

# 电力系统分析（下）复习题

## 9-1 负荷的组成

### 1. 综合负荷的定义

答：系统中所有电力用户的用电设备所消耗的电功率总和就是电力系统的负荷，亦称电力系统的综合用电负荷。它是把不同地区、不同性质的所有的用户的负荷总加起来而得到的。

### 2. 综合负荷、供电负荷和发电负荷的区别及关系

答：综合用电负荷加上电力网的功率损耗就是各发电厂应该供给的功率，称为电力系统的供电负荷。供电负荷再加上发电厂厂用电消耗的功率就是各发电厂应该发出的功率，称为电力系统的发电负荷。

## 9-2 负荷曲线

### 1. 负荷曲线的定义

答：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

#### ✓ 2. 日负荷曲线和年负荷曲线的概念

答：负荷曲线按时间长短分，分为日负荷曲线和年负荷曲线。日负荷曲线描述了一天 24 小时负荷的变化情况；年负荷曲线描述了一年内负荷变化的情况。

#### ✓ 3. 日负荷曲线中最大负荷、最小负荷、平均负荷、负荷率、最小负荷系数的概念

答：负荷曲线中的最大值称为日最大负荷  $P_{\max}$ （又称峰荷），最小值称为日最小负荷  $P_{\min}$ （又称谷荷）；平均负荷是指

某一时期（日，月，年）内的负荷功率的平均值， $P_{av} = \frac{W_d}{24} \int_0^{24} P dt$ ；负荷率  $k_m$  是日平均负荷  $P_{av}$  与日最大负荷  $P_{\max}$  之

比，即  $k_m = \frac{P_{av}}{P_{\max}}$ ；最小负荷系数  $\alpha$  是日最小负荷  $P_{\min}$  跟日最大负荷  $P_{\max}$  之比，即  $\alpha = \frac{P_{\min}}{P_{\max}}$ 。

#### ✓ 4. 日负荷曲线的作用

答：日负荷曲线对电力系统的运行非常重要，它是调度部门安排日发电计划和确定系统运行方式的重要依据。

#### ✓ 5. 年最大负荷曲线的定义和作用

答：年最大负荷曲线描述一年内每月（或每日）最大有功功率负荷变化的情况，它主要用来安排发电设备的检修计划，同时也为制订发电机组或发电厂的扩建或新建计划提供依据。

#### ✓ 6. 年持续负荷曲线的定义、最大负荷利用时数的概念、年持续负荷曲线的用途

答：年持续负荷曲线是按一年中系统负荷的数值大小及其持续小时数顺序排列而绘制成，作用是安排发电计划和进行

可靠性估算。最大负荷利用小时数  $T_{\max}$  是全年实际耗量  $W$  跟负荷最大值  $P_{\max}$  之比，即  $T_{\max} = \frac{W}{P_{\max}} = \frac{1}{P_{\max}} \int_0^{8760} P dt$

## 9-3 负荷特性与负荷模型

### 1. 负荷电压静态特性、ZIP 模型

答：当频率维持额定值不变时，负荷功率与电压的关系称为负荷的电压静态特性；负荷模型 ZIP 是指在电力系统分析计算中对负荷特性所作的物理模拟或数学描述，负荷模型分为静态模型和动态模型。

$$\begin{cases} P = P_N [a_p (V/V_N)^2 + b_p (V/V_N) + c_p] \\ Q = Q_N [a_q (V/V_N)^2 + b_q (V/V_N) + c_q] \end{cases} \quad \text{其中系数满足} \begin{cases} a_p + b_p + c_p = 1 \\ a_q + b_q + c_q = 1 \end{cases}$$

上式中第一部分与电压平方成正比，代表恒定阻抗消耗的功率；第二部分与电压成正比，代表与恒电流负荷相对应的功率；第三部分为恒功率分量。

### 2. 负荷频率静态特性的线性模型

$$\text{答：} \begin{cases} P = P_N (1 + k_{pV} \Delta V) \\ Q = Q_N (1 + k_{qV} \Delta V) \end{cases} \quad \text{和} \quad \begin{cases} P = P_N (1 + k_{pf} \Delta f) \\ Q = Q_N (1 + k_{qf} \Delta f) \end{cases} \quad \text{式中 } \Delta V = (V - V_N)/V_N, \Delta f = (f - f_N)/f_N$$

需要同时考虑电压和频率的变化时，也可采用  $\begin{cases} P = P_N (1 + k_{pV} \Delta V)(1 + k_{pf} \Delta f) \\ Q = Q_N (1 + k_{qV} \Delta V)(1 + k_{qf} \Delta f) \end{cases}$

✓ 习题 9-1: 某系统典型日负荷曲线如题图所示, 试计算: 日平均负荷; 负荷率  $k_m$ , 最小负荷系数  $a$  以及峰谷差  $\Delta P_m$ 。

解: (1) 日平均负荷

$$P_{av} = \frac{70 \times 2 + 50 \times 4 + 80 \times 2 + 100 \times 4 + 80 \times 2 + 90 \times 4 + 120 \times 4 + 70 \times 2}{24} \text{MW} = 85 \text{MW}$$

(2) 负荷率

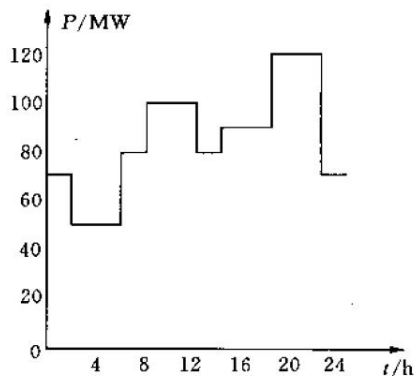
$$k_m = \frac{P_{av}}{P_{\max}} = \frac{85}{120} = 0.7083$$

(3) 最小负荷系数

$$a = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} = \frac{50}{120} = 0.4167$$

(4) 峰谷差

$$\Delta P_m = P_{\max} - P_{\min} = (120 - 50) \text{MW} = 70 \text{MW}$$



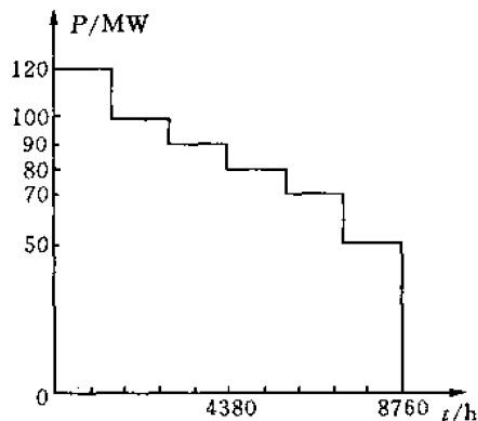
题图 9-1 日负荷曲线

9-2 若题图 9-1 作为系统全年平均日负荷曲线, 试作出系统年持续负荷曲线, 并求出年平均负荷及最大负荷利用小时数  $T_{\max}$

解: 年持续负荷数据如题表 9-2 所示。

题表 9-2 年持续负荷

| 有功功率/MW | 持续时间/h                |
|---------|-----------------------|
| 120     | $4 \times 365 = 1460$ |
| 100     | $4 \times 365 = 1461$ |
| 90      | $4 \times 365 = 1462$ |
| 80      | $4 \times 365 = 1463$ |
| 70      | $4 \times 365 = 1464$ |
| 50      | $4 \times 365 = 1465$ |



题图 9-2 年持续负荷曲线

(1) 系统年持续负荷曲线如题图 9-2 所示。

(2) 年平均负荷

$$P_{av} = \frac{(50 + 70 + 80 + 90 + 100 + 120) \times 4 \times 365}{8760} \text{MW} = 85 \text{MW}$$

(3) 最大负荷利用小时数

$$T_{\max} = \frac{1}{P_{\max}} \int_0^{8760} P dt = \frac{P_{av(y)} \times 8760}{P_{\max}} = \frac{85 \times 8760}{120} \text{h} = 6205 \text{h}$$

✓ 9-3 某工厂用电的年持续负荷曲线如题图 9-3 所示。试求: 工厂全年平均负荷, 全年耗电量及最大负荷利用小时数  $T_{\max}$ 。

解: (1) 全年平均负荷

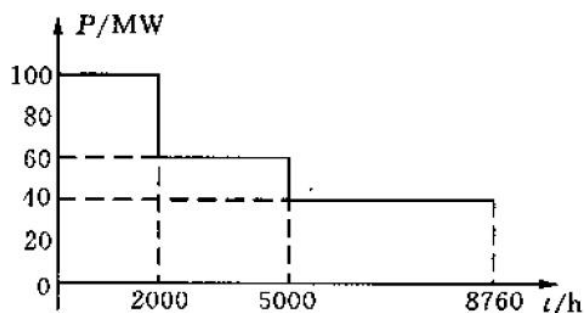
$$P_{av(y)} = \frac{100 \times 2000 + 60 \times 3000 + 40 \times 3760}{8760} \text{MW} = 60.548 \text{MW}$$

(2) 全年耗电量

$$W = \int_0^{8760} P dt = (100 \times 2000 + 60 \times 3000 + 40 \times 3760) \times 10^3 \text{ kW} \cdot \text{h} \\ = 5.304 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

(3) 最大负荷利用小时数

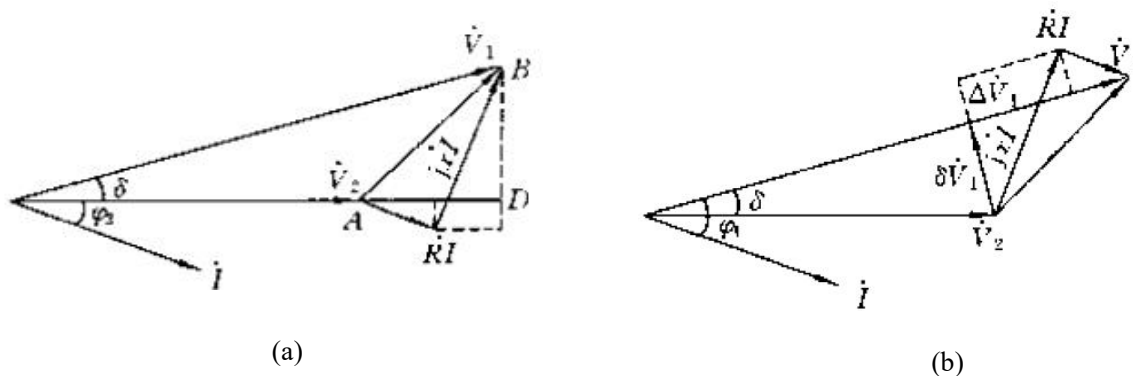
$$T_{\max} = \frac{1}{P_{\max}} \int_0^{8760} P dt = \frac{W}{P_{\max}} = \frac{5.304 \times 10^8}{100 \times 10^3} \text{h} = 5304 \text{h}$$



题图 9-3 年持续负荷曲线

## 10-1 网络元件的电压降落和功率损耗

1. 电压降落纵分量和横分量的计算公式（分两种情况，见图 10-2，掌握计算，画相量图）；



✓ 答：电压降落纵分量  $\Delta V_2 = RI \cos \varphi_2 + XI \sin \varphi_2$ ；横分量  $\delta V_2 = XI \cos \varphi_2 - RI \sin \varphi_2$

以电压相量  $\dot{V}_2$  作参考轴，

$$\begin{cases} \Delta V_2 = \frac{P''R + Q''X}{V_2} \\ \delta V_2 = \frac{P''X - Q''R}{V_2} \end{cases}, V_1 = \sqrt{(V_2 + \Delta V_2)^2 + (\delta V_2)^2}$$

以电压相量  $\dot{V}_1$  作参考轴，

$$\begin{cases} \Delta V_1 = \frac{P'R + Q'X}{V_1} \\ \delta V_1 = \frac{P'X - Q'R}{V_1} \end{cases}, V_2 = \sqrt{(V_1 - \Delta V_1)^2 + (\delta V_1)^2}$$

✓ 2. 电压降落、电压损耗、电压偏移的定义有所不同

答：网络元件的电压降落是指元件首末端两点电压的相量差，即  $\dot{V}_1 - \dot{V}_2 = (R + jX)\dot{I}$ ；把两点间电压绝对值之差称为

电压损耗，用  $\Delta V$  表示， $\Delta V = V_1 - V_2$ ；电压偏移是指网络中某点的实际电压同网络该处的额定电压之差，可以用 KV

表示，也可以用额定电压的百分数表示。若某点的实际电压为  $V$ ，该处的额定电压为  $V_N$ ，则用百分数表示的电压偏移

为，电压偏移 (%) =  $\frac{V - V_N}{V_N} \times 100$

✓ 3. 电压降落公式的分析（为何有功和相角密切相关，无功和电压密切相关？）；

答：从电压降落的公式可见，不论从元件的哪一端计算，电压降落的纵、横分量计算公式的结构都是一样的，元件两端的电压幅值差主要由电压降落的纵分量决定，电压的相角差则由横分量确定。高压输电线的参数中，电抗要比电阻大得多，作为极端情况，令  $R=0$ ，便得  $\Delta V = QX/V$ ， $\delta V = PX/V$ ，上式说明，在纯电抗元件中，电压降落的纵分量是因传送无功功率而产生，电压降落的横分量则因传送有功功率产生。换句话说，元件两端存在电压幅值差是传送无功功率的条件，存在电压相角差则是传送有功功率的条件。

✓ 4. 网络元件功率损耗的计算公式（分串联支路和并联支路的两种情况）

答：网络元件主要是指输电线路和变压器。电流在线路的电阻和电抗上产生的功率损耗为

$$\begin{cases} \Delta S_L = \frac{P'^2 + Q'^2}{V_2^2} (R + jX) \text{ 或 } \Delta S_L = \frac{P'^2 + Q'^2}{V_1^2} (R + jX) \\ \Delta Q_{B1} = -\frac{1}{2} B V_1^2, \Delta Q_{B2} = -\frac{1}{2} B V_2^2 \end{cases} \quad \text{其中 } B = b_0 l, R_L = r_0 l, X_L = x_0 l$$

变压器的功率损耗: 
$$\begin{cases} \Delta S_T = \frac{P'^2 + Q'^2}{V_2^2} (R_T + jX_T) \\ \Delta S_o = (G_T + jB_T)V^2 = \Delta P_o + jQ_o = \Delta P_o + j \frac{I_o \%}{100} S_N \end{cases}$$

### 5. 输电线路何时作为无功电源、何时作为无功负荷

答: 35KV 及以下的架空线路的充电功率甚小, 一般说, 这种线路都是消耗无功功率的; 110KV 及以上的架空线路当传输功率较大时, 电抗中消耗的无功功率将大于电纳中产生的无功功率, 线路成为无功负载, 当传输功率较小 (小于自然功率) 时, 电纳中生产的无功功率, 除了抵偿电抗中的损耗以外, 还有多余, 这时线路就成为无功电源。 ( $\delta < 180^\circ$ ;

无功电源;  $\delta > 180^\circ$ , 无功负荷)。

✓ **习题 10-1:** 一条 100KV 架空输电线路, 长 100km,  $r_o = 0.1209\Omega/\text{km}$ ,  $x_o = 0.400\Omega/\text{km}$ , 忽略线路对地电容,

已知线路末端运行电压  $V_{LD}=105\text{kV}$ , 负荷  $P_{LD}=42\text{MW}$ ,  $\cos\varphi=0.85$ 。试计算: (1) 输电线路的电压降落和电压损耗; (2) 线路阻抗的功率损耗和输电效率; (3) 线路首端和末端的电压偏移。

解: (1)  $R = 12.09 \times 100 = 12.09\Omega$ ,  $X = 0.4 \times 100 = 40\Omega$

$$Q_{LD} = P_{LD} \tan \varphi = P_{LD} \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{\cos \varphi} = 42 \times \frac{\sqrt{1 - 0.85^2}}{0.85} = 26.029\text{MW}$$

$$\Delta V = \frac{P_{LD}R + Q_{LD}X}{V_{LD}} = \frac{42 \times 12.09 + 26.029 \times 40}{105} = 14.7512\text{KV}$$

$$\delta V = \frac{P_{LD}X - Q_{LD}R}{V_{LD}} = \frac{42 \times 40 - 26.029 \times 12.09}{105} = 13.0031\text{KV}$$

电压降落:  $\dot{V}_1 - \dot{V}_{LD} = \Delta V + j\delta V = 14.7512 + j13.0031$

$$V_1 = \sqrt{(V_{LD} + \Delta V)^2 + \delta V^2} = \sqrt{(105 + 14.752)^2 + 13.003^2} = 120.4551\text{KV}$$

电压损耗:  $V_1 - V_{LD} = 120.4551 - 105 = 15.4551\text{KV}$

(2) 功率损耗

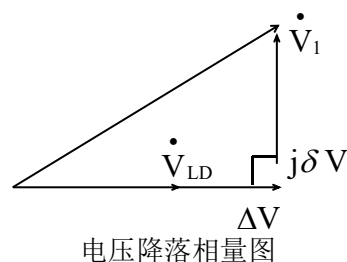
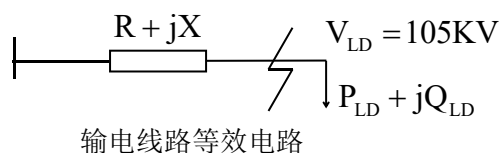
$$\Delta P = I^2 R = \frac{P_{LD}^2 + Q_{LD}^2}{V_{LD}^2} R = \frac{42^2 + 26.029^2}{105^2} \times 12.09 = 2.6767\text{MW}$$

$$\Delta Q = I^2 X = \frac{P_{LD}^2 + Q_{LD}^2}{V_{LD}^2} X = \frac{42^2 + 26.029^2}{105^2} \times 40 = 8.8560\text{MW}$$

$$\text{输电效率: } \eta = \frac{P_{LD}}{P_{LD} + \Delta P} \times 100\% = \frac{42}{42 + 2.68} \times 100\% = 94.01\%$$

$$(3) \text{ 末端电压偏移: } \frac{105 - 110}{110} \times 100\% = -4.545\%$$

$$\text{首端电压偏移: } \frac{120.4551 - 110}{110} \times 100\% = 9.505\%$$



✓ 10-2 若上题的负荷功率因数提高到 0.95，试作同样计算，并比较两题的计算结果。

$$Q_{LD} = P_{LD} \tan \varphi = P_{LD} \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{\cos \varphi} = 42 \times \frac{\sqrt{1 - 0.95^2}}{0.95} = 13.8047 \text{ MW}$$

$$\Delta V = \frac{P_{LD} R + Q_{LD} X}{V_{LD}} = \frac{42 \times 12.09 + 13.8047 \times 40}{105} = 10.095 \text{ KV}$$

$$\delta V = \frac{P_{LD} X - Q_{LD} R}{V_{LD}} = \frac{42 \times 40 - 13.8047 \times 12.09}{105} = 14.4105 \text{ KV}$$

电压降落:  $\dot{V}_1 - \dot{V}_{LD} = \Delta V + j\delta V = 10.095 + j14.4105$

$$V_1 = \sqrt{(V_{LD} + \Delta V)^2 + \delta V^2} = \sqrt{(105 + 10.095)^2 + 14.4105^2} = 115.994 \text{ KV}$$

电压损耗:  $V_1 - V_{LD} = 115.994 - 105 = 10.994 \text{ KV}$

(2) 功率损耗

$$\Delta P = I^2 R = \frac{P_{LD}^2 + Q_{LD}^2}{V_{LD}^2} R = \frac{42^2 + 13.8047^2}{105^2} \times 12.09 = 2.1434 \text{ MW}$$

$$\Delta Q = I^2 X = \frac{P_{LD}^2 + Q_{LD}^2}{V_{LD}^2} X = \frac{42^2 + 13.8047^2}{105^2} \times 40 = 7.0914 \text{ MW}$$

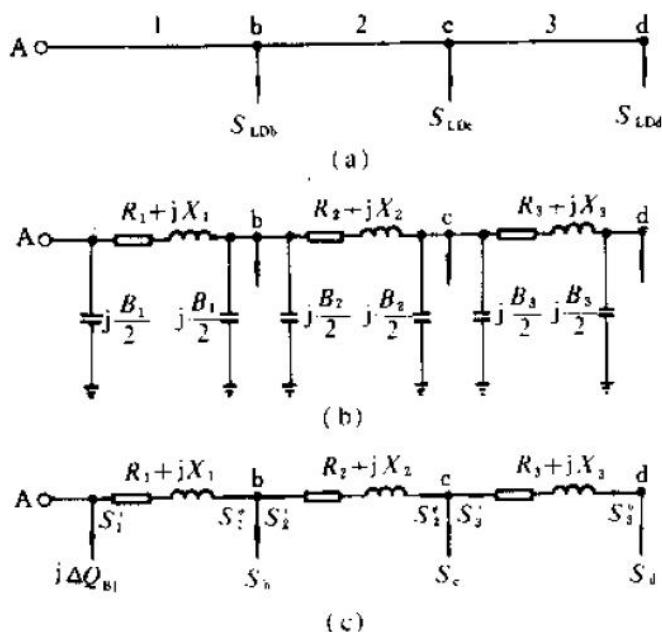
输电效率:  $\eta = \frac{P_{LD}}{P_{LD} + \Delta P} \times 100\% = \frac{42}{42 + 2.1434} \times 100\% = 95.14\%$

(3) 末端电压偏移:  $\frac{105 - 110}{110} \times 100\% = -4.545\%$

首端电压偏移:  $\frac{115.994 - 110}{110} \times 100\% = 5.449\%$

## 11-1 开式网络的电压和功率分布计算

1. 已知供电点电压和负荷节点功率时的计算方法（逆功率传输方向计算功率损耗，顺功率传输方向计算电压降落，看例 11-1）。



答：已知供电点电压和负荷节点功率时的计算方法：

① 从节点 d 开始，利用  $V_N$ ，则

$$S_3'' = S_d, \quad \Delta S_{L3} = \frac{P_3'^2 + Q_3'^2}{V_N^2} (R_3 + jX_3), \quad S_3' = S_3'' + \Delta S_{L3}$$

$$\text{对于第二段线路 } S_2'' = S_c + S_3', \quad \Delta S_{L2} = \frac{P_2'^2 + Q_2'^2}{V_N^2} (R_2 + jX_2), \quad S_2' = S_2'' + \Delta S_{L2}$$

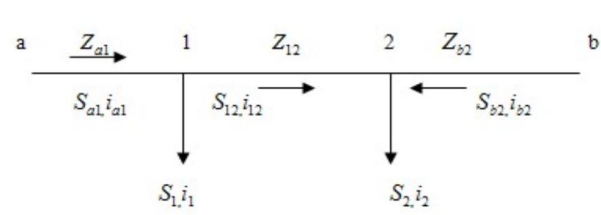
$$\text{第一段线路 } S_1'' = S_b + S_2', \quad \Delta S_{L1} = \frac{P_1'^2 + Q_1'^2}{V_N^2} (R_1 + jX_1), \quad S_1' = S_1'' + \Delta S_{L1}$$

✓ ② 知  $V_A$ ，算  $V_b$   $\begin{cases} \Delta V_{Ab} = (P_1'R_1 + Q_1'X_1)/V_A \\ \delta V_{Ab} = (P_1'X_1 - Q_1'R_1)/V_A \\ V_b = \sqrt{(V_A - \Delta V_{Ab})^2 + (\delta V_{Ab})^2} \end{cases}$  算  $V_c$ ，  $\begin{cases} \Delta V_{bc} = (P_2'R_2 + Q_2'X_2)/V_b \\ \delta V_{bc} = (P_2'X_2 - Q_2'R_2)/V_b \\ V_c = \sqrt{(V_b - \Delta V_{bc})^2 + (\delta V_{bc})^2} \end{cases}$

算  $V_d$ ，  $\begin{cases} \Delta V_{cd} = (P_3'R_3 + Q_3'X_3)/V_c \\ \delta V_{cd} = (P_3'X_3 - Q_3'R_3)/V_c \\ V_d = \sqrt{(V_c - \Delta V_{cd})^2 + (\delta V_{cd})^2} \end{cases}$

## 11-2 简单闭式网络的功率分布计算

1. 两端供电网络功率分布的计算公式（掌握假设的条件和两个功率分量 式 11-7）



$$\begin{cases} S_{a1} = \frac{(Z_{12} + Z_{b2})S_1 + Z_{b2}S_2 + (V_a - V_b)V_N}{Z_{a1} + Z_{12} + Z_{b2}} = S_{a1,LD} + S_{cir} \\ S_{a2} = \frac{Z_{a1}S_1 + (Z_{a1} + Z_{12})S_2 - (V_a - V_b)V_N}{Z_{a1} + Z_{12} + Z_{b2}} = S_{a2,LD} - S_{cir} \end{cases}$$

答：① 第一部分由负荷功率和网络参数确定，阻抗共轭值成反比的关系分配；

② 第二部分与负荷无关，它可以在网络中负荷切除的情况下，由两个供电点的电压差和网络参数确定。

## 2. 什么是循环功率的定义

答：由两端电压不等而产生的功率叫循环功率，它与负荷无关，当两电源点电压相等时，循环功率为零。

## 3. 两台变压器 BYQ 并联的功率分布计算 例 11-4 11-8 P76

## 4. 功率自然分布和经济分布的概念

答：功率在环形网络中是与阻抗成反比分布的，这种分布称为功率的自然分布。功率在环形网络中与电阻成反比分布时，功率损耗为最小，这种功率分布为经济分布。

✓ 2.潮流方程中节点的分类及相应的定义：（填空或问答）

## 11-3 复杂电力系统潮流计算的数学模型

### 1.潮流方程的表达式（式 11-25）

答：  $P_i + jQ_i = \dot{V}_i \sum_{j=1}^n \dot{Y}_{ij} \dot{V}_j^* \quad (i=1, 2, \dots, n)$

答：（1）节点可分为：PQ 节点、PV 节点和平衡节点三种类型。

（2）各类节点介绍：①PQ 节点的有功功率 P 和无功功率 Q 是给定的，节点电压（V，δ）是待求量；②PV 节点的有功功率 P 和电压幅值 V 是给定的，节点的无功功率 Q 和电压的相位 δ 是待求量；③平衡节点在潮流分布算出以前，网络中的功率损失是未知的，因此，网络中至少有一个节点的有功功率 P 不能给定，这个节点承担了系统的有功功率平衡。



### 3.潮流方程中平衡节点存在的必要性（潮流计算前有功网损未知,且电网中节点电源的相角须有参考轴）

答：在潮流分布算出以前，网络中的功率损失是未知的，因此，网络中至少有一个节点的有功功率  $P$  不能给定，这个节点承担了系统的有功功率平衡，故称之为平衡节点。另外必须选定一个节点，指定其电压相位为零，作为计算各节点电压相位的参考，这个节点称为基准节点。为了计算上的方便，常将平衡节点和基准节点选为同一个节点。

### ✓ 4.潮流计算的约束条件（问答必考）

答：（1）所有节点电压必须满足  $V_{i\min} \leq V_i \leq V_{i\max} (i=1,2,\dots,n)$  ；

（2）所有电源节点的有功功率和无功功率必须满足  $P_{Gi\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi\max}, Q_{Gi\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi\max}$  ；

（3）某此节点之间电压的相位差应满足  $|\delta_i - \delta_j| < |\delta_i - \delta_j|_{\max}$ 。

## 11-4 牛顿-拉夫逊法潮流计算

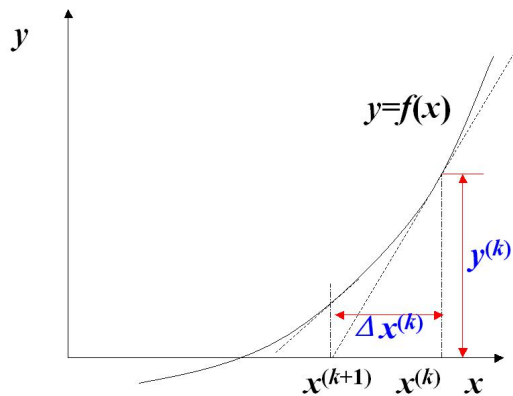
### 1.用单变量非线性方程解释牛顿-拉夫逊法的一般思路

答：函数  $y = f(x)$  为图中的曲线， $f(x) = 0$  的解相当于曲线与  $x$  轴

的交点。如果第  $k$  次迭代中得到  $x^{(k)}$ ，则过  $[x^{(k)}, y^{(k)} = f(x^{(k)})]$  点

作一切线，此切线同  $x$  轴的交点便确定了下一个近似解  $x^{(k+1)}$ 。由此可见，牛顿-拉夫逊法实质上就是切线法，是一种逐步线性化的方法。

迭代计算的通式：
$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - \frac{f(x^{(k)})}{f'(x^{(k)})} = x^{(k)} + \Delta x^{(k)}$$



牛顿法的几何解释

### 2.潮流方程雅可比短阵的概念

答：
$$\begin{cases} F(X^{(k)}) = -J^{(k)} \Delta X^{(k)} \\ X^{(k+1)} = X^{(k)} + \Delta X^{(k)} \end{cases}$$
，式中， $X$  和  $\Delta X$  分别是由  $n$  个变量和修正量组成的  $n$  维列向量； $F(X)$  是由  $n$  个多元

函数组成的  $n$  维列向量； $J$  是  $n \times n$  阶方阵，称为雅可比矩阵，它的第  $i, j$  个元素  $J_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial x_j}$  是第  $i$  个函数  $f_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$

对第  $j$  个变量  $x_j$  的偏导数；上角标  $(k)$  表示  $J$  阵的每一个元素都在点  $(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})$  处取值。

### 3.潮流方程的直角坐标和极坐标的表达式,了解节点和电压相量的表示形式,潮流方程存在不同的形式表达式:

答：潮流方程的直角坐标

节点电压：
$$\dot{V}_i = e_i + jf_i$$

导纳矩阵元素：
$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$$

$$\begin{cases} P_i = e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \\ Q_i = f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) \end{cases}$$

极坐标的表达式：

节点电压：
$$\dot{V}_i = V_i \angle \delta_i = V_i (\cos \delta_i + j \sin \delta_i)$$

$$\text{节点功率方程: } \begin{cases} P_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ Q_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad \text{式中, } \delta_{ij} = \delta_i - \delta_j, \text{ 是 } i, j \text{ 两节点电压的相角差。}$$

#### ✓ 4.潮流计算的基本步骤（问答必考）

答：（1）形成节点导纳矩阵。（2）设定节点电压的初值。（3）将各节点电压初值代入求得修正方程式中的不平衡量。  
（4）将各节点电压初值代入求雅可比矩阵的各元素。（5）求解修正方程式，求得各节点电压的增量。  
（6）计算各节点电压的新值，返回第3步进入下一次迭代，直到满足收敛判据为止。  
（7）最后计算平衡节点功率和线路功率、损耗。

#### 4.用牛顿-拉逊法进行潮流计算的基本步骤

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_{is} - P_i = P_{is} - e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) = 0 \\ \Delta Q_i = Q_{is} - Q_i = Q_{is} - f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) = 0 \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (11-46)$$

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_{is} - P_i = P_{is} - e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) = 0 \\ \Delta V_i^2 = V_{is}^2 - V_i^2 = V_{is}^2 - (e_i^2 + f_i^2) = 0 \end{cases} \quad (i = m+1, m+2, \dots, n-1) \quad (11-47)$$

$$\Delta W = -J \Delta V \quad (11-48)$$

$$\text{当 } i \neq j \text{ 时 } \begin{cases} \frac{\partial \Delta P_i}{\partial e_j} = -\frac{\partial \Delta Q_i}{\partial f_j} = -(G_{ij} e_i + B_{ij} f_i) \\ \frac{\partial \Delta P_i}{\partial f_j} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial e_j} = B_{ij} e_i - G_{ij} f_i \\ \frac{\partial \Delta V_i^2}{\partial e_j} = \frac{\partial \Delta V_i^2}{\partial f_j} = 0 \end{cases} \quad (11-49)$$

$$\text{当 } j = i \text{ 时, } \begin{cases} \frac{\partial \Delta P_i}{\partial e_i} = -\sum_{k=1}^n (G_{ik} e_k - B_{ik} f_k) - G_{ii} e_i - B_{ii} f_i \\ \frac{\partial \Delta P_i}{\partial f_i} = -\sum_{k=1}^n (G_{ik} f_k + B_{ik} e_k) + B_{ii} e_i - G_{ii} f_i \\ \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial e_i} = \sum_{k=1}^n (G_{ik} f_k + B_{ik} e_k) + B_{ii} e_i - G_{ii} f_i \\ \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial f_i} = -\sum_{k=1}^n (G_{ik} e_k - B_{ik} f_k) + G_{ii} e_i + B_{ii} f_i \\ \frac{\partial \Delta V_i^2}{\partial e_i} = -2e_i \\ \frac{\partial \Delta V_i^2}{\partial f_i} = -2f_i \end{cases} \quad (11-50)$$

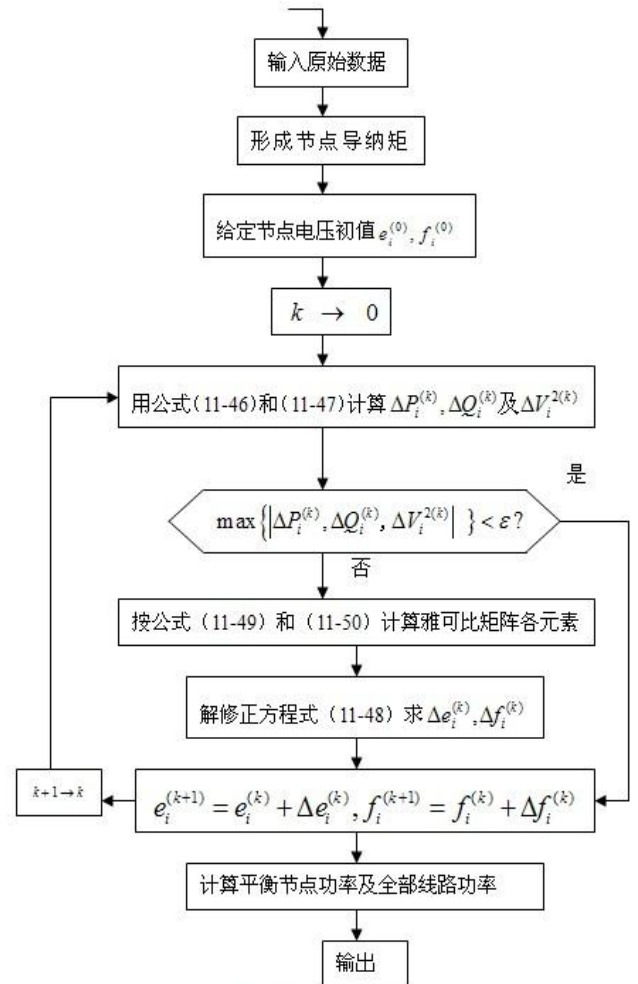


图 11-27 牛顿-拉夫逊法潮流计算程序框图

$$\text{输电线路功率: } S_{ij} = P_{ij} + jQ_{ij} = \dot{V}_i^* I_{ij}^* = V_i^2 y_{i0}^* + \dot{V}_i^* (\dot{V}_i - \dot{V}_j) y_{ij}^* \quad (11-56)$$

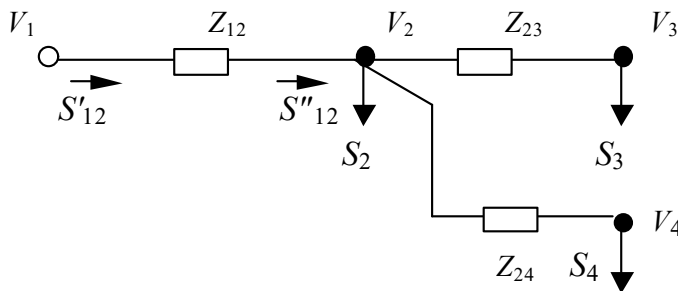


**例题：**电网结构如图所示，额定电压 10kV，已知各节点负荷及线路参数： $S_2=0.3+j0.2\text{MVA}$ ，

$S_3=0.5+j0.3\text{MVA}$ ， $S_4=0.2+j0.15\text{MVA}$ ， $Z_{12}=1.2+j2.4\ \Omega$ ，

$Z_{23}=1.0+j2.0\ \Omega$ ， $Z_{24}=1.5+j3.0\ \Omega$ ，电源电压

$V_1=10.5\text{kV}$ ，试作功率和电压计算。



解：(1) 先假设各节点电压为额定电压进行功率损耗计算，以求得电源点始端功率。

$$\Delta S_{23} = \frac{P_3^2 + Q_3^2}{V_N^2} (R_{23} + jX_{23}) = \frac{0.5^2 + 0.3^2}{10^2} (1 + j2) = 0.0034 + j0.0068$$

$$\Delta S_{24} = \frac{P_4^2 + Q_4^2}{V_N^2} (R_{24} + jX_{24}) = \frac{0.2^2 + 0.15^2}{10^2} (1.5 + j3) = 0.0009 + j0.0019$$

$$S'_{23} = S_3 + \Delta S_{23} = 0.5034 + j0.3068$$

$$S'_{24} = S_4 + \Delta S_{24} = 0.2009 + j0.1519$$

$$S''_{12} = S_2 + S'_{23} + S'_{24} = 1.0043 + j0.6587$$

$$\Delta S_{12} = \frac{P_{12}^2 + Q_{12}^2}{V_N^2} (R_{12} + jX_{12}) = \frac{1.0043^2 + 0.6587^2}{10^2} (1.2 + j2.4) = 0.0173 + j0.0346$$

$$S'_{12} = S''_{12} + \Delta S_{12} = 1.0216 + j0.6933$$

(2) 用已知的电压及第一步求得的功率分布，求出线路各点电压。

$$\Delta V_{12} = (P'_{12} R_{12} + Q'_{12} X_{12}) / V_1 = 0.2752$$

$$V_2 \approx V_1 - \Delta V_{12} = 10.2248\text{kV}$$

$$\Delta V_{23} = (P'_{23} R_{23} + Q'_{23} X_{23}) / V_2 = 0.1100$$

$$V_3 \approx V_2 - \Delta V_{23} = 10.0408\text{kV}$$

$$\Delta V_{24} = (P'_{24} R_{24} + Q'_{24} X_{24}) / V_2 = 0.0740$$

$$V_4 \approx V_2 - \Delta V_{24} = 10.1508\text{kV}$$

(3) 根据求得的电压分布，重算功率分布。

$$\Delta S_{23} = \frac{0.5^2 + 0.3^2}{10.04^2} (1 + j2) = 0.0034 + j0.0068$$

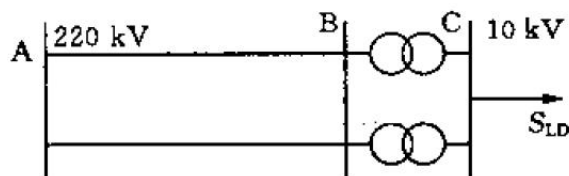
$$\Delta S_{24} = \frac{0.2^2 + 0.15^2}{10.15^2} (1.5 + j3) = 0.0009 + j0.0018$$

$$\Delta S_{12} = \frac{1.0043^2 + 0.6586^2}{10.22^2} (1.2 + j2.4) = 0.0166 + j0.0331$$

$$S'_{12} = S''_{12} + \Delta S_{12} = 1.0209 + j0.6917$$

(4) 比较两次计算得到的电源点功率的差值，小于 0.3%，则可以结束计算。（否则继续重算电压分布、功率分布……直到误差足够小）

11-1 输电系统如图 11-1 所示。已知：每台变压器  $S_N=100\text{MVA}$ ， $\Delta P_0=450\text{kW}$ ， $\Delta Q_0=3500\text{kvar}$ ， $\Delta P_S=100\text{kW}$ ， $V_S=12.5\%$ ，工作在  $-5\%$  的分接头；每回线路长  $250\text{km}$ ， $r_1=0.08\ \Omega/\text{km}$ ， $x_1=0.4\ \Omega/\text{km}$ ， $b_1=2.8\times 10^{-6}\text{S/km}$ ；负荷  $P_{LD}=150\text{MW}$ ， $\cos\varphi=0.85$ 。线路首端电压  $V_A=245\text{kV}$ ，试分别计算：(1) 输电线路，变压器以及输电系统的电压降落和电压损耗；(2) 输电线路首端功率和输电效率；(3) 线路首端 A，末端 B 及变压器低压侧 C 的电压偏移。



题图 11-1 简单输电线路

解：输电线路采用简化  $\Pi$  型等值电路，变压器采用励磁回路前移的等值电路(以后均用此简化)，如题图 11-1(1)所示。

#### 线路参数

$$R_L = r_1 l = 0.08 \times 250 \times \frac{1}{2} \Omega = 10 \Omega$$

$$X_L = x_1 l = 0.4 \times 250 \times \frac{1}{2} \Omega = 50 \Omega$$

$$\frac{B_L}{2} = b_1 l = 2.8 \times 10^{-6} \times 250 \text{ S} = 7 \times 10^{-4} \text{ S}$$

#### 变压器参数

$$R_T = \frac{\Delta P_S V_N^2}{S_N^2} \times 10^3 \times \frac{1}{2} = \frac{1000 \times 220^2}{100^2} \times 10^3 \times \frac{1}{2} \Omega = 2.42 \Omega$$

$$X_T = \frac{\Delta V_S \%}{100} \times \frac{V_N^2}{S_N} \times \frac{1}{2} = \frac{12.5}{100} \times \frac{220^2}{100} \times \frac{1}{2} \Omega = 30.25 \Omega$$

$$\Delta P_{T0} = 2 \times \Delta P_0 = 2 \times 0.45 \text{ MW} = 0.9 \text{ MW}$$

$$\Delta Q_{T0} = 2 \times \Delta Q_0 = 2 \times 3.5 \text{ Mvar} = 7.0 \text{ Mvar}$$

先按额定电压求功率分布

$$P_{LD} = 150 \text{ MW}, \cos\varphi = 0.85, Q_{LD} = 92.9617 \text{ Mvar}$$

$$\Delta S_T = \frac{P_{LD}^2 + Q_{LD}^2}{V_N^2} (R_T + jX_T) = \frac{150^2 + 92.9617^2}{220^2} (2.42 + j30.25) \text{ MV} \cdot \text{A}$$

$$= (1.5571 + j19.4637) \text{ MV} \cdot \text{A}$$

$$S_T = S_{LD} + \Delta S_T$$

$$= [(150 + j92.9617) + (1.5571 + j19.4637)] \text{ MV} \cdot \text{A}$$

$$= (151.5571 + j112.4259) \text{ MV} \cdot \text{A}$$

$$\Delta Q_{\Sigma} = \frac{B_L}{2} V_N^2 = 7 \times 10^{-4} \times 220^2 \text{ Mvar} = 33.88 \text{ Mvar}$$

$$S_2 = S_T + S_{T0} - j\Delta Q_{\Sigma}$$

$$= (151.5571 + j112.4259 + 0.9 + j7.0 - j33.88) \text{ Mvar}$$

$$= (152.4571 + j85.5454) \text{ Mvar}$$

$$\Delta S_L = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{V_N^2} (R_L + jX_L) = \frac{152.4571^2 + 85.5454^2}{220^2} (10 + j50)$$

$$= (6.3143 + j31.5715) \text{ MV} \cdot \text{A}$$

$$S_1 = S_2 + \Delta S_L$$

$$= (152.4571 + j85.5454 + 6.3143 + j31.5715) \text{ MV} \cdot \text{A}$$

$$= (158.7714 + j117.1169) \text{ MV} \cdot \text{A}$$

$$S_A = S_1 - j\Delta Q_{\Sigma} = (158.7714 + j117.1169 - j33.88) \text{ MV} \cdot \text{A}$$

$$= (158.7714 + j83.2369) \text{ MV} \cdot \text{A}$$

(1) 输电线路，变压器以及输电系统的电压降落和电压损耗。

(a) 输电线路

电压降落：

$$\begin{aligned} \Delta \dot{V}_L &= \frac{P_L R_L + Q_L X_L}{V_1} - j \frac{P_L X_L - Q_L R_L}{V_1} \\ &= \left( \frac{158.7714 \times 10 + 117.1169 \times 50}{245} - j \frac{158.7714 \times 50 - 117.1169 \times 10}{245} \right) \text{ kV} \\ &= (30.3819 - j27.622) \text{ kV} = 41.0614 \angle -42.276^\circ \text{ kV} \end{aligned}$$

$$V_B = \sqrt{(V_A - \Delta V_L)^2 + (\delta V_L)^2} = \sqrt{(245 - 30.3819)^2 + (27.622)^2} \text{ kV} = 216.3883 \text{ kV}$$

$$\text{电压损耗: } V_A - V_B = (245 - 216.3883) \text{ kV} = 28.612 \text{ kV}$$

$$\text{或电压损耗: } \frac{28.612}{220} \times 100\% = 13\%$$

(b) 变压器

电压降落：

$$\begin{aligned} \Delta \dot{V}_T &= \frac{P_T R_T + Q_T X_T}{V_H} - j \frac{P_T X_T - Q_T R_T}{V_B} \\ &= \left( \frac{151.5571 \times 2.42 + 112.4254 \times 30.25}{216.3883} - j \frac{151.5571 \times 30.25 - 112.4254 \times 2.42}{216.3883} \right) \text{ kV} \\ &= (17.411 - j19.93) \text{ kV} = 26.464 \angle -48.859^\circ \text{ kV} \end{aligned}$$

$$V'_C = \sqrt{(V_B - \Delta V_T)^2 + (\delta V_T)^2} = \sqrt{(216.3883 - 17.411)^2 + (19.93)^2} \text{ kV} = 199.973 \text{ kV}$$

$$\text{电压损耗: } V_B - V'_C = (216.3883 - 199.973) \text{ kV} = 16.4153 \text{ kV}$$

$$\text{或电压损耗: } \frac{16.4153}{220} \times 100\% = 7.46\%$$

(c) 输电系统的电压损耗:  $(28.612 + 16.4153) \text{ kV} = 45.0273 \text{ kV}$

$$\text{或输电系统的电压损耗: } \frac{45.0273}{220} \times 100\% = 20.467\%$$

(2) 线路首端功率和输电效率

$$\text{首端功率 } S_1 = (158.7714 + j83.2369) \text{ MV} \cdot \text{A}$$

$$\text{输电效率 } \eta = \frac{P_{LD}}{P_A} \times 100\% = \frac{150}{158.7714} \times 100\% = 94.475\%$$

(3) 线路首端 A、末端 B 及变压器低压侧的电压偏移

$$\begin{aligned} \text{点 A 电压偏移: } \frac{V_A - V_N}{V_N} \times 100\% &= \frac{245 - 220}{220} \times 100\% \\ &= 11.36\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{点 B 电压偏移: } \frac{V_B - V_N}{V_N} \times 100\% &= \frac{216.3883 - 220}{220} \times 100\% \\ &= -1.642\% \end{aligned}$$

$$\text{变压器的实际变比 } k_T = \frac{220(1 - 0.05)}{11} = 19$$

$$\text{点 C 低压侧实际电压 } V_C = V'_C \frac{1}{k_T} = \frac{199.973}{19} \text{ kV} = 10.525 \text{ kV}$$

$$\begin{aligned} \text{点 C 电压偏移: } \frac{V_C - V_N}{V_N} \times 100\% &= \frac{10.525 - 10}{10} \times 100\% \\ &= 5.25\% \end{aligned}$$