

教学指导书

第一部分 电力系统稳态分析

第一章电力系统的基本概念

一、基本要求

掌握电力系统的组成和生产过程、电力系统运行的特点和基本要求；了解电力系统负荷的构成；掌握电力系统结线方式、电力系统的电压等级、电力系统中性点运行方式。

二、重点内容

1、电力系统运行的特点

电能具有易于转换、输送，便于实现自动化控制的优点；电能传输速度非常快；电能
在电网中不能大量储存，只能转化成其它能量达到储存的目的（如蓄电池）。

2、电力系统运行的基本要求是：可靠、优质、经济。

3、电力系统结线方式

电力系统结线方式分为无备用和有备用结线两类。无备用结线包括单回路放射式、干
线式和链式网络，有备用结线包括双回路放射式、干线式、链式以及环式和两端供电
网络。

4、电力系统的电压等级

国家标准规定的标准电压等级主要有：3kV、6kV、10kV、35kV、110kV、220kV、
330kV、500kV、750kV……。

5、电力系统中性点运行方式

中性点运行方式主要分为两类：中性点直接接地和不接地，其中中性点不接地还包含
中性点经消弧线圈接地。中性点直接接地系统称为大电流接地系统；中性点不接地系
统称为小电流接地系统。

综合考虑系统供电的可靠性以及设备绝缘费用的因素，在我国 110kV 及以上电压等级
的系统采用中性点直接接地，35kV 及以下电压等级的系统采用中性点不接地或经消
弧线圈接地（35kV 及以下电压等级的系统当单相接地的容性电流较大时，中性点应

装设消弧线圈)。

三、例题分析

例 1-1： 举例说明无备用结线和有备用结线的优缺点。

解：(1) 无备用结线：每一个负荷只能由一回线供电，因此供电可靠性差；其优点在于简单、经济、运行方便。

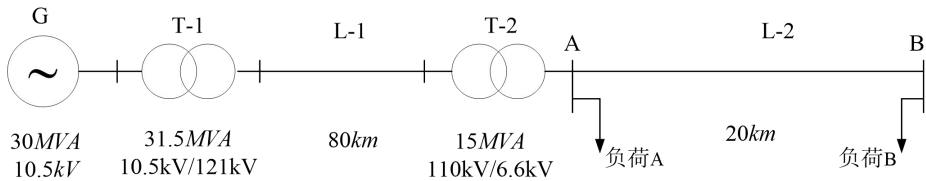


图 1-1 无备用结线

图 1.1 中，发电机额定容量为 $30MVA$ ，输出电压等级为 $10kV$ 。经过升压变压器 T-1，将电压等级升高到 $110kV$ 。L-1 为 $110kV$ 电压等级的高压输电线路，长度为 $80km$ 。T-2 是降压变压器，将电压等级由 $110kV$ 降为 $6kV$ 。L-2 为 $6kV$ 电压等级的输电线路。电网中，A 和 B 为负荷点，都是由发电机 G 向它们供电。

(2) 有备用结线：每一个负荷都能由两回线供电，因此供电可靠性高；其缺点在于不够经济。有备用结线中的环式结线和两端供电网络供电可靠性高，也较为经济，缺点在于运行调度较复杂。

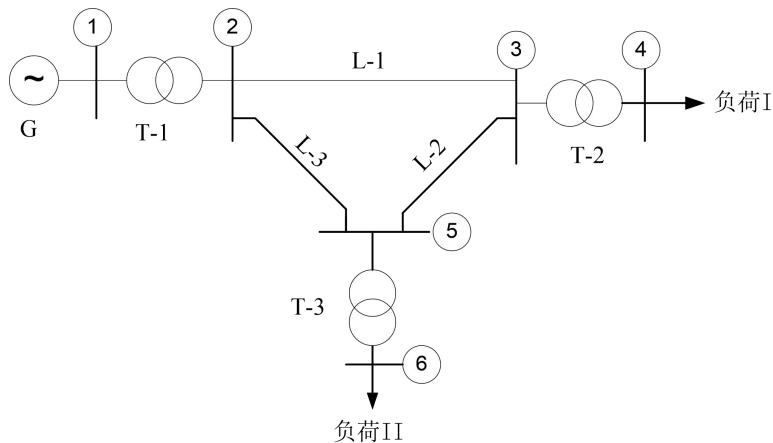


图 1-2 有备用结线

图 1.2 中，节点①是电源节点，节点④和节点⑥是负荷节点。输电线路 L-1、L-2、L-3 构成了一个闭环。这是一个环式结线网络，负荷 I 可以由线路 L-1 和线路 L-2 供电，负荷 II 可以由线路 L-2 和线路 L-3 供电。供电可靠性大大提高。

第二章 电力网络各元件的参数和等值电路

一、基本要求

掌握电力线路的结构；掌握电力线路的电阻、电抗、电导和电纳，电力线路的方程及等值电路；掌握变压器的参数及等值电路，电力网络的等值电路；掌握标么值的计算。

二、重点内容

1、电力线路的参数和等值电路

(1) 电阻
$$R = \frac{\rho}{S} \cdot L \quad \dots\dots\dots (2-1)$$

式中 ρ —— 导线材料的电阻率； S —— 导线的额定截面积； L —— 导线长度。

(2) 电抗
$$X = x_1 \cdot L \quad \dots\dots\dots (2-2)$$

$$x_1 = 0.1445 \lg \frac{D_m}{r} + 0.0157 \quad \dots\dots\dots (2-3)$$

式中 x_1 —— 导线单位长度电抗； D_m —— 几何均距； r —— 导线半径。

(3) 电纳
$$B = b_1 \cdot L \quad \dots\dots\dots (2-4)$$

$$b_1 = \frac{7.58}{\lg \frac{D_m}{r}} \times 10^{-6} \quad \dots\dots\dots (2-5)$$

式中 b_1 —— 导线单位长度电纳。

(4) 电导
$$G \approx 0 \quad \dots\dots\dots (2-6)$$

中等长度电力线路采用 Π 形等值电路，如图 2-1 所示。

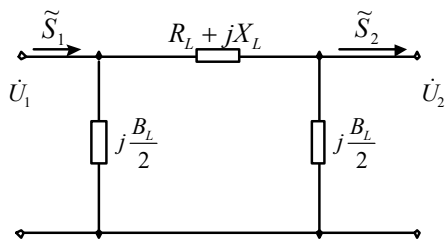


图2-1 电力线路的等值电路

2、双绕组变压器的参数和等值电路

(1) 电阻
$$R_T = \frac{P_k U_N^2}{1000 S_N^2} \dots\dots\dots (2-7)$$

式中 P_k ——变压器的短路损耗 (kW); S_N ——变压器额定容量 (MVA);
 U_N ——变压器额定电压 (kV)。

(2) 电抗
$$X_T = \frac{U_k \% U_N^2}{100 S_N} \dots\dots\dots (2-8)$$

式中 $U_k \%$ ——变压器的短路电压百分数。

(3) 电导
$$G_T = \frac{P_0}{1000 U_N^2} \dots\dots\dots (2-9)$$

式中 P_0 ——变压器的空载损耗 (kW)。

(4) 电纳
$$B_T = \frac{I_0 \% S_N}{100 U_N^2} \dots\dots\dots (2-10)$$

式中 $I_0 \%$ ——变压器的空载电流百分数。

变压器的等值电路有两种, 即 Γ 形等值电路和 T 型等值电路。在电力系统计算中, 通常用 Γ 形等值电路, 如图 2-2 所示。

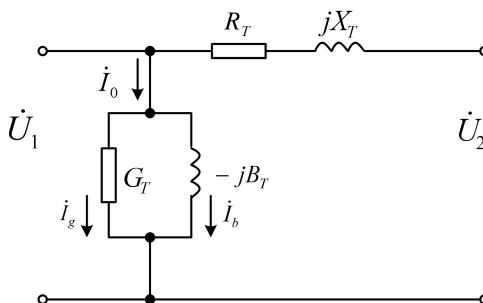


图2-2 双绕组变压器等值电路

3、三绕组变压器的参数和等值电路

计算三绕组变压器参数的方法与计算双绕组变压器时没有本质区别, 但由于三绕组变压器各绕组的容量比有不同组合, 各绕组在铁芯上的排列也有不同方式, 计算时需注意。三个绕组的容量比相同 (100/100/100) 时, 三绕组变压器的参数计算和等值电路如下所示; 三个绕组的容量比不同 (100/100/50、100/50/100) 时, 制造厂提供的短路损耗需要归算, 计算方法参看例 2-3。

(1) 电阻

先根据绕组间的短路损耗 $P_{k(1-2)}$ 、 $P_{k(1-3)}$ 、 $P_{k(2-3)}$ 求解各绕组的短路损耗

$$\left. \begin{aligned} P_{k1} &= \frac{1}{2} [P_{k(1-2)} + P_{k(1-3)} - P_{k(2-3)}] \\ P_{k2} &= \frac{1}{2} [P_{k(1-2)} + P_{k(2-3)} - P_{k(1-3)}] \\ P_{k3} &= \frac{1}{2} [P_{k(1-3)} + P_{k(2-3)} - P_{k(1-2)}] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2-11)$$

然后计算各绕组电阻

$$\left. \begin{aligned} R_{T1} &= \frac{P_{k1} U_N^2}{1000 S_N^2} \\ R_{T2} &= \frac{P_{k2} U_N^2}{1000 S_N^2} \\ R_{T3} &= \frac{P_{k3} U_N^2}{1000 S_N^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2-12)$$

(2) 电抗

先由各绕组之间的短路电压百分数 $U_{k(1-2)}\%$ 、 $U_{k(1-3)}\%$ 、 $U_{k(2-3)}\%$ 求解各绕组的短路电压百分数

$$\left. \begin{aligned} U_{k1}\% &= \frac{1}{2} [U_{k(1-2)}\% + U_{k(1-3)}\% - U_{k(2-3)}\%] \\ U_{k2}\% &= \frac{1}{2} [U_{k(1-2)}\% + U_{k(2-3)}\% - U_{k(1-3)}\%] \\ U_{k3}\% &= \frac{1}{2} [U_{k(1-3)}\% + U_{k(2-3)}\% - U_{k(1-2)}\%] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2-13)$$

然后求各绕组的电抗

$$\left. \begin{aligned} X_{T1} &= \frac{U_{k1}\% U_N^2}{100 S_N} \\ X_{T2} &= \frac{U_{k2}\% U_N^2}{100 S_N} \\ X_{T3} &= \frac{U_{k3}\% U_N^2}{100 S_N} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2-14)$$

(3) 电导、电纳

三绕组变压器导纳的计算与双绕组变压器相同。
三绕组变压器的等值电路如图 2-3 所示。

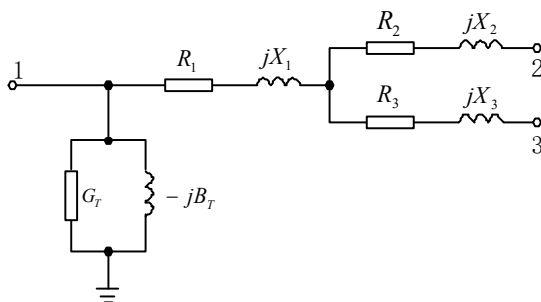


图2-3 三绕组变压器等值电路

4、自耦变压器的参数和等值电路

计算自耦变压器的参数的方法与计算三绕组变压器时相同。自耦变压器三个绕组的容量比不同时，制造厂提供的短路损耗、短路电压百分数都需要归算。

三、例题分析

例 2-1: 一条 110kV 架空线路长 100km，导线为 LGJ-150，水平排列，导线间距为 4m。

- (1) 计算线路每公里参数，并将计算结果与查表结果相对照；(2) 计算线路全长参数，画出等值电路图；(3) 线路产生的容性无功功率是多少？

解：(1) 方法一：用公式计算线路每公里参数：

$$r_0 = \frac{\rho}{S} = \frac{31.5}{150} = 0.21 \Omega / km$$

$$D_m = \sqrt[3]{4 \times 4 \times 8} = 5.04 \text{ m}, \text{ LGJ-150 导线的直径为 } 16.72\text{mm (查表)}$$

$$x_0 = 0.1445 \lg \frac{D_m}{r} + 0.0157 = 0.1445 \lg \frac{5.04 \times 10^3}{8.36} + 0.0157 = 0.417 \Omega / km$$

$$b_0 = \frac{7.58 \times 10^{-6}}{\lg \frac{D_m}{r}} = \frac{7.58 \times 10^{-6}}{\lg \frac{5040}{8.36}} = 2.73 \times 10^{-6} \text{ s / km}$$

方法二：查表得到线路每公里参数：

$$r_0 = 0.21 \Omega / km, \quad x_0 = 0.416 \Omega / km, \quad b_0 = 2.74 \times 10^{-6} \text{ s / km}$$

由两种方法的结果可见：二者误差是很小的，工程中一般采用查表的方法。

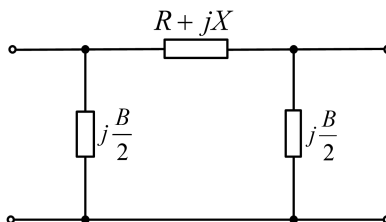
- (2) 线路全长的参数：

$$R = 0.21 \times 100 = 21 \Omega,$$

$$X = 0.416 \times 100 = 41.6 \Omega,$$

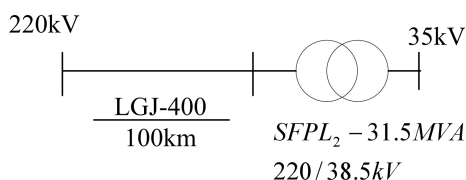
$$B = 2.74 \times 10^{-6} \times 100 = 2.74 \times 10^{-4} \text{ s}$$

画出电力线路的等值电路：



(3) 线路产生的 $Q_c = U^2 B = 110^2 \times 2.74 \times 10^{-4} = 3.3 \text{ MVar}$

例 2-2： 电力网络接线如图所示，计算网络参数并画出网络等值电路。



解：（1）计算线路参数（220kV 电压等级）

根据导线型号 LGJ—400 ， $D_m=6\text{m}$ 查表得出线路每公里长度 r_1 、 x_1 、 b_1 ， 则

$$R_L = 0.078 \times 100 = 7.8 \text{ } \Omega \quad ;$$

$$X_L = 0.396 \times 100 = 39.6 \text{ } \Omega \quad ;$$

$$B_L = 2.91 \times 10^{-6} \times 100 = 2.91 \times 10^{-4} \text{ s} \quad ;$$

$$\frac{1}{2} B_L = 1.455 \times 10^{-4} \text{ s} \quad \circ$$

（2）计算变压器参数（选取变压器的高压侧为电压基本级，将参数归算到高压侧）

根据变压器的型号 SFPL₂—31.5MVA，查表得到变压器实验数据：

$$P_k = 286 \text{ kW}, \quad U_k \% = 14.2, \quad P_0 = 83.7 \text{ kW}, \quad I_0 \% = 2,$$

计算变压器归算到高压侧的参数（ U_N 取变压器高压侧额定电压）：

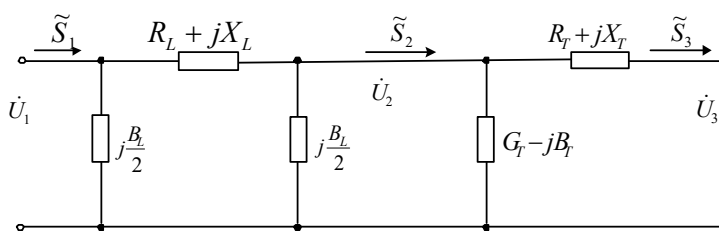
$$R_T = \frac{P_k U_{N1}^2}{1000 S_N^2} = \frac{286 \times 220^2}{1000 \times 31.5^2} = 13.95 \Omega \quad ;$$

$$X_T = \frac{U_K \% U_{N1}^2}{100 S_N} = \frac{14.2 \times 220^2}{100 \times 31.5} = 218.2 \Omega ;$$

$$G_T = \frac{P_0}{1000 U_{N1}^2} = \frac{83.7}{1000 \times 220^2} = 1.73 \times 10^{-6} s ;$$

$$B_T = \frac{I_0 \% S_N}{100 U_{N1}^2} = \frac{2 \times 31.5}{100 \times 220^2} = 13.0 \times 10^{-6} s .$$

(3) 画出电力网络的等值电路



电力网络的等值电路

例 2-3: 已知一台三相三绕组变压器容量比为: 300/300/150 MVA, 三次侧额定电压为 $U_{1N} = 13.8kV$ 、 $U_{2N} = 121kV$ 、 $U_{3N} = 242kV$, 实验数据: $P_{K(1-2)} = 950kW$ 、 $P_{K(1-3)} = 500kW$ 、 $P_{K(2-3)} = 620kW$, $U_{K(1-2)} \% = 13.73$ 、 $U_{K(1-3)} \% = 11.9$ 、 $U_{K(2-3)} \% = 18.64$, $P_0 = 123kW$, $I_0 \% = 0.5$, 计算变压器参数 (归算至高压侧) 并画出等值电路。

解: 由于已知的三绕组变压器三个绕组的容量不同, 因此由变压器制造厂提供的变压器短路实验数据就存在归算的问题。根据标准, 制造厂提供的短路损耗是没有归算到各绕组中通过变压器额定电流时数值, 而制造厂提供的短路电压是归算好的。因此:

(1) 根据容量比归算短路损耗:

$$P'_{K(1-3)} = P_{K(1-3)} \times \left(\frac{300}{150} \right)^2 = 2000kW$$

$$P'_{K(2-3)} = P_{K(2-3)} \times \left(\frac{300}{150} \right)^2 = 2480kW$$

(2) 各绕组的短路损耗: $P_{K1} = \frac{1}{2} (P_{K(1-2)} + P'_{K(1-3)} - P'_{K(2-3)}) = 0.235MW$

$$P_{K2} = \frac{1}{2} (P_{K(1-2)} + P'_{K(2-3)} - P'_{K(1-3)}) = 0.715MW$$

$$P_{K3} = \frac{1}{2}(P_{K(1-3)} + P'_{K(2-3)} - P'_{K(1-2)}) = 1.765MW$$

(3) 各绕组短路电压百分数:

$$U_{K1} = \frac{1}{2}(U_{K(1-2)} + U_{K(1-3)} - U_{K(2-3)}) = 3.495\%$$

$$U_{K2} = \frac{1}{2}(U_{K(1-2)} + U_{K(2-3)} - U_{K(1-3)}) = 10.235\%$$

$$U_{K3} = \frac{1}{2}(U_{K(1-3)} + U_{K(2-3)} - U_{K(1-2)}) = 8.405\%$$

(4) 变压器归算到高压侧参数:

$$Z_1 = R_1 + jX_1 = \frac{0.235 \times 242^2}{300^2} + j \frac{3.495 \times 242^2}{100 \times 300} = 0.153 + j6.823 \Omega$$

$$Z_2 = R_2 + jX_2 = \frac{0.715 \times 242^2}{300^2} + j \frac{10.235 \times 242^2}{100 \times 300} = 0.465 + j19.98 \Omega$$

$$Z_3 = R_3 + jX_3 = \frac{1.765 \times 242^2}{300^2} + j \frac{8.405 \times 242^2}{100 \times 300} = 1.148 + j16.408 \Omega$$

$$Y = G - jB = \frac{123}{1000 \times 242^2} + j \frac{0.5 \times 300}{100 \times 242^2} = (2.1 - j25.6) \times 10^{-6} s$$

第三章简单电力系统的分析和计算

一、基本要求

掌握电力线路中的电压降落和功率损耗的计算、变压器中的电压降落和功率损耗的计算；掌握辐射形网络的潮流分布计算；掌握简单环形网络的潮流分布计算；了解电力网络的简化。

二、重点内容

1、电力线路中的电压降落和功率损耗

图 3-1 中，设线路末端电压为 \dot{U}_2 、末端功率为 $\tilde{S}_2 = P_2 + jQ_2$ ，则

(1) 计算电力线路中的功率损耗

① 线路末端导纳支路的功率损耗：
$$\Delta\tilde{S}_{Y_2} = \left(\frac{Y}{2}\right)^* U_2^2 = -j\frac{B}{2}U_2^2 \quad \dots\dots\dots (3-1)$$

则阻抗支路末端的功率为：
$$\tilde{S}'_2 = \tilde{S}_2 + \Delta\tilde{S}_{Y_2}$$

② 线路阻抗支路中的功率损耗：
$$\Delta\tilde{S}_Z = I^2 Z = \frac{P_2'^2 + Q_2'^2}{U_2^2} (R + jX) \quad \dots\dots (3-2)$$

则阻抗支路始端的功率为：
$$\tilde{S}'_1 = \tilde{S}'_2 + \Delta\tilde{S}_Z$$

③ 线路始端导纳支路的功率损耗：
$$\Delta\tilde{S}_{Y_1} = \left(\frac{Y}{2}\right)^* U_1^2 = -j\frac{B}{2}U_1^2 \quad \dots\dots\dots (3-3)$$

则线路始端的功率为：
$$\tilde{S}_1 = \tilde{S}'_1 + \Delta\tilde{S}_{Y_1}$$

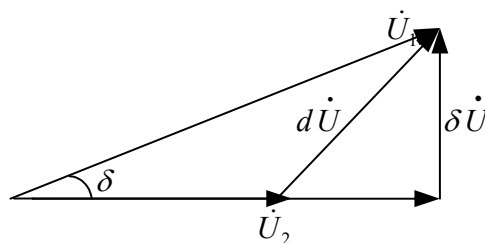
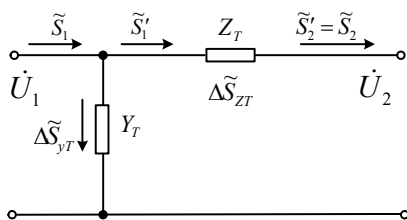


图3-3 变压器的电压和功率

(2) 计算电力线路中的电压降落

选取 \dot{U}_2 为参考向量，如图 3-2。线路始端电压 $\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \Delta U + j\delta U$

其中
$$\Delta U = \frac{P_2' R + Q_2' X}{U_2} \quad ; \quad \delta U = \frac{P_2' X - Q_2' R}{U_2} \quad \dots\dots\dots (3-4)$$

则线路始端电压的大小：
$$U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U)^2 + (\delta U)^2} \dots\dots\dots (3-5)$$

一般可采用近似计算：
$$U_1 \approx U_2 + \Delta U = U_2 + \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} \dots\dots\dots (3-6)$$

2、变压器中的电压降落和电能损耗

图 3-3 中，设变压器末端电压为 \dot{U}_2 、末端功率为 $\tilde{S}_2 = P_2 + jQ_2$ ，则

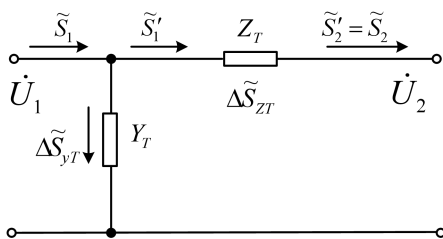


图3-3 变压器的电压和功率

(1) 计算变压器中的功率损耗

① 变压器阻抗支路的功率损耗：

$$\Delta \tilde{S}_{ZT} = I^2 Z_T = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} (R_T + jX_T) \dots\dots (3-7)$$

则变压器阻抗支路始端的功率为： $\tilde{S}'_1 = \tilde{S}_2 + \Delta \tilde{S}_{ZT}$

② 变压器导纳支路的功率损耗：
$$\Delta \tilde{S}_{YT} = Y U_1^2 = (G_T + jB_T) U_1^2 \dots\dots\dots (3-8)$$

则变压器始端的功率为： $\tilde{S}_1 = \tilde{S}'_1 + \Delta \tilde{S}_{YT}$ 。

(2) 计算变压器中的电压降落

变压器始端电压：
$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \Delta U_T + j\delta U_T$$

其中
$$\Delta U_T = \frac{P_2 R_T + Q_2 X_T}{U_2}, \quad \delta U_T = \frac{P_2 X_T - Q_2 R_T}{U_2} \dots\dots\dots (3-9)$$

则变压器始端电压的大小：
$$U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U_T)^2 + (\delta U_T)^2} \dots\dots\dots (3-10)$$

一般可采用近似计算：
$$U_1 \approx U_2 + \Delta U_T = U_2 + \frac{P_2 R_T + Q_2 X_T}{U_2} \dots\dots\dots (3-11)$$

3、辐射形网络潮流计算

潮流 (power flow) 计算是指电力网络中各节点电压、各元件流过的电流或功率等的计算。

辐射形网络潮流计算主要有两种类型：

(1) 已知同一端点的电压和功率求潮流分布，采用**逐段推算法**；

逐段推算法：根据已知端点的电压和功率，逐段推算电网各点电压和功率。参看例 3-1。

(2) 已知不同端点的电压和功率求潮流分布，采用**逐步渐进法**。

逐步渐进法：首先**设已知功率端点的电压**为 $\dot{U}_i^{(0)}$ ，运用该点已知的功率 \dot{S}_i 和 $\dot{U}_i^{(0)}$ 推算电网潮流；再由另一端点已知电压 \dot{U}_j 和求得的功率 $\dot{S}_j^{(0)}$ 推算电网各点电压；以此类推，反复推算，逐步逼近结果。

逐步渐进法的近似算法：首先设电网未知点的电压为 U_N ，运用已知的功率计算电网功率分布；再由另一端点已知电压 U 和求得的各点功率计算电网电压分布。参看例 3-3。

4、环式网络的近似功率分布计算

将最简单的环式网络简化，并将电源节点一分为二得到等值环式网络的等值电路如图 3-4。其两端电压大小相等、相位相同。

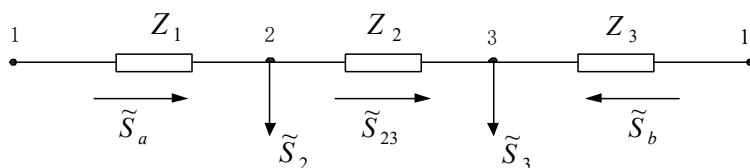


图 3-4 等值环式网络的等值电路

环式网络的近似功率分布：

$$\tilde{S}_a = \frac{\tilde{S}_2 \left(Z_2^* + Z_3^* \right) + \tilde{S}_3 Z_3^*}{Z_1^* + Z_2^* + Z_3^*} \dots\dots\dots (3-12)$$

$$\tilde{S}_b = \frac{\tilde{S}_2 Z_1^* + \tilde{S}_3 \left(Z_1^* + Z_2^* \right)}{Z_1^* + Z_2^* + Z_3^*} \dots\dots\dots (3-13)$$

$$\tilde{S}_{23} = \tilde{S}_a - \tilde{S}_2 \dots\dots\dots (3-14)$$

5、两端供电网络的近似功率分布计算

将最简单的两端供电网络简化，得到两端供电网的等值电路如图 3-5。其两端电压大小不等、相位不同， $\dot{U}_1 \neq \dot{U}_4$ 。

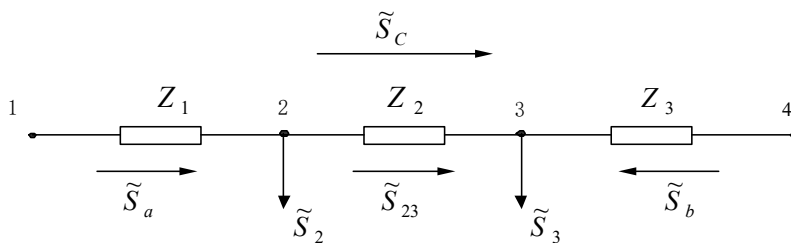


图 3-5 两端供电网的等值电路

由于两端电压 $\dot{U}_1 \neq \dot{U}_4$ ，它们之间存在相量差 $d\dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}_4$ ，就使得由节点 1 到节点 4 产生了一个循环功率，以 \tilde{S}_c 表示

$$\text{循环功率} \quad \tilde{S}_c = \frac{U_N dU^*}{Z_1^* + Z_2^* + Z_3^*} \quad \dots\dots\dots (3-15)$$

两端供电网络中，各线路中流过的功率可以看作是两个功率分量的叠加。其一为两端电压相等时的环式网络的近似功率；另一为循环功率（注意循环功率的方向与 $d\dot{U}$ 的取向有关）。两端供电网络的近似功率分布：

$$\tilde{S}_a = \frac{\tilde{S}_2^* (Z_2^* + Z_3^*) + \tilde{S}_3^* Z_3^*}{Z_1^* + Z_2^* + Z_3^*} + \tilde{S}_c \quad \dots\dots\dots (3-16)$$

$$\tilde{S}_b = \frac{\tilde{S}_2^* Z_1^* + \tilde{S}_3^* (Z_1^* + Z_2^*)}{Z_1^* + Z_2^* + Z_3^*} - \tilde{S}_c \quad \dots\dots\dots (3-17)$$

$$\tilde{S}_{23} = \tilde{S}_a - \tilde{S}_2 \quad \dots\dots\dots (3-18)$$

由此可见，区域性开式网络与区域性闭式网络在计算上的不同点就在于功率分布的计算，后者的功率分布是**分两步完成的**。

当网络各线段的 R/X 值相等时，称之为**均一网络**。这类网络在不计功率损耗影响时，自然功率分布的有功分量和无功分量是互不影响的。这时，他们是按电阻或电抗分布的，即

$$P_A = \frac{\sum_{i=1}^n P_i R_{iB}}{R_\Sigma} \quad Q_A = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i R_{iB}}{R_\Sigma} \quad \dots\dots\dots (3-19)$$

$$P_B = \frac{\sum_{i=1}^n P_i R_{iA}}{R_\Sigma} \quad Q_A = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i R_{iA}}{R_\Sigma} \quad \dots\dots\dots (3-18)$$

将式 (3-18) 中的电阻换为相应的电抗也是正确的，特别是**全网导线截面相同**时，功

率的自然分布按长度分布，即

$$\tilde{S}_A = \frac{\sum_{i=1}^n \tilde{S}_i l_{iB}}{l_\Sigma} \quad \tilde{S}_B = \frac{\sum_{i=1}^n \tilde{S}_i l_{iA}}{l_\Sigma} \quad \dots\dots\dots (3-19)$$

应该注意：环流高鼓功率的计算与网络是否均一无关。

可以证明：在闭式电力网络中，欲使有功功率损耗最小，应使功率分布按电阻分布，即：

$$\tilde{S}_{A-opt} = \frac{\sum_{i=1}^n \tilde{S}_i l_{iB}}{R_\Sigma} \quad \tilde{S}_{B-opt} = \frac{\sum_{i=1}^n \tilde{S}_i l_{iA}}{R_\Sigma} \quad \dots\dots\dots (3-20)$$

由此可见：均一网络功率的自然分布也就是有功损耗最小时的分布。因此，在进行网络规划设计时，应使网络接近均一。对于非均一网络，要达此目的，必须采用一定的措施。

6、地方电力网络的计算

电压为 35kV 及以下的网络称为地方电力网。这种电力网由于其自身的特点（电压较，线路较短，传输功率相对较小，等等），在计算时可大大简化。一般可作如下简化：

- a、可不计线路电容的影响，线路的等值电路仅为一个串联阻抗；
- b、计算功率分布和电压分布时，可不计功率损耗的影响，并用网络额定电压；
- c、计算电压分布时，可不计电压降落横分量（这对 110kV 网络同样适用），这时，电压降落纵分量近似等于电压损耗，即

$$\Delta V \approx \frac{1}{V_N} \sum_{j=1}^n (P_j R_j + Q_j X_j) \approx \sqrt{3} \sum_{j=1}^n (I_j \cos \varphi_j R_j + I_j \sin \varphi_j X_j)$$

式中 $P_j Q_j$ ---- 通过线段 j 负荷功率的有功分量(real power component)和无功分量 (reactive power component)；

$R_j X_j$ ---- 线段 j 的电阻和电抗

$I_j \cos \varphi_j$ ---- 流过线段 j 的负荷电流及功率因数(power factor)

V_N ---- 网络额定电压(rated voltage)

n ---- 计算网络的线段数

- d、有的线段具有较均匀分布的负荷，计算时可用一个集中负荷来代替，其大小等于均匀分布负荷的总和，其位置居均匀分布线段的中点，如图所示。

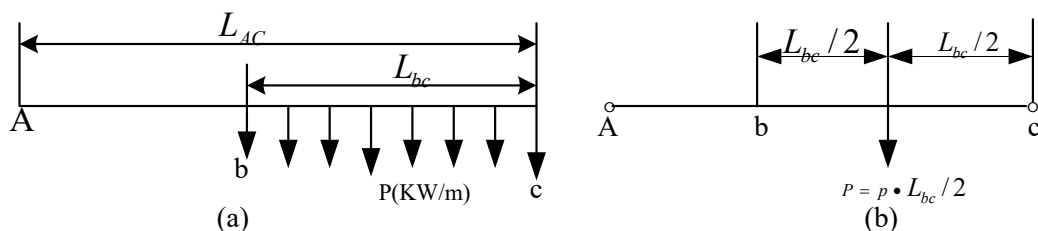


图 3-6 具有均匀分布负荷的地方电力网

(a) 原网络 (b) 等值网络

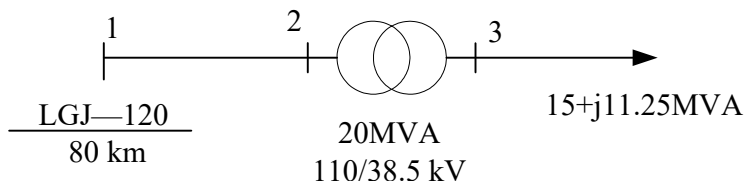
7、电力网络的简化

实际的电力网络是一个较复杂的网络。一般在计算之前，须简化网络的等值电路，即使在利用计算机进行计算时，也须如此。例如，将变电所和发电厂用运算负荷和运算功率代替，将若干电源支路合并为一个等值电源支路，移置中间复负荷，网络结构的等值变换（如星形 \leftrightarrow 三角形网络的等值变换），网络分块，等等。

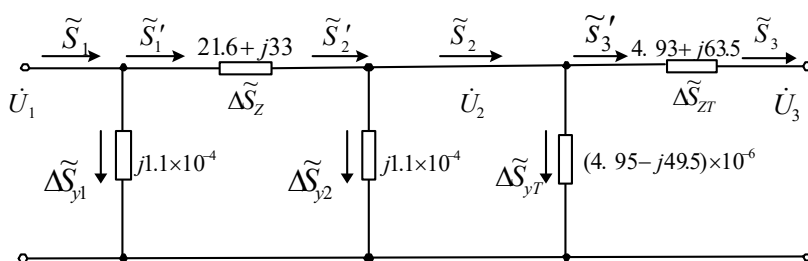
任何简化的计算都有两个过程，其一是简化，其二是还原。所有上述简化的方法皆可以从参考书[1]、[2]、[3]、[4]中找到，这里不再重复。掌握网络简化的技巧对于网络特性的计算和分析是十分有益的。

三、例题分析

例 3-1： 电力网络如图所示。已知末端负荷 $\tilde{S} = 15 + j11.25 \text{MVA}$ ，末端电压 36kV ，计算电网首端功率和电压。



解：(1) 选取 **110kV** 作为电压的基本级，计算网络参数，并画出等值电路。（计算过程略）



电力网络的等值电路

(2) 计算潮流分布

根据画出的电力网络等值电路可见：已知末端功率 $\tilde{S}_3 = 15 + j11.25MVA$ ，将已知末端电压 $36kV$ 归算到电压基本级，则有 $U_3 = 36 \times 110 / 38.5 = 102.85kV$ 。

本网为辐射形电网，并且已知末端的功率和电压，求潮流分布，因此采用逐段推算法进行计算。

① 计算变压器阻抗上的功率损耗

$$\Delta\tilde{S}_{ZT} = \frac{P_3^2 + Q_3^2}{U_3^2} (R_T + jX_T) = \frac{15^2 + 11.25^2}{102.85^2} \times (4.93 + j63.5) = 0.16 + j2.11MVA$$

则变压器阻抗始端功率

$$\tilde{S}'_3 = \tilde{S}_3 + \Delta\tilde{S}_{ZT} = 15 + j11.25 + 0.16 + j2.11 = 15.16 + j13.36MVA$$

② 计算变压器阻抗上的电压损耗

$$\Delta U_T = \frac{P_3 R + Q_3 X}{U_3} = \frac{15 \times 4.93 + 11.25 \times 63.5}{102.85} = 7.67kV$$

则变压器始端电压 $U_2 = U_3 + \Delta U_T = 102.85 + 7.67 = 110.52kV$

③ 计算变压器导纳上的功率损耗

$$\Delta\tilde{S}_{YT} = (G_T + jB_T) U_2^2 = (4.95 + j49.5) \times 10^{-6} \times 110.52^2 = 0.06 + j0.6MVA$$

④ 计算线路末端导纳上的功率损耗

$$\Delta\tilde{S}_{Y2} = -j \frac{B}{2} U_2^2 = -j1.1 \times 10^{-4} \times 110.52^2 = -j1.34MVar$$

则线路阻抗末端的功率

$$\tilde{S}'_2 = \tilde{S}'_3 + \Delta\tilde{S}_{YT} + \Delta\tilde{S}_{Y2} = 15.16 + j13.36 + 0.06 + j0.6 - j1.34 = 15.22 + j12.62MOA$$

⑤ 计算线路阻抗上的功率损耗

$$\Delta \tilde{S}_Z = \frac{P_2'^2 + Q_2'^2}{U_2^2} (R + jX) = \frac{15.22^2 + 12.62^2}{110.52^2} \times (21.6 + j33) = 0.691 + j1.056 \text{ MOA}$$

⑥ 计算线路阻抗上的电压损耗

$$\Delta U = \frac{P_2'R + Q_2'X}{U_2} = \frac{15.22 \times 21.6 + 12.62 \times 33}{110.52} = 6.74 \text{ kV}$$

则线路始端电压 $U_1 = U_2 + \Delta U = 110.52 + 6.74 = 117.26 \text{ kV}$

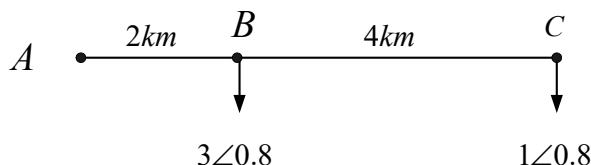
⑦ 计算线路始端导纳上的功率损耗

$$\Delta \tilde{S}_{Y1} = -j \frac{B}{2} U_1^2 = -j1.1 \times 10^{-4} \times 117.26^2 = -j1.51 \text{ MVar}$$

则线路始端功率

$$\tilde{S}_1 = \tilde{S}_2' + \Delta \tilde{S}_Z + \Delta \tilde{S}_{Y1} = 15.22 + j12.62 + 0.691 + j1.056 - j1.51 = 15.91 + j12.16 \text{ MVA}$$

例 3-2: 如图 10kV 三相配电线路。B 点的负荷为 3MW ($\cos \varphi = 0.8$ 感性), 线路末端 C 点负荷为 1MW ($\cos \varphi = 0.8$ 感性)。AB 间线路长 2 km, BC 间线路长 4 km, 线路的参数为: $r_0 = 0.63 \Omega/\text{km}$, $x_0 = 0.4 \Omega/\text{km}$, 忽略电容, 求线路的电压损耗。



解: (1) 计算电力网络参数

$$Z_{AB} = 2 \times (0.63 + j0.4) = 1.26 + j0.8 \Omega$$

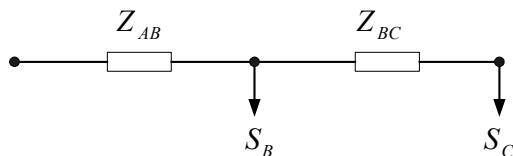
$$Z_{BC} = 4 \times (0.63 + j0.4) = 2.52 + j1.6 \Omega$$

(2) 计算 B 点、C 点的负荷

$$\text{B 点: } P_B = 3 \text{ MW}, \quad Q_B = \frac{P_B}{\cos \varphi} \cdot \sin \varphi = \frac{3}{0.8} \times 0.6 = 2.25 \text{ MVar}$$

$$\text{C 点: } P_C = 1 \text{ MW}, \quad Q_C = \frac{P_C}{\cos \varphi} \cdot \sin \varphi = \frac{1}{0.8} \times 0.6 = 0.75 \text{ MVar}$$

(3) 画出电网的等值电路:



(4) 计算线路 BC 上的电压损耗:

$$\Delta \dot{U}_{BC} = \frac{P_C R_{BC} + Q_C X_{BC}}{U_N} + j \frac{P_C X_{BC} - Q_C R_{BC}}{U_N} = 0.372 - j0.029 \text{ kV}$$

则 B 点电压

$$\dot{U}_B = \dot{U}_C + \Delta \dot{U}_{BC} = 10 + j0 + 0.372 - j0.029 = 10.372 - j0.029 = 10.372 \angle -0.16 \text{ kV}$$

(5) 计算线路 AB 流过的功率:

$$\bar{S} = \bar{S}_B + \bar{S}_C = 3 + j2.25 + 1 + j0.75 = 4 + j3 = 5 \angle 36.87 \text{ MVA}$$

(6) 计算线路 AB 上的电压损耗:

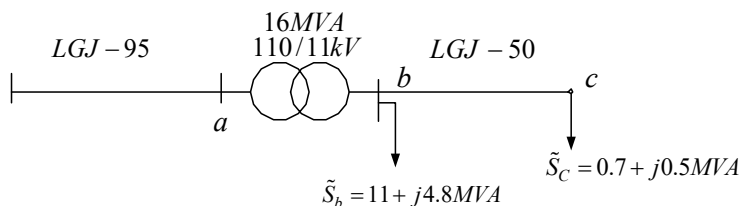
$$\Delta \dot{U}_{AB} = \frac{P \bar{R}_{AB} + Q \bar{X}_{AB}}{U_B} + j \frac{P \bar{X}_{AB} - Q \bar{R}_{AB}}{U_B} = 0.716 - j0.058 \text{ kV}$$

(7) 计算整条线路上的电压损耗

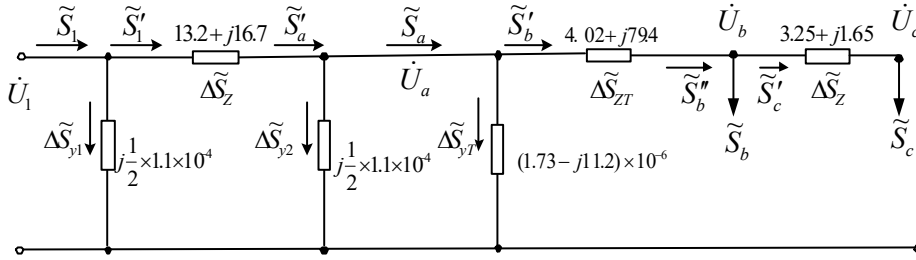
$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{AC} &= \Delta \dot{U}_{AB} + \Delta \dot{U}_{BC} = 0.372 - j0.029 + 0.716 - j0.058 \\ &= 1.088 - j0.087 = 1.091 \angle -4.56 \text{ kV} \end{aligned}$$

以上计算不计线路功率损耗。

例 3-3: 电力网络如图所示。已知始端电压 117 kV, c 点负荷 $\tilde{S}_c = 0.7 + j0.5 \text{ MVA}$, b 点负荷 $\tilde{S}_b = 11 + j4.8 \text{ MVA}$, 计算电网始端功率和末端电压。



解: 1. 选取 110kV 作为电压的基本级, 计算网络参数, 并画出等值电路。(计算过程略)



电力网络的等值电路

2. 计算潮流分布

根据画出的电力网络等值电路可见：已知 c 点负荷 $\tilde{S}_c = 0.7 + j0.5MVA$ ， b 点负荷 $\tilde{S}_b = 11 + j4.8MVA$ ，已知始端电压 $U_1 = 117kV$ 。本网为辐射形电网，并且已知末端功率和始端电压，求潮流分布，因此采用逐步渐近法进行计算。

(1) 先求功率分布： $\tilde{S}_1 \longleftarrow \xrightarrow{\text{设电压为 } U_N} \tilde{S}_c$

$$\tilde{S}_c = 0.7 + j0.5MVA$$

$$\Delta\tilde{S}_Z = \frac{P_c^2 + Q_c^2}{U_N^2} (R + jX) = \frac{0.7^2 + 0.5^2}{110^2} \times (3.25 + j1.65) = 0.02 + j0.01MVA$$

$$\tilde{S}'_c = \tilde{S}_c + \Delta\tilde{S}_Z = 0.7 + j0.5 + 0.02 + j0.01 = 0.72 + j0.51MVA$$

$$\tilde{S}''_b = \tilde{S}'_c + \tilde{S}_b = 0.72 + j0.51 + 11 + j4.8 = 11.72 + j5.31MVA$$

$$\Delta\tilde{S}_{ZT} = \frac{P_b'^2 + Q_b'^2}{U_N^2} (R_T + jX_T) = 0.055 + j1.09MVA$$

$$\tilde{S}'_b = \tilde{S}''_b + \Delta\tilde{S}_{ZT} = 11.77 + j6.4MVA$$

$$\Delta\tilde{S}_{YT} = (G_T + jB_T)U_N^2 = (1.73 + j11.2) \times 10^{-6} \times 110^2 = 0.021 + j0.136MVA$$

$$\Delta\tilde{S}_{Y2} = -j\frac{B}{2}U_N^2 = -j\frac{1}{2} \times 1.1 \times 10^{-4} \times 110^2 = -j0.665MVAR$$

$$\tilde{S}'_a = \tilde{S}'_b + \Delta\tilde{S}_{YT} + \Delta\tilde{S}_{Y2} = 11.8 + j5.87MVA$$

$$\Delta\tilde{S}_Z = \frac{P_a'^2 + Q_a'^2}{U_N^2} (R + jX) = 0.19 + j0.24MVA$$

$$\tilde{S}'_1 = \tilde{S}'_a + \Delta\tilde{S}_Z = 11.99 + j6.11MVA$$

$$\Delta \tilde{S}_{Y1} = -j \frac{B}{2} U_1^2 = -j \frac{1}{2} \times 1.1 \times 10^{-4} \times 117^2 = -j 0.75 \text{MVAR}$$

$$\tilde{S}_1 = \tilde{S}'_1 + \Delta \tilde{S}_{Y1} = 11.99 + j 5.36 \text{MVA}$$

(2) 再求电压分布: $U_1 \longrightarrow U_c$

LGJ-95 线路上的电压损耗

$$\Delta U_1 = \frac{P'_1 R + Q'_1 X}{U_1} = \frac{11.99 \times 13.2 + 6.11 \times 16.7}{117} = 2.22 \text{kV}$$

$$a \text{ 点电压 } U_a = U_1 - \Delta U_1 = 117 - 2.22 = 114.78 \text{kV}$$

$$\text{变压器上电压损耗 } \Delta U_T = \frac{P'_b R_T + Q'_b X_T}{U_a} = \frac{11.77 \times 4.02 + 6.4 \times 79.4}{114.78} = 4.84 \text{kV}$$

$$b \text{ 点电压 } U_b = U_a - \Delta U_T = 114.78 - 4.84 = 109.94 \text{kV}$$

LGJ-50 线路上的电压损耗

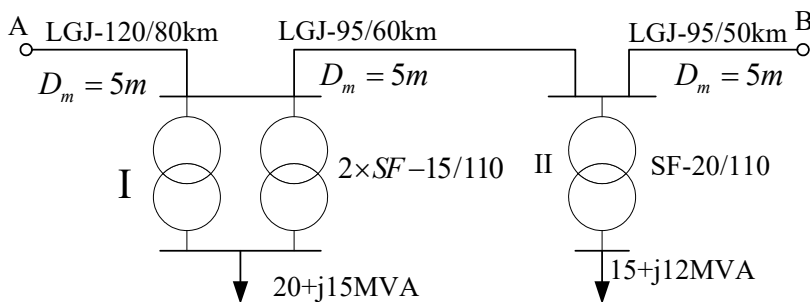
$$\Delta U_2 = \frac{P'_c R + Q'_c X}{U_b} = \frac{0.72 \times 3.25 + 0.51 \times 1.65}{109.94} = 0.029 \text{kV}$$

$$c \text{ 点电压 } U_c = U_b - \Delta U_2 = 109.94 - 0.029 = 109.911 \text{kV}$$

$$b \text{ 点实际电压: } U'_b = 109.94 \times \frac{11}{110} = 10.994 \text{kV}$$

$$c \text{ 点实际电压: } U'_c = 109.911 \times \frac{11}{110} = 10.991 \text{kV}$$

例 3-4: 两端供电网络如图所示。已知电源 A 点电压 117KV, 电源端 B 点电压 112KV, 计算网络功率分布和电压分布。



SF-15/110: 额定变比 110/11kV, $p_k = 128\text{kW}$, $p_0 = 40.5\text{kW}$, $U_k\% = 10.5$, $I_0\% = 3.5$

SF-20/110: 额定变比 110/11kV, $p_k = 157\text{kW}$, $p_0 = 48.6\text{kW}$, $U_k\% = 10.5$, $I_0\% = 2.3$

解: 一, 选取 100kV 作为电压的基本级, 计算网络参数, 并画出等值电路

线路 L_1 : LGJ-120/80km, $D_m = 5\text{m}$

查表: $r_0 = 0.27\Omega/\text{km}$, $x_0 = 0.423\Omega/\text{km}$, $b_0 = 2.69 \times 10^{-6}\text{s}/\text{km}$

$R_{L1} = 0.27 \times 80 = 21.6\Omega$, $X_{L1} = 33.84\Omega$, $B_{L1} = 2.15 \times 10^{-4}\text{s}$

线路导纳上的功率损耗

$$\Delta \bar{S}_{YL1} = -j \frac{B_{L1}}{2} U_N^2 = -j \frac{1}{2} \times 2.15 \times 10^{-4} \times 110^2 = -j1.3\text{MVar}$$

线路 L_2 : LGJ-95/60km, $D_m = 5\text{m}$

查表: $r_0 = 0.33\Omega/\text{km}$, $x_0 = 0.429\Omega/\text{km}$, $b_0 = 2.65 \times 10^{-6}\text{s}/\text{km}$

$R_{L2} = 0.33 \times 60 = 19.8\Omega$, $X_{L2} = 25.74\Omega$, $B_{L2} = 1.59 \times 10^{-4}\text{s}$

线路导纳上的功率损耗

$$\Delta \bar{S}_{YL2} = -j \frac{B_{L2}}{2} U_N^2 = -j \frac{1}{2} \times 1.59 \times 10^{-4} \times 110^2 = -j0.96\text{MVar}$$

线路 L_3 : LGJ-95/50km, $D_m = 5\text{m}$

查表: $r_0 = 0.33\Omega/\text{km}$, $x_0 = 0.429\Omega/\text{km}$, $b_0 = 2.65 \times 10^{-6}\text{s}/\text{km}$

$R_{L3} = 0.33 \times 50 = 16.5\Omega$, $X_{L3} = 21.45\Omega$, $B_{L3} = 1.33 \times 10^{-4}\text{s}$

线路导纳上的功率损耗

$$\Delta \bar{S}_{YL3} = -j \frac{B_{L3}}{2} U_N^2 = -j \frac{1}{2} \times 1.33 \times 10^{-4} \times 110^2 = -j0.81\text{MVar}$$

变压器 T_1 : SF-15/110

$$R_T = \frac{P_K U_{N1}^2}{1000 S_N^2} = \frac{128 \times 110^2}{1000 \times 15^2} = 6.88 \Omega;$$

$$X_T = \frac{U_K \% U_{N1}^2}{100 S_N} = \frac{10.5 \times 110^2}{100 \times 15} = 84.7 \Omega$$

$$G_T = -\frac{P_0}{1000 U_{N1}^2} = \frac{40.5}{1000 \times 110^2} = 3.35 \times 10^{-6} S$$

$$B_T = \frac{I_0 \% S_N}{100 U_{N1}^2} = \frac{3.5 \times 15}{100 \times 110^2} = 43.4 \times 10^{-6} S$$

并联参数： $Z_T = \frac{1}{2} (R_T + jX_T) = 3.44 + j42.35 \Omega$

$$Y_T = 2(G_T - jB_T) = (6.7 - j86.4) \times 10^{-6} S$$

变压器导纳支路的功率损耗

$$\Delta \tilde{S}_{YT1} = 2 \times (G_T + jB_T) U_2^2 = 2 \times (3.35 + j43.4) \times 10^{-6} \times 110^2 = 0.081 + j1.05 MVA$$

变压器 T_2 : SF - 20/110

$$R_T = \frac{P_K U_{N1}^2}{1000 S_N^2} = \frac{157 \times 110^2}{1000 \times 20^2} = 4.75 \Omega;$$

$$X_T = \frac{U_K \% U_{N1}^2}{100 S_N} = \frac{10.5 \times 110^2}{100 \times 15} = 63.53 \Omega$$

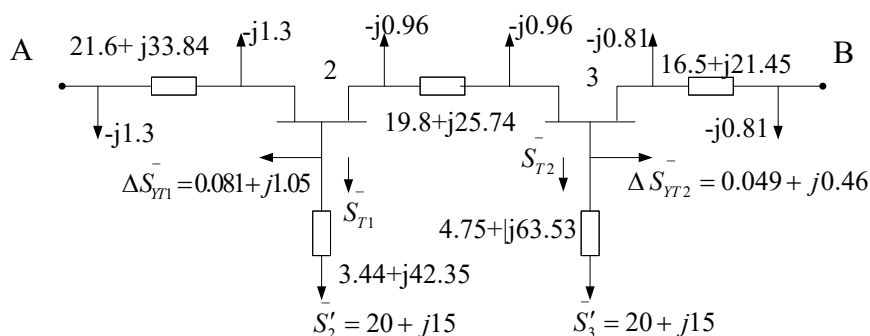
$$G_T = -\frac{P_0}{1000 U_{N1}^2} = \frac{48.6}{1000 \times 110^2} = 4.02 \times 10^{-6} S$$

$$B_T = \frac{I_0 \% S_N}{100 U_{N1}^2} = \frac{2.3 \times 15}{100 \times 110^2} = 38 \times 10^{-6} S$$

变压器导纳支路的功率损耗

$$\Delta \tilde{S}_{YT2} = (G_T + jB_T) U_2^2 = (4.02 + j38) \times 10^{-6} \times 110^2 = 0.049 + j0.46 MVA$$

电力网络的等值电路为：



二、计算运算负荷

(1) 计算 2 点的运算负荷

$$\Delta \tilde{S}_{ZT1} = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_N^2} (R_{T1} + jX_{T1}) = \frac{20^2 + 15^2}{110^2} (3.44 + j42.35) = 0.18 + j2.2 \text{ MVA}$$

$$\tilde{S}_{T1} = \tilde{S}'_2 + \Delta \tilde{S}_{ZT1} = 20 + j15 + 0.18 + j2.2 = 20.18 + j17.2 \text{ MVA}$$

$$\tilde{S}_2 = \tilde{S}'_2 + \Delta \tilde{S}_{ZT1} + \Delta \tilde{S}_{YT1} + \Delta \tilde{S}_{YL1} + \Delta \tilde{S}_{YL2} = 20 + j15 + 0.18 + j2.2 + 0.081 + j1.05 - j1.3 - j0.96 = 20.26 + j15.99 \text{ MVA}$$

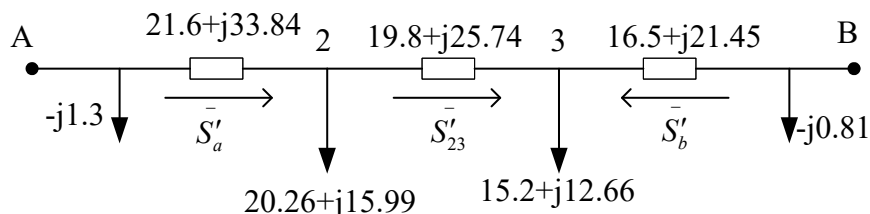
(2) 计算 3 点的运算负荷

$$\Delta \tilde{S}_{ZT1} = \frac{P_3'^2 + Q_3'^2}{U_N^2} (R_{T2} + jX_{T2}) = \frac{15^2 + 12^2}{110^2} (4.75 + j63.53) = 0.15 + j1.97 \text{ MVA}$$

$$\tilde{S}_{T2} = \tilde{S}'_3 + \Delta \tilde{S}_{ZT3} = 15 + j15 + 0.15 + j1.97 = 15.15 + j13.97 \text{ MVA}$$

$$\tilde{S}_3 = \tilde{S}'_3 + \Delta \tilde{S}_{ZT2} + \Delta \tilde{S}_{YT2} + \Delta \tilde{S}_{YL2} + \Delta \tilde{S}_{YL3} = 15 + j12 + 0.15 + j1.97 + 0.049 + j0.46 - j0.96 - j0.81 = 15.2 + j12.66 \text{ MVA}$$

电力网络的简化等值电路如图：



三、计算近似功率分布

$$\begin{aligned}\tilde{S}_a &= \frac{\tilde{S}_2^*(Z_{23} + Z_{3B}) + \tilde{S}_3^* Z_{2B}}{Z_{A2} + Z_{23} + Z_{2B}} \\ &= \frac{(20.26 + j1.99) \times (36.3 - j47.2) + (15.2 + j12.66) \times (16.5 - j21.45)}{57.9 - j81} \\ &= 15.79 + j13.57 MVA\end{aligned}$$

$$[\text{计算 } \tilde{S}_b = \frac{\tilde{S}_2^* Z_{A2} + \tilde{S}_3^* (Z_{A2} + Z_{23})}{Z_{A2} + Z_{23} + Z_{3B}} = 19.6 + j15.08 MVA, \text{ 校 } \bar{S}_a + \bar{S}_b = \bar{S}_2 + \bar{S}_3]$$

$$\dot{U}_A \neq \dot{U}_B \quad \therefore \text{存在循环功率 } \bar{S}_c = \frac{U_N dU}{Z_\Sigma^*} = \frac{110 \times (117 - 112)}{59.7 - j81} = 3.21 + j4.5 MVA$$

$$\bar{S}'_a = \bar{S}_a + \bar{S}_c = 15.79 + j13.57 + 3.21 + j4.5 = 19 + j18.07 MVA$$

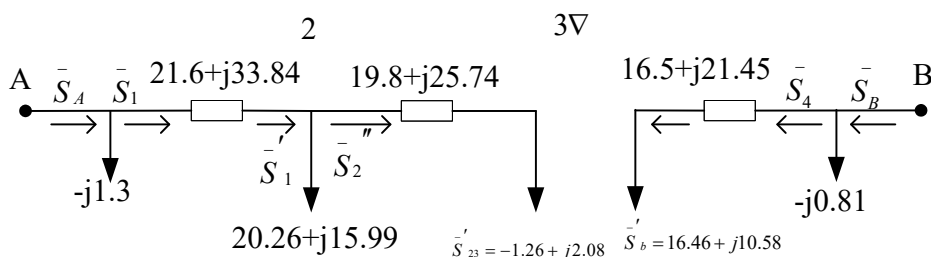
$$\bar{S}'_b = \bar{S}_b + \bar{S}_c = 19.67 + j15.08 - 3.21 - j4.5 = 16.46 + j10.58 MVA$$

$$\bar{S}'_{23} = \bar{S}'_a + \bar{S}_2 = 19 + j18.07 - 20.26 - j15.99 = -1.26 + j2.08 MVA$$

由近似功率分布计算可见： $P_{23} = -1.26 MW < 0$ 有功功率从节点 3 流向节点 2，所以有

有功功率的分布为 2 节点； $Q_{23} = 2.08 MVar > 0$ 无功功率从节点 2 流向节点 3，因此在电

压最低点将电网拆分为两个：



四，计算功率分布和电压分布

1， 左侧电网 $A \rightarrow 2 \rightarrow 3$ 已知：首端电压 $U_A = 117 kV$ ，末端功率

$$\bar{S}'_{23} = -1.26 + j2.08 MVA$$

(1) 计算功率分布

$$\begin{aligned}\tilde{S}'' &= \tilde{S}'_{23} + \frac{P_{23}'^2 + Q_{23}'^2}{U_N^2} (R_{23} + jX_{23}) \\ &= -1.26 + j2.08 + \frac{1.26^2 + 2.08^2}{110^2} (19.8 + j25.74) = -1.25 + j2.09 MVA\end{aligned}$$

$$\bar{S}'_1 = \bar{S}_2'' + \bar{S}_2 = -1.25 + j2.09 + 20.26 + j15.99 = 19 + j18.08 MVA$$

$$\begin{aligned}\tilde{S}_1 &= \tilde{S}'_1 + \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_N^2} (R_{A2} + jX_{A2}) \\ &= 19 + j18.08 + \frac{19^2 + 18.08^2}{110^2} (21.6 + j33.84) = 20.23 + j20 MVA\end{aligned}$$

$$\bar{S}_A = \bar{S}_1 + (-j1.3) = 20.23 + j20 - j1.3 = 20.23 + j18.7 MVA$$

(2) 计算电压分布

$$U_2 = U_A - \frac{P_1 R_{A2} + Q_1 X_{A2}}{U_A} = 117 - \frac{20.23 \times 21.6 + 20 \times 33.84}{117} = 107.49 \text{ kv}$$

$$U_3 = U_2 - \frac{P_2'' R_{A2} + Q_2'' X_{23}}{U_2} = 107.49 - \frac{-1.25 \times 19.8 + 2.09 \times 25.74}{107.49} = 107.22 \text{ kv}$$

2, 右侧电网 $B \rightarrow 3$ 已知: 始端电压 $U_B = 112 \text{ kv}$, 末端功率 $\bar{S}'_b = 16.46 + j10.58 MVA$

(1) 计算功率分布

$$\begin{aligned}\tilde{S}_4 &= \tilde{S}'_b + \frac{P_b'^2 + Q_b'^2}{U_N^2} (R_{3B} + jX_{3B}) \\ &= 16.46 + j10.58 + \frac{16.46^2 + 10.58^2}{110^2} (16.5 + j21.45) = 16.98 + j11.26 MVA\end{aligned}$$

$$\bar{S}_B = \bar{S}_4 + (-j0.81) = 16.98 + j11.26 - j0.81 = 16.98 + j10.45 MVA$$

(2) 计算电压分布

$$U_3 = U_B - \frac{P_4 R_{3B} + Q_4 X_{3B}}{U_B} = 112 - \frac{16.98 \times 16.5 + 11.26 \times 21.45}{112} = 107.34 \text{ kv}$$

五, 计算变电所低压母线电压 (根据电力网络的等值电路图)

$$U'_2 = U_2 - \frac{P_{T1}R_{T1} + Q_{T1}X_{T1}}{U_2}$$

变电所 I
$$= 107.49 - \frac{20.18 \times 3.44 + 17.2 \times 42.35}{107.49} = 100.07 \text{ kv}$$

实际电压为:
$$\frac{U'_2}{K_{T1}} = \frac{100.07}{110/11} = 10 \text{ kv}$$

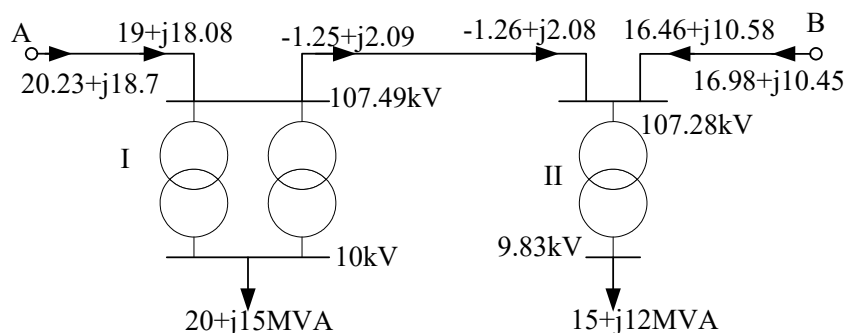
变电所 II

$$U_3 = \frac{107.22 + 107.34}{2} = 107.28 \text{ kv}$$

$$U'_3 = U_3 - \frac{P_{T2}R_{T2} + Q_{T2}X_{T2}}{U_3} = 107.28 - \frac{15.15 \times 4.75 + 13.97 \times 63.53}{107.28} = 98.34 \text{ kv}$$

实际电压为:
$$\frac{U'_3}{K_{T2}} = \frac{98.34}{110/11} = 9.83 \text{ kv}$$

电力网络的潮流分布图



例 3-5: 由钢芯铝绞线架设的 35KV 网络, 其线路公里数, 导线型号以及负荷兆伏安数和功率因数均已示于图中。线路参数如下

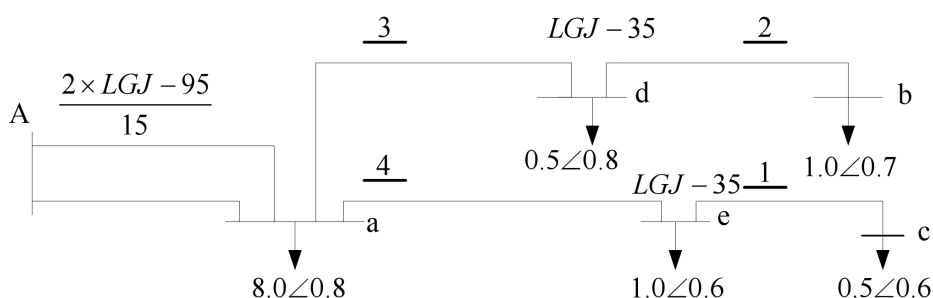
LGJ—35:
$$r_1 = 0.91 \Omega / \text{ km}$$

$$x_1 = 0.442 \Omega / \text{ km}$$

LGJ—95:
$$r_1 = 0.33 \Omega / \text{ km}$$

$$x_1 = 0.40 \Omega / \text{ km}$$

求网络的最大电压损耗。



解 这也是一个地方电力网络。由图中所示各负荷功率及功率因数可求出节点复功率

$$\tilde{S}_a = 8 \times (0.8 + j0.6) = 6.4 + j4.8 \text{ MVA}$$

$$\tilde{S}_b = 1 \times (0.7 + j0.713) = 0.7 + j0.713 \text{ MVA}$$

$$\tilde{S}_c = 0.5 \times (0.6 + j0.8) = 0.3 + j0.4 \text{ MVA}$$

$$\tilde{S}_d = 0.5 \times (0.8 + j0.6) = 0.4 + j0.3 \text{ MVA}$$

$$\tilde{S}_e = 1 \times (0.6 + j0.8) = 0.6 + j0.8 \text{ MVA}$$

A-a 段的电压损耗

$$\begin{aligned} \Delta V &= \frac{1}{2V_N} [(P_a + P_b + P_c + P_d + P_e)R_{Aa} + (Q_a + Q_b + Q_c + Q_d + Q_e)X_{Aa}] \\ &= \frac{1}{2 \times 35} \times [(6.4 + 0.7 + 0.3 + 0.4 + 0.6) \times 0.33 \times 15 + (4.8 + 0.713 + 0.4 + 0.3 + 0.8) \times 0.40 \times 15] \\ &= 1.21 \text{ KV} \end{aligned}$$

a-b 段的电压损耗（叠加算法）

$$\begin{aligned} \Delta V &= \frac{1}{V_N} P_b R_{ab} + P_d R_{ad} + Q_b X_{ab} + Q_d X_{da} \\ &= \frac{1}{35} \times (0.7 \times 0.91 \times 5 + 0.4 \times 0.91 \times 3 + 0.713 \times 0.442 \times 5 + 0.3 \times 0.442 \times 0.3) \\ &= 0.178 \text{ KV} \end{aligned}$$

a-c 段的电压损耗

$$\begin{aligned}\Delta V &= \frac{1}{V_N} P_c R_{ac} + P_e R_{ce} + Q_c X_{ac} + Q_e X_{ce} \\ &= \frac{1}{35} \times (0.3 \times 0.91 \times 5 + 0.6 \times 0.91 \times 4 + 0.4 \times 0.442 \times 5 + 0.8 \times 0.442 \times 4) \\ &= 0.168KV\end{aligned}$$

所以，网络最大电压损耗为

$$\Delta V_{\max} = \Delta V_{Aa} + \Delta V_{ab} = 1.21 + 0.178 = 1.388KV$$

$$\Delta V_{\max} \% = \frac{1.388}{35} \times 100\% = 3.96\%$$

$$P_i = \operatorname{Re} \left[\dot{U}_i \sum_{j=1}^{j=n} Y_{ij}^* \cdot U_j \right] \dots\dots\dots (3-3)$$

$$Q_i = \operatorname{Im} \left[\dot{U}_i \sum_{j=1}^{j=n} Y_{ij}^* \cdot U_j \right]$$

3、电力网络节点的分类

- (1) PQ 节点：已知节点的注入功率 $\bar{S} = P + jQ$ ，节点的电压向量 \dot{U} ($U_i \delta_i$) 为待求量；
- (2) PV 节点：已知节点的注入有功功率 P 和电压大小 U ，节点注入无功功率 Q 和电压相位 δ 为待求量；
- (3) 平衡节点：已知节点的电压大小 U 和电压相位 δ ，节点注入有功功率 P 和无功功率 Q 为待求量。又称 $U \delta$ 节点。

4、牛顿—拉夫逊法潮流计算

运用牛顿—拉夫逊法进行潮流计算的核心问题是修正方程式的建立和修改。每次迭代时都要先求解修正方程式，然后用解得的各节点电压修正量求各节点电压的新值。这些修正方程式为：

用直角坐标表示时	用极坐标表示时
$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta U^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \\ R & S \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta f \\ \Delta e \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U/U \end{bmatrix}$

用极坐标表示的牛顿—拉夫逊法潮流计算的基本步骤：

- (1) 形成节点导纳矩阵 Y_B ；
- (2) 设 PQ 节点电压的初值 $U_i^{(0)} = 1.0$ 、 $\delta_i^{(0)} = 0^\circ$ ，设 PV 节点电压的初值 $U_j^{(0)} = U_{\text{已知}}$ 、 $\delta_j^{(0)} = 0^\circ$ ；
- (3) 求解修正方程式中的不平衡量 $\Delta P_i^{(0)}$ 、 $\Delta Q_i^{(0)}$ ；
- (4) 求解修正方程式中系数矩阵的各个元素 $H^{(0)}$ 、 $N^{(0)}$ 、 $J^{(0)}$ 、 $L^{(0)}$ ；
- (5) 解修正方程式：
$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U/U \end{bmatrix}$$

求出各点电压的相位、大小的修正量 $\Delta \delta_i^{(0)}$ 、 $\Delta U_i^{(0)}$ ；
- (6) 修正各节点电压的相位、大小，得到各点电压的新值：
$$\delta_i^{(1)} = \delta_i^{(0)} + \Delta \delta_i^{(0)} ; \quad U_i^{(1)} = U_i^{(0)} + \Delta U_i^{(0)}$$
- (7) 运用各节点电压的新值返回第 (3) 步进入下一次迭代计算。这样重复迭代求解 (3) ~ (6) 步，每次迭代都要判断是否满足收敛条件：

$$\left| \Delta \delta^{(k)} \right|_{\max} \leq \varepsilon \quad , \quad \left| \Delta U^{(k)} \right|_{\max} \leq \varepsilon$$

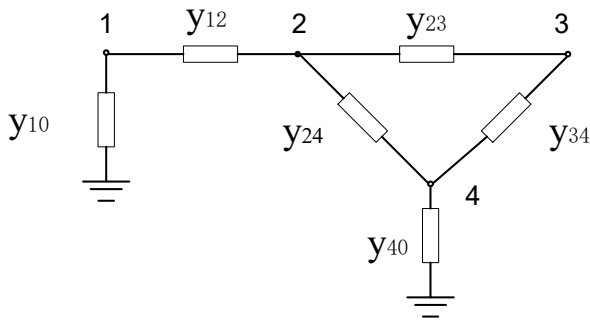
当条件都满足时，迭代收敛，得到各节点电压的结果；否则迭代不收敛，继续迭代计算。

- (8) 计算平衡节点的功率和 PV 节点的无功功率；
- (9) 计算各支路功率。

三、例题分析

例 4-1: 电力网络接线如图, 写出节点导纳矩阵。

解: 电力网络中共有 4 个节点 (接地点除外),
则导纳矩阵是 4×4 阶方阵:



$$Y_B = \begin{bmatrix} y_{10} + y_{12} & -y_{12} & 0 & 0 \\ -y_{12} & y_{12} + y_{23} + y_{24} & -y_{23} & -y_{24} \\ 0 & -y_{23} & y_{23} + y_{34} & -y_{34} \\ 0 & -y_{24} & -y_{34} & y_{40} + y_{24} + y_{34} \end{bmatrix}$$

例 4-2: 已知非线性方程为

$$\begin{cases} f_1(X_1, X_2) = 2X_1 + X_1X_2 - 1 = 0 \\ f_2(X_1, X_2) = 2X_2 - X_1X_2 + 1 = 0 \end{cases}$$

- (1) 用高斯-塞德尔法求解并迭代三次。
- (2) 用牛顿-拉夫逊法求解并迭代三次。

解:

(1) 将方程组改写成便于迭代的形式

$$\begin{cases} X_1 = \frac{1}{2}(-X_1X_2 + 1) \\ X_2 = \frac{1}{2}(X_1X_2 - 1) \end{cases}$$

①取初值

$$X_1^{(0)} = 0 \quad X_2^{(0)} = 0$$

②第一次迭代

$$X_1^{(1)} = 0.5 \quad X_2^{(1)} = -0.5$$

③第二次迭代

$$X_1^{(2)} = \frac{1}{2}(0.5 \times 0.5 + 1) = 0.625$$

$$X_2^{(2)} = \frac{1}{2}(-0.625 \times 0.5 - 1) = -0.656$$

④第三次迭代

$$X_1^{(3)} = \frac{1}{2}(0.625 \times 0.656 + 1) = 0.705$$

$$X_2^{(3)} = \frac{1}{2}(-0.705 \times 0.656 - 1) = -0.731$$

(2) 用牛顿—拉夫逊法求解

①取初值

$$X_1^{(0)} = 0 \quad X_2^{(0)} = 0$$

②第一次迭代

$$\begin{cases} f_1(X_1^{(0)}, X_2^{(0)}) = \frac{\partial f_1}{\partial X_1} \Big|_0 \Delta X_1^{(0)} + \frac{\partial f_1}{\partial X_2} \Big|_0 \Delta X_2^{(0)} \\ f_2(X_1^{(0)}, X_2^{(0)}) = \frac{\partial f_2}{\partial X_1} \Big|_0 \Delta X_1^{(0)} + \frac{\partial f_2}{\partial X_2} \Big|_0 \Delta X_2^{(0)} \end{cases}$$

$$f_1^{(0)} = -1 \frac{\partial f_1}{\partial X_1} \Big|_0 = (2 + X_2) \Big|_0 = 2$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial X_1} \Big|_0 = X_1 \Big|_0 = 0$$

$$f_2^{(0)} = 1 \frac{\partial f_2}{\partial X_1} \Big|_0 = (-X_2) \Big|_0 = 0$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial X_2} \Big|_0 = (2 - X_1) \Big|_0 = 2$$

故得

$$\begin{cases} -1 = 2\Delta X_1^{(0)} \\ 1 = 2\Delta X_2^{(0)} \end{cases}$$

和

$$\begin{cases} \Delta X_1^{(0)} = -0.5 \\ \Delta X_2^{(0)} = 0.5 \end{cases}$$

因而

$$\begin{cases} X_1^{(1)} = X_1^{(0)} - \Delta X_1^{(0)} = 0 + 0.5 = 0.5 \\ X_2^{(1)} = X_2^{(0)} - \Delta X_2^{(0)} = 0 - 0.5 = -0.5 \end{cases}$$

③第二次迭代

$$\begin{cases} X_1^{(1)} = 0.5 \\ X_2^{(1)} = -0.5 \end{cases}$$

$$f_1^{(1)} = 2 \times 0.5 + 0.5 \times (-0.5) - 1 = -0.25$$

$$f_2^{(1)} = 2 \times (-0.5) - 0.5 \times (-0.5) + 1 = 0.25$$

$$\left. \frac{\partial f_1}{\partial X_1} \right|_1 = 2 + (-0.5) = 1.5 \quad \left. \frac{\partial f_1}{\partial X_2} \right|_1 = 0.5$$

$$\left. \frac{\partial f_2}{\partial X_1} \right|_1 = 0.5 \quad \left. \frac{\partial f_2}{\partial X_2} \right|_1 = 2 - 0.5 = 1.5$$

故得

$$\begin{cases} -0.25 = 1.5\Delta X_1^{(1)} + 0.5\Delta X_2^{(1)} \\ 0.25 = 0.5\Delta X_1^{(1)} + 1.5\Delta X_2^{(1)} \end{cases}$$

解得

$$\Delta X_1^{(1)} = \frac{\begin{vmatrix} -0.25 & 0.5 \\ 0.25 & 1.5 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1.5 & 0.5 \\ 0.5 & 1.5 \end{vmatrix}} = -0.25$$

$$\Delta X_2^{(1)} = \frac{\begin{vmatrix} 1.5 & -0.25 \\ 0.5 & 0.25 \end{vmatrix}}{2} = 0.25$$

$$\begin{aligned} X^{(2)} &= X^{(1)} - \Delta X^{(1)} = [0.5, -0.5]^T - [0.25, -0.25]^T \\ &= [0.75, -0.75]^T \end{aligned}$$

④第三次迭代

$$\begin{cases} X_1^{(2)} = 0.75 \\ X_2^{(2)} = -0.75 \end{cases}$$

$$f_1^{(2)} = 2 \times 0.75 - 0.75 \times 0.75 - 1 = -0.0625$$

$$f_2^{(2)} = 2 \times (-0.75) - (-0.75) + 1 = 0.0625$$

$$\left. \frac{\partial f_1}{\partial X_1} \right|_2 = 2 - 0.75 = 1.25 \quad \left. \frac{\partial f_1}{\partial X_2} \right|_2 = 0.75$$

$$\left. \frac{\partial f_2}{\partial X_1} \right|_2 = 0.75 \quad \left. \frac{\partial f_2}{\partial X_2} \right|_2 = 2 - 0.75 = 1.25$$

故得

$$\begin{cases} -0.0625 = 1.25\Delta X_1^{(2)} + 0.75\Delta X_2^{(2)} \\ 0.0625 = 0.75\Delta X_1^{(2)} + 1.25\Delta X_2^{(2)} \end{cases}$$

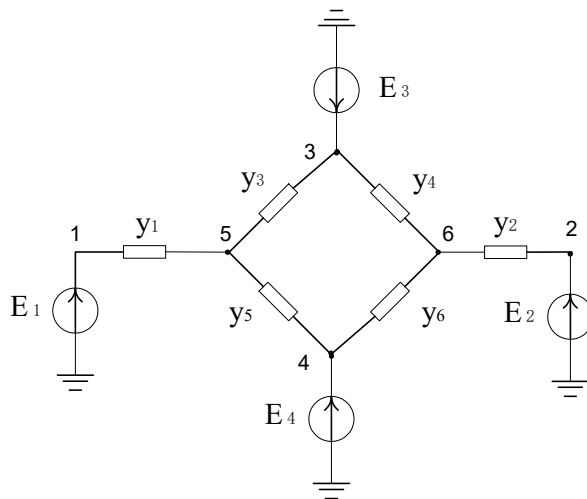
解得

$$\Delta X_1^{(2)} = \frac{\begin{vmatrix} -0.0625 & 0.75 \\ 0.0625 & 1.25 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1.25 & 0.75 \\ 0.75 & 1.25 \end{vmatrix}} = -0.125$$

$$\Delta X_2^{(2)} = 0.125$$

$$\begin{aligned} X^{(3)} &= X^{(2)} - \Delta X^{(2)} = [0.75, -0.75]^T - [0.125, -0.125]^T \\ &= [0.875, -0.875]^T \end{aligned}$$

例 4-3: 电力系统的等值电路如图: 网络各支路导纳为 0.1。试用矩阵分块法计算消去 5、6 两节点, 简化网络的导纳矩阵。并计算节点 2、3 间支路阻抗。



解：电力系统的导纳矩阵：

$$Y_B = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 0 & 0 & -0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 & 0 & 0 & -0.1 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0 & -0.1 & -0.1 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2 & -0.1 & -0.1 \\ -0.1 & 0 & -0.1 & -0.1 & 0.3 & 0 \\ 0 & -0.1 & -0.1 & -0.1 & 0 & 0.3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B & C \\ C^T & D \end{bmatrix}$$

其中 B 、 C 、 C^T 、 D 分别对应矩阵中各块。

列出节点电压方程：

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B & C \\ C^T & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_p \\ U_q \end{bmatrix}$$

$$\text{其中 } I_p = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix}, \quad I_q = \begin{bmatrix} I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = 0, \quad U_p = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix}, \quad U_q = \begin{bmatrix} U_5 \\ U_6 \end{bmatrix}$$

$$\text{则有：} \begin{cases} BU_p + CU_q = I_p \\ C^T U_p + DU_q = I_q = 0 \end{cases}$$

消去 U_q ： $DU_q = -C^T U_p$ ， 则 $U_q = -D^{-1} C^T U_p$ 代入上面的方程

$$BU_p - CD^{-1} C^T U_p = I_p, \quad \therefore [B - CD^{-1} C^T] U_p = I_p$$

即 消去 5、6 节点之后的节点导纳矩阵为： $Y'_b = B - CD^{-1} C^T$ 。

先计算 D^{-1} ：

$$D^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{0.3} & 0 \\ 0 & \frac{1}{0.3} \end{bmatrix}, \quad CD^{-1} = \begin{bmatrix} -0.1 & 0 \\ 0 & -0.1 \\ -0.1 & -0.1 \\ -0.1 & -0.1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{0.3} & 0 \\ 0 & \frac{1}{0.3} \end{bmatrix} = \frac{1}{0.3}C$$

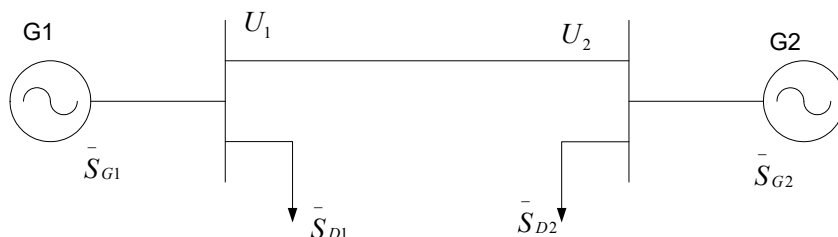
$$CD^{-1}C^T = \frac{1}{0.3} \begin{bmatrix} -0.1 & 0 \\ 0 & -0.1 \\ -0.1 & -0.1 \\ -0.1 & -0.1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -0.1 & 0 & -0.1 & -0.1 \\ 0 & -0.1 & -0.1 & -0.1 \end{bmatrix}$$

$$= \frac{1}{0.3} \begin{bmatrix} 0.01 & 0 & 0.01 & 0.01 \\ 0 & 0.01 & 0.01 & 0.01 \\ 0.01 & 0.01 & 0.02 & 0.02 \\ 0.01 & 0.01 & 0.02 & 0.02 \end{bmatrix}$$

$$Y'_B = B - CD^{-1}C^T = \begin{bmatrix} 0.067 & 0 & -0.033 & -0.033 \\ 0 & 0.067 & -0.033 & -0.033 \\ -0.033 & -0.033 & 0.133 & -0.067 \\ -0.033 & -0.033 & -0.067 & 0.133 \end{bmatrix}$$

$$Z_{23} = \frac{1}{y_{23}} = 30$$

例 4-4： 系统接线如图。线路 $X_l = 0.1$ ， $X_c = 10$ ， $\alpha = 0.1$ ， $P_{D1} = P_{D2} = 20$ ， $Q_{D1} = Q_{D2} = 10^\circ$
运行条件： $U_1 = U_2 = 1$ ， $\sigma_1 = 0$ ， $P_{G1} = 15$ ， 求潮流分布， 画出潮流分布。



解： α 是阻抗角， 其定义为：

$$\alpha = \operatorname{tg}^{-1} R/X$$

$$\alpha = 0.01 \quad \therefore \sin \alpha \approx \alpha = 0.01$$

$$\cos \approx 1$$

代入教材中的公式：

$$\begin{cases} P_{D1} - 20 - \frac{1^2}{0.1} \times 0.01 + \frac{1 \times 1}{0.1} \sin(\alpha + \sigma_2) = 0 \\ 15 - 20 - \frac{1^2}{0.1} \times 0.01 + \frac{1 \times 1}{0.1} \sin(\alpha + \sigma_2) = 0 \\ Q_{G1} - 10 + \frac{1^2}{10} - \frac{1^2}{0.1} \times 1 + \frac{1 \times 1}{0.1} \cos(\alpha + \sigma_2) = 0 \\ Q_{G2} - 10 + \frac{1^2}{10} - \frac{1^2}{0.1} \times 1 + \frac{1 \times 1}{0.1} \cos(\alpha + \sigma_2) = 0 \end{cases}$$

解方程：

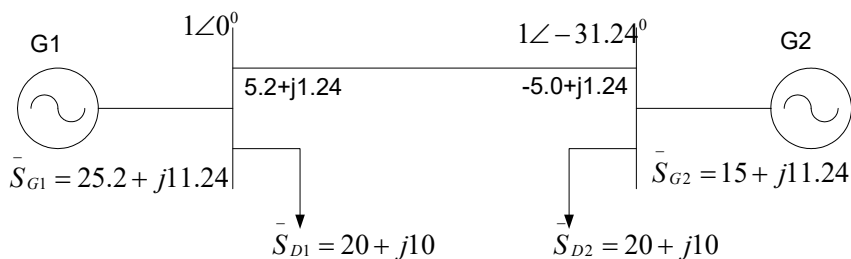
$$\begin{cases} P_{G2} + 10 \sin(\sigma_2 + \alpha) - 20.1 = 0 \\ 10 \sin(\sigma_2 + \alpha) - 5.1 = 0 \\ Q_{G1} + 10 \cos(\sigma_2 + \alpha) - 19.9 = 0 \\ Q_{G2} + 10 \cos(\sigma_2 + \alpha) - 19.9 = 0 \end{cases}$$

由方程 (2) 解得： $\sigma_2 + \alpha = -30.67^\circ$ $\alpha = 0.01$ 弧度 $= 0.57^\circ$ $\sigma_2 = -31.24^\circ$

代入方程 (1) 解得： $P_{G1} = 20.1 - 10 \times \sin 30.67^\circ = 25.20$

代入方程 (3), (4) 解得： $Q_{G1} = 11.24 = Q_{G2}$

潮流分布如图：



分析此系统得潮流分布可知：

- (1) 由于 $R_l = 0$ $\alpha = \frac{\pi}{2}$ 线路中不产生有功损耗。
- (2) 有功从母线 1 流向母线 2, $\delta = \delta_1 - \delta_2 = 0 - (-40.95^\circ) = 40.95^\circ$
- (3) 由于线路电抗较大, 母线得电压损耗为 0.237 标么值, 无功损耗也相当可观。由于在正常运行时线路电压偏移值一般不允许超过 10%, 故母线 2 的电压偏移值低。提高 U_2 的措施有减小线路的电抗值; 提高母线 1 的电压; 在母线 2 设置无功补偿装置, 改变线路无功分布等等。

(4) 现若要求将电压 U_2 的值提高到1, 可将 $U_2 = 1$ 作为已知条件给定, 但必须放开与之关系密切的 Q_{G2} , 将它作为未知量待求。

第五章 电力系统的有功功率和频率调整

一、基本要求

了解电力系统有功功率和频率之间的关系、电力系统的有功功率平衡及备用容量；掌握电力系统中各类电厂的运行特点及合理组合、电力系统中有功功率负荷的最优分布；了解负荷和发电机的功率-频率静特性，掌握电力系统频率的一次调整及二次调整。

二、重点内容

1、电力系统中有功功率电源的最优组合

根据各类发电厂的运行特点可见：

原子能电厂建设投资大，运行费用小，因此原子能电厂应当尽可能的利用，让它满发。

火力发电厂机组投入或者退出运行的时间较长（十几个小时），而且机组频繁的启停或增减负荷既消耗能量又易于损坏设备，因此一般火电厂承担基本不变的负荷。其中，高温高压火电厂效率高，应该优先投入；中温中压火电厂效率低一些，但它的负荷调节能力较强，可以承担一定的负荷变动。

水力发电厂机组投入或者退出运行的时间短（几分钟），操作简单、灵活，具有快速启动、快速增减负荷的突出优点。因此水电厂调节能力强，可以承担急剧变动的负荷。

综合考虑以上因素，得到结论：枯水季节，原子能电厂、火电厂承担基本不变的负荷，主要由带调节水库的水电厂调节负荷的波峰和波谷的变动；洪水季节，为防止水资源的浪费，水电厂、原子能电厂、高温高压火电厂承担基本不变的负荷，由中温中压火电厂承担调节任务。

2、电力系统中有功负荷的最优分配

电力系统有功负荷的最优分配的目标是：在满足系统有功功率平衡的条件下，使系统一次能源的消耗量为最低，使系统经济性达到最优。

汽轮发电机组的耗量特性为：

$$F = a + bP_G + cP_G^2 \quad \dots\dots\dots (5-1)$$

其中 F 为燃料的消耗量（吨/小时）， P_G 为发电机发出的功率。

机组的耗量微增率：

$$\lambda = \frac{dF}{dP} \quad \dots\dots\dots (5-2)$$

要实现电力系统中各机组之间有功负荷的最优分配，必须遵守等耗量微增率准则：

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \dots\dots = \lambda_n = \lambda \quad \dots\dots\dots (5-3)$$

同时必须满足：

$$\begin{cases} \text{等约束条件} & P_L = P_{G1} + P_{G2} + \dots + P_{Gn} \\ \text{不等约束条件} & P_{G\min} \leq P_G \leq P_{G\max} \end{cases}$$

3、电力系统的频率调整

电力系统负荷的变化引起系统频率的变动，而频率变动对系统中的用户会产生不利影响，所以必须保持频率在额定值 $50\text{Hz} \pm 0.2\text{Hz}$ 范围之内。对于负荷变化引起的系统频率的波动，系统采用“一次调整”、“二次调整”、“三次调整”进行调频。

(1) 系统的频率特性

负荷的频率特性反映的是：系统负荷所消耗的有功功率与系统频率之间的关系。如图 5-1 所示，系统负荷所消耗的有功功率随着系统频率的增大而增大；如果系统频率降低，则负荷消耗的有功功率也降低。

发电机的频率特性反映的是：在调速器的作用下，发电机发出的有功功率与系统频率之间的关系。如图 5-2 所示，发电机发出的有功功率随着系统频率的增大而减小；如果系统频率降低，则发电机发出的有功功率反而增大。

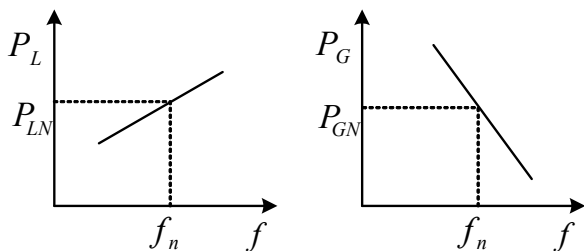


图5-1 负荷频率特性 图5-2 发电机频率特性

(2) 频率的一次调整

针对第一种负荷变动所引起的频率偏移，由发电机组的调速器进行的频率调整称为频率的一次调整。频率的一次调整是在发电机的调速器和负荷自身调节特性的共同作用下完成的，只能做到有差调节。

(3) 频率的二次调整

针对第二种负荷变动所引起的频率偏移，由发电机组的调频器进行的频率调整称为频率的二次调整。频率的二次调整是在发电机的调频器、调速器和负荷自身调节特性三者共同作用下完成的，能够达到无差调节。

(4) 频率的三次调整

三次调整的名词不常用，它其实就是指：将第三种负荷变动按照最优化原则在各发电厂之间进行分配。

三、例题分析

例 5-1：两台发电机共同承担负荷，他们的耗量特性分别为：

$$F_1 = 2.5 + 0.25P_{G1} + 0.0014P_{G1}^2 \quad (\text{t/h})$$

$$F_2 = 5.0 + 0.18P_{G2} + 0.0018P_{G2}^2 \quad (\text{t/h})$$

它们的有功功率的上下限分别为:

$$20\text{MW} \leq P_{G1} \leq 100\text{MW} \quad , \quad 20\text{MW} \leq P_{G2} \leq 100\text{MW}$$

试求负荷为 100 MW 时, 两台发电机组间的最优分配方案。

解: 两台机组的耗量微增率分别为:

$$\lambda_1 = \frac{dF_1}{dP_{G1}} = 0.25 + 0.0028P_{G1}$$

$$\lambda_2 = \frac{dF_2}{dP_{G2}} = 0.18 + 0.0036P_{G2}$$

根据最优分配的等耗量微增率准则应该有:
$$\begin{cases} \lambda_1 = \lambda_2 \\ P_{G1} + P_{G2} = P_L \end{cases}$$

代入参数得到方程组:

$$\begin{cases} 0.25 + 0.0028P_{G1} = 0.18 + 0.0036P_{G2} \\ P_{G1} + P_{G2} = 100 \end{cases}$$

求解方程组则 $P_{G1} = 45.3\text{MW}$, $P_{G2} = 54.7\text{MW}$ 。满足发电机的发电极限范围。

例 5-2: 系统中发电机组的容量和它们的调差系数分别为:

水轮机组: 100MW/台 \times 7 台, $\sigma\% = 2$; 汽轮机组: 200MW/台 \times 4 台, $\sigma\% = 3$;
 50MW/台 \times 5 台, $\sigma\% = 3$; 100MW/台 \times 8 台, $\sigma\% = 3.5$;

其它容量汽轮机组等效为 1500MW, $\sigma\% = 4$ 。系统总负荷为 3500MW, $K_L^* = 1.5$ 。若全部机组都参加调频, 当负荷增加 1% 时, 试计算系统频率下降多少?

解: 先计算系统发电机的 K_G

$$\begin{aligned} \sum K_G &= \sum \frac{P_{GN}}{\sigma\% f_N} \times 100 \\ &= \frac{100 \times 7}{0.02 \times 50} + \frac{50 \times 5}{0.03 \times 50} + \frac{200 \times 4}{0.03 \times 50} + \frac{100 \times 8}{0.035 \times 50} + \frac{1500}{0.04 \times 50} = 2607.143 \text{ MW}/H_z \end{aligned}$$

计算负荷的 K_L

$$K_L = K_L^* P_{LN} / f_N = \frac{1.5 \times 3500}{50} = 105 \text{ MW}/H_z$$

全部机组都参加调频时, $K_S = \sum K_G + K_L = 2607.143 + 105 = 2712.143 \text{ MW}/H_z$

$$\therefore K_S = -\frac{\Delta P_L}{\Delta f} \quad \therefore \Delta f = -\frac{\Delta P_L}{K_S} = -\frac{3500 \times 1\%}{2712.143} = -0.0129 \text{ Hz}$$

即全部机组都参加调频，当负荷增加 1% 时，频率将下降 0.0129 Hz。

例 5-3: A, B 两系统并联运行，A 系统负荷增大 500MW 时，B 系统向 A 系统输送的交换功率为 300MW，如这时将联络线切除，则切除后，A 系统的频率为 49Hz，B 系统的频率为 50Hz，试求：

(1) A, B 两系统的系统单位调节功率 K_A , K_B ；

(2) A 系统负荷增大 750MW，联合系统的频率变化量。

解：

(1) 联络线切除前得

$$-\Delta P_{ab} = \frac{-K_B \Delta P_A + K_A \Delta P_B}{K_A + K_B} = \frac{-500 K_B}{K_A + K_B} = -300$$

故 $2K_B = 3K_A$ ①

联络线切除后

解法一： 设 f 为负荷增大后联络线切除前系统频率， f_A , f_B 分别为联络线切除后 A, B 系统频率。则

$$\begin{cases} -300 = K_A(f_A - f) & \text{②} \\ 300 = K_B(f_B - f) & \text{③} \end{cases}$$

由②和③得 $\frac{300}{K_A} + f_A = -\frac{300}{K_B} + f_B$

$$\frac{300}{K_A} + \frac{300}{K_B} = f_B - f_A = 1 \quad \text{④}$$

将①代入④式得 $K_A = 500 \text{ MW / Hz}$, $K_B = 750 \text{ MW / Hz}$

解法二： 因负荷变化前联合系统频率等于联络线切除后 B 系统得频率，即 50Hz。

故 $K_A = \frac{-\Delta P_A}{\Delta f_A} = \frac{500}{1} = 500 (\text{MW / Hz})$ ，代入①

得 $K_B = 750 \text{ MW / Hz}$

$$(2) \Delta f = -\frac{\Delta P_A + \Delta P_B}{K_A + K_B} = \frac{-750}{500 + 750} = -0.6(\text{Hz})$$

故 A 系统负荷增大 150MW 时，联合系统频率下降 0.6Hz。

第六章电力系统的无功功率和电压调整

一、基本要求

掌握电力系统的无功功率电源及其特点，电力系统的无功功率平衡；了解电力系统的电压管理的方法和要求；掌握电力系统各种调压措施的原理、特点及计算方法。

二、重点内容

1、无功功率电源

电力系统有功功率电源是发电机。无功功率电源除了发电机外，还有调相机、电容器和静止补偿器。

调相机、电容器和静止补偿器统称为无功补偿装置。调相机实质上就是只能发出无功功率的发电机，通过调节励磁电流可以向系统发出或吸取无功功率；并联电容器可以向系统发出无功功率；静止补偿器既可向系统发出无功功率，也可吸取无功功率。目前，系统多采用并联电容器进行无功功率的补偿。

2、电压管理

电力系统结构复杂，负荷众多，不可能对系统中每一点的电压都进行监视和调整。电力系统可以通过监视和调整中枢点的电压来达到调压的目的。所谓中枢点就是指电力系统中反映电压水平的节点，如主要发电厂母线和枢纽变电所母线。我们可以根据负荷对电压的要求以及供电线路上的电压损耗来确定中枢点的电压偏移范围。如果控制了系统中枢点的电压偏移，也就控制住了系统中大部分节点的电压偏移，实现了电压管理。

3、调压措施

(1) 借改变发电机端电压调压

各种调压手段中，首先应考虑调节发电机电压，因为这种调压措施不需增加任何附加设备，简单、经济。但它的缺点是可调节范围有限，对于电气距离较远的负荷调压效果较差。

(2) 借改变变压器变比调压

通过合理的选择变压器的分接头可以达到良好的调压目的。对无功功率供应充裕的系统，改变有载调压变压器分接头进行调压，是目前常用的、有效的调压措施。

(3) 借并联无功补偿设备调压

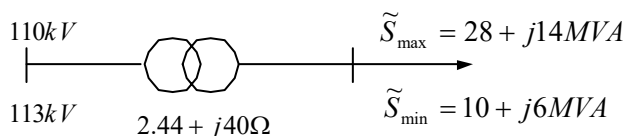
根据系统负荷的需要，装设并联补偿设备——电容器、调相机和静止补偿器进行调压。尽管这种调压措施需要增设专门的补偿设备，增大投资，但是对于无功功率不足的系统应优先采用。采用无功功率的就地补偿可以降低网络损耗，因此系统中大量采用并联无功补偿设备进行调压。

(4) 借串联电容器调压

作为调压措施，串联补偿电容器由于设计、运行等方面的原因，目前很少使用。

三、例题分析

例 6-1: 一台降压变压器变比为 $110 \pm 2 \times 2.5\%kV / 6.3kV$ ，变压器阻抗归算到高压侧为： $R = 2.44\Omega$ ， $X = 40\Omega$ 。当变压器末端负荷最大 $\tilde{S}_{\max} = 28 + j14MVA$ 时，变压器首端电压为 $110kV$ ；当变压器末端负荷最小 $\tilde{S}_{\min} = 10 + j6MVA$ 时，变压器首端电压为 $113kV$ 。为了保证变压器低压侧电压保持在 $6kV \sim 6.6kV$ 范围内，请选择变压器分接头。



解：1、首先计算变压器中的电压损耗

$$(1) \text{ 最大负荷时: } \Delta U_{\max} = \frac{PR+QX}{U} = \frac{28 \times 2.44 + 14 \times 40}{110} = 5.7kV$$

$$(2) \text{ 最小负荷时: } \Delta U_{\min} = \frac{PR+QX}{U} = \frac{10 \times 2.44 + 6 \times 40}{110} = 2.34kV$$

2、计算分接头电压

(1) 最大负荷时，变压器电压损耗大，低压侧电压不能低于 $6kV$ ，因此变比 k 应当

$$K \leq \frac{U_{1\max} - \Delta U_{\max}}{6} = \frac{110 - 5.7}{6} = 17.38$$

$$\text{变压器高压侧分接头电压 } U_{1\max} = k \times 6.3 = 109.4kV$$

(2) 最小负荷时，变压器电压损耗小，低压侧电压不能高于 $6.6kV$ ，因此变比 k 应当

$$K \geq \frac{U_{1\min} - \Delta U_{\min}}{6.6} = \frac{113 - 2.34}{6.6} = 16.77$$

$$\text{变压器高压侧分接头电压 } U_{1\min} = k \times 6.3 = 105.6kV$$

(3) 变压器高压侧分接头电压取两者的平均值

$$U_1 = \frac{U_{1\max} + U_{1\min}}{2} = \frac{109.4 + 105.6}{2} = 107.5kV$$

考虑到变压器高压侧的分接头有五个，分别为： $115.5kV$ 、 $112.75kV$ 、 $110kV$ 、 $107.25kV$ 、 $104.5kV$ ，所以选择最接近的分接头 $107.25kV$ 。

3、校验选择结果

按照所选择的分接头计算变压器低压侧电压

$$\text{最大负荷时: } U_{2\max} = \frac{U_{1\max} - \Delta U_{\max}}{k} = \frac{110 - 5.7}{\frac{107.25}{6.3}} = 6.13kV > 6kV$$

$$\text{最小负荷时: } U_{2\min} = \frac{U_{1\min} - \Delta U_{\min}}{k} = \frac{113 - 2.34}{\frac{107.25}{6.3}} = 6.5kV < 6.6kV$$

根据计算结果可见，所选分接头能够满足调压要求。

第二部分 电力系统暂态分析

第七章 电力系统故障分析的基本知识

一、基本要求

掌握电力系统故障的类型和电力系统故障的危害性；掌握电力系统各元件参数标幺值的计算和电力系统故障分析的标幺值等值电路；了解无限大电源系统三相短路电流分析；掌握无限大电源系统三相短路电流的周期分量、短路冲击电流、最大有效值电流和短路容量的计算。

二、重点内容

1、电力系统故障类型

电力系统的故障分为：短路故障和断线故障。电力系统的短路故障一般称为横向故障，它是相对相或者相对地发生的故障；断线故障称为纵向故障，包括一相断线、两相断线和三相断线故障。

电力系统的故障大多数是短路故障。我们着重分析短路故障。

2、短路故障的类型

短路故障的类型分为三相短路、单相短路接地、两相短路和两相短路接地。其中三相短路时三相回路依旧是对称的，因此称为对称短路；其它三种短路都使得三相回路不对称，故称为不对称短路。断线故障中，一相断线或者两相断线会使系统出现非全运行情况，也属于不对称故障。

在电力系统实际运行中，单相短路接地故障发生的几率较高，其次是两相短路接地和两相短路，出现三相短路的几率很少。

需要注意的是：中性点不接地系统发生单相接地故障时，接地电流很小，允许运行 1~2 小时。

3、电力系统各元件参数标幺值的计算（近似计算）

(1) 发电机
$$X_{*(B)} = X_{*(N)} \cdot \frac{S_B}{S_N} \dots\dots\dots (7-1)$$

式中 $X_{*(N)}$ —— 发电机额定值为基准值的电抗标么值； S_B —— 基准容量；
 S_N —— 发电机额定容量。

(2) 变压器
$$X_{*(B)} = \frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{S_B}{S_N} \dots\dots\dots (7-2)$$

式中 $U_K \%$ —— 变压器短路电压百分数。

(3) 电力线路
 架空线路
$$X_{*(B)} = 0.4 \cdot L \cdot \frac{S_B}{U_B^2} \dots\dots\dots (7-3)$$

电缆线路
$$X_{*(B)} = 0.08 \cdot L \cdot \frac{S_B}{U_B^2} \dots\dots\dots (7-4)$$

式中 L —— 电力线路长度； U_B —— 基准电压。

(4) 电抗器
$$X_{*(B)} = \frac{X_R \%}{100} \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3}I_N} \cdot \frac{S_B}{U_B^2} \dots\dots\dots (7-5)$$

式中 $X_R \%$ —— 电抗器电抗百分数； I_B 、 U_B —— 基准电流、电压；
 I_N 、 U_N —— 电抗器额定电流、电压。

4、无限大功率电源系统三相短路分析

(1) 系统电源功率为无限大时，外电路发生故障引起的功率变化远远小于电源功率，因而电源的电压和频率均为恒定的系统，称为无限大功率电源系统。

(2) 无限大功率电源系统发生三相短路时，短路电流包含两个分量：一个是幅值恒定的交流分量（周期分量）；一个是衰减的直流分量（非周期分量）。短路的全电流为：

$$i_a = I_m \sin(\omega t + \alpha - \phi) + C e^{-\frac{t}{T_a}} \dots\dots\dots (7-6)$$

式中 I_m —— 短路电流周期分量的幅值； C —— 积分常数；
 T_a —— 短路电流非周期分量衰减时间常数。

(3) 短路冲击电流、最大有效值电流、短路容量

冲击电流：
$$i_M = K_M I_m = \sqrt{2} K_M I'' = \begin{cases} 2.55 I'' & K_M = 1.8 \\ 2.69 I'' & K_M = 1.9 \end{cases} \dots\dots\dots (7-7)$$

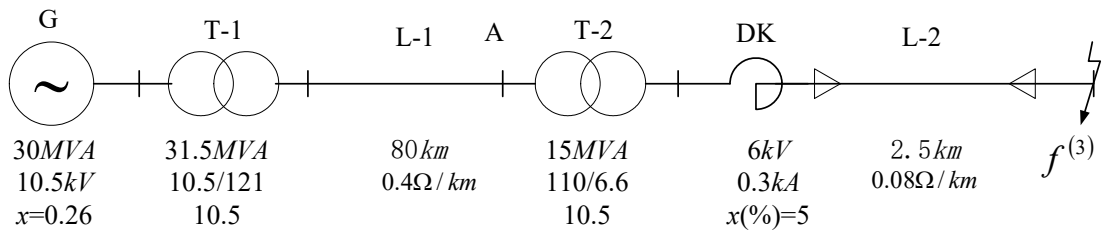
$$\text{最大有效值电流: } I_M = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + 2(K_M - 1)^2} = \begin{cases} 1.52I'' & K_M = 1.8 \\ 1.62I'' & K_M = 1.9 \end{cases} \dots\dots\dots (7-8)$$

$$\text{短路容量: } S_d = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_d \dots\dots\dots (7-9)$$

式中 I_d —— 短路电流周期分量的有效值。

三、例题分析

例 7-1: 电力网络接线如图所示, 计算网络各元件参数标么值, 并画出网络等值电路。



解: 采用近似计算。

选取 $S_B = 100MVA$, U_B 选取各段的平均电压, 则各元件的电抗标么值为:

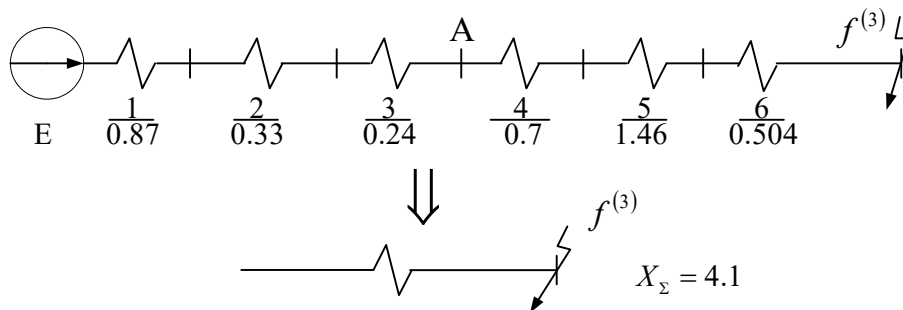
$$\begin{aligned} U_{BI} &= 10.5kV & I_{B1} &= \frac{S_B}{\sqrt{3}U_{B1}} = \frac{100}{\sqrt{3} \times 10.5} = 5.5kA \\ U_{BII} &= 115kV & I_{B2} &= \frac{S_B}{\sqrt{3}U_{B2}} = \frac{100}{\sqrt{3} \times 115} = 0.5kA \\ U_{BIII} &= 6.3kV & I_{B2} &= \frac{S_B}{\sqrt{3}U_{B3}} = \frac{100}{\sqrt{3} \times 6.3} = 9.2kA \end{aligned}$$

1. 发电机 $X_G = X_{*N} \cdot \frac{S_B}{S_N} = 0.26 \times \frac{100}{30} = 0.87$
2. 变压器 T-1 $X_{T1} = \frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{S_B}{S_N} = 0.105 \times \frac{100}{31.5} = 0.33$
3. 架空线路 L-1 $X_{L1} = 0.4L \cdot \frac{S_B}{U_B^2} = 0.4 \times 80 \times \frac{100}{115^2} = 0.24$
4. 变压器 T-2 $X_{T2} = \frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{S_B}{S_N} = 0.105 \times \frac{100}{15} = 0.7$

5. 电抗器
$$X_{DK} = \frac{X\%}{100} \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3}I_N} \cdot \frac{S_B}{U_B^2} = 0.05 \times \frac{6}{\sqrt{3} \times 0.3} \cdot \frac{100}{6.3^2} = 1.46$$

6. 电缆线路 L-2
$$X_{L2} = 0.08L \cdot \frac{S_B}{U_B^2} = 0.08 \times 2.5 \times \frac{100}{6.3^2} = 0.504$$

画出等值电路为:



$$I_*'' = \frac{1}{X_\Sigma} = \frac{1}{4.1} = 0.24$$

$$I'' = I_*'' = I_{B3} = 0.24 \times 9.2 = 2.2 \text{ kA}$$

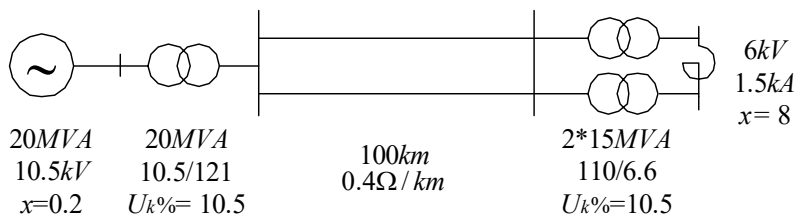
$$I_M = 2.55 I'' = 2.55 \times 2.2 = 5.2 \text{ kA}$$

$$I_M = 1.52 I'' = 1.52 \times 2.2 = 3.38 \text{ kA}$$

$$U_{A*} = I_*'' (X_4 + X_5 + X_6) = 0.24 (0.7 + 1.46 + 0.504) = 0.62$$

$$U_A = U_{A*} \cdot U_{B2} = 0.62 \times 115 = 73.6 \text{ kV}$$

例 7-2: 电力网络接线如图所示, 计算网络各元件参数标么值, 并画出网络等值电路。



解: 采用近似计算。

选取 $S_B = 100 \text{ MVA}$, U_B 选取各段的平均电压, 则各元件的电抗标么值为:

1. 发电机
$$X_G = X_{*N} \cdot \frac{S_B}{S_N} = 0.2 \times \frac{100}{20} = 1.0$$

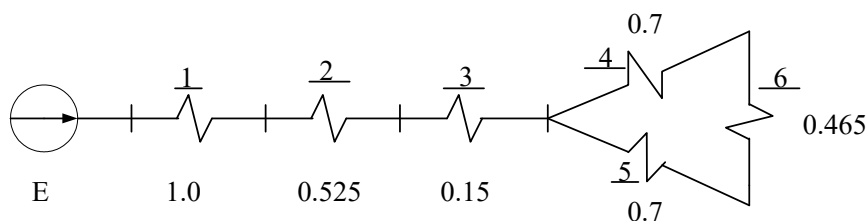
2. 变压器 T-1
$$X_{T1} = \frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{S_B}{S_N} = 0.105 \times \frac{100}{20} = 0.525$$

3. 架空线路 L
$$X_L = \frac{1}{2} \cdot 0.4 \cdot L \cdot \frac{S_B}{U_B^2} = 0.5 \times 0.4 \times 100 \times \frac{100}{115^2} = 0.151$$

4. 变压器 T-2
$$X_{T2} = \frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{S_B}{S_N} = 0.105 \times \frac{100}{15} = 0.7$$

5. 电抗器
$$X_{DK} = \frac{X \%}{100} \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3}I_N} \cdot \frac{S_B}{U_B^2} = 0.08 \times \frac{6}{\sqrt{3} \times 1.5} \cdot \frac{100}{6.3^2} = 0.465$$

等值电路为:



第八章 同步发电机突然三相短路分析

一、基本要求

了解同步发电机突然三相短路的物理过程及短路电流的近似分析；掌握发电机的暂态和次暂态参数；了解其等值电路以及同步发电机稳态运行方程。

二、重点内容

1、同步发电机突然三相短路时，短路电流的分析

定子回路电流：稳定的交流、衰减的交流、衰减的直流、衰减的二倍频率交流。

转子回路电流：稳定的直流、衰减的直流、衰减的交流。

2、同步发电机突然三相短路时，短路电流周期分量初始值计算

(1) 不计阻尼绕组

$$\text{短路前定子的电压方程：} \quad \dot{E}'_{q|0} = \dot{U}_{q|0} + j\dot{I}_{d|0}x'_d \quad \dots\dots\dots (8-1)$$

式中 $\dot{E}'_{q|0}$ —— 发电机交轴暂态电势； $\dot{U}_{q|0}$ —— 短路前端电压的交轴分量；

$\dot{I}_{d|0}$ —— 短路前电流的直轴分量； x'_d —— 发电机直轴暂态电抗。

暂态电势 $\dot{E}'_{q|0}$ 在短路前后瞬间是不变的，因此可以由短路前运行方式求得的 $\dot{E}'_{q|0}$ 来计算短路电流周期分量的起始值，即暂态电流 \dot{I}' ：

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}' &= \dot{E}'_{q|0} / jx'_d \\ \dot{I}' &= \dot{E}'_{q|0} / x'_d \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (8-2)$$

工程计算中为了简便计算，虚构暂态电势 $\dot{E}'_{|0}$ 代替 $\dot{E}'_{q|0}$ ：

$$\dot{E}'_{|0} = \dot{U}_{|0} + j\dot{I}_{|0}x'_d \quad \dots\dots\dots (8-3)$$

则暂态电流近似计算公式为：

$$\dot{I}' = \dot{E}'_{|0} / x'_d \quad \dots\dots\dots (8-4)$$

(2) 计及阻尼绕组

$$\text{短路前定子的电压方程：} \quad \dot{E}''_{q|0} = \dot{U}_{q|0} + j\dot{I}_{d|0}x''_d \quad \dots\dots\dots (8-5)$$

$$\dot{E}''_{d|0} = \dot{U}_{d|0} + j\dot{I}_{q|0}x''_q \quad \dots\dots\dots (8-6)$$

式中 $\dot{E}''_{q|0}$ 、 $\dot{E}''_{d|0}$ —— 发电机交轴、直轴次暂态电势； $\dot{U}_{q|0}$ 、 $\dot{U}_{d|0}$ —— 短路前端电压的

交轴、直轴分量； $\dot{I}_{d|0|}$ 、 $\dot{I}_{q|0|}$ ——短路前电流的直轴、交轴分量； x_d'' 、 x_q'' ——发电机直轴、交轴次暂态电抗。

次暂态电势 $\dot{E}_{q|0|}''$ 和 $\dot{E}_{d|0|}''$ 在短路前后瞬间是不变的，因此可以由短路前运行方式求得的次暂态电势来计算次暂态电流：

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_d'' &= \dot{E}_{q|0|}'' / jx_d'' \\ \dot{I}_q'' &= \dot{E}_{d|0|}'' / jx_q'' \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8-7)$$

式中 \dot{I}_d'' 、 \dot{I}_q'' ——直轴、交轴次暂态电流。

工程计算中为了简便计算，虚构次暂态电势 $\dot{E}_{|0|}''$ ：

$$\dot{E}_{|0|}'' = \dot{U}_{|0|} + j\dot{I}_{|0|}x_d'' \dots\dots\dots (8-8)$$

则次暂态电流计算公式为：

$$I'' = E_{|0|}'' / x_d'' \dots\dots\dots (8-9)$$

3、发电机的同步电抗、暂态电抗、次暂态电抗

发电机直轴同步电抗 $x_d = x_\sigma + x_{ad} \dots\dots\dots (8-10)$

式中 x_σ ——发电机定子漏抗； x_{ad} ——发电机直轴主磁路电抗。

发电机直轴暂态电抗 $x_d' = x_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{f\sigma}}} \dots\dots\dots (8-11)$

式中 $x_{f\sigma}$ ——发电机励磁绕组漏抗。

发电机直轴次暂态电抗 $x_d'' = x_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{f\sigma}} + \frac{1}{x_{D\sigma}}} \dots\dots\dots (8-12)$

式中 $x_{D\sigma}$ ——发电机直轴阻尼绕组漏抗。

发电机交轴次暂态电抗 $x_q'' = x_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{x_{aq}} + \frac{1}{x_{Q\sigma}}} \dots\dots\dots (8-13)$

式中 $x_{Q\sigma}$ ——发电机交轴阻尼绕组漏抗。

由以上分析可见： $x_d > x'_d > x''_d$ 。

4. 同步发电机稳态运行方程

同步发电机正常运行时电压方程式：

$$\dot{U} = -r\dot{I} - jx_d\dot{I}_d - jx_q\dot{I}_q + \dot{E}_q \quad \dots\dots\dots (8-14)$$

式中 \dot{U} —— 发电机端电压相量； \dot{I} —— 电流相量。

三、例题分析

例 8-1： 一台凸极发电机，其 x_d 和 x_q 分别为 0.7 和 0.4。如果发电机运行在额定电压和满负荷情况 ($\cos\varphi = 0.8$)，试计算失掉负荷前后发电机端电压升高多少？计算中忽略定子电阻和磁路饱和。

解：同步发电机正常运行相量图如右所示。

因为同步发电机运行在额定状况、满载运行，取 $\dot{U} = 1\angle 0^\circ$ ， 则

$$\dot{I} = 1\angle -\cos^{-1} 0.8 = 1\angle -36.87^\circ$$

即 $\delta = 14.47^\circ$ 。 所以有

$$\begin{aligned} \dot{E}_q &= U \cos \delta + I_d x_d = U \cos \delta + x_d I \sin(\varphi + \delta) \\ &= 0.968 + 0.564 = 1.515 \end{aligned}$$

发电机失去负荷后端电压升高 $\Delta U = E_q - U = 0.515$ 。

例 8-2： 一台 100 MVA 发电机，其有关参数如下：

$$\begin{array}{lll} x_d = 1.2 & x'_d = 0.3 & x''_d = 0.2 \\ T_a = 0.25 \text{ s} & T_d = 1 \text{ s} & T''_d = 0.04 \text{ s} \end{array}$$

发电机原来作空载运行，其端电压等于额定电压。如果在 $u_a = 0$ 时突然在发电机端部发生三相短路。试计算：

1. 短路瞬间电流周期分量的有效值。
2. 短路三个周期时 a 相的直流分量大小（忽略二倍频率分量）。

解：1. 在 $u_a = 0$ 时突然三相短路， $u_a = U_a \sin \omega t$ 。

短路前为空载运行，因此短路瞬间电流周期分量有效值为：

$$I_* = \frac{E_{q|0|}}{x_d''} = \frac{1}{0.2} = 5$$

2. 忽略二倍频率分量，则直流分量的起始值等于周期分量的起始值 $\sqrt{2} \times 5$ ，直流分量的衰减时间常数为 T_a ，因此短路三个周期（ $3 \times 0.02s$ ）时

$$I_{\text{直流}} = \sqrt{2} \cdot 5 \cdot e^{-t/T_a} = \sqrt{2} \cdot 5 \cdot e^{-0.06/0.25} = 5.562$$

第九章 电力系统三相短路的实用计算

一、基本要求

掌握电力系统三相短路电流周期分量初始值的计算；掌握运用运算曲线求任意时刻的短路电流周期分量；了解复杂电力系统三相短路的计算。

二、重点内容

1、电力系统三相短路电流周期分量初始值的计算

在短路计算中，近似的认为 \dot{E}'' 在突然短路前后瞬间不突变，这样就可以用短路前的正常运行状态计算出 $\dot{E}''_{|0|}$ ，设正常时发电机的端电压为 $\dot{U}_{|0|}$ ，电流为 $\dot{I}_{|0|}$ ，则：

$$\dot{E}''_{|0|} = \dot{U}_{|0|} + j\dot{I}_{|0|}x''_d \quad \dots\dots\dots (9-1)$$

其模值为：

$$E''_{|0|} = \sqrt{(U_{|0|} + I_{|0|}x''_d \sin \varphi_{|0|})^2 + (I_{|0|}x''_d \cos \varphi_{|0|})^2} \quad \dots\dots\dots (9-2)$$

$$\approx U_{|0|} + I_{|0|}x''_d \sin \varphi_{|0|}$$

短路电流周期分量初始值 I'' 为：

$$I'' = \frac{E''_{|0|}}{X_\Sigma} \quad \dots\dots\dots (9-3)$$

式中 X_Σ 为电源点到短路点的等值电抗。

如果在计算中忽略负荷，则短路前为空载状态，电源的次暂态电势 \dot{E}'' 取为额定电压，其标么值为 1.0。

2、运用运算曲线求任意时刻的短路电流周期分量

(1) 转移电抗

各电源电动势节点到短路点之间的电抗称为该电源对电路点间的转移电抗。

各电源点之间的转移电抗只影响电源之间的不平衡电流。

(2) 计算电抗 x_{js}

将各电源与短路点间的转移电抗分别归算到各电源的额定容量下的标么值，得到各电源的计算电抗 x_{js} 。

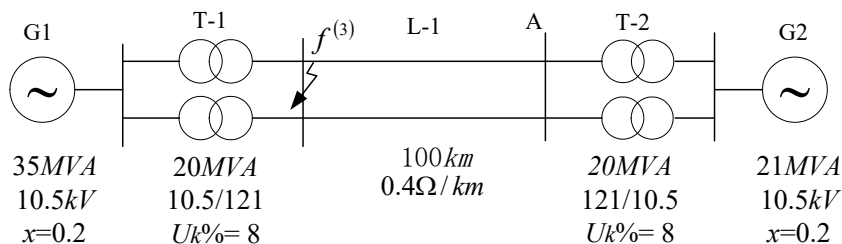
(3) 查运算曲线求任意时刻的短路电流周期分量

根据各电源的计算电抗 x_{js} ，查运算曲线得到各电源至短路点的某时刻的短路电流标么值（是以发电机额定功率为基准的标么值）。

短路点的总电流为各电源至短路点的短路电流标么值换算得到的有名值之和。

三、例题分析

例 9-1： 电力网络接线如图所示，计算 f 点发生三相短路时的 I'' 、 $I_{0.2s}$ 。



解： 1. 选取 $S_B = 56MVA$ ， U_B 选取各段的平均电压，则各元件的电抗标么值为：

$$U_{B1} = 10.5kV \quad I_{B1} = \frac{56}{\sqrt{3} \times 10.5} = 3.14kA$$

$$U_{B2} = 115kV \quad I_{B2} = \frac{56}{\sqrt{3} \times 115} = 0.29kA$$

$$U_{B3} = 10.5kV \quad I_{B3} = \frac{56}{\sqrt{3} \times 10.5} = 3.14kA$$

$$\text{发电机} \quad X_{G1} = X_{*N} \cdot \frac{S_B}{S_N} = 0.2 \times \frac{56}{35} = 0.32$$

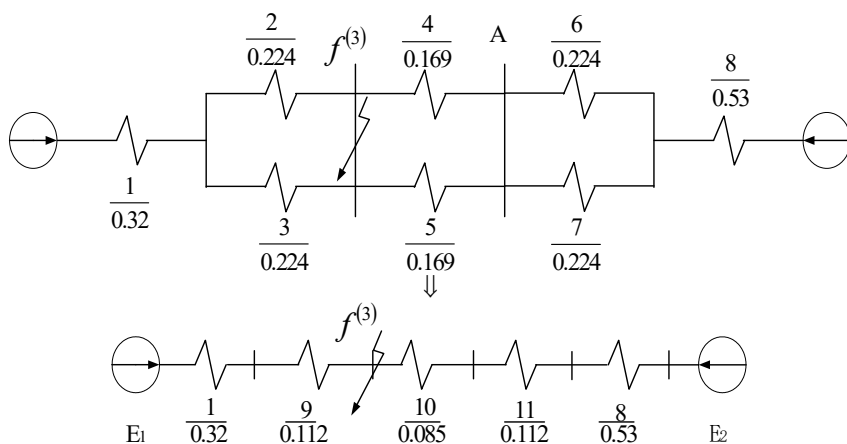
$$\text{变压器 T1} \quad X_{T1} = \frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{S_B}{S_N} = 0.105 \times \frac{56}{20} = 0.224$$

$$\text{线路 L1} \quad X_{L1} = 0.4L \cdot \frac{S_B}{U_B^2} = 0.4 \times 100 \times \frac{56}{115^2} = 0.169$$

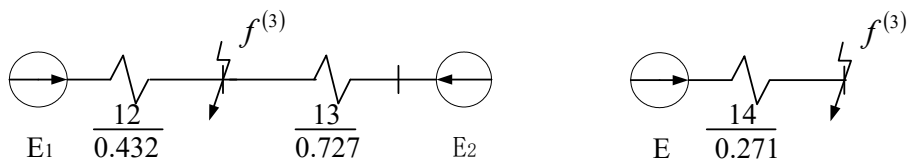
$$\text{变压器 T2} \quad X_{T2} = \frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{S_B}{S_N} = 0.105 \times \frac{56}{20} = 0.224$$

$$\text{发电机} \quad X_{G2} = X_{*N} \cdot \frac{S_B}{S_N} = 0.2 \times \frac{56}{21} = 0.53$$

2. 画出等值电路：



3. 化简为:



4. 计算电流

(1) 三相短路点的起始次暂态电流 (近似计算) $I_{f*}'' = \frac{1}{0.271} = 3.69$

$$I'' = I_{f*}'' I_B = 3.69 \times \frac{56}{\sqrt{3} \times 115} = 1.037 kA$$

$$I_{f*2} = I_{f*}'' \frac{0.432}{0.432 + 0.727} = 1.34$$

$$U_{A*} = I_{f*2} \times X_{10} = 1.34 \times 0.085 = 0.114$$

$$U_A = U_{A*} \cdot U_{B2} = 0.114 \times 115 = 13.11 kV$$

(2) 三相短路电流周期分量有效值 $I_{0.2S}$ (查运算曲线法)

方法一: 同一算法 (将两个电源并联):

$$X_{js} = 0.271 (S_B = 56 MVA), \text{ 查运算曲线得到 } I_{0.2S*} = 3.18 \approx 3.2$$

$$I_{0.2S} = I_{0.2S*} I_B = 3.18 \times \frac{56}{\sqrt{3} \times 115} = 0.894 kA$$

方法二: 个别算法 (两个电源分别处理):

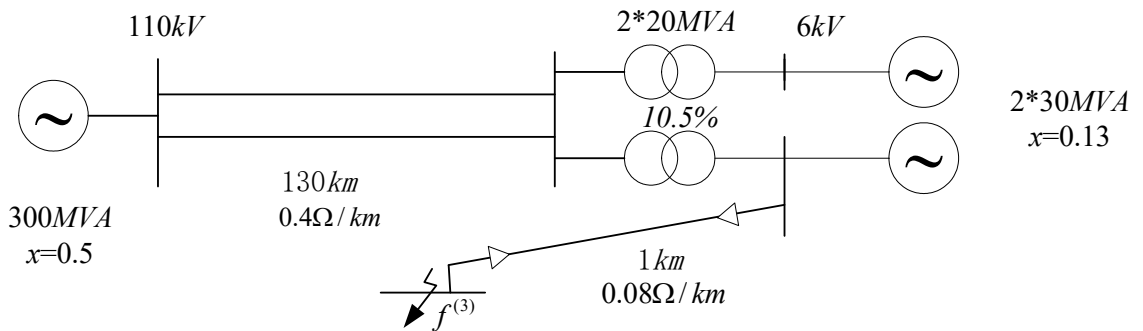
$$E_1: X_{js1} = 0.432 \times \frac{35}{56} = 0.27, \quad \text{查运算曲线得到 } I_{0.2S 1^*} = 3.19$$

$$E_2: X_{js2} = 0.727 \times \frac{21}{56} = 0.273, \quad \text{查运算曲线得到 } I_{0.2S 2^*} = 3.16$$

$$I_{0.2S} = I_{0.2S 1^*} I_{B1} + I_{0.2S 2^*} I_{B2} = 3.19 \times \frac{35}{\sqrt{3} \times 115} + 3.16 \times \frac{21}{\sqrt{3} \times 115} = 0.893 \text{ kA}$$

这里采用同一计算法和个别计算法分别计算 $I_{0.2S}$ ，计算结果相差很小。这是由于两个电源同为水轮发电机组，而且两个电源距离故障点的远近也相差不大，因此将两个电源并联处理，计算误差不大。

例 9-2：某系统接线如图。取 $S_B = 300 \text{ MVA}$ ，计算各发电机对短路点 f 的转移阻抗。



解：1. 选取 $S_B = 300 \text{ MVA}$ ， U_B 选取各段的平均电压，则各元件的电抗标幺值为：

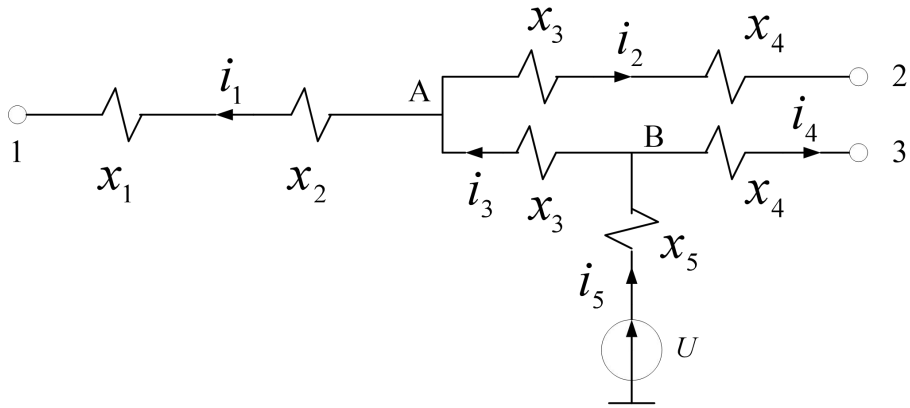
$$U_{B1} = 115 \text{ kV} \quad I_{B1} = \frac{300}{\sqrt{3} \times 115}$$

$$U_{B2} = 6.3 \text{ kV} \quad I_{B2} = \frac{300}{\sqrt{3} \times 6.3}$$

$$x_1 = 0.5; \quad x_2 = 130 \times 0.5 \times 0.4 \times \frac{300}{115^2} = 0.59; \quad x_3 = 0.105 \times \frac{300}{20} = 1.575;$$

$$x_4 = 0.13 \times \frac{300}{30} = 1.3; \quad x_5 = 1 \times 0.08 \times \frac{300}{6.3^2} = 0.605$$

4. 画出等值电路：



3. 求转移阻抗:

在短路点加电压, 设 $i_1 = 1A$,

$$\text{则 } U_A = x_1 + x_2 = 1.09$$

$$i_2 = \frac{U_A}{x_3 + x_4} = \frac{x_1 + x_2}{x_3 + x_4} = 0.379$$

$$i_3 = i_1 + i_2 = 1.379$$

$$U_B = U_A + i_3 \cdot x_3 = 1.09 + 2.172 = 3.262$$

$$i_4 = \frac{U_B}{x_4} = 2.509$$

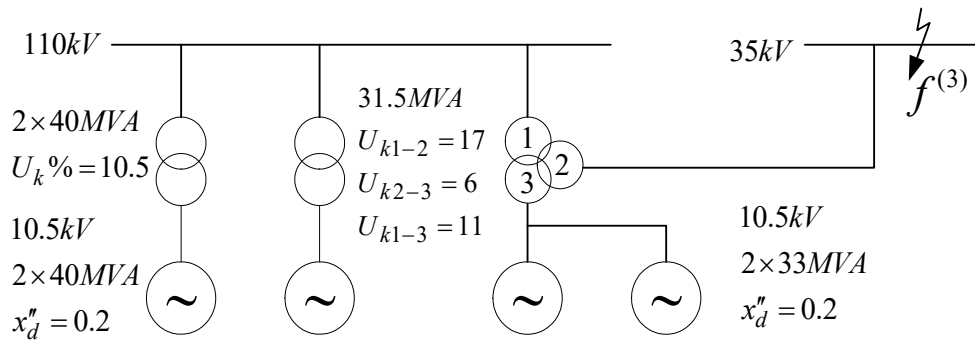
$$i_5 = i_3 + i_4 = 3.888$$

$$U = U_B + i_5 \cdot x_5 = 5.614$$

各发电机对短路点 f 的转移阻抗为:

$$x_{1f} = \frac{U}{i_1} = 5.614 \quad ; \quad x_{2f} = \frac{U}{i_2} = 14.814 \quad ; \quad x_{3f} = \frac{U}{i_4} = 2.238 \quad .$$

例 9-3: 系统接线如图。计算 f 点发生三相短路时的起始暂态电流。



解：1. 等值电路如图。选取 $S_B = 100MVA$ ， U_B 选取各段的平均电压，则各元件的电抗标幺值为：

$$x_1 = x_3 = 0.105 \times \frac{100}{40} = 0.263$$

$$x_2 = x_4 = 0.2 \times \frac{100}{40} = 0.5$$

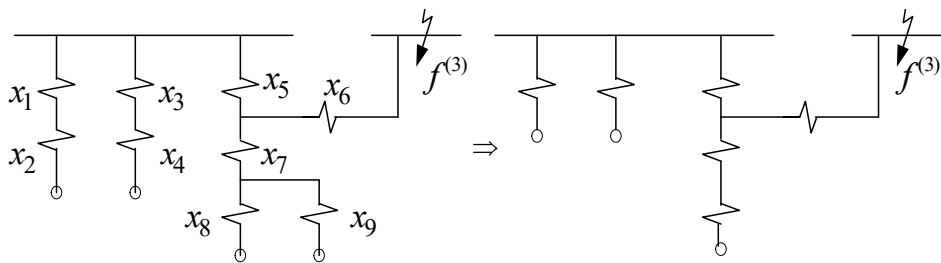
$$x_5 = \frac{1}{2}(0.17 + 0.11 - 0.06) \times \frac{100}{31.5} = 0.349$$

$$x_6 = \frac{1}{2}(0.17 + 0.06 - 0.11) \times \frac{100}{31.5} = 0.190$$

$$x_7 = \frac{1}{2}(0.11 + 0.06 - 0.17) \times \frac{100}{31.5} = 0$$

$$x_8 = x_9 = 0.2 \times \frac{100}{33} = 0.606$$

等值电路：



2. 计算自短路点看进去的等值电抗：

$$x = \left\{ \left[\frac{1}{2}(x_1 + x_2) + x_5 \right] // \left(\frac{1}{2}x_8 + x_7 \right) \right\} + x_6 = 0.190 + 0.214 = 0.404$$

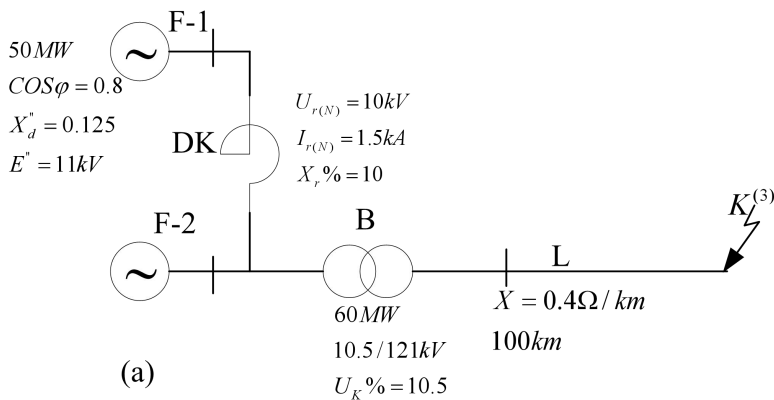
3. 计算起始暂态电流:

$$I_*'' = \frac{1}{x} = 2.474$$

$$I'' = I_*'' \cdot I_B = 2.474 \times \frac{100}{\sqrt{3} \times 37} = 3.86 \text{ kA}$$

例 9-4: 某电力系统如图所示, 发电机 F-1 和 F-2 参数相同, 各元件参数已在图中标出。

- (1) 取 $S_B = 100 \text{ MVA}$, $U_B = U_{av}$, 计算各元件的标幺值参数;
- (2) 当再网络中的 K 点发生三相短路时, 求短路点的 i_{imp} , I_{imp} 和 S_{kl} 的有名值;
- (3) 求上述情况下流过发电机 F-1 和 F-2 的 i_{imp} 的有名值。



解

- (1) 计算各元件参数在统一基准下的标幺值
各电压段的基准值为:

$$S_B = 100 \text{ MVA}$$

$$U_{B(1)} = 10.5 \text{ kV} \quad I_{B(1)} = \frac{S_B}{\sqrt{3}U_{B(1)}} = \frac{100}{\sqrt{3} \times 10.5} = 5.499 \text{ kA}$$

$$U_{B(2)} = 115 \text{ kV} \quad I_{B(2)} = \frac{S_B}{\sqrt{3}U_{B(2)}} = \frac{100}{\sqrt{3} \times 115} = 0.502 \text{ kA}$$

各元件参数的标幺值为:

发电机 F-1, F-2, $E_*'' = \frac{E_*''}{U_{B(1)}} = \frac{11}{10.5} = 1.048$

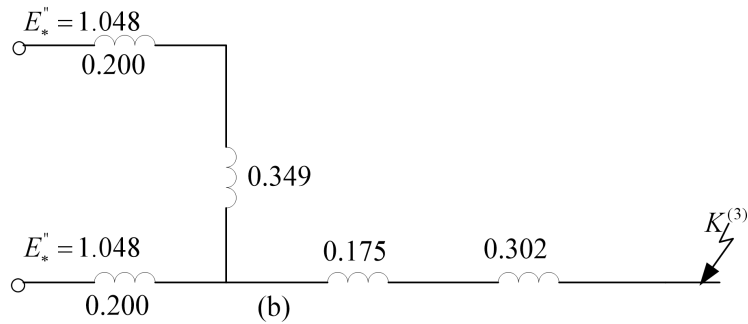
$$X_{d*}'' = 0.125 \times \frac{100}{50/0.8} = 0.200$$

电抗机 DK, $X_{r*} = \frac{10}{100} \times \frac{5.499}{1.5} \times \frac{10}{10.5} = 0.349$

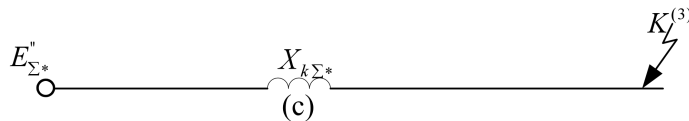
变压器 B, $X_{T*} = \frac{10.5}{100} \times \frac{100}{60} = 0.175$

输电线路 L, $X_{L*} = 0.4 \times 100 \times \frac{100}{115^2} = 0.302$

等值网络如图 (b) 所示。



因为网络中各电源电势相同, 故组合电势等于化简前的电源电势, 化简后的网络如图 (c) 所示,



图中

$$E_{\Sigma*}'' = 1.048$$

$$X_{k\Sigma*} = (0.2 // 0.549) + 0.175 + 0.302 = 0.624$$

(2) 求短路点的 i_{imp} , I_{imp} , S_{kt}

周期分量有效值, $I_{per*}'' = \frac{E_{\Sigma*}''}{X_{k\Sigma*}} = \frac{1.048}{0.624} = 1.680$

$$I_{per}'' = I_{per*}'' \times I_{B(2)} = 1.680 \times 0.502 = 0.843 \text{ kA}$$

取 $K_{imp} = 1.8$, 则

$$i_{imp} = \sqrt{2} K_{imp} I_{per}'' = \sqrt{2} \times 1.8 \times 0.843 = 2.146 \text{ kA}$$

$$I_{imp} = \sqrt{1 + 2(K_{imp} - 1)^2 I_{per}''} = 1.273kA$$

$$S_{kt} = I_{per}'' S_B = 1.680 \times 0.502 = 0.843kA$$

(3) 求流过发电机 F-1, F-2 的~的有名值。

通过 F-1 的 i_{imp}

$$i_{imp} = 2.146 \times \frac{115}{10.5} \times \frac{0.2}{0.549 + 0.2} = 6.276kA$$

通过 F-2 的 i_{imp}

$$i_{imp} = 2.146 \times \frac{115}{10.5} \times \frac{0.549}{0.549 + 0.2} = 17.228kA$$



第十章对称分量法及电力系统元件 的各序参数和等值电路

一、基本要求

掌握对称分量法；掌握各元件负序和零序参数的计算原理和方法；掌握正序、负序、零序的等值电路形成方法。

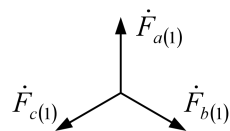
二、重点内容

1、对称分量法

三组对称的三相向量（如图）分别为：

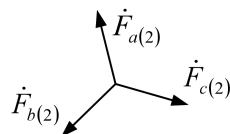
- (1) 正序分量： $\dot{F}_{a(1)}$ 、 $\dot{F}_{b(1)}$ 、 $\dot{F}_{c(1)}$ 幅值相等，相位互差 120° ，相序为 a 超前 b 超前 c。因此有： $\dot{F}_{c(1)} = \alpha \dot{F}_{a(1)}$ ， $\dot{F}_{b(1)} = \alpha^2 \dot{F}_{a(1)}$ 。

式中 $\alpha = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ ， $\alpha^2 = e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$ 。

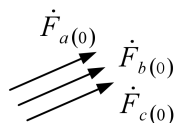


- (2) 负序分量： $\dot{F}_{a(2)}$ 、 $\dot{F}_{b(2)}$ 、 $\dot{F}_{c(2)}$ 幅值相等，相位互差 120° ，但相序与正序相反，为 a 超前 c 超前 b。因此有：

$$\dot{F}_{b(2)} = \alpha \dot{F}_{a(2)}, \quad \dot{F}_{c(2)} = \alpha^2 \dot{F}_{a(2)}。$$



- (3) 零序分量： $\dot{F}_{a(0)}$ 、 $\dot{F}_{b(0)}$ 、 $\dot{F}_{c(0)}$ 幅值和相位均相同，完全相等。因此有： $\dot{F}_{a(0)} = \dot{F}_{b(0)} = \dot{F}_{c(0)}$ 。



正序、负序、零序三组对称的三相向量合成得到一组不对称的三相向量 \dot{F}_a 、 \dot{F}_b 、 \dot{F}_c 。这组不对称三相向量与三组对称分量中 a 相的关系为：

$$\begin{bmatrix} \dot{F}_a \\ \dot{F}_b \\ \dot{F}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{F}_{a(1)} \\ \dot{F}_{a(2)} \\ \dot{F}_{a(0)} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (10-1)$$

其逆关系为:

$$\begin{bmatrix} \dot{F}_{a(1)} \\ \dot{F}_{a(2)} \\ \dot{F}_{a(0)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{F}_a \\ \dot{F}_b \\ \dot{F}_c \end{bmatrix} \dots\dots\dots (10-2)$$

说明一组不对称向量可以唯一地分解成三组对称分量: 正序分量、负序分量和零序分量。

2、变压器的零序电抗和等值电路

变压器是静止元件, 正序和负序电抗是相等的, 零序电抗与正序、负序电抗是不相同的。变压器的零序电抗与变压器绕组的接线方式和变压器的结构密切相关。

(1) 双绕组变压器

零序电压施加在变压器绕组的三角形侧或不接地星形侧时, 变压器中都没有零序电流流通, 变压器的零序电抗 $x_{(0)} = \infty$ 。

零序电压施加在接地星形侧时, 该侧零序电流经中性点流入大地, 构成回路; 但另一侧零序电流流通情况决定于其接线方式。

a. Y_0 / Δ 接线变压器

变压器 Y_0 侧流过零序电流时, 在三角形侧将感应零序电动势, 并在三角形内部形成环流, 零序电流流不到绕组以外。三角形侧感应的电动势以电压降的形式完全降落于该侧的漏电抗中, 相当于该侧绕组接地。变压器的零序电抗 $x_{(0)} = x_1 + x_{II}$ (近似取 $x_{m(0)} = \infty$)。

b. Y_0 / Y 接线变压器

变压器 Y_0 侧流过零序电流时, 在 Y 侧将感应零序电动势, 但零序电流没有通路, 变压器相当于空载, 变压器的零序电抗 $x_{(0)} = x_1 + x_{m(0)}$ (近似取 $x_{m(0)} = \infty$, 则 $x_{(0)} = \infty$)。

c. Y_0 / Y_0 接线变压器

变压器一次 Y_0 侧流过零序电流, 在二次 Y_0 侧将感应零序电动势, 但二次绕组中是否有零序电流, 取决于外电路是否有接地中性点。如果外电路有接地中性点, 则二次绕组中有零序电流流通, 变压器的零序电抗 $x_{(0)} = x_1 + x_{II}$ (近似取 $x_{m(0)} = \infty$); 如果外电路没有接地中性点, 则二次绕组中没有零序电流流通, 变压器的零序电抗 $x_{(0)} = x_1 + x_{m(0)}$ (近似取 $x_{m(0)} = \infty$, 则 $x_{(0)} = \infty$)。

需要说明的是: 三相三柱式变压器由于 $x_{m(0)} \neq \infty$, 需计入 $x_{m(0)}$ 的具体数值。一般在实用计算中可以近似取 $x_{m(0)} = \infty$ 。

(2) 三绕组变压器

可以按照两个双绕组变压器来处理。

(3) 自耦变压器

自耦变压器一、二次绕组都是 Y_0 接线，如果有第三绕组，一般为三角形接线。

a. 中性点直接接地的 Y_0/Y_0 和 $Y_0/Y_0/\Delta$ 接线自耦变压器

它们的零序等值电路与普通的双绕组、三绕组变压器的完全相同。只是中性点的电流为： $3(i_{(0)I} - i_{(0)II})$ 。

b. 中性点经电抗接地的 Y_0/Y_0 和 $Y_0/Y_0/\Delta$ 接线自耦变压器

Y_0/Y_0 接线自耦变压器中性点经电抗 x_n 接地时，归算到一次侧的等值零序电抗为：

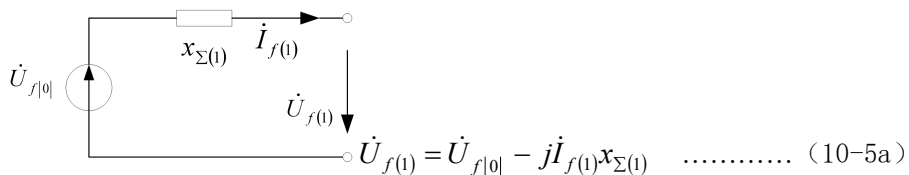
$$x'_{I-II} = x_{I-II} + 3x_n \left(1 - \frac{U_{IN}}{U_{II N}} \right)^2 \dots\dots\dots (10-3)$$

$Y_0/Y_0/\Delta$ 接线自耦变压器中性点经电抗 x_n 接地时，归算到一次侧的各侧零序电抗为：

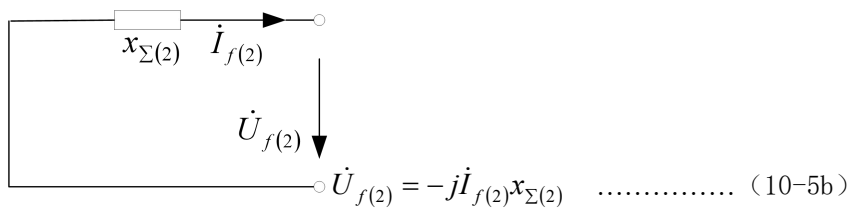
$$\left. \begin{aligned} x'_I &= x_I + 3x_n \left(1 - \frac{U_{IN}}{U_{II N}} \right) \\ x'_{II} &= x_{II} + 3x_n \frac{(U_{IN} - U_{II N})U_{IN}}{U_{II N}^2} \\ x'_{III} &= x_{III} + 3x_n \frac{U_{IN}}{U_{II N}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10-4)$$

3、电力系统正序、负序和零序网络的构成

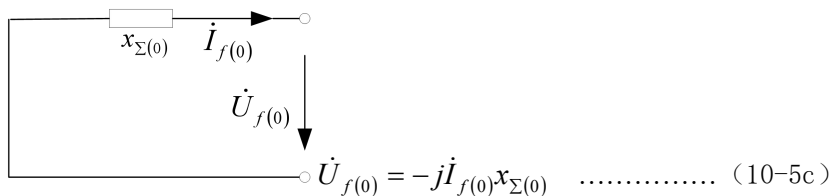
正序网络是一个有源网，正序电流的流通与变压器的接线方式和中性点的运行方式无关。正序网络的等值电路如下图所示，对应的电压电流方程为：



负序网络是一个无源网，负序电流的流通也与变压器的接线方式和中性点的运行方式无关。负序网络的等值电路如下图所示，对应的电压电流方程为：

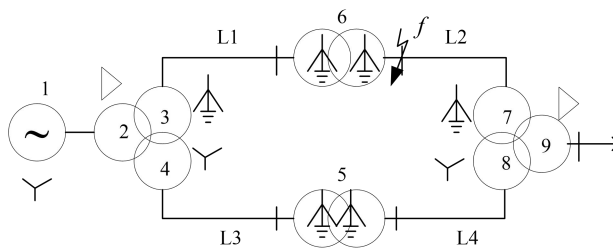


零序网络是一个无源网，零序电流的流通与变压器的接线方式和中性点的运行方式有关系。零序网络的等值电路如下图所示，对应的电压电流方程为：

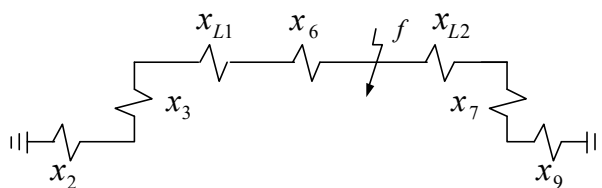


三、例题分析

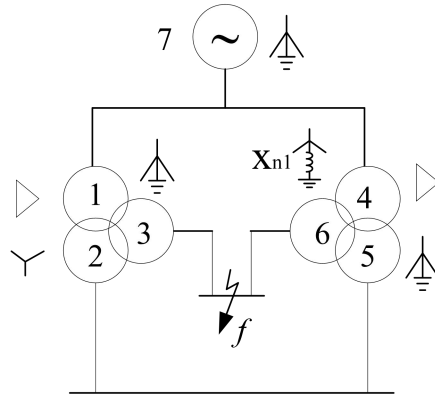
例 10-1： 电力网络接线如图所示，画出零序网络。



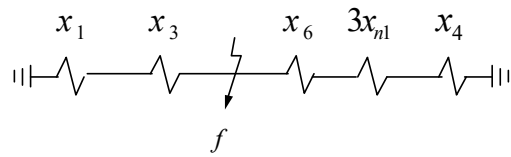
解： 零序网络：



例 10-2： 电力网络接线如图所示，画出零序网络。



解： 零序网络：



第十一章 不对称故障的分析计算

一、基本要求

掌握电力系统单相接地短路、两相短路和两相短路接地故障的电流、电压的计算；了解正序定则，掌握非故障处电流、电压的计算；了解非全相运行的分析计算。

二、重点内容

1、单相接地短路

电力系统发生 a 相短路接地，则边界条件方程为：

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{fa(1)} + \dot{U}_{fa(2)} + \dot{U}_{fa(0)} &= 0 \\ \dot{I}_{fa(1)} = \dot{I}_{fa(2)} = \dot{I}_{fa(0)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11-1)$$

根据单相短路的边界条件，可以得到单相短路的复合序网：

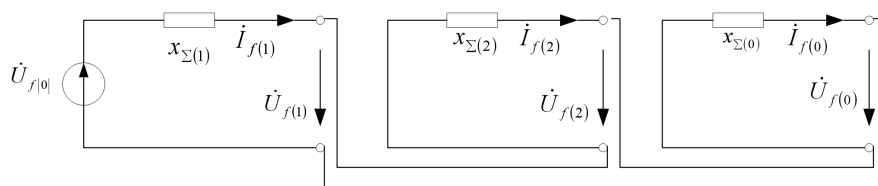


图 11-1 单相短路接地的复合序网

解联立方程 (11-1) 和 (10-11)，或者直接由复合序网均可推导出故障处三序电流为：

$$\dot{I}_{fa(1)} = \dot{I}_{fa(2)} = \dot{I}_{fa(0)} = \frac{\dot{U}_{fa|0}}{j(x_{\Sigma(1)} + x_{\Sigma(2)} + x_{\Sigma(0)})} \dots\dots\dots (11-2)$$

故障相 (a 相) 的短路电流为：

$$\dot{I}_{fa} = \dot{I}_{fa(1)} + \dot{I}_{fa(2)} + \dot{I}_{fa(0)} = \frac{3\dot{U}_{fa|0}}{j(x_{\Sigma(1)} + x_{\Sigma(2)} + x_{\Sigma(0)})} \dots\dots\dots (11-3)$$

故障处各序电压为：

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{fa(1)} &= \dot{U}_{fa|0|} - j\dot{I}_{fa(1)}x_{\Sigma(1)} \\ \dot{U}_{fa(2)} &= -j\dot{I}_{fa(2)}x_{\Sigma(2)} \\ \dot{U}_{fa(0)} &= -j\dot{I}_{fa(0)}x_{\Sigma(0)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11-4)$$

则故障处三相电压为:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{fa} &= \dot{U}_{fa(1)} + \dot{U}_{fa(2)} + \dot{U}_{fa(0)} = 0 \\ \dot{U}_{fb} &= \alpha^2\dot{U}_{fa(1)} + \alpha\dot{U}_{fa(2)} + \dot{U}_{fa(0)} \\ \dot{U}_{fc} &= \alpha\dot{U}_{fa(1)} + \alpha^2\dot{U}_{fa(2)} + \dot{U}_{fa(0)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11-5)$$

2、两相短路

电力系统发生 b、c 两相短路，则边界条件方程为:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{fa(0)} &= 0 \\ \dot{I}_{fa(1)} &= -\dot{I}_{fa(2)} \\ \dot{U}_{fa(1)} &= \dot{U}_{fa(2)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11-6)$$

根据两相短路的边界条件，可以得到两相短路的复合序网:

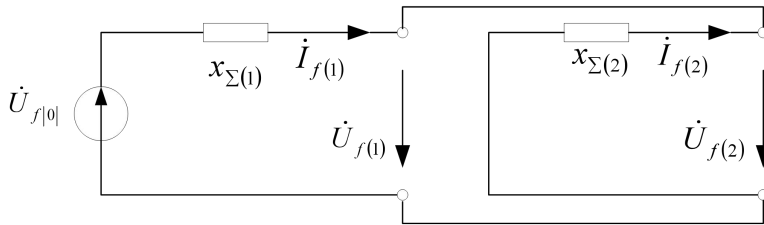


图 11-2 两相短路的复合序网

解联立方程 (11-6) 和 (10-11)，或者直接由复合序网均可推导出故障处三序电流为:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{fa(1)} &= -\dot{I}_{fa(2)} = \frac{\dot{U}_{fa|0|}}{j(x_{\Sigma(1)} + x_{\Sigma(2)})} \\ \dot{I}_{fa(0)} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11-7)$$

故障相 (b、c 两相) 的短路电流为:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{fb} &= -j\sqrt{3}\dot{I}_{fa(1)} \\ \dot{I}_{fc} &= j\sqrt{3}\dot{I}_{fa(1)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11-8)$$

$$|\dot{i}_{fb}| = |\dot{i}_{fc}| = \frac{\sqrt{3}\dot{U}_{fa|0|}}{j(x_{\Sigma(1)} + x_{\Sigma(2)})} \dots\dots\dots (11-9)$$

故障处各序电压为：

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{fa(1)} &= \dot{U}_{fa|0|} - j\dot{I}_{fa(1)}x_{\Sigma(1)} \\ \dot{U}_{fa(2)} &= -j\dot{I}_{fa(2)}x_{\Sigma(2)} = \dot{U}_{fa(1)} \\ \dot{U}_{fa(0)} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11-10)$$

则故障处三相电压为：

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{fa} &= \dot{U}_{fa(1)} + \dot{U}_{fa(2)} = 2\dot{U}_{fa(1)} \\ \dot{U}_{fb} &= \alpha^2\dot{U}_{fa(1)} + \alpha\dot{U}_{fa(2)} = -\dot{U}_{fa(1)} \\ \dot{U}_{fc} &= \alpha\dot{U}_{fa(1)} + \alpha^2\dot{U}_{fa(2)} = -\dot{U}_{fa(1)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11-11)$$

3、两相短路接地

电力系统发生 b、c 两相短路接地，则边界条件方程为：

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{fa(1)} &= \dot{U}_{fa(2)} = \dot{U}_{fa(0)} \\ \dot{I}_{fa(1)} + \dot{I}_{fa(2)} + \dot{I}_{fa(0)} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11-12)$$

根据两相短路接地的边界条件，可以得到两相短路接地的复合序网：

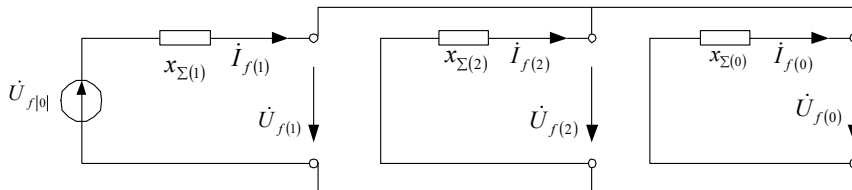


图 11-3 两相短路接地的复合序网

解联立方程 (11-12) 和 (10-11)，或者直接由复合序网均可推导出故障处三序电流为：

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{fa(1)} &= \frac{\dot{U}_{fa|0|}}{j(x_{\Sigma(1)} + \frac{x_{\Sigma(2)} \cdot x_{\Sigma(0)}}{x_{\Sigma(2)} + x_{\Sigma(0)})} \\ \dot{I}_{fa(2)} &= -\dot{I}_{fa(1)} \frac{x_{\Sigma(0)}}{x_{\Sigma(2)} + x_{\Sigma(0)}} \\ \dot{I}_{fa(0)} &= -\dot{I}_{fa(1)} \frac{x_{\Sigma(2)}}{x_{\Sigma(2)} + x_{\Sigma(0)}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11-13)$$

故障相（ b、c 相）的短路电流为：

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{fb} &= \alpha^2 \dot{I}_{fa(1)} + \alpha \dot{I}_{fa(2)} + \dot{I}_{fa(0)} \\ \dot{I}_{fc} &= \alpha \dot{I}_{fa(1)} + \alpha^2 \dot{I}_{fa(2)} + \dot{I}_{fa(0)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11-14)$$

$$|\dot{I}_{fb}| = |\dot{I}_{fc}| = \sqrt{3} \times \sqrt{1 - \frac{x_{\Sigma(1)} \cdot x_{\Sigma(2)}}{(x_{\Sigma(1)} + x_{\Sigma(2)})^2}} \times |\dot{I}_{fa(1)}| \dots\dots\dots (11-15)$$

故障处各序电压为：

$$\dot{U}_{fa(1)} = \dot{U}_{fa(2)} = \dot{U}_{fa(0)} = j\dot{I}_{fa(1)} \frac{x_{\Sigma(2)} \cdot x_{\Sigma(0)}}{x_{\Sigma(2)} + x_{\Sigma(0)}} \dots\dots\dots (11-16)$$

则故障处三相电压为：

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{fa} &= 3\dot{U}_{fa(1)} \\ \dot{U}_{fb} &= 0 \\ \dot{U}_{fc} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11-17)$$

4、非故障处电流、电压的计算

当电网中发生不对称故障时，若要分析计算电网中任意处的电流、电压，必须首先通过复合序网计算故障点处的各序电流 $\dot{I}_{fa(1)}$ 、 $\dot{I}_{fa(2)}$ 、 $\dot{I}_{fa(0)}$ ，然后分别在正序、负序、零序等值电路中计算非故障点处的正序、负序、零序的电流、电压，最后再合成为三相电流、电压。

但是需要注意的是：如果待求点处与短路点之间有星形/三角形连接的变压器，则在各序网中计算正、负序电压、电流时必须分别转动不同的相位，零序电流为零。

例如：经过 Y / Δ - 11 变压器：

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{a(1)} &= \dot{U}_{A(1)} e^{j30^\circ} \\ \dot{U}_{a(2)} &= \dot{U}_{A(2)} e^{-j30^\circ} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11-18)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{a(1)} &= \dot{I}_{A(1)} e^{j30^\circ} \\ \dot{I}_{a(2)} &= \dot{I}_{A(2)} e^{-j30^\circ} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11-19)$$

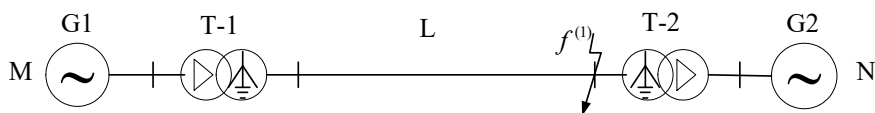
5、非全相运行的分析计算

非全相运行是指一相或两相断开的运行状态。

断线故障中故障电流是流过断线线路上的电流，故障处的电压是断口间的电压。根据推导可以得出：一相断线的边界条件方程与两相短路接地的边界条件方程相同；两相断线的边界条件方程与单相短路接地的边界条件方程相同。不对称断线的计算步骤与不对称短路的基本相同。

三、例题分析

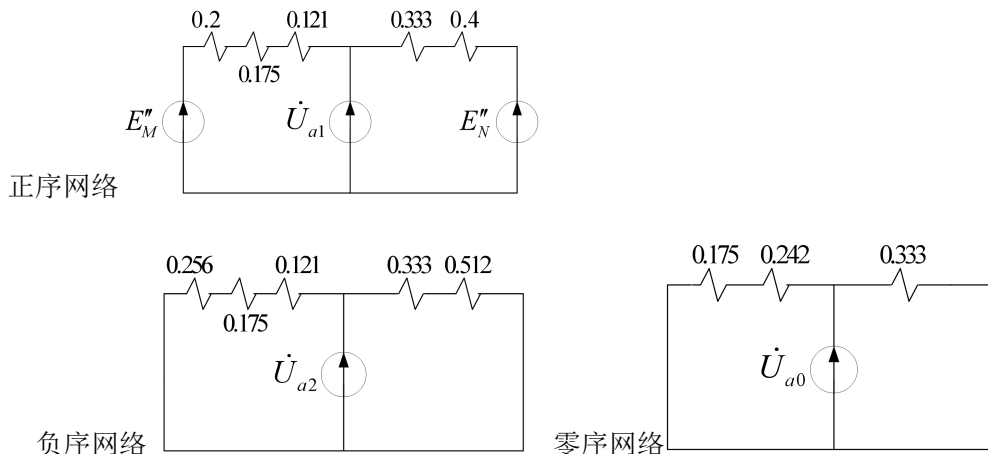
例 11-1：电力网络接线如图所示。当在 f 点发生 a 相短路时，求短路起始瞬间故障处的各序电气量及其各相量。



- 各元件参数：
 $G1$ ：62.5MVA, 10.5kV, $x_d'' = 0.125$, $x_2 = 0.16$, $E_M'' = 11kV$
 $G2$ ：31.5MVA, 10.5kV, $x_d'' = 0.125$, $x_2 = 0.16$, $E_N'' = 10.5kV$
 $T-1$ ：60MVA, 10.5kV/121kV, $U_K\% = 10.5$
 $T-2$ ：31.5MVA, 10.5kV/121kV, $U_K\% = 10.5$
 L ： $x_1 = x_2 = 0.4\Omega/km$, $x_0 = 2x_1$, $L = 40km$

解：（1）计算各序网络的等值参数。

选取 $S_B = 100MVA$ ， U_B 选取各段的平均电压，计算各元件参数的电抗标么值（略），并画出各序网等值电路图：



各序网络的等值参数为：

$$x_{1\Sigma} = \frac{(0.2 + 0.175 + 0.121) \times (0.333 + 0.4)}{0.2 + 0.175 + 0.121 + 0.333 + 0.4} = 0.296$$

$$E_{\Sigma}'' = \frac{E_M''(0.333 + 0.4) + E_N''(0.2 + 0.175 + 0.121)}{0.2 + 0.175 + 0.121 + 0.333 + 0.4} = \frac{1.05 \times 0.733 + 1 \times 0.496}{0.496 + 0.733} = 1.03$$

$$x_{2\Sigma} = \frac{(0.256 + 0.175 + 0.121) \times (0.333 + 0.512)}{0.256 + 0.175 + 0.121 + 0.333 + 0.512} = 0.334$$

$$x_{0\Sigma} = \frac{(0.175 + 0.242) \times 0.333}{0.175 + 0.242 + 0.333} = 0.185$$

(2) 计算各序电气量及各相量

$$\dot{I}_{fa(1)} = \dot{I}_{fa(2)} = \dot{I}_{fa(0)} = \frac{\dot{E}_{\Sigma}''}{j(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})} = \frac{1.03}{j(0.296 + 0.334 + 0.185)} = -j1.264$$

$$\dot{U}_{fa(1)} = \dot{E}_{\Sigma}'' - j\dot{I}_{fa(1)}x_{1\Sigma} = 1.03 - j(-j1.264) \times 0.296 = 0.656$$

$$\dot{U}_{fa(2)} = -j\dot{I}_{fa(2)}x_{2\Sigma} = -j(-j1.264) \times 0.334 = -0.422$$

$$\dot{U}_{fa(0)} = -j\dot{I}_{fa(0)}x_{0\Sigma} = -j(-j1.264) \times 0.185 = -0.234$$

故障处各相电流、电压

$$\dot{I}_{fa} = 3\dot{I}_{fa(1)} = 3 \times (-j1.264) = -j3.792$$

$$\dot{I}_{fb} = \dot{I}_{fc} = 0$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{fa} &= \dot{U}_{fa(1)} + \dot{U}_{fa(2)} + \dot{U}_{fa(0)} = 0 \\ \dot{U}_{fb} &= \alpha^2 \dot{U}_{fa(1)} + \alpha \dot{U}_{fa(2)} + \dot{U}_{fa(0)} = 0.656a^2 - 0.424a - 0.234 \\ &= -0.351 - j0.933 = 0.977e^{-j110.6^\circ} \\ \dot{U}_{fc} &= \alpha \dot{U}_{fa(1)} + \alpha^2 \dot{U}_{fa(2)} + \dot{U}_{fa(0)} = 0.656a - 0.424a^2 - 0.234 \\ &= -0.351 + j0.933 = 0.977e^{j110.6^\circ}\end{aligned}$$

故障处各相电流、电压的有名值

$$I_B = \frac{100}{\sqrt{3} \times 115} = 0.502 \text{ kA} ; \quad U_B = \frac{115}{\sqrt{3}} = 66.4 \text{ kV}$$

$$|\dot{I}_{fa}| = 3.792 \times 0.502 = 1.904 \text{ kA}$$

$$|\dot{U}_{fb}| = |\dot{U}_{fc}| = 0.977 \times 66.4 = 66.2 \text{ kV}$$

例 11-2: 试计算例 11-1 中, 当 f 点发生两相短路时, 短路起始瞬间故障处的电压和电流。

解: (1) 计算各序网络的等值参数 (见例 11-1)。

(2) 计算各序电气量及各相量

$$\dot{I}_{fa(1)} = -\dot{I}_{fa(2)} = \frac{\dot{E}_{\Sigma}''}{j(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma})} = \frac{1.03}{j(0.296 + 0.334)} = -j1.635$$

$$\dot{I}_{fa(0)} = 0$$

$$\dot{U}_{fa(1)} = \dot{E}_{\Sigma}'' - j\dot{I}_{fa(1)}x_{1\Sigma} = 1.03 - j(-j1.635) \times 0.296 = 0.546$$

$$\dot{U}_{fa(2)} = -j\dot{I}_{fa(2)}x_{2\Sigma} = -j(j1.635) \times 0.334 = 0.546$$

$$\dot{U}_{fa(0)} = -j\dot{I}_{fa(0)}x_{0\Sigma} = 0$$

故障处各相电流、电压

$$\dot{I}_{fa} = \dot{I}_{fa(1)} + \dot{I}_{fa(2)} + \dot{I}_{fa(0)} = 0$$

$$\dot{I}_{fb} = \alpha^2 \dot{I}_{fa(1)} + \alpha \dot{I}_{fa(2)} + \dot{I}_{fa(0)} = -j\sqrt{3}\dot{I}_{fa(1)} = -2.83$$

$$\dot{I}_{fc} = \alpha \dot{I}_{fa(1)} + \alpha^2 \dot{I}_{fa(2)} + \dot{I}_{fa(0)} = j\sqrt{3}\dot{I}_{fa(1)} = 2.83$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{fa} &= \dot{U}_{fa(1)} + \dot{U}_{fa(2)} + \dot{U}_{fa(0)} = 1.092 \\ \dot{U}_{fb} &= \alpha^2 \dot{U}_{fa(1)} + \alpha \dot{U}_{fa(2)} + \dot{U}_{fa(0)} = -\dot{U}_{fa(1)} = -0.546 \\ \dot{U}_{fc} &= \alpha \dot{U}_{fa(1)} + \alpha^2 \dot{U}_{fa(2)} + \dot{U}_{fa(0)} = -0.546\end{aligned}$$

故障处各相电流、电压的有名值

$$I_B = \frac{100}{\sqrt{3} \times 115} = 0.502 \text{ kA} ; \quad U_B = \frac{115}{\sqrt{3}} = 66.4 \text{ kV}$$

$$|I_{fa}| = 2.83 \times 0.502 = 1.42 \text{ KA}$$

$$|I_{fc}| = -1.43$$

$$|\dot{U}_{fa}| = 1.092 \times 66.4 = 72.51 \text{ kV}$$

$$|\dot{U}_{fb}| = |\dot{U}_{fc}| = 0.546 \times 66.4 = 36.25 \text{ kV}$$

例 11-3: 试计算例 11-1 中, 当 f 点发生两相短路接地时, 短路起始瞬间故障处电压电流。

解: (1) 计算各序网络的等值参数 (见例 11-1)。

(2) 计算各序电气量及各相量

$$\dot{I}_{fa(1)} = \frac{\dot{E}_{\Sigma}''}{j(x_{1\Sigma} + \frac{x_{2\Sigma} \cdot x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}})} = \frac{1.03}{j(0.296 + \frac{0.334 \times 0.185}{0.334 + 0.185})} = -j2.48$$

$$\dot{I}_{fa(2)} = -\dot{I}_{fa(1)} \cdot \frac{x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} = j2.48 \times \frac{0.185}{0.334 + 0.185} = j0.884$$

$$\dot{I}_{fa(0)} = -\dot{I}_{fa(1)} \cdot \frac{x_{2\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} = j2.48 \times \frac{0.334}{0.334 + 0.185} = j1.596$$

$$\dot{U}_{fa(1)} = \dot{E}_{\Sigma}'' - j\dot{I}_{fa(1)}x_{1\Sigma} = 1.03 - j(-j2.48) \times 0.296 = 0.296$$

$$\dot{U}_{fa(2)} = -j\dot{I}_{fa(2)}x_{2\Sigma} = -j(j0.884) \times 0.334 = 0.296$$

$$\dot{U}_{fa(0)} = -j\dot{I}_{fa(0)}x_{0\Sigma} = 0.296$$

故障处各相电流、电压

$$\dot{I}_{fa} = 0$$

$$|I_{fb}| = |I_{fc}| = \sqrt{3} \times \sqrt{1 - \frac{X_{i(2)} \cdot X_{i(0)}}{X_{i(2)} + X_{i(0)}}} \times |I_{fa(1)}| = 3.72$$

$$\dot{U}_{fa} = \dot{U}_{fa(1)} + \dot{U}_{fa(2)} + \dot{U}_{fa(0)} = 3\dot{U}_{fa(1)} = 0.888$$

$$\dot{U}_{fb} = \dot{U}_{fc} = 0$$

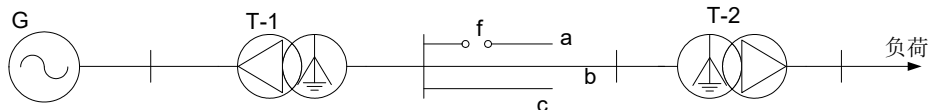
故障处各相电流、电压的有名值

$$I_B = \frac{100}{\sqrt{3} \times 115} = 0.502 \text{ kA} ; \quad U_B = \frac{115}{\sqrt{3}} = 66.4 \text{ kV}$$

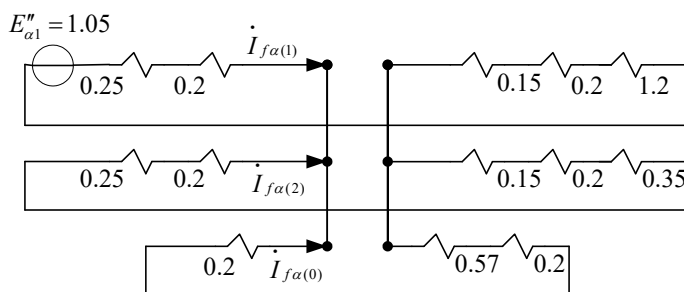
$$|\dot{I}_{fb}| = |\dot{I}_{fc}| = 3.72 \times 0.502 = 1.867 \text{ kA}$$

$$|\dot{U}_{fa}| = 0.888 \times 66.4 = 58.96 \text{ kV}$$

例 11-4：电力网络接线如图所示。当在 f 点发生 a 相断线时，计算断线处的各序电流、电压及非故障相中的电流，并与故障前的电流进行比较。（各元件参数略）



解：一相断线的边界条件方程与两相短路接地的条件方程相同，由此可以得到 a 相断线的复合序网（各元件参数计算略）：



各序阻抗为：

$$x_{\Sigma(1)} = 0.25 + 0.2 + 0.15 + 0.2 + 1.2 = 2$$

$$x_{\Sigma(2)} = 0.25 + 0.2 + 0.15 + 0.2 + 0.35 = 1.15$$

$$x_{\Sigma(0)} = 0.25 + 0.57 + 0.2 = 0.97$$

a 相各序分量为:

$$\dot{I}_{fa(1)} = \frac{\dot{E}_{a1}''}{j(x_{\Sigma(1)} + \frac{x_{\Sigma(2)} \cdot x_{\Sigma(0)}}{x_{\Sigma(2)} + x_{\Sigma(0)}})} = \frac{1.05}{j(2 + \frac{1.15 \times 0.97}{1.15 + 0.97})} = -j 0.416$$

$$\dot{I}_{fa(2)} = -\dot{I}_{fa(1)} \frac{x_{\Sigma(0)}}{x_{\Sigma(2)} + x_{\Sigma(0)}} = -j 0.416 \times \frac{0.97}{1.15 + 0.97} = -j 0.19$$

$$\dot{I}_{fa(0)} = -\dot{I}_{fa(1)} \frac{x_{\Sigma(2)}}{x_{\Sigma(2)} + x_{\Sigma(0)}} = j 0.416 \times \frac{1.15}{1.15 + 0.97} = -j 0.226$$

$$\dot{U}_{fa(1)} = \dot{U}_{fa(2)} = \dot{U}_{fa(0)} = j \dot{I}_{fa(1)} \frac{x_{2\Sigma} \cdot x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}} = 0.416 \times \frac{1.15 \times 0.97}{1.15 + 0.97} = 0.219$$

非故障相的电流为:

$$\left| \dot{I}_{fb} \right| = \left| \dot{I}_{fc} \right| = \sqrt{3} \times \sqrt{1 - \frac{x_{\Sigma(1)} \cdot x_{\Sigma(2)}}{(x_{\Sigma(1)} + x_{\Sigma(2)})^2}} \times \left| \dot{I}_{fa(1)} \right| \approx 1.5 \times \left| \dot{I}_{fa(1)} \right| = 1.5 \times 0.416 = 0.624$$

正常情况下流过线路的负荷电流:

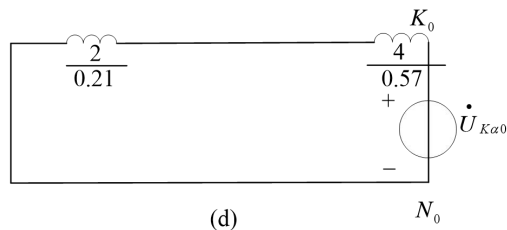
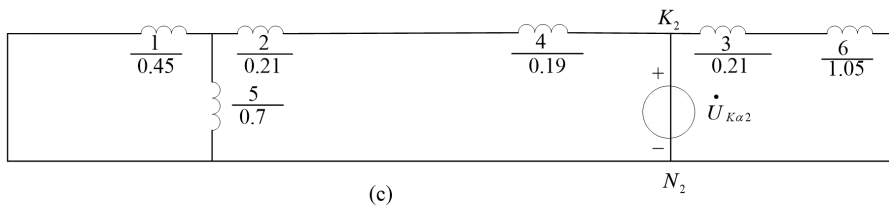
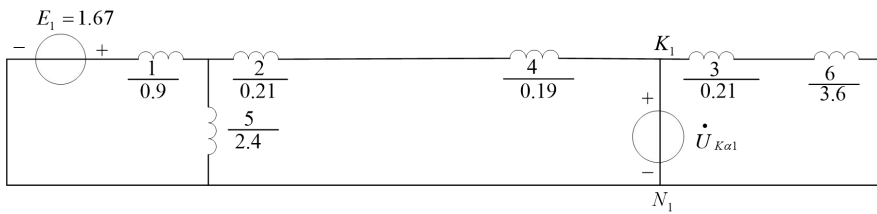
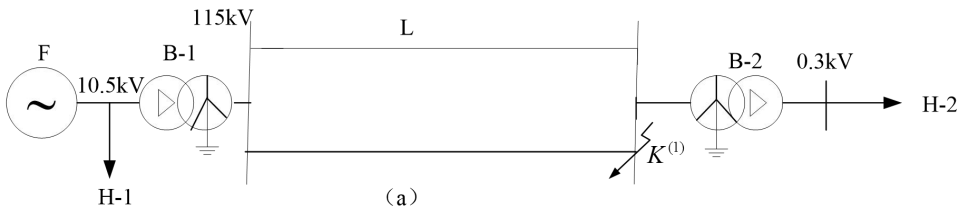
$$\dot{I}_a = \frac{\dot{E}_{a1}}{jx_{1\Sigma}} = \frac{1.05}{j2} = -j 0.5025$$

a 相断弦时, 非故障相 (b、c 相) 电流较正常时负荷电流增幅为:

$$\frac{I_{fb} - I_b}{I_b} = \frac{0.624 - 0.5025}{0.5025} \times 100\% = 24.18\%$$

例 11-5: 如图所示输电系统, 在 K 点发生接地短路, 试绘出各序网络, 并计算电源的组

合电势和各序网络对短路点的组合电抗。系统中各元件的参数如下：发电机 F， $S_N = 120MVA$ ， $U_N = 10.5kV$ ， $E_1 = 1.67$ ， $X_1 = 0.9$ ， $X_2 = 0.45$ ；变压器 B-1， $S_N = 60MVA$ $U_K \% = 10.5$ $K_1 = 10.5/115$ ； B-2， $S_N = 60MVA$ ， $U_K \% = 10.5$ ， $K_2 = 115/6.3$ ；线路 L，每回路长 $L=105km$ ， $X_1 = 0.4\Omega/km$ ， $X_0 = 3X_1$ ；负荷 H-1， $S_N = 60MVA$ ， $X_1 = 1.2$ ， $X_2 = 0.35$ ； H-2， $S_N = 40MVA$ $X_1 = 1.2$ ， $X_2 = 0.35$ 。



解

1. 计算参数标么值

选取基准功率 $S_B = 120MVA$ ，基准电压 $U_B = U_{ab}$ ，计算出各元件的各序电抗的标么值（计算过程从略）。计算结果标于各序网络中。

2. 制定各序网络

本例的正序网络和负序网络都是包含了（a）中的所有元件，分别做出了正序网络和负序网络如图（b）及图（c）所示。

在本例中，由于零序电流仅在线路 L 和变压器 B-1 中流通，所以零序网络只应包含这两个元件，作出了零序网络如图（d）所示。

3. 进行网络化简并求正序组合电势和各序组合电抗。

正序网络：先将支路 1 和支路 5 并联得支路 7，它的电势和电抗分别为

$$E_7 = \frac{E_1 x_5}{x_1 + x_5} = \frac{1.67 \times 2.4}{0.9 + 2.4} = 1.22, x_7 = \frac{x_1 x_5}{x_1 + x_5} = \frac{0.9 \times 2.4}{0.9 + 2.4} = 0.66$$

将支路 7，2 和 4 相串联得支路 9，其电势和电抗分别为

$$x_9 = x_7 + x_2 + x_4 = 0.66 + 0.21 + 0.19 = 1.06, E_9 = E_7 = 1.22$$

将支路 3 和 6 串联得支路 8，其电抗为

$$x_8 = x_3 + x_6 = 0.21 + 3.6 = 3.81$$

将支路 8 和 9 并联得组合电势和组合电抗分别为

$$E_\Sigma = \frac{E_9 x_8}{x_9 + x_8} = \frac{1.22 \times 3.81}{1.06 + 3.81} = 0.95, x_{\Sigma} = \frac{x_8 x_9}{x_8 + x_9} = \frac{3.81 + 1.06}{3.81 + 1.06} = 0.83$$

负序网络

$$x_7 = \frac{x_1 x_5}{x_1 + x_5} = \frac{0.45 \times 0.7}{0.45 + 0.7} = 0.27, x_9 = x_7 + x_2 + x_4 = 0.27 + 0.21 + 0.19 = 0.67$$

$$x_8 = x_3 + x_6 = 0.21 + 1.05 = 1.26, x_{2\Sigma} = \frac{x_8 x_9}{x_8 + x_9} = \frac{1.26 \times 0.67}{1.26 + 0.67} = 0.44$$

零序网络

$$x_{0\Sigma} = x_2 + x_4 = 0.21 + 0.57 = 0.78$$

在以上基础上，再计算出各种不同类型短路时的附加电抗 $x_{\Delta}^{(n)}$ 和 $m^{(n)}$ 值，既能确定其短路电流。

(1) 对于单相接地短路

$$x_{\Delta}^{(1)} = x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma} = 0.44 + 0.78 = 1.22, m^{(1)} = 3$$

$$115\text{kV 侧的基准电流为 } I_B = \frac{120}{\sqrt{3} \times 115} = 0.6\text{kA}$$

因此，单相接地短路时

$$I_{ka1}^{(1)} = \frac{E_{a1\Sigma}}{x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(1)}} I_B = \frac{0.95}{0.83 + 1.22} \times 0.6 = 0.28\text{kA}$$

$$I_k^{(1)} = m^{(1)} I_{ka1}^{(1)} = 3 \times 0.28 = 0.84\text{kA}$$

(2) 对于两相短路

$$x_{\Delta}^{(2)} = x_{2\Sigma} = 0.44, m^{(2)} = \sqrt{3}$$

$$I_{ka1}^{(2)} = \frac{E_{a1\Sigma}}{x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(2)}} I_B = \frac{0.95}{0.83 + 0.44} \times 0.6 = 0.45\text{kA}$$

$$I_k^{(2)} = m^{(2)} I_{ka1}^{(2)} = \sqrt{3} \times 0.45 = 0.78\text{kA}$$

对于两相短路接地

$$x_{\Delta}^{(1.1)} = x_{2\Sigma} // x_{0\Sigma} = 0.44 // 0.78 = 0.28$$

$$m^{(1.1)} = \sqrt{3} \sqrt{1 - [x_{2\Sigma} x_{0\Sigma} / (x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})^2]} = \sqrt{3} \sqrt{1 - [0.44 \times 0.78 / (0.44 + 0.78)^2]} = 1.52$$

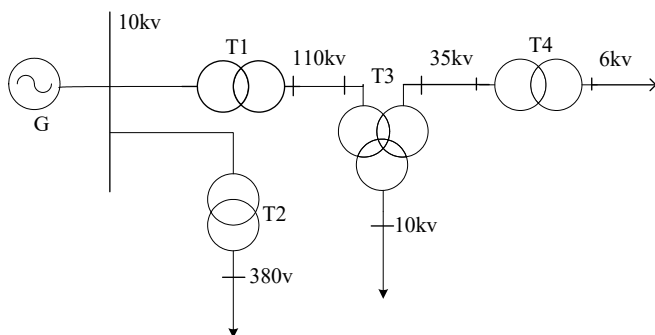
$$I_{ka1}^{(1.1)} = \frac{E_{a1\Sigma}}{x_{1\Sigma} + x_{\Delta}^{(1.1)}} I_B = \frac{0.95}{0.83 + 0.28} \times 0.6 = 0.51 \text{ kA}$$

$$I_{k1}^{(1.1)} = m^{(1.1)} I_{ka1}^{(1.1)} = 1.52 \times 0.51 = 0.78 \text{ kA}$$

第三部分 电力系统分析习题集

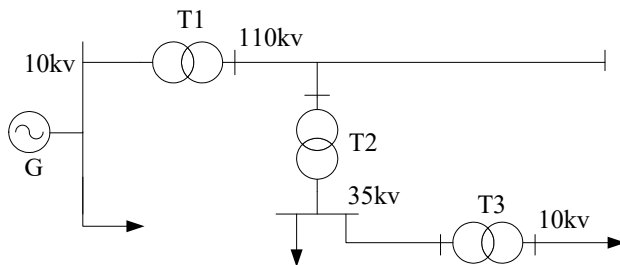
电力系统稳态分析习题

1. 什么是动力系统，电力系统及电力网？
2. 试述电力系统的各类接线方式和它们的优缺点。
3. 我国电力网有哪几种标准电压等级？
4. 电力系统中性点直接接地，不接地与经消弧线圈接地方式的适用有何规定？
5. 电力系统运行的基本要求是什么？
6. 为什么要规定额定电压等级？系统各元件的额定电压是如何确定的？试标出图中发电机和变压器两侧的额定电压(图中电压是电力线路的额定电压)。



题 6 图

7. 电力系统的部分接线如图所示，各级电网的额定电压示于图中。试求：
 - (1) 发电机 G 和变压器 T1, T2, T3 高、低压侧绕组的额定电压。
 - (2) 设变压器 T1 工作于+2.5%抽头, T2 工作于主抽头, T3 工作于-5%抽头。试求这些变压器的实际变比。



题 7 图

8.有一条长 120Km, 电压为 110KV 的双回输电线路, 导线型号为 LGJ-185, 水平排列, 相间距离 4m, 用查表法求线路参数, 并绘制等值电路。

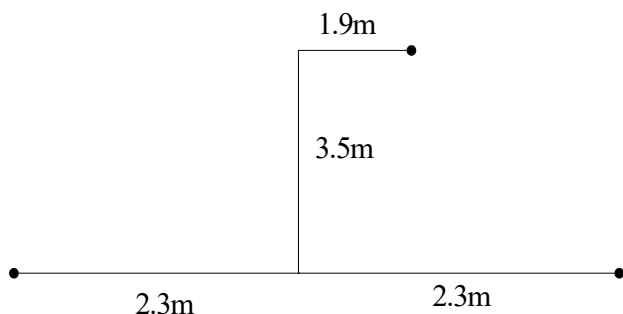
9.列出 TJ-35, LJ-35, LGJ-70, LGJ-120, LGJ-300, 导线每公里的电阻值, (1)用公式计算; (2)用查表法求得。

10.有一条 110KV 架空输电线路, 导线型号 LGJ-150, 水平排列, 线间距离 4m, 试求线路参数 r_1, x_1 和 b_1 。($\rho = 32 \Omega mm^2 / m$, 导线计算直径 $d=17mm$)

11.某 110KV 单回线, 长度为 110Km, 导线型号为 LGJ-185, 三相导线排列方式如图。

试求: (1)环境温度为 $50^\circ C$ 时的线路阻抗。

(2)线路的电纳和电容充电功率。



题 11 图

12.110KV 线路, 长 100Km, 使用 LGJ— 2×150 双分裂导线水平排列, 相间距离 4.125mm, 分裂间距为 25cm。试求 $50^\circ C$ 时的线路阻抗。

(导线外径为 17mm)

13.试决定一台 20MVA 三相三绕组变压器的参数, 如果已知三个线圈的容量比为 100/100/50, 三个线圈的额定电压为 121/38.5/10.5KV, $P_{K1-2}=152.8KW$, $P_{K1-3}=52KW$, $P_{K2-3}=47KW$, $P_0=75KW$, $U_{K1-2}\%=10.5$, $U_{K1-3}\%=18$, $U_{K2-3}\%=6.5$, $I_0\%=4.1$ 。

14.某发电厂, 以三台单相变压器按 Y/ Δ 连接, 组成三相变压器组, 每台变压器的容量为 3500KVA, 电压为 $22.23 \pm 2 \times 2.5\% / 6.3KV$ 。其空载及短路试验数据如表。试求用等值负荷和阻抗表示的变压器等值电路及其参数。

实验数据	1	2	3
P_k (KW)	27.6	28.9	29.4
u_k %	6.42	6.54	6.55
	11.05	8.4	10.6
I_0 %	2.0	1.42	1.84

15. 变电所使用的 OSFPSL₂ ---90000/220 型三相三绕组自耦变压器，额定电压为 220/121/38.5KV，容量比为 100/100/50，实测的空载及短路试验数据如下：

$$P_{(k1-3)} = 265KW;$$

$$U_{(k1-2)} (\%) = 9.09;$$

$$U_{(k1-3)} (\%) = 16.45;$$

$$U_{(k2-3)} = 10.75$$

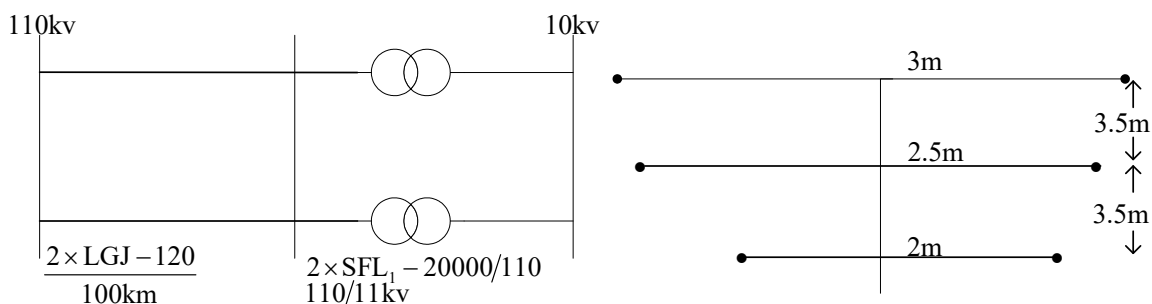
$$P_0 = 59KW;$$

$$I_0 (\%) = 0.332$$

试求变压器参数及等值电路。

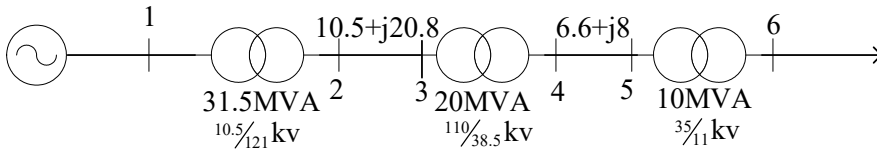
16. 部分电网的结线如图所示，导线的排列方式也示于图中，试求：

- (1) 40°C 时每公里线路的参数；
- (2) 变压器参数（试验数据查表）；
- (3) 并联运行时的等值参数和等值电路；
- (4) 校验电路是否会发生电晕。



题 16 图

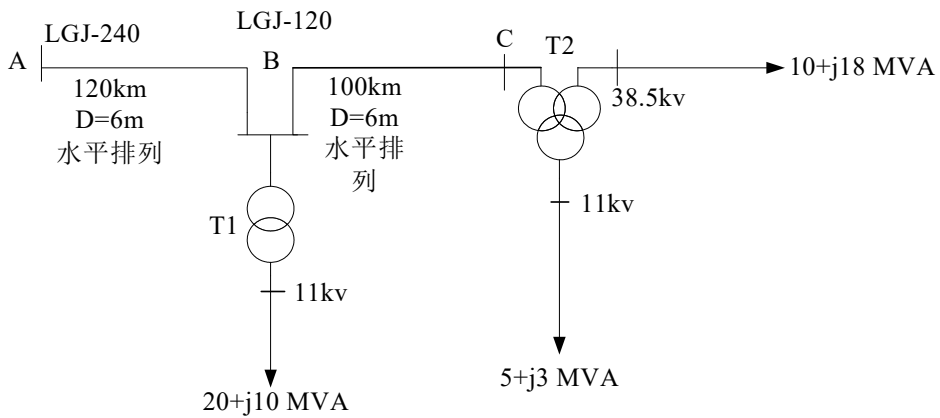
17. 有一系统如图所示，如果已知变压器 T1 归算至 121KV 侧的阻抗为 $2.95+j48.7\Omega$ ，T2 算至于 110KV 侧的阻抗值为 $4.48+j48.4\Omega$ ，T3 归算至 35KV 侧的阻抗为 $1.127+j9.188\Omega$ ，输电线路的参数已注在图中，试作出网络的等值电路，分别用有名值及标么值算出归算至同一电压级的参数（不计导纳）。



题 17 图

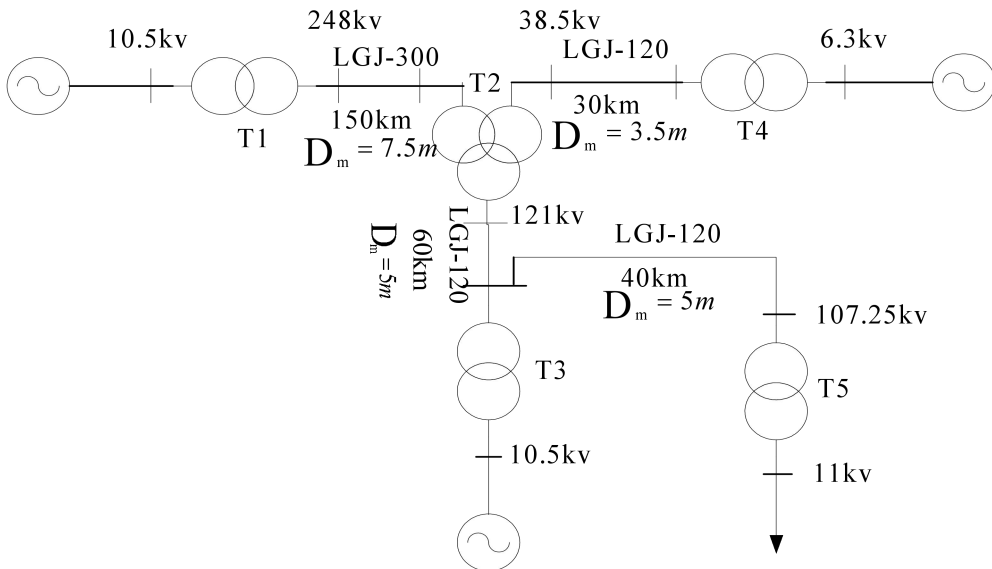
18. 有一 110KV 网络，其结线图如下，线路长度，导线型号及线间距离，变压器型号以及负荷值均已示于图中，试决定其运算网络。

T1: 2×SFL₁-16000/110 , T2: SFSL-20000/110



题 18 图

19. 某电力系统结线如图



题 19 图

图中标明的变压器高低或高中侧的电压为其实际抽头电压，各变压器技术数据如下：

T1: 额定容量：90MVA；额定电压：242/10.5KV；

$$P_K = 472.5\text{KW}; \quad P_0 = 92\text{KW};$$

$$U_K \% = 13.75; \quad I_0 \% = 0.67;$$

T2: 额定容量：90/90/90MVA；额定电压 220/121/38.5KV；

$$P_{K(1-2)} = 580\text{KW}; \quad P_{K(1-3)} = 384\text{KW};$$

$$P_{K(2-3)} = 704\text{KW}; \quad U_{K(1-2)} \% = 14.07;$$

$$U_{K(1-3)} \% = 23.73; \quad U_{K(2-3)} \% = 7.65;$$

$$P_0 = 107.7\text{KW}; \quad I_0 \% = 0.82$$

T3: 额定容量：2×40MVA；额定电压：120/10.5KV

$$P_K = 200\text{KW}; \quad P_0 = 42\text{KW};$$

$$U_K \% = 10.5; \quad I_0 \% = 0.7$$

T4: 额定容量：31.5MVA；额定电压：38.5/6.3KV

$$P_K = 180\text{KW}; \quad P_0 = 30\text{KW};$$

$$U_K \% = 8; \quad I_0 \% = 0.7$$

T5: 额定容量：15MVA；额定电压：110/11KV

$$P_K = 128\text{KW}; \quad P_0 = 40.5\text{KW};$$

$$U_K \% = 10.5; \quad I_0 \% = 3.5$$

各电压的基准电压取为：

$$220\text{KV 级} \quad U_{B1} = 220\text{KV}$$

$$110\text{KV 级} \quad U_{B2} = 110\text{KV}$$

$$35\text{KV 级} \quad U_{B3} = 35\text{KV}$$

$$10\text{KV 级} \quad U_{B4} = 10.5\text{KV}$$

$$6\text{KV 级} \quad U_{B5} = 6.3\text{KV}$$

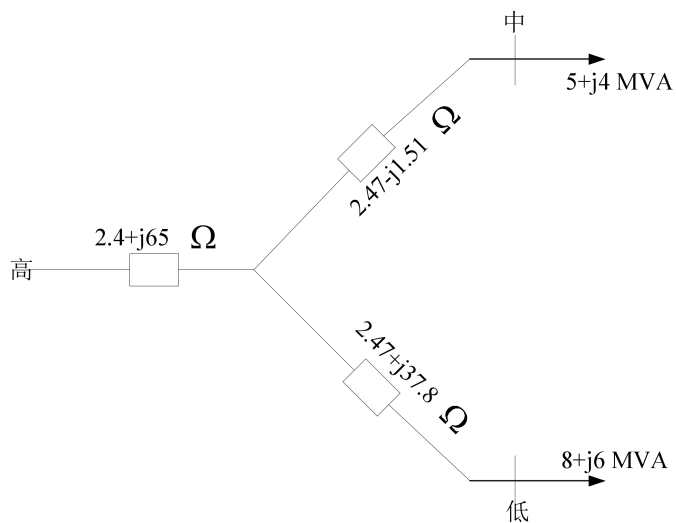
基准功率 $S_B = 100\text{MVA}$

要求作出考虑非标准变比的以有名值表示的和以标么值表示的网络的等值电路。

20. 某 110KV 架空线路长 60KM，所用导线型号为 LGJ-185，水平排列，线间距离为 4m，已知线路末端接有 40MW 的负荷，负荷功率因数为 0.8，线路末端电压为 110KV，试求线路首端功率和电压。

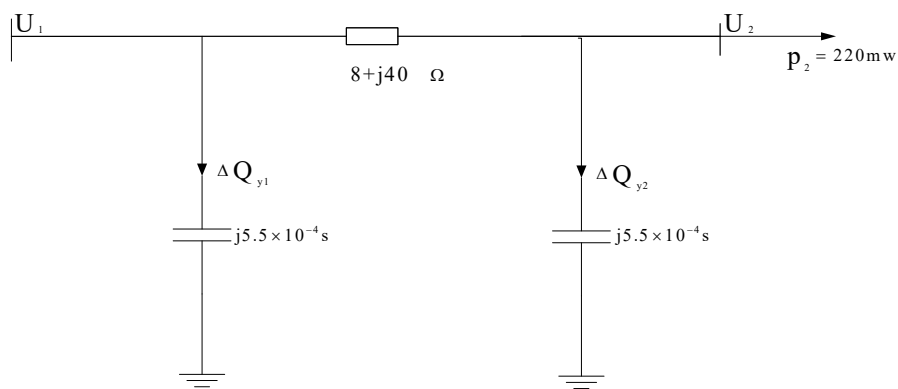
21. 试计算变电所使用的 SFPSL---63000/220 型变压器的参数（容量比为 100/100/100）及当变压器低压绕组开路中压绕组承担额定负荷时变压器的总有功功率损耗。

22. 一台三绕组变压器额定电压为 110/38.5/6.6KV，其等值电路（归算至高压侧）和所供负荷如图，当变比为 110/38.5（1+5%）/6.6KV，低压母线电压保持 6KV 时，试求高压和中压母线的实际电压。



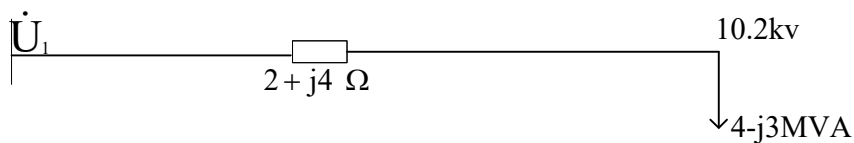
题 22 图

23. 系统如图所示，始端电压 248KV，末端电压 220KV，末端有功负荷 220MW，试求始端功率因数 $\cos \Phi_2$ 。



题 23 图

24. 10KV 线路的等值电路如图所示，已知末端电压为 10.2KV。试求始端电压并作出电压相量图。



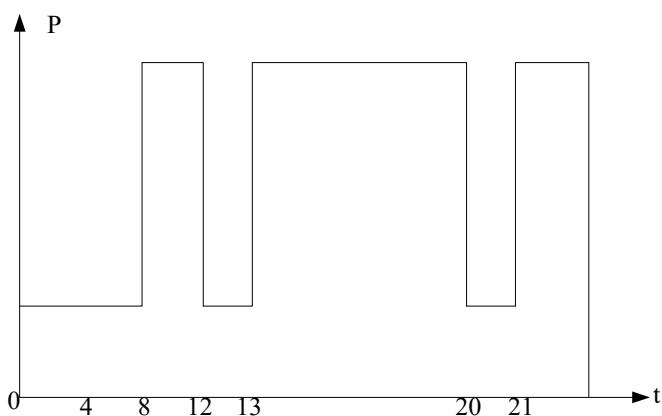
题 24 图

25. 题 16 所示电力网中，变压器低压侧负荷为 $S=30+j20\text{MVA}$ ，试求：

- (1) 低压母线电压为 10KV 时，始端电压和始端输出功率；
- (2) 始端电压为 116KV 时，变压器低压侧的电压及电压偏移百分数；
- (3) 始端电压为 116KV，变压器全部退出运行时，线路末端的电压。

26. 设题 25 中，变压器低压侧的日负荷曲线（视在功率）如图所示，该电力网每年工作 305 天，试求：

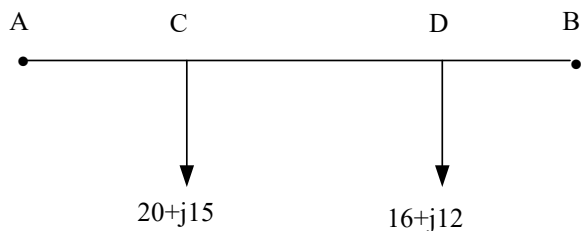
- (1) 该网络的年电能损耗；
- (2) 设电能损耗价格为 0.04 元/千瓦小时，试计算该网络因电能损耗而需要的年运行费用。



题 26 图

27. 两端供电网如图所示，线路参数为 $Z_{AC} = 15 + j20\Omega$ ， $Z_{CD} = 12 + j18\Omega$ ，

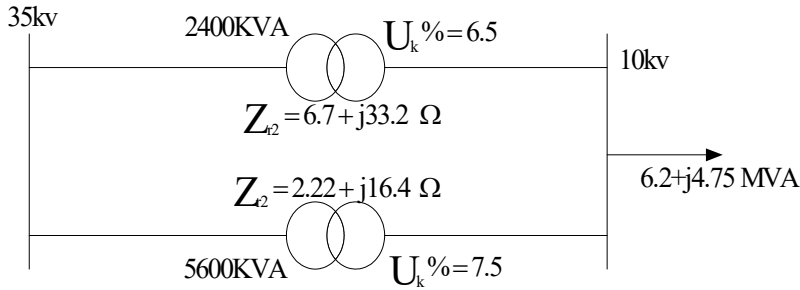
$Z_{BC} = 10 + j16\Omega$ ，当 AT 电压为 $115\angle 0^\circ \text{ kV}$ ，BJ 电压为 $112\angle 0^\circ \text{ kV}$ 时，试算网络功率分布及各点电压。



题 27 图

28.一座 35/11KV 变电所，原是一台 5600KVA 变压器。由于低压负荷的增加，需扩建一台 2400KVA 容量的变压器，其接线如图所示。变压器的阻抗已归算至 35KV 侧。试求：

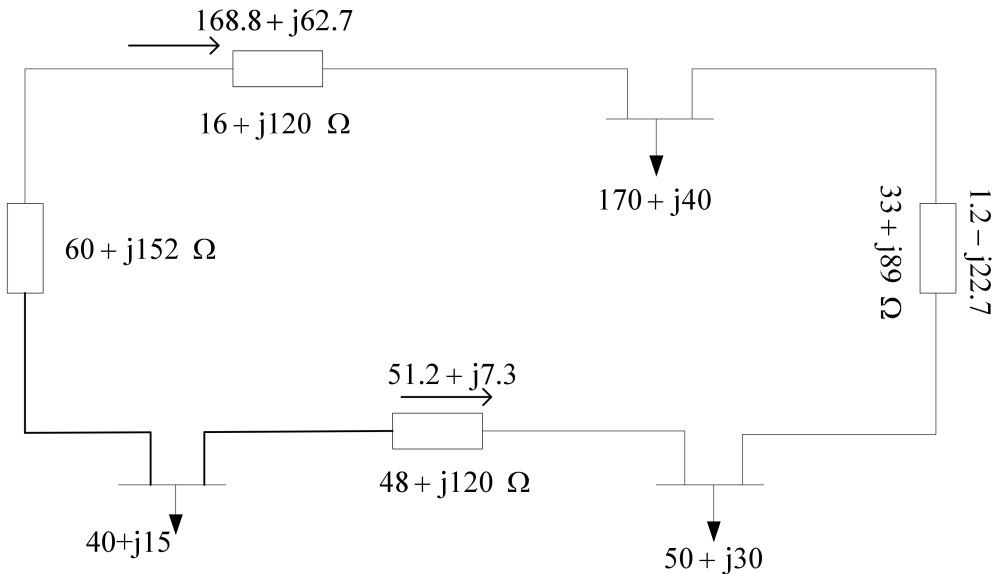
- (1) 当两台变压器的变比都为 35/11 时，各变压器分别输出的视在功率；
- (2) 若一台 5600KVA 的变比为 33.25/11，而 2400KVA 的变比仍为 35/11，再求各变压器输出的视在功率；
- (3) 以变压器实际电压损耗校验 (2) 的计算结果。



题 28 图

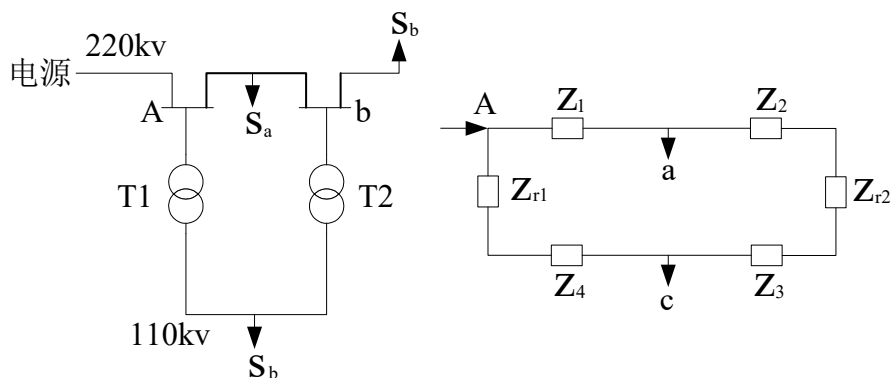
29.某一由发电厂 A 供电的 220KV 环形网络，线路参数，负荷的兆伏安数和自然功率的分布如图所示，试计算：

- (1) 该环形网络的经济功率分布；
- (2) 实现经济功率分布后每年节约的电能。（计算电能损耗时取其平均的 $T_{max} = 5000$ 小时， $\cos \Phi = 0.9$ 可查得 $t = 3200$ 小时）



题 29 图

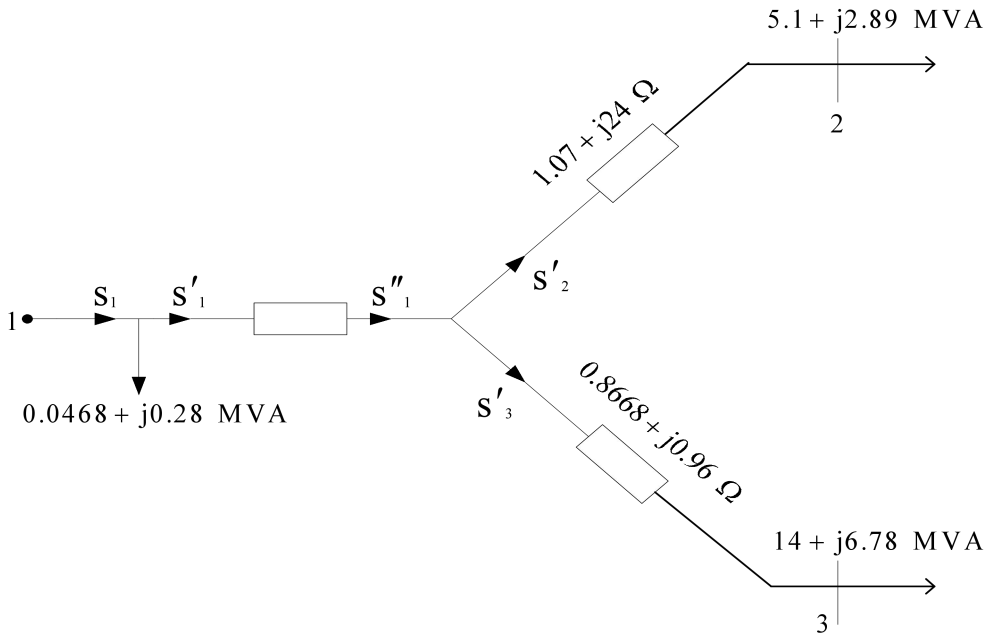
30. 环形网络及其等值网络如下图，图中归算至 220KV 侧的各元件阻抗分别为：
 $Z_1=4+j40\Omega$ ； $Z_2=6+j50\Omega$ ； $Z_3=39+j75\Omega$ ； $Z_4=38+j80\Omega$ ； $Z_{T1}=2+j120\Omega$ ； $Z_{T2}=1+j25\Omega$ ；
 变压器变比分别为： $K_{T1}=231/110$ ； $K_{T2}=209/110$ ；各点负荷分别为： $S_a=50+j30\text{MVA}$ ；
 $S_c=30+j10\text{MVA}$ ； $S_b=150+j100\text{MVA}$ ；试求网络中的功率分布。计算时可略去功率损耗。



题 30 图

31. 有一台三相绕组变压器，额定电压为 110/38.5/11KV，其等值电路如图所示。中压侧的负荷为 $5.1+j2.89\text{MVA}$ ，最大负荷利用小时数为 4500h，低压侧的负荷为 $14+j6.78\text{MVA}$ ，最大负荷利用小时数为 5500h，试求：

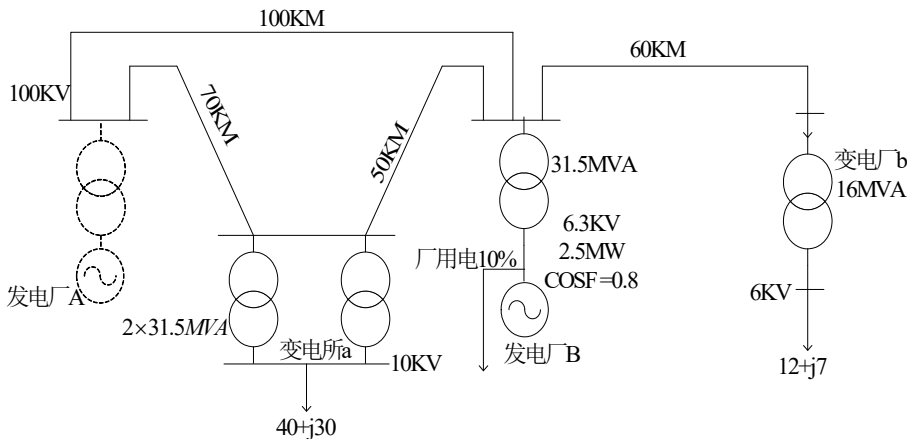
- (1) 该变压器在额定功率时的功率损耗；
- (2) 输电效率；
- (3) 全年电能损耗；
- (4) 变压器的损耗率。



题 31 图

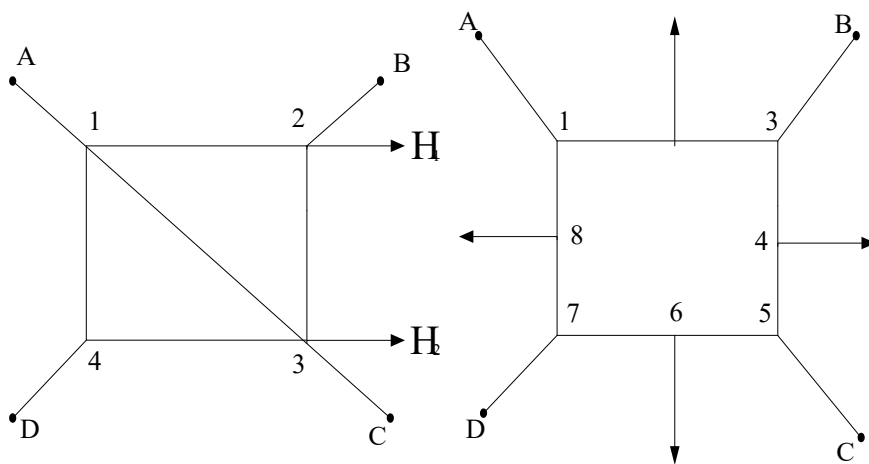
32. 电力网接线如图所示，是一个额定电压为 110KV 的闭式区域电力网，已知发电厂 A（调频发电厂）高压母线电压等于 118KV。发电厂 B（按规定的负荷曲线运行）装有额定电压为 6.3KV，容量 25MW， $\text{COS} \Phi = 0.8$ 的发电机一台，满载运行，除了厂用电 10% 外，其余的功率经一台 SFL₁-31500/110 的升压变压器送入电力网。

变电所 a 装有两台 SFL₁-31500/110 的降压变压器，低压侧电网的额定电压为 10KV，负荷为 $40 + j30$ MVA；变电所 b 装有一台 SFL₁-16000/110 的降压变压器，低压侧电网的额定电压为 6KV，负荷为 $12 + j7$ MVA；电力网中全部线路均用单回路架设，导线为 LGJ-150，水平排列，线间几何均距为 5m。试作该电力网的功率分布及电压计算。



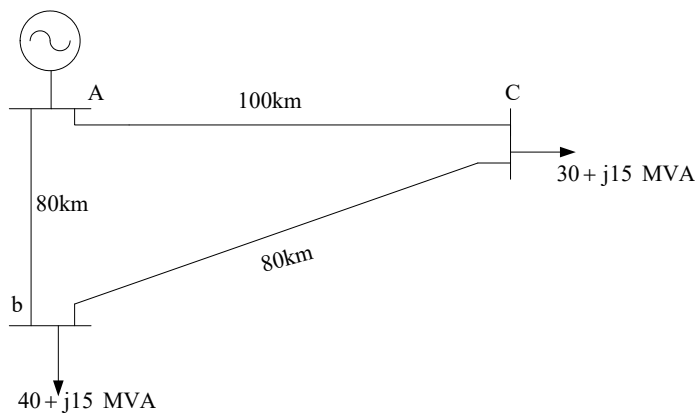
题 32 图

33. 施用网络变换法将下图所示的网络变为两端供电网（其中 A, B, C, D 为电源, H 为负荷）。



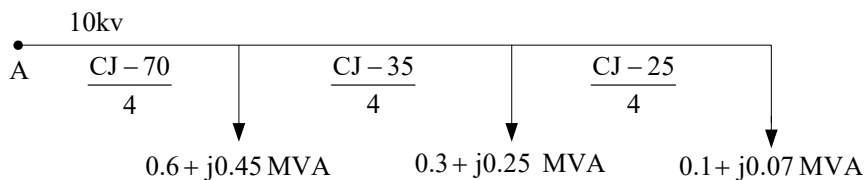
题 33 图

34. 110KV 环形网络如图所示。\$S_b\$ 和 \$S_c\$ 的最大负荷利用小时数分别为 5500h 和 4500h，导线拟采用钢芯铝线，几何均距为 5m。试选择各段导线的截面积。

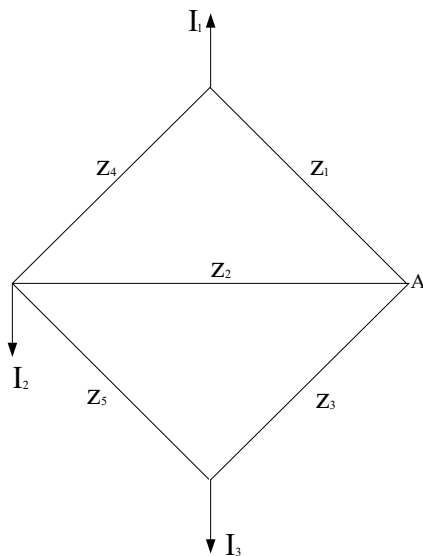


题 34 图

35. 一条 10KV 的架空线路，试计算总的电压损耗是否超过 5% 的允许值。\$D_m = 1m\$。

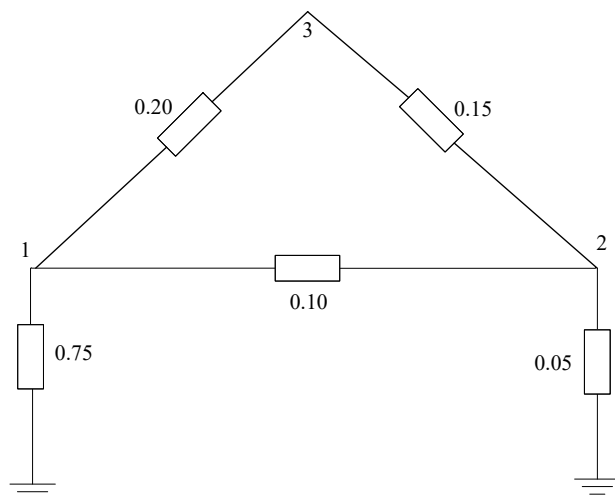


36. 如图所示的网络。图中标出了各线段的标号和各节点的电流。设 $Z_1=1$, $Z_2=2$, $Z_3=1$, $Z_4=4$, 试求该网络的节点导纳矩阵（以节点 A 为参考节点）。



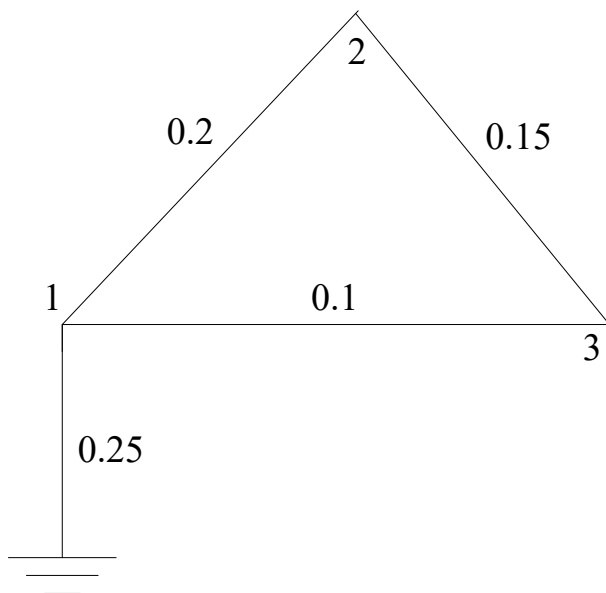
题 36 图

37. 如图所示的网络，各支路阻抗以标幺值表示，试列出其导纳矩阵，并用支路追加法求网络的结点阻抗矩阵。



题 37 图

38. 如图所示的网络，各线段的阻抗值已注在图中，试列出其导纳矩阵，并用求逆法求阻抗矩阵。

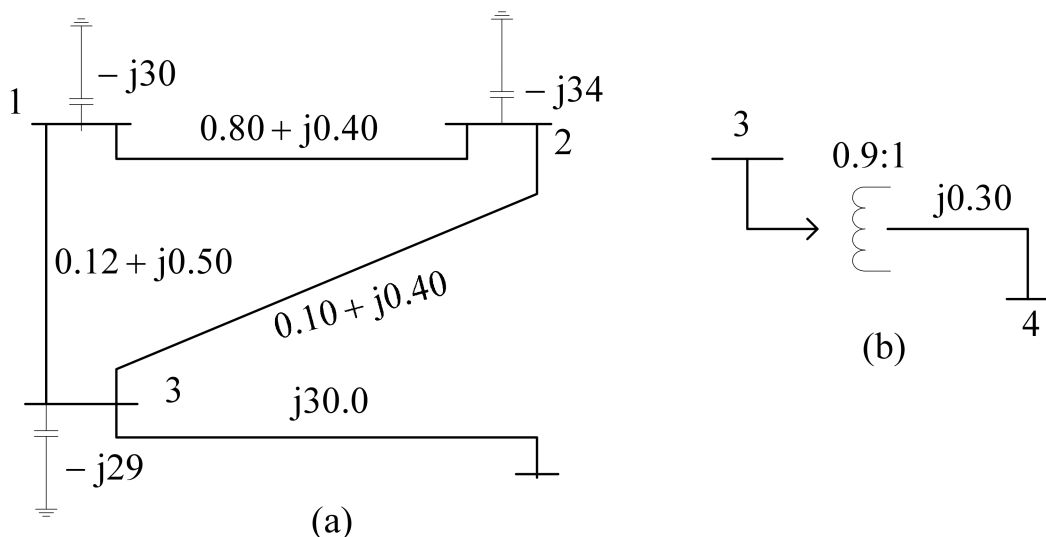


题 38 图

39.如图 (a) 所示的网络支路阻抗以标幺值表示于图中

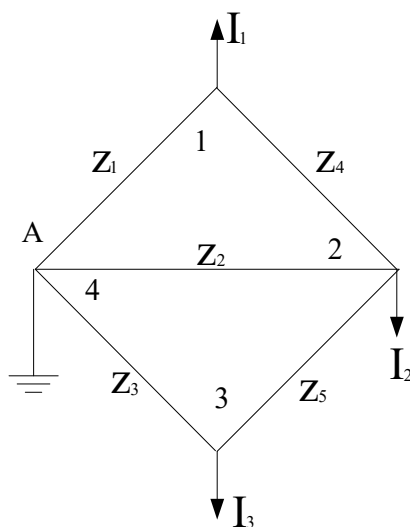
(1) 求该网络的节点导纳矩阵 Y 。

(2) 当支路 3—4 改变为一条变压器支路时 (如图 (b) 所示) 求网络的节点导纳矩阵 (网络其余部分都不改变)。



题 39 图

40.如图所示的网络。图中标出了各线段的编号及阻抗, $Z_1=1, Z_2=2, Z_3=1, Z_4=4, Z_5=4$, 试用支路追加法确定网络的节点阻抗矩阵 (以节点 A 为参考节点)。



题 40 图

41. 试用题 40 所示的节点阻抗矩阵, 其中 $I_1=2$, $I_2=1$, $I_3=3$, 节点 A 的电压为 10, 试求其他各个节点的电压。

42. 已知非线性方程为

$$f_1(x_1, x_2) = 2x_1 + x_1x_2 - 1 = 0$$

$$f_2(x_1, x_2) = 2x_2 - x_1x_2 + 1 = 0$$

取初值 $X_1^{(0)} = 0$, $X_2^{(0)} = 0$ 进行迭代求解, 用高斯—塞德尔迭代法迭代一次, 并用其结果作为牛顿—拉夫逊法的初始值, 迭代两次。

43. 三台发电机组共同承担负荷, 它们的能量微增率分别为:

$$dF_1/dP_{G1} = 0.15P_{G1} + 10 \text{ 元/兆瓦小时} \quad (100 \leq P_{G1} \leq 200 \text{MVA})$$

$$dF_2/dP_{G2} = 0.10P_{G2} + 10 \text{ 元/兆瓦小时} \quad (100 \leq P_{G2} \leq 300 \text{MVA})$$

$$dF_3/dP_{G3} = 0.05P_{G3} + 10 \text{ 元/兆瓦小时} \quad (200 \leq P_{G3} \leq 500 \text{MVA})$$

试求:

(a) 负荷为 750MW 时, 每台发电机组所承担的负荷

(b) 负荷在 400MW 至 1000MW 范围内能量微增率与负荷曲线 $\lambda = f(P_1)$ 。

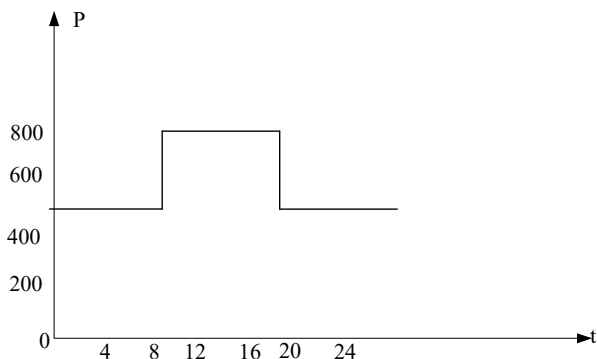
44. 某电力系统中有水电厂, 火电厂各并联运行, 火电厂的能量特性为:

$$F = 4 + 0.3P_G + 0.0003P_G^2 \text{ 吨/小时}$$

水电厂的耗水特性为:

$$W = 3 + P_H + 0.002P_H^2 \text{ 立方米/秒}$$

设水电厂给定的日用水量为 10^7 立方米，系统的日负荷曲线如图所示，火电厂的容量为800MW，水电厂为500MW，试求在给定的日用水量条件下，水，火发电厂的经济功率分布。



题 44 图

45. 两台容量为 60MW 的发电机共同承担负荷，它们的调差系数分别为 4%，3%，若若空载时并联运行，其频率 f_0 为 50 Hz，试求：

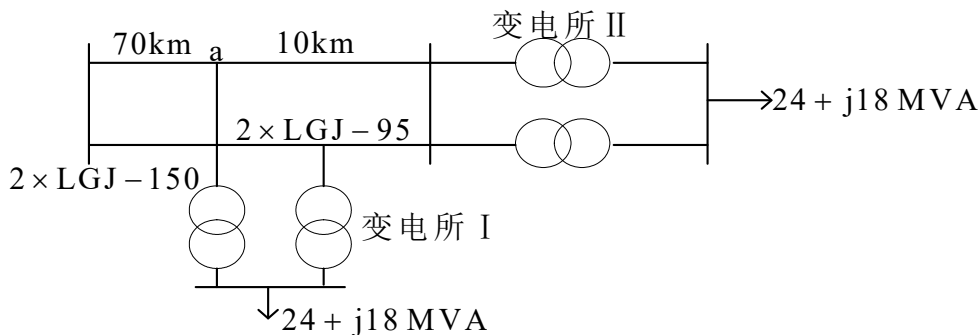
- (1) 总负荷为 100MW 时，这两台发电机组发出的功率；
- (2) 为使总负荷为 100MW 时，两台机组能平均分担负荷，它们门的转速应分别增减多少？

46. A、B 两系统并联运行，A 系统负荷增大 500MW，B 系统向 A 系统输送的交换功率为 300MW，如这时将联络线切除，则切除后，A 系统的频率为 49 Hz，B 系统的频率为 50 Hz，试求：

- (1) A、B 两系统的系统单位调节功率 K_A ， K_B ；
- (2) A 系统负荷增大 750MW，联合系统的频率变化量。

47. 110KV 干线网络如图所示。每一变电所中装设 20MVA，110/11KV 双组变压器两台，共同承担负荷 $24+j18$ MVA，现为了提高电力网运行的经济性，在变电所低压侧装设静电电容器 8MVA。

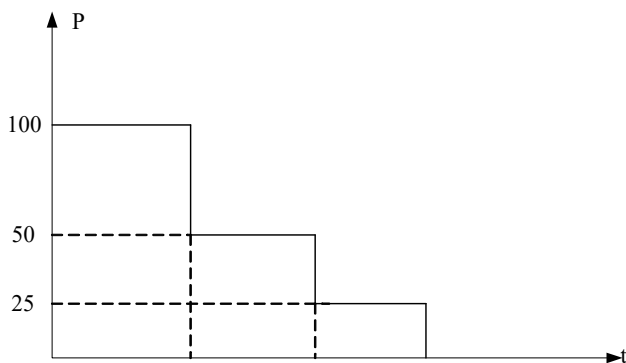
试求静电电容器在两个变电所的合理分布(按 ΔP 最小原则分配)。变压器的特性数据如下： $P_K=163$ KW， $P_0=60$ KW， $U_K\%=10.5$ ， $I_0\%=3$ 。



题 47 图

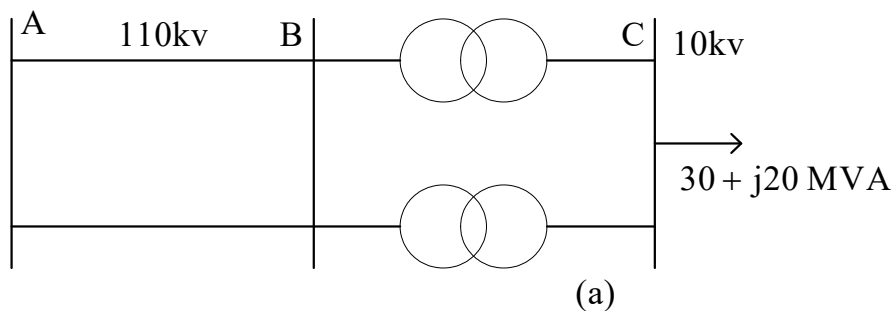
48.某 35KV 降压变电所，装有容量为 $2 \times 10\text{MVA}$ ，变比为 35/11KV 变压器，两台变压器并联运行。变压器的特性数据： $P_0=12.3\text{KW}$ ， $P_K=65\text{KW}$ ， $U_K\%=7.5$ ， $I_0\%=0.8$ ，变压器低压侧最大负荷为 $S=10+j4.8\text{MVA}$ ，有功年持续负荷曲线如图所示，其他负荷情况下的功率因数与最大负荷时相同。试求：

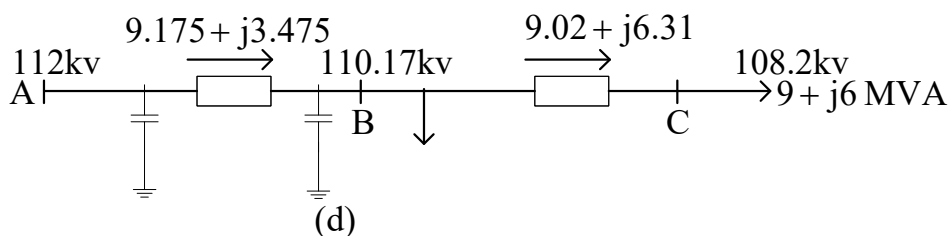
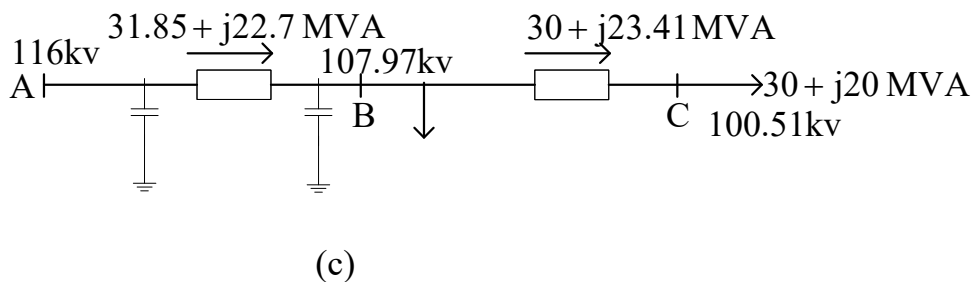
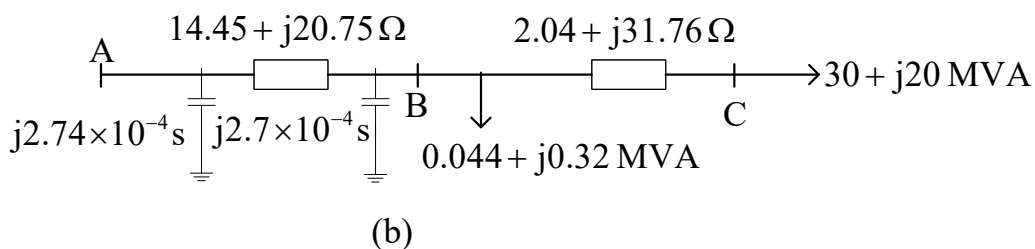
- (1) 两台变压器全年投入运行时的电能损耗；
- (2) 计算不同负荷时，变压器经济运行的台数；
- (3) 计算 (2) 决定的运行方式下，变压器全年的电能损耗，并与 (1) 比较。



题 48 图

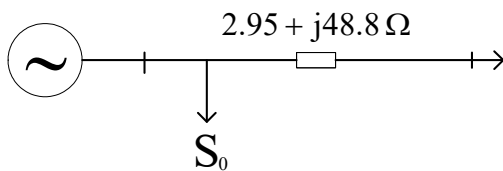
49.电力系统及参数如图所示，变压器采用有载调压变压器，已知 10KV 侧要求+3%的恒调压。试选择变压器的分接头。





题 49 图

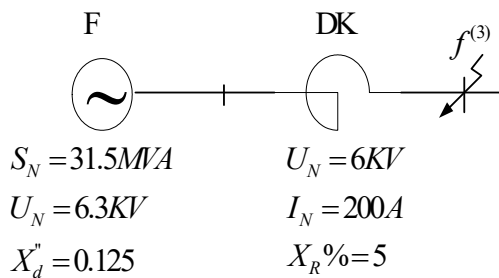
50.某电厂有一台变比 121/6.3KV，容量 31.5MVA 的升压变压器，折算至 121KV 侧的阻抗 $Z_T=2.95+j48.8\Omega$ ，变压器高压侧最大负荷为 30MVA， $\cos\Phi=0.8$ 。最小负荷为 15MVA， $\cos\Phi=0.8$ 。为了满足电力网调压要求：在最大负荷时，电厂最高母线应保持 117KV，而最小负荷应将为 113KV。根据发电机电压负荷的调压要求，希望发电机母线电压在最大最小负荷时与发电机的额定电压有相同的电压偏移，试选择升压变压器分接头。



题 50 图

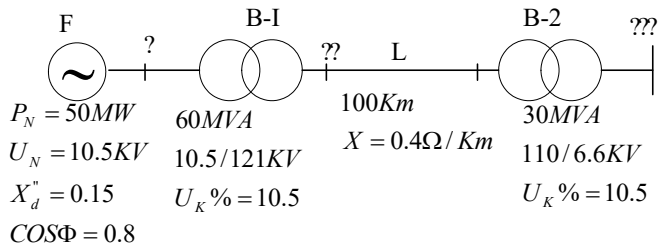
电力系统暂态分析习题

51. 有一条架空输电线路，电压等级为 35KV，长为 35Km，每公里电抗 $X=0.4\Omega/\text{km}$ ，取 $S_B=100\text{MVA}$ ， $U_B=U_{av}$ 。求线路的电抗标幺值。
52. 有一简单电力系统如下图所示，各元件参数已标于图中，选择基准值 $S_B=100\text{MVA}$ ， $U_B=U_{av}$ ，试求：（1）各元件在统一基准下的电抗标幺值（2）画出等值网络，并求出等值阻抗。



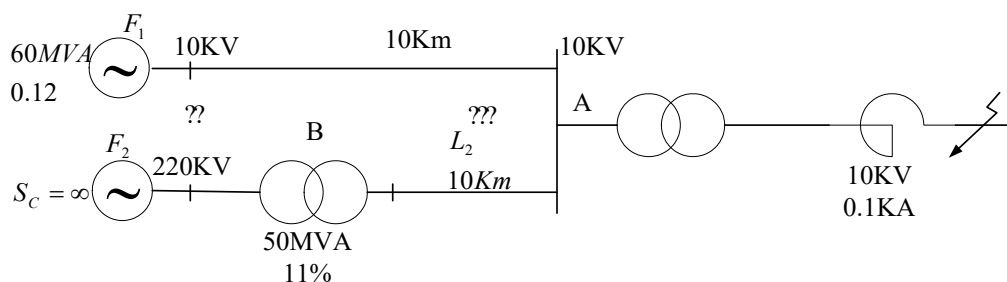
题 52 图

53. 某电力系统的接线如下图所示，取基准值 $S_B=100\text{MVA}$ 。试求：（1）用精确算法计算各元件参数的标幺值，取 I 段为基本段， $U_{B1}=10.5\text{KV}$ ；（2）用近似算法计算各元件参数的标幺值， $U_B=U_{av}$ 。



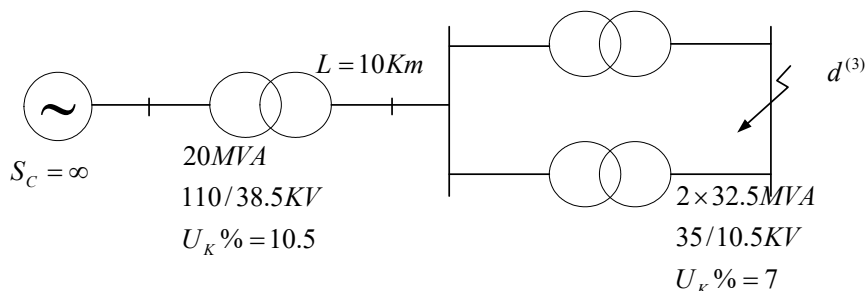
题 53 图

54. 某一线路上装有一台 $X_R \% = 5$ 的电抗器，其额定电流为 150A，额定电压为 6KV，若用另一台额定电流为 300A，额定电压为 10KV 的电抗器来代替它，并要求电抗欧姆值保持不变。问这台电抗器的电抗百分数是多少？
55. 电力系统如下图，试用近似法计算：当 d 点三相短路时，为使 $U_{A*} = 0.75$ ， X_R 应取多少？



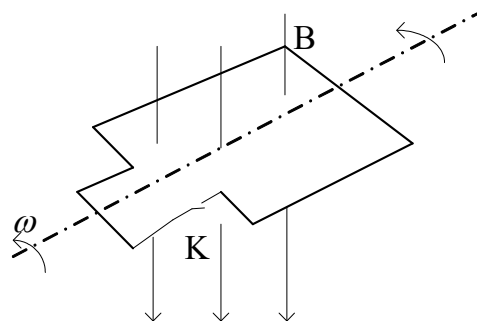
题 55 图

56. 电力网络如下图所示。试求短路点的冲击电流，短路电流的最大有效值和短路功率。



题 56 图

57. 有一超导体线圈在固定均匀磁场中作匀速圆周运动，如下图所示。当线圈旋转到与轴线呈竖直位置时（即线圈平面与磁力线垂直），将线圈短路（开关 K 闭合），问：（1）线圈中出现的电流有什么特点？（2）如果在上述位置往前旋转 $\pi/2$ 角度时，将线圈短路，线圈中出现的电流又如何呢？请写出数学表达式并画出电流波形。



题 57 图

58. 简要叙述暂态电抗和暂态电势的物理意义。

59. 什么是综合矢量，它有何作用？

60. 试说明派克变换前后磁链方程的特点。

61. 为什么用坐标变换？其原理思路是怎样的？变换对象是什么？

62. 应用基本方程分析同步发电机空载运行和对称稳态运行。

63. 一台凸极同步发电机的参数为： $X_d = 1.0, X_d' = 0.35, X_d'' = 0.2, X_q = 0.6$ ，q 轴无阻尼

绕组，短路前是在对称稳态运行，空载电势 $E_a = 1.530^0$ ，定子电流 $I_a = 0.5 - 30^0$ 。试计算：

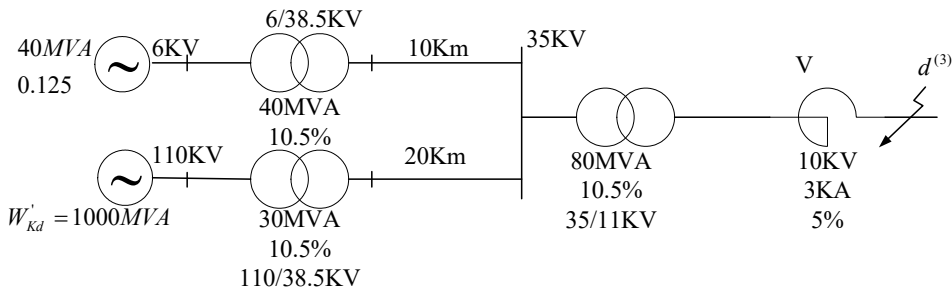
(1) 发电机端电压 U_A ；(2) 机端突然三相短路时的次暂态电流 I'' ；(3) 三相短路后的稳态电流 I_∞ 。

64. 已知同步电机的参数为： $X_d = 1.0; X_q = 0.6; X_d' = 0.3; \cos \Phi = 0.85$ 。试求在额定满载

运行时的 E_q 和 E_q' 。

65. 电力系统如图，用近似法和准确算法分别求 d 点三相短路电流。

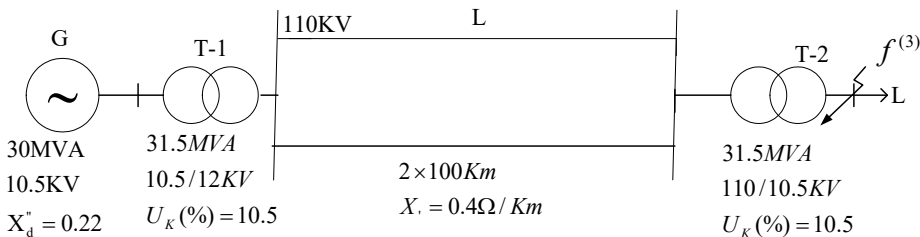
65. 电力系统如图，用近似算法和准确算法分别求点三相短路电流。



题 65 图

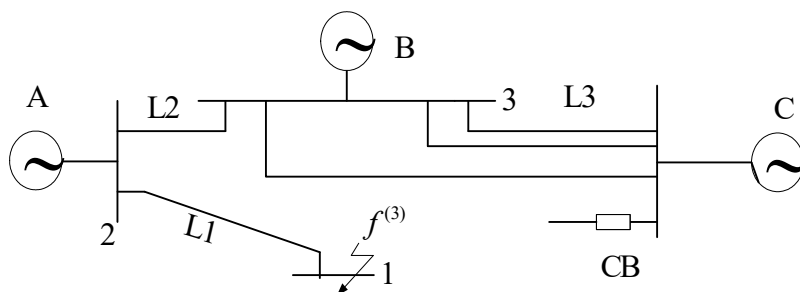
66. 简单电力系统如下图所示。f 点发生三相短路。求：(1) 短路处起始次暂态电流和短路容量；(2) 发电机起始次暂态电流；(3) 变压器 T_2 高压母线的残压。图中负荷 $L: 24MVA, \cos \Phi = 0.9$ ，它可看成由两种负荷并联而成：(a) 电阻性负荷：6MW, $\cos \Phi = 1$ ；(b)

电动机负荷，等值电抗 $X' = 0.3$ ，短路前负荷母线的电压为 10.2KV。



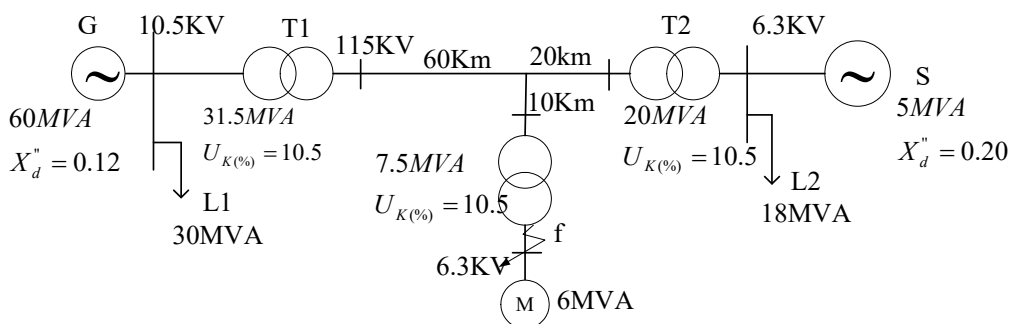
题 66 图

67. 系统如图, A、B、C 为三个等值电源。其中, $S_A=75\text{MVA}$, $S_B=535\text{MVA}$, $X_A=0.380$, $X_B=0.304$ 。C 的容量和电抗值不详。只知装设在母线 4 上的断路器 CB 的断开容量为 3500MVA。线路 L_1, L_2, L_3 的长度分别为 10Km、5 Km、24 Km, 电抗均为 $0.4\Omega/\text{km}$ 。试计算在母线 1 上三相短路时的次暂态电流和冲击电流。



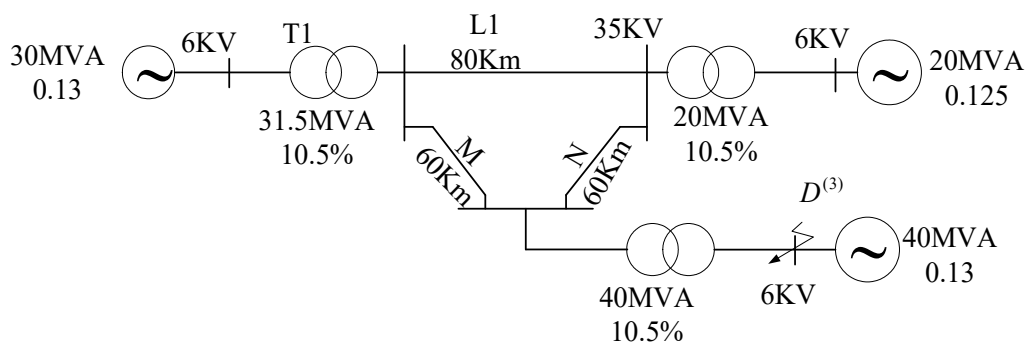
题 67 图

68. 系统如图, G 为发电机, S 为调相机, M 为大型电动机, L_1, L_2 为有各种电动机组成的综合负荷, 它们的次暂态电势分别为 1.08、1.2、0.9、0.8、0.8。综合负荷的次暂态电抗分别为 0.2、0.35。试计算 f 点三相短路时的冲击电流和短路电流的最大有效值。



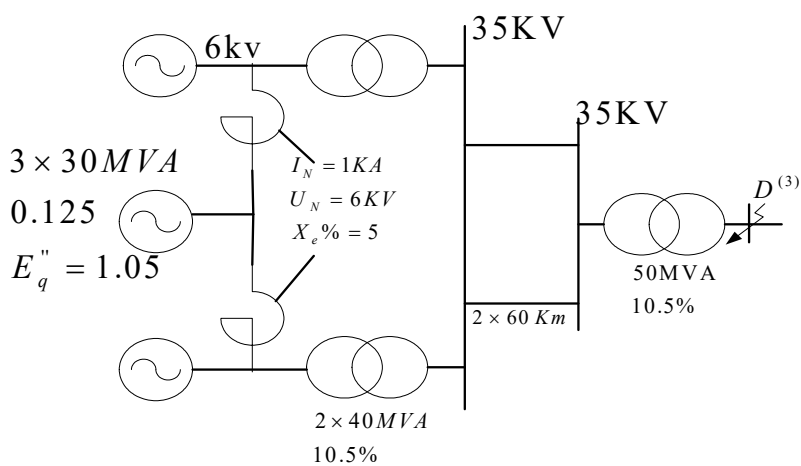
题 68 图

69. 电力系统如下图, 当 D 点发生三相短路时, 求 L、M、N 处的三相短路电流。



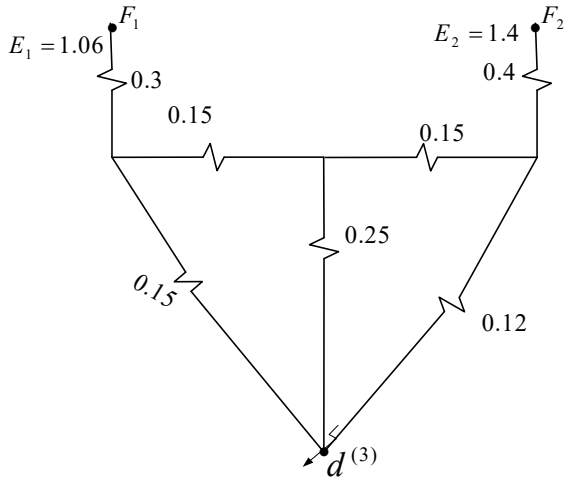
题 69 图

70. 电力系统如下图所示，求 D 点发生三相短路时， I'' 、 I_M 、 i_m 及 W_D 。



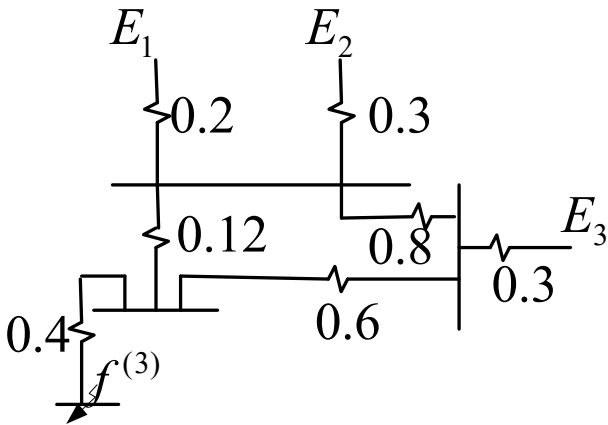
题 70 图

71. 电网如下图，求 F_1 、 F_2 对 D 点的转移电抗以及 K 点等值电抗。



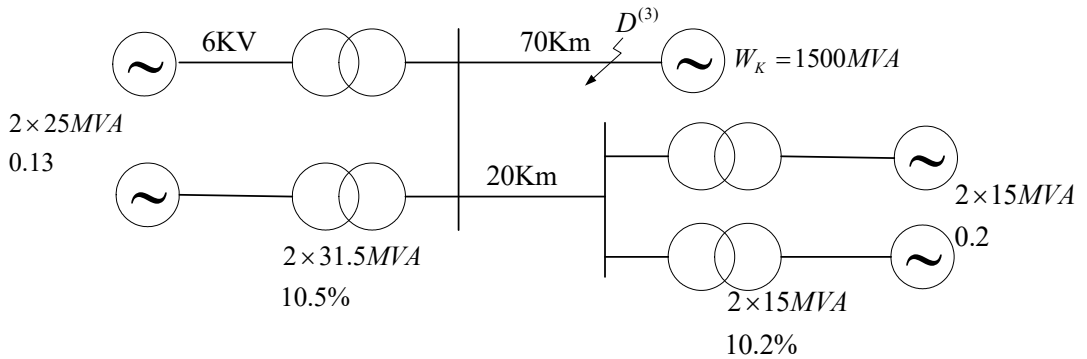
题 71 图

72. 如图所示网络, (1) 若 $E_1 = E_2$, 求各电势对 f 点的转移电抗; (2) 若 $E_1 = E_2 = E_3$, 求电势对 f 点的总阻抗 (3) 若 E_1 、 E_2 、 E_3 均不相等, 则各电势对 f 点的转移电抗怎么计算。



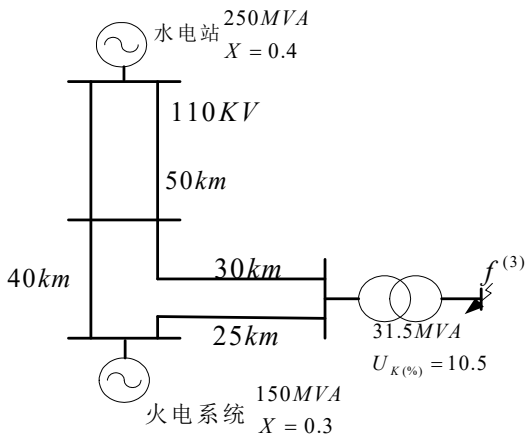
题 72 图

73. 电力系统如图, 求 D 点三相短路时, 0 秒, 0.2 秒以及稳态电流。



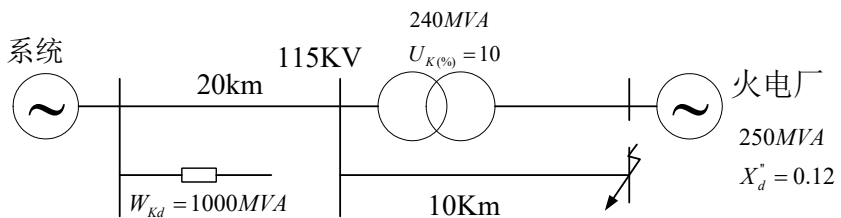
题 73 图

74.系统接线如图。当 f 点发生三相短路，试按同一方法，个别方法计算：（1）次暂态电流初始有效值 I'' 、（2） $I_{0.2}$ 、 I_{∞} ，并比较两种计算法的结果。



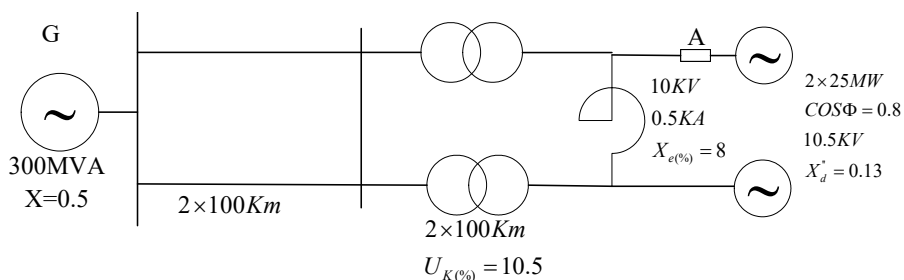
题 74 图

75.如图，系统参数不详，可是已知与系统相接之变电站所装断路器的最大切断功率是 1000KVA，求 f 点发生三相短路 0.2 秒后的短路功率。



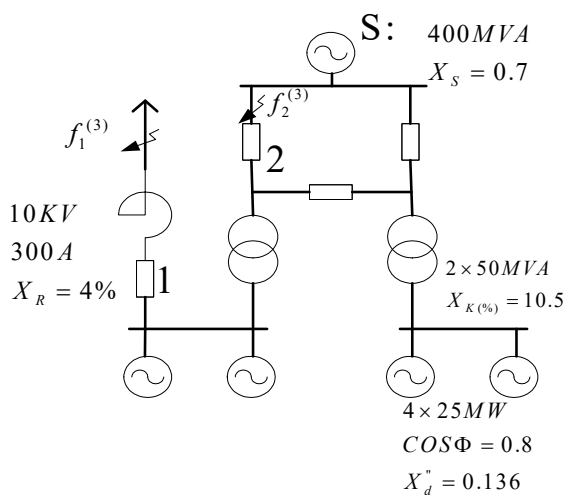
题 75 图

76. 试计算如图所示系统中流过断路器 A 的最大可能 I'' 。



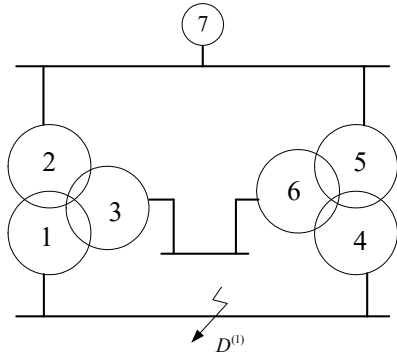
题 76 图

77. 某火电厂接线如图，试计算 (1) f_1 点三相短路时，流过开关 1 的 I'' 和 I_∞ ；(2) f_2 点三相短路时，流过开关 2 的 I'' 和 I_∞ 。



题 77 图

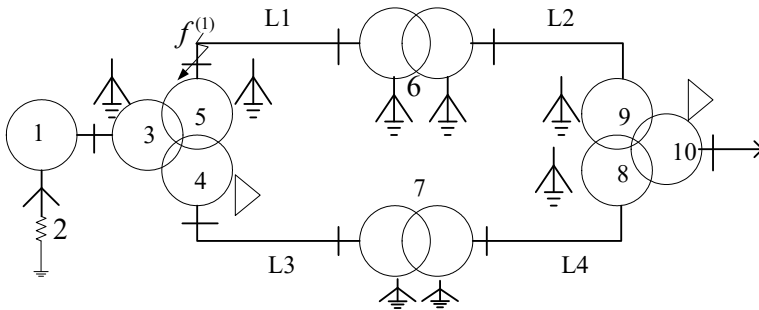
78. 电力系统如图：试画出 D 点单相短路时的零序网络。[变压器接线如下表，分别画出其零序网络]



题 78 图

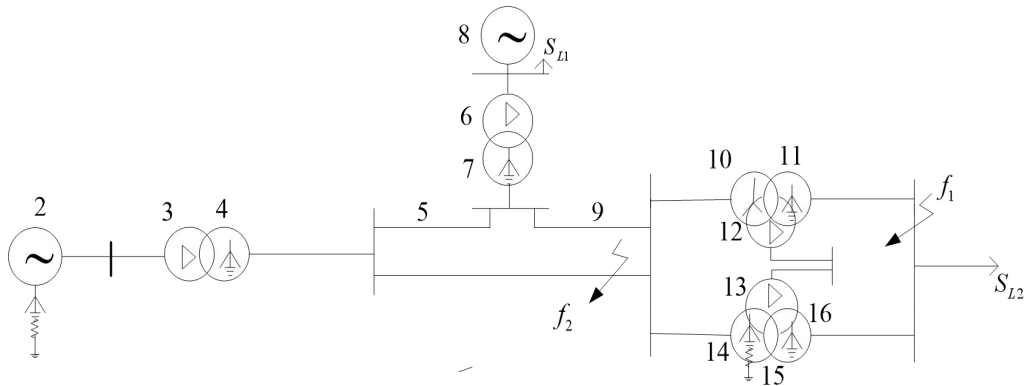
	1	2	3	4	5	6	7
a							
b	 8					 9	
c					 8		
d		 8					
e		 8		 9			

79. 如图所示网络中 f 点发生单相短路，试画出其零序网络。



题 79 图

80. 电力系统如图，试作出 \$f_1\$ 点发生不对称短路时的正序、负序、零序网络；\$f_2\$ 点发生不对称故障时的零序网络。



题 80 图

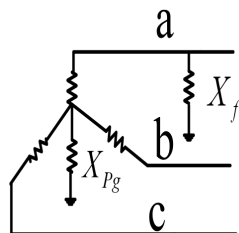
81.请画出单相短路接地，两相短路，两相短路接地故障时的电压、电流向量图。

82.简单电力系统如图所示，当 f 点发生单相接地故障，两相短路接地故障时，试画出它的复合序网。

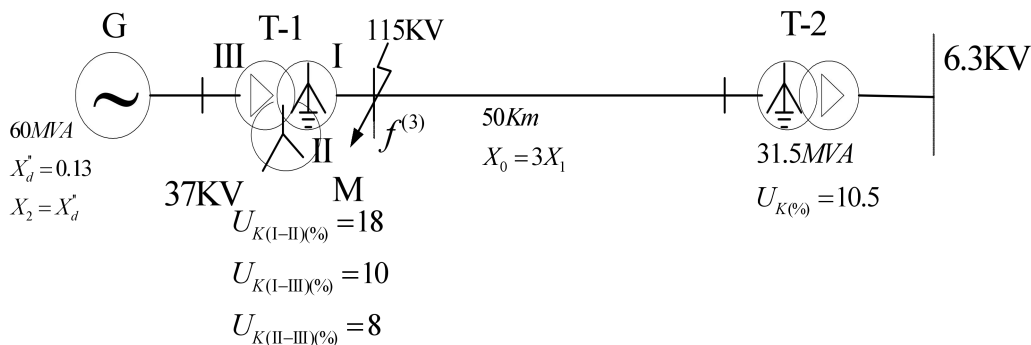


题 83 图

83.如图所示系统中，发电机端经电抗 X_f 发生单相短路故障，已知发电机各序电抗为 X_1 、 X_2 、 X_0 ，中性点接地电抗为 X_{pg} ，试求短路后的 I_a 、 U_b 、 U_c 的计算式。（设故障前为空载）

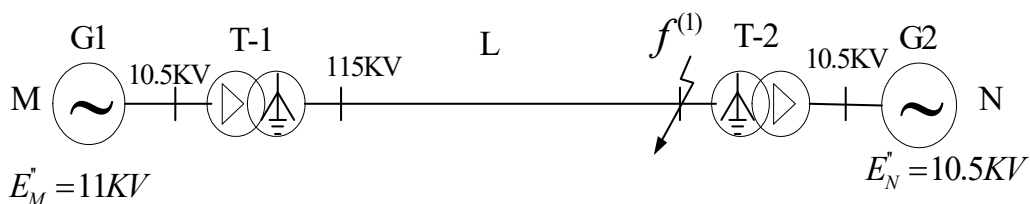


84.系统如图：f 点发生 B 相接地，求：（1）故障相电流 I_{rB} ；（2）M 母线各序电压；（3）通过 T_2 高压绕组中性点电流；（4）通过发电机的负序电流。



题 84 图

85. 电力系统如图：电源的次暂态电势及各元件参数均已知。当 f 点发生 C 相接地短路时，求短路起始瞬间各序电气量及各相量，并画出故障处的电压、电流相量图。



题 85 图

各元件参数如下：

$$G1: S_{1n}=62.5\text{MVA}, U_N=10.5\text{KV}, X_d''=0.125, X_2=0.16, E_M''=11\text{KV}$$

$$G2: S_{2n}=31.25\text{MVA}, U_N=10.5\text{KV}, X_d''=0.125, X_2=0.16, E_N''=11\text{KV}$$

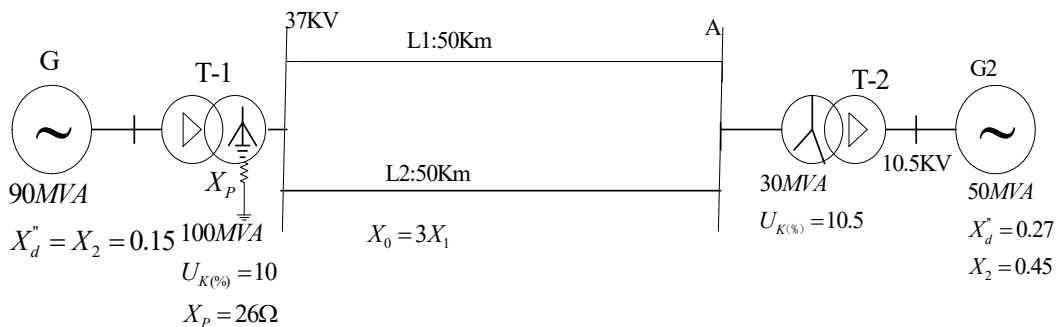
$$T1: S_{T1N}=60\text{MVA}, U_{1N}/U_{2N}=10.5/121\text{KV}, U_K(\%)=10.5$$

$$T2: S_{T2N}=31.5\text{MVA}, U_{1N}/U_{2N}=10.5/121\text{KV}, U_K(\%)=10.5$$

$$L: X_1=X_2=0.4\Omega/\text{km}, X_0=2X_1, L=40\text{Km}。$$

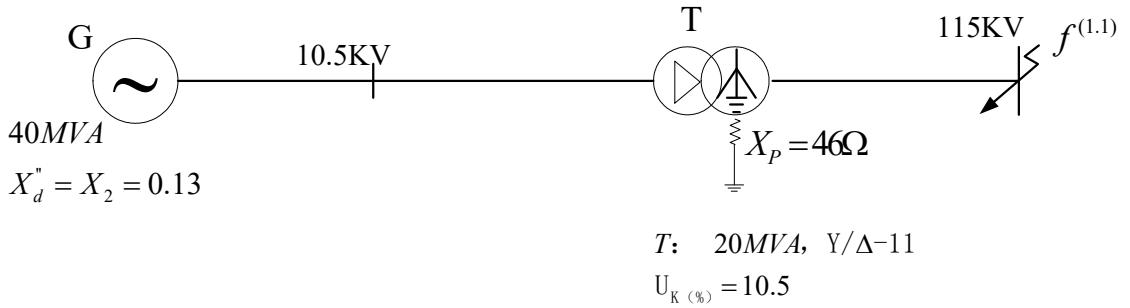
86. 一台 50MVA 汽轮发电机，机端发生两相短路，试求故障处各相电流，电压的初值（不记负荷）。发电机参数为额定容量 50MVA，额定电压 10.5KV， $E''=1.0$ ， $X_d''=X_2=0.12$ 。

87. 图示系统中，f 点发生两相短路故障，试求故障点的各相电流以及 A 处的正序电压。



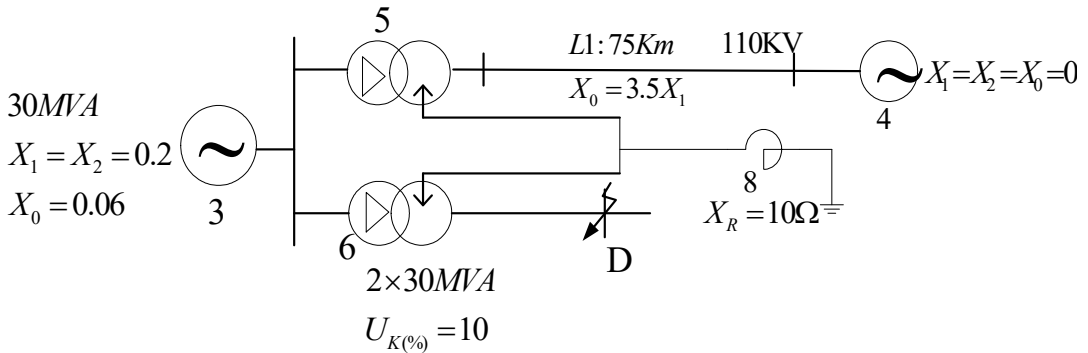
题 87 图

88. 计算如图网络中 f 点发生两相短路接地瞬时故障点的各相电流。



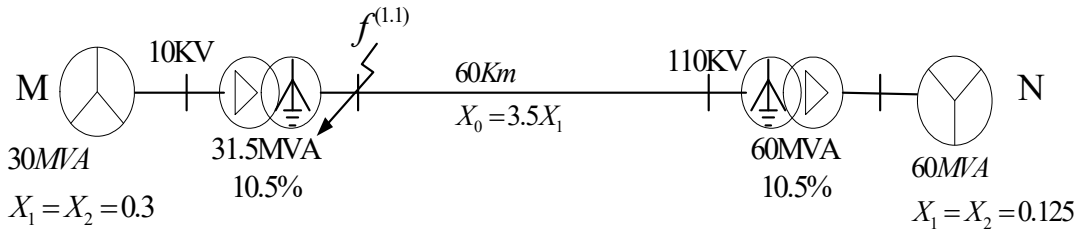
题 88 图

89. 电力系统如下图所示，试求出 D 点单相短路，两相短路，两相短路接地的电流。



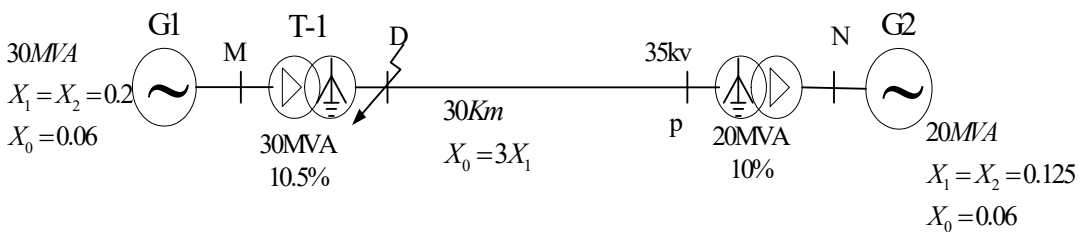
题 89 图

90. 计算如图网络中 f 点两相短路接地的短路电流 I 及各相电压。



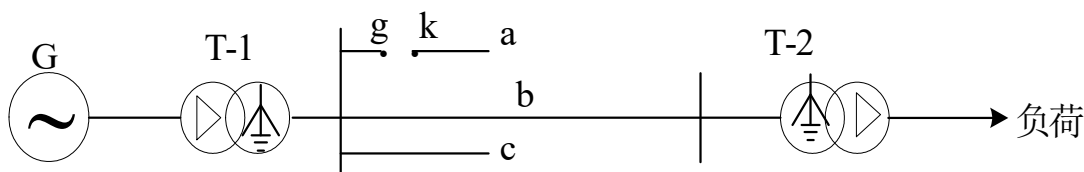
题 90 图

91. 电力系统如图，求 D 点两相短路及两相短路接地的 I'' 、 $I_{0.2}$ 、及 M、N 处电压。



题 91 图

92.如图电力系统，在 g、k 处发生 a 相断线时，求断线处的负序、零序的电流、电压及非故障相中的电流，并与故障前的电流进行比较。



题 92 图

系统各元件参数已归算到以 $S_B=100\text{MVA}$ ， $U_B=U_{\text{平均}}$ 为基准的标幺值。

G: $E' = 1.43$, $X_1 = X_2 = 0.25$

T1: $X_1 = X_2 = X_0 = 0.2$

T2: $X_1 = X_2 = X_0 = 0.2$

L: $X_1 = X_2 = 0.15$, $X_0 = 0.57$

负荷: $X_1 = 1.2$, $X_2 = 0.25$, $X_0 = 0$

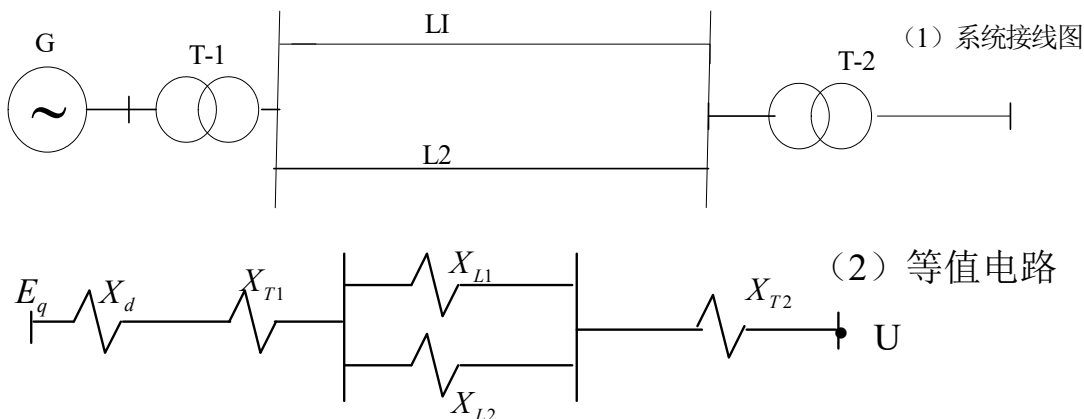
93.电力系统静态稳定的定义是什么？什么叫“小干扰”？

94.试说明应用小干扰法研究简单电力系统静态稳定的方法和步骤。

95.简单电力系统如下图所示，发电机经升压变压器和双回线路相系统供电，参数如下：

$X_d = 0.92$, $X_q = 0.51$, $X_d' = 0.204$, $X_{T1} = 0.125$, $X_{T2} = 0.103$, $X_L = 1.098$,

正常运行时 $P_0 = 1.0 = P_{E(0)}$ ， $\cos \Phi = 0.9$ ， $U = 1.0$ ，试计算该系统发电机的功率特性，极限功率，极限功角及静态稳定储备系数。



题 95 图

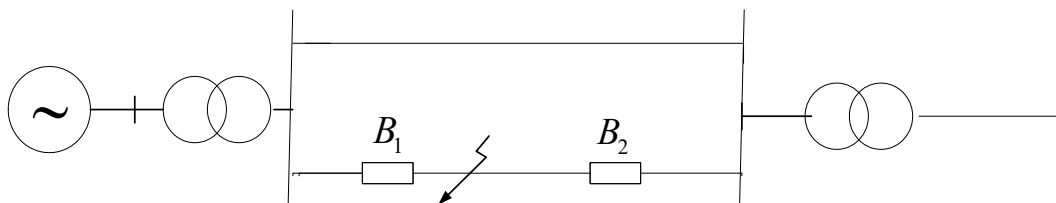
96.在上题所示系统中，当发电机装有按电压偏移比例调节励磁装置时，求极限功角，极限功率及静态稳定储备系数。

97.何谓电力系统暂态稳定性？计算暂态稳定性时应考虑哪种干扰形式？其基本假定条件

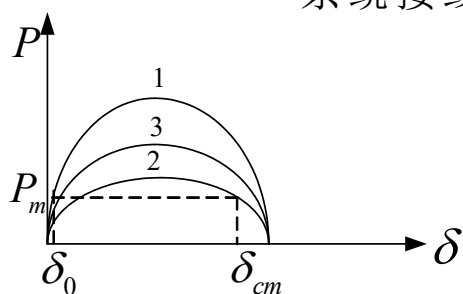
是什么？

98. 试述等面积定则的基本原理和故障切除极限角 δ_{cm} 的确定方法。

99. 某简单电力系统，设当 $t=0$ ($\delta = \delta_0$) 时，线路突然发生短路故障，经过一段时间后，当 $\delta = \delta_m$ 时，开关 B_1 、 B_2 同时跳开，系统在正常时，故障时及故障切除后功率特性曲线分别为 1、2、3 曲线。试指出系统加速及减速面积。

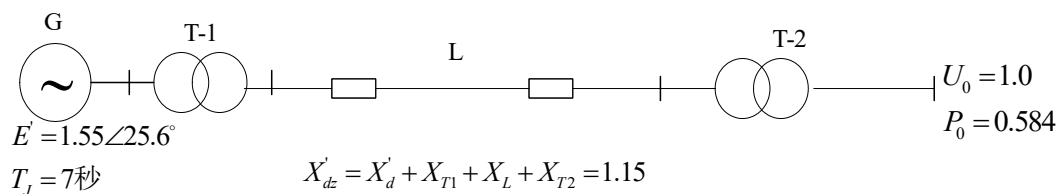


系统接线图



题 99 图

100. 某一简单输电系统，设线路在正常运行情况下突然切除，然后经过一段时间后，又重复合闸，若合闸后系统还没失去稳定，试求出最大允许的合闸角度。



题 100 图

附录

附录 I 架空线型号及参数

1. 型号说明

导线型号一般由二段组成： $\underbrace{LGJ}_{\text{第一段}} - \underbrace{240}_{\text{第二段}}$

第一段为导线材料和特性的代号：T——铜 L——铝
 G——钢 J——绞线
 Q——轻型 J——强加型（位于第四字母）
 H——合金 F——防腐

第二段为导线的标称截面。

额定截面 (mm ²)	导线型号									
	TJ		LJ		LGJ		LGJQ		LGJJ	
	计算外 径 (mm)	安全 电流 (A)	计算外 径 (mm)	安全 电流 (A)	计算外 径 (mm)	安全 电流 (A)	计算外 径 (mm)	安全 电流 (A)	计算外 径 (mm)	安全 电流 (A)
4	2.2									
6	2.7									
10	3.5				4.4					
16	5.04	130	5.1	105	5.4	105				
25	6.33	180	6.4	135	6.6	135				
35	7.47	220	7.5	170	8.4	170				
50	8.91	270	9.0	215	9.6	220				
60	10.4									
70	10.7	340	10.7	265	11.4	275				
95	12.45	415	12.4	325	13.7	335				
120	14.0	485	14.0	375	15.2	380			15.5	
150	15.75	570	15.8	440	17.0	445	16.6		17.5	464
185	17.43	645	17.5	500	19.0	515	18.4	510	19.6	543
240	19.88	770	20.0	610	21.6	610	21.6	610	22.4	629
300	22.19	890	22.4	680	24.2	700	23.5	710	25.2	710
400	25.62	1085	25.9	830	28.0	800	27.2	845	29.0	865
500			29.0	980			30.2	966		
600			32.2	1100			33.1	1090		
700								1250		

2. 架空线规格及安全电流

附表 1

3. 架空线路的电阻

4. 温度修正系数

当周围空气温度温度异于 25 度时，可乘以相应的电流修正系数，周围空气温度应取当地最热的月份平均最高温度。架空线路（裸导线）的电流安全校正系数与导线的最高允许温度有关，当导线最高允许温度为 70 度时，其电流修正系数可见附表 3-3。

附表 2

额 定 截 面 (mm ²)	型 号				
	TJ	LJ	LGJ	LGJQ	LGJJ
	20℃时的电阻 (Ω/km)				
4	4.65				
6	3.06				
10	1.84		3.12		
16	1.20	1.98	2.04		
25	0.74	1.28	1.38		
35	0.54	0.92	0.85		
50	0.39	0.64	0.65		
60	0.32				
70	0.28	0.46	0.46		
95	0.20	0.34	0.33		
120	0.158	0.27	0.27		0.27
150	0.123	0.21	0.21	0.21	0.21
185	0.103	0.17	0.17	0.17	0.17
240	0.078	0.132	0.132	0.13	0.131
300	0.062	0.106	0.107	0.108	0.105
400	0.047	0.080	0.080	0.080	0.078
500		0.063		0.065	
600		0.052		0.055	
700				0.044	

附表 3

周围空气温度 (°C)	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
修正系数	1.29	1.24	1.20	1.15	1.11	1.05	1.00	0.94	0.88	0.81	0.74	0.67

5. 用铝导线敷设的架空线路的感抗和电阻

附表 4

导线型号	LJ-16	LJ-25	LJ-35	LJ-50	LJ-70	LJ-95	LJ-120
电 阻 (Ω/km)	1.96	1.27	0.91	0.63	0.45	0.33	0.27
几何均距 (m)	线路感抗(Ω/km)						
0.6	0.358	0.345	0.336	0.325	0.315	0.303	0.297
0.8	0.377	0.363	0.352	0.341	0.331	0.319	0.313
1.0	0.391	0.377	0.366	0.355	0.345	0.334	0.327
1.25	0.405	0.390	0.380	0.369	0.359	0.347	0.341
1.5		0.402	0.391	0.380	0.370	0.358	0.352
2.0		0.421	0.410	0.398	0.388	0.377	0.371

6. 用铜导线敷设的架空线路的感抗和电阻

附表 5

几 何 均 距 (m)	导线型号	TJ-4	TJ-6	TJ-10	TJ-16	TJ-25	TJ-35	TJ-50	TJ-70	TJ-95	TJ-120	TJ-150
	电 阻 (Ω/km)	4.65	3.06	1.84	1.20	0.74	0.54	0.39	0.28	0.20	0.15	0.123
线路感抗 (Ω/km)												
0.4		0.385	0.371	0.355	0.333	0.319	0.308	0.297				
0.6		0.411	0.397	0.381	0.358	0.345	0.336	0.325	0.309	0.300		
0.8		0.429	0.415	0.399	0.377	0.363	0.352	0.341	0.327	0.318		
1.0			0.429	0.413	0.391	0.377	0.366	0.355	0.341	0.332		
1.25				0.427	0.405	0.391	0.380	0.369	0.355	0.346		
1.50					0.416	0.402	0.391	0.380	0.366	0.357		
2.0					0.435	0.421	0.410	0.308	0.385	0.376	0.368	
2.5						0.435	0.424	0.417	0.399	0.390	0.382	
3.0							0.435	0.423	0.410	0.401	0.393	
3.5							0.445	0.433	0.420	0.411	0.403	
4.0									0.428	0.419	0.411	0.406
4.5									0.435	0.426	0.418	0.413
5.0									0.442	0.433	0.425	0.420
5.5											0.431	0.426
6.0											0.437	0.432

7. 用钢芯铝线敷设的架空线路的感抗和电阻

附表 6

几何均距 (m)	导线型号	LGJ-35	LGJ-										
	电阻 (Ω/km)	0.91	0.63	0.45	0.33	0.27	0.21	0.17	0.13?	0.105	0.078	0.105	0.078
	线路感抗 (Ω/km)												
2.0		0.403	0.392	0.382	0.371	0.365	0.358						
2.5		0.417	0.406	0.396	0.385	0.379	0.372						
3.0		0.429	0.418	0.408	0.397	0.391	0.384	0.377	??				
3.5		0.438	0.427	0.417	0.406	0.400	0.398	0.386	??				
4.0		0.446	0.435	0.425	0.414	0.408	0.401	0.394	??				
4.5				0.433	0.422	0.416	0.409	0.402	??				
5.0				0.440	0.429	0.423	0.416	0.409	??				
5.5						0.429	0.422	0.415	??				
6.0						0.435	0.425	0.420	0.413	0.404	0.396	0.402	0.392
6.5							0.432	0.425	0.420	0.409	0.400	0.407	0.398
7.0							0.438	0.430	0.421	0.414	0.406	0.412	0.403
7.5								0.435	0.423	0.418	0.409	0.417	0.408
8.0									0.432	0.422	0.414	0.421	0.412
8.5										0.425	0.418	0.424	0.416

8. 用铜导线敷设的架空线路的电纳

附表 7

导线型号	TJ-70	TJ-95	TJ-120	TJ-150
几何均距 (m)	线 路 电 纳 $(s/km) \times 10^{-6}$			
3.0	2.76	2.83	2.89	2.95
3.5	2.69	2.76	2.82	2.83
4.0	2.64	2.71	2.76	2.80
4.5	2.59	2.61	2.69	2.76
5.0	2.55	2.60	2.65	2.71
5.5			2.62	2.63
6.0			2.53	2.54

9. 用钢芯铝线敷设的架空线路的电纳

附表 8

导线型号	LGJ-70	LGJ-95	LGJ-120	LGJ-150	LGJ-185	LGJ-240	LGJ-300	LGJ-400	LGJJ-300	LGJJ-400
几何均距 (m)	线 路 导 纳 $(s/km) \times 10^{-6}$									
3.0	2.79	2.87	2.92	2.97	3.03	3.10				
3.5	2.73	2.81	2.85	2.90	2.96	3.02				
4.0	2.68	2.75	2.79	2.85	2.90	2.96				
4.5	2.62	2.69	2.74	2.79	2.84	2.89				
5.0	2.58	2.65	2.69	2.74	2.82	2.85				
5.5		2.62	2.67	2.70	2.74	2.80				
6.0			2.64	2.68	2.71	2.76	2.81	2.88	2.84	2.91
6.5			2.60	2.63	2.69	2.72	2.78	2.84	2.80	2.87
7.0					2.66	2.70	2.74	2.78	2.77	2.83
7.5					2.62	2.69	2.71	2.76	2.73	2.80
8.0						2.65	2.69	2.73	2.70	2.77
8.5							2.67	2.70	2.68	2.75

附录 II 铜芯三芯电缆的感抗和电纳

附表 9

芯线额定截面 (mm ²)	感 抗 (Ω/km)				电 纳 (s/km)×10 ⁻⁶			
	电 缆 额 定 电 压 (kv)							
	6	10	20	35	6	10	20	35
10	0.100	0.113			60	50		
16	0.094	0.104			69	57		
25	0.085	0.094	0.135		91	72	57	
35	0.079	0.088	0.129		104	82	63	
50	0.076	0.082	0.119		119	94	72	
70	0.072	0.079	0.116	0.132	141	100	82	63
95	0.069	0.076	0.110	0.126	163	119	91	68
120	0.069	0.076	0.107	0.119	179	132	97	72
150	0.066	0.072	0.104	0.116	202	144	107	79
185	0.066	0.069	0.100	0.113	229	163	116	85
240	0.063	0.069						

注：对 6KV 和 10KV 的电缆，表中列出的感抗和电纳数字，系指具有扇型芯线的电缆而言。

附录III 电力变压器型号及参数

10. 电力变压器的产品型号

附表 10

序 号	分 类	类 别	代 表 符 号	
			新 型 号	旧 型 号
1	相 数	单 相 三 相	D S	D S
2	绕组外绝缘介质	变压器油 空 气 成型固体	G C	K C
3	冷却方式	油浸自冷式 空气自冷式 风 冷 式 水 冷 式	不表示 不表示 F W	J 不表示 F S
4	油循环方式	自然循环 强迫油导向循环 强迫油循环	表示 D P	不表示 不表示 P
5	绕 组 数	双 绕 组 三 绕 组	不表示 S	不表示 S
6	调压方式	无激磁调压 有载调压	不表示 Z	不表示 Z
7	绕组导线材料	铜 铝	不表示 不表示	不表示 L
8	绕组耦合方式	自 耦 分 裂	0	0

注：自耦变压器，升压时，“C”列型号之后：“0”型号之前。在电力变压器的型号后还可以加注防护类型代号。

例如：湿热带 TH，干热带 TA 等。

11. 电压组合（绕组额定电压 KV）及接线方式

附表 11

高 压 绕 组	6, 6.3, 10.5	Y 接线
	13.8, 15.75, 18, 35, 38.5, 60, 66	Y · Y ₀ 接线
	110, 121, 220, 242, (154), (169), 330, 550	Y ₀ 接线
中 压 绕 组	11, 38.5, (44), 66.121, 220	Y ₀ 接线
低 压 绕 组	0.4	Y ₀ 接线
	3.15, 3.3, 6.3, 6.6, 10.5, 11, 13.8, 15.75, 18	Δ 接线
	38.5, (44), 66, 110	ΔY 或 Y ₀ 接线

12.SL: -50~6300/35 型, 电压 35KV, R_{10} 新容量系列电力变压器

附表 12

型号	额定容量 (kva)	额定电压 (kv)		损耗 (w)		阻抗电压 (%)	空载电压 (%)
		高压	低压	空载	短路		
SL ₁ -800/35	800	35, 38.5	10.5, 6.3, 6	3100	11500	6.5	6
SL ₁ -1000/35	1000	35	0.4	3600	13700	6.5	5.5
SL ₁ -1000/35	1000	35, 38.5	10.5, 6.3, 6	3600	13700	6.5	5.5
SL ₁ -1250/35	1250	35	0.4	4200	16200	6.5	5.5
SL ₁ -1250/35	1250	35, 38.5	10.5, 6.3, 6	4200	16200	6.5	5.5
SL ₁ -1600/35	1600	35	0.4	5050	19000	6.5	5
SL ₁ -1600/35	1600	35, 38.5	10.5, 6.3, 6	5050	19000	6.5	5
SL ₁ -2000/35	2000	35	0.4	5700	22820	6.5	3.5
SL ₁ -2000/35	2000	35, 38.5	10.5, 6.3, 6	5800	22500	6.5	4.5
SL ₁ -2500/35	2500	35, 38.5	10.5, 6.3, 6	6800	26400	6.5	4.5
SL ₁ -3150/35	3150	35, 38.5	10.5, 6.3, 6	8000	31000	7	4
SL ₁ -4000/35	4000	35, 38.5	10.5, 6.3, 6	9500	36500	7	4
SL ₁ -5000/35	5000	35, 38.5	10.5, 6.3, 6	11200	44000	7	3.5
SL ₁ -6300/35	6300	35, 38.5	10.5, 6.3, 6	13200	52000	7.5	3.5

13.容量 6300KVA 及以上，电压 110KV 的双绕组变压器

附表 13

型号	额定电压 (kv)		阻抗电 压 (%)	空 载 电 压 (%)	损耗 (kw)		连接组
	高压	低压			短路	空载	
SFL ₁ -6300/110	121	11, 10.5, 6.6, 6.3	10.5	1.1	52	9.76	Y ₀ /Δ-11
	110	11, 10.5, 6.6, 6.3	10.5	1.1	52	9.76	Y ₀ /Δ-11
SFL ₁ -8000/110	121	11, 10.5, 6.6, 6.3	10.5	1.1	62	11.6	Y ₀ /Δ-11
	110	11, 10.5, 6.6, 6.3	10.5	1.1	62	11.6	Y ₀ /Δ-11
SFL ₁ -10000/110	121	11, 10.5, 6.6, 6.3	10.5	1.1	72	14	Y ₀ /Δ-11
	110	11, 10.5, 6.6, 6.3	10.5	1.1	72	14	Y ₀ /Δ-11
SFL ₁ -16000/110	121	11, 10.5, 6.6, 6.3	10.5	0.9	110	18.5	Y ₀ /Δ-11
	110	11, 10.5, 6.6, 6.3	10.5	0.9	110	18.5	Y ₀ /Δ-11
SFL ₁ -20000/110	121	11, 10.5, 6.6, 6.3	10.5	0.8	135	22	Y ₀ /Δ-11
	110	11, 10.5, 6.6, 6.3	10.5	0.8	135	22	Y ₀ /Δ-11
SFL ₁ -31500/110	121	11, 10.5, 6.6, 6.3	10.5	0.7	190	31.05	Y ₀ /Δ-11
	110	11, 10.5, 6.6, 6.3	10.5	0.7	190	31.05	Y ₀ /Δ-11
SFL ₁ -50000/110	121	11, 10.5, 6.6, 6.3	10.5	0.7	200	41.5	Y ₀ /Δ-11
	110	11, 10.5, 6.6, 6.3	10.5	0.7	200	41.5	Y ₀ /Δ-11
SFL ₁ -50000/110	121, 110	11, 10.5, 6.6, 6.3	10.5	0.75	250	48.5	Y ₀ /Δ-11
SFL ₁ -63000/110	121, 110	11, 10.5, 6.6, 6.3	10.5	0.8	298	60	Y ₀ /Δ-11
SFPL ₁ -90000/110	121, 110	11, 10.5, 6.6, 6.3	10.5	0.7	440	75	Y ₀ /Δ-11

14. 6300KVA 及以上，电压 110KV 的三绕组电力变压器

附表 14

型号	额定容量 (kva)	额定电压 (kv)			损耗 (kw)				阻抗电压 (%)			空载电压 (%)	连接组	参考价格 (千元)
		高压	中压	低压	空载	短路			高 - 中	高 - 低	中 - 低			
						高 - 中	高 - 低	中 - 低						
SFSL ₁ -6300 /110	6300 /6300 /6300	121	38.5	11 10.5 6.6 6.3	12.5	62.8	62.6	50.7	17	10.5	6	1.4		
		100	38.5	11 10.5 6.6 6.3	12.5	62.5	62	50.7	17	10.5	6	1.4		
		121	38.5	11 10.5 6.6 6.3	12.5	66.2	60.2	51.6	10.5	17	6	1.4		
		110	38.5	11 10.5 6.6 6.3	12.5	65.6	59.8	51.6	10.5	17	6	1.4		
SFSL ₁ -8000 /110	8000 /4000 /8000	121 110	38.5	11 10.5 6.6 6.3	14.2	27	83	19	17.5	10.5	6.5	1.26		
	8000 /8000 /4000	121 110	38.5	11 10.5 6.6 6.3	14.2	84	27	21	10.5	17.5	6.5	1.26		
SFSL ₁ -10000 /110	10000	121	38.5	11 10.5 6.6 6.3	17	91	89	69.3	17	10.5	6	1.5		
		110	38.5	11 10.5 6.6 6.3	17	89.6	88.5	70.2	17	10.5	6	1.5		
SFSL ₁ -10000 /110	10000	121	38.5	11 10.5 6.6 6.3	17	89.6	88.7	69.7	10.5	17	6	1.5		124
SFSL ₁ -15000 /110	15000	121 110	38.5	11 10.5 6.6 6.3	22.7	120	120	95	17	10.5	6	1.3		152
		121 110	38.5	11 10.5 6.6 6.3	22.7	120	120	95	10.5	17	6	1.3		152
SFSL ₁ -25000 /110	25000	121 110	38.5	11 10.5 6.6 6.3	42.7	219	224	172	10.5	18	6	3		200
SFSL ₁ -31500 /110	31500	121 110	38.5	11 10.5 6.6 6.3	37.2	229.1	212	181.6	18	10.5	6.5	0.8		221
SFPSL ₁ -400 00/110	40000	121 110	38.5	11 10.5 6.6 6.3	72	244 247	274.5 277	205.5	10.5	17.5	6.5	2.7		290
SFPSL ₁ -500 00/110	50000	121 110	38.5	11 10.5 6.6 6.3	62.6	350.6 351.8	318.3 321.9	252.9 252.9	18	10.5	6.5	1		350
SFPSL ₁ -630 00/110	63000	121 110	38.5	11 10.5 6.6 6.3	64	470	380	330	18.5	10.5	6.5	0.7		430

注：连接组均为 $Y_0/Y_0/\Delta$ -12-11。

15.220KV 级双绕组电力变压器

附表 15

型号	额定电压 (kv)		损耗 (w)		阻抗电 压 (%)	空载电 压 (%)	连 接 组
	高压	低压	空载	短路			
SF-20000/154	151	38.5	53.6	132.2	13		Y_0/Δ -11
SFPL ₂ -31500/220	220	38.5	83.7	286	14.2		Y_0/Δ -11
SFP-63000/220	220	69	120	402.4	14.4	3	Y_0/Δ -11
SSPL-70000/220	242	13.8	97.1	512.5	12.05		Y_0/Δ -11
SSP-75000/220 TH	242	66		442.7	15.45		Y_0/Δ -11
SSPL-90000/220	242	10.5	92	47.5	13.75	0.67	Y_0/Δ -11
SSPL-120000/220	242	10.5	98.2	1011.5	14.2	1.26	Y_0/Δ -11
SSPL-150000/220	242	13.8	137	883	13	1.43	Y_0/Y -12
SSPL-180000/220	242	13.8	175	904	12.55	0.427	Y_0/Δ -11
SSPL-26000/220	242	15.75	232	1460	14	0.963	Y_0/Δ -11
SSP-360000/220	236	18	115	1950	15	1	Y_0/Δ -11
SSP-360000/330	363	18	161	1780	16	0.5	Y_0/Δ -11

16.220KV 级，三绕组电力变压器。

附表 16

附 录

型号	额定容量 (kva)	额定电压 (kv)			损耗 (kw)				阻抗电压 (%)			空载电压 (%)
		高压	中压	低压	空载	短路			高 - 中	高 - 低	中 - 低	
						高-中	高-低	中-低				
SFPSL -31500 /220	31500 /31500 /31500	220	69	10.5	23	173.4	250	239.5	14.8	23	7.3	3.6
SFPSL -63000 /220	63000	220	121	38.5	125	470.5	440	314.2	23	14	7.6	2.7
SFPSL -90000 /220	90000	220	38.5	11	146.1	556.2	612	417	13.1	20.3	5.86	2.56
SWDPS -90000 /220	90000	242	121	13.8	205.5	727.8	579.7	412	24.56	12.94	8.6	
SSPSL -12000 /220	120000 /120000 0 /60000	220	121	10.5	123.1	1023	227	165	24.7	12.7	8.8	1
SSPSL -150000 /220	150000	242	121	10.5	239	918.3	838.6	619.3	24.4	14.1	8.3	2.15
SSPSL -180000 /220	180000	235	121	13.8	254	1057	1173	712	14.2	24.1	8.1	216
SFPSL -50000 /220	50000	220	38.5	11	76.3	329.3	381.08	196.3	15.83	24.75	6.99	0.98
SFPSL -63000 /220	63000	220	38.5	11	91.2	371	432	232	16.23	25.35	7.025	1.25
SFPSL -63000 /220	63000	220	121	11	94	377.1	460.04	252.06	15.15	25.8	8.77	1.25
SFPS -90000 /220	90000 /60000 /90000	220	38.5	11	111.5	290	480	280	19.5	12.4	5.9	0.79
SSPS -90000 /220	90000	242	121	10.5	114	606.2	514.5	393.2	25.5	14.9	9.1	0.75
SFPS -120000 /220	120000	220	121	38.5	121	667.17	857.56	473.54	15.1	24.8	8.3	0.68
SFPS -120000 /220	120000 /80000 /12000	220	121	38.5	131.5	466	691	268	25.7	14.9	8.86	0.85
SFPS -150000 220	150000	242	121	10.5	172	945	883	607	25.4	14.5	9.4	0.68

附录IV 《电力系统分析习题集》部分习题答案:

第 7 题 (2): $K_{T1} = 10.5kV / (121 \times 102.5\%kV)$; $K_{T2} = 110kV / 38.5kV$;

$$K_{T1} = 35 \times 95\%kV / 10.5kV \text{ 。}$$

第 8 题: $Z_L = 10.2 + j24.54\Omega$, $j\frac{B}{2} = j338.4 \times 10^{-6}s$ 。

第 9 题: r_0 分别为: $0.54\Omega/km$, $0.92\Omega/km$, $0.45\Omega/km$, $0.27\Omega/km$, $0.107\Omega/km$ 。

第 10 题: $r_0 = 0.21\Omega/km$, $x_0 = 0.417\Omega/km$, $b_0 = 2.73 \times 10^{-6}s/km$ 。

第 11 题: $Z_L = 18.8 + j40.2\Omega$, $jB_L = j284 \times 10^{-6}s$, $Q_c = 3.44MVar$ 。

第 12 题: $Z_L = 11.6 + j30.4\Omega$, $jB_L = j369 \times 10^{-6}s$, $Q_c = 4.46MVar$ 。

第 13 题: $Z_{T1} = 3.16 + j80.5\Omega$, $Z_{T2} = 2.43\Omega$, $Z_{T3} = 4.45 + j51.24\Omega$,

$$Y_T = (5.12 - j56) \times 10^{-6}s$$

第 14 题: $Z_T = 1.16 + j9.18\Omega$

第 15 题: $Z_{T1} = 0.85 + j55.12\Omega$, $Z_{T2} = 1.14\Omega$, $Z_{T3} = 5.48 + j121.86\Omega$

第 16 题: $Z_L = 14.5 + j20.8\Omega$, $jB_L = j274 \times 10^{-6}s$

$$Z_T = 2.04 + j31.76\Omega , Y_T = (3.64 - j26.4) \times 10^{-6}s$$

$$U_{cr} = 93.49kV$$

第 17 题: $Z_{T1*} = 0.024 + j0.402$, $Z_{T2*} = 0.037 + j0.4$, $Z_{T3*} = 0.076 + j0.62$

$$Z_{L1*} = 0.087 + j0.172 , Z_{L2*} = 0.445 + j0.54$$

第 20 题: $\bar{S}_1 = 42.06 + j32.71MVA$, $U_1 = 120.2kV$

第 23 题: $\cos\varphi = 0.877$

第 24 题: $U_1 = 9.82 + j2.14 = 10.05 \angle 12.3^\circ kV$

第 25 题: (1) $\bar{S}_1 = 32 + j20.17MVA$, $U_1 = 115.2kV$

(2) $\bar{S}_1 = 31.9 + j19MVA$, $U_2 = 100.5kV$

(3) $U_2 = 116.6kV$

第 27 题: $\bar{S}_A = 20.23 + j18.7MVA$, $\bar{S}_B = 17 + j10.45MVA$

变电所 I 实际电压为: $10kV$, 变电所 II 实际电压为: $9.83kV$

第 28 题: (1) $\bar{S}_{T1} = 4.1 + j3.28MVA$, $\bar{S}_{T2} = 2.1 + j1.47MVA$

(2) $\bar{S}_{T1} = 4.32 + j4.476MVA$, $\bar{S}_{T2} = 1.88 + j0.3MVA$

第 31 题: (1) $\Delta P_T = 0.08MW$, (2) $\eta = 99.58\%$, (3) $\Delta W_T = 705.98 \times 10^3 kWh$

(4) 变压器的损耗率: 0.7%

第 36、37 题:
$$Y_B = \begin{bmatrix} \frac{5}{4} & -\frac{1}{4} & 0 \\ -\frac{1}{4} & 1 & -\frac{1}{4} \\ 0 & -\frac{1}{4} & \frac{5}{4} \end{bmatrix}; \quad Y_B = \begin{bmatrix} 16.3 & -10 & -5 \\ -10 & 36.67 & -6.67 \\ -5 & -6.67 & 11.67 \end{bmatrix}$$

(36 题)

(37 题)

第 38 题:
$$Y_B = \begin{bmatrix} 19 & -5 & -10 \\ -5 & 11.67 & -6.67 \\ -10 & -6.67 & 16.67 \end{bmatrix}, \quad Z_B = Y_B^{-1} = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.25 & 0.25 \\ 0.25 & 0.361 & 0.294 \\ 0.25 & 0.294 & 0.328 \end{bmatrix}$$

第 43 题: $P_{G1} = 136.36MW$, $P_{G2} = 204.55MW$, $P_{G3} = 409.1MW$

第 44 题: $P_G = 438.02MW$, $P_H = 61.98MW$

$P'_G = 663.92MW$, $P'_H = 136.88MW$

第 45 题: (1) $P_{G1} = 42.9MW$, $P_{G2} = 57.1MW$,

(2) f_1 上升 0.477% , f_2 下降 0.357%

第 46 题: (1) $K_A = 500MW/Hz$, $K_B = 750MW/Hz$

(2) $\Delta f = -0.6Hz$

第 47 题: $Q_{C1} = 6.7MVar$, $Q_{C2} = 11.3MVar$

第 49 题: 有载调压变压器最大和最小负荷时分接头电压: -2.5% 、 $+5\%$

第 50 题: 变压器分接头电压: 主接头 $121kV$

第 51 题: $x_{L*} = 1.02$

第 52 题: $x_{G*} = 0.397$, $x_{DK*} = 2.19$

第 53 题: $x_{\Sigma*} = 1.07$

第 55 题: $x_R\% = 10.99\%$

第 56 题: $i_M = 15.16kA$, $I_M = 9.04kA$, $S_D = 108MVA$

第 65 题: $I_d^{(3)} = 7.45kA$

第 67 题: $I'' = 6.8kA$, $i_M = 17.34kA$

第 68 题: $i_M = 17.82kA$, $I_M = 10.61kA$

第 69 题: $I_L = 0.03kA$, $I_M = 0.5kA$, $I_N = 0.046kA$

第 70 题: $I'' = 4.17kA$, $S_D = 76MVA$

第 73 题: $I'' = 24kA$, $I_{0.2} = 23kA$, $I_{\infty} = 26kA$

第 85 题: $I_{fa} = 1.904 kA$, $U_{fb} = U_{fc} = 66.2 kV$

第 89 题: $I_d^{(1)} = 0.82kA$, $I_d^{(2)} = 0.682kA$, $I_d^{(1.1)} = 0.804kA$

第 90 题: $I_f^{(1.1)} = 1.3kA$

第 91 题: $I_f^{(2)} = 2kA$, $I_f^{(1.1)} = 2.6kA$

$$I_{f0.2}^{(2)} = 1.96kA, I_{f0.2}^{(1.1)} = 2.5kA$$

第 92 题: $\dot{E}'' = 1.05$ 时, 非故障相 (b 、 c 相) 电流较正常时负荷电流增幅为: 24.18%。

参 考 文 献

- 1 陈珩. 电力系统稳态分析 (第二版). 水利电力出版社. 1995
- 2 李光琦. 电力系统暂态分析 (第二版). 中国电力出版社. 1995
- 3 南京工学院主编. 电力系统. 中国电力出版社. 1981
- 4 何仰赞等. 电力系统分析. 华中理工大学出版社. 1985
- 5 周荣光. 电力系统故障分析. 清华大学出版社. 1988
- 6 西安交通大学等. 电子数字计算机的应用---电力系统计算. 水利电力出版社. 1985
- 7 陆敏政. 电力系统习题集. 水利电力出版社. 1990
- 8 加玛丽汗等. 电力系统分析习题集. 新疆工学院内部刊物. 2000