

中等专业学校教材



# 水电站电气设备

湖南省水利水电学校 尹厚丰 合编  
浙江省水利水电学校 应明耕



# 前 言

本书根据水电部 1990~1995 年中等专业学校水利水电类专业教材选题和编审出版规划、并按中专水电类教研会审定的课程教学大纲编写，作为水电站电力设备专业与机电设备专业的电气设备课程教材。

本书着重阐明水电站电气设备的基本原理与基本方法，既保留该课程的理论系统性，又适当收入我国多年来在小水电建设方面成熟的先进技术经验，紧密地结合我国小型水电站的实际技术问题。在教学法改革上也有较多尝试，对这门直接总结专业实际知识、内容庞杂又过于具体的专业课教材作了进一步的理顺，更多地注重知识的结构层次，循序渐进，以适合初学者阅读和自学。书中结合文字阐述充实了较多的图表，每章之后附有一定数量的习题，书后还录有少量附表，以方便教学和应用。

全书共分十六章。第一、二、五、六章由贵州水利电力学校于自立编写；第七、八、九章由广东水利电力学校司徒海棋编写；第三、四、十、十一、十二、十三章及第十四章的第四、五、六节由湖南水利水电学校尹厚丰编写；第十四（其中四、五、六节除外）、十五、十六章由浙江水利水电学校应明耕编写。全书由尹厚丰统稿。广东水利电力学校吕国雄担任本书主审。

本书的编写过程与教研会课程组活动紧密关联，一些同行教师提过不少宝贵意见，在此表示谢意。

该书的部分章节内容可在实践性教学环节中传授。根据不同的专业、不同的培养目标以及专业课程设置的设置情况，某些章节内容还可作适当取舍。

由于我们的学识和经验有限，书中可能有不少缺点错误，恳请广大教师和读者指正，以利进一步改进。

编 者

1992 年 10 月

# 目 录

前 言

第一章 电力系统及电气设备概述 .....	1
第一节 电力工业发展概述 .....	1
第二节 电力系统概述 .....	3
第三节 水电站的电气设备概述 .....	6
第二章 电力系统中性点运行方式 .....	11
第一节 中性点不接地系统 .....	11
第二节 中性点经消弧线圈接地系统 .....	13
第三节 中性点直接接地系统 .....	15
第四节 中性点接地方式的比较和应用范围 .....	16
第三章 水电站的电气主接线与接入方式 .....	19
第一节 主接线概述 .....	19
第二节 主接线的基本接线形式 .....	22
第三节 主变台数、容量和型式的选择 .....	30
第四节 水电站的接入方式 .....	31
第五节 主接线方案的拟定与技术经济比较 .....	36
第六节 互感器的配置与主接线全图 .....	44
第四章 水电站的站用电 .....	48
第一节 水电站站用负荷 .....	48
第二节 站用电接线 .....	52
第三节 站用变压器的选择 .....	56
第五章 短路电流计算 .....	63
第一节 短路的一般概念 .....	63
第二节 标么值 .....	64
第三节 电力系统元件的电抗值计算 .....	67
第四节 短路电流的计算程序 .....	70
第五节 由无限大容量电力系统供电的三相短路 .....	73
第六节 由发电机供电的三相短路 .....	77
第七节 用运算曲线法计算短路电流 .....	82
第八节 由有限容量电力系统供电的三相短路 .....	88
第九节 6~10 kV 农用配电网络三相短路电流计算的特点 .....	91
第十节 不对称短路计算中的对称分量法及基本电压方程 .....	93
第十一节 序阻抗和序网络图 .....	96
第十二节 不对称短路电流的计算 .....	99

第十三节 短路电流的限制 .....	112
第六章 电弧及触头的基本理论 .....	115
第一节 电弧的形成与熄灭 .....	115
第二节 直流电弧的特性及熄灭 .....	118
第三节 交流电弧的特性及熄灭 .....	121
第四节 灭弧方法及灭弧装置 .....	124
第五节 电气触头 .....	128
第七章 开关电器 .....	136
第一节 开关电器的基本知识 .....	136
第二节 多油式断路器 .....	139
第三节 少油式断路器 .....	144
第四节 断路器的操动机构 .....	151
第五节 隔离开关 .....	157
第六节 高压负荷开关 .....	161
第七节 高低压熔断器 .....	164
第八节 低压开关电器 .....	172
第八章 绝缘子、母线和电缆 .....	186
第一节 绝缘子 .....	186
第二节 母线 .....	190
第三节 电力电缆及电缆敷设 .....	195
第九章 互感器 .....	205
第一节 电流互感器的工作原理 .....	205
第二节 电流互感器的结构原理和类型 .....	210
第三节 电压互感器的工作原理 .....	214
第四节 电压互感器的类型及构造 .....	218
第十章 电气设备选择 .....	224
第一节 电气设备的长期与短时发热 .....	224
第二节 短路电流的电动力及母线弯曲强度计算 .....	229
第三节 电气设备的一般选择条件 .....	232
第四节 母线、电缆和绝缘子的选择 .....	237
第五节 高压开关电器的选择 .....	245
第六节 电压互感器的选择 .....	248
第七节 电流互感器的选择 .....	251
第八节 低压电器的选择 .....	254
第十一章 配电装置及电气总布置 .....	268
第一节 配电装置的基本要求与一般构成方法 .....	268
第二节 屋内配电装置 .....	272
第三节 屋外配电装置 .....	282

第四节	主变场地布置 .....	288
第五节	水电站的电气总布置 .....	292
第六节	低压配电装置 .....	297
第十二章	接地装置 .....	302
第一节	保护接地的的工作原理 .....	302
第二节	接地电阻的计算与测量 .....	307
第三节	接地工程 .....	314
第十三章	防雷保护 .....	319
第一节	大气过电压 .....	319
第二节	避雷针与避雷线 .....	323
第三节	避雷器的保护原理及简单防雷器具 .....	327
第四节	阀型避雷器的类型及其结构原理 .....	331
第五节	阀型避雷器的主要参数及其保护性能的改善 .....	337
第六节	氧化锌避雷器 .....	339
第七节	电站的防雷保护 .....	342
第八节	旋转电机的防雷保护 .....	347
第十四章	水电站的常规二次回路 .....	351
第一节	二次回路基本概念 .....	351
第二节	断路器控制回路的构成 .....	354
第三节	断路器的常用控制回路 .....	358
第四节	信号及信号回路 .....	365
第五节	音响信号回路的工作程序 .....	369
第六节	冲击继电器及其音响信号回路 .....	371
第七节	测量监察回路 .....	378
第八节	同期回路 .....	381
第十五章	直流系统 .....	388
第一节	操作电源概述 .....	388
第二节	蓄电池 .....	389
第三节	蓄电池直流系统 .....	394
第四节	整流操作的直流系统 .....	399
第五节	直流系统的绝缘监察与电压监察 .....	402
第十六章	安装接线图 .....	406
第一节	二次回路的编号 .....	406
第二节	安装接线图 .....	408
第三节	二次设备的布置 .....	419
附录	.....	422

# 第一章 电力系统及电气设备概述

## 第一节 电力工业发展概述

### 一、我国电力工业发展概况

电力具有便于输送、分配、使用等优点，首先作为生产的动力广为使用。又因采用电气控制容易实现生产过程的自动化和远动化，故在现代社会中，无论在农业、工业、交通、国防、科学技术部门乃至人民的日常生活中（如家用电器的发展和普及），电力已成为不可缺少的二次能源，得到极为广泛的应用。电力是工业的先行。电力工业的发展必须优先于其他工业部门，整个国民经济才能不断前进。因此，电力工业的发展水平和各部门的电气化程度是衡量一个国家国民经济发展水平的重要标志。

建国前，我国的电力工业非常落后。自1882年在上海建立第一个火电厂，1912年在昆明滇池石龙坝建立第一座水电站开始，至1949年全国解放，多年来全国总装机容量仅增至185万kW，年发电量43亿kW·h，居世界第25位；110kV电压等级的电力系统仅东北有两个，总容量不超过72万kW。发电厂大部分集中在东北和沿海城市，设备陈旧，类型庞杂，规格极不统一，效率低，安全可靠性能很差。

建国后，我国电力工业得到了迅速发展，到目前为止，无论在运行、设计、安装和设备制造等方面都达到一定的水平。一套完整的、初具规模的电力工业体系迅速建立了起来。1957年底第一个五年计划完成时，全国总装机容量增加至464万kW。1962年底第二个五年计划完成时又增至1300万kW。1978年底增至5511万kW，年发电量达2565亿kW·h。至1990年底，总装机容量已超过1.35亿kW，年发电量达到6150亿kW·h。装机容量平均每年递增10.9%，年发电量平均每年递增13.1%，现已从建国前居世界第25位跃居世界第3位。110kV以上电压等级的电力系统也从建国前的两个增加为数十个，最高输电电压等级已达到500kV。750kV的超高压直流输电也正在研制和设计。装机容量在25万kW以上的大型发电厂已有近百座，自制单机容量60万kW的巨型火电机组也已开始使用。“七五”期间平均每年装机500万~600万kW，其中主要为大容量机组。到2000年全国总装机容量可望超过2亿kW。目前已建成投产的最大的发电站是葛洲坝水电站，装机容量为271.5万kW。比葛洲坝电站还大的四川二滩水电站，装机容量达330万kW，正在建设中。浙江海盐县的秦山核电站装机容量30万kW，现已部分建成发电。广东大亚湾核电站装机容量180万kW，正在兴建中。还计划在华东、东北等地修建更多核电站。这样快的发展速度，在世界先进国家的电力工业发展史上也是少有的。

我国具有丰富的能源资源，水能蕴藏量为6.91亿kW，可开发的有3.78亿kW，居世界首位。此外，煤、石油、天然气、油页岩等资源也很丰富，堪称能源大国。但是，目前我国电力工业发展水平与世界发达国家相比还有较大差距，人均用电量还是很低的；电力发展速度虽不慢，仍不能满足工农业发展的需要；水力资源总量虽大，但人均占有量偏小，开发利用程度也还很低，仅为7%左右；电力工业技术水平和经济效益还有待提高。总

之，我国电力工业的发展前景是美好的，任务是光荣而艰巨的。

## 二、我国小水电发展概况

小水电通常是指小型水电站及其配套的地方小电网。联合国有关组织1980年在我国召开的第二次国际小水电会议上，对小水电站的容量范围作了如下划分：①装机容量为1001~12000 kW为小型水电站；②装机容量为101~1000 kW为小小水电站；③装机容量为100 kW以下的为微型水电站。

该定义范围与我国70年代以来的有关概念相吻合，基本符合我国当时小水电的发展状况。

我国小水电资源十分丰富，按上述定义范围进行统计，理论蕴藏量为1.5亿kW，可开发量约为7100万kW，已开发800余万kW，约占可开发量的11%。

小水电在我国发展很快。解放初期，单机在6000 kW以下、总装机1.2万kW以下的小水电总计仅2万kW。目前，我国已建成小水电站8万多座，总装机容量达1000万kW以上。有810多个县主要靠小水电供电。全国每年平均新增小水电装机容量50万kW以上。我国小水电的迅速发展获得了国际上的关注和好评，1980年以来，联合国确认我国在开发小水电方面的成功经验，两次在杭州召开国际小水电会议，并决定在我国建立亚太地区国际小水电培训中心。

党和政府非常重视小水电的发展。早在1953年便设置了小水电专门机构；全国现有十多所中等专业学校和数十所技工学校设置了小水电专业。广东、四川、湖南、福建等四省的小水电装机容量已超过100万kW。小水电设备的制造也有相应的巨大发展，小型水轮发电机组的产品已发展到36个系列83个品种，由原来进口设备变为出口设备。全国近100家制造厂每年可生产小型水轮发电机组100余万千瓦。1983年国务院决定在全国首先建设100个电气化试点县，我国小水电的发展从此进入一个更加蓬勃发展的新时期。

我国小水电的发展具有如下一些特点：

(1) 分布各地的、规模虽小但具有优越经济指标的小水力资源的广泛存在，是我国小水电发展的得天独厚的能源基础。

(2) 分散在广大农村和乡镇的电力用户是我国小水电的天然般配的负荷。这些总量很大但相当分散的负荷由小水电就地供电或就近补充，可减轻国家大电网的负担，减小电能的长距离输送和输配电设备的容量，改善电网的潮流分布。

(3) 发展小水电可以充分利用当地的人力、物力和财力，只需国家给予适当扶持，便能事半功倍，迅速建成投产，取得相对投资小、收益快的效果。

(4) 小水电具有综合利用的优势，尤其与水利灌溉关系密切。因此不仅在举办上要办电治水统筹规划，在经营管理上也常有“以电养水”和“以电促农”等问题。故我国的小水电常与水利灌溉和农副业经济等同步发展，相互促进。

(5) 目前我国的小水电还较普遍地存在一些弱点、缺点，主要有：多系径流发电，调节性能差，加上农村负荷的不均衡性，丰水——枯水和峰荷——谷荷矛盾大；机组容量和系统容量相对偏小，供电稳定性和可靠性偏低；电网结构脆弱；通讯调度设施差；技术力量薄弱，管理水平低等。

当前在规划建设一个县的农村电气化时，宜把小水电电站容量范围提高到2.5万kW，

单机容量范围仍取 6000 kW 为宜,电压等级范围由过去规定的 35 kV 上限升至 110 kV。适当扩大电网的规模,搞好网络配套,改善系统的调节能力与稳定性能,不断提高技术水平与管理水平,以适应我国小水电的不断发展。因此,摆在我们小水电工作者面前的任务是十分光荣而艰巨的。

## 第二节 电力系统概述

### 一、电力系统的基本概念

为了提高供电的可靠性和经济性,目前广泛地将许多发电厂用电力网连接起来并联工作。这些由发电厂(包括升压变电站)、降压变电所、输电线路及电力用户所组成的统一整体,称为电力系统。电力系统加上发电机的动力装置称为动力系统。电力系统中不包括发电机的部分称为电力网。动力系统、电力系统和电力网三者的联系与区别见示意图 1-1 所示。下面分别就发电厂、电力网及其主要组成部分——变电所和电力线路简述如下。

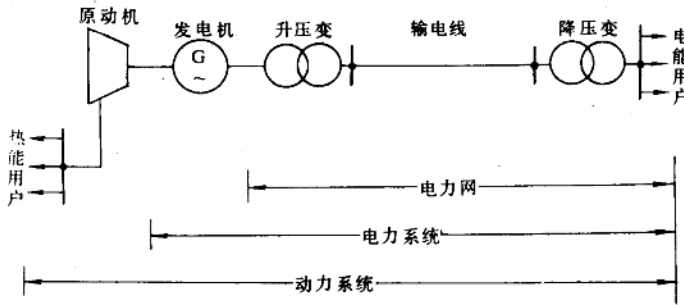


图 1-1 动力系统、电力系统、电力网示意图

发电厂是电力系统的中心环节,它是把其他形式的一次能源转变成二次能源的一种特殊工厂。按原动机的类别分为火力发电厂、水力发电站、潮汐发电站、风力发电站和核能发电厂等。此外还有地热发电、太阳能发电和沼气发电等。按发电厂的规模和供电范围又可分为区域性发电厂、地方发电厂和自备专用发电厂等。

火电厂是利用煤、石油、天然气或油页岩等燃料的热能将锅炉中的水变成高温高压蒸汽,推动汽轮机,带动发电机发电的电厂。它又分为凝汽式发电厂和热电厂,前者专供发电,热效率只有 30%~40%,宜建在燃料产地;后者既发电又向用户供热,热效率可达 60%~70%,宜建在热用户附近。

水电站是利用河流的水能,推动水轮机,带动发电机发电的工厂。水电站的装机容量与水头、流量及水库容积有关。按集中落差的方式,水电站一般分为坝后式、引水式和混合式三种;按主厂房的位置和结构又可分为坝后式、坝内式、河床式、地下式等数种;按运行方式则分为有调节水电站、无调节(径流式)水电站和抽水蓄能水电站;后者系利用夜间用电低谷时或非水期的剩余电力,使水轮机以水泵方式工作,将下游的水抽回到水库内积蓄,以便峰荷或枯水时发电。

核电站是利用核燃料在反应堆中产生的热能,将汽锅中的水变为高温高压蒸汽推动汽



轮机组发电的电厂。目前世界上已投入运行的有 200 多座，预计今后核电站将成为主要电源之一。

电力网按供电范围、输送功率和电压等级分为地方电力网和区域电力网。地方电力网一般电压等级为 110 kV 及以下。区域电力网则为 110 kV 以上，供电范围广，输送功率大。10 kV 及以下的电力网一般称为配电网。电力网按结构特征又分开式和闭式电力网两种。凡用户只能从单方向得到供电的叫开式电力网；用户可从两个或两个以上方向得到供电的叫闭式电力网。按电压等级电力网分为低压（1 kV 及以下）、高压（1~330 kV）、超高压（330~1000 kV）和特高压（1000 kV 以上）几种。

变电所是电力网的重要组成部分，它是汇集电源、升降电压和分配电力的场所，是联系发电厂和用户的中间环节。变电所有升压和降压之分。升压变电所通常是发电厂的升压站部分，紧靠发电厂。降压变电所通常远离发电厂而靠近负荷中心。根据变电所在电力网结构中所处的地位和供电的范围分为区域变电所、地方变电所和终端变电所等。前者在大型电力网中又有枢纽变电所、中间变电所和地区变电所之分。

电力线路也是电力网的重要组成部分，它担负着输送电能和分配电能的任务。由电源向电力负荷中心输送电能的线路，称为输电线路或送电线路，其电压等级一般在 35 kV 及以上。主要担负分配电能任务的、电压较低的线路，称为配电线路。

## 二、电力系统的优越性

把孤立运行的发电厂通过电力网连接起来形成电力系统后，将在技术经济上带来很大好处，现分析如下：

### （一）提高了供电的可靠性

系统中一个发电厂发生故障时，其它发电厂照样可以向用户供电；一条输电线路发生故障时，用户还可以从系统中的不同部分取得电源。因而具有合理结构的电力系统的可靠性大为增高。

### （二）提高了供电的稳定性

电力系统容量较大，个别大负荷的变动即使有较大的冲击，也不会造成电压和频率的明显变化。小容量电力系统或孤立运行电站则不同，较大的冲击负荷很容易引起电网电压和频率的较大波动，影响电能的质量。严重的甚至将系统冲垮，即系统或机组间解裂，造成整体供电中断。

### （三）提高了发电的经济性

联成和扩大电力系统可获得多方面的经济效益。

#### 1. 充分利用动力资源

如果没有电力系统，很多能源就难以充分利用。在电力系统中可实现水电和火电之间的相互调济，丰水期可多发水电，少发火电，节约燃料；枯水期则多发火电以补充水电。其它如具有不同调节性能和特性的水电站之间，以及风力、潮汐、太阳能和核电站等，只有与较大的系统相接，才能相互配合，实现经济调度，达到合理利用资源，提高经济效益的目的。

#### 2. 提高发电的平均效率和其他经济指标

只有在大的电力系统内才能采用大容量的机组，从而获得较高的发电效率、较低的相

对投资和较低的运行维护费用。此外，在电力系统内，在各发电厂之间可以合理地分配负荷，可以让效率高的机组多发电，在提高平均发电效率上实现经济调度。

### 3. 减小总装机容量

电力系统中的综合最大负荷常小于各发电厂单独供电时各片最大负荷的总和。这是因为不同地区间负荷性质的差别、负荷的东西时差和南北季差等，有利于错开各地区的高峰负荷，导致减小系统中的综合最大负荷，从而减小了总工作容量。

每座孤立运行电站至少要有一台备用机组，以备工作机组检修或故障时投入运行，保障继续供电。在电力系统中，各发电厂的机组之间可以相互备用，还可以错开检修时间，故系统的备用容量只需系统总容量的10%~15%，远小于各发电厂孤立运行时单站的备用容量之和。

系统总装机容量（等于工作容量加备用容量）的减小，降低了电站的综合投资和电能生产费用。

## 三、对电力系统运行的基本要求

由于电能不能贮存，电力流程与其他产品的流程相比较具有不同的特点：电能的生产、分配、输送、再分配直至消费必须在同一时刻完成，这就是电力流程的连续性。根据这一特性，要使电力流程的最后环节——电能的消费得以维持，就必须随时保证电力流程的消费前环节不致中断。

又由于电能的无比优越性，它已成为现代工农业生产和人民生活不可缺少的二次能源，成为整个国民经济的“粮食”，对国民经济的发展起着强烈的制约作用。还由于社会经济的不断发展，电能的消费量越来越大，使电力工业成为巨大的经济部门，在国民经济中占有相当大比重。

基于电能的上述特点和电力工业在国民经济中的作用和地位，电力系统应满足下述基本要求：

### （一）保证供电的安全可靠

确保用户能够随时得到供电，叫做电力系统的可靠性。

电力系统因故停电会给工农业生产和人民生活带来不同程度的损失，可能使产量下降，产品报废，生产计划不能完成，生活受到干扰；严重的可导致设备和人身伤亡。例如炼钢厂高炉停电30 min，钢水就要凝固使高炉报废；电解铝厂停电15 min会使电解槽遭到破坏；矿井和医院停电还可能带来人身事故。总之停电对用户造成的经济损失很难具体统计，平均约为停电电价的50倍。通常按重要性将用户分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ三类加以区别对待，以保证其相应的供电可靠性。

为了保证可靠性，必须做到安全生产和安全用电。为此，要保证电力系统中各元件的质量，及时搞好设备的正常维护及定期的检修与试验；加强和完善各项安全技术措施，提高电力系统的运行和管理水平，杜绝可能发生的直接或间接的人员责任事故。

### （二）保证电能质量

衡量电能质量的指标是波形、频率和电压。通常要求电力系统的供电电压（或电流）的波形为严格的正弦形，发电机和变压器的设计制造部门已考虑了这一要求，但在电能输送和分配过程中也要不使波形发生畸变，避免或消除再出现一些谐波源。

**表 1-1 我国电网频率允许偏差值**

运行情况		允许频率偏差值 ( $\Delta\text{Hz}$ )
正常运行	中小容量电网	$\pm 0.5$
	大容量电网	$\pm 0.2$
事故运行	30 min 以内	$\pm 1$
	15 min 以内	$\pm 1.5$
	绝对不允许	-4

**表 1-2 我国对用户供电电压的允许变化范围**

线路额定电压 $U_n$	正常运行电压允许变化范围
35 kV 及以上	$\pm 5\% U_n$
10 kV 及以下	$\pm 7\% U_n$
低压照明及农业用电	$(+5\% \sim -10\%) U_n$

通常系统运行中所说的电能质量主要指频率和电压两个指标。当频率和电压超过允许范围时（见表 1-1 和表 1-2），可能造成企业减产，出次品、废品，影响用电设备的安全运行，甚至引起人身设备事故。频率主要取决于电力系统中有功功率的平衡，电压则取决于无功功率的平衡，可通过调频、调压和无功补偿等措施来保证频率和电压的稳定。

**(三) 完成足够的发电功率和发电量**

根据电力对国民经济的强烈制约作用，电力必须先行。故电力系统要超前搞好规划设计，不断增加投入；同时也要充分挖掘设备潜力，最大限度地向用户提供需要的电力。

**(四) 保证电力系统运行的经济性**

要使电能在生产、输送和分配过程中效率高、损耗小、成本低，必须降低一次能源消耗率（每千瓦·小时的煤耗、油耗或水耗）、厂用电率和线损率，使这三个指标达到最小，这便是经济运行。电能成本的降低不仅节省了能源，还将有助于用户生产成本的降低，因而给整个国民经济带来效益。要实现经济运行，除进行合理规划设计之外，还须对整个系统实施最佳经济调度。

上述各点归纳起来可知：保证对用户不间断地供给充足、优质而又经济的电力，是电力系统的基本任务。

### 第三节 水电站的电气设备概述

为了便于本课程的学习，以下对水电站常用的各类电气设备先加以概略的介绍。在学习第十章电气设备的选择以前还将进行分类详述。

**一、主要电气设备简介**

水电站是利用水能生产和分配电能的工厂，通常装设下述主要电气设备。

**(一) 一次设备**

直接参与生产和分配电能的电气设备称为一次设备，它通常包括以下五类。

**1. 能量转换设备**

发电机、变压器、电动机等属此类。其中的发电机和主变压器是电站的心脏，简称主机主变。

**2. 开关设备**

这类电器用于电路的接通和开断。当电路中通过电流、尤其通过很大的短路电流时，要开断电路很不容易，需要具备足够的灭弧能力。按作用及结构特点，开关电器又分为以下几种：

(1) 断路器。不仅能接通和开断正常的负荷电流，也能关合和开断短路电流。它是作用最重要、构造最复杂、功能最完善的开关电器。

(2) 熔断器。不能接通和开断负荷电流，它被设置在电路中专用于开断故障短路电流，切除故障回路。

(3) 负荷开关。允许带负荷接通和开断电路，但其灭弧能力有限，不足以开断短路电流。将负荷开关和熔断器串联在电路中便大体上相当于断路器的功能。

(4) 隔离开关。主要用于设备或电路检修时隔离电源，造成一个可见的、足够的空气间距。

断路器和熔断器都能在其电路故障时开断一定的短路电流以切除故障电路，故称为保护电器。

断路器和负荷开关能接通和开断一定的负荷电流，称为操作电器。

隔离开关因没有灭弧能力，不能开断负荷电流。若在负荷电流下错误地切开隔离开关，叫做带负荷拉闸，会引起电弧短路，是一种严重的误操作，要尽量避免。

有时只就功能将开关电器分为保护电器、操作电器和隔离电器三类。上述熔断器纯属保护电器；隔离开关是隔离电器；负荷开关为操作电器，有时也兼作隔离电器；断路器则既是保护电器，又是操作电器。

### 3. 载流导体

该类设备有母线、绝缘子和电缆等，用于电气设备或装置间的联接，通过强电流，传递功率。母线是裸导体，需要用绝缘子支持和绝缘。电缆是绝缘导体，并具有密封的封包层以保护绝缘层，外面还有铠装或塑料护套以保护封包。

### 4. 互感器

互感器分为电压互感器和电流互感器等，分别将一次侧的高电压或大电流按变比转变为二次侧的低电压或小电流，以供给二次回路的测量仪表和继电器。

### 5. 电抗器和避雷器

电抗器主要用于限制电路中的短路电流，避雷器则用于限制电气设备的过电压。

## (二) 二次设备

对电气一次设备、机械设备及水工建筑物等的工作状况进行监测、控制和保护的辅助性电气设备称为二次设备。例如各种电气仪表、继电器、自动控制设备、信号及控制电缆等。二次设备不直接参与电能的生产 and 分配过程，但对保证主体设备的正常、有序地工作和发挥其运行经济效益，起着十分重要的作用。

一次设备主要用于高电压、强电流回路，二次设备则用在低压弱电回路。但一次设备中的小容量用电设备也多为低电压。有些设备类别一次和二次都有，例如熔断器、负荷开关、母线、电缆等，名字相同，原理也相近，但实物结构大有差异。部分低压设备与高压设备属于同一类别，在电路中的作用基本相同，但名字不同，如低压断路器叫自动开关，隔离开关叫闸刀开关。至于常见的低压胶盖开关、钢壳开关、转换开关、接触器等，都属于负荷开关这一类别，只是某些开关增多了一些功能。例如有的转换开关可以切换电源；接触器还便于远方和自动控制等。

## 二、电气设备的额定参数

表 1-3 我国交流额定电压等级

(线间电压, 单位 kV)

用电设备 额定电压 与电力网 额定电压	发电机 额定电压	变压器额定电压		
		原边绕组		副边绕组
		接电力网	接发电机	
0.22	0.23	0.22	0.23	0.23
0.38	0.40	0.38	0.40	0.40
(3)	3.15	3	3.15	3.15 及 3.3
6	6.3	6	6.3	6.3 及 6.6
10	10.5	10	10.5	10.5 及 11
—	13.8	—	13.8	—
—	15.75	—	15.75	—
35	—	35	—	38.5
60	—	60	—	66
110	—	110	—	121
220	—	220	—	242
330	—	330	—	363
500	—	500	—	550
750	—	750	—	825

用以表明电气设备在一定条件下的长期工作最佳运行状态的特征量的值叫做额定参数。各类电气设备的额定参数主要有额定电压、额定电流和额定容量。

(一) 额定电压

电气设备的额定电压是按长期正常工作具有最大经济效果所规定的电压。为使电气设备实现标准化和系列化生产, 国家规定了标准电压系列如表 1-3 所示。

1. 用电设备和电力网的额定电压

我国用电设备的额定电压与电力网的额定电压是相等的。下面用图 1-2 来说明它们之间的关系。

设发电机在额定电压下运行, 供电给电力网  $ab$  部分。由于线路有电压损失, 负荷 1-4 点将接受到不同的电压, 线路首端电压  $U_a$  大于末端电压  $U_b$ 。而且由于负荷是变化的, 电力网中各点电压也非恒定不变。实际上电力网各点电压

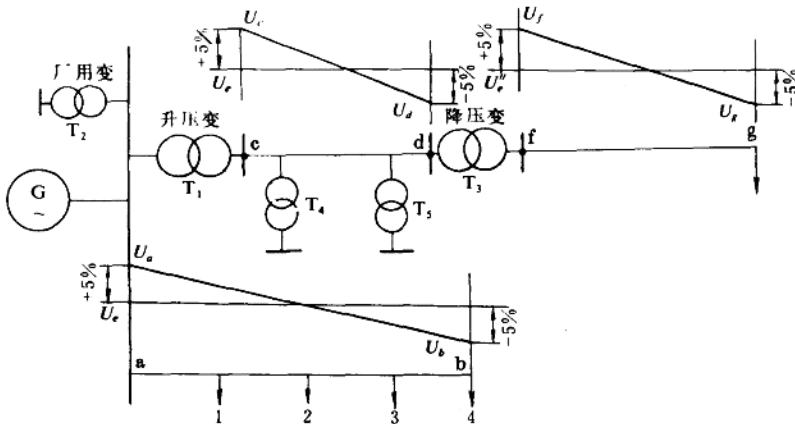


图 1-2 电力网的电压变化

随距离和时间而变。但设备的额定电压不可能按上述变化的电压来制造, 设备生产必须标准化, 用电设备的额定电压只能力求接近于实际的工作电压。一般规定, 用电设备的工作电压允许在额定电压的  $\pm 5\%$  范围内变动, 而沿线的电压降一般允许为  $10\%$ 。因此, 若取电力网首端和末端电压的算术平均值, 即  $U_e = \frac{1}{2} (U_a + U_b)$  作为用电设备的额定电压, 就能满足上述要求, 这个电压也就是电力网的额定电压。

## 2. 发电机额定电压

发电机总是处于电力网首端，其额定电压比电力网的高 5%，即  $U_G = 1.05U_e$ 。允许线路电压降 10%，从而保证用电设备的工作电压均在 ±5% 以内。

发电机的额定电压等级见表 1-3 所示，其单机容量越大，采用的额定电压越高。其中 6.3 kV 电压等级广泛应用于容量 20000 kW 以下至 500 kW 甚至更小的中小型发电机。而 3.15 kV 等级现已很少采用。

## 3. 变压器额定电压

(1) 升压变压器的原绕组通常与发电机电压相连，其额定电压  $U_1$  应与发电机额定电压  $U_G$  相等，即  $U_1 = U_G$ 。副绕组接电力网首端，其额定电压  $U_2$ （通常指空载电压）比电力网额定电压  $U_e$  高 10%，即  $U_2 = 1.1U_e$ ；变压器满载时其绕组本身损失电压约 5%，故副边实际工作电压高出电网额定电压 5% 左右。

10 kV 及以下电压等级的变压器的阻抗电压降在 7.5% 以下，若线路短，线路上压降小，其副绕组额定电压可取  $1.05U_e$ ，见表 1-3。

(2) 降压变压器的原边绕组可能接在线路的始端、末端或沿线上，如图 1-2 中的  $T_3 \sim T_5$ ，其原边绕组额定电压一般取为电网额定电压  $U_e$ ，必要时也可取为连接点的实际工作电压。图中的站用变压器  $T_2$  接于发电机母线上，其原边绕组额定电压取为发电机额定电压  $U_G$ ，即  $1.05U_e$ 。

实际使用时可改变升压或降压变压器的分接头位置，在一定范围内调整电压变比以适应原边和副边电压的要求。但因升压变压器和降压变压器的电压比差别较大，一般不能互相代用。

### (二) 额定电流和额定容量

电气设备的额定电流是指周围介质在额定温度时，其绝缘和载流导体及其连接的长期发热温度不超过极限值所允许长期通过的最大电流值。

我国采用的周围介质额定温度如下：

电力变压器和大部分电器（如断路器、隔离开关、互感器等）的额定周围空气温度取为 40℃。少数电器的取为 35℃。

开启式空气冷却的发电机进入机内的额定空气温度为 35~40℃。

敷设在空气中的母线、电缆和绝缘导线等为 30℃（或 25℃）。

埋设地下的电力电缆的额定泥土温度为 25℃（或 15℃）。

额定容量的规定条件与额定电流同。变压器额定容量用视在功率表示。发电机额定容量也可用视在功率、但常用有功功率表示。电动机也多用有功功率表示。这是因为发电机的原动机和电动机的负载多用有功功率表示。用有功功率表示时，还须表示出其额定功率因数。

## 习 题

1. 电力系统有哪些优越性？电力系统运行要满足哪些基本要求？电能质量的主要指标是什么？
2. 什么叫一次设备和二次设备？开关电器有那些主要类别，其功能有何差异？

3. 用电设备、发电机和变压器的额定电压是如何确定和配合的？试确定图 1-3 中的用电设备、发电机和变压器的额定电压。图中已标出电力网的额定电压等级。

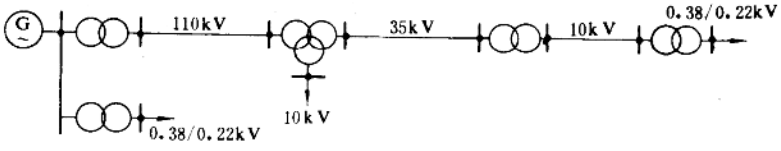


图 1-3 习题 3 的电路图

## 第二章 电力系统中性点运行方式

电力系统的中性点实际上是指发电机和变压器的中性点。我国电力系统目前所采用的中性点运行方式主要有三种，即中性点不接地、中性点经消弧线圈接地和中性点直接接地。采用前两种中性点运行方式的系统称为小接地电流系统；采用后一种的称为大接地电流系统。

中性点运行方式的不同对电力系统运行的可靠性、设备的绝缘、通信的干扰以及继电保护等均有影响。下面就这三种方式分别加以讨论。

### 第一节 中性点不接地系统

中性点不接地系统又叫中性点绝缘系统，可从正常和单相金属性接地故障两种极端情况来说明。

#### 一、正常运行

图 2-1 (a) 为中性点不接地三相系统。假设该三相系统完全对称，即各相对地电压  $U_u$ 、 $U_v$ 、 $U_w$  对称，数值均为相电压  $U_{xg}$ 。负荷电流  $I_{fu}$ 、 $I_{fv}$ 、 $I_{fw}$  对称。各相导线对地的分布电容用集中电容代替，三值相等，即  $C_u = C_v = C_w = C$ 。各相之间的电容和它们所决定的电流忽略不计，因此各相对地的电容电流也是对称的，数值上有

$$I_{cu} = I_{cv} = I_{cw} = I_{co} = \frac{U_{xg}}{X_c} = \omega C U_{xg}$$

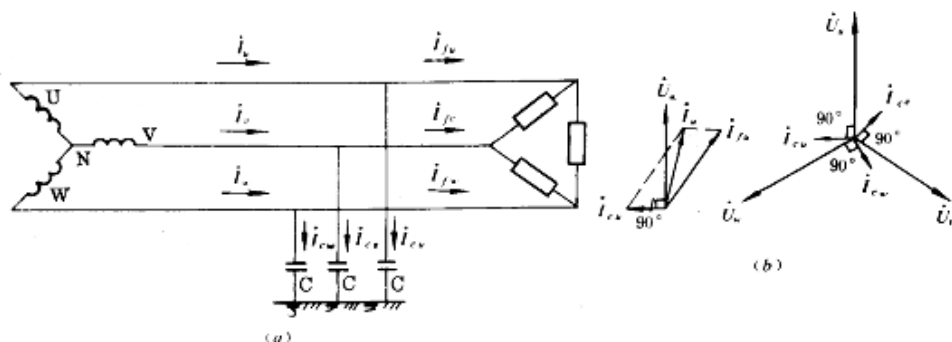


图 2-1 中性点不接地系统的正常工作状态  
(a) 电路图；(b) 向量图

地中没有电容电流流过。各相电流  $I_u$ 、 $I_v$ 、 $I_w$  分别等于负荷电流与对地电容电流的向量和，如图 2-1 (b) 所示。

当电源和负载完全对称时，电源中性点和三相对地电容的中性点之间没有电位差，而电容中性点是大地，故正常运行时电源中性点也具有大地电位。



## 二、单相接地故障运行

中性点不接地系统中任何一相，例如 W 相在  $d$  点发生金属性接地（也叫完全接地），其接地电阻为零，如图 2-2 (a) 所示（图中未计入负荷电流）。接地后 W 相的对地电压变为零，即  $U_w = 0$ 。这时电源电压的对称性未因一点接地而破坏，仍保持不变。按故障相边界条件可列出电压方程式

$$U_w = U_w + U'_w = 0 \quad \text{即} \quad U'_w = -U_w$$

$$U'_u = U_u + U'_w = U_u - U_w = U_{uw}$$

$$U'_v = U_v + U'_w = U_v - U_w = U_{vw}$$

以上各式说明 W 相发生完全接地后，中性点对地电位上升为相电压，等于 W 相电压反号；非故障相对地电压  $U'_u$  和  $U'_v$  升高到相电压的  $\sqrt{3}$  倍，即等于线电压，向量图如图 2-2 (b) 所示。

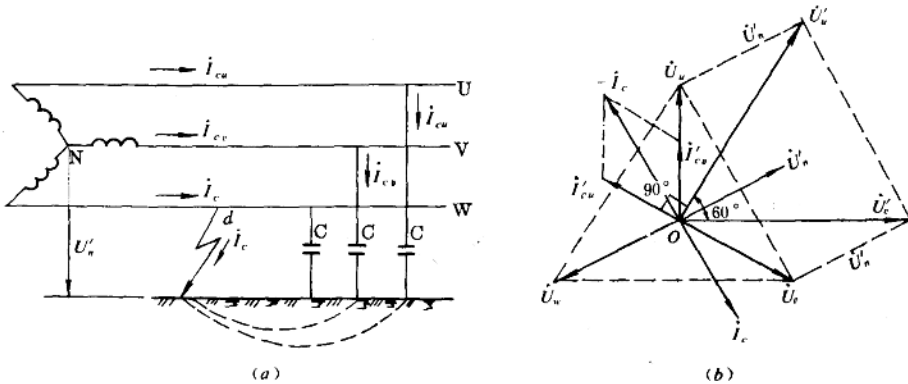


图 2-2 中性点不接地系统的单相接地（未计入负荷电流）

(a) 接线图；(b) 向量图

正常时各相对地电容电流对称。故障后 W 相电容被短接， $I'_{cw} = 0$ ，于是接地点只流过非故障相 U 相和 V 相的对地电容电流之和，并经 W 相导线返回。因非故障相对地电压升高  $\sqrt{3}$  倍，其对地电容电流也相应升高  $\sqrt{3}$  倍，绝对值

$$I'_{cu} = I'_{cv} = \sqrt{3} I_{co}$$

规定相线上的电流正方向是由电源指向电网，则通过一相接地点的电流（即故障接地电流）为

$$I_c = -(I'_{cu} + I'_{cv})$$

由图 2-2 (b) 可知， $I'_{cu}$  与  $I'_{cv}$  分别超前  $U'_u$  与  $U'_v$   $90^\circ$ ，该两电流之间的夹角也是  $60^\circ$ ，其和为  $(-I_c)$ ，故得  $I_c$  超前  $U_w$   $90^\circ$ ，与正常 W 相的对地电容电流  $I_{cw}$  同相位。其绝对值

$$I_c = \sqrt{3} I'_{cu} = 3I_{co} = 3\omega C U_{xg} \quad (2-1)$$

上式说明：单相金属性接地时，通过接地点的电容电流为正常时一相对地电容电流的三倍，它与系统电压、频率和相对地电容  $C$  有关。而电容  $C$  又与电网结构（电缆或架空线）和线路总长度等因素有关。实用计算中，单相接地电流可按下式近似计算