

## 短路电流及其计算

供电系统要求正常地、不间断地可靠供电,以保证生产和生活的正常运行。但是由于种种原因,供电系统难免出现故障。在工矿企业供电系统的设计和运行中,不仅要考虑正常运行的情况,而且要考虑发生故障的情况,最常见、最严重的故障是短路故障。发生短路故障时产生的短路电流是供电系统设备动稳定与热稳定计算的数据基础,是断路器与熔断器断流能力选择的计算依据,也是各类保护定值整定的基本参数。

### 3.1 短路的基本概念

所谓短路,就是指供电系统中不同电位的导电部分(如各相导体、中性点接地系统的地线)之间发生的低阻性短接。其特征是短接前后两点的电位差会发生显著变化。

#### 3.1.1 造成短路的原因

供电系统造成短路的原因有:

(1) 误操作。由于运行、使用人员操作不规范而造成的短路故障,占全部短路故障的70%。因此要强调规范操作、正确操作。

(2) 绝缘老化。设备、材料长期使用后的自然老化,使绝缘强度下降,在正常使用时发生短路故障。故要求定期对设备维护、检修、更换。

(3) 绝缘击穿。因使用的设备自身绝缘强度水平达不到系统要求所致。故要求接入新设备前要检查、校核。

(4) 绝缘损坏。外力致使设备绝缘损坏造成。要求有效防护易损坏的设备,一旦损伤,及时更换。

(5) 过电压击穿。正常设备在非正常过电压(如雷击过电压)作用下,造成电气设备绝缘击穿。故要求对易受过电压侵犯的设备,设置过电压吸收装置。

(6) 其他原因。挖沟施工损伤电缆、鸟兽或风筝跨接在载流裸导体上或动物咬坏设备和导线电缆的绝缘、风灾或雪灾等自然灾害引起架空线断线和电线杆倒塌等。

#### 3.1.2 短路的危害

发生短路故障时,由于短路回路中的阻抗大大减小,短路电流为正常电流的十几倍至几十倍,对供电系统产生极大的危害。

(1) 产生很大的电动力,使故障元件或设备永久变形或严重损坏。

(2) 电流热效应使设备急剧发热,若持续发热过久,绝缘会老化或损坏。

(3) 电压将大幅度下降,影响用户正常工作。如异步电动机电磁转矩下降,致使转速降低,甚至停转。

(4) 短路引起保护装置动作,造成停电。越接近电源的保护装置动作,造成的停电范围越大。

(5) 严重短路影响电力系统的稳定性,可使并列运行的发电机组失去同步,造成系统解列。

(6) 不对称短路将产生较强的不平衡交变磁场,对附近的通信、电子设备产生极大的干扰,影响其正常运行,甚至使之发生误动作。

由此可见,短路的危害非常大。因此,必须尽力设法消除可能引起短路的一切因素;同时需要进行短路电流的计算,以便正确地选择电气设备,使设备有足够的动稳定性和热稳定性,以保证在发生可能有的最大短路电流时不致损坏。同时,为了选择切除短路故障的开关电器、整定短路保护的继电保护装置和选择限制短路电流的元件如电抗器等,也必须计算短路电流。

### 3.1.3 短路的类型

供电系统中短路的类型与其电源的中性点是否接地有关。短路的基本类型分为三相短路、两相短路、单相短路和两相接地短路。

三相短路,用文字符号  $k^{(3)}$  表示,如图 3-1(a) 所示;两相短路,用  $k^{(2)}$  表示,如图 3-1(b) 所示;单相短路,用  $k^{(1)}$  表示,如图 3-1(c) 和图 3-1(d) 所示;两相接地短路,一般用  $k^{(1,1)}$  表示,如图 3-1(e) 和图 3-1(f) 所示,不过它实质上是两相短路,因此也可用  $k^{(2)}$  表示。

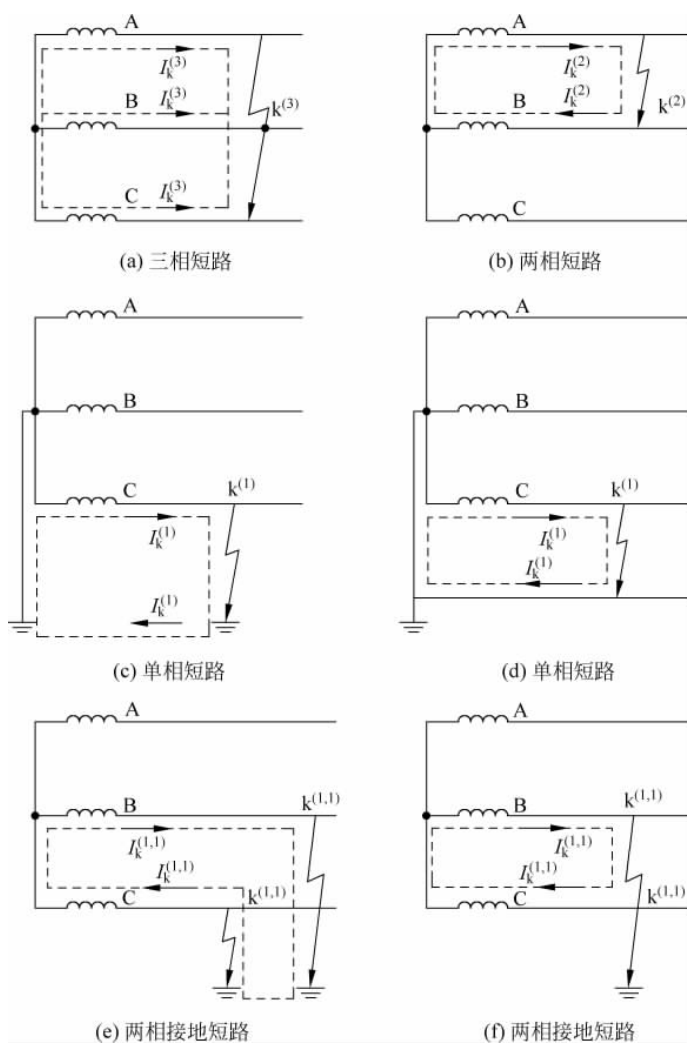


图 3-1 短路类型

上述短路类型中,三相短路属于对称性短路;其他形式短路,属于不对称短路。

电力系统中,发生单相短路的几率最大,而发生三相短路的可能性最小,但是三相短路造成的危害一般来说最为严重。因此为了使电气设备在最严重的短路状态下也能可靠地工作,在作为选择和校验电气设备用的短路计算中,常以三相短路计算为主。实际上,不对称短路也可以按对称分量法将其物理量分解为对称的正序、负序和零序分量,然后按对称量来研究。所以对称的三相短路分析也是分析研究不对称短路的基础。

### 3.1.4 计算短路电流的目的

计算短路电流的目的是为了限制短路的危害和缩小故障的影响范围。在变电所和供电系统的设计和运行中,基于以下用途必须进行短路电流计算:

- (1) 选择电气设备和载流导体,必须用短路电流校验其热稳定性和动稳定性。
- (2) 选择和整定继电保护装置,使之能正确地切除短路故障。
- (3) 确定合理的主接线方案、运行方式及限流措施。

## 3.2 无限大容量供电系统短路过程分析

所谓无限大容量供电系统是指电源的内阻抗为零,不管输出电流如何变动,电源内部均不产生压降,电源母线上的输出电压恒定不变。事实上,供电系统电源的容量不可能无限大,真正的无限大容量供电系统是不存在的。这里所说的无限大容量是个相对极大的容量,当供电系统的容量远大于用电容量(50倍以上),或者供电系统电源的内阻抗小于短路回路总阻抗的10%时,可将该系统看作无限大容量供电系统。

当发生三相短路时,供电系统由原来的工作状态,经过一个暂态过程,最后进入短路稳定状态。供电网络中的电流也由正常的负荷电流,经过一个暂态过程,达到短路电流稳态值。

图3-2所示为无限大容量供电系统发生三相短路时的三相等效电路图。图中, $R_{k1}$ 、 $X_{k1}$ 为短路点前的等效电阻和电抗, $R_L$ 、 $X_L$ 为短路点后的等效电阻和电抗。由于电源和负载三相对称,因此该三相短路电路可用图3-3所示的单相等效电路来分析。

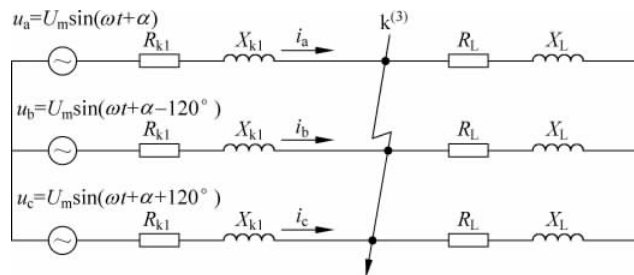


图 3-2 三相短路时的三相等效电路图

此电路在  $k^{(3)}$  点发生三相短路时,电路被分为两个独立回路。短路点的右侧是被短接的负荷回路,失去电源,其电流由原来的负荷电流衰减到零。短路点的左侧是一个与电源相连的短路回路,短路回路电流由原来的负载电流增大为短路电流  $i_k$ ,短路回路的电流  $i_k$  应满足微分方程

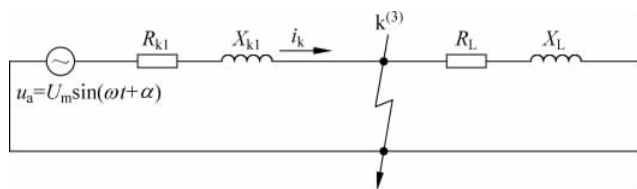


图 3-3 三相短路时的单相等效电路图

$$L_{kl} \frac{di_k}{dt} + R_{kl} i_k = U_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (3-1)$$

式中： $U_m$ ——相电压幅值；

$i_k$ ——每相短路电流瞬时值；

$L_{kl}$ ——由电源至短路点  $k^{(3)}$  的每相等效电感；

$R_{kl}$ ——由电源至短路点  $k^{(3)}$  的每相等效电阻；

$\omega$ ——电源的角频率；

$\alpha$ ——相电压的初相角。

解微分方程(3-1)得

$$i_k = \frac{U_m}{|Z_{kl}|} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{kl}) + C e^{-\frac{t}{\tau}} = I_{km} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{kl}) + C e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3-2)$$

式中： $Z_{kl}$ ——电路中每相等效短路阻抗， $|Z_{kl}| = \sqrt{R_{kl}^2 + X_{kl}^2}$ ；

$X_{kl}$ ——由电源至短路点  $k^{(3)}$  的每相等效电抗；

$\varphi_{kl}$ ——短路电路的阻抗角， $\varphi_{kl} = \arctan\left(\frac{X_{kl}}{R_{kl}}\right)$ ；

$\tau$ ——短路电路的时间常数， $\tau = \arctan \frac{L_{kl}}{R_{kl}}$ ；

$C$ ——积分常数，由电路的初始条件( $t=0$ )来确定。

设短路前整个回路的负载电流为  $I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi)$ ， $I_m$  为负载电流的幅值，为故障前电路的阻抗角。在  $t=0$  时刻发生三相短路的瞬间，由于短路电路存在电感，因此电路电流不会突变，由式(3-2)可得

$$I_m \sin(\alpha - \varphi) = I_{km} \sin(\alpha - \varphi_{kl}) + C \quad (3-3)$$

解得

$$C = I_m \sin(\alpha - \varphi) - I_{km} \sin(\alpha - \varphi_{kl}) \quad (3-4)$$

将式(3-4)代入式(3-2)得短路电流的全电流瞬时值为

$$i_k = I_{km} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{kl}) + (I_m \sin(\alpha - \varphi) - I_{km} \sin(\alpha - \varphi_{kl})) e^{-\frac{t}{\tau}} = i_p + i_{np} \quad (3-5)$$

式(3-5)第一等号右端的第一项称为短路电流的周期分量，以  $i_p$  表示，其幅值为  $I_{km}$ ，其有效值用  $I_k$  表示；第二项称为短路电流的非周期分量，以  $i_{np}$  表示，短路后按时间常数为  $\tau$  的指数规律衰减，经历  $(3 \sim 5)\tau$  即衰减至零，短路的暂态过程即告结束，短路进入稳定状态，这时的电流称为短路稳态电流，其有效值以  $I_\infty$  表示，短路稳态电流仅包含短路电流的周期分量。

如图 3-4 所示为无限大容量供电系统发生三相短路前后电压、电流的变动波形图。

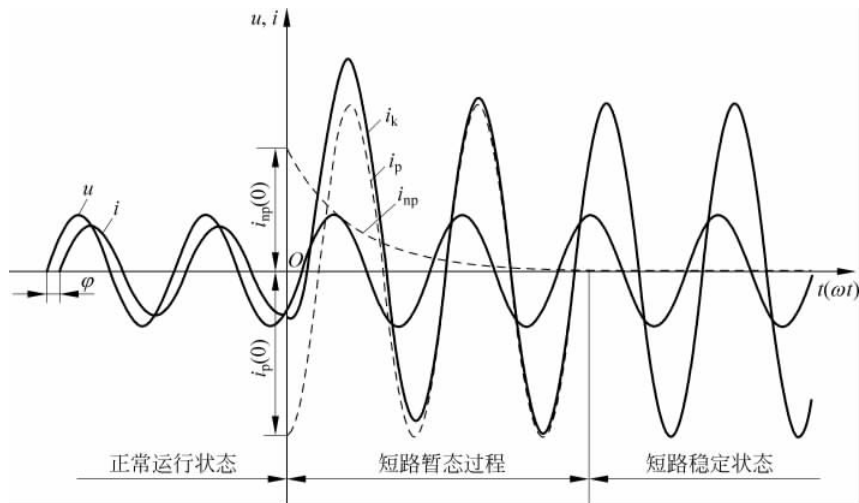


图 3-4 无限大容量供电系统发生三相短路时电压、电流波形图

短路电流最大可能的瞬时值,称为冲击电流,以  $i_{sh}$  表示。在电源电压及短路点不变的情况下,要使短路全电流达到最大值,必须具备以下条件:

(1) 短路前为空载,即  $I_m = 0$ ,这时  $i_{np}(0) = -I_{km} \sin(\alpha - \varphi_{kl})$ 。

(2) 假设短路回路的感抗  $X_{kl}$  比电阻  $R_{kl}$  大得多,即短路阻抗角  $\varphi_{kl} \approx 90^\circ$ 。

(3) 短路发生于某相电压瞬时值过零时,即当  $t = 0$  时,初相角  $\alpha = 0$ 。这时,由式(3-5)得

$$i_k = I_{km} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) + I_{km} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3-6)$$

短路电流为最大时的电压、电流波形图如图 3-5 所示。从图中可以看出,经过 0.01s 时,短路电流的幅值达到最大,即短路冲击电流  $i_{sh}$ ,其大小为

$$i_{sh} = I_{km} + I_{km} e^{-\frac{0.01}{\tau}} = I_{km} (1 + e^{-\frac{0.01}{\tau}}) = k_{sh} I_{km} = \sqrt{2} k_{sh} I'' \quad (3-7)$$

式中:  $k_{sh}$ ——冲击系数;

$I''$ ——次暂态电流有效值。 $I''$ 是短路电流周期分量  $i_p$  在短路后第一个周期的有效值。

在无限大容量供电系统中,短路电流周期分量不衰减,则次暂态电流有效值  $I''$  等于短路电流周期分量有效值  $I_p$ ,即  $I'' = I_p$ 。

冲击系数表示冲击电流与短路电流周期分量幅值的倍数,其值取决于短路回路时间常数  $\tau$  的大小,因一般线路为感性电路,故  $0 \leq \tau \leq \infty$ 。当短路阻抗为纯电感时,即  $R_{kl} = 0$ ,  $\tau = \infty$ ,  $k_{sh} = 2$ ; 当短路阻抗为纯电阻时,即  $X_{kl} = 0$ ,  $\tau = 0$ ,  $k_{sh} = 1$ 。因此,  $k_{sh}$  的变化范围为  $1 \leq k_{sh} \leq 2$ 。

通常,在高压供电系统中,因电抗较大,故  $\tau \approx 0.045s$ ,  $k_{sh} = 1.8$ ,则短路冲击电流为

$$i_{sh} = \sqrt{2} k_{sh} I'' = 2.55 I'' \quad (3-8)$$

在低压供电系统中,因电阻较大,故  $\tau \approx 0.008s$ ,  $k_{sh} = 1.3$ ,则短路冲击电流为

$$i_{sh} = \sqrt{2} k_{sh} I'' = 1.84 I'' \quad (3-9)$$

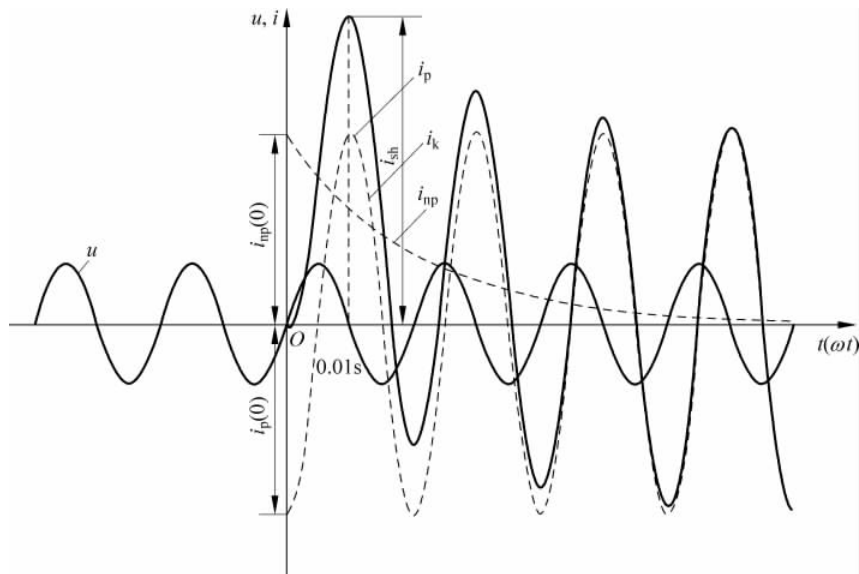


图 3-5 短路电流为最大时的电压、电流波形图

如前所述,在任一瞬时短路全电流  $i_k$  就是其周期分量  $i_p$  和非周期分量  $i_{np}$  之和。某一瞬时  $t$  的短路全电流有效值  $I_{kt}$  是以时间  $t$  为 midpoint 的一个周期内  $i_p$  的有效值  $I_p$  和在  $t$  时刻瞬时值  $i_{np t}$  的方均根值,即

$$I_{kt} = \sqrt{I_p^2 + i_{np t}^2} \quad (3-10)$$

当  $t=0.01\text{s}$  时短路全电流的有效值就是对应于短路冲击电流  $i_{sh}$  时的有效值,称为短路冲击电流有效值,以  $I_{sh}$  来表示

$$I_{sh} = \sqrt{I_p^2 + i_{np(0.01)}^2} \quad (3-11)$$

由式(3-7)可得

$$i_{np(0.01)} = (k_{sh} - 1) \sqrt{2} I'' \quad (3-12)$$

将式(3-12)代入式(3-11),可得

$$I_{sh} = I'' \sqrt{1 + 2(k_{sh} - 1)^2} \quad (3-13)$$

在高压系统中,  $k_{sh}=1.8$ , 所以有

$$I_{sh} = 1.51 I'' \quad (3-14)$$

在低压系统中,  $k_{sh}=1.3$ , 所以有

$$I_{sh} = 1.09 I'' \quad (3-15)$$

当  $t=\infty$  时,短路电流非周期分量已衰减完毕,此时的短路电流称为稳态短路电流,其有效值以  $I_\infty$  表示。因为稳态短路电流仅包含短路全电流中的周期分量,而在无限大容量供电系统中电源电压维持恒定,短路后任何时刻的短路电流周期分量始终不变。所以有

$$I_\infty = I_p = I'' \quad (3-16)$$

习惯上把短路电流周期分量有效值写作  $I_k$ , 即  $I_\infty = I_k = I''$ 。

### 3.3 无限大容量供电系统短路电流计算

由上述分析可知,短路电流是由周期分量和非周期分量所组成。非周期分量的计算主要取决于它的初始值  $i_{np(0)}$  及短路回路的时间常数  $\tau$ ,  $i_{np(0)}$  的最大可能值等于周期分量的幅值。在无限大容量供电系统中发生三相短路时,短路电流周期分量的幅值是不变的,因此它的有效值也是不变的。只要求出短路电流周期分量有效值,就可计算出有关短路的所有物理量。

计算短路电流前,应先收集有关部门的供电系统接线图、运行方式及各元件的技术数据等资料。计算时,根据资料首先绘出计算电路图,如图 3-6 所示。在计算电路图上,将计算短路电流所需考虑的各元件的额定参数都表示出来,并将各元件依次编号,然后确定短路计算点。短路计算点的选择要使得需要进行短路校验的电气元件有最大可能的短路电流通过。接着按所选择的短路计算点绘出等效电路图,如图 3-7 所示,并计算电路中各主要元件的阻抗。在等效电路图上,只需将被计算的短路电流所流经的一些主要元件表示出来,并标明其序号和阻抗值,一般是分子标序号,分母标阻抗值(既有电阻又有电抗时,用复数形式  $R+jX$  来表示)。然后,将等效电路化简。对于供电系统来说,由于将电力系统当作无限大容量电源,而且短路电路也比较简单,因此一般只需要采用阻抗串、并联的方法即可将电路化简,求出其等效阻抗即总阻抗,最后计算短路电流和短路容量。

短路电流计算的方法,常用的有欧姆法(又称有各单位制法)和标幺值法(又称相对单位制法)。

考虑到短路电流的特点,工程设计中短路计算各有关物理量的单位一般采用:电流单位为“千安”(kA),电压单位为“千伏”(kV),短路容量和断流容量单位为“兆伏安”(MV·A),设备容量单位为“千瓦”(kW)或“千伏安”(kV·A),阻抗单位为“欧姆”(Ω)等。但是必须说明:本书计算公式中各物理量单位,除个别经验公式或简化公式外,一律采用国际单位制(SI制)的单位,如:“安”(A)、“伏”(V)、“瓦”(W)、“伏安”(V·A)、“欧”(Ω)等。因此,后面导出的各个公式一般不标注物理量的单位。如果采用工程中常用的单位来计算,则须注意所用公式中各物理量的换算系数。

#### 3.3.1 欧姆法

欧姆法是因为其短路计算中的阻抗都采用有各单位“欧姆”而得名。

在无限大容量供电系统中发生三相短路时,其三相短路电流周期分量有效值可用下式计算:

$$I_k^{(3)} = \frac{U_c}{\sqrt{3} |Z_\Sigma|} = \frac{U_c}{\sqrt{3} \sqrt{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2}} \quad (3-17)$$

式中:  $U_c$ ——短路点的短路计算电压(也称为短路点所在网络的平均额定电压)。由于线路首端短路时其短路最为严重,因此按线路首端电压考虑,即计算电压取为比线路额定电压  $U_N$  高 5%; 按我国电压标准,  $U_c$  有 0.4kV、0.69kV、3.15kV、6.3kV、10.5kV、37kV、69kV、115kV 和 230kV 等;

$|Z_\Sigma|$ 、 $R_\Sigma$ 、 $X_\Sigma$ ——分别为短路电路一相的总阻抗[模]、总电阻和总电抗值。

在高压供电系统的短路电流计算中,由于总电抗值通常远大于总电阻值,因此一般只计

电抗,不计电阻,只有在短路电路的  $R_{\Sigma} > X_{\Sigma}/3$  时才需计入电阻。但是在计算低压电网短路特别是低压配电线路上的短路时,则往往需要计入电阻,这将在后面专门论述。

如果不计电阻,则三相短路电流周期分量有效值为

$$I_k^{(3)} = \frac{U_c}{\sqrt{3} X_{\Sigma}} \quad (3-18)$$

三相短路容量  $S_k^{(3)}$  按下式计算:

$$S_k^{(3)} = \sqrt{3} U_c I_k^{(3)} \quad (3-19)$$

下面分别介绍供电系统中各主要元件如电力系统(电源)、电力变压器、电抗器和电力线路的阻抗计算。至于供电系统中的母线、电流互感器的一次线圈及开关触头等阻抗,相对来说很小,在高压供电系统的短路电流计算中可忽略不计。在略去一些阻抗后,计算出来的短路电流自然偏大。用稍偏大的短路电流来校验电气设备,可以使电气设备运行的安全性更有保证。

#### 1) 电力系统的阻抗

电力系统的电阻相对于电抗来说很小,因此一般不计电阻,只计电抗。电力系统的电抗,可由供电系统在电源母线上的短路容量  $S_k$  来估计,可将供电系统变电所高压馈电线出口断路器的断流容量  $S_{oc}$  (可查有关手册或产品样本(参看附录表 22)) 视为供电系统的极限短路容量  $S_k$ 。因此供电系统的电抗为

$$X_s = \frac{U_c^2}{S_k} = \frac{U_c^2}{S_{oc}} \quad (3-20)$$

式中,  $U_c$ ——高压馈电线的短路计算电压,但为了便于短路电路总阻抗的计算,免去阻抗换算的麻烦,此式中  $U_c$  可直接采用短路点的短路计算电压。

#### 2) 电力变压器的阻抗

变压器的电阻  $R_T$  可由变压器的短路损耗  $\Delta P_k$  近似计算。

$$\text{因} \quad \Delta P_k \approx 3 I_N^2 R_T \approx 3 \left( \frac{S_N}{\sqrt{3} U_c} \right)^2 R_T = \left( \frac{S_N}{U_c} \right)^2 R_T$$

故

$$R_T \approx \Delta P_k \left( \frac{U_c}{S_N} \right)^2 \quad (3-21)$$

式中:  $U_c$ ——短路点的短路计算电压;

$S_N$ ——变压器的额定容量;

$\Delta P_k$ ——变压器的短路损耗(负载损耗),可查有关手册或产品样本(参看附录表 18~20)。

变压器的电抗  $X_T$  可由变压器的短路电压(即阻抗电压)  $U_k\%$  近似地计算。

$$\text{因} \quad U_k\% \approx \frac{\sqrt{3} I_N X_T}{U_c} \times 100 \approx \frac{S_N X_T}{U_c^2} \times 100$$

故

$$X_T \approx \frac{U_k\%}{100} \frac{U_c^2}{S_N} \quad (3-22)$$

式中,  $U_k\%$ ——变压器的短路电压(阻抗电压)百分值,可查有关手册或产品样本(参看附录表 18~20)。



## 3) 电抗器的阻抗

由于电抗器的电阻很小,因此只需计算其电抗值。电抗器的电抗  $X_{LR}$  可由电抗器的电抗百分值  $X_{LR}\%$  求得。

$$U_{LR}\% = \frac{\sqrt{3} I_{LR} X_{LR}}{U_N} \times 100$$

因

$$X_{LR} = \frac{U_{LR}\%}{100} \frac{U_N}{\sqrt{3} I_N} \quad (3-23)$$

式中:  $U_{LR}\%$ ——电抗器的电抗百分值,可查有关手册或产品样本;

$U_N$ ——电抗器的额定电压;

$I_N$ ——电抗器的额定电流。

## 4) 电力线路的阻抗

线路的电阻  $R_{WL}$ ,可由已知截面的导线或电缆的单位长度电阻  $r_0$  值求得,即

$$R_{WL} = r_0 l \quad (3-24)$$

式中:  $r_0$ ——导线或电缆单位长度的电阻,可查有关手册或产品样本(参看附录表 13);

$l$ ——线路长度。

线路的电抗  $X_{WL}$  可由已知截面和线距的导线或已知截面和电压的电缆的单位长度电抗  $x_0$  值求得,即

$$X_{WL} = x_0 l \quad (3-25)$$

式中,  $x_0$ ——导线或电缆单位长度的电抗,可查有关手册或产品样本(参看附录表 13)。

求出短路电路中各元件的阻抗后,化简短路电路,求出短路回路的总阻抗,然后按式(3-17)或式(3-18)计算短路电流周期分量  $I_k^{(3)}$ ,并计算其他短路物理量。

必须注意:在计算短路电路的阻抗时,假如电路内含有电力变压器,则电路内各元件的阻抗值都应该统一换算到短路点的短路计算电压去。阻抗等效换算的条件是元件的功率损耗维持不变。因此由  $\Delta P = U^2/R$  和  $\Delta Q = U^2/X$  可知,元件的阻抗值与电压的平方成正比。因此阻抗换算的公式为

$$R' = R \left( \frac{U'_c}{U_c} \right)^2 \quad (3-26)$$

$$X' = X \left( \frac{U'_c}{U_c} \right)^2 \quad (3-27)$$

式中:  $R, X$  和  $U_c$ ——换算前元件的电阻、电抗和元件所在处的短路计算电压;

$R', X'$  和  $U'_c$ ——换算后元件的电阻、电抗和短路点的短路计算电压。

就短路计算中考虑的几个主要元件的阻抗来说,实际上只有电抗器和电力线路的阻抗需要按上列公式换算,例如计算低压侧短路电流时,高压线路的阻抗就需要换算到低压侧。而电力系统和电力变压器的阻抗,由于其计算公式中均包含有  $U_c^2$ ,因此计算其阻抗时,公式中  $U_c$  的直接代入短路点的短路计算电压,相当于阻抗已经换算到短路计算点的一侧。

**例 3-1** 某简化的供电系统如图 3-6 所示。该供电系统的 35kV/10kV 总降压变电所装有一台 S9-3150/35/10.5 变压器 ( $U_k\% = 7$ )。采用一条 5km 长的 35kV 架空线路供电 ( $x_0 = 0.4\Omega/\text{km}$ )。总降压变电所的一条 10kV 的电缆馈出线 ( $x_0 = 0.08\Omega/\text{km}$ ),向 1km 远

处的 S9-1000/10/0.4 车间变压器 ( $U_k\% = 5$ ) 供电。已知地区变电所高压馈线出口断路器的断流容量为  $400\text{MV}\cdot\text{A}$ 。试求总降压变电所低压 10kV 母线上 k-1 点短路和车间变电所低压 380V 母线上 k-2 点短路的三相短路电流和短路容量。

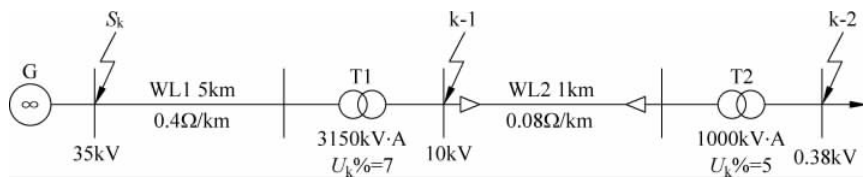


图 3-6 例 3-1 供电系统示意图

**解：**(1) 求 k-1 点的三相短路电流和短路容量 ( $U_{c2} = 10.5\text{kV}$ )。

(a) 计算短路电路中各元件的电抗值。

电力系统的电抗

$$X_S = \frac{U_{c2}^2}{S_k} = \frac{10.5^2}{400} = 0.276(\Omega)$$

35kV 架空线路的电抗值

$$X_{WL1} = x_{01}l_1 \left(\frac{U_{c2}}{U_{c1}}\right)^2 = 0.4 \times 5 \times \left(\frac{10.5}{37}\right)^2 = 0.161(\Omega)$$

35kV 电力变压器的电抗值

$$X_{T1} = \frac{U_{k1}\%}{100} \frac{U_{c2}^2}{S_{NT1}} = \frac{7}{100} \times \frac{10.5^2}{3.15} = 2.45(\Omega)$$

(b) 计算短路点的总电抗。

绘出 k-1 点短路的等效电路图如图 3-7 所示,总的电抗值为

$$X_{\Sigma} = X_S + X_{WL1} + X_{T1} = 0.276 + 0.161 + 2.45 = 2.887(\Omega)$$

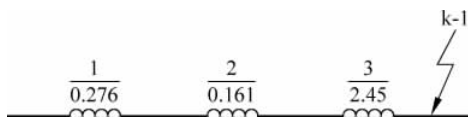


图 3-7 例 3-1 供电系统 k-1 点短路的等效电路图

(c) 计算短路电流和短路容量。

三相短路电流周期分量有效值

$$I_k^{(3)} = \frac{U_{c2}}{\sqrt{3}X_{\Sigma}} = \frac{10.5}{\sqrt{3} \times 2.887} = 2.1(\text{kA})$$

三相次暂态短路电流和短路稳态电流

$$I''^{(3)} = I_{\infty}^{(3)} = I_k^{(3)} = 2.1(\text{kA})$$

三相短路冲击电流及其有效值

$$i_{sh}^{(3)} = 2.55I''^{(3)} = 2.55 \times 2.1 = 5.4(\text{kA})$$

$$I_{sh}^{(3)} = 1.51I''^{(3)} = 1.51 \times 2.1 = 3.2(\text{kA})$$

三相短路容量

$$S_k^{(3)} = \sqrt{3}U_{c2}I_k^{(3)} = \sqrt{3} \times 10.5 \times 2.1 = 38.2(\text{MV}\cdot\text{A})$$

(2) 求 k-2 点的三相短路电流和短路容量( $U_{c3}=0.4\text{kV}$ )。

(a) 计算短路电路中各元件的电抗值

电力系统的电抗

$$X_S = \frac{U_{c3}^2}{S_k} = \frac{0.4^2}{400} = 0.0004(\Omega)$$

35kV 架空线路的电抗值

$$X_{WL1} = x_{01} l_1 \left( \frac{U_{c3}}{U_{c1}} \right)^2 = 0.4 \times 5 \times \left( \frac{0.4}{37} \right)^2 = 0.00023(\Omega)$$

35kV 电力变压器的电抗值

$$X_{T1} = \frac{U_{k1} \%}{100} \frac{U_{c3}^2}{S_{NT1}} = \frac{7}{100} \times \frac{0.4^2}{3.15} = 0.00356(\Omega)$$

10kV 电缆线路的电抗值

$$X_{WL2} = x_{02} l_2 \left( \frac{U_{c3}}{U_{c2}} \right)^2 = 0.08 \times 1 \times \left( \frac{0.4}{10.5} \right)^2 = 0.00012(\Omega)$$

10kV 电力变压器的电抗值

$$X_{T2} = \frac{U_{k2} \%}{100} \frac{U_{c3}^2}{S_{NT2}} = \frac{5}{100} \times \frac{0.4^2}{1} = 0.008(\Omega)$$

(b) 计算短路点的总电抗。

绘出 k-2 点短路的等效电路图如图 3-8 所示,总的电抗值为

$$\begin{aligned} X_{\Sigma} &= X_S + X_{WL1} + X_{T1} + X_{WL2} + X_{T2} \\ &= 0.0004 + 0.00023 + 0.00356 + 0.00012 + 0.008 = 0.01231(\Omega) \end{aligned}$$

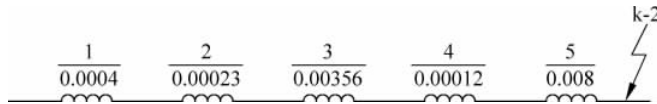


图 3-8 例 3-1 供电系统 k-2 点短路的等效电路图

(c) 计算短路电流和短路容量。

三相短路电流周期分量有效值

$$I_k^{(3)} = \frac{U_{c3}}{\sqrt{3} X_{\Sigma}} = \frac{0.4}{\sqrt{3} \times 0.01231} = 18.8(\text{kA})$$

三相次暂态短路电流和短路稳态电流

$$I''^{(3)} = I_{\infty}^{(3)} = I_k^{(3)} = 18.8(\text{kA})$$

三相短路冲击电流及其有效值

$$i_{sh}^{(3)} = 1.84 I''^{(3)} = 1.84 \times 18.8 = 34.6(\text{kA})$$

$$I_{sh}^{(3)} = 1.09 I''^{(3)} = 1.09 \times 18.8 = 20.5(\text{kA})$$

三相短路容量

$$S_k^{(3)} = \sqrt{3} U_{c3} I_k^{(3)} = \sqrt{3} \times 0.4 \times 18.8 = 13.0(\text{MV} \cdot \text{A})$$

### 3.3.2 标幺值法

在电力系统计算短路电流时,如计算低压系统的短路电流,常采用欧姆法。但是在计算

高压系统的短路电流时,由于有多个电压等级,存在阻抗变换问题。为使计算简化,在电力系统工程计算中常采用标幺值法计算。

### 1. 标幺值的概念

在标幺值法中,参与运算的物理量均采用其相对值表示。标幺值的概念是

$$\text{某量的标幺值} = \frac{\text{该量的实际值(任意单位)}}{\text{该量的基准值(与实际单位同单位)}} \quad (3-28)$$

所谓基准值是衡量某个物理量的标准或尺度。在短路电流计算中,所遇到的电气量有容量、电压、电流和电抗4个量。在用标幺值表示这些物理量时,首先要选择基准值。如果选定基准容量为  $S_d$ 、基准电压为  $U_d$ 、基准电流为  $I_d$  和基准电抗为  $X_d$ ,则实际值  $S$ 、 $U$ 、 $I$ 、 $X$  的标幺值可有以下式表示:

$$S_d^* = \frac{S}{S_d} \quad U_d^* = \frac{U}{U_d} \quad I_d^* = \frac{I}{I_d} \quad X_d^* = \frac{X}{X_d} \quad (3-29)$$

式中,  $S_d^*$ 、 $U_d^*$ 、 $I_d^*$  和  $X_d^*$  分别称为容量、电压、电流和电抗相对于其基准值的标幺值。为方便起见,常将标幺值的下角  $d$  去掉,即用  $S^*$ 、 $U^*$ 、 $I^*$  和  $X^*$  表示它们对基准值的标幺值。要特别注意,用标幺值表示的物理量是没有单位的。

在三相交流系统中,容量  $S$ 、电压  $U$ 、电流  $I$  和电抗  $X$  存在如下关系:

$$S = \sqrt{3}UI \quad (3-30)$$

$$U = \sqrt{3}IX \quad (3-31)$$

同样,这种关系对于基准值也成立,即

$$S_d = \sqrt{3}U_d I_d \quad (3-32)$$

$$U_d = \sqrt{3}I_d X_d \quad (3-33)$$

式(3-32)和式(3-33)说明,4个基准值中,只要选定其中2个,另外2个基准值便可通过关系式计算出来。在短路电流计算中,通常选定基准容量  $S_d$  和基准电压  $U_d$ ,而基准电流  $I_d$  和基准电抗  $X_d$  可根据下式确定:

$$I_d = \frac{S_d}{\sqrt{3}U_d} \quad (3-34)$$

$$X_d = \frac{U_d}{\sqrt{3}I_d} = \frac{U_d^2}{S_d} \quad (3-35)$$

基准值可以任意选定,但是为了简化短路电流的计算,对于容量的基准值可以任选(常选  $S_d=100\text{MV}\cdot\text{A}$ ),而基准电压一般都是选取短路点所在网络段的计算电压(即  $U_d=U_c$ )。

### 2. 供电系统中各元件的电抗标幺值

(1) 电力系统的电抗标幺值

$$X_S^* = \frac{X_S}{X_d} = \frac{U_c^2}{S_k} / \frac{U_c^2}{S_d} = \frac{S_d}{S_k} \quad (3-36)$$

(2) 电力变压器的电抗标幺值

$$X_T^* = \frac{X_T}{X_d} = \frac{U_k\%U_c^2}{100S_N} / \frac{U_c^2}{S_d} = \frac{U_k\%S_d}{100S_N} \quad (3-37)$$

(3) 电抗器的电抗标幺值

$$X_{LR}^* = \frac{X_{LR}}{X_d} = \frac{U_{LR}\%}{100} \frac{U_N}{\sqrt{3}I_N} / \frac{U_c^2}{S_d} = \frac{U_{LR}\%}{100} \frac{U_N}{I_N} \frac{S_d}{\sqrt{3}U_c^2} \quad (3-38)$$

(4) 电力线路的电抗标么值

$$X_{WL}^* = \frac{X_{WL}}{X_d} = x_0 L \sqrt{\frac{U_c^2}{S_d}} = x_0 L \frac{S_d}{U_c^2} \quad (3-39)$$

### 3. 供电系统中电源至短路点的总电抗

计算出每个元件的电抗后,就可以画出电源至短路点的等效电路图(参看图 3-9)。求总电抗时,可根据元件间的串、并联关系求出总的电抗标么值  $X_{\Sigma}^*$ 。由于各元件电抗均采用标么值,与短路计算点的电压无关,因此无须进行电压换算,这也是标么值法较之欧姆法的优越之处。也由于标么值具有相对值的特性,与短路计算点电压无关,因此工程上通用的短路计算图表往往都按标么值编制。

### 4. 供电系统中短路物理量计算

无限大容量供电系统三相短路电流周期分量有效值的标么值按下式计算:

$$I_k^{(3)*} = \frac{I_k^{(3)}}{I_d} = \frac{U_c}{\sqrt{3} X_{\Sigma}} \sqrt{\frac{S_d}{U_c^2}} = \frac{U_c^2}{S_d X_{\Sigma}} = \frac{1}{X_{\Sigma}^*} \quad (3-40)$$

由此可求得三相短路电流周期分量有效值为

$$I_k^{(3)} = I_k^{(3)*} I_d = \frac{I_d}{X_{\Sigma}^*} \quad (3-41)$$

求得  $I_k^{(3)}$  后即可利用前面的公式求出  $I''^{(3)}$ 、 $I_{\infty}^{(3)}$ 、 $i_{sh}^{(3)}$  和  $I_{sh}^{(3)}$  等。

三相短路容量  $S_k^{(3)}$  的计算公式为

$$S_k^{(3)} = \sqrt{3} U_c I_k^{(3)} = \sqrt{3} U_c \frac{I_d}{X_{\Sigma}^*} = \frac{S_d}{X_{\Sigma}^*} \quad (3-42)$$

三相短路容量  $S_k^{(3)}$  用来校验所选断路器的断流能力或断开容量(或称遮断容量)是否满足工作要求。

供电系统的短路电流大小与系统的运行方式有很大的关系。系统的运行方式可分为最大运行方式和最小运行方式。最大运行方式下电源系统中发电机组投运多,双回输电线路及并联变压器均全部运行。此时整个系统的总的短路阻抗最小,短路电流最大;反之,最小运行方式下由于电源中一部分发电机、变压器及输电线路解列,一些并联变压器为保证处于最佳运行状态也采用分列运行,这样将使总的短路阻抗变大,短路电流也相应地减小。在用户供电系统中,用最大运行方式求得的短路电流,一般用于校验所选用电气设备的稳定性和继电保护装置的整定计算等;用最小运行方式求得的短路电流,一般用于继电保护灵敏度校验。

**例 3-2** 试用标么值法计算例 3-1 所示供电系统中 k-1 点和 k-2 点的三相短路电流和短路容量。

**解:** (1) 确定基准值,取  $S_d = 100 \text{MV} \cdot \text{A}$ 。

对于 k-1 短路处,取  $U_{d1} = U_{e2} = 10.5 \text{kV}$ ,则

$$I_{d1} = \frac{S_d}{\sqrt{3} U_{d1}} = \frac{100}{\sqrt{3} \times 10.5} = 5.5 (\text{kA})$$

对于 k-2 短路处,取  $U_{d1} = U_{e3} = 0.4 \text{kV}$ ,则

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

(2) 计算系统中各元件的电抗标么值。

电力系统的电抗标么值

$$X_1^* = \frac{S_d}{S_k} = \frac{100}{400} = 0.25$$

35kV 架空线路的电抗标么值

$$X_2^* = x_{01} l_1 \frac{S_d}{U_{cl}^2} = 0.4 \times 5 \times \frac{100}{37^2} = 0.146$$

35kV 电力变压器的电抗标么值

$$X_3^* = \frac{U_{k1} \%}{100} \frac{S_d}{S_{NT1}} = \frac{7}{100} \times \frac{100 \times 10^3}{3150} = 2.222$$

10kV 电缆线路的电抗标么值

$$X_4^* = x_{02} l_2 \frac{S_d}{U_{c2}^2} = 0.08 \times 1 \times \frac{100}{10.5^2} = 0.073$$

10kV 电力变压器的电抗标么值

$$X_5^* = \frac{U_{k2} \%}{100} \frac{S_d}{S_{NT2}} = \frac{5}{100} \times \frac{100 \times 10^3}{1000} = 5$$

绘出系统短路的等效电路图如图 3-9 所示。

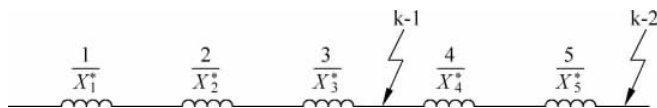


图 3-9 系统短路的等效电路图

(3) 计算 k-1 点短路的短路电流和短路容量。

总的电抗标么值

$$X_{\Sigma(k-1)}^* = X_1^* + X_2^* + X_3^* = 0.25 + 0.146 + 2.222 = 2.618$$

三相短路电流周期分量有效值

$$I_{k-1}^{(3)} = \frac{I_{d1}}{X_{\Sigma(k-1)}^*} = \frac{5.5}{2.618} = 2.1(\text{kA})$$

三相次暂态短路电流和短路稳态电流

$$I''^{(3)} = I_{\infty}^{(3)} = I_{k-1}^{(3)} = 2.1(\text{kA})$$

三相短路冲击电流及其有效值

$$i_{sh}^{(3)} = 2.55 I''^{(3)} = 2.55 \times 2.1 = 5.4(\text{kA})$$

$$I_{sh}^{(3)} = 1.51 I''^{(3)} = 1.51 \times 2.1 = 3.2(\text{kA})$$

三相短路容量

$$S_{k-1}^{(3)} = \sqrt{3} U_{c2} I_{k-1}^{(3)} = \sqrt{3} \times 10.5 \times 2.1 = 38.2(\text{MV} \cdot \text{A})$$

(4) 计算 k-2 点短路的短路电流和短路容量。

总的电抗标么值

$$X_{\Sigma(k-2)}^* = X_1^* + X_2^* + X_3^* + X_4^* + X_5^* = 0.25 + 0.146 + 2.222 + 0.073 + 5 = 7.691$$

三相短路电流周期分量有效值

$$I_{k-2}^{(3)} = \frac{I_{d2}}{X_{\Sigma(k-2)}^*} = \frac{144.34}{7.691} = 18.8(\text{kA})$$

三相次暂态短路电流和短路稳态电流

$$I''^{(3)} = I_{\infty}^{(3)} = I_{k-2}^{(3)} = 18.8(\text{kA})$$

三相短路冲击电流及其有效值

$$i_{\text{sh}}^{(3)} = 1.84I''^{(3)} = 1.84 \times 18.8 = 34.6(\text{kA})$$

$$I_{\text{sh}}^{(3)} = 1.09I''^{(3)} = 1.09 \times 18.8 = 20.5(\text{kA})$$

三相短路容量

$$S_{k-2}^{(3)} = \sqrt{3}U_{c3}I_{k-2}^{(3)} = \sqrt{3} \times 0.4 \times 18.8 = 13.0(\text{MV} \cdot \text{A})$$

### 3.4 低压电网中的短路电流计算

低压配电系统的短路电流计算有不同于高压供电系统的特点,因而短路电流的计算也与高压供电系统有所不同。

#### 3.4.1 低压电网短路电流计算的特点

1kV 以下的低压电网中短路计算具有以下特点:

(1) 配电变压器的高压侧电网可以看作无限大容量电源,即高压母线电压可认为保持不变。

(2) 低压电网中电气元件的电阻值较大,电抗值较小,一般用阻抗进行计算。当  $X > R/3$  时才计算  $X$  的影响。因为当  $X = R/3$  时,用  $R$  代替  $Z$ ,误差 5.4%,在工程允许范围内。除了应计入前述主要元件的阻抗外,通常还需计入母线的阻抗(查附录表 14)、电流互感器一次线圈阻抗(查附录表 15)、低压断路器过电流线圈阻抗(查附录表 16)和低压线路中各开关触头的接触电阻(查附录表 17)等。其中开关触头的接触电阻较小,有时略去不计。此外必须说明,当低压线路中只有两相或一相装有电流互感器时,则在计算三相短路电流时,不要计入电流互感器一次线圈的阻抗,但用于计算校验电流互感器的短路电流,则应计入其阻抗。

(3) 低压配电网电气元件的阻抗多以毫欧(mΩ)计,因而低压电网的短路计算中采用欧姆法(有名单位制法)比较方便。

(4) 因低压配电网的非周期分量衰减快, $k_{\text{sh}}$ 值在 1~1.3 范围。

#### 3.4.2 低压电网中各元件的阻抗计算

在对低压配电网进行短路电流计算时,不仅要计算低压配电网中各元件的电抗值,还应计算各元件的电阻值。

##### 1. 高压侧系统阻抗

通常配电变压器高压侧可视为无限大容量电源供电来考虑,高压系统阻抗一般可忽略不计。若需精确计算时,归算至低压侧的高压系统阻抗可按下式计算:

$$Z_s = \frac{U_c^2}{S_k} \times 10^{-3} \quad (3-43)$$

式中:  $Z_s$ ——归算到低压侧的高压系统阻抗(mΩ);

$U_c$ ——低压侧的短路计算电压(V),通常  $U_c = 400\text{V}$ ;

$S_k$ ——配电变压器高压侧的极限短路容量(MV·A)。

在工程实用计算中,一般高压侧系统电抗  $X_s \approx 0.995Z_s$ , 高压侧系统电阻  $R_s \approx 0.1X_s$ , 电阻可忽略不计。

## 2. 配电变压器的阻抗

变压器电阻

$$R_T = \frac{\Delta P_k U_c^2}{S_{NT}^2} \quad (3-44)$$

式中:  $R_T$ ——变压器的电阻(mΩ);

$\Delta P_k$ ——变压器的短路损耗(kW);

$S_{NT}$ ——变压器的额定容量(kV·A);

$U_c$ ——低压侧的短路计算电压(V),通常  $U_c = 400V$ 。

变压器阻抗

$$Z_T = \frac{\Delta u_k \% U_c^2}{100 S_{NT}} \quad (3-45)$$

式中,  $\Delta u_k \%$ ——变压器的短路电压(或阻抗电压)。

变压器电抗

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (3-46)$$

## 3. 其他元件的阻抗

其他元件的阻抗可查有关手册,低压母线的阻抗参看附录表 14,电流互感器一次线圈的阻抗参看附录表 15,低压断路器过电流脱扣线圈的阻抗参看附录表 16,低压开关触头接触电阻参看附录表 17。

### 3.4.3 低压电网的短路电流计算

三相阻抗相同的低压配电系统,短路电流可根据下式计算:

$$I_k^{(3)} = \frac{U_c}{\sqrt{3} \sqrt{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2}} \quad (3-47)$$

式中:  $I_k^{(3)}$ ——三相短路电流周期分量有效值(kA);

$U_c$ ——低压侧的短路计算电压(V),通常  $U_c = 400V$ ;

$R_\Sigma$ 、 $X_\Sigma$ ——分别为短路电路的总电阻和总电抗值(mΩ)。

**例 3-3** 某车间变电所接线如图 3-10 所示。已知电力变压器高压侧的高压断路器断流容量  $S_{oc} = 300MV \cdot A$ ; 电力变压器为 S9-800/10 型; 低压母线均为铝母线(LMY), 平放, WB1 为  $80 \times 8mm^2$ , 长度  $l = 6m$ , 几何均距  $\alpha = 250mm$ ; WB2 为  $50 \times 5mm^2$ ; 长度  $l = 1m$ , 几何均距  $\alpha = 250mm$ ; WB3 为  $40 \times 4mm^2$ , 长度  $l = 2m$ , 几何均距  $\alpha = 120mm$ ; 其余标注如图。试求 k 点三相短路电流和短路容量。

**解:** (1) 计算短路电路中各元件的电阻和电抗(取  $U_c = 400V$ )。

(a) 电力系统的电抗

$$X_s = \frac{U_c^2}{S_{oc}} = \frac{400^2}{300 \times 10^3} = 0.533(m\Omega)$$



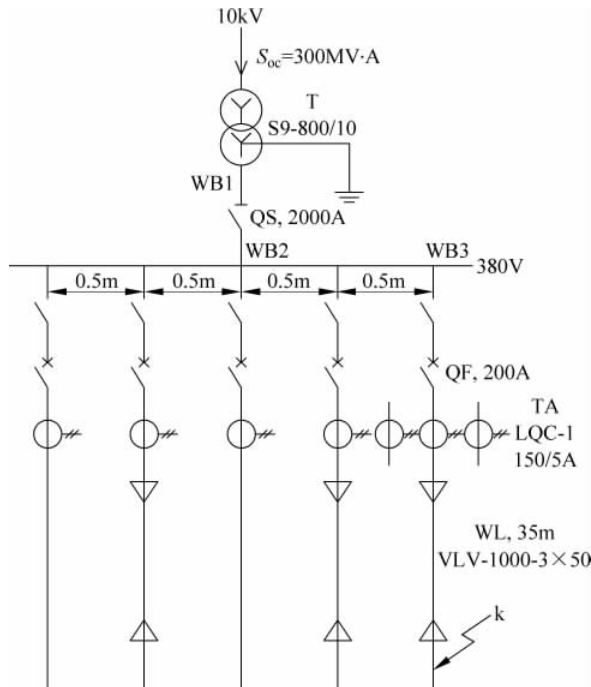


图 3-10 例 3-3 供电系统示意图

(b) 电力变压器的电阻和电抗

查附录表 18 得  $\Delta P_k = 7500\text{W}$ ,  $U_k\% = 4.5$ , 故

$$R_T = \frac{\Delta P_k U_c^2}{S_{NT}^2} = \frac{7.5 \times 400^2}{800^2} = 1.875(\text{m}\Omega)$$

$$Z_T = \frac{U_k\% U_c^2}{100 S_{NT}} = \frac{4.5 \times 400^2}{100 \times 800} = 9(\text{m}\Omega)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{9^2 - 1.875^2} = 8.803(\text{m}\Omega)$$

(c) 母线 WB1 的电阻和电抗

查附录表 14 得  $r_0 = 0.055\text{m}\Omega/\text{m}$ ,  $x_0 = 0.17\text{m}\Omega/\text{m}$  (取几何均距  $\alpha = 300\text{mm}$ ), 故

$$R_{WB1} = r_0 l = 0.055 \times 6 = 0.33(\text{m}\Omega)$$

$$X_{WB1} = x_0 l = 0.17 \times 6 = 1.02(\text{m}\Omega)$$

(d) 母线 WB2 的电阻和电抗

查附录表 14 得  $r_0 = 0.142\text{m}\Omega/\text{m}$ ,  $x_0 = 0.214\text{m}\Omega/\text{m}$  (取几何均距  $\alpha = 300\text{mm}$ ), 故

$$R_{WB2} = r_0 l = 0.142 \times 1 = 0.142(\text{m}\Omega)$$

$$X_{WB2} = x_0 l = 0.214 \times 1 = 0.214(\text{m}\Omega)$$

(e) 母线 WB3 的电阻和电抗

查附录表 14 得  $r_0 = 0.222\text{m}\Omega/\text{m}$ ,  $x_0 = 0.17\text{m}\Omega/\text{m}$  (取几何均距  $\alpha = 150\text{mm}$ ), 故

$$R_{WB3} = r_0 l = 0.222 \times 2 = 0.444(\text{m}\Omega)$$

$$X_{WB3} = x_0 l = 0.17 \times 2 = 0.34(\text{m}\Omega)$$

(f) 电流互感器一次线圈的电阻和电抗

查附录表 15 得

$$R_{TA} = 0.75(\text{m}\Omega)$$

$$X_{TA} = 1.2(\text{m}\Omega)$$

(g) 低压断路器 QF 过电流线圈的电阻和电抗

查附录表 16 得

$$R_{QF} = 0.36(\text{m}\Omega)$$

$$X_{QF} = 0.28(\text{m}\Omega)$$

(h) 电路中各开关触头的接触电阻

查附录表 17 得隔离开关 QS 的接触电阻为  $0.03\text{m}\Omega$ , 刀开关 QK 的接触电阻为  $0.4\text{m}\Omega$ , 低压断路器 QF 的接触电阻为  $0.6\text{m}\Omega$ , 因此总的接触电阻为

$$R_{XC} = 0.03 + 0.4 + 0.6 = 1.03(\text{m}\Omega)$$

(i) 低压电缆 VLV-1000-3×50mm<sup>2</sup> 的电阻和电抗

查附录表 13 得  $r_{0(80^\circ\text{C})} = 0.77\Omega/\text{km}$ ,  $x_{0(1000\text{V})} = 0.07\Omega/\text{km}$ , 故

$$R_{WL} = 0.77 \times 35 = 26.95(\text{m}\Omega)$$

$$X_{WL} = 0.071 \times 35 = 2.485(\text{m}\Omega)$$

(2) 计算短路电路总的电阻、电抗和阻抗。

$$\begin{aligned} R_{\Sigma} &= R_T + R_{WB1} + R_{WB2} + R_{WB3} + R_{TA} + R_{QF} + R_{XC} + R_{WL} \\ &= 1.875 + 0.33 + 0.142 + 0.444 + 0.75 + 0.36 + 1.03 + 26.95 = 31.881(\text{m}\Omega) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{\Sigma} &= X_S + X_T + X_{WB1} + X_{WB2} + X_{WB3} + X_{TA} + X_{QF} + X_{WL} \\ &= 0.533 + 8.803 + 1.02 + 0.214 + 0.34 + 1.2 + 0.28 + 2.485 = 14.875(\text{m}\Omega) \end{aligned}$$

$$|Z_T| = \sqrt{R_T^2 + X_T^2} = \sqrt{31.881^2 + 14.875^2} = 35.18(\text{m}\Omega)$$

(3) 计算短路电流和短路容量。

三相短路电流周期分量有效值

$$I_k^{(3)} = \frac{U_c}{\sqrt{3} |Z_{\Sigma}|} = \frac{400}{\sqrt{3} \times 35.18} = 6.56(\text{kA})$$

三相次暂态短路电流和短路稳态电流

$$I''^{(3)} = I_{\infty}^{(3)} = I_k^{(3)} = 6.56(\text{kA})$$

三相短路冲击电流及其有效值

$$i_{sh}^{(3)} = 1.84 I''^{(3)} = 1.84 \times 6.56 = 12.07(\text{kA})$$

$$I_{sh}^{(3)} = 1.09 I''^{(3)} = 1.09 \times 6.56 = 7.15(\text{kA})$$

三相短路容量

$$S_k^{(3)} = \sqrt{3} U_c I_k^{(3)} = \sqrt{3} \times 0.4 \times 6.56 = 4.54(\text{MV} \cdot \text{A})$$

### 3.5 无限大容量供电系统两相和单相短路电流计算

对于工矿企业的供电系统,除了需要计算三相短路电流,还需要计算两相和单相短路电流,用于继电保护灵敏度的校验。对于两相和单相短路这种不对称故障,一般要采用对称分量法来进行分析和计算,但对于无限大容量供电系统的两相短路电流和单相短路电流,可采

用实用计算方法。

### 3.5.1 两相短路电流的计算

在无限大容量供电系统中发生两相短路时(参看图 3-11),其短路电流周期分量有效值可按下列式计算:

$$I_k^{(2)} = \frac{U_c}{2|Z_\Sigma|} = \frac{U_c}{2\sqrt{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2}} \quad (3-48)$$

式中:  $U_c$ ——短路点的短路计算电压(也称为短路点所在网络的平均额定电压),比短路点线路额定电压高 5%;

$|Z_\Sigma|$ 、 $R_\Sigma$ 、 $X_\Sigma$ ——分别为短路电路一相的总阻抗[模]、总电阻和总电抗值。

如果忽略电阻只计电抗,则短路电流为

$$I_k^{(2)} = \frac{U_c}{2X_\Sigma} \quad (3-49)$$

其他两相短路电流  $I_k^{\prime(2)}$ 、 $I_\infty^{(2)}$ 、 $i_{sh}^{(2)}$  和  $I_{sh}^{(2)}$  等,都可按前面三相短路的对应公式计算。

根据式(3-18)和式(3-49),得到两相短路电流与三相短路电流的关系如下:

$$\frac{I_k^{(2)}}{I_k^{(3)}} = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0.866 \quad (3-50)$$

因此

$$I_k^{(2)} = 0.866 I_k^{(3)} \quad (3-51)$$

上式说明,无限大容量系统中,同一地点的两相短路电流为其三相短路电流的 0.866 倍(仅适用于远离发电机的无限大容量系统。如果是发电机出口短路时,则  $I_k^{(2)} = 1.5 I_k^{(3)}$ )。因此无限大容量供电系统中的两相短路电流,可根据三相短路电流利用式(3-51)直接求得。

### 3.5.2 单相短路电流的计算

在大接地电流系统或三相四线制系统中发生单相短路时(参看图 3-1(c)、图 3-1(d)),根据对称分量法可求得单相短路电流为:

$$\dot{I}_k^{(1)} = \frac{3\dot{U}_\varphi}{Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}} \quad (3-52)$$

式中:  $\dot{U}_\varphi$ ——电源相电压;

$Z_{1\Sigma}$ 、 $Z_{2\Sigma}$ 、 $Z_{3\Sigma}$ ——分别为单相短路回路的正序、负序和零序阻抗。

在工程设计中,常利用下列式计算单相短路电流:

$$I_k^{(1)} = \frac{U_\varphi}{|Z_{\varphi-0}|} \quad (3-53)$$

式中:  $U_\varphi$ ——电源相电压;

$|Z_{\varphi-0}|$ ——为单相短路回路的阻抗模,可查有关手册,或按下式计算:

$$|Z_{\varphi-0}| = \sqrt{(R_T + R_{\varphi-0})^2 + (X_T + X_{\varphi-0})^2} \quad (3-54)$$

式中:  $R_T$ 、 $X_T$ ——分别为变压器单相等效电阻和电抗;

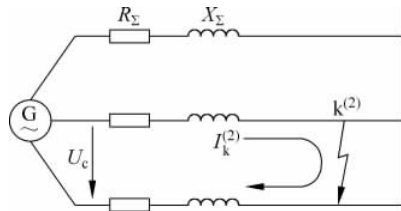


图 3-11 无限大容量供电系统中发生两相短路

$R_{\varphi-0}$ 、 $X_{\varphi-0}$ ——分别为相线与 N 线(或 PE 线、PEN 线)的短路回路电阻和电抗,包括短路回路中低压断路器过电流线圈的阻抗、电流互感器一次线圈的阻抗和各开关触头的接触电阻等,可查有关手册或附录表 15~17。

在远离发电机的用户变电所低压侧发生单相短路时,  $Z_{1\Sigma} \approx Z_{0\Sigma}$ , 因此由式(3-52)得单相短路电流

$$\dot{i}_k^{(1)} = \frac{3\dot{U}_\varphi}{2Z_{1\Sigma} + Z_{0\Sigma}} \quad (3-55)$$

而三相短路时,三相短路电流为

$$\dot{i}_k^{(3)} = \frac{\dot{U}_\varphi}{Z_{1\Sigma}} \quad (3-56)$$

因此

$$\frac{\dot{i}_k^{(1)}}{\dot{i}_k^{(3)}} = \frac{3}{2 + \frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{1\Sigma}}} \quad (3-57)$$

由于远离发电机发生短路时,  $Z_{0\Sigma} > Z_{1\Sigma}$ , 因此

$$\dot{i}_k^{(1)} < \dot{i}_k^{(3)} \quad (3-58)$$

由式(3-51)和式(3-58)可知,在无限大容量供电系统中或远离发电机处发生短路时,两相短路电流和单相短路电流均比三相短路电流小,因此用于选择电气设备和导体的短路动、热稳定度校验的短路电流,应采用三相短路电流。而两相短路电流主要用于相间短路保护的灵敏度校验,单相短路电流主要用于单相短路保护的整定和单相热稳定度的校验。

### 3.6 短路电流的效应和稳定度校验

电力系统发生短路故障时,短路电流是相当大的,如此大的短路电流通过电器和导体,一方面要产生很大的电动力,即力效应;另一方面要产生很高的温度,即热效应。这两种短路效应,对电器和导体的安全运行威胁极大,必须充分注意。

#### 3.6.1 短路电流的力效应和热效应

短路电流流过导体产生的力效应和热效应是校验载流导体及电气设备能否稳定工作的主要依据之一。

##### 1. 短路电流的力效应

由电工原理知,处在空气中的两平行导体分别通以电流  $i_1$ 、 $i_2$ (单位为 A)时,两导体间产生的电磁相互作用力即电动力(单位为 N)为

$$F = \mu_0 i_1 i_2 \frac{l}{2\pi a} = 2i_1 i_2 \frac{l}{a} \times 10^{-7} \quad (3-59)$$

式中:  $i_1$ 、 $i_2$ ——载流导体中通过的电流(A);

$l$ ——平行敷设的载流导体长度(m);

$a$ ——两载流导体轴线间的距离(m);

$\mu_0$ ——真空和空气的磁导率,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{N/A}^2$ 。

上式适用于圆形截面的实心导体。对矩形截面导体,应计入一个形状系数  $k_f$ ,即

$$F = 2k_f i_1 i_2 \frac{l}{a} \times 10^{-7} \quad (3-60)$$

式中： $i_1, i_2$ ——为载流导体中通过的电流(A)；

$l$ ——平行敷设的载流导体长度(m)；

$a$ ——两载流导体轴线间的距离(m)；

$k_f$ ——与载流导体的形状和相对位置有关的形状系数。设矩形截面导体的宽为  $b$ ，高为  $h$ ，两导体轴线间距离为  $a$ ，则形状系数  $k_f$  的值可根据  $\frac{a-b}{b+h}$  和  $m = \frac{b}{h}$  查曲线图 3-12 求得；对于圆形、管形导体， $k_f = 1$ 。

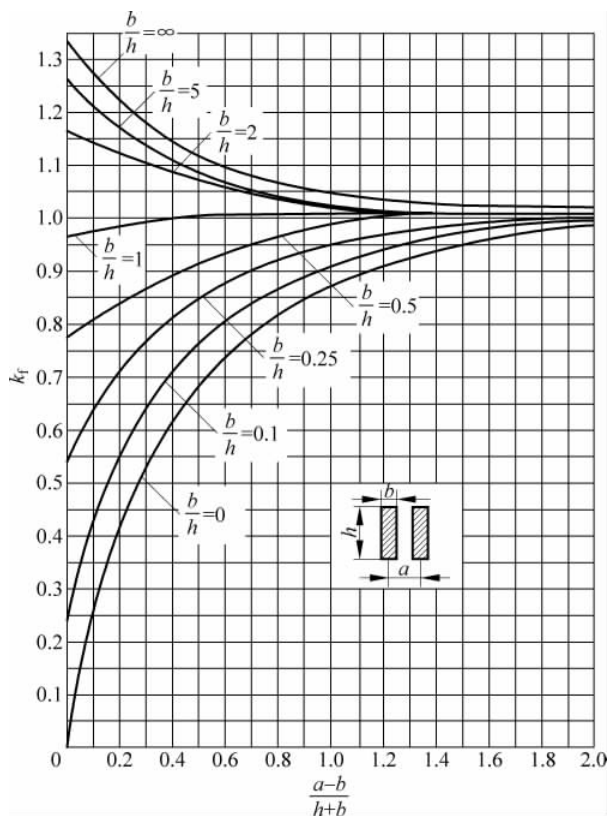


图 3-12 矩形母线的形状系数曲线

供电系统发生短路故障时的短路电流尤其是短路冲击电流，通过导体相互间的电磁作用产生的电动力最大。

如果供电系统的三相线路中发生两相短路，则两相短路冲击电流  $i_{sh}^{(2)}$  通过两相导体时产生的电动力最大，其值为

$$F^{(2)} = 2k_f i_{sh}^{(2)2} \frac{l}{a} \times 10^{-7} \quad (3-61)$$

如果供电系统的三相线路中发生三相短路，则三相短路冲击电流  $i_{sh}^{(3)}$  在中间相产生的电动力最大，其值为

$$F^{(3)} = \sqrt{3} k_f i_{sh}^{(3)2} \frac{l}{a} \times 10^{-7} \quad (3-62)$$

由此可见,供电系统的三相线路发生三相短路时中间相导体所受电动力比两相短路时导体所受的电动力大,因此校验电器和载流导体的动稳定度,一般采用三相短路冲击电流  $i_{sh}^{(3)}$  或其有效值  $I_{sh}^{(3)}$ 。

## 2. 短路电流的热效应

导体通过正常负荷电流时,由于导体具有电阻,因此要产生电能损耗。这种电能损耗转换为热能,一方面使导体温度升高,另一方面向周围介质散热。当导体内产生的热量与导体向周围介质散失的热量相等时,导体就维持在一定的温度值。

在供电系统发生短路时,极大的短路电流将使导体温度迅速升高。由于短路后供电系统的保护装置很快动作,切除短路故障,所以短路电流通过导体的时间不会很长,一般不超过 2~3s。因此在短路过程中,可不考虑导体向周围介质的散热,即近似地认为导体在短路时间内是与周围介质绝热的,短路电流在导体内产生的热量,全部用来使导体温度升高。

图 3-13 表示短路前后导体的温度变化情况。导体在正常负荷时的温度为  $\theta_1$ 。设在  $t_1$  时发生短路,导体温度按指数规律迅速升高,而在  $t_2$  时线路的保护装置动作,切除短路故障,这时导体温度已经达到最高值  $\theta_k$ 。此后由于系统断电,导体不再产生热量,而只按指数规律向周围介质散热,直到导体温度等于周围介质温度  $\theta_0$  为止。

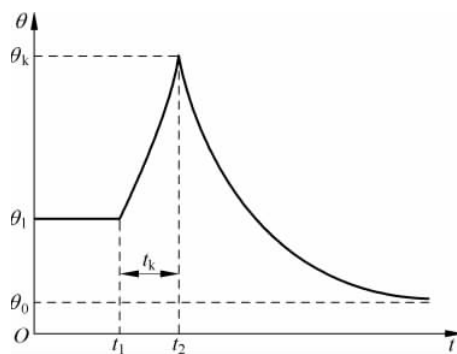


图 3-13 短路后导体温度对时间的变化曲线

按照导体的允许发热条件,导体在正常负荷和短路时的最高温度如附录表 21 所示。如果导体和电器在最严重短路时的发热温度不超过允许温度,则可认为其短路热稳定度是满足要求的。

要确定导体短路后达到的最高温度  $\theta_k$ ,必须先求出实际短路电流在短路时间  $t_k$  内产生的热量  $Q_k$ ,但由于实际短路全电流是一个幅值变动的电流,用它来计算  $Q_k$  是相当困难的,因此一般是采用一个恒定的短路稳态电流  $I_\infty$  来等效计算实际短路全电流所产生的热量。假设在某一假想时间  $t_{ima}$  内导体内通过短路稳态电流  $I_\infty$  所产生的热量,恰好等于实际短路全电流  $i_k$  或  $I_{k(t)}$  在实际短路时间  $t_k$  内在导体内产生的热量  $Q_k$ ,即

$$Q_k = \int_0^{t_k} I_{k(t)}^2 R dt = I_\infty^2 R t_{ima} \quad (3-63)$$

式中:  $R$ ——导体的电阻( $\Omega$ );

$I_{k(t)}$ ——短路全电流有效值(kA);

$I_\infty$ ——短路稳态电流有效值(kA);

$t_k$ ——短路时间(s);

$t_{ima}$ ——短路发热假想时间(s)。

短路发热假想时间  $t_{ima}$  可用下式近似地计算:

$$t_{ima} = t_k + 0.05 \left( \frac{I''}{I_\infty} \right)^2 \quad (3-64)$$

式中： $t_k$ ——短路时间(s)；

$I''$ ——短路次暂态电流(kA)。

在无限大容量系统中发生短路时，由于  $I'' = I_\infty$ ，因此

$$t_{ima} = t_k + 0.05 \quad (3-65)$$

当  $t_k > 1s$  时，可以认为  $t_{ima} = t_k$ 。

短路时间  $t_k$  为短路保护装置实际最长的动作时间  $t_{op}$  与断路器(开关)的断路时间  $t_{oc}$  (含固有分闸时间和灭弧时间)之和，即

$$t_k = t_{op} + t_{oc} \quad (3-66)$$

对于一般高压断路器(如油断路器)，可取  $t_{oc} = 0.2s$ ；对于高速断路器(如真空断路器、六氟化硫断路器)，可取  $t_{oc} = 0.1 \sim 0.15s$ 。

根据式(3-63)计算出的热量  $Q_k$ ，可计算出导体在短路后所达到的最高温度  $\theta_k$ ，但计算不仅繁复，而且涉及一些难于准确确定的系数，包括导体的电导率(在短路过程中不是常数)。因此工程设计中，一般是利用导体的加热系数  $K$  与导体温度的关系来确定短路发热温度  $\theta_k$ ，这样更为简便。图 3-14 所示曲线为常用铜、铝和钢三种导体金属的温度曲线，纵坐标表示导体温度  $\theta$ ，横坐标为导体加热系数  $K$ 。它的使用方法和步骤以简化图 3-15 来说明。

(1) 先从纵坐标轴上找出导体在正常负荷时的温度  $\theta_L$  值。如果实际负荷时导体的温度不详，可采用附录表 21 所列的额定负荷时的最高允许温度作为  $\theta_L$ ；

(2) 由  $\theta_L$  向右做水平线交曲线于点  $a$ ，再由  $a$  点向下做垂线，交横坐标轴于  $K_L$ ；

(3) 按下式计算出  $K_k$ ：

$$K_k = K_L + \left(\frac{I_\infty}{A}\right)^2 t_{ima} \times 10^6 \quad (3-67)$$

式中： $K_k$ ——正常负荷时导体加热系数( $A^2 \cdot s/mm^4$ )；

$K_L$ ——短路时导体加热系数( $A^2 \cdot s/mm^4$ )；

$I_\infty$ ——短路稳态电流有效值(kA)；

$A$ ——导体截面积( $mm^2$ )；

$t_{ima}$ ——短路发热假想时间(s)。

(4) 从横坐标轴上找出  $K_k$  值，向上做垂线交曲线于点  $b$ ，再由  $b$  点向左做水平线交纵坐标于  $\theta_k$ 。

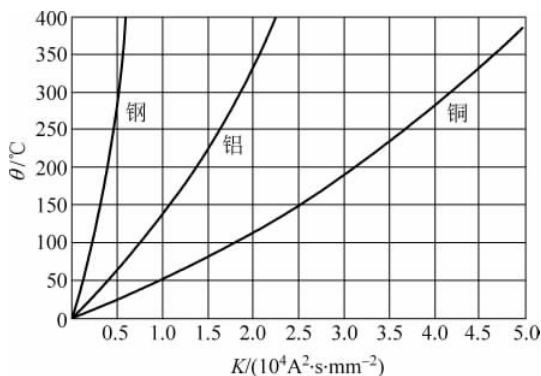


图 3-14 确定导体温度  $\theta_k$  的曲线

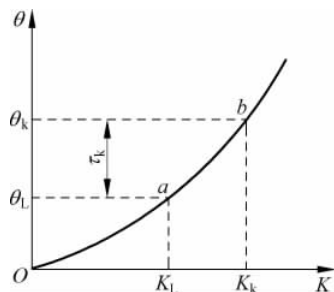


图 3-15 由  $\theta_L$  查  $\theta_k$  的步骤

### 3.6.2 短路电流的稳定度校验

由于短路电流流过导体时产生力效应和热效应,为了正确选择电气设备和载流导体,保证电气设备可靠工作,必须对电气设备进行动稳定度校验和热稳定度校验。

#### 1. 动稳定度校验

电器和导体的动稳定度校验,依校验对象的不同而采用不同的校验条件。

##### 1) 一般电器

一般电器满足动稳定度的校验条件为

$$i_{\max} \geq i_{\text{sh}}^{(3)} \quad (3-68)$$

或

$$I_{\max} \geq I_{\text{sh}}^{(3)} \quad (3-69)$$

式中:  $i_{\max}$ ——电器的极限通过电流(或称动稳定电流)峰值(kA),可由有关手册或产品样本查得;

$I_{\max}$ ——电器的极限通过电流(动稳定电流)有效值(kA),可由有关手册或产品样本查得。

##### 2) 绝缘子

绝缘子满足动稳定度的校验条件为

$$F_{\text{al}} \geq F_{\text{c}}^{(3)} \quad (3-70)$$

式中:  $F_{\text{al}}$ ——绝缘子的最大允许负荷,可由有关手册或产品样本查得。如果手册或产品样本给出的是绝缘子的抗弯破坏负荷值,则可将其抗弯破坏负荷值乘以 0.6 得到  $F_{\text{al}}$ ;

$F_{\text{c}}^{(3)}$ ——三相短路时作用于绝缘子上的计算力。如果母线在绝缘子上为平放,按式(3-62)计算,即  $F_{\text{c}}^{(3)} = F^{(3)}$ ; 如果母线为竖放,则按  $F_{\text{c}}^{(3)} = 1.4F^{(3)}$  计算。

##### 3) 硬母线

硬母线满足动稳定度的校验条件为

$$\sigma_{\text{al}} \geq \sigma_{\text{c}} \quad (3-71)$$

式中:  $\sigma_{\text{al}}$ ——母线材料的最大允许应力(Pa),硬铜母线(TMY),  $\sigma_{\text{al}} = 140\text{MPa}$ ,硬铝母线(LMY),  $\sigma_{\text{al}} = 70\text{MPa}$ ;

$\sigma_{\text{c}}$ ——母线通过  $i_{\text{sh}}^{(3)}$  时所受到的最大计算应力。

上述最大计算应力按下式计算:

$$\sigma_{\text{c}} = \frac{M}{W} \quad (3-72)$$

式中:  $M$ ——母线通过  $i_{\text{sh}}^{(3)}$  时所受到的弯曲力矩。当档数为 1~2 时,  $M = F^{(3)}l/8$ ; 当档数大于 2 时,  $M = F^{(3)}l/10$ 。这里  $F^{(3)}$  按式(3-62)计算,  $l$  为母线的档距;

$W$ ——母线的截面系数。当母线水平放置时,  $W = b^2h/6$ , 此处  $b$  为母线的水平宽度,  $h$  为母线截面的垂直高度。

电缆的机械强度很好,无须校验其短路动稳定度。

##### 4) 短路点附近交流电动机的反馈电流影响

当短路点附近所接交流电动机总容量超过 100kW,或者其额定电流之和超过系统短路电流的 1%时,应计入电动机反馈电流的影响。由于短路时电动机端电压骤降,致使电动机



因其定子绕组电动势反高于外施电压,从而向短路点反馈电流,如图 3-16 所示。但由于交流电动机在外电路短路后很快受到制动,使得它产生的反馈电流衰减很快,因此只在考虑短路冲击电流的影响时才计入电动机的反馈电流,使短路计算点的短路冲击电流增大。

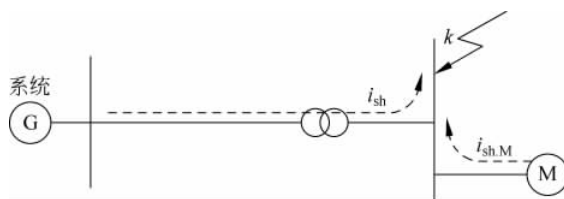


图 3-16 大容量电动机对短路点反馈电流

当交流电动机进线端发生三相短路时,它反馈的最大短路电流瞬时值(称为电动机反馈冲击电流)可按下列式计算:

$$i_{sh,M} = \sqrt{2} \frac{E_M''^*}{X_M''^*} K_{sh,M} I_{N,M} = CK_{sh,M} I_{N,M} \quad (3-73)$$

式中:  $E_M''^*$ ——为电动机次暂态电动势标幺值(参看表 3-1);

$X_M''^*$ ——为电动机次暂态电抗标幺值(参看表 3-1);

$C$ ——为电动机反馈冲击系数(参看表 3-1);

$K_{sh,M}$ ——为电动机短路电流冲击系数,对 3~10kV 电动机可取 1.4~1.7,对 380V 电动机可取 1;

$I_{N,M}$ ——为电动机额定电流(kA)。

表 3-1 交流电动机的  $E_M''^*$ 、 $X_M''^*$  和  $C$

电动机类型	$E_M''^*$	$X_M''^*$	$C$	电动机类型	$E_M''^*$	$X_M''^*$	$C$
感应电动机	0.9	0.2	6.5	同步补偿机	1.2	0.16	10.6
同步电动机	1.1	0.2	7.8	综合性负荷	0.8	0.35	3.2

## 2. 热稳定度校验

电器和导体的热稳定度校验,也依校验对象的不同而采用不同的校验条件。

### 1) 一般电器

一般电器满足热稳定度的校验条件为

$$I_t^2 t \geq I_{\infty}^{(3)2} t_{ima} \quad (3-74)$$

式中:  $I_t$ ——为电器的热稳定电流(kA);

$t$ ——为电器的热稳定试验时间(s),  $I_t$ 和  $t$ 可查有关手册或产品样本;

$I_{\infty}^{(3)}$ ——三相短路稳态电流有效值(kA);

$t_{ima}$ ——短路发热假想时间(s)。

### 2) 母线及绝缘导线和电缆等导体

母线及绝缘导线和电缆等导体满足热稳定度的校验条件为

$$\theta_{k,max} \geq \theta_k \quad (3-75)$$

式中:  $\theta_{k,max}$ ——为导体在短路时的最高允许温度(°C),如附录表 21 所示;

$\theta_k$ ——为导体温度(°C)。

如前所述,要确定  $\theta_k$  比较麻烦,因此也可根据短路热稳定度的要求来确定其最小允许截面  $A_{\min}$  ( $\text{mm}^2$ )。

由式(3-67)可得最小允许截面

$$A_{\min} = I_{\infty}^{(3)} \times 10^3 \times \sqrt{\frac{t_{\text{ima}}}{K_k - K_L}} = I_{\infty}^{(3)} \times 10^3 \times \frac{\sqrt{t_{\text{ima}}}}{C} \quad (3-76)$$

式中:  $A_{\min}$ ——最小允许的横截面积( $\text{mm}^2$ );

$I_{\infty}^{(3)}$ ——三相短路稳态电流有效值(kA);

$t_{\text{ima}}$ ——短路发热假想时间(s);

$K_k$ ——正常负荷时导体加热系数( $\text{A}^2 \cdot \text{s}/\text{mm}^4$ );

$K_L$ ——短路时导体加热系数( $\text{A}^2 \cdot \text{s}/\text{mm}^4$ );

$C$ ——导体的热稳定系数( $\text{A}\sqrt{\text{s}}/\text{mm}^2$ ),见附录表 21。

## 习题

- 3-1 什么叫短路? 短路产生的原因有哪些? 它对电力系统有哪些危害?
- 3-2 短路有哪些形式? 哪种短路形式发生的可能性最大? 哪种短路形式的危害最为严重?
- 3-3 无限大容量电力系统突然短路时,系统中的短路电流将如何变化?
- 3-4 短路冲击电流  $i_{\text{sh}}$ 、冲击电流有效值  $I_{\text{sh}}$ 、短路次暂态电流  $I''$  和短路稳态电流  $I_{\infty}$  各是什么含义?
- 3-5 什么叫短路计算的欧姆法和标幺值法? 各有什么主要特点?
- 3-6 什么叫短路计算电压? 它与线路额定电压有什么关系?
- 3-7 在无限大容量系统中,两相短路电流与三相短路电流有什么关系? 单相短路电流又如何计算?
- 3-8 什么叫短路电流的力效应? 为什么采用短路冲击电流来计算? 什么情况下应考虑短路点附近大容量交流电动机的反馈电流?
- 3-9 什么叫短路电流的热效应? 为什么采用短路稳态电流来计算? 什么叫短路发热假想时间? 如何计算?
- 3-10 对一般开关电器,短路动稳定度和热稳定度校验的条件各是什么?
- 3-11 有一地区变电站通过一条长 7km 的 10kV 架空线路供电给某工厂变电所,该变电所装有两台并列运行的 Yyn0 联结的 S9-1000 型变压器。已知地区变电站出口断路器为 SN10-10 II 型。试用欧姆法计算该工厂变电所 10kV 母线和 380V 母线的短路电流  $I_k^{(3)}$ 、 $I''^{(3)}$ 、 $I_{\infty}^{(3)}$ 、 $i_{\text{sh}}^{(3)}$ 、 $I_{\text{sh}}^{(3)}$  及短路容量  $S_k^{(3)}$ 。
- 3-12 试用标幺值法重做习题 3-11。
- 3-13 某变电所 380V 侧母线采用  $80 \times 10 \text{mm}^2$  铝母线,水平平放,两相邻母线轴线间距离为 200mm,档距为 0.9m,档数大于 2。该母线上接有一台 500kW 同步电动机,  $\cos\varphi = 1$  时,  $\eta = 94\%$ 。已知该母线三相短路时,由电力系统产生的  $I_k^{(3)} = 36.5 \text{kA}$ ,  $i_{\text{sh}}^{(3)} = 67.2 \text{kA}$ 。试校验此母线的短路动稳定度。
- 3-14 设习题 3-13 所述 380V 母线的短路保护时间为 0.5s,低压断路器的断路时间为 0.05s。试校验该母线的短路热稳定度。