

1000MW火力发电机组培训教材



DIANQI SHEBEI XITONG JI YUNXING

电气设备系统及运行

常湧 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

1000MW火力发电机组培训教材

电气设备系统及运行

主 编 常 湧
副主编 王义平
参 编 王明磊 陈 伟 饶 翔



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

《1000MW 火力发电机组培训教材》

编 审 委 员 会

主 任：陈 飞

副主任：胡念苏 范云滩 黄忠祥 罗家林 刘克兴

委 员：(以姓氏笔画为序)

马广平 王义平 王建梅 刘先斐 李 庆

李正奉 朱全利 汪文化 邹向群 陈志和

肖启标 杨 俊 周荣迁 周柏青 郑桂波

俞红梅 郝忠义 黄 梅 常 湧 喻亚非

熊立红 熊杨恒 蔡 锴 樊天竞 滕维忠

前 言

我国电力工业已经进入大电网、大机组、高电压、高自动化的发展时期。目前，以大容量和超临界技术为特征的火力发电机组被广泛采用，这对火力发电设备的制造和运行水平都提出了更高的要求，生产运行人员和从事相关工作的技术人员也面临知识的更新。

为帮助现场生产运行人员了解 1000MW 火力发电机组的结构、系统、运行等知识，编者编写了本套《1000MW 火力发电机组培训教材》，力求将我国目前在 1000MW 火力发电机组方面的最新成果展示给读者。丛书包括《电气设备系统及运行》、《锅炉设备系统及运行》、《水处理设备系统及运行》、《控制设备系统及运行》、《汽轮机设备系统及运行》五个分册。

本书结合现场实际设备和系统，叙述了电力工业发展概况，分八章详细介绍了发电厂的 1000MW 发电机、变压器、高压电器设备、电气主接线和厂用主接线、直流系统、继电保护系统、自动装置等的原理、结构、特性、运行、维护等。本书可供设计院、发电厂、电力试验研究所、电力建设部门等从事 1000MW 发电机组电气专业的设计、安装、调试、运行、检修的技术人员和管理人员阅读，可作为现场生产运行人员的培训资料和教材，也适合电网系统的电气专业技术人员查阅，还可供电气专业的大中专师生参考。

本书由武汉大学电气工程学院常湧主编，国电荆门热电厂王义平副主编，武汉大学电气工程学院王明磊、陈伟、饶翔参编。

本书在编写过程中，参阅了参考文献中列写的正式出版文献以及相关电厂、设计院和高等院校的技术资料、说明书、图纸等，特别是在收集资料的过程中得到国电荆门电厂的黄画剑和徐挺进两位高级工程师的大力支持，在此一并表示衷心感谢。

由于编者水平所限和编写时间紧迫，疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

2008 年 9 月

目 录

前言

| | |
|-----------------------------|-----|
| 第一章 绪论 | 1 |
| 第一节 我国电力工业的发展概况 | 1 |
| 第二节 电力系统的基本概念 | 2 |
| 第三节 电力生产的特点和对电力系统的要求 | 6 |
| 第二章 同步发电机 | 9 |
| 第一节 同步发电机的工作原理、机构特点及性能..... | 10 |
| 第二节 同步发电机励磁系统..... | 15 |
| 第三节 同步发电机的冷却系统..... | 24 |
| 第四节 同步电机的密封油系统..... | 42 |
| 第五节 同步电机的运行..... | 46 |
| 第六节 同步发电机的维护与检修..... | 56 |
| 第三章 变压器 | 68 |
| 第一节 变压器的工作原理..... | 68 |
| 第二节 主变压器的结构特点和主要技术参数..... | 74 |
| 第三节 厂用变压器和启动/备用变压器 | 81 |
| 第四节 变压器投运前的准备工作..... | 82 |
| 第五节 变压器运行中的检查和维护..... | 85 |
| 第六节 变压器的异常运行和事故处理..... | 87 |
| 第七节 变压器的运行方式和经济运行..... | 91 |
| 第八节 变压器的过负荷运行..... | 93 |
| 第九节 变压器的油质监测..... | 94 |
| 第四章 高压电器设备 | 97 |
| 第一节 高压断路器概述..... | 97 |
| 第二节 GIS 高压组合系统 | 100 |
| 第三节 GIS 的维护和检修 | 104 |
| 第四节 高压开关柜 | 106 |
| 第五节 过电压保护及避雷器 | 110 |
| 第六节 封闭母线 | 125 |

| | |
|------------------------------|-----|
| 第五章 电气主接线和厂用电接线 | 129 |
| 第一节 电气主接线 | 129 |
| 第二节 电气主接线的接线方式及运行 | 131 |
| 第三节 厂用电接线 | 141 |
| 第四节 厂用电系统的运行 | 148 |
| 第六章 直流系统 | 158 |
| 第一节 直流系统概述 | 158 |
| 第二节 直流系统装置 | 160 |
| 第三节 蓄电池的基础知识 | 165 |
| 第四节 交流不间断电源 | 170 |
| 第七章 继电保护系统 | 175 |
| 第一节 微机保护的概述 | 175 |
| 第二节 发电机微机保护 | 180 |
| 第三节 变压器继电保护 | 213 |
| 第四节 发电机—变压器组继电保护配置原则 | 223 |
| 第五节 发电机—变压器组微机成套保护装置 | 233 |
| 第六节 启动/备用变压器保护 | 238 |
| 第八章 自动装置 | 245 |
| 第一节 同期装置 | 245 |
| 第二节 励磁系统 | 253 |
| 第三节 厂用电切换装置 | 259 |
| 第四节 故障录波装置 | 262 |
| 第五节 自动装置的故障处理 | 269 |
| 参考文献 | 271 |

第一章

绪 论

第一节 我国电力工业的发展概况

1879年,上海外滩实现10马力(1马力=735W)发电机运转,1882年,英商在上海乍浦路建设的12kW电灯厂正式对外供电,1912年,云南螳螂川的石龙坝水电站开始发电。这些是中国电力工业较为公认的起点。此后我国电力工业经历了一段缓慢发展时期,至1949年,全国的装机总容量仅1850MW,年人均用电量不到10kW·h。

新中国的成立为中国电力工业的发展创造了有利的条件,电力工业有了快速发展。到1978年改革开放前,全国火电装机容量达43900MW,年人均用电量已近200kW·h。我国已经建立起独立的、较为完整的电力工业体系。

1978年实行改革开放政策后,电力工业开始快速发展,技术装备水平逐步提高。2000年底,全国发电装机容量和发电量已居世界第二位。至2007年全国总装机容量达到7亿kW,年人均用电量超过1500kW·h,我国已成为世界上仅次于美国的电力生产大国。1978~2005年中国人均GDP与人均用电量关系曲线,如图1-1所示。

电力工业是国民经济的基础产业,它要对国民经济的发展起拉动作用。因此,电力工业增长率必须高于同期的国民经济的增长率,要超前发展,要先行。近期,我国先后经历了两次电力体制改革,对电力工业发展意义深远。

1997年1月,国家电力公司成立。经过一年多的双轨制运行和平稳过渡,电力工业部于1998年2月撤销,实现了我国电力工业管理体制由计划经济向社会主义市场经济过渡的历史性转折。

2003年起,国家电力公司撤销,成立电监会、五大发电集团公司、两大电网公司和四个辅业集团,均由国有资产管理委员会管理,标志着电力工业管理体制改革又按照“厂网分离”的原则再进了一步。与此同时,网、省电力局改组为二、三级法人;发电集团公司形成三级法人治理结构;辅业逐步分离;进一步优化了电力建设的格局。

目前,我国电力工业已经进入大电网、大机组、高电压、高自动化的发展时期。在原有的主要以500kV交流和±500kV直流系统为主电网基础上,国家电网公司开始了百万伏级交流和±800kV级直流系统特高压电网的建设。建设特高压电网是满足未来持续增长的电力需求的根本保证,可以提高我国能源开发和利用的效率,提高电力工业整体效益,是培育和发展国家电力市场的重要条件。

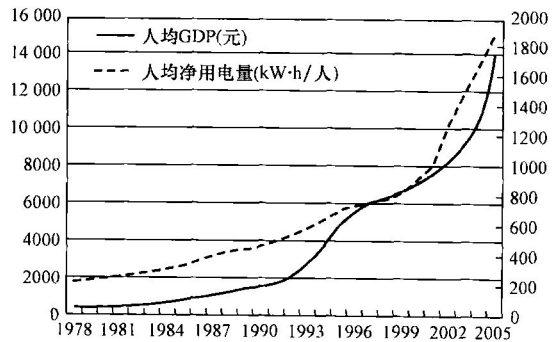


图 1-1 1978~2005 年中国人均 GDP 与人均用电量关系曲线图

到 2010 年,随着三峡输变电工程的建成,加上华东、华中、重庆和四川的 500kV 骨干网架,将形成稳固的三峡电网。金沙江下游的巨型电站溪洛渡和向家坝电站及其外送输变电工程建成后,与三峡电网相连,将形成以三峡电站为中心,沿长江展开的我国中部电网。随着华北煤电基地的开发,华北与东北电网的联系将进一步加强,并实现与山东电网的互联,同时通过开发黄河上游拉西瓦等水电站,实现西北与华北电网互联,初步形成以华北电网为中心的北部电网。随着红水河、澜沧江、乌江流域的开发和贵州煤电基地建设的加快,在目前南方电网的基础上,将形成我国的南部电网。

与此同时,北、中、南三大电网也将进一步加强南北联网。其中,北部电网与中部电网之间从西到东将形成“三纵”的结构,西线是西北电网与川渝电网以直流方式相连,中线是华北电网与华中电网以直流背靠背互联,东线是山东电网与华东电网以直流背靠背互联。随着电网不断扩大和主网架的加强,各电网 500kV 主网架互相靠拢。在北、中、南三大电网形成过程中,我国北部、中部、南部电网之间将出现多点互联。

到 2015 年左右我国有望最终形成全国统一的联合电网和电力市场。这些对我国电力工业的发展提出了更高的要求。未来,电力工业将贯彻科学发展观,大力发展水电、积极发展核电、优化发展火电、开发新能源和清洁能源。以 1000kV 交流和 ± 800 kV 的直流为构架的国家级电网实现“西电东送、南北互供、全国联网”的能源安全战略。到 2020 年,全国总装机容量将达到 950 000MW,发电量将达到 4200 亿 kW·h 左右,成为世界第一电力大国。

纵观世界,发展覆盖全国甚至是跨国互联的大电网也是当今世界电力工业实现资源优化配置能力和规模经济效益发展的总趋势。实现全国联网和形成全国统一的电力市场后,相信在市场机制的作用下,电力资源的配置将取得三个方面的效益:一是利用电力需求出现的峰谷时差,取得较大的互为备用效益和电网运行的稳定;二是取得巨大的水电跨流域补偿效益;三是取得水电、火电的互济补偿效益。

第二节 电力系统的基本概念

一、电力系统

发电厂将一次能源转变成电能,通过升、降压变电所向用户送电,输电线路将多个发电厂用电力网连接起来并列工作。这种由发电、输电、变电、配电、用电设备及相应的辅助系统组成的电能生产、输送、分配、使用的统一整体称为电力系统。图 1-2 所示为电力系统示意图。

电力系统在技术和经济上具有一系列突出的优点。

(1) 合理利用资源,提高系统运行的经济效益。由于不同类型的火电厂、水电厂、核电厂等均在电力系统中并列运行,因此可以根据一次能源情况机动灵活地调整各个电厂的发电量,在保证用户所需电量的基础上,充分利用价廉的一次能源和提高发电设备的利用效率。例如,丰水季节应尽量让水电厂多发电,减少火电厂的负荷,以节约燃料、减少污染;在枯水季节,可增大火电厂的负荷,用水电厂提供尖峰负荷;核电厂则用来保证基本负荷的需要,为系统提供稳定的电能。这样,通过电厂之间的调节和互补,既能充分利用水力资源、降低煤耗,又能保证系统有充足的电能供应,从而可以提高电力系统运行的整体效益。

(2) 可以减少总负荷的峰值,充分利用系统的装机容量,减小备用容量。不同地区最高

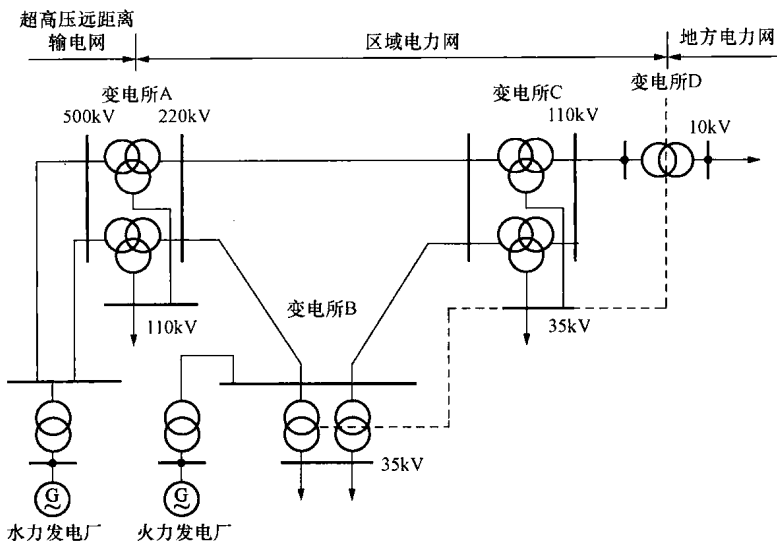


图 1-2 电力系统示意图

负荷发生的时间往往不同。组成电力系统后，由于各个地区负荷尖峰的相互交错，系统的最高负荷一定会比各地区的最高负荷之和要小，因此系统的装机容量就可以得到充分利用。另一方面，在设计电力系统时，一般都要保证一定的备用容量，以防系统中发生局部故障或检修时造成供电不足。当组成电力系统后，由于系统中的所有发电机都并列运行，其负荷可以互相调节，各机组互为备用，所以某一机组发生故障或需要检修时，它所带的负荷可由系统中的其他机组分担。因此，整个系统实际所需的备用容量，要比按各个电厂孤立运行时所需备用容量的总和小得多。

(3) 可以大大提高供电的可靠性和电能质量。由于在系统中是多个发电厂并列运行，发电机组较多，个别机组发生故障时对系统电能质量（如电压、频率等）的影响甚微；而且故障机组退出运行后，它所带的负荷可以由系统中其他运行的机组或备用机组分担，因此可以大大提高供电的可靠性和电能质量。

(4) 可以采用高效率的大容量发电机组。运行经验表明，大容量发电机组的运行效率较高，而其单位容量的基建投资和运行费用均相对较低，因此目前单机的容量愈来愈大。例如三峡电站采用 700MW 的水轮发电机组，大亚湾核电站采用 1000MW 的发电机组，600MW 的汽轮发电机组已在我国广泛使用。但是，如果将大容量的发电机组用于孤立运行的电厂，就会受到备用容量过大的限制。组成大的电力系统后，由于有足够的备用容量可使大容量机组的运行无后顾之忧，因此可以充分发挥其效益，提高电力系统整体运行的经济性。

二、电力网

电力系统中的各种电压等级的变电所及输、配电线路的组成部分，称为电力网，图 1-1 中除发电机外的部分即为电力网。电力网的作用是输送、控制和分配电能。

(一) 电力网的电压等级

电力网中存在多个层次的电压等级。这些电压等级是按输送和分配电能的需要从国家规定的标准电压（又称额定电压）中选定的。我国国家标准规定的额定电压等级为 3, 6, 10, 20, 35, 63, 110, 220, 330, 500, 750kV，均指三相交流系统的线电压。

电能输送过程中，当输送的功率一定时，线路的电压越高，线路中通过的电流就越小，所用导线的截面就可以减小，用于导线的投资可减少，而且线路中的功率损耗、电能损耗也都会相应降低。因此大容量、远距离输送电能要采用高压输电。但是，电压越高，要求线路的绝缘水平也越高，除去线路杆塔投资增大、输电走廊加宽外，所需的变压器、电力设备等的投资也要增加。因此，对电力系统电压等级的选择，过高或过低都不合理。科学的方法是根据输送功率和输送距离，结合电力系统运行和发展的实际需要以及电力设备的制造水平，通过对若干方案的计算结果进行比较来确定。电力工业发展的经验表明，电压等级不宜过多或过少，即相邻的两个电压等级的级差不宜过大或过小。级差过小，将导致电压等级过多，使电力设备制造部门的生产复杂化，增加了设备成本，也为电力系统中设备的维护和检修带来诸多不便，增大运行管理的困难。反之，过少的电压等级又会使电压等级的选择受到限制，不易达到合理配置。根据经验，电力系统输电额定电压等级中相邻的两个电压之比，在电压为 110kV 以下时一般为 3 倍左右，在 110kV 以上时宜在 2 倍左右。表 1-1 给出了架空输电线路的额定电压与输送功率和合理的输送距离间的关系，可供选择电压等级时参考。

表 1-1 架空输电线路的额定电压与输送功率和输送距离的关系

| 线路电压 (kV) | 输送功率 (MW) | 输送距离 (km) | 线路电压 (kV) | 输送功率 (MW) | 输送距离 (km) |
|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|-----------|
| 3 | 0.1~1.0 | 1~3 | 220 | 100.0~500.0 | 100~300 |
| 6 | 0.1~1.2 | 4~15 | 330 | 200.0~800.0 | 200~600 |
| 10 | 0.2~2.0 | 6~20 | 500 | 1000.0~1500.0 | 250~850 |
| 35 | 2.0~10.0 | 20~50 | 750 | 2000.0~2500.0 | 500 以上 |
| 110 | 10.0~50.0 | 50~150 | | | |

随着大型水电厂、大型火电厂及大型核电厂的建设，输电距离和输电容量的不断增大，输电电压会不断提高。因此，输电线路的最高电压等级已成为一个国家电力系统规模和输电技术水平的象征。

(二) 电气设备的额定电压

为了方便地指明某一电气设备或系统的电压级别（设备应该在额定电压下工作）而设定的标称值，通常称为额定电压也称标称电压。所谓额定电压，就是发电机、变压器和电气设备等在正常运行时具有最大经济效益时的电压。采用统一的额定电压标准，可以使电力工业、电工电器制造等行业便于实现生产的标准化、系列化，有利于保证产品的质量和使用的安全可靠。表 1-2 所示为和各级电力网相对应的主要电气设备（或元件）的额定电压。

表 1-2 我国交流电力网和电气设备的额定电压

| 电力网的额定电压 (kV) | 用电设备的额定电压 (kV) | 发电机额定电压 (kV) | 电力变压器额定电压 (kV) | |
|---------------|----------------|--------------------|--------------------|------------|
| | | | 一次绕组 | 二次绕组 |
| 3 | 3 | 3.15 | 3 及 3.15 | 3.15 及 3.3 |
| 6 | 6 | 6.3 | 6 及 6.3 | 6.3 及 6.6 |
| 10 | 10 | 10.5 | 10 及 10.5 | 10.5 及 11 |
| — | — | 13.8, 15.75, 18.20 | 13.8, 15.75, 18.20 | — |
| 35 | 35 | — | 35 | 38.5 |

| 电力网的额定电压 (kV) | 用电设备的额定电压 (kV) | 发电机额定电压 (kV) | 电力变压器额定电压 (kV) | |
|------------------|-------------------|-----------------|----------------|------|
| | | | 一次绕组 | 二次绕组 |
| 63 | 63 | — | 63 | 69 |
| 110 | 110 | — | 110 | 121 |
| 220 | 220 | — | 220 | 242 |
| 330 | 330 | — | 330 | 363 |
| 500 | 500 | — | 500 | 550 |
| 750 | 750 | — | 750 | — |

1. 用电设备的额定电压

用电设备的额定电压应和电网的额定电压相一致。但实际中，由于输送电能时在线路和变压器等元件上产生的电压损失，会使线路上各处的电压不相等，使各点的实际电压偏离额定电压，即线路首端的电压将高出额定电压，线路末端的电压会低于额定电压，其电压分布如图 1-3 所示。

为了使电气设备有良好的运行性能，国家标准规定各级电网电压在用户处的电压偏差不得超过 $\pm 5\%$ 。故在运行中通常可允许线路首端的电压比额定电压高 5%，而末端的电压比额定电压低 5%，即电力线路从首端至末端的电压损失允许为 10%。这样，无论用电设备接在线路的哪一点，都能保证其承受的电压不超过额定电压值的 $\pm 5\%$ ，以满足用电设备安全、经济运行的要求。

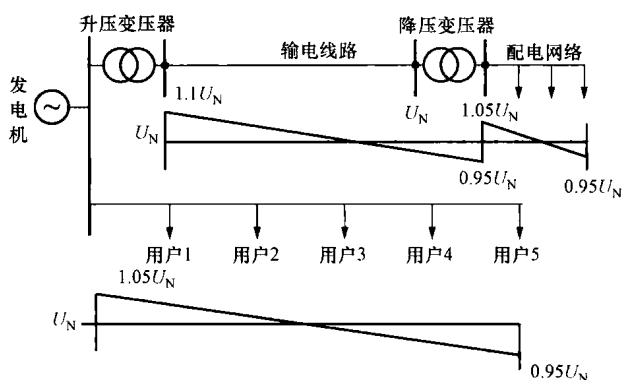


图 1-3 电力网各部分电压分布示意图

2. 发电机的额定电压

因为发电机总是接在线路的首段，所以它的额定电压应比电网的额定电压高 5%，用于补偿电网上的损失。

3. 变压器的额定电压

变压器在电力系统中具有发电机和用电设备的双重性。变压器的一次绕组是从电网接受电能，故相当于用电设备；其二次绕组是输出电能，则相当于发电机。因此规定：变压器一次绕组的额定电压等于电网的额定电压。但是，当变压器的一次绕组直接与发电机的出线端相连时，其一次绕组的额定电压应与发电机的额定电压相同。变压器二次绕组的额定电压是指变压器空载运行时的电压。当变压器在额定负荷下运行时，其内部阻抗会造成大约 5% 的电压损失。为使变压器在额定负荷下工作时，二次绕组的电压比同级电网的额定电压高 5%，因此规定变压器二次绕组的额定电压应比同级电网的额定电压高 10%。当变压器的二次侧输电距离较短，或变压器阻抗较小时，则变压器二次绕组的额定电压可比同级电网的额定电压高 5%。

第三节 电力生产的特点和对电力系统的要求

一、电力生产的特点

电能的生产与其他工业生产相比有着显然不同的特点。

(1) 电能不能大量储藏。电力系统中负荷的多少,取决于用户的需要。电能的生产 and 消费必须时时刻刻保持平衡。电能的生产、分配和消费过程的同时性,使电力系统的各个环节形成了一个紧密的有机联系的整体,其中任一台发、供、用电设备发生故障,都将影响电能的生产和供应。

(2) 电力系统的电磁变化过程非常迅速。电力系统中,电磁波的变化过程只有千分之几秒,甚至百万分之几秒;而短路过程、发电机运行稳定性的丧失则在十分之几秒或几秒内发生。为了防止某些短暂的过渡过程对系统运行和电气设备造成危害,要求调整及切换操作非常迅速和灵敏,显然,靠手动操作不能获得满意的效果,甚至是不可能的,因此必须采用各种自动装置。

(3) 电能的质量管理是非常严格的。交流电网的电压和频率的质量,不仅直接影响电力用户终端产品的质量,而且直接关系电网本身的安全和电力用户用电的可靠性。

(4) 电力工业和国民经济各部门之间有着极其密切的关系。电能供应不足或中断,将直接影响国民经济各个部门的生产和运行,也将影响人们的正常生活,因此要求电力工业必须保证安全生产和成为国民经济中的先行工业,必须有足够的负荷备用容量,以满足日益增长的负荷需要。

二、对电力系统的要求

根据电能生产显著的特点,对电力系统提出以下基本要求。

1. 保证对用户供电的可靠性

系统运行可靠性的破坏,将引起系统设备损坏或供电中断,以致造成国民经济各部门生产和运行停顿以及人民生活秩序的破坏,甚至发生设备和人身事故。

电力用户对供电可靠性的要求并不一样,即使一个企业中各个部门或车间,对供电持续性的要求也有所差别。根据对供电持续性的要求,可把用户分为三级。

一级负荷。指由于中断供电会造成人身伤亡的用户,如煤矿、大型医院;或中断供电会在政治、经济上给国家造成重大损失的用户,如大型冶炼厂、军事基地等;或中断供电会影响国家重要部门的正常工作的用户,如国家重要机关、铁路枢纽、通信枢纽等以及大量人员集中的公共场所、城市公用照明等。对一类负荷用户通常应设置两路以上相互独立的电源供电,所以一类用户要求很高的供电可靠性。

二级负荷。指由于中断供电会在政治、经济上造成较大损失的用户,如使主要设备损坏、大量产品报废、重点企业大量减产等;或中断供电会影响重要单位的正常工作的用户以及大型影剧院、大型商场等。对二类用户应设专用供电线路,条件许可时也可采用双回路供电。

三级负荷。一般指短时停电不会造成严重后果的用户,如小城镇、小加工厂及农村用电。

当系统发生事故,出现供电不足的情况时,应当首先切除三类用户的用电负荷,以保证

一、二类用户的供电。

2. 保证电能的良好质量

电力系统不仅要满足用户对电能的需要,而且还要保证电能的良好质量。频率、电压和波形是电能质量的三个基本指标,其额定值是电气设备设计的最佳运行条件。当系统的频率、电压和波形不符合电气设备的额定值要求时,往往会影响设备的正常工作,造成振动、损耗增加、使设备的绝缘加速老化甚至损坏,危及设备和人身安全,影响用户的产品质量等。因此要求系统所提供电能的频率、电压及波形必须符合其额定值的规定。

系统频率主要取决于系统中有功功率的平衡。发电机发出的有功功率不足,会使系统频率偏低。节点电压主要取决于系统中无功功率的平衡。无功不足,则电压偏低。波形质量问题是由谐波污染引起的。波形质量用波形总畸变率来表示,正弦波的畸变率是指各次谐波有效值平方和的方根值占基波有效值的百分比。保证波形质量就是限制系统中电压、电流中的谐波成分。

我国规定的电力系统的额定频率为50Hz,大容量系统允许频率偏差 $\pm 0.2\text{Hz}$,中小容量系统允许频率偏差 $\pm 0.5\text{Hz}$ 。35kV及以上的线路额定电压允许偏差 $\pm 5\%$;10kV线路额定电压允许偏差 $\pm 7\%$,电压波形为正弦形,其波形总畸变率不大于4%;380V/220V线路额定电压允许偏差 $\pm 7\%$,电压波形总畸变率不大于5%。

电力系统的负荷是不断变化的,系统的电压和频率必然会随之变动。这就要求调度必须时刻注视电压、频率变化情况和系统的有功和无功负荷平衡情况,随时给发电厂及变电所下达指令,通过自动装置快速、及时地调节发电机的励磁电流或原动力,停止或启动备用电源及切除部分负荷等,使电力系统中发出的无功和有功功率与负荷的无功和有功功率保持平衡,以保持系统额定电压和额定频率的稳定,确保系统的电能质量。

3. 保证电力系统运行的稳定性

电力系统在运行过程中不可避免地会发生短路事故,此时系统的负荷将发生突变。当电力系统的稳定性较差,或对事故处理不当时,局部事故的干扰有可能导致整个系统的全面瓦解(即大部分发电机和系统解列),而且需要很长时间才能恢复,严重时会造成大面积、长时间停电,因此稳定问题是影响大型电力系统运行可靠性的一个重要因素。为使电力系统能保持稳定运行,除要求系统参数配置得当,自动装置灵敏、可靠、准确外,还应做到调度合理,处理事故果断、正确等。

4. 保证运行人员和电气设备工作的安全

保证运行人员和电气设备工作的安全是电力系统运行的基本原则,为此要求不断提高运行人员的技术水平和保持电气设备始终处于完好状态。这一方面要求在设计时,合理选择设备,使之在一定过电压和短路电流的作用下不致损坏;另一方面还应按规程要求及时安排对电气设备进行预防性试验,及早发现隐患,及时进行维修。在运行和操作中要严格遵守有关的规章制度。

5. 保证电力系统运行的经济性

为使电能在生产、输送和分配过程中效率高、损耗小,以期最大限度地降低电能成本,实现发电厂和电力网的经济运行,就要最大限度地降低电厂的燃料消耗率(或水的消耗率)、用电率及线路损耗等。应该看到,电能成本的降低不仅会使各用电部门的成本降低,更重要

的是节省了能量资源，因此会带来巨大的经济效益和长远的社会效益。为了实现电力系统的经济运行，除了进行合理的规划设计外，还须对整个系统实施最佳经济调度，实现火电厂、水电厂及核电厂负荷的合理分配，同时还要提高整个系统的管理技术水平。

综上所述，保证电力系统运行的稳定性，安全可靠地向用户提供充足、优质而又经济的电能，是人们对电力系统的基本要求。

第二章

同步发电机

由于理论分析、实验研究的进步及新材料的发展，发电机单机容量越来越大，目前单机容量已达 1333MVA(3000r/min) 和 1650MVA(1800r/min)，且正在研制 2000~2500MVA 两极或四极的发电机组。大型超超临界火电机组，由于具有良好的经济性和较高的热效率，机组效率比超临界机组提高约 2%~3%，而成为火电机组的发展方向。

同时，由于世界一次能源中煤的储量远远超过石油和天然气，环境保护对减少排放污染提出要求，京都协议书为控制地球温室效应确定减少 CO₂ 排放目标等原因，高效洁净燃煤发电技术将成为今后世界电力工业的主要发展方向之一。1993 年，应用新一代 600℃ 铁素体高温材料的首台温度 593℃ 的 700MW 机组在日本投运，标志着世界汽轮机技术的发展进入了一个新的“超超临界参数”发展阶段。相对热力学的超临界概念，超超临界参数是一种商业性称谓，以表示汽轮机具有更高的压力和温度，有的公司也将超超临界机组称为高效超临界机组。

国外如美国、俄罗斯、日本及欧洲各国在超超临界机组研究和应用领域已有十多年的发展，并在超超临界机组的设计、制造、运行等方面积累了宝贵的经验。而国内超超临界机组制造技术还处在起步阶段，各制造厂家基本上都是引进国外的成套技术，设备设计结构与国外制造厂基本相同。

德国西门子 (SIEMENS) 公司 1000MW 级发电机具有非常好的技术和运行经验，已有 8 台 3000r/min 1000MW 级发电机在国际上投入运行，处于国际领先水平。上海汽轮发电机有限公司依托西门子公司 1000MW 级发电机的先进技术，从 2001 年分包制造 THDF125/67 型发电机，到 2003 年全面引进，经过长期的研究、消化、吸收和国产化工作，已完全拥有该 1000MW 级发电机的先进技术以及生产制造能力，成为国内首家拥有国际先进水平的单轴全速 1000MW 级发电机技术及生产制造能力的厂家。

THDF 125/67 发电机采用德国西门子公司最新技术，性能优良，为具有国际先进水平的成熟产品，发电机出力裕度大。THDF 125/67 发电机的原设计容量为 1150MVA，功率因数 0.85，定子电压 27kV，氢压 0.5MPa。SIEMENS 公司在 2001 年针对该型发电机进行了 1150MVA 的型式试验。该发电机为水氢氢冷却方式，即：定子绕组水内冷，转子绕组和定子主出线氢内冷，铁芯轴向氢冷。作为攻关项目依托工程的我国第一个超超临界电厂——华能玉环电厂 4×1000MW 项目于 2003 年 11 月正式启动，标志着我国电力工业进入了一个以环保、高效为中心的发展新阶段。

1000MW 超超临界机组电气设备与超超临界的参数没有直接的关系，但是由于超超临界机组容量的增加以及发电机出口电压的提升，在发电机、变压器及厂用配电、电机设备的结构设计和参数选型上都要考虑相应的影响。根据国内发电机的设计、制造能力及汽轮机的匹配能力，建议 1000MW 机组发电机参数选型如下：额定功率 1000MW；功率因数 0.9 (滞后)；额定电压 27kV；额定转速 3000r/min；冷却方式水氢氢；热效率不小于 98.9%；

绝缘等级 F 级 (B 级温升); 励磁方式可根据接入系统要求和各汽轮发电机组制造厂的成熟配置情况而定, 主要有无刷或静态自并励两种方式。

第一节 同步发电机的工作原理、机构特点及性能

一、同步发电机的基本特点

同步发电机是交流发电机的一种, 与异步发电机的根本区别是转子侧 (特殊结构时也可以是定子侧) 装有磁极并通入直流电流励磁, 因而具有确定的极性。由于定、转子磁场相对静止及气隙合成磁场恒定是所有旋转电机稳定实现机电能量转换的两个前提条件, 因此, 同步发电机的运行特点是转子的转速恒等于定子旋转磁场的同步转速, 它和电网频率 f_1 之间严格遵守

$$n = n_1 = \frac{60 f_1}{p} \quad (2-1)$$

式中: n 为转子的转速 (r/min); n_1 为定子旋转磁场的转速 (r/min); p 为转子的极对数; f_1 为频率 (Hz)。

同步发电机即由此得名。我国工业频率规定为 $f_1 = 50\text{Hz}$, 而电机极对数是整数, 因此, 对某一同步发电机其转速总为一固定值。例如: 二极同步发电机的转速为 3000r/min, 四极同步发电机的转速为 1500r/min, 依此类推。

同步发电机主要用来作为产生三相交流电的发电机, 现代工农业所用的交流电能几乎全由同步发电机供给, 所以同步发电机的作用和价值是极其重要的。和其他所有电机一样, 从原理上讲也是可逆的, 它不仅可以作为发电机运行, 也可以作为电动机运行。同步发电机的另一种特殊运行方式为同步调相机, 或称同步补偿机, 专门用来向电网发送滞后的无功功率, 以改善电网的功率因数。

二、同步发电机的基本工作原理

同步发电机主要结构由定子和转子两部分组成, 定转子之间有气隙。定子上有 AX、BY、CZ 三相绕组, 每相绕组由多匝串联的绕组元件连接而成, 每相绕组的匝数相等, 在空间上彼此相差 120° 电角度。转子磁极上装有励磁绕组, 由直流励磁电流通过产生磁场, 其磁通由转子 N 极出来, 经过气隙、定子铁芯、气隙, 进入转子 S 极而构成回路, 如图 2-1 中虚线所示。转子为凸极式。

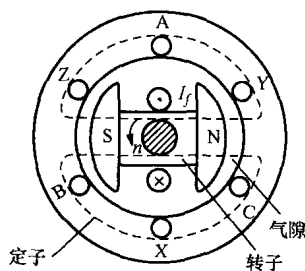


图 2-1 同步发电机结构原理图

同步发电机的转子由铁芯和励磁绕组构成。励磁绕组靠外接直流电源供给励磁电流。当励磁绕组中流过直流电流后, 产生磁极磁场 (或称为励磁磁场), 原动机拖动转子旋转时, 主磁场同转子一起旋转, 就得到一个机械旋转磁场, 该磁场对定子

发生相对运动, 在定子绕组中感应出三相对称的交流电势。由于定子三相对称绕组在空间相差 120° 电角度, 因此三相电势也在时间上相差 120° 电角度, 分别用 e_{OA} 、 e_{OB} 和 e_{OC} 表示。则

$$\begin{cases} e_{OA} = E_m \sin \omega t \\ e_{OB} = E_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ e_{OC} = E_m \sin(\omega t - 240^\circ) \end{cases} \quad (2-2)$$

式中： E_m 为定子绕组中最大电势。

如果同步发电机接上负荷，就有三相电流流过，这时同步发电机将机械能转换为电能。接入电网的同步发电机，在一定条件下也可作电动机运行，这时同步发电机便将电能转换为机械能。

三、同步发电机的构造特点

现代同步发电机绝大部分都是做成电枢固定而磁场旋转的，称为转场式，如有特殊要求时，可做成转枢式，如交流励磁机。在旋转磁极式的同步发电机中，按磁极的形状又可分为隐极式和凸极式两种，如图 2-2 所示。

在固定的电源频率下，采用哪一种形式的转子和电机的转速有关。对于用汽轮机拖动的同步发电机，由于汽轮机转速较高（如 $p=1$ ， $n=3000\text{r/min}$ ，转子直径为 1m 时，转子圆周的线速度就达到 157m/s ），要求有足够的机械强度，所以转子磁极宜做成隐极式，这种电机通常称为汽轮发电机。对

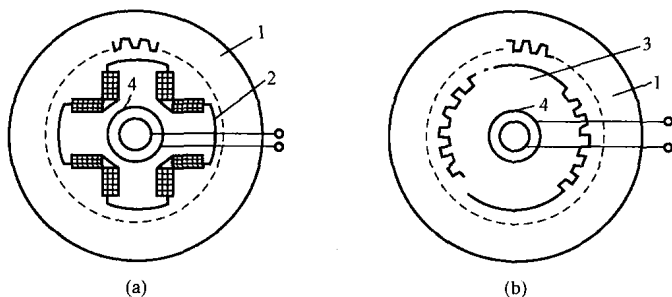


图 2-2 同步发电机的基本形式

(a) 凸极式；(b) 隐极式

1—定子；2—凸极转子；3—隐极转子；4—滑环

于用水轮机拖动的发电机，由于水轮机转速较低，因而要求有较多的磁极，转子宜做成凸极式，凸极式的转子在结构和加工工艺上都比隐极式的简单，这种电机通常称为水轮发电机。

无论是汽轮发电机还是水轮发电机，它们都含有共同的三个部分，即：定子、转子和气隙。依靠转子磁场旋转，在定子绕组中产生电磁感应，实现能量转换。

由于同步发电机的励磁功率是由直流电源供给的，不像异步电机那样由电网供给无功励磁功率；同时为了满足同步发电机运行性能的要求，电机应具有较大的气隙。按容量大小不同，气隙长度约在 $0.5\sim 8\text{cm}$ 范围内。而异步电机气隙较小，其长度很少有超过 0.3cm 的。

同步发电机的定子铁芯和绕组就其结构原理而言，与异步电机没有本质的区别；只是由于同步发电机容量大，电压高，因而要求一些特殊的通风冷却和绝缘结构以及专门的加工工艺。

四、汽轮发电机的特点

汽轮发电机是以汽轮机为原动机的同步发电机，其基本结构为隐极式。因为隐极式转子适合高速旋转，而提高转速可以提高发电机组的效率、减小尺寸并降低造价，所以汽轮发电机大多都做成具有最高转速的两极结构。

汽轮发电机的主要结构部件有定子、转子、端盖和轴承等，简介如下：

1. 定子

定子由铁芯、绕组、机座以及若干紧固连接件构成。

定子铁芯一般采用含硅量极高的无取向冷轧硅钢片分组叠压而成，整个铁芯用拉紧螺杆和非导磁端压板压紧成整体后固定在机座上。

定子绕组一般采用双层短距叠绕形式，由于绕组的电压都设计得很高，因此对绝缘材料和绝缘结构有特殊的要求。此外，为了限制电流密度，绕组导体的截面都比较大。但出于减