

第 1 章 电力系统

电力系统是包括发电、输电、供电的庞大系统，它随着用电量的增加而扩大。面对年年增加的需求，为确保供电可靠性和经济性，要考虑日益增长的需求搞好电源计划，同时必须把握电力系统的全局来考虑全系统的构成和控制。本章我们将电力系统作为系统工程，学习掌握电力系统的总构成。

1.1 电力系统的构成

1.1.1 电力资源规划

1 电力资源规划的思路

为确保电力需求和供电可靠性的目标，要有满足需求的足够的电力资源，即针对增长的需求，要不断开发电力资源。

所谓电力资源开发规划是电力公司计划何时、何地、要建多大规模、什么类型电厂的决策过程，即决策：

- 电力设备的需要时间；
- 电力设备的容量；
- 电力设备的类型；
- 电力设备的配置等。

首先，要决定电力设备的需要时间及其容量，重要的是要考虑长远需求，即规划要多大的设备容量才能满足日益增加的需求，计算若干年以后需要增加多少万 kW 的设备等。这里有一个到底需要多少备用容量为合适的问题。少了，经常停电，损坏电力公司的信誉；多了，浪费设备投资，增加经费投资。要斟酌这个利弊综合考虑的过程，叫电力需求规划。制定规划的关键是以供电可靠性分析为基础的综合考虑。

1964年制定的《电力事业法》，实行了31年后进行了修改（1995年12月1日实行），该法允许自由经营发电等，引入了电力经营的竞争机制。因此，制定规划时必须考虑，IPP(Independent Power Producer 独立系统供电经营者)倡导的‘顾客为上帝’的服务思想。

理想地来说，决定发电容量和发电形式后，在众多候选地点中，选择最合理的厂址是再好不过了。但是，像日本国土狭窄的国家，选址的制约性很大，因此选址成为首先考虑的问题。如图1.1的电力开发示意图，说明供电规划、电力构成规划、电力配置规划是相互关联的，必须把相互制约条件反复比较，构筑最优方案。

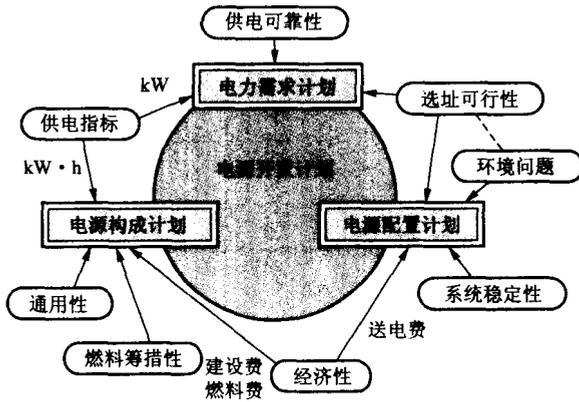


图 1.1 电力开发规划相关图

在这里的关键是发电形式的选择，不同的发电形式其工程费（建厂费）、燃料费也不同，因此，应在全面分析的基础上追求经济效益。表 1.1 列出各发电形式的电价比较表。

表 1.1 按发电形式的电价比较

(1992年度运行标准：通商产业省)(每 kW·h, kW)

	年度发电原价(输电端)	建设单价
一般水力	13 日元左右	60 万日元左右
石油火力	10 日元左右	19 万日元左右
原子能	9 日元左右	31 万日元左右

这里需要分析燃料的供应情况，在确保供应的同时还要看其价格的动向，因为它将左右经济效益。那么根据以上分析，确定电厂要建在什么地方，已成为又一新课题了。水力发电首当其冲的是受地理条件的限制。火力发电厂的选址自由度大一些，但距离的远近，对输电设备规划影响很大。若远距离输电，则输电中的电压问题将成为系统安全性的关键，因此必须考虑随着输电设备的增加而产生的综合经济效益分析。

2 供电指标

短期和长期的供电指标有很大的区别，电力开发规划中则考虑长期供电(指标为 10 年)。供电指标包括年供电量($\text{kW} \cdot \text{h}$)、最大电力 kW 和负荷曲线等。最大电力指标，是指全系统的总供电能力，有时最大供电能力指一年间的连续供电能力，但常用的是每月的最大供电能力。这是因为发电设备定期保养维修占去很长时间，有必要按月考虑供电平衡的缘故。

发电量指标，是在电力规划中使用的指标，是按发电形式最优组合时计算燃料费的依据。但要计算燃料费只有总发电量是不够的，同时需要负荷曲线。表示一天内负荷变化的叫日负荷曲线(daily load curve)把 365 天的日

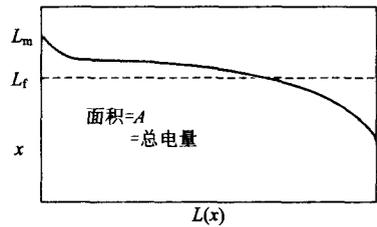


图 1.2 负荷曲线

负荷曲线汇集起来，按峰值大小排列描绘出如图 1.2 所示为年负荷曲线。这里 L_m 为负荷峰值，面积 A 为总电量。平均电力 (L_f) 是一定时间的电量 ($\text{kW} \cdot \text{h}$) 除以时间的值，把平均电力除以最大电力 (L_m) 得负荷率，即年负荷率，可用下式计算：

$$\text{年负荷率} = \frac{\text{总电量}(\text{kW} \cdot \text{h})}{\text{最大电力}(\text{kW}) \times \text{总时间}(\text{h})} \times 100\% \quad (1.1)$$

3 电源形式

针对年年增加的需求，应考虑长远的能源发展趋势，从稳定性和经济性出发，选择最佳电源形式是必要的。具体来说对于水力、火力、原子能等，其经济性、运转特性等有很大区别的电力，应针对负荷状况进行组合，充分发挥各设备的潜能，规划出更经济更合理的电源形式。

电力工程一旦完成，在确保供电的稳定性基础上为了长远利用，根据能源的发展动向，应使开发用综合经费做到最小，即根据供电、燃料动向、技术开发预测，在分析电源形式的经济性基础上，选择供电稳定又经济的最佳电源形式（表 1.2）。

4 电力开发量

用式 (1.2) 计算的供电备用率，取合适值决定电力开发及开始运转的最佳时间。

$$\text{供电备用率} = \frac{\text{供电力} - \text{需求}}{\text{需求}} \times 100\% \quad (1.2)$$

表 1.2 全电力公司的电源构成发展

单位: 10⁶ kW, () 内表示所占比率, %

年度	1990	1991	1992	1993	1994	1995
水力	3632 (21)	3760 (21)	3801 (21)	3847 (21)	4043 (21)	4196 (21)
火力	10300 (60)	10452 (60)	10706 (60)	10908 (59)	11219 (58)	11501 (58)
原子能	3148 (19)	3324 (19)	3442 (19)	3838 (20)	4037 (21)	4119 (21)

(日本中央电力协会资料)

供电备用率是在事故、缺水、负荷增加时也能确保稳定供电，是具有超过计划的供电能力。供电备用率指标，是由供电可靠性指标所决定的。通常系统的最大发电机组中，即便停机 1~2 台也应具备继续供电的能力。这里所说的需求是在供电计划中常用的词，它是从某月的月内一小时最大用电量往前推 3 天的用电平均值（最大 3 日用电平均值）。

5 IPP

根据近年来机制要放宽的形势，为了进一步提高供电效率，修改了《电力事业法》(1995 年 12 月 1 日施行)在供电行业中出现了用户为“上帝”的叫做 IPP (Independent Power Producer) 的供电公司。

从确保电力系统的稳定运行和提供优质电能的考虑，应对从电厂到用户用电地点的电力系统，进行统一的运行管理。对供电公司的新增设备，要

十分关注电气设备技术标准和下列事项：

做到全系统的协调；

防止供电企业的设备故障；

防止由于用户的故障波及系统安全。

面对新的服务规范，电力公司引入了招标制，但要发挥新制度的有效作用，还需要公开性和公平性。

● 1.1.2 联合经营

1 联合经营的方法

电力企业的联合经营，是九个电力公司和电能开发公司应用新技术并考虑经济性相互协作进行电源开发、系统联接、设备运用、电力联网（互补）及供电运营等，是以供电的稳定和电价的稳定为目标而成立的（从1958年4月启动）

具体的来说，由于供电能力、设备的故障和洪水等随机因素，造成各电力公司的最大负荷不是同时发生，即不同步性。联合各个系统互补可保证稳定供电，可以暂缓能源设备等的建设。如上所述，联合经营是以其主管办事机构中央电力协议会为中心进行工作的（表1.3）。

表 1.3 联合经营的经营组织

中央电力协议会：决定各公司间的电源开发计划设备运用计划联合经营的有关重要问题

理事会：调整中央电力协会的重要协议事项。

中央供电联席会议：遵从中央电力协议会决定的基本方针，协议或决定联合供电运营的有关事项。

中央供电指令所：隶属于中央供电联席会，是融通调整指令等进行供电运营的业务机构

2 电力联网

电力联网的目的是缓和各电力公司之间的供电不平衡，经济合理运用电力设备。

电力联网大致分为“全国联网”和“二公司间联网”其关系如表1.4所示。

3 全国主要联网供电地区

全国的联网供电地区如图1.3所示。

表 1.4 电力联网的种类

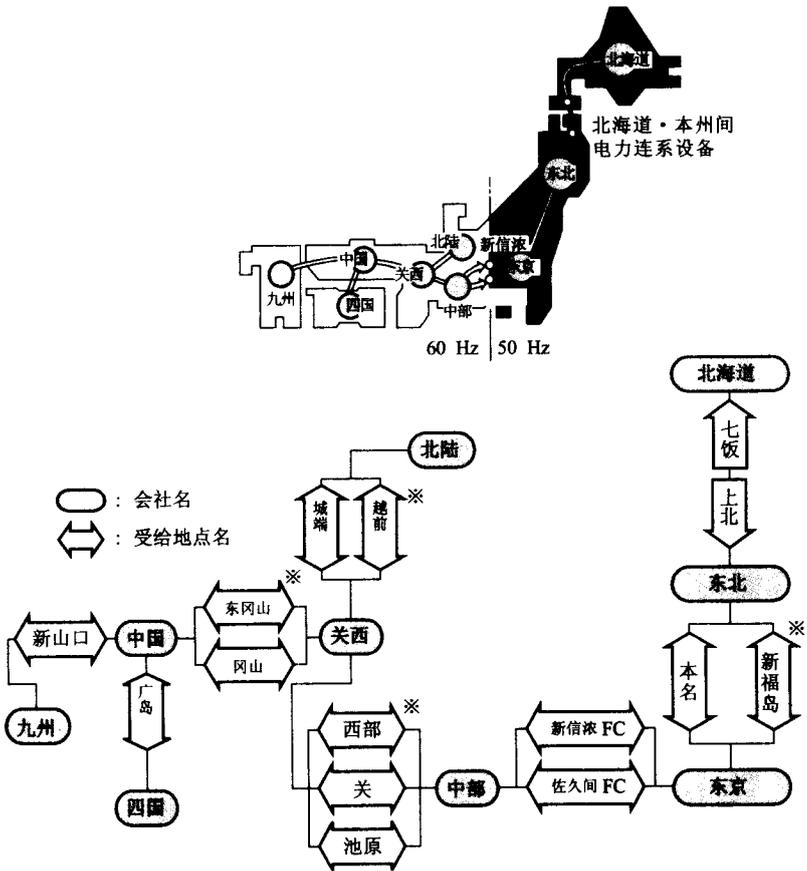
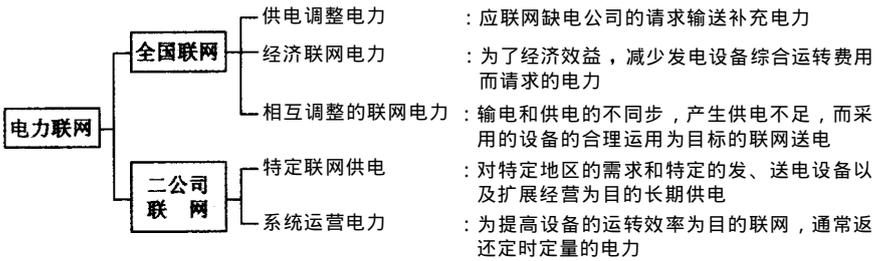


图 1.3 全国(日本)联网主要供电地点

日本的电力是以富士川为界使用不同的频率，川东为 50Hz，川西为 60Hz。东京电力和中部电力之间，设有变频所（新信浓变频所、佐久间变频所），它负责调配全国联网供电。还有，除冲绳电力公司外的九个电力公司，用直流海底电缆和交流架空输电线联网，其将为提高运行效率和供电稳定性等方面做出贡献。

4 直流输电

现今的电力网主要用频率为 50Hz 和 60Hz 的商用交流电。电能起初是使用直流电，但远距离有效输电，需要变成高压电，交流电比直流电容易变压，因此直流电很快就被交流电所代替，现在一般都用电交流电。

交流电网输送电力的能力，具有大致与距离成反比的基本性质，也就是增加一倍的距离其输电能力减半。

交流电的输电功率包括有功功率和无功功率，无功功率是不影响输送有效功率的电能，但具有增加输电线电流的性质，并且无功功率的分布影响电压。

使用交流电的情况下，相互联接的同步电机，必须是同步运行，否则不能稳定运转。从电厂到用户的距离越来越远，输电中的输送距离、无功功率、同步等问题越发突出，也许将来会采用直流输电。现在日本已在北海道和本州的联网上采用直流输电（ $\pm 250\text{kV}$ ）。

1.1.3 电力系统构造

1 电力系统构成的基本思路

电力系统具有生产和消费同时性的特性，从发电到供电过程中各设备必须协调联接运行。从系统统一的观点出发，以系统的有效利用为前提，考虑将来的系统扩展和设备的日常维修、使用以及地区间协调等，应该构成既合理又经济的电力系统。

电力系统构成时注意事项如下。

(a) 确保服务质量电力系统的平时安全供电是起码的要求，当发生事故时也要限定范围，并想法尽早恢复供电。特别是可能波及大范围长时间的停电事故的隐患，哪怕是发生几率很小也要必须特别注意。另外，电压、频率的变化等影响供电信誉的服务项目，必须稳定在预期的承诺目标范围内。

(b) 系统统一的观点 要相互协调从电厂到用户的各种设备，使全系统有效稳定运行。

(c) 适应将来的系统扩展 电力系统将年年扩大，电力设备建设需要长期的巨额资金投入，投下的资金又长期无法流通，因此，从长远的观点出发，追求高效的设备组合，有利于将来的系统扩大，即必须注意长远规划。

(d) 设备的维修和使用之间的协调 考虑设备节能对策的同时，作好维修和使用方面的协调。

(e) 与地区社会的协调 适应地方情况，确保安全、保护环境等力求与地区环境相协调。

(f) 提高投资效率 最大限度的发挥已建设设备的效用，努力提高投资效益。

2 系统构成中应考虑的技术问题

主干系统是指主要变电所之间的联接和主要电厂以及公司系统等之间的联接，是非常重要的系统，因此要确保很高的可靠性。要构成可靠性很高的系统，必须注意以下技术问题：

确保系统稳定性和电压稳定性；

短路和接地电流不能超过断路器的额定电流；

要避免诱发性故障和电压异常的发生；

便于进行系统电压的调整；

⑤ 便于进行系统的监视；

⑥ 系统构成要简单，便于迅速、准确处理事故；

⑦ 相邻互为备用的系统能可靠解列；

⑧ 减少有功功率和无功功率的网损；

⑨ 中性点接地方式和继电器等系统保护装置要配合，协调好继电器的参数设定。

3 主干系统的构成

(a) 电源系统 由于输电线过长，从系统稳定性方面考虑，在不能输送所需电力的情况下，电源在采取增加线路和设置中间开关所等措施的同时，还应考虑采用快速励磁、PSS（系统稳定装置）、PSVR（系统电压调整装置）等措施，做到全面考虑电源和系统的最佳方案。

输电方式要综合考虑输电线的故障频率和系统规模。即使发电机发生失步故障导致频率变化，系统也可以承受，在不影响系统运行而且不妨碍电厂安全运转时，电厂一般采用省去母线的单元输电方式（一输电线路接一个发电机）。

原子能发电厂，采用设置母线的并用送电方式（图 1.4）。在慎重考虑频率变化和确保供电可靠性，以及启动电源供应方式和确保安全电源及经济性等方面的前提下，通常采用单元输电方式。

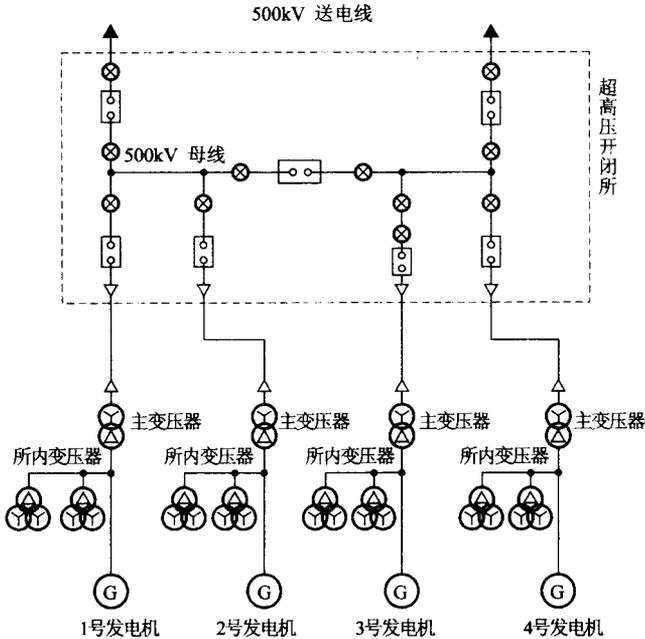


图 1.4 原子能电厂的线路图

(b) 外围系统 外围系统是围绕用电地区形成的具有汇集各电厂电能作用的系统。外围系统的容量，除了平时的潮流，还要考虑电厂维修和故障停机时的应急潮流和随时间变化的变动潮流以及电能的经济运行等因素来决定。另外还要考虑，长远需求动向、适应电能开发计划等，并在能满足最大容量的同时，为限制系统扩大规模而增大的短路和接地电流，采用高等级电压。

外围系统的故障影响范围很广，因此单一设备的故障不能影响系统的

稳定性；不能引发供电障碍和影响发电能力。

(c) **275kV 城市引入系统** 对高度集中用电的重要城市等地，应采用简单化、大容量化、设备小型化的系统，追求高效率的设备组合。当前，从外部系统逐步引进数个 275kV 系统，加强系统运行上的相互联系，形成高可靠性的系统。以 275kV 系统为据点，考虑地区需求动向和下位系统的联系，设置兼顾相互联系机能的 275/66kV 供电变电所。

4 环状系统及放射状系统的构成

为了可靠性主干系统采用环形连接，其与放射形相比较的特征如表 1.5 所示。环形连接在输送大电能的同时应使潮流分布的无功损失最小，这样可做到高效的设备组合。否则，可导致故障时事故范围蔓延弄成复杂化。

表 1.5 系统构成的特征

	循环形	放射形
设备的可利用限度	并列线路数——相当于 1 线路的送电能力 (4 线路的情况 75%)	2 线路中, 1 线路的送电能力(50%)
少发性故障的影响	过负荷、破坏稳定性、电压下降等紊乱及事故的蔓延	波及紊乱的形态简单且局部的
短路	随需求的增大而短路增加	容易抑制短路
适应性	大功率远距电网、需求和电能厂的范围大的分散系统	比较狭小的地区用电集中 电厂的选址可分散的系统

5 地方系统

(a) 地方主干系统的组成 对过密的电网，以 275 kV/66kV 为中心，组成 66kV 系统。但是，对已有 154kV 系统的地区，视情况而定。联接 275kV 外围系统的相邻地区或 275kV 高压线通过的 66kV 架空电网系统发达的地区来说 275kV/66kV 是标准的。

对于周边及外围用电分布范围比较大，且将来有望成为相当规模的地区，从 500kV/154kV 中心变电所逐步增加 154kV 电网，组成 154kV 的地方供电干线。

(b) 一般供电系统的组成 (154kV、66kV 电网系统) 供电用变电所一次侧引入二个线路输电线，平常一线路供电一线路做备用。输电变电所变

压器，由于短路容量的原因平时的并列运行无法实施。但是，现正在想法使变压器出现故障时可以并列运行。

(c) **66kV 地下供电系统** 供电变电所的一次侧用地下电缆时，多端子单元方式为标准。

多端子单元方式，可节省变压器一次侧的断路器和一次侧母线，因线路和变压器之间直接或用断路器连接，可节约变电所很大空间，因此有降低工程费以及容易获得变电所用地的优点（图 1.5）。

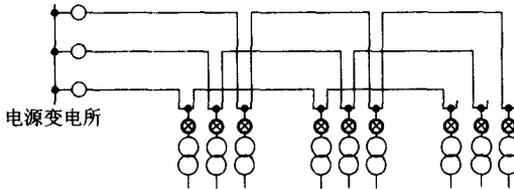
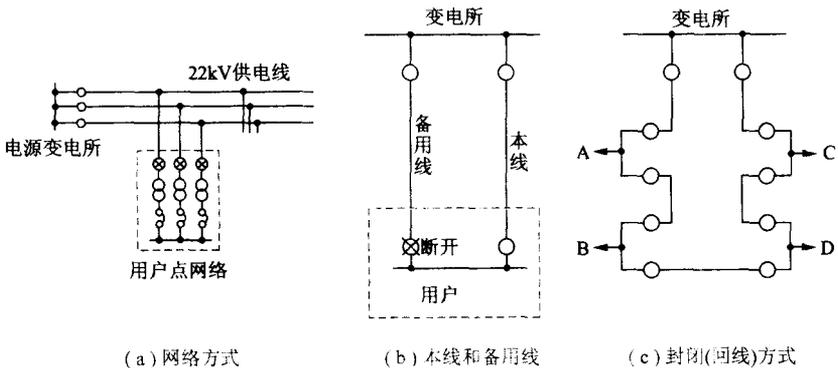


图 1.5 多端子单元方式的系统图

6 供电系统

(a) **22kV 地下供电系统** 22kV 地下供电系统，有以下三种方式（图 1.6）：



(a) 网络方式

(b) 本线和备用线

(c) 封闭(回线)方式

图 1.6 22kV 地下供电系统图

局部网络方式；

② 2 线路供电方式；

环状方式。

(b) **22kV 架空线式供电系统** 22kV 供电方式 作为地区供电方式 适用于经济、维修等综合条件有利的地区 (图 1.7)。

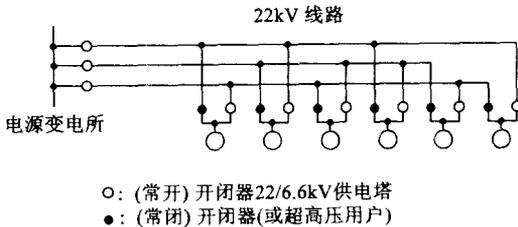


图 1.7 22kV 架空供电系统图

比如，供电线路过长、用电户稀少，从电压等级及长远需求等方面考虑，适合于 22kV 架空线供电的地区，即填海造地、内地工业园区、新建城市等，其地理情况、用电趋向等比较清楚的地区，直接用 22kV 供电的比例大，而且道路和电缆通道等方面有利于架设 22kV 架空电缆。当 22kV 主线路发生故障时，可考虑用备用线满负荷切换供电。

高压供电系统 系统的组成以多分割多联系为标准，应急时使用备用线路。高压供电线路发生故障时，高压供电系统之间，考虑无故障区间的切换送电。另外，变电所的变压器等，电源一侧发生故障时也要考虑一部分负荷的切换送电。

② 低压供电系统 以放射状为主，适用于所有地区。

7 中性点接地方式

为防止除接地故障以外的原因发生的电压异常，为确保继电保护的正確动作，在三相送电方式中，使用中性点接地方式。对于经消弧电抗器的接地方式，是为早期消灭一相接地时的电弧，保证继续送电为目的而设置的 (表 1.6)

(a) 控制过电压 为保持系统不平衡故障中的正常相的基础电压，要抑制故障发生瞬间或故障解除瞬间的自由振荡电压的同时必须要加速衰减振荡电压，保护系统的绝缘。为此对系统组成采用合适的中性点接地方式，

以防过电压发生。

表 1.5 中性点接地方式的标准

类别		中性点接地方式	参 考
设 备	发电机 调相机	非接地	因容量小不发生过电压的情况
		间隙接地	与上以外的场合
送电系统	系统在 275kV 以上	直接接地	
	154kV 系统	间隙接地	一般
		补偿电抗器接地	电缆系统等充电电流大且怕有电磁诱发故障的场合
	66kV 系统	间隙接地	一般
		补偿电抗器接地	电缆系统等充电电流大且怕有电磁诱发故障的场合
		消弧电抗器接地	消弧电抗器接地合适的场合
22kV 系统	间隙接地		
供电系统	6.6kV 系统	非接地	

(b) 确保继电保护的動作 即使系统内任何地方发生故障，为确保保护继电器的正常动作，必须供应非常稳定的电流。尤其是电缆系统中故障后自由振荡变大，因此为防止继电保护的误动作，必要考虑采用补偿消弧接地方式。

(c) 防止电磁诱发故障 故障时接地电流诱发通信电缆的电磁诱导电压，必须限制在规定值以下，为抑制接地电流，采取适合于系统继电保护等的接地措施。

(d) 减少故障时的设备损伤 为了减少故障时的设备损伤，必须降低故障点的电流或早期隔离。

(e) 配置中注意的事项

系统运用上 一般系统运行中，必须防止中性点接地方式的改变。

② 系统事故时 不能因发生继电器动作而衍生带电的非接地系统。

8 短路、接地电流

系统各处的短路、接地电流的最大值，随系统规模的扩大而增大，特别是直接受能源集中、不均等影响的主干系统，短路、接地电流增加非常显著

(表 1.7)

随着短路、接地电流的增加,将出现以下问题:

断路器串联设备以及送电线的容量不足;

产生通信线的电磁感应障碍;

故障电流大致使设备损坏。

表 1.7 系统的短路、接地电流的最大值

电压等级/kV	短路电流/kA	接地电流/kA
500	63	63
275	50	50
154	31.5	—

为此,考虑事故的允许范围、用户的用电设备状态以及设备的制造参数、故障电流的诱发事故等因素,综合斟酌的允许最大电流目标值列于表 1.7。

9 短路、接地电流的控制措施

短路、接地电流的控制措施应斟酌系统稳定性、电压稳定性、经济性等综合因素,从以下措施中选择合适的控制措施:

系统的分割、电源的分割;

电厂、变电所的母线稳定分割或故障时分割;

采用阻抗大的变压器;

采用串联电抗器;

采用直流送电、直流联接等非同步联接;

⑥ 直接接地系统部分变压器的中性点采用间隙或经阻抗接地。

1.2 供电质量——电力系统的运行目的

电力系统,作为一个整体的庞大的系统,它的使命是供应优质经济的电能。

优质的电能是:

电压的变化小;

频率的变化小;

停电少等。

1.2.1 标准电压及其维持

1 基本思路

维持正常的系统电压，不仅是最基本的服务，而且是维持电力系统稳定运行的基础。因此，有必要设置稳压设备及调相设备，力求维持电压的稳定。

设置这些设备时，为确保主干线的电压稳定，从电源到供电的各系统，尽量取得无功功率平衡，尽力控制无功功率损失，同时要适当保持系统电压以及用电端电压，有效使用发电机的无功功率，综合考虑电压调整设备和调相设备的设置，计划好更效率的系统。

2 电压等级

电压等级是决定电力系统基本形态的重要因素，选定各个地区的电压等级时，从长远考虑计划主干系统，考虑已有系统的发展情况、地区需求动向、用户服务等综合因素的同时，应慎重考虑新的电压等级带来的影响，尽量简化电压等级，组成高效率的电力系统。

3 标准电压

标准电压是以《电气规格调查标准规格》(电气学会制定)为标准，它已适用于各种线路(表 1.8)。

表 1.8 标准电压

额定电压/kV	3.3, 6.6, 11, 22, 33, 66, 77, 110, 154, 187, 220, 275, 500
最高电压/kV	3.45, 6.9, 11.5, 23, 34.5, 69, 80.5, 115, 161, 195.5, 230, 287, 525/550
额定电压在 1000V 以下的额定电压/V	100, 200, 100/200, 415, 240/415

电力企业供应用户的电压，在《电气事业法》第 26 条的施行规则第 44 条中已有规定，如表 1.9 所示。

表 1.9 低压用户供电标准

额定电压/V	低压用户供电标准/V
100	101±6
200	202±20

为保持电力系统的电压稳定，应对系统中各处配置各种的电压调整装置进行调整。主要的调整装置及其功能，有以下几种：

发电机控制发电机端子电压和输电线输出电压以及产生的无功功率（加减励磁电流）

② 电力用电容器产生无功功率。其电压调整是阶段性的。

分路电抗器吸收无功功率。用于防止电压上升。

带有有载调压器的变压器由有载调压器调整二次电压。

⑤ 同步调相机与发电机一样可产生和吸收无功功率，调整灵敏性高。

发电厂变电所中的调整大致如图 1.8 所示。

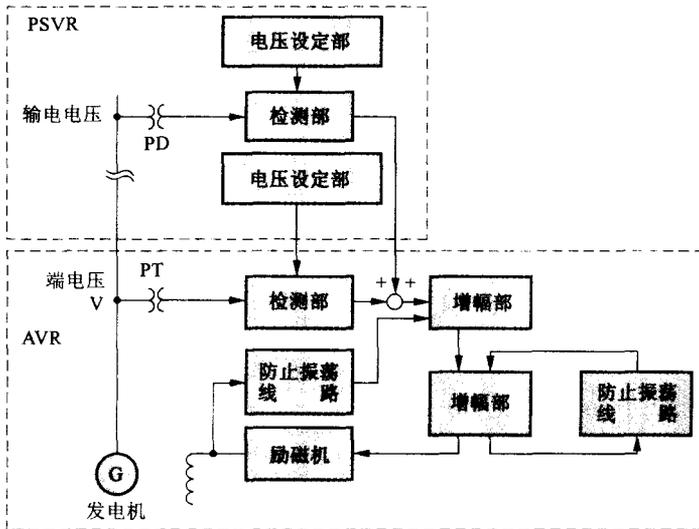


图 1.8 AVR, PSVR 框图

与火力、原子能电厂以及超高压系统联接的水力发电厂，主要采用自动电压调整装置 AVR (Automatic Voltage Regulator) 或发电机输电电压控制励磁装置 PSVR (Power System Voltage Regulator)，以控制发电机端子电压和输电线输出电压。

其余的电厂则采用，AVR 或无功功率自动调整装置 AQR(Automatic Reactive Power Regulator)，控制发电机端子电压或产生的无功功率。

输电变电所则采用自动控制装置 VQC(V-Q Controller) 控制一次和二次母线电压或二次母线电压以及变压器一次侧无功功率。

供电用变电所则采用线路电压降补偿装置 LDC(Line Drop Compensation)，控制二次母线电压。

5 发电机的 AVR 和 PSVR

发电机几乎都备有 AVR、AQR 或输出功率自动控制装置 APFR(Automatic Power and Frequency Controller)，自动控制励磁电流保持一定的发电机电压，控制无功功率或功率因数不变。

PSVR 是安装在联接 500kV 主干系统的发电机上，其作用是保持输电线的输出电压一定，提高系统电压的稳定性。另外，PSVR 是以电压调整特性曲线为基础，自动调整输电线电压的，是在 AVR 装置上附加的功能装置。

1.2.2 频率及其维持

1 基本想法

为保持电力系统的标准频率，确保发电厂的调整能力，要进行下述范围内的调整：发电机的转数，决定于原动机的能量与输出电能的平衡。

拖动转矩比发电机输出制动转矩大则转数增加；

拖动转矩比发电机输出制动转矩小则转数减少。

平时频率的变化，主要是由于全系统的负荷变动引起的。对应负荷的变动，进行发电量和频率的调整。为此，根据负荷变动，有必要确定发电厂的调整容量，其调整是在运行可调容量内进行。对一般发电厂特性来说，输出功率的变化速度越快，输出功率的可调整容量将受到限制。

所谓异常，是大电源发电机跳闸引起的频率下降，还有大容量负荷（包括扬水用动力）引起的频率下降，以及故障断路引起的频率上升等。即使是这样异常的时候，也要使系统的发电机继续稳定运转，尽快恢复正常的状态。

2 标准频率

我国电网频率，是以静冈县的富士川为界，东侧为 50Hz 西侧为 60Hz，分成不同的系统频率。东日本的北海岛、东北、东京的电力公司，以 50Hz

作为调整目标；西日本的中部、关西、北陆、中国及四国、九州电力公司，以60Hz作为调整目标。

即使频率异常，也要采取措施使系统的发电机继续运转，不受异常的影响，而且在可能的情况下尽快恢复正常状态。

电力系统频率的变动，对用户和电力公司从不同角度有不同的影响。

用户方：若电力系统的频率发生变动，则引起电机的转数变化。频率变化很大，则电机的回转不匀可能发生产品质量事故。

电力公司方：发电机的转数发生变化，引起气轮机转子的共振，影响机械寿命，威胁发电机设备的稳定运行。

3 频率的调整

控制频率的方法，是发电机的调速机运转（Governor operation）和负载频率特性配合进行的。

(a) 输出功率调整命令 统辖系统的中央供电指令所，根据负载的变动调整输出，向各控制电厂发指令调整，使频率始终保持为标准值。

(b) 频率异常下降时的调整 因主干电源系统的事故或电源分割，造成全系统的频率下降时，若疏忽放任，则妨碍发电机的稳定运转并波及全系统，将产生很大的影响。对此，采取的紧急处置的方法是，增加发电量，通过电网紧急求救，尽快恢复频率的标准值。

(c) 频率异常上升时的调整 因系统事故大量的扬水动力等停机，导致频率异常上升时，也妨碍火力、原子能发电厂稳定运转，可能波及全系统。对此，作为紧急措施，应减少发电量（介入机械力减少发电机输出力），尽快恢复标准值。

1.2.3 确保供电可靠性

1 基本思路

掌握各用户及社会服务的需求，斟酌供电设备的故障及其恢复的能力，要确保供电可靠性。

准确把握，通常预料中的设备故障对各用户和地方社会供电的影响，考虑供电障碍规模、时间、频度，协调从电源设备到供电设备之间的供电可靠性，制定适合全系统的设备计划。

即便事故发生率很低，但一旦发生，为避免全系统性破坏的重大事

故，在做设备计划时，要考虑万全的预防对策。

对台风、洪水、地震等自然灾害 根据地方的实情 从技术、经济方面考虑，要以尽快恢复为目标作好设备计划。

2 影响设备计划的因素

供电可靠性是能明晰的反映预料中的设备事故和事故中的供电可靠度。

(a) 电源 对水利、火力和原子能发电设备，首先以能对它进行适当检视为前提，考虑电源的事故，需求的变动，河川的满枯等对发电的影响。

(b) 主干系统

单一设备故障时¹⁾

不影响正常供电；

不影响主要电源的发电限额。

② 二重设备故障时²⁾

产生大面积供电障碍；

尽力防止电源失步和系统分割，并且即使二系统分割时，也不太影响供电，能够稳定运转。

因施工、维修等，即使要停一部分设备，也不使供电可靠度降低很多。

(c) 地方系统 单一设备故障时，要在很短时间内恢复供电。

变电所 变电所在平常运行中 3 日平均最大供电量，不应超过变电所一台主变压器故障时，剩余正常变压器许容的短时过负荷容量，以及短时间内可切换的二次侧输电线或供电线负荷切换量的合计值。

但是，对于变电所的事故，由三相变压器组成的变电所，则考虑容量大的一台停机；由单相变压器组成的变电所，则考虑任何一相的停机。

输电线 多线路并用输电线中，剩下正常线路短时间最大许容容量的合计值，不应超过从平时运转时 3 日平均最大供电量的合计值中，减去一个线路故障停止时，用其他系统的输电线短时间可能切换的 3 日最大平均电量，再减去除除了该故障线路供电的备用线契约之外的超高压特别用户的 3 日最大平均供电量的差值。

1) 单一设备故障是指电力系统中的一台发电机、一台变压器，送、供电线一个线路等设备的故障。但是对母线区间的故障按二重设备故障处理。

2) 二重设备故障是，指电力系统中的二台发电机、二台变压器、输电线二个线路以及输电线一个线路和一台变压器等设备同时故障。

瞬时电压下降，是组成电力系统的设备，受雷击等异常时，继电保护器检测出异常处，自动断开断路器，把故障处从正常系统中隔离开，这个过程目前最短需要 50~70ms 时间，在这段时间里尚未构成大范围的停电，但用户的电压下降 20%~80% 的叫做瞬时电压下降。

这种情况大半是，高架输电线受雷击等自然灾害所致，其发生频度按地区不同，但平均而言，一家用户一年间摊上几次，这比停电频率多的多。它影响精密仪器设备、自动化工厂的生产线以及计算机等，在很多领域里带来重大影响。做为其防范措施，用户要配置定电压定频率装置 CVCF (Constant Voltage Constant Frequency) 防祸于未然。

4 高次谐波

近年电气电子技术迅速发展，从家电、OA 机器到产业机械，广泛应用电子技术。随着电子技术的广泛应用，机器中产生的高频电流流入电力系统，影响电力系统的电源，引起部分机器的故障越来越严重。

(a) 高次谐波 基本波 (50Hz, 60Hz) 的整数倍频率的电压电流叫做高次谐波。不包含高次谐波的波形是很规范的正弦波，但包含高次谐波的波形成畸变波 (图 1.9)。

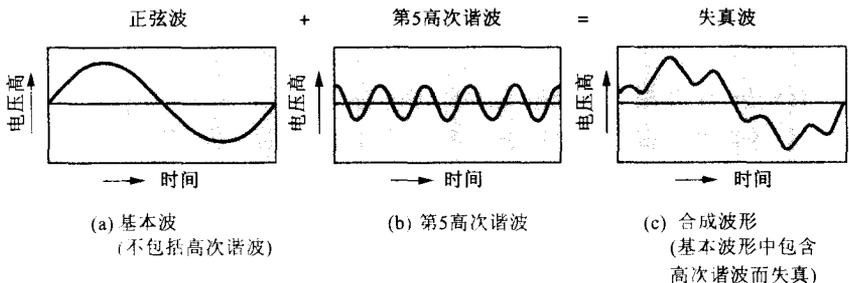


图 1.9 高次谐波 250Hz; 包含第 5 高次谐波)

(b) 在电力系统中高次谐波的情况 电压波形中包含的高次谐波成分中第 5 次谐波最多。电压畸变率最大的时间带是 19~22 点 其次是白天，

深夜最小。受高次谐波影响的机器中，6.6kV 用户的电力用电容及其附属设备（串联电抗电阻），在受害设备中占大多数。发生高次谐波源的设备大致有以下几类：

高压、超高压用户的场合 可控硅整流器、电动机起动用变换器、轧机、印刷机、空调设备等。

② 一般家电及用电器具的场合 电视、荧光灯、电脑、微波炉等。

(c) 抑制高次谐波的对策 为确保当今社会的电能质量，资源能源厅于 1994 年 9 月制定了控制高次谐波的对策指南。接着日本电气协会，确定了控制高次谐波对策的指导原则的详细技术内容，于 1995 年 6 月制定了“高次谐波控制对策技术指南 (JEAG9702)”，从此高次谐波在电力系统中，按环境问题来对待，制止高次谐波从各负载中侵入系统的方针才得以实施。

1.3 电力高峰的日益增长及其对策

1.3.1 电力高峰

1 用电动向

最大电力 最近东京电力的最大电力，增加到 1951 年的 35 倍。今后还以每年 130 万 kW (全国大约 560 万 kW) 的速度继续增加，估计 10 年后增加 1.2 倍。

最大电力，以往是发生在日短的冬季的晚上，可是到了 1969 年左右变成夏季“高峰”。这是因为空调等冷冻用电急速增加的缘故，现在它已占最大电力的 40% 左右。用电最多的是空调等冷冻机械，使用时间集中在盛夏的午后 1 时到 4 时 (气温每增加 1℃ 多耗电约 150 万 kW (东京电力为例))。为了限制最大电力的继续增加，即为了提高负荷率，正在考虑各种必要的对策 (图 1.10)。

2 总需求曲线

电的使用情况与天气的变化、季节和周日的不同，气温、湿度、日照等气象状况，以及反映社会动态的电视收视率的增加等很多因素有关。

一天的电力消费情况，随时间的变化，明显的反映出人们生产活动、社会活动的开始一进入高潮期一午休一再度出现诸活动的高潮一然后部分活

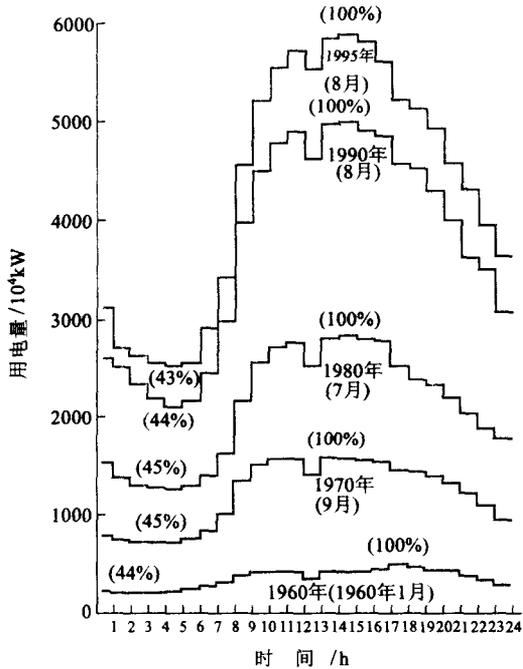


图 1.10 1 日用电情况

动结束等人们的活动情况。这里还有受天气状况和社会的动向的影响，一般 1 天中夏季 15 时左右 冬季 17 时左右，用电量最大。生产活动和社会活动大部停止的夜间的电力消费，约占白天的 40%~50%。季节的差别，如同昼夜的差别，其差别有年年扩大的趋势，近年由于冷冻需要的增加，冬季和夏季用电都呈隆起状（图 1.11）。

● 1.3.2 尖峰调整对策

1 DSM

各电力公司为抑制和缓和夏季白天的用电高峰，在征得用户的理解和支持的前提下，采取调整用电合同等各种抑制高峰用电措施。但实际上还是夏季的白天比凌晨多 2.2 倍，仍有很大的昼夜之差别。若能抑制用电高峰，也就是提高负荷率，即可提高设备的利用率，还可以减少设备投资和供电成本。

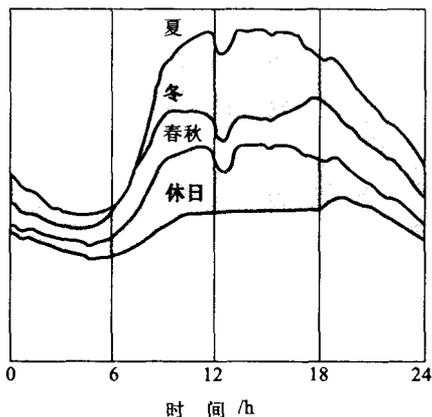


图 1.11 需求曲线

为此，推荐用户措施负荷平缓 **DSM**(Demand Side Management) 具体的内容如下所述。

想法平缓高峰。利用夜间富余电力把冷水（或温水）储存到储热槽里，白天取冷或取暖用其冷热能，筹建储热式空调系统；还可以代水用冰储热，达到储热槽的小型化，发展冰储热式空调系统。

电费政策上，考虑夜间收费低等多样化措施。

2 抽水蓄能式发电

抽水蓄能式发电见图 1.12 利用夜间火力、原子能发电的廉价电能 用水泵把下边的调整水池的水提升到上部调整水池中，等白天用电高峰时，利用水的落差发电。

电能直接储存是不可能的，但变成水的势能储存是可能的。抽水蓄能式发电，因抽水和发电两方均有效率损失，故其总效率为 65%~70%左右。抽水蓄能时虽然损失了能量，但利用深夜原子能发的富余的低价电，转换成用电高峰时的高价电还是合算的。

3 电能储存

用 **Na-S** 电池（新型钠-硫电池）储存电能的研究开发现正在顺利进行。**Na-S** 电池 用 **Na** 做阴极离子 **S** 做阳极离子，使用具有钠离子传导性的氧

化铝陶瓷作电解质（固体）。电池可在 300℃左右充放电，属高温电池。它比铅电池储存高 3 倍的能量，因此可在变电所、高楼等狭窄的空间安装，自身又不放电，充放电效率高，是能长期储存电能的绿色电池。若使用普及 Na-S 电池，可以在夜间充电白天取用，还减少输电设备的输电损失，又可在城市周围分散设置，提高输电可靠性。除此之外，可使昼夜间及不同季节的负荷变动平稳化，实现电能高效率利用。

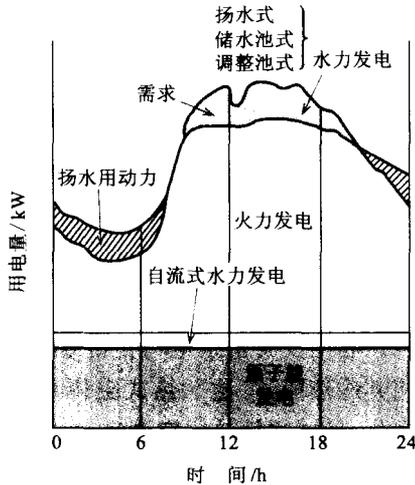


图 1.12 需求与供电关系

4 储热泵

储热泵，是将热源机的储热泵放在屋顶上，热水储槽置于地下，利用夜间的低价电 夏季储冷水 冬季储热水 分季组成不同的白天用空调系统(1.13)。

一般热源装置能 100%满负荷运转的时间，是在负荷最大的夏季，但一天只不过几个小时，一年中算下来也仅有很少的时间，其大部分时间是在部分负荷状态下运转，即其余时间是都在功率损失的状态下运转。储热泵空调方式一般是，把热源装置容量设定在小于最大负荷值，使它经常在高负荷状态下运转，若一建筑物负荷达到最大时，其不足部分是从储热槽中吸用，即利用夜间便宜的电运转热源装置储存的热能。

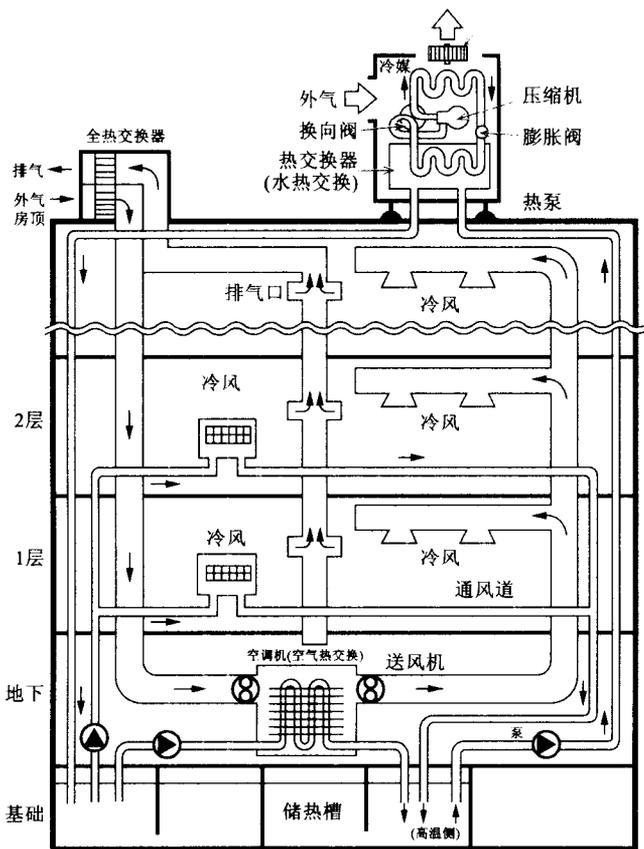


图 1.13 储热式热泵的原理

5 电热水器

电热水器，是利用深夜规定时间的便宜电，到时开关自动动作把电切入到热水槽热水，反复对流加热成开水。若达到预先设定的温度或水沸腾时自动停止供电，以免浪费热能。

其加热装置如图 1.14，分内设加热器对流式的和外设加热器从上注入水的两种方式。热水槽经过一段时间也能保持一定的水温，是因为一旦热水和注入水的温度相差 20°C 以上时 由于比重的差 形成混合层分界 热水和冷水不能混合的缘故。

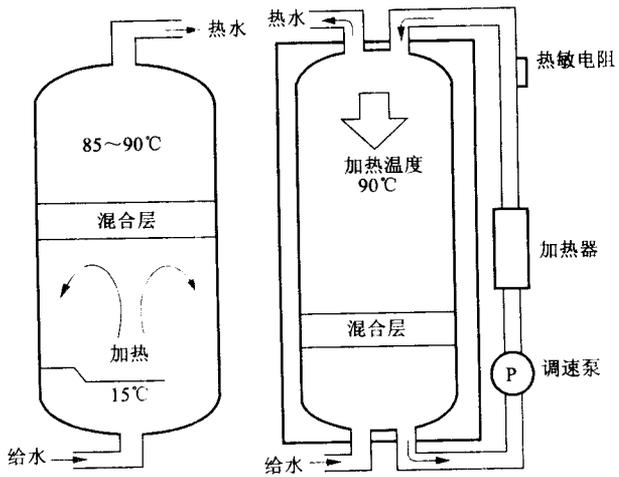


图 1.14 电热水器

第 2 章 发电设备

原子能、火力、水力等发电设备，随着需求的增加而年年增加，而且趋于大规模、大容量化，采用的技术也日新月异。

从发电设备的构成比例来看，从前是以水力发电为主，到了 20 世纪 60 年代后半期火力发电超过水力发电；到了 1994 年火力发电占总发电量的 60%，而原子能发电约占 30% 原子能发电在供电中所起的作用越来越重要。估计我国在不远的将来随着原油价格的上涨，能源的缺乏，从经济性和稳定供电的观点考虑，寄予原子能发电很大期望。本章中将要学习以发电设备的构成和筹划等的计划、设计的方法为中心，介绍各设备的概要和最新技术以及实际运用情况。

2.1 原子能发电

● 2.1.1 发电原理

铀 235 的原子核吸收中子时，原子核将分裂，并放出大量的热能和 2~4 个中子。放出的中子又被铀 235 原子核吸收又引起原子分裂（这叫连锁反应）。利用核裂变产生的热能发电的叫做原子能发电。

原子核的质量，比组成原子核的各粒子单独质量的和大。这一质量的差叫做原子核的质量缺损。

据爱因斯坦的相对论，质量与能量是等同的，质量 $m[\text{kg}]$ 就是能量，可用下式表示；

$$E = mc^2 [\text{J}]$$

式中 $c[\text{m/s}]$ 是真空中光速。

铀 235 的原子核吸收中子引起核分裂时，核分裂物的质量的和比铀

235 与中子的和小。核分裂造成质量的缺损，相当于释放出的能量。铀 235 的一个原子核放出的能量，约等于 200MeV。

不同形式的原子反应堆使用不同的减速剂（降低中子速度的物质）和冷却剂（核分裂时产生的热，从反应堆中排出）。减速剂、冷却剂均用普通水（轻水）的反应堆叫做轻水反应堆。日本正在运行和建设的基本上是轻水反应堆。轻水反应堆是现在世界上采用最多的实用化反应堆。此外还有沸腾水型反应堆（BWR）和加压水型反应堆（PWR）两种。

沸腾水型反应堆和加压水型反应堆的原理，分别由图 2.1 和图 2.2 表示。

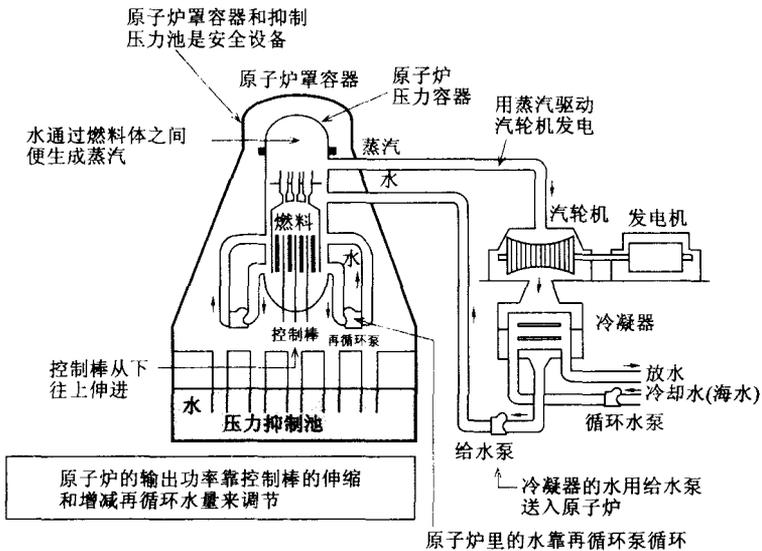


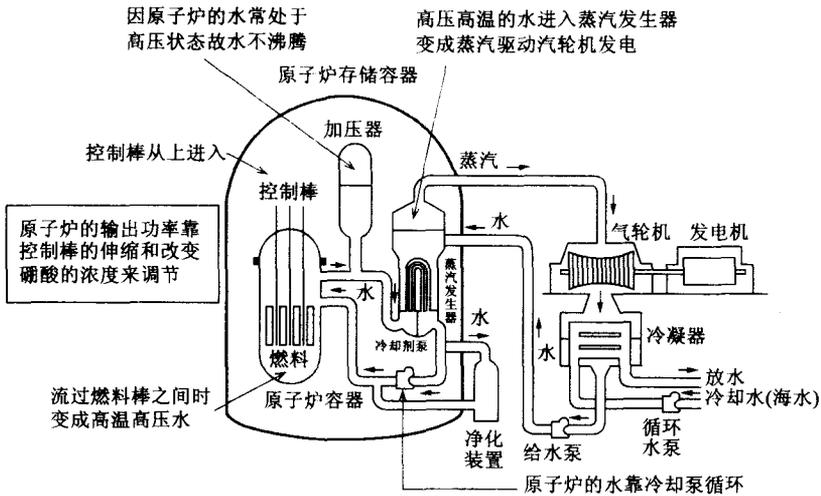
图 2.1 沸腾水型原子反应堆 (BWR) 简图

2.1.2 主要设备

原子能发电设备，由原子反应堆设备、汽轮机发电机设备和反应堆安全设备等构成。以沸腾水型反应堆为例，其原理叙述如下：

1 反应堆设备

反应堆是反应堆压力容器和内藏燃料的组合物，由控制棒、驱动装置、



(反原子炉的水加热成高温高压的水送到蒸汽发生器汽化成蒸汽驱动气轮机发电)

图 2.2 加压水型原子反应堆 (PWR 简图

炉内构造物以及蒸汽干燥器等组成。炉心由燃料组合体和控制棒有规则的排列组成。燃料铀 235 是浓度为 2%~4% 的低浓缩二氧化铀的烧结丸，是装入到泽卡洛伊锆锡合金管内的棒状燃料。

控制棒是吸收中子效果好的碳化硼（还可用铪）的粉末，用不锈钢管包裹成形的棒状物。

2 汽轮机发电设备

从原子反应炉中烧出来的蒸汽，通过主蒸汽管送到汽轮机一侧，经过主蒸汽门、调速汽门进入汽轮机高压缸。在汽轮机高压缸作完功的蒸汽，到气水分离器中去掉水分，再进入汽轮机低压缸。在汽轮机低压缸做完功的蒸汽，到冷凝器凝结成水，用给水加热器加热，再用给水泵送到原子炉里。

发电机是直接和转速为 1500r/min(50 Hz 的情况) 的蒸汽汽轮机联结的横轴原筒旋转磁场三相同步发电机 其转子采用氢气冷却定子采用水冷却等。

3 原子炉安全设备

原子炉外壳设施，在发生冷却剂流失事故，从原子炉中泄露放射性物质

时，应具有抑制泄漏量在所规定的值以下的功能，从而实现大气中的泄漏量非常低。

若原子炉的第一系统发生破坏性事故，可能冷却剂部分或大部在短时间内往外泄露，导致炉心温度上升，最终造成燃料棒熔融。万一发生这类事故，为防止燃料熔融，应具备有应急用炉心冷却系统。

4 BWR 和 PWR 的比较

沸腾水型原子炉 (BWR) 是在压力容器中把水变成蒸汽，把蒸汽直接送入汽轮机，驱动汽轮机转动发电机发电，而驱动汽轮机后的蒸汽，到冷凝器变成水，再用给水泵送到原子炉压力容器里。原子炉压力容器内的水，靠再循环泵及喷射泵在炉心部循环。

BWR 的特征归纳如下：

原子炉压力容器内部，有炉心还有喷射泵、汽水分离器、蒸汽干燥器等，因此原子炉压力容器搞的很庞大。

② 由于直接循环，不需要 PWR 型那样的附属蒸汽发生器，因此整体构成很简单。

靠改变炉心的间隙，可调整原子炉的功率，因此容易控制。

送到汽轮机的蒸汽中也含有放射性物质，因此在汽轮机一侧也需要防放射线，采取放射性气体遗弃物的处理对策是必要的。

加压水型原子炉 (PWR) 是加压的高压水在原子炉内加热成高温，原子炉容器和蒸汽发生器之间，设有冷却剂循环冷却泵。这时所用的冷却水叫一次冷却剂，循环一次冷却剂的封闭系统叫做一次冷却系统。

通过蒸汽发生器的传热管，一次冷却系统和二次冷却系统进行热交换。二次冷却剂以蒸汽状态送到汽轮机，驱动汽轮机发电机发电。驱动汽轮机的蒸汽，在冷凝器中变成水，再用给水泵送到蒸汽发生器中。

PWR 的特征归纳如下：

因使用高压水，可实现原子炉容器及炉心小型化。但必需设置大型蒸汽发生器。

分隔成包含放射性物质的一次冷却系统和不包含放射性物质的二次冷却系统，由蒸汽发生器相互隔开，因此可进行适合各自情况的独立设计。

靠一次冷却剂中调整硼的浓度，在几乎拔掉控制棒的情况下，原子炉可正常运行，因此容易做到输出功率的平稳化。

即使燃料的放射性物质泄漏到一次冷却剂系统里，也不污染二次冷却系统，因此用不着对二次冷却系统采取防护对策。

5 预防强烈地震对策

原子能发电所的地震对策如下：

为尽量减少地震影响，原子炉等重要的建筑物，应建在坚固的岩盘上，而且建筑物结构本身也应坚固。

② 设计原子能发电所的时候，在调查过去地震及板块活动断层等历史资料的基础上，预测出最大地震，并按照《建筑基准法》规定的用于一般建筑物抗震设计标准的3倍来考虑，进行非常安全的设计。

设置地震仪，地震达到一定程度以上时，即可安全地自动关闭原子炉。

经历1995年兵库县南部地震后，原子能安全委员会从保证原子能设施安全的万全之策考虑，建立了“原子能设施抗震安全审核委员会”，认真审查以往的原能设施的抗震性措施（抗震设计方案）是否有问题。

其审查结果如下：

尽管兵库县南部受到了地震，但无损于原抗震方案的妥当性。

但是，原子能有关部门不能满足于现状，为进一步提高原子能设施的抗震安全性和可靠性，需要继续努力。

原子能设施的地震安全设计时应考虑的问题如下：

方针——设计上要考虑自然情况

重要的建筑物、系统及设备的安全性，按重要程度进行不同的抗震设计，即要考虑因地震丧失或破坏其功能时对安全的影响，还要参照地基和周边地域的历史记载以及实地调查，做到足以抗住当地地震的十分坚固、非常可靠的设计。

切合实际的设计方案

从地震可能发生放射线泄漏污染的方面考虑，原子炉的抗震设计按设施的重要程度，分为A、B和C三个级别，分别进行不同的抗震设计。

A、B和C级的设施，应具有以下抗震安全性。

A级的各设施要做到，从《建筑基准法》中规定的以水平震度的静震度的3倍求得水平震动力，还要模拟建筑用地地基的最大速度振幅为12.1Kine的基准地震，进行动态分析求得的分析计算地震力，能抵住按以上求得的两种地震力中任一最大的地震力。

B级的各类设施要做到能承受根据《建筑基准法》规定的以 1.5 倍水平震度的静震度求得的水地震力，但怕引起共振的设施还要进行动态分析。

C级各类设施要做到能承受根据《建筑基准法》规定水平震度 1 倍的静震度所求得的水地震力。

● 2.1.3 原子燃料

在矿山采掘的铀矿，经过精练、转换、浓缩、成型等加工工艺，做成燃料组合体。然后，运到原子能发电厂当燃料使用。使用后排出的废渣要进行化学处理（又称再处理）从中提取铀、钚提取的铀、钚再做燃料使用。铀的这一使用处理流程称为原子燃料周期。对于几乎没有能源资源的我国来说，应谋求铀资源的再利用，在国内完成原子燃料周期，做到准国产能源原子能发电厂。

● 2.1.4 运行

原子能发电厂比火力发电厂建筑费用高，但燃料费低。因此，要提高经济效益，提高原子能发电厂的设备利用率是很重要的。

尽可能以接近最大输出功率为基本负荷状态进行运行。

尽可能缩短原子能发电厂的停机时间。

建厂初期 定期检查的停机时间 大约 90~100 天，但是，随着我国自主技术开发的轻水炉技术以及轻水炉改良标准化的发展，最近建成的工厂停机检查时间已缩短到 55 天左右。

在采用可靠性高的设备的同时，还要设置备用设备，万一发生设备故障也不影响发电。另外，对维修检查，尽量做到预防性保护。

● 2.1.5 确保安全性和可靠性

原子能发电安全的基本要求是，封闭好放射性物质防止向周边环境泄漏，使一般公众不应受到放射线的影响。为此，应采取特殊的安全措施，保证原子炉设计的安全性。对放射性物质，不管哪一层都要设置屏障，不管哪一段应分别采取安全措施，树立“多重防护”意识。

现在原子能发电厂设计中，谋求“防止异常情况发生”、“防止事故的扩大”、“防止放射性物质向周边异常泄漏”的三段安全对策。即无论什么情况应以“及时关上核反应堆”、“冷却燃料”、“封闭放射性物质”的原则进行

设计，以防放射性物质影响周边环境。原子能发电厂的确保安全的示意图如图 2.3 所示。

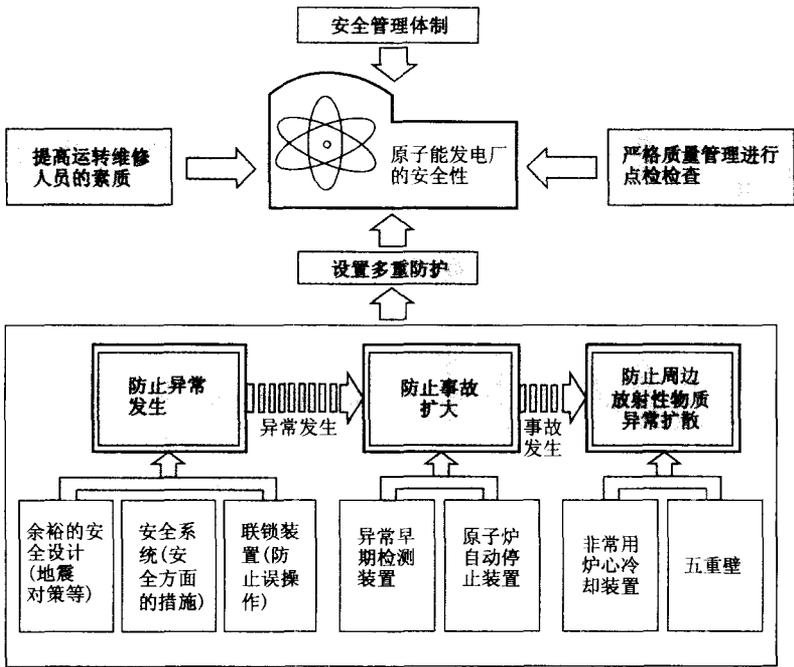


图 2.3 原子能发电厂的安全系统

2.1.6 电源开发程序

电源开发大致按四个阶段进行。

第一阶段：事前调查

原子能发电厂选址，应从气象、海象、地形、地质、生态等方面进行调查，从多个候选地中进行比较确定。

第二阶段：制订电源开发基本计划

对已选定的原子能发电厂（所）的地点进行环境影响调查，预测对周围环境带来的影响。

通商产业省，对原子能发电厂（所）涉及的诸多问题，召开第一次公开说

明会（由通商产业省主持开发商说明），听取当地居民的意见和取得理解。然后，附上电源开发调整审议会的审查，并编入电源开发基本计划中。

第三阶段：原子能发电厂施工前的准备

办理施工前的各种许可手续。

通商产业省对所提出的原子反应堆申请，进行第一次审查，在此基础上原子能委员会和原子能安全委员会进行再审查。对原子反应堆特殊的安全性，原子能安全委员会参考当地居民的意见，召开第二次公开说明会，为再审查作准备。

第四阶段：开工到试运转

进行的每一个工程，都由通商产业省进行检查（使用前检查）。而且，与地方自治体签署原子能安全协议。

2.2 火力发电

火力发电中，用燃料燃烧加热锅炉，将热能变成蒸汽，用蒸汽转动汽轮机发电的叫“汽轮机发电”；燃烧燃气直接带动燃气轮机发电的叫“燃气轮机发电”；燃气轮机发电和汽轮机发电组合的叫“联合循环发电”；用柴油机驱动发电机发电的叫“内燃机发电”；把地热能变为蒸汽转动汽轮机发电的叫“地热发电”等。这里主要概括介绍统称为汽轮机发电的火力发电。

2.2.1 火力发电的组成

1 火力发电的组成

火力发电，是在锅炉里燃烧煤、石油、天然气等燃料，把水加热成高温、高压的蒸汽，再把这个蒸汽集中起来转动汽轮机，蒸汽汽轮机轴直接联结发电机轴上驱动发电机发电的方式。其示意图如图 2.4 所示。

2 热效率

水加热成蒸汽，蒸汽做功后再变成水，这一状态的循环变化，在火力发电中称其为基本热循环 也称“兰金循环”见图 2.5。T-s 线图图中 T 是绝对温度，s 是表示熵。

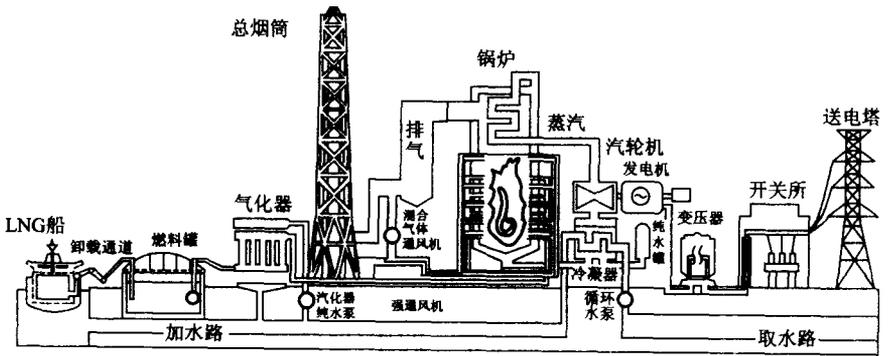
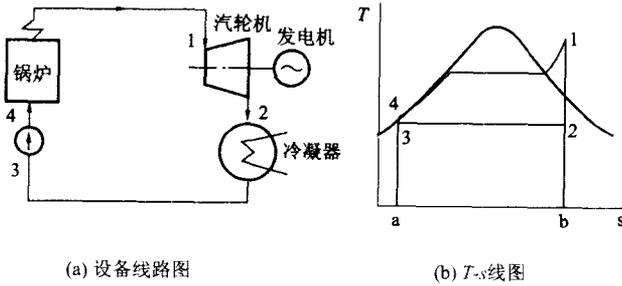


图 2.4 火力发电系统示意图



(a) 设备线路图

(b) $T-s$ 线图

图 2.5 兰金循环图

在锅炉中产生的过热蒸汽 1 导入汽轮机里，膨胀做功变为 2 的状态，再进入冷凝器冷却饱和变成水，再用给水泵加压成 4 的状态送到锅炉里，再加热又回到 1 的状态。在这个循环里，面积 1-2-3-4 相当于做功热量，面积 a-4-1-b 是锅炉供给的热量，面积 a-3-2-b 冷凝器中损失的热量。因此，兰金循环的理论效率 η 可用下式表示：

$$\begin{aligned} \eta &= \text{用于工作的循环热量} / \text{循环中的加热量} \\ &= [h_1 - h_2] - [h_4 - h_3] / (h_1 - h_4) \end{aligned} \quad (2.1)$$

这里 $h_1 - h_4$ 是循环中蒸汽和水的焓函数。

最近火力发电厂中，为进一步提高热效率，采用在高压汽轮机中做功的蒸汽再行加热利用过热蒸汽的再热循环，和从高、中、低压汽轮机的中途抽取蒸汽，利用给水加热器等进行热交换的再生循环，以及两者组合而成的

再热再生循环。各自的循环如图 2.6 所示。

设备线路图

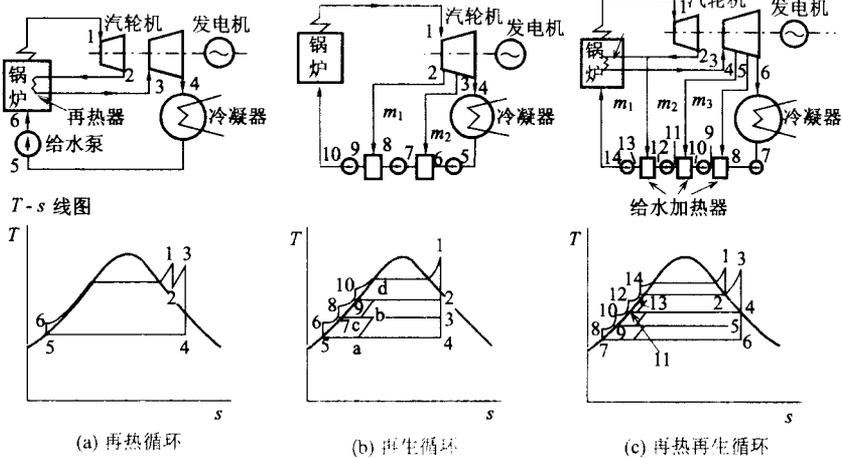


图 2.6 发电厂的热循环

在兰金循环中解释了热效率，但在火力发电厂进行性能管理时，一般采用单位热效率。单位热效率，是一定时间生产的电量和消耗的燃料发热量之比求得值，分别以发电端效率和输电端效率来表示。

$$\begin{aligned} \text{发电端效率 } (\%) &= \frac{\text{发电电量} [\text{kW} \cdot \text{h}] \times 860 (\text{kcal/kW} \cdot \text{h})}{[\text{燃料消费量} [\text{kg}] \times \text{燃料发热量} (\text{kcal/kg})]} \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} \text{输电热效率 } (\%) &= \frac{\text{输电电量} (\text{kW} \cdot \text{h}) \times 860 (\text{kcal/kW} \cdot \text{h})}{[\text{燃料消费量} (\text{kg}) \times \text{燃料发热量} (\text{kcal/kg})]} \end{aligned} \quad (2.3)$$

2.2.2 主要设备

1 锅炉

一般锅炉由锅炉本体、锅炉附属装置和附属件、燃烧装置、通风装置、主要配管、燃料储藏装置、搬运装置、排气处理装置和烟筒所组成。大致分为自然循环形和强制循环形（图 2.7）。

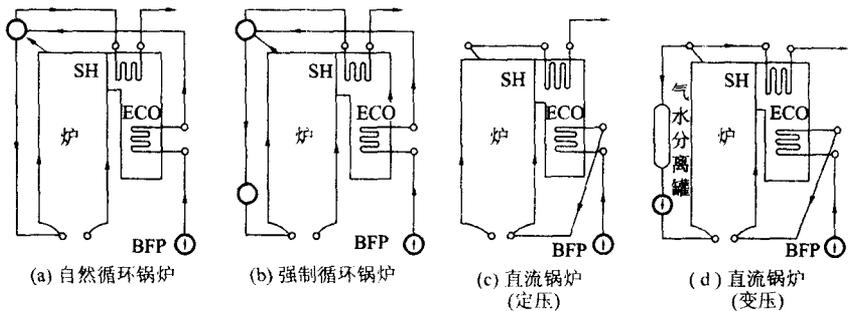


图 2.7 锅炉种类示意图

汽泡形自然循环锅炉是在饱和温度下靠水与蒸汽的密度差自然循环的锅炉。随着蒸汽的压力和温度升高，水和蒸汽的密度差减少，因此要保证循环力就需要提高锅炉的高度，由此其结构就比较大，而且启动、停止性能等方面也有很大的限制。

汽泡形强制循环锅炉是锅炉水循环回路中设置水循环泵，强制水循环的锅炉。它可做到各蒸发管的热负荷均匀，因此比自然循环锅炉紧凑，启动和停止等性能也比自然循环型好。

定压直流形锅炉是用给水泵把水打入火炉膛里的管内，进行加热直接生产过热蒸汽，蒸汽的压力超过临界压力的锅炉。它不需要汽包罐，故重量轻，但热容量和水容量少，因此可以急速启动停止。另一方面，因水容量少对负荷的急剧变化的承受能力差，需要随时控制给水和燃料。

2 汽轮机

蒸汽汽轮机，是把蒸汽的热能转化为动能，用具有动能的蒸汽推动叶片转动叶轮变为机械能的设备。它由喷嘴、动叶片、叶轮、机罩、轴承、联轴节、密封、调速装置、协调装置、主要汽门类等组成。

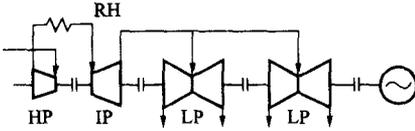
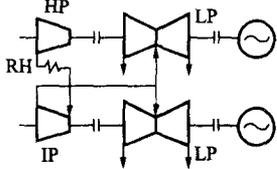
蒸汽汽轮机，从动作原理分成反击汽轮机和冲击汽轮机，按轴的排列分串联形和并列形。

反击式汽轮机，是蒸汽通过静叶和动叶时降低各自的压力增加速度，从动叶喷出的蒸汽的反作用力推动叶轮回转。因每一段落消耗的热差不大，故设置有很多段落，每段落上的叶片承受的负荷又不大，因此可以实现叶片小型化。

冲击形汽轮机，是蒸汽通过喷嘴时，降低各自的压力增加速度，从动叶片喷出的蒸汽冲击力带动叶轮旋转。因在每一段落消耗的热差大，故全段落的段落数少，每段落承受的负荷大，叶片也就大。

串联形，是高压、中压、低压汽轮机排列在同一轴上，适用于小容量机。另外还有并列形，它通常有二个轴，一轴配列高压、低压，另一轴配列中压、低压。在大容量机组中，一轴配列高压、中压，另一轴配列低压、低压。配列的形式列于表 2.1。

表 2.1 汽轮机排列举例

形式名称	串联形式(梳形结构)	并联形式(并列结构)
汽轮机 排列 (例)	 <p>HP: (高压汽轮机) IP: (中压汽轮机) LP: (低压汽轮机)</p>	

3 发电机

火力发电厂的发电机，是直接联结在高转速的汽轮机上，横轴上有圆筒形二极励磁或四极励磁转子的同步发电机。同步发电机的转数 N [r/min] 和电压频率 f [Hz] 的关系，可用下式求得：

$$N = 120f/p \quad (p \text{ 为极数}) \quad (2.4)$$

四极机使用于大容量并列形低速机一侧。还有，为确保系统的稳定性和电压的稳定性，发电机和主要变压器等的系统联结，需要与系统很好协调。

日本的汽轮机发电机的定型规格列于表 2.2。具体的选择方法，是根据系统中的位置、发电容量、励磁方式等来选定。

(a) 发电机电压 火力发电厂的发电机，是通过主变压器和厂内变压器，各自与输电线和厂内线路联结。因此，发电机的电压，要考虑到主变压器低压一侧的所有设备的经济性，由输出和冷却方式以及定子的线圈并列线路数等因素来决定，一般采用 15~20kV。

表 2.2 汽轮机发电机额定规格

汽轮机		发电机			
额定功率 /MW	形式	容量 /MVA	电压 /kV	功率因数	短路比
1000	C, C	636/529	20/20	0.9	0.6/0.6
	C, C	634.8/519.9	20/20	0.9	0.6/0.6
600	C, C	350×350	18	0.9	0.60
	T, C	670	19	0.9	0.58
350	C, C	2×224	15	0.85	0.60
265	C, C	2×169.6	15	0.85	0.64
	C, C	2×150	13.8	0.8	0.58
175	T, C	224	12	0.85	0.64
	T, C	224	16.5	0.85	0.64

(注) T, C: 串联复合形 C, C 双轴形

(b) 功率因数 功率因数，决定于发电机的额定容量和系统的无功功率，国内的汽轮机发电机的功率因数，采用大约 0.9 或 0.85。

(c) 短路比 短路比，是决定发电机功率因数和额定功率的主要因素。短路比是能左右静态稳定界限范围的参数，是根据系统稳定性和发电机励磁机的适应性等来选择，一般采用 0.58~0.64。

● 2.2.3 火力发电燃料

火力发电厂使用的燃料按形态大致分成气体燃料液体燃料固体燃料。

气体燃料的燃烧效率高，主要使用的有天然气和液化天然气。天然气主要成分是甲烷，因不包含硫不产生硫氧化物，又没有灰粉、灰尘，是很好的绿色燃料。

液体燃料，燃烧效率仅次于气体燃料，它的运输、储藏也都很方便。主要使用原油、重油。原油、重油的主要成分是碳水化合物，含有硫磺粉、灰粉。燃烧重质油时若操作不当还产生煤烟。

固体燃料，是以煤为主。煤的性质和形状按产地不同有千差万别的区别，它因含有不少硫磺粉和灰粉，其使用率逐年下降。但是，与石油、天然气相比，其埋藏量多，而且近来治污技术也在进步，因此，近年又有回升的趋

势。煤以块状或以微粉化使用，因其从燃烧、运输、储藏等方面较为便利，而且微粉化的煤粉又可以与水或者石油混合，当液体燃料使用的 CWM(Coal Water Mixture) 和 COM(Coal Oil Mixture) 技术已逐渐成为实用化。此外，还有正在开发的煤碳气化技术。

● 2.2.4 发电厂的运行

最大电力的需求当作最大电力的话，各季节中夏冬二季比其他季节高，一日中白天比夜间高，平日比休假日高。这样其需求按季节和星期均有差别，其差别反映了经济和社会活动的变化，并正在扩大。电力的需求与气温的高低等气象状况有密切关联，为了适应这种需求的变化，电厂应根据以下情况，灵活对应：

- 年中应根据需求经常调整供电（定期检修调整等）；
- 周末或节假日停止机组发电或低输出运行；
- 每天深夜停止机组发电或低输出运转。

在平时全机组运行时，针对时刻变化的需求，根据从供电所发出的指令进行输出调整、电压调整、频率调整运行。

● 2.2.5 环境对策

1 环境对策的种类

日本在 20 世纪 50 年代以大型企业为中心实现了工业的高速发展，但随即带来了的大气污染、水污染等造成了社会问题，人们越来越认识到环境保护的重要性，开始完善环境保护方面的立法。最近火力发电厂采用高新技术和先进设备努力治理环境。环境对策的种类示于表 2.3。

表 2.3 环境对策的种类

项 目	火力发电厂的对策	有 关 法 规
防止大气污染	排烟对策 燃料对策	公害对策基本法，大气污染防治法，噪音限制法，震动限制法，电气事业法，航空法，水质污染防治法，海洋污染防治法，港湾法，地方公害防止条例，工厂选址法，垃圾处理及清扫有关法律，自然环境保护法，其他
其他环保对策	防止水质污染，温水排放对策，噪音防止对策，其他(绿化、地基下沉、垃圾处理、位置、环境调和配色等)...	

2 大气保护对策

在火力发电厂使用的液体、固体燃料中含有硫磺。燃烧时产生 SO_x (氧化硫) 和煤尘。燃烧中还产生 NO_x (氧化氮)。这 NO_x 是燃料中的 N 的成分氧化生成 Fuel NO_x 和高温燃烧时空气中的 N 氧化生成 Thermal NO_x 等。

降低 SO_x 对策, 有减少燃料中硫的方法和燃烧排烟中去掉 SO_x 的排烟脱硫法。脱硫是用吸附剂和吸收剂吸附、吸收 SO_x 的方法, 有干式和湿式两种。

降低 NO_x 对策, 采用降低火焰温度或降低氧的浓度来改善燃烧的方法 (二段燃烧、排烟混合、低 NO_x 燃烧室), 抑制 NO_x 的生成, 和对已生成的 NO_x 采用排烟脱硝法。

至于脱硝, 有接触还原、接触分解等干式方法和氧化还原、碱吸收等的湿式方法, 发电用锅炉中主要采用氨选择接触还原法。关于煤尘的防范对策是使用优质燃料和采用集尘装置等。

3 其他环境保护对策

对水污染对策, 用废水处理装置进行净化处理 (沉淀、过滤等物理处理, 凝结、氧化、还原等化学处理 利用细菌等生物处理) 对于噪音、振动的防范对策, 是设置消音器、遮音壁等工程上想办法解决。

2.2.6 火力发电的开发

火力发电的容量越大建设费用越低热效率越高, 因此从追求规模化的观点进行开发。火力发电分担着负荷的基础部分和中间部分, 起到了稳定供电的作用。但是, 自从原子能发电的发展和它的高经济效益, 负荷基础部分已由原子能发电分担, 火力发电只分担中间部分和高峰部分。因此, 其利用率也随之下降, 要想大幅度提高传统的火力发电效率的期望几乎是不可能的, 要考虑全系统的综合运营效率, 需要开发便于起动停止灵活高效率的火力发电设备是很现实的。

因此, 近年来开发采用中间负荷为主的效率高又经济的联合循环火力发电。

联合循环火力发电, 是蒸汽汽轮机和燃气汽轮机组合发电的方式。在压缩的空气中燃烧燃料产生燃烧气体, 用这强劲的燃烧气驱动燃汽轮机并

带动发电机发电，从燃汽轮机排出的大量的的高温燃烧气，导入热回收锅炉里生产蒸汽，用蒸汽又驱动蒸汽汽轮机并带动发电机发电。这种联合循环火力发电效率，从以往的 41% 火力发电效率提高到 43%~48%。

总之，火力发电设备的开发，要适应需求选择好地址，运用技术革新成果，开发经济效益高又省能源的，还要有充足的资源又有足够的储备，同时充分考虑环境治理措施。

2.3 水力发电

利用水从高处往下落时的动能转动水轮机发电的叫做水力发电。水力发电，有引水式、堤坝式等，具有对负荷的适应性好、设备使用时间长、运行经费少、可靠性高、效率高和没有环境负担的优点。

● 2.3.1 水力发电的组成

水力发电厂，是利用水持有的势能（落差）和它的容量（水量）转变成电能。水力发电厂，有利用河川的流水能的一般水力发电，和利用夜间富裕电抽水储能，待用电高峰时适应负荷发电的抽水蓄能式水力发电。

图 2.8 是水库式发电厂的例子，从取水塔的取水口取水，进入铁管的高压、高速的水有力地推动水轮机，然后从排水口放水。此时，靠高速旋转的水轮机轴联结发电机的轴一起转动发电。当水的有效落差为 H [m] 流量为 Q [m³/s] 时，则单位时间里流过水车的水的能量为 $W_0 \times HQ$ [kg·m/s]。

当 $W_0 = 1000\text{kg/m}^3$, $g = 9.8\text{m/s}^2$ 时 水车的输入力 P_w [kW] 以下式计算：

$$P_w = 9.8 \cdot Q \cdot H \text{ [kW]} \quad (2.5)$$

单位时间内水的能量所做的功叫做功率，其单位为 kW（千瓦）。

在水力发电厂把水取入，用水轮机转换为机械能，再用联结轴传递给发电机，由发电机转换为电能，电厂再把电送出。要考虑在水轮机和发电机中的功率损失，即考虑其效率的话，水电厂的实际发电功率式为

$$P = 9.8 \cdot Q \cdot H \cdot \eta_r \cdot \eta_G \text{ [kW]} \quad (2.6)$$

这里 η_r 为水车效率 [%]； η_G 为发电机效率 [%]。

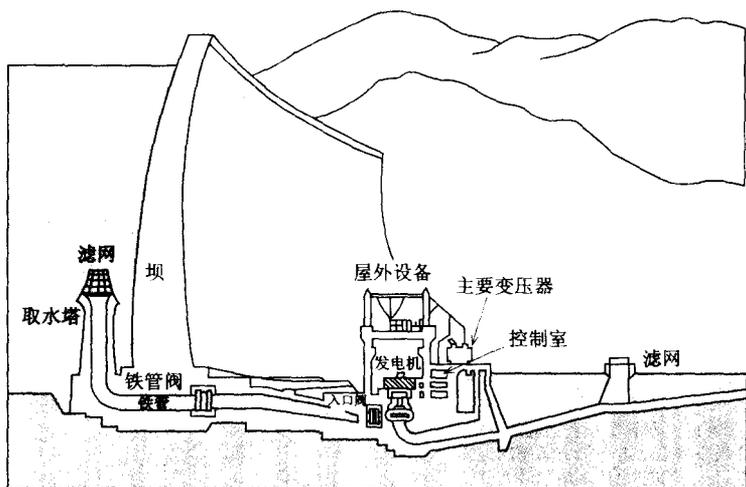


图 2 8 水力发电的构成

2.3.2 水力发电的种类

水力发电厂按取水方法和运行等方面进行分类。

1 按取水方法分

(a) 引水式 河川的上游筑小坝储水，把水经引水渠引入发电厂，获得与河川的落差的方式，见图 2.9(a)。

(b) 堤坝式 选择河川宽度狭窄并地基坚固的地方，横断河川筑坝，获得坝上游一侧和下游一侧之间的落差的方式，见图 2.9(b)。

(c) 混合式 引水式和堤坝式组合，获得坝和水渠二者的落差的方法，见图 2.9(c)。

2 按运行分

(a) 径流式 不能人为的调整河川流量，用自然河川流量发电的电厂，见图 2.10(a)。

(b) 储水式 按季节调节河川流量变化的水库发电厂，轻负荷时储水干旱时放水发电，见图 2.10(b)。

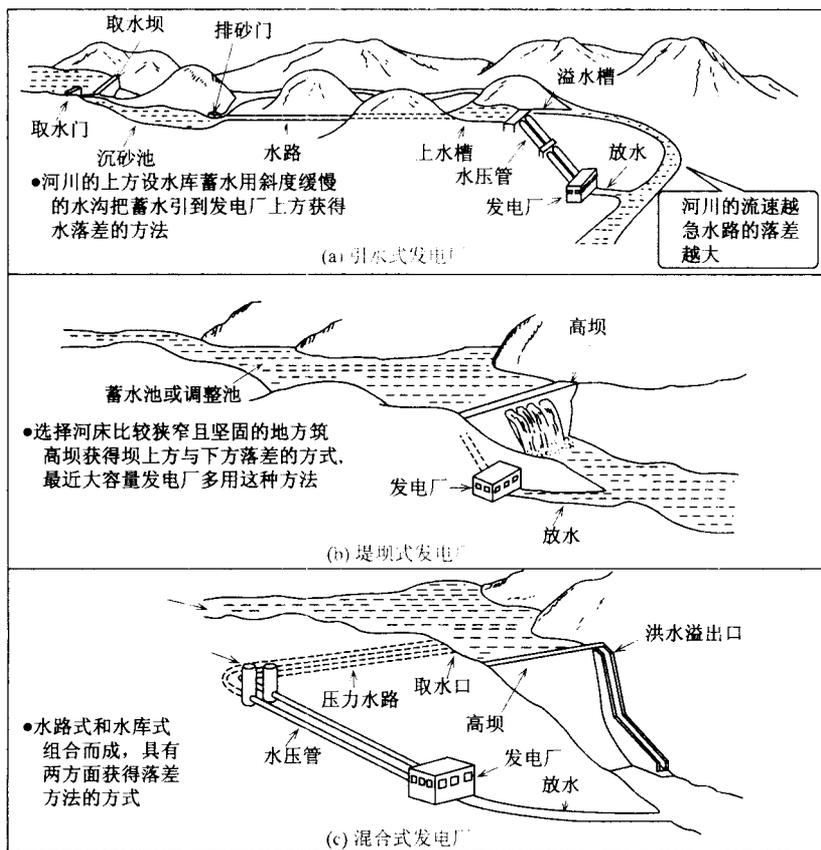


图 2.9 不同的取水方法

(c) 调整式 比储水式调整能力小，只有日间和周间的调整能力的水库电厂，见图 2.10(c)。

(d) 抽水蓄能式 夜间用电少的时候，利用廉价电起动泵把下游储水池的水打入上游的储水池，待用电高峰或急用时利用储水发电，见图 2.10(d)。

2.3.3 水力发电的基本思路

制订计划的步骤，见图 2.11。

水力开发的主要目的大致有三个。

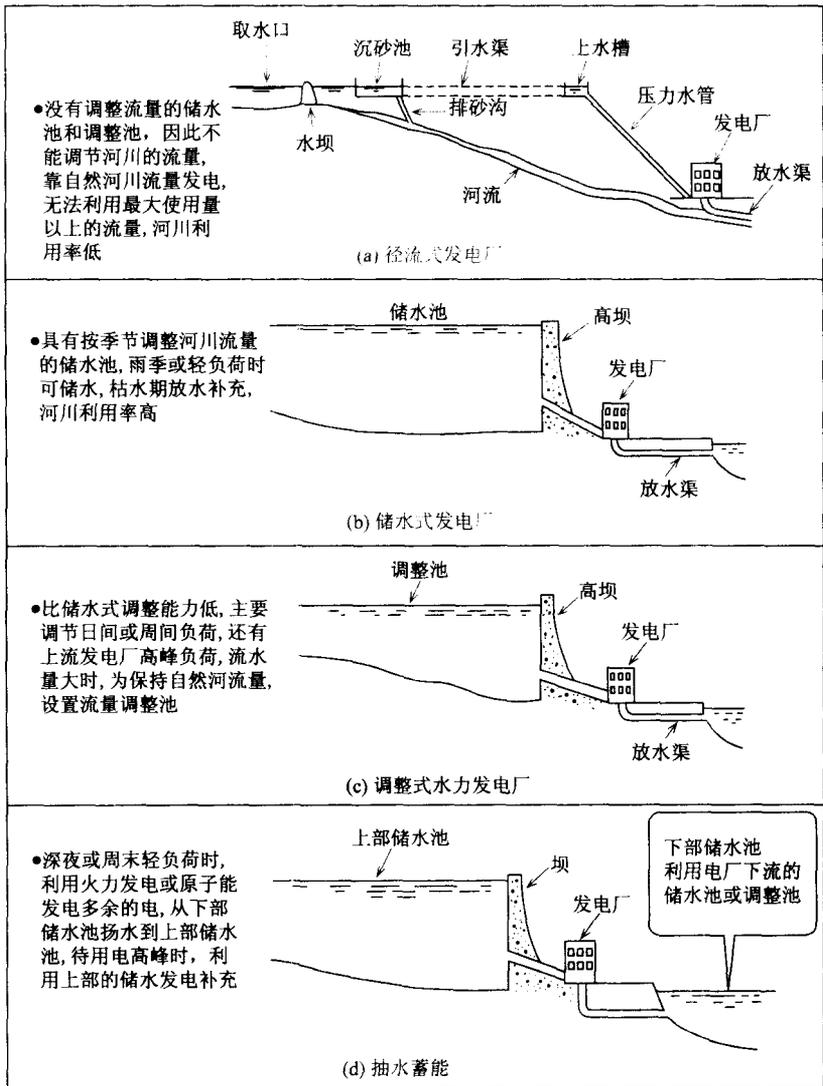
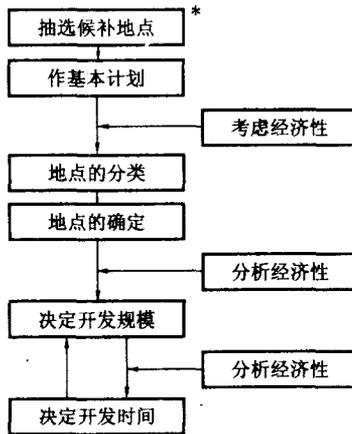


图 2.10 按运营分类

国内资源的有效利用。

以低廉的高峰供电节约系统总合经费。

为提高服务水平，改善负荷适应能力。



* : 从1:50000的地形图 国土
地理院发行 中 选择可能
实现电力计划的地点

图 2.11 计划制订步骤

1 一般水力

一般水力多数用于比较小规模的开发，考虑火力发电用燃料费长远走势的同时，评价当地供电密切相关的有关指标等，以决定开发规模和开发时间。

2 抽水蓄能式水利

抽水蓄能式水利因不依赖河川的落差，与一般水力相比有较大的选址自由度，而且随着抽水蓄能发电设备和高坝等技术的发展，高落差大容量已成为可能。

因此，当制订计划时，不要侧重于特定地点，在考虑将来发展的基础上，扩大水利发电的选址范围，与此同时综合考虑有关水力和火力以及原子能等各种电源的特性及组成，还要结合与输变电系统关联等问题，确保供电的同时，提高系统综合经济效益为目标来决定地点和开发规模及开发时间。

● 2.3.4 主要设备

水力发电的主要设备水轮机的种类和特征如下。

1 珀耳顿冲击式水轮机

珀耳顿冲击式水轮机的主要部分，有带斗叶轮和喷嘴及针阀三部分组成。斗式叶片[见图 2.12(a)]其中央有切水口。珀耳顿冲击式水轮机按轴的方向分为立式和横轴式，按喷嘴数分为单射、2射、4射、6射等形式[见图 2.12(b)]。

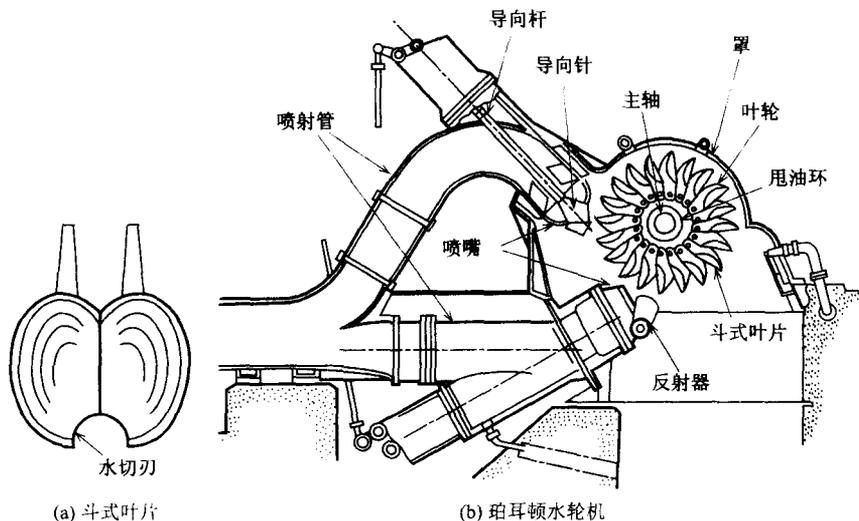


图 2.12

珀耳顿冲击式水轮机一般使用于高落差，它具有以下特征：
负荷变化时效率变化不大（多叶片时这种倾向更明显）。
可以控制水压，加长取水管经济上更有利。
叶轮的安装位置比放水面高，因此，尾水位高的地方落差损失大。

2 弗朗西斯水轮机及弗朗西斯形泵水轮机

如图 2.13 所示弗朗西斯水轮机的主要部件，有叶轮和导水叶片及蜗壳、尾水管等附属件。

泵水轮机的结构基本与专用水轮机没有什么区别，只是叶轮的直径大、叶片长、数目少。起动泵时为克服切断水压时的振动等，上罩和叶片结构的

刚性和强度都要比专用水轮机要好。

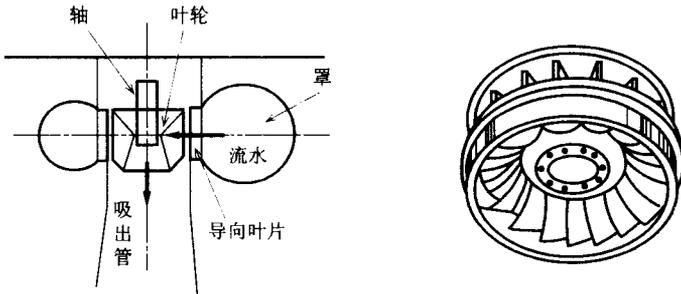


图 2.13 弗朗西斯水轮机

弗朗西斯形落差流量的适用范围大，它有以下特征：

落差的适用范围广，从小容量到大容量都可使用。

效率随水轮机的速度比和落差变动有关，速度比增加时轻负荷和过负荷时的效率明显下降，落差的变化也影响效率。

螺旋桨水轮机及螺旋桨形泵水轮机

螺旋桨水轮机的流水方向与叶轮的轴向一致，叶片有可拆结构和不可拆结构，不可拆结构一般称螺旋桨水轮机，可拆结构的称卡普兰水轮机。

螺旋桨水轮机的结构与弗朗西斯水轮机的结构相似，但没有叶片安装环，叶片是一片一片安装在轴上的（图 2.14）。卡普兰水轮机的叶片与导水机构相关联，随导水叶片的开度可自动调整叶片的角度（图 2.15）。

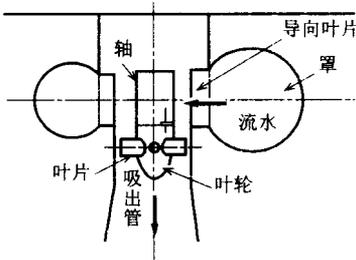


图 2.14 螺旋桨水轮机

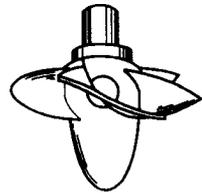


图 2.15 卡普兰水轮机

螺旋桨水轮机，适用于低落差大流量，卡普兰水轮机的特征如下。

适用于高速度比，因此，水轮机和发电机可小型化，与此相适应的建厂房等的费用也便宜。只是为了降低放水的高度，而增加土建工程的费用。

可调整导水叶片改变水流入方向，因此对部分负荷的效率。

落差的变化对效率及功率的影响不大。

可单独更换叶片，检修方便。

叶片与叶片之间间隔大不受流入异物的障碍。

⑥ 因叶片是可拆，故其结构相对复杂。

4 斜流水轮机及斜流泵水轮机

斜流水轮机也称特里阿滋水轮机，是弗朗西斯水轮机和卡普兰水轮机的组合形，可看做是去掉弗朗西斯水轮机的叶轮缘，把叶片改成可动形（图 2.16）

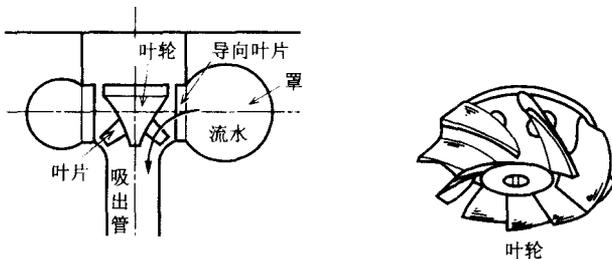


图 2 16 斜流式水轮机

根据功率的大小和落差的变化，改变导水叶片的开度，随开度变化可自动调整叶片角度。斜流水轮机的特征如下：

可改变落差和功率方面优于弗朗西斯水轮机。

与卡普兰水轮机相比，作用于叶片的负荷小，因此操作机构轻便，损失也少。

自由速度比卡普兰水轮机低，与弗朗西斯水轮机相似。

水轮机的叶轮的结构，介于弗朗西斯水轮机和卡普兰水轮机之间。

因有高扬程泵（70m左右）可防止效率下降。

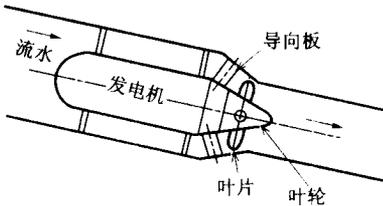


图 2 17 圆筒水轮机

圆筒水轮机是为用于低落差而开发的，相当于把卡普兰水轮机放平。水轮机从入水口到出水口在同一轴线上，配有圆筒罩，并与发电机直接联结（图 2.17）。

圆筒水轮机的特征如下：

用增速齿轮增速，可实现设备小型化。

流水没有弯道，不产生涡流，故低落差时的损失少。

2.3.5 水力发电厂的控制方式和技术开发

1 控制方式

水力发电厂，是根据河川的流量、储水池、调整池的储水情况，或者为适应用电情况，增减运转台数，进行功率、电压、频率的调整。水力发电厂中使用的控制方式如下所述。

① 1人控制方式 1人控制方式，是一运转员在配电盘进行水轮机和发电机的运行操作，同时进行各种控制和检测，但发生故障时自动停机警报的一般自动运行方式。

远方监视控制方式 远方监视控制方式，是在控制所进行运转、停机操作及输出、电压、功率因数等的调整，而发生故障时自动停止并向发电控制所发警报的自动运行方式。

全自动控制方式 全自动控制方式，是一旦满足事先设定的运转条件，水轮机、发电机自动启动，自动调整出力；规定的停止条件或故障时自动停止的全自动运行方式。

半自动控制方式 半自动方式，是水轮机、发电机的启动、运转及正常停机用手动操作，只在故障时自动停机，是手动和自动并用的控制方式，也是从手动控制到一人控制方式过渡的中间控制方式。

最近，由于开发高落差大容量、泵水轮机等技术的革新，改善了抽水蓄能发电的经济性。抽水蓄能发电作为在全电力系统用电高峰和故障等时的备用电源，与大容量火力和原子能电厂协作，带来了可观的经济效益。

近来为最经济的解决用电高峰的问题，出现了深夜利用富裕电抽水储能，用电高峰时利用储水发电的适应性高又灵活的抽水蓄能发电厂，而且逐渐发展增多。抽水蓄能发电厂近期更注重高落差大容量化的发展，已成为技术上比较新的开发领域，今后追求经济性的同时更注重高落差大容量抽水蓄能发电技术开发成为新的焦点。

现在为进一步提高抽水蓄能发电机的性能，运用动力机电一体化在发电电动机的转子上加低频交流励磁，即利用 AFC（自动频率调整）可变速抽水，正在开发应用可变速抽水蓄能发电系统。另外，近年开发了海水抽水发电厂，是一重大科研成果。

2.4 以新能源为中心的分散性电源

从两次石油危机给日本带来能源需求结构的急剧变化中，深刻的认识到能源供应的不稳定性。从能源保障及 CO₂ 的环境问题的观点来看，对热力发电余热利用系统、太阳能发电、燃料电池、风力发电等能源的进一步开发，成为开发新能源的中心，将来有望广泛利用。

● 2.4.1 热力发电余热利用系统

热力发电余热利用系统的基本系统如图 2.18 所示。用燃汽轮机、燃气发动机、柴油机作原动机驱动发电机发电，同时回收原动机伴生的热进行供暖的电热并用系统。若热交换效率好则其能源利用率可高达 70%。

● 2.4.2 太阳能发电

太阳能发电是利用太阳光照在硅等半导体上，光子冲击原子时产生的光电效应，直接将光能转换成电能的发电方式。图 2.19 为太阳能发电系统的原理图 2.20 示出它的分类。

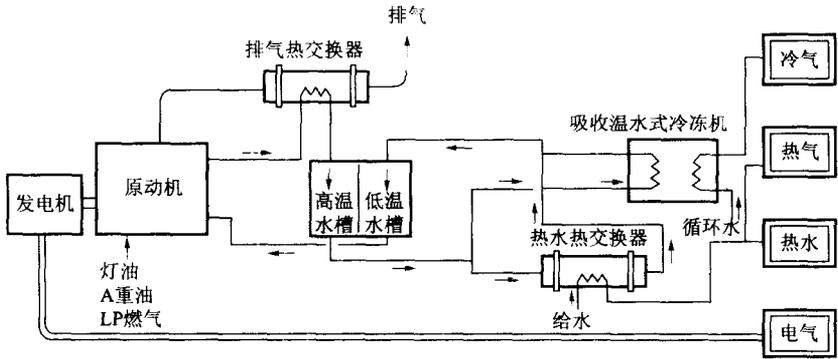


图 2.18 热力发电余热利用系统

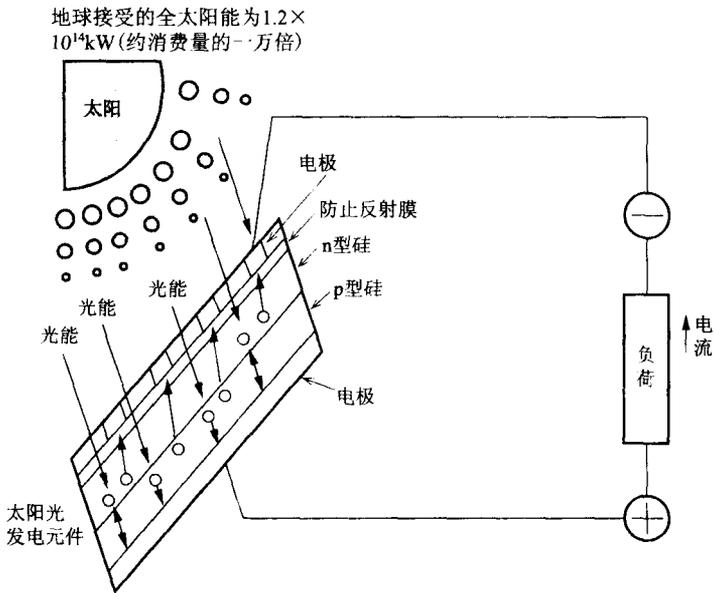


图 2.19 太阳能发电系统 (太阳能电池) 的原理

太阳在天气晴朗时,照在地面上的能量为 $1 \text{kW}/\text{m}^2$,一般其能量的密度较低,并受自然条件的影响。图 2.21 为太阳光发电系统的利用示意图。

表 2 4 按原动机分用石油的热电并用系统的比较

系 统	柴油 机	燃气 发动机	燃 汽 轮 机
燃 料	灯油, A 重油	LP 燃气	灯油, A 重油, LP 燃气
功率范围	20~10000kW	20~10000kW	400kW
发电效率	30%~40%	25%~30%	15%~25%
总合热效率	70%~80%	70%~80%	65%~75%
设备价格	便宜	价高	价稍高
特 征	经验丰富 发电效率高	烟气腐蚀少	
主要利用领域	业务用	小规模~大规模的业务用设施 宾馆, 医院, 商店, 写字楼, 餐馆等	小规模业务用设施
	工厂	小规模~大规模工厂	小规模~中规模工厂

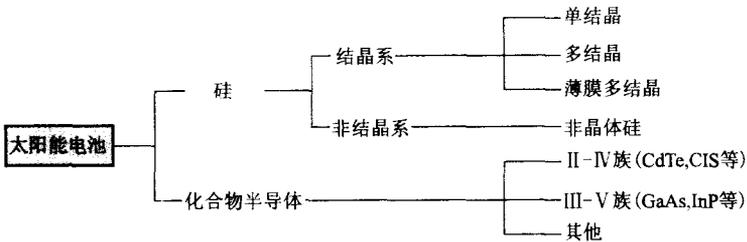


图 2 20 太阳能电池的分类

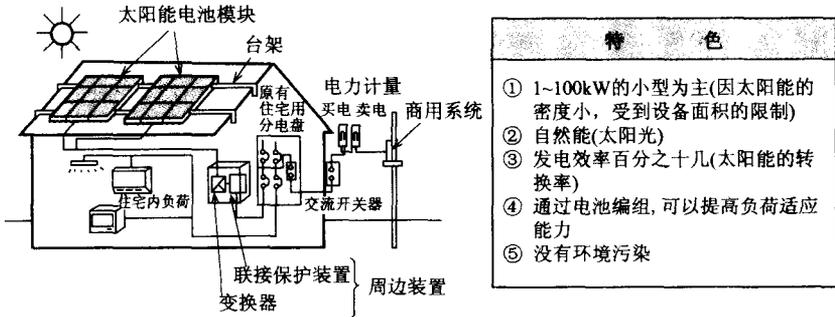


图 2 21 太阳能发电的概况及其特色

2.4.3 燃料电池

燃料电池是利用水的电解逆向原理开发的。具体来说，是用天然气等燃料中分解的氢和空气中的氧反应获得电能的直接发电装置。燃料电池，按电解质不同，有磷酸型、熔融碳酸盐型等种类。表 2.5 列出燃料电池的分类，图 2.22 是磷酸型燃料电池的示意图。

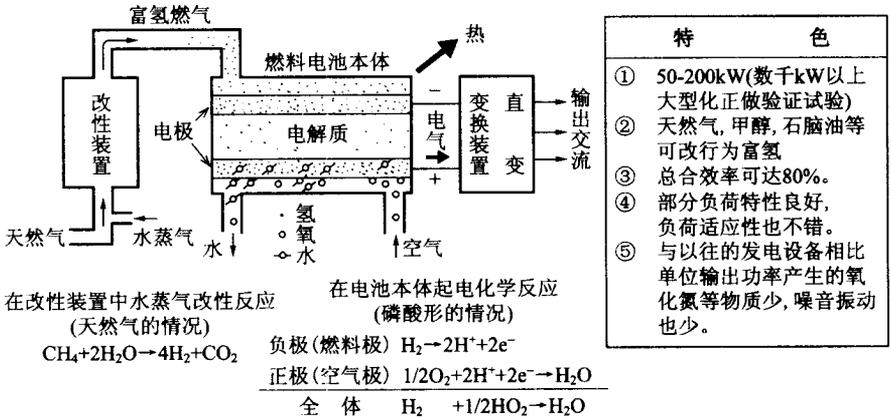


图 2.22 燃料电池发电系统的概要和特点

表 2.5 燃料电池的分类

	磷酸形 PAFC	熔融碳酸盐型 MCFC	个体电解质型 SOFC	个体高分子型 PEFC
电解质	磷酸	熔融碳酸盐	稳定化的氧化锆等	高分子电解质膜
电解质内的载体	H^+	CO_3^{2-}	O^{2-}	H^+
操作温度	150~220℃	600~700℃	900~1000℃	60~100℃
反应物质	氢	氢, CO	氢, CO	氢, 天然气
可能使用的燃料	天然气 甲醇 LPG 石蜡油 灯油	天然气 甲醇 LPG 石蜡油 灯油 煤	天然气 甲醇 LPG 石蜡油 灯油 煤	甲醇 LPG 石蜡油 灯油

	磷酸形 PAFC	熔融碳酸盐型 MCFC	个体电解质型 SOFC	个体高分子型 PEFC
电极	多孔质碳 (白金催化剂)	多孔质镍等 (不要白金催化剂)	氧化镍等 (不要催化剂)	
特征	<ul style="list-style-type: none"> 限制 CO 的含有率 使用白金催化剂 可以利用排热 	<ul style="list-style-type: none"> 含有 CO 也无妨 使用镍系催化剂 可以内部改质 可以利用排热 	<ul style="list-style-type: none"> 含有 CO 也无妨 不用催化剂 可以内部改质 可以利用排热 	<ul style="list-style-type: none"> 严格限制 CO 的含有率 因操作温度低材料选择范围很广而且启动时间很短 可以高电力密度启动, 可实现小型化轻量化
主要用途	<ul style="list-style-type: none"> 用于热电并用系统 用于分散型电气事业 孤岛型电气事业用 	<ul style="list-style-type: none"> 用于热电并用系统 用于分散型电气事业 用于代替火力电源(大规模) 	<ul style="list-style-type: none"> 用于热电并用系统 用于分散型电气事业 用于代替火力电源(小规模) 	<ul style="list-style-type: none"> 小规模发电用 用于分散型电气事业 用于可移动电源 用于输送用电源
系统发电效率	40%~45%	45%~60%	50%~60%	~60% (燃料电池本身)

2.4.4 风力发电

风力发电是利用风能发电机把风能转换成电能的发电方式。按风车的形式分为螺旋桨型、达里厄斯型等的形式。图 2.23 为风车的分类；表 2.6 为引用事例。

表 2.6 国内风力发电主要引用事例

运行主体	设置场所	容量/kW	台数	运行时间/年	备注
九州电力	冲永良岛	300	1	1982~1990	孤岛的供电实验
NEDO	三宅岛	100	1	1983~1986	实验研究
MHI	长崎市	250	1	1985~1987	实验研究
九州电力	甬岛	250	1	1990~	孤岛的供电实验
MHI	长崎市	250	1	1990~	实验研究
雅马哈	冲绳	100	1	1990~1991	实验研究

运行主体	设置场所	容量/kW	台数	运行时间/年	备注
濑户町	濑户町	100	1	1990~	农业用供电
NEDO	宫古岛	250	2	1991~	孤岛的供电实验
东北电力	龙飞岬	275	5	1991~	电力系统验证实验
中部电力	碧南火力	250	1	1991~	公开实验
北海道电力	泊	275,300,250	4	1993~	电力系统验证实验
东京电力	富津火力	300	1	1993~	新能源演示
立川町	山形县立川町	100	3	1993~	公开实验
松任市	石川县松任市	100	1	1993~	公开实验
四国电力	室户岬	300	1	1994~	供电实验
九州电力		250	1	1995~	
NEDO	龙飞岬	500	1	1995~	大型实验研究
关西电力		100	1	1995~	
东北电力	龙飞岬	275	5	1995~	风场

注：NEDO编写。

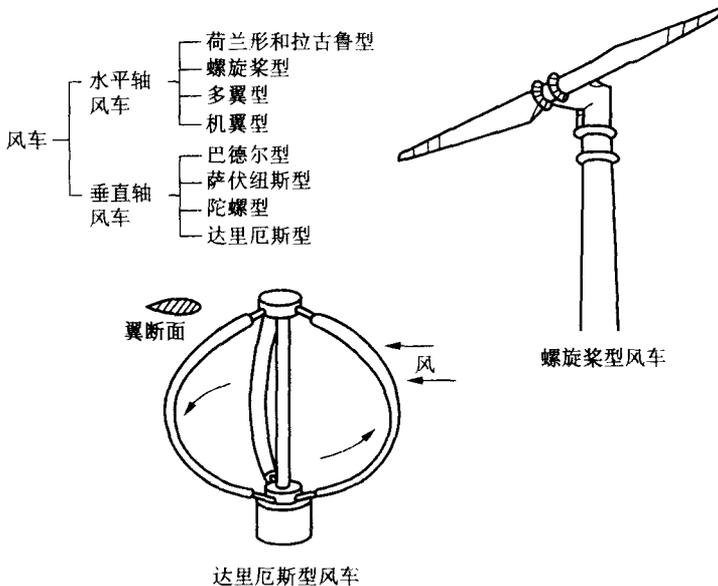


图 2.23 风车的分类

第 3 章 输电设备

供电设备中，联接电厂到用户有输电功能的设备，即架空输电线、地下电缆、变电所及其包括联接各部分的供电线叫做输电设备。输电设备像网络一样向各地区延伸，其设备年年增加，向大规模、大容量、高电压的方向发展。为适应这一趋势，输电事业广泛采用了高新技术。

本章学习组成输电设备的变电所、架空电线、地下电缆和供电线等各设备及其基本计划和设计方法，同时学习各类设备器具的使用目的、作用，以及包括功能为中心的最新技术的概要和现状。

3.1 变电所

3.1.1 变电所的种类

电力产业用的变电所叫做电力用变电所，有输电用和供电用两种。输电用的有升压和降压变压器，升压用的一般附设在电厂。独立的变电所里几乎都是降压用变压器。输电用变电所，分成 500kV、超高压、一次或中间变电所。供电变电所，是将输入的高电压降压成 6.6kV 的变电所。

3.1.2 变电所的选址

当选变电所的地址时，从系统的角度希望从用电中心到输供变电所相关联线路的距离最短。具体来说，选址要考虑当地的灾害历史、地形地基条件、设备搬运、输供电线的引入和引出等条件。设计上对周围环境的影响，还要与地方协调考虑城市规划等。最近从以上选址条件考虑，利用市区的高楼地下室作变电所的情况多了起来。

3.1.3 变压器容量及其单元数

变电所的总容量，是以考虑将来的需求和电源开发计划、输电线容量、输电系统的变更等来决定。这样一旦决定了总容量，就以它为基础决定变压器的容量和单元数。

这里所谓“单元”是用于变压的单位变压器群，单相变压器 3 台为一个单元，三相变压器则 1 台是一个单元。

1 输电用变电所

从长远观点出发，准确把握需求规模和地区开发的动向，考虑所建变电所在系统中的位置，协调引出输电线规模、系统联系、运行、维修等条件，决定变电所的规模，表 3.1 为标准选定单元数。具体来说，要依据设置在变电所一次侧、二次侧输电线的种类（地下线，架空线）及电压，决定单元数。不管什么情况开始设置的单元数原则上是两个单元以上。

表 3.1 输电用变电所的标准规模

地域	电压/kV	单元容量/MVA	最终单元数
地下线地域	500/275	1500	3
	275/154	450, (300)	3
	275/66	300, (200)	3
	(154/66)	(200)	3
	(154/22)	60, (45)	3
	66/22	60, (45)	3
架空线地域	500/275	1500, (1000)	4
	500/154	750	4
	275/154	450, (300)	4
	275/66	300, (200)	4
	154/66	200, (100)	4

注：（）内的数据在增设等情况下个别研究时适用。

2 供电用变电所

变压器的单位容量和单元数，是综合考虑二次系统和供电系统的经济

性、供电可靠性、电压下降、需求的增大、变电所、确保输电线用地、送供电线引出引入的难易程度、供电线路的道路状况、设备的动用计划等后决定。供电用变电所的标准规模，如表 3.2 所示。

表 3.2 供电用变电所的标准规模

使用地域	电压/kV	变电所规模
需求密度高地域	154/6.6	30MVA×3
都内及其周围,地方城市		20MVA×3
的城界地及近郊	22/6.6	10MVA×3
以上以外的地域		

新设置的单元，考虑一个单元停运检修，一般设二个单元为基础数，但在一个单元的情况下也和二单元一样能确保供电可靠性时，也有用一个单元的。

3.1.4 开闭装置

变电所的高电压、大电流的回路中代表性的开闭装置，有开关器（遮断器）(CB)、断路器(LC,DS)、空气绝缘开关装置(GIS)它们有系统切换、潮流的调整和隔离事故地、检修地等功能。

1 开关器

开关器是设置在变电所的电输入口、输供电线的输出口，变压器组的一次侧及二次侧，联结母线等的开关设备。

开关器通过开闭负荷电流，线路充电电流，变压器励磁电流等，运转或停止系统及变电所内的设备。而且在故障时，根据保护继电器的动作信号，切断短路电流、接地电流等故障电流。开关器有很多种类和形式，东京电力采用以下 5 种标准。

少油型开关器(PCB)由上下二段的电瓷瓶组成，下部电瓷瓶起绝缘作用，而上部的电瓷瓶消弧罐内灌满压力为 $5\text{kg}/\text{cm}^2$ 的绝缘油，切断电流时油中发生的电弧把油汽化，利用这油气的消弧作用和油气分离成球状切断电弧的作用进行灭弧，主要使用于供电用变电所的一次侧。

② 磁力断路器(MBB)用切断电流通过消弧线圈产生的电磁力，把

电弧引进用瓷做的消弧沟里，将它拉伸冷却消弧。开关器通常安装在供电用变电所的小房间里。

真空开关 (VCB) 是在真空度为 10^{-6} mmHg 的高真空管里切断电流，靠高真空绝缘耐力和电弧扩散作用进行消弧，它需要真空管的高真空技术。

目前电压在 6~154kV 范围采用的有，6kV 供电用固体绝缘小型封闭组合开关¹⁾、22kV 供电用固体绝缘小型封闭组合开关和调相设备用封闭组合开关、66kV 及 154kV 供电用变电所配电用超级封闭组合开关²⁾。

空气开关 (ABB) 用高压压缩空气吹灭电弧，因此常用于高速切断、短路及充电电流的场合。也适应于切断联结单元的高电压、大电流，广泛使用于 66~500kV 范围。

⑤ 气体开关 (GCB) 使用消弧能力强的 SF_6 (六氟化硫蒸气) 蒸气吹灭电弧，可以高速遮断，开关容量也大，还有噪音低、耐震及维修方便的优点，广泛适应于 66~500kV 范围。有时也可作成小型开关器。

2 刀 闸 (LS, DS)

刀闸只能用物理的方法开闭充电电路，不能开闭负荷电流。其种类有称做 LS (三相刀闸) 和 DS (单相刀闸) 的二种，是按相数和操作方式区分的。

LS 是拨动操作机构同时开闭三相电。它附设连锁装置，故只能在与此关联的开关在开放状态下进行操作。DS 是用带勾的绝缘棒，一相一相开闭，东京电力变电所几乎已以 DS 替代 LS。刀闸开关的使用目的如下：

检修设备时为了确保安全，停电部分从电源隔离。

输电系统的切换。

开闭比较小的线路充电电流和变压器励磁电流及小环封闭电流。

3 气体绝缘开关站 (GIS)

气体绝缘开关站 (GIS) 是变电所的设备中，开关器、刀闸、接地装置、仪器用互感器、避雷器等变压器以外的设备，装入接地的金属容器里，其空间

1) 用有良好绝缘性的环氧树脂，完全模压充电部的可靠形高的小型设备，东京电力称其为小型封闭组合电气。1969 年在 22kV 中使用 1971 年在 6kV 中使用。

2) 为缩小供电用变电所的占地面积和增强环境调和以及缩短工期等，66kV 受电用开闭装置和变压器作成一体，东京电力称其为超级封闭组合电气。自从 1974 年实用化以来进行数次改进，1985 年以后开闭装置使用蒸气 (氟化硫蒸气： SF_6) 绝缘的蒸气超级封闭组合电气。

充填 SF₆ 气体密封，带电部分全然不能外露的保护装置。这个保护设施，占用较少的空间有效利用变电所用地，还调和了周围环境等，还有确保安全性、维修方便、保证高性能、减少现场工程量以及缩短工期等优点。东京电力在 66~500kV 的范围内广泛使用。

● 3. 1. 5 调相设备

电力系统要安全运行，必须结合每时每刻变化的负荷状态，供给适当的无功电力。无功电力的供给方法有两种，一种是根据发电机运转情况决定，另一种是根据调相设备情况决定的。调相设备一般设置在系统的中心输电变电所，但最近为保证电压稳定，部分变电所也设置此设备。

调相设备大致分为静止调相器和回转调相机。以往从维修方便和经济性出发，利用电力用电容器和分路电抗器，进行阶段性的无功电力控制。最近从系统的稳定性考虑，把可控硅的无功电力补偿器（SVC 和同步调相机，设置在占据电压稳定作用的超高压以上的部分变电所中，可高速的、连续控制无功电力。

● 3. 1. 6 避雷装置

电力系统中有因落雷和开关器及刀闸的开闭所产生的冲击电流造成电压异常。尤其落雷引起的电压异常达平时的数十倍，要承受这样大的电压是困难的，也是不经济的。因此，在变电所设置避雷器、架空地线、保护罩、冲击电流吸收器等避雷设施。尤其避雷器的作用更为有效，最近开发了使用氧化锌（ZnO）材料的高性能避雷器，取得可以降低设备绝缘的好效果。

● 3. 1. 7 继电保护装置

电力系统以变电所为站点，用很多输电线形成网络。因此，系统一旦发生故障（接地、短路、断线）将严重影响到整个系统还要损伤设备。为此在变电所应及时检测出故障地点，迅速将故障从系统中隔离是非常重要的。检测确定故障地点，从系统隔离，就需要发出开关器的切断命令，继电保护装置担负这个任务。

继电保护装置是通过设置在变电所内各处的计量用互感器，用它读取故障电压电流，判断故障的种类和地点。其按结构大致分成电磁机械型、半导体型、微型型，最近使用微型型成为主流。

3.1.8 变电所引出线路数

1 输电变电所

输电线的输电容量，是根据系统的联系能力、输电线的利用率，和适应变电所的规模而选定的。

2 供电变电所

为适应供给范围，以供电线容量、变压器单元容量承受合适的负荷为前提，最终决定引出线路数，而单个变压器容量的最大引出线路数示于表 3.3。

表 3.3 供电线最大引出线路数

击穿容量 /MVA	最大引出线路数	
	600A 系统	300A 系统
20	8	—
10	6	7

3.1.9 接线方式

变电所的接线，是组成变电所各种设备之间的相互联接，即变电设备和输电线以及供电线之间的相互联结。为了发挥电力系统的最大的功能，特别注意下列事项。

确保正常运行、维修的安全。

接线尽量简单，但最大发挥其性能。

万一发生事故，其影响限制在最小范围的同时，可迅速进行负荷切换操作。

设备的停运，对整个系统没有太大的影响。

今后容易进行增容改造工程。

⑥ 有利于经济效益。

1 输电变电所

输电变电所应具有很高的可靠性，一般如图 3.1，采用由母联开关联接

的双母线联接方式为标准。输电线也要一个通道配二条线路，通常采用 1 号线联接甲母线，2 号线联接乙母线的 1 甲、2 乙形式。变压器也同样 1 号组接甲母线，2 号组接乙母线。

特别重要的 500kV 变电所、超高压变电所，采用如图 3.2 把母线进一步分割成双母线 4 分段方式。

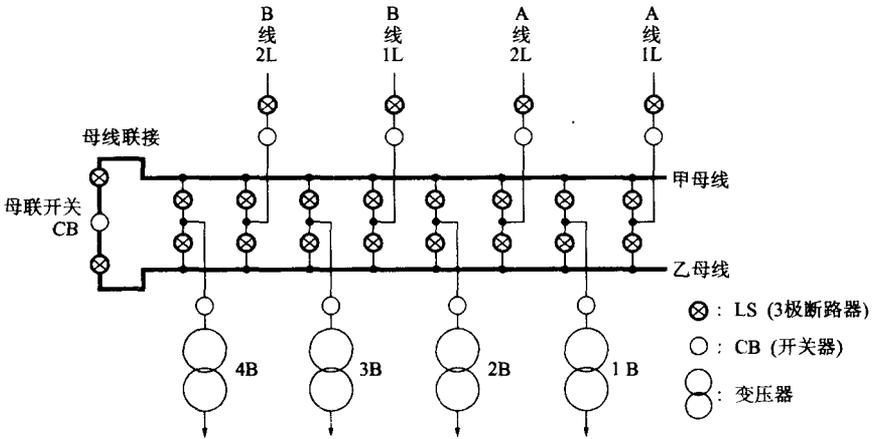


图 3 二重母线 1 母联开关方式

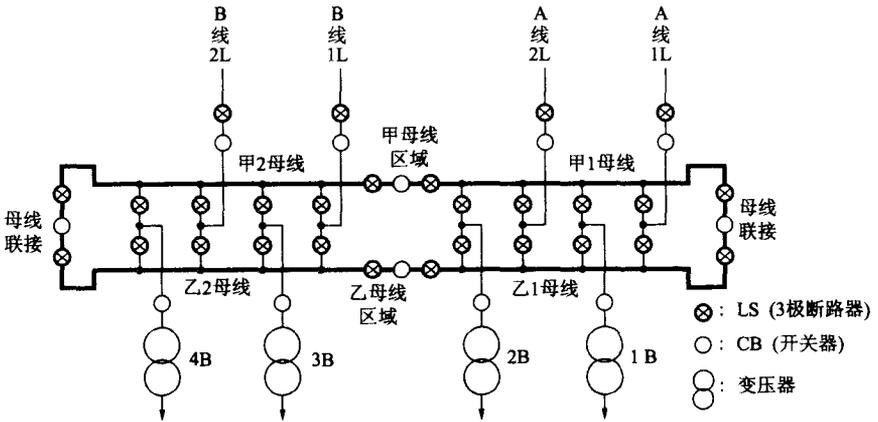


图 3.2 二重母线 4 母联开关方式

单母线方式，只在输电线路数少，系统切换操作可能性少的变电所和屋内及地下变电所中，联接线路为地下线路的单元系统中采用。

2 供电变电所

一次母线原则上，2 线路配电场合采用如图 3.3 所示的单母线形式，地下线路单元（二次）系统的配电场合采用如图 3.4 所示的省略母线形式。

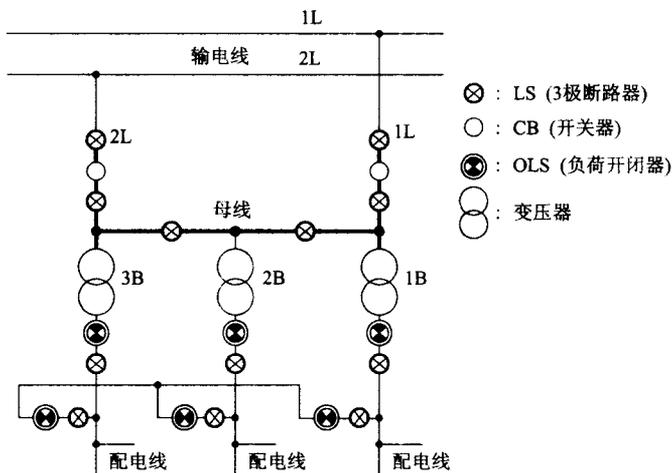


图 3.3 单母线（二线路供电）

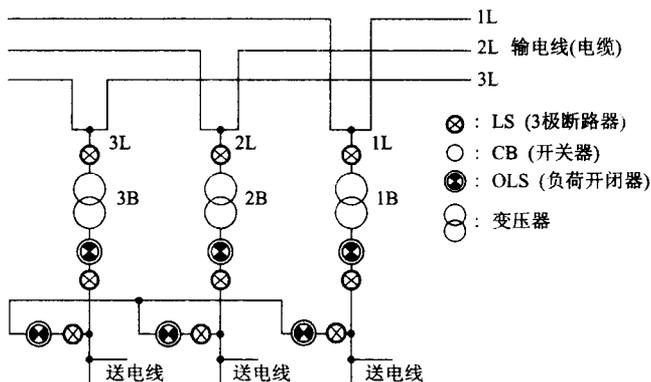


图 3.4 省略母线（地下线路系统）

二次母线原则上是单母线，各单元间设侧路母线，侧路母线用于因事故或检修等停止二次系统的场合使用，平时不使用。

● 3.1.10 变电所的形式

变电所按其形式分类成屋外式、半屋外式、半屋内式及地下式。

屋外式变电所，是把主要变压器、开关设备等主要设备，全部设置在屋外，只有配电盘等控制设备安放在屋内，虽然用地面积多，但设备布置井然，工程费也便宜。

② 屋内式变电所，是主要变压器、开关设备等主要设备全部安装在屋内，虽然用地面积小但建筑工程费用高。

半屋外式变电所，主要变压器放屋外，其余主要设备的部分或全部安放在屋内。

半屋内式变电所，主要变压器安放在屋内，其余主要设备的部分或全部放在屋外。

⑤ 地下室变电所，城市中心部等地方，因占地困难，在高楼地下室、公园等地下设置主要变压器和所有主要设备。这种场合，变压器的冷却设备及监视设备，应尽量设置在地上。

● 3.1.11 强烈地震对策

地震由时间的位移、速度、加速度来表示，工程上多用加速度。加速度的单位有 gal (伽)($1\text{gal}=1\text{cm/s}^2$)和 G (重力加速度)($1\text{G}=980\text{gal}$)。抗震设计时，一般取地震加速度 $300\text{gal}(0.3\text{G})$ 地震频率 $1\sim 10\text{Hz}$ 。

1 变电设备的抗震设计条件

参考过去的地震情况，地表面水平加速度抗地震强度为 0.3G 对垂直地震力在结构上有特殊需要的设备一般取水平加速度的 $1/2$ 。

对设备的抗地震设计，一般取水平加速度 0.3G 、共振正弦 3 波、设备的固有振动频率在 $0.5\sim 10\text{Hz}$ 范围 (共振正弦 3 波 0.3G 就意味着设备的固有频率为加速度 0.3G 正弦波 3 个周波)

另外要确认设备的抗震性，把设备放在振动台上进行加振试验，这时试验地震力，对绝缘子形设备，在底座下加 3 个 0.3G 共振正弦波；对变压器，是在瓷瓶套管下段加 3 个 0.5G 共振正弦波，对变压器本体则只加水平加

速度 0.5G。

2 耐震对策的现状

对设备的耐震对策，主要采用强化设备零部件和降低应力的方法，具体来说，为降低薄弱的瓷瓶根部安装部的应力，强化瓷瓶（增加胴径，强化凸缘，采用高强度瓷材料）和安装瓷瓶支撑杆（从中部 2 或 3 方向支撑）加强底座支板等。

为降低发生的动应力，采取在瓷瓶支撑部附加阻尼器和变压器本体安装时加防震橡胶垫等措施，同时采取对中卡紧瓷瓶，强化金属件连接，防止部件错动等强化措施。

另外，对设备安装来说，加强基础螺栓的强度和取宽松的设备间距是要注意的共性问题。

3 高耐震性设备

最近，随着气体开关、氧化锌性避雷器、气体绝缘开闭装置（GIS）等新形设备的逐步普及，促进了设备的轻型化和耐震性措施的提高。

3.2 架空输电线

3.2.1 输电电压

要高效率的输送大功率电，有效的方法是提高输电电压。输电线的输电电压，正逐渐增高。日本在 1887 年东京电灯（株）以 210V 开始供电，1899 年群山绢丝会社，从远离 22km 的沿上发电所（300kW）以 10kV 的电压输电，1911 年猪苗代第一发电所（容量 35700kW）开始往远离 225km 的东京田端以 110kV 电压远距离输电，还有龙岛发电所（20000kW）和户冢变电所之间 285km 的距离以 154kV 电压输电线输电。

近几年考虑用电量进一步增加和电源的大容量化及土地的有效利用等，正逐渐增大输电容量。经过输电电压 275kV 后，到了 1973 年东京电力的房总线用 500kV 电压开始输电，并陆续在全国的主干线系统普及 500kV 电压输电，目前为往更远距离输送更大功率，进一步减少输电损失，东京电力正在建设 1000kV(UHV)输电线。

3.2.2 通道的选定

通道的选定按以下步骤进行。

计划的制定 根据当地的长远需求，计划在什么地方、什么时间需要多少电力，并落实新建或改增建的输电线规模、区间、时间等。

确定工程计划 对选定输电通道，从经济性和维修等方面考虑进行设备计划和工程计划。

通道选定方案 考虑地区的开发、法规、地质、气象等，按复线通道，对重要地点和环境问题进行调查。

选定基本通道 结合通道方案，审查与输电线交叉的公路、铁路、河川等，对全通道进行机上空考察后，进行实地勘查。

⑤ **决定基本通道** 根据实地勘查，认真考虑经济性、施工性、用地费用等，决定最合理的通道。

3.2.3 线路数的选定和支持物的设计

1 线路数的选定

交流三相三线式的线路是以三相为单位的，这三相组数为二的场合构成双线路。线路数应确保一线路故障或一线路作业时也能正常供电，又考虑维修方便等以双线路作为标准。

在输电容量、经济性、地域环境（电压、电线种类、规格、电株等）设备可靠性等综合考虑的基础上，也有选择4线路、6线路的。

2 支持物的设计

支持物间距，电线间距 带电部和铁塔之间的间隙，在考虑电线的风摆、冰雪跳蹦（电线上的雪下落时的反作用跳动）等基础上决定水平和垂直距离。

② **铁塔的基本形状和规格尺寸** 斟酌上述情况，从经济上考虑决定结构设计、工程施工、维修等。

基础开度（铁塔从地面树立部的构造物宽度）要考虑铁塔的种类、高度、基础的种类、地形状况来决定，但近年多数视征地情况来决定。

塔体宽度 托架的安装部位和腰部部位的宽度，应考虑托架的宽度和附属件的安装及其重量平衡等，同时考虑结构的经济性。

⑤ 电线的弛度及地上高度 电线的弛度，是与电线架设时间和电线的种类有关，将影响电线的地上高度，是决定铁塔高度的很重要的因素。电线的地上高度按电压，以及按通道地域情况，在有关电气设备技术标准中作了具体规定。

⑥ 上下线路间的间隔 在铁塔上支持有上线路下线路电线的场合，要考虑塔上作业维修方便以及上下线的温差进行设计，确保必要的间隔。

⑦ 铁塔高度及其支撑点的高度 考虑铁塔之间的跨度、相邻铁塔间的高度差、电线的地上高度、铁塔的限制高度、地域情况等，进行纵断设计，最后决定铁塔高度 图 3.5 图 3.6)。

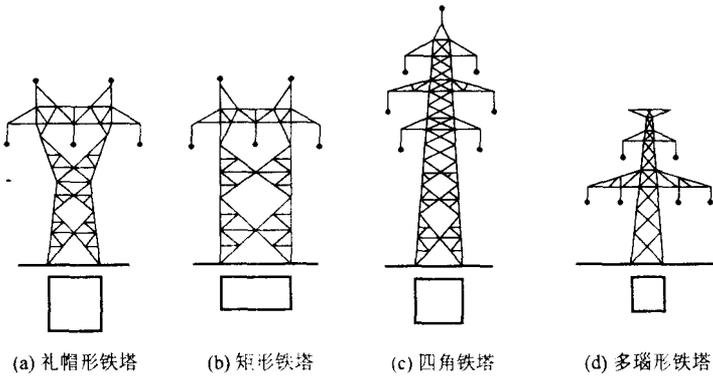


图 3.5 标准铁塔结构

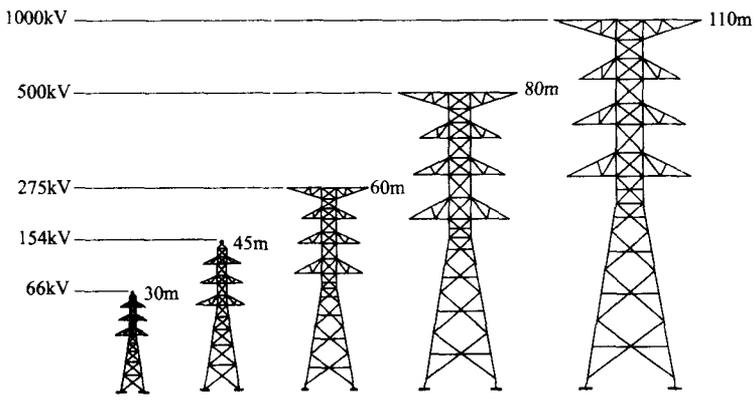


图 3.6 按电压分铁塔高度

● 3.2.4 选择电线

1 选择电线种类

架空输电线使用裸线，从低消耗性、安全性、施工性、经济性等考虑，应具备下述条件。

低消耗性：导电率要高。

安全性：要有足够的机械强度和耐久性。

施工性：架线和维修容易方便。

经济性：重量轻价格低。

基本具备以上条件的，有钢心铝绞线和铜线，从经济上考虑钢心铝绞线比铜线好，因此广泛使用钢心铝绞线。

2 电线直径的选择

现使用的钢心铝绞线（ACSR）和钢心耐热铝合金线（TACSR）的标准电容量，按粗细列于表 3.4 上。

表 3.4 输电容量(夏季连续)

电线种类	面积 /mm ²	许容电流*/A (电线温度 90℃)	电线种类	面积 /mm ²	许容电流/A (电线温度/150℃)
A	810	1238	T	810	2007
	610	1044		A	610
B	410	830	C	410	1324
S	240	593	S	240	933
	160	454	R		

* 电流通过电线时，由于电阻发热电线的温度比周围的温度高。电线的温度超过一定的限度，就影响电线的诸性能，比如抗拉强度下降等，因此，电线的电流不能超过影响其性能温度的电流，这时的电流称做许容电流。

$$I = \sqrt{\frac{\left\{ h\nu + \left(h_r - \frac{w_s}{\pi\theta} \right) \eta \right\} \pi d \theta}{k\beta R}} \quad \text{屋外的情况}$$

$$I = \sqrt{\frac{(h_r + h_r \eta) \pi d \theta}{\beta R}} \quad \text{屋内的情况}$$

$$h\nu = \frac{0.00572}{(273 + T + \theta/2)^{0.123}} \cdot \sqrt{\frac{V}{d}} \quad \text{对流热散射系数}$$

$$h_e = 0.00035 \cdot 4 \sqrt{\frac{\theta}{d}} \quad \text{对流热放散系数 (无风的场合)}$$

$$h_r = 0.000567$$

$$\cdot \frac{\left(\frac{273 + T + \theta}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + T}{100} \right)^4}{\theta} \quad \text{对流热散射系数}$$

I	A	许 容 电 流	θ	℃	相对于周围温度的温度上升
R	Ω/cm	$(T+\theta)$ ℃ 时直流电阻	T	℃	周 围 温 度
w_s	W/cm^2	日 射 量	η	---	辐 射 率
V	m/s	风 速	β	---	表 面 效 果 系 数
d	cm	导 体 内 径	k	---	铁 损 系 数

图 3.7 许容电流计算式

3.2.5 导线分裂方式的选定

在 154kV 以下输电线路一般使用单导线，用单导体输电容量不够时，也有使用双分裂导线的。275kV 的场合，考虑冰雪灾害、电晕障碍、电晕障碍、风噪音障碍等诸条件，包括输电损失的经济性，综合考虑决定。一般增加导线数则可增加下雪、电晕、风噪音等障碍，但也有以下优点。

与截面积相同的单导体相比，多导体电流容量大，因此可增加短中距离的输电容量。

由于电线表面的电位倾度下降，电晕初始电压升高，可防止电晕障碍，确保稳定性。

表 3.5 列出按电压配列导体数的例子。

表 3.5 按电压分导体数

电压/kV	电线截面积/mm ²	导体数
100	610, 810	8
500	410, 610, 810	4,6
	1520	4
275	410, 610, 810, 1520	2,4
154	610, 810	1,2
	240, 410, 1520	1
66	240, 410, 610, 810	1

● 3.2.6 转相塔

为防止因三相输电线没有按正三角形配置而引起的电感和电容的不平衡现象 设置转相塔(表 3.6 图 3.8)。

表 3.6 电线排列例

排列	一线路	二线路
三角排列	○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○ ○
水平排列	○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○ ○
垂直排列	○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○ ○

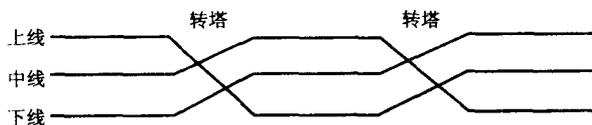


图 3.8 转相塔

● 3.2.7 接入方式

输电线路联接于发电厂之间、变电所之间、发电厂和变电所之间。变电所或高电压用户接入高电压时，从高压线路接入。

其接入方式有 T 接入方式和 π 接入方式。

T 接入方式 是从一个输电线路的中途接入其他输电线路，因其接入的形态就像 T 字型就称做 T 型接入，分成单线路和双线路接入。这种方式因直接与输电线直接接触联接，因此一旦发生固障，其系统全部停电，有事故波及范围广的缺点。

② **π 接入方式** 这种接入方式是接入的地方通过变电所接入到各自的输电线。这种接入形式与 π 字相似 因此称做 π 接入方式，分成单线路接入和双线路接入。这种方式即便发生事故，接入的输电线路是各自不同的系统，有事故限定在一定范围内的优点。

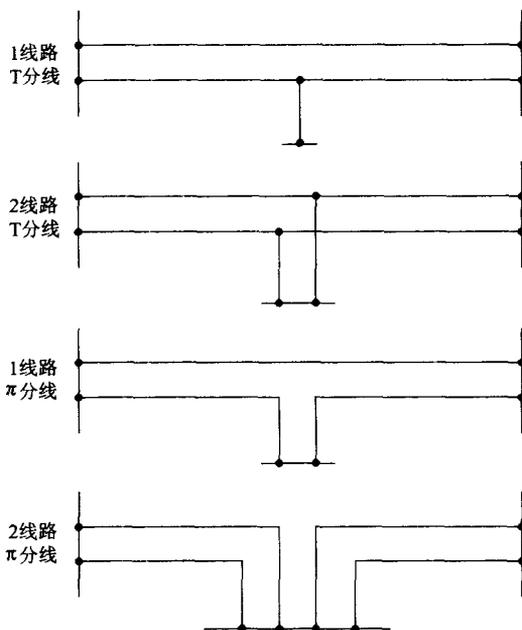


图 3.9 2 线路的 T 分线和 π 分线

3.2.8 故障点测定装置

故障的早期发现，以往主要靠在变电所设置的 FI(故障地点探测器)或安装在支持物上的避雷器进行的。最近，不单独使用 FL 装置，当只用 FL 不太可靠的输电线路中，设置输电线路故障区间测定装置进行测定，故障测定装置的分类如图 3.10 所示。

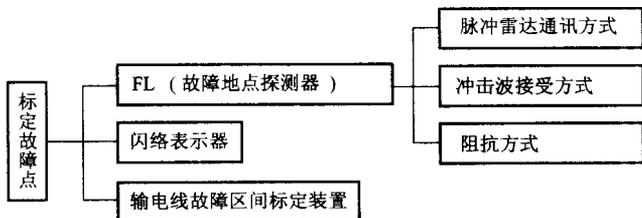


图 3.10 故障地点测定装置的分类

① **FL(故障地点探测器)** 输电线发生故障时，为迅速发现故障地点，利用故障冲击电流从故障点到达对方输电线路两端的时间差，计算距离确定其故障地点。其中最一般的受信方式是，两端变电所检测冲击波形，从到达的时间计测故障地点。但是，冲击波在长距离传递中，有畸变波形和有输电线路接入口的冲击波反射，造成严重衰减，有时无法测定。

闪络表示器(雷击测试器)铁塔的支架下安装闪络表示器，雷击时飞出红布来显示。这是利用雷击电流通过线圈时，产生一定的电磁力作用动作表示的。

输电线故障区间的测定装置 故障时流过架空地线的诱导电流，由联接架空地线的多个点的 CT(变流器)检测，测定出电流方向和电压的信息，通过计算机处理测定事故发生的瞬时区间，测定的信息传到维修所的显示屏上。安装在接入地和远距离输电线路中的 CT 指出事故区间，可争取迅速恢复供电。

3.2.9 OPGW 的适用探讨

为确保电力的高品质化和稳定供电提高经营效率，而实施的电力设备自动化和操作机械化等就必然带来信息量的增加，为传输大量信息，采用

OPGW(Composite Fiber Overhead Ground Wire 光纤复合架空地线)

这个 OPGW 是把光纤内藏在架空地线内，由传送光信号的部分和其外侧的铝包钢线的地线部分所组成。

输电线路上架设的 OPGW 是因其施設形态上的坚固，能经得住不断受灾，比另架光缆引起的事故少，有确保远距离通信的优点，担负着促进 DNS (Digital Network System : 数字网络系统) 发展的重要作用。图 3.11 表示 OPGW 的 (典型) 标准结构。

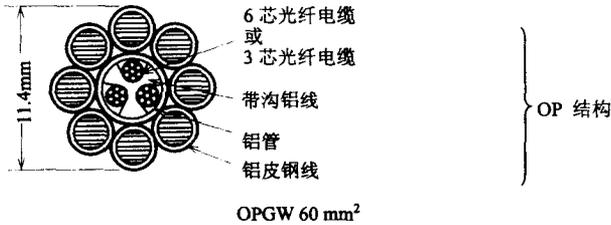


图 3.11 OPGW 电缆的典型结构

3.2.10 障碍

UHV 输电设备的建设和输电设备的大型化及大容量化的发展，引起输电线的各种障碍致使经常关闭线路。对于这些问题和课题，正在深入研究，但其内容日益复杂化，同时解决的方法也不断增加。

因此在建设输电线中 要认真注意遵守电气设备技术标准 112 条。

1 诱导障碍

输电线和通信线的设置接近时，受输电线电压和电流的影响，通信受干扰而给操作者造成的危害称做诱导障碍。诱导障碍有电磁诱导和静电诱导两种障碍，对它们的对策是，尽量拉开输电线和通信线之间的距离，架设铁塔或输电线和通信线之间施設屏蔽。

2 无线信号障碍

输电线引起的电波障碍，有电视障碍和电晕障碍。

电视障碍是，从电视发射塔发射的直接波和输电线反射的反射波，

同时射入电视的天线时，因其各波到达的时间不同，电视图像重影，这是最典型的障碍。此外，电视无线信号发射地和电视天线之间，因输电线的屏蔽造成电视信号减弱，影像不清楚的障碍。

为解决这种障碍，通常使用公用天线，采用地域性共视听听的方法。

电晕杂音，是用比较细的电线高压输电时，其表面电位梯度超过空气的绝缘耐力，便产生电晕放电，致使输电效率下降，连附近的收音机收听也受到障碍的现象称做电晕杂音。

3 环境障碍

说到环境障碍，就能想到风噪音和电晕噪音。

风噪音，是指风吹打电线时，电线的下方产生卡曼涡旋风，发生的噪音。应采用低噪音电线（电线带有突起物）等的措施进行消音。

电晕噪音是前面说过的随电晕放电发生的噪音，通常用一般控制噪声的方法进行消音。

4 电磁场 (EMF)

电磁场 (EMF: Electric Magnetic Fields) 问题是输电线产生的电磁场对人的健康是否有影响的问题。据世界卫生组织 (WHO) 的环境保健标准 电场在 10kV 和磁场强度在 50Gs 以下，对健康没有影响。电力设备产生的电场和磁场分别为 3kV/m 和 0.2Gs 以下，对健康可以认为毫无影响。

日本于 1993 年由通商产业省资源能源厅提供的报告书中指出“在居住环境中产生的商用频率磁场，对人的健康有害的证据不足，而且，居住环境的实际磁场强度，比世界卫生组织 WHO 筹的数字低得多”。最近于 1996 年全美科学院作出的结论是“至今的研究没有发现电磁场对健康有害”。

3.3 地下输电线

在城市施設架空输电线一般较困难，因此现正在发展马路地下埋设地下输电线供电。地下输电线几乎不受风雨等自然环境的影响，供电可靠性高且使市容美观。但是，其工程费用比架空输电高 10~20 倍 并且事故修复时间也较长。

近几年随着城市的发展，从安全、美化地区环境、经济性等方面考虑，架空输电线的难度比较大，因此与技术的进步相适应正在扩大和发展地下输电线。

3.3.1 地下电缆的敷设方式和使用电压

地下输电用电力电缆，需要有容纳电缆的通道。一般采用马路底下挖电缆地沟埋设的直接埋设法；还有利用事先埋设的管道贯通的管路布方式和构筑人也能行走的地道（隧道）布设电缆方式等。除此之外在大城市，有与电话电缆、水道等一起埋设的共用地道（图 3.12）。直接埋设法，要更换电缆时，还要刨开地沟施工，很麻烦，故现在很少使用。

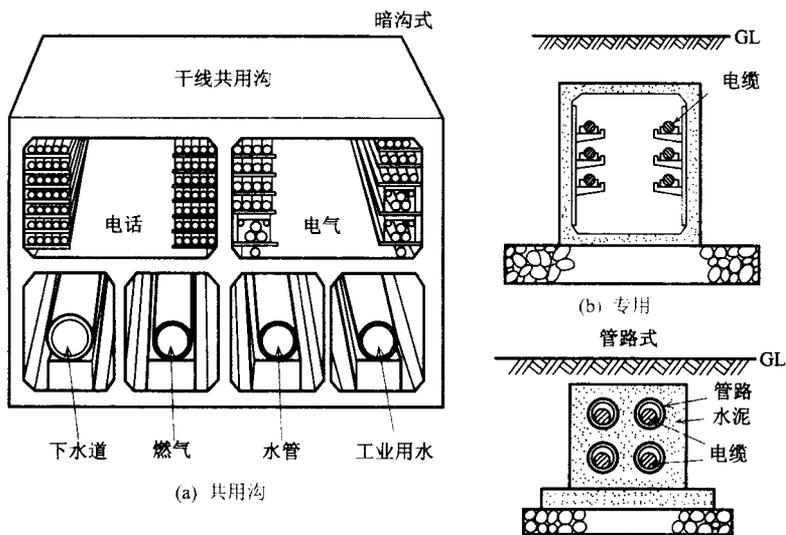


图 3.12 地下电缆的布设方式

地下输电线的输电电压，随着电力需求的增加和有关大容量输电技术的发展，从开始实用 6kV 电压起，经过 22kV、66kV、154kV 电压，目前在主干线输电线已使用 275kV 电压，已形成 275kV 输电系统的电力网。近年，随着容量的进一步增大，已面临必需采用 500kV 地下输电线的时候了。

3.3.2 选定地下输电线的通道

城市的各种埋设物(电气、煤气、自来水、电话、下水、地下铁路等)的过密化,选定地下输电线的通道一年比一年困难。因此,必须与地方城市规划、道路调整规划(道路工程调整)共用隧道整备规划协调选定。

3.3.3 电力电缆及其附件

按电力电缆的绝缘方式大致分为;

使用油纸绝缘的。

使用聚乙烯和橡胶等高分子材料绝缘的。

使用 SF₆ 等气体或支持导体的衬套绝缘的。

其他。

属于油纸绝缘的主要电缆,有油浸电缆(略称 OF 电缆)高压油管电缆(略称 POF 电缆);用高分子材料作绝缘体的代表有架桥聚乙烯绝缘电缆(略称 CV 电缆)(图 3.13 图 3.14)。还有特殊的电缆及大容量输电的 SF₆ 气体做绝缘体的气隙衬套管路电缆。除外超导电缆,还有直接冷却导体内部的内部冷却电缆。



单芯方铝皮 OF 电缆

图 3.13 单芯 OF 电缆

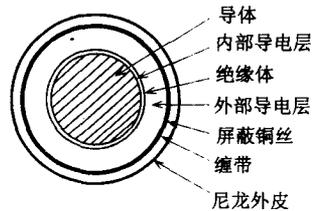


图 3.14 单芯 CV 电缆

电力电缆的联结附件,有与其他设备联接的末端联结部和电缆之间联接的普通联结部;单芯电缆中绝缘两侧金属外皮的绝缘联结部;有 OF 电缆的防止电缆内绝缘油流动的止油联结部等。另外,在 OF 电缆中,有在末端

注绝缘油和加压绝缘油的加压装置，还有油压监视器和警报装置。

这些联结部应具备的性能如下：

具有与电缆同等的绝缘性能。

具有承受使用条件下发生的力和振动的能力。

通电时联结部的温度不能超过电缆的温度。

不能影响电缆材料的性能，且耐久性好。

3.3.4 冷却方式

为了提高地下电缆的输电容量，需要冷却（强制冷却）电缆在输电中产生的热 这在 275kV 以上电缆系统中已被采用。

强制冷却，有从电缆外部冷却的外部冷却方式和导体内部冷却的内部冷却方式。另外按电缆布设方式、电缆种类、冷却介质的种类不同，其冷却方法也不同。强制冷却方式的实用例见图 3.15,隧道内电缆槽中用水间接冷却的方式在远距离线路中广泛被采纳。

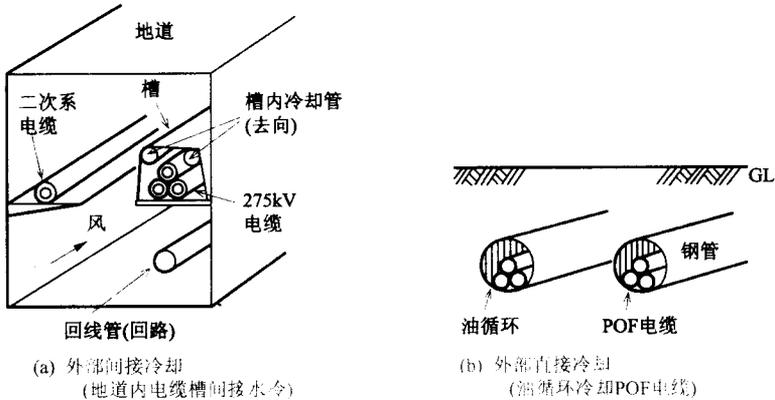


图 3.15 电缆冷却方式的种类

3.3.5 地下电缆异常信息处理

地下电缆的异常信息，有 OF 电缆的注油装置异常信息；有架空输电线和地下输电线混成系统中设置的故障地点检测装置的信息；有隧道里泵等附属设备的信息；还有强制冷却设备的信息等，多数为维修、管理需要的信

息。为此，现采用从远方控制监视装置检测到的信息传递到设备检修处所的显示器上表示并打印的监视系统。

3.4 供电线

供电线路，在电气事业法施行规则第 1 条中规定“供电线路，是指发电所、变电所或者输电线路和设备之间以及供电设备相互间的线路及其附属开关所的其他电气工作物”。

3.4.1 电压和供电方式

供电线实用的电压，在“关于电气设备技术标准制订的省令”中，有如表 3.7 所示的区分为低压、高压、超高压三种。

表 3.7 供电线电压（交流）等级

区分	电 压 区 分
低压	600 伏以下
高压	600 伏以上 7000 伏以下
超高压	7000 伏以上

这些电压等级，是从危险性和实用性两个方面考虑决定的。

供电线路的供电方式，使用交流方式，可以分成单相和三相。高压以上和低压动力用三相三线电，其每一条线路的输电能力比单相二线式的大，并容易形成旋转磁场，有利于旋转机械使用等，因此，通常使用三相三线式。

具体的供电方式电压如表 3.8 所示。

3.4.2 电压下降幅度

低压用户的标准电压在电气事业法施行规则第 44 条中规定了电压的幅度范围。电压下降的计算一般用下式求其幅度范围，并进行管理。

图 3.16 表示的高压供电线路的电压下降 $V(V)$ ，可用下式计算 对输电端电压为 V_s 的受电端电压 V_r 也可用下式计算。

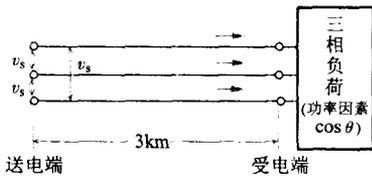


图 3.16 高压线路的电压下降

$$v = \sqrt{3}I(R\cos\theta + X\sin\theta)$$

$$V_r = V_s - v$$

这里, R 为一根线的电阻 (Ω/km), X 为一根线的阻抗 (Ω/km), $\cos\theta$ 为功率因素, I 为高压电流 (A)。

表 3.8 供电方式和电压

电压区分	供电方式公称电压	标准的适用等级
22kV	三相 3 线式 22000V	适用于主要城市中心部的超高密度负荷地区、大规模工业园区、高层住宅等的供给方式
高压	三相 3 线式 6600V	高压供电线的供给方式
低压	单相 2 线式 100V	主要供给小电灯的供电方式
	单相 2 线式 200V	电焊机、X 光机等特殊单相负荷用电供给方式
	单相 3 线式 100/200V	一般照明供给方式
	三相 3 线式 200V	主要小型动力用电供给方式
	三相 4 线式 100/200V	主要用于繁华街、市区等一般用电供给方式
	三相 4 线式 240/415V	主要用于城市中心部超高密度地区适用 2200V 电压的供给方式

3.4.3 系统构成

1 高压供电系统

高压供电系统的分类, 可分放射状式和环状式, 一般使用放射状方式。

放射状式如图 3.17, 从干线根据负荷的分布, 按放射状接入的方式。这种方式工程费用低维修也简单, 易于适应需求。事故时为尽量缩小停电范围线路的途中设置区分开器(常闭)或邻接的其他供电线间设置联系(联接)用开器(常开)以隔离事故区输电的方式。

环状式见图 3.18, 线路的形状成环状, 线路间设置联系开器联接的方式。事故发生时, 有启用联接开器逆送的常开方式和常闭状态的常闭方式。这种方式可靠性高、电力损失和电压下降也小, 但建设费高保护方式也很复杂。

2 低压供电系统

低压架空供电系统,一般以图 3.19 所示放射状方式作为标准。城市内超高密度地区的部分地区,采用 22kV 地下供电方式的低压一般网络方式(图 3.20)。另外,为了减轻闪络,采用电杆上变压器的二次侧并联的供电变压器方式。

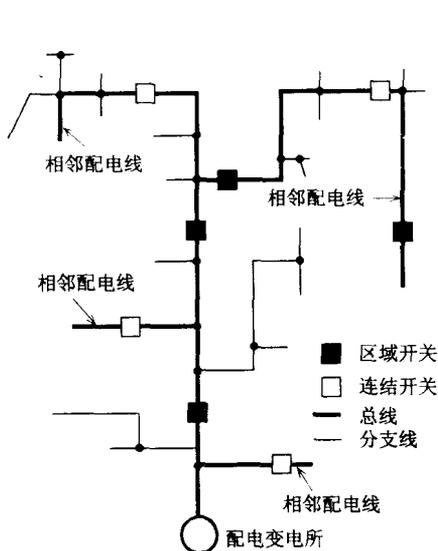


图 3.17 高压树枝状配电方式

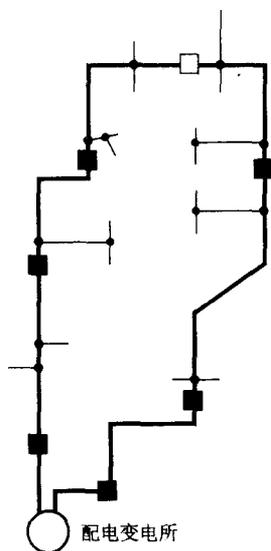


图 3.18 高压环状配电方式

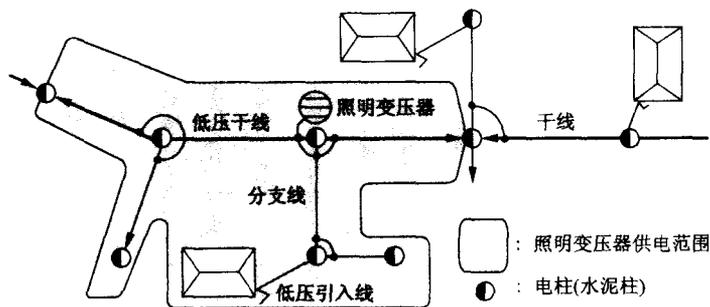


图 3.19 低压架空供电方式

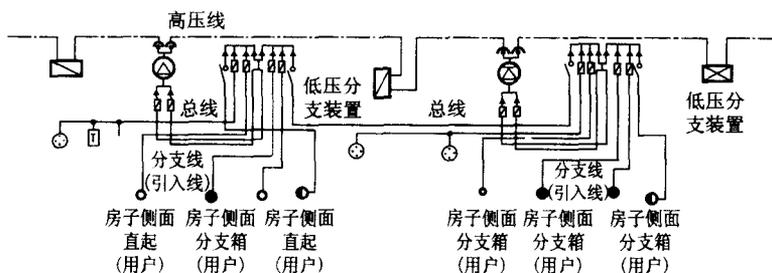


图 3.20 低压地下供电方式

3 22kV 供电系统

对城市内过密地区的大用户（契约电力数百 kW~10000kW 以下）供 22kV 电，其供给方式有一线路方式和有本线、备用线方式以及环状方式，但从可靠性考虑一般采用本线、备用线方式（图 3.21）。另外，在城市中心从可靠性、设备效率的观点考虑，可采用区域网络方式（图 3.22）。

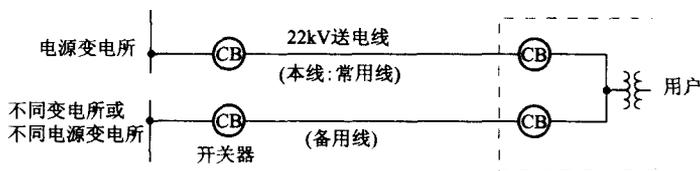


图 3.21 备用线方式

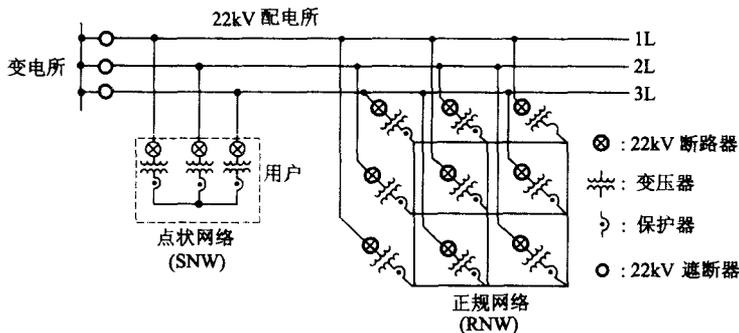


图 3.22 22kV 网络配电方式

3.4.4 供电线路的种类和适用区分

供电线按施工方式，可分成架空供电线路和地下供电线路。

架空供电线路见图 3.23，由高压架空供电线（主要是 6.6kV） 低压线（100V,200V） 接入线和支持它的支持物（电杆），高压变低压的变压器，区分线路的高压开关器，绝缘充电部分的瓷瓶等所组成。

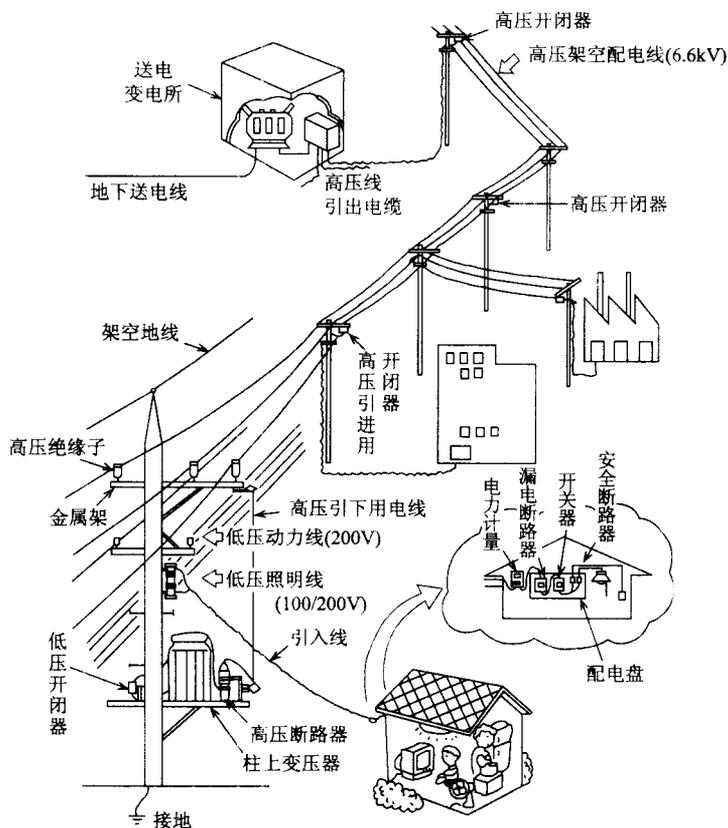


图 3.23 架空供电线路的构成

由于受架空线间隔的法规限制和用户与公路管理等的相互制约，即变电所的接入口被高速公路、铁路阻断等，从地方和城市美化环境的需要，无

法建架空线路而铺设地下供电线。这个地下供电线，有电缆、贯通电缆的管路和地下设置型高压开关、变压器等地下线用设备所组成。使用的电缆比较典型的有聚乙烯为绝缘材料的 CVT 电缆 (图 3.24)。图 3.25 为地下电缆配线示意图。

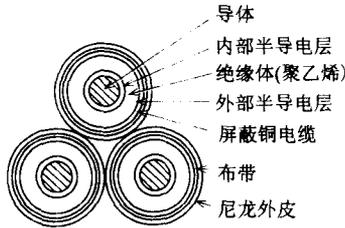


图 3.24 CVT 电缆

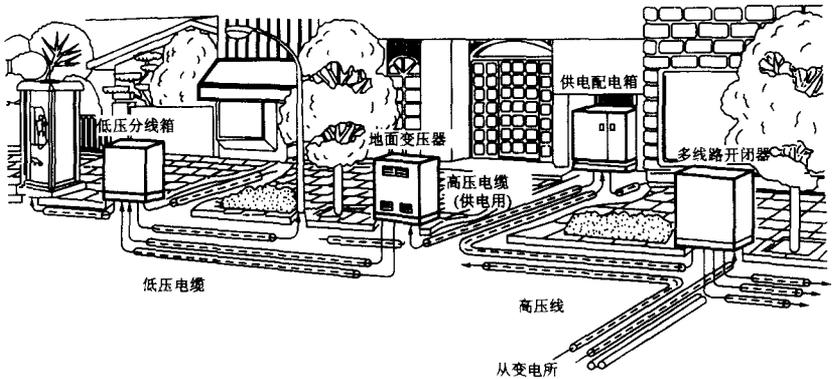


图 3.25 地下供电线的构成

3.4.5 高压供电线的控制方式

在高压供电线事故中，为了隔离事故地区并尽快恢复正常供电，进行高压供电线路线路开关的自动控制。其控制方式，是设定变电所开关器与重合继电器的协调时限，根据这个时间，进行开闭操作的限时自动分隔方式和自动分隔自动切换方式。

自动分隔方式，是用限时型事故探测（搜查）器和自动控制分离开闭器，自动向正常地区输电的方式，一般使用于放射状供电线。

自动分隔自动切换方式，是在自动分隔方式的基础上，利用限时事故探测器（联接用）和中央控制装置，自动控制分离开闭器和联接开闭器，除了事故地区之外的所有正常地区进行自动供电的方式，见图 3.26 图 3.27 适用于多分隔多联接高压供电线。

3.4.6 住宅小区的供电方式

住宅小区是用低压架空线供电。用低压架空线供电困难的园区以及大规模的住宅社区和高低压并用的住宅区，借用用户方的建筑物，由电力公司铺设电缆和变压器，用户方铺设低压室内电缆向各用户供电。

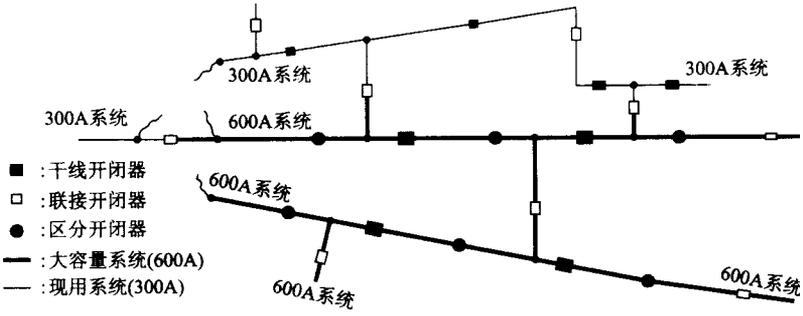


图 3.26 架空供电线系统

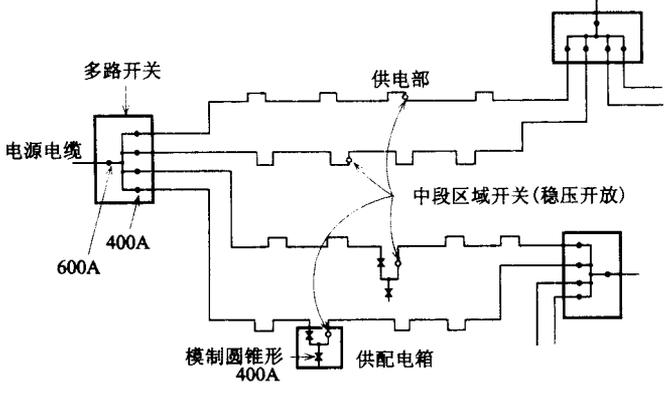


图 3.27 地下配电线系统布置图

● 3.4.7 盐雾害及其他灾害的思考

1 盐 雾

海岸线附近布设的供电线因受海潮风浸蚀使其支撑架和设备的外箱等铁质物生锈，而且由于绝缘子和设备的绝缘导线受到污损，导致微量电外漏造成绝缘子破损、电线烧损等事故时有发生。因此，考虑过去的盐害调查分析，即进行盐分附着量和地形调查等的基础上，划分地区实施如表 3.9 的防盐雾害的措施。在盐雾害特别严重的地区应采取洗刷绝缘子（电瓷瓶）等保护措施。

2 雷 害

输（供）电线的雷击事故，是由于经常发生雷击加上电力设备中供电线

表 3.9 供电线的盐雾对策

工作物	对策内容
高压绝缘子	扩大绝缘子表面漏距(高压用实心绝缘子和耐拉绝缘子接合用)
变 压 器	采用耐漏电性好的引导线楔形标准绝缘套管
开 闭 器	采用充电部的遮盖、楔形绝缘套管及不锈钢罩

的绝缘性差，导致电力设备事故，此类事故在电力设备事故中占的比重很大，在 6kV 输（供）电线中雷击事故成为绝缘子设计的重要考虑因素。

供电设备中因受直击雷和诱导雷引起雷冲击波的机率很高，为避免诱导雷的发生主要按表 3.10 列出的对策实施防范。

表 3.10 供电线的雷害对策

雷害对策	具体对策
遮蔽	架空地线
抑制雷冲击波	避雷器,避雷器内藏变压器、开关
绝缘子保护	放电夹
限定闪络点	改变设备中的绝缘水平(格差绝缘)

供电线的雪害，是由于电线上附着粘雪使电线外径扩大，增加电线自重和风压负荷的机械外力，受这一机械外力的作用发生电线断裂和电杆倾斜倒塌的现象。如图 3.28 示出电线上附着的雪围绕电线周围滑转形成圆筒状，为防止雪的滑转，可使用带凸楞的难着雪的电线。除此之外，还有对倾斜电杆采取引流和加强基础等的措施。

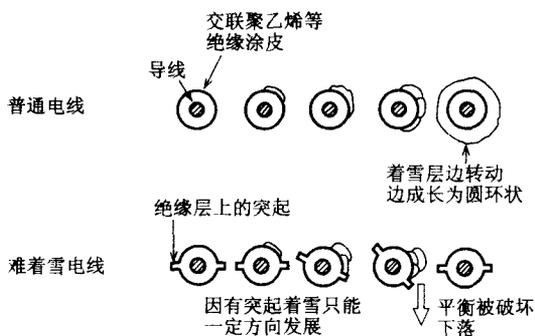


图 3.28 难着雪电线的作用机理

● 3.4.8 计量用电表

计量用电表，是计量用电量的仪表。电力公司根据电表的计量收缴电费，因此需要较高的精度。为此计量法中规定了计量标准和准确计量的方法，并由 JIS(日本工业规格)统一了制造规格，由日本电气计量器检定所初检和定期取表检测。

电力仪表有利用电流产生的磁场作用于驱动圆盘上，再把与使用电量成比例的转速作用于圆盘而测量的感应圆盘型和利用改变电压脉动波形的脉冲信号检测电量的，即改变与电流成比例的脉冲波高和与电压成比例的脉冲波宽的矩形波状电流来检测电量的电子型(图 3.29 图 3.30)。

在高压用户等大容量计量中，接入电压互感器和电流互感器，用上述的同样装置在低压侧进行计量。

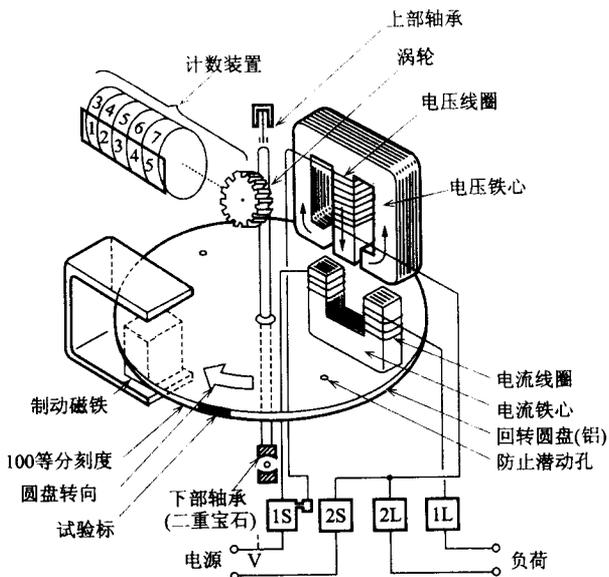


图 3 29 电磁圆盘型电表的构造

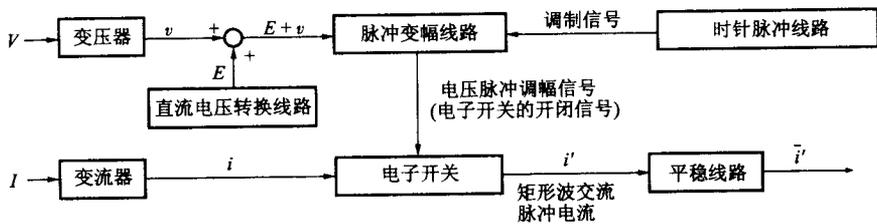


图 3.30 电子型电表的构成图

第 4 章 电力设备的维修技术

电力设备作为电力企业用电气工作物，为确保工程、运行的安全和保护，应对电力设备进行巡检和检修。电气事业法中对此作了有关安全保护的规定（“保安规程”）。其中对各种不同设备巡检维修的项目和次数，实施巡检标准和检修操作标准，作了具体的规定，做到防患于未然保证设备的正常运行。

但是最近随着设备的增加，检修维修的工作量也随之增加，而且不能因维修长时间停用，弄得捉襟见肘。这样希望以少维修、少检修为目标，采用了气体绝缘设备和自动检修自动监视装置的新技术，促进了检修维修自动化。

这里，以一般使用的电气设备及电线、绝缘子等为中心，以实际现场进行的设备诊断方法和判断、检查操作等为重点，学习维护技术的现状。另外，还要掌握电力用设备在系统中发生的特殊故障、异常现象和典型事故恢复的办法和对策的概况。

4.1 电力设备的异常诊断

● 4.1.1 设备异常诊断的基本方法

电力系统，是从发电厂经过输供电设备到用户形成的有纲和目的网络，由各种各样的设备所组成。要使电力系统稳定的正常运行，结合各设备的特性进行可靠的诊断是很重要的。

进行设备诊断时必须考虑的基本要点是：

结合设备特性确定诊断项目。

诊断内容和周期等要适当。

根据诊断要确实能掌握有无异常和异常程度。

以往基本上是实施定期检修的办法进行设备诊断，但最近设备的外部检修诊断和巡检检修数据用计算机管理等，趋向远离设备在运行状态下随时进行诊断的方法。

另外，设备的检修和诊断，当然是不可分割的整体，诊断技术的发展必然会影响检修的周期和手段。

● 4.1.2 发电机的寿命老化诊断

发电机线圈的绝缘老化，是影响发电机运转时间、起停次数和外部环境等运转条件的重要因素。起初线圈的绝缘方式是主绝缘层采用云母和浸沥青复合材料，到了1955年初采用聚脂树脂，其后开始使用浸环氧树脂做绝缘材料。绝缘性能及其寿命的评价有如下方法：

1 简易评价法

这种方法是从发电机的运转年限（考虑电气、热、环境老化）和起停次数做为评价的依据，是平均老化指标。

2 绝缘特性试验（非破坏性）数据评价法

非破坏性线圈试验数据的评价方法有以下种类。

(a) 测定绝缘阻抗的方法 设备停止运转后立即从运转状态下的温度下降到周围的温度为止，随温度变化测量线圈阻抗，记录的温度-阻抗曲线图数据与以往的记录相比较，评价绝缘状态的好坏

(b) $\tan\delta$ 法 在绝缘物C上施加交流电压E 电流I时，因C不是导体 电流有一定的损失 故I和E的相位不成 90° 。损失的相位角为 δ ，从它的 $\tan\delta$ （介质损失角）值可知道绝缘物的好坏，评价绝缘物的阻抗。

(c) 直流高压法 在绝缘物上施加高压直流时，依据漏电的时间特性，判断绝缘老化程度。

(d) 电晕法 当发电机线圈内部产生空隙（微小的间隙）时，空隙使电介质在额定电压以下发生电离（离子化），产生电晕脉冲。根据检测的电晕脉冲评价电介质的老化程度。

(e) 直流分量法 在绝缘物上施加商用交流电压时，检测漏电电流或充电电流中含有的微小的直流分量的大小、方向、波动，以及检测其电压的特性和其温度特性等，综合以上与绝缘物的绝缘状态有密切关联的检测数

据，评价绝缘状态。

(f) 交流电流法 在绝缘物上施加交流电，在增加其电压时，充电电流的大小与电压高低成正比。绝缘层老化有空隙时，空隙中发生放电引起电流损失，因此检测的电压-电流特性出现拐点不成比例，用这种检测电压及电流增加率来判断其老化程度。

对定子铁心没有明确的评价标准。

● 4.1.3 锅炉和汽轮机的寿命老化诊断

火力发电设备老化损伤的机理有蠕变、疲劳、腐蚀、浸蚀、磨耗、绝缘性下降等。这些损伤单一或多种发生在设备和部件上，若不及时修补更新，招来事故停运是免不了的。而且，火力发电设备在平时保修工作正常的前提下，必须保证在数年间（至少检修间隔）可靠运行。

另外，考虑火力发电设备经济性的铭牌设计寿命一般在 25~30 年。我国在高速发展的年代建设的发电设备，现在已老化，但为了满足日益增加的电力需求，到时不得不继续运行。因此，为今后逐年增加的老化火力发电厂继续长期运行，要采取长寿命化措施。所以，寿命老化诊断成为重要的课题。

目前的现状是设备诊断以比较短时间内获得的材料特性数据为基础的，长时间的寿命老化评价和预测的技术，尚未确立。以某些部分确立的诊断技术为例，对影响锅炉寿命的重要因素，如气泡、水罐、管件等厚壁耐压部件的诊断，对影响气轮机寿命的重要因素的转子中心部诊断，一般采用超声波探伤、磁粉探伤、比色检测等“无损检测”方法还有取实际运转零件代表部位的试样，进行拉伸试验、蠕变试验等直接求材料特性的“破坏性试验”方法；以及定期检测锅炉堂的腐蚀、壁损量等进行趋向分析预测寿命的“实际统计法”等。除此之外，根据设备的图纸、尺寸等几何形状，材料的性质，运转情况，运行历史等，计算应力分布，求老化程度，预测寿命老化的“理论解析”法等。

现在利用综合以上相互密切关联的技术组合的综合技术，对火力发电设备进行余寿命诊断。

● 4.1.4 用分析油中气体的方法进行变压器的设备诊断

用油做绝缘或冷却介质的设备，有变压器和互感器等，它不同于开关器等用油做绝缘和消弧介质的设备。对前者分析油中溶解的气体成分和浓

度，可推测内部有无异常，因而促进了油中气体分析技术的发展，最近已确立为高可靠性的诊断技术。另外，最近抽取绝缘纸的试样，利用它的机械强度和结合度的下降以 CO 、 CO_2 的生成速度等相关连的特性，预测绝缘物余寿命的技术也正在应用。

对于后者绝缘油的氧化度、水分、绝缘破坏等性能的管理，一旦认定性能下降则要及时过滤或更换。另外，对于机器构件的诊断，是以驱动构件和运动副的磨损和表面粗糙等诊断为主。

变压器内部部分放电，局部过热等异常现象发生时，如图 4.1 过热引起绝缘油和绝缘纸热分解，生成的气体溶解于油中。因此，可在平常运转状态下，采油样检验分析溶解于油中的气体，诊断变压器内部有无异常。

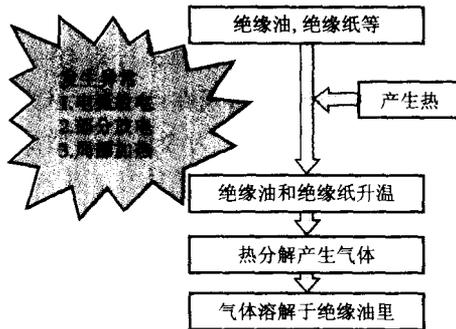


图 4.1 变压器内部发生的现象

1 分析方法与分析的气体

从运转中变压器的采油瓶中采油时，采集的油尽量不接触空气，拿到试验室用气相色谱分析仪进行分析。最近，开发了对可燃性气体现场分析的携带型仪器。油中气体种类及其生成原因如表 4.1 所示。

2 分析油中气体的判定标准和诊断

分析油中气体，是定期检测可燃性气体总量（TCG），即各种可燃性气体量和可燃性气体的总量及其增加趋势，对照判定标准分析判断有无异常。

表 4.1 S 油中气体发生原因

油中气体种类	发生原因	
O ₂ (氧)	空气的侵入	
N ₂ (氮)		
CO ₂ (二氧化碳)	绝缘纸的热分解	
CO(一氧化碳)*		
CH ₄ (甲烷)*	绝缘油的热分解	中温
C ₂ H ₆ (乙烷)*		
C ₂ H ₄ (乙烯)*		
C ₂ H ₂ (乙炔)*		高温
H ₂ (氢)*		

* 可燃性气体

作为判定标准的一例，表 4.2 中列出（社）电气协同研究会报告的判定标准。

根据此表，可燃性气体的总量和不同成分气体量的增加率中，任何一项都要注意其标准，若其中一项超过标准，即判断为异常。

诊断变压器内部的异常时，追踪调查油中的气体分析，根据产生的气体成分和比率等 诊断异常的种类（电弧放电、部分放电、局部加热）场所、程度、紧急性等。

表 4.2 油中气体分析的判定基准

（变压器容量为 10MVA 以上）

判定基准	各气体量/ppm						TCG 增加率
	TCG(可燃型气体 总量)	H ₂ 氢	CH ₄ 甲烷	C ₂ H ₆ 乙烷	C ₂ H ₄ 乙烯	CO 一氧化碳	
要注意	700	400	150	150	200	300	250ppm/年
异常	1400	800	300	300	400	600	70ppm/年

注：(1) TCG：可燃性气体总量。

(2) ppm=10⁻⁶

[例]油 1kL 中有 1mL 溶解气体时

1kL=1000L

$$1\text{L}=1000\text{mL}$$

所以, $1\text{kL}=1\ 000\ 000\text{mL}$

$$\frac{1\text{mL}(\text{气体})}{1\ 000\ 000(\text{油})}:=1\text{ppm}$$

(3) 若可燃性中检修出微量乙炔就算异常。

● 4.1.5 气体绝缘设备的诊断

气体绝缘设备利用 SF_6 气的高绝缘性、稳定性、非活性、负性离子等特性, 填充在设备的密封罩内, 在密封状态下发挥其绝缘特性。而且, 其诊断也应在密封状态下进行。

预测的故障大致分为绝缘故障、热故障、机械故障。无论是什么情况, 检测出初期阶段的症候防患于未然是很重要的, 目前用各种传感器进行设备诊断管理。典型的诊断项目和使用的传感器的概况如下。

气体特性诊断

密闭状态管理: 利用气体检漏器检测漏气压力和温度特性管理。

② SF_6 气的品质管理 测定 SF_6 气中的水分和进行分解分析。

• 绝缘性能诊断

内部绝缘状态管理: 检测微小放电部分(电晕传感器)。

有无内部异物的管理: 用超声波传感器和加速度传感器检测。

• 导电性能诊断

内部导体接触状态管理: X光摄影、检测导电异常。

② 开闭动作性能管理: 开闭时间监控传感器、切换动作时间检测传感器、避雷器的漏电分流传感器。

另外, 关于具体诊断方法和评价和部分诊断技术介绍如下。

1 微小部分放电诊断技术

利用 GIS 的密闭罩上安装的耦合电容传感器, 可高敏感度的检测到几个 pC 以下放电。在部分放电时, 可检测外面的噪音, 利用 750MHz 以上的放电电磁波, 进行频谱分析, 检测微小部分放电。

在外面发生的大气中的电晕噪音为 500MHz 以下, GIS 内部部分放电的电磁波频带在 750~1500MHz 的范围, 可以高精度的检测微小部分放电。具体的传感器和检测线路, 以及检测微小部分放电标准等的概况如图

4.2 和表 4.3。另外，确认检测发现问题时，赶紧与有关人员协商讨论的基础上，停机进行分解检测，采取适当措施。

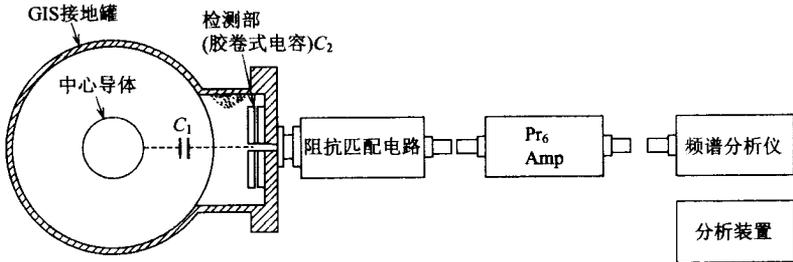


图 4.2 传感器检测线路构成示意图

表 4.3 微小部分检测程度

检测条件	频谱	特征
① 外部部分放电		在 GIS 外部产生的放电强度较大,但频率不超过 500MHz
② 内部部分放电		在 GIS 内部产生的部分放电在 750~1500MHz 范围
③ ①+② 外部内部放电重叠		在 GIS 内外部同时发生的情况下也能区别检测出内部部分放电

2 X 射线外部诊断技术

X 射线外部诊断装置，是由 X 射线发生装置和摄像装置及图像处理装置所组成。用它可不用拆卸设备从封闭罩的外部观察内部状态，是一种携带方便的手提式的诊断装置。本装置可检测导体接触部分的接触状态、开闭状态和连接部的松弛、脱落、变形等可检测很多项目。

4.1.6 绝缘子的绝缘性检测和老化诊断

1 绝缘子的绝缘检测

绝缘子的绝缘检测大致可分为线路带电状态下用检测器检测异常的方法和不带电检测绝缘耐力的方法。

另外，对主干线绝缘子和 LP 绝缘子等，则用肉眼定期检测。对于带电作业来说，有谐振腔缝式、音响脉冲式、自行式。停电作业时用摇表（绝缘检测器）式。这些方式的原理如图 4.3 所示。

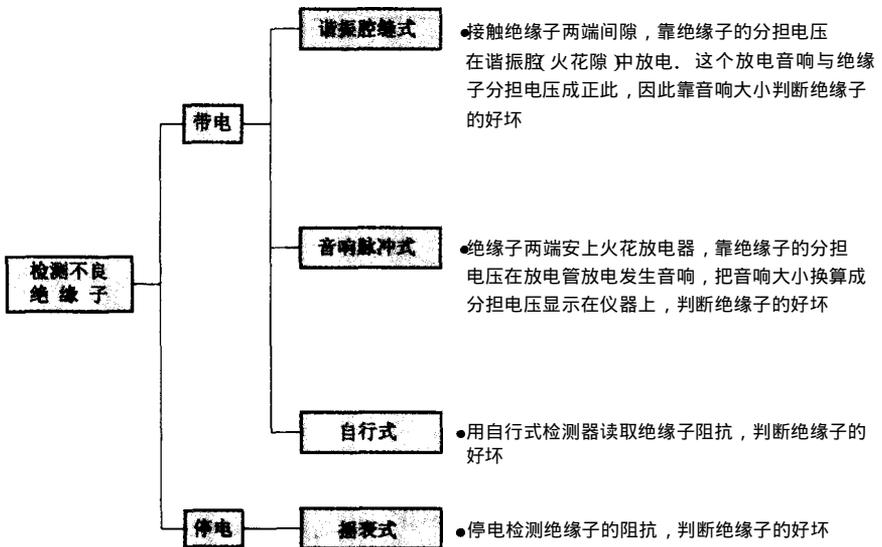


图 4.3 检测绝缘子绝缘性的要点

2 绝缘子的老化诊断

绝缘子的性能老化及其老化的进展情况，必须要认真掌握。从外表上难于辨别和预料的老化，有因制造缺陷和疲劳破坏造成绝缘不良的，也有销和槽等金属部生锈磨损和电蚀造成的浸蚀痕等。

近年虽然绝缘子的性能越来越好，但定期进行检测发现异常并预测寿命老化还是很有必要的。另外，环境条件严酷的工业区和沿海地区，要缩短检测周期进行弹性工作是必要的。

4.1.7 绝缘电线的老化诊断

1 老化诊断方法

在电气设备的技术标准中规定，高低压供电线要用绝缘电线。但因导体的应力腐蚀造成断线现象时有发生，因此有必要对绝缘电线的老化进行诊断。

应力腐蚀断线发生在架空硬铜线绝缘电线上，硬铜线在拉应力的状态下受雨水浸入绝缘层被浸湿，表面氧化生成黑色膜，黑色膜受拉应力破损剥落，雨水再次浸入表面氧化，这种现象循环反复最终导致断线。这种断线现象是绝缘电线固有的，裸线不会发生。把断线事故防患于未然，用绝缘电线生锈检测器，在带电状态下进行检测，掌握导线情况。这个检测器，是利用生锈导体表面阻抗变化影响导体表面磁场而产生涡流变化的原理，根据检测的涡流的大小判断生锈状况。这种检测器由在电线上边行走边用传感器检测生锈情况的空中检测设备和在地面用无线通信接受的地面设备所组成（图 4.4）。

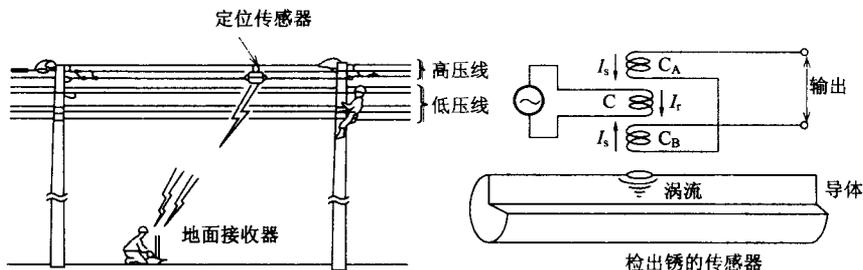


图 4.4 绝缘电线锈检测方法

2 老化判断

生锈情况检测传感器，是把励磁线圈 C 插入检测线圈 C_A 与 C_B 之间，组成两线圈的差动输出信号线路，不靠近被测电线的状态下输出的差动检测信号调整为零。再把传感器与电线靠近接触，则靠近电线的励磁线圈因导体表面生成涡流，受涡流的影响磁通发生变化输出差动信号。导体生了锈，产生涡流较困难输出信号就弱，没有锈就输出信号大。图 4.5 是检测坐标的例子。

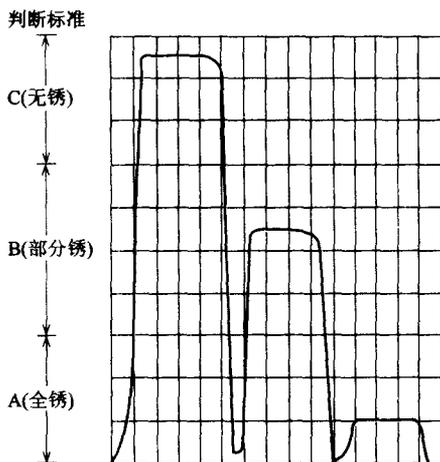


图 4.5 锈检测线图

● 4.1.8 电缆的老化诊断

1 老化诊断的方法

一般电缆的寿命，在正常的环境下根据电压-寿命特性进行诊断。通常使用寿命设定在 20~30 年，但有时因绝缘老化尚未到设定寿命，就有招致破坏性事故的情况。电缆老化的主要原因，有电气性老化（部分放电、漏电痕迹、异常电压等）物理性老化（水树枝放电）化学性老化、机械性老化、动物害性老化等。

高压地下电缆，除了施工时必须检测以外，布设后 10 年左右应开始定

期检测(5~7年为周期)发现问题的电缆应在1~3年内再行检测。另外,在施工现场露出电缆时,也可根据现场发现的情况,可即时检测绝缘状况,防事故于未然。检测方法如表4.4所示。

表 4.4 检测方法于适用范围

检测方法	适用范围	备注
CV 电缆的带电诊断	适用于 CV 或由 CV 电缆构成的线路检测	使用 CV 电缆带电检测装置
摇表检测	适用于带纸电缆及带纸电缆混杂的线路检测	使用 1000V 摇表检测
直流特性试验	同上	试验电压 第 1 步:DC6kV 第 2 步:DC10kV
部分放电检测试验	适用于摇表检测和直流特性试验结果以及有问题线路的再检测等,根据需要适当选用,补充上记的检测	上升下降 DC10kV 或施加准三角波电压

2 老化判断

判断 6kV CV 电缆的老化方式,有供电线路停电后进行的直流漏电流检测和带电进行的直流量检测两种。直流漏电流检测,是直流高压施加在导体和屏蔽带之间,检测漏电流、吸收电流和反充电流,判断绝缘特性,图 4.6 出示典型的检测接线。

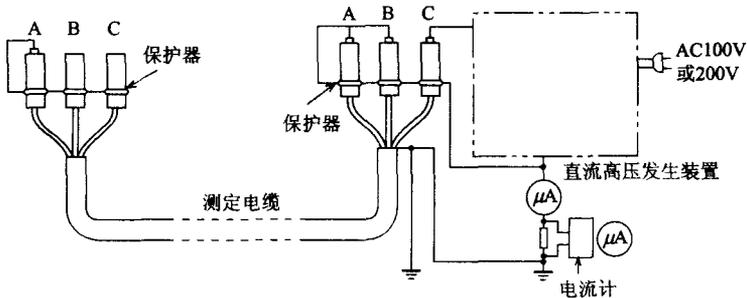


图 4.6 检测直流漏电的典型线路

检测结果与过去的检测结果相比较分析，绝缘阻抗明显下降的，有反充电流现象的，有漏电流渐增趋向的，漏电流达数 10mA 的 则判断为“ 要注意 ”或“ 不良 ”。另外 直流成分的检测 是拆除被检测电缆地线的接地 地线和大地之间接入检测器，在屏蔽铜带和大地之间流过水树枝放电电流时，检测特有的直流电流，其电流达数 nA 以上则判断为“ 要注意 ”或“ 不良 ”。

4.2 电力设备的事故和电力系统的异常

4.2.1 电力设备的事故

电气事故中 根据“ 电气责任报告规则 ”需要一般电气经营者有义务向上级有关部门报告的情况有以下 10 种：

触电死伤事故。

电气火灾事故。

电气工作物有关的死伤事故或者严重损坏其他设施的事故。

放射线事故。

主要电气工作物的损坏事故。

⑥ 发电障碍事故。

⑦ 供电障碍事故。

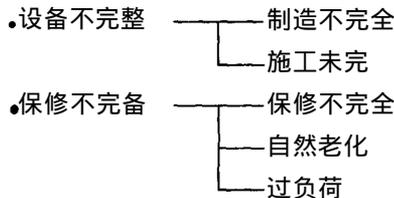
⑧ 波及其他公司的事故。

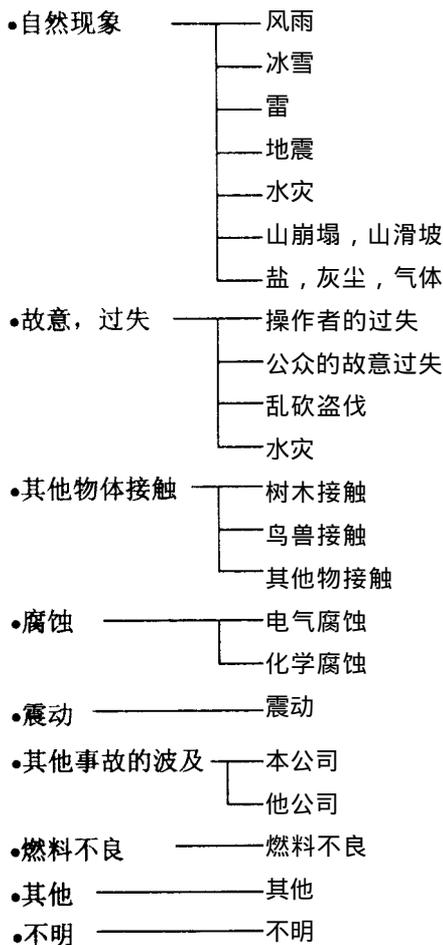
⑨ 台风等灾害引起的事故。

⑩ 电气工程施工中发生的事故或影响社会的事故。

4.2.2 电力设备的事故原因

根据电气关系报告规则，事故的原因可分类如下：





4.2.3 自然现象造成的电气事故发生的原因

电气的事故有多种，其中自然现象造成的典型的事故说明如下。

1 雷

雷造成的事故，大部分发生在架空输电线和供电线上。发电厂变电所等地架设架空地线或避雷器，基本上可避免落雷事故。

雷有雷击电线的直击雷和受雷云放电的影响，在电线上的电荷不受约束的在电线上串动，串到铁塔的绝缘子部分引起闪络的诱导雷。还有，在架空地线落雷时，电荷从铁塔向大地放电，因而铁塔的电位上升引起铁塔和电线之间闪络的逆闪络现象。

另外，诱导雷多数是 6kV 以下供电线事故的诱因，但在 66kV 以上的输电线不发生诱导雷事故。

2 冰 雪

架空电线的事故中，有冰雪附着电线造成的事故，冰雪附着的电线受风力晃动，与相邻相电线相碰的飞线事故；附着的冰雪下落时，电线往上反弹的冰雪跳蹦事故等。

3 地 震

地震事故，大部分是发生在变电所和发电厂中，由安装在 154kV 以上的变压器、空气开关、避雷器等上的瓷瓶折损引起的，最近为了提高抗震性，正在研究抗震性能高的替代材料。变电设备的地震对策请参考第 3 章。

架空输电线和供电线，因为风负荷比地震力大，一般用风负荷来设计。地下输电线因地道等构造物与周围的大地一起震动，一般不受地震损害。

4 盐雾 灰尘

架空输电线、供电线，变电所、发电厂的母线等用绝缘子的绝缘设备和在变电所、发电厂的变压器、开关器上的套管，一旦其表面附着盐和灰尘，则其绝缘性能下降。尤其是台风从海上刮来的大量盐分，在绝缘子上附着，容易引起事故。

● 4.2.4 电力系统的异常

1 电力系统异常的种类

电力系统的异常现象有如表 4.5 所示。其中对缺相、高次谐波增大、电压异常等现象加以说明。

(a) 缺相 输供电系统的缺相，是使用电力熔断器时其中一相熔断或线路开关接触不良或端子螺丝松动等原因造成的。虽然很少发生但有时可

表 4.5 电力系统异常种类

电力系统异常	
• 常态稳定性下降	• 频率异常
• 电压稳定性下降	• 逆相电流
• 高次谐波	• 缺相
• 发电机轴扭振现象	• 设备过负荷
• 异常电压	• 闪络

引起电机烧损等重大事故，造成缺相的原因主要有以下几种：

发电厂变电所的 CB 和 LS 等开闭器类的机构动作不协调，其中一相动作不良。

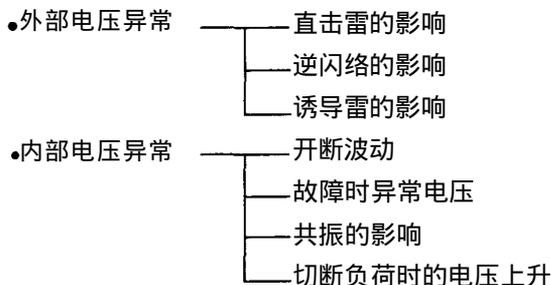
- 供电线株上变压器的区分开闭机构动作不协调，其中一相动作不良。
挖掘机等土建工程施工中造成输供电线被铲断。
用户或电气设备的开闭机构动作不协调和断路器熔断。
台风飞来物碰断输供电线。

(b) 高次谐波增大 最近，使用半导体元件的电气制品越来越多，这些设备电流波形的变异是产生高次谐波的根源。由于用户的电抗和电容的大小以及共振的影响，引起输供电线的高次谐波电流变化很大。

高压用户设置的电容器一般都不串联电抗线圈（扼流器），这是高次谐波增大的原因之一。其中也有串联电抗线圈的情况，但这时电容对高次谐波的阻抗减少，高次谐波电流容易往串联电抗线圈的电容器集中，容易引起烧损电抗线圈事故。

高次谐波的事故多数是串联电抗线圈的烧损事故。

(c) 电压异常 系统电压异常产生的原因有以下几种。



除此之外，电力系统还有下列电压波动现象

(a) 瞬时电压下降 瞬时电压下降是雷击或分隔异常地区时发生，其时间非常短，但对计算机等 OA 设备的损害就很大，为此，想到了设置定电压定频率供电装置 CVCF(图 4.7)。

(b) 费兰梯效应 在架空输电线路中，一般离电源近的一端比负荷近的一端电压高。这是因为，在输电线随电流有电压降的缘故。

但是，深夜轻负荷和负荷端设置大量的电容器的场合，长距离的地下输电中有负荷端比电源端电压高的情况。这种现象叫做费兰梯效应。

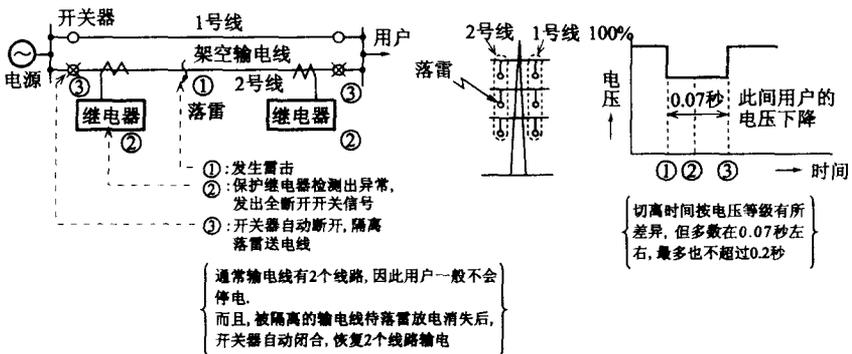


图 4.7 电压瞬时下降的机理

(c) 不平衡 在 15kV 以下的架空输电线路中，为了各相的感应系数和电容相同，采用转塔。在 275kV 以上的输电线中，因不能用转塔，将产生中性点残留电压和发生逆相和零相电流。

4.3 保护技术和设备检修

4.3.1 设备检修的基本思路

设备维修的基本思路是，预防事故发生的预防保护措施为主。预防保护具体措施的实施方法，大致分成在设备运行状态下的巡检和设备停止后的检修。无论是什么情况，应根据设备的种类特征决定检修周期和项目。前边在设备诊断的项目中论述过，过频的检测不经济，过少则有招引事故的

危险。因此，设备检测时，要注意以下事项：

要结合设备的特性制定巡检和检修项目。

巡检检查内容要贴切。

本次巡检检查到下次巡检检查之前保证设备的良好性能。

另外，最近随着设备诊断技术的发展和设备自身技术的发展，有减少检修项目和延长检修周期的趋势。还有，从经济性考虑，有明显老化的零部件事前更换，延长设备本身的寿命。

基本的设备检修种类有：

普通检修：主要从外部进行检修操作。

精密检修：主要是分解后进行检修操作。

临时检修：台风等自然灾害后或发现设备异常时进行检修操作。

初次检修：主要为了防止新增设备的初期故障，增设一年内进行检修操作。

在保持设备性能的前提下，制定检修项目和检修周期是很重要的。还有，根据设备的重要性，选用检测范围大的传感器，在运转使用状态下，采用能读取异常和事故的预兆信号等的新技术。这样随着预测诊断技术的发展和充实，以创新思路想方设法防止事故发生。

关于为各种设备的保护安全进行的巡检、检修及检查，根据 1964 年制定的电器事业法第 52 条“保安规程”中，规定向通商产业大臣申报的义务。在要加强法规的呼声中，于 1995 年 12 月 1 日修改了“电气事业法”但是，企业者从自己的责任心为原则，在自我保护的前提下编成的“保安规程”（电气事业法第 42 条中也有申报义务的条款。

● 4.3.2 原子能发电厂

1 设备检测的思路

在原子能发电厂中，要维持反应炉、汽轮机、电气、控制及燃料设备的性能，确保正常运行稳定运转，必须进行保全措施。

原子能设备检修的基本思路，不同于一般设备故障后修理或更换的方法，而是故障前进行检修、调整、更换的“预防保护（保全）”方法，设备保护是本着企业者自身责任的原则进行的。

2 检修的种类

检修分运转状态和停止状态下的检修。

运转状态下的检修 有定期的巡检检修，看各设备是否正常运转的正常检修，还有非常用炉心冷却系和安全上重要的设备是否正常动作，进行定期性能试验。

停机检修 停机检修是根据电器事业法的“定期检查”和电力公司自行制定的“电力自主检查”的条例进行。

3 检修事例

必须接受定期检查的设备有原子反应炉、原子炉冷却系统设备、计量控制设备、燃料设备、放射线管理设备、原子炉容纳设备、蒸汽气轮机、辅助锅炉及非常用预备电源设备。

这些检查是在原子能发电厂安全正常运转的条件下进行的重要设备的检查。其检查事项如下：

对原子炉自动安全停止装置等，确保安全的机器设备，进行分解检查、系统性能检查。

② 使用期间检查，即对原子炉压力容器、主要配管、阀等，为确认健全性有计划的进行非破坏性检查。

依据国内外的经验对重要机器设备进行检查。

在调试阶段，最后能确认原子能发电厂稳定运转的检查。

4.3.3 火力发电厂

1 设备检修的思路

在火力发电厂，为保持锅炉、气轮机、电气、控制和燃料设备的性能正确、稳定运转，应采取安全保护措施。

火力发电厂的保护有日常的巡查和定期检查，通过定期检测掌握的老化情况和反映设备诊断等的结果，有计划的进行保护的“预防保护”，这些设备保护措施，由从业者当作自己的责任认真执行。

2 检修种类

对单元设备、充气设备、变电设备等不同的设备的检修，规定不同的周

期(1~4年)进行检修。

发电厂的发电设备中,对锅炉、气轮机,要定期接受上级主管部门的检查,这在电气事业法中作为义务规定。根据检查,掌握金属材料受高温高压蒸汽或煤气的损伤、腐蚀、蠕变及其强度下降等,定期掌握随使用年限变化老化的情况,以确保安全。

3 检修事例

在锅炉设备中 检查汽包、水罐、管件、蒸发管等是否发生腐蚀、磨损、龟裂,分解检修各泵、风机、安全阀等并进行烟风通道的清扫。

在气轮机设备中 检查汽缸、轮轴、叶片的龟裂和磨损 分解检修轴承和主蒸汽门等主要阀类,分解检修控制用、轴承用油系统的泵类,检修给水加热器等热交换器,进行海水系统的检修、清扫等。

还有,当检修时事先进行适应性设备动作试验,认真查看机器的状况,决定拆检的内容并进行检修,检修组装后做动作调整试验,确认是否发挥正常的性能和动作。另外,把检修结果按设备分类记录要点入档进行管理。

4.3.4 水力发电厂

1 设备检修的思路

水力发电设备检修的作用是,保持正常的工作状态和保证连续稳定的供电。水力发电厂几乎是无人状态,因此要维持稳定的性能,平时的检修是理所当然的,重要的是有计划的进行设备的补修和更新。

2 检修的种类

检修的种类,有擦拭设备的污垢,修补涂刷表面剥落或生锈的地方,查看松脱的螺栓、螺母、销等日常的检修和定期检修。

定期检修,有短期停机查看设备有无异常的普通检修和长期停机进行分解设备、修补、内部诊断等的精密检修,这些检修周期按设备不同规定不同的周期。

另外,除了上述检修,还有发现设备异常时要进行的临时检修。

3 检修事例

① 水轮机的一般检修 断水设备停止后,打开机罩和拆下进水管仔细

检查机罩内部、速度环、固定导叶、撑螺的腐蚀、磨耗、龟裂等。对导向叶片和操作机构，检修导向叶片的间隙和操作机构的各部销、轴瓦等的磨耗，损伤程度。根据检查结果，确定长时间修补或更新的计划。

叶轮检修 仔细检查叶轮的磨耗、气穴浸蚀、水质腐蚀等的发生位置和发展趋势及程度，检查结合部有无间隙等，确定维修更新计划。对严重的部分尽早采取措施。

水坝和水渠检修 水坝要经常巡检，随时掌握河床的状态和性质，并要做到非常情况下安全可靠地操作闸门。

水渠的作用是从河川安全有效的引水到压力水管，因此，特别要注意水渠壁面的泄露和老化。

4.3.5 变电所

1 设备检修的思路

机器设备必须始终要保持其性能，为此要及时发现隐患，防故障于未然是很重要的。

设备检修是在掌握设备构造性能的基础上，进行定期检查和外部检修及内部分解检修，及时更换部件、试验测定、补修，以防止突发事件“预防保护”为主。

因此，巡检检修的同时，灵活运用设备的定期检修、临时检修及初次检修，根据不同的种类、项目、周期等，按规定标准的指南手册进行检修。

检修标准是根据设备情况、事故、障碍等实际情况规定的。最近随着设备结构的不可拆卸化和高可靠性的发展，外部检修和监视正在成为主要检修方式。

巡检检修，分成有无异常为目的的一般巡检检修（有人变电所 1 次 / 月，无人变电所 2 次 / 月）和判断设备是否要检修的精密巡检检修（3 个月进行 1 次的）

设备的定期检修有大约 1~3 年 1 次的普通检修和 1~12 年 1 次或按规定的运转动作次数进行的精密检修。除此之外，还有按设备的种类形式和实际情况进行的初检和临时检修。

2 设备检修的种类和周期

变压器和开关器及其组件应 3~6 年左右为周期定期进行普通检修和

精密检修。尤其对开关器的开关次数认为达到标准次数时，尚未到检修周期也要进行触点、绝缘油等的老化方面的临时检修。最近，使用气体绝缘开关(GIS)超级包覆、固体绝缘包覆等小型化的密闭设备越来越多，检修操作次数逐渐减少和操作简单，以外部检修和各种检测试验为主，约3~6年为周期进行检修。另外，为了防止初期故障，新增设备在1年以内要进行初次检修。

这样各机器设备装置的检修种类、周期和具体检修项目，要遵循“保安规程”，其具体操作要按指南手册进行。

3 具体的事例

变压器的检修，因其结构是密闭型只能本体外观检修和清扫以及绝缘检测和确认各种警报试验为主。附属的冷却设备、泵类分别隔几年进行普通检修和精密检修。尤其分接头转换开关，滤油泵达到一定的动作次数就进行精密检修。

另外，对绝缘油也进行一般性试验，每13年按适应电压进行水分测定和油内气体分析。开关的普通检修，以外部检修清扫和操作试验、绝缘测定为主进行，主要以气体、空气、油开关为对象进行。精密检修，要对空气、磁力、油开关进行分解检修，对气体、真空开关要追加各种检测试验。

4.3.6 架空输电线

1 设备检修的思路

架空输电线，是把发电厂发出的大电力稳定高效地输送到用户的输送大动脉。

架空输电线经过山岳、平原、市区其环境条件极其恶劣。因此需要收集电力设备和周边环境的确切信息，事先掌握实际情况和动向，要使设备充分发挥它具有的性能状态是很必要的。为此，应以预防性的巡检、检修为主，根据巡检情况随时修改计划，进行设备保护。

2 检修的种类

设备检修大致分为巡检和检修。

巡检 巡检可分为，为防止电气事故、设备事故、因违反技术标准以及感电造成的灾害，定期的对输电线路和周边状况进行地面或空中巡检的普

通巡检事故发生时,为掌握事故地点及其状况的事故巡检,暴风雨、大雪、洪水等气象状况的异常时或地震后,掌握输电线路状态为重点的临时巡检。

② 检修 检修可分为为确认设备的初期异常,竣工后 1 年到 2 年之内,用检测仪和维修工具进行初期检修;定期的从地面或空中全貌性的目视观察的外观检修和用检测工具进行检测的定期检修,以及因台风、暴雨等可能发生设备异常时进行的临时检修。

3 检修的具体事例

铁塔检修 初期检修和特别检修是,作业员爬上铁塔,用扭力扳手或扳手拧紧螺栓,检查有无脱落、变形、龟裂。普通检修是从地面或空中用肉眼检查铁塔是否倾斜、是否扭曲,构件是否变形、生锈、腐蚀、是否脱落等。

绝缘子 初期检修和特别检修是,作业员爬上铁塔,用肉眼检查绝缘子的外观,还用绝缘子检测器检测出不良绝缘子。普通检修是,在地面或空中用肉眼检查绝缘子破损、有无污垢,金属件有无变形、损伤、生锈、腐蚀等。

电线检修 初期检修和特别检修是,作业员乘空中缆车检查衬套、阻尼器、配重等附属件的螺栓松动、变形、生锈、腐蚀。普通检修是,对电线及其附属件,同样用肉眼在地面或空中进行检查。

● 4.3.7 地下输电线

1 设备检修的目的

地下输电线,是在城市中联接发电厂和变电所以及变电所之间的电线,由电缆及其附属装置(给油、冷却设备等)和容纳电缆的管路、地道等构成。也有利用国、都、区、市级公路地下布设的。设备检修,是依据设备的特征早期发现异常处,防事故于未然为基本目的。

2 检修的种类

地下输电设备的检修,大致分为“巡检”和“检修”,其内容如下。

巡检 为保证线路的安全而进行的,检查地下输电线的通道,检查线路是否有异常的地方,查看有无挖掘工程,查看工程是否损伤线路等,称其为巡检。巡检有平时定期进行的巡检和灾害和事故时特别进行的巡检。

检修 检修适于在巡检方式无法确认的地方进行,也顺便对轻微异常部分进行修补更换。检修有为保持设备性能的正常检修和对付突发性

事故发生而进行的特别检修。

3 检修的具体事例

设备检修的具体内容用表 4.6 和表 4.7 来表示。

表 4.6 巡检的种类

种类	周期	内 容
普通巡检	1次/3月	通道上其他公司的工程,公路情况,路上设备和影响通道的东西
特定巡检	随时	
设备巡检	1次/6月	变电所,用户院内,油槽设备,开闭塔
	1次/1年	GIS,SPC,CV柜
	1次/6月	专用桥,防护栅,标示类设备的外观检修
特别巡检	根据当时情况	台风期,长期下雨等灾害预报为目的
事故巡检	根据当时情况	事故发生地处、状况等的调查发现

表 4.7 检修的种类

种 类	检 修 次 数
人孔地道内部检修	1次/3年
人孔内等存留气体检修	随时
管路检修	随时
电缆支撑架检修	1次/年
电缆头检修	随时
开闭塔和开闭装置检修	1次/5年
给油系统检修	油槽、油压 1次/6月,装置 1次/3年
警报线路检修	1次/1年
油槽房,油槽台检修	1次/6月

● 4.3.8 供电线

1 设备检修的目的

供电设备,是把从发电厂输送到变电所的电力再送到用户的最后电力

设备，因此早期发现异常现象，争取防止人身事故发生是非常重要的。为此，应本着各负其责为原则履行设备保护。

2 检修的种类

供电线的检修可分成巡检、检修和巡逻值勤。

巡检是为了使供电线路维持电气设备技术标准所规定的性能而从外部目视设备全貌进行检查的作业，其分为定期进行的定期巡检和特殊情况进行的临时巡检。

检修是从外部目视无法确认的设备老化和设备性能状态，用检测仪和维修工具进行检测检查的工作。其分为定期进行的定期检修和根据地区实际情况（雷害、烟尘害等）设备老化和事故情况进行的性能检修。

巡逻值勤是除上述的巡检和检修以外，适应某种必要（目的）从外部目视检查确认设备状态而进行的工作。它适用于环境变化大的地区，非常灾害时和事故再送电后进行的作业。

3 巡检检修的周期

供电线的巡检、检修周期等具体内容在表 4.8 中列出。

4.4 事故恢复

4.4.1 事故恢复的目的

电力系统中万一发生事故时，要确保供电必须采取应急措施。根据供电系统的事故必须采取的基本措施有以下两点：

事故地点从系统中迅速隔离。

切换系统继续供电，或其范围缩小到最小，或者迅速恢复事故地的供电。

根据事故进行恢复措施时，其方法和步骤应做认真准备，要考虑不使事故的范围和停电的范围扩大，同时考虑解除供电障碍的万全之策。各电力供给设备事故解除的现状将在下面加以论述。

表 4.8 送、供电设备的巡检、检修 (东京电力为例)

设置别	巡视		点检			备考	
	机器设备	周期	机器设备	项目	周期		
送电设备	输电设备 全貌	1次 /3月*1	电线、支持物	外观检修	铁塔、铁株线路、木株、水泥株、铠装线路	1次 /5年 1次 /4年	*1 线路经过地的变化多,有障碍危险地带特别是指定地区1次/月。 但是,在大雪积雪地区,考虑行走不便可考虑减少到1次/3月。 *2 指从地面巡检、检修无法确认的人孔、暗沟的内部进行的检修,包括包容电缆。 注: 对开闭所(需要监视)以变电设备为准
					绝缘子	查出不良悬垂绝缘子	
			电缆	外观检修			
					管路	内部检修	
供电设备	供电设备全貌	1次 /2年	接地装置	测试试验	第二种接地阻抗	1次 /5年	

4.4.2 发电厂·变电所

各发电厂·变电所和供电所的事故预测分析和对应处理措施以及分析事故原因等,要按下面步骤确定具体措施。

考虑用户的知名度影响度和设备的实际情况,划定停电范围和慎定系统恢复的步骤。

应急措施和恢复方案的确定。

恢复用资金、设备、材料及其备用品的准备和事故解除的演练等。

恢复工作人员的组织。

图 4.8 示出变电所变压器发生事故时调查工作程序,以做参考。

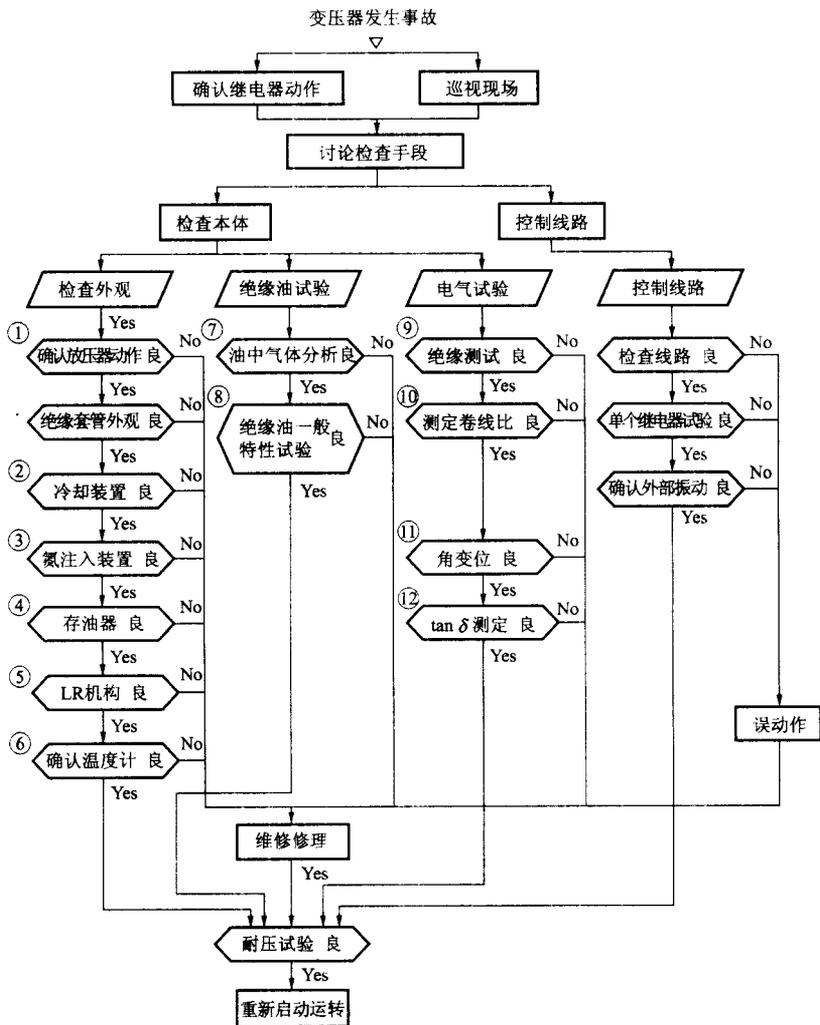


图 4.8 变压器事故调查恢复工作程序

● 4.4.3 架空输电线

发现事故场所时，供电所和有关机构取得紧密联系，根据情况迅速采取下列安全措施后，妥当恢复事故场所。

(a) 事故可能要扩大影响到一定范围的地区社会时，立即切断电路采

取应急措施，防止危险。

(b) 受到供电障碍时，想尽一切办法，迅速恢复供电。

两端均有电源时，事故区从系统分离，迅速对无故障地区送电，缩小或解除供电障碍范围。

② 二线路均发生故障时，为了迅速恢复其中一线路供电，恢复用器材的搬运困难需要时间的情况下，应拆卸另一线路的器材用于恢复。

单线输电线路中，事故点和用电负荷处附近，有其他输电线，而且有可能接入时，要隔离事故点，接入另一电源，尽早解除停电。

以上根据情况和平时的积累的经验，选择最佳方法进行处置是非常重要的。

(c) 恢复时要注意勘察天气和现场状况，采取充分的安全措施以防再次受害。

● 4.4.4 地下输电线

与架空输电线路不同，地下线路的事故，其绝缘不好恢复，因此再输电的成功率低。因绝缘油和含浸混合物作为绝缘，只能逐渐提高绝缘强度，恢复绝缘需要一定时间。地下输电线的通道，是布设在马路下，因此可以迅速出动，确定事故点，进行检查测定掌握事故情况。

事故时检查恢复的工作程序如图 4.9 所示。

● 4.4.5 供电线

日常生活中的电器化和随着信息社会化的发展，人们对电气的依赖性越来越大，减少供电线的事故和迅速恢复供电显得非常重要。

为减少事故，强化绝缘、带电部的遮蔽化、设备的密闭化以及雷害对策等，进行强化设备定期检修、及时维修异常设备，努力做到防事故于未然。

为尽力缩短停电时间，在高压供电线的系统构成上，为防止切换接入的高压系统过载，所有开关器操作要自动化，完善与系统的联接，促进事故区以外的自动送电。

另外，高压供电线的事故探察，是靠区分开关器的自动操作来隔离事故区，逐步向无故障区输电。探察使用加电压式事故探测器（图 4.10）在高压供电线上施加高压直流脉冲电压，测出事故点。此外，应使用无线通信车取得联系，加快探察恢复。

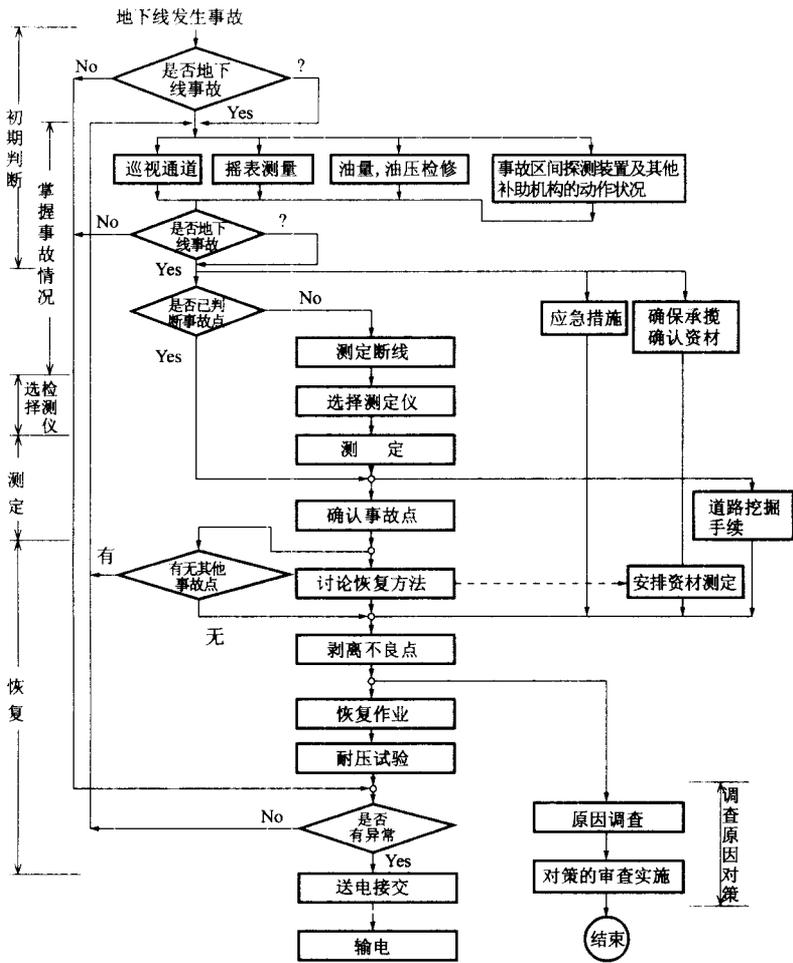


图 4.9 调查恢复地下线事故程序

供电线的事故不能立即恢复时，即需要恢复的时间较长和发电厂的电源流通中断时，可临时调用备用高低压电源车。

另外，还应准备供电线事故发生时备用的高低压电源车和应急电缆以及变压器等。

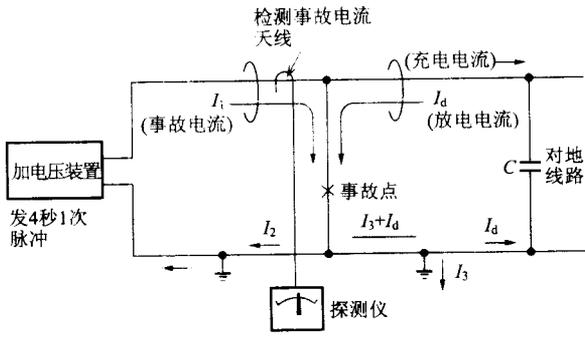


图 4.1C 加电压式事故探测器简图

第 5 章 电力系统的运行技术

电力设备包括原子能、火力、水力等发电厂设备和主干系统、地方系统等的输电线、变电所以及供电线等，形成很庞大的电力网。

电力是不能大量储存的能量，必须生产与消费同时进行，针对时刻变化的用电需求，发电厂必须随时保证不多不少的对应供电。还有如果电力网某处发生故障，必须把故障处隔离，对正常区迅速安全地供电。但是，必须考虑频率和电压是否一样，经济上是否合适。

本章中将要学习，上述电力系统的运行技术概要，也就是供电运行和系统操作、系统稳定运行技术，以及一旦系统发生故障时的系统保护和监视控制方法；还要学习支持电力保安的通信设备。

5.1 系统运行

电力系统的运行也就是供电运行，是电力系统的一贯的管理宗旨，是供电运行和系统运行的总合，是以供电可靠性、经济性和提高供电品质为宗旨进行运行的。

● 5.1.1 供电业务

1 供电业务的概况

电力的使用情况，随人们的生活周期性变化时时刻刻发生变化。人们早晨起来就开始活动，电力的使用量立即上升，午休时间虽然很短但需求变化很大，下午又出现用电高峰，到了夜间用电量减少。还有，供电量也随季节天气变化而变化。

电力的供应，是顺应这样的变化，应时的控制各种发电机的发电量，时时刻刻一直在进行调整，供应稳定又经济的电力。

在电力系统中，实际上有数百台大容量的发电机与输电线、变电所及供电线联接在一起。在这样的情况下，每一个电气所想要独立有效运行是不可能的，因为受到自身职权范围的限制得到的系统信息是有限的，一个电气所想要包容很多电气所（发电厂、变电所、开闭所等）的系统信息，几乎是不可能的。

这样庞大的电力系统，要想稳定的、经济的进行控制运行，必须要掌握其他地理上远离的很多电气所的信息。

供电业务上，为供应稳定而经济的电力，需要结合发电、输电、变电设备的联接运行状态进行综合判断；为维持系统的正常运行，需要命令畅通，具备能及时调整发电和输变电设备的条件，要有及时停止或起用使用等的运行手段。

2 分级别控制

供电命令的操作，是发指令一方和接受命令的电气所执行操作要一对一的对应。这时作为下达系统运行指令的组织，就像金字塔有层次的上下结构。下指令的组织层次结构概念用图 5.1 表示。

下边按层次将从上到下各层次调度所的权限作用加以说明。

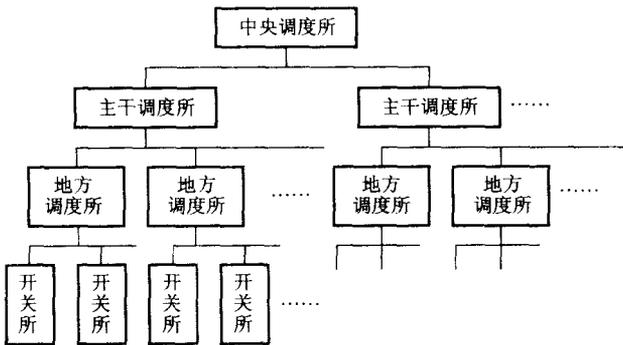


图 5.1 供电指令组织的层次结构

地方调度所 地方调度所又称调度分支所或供电控制所，一般位于系统的末端接近用电负荷，担任供电系统运行。与其他电气所有关的操作，是使用通信线路用远距离监视装置和远距离遥测装置掌握其他所的状态，

下达供电指令

下级调度所规定了各自的职权范围，系统操作与其他所有关联时，对地方调度所之间协商操作的方法也事先作了规定。

主干调度所 主干调度所又称系统供电调度所，它担任要影响数个地方调度所的主干系统（主要 500kV、275kV 等高压大容量系统）的运行，还要统管下级调度所。

上级中央调度所 上级调度所又称中央调度所，通常统辖主干、地方调度所。其与主干、地方调度所不同的是，它要制订需求和供应平衡的计划，按计划进行供电运行。

● 5.1.2 系统操作

系统操作是为电力系统平稳运行而进行的，对电力流通设备进行开断操作和电压、频率调整等的操作，它区别于平时操作和事故时操作以及大范围停电时的紧急恢复操作。

1 平时操作

为确保电力系统设备的稳定性能，应制订检修的时间间隔，定期进行设备的保护和检修。为此停止设备运行的叫做停电作业。停电作业进行的设备停止和检修作业完成后的恢复操作，日益频繁。停电作业要确保在一定可靠性的前提下，参照全系统的状况，对停电内容和实施时间的调整，都要有计划的进行。计划时间按年度计划（1年前）期计划（6月前）月计划（1个月前）的周期，调整停电计划。在停电调整会议上，以电力供应可靠性为硬性指标，进行调整不能重复停电。

供电可靠性的指标是，在主干系统中，除了停电设备以外，再有单一设备发生故障，也不造成停电；即使是负荷供电系统中，单一设备发生故障造成停电，也可以在短时间内恢复供电等。

停电方案的制定，先绘制预想潮流图，以此为基础，调整系统切换操作和调整电源输出等，选取可靠的对策。另外，各电气所自行确定电压标准，在一定的管辖范围内一直进行调整。

2 事故时的操作

电力系统发生故障时，通过系统保护装置，切断故障地周边的开关器，

隔离事故区。这样事故地区必然要停电，因此恢复供电为第一目标，准备恢复操作。

(a) 输电线的恢复操作 架空输电线故障停电时，一般靠自动重合闸装置自动完成恢复送电。输电线受雷害时，多数是暂时的，只要切断输电线设备就能恢复其机能，自动重合闸成功率高。自动重合闸的自动操作失败时，调度所和输电维修所协商，在确认设备安全状态和系统状态后，按送电指令再充电。

(b) 发电厂·变电所的恢复操作

发电厂的恢复操作 发电机从系统中解列时，应尽快从系统向发电厂送电，把发电机并入系统中。

变电所的恢复 因上一电压等级电源系统事故全部停电时，变电所按事先的事故预想决定自主配电和做好负荷充电的准备。另外，这时的操作必须考虑设备的过负荷和变压器的励磁涌流的影响。

3 大范围停电时的恢复手段

大范围停电的恢复与通常事故恢复方法不同，万一发生包括电源设备在内的大范围停电时，应优先恢复电源设备。确认了大范围停电，则立即通报全变电所（电气所），不能用常规的恢复方法。大范围停电时的恢复步骤的例子示于图 5.2 中。

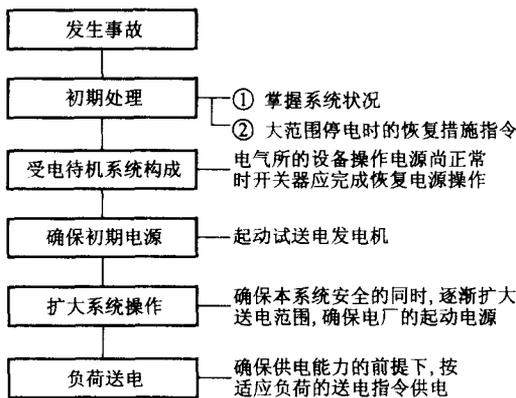


图 5.2 大范围停电时的恢复步骤

因爆炸、火灾、漏水等造成电气设备破坏时，认为它会造成社会性的大范围停电时，应紧急将该设备或该区域系统停电

5.1.3 操作指令

操作指令，是为电力系统的正常运转，从调度所向发电厂和变电所或者从上级调度所向下级调度所而发的指示事项

调度所和开关所之间的操作种类，有预先指定操作时间的预指令和停电之前发令的即时指令。比如，向多数的变电所和特别高压用户的多端子输电线的停止操作，就有很多切换操作和为了安全的开关器等的开断操作只靠即时操作指令完成停止操作的时间过长，因此发预指令进行停止前的准备操作。

图 5.3 列出操作种别的体系图例，图中 1 目的 1 操作，是从调度所每一个目的发的指令，操作所就根据指令按事先规定的操作步骤执行。还有发电厂变电所内设备和输电线的运行停止的操作和平时系统切换操作等指令。

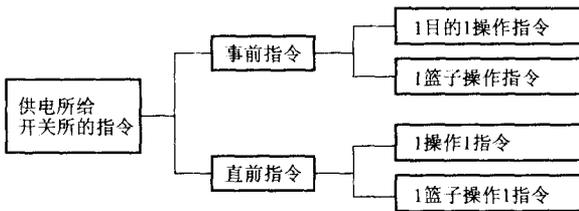


图 5.3 指令和操作种别

1 组操作 1 指令是从调度所发出与多个开关器关联的操作指令，操作所根据此指令执行多个开关的操作。有系统变化为目的，操作内容变化很大的指令，也有事故地的恢复等操作指令均属此类指令。

1 操作 1 指令是从调度所对每一个开闭器操作发指令，操作所根据此指令执行操作的指令。从系统安全方面考虑需要确认每一操作的指令和事故

地所恢复操作中使用的指令。

2 调度所之间

调度所间的指令，除从上级调度所向下级调度所发的指令外，还有向其他调度所委托发指令和代行操作（地所）的指令。图 5.4 表示调度所间的指令种别。

图 5.4 中的大纲指令，是从中央供电调度所向系统调度所、分支调度所或着系统供电指令所向分支调度所发出的供电和系统运行上的方针指令。比如，大范围停电时恢复措施指令，和提前决定的系统构成变化的指令。

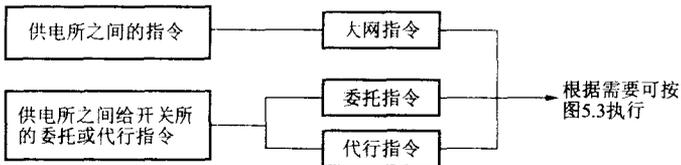


图 5.4 调度所之间的操作指令种别

委托指令，对责任范围以外相邻特定的开关器，与相邻调度所协商委托代本所向操作所发的指令，操作所根据这个命令执行操作。比如，发电厂、变电所的设备 and 输电线的使用和停止的操作，发 1 目的指令 1 操作或 1 组操作 1 指令发委托指令进行操作等。

代行指令，根据系统运行的需要，紧急情况下，按事先的约定由代行责任调度所发指令，操作所根据这一指令进行操作。

3 操作步骤

调度所向其他电气所发操作指令的工作中，为防止误指令、误操作，稳妥的执行操作，必须先明确规定操作目的、操作内容、操作步骤。还要相互确认发、受指令人的姓名，重述指令内容确认。工作步骤举例如下：

- 步骤 1 决定操作目的
- 步骤 2 制定操作步骤表
- 步骤 3 与有关电气所协商（事前指令时，指定操作时刻）
- 步骤 4 必要时修改操作步骤表

步骤 5 操作前检查系统状态

步骤 6 操作指令

步骤 7 设备操作

步骤 8 确认

步骤 9 报告

5.1.4 计划停电

1 停电计划的必要性

为了电力系统的稳定运行,对系统的发电、输电、变电设备的定期维修、检修是不可缺的。为维修、检修时的安全,一般都要将带电设备停电。从电力系统确保供电稳定性考虑,有计划的进行边调整边停电。有计划的调整实施停电作业的称作计划停电。

2 计划停电作业的种别

为合理进行停电作业计划的调整,应尽量早期开始进行调整。比如说,主干系统的计划停电作业和电源停电作业,是3年前就开始同时进行调整。还有,短期停电作业计划,在1年、半年、1个月前各自进行调整。

3 停电权限级别

停电权限级别,是考虑停电的设备对系统运行的影响范围,应由哪一级调度所有权决定执行,如表5.1所示的分法。

表 5.1 停止种别和范围的例

级别	范围	停止决定所
A	关系到全系统运行的电源设备	上级调度所
B	主干系统(500kV,275kV)设备	主干供电指令所
C	地方供电系统的设备	地方调度所
D	发电厂变电所内设备	电气所

5.1.5 作业用地线的操作

1 作业用地线的必要性

高压或特别高压线路停电时，为防止其他线路引起的感应电压和与其他线路混接的危险，应把停运线路接到接地用具或接地装置接地短路。

作业用接地联接步骤为首先联接接地一侧，然后联接线路。去掉接地时，首先摘下线路一侧，然后摘下接地。这个规定是为了确保作业者的安全采取的步骤，这样即便线路中有残留电压或感应电压也不影响人身安全。

2 作业用接地的种类

电力系统是由发电厂、输电线、变电所相互联接组成的，执行停电作业时，事前准备应相互协作做好。进行输电线的停电作业时，发电厂和变电所应切断该输电线的开闭装置，并接到作业用接地装置，建造一个安全的环境。停电作业的输电线的两端电气所离的比较远时，负责接地操作的调度所必须掌握双方的情况按供电指令进行接地操作（这种接地的称为 A 接地）。还有，在输电线进行作业时为确保安全，由现场作业方负责接地（称为 C 接地）。再有，发电厂和变电所内进行内部停电作业时，为确保安全厂（所）方负责联接作业用接地（称为 B 接地）。

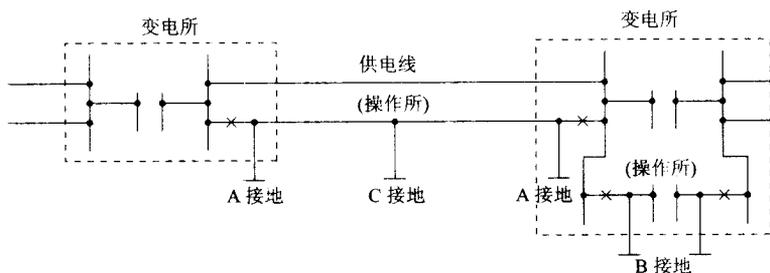


图 5.5 作业用接地联接

5.2 确保系统稳定性

5.2.1 稳定性

电力系统的稳定性，是指发电机之间的相位角差的稳定性和电压稳定性。前者是发电机的同步运转问题，不同步则引起电力震荡，影响全系统。电压稳定性，是系统的无功功率供求失去平衡时发生电压不稳定，它具有只影响局部范围的特征。

5.2.2 相位角的稳定性

在图 5.6 的一发电机组的大电力系统中，假设从电源 A 向大电力系统输电电力为 $P+jQ$ 。设输电端的电压为 E_s ，相位角为 δ ，受电端的电压为 E_R ，系统中的同步发电机组为 G ，电动机负荷为 M ，其他负荷为 L 的大电力系统。另外，设 X 为包括发电机的同步电抗和变压器及输电线等的电抗。

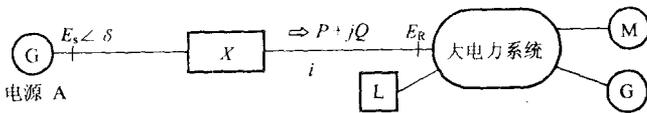


图 5.6 一台发电机与大电力系统

系统中逐渐增加输电电力 P 时，电源 A 能否无止境增加输电呢？不然有哪些制约和限制？结论是后者，即从电源通过电线给负荷输电时，能输出的电力，其受到系统制约条件的限制。

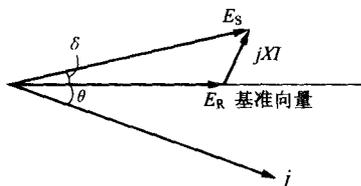
在短距离输电中，主要决定于线路和串联设备的许容电流；在长距离输电中，则用电力计算式计算出理论最大输电量。在输电电力逐渐增加时的理论最大输电量和系统事故发生时的最大输电量，是判断系统在各种状态下发电机组在系统中能否继续稳定运转的依据。

所谓稳定性，是衡量系统受重负荷和受外界影响时，能否稳定输电的尺度。相位角在指定的时间范围中，按时间长短分成静态稳定性、暂态稳定性、动态稳定性。

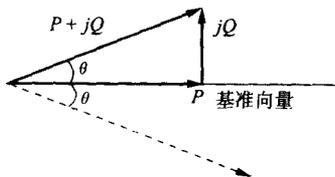
1 静态稳定性

输电系统的负荷逐渐增加时在系统输电能力的范围内，平时需求变化等外部干扰有规律变化时（小干扰）能够恢复平衡状态的能力称为静态稳定性。

输电电力可用公式求得静态稳定性。现考虑图 5.6 的简单的电力系统模型，它是通过电抗 X 连接发电机和大电力系统。电源电压为 E_S 受电端电压为 E_R 电流为 I ， E 和 E_R 的相位角为 δ ，则其电压电流向量如图 5.7(a) 所示。从向量图可有 $P+jQ$ 的关系式。图 5.7(a) 所示的向量方程式 $E_R = E_S - jXI$ 为单位向量时



(a) 电压和电流的向量



(b) 有效和无效的电力向量

图 5.7

$$E_S = E_R + jXI \quad (5.1)$$

从式 (5.1) 可求得

$$\begin{aligned} \dot{I} &= \frac{\dot{E}_S - E_R}{jX} \\ &= \frac{(E_S \cos \delta - E_R) + jE_S \sin \delta}{jX} \end{aligned} \quad (5.2)$$

$$= \frac{E_S \sin \delta - j(E_S \cos \delta - E_R)}{X} \quad (5.3)$$

其复数向量 I 是

$$\bar{I} = \frac{E_S \sin \delta + j(E_S \cos \delta - E_R)}{X} \quad (5.4)$$

受电端的有效电力 P 无效电力 Q 从式

$$P + jQ = \dot{E}_R \cdot \bar{I} \quad (5.5)$$

可求

$$= \frac{E_S \cdot E_R}{X} \sin \delta + j \frac{E_S E_R \cos \delta - E_R^2}{X} \quad (5.6)$$

$$P = \frac{E_S \cdot E_R}{X} \sin \delta \quad (5.7)$$

$$Q = \frac{E_S E_R \cos\delta - E_R^2}{X} \quad (5.8)$$

式(5.7)表示输电电力 P 与电压 E_S, E_R 以及 $\sin\delta$ 成正比 与 X 成反比。

P 在 $\delta=90^\circ$ 时最大, 其最大值 P_M 为

$$P_M = \frac{E_S \cdot E_R}{X} \quad (5.9)$$

这时 P_M 为静态稳定极限电力, 平时增加电力也只能增加到这个限度。式(5.7)用输电电力 P 和相位角 δ 的关系用坐标表示则见图 5.8 这个曲线称负荷曲线或 P - δ 曲线。

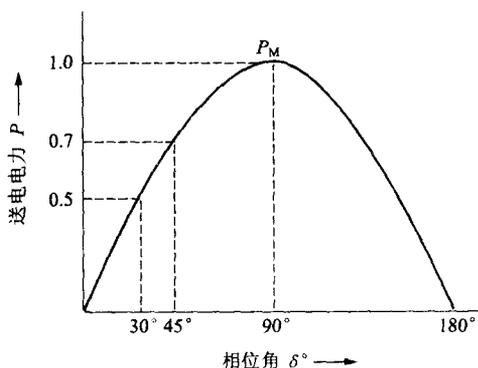


图 5.8 2 机系统的 P 与 δ 的关系

从式 5.7)和式(5.9)可得

$$P = P_M \sin\delta \quad (5.10)$$

式(5.10) P 和 δ 关系图就是图 5.8 从图中可看出 P 最大时 δ 正好是 90° 。

式(5.10)示出 δ 变化微小时, P 的变化从式(5.10)对 δ 的微分可看出, 即

$$F = \frac{dP}{d\delta} P_M \cos\delta \quad (5.11)$$

如式(5.11)所示 在 $0 < \delta < 90^\circ$ 时, F 为正, $\delta > 90^\circ$ 时, F 为负。这是反映系统电力强弱的指标。也就是说, $\delta < 90^\circ$ 时 $F > 0$ 这就意味着 δ 有上升的趋势, 则发电机的输出功率增加, 发电机输出制动转矩增加, 结果发电机的转速慢下来 δ 又回到原来的值。 δ 有减少的趋势时, 正好发生相反情形, 但 δ

仍要回到原来的值。因此，发电机就能安全运转。

$\delta > 90^\circ$ 时 $F < 0$ 当 δ 有微小增加变化时，输电电力下降而发电机的转数则加快，相位角就又慢慢回升。这时由于惯性不但不停止反而加速，无法同步运转，这种不同步的现象叫做“失步”，

$$F = dP/d\delta$$

称做同步化力， $F > 0$ 时稳定运转， $F \leq 0$ 时不可能稳定运转。

2 暂态稳定性

电力系统一旦发生短路事故等大干扰时，便发生的电力震荡。这种震荡，使发电机组间发生相对运动，相对角不断变化，从而影响发电机的输入输出功率特性、发电机端子电压的励磁系控制特性、负荷电压频率等，并相互影响引起很复杂的震荡，不能简单的用重合闸恢复稳定运行状态。系统的控制系统，对此采取抑制措施，经过一个暂态机电过程恢复原来的稳定状态或达到新的稳定运行状态。如果控制系统的控制措施不当，则可能扩大震荡，系统就不能稳定，从而引发电机失步、失磁等异常现象。能否抑制电力震荡，与电力系统的控制特性有很大关系。若抑制电力震荡继续稳定运转的能力高，则暂态稳定性也就高。大干扰震荡的影响允许暂态持续时间为 10 秒左右。

提高暂态稳定性的措施

提高暂态稳定性的措施有，利用电力系统稳定装置 PSS(Power System Stabilizer) 和自动电压调整装置 AVR(Automatic Voltage Regulator) 控制发电机励磁系的方法来抑制电力震荡。

当发电机的相位角(继续)增加时，要加大 AVR 输出，增大发电机电压，抑制发电机加速当发电机的相位角下降时，要减少 AVR 输出，减小发电机电压，防止发电机减速。

3 动态稳定性

在电力系统稳定运转中，发生短路、接地等系统故障时，发电机的输出制动转矩和原动机输入的拖动转矩不平衡，可能发生失步现象。这样系统发生大的扰动时，也能恢复同步稳定输电的能力叫做动态稳定性。另外，系统发生故障前的最大输电电力称动态稳定极限电力。

动态是时间区域的概念，是发生电力震荡时的第 1 个波或者最长也不

过 2~3 个波左右的时间为对象。

稳定性，是在同一电力系统中的各同步机是否保持同步运转，系统内的所有电气设备的输入和输出能量是否平衡的问题。

因此，动态稳定性，与故障的种类、持续时间、故障前的系统负荷有很大关系。同时也与系统诸设备的过渡特性有很大关系，比如调速机的动力特性，电压调整器的特性、电机的惯性力矩等以及线路参数、继电保护方式、中性点联接方式、开关的开断时间等。

提高动态稳定性的措施

要提高动态稳定性，是在系统故障等系统状态突变时，尽量抑制发电机感应的电压相位角的变化是很重要的。另一方面，即便发电机感应相位角变化，也应采取不易失步的措施。提高动态稳定性的主要措施有缩短事故解除时间和发电机励磁系的高速控制等方法。

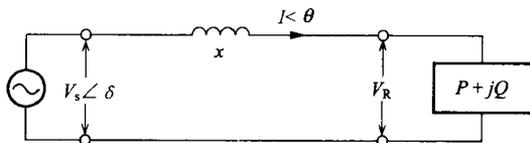
5.2.3 电压稳定性

1 电压不稳定现象

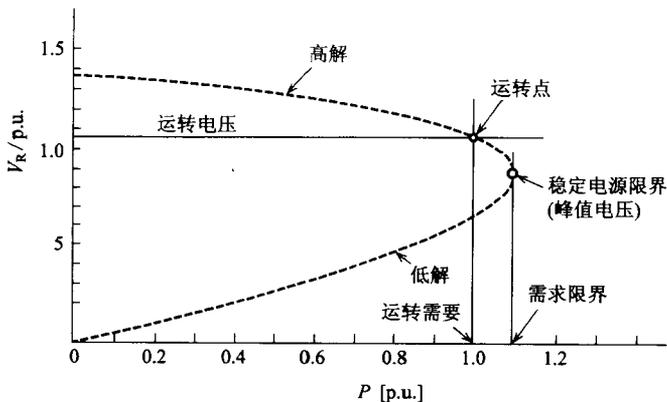
在长距离输电线路中大容量输电（有功功率，无功功率）时，要确保稳定输电，必须有功功率和无功功率与需求保持平衡。电压稳定性，主要与无功功率的供求平衡有关。如果供给的无功功率跟不上负荷消耗的无功功率及其损失，则负荷端的电压急剧下降，造成系统破坏。

图 5.9(a) 是一台发电机和一负荷的系统模型。图 5.9(b) 是表示电力 P 和电压 V 的特性曲线。在这个系统模型中，电力 $P + jQ$ 在一定的功率因数下逐渐增加时，因发电机、变压器及输电线的阻抗，负荷端的电压也慢慢下降。负荷电力 P 是电压 V_R 和电流 I 乘积， V 下降则 P 增加到一定程度以后就无法继续增加，若想继续增加，则 V 急剧下降可能造成系统破坏。这一极限状态的电压称稳定极限电压。

但是因 P 是 V 和 I 的乘积除 V 和 I 在正常区域之外，若电压下降很大时，电流增加很大也能获得同样的电力 P 。也就是说，要想获得同样的电力有两种解，前者称高解后者称低解。总之，高解是稳定运转区域，低解是不稳定运转区域。图 5.9(b) 的 P - V 曲线形状叫做凸峰曲线，稳定极限电压称凸峰电压。



(a) 1组发电机1负荷系统



(b) P - V 曲线

图 5.9

2 提高电压稳定性的措施

要提高电压稳定性的有效方法，是确保有功功率供给和减少无功功率的供给损失。具体的措施如下：

(a) 系统切换

切换负荷 在电压稳定性较低的系统（负荷一侧无电源，联系潮流多的系统）中，可能要出现重潮流，则事先把负荷切换到其他系统里。

负荷一侧联接电源 负荷一侧联接电源，可增加无功功率的供给力，这是因为离发电机很近，减少无功功率损失。

(b) 提高电压运行

系统电压提高时：

增加输电线（尤其是电力系统）的无功功率（无功功率发生量与电压的二次方成正比）。

减少无功功率损失（无功功率损失与电压的二次方成反比）。

(c) 调相设备的使用

利用具有向系统供给无功功率特性的电力用电容 SC(Static Condenser) 和静止型无功功率补偿装置 SVC(Static Var Compensator) 同步调相机 RC(Rotary Condenser) 等设备，根据负荷恰当的往系统投入无功功率，则可提高电压的稳定性。

3 近年的系统状况

电压不稳定现象受负荷特性和重负荷的影响很大，近年夏季最大负荷时，受空调的影响负荷不受电压大小的影响接近定电力特性。因此，在作系统计划运行时，必须考虑负荷特性是很重要的。

5.3 系统保护方式

5.3.1 基本思路

组成电力系统的设备和设施易受雷、风雨、盐雾等自然灾害的影响 还有其他物体接触引发事故的可能。因此电力系统的事故是不可避免的，既是这样也应尽量供给优质的电力。

一旦电力系统发生事故，需求的平衡和电力系统的稳定性就受到破坏，不及时采取恰当的措施，可能扩大停电范围和延长停电时间。

为此，电力系统施設高级的保护和控制系统，这是电力系统的组成和系统运行等方面协调和配合的基础。

系统继电保护是在系统发生事故和异常时，根据状况立即执行开断系统的开断操作，可确保人身和设备安全。还有防止事故向正常系统蔓延，从而提高和保持电力系统稳定性的作用。其可归纳为以下三点。

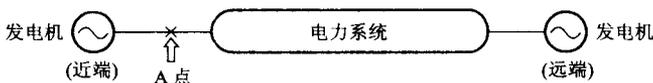


图 5.10 电力震荡说明系统

解除电力系统的故障。
防止事故波及正常系统。
靠自动重合闸机能确保系统联系和迅速恢复供电。

● 5.3.2 解除事故

1 故障的灵敏检测和准确高速的解除

系统中发生短路故障时，如放任自流，则设备和与其相邻的关联设备因短路电流受损。还有可能影响系统稳定性进而造成停电。

为了避免事故的蔓延，要灵敏的检测出故障，同时必须准确快速的加以解除。对主干系统等重要的系统应设双重继电保护，还有故障解除时间应限制在 70ms 以内。

2 隔离区间的最小化

要解除故障必须把故障点的设备同正常设备隔离，隔离的选定范围应尽量限制在最小范围内。

所谓解除故障就是停电范围限制在最小范围，即用开关围起来的故障范围应限制在最小范围。

3 继电保护动作的可靠性

继电保护的動作应准确无误，必须避免误动作。而且，其特性要稳定且抗老化。

● 5.3.3 防止事故扩大

电力系统发生的事故，以解除事故为目的，即利用保护继电器及时从电力系统中解除，但是，受事故的直接影响或事故引起的系统构成变化的影响，给电力系统或多或少带来电力震荡。

这个震荡，一般在系统固有的衰减特性和各种控制装置的控制下，可迅速恢复稳定。但是，事故严重时将发生频率异常和系统失步及设备过负荷等，而且还有可能扩大事故现举稳定性做一例子，如图 5.10 的 A 点发生了短路事故则 A 点的电压几乎等于零，离事故点越远电压的影响就越小。事故发生的同时在 A 点附近的发电机的输出电力急剧下降，但发电机从原

动机械输入的功率不但下降,反而出现比输出功率大的状态这时发电机的转数上升以动能的形式把能量存起来但是远离 A 点的发电机几乎不受其影响,与电力系统联接的其他发电机都以同一频率正常运转,而 A 点附近的发电机则无法同步便容易造成失步。这一现象,离事故点越近,事故的持续时间越长,越容易进一步发生严重事故。

5.3.4 确保系统联接与供电恢复快速化

1 重合闸的方法

电力系统一旦发生故障要立即隔离事故区,如不及时解除就影响系统稳定运行,尤其是在主干系统中可能酿成发电机失步和系统瓦解等事故。若进一步发展则不得不切断大容量输电线,其影响之大就可想而知,而且在供电系统中造成持续停电,因此迅速恢复正常状态是非常重要的。

架空输电线发生的事故中,多数是雷击造成的绝缘子在大气中的闪络故障。这样的故障,一旦立即停止输电,电弧就消失,过一会儿故障点的电离子就散去,即可恢复绝缘,因此重合闸的成功率比较高。

但是,地下输电线事故中,基本上不设重合闸,因为有再发故障的隐患,有时还有烧坏电缆的危险。

2 自动重合闸方式

主要的重合闸方式,有三相重合闸方式、单相重合闸方式、多相重合闸方式。三相重合闸方式,是如图 5.11 示出在二线路输电线路中,一线路不管发生是什么故障,靠保护继电器动作被切断三相后,过一段时间重合的方式。这种方式在一般供电系统中广泛使用。

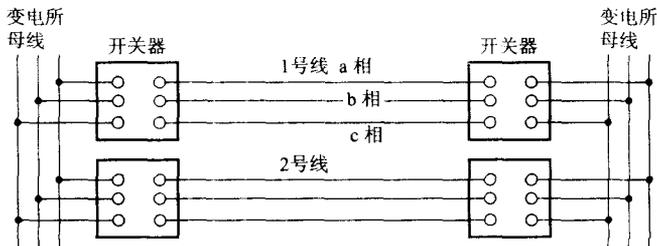


图 5.11 再闭路的例(2线路输电线)

单相重合闸，是只限于一线路接地故障时切断故障相，过一段时间后重合的方式。这种情况下，剩下的二个正常相继续输电，因此在缺相状态下继续与系统保持联接。比如，假设一号线路 a 相和二号线路 b 相发生接地事故，这在三相重合闸方式中就同时停止一和二号线路，解除与系统的联接；但是，在单相重合闸方式中，只要重合闸成功就能保持系统联接。不过要想使用单相重合闸，需要每一相都要施以能控制开断的开关器。这个方式以往一直沿用于主干系统中，但近年改用多相重合闸方式。

多相重合闸方式，是在二条平行输电线中，只切断发生故障的相的重合闸的方式，二个线路发生多相事故的条件下也同样适用。不过确保切断中的系统联系，在二个线路中至少有二相以上正常相为实施条件。比如，一号线路的 a 和 b 相，二号线路的 b 和 c 相发生故障时，还剩下一号线路的 c 相和二号线路的 a 相二个正常相，就符合自动重合闸条件。开关器的性能是与单相重合闸一样按相控制开断。多相重合闸方式，比三相重合闸方式和单相重合闸方式自动重合的成功率高，一般使用于可靠性要求高的主干系统中。

5.3.5 继电保护方式

1 系统故障现象和继电保护方式

保护继电器保护的系统故障现象，有 ① 短路和它引起的事故；② 过负荷；③ 失步；④ 频率下降等，下面对一般故障隔离的继电器方式加以论述。

隔离故障继电器有主保护继电器和后备保护继电器，一旦系统发生故障，首先由主保护继电器检测出并立即投入隔离故障的工作。故障点的隔离基本上是靠主保护继电器进行的，但万一继电器拒动作（该动作不动作的状况）或控制线路不畅，开关切断失败等不能隔离故障点时，故障就无法被切除，进而有扩大停电范围的危险。这种状态下，作为主保护继电器的替补，设置了后备保护继电器

2 主保护继电器

主保护继电器，可准确、高速的检测出由开关器围成的最小停电范围内的故障，它作为各设备专用检测器分别设置在发电机、变压器、输电线、母线等设备上，一旦检测出故障，按事先的规定向开关器发动作指令。图 5.12 表示保护继电器担负的保护范围。

发电厂变电所的变压器和母线的保护，是通过所内检测用互感器，读取可以计量的系统电压信息和电流信息，平时则由继电器来监视某设备发生故障时，该设备上的继电器迅速反应检测。还有比较设备的输入量和输出量，来判断设备内部是否有故障的差动继电器和检测事故电流的过电流继电器。

输电线两端的电气所离的较远时，继电器只能检测到本电气所的信息。如图 5.12 示出的二线路并用的一般输电线中，利用线路选择继电器，比较二线路的信息，以判断哪一个线路发生事故的方法使用比较多。但是，在系统末端发生事故时，因距离远这种方式无法判断哪一个线路发生故障。这时开关器的动作成段落性一段一段进行开闭，解除事故的时间需要很长。在主干系统等重要系统中，利用通信线路把两端的信息传给继电器，迅速判断故障线路，这种方式可靠性很高。以往采用电磁型或静止形相位比较继电器，但现在已采用微型电流相位比较继电器。

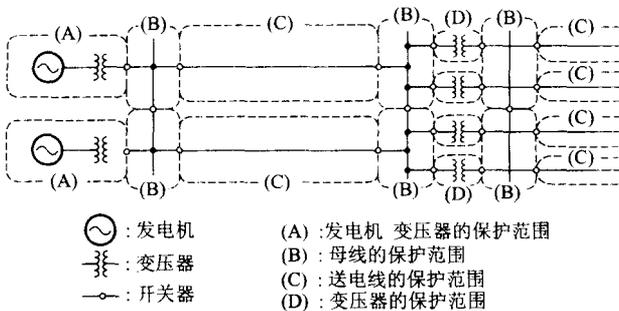


图 5.12 保护继电器的保护范围

3 后备保护继电器

后备保护继电器，是万一主保护继电器发生故障或继电器虽然动作但因开关器发生故障等，靠主保护继电器不能解除故障时做为备用的。对主保护继电器的误动作或拒动作时，多采用能测定故障地点距离的距离继电器。后备保护继电器的保护范围比主保护继电器设定范围更大。还有利用时间延时器，在主保护继电器动作后，按时间延时器设定时间后备保护继电器延时动作的远端后备方式。

另外还有开关器动作失灵时采用的失灵后备方式。这是电力系统内输电线的主保护继电器已经动作，但事故在继续的情况下，停止包围该输电线开关器的母线方式。电力系统的保护，分为主保护和后备保护两种继电器进行，根据不同的保护范围和协调动作时间，准确的界定保护范围

● 5.3.6 安装保护继电器的条件

保护继电器必须能灵敏的检测出故障类型，但灵敏度过高反而不好区分类似的故障。因此，需要看清系统现象的全貌，要求要有能区分类似故障现象和故障类型的性能。主要的故障类型有以下几种：

电力振荡。

过负荷电流。

过渡电压电流。

平时以及事故时发生的不正常电压电流。

⑤ 系统间的电磁感应。

⑥ 变压器充电时励磁涌流

5.4 电力设备的监视控制（水力发电·变电）

● 5.4.1 基本思路

电力设备的监视控制，是指靠电力设备、仪器、显示装置等，准确掌握运转状况，同时设备和线路发生异常时进行适当的设备操作（包括自动操作）。

● 5.4.2 监视控制方式

发电厂（水力）和变电所的监视控制方式，应根据其规模和系统所占的重要性等条件采用不同的方式。从前是靠常住技术人员进行监视控制，但近年随着遥感控制技术的发展，利用控制用计算机进行大范围集中控制。

下面介绍监视控制方式。

1 水力发电厂的监视控制方式

远距离监视控制方式，有常规监视控制、远距离监视控制、随时监视控制以及随时巡回监视等方式。

常规监视控制方式 是指技术员常住在发电厂，对发电厂进行监视和进行设备操作的方式。不限制输出功率。

② 远距离常规监视控制方式 是指技术员常住在控制所，在远离发电厂的控制所内对发电厂进行监视和设备的操作。不限制输出功率。

随时监视控制方式 是指技术员平时住在发电厂或厂外的某技术员驻在所，根据需要到发电厂监视并进行设备操作，还有根据情况技术员从技术员驻在所走到某控制所，在控制所进行发电厂的监视以及设备操作。不限制输出功率，但技术员到达发电厂的时间和切换操作频度方面有具体的规定。

随时巡视方式 是指技术员隔适当的时间到发电厂，就在发电厂内进行监视和设备的操作的方式。即便有停电事故，也不至于发生供电障碍，输出功率调整限制在 500kW 以下。

2 变电所的监视控制方式

变电所的监视控制方式 有实时、间断、远方实时、远方断续、简易监视等方式，东京电力现采用以下二种方式。

实时监视控制方式 技术员常住在变电所，监视变电所和设备的操作，均在该变电所进行。一般有 10~15 名技术员三班倒 24 小时工作。没有使用电压、输出功率的限制，这是大容量又重要的变电所采取的方式。

远方实时监视控制方式 常住三班倒技术员在工务所控制科或总合控制所或自动控制所等地，对变电所进行监视和设备操作的方式，平时现场一般无人，非常情况下从控制所出勤处理。使用电压和输出功率方面没有限制。由超高压一次变电所的一部分和中间供电用变电所采用这种运行方式。这种无人化变电所的比例已达 98.7%。

● 5.4.3 设备自动化

为庞大而复杂的电力系统的稳定而有效率的正常运行，以电力用设备与信息控制技术的发展相结合，正在积极的促进电力设备的自动化，在供电和生产方面起着巨大的作用。

下面以东京电力为例，讲述有关电力系统控制及设备自动化系统的情况。

1 各系统的控制分工

电力系统的控制按其特性分四个级别，各级的作用和分工如下：

(a) 全系统的供需控制

中央调度所 控制频率，控制供需平衡，控制负荷经济分配。

火力、原子能、抽水蓄能发电厂 控制各发电厂的运转。

(b) 500kV 为主的主干系统

系统供电调度所 500kV、275kV 系统的供电运行。

主干系统变电所 500kV、275kV 变电所的运行（一部分由工务所和总合控制远距离控制）。

(c) 154kV、66kV 以下的地方系统

分支调度所 154kV 以下包括一部分 275kV 地方系统的供电运行。

工务所、总合控制所 154kV 以下变电所的运行（包括一部分 275kV 变电所）水力发电厂的运行（包括抽水蓄能发电厂）。

(d) 6kV 的供电系统

分公司、营业所 6kV 供电线的运行。

2 各部门的自动化

调度、工务、供电部门的自动化，是以提高系统运行、设备运转的效率化、自动化、安全性、可靠性为目的，经过了如表 5.2 所示的发展经历，这里简单介绍各部门自动化。

(a) 调度部门 在中央调度所，根据近年需求和供应力之间严重的供需矛盾，在主干系统的电压安全监视系统中，引进应用计算机高新技术的供需自动化系统（ELDAC）等，促进了应用最新系统技术的高可靠性系统自动化的发展。

另一方面，在系统供电调度所和地方调度所中，逐步设置使用计算机控制的供电自动化系统，增强系统监控功能；在记录和统计处理运行状态和制定操作指令步骤等方面实施自动化。

(b) 工务部门 工务部门的自动化工作，以往是以发电厂变电所的远距离监视控制自动化为中心，但随着设备的改善和发电厂变电所自动化水平的提高，控制规模大幅度增加，变电所已使用计算机控制的集中监视控制装置。

表 5.2 各部门自动化的经历

	1955 年	1965 年	1975 年	1985 年
输电部门	<ul style="list-style-type: none"> • 模拟监视控制 • 模拟 TM 数字信息传输 	<ul style="list-style-type: none"> • 数字方式监视控制 • CDT 监视信息传输 	<ul style="list-style-type: none"> • 引进输电所计算机系统 	<ul style="list-style-type: none"> • 使用总合自动化系统
发电变电部门	<ul style="list-style-type: none"> • 使用远距离监视控制装置 	<ul style="list-style-type: none"> • 使用远距离监视控制装置(自动控制所) 	<ul style="list-style-type: none"> • 发变电中引进计算机系统 	<ul style="list-style-type: none"> • 使用总合自动化系统
供电部门	<ul style="list-style-type: none"> • 使用供电线开闭器事故探察 	同左	<ul style="list-style-type: none"> • 试用高压供电线载波方式的供电自动化技术 	<ul style="list-style-type: none"> • 引进供电自动化系统 • 使用总合自动化系统

目前运行部门自动控制所和维修部门合并为总合控制所和工务控制所 进一步扩大监视控制规模 对 20~40 个发电厂、变电所进行集中控制。

另一方面，在系统中随着电力设备运行技术的飞速发展和计算机技术在硬件和软件方面的进一步改进，增加了顺序控制性能，从双重运行方式的系统发展成采用 LAN 技术的高速处理分散形系统，加强了数据处理的高可靠性，促进系统的扩展。还有在变电所设置的远距离监视控制装置，除了以往的周期性方式外，使用传递高速、大容量信息的电传，可以收集设备异常的详细资料，促进变电所设备的远距离控制。

(c) 供电部门 在供电自动化的第一阶段，出现供电事故时，使用供电线开关自动划分事故区的事故搜查方式。但到了 1991 年成功的开发了供电自动化的供电系统，供电开关器的信息，用高压线载波传递信号的方式，实行供电线开关器的远距离控制。

另外，为适应地区特点，采用三种不同的供电系统。特别是城区中心过密地区的供电系统，已采用具有映射显示功能的供电系统图。

(d) 电子通信部门 结合各部门的自动化进程，为适应远距离显示装置 SV(Super Visory)和远距离测定装置 TM(Telemetering)的信息以及事故信息等信息种类的增加，各调度所设置了周期数字信息传送装置 CDT(Cyclic digital Data Transmission equipment)和高速、高可靠性的报文分

组交换方式的数据集配信装置。

还有，采用二系列同步处理方式，促进信息传送离散化。

3 设备总合自动化

设备总合自动化 是在部门自动化的基础上 组成输电、变电、供电自动化系统相互联系总合的工作系统 (图 5.13)。

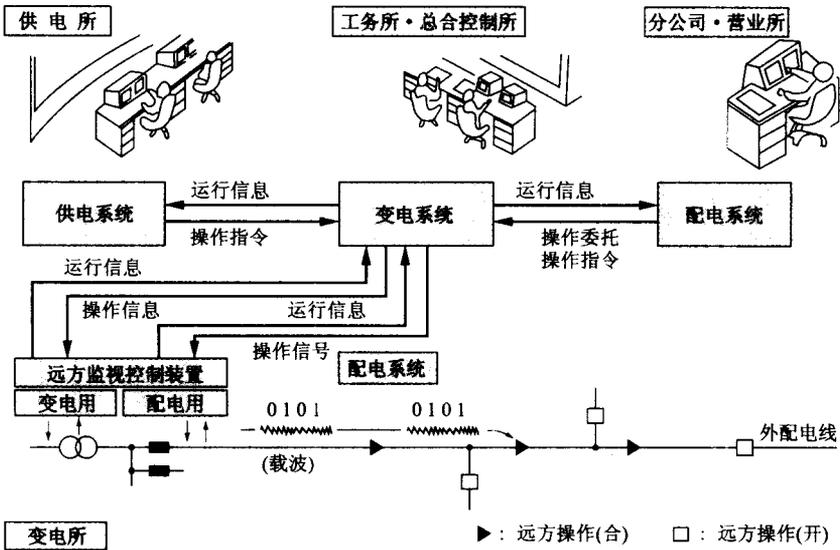


图 5.13 设备总合自动化系统

系统组成的特征是，输电、变电、供电的各系统通过 DX 网在线联接 由输电系统和供电系统制定的设备操作指令，通过在线联接系统传送到变电系统，按指令自动执行设备操作步骤。

5.5 电力通信设备

5.5.1 电力通信设备的作用

储存电力是非常困难的，因此必须时时刻刻掌握供需平衡。为此根据

电的使用量经常调整发电量，应保持正常的电压和频率。

万一遭受台风或雷害，电力设备或输供电线路发生故障时，也能迅速检测出事故区并隔离事故区，继续供电是很重要的。

电力用通信设备，设置在广泛的范围里，控制火力、原子能、水力等发电厂的发电，迅速准确把握变电所等的信息，是运筹电力系统的神经系统，起着稳定的、效率供电的重要作用。

今后日益庞大化、复杂化的电力系统，为安全有效率的运行和业务管理合理化 适应高度信息化的社会 应建设高速度、高可靠性的数字通信线路网。

5.5.2 电力通信线路的使用范围

电力通信线路的使用范围大致分成以下 4 类。

电力系统保护。

电力设备的监视控制。

协助电力设备运行。

业务的精细化效率化。

通信系统由末端设备（继电器和检测器、末端 PC、计算机等 和信号转换装置（载波信号端局装置和循环数据传送装置及局内线路终端装置等）以及数据通信网（数据网系统 DNS）构成。数据通信线路网由无线装置和光纤通信装置等通信传送装置和电子交换机等组成（图 5.14）。

5.5.3 通信设备的概况

1 传送设备

数据传递设备传输速度的多重化是以 64Kbps 为基础，以 1.5Mbps、6Mbps、32Mbps、100Mbps、400Mbps 等为标准，是无线电和有线电组合成的系统（图 5.15）。

无线电设备中，主要使用 7GHz 的微波通信，通过线路监视控制有关电力供应的超高压系统的保护运行和发供电指令等。微波通信的通道，在超高压以上电气所之间确保二个通道以上，组成通信网的干线。

被高层建筑等遮挡，无线线路无法保证的市区调度所，应使用不受灾害影响的卫星通信线路，确保与上级联系的固定线路。在非常灾害时期，通过卫星移动通信局传送电话和影像。

有线设备中，使用光纤通信线路，不受电气感应和杂音的影响，且能

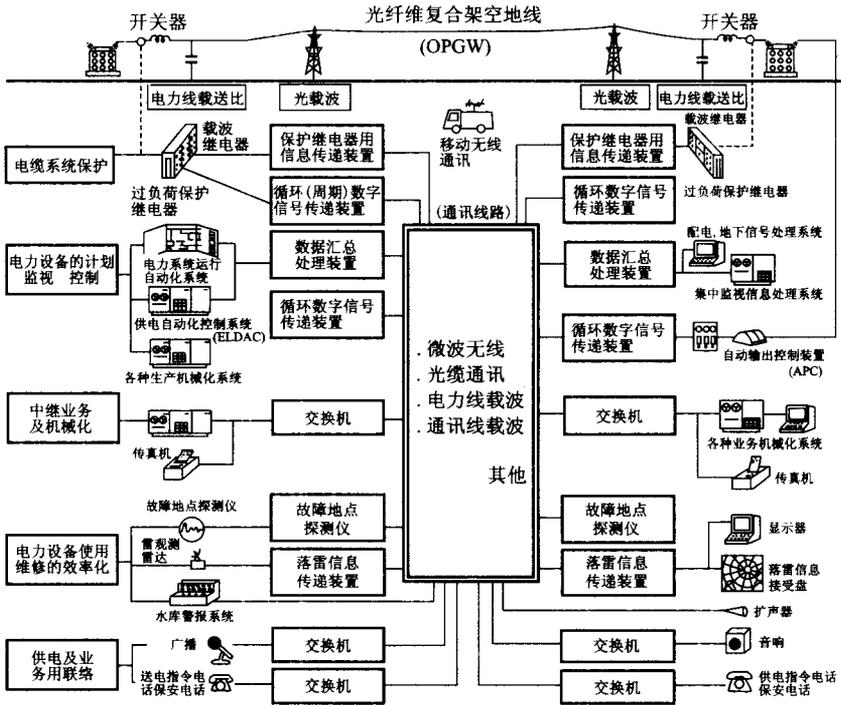


图 5.14 电力用通信使用方法和系统构成

长距离宽频带传递，因此在 154kV 以下系统中，用于系统信息和图像信息以及业务机械化的数字信息的传递。

电力系统特有的传送设备是，使用内藏光纤的复合架空地线 (OPGW) 和利用输电线的电力载波通信。

2 交换设备

营业所和电气所各自分散在很广的范围，为进行各地间的信息交换，要设置交换机相互联接沟通。

(a) 电话用交换机 在电力系统的运行和保护中，电话通信起着很重要的作用。因此在主要的营业所（事业所）应设置电子交换机，作为中继局组成拨号接线网络，并在接纳电话传真中继线路的同时，用于转接各所间的电话供电指令（图 5.16）。

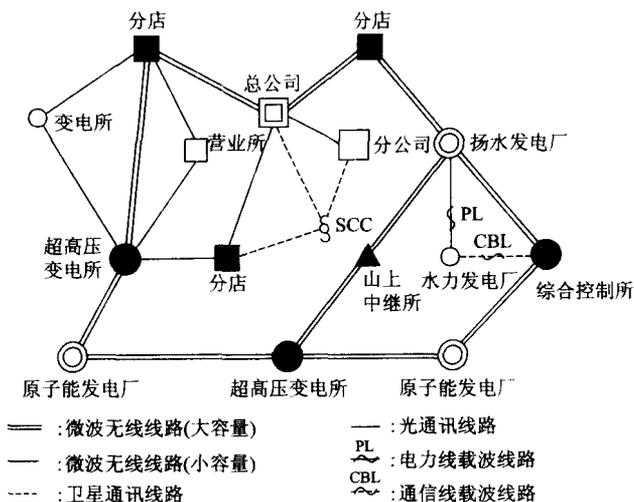


图 5.15 电力保护通信网的基本形式

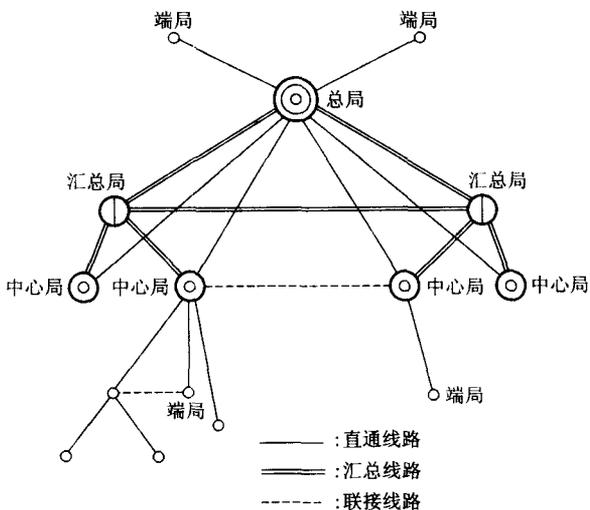


图 5.16 保安电话网的基本形式

(b) 供电指令用交换机用于调度所和超高压电气所之间和调度所相互之间，相互联系的供电指令电话，构成专用交换网。对于重要的指令对

象，为确保在非常灾害时也信息畅通，设置两个以上的地方交换机，并开通不同的线路通道（图 5.17）。

(c) 数据处理用交换机 业务机械化等数据处理的信息传递频繁，但每一次信息量比较少，因此使用报文分组交换机和 LAN 组合的信息组线路网。还有电气所的电力设备运行信息（遥测信息和继电器信息）和设备综合自动化信息以及用户的负荷信息等数据处理，是由设置数据集配信装置 (DX) 和集线装置，形成专用数据集配信息处理网。

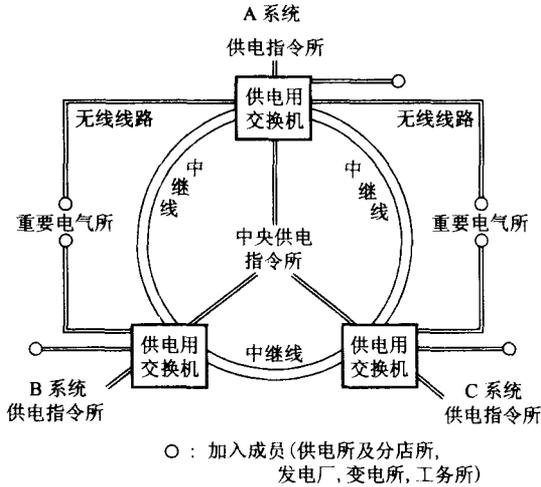


图 5.17 供电指令电话的基本系统

第 6 章 配电设备

维系电气事业的发电和电力流通设备中，用户一侧的设备叫做配电设备。本章中要学习住宅和大厦、工厂等地使用的照明、空调、热源等设备上的电气设备，即配电设备和内线设备知识。

本章中以修订的电器事业法为基础，除了电力企业设备以外，介绍用户使用的一般低压配电设备和自家用高压以上的配电设备。而且，在本章以上述配电设备的保护安全方面为重点，兼学设计、施工以及维修管理等知识。

6.1 供电的基本思路

6.1.1 契约电力和供电电压

给用户的供电方式和供电电压的标准见图 6.1。不过，供电电压可根据用户的特殊情况和电力公司的情况，可以调到该标准的上一档或下一档的电压。

表 6.1 契约电力的供电电压和电气方式

契约电力/kW	标准电压/V	电气方式
50 未満	100,200	单相 2 线式,单相 3 线式,三相 3 线式
50 以上 2000 未満	6000	三相 3 线式
2000 以上 10000 未満	20000	三相 3 线式
10000 以上 50000 未満	60000	三相 3 线式
50000 以上	140000	三相 3 线式

6.1.2 电气契约种类和容量

按电力（气）契约种类的使用范围见表 6.2。

表 6.2 契约种别和使用范围

用电区分	契约种类	适用范围	
照明	定额照明	照明或小型机器使用需求	总容量 400VA 以下
	计量照明		不适应定额照明且契约电量在 50kVA 以下
	临时照明	照明或小型机器使用, 契约用电时间不到 1 年的需求	契约容量 50kW 以下
	马路照明	一般道路、公园等的照明以及小型机器	契约容量 50kW 以下
照明电力并用	业务(生产)用电力	高压、超高压供电, 照明和小型机器及动力并用需求	契约容量 50kW 以上
电力需求	低压电力	低压需求和使用动力需求	契约容量 50kW 以下
	高压电力	高压需求和使用动力(包括照明)需求	契约容量在 50kW 以上 2000kW 以下
	超高压电力	超高压需求和使用动力(包括照明)需求	契约容量 2000kW 以上
	临时电力	低压、高压或超高压需求, 动力或照明以及小型机器、动力并用需求, 契约使用期不到 1 年	
	农业用电	农业灌溉排水用动力需求	
	自家发电补充电力	高压、超高压需求, 照明、小型机器和动力并用。因用户的发电设备发生故障电力不足而请求补充供电的	
	备用电力	生产用高压、超高压用电需求, 平时因事故电力不足时需要用备用线供电补充请求时	

6.2 高压配电设备

6.2.1 高压用户引入口设施

1 引进方式和责任分界点

从供电线引进到配电线路的方式, 有架空线引入方式和地下线引入方式。电力公司的设备(电力事业用工作物)和高压配电设备(自家用电气工作物)的界线从保安的责任考虑界定为如表 6.3。保安责任的分界点由电

力和用户协商，依据行政官厅的处理方针界定。

根据界线，负荷一侧的有关工事、运营、维持的保安责任，由高压配电设备施工一方负责。为此，高压配电设备设施一方，有义务委任电气责任技术人员进行监督保安。

同时，为防止事故波及到电力公司，建议用户在责任分界点施设区分开关和接地保护装置（GR 附带 PAS 等）。

表 6.3 引线(电)方式和责任分界点

引入方式	保安上的责任分界点和区分闭器
从架空供电线 (包括架空电缆) 用绝缘线引入时	
从地下供电线 用地下电缆引入时	

(注) VCT: Voltage Current Transformers

2 从电力公司的架空引入线引入

从电力公司的架空引入线引入时，一般由用户在自家院内埋立电株，把自家的高压地下电缆拉上电株，以此电株为引入点（即责任分界点）的引入方式（图 6.1、图 6.2）。

还有，从防止用户事故波及的观点出发，以保护用户电缆等为目的，施工时根据高压配电设备指南（资源能源厅公益事业部技术课监制）遵从波及事故防止指导事项，在这个连接点上安装附带负荷开关器的接地保护开关装置（附带 PAS 的 GR）。

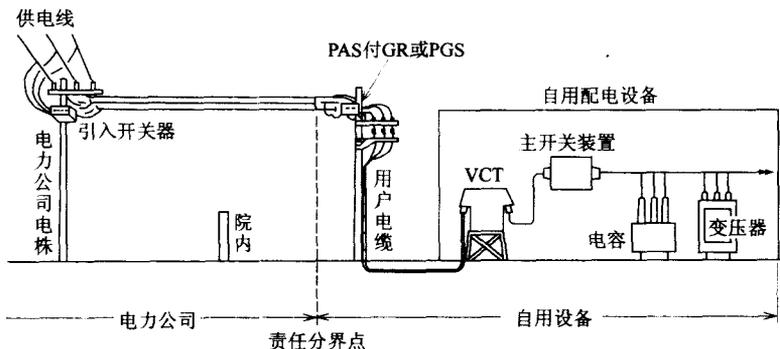
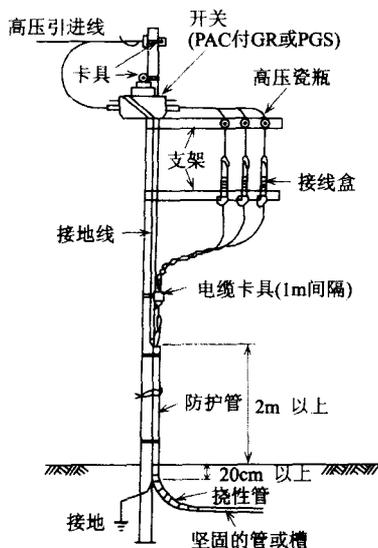


图 6.1 从架空线引进配电形式



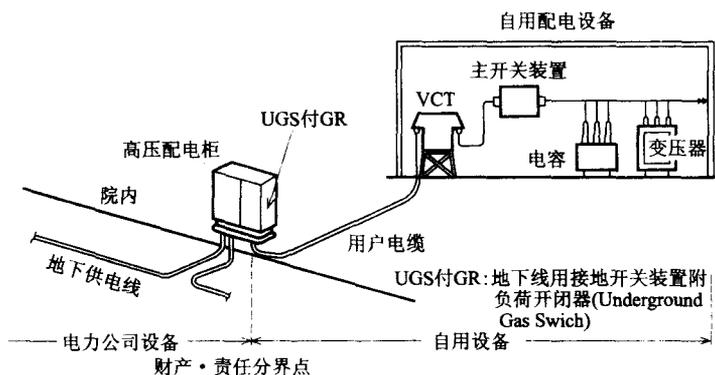
PAS付GR: 架空线用接地开关装置
附负荷开闭器(Pole Air Switch)
PGS付GR: 地下线用接地开关装置
附负荷开闭器(Pole Gas Switch)

图 6.2 高压电缆从地下拉上电杆安装引进

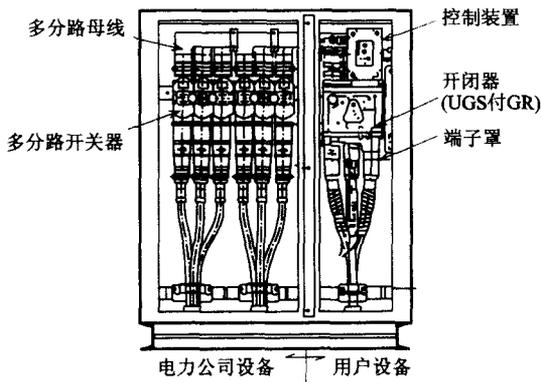
3 从电力公司的地下引入线引入的情况

从电力公司的地下引入线引入时，在用户院内设置的高压配电柜中，在用户一侧联接高压引入电缆，把这一点作为引入点（为财产责任分界点，见图 6.3 引入）。

还有，为防止用户用电事故波及电力公司，引入设施时在这一联接点上，安装附带负荷开关器的接地保护开关装置（附带 UGS 的 GR）。另外，有的电力公司，从供电塔到用户院内电源一侧引入用的 VCT 由电力公司负责用电缆联结引入，见表 6.3 中的 (a)。



(a)



(b) 高压配电柜

图 6.3 从地下线引进配电形式

为防止地下弱电流的诱发障碍和从水管道漏电，高压引入电缆的敷设，适当采取隔离措施是必要的。高压电缆，使用聚乙烯绝缘尼龙外皮的电缆（CV或CTV）。

高压电缆的埋设有管路式和直接埋设式，在院内一般都采用直接埋设式，直接埋设上方可能受车辆或重物压力时，埋设深度应超过 1.2m 以上，其余场合为 0.6m。还有，应把电缆埋设在坚固的电缆沟或收入保护物里。

电缆埋设的标识，要便于判断高压电缆的地下位置，在电缆上方的地面上设置耐久性标识，并写上高压电缆名称和管理者名（公司名）以及表示电压的尼龙制电缆标识牌，连续埋立在如图 6.4 所示的电缆的正上方的地面上。

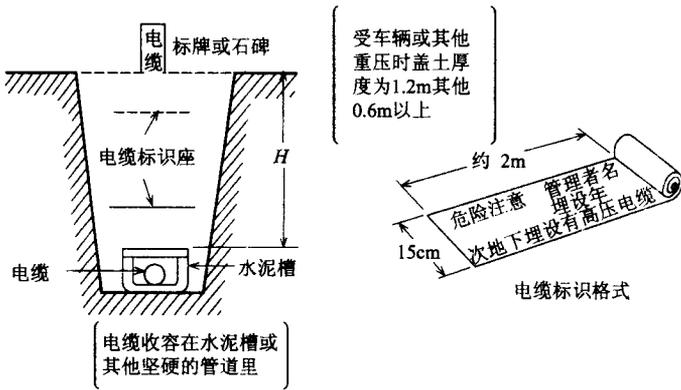


图 6.4 直接埋设法和埋设表示方法

6.2.2 配电方式和配电设备容量

配电方式是按主开关装置的种类，分为如图 6.5 中的 CB 形和 PF·S 形。

CB形一般不受配电设备容量的限制，主开关器使用于高压开关，与过电流继电器和接地保护继电器等组合，担负短路、接地等故障保护。

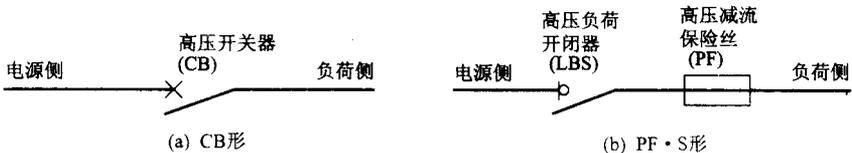


图 6.5 配电方式

PF·S形一般适用于配电设备容量在 300kVA 以下，是简单又经济的供电方式。在柜式高压配电设备等比较小容量的简易的设备中适用。短路电流的保护是靠限流熔断器，而过负荷、接地保护则使用附带隔离装置的负荷开关器，由此便组成了限流熔断器（PF）和负荷开闭器的协调保护，而且具有一定（指定容量）的切断能力。

还有，配电设备的容量根据主开关装置的形式和设施方式，按表 6.4 不得超过各自的容量限制。

表 6.4 高原配电设备的容量限制

设施方式		主开关装置的形式		
		CB形	PF·S形	
不能 用箱式 的场合 用箱式 的场合	室外式	屋顶式	150kVA	
		柱上式	—	
		地面式	150kVA	
	室内式			150kVA
	箱式配电设备(JISC4620 中规定)		1000kVA	300kVA
	箱式配电设备(JISC4620 标准)			—
	上述情况以外			—

注 1. 表的空栏的方式表示没有容量限制。

2. 表栏的空栏中有“—”标识的方式表示不使用。

3. 用箱式的场合中的“上述情况以外”表示执行（社）日本电机工业会规格 JEM1425 金属闭锁形开关或控制开关的规定。

6.2.3 配电设备

1 构成高压配电设施的设备

CB形高压配电设施如图 6.6 所示的单线线路图，由配电部分、变压器部分和二次母线以下的低压部分所组成。构成的电气设备及其性能在表 6.5 中示出。

2 施設位置及其布置

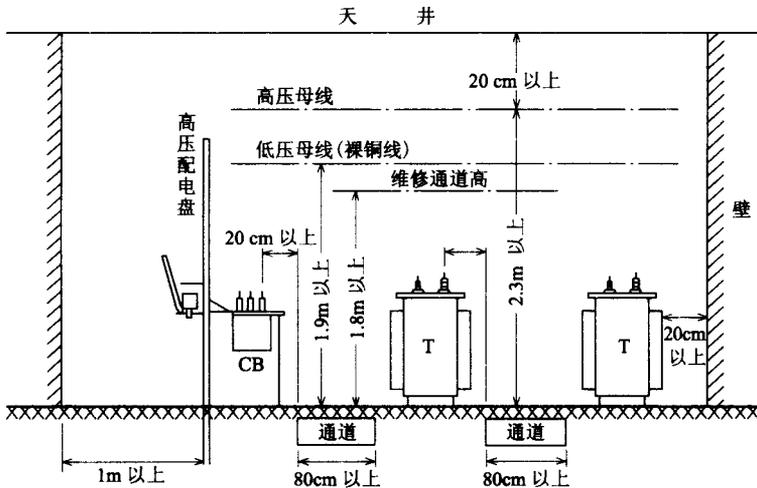
配电室的位置及布置如图 6.7 所示图中示出配电室内设备之间的最小保持距离。

火材料，而且窗户和出入口要用甲种防火窗门¹⁾。

有爆炸性、可燃性或腐蚀性气体、液体、粉尘等的地方不能建配电室。

表 6.5 高压配电设施的主要构成设备及其机能

设备的机能	设备名称(《)内是图 6.6 的标识)
变电压变电流	变压器(T)、供电用仪器的变成(转换)器(VCT)、仪器用变压器(VT)、变流器(CT、ZCT)
开闭开关电压电流	高压开关器(CB)、高压交流负荷开闭器(LBS)、刀闸(DS)配 电用开关器(MCCB)、熔断器(PF·F)
检测线路故障和异常	过电流继电器(OCR)、接地继电器(GR)、配电用开关器 (MCCB)、熔断器(PF·F)
检测线路电压及其波形	电压表(V)、电流表(A)
防止雷冲击等过电压侵入	避雷器(LA)
改善功率因素	调相电容(SC)



注：1. 设置1.8m的绝缘防护板时，高低压母线的高度最多降到护板高度；
2. 图时以外的裸线应在2m高度以上

图 6.7 配电室内的高度宽度及设备间距

1) 关于防火结构、耐火结构、耐火材料，在建筑标准法、消防法和都道府县以及市町村的防火条令中有规定。

6.2.4 保护（检查·试验）

1 电气设计图的协议

电力公司收到供电申请后（一般由承揽施工的电气工程施工公司代收），看其是否符合“电气设备技术标准”和维修安全等条件，应对照电气设计与用户进行协商。比如，施工前要确定的配电柜等设备与配电室间的保持距离（图 6.8）和 VCT 的搬入出通道等。对协议中有不完备的地方应要求改进。

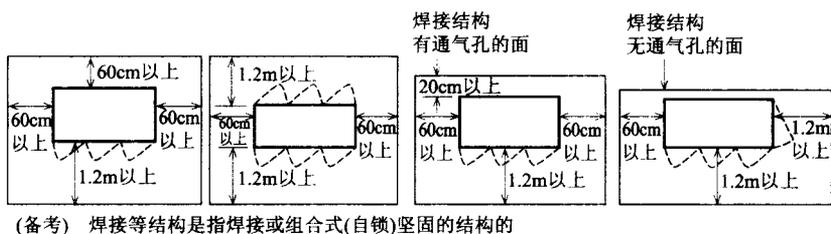


图 6.8 柜式配电设备和配电室的保持距离

2 新增设备会审检查

用户新增加设备时，基本上由主任技术员（主任工程师）负责进行自主检查。但是，为防止设备的事故波及配电线等，以稳定供电为目的，预防不良施工事故发生，对电缆施工和设备的状况等按表 6.6 中所列的事项，送电前由电力公司会审确认。

表 6.6 新增设备检查时电力公司方面确认事项

点 检	测 定 · 试 验
<ul style="list-style-type: none"> · 引入联接电, 电缆设施状况 · 配电设备的设施状况 · 计量装置的设施状况 	<ul style="list-style-type: none"> · 接地测定 · 绝缘测定 · 耐压测定 · 保护继电器动作试验

3 送电时会审检查

送电由电力公司和主任工程师会审决定实施，确认电力表（计量）、定时开关的动作、相序、电压等的准确性。

4 用电计量表的试验

电力公司为保持计量精度进行所有计量装置的质量管理，定期进行表 6.7 中所列试验。

另外 根据“收费用电表计量法”组合仪表的定检期为 5 年（低压的单独仪表为 10 年）。检测试验要在这个时间内进行。

表 6.7 计费用计量器的试验（组合计量器）

试验内容	安装试验	定期试验	
试验计量表	超高压组合计量器 高压组合计量器 低压组合计量器	超高压组合计量器 高压组合计量器契约电力(500kW 以上)	高压组合计量器契约电力 500kW 以下
试验时间	安装后 1 个月以内	安装后 2~3 年后	安装后 2~3 年后
试验内容	点 检 测 定	点 检 测 定	点 检

6.2.5 保护方式

1 保护配合

在电力系统中由于气象条件和设备的老化 发生短路、接地、过电压、电压不足以及过负荷等异常现象。

为保护电气系统就应具备以下性能：

检测确认线路异常。

判断异常内容并下指令。

根据指令切断事故线路。

要保护配合的对象有：

第一 变压器、电线、电动机等设备 防止设备损伤 确保开关器的动作

进行设备保护。

第二，在主开关装置的负荷一侧，设置保护各分支线路的开关器，当各分支线路发生事故时，分支线路开关很快被切断，不涉及主开关装置。

第三，用户主开关装置的动作要比供电用变电所的保护继电器的动作要快，以防止事故波及电力公司的供电线。

以上三点，包含了相互配合的含义，故称做保护配合。

2 过电流接地保护

以过电流事故为对象的保护称做过电流保护，以接地事故为对象的保护称做接地保护。

保护短路事故时的切断线路方式，一般使用选择切断方式。这个选择切断方式也叫做阶段限时选择切断。负荷一侧发生事故时，只有负荷一侧的保护装置动作进行保护，不涉及电源一侧的保护装置，正常线路可以继续供电，提高系统的供电可靠性。如以经济性和可靠性为目的一般采用这个方式。

关于接地保护，是根据电力公司的保护装置，调整配用电接地保护装置的动作时限。

这一接地保护，有配用电主开关装置的保护配合和与附带 PAS 的 GR 保护配合使用附带 PAS 的 GR 装置时，配用电主开关装置一般不具有接地切断功能。

3 保护继电器的种类和动作调整

用户发生事故时为正确施行电力系统的保护配合，按表 6.8 为基准调整配用电设备开关装置的保护继电器。

另外，用户设备无法按基准调整时，应与电力公司协商进行适当调整。

6.2.6 地线工程

在关于制定电气设备技术基准的省（部）颁标准中，为防止感电、火灾、设备绝缘的破坏等为目的，分类规定如表 6.9 的第一种接地工程、第二种接地工程、第三种接地工程和特别第三种接地工程。

6.2.7 备用电源

(a) 使用生产用电力、高压电或超高压电的用户，因供电设备发生故障

或平时维修等，电力不足需要补充电力时，根据用户的申请通过备用线路进行供电。契约有备用契约和备用电源契约两种。

表 6.8 保护继电器的调整（标定）表

继电器的种类	用途	动作调整值	限时调整值	备考	
过电流继电器	诱导形	一般负荷	最大契约电力的 120% ~ 170%	限时时部分中 0.2s 以下一般 0.1s 为基准	开关器跳闸方式中，利用变流器的二次电流(CT 断路器方式)的场合，防止继电器动作时开关器的误动作，调整开关器、断路器的分离动作值，确定其分流值
		变动负荷	最大契约电力的 200% ~ 250%	限时时部分中 0.2s 以下	
	在诱导形中带有瞬时因数的或静止形	一般负荷及变动负荷	诱导形动作部分最大契约电力的 110% ~ 150%	1s 以下	变压器的突入电流和电动机的启动电流等电流流过也不动作
			临时要素部分最大契约电力的 500% ~ 1500%	瞬时	
短路跳闸开关器(没有过电流继电器时)	一般负荷	最大契约电力的 140% ~ 200%	瞬时	变压器的突入电流和电动机的启动电流等不影响保护电器的动作	
	变动负荷	最大契约电力的 200% ~ 250%	瞬时		
接地继电器	各种	地线保护	调整防止用户的接地继电器误动作的电流范围，一般 200mA 为标准	0.6s 以下 (非调节)	用户的接地继电器的电源一侧的任何地方，发生接地事故时，受其影响负荷一侧发生的中性相电流超过 200mA 时，其值调整为上一位值

注：上面说的最大契约电力是指契约时计算的最大设备电力

备用线契约 是指从平时供电的变电所给用户以平时供电电压同等级电压供电的契约。

备用电源契约 是指从平时供电的变电所以外的其他变电所供电或本变电所用平时供电与不同的电压等级供电的契约。

表 6.9 各种接地工程

接地工程的种类	接地阻抗值	接地地点	备注
第一种接地工程	10Ω 以下	<ul style="list-style-type: none"> ● 超高压、高压设备的外箱、铁台(架) ● 避雷器 ● 超高压计量用变压器的二次侧电路 	第一种、第三种及特别第三种工程,是适用于电路以外的金属体和平时不通电的电路接地。其中危险性大的是第一种(接地阻抗 10Ω 以下)危险性不大的为第三种(接地阻抗 100Ω 以下),比第三种危险性大有必要接地阻抗为相当于第一种 10Ω 以下时,可实施特别第三种接地工程
第三种接地工程	100Ω 以下 (电路发生接地时 0.5s 之内自动切断的 500Ω 以下)	<ul style="list-style-type: none"> ● 300V 以下的低压设备的外箱、铁台 ● 高压设备用变压器的二次侧电路 	
特别第三种接地工程	10Ω 以下 (电路发生接地时 0.5s 之内自动切断的 500Ω 以下)	<ul style="list-style-type: none"> ● 超过 300V 的低压设备的外箱铁板 	
第二种接地工程	变压器的高压侧或超高压侧电路的一线的接地电流的安培数,除以 150 的商为欧姆值,接地阻抗应为此欧姆值以下(但是,在 1s 以上 2s 以内切断事故电路时除数为 300,1s 之内切断事故电路时为 600)	<ul style="list-style-type: none"> ● 变压器的低压一侧一端子(低压侧的使用电压超过 300V 时是低压侧的中性点) ● 变压器的混触隔离板 	高压或超高压电路和低压电路有混接的危险时,保护低压电路为目的使用,混接时低压电路的接地阻抗值应使对地电位不应超过人畜许容限度电位 150V

(b) 每当电力公司和用户设备故障停电时,对人身、治安等,给社会带来很大影响的电气铁路、上下水道、新闻、政府机关、大医院或人集聚的高层建筑、商店等的用电,采取备用线和自备发电等措施,对于采取自救措施的给予鼓励。这里有很多措施是根据建筑基准法和消防法作为义务规定的。

6.3 低压配电电气设备

6.3.1 供电方式

1 室内配线

用于室内配线的电压等级和相数，有以下几种（图 6.9）：

- ① 100V 单相 2 线式。
- ② 200V 三相 3 线式。
- ③ 100/200V 单相 3 线式。
- ④ 400V 三相 4 线式。

单相 2 线式和单相 3 线式一般用于照明和小型设备，三相 3 线式用于电动机 三相 4 线式用于大型建筑物等。

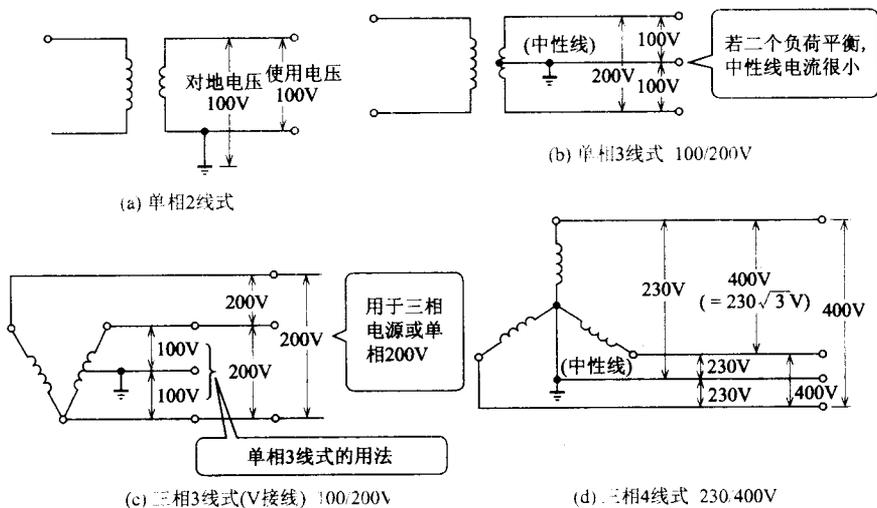


图 6.9 不同相制的室内配电方式

2 400V 配电

对负荷密度过密的地区的供电、配电系统，因限制用高压供电设备供电 使用 20kV 的逐渐在全国范围推广。

20kV 供电的构想是，除 20kV 地域网络等直接供电外，目前使用的 6kV 的供电电压地区和使用 100/200V 用户的供电电压改为 20kV。在中小建筑物、商店等在室内配线中使用 400V 电压将获得较好的经济性。其电气方式如图 6.9(d) 所示 采用 230V/400V 三相 4 线式 Y 联接方式。

400V 配电方式例子如图 6.10 所示。

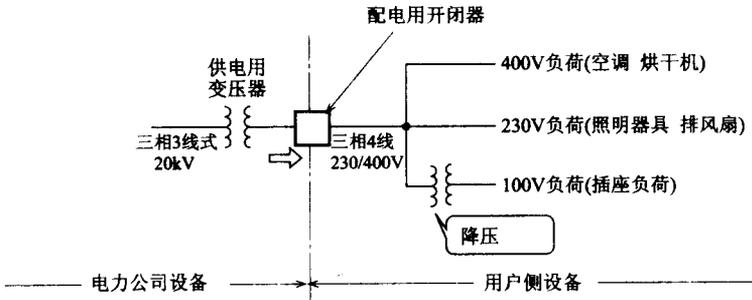


图 6.10 400V 配电方式

● 6.3.2 分电盘

分电盘是从室外引进来的电力分成多个支线路的地方，是集中安装电流限制器、配电用开关器等的盘，是家中平时监视是否正确用电及是否漏电等的场所。

电流限制器，是电流超过限制电流值就自动切断线路的自动开关器，是电力公司根据收费制度给予安装的（也有不给安装的公司）。

配线用开关器，是以分支线路的配线维护为目的，室内线路的电流超过规定电流时，切断机构自动动作切断联结点进行保护。各种配电开关器的安装线路如图 6.11 所示。

还有漏电开关器，是由于洗衣机等用电设备本体和电线的老化，可能发生漏电引起感电或火灾等事故，为防漏电事故于未然，在家庭设置的设备，一旦发生这种事故时漏电开关器自动切断线路确保安全。图 6.12 示出漏电开关器的动作原理。

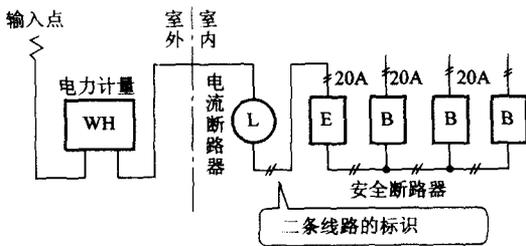


图 6 11 分电盘的构成

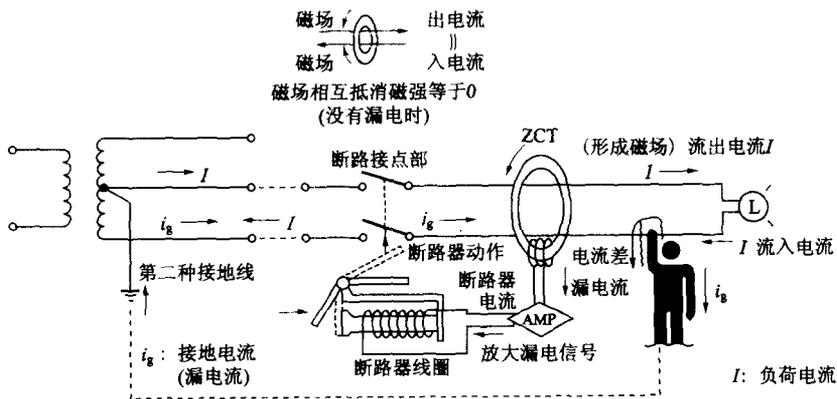


图 6.12 漏电开关器的动作原理

6.3.3 配线方法和使用电线

配线方法有绝缘子引配线、金属管配线、电缆配线等，从表 6.10 中可以根据使用电压和施设场所，选择不同的配线方法。

使用的电线，有绝缘电线、软线、电缆等。表 6.11 列出使用的一般电线。

6.3.4 保护 (检修·检查)

高压用户方面的保安义务基本得到落实，但低压用户多数缺乏电气知识和技能，电力公司依照电力事业法有义务进行检查。检查有新增设备检查和定期设备检查。

表 6.10 低压室内配线适用选择

配线	使用电压		300V 以下						300V 以上					
			开放场所		可点检的隐蔽场所		无法点检的隐蔽场所		开放场所		可点检的隐蔽场所		无法点检的隐蔽场所	
	干燥场所	其他场所	干燥场所	其他场所	干燥场所	其他场所	干燥场所	其他场所	干燥场所	其他场所	干燥场所	其他场所	干燥场所	其他场所
合成树脂管配线	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
金属管配线	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
挠性电线管配线	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
电缆配线	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
绝缘子引线配线	○	○	○	○					○	○	○	○		
合成树脂线皮配线	○		○											
金属线皮配线	○		○											
金属导管配线	○		○						○		○			
总线管配线	○		○						○		○			
台面配线							○							
分格(单元)配线							○							
办公用配线	○		○											
平行保护层配线			○											

注 :有 ○标识的场所为可实施。

表 6.11 常用低压电线的种类

电线分类	电线名称	主要用途
绝缘电线	600V 尼龙绝缘电线 600V 橡胶绝缘电线 600V 聚乙烯绝缘电线 600V 氟绝缘电线	室内配用电
软线	室内软线 单芯软线, 双芯软线 袋形软线, 圆形软线 防潮软线 器具用尼龙软线 单芯尼龙软线, 双芯尼龙软线 平行尼龙软线, 圆形尼龙软线	灯线或移动电线

电线分类	电线名称	主要用途
绝缘电缆	绝缘电缆 1种、2种、3种、4种尼龙龙电缆	电气设备的移动电线 电灯线 (使用电压 300V 以下)
低压电缆	尼龙外包电缆 氟丁橡胶外包电缆 聚乙烯外包电缆 MI 电缆	室内配线用 用户的地下电线

新增设备检查是指设备的新设、增设或改装的检查。检查内容是，对工程方法以及使用的材料等是否符合有关电气设备的技术标准进行检测检修和检查，同时检查负荷设备与供电契约是否一致。

定期检查是新增设检查后每 4 年进行 1 次。检查内容是电气工作物的设施情况是否符合有关技术标准进行检测检修和检查。

新增设以及定期检查的结果有不符有关技术标准的，就通知用户改进，改进后再进行检查。

译者跋

本书几乎包括了电力系统的各个方面，而且具有较强的专业性。书中不仅较全面地介绍了电力设备的构造、原理、维护等，还涉及到日本电网的管理、运行、法规等。对电力设备的阐述，不单纯是几个不同专业的简单综合，而是有一个总体的构思，确有独到之处。更有意义的是，书中有关日本的管理机制、法规等的介绍对我们就更有值得借鉴的地方。技术是“死”的，管理是“活”的，现代电网不仅要技术现代化，也要管理现代化。书中紧紧把握现代电网的特点，不仅对电网的过去和现在进行了详细介绍，还对高新技术做了初步探讨，使我们看到日本电力事业现状的同时，也看到了将来电网的发展趋势。

本书是集体编写的、电力系统方面的综合性专业技术教材，涉及的面很广，常使译者感到力不从心。在技术专业名词翻译中，译者使用了中国电力行业的规范用语；对管理、法规等方面的词语翻译，尊重日本使用中文的习惯，力求使读者感受到日本的特色。书中对各专业的介绍，其技术特点及深浅程度不尽相同，译者只能忠于原著未做改动。由于国情不同，建设电网的思路、出发点也不尽相同，但从中我们可以学习他们建设电网的思路，扬长避短，以发展我国的电力事业。

本书图文并茂，层次清楚，脉络清晰，说理深入浅出，是可读性强的一本好书。本书可作为专业技术人员的培训教材和大专院校的教材，也是专业技术人员很好的自学用书。

由于译者水平所限，难免有不妥和错误之处，敬请读者不吝赐教。

主编的话

当今，电子设备已广泛应用于国民经济的各个领域。为了用好这些电子设备，科技人员必须掌握电子技术方面的有关知识。目前，电子技术的应用领域也在迅速扩展，人材需求量很大的状况一直没有改变。因此对电子工程专业的毕业生有必要从应用的角度进行二次培训，也有必要为非电专业的技术工作者学习电气电子技术的基础知识创造更多的机会。

为了适应这一形势的需要，组织编写了“21世纪电子电气工程师系列”丛书，目的是要编写一套全面系统介绍电子电气专业基础知识的，既适用于企业技术人员培训，也适于非电专业技术人员阅读的新型教科书。丛书编委都是在日本有名的电子电气企业中长期从事职工教育培训的专家，丛书结构及各册内容均由编委会讨论决定。

本套丛书的特点首先表现在教材内容紧密联系实际。通过产品和技术模型说明基础知识与产品、系统的关系，通过具体产品的结构和系统中所发生的现象说明其工作原理或理论。另外，本丛书的所有执笔者均为在相应企业中长期从事实际技术工作或从事职工教育工作的专家，所以，具有丰富的实际经验，书中的举例和例题都是他们多年工作经验的结晶。

此外，在电子技术的专业教学中，由于所涉及内容非常广泛，所以以往在对教学内容细化的同时常常忽略了对基础内容的充分消化。本丛书充分注意到了这一问题，从现象入手说明原理，从而保证了基础知识易学易懂，教材内容紧密联系实际。本丛书还可用于大专院校的专业课教学。

由于受产业全球化和社会环境的影响，21世纪的工程学科必将会发生巨大的变化。读者通过对本套丛书的学习，可以对新时代的电子技术知识有较系统的了解，并在各种领域的产品和系统的革新中充分发挥自己的聪明才智。

东京理科大学教授，工学博士

正田英介

编辑委员会

主 编 正田英介（东京大学）

编 委 楠本一幸 株式会社东芝）

岛田弥（三菱电机株式会社）

高木正藏（东芝综合人材开发株式会社）

常深信彦（株式会社日立制作所 日立京滨工业专科学院）

丹羽信昭（东京电力株式会社 东电学园）

春木弘（株式会社富士电机能力开发中心）

吉冈芳夫（株式会社日立制作所）

吉永淳（福井工业大学 前三菱电机株式会社）

执笔（东京电力株式会社 东电学园）

安西隆 石塚胜美

川口尊 舆石正明

小矢胜义 坂本正喜

佐佐木昭 新保寿郎

永井利幸 山本勋