



中华人民共和国国家标准

GB/T 15544.4—2017/IEC 60909-3:2009

三相交流系统短路电流计算 第4部分：同时发生两个独立单相接地 故障时的电流以及流过大地的电流

Short-circuit current calculation in three-phase a.c. systems—
Part 4: Currents during two separate simultaneous line-to-earth short circuits
and partial short-circuit currents flowing through earth

(IEC 60909-3: 2009, Short-circuit current in three-phase a.c. systems—
Part 3: Currents during two separate simultaneous line-to-earth short circuits
and partial short-circuit currents flowing through earth, IDT)

2017-12-29 发布

2018-07-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 发布
中国国家标准化管理委员会

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语及定义	1
4 符号	4
5 同时发生两个独立单相接地短路期间的电流	5
5.1 对称短路电流初始值	5
5.2 短路电流峰值、对称开断电流及稳态短路电流	7
5.3 同时发生两个独立单相接地短路期间线路对地短路电流的分布	7
6 在不对称短路情况下通过接地的局部短路电流	7
6.1 概述	7
6.2 厂站内的单相接地短路	7
6.3 厂站外的单相接地短路	9
6.4 厂站附近的单相接地短路	10
7 带地线架空线路的减缩系数	11
8 金属护套或屏蔽两端接地电缆的电流分布及减缩系数的计算	12
8.1 概述	12
8.2 三芯电缆	12
8.3 三条单芯电缆	15
附录 A (资料性附录) 同时发生两个独立单相接地短路的计算实例	18
附录 B (资料性附录) 流经大地的短路电流计算实例	20
附录 C (资料性附录) 三芯电缆减缩系数和入地电流分布计算实例	27
附录 D (资料性附录) 三根单芯电流减缩因数 r_3 和入地电流分布计算实例	31

前 言

GB/T 15544《三相交流系统短路电流计算》分为以下 5 个部分：

- 第 1 部分：电流计算；
- 第 2 部分：短路电流计算应用的系数；
- 第 3 部分：电气设备数据；
- 第 4 部分：同时发生两个独立单相接地故障时的电流以及流过大地电流；
- 第 5 部分：算例。

本部分为 GB/T 15544 的第 4 部分。

本部分按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本部分使用翻译法等同采用 IEC 60909-3:2009《三相交流系统短路电流计算 第 3 部分：同时发生两个独立单相接地故障时的电流以及流过大地电流》。

本部分做了下列编辑性修改：

- 为与现有标准系列一致，将标准名称改为《三相交流系统短路电流计算 第 4 部分：同时发生两个独立单相接地故障时的电流以及流过大地电流》。

本部分由中国电力企业联合会提出。

本部分由全国短路电流计算标准化技术委员会(SAC/TC 424)归口。

本部分起草单位：中国电力科学研究院、国家电网公司国家电力调度通信中心、西安交通大学。

本部分主要起草人：汤涌、李明节、卜广全、张彦涛、周济、郭强、施浩波、张玉红、段翔颖、韩家辉、肖惕。

三相交流系统短路电流计算

第4部分：同时发生两个独立单相接地故障时的电流以及流过大地电流

1 范围

GB/T 15544 的本部分给出了高压三相交流系统(50 Hz 或 60 Hz)中不平衡短路情况下预期短路电流的计算步骤,即:

- a) 中性点不接地系统或中性点高阻抗接地系统中同时发生两个独立单相接地短路期间的电流;
- b) 中性点直接接地或中性点低阻抗接地系统中发生一个单相接地短路情况下流经大地的局部短路电流。

利用这些计算步骤算得的电流,用于确定发电厂或变电站以及架空线铁塔的感应电压、接触电压或跨步电压以及地电位的升高值。

该计算步骤会给出一个或两个架空线的减缩系数的计算。

本部分不包括:

- a) 特意在受控条件下(如在短路测试站内)生成的短路电流;
- b) 船只或飞机上电气装置内的短路电流;
- c) 中性点不接地或中性点高阻抗接地系统中的发生一个单相接地故障。

本部分的目的是制定实用、简明的步骤,用于计算同时发生两个独立单相接地短路时的接地短路电流,以及从电气设备经由大地或架空线路的地线和电缆的护套或屏蔽层的部分短路电流,从而获得具有足够精度的保守结果。为此目的,在短路发生处引入等效电压源,并假定其他电压源均为零。当计算短路点的短路电流时,站内的地线阻抗及架空线铁塔的塔基电阻予以忽略。

本部分是对 GB/T 15544.1 的补充。基本定义、符号及计算假设条件可参见 GB/T 15544.1。本部分只对一些特别项目进行了定义或说明。

计算短路参数时依照电气设备的额定数据、系统的拓扑结构,这使短路计算可应用于现有系统或规划阶段的系统。本部分不排斥在特定条件下可以得到同等精度的其他算法,如叠加法。

如 GB/T 15544.1 所述,短路电流及其参数也可通过系统测试加以确定。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 15544.1—2013 三相交流系统短路电流计算 第1部分:电流计算(IEC 60909-0:2001, IDT)

GB/T 15544.3—2017 三相交流系统短路电流计算 第3部分:电气设备数据(IEC/TR 60909-2:2008, IDT)

3 术语及定义

下列术语和定义适用于本文件。

GB/T 15544.4—2017/IEC 60909-3:2009

3.1

同时发生两个独立单相接地短路 **two separate simultaneous line-to-earth short circuits**

中性点高阻抗接地或不接地的三相交流系统中,在不同导线的不同位置同时发生的单相接地短路。

3.2

同时发生两个独立单相接地短路的初始短路电流 **initial short-circuit currents during two separate simultaneous line-to-earth short circuits**

I''_{kEE}

同时发生两个独立单相接地短路期间,流经两个接地点的短路电流初始有效值,两短路点具有相同的电流幅值。

3.3

流经大地的局部短路电流 **partial short-circuit current through earth**

$I_{E\delta}$

在等效大地渗透深度 δ 处的虚拟线路上流过的电流有效值。

注:在短路点及厂站的接地系统附近,电流在接地导体与大地之间的分配基本恒定,而在远离短路点及厂站的架空线路处,流经大地的电流 $I_{E\delta}$ 取决于架空线路的减缩系数(见图 4 和图 5)。对于电缆带有金属护套或屏蔽层并且在两端的 A 站与 B 站均接地的情况, $I_{E\delta}$ 指流过 A、B 站之间大地的电流[如图 9a)和图 10a)],也指流过短路点到 A 站或 B 站之间大地的电流[如图 9b)和 10b)]。

3.4

架空线路杆塔 T 短路点入地总电流 **total current to earth at the short-circuit location on the tower T of an overhead line**

I_{ETot}

两侧均远离厂站的架空线路杆塔上发生短路时,经塔基电阻流入大地的电流有效值。等效电路中,杆塔两侧均连接输入阻抗,见图 5。

3.5

厂站 B 内短路点入地总电流 **total current to earth at the short-circuit location in the station B**

I_{EBtot}

厂站 B 内发生短路时,经过 B 站的接地系统流入大地的电流有效值。其接地系统与接地导体相连(如:架空线路的地线;电缆的金属护套、屏蔽层或铠装层;金属水管等其他接地导体),见图 4。

3.6

(杆塔 n)入地电流 **current to earth**

I_{ETn}

厂站附近架空线路杆塔 n 处流入大地的电流有效值。该电流导致杆塔 n 处地电位升高。

3.7

(杆塔 n 短路时厂站 B)入地电流 **current to earth**

I_{EBn}

在厂站 B 附近的架空线路杆塔 n 处发生单相接地短路时,厂站 B 处的入地电流有效值。该电流导致厂站 B 处地电位升高 U_{EBn} 。

3.8

(架空线路)减缩系数 **reduction factor**

r

对于架空线路,用来确定流经远端大地部分单相短路电流的系数。这里所指的远端大地系远离短路点及厂站接地系统。

3.9

(三芯电缆)减缩系数 reduction factor

r_1

应用于带有两端接地的金属护套或屏蔽层的三芯电缆,意义同 3.8。

3.10

(三条单芯电缆)减缩系数 reduction factor

r_3

应用于带有两端接地的金属护套或屏蔽层的三条单芯电缆,意义同 3.8。

3.11

无限链的输入阻抗 driving point impedance of an infinite chain

$\underline{Z}_P$

以架空地线与大地为回路,由相邻杆塔地线阻抗 $\underline{Z}_Q$ 与塔基电阻 R_T 构成的无限链(见图 1)的等值阻抗。该阻抗由式(1)计算。

$$\underline{Z}_P = 0,5 \cdot \underline{Z}_Q + \sqrt{(0,5 \cdot \underline{Z}_Q)^2 + R_T \underline{Z}_Q} \dots\dots\dots (1)$$

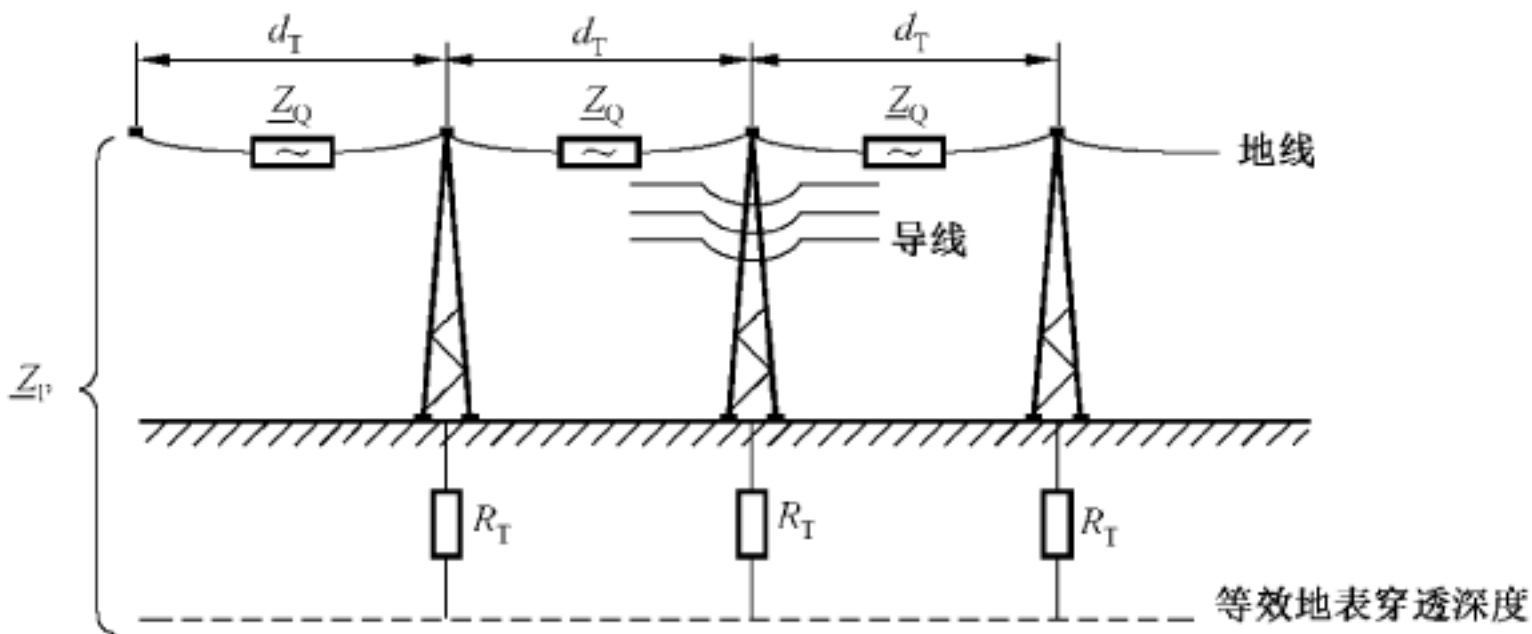


图 1 无限链输入阻抗 $\underline{Z}_P$

当驱动点 P 与短路点 F 的距离大于 D_F [见式(18)]时,可假定输入阻抗达到恒定值,即 $\underline{Z}_P$ 。

3.12

有限链的输入阻抗 driving point impedance of a finite chain

$\underline{Z}_{Pn}$

如图 2 所示 n 个杆塔及一端发电厂或变电站 B 构成有限链,B 接地阻抗为 $\underline{Z}_{EB}$,由式(2)计算架空线路的输入阻抗 $\underline{Z}_{Pn}$ 。

$$\underline{Z}_{Pn} = \frac{\underline{Z}_P (\underline{Z}_{EB} + \underline{Z}_P) \cdot \underline{k}^n + (\underline{Z}_P - \underline{Z}_Q) (\underline{Z}_{EB} - \underline{Z}_P + \underline{Z}_Q) \cdot \underline{k}^{-n}}{(\underline{Z}_{EB} + \underline{Z}_P) \cdot \underline{k}^n - (\underline{Z}_{EB} - \underline{Z}_P + \underline{Z}_Q) \cdot \underline{k}^{-n}} \dots\dots\dots (2)$$

式(2)中:

$$\underline{k} = 1 + \frac{R_T}{\underline{Z}_P} \dots\dots\dots (3)$$

注: 令 $n \rightarrow \infty$,可由式(2)导出式(1)。在实际计算中,当 $n = 10 \dots\dots 15$ 时即可认为 $n \rightarrow \infty$ 条件成立。

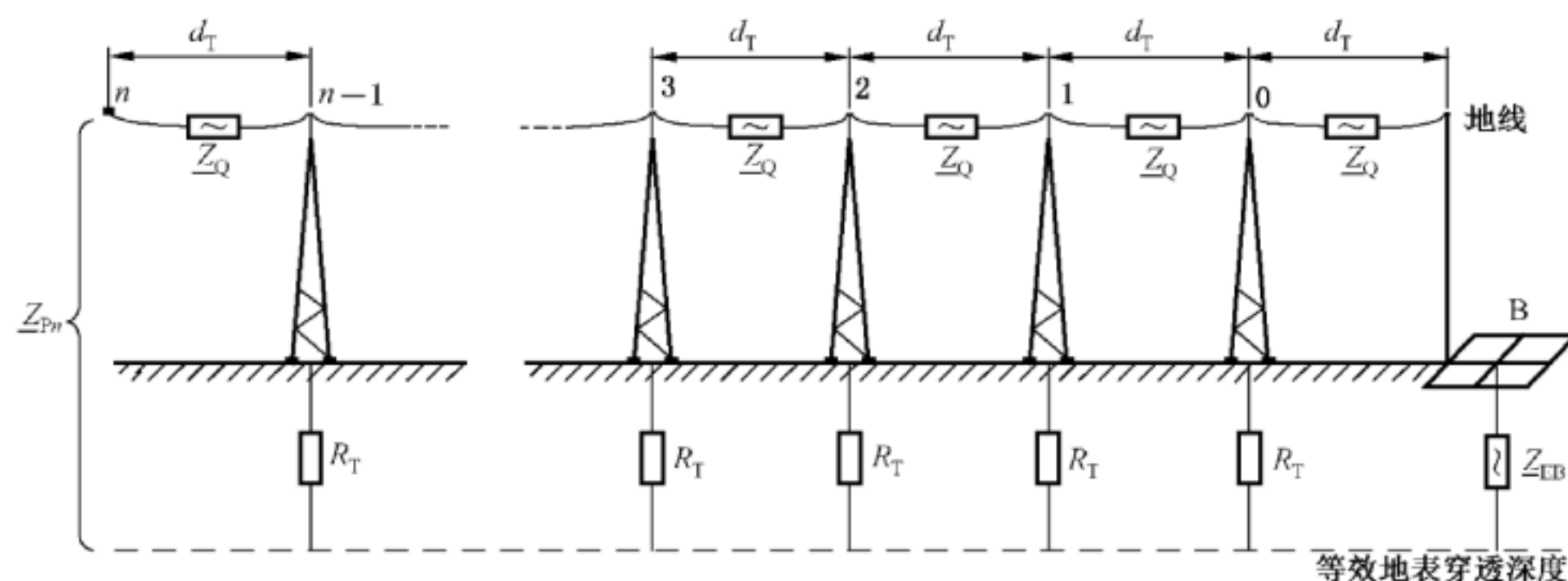


图2 有 n 个杆塔无限长链的输入阻抗 $\underline{Z}_{Pn}$ ，由地线阻抗 $\underline{Z}_Q = \underline{Z}'_Q d_T$ ，塔基电阻 R_T ，杆塔等效间距 d_T 及根据式(29)计算得到的厂站 B 接地阻抗 $\underline{Z}_{EB}$ 组成

4 符号

下列符号适用于本文件。

所有公式均为数量方程式，其中符号均为表示数值及维数的物理量，复数用下划线表示。

$cU_n/\sqrt{3}$ ：等效电压源，见 GB/T 15544.1；

D_F ：远离厂站的距离，见式(19)；

d_T ：杆塔之间的距离；

d_{L1L2} ：导线 L1 与 L2 之间的距离；

d_{Q1Q2} ：地线 Q1 与 Q2 之间的距离；

I_{bEE} ：在同时发生两个独立单相接地短路情况下的开断短路电流；

I_E ：入地电流(图 4、图 5、图 7 中的 I_{EA} 、 I_{EB} 、 I_{EC} 和 I_{ET})；

I_{EBn} ：杆塔 n 短路时厂站 B 入地电流(见图 7)；

I_{EBtot} ：厂站 B 内短路点入地总电流(见图 4)；

I_{ETn} ：厂站附近杆塔 n 短路时，杆塔 n 处入地电流(见图 7)；

I_{ETtot} ：远离厂站的杆塔短路时，该杆塔处总入地电流(见图 5)；

I''_{kEE} ：同时发生两个独立单相接地短路的初始短路电流；

I''_{kE2E} ：两相接地短路时注入大地的初始对称短路电流，见 GB/T 15544.1；

$I_{E\delta}$ ：流过大地的局部短路电流[见图 4， $\underline{I}_{E\delta A} = r_A \times 3 \underline{I}_{(0)A}$ ；图 9b)由式(45)计算流回站 A 的电流 $\underline{I}_{E\delta A}$]；

I_Q ：地线电流；

I_S ：电缆护套或屏蔽层中的电流(三条单芯电缆： I_{S1} 、 I_{S2} 和 I_{S3})；

I_T ：流经架空线杆塔基础电阻 R_T 的局部短路电流；

i_{pEE} ：同时发生两个独立单相接地短路情况下的峰值短路电流；

$\underline{M}_{(1)}$ 、 $\underline{M}_{(2)}$ ：正序、负序耦合阻抗；

R_{EA} 或 R_{EB} ：站 A 或 B 的接地网电阻；

R_{EF} ：电缆短路点的对地电阻[图 9b)或 10b)]；

R_T ：架空线杆塔基础电阻；

r ：架空线路减缩系数；

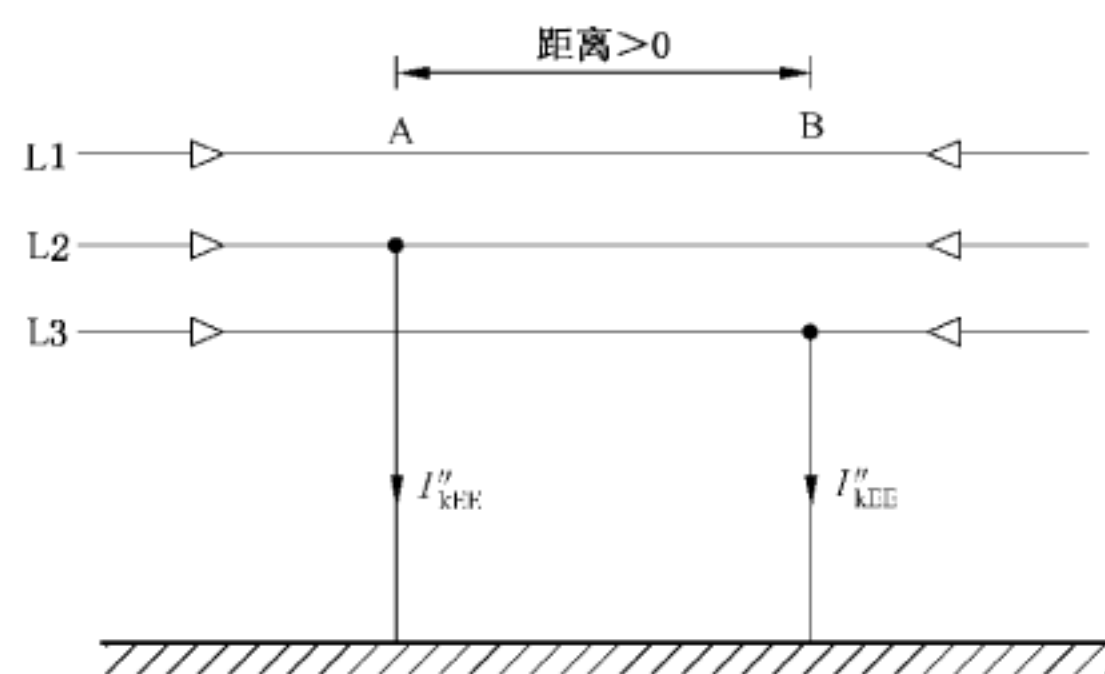
r_1 ：三芯电缆减缩系数[图 9a)]；

r_3 : 三条单芯电缆减缩系数[图 10a)];
 r_Q : 地线半径;
 r_S : 电缆金属护套或屏蔽层的半径(中间值);
 $Z_{(1)A}$ 、 $Z_{(1)B}$: 连接位置 A、B 处三相交流系统的正序短路阻抗(参见附录 B);
 $Z_{(0)}$: 短路位置 A 及 B 之间整个网络的零序短路阻抗(导线之间及对地的导纳忽略不计);
 Z_{EB} : 根据式(29)得出的厂站的接地阻抗;
 Z_{EBtot} : 根据式(17)得出的厂站的总接地阻抗;
 Z_{ET} : 根据式(28)得出的短路杆塔的接地阻抗;
 Z_{ETtot} : 根据式(23)得出的短路杆塔的总接地阻抗;
 Z_P : 无限链的输入阻抗, 见式(1)及图 1;
 Z_{Pn} : 有限链的输入阻抗, 见式(2)及图 2;
 $Z_Q = Z'_Q \cdot d_T$: 两个接地杆塔之间以大地为回路的地线阻抗;
 Z'_Q : 以大地为回路的单位长度的地线阻抗;
 Z'_{QL} : 以大地为回路, 地线与导线之间的单位长度互感阻抗;
 Z'_S : 以大地为回路, 接地金属护套或屏蔽的单位长度的阻抗;
 Z'_{SL} : 以大地为回路, 接地电缆护套(屏蔽)和电缆芯之间单位长度的互感阻抗;
 Z_U : 护套(屏蔽)、铠装电缆或其他金属管线或管道的输入阻抗, 见式(17);
 δ : 等效大地渗透深度, 见式(36);
 μ_0 : 磁常数, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Vs/Am}$;
 ρ : 土壤电阻率;
 ω : 角频率, $\omega = 2\pi f$ (f 为 50 Hz 或 60 Hz)。

5 同时发生两个独立单相接地短路期间的电流

5.1 对称短路电流初始值

如图 3 所示, 位置 A 及 B 均远离厂站且 A 与 B 之间为有限距离, 两处不同导线上同时发生独立单相接地短路故障, 故障期间的短路电流为 I''_{kEE} 。



注: 电流方向为任意选择。

图 3 同时发生两个独立单相接地短路的电流 I''_{kEE}

在中性点不接地或高阻抗接地系统中, 初始对称短路电流 I''_{kEE} 由式(4)计算。

$$I''_{kEE} = \frac{3cU_n}{|Z_{(1)A} + Z_{(2)A} + Z_{(1)B} + Z_{(2)B} + \underline{M}_{(1)} + \underline{M}_{(2)} + \underline{M}_{(0)}|} \quad \dots\dots\dots (4)$$

注：式(4)的推导参见“ITU-T—保护通信线路防止其受到电力及电气化铁路线有害影响的指导，卷 V：电力传输及配电系统中的感应电流与电压，1999”。

在远端短路情况下， $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$ ， $\underline{M}_{(1)} = \underline{M}_{(2)}$ ，短路电流初始值由式(5)计算。

$$I''_{\text{kEE}} = \frac{3cU_n}{|2\underline{Z}_{(1)A} + 2\underline{Z}_{(1)B} + 2\underline{M}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}|} \dots\dots\dots (5)$$

5.1.1 $\underline{M}_{(1)}$ 及 $\underline{M}_{(2)}$ 的确定

在短路位置 A 施加电压源 $\underline{U}_A$ ，该电压为系统的唯一激励电压。短路位置 A 处因该电压源激励而产生的正序及负序电流为 $\underline{I}_{(1)A}$ 及 $\underline{I}_{(2)A}$ ，位置 B 处激励产生的正序及负序电压为 $\underline{U}_{(1)B}$ 及 $\underline{U}_{(2)B}$ ，则正序及负序耦合阻抗 $\underline{M}_{(1)}$ 及 $\underline{M}_{(2)}$ 由式(6)计算。

$$\underline{M}_{(1)} = \frac{\underline{U}_{(1)B}}{\underline{I}_{(1)A}} \quad \underline{M}_{(2)} = \frac{\underline{U}_{(2)B}}{\underline{I}_{(2)A}} \dots\dots\dots (6)$$

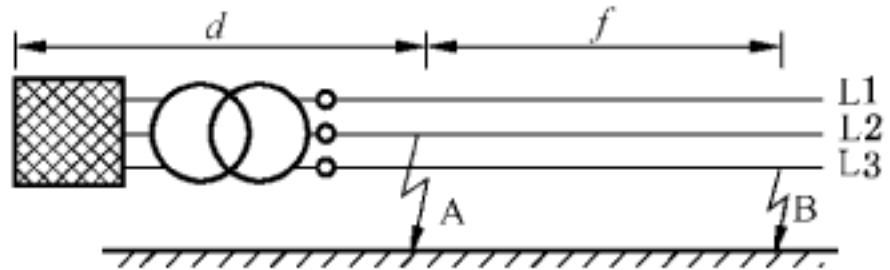
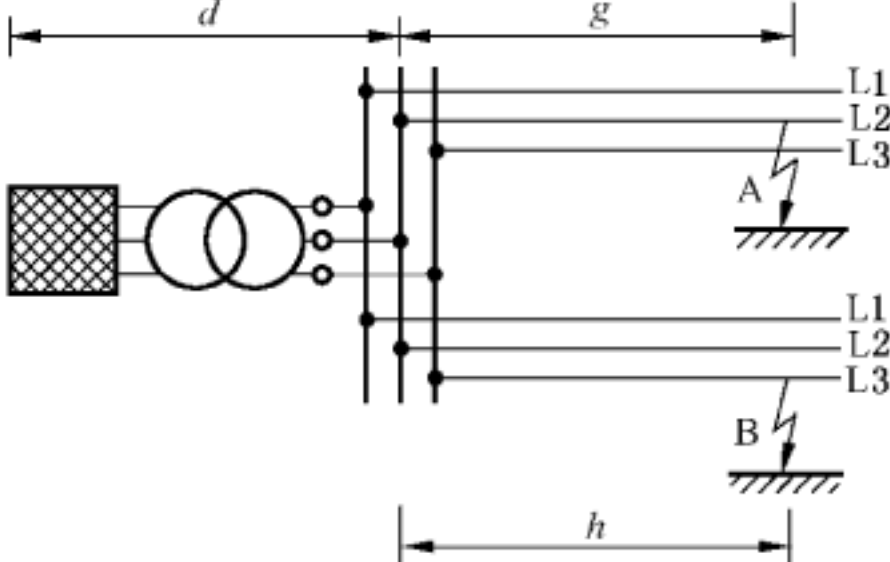
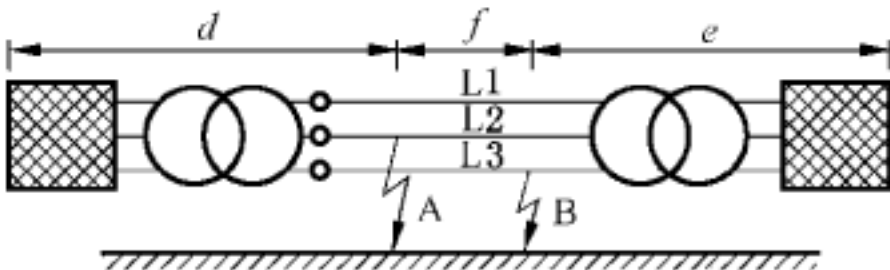
耦合阻抗 $\underline{M}_{(1)}$ 及 $\underline{M}_{(2)}$ 也可由短路位置 B 而非位置 A 确定，如式(7)所示。

$$\underline{M}_{(1)} = \frac{\underline{U}_{(1)A}}{\underline{I}_{(1)B}} \quad \underline{M}_{(2)} = \frac{\underline{U}_{(2)A}}{\underline{I}_{(2)B}} \dots\dots\dots (7)$$

5.1.2 同时发生两个独立单相接地短路的简单情况

在简单情况下，假定 $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$ 且 $\underline{M}_{(1)} = \underline{M}_{(2)}$ ，同时发生两个独立单相接地短路时的电流可用表 1 中式(8)~式(10)计算。式(8)~式(10)均从式(5)推导得出，相关阻抗均与电路中的标注对应。

表 1 简单情况下短路电流初始值的计算

a)		一条单端馈电辐射线路 $I''_{\text{kEE}} = \frac{3cU_n}{ 6\underline{Z}_{(1)d} + 2\underline{Z}_{(1)f} + \underline{Z}_{(0)f} } \dots\dots\dots (8)$
b)		两条单端馈电辐射线路 $I''_{\text{kEE}} = \frac{3cU_n}{ 6\underline{Z}_{(1)d} + 2[\underline{Z}_{(1)g} + \underline{Z}_{(1)h}] + \underline{Z}_{(0)g} + \underline{Z}_{(0)h} } \dots\dots\dots (9)$
c)		一条双端馈电线路 $I''_{\text{kEE}} = \frac{3cU_n}{\left \frac{6\underline{Z}_{(1)d}\underline{Z}_{(1)e} + 2\underline{Z}_{(1)f}[\underline{Z}_{(1)d} + \underline{Z}_{(1)e}]}{\underline{Z}_{(1)d} + \underline{Z}_{(1)f} + \underline{Z}_{(1)e}} + \underline{Z}_{(0)f} \right } \dots\dots\dots (10)$
电压系数 c 根据 GB/T 15544.1 的表 1 取值。		

5.2 短路电流峰值、对称开断电流及稳态短路电流

短路电流峰值根据 GB/T 15544.1 计算,即式(11)。

$$i_{pEE} = \kappa \sqrt{2} I''_{kEE} \dots\dots\dots (11)$$

系数 κ 取值与位置 A 或 B 处发生三相短路时的数值相同,并取较大者。

若单相接地短路为远端短路,则有式(12)。

$$I_{kEE} = I_{bEE} = I''_{kEE} \dots\dots\dots (12)$$

5.3 同时发生两个独立单相接地短路期间线路对地短路电流的分布

在位置 A 与 B 处同时发生独立单相接地短路,计算接地电流的分布情况时,可假设电流源 $r \cdot 3I_{(0)} = r \cdot I''_{kEE}$ 向 A 与 B 点零序系统馈电,且该电流源为系统唯一激励,其他所有电源均置零。

架空线杆塔 A 与 B 处同时发生独立单相接地短路情况下,远离厂站的各杆塔的电流 I_T 由式(13)计算。

$$I_T = r \cdot I''_{kEE} \frac{Z_P}{Z_P + 2R_T} \dots\dots\dots (13)$$

式中:

Z_P ——无限长链输入阻抗,见式(1)。

注:用 $r \cdot I''_{kEE}$ 代替 I_{Etot} ,可从图 6 推导出式(13)。

无地线架空线路(如中压网络)上同时发生两个独立单相接地短路,对地电流等同于短路电流 I''_{kEE} 。

6 在不对称短路情况下通过接地的局部短路电流

6.1 概述

下列内容说明了在单相接地短路情况下流过大地及接地导体(如接地系统,架空线路的地线)的局部短路电流。在中性点直接接地的高压系统,此类短路是最为常见的不对称短路。如果 $Z_{(0)} > Z_{(1)}$,在两相接地短路情况下 I''_{kl} 可产生流过大地最大短路电流(见 GB/T 15544.1, $Z_{(0)} = Z_{(1)}$,图 10)。若 $Z_{(0)} < Z_{(1)}$,需按 GB/T 15544.1 计算接地系统相间短路的人地电流 I''_{kE2E} 。

根据 GB/T 15544.1,计算短路电流时杆塔阻抗(有或无地线)、接地网阻抗及其他与地的连接可忽略不计。

可在由三个厂站 A、B、C,单回架空线路及一条地线组成的简化网络上进行该计算过程(算例参见附录 B)。另外假设厂站 A、B 与 C 之间的间隔为 D_F [见式(19)]的两倍以上。

6.2 厂站内的单相接地短路

如图 4 所示,厂站 B 通过馈线与厂站 A、C 相连。

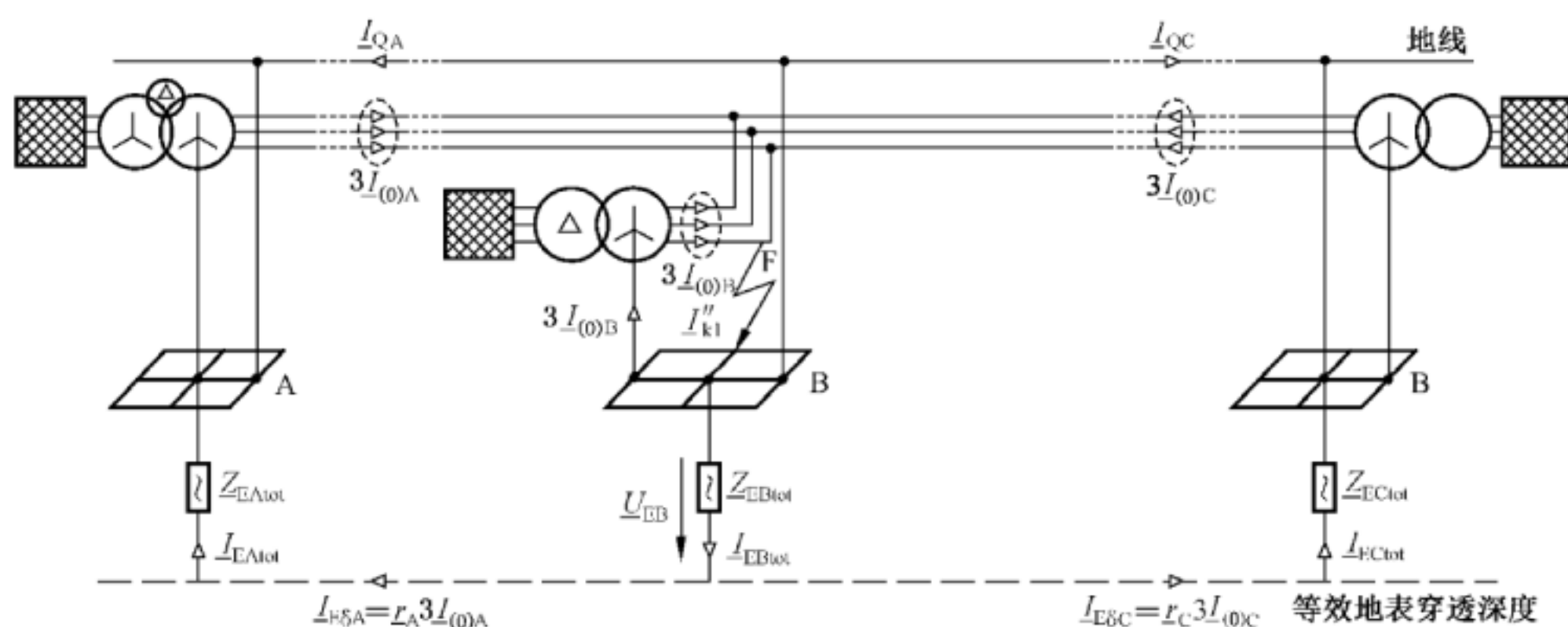


图4 电站B内单相接地短路情况下的局部短路电流

图4中单相接地短路电流 I''_{K1} 等于流向短路位置F的零序电流的三倍,即有式(14)。

$$I''_{K1} = 3 \underline{I}_{(0)A} + 3 \underline{I}_{(0)B} + 3 \underline{I}_{(0)C} \quad \dots\dots\dots (14)$$

电流 $3 \underline{I}_{(0)B}$ 为短路点F经过B站的接地网流回变压器中性点的电流,该电流不会导致B站电位上升。 $3 \underline{I}_{(0)A}$ 与 $3 \underline{I}_{(0)C}$ 分别流回A站与C站的电流。 $3 \underline{I}_{(0)A}$ 流经B站与A站之间的大地及地线; $3 \underline{I}_{(0)C}$ 流经B站与C站之间的大地及地线。由于AB之间、BC之间距离较远,有式(15)成立(见图4)。式中 $\underline{r}_A$ 、 $\underline{r}_B$ 分别为B站与A站之间、B站和C站之间地线的减缩系数。

$$3 \underline{I}_{(0)A} = \underline{I}_{E\delta A} + \underline{I}_{QA} \approx \underline{r}_A 3 \underline{I}_{(0)A} + (1 - \underline{r}_A) 3 \underline{I}_{(0)A} \quad \dots\dots\dots (15a)$$

$$3 \underline{I}_{(0)C} = \underline{I}_{E\delta C} + \underline{I}_{QC} \approx \underline{r}_C 3 \underline{I}_{(0)C} + (1 - \underline{r}_C) 3 \underline{I}_{(0)C} \quad \dots\dots\dots (15b)$$

厂站B内短路点入地总电流 $\underline{I}_{EBtot}$ 表示为式(16)。

$$\underline{I}_{EBtot} = \underline{r}_A 3 \underline{I}_{(0)A} + \underline{r}_C 3 \underline{I}_{(0)C} \quad \dots\dots\dots (16)$$

厂站B内短路点入地总电流 $\underline{I}_{EBtot}$ 流过的总接地阻抗用式(17)计算。

$$\underline{Z}_{EBtot} = \frac{1}{\frac{1}{R_{EB}} + \sum_i \frac{1}{\underline{Z}_{Pi}} + \sum_i \frac{1}{\underline{Z}_{Ui}}} \quad \dots\dots\dots (17)$$

式中:

R_{EB} ——厂站B接地网电阻;

$\underline{Z}_P$ ——输入阻抗,见式(1);

$\underline{Z}_U$ ——为电缆或其他金属管线的护套、屏蔽或防护层的输入阻抗。

电流经过 $\underline{Z}_{EBtot}$ 引起的变电站B处的电位升 $\underline{U}_{EB}$ 由式(18)计算。

$$\underline{U}_{EB} = \underline{Z}_{EBtot} \underline{I}_{EBtot} \quad \dots\dots\dots (18)$$

厂站远区距离(远离短路地点)计算如下:

$$D_F = 3 \sqrt{R_T} \frac{d_T}{\text{Re}\{\sqrt{\underline{Z}_Q}\}} \quad \dots\dots\dots (19)$$

式中:

R_T ——杆塔基础电阻;

d_T ——杆塔之间的距离;

$\text{Re}\{\sqrt{\underline{Z}_Q}\}$ ——为地线阻抗 $\underline{Z}_Q = \underline{Z}'_Q d_T$ 平方根的实部,其中 $\underline{Z}_Q$ 见式(34)。

注1:若A站或C站与B站的距离小于 D_F ,厂站B内短路点入地总电流 $\underline{I}_{EBtot}$ 中的 $\underline{r}_A 3 \underline{I}_{(0)A}$ 或 $\underline{r}_C 3 \underline{I}_{(0)C}$ 还将额外减少一部分,这部分通过地线流回较近的厂站。

注2:对双回线或存在零序耦合的平行线路的情况,需要特殊处理。

6.3 厂站外的单相接地短路

架空线路杆塔处单相接地时的电路图如图 5 所示,假设该短路在远离各站的位置发生。

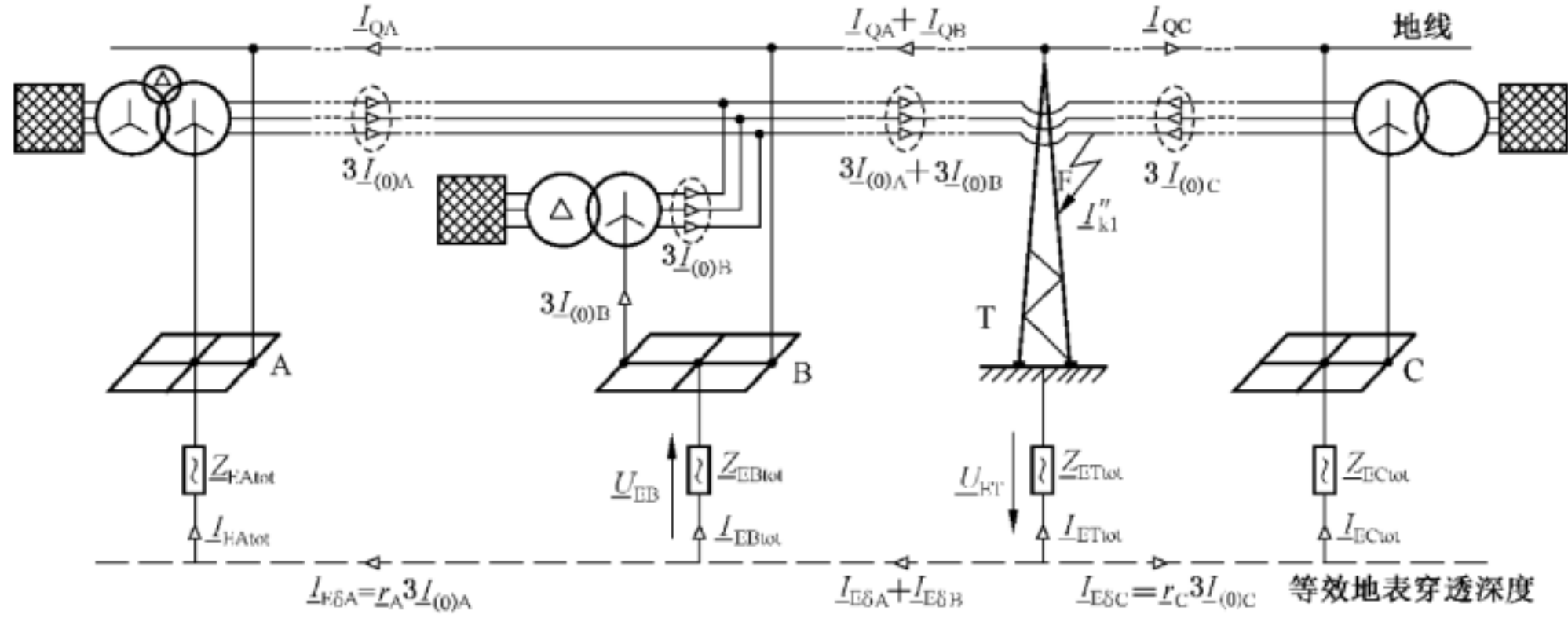


图 5 架空线杆塔 T 处发生单相接地短路时的局部短路电流

图 5 中单相对地短路电流 I''_{K1} 等于 3 倍的短路点 F 零序电流,即有式(20)。

$$I''_{K1} = 3 I_{(0)A} + 3 I_{(0)B} + 3 I_{(0)C} \quad \dots\dots\dots (20)$$

电流 $3 I_{(0)A}$ 、 $3 I_{(0)B}$ 、 $3 I_{(0)C}$ 分别通过站之间的地与架空线地线流回到厂站 A、B、C,即式(21)成立:

$$3 I_{(0)A} + 3 I_{(0)B} = I_{E8A} + I_{E8B} + I_{QA} + I_{QB} = r_C (3 I_{(0)A} + 3 I_{(0)B}) + (1 - r_C) (3 I_{(0)A} + I_{(0)B}) \quad \dots\dots\dots (21)$$

由图 4 及式(15)知:

$$\begin{aligned} 3 I_{(0)A} &= I_{E8A} + I_{QA} = r_A 3 I_{(0)A} + (1 - r_A) 3 I_{(0)A} \\ 3 I_{(0)C} &= I_{E8C} + I_{QC} = r_C 3 I_{(0)C} + (1 - r_C) 3 I_{(0)C} \end{aligned}$$

其中, r_A 、 r_C 分别为 B 与 A 之间、B 与 C 之间地线的减缩系数。

杆塔 T(短路地点)处远离厂站 B 和 C(距离远大于 D_F),该处的总电流为式(22)。

$$I''_{ETot} = I_{E8A} + I_{E8B} + I_{E8C} = r_C (3 I_{(0)A} + 3 I_{(0)B} + 3 I_{(0)C}) = r_C I''_{K1} \quad \dots\dots\dots (22)$$

根据图 6,短路杆塔的总接地阻抗为式(23)。

$$Z_{ETot} = \frac{1}{\frac{1}{R_T} + \frac{2}{Z_P}} \quad \dots\dots\dots (23)$$

式中, R_T 为杆塔基础电阻; Z_P 为输入阻抗,按式(1)计算。

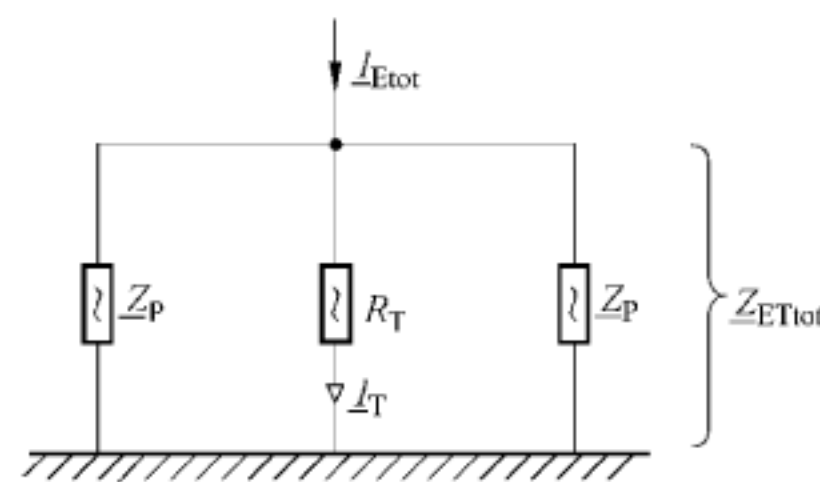


图 6 总接地电流 I_{ETot} 的分配

式(13)中用 $r_C I''_{K1}$ 替换 $r \cdot I''_{KEE}$ 可得 I_T 。

短路处的地电流经过 Z_{ETot} ,产生杆塔处的地电位(见图 6)用式(24)计算。

$$U_{ET} = Z_{ETot} I_{ETot} = R_T I_T \quad \dots\dots\dots (24)$$

如果对地短路的杆塔位于厂站 B 近区,其地电位可能会高于由式(24)计算得到的数值。具体计算

需特殊考虑,详见 6.4。

如图 5 所示,在杆塔 T 处(与厂站 B 的距离远大于 D_F)发生单相短路情况下,厂站 B 内流经大地的电流用式(25)计算。

$$\underline{I}_{EBtot} = \underline{r}_C [3 \underline{I}_{(0)A} + 3 \underline{I}_{(0)B}] - \underline{r}_A 3 \underline{I}_{(0)A} \quad \dots\dots\dots (25)$$

由式(25)得到的电流 $\underline{I}_{EBtot}$,根据式(26)计算站 B 内的地电位 $\underline{U}_{EB}$ 。

$$\underline{U}_{EB} = \underline{Z}_{EBtot} \underline{I}_{EBtot} \quad \dots\dots\dots (26)$$

若发生单相接地短路的杆塔位置距离 B 站较近,B 站的地电流可能会高于 B 站内发生单相接地短路(见图 4)时由式(16)得到的电流 $\underline{I}_{EBtot}$ 。详见 6.4。

6.4 厂站附近的单相接地短路

如果在厂站附近(距离小于 D_F)发生单相接地短路(如图 7),则地电位 $\underline{U}_{EBn}$ (标号 n 表示单相接地短路发生在站外杆塔 $n=0,1,2,3,\dots\dots$ 处)可能大于根据式(18)算出的 $\underline{U}_{EB}$ 。在该情况下,杆塔 n 的地电位 $\underline{U}_{ETn}$ 也要大于按照式(24)确定的远离厂站的杆塔地电位 $\underline{U}_{ET}$ 。

图 2 中,计算 $\underline{I}_{K1}$ 及 $3 \underline{I}_{(0)B}$ 时应考虑到杆塔的编号。

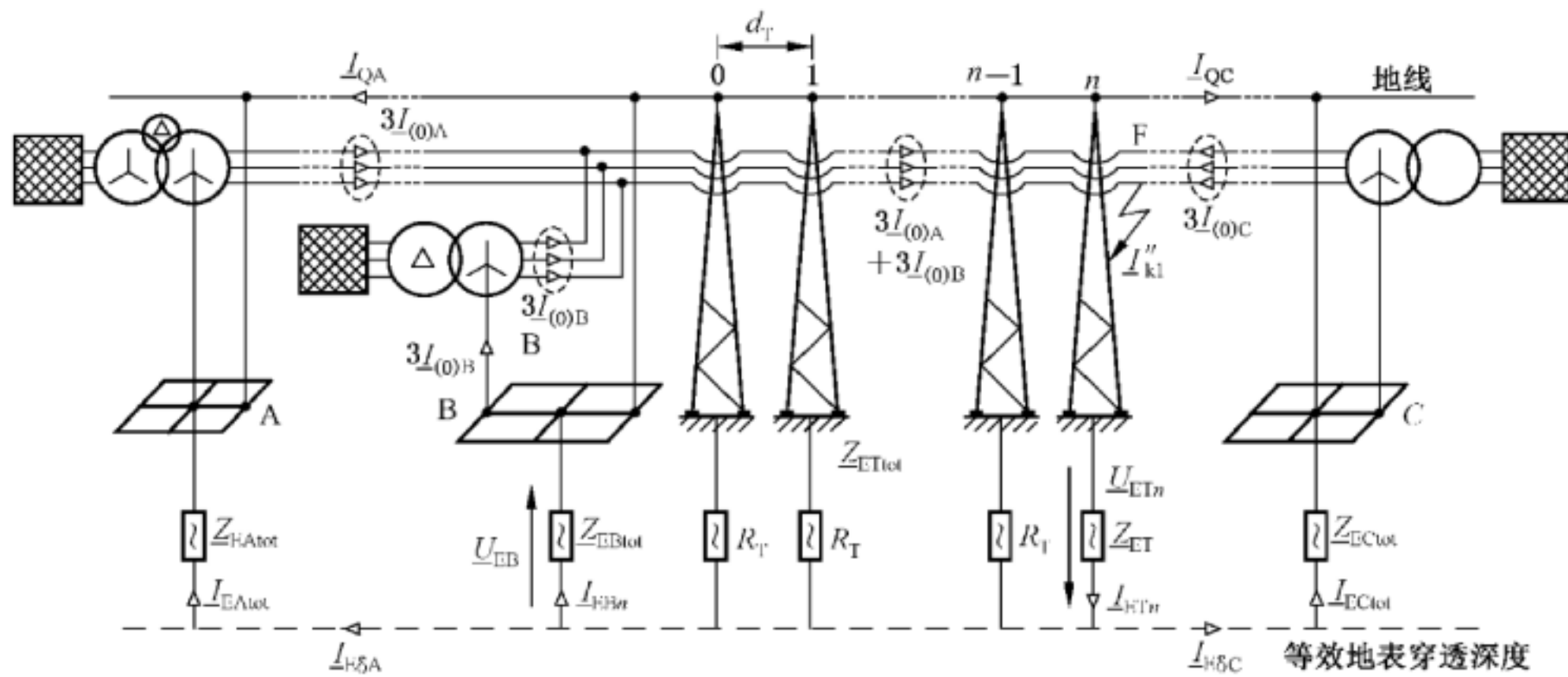


图 7 厂站 B 附近杆塔 n 发生单相接地短路时的局部短路电流

6.4.1 厂站 B 外杆塔 n 处地电位 $\underline{U}_{ETn}$

厂站 B 近区杆塔 n 处短路时的电流 $\underline{I}_{ETn}$,流经的阻抗 $\underline{Z}_{ET}$ 由式(28)计算。电流 $\underline{I}_{ETn}$ 由两部分叠加获得:第一个部分取决于短路位置处流入大地的电流 $\underline{r}_C \underline{I}_{K1}''$,第二部分取决于经大地回流到站 B 变压器中性点的电流 $\underline{r}_C 3 \underline{I}_{(0)B}$ 。 $\underline{I}_{ETn}$ 由式(27)计算。

$$\underline{I}_{ETn} = \underline{r}_C \underline{I}_{K1}'' \frac{\underline{Z}_{Pn}}{\underline{Z}_{Pn} + \underline{Z}_{ET}} - \underline{r}_C 3 \underline{I}_{(0)B} \frac{\underline{Z}_{EB}}{\underline{Z}_{EB} + \underline{Z}_P} \cdot \frac{1}{k^n} \quad \dots\dots\dots (27)$$

式中:

$$\underline{Z}_{ET} = \frac{1}{\frac{1}{R_T} + \frac{1}{\underline{Z}_P}} \quad \dots\dots\dots (28)$$

$$\underline{Z}_{EB} = \frac{1}{\frac{1}{R_{EB}} + \frac{1}{\underline{Z}_P}} \quad \dots\dots\dots (29)$$

输入阻抗 $\underline{Z}_P$ 由式(1)计算, $\underline{Z}_{Pn}$ 按式(2)计算, k 由式(3)计算。

短路杆塔 n 处的地电位 $\underline{U}_{ETn}$ 由式(30)计算。

$$U_{ETn} = \underline{Z}_{ET} \underline{I}_{ETn} \quad \dots\dots\dots (30)$$

6.4.2 杆塔 n 处单相接地短路时 B 站的地电位

厂站 B 附近杆塔 n 处发生单相接地短路时厂站 B 中通过 $\underline{Z}_{EB}$ (见图 7) 的电流 $\underline{I}_{EBn}$ 由式(31)计算, B 站地电位由式(32)计算。

$$\underline{I}_{EBn} = \underline{r}_C \underline{I}_{K1}'' \frac{\underline{Z}_{ET}}{\underline{Z}_{Pn} + \underline{Z}_{ET}} \cdot \frac{2 \underline{Z}_P - \underline{Z}_Q}{(\underline{Z}_{EB} + \underline{Z}_P) \underline{k}^n - (\underline{Z}_{EB} - \underline{Z}_P + \underline{Z}_Q) \underline{k}^{-n}} - \underline{r}_C 3 \underline{I}_{(0)B} \frac{\underline{Z}_P}{\underline{Z}_{EB} + \underline{Z}_P} \quad \dots\dots\dots (31)$$

$$\underline{U}_{EBn} = \underline{Z}_{EB} \underline{I}_{EBn} \quad \dots\dots\dots (32)$$

7 带地线架空线路的减缩系数

带地线架空线路的减缩系数由式(33)计算(算例参见附录 A)。

$$\underline{r} = \frac{\underline{I}_{E\delta}}{3 \underline{I}_{(0)}} = 1 - \frac{\underline{Z}'_{QL}}{\underline{Z}'_Q} \quad \dots\dots\dots (33)$$

其中 $\underline{Z}'_Q$ 、 $\underline{Z}'_{QL}$ 分别由式(33)、式(34)计算,其值取决于土壤电阻率 ρ 、地线与导线之间的距离 d_{QL} 以及单条或多条地线的等效地线半径 r_{QQ} 。

表 2 不同土壤类型的电阻率及等效大地渗透深度

土壤类型	电阻率 ρ Ωm	等效大地渗透深度 δ m	
		50 Hz	60 Hz
花岗岩	$>10\,000$	$>9\,300$	$>8\,500$
岩石	$3\,000 \sim 10\,000$	$5\,150 \sim 9\,330$	$4\,670 \sim 8\,520$
石质土	$1\,000 \sim 3\,000$	$2\,950 \sim 5\,110$	$2\,690 \sim 4\,670$
干砂、卵石	$200 \sim 1\,200$	$1\,320 \sim 3\,230$	$1\,200 \sim 2\,950$
石灰性土壤、湿沙	$70 \sim 200$	$780 \sim 1\,320$	$710 \sim 1\,200$
农田土壤	$50 \sim 100$	$660 \sim 1\,320$	$600 \sim 850$
黏土、壤土	$10 \sim 50$	$295 \sim 660$	$270 \sim 600$
沼泽土	<20	<420	<380

单位长度的地线,当电流由大地返回时,其阻抗由式(34)计算。

$$\underline{Z}'_Q = \frac{R'_Q}{v} + \omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{\mu_r}{4v} + \ln \frac{\delta}{r_{QQ}} \right) \quad \dots\dots\dots (34)$$

地线与导线之间的单位长度互阻抗由式(35)计算。

$$\underline{Z}'_{QL} = \omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{d_{QL}} \quad \dots\dots\dots (35)$$

等效大地渗透深度 δ 取决于表 2 中给出的土壤类型,可由式(36)计算。

$$\delta = \frac{1\,851}{\sqrt{\omega \frac{\mu_0}{\rho}}} \quad \dots\dots\dots (36)$$

式中:

R'_Q ——单位长度的地线电阻。

- d_{Q1Q2} ——地线 Q1 和 Q2 之间的距离。
- r_Q ——地线半径。
- r_{QQ} ——等效地线半径：
单条地线： $r_{QQ}=r_Q$ ；
两条地线： $r_{QQ}=\sqrt{r_Q d_{Q1Q2}}$ 。
- v ——地线数量($v=1,2$)。
- d_{QL} ——地线与导线 L1、L2 及 L3 之间的几何平均距离：
单条地线： $d_{QL}=\sqrt[3]{d_{QL1} d_{QL2} d_{QL3}}$ ；
两条地线： $d_{QL}=\sqrt[6]{d_{Q1L1} d_{Q1L2} d_{Q1L3} d_{Q2L1} d_{Q2L2} d_{Q2L3}}$ 。
- μ_r ——地线材料的相对磁导率：
单层铝的钢芯铝绞线(ACSR)： $\mu_r=5\cdots\cdots 10$ ；
其他钢芯铝线： $\mu_r\approx 1$ ；
钢线： $\mu_r\approx 75$ 。

根据式(34)、式(35)，通常 ACSR 地线的减缩系数取决于大地电阻率 ρ 。图 8 给出了标称电压 60 kV~220 kV 不同类型架空线路非铁质地线的减缩系数。

在架空线路具有单条、两条铁质地线的情况下，减缩系数大小会分别达到 0.95、0.90。

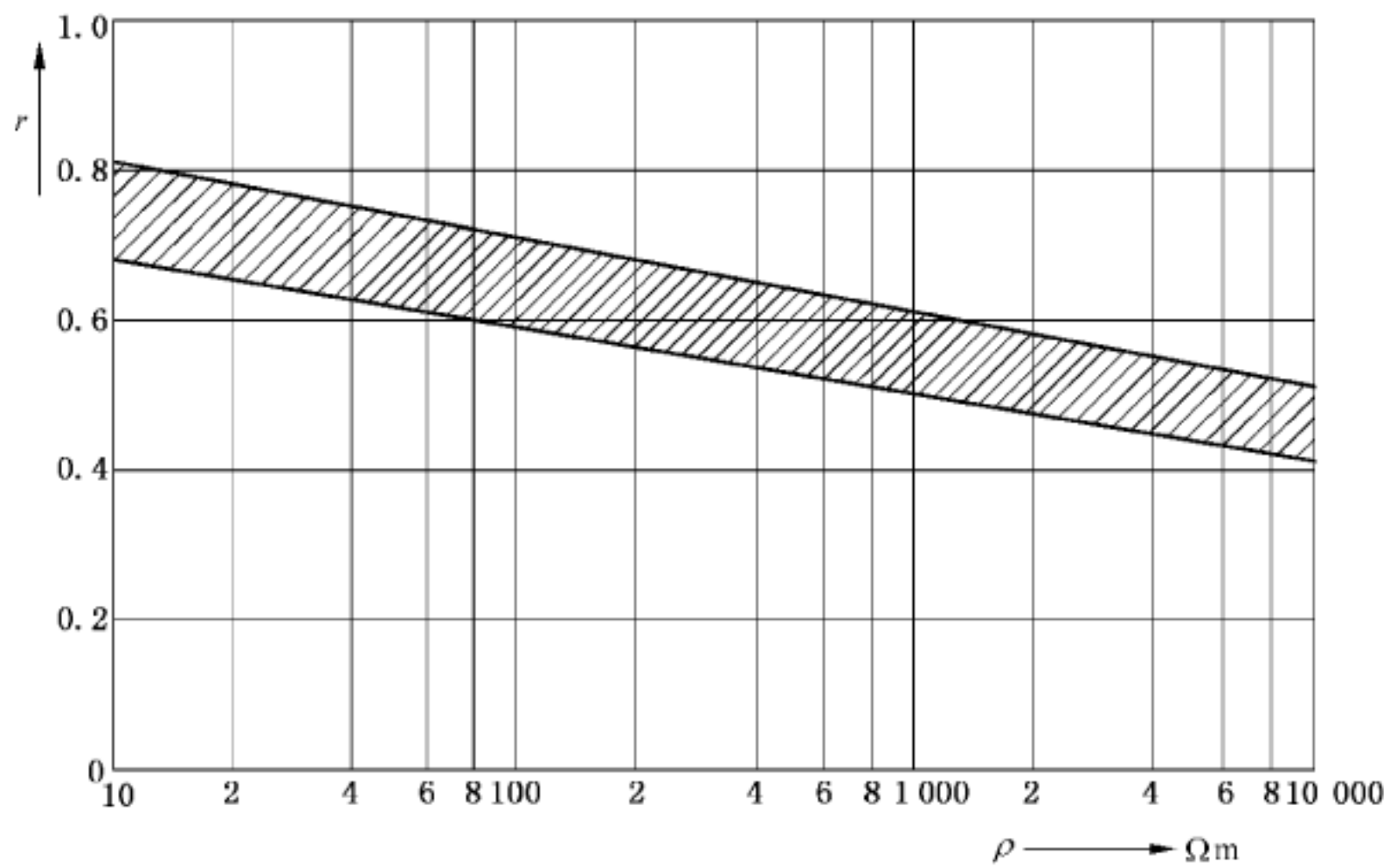


图 8 非铁质地线的减缩系数 r 与土壤电阻率 ρ 的关系

8 金属护套或屏蔽两端接地电缆的电流分布及减缩系数的计算

8.1 概述

金属护套、屏蔽及铠装层两端接地的电力电缆，其减缩系数由电缆类型决定：三芯整体护套电缆、三条单芯电缆，有些情况下电缆横截面符合国家技术标准但具有额外的铠装。

钢铠电缆的减缩系数由制造商提供(见 GB/T 15544.3)。

本部分设定电缆具有热塑性塑料外护套(见 GB/T 15544.3)。

8.2 三芯电缆

图 9 给出了三芯电缆的结构，电缆具有金属护套或屏蔽层且两端接地，热塑性塑料外护套将电缆与

周围土壤隔离(算例参见附录 C)。

8.2.1 厂站 B 内发生单相接地短路

如图 9a)所示,若电缆仅由 A 侧供电,B 站内发生单相接地短路时 B 站短路电流 $I''_{k1} = 3 I_{(0)A}$ 。由于电缆的减缩作用,经过大地返回 A 侧的电流为 $I_{E\delta A} = r_1 3 I_{(0)A}$, r_1 为减缩系数,由式(37)计算。

$$r_1 = \frac{I_{E\delta A}}{3 I_{(0)A}} = 1 - \frac{Z'_{SL}}{Z'_S} = \frac{R'_S}{R'_S + \omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{r_s}} \quad \dots\dots\dots (37)$$

Z'_S 为金属(非铁磁)护套(屏蔽)以大地返回路径的单位长度阻抗,由式(38)计算。

$$Z'_S = R'_S + \omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{r_s} \quad \dots\dots\dots (38)$$

Z'_{SL} 为护套与某一内芯(与其在护套内的位置无关)之间的单位长度互阻抗,以大地为返回路径,由式(39)计算。

$$Z'_{SL} = \omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{r_s} \quad \dots\dots\dots (39)$$

式中:

R'_S ——单位长度护套或屏蔽层的(铜、铝或铅)电阻;

$R'_S = 1/(\kappa \cdot q_s)$, $q_s = 2\pi r_s d_s$, d_s 为护套或屏蔽层厚度。

r_s ——护套或屏蔽层的中值半径;

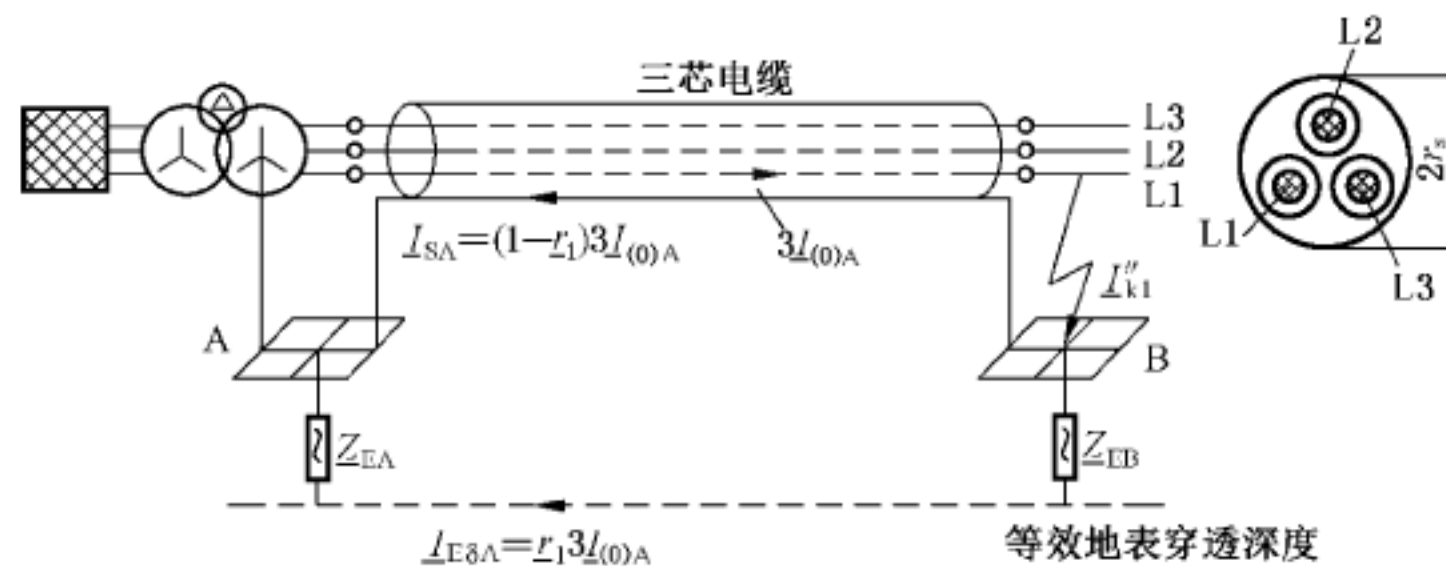
δ ——等效大地渗透深度[见表 2 或式(36)]。

图 9a)中护套或屏蔽层中的电流由式(40)计算。

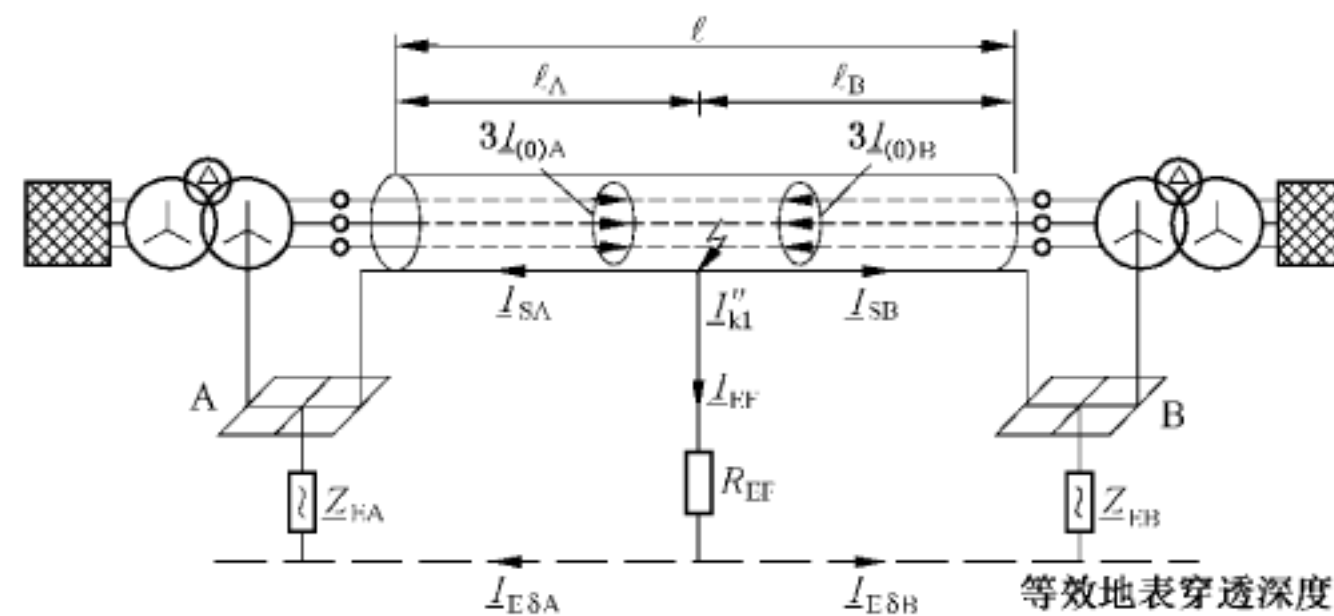
$$I_{SA} = (1 - r_1) 3 I_{(0)A} \quad \dots\dots\dots (40)$$

图 9a)中流过地面的电流由式(41)计算。

$$I_{E\delta A} = r_1 3 I_{(0)A} \quad \dots\dots\dots (41)$$



a) 由 A 站单端供电, B 站内单相接地短路



$$[I''_{k1} = 3 I_{(0)A} + 3 I_{(0)B}; 3 I_{(0)A} = I_{SA} + I_{E\delta A}; 3 I_{(0)B} = I_{SB} + I_{E\delta B}]$$

b) 由 AB 两端供电, AB 之间电缆单相接地短路

图 9 三芯电力电缆的减缩系数

8.2.2 厂站 AB 之间电缆上发生单相接地短路

当单相接地短路发生在厂站 AB 之间的电缆上时[见图 9b)], 护套或屏蔽层中的电流由式(42)、式(43)计算(算例见到附录 C)。

$$\underline{I}_{SA} = (1 - \underline{r}_1) 3 \underline{I}_{(0)A} + \underline{r}_1 3 \underline{I}_{(0)A} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_{s\ell_A}} + \underline{r}_1 3 \underline{I}_{(0)B} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_{s\ell_A}} \dots\dots\dots (42)$$

$$\underline{I}_{SB} = (1 - \underline{r}_1) 3 \underline{I}_{(0)B} + \underline{r}_1 3 \underline{I}_{(0)B} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_{s\ell_B}} + \underline{r}_1 3 \underline{I}_{(0)A} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_{s\ell_B}} \dots\dots\dots (43)$$

故障点流入大地的短路电流由式(44)计算。

$$\underline{I}_{EF} = \underline{r}_1 3 \underline{I}_{(0)A} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{R_{EF}} + \underline{r}_1 3 \underline{I}_{(0)B} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{R_{EF}} \dots\dots\dots (44)$$

图 9b)中经大地流向 A 站、B 站的电流可按式(45)、式(46)计算。

$$\underline{I}_{E\delta A} = \underline{r}_1 3 \underline{I}_{(0)A} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_{s\ell_B}} + \underline{r}_1 3 \underline{I}_{(0)A} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{R_{EF}} - \underline{r}_1 3 \underline{I}_{(0)B} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_{s\ell_A}} \dots\dots\dots (45)$$

$$\underline{I}_{E\delta B} = \underline{r}_1 3 \underline{I}_{(0)B} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_{s\ell_A}} + \underline{r}_1 3 \underline{I}_{(0)B} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{R_{EF}} - \underline{r}_1 3 \underline{I}_{(0)A} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_{s\ell_B}} \dots\dots\dots (46)$$

式中:

$$\underline{Z}_{EStot} = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}'_{s\ell_A}} + \frac{1}{\underline{Z}'_{s\ell_B}} + \frac{1}{R_{EF}}} = \frac{\underline{Z}'_{s\ell_A} \ell_B}{\ell + \frac{\underline{Z}'_{s\ell_A} \ell_B}{R_{EF}}} \dots\dots\dots (47)$$

减缩系数 $\underline{r}_1$ 由式(37)得到。

为使所给公式计算合理, 图 9a)中厂站 AB 间电缆长度应不小于 $\ell \approx \delta/2$ ($\rho = 100 \text{ } \Omega\text{m}$ 时, $\ell = 0.5 \text{ km}$)。根据 8.2.2.2, 图 9b)中故障点与相邻站 A、B 的距离 ℓ_A 、 ℓ_B , 至少为 $\ell \approx \delta/2$ 。

通常情况下短路点相对参考地的电阻 R_{EF} 是未知的, 应考虑 $R_{EF} \rightarrow \infty$ (短路点电缆的金属护套或屏蔽与周围土壤无连接) 和 $R_{EF} \rightarrow \min$ 两种情况。

8.2.2.1 例 1: $R_{EF} \rightarrow \infty$

$R_{EF} \rightarrow \infty$ 的情况, 可假定外层热塑性塑料护套没有被短路电流或短路点的电弧毁损。从式(42)与式(43)可推导出式(42a)与式(43a)。

$$\underline{I}_{SA} = (1 - \underline{r}_1) 3 \underline{I}_{(0)A} + \underline{r}_1 3 \underline{I}_{(0)A} \frac{\ell_B}{\ell} + \underline{r}_1 3 \underline{I}_{(0)B} \frac{\ell_B}{\ell} \dots\dots\dots (42a)$$

$$\underline{I}_{SB} = (1 - \underline{r}_1) 3 \underline{I}_{(0)B} + \underline{r}_1 3 \underline{I}_{(0)B} \frac{\ell_A}{\ell} + \underline{r}_1 3 \underline{I}_{(0)A} \frac{\ell_A}{\ell} \dots\dots\dots (43a)$$

由式(45)与式(46)可推导出式(45a)与式(46a)。

$$\underline{I}_{E\delta A} = \underline{r}_1 3 \underline{I}_{(0)A} \frac{\ell_A}{\ell} - \underline{r}_1 3 \underline{I}_{(0)B} \frac{\ell_B}{\ell} \dots\dots\dots (45a)$$

$$\underline{I}_{E\delta B} = \underline{r}_1 3 \underline{I}_{(0)B} \frac{\ell_B}{\ell} - \underline{r}_1 3 \underline{I}_{(0)A} \frac{\ell_A}{\ell} \dots\dots\dots (46a)$$

计算 AB 之间发生单相接地短路时的电流仅通过电缆护套或屏蔽层返回, 因而应用电缆的单位长度零序阻抗 $\underline{Z}'_{(0)S}$ 来计算短路点的电流[见 GB/T 15544.3, 式(30)及式(31)]。

流过护套或屏蔽层的最大短路电流出现的条件是: 如图 9b)所示短路电流从两侧馈入; 短路位置位于靠近 A 站或靠近 B 站处。该最大数值由式(42b)或式(43b)得到。

$$\underline{I}_{SAmax} = 3 \underline{I}_{(0)A} (\ell_A = 0) + \underline{r}_1 3 \underline{I}_{(0)B} (\ell_A = 0) \dots\dots\dots (42b)$$

$$\underline{I}_{SBmax} = 3 \underline{I}_{(0)B} (\ell_A = \ell) + \underline{r}_1 3 \underline{I}_{(0)A} (\ell_A = \ell) \dots\dots\dots (43b)$$

最大入地电流也在短路发生于靠近 A 站或靠近 B 站时取得,数值由式(45b)或式(46b)计算。

$$\underline{I}_{E\delta A\max} = \underline{r}_1 3 \underline{I}_{(0)A} (\ell_A = \ell) \quad \dots\dots\dots (45b)$$

$$\underline{I}_{E\delta B\max} = \underline{r}_1 3 \underline{I}_{(0)B} (\ell_A = 0) \quad \dots\dots\dots (46b)$$

8.2.2.2 例 2: $R_{EF} = 5 \Omega$

即使电缆外层塑料护套被毁损时,电缆导体与外周土壤的接触面积也较小,数值 $R_{EF} = 5 \Omega$ 可作为比较保守的假设值。当确定该数值时,应假定短路发生在厂站之外,且短路点周围无金属杆棒或金属管线。

在该情况下,厂站 AB 之间发生单相接地短路时,电流通过电缆的护套或屏蔽层及大地返回,计算短路点的短路电流 $\underline{I}_{kl}''$ 应用阻抗 $\underline{Z}'_{(0)SE}$ (见 GB/T 15544.3)。

流经护套或屏蔽层的电流以及流过大地电流分别用式(42)、式(43)以及式(45)、式(46)计算。

流经护套或屏蔽层的最大电流可用式(42b)与式(43b)计算得到。

如需计算流经大地的最大电流,可只计算从单侧馈入的最大短路电流,忽略另一侧的贡献,从而式(45)与式(46)简化为式(45c)与式(46c)。

$$\underline{I}_{E\delta A\max} = \underline{r}_1 3 \underline{I}_{(0)A} \left(\frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_{s\ell_B}} + \frac{\underline{Z}_{EStot}}{R_{EF}} \right) \quad \dots\dots\dots (45c)$$

$$\underline{I}_{E\delta B\max} = \underline{r}_1 3 \underline{I}_{(0)B} \left(\frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_{s\ell_A}} + \frac{\underline{Z}_{EStot}}{R_{EF}} \right) \quad \dots\dots\dots (46c)$$

与式(45b)、式(46b)相比,使用式(45c)、式(46c)可能会得到更大的电流值。

注:附录 C 中的 C.2 给出了一个需计算最大过地电流的算例。

若电缆带有额外的铁质铠装(如采用铅质护套时),制造商应提供减缩系数(取决于流过护套的电流)的测量值,见 GB/T 15544.3。

8.3 三条单芯电缆

同 8.2, 三根单芯电缆下的单相短路电流计算(算例参见附录 D)也需区分两种情况:短路发生在厂站 B 且仅从厂站 A 馈入电流[图 10a)];短路发生在厂站 AB 之间的电缆上[图 10b)]。

8.3.1 厂站 B 处发生对地短路

如图 10a)所示的三条单芯电缆分别具有独立的护套(屏蔽层)并在两侧接地,其减缩系数 $\underline{r}_3$ 用式(48)计算。

$$\underline{r}_3 = 1 - \frac{\underline{I}_{S1} + \underline{I}_{S2} + \underline{I}_{S3}}{3 \underline{I}_{(0)}} = \frac{R'_s}{R'_s + 3 \cdot \omega \frac{\mu_0}{8} + j 3 \cdot \omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{\sqrt[3]{r_s d_{L1L2} d_{L1L3}}}} \quad \dots\dots\dots (48)$$

距离 d_{L1L2} 与 d_{L1L3} 适用于电缆平面敷设及三角形敷设两种型式。式(48)恰为三角形敷设的计算公式;对于平面敷设,无论短路发生在外侧电缆还是中间电缆,本标准按式(48)均可得到足够接近的结果。

如图 10a)所示,流过三个护套或屏蔽层的电流之和用式(49)计算。

$$\underline{I}_{SA} = \underline{I}_{S1A} + \underline{I}_{S2A} + \underline{I}_{S3A} = (1 - \underline{r}_3) 3 \underline{I}_{(0)A} \quad \dots\dots\dots (49)$$

图 10a)中经大地回流到厂站 A 的电流由式(50)计算,式中减缩系数 $\underline{r}_3$ 由式(48)计算。

$$\underline{I}_{E\delta A} = \underline{r}_3 3 \underline{I}_{(0)A} \quad \dots\dots\dots (50)$$

8.3.2 A 站与 B 站之间电缆上单相接地短路

当单相接地短路发生在 A 站与 B 站之间的电缆上时,电流从两侧流入[见图 10b)]。通常三条单

芯电缆的导体及护套或屏蔽层均有电流流过。

流过三个单芯电缆的护套或屏蔽层中的电流总和由式(51)、式(52)计算。

$$\underline{I}_{SA} = (1 - \underline{r}_3) 3 \underline{I}_{(0)A} + \underline{r}_3 3 \underline{I}_{(0)A} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_S \ell_A} + \underline{r}_3 3 \underline{I}_{(0)B} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_S \ell_A} \dots\dots\dots (51)$$

$$\underline{I}_{SB} = (1 - \underline{r}_3) 3 \underline{I}_{(0)B} + \underline{r}_3 3 \underline{I}_{(0)B} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_S \ell_B} + \underline{r}_3 3 \underline{I}_{(0)A} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_S \ell_B} \dots\dots\dots (52)$$

短路点处流入大地的电流由式(53)计算。

$$\underline{I}_{EF} = \underline{r}_3 3 \underline{I}_{(0)A} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{R_{EF}} + \underline{r}_3 3 \underline{I}_{(0)B} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{R_{EF}} \dots\dots\dots (53)$$

经过大地返回 A 站、B 站的电流分别由式(54)、式(55)计算。

$$\underline{I}_{E\delta A} = \underline{r}_3 3 \underline{I}_{(0)A} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_S \ell_B} + \underline{r}_3 3 \underline{I}_{(0)A} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{R_{EF}} - \underline{r}_3 3 \underline{I}_{(0)B} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_S \ell_A} \dots\dots\dots (54)$$

$$\underline{I}_{E\delta B} = \underline{r}_3 3 \underline{I}_{(0)B} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_S \ell_A} + \underline{r}_3 3 \underline{I}_{(0)B} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{R_{EF}} - \underline{r}_3 3 \underline{I}_{(0)A} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_S \ell_B} \dots\dots\dots (55)$$

式中 $\underline{Z}_{EStot}$ 由式(47)得到。 $\underline{Z}'_S$ 为一条单芯电缆护套或屏蔽层的单位长度自阻抗,由式(38)得到。

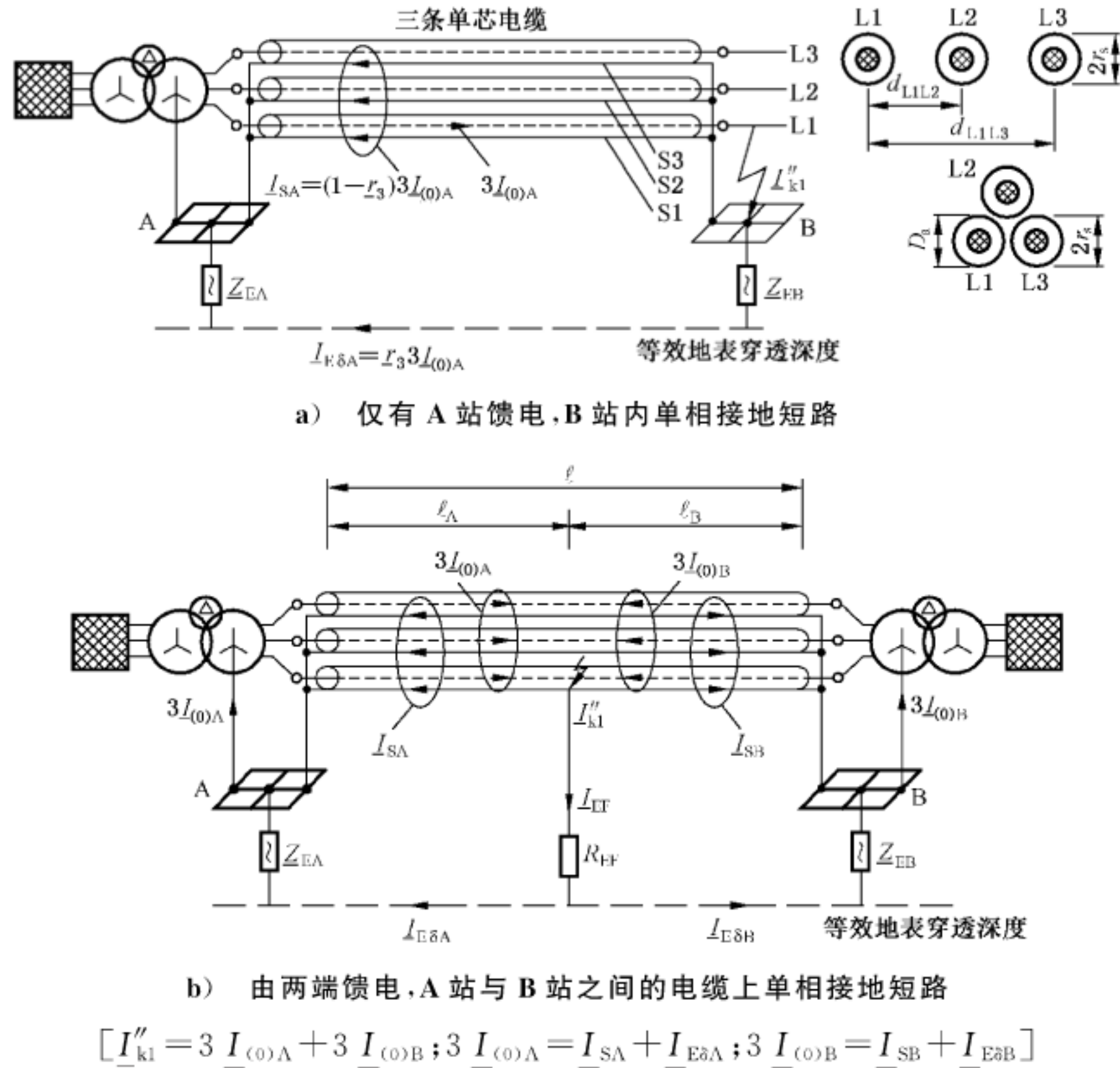


图 10 三条单芯电力电缆的减缩系数

通常情况下短路点相对参考地的电阻 R_{EF} 是未知的,应考虑 $R_{EF} \rightarrow \infty$ (短路点电缆的金属护套或屏蔽与周围土壤无连接)和 $R_{EF} \rightarrow \min$ 两种情况。

8.3.2.1 例 1: $R_{EF} \rightarrow \infty$

$R_{EF} \rightarrow \infty$ 的情况,可假定外层热塑性塑料护套没有被短路电流或短路点的电弧毁损。从式(51)与式(52)可推导出式(51a)与式(52a)。

$$\underline{I}_{SA} = (1 - \underline{r}_3) 3 \underline{I}_{(0)A} + \underline{r}_3 3 \underline{I}_{(0)A} \frac{\ell_B}{\ell} + \underline{r}_3 3 \underline{I}_{(0)B} \frac{\ell_B}{\ell} \dots\dots\dots (51a)$$

$$\underline{I}_{SB} = (1 - \underline{r}_3) 3 \underline{I}_{(0)B} + \underline{r}_3 3 \underline{I}_{(0)B} \frac{\ell_A}{\ell} + \underline{r}_3 3 \underline{I}_{(0)A} \frac{\ell_A}{\ell} \dots\dots\dots (52a)$$

由式(54)与式(55)推导出式(54a)与式(55a)。

$$\underline{I}_{E\delta A} = \underline{r}_3 3 \underline{I}_{(0)A} \frac{\ell_A}{\ell} - \underline{r}_3 3 \underline{I}_{(0)B} \frac{\ell_B}{\ell} \dots\dots\dots (54a)$$

$$\underline{I}_{E\delta B} = \underline{r}_3 3 \underline{I}_{(0)B} \frac{\ell_B}{\ell} - \underline{r}_3 3 \underline{I}_{(0)A} \frac{\ell_A}{\ell} \dots\dots\dots (55a)$$

计算 AB 之间发生单相接地短路时的电流仅通过电缆护套或屏蔽层返回,因而应用电缆的单位长度零序阻抗 $\underline{Z}'_{(0)S}$ 来计算短路点的电流(见 GB/T 15544.3)。

流过护套或屏蔽层 S1 的最大短路电流出现的条件是:如图 10b)所示短路电流从两侧馈入;短路位置靠近 A 站或靠近 B 站。该最大数值由式(51b)或式(52b)得到。

$$\underline{I}_{S1Amax} \approx 3 \underline{I}_{(0)A} (\ell_A = 0) + (2 + \underline{r}_3) \underline{I}_{(0)B} (\ell_A = 0) \dots\dots\dots (51b)$$

$$\underline{I}_{S1Bmax} \approx 3 \underline{I}_{(0)B} (\ell_A = \ell) + (2 + \underline{r}_3) \underline{I}_{(0)A} (\ell_A = \ell) \dots\dots\dots (52b)$$

最大过地电流也在短路发生于靠近 A 站或靠近 B 站时取得,数值由式(54b)或式(55b)计算。

$$\underline{I}_{E\delta Amax} = \underline{r}_3 3 \underline{I}_{(0)A} (\ell_A = \ell) \dots\dots\dots (54b)$$

$$\underline{I}_{E\delta Bmax} = \underline{r}_3 3 \underline{I}_{(0)B} (\ell_A = 0) \dots\dots\dots (55b)$$

8.3.2.2 例 2: $R_{EF} = 5 \Omega$

取 $R_{EF} = 5 \Omega$, 为偏于保守的假设, 见 8.2.2.2。

厂站 A 与 B 之间发生单相接地短路时, 电流通过电缆的护套或屏蔽层及大地返回, 计算短路点的短路电流 $\underline{I}_{kl}$ 应用阻抗 $\underline{Z}'_{(0)SE}$ (见 GB/T 15544.3)。

流经护套或屏蔽层的电流总和以及流过地面的电流分别用式(51)、式(52)以及式(54)、式(55)计算。

流经护套或屏蔽层 S1 的最大电流可用式(51b)与式(52b)计算得到。

如需计算流经地面的最大电流, 可只计算从单侧馈入的最大短路电流, 忽略另一侧的贡献, 从而式(54)与式(55)简化为式(54c)与式(55c)。

$$\underline{I}_{E\delta Amax} = \underline{r}_3 3 \underline{I}_{(0)A} (\ell_A = \ell) \left[\frac{\underline{Z}_{ES\delta tot} (\ell_A = \ell)}{\underline{Z}'_{S\ell_B}} + \frac{\underline{Z}_{ES\delta tot} (\ell_A = \ell)}{R_{EF}} \right] = \underline{r}_3 3 \underline{I}_{(0)A} (\ell_A = \ell) \dots\dots\dots (54c)$$

$$\underline{I}_{E\delta Bmax} = \underline{r}_3 3 \underline{I}_{(0)B} (\ell_A = 0) \left[\frac{\underline{Z}_{ES\delta tot} (\ell_A = 0)}{\underline{Z}'_{S\ell_A}} + \frac{\underline{Z}_{ES\delta tot} (\ell_A = 0)}{R_{EF}} \right] = \underline{r}_3 3 \underline{I}_{(0)B} (\ell_A = 0) \dots\dots\dots (55c)$$

注: 附录 D 给出了一个计算最大过地电流的算例。

若电缆带有额外的铁质铠装, 制造商应提供减缩系数及电流分布。

附录 A

(资料性附录)

同时发生两个独立单相接地短路的计算实例

A.1 概述

在一条单端馈电架空线上同时发生两个独立单相接地短路的情况,如图 A.1 所示。

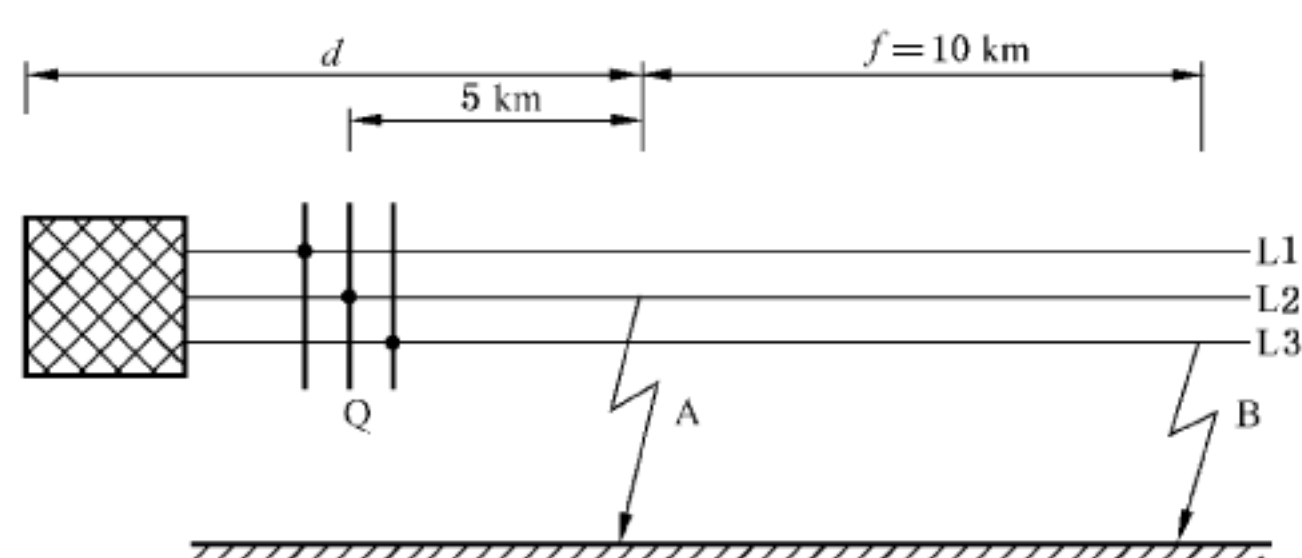


图 A.1 在一条单端馈电架空线上同时发生两个独立单相接地短路(见表 1)

A.2 数据

标称电压: $U_n = 66 \text{ kV}$

标称频率:50 Hz

网络中性点不接地或谐振接地

馈线连接点 Q 的网络等效阻抗: $Z_Q = (1.5 + j15) \Omega$

馈线连接点 Q 的初始对称短路电流值(见 GB/T 15544.1)

$$I''_{kQ} = \frac{1.1 \times 66 \text{ kV}}{\sqrt{3} |1.5 + j15| \Omega} = 2.8 \text{ kA}$$

架空线:

导体: $3 \times 1 \times 166/88 \text{ mm}^2 \text{ ACSR}$;

地线: $1 \times 49 \text{ mm}^2 \text{ 钢}$, $r_Q = 4.5 \text{ mm}$, $R'_Q = 2.92 \Omega/\text{km}$, $\mu_r = 75$;

地线和导线导体之间的几何平均距离 $d_{QL} = 6 \text{ m}$ 。

单位长度的线路阻抗:

正序阻抗: $Z'_{(1)} = (0.17 + j0.40) \Omega/\text{km}$;

零序阻抗: $Z'_{(0)} = (0.32 + j1.40) \Omega/\text{km}$;

土石电阻率: $\rho = 1000 \Omega\text{m}$;

等效大地渗透深度: $\delta = 2940 \text{ m}$ (由表 2 或式 36 得出);

杆塔接地电阻: $R_T = 10 \Omega$;

杆塔高度: $d_T = 300 \text{ m}$ 。

A.3 计算

根据式(34),单位长度地线的阻抗为($\nu = 1$):

$$\underline{Z}'_{\text{q}} = 2.92 \frac{\Omega}{\text{km}} + 0.049 \frac{\Omega}{\text{km}} + j 314 \text{ s}^{-1} \frac{4\pi \cdot 10^{-4} \text{ Vs}}{2\pi \cdot \text{Akm}} \left(\frac{75}{4} + \ln \frac{2\,950 \text{ m}}{4.5 \text{ mm}} \right) = (2.969 + j 2.020) \frac{\Omega}{\text{km}}$$

根据式(35),可以得出单位长度带接地回路的平行线导体和地线之间的互阻抗为:

$$\underline{Z}'_{\text{ql}} = 0.05 \frac{\Omega}{\text{km}} + j 314 \text{ s}^{-1} \frac{4\pi \cdot 10^{-4} \text{ Vs}}{2\pi \text{ Akm}} \ln \frac{2\,950 \text{ m}}{6 \text{ m}} = (0.049 + j 0.389) \frac{\Omega}{\text{km}}$$

根据式(33),地线减缩系数:

$$\underline{r} = 1 - \frac{\underline{Z}'_{\text{ql}}}{\underline{Z}'_{\text{q}}} = 1 - \frac{(0.049 + j 0.389) \Omega/\text{km}}{(2.969 + j 2.020) \Omega/\text{km}} = 0.928 - j 0.082; \quad r = 0.931$$

根据式(1),可以得出驱动点的阻抗:

$$\underline{Z}_{\text{q}} = \underline{Z}'_{\text{q}} d_{\text{T}} = (2.97 + j 2.02) (\Omega/\text{km}) \times 0.3 \text{ km}$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{\text{p}} &= 0.5 \times (0.891 + j 0.606) \Omega + \sqrt{[0.5 \times (0.891 + j 0.606)]^2 + 10 \times (0.891 + j 0.606) \Omega} \\ &= (3.610 + j 1.303) \Omega \end{aligned}$$

用表 1 中的式(8)计算:

$$\underline{I}''_{\text{kEE}} = \frac{3 \times 1.1 \times 66 \text{ kV}}{(14.1 + 3.4 + 3.2) \Omega + j (102 + 8 + 14) \Omega} = (0.285 - j 1.709) \text{ kA}; \quad I''_{\text{kEE}} = 1.732 \text{ kA}$$

式中:

$$6 \underline{Z}_{(1)\text{d}} = 6 \times \left[(1.5 + j 15) \Omega + 5 \text{ km} \times (0.17 + j 0.40) \frac{\Omega}{\text{km}} \right] = (14.1 + j 102) \Omega$$

$$2 \underline{Z}_{(1)\text{f}} = 2 \times 10 \text{ km} (0.17 + j 0.40) \frac{\Omega}{\text{km}} = (3.4 + j 8) \Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)\text{f}} = 10 \text{ km} (0.32 + j 1.4) \frac{\Omega}{\text{km}} = (3.2 + j 14) \Omega$$

根据式(13),可以确定短路点 A 或 B 的杆塔通过基础阻抗 R_{T} 的对地电流:

$$\underline{I}_{\text{T}} = (0.928 - j 0.082) (0.285 - j 1.709) \text{ kA} \frac{(3.610 + j 1.303) \Omega}{(3.610 + j 1.303) \Omega + 2 \times 10 \Omega} = (0.094 - j 0.244) \text{ kA};$$

$$\underline{I}_{\text{T}} = 0.262 \text{ kA};$$

附录 B

(资料性附录)

流经大地的短路电流计算实例

B.1 概要

如图 B.1 和图 B.3 所示,某 132 kV/50 Hz 电力网络,厂站 A 与 B 之间距离为 40 km,B 与 C 之间距离为 100 km。

B.2 数据

厂站 A:

短路阻抗

$$\underline{Z}_A = (0 + j6.4) \Omega$$

变压器零序阻抗

$$\underline{Z}_{(0)A} = (0 + j12) \Omega$$

厂站 B:

短路阻抗

$$\underline{Z}_B = (0 + j7.6) \Omega$$

变压器零序阻抗

$$\underline{Z}_{(0)B} = (0 + j7) \Omega$$

接地网电阻

$$R_{EB} = 5 \Omega$$

厂站 C:

短路阻抗

$$\underline{Z}_C = (0 + j21) \Omega$$

变压器零序阻抗

$$\underline{Z}_{(0)C} = (0 + j20.3) \Omega$$

架空线:

导体

$$3 \times 2 \times 240/40 \text{ mm}^2 \text{ ACSR}$$

地线

$$1 \times 240/40 \text{ mm}^2 \text{ ACSR}$$

单位长度正序阻抗

$$\underline{Z}'_{(1)L} = \underline{Z}'_L = (0.06 + j0.298) \Omega/\text{km}$$

单位长度零序阻抗

$$\underline{Z}'_{(0)L} = (0.272 + j1.48) \Omega/\text{km}$$

土壤电阻率

$$\rho = 1000 \Omega\text{m}$$

等效大地渗透深度

$$\delta = 2950 \text{ m (见表 2)}$$

单位长度地线阻抗

$$\underline{Z}'_Q = (0.17 + j0.801) \Omega/\text{km}$$

地线减缩系数

$$\underline{r}_A = \underline{r}_C = \underline{r} = 0.6 - j0.03 \approx 0.6$$

塔基电阻

$$R_T = 10 \Omega$$

塔间距

$$d_T = 400 \text{ m}$$

厂站 AB 之间架空线长度

$$\ell_1 = 40 \text{ km}$$

厂站 BC 之间架空线长度

$$\ell_2 = 100 \text{ km}$$

B.3 厂站内发生接地短路

如图 B.1 所示,厂站 B 内发生接地短路。

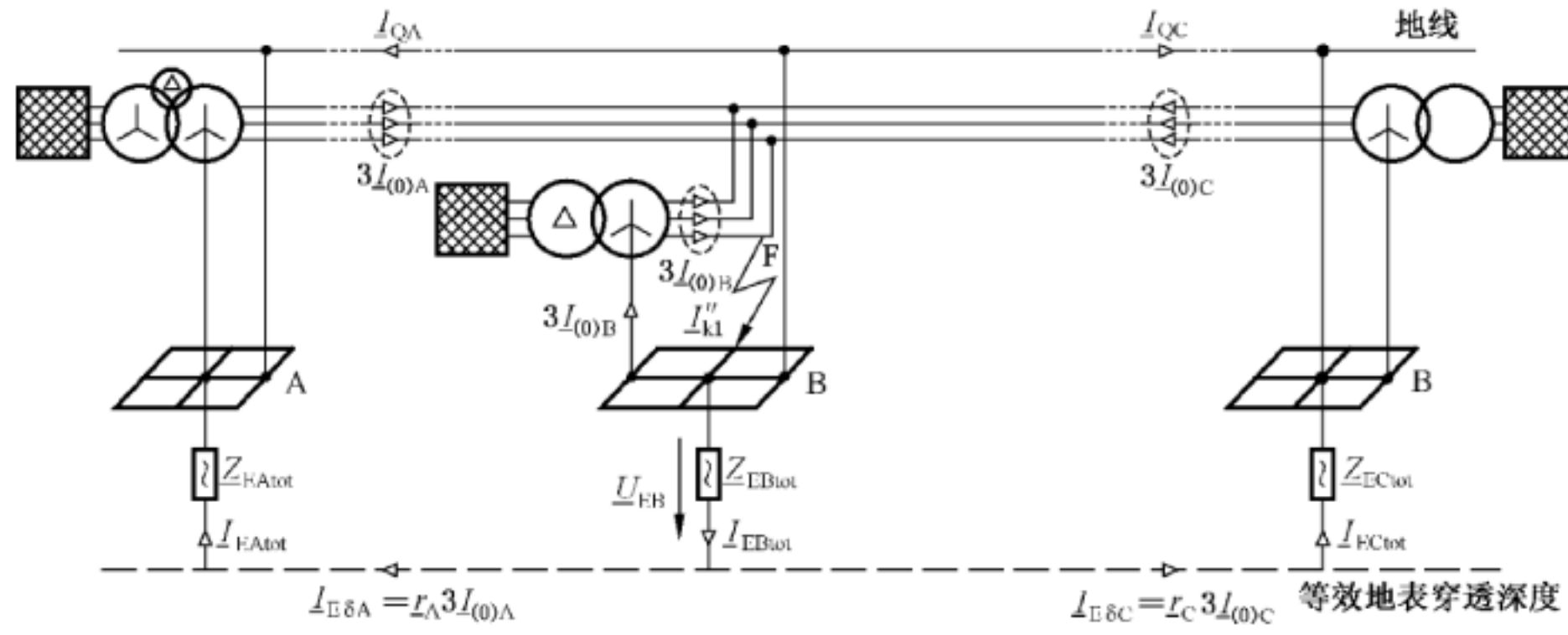


图 B.1 厂站 B 内发生接地短路—接线图

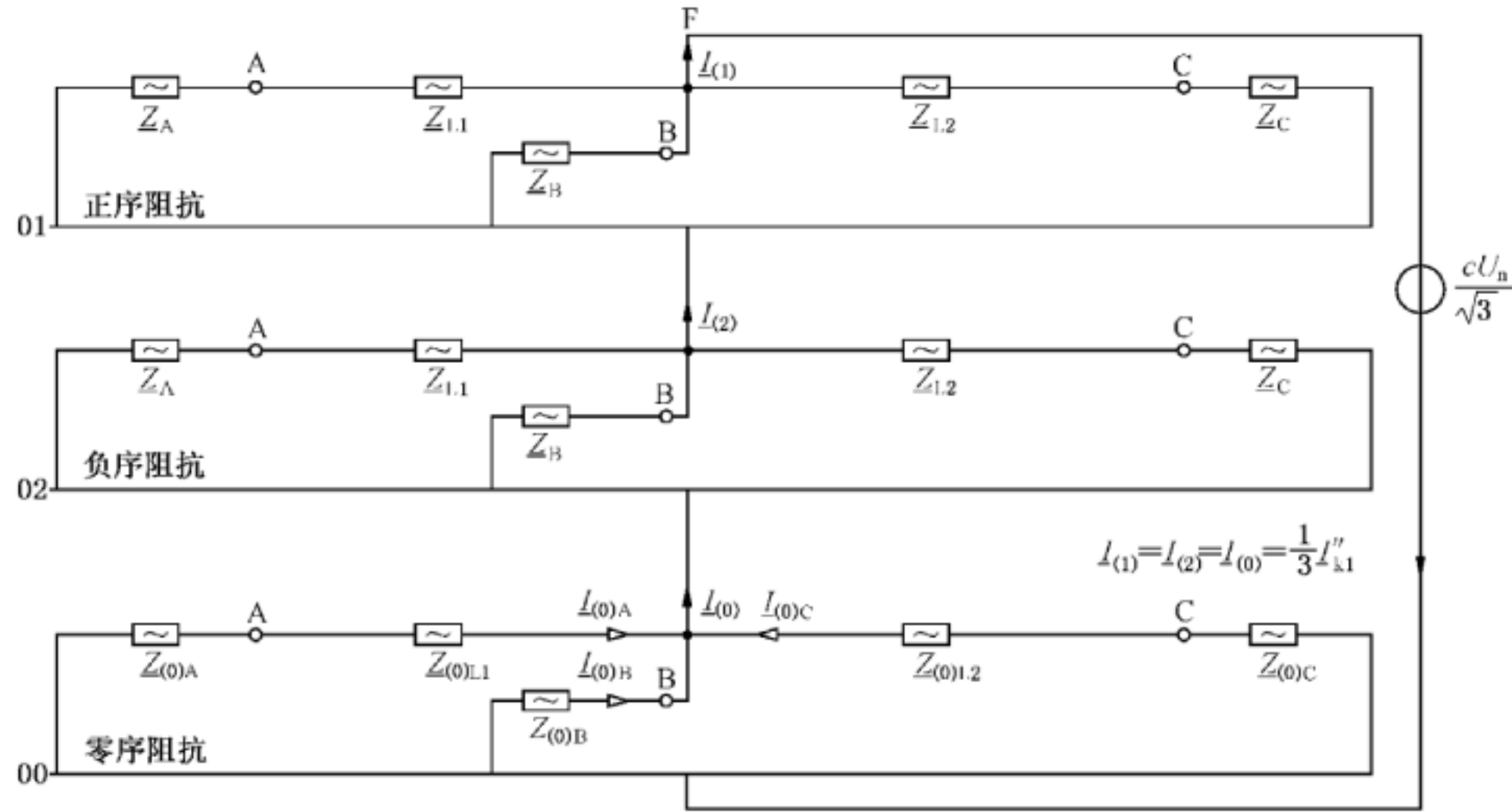


图 B.2 厂站 B 内发生接地短路—正负零序电路连接于厂站 B 内故障点 F

利用图 B.2, 根据 GB/T 15544.1 中式(52)计算接地短路电流:

$$\underline{I}_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \times 1.1 \times 132 \text{ kV}}{2(0.222 + j4.876) \Omega + (0.115 + j6.157) \Omega} = (0.555 - j15.789) \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{k1}'' = 15.799 \text{ kA}$$

式中:

$$\underline{Z}_{(1)} = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_A + \underline{Z}_{L1}} + \frac{1}{\underline{Z}_B} + \frac{1}{\underline{Z}_C + \underline{Z}_{L2}}} = (0.222 + j4.876) \Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_{(0)A} + \underline{Z}_{(0)L1}} + \frac{1}{\underline{Z}_{(0)B}} + \frac{1}{\underline{Z}_{(0)C} + \underline{Z}_{(0)L2}}} = (0.115 + j6.157) \Omega$$

故障点零序电流:

$$\underline{I}_{k0}'' = \frac{1}{3} \underline{I}_{k1}'' = (0.185 - j5.263) \text{ kA}$$

图 B.2 中部分零序电流:

$$\underline{I}_{(0)A} = (0.075\ 3 - j0.443\ 9)\text{kA}; \quad \underline{I}_{(0)A} = 0.450\ \text{kA}$$

$$\underline{I}_{(0)B} = (0.075\ 3 - j4.631\ 9)\text{kA}; \quad \underline{I}_{(0)B} = 4.633\ \text{kA}$$

$$\underline{I}_{(0)C} = (0.033\ 4 - j0.187\ 2)\text{kA}; \quad \underline{I}_{(0)C} = 0.190\ \text{kA}$$

根据式(16), 计算厂站 B 发生短路时流过 $Z_{EB\text{tot}}$ 总电流 $\underline{I}_{EB\text{tot}}$ (图 B.1), 若 $r_A = r_B = r_C$:

$$\underline{I}_{EB\text{tot}} = r \cdot 3[\underline{I}_{(0)A} + \underline{I}_{(0)C}] = 0.6 \times 3(0.108\ 8 - j0.631\ 1)\text{kA} = (0.195\ 8 - j0.136\ 0)\text{kA};$$

$$\underline{I}_{EB\text{tot}} = 1.152\ 8\ \text{kA}$$

计算 $Z_{EB\text{tot}}$ 需要的输入阻抗根据式(1) $\underline{Z}_Q = \underline{Z}'_Q d_T$ 有:

$$\underline{Z}_P = 0.5(0.068 + j0.320\ 4)\Omega + \sqrt{[0.5(0.068 + j0.320\ 4)]^2 + 10(0.068 + j0.320\ 4)\Omega};$$

$$\underline{Z}_P = (1.436\ 9 + j1.306)\Omega$$

两条架空出线的厂站 B 的总地电阻 $Z_{EB\text{tot}}$ 根据式(17):

$$\underline{Z}_{EB\text{tot}} = \frac{1}{\frac{1}{5\Omega} + \frac{1}{(1.436\ 9 + j1.306)\Omega}} = (0.684\ 5 + j0.492\ 8)\Omega$$

厂站 B 的地电势, 根据式(18):

$$\underline{U}_{EB} = (0.684\ 5 + j0.492\ 8)\Omega(0.195\ 8 - j0.136\ 0)\text{kA} = (0.693\ 8 - j0.681\ 1)\text{kV};$$

$$\underline{U}_{EB} = 0.972\ 2\ \text{kV}$$

厂站远区的距离, 根据式(19):

$$D_F = 3\sqrt{R_T} \frac{d_T}{\text{Re}\{\sqrt{\underline{Z}_Q}\}} = 3\sqrt{10\Omega} \frac{0.4\ \text{km}}{\text{Re}\{\sqrt{(0.068 + j0.320\ 4)\Omega}\}} = 8.53\ \text{km}$$

对于距离厂站较远的地方, 即与厂站距离大于 D_F , 地线电流可以根据式(13)计算得到:

$$\underline{I}_{QA} = (1-r)3\underline{I}_{(0)A} = 0.4 \times 3(0.075\ 3 - j0.443\ 9)\text{kA} = (0.090\ 4 - j0.532\ 7)\text{kA}$$

$$\underline{I}_{QA} = 0.540\ \text{kA}$$

$$\underline{I}_{QC} = (1-r)3\underline{I}_{(0)C} = 0.4 \times 3(0.033\ 4 - j0.187\ 3)\text{kA} = (0.040\ 1 - j0.224\ 7)\text{kA}$$

$$\underline{I}_{QC} = 0.288\ \text{kA}$$

远离厂站 A 和 B 的入地电流与厂站 B 和 C 一样:

$$\underline{I}_{E\&A} = r \cdot 3\underline{I}_{(0)A} = 0.6 \times 3 \times 0.450\ \text{kA} = 0.810\ \text{kA}$$

$$\underline{I}_{E\&C} = r \cdot 3\underline{I}_{(0)C} = 0.6 \times 3 \times 0.190\ \text{kA} = 0.342\ \text{kA}$$

B.4 厂站外接地短路

在 AB 之间远离厂站的杆塔 T 处发生接地短路。如图 B.3, 距离 $\ell_{2a} = 60\ \text{km}$, $\ell_{2b} = 40\ \text{km}$ 。

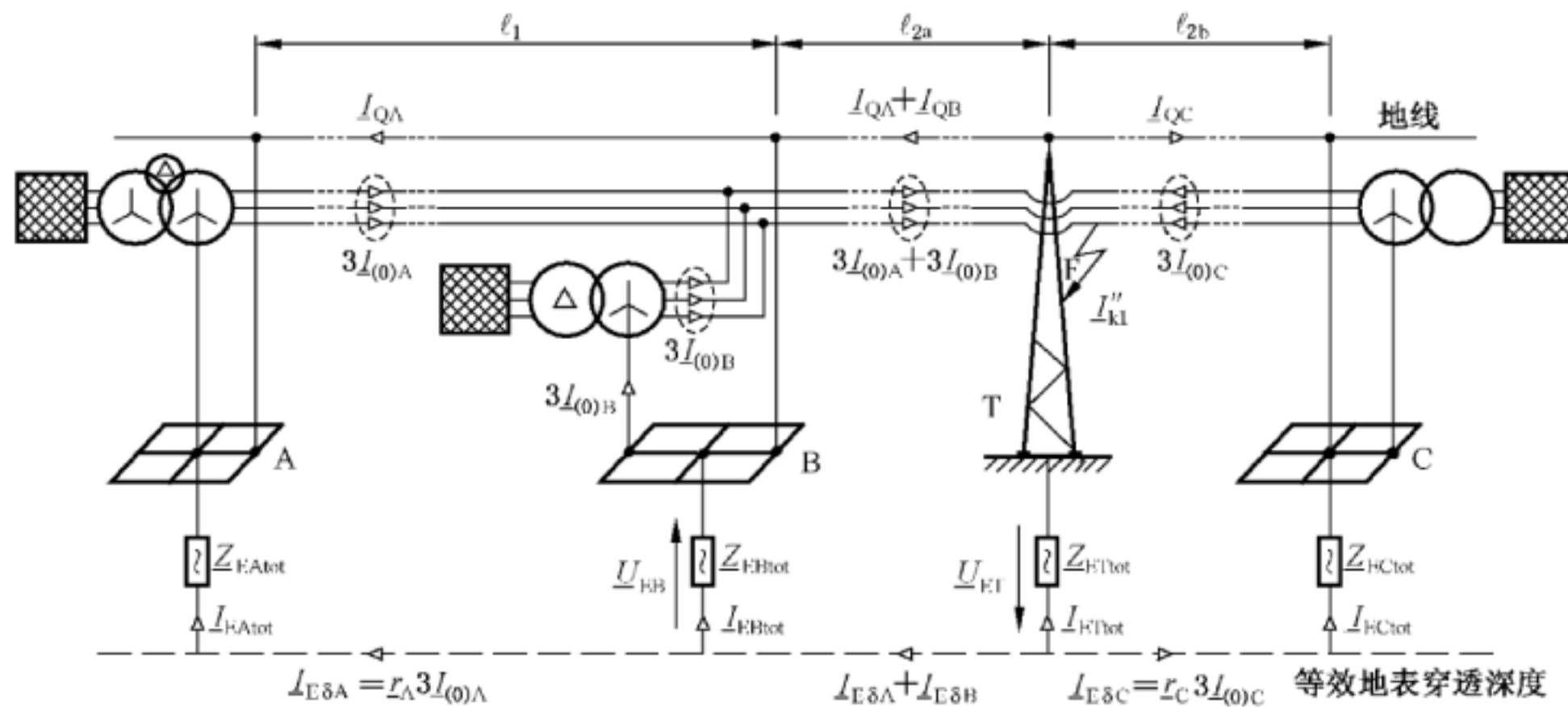


图 B.3 厂站 B 和 C 外杆塔 T 处架空线发生接地短路—厂站 A、B 和 C 系统接线图

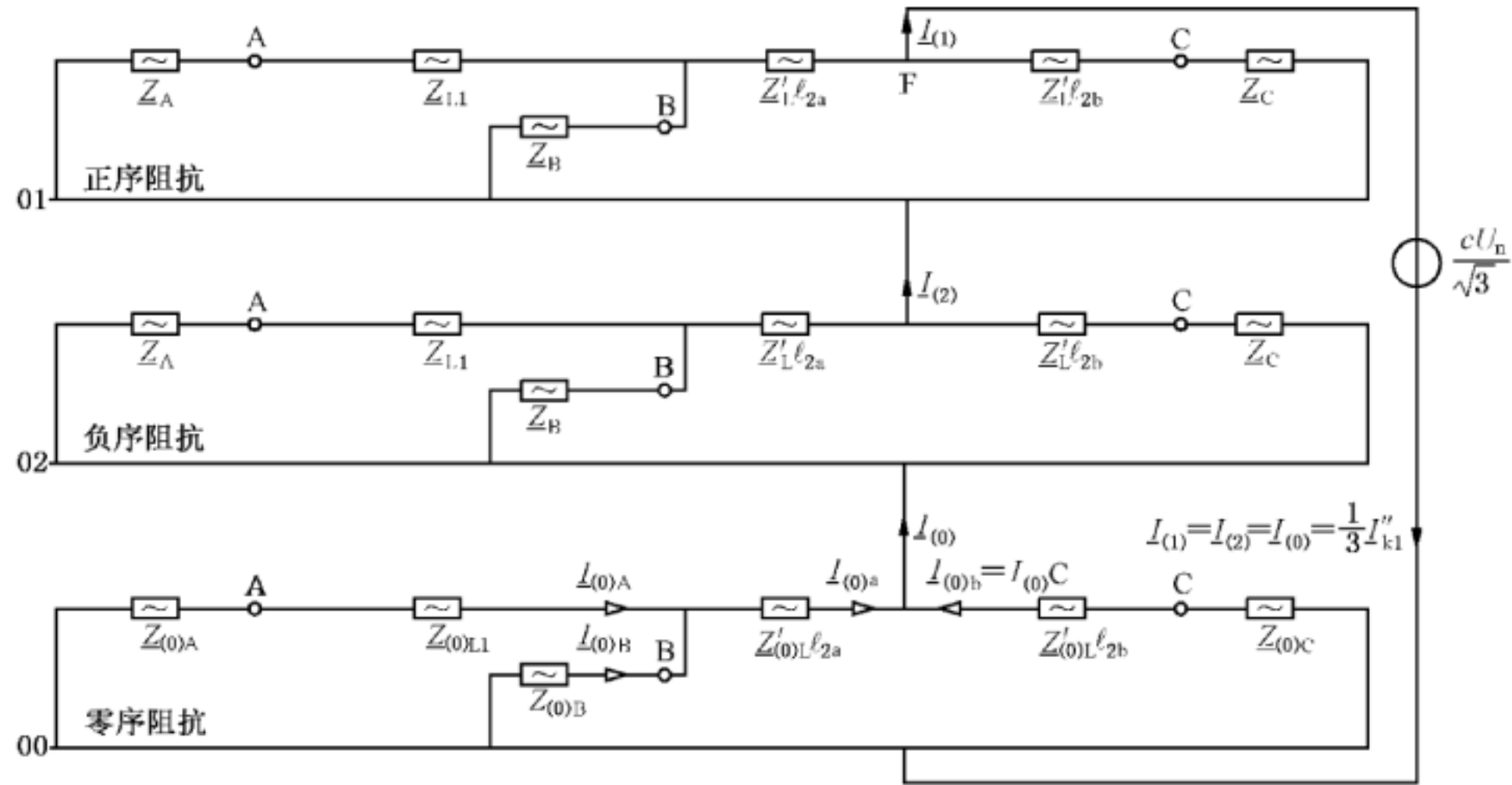


图 B.4 厂站 B 和 C 外杆塔 T 处架空线发生接地短路—正、负、零序系统,连接于故障点 F

根据图 B.4,采用 GB/T 15544.1 中式(52)计算接地短路电流:

$$\underline{I}_{\text{k1}}'' = \frac{\sqrt{3} \times 1.1 \times 132 \text{ kV}}{2(1.714 \ 5 + j13.660 \ 2)\Omega + (6.626 \ 2 + j43.332 \ 4)\Omega} = (0.496 \ 5 - j3.488 \ 9) \text{ kA}$$

式中:

$$\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}'_{L2b} + \underline{Z}_C} + \frac{1}{\underline{Z}'_{L1} + \frac{1}{\underline{Z}_B + \frac{1}{\underline{Z}_{L1} + \underline{Z}_A}}}} = (1.714 \ 5 + j13.660 \ 2)\Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}'_{(0)L2b} + \underline{Z}_{(0)C}} + \frac{1}{\underline{Z}'_{(0)L2a} + \frac{1}{\underline{Z}_{(0)B} + \frac{1}{\underline{Z}_{(0)L1} + \underline{Z}_{(0)A}}}}} = (6.626 \ 2 + j43.332 \ 4)\Omega$$

故障点零序电流:

$$\underline{I}_{(0)} = \frac{1}{3} \underline{I}_{\text{k1}}'' = (0.165 \ 5 - j1.163 \ 0) \text{ kA}$$

图 B.4 中故障点左右两侧的部分零序电流 $\underline{I}_{(0)a}$ 和 $\underline{I}_{(0)b}$:

$$\underline{I}_{(0)a} = \frac{\underline{Z}'_{(0)L2b} + \underline{Z}_{(0)C}}{\underline{Z}'_{(0)L2b} + \underline{Z}_{(0)C} + \underline{Z}'_{(0)L2a} + \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}'_{(0)B}} + \frac{1}{\underline{Z}_{(0)L1} + \underline{Z}_{(0)A}}}} = (0.085 \ 1 - j0.526 \ 3) \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{(0)b} = \underline{I}_{(0)} - \underline{I}_{(0)a} = (0.080 \ 4 - j0.636 \ 7) \text{ kA} = \underline{I}_{(0)C}; \underline{I}_{(0)C} = 0.641 \ 7 \text{ kA}$$

根据 $\underline{I}_{(0)a}$ 计算得到部分零序短路电流 $\underline{I}_{(0)A}$ 和 $\underline{I}_{(0)B}$:

$$\underline{I}_{(0)A} = \underline{I}_{(0)a} \frac{\underline{Z}_{(0)B}}{\underline{Z}_{(0)A} + \underline{Z}_{(0)B} + \underline{Z}_{(0)L1}} = (0.013 \ 9 - j0.045 \ 2) \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{(0)A} = 0.047 \ 3 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{(0)B} = \underline{I}_{(0)a} \frac{\underline{Z}_{(0)A} + \underline{Z}_{(0)L1}}{\underline{Z}_{(0)A} + \underline{Z}_{(0)B} + \underline{Z}_{(0)L1}} = (0.071 \ 2 - j0.481 \ 1) \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{(0)B} = 0.486 \ 4 \text{ kA}$$

根据式(22)计算故障杆塔处的总电流(图 B.3):

$$\underline{I}_{\text{ETot}} = \underline{r} \underline{I}_{\text{kl}}'' = 0.6 \times (0.496\ 5 - j\ 3.488\ 9) \text{ kA} = (0.297\ 9 - j\ 2.093\ 3) \text{ kA};$$

$$\underline{I}_{\text{EBtot}} = 2.114\ \text{kA}$$

基础电阻 R_{T} 和输入阻抗根据 B.3 计算,总大地阻抗 $\underline{Z}_{\text{ETot}}$ 根据式(23)有:

$$\underline{Z}_{\text{ETot}} = \frac{1}{\frac{1}{10\ \Omega} + \frac{2}{(1.437 + j\ 1.306)\ \Omega}} = (0.704\ 8 + j\ 0.566\ 3)\ \Omega$$

$$\underline{Z}_{\text{ETot}} = 0.904\ 1\ \text{kA}$$

根据式(24)得到杆塔处的地电势:

$$\underline{U}_{\text{ET}} = \underline{Z}_{\text{ETot}} \underline{I}_{\text{ETot}} = (0.704\ 8 + j\ 0.565\ 3)\ \Omega \times (0.297\ 9 - j\ 2.093\ 3) \text{ kA} = (1.395\ 4 - j\ 1.306\ 7) \text{ kV}$$

$$U_{\text{ET}} = 1.912\ \text{kV}$$

厂站 A、B、C 的短路电流:

$$\underline{I}_{\text{EAtot}} = \underline{r} 3 \underline{I}_{(0)\text{A}} = 0.6 \times 3 \times 0.047\ 3\ \text{kA} = 0.085\ 1\ \text{kA}$$

$$\underline{I}_{\text{EBtot}} = \underline{r} 3 \underline{I}_{(0)\text{B}} = 0.6 \times 3 \times 0.486\ 4\ \text{kA} = 0.875\ 4\ \text{kA}$$

$$\underline{I}_{\text{ECtot}} = \underline{r} 3 \underline{I}_{(0)\text{C}} = 0.6 \times 3 \times 0.641\ 7\ \text{kA} = 1.155\ 1\ \text{kA}$$

厂站 B 地电势:

$$\underline{U}_{\text{EB}} = \underline{Z}_{\text{EBtot}} \cdot \underline{r} \cdot 3 \underline{I}_{(0)\text{B}} = (0.684\ 5 + j\ 0.492\ 8) \times 0.6 \times 3 \times (0.071\ 2 - j\ 0.481\ 1) \text{ kV}$$

$$\underline{U}_{\text{EB}} = (0.514\ 5 - j\ 0.529\ 6) \text{ kV}$$

$$U_{\text{EB}} = 0.738\ 3\ \text{kV}$$

远离厂站和故障杆塔的地线和入地的短路电流:

$$\underline{I}_{\text{QA}} = (1 - \underline{r}) 3 \underline{I}_{(0)\text{A}} = 0.4 \times 3 \times (0.013\ 9 - j\ 0.045\ 2) \text{ kA} = (0.016\ 7 - j\ 0.054\ 2) \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{\text{QA}} = 0.056\ 7 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{\text{QA}} + \underline{I}_{\text{QB}} = (1 - \underline{r}) 3 [\underline{I}_{(0)\text{A}} + \underline{I}_{(0)\text{B}}] = 0.4 \times 3 \times (0.085\ 1 - j\ 0.526\ 3) \text{ kA} = (0.102\ 1 - j\ 0.631\ 6) \text{ kA}$$

$$|\underline{I}_{\text{QA}} + \underline{I}_{\text{QB}}| = 0.639\ 7\ \text{kA}$$

$$\underline{I}_{\text{QC}} = (1 - \underline{r}) 3 \underline{I}_{(0)\text{C}} = 0.4 \times 3 \times (0.080\ 4 - j\ 0.636\ 7) \text{ kA} = (0.096\ 5 - j\ 0.764\ 0) \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{\text{QC}} = 0.770\ 1\ \text{kA}$$

$$\underline{I}_{\text{E\&A}} = \underline{r} 3 \underline{I}_{(0)\text{A}} = 0.6 \times 3 \times 0.047\ 3\ \text{kA} = 0.085\ 1\ \text{kA}$$

$$\underline{I}_{\text{E\&A}} + \underline{I}_{\text{E\&B}} = \underline{r} 3 |\underline{I}_{(0)\text{A}} + \underline{I}_{(0)\text{B}}| = 0.6 \times 3 \times 0.533\ 1\ \text{kA} = 0.959\ 6\ \text{kA}$$

$$\underline{I}_{\text{E\&C}} = \underline{r} 3 \underline{I}_{(0)\text{C}} = 0.6 \times 3 \times 0.641\ 7 \text{ kA} = 1.155\ 1\ \text{kA}$$

B.5 厂站附近发生接地短路

本例计算在厂站 AB 之间,距厂站 B 4.4 km 处杆塔编号 10 的地方发生接地短路时的短路电流和地电势(见图 7)。

根据图 B.4,采用 GB/T 15544.1 中式(52)计算接地短路电流:

$$\underline{I}_{\text{kl}}'' = \frac{\sqrt{3} \times 1.1 \times 132\ \text{kV}}{2(0.444\ 9 + j\ 5.903\ 7)\ \Omega + (1.241\ 2 + j\ 11.948\ 1)\ \Omega} = (0.942\ 1 - j\ 10.502\ 2) \text{ kA};$$

$$\underline{I}_{\text{kl}}'' = 10.544\ 4\ \text{kA}。$$

式中:

$$\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}'_{\text{L}}(\ell_2 - 11 \cdot d_{\text{T}}) + \underline{Z}_{\text{C}}} + \frac{1}{\underline{Z}'_{\text{L}} \cdot 11 \cdot d_{\text{T}} + \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_{\text{B}}} + \frac{1}{\underline{Z}_{\text{L1}} + \underline{Z}_{\text{A}}}}} = (0.444\ 9 + j\ 5.903\ 7)\ \Omega$$

故障点零序电流:

$$\underline{I}_{(0)} = \frac{1}{3} \underline{I}_{K1}'' = (0.314\ 1 - j\ 3.500\ 7) \text{ kA}$$

杆塔 T($n=10$)左右两侧的零序分电流 $\underline{I}_{(0)a}$ 和 $\underline{I}_{(0)b}$:

$$\underline{I}_{(0)a} = \underline{I}_{(0)} \frac{Z'_{(0)L}(\ell_2 - 11 \cdot d_T) + Z_{(0)C}}{Z'_{(0)L}(\ell_2 - 11 \cdot d_T) + Z'_{(0)C} + Z'_{(0)L} \cdot 11 \cdot d_T + \frac{1}{\frac{1}{Z'_{(0)B}} + \frac{1}{Z_{(0)L1} + Z_{(0)A}}}}$$

$$\underline{I}_{(0)a} = 0.288\ 8 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{(0)b} = \underline{I}_{(0)} - \underline{I}_{(0)a} = (0.0373\ 1 - j\ 0.254\ 9) \text{ kA} = \underline{I}_{(0)c};$$

$$\underline{I}_{(0)c} = 0.257\ 7 \text{ kA}$$

通过 $\underline{I}_{(0)a}$ 得到零序分电流 $\underline{I}_{(0)A}$ 和 $\underline{I}_{(0)B}$:

$$\underline{I}_{(0)A} = \underline{I}_{(0)a} \frac{Z_{(0)B}}{Z_{(0)A} + Z_{(0)B} + Z_{(0)L1}} = (0.064\ 0 - j\ 0.281\ 7) \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{(0)A} = 0.288\ 8 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{(0)B} = \underline{I}_{(0)a} \frac{Z_{(0)A} + Z_{(0)L1}}{Z_{(0)A} + Z_{(0)B} + Z_{(0)L1}} = (0.212\ 8 - j\ 2.964\ 2) \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{(0)B} = 2.971\ 8 \text{ kA}$$

根据式(3)得到因数 $\underline{k}$:

$$\underline{k} = 1 + \frac{Z_P}{R_T} = 1 + \frac{(1.436\ 9 + j\ 1.306\ 0) \Omega}{10\ \Omega} = (1.143\ 7 + j\ 0.130\ 6)$$

根据式(29)得到厂站 B 的接地阻抗:

$$\underline{Z}_{EB} = \frac{1}{\frac{1}{R_B} + \frac{1}{Z_P}} = \frac{1}{\frac{1}{5\ \Omega} + \frac{1}{(1.437\ 0 + j\ 1.306\ 0) \Omega}} = (1.269\ 8 + j\ 0.756\ 8) \Omega$$

根据式(2), $N=10$ 的无限长链驱动点电阻:

$$\underline{Z}_{P10} = (1.429\ 4 + j\ 1.320\ 0) \Omega; \quad Z_{P10} = 1.945\ 7\ \Omega$$

根据式(28)计算得到故障杆塔的接地阻抗:

$$\underline{Z}_{ET} = \frac{1}{\frac{1}{R_T} + \frac{1}{Z_P}} = \frac{1}{\frac{1}{10\ \Omega} + \frac{1}{(1.437\ 0 + j\ 1.306\ 0) \Omega}} = (1.369\ 0 + j\ 0.985\ 6) \Omega$$

根据式(27)计算, 流过 $\underline{Z}_{ET}$ 的电流 $\underline{I}_{ET10}$:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{ET10} &= \underline{r} \underline{I}_{K1}'' \frac{Z_{P10}}{Z_{P10} + Z_{ET}} - \underline{r} 3 \underline{I}_{(0)B} \frac{Z_{EB}}{Z_{EB} + Z_P} \cdot \frac{1}{k^{10}} \\ &= 0.6 \times (0.942\ 1 - j\ 10.502\ 2) \text{ kA} \frac{(1.429\ 4 + j\ 1.320\ 0) \Omega}{(2.798 + j\ 2.306) \Omega} - \\ &\quad 0.6 \times 3 \times (0.212\ 8 - j\ 2.964\ 2) \text{ kA} \frac{(1.269\ 7 + j\ 0.756\ 8) \Omega}{(2.706\ 7 + j\ 2.062\ 8) \Omega} \times \frac{1}{(1.143\ 7 + j\ 0.130\ 6)^{10}} \\ &= (1.019\ 4 - j\ 3.141\ 7) \text{ kA} \end{aligned}$$

$$\underline{I}_{ET10} = 3.302\ 9 \text{ kA}$$

使用式(30)计算故障杆塔地电势:

$$\underline{U}_{ET10} = \underline{Z}_{ET} \underline{I}_{ET10} = (4.491\ 8 - j\ 3.296\ 1) \text{ kV}$$

$$U_{ET10} = 5.571\ 4 \text{ kV}$$

流过 $\underline{Z}_{EB}$ 的厂站 B 附近杆塔($n=10$)接地短路电流, 根据式(31):

$$\begin{aligned}
\underline{I}_{\text{EB10}} &= \underline{r} \underline{I}_{\text{K1}}'' \frac{\underline{Z}_{\text{ET}}}{\underline{Z}_{\text{P10}} + \underline{Z}_{\text{ET}}} \cdot \frac{2 \underline{Z}_{\text{P}} - \underline{Z}_{\text{Q}}}{(\underline{Z}_{\text{EB}} + \underline{Z}_{\text{P}})k^{10} - (\underline{Z}_{\text{EB}} - \underline{Z}_{\text{P}} + \underline{Z}_{\text{Q}})k^{-10}} - \underline{r} 3 \underline{I}_{(0)\text{B}} \frac{\underline{Z}_{\text{P}}}{\underline{Z}_{\text{EB}} + \underline{Z}_{\text{P}}} \\
&= 0.6(0.942\ 1 - j10.502\ 2)\text{kA} \frac{(1.369\ 0 + j0.985\ 5)\Omega}{(2.798\ 4 + j2.305\ 6)\Omega} \times (0.118\ 5 - j0.232\ 3) - \\
&\quad 0.6 \times 3(0.212\ 8 - j2.964\ 2)\text{kA} \frac{(1.437\ 0 + j1.306\ 0)\Omega}{(2.706\ 7 + j2.062\ 8)\Omega} = (1.155\ 7 - j2.648\ 7)\text{kA}
\end{aligned}$$

$$I_{\text{EB10}} = 2.889\ 9\ \text{kA}$$

据式(32)计算得到厂站 B 的地电势:

$$\underline{U}_{\text{EB10}} = \underline{Z}_{\text{EB}} \underline{I}_{\text{EB10}} = (-3.472\ 0 + j2.248\ 4)\text{kV}$$

$$U_{\text{ET10}} = 4.272\ \text{kV}$$

图 B.5 为 B.4 中给出的 $U_{\text{ET}} = 1.921\ 2\ \text{kV}$ 时地电势 U_{ETn} 及 B.3 给出的 $U_{\text{EB}} = 0.972\ \text{kV}$ 时的 U_{EBn} 。

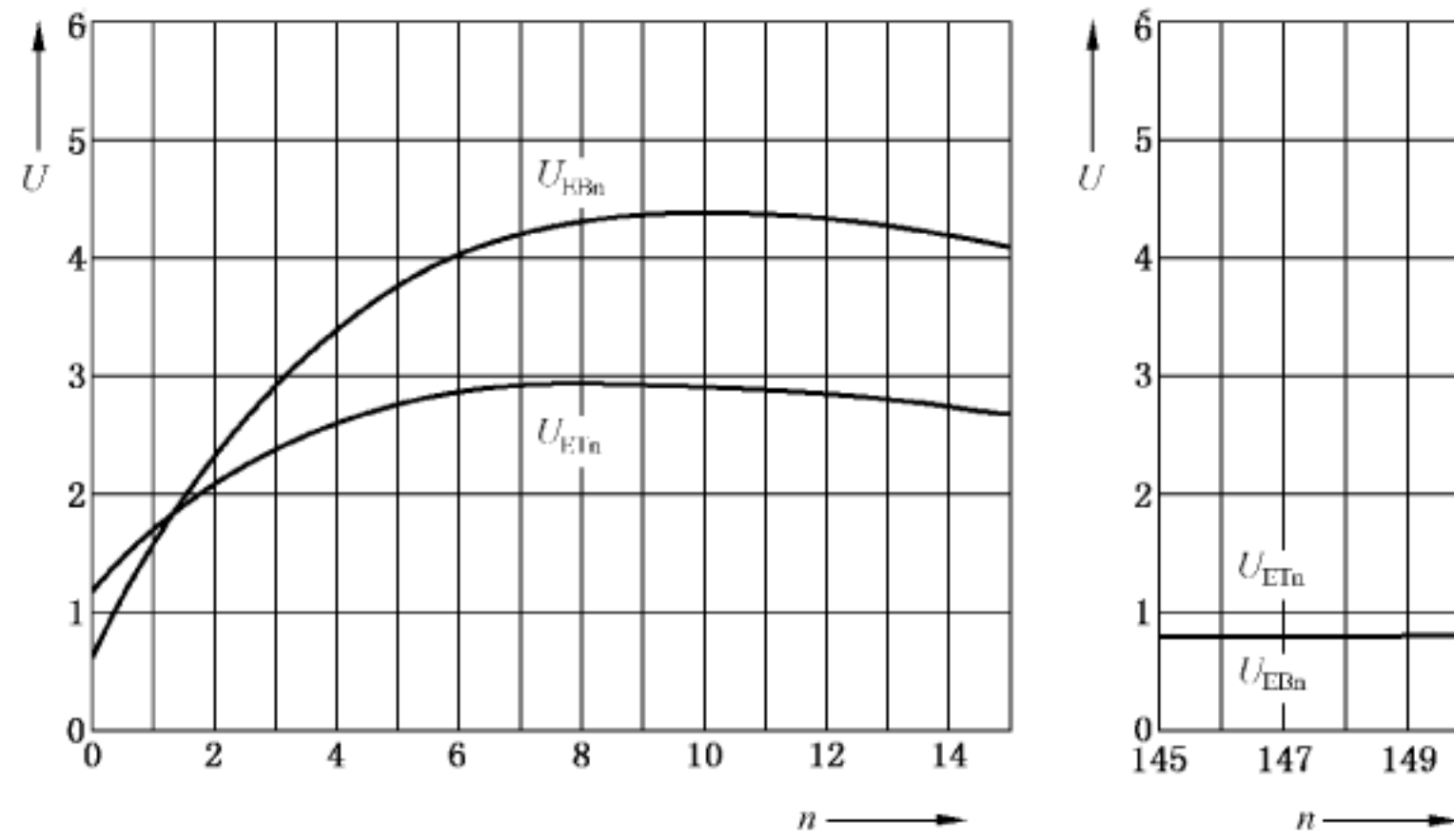


图 B.5 厂站 B 近区杆塔 $n = 1, 2, 3, \dots$ 发生接地短路时 $U_{\text{ETn}} = U_{\text{ETn}}/U_{\text{ET}}$ ($U_{\text{ET}} = 1.921\ 2\ \text{kV}$) 及 $U_{\text{EBn}} = U_{\text{EBn}}/U_{\text{EB}}$ ($U_{\text{EB}} = 0.972\ \text{kV}$)

附录 C

(资料性附录)

三芯电缆减缩系数和入地电流分布计算实例

C.1 概述

10 kV 直接接地网络(变压器中压侧星形接地)中厂站 A 和 B 通过 10 kV 电缆连接,电缆铜屏蔽层在两侧接地。

C.2 电缆末端发生接地短路

C.2.1 数据

电缆: 6/10kV NA2XS2Y 3×150/25;

铝芯线: $q_L = 150 \text{ mm}^2$; $r_L = 6.91 \text{ mm}$; $R'_L = 0.206 \text{ } \Omega/\text{km}$;

铜屏蔽层: $q_S = 25 \text{ mm}^2$; $r_S = 23.6 \text{ mm}$; $R'_S = 0.714 \text{ } \Omega/\text{km}$;

电缆芯线之间距离: $d = 22.38 \text{ mm}$;

电缆外直径: $D_a = 53 \text{ mm}$;

接地阻抗: $Z_{EA} = 0.5 \text{ } \Omega$; $Z_{EB} = 0.5 \text{ } \Omega$;

土壤电阻率: $\rho = 100 \text{ } \Omega\text{m}$ 。

C.2.2 单位长度电缆阻抗

根据 GB/T 15544.3 中式(30)和式(32),有:

单位长度正序阻抗:

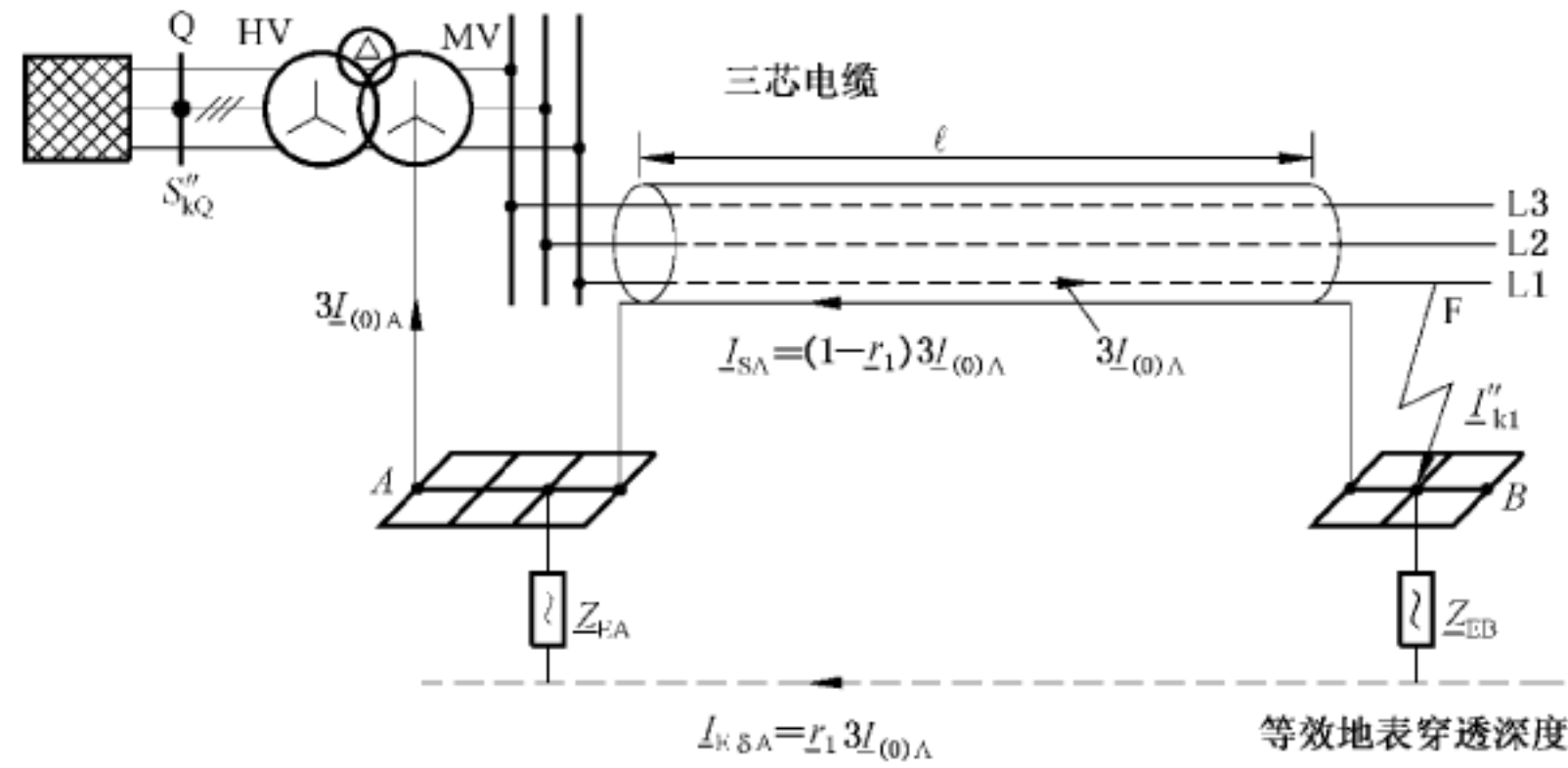
$$Z'_{(1)L} = R'_L + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{d}{\eta} \right) = (0.206 + j0.0896) \Omega/\text{km}$$

电流流过屏蔽层和大地时单位长度零序阻抗:

$$Z'_{(0)LSE} = R'_L + 3\omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + 3\ln \frac{d}{\sqrt[3]{r_L d^2}} \right) - \frac{3 \left(\omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{r_S} \right)^2}{R'_S + \omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{r_S}}$$

$$Z'_{(0)LSE} = (1.209 + j1.092) \Omega/\text{km}$$

C.2.3 短路电流



系统参数: $S''_{kQ} = 3\,000\text{ MVA}$; $U_{nQ} = 110\text{ kV}$; $R_Q/X_Q = 0.1$;

变压器: $S_{rT} = 31.5\text{ MVA}$; $U_{rTHV} = 115\text{ kV}$; $U_{rTLV} = 10.5\text{ kV}$; $u_{kr} = 12\%$; $u_{Rr} = 1\%$; $\underline{Z}_{(0)T} = 1.6 \underline{Z}_{(1)T}$

图 C.1 10 kV 电缆减缩系数和电流分布计算算例, $U_n = 10\text{ kV}$; $c = 1.1$; $f = 50\text{ Hz}$

根据 6.1, 计算接地的短路电流是忽略阻抗 $\underline{Z}_{EA}$ 和 $\underline{Z}_{EB}$ 。

短路电流:

$$\underline{I}''_k = \underline{I}''_{k3} = \frac{c U_n}{\sqrt{3} (\underline{Z}_{Qt} + \underline{Z}_{TLV} + \underline{Z}'_{(1)L} \ell)}$$

$$\underline{I}''_k(\ell=0) = (1.186 + j13.844)\text{ kA}$$

流过屏蔽层和地的短路电流:

$$\underline{I}''_{k1SE} = \frac{\sqrt{3} c U_n}{2 \underline{Z}_{Qt} + 2 \underline{Z}_{TLV} + 2 \underline{Z}_{(0)TLV} + (2 \underline{Z}'_{(1)L} + \underline{Z}'_{(0)LSE}) \cdot \ell}$$

$$\underline{I}''_{k1SE}(\ell=0) = (1.015 + j11.968)\text{ kA}$$

C.2.4 减缩系数、护套中的电流及流经大地的电流

根据式(40), 屏蔽层中电流:

$$\underline{I}_{SA} = (1 - \underline{r}_1) 3 \underline{I}_{(0)A} = (1 - \underline{r}_1) \underline{I}''_{k1SE}$$

根据式(41), 入地的分电流:

$$\underline{I}_{E\&A} = \underline{r}_1 3 \underline{I}_{(0)A} = \underline{r}_1 \underline{I}''_{k1SE}$$

根据式(37), 减缩系数 $\underline{r}_1$:

$$\underline{r}_1 = \frac{R'_S}{R'_S + \omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{r_s}} = \frac{0.714\ \Omega/\text{km}}{\left(0.714 + 0.049\ 35 + j0.062\ 83 \ln \frac{931\text{ m}}{23.6 \times 10^{-3}\text{ m}}\right) \frac{\Omega}{\text{km}}}$$

$$\underline{r}_1 = 0.531\ 8 - j0.463\ 3; \quad \underline{r}_1 = 0.705\ 3$$

流过屏蔽层和入地的电流与厂站 AB 间的距离 ($\ell \geq 1\text{ km}$) 有关, 图 C.2 给出了计算得到的短路电流与电缆长度的曲线。

$\ell = 5\text{ km}$, $I_{E\&A} = 1.175\text{ kA}$ (见表 C.1) 时厂站 A 的地电位:

$$U_{EA} = Z_{EA} I_{E\&A} = 0.5\ \Omega \times 1.175\text{ kA} = 588\text{ V};$$

表 C.1 图 C.1 计算结果

ℓ	$\underline{I}_{K1sc}''$	I_{K1sc}''	$\underline{I}_{SA}$	I_{SA}	$\underline{I}_{E\delta-A}$	$I_{E\delta-A}$
km	kA	kA	kA	kA	kA	kA
1	$2.983-j4.846$	5.690	$3.641-j0.887$	3.748	$-0.659-j3.959$	4.014
5	$1.200-j1.158$	1.666	$1.097+j0.015$	1.097	$0.103-j1.170$	1.175
10	$0.661-j0.578$	0.878	$0.577+j0.036$	0.578	$0.084-j0.613$	0.619

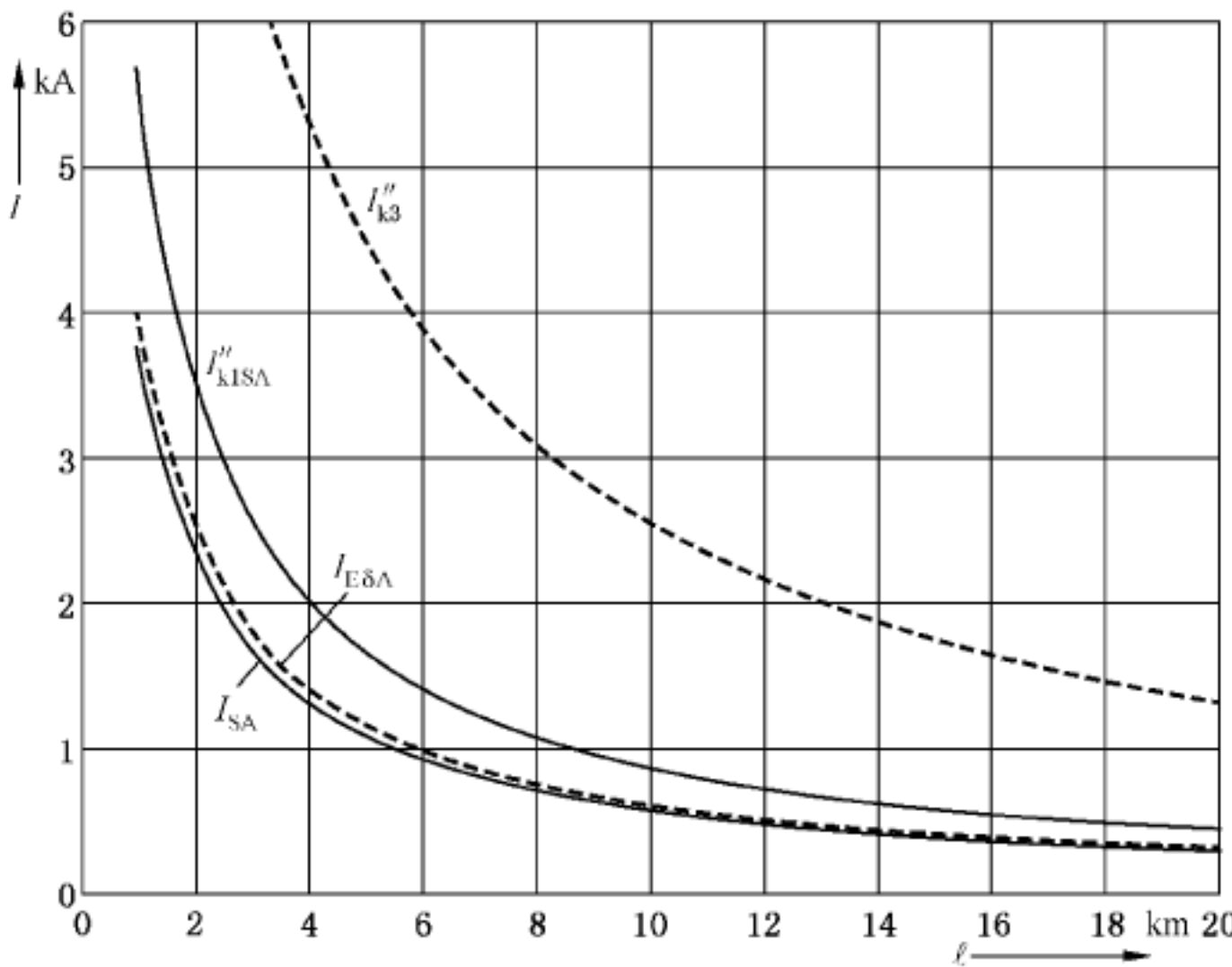


图 C.2 图 C.1 例中短路电流与入地的分电流

C.3 厂站 AB 间接地短路

C.3.1 配置和参数

系统布局见图 C.3

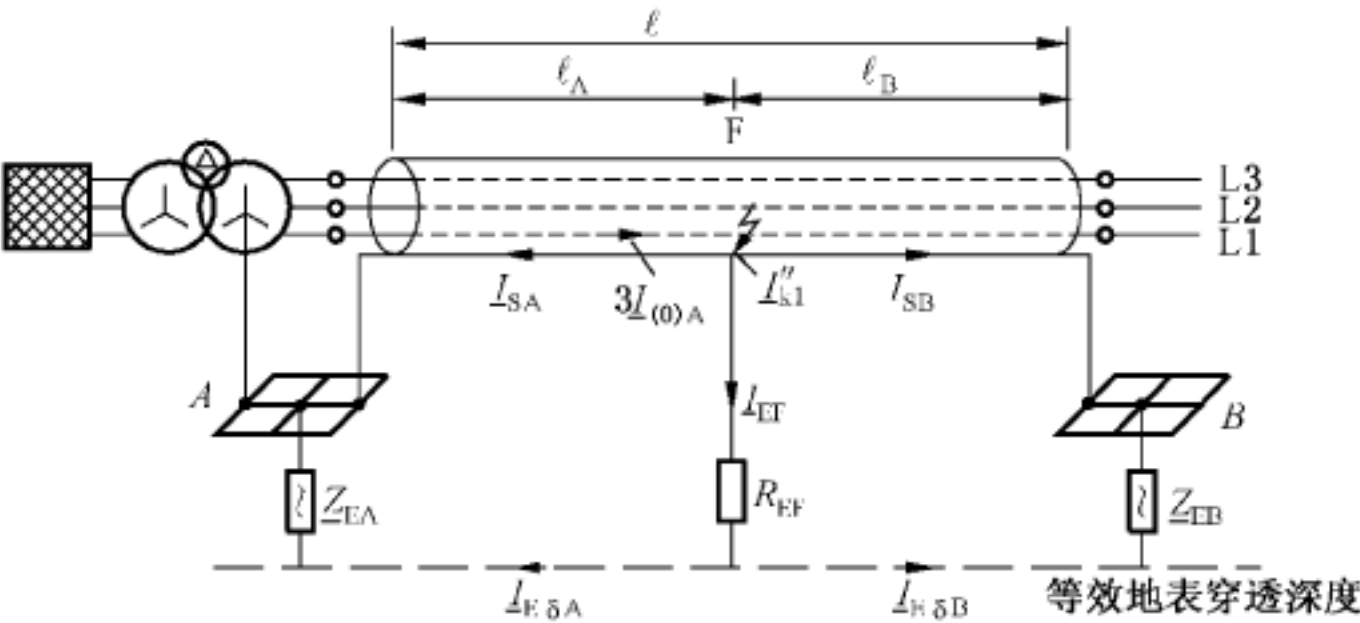


图 C.3 10 kV 系统厂站 AB 间电缆短路电流分布
(参数见 C.2.1 和图 C.1)

图 C.3 中接地短路只从厂站 A 侧馈入,接地点 F 处 $R_{FF}=5\ \Omega$ (见 8.2.2.2)。

C.3.2 计算结果

根据式(37),计算得到减缩系数 $r_1=0.531\ 8-j\ 0.463\ 3$ 。

图 C.4 中故障点左侧电流 $\underline{I}_{SA}$ 和 $\underline{I}_{E\&A}$ 根据式(42)和式(45)计算,见表 C.2;右侧电流根据式(43)和式(46)计算,见表 C.3。根据图 C.3,3 $\underline{I}_{(0)B}=0$ 时有 $\underline{I}_{E\&B}=-\underline{I}_{SB}$ 。

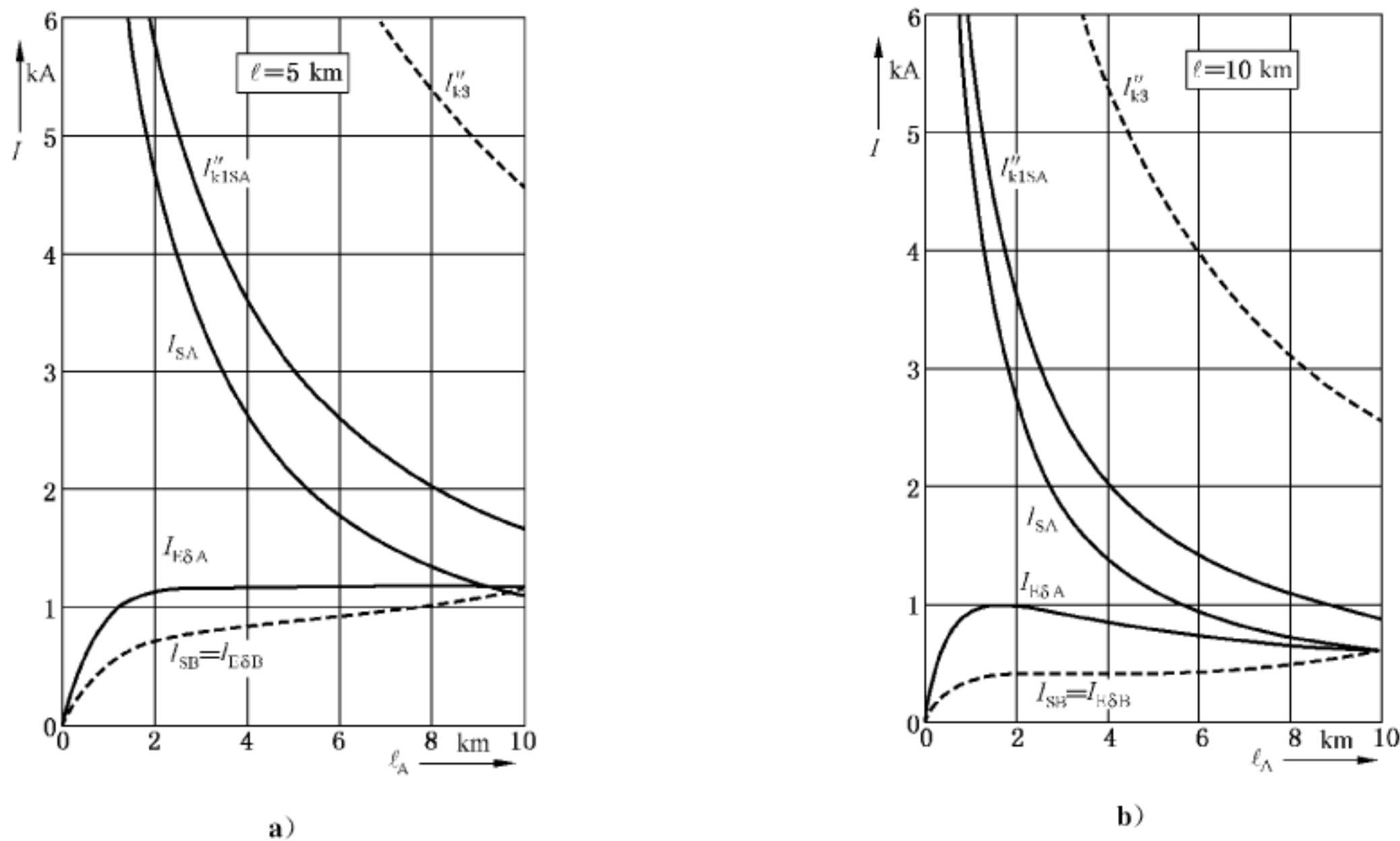


图 C.4 接地短路电流,屏蔽层和入地分电流(a: $\ell=5\text{ km}$, b: $\ell=10\text{ km}$)

表 C.2 图 C.3 算例计算结果, $\ell=5\text{ km}$

ℓ km	I''_{K1sc} kA	$\underline{I}_{SA}$ kA	I_{SA} kA	$\underline{I}_{SB} = -\underline{I}_{E\&B}$ kA	$\underline{I}_{SB}$ kA	$\underline{I}_{E\&A}$ kA	$I_{E\&A}$ kA
0	12.000	$1.016-j\ 11.967$	12.000	0	0	0	0
1	5.090	$2.911-j\ 3.640$	4.661	$-0.183-j\ 0.688$	0.712	$0.072-j\ 1.206$	1.208
2.5	3.006	$1.858-j\ 1.011$	2.115	$-0.188-j\ 0.874$	0.882	$0.128-j\ 1.246$	1.253
5	1.668	$1.097+j\ 0.015$	1.097	$0.103-j\ 1.170$	1.176	$0.103-j\ 1.170$	1.175

表 C.3 图 C.3 算例计算结果, $\ell=10\text{ km}$

ℓ km	I''_{K1sc} kA	$\underline{I}_{SA}$ kA	I_{SA} kA	$\underline{I}_{SB} = -\underline{I}_{E\&B}$ kA	$\underline{I}_{SB}$ kA	$\underline{I}_{E\&A}$ kA	$I_{E\&A}$ kA
0	12.000	$1.016-j\ 11.967$	12.000	0	0	0	0
1	5.690	$2.800-j\ 3.931$	4.826	$-0.094-j\ 0.338$	0.351	$0.183-j\ 0.915$	0.933
2.5	3.006	$1.750-j\ 1.330$	2.198	$-0.075-j\ 0.309$	0.405	$0.236-j\ 0.928$	0.957
5	1.668	$1.036+j\ 0.394$	1.108	$0.061-j\ 0.409$	0.413	$0.164-j\ 0.762$	0.779
10	0.878	$0.577-j\ 0.036$	0.578	$0.084-j\ 0.613$	0.619	$0.084-j\ 0.613$	0.619

附录 D

(资料性附录)

三根单芯电流减缩因数 r_3 和入地电流分布计算实例

D.1 概述

110 kV 中性点直接接地网络中厂站 A 和 B 通过 110 kV 三根单芯电缆连接,电缆铅屏蔽层在两侧接地。

D.2 电缆末端发生接地短路

D.2.1 数据

单芯电缆: 64/110 kV 2XK2Y; $3 \times 1 \times 630$ mm², Cu, 三角形排列;

铜芯: $q_L = 630$ mm²; $r_L = 1.56$ mm; $R'_L = 0.0283$ Ω/km;

铅屏蔽层: $q_S = 550$ mm²; $r_S = r_{Sm} = 39.8$ mm; $R'_S = 0.378$ Ω/km;

电缆外直径: $D_a = 85$ mm;

电缆芯线之间距离: $d = 1.06$; $D_a = 90.1$ mm;

土壤电阻率: $\rho = 100$ Ω·m。

D.2.2 单位长度电缆阻抗

根据 GB/T 15544.3 中式(15),单位长度正序阻抗:

$$Z'_{(1)LS} = R'_L + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{d}{\eta} \right) + \frac{\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{d}{r_{Sm}}}{R'_S + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{d}{r_{Sm}}} = (0.0351 + j0.125) \Omega/\text{km}$$

注 1: 因为屏蔽层损耗,当处理护套中电流时 $Z'_{(1)LS}$ 的实部大于 $Z'_{(1)L}$ 的实部,见 GB/T 15544.3 的表 5。

电流只流过屏蔽层时单位长度零序阻抗:

$$Z'_{(0)LSE} = R'_L + R'_S + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + 3 \ln \frac{d}{r_L} \right) = (0.4073 + j0.0746) \Omega/\text{km}$$

电流流过屏蔽层和大地时单位长度零序阻抗[见 GB/T 15544.3 中式(16)]:

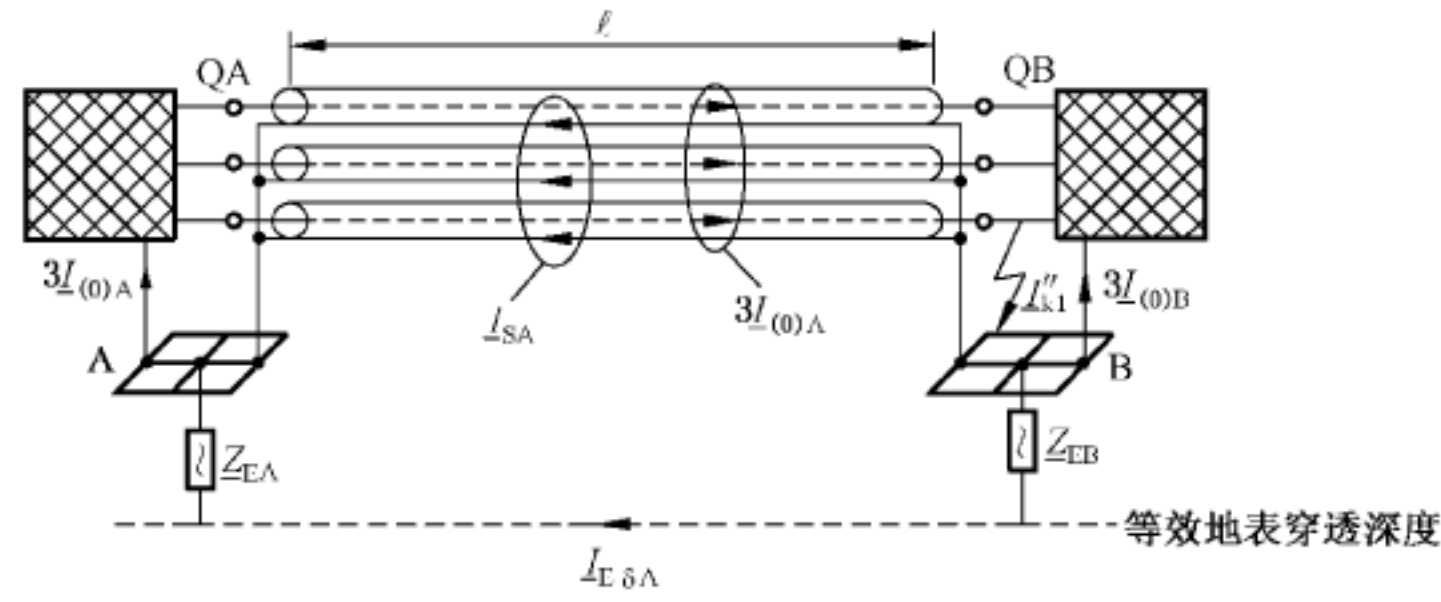
$$\underline{Z'_{(0)LSE}} = R'_L + 3\omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + 3 \ln \frac{d}{\sqrt[3]{r_L d^2}} \right) - \frac{3 \left(\omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{r_S} \right)^2}{R'_S + \omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{r_S}}$$

$$\underline{Z'_{(0)LSE}} = (0.3856 + j0.1483) \Omega/\text{km}$$

注 2: $Z'_{(0)LS} = 0.414$ Ω/km 和 $Z'_{(0)LSE} = 0.4131$ Ω/km 只相差 2%。

D.2.3 短路电流

厂站 A、B 通过电缆连接,B 站内发生单相接地短路,示意图如图 D.1 所示,短路点的复序计算网络如图 D.2 所示。



电力网络馈电线 QA: $Z_{(1)QA} = (0.442 + j4.418)\Omega$; $Z_{(0)QA} = (1.768 + j8.836)\Omega$;
 电力网络馈电线 QB: $Z_{(1)QB} = (1.350 + j8.000)\Omega$; $Z_{(0)QB} = (4.050 + j12.800)\Omega$ 。

图 D.1 三根单芯电缆厂站 B 发生接地短路时减缩系数和电流分布计算

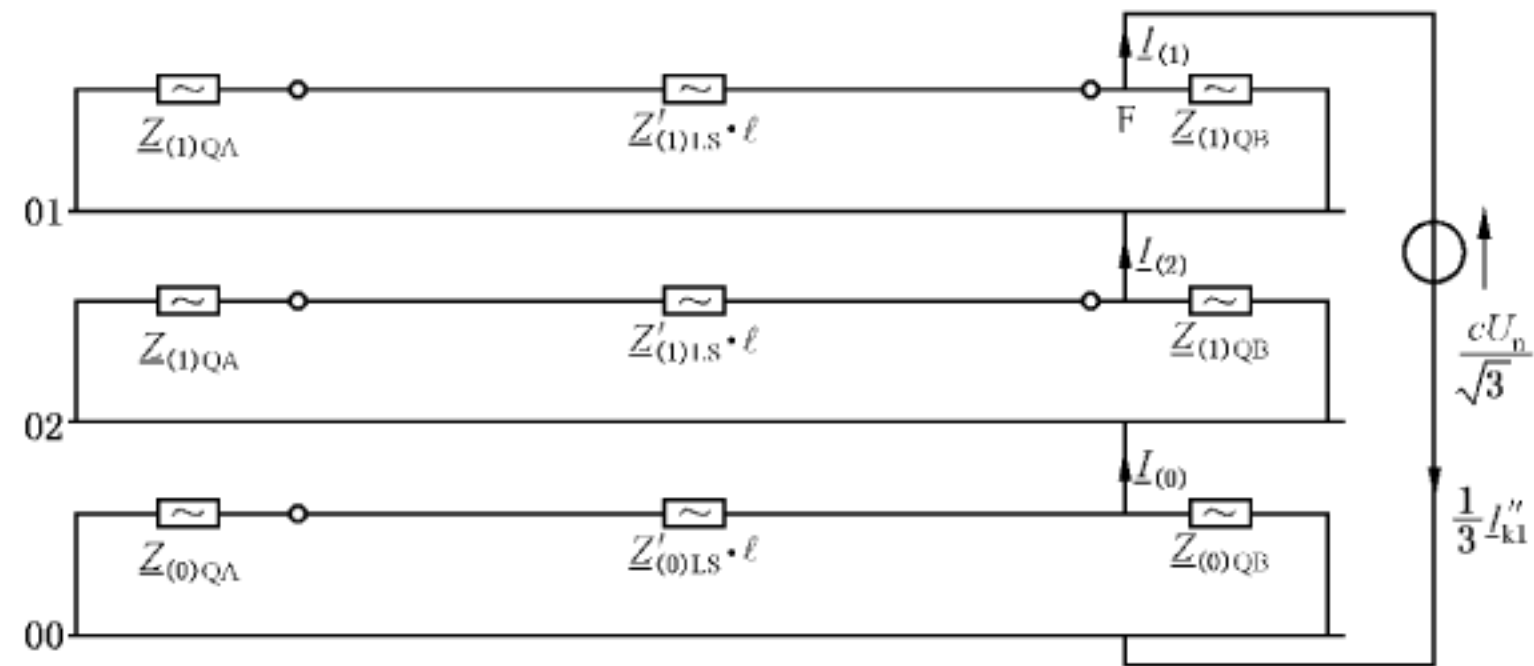


图 D.2 图 D.1 正负零序网络, 三序网络连接于短路点(厂站 B)

以电缆长度 $\ell = 5 \text{ km}$ 为例, 根据图 D.2 厂站 B 处接地短路短路电流为:

$$I_{k1}'' = 3 I_{(0)} = \frac{\sqrt{3} c U_n}{2 Z_{(1)} + Z_{(0)}} = \frac{\sqrt{3} \times 1.1 \times 110 \text{ kV}}{2(0.4339 + j3.0947)\Omega + (1.9492 + j5.4842)\Omega};$$

$$I_{k1}'' = (4.0939 - j16.9654) \text{ kA}.$$

式中:

$$Z_{(1)} = Z_{(2)} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{(1)QA} + Z'_{(1)LS} \ell} + \frac{1}{Z_{(1)QB}}} = (0.4339 + j3.0947)\Omega$$

$$Z_{(0)} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{(0)QA} + Z'_{(0)LS} \ell} + \frac{1}{Z_{(0)QB}}} = (1.9492 + j5.4841)\Omega$$

根据这个结果有, 分电流 $3 I_{(0)A}$ 和 $3 I_{(0)B}$:

$$3 I_{(0)A} = I_{k1}'' \frac{Z_{(0)QB} + Z'_{(0)LS} \ell}{Z_{(0)QA} + Z_{(0)QB} + Z'_{(0)LS} \ell} = (2.5780 - j9.5528) \text{ kA}$$

$$3 I_{(0)B} = I_{k1}'' \frac{Z_{(0)QA} + Z'_{(0)LS} \ell}{Z_{(0)QA} + Z_{(0)QB} + Z'_{(0)LS} \ell} = (1.5160 - j7.4126) \text{ kA}$$

D.2.4 减缩系数与电流分布

根据式(48), 三角形排列的三根单芯电缆的减缩系数:

$$\underline{r}_3 = \frac{R'_s}{R'_s + \omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{\sqrt[3]{r_s d^2}}} = 0.057\ 2 - j0.194\ 5;$$

$$r_3 = 0.202\ 7$$

根据式(49) $\ell = 5\ \text{km}$, 三个屏蔽层中电流之和:

$$\underline{I}_{SA} = (1 - \underline{r}_3) 3 \underline{I}_{(0)A} = (1 - 0.057\ 2 - j0.194) \times (2.578\ 0 - j9.552\ 8) \text{ kA};$$

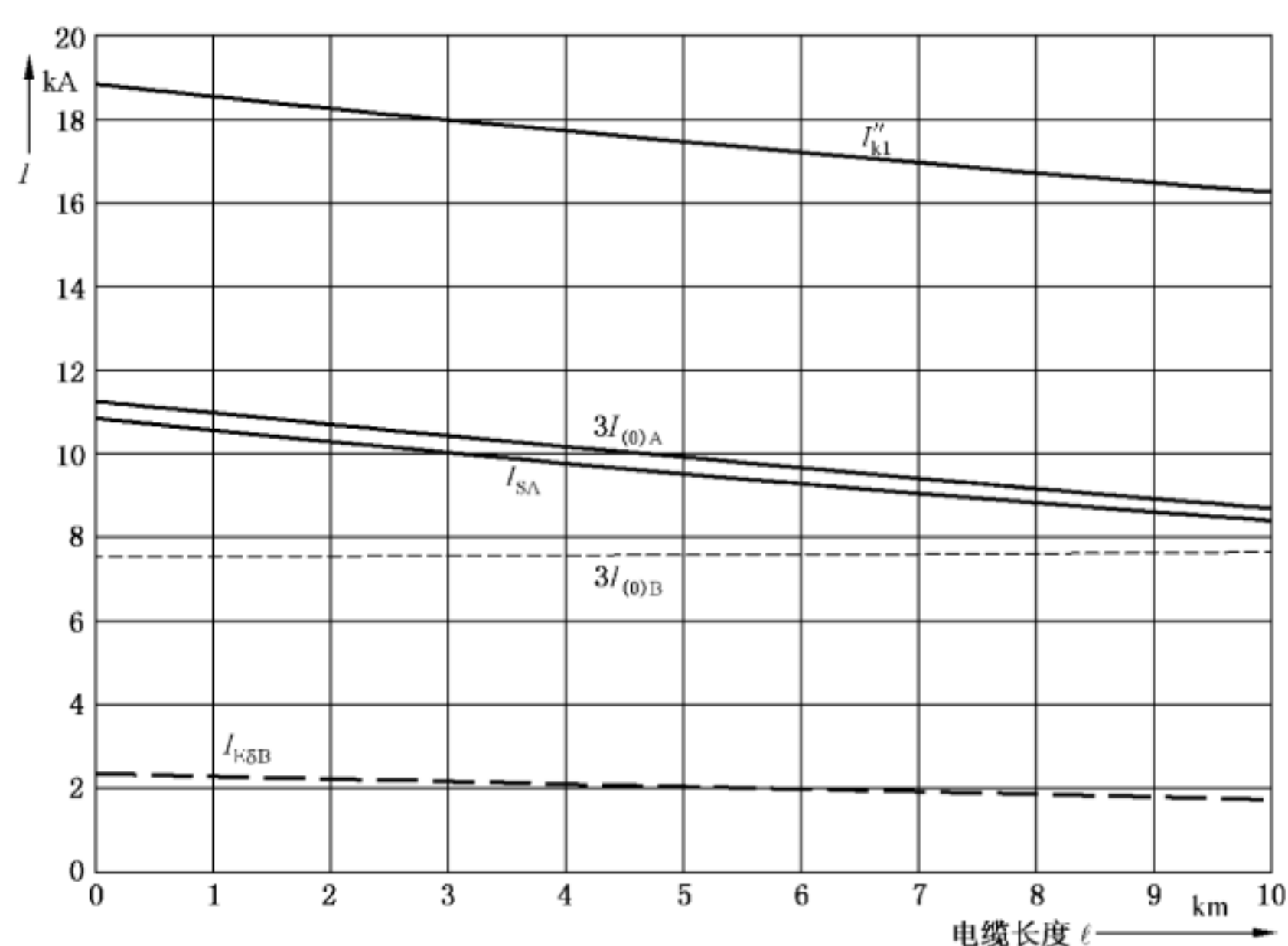
$$\underline{I}_{SA} = (4.288\ 7 - j8.505\ 4) \text{ kA}$$

根据式(50) $\ell = 5\ \text{km}$, 入地的分电流:

$$\underline{I}_{E\delta A} = \underline{r}_3 3 \underline{I}_{(0)A} = (0.057\ 2 - j0.194\ 5) \times (2.578\ 0 - j9.552\ 8) \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{E\delta A} = (-1.710\ 8 - j1.047\ 4) \text{ kA}$$

图 D.3 给出电流随厂站 AB 间电缆距离 ℓ 的分布变化。



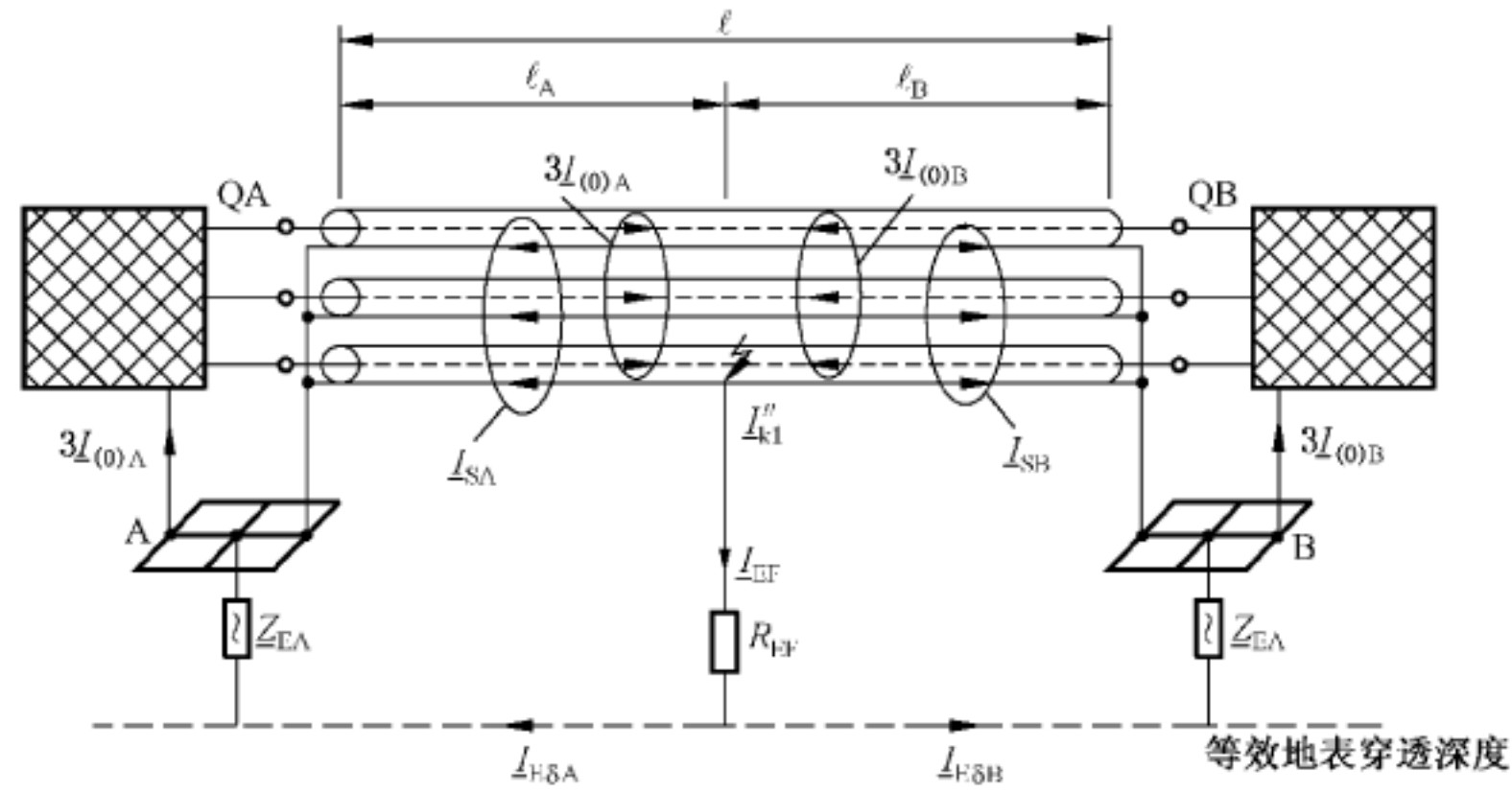
B 站发生单相接地短路时的电流: $\underline{I}''_{kl} = 3 \underline{I}_{(0)A} + 3 \underline{I}_{(0)B}$; $3 \underline{I}_{(0)A} = \underline{I}_{SA} + \underline{I}_{E\delta A}$

图 D.3 厂站 AB 间三条单芯电缆时, 图 D.1 网络中电流分布与电缆长度 ℓ 的关系

D.3 厂站 AB 间接地短路

D.3.1 配置和参数

如图 D.4 所示, 接地故障有厂站 AB 两侧馈入, 参数见 D.2.1 和图 D.1, 分别考虑 $R_{EF} \rightarrow \infty$ 和 $R_{EF} = 5\ \Omega$ (见 8.3.2)。

图 D.4 三条单芯电缆厂站 AB 间发生接地短路时减缩系数 r_3 和电流分布

电力网络馈线 QA 和 QB 由图 D.1 给出。

D.3.2 短路电流

根据图 D.4 给出正序、负序和零序网络在故障点处构成复合序网,如图 D.5 所示。

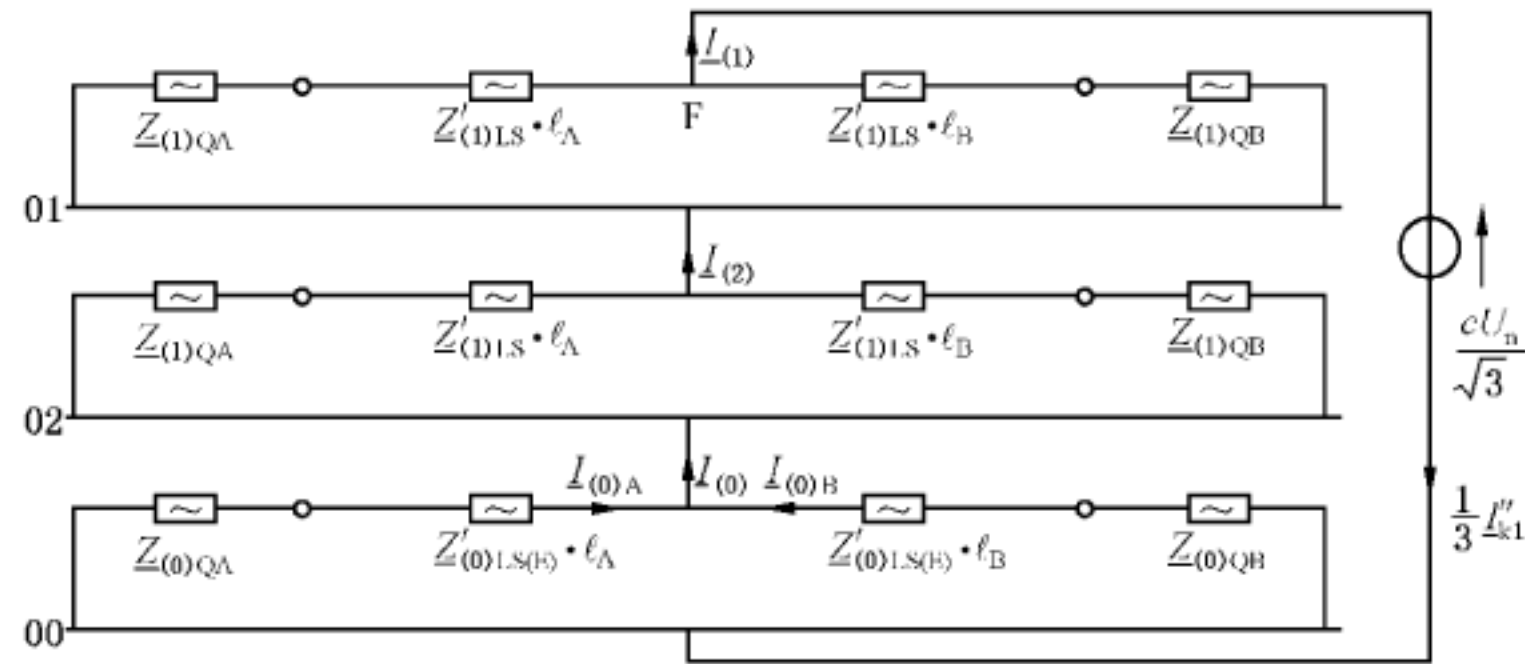


图 D.5 图 D.4 对应的复合序网络(故障点位于厂站 AB 间)

D.3.3 $R_{EF} \rightarrow \infty$ 时电流分布

以短路点与厂站 A 距离 $l_A = 5 \text{ km}$ 为例,若电缆总长度 $l = 10 \text{ km} (l_A + l_B)$,接地短路电流:

$$I''_{k1} = 3 I_{(0)} = \frac{\sqrt{3} c U_n}{2 Z_{(1)} + Z_{(0)}} = \frac{\sqrt{3} \times 1.1 \times 110 \text{ kV}}{2(0.433 \ 9 + j 3.094 \ 7) \Omega + (1.949 \ 2 + j 5.484 \ 2) \Omega},$$

$$I''_{k1} = (4.093 \ 9 - j 16.965 \ 4) \text{ kA}.$$

式中:

$$Z_{(1)} = Z_{(2)} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{(1)QA} + Z'_{(1)LS} l_A} + \frac{1}{Z_{(1)QB} + Z'_{(1)LS} l_B}} = (0.453 \ 2 + j 3.184 \ 3) \Omega$$

$$Z_{(0)} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{(0)QA} + Z'_{(0)LS} l_A} + \frac{1}{Z_{(0)QB} + Z'_{(0)LS} l_B}} = (2.347 \ 1 + j 5.422 \ 5) \Omega$$

根据这个结果有,分电流 $I_{(0)A}$ 和 $I_{(0)B}$:

$$I_{(0)A} = \frac{1}{3} I''_{k1} \frac{Z_{(0)QB} + Z'_{(0)LS} l_B}{Z_{(0)QA} + Z_{(0)QB} + Z'_{(0)LS} l} = (0.846 \ 2 - j 3.279 \ 4) \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{(0)B} = \frac{1}{3} \underline{I}_{kl}'' \frac{Z_{(0)QA} + \underline{Z}'_{(0)LS} \ell_A}{Z_{(0)QA} + Z_{(0)QB} + \underline{Z}'_{(0)LS} \ell} = (0.672\ 9 - j2.226\ 0) \text{ kA}$$

根据式(51a)和(52a)计算屏蔽层中电流, $r_3 = 0.057\ 2 - j0.194\ 5$, $\ell = 5\ \text{km}$:

$$\underline{I}_{SA} = (1 - \underline{r}_3) 3 \underline{I}_{(0)A} + \underline{r}_3 3 \underline{I}_{(0)A} \frac{\ell_B}{\ell} + \underline{r}_3 3 \underline{I}_{(0)B} \frac{\ell_B}{\ell} = (2.831\ 0 - j9.697) \text{ kA};$$

$$\underline{I}_{SA} = 10.102\ 2\ \text{kA}$$

$$\underline{I}_{SB} = (1 - \underline{r}_3) 3 \underline{I}_{(0)B} + \underline{r}_3 3 \underline{I}_{(0)B} \frac{\ell_A}{\ell} + \underline{r}_3 3 \underline{I}_{(0)A} \frac{\ell_A}{\ell} = (1.726\ 3 - j6.818\ 9) \text{ kA};$$

$$\underline{I}_{SB} = 7.034\ 1\ \text{kA}$$

根据式(54a)和式(55a), $\ell = 5\ \text{km}$, 入地的分电流:

$$\underline{I}_{E\&A} = \underline{r}_3 3 \underline{I}_{(0)A} \frac{\ell_A}{\ell} - \underline{r}_3 3 \underline{I}_{(0)B} \frac{\ell_B}{\ell} = (-0.292\ 5 - j0.140\ 9) \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{E\&A} = 0.324\ 6\ \text{kA}$$

$$\underline{I}_{E\&B} = \underline{r}_3 3 \underline{I}_{(0)B} \frac{\ell_B}{\ell} - \underline{r}_3 3 \underline{I}_{(0)A} \frac{\ell_A}{\ell} = (0.292\ 5 + j0.140\ 9) \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{E\&B} = 0.324\ 6\ \text{kA}$$

根据式(51b)和(52b)流过屏蔽层的最大电流:

$$\underline{I}_{S1Amax} = 3 \underline{I}_{(0)A} (\ell_A = 0) + (2 + \underline{r}_3) \underline{I}_{(0)B} (\ell_A = 0) = (2.328\ 2 - j16.345\ 4) \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{S1Amax} = 16.510\ 4\ \text{kA}$$

$$\underline{I}_{S1Bmax} = 3 \underline{I}_{(0)B} (\ell_A = \ell) + (2 + \underline{r}_3) \underline{I}_{(0)A} (\ell_A = \ell) = (2.918\ 3 - j13.280\ 5) \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{S1Bmax} = 13.597\ 3\ \text{kA}$$

根据式(54b)和式(55b)流入大地的最大电流:

$$\underline{I}_{E\&Amax} = \underline{r}_3 \underline{I}_{(0)A} (\ell_A = \ell) = (-1.419\ 1 - j1.155\ 7) \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{E\&Amax} = 1.830\ 2\ \text{kA}$$

$$\underline{I}_{E\&Bmax} = \underline{r}_3 \underline{I}_{(0)B} (\ell_A = 0) = (-0.991\ 5 - j0.881\ 0) \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{E\&Bmax} = 1.326\ 4\ \text{kA}$$

图 D.6 给出相对于故障点距厂站 A 距离 ℓ_A 的电流分布。

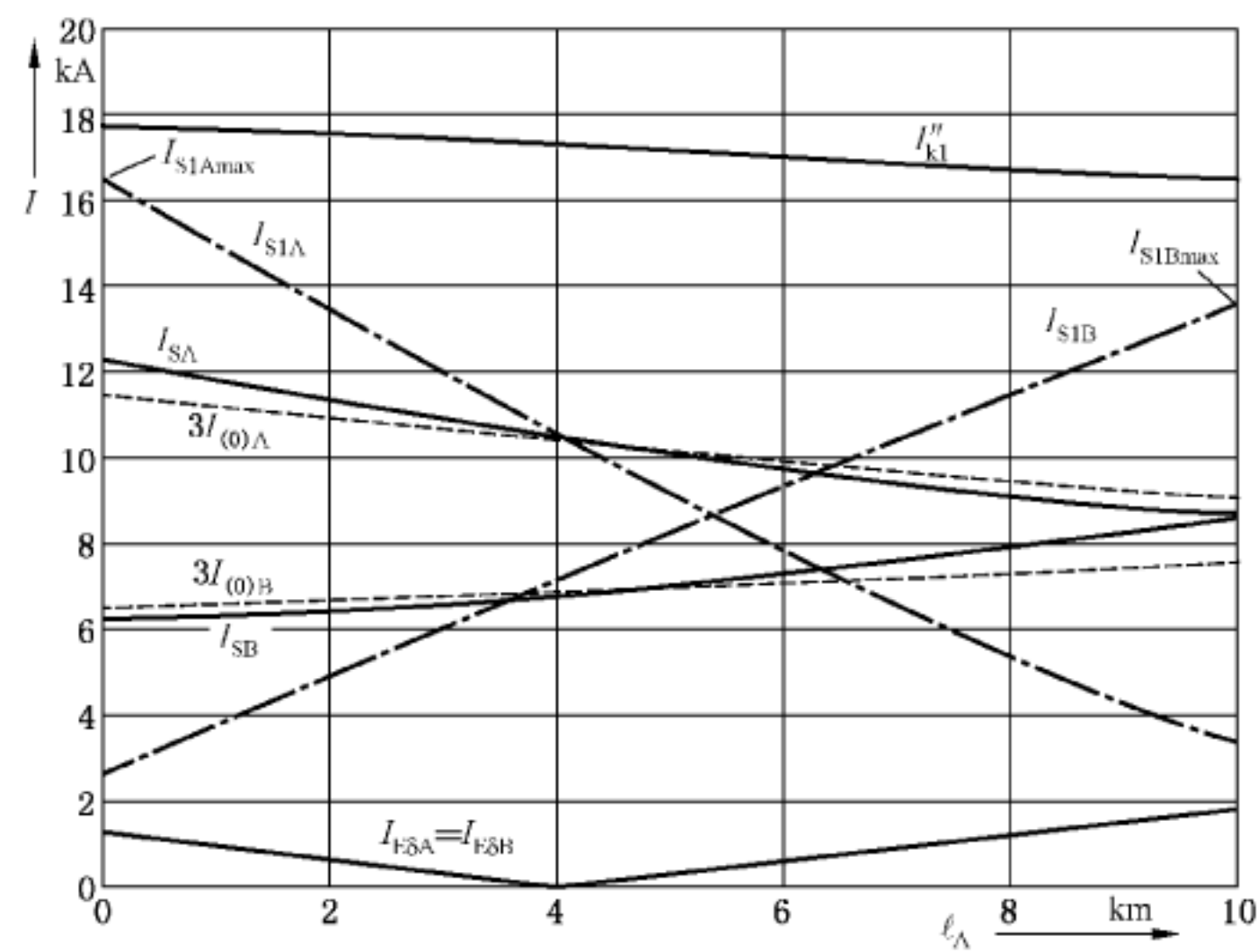


图 D.6 相对于故障点距厂站 A 距离 ℓ_A 的电流分布, $R_{EF} \rightarrow \infty$

D.3.4 $R_{EF} \rightarrow 5 \Omega$ 时电流分布

以短路点与厂站 A 距离 $\ell_A = 5 \text{ km}$ 为例,若电缆总长度 $\ell = 10 \text{ km} (\ell_A + \ell_B)$,接地短路电流:

$$\underline{I}_{kl}'' = 3 \underline{I}_{(0)} = \frac{\sqrt{3} c U_n}{2 \underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}} = \frac{\sqrt{3} \times 1.1 \times 110 \text{ kV}}{2(0.453 \ 2 + j 3.184 \ 3) \Omega + (2.292 \ 5 + j 5.613 \ 4) \Omega}$$

$$\underline{I}_{kl}'' = (4.358 \ 8 - j 16.326 \ 9) \text{ kA}.$$

式中:

$$\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}'_{(1)QA} + \underline{Z}'_{(1)LS} \ell_A} + \frac{1}{\underline{Z}_{(1)QB} + \underline{Z}'_{(1)LS} \ell_B}} = (0.453 \ 2 + j 3.184 \ 3) \Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_{(0)QA} + \underline{Z}'_{(1)LS} \ell_A} + \frac{1}{\underline{Z}_{(0)QB} + \underline{Z}'_{(1)LS} \ell_B}} = (2.292 \ 5 + j 5.613 \ 4) \Omega$$

根据这个结果有,分电流 $3 \underline{I}_{(0)A}$ 和 $3 \underline{I}_{(0)B}$:

$$3 \underline{I}_{(0)A} = \underline{I}_{kl}'' \frac{\underline{Z}_{(0)QB} + \underline{Z}'_{(0)LS} \ell_B}{\underline{Z}_{(0)QA} + \underline{Z}_{(0)QB} + \underline{Z}'_{(0)LS} \ell} = (2.386 \ 7 - j 9.691 \ 6) \text{ kA}$$

$$3 \underline{I}_{(0)B} = \underline{I}_{kl}'' \frac{\underline{Z}_{(0)QA} + \underline{Z}'_{(0)LS} \ell_A}{\underline{Z}_{(0)QA} + \underline{Z}_{(0)QB} + \underline{Z}'_{(0)LS} \ell} = (1.972 \ 1 - j 6.635 \ 4) \text{ kA}$$

根据式(47) $R_{EF} = 5 \Omega$,屏蔽层到地阻抗之和:

$$\underline{Z}_{EStot} = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}'_S \times 5 \text{ km}} + \frac{1}{\underline{Z}'_S \times 5 \text{ km}} + \frac{1}{5 \Omega}} = (1.143 \ 3 + j 1.003 \ 9) \Omega$$

根据式(51)和式(52)计算屏蔽层中电流, $r_3 = 0.057 \ 3 - j 0.194 \ 5$, $\ell = 5 \text{ km}$:

$$\underline{I}_{SA} = (1 - r_3) 3 \underline{I}_{(0)A} + r_3 3 \underline{I}_{(0)A} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_S \ell_A} + r_3 3 \underline{I}_{(0)B} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_S \ell_A} = (2.827 \ 9 - j 9.066 \ 5) \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{SB} = (1 - r_3) 3 \underline{I}_{(0)B} + r_3 3 \underline{I}_{(0)B} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_S \ell_B} + r_3 3 \underline{I}_{(0)A} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_S \ell_B} = (1.842 \ 5 - j 6.265 \ 6) \text{ kA}$$

根据式(54)和式(55), $\ell_A = 5 \text{ km}$,入地的分电流:

$$\underline{I}_{E\&A} = r_3 3 \underline{I}_{(0)A} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_S \ell_B} + r_3 3 \underline{I}_{(0)A} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{R_{EF}} - r_3 3 \underline{I}_{(0)B} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_S \ell_A} = (-0.441 \ 2 - j 0.625 \ 0) \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{E\&B} = r_3 3 \underline{I}_{(0)B} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_S \ell_A} + r_3 3 \underline{I}_{(0)B} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{R_{EF}} - r_3 3 \underline{I}_{(0)A} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_S \ell_B} = (0.129 \ 6 - j 0.369 \ 7) \text{ kA}$$

流过屏蔽层 S1 的最大电流有 D.3.3 给出。

如果短路电流 $\underline{I}_{(0)A} (\ell_A = \ell) = (-1.528 \ 7 - j 1.062 \ 1) \text{ kA}$ 只从厂站 A 侧馈入,流入大地的最大电流由式(54c)计算得到:

$$\underline{I}_{E\&Amax} = r_3 3 \underline{I}_{(0)A} (\ell_A = \ell) = (-1.528 \ 7 - j 1.062 \ 1) \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{E\&Amax} = 1.861 \ 4 \text{ kA}$$

图 D.4 中两侧馈入短路电流时,最大值 $I_{E\&Amax} = 1.764 \ 4 \text{ kA}$ (见图 D.7)。

图 D.7 给出了相对于厂站 A 和短路位置距离 ℓ_A 的电流分布。

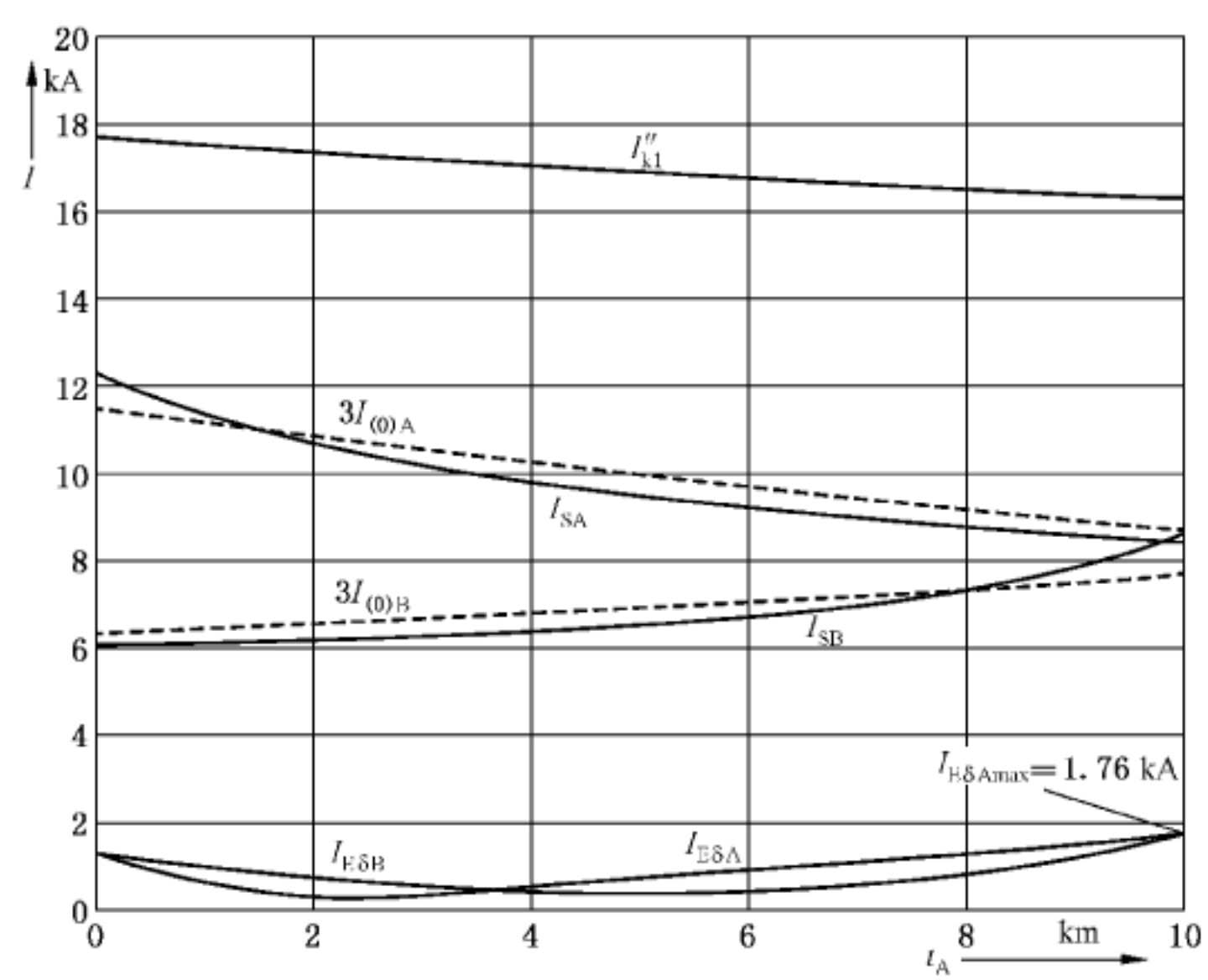


图 D.7 图 D.4 电缆中电流对 ℓ_A 的分布, $R_{EF} = 5 \, \Omega$

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
三相交流系统短路电流计算
第4部分：同时发生两个独立单相接地
故障时的电流以及流过大地的电流
GB/T 15544.4—2017/IEC 60909-3:2009

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100029)
北京市西城区三里河北街16号(100045)

网址：www.spc.org.cn

服务热线：400-168-0010

2018年1月第一版

*

书号：155066·1-59191

版权专有 侵权必究



GB/T 15544.4-2017