

## 《电力系统分析（上）》课程习题集

注：请结合第一部分的“主要知识点”进行复习，第二部分的“习题讲解”补充部分课后题的求解过程，供同学们参考。

### 一、主要知识点

#### （一）概念题（包括填空题和简答题）

1. 电力系统的定义。
2. 电力生产的主要特点。
3. 对电力系统的基本要求
4. 无备用网络和有备用网络分别包括哪几种接线形式，分别适合什么情况和什么负荷类型的供电。
5. 变压器的主要参数包括哪几个，掌握参数计算公式和等值电路。
6. 线路的主要参数包括哪几个，掌握参数计算公式和等值电路。
7. 分裂导线的特点和优点。
8. 有名单位制和标么制的概念。
9. 标么值的计算公式，为什么要采用标么制？
10. 单相系统和三相系统基准值的选取必须满足的方程式。
11. 单相系统和三相系统标么值的计算公式。
12. 同步电机的基本方程包括  $d,q,0$  坐标系下同步电机的电势方程和磁链方程。
13. 派克变换的概念和物理意义。
14. 节点导纳矩阵的主要特点。
15. 节点导纳矩阵中自导纳和互导纳的物理意义。
16. 短路的概念。
17. 短路的类型。
18. 短路的危险后果。
19. 短路计算的目的。
20. 同步发电机发生短路电流最大的时间和条件。
21. 短路冲击系数的选取范围和取值。
22. 互阻抗（节点阻抗矩阵）和转移阻抗的概念有何区别。
23. 序阻抗的概念。
24. 对称分量法的概念和应用。
25. 正序、负序和零序网络的特点。
26. 什么是正序等效定则。

#### （二）计算题（包括分析计算题）

例 2-6，例 2-8，例 3-2，例 4-1，例 6-2，例 6-10

习题 1-2，习题 4-1，习题 5-1，习题 5-3，习题 6-3

## 二、习题讲解

### 1、P10 习题 1-2

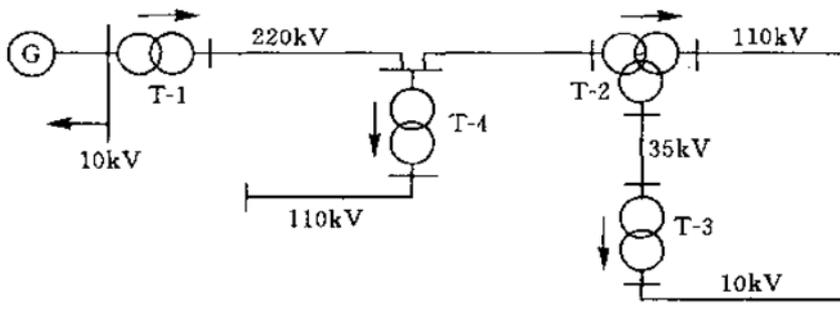
1-2 电力系统的部分接线如题图 1-2 所示,各电压级的额定电压及功率输送方向已标明在图中。

试求:

(1)发电机及各变压器高、低压绕组的额定电压;

(2)各变压器的额定变比;

(3)当变压器 T-1 工作于+5%抽头,T-2、T-4 工作于主抽头,T-3 工作于-2.5%抽头时,各变压器的实际变比是多少?



题图 1-2 系统接线图

解 (1)发电机及各变压器高、低压绕组的额定电压。

发电机: $V_{GN}=10.5\text{ kV}$ ,比同电压级网络的额定电压高 5%。

对于变压器的各侧绕组,将依其电压级别从高到低赋以标号 1、2 和 3。

变压器 T-1 为升压变压器: $V_{N2}=10.5\text{ kV}$ ,等于发电机额定电压; $V_{N1}=242\text{ kV}$ ,比同电压级网络的额定电压高 10%。

变压器 T-2 为降压变压器: $V_{N1}=220\text{ kV}$ ,等于同电压级网络的额定电压; $V_{N2}=121\text{ kV}$  和  $V_{N3}=38.5\text{ kV}$ ,分别比同电压级网络的额定电压高 10%。

同理,变压器 T-3: $V_{N1}=35\text{ kV}$  和  $V_{N2}=11\text{ kV}$ 。

变压器 T-4: $V_{N1}=220\text{ kV}$  和  $V_{N2}=121\text{ kV}$ 。

(2)各变压器的额定变比。

以较高的电压级作为分子。

$$\text{T-1: } k_{T1N} = 242/10.5 = 23.048$$

$$\text{T-2: } k_{T2N(1-2)} = 220/121 = 1.818$$

$$k_{T2N(1-3)} = 220/38.5 = 5.714$$

$$k_{T1N(2-3)} = 121/38.5 = 3.143$$

$$\text{T-3: } k_{T3N} = 35/11 = 3.182$$

$$\text{T-4: } k_{T4N} = 220/121 = 1.818$$

(3)各变压器的实际变比。

各变压器的实际变比为两侧运行时实际整定的抽头额定电压之比。

$$\text{T-1: } k_{T1} = (1+0.05) \times 242/10.5 = 24.2$$

$$\begin{aligned} \text{T-2: } k_{T2(1-2)} &= 220/121 = 1.818 \\ k_{T2(1-3)} &= 220/38.5 = 5.714 \\ k_{T2(2-3)} &= 121/38.5 = 3.143 \\ \text{T-3: } k_{T3} &= (1-0.025) \times 35/11 = 3.102 \\ \text{T-4: } k_{T4} &= 220/110 = 2 \end{aligned}$$

## 2、P93 习题 4-1

4-1 系统接线示于题图 4-1, 已知各元件参数如下。

发电机 G-1:  $S_N = 120 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ,  $x''_d = 0.23$ ;

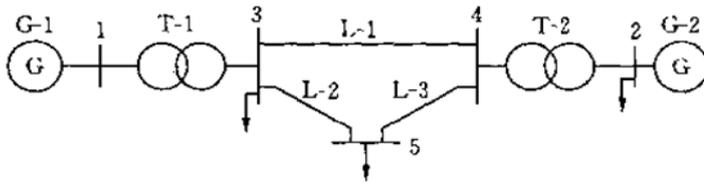
G-2:  $S_N = 60 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ,  $x''_d = 0.14$ ;

变压器 T-1:  $S_N = 120 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ,  $V_s \% = 10.5$ ;

T-2:  $S_N = 60 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ,  $V_s \% = 10.5$ 。

线路参数:  $x_1 = 0.4 \Omega/\text{km}$ ,  $b_1 = 2.8 \times 10^{-6} \text{ S}/\text{km}$ 。

线路长度: L-1 为 120 km, L-2 为 80 km, L-3 为 70 km。取  $S_B = 120 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ,  $V_B = V_{av}$ , 试求标么制下的节点导纳矩阵。



题图 4-1 系统接线图

解 选  $S_B = 120 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ,  $V_B = V_{av}$ , 采用标么参数的近似算法, 即忽略各元件的额定电压和相应电压级的  $V_{av}$  的差别, 并认为所有变压器的标么变比都等于 1。

(1) 计算各元件参数的标么值

$$X''_{d1} = x''_{dG1} \frac{S_B}{S_{G1N}} = 0.23 \times \frac{120}{120} = 0.23$$

$$X''_{d2} = x''_{dG2} \frac{S_B}{S_{G2N}} = 0.14 \times \frac{120}{60} = 0.28$$

$$X_{T1} = \frac{V_{s1} \%}{100} \times \frac{S_B}{S_{T1N}} = \frac{10.5}{100} \times \frac{120}{120} = 0.105$$

$$X_{T2} = \frac{V_{s2} \%}{100} \times \frac{S_B}{S_{T2N}} = \frac{10.5}{100} \times \frac{120}{60} = 0.21$$

$$X_{l1} = x_1 l_1 \frac{S_B}{V_{av}^2} = 0.4 \times 120 \times \frac{120}{115^2} = 0.43554$$

$$\frac{1}{2} B_{l1} = \frac{1}{2} b l_1 \frac{V_{av}^2}{S_B} = \frac{1}{2} \times 2.8 \times 10^{-6} \times 120 \times \frac{115^2}{120} = 0.01852$$

$$X_{l2} = X_{l1} \frac{l_2}{l_1} = 0.43554 \times \frac{80}{120} = 0.2904$$

$$\frac{1}{2} B_{l2} = \frac{1}{2} B_{l1} \frac{l_2}{l_1} = 0.01852 \times \frac{80}{120} = 0.01235$$

$$X_{l3} = X_{l1} \frac{l_3}{l_1} = 0.43554 \times \frac{70}{120} = 0.2541$$

$$\frac{1}{2}B_{13} = \frac{1}{2}B_{11}\frac{l_3}{l_1} = 0.01852 \times \frac{70}{120} = 0.0108$$

(2) 计算各支路导纳。

$$y_{10} = \frac{1}{jX''_{d1}} = -j\frac{1}{0.23} = -j4.3478$$

$$y_{20} = \frac{1}{jX''_{d2}} = -j\frac{1}{0.28} = -j3.7514$$

$$y_{13} = \frac{1}{jX_{T1}} = -j\frac{1}{0.105} = -j9.524$$

$$y_{24} = \frac{1}{jX_{T2}} = -j\frac{1}{0.21} = -j4.762$$

$$y_{34} = \frac{1}{jX_{l1}} = -j\frac{1}{0.43554} = -j2.296$$

$$y_{35} = \frac{1}{jX_{l2}} = -j\frac{1}{0.2904} = -j3.444$$

$$y_{45} = \frac{1}{jX_{l3}} = -j\frac{1}{0.2541} = -j3.936$$

$$y_{30} = j\frac{1}{2}B_{11} + j\frac{1}{2}B_{12} = j(0.01852 + 0.01235) = j0.03087$$

$$y_{40} = j\left(\frac{1}{2}B_{11} + \frac{1}{2}B_{13}\right) = j(0.01852 + 0.0108) = j0.02932$$

$$y_{50} = j\left(\frac{1}{2}B_{12} + \frac{1}{2}B_{13}\right) = j(0.01235 + 0.0108) = j0.02315$$

(3) 计算导纳矩阵元素。

(a) 对角元

$$Y_{11} = y_{10} + y_{13} = -j4.3478 - j9.524 = -j13.872$$

$$Y_{22} = y_{20} + y_{24} = -j3.7514 - j4.762 = -j8.333$$

$$Y_{33} = y_{30} + y_{31} + y_{34} + y_{35} \\ = j0.03087 - j9.524 - j2.296 - j3.444 = -j15.233$$

$$Y_{44} = y_{40} + y_{42} + y_{43} + y_{45} \\ = j0.02932 - j4.762 - j2.296 - j3.936 = -j10.965$$

$$Y_{55} = y_{50} + y_{53} + y_{54} \\ = j0.02315 - j3.444 - j3.936 = -j7.357$$

(b) 非对角元

$$Y_{12} = Y_{21} = 0.0, Y_{13} = Y_{31} = -y_{13} = j9.524$$

$$Y_{14} = Y_{41} = 0.0, Y_{15} = Y_{51} = 0.0$$

$$Y_{24} = Y_{42} = -y_{24} = j4.762$$

$$Y_{34} = Y_{43} = -y_{34} = j2.296, Y_{35} = Y_{53} = -y_{35} = j3.444$$

$$Y_{45} = Y_{54} = -y_{45} = j3.936$$

导纳矩阵如下

$$Y = \begin{bmatrix} -j13.872 & 0.0 & j9.524 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & -j8.333 & 0.0 & j4.762 & 0.0 \\ j9.524 & 0.0 & -j15.233 & j2.296 & j3.444 \\ 0.0 & j4.762 & j2.296 & -j10.965 & j3.936 \\ 0.0 & 0.0 & j3.444 & j3.936 & -j7.357 \end{bmatrix}$$

### 3、P131 习题 5-1

5-1 供电系统如题图 5-1 所示,各元件参数如下。

线路 L:长 50 km,  $x=0.4 \Omega/\text{km}$ ;

变压器 T:  $S_N=10 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ,  $V_s\%=10.5$ ,  $k_T=110/11$ 。

假定供电点电压为 106.5 kV,保持恒定,当空载运行时变压器低压母线发生三相短路。试计算:

(1)短路电流周期分量,冲击电流,短路电流最大有效值及短路功率等的有名值;

(2)当 A 相非周期分量电流有最大或零初始值时,相应的 B 相及 C 相非周期电流的初始值。



题图 5-1 简单供电系统

解法一 按有名值计算

$$X_L = xl = 0.4 \times 50 \Omega = 20 \Omega$$

$$X_T = \frac{V_s\%}{100} \times \frac{V_N^2}{S_{TN}} = \frac{10.5}{100} \times \frac{110^2}{10} \Omega = 127.05 \Omega$$

$$X_\Sigma = X_L + X_T = (20 + 127.05) \Omega = 147.05 \Omega$$

(1)短路电流和短路功率计算。

$$(a) \text{基频分量 } I'' = \frac{V(\omega)}{\sqrt{3}x_\Sigma} = \frac{106.5}{\sqrt{3} \times 147.05} \text{ kA} = 0.4181 \text{ kA}$$

$$\text{短路点的电流 } I_p = I'' k_T = 0.4181 \times \frac{110}{11} \text{ kA} = 4.181 \text{ kA}$$

$$(b) \text{冲击电流取 } k_{\text{imp}} = 1.8$$

$$i_{\text{imp}} = \sqrt{2} I_p k_{\text{imp}} = \sqrt{2} \times 4.181 \times 1.8 \text{ kA} = 10.644 \text{ kA}$$

(c)短路电流最大有效值

$$I_{\text{imp}} = I_p \sqrt{1 + 2(k_{\text{imp}} - 1)^2} = 4.181 \times \sqrt{1 + 2(1.8 - 1)^2} \text{ kA} \\ = 6.314 \text{ kA}$$

$$(d) \text{短路功率 } S_f = \sqrt{3} V_N I_p = \sqrt{3} \times 1.0 \times 4.181 \text{ MV} \cdot \text{A} \\ = 72.424 \text{ MV} \cdot \text{A}$$

(2)非周期分量计算。

(a)当 A 相非周期分量为最大值时,对应的  $\alpha=0$ 。

$$i_{\text{ap}(a)} = \sqrt{2} I_p = \sqrt{2} \times 4.181 \text{ kA} = 5.857 \text{ kA}$$

$$i_{\text{ap}(b)} = i_{\text{ap}(c)} = -\frac{1}{2} i_{\text{ap}(a)} = -\frac{1}{2} \times 5.857 \text{ kA} = -2.929 \text{ kA}$$

(b)当 A 相非周期分量为零,即  $\alpha=90^\circ$  时,有

$$i_{\text{ap}(a)} = 0$$

$$i_{\text{ap}(b)} = -\sqrt{2} I_p \cos(90^\circ - 120^\circ) = -\sqrt{2} \times 4.181 \times \cos(-30^\circ) \text{ kA} \\ = -5.121 \text{ kA}$$

$$i_{\text{ap}(c)} = -i_{\text{ap}(b)} = 5.121 \text{ kA}$$

解法二 按标么值准确计算。

方案1 各电压级均取  $V_B = V_{av}$ , 保留非基准变比变压器。选  $S_B = 10 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ,  $V_{B(110)} = 115 \text{ kV}$ ,  $V_{B(10)} = 10.5 \text{ kV}$

$$I_{B(10)} = \frac{10}{\sqrt{3} \times 10.5} \text{ kA} = 0.5499 \text{ kA}$$

$$X_L = xl \frac{S_B}{V_{B(110)}^2} = 0.4 \times 50 \times \frac{10}{115^2} = 0.0151$$

$$X_T = \frac{V_S \%}{100} \times \frac{S_B}{S_{TN}} \times \frac{V_N^2}{V_B^2} = \frac{10.5}{100} \times \frac{10}{10} \times \frac{110^2}{115^2} = 0.09607$$

$$X_\Sigma = X_L + X_T = 0.0151 + 0.09607 = 0.1112$$

$$k_{T*} = \frac{k_T}{k_B} = \frac{110/11}{115/10.5} = 0.913$$

$$V_{(0)*} = \frac{106.5}{115} = 0.9261$$

$$I''_* = \frac{V_{(0)}}{X_\Sigma} k_{T*} = \frac{0.9261}{0.1112} \times 0.913 = 7.6037$$

短路点基频电流有名值

$$I_p = I''_* I_{B(10)} = 7.6037 \times 0.5499 \text{ kA} = 4.1813 \text{ kA}$$

与解法一的结果完全相符, 后续计算与单位制无关。

方案2 选  $S_B = 10 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ,  $V_{B(110)} = 115 \text{ kV}$

$$V_{B(10)} = 115 \times \frac{1}{k_T} = 115 \times \frac{11}{110} \text{ kV} = 11.5 \text{ kV}$$

$$I_{B(10)} = \frac{10}{\sqrt{3} \times 11.5} \text{ kA} = 0.50206 \text{ kA}$$

网络元件参数, 除了  $k_{T*} = 1$  外, 其余参数标么值与方案1相同。

$$I_* = \frac{V_{(0)}}{X_\Sigma} = \frac{0.9261}{0.1112} = 8.3282$$

短路点短路基频电流的有名值

$$I_p = I_* I_{B(10)} = 8.3282 \times 0.50206 \text{ kA} = 4.1813 \text{ kA}$$

同样与解法一及方案1相符。

解法三 采用标么参数近似算法。选  $S_B = 10 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ,  $V_{B(110)} = 115 \text{ kV}$ ,  $V_{B(10)} = 10.5 \text{ kV}$ 。忽略各元件额定电压和相应电压级平均额定电压的差别, 并认为所有变压器的标么变比都等于1。

$$X_L = xl \frac{S_B}{V_{B(110)}^2} = 0.4 \times 50 \times \frac{10}{115^2} = 0.0151$$

$$X_T = \frac{V_S \%}{100} \times \frac{S_B}{S_{TN}} = \frac{10.5}{100} \times \frac{10}{10} = 0.105$$

$$X_\Sigma = X_L + X_T = 0.0151 + 0.105 = 0.1201$$

$$V_{(0)} = \frac{106.5}{115} = 0.9261, I_{B(10)} = \frac{S_B}{\sqrt{3} V_{B(10)}} = \frac{10}{\sqrt{3} \times 10.5} \text{ kA} = 0.5499 \text{ kA}$$

(1) 短路电流和短路功率。

(a) 短路电流的基频分量

$$I_* = \frac{V_{(0)}}{x_\Sigma} = \frac{0.9261}{0.1201} = 7.711$$

$$I_p = I_* \cdot I_B = 7.711 \times 0.5499 \text{ kA} = 4.2400 \text{ kA}$$

(b) 冲击电流

$$i_{1mp} = \sqrt{2} I_p k_{1mp} = \sqrt{2} \times 4.2403 \times 1.8 \text{ kA} = 10.794 \text{ kA}$$

(c) 短路电流最大有效值

$$I_{mp} = I_p \sqrt{1+2(k_{1mp}-1)^2} = 4.2403 \times \sqrt{1+2(1.8-1)^2} \text{ kA} \\ = 6.403 \text{ kA}$$

(d) 短路功率

$$S_f = \sqrt{3} V_n I_p = \sqrt{3} \times 10.5 \times 4.2403 \text{ MV} \cdot \text{A} = 77.116 \text{ MV} \cdot \text{A}$$

(2) 非周期分量计算。

(a) 当 A 相非周期分量为最大值时, 对应的  $\alpha = 0^\circ$ , 有

$$i_{ap(a)} = \sqrt{2} I_p = \sqrt{2} \times 4.2403 \text{ kA} = 5.997 \text{ kA}$$

$$i_{ap(b)} = i_{ap(c)} = -\frac{1}{2} i_{ap(a)} = -\frac{1}{2} \times 5.997 \text{ kA} = -2.998 \text{ kA}$$

(b) 当 A 相非周期分量为零时, 对应的  $\alpha = 90^\circ$ , 有

$$i_{ap(a)} = 0$$

$$i_{ap(b)} = -\sqrt{2} I_p \cos(90^\circ - 120^\circ) = \sqrt{2} \times 4.2403 \times \cos(90^\circ - 120^\circ) \text{ kA} \\ = -5.193 \text{ kA}$$

$$i_{ap(c)} = -i_{ap(b)} = 5.193 \text{ kA}$$

将近似计算的结果(解法三)与准确结果(解法一、二)比较一下, 短路电流的相对误差为

$$\frac{4.240 - 4.181}{4.181} \times 100\% = 1.411\%$$

对实用计算而言, 这个误差是比较小的。但是, 由于忽略额定电压与元件额定电压的差别, 在短路功率计算中相对误差有所扩大, 达到了

$$\frac{77.116 - 72.424}{72.424} \times 100\% = 6.478\%$$

#### 4、P132 习题 5-3

5-3 一台无阻尼绕组同步发电机, 已知:  $P_N = 150 \text{ MW}$ ,  $\cos\varphi_N = 0.85$ ,  $V_N = 15.75 \text{ kV}$ ,  $x_d = 1.04$ ,  $x_q = 0.69$ ,  $x'_d = 0.31$ 。发电机额定满载运行, 试计算电势  $E_q$ ,  $E'_q$  和  $E'$ , 并画出相量图。

解 已知  $V_G = 1.0$ ,  $I_G = 1.0$ ,  $\cos\varphi_N = 0.85$ ,  $\varphi_N = 31.79^\circ$ ,  $\sin\varphi_N = 0.52678$ , 设  $\dot{V}_G = 1.0 \angle 0^\circ$ , 则

$$\dot{I}_G = 1.0 \angle -31.79^\circ = 0.85 - j0.5268$$

$$\dot{E}_Q = \dot{V}_G + j \dot{I}_G x_q = 1.0 + j(0.85 - j0.5268) \times 0.69 \\ = 1.48427 \angle 23.275^\circ$$

$$\delta = 23.275^\circ$$

$$I_d = I_G \sin(\delta + \varphi_N) = 1.0 \times \sin(23.275^\circ + 31.79^\circ) = 0.8197855$$

$$E_q = E_Q + I_d(x_d - x_q) \\ = 1.48427 + 0.8197855 \times (1.04 - 0.69) = 1.7712$$

$$E'_q = E_Q - I_d(x_q - x'_d)$$

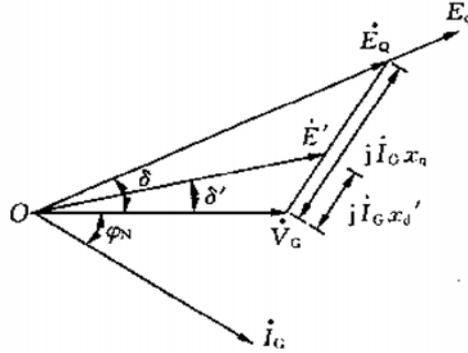
$$= 1.48427 - 0.819785 \times (0.69 - 0.31) = 1.17275$$

$$\dot{E}' = \dot{V}_G + j \dot{I}_G x'_d$$

$$= 1.0 \angle 0^\circ + j(0.85 - j0.52678) \times 0.31 = 1.193 \angle 12.763^\circ$$

$$E' = 1.193, \delta' = 12.763^\circ$$

相量图如题图 5-3 所示。



题图 5-3 电势相量图

### 5、P163 习题 6-3

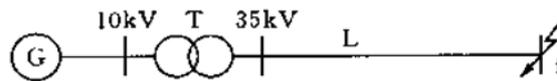
6-3 系统接线如题图 6-3 所示,已知各元件参数如下。

发电机 G:  $S_N = 60 \text{ MV} \cdot \text{A}, x''_d = 0.14$ ;

变压器 T:  $S_N = 30 \text{ MV} \cdot \text{A}, V_s \% = 8$ ;

线路 L:  $l = 20 \text{ km}, x = 0.38 \Omega/\text{km}$ 。

试求在 f 点三相短路时的起始次暂态电流、冲击电流、短路电流最大有效值和短路功率等的有名值。



题图 6-3 系统接线图

解 选  $S_B = 60 \text{ MV} \cdot \text{A}, V_B = V_{av}$ , 则

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3}V_B} = \frac{60}{\sqrt{3} \times 37} \text{ kA} = 0.936 \text{ kA}$$

$$\text{取 } E'' = 1.05, x''_d = 0.14, X_T = \frac{V_s \%}{100} \cdot \frac{S_B}{S_{TN}} = \frac{8}{100} \times \frac{60}{30} = 0.16$$

$$X_l = xl \frac{S_B}{V_B^2} = 0.38 \times 20 \times \frac{60}{37^2} = 0.333$$

$$X''_{\Sigma} = X''_d + X_T + X_l = 0.14 + 0.16 + 0.333 = 0.633$$

(1) 起始次暂态电流

$$I'' = \frac{E''}{X''_{\Sigma}} I_B = \frac{1.05}{0.633} \times 0.936 \text{ kA} = 1.553 \text{ kA}$$

(2) 求冲击电流, 取冲击系数  $k_{\text{imp}}=1.8$ , 有

$$i_{\text{imp}}=\sqrt{2}I''k_{\text{imp}}=\sqrt{2}\times 1.553\times 1.8\text{ kA}=3.953\text{ kA}$$

(3) 短路电流最大有效值

$$\begin{aligned} I_{\text{imp}} &= I''\sqrt{1+2(k_{\text{imp}}-1)^2}=1.553\times\sqrt{1+2(1.8-1)^2}\text{ kA} \\ &=2.345\text{ kA} \end{aligned}$$

(4) 短路功率

$$S_{\text{f}}=\frac{E''}{X_{\Sigma}}S_{\text{B}}=\frac{1.05}{0.633}\times 60\text{ MV}\cdot\text{A}=99.526\text{ MV}\cdot\text{A}$$

或  $S_{\text{f}}=\sqrt{3}I''V_{\text{av}}=\sqrt{3}\times 1.553\times 37\text{ MV}\cdot\text{A}=99.525\text{ MV}\cdot\text{A}$