



指导性文件
GUIDANCE NOTES
GD021—1999

中国船级社

岸上供电交流电力系统
的短路电流计算
1999

目 录

第 1 章 通则.....	(1)
1.1 一般规定.....	(1)
1.2 定义.....	(2)
1.1 符号.....	(3)
第 2 章 短路电流计算.....	(6)
2.1 一般规定.....	(6)
2.2 电网电源馈送的短路电流计算.....	(6)
2.3 异步电动机馈送的短路电计算	(8)
2.4 短路点短路电流计算.....	(12)
第 3 章 电抗、电阻与阻抗计算.....	(13)
3.1 电动机的电阻与电抗计算.....	(13)
3.2 变压器电抗、电阻与阻抗计算.....	(13)
3.3 电缆电抗与电阻计算	(14)
3.4 不同电压下阻抗与短路电流换算.....	(15)
第 4 章 计算步骤.....	(16)
4.1 电力系统示意图.....	(16)
4.2 计算所需参数.....	(17)
4.3 K 点短路电流计算	(17)
4.4 K1 点短路时的短路电流计算	(23)
4.5 K2 点短路时的短路电流计算	(23)
4.6 K3 点短路时的短路电流计算	(27)

第 1 章 通 则

1.1 一般规定

1.1.1 本计算方法适用于由岸上供电的海上固定平台、浮船坞和围船等（以下简称“水上设施”）额定电压为 35kV 及以下的交流电力系统三相短路电流的计算，其两相短路电流值可取为相应三相短路电流值的 0.866 倍。

1.1.2 本计算方法适用于非网格形，且中性点通过阻抗接地或中性点绝缘的低压和高压三相交流电力系统。

1.1.3 计算短路发生后 100ms 以内的短路电流，计算结果具有足够的精度，其可用作：

- (1) 校核所选用的保护电器的短路接通能力和短路分断能力；
- (2) 校核汇流排等元件的电动力稳定性和热稳定性；
- (3) 为电力系统保护的设计和整定提供依据；
- (4) 必要时为选择适当的限流设备，以能将短路电流限制在保护电器的能力范围之内提供依据。

1.1.4 在计算最大短路电流时，应考虑最恶劣的情况，即应计及水上设施最大电负载工况下：

- (1) 所有可能同时供电的岸上电网电源馈送的短路电流；
- (2) 所有可能投入运行的电动机馈送的短路电流。

1.1.5 一般应计算下列各处的短路电流；

- (1) 各级开关箱、配电板的汇流排；
- (2) 电力和照明变压器的次级侧。

1.1.6 除特殊要求外，应计算短路点的预期峰值短路电流及断路器触头分断瞬间的预期对称短路电流（方均根值）。对于高压断路器而言，其运作时间为固定有分断时间和延时运作时间之和，约为 70 ~ 80ms。

1.1.7 计算所需的电动机、变压器和电缆等的各项特征参数，应由制造厂提供，并应具有足够的精度。岸上大电网的有关参数可从电力部门获得。

1.2 定义

1.2.1 本指南有关定义如下：

(1) 短路：在正常情况下电路中处于不同电压的两点或更多点，通过一比较低的电阻或阻抗偶然或有意的连接。

(2) 短路电流：由于故障或误操作引起的短路而产生的过电流。

(3) 预期（可达到的）短路电流：在电源不变的情况下，如果短路由一阻抗可忽略不计的理想连接所代替时，电路中可能流过的电流。

(4) 对称短路电流：预期（可达到的）短路电流交流对称分量的方均根值。如有直流分量，应不计算在内。

(5) 初始对称短路电流：如果阻抗维持为零时刻的数值，短路发生瞬间预期（可达到的）短路电流交流对称分量的方均根值。

(6) 初始对称短路功率（视在功率）：其假想值为初始对称短路电流、系统标称电压和系统 $\sqrt{3}$ 的乘积。

(7) 短路电流直流分量：短路电流上包络线和下包络线之间的平均值，其数值从初始值衰减至零。

(8) 峰值短路电流：预期（可达到的）短路电流的最大可能瞬时值。

(9) 等效电路：用理想元件组成的网络描述电路状态的模型。

(10) 系统标称电压 (U_n)：设计的系统线对线电压，系统若干运行性能系以其为基准。

(11) 等效电压源 ($cU_n/\sqrt{3}$)：在计算短路电流的正序系统中，加在短路点的理想电源的电压，该项电压仅为网络的有效电压。

(12) 电压系数 c ：等效电压源与系统标称电压 U_n 除以 $\sqrt{3}$ 所得之值。

(13) (独立) 电压源：由可用独立于电路中所有电流和电压的理想电压源表述的有源元件，与无源元件串联组成。

(14) 大电动机：指系统中容量相对较大的电动机。

(15) 等效电动机：为简化短路电流的计算，将运行中除大电动机以外的各台电动机综合成一台等效电动机，该等效电动机馈送的短路电流等效于上述各台电动机馈送的短路电流之和。

1.3 符号

1.3.1 本计算方法采用 1.3.4 至 1.3.9 规定的符号，并规定了统一单

位。

1.3.2 在阻抗、电抗、电阻和电压的符号中，大写字母代表绝对值，小写字母代表相对值（标么值）。

1.3.3 对电流和电压等与时间有关的量，大写字母代表有效值（方均根值），小写字母代表瞬时值。

1.3.4 电压符号见表 1.3.4。

电压符号 表 1.3.4

符号	名称	单位
U_{IQ}	岸上网对水上设施供电点 Q 的电压	V
U_{iT}	变压器初级侧额定电压	V
u_K	变压器短路电压	%
u_R	变压器短路电压的电阻分量	%
u_X	变压器短路电压的电抗分量	%
U_{iM}	异步电动机额定线电压	V
E''_M	异步电动机的超瞬态电动势	V

1.3.5 电流符号见表 1.3.5

电流符号 表 1.3.5

符号	名称	单位
$I''_{k(Q)}, I''_k$	电网电源提供的对称短路电流	kA
I_{iT}	变压器初级侧的额定电流	kA
i_p	峰值短路电流	kA
i_M	异步电动机馈送的短路电流上的包络线值	kA
I_{sc}	对称短路电流	kA
i_{pM}	异步电动机馈送的峰值短路电流	kA
I_{dcM}	异步电动机馈送的短路电流的直流分量	kA
I_{scM}	异步电动机馈送的对称短路电流	kA
I_{eM}	异步电动机的额定电流	kA

1.3.6 电抗、电阻和阻抗符号见表 1.3.6。

电抗、电阻和阻抗符号

表 1.3.6

符号	名称	单位
R	电阻	m
K_r	单位长度电缆电阻	m /m
R_M	异步电动机电阻	m
R_R	折算至定子侧的异步电动机转子电阻	m
R_S	异步电动机定子电阻	m
R_T	变压器电阻	m
X	电抗	m
K_x	单位长度电缆单位	m /m
X''_M	异步电动机超瞬态电抗	m
X_R	折算至定子侧的异步电动机转子电抗	m
X_S	异步电动机定子电抗	m
X_T	变压器电抗	m
Z	阻抗	m
Z''_M	异步电动机超瞬态阻抗	m
Z_T	变压器阻抗	m
\underline{Z}	复阻抗	m
Z_Q	电网电源的阻抗	m
R_L	外部电阻	m
X_L	外部电抗	m

1.3.7 时间和时间常数见表 1.3.7。

时间和时间常数符号 表 1.3.7

符号	名称	单位
t	以短路发生时刻为起点的持续时间	ms
T''_M	异步电动机超瞬态时间常数	ms
T''_{Me}	计及外线路阻抗影响的异步电动机超瞬态时间常数	ms
T_{dcM}	异步电动机直流时间常数	ms
T_{dcMe}	计及外线路阻抗影响的异步电动机直流时间常数	ms

1.3.8 功率符号见表 1.3.8

功率符号 表 1.3.8

符号	名称	单位
P_{rM}	异步电动机额定输出功率	kW
S_{rT}	变压器额定视在功率	kVA
P_k	变压器短路损耗	kW
S''_{kQ}	电网电源对水上设施供电点 Q 的初始对称短路视在功率	kVA

1.3.9 其他符号见表 1.3.9。

其他符号 **表 1.3.9**

符号	名称	单位
$\cos j_M$	异步电动机额定功率因数	
η_M	异步电动机效率	
a	并联电缆根数	
e	自然指数的底数	
l	电缆长度	m
k	峰值系数	
S	电缆截面积	mm ²
T	周期	ms
	电阻率	mm ² /m

第 2 章 短路电流计算

2.1 一般规定

2.1.1 本章所给出的计算公式，是以下列假设为基础的：

- (1) 忽略电力系统中的所有电容；
- (2) 短路发生瞬间，短路点某相的相电压瞬时值为零；
- (3) 短路期间短路电流的路径不变；
- (4) 忽略短路电弧阻抗，不计汇流排、电流互感器阻抗以及导体之间连接点的接触电阻；
- (5) 变压器处于主抽头位置；
- (6) 短路在三相同时发生；
- (7) 水上设施一般通过架空线或海底电缆从岸上变电所获得电能，由于岸上电网已基本上形成一个统一的大电网，水上设施上网容量相对于陆上变电所的容量来讲比较小，在计算时把岸上大电网按无限容量系统处理。

2.1.2 在水上设施的交流电力系统中，当短路发生时，只有电网和电动机馈送短路电流，它们均为电压源，所以可利用电路理论中的叠加原理分别计算系统中电网电源和电动机馈送的短路电流，然后相加，求得短路点的短路电流。叠加原理为：在线性系统中，任意支路的电源/电压都是电路中各个电源单独作用时在支路中产生的电流/电压的代数和。在计算一个电压源的作用时，其他电压源作短路处理。

2.2 电网电源馈送的短路电流计算

2.2.1 如图 2.2.1 所示，已知岸上变电所对水上设施供电点 Q 的电压 U_{rQ} ，初始对称短路视在功率 S''_{kQ} 或初始对称短路电流 I''_{kQ} （由陆上电业管理部门提供），则 Q 点电网电源的阻抗 Z_Q 可按下列计算：

$$Z_Q = \frac{cU_{rQ}^2}{S''_{kQ}} = \frac{cU_{rQ}}{\sqrt{3}I''_{kQ}}$$

式中： c ——电压系数，根据电网电压的等级按下列原则选取；

$c = 1.00$ ，低压系统 230V/400V，50Hz；

$c = 1.05$, 其他的低压系统 ;

$c = 1.10$, 1kV 以上的中高压系统。

电网电源阻抗 $\underline{Z}_Q = R_Q + jX_Q$, 可取其中的 $R_Q = 0.1X_Q$,

$X_Q = 0.995Z_Q$ 。

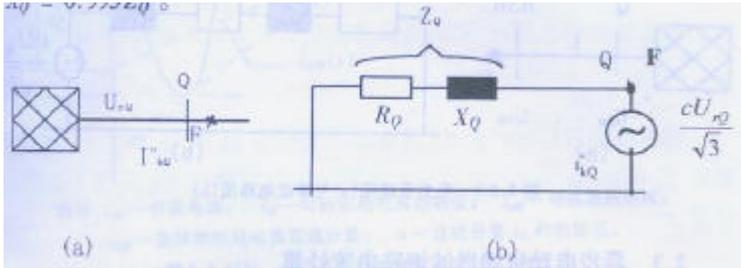


图 2.2.1 电力系统图 (a) 与等效电路图 (b)

2.2.2 如图 2.2.2 所示 , 岸上变电所通过架空线或海底电缆 L 向水上设施高压配电板 HSB 供电 , 则 F 点的初始对称短路电流可按下式计算 :

$$I''_k = \frac{cU_{rQ}}{\sqrt{3}\sqrt{R_k^2 + X_k^2}}$$

式中 : $R_k = R_Q + R_L$

$$X_k = X_Q + X_L$$

峰值短路电流 i_p 可按下式计算 :

$$i_p = k\sqrt{2}I''_k$$

式中峰值系数 k 可按下式近似计算 :

$$k \approx 1.02 + 0.98e^{-3R_k/X_k}$$

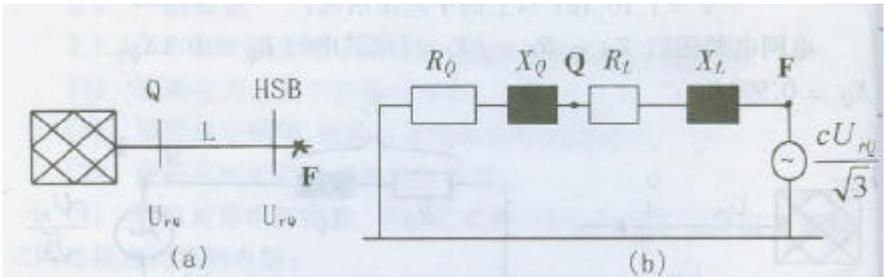


图 2.2.2 电力系统图 (a) 与等效电路图 (b)

2.3 异步电动机馈送的短路电流计算

2.3.1 当电力系统中某处发生短路时，所有连接于系统中的电动机均产生短路电流。通常，大电动机产生的短路电流应单独计算，而将小电动机编成一组，作为一个等效电动机处理。

2.3.2 电动机的等效电路如图 2.3.2(1) 所示，电动机的三相短路电流的最大包络线值见图 2.3.2(2)，并可按下式计算：

$$i_M(t) = \sqrt{2}I_{acM}(t) + i_{dcM}(t)$$

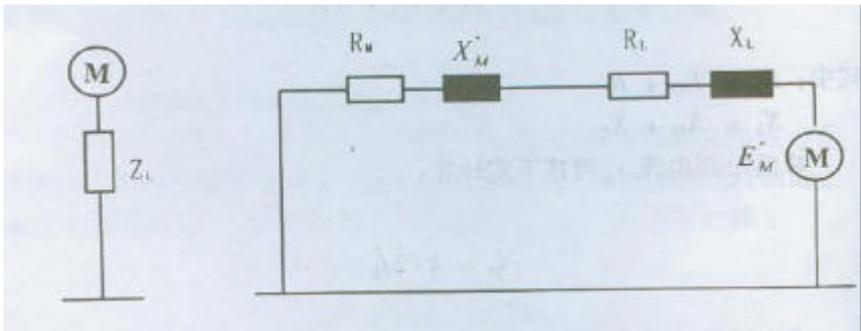
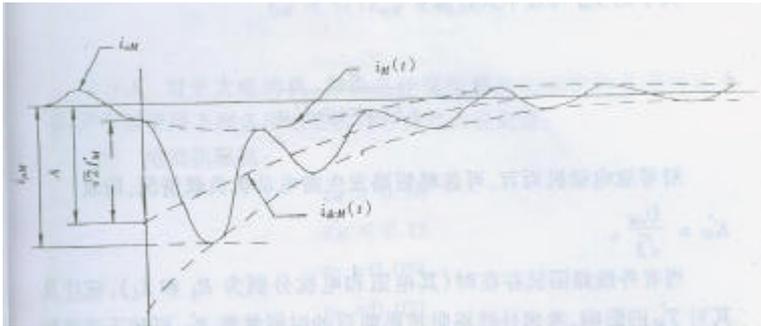


图 2.3.2(1) 电动机连线图和等效电路图



图中： i_{oM} —空载电流； I_M'' —对称短路电流初始值； i_{pM} —峰值短路电流；

i_{dcM} —衰减的短路电流直流分量；A—直流分量 i_{dc} 的初始值

图 2.3.2 (2) 电动机端部短路电流的时间函数

2.3.3 对称短路电流 $I_{acM}(t)$ 可按下式计算：

$$I_{acM}(t) = I_M'' e^{-t/T_M'}$$

上式的 I_M'' 可按下式计算：

$$\begin{aligned} I_M'' &= \frac{E_M''}{\sqrt{(R_R + R_S + R_L)^2 + (X_R + X_S + X_L)^2}} \\ &= \frac{E_M''}{\sqrt{(R_M + R_L)^2 + (X_M'' + X_L)^2}} \end{aligned}$$

上式中的电动势 E_M'' 可按下式计算：

$$E_M'' = \sqrt{\left(\frac{U_{rM}}{\sqrt{3}} \cos \mathbf{j}_M - R_M I_{rM}\right)^2 + \left(\frac{U_{rM}}{\sqrt{3}} \sin \mathbf{j}_M - X_M'' I_{rM}\right)^2}$$

其中的 I_{rM} 可按下式计算：

$$I_{rM} = \frac{P_{rM}}{\sqrt{3}h_M \cos \mathbf{j}_M U_{rM}}$$

对等效电动机而言，可忽略短路发生前电动机负载情况，即取

$$E_M'' = \frac{U_{rM}}{\sqrt{3}}。$$

当有外线路阻抗存在时（其电阻和电抗分别为 R_L 和 X_L ），应计及其对 T_M'' 的影响，考虑外线路阻抗影响后的时间常数 T_{Me}'' 可按下式进行计算：

$$T_{Me}'' = \frac{X_M'' + X_L}{2pfR_R}$$

2.3.4 直流分量 $i_{dcM}(t)$ 按下式计算：

$$i_{dcM}(t) = \sqrt{2}(I_M'' + I_{rM} \sin \mathbf{j}_M) e^{-t/T_{dcM}}$$

对于等效电动机，可以忽略 $I_{rM} \sin \mathbf{j}_M$ 一项。

当有线路阻抗存在时，应计其对 T_{dcM} 的影响，考虑外线路阻抗影响后的时间常数 T_{dcMe} 可按下式进行计算：

$$T_{dcMe} = \frac{X_M'' + X_L}{2pf(R_S + R_L)}$$

2.3.5 电动机馈送的峰值短路电流 i_{pM} 出现在 $T/2$ ，可按下式计算：

$$i_{pM} = (\sqrt{2}I_{acM} + i_{dcM}) \frac{T}{2}$$

2.3.6 对于大电动机，如缺乏计算所需的电动机的各项特征参数，则可以使用下列各项电动机特征参数的近似值：

(1) 电动机阻抗：

$$z_M'' = 0.16$$

$$x_M'' = 0.15$$

$$r_S = 0.034$$

$$r_R = 0.021$$

(2) 电动机时间常数：

当频率 $f = 50\text{Hz}$ 时：

$$T_M'' = 22.4 \text{ ms}$$

$$T_{dcM} = 14.08 \text{ ms}$$

当频率 $f = 60\text{Hz}$ 时：

$$T_M'' = 18.67 \text{ ms}$$

$$T_{dcM} = 11.73 \text{ ms}$$

2.3.7 对于等效电动机，可采用下列各项电动机特征参数的近似值：

(1) 电动机阻抗：

$$z_M'' = 0.2$$

$$x_M'' = 0.188$$

$$r_S = 0.043$$

$$r_R = 0.027$$

(2) 电动机时间常数：

当频率 $f = 50\text{Hz}$ 时：

$$T_M'' = 22.4 \text{ ms}$$

$$T_{dcM} = 14.08 \text{ ms}$$

当频率 $f = 60\text{Hz}$ 时：

$$T_M'' = 18.67 \text{ ms} \quad T_{dcM} = 11.73 \text{ ms}$$

2.3.8 等效电动机的额定输出功率，可按“电力负荷计算书”进行估算。

2.4 短路点短路电流计算

2.4.1 如果电力系统中有 n 个短路电流馈送源，则应利用叠加原理求得短路点的短路电流，按 2.2 和 2.3 给出的公式分别计算出各馈送源向该点馈送的短路电流 $I_{aci}(t)$ 和 i_{pi} ，则短路点的对称短路电流 $I_{ac}(t)$ 和峰值短路电流 i_p 分别按下式进行计算：

$$I_{ac}(t) = \sum_{i=1}^n I_{aci}(t)$$

$$i_p = \sum_{i=1}^n i_{pi}$$

第 3 章 电抗、电阻与阻抗计算

3.1 电动机的电阻、电抗与阻抗计算

3.1.1 电动机的超瞬态电阻、电抗与阻抗可按式进行计算：

$$X_M'' = x_M'' \frac{U_{rM}}{\sqrt{3}I_{rM}} = x_M'' \frac{U_{rM}^2 \cdot \mathbf{h}_M \cdot \cos \mathbf{j}_M}{P_{rM}}$$

$$R_s = r_s \frac{U_{rM}}{\sqrt{3}I_{rM}} = r_s \frac{U_{rM}^2 \cdot \mathbf{h}_M \cdot \cos \mathbf{j}_M}{P_{rM}}$$

$$R_R = r_R \frac{U_{rM}}{\sqrt{3}I_{rM}} = r_R \frac{U_{rM}^2 \cdot \mathbf{h}_M \cdot \cos \mathbf{j}_M}{P_{rM}}$$

$$Z_M = \sqrt{(R_R + R_s)^2 + (X_M'')^2}$$

在缺少确切数值时，以上公式的 $\mathbf{h}_M \cos \mathbf{j}_M$ 可取 0.76。

3.2 变压器电抗、电阻与阻抗计算

3.2.1 变压器电抗、电阻与阻抗可用下列各式进行计算：

$$Z_T = u_K \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}$$

$$R_T = P_K \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}^2}$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}$$

$$R_T = r_T \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}^2} = u_R \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}^2}$$

$$X_T = x_T \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}^2} = u_x \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}^2}$$

3.2.2 电抗器的处理与变压器相同。

3.3 电缆电抗与电阻计算

3.3.1 电缆电抗与电阻可用下列公式计算：

$$R = K_r l / a$$

$$X = K_x l / a$$

3.3.2 架空线的电抗与电阻可按下列式进行计算：

(1) 在温度为 20 时，单位长度上的电阻 K_r 按下式计算：

$$K_r = \frac{d}{S} \times 10^3 \quad \text{m} / \text{m}$$

式中： $d = \frac{1}{54} \times \frac{\Omega \text{mm}^2}{m}$ ，当导线为铜时；

$d = \frac{1}{34} \times \frac{\Omega \text{mm}^2}{m}$ ，当导线为铝时；

$d = \frac{1}{31} \times \frac{\Omega \text{mm}^2}{m}$ ，当导线为铝合金时。

(2) 单位长度的电抗按下式进行计算：

当频率 $f = 50\text{Hz}$ 时： $K_x = 0.0628 \left(\frac{0.25}{n} + \ln \frac{d}{r} \right)$ m / m

当频率 $f = 60\text{Hz}$ 时： $K_x = 0.0754 \left(\frac{0.25}{n} + \ln \frac{d}{r} \right)$ m / m

式中： d ——导体束中心线之间的几何平均距离，

$$d = \sqrt[3]{d_{L1L2} \cdot d_{L2L3} \cdot d_{L1L3}} ;$$

r ——单根导体的半径。在导体束中， r 用 $\sqrt[n]{nrR^{n-1}}$ 代替， R 为导体束半径；

n ——导体束中导体的根数，单根导体取 $n=1$ 。

3.4 不同电压下阻抗与短路电流换算

3.4.1 在电压为 U_1 下的 R_1 、 X_1 、 Z_1 换算至 U_2 电压下时，其值分别为：

$$R_2 = R_1 \times \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2$$

$$X_2 = X_1 \times \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2$$

$$Z_2 = Z_1 \times \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2$$

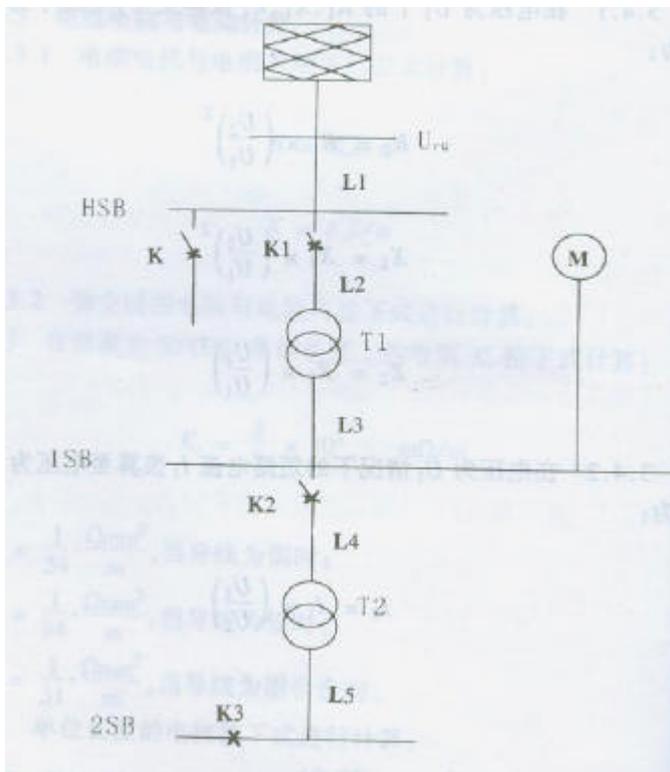
3.4.2 在电压为 U_1 情况下的短路电流 I_1 换算至电压为 U_2 时，其值为：

$$I_2 = I_1 \times \left(\frac{U_1}{U_2}\right)$$

第 4 章 计算步骤

4.1 电力系统示意图

4.1.1 为了阐述本计算方法的计算步骤，以图 4.1.1 所给出的电力系统示意图为例进行说明，下面计算 K 、 $K1$ 、 $K2$ 、 $K3$ 点的发生短路时的短路电流。



图中：HSB、1SB、2SB 为汇流排；L1、L2、L3、L4、L5 为电缆；
T1、T2 为变压器；M 为等效电动机。

图 4.1.1 电力系统示意图

4.2 计算所需参数

4.2.1 电网电源参数为：额定电压 U_{r0} ，初始对称短路功率 S''_{kQ} ，频率 f 。

4.2.2 变压器的参数如表 4.2.2 所示。

变压器参数

表 4.2.2

变压器	额定视在功率	短路损耗	短路电压	初级电压	次级电压
T1	S_{rT1}	P_{kT1}	u_{kT1}	U_{T1P}	U_{T1S}
T2	S_{rT2}	P_{kT2}	u_{kT2}	U_{T2P}	U_{T2S}

4.2.3 电动机 M 的参数为：功率 P_{rM} ，定子电阻 r_S ，转子电阻 r_R ，超瞬态电抗 x_M' ，效率 h ，功率因数 $\cos j$ ，额定电压 U_{rMo} 。

4.2.4 电缆的参数如表 4.2.4 所示。

电缆参数

表 4.2.4

编号	单位长度电阻	单位长度电抗	长度	并联根数
L1	K_{r1}	K_{x1}	$l1$	$a1$
L2	K_{r2}	K_{x2}	$l2$	$a2$
L3	K_{r3}	K_{x3}	$l3$	$a3$
L4	K_{r4}	K_{x4}	$l4$	$a4$
L5	K_{r5}	K_{x5}	$l5$	$a5$

4.3 K点短路电流计算

4.3.1 系统等效阻抗图如图 4.3.1 所示。

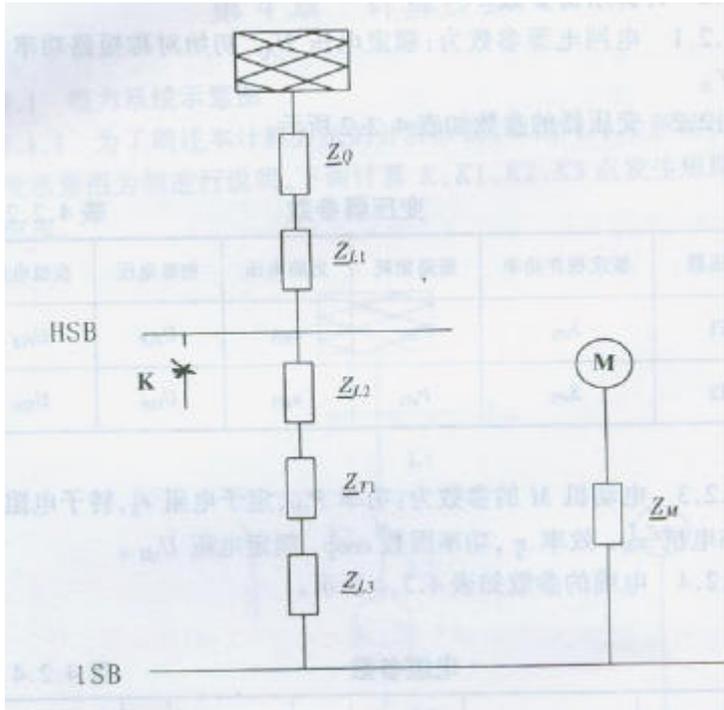


图 4.3.1 计算 K 点短路电流的系统等效阻抗图

4.3.2 电网电源的馈送的短路电流计算如下：

在计算电网电源馈送的短路电流时，将等效电动机短路，那么等效电路就变成电网电源通过电缆 L1 向 K 点提供短路电流，计算中的阻抗应换算成 K 点电压下的阻抗值。

(1) 电网电源的阻抗计算如下：

$$Z_Q = \frac{CU_{rQ}^2}{S_{kQ}''}$$

$$\underline{Z}_Q = (0.0995 + j0.995)Z_Q$$

(2) 电缆 L1 的阻抗计算如下：

$$R_{L1} = \frac{K_{r1}l1}{a1}$$

$$X_{L1} = \frac{K_{x1}l1}{a1}$$

$$\underline{Z}_{L1} = R_{L1} + jX_{L1}$$

(3) 总外阻抗计算如下：

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{QK} &= \underline{Z}_Q + \underline{Z}_{L1} \\ &= R_{QK} + jX_{QK}\end{aligned}$$

$$Z_{QK} = \sqrt{R_{QK}^2 + X_{QK}^2}$$

(4) 电网电源馈送的对称短路电流计算如下：

$$I''_{KK} = \frac{c \cdot U_{rQ}^2}{\sqrt{3}Z_{QK}}$$

(5) 峰值系数 k_K 计算如下：

$$k_K \approx 1.02 + 0.98e^{-3R_{QK}/X_{QK}}$$

(6) 电网电源向 K 点馈送的峰值短路电流 i_{pQK} 计算如下：

$$i_{pQK} = k_K \sqrt{2} I_{KK}''$$

4.3.3 等效电动机 M 馈送的短路电流计算如下：

在计算等效电动机 M 馈送的短路电流时，将电网电源短路，那么等效电路就变成了等效电动机 M 通过电缆 L2、L3 和变压器 T1 向 K 点提供短路电流。计算时，该电路中所有的阻抗应换算成等效电动机额定电压下的阻抗值。

(1) 等效电动机 M 的阻抗计算如下：

$$R_R = r_R \times \frac{U_{rM}^2 \cdot h \cdot \cos j}{P_{rM}}$$

$$R_s = r_s \times \frac{U_{rM}^2 \cdot h \cdot \cos j}{P_{rM}}$$

$$X_M'' = x_M'' \times \frac{U_{rM}^2 \cdot h \cdot \cos j}{P_{rM}}$$

$$\underline{Z}_M = (R_s + R_R) + jX_M''$$

(2) 电缆 L2 的阻抗计算如下：

$$R_{L2} = \frac{K_{r2} l_2}{a_2}$$

$$X_{L2} = \frac{K_{x2} l_2}{a_2}$$

$$\underline{Z}_{L2} = R_{L2} + jX_{L2}$$

换算至变压器 T1 次级侧，即电动机额定电压下时，阻抗 \underline{Z}_{L2T1S} 按下式计算：

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{L2T1S} &= \left(\frac{U_{T1S}}{U_{T1P}}\right)^2 \times \underline{Z}_{L2} \\ &= \left(\frac{U_{T1S}}{U_{T1P}}\right)^2 \times (R_{L2} + jX_{L2}) \\ &= R_{L2T1S} + jX_{L2T1S}\end{aligned}$$

(3) 电缆 L3 的阻抗按下式计算：

$$\begin{aligned}R_{L3} &= \frac{K_{r3}l3}{a3} \\ X_{L3} &= \frac{K_{x3}l3}{a3} \\ \underline{Z}_{L3} &= R_{L3} + jX_{L3}\end{aligned}$$

(4) 变压器 T1 的阻抗计算如下：

$$\begin{aligned}Z_{T1} &= u_{kT1} \times \frac{U_{T1P}^2}{S_{rT1}} \\ R_{T1} &= \frac{P_{kT1}}{3I_{rT1}^2} = \frac{P_{kT1}U_{T1P}^2}{S_{rT1}^2} \\ X_{T1} &= \sqrt{Z_{T1}^2 - R_{T1}^2} \\ \underline{Z}_{T1} &= R_{T1} + jX_{T1}\end{aligned}$$

换算至变压器次级侧时，阻抗按下式计算：

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{T1S} &= \left(\frac{U_{T1S}}{U_{T1P}}\right)^2 \times \underline{Z}_{T1} \\ &= \left(\frac{U_{T1S}}{U_{T1P}}\right)^2 \times (R_{T1} + jX_{T1}) \\ &= R_{T1S} + jX_{T1S}\end{aligned}$$

(5) 在计算 K 点的短路电流时，对等效电动机 M 来讲，外线路阻抗 \underline{Z}_{LK} 按下式计算：

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{LK} &= \underline{Z}_{L2T1S} + \underline{Z}_{T1S} + \underline{Z}_{L3} \\ &= R_{LK} + jX_{LK}\end{aligned}$$

(6) 时间常数按下式计算：

$$\begin{aligned}T_{MK}'' &= \frac{X_M'' + X_{LK}}{2pfR_R} \\ T_{dcMK} &= \frac{X_M'' + X_{LK}}{2pf(R_S + R_{LK})}\end{aligned}$$

(7) 短路电流按下式计算：

$$\begin{aligned}I_{MK}' &= \frac{U_{rM}}{\sqrt{3} \times \sqrt{(R_R + R_S + R_{LK})^2 + (X_M'' + X_{LK})^2}} \\ I_{acMK}(t) &= I_{MK}'' e^{-t/T_{MK}''} \\ I_{dcMK}(t) &= \sqrt{2} I_{MK}'' e^{-t/T_{dcMK}}\end{aligned}$$

$$i_{pMK} = \sqrt{2}I_{acMK}\left(\frac{T}{2}\right) + i_{acMK}\left(\frac{T}{2}\right)$$

(8) 将等效电动机 M 馈送的短路电流换算至 K 点电压时, 对称短路电流 $I_{acMKF}(t)$ 和峰值短路电流 i_{pMKF} 按下式计算:

$$I_{acMKF}(t) = I_{acMK}(t) \times \frac{U_{T1S}}{U_{T1P}}$$

$$i_{pMKF} = i_{pMK} \times \frac{U_{T1S}}{U_{T1P}}$$

4.3.4 根据以上计算结果, 利用叠加原理, K 点的短路电流按下式计算:

$$I_{acK}(t) = I''_{KK} + I_{acMKF}(t)$$

$$i_{pK} = i_{pQK} + i_{pMKF}$$

4.4 K1 点短路时的短路电流计算

4.4.1 由图 4.4.1 电力系统示意图可知, 在计算流过 K1 点上面断路器短路电流时, 由于等效电动机不可能对其馈送短路电流, 所以仅有电网电源馈送的短路电流, 即:

$$I_{acK1}(t) = I''_{KK}$$

$$i_{pK} = i_{pQK}$$

4.5 K2 点短路时的短路电流计算

4.5.1 计算 K2 点的短路电流时, 系统等效阻抗图如图 4.5.1 所示。

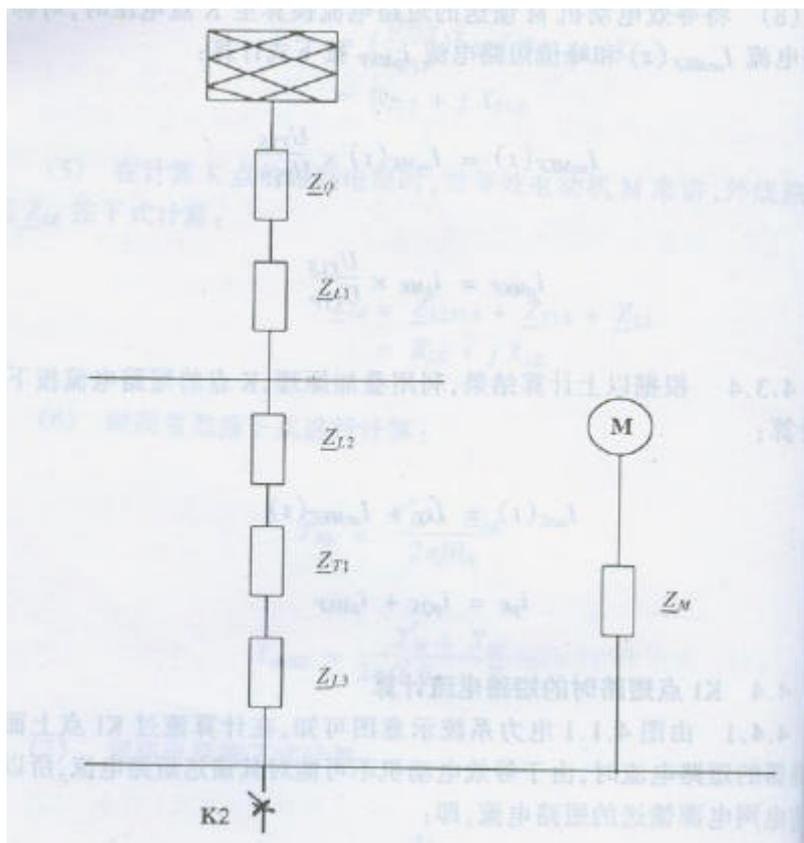


图 4.5.1 计算 K2 点时的系统等效阻抗图

4.5.2 电网电源馈送的短路电流计算如下：

在计算电网电源馈送的短路电流时，将等效电动机短路，那么电网电源通过电缆 L1、L2、T1、L3 向短路点 K2 提供短路电流。计算时，将抗换算至短路点 K2 点电压 (U_{T1S}) 时的阻抗值。

(1) 电网电源的阻抗换算至 K2 点电压的阻抗 Z_{QT1S} ；

$$\underline{Z}_{QT1S} = \underline{Z}_Q \times \left(\frac{U_{T1S}}{U_{T1P}} \right)^2$$

(2) 电缆 L1 的阻抗换算至 K2 点电压的阻抗 \underline{Z}_{L1T1S} 按下式计算：

$$\underline{Z}_{L1T1S} = \underline{Z}_{L1} \times \left(\frac{U_{T1S}}{U_{T1P}} \right)^2$$

(3) 总外阻抗 \underline{Z}_{QK2} 计算如下：

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{QK2} &= \underline{Z}_{QT1S} + \underline{Z}_{L1T1S} + \underline{Z}_{T1S} + \underline{Z}_{L2T1S} + \underline{Z}_{L3} \\ &= R_{QK2} + jX_{QK2} \\ \underline{Z}_{QK2} &= \sqrt{R_{QK2}^2 + X_{QK2}^2} \end{aligned}$$

(4) 电网电源馈送的对称短路电流计算如下：

$$I''_{KK2} = \frac{cU_{T1S}^2}{\sqrt{3Z_{QK2}}}$$

(5) 峰值系数 k_{K2} 计算如下：

$$k_{K2} \approx 1.02 + 0.98e^{-3R_{QK2}/X_{QK2}}$$

(6) 电网电源向 K2 点馈送的峰值短路电流 i_{pQK2} 计算如下：

$$i_{pQK2} = k_{K2} \sqrt{2} I''_{KK2}$$

4.5.3 等效电动机 M 馈送的短路电流计算如下：

在计算等效电动机 M 馈送的短路电流时，将电网电源短路，那么等效电路就变成了等效电动机 M 直接向 K2 点提供短路电流。

(1) 时间常数计算如下：

$$T''_{MK2} = \frac{X''_M}{2pfR_R}$$

$$T_{dcMK2} = \frac{X''_M}{2pfR_S}$$

(2) 短路电流按下式计算：

$$I''_{MK2} = \frac{U_{rM}}{\sqrt{3} \times \sqrt{(R_R + R_S)^2 + (X''_M)^2}}$$

$$I_{acMK2}(t) = I''_{MK2} e^{-t/T''_{MK2}}$$

$$I_{dcMK2}(t) = \sqrt{2} I''_{MK2} e^{-t/T_{dcMK2}}$$

$$i_{pMK2} = \sqrt{2} I_{acMK2} \left(\frac{T}{2} \right) + i_{acMK2} \left(\frac{T}{2} \right)$$

4.5.4 根据以上计算结果，利用叠加原理，求得 K2 点的短路电流为：

$$I_{acK2}(t) = I''_{KK2} + I_{acMK2}(t)$$

$$i_{pK2} = i_{pQK2} + i_{pMK2}$$

4.6 K3 点短路时的短路电流计算

4.6.1 系统等效阻抗图如图 4.6.1 所示。

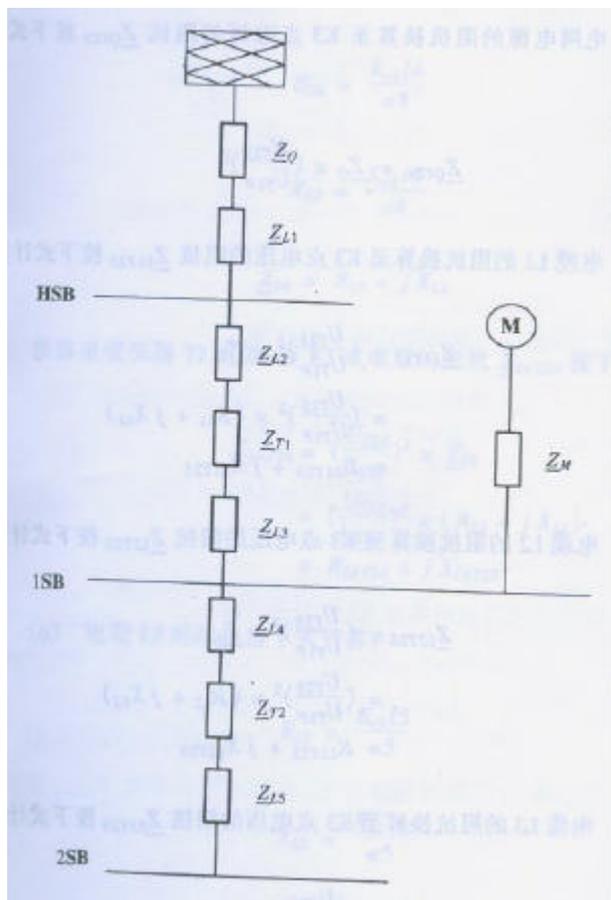


图 4.6.1 电力系统的阻抗图

4.6.2 电网电源馈送的短路电流按下式计算：

在计算电网电源馈送的短路电流时，将等效电动机短路，那么等效阻抗就变成图 4.6.2。计算时，阻抗应换算至 K3 点电压 (U_{T2S}) 的值。

(1) 电网电源的阻抗换算至 K3 点电压的阻抗 \underline{Z}_{QT2S} 按下式计算：

$$\underline{Z}_{QT2S} = \underline{Z}_Q \times \left(\frac{U_{T2S}}{U_{T1P}} \right)^2$$

(2) 电缆 L1 的阻抗换算至 K3 点电压的阻抗 \underline{Z}_{L1T2S} 按下式计算：

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{L1T2S} &= \left(\frac{U_{T2S}}{U_{T1P}} \right)^2 \times \underline{Z}_{L1} \\ &= \left(\frac{U_{T2S}}{U_{T1P}} \right)^2 \times (R_{L1} + jX_{L1}) \\ &= R_{L1T2S} + jX_{L1T2S} \end{aligned}$$

(3) 电缆 L2 的阻抗换算至 K3 点电压的阻抗 \underline{Z}_{L2T2S} 按下式计算：

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{L2T2S} &= \left(\frac{U_{T2S}}{U_{T1P}} \right)^2 \times \underline{Z}_{L2} \\ &= \left(\frac{U_{T2S}}{U_{T1P}} \right)^2 \times (R_{L2} + jX_{L2}) \\ &= R_{L2T2S} + jX_{L2T2S} \end{aligned}$$

(4) 电缆 L3 的阻抗换算至 K3 点电压的阻抗 \underline{Z}_{L3T2S} 按下式计算：

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{L3T2S} &= \left(\frac{U_{T2S}}{U_{T2P}} \right)^2 \times \underline{Z}_{L3} \\ &= \left(\frac{U_{T2S}}{U_{T2P}} \right)^2 \times (R_{L3} + jX_{L3}) \\ &= R_{L3T2S} + jX_{L3T2S} \end{aligned}$$

(5) 电缆 L4 的阻抗计算如下：

$$R_{L4} = \frac{K_{r4} l4}{a4}$$
$$X_{L4} = \frac{K_{x4} l4}{a4}$$
$$\underline{Z}_{L4} = R_{L4} + jX_{L4}$$

换算至变压器 T2 次级，即 K3 点电压的阻抗 \underline{Z}_{L4T2S} 按下式计算：

$$\underline{Z}_{L4T2S} = \left(\frac{U_{T2S}}{U_{T2P}} \right)^2 \times \underline{Z}_{L4}$$
$$= \left(\frac{U_{T2S}}{U_{T2P}} \right)^2 \times (R_{L4} + jX_{L4})$$
$$= R_{L4T2S} + jX_{L4T2S}$$

(6) 电缆 L5 的阻抗按下式计算：

$$R_{L5} = \frac{K_{r5} l5}{a5}$$
$$X_{L5} = \frac{K_{x5} l5}{a5}$$
$$\underline{Z}_{L5} = R_{L5} + jX_{L5}$$

(7) 变压器 T2 的阻抗计算如下：

$$Z_{T2} = u_{kT2} \times \frac{U_{T2P}^2}{S_{rT2}}$$

$$R_{T2} = \frac{P_{kT2}}{3I_{rT2}^2} = \frac{P_{kT2}U_{T2P}^2}{S_{rT2}^2}$$

$$X_{T2} = \sqrt{Z_{T2}^2 - R_{T2}^2}$$

$$\underline{Z}_{T2} = R_{T2} + jX_{T2}$$

换算至变压器次级侧的阻抗按下式计算：

$$\underline{Z}_{T2S} = \left(\frac{U_{T2S}}{U_{T2P}}\right)^2 \times \underline{Z}_{T2}$$

$$= \left(\frac{U_{T2S}}{U_{T2P}}\right)^2 \times (R_{T2} + jX_{T2})$$

$$= R_{T2S} + jX_{T2S}$$

(8) 电动机的阻抗换算至 K3 点电压下时：

$$\underline{Z}_{MT2S} = \left(\frac{U_{T2S}}{U_{T2P}}\right)^2 \times \underline{Z}_M$$

(9) 变压器 T1 的阻抗换算到 K3 点的电压的阻抗 \underline{Z}_{T1T2S} 按下式计算：

$$\underline{Z}_{T1T2S} = \left(\frac{U_{T2S}}{U_{T1P}}\right)^2 \times \underline{Z}_{T1}$$

(10) 下面两并联支路的总外阻抗 \underline{Z}_1 计算如下：

$$\begin{aligned}\frac{1}{\underline{Z}_1} &= \frac{1}{\underline{Z}_{L4T2S} + \underline{Z}_{L5T2S} + \underline{Z}_{T2S}} + \frac{1}{\underline{Z}_{MT2S}} \\ &= \frac{1}{\underline{Z}_2} + \frac{1}{\underline{Z}_{MT2S}}\end{aligned}$$

$$\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1$$

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{QK3} &= \underline{Z}_{QT2S} + \underline{Z}_{L1T2S} + \underline{Z}_{L3T2S} + \underline{Z}_{T1T2S} + \underline{Z}_1 \\ &= R_{QK3} + jX_{QK3}\end{aligned}$$

$$\underline{Z}_{QK3} = \sqrt{R_{QK3}^2 + X_{QK3}^2}$$

(11) 电网电源馈送的对称短路电流计算如下：

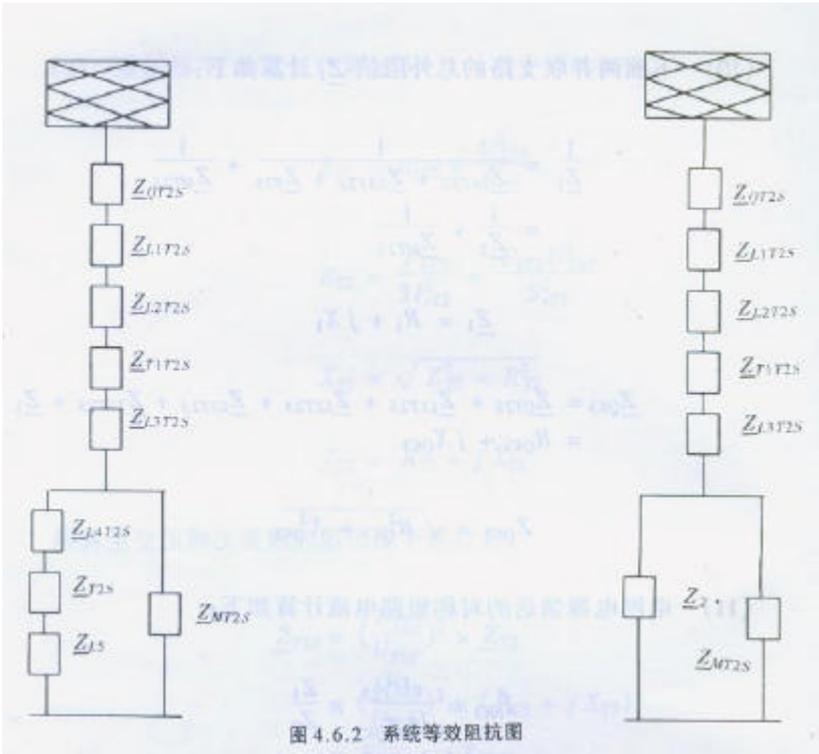
$$I''_{KK3} = \frac{cU_{T2S}^2}{\sqrt{3}Z_{QK3}} \times \frac{Z_1}{Z_2}$$

(12) 峰值系数计算如下：

$$k_{K3} \approx 1.02 + 0.98e^{-3R_{QK3}/X_{QK3}}$$

(13) 峰值短路电流计算如下：

$$i_{pQK3} = k_K \sqrt{2} I''_{KK3}$$



4.6.3 等效电动机 M 馈送的短路电流计算如下：

在计算等效电动机 M 馈送的短路电流时，将电网电源短路，那么等效阻抗图如图 4.6.3 所示。计算时所有的阻抗应换算至等效电动机 M 的额定电压，即 U_{T1S} 或 U_{T2P}

(1) 电缆 L5 的阻抗换算至 U_{T2P} 的阻抗 \underline{Z}_{L5T2P} 按下式计算：

$$\underline{Z}_{L5T2P} = \left(\frac{U_{T2P}}{U_{T2S}} \right)^2 \times \underline{Z}_{L5}$$

(2) 下面两并联支路总的外阻抗 \underline{Z}_5 计算如下：

$$\underline{Z}_3 = \underline{Z}_{QT1S} + \underline{Z}_{L1T1S} + \underline{Z}_{L2T1S} + \underline{Z}_{T1S} + \underline{Z}_{L3}$$

$$\underline{Z}_4 = \underline{Z}_{L4} + \underline{Z}_{T2} + \underline{Z}_{L5T2P}$$

$$\frac{1}{\underline{Z}_5} = \frac{1}{\underline{Z}_3} + \frac{1}{\underline{Z}_4}$$

$$\underline{Z}_5 = R_5 + jX_5$$

(3) 时间常数按下式进行计算：

$$T''_{MK3} = \frac{X''_M + X_5}{2pfR_R}$$

$$T_{dcMK3} = \frac{X''_M + X_5}{2pf(R_S + R_5)}$$

(4) 短路电流按下式计算：

$$I''_{MK3} = \frac{U_{rM}}{\sqrt{3} \times \sqrt{(R_R + R_S + R_5)^2 + (X''_M + X_5)^2}}$$

$$I_{acMK3}(t) = I''_{MK3} e^{-t/T''_{MK3}} \times \frac{Z_5}{Z_4}$$

$$I_{dcMK3}(t) = \sqrt{2} I''_{MK3} e^{-t/T_{dcMK3}} \times \frac{Z_5}{Z_4}$$

$$i_{pMK3} = \sqrt{2} I_{acMK3} \left(\frac{T}{2} \right) + i_{acMK3} \left(\frac{T}{2} \right)$$

(5) 将等效电动机 M 馈送的短路电流换算至 K3 点电压下的短路电流，按下式计算：

$$I_{acMK3F}(t) = I_{acMK3}(t) \times \frac{U_{T2P}}{U_{T2S}}$$

$$i_{pMK3F} = i_{pMK3}(t) \times \frac{U_{T2P}}{U_{T2S}}$$

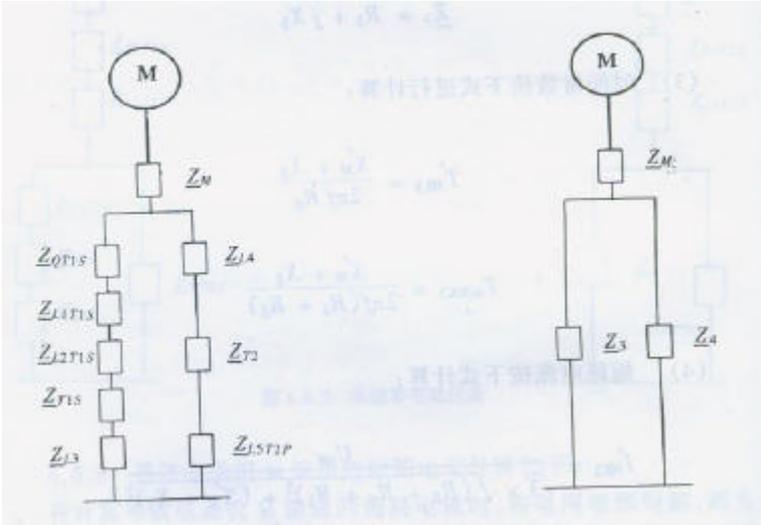


图 4.6.3 等效电动机馈送短路电流时的等效阻抗图

4.6.4 根据以上计算结果，利用叠加原理，求得 K3 点的对称短路电流 $I_{acK3}(t)$ 和峰值短路电流 i_{pK3} 为：

$$I_{acK3}(t) = I''_{KK3} + I_{acMK3F}(t)$$

$$i_{pK3} = i_{pQK3} + i_{pMK3F}$$