

国家电网考试复习题 3（下）

✓ 11-10. 简单电力系统如图 11-10 所示，已知各段线路阻抗和节点功率为： $Z_{12}=10+j16\Omega$ ， $Z_{13}=13.5+j21\Omega$ ， $Z_{23}=24+j22\Omega$ ， $SLD_2=20+j15\text{MVA}$ ， $SLD_3=25+j18\text{MVA}$ ，节点 1 为平衡节点， $V_1=115\angle 0^\circ\text{kV}$ 。试用牛顿-拉夫逊法计算潮流：

(1) 形成节点导纳矩阵；(2) 求第一次迭代用的雅可比矩阵；(3) 列写出第一次迭代时的修正方程。

解：(1) 节点导纳矩阵

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta Q_3 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P_2}{\partial e_2} & \frac{\partial \Delta P_2}{\partial f_2} & \frac{\partial \Delta P_2}{\partial e_3} & \frac{\partial \Delta P_2}{\partial f_3} \\ \frac{\partial \Delta Q_2}{\partial e_2} & \frac{\partial \Delta Q_2}{\partial f_2} & \frac{\partial \Delta Q_2}{\partial e_3} & \frac{\partial \Delta Q_2}{\partial f_3} \\ \frac{\partial \Delta P_3}{\partial e_2} & \frac{\partial \Delta P_3}{\partial f_2} & \frac{\partial \Delta P_3}{\partial e_3} & \frac{\partial \Delta P_3}{\partial f_3} \\ \frac{\partial \Delta Q_3}{\partial e_2} & \frac{\partial \Delta Q_3}{\partial f_2} & \frac{\partial \Delta Q_3}{\partial e_3} & \frac{\partial \Delta Q_3}{\partial f_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e_2 \\ \Delta f_2 \\ \Delta e_3 \\ \Delta f_3 \end{bmatrix}$$

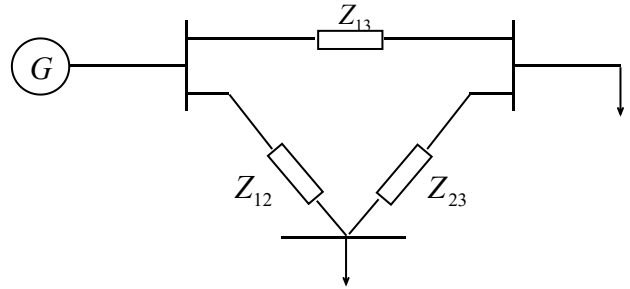


图 11-10

$$Y_{11} = \frac{1}{Z_{12}} + \frac{1}{Z_{13}} = \frac{1}{10+j16} + \frac{1}{13.5+j21} = 0.049 + j0.0078, \quad Y_{12} = -Y_{21} = -\frac{1}{Z_{12}} = -\frac{1}{10+j16} = -0.028 + j0.044$$

$$Y_{13} = -Y_{31} = -\frac{1}{Z_{13}} = -\frac{1}{13.5+j21} = -0.021 + j0.033, \quad Y_{22} = \frac{1}{Z_{12}} + \frac{1}{Z_{23}} = \frac{1}{10+j16} + \frac{1}{24+j22} = 0.050 - j0.065$$

$$Y_{23} = -Y_{32} = -\frac{1}{Z_{23}} = -\frac{1}{24+j22} = -0.022 + j0.020, \quad Y_{33} = \frac{1}{Z_{13}} + \frac{1}{Z_{23}} = \frac{1}{13.5+j21} + \frac{1}{24+j22} = 0.044 - j0.054$$

$$e_1 = 115, \quad f_1 = 0; \quad e_2^{(0)} = 110, \quad f_2^{(0)} = 0; \quad e_3^{(0)} = 110, \quad f_3^{(0)} = 0$$

$$\begin{aligned} \Delta P_2^{(0)} &= 20 - e_2^{(0)}(G_{21}e_1^{(0)} + G_{22}e_2^{(0)} + G_{23}e_3^{(0)}) \\ &= 20 - 110 \times (0.028 \times 115 + 0.050 \times 110 - 0.022 \times 110) \\ &= -673 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta P_3^{(0)} &= 25 - e_2^{(0)}(G_{21}e_1^{(0)} + G_{22}e_2^{(0)} + G_{23}e_3^{(0)}) \\ &= 25 - 110 \times (0.028 \times 115 + 0.050 \times 110 - 0.022 \times 110) \\ &= -668 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_2^{(0)} &= 15 - (-e_2 \times (B_{21}e_1^{(0)} + B_{22}e_2^{(0)} + B_{23}e_3^{(0)})) \\ &= 15 + 110 \times (0.044 \times 115 + 0.065 \times 110 + 0.020 \times 110) \\ &= 1549.5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_2^{(0)} &= 18 - (-e_2 \times (B_{21}e_1^{(0)} + B_{22}e_2^{(0)} + B_{23}e_3^{(0)})) \\ &= 18 + 110 \times (0.044 \times 115 + 0.065 \times 110 + 0.020 \times 110) \\ &= 1552.5 \end{aligned}$$

(2) 列写矩阵

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.049 + j0.0078 & -0.028 + j0.044 & -0.021 + j0.033 \\ \times & 0.050 - j0.065 & -0.022 + j0.020 \\ \times & \times & 0.044 - j0.054 \end{bmatrix}$$

(3) 列写出第一次迭代时的修正方程

$$\begin{aligned} J_{11} &= \frac{\partial \Delta P_2}{\partial e_2} = \sum_{j=1}^3 (G_{2j}e_j - B_{2j}f_j) - (G_{22}e_2 - B_{22}f_2) = -(G_{21}e_1 + G_{22}e_2 + G_{23}e_3) - G_{22}e_2 \\ &= -(-0.028 \times 115 + 0.050 \times 110 - 0.022 \times 110) - 0.050 \times 110 = 5.64 \end{aligned}$$

$$J_{12} = \frac{\partial \Delta P_2}{\partial f_2} = -\sum_{j=1}^3 (G_{2j}f_j - B_{2j}e_j) + (B_{22}e_2 - G_{22}f_2) =$$

$$J_{13} = \frac{\partial \Delta P_2}{\partial e_3} = -(G_{23}e_2 + B_{23}f_2) = -(0.021 \times 110) = -2.31, \quad \begin{cases} e_2^{(1)} = e_2^{(0)} + \Delta e_2^{(0)} \\ f_2^{(1)} = f_2^{(0)} + \Delta f_2^{(0)} \\ e_3^{(1)} = e_3^{(0)} + \Delta e_3^{(0)} \\ f_3^{(1)} = f_3^{(0)} + \Delta f_3^{(0)} \end{cases}$$

12-1 电力系统的无功功率平衡

1. 无功负荷的无功特性：分串联之路和并联之路（填空）

答：系统无功负荷的电压特性主要由异步电动机决定。它所消耗的无功功率为： $Q_M = Q_m + Q_\sigma = \frac{V^2}{X_m} + I^2 X_\sigma$ ，（ Q_m

为励磁功率， Q_σ 漏抗无功损耗），在额定电压附近，电动机的无功功率随电压的升降而增减，当电压明显地低于额定值时，无功功率主要由漏抗中的无功损耗决定，因此，随电压下降反而具有上升的性质。

2. 变压器的无功特性

答：变压器的无功损耗 Q_{LT} 包括励磁损耗 ΔQ_o 和漏抗中的损耗 ΔQ_T ，励磁功率大致与电压平方成正比，当通过变压器的视在功率不变时，漏抗中损耗的无功功率与电压平方成反比，因此，变压器的无功损耗电压特性也与异步电动机的相似。

3. 输电线路的无功特性

答：35KV 及以下架空线路是消耗无功功率的，110kV 及以上架空线路，当传输功率较大时，线路为无功负载，当传输功率较小时，线路成为无功电源。

4. 无功电源的种类（填空）

答：①发电机；②同步调相机；③静电电容器；④静止无功补偿器；⑤静止无功发生器

5. 无功功率平衡的含义

答：系统中的无功电源可能发出的无功功率应该大于或至少等于负荷所需的无功功率和网络中的无功损耗之和。为了保证运行可靠性和适应无功负荷的增长，系统还必须配置一定的无功备用容量。令 Q_{GC} 为电源供应的无功功率之和，

Q_{LD} 为无功负荷之和， Q_L 为网络无功功率损耗之和， Q_{res} 为无功功率备用，则系统中无功功率的平衡关系式是：

$$Q_{GC} - Q_{LD} - Q_L = Q_{res}$$

12-2 电压调整的基本概念

✓ 允许电压偏移的范围（填空）

答：35kV 及以上供电电压正、负偏移的绝对值之和不超过额定电压的 10%；10KV 及以下三相供电电压允许偏移为额定电压的 ±7%；

220V 单相供电电压允许偏移为额定电压的 +7% 和 -10%。

✓ 电力系统的四种常见调压措施。（问答必考）

答：（1）调节励磁电流以改变发电机端电压 VG；（2）适当选择变压器的变比；（3）改变线路的参数；（4）改变无功功率的分布

✓ 2. 电力系统三种调压方式及含义（填空必考）

答：逆调压、顺调压、恒/常调压

（1）逆调压：在大负荷时升高电压(1.05UN)，小负荷时降低电压(UN)。

（2）顺调压：大负荷时允许电压稍低(>1.025UN)；小负荷时允许稍高(<1.075UN)。

（3）常调压：保持为大约恒定的数值 1.02~1.05UN。

12-3 电压调整的措施

✓ 改变变压器变比的调压方法（分降压变两种情况，看例 12-3）；

答：对应额定电压 V_N 的称为主接头，改变变压器的变比调压实际上就是根据调压要求适当选择分接头。

①降压变压器分接头的选择： $\Delta V_T = (PR_T + QX_T)/V_1$ ， $V_2 = (V_1 - \Delta V_T)/k$ ， $k = V_{1r}/V_{2N}$ ，

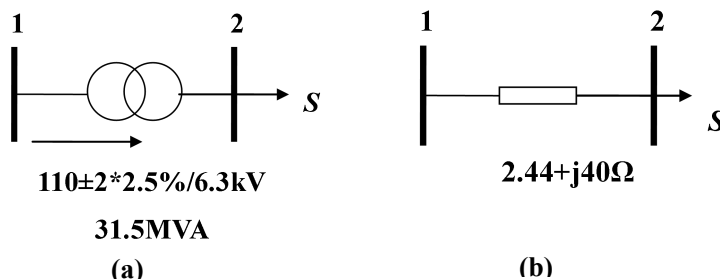
高压侧分接头电压是： $V_{1r} = \frac{V_1 - \Delta V_T}{V_2} V_{2N}$ ；②升压变压器分接头的选择： $V_{1r} = \frac{V_1 + \Delta V_T}{V_2} V_{2N}$

例 12-3 降压变压器及其等值电路示于图 (a)、(b)。已知在最大和最小负荷时通过变压器的功率分别为 $S_{\max} = (28 + j14)$ MVA 和 $S_{\min} = (10 + j6)$ MVA，高压侧的电压分别为 $V_{1\max} = 110$ kV 和 $V_{1\min} = 113$ kV。要求低压母线的电压变化不超出 (6~6.6) kV 的范围，试选择分接头。

解：先计算最大/最小负荷时变压器的电压损耗

$$\Delta V_{T\max} = \frac{28 \times 2.44 + 14 \times 40}{110} = 5.7 \text{ kV}$$

$$\Delta V_{T\min} = \frac{10 \times 2.44 + 6 \times 40}{113} = 2.34 \text{ kV}$$



假定在最大/最小负荷时低压侧 $V_{2\max} = 6$ kV 和 $V_{2\min} = 6.6$ kV，则

$$V_{1t\max} = \frac{110 - 5.7}{6.0} \times 6.3 = 109.4 \text{ kV}$$

$$V_{1t\min} = \frac{113 - 2.34}{6.6} \times 6.3 = 105.6 \text{ kV}$$

取算术平均值 $V_{1t\text{av}} = 107.5$ kV

选最接近的分接头 $V_{1t} = 107.25$ kV 并校验低压母线的实际电压

$$V_{2t\max} = \frac{110 - 5.7}{107.25} \times 6.3 = 6.13 \text{ kV} > 6 \text{ kV}$$

$$V_{2t\min} = \frac{113 - 2.34}{107.25} \times 6.3 = 6.5 \text{ kV} < 6.6 \text{ kV}$$

可见所选分接头是能满足电压要求的。

2. 利用无功功率补偿调压的原则和基本思路 (分并联电容器补偿和调相机补偿两种情况)。(填空)

答：思路：合理的配置无功功率补偿容量，以改变电力网的无功潮流分布，可以减少网络中的有功功率损耗和电压损耗，从而改善用户处的电压质量。

①补偿设备为静电电容器：原则：在最大负荷时电容器应全部投入，在最小负荷时全部退出。

②补偿设备为同步调相机：原则：调相机在最大负荷时按额定容量过励磁运行，在最小负荷时按 (0.5~0.65) 额定容量欠励磁运行。

13-1 频率调整的必要性

1. 有功负荷的三种分量及它们的各调整方法 (填空)

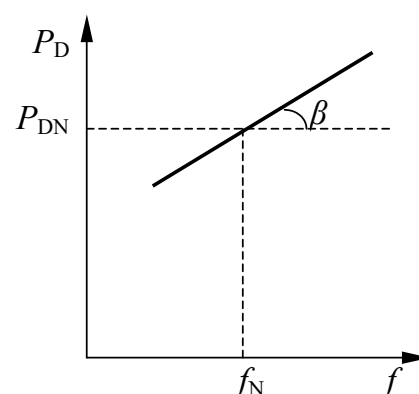
答：有功负荷的三种分量：第一种：幅度小，周期短 (<10S) 的负荷分量；第二种：幅度大，周期较长 (10S~3min) 的负荷分量；第三种：变化缓慢的持续变动负荷。

调整方法：①频率的一次调整 (发电机组的调速器进行调整)；②二次调整 (调频器参与调整)；③联合调整 (调度安排)。

13-2 电力系统的频率特性

1. 负荷的频率特性

答：系统处于运行稳态时，系统中有功负荷随频率的变化特性称为负荷的静态频率特性。当频率偏离额定值不大时，负荷的静态频率特性常用一条直线近似表示。直线的斜率为 $K_D = \tan \beta = \Delta P_D / \Delta f$ ，用标幺值表示：



有功负荷的频率静态特性

$K_{D^*} = K_D f_N / P_{DN}$, K_D 、 K_{D^*} 称为负荷的频率调节效应系数或简称为负荷的频率调节效应。在实际系统中,

$K_{D^*} = 1 \sim 3$, 表示频率变化 1% 时, 负荷有功功率相应变化 (1~3) %。

2. 发电机的频率特性 (静态调差系数, 单位调节功率)

答: 当调速器的调节过程结束, 建立新的稳态时, 发电机的有功出力同频率之间的关系称为发电机组调速器的功率—频率静态特性 (简称为功频静态特性)。

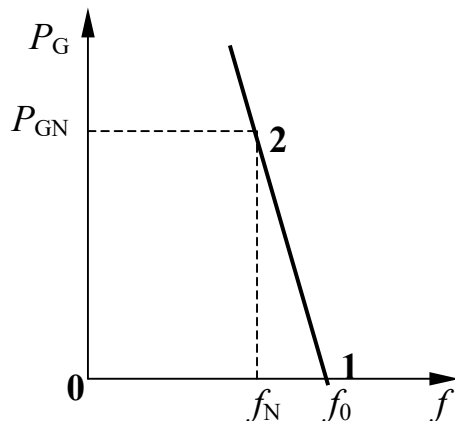
① 机组的静态调差系数: $\delta = -\Delta f / \Delta P$ (Hz/MW), 以额定参数为基准的

标么值表示时, 便有 $\delta_* = -\frac{\Delta f / f_N}{\Delta P / P_{GN}} = \delta \frac{P_{GN}}{f_N}$ 。调差系数也叫调差率, 可定

量表明某台机组负荷改变时相应的转速 (频率) 偏移。例如, 当 $\delta_* = 0.05$, 如负荷改变 1%, 频率将偏移 0.05%; 如负荷改变 20%, 则频率将偏移 1% (0.5HZ)。

② 调差系数的倒数就是机组的单位调节功率 (或称发电机组功频静特性系

数) 即 $K_G = \frac{1}{\delta} = -\frac{\Delta P_G}{\Delta f}$, 或用标么值表示 $K_{G^*} = \frac{1}{\delta_*} = \frac{1}{\delta} \frac{f_N}{P_{GN}} = K_G \frac{f_N}{P_{GN}}$,



发电机组的功频静特性

K_G 的数值表示频率发生单位变化时, 发电机组输出功率的变化量。调差系

数的大小对频率偏移的影响很大, 调差系数愈小 (即单位调节功率愈大), 频率偏移亦愈小。

汽轮发电机组: $\delta_* = 0.04 \sim 0.06$, $K_{G^*} = 25 \sim 16.7$

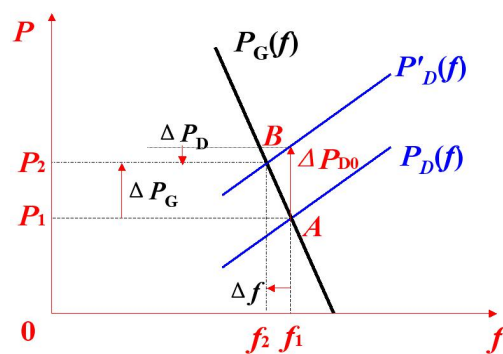
水轮发电机组: $\delta_* = 0.02 \sim 0.04$, $K_{G^*} = 50 \sim 25$

3. 电力系统的有功功率—频率静态特性

答: $\Delta P_{D0} = \Delta P_G - \Delta P_D = -(K_G + K_D) \Delta f = -K \Delta f$;

$$K = K_G + K_D = -\Delta P_{D0} / \Delta f$$

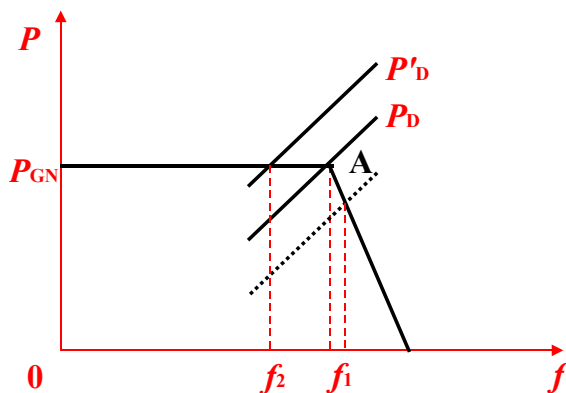
K 称为系统的功率—频率静特性系数, 或系统的单位调节功率。 K 的数值越大, 负荷增减引起的频率变化就越小, 频率也就越稳定。



电力系统功率-频率静态特性

5. 负荷的频率特性和发电机的频率特性的分合成, 发电机的满载

答: 有功功率电源应该有一定的备用容量



13-3 电力系统的频率调整

✓ 频率的一次调整 (掌握例 13-2)

答: 当 n 台装有调速器的机组并联运行时, 可根据各机组的调差系数和单位调节功率算出其等值调差系数 δ (δ_*), 或算出等值单位调节功率 K_G (K_{G^*})。

N 台机组的等值单位调节功率: $K_G = \sum_{i=1}^n K_{Gi} = \sum_{i=1}^n K_{Gi^*} \frac{P_{GiN}}{f_N}$

等值单位调节功率的标幺值： $K_{G*} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{Gi*} P_{GiN}}{P_{GN}}$ ；等值调差系数： $\delta_* = \frac{1}{K_{G*}} = \frac{P_{GN}}{\sum_{i=1}^n \frac{P_{GiN}}{\delta_{i*}}}$

✓ **例 13-2** 某电力系统中，40%的容量已完全利用，其余 30%为火电厂，有 15%的备用容量，其单位调节功率为 16；30%为水电厂，有 18%的备用容量，其单位调节功率为 18；系统有功负荷的频率调节效应系数为 $K_{D*} = 2.0$ 。试问：若负荷变化的范围是 $\pm 10\%$ ，则系统频率变化的范围是多少？（计算必考）

解：（1）计算系统的单位调节功率，令系统中发电机组的总额定容量等 1，即发电机组的等值单位调节功率为

$$K_{G*} = 0.4 \times 0 + 0.3 \times 16 + 0.3 \times 18 = 10.2, \text{ 系统负荷功率 } P_D = 0.4 + 0.3 \times (1 - 0.15) + 0.3 \times (1 - 0.18) = 0.901$$

$$\text{系统备用系数 } k_r = 1/0.901 = 1.110 \text{ 于是 } K_* = k_r K_{G*} + K_{D*} = 1.110 \times 10.2 + 2.0 = 13.322$$

$$(2) \text{ 系统负荷变化 } \pm 10\% \text{ 时的频率偏移为: } \Delta f_* = -\frac{\Delta P_*}{K_*} = -\frac{0.1}{13.322} = -7.506 \times 10^{-3}$$

$$\text{一次调整后的系统稳定频率变化的范围为 } f = (50 - 0.007506 \times 50) \text{ Hz} = 49.625 \text{ Hz}$$

2. 频率的二次调整 图 13-7 13-8 13-18 13-19

答：当机组负荷变动引起频率变化时，利用同步器平行移动机组功频静特性来调节系统频率和分配机组间的有功功率，这就是频率的“二次调整”，也就是通常所说的“频率调整”。

系统负荷的初始增量： $\Delta P_{D0} = \Delta P_G - K_G \Delta f - K_D \Delta f$ （二次调整时的功率平衡方程）该式也可改写成，

$$\Delta P_{D0} - \Delta P_G = -(K_G + K_D) \Delta f = -K \Delta f, \text{ 或 } \Delta f = -\frac{\Delta P_{D0} - \Delta P_G}{K}$$

二次调整一般只是由一台或少数几台发电机组（一个或几个厂）承担，这些机组（厂）称为主调频机组（厂）。

3. 互联系统的频率调整

整体性：作为一个系统整体调频。

独立性：各自进行二次调频可实现交换功率增量等于零。

相互性：为对方系统进行二次调频。

$$\Delta P_{DA} + \Delta P_{AB} - \Delta P_{GA} = -K_A \Delta f_A, \quad \Delta P_{DB} - \Delta P_{AB} - \Delta P_{GB} = -K_B \Delta f_B$$

$$\Delta f_A = \Delta f_B = \Delta f, \quad \Delta f = -\frac{\Delta P_D - \Delta P_G}{K}, \quad \Delta P_{AB} = \frac{K_A (\Delta P_{DB} - \Delta P_{GB}) - K_B (\Delta P_{DA} - \Delta P_{GA})}{K_A + K_B}$$

A、B 都进行二次调整的话，若满足条件： $\frac{\Delta P_{DA} - \Delta P_{GA}}{K_A} = \frac{\Delta P_{DB} - \Delta P_{GB}}{K_B}$ ，则联络线上的交换功率增量 ΔP_{AB} 便等于零，

如果没有功率缺额，则 $\Delta f = 0$ 。

若 B 不进行二次调整，则 $\Delta P_{GB} = 0$ ，其负荷变化量 ΔP_{DB} 将由系统 A 的二次调整来承担，这时联络线的功率增量

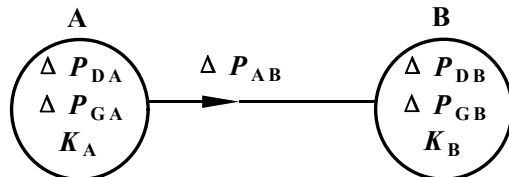
$$\Delta P_{AB} = \Delta P_{DB} - \frac{K_B (\Delta P_D - \Delta P_{GA})}{K_A + K_B}, \text{ 当互联系统的功率能够平衡时 } \Delta P_D - \Delta P_{GA} = 0, \text{ 于是有 } \Delta P_{AB} = \Delta P_{DB}, \text{ 系统 B 的负}$$

荷增量全由联络线的功率增量来平衡，这时联络线的功率增量最大。

4. 主调频厂的概念和选择原则

答：概念：负责全系统的频率调整（即二次调整）称为主调频厂（一般是 1~2 个电厂）。

原则：① 应拥有足够的调整容量及调整范围；② 调频机组具有与负荷变化速度相适应的调整速度；③ 调整出力时符合安全及经济的原则。



5.频率调整和电压调整的关系或它们的调节顺序

答：当系统由于有功不足和无功不足因而频率和电压都偏低时，应该首先解决有功功率平衡的问题，因为频率的提高能减少无功功率的缺额，这对于调整电压是有利的。如果首先去提高电压，就会扩大有功的缺额，导致频率更加下降，因而无助于改善系统的运行条件。

✓ **13-2** 某电力系统有 4 台额定功率为 100MW 的发电机，每台发电机的调速器的调差系数 $\delta = 4\%$ ，额定频率 $f_N = 50\text{Hz}$ ，系统总负荷为 $P_D = 320\text{MW}$ ，负荷的频率调节效应系数 $K_D = 0$ 。在额定频率运行时，若系统增加负荷 60MW，试计算下列两种情况下系统频率的变化值。（计算必考）

（1）40 台机组原来平均承担负荷；（2）原来 3 台机组满载，1 台带 20MW。说明两种情况下频率变化不同的原因。

解：每一台发电机的单位调节功率

$$K_G = \frac{1}{\delta_*} \times \frac{P_{GN}}{f_N} = \frac{1}{0.04} \times \frac{100}{50} \text{MW/Hz} = 50 \text{MW/Hz}$$

（1）4 台发电机原来平均承担负荷

每台发电机承担 $P_{G1} = \frac{320}{4} \text{MW} = 80\text{MW}$ ，因此，增加 MW 负荷后，每台发电机可承担

$$\Delta P_{G1} = \frac{60}{4} \text{MW} = 15\text{MW}, \quad \Delta f = \frac{\Delta P_{G1}}{K_{G1}} = -\frac{15}{50} \text{Hz} = -0.3\text{Hz} \text{ 或 } \Delta f = \frac{-\Delta P_{G\Sigma}}{4 \times K_{G1}} = -\frac{60}{200} \text{Hz} = -0.3\text{Hz}$$

（2）原来三台满载，一台带 20MW 负荷。此时，所有的负荷增量只能由一台发电机负担，即

$$\Delta P_{G1} = 60\text{MW}, \quad \Delta f = -\frac{\Delta P_{G1}}{K_{G1}} = -\frac{60}{50} \text{Hz} = -1.2\text{Hz}$$

（3）两种情况下频率变化不同是因为第一种情况下， $\Delta P_{G1} = 15\text{MW}$ ，而第二种情况下变成 $\Delta P_{G1} = 60\text{MW}$ ，因而在相同的 K_{G1} 下， Δf 变大 4 倍。

14-1 电力网中的能量损耗

1.网损，网损率的概念

答：所有送电、变电和配电环节所损耗的电量，称为电力网的损耗电量（或损耗能量）。在同一时间内，电力网损耗电量占供电量的百分比，称为电力网的损耗率，简称网损率或线损率。电力网损耗率=电力网损耗电量÷供电量×100%

✓ 2.降低网损的技术措施（问答必考）

答：① 提高用户的功率因数，减少线路输送的无功功率；② 改善网络中的功率分布；③ 合理地确定电力网的运行电压水平；④ 组织变压器的经济运行；⑤ 对原有电网进行技术改造。

3.通过变压器经济运行，降低网损的基本原理

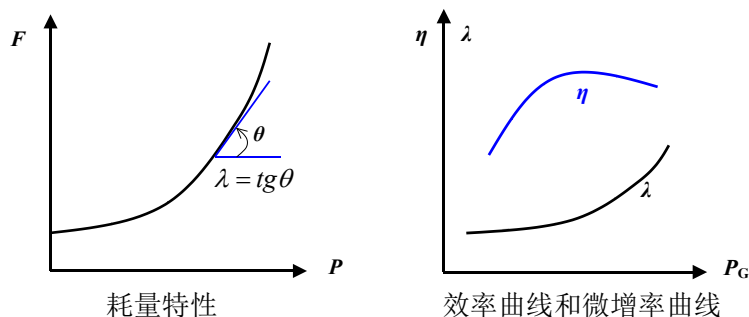
答：当总负荷功率为 S 时，并联运行的 k 台变压器的总损耗为 $\Delta P_{T(k)} = k\Delta P_0 + k\Delta P_s \left(\frac{S}{kS_N}\right)^2$ ，式中， ΔP_0 和 ΔP_s 分别为

一台变压器的空载损耗和短路损耗； S_N 为一台变压器的额定容量。铁芯损耗与台数成正比，绕组损耗则与台数成反比。

当变压器轻载运行时，绕组损耗所占比重相对减小，铁芯损耗的比重相对增大，在某一负荷下，减少变压器台数，就能降低总的功率损耗。为了求得这一临界负荷值，我们先写出负荷功率为 S 时， $k-1$ 台并联运行的变压器的总损耗

$$\Delta P_{T(k-1)} = (k-1)\Delta P_0 + (k-1)\Delta P_s \left(\frac{S}{(k-1)S_N}\right)^2, \quad \text{使}$$

$\Delta P_{T(k)} = \Delta P_{T(k-1)}$ 的负荷功率即是临界功率，其表达式



为: $S_{cr} = S_N \sqrt{k(k-1) \frac{\Delta P_0}{\Delta P_s}}$, 当负荷功率 $S > S_{cr}$ 时, 宜投入 k 台变压器并联运行; 当 $S < S_{cr}$ 时, 并联运行的变压器可减为 $k-1$ 台。

14-2 火电厂间有功功率负荷的经济分配

✓ 耗量特性曲线及相应微增率的概念; (必考)

答: (1) 反映发电设备 (或其组合) 单位时间内能量输入和输出关系的曲线, 称为耗量特性。

(2) 耗量特性曲线上某点切线的斜率称为该点的耗量微增率 λ , $\lambda = dF/dP$, 发电效率 $\eta = P/F$ 。

✓ 2. 等微增率准则 (分两台机组的情况)。 例 14-3

答: 负荷在两台机组间分配时, 如它们的燃料消耗微增率相等, 即 $dF_1/dP_{G1} = dF_2/dP_{G2}$, 则总的燃料消耗量将是最小的。这就是著名的等微增率准则。

✓ 三个火电厂并联运行, 各电厂的燃料消耗特性及功率约束条件如下: P138

$$F_1 = (4 + 0.3P_{G1} + 0.0007P_{G1}^2) \text{ t/h}, 100\text{MW} \leq P_{G1} \leq 200\text{MW}$$

$$F_2 = (3 + 0.32P_{G2} + 0.0004P_{G2}^2) \text{ t/h}, 120\text{MW} \leq P_{G2} \leq 250\text{MW}$$

$$F_3 = (3.5 + 0.3P_{G3} + 0.00045P_{G3}^2) \text{ t/h}, 120\text{MW} \leq P_{G3} \leq 300\text{MW}$$

当总负荷为 400MW 和 250MW 时, 试分别确定发电厂间功率的经济分配 (不计网损)

$$\text{解: (1) 按所给耗量特性可得各厂的微增耗量特性为 } \lambda_1 = \frac{dF_1}{dP_{G1}} = 0.3 + 0.0014P_{G1}, \lambda_2 = \frac{dF_2}{dP_{G2}} = 0.32 + 0.0008P_{G2}$$

$$\lambda_3 = \frac{dF_3}{dP_{G3}} = 0.3 + 0.0009P_{G3}, \text{ 令 } \lambda_1 = \lambda_2, \text{ 可解出 } P_{G1} = 14.29 + 0.572P_{G2} = 0.643P_{G3}, P_{G3} = 22.22 + 0.889P_{G2}$$

(2) 总负荷为 400MW, 即 $P_{G1} + P_{G2} + P_{G3} = 400\text{MW}$ 。

将 P_{G1} 和 P_{G3} 都用 P_{G2} 表示, 便得 $14.29 + 0.572P_{G2} + P_{G2} + 22.22 + 0.889P_{G2} = 400$

由此可算出 $P_{G2} = 270\text{MW}$, 已越出上限值, 故应取 $P_{G2} = 250\text{MW}$ 。剩余的负荷功率 450MW 再由电厂 1 和 3 进行经济分配。 $P_{G1} + P_{G3} = 450$, 将 P_{G1} 和 P_{G3} 表示, 便得 $0.643P_{G3} + P_{G3} = 450$

由此解出: $P_{G3} = 274\text{MW}$ 和 $P_{G1} = (450 - 274)\text{MW} = 176\text{MW}$, 都在限值以内。

(3) 总负荷为 250MW, 即 $P_{G1} + P_{G2} + P_{G3} = 250\text{MW}$ 。

将 P_{G1} 和 P_{G3} 都用 P_{G2} 表示, 可得 $2.461P_{G2} = 363.49$

于是, $P_{G2} = 147.7\text{MW}$, $P_{G1} = 14.29 + 0.572P_{G2} = (14.29 + 0.572 \times 147.7)\text{MW} = 98.77\text{MW}$

由于 P_{G1} 已低于下限值, 故应取 $P_{G1} = 100\text{MW}$ 。剩余的负荷功率 300MW, 应该在电厂 2 和 3 之间重新分配。 $P_{G2} + P_{G3} = 300$, 将 P_{G3} 和 P_{G2} 表示, 便得 $P_{G2} + 22.22 + 0.889P_{G2} = 300$

由此解出: $P_{G2} = 147.05\text{MW}$ 和 $P_{G3} = (300 - 147.05)\text{MW} = 152.95\text{MW}$, 都在限值以内。

✓ 习题 14-9 两个火电厂并联运行, 其燃料耗量特性如下: (计算题必考)

$$F_1 = (4 + 0.3P_{G1} + 0.0008P_{G1}^2) \text{ t/h}, 200\text{MW} \leq P_{G1} \leq 300\text{MW}$$

$$F_2 = (3 + 0.33P_{G2} + 0.0004P_{G2}^2) \text{ t/h}, 340\text{MW} \leq P_{G2} \leq 560\text{MW}。$$

系统总负荷分别为 850MW 和 550MW, 试确定不计网损时各厂负荷的经济分配。

解: (1) 系统总负荷为 850MW 时

$P_{G2} = 850 - P_{G1}$, 各发电厂的燃料耗量微增率为

$$\lambda_1 = \frac{dF_1}{dP_{G1}} = \frac{d}{dP_{G1}} (4 + 0.3P_{G1} + 0.0008P_{G1}^2) = 0.3 + 0.0016P_{G1}$$

$$\lambda_2 = \frac{dF_2}{dP_{G2}} = \frac{d}{dP_{G2}} (3 + 0.33P_{G2} + 0.0004P_{G2}^2) = 0.33 + 0.0008P_{G2}$$

令 $\lambda_1 = \lambda_2$, 并将 $P_{G2} = 850 - P_{G1}$ 代入, 可解出 P_{G1} , 即

$$0.3 + 0.0016P_{G1} = 0.33 + 0.0008(850 - P_{G1})$$

$(0.0016 + 0.0008)P_{G1} = 0.33 - 0.3 + 0.0008$, 可得

$$P_{G1} = 295.883\text{MW}, P_{G2} = 850 - P_{G1} = (850 - 295.883)\text{MW} = 554.117\text{MW}$$

(2) 当系统总负荷为 550MW 时, 即 $P_{G2} = 550 - P_{G1}$, 令 $\lambda_1 = \lambda_2$, 并将 $P_{G2} = 550 - P_{G1}$ 代入, 便得

$$(0.0016 + 0.0008) \times 10^{-3} P_{G1} = 0.33 - 0.3 + 0.0008 \times 550 \times 10^{-3}$$

由此可得 $P_{G1} = 195.833\text{MW}$, 但 P_{G1} 的最小允许负荷 $P_{G1} \geq 200\text{MW}$, 故 $P_{G1} = 200\text{MW}$, $P_{G2} = (550 - 200)\text{MW} = 350\text{MW}$ 。

14-4 无功功率负荷的经济分配

✓ 有功经济分配和无功经济分配目标的区别（必考）

答：（1）有功：消耗燃料最少，无功：有功分配已确定的前提下电网有功网损最小。

（2）有功功率负荷经济分配的原则是等微增率准则，无功功率负荷经济分配的原则也是等微增率准则，

15-1 电力系统运行稳定性的基本概念

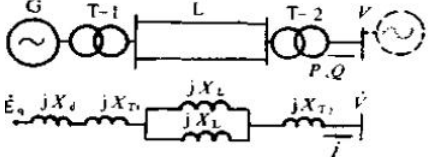
1. 电力系统稳定性, 同步稳定性概念

答：电力系统稳定性，通常是指电力系统受到微小的或大的扰动后，所有的同步电机能否继续保持同步运行的问题。

同步稳定性：人们把电力系统在运行中受到微小的或大的扰动之后能否继续保持系统中同步电机（最主要是同步发电机）的同步运行的问题，称为电力系统同步稳定性问题（也叫功角稳定性）。

15-2 功角的概念

1. 理解图 15-1 15-2 式子 15-3 图 15-3

答：简单电力系统如图示，考虑隐极发电机。

发电机电势到系统电压的电抗为：

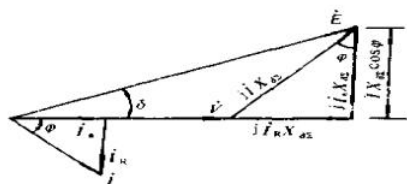
$$X_{d\Sigma} = X_d + X_{T1} + \frac{1}{2}X_L + X_{T2}$$

发电机输出功率为：

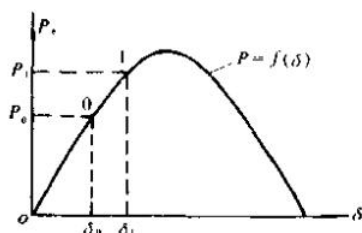
$$P_e = \frac{E_q V}{X_{d\Sigma}} \sin \delta$$

δ 为 \vec{E}_q 和 \vec{V} 之间的相位差角，因为传输功率大小与 δ 密切相关， δ 又称为功角。

传输功率与功角的关系 $P_e = f(\delta)$ 称为“功角特性”或“功率特性”，见图。



简单电力系统的相量图



功角特性

✓ 15-3 静态稳定的初步概念（必考）

答：所谓电力系统静态稳定性，一般是指电力系统在运行中受到微小扰动后，独立地恢复到原来的运行状态的能力。

✓ 15-3 理解图 15-5 和静态稳定判据式 15-5。

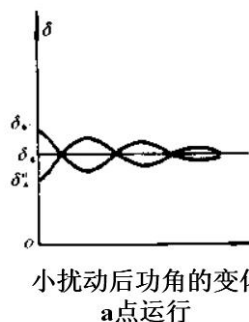
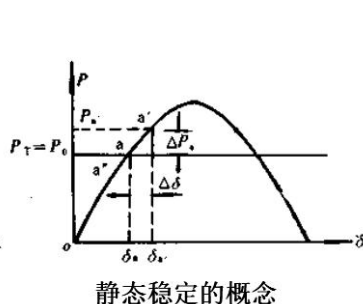
静态稳定性分析：

$$P_T = P_0 = \text{constant}$$

初始状态必须是平衡点。

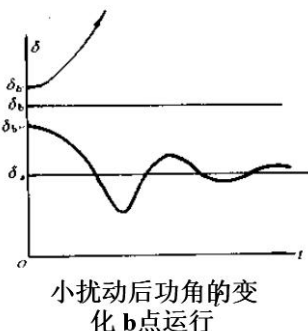
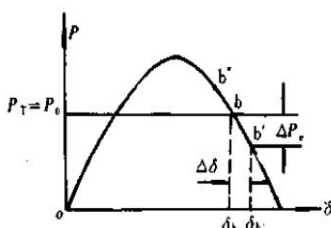
1. 在 a 点运行时，假定受微小扰动

发电机能够恢复到 a 点运行
所以在 a 点运行是稳定的。



2. 在 b 点运行时，假定受微小扰动

发电机转速不断增加不能恢复到 b 点运行，所以在 b 点运行是不稳定的。



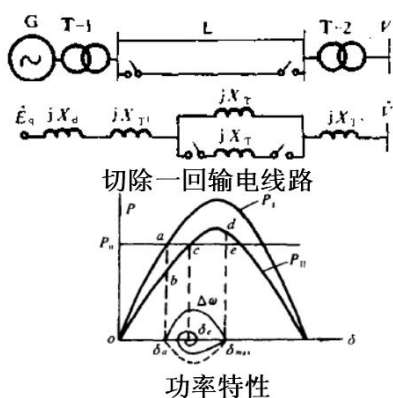
电力系统的静态稳定性：电力系统在运行中受到微小扰动后，独立地恢复到它原来的运行状态的能力。

静稳判据： $\frac{dP_e}{d\delta} > 0$ （在曲线上升的区间是稳定的）

15-4 暂态稳定的初步概念

研究系统受到大的扰动能否保持稳定运行。

讨论简单电力系统突然切除一回输电线路的情况。



正常运行时，系统的总电抗：

$$X_{d\Sigma I} = X_d + X_{T1} + \frac{1}{2}X_L + X_{T2}$$

$$\text{功率特性为: } P_I = \frac{E_q V}{X_{d\Sigma I}} \sin \delta$$

切除一回线路后，系统总电抗：

$$X_{d\Sigma II} = X_d + X_{T1} + X_L + X_{T2}$$

$$\text{功率特性为: } P_{II} = \frac{E_q V}{X_{d\Sigma II}} \sin \delta$$

$$\text{显然 } X_{d\Sigma II} > X_{d\Sigma I}$$

功率特性曲线如图。

暂态稳定性分析：

正常运行状态点 a, $P_T = P_e = P_0$ (初始状态必须是静态稳定点。)

1. 切除线路瞬间运行于点 b

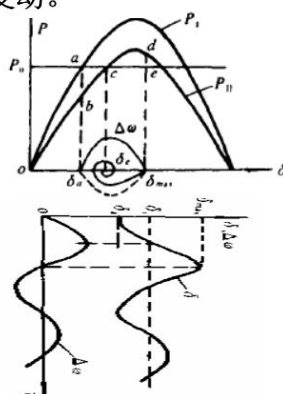
原动机保持 $P_T = P_0$ ，则 $P_T > P_e$ ，发电机加速。于是送、受端出现正的相对速度 $\Delta\omega > 0$ ，功角开始增大。发电机工作点由 b 向 c 点变动。

2. 达到 c 点处，转矩平衡，由于转子的惯性，功角将继续增大而越过点 c。之后，当功角继续增大时， $P_T < P_e$ ，发电机开始减速， $\Delta\omega$ 开始减小并在 d 点达到零值。

3. 在 d 点， $\Delta\omega = 0$ ，送、受端恢复同步，功角不再增大并抵达它的最大值 δ_{max} 。此刻电磁功率仍大于原动机功率，发电机继续减速，且发电机转速开始小于受端发电机转速。

由于 $\Delta\omega < 0$ ，功角开始减小，工作点向 c 点移动。

以后功角在 b 点而在 d 点之间等幅振荡。考虑各种损耗，则功角变化是一种减幅振荡。



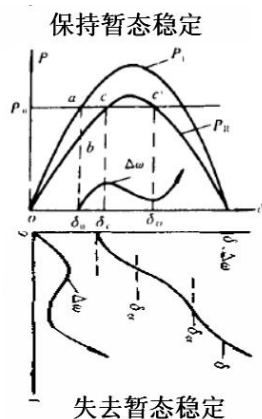
4. 最终稳定运行点为c点，稳定运行功角为 δ_c 。

暂态不稳定情况：

从点c开始，转子减速。因为 $\Delta\omega > 0$ ，功角仍增大。若 $\Delta\omega > 0$ 未降到零时，功角已达到临界角 δ_{cr} (c'点)，功角将继续增大而越过点c'，转子上的不平衡转矩又变成加速性质。于是 $\Delta\omega$ 又开始增加，功角将继续增大，使发电机与受端系统失去同步，破坏了电力系统的稳定运行。

电力系统的暂态稳定性：指电力系统在正常运行时，受到一个大的扰动后，能从原来的运行状态(平衡点)，不失去同步地过渡到新的运行状态，并在新的运行状态下稳定地运行。

暂稳判据：用功角随时间变化的特性作为暂态稳定的判据。

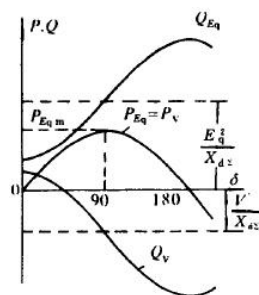


16-1 简单电力系统的功率特性

1. 隐极式发电机的功率特性

答：简单电力系统的功率特性曲线如图，由功率公式可见

功率极限为 $P_{Eqm} = \frac{E_q V}{X_{d\Sigma}}$ ，对应的功率极限角 $\delta_{Eqm} = 90^\circ$



17-2 暂态稳定分析计算的基本假设

1. 引起电力系统大扰动的主要原因

- (1) 负荷的突然变化，如投入或切除大容量的用户等；
- (2) 切除或投入系统的主要元件，如发电机、变压器及线路等；
- (3) 发生短路故障，短路故障扰动最严重，作为检验系统是否具有暂态稳定的条件。

17-2 简单电力系统暂态稳定的分析计算

✓ 等面积定则（问答）

答：当加速面积和减速面积大小相等时，转子动能增量为零，发电机重新恢复到同步速度。

19-1 提高稳定性的一般原则

✓ 提高稳定性的一般原则（问答必考）

答：(1) 尽可能地提高电力系统的功率极限 $P_m = \frac{EV}{X}$ ；(2) 抑制自发振荡的发生；(3) 减小发电机相对运动的振荡幅度，减小发动机转轴上的不平衡功率。

✓ 2. 可采取什么措施提高稳定性（问答必考）

答：(1) 改善电力系统基本元件的特性和参数；(2) 采用附加装置提高电力系统的稳定性；(3) 改善电力系统运行方式和及其他措施。

17-2 极限切除角

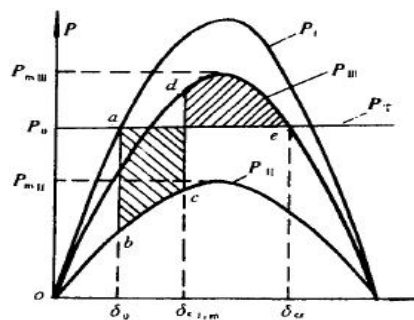
如果在某一切除角时，最大可能的减速面积与加速面积大小相等，则系统将处于稳定的极限情况，大于这个角度切除故障，系统将失去稳定。这个角度成为**极限切除角** $\delta_{c,lim}$ 。

应用等面积定则可确定 $\delta_{c,lim}$

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{c,lim}} (P_0 - P_{mII} \sin \delta) d\delta + \int_{\delta_{c,lim}}^{\delta_{cr}} (P_0 - P_{mIII} \sin \delta) d\delta = 0$$

整理得：

$$\delta_{c,lim} = \arccos \frac{P_0(\delta_{cr} - \delta_0) + P_{mIII} \cos \delta_{cr} - P_{mII} \cos \delta_0}{P_{mIII} - P_{mII}}$$



式中所有角度都用弧度表示。

考试题型：

填空题（20 空 20 分）

问答题（5 题 40 分）

计算题（3 题 40 分）