

发电厂电气部分

第一章 • 概述

1. 电力工业发展概况

2. 发电厂类型

火力发电厂

分类：

按燃料分：燃煤发电厂；燃油发电厂；燃气发电厂；余热发电厂。

按蒸汽压力和温度分：中低压发电厂；高压发电厂；超高压发电厂；亚临界压力发电厂；超临界压力发电厂。

按原动机分：凝所式汽轮机发电厂；燃汽轮机发电厂；内燃机发电厂；蒸汽—燃汽轮机发电厂。

按输出能源分：凝气式发电厂；热电厂。

按发电厂总装机容量分：小容量发电厂；中容量发电厂；大中容量发电厂；大容量发电厂。

电能生产过程：

火电厂的生产过程概括起来说是把煤中含有的化学能转变为电能的过程。整个生产过程分三个系统：

燃料的化学能在锅炉燃烧变为热能，加热锅炉中的水使之变为蒸汽，称为燃烧系统；

锅炉产生的蒸汽进入汽轮机，冲动汽轮机的转子旋转，将热能转变为机械能，称为汽水系统；

由汽轮机转子的机械能带动发电机旋转，把机械能变为电能，称为电气系统。

特点：

（1）火电厂布局灵活，装机容量的大小可按需决定；

（2）火电厂的一次性建造投资少，单位容量的投资仅为同容量水电厂的一半左右；建造工期短，发电设备年利用小时数较高。

（3）火电厂耗煤量大，目前发电用煤约占全国煤炭总产量的 50%左右，加上运煤费用和大量用水，其生产成本比水力发电要高出 3~4 倍。

（4）火电厂动力设备繁多，发电机组控制操作复杂，厂用电量和运行人员都多于水电厂，运行费用高。

（5）燃煤发电机组由停机到开机并带满负荷需要几小时到十几小时，并附加耗用大量燃料。此外，火电厂担负急剧升降的负荷时，还必须付出附加燃料消耗的代价。

（6）火电厂担负调峰、调频或事故备用时，相应的事故增多，强迫停运率增高，厂用电率增高。据此，从经济性和供电可靠性考虑，火电厂应当尽可能担负较均匀的负荷。

（7）火电厂的各种排放物（如烟气、灰渣和废水）对环境的污染较大。

水力发电厂

分类：

按集中落差方式：堤坝式水电厂；坝后式水电厂；河床式水电厂；引水式水电厂；混合式水电厂。

按径流调节程度：无调节水电厂；有调节水电厂；日调节水电厂；年调节水电厂；多年调节水电厂。

特点：

（1）可综合利用水能资源；

（4）水能可储蓄和调节；

（2）发电成本低，效率高；

（5）水力发电不污染环境；

（3）运行灵活；

（6）水电厂建设投资较大，工期长；

（7）水电厂建设和生产都受到河流的地形、水量及季节气象条件限制，因此发电量也受到水文气象条件的制约，有丰水期和枯水期之分，发电量不均衡；

（8）由于水库的兴建，淹没土地，移民搬迁，农业生产带来不利，还可能在一定程度破坏自然的生态平衡。

抽水蓄能电厂

在电力系统中的作用：调峰：填谷：备用：调频：调相。

效益：

（1）容量效益：减少备用机组的容量；

（4）动态效益；

（2）节能效益：降低电力系统燃料消耗；

（5）提高火电设备利用率；

（3）环保效益：节省火电机组脱硝脱硫的成本；

（6）对环境没有污染且可美化环境。

核能发电厂

运行特点：

- （1）在火电厂中，可连续不断地向锅炉供燃料，而压水堆核电厂的反应堆，只能对反应堆堆芯一次装料，交定期停堆换料。在堆芯换新料后的初期，过剩反应性很大。为了补偿过剩反应性，除采用控制棒外，还需要在冷却剂中加入硼酸，并通过硼浓度变化来调节反应堆的反应速度。反应堆冷却剂中含有硼酸后，就给一次回路系统及辅助系统的运行和控制带来一定的复杂性。
- （2）反应堆的堆芯内，核燃料发生裂变反应放出核能的同时，也放出瞬发中子和瞬发 **gamma** 射线。由于裂变产物的积累，以及反应堆的堆内构件和压力容器等因受中子的辐射而活化，反应堆不管在运行中或停闭后，都有很强的放射性，这就给电厂的运行和维修带来了一定困难。
- （3）反应堆在停闭后，运行管路中积累起来的裂变碎片和 **beta**，**gamma** 衰变，将继续使堆芯产生余热。因此堆停闭后不能立刻停机冷却，还必须把这部分余热排放出去，否则会出现燃料元件因过热而烧毁的危险；即使核电厂在长期停闭情况下，也必须继续除去衰变热；当核电厂发生停电，一回路管道破裂等重大事故时，事故电源、应急堆芯冷却系统立即自动投入，做到在任何事故工况下，保证反应堆进行冷却。
- （4）核电厂在运行过程中，会产生气态，液态和固态的放射性废物，对这些废物必须遵守核安全规定进行妥善处理，以确保工作人员和居民的健康。
- （5）与火电厂相比，核电厂的建设费用高，但燃料所占费用较为便宜。为了提高核电厂的运行经济性，极为重要的是维持高的发电设备利用率，为此，核电厂应在额定功率或尽可能在接过额定功率的工况下带基本负荷连续运行，并尽可能缩短核电厂反应堆的停闭时间。

3. 变电站类型

分类：

1. 变电站在电力系统中的地位和作用：

- （1）枢纽变电站
- （2）中间变电站
- （3）区域（地区）变电站
- （4）企业变电站
- （5）末端（用户）变电站

2. 按变电站建筑形式和电气设备布置方式分类

- （1）户内变电站
- （2）半户内变电站
- （3）户外变电站

3. 其他分类

- （1）按变电站供电对象的差异，分为城镇变电站、工业变电站和农业变电站；
- （2）按变电站是否有人正常运行值班，分为有人值班变电站和无人值班变电站；
- （3）按变电站围护结构不同，分为土建变电站和箱式变电站。

背靠背换流站与常规换流站相比的优势：

- （1）换流站的结构简单，比常规换流站的造价低 15%~20%。
- （2）控制系统响应速度更快。直流侧的故障率很低，从而使保护得到了简化。
- （3）在运行中可方便地降低直流电压和增加直流电流来进行无功功率控制或交流电压控制，以提高电力系统电压稳定性。
- （4）在实现电力系统非同步联网时，可不增加被联电力系统的短路容量，从而避免了由此所产生的需要更换开关等问题；可利用直流输送功率的可控性，方便地实现被联电力系统之间的电力和电量的经济调度；此外，可方便地利用直流输送功率的快速控制来进行电力系统的频率控制或阻尼电力系统的低频振荡，从而提高了电力系统运行的稳定性和可靠性。
- （5）由于直流侧电压较低，有利于换流站设备的模块化设计。采用模块化设计可进一步降低换流站的造价，缩短工程的建设周期，提高工程运行的可靠性。

数字化变电站

定义：

由智能化一次设备、网络化二次设备在 IEC61850 通信协议基础上分层构建，能够实现智能设备间信息共享和互操作的现代化变电站。数字化变电站自动化系统的结构；
在物理上可分为两类，即智能化的一次设备和网络化的二次设备；
在逻辑结构上可分为三个层次，分别为过程层、间隔层、站控层。

特点：（1）变电站传输和处理的信息全数字化；（2）过程层设备智能化；（3）统一的信息模型，包括数据模型和功能模型；（4）统一的通信协议，数据无缝交换；（5）高质量信息，具有可靠性、完整性、实时性；（6）各种设备和功能共享统一的信息平台。

4. 发电厂和变电站电气部分概述

一次设备：生产、变换、分配和使用电能的设备，如发电机、变压器和断路器；

二次设备：对一次设备和系统运行状态进行测量、监视和保护的设备，如仪用互感器、测量表计，继电保护及自动装置等。其主要功能是起停机组，调整负荷和，切换设备和线路，监视主要设备的运行状态。

300MW 发电机组

电气部分特点：

- （1）发电机与变压器的连接采用发电机—变压器单元接线；
- （2）在主变压器低压侧引接一台高压厂用变压器，供给厂用电；
- （3）在发电机出口侧，通过高压熔断器接有三组电压互感器和一组避雷器；
- （4）在发电机出口侧和中性点侧，每组装有电流互感器 4 个；
- （5）发电机中性点接有中性点接地变压器；
- （6）高压厂用变压器高压侧，每组装有电流互感器 4 个。

主要设备：

电抗器：限制短路电流；

电流互感器：用来变换电流的特种变压器；

电压互感器：将高压转换成低压，供各种设备和仪表用；

高压熔断器：进行短路保护；

中性点接地变压器：限制电容电流。

600MW 发电机组

电气部分特点：

- （1）发电机与主变压器的连接采用发电机—变压器单元接线，发电机和主变压器之间没有断路器和隔离开关。
- （2）主变压器采用三相双绕组变压器，低压侧绕组接成三角形，高压侧绕组接成星形。变压器高压侧中性点接地方式为直接接地。
- （3）在主变压器低压侧引接一台高压厂用变压器和一台高压公用变压器，供给厂用电。
- （4）在发电机出口侧，通过高压熔断器接有三组电压互感器和一组避雷器。
- （5）在发电机出口侧和中性点侧，每相装有电流互感器 4 只。
- （6）发电机中性点接有中性点接地变压器。
- （7）高压厂用变压器高压侧，每相配置套管式电流互感器 3 只。
- （8）主变压器高压侧每相各配置套管式电流互感器 3 只，中性点配置电流互感器 1 只

主要电气设备：发电机、主变压器、高压厂用变压器、电压互感器、电流互感器、中性点接地变压器、高压熔断器、避雷器。

1000MW 发电机组

电气主接线特点：

- （1）发电机与主变压器的连接采用发电机—变压器单元接线，发电机和主变压器之间没有断路器和隔离开关，但在主母线上设有可拆连接点。
- （2）发电机出口主封闭母线上有接地刀闸，母线按地刀闸能承受主回路动、热稳定的要求。接地刀闸附近有观察接地刀闸位置的窥视孔。
- （3）主变压器采用三合单相双绕组油浸式变压器，低压侧绕组接成三角形，高压侧绕组接成星形。变压器高压侧中性点接地方式为直接接地。
- （4）在主变压器低压侧引接两台容量相同的高压厂用变压器，供给厂用电。
- （5）在发电机出口主封闭母线有短路试验装置，主回路下接引至电压互感器柜，通过高压熔断器接有三组三相电压互感器和一组避雷器。
- （6）在发电机出口侧和中性点侧，每相装有套管式电流互感器 4 只。
- （7）发电机中性点经隔离开关接有中性点接地变压器。
- （8）高压厂用变压器高压侧，每相配置套管式电流互感器 3 只。
- （9）主变压器高压侧每相各配置套管式电流互感器 4 只，中性点配置电流互感器 2 只。

500kV 交流变电站

电气主接线：一般采用双母线四分段带专用旁路母线和 3/2 断路器两种接线方式。

主要电气设备：主变压器（500kV 升压变压器和 500kV 自耦变压器）、断路器、隔离开关、电压互感器、电流互感器、避雷器。

交流换流站

电气主接线：一种由换流单元串联而成，另一种由换流单元并联而成。

课后题

1-1 火力发电厂的分类、电能生产过程及其特点？

1-2 水力发电厂的分类、电能生产过程及其特点？

1-3 抽水蓄能电厂在电力系统中的作用及其效益？

1-4 核能发电厂的电能生产过程及其特点？

1-5 变电站的分类

1-6 什么是数字化变电站？简述其特点？

1-7 简述背靠背换流站与常规换流站相比具有哪些优势

1-8 哪些设备属于一次设备？哪些设备属于二次设备？其功能是什么？

1-9 简述 300MW 发电机组电气接线的特点及主要设备功能。

1-10 简述 600MW 发电机组电气接线的特点及主要设备功能。

1-11 简述 1000MW 发电机组电气主接线的特点

1-12 简述 500kV 交流变电站电气主接线及主要电气设备

1-13 简述交流换流站的电气主接线及主要电气设备

第二章 • 载流导体的发热和电动力

1. 概述

发热对电气设备的影响：

- (1) 使绝缘材料性能降低；
- (2) 使金属材料的机械强度下降；
- (3) 使导体接触电阻增加。

2. 导体的发热和散热

热量耗散形式：对流、辐射、导热

$$Q_R + Q_t = Q_l + Q_f$$

导体电阻损耗热量 Q_R

导体交流电阻：

$$R_{ac} = K_f R_{dc} = K_f \frac{\rho[1 + \alpha_t(\theta_w - 20)]}{S}$$

ρ 与 α_t 查表 2-1 得到， K_f 查图 2-2，由直流电阻与频率确定。

单位长度导体发热量：

$$Q_R = I_W^2 R_{ac}$$

导体吸收太阳辐射热量 Q_t

安装在屋外的导体应考虑日照影响。

$$Q_t = E_t A_t F_t = E_t A_t D$$

E_t 取 1000W/m²， A_t 由材料决定。

导体空气对流散热量 Q_l

$$Q_l = \alpha_l(\theta_w - \theta_0)F_l$$

α_l 由对流条件决定：

- (1) 自然对流散热：屋内自然通风/屋外风速小于 0.2m/s²

$$\alpha_l = 1.5(\theta_w - \theta_0)^{0.35}$$

- (2) 强迫对流散热：

$$\alpha_l = \frac{N_u \lambda}{D}$$

$$N_u = 0.13 \left(\frac{VD}{\nu} \right)^{0.65}$$

考虑到风向与导体的位置关系，引入修正系数

$$\beta = A + B(\sin \varphi)^n$$

ν, λ 查相关数据，A，B 按 φ 选取（P47）

F_l 由导体形状决定，按 46 页各情况分别计算；

导体辐射散热量 Q_f

$$Q_t = 5.7\varepsilon \left[\left(\frac{273 + \theta_w}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + \theta_0}{100} \right)^4 \right] F_f$$

ε 查表 2-2， F_f 由导体形状决定，按 47 页各情况分别计算；

导热散热量 Q_d （空气导热量小）

$$Q_d = \lambda F_d \frac{\theta_1 - \theta_2}{\delta}$$

3. 导体的长期发热及其载流量的计算

导体的温升过程

$$Q_R = Q_c + Q_l + Q_f$$

将对流散热与辐射散热统一

$$Q_l + Q_f = \alpha_w(\theta_w - \theta_0)F$$

升温过程表达式:

$$\tau = \tau_w \left(1 - e^{-\frac{t}{T_r}}\right) + \tau_k e^{-\frac{t}{T_r}}$$

其中, 散热时间常数 $T_r = \frac{mc}{\alpha_w F}$, 初始温升 $\tau_k = \theta_k - \theta_0$, 稳定温升 $\tau_w = \frac{I^2 R}{\alpha_w F}$

导体的载流量

导体载流量 (Q_t 项为考虑日照)

$$I = \sqrt{\frac{Q_l + Q_f - Q_t}{R}}$$

减少钢构件损耗、发热的措施:

- (1) 加大钢构件和导体间距离, 减弱磁场强度, 降低涡流和磁滞损耗;
- (2) 断开钢构件回路, 加上绝缘垫, 消除环流;
- (3) 采用电磁屏蔽, 在磁场强度最大的部位加上短路环, 削弱磁场;
- (4) 采用分相封闭母线, 使壳内、外磁场降低;

4. 短路时导体的发热及其最高温度的计算

导体短路发热过程

短路发热特点: (1) 短路电流大, 持续时间短, 可认为是一个绝热过程;
(2) 短路时导体温度变化大, 电阻与比热容不能看作常数;

短路电流热效应:

$$\frac{1}{S^2} Q_k = A_h - A_w$$

最高温度计算曲线:

- (1) 由已知的导体初始温度 θ_w 查图 2-9 得 A_w
- (2) 由上式计算 A_h
- (3) 由图 2-9 得对应的 θ_h

短路电流热效应

$$Q_k = Q_p + Q_{np}$$

周期分量:

$$Q_p = \frac{t_k}{12} (I''^2 + 10I_{t_k/2}^2 + I_{t_k}^2)$$

非周期分量 (短路电流切除时间 $t_k \leq 1s$):

$$Q_{np} = TI''^2$$

非周期分量等效时间查表 2-3 得。等值时间法计算简单, 并有一定精度, 但是曲线所示是根据容量为 500MW 以下的发电机, 按短路电流周期分量衰减曲线的平均值制作的, 用于更大容量的发电机, 势必产生误差。

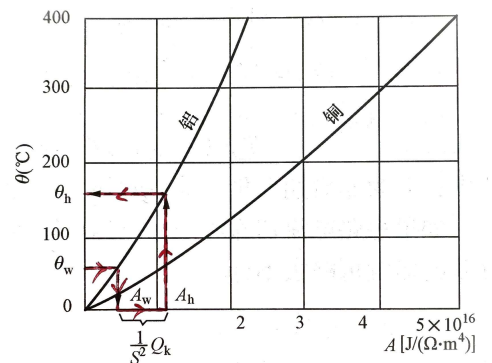
5. 短路时导体电动力的计算

在短路时, 特别是短路冲击电流流过时, 电动力可达到很大的数值, 当载流导体和电气设备的机械强度不够时, 将会产生变形或损坏。

电动力计算方法

毕奥—萨法尔定律:

$$F = \int_0^L iB \sin \alpha dl$$



平行导体间电动力:

$$F = 2 \times 10^{-7} K \frac{L}{a} i_1 i_2$$

矩形导体形状系数查图 2-12 得到, 圆柱形、管型、槽型导体形状系数一般取 1

三相导体短路电动力

最大电动力

$$F_{max} = 1.73 \times 10^{-7} \frac{L}{a} i_{sh}^2$$

导体一阶固有频率:

$$f_1 = \frac{N_f}{L^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}}$$

N_f 查表 2-4 得。固有频率应满足:

- (1) 单条导体及一组中的各条导体: 35~135Hz
- (2) 多条导体及引下线的单条导体: 35~135Hz
- (3) 槽形、管型导体: 30~160Hz

若不满足, 最大电动力应乘动态应力系数 (图 2-16):

$$F'_{max} = \beta F_{max}$$

动态应力系数: 动态应力与静态应力的比值

课后题

2-1 研究导体和电气设备的发热有何意义? 长期发热和短时发热各有何特点?

2-2 为什么要规定导体和电气设备的发热允许温度? 短时发热允许温度和长期发热允许温度是否相同, 为什么?

2-3 导体长期发热允许电流是根据什么确定的? 提高允许电流应采取哪些措施?

2-4 为什么要计算导体短时发热最高温度? 如何计算?

2-5 等值时间的意义是什么等值时间法适用于什么情况?

2-6 电动力对导体和电气设备的运行有何影响?

2-7 三相平行导体发生三相短路时最大电动力出现在哪一相上, 试加以解释。

2-8 导体的动态应力系数的含义是什么, 在什么情况下才考虑动态应力?

2-9 设发电机容量为 10 万 kW, 发电机回路最大持续工作电流 $I_{max} = 6791A$, 最大负荷利用小时数 $T_{max} = 5200h$, 三相导体水平布置, 相间距离 $a = 0.70m$, 发电机出线上短路时间 $t_k = 0.2s$, 短路电流 $I'' = 36.0kA$, $I_{tk/2} = 28.0kA$, $I_{tk} = 24.0kA$, 周围环境温度 $+35^\circ C$, 试选择发电机引出导线。

第三章 • 灭弧原理与主要开关电器

1. 电弧的形成和熄灭

电弧的形成和弧隙中介质的游离过程

电子发射：

热电子发射：触头分离瞬间，接触电阻突然加大，产生高温、电弧燃烧，阴极表面出现强烈炽热点，使电子逸出金属表面。

强电场电子发射：触头刚分开时场强较大，阴极表面的电子被电场力拉出，形成触头空间的自由电子。

碰撞游离：

阴极表面发射出的电子和弧隙中原有的少数电子在强电场能的作用下，向阳极方向运动，不断地与其他粒子发生碰撞，将中性粒子中的电子击出，游离成正离子和新的自由电子，新产生的电子也向阳极加速运动，同样也会使它所碰撞的中性质点游离。

热游离（维持电弧燃烧）：

电弧产生之后，弧隙的温度很高，具有足够动能的中性质点不规则热运动速度增加，互相碰撞游离出电子和正离子的现象。

电弧间隙的去游离

复合：

正离子和负离子互相吸引，结合在一起，电荷互相中和的过程。两异号电荷要在一定时间内，处在很近的范围内才能完成复合过程，两者相对速度越大，复合可能性就越小。

扩散：

带电质点从电弧内部逸出而进入周围介质中的现象。扩散去游离主要有：

①浓度扩散，带电质点将会由浓度高的弧道向浓度低的弧道周围扩散，使弧道中的带电质点减少；

②温度扩散，弧道中的高温带电质点将向温度低的周围介质中扩散。扩散出去的带电质点在周围介质中进行再复合，电弧间隙中则减少了带电质点数目，有利于熄弧。扩散的速率决定于电弧表面上带电质点的数目，因而扩散的速率也与电弧直径成反比。

电弧的特性与灭弧基本原理

电弧伏安特性非线性：

电弧上的电压是弧电流与电弧电阻的乘积，电弧介质的电阻大小是由介质中弧电流消耗的热能所致的游离程度决定，显然介质电阻不仅与弧电流的平方成比例，而且受热惯性因素影响。由于弧柱的热惯性，电弧温度变化即热游离程度变化滞后于电流变化，因而电弧电压呈现马鞍形，电弧的伏安特性将呈现非线性。

燃弧电压大于熄弧电压：

对应于正弦波电流，半个波内，电弧电压中间大部分平坦，只有在电流靠近零点，瞬时值很小时，电弧电压升高，呈现为电弧尖峰。电弧产生时的电压，称为燃弧电压，电弧熄灭时的电压，称为熄弧电压。由于介质的热惯性，燃弧电压必然大于熄弧电压。

弧隙介质强度恢复过程：

电弧电流过零时电弧熄灭，而弧隙的绝缘能力要经过一定的时间恢复到绝缘的正常状态的过程。弧隙介质强度主要由断路器灭弧装置的结构和灭弧介质的性质所决定，随断路器形式而异。

弧隙电压恢复过程：

电弧电流自然过零后，电源施加于弧隙的电压，将从不大的电弧熄灭电压逐渐增长，一直恢复到电源电压的过程，这一过程中的弧隙电压称为恢复电压。电压快复过程主要取决于系统电路的参数，即线路参数、负荷性质等，可能是周期性的或非周期性的变化过程。

电弧熄灭条件：

在电弧电流过零时，弧隙之间同时存在着介质强度恢复过程 $U_d(t)$ 和电源电压恢复过程 $U_r(t)$ 。电弧熄灭的条件应为 $U_d(t) > U_r(t)$ ；反之，弧隙被电击穿，电弧重燃。

2. 切断交流电路时电压的恢复过程

弧隙电压恢复过程

开断瞬间工频恢复电压：

当电弧电流过零时，由于 u 和 i 不同相位，此时电源电压存在一定的瞬时值 U_0 。

在断路器触头间通过辅助触点接入一定数值的并联电阻的作用：

弧隙电压恢复过程取决于电路的参数，而触头两端的并联电阻可以改变恢复电压的特性。当并联电阻的数值低于临界电阻时，将把具有周期性震荡特性的恢复电压过程转变为非周期性恢复过程。从而，大大降低恢复电压的幅值和恢复速度，相应地可增加断路器的开断能力。

首相开断系数 K_1 ：

首先开断相的工频恢复电压与相电压比。

近距离开断：

在大容量系统中，距断路器出线端数百米至几千米线路上发生短路的故障开断。

失步故障开断：

当电力系统发生短路或冲击负荷时，可能使一部分发电机过负荷，另一部分发电机欠负荷，导致电力系统失去稳定，发电机转入异步运行。

近阴极效应：

电流经过零值后，阴极附近空间的介质强度立刻恢复的现象。

不同短路类型对断路器开断能力影响

特殊运行方式下开断对断路器开断能力影响

断路器不仅在开断电力系统的短路大电流时可能出现震荡恢复电压，延长开断电路的时间，而在某些特殊运行方式时，即使开断的是小电流（如空载变压器、并联电抗器和空载长线等）也可能出现过高的恢复电压上升速度或幅值，发生不能开断电弧或在系统中引起危险的过电压，从而威胁设备的绝缘和系统运行的稳定性。

3. 交流电弧熄灭的基本方法

- （1）利用灭弧介质，如采用 SF6 气体；
- （2）采用特殊金属材料作灭弧触头；
- （3）利用气体或油吹动电弧，吹弧使带电离子扩散和强烈地冷却面复合；
- （4）采用多段口熄弧；
- （5）提高断路器触头的分离速度，迅速拉长电弧，可使弧隙的电场强度骤降，同时使电弧的表面突然增大，有利于电弧的冷却和带电质点向周围介质中扩散和离子复合。

4. 高压断路器原理及主要结构

真空断路器

三大部分及技术要求：

- （1）外壳：要求具有很高的密封性和一定的机械强度。
- （2）触头：开断能力和电器寿命主要由触头状况来决定。要求触头具有抗熔焊性能和抗电蚀性。
- （3）屏蔽罩：要求具有导热性能好屏蔽罩的厚度适中。

中压领域广泛使用真空短路器：

真空灭弧能力优于油，维护间隔时间较长，同时重量轻，没有油、少了爆炸、燃烧的危险。

横磁吹触头与纵磁吹触头区别：

横磁吹触头利用电流流过触头时所产生的横向磁场，驱使集聚性电弧不断在触头表面运动的触头。纵向磁场的作用是，削弱电弧自生磁场所产生的磁收缩力，使真空电弧电流在电极间隙内及触头表面均匀分布，阻止阳极斑点的出现。其开断能力及抗电蚀性都强于横磁吹触头。

SF6 断路器

优点：

断口电压高、开断能力强，可频繁操作和连续开断故障电流，以及开断容性电流不重燃等。同时广泛采用 GIS（封闭组合电器）结构，与开敞式布置结构相比大幅度缩小占地面积，减少高电压的电磁污染，大大延长设备检修周期。

定开距和变开距灭弧室结构对高压电网短路电流开断能力的差异？

（1）变开距在吹弧过程中电极开距不断变大，破坏了气流场的死区；此外，虽然熄弧后有较大的绝缘间隙，避免了熄弧后“电击穿”引发的电弧重燃，但由于燃弧时间增长，可能由于介质强度恢复速度减慢致使“热击穿”，从而限制了变开距断路器产品的极限开断电流。

（2）定开距结构的电场集中在固定的两喷口电极之间，开断过程中压气缸要耐受恢复电压，且在动触头过喷口瞬间，断口绝缘强度因短接一部分而降低，这使得定开距断路器产品的单元断口电压提高受限。

5. 特高压断路器和智能断路器

智能断路器：

具有较高性能的断路器和控制设备，配有电子设备、传感器和执行器，不仅具有断路器的基本功能，还具有附加功能，尤其是在监测和诊断方面。

特高压断路器特殊要求：

- (1) 降低开断和关合时的操作过电压；
- (2) 提高 GIS 中的 SF₆ 气体绝缘性能；
- (3) 提高单个断口电压；
- (4) 配置大功率高性能的操动机构。

6. 高压断路器操动机构

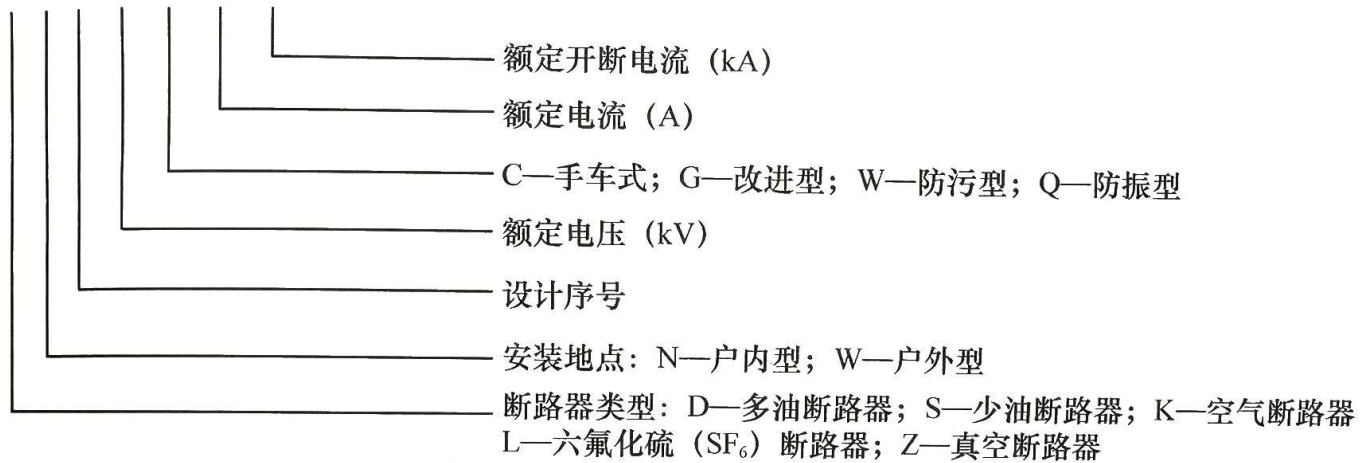
断路器操动机构的性能要求：

- (1) 具有足够的合闸功率；
- (2) 接到分闸命令后应迅速可靠地分闸；
- (3) 具有自由脱扣装置与防跳跃措施；
- (4) 复位与闭锁功能。

常用操动机构的类型：

所提供能源形式的不同，可分为手动操动机构（CS）、电磁操动机构（CD）、弹簧操动机构（CT）、气动操动机构（CQ）、液压操动机构（CY）等几种。其中，手动、电磁操动机构属于直动机构，弹簧、气动、液压操动机构属于储能机构。在高压乃至特高压 SF₆ 断路器中，配用的操动机构有三种：液压、气动、弹簧操动机构。

□□□-□□/□-□



课后题

3-1 什么是碰撞游离、热游离、复合和扩散？

3-2 为什么电弧的伏安特性是非线性的，且燃弧电压大于熄弧电压？

3-3 什么是弧隙介质强度恢复过程及弧隙电压恢复过程？影响这两种恢复过程的因素有哪些？

3-4 电弧熄灭的条件是什么？

3-5 什么是开断瞬间工频恢复电压？

3-6 在断路器触头间通过辅助触点接入一定数值的并联电阻有何作用？

3-7 什么是首相开断系数？

3-8 为什么需要对开断空载变压器、并联电抗器、空载高压电动机，以及开断电容器组或超高压空载长线着重关注？

3-10 长弧和短弧的熄灭有何差别？

3-11 断路器的常用熄弧方法有哪些？

3-12 为什么真空断路器在中压领域能很快替代了传统的油断路器？

3-13 真空灭弧室外壳、触头和屏蔽罩三大部分的技术要求有哪些？

3-14 真空断路器的横磁吹触头与纵磁吹触头对灭弧室的开断能力影响有何差异？

3-15 为什么 SF₆ 断路器能在高压、特高压领域独占市场？

3-16 SF₆ 断路器的定开距和变开距灭弧室结构对高压电网短路电流的开断能力有何差异？

3-17 特高压断路器必须具有比一般高压断路器更高的要求，体现在哪些方面？

3-18 何为智能断路器？

3-19 对断路器操动机构的性能要求有哪些？

3-20 简述常用操动机构的类型与各类操动机构的优缺点及应用范围。

3-21 简述当前操动机构的技术创新和发展概况。

第四章 • 电气主接线及其设计

1. 电气主接线的基本要求及设计程序

电气主接线设计基本要求

可靠性

- （1）断路器检修时，不宜影响对系统供电；
- （2）线路、断路器、母线故障，母线/母线隔离开关检修时，尽量减少停运出线回路数和停电时间，保证对全部 1 类及全部/大部分 2 类用户的供电；
- （3）尽量避免发电厂或变电站全部停电的可能性；
- （4）大型机组突然停运时，不应危及电力系统稳定运行；

灵活性

- （1）操作的方便性：接线简单，操作步骤尽可能少，便于运行人员掌握；
- （2）调度的方便性：正常运行时，能根据调度要求，方便地改变运行方式；发生事故时，能尽快切除故障，使停电时间最短，影响范围最小；
- （3）扩建的方便性：对将来要扩建的发电厂/变电站，其主接线必须有扩建的方便性；

经济性

- （1）节省一次投资：主接线应简单清晰，适当采用限制短路电流的措施，节省开关电器数量，选用价廉/轻型电器，降低投资；
- （2）占地面积少：为配电装置布置创造节约土地条件，同时注意节约搬迁、安装、外汇费用；
- （3）电能损耗少：应经济合理地选择变压器的型式、容量、台数，避免两次变压，增加电能损耗；

电气主接线设计程序

- （1）原始资料分析：工程情况、电力系统情况、负荷情况、环境条件、设备供货情况；
- （2）主接线方案的拟定与选择；
- （3）短路电流计算、主要电气设备选择；
- （4）绘制电气主接线图；
- （5）编制工程概算；

2. 主接线的基本接线形式

分类：

无汇流母线：使用开关电器少、配电装置占地面积小，通常用于进出线回路少、不再扩建的发电厂/变电站

桥型接线

角形接线

单元接线

有汇流母线：接线简单清晰，运行方便，利于安装扩建

单母线接线

双母线接线

单母线接线

断路器：具有专用灭弧装置，可以开断或闭合负荷电流和开断短路电流，故用来作为接通和切断电路的控制电器。

隔离开关：无灭弧装置，其开合电流极小，只能用来做设备停用后退出工作时断开电路。

母线隔离开关：靠近母线侧的隔离开关。

线路隔离开关：靠近线路侧的隔离开关。

倒闸操作原则：

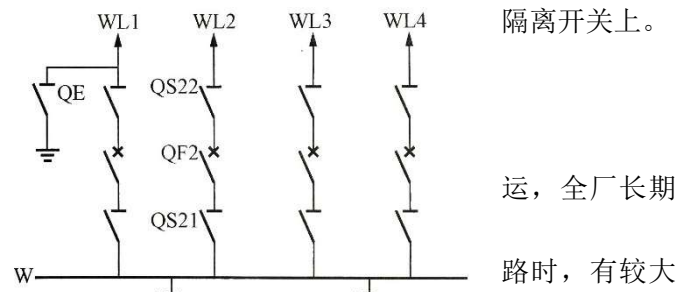
- （1）防止隔离开关带负荷合闸/拉闸。

(2) 防止断路器合闸状态下，误操作隔离开关的事故不发生在母线

优点：
接线简单、操作方便、设备少、经济性好。

缺点：
(1) 可靠性差：母线/母线隔离开关检修或故障时，所有回路都要停电。
(2) 调度不方便：电源只能并列运行，不能分列运行，线路侧发生短

应用：出线回路少，无重要负荷的发电厂/变电站。

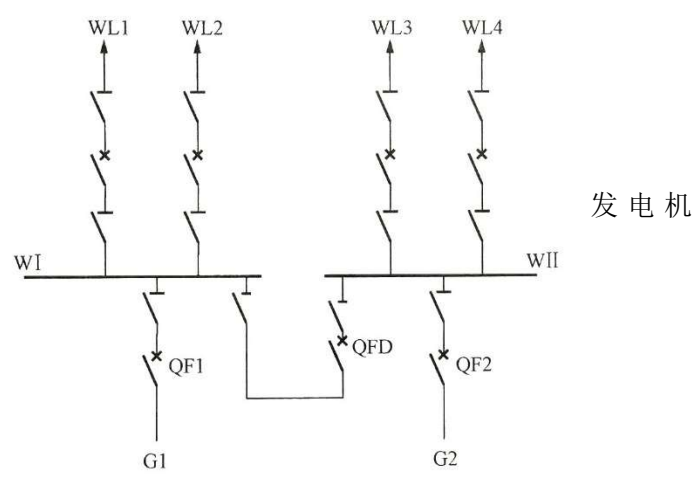


单母线分段接线

优点：
供电可靠性和灵活性提高，使用分段断路器时可保证不间断供电。

缺点：
用隔离开关分段时，当任意段母线故障时，将造成母线同时停电。

应用：
(1) 小容量发电厂的发电机电压配电装置，一般每段母线上所接的容量为 12MW 左右，每段母线上出线不多于 5 回；
(2) 变电站有两台主变压器时的 10kV 配电装置；
(3) 35~63kV 配电装置出线 4~8 回；
(4) 110~220kV 配电装置出线 3~4 回；

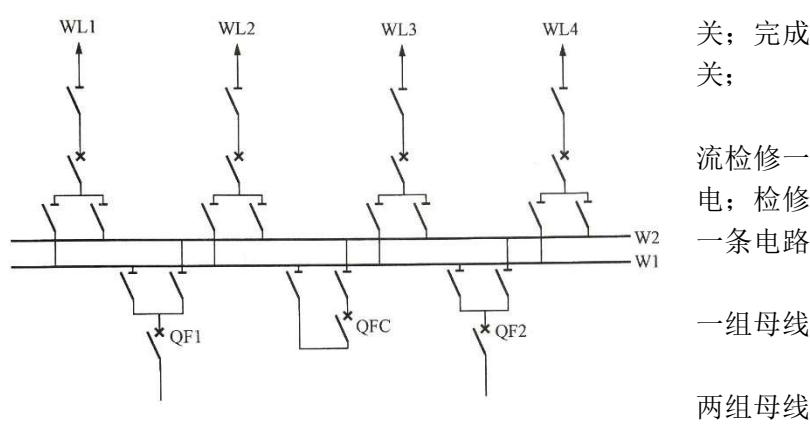


双母线接线

倒闸操作：
先通备用母线上的隔离开关，再断开工作母线上的隔离开关；完成

优点：
(1) 供电可靠：通过两组母线隔离开关的倒换操作，可轮流组母线而不致供电中断；一组母线故障后，能迅速恢复供任意回路的母线隔离开关时，只需断开此隔离开关所属的和与此隔离开关相连的该组母线；
(2) 调度灵活：各个电源和各回路负荷可任意分配到某上，能灵活地适应那里系统中各种运行方式；
(3) 扩建方便：向双母线左右任何方向扩建，均不会影响的电源和负荷自由组合分配，在施工中也不会造成原有回路停电；

应用：

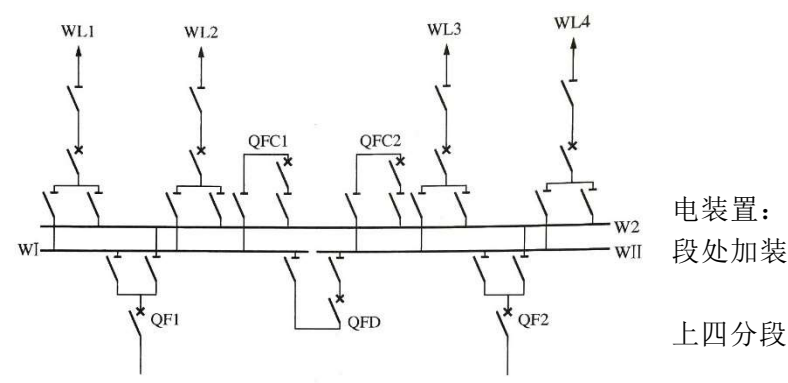


(1) 进出线回路数较多、容量较大、出线带电抗器的 6~10kV 配电装置；
(2) 35~60kV 出线超过 8 回，或连接电源较大、负荷较大时；
(3) 110kV 出线数为 6 回及以上时；
(4) 220kV 出线数为 4 回及以上时；

双母线分段接线

优点：
(1) 较双母线接线可靠性更高，母线故障的停电范围更小；
(2) 任何时刻都有备用母线，有较高的可靠性与灵活性；

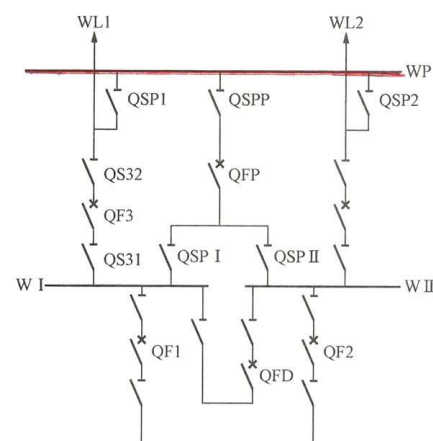
应用：
(1) 中小发电厂的发电机电压配电装置/变电站 6~10kV 配进出线回路数/母线上电源较多，输送和通过功率较大；(分母线电抗器)
(2) 220kV 配电装置：进出线 10~14 回三分段，15 回及以上
(3) 330~500kV 配电装置：出线 6 回及以上；



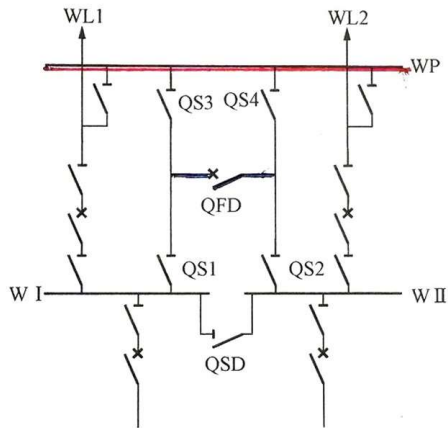
带旁路母线的单母线与双母线接线

旁路母线接线方式：

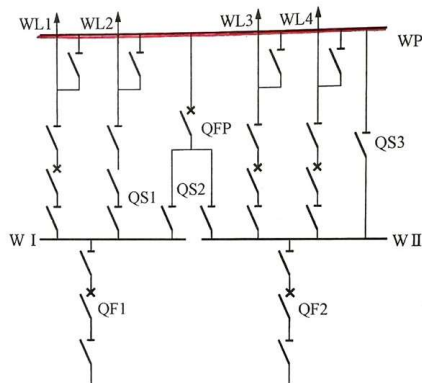
- (1) 带专用旁路断路器的旁路母线接线；
- (2) 母联断路器兼作旁路断路器的旁路母线接线；
- (3) 分段断路器兼作旁路断路器的旁路母线接线；



单母线分段带专用旁路断路器



分段断路器兼作旁路断路器



旁路断路器兼作分段断路器

倒闸操作：

- (1) QSPP, QSP1 合, 检修 QF3:

合 QFP——合 QSP1——断 QF3——断 QS32, QS31

或: 合 QFP——断 QFP——合 QSP1——合 QFP——合 QSP1——断 QF3——断 QS32, QS31

- (2) QS3, QS4 断, QS1, QS2, QFD 通, 检修 W1:

合 QSD——断 QFD、QS2——合 QS4——合 QFD

- (3) QS1, QS3, QFP 通, 检修 W1 上出线断路器:

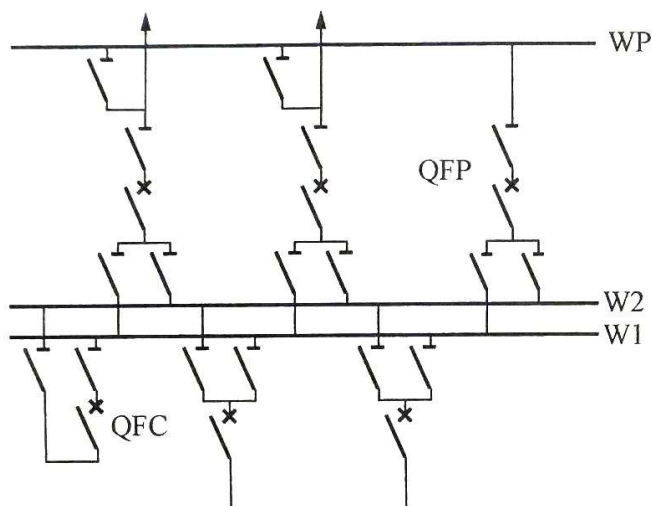
合 QS2——断 QS3——合待检修出线回路旁路隔离开关——断要检修的出线断路器及其两侧隔离开关

单母线分段带专用旁路断路器:

优点: 极大提高供电可靠性;

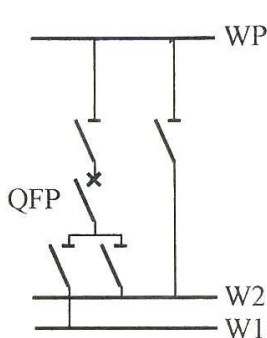
缺点: 增加一台旁路断路器的投资;

双母线分段带旁路母线



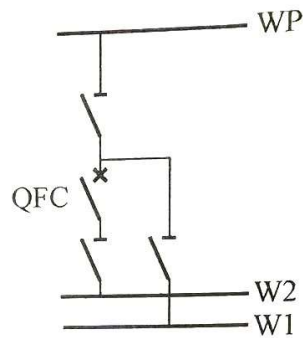
(a)

设专用旁路断路器



(b)

旁路断路器兼作母联断路器



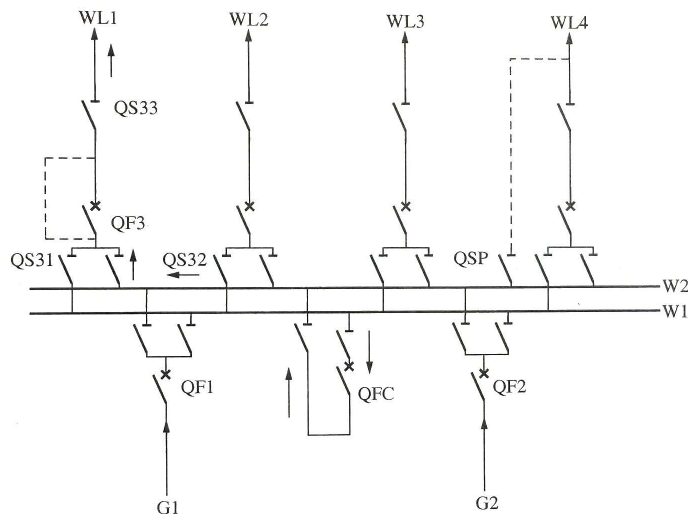
(c)

母联断路器兼作旁路断路器

跨条：特殊需要，但不便于设置旁路母线；

检修 QF3：

原来接在 W2 上的各回路切换至 W1——断开母联断路器
隔离开关——断开 QF3、QS31、QS33——将 QF3 两端
用跨条接上——接通 QS32、QS33——接通母联断路器
开关——接通母联断路器



器、两侧
接线拆开
两侧隔离

旁路母线设置原则：

110kV 及以上高压配电装置：

- (1) 不允许因检修断路器长期停电，均需设置旁
- (2) 110kV 出线 6 回及以上、220kV 出线 4 回及以上，宜采用带专用旁路断路器的旁路母线。

35~60kV 配电装置：

- (1) 采用单母线分段，断路器允许无条件停电检修：可设置不带专用旁路断路器的旁路母线；
- (2) 采用双母线接线：不宜设置旁路母线，有条件可设置旁路隔离开关；
- (3) 采用 35kV 单母线手车式成套开关柜：可不设旁路设置；

6~10kV 配电装置：

- (1) 一般不设置旁路母线；
- (2) 采用手车式成套开关柜：可不设旁路设施；
- (3) 单母线/单母线分段：可考虑装设旁路母线；

优点： (1) 可靠性提高；
(2) 检修出线断路器的倒闸操作简单；

缺点：(1) 增加投资；

可不设置旁路设施情况：

- (1) 系统条件允许断路器停电检修；(双回路供电负荷)
- (2) 接线允许断路器停电检修；(角形、一台半断路器接线)
- (3) 中小型水电站枯水季允许停电检修出现断路器；
- (4) 采用高可靠性的 SF6 断路器及 GIS；

主母线、旁路母线作用：

主母线：主要用来汇集电能和分配电能。

旁路母线：主要用与配电装置检修短路器时不致中中断回路而设计的。设置旁路短路器极大的提高了可靠性。而分段短路器兼旁路短路器的连接和母联短路器兼旁路断路器的接线，可以减少设备，节省投资。当出线和短路器需要检修时，先合上旁路断路器，检查旁路母线是否完好，如果旁路母线有故障，旁路断路器在合上后会自动断开，就不能使用旁路母线；如果旁路母线完好，旁路断路器在合上就不会断开，先合上出线侧的旁路隔离开关，然后断开出线的断路器，再断开两侧的隔离开关，有旁路短路器代替断路器工作，便可对短路器进行检修。

一台半断路器接线

优点：

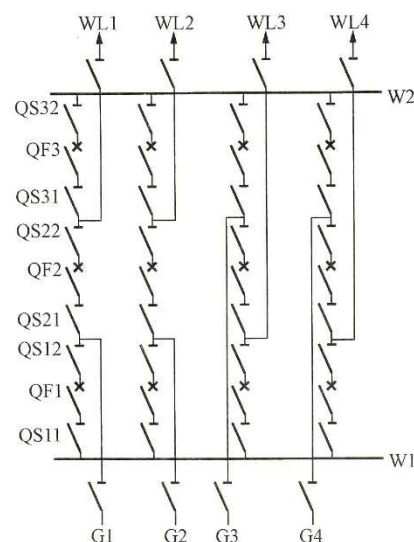
- (1) 运行的可靠性和灵活性很高；
- (2) 在检修母线时不必用隔离开关进行大量的倒闸操作；
- (3) 并且调试和扩建也方便。

缺点：接线费用太高，只适用于超高电压线路；

接线原则：

- (1) 电源线宜与负荷线配对成串，避免联络断路器发生故障时，两条电
负荷回路被切除；
- (2) 配电装置建设初期仅有两串时，同名回路宜分别接入不同侧的母线，
隔离开关。接线达 3 串及以上时，同名回路可接于同一侧母线，进出线不
关；

应用： (1) 330~500kV 电压：进出线 6 回及以上；
(2) 交叉布置比非交叉接线具有更高的运行可靠性，可减少特殊运
扩大；

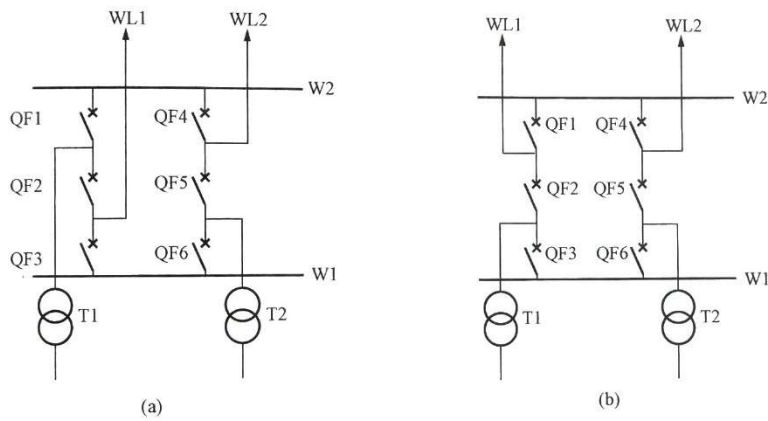


源回路或两条

进出线应装设
宜装设隔离开

行方式下事故

(3) 随着系统容量的增加，一台半断路器接线和双母线并列运行接线形式在发生短路时，短路电流可能会超过目前断路器的短路容量，需要分列运行，失去了一台半断路器接线和双母线接线形式的优势随着系统容量的增加，一台半断路器接线和双母线并列运行接线形式在发生短路时，短路电流可能会超过目前断路器的短路容量，需要分列运行，失去了一台半断路器接线和双母线接线形式的优势。



三分之四台断路器接线

优点：

- (1) 减少设备投资；
- (2) 提高配电装置可靠性与灵活性；

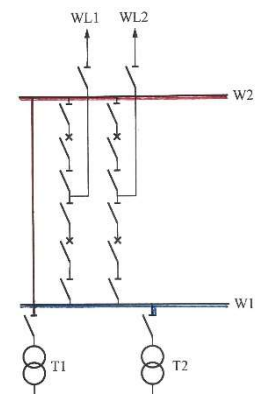
应用：发电机台数大于线路数的大型水电厂，以便实现一个串的3个回路中电源与负荷容量相互匹配。

变压器—母线组接线

优点：接线调度灵活、电源和负荷可自由调配、安全可靠、有利于扩建；

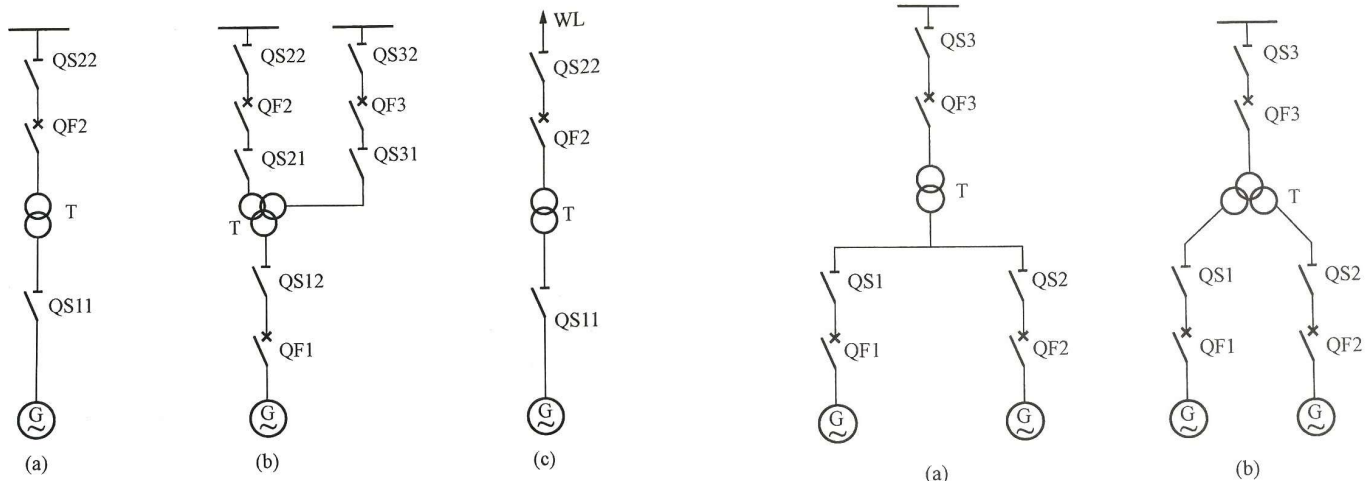
应用：

- (1) 长距离大容量输电线路；
- (2) 系统稳定性问题突出和要求线路有高度可靠性并要求主变压器质量可靠、故障



率低的变电站；

单元接线



发电机—双绕组 发电机—三绕组 发电机—变压器—线路

发电机—双绕组

发电机—分裂绕组

优点：

- (1) 接线简单，开关设备少，操作简便；
- (2) 在发电机和变压器低压侧短路的几率和短路电流相对于具有发电机电压级母线时有所减小；

缺点：

- (1) 变压器或者厂用变压器发生故障时，除了跳主变压器高压侧出口断路器外，还需跳发电机磁场开关，若磁场开关拒跳，则会出现严重的后果，而当发电机定子绕组本身发生故障时，若变压器高压侧失灵跳闸，则造成发电机和主变压器严重损坏；
- (2) 发电机一旦故障跳闸，机组将面临厂用电中断的威胁；

大容量发电机装设出口断路器的优越性：

- (1) 主变压器/厂用变压器故障时，迅速断开变压器高压侧断路器和发电机出口断路器，利于发电机和变压器的安全；

- (2) 发电机故障只需断开发电机出口断路器，不需断开变压器高压侧断路器，不会造成高压系统正常运行方式下接线方式改变，利于电网安全运行；
- (3) 发电机组正常启停或事故停机时，只需操作发电机出口断路器，厂用电可由主变压器从系统倒送，不需切换厂用电的操作，大大提高厂用电可靠性；
- (4) 主变压器可兼作厂用的启动、备用电源，容量大，可靠性高，可减少厂用变压器台数和容量，简化厂用电系统接线，具有明显经济效益。

桥形接线

- 内桥：线路故障或切除、投入时，不影响其余回路工作，操作简单；
线路较长、变压器不需要经常切换；
- 外桥：系统中有穿越功率通过主接线为桥形接线的发电厂/变电站高压侧线路较短，变压器需要经常切换；

- 优点：较单母线接线节省一台断路器，无母线，节省投资；
- 应用：

- (1) 小容量发电厂/变电站；
- (2) 作为最终将发展为单母线分段/双母线的工程初期接线形式；
- (3) 大型发电机组的启动/备用变压器的高压侧接线方式；

多角形接线

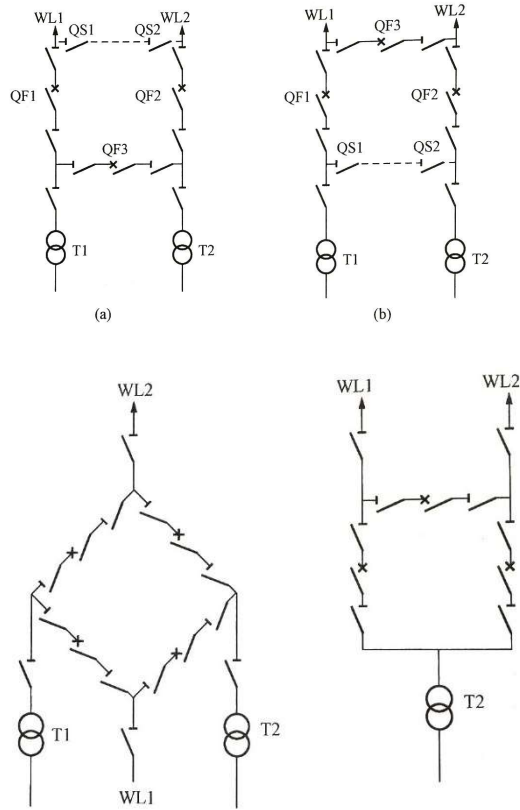
- 优点：
- (1) 断路器数目较单母线分段/双母线少一台，可靠性相同；
- (2) 断路器检修时，不引起任何回路停电；
- (3) 任一回路故障时，只跳开与其相接的两台断路器；
- (4) 操作方便，所有隔离开关只用于检修时隔离电源；

- 缺点：
- (1) 检修任意一台断路器时，多角形开环运行，此时出现故障则使供电紊乱；
- (2) 运行方式变化大，电气设备的选择困难，继电保护装置复杂化，不便于扩建；
- 应用：
- (1) 回路较少且能一次建成、不需扩建的 110kV 及以上的配电装置中；
- (2) 进出线数不超过 6 回，地形狭窄的中小型水力发电厂；

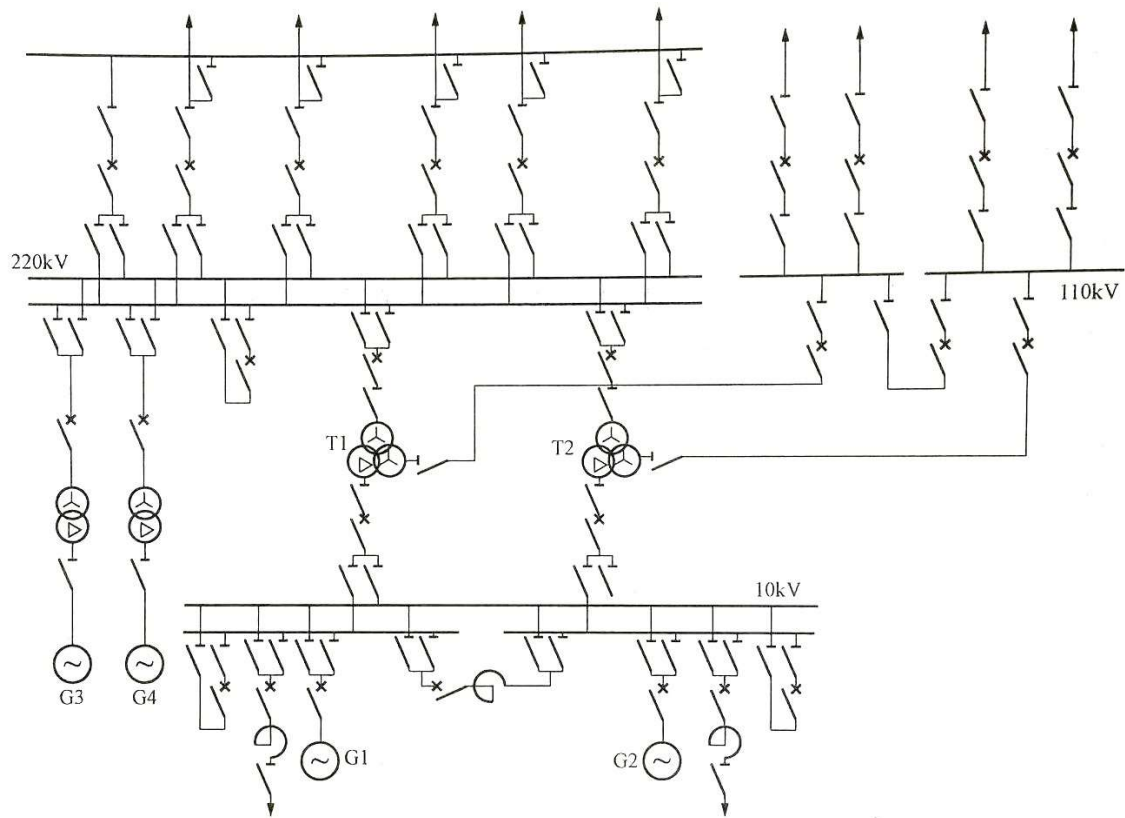
典型主接线分析

火电厂

1. 地方性火电厂

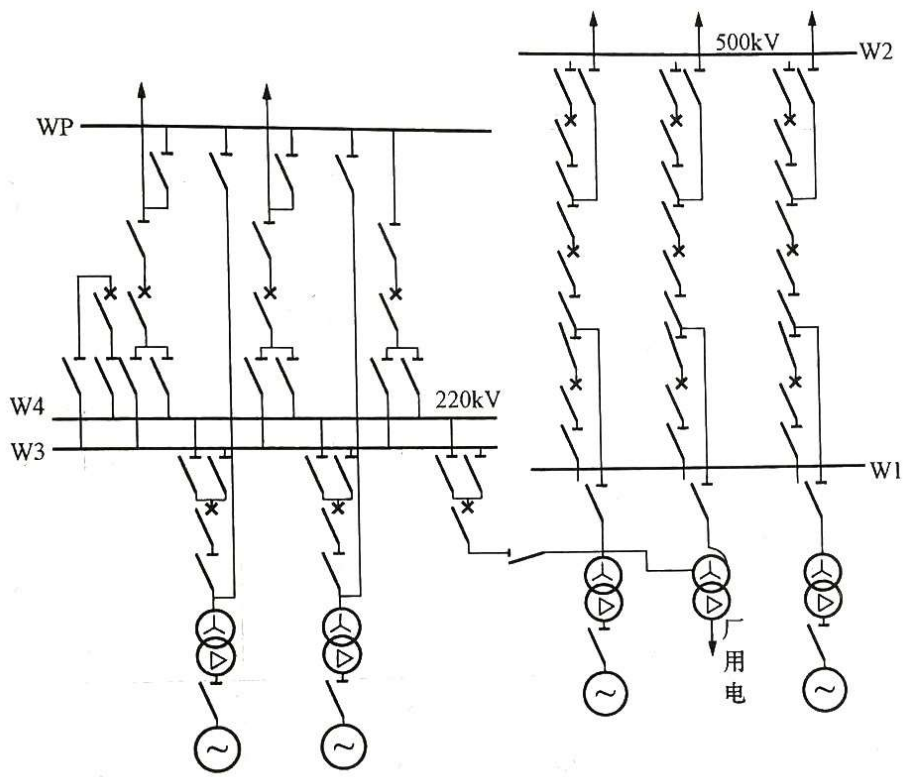


通常建设在城市附近或工业负荷中心



2. 区域性火电厂

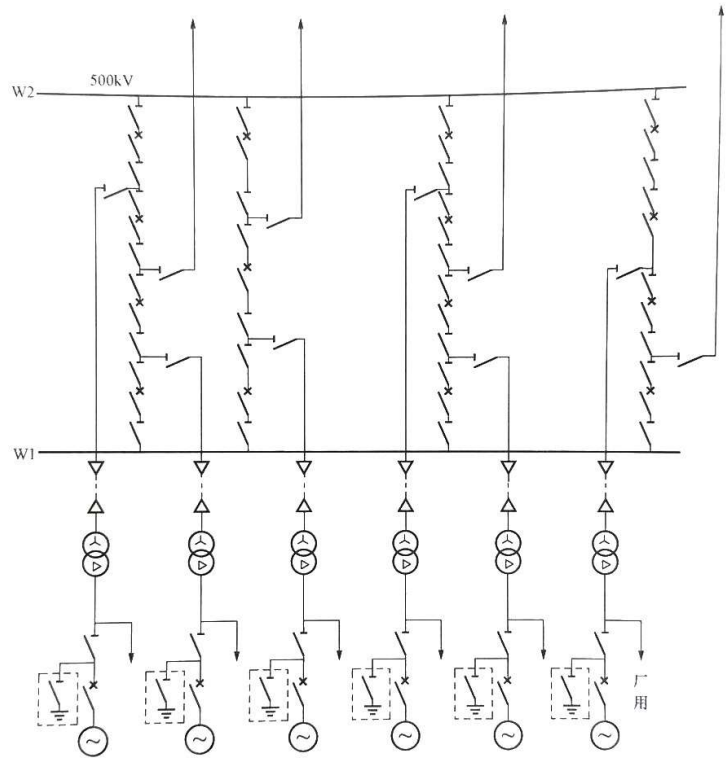
通常建在煤炭生产基地附近，为凝汽式火电厂，一般距负荷较远，电能几乎全部用在高压或超高压输电线路送至远方，担负系统的基本负荷。



水电厂

一般距负荷中心较远，基本无发电机电压负荷，全部电能用于升高电压送入系统

水电厂附近地形复杂，电气主接线应尽可能简单，使配电装置紧凑。



变电站

通常其主接线的高压侧应尽量采用断路器数目较少的接线以节省投资；
超高压等级/枢纽变电站：双母线分段带旁路接线/一台半断路器接线；
低压侧常采用单母线分段/双母线，便于扩建；

3. 主变压器的选择

主变压器：向电力系统/用户输送功率的变压器；
联络变压器：两种电压等级间交换功率的变压器；

变压器容量与台数

1. 单元接线的主变压器（二者容量较大）

- （1）发电机的额定容量扣除本机组的厂用负荷后，留有 10%裕度；
- （2）发电机的最大连续容量扣除一台厂用变压器的计算负荷，及变压器绕组平均温升不超过 65° ；

2. 具有发电机电压母线接线的主变压器

- （1）发电机全部投入运行时，满足发电机电压供电的日最小负荷，并扣除厂用负荷后，主变压器应能将发电机电压母线上的剩余有功和无功功率送入系统；
- （2）当接在发电机电压母线上的最大一台机组检修/供热机组因热负荷变动而需限制本厂输出功率时，主变压器应能从电力系统倒送功率，保证发电机电压母线上最大负荷的需要；
- （3）若发电机电压母线上接有两台及以上的主变压器时，其中容量最大的一台因故退出运行时，其他主变压器应能输送母线剩余功率的 70%以上；
- （4）停用电厂的部分或全部机组时，主变压器应具有从系统倒送功率的能力，满足发电机电压母线上最大负荷的要求；

3. 连接两种升高电压母线的联络变压器

联络变压器一般设置 1 台，最多不超过 2 台；

- （1）容量应能满足两种电压网络在各种不同运行方式下有功、无功功率的较好；
- （2）联络变压器容量一般不应小于接在两种电压母线上的最大一台机组容量，以保证最大一台机组故障/检修时，通过联络变压器满足本侧负荷要求；

4. 变电站主变压器

枢纽变电站中、低压侧形成环网情况下，设置 2 台主变压器；地区性鼓励的一次变电站/大型工业专用变电站，可设 3 台主变压器；

- （1）重要变电站，一台主变压器停运时，其余变压器容量在过负荷能力允许时间内，应满足 1 类、2 类负荷的供电；
- （2）一般变电站，一台主变压器停运时，其余变压器容量应满足全部负荷的 70%~80%；

变压器型式和结构

绕组数与结构

- (1) 一个发电厂/变电站中采用三绕组变压器台数不多于 3；
- (2) 机组容量为 200MW 以上的发电厂采用发电机—双绕组变压器单元接入系统，应加装联络变；
- (3) 扩大单元接线主变压器优先选用低压分裂绕组变压器（限制短路电流）；
- (4) 110kV 及以上中性点接地系统中，选用三绕组变压器场所，优先选自耦变压器；

阻抗与调压方式

- (1) 220kV 及以上降压变压器一般无励磁调压，电网电压有较大变化时有载调压；
- (2) 110kV 及以下变压器应至少有一级电压的变压器采用有载调压；

冷却方式

- (1) 容量 31.5MVA 及以上的大容量变压器一般采用强迫油循环冷却，发电厂水源充足时也可强迫油循环水冷却；
- (2) 容量 350MVA 及以上的特大变压器一般采用强迫油循环导向冷却；

4. 限制短路电流的方法

- (1) 在发电厂和变电站的 6~10kV 配电装置中，加装限流电抗器限制短路电流。
 - a) 在母线分段处设置母线电抗器，目的是发电机出口断路器，变压器低压侧断路器，母联断路器等能按各自回路额定电流来选择，不因短路电流过大而使容量升级；
 - b) 线路电抗器：主要用来限制电缆馈线回路短路电流；
 - c) 分裂电抗器。
- (2) 采用低压分裂绕组变压器。当发电机容量越大时，采用低压分裂绕组变压器组成扩大单元接线以限制短路电流。
- (3) 采用不同的主接线形式和运行方式。

分裂电抗器具有正常运行时电抗小，而一臂出现短路时电抗大，能取得限流作用强的效果：

分裂电抗器在正常运行时两分支负荷电流相等，在两臂中通过大小相等，方向相反的电流，产生方向相反的磁通，在正常情况下，分裂电抗器每个臂的电抗仅为每臂自感电抗的 1/4。当某一分支短路时，分裂电抗器通过互感，能有效的限制另一臂送来的短路电流。所以分裂电抗器具有正常运行时电抗小，而短路时电抗大的特点。

5. 电气设备及主接线的可靠性分析

可靠性：元件、设备和系统在规定的条件下和预定时间内，完成规定功能的概率。

不可修复元件可靠性指标：

可靠度 $R(t)$ ：元件在预定时间 t 内和规定条件下执行规定功能的概率；

不可靠度 $F(t)$ ：元件在小于等于预定时间 t 发生故障的概率；

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt$$

故障率 $\lambda(t)$ ：故障密度函数与可靠度函数的比，元件已工作到 t 时刻， t 时刻后的下一个时间间隔内发生故障的条件概率；

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = -R(t) \frac{dR(t)}{dt}$$

平均无故障工作时间 T_U ：元件寿命时间的数学期望；

$$T_U = \int_0^{\infty} t f(t) dt$$

可修复元件可靠性指标：

可靠度 $R(t)$ ：元件在起始时刻正常运行条件下，在时间区间 $[0, t]$ 不发生故障的概率，对可修复元件主要集中在从起始时刻到首次故障的时间。

不可靠度 $F(t)$ ：元件在起始时刻完好条件下，在时间区间 $[0, t]$ 发生首次故障的概率。

故障率 $\lambda(t)$ ：元件从起始时刻直至时刻 t 完好条件下，在时刻 t 以后单位时间里发生故障的次数。

修复率 $\mu(t)$ ：在现有检修能力和维修组织安排的条件下，平均单位时间内能修复设备台数。

平均修复时间 T_D ：电气设备每次连续检修所用时间的平均值。

平均运行周期 T_S ：可修复元件的平均故障间隔时间。

$$T_S = T_U + T_D$$

可用度 A ：稳态下元件或系统处于正常运行状态的概率。

$$A = \frac{T_U}{T_S}$$

不可用度 \bar{A} ：稳态下元件或系统失去规定功能而处于停运状态的概率。

故障频率 f ：设备在长期运行条件下，每年平均故障的次数。

$$f = \frac{1}{T_s}$$

电气主接线基本结构可靠性分析计算方法：网络法、状态空间法。

6. 技术经济分析

财务评价：

从企业角度根据国家现行财税制度和现行价格，分析测算工程项目的经济效益和费用，考察项目的获利能力、清偿能力及外汇效果等财务状况，以判别建设工程项目财务上的可行性。

国民经济评价：

从国家整体角度考察工程项目的效益和费用，计算分析项目给国民经济带来的净效益，评价项目经济上合理性。

7. 电气主接线设计举例

课后题

4-1 设计主接线时主要应收集、分析的原始资料有哪些？

4-2 隔离开关与断路器的区别何在？对它们的操作程序应遵循哪些重要原则？

4-3 主母线和旁路母线各起什么作用？设置专用旁路断路器和以母联断路器或者分段断路器兼作旁路断路器，各有什么特点？检修出线断路器时，如何操作？

4-4 发电机—变压器单元接线中，在发电机和双绕组变压器之间通常不装设断路器，有何利弊？

4-5 一台半断路器接线与双母线带旁路接线相比，各有何利弊？一台半断路器接线中的交叉布置有何意义？

4-6 选择主变压器时应考虑哪些因素？其容量、台数、型式应根据哪些原则来选择？

4-7 为什么在特大型发电厂主接线设计时，可靠性很高的一台半断路器接线和双母线接线形式受到质疑？

4-8 电气主接线中通常采用哪些方法限制短路电流？

4-9 为什么分裂电抗器具有正常运行时电抗小，而一臂出现短路时电抗大，能取得限流作用强的效果？

4-10 某 220kV 系统的重要变电站设置 2 台 120MVA 的主变压器，220kV 侧有 4 回进线，110kV 侧有 10 回出线且均为 1，2 类负荷，不允许停电检修出线断路器，应采用何种接线方式？画出接线图并说明。

4-11 某新建地方热电厂有 $2 \times 25MW + 2 \times 50MW$ 共 4 台发电机， $\cos \varphi = 0.8$ ， $U = 6.3kV$ ，发电机电压级有 10 条电缆馈线，其最大综合负荷为 30MW，最小为 20MW，厂用电率为 10%，高压侧为 110kV，有 4 回线路与电力系统相连，试初步设计该厂主接线图，并选择主变压器台数和容量。主接线图上应画出各主要电气设备及馈线，可不标注型号和参数。

4-12 可靠性的定义是什么？电气设备常用的可靠性指标有哪些？

4-13 什么是故障率与不可靠度？可靠度与可用度有何区别？

4-14 电气主接线的可靠性指标有哪些？

4-15 电气主接线基本结构可靠性分析计算方法有哪些？

4-16 财务评价与国民经济评价的主要区别是什么？

第五章 • 厂用电接线及设计

1. 概述

厂用电 A_p ：

发电厂在启动、远转、停役、检修过程中，用以保证机组的主要设备（如锅炉、汽轮机或水轮机、发电机等）和输煤、碎煤、除灰、除尘及水处理的正常运行的电动机以及全厂的运行、操作、试验、检修、照明等用电设备总的耗电量。

降低厂用电率可以降低电能成本，同时也相应地增大了对电力系统的供电量。

厂用电率 K_p ：

在一定时间内，厂用电耗电量占全部发电量的百分数。

$$K_p = \frac{A_p}{A}$$

厂用负荷分类：

根据其用电设备在生产中的作用和突然中断供电所造成的危害程度，按其重要性可分为四类：

（1）1 类厂用负荷：凡是属于短时（手动切换恢复供电所需要的时间）停电会造成主辅设备损坏、危急人身安全、主机停运以及出力下降的厂用负荷。

（2）I 类厂用负荷。允许短时停电（几秒钟或者几分钟），不致造成生产紊乱，但较长时间停电有可能损坏设各或影响机组正常运转的厂用负荷

（3）四类厂用负荷。较长时间停电，不会直接影响生产，仅造成生产上的不方便的厂用负荷。

（4）01 类负荷（不停电负荷）、02 类负荷（直流保安负荷）、03 类负荷（交流保安负荷）。

2. 厂用电接线的设计原则和接线形式

厂用电接线要求

（1）供电可靠，运行灵活。

（2）各机组的厂用电系统应是独立的。

（3）全厂性公用负荷应分散接入不同机组的厂用母线或公用负荷母线。

（4）充分考虑发电厂正常，事故，检修启动等运行方式下的供电要求，尽可能的使切换操作简便，启动（备用）电源能在短时间内投入。

（5）供电电源应尽量与电力系统保持紧密的联系。

（6）充分考虑电厂分期建设和连续施工过程中厂用电系统的运行方式，特别要注意对公用负荷供电的影响，要便于过渡，尽量减少改变接线和更换设置。

设计原则

（1）厂用电接线应保证对厂用负荷可称和连续供电，使发电厂主机安全运转。

（2）接线应能灵活地适应正常、事故、检修等各种运行方式的要求。

（3）厂用电源的对应供电性，本机、炉的厂用负荷由本机组供电。

（4）设计时应适当注意其经济性和发展的可能性并积极慎重地采用新技术、设备，使接线具有可行性和先进性。

（5）在设计厂用电系统接线时，还应应对厂用电的电压等级、中性点接地方式、厂用电源及其引接和厂用电接线形式等问题进行分析和论证。

电压等级

按发电机容量、电压确定高压厂用电压等级

（1）发电机组容量 60MW 及以下，发电机电压为 10.5kV，可采用 3kV 作为高压厂用电压；发电机电压为 6.3kV，可采用 6kV 作为高压厂用电压；

（2）容量 100~300MW：6kV；

（3）容量高于 600MW：可采用 6kV 一级电压或 3kV、10kV 两级电压；

厂用电压等级的应用

（1）300MW 汽轮发电机组的厂用电压：高压 6kV，低压 380V；

（2）600MW 汽轮发电机组厂用电压：

a. 6kV 与 380V，200kW 以上采用 6kV，200kW 以下采用 380V；

b. 10kV，6kV，380V，1800kW 以上采用 10kV，200~1800kW 采用 6kV，200kW 以下采用 380V；

（3）1000MW 汽轮发电机组厂用电压（低压均为 380V）：

a. 6kV 一级电压；

- b. 10kV，6kV 两级电压；
- c. 10kV，3kV 两级电压；
- d. 10kV 一级电压；

(4) 水电厂一般只设 380V 一级电压。大型水电厂中，某些设备距主厂房较远，需设专变，6/10kV 供电；

中性点接地方式

高压厂用电系统：

- (1) 中性点不接地：接地电容电流小于 10A；
- (2) 中性点经高阻抗接地：高压厂用电系统接地电容电流小于 10A，为了降低间歇性弧光接地过电压水平、便于寻找接地故障点；
- (3) 中性点经消弧线圈接地：大机组高压厂用电系统接地电容电流大于 10A；

低压厂用电系统：

- (1) 中性点不接地/经高电阻接地；
- (2) 中性点直接接地；

厂用电源及其引接

工作电源：即使发电机组全部停止运行，仍可从电力系统倒送电能供给厂用电源；

主接线有发电机电压母线时，直接从母线上引接；单元接线时，从主变压器低压侧引接；

备用电源：

具有独立性和足够的供电容量，最好能与电力系统紧密联系，在全厂停电情况下仍能从系统取得厂用电源。

- (1) 从发电机电压母线的不同分段上，通过厂用备用变压器引接。
- (2) 从发电厂联络变压器的低压绕组引线，但应保证在机组全停运情况下，能够获得足够的电源容量。
- (3) 从与电力系统联系紧密，供电可靠的最低一级电压母线引接。
- (4) 当经济技术合理时，可由外部电网引接专用线路，经过变压器取得独立的备用电源或启动电源。

事故保安电源：

为确保在严重事故状态下能安全停机，事故消除后又能及时恢复供电；

通常采用快速自动程序启动的柴油发电机组、蓄电池组以及逆变器将直流交为交流作为交流事故保安电源。

200MW 及以上机组还应由附近 110kV 及以上的变电站或发电厂引入独立可靠专用线路，作为事故备用保安电源。

厂用电接线形式

火电厂厂用电接线按锅炉分段：

- (1) 保证厂用供电的连续性；
- (2) 使发电厂安全满发，并满足运行安全可靠灵活方便；

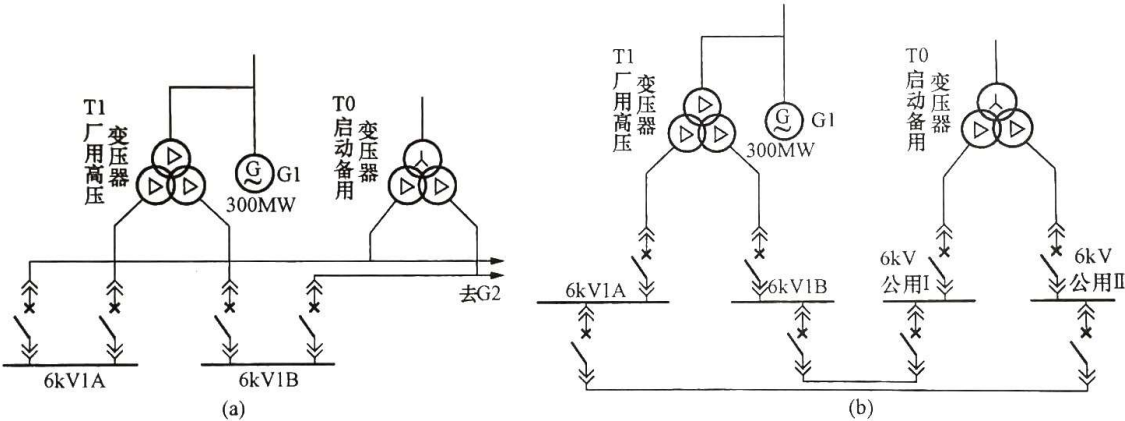
提高厂用电工作的可靠性措施：

高压厂用变压器和启动备用变压器采用带负荷高压变压器，以保证厂用电安全，经济的运行。

3. 不同类型发电厂的厂用电接线

火电厂

300MW 汽轮发电机组高压厂用电接线



方案 1. 将全厂公用负荷分别接在各机组 A、B 段母线上；

优点：公用负荷分接于不同机组的厂用高压变压器上，供电可靠性高，投资省；

缺点：公用负荷分接于两台机组的工作母线上，机组工作母线清扫时，将影响公用负荷的备用；公用负荷分接于两台机组的工作母

线上，一个机组发电时，必须安装好另一个机组的 6kV 厂用电配置，并由启用/备用变压器供电；

方案 2. 单独设置两段公用负荷母线，集中供全厂公用负荷用电，公用负荷母线段由启动/备用变压器供电；

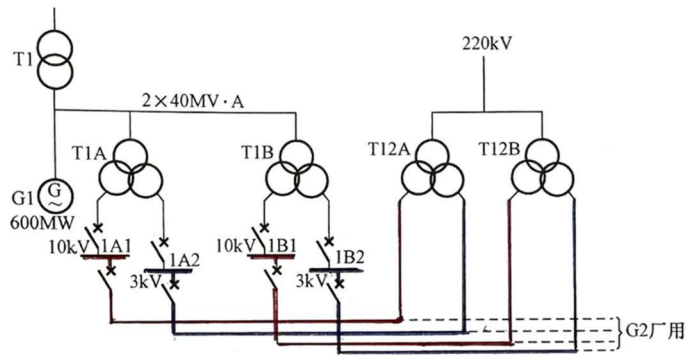
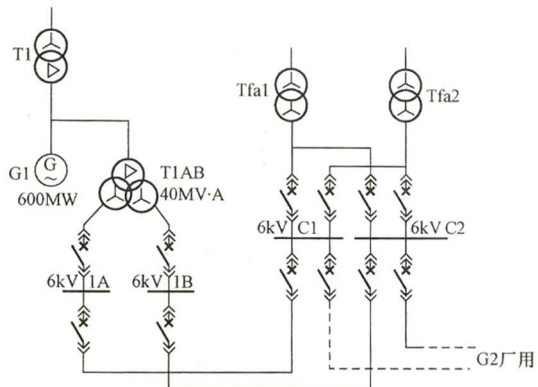
优点：公用负荷集中，无过渡问题，各单元机组独立性强，便于各机组厂用母线清扫；

缺点：公用负荷集中，厂用高压变压器要考虑在启动备用变压器检修/故障时带公共负荷母线段运行，投资更大；

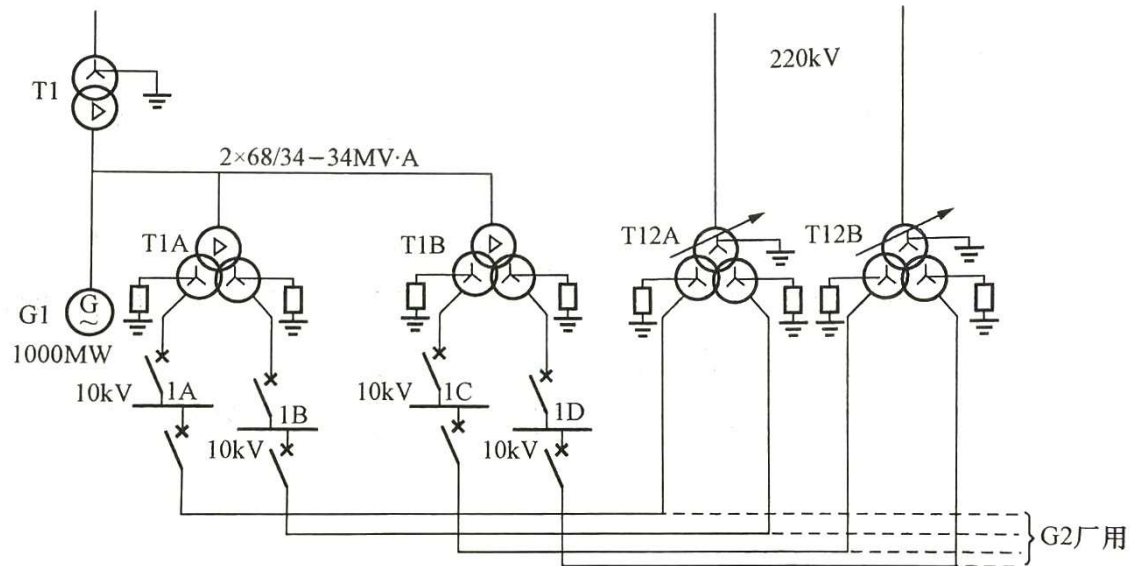
600MW 汽轮发电机组高压厂用电接线

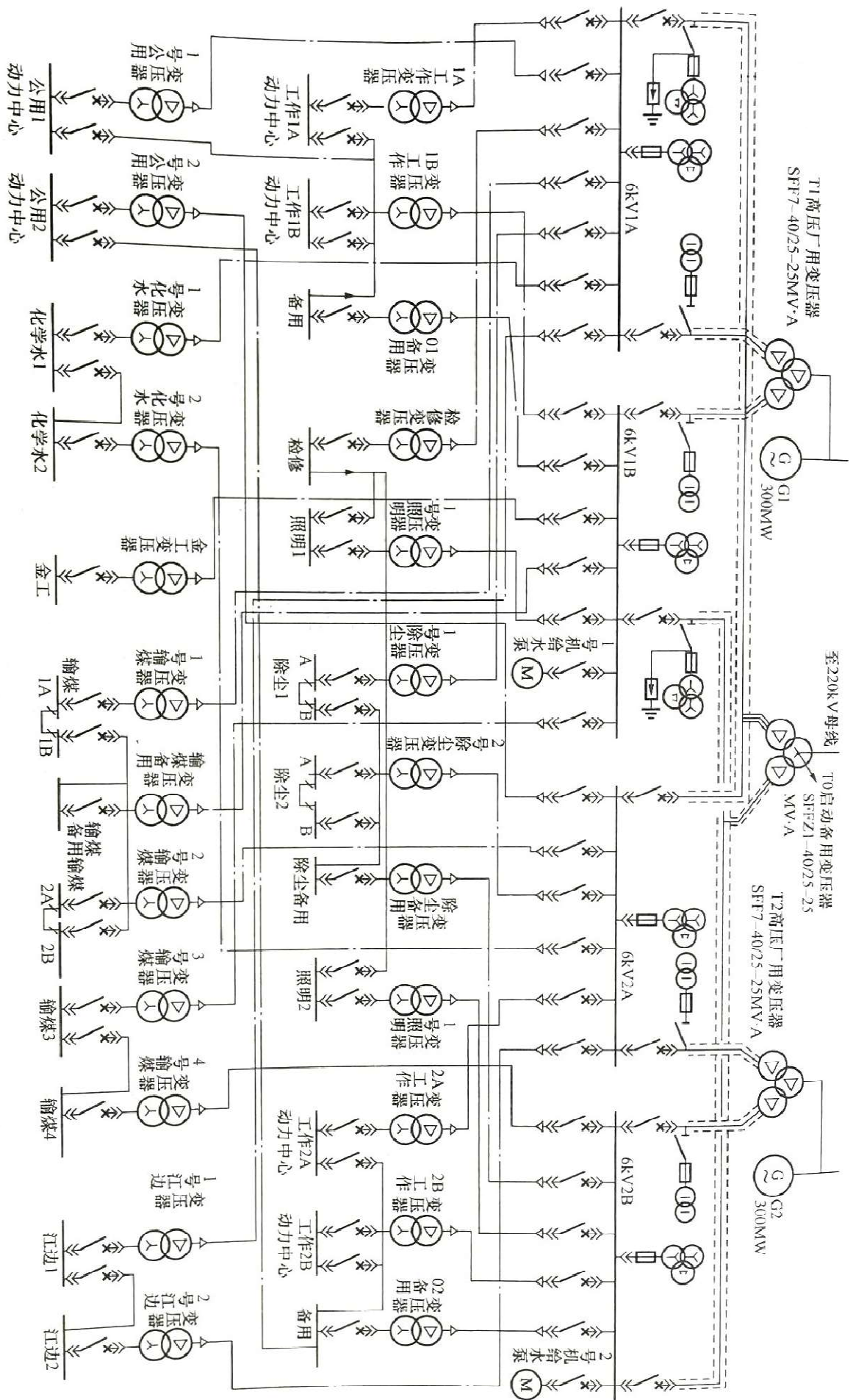
方案 1. 高压厂用电采用 6kV 一个电压等级

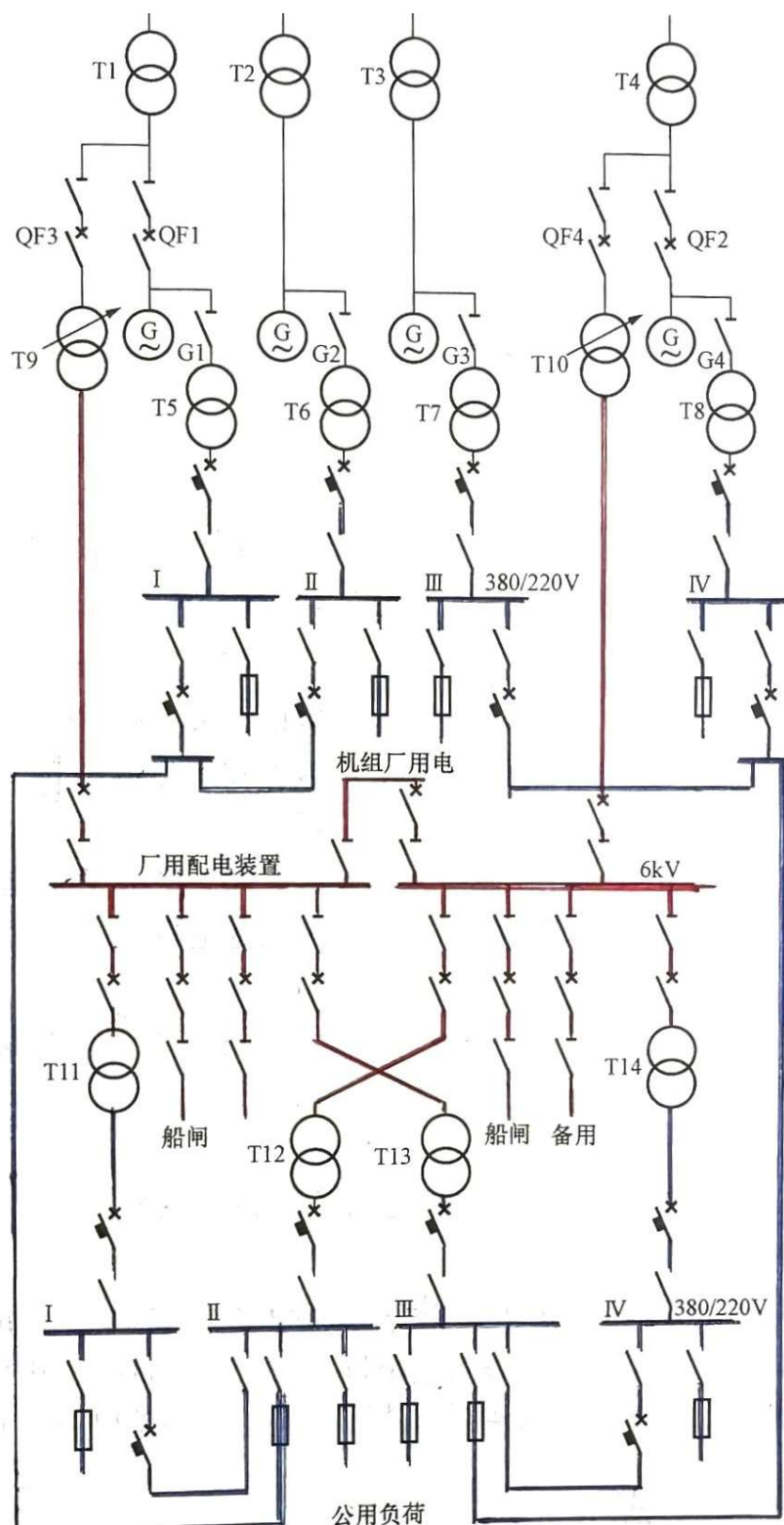
方案 2. 高压厂用电采用 10kV，3kV 两个电压等级



1000MW 汽轮发电机组高压厂用电接线







变电站

发电厂和变电站的自用电在接线上的区别：

发电厂厂用电系统一般采用单母线分段接线形式，并多以成套配电装置接受和分配电能。厂用电源由相应的高压厂用母线供电。而变电站的站用电源引接方式主要有：

- (1) 小型变电站，大多只装一台站用变压器，从变电站低压母线上引接。

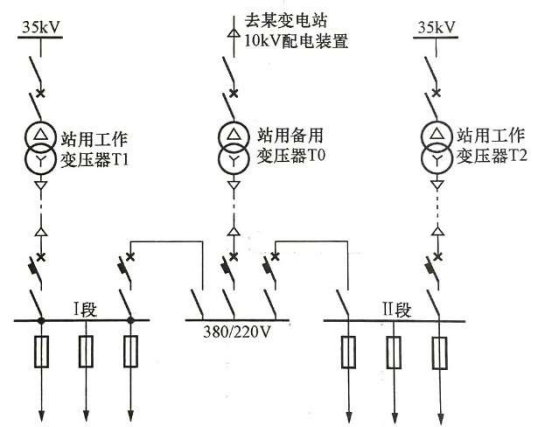
(2) 对于中型变电站或装有调相机的变电站，通常装设 2 台站用变压器，接在变电站低压母线的不同分段上。

(3) 500kV 变电站必须装设 2 台或 2 台以上的站用工作变压器。500kV 站的站用电源引接方式，有下述三种：

a. 由变电站内主变压器第三绕组引接，站用变压器高压侧要选用较大断流的开关设备，否则要加限流电抗器。

b. 当站内有较低电压母线时，一般由这类电压母线上引接 2 个站用电源，站用电源引接方式具有经济性好和可靠性高的特点。

c.500kV 变电站的外接站用电源多由附近的发电厂或变电站的低压母线引



分 别
变 电
容 量
这 种
接。

4. 厂用变压器的选择

厂用电负荷计算

1. 换算系数法

$$S = \sum (KP)$$

其中，

$$K = \frac{K_m K_L}{\eta \cos \varphi}$$

电动机计算功率按 P163 各情况确定。

2. 轴功率法

$$S = K_m \sum \frac{P_{max}}{\eta \cos \varphi} + \sum S_L$$

K_m 按 P163 中电厂类型取值。

厂用变压器选择

1. 额定电压

变压器一、二次侧额定电压必须与引接电源电压和厂用网络电压一致；

2. 台数与型式

6kV 或 10kV 一种电压等级：母线分 2 段，200MW 以上可分 4 段；

高压厂用工作变压器可选 1 台全容量的低压分裂绕组变压器/2 台 50%容量的双绕组变压器；

200MW 以上，可选用 2 台低压分裂绕组变压器；

10kV 与 3kV 同时存在：母线分 4 段；

高压厂用工作变压器可选 2 台 50%容量的三绕组变压器；

3. 容量

(1) 高压厂用工作变压器

双绕组变压器：

$$S_T \geq 1.1S_H + S_L$$

分裂绕组变压器：

高压绕组：

$$S_{IN} \geq \sum S_C - S_r$$

分裂绕组：

$$S_{2N} \geq S_C$$
$$S_C = 1.1S_H + S_L$$

(2) 高压厂用备用变压器

应与最大一台高压厂用工作变压器容量相同；低压厂用备用变压器容量类似选取；

(3) 低压厂用工作变压器

$$K_\theta S \geq S_L$$

5. 厂用电机的选择和自启动校验

自启动

厂用电系统中运行的电动机，当突然断开电源或厂用电压降低时，电动机转速就会下降，甚至会停止运行，这一转速下降的过

程称为惰行。若电动机失去电压以后，不与电源断开，在很短时间（一般在 0.5~1.5s）内，厂用电压又恢复或通过自动切换装置将备用电源投入，此时，电动机惰行尚未结束，又自动启动恢复到稳定状态运行的过程。

危害：

参加自启动的电动机数量多、容量大时，启动电流过大，可能会使厂用母线及厂用电网络电压下降，甚至引起电动机过热，将危及电动机的安全以及厂用电网络的稳定运行，因此必须进行电动机自启动校验。若经校验不能自启动时，应采取相应的措施。厂用变压器的容量小于自启动电动机总容量时，应采取以下措施：

（1）限制参加自启动的电动机数量。

（2）机械负载转矩为定值的重要设备的电动机，因它只能在接近额定电压下启动，也不应参加自启动，可采用低电压保护和自动重合闸装置，即当厂用母线电压低于临界值时，把该设备从母线上断开，而在母线电压恢复后又自动投入。

（3）重要的厂用机械设备，应选用具有较高启动转矩和允许过载倍数较大的电动机与其配套。

（4）不得已情况下，或增大厂用变压器容量，或结合限制短路电流问题一起考虑，适当减小厂用变压器的阻抗值。

自启动校验

1. 电压校验

单台/成组电动机自启动

厂用电动机启动开始瞬间高压厂用母线电压：

$$U_{*1} = \frac{U_{*0}}{1 + x_{*t} S_{*m\Sigma}}$$

自启动电动机容量标么值

$$S_{*m\Sigma} = \frac{K_{av} P_{m\Sigma}}{\eta S_t \cos \varphi}$$

厂用母线电压不应低于自启动要求的厂用母线最低电压值。

厂用高低压变压器串联，高低压电动机同时自启动

高压厂母线合成负荷（分裂绕组变压器）

$$S_{*H} = \frac{\frac{K_1 P_1}{\eta \cos \varphi} + S_0}{S_{2N}}$$

高压厂用变压器电抗标么值

$$x_{*t1} = 1.1 \frac{U_k \% S_{2N}}{100 S_{1N}}$$

高压母线电压标么值

$$U_{*1} = \frac{U_{*0}}{1 + x_{*t1} S_{*H}} > 0.65 \sim 0.7$$

（查表 5-4 得自启动要求的厂用母线最低电压）

低压厂用母线合成负荷标么值

$$S_{*L} = \frac{K_2 P_2 / \eta \cos \varphi}{S_{t2}}$$

低压厂用变压器电抗标么值

$$x_{*t2} = 1.1 \frac{U_k \%}{100}$$

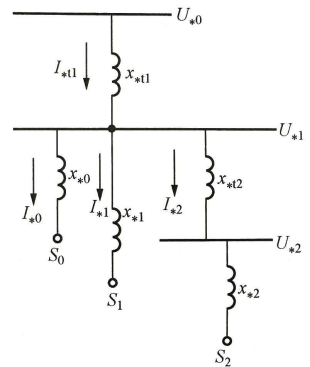
低压母线电压标么值

$$U_{*2} = \frac{U_{*1}}{1 + x_{*t2} S_{*L}} > 0.55$$

2. 容量校验

自启动电动机最大允许容量标么值

$$S_{*m\Sigma} = \frac{U_{*0} - U_{*1}}{U_{*1} x_{*t}}$$



课后题

5-1 什么叫厂用电和厂用电率？

5-2 厂用电的作用和意义是什么？

5-3 厂用电负荷分为哪几类？为什么要进行分类？

5-4 对厂用电接线有哪些基本要求？

5-5 厂用电接线的设计原则是什么？对厂用电压等级的确定和厂用电源引接的依据是什么？

5-6 在大容量发电厂中，要设启动电源和事故保安电源，如何实现？

5-7 火电厂厂用电接线为什么要按锅炉分段？为提高厂用电系统供电可靠性，通常都采用那些措施？

5-8 发电厂和变电站的自用电在接线上有何区别？

5-9 何谓厂用电电动机的自启动？为什么要进行电动机自启动校验？如果厂用变压器的容量小于自启动电动机总容量时，应如何解决？

5-10 已知某火电厂厂用 6kV 备用变压器容量为 12.5MVA， $U_k\% = 8$ ，要求同时自启动电动机容量为 11400kW，电动机启动平均电流倍数为 5， $\cos\varphi = 0.8$ ， $\eta = 0.90$ 。试校验该备用变压器容量能否满足自启动要求。

5-11 厂用母线失电的影响和应采取的措施？

第六章 • 导体和电气设备的原理与选择

1. 电气设备选择的一般条件

正常工作条件

额定电压：电气设备的额定电压不低于装置地点电网额定电压；

额定电流：额定环境温度下，电气设备的长期允许电流不小于该回路在各种合理运行方式下的最大持续工作电流；
环境条件

短路状态校验

短路热稳定校验：短路电流通过电气设备时，电气设备各部件温度不超过允许值

$$I_t^2 t \geq Q_k$$

电动力稳定校验：电气设备承受短路电流机械效应的能力；

$$i_{es} \geq i_{sh} \text{ 或 } I_{es} \geq I_{sh}$$

不校验热稳定/动稳定：

- （1）用熔断器保护的电气设备，可不验算动稳定；
- （2）采用有限流电阻的熔断器保护的设各可不校验动稳定；
- （3）装设在电压互感器回路中的裸导体和电气设备可不验算动、热稳定；

短路计算时间：

热稳定短路计算时间 t_k ：

$$t_k = t_{pr} + t_{br}$$

其中，断路器全开断时间 t_{br} ：

$$t_{br} = t_{in} + t_a$$

无延时保护时， t_k 可查表 6-2 得。断路器开断时电弧持续时间 t_a 由断路器种类决定，见 P184。断路器固有分闸时间 t_{in} 可查手册得到。

短路开断计算时间 t'_k ：

$$t'_k = t_{pr1} + t_{in}$$

保护启动和执行机构时间之和 t_{pr1} 由保护装置决定。

2. 高压断路器和隔离开关的选择

高压断路器

1. 断路器种类与型式

2. 额定电压、额定电流

$$U_N \geq U_{SN}$$

$$I_N \geq I_{max}$$

3. 开断电流

中小型发电厂/变电站采用中、慢速断路器：

$$I_{Nbr} \geq I''$$

中大型发电厂/枢纽变电站采用快速保护和高速断路器：

$$I'_k = \sqrt{I_{pt}^2 + (\sqrt{2}I''e^{-\frac{\omega t'_k}{T_a}})^2}$$

其中，非周期分量衰减时间常数

$$T_a = \frac{x_\Sigma}{r_\Sigma}$$

4. 短路关合电流

断路器额定短路关合电流不应小于短路电流最大冲击值：

$$i_{Ncl} \geq i_{sh}$$

5. 短路热稳定、动稳定校验

$$I_t^2 t \geq Q_k$$

$$i_{es} \geq i_{sh}$$

6. 发电机断路器特殊要求

(1) 额定值方面的要求。发电机断路器要求承载的额定电流特别高，而且开断的短路电流特别大，这都远超出相同电压等级的输配电断路器。

(2) 开断性能方面的要求。发电机断路器应具有开断非对称短路电流的能力，其直流分量衰减时间可达 133ms，还应具有关合额定短路电流的能力，该电流峰值为额定短路开断电流有效值的 2.74 倍，以及要具有开断失步电流等能力等。

(3) 固有恢复电压方面的要求。因为发电机的瞬态恢复电压是由发电机和升压变压器参数决定的，而不是由系统决定的，所以其瞬态恢复电压上升率取决于发电机和变压器的容量等级，等级越高，瞬态恢复电压上升得越快。

隔离开关

隔离开关与断路器相比，在额定电压、电流的选择及短路动、热稳定校验的项目相同。但由于隔离开关不用来接通和切除短路电流，故无需进行开断电流和短路关合电流的校验。

3. 互感器的原理及选择

电流互感器常用的二次接线方式不将三角形接线用于测量表计：

不论一次绕组采用三角形或星形，电流互感器二次绕组反映的是一次绕组的电流，若将二次绕组接为三角形，相连的两个互感器输出电流合并，形成线电流，而电流表测量的是相电流。如果三相平衡，那么，线电流是互感器输出的 1.732 倍，相电流电弧上的电压是弧电流与电弧电阻的乘积，而电弧介质的电阻大小是由介质中弧电流消耗的热能所致的游离程度决定，显然介质电阻不仅与弧电流的平方成比例，而且受热惯性因素影响。是线电流的 1/1.732 倍，实际电流表测量的还是互感器直接输出的电流。但当三相不平衡时，电流表的电流意义不明确。电流互感器使用时，规范用法通常是二次的 S2 端接地。三角型连接时，不能满足接地要求。

为提高电流互感器容量，能否采用同型号的两个电流互感器在二次侧串联或并联使用：

(1) 可以将电流互感器串联使用，提高二次侧的容量，但是要求两个电流互感器型号相同。因为电流互感器的变比是一次电流与二次电流之比。两个二次绕组串联后，二次电路内的额定电流不变，一次电路内的额定电流也没有变，故其变比也保持不变。二次绕组串联后，匝数增加一倍，感应电势也增加一倍，互感器的容量增加了一倍。也即每一个二次绕组承担二次负荷的一半，从而误差也就减小，容易满足准确度的要求。在工程实际中若要扩大电流互感器的容量，可采用二次绕组串联的接线方式。

(2) 不能将电流互感器并联使用。

电压互感器一次绕组及二次绕组的接地的作用：

电压互感器一次绕组直接与电力系统高压连接，如果在运行中电压互感器的绝缘损坏，高电压就会窜入二次回路，将危及设备和人身的安全。所以电压互感器二次绕组要有一端牢固接地。

4. 限流电抗器的选择

1. 额定电压、额定电流

分裂电抗器用于发电厂的发电机/主变压器回路时， I_{max} 一般选为发电机/主变压器额定电流 70%；用于变电站主变压器回路时， I_{max} 取两臂中负荷电流较大者，无负荷资料时，也取 70%。

$$\begin{aligned} U_N &\geq U_{SN} \\ I_N &\geq I_{max} \end{aligned}$$

2. 电抗百分值

普通电抗器

(1) 按将短路电流限制到要求值选择（限制到 I'' ）

电抗器的电抗百分值

$$x_L \% = \left(\frac{I_d}{I''} - x'_{*\Sigma} \right) \frac{I_N}{U_N} \frac{U_d}{I_d} \times 100(\%)$$

电源至电抗器前的系统电抗标么值为 $x'_{*\Sigma}$

(2) 电压损失校验

电抗器电压损失不得大于额定电压的 5%：

$$\Delta U \% = \frac{x_L \%}{100} \frac{I_{max}}{I_N} \sin \varphi \times 100(\%) \leq 5\%$$

(3) 短路时母线残压校验

母线残压不应低于电网电压额定值的 60%~70%

$$\Delta U_{re}\% = \frac{x_L\% I''}{100 I_N} \sin \varphi \times 100(\%) \geq 60\% \sim 70\%$$

分裂电抗器

(1) 按将短路电流限制到要求值选择

按普通电抗器计算电抗百分值后, 进行换算

仅 3 侧有电源, 1/2 侧短路时:

$$x_{L1}\% = x_L\%$$

1, 2 侧有电源, 3 侧短路时:

$$x_{L1}\% = \frac{2}{1-f} x_L\%$$

分裂电抗器的互感系数 f 一般查厂家资料, 若无则取 0.5。

(2) 电压波动校验

两臂母线电压波动不大于母线额定电压的 5%:

$$U_1\% = [U\% - \frac{x_{L1}\%}{100} (\frac{I_1}{I_N} \sin \varphi_1 - f \frac{I_2}{I_N} \sin \varphi_2) \times 100](\%)$$

$$U_2\% = [U\% - \frac{x_{L1}\%}{100} (\frac{I_2}{I_N} \sin \varphi_2 - f \frac{I_1}{I_N} \sin \varphi_1) \times 100](\%)$$

(3) 短路时残压及电压偏移校验

设 1 段母线故障, 短路电流为 I_k , 分裂电抗器电源侧残压百分值和 2 段母线上的电压百分值:

$$U\% = \frac{x_{L1}\%}{100} (\frac{I_k}{I_N} - f \frac{I_2}{I_N} \sin \varphi_2) \times 100(\%)$$

$$U_2\% = \frac{x_{L1}\%}{100} (1+f) (\frac{I_k}{I_N} - \frac{I_2}{I_N} \sin \varphi_2) \times 100(\%)$$

3. 热稳定、动稳定校验

$$\begin{aligned} I_t^2 t &\geq Q_k \\ i_{es} &\geq i_{sh} \end{aligned}$$

5. 高压熔断器的选择

1. 额定电压、额定电流

$$U_N \geq U_{SN}$$

熔断器熔管额定电流应大于等于熔体的额定电流

$$I_{FTN} \geq I_{FSN}$$

1. 熔体额定电流应根据电力变压器回路最大工作电流选择:

$$I_{FSN} = K I_{max}$$

可靠系数 K 按 P207 是否考虑自启动选取。

2. 回路电流涌流时, 保护电力电容器的高压熔断器熔体不应熔断。熔体额定电流根据电容器的回路的额定电流选取:

$$I_{FSN} = K I_{max}$$

可靠系数 K 按照 P207 熔断器作用选取。

2. 开断电流与选择性校验

开断电流校验

1. 无限流作用的熔断器:

$$I_{Nbr} \geq I_{sh}$$

2. 有限流作用的熔断器:

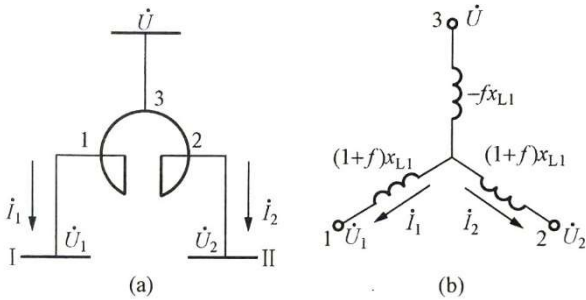
$$I_{Nbr} \geq I''$$

选择性校验

熔断器的熔体熔断时间可在安秒特性曲线上查出, 保证前后两级熔断器间/熔断器与电源保护装置间动作的选择性。

3. F-C 回路中高压熔断器特性曲线的配合

依据 FC 回路的大电流、高限流特性、快速切除要求, 通过对回路负荷的启动电流曲线与熔断器特性曲线的配合选定高压熔断器。



6. 裸导体的选择

1. 导体选型

材料

铝锰合金：载流量大、强度差；

铝镁合金：载流量小、机械强度大、焊接困难；

铜：持续工作电流大、出现位置狭窄/污秽、对铝有严重腐蚀的场所；

形状

（1）硬导体

矩形：一般 35kV 及以下，电流 4kA 及以下的配电装置；

槽形：机械强度好、载流量大、集肤效应系数小，一般用于 4kA~8kA 配电装置；

管形：集肤效应系数小、机械强度高，8kA 以上的大电流母线或要求电晕放电电压高的 110kV 及以上的配电装置；

（2）软导体

钢芯铝绞线、组合导线、分裂导线、扩径导线；

2. 导体截面积选择

长期发热允许电流

配电装置的汇流母线。

$$I_{max} \leq KI_{a1}$$

综合修正系数查附表 3 得，可计算为

$$K = \sqrt{\frac{\theta_{a1} - \theta}{\theta_{a1} - \theta_0}}$$

经济电流密度

年负荷利用小时数大 ($T_{max} > 5000h$)，传输容量大，长度 20m 以上的导体（发电机、变压器连接导体）。

导体的经济截面积

$$S_J = \frac{I_{max}}{J}$$

铝导体的经济电流密度可如图查得

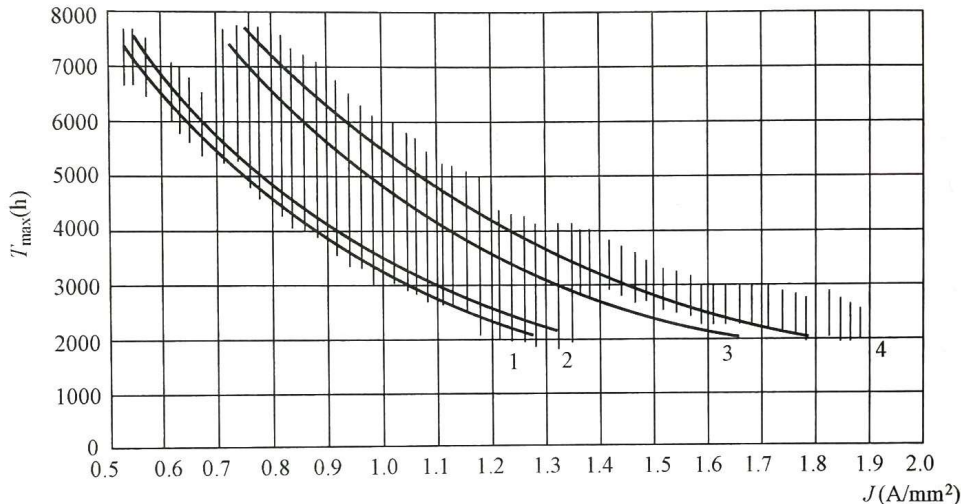


图 6 - 10 铝导体的经济电流密度

1—变电站站用、工矿用及电缆线路的铝线纸绝缘铅包、铝包、塑料护套及各种铠装电缆；

2—铝矩形、槽型母线及组合导线；3—火电厂厂用铝芯纸绝缘铅包、铝包、塑料护套及

各种铠装电缆；4—35~220kV 线路的 LGJ、LGJQ 型钢芯铝绞线

按经济电流密度选择的导体，还必须按长期发热允许电流进行校验：

按经济电流密度选择的导体应尽量选择接近计算的标准截面，为节约投资，允许选择小于经济截面的导体，因此按经济电流密度选择的导体截面还必须进行长期发热允许电流进行校验。

3. 电晕电压校验

110kV 及以上裸导体需按晴天不发生全面电晕进行校验。

4. 热稳定校验

短路热稳定决定的导体最小截面积

$$S_{min} = \frac{1}{C} \sqrt{Q_k K_f}$$

热稳定系数

$$C = \sqrt{A_h - A_w}$$

不同工作温度下裸导体的热稳定系数可查表 6-12 得。

5. 硬导体动稳定校验

(1) 矩形导体

单条导体最大相间应力

$$\sigma_{ph} = \frac{f_{ph} L^2}{10W} \leq \sigma_{al}$$

导体对垂直于作用力方向轴的截面系数 W 按布置情况选取，P211

多条导体：

$$\sigma_{ph} + \sigma_b = \frac{f_{ph} L^2}{10W} + \frac{f_b L_b^2}{12W} \leq \sigma_{al}$$

条间作用力 f_b 按导体布置情况确定，P211

为减小同相条间应力，装设衬垫，衬垫间允许的最大跨距

$$L_{cr} = \lambda b^4 \sqrt{\frac{h}{f_b}}$$

系数 λ 由材料和布置方式确定，见 P212。

(2) 槽形导体

应力计算方法与矩形导体相同。(a) 为垂直布置：

$$W = 2W_X$$

(b) 为水平布置：

$$W = 2W_Y$$

若焊接为整体，则：

$$W = W_{Y0}$$

截面系数可由附表 2 查得。

6. 硬导体共振校验

导体不发生共振的最大绝缘子跨距

$$L_{max} = \sqrt{\frac{N_f}{f_1}} \sqrt{\frac{EJ}{m}}$$

7. 电力电缆、绝缘子、套管的选择

电力电缆

1. 电缆芯线材料与型号选择

2. 电压选择

$$U_N \geq U_{SN}$$

额定电压：

中性点直接接地系统：回路的工作相电压；

中性点不接地系统：额定电压一般不低于 1.33 倍相电压；

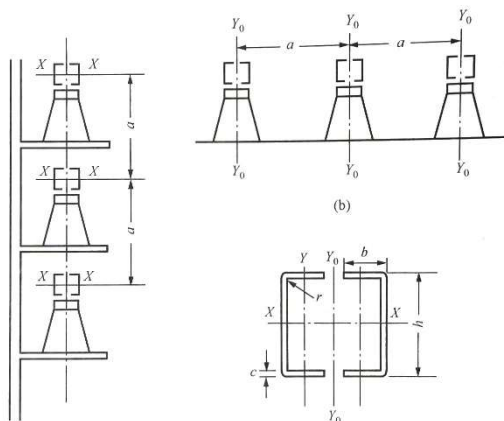
单相接地故障可能持续 8h 及以上/对发电机等安全性要求较高的回路电缆：该回路线电压；

3. 截面选择

与裸导体基本相同，修正系数与敷设方式、环境温度有关：

$$K = K_t K_1 K_2 \text{ 或 } K = K_t K_3 K_4$$

K_2 按 P215 选取，由电压等级、截面积决定； $K_t, K_1, K_3, K_4, \theta_{al}$ 可由附表 16~19 查得。



4. 允许电压降校验

$$\Delta U\% = \frac{173}{U} I_{max}(r \cos \varphi + x \sin \varphi)(\%) \leq 5\%$$

5. 热稳定校验

满足短路热稳定的最小截面积

$$S_{min} = \frac{\sqrt{Q_k}}{C} \times 10^3 (mm^2)$$

电缆的热稳定系数

$$C = \frac{1}{\eta} \sqrt{\frac{4.2Q}{K_f \rho_{20} \alpha} \ln \frac{1 + \alpha(\theta_h - 20)}{1 + \alpha(\theta_w - 20)}} \times 10^{-2}$$

计及电缆芯线填充物热容量随温度变化及绝缘散热影响的校正系数 η ，电缆芯单位体积热容量 Q ， 20° 时电缆芯线集肤效应系数 K_f ， 20° 时电缆芯的电阻系数，电缆短路时最高允许温度 θ_h 按照 P215 取值。

支柱绝缘子与套管

1. 型式选择

2. 额定电压选择

3~20kV 屋外支柱绝缘子/套管应选用高一电压等级产品；

3~6kV 可选用提高两电压等级的产品；

3. 穿墙套管的额定电流选择与窗口尺寸配合

具有导体的穿墙套管额定电流在温度修正后 ($\theta_{al} = 85$):

$$\sqrt{\frac{85 - \theta}{45}} I_N \geq I_{max}$$

4. 动、热稳定校验

穿墙套管的热稳定校验：

$$I_t^2 t \geq Q_k$$

母线型穿墙套管无需进行热稳定校验；

支柱绝缘子所受电动力

$$F_{max} = 1.73 i_{sh}^2 \frac{L_C}{a} \times 10^{-7} (N)$$

支柱绝缘子机械强度校验：

$$\frac{H_1}{H} F_{max} \leq 0.6 F_{de}$$

其中

$$H_1 = H + b + \frac{h}{2}$$

对穿墙套管，电动力计算式相同

$$L_C = \frac{L_1 + L_{ca}}{2}$$
$$F_{max} \leq 0.6 F_{de}$$

课后题

6-1 什么是验算热稳定的短路计算时间，及电气设备的开断计算时间支？

6-2 断路器与隔离开关在选择与校验上有什么异同？

6-3 发电机断路器有何特殊要求？

6-4 电流互感器常用的二次接线方式中，为什么不将三角形接线用于测量表计？

6-5 为提高电流互感器容量，能否采用同型号的两个电流互感器在二次侧串联或并联使用？

6-6 电压互感器一次绕组及二次绕组的接地有什么作用？

6-7 选择某 10kV 配电装置的出线断路器及出线的电抗器。设系统容量为 150MVA，归算到 10kV 母线上的电源短路总电抗 $X'_{*\Sigma} = 0.14$ （基准： $S_d = 100MVA$ ），出线最大负荷为 560A，出线保护动作时间 $t_{pr} = 1s$ 。

6-8 某分裂电抗器额定电流 $I_N = 2000A$ ， $X_{L1}\% = 10$ ， $f = 0.5$ 。在 2 臂母线发生短路故障，其短路电流 $I_k = 16kA$ ，试计算当 1 臂母线负荷电流 $I_1 = 800A$ ， $\cos \varphi_1 = 0.85$ 时，母线电压百分值 $U_1\%$ 为多少？

6-9 按经济电流密度选择的导体,为何还必须按长期发热允许电流进行校验? 配电装置的汇流母线,为何不按经济电流密度选择导体截面?

6-10 设发电机容量为 $25MW$, $I_N = 1718A$, 最大负荷利用小时数 $T_{max} = 6000h$, 三相导体水平布置, 相间距离 $a=0.35m$, 发电机出线上短路持续时间 $t_k = 0.2s$, 短路电流 $I'' = 27.2kA$, $I_{t_k/2} = 21.9kA$, $I_{t_k} = 19.2kA$, 周围环境温度 40° 。试选择发电机引出导体。

6-11 选择 $100MW$ 发电机和变压器组之间母线桥的导体。已知发电机回路最大持续工作电流 $I_{max} = 6791A$, $T_{max} = 5200h$, 连接母线三相水平布置, 相间距离 $a=0.7$, 最高温度 35° , 母线短路电流 $I'' = 36kA$, 短路热效应 $Q_k = 421.1(kA)^2s$

Missing Course

转差率: 异步电机转速 n 与同步电机转速 n_0 之差与同步电机转速的比值;

$$S = \frac{n - n_0}{n_0}$$

启动电流倍数 K : 启动所需电流与额定电流之比;

电动机效率 η : 电动机输出功率与输入功率的比值;

发电机最大持续工作电流 I_{max} :

$$I_{max} = \frac{1.05P_N}{\sqrt{3}U_N \cos \varphi}$$

短路冲击电流 i_{sh} :

$$i_{sh} = \sqrt{2}K_{sh}I''$$

冲击系数 K_{sh} 需查手册得到。

电力系统检修备用容量: $8\% \sim 15\%$; 事故备用容量: 10% ;