电力系统稳态分析知识点汇总

第一章 电力系统的基本概念

一、电力系统组成（\*）

电力系统 由发电厂、变电站、输电线、配电系统及负荷组成的有机的整体。

电力网络 是由电力线路、变压器等变换、输送、分配电能设备所组成的部分。

在电力系统中，发电机、变压器、线路和受电器等直接参与生产、输送、分配和使用电能的电力设备常称为主设备或称一次设备，由他们组成的系统又称为一次系统。

在电力系统中还包含各种测量、保护和控制装置，习惯上将它们称为二次设备和二次系统。

二、电力系统基本参量

总装机容量 系统中实际安装的发电机组额定有功功率的总和，其单位用千瓦（KW）、兆瓦（MW）或吉瓦（GW）。

年发电量 指系统中所有发电机组全年实际发出电能的总和，其单位用兆瓦时，吉瓦时或太瓦时。

最大负荷 电力系统总有功夫和在一年内的最大值，以千瓦，兆瓦或吉瓦计。年发电量与最大负荷的比成为年最大负荷利用小时数Tmax

额定频率 按国家标准规定，我国所有交流电系统的额定功率为50HZ。

最高电压等级 是指该系统中最高的电压等级电力线路的额定电压。

三、电力系统的结线方式

对电力系统接线方式的基本要求：1、保证供电可靠性和供电质量；2、接线要求简单、明了，运行灵活，操作方便；3、保证维护及检修时的安全、方便；4、在满足以上要求的条件下，力求投资和运行费用低；5、满足扩建的要求。

无备用结线 包括单回路放射式、干线式和链式网络。 优点：简单、经济、运行方便。缺点：供电可靠性差。 适用范围：供电可靠性要求不高的场合。

有备用结线 包括双回路放射式、干线式和链式网络。 优点：供电可靠性和电压质量高。缺点：不经济。 适用范围：电压等级较高或重要的负荷。

四、电压等级及适用范围（\*）

制定标准电压的依据：1、三相功率正比于线电压及线电流 S=UI。当输送功率一定时，输电电压越高，则输送电流越小，因而所用导线截面积越小。2、电压越高对绝缘的要求越高，杆塔、变压器、断路器的绝缘投资也越大。因而对应于一定的输送功率与输送距离应有一最佳的输电电压、3、从设备制造的经济性以及运用时便于代换，必须规格化、系列化，且等级不宜过多。

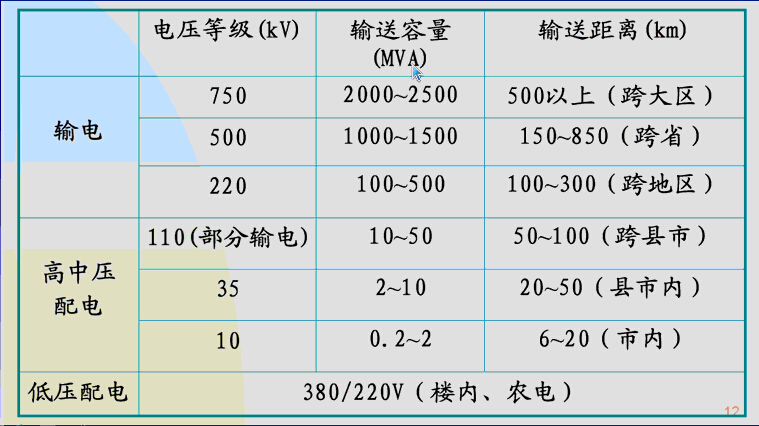
750/500KV为输电远距离输电网络电压，及区域网之间的互联线路电压

330、220KV多半用于大电力系统的主干线，330KV电压等级是西北网的特有电压等级，也用于省网之间的联络

110KV既用于中小电力系统的主干线，也用于大电力系统的二次网络

35KV用于大城市或大工业企业内部网络，也广泛用于农村网络

10KV则是常用的更低一级配电电压，只有负荷中高压电动机的比重很大时，才考虑以6KV配电的方案



如何确定额定电压

线路（电网）额定电压=用电设备额定电压

发电机额定电压=105%线路额定电压

升压变压器额定电压：

一次侧=线路额定电压=发电机额定电压（与发电机相关联105%）

二次侧=110%（或105%）线路额定电压

五、电力系统中性点的运行方式（\*）

直接接地 特点：供电可靠性低，比较经济；故障时：如发生接地故障，构成短路回路，接地相电流很大；适用范围：110KV以上系统

不接地 特点：供电可靠性高，绝缘费高；故障时：如发生接地故障，不必切除；接地相，但非接地相对地电压为相电压倍。适用范围：35KV以下系统

中性点经消弧线圈接地

1、中性点绝缘故障后相电压升高倍，但线电压不变，供电可靠性高，适用于35KV及以下的网络。

2、110KV及以上网络，考虑到绝缘投资与运行维护费用常采用中性点直接接地系统。

3、在中性点不接地系统，当接地电流超过以下数值时，中性点经消弧线圈接地。

3—6KV网络 30A

10KV网络 20A

35-60KV网络 10A

中性点经消弧线圈接地时，又有过补偿和欠补偿之分。 过补偿，感性电流小于容性电流。 欠补偿，感性电流大于容性电流

六、电力系统运行的特点、要求（\*）

电能的特点

电能不能大量储存，电力系统在任何时刻的电能必须满足∑P=∑P+∑P

对电力系统的要求

1、最大限度的满足用户的用电需求

2、保证安全可靠的供电，按对供电的可靠性的哟求讲负荷分为三级：

一级负荷：对这一级负荷中断供电，将造成人身事故，经济严重损失，人民生活发

生混乱。

二级负荷：对这一级负荷中断供电，将造成大量减产，人民生活受影响。

三级负荷：所有不属于一、二级的负荷，如学校，工厂的附属车间，农电等

保证电能的良好质量（\*）

衡量电能质量的的指标为：电压、频率、波形

电压质量和频率质量一般都以偏移是否超过给定值来衡量，例如给定的允许电压偏移为额定值的，给定的允许频率偏移为。波形质量则以畸变率是否超过给定值来衡量。我国电力系统的额定频率规定为50HZ，=

保证系统运行的经济性 降低一次能源在国民经济一次能源总消耗中的比例，减少煤耗率和线损率，厂用电率等。

第二章 电力系统各元件的特性和数学模型

一、电力线路的参数和数学模型

电力线路按结构可分架空线路和电缆线路。

架空线路由导线、避雷线、杆塔、绝缘子和金具等构成。

导线、传输电能；避雷线、讲雷电流引入大地以保护电力线路免受雷击；杆塔、支持导线和避雷线；绝缘子、使导线和杆塔间保持绝缘；金具、支持、接续、保护导线和避雷线，连接和保护绝缘子。

电缆线路由导线、绝缘层、保护层等构成。

导线、传输电能；绝缘层、使导线与导线、导线与保护层互相绝缘；保护层、保护绝缘层，并有防止绝缘油外溢的作用。

架空线路的绝缘子分针式和悬式两种，针式绝缘子使用在电压不超过35KV的线路上，悬式绝缘子是成串实用的绝缘子，用于电压为35KV及以上的线路上。

架空线路的换位 为减少三项参数的不平衡，输电线路进行换位循环，使三项线路参数尽量平衡。整换位循环：指一定长度内有两次换位而三相导线都分别处于三个不同位置，完成一次完整的循环。

二、电力线路的物理现象

热效应 电流流过导线时会因电阻损耗而产生热量，电流越大，损耗越大，发热也越厉害。用电阻R描述

磁场效应 当交流电流通过电力线路时，在三相导线内部和三相导线的周围都要产生交变的磁场，而交变磁通匝链导线后，将在导线中产生感应电势。用电感L描述。

电场效应 当交流电流加在电力线路上时，在三相导线的周围会产生交变的电场，在它的作用下，不同相的导线之间和导线与大地之间将产生位移电流，从而形成容性电流和容性功率。用电容C描述。

电晕现象和电流泄漏 在高电压的作用下，当导线表面的电场强度过高时，当导致输电线周围的空气游离放电（在电力系统中常称这种现象为电晕现象）；而且由于绝缘的不完善，可能引起少量的电流泄漏等。用电导G描述。

三、波阻抗和自然功率

如果令线路的r1=0和g1=0，则成为一条无损耗的线路，相应的，，它的波阻抗为纯电阻，传播系数则仅有虚部，称为相位系数。在无损线路中，当线路末端所接负荷等于波阻抗Zc时,线路末端的功率为纯有功功率。这个功率成为线路的自然功率。自然功率常用来衡量长距离输电线路的输电能力，一般220kV及以上电压等级架空线路的输电能力大致接近于自然功率。

四、负荷的运行特性和数学模型

1、负荷和负荷曲线

1.1 电力系统的负荷

电力系统总负荷 就是系统中千万个用电设备消耗功率的总和。他们大致分异步电动机、同步电动机、电热电炉、整流设备、照明设备若干类。

电力系统综合用电负荷 工业、农业、邮电、交通、市政、商业及城乡居民锁消耗的功率综合。

电力系统的供电负荷 综合用电负荷加网络中损耗的功率就是系统中各发电厂应供应的功率。

电力系统的发电负荷 供电负荷再加各发电厂本身消耗的功率—厂用电，就是系统中各发电机应发的功率

电力系统负荷的运行特性分为两大类： 1、负荷曲线：负荷随时间而变化的规律；2、符合特性：负荷随电压或频率而变化的规律

1.2 负荷曲线

按负荷种类分，可分为有功功率负荷和无功功率负荷曲线；

按照时间段长短分，可分为日负荷和年负荷曲线。

按计量地点分，可分为个别用户、电力线路、变电所、发电厂、乃至整个系统的负荷曲线。

1.2.1 有功功率日负荷曲线

日负荷曲线 描述一日内负荷随时间（以小时为单位）变化的曲线。反映一段时间内负荷随时间而变化的规律用负荷曲线来描述。最大、最小值之差，即所谓峰谷差。日负荷曲线它是制订各发电负荷计划的依据。

日负荷率 24小时平均负荷与该时间段内的最高负荷的百分比。

1.2.2 有功功率年负荷曲线

一般指年最大负荷曲线，即表示一年内每月最大有功功率负荷变化的曲线。有功功率年负荷曲线常用语制订发电设备检修计划及计算全年的发电量。

2、负荷的静态特性和数学模型

2.1负荷的静态特性

负荷特性指负荷功率随负荷端电压或系统频率变化而变化的规律，因而有电压特性和频率特性之分，进一步可分为静态特性和动态特性。

静态特性： 指电压或频率变化后进入稳态时负荷功率与电压或频率的关系。

动态特性： 指电压或频率急剧变化过程中负荷功率与电压或频率的关系。

由于负荷有功功率和无功功率的变化规律不同，负荷特性还应分为有功功率特性和无功功率特性两种。

第三章 简单电力网络的计算和分析

一、潮流计算

潮流计算的目标

针对系统正常稳态运行状态的计算：给定运行方式下的负荷和某些发电机功率及某些节点电压，求整个系统的电压和功率分布。

潮流计算的用途

检查各元件是否过负荷

各节点电压是否满足要求、计算功率损耗

功率的分布和分配是否合理

潮流计算的重要性——电力系统最基本的计算

现有系统的运行和扩建

新系统的规划设计

系统的安全估计、静态和暂态稳定分析

潮流计算结果：各节点电压（大小、相位）、各支路电流及功率分布（功率的传输和功率损耗）

首先从简单网络潮流计算入手，掌握手算潮流的方法和了解系统稳态运行下的物理现象，然后学习复杂网络的潮流计算（侧重于基本的计算机算法）

二、电压降落、电压损耗和电压偏移

电压降落 或称线路阻抗中的电压降落，是指线路始末两端电压的向量差，电压降落也是向量，有纵分量和横分量

电压损耗 在电力系统中，关心较多的是线路两端电压的数值差，并将这一差值称为电压损耗。常用百分数表示为 电压损耗% = 

在近似计算中，常用电压降落的纵分量来代替电压损耗 

电压偏移 是指线路始端电压和末端电压与线路额定电压之间的差值，即和，分别用他们来衡量两端电压偏离额定电压的程度。电压偏移常用百分数表示，有始端电压偏移%= 末端电压偏移%=

电压调整 是指线路末端空载与负载时电压的数值差。电压调整也仅有数值。不计线路对地导纳时，，电压调整等于电压损耗，即，电压调整也常以百分值表示，即 电压调整 % =  式中的为线路末端空载时电压。

输电功率 是指线路末端输出有功功率P2与线路始端输入有功功率P1的比值，常以百分值表示，即 输电效率% =  因为线路始端输出有功功率P1总大于末端有功功率P2，输电效率总小于100%

可得出以下结论

三、电力线路上的电能损耗

有功功率损耗伴随着电能损耗，从而使电力系统一次能源消耗增加。

对于无功功率损耗虽然它并不直接引起电能损耗，但无功损耗需要由发电机和无功补偿设备供给，从而也增大了他们的容量和所需要的费用。

当无功功率流过线路和变压器时，使总电流增大，因而增大了电阻中的有功功率损耗。

显然系统中不希望无功功率远距离输送，希望用户提高功率因素，无功功率分层控制，就地平衡。

线路等值电抗消耗的无功：与负荷平方成正比。

对地等值电纳发出的无功：充电功率，与所加电压平方成正比，与通过负荷无直接关系。

轻载时，线路消耗很少的无功，甚至发出无功。对于超高压线路，可能引起线路末端电压升高，导致绝缘设备损坏，故线路末端常设并联电抗器，在线路空载或轻载时抵消充电功率，避免线路上出现过电压。

四、电力线路上的电能损耗

最大负荷利用小时数Tmax 指一年中负荷消费的电能A除以一年中的最大负荷Pmax，即：

年负荷率 一年中负荷消费的电能A除以一年中的最大负荷Pmax与8760h的乘积，即：

年负荷损耗率 全年电能损耗除以最大负荷时的功率损耗与8760h的乘积，即：

最大负荷损耗时间 全年电能损耗除以功率损耗，即： 

求取全年电能损耗的方法有以下两个：

根据最大负荷损耗率计算：

根据最大负荷损耗时间计算：

最大负荷损耗时间与和功率因素均有关系，通过书中表3-1利用和可得到

五、电能经济指标

输电效率 指线路末端输出有功功率与线路始端输入有功功率的比值，以百分数表示

线损率或网损率 线路上损耗的电能与线路始端输入的电能的比值



六、线路分析结论

1、输电线路的最大传输功率与两端电压的乘积成正比，而与线路的电抗呈反比。2、增加始端或末端的电压可以提高线路的传输功率极限，但是由于受设备绝缘等因素的限制，其最高电压通常不允许超过一定的容许值，除非提高线路的电压等级，采用更高一级的额定电压。3、减少线路的电抗比提高电压等级容易和经济得多。其中，线路采用分裂导线便是减少的措施之一，另一个措施是在线路上串联电容器，用电容器的容抗来补偿线路的一部分感抗。

输电线路功率与电压之间的定性关系

在输电系统，特别是超高压输电系统中，由于线路和变压器的电阻远小于电杭，其结果是有功功率与两端电压相位差之间，无功功率与电压损耗之间呈比较紧密的关系，而有功功率与电压损耗之间、无功功率与电压相位差之间的关系较弱。



有功功率一般是由电压相位相对超前的一端向电压相位相对滞后的一端传送(相当于)。

对于线路所传输的无功功率，在忽略线路的电阻时有

下式可以得出无功功率与两端电压的关系。





可见，线路传输的无功功率与线路两端电压差即电压损耗成正比。而且，无功功率一般由电压高的一端向电压低的一端流动。如果要增加线路始端送到末端的无功功率，需要设法提高始端电压或降低末端电压。

七、辐射形网络中的潮流计算

辐射形电网特点:线路有明确的始端和末端辐射形电网的分析计算利用已知的负荷、节点电压求取未知节点电压、线路功率分布、功率损耗及始端输出功率。按已知条件的不同，一般可以分为两种:已知末端功率、电压:根据前述方瘩，从末端逐级往上推算已知末端功率、始端电压:迭代法求解

第四章 复杂电力系统潮流的计算机算法

潮流计算中节点的分类

在潮流计算中，给定的量应该是负荷吸收的功发电机发出的功率或者发电机的电压和具有电压调整能力的变电所母线电压。这样，按照给定量种类的不同，可以将节点分为以下三类:

（1）PQ节点。给定节点的注入有功功率P和注入无功功率Q，这类节点对应于实际系统中的纯负荷节点(如变电所母线)、有功和无功出力都给定的发电机节点(包括节点上带有负荷卜以及联络节点(注入有功和无功功率都等于零)。这类节点占系统中的绝大多数，它们的节点电压有效值和相位未知。

（2）PV节点。给定节点的注入有功功率尸和节点电压已知效值，待求量是节点的注入无功功率Q和电压的相位e。这类节点通常为发电机节点，其有功出力给定而且具有比较大的无功容量，它们能依靠自动电压调节器的作用使母线电压保持为给定值。有时将一些装有无功补偿设备的变电站母线也处理为PV节点。

(3}平衡节点。在潮流计算中，必须设置一个平衡节点，其电压有效值为给定值，电压相位为B -D，即系统其它各节点的电压相位都以它为参考;而其注入的有功功率和无功功率都是待求量。

第五章 电力系统的有功功率和频率调整

一、电力系统的有功平衡

频率偏移对电能用户的影响

电力设备在额定频率下设计:好技术经济性能，是电能质量的另一重要指标。

用户观点:要求提供合格哪优质电能商品。

影响举例:

电动机:变化，转速改变，影响产品质量。

电子设备:对敏感，要求更高，现代投资环境。

火电厂主要设备:水泵、风机、磨煤机都是异步电机，下降，输出下降，有功发电下降，进一步下降，恶性循环。

有功功率和系统频率的关系

1. 电力系统的频率与发电机的转速的关系

在稳态运行情况下，全系统各点的频率都相等，所有发电机都保持同步运行。每一台发电机的转速与系统频率之间的关系为

 Hz

n:发电机转速

p:发电机极对数

发电机的转速取决于其转轴上的原动机的机械功率和发电机输出的电磁功率电网:发电机转速的体现当发电机与.平衡时，和不变负荷随机变化引起随机变化，无法突变，引起随机变化。

结论:频率偏移不可避免

·为了保持系统的频率在额定值附近，需要不断调整原动机的输入功率，使发电机的偷出功率与系统负荷有功功率的变化相适应，从而使发电机的稳态转速变化不致过大。

·因此，系统频率的控制，与负荷有功功率的变化及其在发电机间的分配以及发电机组功

率的控制密切相关。

2. 有功负荷的变动及控制

实际的负荷变化比图中的曲线1要复杂得多，除了在总体上呈连续变化的趋势以外还包含呈随机变化的部分，在随机变化的部分中，主要是变化幅度较小、变化周期较短(以几秒钟为周期)的随机分量;

有的还具有变化幅度稍大、变化周期稍长的(以几分钟为周期)脉动分量。

另外一种负荷变动基本上可以预计，其变动幅度最大，周期也最长，是由于生产、生活、气象等变化引起的负荷变动，有规率的。

电力系统频率的一次调整 对变化幅度较小、变化周期较短(以几秒钟为周期)的随机分量，由发电机组的调速器来调整，当调速器的测速系统感受到发电机转速变化时(如转速下降)，调速器的执行机构会自动调节发电机的功率(增加发电机功率)，由调速器来平衡负荷变动的方式常称为电力系统频率的一次调整;一次调频是所有运行中的发电机组都可参加的，取决于发电机组是否已经满负荷发电。

电力系统频率的二次调整 对变化幅度稍大、变化周期稍长的(以几分钟为周期)脉动分量，只由发电机组的调速器动作不能满足频率偏差的要求，由系统中指定发电机组的调频器来调整，这种调整称为电力系统频率的二次调整;二次调频厂往往是系统的平衡节点。

电力系统频率的三次调整 对变动可以预计的负荷，根据预测负荷采用有功功率经济分配，由调度部门根据负荷曲线进行最优分配。这种调整称为电力系统频率的三次调整。

负荷预测的简要介绍

电力系统经济调度的第一个问题就是研究用户的需求，即进行电力负荷预测，按照调度计划的周期，可分为日负荷预测，周负荷预测和年负荷预测。不同的周期的负荷有不同的变化规律：

1.第一种变动幅很小，周期又很短，这种负荷变动有很大的偶然性

2.第二种变动幅度较大，周期也较长，属于这种负荷的主要有:电炉、压延机械、电气机车等带有冲击性的负荷变动;

3.第三种变动基本上可以预计，其变动幅度最大，周期也最长，是由于生产、生活、气象等变化引起的负荷变动。

负荷预测的精度直接影响经济调度的效益，提高预测的精度就可以降低备用容量，减少临时出力调整和避免计划外开停机组，以利于电网运行的经济性和安全性。

负荷预测分类:

1.安全监视过程中的超短期负荷预测;

2.日调度计划;

3.周负荷预测;

4.年负荷预测;

5.规划电源和网络发展时需要用10-20年的负荷预测值。

有功功率电源和系统的备用容量

1.有功功率电源

电力系统中有功功率电源是各众电厂的发电机。

系统中的总装机容量=所有发电机额定容量之和

但系统中的电源容量并不一定始终等于所有发电机额定容量之的电和，这是因为并不是所有发电机组不间断地全部投入运行(停运、检修等)，且投入运行的发电机组也不是全部按额定容量发电。系统中电源容量=可投入发电设备的可发率之和投入运行的发电设备可发功率之和是真正可供调度的系统电源容量。其不应小于包括网损和厂用电在内的系统(总)发电负荷。

2.系统的备用容量

系统电源容量大于发电负荷的部分，可分为热备用和冷备用或负荷备用、事故备用、检修备用和国民经济备用等。

(1)负荷备用容量。 负荷备用容量是为了适应系统中短时的负荷波动，以及因负荷预测不准而产生的计划外负荷增加，一般取负荷的2%-5%

(2)事故备用容量。 事故备用容量是为了防止因机组发生事故使有功产生缺额而设置的备用容量，其大小应根据系统容量、发电机台数、单位机组容量、机组的事故概率以及系统的可靠性指标等确定。一般取为系统最大负荷的5%--}}0%，且应大于系统中最大机组的容量。

(3)检修备用。 检修备用是为系统中的发电设备能进行定期检修而设置的备用容量。通常机组的检修安排在系统负荷较低的季节和节假日进行，如果这些时间不够安排，则需设置专门的检修备用容量。

(4)国民经济备用。 国民经济备用指适应负荷的超计划增长而设置的备用。

负荷备用和事故备用是在系统每天的运行过程中都必须加以考虑和安排的，检修备用在安排每年运行方式时加以考虑，而国民经济备用则属于电力系统规划和设计考虑的内容。

热备用 热备用是指所有投入运行的发电机组可能发出的最大功率之和与全系统发电负荷之差，因而也称运转备用或旋转备用。

负荷备用必须以热备用的形式存在于系统之中。事故备用中一部分应为热备用，另一部分可以冷备用的形式存在于系统之中。

冷备用 冷备用容量是指系统中处于停止运行状态，但可以随时待命启动的发电机组最大出力的总和。

冷备用可以作为检修备用和国民经济备用及一部分事故备用。

要保证电力系统运行过程中的频率质量，首先必须满足在额定频率下系统有功功率平衡的要求，除了满足有功功率平衡要求以外，在系统中还必须安排适当的备用容量，有功功率平衡和备用要求可以归纳为:



一发电机i的可用有功出力，g为系统中发电机的总数

一全系统总的最大负荷;

一全系统的最大有功功率损耗和厂用电;

一全系统总有功功率备用容量。

二、电力系统中有功功率的最优分配

电力系统中有功功率的最有分配有两个主要内容，包括有功功率电源的最优组合和有功功率负荷的最优分配。

有功功率电源的最优组合

是指系统中发电设备或发电厂的合理组合。通常所说的机组的合理开停，包括三个部分:

1.机组的最优组合顺序

2.机组的最优组合数量

3.机组的最优开停时间

涉及的是系统中冷备用容量的合理分布问题。

各类发电厂的运行特点和合理组合

只对各类发电机的运行特点及对它们承担负荷的合理顺序作一说明

1.各类发电厂的运行特点

火力发电厂的特点有

(1)火力发电厂的锅炉和汽轮机都有一个技术最小负荷，也就是约束条件，锅炉的技术最小负荷取决于锅炉燃烧的稳定性，其值约为额定负荷的25%~70%，因锅炉类型和燃料种类而异。汽轮机的技术最小负荷约为额定负荷的10%~15%

(2)火力发电厂锅炉和汽轮机的退出运行和再度投入不仅要耗费能量，而且要花费时间，又易于损坏设备。

(3)火力发电厂的锅炉和汽轮机承担急剧变动的负荷时，也是既要额外耗费能量，又花费时间。

(4)火力发电厂锅炉和汽轮机的高温高压设备效率高，可以灵活调节的范围窄。中温中压设备效率较前者低，但可以灵活调节的范围较前者宽。低温低压设备效率最低，技术经济指标最差。

(5)热电厂(供热式火力发电厂)与一般火电厂的区别在于热电厂的技术最小负荷取决于其热负荷，因而称强迫功率。由于热电厂抽气供热，其效率较高.

原子能发电厂的特点有:

(1)原子能发电厂反应堆的负荷基本上没有限制，因此，其技术最小负荷主要取决于汽轮机，也约为额定负荷的10%15%。

(2)原子能发电厂的反应堆和汽轮机退出运行和再度投入皆承担急剧变动负荷时，也要耗费能量、花费时间，且易于损坏设备。

(3)原子能发电厂的一次投资大，运行费用小。

水力发电厂的特点有:

(1)为综合利用水能，保证河流下游的灌溉、通航，水电厂必须向下游释放一定水量，释放这部分水量的同时发出的功率也是强迫功率。

(2)水电厂的水轮机也有一个技术最小负荷，其值因水电厂的具体条件而异。

(3)水电厂的水轮机退出运行和再度投入不需耗费很多能量，也不需花费很多时间，操作简单。这是水电厂的主要优点之一。

(4)水电厂的水涛仑机承担急剧变动负荷时，不需额外耗费能量和花费时间。

(5)水电厂水头过分低落时，水轮发电机组可发的功率要降低。水电厂不总能承担额定容量范围内的负荷。

(6)水电厂按其有无调节水库、调节水库的大小或其功能分为无调节、日调节、季调节、年调节、多年调节和抽水蓄能等几类。

抽水蓄能水电厂起的是调峰作用。在其上、下方各有一水库，系统负荷出现低谷时，抽水至上水库，储蓄水能;系统负荷出现高峰时，放水至下方水库，同时发电.因此，其水源仅需维持泄漏和蒸发所需水量。

2.各类发电厂的合理组合

火电厂 承担基本不变的负荷。避免频繁开停设备或增减负荷。高温高压电厂因效率最高，应优先投入，在负荷曲线的更基底部分运行。中温中压电厂、低温低压电厂设备陈旧，效率很低，只能在高峰负荷期间发必要的功率。

原子能电厂 可调容量大，一次投资大，运行费用小，应持续承担额定容量负荷，在负荷曲线的基底部分运行。

无调节水库水电厂 全部功率应首先投入。

有调节水库水电厂 强迫功率都不可调，应首先投入。在洪水季节，为防止弃水，优先投入;在枯水季节则恰相反，应承担高峰负荷。在耗尽日耗水量的前提下，枯水季节水电厂可调功率用于调峰，使火电厂的负荷更平稳.从而减少设备开停或负荷增减，从而节约总的燃料消耗。

抽水蓄能电厂 在低谷负荷时，其水轮发电机组作电动机水泵方式运行，因而应作负荷考虑。在高峰负荷时发电，与常规水电厂无异。

虽然抽水蓄能、放水发电循环的总效率只有70%左右，但因这类电厂的介入，使火电厂的负荷进一步平稳，就系统总体而言，是很合理的。这类电厂常伴随原子能电厂出现，其作用是确保原子能电厂有平稳的负荷。但系统中严重缺乏调节手段时，也考虑建设这类电厂。

有功功率负荷的最优分配

1、概述

最优化 人们为某个目的而选择的一个“最好”方案或一组“得力”措施以取得“最佳”效果这样一个宏观过程

有功功率负荷的最优分配 是指系统的有功功率负荷在各个正在运行的发电设备或发电厂之间的合理分配。经典的方法是按等耗量微增率准则进行分配，现代采用数学规划的方法。

电力系统最优运行 是电力系统分析的一个重要分支，研究的问题主要是在保证用户用电需求的前提下，如何优化地调度系统中各发电机组和系统中可调状态变量的运行工况，从而使系统发电所消耗的总燃料耗量或网络损耗达到最小。

在电力系统中，由于各个发电厂的形式可能不同，它们的经济性各不相同。因此，系统的有功负荷(包括网络损耗)在电厂和机组间的不同分配，将影响到整个系统运行的经济性。在系统各节点的负荷都已知的情况下，如何分配发电机和补偿设备的功率，使得所有设备不发生过载、全部母线电压都满足要求，并且使得全系统运行最为经济，玲这便属于电力系统运行方式的优化问题。

优化问题的数学描述：

求解问题的变量，在满足等式和不等式函数约束的条件下，使目标函数达到最小。

2.火力发电厂之间的有功功率经济分配

经典的经济调度在决定全系统的总有功负荷和损耗在发电机之间的经济分配时，只计及发电机组有功出力的限制，而不考虑其它安全约束和电压要求，其目标是使全系统的总燃料消耗量(或总费用)最少。

1)火力发电机组的燃料消耗特性

对于纯火电系统，发电厂的燃料费用主要与发电机输出的有功功率有关，这种反映单位时间内发电设备的能量消耗与发出的有功功率之间的关系称为耗量特性。燃料消耗用含热量为29.31MJ/kg的标准煤重量表示。

耗量微增率 单位时间内输入能量微增率与输出功率微增量的比值。耗量特性曲线某点切线的斜率。

2)不计网损变化影响的有功功率经济分配

不计网损变化影响的有功功率经济分配，是指网络中的总有功功率损耗假定与发电机之间的有功功率分配情况无关。

各个发电机的出力都不超过容许范围的前提下，全系统总的燃料消耗量达到最小。

等微增率准则作如下物理解释:

煤耗微增率是机组增加单位出力时所增加的燃料消耗量。如果在某一有功功率分配情况下，各机组的煤耗微增率不等，例如机组的煤耗微增率小于机组，在此情况下，若将机组的出力增加一个微小增量并同时将机组减少同一数量，使功率仍保持平衡，则其结果是机组因此而增加的燃料消耗量将小于机场减少的燃料消耗量，即可以使全系统的燃料消耗量减少，由此说明应该增加机组i的出力并减少场的出力，直至它们的煤耗微增率相等为止。

三、电力系统的频率调整

（一）概述

频率是电力系统运行的一个重要的指标，直接影响着负荷的正常运行。负荷要求频率的偏差一般应控制在Hz的范围内。

一般而言，系统综合负荷的有功功率与频率大致呈一次方关系。

要维持频率在正常的范围内，其必要的条件是系统必须具有充裕的可调有功电源。

在频率调整前，必须了解电力系统负荷、发电机组及电力系统的频率特性。

负荷是随时间不断变化的，其中包括变化幅度较小、变化周期较短的随机分量，以及变化幅度稍大、变化周期稍长的脉动分量和连续变化的部分。要调整.句虑机的有功出力使之随时与负荷相适应，目前所采用的方法是针对不同的变化分量采取不同的手段。

对于数量较小而变化较快的随机变化分量，发电机有功出力的调整在速度上必须能与之相适应，而要求出力改变的数量也较小。对于这一分量，可以通过原动机调速器的作用来完成发电机组出力和频率的调整，习惯上称之为频率的一次调整。

下面先从自动调速系统的作用开始讨论系统的频率调整问题。

（二）、自动调速系统及其调节特性

1.自动调速系统

发电机组调速系统的种类很多，但根据其转速测量元件的不同，基本上可以分为机械液压式和电气液压式两大类。为了说明调速器和调频器的工作原理，介绍一种原始的机械调速系统一离心飞摆式。这种调速系统简单直观，它的调节机理又和新型调速系统没有太大的差别。

2.发电机组有功功率静态频率特性

在自动调速系统作用下，发电机组输出的有功功率与频率之间的稳态关系称为机组的有功功率静态频率特性，简称机组的频率特性。由于发电机的有功功率随着原动机的功率的增加而增加，而且系统的频率与机组转速成正比，因此可以近似地认为机组的频率特性为一条直线，稳态下发电机在调速器作用下发出的有功功率增量与频率增量之间的关系为:

3.系统频率的一次调整

在电力系统中，所有发电机组都具有自动调速系统，它们共同承担频率的一次调整任务，其主要目标是针对全系统有功负荷的随机变化。

为了保证负荷在有较大的变化时，使系统的频率满足要求，需进一步调整发电机组的出力，使它们能更好地跟踪负荷的变化，以便将频率偏差限制在容许变化范围内，并能得到更高的频率质量，就需要进行频率的二次调整。

然而，频率的二次调整，既不是所有的机组都参与，也不是连续不断地进行，而是每隔一段时间进行一次，其周期因系统而异，二次调频是由发电机组的调频器实现的，一般只由系统的调频厂即系统中的平衡节点的发电机组担负的。

4.频率的二次调整

在实际电力系统中，基本上所有的机组都装有自动调速系统，因此所有机组都参与一次调频。当负荷变化时，虽然发电机组的自动调速系统能在一定程度上调节发电机的功率，使它们随着负荷的变化而变化，但由于调速系统的调差系数不为零，是由差调节，因此，单靠机组的自动调速系统不可避免地会产生较大的频率偏差，而当负荷变化较大时，频率偏差甚至超过容许范围。

由上述可见在进行频率的二次调整时，系统负荷的增减基本上要由调频机组或调频厂来承担，如调频厂不位于负荷中心，有可能出现在控制系统频率的同时，通过联络线交换的有功功率超出允许值的情况，这样就出现了在调整系统频率的同时控制联络线上流通功率的问题。

6.自动发电控制

以上只是从原理上解释了系统的频率调整。在现代电力系统中频率的控制和调整除自动调速系统外，主要依靠自动发电控制系统来保证系统的频率，联络线功率及经济运行。

1.自动发电控制(Automatic Generation Control,缩写AGC)的功能:

1)频率偏差限制在容许变化范围内并能得到更高的频率质量。

2)使系统各区域之间通过联络线交换的净功率按照事先约定的协议执行。

3}发电机组之间的功率分配应满足经济性要求。

完成系统内区域之间通过联络线交换的净功率按照事先约定的协议执行的功能称为频率和联络线功率控制，也称为负荷频率控制((Load FrequencyControl缩写LFC) ,也即为上面讲述的二次调频。负荷预测通常存在误差，因此需要不断对机组间功率的经济分配作调整。为了达到经济分配目的而进行的调整和控制常称为经济调度控制(Economic Dispatching Control缩写EDC)，或简称经济调度((ED)，也即为上面讲述的三次调频。

两者组成了自动发电控制(AGC)

第六章 电力系统无功功率与电压调整

本章的主要内容：介绍无功功率与系统电压的关系，了解无功电源和无功负荷的特性，系统中各种调压方式及其调压原理，利用发电机、变压器及并联、串联无功补偿装置进行系统的电压调整。

电压是电力系统电能质量的另一个重要指标。由于线路和变压器中的电压损耗与通过它们的功率有关，而在高压系统中又主要决定于通过的无功功率，因此，电压的调整和控制与系统中无功功率的分布密切相关。无功功率和电压的控制与有功功率和频率的控制之间的区别:(1)在稳态情况下，全系统各点的频率是相同的，但各点的电压则不相同。(2)调整电压的手段除了各个发电机以外，还有大量的无功功率补偿设备和带负荷调整分接头变压器，它们分散在整个电力系统中。

一、电力系统无功功率的平衡

(一)电压偏移造成的影响和容许电压偏移

电气设备都是按照额定电压来设计的。实际运行电压高于或低辱它的额定电压，则运行性能和效率将有所下降，并可能影响到使用寿命甚至使设备损坏。

电压低于额定电压时，感应电动机来说，其转差率将增大，从而使绕组中的电流增加，使绕组电阻中的损耗加大，引起效率降低、温升增加并使寿命缩短。

而且，由于转差率的增大，其转速下降，使电动机的输出功率减少，从而使产品的产量和质量降低。电动机的起动过程将因电压低而加长，在电压过低的情况下有可能在起动过程中因温度过高而烧毁。

对于火力发电厂来说，由电动机所驱动的风机和给水泵等厂用机械的出力将因为转速的降低而减少，结果使锅炉和汽轮机的出力降低。

当电压过低时，电弧炉所消耗的有功功率减少，使金属在其中的冶炼时间增加从而影响产量;

对于白炽灯来说其发光效率将降低;各种电子设备将不能正常工作，等等。

运行电压高于额定电压所引起的主要危害是使电气设备的绝缘性能降低、并影响到使用寿命。如果电压过高，则可能使绝缘击穿，从而使设备损坏。

另外，当电压高于额定电压时，变压器和电动机铁芯的饱和程度增大，使铁芯损耗增加;白炽灯的寿命则因电压过高而明显降低，例如，当电压高出IQ%时，寿命将缩短一半。

为了避免电压偏移造成很大的影响，各国电网都规定电压偏移的容许范围。我国在《电力系统电压和无功电力技术导则》中规定:

对于发电厂和变电所的母线，也规定了它们的容许电压偏移范围。330kv和500kv母线最高不超过额定电压的110%;发电厂和500kV变电所的220kV母线容许电压偏移为0%~10%; 110kV和35kV母线的容许电压偏移为-3%~7%; 10kV母线的电压则应使所供给的全部高压和低压用户满足上表所规定的要求。

(二)无功功率负荷和无功功率损耗

1.无功功率负荷

在各种用电设备中，除了白炽灯和电热器等电阻性负荷只取用有功功率以外，其它都需要从电网吸收感性无功功率才能运行，尤其是感应电动机。

1)感应电动机 目前我国电力负荷以工业负荷为主，而工业负荷中感应电动机占比重比较大，无功负荷特性一般以感应电动机特性代替。感应电动机所吸收的无功功率包括两部分。一部分是励磁无功功率，即下图所示感应电动机等值电路中励磁电抗}M中的无功功率，它将随着电压的降低而减少。另一部分是定子和转子漏抗

2)变压器中的无功功率损耗 励磁无功损耗和漏抗无功损耗

3)线路的无功功率损耗 在线路中，电流流过电抗后的无功功率损耗，与电流的平方成正比，而分布电容发出的感性无功功率与线路实际运行电压的平方成正比。

当线路的传输功率等于自然功率时，电抗中消耗的无功功率正好与分布电容发出的无功功率相平衡。在传输功率大于自然功率的情况下，电杭消耗的无功功率大于电容发出的无功功率，即线路的无功损耗大于零。反之，无功损耗小于零。

从发电机到用户往往要经过多级变压器进行多次升压和降压，而每经过一个变压器都要产生无功功率损耗。因此整个系统的无功功率损耗比有功功率损耗大得多。

2.无功功率电源

1)同步发电机

由第二章中介绍过的内容已知同步发电机是电力系统中主要的无功功率源之一，它除了能发出无功功率以外，在必要时还能吸收无功功率。发电机在额定情况下能够发出的无功功率主要决定于它的额定容量和额定功率因数

同步发电机吸收无功功率时以超前功率因数运行，即所谓的进相运行，其所能吸收的数量一般需要通过试验来决定。

2)同步调相机

同步调相机既可以用于发出无功功率，也可以用于吸收无功功率。即调相和聪够过激运行也能够欠激运行，过激运行能够发出额定容量功率，在欠激运行时所能吸收的无功功率为额定容量的60%左右。同步调相机的优点是调节比较灵活，不但可以用来拉制系统的电压，而且可以用于提高系统的稳定性。

其缺点是设备投资和维护费用高，因此，只在十分必要时才考虑采用。

3)并联电容器

并联电容器的费用比较低廉、能量损耗小，而且可以分散安装在用户、变电所和配电所中进行就近补偿，因此是应用最为广泛的无功补偿设备。

其主要缺点是:

发出的无功功率与电压的平方成正比，当电压降低时发出的无功显著减少，而这时正是系统需要无功电源的时候，反之电压增加时发出的无功显著增加，而这时正是系统需要减少无功电源的时候。

并联电容器只能成组地投入和切除而不能进行连续调节。

4）并联电抗器

并联电杭器主要用于补偿线路的充电功率，特别是在超高压长距离输电线路中，往往必须安装并联电抗器来吸收充电功率，以限制线路空载时末端的电压升高。

5)静止无功补偿器

静止无功补偿器(Static Var Compensator,缩写SVC)可以用于对无功功率进行连续和快速的调节，其性能与同步调相机相同，由于它由静止元件所组成，因此维护比较容易。

(三)无功功率的平衡

要使各用户和各母线的电压在容许的电压偏移范围内，首先必须满足系统的无功功率平衡，在此基础上，再采取适当的电压调整措施。

为了认识无功功率平衡与满足电压要求之间的关系，用单个发电机向一个综合负荷供电的藻单系统情况来加以说明。

设综合负荷在额定电压下需要的无功功率为，如果发电机的额定无功容量大于，则显然借助于调节发电机的励磁电流，可以改变发电机的端电压，即对综合负荷供电的电压，使电压偏移在规定的容许范围内。

如果发电机的额定无功容量小于，而且一定要让发施机在额定电压下供给综合负荷所需要的无功功率，则发电机励磁绕组的励磁电流势必要超出它的额定值，使励磁绕组过载，而这是不允许的。结果，只得降低对综合负荷供电的电压，使得综合负荷按照它的静态电压特性减少所需要的无功功率，直到等于发电机所能发出的无功功率为止，即在较低的电压下满足发电机与综合负荷之间的无功功率平衡。所以说，系统在额定电压下的无功功率平衡，是保证电压质量的先决条件。

二、电力系统的电压调整

(一)、中枢点电压的管理

电力系统调压的目的是使用户的电压偏移保持在规定的范围内。

中枢点是少数能反映系统电压水平的有代替性的节点，一般选主要发电厂或枢纽变电所母线作为中枢点。

中枢点的电压确定了，其他节点电压也就确定了。

电力系统的电压管理和监视可以通过监视和调整中枢点的电压而实现。

中枢点:

1)大型水、火电厂的高压母线。

2)枢纽变电所的二次母线。

3)有大量地区负荷的发电厂机压母线。

中枢点的电压上限=负荷允许的最高电压+线路最大负荷产生的电压降落

中枢点的电压下限=负荷允许的最低电压+线路最小负荷产生的电压降落

显然在两个负荷最大、最小负荷功率变化大的时候可能没有公共部分，说明管理中枢点电压不能同时满足A, B两点的电压要求。只靠管理中枢点电压，不能满足电压要求，必须采取别的调压措施。

根据电网规划和运行的要求对中枢点的电压调整

提出原则性要求。一般中枢点的调压方式分为三类:

逆调压:   ；  

适用于供电线路长，负荷变动大的场合，电压要求高的场合。

顺调压:

  电压不低于1.025

  电压不高于1.075

适用于对供电线路短，负荷变化小，电压要求不高的场合。

恒调压:

（二）电压调整的措施

1、利用发电机调压

现代同步发电机在端电压偏离额定值不超过士的范围内，能够以额定功率运

行。

对于不同类型的供电网络，发电机调压所起的作用是不同的。

由孤立发电厂不经升压直接供电的小型电网，因线路不长，不大，对发电机实现逆调压，就可以满足负荷点的电压质量要求，不必另加其它调压设备，这是最经济合理的调压方式。

另外在并联运行的发电厂中，调整个别发电厂的母线电压，会引起系统中无功功率的重新分配，也有可能同无功功率的经济分配发生矛盾。

因此大型电力系统中发电机调压一般只作为一种辅助性的调压措施。

2改变变压器变比调整电压

(1)变压器分接头选择

a降压变压器分接头选择

c 三绕组变压器

(2)有载调压变压器

可以带负荷切换分接头，调节范围比较大，一般在15%以上。我国暂定110kV级的

调压变压器有7个分接头， ; 220kV级有9个分接头，

根据计算分别选择各自合适的分接头，能缩小负荷电压的变化幅度，甚至改变电压变化的趋势。

(3)加压调压变压器

加压调压变压器主要用于改变环形网中的功率分布及网络电压。加压调压变压器有电源变压器和串联变压器组成。串联变压器的次级绕组串联在网络中，作为加压绕组，相当于在线路上串连了附加电势。改变附加电势的大小和相位就可以改变线路上电压的大小和相位。

a)纵向调压变压器

如将串联变压器反接，可以降低电压。纵向变压器只产生纵向电势，只改变线路电压的大小，不改变线路电压的相位，它的作用同具有调压绕组的调压变压器的一样。

b)横向变压器

加压绕组产生的附加电势的方向与线路的相位有的相位差，故称为横向电势。它能改变线路电压的相位，几乎不改变电压的大小。

c)混合型调压变压器

既有纵向串联加压变压器，又有横向串

连加压器。

加压调压变压器和主变压器配合使用，相当于有载调压变压器。对辐射调压设备，对于环形网除起调压可以改变网络中的功率分布。

注意： 调整变压器分接头调整电压，本质是通过改变变压器的匝数改变了变压器参数，从而引起无功功率的重新分配，并没有改变系统无功电源的总量。当系统无功功率充足时，这种调压方式有效。当系统无功不足时，这种调压方式有效;当系统无供不足时，靠调节变压器的分接头，只能满足局部电压要求，不能改变整个系统的电压水平，要从根本上改变系统的电压问题，要补偿无功功率装置。

3并联无功补偿装置

当系统无功功率不足时，只有并联无功补偿装置才能从根本上解决调压的问题。以简单系统为例说明如何根据电压的要求加装无功补偿容量。

三各种调压措施的比较及应用范围

1发电机调压因不增加费用，调节方便。在可能的情况下，优先利用。一般采用逆调压。

2变压器分接头

变压器分接头调压的本质是改变了变压器的匝数，引起电压的变化，进而引起全网络无功功率的分布变化。

当系统无功功率不足时，只凭调分接头电压是不行的，必须补偿无功功率，在无功充足的情况下，应首先调分接头。

小结与要求

本章主要介绍了电力系统无功功率负荷及无功电源，并解释了无功功率与电压的关系，介绍了电力系统电压调整的措施及调压原理。

无功功率的平衡计算较有功功率的平衡计算复杂，因系统中无功电源不仅有发电机还，有调相机、电容器和静止无功补偿装置。而且无功功率的负荷除电动机负荷吸收大量的无功功率外，变压器和线路也有大量的无功损耗。

掌握逆调压、顺调压、恒调压的电压调整范围及适用场合。