

在短路全过程中是恒定的。因此有

$$I_{\infty} = I'' = I_k$$

5.3 无限大容量电力系统三相短路电流的计算

5.3.1 标幺值

为了预防短路及其产生的破坏,需要对电力系统中可能产生的短路电流数值预先进行计算,计算结果可作为选择电气设备及供电设计的依据。一般短路电流的计算方法有标幺值法与短路功率法,本书主要介绍标幺值法。

标幺值是指任意一个有名值的物理量与同单位的基准值之比。它是个相对值,是无单位的纯数,可用小数或百分数表示。基准值可以是任意选择的,选择以运算方便、简单为目的。通常标幺值用 A_* 表示,基准值用 A_d 表示,实际值用 A 表示,因此

$$A_* = \frac{A}{A_d} \quad (5-4)$$

按标幺值法进行短路计算时,一般要先选取基准值。各电量基准值的确定方法如下:

1. 基准容量 S_d

在工程计算中,为计算方便,基准容量一般取 $S_d = 100 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 或 $S_d = 1\,000 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。

2. 基准电压 U_d

基准电压通常选取短路所在处的计算电压,即

$$U_d = U_c$$

考虑到短路发生在电源首端时,故障电流最大,故一般取 U_c 比线路额定电压 U_N 高 5%。

3. 基准电流 I_d

选定了基准容量 S_d 和基准电压 U_d 后,基准电流计算为

$$I_d = \frac{S_d}{\sqrt{3}U_d} = \frac{S_d}{\sqrt{3}U_c} \quad (5-5)$$

4. 基准电抗 X_d

选定了基准容量、基准电压和基准电流后,基准电抗计算为

$$X_d = \frac{U_d}{\sqrt{3}I_d} = \frac{U_c^2}{S_d} \quad (5-6)$$

5.3.2 短路回路元件阻抗的标幺值

电力系统中各主要元件电抗标幺值计算时首先选取基准容量 S_d 及基准电压 U_d , 并取 $U_d = U_c$, 然后计算电力系统中各元件的电抗标幺值。类型有电力系统的电抗标幺值、电力变压器的电抗标幺值、电力线路的电抗标幺值等。

1. 电力系统的电抗标幺值 X_{Σ}^*

$$X_{\Sigma}^* = \frac{X_{\Sigma}}{X_d} = \frac{\frac{U_c^2}{S_{\infty}}}{\frac{U_d^2}{S_d}} = \frac{S_d U_c^2}{S_{\infty} U_d^2} = \frac{S_d}{S_{\infty}} \quad (5-7)$$

式中 X_{Σ} ——电力系统的电抗值;
 S_{∞} ——电力系统断路器的开口容量。

2. 电力变压器的电抗标幺值 X_T^*

$$X_T^* = \frac{X_T}{X_d} = \frac{\frac{U_k \% U_c^2}{100 S_N}}{\frac{U_d^2}{S_d}} = \frac{U_k \% S_d U_c^2}{100 S_N U_d^2} = \frac{U_k \% S_d}{100 S_N} \quad (5-8)$$

式中 X_T ——电力变压器的电抗;
 $U_k \%$ ——电力变压器短路电压百分比;
 S_N ——电力变压器的额定容量。

3. 电力线路的电抗标幺值 X_{WL}^*

$$X_{WL}^* = \frac{X_{WL}}{X_d} = \frac{X_0 l}{\frac{U_d^2}{S_d}} = \frac{X_0 l S_d}{U_d^2} \quad (5-9)$$

式中 X_{WL} ——电力线路的电抗;
 X_0 ——导线单位长度的电抗;
 l ——导线的长度。

5.3.3 三相短路电流计算

1. 三相短路电流的计算

计算出各标幺值后,根据标幺值的概念,无限大容量电力系统中,三相短路电流周期分量有效值的标幺值 $I_k^{(3)*}$ 为

$$I_k^{(3)*} = \frac{I_k^{(3)}}{I_d} = \frac{\frac{U_c}{\sqrt{3} X_{\Sigma}}}{\frac{U_d}{\sqrt{3} U_d}} = \frac{U_c^2}{S_d X_{\Sigma}} = \frac{1}{X_{\Sigma}^*} \quad (5-10)$$

式中 X_{Σ}^* ——短路点到电源的总电抗标幺值,等于短路点到电源的各元件电抗标幺值之和。

由此可得三相短路电流值 $I_k^{(3)}$ 为

$$I_k^{(3)} = I_k^{(3)*} I_d = \frac{I_d}{X_{\Sigma}^*} \quad (5-11)$$

三相短路容量 S_k 的计算公式为

$$S_k = \sqrt{3} U_c I_k = \sqrt{3} U_c \frac{I_d}{X_{\Sigma}^*} = \frac{S_d}{X_{\Sigma}^*} \quad (5-12)$$

然后,即可用前面的公式分别求出 I'' 、 I_{∞} 、 I_{sk} 和 i_{sk} 等。

2. 利用标幺值法计算短路电流的具体步骤

- (1) 画出计算电路图, 分析并标明各元件的参数。
- (2) 画出相应的等值电路图(采用电抗的形式), 并注明短路计算点, 对各元件进行编号。
- (3) 选取基准容量与基准电压, 一般取 $S_d = 100 \text{ MV} \cdot \text{A}$, $U_d = U_c$ 。
- (4) 计算各元件的电抗标幺值 X^* , 并标于等值电路图上。
- (5) 从电源到短路点化简等值电路, 依次求出各短路点的总电抗标幺值 X_Σ^* 。
- (6) 计算短路电流 I_k , 并根据题目要求, 依次计算出各短路点的短路电流及各短路参数, 如 $I_k, I_k^{(2)}, I_\infty, I_\infty^{(2)}, S_k, i_k, I_{\Delta k}, I''$ 等。
- (7) 将计算结果列成表格形式表示。

例 5-1

某电力系统如图 5-4 所示。系统出口断路器 QF 的断流容量为 $300 \text{ MV} \cdot \text{A}$, 工厂变电所装有两台并列运行的 $\text{SL}_7-800/10$ 型电力变压器。试用标幺值法计算该变电所 10 kV 母线上 $(k-1)$ 点短路和 380 V 母线 $(k-2)$ 点短路的三相短路电流和短路容量。

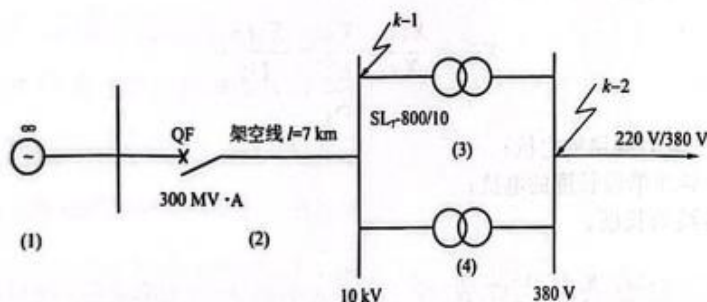


图 5-4 短路计算电路

解 (1) 绘制短路电路的等效电路图, 并注明短路计算点, 对各元件进行编号, 如图 5-5 所示。

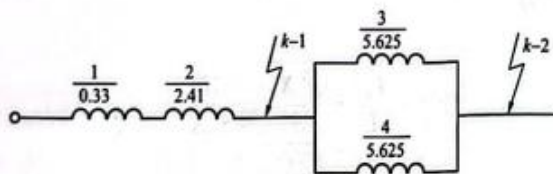


图 5-5 等效电路图

(2) 确定基准容量与基准电压。选取 $S_d = 100 \text{ MV} \cdot \text{A}$, $U_{d1} = U_{c1} = 10.5 \text{ kV}$, $U_{d2} = U_{c2} = 0.4 \text{ kV}$, 则

$$I_{d1} = \frac{S_d}{\sqrt{3} U_{d1}} = \frac{100}{\sqrt{3} \times 10.5} = 5.50 \text{ kA}$$

$$I_{d2} = \frac{S_d}{\sqrt{3}U_{d2}} = \frac{100}{\sqrt{3} \times 0.4} = 144.34 \text{ kA}$$

(3) 计算短路电路中各主要元件电抗标幺值。

① 电力系统的电抗标幺值为

$$X_1^* = \frac{S_d}{S_{\infty}} = \frac{100}{300} = 0.33$$

② 电力线路的电抗标幺值(X_0 取电力线路的平均值 $0.38 \Omega/\text{km}$)为

$$X_2^* = \frac{X_0 l S_d}{U_{d1}^2} = \frac{0.38 \times 7 \times 100}{10.5^2} = 2.41$$

③ 查附录表 C-1 得, SL₇-800/10 型电力变压器的 $U_k\% = 4.5$, 代入得电力变压器的电抗标幺值为

$$X_3^* = X_4^* = \frac{U_k\% S_d}{100 S_N} = \frac{4.5 \times 100}{100 \times 0.8} = 5.625$$

(4) 计算 $(k-1)$ 点的短路时, 电路总电抗标幺值及三相短路电流和短路容量。

① 总电抗标幺值为

$$X_{\Sigma(k-1)}^* = X_1^* + X_2^* = 0.33 + 2.41 = 2.74$$

② 三相短路电流周期分量有效值为

$$I_{(k-1)}^{(3)} = \frac{I_{d1}}{X_{\Sigma(k-1)}^*} = \frac{5.50}{2.74} = 2.01 \text{ kA}$$

③ 其他短路电流为

$$I_{(k-1)}'' = I_{\infty(k-1)}^{(3)} = I_{(k-1)}^{(3)} = 2.01 \text{ kA}$$

$$i_{sk(k-1)}^{(3)} = 2.55 I_{(k-1)}'' = 2.55 \times 2.01 = 5.13 \text{ kA}$$

$$I_{sk(k-1)}^{(3)} = 1.51 I_{(k-1)}'' = 1.51 \times 2.01 = 3.04 \text{ kA}$$

④ 三相短路容量为

$$S_{(k-1)}^{(3)} = \frac{S_d}{X_{\Sigma(k-1)}^*} = \frac{100}{2.74} = 36.50 \text{ MV} \cdot \text{A}$$

(5) 计算 $(k-2)$ 点短路时, 电路总电抗标幺值及三相短路电流和短路容量。

① 总电抗标幺值为

$$X_{\Sigma(k-2)}^* = X_1^* + X_2^* + X_3^* // X_4^* = 0.33 + 2.41 + \frac{5.625}{2} = 5.55$$

② 三相短路电流周期分量有效值为

$$I_{(k-2)}^{(3)} = \frac{I_{d2}}{X_{\Sigma(k-2)}^*} = \frac{144.34}{5.55} = 26.01 \text{ kA}$$

③ 其他短路电流为

$$I_{(k-2)}'' = I_{\infty(k-2)}^{(3)} = I_{(k-2)}^{(3)} = 26.01 \text{ kA}$$

$$i_{sk(k-2)}^{(3)} = 1.84 I_{(k-2)}'' = 1.84 \times 26.01 = 47.86 \text{ kA}$$

$$I_{sk(k-2)}^{(3)} = 1.09 I_{(k-2)}'' = 1.09 \times 26.01 = 28.35 \text{ kA}$$

④三相短路容量为

$$S_{(k-2)}^{(3)} = \frac{S_d}{X_{\Sigma(k-2)}} = \frac{100}{5.55} = 18.02 \text{ MV} \cdot \text{A}$$

(6)各点短路时,各短路计算值见表 5-1。

表 5-1

例 5-1 短路计算值

短路 计算点	短路电流/kA					短路容量/ (MV·A)
	$I_k^{(3)}$	I''	$I_{\infty}^{(3)}$	$i_{sk}^{(3)}$	$i_{sk}^{(2)}$	
k-1	2.01	2.01	2.01	5.13	3.04	36.50
k-2	26.01	26.01	26.01	47.86	28.35	18.02

5.3.4 电动机对三相短路电流的影响

电力系统中,若三相短路发生在电动机附近,如图 5-6 所示的 $k^{(s)}$ 点,此时电动机电源进线端电压为零,但由于电动机有较大的惯性,电动机仍快速转动着,因此电动机相当于发电机,其反电势大于短路点电压,则有反馈电流流向短路点,短路点的冲击电流则会相应地增大。

电动机瞬时反电势向短路点反馈的冲击电流计算为

$$i_{skM} = \sqrt{2} \frac{E_M^*}{X_M^*} K_{skM} I_{NM} \quad (5-13)$$

式中 E_M^* ——电动机的次暂态电动势,一般取 0.9;

X_M^* ——电动机的次暂态电抗,一般取 0.2;

K_{skM} ——短路电流冲击系数,对高压电动机取 1.4~1.6,对低压电动机取 1.0;

I_{NM} ——电动机的额定电流,其值为

$$I_{NM} = \frac{P_{NM}}{\sqrt{3} U_{NM} \eta \cos \varphi}$$

通常感应电动机带负荷运行时,电动机一旦进线端失压,将很快被制动,即流向短路点的电流衰减很快,所以只需要考虑对短路冲击电流的影响。

系统短路点短路冲击电流分为三相短路冲击电流和电动机瞬时反电势向短路点反馈的冲击电流两部分,即

$$i_{skM}^{(3)} = i_{sk}^{(3)} + i_{skM} \quad (5-14)$$

在实际工程计算中,短路点(一般指 20 m 以内)附近有 100 kW 以上的单台或多台电动机运行,且当 i_{skM} 值为该短路点冲击电流 $i_{sk}^{(3)}$ 的 5% 以上时需考虑其影响。

供电线路短路时,由于短路电流远远大于工作电流,当其通过导线和电气设备时,将产生很大的电动力,同时会产生很多的热量。

如系统设备选择不当,它将危害系统导线和电气设备的运行安全。

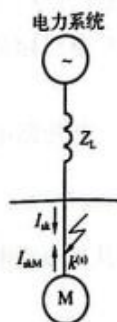


图 5-6 三相短路发生在电动机附近的 $k^{(s)}$ 点