

高等学校教材

# 发电厂电气工程

北京水利电力经济管理学院 陈连 主编



TM 62

360766

C 47

高等学校教材

---

# 发电厂电气工程

北京水利电力经济管理学院 陈连 主编



水利电力出版社

(京)新登字115号

### 内 容 提 要

本书着重讲述发电厂电气部分、继电保护和过电压保护的基本知识和原理。全书共分为二十二章,包括:绪论、同步发电机和变压器的运行、高压开关电器、互感器、电气设备的发热和电动力、发电厂和变电所电气主接线、厂用电、配电装置、电气设备的选择、发电厂电气设备的控制与信号、继电保护基础知识、电流保护、变压器的继电保护、发电机的继电保护、母线的继电保护、距离保护、高频保护、自动重合闸、计算机继电保护、雷电过电压、内部过电压、电力系统绝缘配合等。

本书是高等学校“电力技术经济”专业及“电力工业管理工程”专业的教材,亦可供从事电力技术经济工作和电力工业管理工作的人员参考或作为成人高等教育有关专业的参考书。

ED/B/B1  
24

高等学校教材

发电厂电气工程

北京水利电力经济管理学院 陈连 主编

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

787×1092毫米 16开本 22.5印张 508千字

1992年11月第一版 1992年11月北京第一次印刷

印数 0001—4610册

ISBN7-120-01599-0/TM·431

定价 5.00元

## 前 言

本书是根据1988年能源部制定的电力类高等学校教材编审出版规划和1989年召开的电力技术经济教学组会议讨论通过的教材编写提纲而编写的。本书作为高等学校“电力技术经济”专业及“电力工业管理工程”专业“发电厂电气工程”教材，亦可供从事电力技术经济工作和电力工业管理工作的人员参考或作为成人高等教育有关专业的参考书。

本书共分二十二章。第一章至第十章由陈连副教授编写，第十一章至第十九章由黄祖贻副教授编写，第二十章至第二十二章由邢郁甫高级工程师编写。全书由陈连副教授主编，戴克健教授主审。

本书的编写参考了范锡普教授主编的《发电厂电气部分》、贺家李教授等编的《电力系统继电保护原理》、解广润教授主编的《电力系统过电压》和一些公开出版的有关专业的教材和资料。盛绪美副教授和郭家骥副教授对本书稿也提出了很多宝贵意见。此外，编写过程中还得到其它一些单位和个人的大力支持和帮助。编者在此一并表示衷心的感谢。

由于编写时间短促，编者水平有限，书中有不妥和谬误之处，恳请读者批评指正。

编者

1990年9月

# 目 录

前 言	
第一章 绪论	1
第一节 我国电力工业发展概况	1
第二节 发电厂和变电所类型	1
第三节 发电厂和变电所电气设备简述	4
第二章 同步发电机和变压器的运行	7
第一节 同步发电机的额定运行方式及温升	7
第二节 同步发电机非额定参数下的运行	8
第三节 同步发电机的调相运行	12
第四节 同步发电机的非正常工作状态	13
第五节 变压器的运行	14
第三章 高压开关电器	17
第一节 开关电器概述	17
第二节 开关电器中电弧的形成和熄灭	17
第三节 高压断路器的基本参数和类型	22
第四节 高压断路器的结构和工作原理	25
第五节 高压断路器开断短路电流时的工作状态	30
第六节 隔离开关	36
第七节 高压熔断器	39
第四章 互感器	42
第一节 概述	42
第二节 电流互感器	42
第三节 电压互感器	47
第五章 电气设备的发热和电动力	54
第一节 电气设备的发热和允许温度	54
第二节 均匀导体的长期发热与允许电流的计算	56
第三节 均匀导体短时发热计算	58
第四节 大电流母线附近钢构的感应发热	63
第五节 短路时载流导体间的电动力	65
第六节 全连式分相封闭母线的电动力	71
第六章 发电厂和变电所电气主接线	75
第一节 电气主接线的基本要求	75
第二节 电气主接线的基本形式	75
第三节 发电厂和变电所主变压器的选择	81
第四节 限制短路电流的措施	83
第五节 不同类型发电厂电气主接线的特点	86

第六节	降压变电所电气主接线的特点	88
第七节	电气主接线方案的技术经济比较	89
第七章	厂用电	91
第一节	概述	91
第二节	厂用电系统电压等级的确定	93
第三节	厂用供电电源及其引接方式	93
第四节	厂用电接线基本形式	96
第五节	厂用变压器和电抗器的选择	100
第六节	电动机的自启动校验	103
第八章	配电装置	106
第一节	概述	106
第二节	配电装置的最小电气间距	107
第三节	屋内配电装置	110
第四节	屋外配电装置	112
第五节	成套配电装置	115
第九章	电气设备的选择	118
第一节	电气设备选择的一般条件	118
第二节	母线的选择	121
第三节	电力电缆的选择	129
第四节	支持绝缘子及穿墙套管的选择	130
第五节	高压断路器、隔离开关及高压熔断器的选择	131
第六节	限流电抗器的选择	135
第七节	电流互感器的选择	137
第八节	电压互感器的选择	139
第九节	消弧线圈的选择	141
第十章	发电厂电气设备的控制与信号	143
第一节	发电厂的控制方式	143
第二节	二次接线图	144
第三节	断路器的距离控制	151
第四节	中央信号	157
第五节	发电厂和变电所的弱电控制	161
第六节	发电厂计算机监控系统简介	164
第十一章	继电保护基础知识	167
第十二章	电流保护	178
第一节	单侧电源的电流保护	178
第二节	方向电流保护	185
第三节	接地短路的零序电流保护	193
第十三章	变压器的继电保护	199
第一节	变压器的故障类型及其保护方式	199
第二节	变压器的瓦斯保护	199
第三节	变压器的纵差动保护	200
第四节	变压器的过电流保护	209

第五节	变压器的接地保护	212
第六节	变压器的过负荷保护	214
第十四章	发电机的继电保护	215
第一节	发电机的故障类型及其保护方式	215
第二节	发电机纵差动保护	215
第三节	发电机匝间短路保护	217
第四节	发电机定子绕组接地保护	221
第五节	发电机过电流保护	225
第六节	发电机失磁保护	228
第十五章	母线的继电保护	234
第十六章	距离保护	244
第一节	距离保护作用原理	244
第二节	阻抗继电器的特性	247
第三节	阻抗继电器接线方式	254
第四节	整流型方向阻抗继电器	256
第五节	电力系统振荡对距离保护的影响	259
第六节	过渡电阻对距离保护的影响	263
第七节	距离保护的整定	265
第十七章	高频保护	269
第一节	高频保护的基本原理	269
第二节	方向高频保护	271
第三节	相差动高频保护	276
第四节	微波保护简介	282
第十八章	自动重合闸	284
第十九章	计算机继电保护	290
第二十章	雷电过电压	300
第一节	雷电过电压的产生	300
第二节	防雷保护装置	303
第三节	送电线路防雷	311
第四节	变电所防雷	316
第五节	旋转电机防雷	320
第二十一章	内部过电压	325
第一节	工频电压升高	325
第二节	谐振过电压	332
第三节	操作过电压	338
第二十二章	电力系统绝缘配合	342
第一节	绝缘配合的原则和方法	342
第二节	中性点接地方式对绝缘水平的影响	343
第三节	线路和变电所架空导线绝缘的选择	344
第四节	电气设备试验电压的确定	346
参考文献		351

# 第一章 绪 论

## 第一节 我国电力工业发展概况

电力工业是国民经济的重要行业之一，它既为现代工业、农业、科学技术和国防提供必不可少的动力，又和人民群众的日常生活有着密切的关系。

我国具有丰富的能源资源。全国水能资源的蕴藏量为 6.8 亿 kW（其中可开发利用的约为 3.7 亿 kW），居世界首位。此外，煤、石油、天然气等资源也很丰富。这些优越的自然条件为我国电力工业的发展提供了良好的物资基础。但是，旧中国的电力工业却非常落后，到解放前夕，全国发电设备的总装机容量仅 184.9 万 kW，年发电量仅 43 亿 kW·h。解放以后，我国电力工业发展很快，至 1989 年全国总装机容量已达 1.24 亿 kW，成为世界上第五个装机容量超过 1 亿 kW 的国家；年发电量为 5820 亿 kW·h，居世界第四位。我们已经在江河和煤炭基地上建起了大型水力发电厂和坑口火电厂，大型核电厂也正在建设中，中小型发电厂则更是星罗棋布，遍布全国。500 kV 超高压输电线路已成为部分电网的骨干输电线路。至 1989 年底，全国已有四个电网装机容量超过 1500 万 kW。我国电力工业已进入了大机组、大电网和超高压的新阶段。

我国电力工业自动化水平正在逐年提高，已有许多电厂实现了集中控制和计算机控制，电网也实现了分级集中调度。我国电力工业将跨入世界先进行列。

## 第二节 发电厂和变电所类型

### 一、发电厂类型

发电厂是把各种天然能源，如煤炭、水能、核能等转换成电能的工厂。按能源分类，发电厂可分为火力发电厂、水力发电厂、核能发电厂等。

#### 1. 火力发电厂

火力发电厂是指用煤、石油和天然气等作为燃料的发电厂。在火力发电厂中，燃料燃烧时的化学能被转换为热能，热能借助汽轮机等热力机械转换为机械能，再由汽轮机带动发电机将机械能转换为电能。

火力发电厂按其作用来分有只发电和发电兼供热两种类型，前者指一般的火力发电厂（一般火力发电厂多采用凝汽式汽轮发电机组，故又称为凝汽式火电厂），后者称为供热式火力发电厂（或称热电厂）。一般火力发电厂应尽量建设在燃料基地附近，发出的电能通过高压线路送往负荷中心。这样既避免了燃料的长途运输，提高了能量输送的效益，还防止了对大城市及其周围地区环境的污染。通常把这种火力发电厂称为“坑口电厂”。这是今后建设大型火力发电厂（特别是烧低质煤的火力发电厂）的主要方向。热电厂的建设是为



了提高热能的利用效率，由于兼供热，所以必须建在大城市或工业区的附近。为了使热电厂维持较高的效率，当需供热量多时，热电厂应多发电；反之，则应少发电。因此，热电厂在电力系统中的运行方式远不如凝汽式发电厂的灵活。

据统计，全世界发电厂的总装机容量中，火力发电厂占70%以上。

## 2. 水力发电厂

水力发电厂是利用河流所蕴藏的水能资源来发电的。在水力发电厂中，具有一定压力或流速的水流冲动水轮机使水能转换为机械能，再由水轮机带动发电机将机械能变换为电能。

水力发电厂按枢纽布置可分为堤坝式、引水式等。堤坝式水力发电厂是在河床上游修建拦河坝，将水积蓄起来，抬高上游水位，形成发电水头。堤坝式水力发电厂又可分为坝后式和河床式两种：①坝后式水力发电厂是将厂房修建在坝的后面，水头压力全部由坝体承受，水库的水由压力水管引入厂房，冲动水轮发电机组发电；②河床式水力发电厂是将厂房修建在河床上，厂房和挡水堤坝连成一体，厂房也起挡水作用。引水式水力发电厂是修建在山区水流湍急的河道上或河床坡度较陡的地方，由引水渠道造成水头，一般不需修坝或只需修低堰。

上述的水力发电厂是专作发电用的。还有一种特殊形式的水力发电厂，叫做抽水蓄能电厂。抽水蓄能电厂设有上下两座水库，用压力隧洞或压力水管相连。当电力系统处于深夜、节假日等负荷低谷时，利用多余电能，从下水库抽水至上水库蓄能；当电力系统负荷高峰到来时，从上水库放水至下水库发电，起到调峰作用。此外，抽水蓄能电厂还可以有调频、调相、系统备用和生产季节性电能等多种用途。

水力发电厂的生产过程比火力发电厂简单，所需的运行维护人员较少，易于实现全盘自动化；水力发电厂不消耗燃料，电能成本比火力发电厂低得多，并且没有环境污染；水力发电机组的效率较高，承受变动负荷的性能较好，在系统中的运行方式较为灵活；水力发电机组起动迅速，在系统发生事故能及时有效地发挥其后备作用。但是，水力发电厂相对于火力发电厂而言，建设投资大、工期长、占用劳动力多；水力发电厂的运行方式受气象、水文等自然条件的影响，有丰水期、枯水期之别，发电出力不如火力发电厂稳定。

## 3. 核能发电厂

核能发电厂是指用铀、钚等作为燃料的发电厂。在核能发电厂中，核燃料在反应堆内产生核裂变，释放出大量热能，由冷却剂（水或气体）带出，在蒸汽发生器中将水加热为蒸汽，然后同一般火力发电厂一样，用蒸汽推动汽轮机，带动发电机发电。核能发电厂与火力发电厂在构成上的最主要区别是前者用核-蒸汽发生系统（反应堆、蒸汽发生器、泵和管道等）代替后者的蒸汽锅炉。故核能发电厂中的反应堆又被称为原子锅炉。

核能发电厂的主要特点：①消耗燃料少，可避免大量燃料的运输，也可以大量节省煤、石油等燃料。例如，一座容量为50万kW的火力发电厂每年需烧煤150万t左右，而相同容量的核能发电厂每年只需消耗20t的铀燃料；②燃烧时不需要空气助燃，可以建在地下、山洞里、水下或空气稀薄的高原地区；③从发电厂的建设投资和发电成本看，核能发电厂的造价虽较火力发电厂高，但发电成本比火力发电厂低30%~50%，随着规模增大，单位

千瓦投资费用的下降速度愈来愈快，据国外资料介绍，如装机容量为50万kW，则建核能发电厂比建一般火力发电厂经济。

核能发电厂存在的主要问题是放射性污染的防护。目前在技术上已能够较好地解决放射性污染的防护以及放射性废弃物的处理问题。但在核能发电厂的运行中，放射性污染事故仍有发生。预计在今后相当一段时间内，对有关核能发电安全技术的研究，仍将是人们关注的中心。

#### 4. 其它发电方式

除了上述的火力、水力和核能发电方式以外，世界各国正在试验研究各种新的发电方式，有些已得到广泛应用，目的是为了充分利用自然界的各种能源，提高发电的效率或是为了满足各种特殊用途。以下仅作一些简单的原理性介绍。

(1) 地热发电 利用地下喷出的热水（或汽水混合物）经过减低压力后产生蒸汽或经过热交换使低沸点液体产生蒸汽来发电。

(2) 风力发电 利用风车来带动发电机发电。适用于农村中小规模的用电场合。

(3) 太阳能发电 一种方法是将太阳光聚集到一个容器上加热水或低沸点液体产生蒸汽来发电，另一种方法是用光电池直接发电。

(4) 磁流体发电 利用高温导电流体高速通过强磁场来发电。

(5) 潮汐能发电 利用某些河道出海口涨潮和落潮时的水位差来发电。

(6) 波浪能发电 利用海面上波浪起伏的能量发电。

(7) 海洋温差发电 利用热带海洋表层水温较高而下层水温较低的温差使低沸点液体产生蒸汽来发电。

目前世界各国所采用的各种发电方式中，最主要的还是火力发电和水力发电两种。一个国家以何种发电方式为主是根据其自然资源等情况所决定的。例如：瑞士、瑞典、加拿大等国家由于水力资源丰富，开发成本也较低，故以水力发电为主；又如日本可开发的水力资源已不多了，所以目前大量进口燃料，以大力发展火力发电厂作为过渡，将来则以核能发电为主。我国目前火力发电占主要地位，由于我国各种能源资源都很丰富，所以各种发电方式都有极其广阔的发展前景。

## 二、变电所类型

电力系统由发电厂、变电所、输电线路和用户组成。变电所是联系发电厂和用户的中间环节，起着转换和分配电能的作用。

如图1-1所示，变电所根据它在电力系统中的地位，可分为下列几种类型。

### 1. 枢纽变电所

枢纽变电所是指位于电力系统的枢纽点，连接电力系统高压和中压的几个部分，汇集多个电源，高压侧电压为330~500kV的变电所。全所停电后，将引起系统解列，甚至使部分系统瘫痪。

### 2. 中间变电所

中间变电所是指以交换潮流或使长距离输电线路分段为主，同时降压供给当地用电的变电所。一般汇集2~3个电源，电压为220~330kV。全所停电后，将引起区域网络解列。

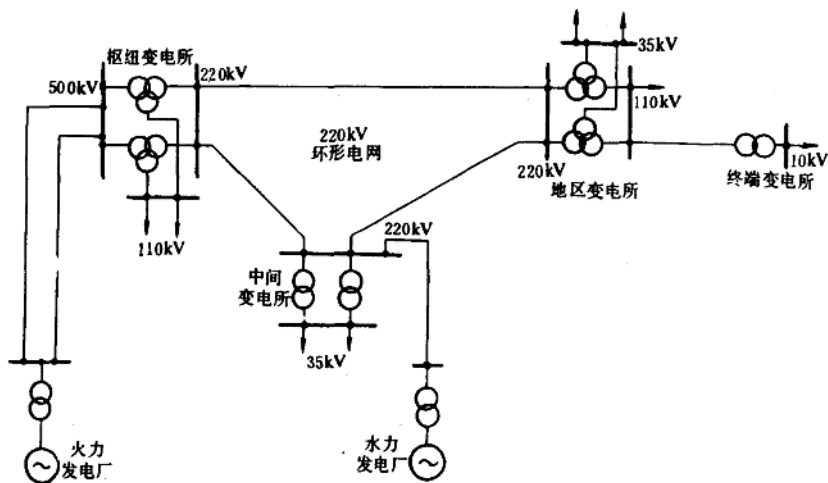


图 1-1 电力系统图

### 3. 地区变电所

地区变电所是指以向地区用户供电为主，高压侧电压一般为110~220kV的变电所。全所停电后，仅使该地区中断供电。地区变电所是一个地区或城市的主要变电所。

### 4. 终端变电所

终端变电所是指在输电线路的终端，接近负荷点，直接向用户供电的变电所，高压侧电压多为110kV。全所停电后，只有用户中断供电。

## 第三节 发电厂和变电所电气设备简述

为了便于学习以后各章节，下面对发电厂和变电所的电气设备作一简单介绍。

### 一、主要电气设备

发电厂和变电所内的主要工作是：①生产和输送分配电能；②根据系统要求，启动或停止机组，改变运行方式，调整其参数；③对电路进行必要的切换；④不断监视主要设备的工作；⑤周期性地检查和维护主要设备；⑥迅速消除发生的故障。根据上述工作要求，发电厂和变电所内常装设以下主要电气设备。

#### 1. 一次设备

直接与发供电电路相连接的电气设备，称为一次设备。它主要有：

- 1) 生产和转换电能的设备。如发电机、变压器、电动机等。
- 2) 接通和断开电路的开关设备。如断路器、隔离开关、低压闸刀开关、自动空气开关、接触器等。
- 3) 限制电流和防御过电压的设备。如限制故障电流的限流电抗器、限制启动电流的启动电抗器、限制过电压的避雷器、补偿中性点非直接接地系统单相接地时电容电流的消

弧线圈和作为小容量电路过载或短路保护的熔断器等。

4) 变换电路电气量(电压或电流),反映给保护、监测装置,并使之与高电压隔离的设备。如电压互感器、电流互感器等。

5) 用以连接电路中各种电气设备的载流体。如母线、电力电缆和架空输电线等。

6) 用以工作接地或保护接地的接地装置。

## 2. 二次设备

对一次设备的工作进行监视、测量、控制和保护的辅助设备,称为二次设备。它主要有:

1) 用于对电路的参数进行测量的各种仪表。如电流表、电压表、功率因数表、电度表、频率表等。

2) 用以反映电力系统不正常工作状态和故障状态以及在这些状态下动作的各种信号装置及继电保护装置。

3) 用于操作电器的设备以及自动、远动装置。如操作开关、同期装置、自动调压装置、自动调频装置、遥测、遥控、遥信装置等。

4) 用以连接二次设备的导体。如操作电缆、小母线、连接线等。

5) 给直流操作、保护、监测设备供电和供给事故照明用电的直流电源设备。如直流发电机组、整流装置、蓄电池组等。

## 二、电气主接线图

由一次设备相互连接,即发电机、变压器、电力线、电抗器、用电设备等按一定接线方式连接而成的电气回路,称为一次回路或电气主接线。描述电气主接线的图纸,称为电气主接线图或一次回路图。由二次设备相互连接而成的电气回路,称为二次回路或电气二次接线。描述二次接线的图纸,称为二次接线图或二次回路图。

电气主接线图一般都用单线图(用一条线代表三相电路)绘制,只有在个别地方必须同时绘出三相时,才用三线图来表示。在绘制主接线图时,电气设备图形符号和文字符号必须采用国家标准规定的统一符号。图1-2是具有两种电压(发电机电压及变压器高压侧电压)的火电厂电气主接线图。

由图1-2可知,发电机( $F_1$ 和 $F_2$ )发

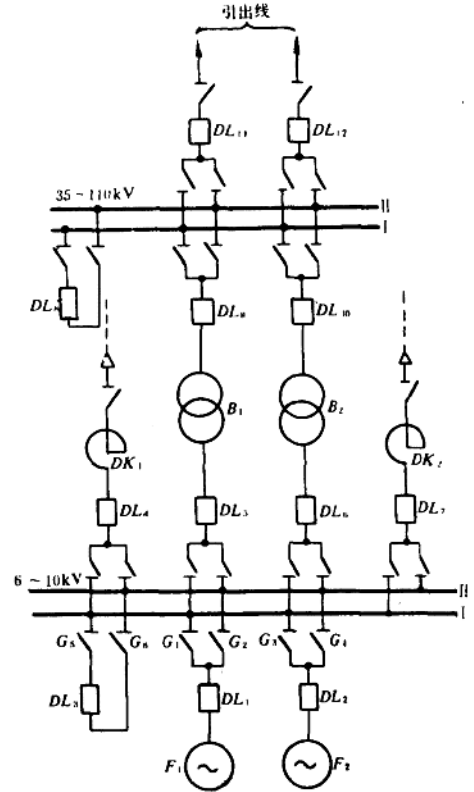


图 1-2 火电厂主接线图

出的电能先经断路器 ( $DL_1$  和  $DL_2$ ) 和隔离开关 ( $G_1 \sim G_4$ ) 送至  $6 \sim 10\text{kV}$  电压母线, 再由此将一部分电能经电抗器 ( $DK_1$  和  $DK_2$ ) 及电力电缆送到附近用户。另一部分电能通过升压变压器  $B_1$ 、 $B_2$  送到  $35 \sim 110\text{kV}$  电压母线上。图中母线是汇集和分配电能的装置, 每种电压的母线都有两组 (即双母线)。正常运行时, 一组母线工作, 另一组母线备用。如工作母线检修或发生故障, 电路可切换至备用母线上工作。断路器具有灭弧装置, 正常运行时可接通或断开电路负荷电流, 在故障情况下, 能切断规定的异常电流。隔离开关 ( $G_1$ 、 $G_2$ ……等) 没有灭弧装置, 不能用来接通或断开有负荷电流的电路, 它的作用是在检修断路器和其它电气设备时使其与电源隔离, 保证工作人员的安全。电抗器的作用是限制短路电流。

由图1-2还可知, 电气主接线不仅表明发电机、变压器、线路和断路器等电气设备的数量和连接顺序, 而且还表示发电机等设备之间汇集和分配电能的方式以及与系统连接的情况等。

## 第二章 同步发电机和变压器的运行

因为大多数同步发电机和变压器都并入电力系统运行，故本章仅对并入系统运行的同步发电机和变压器进行讨论。

### 第一节 同步发电机的额定运行方式及温升

发电机的额定容量是指在额定电压、额定频率、额定功率因数和额定冷却介质温度等条件下，发电机所能长期连续发出的最大功率。发电机的额定数据是由制造厂在其稳定和对称运行条件下给出的。

发电机按照制造厂铭牌规定数据运行的方式，称为发电机额定运行方式。发电机在额定运行方式下运行时，具有效率高、转矩均匀等较好的性能，因此运行部门都力图保持发电机在额定数据下运行。实际运行中的发电机不仅冷却介质温度和功率因数经常发生变化，而且工作电压和频率也常与额定值有偏差，不过发电机在运行时，其运行参数（如电压、频率、冷却介质温度和功率因数等）在额定值附近的一定范围内变动是允许的。发电机的额定运行方式以及在其运行参数允许变化范围内的运行方式，称为发电机的正常运行方式。

发电机运行时，它的铁芯和绕组中都有能量损耗，引起各部分发热，温度升高。发电机负荷电流愈大，损耗愈大，所产生的热量愈多，温度也愈高。对铁芯和绕组导体来说，其耐热温度相对较高。而绝缘材料的耐热温度则较低，过高的运行温度会加速绝缘材料的“老化”过程，缩短其使用寿命。甚至会在运行中发生故障，威胁电机的安全，因此，发电机运行时的最高允许工作温度应按绝缘材料耐热等级来考虑。绝缘材料的耐热等级规定可参阅有关电机设计手册。

理论和实践证明，绝缘材料的使用寿命随温度升高呈指数规律下降。当发电机一直处于最高允许工作温度下运行时，一般有15~20年的使用寿命。当运行温度超过最高允许工作温度时，其使用寿命将迅速缩短。例如：对采用A级绝缘的发电机，当一直处于90~95℃运行时，其使用寿命可达20年，而在110℃下运行时，其使用寿命只有4~5年；对采用B级绝缘的发电机，当运行温度为105℃时，其使用寿命可达25~30年，而当运行温度达到140℃时，其使用寿命剧减到2年。由此可见，绝缘材料对温度十分敏感，因此，在发电机运行中，在任何情况下，都不能让其绝缘加热温度超过规定的最高允许工作温度。

为了能够真正反映电机绕组的发热情况，还要规定发电机的温升。所谓温升就是发电机各部分的温度与冷却介质入口温度之差。它所表示的是电机内部因损耗而引起的发热情况，因此温升比温度更能说明电机本身的运行情况，也便于衡量电机的设计和制造质量。电机的温升是设计和使用电机的主要性能指标之一。

当周围冷却介质的最高温度一定时，电机各部分的最高温度决定于它们的温升。这时，为了保证电机的安全运行和具有适当寿命，电机各部分的温升不应超过一定数值，也就是电机各部分的允许温升有一定的最大值，简称温升极限值。根据国家标准GB755-81规定，对于空气冷却发电机，当周围冷却空气的最高温度为+40℃时，电机各部分的允许温升极限值如表2-1所示。

表 2-1 发电机的允许温升极限值 (℃)

绝 缘 等 级		A 级			B 级		
		温度计法	电 阻 法	检温计法	温度计法	电 阻 法	检温计法
部 件	定子绕组	50	60	60	70	80	80
	转子绕组		65		80	90	
	铁 芯	60		60	80		80

其它不同结构和冷却方式的发电机，因温升分布和热流过程各异，允许温升极限值标准也略有不同，因此，对不同类型发电机的允许温升极限值，应以制造厂的规定为依据。同时，在发电机投入运行以后，应进行温升试验，求出额定负荷下的温升，以检验制造和安装质量，并为以后的运行提供依据。运行中的发电机每隔3~5年也应进行核对性温升试验，检查各部分的温升是否正常，从中发现问题，重新鉴定出力，以保证安全运行和充分挖掘设备潜力。

## 第二节 同步发电机非额定参数下的运行

发电机的额定容量是按额定冷却介质温度、额定电压、额定频率和额定功率因数等运行条件设计的。在实际运行中，不仅冷却介质温度和功率因数时常发生变化，而且工作电压和频率也和额定值常有偏差。因此，发电机的允许出力需作相应的改变。下面分几种情况进行讨论。

### 一、冷却介质温度不同于额定值时发电机的允许出力

如前所述，发电机的使用寿命是由绝缘材料的老化程度决定的，而绝缘老化的基本原因是发热，因此定子和转子的温升就成为发电机运行的一个关键问题。

运行中的发电机，当冷却介质温度超过额定值时，若转子绕组、定子绕组以及定子铁芯的温度，经过试验未超过其绝缘等级的极限温度和制造厂规定的允许温度，可以降低发电机的出力；反之，则必须降低发电机出力，即减少定子或转子电流，直至定子绕组、转子绕组和铁芯的温度不超过温升试验所确定的允许温度（监视温度）为止。当冷却介质温度低于额定值时，定子和转子的电流可以大于额定值，直至定子绕组、转子绕组和铁芯的温度达到温升试验时所确定的允许温度（监视温度）为止。总之，当发电机冷却介质温度变化时，电流较额定值高或低是以绕组温度不超过规定的允许极限为依据的。

下面以空气冷却发电机为例，分析绕组温度维持在允许极限、冷却介质温度变化时，发电机定子电流和转子电流的变化情况。

假设发电机定子绕组的温度为 $\theta_d$ ，它是由冷却介质的温度 $\theta_j$ 、通风摩擦损耗引起的温升 $\tau_f$ 、铁损引起的温升 $\tau_{ei}$ 、铜损引起的温升 $\tau_{eo}$ 等几部分组成的。在转速恒定时，可以认为通风摩擦损失保持不变，而铁损大致与电压平方成正比，铜损与电流平方成正比。角注“e”表示额定状态时的相应温升，则在电压为 $U$ ，电流为 $I$ 时定子绕组的温度为：

$$\theta_d = \theta_j + \tau_{ef} + \tau_{eii} \left( \frac{U}{U_e} \right)^2 + \tau_{eio} \left( \frac{I}{I_e} \right)^2 \quad (2-1)$$

在额定状态时（即在额定电压 $U_e$ 、额定电流 $I_e$ 、额定转速 $n_e$ 、额定冷却介质温度 $\theta_{ej}$ 时），由式（2-1）可得定子绕组温度：

$$\theta_{ed} = \theta_{ej} + \tau_{ef} + \tau_{eii} + \tau_{eio} \quad (2-2)$$

若冷却介质温度不同于额定值，但发电机在额定电压下运行，根据定子绕组温度不超过 $\theta_{ed}$ 的原则，令式（2-1）中 $\theta_d = \theta_{ed}$ ， $U = U_e$ ，由式（2-2）减式（2-1），经整理后，可得发电机定子电流的允许倍数为：

$$\frac{I}{I_e} = \sqrt{\frac{\tau_{eio} + \theta_{ej} - \theta_j}{\tau_{eio}}} \quad (2-3)$$

由于发电机转子绕组中的电流为直流，故在转子电流为 $I_z$ 时转子绕组的温度应为：

$$\theta_z = \theta_j + \tau_{ez} \left( \frac{I_z}{I_{ez}} \right)^2 \quad (2-4)$$

式中  $\theta_z$ ——转子绕组的温度；

$\theta_j$ ——周围介质的温度；

$\tau_{ez}$ ——转子绕组在额定状态时的温升；

$I_z$ ——转子电流；

$I_{ez}$ ——转子额定电流。

在额定状态下转子绕组的温度应为：

$$\theta_{ez} = \theta_{ej} + \tau_{ez} \quad (2-5)$$

令 $\theta_z = \theta_{ez}$ ，则可求得冷却介质温度不同于额定值时，转子电流的允许倍数为：

$$\frac{I_z}{I_{ez}} = \sqrt{\frac{\tau_{ez} + \theta_{ej} - \theta_j}{\tau_{ez}}} \quad (2-6)$$

由式（2-3）和式（2-6）可知，绕组温度维持在允许极限时发电机的定子允许电流和转子允许电流均随冷却介质温度变化而变化。

以某台发电机为例：定子绕组用沥青云母绝缘， $\theta_{ed} = 105^\circ\text{C}$ ， $\theta_{ej} = 40^\circ\text{C}$ ， $\tau_{eii} = 25^\circ\text{C}$ ， $\tau_{eio} = 40^\circ\text{C}$ 。转子绕组用B级绝缘， $\theta_{ez} = 130^\circ\text{C}$ ， $\tau_{ez} = 90^\circ\text{C}$ 。用上述数值代入式（2-3）和式（2-6），求得不同冷却介质温度下定子和转子电流允许倍数，列于表2-2。

根据表2-2绘成的电流允许倍数与冷却介质温度的关系曲线，如图2-1所示。当冷却介质温度低于额定值时，定子电流可以提高的倍数比转子的多，故应按转子电流允许增大倍



表 2-2 不同冷却介质温度时发电机的定子和转子电流允许倍数

$\theta, (^{\circ}\text{C})$	20	30	40	50	60
$I/I_e$	1.22	1.12	1.00	0.87	0.71
$I_r/I_{r_e}$	1.11	1.05	1.00	0.95	0.88

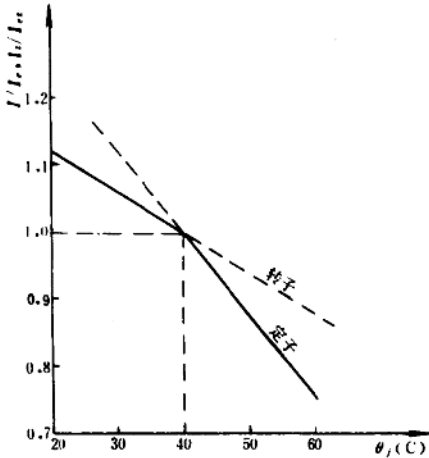


图 2-1 冷却介质温度变化时发电机的允许出力

数来决定提高发电机出力的幅度，此时定子绕组温度不会超过允许值。当冷却介质温度高于额定值时，应降低的定子电流倍数比转子的多，故应按定子电流降低的倍数来决定减少发电机出力的幅度，转子绕组温度此时不会超过允许值。虽然各台发电机的温升数据不尽相同，但图2-1所表明的基本特征，即冷却介质温度比其额定值每低 $1^{\circ}\text{C}$ 所能增加的电流倍数，较之冷却介质温度比其额定值每高 $1^{\circ}\text{C}$ 所应降低的电流倍数小。这个原则对一般外冷发电机都适用。发电机运行规程中规定的电流允许变化范围便是按这一原则确定的。

## 二、端电压不同于额定值时发电机的运行

发电机正常运行时的端电压，允许在额定值的 $\pm 5\%$ 范围内变动，此时发电机可保持额定出力不变。当定子电压升高 $5\%$ 时，定子电流应降低 $5\%$ ；当定子电压降低 $5\%$ 时，定子电流可增加 $5\%$ 。在这样的变化范围内，电机的定子绕组和转子绕组温度不会超过允许值。

当电压低于额定值的 $95\%$ 时，定子电流仍不应超过额定值的 $5\%$ ，此时发电机要降低出力运行，否则定子绕组的温度要超过允许值。

发电机运行电压的下限，可根据稳定要求确定，一般不应低于额定值的 $90\%$ 。

发电机运行电压升高到额定值的 $105\%$ 以上时，其出力必须相应降低。因为电压升高，铁芯内磁密增加，铁损增加，引起铁芯温度和定子绕组温度增高。除此之外，电压增高，如维持出力不变，就要增加励磁电流，致使转子绕组的温度超过允许限度。

发电机连续运行的最高允许电压，应遵照制造厂的规定，但最高值不得超过额定值的 $110\%$ 。因为现代大容量发电机铁芯是按相当高的饱和程度设计的，当运行电压超过额定电压 $5\% \sim 10\%$ 时，就会由于过度饱和，使定子旋转磁场的漏磁部分大大增加，在机架的一些接缝处造成局部发热，甚至引起火花，使机架损坏。

## 三、运行频率不同于额定值时发电机的运行

发电机正常运行时的频率允许变动范围是 $\pm 0.5\text{Hz}$ 。

发电机运行频率如高于额定值，即转速高于额定值时，转子上承受的离心力增大，可能使转子某些部件损坏，因此频率增高主要受转子机械强度的限制。频率增高，通风摩擦