

21世纪高等学校规划教材  
Textbook Series of 21st Century

# 电力系统继电保护

谷水清 主编 李凤荣 副主编



中国电力出版社

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

# 前 言

本书是21世纪高等学校规划教材,是为了适应电力系统继电保护技术的发展,使在校电力系统自动化专业及相关专业学生全面了解和掌握电力系统继电保护技术,对现场继电保护管理人员、技术人员以及调度和运行人员的继续教育所编写的,可作为电力工程类高等学校及相关专业“电力系统继电保护”课程教材,也可作为现场培训教材。

本书按照深入浅出的原则对电力系统继电保护技术做了全面的介绍,尤其在相应章节中对微机保护基础知识和微机保护装置也进行了不同程度的介绍。对于所涉及到的相关基础知识也在书中或附录中给予介绍,同时每章后面附有复习思考题,有利于读者全面了解电力系统继电保护的概念及其所涵盖的内容,有利于读者自学。

全书共分十一章。第一章概述,简要介绍了电力系统继电保护的概念、对继电保护装置的基本要求以及继电保护技术国内外发展概况;第二章介绍了继电保护的基础知识,包括继电保护装置常用的互感器、常用继电器、微机保护常用算法以及微机保护硬件系统;第三、四、五章主要介绍了低压线路的相间短路保护和接地保护;第六章介绍了输电线路的距离保护,尤其对各种阻抗继电器动作特性做了较详尽的介绍,同时对微机型距离保护的软件工作情况做了一定的介绍;第七章介绍了输电线路的差动保护和高频保护,其中对光纤纵差动保护也进行了介绍;第八、九、十章主要介绍了元件保护,包括变压器保护、发电机保护及母线保护;第十一章主要介绍了厂用电设备保护。

本书第一、二章由谷水清编写,第三、四、五章和第十章由王丽君编写,第六章和第十一章由李凤荣编写,第七、八、九章由梁国艳编写,由谷水清进行全书的修改及定稿。全书承北京交通大学高沁翔教授审阅,并提出许多宝贵意见,在此表示深切的谢意。

由于新技术总在不断的发展,加之作者水平有限,书中难免有错误和不足之处,恳请专家和读者批评指正。

编 者

于沈阳工程学院

## 目 录

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 前言                               |    |
| <b>第一章 继电保护概述</b> .....          | 1  |
| 第一节 继电保护的任務.....                 | 1  |
| 第二节 继电保护装置的基本原理、组成及分类.....       | 2  |
| 第三节 对继电保护的基本要求.....              | 3  |
| 第四节 继电保护技术的发展.....               | 5  |
| 复习思考题.....                       | 6  |
| <b>第二章 继电保护的基础知识</b> .....       | 7  |
| 第一节 电流互感器及电压互感器.....             | 7  |
| 第二节 变换器.....                     | 11 |
| 第三节 对称分量滤波器.....                 | 12 |
| 第四节 幅值比较与相位比较.....               | 16 |
| 第五节 常用电磁型继电器和集成电路型过电流继电器.....    | 17 |
| 第六节 离散信号及系统.....                 | 21 |
| 第七节 采样信号和采样定理.....               | 24 |
| 第八节 数字滤波.....                    | 28 |
| 第九节 数字式继电保护算法.....               | 33 |
| 第十节 微机型继电保护装置的硬件系统及其作用原理.....    | 45 |
| 复习思考题.....                       | 61 |
| <b>第三章 输电线路相间短路电流、电压保护</b> ..... | 63 |
| 第一节 无时限电流速断保护.....               | 63 |
| 第二节 限时电流速断保护.....                | 65 |
| 第三节 定时限过电流保护.....                | 68 |
| 第四节 电流保护的接线方式.....               | 70 |
| 第五节 阶段式电流保护.....                 | 74 |
| 第六节 电流电压联锁速断保护.....              | 77 |
| 第七节 电流电压保护的评价.....               | 79 |
| 复习思考题.....                       | 80 |
| <b>第四章 输电线路相间短路的方向电流保护</b> ..... | 82 |
| 第一节 方向问题的提出及方向电流保护.....          | 82 |
| 第二节 功率方向继电器.....                 | 84 |
| 第三节 功率方向继电器的接线方式.....            | 89 |

|            |                         |            |
|------------|-------------------------|------------|
| 第四节        | 非故障相电流的影响和按相起动          | 92         |
| 第五节        | 方向电流保护的整定计算             | 94         |
|            | 复习思考题                   | 95         |
| <b>第五章</b> | <b>输电线路接地保护</b>         | <b>96</b>  |
| 第一节        | 中性点直接接地电网中单相接地故障的保护     | 96         |
| 第二节        | 小接地电流系统单相接地故障的保护        | 105        |
|            | 复习思考题                   | 114        |
| <b>第六章</b> | <b>电网的距离保护</b>          | <b>116</b> |
| 第一节        | 距离保护的基本工作原理及组成元件        | 116        |
| 第二节        | 阻抗继电器                   | 117        |
| 第三节        | 方向阻抗继电器的特殊问题            | 128        |
| 第四节        | 阻抗继电器的接线方式              | 136        |
| 第五节        | 影响距离保护正确工作的因素           | 144        |
| 第六节        | 距离保护的整定计算               | 156        |
| 第七节        | 微机距离保护举例                | 159        |
|            | 复习思考题                   | 173        |
| <b>第七章</b> | <b>输电线路的差动保护和高频保护</b>   | <b>175</b> |
| 第一节        | 输电线路的纵联差动保护             | 175        |
| 第二节        | 光纤纵联差动保护                | 177        |
| 第三节        | 平行双回线路保护                | 179        |
| 第四节        | 高频保护的基本原理               | 184        |
| 第五节        | 高频通道及高频信号类型             | 184        |
| 第六节        | 方向高频保护                  | 188        |
| 第七节        | 相差高频保护                  | 191        |
|            | 复习思考题                   | 198        |
| <b>第八章</b> | <b>电力变压器保护</b>          | <b>199</b> |
| 第一节        | 电力变压器的故障类型、不正常运行状态及保护配置 | 199        |
| 第二节        | 气体保护                    | 200        |
| 第三节        | 变压器纵差动保护                | 202        |
| 第四节        | 电流速断保护                  | 216        |
| 第五节        | 变压器相间短路的后备保护和过负荷保护      | 217        |
| 第六节        | 变压器的接地保护                | 222        |
| 第七节        | 三绕组变压器保护的特点             | 224        |
| 第八节        | 变压器的过励磁保护               | 226        |
| 第九节        | 微机变压器保护                 | 228        |
|            | 复习思考题                   | 233        |
| <b>第九章</b> | <b>同步发电机保护</b>          | <b>234</b> |

|             |                       |            |
|-------------|-----------------------|------------|
| 第一节         | 发电机的故障类型、不正常运行状态和保护方式 | 234        |
| 第二节         | 发电机纵联差动保护             | 236        |
| 第三节         | 同步发电机定子绕组匝间短路保护       | 239        |
| 第四节         | 同步发电机定子绕组的接地保护        | 242        |
| 第五节         | 同步发电机定子绕组相间短路的后备保护    | 246        |
| 第六节         | 同步发电机的负序电流保护和过负荷保护    | 247        |
| 第七节         | 同步发电机的失磁保护            | 250        |
| 第八节         | 同步发电机转子回路接地保护         | 257        |
| 第九节         | 同步发电机失步保护、逆功率保护       | 262        |
| 第十节         | 同步发电机过电压保护            | 264        |
| 第十一节        | 发电机变压器组保护特点           | 265        |
| 第十二节        | 微机型发电机变压器组保护          | 267        |
|             | 复习思考题                 | 270        |
| <b>第十章</b>  | <b>母线保护</b>           | <b>271</b> |
| 第一节         | 母线故障和装设母线保护的基本原则      | 271        |
| 第二节         | 单母线保护                 | 272        |
| 第三节         | 双母线保护                 | 277        |
| 第四节         | 3/2 断路器母线的保护          | 285        |
| 第五节         | 断路器失灵保护               | 291        |
| 第六节         | 微机型母线保护举例             | 293        |
|             | 复习思考题                 | 299        |
| <b>第十一章</b> | <b>厂用电气设备保护</b>       | <b>300</b> |
| 第一节         | 电动机的电流和电压保护           | 300        |
| 第二节         | 电动机的过热保护和温度电流保护       | 319        |
| 第三节         | 同步电动机的失步保护和失磁保护       | 320        |
| 第四节         | 电力电容器保护               | 323        |
| 第五节         | 电抗器保护                 | 329        |
|             | 复习思考题                 | 332        |
| 附录 1        | 本书使用的文字符号、图形符号说明      | 334        |
| 附录 2        | 集成电路型继电保护装置中常用的基本电路   | 336        |
| 附录 3        | 集成电路型距离保护装置举例         | 343        |
|             | 参考文献                  | 349        |

## 第一章 继电保护概述

### 第一节 继电保护的任務

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。

发电——输电——配电——用电构成了一个有机系统。通常把由各种类型的发电厂、输电设施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。电力系统的功能是将自然界的一次能源通过发电动力装置转化成电能，再经输电、变电和配电将电能供应到用户。

电力系统在运行中，各种电气设备可能出现故障和不正常运行状态。不正常运行状态是指电力系统中电气元件的正常工作遭到破坏，但没有发生故障的运行状态。如过负荷、过电压、频率降低、系统振荡等。故障主要包括各种类型的短路和断线，如三相短路、两相短路、单相接地短路、两相接地短路、发电机和电动机以及变压器绕组间的匝间短路、单相断线、两相断线等。其中最常见且最危险的是各种类型的短路，电力系统中的短路故障会产生如下后果：

(1) 故障点的电弧使故障设备损坏。

(2) 比正常工作电流大许多的短路电流产生热效应和电动力效应，使故障回路中的设备遭到损坏。

(3) 部分电力系统的电压大幅度下降，使用户的正常工作和生活遭到破坏，影响企业的经济效益和人们的正常生活。

(4) 破坏电力系统运行的稳定性，引起系统振荡，甚至使电力系统瓦解，造成大面积停电的恶性事故。

故障或不正常运行状态若不及时正确处理，都可能引发事故。事故是指对用户少送电或停止送电，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。

为了及时正确处理故障和不正常运行状态，避免事故发生，就产生了继电保护，它是一种重要的反事故措施。继电保护包括继电保护技术和继电保护装置。继电保护装置是完成继电保护功能的核心。

继电保护装置就是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。

继电保护的基本任务是：

(1) 当电力系统中某电气元件发生故障时，能自动、迅速、有选择地将故障元件从电力系统中切除，避免故障元件继续遭到破坏，使非故障元件迅速恢复正常运行。

(2) 当系统中电气元件出现不正常运行状态时，能及时反应并根据运行维护的条件发出信号或跳闸。

## 第二节 继电保护装置的基本原理、组成及分类

### 一、继电保护装置的基本原理

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，要想区别这些状态，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。

我们知道在电力系统发生短路故障时，许多参量较比正常时都有了变化，当然有的变化可能明显，有的不够明显，显然，变化明显的参量就适合用来作为保护判据，来构成保护。比如：根据短路电流较正常电流升高的特点，可构成过电流保护；利用短路时母线电压降低的特点可构成低电压保护；利用短路时线路始端测量阻抗降低可构成距离保护；利用电压与电流之间的相位差的改变可构成方向保护。除此之外，根据线路内部短路时，两侧电流相位差变化可以构成差动原理的保护。当然还可以根据非电气量的变化来构成某些保护，如反应变压器油在故障时分解产生的气体而构成的气体保护。

原则上说：只要找出正常运行与故障时系统中电气量或非电气量的变化特征（差别），即可形成某种判据，从而构成某种原理的保护，且差别越明显，保护性能越好。

各种原理的保护将在以后各章节中详细介绍。

### 二、继电保护装置的组成

继电保护装置一般由测量元件、逻辑元件和执行元件三部分组成，如图 1-1 所示。

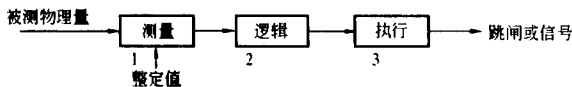


图 1-1 继电保护装置基本组成框图

#### 1. 测量元件

测量元件的作用是，测量从被保护对象输入的有關物理量（如电流、电压、阻抗、功率方向等），并与已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”等具有“0”或“1”性质的一组逻辑信号，从而判断保护是否应该启动。

#### 2. 逻辑元件

逻辑元件的作用是，根据测量部分输出量的大小、性质、输出的逻辑状态、出现的顺序或它们的组合，使保护装置按一定逻辑关系工作，最后确定是否应跳闸或发信号，并将有关命令传给执行元件。

逻辑回路有：或、与、非、延时启动、延时返回、记忆等。

#### 3. 执行元件

执行元件的作用是，根据逻辑元件传送的信号，最后完成保护装置所担负的任务。如：故障时跳闸，不正常运行时发信号，正常运行时不动作等。

### 三、继电保护装置的分类

继电保护装置按其被保护对象、保护原理、反应故障的类型、保护所起的作用，有不同的分类方法。如：

(1) 按被保护的對象分类：输电线路保护、发电机保护、变压器保护、电动机保护、母线保护等。

(2) 按保护原理分类：电流保护、电压保护、距离保护、差动保护、方向保护、零序保护等。

(3) 按保护所反应故障类型分类：相间短路保护、接地故障保护、匝间短路保护、断线保护、失步保护、失磁保护及过励磁保护等。

(4) 按继电保护装置的实现技术分类：机电型保护（如电磁型保护和感应型保护）、整流型保护、晶体管型保护、集成电路型保护及微机型保护等。

(5) 按保护所起的作用分类：主保护、后备保护、辅助保护等。

主保护是指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元件故障的保护。

后备保护是指当主保护或断路器拒动时用来切除故障的保护。后备保护又分为远后备保护和近后备保护两种。

远后备保护是指当主保护或断路器拒动时，由相邻电力设备或线路的保护来实现的后备保护。

近后备保护是指当主保护拒动时，由本电力设备或线路的另一套保护来实现后备的保护。

辅助保护是为补充主保护和后备保护的性或当主保护和后备保护退出运行而增设的简单保护。

### 第三节 对继电保护的基本要求

对动作于跳闸的继电保护，在技术上一应满足四个基本要求：选择性、速动性、灵敏性、可靠性。即保护四性。

#### 一、选择性

选择性是指电力系统发生故障时，保护装置仅将故障元件切除，而使非故障元件仍能正常运行，以尽量缩小停电范围的一种性能。

下面以图 1-2 为例，来说明选择性的概念。

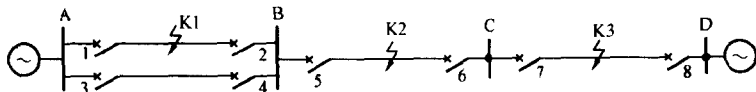


图 1-2 保护动作选择性的说明

在图 1-2 的网络中，当 K1 短路时，应该由距故障点最近的保护 1、2 动作，跳开 1QF、2QF，这样即切除了故障线路，又使停电范围最小，因此我们说此时保护 1、2 动作是有选择性的动作，也就是满足了选择性的要求。

同理当 K2 短路时，保护 5、6 动作跳开 5QF、6QF；当 K3 短路时，保护 7、8 动作跳开 7QF、8QF，都是有选择性的动作。若当 K3 短路时，7QF 拒动，保护 5 动作跳开 5QF 将故障



切除,那么此时停电范围扩大了。但是如果保护5不动作跳闸,那么故障线路就无法切除,因此,此时保护5的动作也是有选择性动作,只不过是保护5做了保护7的远后备保护而已。若保护7和7QF正确动作于跳闸同时,保护5也动作跳开5QF,则保护5的动作就是非选择性动作,我们也习惯称为越级跳闸。

## 二、速动性

速动性就是指保护快速切除故障的性能。故障切除时间包括继电保护动作时间和断路器的跳闸时间。即

$$t = t_p + t_{QF}$$

式中  $t$ ——故障切除时间;

$t_p$ ——保护动作时间;

$t_{QF}$ ——断路器跳闸时间。

一般的快速保护动作时间为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。

当系统发生故障时,快速切除故障可以提高系统并列运行的稳定性、减少用户在低电压下的工作时间、减少故障元件的损坏程度,避免故障进一步扩大。

## 三、灵敏性

灵敏性是指在规定的保护范围内,保护对故障情况的反应能力。满足灵敏性要求的保护装置应在区内故障时,不论短路点的位置与短路的类型如何,都能灵敏地正确地反应出来。

通常,灵敏性用灵敏系数来衡量,并表示为 $K_{sen}$ ,也称为灵敏度。任何继电保护装置对规定的保护区内短路故障,都必须具有一定的灵敏度,以保证在考虑了短路电流计算、保护动作值整定实验等误差后,在最不利于保护动作的条件下仍能可靠动作。

在计算保护的灵敏系数时,可按如下原则考虑:

- (1) 在可能的运行方式下,选择最不利于保护动作的运行方式;
- (2) 在所保护的短路类型中,选择最不利于保护动作的短路类型;
- (3) 在保护区内选择最不利于保护动作的那点作为灵敏度校验点(计算 $K_{sen}$ 所选的短路点)。

在《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 $K_{sen}$ 的要求都作了具体规定,在具体装置的灵敏度校验时可按照规程规定的灵敏系数来校验。

## 四、可靠性

可靠性是指发生了属于它该动作的故障,它能可靠动作,即不发生拒绝动作(拒动);而在不该动作时,它能可靠不动,即不发生错误动作(简称误动)。

简单说就是该动则动,不该动则不动。

影响保护动作的可靠性有内在的和外在的因素,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。外在的因素主要是体现在运行维护水平、调试和安装是否正确上。

以上讲述了对继电保护四项基本要求的含义。但是从一个保护设计与运行的角度上看,很难同时很好的满足这四项基本要求。因此在实际中,对一套继电保护的设计和评价往往是结合具体情况,协调处理各个性能之间的关系,取得合理统一,达到保证电力系统安全运行的目的。

## 五、继电保护工作特点

继电保护在电力系统中的作用极其重要,其任务完成的好坏,除装置本身性能之外,还依赖于继电保护工作者的水平和工作能力以及工作责任心,因此继电保护工作者要充分了解继电保护工作特点。

(1)电力系统是由很多复杂的一次主设备和二次保护、控制、调节、信号等辅助设备组成的一个有机的整体。因为每个设备都有其特有的运行特性,因此,任一设备的故障都将立即引起系统正常运行状态的改变或破坏,给其他设备以及整个系统造成不同程度的影响。因此,继电保护的工作牵涉到每个电气主设备和二次辅助设备。这就要求继电保护工作者对所有这些设备的工作原理、性能、参数计算和故障状态的分析等有深刻地理解,还要有广泛的生产运行知识。此外对于整个电力系统的规划设计原则、运行方式制订的依据、电压及频率调节的理论、潮流及稳定计算的方法以及经济调度、安全控制原理和方法等都要有清楚的概念。对于初学这门课程的学生,要求首先熟悉掌握电工原理、电机学及相关课程讲授的主要内容。

(2)电力系统继电保护是一门综合性专业课程,它奠基于理论电工、电机学和电力系统等基础理论,还与电子技术、通信技术、计算机技术和信息科学等新理论新技术有着密切的关系。纵观继电保护技术的发展史,可以看到电力系统通信技术上的每一个重大进展都导致了一种新保护原理的出现(例如高频保护和微波保护等),每一种新电子元件的出现也都引起了继电保护装置的革命。由机电式继电器发展到晶体管保护装置、集成电路式保护装置、微机保护装置。由此可见,继电保护工作者应密切注意相邻学科中新理论、新技术、新材料的发展情况,积极而慎重地运用各种新技术成果,不断发展继电保护的理论和提高其技术水平和可靠性指标,改善保护装置的性能,以保证电力系统的安全运行。

(3)继电保护是一门理论和实践并重的课程。为掌握继电保护装置的性能及其在电力系统故障时的动作行为,既需运用所学课程的理论知识对系统故障情况和保护装置动作行为进行分析,还需对继电保护装置进行实验室试验、在电力系统动态模型上试验、现场人工故障试验以及在现场条件下的试运行。仅有理论分析不能认为对保护性能的了解是充分的,只有经过各种严格的试验,试验结果和理论分析基本一致,并满足预定的要求,才能在实践中采用。因此,要搞好继电保护工作不仅要善于对复杂的系统运行和保护性能问题进行理论分析,还必须掌握科学的实验技术,尤其是在现场条件下进行调试和实验的技术。

(4)继电保护的工作稍有差错,就可能对电力系统的运行造成严重的影响,给国民经济和人民生活带来不可估量的损失。这就要求继电保护工作者具有高度的责任感,严谨细致的工作作风和较强的技术能力。此外,还要求他们有合作精神,主动配合各规划、设计和运行部门分析研究电力系统发展和运行情况,了解对继电保护的要求,以便及时采取应有的措施,确保继电保护满足电力系统安全运行的要求。

## 第四节 继电保护技术的发展

继电保护技术的发展是伴随电力系统、电子技术、计算机技术、通信技术发展而发展。从继电保护装置结构方面来看,它的发展过程大致可分为五个阶段:机电型保护阶段、整流

型保护阶段、晶体管型保护阶段、集成电路型保护阶段、微机型保护阶段。从它的构成原理方面来看，一直是随着电力系统发展而不断提出相应的新原理保护，新原理保护又在电力系统运行中不断完善，不断趋向成熟。

随着电子技术、通信技术和计算机技术的不断发展，继电保护必将向着综合自动化领域迈进，目前微机保护已经在全国普遍应用。就保护的原理方面目前仍然没有太大的突破，但是在实现手段上有了根本的变化。微机保护与以往的各种类型的继电保护相比，是采用数字计算技术实现的各种保护功能。由于微机保护具有灵活性大、可靠性高、易于获得附加功能和维护调试方便等优点，因此必将越来越多的应用，有着很好的发展前途。但是，采用微机保护要求良好的抗电磁干扰措施和较好的工作环境；同时，微机保护所有保护功能都是依赖软件实现的，硬件电路几乎是一样的，这样一套硬件电路可以完成多个保护功能，也就给硬件电路提出了更高的要求；另外，由于微机保护采用的硬件芯片发展迅速，更新换代时间短，从而导致微机保护服役时间比较短。

我国电力系统有着输电线路长、输送功率大、系统结构薄弱、安全性要求高的特点，国产继电保护装置更适合国情。考虑到我国幅员广大，各地继电保护水平不一、经济发展水平的差异，目前运行的保护装置仍然有机电型、整流型和集成电路型。当然随着科学技术的不断进步，新型保护装置也会不断出现，保护装置也将更加成熟，给继电保护工作者和电力系统安全运行带来更美好的前景。

继电保护技术发展历程。

保护原理方面：

过电流保护（最早熔断器）→电流差动保护→方向性电流保护→  
（1901年）（1908年）（1910年）

距离保护→高频保护→微波保护→行波保护、光纤保护  
（1920年）（1927年）（20世纪50年代）（20世纪70年代）

结构型式方面：

机电型（电磁型、感应型）→整流型→晶体管型→集成电路型→微机型

## 复习思考题

- 1-1 什么是电力系统故障、不正常运行状态与事故？它们之间有何关系？
- 1-2 什么是继电保护装置？其任务是什么？
- 1-3 举例说明继电保护选择性的概念。
- 1-4 继电保护装置一般由哪几部分组成？其作用是什么？
- 1-5 后备保护的作用是什么？什么是近后备和远后备？

## 第二章 继电保护的基础知识

### 第一节 电流互感器及电压互感器

#### 一、保护用电流互感器

保护用电流互感器是将电力系统的一次电流按一定的变比变换成二次较小电流，供给测量表和继电器，同时还可以使二次设备与一次高压隔离，保证人身与设备的安全。电流互感器均是单相式，一次通入的是电流源，二次接相应负载。

##### (一) 电流互感器正方向规定

制造厂家常在电流互感器一次绕组两端，分别用 L1、L2 标记出它的始端和末端，用 K1、K2 标记二次绕组的始端和末端，如图 2-1 (a) 所示。一次绕组始端 L1 和二次绕组始端 K1 为同极性端，同理 L2 和 K2 也为同极性端。我们通常用 \* 标记在 L1 和 K1 上，或 L2 和 K2 上，来表明它们是同极性端，如图 2-1 (b) 所示。

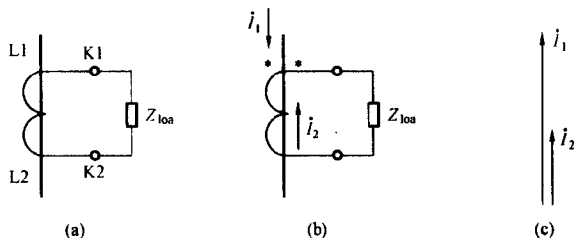


图 2-1 电流互感器极性、正方向规定、电流相量图  
(a) 电流互感器极性；(b) 正方向规定；(c) 电流相量图

保护用电流互感器正方向规定如图 2-1 (b) 所示，一、二次电流相量关系如图 2-1 (c) 所示，等值电路如图 2-2 所示。保护用电流互感器这样规定正方向以后，当忽略励磁电流时，一次电流与二次电流相位相同，便于以后用相量图分析保护动作行为。

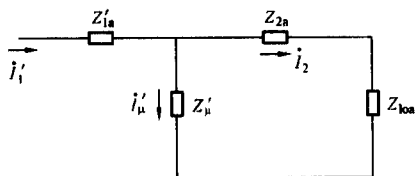


图 2-2 电流互感器等值电路

从电流互感器等值电路可见： $\dot{i}'_1 - \dot{i}'_\mu = \dot{i}_2$ ，因为电流互感器二次所接的负荷阻抗很小，远小于其励磁阻抗，所以它是在二次接近短路状态下运行的。一般情况下，在计算电流互感器二次电流时，往往忽略励磁电流，这样  $\dot{i}'_1 = \dot{i}_2$ 。

根据变压器磁势平衡原理

$$\dot{i}_1 W_1 = \dot{i}_2 W_2$$

所以

$$\dot{i}_2 = \dot{i}_1 / n_{TA} = \dot{i}'_1 \quad (2-1)$$

$$n_{TA} = W_2 / W_1$$

式中  $n_{TA}$ ——电流互感器变比。

## (二) 电流互感器误差

从电流互感器的等值电路可见, 由于励磁电流的存在, 使  $\dot{I}'_1 \neq \dot{I}_2$ , 即两者出现了大小不同和相位不同, 也就是说出现了比值误差和相角误差。

$$\text{比值误差} \quad \Delta I = \frac{I_2 - I'_1}{I'_1} \times 100\% \quad (2-2)$$

$$\text{角度误差} \quad \theta = \arg \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}'_1} \quad (2-3)$$

保护用电流互感器规定其比值误差小于 10%, 角度误差小于 7°。电流互感器如何在运行中满足误差的要求呢? 我们下面就讲述这个问题。

电流互感器的励磁电流与电流互感器一次电流大小和二次负载阻抗大小有关。当一次电流增大时, 励磁电流也增大; 同时励磁电流增大, 铁芯饱和程度增加, 励磁阻抗相应减小, 励磁电流增加。当电流互感器二次负载阻抗增加时, 在同样一次电流情况下, 励磁电流要增大。这也说明了电流互感器在运行中的误差主要是由电流互感器一次电流大小和二次负载阻抗大小决定的。那么一次电流最大值与二次负载阻抗  $Z_{\text{load}}$  之间有一定的关系, 这个关系就是我们经常说的电流互感器 10% 误差曲线。

所谓电流互感器 10% 误差曲线是指: 电流互感器比值误差为 10%, 角度误差小于 7°, 电流互感器一次电流倍数  $m \left( m = \frac{I_1}{I_{1N}} \right)$  与允许的二次负载阻抗  $Z_{\text{load}}$  之间的关系曲线, 如图 2-

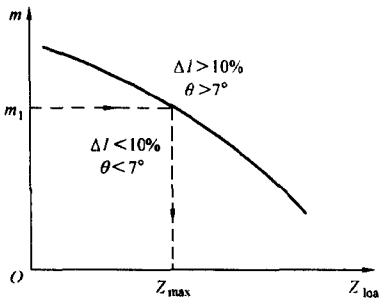


图 2-3 电流互感器 10% 误差曲线

3 所示。10% 误差曲线通常是由制造厂家给定或试验测得。它主要是用来校验电流互感器是否满足误差要求的。校验的步骤是: 首先求出电流互感器最大短路电流相对于额定电流的倍数, 如图 2-3 中的  $m_1$  值, 再按图中箭头方向确定最大二次负载阻抗  $Z_{\text{max}}$ 。若电流互感器实际接入的二次负载阻抗小于  $Z_{\text{max}}$ , 则电流互感器误差满足要求, 否则就需要减小电流互感器二次负载阻抗或采用两个变比相等的电流互感器串联使用来减小电流互感器二次负载阻抗以满足电流互感器的误差要求。

## 二、电压互感器

电压互感器是将电力系统的一次电压按一定的变比变换成二次较小电压, 供给测量表和继电器, 同时还可以使二次设备与一次高压隔离, 保证人身和设备的安全。其工作原理与变压器基本相同。

### (一) 电磁式电压互感器常用接线方式

电磁式电压互感器常用接线方式有: 两个单相式电压互感器构成的 V-V 接线; 三个单相电压互感器构成的星形接线; 三相五柱式电压互感器的接线方式。如图 2-4 (a)、(b)、(c) 所示。

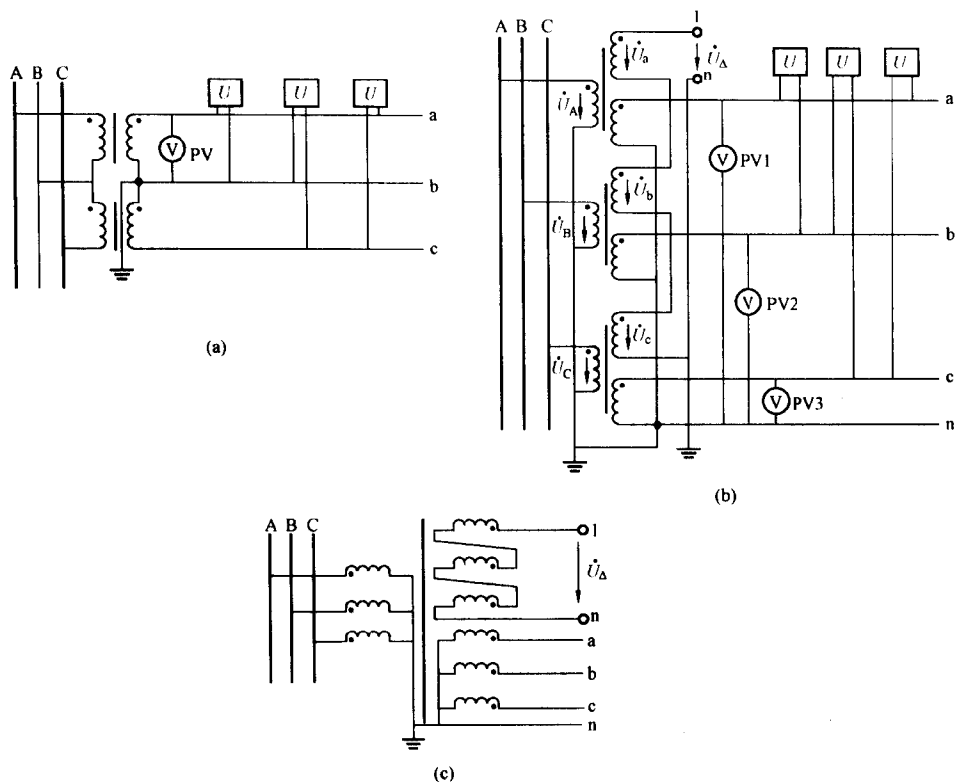


图 2-4 电磁式电压互感器常用接线方式

(a) 两个单相式电压互感器构成的 V-V 接线; (b) 三个单相电压互感器构成的星形接线;

(c) 三相五柱式电压互感器的接线方式

## (二) 各接线方式特点

### 1. 两个单相式电压互感器构成的 V-V 接线

从图 2-4 (a) 可见, 这种接线方式可以获得对称的三个线电压, 但不能获得相电压。当自动装置和继电保护装置以及测量表计只需要线电压时, 可以采用此接线方式。该接线方式电压互感器变比为  $U_{1N}/100V$  ( $U_{1N}$  为电压互感器一次额定电压)。这种接线方式适用于小电流接地系统。

### 2. 三个单相电压互感器构成的星形接线

从图 2-4 (b) 可见, 每个单相电压互感器二次侧都有一个主二次绕组和一个辅助二次绕组, 一般主二次绕组接成星形, 辅助二次绕组为开口三角接线, 这样就可以获得相电压、线电压和零序电压。

开口三角形绕组的输出电压为

$$\dot{U}_{\Delta} = \dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = \frac{1}{n_0}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) = \frac{1}{n_0}3\dot{U}_0 \quad (2-4)$$

式中  $n_0$ ——电压互感器一次绕组对辅助二次绕组的变比 [使用在大电流接地系统中时  $n_0 = (U_{1N}/\sqrt{3})/100V$ ; 使用在小电流接地系统中时  $n_0 = (U_{1N}/\sqrt{3})/(100/3V)$ ]。

电压互感器一次绕组电压为接入系统的相电压, 二次主绕组电压为  $100/\sqrt{3}V$ , 即一次绕组对二次主绕组的变比是:  $(U_{1N}/\sqrt{3})/(100/\sqrt{3}V)$ 。

### 3. 三相五柱式电压互感器的接线方式

三相五柱式电压互感器是具有五个磁柱的铁芯, 三个一次绕组绕在中间的三个铁芯柱上。这种接线方式的工作情况与图 2-4 (b) 类似, 只是一般常用于小电流接地系统。

这种接线方式用于小电流接地系统中时, 其一次绕组对二次主绕组的变比是:  $(U_{1N}/\sqrt{3})/(100/\sqrt{3}V)$ ; 一次绕组对辅助二次绕组的变比为:  $(U_{1N}/\sqrt{3})/(100/3V)$ 。如果用于大电流接地系统中时其一次绕组对二次主绕组的变比是:  $(U_{1N}/\sqrt{3})/(100/\sqrt{3}V)$ ; 一次绕组对辅助二次绕组的变比为:  $(U_{1N}/\sqrt{3})/100V$ 。

### (三) 电压互感器误差

电压互感器等值电路与电流互感器等值电路相同, 工作时存在励磁电流, 同时电压互感器的负荷电流在一次绕组的电阻和二次绕组的电阻、漏抗上形成电压降, 也使电压互感器的二次电压与折算到二次侧的一次电压存在大小误差 (比值误差) 和角度误差, 但在继电保护中, 电压互感器的比值误差和角度误差在一般情况下可不考虑。

### 三、电压互感器与电流互感器的工作特点

电压互感器与电流互感器有相同的等值电路, 但是其工作原理是不同的, 这点在使用中要给予充分的注意。

(1) 电压互感器一次施加的是电压源, 而电流互感器一次输入的是电流源。因此, 电压互感器二次电压可看成是电压源, 而电流互感器二次电流可看成是电流源。

(2) 电压互感器的误差主要是由负荷电流在其内部阻抗上的电压降引起, 而电流互感器的误差主要是由励磁电流引起的, 所以电压互感器在正常工作情况下铁芯的工作磁密较电流互感器高得多。

(3) 电压互感器与电流互感器在正常工作情况下都有较大的励磁阻抗, 但是, 与二次负载阻抗相比, 两者就不同了。电压互感器二次接的负荷阻抗远远大于一次绕组和二次绕组的漏阻抗, 所以, 它相当于工作在二次侧开路状态; 而电流互感器由于其二次接的负荷阻抗很小, 所以它相当于工作在二次侧短路状态。

(4) 对于继电保护工作者来说, 在对继电保护装置进行调试时, 一定注意电流互感器二次不能开路, 电流互感器二次绕组与其他二次设备之间连接要可靠, 如果必须在电流互感器运行时拆除继电器线圈时, 也必须首先将电流互感器二次绕组短接, 然后再拆除继电器。这是因为如果电流互感器二次开路, 则一次电流全部变成励磁电流, 将使铁芯中的磁通猛增, 在二次绕组感应很高电压, 这对工作人员来说很危险。同时电流互感器也会因铁芯过热而烧坏。

## 第二节 变 换 器

在继电保护装置中,尤其是晶体管型保护、整流型保护和微机保护中,常用测量变换器(电流变换器、电压变换器、电抗变压器)来完成下述功能:

- (1) 按照保护装置构成原理的要求,进行电气量的变换与综合;
- (2) 将被保护设备的强电交流二次回路与保护装置的直流弱电回路相隔离;
- (3) 利用测量变换器一、二次绕组的屏蔽层,抑制干扰信号的侵入,提高保护装置的抗干扰能力。

下面分别介绍这三种变换器的工作原理及特点。

### 一、电压变换器 (TV)

电压变换器用于将一次电压变换成装置所需要的二次电压。它是单相式的,其等值电路与工作原理与单相电压互感器相同。

当忽略其比值误差和角度误差时,则二次输出电压为

$$\begin{aligned}\dot{U}_2 &= n_u \dot{U}_1 \\ n_u &= W_2/W_1\end{aligned}\quad (2-5)$$

式中  $n_u$ ——电压变换器变换系数;

$\dot{U}_1$ ——电压变换器一次输入电压;

$\dot{U}_2$ ——电压变换器二次输出电压。

### 二、电流变换器 (T)

电流变换器用于将一次电流变换成装置所需要的二次电压。它是由一台小型电流互感器和并联在二次侧的小电阻组成。

当忽略其比值误差和角度误差时,则二次输出电压为

$$\begin{aligned}\dot{U}_2 &= \frac{\dot{I}_1}{n_{TA}} R_2 = n_1 \dot{I}_1 \\ n_1 &= R_2/n_{TA} \\ n_{TA} &= W_2/W_1\end{aligned}\quad (2-6)$$

式中  $n_1$ ——电流变换器变换系数;

$n_{TA}$ ——T里的小型电流互感器变比;

$\dot{I}_1$ ——电流变换器一次输入电流;

$\dot{U}_2$ ——电流变换器二次输出电压。

### 三、电抗变压器 (UR)

电抗变压器用于将一次电流变换成装置所需要的二次电压。原理结构、原理图及等值电路分别如图 2-5 (a)、(b)、(c) 所示。



从电抗变压器结构图中可见，它的铁芯具有气隙，因此其励磁回路的励磁电抗  $X_\mu$  数值很小，相对于二次较大的负荷阻抗来说，完全可以忽略不计，故一次电流全部作为励磁电流，电抗变压器在工作时， $N_2$  绕组可认为处于开路状态。

$$\begin{aligned} \text{所以} \quad \dot{U}_{oc} &= \dot{I}_1 (R_m + jX_\mu) // (Z'_{3\sigma} + R'_\varphi) \\ \text{令} \quad Z_{br} &= (R_m + jX_\mu) // (Z'_{3\sigma} + R'_\varphi) \end{aligned}$$

式中  $Z_{br}$ ——电抗变压器的转移阻抗，它定义为  $\dot{U}_{oc}/\dot{I}_1$ 。

$$\text{则有} \quad \dot{U}_{oc} = Z_{br} \dot{I}_1 \quad (2-7)$$

可见在电抗变压器中，我们通过调节电抗变压器一、二次绕组的匝数可以改变  $\dot{U}_{oc}$  的大小；通过调节电抗变压器  $N_3$  绕组所接的电阻  $R_\varphi$  可以改变  $\dot{U}_{oc}$  的角度。

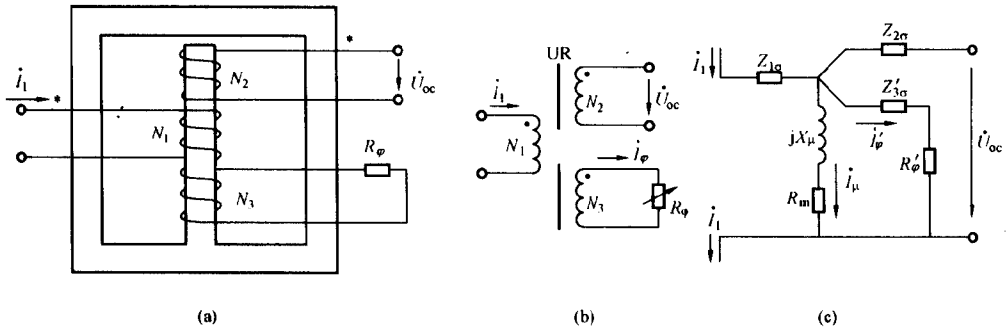


图 2-5 电抗变压器原理结构、原理图、等值电路

(a) 原理结构图；(b) 原理图；(c) 等值电路图

需要说明的是：电流变换器与电抗变压器都是将一次电流成比例地变换成二次电压的，但是在应用上有些不同。

电流变换器在磁路未饱和时，励磁电流可以忽略，这样其二次输出电压波形基本保持了一次电流信号的波形。

电抗变压器一次电流全部作为励磁电流，在暂态情况下，忽略铁芯有功损耗，其二次输出电压为

$$u_{oc} = L_\mu \frac{di_\mu}{dt} = L_\mu \frac{di_1}{dt} = \sqrt{2} I_w \omega L_\mu \sin \omega t - \sqrt{2} I_w \frac{L_\mu}{T_1} e^{-\frac{t}{T_1}} \quad (2-8)$$

从式 (2-8) 中可以看出，电抗变压器二次输出电压对一次电流中的谐波成分有放大作用，对一次电流中的非周期电流有抑制作用。

### 第三节 对称分量滤过器

为了提高保护装置的灵敏度，在构成保护装置时，经常采用序分量来作为保护的判据。