

第3章 短路电流及其计算

学习目标与重点

- ✧ 了解短路与短路电流的概念。
- ✧ 掌握采用欧姆法计算短路电流。
- ✧ 掌握采用标幺制法计算短路电流。
- ✧ 了解短路电流的电动效应和稳定度校验。

关键术语

短路电流；欧姆法；标幺制法；电动效应；热效应

3.1 短路的原因、后果和形式

3.1.1 短路的原因

工厂供电系统要求正常地不间断地对用电负荷供电，以保证工厂生产和生活的正常进行。然而由于各种原因，也难免出现故障，使系统的正常运行遭到破坏。系统中最常见的故障就是短路（Short Circuit）。短路就是指不同电位的导电部分（包括导电部分对地）之间的低阻性短接。造成短路的原因主要如下。

（1）电气设备绝缘损坏。这是设备长期运行、绝缘自然老化造成的，也可能是设备本身质量低劣、绝缘强度不够而被正常电压击穿造成的，或者是设备质量合格、绝缘合乎要求而被过电压（包括雷电过电压）击穿，以及设备绝缘受到外力损伤而造成的短路。

（2）有关人员误操作。大多是操作人员违反安全操作规程而发生的。例如，带负荷拉闸（即带负荷断开隔离开关），或者误将低电压设备接入较高电压的电路中而造成击穿短路。

（3）鸟兽为害事故。鸟兽（包括蛇、鼠等）跨越在裸露的带电导体之间或带电导体与接地物体之间，以及咬坏设备和导线电缆的绝缘，会导致短路。

3.1.2 短路的后果

短路后，系统中出现的短路电流（Short-Circuit Current）比正常负荷电流大得多。在大电力系统中，短路电流可达几万安甚至几十万安。如此大的短路电流可对供电系统造成极大的危害。

（1）短路时要产生很大的电动力和很高的温度，使故障元件和短路电路中的其他元件受到损害和破坏，甚至引发火灾事故。

（2）短路时电路的电压骤然下降，严重影响电气设备的正常运行。

（3）短路时保护装置动作，将故障电路切除，从而造成停电，而且短路点越靠近电源，停电范围越大，造成的损失也越大。

（4）严重的短路会影响电力系统运行的稳定性，可使并列运行的发电机组失去同步，造成系统解列。

(5) 不对称短路包括单相短路和两相短路，其短路电流将产生较强的不平衡交流电磁场，对附近的通信线路、电子设备等产生电磁干扰，影响其正常运行，甚至使之发生误动作。

由此可见，短路的后果是十分严重的，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，使设备具有足够的动稳定性和热稳定性，以保证它在最大短路电流时不致损坏。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 短路的形式

在三相系统中，短路的形式有三相短路、两相短路、单相短路和两相接地短路等，如图 3-1 所示。其中两相接地短路，实质与两相短路相同。

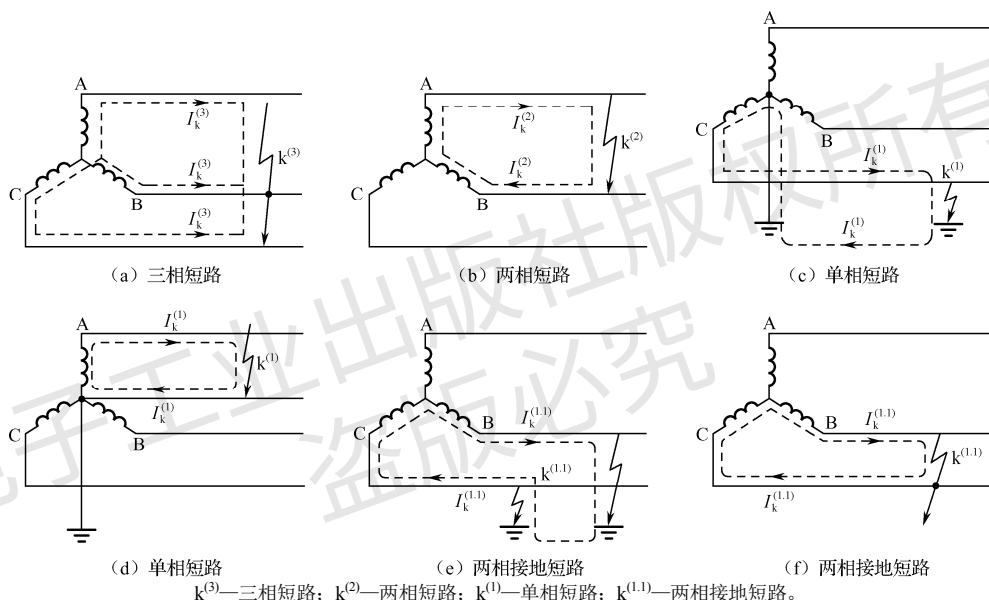


图 3-1 短路的形式（虚线表示短路电流路径）

按短路电路的对称性来分，三相短路属于对称短路，其他形式短路均为不对称短路。电力系统中，发生单相短路的可能性最大，而发生三相短路的可能性最小。但一般情况下，特别是远离电源（发电机）的工厂供电系统中，三相短路电流最大，它造成的危害也最为严重。为了使电力系统中的电气设备在最严重的短路状态下也能可靠地工作，因此在作为选择和校验电气设备用的短路计算中，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不对称的短路电流分解为对称的正序、负序和零序分量，然后按对称量来分析和计算。所以，对称的三相短路分析计算也是不对称短路分析计算的基础。

3.2 无限大容量电力系统发生三相短路时的物理过程和物理量

3.2.1 无限大容量电力系统及其发生三相短路时的物理过程

无限大容量电力系统，是指供电容量相对于用户供电系统容量大得多的电力系统。其特

点是,当用户供电系统的负荷变动甚至发生短路时,电力系统变电所馈电母线上的电压能基本维持不变。如果电力系统的电源总阻抗不超过短路电路总阻抗的 10%, 或者当电力系统容量超过用户供电系统容量的 50 倍时, 可将电力系统视为无限大容量系统。

对一般工厂供电系统来说, 由于工厂供电系统的容量远比电力系统总容量小, 而阻抗又较电力系统大得多, 因此工厂供电系统内发生短路时, 电力系统变电所馈电母线上的电压几乎维持不变, 也就是说可将电力系统视为无限大容量的电源。

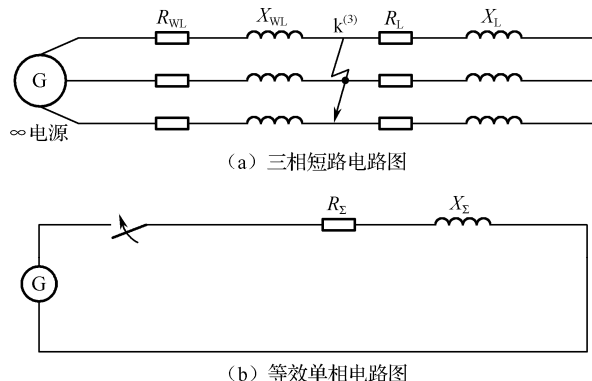


图 3-2 无限大容量电力系统发生三相短路

图 3-2 是一个无限大容量电力系统发生三相短路时的电路图和等效单相电路图。图 3-2 (a) 是一个电源为无限大容量电力系统发生三相短路的电路图。图中 R_{WL} 、 X_{WL} 为线路 (WL) 的电阻和电抗, R_L 、 X_L 为负荷 (L) 的电阻和电抗。由于三相短路对称, 因此这一三相短路电路可用图 3-2 (b) 所示的等效单相电路来分析和研究。

供电系统正常运行时, 电路中的电流取决于电源电压和电路中所有元件 (包括负荷在内) 的所有阻抗。当发生三相短路时, 由于负荷阻抗和部分线路阻抗被短路, 因此电路电流根据欧姆定律要突然增大。但是由于电路中存在着电感, 根据楞次定律, 电流不能突变, 因而引起一个过渡过程, 即短路暂态过程。最后短路电流达到一个新的稳定状态。

图 3-3 表示无限大容量电力系统发生三相短路前后的电压、电流变动曲线。其中短路电流周期分量 (Periodic Component of Short-Circuit Current) i_p 是指由于短路后电路阻抗突然减小很多, 而按欧姆定律应突然增大很多的电流。短路电流非周期分量 (Non-Periodic Component of Short-Circuit Current) i_{np} 是因短路电路存在电感, 而按楞次定律电路中感生的用以维持短路初瞬间 ($t=0$ 时) 电路电流不致突变的一个反向抵消 $i_{p(0)}$ 且按指数函数规律衰减的电流。短路电流周期分量 i_p 与短路电流非周期分量 i_{np} 的叠加, 就是短路全电流 (Short-Circuit Whole-Current)。短路电流非周期分量 i_{np} 衰减完毕后的短路电流, 称为短路稳态电流, 其有效值用 i_{∞} 表示。

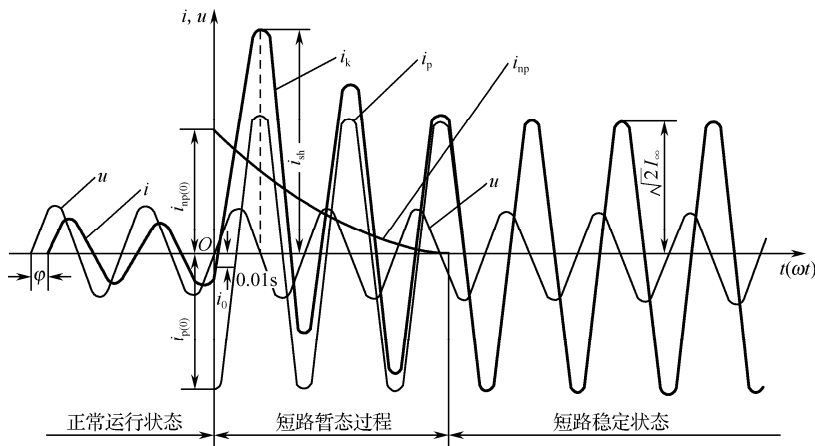


图 3-3 无限大容量电力系统发生三相短路前后的电压、电流变动曲线

3.2.2 短路有关的物理量

1. 短路电流周期分量

假设在电压 $u=0$ 时发生三相短路, 如图 3-3 所示。短路电流周期分量为

$$i_p = I_{km} \sin(\omega t - \phi_k) \quad (3-1)$$

式中, $I_{km} = U/(\sqrt{3}|Z_\Sigma|)$, 为短路电流周期分量幅值, 其中 $|Z_\Sigma| = \sqrt{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2}$ 为短路电路总阻抗[模]; $\phi_k = \arctan(X_\Sigma/R_\Sigma)$ 为短路电路的阻抗角。

由于短路电路的 $X_\Sigma \gg R_\Sigma$, 因此 $\phi_k \approx 90^\circ$ 。故短路初瞬间 ($t=0$ 时) 的短路电流周期分量为

$$i_{p(0)} = -I_{km} = -\sqrt{2}I'' \quad (3-2)$$

式中, I'' 为短路次暂态电流有效值, 即短路后第一个周期的短路电流周期分量 i_p 的有效值。

2. 短路电流非周期分量

由于短路电路存在电感, 因此在突然短路时, 电路的电感要感生一个电动势, 以维持短路初瞬间 ($t=0$ 时) 电路内的电流和磁链不致突变。电感的感应电动势所产生的与初瞬间短路电流周期分量反向的这一电流, 即短路电流非周期分量。

短路电流非周期分量的初始绝对值为

$$i_{np(0)} = |i_0 - I_{km}| \approx I_{km} = \sqrt{2}I'' \quad (3-3)$$

由于短路电路还存在电阻, 因此短路电流非周期分量逐渐衰减。电路内的电阻越大或电感越小, 衰减越快。

短路电流非周期分量是按指数函数衰减的, 其表达式为

$$i_{np} = i_{np(0)} e^{-\frac{t}{\tau}} \approx \sqrt{2}I'' e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3-4)$$

式中, $\tau = L_\Sigma/R_\Sigma = X_\Sigma/314R_\Sigma$, 称为短路电流非周期分量衰减时间常数, 或称为短路电路时间常数, 它就是使 i_{np} 由最大值按指数函数衰减到最大值的 $1/e=0.3679$ 时所需的时间。

3. 短路全电流

短路电流周期分量 i_p 与短路电流非周期分量 i_{np} 之和, 即短路全电流 i_k 。而某一瞬间 t 的短路全电流有效值 $I_{k(t)}$, 则是以时间 t 为中点的一个周期内的 i_p 有效值 $I_{p(t)}$ 与 $i_{np(t)}$ 在某一瞬间 t 的均方根值, 即

$$I_{k(t)} = \sqrt{I_{p(t)}^2 + i_{np(t)}^2} \quad (3-5)$$

4. 短路冲击电流

短路冲击电流 (Short-Circuit Shock Current) 为短路全电流中的最大瞬时值。由图 3-3 所示的短路全电流 i_k 的曲线可以看出, 短路后经半个周期 (即 0.01s), i_k 达到最大值, 此时的短路全电流即短路冲击电流 i_{sh} 。

短路冲击电流按下式计算:

$$i_{sh} = i_{p(0.01)} + i_{np(0.01)} \approx \sqrt{2}I''(1 + e^{-\frac{0.01}{\tau}}) \quad (3-6)$$

或

$$i_{sh} \approx K_{sh} \sqrt{2} I'' \quad (3-7)$$

式中, K_{sh} 为短路电流冲击系数。

由式 (3-6) 和式 (3-7) 可知, 短路电流冲击系数为

$$K_{sh} = 1 + e^{\frac{0.01}{\tau}} = 1 + e^{\frac{0.01 R_{\Sigma}}{L_{\Sigma}}} \quad (3-8)$$

由式 (3-8) 可知, 当 $R_{\Sigma} \rightarrow 0$ 时, $K_{sh} \rightarrow 2$; 当 $L_{\Sigma} \rightarrow 0$ 时, $K_{sh} \rightarrow 1$; 因此 $K_{sh} = 1 \sim 2$ 。

短路全电流 i_k 的最大有效值是短路后第一个周期的短路电流有效值, 用 I_{sh} 表示, 也可称为短路冲击电流有效值, 用下式计算:

$$I_{sh} = \sqrt{I_{p(0.01)}^2 + i_{np(0.01)}^2} \approx \sqrt{I''^2 + (\sqrt{2} I'' e^{\frac{0.01}{\tau}})^2}$$

或

$$I_{sh} \approx \sqrt{1 + 2(K_{sh} - 1)^2} I'' \quad (3-9)$$

在高压电路发生三相短路时, 一般可取 $K_{sh} = 1.8$, 因此

$$i_{sh} = 2.55 I'' \quad (3-10)$$

$$I_{sh} = 1.51 I'' \quad (3-11)$$

在 1000kVA 及以下的电力变压器和低压电路中发生三相短路时, 一般可取 $K_{sh} = 1.3$, 因此

$$i_{sh} = 1.84 I'' \quad (3-12)$$

$$I_{sh} = 1.09 I'' \quad (3-13)$$

5. 短路稳态电流

短路稳态电流是短路电流非周期分量衰减完毕以后的短路全电流, 其有效值用 I_{∞} 表示。

在无限大容量电力系统中, 由于系统馈电母线电压维持不变, 因此其短路电流周期分量有效值 (习惯上用 I_k 表示) 在短路的全过程中维持不变, 即 $I'' = I_{\infty} = I_k$ 。

为了表明短路的类别, 凡是三相短路电流, 可在相应的电流符号右上角标 (3), 例如, 三相短路稳态电流写作 $I_{\infty}^{(3)}$ 。同样地, 两相或单相短路电流, 则在相应的电流符号右上角分别标 (2) 或 (1), 而两相接地短路, 则标注 (1.1)。在不引起混淆时, 三相短路电流各量可不标注 (3)。

3.3 无限大容量电力系统中短路电流的计算

3.3.1 概述

进行短路电流计算, 首先要绘出计算电路图, 如图 3-4 所示。在计算电路图上, 应将短路计算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后确定短路计算点。短路计算点要选择能够使需要进行短路校验的电气元件有最大短路电流通过。其次, 按所选择的短路计算点绘出等效电路图, 如图 3-5 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主要元件表示出来, 并标明各元件的序号和阻抗值, 一般是分子标序号, 分母标阻抗值 (阻抗用复数形式 $R + jX$ 表示)。然后将等效电路化简。对于工厂供电系统来说, 由于将电力系统当作无限大容量的电源, 而且短路电路比较简单, 因此通常只需采用阻抗串并联的方法即可将电路化简, 求出其等效的总阻抗。最后计算短路电流和短路容量。

一般短路计算中相关物理量在工程设计中采用下列单位：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”(MVA)，设备容量单位为“千瓦”(kW)或“千伏安”(kVA)，阻抗单位为“欧姆”(Ω)等。但是请注意：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)的基本单位“安”(A)、“伏”(V)、“瓦”(W)、“伏安”(VA)、“欧姆”(Ω)等。因此后面导出的各个公式一般不标注物理量单位。若采用工程设计中常用的单位计算，则需注意所用公式中各物理量单位的换算系数。

常用的短路电流的计算方法，有欧姆法和标么值法。

3.3.2 采用欧姆法进行三相短路计算

欧姆法又称有单位制法，因其短路计算中的阻抗都采用有单位“欧姆”而得名。

在无限大容量电力系统中发生三相短路时，其三相短路电流周期分量有效值按下式计算：

$$I_k^{(3)} = \frac{U_c}{\sqrt{3}|Z_\Sigma|} = \frac{U_c}{\sqrt{3}\sqrt{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2}} \quad (3-14)$$

式中， $|Z_\Sigma|$ 、 R_Σ 和 X_Σ 分别为短路电路的总阻抗[模]、总电阻和总电抗值； U_c 为短路点的短路计算电压（或称平均额定电压）。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，即短路计算电压取比线路额定电压 U_N 高5%的值，按我国电压标准， U_c 有0.4kV、0.69kV、3.15kV、6.3kV、10.5kV、37kV、69kV、115kV、230kV等。

在高压电路的短路计算中，通常总电抗远比总电阻大，所以一般只计电抗，不计电阻。

在计算低压侧短路时，仅当 $R_\Sigma > X_\Sigma/3$ 时才需计入电阻。

如果不计电阻，则三相短路电流周期分量有效值为

$$I_k^{(3)} = \frac{U_c}{\sqrt{3}X_\Sigma} \quad (3-15)$$

三相短路容量为

$$S_k^{(3)} = \sqrt{3}U_c I_k^{(3)} \quad (3-16)$$

下面介绍供电系统中各主要元件（包括电力系统、电力变压器和电力线路）的阻抗计算。至于供电系统中的母线、线圈型电流互感器一次绕组、低压断路器过电流脱扣线圈等的阻抗及开关触头的接触电阻，相对来说很小，在短路计算中可略去不计。在略去上述阻抗后，计算所得的短路电流略比实际值偏大，但用略偏大的短路电流来校验电气设备，却可以使其运行的安全性更有保证。

1. 电力系统的阻抗计算

电力系统的电阻相对于电抗来说很小，一般不予考虑。电力系统的电抗，可由电力系统变电站馈电线出口断路器的断流容量 S_{oc} 来估算， S_{oc} 可看作电力系统的极限短路容量 S_k 。因此电力系统的电抗为

$$X_s = \frac{U_c^2}{S_{oc}} \quad (3-17)$$

式中， U_c 为电力系统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，此式中的 U_c 可直接采用短路点的短路计算电压； S_{oc} 为系统出口断路器的断流容量，可查有关手册或产品样本，若只有断路器的开断电流 I_{oc} 数据，则其断流容量 $S_{oc} = \sqrt{3}I_{oc}U_N$ ，

这里 U_N 为断路器的额定电压。

2. 电力变压器的阻抗计算

(1) 电力变压器的电阻 R_T 可由电力变压器的短路损耗 ΔP_k 近似计算。

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

$$\text{故} \quad R_T \approx \Delta P_k \left(\frac{U_c}{S_N} \right)^2 \quad (3-18)$$

式中, U_c 为短路点的短路计算电压; S_N 为电力变压器的额定容量; ΔP_k 为电力变压器的短路损耗 (又称负载损耗), 可查有关手册或产品样本。

(2) 电力变压器的电抗 X_T 可由电力变压器的短路电压 $U_k\%$ 近似地计算。

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

$$\text{故} \quad X_T = \frac{U_k\%}{100} \cdot \frac{U_c^2}{S_N} \quad (3-19)$$

式中, $U_k\%$ 为电力变压器的短路电压 (又称阻抗电压) 百分值, 可查有关手册或产品样本。

3. 电力线路的阻抗计算

(1) 线路的电阻 R_{WL} 可由导线电缆的单位长度电阻乘以线路长度求得, 即

$$R_{WL} = R_0 l \quad (3-20)$$

式中, R_0 为导线电缆单位长度的电阻, 可查有关手册或产品样本; l 为线路长度。

(2) 线路的电抗 X_{WL} 可由导线电缆的单位长度电抗乘以线路长度求得, 即

$$X_{WL} = X_0 l \quad (3-21)$$

式中, X_0 为导线电缆单位长度的电抗, 亦可查有关手册或产品样本; l 为线路长度。

这里要说明: 三相线路导线电缆单位长度的电抗, 要根据导线截面和线间几何均距查得。三相线路的排列布置及线间距离如图 3-4 所示。设三相线路线间距离分别为 a_1 、 a_2 、 a_3 , 如图 3-4 (a) 所示, 则线间几何均距 $a_{av} = \sqrt[3]{a_1 a_2 a_3}$ 。当三相线路为等边三角形排列时, 每边线间距离为 a , 如图 3-4 (b), 则 $a_{av} = \sqrt[3]{2}a = 1.26a$ 。当三相线路为等距水平排列时, 相邻线间距离为 a , 如图 3-4 (c) 所示, 则 $a_{av} = a$ 。

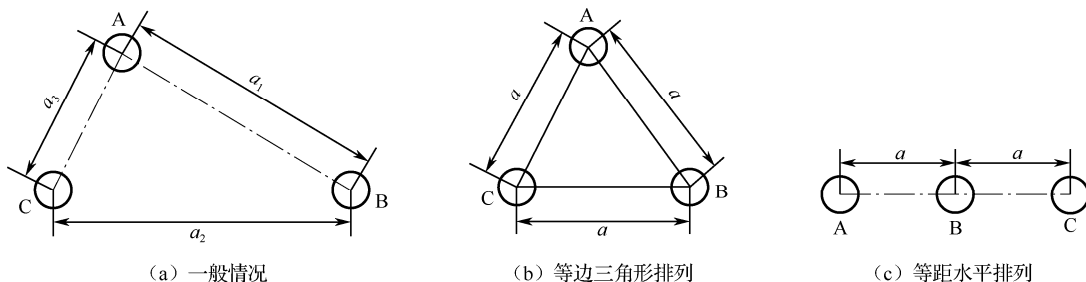


图 3-4 三相线路的排列布置及线间距离

如果线路的结构数据不详, X_0 可按表 3-1 取其电抗平均值。

表 3-1 电力线路每相的单位长度电抗平均值

单位: Ω/km

线路结构	线路电压		
	35kV 及以上	6~10kV	220/380V
架空线路	0.40	0.35	0.32
电缆线路	0.12	0.08	0.066

求出短路电路中各元件的阻抗后,化简短路电路,求出其总阻抗。按式(3-14)或式(3-15)计算短路电流周期分量有效值 $I_k^{(3)}$ 。其他短路电流的计算公式见 3.2 节。

必须注意:在计算短路电路阻抗时,若电路内含有电力变压器,则电路内各元件的阻抗都应统一换算到短路点的短路计算电压,阻抗等效换算的条件是元件的功率损耗不变。

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,因此阻抗等效换算的公式为

$$R' = R \left(\frac{U'_c}{U_c} \right)^2 \quad (3-22)$$

$$X' = X \left(\frac{U'_c}{U_c} \right)^2 \quad (3-23)$$

式中, R 、 X 和 U_c 为换算前元件的电阻、电抗和短路点的短路计算电压; R' 、 X' 和 U'_c 为换算后元件的电阻、电抗和短路点的短路计算电压。

就短路计算中需要计算的几个主要元件的阻抗来说,实际上只有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去。而电力系统和电力变压器的阻抗,由于其计算公式中均含有 U_c^2 , 因此计算其阻抗时,可将短路点的计算电压直接代入 U_c , 相当于阻抗已经换算到短路计算点一侧了。

例 3-1 某供电系统如图 3-5 所示。已知电力系统出口断路器为 SN10-10 II 型。试求工厂变电所高压 10kV 母线上 k-1 点和低压 380V 母线上 k-2 点的三相短路电流和三相短路容量。

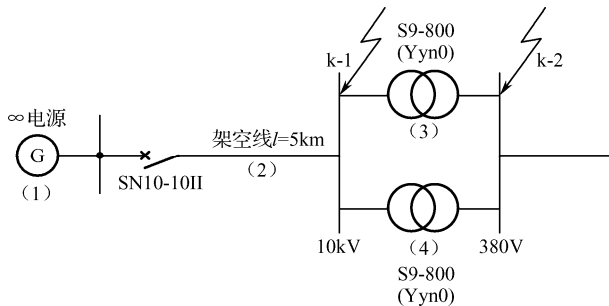


图 3-5 例 3-1 的短路计算电路图

解: 1. 求 k-1 点的三相短路电流和三相短路容量 ($U_{cl} = 10.5\text{kV}$)

利用欧姆法计算元件电抗并画出短路等效电路图,如图 3-6 所示。

1) 计算短路电路中各元件的电抗及总电抗

(1) 电力系统的电抗:查附录表 12,得 SN10-10 II 型断路器的断流容量 $S_{oc} = 500\text{MVA}$, 因此

$$X_1 = \frac{U_{cl}^2}{S_{oc}} = \frac{(10.5\text{kV})^2}{500\text{MVA}} = 0.22\Omega$$

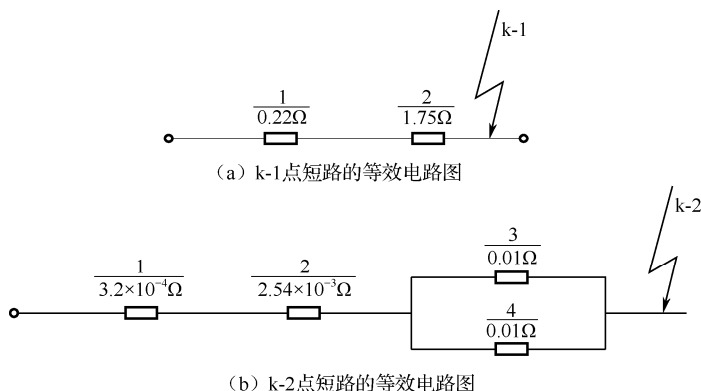


图 3-6 例 3-1 的短路等效电路图 (欧姆法)

(2) 架空线路的电抗: 由表 3-1 查得 $X_0=0.35\Omega/\text{km}$, 因此

$$X_2 = X_0 l = 0.35(\Omega/\text{km}) \times 5\text{km} = 1.75\Omega$$

(3) k-1 点短路的等效电路图如图 3-6 (a) 所示。

在图上标出各元件的序号 (分子) 和电抗值 (分母), 并计算其总电抗为

$$X_{\Sigma(k-1)} = X_1 + X_2 = 0.22\Omega + 1.75\Omega = 1.97\Omega$$

2) 计算三相短路电流和三相短路容量

(1) 三相短路电流周期分量有效值为

$$I_{k-1}^{(3)} = \frac{U_{cl}}{\sqrt{3}X_{\Sigma(k-1)}} = \frac{10.5\text{kV}}{\sqrt{3} \times 1.97\Omega} = 3.08\text{kA}$$

(2) 三相短路次暂态电流和稳态电流为

$$I''^{(3)} = I_{\infty}^{(3)} = I_{k-1}^{(3)} = 3.08\text{kA}$$

(3) 三相短路冲击电流及第一个周期短路全电流有效值为

$$i_{sh}^{(3)} = 2.55I''^{(3)} = 2.55 \times 3.08\text{kA} = 7.85\text{kA}$$

$$I_{sh}^{(3)} = 1.51I''^{(3)} = 1.51 \times 3.08\text{kA} = 4.65\text{kA}$$

(4) 三相短路容量为

$$S_{k-1}^{(3)} = \sqrt{3}U_{cl}I_{k-1}^{(3)} = \sqrt{3} \times 10.5\text{kV} \times 3.08\text{kA} = 56.0\text{MVA}$$

2. 求 k-2 点的三相短路电流和三相短路容量 ($U_{c2}=0.4\text{kV}$)

1) 计算短路电路中各元件的电抗及总电抗

(1) 电力系统的电抗为

$$X'_1 = \frac{U_{c2}^2}{S_{oc}} = \frac{(0.4\text{kV})^2}{500\text{MVA}} = 3.2 \times 10^{-4}\Omega$$

(2) 架空线路的电抗为

$$X'_2 = X_0 l \left(\frac{U_{c2}}{U_{cl}} \right)^2 = 0.35(\Omega/\text{km}) \times 5\text{km} \times \left(\frac{0.4\text{kV}}{10.5\text{kV}} \right)^2 = 2.54 \times 10^{-3}\Omega$$

(3) 电力变压器的电抗: 查附录表 9 得 $U_k\%=5$, 因此

$$X_3 = X_4 \approx \frac{U_k\%}{100} \cdot \frac{U_{c2}^2}{S_N} = \frac{5}{100} \times \frac{(0.4\text{kV})^2}{800\text{kVA}} = 0.01\Omega$$

(4) k-2 点短路的等效电路图如图 3-6 (b) 所示, 并计算其总电抗为

$$\begin{aligned} X_{\Sigma(k-2)} &= X_1 + X_2 + X_3 // X_4 = X_1 + X_2 + \frac{X_3 X_4}{X_3 + X_4} \\ &= 3.2 \times 10^{-4} \Omega + 2.54 \times 10^{-3} \Omega + \frac{0.01 \Omega}{2} = 7.86 \times 10^{-3} \Omega \end{aligned}$$

2) 计算三相短路电流和三相短路容量

(1) 三相短路电流周期分量有效值为

$$I_{k-2}^{(3)} = \frac{U_{c2}}{\sqrt{3} X_{\Sigma(k-2)}} = \frac{0.4 \text{ kV}}{\sqrt{3} \times 6.86 \times 10^{-3} \Omega} = 33.7 \text{ kA}$$

(2) 三相短路次暂态电流和稳态电流为

$$I''^{(3)} = I_{\infty}^{(3)} = I_{k-2}^{(3)} = 33.7 \text{ kA}$$

(3) 三相短路冲击电流及第一个周期短路全电流有效值为

$$i_{sh}^{(3)} = 1.84 I''^{(3)} = 1.84 \times 33.7 \text{ kA} = 62.0 \text{ kA}$$

$$I_{sh}^{(3)} = 1.09 I''^{(3)} = 1.09 \times 33.7 \text{ kA} = 36.7 \text{ kA}$$

(4) 三相短路容量为

$$S_{k-2}^{(3)} = \sqrt{3} U_{c2} I_{k-2}^{(3)} = \sqrt{3} \times 0.4 \text{ kV} \times 33.7 \text{ kA} = 23.3 \text{ MVA}$$

在工程设计说明书中, 往往列出短路计算表, 如表 3-2 所示。

表 3-2 例 3-1 的短路计算表

短路计算点	三相短路电流/kA					三相短路容量/MVA
	$I_k^{(3)}$	$I''^{(3)}$	$I_{\infty}^{(3)}$	$i_{sh}^{(3)}$	$I_{sh}^{(3)}$	$S_k^{(3)}$
k-1	3.08	3.08	3.08	7.85	4.65	56.0
k-2	33.7	33.7	33.7	62.0	36.7	23.3

3.3.3 采用标幺制法进行三相短路计算

标幺制法又称相对单位制法, 因其短路计算中的有关物理量采用标幺值 (即相对单位) 而得名。任一物理量的标幺值 A_d^* , 为该物理量的实际量 A 与所选定的基准值 (Datum Value) A_d 的比值, 即

$$A_d^* = \frac{A}{A_d} \quad (3-24)$$

采用标幺制法进行三相短路计算时, 一般先选定基准容量 S_d 和基准电压 U_d 。工程设计中基准容量通常取 $S_d=100\text{MVA}$ 。基准电压通常取元件所在处的短路计算电压, 即取 $U_d=U_c$ 。选定了基准容量和基准电压以后, 基准电流 I_d 按下式计算:

$$I_d = \frac{S_d}{\sqrt{3} U_d} = \frac{S_d}{\sqrt{3} U_c} \quad (3-25)$$

基准电抗 X_d 则按下式计算:

$$X_d = \frac{U_d}{\sqrt{3} I_d} = \frac{U_c^2}{S_d} \quad (3-26)$$

下面分别讲述供电系统中各主要元件电抗标幺值的计算 (取 $S_d=100\text{MVA}$, $U_d=U_c$)。

(1) 电力系统的电抗标么值为

$$X_S^* = \frac{X_S}{X_d} = \frac{U_c^2/S_{oc}}{U_c^2/S_d} = \frac{S_d}{S_{oc}} \quad (3-27)$$

(2) 电力变压器的电抗标么值为

$$X_T^* = \frac{X_T}{X_d} = \frac{U_k\%}{100} \cdot \frac{U_c^2}{S_N} \cdot \frac{U_c^2}{U_c^2} = \frac{U_k\%S_d}{100S_N} \quad (3-28)$$

(3) 电力线路的电抗标么值为

$$X_{WL}^* = \frac{X_{WL}}{X_d} = \frac{X_0 l}{U_c^2/S_d} = X_0 l \frac{S_d}{U_c^2} \quad (3-29)$$

短路计算中各主要元件的电抗标么值求出以后,即可利用其等效电路图(参看图 3-7)进行电路的化简,求出其总电抗标么值 X_Σ^* 。由于各元件均采用标么值,与短路计算点的电压无关,因此电抗标么值无须进行电压换算,这也是标么制法较欧姆法的优越之处。

无限大容量系统三相短路电流周期分量有效值的标么值按下式计算(注:下式未计电阻,因标么制法一般用于高压电路短路计算,通常只计电抗):

$$I_k^{(3)*} = \frac{I_k^{(3)}}{I_d} = \frac{U_c/\sqrt{3}X_\Sigma}{S_d/\sqrt{3}U_c} = \frac{U_c^2}{S_d X_\Sigma} = \frac{1}{X_\Sigma^*} \quad (3-30)$$

由此可求得三相短路电流周期分量有效值为

$$I_k^{(3)} = \sqrt{3} I_k^{(3)*} U_c = \frac{\sqrt{3} I_d U_c}{X_\Sigma^*} = \frac{S_d}{X_\Sigma^*} \quad (3-31)$$

求得 $I_k^{(3)}$ 以后,即可利用欧姆法有关的公式求出 $I''^{(3)}$ 、 $I_\infty^{(3)}$ 、 $i_{sh}^{(3)}$ 、 $I_{sh}^{(3)}$ 等。

三相短路容量的计算公式为

$$S_k^{(3)} = \sqrt{3} I_k^{(3)} U_c = \frac{\sqrt{3} I_d U_c}{X_\Sigma^*} = \frac{S_d}{X_\Sigma^*} \quad (3-32)$$

例 3-2 试采用标么制法计算例 3-1 所示供电系统中 k-1 点和 k-2 点的三相短路电流和三相短路容量。

解: 1. 确定基准值

取 $S_d = 100\text{MVA}$, $U_{c1} = 10.5\text{kV}$, $U_{c2} = 0.4\text{kV}$, 则

$$I_{d1} = \frac{S_d}{\sqrt{3}U_{c1}} = \frac{100\text{MVA}}{\sqrt{3} \times 10.5\text{kV}} = 5.50\text{kA}$$

$$I_{d2} = \frac{S_d}{\sqrt{3}U_{c2}} = \frac{100\text{MVA}}{\sqrt{3} \times 0.4\text{kV}} = 144\text{kA}$$

2. 计算短路电路中各主要元件的电抗标么值

1) 电力系统的电抗标么值

查得 $S_{oc} = 500\text{MVA}$, 因此

$$X_1^* = \frac{S_d}{S_{oc}} = \frac{100\text{MVA}}{500\text{MVA}} = 0.2$$

2) 架空线路的电抗标么值

由表 3-1 查得 $X_0 = 0.35\Omega/\text{km}$, 因此

$$X_2^* = X_0 l \frac{S_d}{U_{cl}^2} = 0.35(\Omega/\text{km}) \times 5\text{km} \times \frac{100\text{MVA}}{(10.5\text{kV})^2} = 1.59$$

3) 电力变压器的电抗标么值

查得 $U_k\% = 5$ ，因此

$$X_3^* = X_4^* = \frac{5 \times 100\text{MVA}}{100 \times 1000\text{kVA}} = \frac{5 \times 100 \times 10^3\text{kVA}}{100 \times 1000\text{kVA}} = 5.0$$

短路等效电路图如图 3-7 所示，图上标出各元件的序号和标么值，并标明短路计算点。

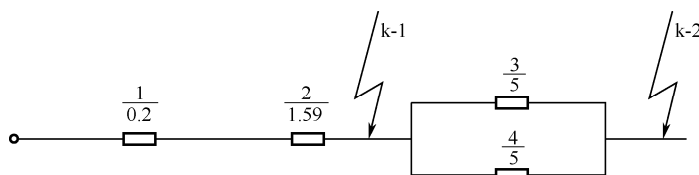


图 3-7 例 3-2 的短路等效电路图（标么制法）

3. 计算 k-1 点的短路电路总电抗标么值及三相短路电流和三相短路容量

1) 总电抗标么值

$$X_{\Sigma(k-1)}^* = X_1^* + X_2^* = 0.2 + 1.59 = 1.79$$

2) 三相短路电流周期分量有效值

$$I_{k-1}^{(3)} = \frac{I_{d1}}{X_{\Sigma(k-1)}^*} = \frac{5.5\text{kA}}{1.79} = 3.07\text{kA}$$

3) 其他三相短路电流

$$I''^{(3)} = I_{\infty}^{(3)} = I_{k-1}^{(3)} = 3.07\text{kA}$$

$$i_{sh}^{(3)} = 2.55 I''^{(3)} = 2.55 \times 3.07\text{kA} = 7.83\text{kA}$$

$$I_{sh}^{(3)} = 1.51 I''^{(3)} = 1.51 \times 3.07\text{kA} = 4.64\text{kA}$$

4) 三相短路容量

$$S_{k-1}^{(3)} = \frac{S_d}{X_{\Sigma(k-1)}^*} = \frac{100\text{MVA}}{1.79} = 55.9\text{MVA}$$

4. 计算 k-2 点的短路电路总电抗标么值及三相短路电流和三相短路容量

1) 总电抗标么值

$$X_{\Sigma(k-2)}^* = X_1^* + X_2^* + X_3^* // X_4^* = 0.2 + 1.59 + \frac{5.0}{2} = 4.29$$

2) 三相短路电流周期分量有效值

$$I_{k-2}^{(3)} = \frac{I_{d2}}{X_{\Sigma(k-2)}^*} = \frac{144\text{kA}}{4.29} = 33.6\text{kA}$$

3) 其他三相短路电流

$$I''^{(3)} = I_{\infty}^{(3)} = I_{k-2}^{(3)} = 33.6\text{kA}$$

$$i_{sh}^{(3)} = 1.84 \times 33.6\text{kA} = 61.8\text{kA}$$

$$I_{sh}^{(3)} = 1.09 \times 33.6\text{kA} = 36.6\text{kA}$$

4) 三相短路容量

$$S_{k-2}^{(3)} = \frac{S_d}{X_{\Sigma(k-2)}^*} = \frac{100\text{MVA}}{4.29} = 23.3\text{MVA}$$

由此可见, 采用标么制法的计算结果与例 3-1 采用欧姆法的计算结果基本相同。

3.4 短路电流的效应和稳定度校验

3.4.1 概述

通过上述短路计算得知, 供电系统中发生短路时, 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, 即电动效应; 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, 因此这里要研究短路电流的效应及稳定度校验的问题。

3.4.2 短路电流的电动效应和动稳定度

供电系统短路时, 短路电流 (特别是短路冲击电流) 将使相邻导体之间产生很大的电动力, 有可能使电器和载流部分遭受严重破坏。为此, 要使电路元件能承受短路时最大电动力的作用, 电路元件必须具有足够的动稳定度。

1. 短路时的最大电动力

由“电工原理”课程可知, 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, 两导体间的电磁互作用力, 即电动力 (单位为 N) 的表达式为

$$F = \mu_0 i_1 i_2 \frac{l}{2\pi a} \times 10^{-7} \quad (3-33)$$

式中, a 为两导体轴线间距离; l 为导体的两相邻支持点间距离, 即档距 (又称跨距); μ_0 为真空和空气的磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ 。

式 (3-33) 适用于实心或空心的圆截面导体, 也适用于导体间的净空距离大于导体截面周长的矩形截面导体。因此式 (3-33) 对于每相只有一条矩形截面导体的线路都是适用的。

若三相线路中发生两相短路, 则两相短路冲击电流 $i_{sh}^{(2)}$ 通过导体时产生的电动力最大, 其值 (单位为 N) 为

$$F^{(2)} = 2i_{sh}^{(2)2} \cdot \frac{l}{a} \times 10^{-7} \quad (3-34)$$

若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 (单位为 N) 为

$$F^{(3)} = \sqrt{3}i_{sh}^{(3)2} \cdot \frac{l}{a} \times 10^{-7} \quad (3-35)$$

由于三相短路冲击电流 $i_{sh}^{(3)}$ 与两相短路冲击电流 $i_{sh}^{(2)}$ 有下列关系: $i_{sh}^{(3)}/i_{sh}^{(2)} = 2\sqrt{3}$, 因此三相短路与两相短路产生的最大电动力之比为

$$F^{(3)}/F^{(2)} = 2/\sqrt{3} = 1.15 \quad (3-36)$$

由此可见, 在无限大容量电力系统中发生三相短路时, 中间相导体所受的电动力比两相

短路时导体所受的电动力大,因此校验电器和载流部分的短路动稳定度,一般应采用三相短路冲击电流 $i_{sh}^{(3)}$ 或短路后第一个周期的三相短路全电流有效值 $I_{sh}^{(3)}$ 。

2. 短路动稳定度的校验条件

1) 一般电器的动稳定度校验条件

按下列公式校验:

$$i_{\max} \geq i_{sh}^{(3)} \quad (3-37)$$

$$I_{\max} \geq I_{sh}^{(3)} \quad (3-38)$$

式中, $i_{\max}$ 和 $I_{\max}$ 分别为电器的动稳定电流峰值和有效值,可查有关手册或产品样本。

2) 绝缘子的动稳定度校验条件

按下列公式校验:

$$F_{al} \geq F_c^{(3)} \quad (3-39)$$

式中, F_{al} 为绝缘子的最大允许载荷,可查有关手册或产品样本;若手册或产品样本给出的是绝缘子的抗弯破坏负荷值,则将其抗弯破坏负荷值乘以 0.6 作为 F_{al} 值; $F_c^{(3)}$ 为三相短路时作用于绝缘子上的计算力;图 3-8 为水平排列的母线平放与竖放的布置简图,若母线在绝缘子上为平放,则 $F_c^{(3)}$ 按式 (3-35) 计算,即 $F_c^{(3)} = F^{(3)}$;若母线为竖放,则 $F_c^{(3)} = 1.4F^{(3)}$ 。

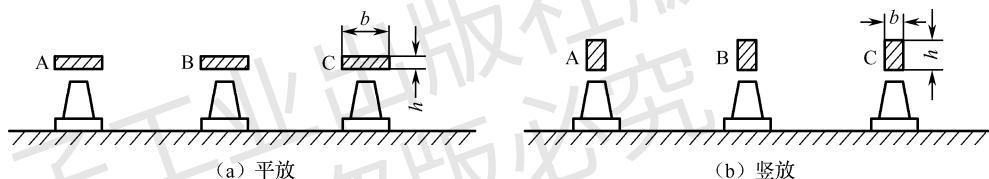


图 3-8 水平排列的母线

3) 硬母线的动稳定度校验条件

按下列公式校验:

$$\sigma_{al} \geq \sigma_c \quad (3-40)$$

式中, σ_{al} 为母线材料的最大允许应力(单位为 Pa),硬铜母线(TMY 型)的 $\sigma_{al} = 140\text{MPa}$,硬铝母线(LMY)的 $\sigma_{al} = 70\text{MPa}$ 。

最大计算应力 σ_c 按下式计算:

$$\sigma_c = \frac{M}{W} \quad (3-41)$$

式中, M 为母线通过 $i_{sh}^{(3)}$ 时所受到的弯曲力矩;当母线档数为 1~2 时, $M = F^{(3)}l/8$;当母线档数大于 2 时, $M = F^{(3)}l/10$;这里 $F^{(3)}$ 均按式 (3-35) 计算, l 为母线的档距, W 为母线的截面系数;当母线水平排列时, $W = b^2h/6$, 这里 b 为母线截面的水平宽度, h 为母线截面的垂直高度。

注意: 电缆的机械强度很好,无须校验其短路动稳定度。

3. 对短路计算点附近交流电动机反馈冲击电流的考虑

当短路计算点附近所接交流电动机的额定电流之和超过系统短路电流的 1% 时(根据 GB 50054—2011《低压配电设计规范》规定),或者交流电动机的总容量超过 100kW 时,应计入交流电动机在附近短路时反馈冲击电流的影响。

如图 3-9 所示, 当交流电动机附近短路时, 由于短路交流时电动机端电压骤降, 致使交流电动机因其定子电动势反高于外施电压而向短路计算点反馈冲击电流, 从而使短路计算点的短路冲击电流增大。

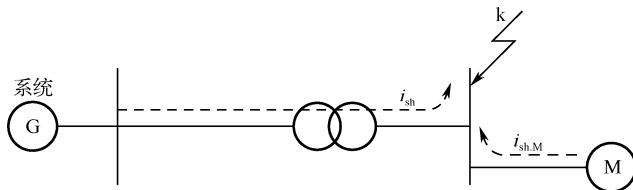


图 3-9 大容量交流电动机对短路计算点反馈冲击电流

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 (交流电动机反馈冲击电流) 可按下式计算:

$$i_{sh.M} = \sqrt{2}(E_M^{**}/X_M^{**})K_{sh.M}I_{N.M} = CK_{sh.M}I_{N.M} \quad (3-42)$$

式中, E_M^{**} 为电动机次暂态电动势标幺值, X_M^{**} 为电动机次暂态电抗标幺值, C 为电动机的反馈冲击倍数, 以上各量如表 3-3 所示; $K_{sh.M}$ 为电动机的短路电流冲击系数, 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。

表 3-3 电动机的 E_M^{**} 、 X_M^{**} 和 C 值

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

由于交流电动机在外电路短路后很快受到制动, 因此它产生的反馈冲击电流衰减极快, 因此在只考虑短路冲击电流的影响时才需计算电动机反馈冲击电流。

3.4.3 短路电流的热效应和热稳定度

导体通过正常负荷电流时, 由于其具有电阻, 因此会产生电能损耗。这种电能损耗转化为热能, 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向周围介质散发的热量相等时, 导体就维持在一定的温度值。当线路发生短路时, 短路电流将使导体温度迅速升高。由于短路后线路的保护装置很快动作, 以切除短路故障, 因此短路电流通过导体的时间不长, 通常不超过 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, 短路电流在导体中产生的热量, 全部用来使导体的温度升高。

图 3-10 表示短路前后导体的温度变化情况。导体在短路前正常负荷时的温度为 θ_L 。假设在 t_1 时刻发生短路, 导体温度按指数规律迅速升高, 而在 t_2 时刻线路保护装置将短路故障切除, 这时导体温度已达到 θ_k 。短路故障切除后, 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 θ_0 为止。

按照导体的允许发热条件, 导体在正常负荷时和短路时的最高允许温度如附录表 11 所示。若导体和电器在短路时的发热温度不超过允许温度, 则应认为导体和电器是满足短路热稳定度要求的。要确定导体短路后实际达到的最高温度 θ_k , 应先求出短路期间实际的短路全电流 $I_{K(t)}$

或导体中产生的热量 Q_K 。但是 i_K 和 $I_{K(t)}$ 都是幅值变动的电流，要计算其 Q_K 是相当困难的，因此一般采用一个恒定的短路稳态电流 I_∞ 来等效计算实际短路电流所产生的热量。

由于通过导体的短路电流实际上不是 i_K ，因此假定一个时间 t_K ，在此时间内，设导体通过 I_∞ 所产生的热量，恰好与实际短路电流 i_K 或 $I_{K(t)}$ 在实际短路时间 $I_{K(t)}$ 内所产生的热量相等。这一假定的时间，称为短路发热的假想时间（Imaginary Time），也称热效时间，用 t_{ima} 表示，如图 3-11 所示。

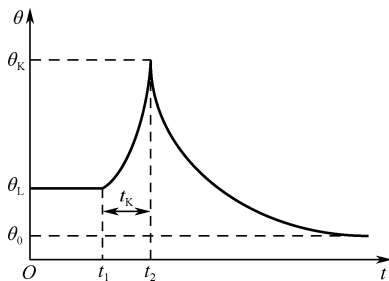


图 3-10 短路前后导体的温度变化

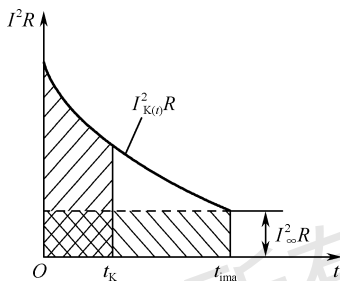


图 3-11 短路发热假想时间

本章小结

本章首先介绍了短路的原因、后果和形式，接着讲述了无限大容量电力系统发生三相短路时的物理过程及有关物理量，然后重点讲述了工厂供电系统三相短路、两相短路和单相短路的计算，最后讲述了短路电流的效应及稳定度校验条件。本章内容是工厂供电系统运行分析和设计计算的基础。第 2 章是讨论和计算供电系统在正常状态下运行的负荷，而本章则是讨论和计算供电系统在短路故障状态下产生的电流及其效应问题。

复习思考题

- 3-1 什么是短路？短路故障产生的原因有哪些？短路对电力系统有哪些危害？
- 3-2 短路有哪些形式？哪种短路形式的可能性（概率）最大？哪种短路形式的危害最为严重？
- 3-3 什么是无限大容量电力系统？它有什么特点？当无限大容量电力系统短路时，短路电流将如何变化？能否突然增大？
- 3-4 短路电流周期分量和短路电流非周期分量各是如何产生的？各符合什么定律？
- 3-5 什么是短路冲击电流？什么是短路次暂态电流？什么是短路后第一个周期短路全电流有效值？什么是短路稳态电流？
- 3-6 短路计算的欧姆法和标幺制法各有哪些特点？
- 3-7 什么是短路计算电压？它与线路额定电压有什么关系？
- 3-8 在无限大容量电力系统中，两相短路电流和单相短路电流各与三相短路电流有什么关系？
- 3-9 什么是短路电流的电动效应？它应该采用哪一个短路电流来计算？
- 3-10 当短路计算点附近有大容量交流电动机运行时，交流电动机对短路计算有什么影响？

习题

3-1 有一地区变电站通过一条长 4km 的 10kV 电缆线路供电给装有两台并列运行的 S9-800 型 (Yyn0 联结) 电力变压器的某厂变电所。地区变电站出口断路器的断流容量为 300MVA。试用欧姆法求该厂变电所 10kV 高压母线上和 380V 低压母线上的短路电流 $I_k^{(3)}$ 、 $I''^{(3)}$ 、 $I_\infty^{(3)}$ 、 $i_{sh}^{(3)}$ 、 $I_{sh}^{(3)}$ 和短路容量 $S_k^{(3)}$ ，并列短路计算表。

3-2 试用标幺制法重做习题 3-1。

3-3 设习题 3-1 所述工厂变电所 380V 侧母线采用 $80\text{mm} \times 10\text{mm}^2$ 的 LMY 铝母线，水平平放，两相邻母线轴线间距为 200mm，挡距为 0.9m，挡数大于 2。该母线上接有一台 500kW 的同步电动机， $\cos\varphi=1$ 时， $\eta=94\%$ 。试校验此母线的短路动稳定度。

3-4 设习题 3-3 所述 380V 母线的短路保护动作时间为 0.5s，低压断路器的断路时间为 0.05s。试校验此母线的短路热稳定度。