的时间通常要求小到几十毫秒到几百毫秒，实践证明，只有装设在每个电力元件上的继电保护装置，才有可能完成这个任务。继电保护装置 (Relay Protection)，就是指能反应电力系统中电气设备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。

电力系统继电保护 (Power System Protection) 一词泛指继电保护技术和由各种继电保护装置组成的继电保护系统，包括继电保护的原理设计、配置、整定、调试等技术，也包括由获取电量信息的电压、电流互感器二次回路，经过继电保护装置到断路器跳闸线圈的一整套具体设备，如果需要利用通信手段传送信息，还包括通信设备。

电力系统继电保护的基本任务是：

(1) 自动、迅速、有选择性地切除故障元件从电力系统中切除，使故障元件免于继续遭到损坏，保证其他无故障部分迅速恢复正常运行；

(2) 反应电力设备的不正常运行状态，并根据运行维护条件，而动作于发出信号或跳闸。此时一般不要求迅速动作，而是根据对电力系统及其元件的危害程度规定一定的延时，以免暂短的运行波动造成不必要的动作和干扰引起的误动。

## 1.2 继电保护的基本原理及其组成 (Basic Principle and Elements of Relay Protection)

### 1.2.1 继电保护的基本原理 (Basic Principles of Relay Protection)

要完成电力系统继电保护的基本任务,首先必须“区分”电力系统的正常、不正常工作和故障三种运行状态,“甄别”出发生故障和出现异常的元件。而要进行“区分和甄别”,必须寻找电力元件在这三种运行状态下的可测参量(继电保护主要测电气量)的“差异”,提取和利用这些可测参量的“差异”,实现对正常、不正常工作和故障元件的快速“区分”。依据可测电气量的不同差异,可以构成不同原理的继电保护。目前已经发现不同运行状态下具有明显差异的电气量有:流过电力元件的相电流、序电流、功率及其方向;元件的运行相电压幅值、序电压幅值;元件的电压与电流的比值即“测量阻抗”等。发现并正确利用能可靠区分三种运行状态的可测参量或参量的新差异,就可以形成新的继电保护原理。

对于图 1.1 (a) 所示我国常用的 110kV 及以下单侧电源供电网络,在正常运行时,每条线路上都流过由它供电的负荷电流  $\dot{I}_L$ ,越靠近电源端,负荷电流越大。假定在线路 B—C 上发生三相短路 [如图 1.1 (b) 所示],从电源到短路点之间将流过很大的短路电流  $\dot{I}_k$ 。利用流过被保护元件中电流幅值的增大,可以构成过电流保护。

正常运行时,各变电所母线上的电压一般都在额定电压  $\pm (5 \sim 10)\%$  范围内变化,且靠近电源端母线上的电压略高。短路后,各变电所母线电压有不同程度的降低,离短路点越近,电压降得越低,短路点的相间或对地电压降低到零。利用短路时电压幅值的降低,可以构成低电压保护。

同样,在正常运行时,线路始端的电压与电流之比反映的是该线路与供电负荷的等值阻抗及负荷阻抗角(功率因数角),其数值一般较大,阻抗角较小。短路后,线路始端的电压与电流之比反映的是该测量点到短路点之间线路段的阻抗,其值较小,如不考虑分布电容时一般正比于该线路段的距离(长度),阻抗角为线路阻抗角,较大。利用测量阻抗幅值的降低和阻抗角的变大,可以构成距离(低阻抗)保护。

如果发生的不是三相对称短路,而是不对称短路,则在供电网络中会出现某些不对称分

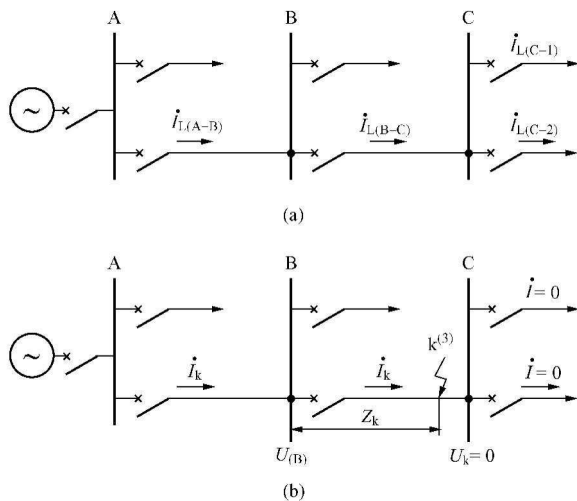


图 1.1 单侧电源网络接线  
(a) 正常运行情况; (b) 三相短路情况

量，如负序或零序电流和电压等，并且其幅值较大。而在正常运行时系统对称，负序和零序分量不会出现。利用这些序分量构成的保护，一般都具有良好的选择性和灵敏性，获得了广泛的应用。

短路点到电源之间的所有元件中诸如以上的电气量，在正常运行与短路时都有相同规律的差异。利用这些差异构成的保护装置，短路时都有可能作出反应，但还需要甄别出哪一个是发生短路的元件。若是发生短路的元件，则保护动作跳开该元件，切除故障；若是短路点到电源之间的非故障元件，则保护可靠不动作。常用的方法是预先给定各电力元件保护的保护区，求出保护区末端发生短路时的电气量，考虑适当的可靠性裕度后作为保护装置的整定值，短路时测得的电气量与之进行比较，作出是否本元件短路的判别。但当故障发生在本线路末端与下级线路的首端出口处时，在本线路首端测得的电气量差别不大，为了保证本线路短路被快速切除而下级线路短路时不动作，快速动作的保护只能保护本线路的一部分。对末端部分的短路，则采用慢速的保护，当下级线路快速保护不动作时才切除本级线路。这种利用单端电气量的保护，需要上、下级保护（离电源的近、远）动作整定值和动作时间的配合，才能完成切除任意点短路的保护任务，被称为阶段式保护特性。

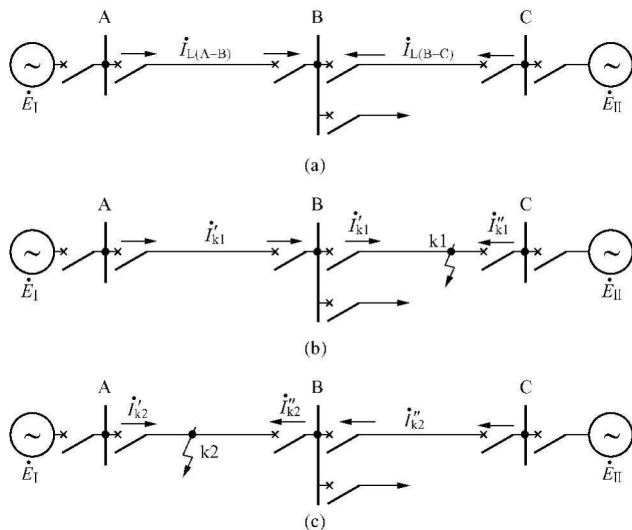


图 1.2 双侧电源网络接线

(a) 正常运行；(b) k1 点短路；(c) k2 点短路

对于 220kV 及以上多侧电源的输电网络中的任一电力元件，如图 1.2 中的线路 A—B，在正常运行的一瞬间，负荷电流总是从一侧流入而从另一侧流出，如图 1.2 (a) 所示。如果规定电流的正方向是从母线流向线路，那么 A—B 两侧电流的大小相等，相位相差 180°，两侧电流的相量和为零。并且只要被保护的线路 A—B 内部没有短路（电流没有其他的流通回路），即使发生被保护的线路 A—B 外部短路，如图 1.2 (b) 所示的 k1 点短路情况下，这种关系始终保持成立。

但是，当发生被保护的线

路 A—B 内部 k2 点短路 [如图 1.2 (c) 所示] 时，两侧电源分别向短路点供给短路电流  $I'_{k2}$  和  $I''_{k2}$ ，线路 A—B 两侧的电流都是由母线流向线路，此时两个电流一般不相等，在理想条件（两侧电动势同相位且全系统的阻抗角相等）下，两个电流同相位，两个电流的相量和等于短路点的总电流，其值较大。

利用每个电力元件在内部与外部短路时两侧电流相量的差别可以构成电流差动保护，利

用两侧电流相位的差别可以构成电流相位差动保护，利用两侧功率方向的差别可以构成方向比较式纵联保护，利用两侧测量阻抗的大小和方向等还可以构成其他原理的纵联保护。利用某种通信通道同时比较被保护元件两侧正常运行与故障时电气量差异的保护，称为纵联保护。它们只在被保护元件内部故障时动作，可以快速切除被保护元件内部任意点的故障，被认为具有绝对的选择性，常被用作 220kV 及以上输电网络和较大容量发电机、变压器、电动机等电力元件的主保护。

除反应上述各种电气量变化特征的保护外，还可以根据电力元件的特点实现反应非电量特征的保护。例如，当变压器油箱内部的绕组短路时，反应于变压器油受热分解所产生的气体，构成瓦斯保护；反应于电动机绕组温度的升高而构成的过热保护等。

### 1.2.2 保护装置的构成 (Elements of Relay Protection)

一般继电保护装置由测量比较元件、逻辑判断元件和执行输出元件三部分组成，如图 1.3 所示。现分述如下。



图 1.3 继电保护装置的组成方框图

#### 1. 测量比较元件

测量比较元件测量通过被保护的电力元件的物理参量，并与给定的值进行比较，根据比较的结果，给出“是”、“非”、“0”或“1”性质的一组逻辑信号，从而判断保护装置是否应该启动。根据需要继电保护装置往往有一个或多个测量比较元件。常用的测量比较元件有：被测电气量超过给定值动作的过量继电器，如过电流继电器、过电压继电器、高周波继电器等；被测电气量低于给定值动作的欠量继电器，如低电压继电器、阻抗继电器、低周波继电器等；被测电压、电流之间相位角满足一定值而动作的功率方向继电器等。

#### 2. 逻辑判断元件

逻辑判断元件根据测量比较元件输出逻辑信号的性质、先后顺序、持续时间等，使保护装置按一定的逻辑关系判定故障的类型和范围，最后确定是否应该使断路器跳闸、发出信号或不动作，并将对应的指令传给执行输出部分。

#### 3. 执行输出元件

执行输出元件根据逻辑判断部分传来的指令，发出跳开断路器的跳闸脉冲及相应的动作信息、发出警报或不动作。

### 1.2.3 继电保护的工作回路 (Working Circuit of Relay Protection)

要完成继电保护的任務，除需要继电保护装置外，必须通过可靠的继电保护工作回路的正确工作，才能最后完成跳开故障元件的断路器、对系统或电力元件的不正常运行状态发出警报、正常运行时不动作的任务。

在继电保护的工作回路中一般包括：将通过一次电力设备的电流、电压线性地转变为适合继电保护等二次设备使用的电流、电压，并使一次设备与二次设备隔离的设备，如电流、电压互感器及其与保护装置连接的电缆等；断路器跳闸线圈及与保护装置出口间的连接电缆，指示保护装置动作情况的信号设备；保护装置及跳闸、信号回路设备的工作电源等。图

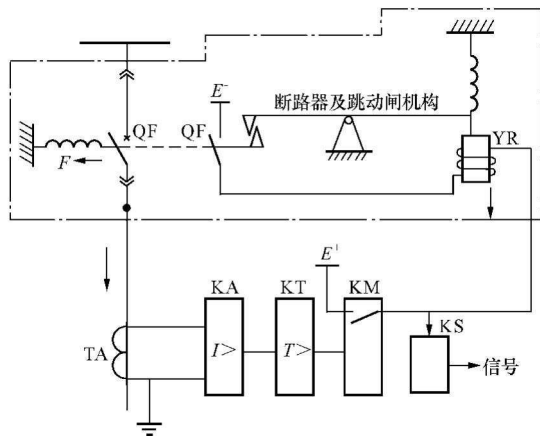


图 1.4 过电流保护工作原理图

1.4 以过电流保护为例，展示了一个简单的保护工作回路的原理接线。

电流互感器 TA 将一次额定电流变换为二次额定电流 5A 或 1A，送入电流继电器 KA（测量比较元件），当流过电流继电器的电流大于其预定的动作值（整定值，可调整）时其输出启动时间继电器 KT（逻辑部分），经预定（可调整）的延时（逻辑运算）后，时间继电器的输出启动中间继电器 KM（执行输出）并使其接点闭合，接通断路器的跳闸回路，同时使信号继电器 KS 发出动作信号。在正常运行时，由于负荷电流小于电流继电器的整定电流，电流继电器

不动作，整套保护不动作。当被保护的线路发生短路后，线路中流过的短路电流一般是额定负荷电流的数倍至数十倍，电流互感器二次侧输出的电流线性增大，流过电流继电器的电流大于整定电流而动作，启动时间继电器，经预定的延时后，时间继电器的触点闭合启动中间继电器，中间继电器的触点瞬时闭合，当断路器 QF 处于合闸位置时，其位置触点 QF 是闭合的，使断路器的跳闸线圈 YR 带电，在电磁力的作用下使脱扣机构释放，断路器在跳闸弹簧力  $F$  的作用下跳开，故障设备被切除，短路电流消失，电流继电器返回，整套保护装置复归，做好下次动作的准备。

可见，为安全可靠地完成继电保护的工作任务，继电保护回路中的任一个元件及其连线都必须时时刻刻正确工作。

#### 1.2.4 电力系统继电保护的工作配合 (Co-ordination of Relay Protection)

每一套保护都有预先严格划定的保护范围 [有时也称保护区 (zone of protection)]，只有在保护范围内发生故障，该保护才动作。保护范围划分的基本原则是任一个元件的故障都能可靠地被切除并且造成的停电范围最小，或对系统正常运行的影响最小。一般借助于断路器实现保护范围的划分。

图 1.5 给出了一个简单电力系统部分电力元件保护的保护区的划分，其中每个虚线框表示一个保护范围。由图可见，发电机保护与低压母线保护、低压母线保护与变压器保护等上、下级电力元件的保护区间必须重叠，这是为了保证任意处的故障都置于保护区内。同时重叠区越小越好，因为在重叠区内发生短路时，会造成两个保护区内所有的断路器跳闸，扩大停电范围。

为了确保故障元件能够从电力系统中被切除，一般每个重要的电力元件配备两套保护，一套称为主保护 (Primary Protection)，一套称为后备保护 (Back-up Protection)。图 1.5 示出的是各电力设备主保护的保护区。实践证明，保护装置拒动、保护回路中的其他环节损坏、断路器拒动、工作电源不正常乃至消失等时有发生，造成主保护不能快速切除故障，这

时需要后备保护来切除故障。

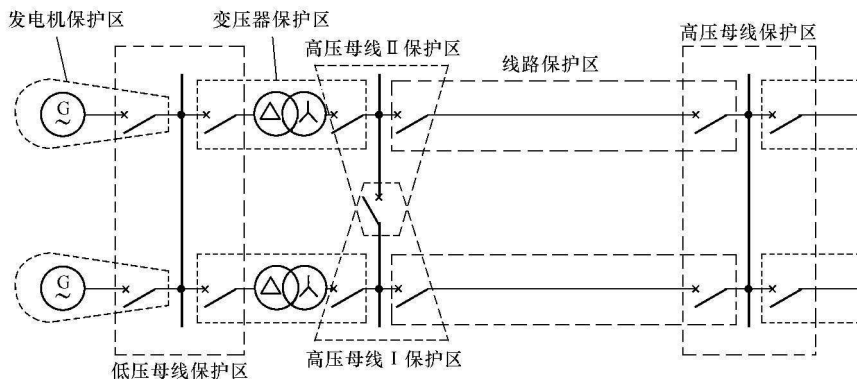


图 1.5 保护范围和配合关系示意图

一般下级电力元件的后备保护安装在上级（近电源侧）元件的断路器处，称为远后备保护。当多个电源向该电力元件供电时，需要在所有电源侧的上级元件处配置远后备保护。远后备保护动作将切除所有上级电源侧的断路器，造成事故扩大。同时，远后备保护的覆盖范围覆盖所有下级电力元件的主保护范围，它能解决远后备保护范围内所有故障元件任何原因造成的不能切除问题。远后备保护的配置、配合需要一定的系统接线条件，在高压电网中往往不能满足灵敏度的要求因而采用近后备附加断路器失灵保护的方案。近后备保护与主保护安装在同一断路器处，当主保护拒动时，由后备保护启动断路器跳闸；当断路器失灵时，由失灵保护启动跳开所有与故障元件相连的电源侧断路器。

由后备保护动作切除故障，一般会扩大故障造成的影响。为了最大限度的缩小故障对电力系统正常运行产生的影响，应保证由主保护快速切除任何类型的故障，一般后备保护都延时动作，等待主保护确实不动作后才动作。因此，主保护与后备保护之间存在动作时间和动作灵敏度的配合。

由上述可见，电力系统中的每一个重要元件都必须配备至少两套保护，电力系统的每一处都在保护范围的覆盖下，系统任意点的故障都能被自动发现并切除。现代电力系统离开完善的继电保护系统是不能运行的，没有安装保护的电力元件，是不允许接入电力系统工作的。由成千上万个电力元件组成的现代电力系统，每一个电力元件如何配置保护、配备几套继电保护，以及各电力元件继电保护之间怎么配合，需要视电力元件的重要程度、电力元件对电力系统影响的重要程度等因素决定，根据多年的科学研究和运行经验，在 GB 14285—1993《继电保护和安全自动装置技术规程》中已作出明确规定。

### 1.3 对继电保护的基本要求

#### (Basic Requirements for Relay Protection)

动作于跳闸的继电保护，在技术上一般应满足四个基本要求，即可靠性（安全性和信赖

性)、选择性、速动性和灵敏性。这几“性”之间，紧密联系，既矛盾又统一，必须根据具体电力系统运行的主要矛盾和矛盾的主要方面，配置、配合、整定每个电力元件的继电保护。充分发挥和利用继电保护的科学性、工程技术性，使继电保护为提高电力系统运行的安全性、稳定性和经济性发挥最大效能。

### 1.3.1 可靠性 (Reliability)

可靠性包括安全性和信赖性，是对继电保护性能的最根本要求。所谓安全性，是要求继电保护在不需要它动作时可靠不动作，即不发生误动作。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，即不发生拒绝动作。

安全性和信赖性主要取决于保护装置本身的制造质量、保护回路的连接和运行维护的水平。一般而言，保护装置的组成元件质量越高、回路接线越简单，保护的工作就越可靠。同时，正确地调试、整定，良好地运行维护以及丰富的运行经验，对于提高保护的可靠性具有重要的作用。

继电保护的误动作和拒绝动作都会给电力系统造成严重危害。然而，提高不误动作的安全性措施与提高不拒动的信赖性措施往往是矛盾的。由于不同的电力系统结构不同，电力元件在电力系统中的位置不同，误动和拒动的危害程度不同，因而提高保护安全性和信赖性的侧重点在不同情况下有所不同。例如，对 220kV 及以上电压的超高压电网，由于电网联系比较紧密，联络线较多，系统备用容量较多，如果保护误动作，使某条线路、某台发电机或变压器误切除，给整个电力系统造成直接经济损失较小。但如果保护装置拒绝动作，将会造成电力元件的损坏或者引起系统稳定的破坏，造成大面积的停电事故。在这种情况下一般应该更强调保护不拒动的信赖性，目前要求每回 220kV 及以上电压输电线路都装设两套工作原理不同、工作回路完全独立的快速保护，采取各自独立跳闸的方式，提高不拒动的信赖性。而对于母线保护，由于它的误动将会给电力系统带来严重后果，则更强调不误动的安全性，一般以两套保护出口触点串联后跳闸的方式。

即使对于相同的电力元件，随着电网的发展，保护不误动和不拒动对系统的影响也会发生变化。例如，一个更高一级电压网络建设初期或大型电厂投产初期，由于联络线较少，输送容量较大，切除一个元件就会对系统产生很大影响，防止误动是最重要的；随着电网建设的发展，联络线越来越多，联系越来越紧密，防止拒动可能变成最重要了。在说明防止误动更重要的时候，并不是说拒动不重要，而是说，在保证防止误动的同时，要充分防止拒动；反之亦然。

### 1.3.2 选择性 (Selectivity of Protection)

继电保护的选择性是指保护装置动作时，在可能最小的区间内将故障从电力系统中断开，最大限度地保证系统中无故障部分仍能继续安全运行。它包含两种意思：其一是只应由装在故障元件上的保护装置动作切除故障；其二是要力争相邻元件的保护装置对它起后备保护的作用。

在图 1.6 所示的网络中，当线路 A—B 上 k1 点短路时，应由线路 A—B 的保护动作跳开断路器 QF1 和 QF2，故障被切除。而在线路 C—D 上 k3 点短路时，由线路 C—D 的保护动作跳开断路器 QF6，只有变电所 D 停电。故障元件上的保护装置如此有选择性地切除故障，



可以使停电的范围最小，甚至不停电。如果 k3 点故障时，由于种种原因造成断路器 QF6 跳不开，相邻线路 B—C 的保护动作跳开断路器 QF5，相对的停电范围也是较小的，相邻线路的保护对它起到了远后备

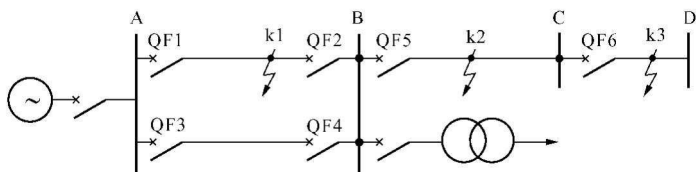


图 1.6 保护选择性说明图

作用，这种保护的動作也是有选择性的。若线路 B—C 的保护本来能够动作跳开断路器 QF5，而线路 A—B 的保护抢先跳开了断路器 QF1 和 QF3，则该保护动作是无选择性的。

这种选择性的保证，除利用一定的延时使本线路的后备保护与主保护正确配合外，还必须注意相邻元件后备保护之间的正确配合。其一是上级元件后备保护的灵敏度要低于下级元件后备保护的灵敏度；其二是上级元件后备保护的動作时间要大于下级元件后备保护的動作时间。在短路电流水平较低、保护处于動作边缘情况下，此两条件缺一不可。

### 1.3.3 速动性 (Speed)

继电保护的速动性是指尽可能快地切除故障，以减少设备及用户在大短路电流、低电压下运行的时间，降低设备的损坏程度，提高电力系统并列运行的稳定性。動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，价格比较昂贵，对大量的中、低压电力元件，不一定都采用高速動作的保护。对保护速动性的要求应根据电力系统的接线和被保护元件的具体情况，经技术经济比较后确定。一些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允许值（一般为 0.7 倍额定电压）；
- (2) 大容量的发电机、变压器和电动机内部发生的故障；
- (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系统有强烈干扰的故障。

在高压电网中，维持电力系统的暂态稳定性往往成为继电保护快速性要求的决定性因素，故障切除越快，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）越高，越能发挥电网的输电效能。图 1.7 给出某电网同一点发生不同类型短路时，暂态稳定极限随故障切除时间的变化曲线。

故障切除时间等于保护装置和断路器動作时间的总和，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。

### 1.3.4 灵敏性 (Sensitivity)

继电保护的灵敏性，是指对于其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规定的保护范围内部故障时，在系统任意的运行条件下，无论短路点的位置、短路的类型如何，以及短路点是否有过渡电阻，当发生短路时都能敏锐感觉、正确反应。灵敏性通常用灵敏系数或灵敏度来衡量，增大灵敏度，增加了保护動作的信赖性，但有时与安全性相矛盾。在 GB 14285—1993《继电保护和安全自动装置技术规程》中，对各类保护的灵敏系数的要求都作了具体的规定，一般要求灵敏系数在 1.2~2 之间。