

# 水电站电气一次部分

何开杰 雷家兰

小型水电站运行工人培训教材

水利电力出版社

小型水电站运行工人培训教材

---

# 水电站电气一次部分

何开杰 雷家兰

水利电力出版社

## 内 容 提 要

本书是《小型水电站运行工人培训教材》的一个分册。

本书的内容包括以下几个部分：第1章和第2章着重介绍电网短路的概念及其简单的计算、电气触头、电弧产生和熄灭的基本原理；第3章至第6章为各种主要高、低压开关电器、仅用互感器、载流导体及绝缘子的基本结构、工作原理及有关的技术特性，并简略介绍载流导体截面积选择的条件及其计算方法；第7章着重介绍小型水电站常用的主接线和配电装置的类型；第8章介绍各种防雷器具的工作原理、用途及其布置方面的特点；第9章介绍接地的概念、接地的实施和接地电阻的测量。附录中列有各种主要电器和载流导体的特性参数。

本书可供具有中等文化水平的小型水电站运行工人培训用，也可作为自学参考书。

小型水电站运行工人培训教材

水电站电气一次部分

何开杰 雷家兰

\*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

\*

850×1168毫米 32开本 11.125印张 294千字 1插图

1990年1月第一版 1990年1月北京第一次印刷

印数0001—7300册

ISBN 7-120-01027-1/TV·339

定价7.00元

## 前 言

近年来，我国小水电建设发展很快。为了提高小水电站、电网运行工人的技术和管理水平，充分发挥小水电的经济效益，巩固和扩大办电成果，迫切需要加强对职工进行技术培训。为此，我们组织成都科技大学的有关同志，编写了培训讲义。经多次使用并广泛征求读者意见，现修改编写成这套“小型水电站运行工人培训教材”，供各地举办技术培训班之用。全套教材共十一册：《电工数学基础》、《电工原理》、《电子技术及应用》、《电机原理和运行》、《电工仪表和测量》、《水电站电气一次部分》、《水电站电气二次部分》、《地方电力系统》、《水轮机》、《水轮机调节》、《水轮发电机组辅助设备及自动化》。本教材内容丰富、针对性强、理论联系实际，凡小型水电站和35千伏及以下电网运行、维护、检修中应当掌握的主要知识，都作了较系统的讲述。对有关领域的新设备和新技术，也有简要的介绍。

本教材适用于培训具有初中毕业文化程度的小型水电站和电网的发、供电运行工人，也可作为具有同等文化程度的有关人员的自学参考书。各地可根据实际需要，选用其中有关分册，进行培训。一般以半年为一期，总教学时数控制在500左右。

《水电站电气一次部分》一书由何开杰、雷家兰编写，张万楷审阅，教学时数约为100学时。

由于受经验和水平限制，本书中存在的缺点和问题，恳请读者批评指正。

四川省地方电力公司

1984年11月

# 目 录

## 前言

|   |     |
|---|-----|
| 第1章 电气设备和电网短路 .....                       | 1   |
| 1-1 电气设备的分类、用途和应满足的要求 .....               | 1   |
| 1-2 电器的载流导体在持续状态下的发热 .....                | 5   |
| 1-3 短路过程的基本概念 .....                       | 9   |
| 1-4 简单的短路电流计算 .....                       | 16  |
| 1-5 运算曲线法计算短路电流 .....                     | 21  |
| 1-6 短路电流的非周期分量、冲击电流和总短路电流有效值的<br>计算 ..... | 27  |
| 1-7 短路电流的热效应 .....                        | 30  |
| 1-8 短路时载流导体之间的电动力 .....                   | 36  |
| 第2章 电气触头与电弧 .....                         | 41  |
| 2-1 触头的基本概念 .....                         | 41  |
| 2-2 触头的分类 .....                           | 44  |
| 2-3 电弧的基本概念 .....                         | 51  |
| 2-4 直流电弧的特性及熄灭 .....                      | 58  |
| 2-5 交流电弧的特性及熄灭 .....                      | 62  |
| 2-6 熄灭电弧的基本方法 .....                       | 67  |
| 第3章 低压开关电器 .....                          | 73  |
| 3-1 低压开关电器分类 .....                        | 73  |
| 3-2 刀开关 .....                             | 78  |
| 3-3 接触器 .....                             | 83  |
| 3-4 磁力起动器 .....                           | 89  |
| 3-5 自动空气开关 .....                          | 91  |
| 3-6 低压熔断器 .....                           | 98  |
| 第4章 高压开关电器 .....                          | 109 |
| 4-1 高压开关电器的分类 .....                       | 109 |
| 4-2 断路器的类型和技术特性 .....                     | 109 |

|            |                         |            |
|------------|-------------------------|------------|
| 4-3        | 电弧在油中自然熄灭的多油断路器         | 113        |
| 4-4        | 具有专门灭弧装置的多油断路器          | 115        |
| 4-5        | 少油断路器                   | 120        |
| 4-6        | 负荷开关                    | 127        |
| 4-7        | 断路器和负荷开关的操动机构           | 130        |
| 4-8        | 隔离开关                    | 140        |
| 4-9        | 隔离开关的操动机构               | 147        |
| 4-10       | 高压熔断器                   | 149        |
| <b>第5章</b> | <b>互感器</b>              | <b>156</b> |
| 5-1        | 概述                      | 156        |
| 5-2        | 电流互感器的原理及误差             | 157        |
| 5-3        | 电流互感器的主要参数及类型           | 160        |
| 5-4        | 电压互感器的原理及误差             | 167        |
| 5-5        | 电压互感器的主要参数和类型           | 170        |
| 5-6        | 电容式电压互感器                | 176        |
| 5-7        | 使用中的注意事项                | 178        |
| <b>第6章</b> | <b>载流导体和绝缘子</b>         | <b>180</b> |
| 6-1        | 概述                      | 180        |
| 6-2        | 裸导线                     | 181        |
| 6-3        | 母线                      | 183        |
| 6-4        | 电缆                      | 185        |
| 6-5        | 绝缘导线                    | 190        |
| 6-6        | 载流导体截面的选择               | 191        |
| 6-7        | 绝缘子                     | 196        |
| <b>第7章</b> | <b>电气主接线、自用电接线和配电装置</b> | <b>204</b> |
| 7-1        | 电气主接线的重要性及其基本要求         | 204        |
| 7-2        | 单母线接线                   | 207        |
| 7-3        | 双母线接线                   | 210        |
| 7-4        | 无母线的接线                  | 213        |
| 7-5        | 小型水电站主接线的特点             | 217        |
| 7-6        | 自用电接线                   | 220        |
| 7-7        | 小型水电站主接线举例              | 225        |

|            |                            |            |
|------------|----------------------------|------------|
| 7-8        | 配电装置 .....                 | 226        |
| <b>第8章</b> | <b>过电压及其保护 .....</b>       | <b>245</b> |
| 8-1        | 概述 .....                   | 245        |
| 8-2        | 雷电的起因 .....                | 246        |
| 8-3        | 在大气过电压作用下, 电气设备绝缘的性能 ..... | 248        |
| 8-4        | 电气设备的防雷保护措施 .....          | 251        |
| 8-5        | 避雷针和避雷线的作用 .....           | 253        |
| 8-6        | 避雷器的作用 .....               | 260        |
| 8-7        | 变电所的防雷保护 .....             | 273        |
| 8-8        | 水轮发电机的防雷保护 .....           | 279        |
| <b>第9章</b> | <b>接地装置 .....</b>          | <b>286</b> |
| 9-1        | 概述 .....                   | 286        |
| 9-2        | 接地的范围 .....                | 291        |
| 9-3        | 380V 低压电网中的接地 .....        | 292        |
| 9-4        | 各种接地装置之间的关系 .....          | 298        |
| 9-5        | 各种接地装置的接地电阻 .....          | 299        |
| 9-6        | 接地装置的实施 .....              | 300        |
| 9-7        | 接地电阻的测量 .....              | 301        |
| <b>附录</b>  | <b>.....</b>               | <b>309</b> |
| 附录1        | 裸导体载流量 .....               | 309        |
| 附录2        | 电力电缆载流量 .....              | 316        |
| 附录3        | 绝缘电线载流量 .....              | 321        |
| 附录4        | 金属导线的熔断电流 .....            | 326        |
| 附录5        | 高压油断路器技术数据 .....           | 328        |
| 附录6        | 隔离开关技术数据 .....             | 332        |
| 附录7        | 负荷开关技术数据 .....             | 336        |
| 附录8        | 操动机构技术数据 .....             | 338        |
| 附录9        | 熔断器技术数据 .....              | 344        |

# 第1章 电气设备和电网短路

## 1-1 电气设备的分类、用途和应满足的要求

在发电厂和变电所中，根据工艺流程的要求，要经常适时地对发电机、变压器、电动机和输电线路进行操作、控制、监测和保护。这就需要在发电厂和变电所中装设各种电气设备来实现上述任务。例如，机组的起、停需要采用开关电器，对生产过程的监察需要采用测量电器；在不正常运行和事故情况下，对电机、变压器和线路提供保护需要采用保护电器等等。此外，上述的电气设备还要按照一定的技术要求，通过载流导体相互连接起来在电气上形成一个整体。这个整体称为配电装置。

显然，要熟练地担负起发电厂和变电所运行值班、维护检修工作，就需要学习和掌握上述各类电气设备的类型、用途、工作原理及其主要技术性能。

### 一、电气设备的分类

按照电气设备在电能生产过程中的地位和作用，可以分为一次设备和二次设备两大类。

#### 1. 一次设备

一次设备是直接参与电能的生产、变换、输送和分配的电气设备。它们的特点是电压高（达 $10\sim 500\text{kV}$ ），电流大（达几千A到上万A）。由于这类设备与电能生产过程直接有关，因而，对发电厂和变电所的安全、经济的运行起着极为重要的作用。属于一次设备的有：发电机、变压器、电动机、断路器、隔离开关、母线和电力电缆等。

#### 2. 二次设备

二次设备是在电能生产过程中，用来对一次设备进行控制、操作、测量、监察和保护的电气设备。它的特点是，电压低（正



常时，交流不超过100V，直流不超过220V）、电流小（正常时，交流不超过5A，直流不超过10A）。二次设备在一定的程度上决定着生产过程的自动化水平，对保证一次设备安全、可靠地运行起着很重要的作用。属于二次设备的有：测量监察仪表、继电保护装置、自动装置、操作信号电器和控制电缆等。

## 二、一次设备的分类和用途

水电站主要的一次设备，可以用图1-1的电气接线示意图来说明。

由图可见一次设备可以分为如下四类即：电机（包括发电机和变压器），开关电器（包括断路器、隔离开关等），测量电器（包括电流互感器和电压互感器）以及限流和保护电器（包括限流电抗器和避雷器）。

图1-1中仅表示出电压为1000V以上高压电气设备，电压为1000V以下的低压电气设备大体上也可以分为以上四类。下面仅对后三类电气设备的特点和用途加以说明。

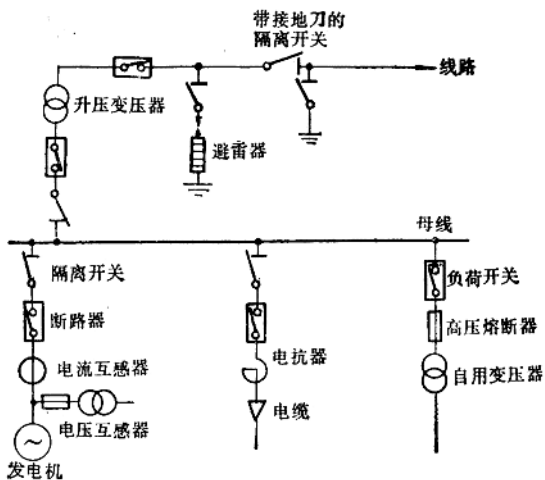


图 1-1 说明电器种类和用途的接线图

## 1. 开关电器

开关电器是用来接通和断开电路的一次设备。属于开关电器的有：高压断路器、高压隔离开关、低压空气开关、低压闸刀开关、接触器和高低压熔断器等。

开关电器可按照在结构上有无专门的灭弧装置区分为两类。有灭弧装置的开关电器能在正常和事故情况下切断电路的电流。无灭弧装置的开关电器则不具备这种带电切换电路的功能。高压断路器和高压隔离开关是这两类开关电器最典型的代表。

高压断路器按所采用的灭弧介质的种类可以分为，油断路器、真空断路器、空气断路器、六氟化硫断路器和负荷开关等。它不仅能在正常工作情况下进行操作，而且能在短路情况下进行操作（负荷开关除外）。断路器配备有专门的操动机构可以就地手动操作和远距离自动操作。

在电机、变压器、断路器等电气设备检修时，隔离开关用来使被检修的设备与其余带电部分隔离，并形成明显的间隙以确保工作人员的人身安全。为此，隔离开关在电路中布置的方式、配置的数量和选用的类型应满足需要检修的电气设备的要求。例如，为了检修线路断路器，必须使断路器的两侧均与带电部分隔离，这就需要在该断路器的两侧安装隔离开关。检修发电机的断路器可以和检修发电机同时进行，用一台安装在母线侧的隔离开关即可使该断路器与带电部分隔离。

在电网运行的情况下，为了保证检修工作的安全进行，除了使工作点与带电部分隔离外，还必须采取检修接地的措施防止意外带电。为此，要求在高压配电装置的母线侧和线路侧装设带专门接地刀闸的隔离开关，以便在检修母线和线路断路器时，使之可靠的接地。这种带接地刀闸的隔离开关的工作方式为：正常运行时，主刀闸闭合，接地刀闸断开；检修时，主刀闸断开，接地刀闸闭合。它们的操动机构之间具有机械闭锁来确保这种工作方式。

隔离开关不能用来切断电路的电流，为了避免误操作造成的事故（俗称“带负荷拉闸”），应严格遵守隔离开关和断路器的

操作顺序：当接通电路时，先合隔离开关，后合断路器；在断开电路时，先断断路器，后断隔离开关。总之，应保证隔离开关在无电流的情况下进行操作。

隔离开关可以用来断开很小（20A以下）的工作电流，例如，小容量变压器的空载电流。

低压自动空气开关、高低压熔断器和接触器属于带灭弧装置的开关电器。但接触器只能切断正常的工作电流，与负荷开关相似。低压闸刀开关属于不带灭弧装置的开关电器。

## 2. 测量电器

测量电器是用来供给测量仪表电源的一种电气设备。它分为电流互感器和电压互感器。电流互感器的被测量为电流，其类型与数量取决于二次回路的要求。电压互感器的被测量为电压，它安装在发电机、电源线路和母线上。

## 3. 限流和保护电器

限流电抗器是用来限制短路电流的一种电气设备。由于限流电抗器减小了短路电流，就可以选用轻型的开关电器，从而可降低配电装置和电网的投资。限流电抗器通常装于线路上和各分段母线之间。

避雷器用来保护电机和变压器，避免因大气过电压造成的损坏。避雷器装于输电线、母线和电机、变压器的引出线上。

从图中还可以看到，同一级电压的电器间用母线相互连接。因而母线就成为汇集，交换和分配电能的通道。母线由一组或几组的三相导线系统组成。

发电机、变压器和电动机用导线连接到配电装置。这些连接导线应根据输送的功率、工作电压和安装的场地，选用母线、架空线和电缆。

母线、架空线和电缆总称为载流导体。

电器还可以根据安装的场所分为屋内式和屋外式。后者的工作条件比较恶劣，受环境温度、风、雨、冰、雪的影响较大。

### 三、电气设备应满足的基本要求

为了确保不间断地、安全可靠地进行电能生产，电气设备应满足如下的三项基本要求：

(1) 为了能经受持续的工作电压和短时过电压，电气设备应该有一定的绝缘水平；

(2) 工作电流持续通过电器和载流导体时，其温升不应超过允许的数值；

(3) 能经受短路电流所引起的电动力和热的效应。

## 1-2 电器的载流导体在持续状态下的发热

### 一、温度对电器的影响

电气设备都包含有载流导体和绝缘两部分。在运行中载流导体因流过电流而发热使温度升高。这个发热温度必须受到限制，因为过高的温度会使载流导体的连接部分的工作条件恶化，并使电器的绝缘老化。

金属导体的电阻随着温度的升高而增大。当温度超过70~75℃，载流导体连接部分的过渡电阻会显著增加，而电阻的增加又会引起温度的进一步升高，这样恶性循环的结果，会导致接触部分的烧毁。此外，在温度超过一定值后，随着温度的升高，载流导体的机械强度迅速降低，从而有可能在外部机械力的作用下使电器损坏。

当温度超过一定值后，电器绝缘部分的介质损失大大增加，加速了绝缘的老化，降低了电器的机械强度和绝缘性能，以致发生电击穿的现象。

为保证电器正常安全运行，必须规定载流导体的最高容许发热温度以及各种绝缘材料的耐热温度。

表1-1为各种高压电器持续发热的容许温度。表1-2为各类绝缘材料的耐热温度。

表 1-1

各种高压电器持续发热的容许温度

| 电 器 部 分 名 称                                  | 最 大 容 许 温 度 |        | 在周围介质温度为40℃时的温升 |        |
|--|-------------|--------|-----------------|--------|
|  | 在空气中(℃)     | 在油中(℃) | 在空气中(℃)         | 在油中(℃) |
| 不与绝缘材料接触的金属材料                                | 115         | 90     | 75              | 55     |
| 与绝缘材料接触的金属材料, 以及由绝缘材料制成的零件<br>当绝缘材料的等级:      |             |        |                 |        |
| 1)为Y   | 85          | —      | 45              | —      |
| 2)为A   | 100         | 90     | 60              | 50     |
| 3)为E、B、F、H和C                                 | 115         | 90     | 75              | 50     |
| 最上层变压器油                                      |             |        |                 |        |
| 1)作为灭弧介质时                                    | —           | 80     | —               | 40     |
| 2)只作为绝缘介质时                                   | —           | 90     | —               | 50     |
| 接 触 连 接                                      |             |        |                 |        |
| 1)由钢或其它合金制成, 没有银覆盖层, 用螺栓、螺丝、铆钉和其它保证紧固连接方法压紧的 | 80          | 85     |                 | 45     |
| 2)用弹簧压紧的                                     | 75          | 80     |                 | 40     |
| 3)用钢或其它合金制成, 有银镀层                            | 90          | 90     |                 | 50     |
| 4)由银制成或表面带有焊接的银件                             | 105         | 95     |                 | 50     |

## 二、持续电流下载流部分的发热

当导体不通过电流时, 其温度与周围介质(如空气或油)的温度相等。在通过电流后, 导体内就有热量产生。而在持续通过电流时, 导体的温度则要经历一个逐渐上升到稳定的过程。在导体发热的初期, 热量的一部分用于导体本身温度的提高, 另一部分则散失到周围介质中去。导体温度开始上升得较快, 经过一段时间后就稳定在某一个值上, 不再继续上升。这时由导体产生的全部热量都散失到周围介质中。

假定周围介质的温度为 $\theta_0$ , 导体的温度升到 $\theta_1$ 时的温升为 $\tau$  ( $\tau = \theta_1 - \theta_0$ ); 导体的电阻为 $R(\Omega)$ , 散热面积为 $S(\text{cm}^2)$ , 导体的重量为 $g(\text{g})$ ; 材料的比热为 $C(\text{J/g} \cdot ^\circ\text{K})$ ; 散热系数为 $\alpha(\text{W/}$

表 1-2

各类绝缘材料的耐热温度

| 等 级                                  | 耐热温度<br>(°C) |
|--------------------------------------|--------------|
| Y(包括未浸渍的棉、丝、电工绝缘纸板等)                 | 90           |
| A[包括浸渍或液体电介质(如油)中浸渍过的棉、丝、电工绝缘纸板、皮革等] | 105          |
| E(耐热温度高于A级绝缘15°C的各种材料)               | 120          |
| B(包括云母、玻璃纤维、石棉等的粘合材料)                | 130          |
| F(耐热温度高于B级绝缘15°C的各种材料)               | 145          |
| H(包括硅有机物、云母、玻璃纤维、石棉等用硅有机树脂粘合的材料等)    | 180          |
| O(包括云母、陶瓷、玻璃及石英或不用无机粘合剂的材料等)         | >180         |

$\text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{K}$ ), 于是可用下式表示导体的发热过程:

$$\tau = \tau_w \left( 1 - e^{-\frac{\alpha t}{c\vartheta}} \right) = \tau_w (1 - e^{-t/\tau}) \quad (1-1)$$

式中  $T = \frac{cg}{\alpha s}$  —— 发热时间常数。为导体吸热能力(由  $cg$  决定)与散热能力(由  $\alpha s$  决定)的比;

$\tau_w$  —— 为导体持续发热情况下的稳定温升。

当导体达到稳定温升时, 电流  $I$  在导体中产生的热量全部散失到周围介质中。于是有:

$$P_w = I^2 R = \alpha s \tau_w = \alpha s (\theta_w - \theta_0) \quad (1-2)$$

式中  $\theta_w$  —— 导体的稳定温度。

由此可得下式:

$$\tau_w = \frac{I^2 R}{\alpha s} \quad (1-3)$$

由上式可见, 导体的稳定温升取决于流过导体的电流。

根据式(1-1)，可以绘出一个均匀导体（指沿全长有相同截面和同样材料的导体）发热时的温度随时间变化的曲线  $\theta = f(t)$ ，如图1-2所示。

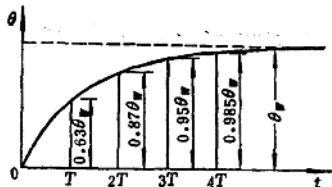


图 1-2 均匀导体温度变化与发热持续时间关系

$\theta = f(t)$  是一条指数曲线。当发热时间  $t = T$  时，温升达稳定温升的 63%；当  $t = 2T$  时为 87%；当  $t = 3T$  时为 95%，随着时间增长越来越慢地趋向稳定温升  $\theta_{\infty}$ 。

### 三、在持续发热情况下均匀导体的允许电流

载流导体热计算的目的在于确定其温度不超过规定值时的最大持续允许电流值。设导体的起始温度为  $\theta_0$ ，最终温度为  $\theta_z$ ，则由式(1-2)可得：

$$I_{x0} = \sqrt{\frac{(\theta_z - \theta_0) \alpha S}{R_{\theta z}}} \quad (1-4)$$

$R_{\theta z}$  为温度在  $\theta_z$  时导体的电阻，可由下式确定：

$$R_{\theta z} = \rho_{\theta_0} [1 + \beta(\theta_z - \theta_0)] \frac{l}{q} \quad (1-5)$$

式中  $l$  —— 导体长度 (m)；

$q$  —— 导体截面积 ( $\text{mm}^2$ )；

$\rho_{\theta_0}$  —— 温度为  $\theta_0$  时导体的电阻系数 ( $\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ )；

$\beta$  —— 电阻的温度系数，铜和铝为  $\beta \approx 0.004$ 。

当通过的电流为交流电时，还存在由于集肤效应和邻近效应（集肤效应和邻近效应在第 6 章介绍）引起导体电阻增大的现象。通常这个增大的程度可用系数  $K_{\omega}$  来加以考虑。于是在交流电流的情况下，式(1-4)变为：

$$I_{xU} = \sqrt{\frac{(\theta_z - \theta_0) \alpha S}{R_{0z} K_w}} \quad (1-6)$$

上式表明，导体允许电流的数值与周围空气的温度、电流的种类（直流或交流）、导体的材料有关。用于配电装置的母线，一般采用扁导线或圆导线（槽形或菱形导线，均由扁导线焊接而成）。其截面是标准化的，可以由附录中的附表1按持续允许电流选择。

附表中持续发热的允许温度对于裸母线取为70°C，周围空气的计算温度取为25°C。如果周围的平均温度高于或低于25°C，则允许电流应按下式进行校正：

$$I_{xU(\theta)} = I_{xU(298)} \sqrt{\frac{343 - \theta}{343 - 298}} \quad (1-7)$$

式中  $\theta$  —— 周围空气的实际温度；

$I_{xU(\theta)}$  —— 温度为  $\theta$  时，母线的持续允许电流；

$I_{xU(298)}$  —— 温度为 298 (°K) (即 25°C) 时，由附表查得的允许电流值。

式中的温度值应换算为绝对温度值。例如，25°C = (25 + 273)°K = 298°K；70°C = (70 + 273)°K = 343°K。

一条母线的允许电流在直流时比交流时略大。但当为多条母线时，由于集肤效应和邻近效应的影响，直流和交流两者的差值就变得较大了。例如，在每相三条母线时，中间那一条母线的电流占总电流的20%，而外侧两条母线则各占40%。交流装置中的母线每相的条数很少超过2~3条。

母线平放的允许电流比竖放时减少5~8%。因为在平放的情况下母线冷却条件恶化了。

### 1-3 短路过程的基本概念

#### 一、短路的概念和种类

所谓短路是指电气装置中或电路中相和相的直接连接，而在



中性点接地的系统中，也指一相或两相与地（或零线）直接连接。短路是电网中一种最危险的事故。短路时，电压急剧降低，使电流所经的元件及导体产生额外不能允许的发热，并使它们遭受到很大的机械应力，从而有可能使其损坏。短路破坏对用户供电的持续性。短路最严重的后果是系统的瓦解。另外，在对地短路时，由于不平衡电流所产生的磁通，对通讯线路造成严重的干扰，危及在通讯系统中工作的人员和设备的安全。短路通常是由于电气设备某一部分的绝缘损坏所引起。

短路的种类可分为：1）三相短路（ $D^{(3)}$ ）；2）两相短路（ $D^{(2)}$ ）；3）单相短路（ $D^{(1)}$ ）；4）两相在同一点短路接地（ $D^{(1,1)}$ ），如图 1-3 所示。统计资料表明，单相短路发生的次数最多，依次是两相对地短路、两相短路，最后是三相短路。由于三相短路最严重，因此，尽管它发生的机率较小，也必须予以考虑。

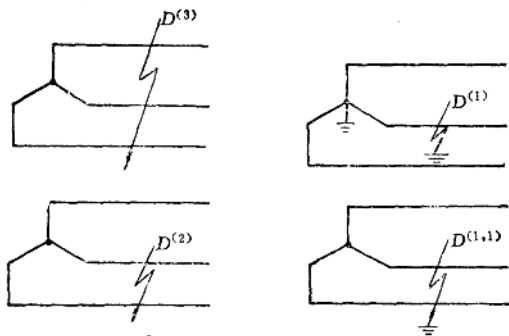


图 1-3 短路的种类

短路电流的大小与故障线路的正常负载无关，而决定于发电机的特性和发电机到短路点的阻抗。该段线路越长则短路电流越小，该段线路越短则短路电流越大。

此外，短路电流还与短路点的过渡阻抗有关。由于过渡阻抗