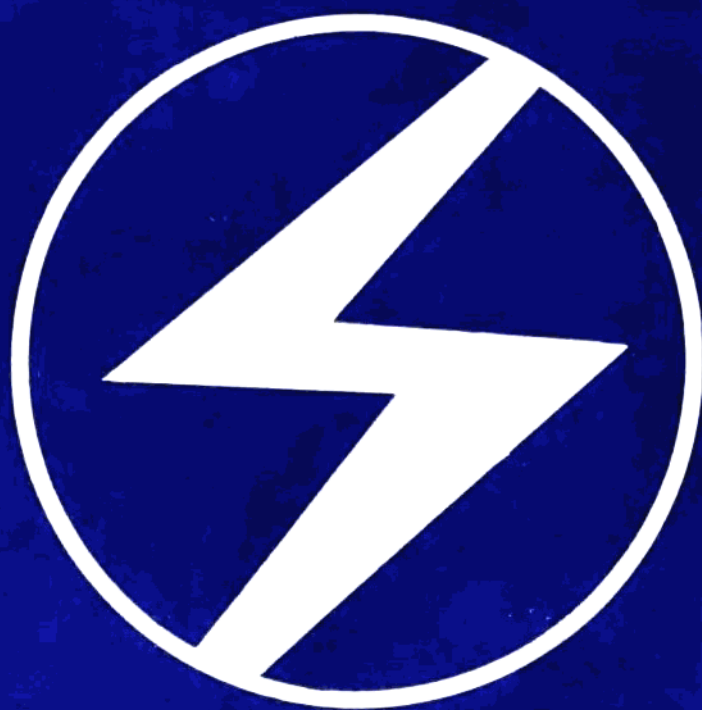


电力工程与工厂供电

苑文叔 薛世杰 编



西安交通大学出版社

内 容 提 要

本书讲述了电力工程与工厂供电的基本内容和有关新技术。内容包括负荷计算方法,各种主接线适用范围,电气设备选择和校验方法,网路正常运行和故障运行的分析与计算。在继电保护与自动装置的内容中,阐述了有触点电磁式保护和无触点半导体保护,分析了网路中大量使用的电动机故障,介绍了电动机半导体多功能保护装置的新成果及其保护特性改善的基本实现方法。另外,还从电力系统运行稳定性的角度出发,提出了电气设备特性改善的理论依据和途径。本书对工厂供电运行的经济性、安全性和供电可靠性计算等基本问题也作了扼要地阐述。

本书可做高等学校电器专业的教材,也可满足电机、工业企业电气自动化专业的需要,并可作为从事电力设计及运行人员的参考书。

电力工程与工厂供电

范文叔 薛世杰 编

*

西安交通大学出版社出版

(西安市咸宁路28号)

西安电子科技大学出版社印刷厂印装

陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张12.125 字数: 290千字

1990年3月第1版 1990年3月第1次印刷

印数: 1—4000

ISBN7-5605-0330-6/TM·13 定价: 4.15元

前 言

本书是根据1984年5月在杭州召开的高等学校机械电子工业部对口专业教材“教学大纲”研讨会,以及1985年初在武汉召开的全国电器专业教材会议和同年在西安修改的“电力工程与工厂供电”大纲编写的。

本书从电器专业出发,兼顾电机、工业企业电气自动化专业的需要,加强理论基础,结合高低压电气设备,系统地阐述了有关电力系统及工厂供电系统的基本结构原理、系统运行的基本知识以及电器设备选择和校验的方法。为提高电气设备的技术指标和工作的可靠性,对系统稳定运行和系统故障运行进行了分析,向读者提供了电气设备的改善途径和理论依据。本书继电保护装置部分还着重介绍了与传统有触点保护相对应的半导体保护装置和新的保护电器。

为了开阔视野,本书按电力设计的思路、步骤和方法编写,以期增强有关读者工作的适应能力。本书共八章。第一、二章阐述了电力系统、工厂供电系统、负荷计算方法和在正常运行条件下电气设备的选择方法;第三、四、五章分别介绍短路电流分析及计算、继电保护及自动装置和在故障运行条件下电气设备的校验方法;第六、七、八章为电力系统运行的稳定性、接地接零和系统运行的经济性及电能质量等,它属于可靠、安全与经济运行方面的基本知识。

本书可作为高等学校电器专业的教材,也适用于电机、工业企业电气自动化专业的要求,并可作为从事电力设计及运行人员的参考。

《电力工程与工厂供电》中的第一、二、四、六、七、八章由沈阳工业大学苑文叔执笔;第三、五章由西安交通大学薛世杰执笔。本书由西安交通大学王季梅教授主审。

限于业务水平,在内容中难免有错误和不当之处,希读者提出批评和指正。

编者

目 录

前言	()
第一章 电力系统及工厂供电系统	(1)
§ 1.1 发电厂的类型及其生产工艺过程简述	(1)
§ 1.2 电力系统概述	(4)
§ 1.3 电力系统的接线方式和电压等级	(7)
§ 1.4 供电系统	(11)
§ 1.5 负荷的计算	(13)
第二章 工业企业变电所	(24)
§ 2.1 变压器过负荷能力与容量确定	(24)
§ 2.2 高压开关设备	(27)
§ 2.3 工业企业变电所主接线	(29)
§ 2.4 导线和电缆截面的选择	(35)
第三章 短路电流的分析与计算	(45)
§ 3.1 “无穷大”容量系统短路电流的分析	(46)
§ 3.2 短路电流计算的基本方法	(49)
§ 3.3 “无穷大”系统短路电流计算	(55)
§ 3.4 两相短路电流的估算	(59)
§ 3.5 系统接地与漏电分析	(60)
§ 3.6 短路电流的效应	(64)
第四章 继电保护与自动装置	(69)
§ 4.1 概述	(69)
§ 4.2 继电保护用的互感器	(71)
§ 4.3 工厂供电系统 10 千伏网路保护	(77)
§ 4.4 变压器保护	(85)
§ 4.5 电动机保护	(94)
§ 4.6 漏电保护	(101)
§ 4.7 备用电源自动投入装置(BZT)	(105)
§ 4.8 自动重合闸装置(ZCH)	(107)
第五章 电气设备选择	(113)
§ 5.1 电气设备选择的原则	(113)
§ 5.2 高压电气设备的选择	(113)
§ 5.3 低压开关设备的选择	(121)
第六章 电力系统运行的稳定性	(128)
§ 6.1 电力系统静态稳定的基本概念	(128)
§ 6.2 提高静态稳定性措施	(130)

§ 6.3 电力系统暂态稳定的基本概念	(132)
§ 6.4 提高暂态稳定措施	(133)
第七章 接地与接零	(137)
§ 7.1 接地与接零的目的和作用	(137)
§ 7.2 接触电压与跨步电压	(140)
§ 7.3 接地电阻的计算与测量	(141)
第八章 供电系统的经济运行与电能质量	(149)
§ 8.1 提高功率因数的途径	(146)
§ 8.2 企业供用电设备谐波源的产生和抑制	(149)
§ 8.3 企业供电的电能质量	(152)
§ 8.4 供电可靠性的计算	(157)
附录 部分电器产品技术数据	(161)
附录表 1 SL 型铝电线电力变压器技 术数据	(161) 气中、土中时的长期允许 电流表 (166)
附录表 2 TJ、LJ 型裸铜、裸铝绞线的 载流量(A) $T+70^{\circ}\text{C}$	(162) 附录表 13 导体载流量的温度校正系数 (167)
附录表 3 BBLX, BLV 型铝芯导线 套钢管时载流量(A) $T+$ 60°C	(162) 附录表 14 电缆埋地多根并列校正系数 (167)
附录表 4 BBX, BV 型铜芯导线套铜 管时载流量(A) $T+60^{\circ}\text{C}$	(163) 附录表 15 电缆埋地土壤热阻系数不 同时的校正系数 (167)
附录表 5 BBLX, BLV 型铝芯导线 套硬塑料管时载流量(A) T $+60^{\circ}\text{C}$	(163) 附录表 16 TJ 型裸铜导线的电阻和感 抗 (167)
附录表 6 BBX, BX 型铜芯导线套硬 塑料管时载流量(A) $T+$ 60°C	(164) 附录表 17 LJ 型裸铝导线的电阻和感 抗 (168)
附录表 7 BBLX, BBX, BV 型橡皮 和塑料绝缘导线明敷时载 流量(A) $T+60^{\circ}\text{C}$	(164) 附录表 18 LGJ 型铜芯铝绞线的电阻 和感抗 (168)
附录表 8 BLVV, BVV 型塑料护套 线明敷时载流量(A) $T+$ 60°C	(165) 附录表 19 矩形母线的电阻和感抗 (168)
附录表 9 RFB, RFS 型丁腈聚乙 烯复合物铜芯绝缘软线载 流量(A) $T+70^{\circ}\text{C}$	(165) 附录表 20 1000V 三芯铜(铝)芯纸绝 缘电缆的阻抗($\text{m}\Omega/\text{m}$) (169)
附录表 10 矩形铝母线载流量表(最高 允许温度 70°C)	(165) 附录表 21 圆钢的系数值 K 及其特性 (170)
附录表 11 按环境选择导线、电缆及 其敷设方式	(166) 附录表 22 扁钢的系数值 K 及其特性 (171)
附录表 12 铝芯纸绝缘电缆敷设在空	(166) 附录表 23 角钢的系数值 K 及其特性 (172)
	附录表 24 户外产气式负荷开关的技 术数据 (173)
	附录表 25 户外压气式负荷开关 (173)
	附录表 26 户内压气式负荷开关 (173)
	附录表 27 FN3-10R 所配 RN1 型熔 断器的数据 (173)

附录表 28	隔离开关的基本特性.....	(174)		毫米)——周围环境温度	
附录表 29	高压熔断器的基本特性...	(174)		+25°C.....	(181)
附录表 30	高压断路器技术数据.....	(175)	附录表 41	常用测量与计量仪表的串	
附录表 31	电流互感器基本特性.....	(176)		联线圈负荷.....	(182)
附录表 32		(176)	附录表 42	常用测量与计量仪表和继	
附录表 33		(177)		电器的消耗功率和功率因	
附录表 34	零序电流互感器.....	(177)		数.....	(182)
附录表 35	各型电压互感器的二次		附录表 43	电磁式电流继电器.....	(182)
	负荷值.....	(178)	附录表 44	感应式电流继电器.....	(182)
附录表 36	绝缘子及穿墙套管技术数		附录表 45	电压继电器.....	(183)
	据.....	(179)	附录表 46	中间继电器.....	(183)
附录表 37	刀开关及转换开关技术数		附录表 47	时间继电器.....	(184)
	据.....	(179)	附录表 48	信号继电器.....	(184)
附录表 38	低压熔断器基本技术数据		附录表 49	避雷器的基本特性.....	(184)
		(180)	附录表 50	移相电容器技术数据.....	(184)
附录表 39	自动开关基本技术数据...	(180)	附录表 51	白炽灯泡技术数据.....	(185)
附录表 40	配合线路保护(熔断器、		附录表 52	照明光源技术数据.....	(185)
	自动开关)铜芯导线和电		附录表 53	配照型工厂灯单位面积安	
	缆的最小容许截面(平方			装功率(w/m^2)	(186)

第一章 电力系统及工厂供电系统

§ 1.1 发电厂的类型及其生产工艺过程简述

一、发电厂的类型

发电厂可根据不同特征分为几类。

1. 根据用户性质和服务区域, 发电厂可分为:

1) 城市的(公用的); 2) 企业的(工厂的); 3) 农业的; 4) 区域的; 5) 特殊用途的(如移动式发电站等)。

一般发电厂均并入电力系统运行, 它将部分或全部生产的电能送入电力系统, 而供电给各种不同的用户。因此, 对这些发电厂进行分类时, 只按其所承担的主要负荷性质来判定电厂类型。

2. 根据能源和发电机的种类, 发电厂可分为:

- | | | | |
|----------|---|-----|---------|
| 1) 火力发电厂 | { | 凝汽式 | 只生产电能 |
| | | 供热式 | 生产电能与热能 |
| | { | 蒸汽机 | |
| | | 内燃机 | |
| 燃气轮机 | | | |

2) 水力发电厂 3) 原子能发电厂 4) 太阳能发电厂 5) 风力发电厂 6) 潮汐发电厂 7) 地热发电厂

目前, 我国电能的生产方式是以火力发电和水力发电为主, 其它生产方式的规模和容量都不大, 因此只对这两种发电厂的电能生产过程给予阐述。

二、火力发电厂电能生产过程简述

这种发电厂是利用热能转换为机械能, 由机械能再转换为电能。产生热能所需要的燃料可以是固体(煤)、液体(油)或气体(瓦斯)。目前我国以利用固体燃料最为普遍。

对于大型发电厂, 一般都采用粉状燃料, 因为煤粉燃烧较充分, 锅炉设备的热效率也比较高。图 1-1 为凝汽式发电厂的电能生产流程图。

块煤从煤场被送入碎煤设备中被压成均匀碎块。再将碎煤运入装设在锅炉车间的磨煤设备中, 碎煤被磨成粉状并被烘干, 煤粉由排粉机排送至煤斗内。从煤斗下来的煤粉由给煤器运送, 并由送风机所供给的空气流经喷嘴而吹入锅炉的炉膛内, 煤粉即在炉膛内进行燃烧。煤粉所产生的热能对锅炉汽鼓中的水进行加热, 锅炉生产具有一定温度和一定压力的蒸汽经蒸汽管路输入汽轮机, 而使汽轮机转动。即蒸汽的热能转换为机械能。

由于汽轮机与发电机的轴之间设有结合器, 发电机就随同汽轮机转动而发出电能。即汽轮机传递给发电机轴上的机械能转换为电能。所发出的电能可送至发电机电压母线, 供电给当地负荷, 或再经升压送入系统。

从上述电能生产过程可知, 若增加发电厂的发电量, 就需要传递给发电机的机械功率、进入汽轮机的蒸汽量以及锅炉所消耗的煤量和给水量等相应地增加。

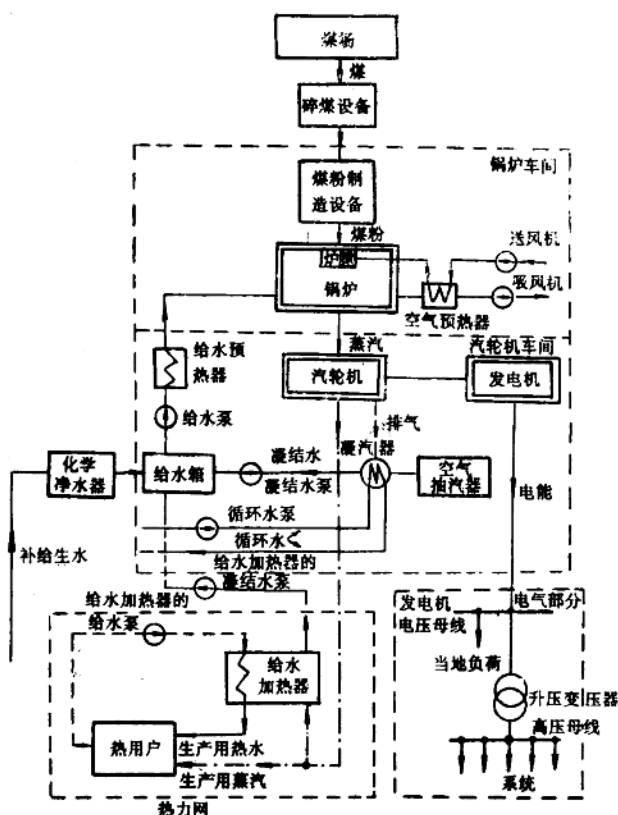


图 1-1 凝汽式发电厂的电能生产流程图

燃烧的烟气被送风机送入炉膛内的空气送出和吸风机所造成的负压吸出。烟气在排入大气之前，为了回收其中的部分热量，经过空气预热器将热量传递给送风机送入的空气，这样不仅减少了烟气热量的损失，而且使炉膛内温度稳定，煤粉得以充分燃烧。

蒸汽在汽轮机内经过许多分级，逐渐膨胀，而其压力和热能逐渐减小，产生机械能，从汽轮机最后一级出来的排汽，进入凝汽器。在凝汽器内管流过用循环水泵打入的循环水的冷却作用下，蒸汽凝结成水，利用凝结水泵将其压入给水箱，再利用给水泵将给水经由给水预热器压入锅炉汽鼓之中。

在给水进入锅炉之前，经过给水预热器的目的，在于利用从汽轮机某分级处抽出已作过一部分机械功的蒸汽将给水加热，提高给水温度，因此节省了使给水变成蒸汽所需要的燃料。蒸汽进入凝汽器中与循环冷却水进行热量交换，大量热能被循环冷却水所吸收，而后放至大气之中。由于从汽轮机抽出部分蒸汽量送入给水预热器，相应地减少进入凝汽器的蒸汽量，因而减少了由循环冷却水带走的热量损失，而使发电厂效率有所提高。

蒸汽在汽轮机内所做的功，与汽轮机的进口和出口之间的蒸汽压力差有关，汽轮机进口处蒸汽压力愈高，出口处蒸汽压力愈低，即凝汽器中的汽压愈低，则汽压差愈大，蒸汽的热能变成机械能的部分就愈大，效率就愈高。如采用蒸汽为 100pa 、 510°C 的火力发电厂，其效

率可达30~32%，这就是说，只有30~32%的燃料热量是用来生产电能的，其余70~68%的燃料热量，在发电过程中未加利用而被损耗掉了。采用蒸汽为170~225pa、550~660℃发电厂的效率则可达34~40%。

为补偿水、蒸汽的消耗和保持锅炉内具有一定的水位，则将经过化学处理过的洁净的补给水加入给水箱。为保持凝汽器内有一定的真空度(0.04大气压)，设置空气抽气器将凝汽器内的漏入空气抽出，如图1-1所示。

供热式发电厂与凝汽式发电厂不同之处在于不仅生产电能，而且生产热能。在结构上装有给水加热器，与热用户构成热力网，如图1-1中虚线所示。利用汽轮机的抽汽将水加热后，其所带热负荷可能是水或蒸汽，视用户性质而定。从汽轮机抽出的蒸汽量，决定于热能用户对热水或蒸汽的需要量，当抽出蒸汽量占有汽轮机总输入蒸汽量较大比重时，进入凝汽器的蒸汽量就减小，因此，循环水的热量损耗也降低而使供热式发电厂远高于凝汽式发电厂的效率。

三、水力发电厂电能生产过程简述

水力发电厂是利用水的势能转换成机械能，由机械能再转换为电能。因而水力发电厂是建立在水流能量适宜利用的地方，并要综合考虑改善航运、灌溉等其它方面问题。

水力发电厂电能的生产过程是由堤坝1将水维持具有一定的势能，如图1-2所示。在水的势能作用下，水由高水位 H_G ，流向低水位 H_{GN} ，经过管道2进入螺旋形机壳3，水的势能转换为动能，作用于水轮机转子4产生机械能，经发电机5发出电能。水流对水轮机做功之后，经尾水管6自由地流到低水位 H_{GN} 。

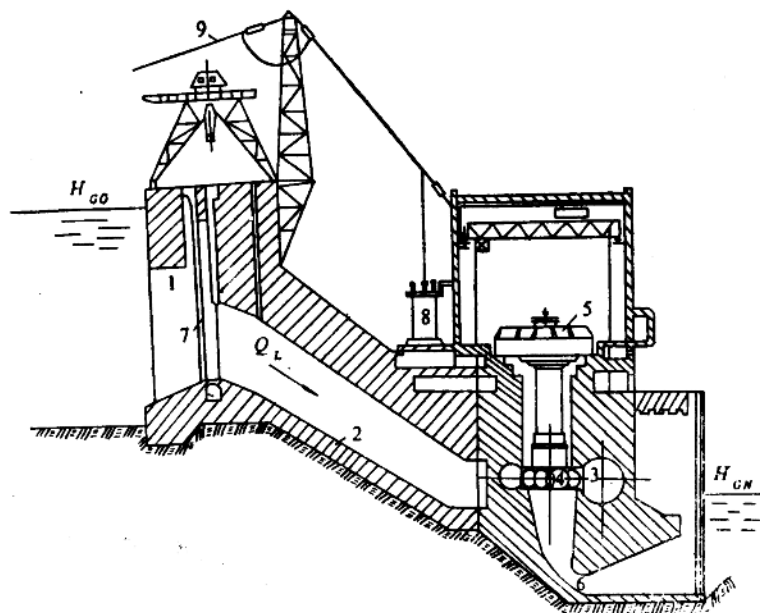


图1-2 水力发电厂的截面略图

水力发电厂所发出的功率 P 与堤坝前后的水位差($H_G - H_{GN}$)、蓄水库情况有关，

$$P = 9.81 Q_L (H_G - H_{GN}) \eta \text{ (千瓦)} \quad (1-1)$$

式中 Q_L ——通过水轮机的流量, (公斤/秒),

H_{G0} 、 H_{GN} ——分别为堤坝前和堤坝后的水位, (米);

η ——水力发电厂的效率, 其值可达 0.85~0.86。

在水位差一定的条件下, 调节闸门 η , 加大流量 Q_L , 即可提高发电厂的功率 P , 满足负荷增加的需要。图 1-2 中的 8 和 9 分别表示升压变压器和高压线路。

与火力发电厂相比水力发电厂的建设费用较高、时间长, 但由于水力发电厂所用的动力资源是水能, 它所发出的电能成本与火力发电厂的电能成本相比低得多, 而且效率也比较高, 运行方便, 所需运行人员也少, 易于实现电能生产自动化。因此, 经过若干年运行后, 电厂的投资就可得到补偿。

§ 1.2 电力系统概述

一、电力系统的概念

目前我国城市、工业、农业以及其它电力用户所需的电能, 多数是由生产电能的火力和水力发电厂供给。发电厂可位于用户附近, 也可相距很远。但在任何情况下, 电能总是从发电厂经过线路而输送给用户。若用户与发电厂相距很远, 电能的输送则须采用升高电压的方法, 以减少电能损耗, 同时为满足用户对电压的要求, 又须采用降低电压的方法, 故在发电厂与用户之间, 就必须建立升压和降压变电所。

从经济观点来看, 将发电厂设置在燃料、水力蕴藏地区或附近较为有利。这样, 不但可取得廉价的动力(例如水)或工业上效用不大的燃料(例如劣质煤), 同时由线路输送电能, 比用运输工具输送燃料有显著的经济效益, 因此大型火力发电厂一般建设在蕴藏燃料的地点。而原子能发电厂、太阳能发电厂不受动力资源的限制, 其位置均可设立在负荷中心。

但也有某些火力发电厂和热力发电厂例外。前者机组容量不大, 设立在负荷中心或其附近之处, 其目的是为降低电能损耗、电压损耗, 主要起无功功率补偿作用。后者与一般火力发电厂不同, 它不仅发电, 而且供热。由于输送热能的热力网路受热能损耗的限制, 热能输送距离不能过长(不超过几公里), 因而热力发电厂都建在热负荷中心或其附近处。将各种类型发电厂中的发电机和升、降压变压器、输电线路以及各种用电设备联系在一起所构成的统一整体就是电力系统, 如图 1-3 所示。该系统起着电能生产、输送、分配和消费的作用。

电力系统和动力部分构成动力系统。动力部分包括火力或热力发电厂的锅炉、汽轮机、热力网和用热设备, 水力发电厂的水库、水轮机以及原子能发电厂的原子反应堆等。

电力系统的一部分, 包括变电所和不同电压等级的输电线路, 称作电力网。其作用是输送和分配电能。

电力网可依据不同的特征分为多种, 例如直流和交流电力网, 低压和高压电力网, 城市的、工业企业的与农村的电力网。但一般以线路电压、供电范围分为两类: 输电线路电压等级在 35 千伏以下, 供电半径在 20~50 公里以内的电力网称作地方电力网。电压等级在 35 千伏以上、供电半径超过 20~50 公里的电力网称作区域电力网。而 35 千伏的电力网既可属于地方电力网, 也可属于区域电力网。

电力系统的终端配用电网, 包括电力网终端降压变电所、配电线路和用电设备, 称作供电系统, 如图 1-3 虚线框图中所示。该系统将在本章第四节中介绍。

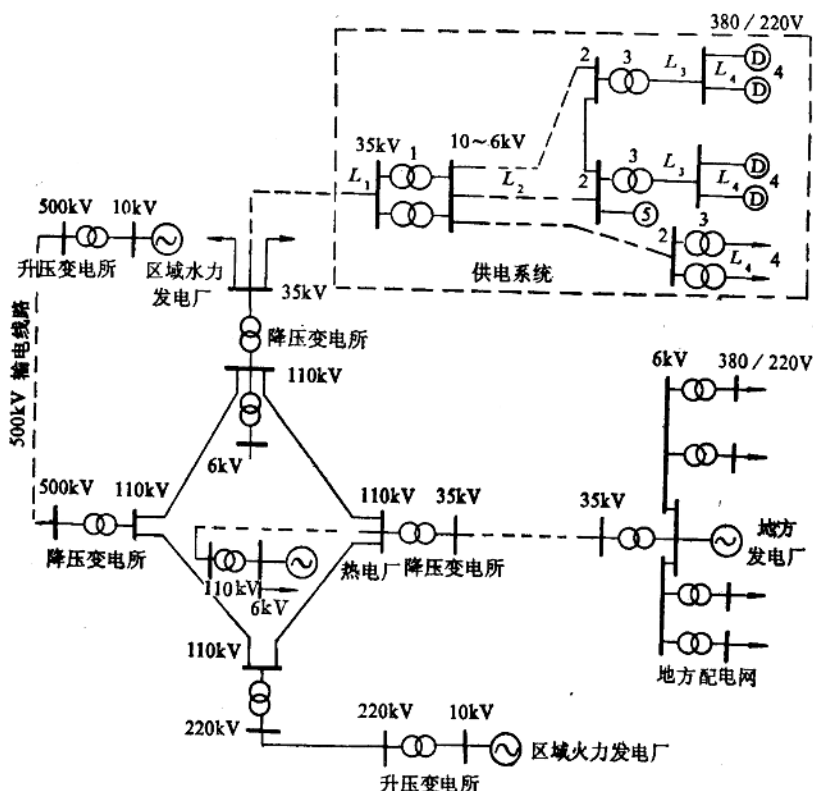


图 1-3 电力系统图

组成电力系统的优点是:

1) 降低发电厂的造价和运行费用。

发电厂单独运行时, 机组容量和数目须按如下原则选择; 当一个机组检修或因事故而停机时, 其余机组应能承担全部负荷, 备用容量较大。若将所有发电机并联在同一电网内构成电力系统, 只需要系统总容量的 10~15% 后备容量, 就能保证对用户经常供电。此一数值远小于各个独立发电厂所需备用容量的总和, 而且机组容量和数目不受地方负荷限制, 可选用大型机组来承担系统中的部分负荷, 有利于提高发电厂的效率和降低发电厂的造价及其运行费用。

2) 在各个发电厂之间能对负荷进行经济合理地分配。例如, 高水位期间, 所有水力发电厂均满负荷运行, 减少火力发电厂的出力。低水位期间, 火力发电厂满负荷运行, 以水力发电厂调节巅峰负荷。

3) 充分利用当地的动力资源(水力、燃料), 减少铁路的运输量。

4) 构成电力系统, 能提高对用户供电的可靠性。

5) 便于集中管理和控制。

二、对电力系统运行的基本要求

由于电能的生产、输送、分配和消费比较方便, 宜于大量生产、远距离输送、集中管理、

自动控制,使用电能较其它能量有显著的优点,所以各部门都广泛使用电能。电能供应的中断或减少将影响国民经济各个部门的正常工作。发电机、变压器、输电线路和用电设备等元件的投入或退出电力系统都在瞬间完成,电能从一处输送至另一处的速度接近于光速,所以电力系统从一种运行方式过渡到另一种运行方式的过渡过程非常短促,电能的生产、输送、分配和消费实际上是同时进行的,即发电厂任何时刻生产的电能必须等于同一时刻用电设备消费的电能与输送、分配中损耗的电能总和。

根据上述特征,对电力系统有如下基本要求:

1) 保证电力系统供电的可靠性。

供电中断将使生产停顿、生活混乱,甚至危及人身和设备的安全,给国民经济造成的损失远超过电力系统本身的损失。因此,电力系统运行首先要满足安全供电的要求。

负荷重要程度是决定系统接线方式的主要依据,一般按供电可靠性的要求将负荷分为三类:

一类负荷 中断对这一类负荷的供电,将造成人身事故或重大设备损坏,且难以修复或给国民经济带来重大损失。

由于此类负荷重要,在正常运行和故障情况下,系统接线方式必须有足够的可靠性和灵活性,保证对用户的连续供电。

二类负荷 中断对这一类负荷的供电,将造成大量减产和废品,以致损坏生产设备,在经济上造成重大损失。出自经济上考虑,要求与一类负荷的系统接线方式相同。

三类负荷 所有不属于一、二类的用户均属此类负荷。例如农业用电、小型的或一班工作制的手工业用户以及工厂的附属车间等。

负荷分类是个复杂而重要的问题。同样机械设备,但不同容量,或设置于不同性质的工厂之中,负荷分类就有所不同。而且有某些一类负荷也允许有极短间隔时间的供电中断。因此,必须对系统中各种用户、不同设备所承担的任务应进行详细调查和综合分析,以确定经济合理的系统接线方式。上述负荷分类及其对供电可靠性的要求、对电力系统或工厂供电系统均适用。

2) 保证电能质量。

电力系统的电能质量系指运行电压与频率,规定正常电压偏移不超过额定值的 $\pm 5\%$,正常频率偏移不超过 $\pm 0.2 \sim 0.5\%$ 赫。电压或频率偏移过大时,不仅引起电能损耗增大,而且会引起大量减产,生产废品,并加速电气设备绝缘老化而缩短使用寿命。

电能的发供与消费失去平衡是造成电压和频率偏移的主要原因。电能供应不足,将引起电压和频率偏低。电能供应过剩,则引起电压和频率升高。从原则上讲,电力系统频率偏移是由发电厂设有调速系统自动控制原动机的输出功率,即自动控制火力发电厂汽轮机和水利发电厂水轮机的蒸汽流量和水流量,如频率下降,调速系统收到原动机转速下降信号,将使原动机的汽门和闸门增大,提高流量和发电机组的输出功率,于是电力系统的频率得到升高,直到频率恢复到允许范围内为止。此时由于频率而引起的系统电压降低也将得到恢复。若系统中只有电压偏移,则可通过改变各级变压器的变比来满足系统中用电设备对电压质量的要求。

3) 保证电力系统运行的经济性

降低每生产一度电所消耗的能源和输送、分配时的电能损耗具有重要意义。为此应不断提高电力系统经济运行工作,使负荷在各发电厂之间合理分配。例如,水力发电厂应充分利

用水能，避免弃水；火力发电厂按其运行经济性分配发电量，避免频繁地开停机组；在电力系统中功率合理分布以降低输送、分配时的功率损耗等。此外，还应保证电力系统运行的灵活性。

应指出，上述要求是相互关联，相互制约而又往往相互矛盾的。因此，在预计满足某一项要求时，必须兼顾其它两项，以便取得综合的经济效益。

§ 1.3 电力系统的接线方式和电压等级

电力系统的接线图有两种：电力系统的电气接线图和地理接线图。电力系统电气接线图如图 1-3 所示。在电气接线图上较详细地表示出电力系统各主要元件之间的电气联系。在地理接线图上则按一定比例反映出各发电厂、变电所之间的相对地理位置和各条输电线路的路线，但各主要元件之间的电气联系却难以表示。因此，这两种接线图常配合使用。

一、各种接线方式

电力系统的接线方式大致分为无备用和有备用两类。无备用接线包括单回线放射式、树干式和链式网路，如图 1-4 所示。有备用接线包括双回线放射式、树干式、链式和环式以及两端供电网路，如图 1-5 所示。

无备用接线的主要优点是线路结构简单、经济和运行方便。缺点是供电可靠性差。因此，这种接线不适用于一类负荷占比重量较大的用户。若这类负荷设有单独备用电源时，仍可采用这种接线方式。对于采用成功率较高的自动重合闸的输电线路，这种接线方式即使无备用电源时也可用于二类负荷。

有备用接线的双回线放射式、树干式和链式网路的优点是供电可靠性和电压质量都比较高。但其所需要的断路器、保护电器等设备均要成倍地增加。若每回线负荷量不大，往往为避免电晕等现象的发生，则不得不选用大于由该负荷所求得导线截面，使有色金属量显著地增加。因此，有备用接线只适用于一、二类负荷。图 1-5e) 环式接线与上述 a)、b)、c)、d) 接线方式相比，不仅有相同的供电可靠性，而且比较经济。缺点是运行调度复杂，线路发生故障切除后，由于功率重新分配，往往导致电压质量降低。有备用接线的两端供电网路最为常见，但采用这种接线方式的先决条件必须有两个或两个以上的独立电源，而电源与各负荷点的相对位置则又是决定选用这种接线方式合理性的依据。

二、电力系统的电压等级

在图 1-3 所示的电力系统中，线路有不同的电压等级，它是由输送距离和输送功率所决

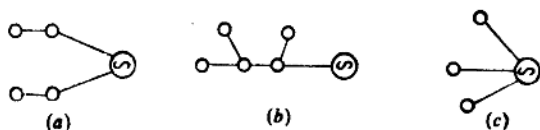


图 1-4 无备用接线方式

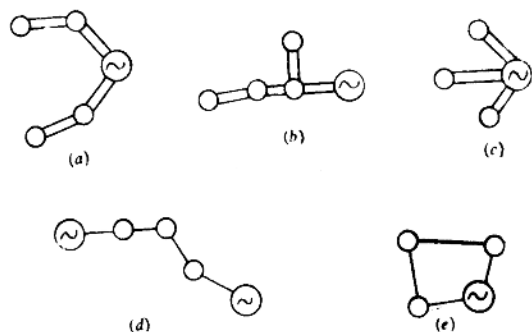


图 1-5 有备用接线方式

定的。根据三相视在功率 S 与线电压 U 、线电流 I 之间的关系 $I = \frac{S}{\sqrt{3}U}$ 可知：当输送功

率 S 一定时，提高输电电压等级，在导线截面不变的条件下，可降低电流值和增大输送距离；当输送距离一定时，提高输电电压等级，在电流不变的条件下，可增大输送功率。也就是说提高输电电压等级不仅能提高输送功率，而且能增大输送距离。但提高输电电压等级则要求线路电气设备的绝缘水平作相应地提高，使设备投资增大，而不适当地提高电压等级，则会导致输电设备总投资的过分增大。综合考虑这几方面因素可知：对应一定的输送功率和输送距离必有一经济合理的输电电压等级。表 1-1 列出了线路不同额定电压等级及其相适应的输送功率和输送距离的经验数据。220 千伏以上电压等级相适应的输送功率和输送距离，示于图 1-6。

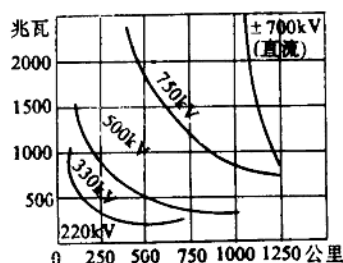


图 1-6 220 千伏以上电压等级与输送功率和输送距离的关系

表 1-1 不同额定电压等级及其相应的输送功率和输送距离

额定电压(千伏)	输送方式	输送功率(千瓦)	输送距离(公里)
0.22	架空线	小于 50	0.15
0.22	电 缆	小于 100	0.2
0.38	架空线	100	0.25
0.38	电 缆	175	0.35
3	架空线	100~1000	3~1
6	架空线	200~2000	10~3
6	电 缆	3000	小于 8
10	架空线	200~3000	20~5
10	电 缆	5000	小于 10
35	架空线	2000~10000	50~20
110	架空线	10000~50000	150~50
220	架空线	100000~500000	300~200

在表 1-1 中所示的额定电压等级外，在我国还有 154、60 千伏电压等级。从电气设备制造的角度和电力工业的发展来看，电力系统额定电压等级不宜过多。110 千伏以下的电压等级差应超过 3 倍，如 110、35、10 千伏；110 千伏以上的电压等级差则以两倍左右为宜，如 110、220、500 千伏。而 60、154 千伏是增加多余的电压等级不宜推广。各级电压使用范围，大体是：220 千伏以上电压等级用于大型电力系统的主干线；110 千伏既可用于中、小型电力系统的主干线，也可用于大型电力系统的二次网路；10 千伏则是常用的更低一级配电电压，只有在负荷中高压电动机占有较大比重时，才考虑 6 千伏的配电方案。这种电压划分法并非是一成不变的。例如，几个电力系统联合之后，其主干线的电压等级必将提高，而使 220 千伏退为二次网路电压；农业用电增加将以 110 千伏取代 35 千伏作为农村网路电压。也就是说，电力系统规模的扩大和负荷的增加必然导致电压等级的升高。

当线路输送功率时，沿线路的电压分布往往是始端 U_a 高于末端 U_b ，如图 1-7 所示。在线路 ab 段均匀分布负荷，则与之对应的电压分布可近似地如直线 $U_a - U_b$ 所示。 $a \sim b$ 负荷

端电压各不相同，且随负荷变化而变化。所谓线路的额定电压 U_e ，实际就是线路的平均电压 $(U_a + U_b)/2$ 。为使用电设备经济有效地运行，要求在制造用电设备时，用电设备的额定电压应与线路额定电压相等，在运行时则应使线路实际运行电压能接近于用电设备的额定电压。

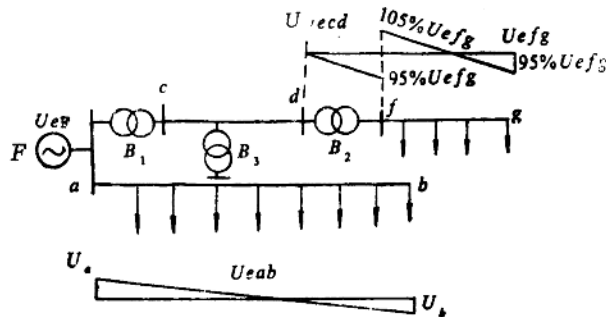


图 1-7 电力网中的电压分布

一般用电设备的允许电压偏移规定为 $\pm 5\%$ 的额定值，而沿线路(如 $\overline{ab}$ 段)的电压降低，即线路始末两端电压代数差 $(U_a - U_b)$ 允许值约为 10% 的线路额定电压。这就要求线路始端电压为其额定值的 105% ，而线路的末端电压则不应低于额定值的 95% 。因此，发电机(如 F)的额定电压 U_{eF} 应为线路(如 $\overline{ab}$ 段)额定电压 U_{eab} (如 3 、 6 、 10 千伏)的 105% (即 3.15 、 6.3 、 10.5 千伏)。

电力系统中的不同电压等级线路是通过有变压功能的变压器联接起来的。变压器一次绕组向负荷供电，又相当于发电机。因此，变压器(如 B_2)一次绕组额定电压应与用电设备额定电压相等，即等于线路 $\overline{cd}$ 段的额定电压 U_{ecd} ，二次绕组电压则应高于线路 $\overline{fg}$ 段额定电压 U_{efg} 5% 。但由于在额定负荷下，短路电压 $U_d \geq 7.5\%$ 的变压器漏抗的电压降落约为 5% ，从而要求变压器二次绕组额定电压，亦即空载电压应高于线路额定电压 U_{efg} 10% ，可采用 3.3 、 6.6 、 11 千伏作为变压器二次绕组的额定电压，以保证线路满载运行时，变压器(B_2)二次绕组输出实际电压高于线路($\overline{fg}$ 段)额定电压 5% 。只有漏抗较小，短路电压 U_d 较小的变压器，或二次绕组直接与用电设备相联的变压器，可采用 3.15 、 6.3 、 10.5 千伏作为变压器二次绕组的额定电压，二次绕组的额定电压高于线路的额定电压约 5% ，而其输出的实际电压则接近于线路的额定电压。

对于直接和发电机相联的变压器(如 B_1)，要求其一次绕组的额定电压等于发电机的额定电压，即高于所接入线路($\overline{ab}$ 段)的额定电压 U_{eab} 5% ，其二次绕组输出的实际电压则应高于线路额定电压 U_{ecd} 5% 。在高压线路($\overline{cd}$ 段)上的各点电压是不相同的，因而作用于变压器(B_3)一次绕组的电压并非为线路的额定电压，为保持变压器(B_3)用户的电压在容许范围之内，可借助于改变变压器(B_3)的变比，即调节变压器的分接头使其输出的实际电压接近于用电设备的额定电压。

综合上述可知，用电设备和线路的额定电压值是相等的，而它们与发电机、变压器的额定电压即使属于同一等级，但在数值上并非一致。从设备制造和电力工业发展情况考虑，为有利于各种设备系列化生产，我国国家标准规定了用电设备、发电机和变压器的几种额定电压等级，如表 1-2 所示。

表 1-2 用电设备、发电机、变压器的额定电压等级

用电设备额定 电压(千伏)	交流发电机 电压(千伏)	变压器电压(千伏)	
		一次绕组	二次绕组
3	3.15	3 3.15	3.15 3.3
6	6.3	6 6.3	6.3 6.6
10	10.5	10 10.5	10.5 11
35		35	38.5
(60)		(60)	(66)
110		110	121
220		220	242
500		500	550

注 变压器一次绕组栏内 3.15、6.3 千伏电压适于直接与发电机连接的升压变压器和降压变压器。变压器二次绕组栏内 3.3、6.6、11 千伏电压适用于短路电压 $U_d \geq 7.5\%$ 的降压变压器。各栏内的括弧内数值，如(60)、(66)为不宜推广的电压等级。

三、电力系统中性点接地方式

电力系统的中性点指的是星形联结的变压器和发电机的中性点。根据中性点接地方式分为：中性点接地、不接地(绝缘)和经消弧线圈或电阻等三种接地方式。在中性点直接接地系统中，当发生单相接地短路时，由于构成单相短路回路将产生单相接地短路电流，见图 1-8 a)。若接地故障为金属性短路，则单相接地短路电流 I_A 往往大于同一地点发生三相短路时的短路电流。为防止设备的损坏和保持电力系统的稳定运行，必须迅速切除故障线路。由于这种系统单相接地短路电流较大，所以又称它为大电流系统。在中性点不接地系统中，当发生单相接地短路时，则由非故障相导线对地电容经故障点、电源构成回路，见图 1-8 b)。图中电容 C_A 、 C_B 、 C_C 为线路对地的等效电容。由于每相导线对地的电容值较小，短路电流值不大，且为容性，所以这种系统又称它为小电流系统。它允许不切除故障线路而维持继续运行。但此时非故障相电压却升高为正常电压的 $\sqrt{3}$ 倍。在电压等级较高的系统中，这将使绝缘费用在电气设备总价中的比重迅速增大。而中性点直接接地方式非故障相电压则无 $\sqrt{3}$ 倍的变化关系，这对降低绝缘水平及其所带来的经济效益异常显著。供电可靠性可采用其它措施得到提高，如在线路上装设自动重合闸装置。目前在我国，一般在 110 千伏以上电压等级的系统中采用中性点直接接地方式，在 60 千伏以下电压等级的系统中采用中性点不接地或经消弧线圈接地，如图 1-8 c)所示。所谓消弧线圈就是电抗器，其功能是起消弧作用。从图 1-8 b)可知，单相接地短路电流属于电容性电流，大小由网路规模决定。网路规模大，线路对地电容值也大，单相接地电容电流必然增大。这有可能造成故障点电弧不能自行熄灭，并引起弧光接地处产生过电压。装设消弧线圈之后，则消弧线圈经电源变压器、线路及其对地故障点构成另一个回路。故障点接地相电流中增加了一个与容性电流 I_A 相位相反的感性电流 I_A' ，而使单相接地短路电流减小，为电弧熄灭创造有利条件，提高了供电的可靠性。一般在 3~60 千伏网路，电容电流超过下列数值时，中性点应装设消弧线圈：

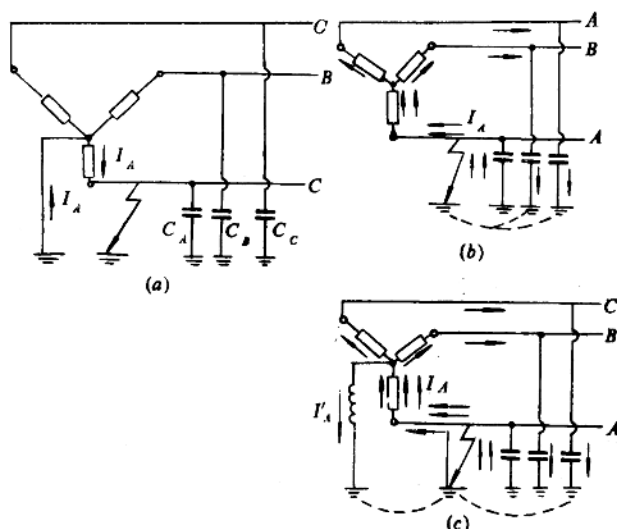


图 1-8 中性点接地系统与不接地系统的故障情况

3~6 千伏网路	30 安
10 千伏网路	20 安
35~60 千伏网路	10 安

综上所述,采用中性点直接或经消弧线圈等接地是为了给电力系统在正常及故障情况下提供适当的运行条件,满足电力设备绝缘所要求的工作条件和保证继电保护等正常工作。所以又称这种接地为工作接地。

§ 1.4 供 电 系 统

工厂供电系统是电力系统中的终端网路,如图 1-3 中虚框内所示。它是由工厂总降压变电所 1、配电所 2、车间变电所 3 和高低压用电设备 5、4 通过线路 L_2 、 L_3 和 L_4 连接构成的整体。电能从高压输电线路 L_1 输送到工厂总降压变电所,经变压、配电向各种用电设备供电。对于大型工厂,由于配电电压高,电能到各个车间还需经车间变电所 3 降压之后,再向低压用电设备 4 供电。通过变电所 1 和 3 两次变压,将供电系统分为 35~110 千伏高压进线线路、6~10 千伏高压配电网和 380/220 伏低压配电网几个环节。进线线路是指高压输电线路进入工厂总降压变电所的输电线路。厂区高压配电网是指总降压变电所与车间变电所之间的网路,厂区低压配电网是指车间变电所至用电设备之间的网路。工厂供电系统的供电环节多少不是固定不变的,它是由工厂总负荷量的大小、各个车间的分布、工厂与供电电源之间的距离以及地区电网的供电条件等综合因素而决定的。

根据高压输电降压配电的理论分析,当各个车间是分散布置的,图 1-3 中的总降压变电所 1 应尽可能地靠近各个车间负荷的中心,即总负荷的中心,以使供电的可靠性和电压质量得到提高,而用于网路导线的有色金属和电能损耗得到降低。此时 35~110 千伏的高压进线 L_1 从高压电源端直接深入到理论上的总负荷中心,并与 A、B、C 各车间负荷保持一定距离,