

第3章 简单电力系统的潮流计算

引子：

伟大的事业，需要决心、能力、组织和责任感。
——易卜生

本章提示

1. 负荷功率的表示法；
2. 电压降落、电压损耗、电压偏移、运算电源功率、运算负荷功率的基本概念；
3. 电力网元件的功率损耗、电压损耗的计算；
4. 开式网、简单闭式网的潮流计算(同一电压级、多个电压级)。

潮流计算是电力系统中应用最广泛、最基本和最重要的一种电气运算。在系统规划设计和安排系统的运行方式时,采用离线潮流计算;在电力系统运行状态的实时监控中,则采用在线潮流计算。电力系统的潮流计算是研究和分析电力系统的基础,它的任务是根据给定的运行条件确定网络中的功率分布、功率损耗以及各母线的电压。潮流计算的主要目的是:

(1) 在电力系统规划设计中,用于选择接线方式,选择电气设备;

(2) 在电力系统运行中,用于确定运行方式,制定检修计划,为调压运算、经济运行计算和稳定计算提供必要的数据。

潮流计算的方法包括解析法手算和计算机算法。解析法手算适用于简单系统,它可加深对物理概念的理解,同时也可作为计算机算法提供原始数据。实际电力系统计算大都采用计算机算法。本章介绍解析法手算,计算机算法在第17章介绍。

3.1 基本概念

3.1.1 负荷功率的表示方法

在电力系统计算中,负荷常以复功率形式给出,复功率的表示方法有两种,即

$$\tilde{S} = \sqrt{3} \dot{U} \dot{I}^* \quad \text{或} \quad \tilde{S} = \sqrt{3} \dot{U}^* \dot{I} \quad (3.1)$$

本书采用前一种表示形式。如图3.1所示,若负荷为感性时,电流相量滞后于电压相量,可得

$$\begin{aligned} \tilde{S} &= \sqrt{3} \dot{U} \dot{I}^* = \sqrt{3} U e^{j\beta} I e^{-j\alpha} = \sqrt{3} U I e^{j(\beta-\alpha)} \\ &= \sqrt{3} U I e^{j\varphi} = \sqrt{3} U I (\cos \varphi + j \sin \varphi) \\ &= \sqrt{3} U I \cos \varphi + j \sqrt{3} U I \sin \varphi = P + jQ \end{aligned} \quad (3.2)$$

若负荷为容性时,电流相量超前于电压相量,同理可推得

$$\tilde{S} = P - jQ \quad (3.3)$$

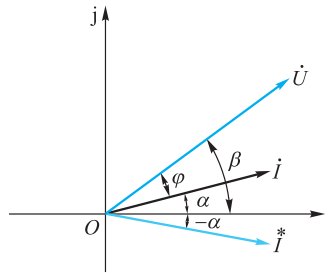


图3.1 电压与电流的相量图

可见,用上述规定的方法表示负荷时,感性无功功率前面的j取正号;容性无功功率前面的j取负号。若 $\tilde{S} = \sqrt{3} \dot{U} \dot{I}^*$,按相同的推导方法,感性无功功率前面的j取负号,容性无功功率前面的j取正号。

3.1.2 电压降落、电压损耗、电压偏移

电流通过电力网元件时,电压会发生变化。该网络元件的一相等值电路如图3.2所示,图中R和X分别表示一相的电阻和电抗, \dot{U} 和 \dot{I} 表示相电压和相电流。

1. 电压降落

电压降落是指网络元件首末端电压的相量差,由图3.2可得

$$\dot{U}_1 - \dot{U}_2 = (R + jX) \dot{I} \quad (3.4)$$

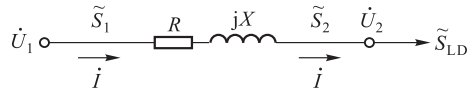


图 3.2 网络元件的一相等值电路

由复功率表示式 $\tilde{S}_2 = \dot{U}_2 \dot{I}^* = P_2 + jQ_2$ 可得到

$$\dot{I} = \frac{P_2 - jQ_2}{U_2^*} \quad (3.5)$$

将式(3.5)代入式(3.4)后得到

$$\dot{U}_1 - \dot{U}_2 = \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2^*} + j \frac{P_2 X - Q_2 R}{U_2^*} \quad (3.6)$$

当网络元件末端 \dot{U}_2 、 P_2 、 Q_2 已知时,以 \dot{U}_2 为参考相量,即 $\dot{U}_2 = U_2 \angle 0^\circ$,首端电压 \dot{U}_1 为

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= U_2 + \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} + j \frac{P_2 X - Q_2 R}{U_2} \\ &= U_2 + \Delta U_2 + j\delta U_2 \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U_2)^2 + (\delta U_2)^2} \quad \delta = \arctan \frac{\delta U_2}{U_2 + \Delta U_2}$$

式中, ΔU_2 和 δU_2 分别称为电压降落的纵分量和横分量, δ 为首末端电压的相位差。

上述关系可用相量图表示,如图 3.3 所示,图中 \overline{AB} 就是电压降相量 $(R+jX)\dot{I}$, 电压降相量的两个分量分别为 \overline{AC} 和 \overline{CB} , 其大小为 $AC = \Delta U_2$, $CB = \delta U_2$ 。

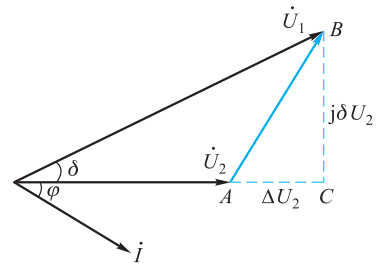


图 3.3 电压降落相量图

当网络元件首端 \dot{U}_1 、 P_1 、 Q_1 已知时,以 \dot{U}_1 为参考相量,即 $\dot{U}_1 = U_1 \angle 0^\circ$,同样可得到

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_2 &= \dot{U}_1 - \frac{P_1 R + Q_1 X}{U_1} - j \frac{P_1 X - Q_1 R}{U_1} \\ &= U_1 - \Delta U_1 - j\delta U_1 \\ U_2 &= \sqrt{(U_1 - \Delta U_1)^2 + (\delta U_1)^2} \\ \delta &= \arctan \frac{\delta U_1}{U_1 - \Delta U_1} \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

应用上面两组公式时需注意:

- (1) 由于参考轴不同,同一个电压降落的两个分量也不同,即 $\Delta U_1 \neq \Delta U_2$, $\delta U_1 \neq \delta U_2$ 。
- (2) 使用公式计算电压降落的纵、横分量时,应用同一点的电压和功率,功率用的是环节首

端或环节末端的功率,所谓环节是指电流不变的单元。近似计算时电压可用额定电压代替。

(3) 上面两组公式虽然是以一相等值电路推导的,但用三相功率、线电压代入等式仍成立,无论单相或三相电路,阻抗均为一相参数。

(4) 近似计算时,可忽略电压降落的横分量。

2. 电压损耗、电压偏移

电压损耗:电力网两点电压的代数差,用 ΔU 表示,如图 3.4 所示。可见

$$\Delta U = U_1 - U_2 = \overline{AD}$$

当 δ 角较小时, $AC \approx AD$, 所以可近似地认为电压损耗等于电压降落的纵分量。

电压偏移:电力网中,某点的实际电压同网络该处的额定电压之差,可用偏差表示,也可用额定电压的百分比表示

$$\text{电压偏移}(\%) = \frac{U - U_N}{U_N} \times 100\% \quad (3.9)$$

在讨论电力网的电压水平时,电压损耗和电压偏移是两个常用的概念。为了便于比较线路首、末端电压偏差的大小,在电力系统设计时常采用电压损耗百分数,即电压损耗与相应线路的额定电压相比的百分数,一条线路的电压损耗百分数在线路通过最大负荷时一般不应超过 10%。而电压偏移直接反映供电电压的质量。

3.1.3 功率损耗

电力网在传输功率的过程中要在输电线路和变压器上产生功率损耗。功率损耗由两部分组成:一部分是在网络元件阻抗上产生的损耗,这部分损耗随传输功率的增大而增大;另一部分是在网络元件导纳上产生的损耗,可近似认为只与电压有关,与传输功率无关。输电线路和变压器的等值电路如图 3.5 所示。

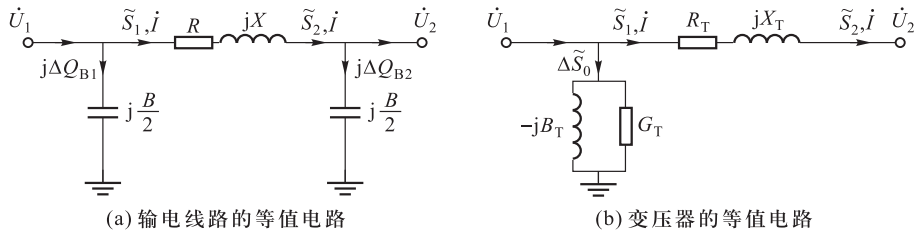


图 3.5 输电线路和变压器的等值电路

1. 阻抗中的功率损耗

电流在输电线路阻抗上的功率损耗为

$$\Delta \tilde{S}_L = I^2(R + jX) = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2}(R + jX) = \Delta P_L + j\Delta Q_L \quad (3.10)$$

或

$$\Delta \tilde{S}_L = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_1^2} (R + jX) \quad (3.11)$$

电流在变压器阻抗上的功率损耗的计算公式与式(3.10)、式(3.11)相似,只需将两式中的线路阻抗换成变压器阻抗即可。

2. 导纳中的功率损耗

(1) 输电线路

输电线路由于忽略了电导,只有电容产生的无功损耗 ΔQ_B ,此无功损耗为容性无功功率,首、末端无功损耗分别为

$$\Delta Q_{B1} = -\frac{1}{2}BU_1^2, \quad \Delta Q_{B2} = -\frac{1}{2}BU_2^2$$

近似计算时, U_1 、 U_2 常用额定电压 U_N 代替。

(2) 变压器

$$\Delta \tilde{S}_0 = G_T U_1^2 + jB_T U_1^2$$

实际计算时,变压器的励磁损耗可直接根据空载试验数据确定

$$\Delta \tilde{S}_0 = \Delta P_0 + j \frac{I_0 \%}{100} S_N \quad (3.12)$$

对于 35 kV 以下的电力网,在简化计算中常将变压器的励磁功率略去。需要说明的是本节公式中功率的单位为 MW、Mvar,电压为 kV,阻抗为 Ω ,导纳为 S。

3.1.4 运算负荷功率和运算电源功率

进行电力网的潮流计算时,通常先给出电力网的等值电路,然后对发电厂和变电所进行简化处理,得到一个只有线路阻抗和集中负荷的简化的等值电路,为此引入运算电源功率和运算负荷功率。

所谓运算电源功率,实际上是发电厂高压母线输入系统的等值功率,它等于发电机机压母线送出的功率,减去变压器阻抗、导纳的功率损耗,加上发电厂高压母线所连线路导纳中无功功率损耗的一半,如图 3.6(a) 所示,设发电机送出功率为 \tilde{S}_1 ,变压器阻抗、导纳的功率损耗分别为 $\Delta \tilde{S}$ 、 $\Delta \tilde{S}_0$,线路导纳功率为 Q_c ,则运算电源功率 \tilde{S}_2 为

$$\begin{aligned} \tilde{S}_2 &= \tilde{S}_1 - \Delta \tilde{S} - \Delta \tilde{S}_0 - \left(-j \frac{Q_c}{2} \right) \\ &= \tilde{S}_1 - \Delta \tilde{S} - \Delta \tilde{S}_0 + j \frac{Q_c}{2} \end{aligned} \quad (3.13)$$

所谓运算负荷功率,实际上是变电所高压母线从系统吸取的等值功率,它等于变电所二次侧的集中负荷功率,加上变压器阻抗、导纳的功率损耗,减去变电所高压母线所连线路导纳中无功功率的一半,如图 3.6(b) 所示,运算负荷功率 \tilde{S}_1 为

$$\begin{aligned}\tilde{S}_1 &= \tilde{S}_2 + \Delta\tilde{S} + \Delta\tilde{S}_0 + \left(-j\frac{Q_c}{2}\right) \\ &= \tilde{S}_2 + \Delta\tilde{S} + \Delta\tilde{S}_0 - j\frac{Q_c}{2}\end{aligned}\quad (3.14)$$

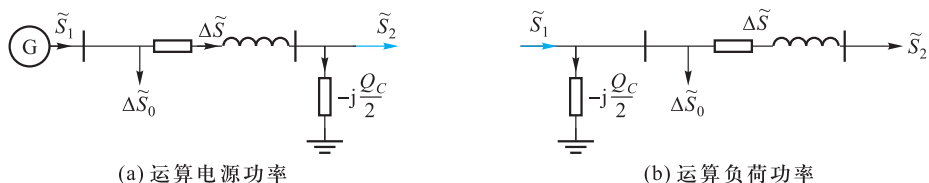


图 3.6 运算电源功率和运算负荷功率

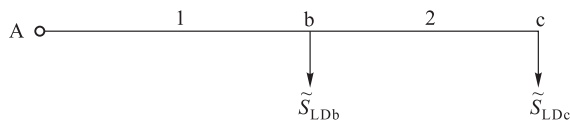
在计算运算电源功率和运算负荷功率时,变压器和线路电纳的无功功率都是按额定电压计算的。

3.2 开式网络电压和功率分布计算

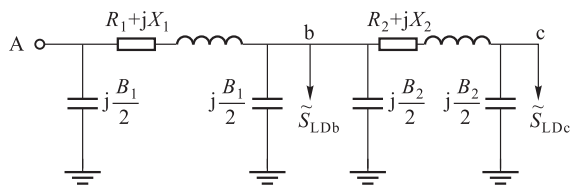
开式网络是电力网中结构最简单的一种,网络中任何一个负荷点都只能由一个方向获得电能。开式网络可分为:同一电压等级的开式网络和多级电压开式网络。

3.2.1 同一电压等级开式网络的计算

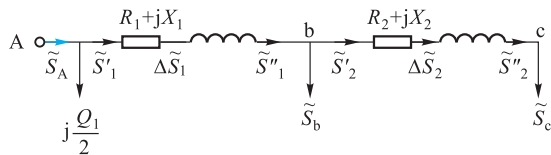
图 3.7(a)所示网络为供电点 A 通过馈电干线向负荷点 b 和 c 供电,各负荷点功率已知,网络的额定电压为 U_N 。



(a) 系统图



(b) 等值电路



(c) 化简后的等值电路

图 3.7 开式网络及其等值电路

进行开式网络计算时,首先确定网络元件的参数,并绘出其等值电路,如图 3.7(b)所示,然后将等值电路化简为如图 3.7(c)所示,图中

$$\left. \begin{aligned} \tilde{S}_c &= \tilde{S}_{LDc} - j \frac{B_2}{2} U_N^2 \\ \tilde{S}_b &= \tilde{S}_{LDb} - j \frac{B_1}{2} U_N^2 - j \frac{B_2}{2} U_N^2 \\ Q_1 &= B_1 U_N^2 \end{aligned} \right\} \quad (3.15)$$

在电力网的实际计算中,常见的有以下两种类型。

1. 已知同一端的电压和功率

这种类型比较简单,多数是已知末端电压和功率,求首端电压和功率。针对图 3.7,已知 \tilde{S}_{LDc} 、 \dot{U}_c , 求 \tilde{S}_A 、 \dot{U}_A , 计算过程如下:

$$\begin{aligned} \tilde{S}_2'' &= \tilde{S}_c \\ \Delta \tilde{S}_2 &= \left(\frac{P_2''^2 + Q_2''^2}{U_c^2} \right) (R_2 + jX_2) \\ &= \frac{P_2''^2 + Q_2''^2}{U_c^2} R_2 + j \frac{P_2''^2 + Q_2''^2}{U_c^2} X_2 \\ \tilde{S}_2' &= \tilde{S}_2'' + \Delta \tilde{S}_2 \\ \tilde{S}_1'' &= \tilde{S}_2' + \tilde{S}_b \\ \Delta U_2 &= \frac{P_2'' R_2 + Q_2'' X_2}{U_c}, \quad \delta U_2 = \frac{P_2'' X_2 - Q_2'' R_2}{U_c} \\ U_b &= \sqrt{(U_c + \Delta U_2)^2 + (\delta U_2)^2} \end{aligned}$$

对于第 1 段线路

$$\begin{aligned} \Delta \tilde{S}_1 &= \frac{P_1''^2 + Q_1''^2}{U_b^2} (R_1 + jX_1) \\ \tilde{S}_1' &= \tilde{S}_1'' + \Delta \tilde{S}_1 \\ \tilde{S}_A &= \tilde{S}_1' - j \frac{Q_1}{2} \\ \Delta U_1 &= \frac{P_1'' R_1 + Q_1'' X_1}{U_b} \\ \delta U_1 &= \frac{P_1'' X_1 - Q_1'' R_1}{U_b} \\ U_A &= \sqrt{(U_b + \Delta U_1)^2 + (\delta U_1)^2} \end{aligned}$$

可以看出,这种类型的解题思路,是由末端向首端逐段推算,并且各点的功率和电压计算同时进行。

2. 已知不同端的电压和功率

这种类型的计算略为复杂,多数是已知末端功率和首端电压,求首端功率和末端电压。解题步骤如下:

第一步 由末端向首端逐段计算功率

在计算网络元件的功率损耗时,公式中的电压以额定电压 U_N 代替。

第二步 由首端向末端逐段计算各点的电压

在计算网络元件的电压损耗时,公式中的电压应代入各点的实际电压。

通过以上两个步骤便完成了第一轮的计算。由于第一步计算时,以额定电压代替各点实际电压,因此计算结果不够精确。为了提高计算精度,可以重复以上的计算,在计算功率损耗时可以利用前一轮第二步所求得的节点电压。

应该说明的是,对于电压为 35 kV 及以下的地方电力网,由于电压较低、线路较短、输送功率较小,因此在潮流计算中可以采取下列简化措施:

- (1) 等值电路中忽略并联导纳支路。
- (2) 不计阻抗中的功率损耗。
- (3) 不计电压降的横分量。
- (4) 在计算公式中用额定电压代替实际电压。

例 3.1 系统图及其等值电路图如图 3.8(a)、(b) 所示。参数已归算至 110 kV 侧,每台变压器额定容量 $S_N = 20 \text{ MV} \cdot \text{A}$, $\Delta P_s = 135 \text{ kW}$, $U_s\% = 10.5$, $\Delta P_0 = 22 \text{ kW}$, $I_0\% = 0.8$, 变压器变比为 110 kV/11 kV, 低压侧负荷 $\tilde{S}_C = (30 + j20) \text{ MV} \cdot \text{A}$, 当始端电压 U_A 为 116 kV 时,求变压器低压侧电压及电压偏移百分数。

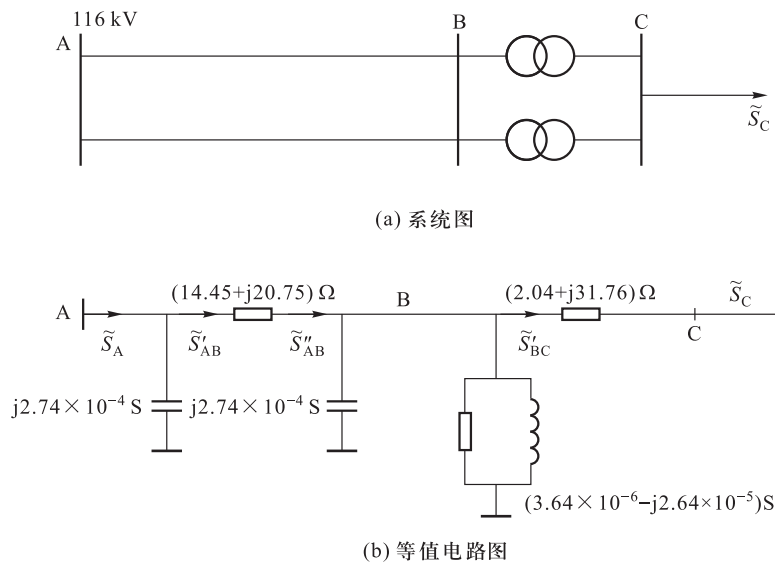


图 3.8 例 3.1 图

解：首先用额定电压 110 kV 计算变压器和线路功率损耗，得线路始端功率

$$\begin{aligned}\tilde{S}_C &= (30 + j20) \text{ MV} \cdot \text{A} = 36.06 \angle 33.69^\circ \text{ MV} \cdot \text{A} \\ \Delta \tilde{S}_T &= \Delta P_T + j\Delta Q_T = 2 \left(\Delta P_s + j \frac{U_s \%}{100} S_N \right) \left(\frac{S_C}{2S_N} \right)^2 \\ &= 2 \times \left(0.135 + j \frac{10.5}{100} \times 20 \right) \times \left(\frac{36.06}{2 \times 20} \right)^2 \text{ MV} \cdot \text{A} \\ &= (0.22 + j3.41) \text{ MV} \cdot \text{A} \\ \tilde{S}'_{BC} &= (30 + j20 + 0.22 + j3.41) \text{ MV} \cdot \text{A} \\ &= (30.22 + j23.41) \text{ MV} \cdot \text{A} \\ \Delta \tilde{S}_0 &= \Delta P'_0 + j\Delta Q'_0 = 2\Delta P_0 + j \frac{I_0 \% \times 2S_N}{100} \\ &= 2 \times 0.022 + j \frac{0.8 \times 2 \times 20}{100} \\ &= (0.044 + j0.32) \text{ MV} \cdot \text{A}\end{aligned}$$

线路末端电容充电功率

$$\begin{aligned}Q_C &= -B_C U_N^2 = -2.74 \times 10^{-4} \times 110^2 \text{ Mvar} \\ &= -3.32 \text{ Mvar}\end{aligned}$$

故
$$\begin{aligned}\tilde{S}''_{AB} &= (30.22 + j23.41 + 0.044 + j0.32 - j3.32) \text{ MV} \cdot \text{A} \\ &= (30.26 + j20.41) \text{ MV} \cdot \text{A}\end{aligned}$$

线路阻抗的功率损耗

$$\begin{aligned}\Delta \tilde{S}_L &= \frac{P''_{AB}{}^2 + Q''_{AB}{}^2}{U_N^2} (R_L + jX_L) \\ &= \frac{30.26^2 + 20.41^2}{110^2} \times (14.45 + j20.75) \text{ MV} \cdot \text{A} \\ &= (1.59 + j2.28) \text{ MV} \cdot \text{A}\end{aligned}$$

故
$$\begin{aligned}\tilde{S}'_{AB} &= \tilde{S}''_{AB} + \Delta \tilde{S}_L = (30.26 + j20.41 + 1.59 + j2.28) \text{ MV} \cdot \text{A} \\ &= (31.85 + j22.69) \text{ MV} \cdot \text{A}\end{aligned}$$

再根据始端电压 U_A ，求 B 和 C 点的电压。

线路 AB 的电压损耗

$$\begin{aligned}\Delta U_{AB} &= \frac{P'_{AB} R_L + Q'_{AB} X_L}{U_A} = \frac{31.85 \times 14.45 + 22.69 \times 20.75}{116} \text{ kV} \\ &= 8.03 \text{ kV}\end{aligned}$$

B 点的电压

$$U_B = U_A - \Delta U_{AB} = (116 - 8.03) \text{ kV} = 107.97 \text{ kV}$$

变压器电压损耗

$$\Delta U_{BC} = \frac{P'_{BC} R_T + Q'_{BC} X_T}{U_B} = \frac{30.22 \times 2.04 + 23.41 \times 31.76}{107.97} \text{ kV} = 7.46 \text{ kV}$$

C点归算至高压侧的电压

$$U'_c = U_B - \Delta U_{BC} = (107.97 - 7.46) \text{ kV} = 100.51 \text{ kV}$$

C点低压侧母线实际电压及其电压偏移百分数

$$U_c = 100.51 \times \frac{11}{110} = 10.05 \text{ kV}$$

$$\frac{U_c - U_N}{U_N} \times 100\% = \frac{10.05 - 10}{10} \times 100\% = 0.5\%$$

例 3.2 图 3.9(a) 为额定电压为 10 kV 的配电线路, 已知数据示于图中, 若各负荷功率因数 $\cos \varphi = 0.8$, 试计算线路的最大电压损耗。

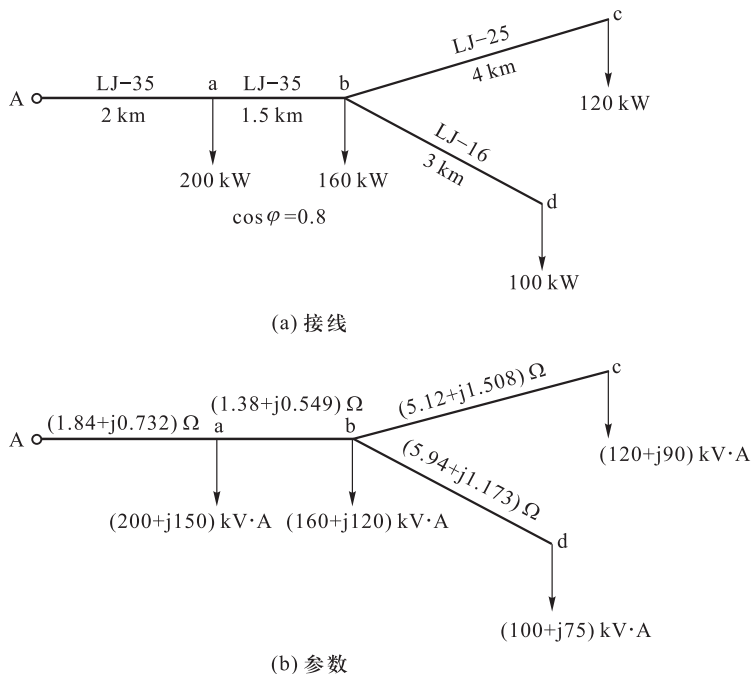


图 3.9 例 3.2 图

解: 参数计算结果及等值电路如图 3.9(b) 所示。据各负荷的 P 及 $\cos \varphi$, 可求得各负荷的复功率分别为

$$\tilde{S}_a = P_a + jQ_a = (200 + j150) \text{ kV} \cdot \text{A}$$

$$\tilde{S}_b = P_b + jQ_b = (160 + j120) \text{ kV} \cdot \text{A}$$

$$\tilde{S}_c = P_c + jQ_c = (120 + j90) \text{ kV} \cdot \text{A}$$

$$\tilde{S}_d = P_d + jQ_d = (100 + j75) \text{ kV} \cdot \text{A}$$

功率分布为

$$\begin{aligned}\tilde{S}_{bc} &= \tilde{S}_c = (120 + j90) \text{ kV} \cdot \text{A} \\ \tilde{S}_{bd} &= \tilde{S}_d = (100 + j75) \text{ kV} \cdot \text{A} \\ \tilde{S}_{ab} &= \tilde{S}_{bc} + \tilde{S}_{bd} + \tilde{S}_b = [(120 + 100 + 160) + j(90 + 75 + 120)] \text{ kV} \cdot \text{A} \\ &= (380 + j285) \text{ kV} \cdot \text{A} \\ \tilde{S}_{Aa} &= \tilde{S}_{ab} + \tilde{S}_a = [(380 + 200) + j(285 + 150)] \text{ kV} \cdot \text{A} \\ &= (580 + j435) \text{ kV} \cdot \text{A}\end{aligned}$$

计算最大电压损耗

$$\begin{aligned}\Delta U_{Aa} &= \frac{P_{Aa} R_{Aa} + Q_{Aa} X_{Aa}}{U_N} = \frac{580 \times 1.84 + 435 \times 0.732}{10} \text{ V} = 138.6 \text{ V} \\ \Delta U_{ab} &= \frac{380 \times 1.38 + 285 \times 0.549}{10} \text{ V} = 68.1 \text{ V} \\ \Delta U_{bc} &= \frac{120 \times 5.12 + 90 \times 1.508}{10} \text{ V} = 75 \text{ V} \\ \Delta U_{bd} &= \frac{100 \times 5.94 + 75 \times 1.173}{10} \text{ V} = 68.2 \text{ V}\end{aligned}$$

因此,最大电压损耗为

$$\begin{aligned}\Delta U_{Ac} &= \Delta U_{Aa} + \Delta U_{ab} + \Delta U_{bc} \\ &= (138.6 + 68.1 + 75) \text{ V} = 281.7 \text{ V} \approx 282 \text{ V}\end{aligned}$$

3.2.2 不同电压等级开式网络的计算

图 3.10(a)所示为两级电压的开式网络。降压变压器的实际变比为 K , 变压器的阻抗折算到高压侧。对于这种网络的潮流计算通常有两种方法。

方法一 把变压器表示成理想变压器形式,如图 3.10(b)所示,阻抗折算到高压侧,变压器的变比标么值为 K_* 。按照前边介绍的方法,根据已知条件,由末端向首端或由首端向末端逐段进行计算。计算时需注意,经理想变压器时,功率不变,但电压需折算。

方法二 把变压器只用折算到高压侧的阻抗 Z'_T 表示,线路 L2 的参数折算到高压侧,如图 3.10(c)所示,参数的折算公式为

$$\left. \begin{aligned}R'_2 &= K^2 R_2 \\ X'_2 &= K^2 X_2 \\ B'_2 &= \frac{1}{K^2} B_2\end{aligned} \right\} \quad (3.16)$$

这时,网络的参数为同一电压等级下的参数,可以按照前边介绍的同一电压级的开式网络计算。计算时需注意,计算的最后结果 U_c 、 U_d 需按变比折算成低压侧的实际电压。

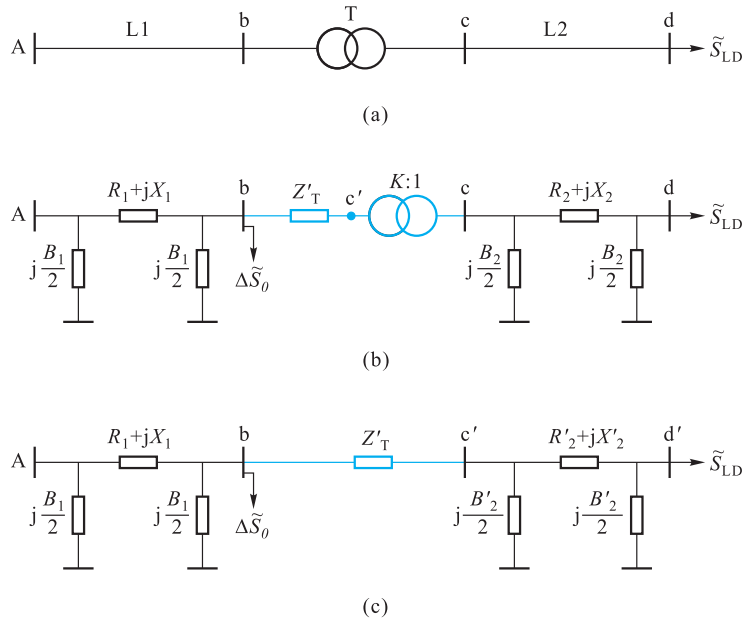


图 3.10 两级电压的开式网络及其等值电路

需要说明的是,两级电压开式网络中若为升压变压器,计算方法与降压变压器相似。

3.3 简单闭式网络的电压和功率分布计算

简单闭式网络是指网络中任何一个负荷点都只能从两个方向获得电能,它包括两端供电网和多级电压环网。

3.3.1 两端供电网的计算

两端供电网是由两个电源给用户或变电所供电,供电可靠性高。它的功率分布通常分两步进行。

1. 两端供电网的初步功率分布

所谓初步功率分布是指忽略各线路上的功率损耗的近似功率分布。图 3.11 (a) 所示为一个有两个电源、两个变电站的两端供电网,两侧电源电压为 \dot{U}_A 、 \dot{U}_B , 变电所的运算负荷为 \tilde{S}_a 、 \tilde{S}_b , 各段线路复阻抗为 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 。设各段传输功率为 \tilde{S}_1 、 \tilde{S}_2 、 \tilde{S}_3 , 假设功率方向如图 3.11 (b) 所示。据基尔霍夫电压和电流定律有

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{U}_B + Z_1 \dot{I}_1 + Z_2 \dot{I}_2 - Z_3 \dot{I}_3 \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_a + \dot{I}_2 \\ \dot{I}_2 + \dot{I}_3 &= \dot{I}_b \end{aligned} \right\} \quad (3.17)$$

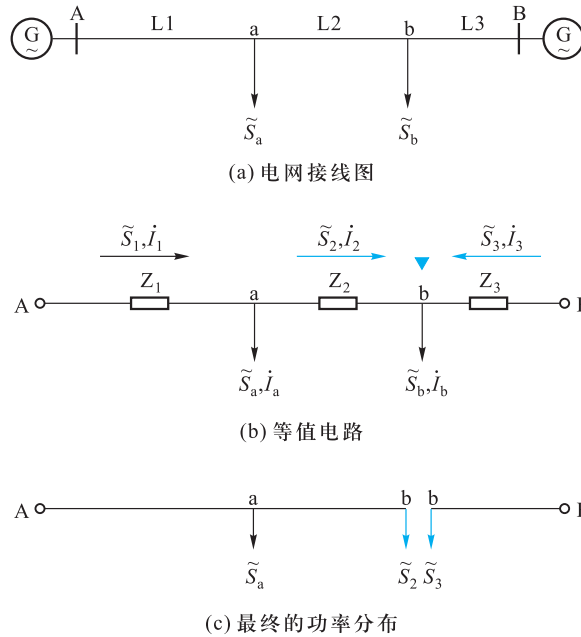


图 3.11 两端供电网

由式(3.17)可解出

$$\left. \begin{aligned} \dot{i}_1 &= \frac{(Z_2 + Z_3)\dot{i}_a + Z_3\dot{i}_b}{Z_1 + Z_2 + Z_3} + \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_B}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \\ \dot{i}_3 &= \frac{Z_1\dot{i}_a + (Z_1 + Z_2)\dot{i}_b}{Z_1 + Z_2 + Z_3} + \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_A}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \end{aligned} \right\} \quad (3.18)$$

据复功率表示式 $\tilde{S} = \dot{U} \dot{I}^*$, 将式(3.18)的各量取共轭值, 取 $\dot{U}_N = U_N \angle 0^\circ$, 然后全式乘以 U_N , 可得

$$\left. \begin{aligned} \tilde{S}_1 &= \frac{(Z_2^* + Z_3^*)\tilde{S}_a + Z_3^*\tilde{S}_b}{Z_1^* + Z_2^* + Z_3^*} + \frac{(\dot{U}_A^* - \dot{U}_B^*)U_N}{Z_1^* + Z_2^* + Z_3^*} = \tilde{S}_{1LD} + \tilde{S}_L \\ \tilde{S}_3 &= \frac{Z_1^*\tilde{S}_a + (Z_1^* + Z_2^*)\tilde{S}_b}{Z_1^* + Z_2^* + Z_3^*} + \frac{(\dot{U}_B^* - \dot{U}_A^*)U_N}{Z_1^* + Z_2^* + Z_3^*} = \tilde{S}_{3LD} - \tilde{S}_L \end{aligned} \right\} \quad (3.19)$$

由式(3.19)可见, 每个电源发出的功率都由两部分组成, 第一部分与各点负荷及负荷到另一电源的阻抗有关, 为供给负荷的功率, 简称为供载功率; 第二部分与电源两端电压向量差有关, 而与负荷无关, 简称为循环功率。

需要说明的是, 式(3.19)对于单相和三相系统都适用。由式(3.19)求出供电点的功率后, 即可求出各段线路上的传输功率, 如 $\tilde{S}_2 = \tilde{S}_1 - \tilde{S}_a$ 。然后根据计算的功率值判断出网络中各段功率传

输的实际方向。

在电力网中,功率由两个方向流入的节点称为功率分点,用“▼”号表示。有功功率分点与无功功率分点可能重合,也可能不重合,若不重合时,有功功率分点用“▼”表示,无功功率分点用“▽”表示。无功功率分点通常是环形网中电压最低点,因此应选无功功率分点作为功率分点。在图 3.11(b)中,假设实际方向如图所示,则 b 点即为功率分点。

2. 两端供电网的最终功率分布

对于两端供电网,当计算初步潮流分布后,从功率分点处将网络打开,变成两个开式电力网络。如图 3.11(c)所示,假设将功率分点处的负荷 \tilde{S}_b 分成 \tilde{S}_2 和 \tilde{S}_3 两部分,分别作为两个开式网络的末端负荷,然后按照开式网络功率分布的计算方法,计算考虑功率损耗的功率分布。在计算功率损耗时,网络中各点的未知电压可用线路额定电压代替。当有功功率分点和无功功率分点不一致时,常选电压较低的分点将网络打开。

关于两端供电网功率分布的几点说明:

(1) 当两端供电网两端电压相等时,就得到环网,因此可说环网是两端供电网的特例。同一电压等级的环网中无循环功率。

(2) 对于电压等级为 35 kV 及以下的两端供电地方网,由于可以忽略阻抗和导纳中的功率损耗,因此初步潮流分布也是最终潮流分布。

(3) 从上面计算供电点输出功率的公式可见,由于公式中的功率、电压、阻抗都是复数,因此需进行复杂的复数运算,通常称为复功率法。这种运算在某些特殊情况下可以简化。

当电力网各段线路的电抗与电阻的比值相等时,称为近似均一网。式(3.19)的第一项,即供电功率可简化为

$$\begin{aligned}\tilde{S}_{1LD} &= \frac{(R_2+R_3)P_a+R_3P_b}{R_1+R_2+R_3} + j \frac{(R_2+R_3)Q_a+R_3Q_b}{R_1+R_2+R_3} \\ \tilde{S}_{3LD} &= \frac{R_1P_a+(R_1+R_2)P_b}{R_1+R_2+R_3} + j \frac{R_1Q_a+(R_1+R_2)Q_b}{R_1+R_2+R_3}\end{aligned}\quad (3.20)$$

可见,在均一网中有功功率和无功功率的分布彼此无关,并且只利用各线段的电阻(或电抗)分别计算。

当电力网各段线路单位长度的阻抗值相等时,称为均一网。式(3.20)可进一步简化为

$$\begin{aligned}\tilde{S}_{1LD} &= \frac{\sum_{i=1}^k \tilde{S}_i l_i}{l_\Sigma} = \frac{\sum_{i=1}^k P_i l_i}{l_\Sigma} + j \frac{\sum_{i=1}^k Q_i l_i}{l_\Sigma} \\ \tilde{S}_{3LD} &= \frac{\sum_{i=1}^k \tilde{S}_i l'_i}{l_\Sigma} = \frac{\sum_{i=1}^k P_i l'_i}{l_\Sigma} + j \frac{\sum_{i=1}^k Q_i l'_i}{l_\Sigma}\end{aligned}\quad (3.21)$$

式中, l_Σ 为整条线路的总长度, l_i 、 l'_i 分别为从第 i 个负荷点到供电点 B、A 的线路长度。可见,这种均一网,有功功率和无功功率分布只由线路长度来决定。

例 3.3 对图 3.12 (a) 所示环形等值网络进行潮流计算。图中各线路的复阻抗为 $Z_1 = (10+j17.32) \Omega$, $Z_2 = (20+j34.6) \Omega$, $Z_3 = (25+j43.3) \Omega$, $Z_4 = (10+j17.3) \Omega$, 各点的运算负荷为 $\tilde{S}_2 = (90+j40) \text{ MV} \cdot \text{A}$, $\tilde{S}_3 = (50+j30) \text{ MV} \cdot \text{A}$, $\tilde{S}_4 = (40+j15) \text{ MV} \cdot \text{A}$, 且 $U_1 = 235 \text{ kV}$ 。

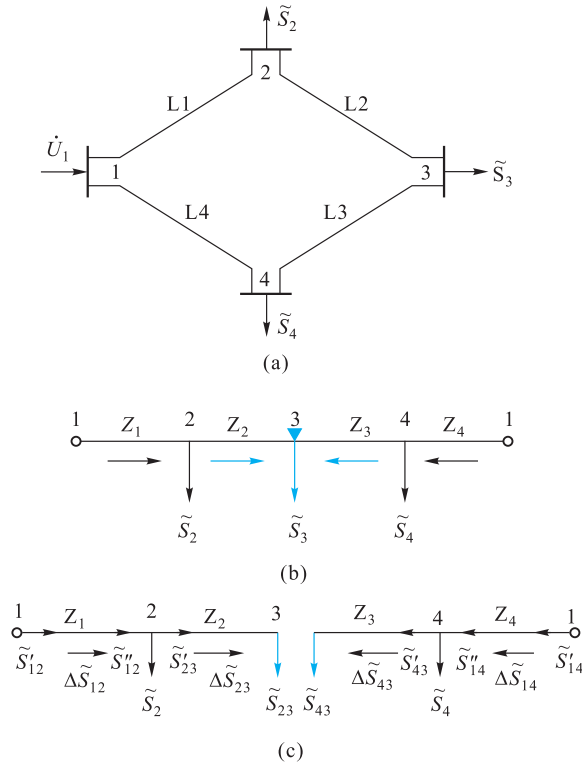


图 3.12 例 3.3 图

解: (1) 求初步功率分布

从电源点 1 处拆开网络, 如图 3.12(b) 所示。这是两端电源电压相等的两端供电网。

$$\tilde{S}_{12} = \frac{\tilde{Z}_4 \tilde{S}_4 + (\tilde{Z}_3 + \tilde{Z}_4) \tilde{S}_3 + (\tilde{Z}_2 + \tilde{Z}_3 + \tilde{Z}_4) \tilde{S}_2}{\tilde{Z}_1 + \tilde{Z}_2 + \tilde{Z}_3 + \tilde{Z}_4}$$

因为该网络中

$$\begin{aligned} \frac{X_1}{R_1} &= \frac{17.32}{10} = 1.732 & \frac{X_2}{R_2} &= \frac{34.6}{20} = 1.73 \\ \frac{X_3}{R_3} &= \frac{43.3}{25} = 1.732 & \frac{X_4}{R_4} &= \frac{17.3}{10} = 1.73 \end{aligned}$$

它们已近乎相等, 所以可按均一网的简化公式进行计算。

$$\begin{aligned}
\tilde{S}_{12} &= \frac{\sum_{i=1}^4 P_i R_i}{R_\Sigma} + j \frac{\sum_{i=1}^4 Q_i R_i}{R_\Sigma} \\
&= \left[\frac{40 \times 10 + 50 \times (10 + 25) + 90 \times (10 + 25 + 20)}{10 + 20 + 25 + 10} \right. \\
&\quad \left. + j \frac{15 \times 10 + 30 \times 35 + 40 \times 55}{10 + 20 + 25 + 10} \right] \text{ MV} \cdot \text{A} \\
&= (109.23 + j52.31) \text{ MV} \cdot \text{A} \\
\tilde{S}_{14} &= \frac{\sum PR}{R_\Sigma} + j \frac{\sum QR}{R_\Sigma} \\
&= \left[\frac{90 \times 10 + 50 \times (10 + 20) + 40 \times (10 + 20 + 25)}{10 + 20 + 25 + 10} \right. \\
&\quad \left. + j \frac{40 \times 10 + 30 \times 30 + 15 \times 55}{10 + 20 + 25 + 10} \right] \text{ MV} \cdot \text{A} \\
&= (70.77 + j32.69) \text{ MV} \cdot \text{A} \\
\tilde{S}_{23} &= \tilde{S}_{12} - \tilde{S}_2 = [(109.23 + j52.31) - (90 + j40)] \text{ MV} \cdot \text{A} \\
&= (19.23 + j12.31) \text{ MV} \cdot \text{A} \\
\tilde{S}_{43} &= \tilde{S}_3 - \tilde{S}_{23} = [(50 + j30) - (19.23 + j12.31)] \text{ MV} \cdot \text{A} \\
&= (30.77 + j17.69) \text{ MV} \cdot \text{A}
\end{aligned}$$

3 点为功率分点。

(2) 求最终功率分布,从功率分点 3 开始往两边算

$$\begin{aligned}
\Delta \tilde{S}_{23} &= \frac{P_{23}^2 + Q_{23}^2}{U_N^2} (R_2 + jX_2) = \frac{19.23^2 + 12.31^2}{220^2} (20 + j34.6) \text{ MV} \cdot \text{A} \\
&= (0.215 + j0.373) \text{ MV} \cdot \text{A} \\
\tilde{S}'_{23} &= \tilde{S}_{23} + \Delta \tilde{S}_{23} = (19.23 + j12.31) + (0.215 + j0.373) \text{ MV} \cdot \text{A} \\
&= (19.445 + j12.683) \text{ MV} \cdot \text{A} \\
\tilde{S}''_{12} &= \tilde{S}'_{23} + \tilde{S}_2 = (19.445 + j12.683) + (90 + j40) \text{ MV} \cdot \text{A} \\
&= (109.445 + j52.683) \text{ MV} \cdot \text{A} \\
\Delta \tilde{S}_{12} &= \frac{P_{12}''^2 + Q_{12}''^2}{U_N^2} (R_1 + jX_1) = \frac{109.445^2 + 52.683^2}{220^2} (10 + j17.32) \text{ MV} \cdot \text{A} \\
&= (3.048 + j5.280) \text{ MV} \cdot \text{A} \\
\tilde{S}'_{12} &= \tilde{S}''_{12} + \Delta \tilde{S}_{12} = (109.445 + j52.683) + (3.048 + j5.280) \text{ MV} \cdot \text{A} \\
&= (112.493 + j57.963) \text{ MV} \cdot \text{A} \\
\Delta \tilde{S}_{43} &= \frac{P_{43}^2 + Q_{43}^2}{U_N^2} (R_3 + jX_3) = \frac{30.77^2 + 17.69^2}{220^2} (25 + j43.3) \text{ MV} \cdot \text{A}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= (0.651 + j1.127) \text{ MV} \cdot \text{A} \\
\tilde{S}'_{43} &= \tilde{S}_{43} + \Delta \tilde{S}_{43} = (30.77 + j17.69) + (0.651 + j1.127) \text{ MV} \cdot \text{A} \\
&= (31.421 + j18.817) \text{ MV} \cdot \text{A} \\
\tilde{S}''_{14} &= \tilde{S}'_{43} + \tilde{S}_4 = (31.421 + j18.817) + (40 + j15) \text{ MV} \cdot \text{A} \\
&= (71.421 + j33.817) \text{ MV} \cdot \text{A} \\
\Delta \tilde{S}_{14} &= \frac{P''_{14}{}^2 + Q''_{14}{}^2}{U_N^2} (R_4 + jX_4) = \left[\frac{71.421^2 + 33.817^2}{220^2} (10 + j17.3) \right] \text{ MV} \cdot \text{A} \\
&= (1.29 + j2.232) \text{ MV} \cdot \text{A} \\
\tilde{S}'_{14} &= \tilde{S}''_{14} + \Delta \tilde{S}_{14} = [(71.421 + j33.817) + (1.29 + j2.232)] \text{ MV} \cdot \text{A} \\
&= (72.711 + j36.049) \text{ MV} \cdot \text{A}
\end{aligned}$$

(3) 求各点电压

$$\begin{aligned}
U_2 &= U_1 - \frac{P'_{12}R_1 + Q'_{12}X_1}{U_1} = \left(235 - \frac{112.493 \times 10 + 57.963 \times 17.32}{235} \right) \text{ kV} \\
&= 225.94 \text{ kV} \\
U_3 &= U_2 - \frac{P'_{23}R_2 + Q'_{23}X_2}{U_2} = \left(225.94 - \frac{19.445 \times 20 + 12.683 \times 34.6}{225.94} \right) \text{ kV} \\
&= 222.28 \text{ kV} \\
U_4 &= U_1 - \frac{P'_{14}R_4 + Q'_{14}X_4}{U_1} = \left(235 - \frac{72.711 \times 10 + 36.049 \times 17.3}{235} \right) \text{ kV} \\
&= 229.25 \text{ kV}
\end{aligned}$$

3.3.2 多级电压环网的功率分布

在电力系统中,由几个电压等级组成的环形网,简称多级环网。在多级环网内必然有串联的变压器接入,若串联接入的变压器变比不匹配时,在环网内就会出现附加电动势,形成循环功率。此时,先由环网负荷和阻抗参数求出供载功率,再由附加电动势和环网总阻抗求出循环功率,将两者叠加,即可求出初步潮流分布。

图 3.13 为变比不等的两台升压变压器并联运行时的功率分布。变压器的变比为高压侧抽头电压与低压侧额定电压之比,设变比分别为 K_1 和 K_2 ,忽略变压器的导纳, Z'_{T1} 和 Z'_{T2} 为归算到高压侧的阻抗值。

已知变压器一次侧的电压为 \dot{U}_A ,则变压器二次侧的电压为 $\dot{U}_{a1} = K_1 \dot{U}_A$, $\dot{U}_{a2} = K_2 \dot{U}_A$

由于 $\dot{U}_{a1} \neq \dot{U}_{a2}$,由 A 点拆开的两端供电网的两端电压不等,因此产生循环功率。设循环功率的方向由 a1 经变压器阻抗流向 a2,则循环功率为

$$\tilde{S}_c = \frac{\Delta E^* \dot{U}_N}{Z'^*_{T1} + Z'^*_{T2}} = \frac{(\dot{U}_{a1}^* - \dot{U}_{a2}^*) U_N}{Z'^*_{T1} + Z'^*_{T2}} \quad (3.22)$$

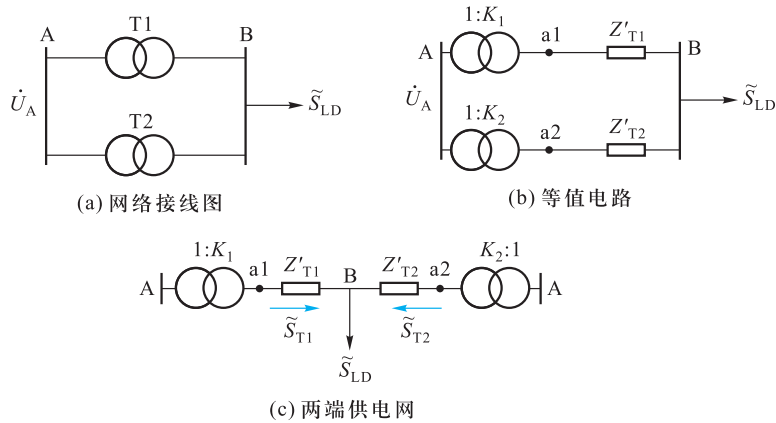


图 3.13 变比不等的两台升压变压器并联运行时的功率分布

式中, U_N 为高压侧的额定电压。

可见, 循环功率是由环路电动势 $\Delta \dot{E}$ 产生的, 因此, 循环功率的方向同环路电势的作用方向一致。当两变压器的变比相等时, $\Delta \dot{E} = 0$, 循环功率也就不存在了。开口处可在高压侧, 也可在低压侧, 但应与阻抗归算的电压级一致。

对图 3.13(c) 所示两端供电网供载功率的计算方法与前边介绍的相同。阻抗归算到哪一电压侧, 环路电动势就用哪个电压侧的值。

例 3.4 某 35 kV 变电所有两台降压变压器并联运行, 如图 3.14(a) 所示, 其归算至高压侧的参数如下: $R_{T1} = 1.11 \Omega$, $X_{T1} = 11.48 \Omega$, $R_{T2} = 7.35 \Omega$, $X_{T2} = 39.81 \Omega$ 。两台变压器均忽略励磁支路, 变电所低压侧通过的总功率为 $\tilde{S} = (8.5 + j5.3) \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。试问: (1) 当变压器的变比为 $K_{T1} = K_{T2} = 35 \text{ kV}/11 \text{ kV}$ 时, 每台变压器通过的功率为多少? (2) 当 $K_{T1} = 34.125 \text{ kV}/11 \text{ kV}$, $K_{T2} = 35 \text{ kV}/11 \text{ kV}$ 时, 每台变压器通过的功率为多少?

解: (1) 当变压器的变比为 $K_{T1} = K_{T2} = 35 \text{ kV}/11 \text{ kV}$ 时, 因两台变压器变比相等, 故无循环功率通过。其等值电路如图 3.14(b) 所示。

$$\begin{aligned} \tilde{S}_{T1} &= \frac{\tilde{Z}_{T2}^* \tilde{S}}{\tilde{Z}_{T1}^* + \tilde{Z}_{T2}^*} = \frac{(7.35 - j39.81)(8.5 + j5.3)}{(1.11 - j11.48) + (7.35 - j39.81)} \text{ MV} \cdot \text{A} \\ &= (6.540 + j4.253) \text{ MV} \cdot \text{A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{S}_{T2} &= \frac{\tilde{Z}_{T1}^* \tilde{S}}{\tilde{Z}_{T1}^* + \tilde{Z}_{T2}^*} = \frac{(1.11 - j11.48)(8.5 + j5.3)}{(1.11 - j11.48) + (7.35 - j39.81)} \text{ MV} \cdot \text{A} \\ &= (1.96 + j1.047) \text{ MV} \cdot \text{A} \end{aligned}$$

验证

$$\tilde{S}_{T1} + \tilde{S}_{T2} = \tilde{S}$$

$$(6.540 + j4.253 + 1.96 + j1.047) \text{ MV} \cdot \text{A} = (8.5 + j5.3) \text{ MV} \cdot \text{A} = \tilde{S}$$

验证无误

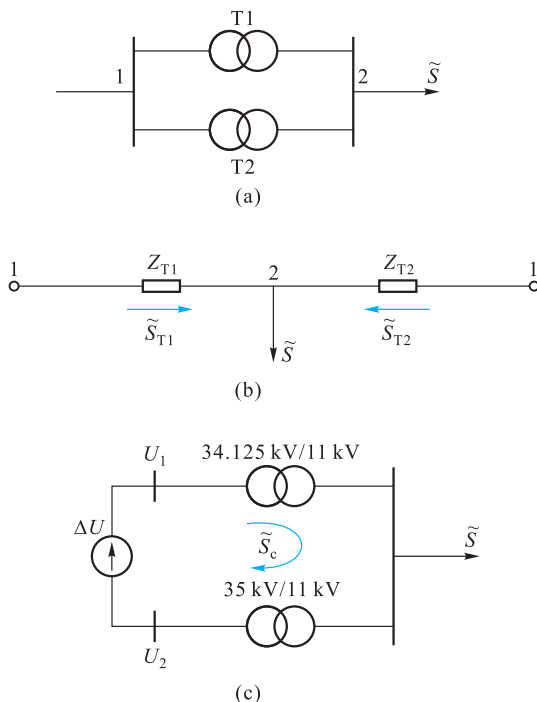


图 3.14 例 3.4 图

(2) 当 $K_{T1} = 34.125 \text{ kV}/11 \text{ kV}$, $K_{T2} = 35 \text{ kV}/11 \text{ kV}$ 时, 如图 3.14(c) 所示。因参数已归算至 35 kV 侧, 如将 35 kV 母线分为上下两段, 由于两台变压器的变比不相等而产生附加电动势。设上母线电压 U_1 为 35 kV, 则下母线电压 $U_2 = 35 \times \frac{11}{34.125} \times \frac{35}{11} \text{ kV} = 35.897 \text{ kV}$ 。

附加电动势

$$\Delta E = U_2 - U_1 = (35.897 - 35) \text{ kV} = 0.897 \text{ kV}$$

且下母线电压高于上母线电压, 产生循环功率, 循环功率的方向同 ΔE 的方向一致, 即顺时针方向。

$$\begin{aligned} \tilde{S}_c &= \frac{\Delta E U_N}{Z_\Sigma^*} = \frac{0.897 \times 35}{(1.11 - j11.48) + (7.35 - j39.81)} \text{ MV} \cdot \text{A} \\ &= (0.098 + j0.596) \text{ MV} \cdot \text{A} \end{aligned}$$

故通过变压器的功率为

$$\begin{aligned} \tilde{S}_{T1} &= [(6.540 + j4.253) + (0.098 + j0.596)] \text{ MV} \cdot \text{A} \\ &= (6.638 + j4.849) \text{ MV} \cdot \text{A} \\ \tilde{S}_{T2} &= [(1.96 + j1.047) - (0.098 + j0.596)] \text{ MV} \cdot \text{A} \\ &= (1.862 + j0.451) \text{ MV} \cdot \text{A} \end{aligned}$$

验证: $\tilde{S}_{T1} + \tilde{S}_{T2} = (6.638 + j4.849 + 1.862 + j0.451) \text{ MV} \cdot \text{A} = (8.5 + j5.3) \text{ MV} \cdot \text{A}$ 正确

对任意多电压级环网,通常先计算环网的等值变比,方法为:各变压器变比均规定为高压侧比低压侧,在环网中任选一起点,任选一环绕方向(多数情况选顺时针方向),沿环网绕行一周,遇到顺环绕方向起升压作用的变压器乘以变比,遇到起降压作用的变压器除以变比,即可求得 k_{Σ} 。然后计算出环路电势和循环功率为:

$$\Delta \dot{E} = \dot{U}_N (k_{\Sigma} - 1)$$

$$\tilde{S}_c = \frac{\Delta \dot{E} \dot{U}_N^*}{Z_{\Sigma}^*}$$

小结

本章阐述了简单电力系统开式网和闭式网潮流计算的解析计算方法。

开式网络潮流计算的已知条件通常为电源点的电压和负荷点的功率,计算时可分两步进行:第一步由负荷端向电源端计算功率分布,计算时注意各点电压用该点网络的额定电压;第二步由电源端向负荷端计算各节点的实际电压,计算时注意确定电压损耗的电压用各点的实际电压。

简单闭式网潮流计算也分两步进行:首先进行的是初步潮流分布,即不计网络的功率损耗,此时每个电源点送出的功率由两部分组成,一部分是供载功率,另一部分是循环功率;其次进行的是最终潮流分布,即在功率分点处将网络打开,变成两个开式网,然后按着开式网的计算方法计算潮流分布。

环网是两端供电网的特例,含有变压器的环网,当变比不匹配时,将产生环路电动势,并产生循环功率,这个内容为本章的难点。

思考题与习题

3.1 什么叫电压降落、电压损耗、电压偏移?

3.2 什么是运算电源功率? 什么是运算负荷功率?

3.3 某一回 10 kV 线路如题 3.3 图所示,已知线路参数 $Z = (2 + j4) \Omega$, 末端电压为 10.3 kV。试求始端电压并作出电压相量图。



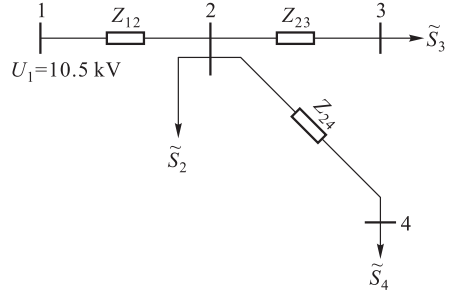
题 3.3 图

3.4 110 kV 双回架空线路,长度为 140 km,导线型号为 LGJ-120,导线每公里的参数: $r_0 = 0.26 \Omega/\text{km}$, $x_0 = 0.42 \Omega/\text{km}$, $b_0 = 2.69 \times 10^{-6} \text{ s}/\text{km}$ 。已知电力线路末端负荷为 $(32 + j15) \text{ MV} \cdot \text{A}$, 末端电压为 106 kV,求始端电压、功率,并作出电压相量图。

3.5 110 kV 单回架空线路,长度为 90 km,导线型号为 LGJ-95,导线计算外径为 13.7 mm,三相导线几何平均距离为 5 m。已知电力线路末端负荷为 $(14+j9)$ MV·A,始端电压为 116 kV,求末端电压和始端功率。

3.6 长度为 220 km 的 220 kV 单回架空电力线路,电力线路每公里的参数 $r_0=0.108 \Omega/\text{km}$, $x_0=0.42 \Omega/\text{km}$, $b_0=2.66 \times 10^{-6} \text{ S}/\text{km}$ 。线路空载运行,当线路末端电压为 225 kV 时,求:(1) 线路首端的功率因数;(2) 线路首端的电压;(3) 对首、末端电压进行比较,解释原因。

3.7 电网结构如题 3.7 图所示,其额定电压为 10 kV。已知各节点的负荷功率及线路参数:



$$\tilde{S}_2 = (0.3+j0.2) \text{ MV} \cdot \text{A}$$

$$\tilde{S}_3 = (0.5+j0.3) \text{ MV} \cdot \text{A}$$

$$\tilde{S}_4 = (0.2+j0.15) \text{ MV} \cdot \text{A}$$

$$Z_{12} = (1.2+j2.4) \Omega$$

$$Z_{23} = (1.0+j2.0) \Omega$$

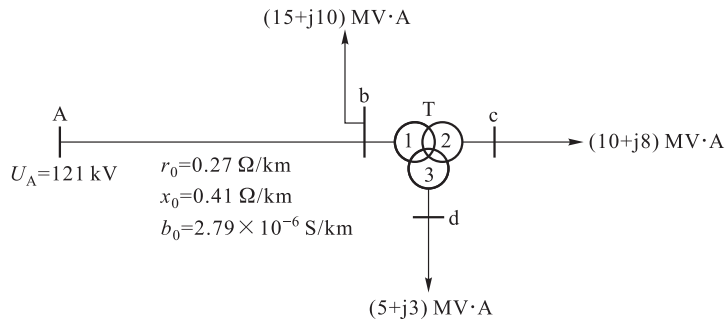
$$Z_{24} = (1.5+j3.0) \Omega$$

题 3.7 图

试计算功率和电压。

3.8 某架空电力线路,已知导线型号为 LGJ-185,长度为 100 km,导线计算外径为 19 mm,线路末端负荷为 $(14+j9)$ MV·A。该电力线路由 110 kV 升至 220 kV 运行,假设升压后导线截面和负荷大小保持不变,导线水平排列,升高电压前后线间距离由 4 m 增加到 5.5 m。试问:升压后该电力线路的功率损耗减少了多少? 电压损耗的百分数减少了多少?

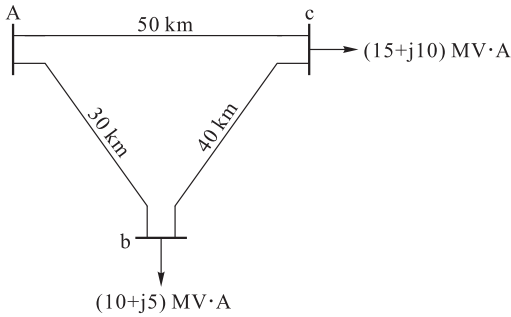
3.9 如题 3.9 图所示为一条 100 km 的 110 kV 线路向变电所供电,变电所内有一台 20 MV·A 的三绕组变压器,电压比为 110 kV/38.5 kV/6.3 kV,容量比为 100/100/100, $\Delta P_{S(1-2)} = 142 \text{ kW}$, $\Delta P_{S(2-3)} = 120 \text{ kW}$, $\Delta P_{S(3-1)} = 151 \text{ kW}$, $U_{S(1-2)} \% = 10.5$, $U_{S(2-3)} \% = 6.5$, $U_{S(3-1)} \% = 17.5$, $\Delta P_0 = 39.7 \text{ kW}$, $I_0 \% = 2.85$ 。当线路始端电压 $U_A = 121 \text{ kV}$,试求变电所的中、低压侧母线的电压。



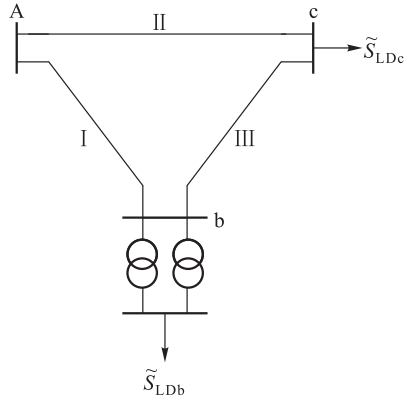
题 3.9 图

3.10 如题 3.10 图所示的简单均一环网(各线路单位长度阻抗相同),各线路长度和 b、c 节点所带负荷功率标于图中,求该网络的无功功率分点。

3.11 如题 3.11 图所示闭式网, A 为某发电厂高压母线, 其运行电压为 118 kV, 各元件参数如下: 线路参数 $Z_I = j16 \Omega$, $Z_{II} = j13 \Omega$, $Z_{III} = j17 \Omega$, 忽略导线; 变电所 b 的每台变压器归算到高压侧 110 kV 电压级的阻抗 $Z_{Tb} = (2+j30) \Omega$; 励磁功率 $\tilde{S}_{b0} = (0.1+j1.2) \text{ MV} \cdot \text{A}$; 负荷功率 $\tilde{S}_{LDb} = (22+j12) \text{ MV} \cdot \text{A}$, $\tilde{S}_{LDc} = (15+j9) \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。试求电力网的功率分布及降压变电所 b 高压母线的实际电压。



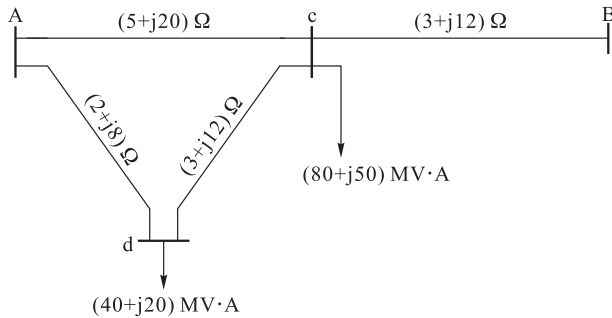
题 3.10 图



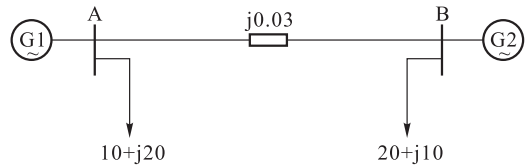
题 3.11 图

3.12 两端供电网的线路阻抗及负荷功率如题 3.12 图所示, 其中电源点电压 $U_A = 115 \angle 0^\circ \text{ kV}$, $U_B = 112 \angle 0^\circ \text{ kV}$, 试求网络的功率分布及各母线电压。

3.13 两台发电机经线路相连, 接线如题 3.13 图所示。已知母线 A、B 的计算负荷分别为 $\tilde{S}_{LDA*} = 10+j20$, $\tilde{S}_{LDB*} = 20+j10$, 线路阻抗 $Z_* = j0.03$, 线路电阻略去不计。(1) 设 $P_{G2*} = 10$, \dot{U}_{A*} 及 \dot{U}_{B*} 的幅值相等, 且等于 1, 计算发电机 1、2 输出的无功功率 Q_{G1*} 和 Q_{G2*} , 以及 \dot{U}_{A*} 和 \dot{U}_{B*} 间的相角差; (2) 若 \dot{U}_{A*} 及 \dot{U}_{B*} 的幅值均等于 1, \dot{U}_{B*} 比 \dot{U}_{A*} 滞后 30° 时, 两台发电机输出的有功功率及无功功率各为多少?



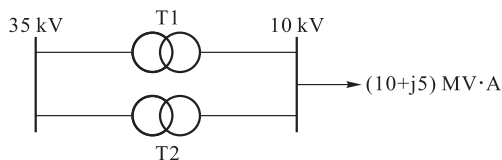
题 3.12 图



题 3.13 图

3.14 某 35 kV 变电所如题 3.14 图所示, 有两台变压器并列运行, T1 额定容量为

5 000 kV·A, T2 额定容量为 4 000 kV·A, 归算至 35 kV 侧阻抗 $Z_{T1} = (6 + j30) \Omega$, $Z_{T2} = (4 + j20) \Omega$ 。试求: (1) 当两台变压器的变比都为 35 kV/11 kV 时, 各变压器分别通过的视在功率; (2) 若变压器 T1 的变比为 33.25 kV/11 kV, 而变压器 T2 的变比为 35 kV/11 kV 时, 再求各变压器通过的视在功率。



题 3.14 图



第 3 章 思考题与习题答案