

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



DIANLI XITONG  
JIDIAN BAOHU

# 电力系统 继电保护

霍利民 主编

葛丽娟 吕佳 副主编  
刘伟娜 宗哲英



中国电力出版社

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

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



DIANLI XITONG  
JIDIAN BAOHU

# 电力系统 继电保护

主 编 霍利民  
副主编 葛丽娟 吕 佳  
刘伟娜 宗哲英  
编 写 张 青 于 尧  
陈俊红 张立国  
陈 丽 谢云芳  
闫国琦  
主 审 刘学军 张 举



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”规划教材。

本书着重阐明电力系统继电保护的基本原理、各种基本继电器的分析方法和整定原则，融入了继电保护新技术，反映了继电保护技术的新发展。全书共分九章，主要内容包括绪论，电网的电流保护、距离保护，输电线路纵联保护和自动重合闸，电力变压器、发电机和母线等元件的保护，微机保护的软、硬件基本知识。

本书主要作为高等学校电气工程及其自动化和农业电气化与自动化专业本科教材，也可作为高职高专相关专业的教材或电力工程技术人员的参考用书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统继电保护/霍利民主编. —北京: 中国电力出版社, 2008

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 7752 - 0

I. 电… II. 霍… 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 119817 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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2008 年 8 月第一版 2008 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.75 印张 333 千字

定价 22.00 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

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神，加强教材建设，确保教材质量，中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校，满足学科发展和人才培养的需求，坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

本书的编写遵循继电保护技术发展的历史，强调了叙述的系统性、逻辑性和严密性，便于初学者理解和掌握。从传统的继电器结构和作用框图入手，对继电保护的基本概念、基本原理和基本分析方法由浅入深地做了较全面的阐述，在此基础上，对微机保护的原理、特点、软硬件构成和实际应用进行了较深入的介绍和分析。

全书以电流保护、距离保护、变压器保护和微机保护为重点章节。输电线路的电流保护、距离保护和变压器保护三章中有较详细的整定计算范例；微机保护一章给出了变压器比率制动式差动保护的实现方法，并介绍了变电站综合自动化的基本内容；自动重合闸一章中介绍了馈线自动化的新内容。每章均附有复习思考题，力求重点突出，理论结合实际，反映了近年来继电保护的发展和新技术成就。

参加本教材编写的单位有河北农业大学、内蒙古农业大学、华南农业大学三所院校。

本书第一章和第三章由刘伟娜、张青、于尧、陈俊红编写，第二章由吕佳编写，第五章由吕佳、闫国琦编写，第四章和第七章由宗哲英编写，第六章和第八章由葛丽娟编写，第九章由霍利民、张立国、陈丽、谢云芳编写。霍利民担任主编并进行全书的修改和统稿。

本书由北华大学刘学军教授主审，华北电力大学张举教授审阅了本书大纲并提出了许多有价值的意见和建议，在此深表谢忱！在编写过程中，借鉴和参考了书后所列参考文献，在此向文献作者致以衷心的感谢。

限于编者水平和时间所限，书中疏漏和不足之处在所难免，恳请专家和读者批评指正。

编 者

2008年5月

## 目 录

前言	
<b>第一章 绪论</b> .....	1
第一节 电力系统继电保护的作用.....	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.....	4
第四节 继电保护技术的发展简史.....	5
<b>第二章 电网的电流保护</b> .....	7
第一节 继电保护用继电器和电力互感器.....	7
第二节 相间短路的电流保护 .....	15
第三节 多侧电源电网相间短路的方向性电流保护 .....	27
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 .....	34
第五节 中性点非直接接地电网中单相接地故障的保护 .....	45
复习思考题 .....	50
<b>第三章 电网的距离保护</b> .....	52
第一节 距离保护概述 .....	52
第二节 阻抗继电器 .....	54
第三节 阻抗继电器的接线方式 .....	70
第四节 影响距离保护正确工作的因素及采取的防止措施 .....	73
第五节 距离保护的整定计算 .....	80
复习思考题 .....	85
<b>第四章 输电线路纵联保护</b> .....	87
第一节 输电线路纵联保护的基本原理和分类 .....	87
第二节 输电线路纵联保护的通信通道 .....	89
第三节 输电线路的导引线纵联差动保护 .....	94
第四节 方向比较式纵联保护 .....	97
第五节 相位比较式纵联保护.....	100
复习思考题.....	105
<b>第五章 输电线路的自动重合闸</b> .....	106
第一节 自动重合闸的作用及要求.....	106
第二节 三相自动重合闸.....	109
第三节 单相自动重合闸.....	114
第四节 综合自动重合闸.....	116
第五节 自动重合闸与继电保护的配合.....	118
第六节 重合器与分段器.....	119

复习思考题·····	123
<b>第六章 电力变压器的继电保护</b> ·····	124
第一节 电力变压器的故障类型、不正常运行状态和应加装的保护·····	124
第二节 变压器的瓦斯保护·····	125
第三节 变压器的电流速断保护·····	127
第四节 变压器纵联差动保护·····	128
第五节 变压器的电流和电压保护·····	145
第六节 变压器的零序保护·····	150
第七节 变压器的过励磁保护·····	153
复习思考题·····	154
<b>第七章 发电机保护</b> ·····	156
第一节 发电机的故障类型、不正常运行状态及其保护方式·····	156
第二节 发电机的纵差动保护·····	157
第三节 发电机匝间短路的横差动保护·····	161
第四节 发电机定子绕组单相接地保护·····	162
第五节 发电机的其他保护·····	165
复习思考题·····	167
<b>第八章 母线保护</b> ·····	168
第一节 母线故障和装设母线保护的基本原则·····	168
第二节 单母线保护·····	169
第三节 双母线保护·····	170
第四节 一个半断路器接线的母线保护·····	175
第五节 断路器失灵保护·····	176
复习思考题·····	177
<b>第九章 微机保护概述</b> ·····	178
第一节 微机保护系统简介·····	178
第二节 微机保护的硬件框图简介·····	179
第三节 微机保护的算法·····	187
第四节 微机变压器差动保护举例·····	197
第五节 提高微机保护可靠性的措施·····	204
第六节 变电站微机综合自动化系统简介·····	206
复习思考题·····	210
<b>附录 本书使用的文字符号、图形符号说明</b> ·····	211
<b>参考文献</b> ·····	213

## 第一章 绪 论

### 第一节 电力系统继电保护的作用

#### 一、电力系统的故障和不正常运行状态

电能是一种特殊的商品，为了远距离传送，需要提高电压，实施高压输电；为了分配和使用，需要降低电压，实施低压配电、供电和用电。通常把由各种类型的发电厂、输电设备和配电设施以及用电设备组成的电能生产与消费系统称为电力系统。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。

电能的生产量应时时刻刻与电能的消耗量保持平衡，并满足质量要求。由于一年内夏、冬季的负荷较春、秋季的大，一周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，随时都会因绝缘材料的老化、制造中的缺陷、自然灾害等原因出现故障而退出运行。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态。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。等式约束条件包括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。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。如发电机、变压器或用电设备的功率及其上限，母线电压及其上下限，输电线路中的电流及其上限，系统频率及其上下限。

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。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。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了额定电流。过负荷使元件的载流部分和绝缘材料的温度不断升高，加速了绝缘老化和损坏，可能发展成故障。此外，系统中出现有功功率缺额而引起的额定频率减低，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升高，以及系统发生振荡等，都属于不正常运行状态。不正常运行状态往往影响电能质量、设备寿命、用户生产产品的质量等。电力系统的所有一次设备在运行过程中由于雷击或鸟兽跨接电气设备、绝缘老化、过电压、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等原因会发生短路、断路等故障。最常见也是最危险的故障是各种形式的短路，其中以单相接地故障最为常见，而三相短路是比较少见的。此外，输电线路有时可能发生断线故障或者几种故障同时发生的复合故障。在发生故障时可能产生以下后果：

(1) 通过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) 短路电流通过系统中非故障元件时，由于发热和电动力作用引起它们的损坏或缩短使用寿命。

(3) 部分电力系统的电压大幅度下降, 使大量电力用户的正常工作和生活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, 甚至使整个系统瓦解。

## 二、继电保护装置及其任务

故障和不正常运行状态若不及时正确处理, 都可能引起事故。事故是指对用户少送电或停止供电, 电能质量降低到不能允许的程度, 造成人身伤亡及电气设备损坏等。

为防止电力系统中发生事故, 一般采取如下对策:

(1) 改进设计, 加强维护检修, 提高运行水平和工作质量, 采取各项积极措施消除或减少事故发生的可能性。

(2) 故障一旦发生, 迅速而有选择地切除故障元件, 保证无故障部分正常运行。

继电保护装置, 就是指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。它的基本任务包括如下两方面:

1) 发生故障时, 自动、迅速、有选择地将故障元件从电力系统中切除, 使故障元件免于继续遭受破坏, 保证非故障部分迅速恢复正常运行。

2) 对不正常运行状态, 根据运行维护条件 (例如有无经常值班人员), 而动作于发出信号、减负荷或跳闸, 且能与自动重合闸相配合。

## 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

为了完成继电保护的任務, 继电保护就必须能够区别是正常运行还是非正常运行或故障, 要区别这些状态, 最关键的就是要寻找这些状态下的参量情况, 找出其间的差别, 从而构成各种不同原理的保护。

#### 1. 利用基本电气参数的区别

发生短路后, 利用电流、电压、线路测量阻抗等的变化, 可以构成如下保护:

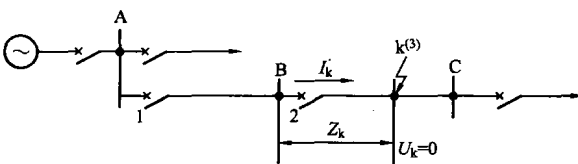


图 1-1 单侧电源线路

(1) 过电流保护。单侧电源线路如图 1-1 所示, 若在 BC 段上发生三相短路, 则从电源到短路点 k 之间将流过很大的短路电流  $I_k$ , 可以使保护 2 反应这个电流增大而动作于跳闸。

(2) 低电压保护。如图 1-1 所示, 短路点 k 的电压  $U_k$  降到零, 各变电站母线上的电压都有所下降, 可以使保护 2 反应于这个下降的电压而动作。

(3) 距离保护。距离保护反应于短路点到保护安装地之间的距离 (或测量阻抗) 的减小而动作。如图 1-1 所示, 设以  $Z_k$  表示短路点到保护 2 (即变电站 B 母线) 之间的阻抗, 则母线上的残余电压为  $\dot{U}_B = \dot{I}_k Z_k$ 。  $Z_k$  就是在线路始端的测量阻抗, 它的大小正比于短路点到保护 2 之间的距离。



2. 利用内部故障和外部故障时被保护元件两侧电流相位（或功率方向）的差别

图 1-2 所示为双侧电源网络。若统一规定电流的正方向是从母线流向线路，则对线路 AB 两侧电流相位（或功率方向）的分析如下。

正常运行时，A、B 两侧电流的大小相等，相位相差  $180^\circ$ ；当线路 AB 外部故障时，A、B 两侧电流仍大小相等，相位相差  $180^\circ$ ；当线路 AB 内部短路时，A、B 两侧电流一般大小不相等，在理想情况下（两侧电势同相位且全系统的阻抗角相等），两侧电流同相位。

从而可以利用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构成各种差动原理的保护（内部故障时保护动作），如纵联差动保护、相差高频保护、方向高频保护等。

3. 序分量是否出现

电气元件在正常运行（或发生对称短路）时，负序分量和零序分量为零；在发生不对称短路时，一般负序和零序都较大。因此，根据这些分量的是否存在可以构成零序保护和负序保护。此种保护装置具有良好的选择性和灵敏性。

4. 反应于非电气量的保护

反应于变压器油箱内部故障时所发生的气体而构成瓦斯保护；反应于电动机绕组的温度升高而构成过负荷保护等。

## 二、继电保护装置的组成

继电保护的种类虽然很多，但是在一般情况下，都是由三个部分组成的，即测量部分、逻辑部分和执行部分，其原理结构如图 1-3 所示。



图 1-3 继电保护装置的原理结构图

1. 测量部分

测量部分是测量被保护元件工作状态（正常工作、非正常工作或故障状态）的一个或几个物理量，并和已给的整定值进行比较，从而判断保护是否应该启动。

2. 逻辑部分

逻辑部分的作用是根据测量部分各输出量的大小、性质、出现的顺序或它们的组合，使保护装置按一定的逻辑程序工作，最后传到执行部分。

3. 执行部分

执行部分的作用是根据逻辑部分送的信号，最后完成保护装置所担负的任务。如故障时，动作于跳闸；不正常运行时，发出信号；正常运行时，不动作。

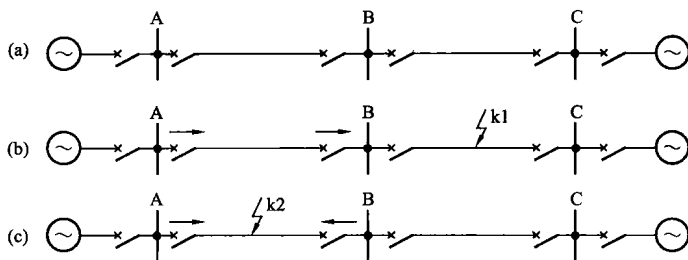


图 1-2 双侧电源网络

(a) 正常运行情况；(b) 线路 AB 外部短路情况；  
(c) 线路 AB 内部短路情况

### 第三节 对继电保护的基本要求

电力系统继电保护的基本性能应满足四个基本要求，即选择性、速动性、灵敏性、可靠性。这些要求之间，有的相辅相成，有的相互制约，需要针对不同的使用条件，分别进行协调。

#### 一、选择性

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。图 1-4 所示的网络接线中，当 k1 点短路时，首先应先由距离短路点最近的保护 3 动作跳闸，将故障线路 CD 切除，而变电站 ABC 继续供电；而不是由保护 1 或 2 首先动作跳闸，中断变电站 BCD 的供电，造成大面积停电。

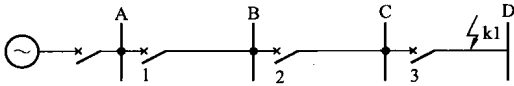


图 1-4 有选择性动作的说明

在要求继电保护动作有选择性的同时，还必须考虑继电保护或断路器有拒绝动作的可能性。图 1-4 中 k1 点短路时，应该保护 3 动作，但由于某种原因，该处的继电保护或断路器拒绝动作时，此时如果前一条线路 BC 的保护 2 动作，故障也可消除（使停电范围不致过大），线路 BC 的保护又称为相邻元件（下一条线路 CD）的后备保护。由于这个保护 2 相对于线路 CD 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，在某些元件上应装设单独的主保护和后备保护，如在线路 CD 上装设两套保护。

#### 二、速动性

短路时快速切除故障，可以缩小故障范围，减轻短路引起的破坏程度，减小对用户工作的影响，提高电力系统的稳定性。因此，在发生故障时，应使保护装置能迅速动作以切除故障。

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，价格比较昂贵。电力系统在一些情况下，允许保护装置带有一定的延时切除故障。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，必须快速切除的高压输电电路上发生的故障；
- (2) 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）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、对通信系统或铁道信号系统有强烈干扰的故障等。

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

#### 三、灵敏性

保护装置的灵敏性，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,以及短路点是否存在过渡电阻,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。关于灵敏度的求取方法在以后各章中还将分别予以讨论。

#### 四、可靠性

保护动作可靠性是指在规定的保护范围内发生了属于它应该动作的故障时,它不应该拒绝动作,而在其他不属于它应该动作的情况下,则不应该误动作。

影响保护动作可靠性的因素包括内在和外在两方面因素。内在的因素主要是装置本身的质量,如保护原理是否成熟、所用元件的好坏、结构设计是否合理、制造工艺水平、内外接线情况、触点多少等。外在的因素主要体现在运行维护水平、调试和安装是否正确上。

以上四个基本要求是分析研究继电保护的基础,也是贯穿全课程的一个基本线索。根据被保护元件在电力系统中的地位和作用协调处理各个性能指标之间的关系,取得合理统一,达到保证电力系统安全运行的目的。

### 第四节 继电保护技术的发展简史

继电保护技术是随着电力系统的发展而发展起来的。电力系统中的短路是不可避免的。短路必然引起电流的增大,因而为了保护发电机免受电流的破坏,首先出现了反应电流超过一预定值的过电流保护。熔断器就是最早的、最简单的过电流保护。这种保护方式至今仍广泛应用于低压线路和用电设备。熔断器的特点是融保护装置与切断电流的装置于一体,因而最为简单。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(断路器)的过电流继电器。1890年出现了装于断路器上直接反应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保护技术发展的开端。

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相比较的保护原理,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,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。在1975年前后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、保护装置的结构型式和制造工艺也发生了巨大的变革。在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保护组成的。这些继电器都具有机械转动部件,统称为机电式继电器。在20世纪50年代,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。这种保护装置体积小,功率消耗小,动作速度快,无机械转动部分,称为电子式静态保护装置。20世纪80年代后期,标志着静态继电保护从第一代(晶体管式)向第二代

(集成电路式)的过渡。20世纪90年代微机保护装置已取代集成电路式继电保护装置,成为静态继电保护装置的主要形式,并沿着网络化、智能化以及保护、测量、控制和数据通信一体化的方向不断前进。总之,在20世纪50~90年代的40年时间里,继电保护的结构型式走过了机电式(电磁型、感应型)、整流式、晶体管式、集成电路式和微机式五个发展阶段。

## 第二章 电网的电流保护

电网的输电线路的电流电压保护包括相间短路的电流电压保护、相间短路的方向电流电压保护、接地短路的电流电压保护和接地短路的方向电流电压保护。

电流电压保护中一种电流保护是以反应电流增大而动作的电流测量元件为基础构成的；另一种电流电压保护是以反应电流增大而动作的电流测量元件和反应电压下降而动作的电压测量元件为基础构成的。相间短路的电流电压保护用于单电源辐射网络的线路上切除相间短路故障；相间短路的方向电流电压保护用于双电源网络及单电源环形网络的线路上切除相间短路故障；接地短路的电流电压保护用于单电源辐射网络的线路上切除单相接地短路故障；接地短路的方向电流电压保护用于双电源网络及单电源环形网络的线路上切除单相接地短路故障。

### 第一节 继电保护用继电器和电力互感器

继电器是组成继电保护装置的基本测量和起动元件。互感器是将一次回路的高电压和大电流变为二次回路的标准低电压和小电流，用以分别向测量仪表、继电器供电，正确反应电气元件的正常运行和故障情况。

#### 一、电磁型电流继电器

电磁型继电器是利用电磁原理工作的，电磁型继电器在 35kV 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。电磁型继电器基本结构型式有转动舌片式、螺管绕组式和吸引衔铁式三种。以上三种结构的继电器都是由电磁铁、可动衔铁（或舌片）、绕组、触点、反作用弹簧和止档组成的。通常电磁型电流和电压继电器采用转动舌片式结构，时间继电器采用螺管绕组式结构，信号继电器和中间继电器采用吸引衔铁式结构。

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定值而动作的继电器，在电流保护中常用 DL-10 系列电流继电器。电磁型电流继电器的工作原理可用图 2-1 (a) 说明。在绕组 1 中通以电流  $I_k$ ，则产生与其成正比的磁通  $\Phi$ ，磁通  $\Phi$  通过铁芯、空气隙和可动舌片构成闭合磁路。舌片在磁场中被磁化，产生电磁力  $F$  和电磁转矩  $M$ ，当电磁力足够大时，即可吸动舌片转动，使继电器动触点和静触点闭合，称为继电器“动作”。

首先，分析使继电器触电接通的力矩（即动作力矩）。根据电磁学原理可知，电磁力  $F$  和电磁转矩  $M$  与磁通的平方  $\Phi^2$  成正比，即

$$F = K_1 \Phi^2 \quad (2-1)$$

式中  $K_1$ ——比例常数。

磁通  $\Phi$  与绕组中通入的电流  $I_k$  产生的磁通势  $I_k W_1$  和磁通所经过的磁路的磁阻  $R_m$  有关，即

$$\Phi = \frac{I_k W_1}{R_m} \quad (2-2)$$

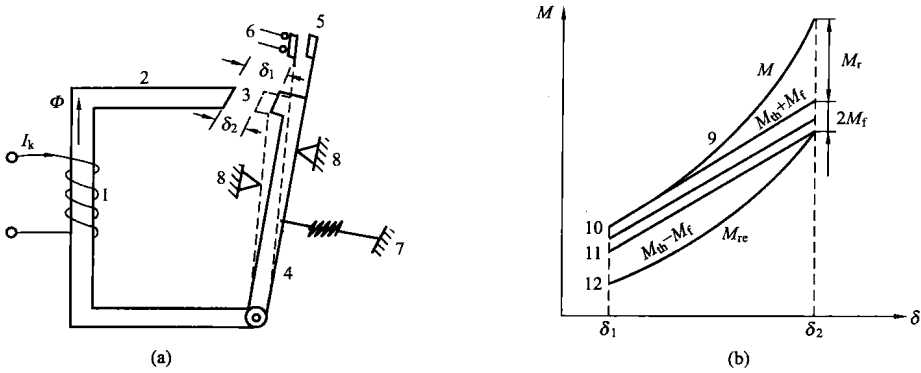


图 2-1 电磁型电流继电器的原理结构和转矩曲线

(a) 工作原理图；(b) 电磁转矩及反作用转矩与舌片行程的关系

1—绕组；2—铁芯；3—空气隙；4—被吸引的可动舌片；5—可动触点；6—固定触点；

7—弹簧；8—止档；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

将式 (2-2) 代入式 (2-1) 可得

$$F = K_1 \frac{I_k^2 W_1^2}{R_m^2} \quad (2-3)$$

电磁转矩  $M$  为

$$M = FL = K_1 L \frac{I_k^2 W_1^2}{R_m^2} = K_2 I_k^2 \quad (2-4)$$

式中  $K_2$ ——比例系数，当磁阻一定时， $K_2$  为常数。

式 (2-4) 说明，当磁阻为常数时，电磁转矩  $M$  正比于电流  $I_k$  的平方，而与通入绕组中的电流方向无关，所以根据电磁原理构成的继电器，可以制成直流继电器或交流继电器。

由于  $R_m = \frac{\delta}{\mu_0 S}$ ，如果假定磁路的磁阻全部集中在空气隙中，设  $\delta$  表示电磁铁与可动铁芯之间的气隙长度，由电磁力作用在舌片上的电磁转矩  $M$  即可表示为

$$M = FL = K_1 L \frac{I_k^2 W_1^2}{R_m^2} = K_1 L \frac{I_k^2 W_1^2 \mu_0^2 S^2}{\delta^2} = K_3 \frac{I_k^2}{\delta^2} \quad (2-5)$$

式中  $K_3$ ——比例常数。

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  $\delta_1$  产生一初始力矩  $M_{th1}$ 。由于弹簧的张力与伸长量成正比，因此，当空气隙长度由  $\delta_1$  减小到  $\delta_2$  时，弹簧产生的反抗力矩为

$$M_{th} = M_{th1} + K_4 (\delta_1 - \delta_2) \quad (2-6)$$

式中  $K_4$ ——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  $\delta$  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  $M_{th} + M_f$ 。

(1) 继电器的动作条件。为使继电器动作，必须增大电流  $I_k$ ，以增大电磁转矩  $M$ ，使其满足关系式

$$M \geq M_{th} + M_f \quad (2-7)$$

这是继电器能够动作的条件。

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

$$M_{act} = K_3 \frac{I_{act}^2}{\delta^2} \quad (2-8)$$

图 2-1 (b) 表示了当可动舌片由气隙为  $\delta_1$  的起始位置转动到气隙为  $\delta_2$  的终端位置时，电磁转矩及机械反抗转矩与行程的关系曲线。当  $I_{act}$  不变时，随着  $\delta$  的减小， $M_{act}$  与其平方倍成反比增加，按曲线 9 变化，而机械反抗力矩则按比例关系增加，如直线 10 所示，并且在整个  $\delta$  减小的过程中，电磁转矩随  $\delta$  的增大值大于机械反抗力矩随  $\delta$  的增大值，因此触电闭合的  $\delta_2$  位置将出现一个剩余力矩  $M_r$ ，即电磁转矩与反抗力矩的差值，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，为使其重新返回原位，就必须减小电流以减小电磁转矩，继电器在弹簧的反作用下将返回。在这个过程中，摩擦力又起着阻碍返回的作用，因此，为使继电器返回，弹簧的作用力矩  $M_{th}$  必须大于电磁力矩  $M$  及摩擦力矩  $M_f$  之和，即

$$M_{th} \geq M + M_f \quad (2-9)$$

这就是继电器能够返回的条件。

(4) 继电器的返回电流  $I_{re}$ 。满足上述条件，能使继电器返回原位（动合触点打开）的最大电流称为继电器的返回电流，以  $I_{re}$  表示，则对应于返回电流的电磁转矩为

$$M_{re} = K_3 \frac{I_{re}^2}{\delta^2} \quad (2-10)$$

在返回过程中，转矩与行程的关系如图 2-1 (b) 中的直线 11 和曲线 12 所示。

(5) 继电器的特性。由前所述，当  $I_k < I_{act}$  时，继电器不动作，而当  $I_k > I_{act}$  时，则继电器能够迅速动作，触点闭合；在继电器动作以后，只有当电流减小到  $I_k < I_{re}$  时，继电器才能立即返回原位，触点重新打开。无论起动或者返回，继电器的动作都是明确干脆的，它不可能停留在某一个中间位置。保护继电器的输入电流与输出状态之间的矩形的动作和返回特性称为“继电器特性”。过电流继电器的继电器特性如图 2-2 所示。

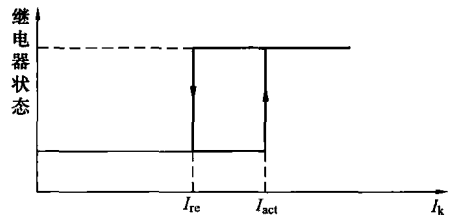


图 2-2 过电流继电器的继电器特性

继电器特性表明对保护继电器有两个重要的技术要求：规定出口状态垂直跃变，使保护继电器的出口应永远处在“返回”或“动作”状态的一种状态，决不能呈现处于两者之间的状态；规定动作值与返回值不相等，使保护继电器不会因为测量误差等原因而使其出口状态在“返回”或“动作”状态之间频繁切换。前者表明保护继电器动作的确切性要求，后者表明动作的稳定性要求。

(6) 继电器的返回系数。电磁型继电器的继电器特性是通过力矩相互作用实现的。能使继电器动作（动合触点闭合）的最小电流称为继电器的动作电流；能使继电器返回（动合触点打开）的最大电流称为继电器的返回电流。由于摩擦力矩的存在，使得返回电流与动作电流不等。

保护继电器的返回电流与动作电流的比值称为返回系数，记为  $K_{re}$ 。以过电流保护为例，其返回系数定义为

$$K_{re} = \frac{I_{re}}{I_{act}} \quad (2-11)$$

显然，对于过量继电器， $K_{re} < 1$ ；而对于欠量继电器， $K_{re} > 1$ 。由于剩余转矩  $M_r$  和摩擦转矩  $M_f$  的存在，决定了返回电流必然小于动作电流，故电流继电器的返回系数恒小于 1。在实际应用中，要求过量继电器有较高的返回系数，如 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。要提高返回系数，可以采用坚硬的轴承以减小摩擦力矩  $M_f$ ，或者改善磁路结构以减小剩余力矩  $M_r$ 。

(7) 继电器动作电流的调整方法。继电器动作电流的调整可以通过改变弹簧反作用转矩，即改变动作电流调整把手的位置来实现。当调整把手由左向右移动时，由于弹簧的弹力增强，使  $M_{in}$  增大，因而使继电器的动作电流增大；反之，如果将调整把手由右向左移动，则动作电流减小。

继电器动作电流的调整也可以通过改变继电器两个绕组的连接方法来实现，当绕组串联时电流动作值较并联时小一倍。

## 二、晶体管型继电器

在 20 世纪 70 年代以前，电力系统中广泛采用的都是电磁型、感应型等原理做成的有触点的机电式继电器。随着半导体电子技术的迅速发展及其在国民经济各个部门中的广泛应用，晶体管也被引入了继电保护技术领域中，做出了各种型式的无触点晶体管继电器及保护装置。由于其具有动作快、灵敏度高、体积小、功率消耗小、无可动部分等优点，因此已成为继电保护技术的发展方向之一，在国内外获得了日益广泛的应用。目前其存在的主要问题是晶体管元件等的工作可靠性还不够高，因而使用受到了限制。

晶体管型继电器的功能是由晶体管开关电路完成的。

### 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 TA 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。其原理接线图如图 2-3 所示。

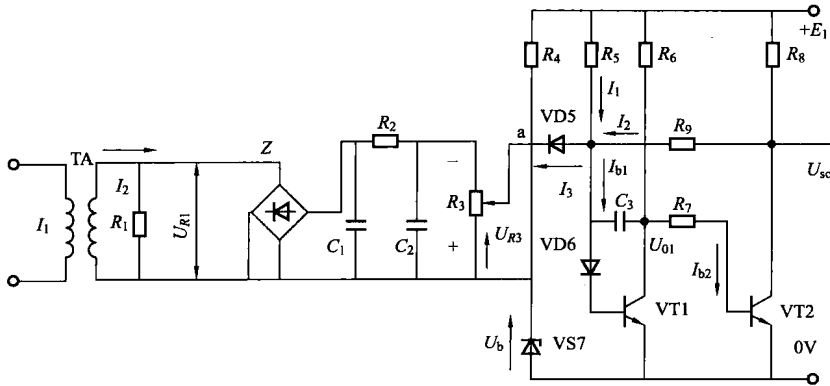


图 2-3 晶体管型电流继电器的原理接线图

(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。



