



中华人民共和国国家标准

GB/T 15544.5—2017/IEC/TR 60909-4:2000

三相交流系统短路电流计算 第5部分:算例

Short-circuit current calculation in three-phase a.c.systems—Part 5: Examples

(IEC/TR 60909-4:2000, Short-circuit current in three-phase a.c.systems—
Part 4: Examples for the calculation of short-circuit currents, 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

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
三相交流系统短路电流计算
第 5 部分：算例

GB/T 15544.5—2017/IEC/TR 60909-4:2000

*

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：155066·1-59237

版权专有 侵权必究

目 次

前言	III
1 概述	1
1.1 范围及目的	1
1.2 规范性引用文件	1
1.3 定义、符号、系数和公式	1
2 电气设备的正序、负序及零序阻抗	1
2.1 架空线、电缆及短路限制电抗器	2
2.2 变压器	2
2.3 发电机及发变组	7
3 $U_n=400\text{ V}$ 的低压系统中的短路电流计算	10
3.1 问题	10
3.2 正序阻抗的确定	11
3.2.1 网络馈线	11
3.2.2 变压器	12
3.2.3 线路(电缆及架空线)	12
3.3 零序阻抗的确定	13
3.3.1 变压器	13
3.3.2 线路(电缆和架空线)	13
3.4 三相短路电流 I_k'' 及 i_p 计算	13
3.4.1 短路位置 F1	13
3.4.2 短路位置 F2	14
3.4.3 短路位置 F3	15
3.5 单相短路点流 I_{k1}'' 及 i_{p1} 计算	15
3.5.1 短路位置 F1	15
3.5.2 短路位置 F2	16
3.5.3 短路位置 F3	16
3.6 结果汇总	16
4 中压系统中三相短路电流的计算—电动机的影响	17
4.1 问题	17
4.2 带绝对值的复数计算	17
4.3 采用电气设备的短路电抗进行计算	20
4.4 基于标幺值的计算	21
4.5 采用叠加方法的计算	23
5 发电机变压器组及辅助网络三相短路电流计算	25
5.1 问题	25
5.2 电气设备短路阻抗	27
5.2.1 网络馈线	27

5.2.2	发变组	27
5.2.3	辅助变压器	28
5.2.4	2.5 MVA 及 1.6 MVA 低压变压器	28
5.2.5	异步电动机	30
5.3	短路电流的计算	31
5.3.1	短路位置 F1	31
5.3.2	短路位置 F2	32
5.3.3	短路位置 F3	33
5.3.4	短路位置 F4	35
5.3.5	短路位置 F5	37
6	参照 GB/T 15544.1 使用数字程序进行短路电流计算的测试网络	38
6.1	概述	38
6.2	380 kV/110 kV/30 kV/10 kV 的高压测试网络	39
6.2.1	网络拓扑及数据	39
6.2.2	电气设备的短路阻抗	40
6.3	结果	41
6.3.1	三相短路电流	41
6.3.2	线路对地短路电流	42

前 言

GB/T 15544《三相交流系统短路电流计算》分为 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 5 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/TR 60909-4:2000《三相交流系统短路电流 第 4 部分：短路电流计算案例》。

本部分做了下列编辑性修改：

- 为与现有标准系列一致，将本部分名称改为《三相交流系统短路电流计算 第 5 部分：算例》。与本部分中规范性引用的国际文件中有一致性对应关系的我国文件如下：
- GB/T 156—2007 标准电压(IEC 60038: 2002, MOD)
- GB/T 15544.2—2017 三相交流系统短路电流计算 第 2 部分：短路电流计算应用的系数(IEC TR 60909-1:2002, 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)
- GB/T 15544.4—2017 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短路故障时的短路电流以及流过大地电流(IEC 60909-3:2009, IDT)
- GB/T 35698.1—2017 短路电流效应计算 第 1 部分：定义和计算方法(IEC 60865-1:2011, IDT)

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控制中心、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、印永华、肖惕、姜树德、申旭辉、施浩波、段翔颖、张玉红、韩家辉、赵强、李晶。

三相交流系统短路电流计算

第 5 部分:算例

1 概述

1.1 范围及目的

GB/T 15544 的本部分给出了依照 GB/T 15544.1 进行 50 Hz 或 60 Hz 三相交流系统短路电流计算的算例。

本部分内容包括正序、负序及零序系统(第 2 章)中电气设备的建模,以及低压系统(第 3 章)、带有异步电机的中压系统(第 4 章)及发电厂系统(其辅助系统接有大量中压和低压异步电动机)(第 5 章)的算例。

第 3 章、第 4 章、第 5 章中给出的三个算例与 IEC 60909 (1988) 中给出的算例相似,但根据 GB/T 15544.1—2013 进行了修改。第 3 章中增加了 3.6,将等效电压源法和叠加法的计算结果进行对比。

第 6 章提供了测试系统的接线图和计算数据,以及依据 GB/T 15544.1 得到的短路电流计算结果。该算例包括 380 kV、110 kV、30 kV 及 10 kV 4 个不同电压等级,含有发电厂设备、发电机、异步电动机等,计算结果包括 I_k'' 、 i_p 、 I_b 、 I_k 、 I_{k1}'' 和 i_{p1} 。该算例可用于测试短路电流的计算机程序。

1.2 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)

IEC 60038:1983 IEC 标准电压(IEC Standard voltages)

IEC 60909-1:1991 三相交流系统中的短路电流 第 1 部分:根据 IEC 60909 计算三相交流系统短路电流时的系数(Short-circuit current calculation in three-phase a.c. systems—Part 1: Factors for the calculation of short-circuit currents in three-phase a.c. systems according to IEC 60909)

IEC 60909-2:1992 电气设备 按照 IEC 60909 进行短路电流计算所需的数据(Electrical equipment—Data for short-circuit current calculations in accordance with IEC 60909)

IEC 60909-3:1995 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地面的电流(Short-circuit currents calculation in three-phase a.c. system—Part 3: Currents during two separate simultaneous single phase line-to-earth short circuits and partial short-circuit currents flowing through earth)

IEC 60865-1:1993 短路电流 效应计算 第 1 部分:定义和计算方法(Short-circuit currents—Calculation of effects—Part 1: Definitions and calculation methods)

1.3 定义、符号、系数和公式

定义、符号、系数和公式与 GB/T 15544.1 中的内容相同。

2 电气设备的正序、负序及零序阻抗

本章在 GB/T 15544.1—2013 中第 3 章基础上给出了电气设备的正序、负序及零序阻抗的建模及

GB/T 15544.5—2017/IEC/TR 60909-4:2000

计算过程。在计算短路电流初始值时,负序阻抗通常与正序阻抗相等,特殊情况参见 GB/T 15544.1—2013 中的 3.6.1 以及 IEC 60909-2。

2.1 架空线、电缆及短路限制电抗器

图 1 为单回架空线路正序阻抗、零序阻抗的意义及测量方法示意图。

在实际中,由电压 U_{L1} 及电流 I_{L1} 测量值可计算阻抗模值 Z 。结合电流 I_{L1} 产生的线路总损耗 P_V 测量值即可得到复阻抗 \underline{Z} :

$$Z = \frac{U_{L1}}{I_{L1}} \quad R = \frac{P_V}{3I_{L1}^2} \quad X = \sqrt{Z^2 - R^2} \quad \underline{Z} = R + jX$$

IEC 60909-2 给出了单回或并行双回架空线在无地线或有一条或两条地线情况下的正序及零序阻抗计算方法。负序阻抗等于正序阻抗。带有护套、屏蔽层及铠装的电缆,其正序和零序阻抗测量类似于图 1,IEC 60909-2 中给出了示例。对电缆而言,其护套、屏蔽层或铠装的接地情况,以及并联电缆的数目对零序阻抗影响很大。对于低压四芯电缆,其接地线芯的横截面对零序阻抗也有影响。

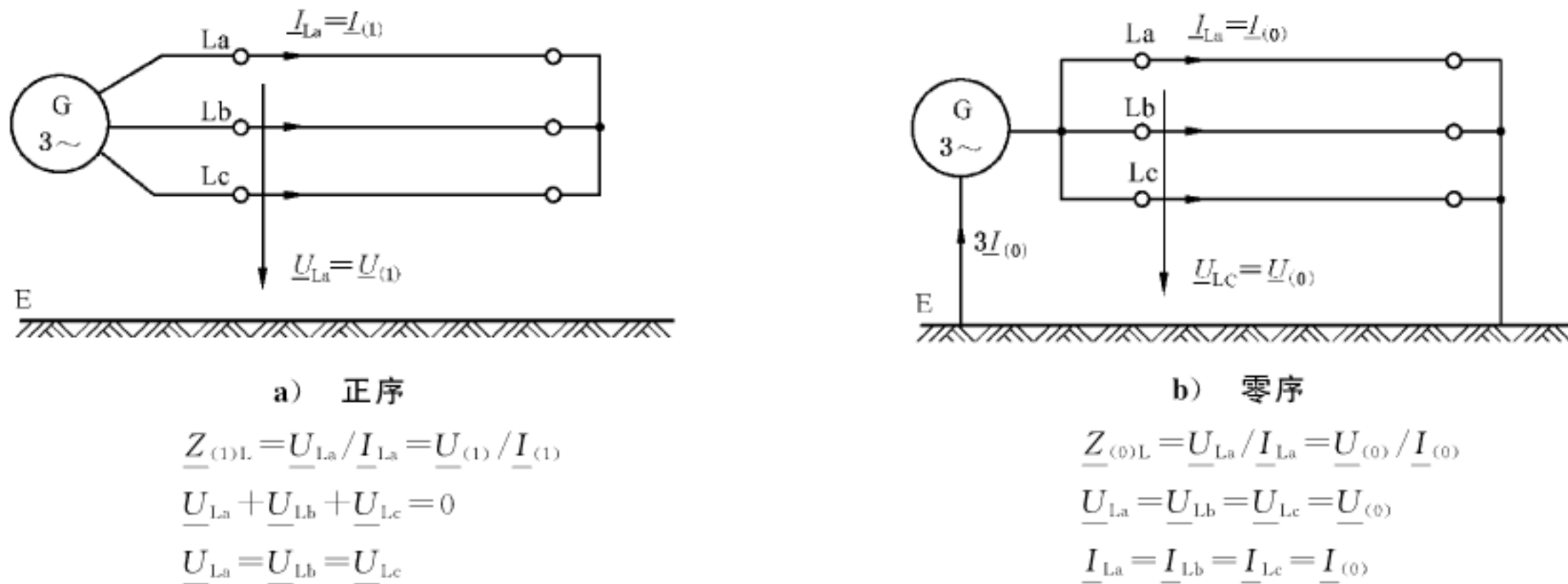


图 1 架空线(单回)的正序及零序阻抗

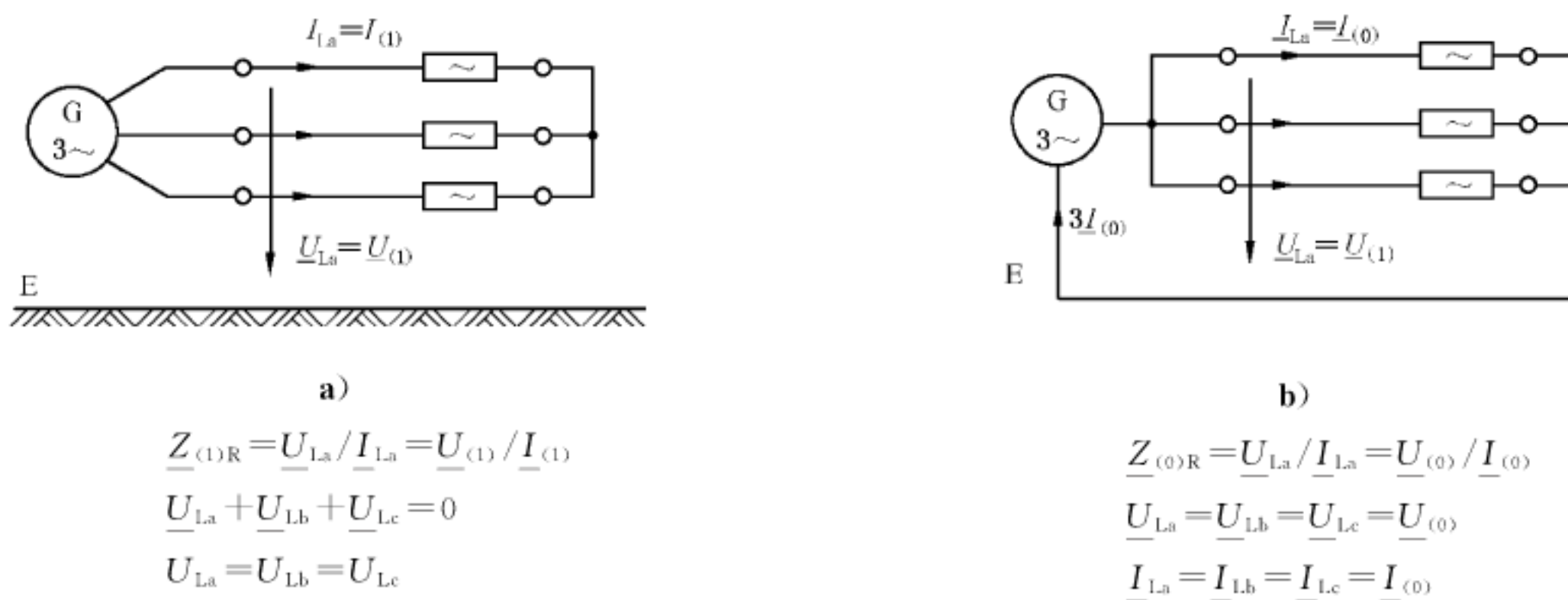


图 2 短路限制电抗器的正序及零序阻抗,通常 $R_R \ll X_R$

图 2 为三相交流短路限制电抗器正序阻抗、零序阻抗的意义及测量方法示意图。

如果三个线圈(有或无铁芯)之间的磁耦合较小,则零序阻抗 $\underline{Z}_{(0)R}$ 与正序阻抗 $\underline{Z}_{(1)R}$ 大致相等。在计算高压系统中的短路电流时,通常只用正序电抗即可。

2.2 变压器

发电厂中的单元接线的变压器的说明见 2.3。

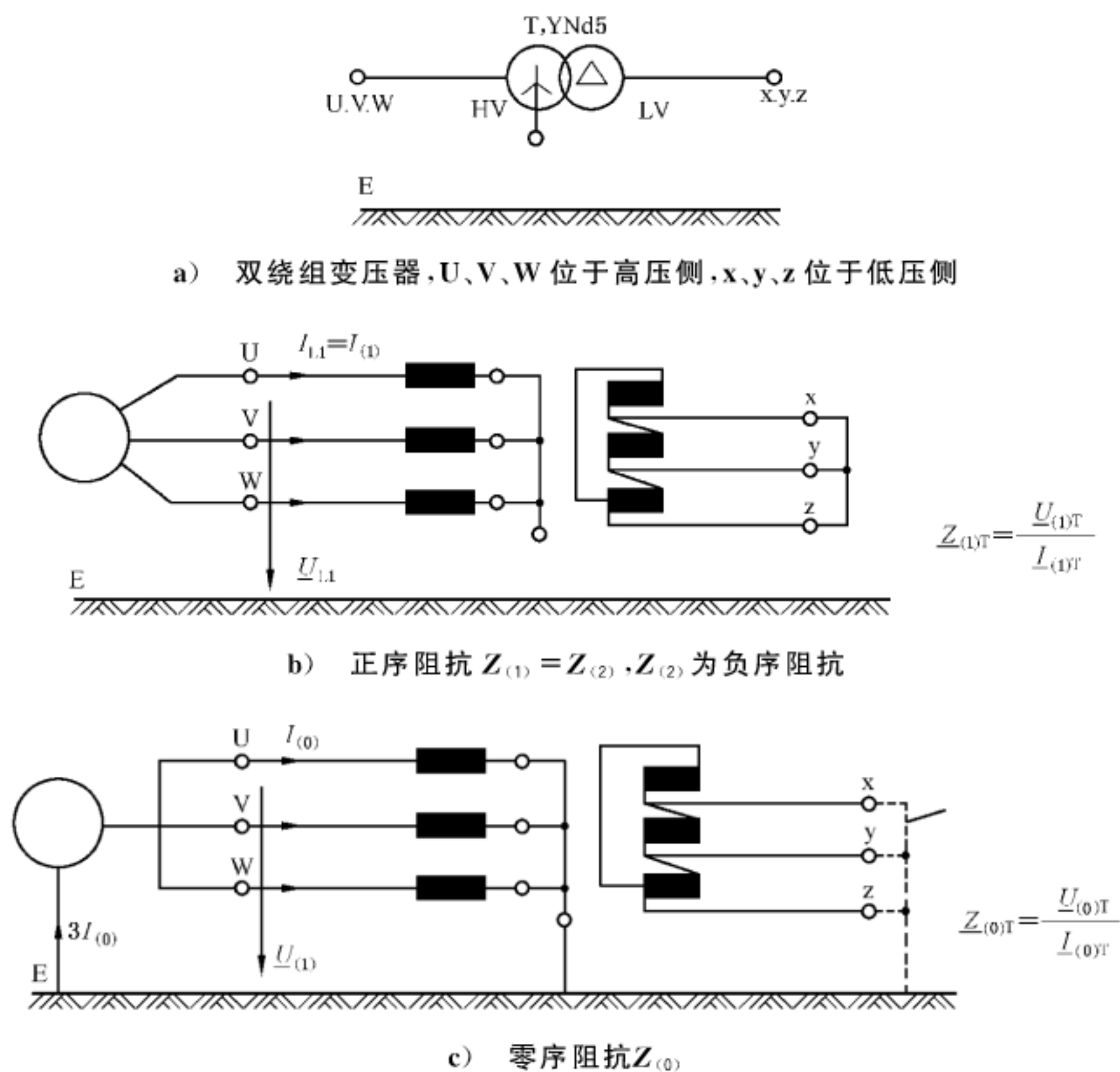
网络变压器有两个、三个或更多的三相绕组。图 3 为双绕组变压器(矢量组别为 YNd5)正序及零序系统阻抗的示例。

对于三绕组变压器(示例参见 IEC 60909:2—1992 中的表 3b),应测量三个不同的阻抗,然后计算得到变压器的正序或零序等效阻抗,见 GB/T 15544.1—2013 中的 3.3.2 及本条示例。

双绕组和三绕组变压器的零序等效电路与高压绕组、中压侧绕组的接线形式有关,表 1 给出了各种接线形式下的正序和零序等效电路,表中阻抗均折算到 A 侧,A 侧即可作为变压器的高压侧也可作为中压侧。

如表 2 所示,低压侧有低阻抗接地的低压系统(TN 网络)中不得使用 Yy 型接线的变压器,因为 $Z_{(0)}$ 可能会非常高,造成短路保护失效。为 TN 网络供电,应使用表 1 中的第 2 种或第 3 种变压器。

接线组别为 YNyn,d 的变压器在高压网络中非常典型,其中性点通常仅在一侧(A 或 B)接地。表 1 中的 4b 和 6 表明如果两个中性点 A 及 B 均接地(4b 中的接地开关 ES 闭合),则两个网络的零序系统会出现耦合。此时应作特殊考虑,特别是变压器变比较大时,以确定该耦合是否允许。表 1 中的情况 5 为可避免零序系统中出现该耦合。情况 9 进一步给出两个并行变压器之间如何避免零序系统中出现耦合。



注:在三角形绕组的情况下,不必介绍短路及接地情况。

图 3 双绕组变压器 YNd5 的正序及零序系统阻抗

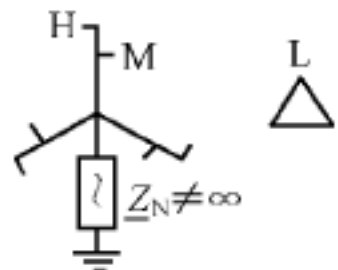
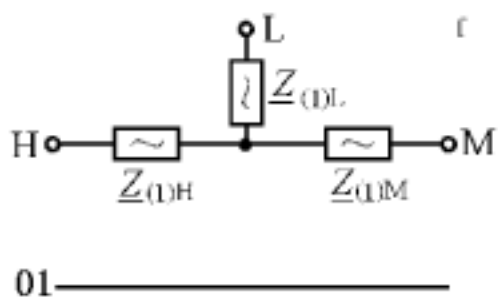
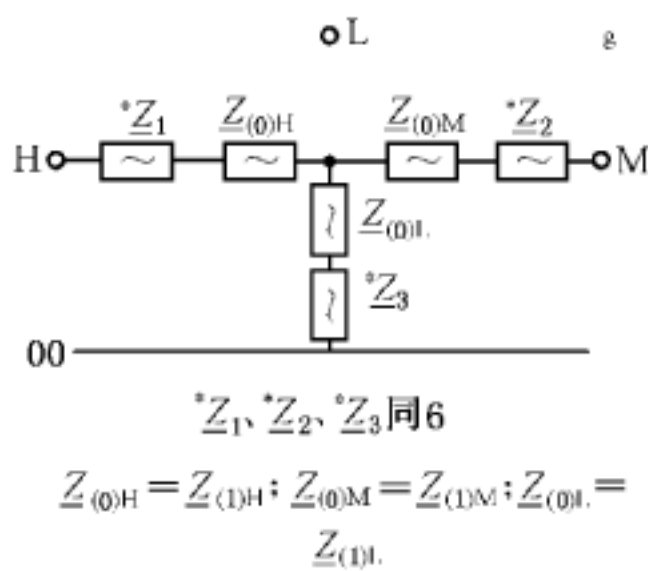
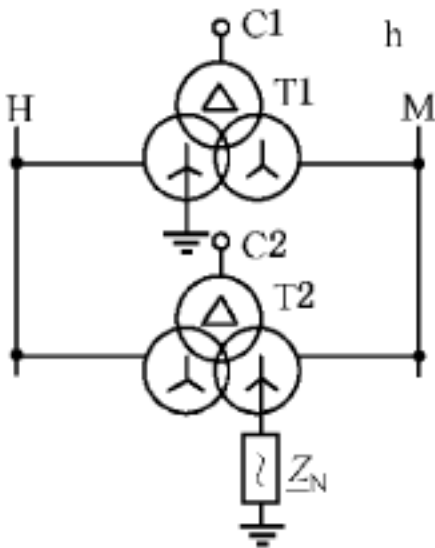
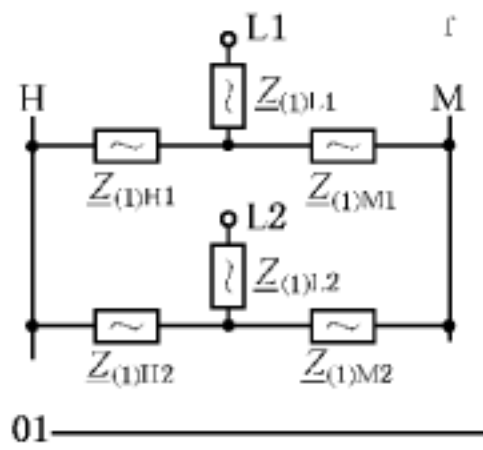
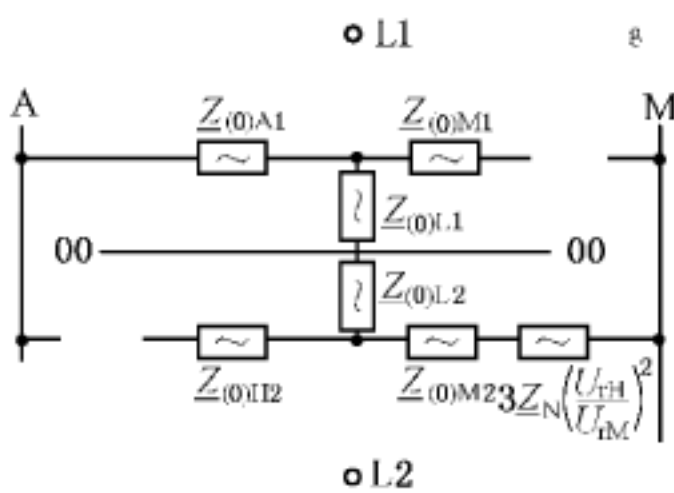
表 1 正序及零序系统中变压器等效电路图示例

No.	变压器	正序系统	零序系统
1a			

表 1 (续)

No.	变压器	正序系统	零序系统
1b			
2			
3			
4a			
4b			
5			
6			
7			

表 1 (续)

No.	变压器	正序系统	零序系统
8	<p>三台单相自耦变压器</p> 		 <p>$^*Z_1, ^*Z_2, ^*Z_3$ 同 6</p> <p>$Z_{(0)H} = Z_{(1)H}; Z_{(0)M} = Z_{(1)M}; Z_{(0)L} = Z_{(1)L}$</p>
9			 <p>$Z_{(0)M2} = 3Z_N \left(\frac{U_{FH}}{U_{FM}}\right)^2$</p>

^a $Z_{(1)K} = K_T Z_{(1)}$, K_T 取自 GB/T 15544.1—2013 中式(12a)或式(12b)。

^b $Z_{(0)K} = K_T Z_{(0)}$, K_T 取自 GB/T 15544.1—2013 中式(12a)或式(12b); Z_N 没有校正系数。

^c $K_{TAB}, K_{TAC}, K_{TBC}$ 取自 GB/T 15544.1—2013 中式(13)。

^d 校正因子如^c中内容所示; Z_N 及 X_S 没有校正系数。

^e 接地开关(4b 第 1 列 ES)。

^f $K_{TAB}, K_{TAC}, K_{TBC}$ 取自 GB/T 15544.1—2013 中式(13)。

^g 校正因子如^c中内容所示; Z_N 没有校正系数。

^h 接地形式相同的两并联三绕组变压器, 将网络 A、B 的零序系统分离。

在情况 8 中由三台单相变压器构成自耦变压器, 中性点接地阻抗为 $Z_N \neq \infty$, 第三绕组三角形连接, 变压器两侧网络零序系统之间无可避免地会出现耦合现象。 $^*Z_1, ^*Z_2$ 及 *Z_3 是 $Z_N \neq \infty$ 的函数, 按表 1 中第 6 项中的公式进行计算。

升压变压器(用于调压及/或相角控制)与表 1 中情况 6 基本相当。并联变压器的结构及连接布局决定 $Z_{(0)C}$ 是否为一个较小的值, 在这种情况下需要测量三个不同的阻抗(对于三绕组变压器), 用来计算等效电路的阻抗。

表 2 提供了变压器中性点接地情况下, $X_{(0)T}/X_T$ 的近似值。对于三绕组变压器(表 1 中 4、7 及 9), 电抗 $X_T = X_{(1)T}$ 由 $X_{(1)T} = X_{(1)A} + X_{(1)B}$ 给出。

表 2 双绕组及三绕组变压器比率 $X_{(0)T}/X_T$ 的近似值

变压器结构	连接方式			
	YNd 或 Dyn	Yzn	YNyn,d	Yny ^c 或 YNz
三相三柱	0.7……1.0 ^a 1.0 1.0	0.1……0.15	1……3.5 ^b	3……10
三相五柱				10……100
三台单相				10……100

^a 视在功率较小的变压器: $X_{(0)T}/X_T \approx 1.0$ ($S_{rT} = 400$ kVA 的变压器 Dyn5, $U_{rTHV}/U_{rTLV} = 10$ kV/0.4 kV)。
^b 比率 $X_{(0)T}/X_T$ 取决于变压器的结构, 见 IEC 60909-2。
^c 变压器 Yy 不得用于具有低阻抗接地的网络中, 如低压 TN 网络(见 IEC 61200-413)。

以下为三绕组变压器阻抗及等效电路的算例(YNyn,d5, $S_{rTHVMV} = 350$ MVA)。

图 4 所示为三绕组变压器正序及零序等效电路, 负序系统与正序系统相同(见表 1 中第 4 项)。

下列数据通过测量获得:

$U_{rTHV} = 400$ kV;	$U_{rTMV} = 120$ kV;	$U_{rTLV} = 30$ kV
$S_{rTHV} = 350$ MVA;	$S_{rTMV} = 350$ MVA;	$S_{rTLV} = 50$ MVA
$u_{krHVMV} = 21\%$; $u_{RrHVMV} = 0.26\%$	参考基准为 $S_{rTHVMV} = 350$ MVA,	$U_{rTHV} = 400$ kV;
$u_{krHVLV} = 10\%$; $u_{RrHVLV} = 0.16\%$;	参考基准为 $S_{rTHVLV} = 50$ MVA	$U_{rTHV} = 400$ kV;
$u_{krMVLV} = 7\%$; $u_{RrMVLV} = 16\%$;	参考基准为 $S_{rTHVLV} = 50$ MVA,	$U_{rTMV} = 120$ kV;

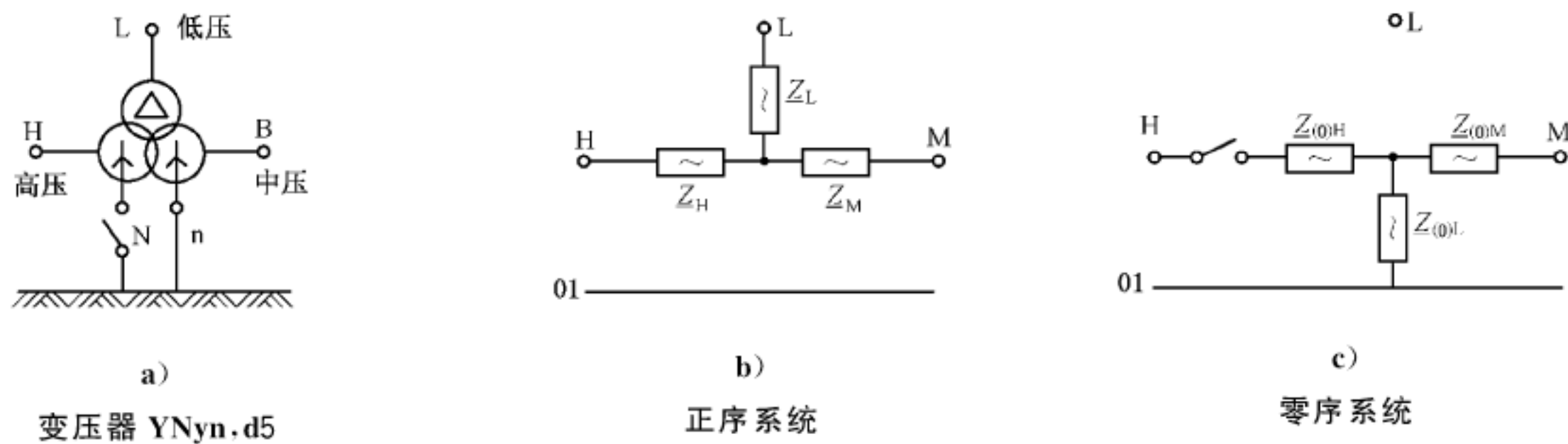


图 4 三绕组网络变压器的等效电路

通过 GB/T 15544.1—2013 中的式(10)获得正序系统中与中压侧 M 相关的下列阻抗:

$$\underline{Z}_{AB} = \left(\frac{u_{RrHVMV}}{100\%} + j \frac{u_{XrHVMV}}{100\%} \right) \frac{U_{rTMV}^2}{S_{rTHVMV}} = (0.106\ 971 + j8.639\ 338)\ \Omega$$

$$\underline{Z}_{AC} = \left(\frac{u_{RrHVLV}}{100\%} + j \frac{u_{XrHVLV}}{100\%} \right) \frac{U_{rTMV}^2}{S_{rTHVLV}} = (0.460\ 800 + j28.796\ 313)\ \Omega$$

$$\underline{Z}_{BC} = \left(\frac{u_{RrMVLV}}{100\%} + j \frac{u_{XrMVLV}}{100\%} \right) \frac{U_{rTMV}^2}{S_{rTMVLV}} = (0.460\ 800 + j20.154\ 733)\ \Omega$$

该算例还用于第 6 章的测试网络(变压器 T3=T4), 故小数点后保留六位数字进行计算。

根据 GB/T 15544.1—2013 中的式(10), 由短路电压 $u_{Xr} = \sqrt{u_{kr}^2 - u_{Rr}^2}$ 可计算电抗 X_T , 进而可得到下列阻抗校正系数[GB/T 15544.1—2013 式(13)]:

$$K_{TAB} = 0.95 \frac{c_{\max}}{1 + 0.6x_{TAB}} = 0.95 \frac{1.1}{1 + 0.6 \times 0.209\ 984} = 0.928\ 072$$

$$K_{TAC} = 0.95 \frac{c_{\max}}{1 + 0.6x_{TAC}} = 0.95 \frac{1.1}{1 + 0.6 \times 0.099\ 987} = 0.985\ 856$$

$$K_{TBC} = 0.95 \frac{c_{\max}}{1 + 0.6x_{TBC}} = 0.95 \frac{1.1}{1 + 0.6 \times 0.069\ 982} = 1.002\ 890$$

应用校正系数, $\underline{Z}_{ABK} = K_{TAB} \underline{Z}_{AB}$, 可获得下列校正后的阻抗值:

$$\underline{Z}_{ABK} = (0.099\ 277 + j8.017\ 927)\ \Omega$$

$$\underline{Z}_{ACK} = (0.454\ 283 + j28.389\ 024)\ \Omega$$

$$\underline{Z}_{BCK} = (0.462\ 132 + j20.212\ 973)\ \Omega$$

图 4b) 中的正序阻抗(折算到高压侧)通过 GB/T 15544.1—2013 中式(11)计算。

$$\underline{Z}_{AK} = (0.045\ 714 + j8.096\ 989)\ \Omega$$

$$\underline{Z}_{BK} = (0.053\ 563 - j0.079\ 062)\ \Omega$$

$$\underline{Z}_{CK} = (0.408\ 568 + j20.292\ 035)\ \Omega$$

变压器的零序系统模型图 4c), 已知下列阻抗, 折算到中压侧:

$$X_{(0)A} = 8.555\ 1\ \Omega; \quad X_{(0)B} = -0.688\ 1\ \Omega; \quad X_{(0)C} = 18.830\ 7\ \Omega;$$

如果变压器只有中压侧中性点接地, 有效零序阻抗为 $X_{(0)B}$ 与 $X_{(0)C}$ 之和, 并引入阻抗校正系数 K_{TBC} 得到 $X_{(0)MVK}$:

$$X_{(0)MVK} = K_{TBC} [X_{(0)B} + X_{(0)C}] = 18.195\ 032\ \Omega$$

无校正系数时的阻抗比率 $X_{(0)T}/X_T$:

$$X_{(0)T}/X_T = (X_{(0)B} + X_{(0)C})/X_{AB} = 18.142\ 6\ \Omega/8.639\ 338\ \Omega = 2.099\ 9 \approx 2.1$$

在许多情况下, 带有辅助三角形绕组的三绕组网络变压器(如 YNyn, d5) 可视为双绕组变压器(参见图 16 中的变压器 T4、T5 及 T6)。

在该例中(图 16 中的变压器 T4), 如果电阻忽略不计($R_T/X_T=0.012$), 计算将简化:

$$X_T = X_{AB} = 8.639\ 338\ \Omega; \quad K_T = K_{TAB} = 0.928\ 072; \quad X_{TK} = K_T X_T = 8.017\ 927\ \Omega;$$

$$X_{(0)T} = 2.1 \times X_T = 18.142\ 6\ \Omega$$

由 $K_T = K_{TAB}$ 得 $X_{(0)TK} = 16.838\ \Omega$, 与详细计算得到的结果 $X_{(0)TK} = K_{TBC} X_{(0)TK} = 18.195\ \Omega$ 相比, 简化计算较为保守。

2.3 发电机及发变组

2.3.1 发电机及发变组阻抗计算

不经单元变压器直接接入低压或中压网络中的同步发电机, 其正序电抗为 X''_d 、 X'_d 及 X_d 。在短路的初始时刻, 产生与超瞬态电抗 X''_d 相关的电流 I''_k 。

负序电抗约等于超瞬态电抗: $X_{(2)} \approx X''_d$ 。如果 X''_q 与 X''_d 差别较大, 则应使用 $X_{(2)} = 0.5(X''_d + X''_q)$ (参见 GB/T 15544.1)。

根据同步电机的绕组配置(参见 IEC 60909-2), 其零序电抗 $X_{(0)}$ 小于超瞬态电抗。如果发电机的中性点通过阻抗(通常为电抗)接地, 以限制单相短路电流($I''_{k1} \leq I''_k$) 及/或消除发电机并联或发电机与变压器并联(中性点在同一网络接地)情况下的三次谐波电流, 则阻抗校正系数 K_G 用于正序、负序及零序系统中, 但不用于中性点接地阻抗(参见 GB/T 15544.1—2013 的 3.6.1)。

带有载调节分接开关(见 GB/T 15544.1—2013 的 3.7.1) 或不带有载调节分接开关(见 GB/T 15544.1—2013 的 3.7.2) 的发变组, 其高压侧的零序阻抗由变压器零序阻抗和高压侧中性点阻抗 \underline{Z}_N 的三倍组成。发变组的正序及负序阻抗由 GB/T 15544.1—2013 中的式(21)或式(23)计算, 并考虑

由 GB/T 15544.1—2013 中的式(22)或式(24)得到的阻抗校正系数 K_S 。零序阻抗由公式 $\underline{Z}_{(0)S} = \underline{Z}_{(0)THV}K_S + 3\underline{Z}_N$ 计算。即阻抗校正系数应作如下应用:

a) 对于正序阻抗:

$$\underline{Z}_S = [(R_G + jX_d'')t_r^2 + \overline{Z}_{THV}]K_S$$

b) 对于负序阻抗:

$$\underline{Z}_{(2)S} = [(R_G + jX_2)t_r^2 + \overline{Z}_{THV}]K_S$$

c) 对于零序阻抗:

$$\underline{Z}_{(0)S} = \underline{Z}_{(0)THV}K_S + 3\underline{Z}_N$$

电流 $3\underline{I}_{(0)S}''$ 通过变压器的中性点流向阻抗 \underline{Z}_N , 引起发电厂的接地系统电位升高, 从而导致接触电压和跨步电压。

计算局部短路电流 $\underline{I}_{(1)S}''$, $\underline{I}_{(2)S}''$ 及 $\underline{I}_{(0)S}''$ 时, 根据发电机可能的工作范围(参见 GB/T 15544.1), 引入阻抗校正系数[根据 GB/T 15544.1—2013 中式(22)]。对于不带有载调节分接开关的发变组, 计算 $\underline{I}_{(1)S}''$, $\underline{I}_{(2)S}''$ 及 $\underline{I}_{(0)S}''$ 时使用 GB/T 15544.1—2013 中式(24)得到的系数 K_{S0} 。

2.3.2 算例: 带有载调节分接头的发变组高压侧短路

带有载调节分接头的发变组高压侧短路算例如图 5 所示。算例使用图 16 中的发变组数据 $S_1 = G_1 + T_1$ 。单元变压器 YNd5 中性点通过电抗 $X_{R1} = 22 \Omega (R_{R1} \ll X_{R1})$ 接地(见 6.2.1):

- 发电机

$$S_{rG} = 150 \text{ MVA}; \quad U_{rG} = 21 \text{ kV}; \quad x_d = 0.14 \text{ p.u.}; \quad x_d' = 1.8 \text{ p.u.};$$

$$\cos\varphi_{rG} = 0.85; \quad R_G = 0.002 \Omega$$

(隐极机在过励磁区域工作)

- 单元变压器

$$S_{rT} = 150 \text{ MVA}; \quad U_{rTHV}/U_{rTLV} = 115 \text{ kV}/21 \text{ kV}; \quad u_{kr} = 16\%; \quad u_{Rr} = 0.5\%;$$

$$p_T = \pm 12\%; \quad X_{(0)T}/X_T = 0.95; \quad R_{(0)T}/R_T = 1.0; \quad \underline{Z}_N = jX_{R1} = j22 \Omega$$

- 网络馈线(由网络化简得到)

$$U_{nQ} = 110 \text{ kV}; \quad c_{Q\max} = 1.1; \quad I_{kQ}'' = 13.612 \text{ kA}; \quad R_Q/X_Q = 0.203 \text{ 28};$$

$$X_{(0)Q}/X_Q = 3.479 \text{ 27}; \quad R_{(0)Q}/R_Q = 3.033 \text{ 61}$$

计算结果如下(见图 5):

$$\underline{Z}_G = R_G + jX_d'' = \left[0.002 \Omega + j0.14 \frac{(21 \text{ kV})^2}{150 \text{ MVA}} \right] = (0.002 + j0.411 \text{ 6}) \Omega$$

$$\underline{Z}_{Gt} = \underline{Z}_G t_r^2 = (0.059 \text{ 98} + j12.343 \text{ 33}) \Omega, \quad t_r = 115 \text{ kV}/21 \text{ kV}$$

$$\underline{Z}_{THV} = \left(\frac{u_{Rr}}{100\%} + j \frac{u_{Xr}}{100\%} \right) \frac{U_{rTHV}^2}{S_{rT}} = (0.440 \text{ 83} + j14.099 \text{ 78}) \Omega$$

其中 $u_{Xr} = \sqrt{u_{kr}^2 - u_{Rr}^2} = 15.992 \text{ 19}\% (x_T = 0.159 \text{ 921 9 p.u.})$

$$K_S = \frac{U_{nQ}^2}{U_{rG}^2} \times \frac{U_{rTLV}^2}{U_{rTHV}^2} \times \frac{c_{\max}}{1 + |x_d'' - x_T| \sin\varphi_{rG}} = 0.995 \text{ 97}$$

$$\underline{Z}_S = (\underline{Z}_{Gt} + \underline{Z}_{THV})K_S = (0.498 \text{ 79} + j26.336 \text{ 68}) \Omega$$

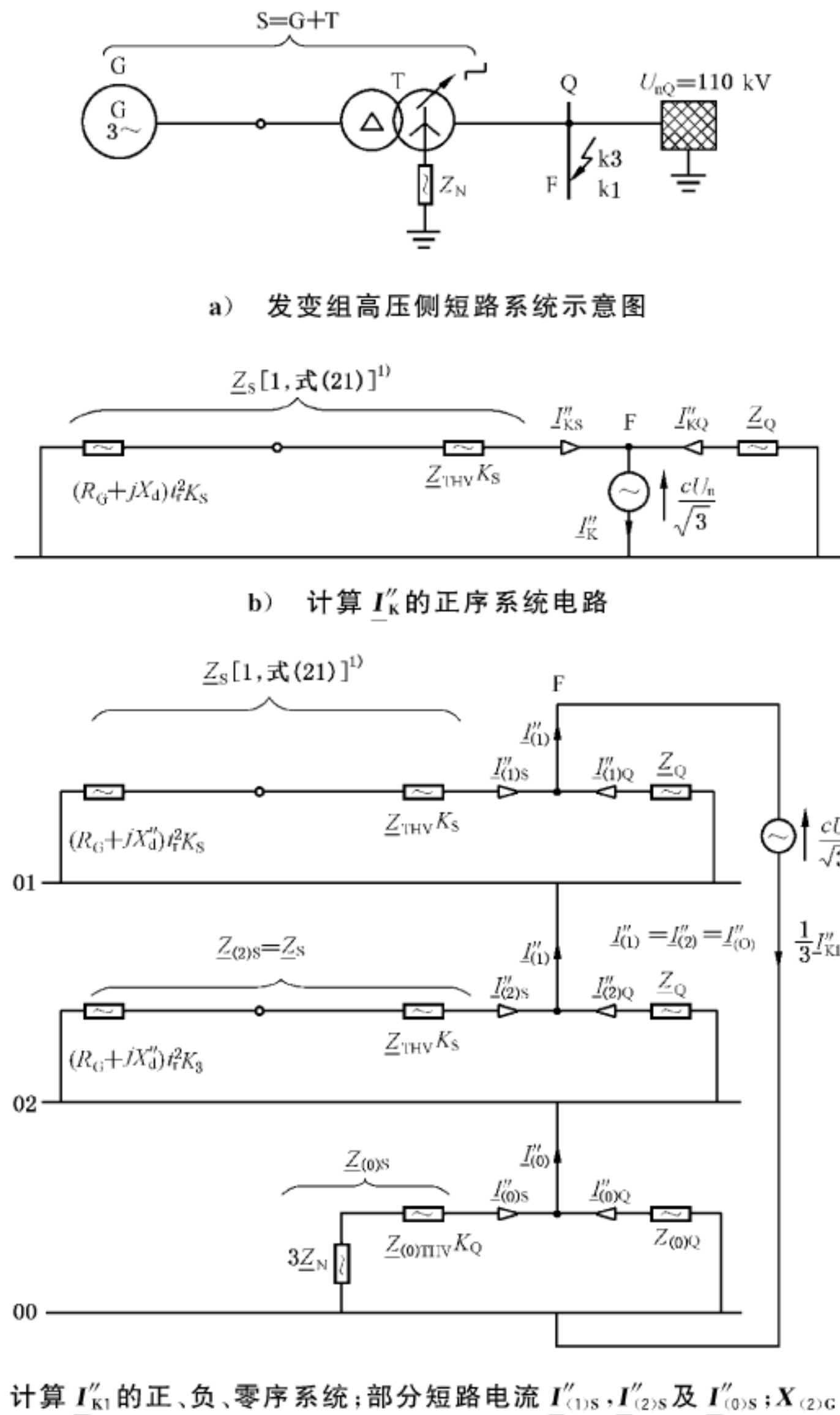


图 5 发变组高压侧短路

在 $U_n = U_{nQ}$ 条件下，三相短路(见图 5)电流：

$$\underline{I''_{ks}} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_s} = (0.050\ 22 - j2.651\ 60)\text{kA}; \quad I''_{ks} = 2.652\ 08\ \text{kA}$$

$$\underline{I''_{kQ}} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_Q} = (2.711\ 61 - j13.339\ 31)\text{kA}; \quad I''_{kQ} = 13.612\ 13\ \text{kA}$$

其中 $Z_Q = \frac{1.1U_{nQ}}{\sqrt{3} I''_{kQ}}$ ，及 $X_Q = \frac{1.1U_{nQ}}{\sqrt{3} I''_{kQ}} = 0.979\ 96 Z_Q$ 。

$$\underline{I''_k} = \underline{I''_{ks}} + \underline{I''_{kQ}} = (2.761\ 83 - j15.990\ 91)\text{kA}; \quad I''_k = 16.227\ 66\ \text{kA}$$

在表 11 中也提供了这些结果。

单相短路电流 I''_{k1} [参见 GB/T 15544.1—2013 中的式(52)]：

$$\underline{Z}_{(1)} = \frac{Z_s \times Z_Q}{Z_s + Z_Q} = (0.732\ 67 + j4.242\ 15)\Omega; \quad \underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \frac{\underline{Z}_{(0)S} \times \underline{Z}_{(0)Q}}{\underline{Z}_{(0)S} + \underline{Z}_{(0)Q}} = (2.093\ 96 + j\ 14.398\ 89)\ \Omega$$

其中:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{(0)S} &= \underline{Z}_{(0)THV} K_S + 3\underline{Z}_N \\ &= (0.440\ 83 + j\ 0.95 \times 14.099\ 78)\ \Omega \times 0.995\ 97 + j\ 66\ \Omega = (0.439\ 06 + j\ 79.340\ 81)\ \Omega \end{aligned}$$

以及,

$$\underline{Z}_{(0)Q} = (3.101\ 49 + j\ 17.498\ 22)\ \Omega$$

因此,有:

$$\underline{I}_{kl}'' = \frac{\sqrt{3}cU_n}{2\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}} = (1.390\ 90 - j\ 8.942\ 26)\ \text{kA}; \quad I_{kl}'' = 9.049\ 79\ \text{kA}$$

表 12 中也列出了该计算结果。图 5 中的局部短路电流:

$$\underline{I}_{(1)S}'' = \underline{I}_{(2)S}'' = \frac{I_{kl}''}{3} \times \frac{\underline{Z}_Q}{\underline{Z}_S + \underline{Z}_Q} = (0.001\ 09 - j\ 0.493\ 00)\ \text{kA}$$

$$\underline{I}_{(1)Q}'' = \underline{I}_{(2)Q}'' = \frac{I_{kl}''}{3} \times \frac{\underline{Z}_Q}{\underline{Z}_S + \underline{Z}_Q} = (0.462\ 55 - j\ 2.487\ 75)\ \text{kA}$$

$$\underline{I}_{(0)S}'' = \frac{I_{kl}''}{3} \times \frac{\underline{Z}_{(0)Q}}{\underline{Z}_{(0)S} + \underline{Z}_{(0)Q}} = (0.008\ 53 - j\ 0.553\ 14)\ \text{kA}$$

$$\underline{I}_{(0)Q}'' = \frac{I_{kl}''}{3} \times \frac{\underline{Z}_{(0)S}}{\underline{Z}_{(0)S} + \underline{Z}_{(0)Q}} = (0.455\ 10 - j\ 2.427\ 61)\ \text{kA}$$

如果发电机只工作在过励磁区域,则发电厂侧线电流:

$$\underline{I}_{L1S}'' = \underline{I}_{(0)S}'' + \underline{I}_{(1)S}'' + \underline{I}_{(2)S}'' = (0.010\ 72 - j\ 1.539\ 14)\ \text{kA}$$

$$\underline{I}_{L2S}'' = \underline{I}_{(0)S}'' + a^2 \underline{I}_{(1)S}'' + a \underline{I}_{(2)S}'' = (0.007\ 44 - j\ 0.060\ 14)\ \text{kA}$$

$$\underline{I}_{L3S}'' = \underline{I}_{(0)S}'' + a \underline{I}_{(1)S}'' + a^2 \underline{I}_{(2)S}'' = (0.007\ 44 - j\ 0.060\ 14)\ \text{kA}$$

变压器中性点至接地设备的电流为:

$$\underline{I}_{L1S}'' + \underline{I}_{L2S}'' + \underline{I}_{L3S}'' = 3 \underline{I}_{(0)S}'' = (0.025\ 60 - j\ 1.659\ 42)\ \text{kA}$$

3 $U_n = 400\ \text{V}$ 的低压系统中的短路电流计算

3.1 问题

图 6 为 $U_n = 400\ \text{V}$ 、 $f = 50\ \text{Hz}$ 的低压系统接线图。需计算 F1~F3 处短路时的短路电流 I_k'' 及 i_p , 并假设短路点 F1~F3 均远离发电机(参见 GB/T 15544.1—2013 的 1.3.17)。表 3 中列出了正序、负序及零序系统的设备数据。

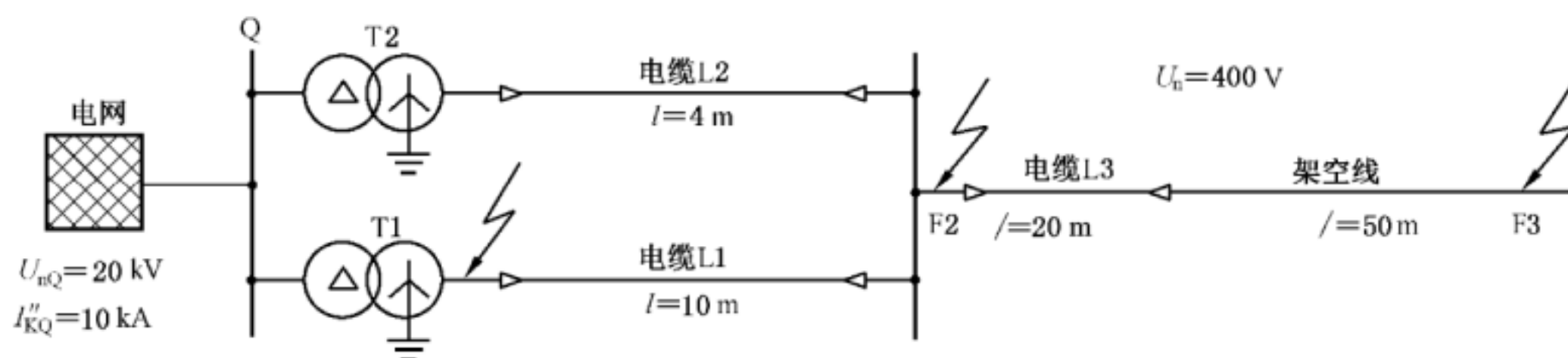


图 6 $U_n = 400\ \text{V}$ 的低压系统,短路点 F1、F2 及 F3

表 3 图 6 算例中电气设备的数据—正序及零序阻抗($Z_2 = Z_1$)

算式	元件数据	公式 (GB/T 15544.1— 2013)	$Z_{(1)} = Z_{(2)}$	$Z_{(0)}$
			mΩ	mΩ
馈电 网络 Q	$U_{nQ} = 20 \text{ kV}; I''_{kQ} = 10 \text{ kA}$ $c_Q = c_{Q_{\max}} = 1.1$ (GB/T 15544.1—2013 中表 1) $R_Q = 0.1X_Q, X_Q = 0.995Z_Q$	(6)	$Z_Q = 0.053 + j0.531$	—
变压器 T1 (Dyn 5)	$S_{rT} = 630 \text{ kVA}; U_{rTHV} = 20 \text{ kV}$ $U_{rTLV} = 410 \text{ V}; u_{kf} = 4\%$; $P_{krT} = 6.5 \text{ kW}; R_{(0)T}/R_T = 1.0$; $X_{(0)T}/X_T = 0.95$	(7)~(9) K_T (12a)	$Z_{T1K} = 2.68 + j10.054$	$Z_{(0)T1K} = 2.68 + j9.551$
T2 (Dyn 5)	$S_{rT} = 400 \text{ kVA}; U_{rTHV} = 20 \text{ kV}$ $U_{rTLV} = 410 \text{ V}; u_{kf} = 4\%$; $P_{krT} = 4.6 \text{ kW}; R_{(0)T}/R_T = 1.0$; $X_{(0)T}/X_T = 0.95$		$Z_{T2K} = 4.712 + j15.698$	$Z_{(0)T2K} = 4.712 + j14.913$
线路	平行双回 4 分裂电缆: $l = 10 \text{ m}; 4 \times 240 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$ $Z'_L = (0.077 + j0.079)/\text{km}$ $R_{(0)L} = 3.7R_L; X_{(0)L} = 1.81X_L$	数据 $\frac{R_{(0)L}}{R_L}; \frac{X_{(0)L}}{X_L}$ 从厂商获得	$Z_{L1} = 0.385 + j0.395$	$Z_{(0)L1} = 1.425 + j0.715$
L1	平行双回 3 分裂电缆: $l = 4 \text{ m}; 3 \times 185 \text{ mm}^2 \text{ Al}$; $Z'_L = (0.208 + j0.068)/\text{km}$ $R_{(0)L} = 4.23R_L; X_{(0)L} = 1.21X_L$		$Z_{L2} = 0.416 + j0.136$	$Z_{(0)L2} = 1.760 + j0.165$
L2	4 分裂电缆 $l = 20 \text{ m}; 4 \times 70 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$; $Z'_L = (0.271 + j0.087)/\text{km}$ $R_{(0)L} = 3R_L; X_{(0)L} = 4.46X_L$		$Z_{L3} = 5.420 + j1.740$	$Z_{(0)L3} = 16.260 + j7.760$
L3	架空线路; $l = 50 \text{ m}$; $q_b = 50 \text{ mm}^2 \text{ Cu}; d = 0.4 \text{ m}$; $Z'_L = (0.3704 + j0.297) \Omega/\text{km}$ $R_{(0)L} = 2R_L; X_{(0)L} = 3X_L$		(14), (15)	$Z_{L4} = 18.50 + j14.85$
L4				

3.2 正序阻抗的确定

3.2.1 网络馈线

根据 GB/T 15544.1—2013 中式(6), 其中 $c_Q = c_{Q_{\max}} = 1.1$ (参见 GB/T 15544.1—2013 中表 1), 计算如下:

$$Z_{Qt} = \frac{c_Q U_{nQ}}{\sqrt{3} I''_{kQ}} \times \frac{1}{t_r^2} = \frac{1.1 \times 20 \text{ kV}}{\sqrt{3} 10 \text{ kA}} \left(\frac{0.41 \text{ kV}}{20 \text{ kV}} \right)^2 = 0.534 \text{ m}\Omega$$

$$\left. \begin{aligned} X_{Qt} &= 0.995 Z_{Qt} = 0.531 \text{ m}\Omega \\ R_{Qt} &= 0.1 X_{Qt} = 0.053 \text{ m}\Omega \end{aligned} \right\} \underline{Z}_{Qt} = (0.053 + j0.531) \text{ m}\Omega$$

3.2.2 变压器

根据 GB/T 15544.1—2013 中的式(7)~式(9),有下列关系:

a) 变压器 T1

$$Z_{T1} = \frac{u_{krT1}}{100\%} \times \frac{U_{rT1LV}^2}{S_{rT1}} = \frac{4\%}{100\%} \times \frac{(410\text{V})^2}{630 \text{ kVA}} = 10.673 \text{ m}\Omega$$

$$R_{T1} = \frac{P_{krT1}}{3I_{rT1LV}^2} = \frac{P_{krT1} \times U_{rT1LV}^2}{S_{rT1}^2} = \frac{6.5 \text{ kW} \times (410\text{V})^2}{(630 \text{ kVA})^2} = 2.753 \text{ m}\Omega$$

$$u_{Rr} = \frac{P_{krT1}}{S_{rT1}} \times 100\% = 1.032\%; u_{Xr} = \sqrt{u_{kr}^2 - u_{Rr}^2} = 3.865\%$$

$$X_{T1} = \sqrt{Z_{T1}^2 - R_{T1}^2} = 10.312 \text{ m}\Omega$$

$$\underline{Z}_{T1} = (2.753 + j10.312) \text{ m}\Omega$$

$$K_{T1} = 0.95 \frac{c_{\max}}{1 + 0.6x_{T1}} = 0.95 \frac{1.05}{1 + 0.6 \times 0.03865} = 0.975$$

$$\underline{Z}_{T1K} = \underline{Z}_{T1} K_{T1} = (2.684 + j10.054) \text{ m}\Omega$$

b) 变压器 T2

$$Z_{T2} = \frac{u_{krT2}}{100\%} \times \frac{U_{rT2LV}^2}{S_{rT2}} = \frac{4\%}{100\%} \times \frac{(410\text{V})^2}{400 \text{ kVA}} = 16.810 \text{ m}\Omega$$

$$R_{T2} = \frac{P_{krT2} \times U_{rT2LV}^2}{S_{rT2}^2} = \frac{4.6 \text{ kW} \times (410\text{V})^2}{(400 \text{ kVA})^2} = 4.833 \text{ m}\Omega$$

$$\underline{Z}_{T2} = (4.833 + j16.100) \text{ m}\Omega$$

$$K_{T2} = 0.95 \frac{c_{\max}}{1 + 0.6x_{T2}} = 0.95 \frac{1.05}{1 + 0.6 \times 0.03831} = 0.975$$

$$\underline{Z}_{T2K} = \underline{Z}_{T2} K_{T2} = (4.712 + j15.698) \text{ m}\Omega$$

3.2.3 线路(电缆及架空线)

交流线路正序阻抗参数计算如下:

a) 线路 L1(两条并行电缆)

$$\underline{Z}_{L1} = 0.5(0.077 + j0.079) \frac{\Omega}{\text{km}} \times 10 \text{ km} = (0.385 + j0.395) \text{ m}\Omega$$

b) 线路 L2(两条并行电缆)

$$\underline{Z}_{L2} = 0.5(0.208 + j0.068) \frac{\Omega}{\text{km}} \times 4 \text{ m} = (0.416 + j0.136) \text{ m}\Omega$$

c) 线路 L3(电缆)

$$\underline{Z}_{L3} = (0.271 + j0.087) \frac{\Omega}{\text{km}} \times 20 \text{ m} = (5.420 + j1.740) \text{ m}\Omega$$

d) 线路 L4(架空线)

$$R'_{L4} = \frac{\rho}{q_n} = \frac{\Omega \text{ mm}^2}{54 \text{ m} \times 50 \text{ mm}^2} = 0.3704 \frac{\Omega}{\text{km}}; r = 1.14 \sqrt{\frac{q_n}{\pi}} = 4.55 \text{ mm};$$

$$X'_{L4} = 2\pi f \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{d}{r} \right) = 2\pi \times 50 \text{ s}^{-1} \frac{4\pi \times 10^{-4} \text{ Vs}}{2\pi \text{ Akm}} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{0.4 \text{ m}}{0.455 \times 10^{-2} \text{ m}} \right) = 0.297 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$\underline{Z}_{L4} = (R'_{L4} + jX'_{L4})l = (0.370 + j0.297) \times \frac{\Omega}{\text{km}} \times 50 \text{ m} = (18.50 + j14.85) \text{ m}\Omega$$

3.3 零序阻抗的确定

3.3.1 变压器

变压器 T1 及 T2(Dyn5)的零序参数:

$$R_{(0)T} = R_T \text{ 与 } X_{(0)T} = 0.95X_T \text{ (参见表 3)}$$

应用 3.2.2 中阻抗校正系数 K_T , 可得变压器零序阻抗:

$$Z_{(0)T1K} = (R_{T1} + j0.95X_{T1})K_{T1} = (2.684 + j9.551) \text{ m}\Omega$$

$$Z_{(0)T2K} = (R_{T2} + j0.95X_{T2})K_{T2} = (4.712 + j14.913) \text{ m}\Omega$$

3.3.2 线路(电缆和架空线)

交流线路零序阻抗参数计算如下:

a) 线路 L1

$R_{(0)L} = 3.7R_L$; $X_{(0)L} = 1.81X_L$, 以第四条导线和周围导体为回路:

$$Z_{(0)L1} = (3.7R_{L1} + j1.81X_{L1}) = (1.425 + j0.715) \text{ m}\Omega$$

b) 线路 L2

$R_{(0)L} = 4.23R_L$; $X_{(0)L} = 1.21X_L$, 以护套为回路:

$$Z_{(0)L2} = (4.23R_{L2} + j1.21X_{L2}) = (1.760 + j0.165) \text{ m}\Omega$$

c) 线路 L3

$R_{(0)L} = 3R_L$; $X_{(0)L} = 4.46X_L$, 以第四条导线、护套及大地为回路:

$$Z_{(0)L3} = (3R_{L3} + j4.46X_{L3}) = (16.260 + j7.760) \text{ m}\Omega$$

d) 线路 L4

在计算最大短路电流时, 架空线取 $R_{(0)L} = 2R_L$; $X_{(0)L} = 3X_L$:

$$Z_{(0)L4} = (2R_{L4} + j3X_{L4}) = (37.04 + j44.55) \text{ m}\Omega$$

3.4 三相短路电流 I''_k 及 i_p 计算

3.4.1 短路位置 F1

3.4.1.1 根据正序系统示意图(图 7), 在位置 F1 处有短路阻抗:

$$\underline{Z}_k = \underline{Z}_{Q1} + \frac{Z_{T1K}(Z_{T2K} + Z_{L1} + Z_{L2})}{Z_{T1K} + Z_{T2K} + Z_{L1} + Z_{L2}} = (1.881 + j6.746) \text{ m}\Omega$$

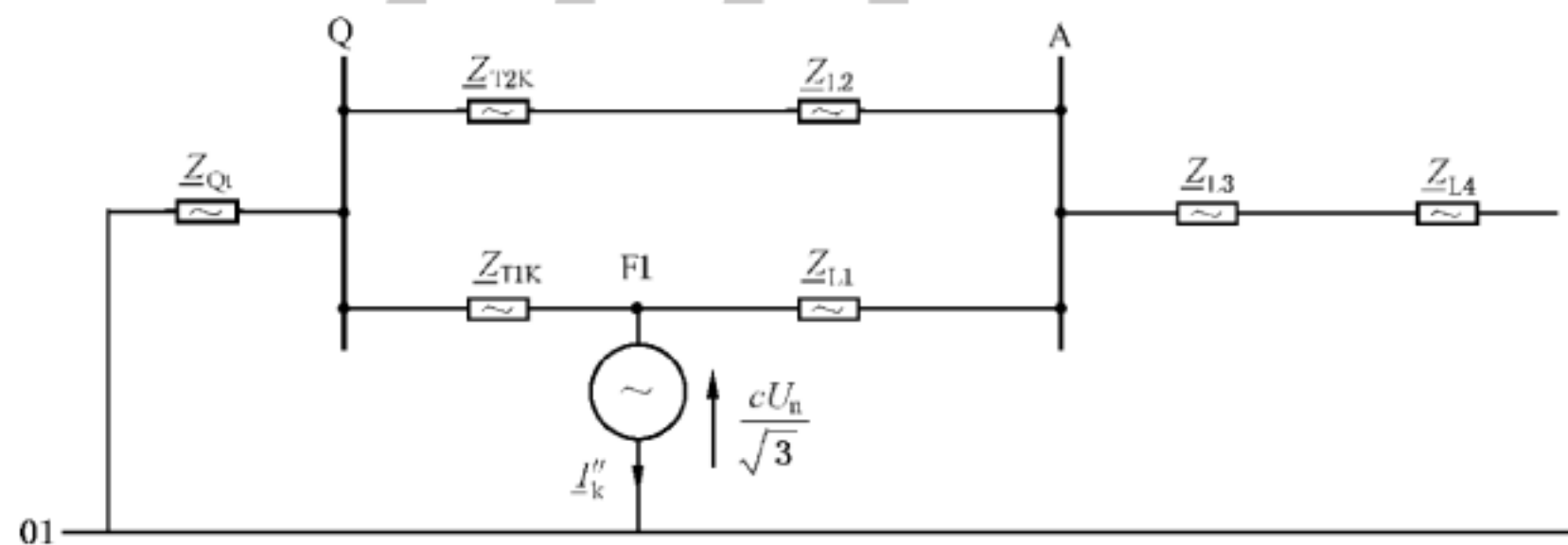


图 7 计算短路点 F1 处 I''_k 的正序系统(根据图 6)

计算三相短路电流最大值[GB/T 15544.1—2013 中式(29)],取 $c = c_{\max} = 1.05$ (GB/T 15544.1—2013 表 1):

$$I''_k = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{1.05 \times 400\text{V}}{\sqrt{3} \times 7.003 \text{ m}\Omega} = 34.62 \text{ kA}$$

注:此处的计算结果偏差主要来自于 400 V 系统额定电压的取值差异(见 IEC 60038)。由计算系数 K_T 引起的偏差仅为 0.25%。

计算 Z_k 是以复数形式进行,通过计算短路位置处 R/X 比率的方法(b)很容易获得 i_p ,也可采用更为精确的方法(c)。

3.4.1.2 方法(b):短路位置处的阻抗比率(见 GB/T 15544.1—2013 的 4.3.1.2):

$$\frac{R}{X} = \frac{R_k}{X_k} = 0.279$$

$$\kappa_{(b)} = 1.02 + 0.98e^{-3R/X} = 1.445 \text{ [GB/T 15544.1—2013 的式(55)]}$$

因为 $Z_{T2K} + Z_{L1} + Z_{L2}$ 的 R/X 比率大于 0.3,有必要在方法(b)中引入系数 1.15[见 GB/T 15544.1—2013 的 4.3.1.2b)]。

$$i_{p(b)} = 1.15\kappa_{(b)} \sqrt{2} I''_k = 1.15 \times 1.445 \times \sqrt{2} \times 34.62 \text{ kA} = 81.36 \text{ kA}$$

3.4.1.3 方法(c):采用 GB/T 15544.1—2013 中式(59)计算等效频率时的 R/X :

根据方法(c)计算阻抗 $Z_c = R_c + jX_c$,其中等效频率 $f_c = 20 \text{ Hz}$ ($f = 50 \text{ Hz}$)。该计算过程类似于 Z_k 的计算,但使用了 20 Hz 的数值:

$$Z_{Qtc} = (0.053 + j0.212) \text{ m}\Omega$$

$$Z_{T1Kc} = (2.684 + j4.021) \text{ m}\Omega; Z_{T2Kc} = (4.712 + j6.279) \text{ m}\Omega$$

$$Z_{L1c} = (0.385 + j0.158) \text{ m}\Omega; Z_{L2c} = (0.416 + j0.054) \text{ m}\Omega$$

$$Z_c = Z_{Qtc} + \frac{Z_{T1Kc}(Z_{T2Kc} + Z_{L1c} + Z_{L2c})}{Z_{T1Kc} + Z_{T2Kc} + Z_{L1c} + Z_{L2c}} = (1.8738 + j2.7076) \text{ m}\Omega$$

$$\frac{R}{X} = \frac{R_c}{X_c} \times \frac{f_c}{f} = \frac{1.874 \text{ m}\Omega}{2.707 \text{ m}\Omega} \times \frac{20 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} = 0.277$$

$$\kappa_{(c)} = 1.02 + 0.98e^{-3R/X} = 1.447$$

$$i_{p(c)} = \kappa_{(c)} \sqrt{2} I''_k = 1.447 \times \sqrt{2} \times 34.62 \text{ kA} = 70.85 \text{ kA}$$

注:在该算例使用方法(a)是不准确的(见 GB/T 15544.1—2013 的 4.3.1.2)。在仅使用电抗完成短路电流计算时,方法(a)只能用作粗略估计。方法(a)采用 Z_{T1K} 及 $Z_{T2K} + Z_{L2} + Z_{L1}$ 的最小比率 R/X ,得到 $\kappa_{(a)} = 1.46$ 。若 $R_{Qt}/X_{Qt} = 0.1$ 的网络馈线也视为一个支路,则可得系数 $\kappa_{(a)} = 1.75$ 及峰值短路电流 $i_{p(a)} = 85.5 \text{ kA} > i_{p(c)}$ (见 IEC 60909-1)。

3.4.2 短路位置 F2

$$Z_k = Z_{Qt} + \frac{(Z_{T1K} + Z_{L1})(Z_{T2K} + Z_{L2})}{Z_{T1K} + Z_{T2K} + Z_{L1} + Z_{L2}} = (1.977 + j6.827) \text{ m}\Omega$$

$$I''_k = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{1.05 \times 400 \text{ V}}{\sqrt{3} \times 7.107 \text{ m}\Omega} = 34.12 \text{ kA}$$

采用方法(c)计算(见 GB/T 15544.1—2013 的 4.3.1.2)可得到:

$$Z_c = (1.976 + j2.733) \text{ m}\Omega$$

$$\frac{R}{X} = \frac{R_c}{X_c} \times \frac{f_c}{f} = \frac{1.976 \text{ m}\Omega}{2.733 \text{ m}\Omega} \times \frac{20 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} = 0.289$$

$$i_{p(c)} = \kappa_{(c)} \sqrt{2} I''_k = 1.432 \times \sqrt{2} \times 34.12 \text{ kA} = 69.10 \text{ kA}$$

注:最终的比率 R/X 主要由两条支路 $Z_{T1K} + Z_{L1}$ 及 $Z_{T1K} + Z_{L1}$ (其中 $R/X = 0.294$ 及 0.324) 决定。这两个比率近似

于 $R_k/X_k \approx 0.29, \kappa_{(b)} = 1.431$ 。采用方法(b)的计算(未使用附加系数 1.15)会得到 $i_{p(b)} = \kappa_{(b)} \sqrt{2} I_k'' = 1.431 \times \sqrt{2} \times 34.12 \text{ kV} = 69.05 \text{ kA}$ 。

3.4.3 短路位置 F3

$$\underline{Z}_k = \underline{Z}_{Qt} + \frac{(\underline{Z}_{T1K} + \underline{Z}_{L1})(\underline{Z}_{T2K} + \underline{Z}_{L2})}{\underline{Z}_{T1K} + \underline{Z}_{T2K} + \underline{Z}_{L1} + \underline{Z}_{L2}} + \underline{Z}_{L3} + \underline{Z}_{L4} = (25.897 + j23.417) \text{ m}\Omega$$

$$I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{1.05 \times 400 \text{ V}}{\sqrt{3} \times 34.914 \text{ m}\Omega} = 6.95 \text{ kA}$$

$$\underline{Z}_c = \underline{Z}_{F2c} + \underline{Z}_{L3c} + \underline{Z}_{L4c} = (1.976 + j2.733) \text{ m}\Omega + (23.920 + j6.636) \text{ m}\Omega$$

$$\frac{R}{X} = \frac{R_c}{X_c} \times \frac{f_c}{f} = \frac{25.896 \text{ m}\Omega}{9.369 \text{ m}\Omega} \times \frac{20 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} = 1.106$$

$$i_{p(c)} = \kappa_{(c)} \sqrt{2} I_k'' = 1.056 \times \sqrt{2} \times 6.95 \text{ kA} = 10.38 \text{ kA}$$

3.5 单相短路电流 I_{k1}'' 及 i_{p1} 计算

3.5.1 短路位置 F1

图 8 为图 6 系统正序、负序与零序网络的等效电路,在 F1 处单相短路。

$$\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_k = (1.881 + j6.764) \text{ m}\Omega \text{ (见 3.4.1)}$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \frac{\underline{Z}_{(0)T1K} [\underline{Z}_{(0)T2K} + \underline{Z}_{(0)L1} + \underline{Z}_{(0)L2}]}{\underline{Z}_{(0)T1K} + \underline{Z}_{(0)T2K} + \underline{Z}_{(0)L1} + \underline{Z}_{(0)L2}} = (2.140 + j6.009) \text{ m}\Omega$$

$$\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)} = 2\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)} = (5.902 + j19.537) \text{ m}\Omega$$

应用 3.4.1 中正序系统系数 $\kappa_{(c)} = 1.447$ 计算峰值短路电流 i_{p1} :

$$i_{p1(c)} = \kappa_{(c)} \sqrt{2} I_{k1}'' = 1.447 \times \sqrt{2} \times 35.64 \text{ kA} = 72.93 \text{ kA}$$

注:将 $\underline{Z}_c, \underline{Z}_{(0)c}$ 用于计算 $\kappa_{(c)}, i_{p1(c)}$, 结果如下:

$$\frac{R}{X} = \frac{2R_c + R_{(0)c}}{2X_c + X_{(0)c}} \times \frac{f_c}{f} = \frac{5.828 \text{ m}\Omega}{7.875 \text{ m}\Omega} \times \frac{20 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} \approx 0.296$$

$$\kappa_{(c)} = 1.02 + 0.98e^{-3R/X} = 1.423$$

$$i_{p1(c)} = \kappa_{(c)} \sqrt{2} I_{k1}'' = 1.423 \times \sqrt{2} \times 35.64 \text{ kA} = 71.72 \text{ kA}$$

偏差仅为 1.7%。

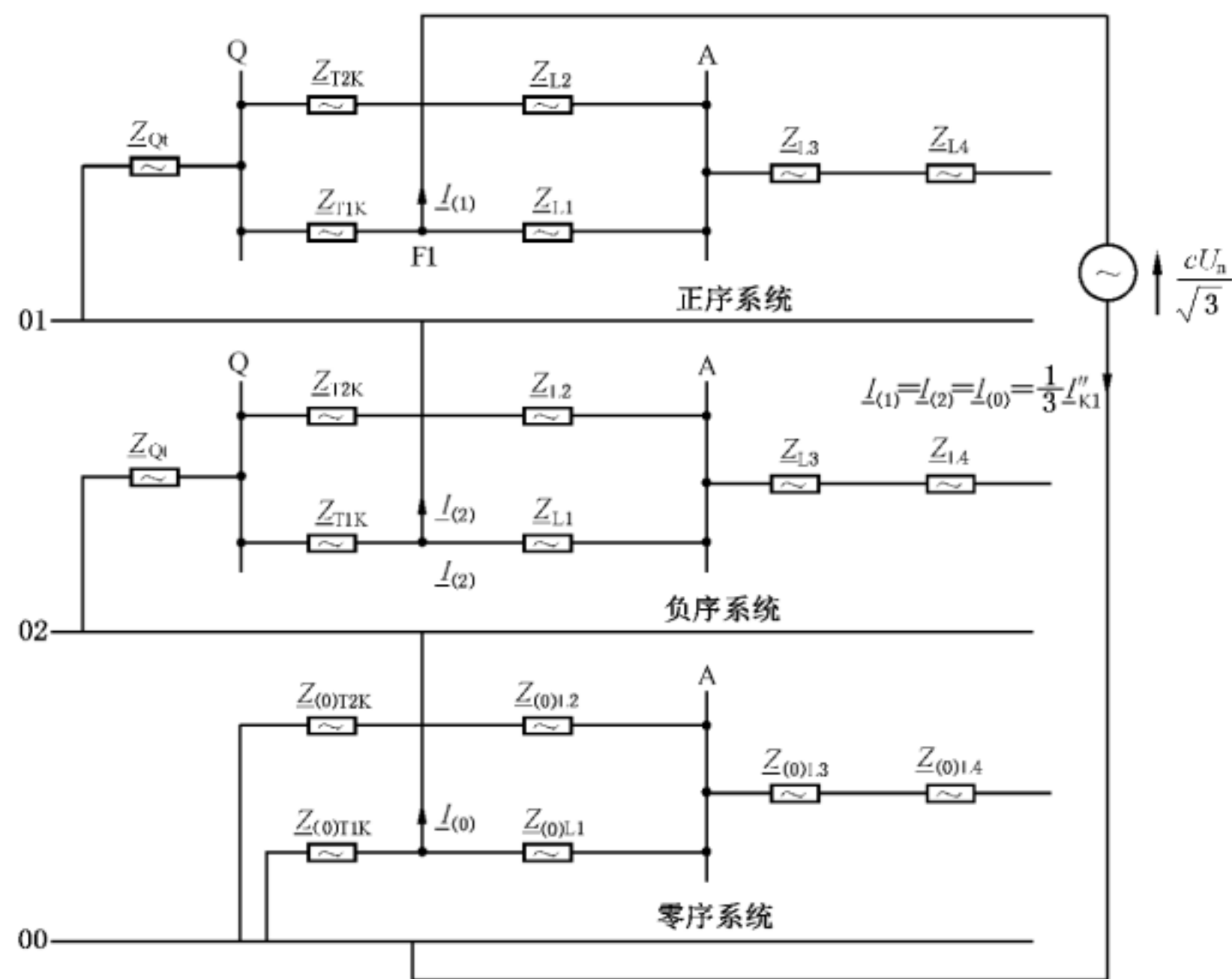


图 8 F1 处单相短路计算 I''_{k1} 的正序、负序及零序等值电路

3.5.2 短路位置 F2

$$\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_k = (1.977 + j6.827) \text{ m}\Omega \text{ (见 3.4.2)}$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \frac{(\underline{Z}_{(0)T1K} + \underline{Z}_{(0)L1})(\underline{Z}_{(0)T2K} + \underline{Z}_{(0)L2})}{\underline{Z}_{(0)T1K} + \underline{Z}_{(0)T2K} + \underline{Z}_{(0)L1} + \underline{Z}_{(0)L2}} = (2.516 + j6.109) \text{ m}\Omega$$

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3} c U_n}{|2 \underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}|} = \frac{\sqrt{3} \times 1.05 \times 400 \text{ V}}{20.795 \text{ m}\Omega} = 34.98 \text{ kA}$$

$$i_{p1(c)} = \kappa_{(c)} \sqrt{2} I''_{k1} = 1.432 \times \sqrt{2} \times 34.98 \text{ kA} = 70.84 \text{ kA}$$

3.5.3 短路位置 F3

$$\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_k = (25.897 + j23.417) \text{ m}\Omega \text{ (见 3.4.3)}$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \underline{Z}_{(0)F2} + \underline{Z}_{(0)L3} + \underline{Z}_{(0)L4} = (55.816 + j58.419) \text{ m}\Omega$$

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3} c U_n}{|2 \underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}|} = \frac{\sqrt{3} \times 1.05 \times 400 \text{ V}}{150.550 \text{ m}\Omega} = 4.83 \text{ kA}$$

$$i_{p1(c)} = \kappa_{(c)} \sqrt{2} I''_{k1} = 1.056 \times \sqrt{2} \times 4.83 \text{ kA} = 7.21 \text{ kA}$$

3.6 结果汇总

图 6 所示算例的短路阻抗及短路电流汇总见表 4a, 焦耳积分计算结果[GB/T 15544.1—2013 中式(102)]见表 4b。

应用 GB/T 15544.1 中图 21 及图 22 中的系数 m 及 n 计算图 6 算例中 F2、F3 处短路的焦耳积分。系数 m 通过 GB/T 15544.1 中附录 A 的公式来计算。可根据 250A 低压保险丝的特性得到保险丝的熔断时间(短路时间 T_k)。

表 4a 短路阻抗及短路电流

短路位置	$Z_k = Z_{(1)}$	$Z_{(0)}$	I''_k	$i_{(p)c}$	I''_{kl}	$i_{pl(c)}$	I''_{kl}/I''_k
	m	m	kA	kA	kA	kA	—
F1	7.003	6.421	34.62	70.85	35.64	72.93	1.03
F2	7.107	6.601	34.12	69.10	34.98	70.84	1.03
F3	34.929	80.79	6.95	10.38	4.83	7.21	0.70

表 4b 短路位置 F2 及 F3 处依据 T_k 的焦耳积

短路位置	短路位置	保护类型	T_k		m^a	n^b	焦耳积分 [GB/T 15544.1— 2013 中式(102)]
	kA	—	S	—	—	—	(kA) ² s
F2	$I''_k = 34.12$	断路器 250 A	0.06	1.43	0.197	1	83.61
F3	$I''_k = 6.95$		0.06	1.06	0.059	1	3.07
F3	$I''_{kl} = 4.83$		0.06	1.06	0.059	1	1.48
F2	$I''_k = 34.12$	熔断器 250 A	<0.005	—	—	—	<0.56 ^c
F3	$I''_k = 6.95$		0.02	1.06	0.178	1	1.19
F3	$I''_{kl} = 4.83$		0.07	1.06	0.051	1	1.72

^a 根据公式计算 m (参见 GB/T 15544.1—2013 的附录 A)。
^b 远端短路: $I_k = I''_k n = 1$ 。
^c 保险丝的开断特性。

注:若短路持续时间 T_k 一定,如本例中的断路器,则在最大短路电流时会产生最大焦耳积分。而对于反时限特性的情况,如本例中的熔断器,则在最小短路电流时产生最大焦耳积分,如 F3 处单相短路。

4 中压系统中三相短路电流的计算—电动机的影响

4.1 问题

图 9 为 33 kV/6 kV(50 Hz)的中压系统接线图。计算带有及不带有异步电动机(由 6 kV 母线馈电)情况下的短路电流,以说明电动机对 F 处短路电流的影响。

33 kV/6 kV 变电站装备两台变压器 $S_{rT} = 15$ MVA,均通过三芯 30 kV 电缆从馈电点 Q 受电, $U_{nQ} = 33$ kV, $I''_{kQ} = 13.12$ kA, $S''_{kQ} = \sqrt{3}U_{kQ}I''_{kQ} = 750$ MVA(参见 GB/T 15544.1—2013 的 1.3.6)。有关馈电网络的信息由电力公司提供,并根据 GB/T 15544.1 进行计算。

计算过程分别采用复阻抗(见 4.2)与仅用电抗(见 4.3)进行以示对比,在低压及中压系统大多情况下,计算三相短路电流时仅使用电气设备的短路电抗即可达到足够精度。折算为标么值的计算过程见 4.4。

采用叠加方法进行计算(见 4.5),说明短路电流结果取决于短路前故障点的负载及电压,以及变压器有载调压分接头的位置。

图 9 给出了 33 kV/6 kV 三相交流系统的电路图及电气设备的数据。

4.2 带绝对值的复数计算

表 5 中的复数短路阻抗根据图 9 中的数据及 GB/T 15544.1 中的相关公式得出。

短路点 F 处的短路电流 \underline{I}''_k 由图 9 中各支路电流的复数之和得到(见 GB/T 15544.1 的 4.2.1.2):

$$\underline{I}''_k = \underline{I}''_{kT1} + \underline{I}''_{kT2} + \underline{I}''_{kM1} + \underline{I}''_{kM2}$$

式中: \underline{I}''_{kM2} 为三台并联电动机(每台电动机 $P_{rM} = 1 \text{ MW}$)提供的分支电流(图 9),三台并联电动机处理为一台等效电动机 M2。

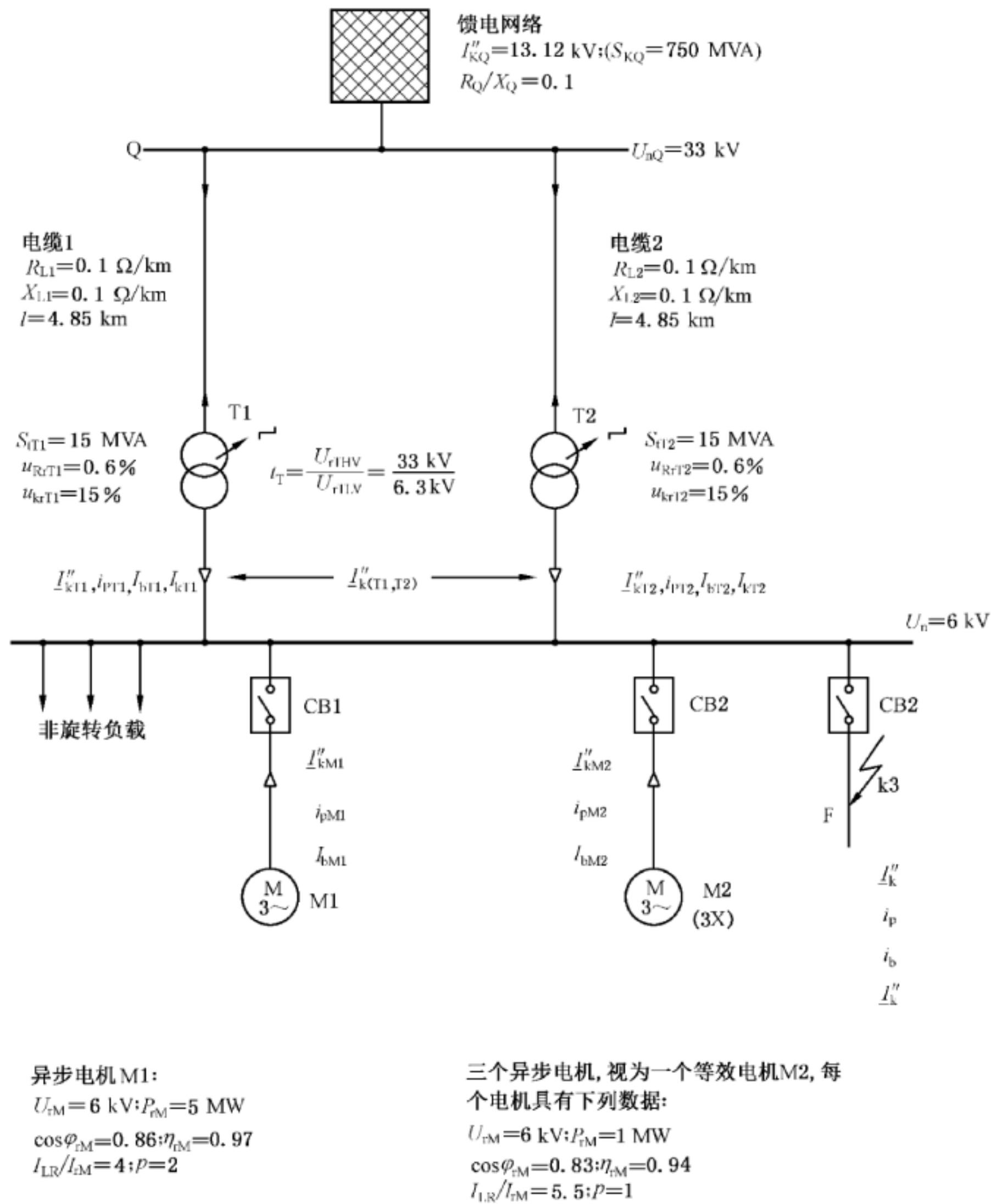


图 9 33 kV/6 kV 中压网络接线及数据

通过表 5 的 $\underline{Z}_{k(T1,T2)}$ 得到变压器二次侧短路电流 $\underline{I}''_{kT1} + \underline{I}''_{kT2}$ 。

$$\underline{I}''_{kT1} + \underline{I}''_{kT2} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_{k(T1,T2)}} = \frac{1.1 \times 6 \text{ kV}}{\sqrt{3} (0.0223 + j0.2569) \Omega} = (1.28 - j14.72) \text{ kA}$$

$$I''_{k(T1,T2)} = |\underline{I}''_{kT1} + \underline{I}''_{kT2}| = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_{k(T1,T2)}} = \frac{1.1 \times 6 \text{ kV}}{\sqrt{3} \times 0.2579 \Omega} = 14.78 \text{ kA}$$

异步电动机 $P_{rM}/p \geq 1 \text{ MW}, R_M = 0.1X_M, X_M = 0.995Z_M$ (见 GB/T 15544.1—2013 的 3.8.1), 其提供的分支电流为 \underline{I}''_{kM1} 及 \underline{I}''_{kM2} 。

$$\underline{I''_{kM1}} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_{M1}} = \frac{1.1 \times 6 \text{ kV}}{\sqrt{3} (0.149 + j1.493) \Omega} = (0.25 - j2.53) \text{ kA}$$

$$\underline{I''_{kM2}} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_{M2}} = \frac{1.1 \times 6 \text{ kV}}{\sqrt{3} (0.170 + j1.696) \Omega} = (0.22 - j2.22) \text{ kA}$$

将各分支电流 $\underline{I''_{kT1}} + \underline{I''_{kT2}}$ 、 $\underline{I''_{kM1}}$ 及 $\underline{I''_{kM2}}$ 相加得到:

$$\underline{I''_k} = (1.75 - j19.47) \text{ kA}; \quad I''_k = 19.55 \text{ kA}$$

表 5 电气设备短路阻抗及 F 处短路阻抗 $\underline{Z}_{k(T1, T2)}$ 计算无电机(断路器 CB1 及 CB2 断开)

No.	元件	计算公式(GB/T 15544.1)	阻抗 Ω
1	馈电网络	$(6) Z_{Qt} = \frac{c_U U_{nQ}}{\sqrt{3} I''_{kQ}} \times \frac{1}{2} = \frac{1.1 \times 33 \text{ kV}}{\sqrt{3} \times 13.12 \text{ kA}} \times \left(\frac{6.3 \text{ kV}}{33 \text{ kV}} \right)^2$ $X_{Qt} = 0.995 Z_{Qt}; \quad R_{Qt} = 0.1 X_{Qt}$ $\underline{Z}_{Qt} = R_{Qt} + j X_{Qt}$	(0.058 2) 0.005 8 + j0.057 9
2	电缆 L1=L2	$R_{L1t} = R'_{L1} l \frac{1}{t_i^2} = 0.1 \frac{\Omega}{\text{km}} \times 4.85 \text{ km} \left(\frac{6.3 \text{ kV}}{33 \text{ kV}} \right)^2$ $R_{L1t} = X'_{L1} l \frac{1}{t_i^2} = 0.1 \frac{\Omega}{\text{km}} \times 4.85 \text{ km} \left(\frac{6.3 \text{ kV}}{33 \text{ kV}} \right)^2$ $\underline{Z}_{L1t} = R_{L1t} + j X_{L1t}$	0.0177 + j0.017 7
3	变压器 T1=T2	$(7) Z_{T1} = \frac{u_{kl}}{100\%} \times \frac{U_{iTLV}^2}{S_{rT}} = \frac{15\%}{100\%} \times \frac{(6.3 \text{ kV})^2}{15 \text{ MVA}}$ $(8) R_{T1} = \frac{u_{Rr}}{100\%} \times \frac{U_{iTLV}^2}{S_{rT}} = \frac{0.6\%}{100\%} \times \frac{(6.3 \text{ kV})^2}{15 \text{ MVA}}$ $(9) X_{T1} = \sqrt{Z_{T1}^2 - R_{T1}^2}$ $(12a) K_T = 0.95 \frac{c_{\max}}{1 + 0.6 \times 0.149 9} = 0.958 8$ $Z_{T1K} = (R_{T1} + j X_{T1}) K_T$	(0.396 9) (0.015 9) (0.396 6) 0.015 2 + j0.380 3
4	L1+T1=L2+T2	$\underline{Z}_{L1t} + \underline{Z}_{T1K} = \underline{Z}_{L2t} + \underline{Z}_{T2K}$	0.032 9 + j0.398 0
5	(L1+T1) (L2+T2) 并联	$\frac{1}{2} (\underline{Z}_{L1t} + \underline{Z}_{T1K})$	0.016 5 + j0.199 0
6	无电动机时的阻抗	$\underline{Z}_{k(T1, T2)} = \underline{Z}_{Qt} + \frac{1}{2} (\underline{Z}_{L1t} + \underline{Z}_{T1K})$	0.022 3 + j0.256 9
7	电动机 M1 电动机 M2 (3 台 1MW)	$(26) Z_{M1} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \times \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} = \frac{1}{4} \times \frac{(6 \text{ kV})^2}{6 \text{ MVA}}$ $S_{rM} = P_{rM} / (\cos\varphi_{rM} \eta_{rM}) = 6 \text{ MVA}$ $(26) Z_{M2} = \frac{1}{3} \times \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \times \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} = \frac{1}{3} \times \frac{1}{5.5} \times \frac{(6 \text{ kV})^2}{1.28 \text{ MVA}}$ $S_{rM} = P_{rM} / (\cos\varphi_{rM} \eta_{rM}) = 1.28 \text{ MVA}$	1.500 1.705

根据 GB/T 15544.1—2013 中 4.3.1.1 相关内容及式(57)得峰值短路电流:

$$i_p = i_{p(T1, T2)} + i_{pM1} + i_{pM2} = (37.21 + 6.29 + 5.52) \text{ kA} = 49.02 \text{ kA}$$

其中计算变压器分支峰值短路电流,取 $R/X=0.022 \Omega/0.257 \Omega$ 、 $\kappa=1.78$,按 GB/T 15544.1—2013 式(55)计算如下:

$$i_{p(T1,T2)} = \kappa \sqrt{2} I''_{k(T1,T2)} = 1.78 \times \sqrt{2} \times 14.78 \text{ kA} = 37.21 \text{ kA}$$

对于 M1,取 $R_{M1}/X_{M1}=0.1$ 、 $\kappa=1.75$ (GB/T 15544.1 表 3),有:

$$i_{pM1} = \kappa \sqrt{2} I''_{kM1} = 1.75 \times \sqrt{2} \times 2.54 \text{ kA} = 6.29 \text{ kA}$$

对于 M2,取 $R_{M2}/X_{M2}=0.1$ 、 $\kappa=1.75$ (GB/T 15544.1 表 3),有:

$$i_{pM2} = \kappa \sqrt{2} I''_{kM2} = 1.75 \times \sqrt{2} \times 2.23 \text{ kA} = 5.52 \text{ kA}$$

根据 GB/T 15544.1 的 4.5.2 及式(70)、式(73),最短延时 $t_{\min}=0.1 \text{ s}$ 情况下的对称开断电流:

$$I_b = I_{b(T1,T2)} + I_{bM1} + I_{bM2} = I''_{k(T1,T2)} + \mu_{M1} q_{M1} I''_{kM1} + \mu_{M2} q_{M2} I''_{kM2}$$

$$I_b = (14.78 + 0.80 \times 0.68 \times 2.54 + 0.72 \times 0.57 \times 2.23) \text{ kA} = 17.08 \text{ kA}$$

其中:

$$\mu_{M1} = 0.62 + 0.72e^{-0.32 \times 4.4} = 0.80$$

$$q_{M1} = 0.57 + 0.12 \times \ln 2.5 = 0.68$$

$$\mu_{M2} = 0.62 + 0.72e^{-0.32 \times 6.05} = 0.72$$

$$q_{M2} = 0.57 + 0.12 \times \ln 1.0 = 0.57$$

在 $t=t_{\min}=0.1 \text{ s}$ 情况下短路电流周期分量 $i_{d.c.}$ 的最大衰减可通过 GB/T 15544.1—2013 式(64)估算。

$$i_{d.c.} = i_{d.c.(T1,T2)} + i_{d.c.M1} + i_{d.c.M2} = (1.420 + 0.155 + 0.137) \text{ kA} = 1.71 \text{ kA}$$

其中:

$$i_{d.c.(T1,T2)} = \sqrt{2} I''_{k(T1,T2)} e^{-2\pi f t (R/X)} = 1.420 \text{ kA}$$

$$i_{d.c.M1} = \sqrt{2} I''_{kM1} e^{-2\pi f t (R_{M1}/X_{M1})} = 0.155 \text{ kA}$$

$$i_{d.c.M2} = \sqrt{2} I''_{kM2} e^{-2\pi f t (R_{M2}/X_{M2})} = 0.136 \text{ kA}$$

该直流分量与 I_b 相比是较小的。

在机端短路情况下异步电动机不会贡献稳态短路电流($I_{kM1}=0, I_{kM2}=0$),F 处的稳态短路电流为:

$$I_k = I_{k(T1,T2)} + I_{kM1} + I_{kM2} = I''_{k(T1,T2)} = 14.78 \text{ kA}$$

4.3 采用电气设备的短路电抗进行计算

在 $R_k < 0.3X_k$ 情况下仅使用电气设备的电抗进行计算即可达到足够精度(GB/T 15544.1—2013 中 4.2.1.1)。可通过图 9 中的数据检验是否满足该条件。

表 6 为没有异步电动机情况下(CB1 及 CB2 断开) $X_{k(T1,T2)}$ 的计算过程。没有电动机情况下的短路电流 $I''_{k(T1,T2)}$:

$$I''_{k(T1,T2)} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} X_{k(T1,T2)}} = \frac{1.1 \times 6 \text{ kV}}{\sqrt{3} \times 0.2573 \Omega} = 14.81 \text{ kA}$$

由于变压器 R/X 比率较小,该计算结果与 4.2 的计算结果仅有 +0.2% 的偏差。

电动机电抗及分支电流为:

$$X_{M1} \approx \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \times \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} = \frac{1}{4} \times \frac{(6 \text{ kV})^2}{6 \text{ MVA}} = 1.5 \Omega; I''_{kM1} = 2.54 \text{ kA}$$

$$X_{M2} \approx \frac{1}{3} \times \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \times \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} = \frac{1}{3} \times \frac{1}{5.5} \times \frac{(6 \text{ kV})^2}{1.28 \text{ MVA}} = 1.705 \Omega; I''_{kM2} = 2.23 \text{ kA}$$

若计及异步电动机对 F 处短路电流的贡献(CB1 及 CB2 闭合),则 F 处短路电流:

$$I''_k = I''_{k(T1,T2)} + I''_{kM1} + I''_{kM2} = (14.81 + 2.54 + 2.23) \text{ kA} = 19.58 \text{ kA}$$

该计算结果与 4.2 基本相同($I''_k=19.55 \text{ kA}$)。

表6 电气设备短路电抗及 F 处短路电抗 $X_{k(T1,T2)}$ 的计算

No.	元件	计算公式(GB/T 15544.1—2013)	电抗
1	馈电网络 ($X_Q = Z_Q$)	$(6) X_{Qf} = \frac{c_Q U_{nQ}}{\sqrt{3} I''_{kQ}} \times \frac{1}{t_i^2} = \frac{1.1 \times 33 \text{ kV}}{\sqrt{3} \times 13.12 \text{ kA}} \times \left(\frac{6.3 \text{ kV}}{33 \text{ kV}} \right)^2$	0.058 2
2	电缆 L1	$X_{L1f} = X'_{L1} l \frac{1}{t_i^2} = 0.1 \frac{\Omega}{\text{km}} \times 4.85 \text{ km} \left(\frac{6.3 \text{ kV}}{33 \text{ kV}} \right)^2$	0.017 7
3	变压器 T1 ($X_T = Z_T$)	$(7) X_{T1} = \frac{u_{krT1}}{100\%} \times \frac{U_{rTLV}^2}{S_{rT1}} = \frac{15\%}{100\%} \times \frac{(6.3 \text{ kV})^2}{15 \text{ MVA}}$ $(12a) K_T = 0.95 \frac{c_{\max}}{1+0.6 \times X_T} = 0.95 \frac{1.1}{1+0.6 \times 0.15}$ $K_T = 0.959$ $X_{T1K} = X_{T1} K_T$	(0.396 9)
4	L1+T1=L2+T2	$X_{L1f} + X_{T1K} = X_{L2f} + X_{T2K}$	0.398 2
5	(L1+T1) (L2+T2)	$\frac{1}{2} (X_{L1f} + X_{T1K})$	0.199 1
6	无电动机时的阻抗	$X_{k(T1,T2)} = X_{Qf} + \frac{1}{2} (X_{L1f} + X_{T1K})$	0.257 3

可通过变压器的 R/X 比率大致得到峰值短路电流:

$$R_T/X_T \approx u_{Rr}/u_{kr} = 0.6\%/15\% = 0.04 \text{ (保守值)}, R_M/X_M = 0.1。$$

$$i_p = i_{p(T1,T2)} + i_{pM1} + i_{pM2} = (39.57 + 6.29 + 5.52) \text{ kA} = 51.38 \text{ kA}$$

其中:

$$i_{p(T1,T2)} = \kappa_{(T1,T2)} \sqrt{2} I''_{k(T1,T2)} = 1.89 \times \sqrt{2} \times 14.81 \text{ kA} = 39.57 \text{ kA}$$

$$i_{pM1} = \kappa_{(M1)} \sqrt{2} I''_{kM1} = 1.75 \times \sqrt{2} \times 2.54 \text{ kA} = 6.29 \text{ kA}$$

$$i_{pM2} = \kappa_{(M2)} \sqrt{2} I''_{kM2} = 1.75 \times \sqrt{2} \times 2.23 \text{ kA} = 5.52 \text{ kA}$$

该结果($i_p = 51.38 \text{ kA}$)比 4.2 中通过复数计算所得结果($i_p = 49.02 \text{ kA}$)大 5%。

I_b 及 I_k 的计算见 4.2。

4.4 基于标么值的计算

如 4.2、4.3 所示,计算短路电流时使用电抗已满足精度要求,因而此处计算(采用标么值)也仅应用电气设备的电抗。

标么值(p.u.)计算,需首先选择两个基准值如下(下标 R):

$$U_R = U_n = 6 \text{ kV 或 } 33 \text{ kV 且 } S_R = 100 \text{ MVA.}$$

标么值(符号前带有星号[*]上标)定义如下:

$$*U = \frac{U}{U_R}; \quad *I = \frac{I \times U_R}{S_R}; \quad *Z = \frac{Z \times S_R}{U_R^2}; \quad *S = \frac{S}{S_R}$$

如果 $U_{rTHV}/U_{rTLV} \neq U_{nHV}/U_{nLV}$, 则变压器额定变比为:

$$*t_r = \frac{U_{rTHV}}{U_{rTLV}} \times \frac{U_{R,6 \text{ kV}}}{U_{R,33 \text{ kV}}} = \frac{33 \text{ kV}}{6.3 \text{ kV}} \times \frac{6 \text{ kV}}{33 \text{ kV}} = 0.952 4$$

表 7 列出了没有电动机情况下短路电抗 $*X_{k(T1,T2)}$ 的计算过程。

表 7 电气设备短路电抗及 F 处短路电抗 *X_{k(T1,T2)} 的计算

No.	元件	计算公式(GB/T 15544.1—2013)	电抗 p.u.
1	馈网络 ^a	$(6) {}^*X_{Qf} = \frac{c_Q {}^*U_{nQ}}{\sqrt{3} {}^*I_{kQ}''} \times \frac{1}{{}^*t_f'} = \frac{1.1 \times 1 \text{ p.u.}}{\sqrt{3} \times 4.33 \text{ p.u.}} \times \frac{1}{0.952 \text{ s}^2}$	0.161 7
2	电缆 L1 ^b	${}^*X_{L1t} = X_{L1t}' l \times \frac{S_R}{U_R^2} \times \frac{1}{{}^*t_f'}$ $= 0.1 \frac{\Omega}{\text{km}} \times 4.85 \text{ km} \times \frac{100 \text{ MVA}}{(33 \text{ kV})^2} \times \frac{1}{0.952 \text{ s}^2}$	0.049 1
3	变压器 T1 ^c	$(7) {}^*X_{T1} = \frac{u_{krT1}}{100\%} \times \frac{U_{rT1LV}^2}{S_{rT1}} \times \frac{S_R}{U_R^2}$ $= \frac{15\%}{100\%} \times \frac{(6.3 \text{ kV})^2}{15 \text{ MVA}} \times \frac{100 \text{ MVA}}{(6 \text{ kV})^2}$ $(12a) K_T = 0.95 \frac{c_{\max}}{1+0.6 \times X_T} = 0.95 \frac{1.1}{1+0.6 \times 0.15}$ $K_T = 0.959$ (见表 6) ${}^*X_{L1t} + {}^*X_{T1K} = {}^*X_{L2t} + {}^*X_{T2K}$	(0.102 5) 1.057 3
4	L1+T1+L2+T2	${}^*X_{L1t} + {}^*X_{T1K} = {}^*X_{L2t} + {}^*X_{T2K}$	1.106 4
5	(L1+T1) (L2+T2)	$\frac{1}{2} ({}^*X_{L1t} + {}^*X_{T1K})$	0.553 2
6	无电动机时的电抗 p.u.	${}^*X_{k(T1,T2)} = {}^*X_{Qf} + \frac{1}{2} ({}^*X_{L1t} + {}^*X_{T1K})$	0.714 9

^a ${}^*I_{kQ}'' = I_{kQ}'' \times U_R / S_R = 13.12 \text{ kA} \times 33 \text{ kV} / 100 \text{ MVA} = 4.33 \text{ p.u.}$
^b $U_R = 33 \text{ kV.}$
^c $U_R = 6 \text{ kV.}$

没有电动机情况下的短路电流 *I''_{k(T1,T2)} :

$${}^*I''_{k(T1,T2)} = \frac{c {}^*U_n}{\sqrt{3} {}^*X_{k(T1,T2)}} = \frac{1.1 \times 1 \text{ p.u.}}{\sqrt{3} \times 0.714 9 \text{ p.u.}} = 0.888 4 \text{ p.u.}$$

$$I''_{k(T1,T2)} = {}^*I''_{k(T1,T2)} \times \frac{S_R}{U_R} = 0.888 4 \text{ p.u.} \times \frac{100 \text{ MVA}}{6 \text{ kV}} = 14.81 \text{ kA}$$

异步电动机的标么电抗及短路电流为(U_{rM}=U_R=6 kV):

$${}^*X_{M1} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \times \frac{S_R}{S_{rM}} = \frac{1}{4} \times \frac{100 \text{ MVA}}{6 \text{ MVA}} = 4.167 \text{ p.u.}$$

$${}^*X_{M2} = \frac{1}{3} \times \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \times \frac{S_R}{S_{rM}} = \frac{1}{3} \times \frac{1}{5.5} \times \frac{100 \text{ MVA}}{1.28 \text{ MVA}} = 4.735 \text{ p.u.}$$

$${}^*I''_{kM1} = \frac{c \times {}^*U_R}{\sqrt{3} \times {}^*X_{M1}} = \frac{1.1 \times 1 \text{ p.u.}}{\sqrt{3} \times 4.167 \text{ p.u.}} = 0.152 4 \text{ p.u.}; \quad I''_{kM1} = {}^*I''_{kM1} \frac{S_R}{U_R} = 2.54 \text{ kA}$$

$${}^*I''_{kM2} = \frac{c \times {}^*U_R}{\sqrt{3} \times {}^*X_{M2}} = \frac{1.1 \times 1 \text{ p.u.}}{\sqrt{3} \times 4.735 \text{ p.u.}} = 0.134 \text{ p.u.}; \quad I''_{kM2} = {}^*I''_{kM2} \frac{S_R}{U_R} = 2.23 \text{ kA}$$

如果计及异步电动机对 F 处的短路电流的影响,则:

$${}^*I''_k = {}^*I''_{k(T1,T2)} + {}^*I''_{kM1} + {}^*I''_{kM2} = (0.888 4 + 0.152 4 + 0.134) \text{ p.u.} = 1.174 8 \text{ p.u.}$$

$$I''_k = {}^*I''_k \frac{S_R}{U_R} = 1.174 8 \text{ p.u.} \times \frac{100 \text{ MVA}}{6 \text{ kV}} = 19.58 \text{ kA}$$

该计算结果与 4.3 相同。

注:如果不考虑校正系数 K_T ($K_T=1.0$),则结果为 $I''_{k(T1,T2)}=14.35 \text{ kA}=0.97 \times 14.81 \text{ kA}$ 。如果忽略非标准变比 t_r ($t_r=1.0$),但采用 $K_T=0.959$,则结果为 $I''_{k(T1,T2)}=16.33 \text{ kA}=1.10 \times 14.81 \text{ kA}$ 。如果既未考虑 K_T ,也未采用 t_r ,则结果为 $I''_{k(T1,T2)}=15.83 \text{ kA}=1.07 \times 14.81 \text{ kA}$ 。

4.5 采用叠加方法的计算

IEC 60909-1 中给出了应用叠加法计算短路电流及各分支电流的主要过程。

短路电流取决于短路前负载、33 kV 及 6 kV 系统的工作电压以及变压器有载调压分接头的位置(图 9)。下列信息是对于 4.1 和图 9 数据的补充,其对于应用叠加法是必要的:

a) 变压器 T1、T2:

有载调压分接头 $p_T = \pm 18\%$,分接头位于 $+p_T$ 时, $u_{k+} = 16.5\%$;分接头位于 $-p_T$ 时, $u_{k-} = 14\%$ 。

b) 短路前(上标 b)6 kV 母线处的负载电流:

$$I^b = (0 \dots 2.75) \text{ kA}, \cos\varphi^b = 0.8 \text{ 或 } \cos\varphi^b = 0.9, \underline{S}^b = \sqrt{3} U^b \underline{I}^{*b}。$$

c) 短路前的工作电压:

$$U^b = (6 \dots 6.6) \text{ kV}; U_n = 6 \text{ kV}; U_m = 7.2 \text{ kV (IEC 60038)}$$

$$U^b = (30 \dots 36) \text{ kV}; U_n = 33 \text{ kV}; U_m = 36 \text{ kV (IEC 60038)}$$

采用叠加法(标号 S)计算来自两台变压器的分支电流 $I''_{k(T1,T2)S}$,可通过短路前负载电流 $I^b_{(T1,T2)}$ 与电压 U^b 产生的电流 $I''_{k(T1,T2)U^b}$ 叠加获得[见式(1)]:

$$\underline{I}''_{k(T1,T2)S} = \underline{I}^b_{(T1,T2)} + \underline{I}''_{k(T1,T2)U^b} = \underline{I}^b_{(T1,T2)} + \frac{U^b}{\sqrt{3} \left[0.5 \underline{Z}_T(t) + \frac{1}{t^2} (\underline{Z}_Q + 0.5 \underline{Z}_L) \right]} \dots \dots \dots (1)$$

变压器阻抗 $\underline{Z}_T(t) = \underline{Z}_{T1}(t) = \underline{Z}_{T2}(t)$ (没有校正系数)取决于变压器实际变比 t ($u_{k+} \geq u_k \geq u_{k-}$)。

式(2)说明了 \underline{U}^b_Q 与短路点故障前电压 \underline{U}^b 的关系:

$$\underline{U}^b_Q = t \left[\underline{U}^b + \sqrt{3} \underline{I}^b \left(0.5 \underline{Z}_T(t) + \frac{1}{t^2} 0.5 \underline{Z}_L \right) \right] \dots \dots \dots (2)$$

图 10 以 \underline{S}^b ($\cos\varphi^b = 0.8$) 及电压 \underline{U}^b 为变量,并假定变压器分接头位于额定位置 ($t = t_r = 33 \text{ kV} / 6.3 \text{ kV} = 5.238, u_k(t) = u_{kr} = 15\%; u_{Rr} = 0.6\%$),左右两个纵坐标分别给出了式(1)和式(2)的计算结果。此外, $\underline{U}^b = 6.0 \text{ kV}$ 曲线给出了 $\cos\varphi^b$ 的影响。电压 \underline{U}^b_Q 的值限定在 $33 \text{ kV} (U_{nQ}) \sim 36 \text{ kV} (U_{mQ})$ 之间。

图 11 给出了包括电动机(M1 及 M2)影响,且有载调压分接开关在不同位置情况下,叠加法计算 F 处短路电流 I''_{kS} 的结果。图 11 的下部曲线为 $u_k(t)$ 。短路之前的电流为零,因此在短路时短路位置处的总短路电流如式(3)、(4)所示:

$$\underline{I}''_{kS} = \underline{I}''_{k(T1,T2)} U^b + \underline{I}''_{k(M1,M2)} U^b \dots \dots \dots (3)$$

其中

$$\underline{I}''_{k(M1,M2)} U^b = \frac{U^b}{\sqrt{3} \frac{\underline{Z}_{M1} \underline{Z}_{M2}}{\underline{Z}_{M1} + \underline{Z}_{M2}}} \dots \dots \dots (4)$$

$\underline{I}''_{k(T1,T2)U^b}$ 如式(1)所示。

作为补充信息,图中绘制了运行电压曲线。变压器分接头位于额定位置。

作为例子,考虑到,特别是最大电压 $U^b_Q = U_{mQ}$ 限制了图 11 中可能出现短路电流的区域。

计算时采用了如下负载条件作为算例: $\underline{S}^b = 0, \underline{S}^b = 15 \text{ MVA}$ 及 $\underline{S}^b = 30 \text{ MVA}$,且 $\cos\varphi^b = 0.8$,电压限制在 $U^b_Q = 30 \text{ kV}$ 与 $U^b_Q = 36 \text{ kV} = U_{mQ}$ 之间。从图 11 可看出,最高电压 $U^b_Q = U_{mQ}$ 为短路电流范围的限制因素。

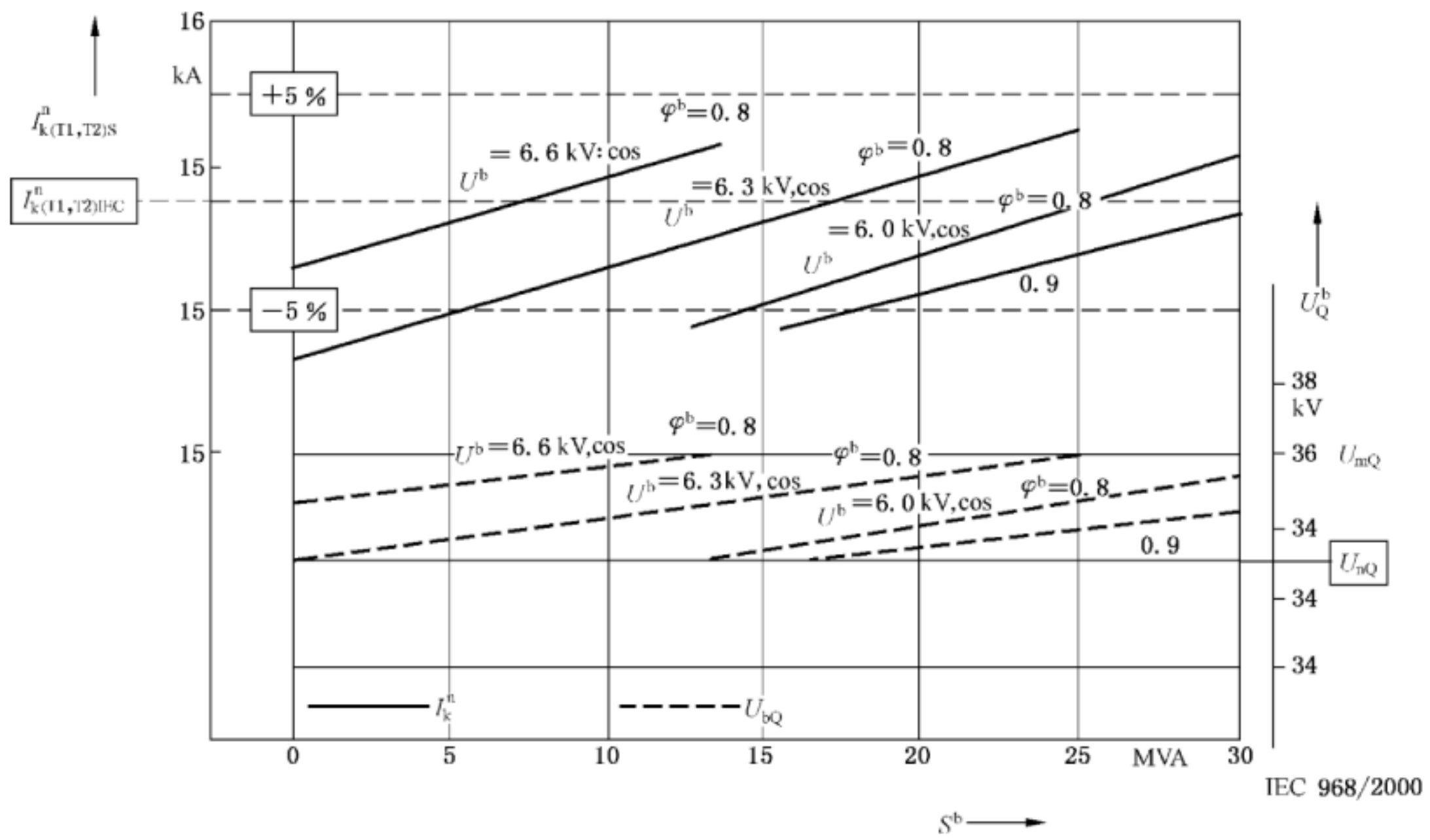


图 10 叠加法(S)算得的短路电流 $I''_{k(T1,T2)S}$ 与等效电压源法算得的 $I''_{k(T1,T2)IEC}$ 比较

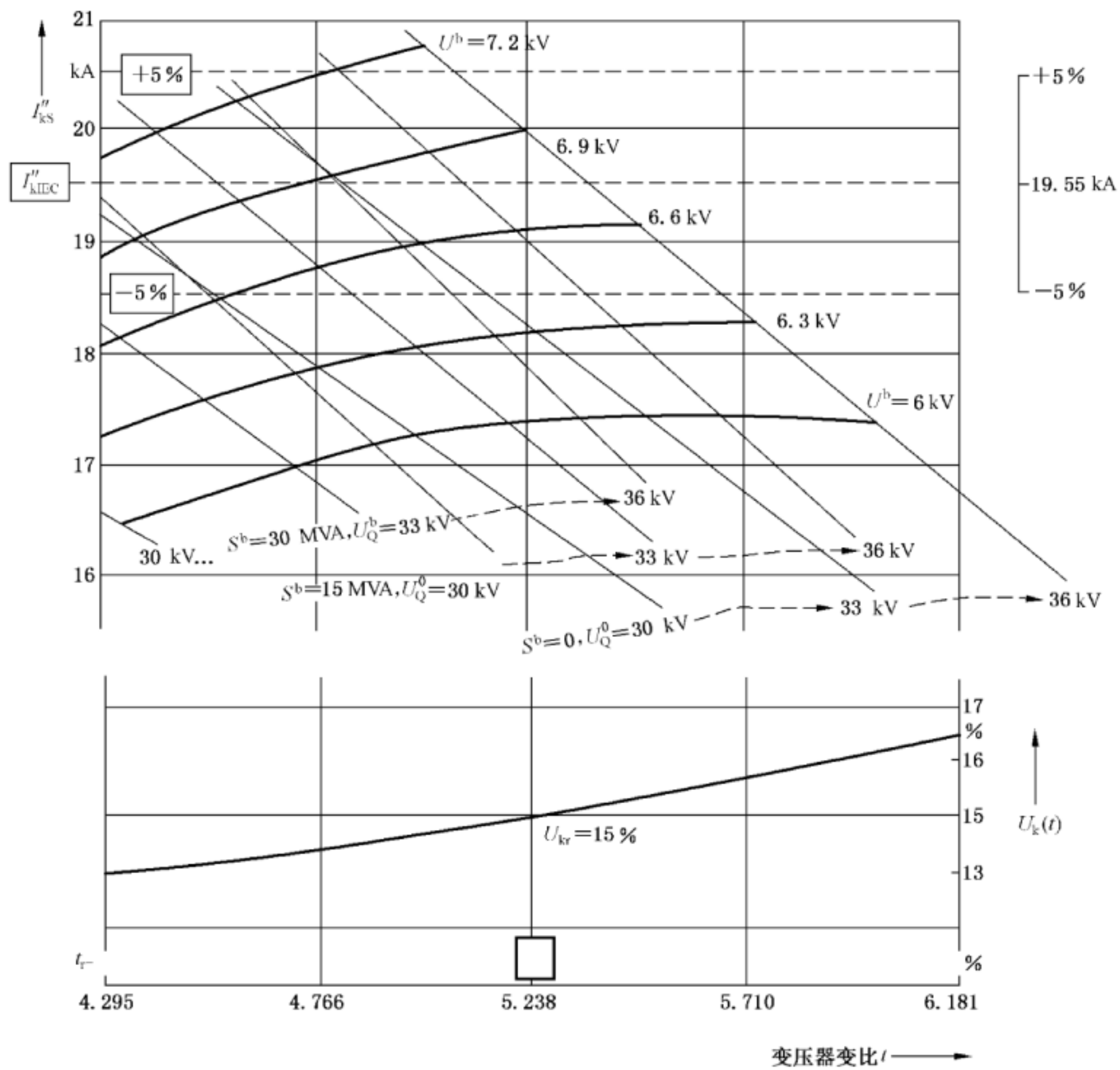


图 11 叠加法(S)算得的短路电流 I''_{ks} 与等效电压源法算得的 I''_{kIEC} 比较

5 发电机变压器组及辅助网络三相短路电流计算

5.1 问题

根据 GB/T 15544.1 计算图 12 中短路位置 F1~F5 处的三相短路电流。

发变组(S) $S_{rG}=S_{rT}=250$ MVA 连接到的馈电网络 Q, $U_{nQ}=220$ kV。馈电网络的短路电流 $I'_{kQ}=21$ kA, 根据 GB/T 15544.1 计算, $c=c_{\max}=1.1$ ($S''_{kQ}\approx\sqrt{3}U''_{kQ}I''_{kQ}\approx 8\ 000$ MVA)。单元变压器高压侧装有有载调压分接开关(见 GB/T 15544.1—2013 的 3.7.1)。厂用变压器 AT 为三绕组变压器(见 GB/T 15544.1—2013 的 3.3.2), 带有两个次级绕组, 为两条独立母线 B、C ($U_{nB}=U_{nC}=10$ kV) 供电。

在计算 F2~F5 处的短路电流时, 必须考虑中压及低压异步电动机的影响(参见 GB/T 15544.1—2013 的 3.8)。与母线 D、E 相连的低压电动机群可视为等值电动机(见 GB/T 15544.1—2013 的 3.8.2)。

应用 GB/T 15544.1—2013 的表 3, 在表 8 及表 9 中计算中压电动机 M1~M14 及低压电动机群 M15~M26 的机端短路电流。母线与电动机之间相连的电缆予以忽略, 计算结果偏于保守。

异步电动机通常在不同负载状况下运行, 短路计算则假定运行于额定工况, 这也会使计算结果偏于保守。母线 B 处异步电动机额定视在功率总和为 $\sum S_{rMB}\approx 40$ MVA, 母线 C 处为 $\sum S_{rMC}\approx 30$ MVA。与额定视在功率对比, 火力发电机在运行期间的最大厂用电仅为 25 MVA $\leq S_{rATA}=0.1\times S_{rG}$ 。

按照 5.3.4 对 F4 处短路电流进行计算, 可以看到通过母线 C 馈电的电动机对短路电流 I''_{kF4} 的影响不到 1%。因此计算 F4 处短路电流时, 可忽略电动机 M8……M14 及电动机群 M21……M26。

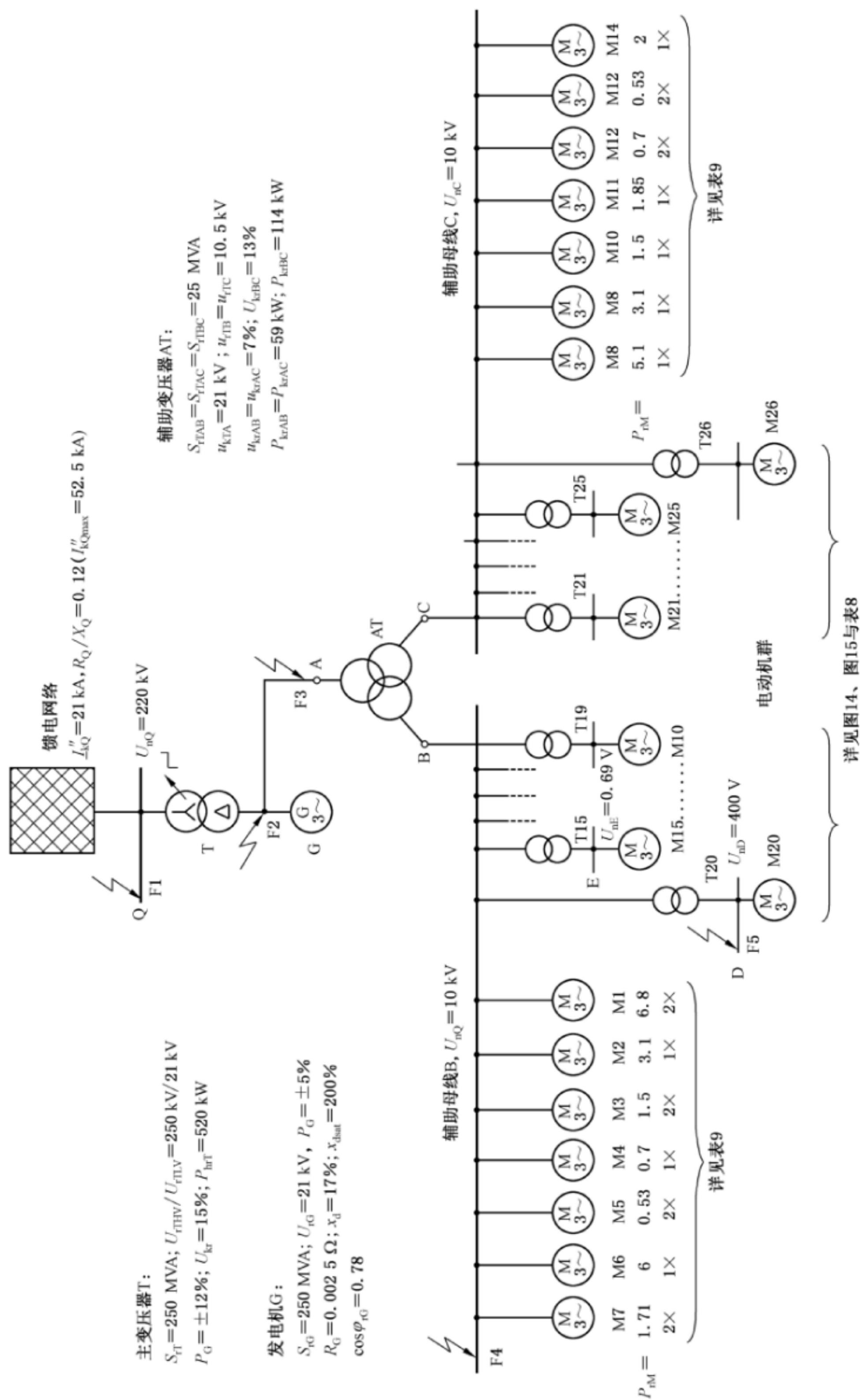


图 12 发变组(发电机及带有载调压分接头的单元变压器)和包含中压、低压异步电动机的厂用电网络

5.2 电气设备短路阻抗

5.2.1 网络馈线

根据 GB/T 15544.1—2013 中 3.2 及式(4)、式(5),由 $I''_{kQ} = 21 \text{ kA}$, $R_Q/X_Q = 0.12$ 及 $c = c_{\max} = 1.1$ (GB/T 15544.1—2013 表 1),可得到馈电网络阻抗 \underline{Z}_Q :

$$Z_Q = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}I''_{kQ}} = \frac{1.1 \times 220 \text{ kV}}{\sqrt{3} \times 21 \text{ kA}} = 6.653 \text{ } \Omega$$

$$X_Q = \frac{Z_Q}{\sqrt{1 + (R_Q/X_Q)^2}} = \frac{6.653 \text{ } \Omega}{\sqrt{1 + (0.12)^2}} = 6.606 \text{ } \Omega; R_Q = 0.12X_Q$$

$$\underline{Z}_Q = (0.793 + j6.606) \text{ } \Omega$$

计算 F2~F5 处的最大短路电流,应取对应于 $I''_{kQ\max} = 52.5 \text{ kA}$ 的阻抗 $Z_{Q\min}$ (GB/T 15544.1—2013 中 4.2.1.3)。 $I''_{kQ\max}$ 取值以及 $R_Q/X_Q = 0.1$,是由发变组寿命期限内电力系统规划估算得到:

$$Z_{Q\min} = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}I''_{kQ\max}} = \frac{1.1 \times 220 \text{ kV}}{\sqrt{3} \times 52.5 \text{ kA}} = 2.661 \text{ } \Omega$$

$$\underline{Z}_{Q\min} = (0.265 + j2.648) \text{ } \Omega$$

5.2.2 发变组

5.2.2.1 发电机

$$\underline{Z}_G = R_G + jX''_d = (0.0025 + j0.2999) \text{ } \Omega; Z_G = 0.2999 \text{ } \Omega$$

其中:

$$X''_d = \frac{x''_d}{100\%} \times \frac{U''_{rG}}{S_{rG}} = \frac{17\%}{100\%} \times \frac{(21 \text{ kV})^2}{250 \text{ MVA}} = 0.2999 \text{ } \Omega$$

在计算 κ 及 i_p 时,应使用假想电阻 R_{Gf} (见 GB/T 15544.1—2013 中 3.6.1):

$$R_{Gf} = 0.05X''_d (S_{rG} \geq 100 \text{ MVA});$$

$$Z_{Gf} = R_{Gf} + jX''_d = (0.0150 + j0.2999) \text{ } \Omega$$

5.2.2.2 单元变压器

根据 GB/T 15544.1—2013 中 3.3.1,单元变压器高压侧及低压侧的阻抗如下所示:

$$Z_{THV} = \frac{u_{kr}}{100\%} \times \frac{U_{rTHV}^2}{S_{rT}} = \frac{15\%}{100\%} \times \frac{(240 \text{ kV})^2}{250 \text{ MVA}} = 34.56 \text{ } \Omega$$

$$R_{THV} = P_{krT} \frac{U_{rTHV}^2}{S_{rT}^2} = 0.52 \text{ MW} \frac{(240 \text{ kV})^2}{(250 \text{ MVA})^2} = 0.479 \text{ } \Omega = \frac{u_{Rr}}{100\%} \times \frac{U_{rTHV}^2}{S_{rT}}$$

其中:

$$u_{Rr} = \frac{P_{krT}}{S_{rT}} \times 100\% = 0.208\%$$

$$X_{THV} = \sqrt{Z_{THV}^2 - R_{THV}^2} = 34.557 \text{ } \Omega$$

$$\underline{Z}_{THV} = R_{THV} + jX_{THV} = (0.479 + j34.557) \text{ } \Omega$$

单元变压器短路阻抗折算至低压侧, $t_r = 240/21 \text{ kV} = 11.429$:

$$\underline{Z}_{TLV} = \underline{Z}_{THV} \times \frac{1}{t_r^2} = (0.0037 + j0.265) \text{ } \Omega; Z_{TLV} = 0.265 \text{ } \Omega$$

5.2.2.3 发变组(单元变压器带有载调压分接头)

根据 GB/T 15544.1—2013 中 3.7.1, $U_G = U_{rG}$:

$$K_s = \frac{U_{nQ}^2}{U_{rG}^2} \times \frac{U_{rTLV}^2}{U_{rTHV}^2} \times \frac{c_{\max}}{1 + |x''_d - x_T| \sin\varphi_{rG}}$$

$$K_s = \frac{(220 \text{ kV})^2}{(21 \text{ kV})^2} \times \frac{(21 \text{ kV})^2}{(240 \text{ kV})^2} \times \frac{1.1}{1 + |0.17 - 0.15| \times 0.6258} = 0.913$$

$$\underline{Z}_s = K_s (t_r^2 \underline{Z}_G + \underline{Z}_{THV})$$

$$\underline{Z}_s = 0.913 \left[\left(\frac{240 \text{ kV}}{21 \text{ kV}} \right)^2 (0.0025 + j0.2999) \Omega + (0.479 + j34.557) \Omega \right]$$

$$= (0.735 + j67.313) \Omega$$

采用假定电阻 R_{Gf} , 可得到阻抗:

$$\underline{Z}_{sf} = (2.226 + j67.313) \Omega; \quad (R_{sf}/X_{sf} = 0.033)$$

5.2.3 辅助变压器

三绕组变压器 AT(图 12)折算至 A 侧的正序阻抗可通过 GB/T 15544.1—2013 的式(10)计算:

$$\underline{Z}_{AB} = \left[\frac{u_{RrAB}}{100\%} + j \frac{u_{XrAB}}{100\%} \right] \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAB}} = (0.0416 + j1.235) \Omega$$

其中 $u_{RrAB} = \frac{P_{krTAB}}{S_{rTAB}} \times 100\%$ 且 $u_{XrAB} = \sqrt{u_{krAB}^2 - u_{RrAB}^2}$ [GB/T 15544.1 式(10d)]

$$\underline{Z}_{AC} = \underline{Z}_{AB} = (0.0416 + j1.235) \Omega$$

$$\underline{Z}_{BC} = \left[\frac{u_{RrBC}}{100\%} + j \frac{u_{XrBC}}{100\%} \right] \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTBC}} = (0.0804 + j2.292) \Omega$$

可通过 GB/T 15544.1—2013 的式(13)得到阻抗校正系数 K_T , 其中 $x_{TAB} = x_{TAC} \approx 0.07$, $x_{TBC} \approx 0.1299$:

$$K_{TAB} = K_{TAC} = 0.95 \frac{c_{\max}}{1 + 0.6 \times x_{TAB}} = 1.003$$

$$K_{TBC} = 0.95 \frac{c_{\max}}{1 + 0.6 \times x_{TBC}} = 0.969$$

由 \underline{Z}_{ABK} 、 \underline{Z}_{ACK} 、 \underline{Z}_{BCK} 可得到 \underline{Z}_{AK} 、 \underline{Z}_{BK} 、 \underline{Z}_{CK} [GB/T 15544.1—2013 式(11)]:

$$\underline{Z}_{AK} = \frac{1}{2} (K_{TAB} \underline{Z}_{AB} + K_{TAC} \underline{Z}_{AC} - K_{TBC} \underline{Z}_{BC}) = (0.0028 + j0.1275) \Omega$$

$$\underline{Z}_{BK} = \underline{Z}_{CK} = \frac{1}{2} (K_{TBC} \underline{Z}_{BC} + K_{TAB} \underline{Z}_{AB} - K_{TAC} \underline{Z}_{AC}) = (0.0390 + j1.1105) \Omega$$

5.2.4 2.5 MVA 及 1.6 MVA 低压变压器

图 12 中, 辅助母线 B 接有 5 台变压器(T15……T19), 辅助母线 C 也接有 5 台变压器(T21……T25), 每台变压器 $S_{rT} = 1.6 \text{ MVA}$, $U_{rTHV}/U_{rTLV} = 10 \text{ kV}/0.73 \text{ kV}$ (见表 8)。此外, 变压器 T20 与 T26, $S_{rT} = 1.6 \text{ MVA}$, $U_{rTHV}/U_{rTLV} = 10 \text{ kV}/0.42 \text{ kV}$ (表 8), 连接到母线 B(T20)与母线 C(T26)。每台变压器均为一组异步电动机(见表 8)馈电。根据 GB/T 15544.1—2013 中 3.3.1 及 GB/T 15544.1—2013 式(12a)中的校正系数 K_T 计算变压器阻抗, 数据在表 8 中给出。

5.2.4.1 变压器 $S_{rT} = 2.5 \text{ MVA}$ (T15……T19, T21……T25)

$$Z_{T15HV} = \frac{u_{krT15}}{100\%} \times \frac{U_{rT15HV}^2}{S_{rT15}} = \frac{6\%}{100\%} \times \frac{(10 \text{ kV})^2}{2.5 \text{ MVA}} = 2.4 \Omega$$

$$R_{T15HV} = P_{krT15} \frac{U_{rT15HV}^2}{S_{rT15}^2} = 0.0235 \text{ MW} \frac{(10 \text{ kV})^2}{(2.5 \text{ MVA})^2} = 0.376 \Omega; \quad (u_{Rr} = 0.94\%)$$

$$\underline{Z}_{T15HV} = (0.376 + j2.370) \Omega$$

$$K_{T15HV} = 0.95 \frac{c_{\max}}{1 + 0.6x_{T15}} = 0.95 \frac{1.1}{1 + 0.6 \times 0.0593} = 1.009$$

$$\underline{Z}_{T15HVK} = (0.379 + j2.392) \Omega$$

$$\underline{Z}_{T15HVK} = \underline{Z}_{T16HVK}, \dots, \underline{Z}_{T19HVK}, \underline{Z}_{T21HVK}, \dots, \underline{Z}_{T25HVK}$$

5.2.4.2 变压器 $S_{rT} = 1.6 \text{ MVA} (T20, T26)$

$$Z_{T20HV} = \frac{u_{krT20}}{100\%} \times \frac{U_{rT20HV}^2}{S_{rT20}} = \frac{6\%}{100\%} \times \frac{(10 \text{ kV})^2}{1.6 \text{ MVA}} = 3.75 \Omega$$

$$R_{T20HV} = P_{krT20} \frac{U_{rT20HV}^2}{S_{rT20}^2} = 0.0165 \text{ MW} \frac{(10 \text{ kV})^2}{(1.6 \text{ MVA})^2} = 0.645 \Omega; (u_{Rr} = 1.03\%)$$

$$\underline{Z}_{T20HV} = (0.645 + j3.694) \Omega$$

$$K_{T20HV} = 0.95 \frac{c_{\max}}{1 + 0.6x_{T20}} = 0.95 \frac{1.1}{1 + 0.6 \times 0.0591} = 1.009$$

$$\underline{Z}_{T20HVK} = (0.651 + j3.728) \Omega$$

折算至低压侧:

$$\underline{Z}_{T20LV} = \underline{Z}_{T20HV} \times \frac{1}{t_r^2} = (1.138 + j6.516) \text{ m}\Omega; (t_r = 10 \text{ kV}/0.42 \text{ kV})$$

$$K_{T20LV} = 0.95 \frac{c_{\max}}{1 + 0.6x_{T20}} = 0.95 \frac{1.05}{1 + 0.6 \times 0.0591} = 0.963$$

$$\underline{Z}_{T20LVK} = (1.096 + j6.277) \text{ m}\Omega$$

表 8 10 kV/0.73 kV、10 kV/0.42 kV 变压器数据, 低压电动机群数据以及 F4 处短路时的分支短路电流

变压器电动机群		15 16 17 18 19	Σ 15.....19	20	Σ 15.....20	备注
S_{rT}	MVA	2.5	12.5	1.6		数据由厂商提供
U_{rTHV}	kV	10		10		
U_{rTLV}	kV	0.73		0.42	14.1	
u_{kr}	%	6		6		
P_{krT}	kW	23.5		16.5		
P_{rM}	MW	0.9	4.5	1.0	5.5	电动机群数据见 GB/T 15544.1—2013 的 3.8.2 GB/T 15544.1—2013 的 3.8.2 GB/T 15544.1—2013 的 3.8.2 $P_{rM}/(\cos\varphi_{rM}\eta_{rM})$
U_{rM}	kV	0.69		0.40		
$\cos\varphi_{rM}\eta_{rM}$	—	0.72		0.72		
I_{LR}/I_{rM}	—	5		5		
R_M/X_M	—	0.42		0.42		
k_{rM}	—	1.3		1.3		
S_{rM}	MVA	1.25	6.25	1.39	7.64	

表 8(续)

变压器电动机群		15 16 17 18 19	Σ 15……19	20	Σ 15……20	备注
R_{THVK}		0.379		0.651		见 5.2.4
X_{THVK}		2.392		3.728		
R_M		0.029 5		0.008 9		$R_M = 0.42X_M$
X_M		0.070 2		0.021 2		$X_M = 0.922Z_M^a$
I''_{kM}	kA	5.491		10.53 ^b		$c = 1.05$; $U_{nE} = 0.69$ kV; $U_{nD} = 0.4$ kV
$R_{M1} = R_{M1}t_r^2$		5.536		5.045		$t_r = 10$ kV/0.73 kV 或 $t_r = 10$ kV/0.42 kV
$X_{M1} = X_{M1}t_r^2$		13.179		12.018		
$R_{THVK} + R_{M1}$		5.915	1.183	5.696	0.980	10 kV 侧
$X_{THVK} + X_{M1}$		15.571	3.114	15.746	2.600	
$ Z_{THVK} + Z_{M1} $		16.657	3.331	16.745	2.779	
$I''_{kTF4} \cdot \Sigma I''_{kTF4}$	kA	0.381	1.906	0.379	2.285 ^c	$U_{nB} = 10$ kV, $c = 1.1$

^a Z_M 取自 GB/T 15544.1—2013 的式(26)。
^b F5 的分支短路电流。
^c F4 的分支短路电流。

5.2.5 异步电动机

表 8 列出了低压电动机组的数据及短路阻抗,还列出 F4(图 12 中的母线 B)处短路时电动机组(M15~M20)提供的分支短路电流(折算到变压器 T15~T20 高压侧)。

表 9 列出了图 12 中的中压电动机 M1……M7(母线 B)、M8……M14(母线 C)的数据及短路阻抗。根据 GB/T 15544.1—2013 的式(26)与式(91), $U_{rM} = U_n$,按下式计算 I''_{kM} :

$$I''_{kM} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_M} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}} \times \frac{I_{LR}}{I_{rM}} \times \frac{I_{rM}}{U_{rM}/\sqrt{3}} = c \frac{I_{LR}}{I_{rM}} \times I_{rM}$$

表9 中压异步电动机数据及在母线 B(F4)和母线 C 上分别短路时的分支电流

厂内辅助母线		B (短路点 F4)								C							
电动机序号		1	2	3	4	5	6	7	(1……7)	8	9	10	11	12	13	14	(8……14)
P_{rM}	kW	6.8	3.1	1.5	0.7	0.53	2	1.71	—	5.1	3.1	1.5	1.85	0.7	0.53	2	—
Quantity	—	2	1	2	1	2	1	2	—	1	1	2	1	2	2	1	—
U_{rM}	kV	—10—							10	—10—							10
$\cos\varphi_{rM}$	—	0.89	0.85	0.88	0.85	0.75	0.85	0.85	—	0.87	0.85	0.88	0.85	0.85	0.75	0.85	—
h_{rM}	—	0.976	0.959	0.952	0.952	0.948	0.96	0.96	—	0.973	0.959	0.962	0.959	0.952	0.948	0.96	—
I_{LR}/I_{rM}^a	—	—4—							—	—4—							—
极对数 p	—	2	2	1	3	5	3	3	—	3	2	1	3	3	5	3	—
S_{rM}, S_{rM}	MVA	15.66	3.80	3.54	0.87	1.49	2.45	4.19	32.0	6.02	3.80	3.54	2.27	1.73	1.49	2.45	21.3
I_{rM}, I_{rM}	kA	0.904	0.220	0.205	0.05	0.086	0.142	0.242	1.85	0.348	0.22	0.205	0.131	0.10	0.086	0.141	1.23
P_{rM}/p	—	3.4	1.55	1.5	0.23	0.11	0.67	0.57	—	1.7	1.55	1.50	0.62	0.23	0.11	0.67	—
R_M/X_M	—	—0.1—			—0.15—				—	—0.1—			—0.15—				—
κ_M	—	—1.75—			—1.65—				—	—1.75—			—1.65—				—
$(t_{\min}=0.1\text{ s})^b$	—	—0.796—							—	—0.796—							—
$q(t_{\min}=0.1\text{ s})^c$	—	0.72	0.62	0.62	0.39	0.31	0.52	0.50	—	0.63	0.62	0.62	0.51	0.39	0.31	0.52	—
$I''_{kM}, \sum I''_{kM}$	kA	3.98	0.97	0.90	0.22	0.38	0.62	1.06	8.13	1.53	0.97	0.90	0.58	0.44	0.38	0.62	5.41
i_{pM}	kA	9.85	2.40	2.23	0.51	0.89	1.45	2.47	19.80	3.79	2.39	2.23	1.35	1.03	0.88	1.45	13.12
I_{pM}	kA	2.28	0.48	0.44	0.07	0.09	0.26	0.42	4.04	0.77	0.48	0.44	0.24	0.14	0.09	0.26	2.42
Z_M		1.60	6.58	7.09	28.74	16.78	10.20	5.97	0.782	4.15	6.58	7.09	11.01	14.45	16.78	10.20	1.173
X_M		—0.995 Z_M —			—0.989 Z_M —				0.777	—0.995 Z_M —			—0.989 Z_M —				1.165
R_M		—0.1 X_M —			—0.15 X_M —				0.089	—0.1 X_M —			—0.15 X_M —				0.138

^a $I''_{kM}/I_{rM}=4.4; I''_{kM}=c(I_{LR}/I_{rM})I_{rM}$ 。
^b $\mu(0.1\text{ s})=0.62+0.72^{-0.32I''_{kM}/I_{rM}}$ [GB/T 15544.1—2013 的式(70)]。
^c $q(0.1\text{ s})=0.57+0.12\ln(P_{rM}/p)$ [GB/T 15544.1—2013 的式(73)]。

5.3 短路电流的计算

5.3.1 短路位置 F1

F1 处的短路电流 I''_k 可表示为 I''_{kQ} 与 I''_{kS} 之和。根据 GB/T 15544.1—2013 中的式(21),由 Z_s 即可计算电流 I''_{kS} 。不必考虑厂用网络中的异步电动机,因为其在该情况下对 I''_k 的影响不足 1%(见 5.3.3)。

5.3.1.1 短路电流初始值 I''_k

$$\underline{I''_{kQ}} = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}Z_Q} = \frac{1.1 \times 220\text{ kV}}{\sqrt{3}(0.793 + j6.606)\ \Omega} = (2.502 - j20.850)\text{ kA}$$

$$\underline{I''_{kS}} = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}Z_S} = \frac{1.1 \times 220\text{ kV}}{\sqrt{3}(0.735 + j67.313)\ \Omega} = (0.023 - j2.075)\text{ kA}$$

$$\underline{I}_k'' = \underline{I}_{kQ}'' + \underline{I}_{kS}'' = (2.525 - j22.925) \text{ kA}; \quad I_k'' = 23.064 \text{ kA}$$

5.3.1.2 峰值短路电流 i_p

根据阻抗 Z_Q , $R_Q/X_Q = 0.12$ 得 $\kappa_Q = 1.704$ 。根据阻抗 Z_{sf} (见 5.2.2), 可得到比率 $R_{sf}/X_{sf} = 0.033$, $\kappa_S = 1.908$ 。

$$\begin{aligned} i_p + i_{pQ} + i_{pS} &= \kappa_Q \sqrt{2} I_{kQ}'' + \kappa_S \sqrt{2} I_{kS}'' \\ &= 1.704 \times \sqrt{2} \times 21 \text{ kA} + 1.908 \times \sqrt{2} \times 2.075 \text{ kA} = 56.21 \text{ kA} \end{aligned}$$

5.3.1.3 对称开断电流 I_b

$$I_b = I_{bQ} + I_{bS} = I_{kQ}'' + \mu I_{kS}'' = 21 \text{ kA} + 0.859 \times 2.075 \text{ kA} = 22.78 \text{ kA}$$

其中: $\mu_{0.1} = 0.62 + 0.72e^{-0.23 \times I_{kG}''/I_{rG}}$ [GB/T 15544.1—2013 式(70), 对应 $t_{\min} = 0.1 \text{ s}$]

比率 I_{kG}''/I_{rG} 的计算如下所示:

$$\frac{I_{kG}''}{I_{rG}} = \frac{I_{kSt}''}{I_{rG}} = \frac{2.075 \text{ kA} (240 \text{ kV}/21 \text{ kV})}{6.873 \text{ kA}} = 3.45$$

5.3.1.4 稳态短路电流 $I_{k\max}$

$$I_k = I_{kQ} + I_{kS} = I_{kQ}'' + \lambda_{\max} I_{rGt} = 21 \text{ kA} + 1.65 \times 0.601 \text{ kA} \approx 22 \text{ kA}$$

系数 $\lambda_{\max} = 1.65$ 通过 GB/T 15544.1—2013 的图 18a) 得到, 取 $x_{\text{dsat}} = 2.0$, 并假定 $S_{rG} = 250 \text{ MVA}$ 隐极发电机的最大励磁电压倍数为 1.3 倍(见 IEC 60909-1 的 2.5.2.2)。

5.3.2 短路位置 F2

根据图 13 及 GB/T 15544.1—2013 的 4.2.1.3, 两个局部短路电流 I_{kG}'' [GB/T 15544.1—2013 的式(35)] 及 I_{kT}'' [GB/T 15544.1—2013 的式(37)] 均需计算, 这两个电流的最大值将用于确定发电机与单元变压器之间汇流条及断路器(如果有)的参数。

5.3.2.1 短路电流初始值 I_{kG}'' 及 I_{kT}''

$$I_{kG}'' = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3} K_{G,S} Z_G} = \frac{1.1 \times 21 \text{ kV}}{\sqrt{3} \times 0.994 \times 0.2999 \Omega} = 44.74 \text{ kA}$$

由 GB/T 15544.1—2013 式(36):

$$K_{G,S} = \frac{c_{\max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{rG}} = \frac{1.1}{1 + 0.17 \times 0.626} = 0.994$$

以及 5.2.2 中的 Z_G

$$I_{kT}'' = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3} \left| Z_{TLV} + \frac{1}{t_r^2 Z_{Q\min}} \right|} = \frac{1.1 \times 21 \text{ kV}}{\sqrt{3} | 0.0057 + j0.285 | \Omega} = 46.79 \text{ kA}$$

其中: $Z_{Q\min} = (0.265 + j2.648) \Omega$ 见 5.2.1; $Z_{TLV} = (0.0037 + j0.265) \Omega$ 见 5.2.2, 并且考虑 $t_r = 240 \text{ kV}/21 \text{ kV}$ 。

决定发电机与单元变压器之间汇流条参数的电流为 I_{kT}'' 与 $I_{kM,AT}''$ (见 5.3.3) 的和:

$$\begin{aligned} I_{kT}'' + I_{kM,AT}'' &= (46.79 + 6.35) \text{ kA} = 53.14 \text{ kA} \\ |\underline{I}_{kT}'' + \underline{I}_{kM,AT}''| &= |1.76 - j53.08| \text{ kA} = 53.11 \text{ kA} \end{aligned}$$

5.3.2.2 峰值短路电流 i_{pG} 及 i_{pT}

$$i_{pG} = \kappa_G \sqrt{2} I_{kG}'' = 1.86 \times \sqrt{2} \times 44.74 \text{ kA} = 117.69 \text{ kA}$$

其中, $R/X = R_{Gf}/X_d'' = 0.05$, $\kappa_G = 1.86$ [GB/T 15544.1 的式(55)]

$$i_{pT} = \kappa_T \sqrt{2} I''_{kT} = 1.94 \times \sqrt{2} \times 46.79 \text{ kA} = 128.37 \text{ kA}$$

其中, $R/X = 0.0057 \text{ } \Omega / 0.285 \text{ } \Omega = 0.02$, $\kappa_T = 1.94$ 。

5.3.2.3 对称开断电流 I_{bG} 及 I_{bT}

$$I_{bG} = \mu I''_{kG} = 0.71 \times 44.74 \text{ kA} = 31.77 \text{ kA}$$

其中:

$$\mu = 0.62 + 0.72e^{-0.32 \times I''_{kG}/I_{rG}} = 0.71; t_{\min} = 0.1 \text{ s}$$

且

$$I''_{kG}/I_{rG} = 44.74 \text{ kA} / 6.87 \text{ kA} = 6.51$$

$I''_{bT} = I''_{kT}$ [远端短路, GB/T 15544.1—2013 的式(65)]。

5.3.2.4 稳态短路电流 I_{kGmax} 及 I_{kTmax}

$$I_{kGmax} = \lambda_{\max} I_{rG} = 1.75 \times 6.87 \text{ kA} = 12.0 \text{ kA}$$

其中, $\lambda_{\max} = 1.75$ 取自 GB/T 15544.1—2013 的图 18a, 且 $I''_{kG}/I_{rG} = 6.51$ 。

$I_{kTmax} = I''_{kT}$ [远端短路, GB/T 15544.1—2013 的式(84)]。

考虑由厂用变压器 AT 馈电的电动机影响(见 5.3.3)可得如下电流, 其用来决定发电机与单元变压器之间汇流条的参数:

$$\begin{aligned} i_{pT} + i_{pM,AT} &= (128.37 + 15.09) \text{ kA} = 143.46 \text{ kA} \\ I_{bT} + I_{bM,AT} &\approx I''_{kT} + I''_{kM,AT} = 53.14 \text{ kA} \text{ (结果偏于保守)}. \end{aligned}$$

5.3.3 短路位置 F3

5.3.3.1 短路电流初始值 I''_{krs1} 及 $I''_{kM,AT}$

图 13 所示的正序系统, 可用来计算 F3 处短路电流、 Z_{rs1} 的局部短路电流 I''_{krs1} [GB/T 15544.1—2013 的式(38)]以及厂用变压器高压侧局部短路电流 $I''_{kM,AT}$ 。

$$I''_{krs1} = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3}} \left[\frac{1}{K_{G,S} Z_G} + \frac{1}{K_{T,S} Z_{TLV} + \frac{1}{t_r^2} Z_{Qmin}} \right] = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3} Z_{rs1}}$$

其中, $K_{G,S} = 0.994$ (见 5.3.2); $Z_G = (0.0025 + j0.2999) \text{ } \Omega$ (见 5.2.2);

$Z_{LTV} = (0.0037 + j0.265) \text{ } \Omega$ (见 5.2.2);

以及

$$K_{T,S} = \frac{c_{\max}}{1 - x_T \sin \varphi_{rG}} = \frac{1.1}{1 - 0.15 \times 0.626} = 1.214 \text{ [GB/T 15544.1—2013 的式(39)]}$$

可得如下局部短路电流:

$$I''_{krs1} = \frac{1.1 \times 21 \text{ kV}}{\sqrt{3}} = \left[\frac{1}{(0.0025 + j0.298) \text{ } \Omega} + \frac{1}{(0.0045 + j0.322) \text{ } \Omega + (0.0020 + j0.020) \text{ } \Omega} \right]$$

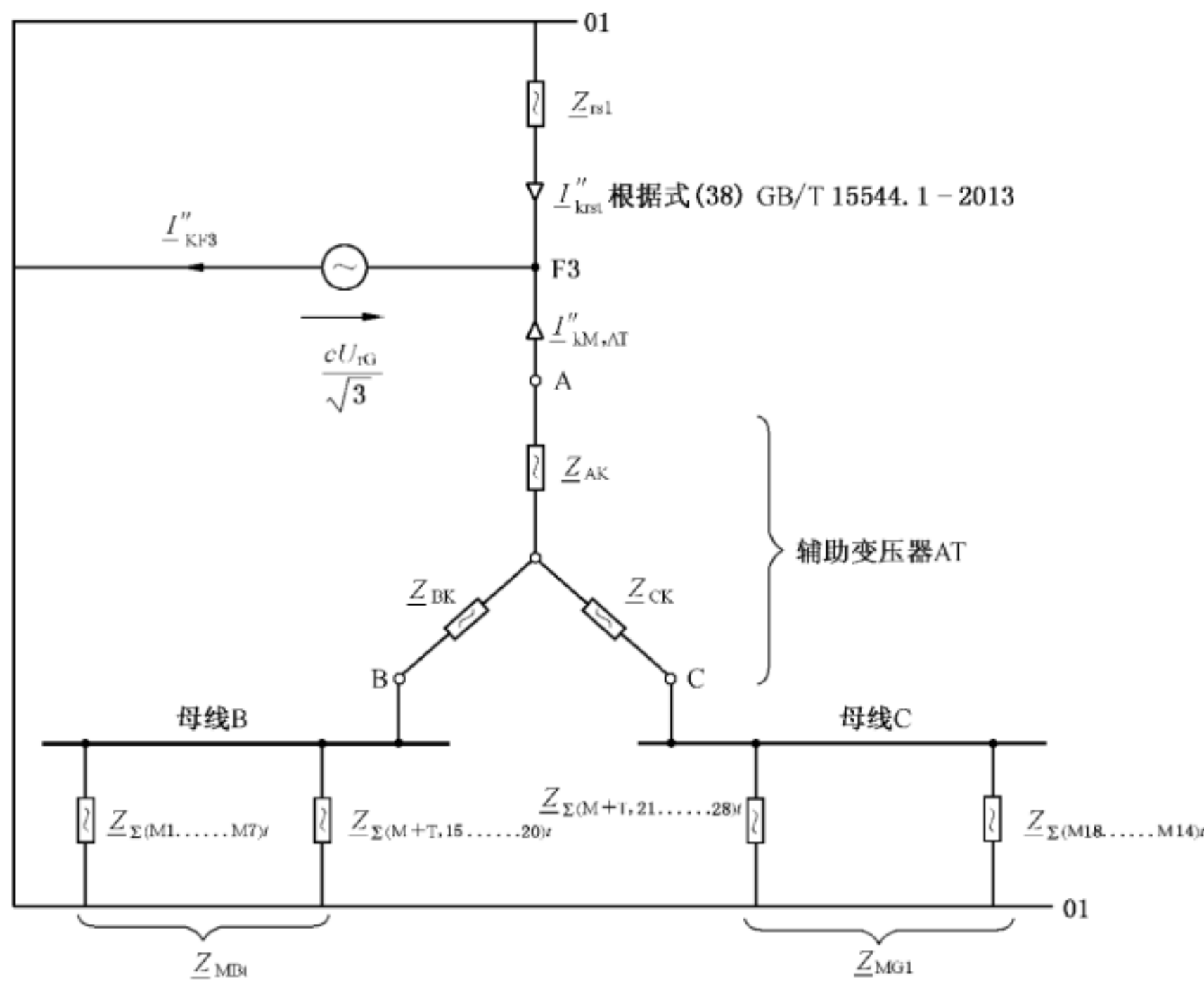


图 13 用于计算 F3 处短路电流的正序系统(见图 12)

下标为 t 的阻抗按照变比 $t_{rT} = 21 \text{ kV}/10.5 \text{ kV} = 2.0$, 折算到厂用变压器高压侧 A。

$$\underline{I''_{krs1}} = \frac{1.1 \times 21 \text{ kV}}{\sqrt{3} (0.0021 + j0.1592) \Omega} = (1.13 - j83.73) \text{ kA}; \quad I''_{krs1} = 83.74 \text{ kA}$$

$$\underline{Z}_{rs1} = (0.0021 + j0.1592) \Omega$$

将 5.3.2 中的 I''_{kG} 与 I''_{kT} 相加, 得:

$$I''_{kG} + I''_{kT} = 44.74 \text{ kA} + 46.79 \text{ kA} = 91.53 \text{ kA},$$

该结果比通过 GB/T 15544.1—2013 的式(38)得到的 I''_{krs1} 大 9.3%。

注: 叠加法或暂态计算的结果为何小于 I''_{kG} 与 I''_{kT} 简单相加的结果? 通过以上比较说明了其中一个原因。

图 13 中的局部短路电流 $I''_{km,AT}$ 可由表 8 及表 9 中的结果得到。图 13 中的各阻抗为:

$$\underline{Z}_{\Sigma(M1 \dots M7)t} = (0.089 + j0.777) \Omega \left(\frac{21 \text{ kV}}{10.5 \text{ kV}} \right)^2 = (0.356 + j3.108) \Omega$$

$$\underline{Z}_{\Sigma(M+T, 15 \dots 20)t} = (0.980 + j2.600) \Omega \left(\frac{21 \text{ kV}}{10.5 \text{ kV}} \right)^2 = (3.92 + j10.40) \Omega$$

$$\underline{Z}_{MBt} = (0.410 + j2.420) \Omega \text{ (见图 13)}$$

$$\underline{Z}_{\Sigma(M8 \dots M14)t} = (0.138 + j1.165) \Omega \left(\frac{21 \text{ kV}}{10.5 \text{ kV}} \right)^2 = (0.552 + j4.660) \Omega$$

$$\underline{Z}_{\Sigma(M+T, 21 \dots 26)t} = \underline{Z}_{\Sigma(M+T, 15 \dots 20)t} = (3.92 + j10.40) \Omega$$

$$\underline{Z}_{MCt} = (0.626 + j3.260) \Omega \text{ (见图 13)}$$

折算到 A 侧的阻抗 \underline{Z}_{AK} , \underline{Z}_{BK} 及 \underline{Z}_{CK} 已在 5.2.3 中予以计算。为计算 $I''_{km,AT}$ 还需计算阻抗 $\underline{Z}_{M,AT}$:

$$\underline{Z}_{M,AT} = \underline{Z}_{AK} = \frac{(\underline{Z}_{BK} + \underline{Z}_{MBt})(\underline{Z}_{CK} + \underline{Z}_{MCt})}{\underline{Z}_{BK} + \underline{Z}_{CK} + \underline{Z}_{MBt} + \underline{Z}_{MCt}} = (0.273 + j2.081) \Omega$$

$$\underline{I''_{km,AT}} = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3} \underline{Z}_{M,AT}} = \frac{1.1 \times 21 \text{ kV}}{\sqrt{3} (0.273 + j2.081) \Omega} = (0.827 - j6.300) \text{ kA}$$

$$I''_{km,AT} = 6.35 \text{ kA}$$

局部短路电流 ($I''_{km,AT} = 6.35 \text{ kA}$) 约为 $I''_{krs1} = 83.74 \text{ kA}$ 的 7.5%, 所以必须考虑其影响。

F3 处的总短路电流为(见图 13):

$$\underline{I}''_{\text{kF3}} = \underline{I}''_{\text{krst}} + \underline{I}''_{\text{kM,AT}} = (1.96 - j90.03) \text{ kA}; \quad I''_{\text{kF3}} = 90.05 \text{ kA}$$

注:在 F3 处出现短路情况下(图 13),母线 B 处的残余线电压约为 4.1 kV,约为短路之前的 40%。

5.3.3.2 峰值短路电流 i_{prsl} 及 $i_{\text{pM,AT}}$

可由 GB/T 15544.1—2013 的式(38)中的两部分初始短路电流计算峰值短路电流 i_{prsl} :

$$i_{\text{prsl}} = \kappa_{\text{G,S}} \sqrt{2} \frac{cU_{\text{rG}}}{\sqrt{3} K_{\text{G,S}} Z_{\text{G}}} + \kappa_{\text{T,S}} \sqrt{2} \frac{cU_{\text{rG}}}{\sqrt{3} |K_{\text{T,S}} Z_{\text{TLV}} + Z_{\text{Qminf}}|}$$

$$i_{\text{prsl}} = 1.86 \times \sqrt{2} \times 44.74 \text{ kA} + 1.94 \times \sqrt{2} \times 39.0 \text{ kA} = 224.7 \text{ kA}$$

其中:

$$\frac{R_{\text{Gf}}}{X_{\text{d}}''} = \frac{0.015 \text{ } \Omega}{0.299 \text{ } \Omega} = 0.05 \rightarrow \kappa_{\text{G,S}} = 1.86; \quad (Z_{\text{Gf}} \text{ 见 } 5.2.2)$$

$$\frac{\text{Re}\{K_{\text{T,S}} Z_{\text{TLV}} + Z_{\text{Qminf}}\}}{\text{Im}\{K_{\text{T,S}} Z_{\text{TLV}} + Z_{\text{Qminf}}\}} = \frac{0.006 \text{ } \Omega}{0.342 \text{ } \Omega} = 0.019 \rightarrow \kappa_{\text{rst}} = 1.94$$

注:使用 20 Hz 方法[GB/T 15544.1—2013 中 4.3.1.2(c)],应用 2.5.5 中的 Z_{Gf} 及根据 GB/T 15544.1—2013 式(38)得到的阻抗 $Z_{\text{rs1(c)}}$, 计算如下:

$$\frac{R}{X} = \frac{R_{\text{rs1(c)}}}{X_{\text{rs1(c)}}} \times \frac{f_{\text{c}}}{f} = \frac{0.005 \text{ } \Omega}{0.063 \text{ } \Omega} \times \frac{20 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} = 0.033 \text{ } \rightarrow \kappa_{\text{rs1}} = 1.91$$

$$i_{\text{prsl}} = \kappa_{\text{rs1}} \sqrt{2} I''_{\text{krst}} = 1.91 \times \sqrt{2} \times 83.73 \text{ kA} = 226.2 \text{ kA}$$

峰值短路电流 $i_{\text{pM,AT}}$ 可通过 GB/T 15544.1—2013 的 4.3.1.2 方法(b)计算,无需应用系数 1.15,因为中压电动机阻抗比率 $R/X < 0.3$ 。

$$i_{\text{pM,AT}} = \kappa_{\text{(b)}} \sqrt{2} I''_{\text{kM,AT}} = 1.68 \sqrt{2} \times 6.35 \text{ kA} = 15.09 \text{ kA}$$

其中:

$$\frac{R_{\text{M,AT}}}{X_{\text{M,AT}}} = \frac{0.273 \text{ } \Omega}{2.081 \text{ } \Omega} = 0.131 \rightarrow \kappa_{\text{(b)}} = 1.68$$

注:采用 20 Hz 方法计算会得到与该情况相同的结果(偏差小于 0.4%)。

5.3.3.3 开断短路电流及稳态短路电流

在短路位置 F3 处讨论开断电流 I_{b} 没有意义。稳态短路 I_{k} 主要由 $I_{\text{kT}} = I''_{\text{kT}}$ 决定:

$$I_{\text{kF3}} = I_{\text{kG}} + I_{\text{kT}} + I_{\text{kM,AT}} \approx \lambda_{\text{max}} I_{\text{rG}} + I''_{\text{kT}} = 12 \text{ kA} + 46.79 \text{ kA} = 58.8 \text{ kA}$$

I_{kG} 和 I''_{kT} 见 5.3.2, 另外 $I_{\text{kM,AT}} \rightarrow 0$ 。

5.3.4 短路位置 F4

F4 处(图 12)的初始三相短路电流可通过如图 14 所示的分流短路电流获得(GB/T 15544.1—2013 中的 4.2.1.2):

$$I''_{\text{kF4}} = \underline{I}''_{\text{kAT}} + \underline{I}''_{\text{k(1}\dots\text{7)}} + \underline{I}''_{\text{k(15}\dots\text{20)}}$$

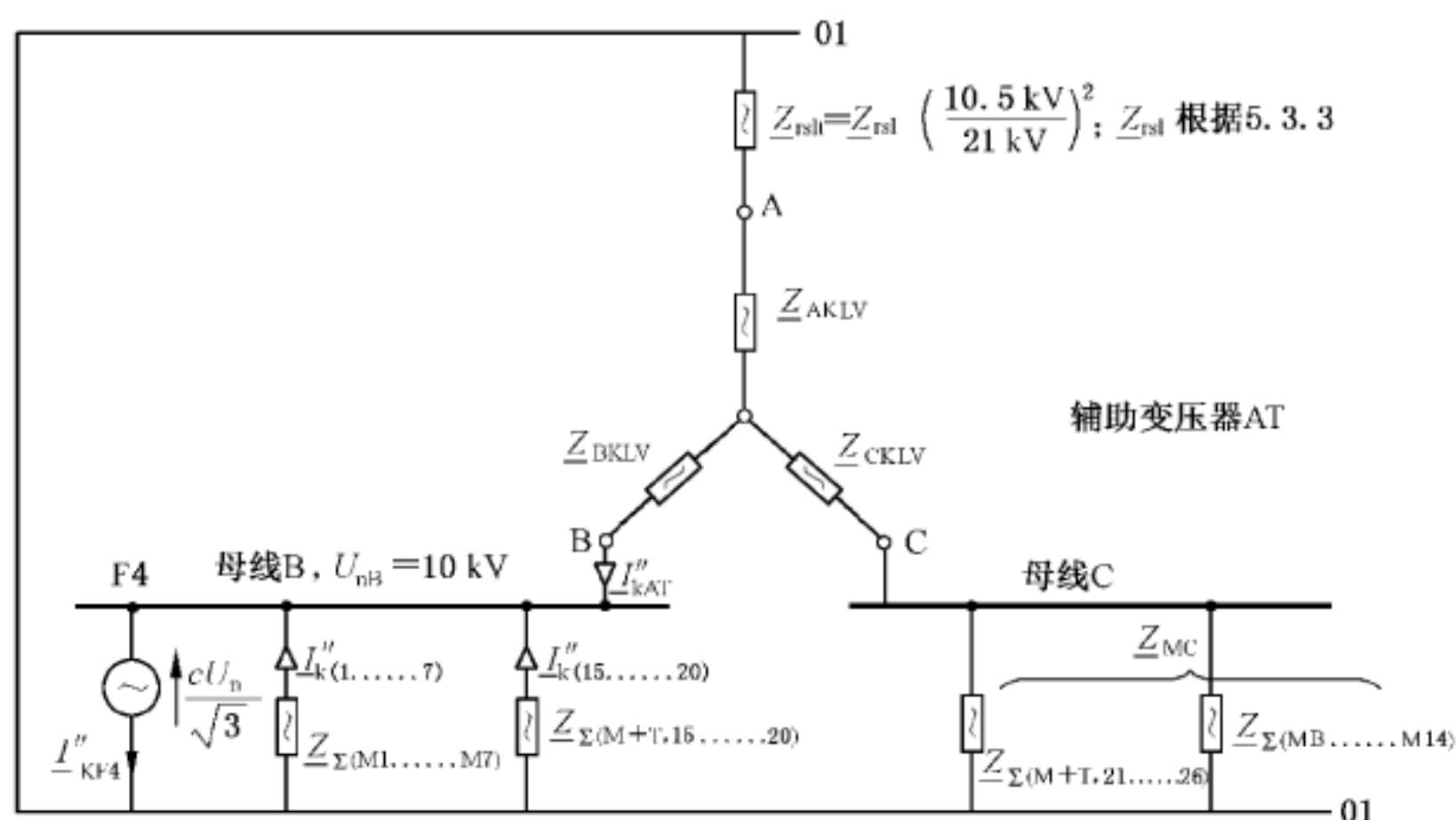


图 14 用于计算位置 F4 处短路电流的正序系统(参见图 12)

阻抗归算到站用变压器 AT 的二次侧 B。

$$\underline{Z}_{kAT} = \underline{Z}_{BKLTV} + \frac{(\underline{Z}_{AKLV} + \underline{Z}_{rsl})(\underline{Z}_{CKLTV} + \underline{Z}_{MC})}{\underline{Z}_{AKLV} + \underline{Z}_{rsl} + \underline{Z}_{CKLTV} + \underline{Z}_{MC}}$$

$$\underline{Z}_{kAT} = (0.009\ 8 + j0.277\ 6)\ \Omega + (0.001\ 7 + j0.067\ 3)\ \Omega = (0.011\ 5 + j0.344\ 9)\ \Omega$$

$$Z_{kAT} = 0.345\ 1\ \Omega$$

其中:

$$\underline{Z}_{AKLV} = \underline{Z}_{AK} / t_r^2; \quad \underline{Z}_{BKLTV} = \underline{Z}_{CKLTV} = \underline{Z}_{BK} / t_r^2$$

\underline{Z}_{AK} 、 \underline{Z}_{BK} 见 5.2.3 的相关内容。

$$\underline{Z}_{MC} = \underline{Z}_{MCt} / t_r^2$$

\underline{Z}_{MCt} 见 5.3.3 的相关内容。

\underline{Z}_{rsl} 取自 5.3.3(见图 13)。

$$\underline{I}''_{kAT} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\underline{Z}_{kAT}} = \frac{1.1 \times 10\ \text{kV}}{\sqrt{3}(0.011\ 5 + j0.344\ 9)\ \Omega} = (0.613 - j18.393)\ \text{kA}$$

根据表 8 及表 9:

$$\underline{I}''_{k(1...7)} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\underline{Z}_{\Sigma(M1...M7)}} = \frac{1.1 \times 10\ \text{kV}}{\sqrt{3}(0.089 + j0.777)\ \Omega} = (0.924 - j8.068)\ \text{kA}$$

$$\underline{I}''_{k(15...20)} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\underline{Z}_{\Sigma(M+T,15...20)}} = \frac{1.1 \times 10\ \text{kV}}{\sqrt{3}(0.980 + j2.600)\ \Omega} = (0.806 - j2.139)\ \text{kA}$$

$$I''_{kF4} = (2.343 - j28.60)\ \text{kA}; \quad I''_{kF4} = 28.70\ \text{kA}$$

注:忽略由母线 C 馈电的电动机对 F4 处短路电流的影响会得到:

$$\underline{Z}_{kAT} = \underline{Z}_{BKLTV} + \underline{Z}_{AKLV} + \underline{Z}_{rsl} = (0.011 + j0.349)\ \Omega$$

$$\underline{I}''_{kAT} = (0.573 - j18.179)\ \text{kA}$$

$$\underline{I}''_{kF4} = (2.303 - j28.386)\ \text{kA}; \quad I''_{kF4} = 28.48\ \text{kA}$$

由母线 C 馈电的电机影响非常小,小于电流 I''_{kF4} 的 1%。在该情况下可忽略不计。

因为与 \underline{I}''_{kAT} 及中压异步电动机相关的分支电路中的 $R/X < 0.3$, 可通过 GB/T 15544.1—2013 中 4.3.1.2 方法(b)得到短路电流峰值(没有系数 1.15)。

$$i_{pF4} = \kappa_{AT} \sqrt{2} I''_{kAT} + \kappa_{(1...7)} \sqrt{2} I''_{k(1...7)} + \kappa_{(15...20)} \sqrt{2} I''_{k(15...20)}$$

$$i_{pF4} = 1.91 \times \sqrt{2} \times 18.40\ \text{kA} + 1.72 \times \sqrt{2} \times 8.12\ \text{kA} + 1.34 \times \sqrt{2} \times 2.29\ \text{kA} = 73.79\ \text{kA}$$

如果分流短路电流 \underline{I}''_{kAT} 转移到站用变压器高压侧,可以看到 $I''_{kAT1} = 9.2\ \text{kA}$ 小于 $2I_{rG} = 2 \times 6.87\ \text{kA}$, 因此 F4 处的短路为远离发电机短路情况。

$$I_{bF4} = I_{bAT} + I_{b(1\cdots 7)} + I_{b(15\cdots 20)} = 22.8 \text{ kA}$$

其中：

$$I_{bAT} = I''_{kAT} = 18.40 \text{ kA}$$

$$I_{b(1\cdots 7)} = \sum_{i=1}^7 \mu_i q_i I''_{kMi} = 4.04 \text{ kA (参见表 9)}$$

$$I_{b(15\cdots 20)} = \mu \times q \times I''_{k(15\cdots 20)} = 0.74 \times 0.21 \times 2.29 \text{ kA} = 0.36 \text{ kA}$$

(由 $t_{\min} = 0.1 \text{ s}$ 和 $I''_{kM}/I_{rM} = 5.5$ 得到 $\mu = 0.74$ ；由 $t_{\min} = 0.1 \text{ s}$ 和 $P_{rM}/p = 0.05 \text{ MW}$ 得到 $q = 0.21$ ；由表 8 得到 $I''_{k(15\cdots 20)} = 2.29 \text{ kA}$)

5.3.5 短路位置 F5

短路位置 F5 处的初始对称短路电流可通过图 15 中的正序系统进行计算。

$$I''_{kF5} = I''_{kT20} + I''_{kM20}$$

为计算分流短路电流 I''_{kT20} ，会用到下列阻抗(见图 15)：

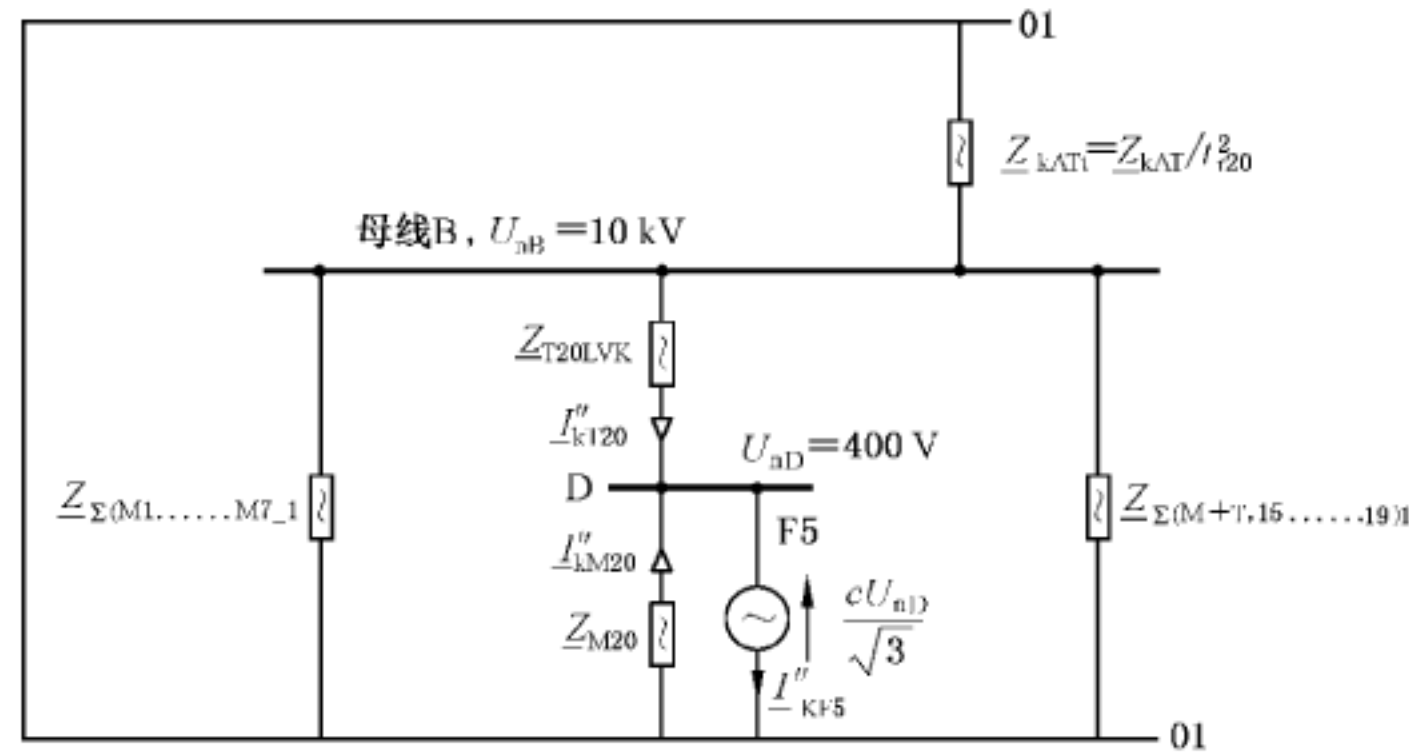


图 15 用于计算位置 F5 处短路电流的正序系统(参见图 12)。

阻抗归算到变压器 T20 ($t_{r20} = 10 \text{ kV}/0.42 \text{ kV}$) 的低压侧

$$Z_{kATt} = Z_{kAT} \frac{1}{t_{r20}^2} = (0.0115 + j0.3449) \Omega \left(\frac{0.42 \text{ kV}}{10 \text{ kV}} \right)^2 = (0.0203 + j0.6084) \text{ m}\Omega$$

$$Z_{\Sigma(M1\cdots M7)t} = Z_{\Sigma(M1\cdots M7)} = \frac{1}{t_{r20}^2} = (0.089 + j0.777) \Omega \left(\frac{0.42 \text{ kV}}{10 \text{ kV}} \right)^2 = (0.157 + j1.3706) \text{ m}\Omega$$

$$Z_{\Sigma(M+T,15\cdots 19)t} = Z_{\Sigma(M+T,15\cdots 19)} = \frac{1}{t_{r20}^2} = (1.183 + j3.114) \Omega \left(\frac{0.42 \text{ kV}}{10 \text{ kV}} \right)^2 = (2.087 + j5.493) \text{ m}\Omega$$

5.3.4 中计算了阻抗 Z_{kAT} 。表 9 及表 8 中分别列出了阻抗 $Z_{\Sigma(M,1\cdots 7)}$ 及 $Z_{\Sigma(M+T,15\cdots 19)}$ 。

5.2.4 给出了低压变压器 T20 低压侧的阻抗：

$$Z_{T20LVK} = (1.096 + j6.277) \text{ m}\Omega$$

其中：

$$K_T = 0.963 (c_{\max} = 1.05)$$

则有：

$$I''_{kT20} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_{kT20}} = \frac{1.05 \times 400 \text{ V}}{\sqrt{3} (1.127 + j6.671) \text{ m}\Omega} = (5.97 - j35.33) \text{ kA}$$

$$I''_{kT20} = 35.83 \text{ kA}$$

可根据与三个并联电阻 Z_{kATt} 、 $Z_{\Sigma(M,1\cdots 7)t}$ 及 $Z_{\Sigma(M+T,15\cdots 19)t}$ 串联的 Z_{T20LVK} 得到阻抗 Z_{kT20} 。表 8 中给出了阻抗 Z_{M20} 。

$$I''_{kM20} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_{M20}} = \frac{1.05 \times 400 \text{ V}}{\sqrt{3} (8.9 + j21.2) \text{ m}\Omega} = (4.07 - j9.72) \text{ kA}; \quad I''_{kM20} = 10.54 \text{ kA}$$

$$\underline{I''_{kF5}} = \underline{I''_{kT20}} + \underline{I''_{kM20}} = (10.04 - j45.05) \text{ kA};$$

根据下列等式得到短路电流峰值:

$$i_{pF5} = i_{pT20} + i_{pM20} = \kappa_{T20} \sqrt{2} I''_{kT20} + \kappa_{M20} \sqrt{2} I''_{kM20}$$

其中,由 $R_{T20LVK}/X_{T20LVK}=0.175$ 得到 $\kappa_{T20}=1.60$,因为变压器的阻抗是 Z_{kT20} 的主要部分(超过 90%),对于发电机组的等效电机 $\kappa_{M20}=1.3$ (GB/T 15544.1—2013 中的 3.8.2)。

$$i_{pF5} = 1.60\sqrt{2} \times 35.83 \text{ kA} + 1.30\sqrt{2} \times 10.54 \text{ kA} = 100.5 \text{ kA}$$

从图 15 中阻抗的配置及数值,可看到母线 B 上 F5 处短路期间的残余电压约为短路前电压的 95%。这样以来电机 M1……M7 及 M15……M19 将不会影响到 F5 处的开断电流[在各种情况下根据 GB/T 15544.1—2013 中的式(75)有 $\mu_{Mj}=1$]。

$$I_{bF5} = I''_{kT20M} + \mu_{M20} q_{M20} I''_{kM20}$$

其中, I''_{kT20M} 为分流短路电流,不受 M1……M7 及 M15……M19 的影响。

$$I_{bF5} = 34.77 \text{ kA} + 0.902 \times 0.67 \times 10.54 \text{ kA} = 41.1 \text{ kA}$$

在 $t_{min}=0.02 \text{ s}$ 时采用 $\mu_{M20}=0.84+0.26e^{-0.26 \times 5.5}$ 及 $q_{M20}=0.67$,等效电机 M20 采用 $p_{rm}/p=0.05 \text{ MW}$ (见 GB/T 15544.1—2013 的 3.8.2)。

稳态短路电流:

$$I_{kF5} = I_{kT20} + I_{kM20} = I''_{kT20M} = 34.77 \text{ kA}$$

因为 $I_{kM20}=0$ (参见 GB/T 15544.1—2013 中的表 3)。

6 参照 GB/T 15544.1 使用数字程序进行短路电流计算的测试网络

6.1 概述

本章将给出一个具有电气设备数据的测试网络,以及根据 GB/T 15544.1 计算出的短路电流结果。便于数字程序设计者和用户按此结果进行校核。

用户应得到表 12 及表 13 中给出的结果,这样才可认为算出结果与给出结果之间非常近似。而这只是程序正确的必要非充分条件,因为即使完成了测试,程序内的其他进程也还可能产生错误。如果存在偏差,则偏差应在 $\pm 0.02\%$ 范围内。

表 11 列出了图 16 所示的测试网络中各母线之间的正序和零序阻抗(归算到 110 kV 侧)。克服了对电气设备铭牌数据及补充数据进行解释的困难(这些数据与 GB/T 15544.1 中的公式一致)。

根据 GB/T 15544.1—2013 的表 1 采用 $c=c_{max}=1.1$ 计算母线①~⑧处的最大三相短路电流,以及母线②~⑤处的最大线路对地短路电流。在任何情况下,短路阻抗均与短路位置处的电压水平相关。

如果给出了连接点处的网络馈线的 R_Q/X_Q [见 GB/T 15544.1—2013 的式(5)],则其复阻抗应采用下列等式计算:

$$X_Q = \frac{1}{\sqrt{1 + (R_Q/X_Q)^2}} Z_Q$$

因为在特殊情况 $R_Q/X_Q=0,1$ 下才有 $X_Q \approx 0.995 Z_Q$ 成立(GB/T 15544.1—2013 中的 3.2)。如果给出了比率 R_M/X_M ,对异步电动机采用类似的处理(GB/T 15544.1—2013 中 3.8.1)。

接地故障系数小于 1.4,因此不考虑线路电容(GB/T 15544.1—2013 中的 2.3.2)。

测试网络的负载情况未知,根据 GB/T 15544.1—2013 中的式(12a)计算 K_T 。

为计算发电厂设备 S1 的阻抗校正因子 K_{S1} ,发电机只能在过励磁区域运行(IEC 60909:1-1991 的图 7)。

三绕组变压器的正序或负序电抗为负值时,不应把它们理解为电容,尤其是在采用等效频率方法计算的情况下[GB/T 15544.1—2013 中的 4.3.1.2(c)]。三绕组变压器的绕组等值电抗(见 GB/T 15544.1—2013 的图 7b)为与其他两个绕组匹配可能会出现负值(见 IEC 60909-2 的表 3B,如第 6 项)。

在网状网络中使用 20 Hz 或 24 Hz 方法得到的系数 κ 时,给出的表格中应使用阻抗校正因子 K_G ,

K_S 及 K_T (GB/T 15544.1)。

6.2 380 kV/110 kV/30 kV/10 kV 的高压测试网络

6.2.1 网络拓扑及数据

如图 16 所示为 50 Hz 三相交流测试网络的拓扑结构,其中有母线 8 条(编号为①~⑧)和其他电气设备。在三相短路时母线①~⑧ 为短路点,在线路对地短路时母线②~⑤为短路点。在网络的 110 kV 系统有三个接地点:变压器 T4、发电厂设备 S1(G1+T1)及馈线 Q2。

电气设备数据:

网络馈线:

Q1: $U_{nQ} = 380 \text{ kV}$; $I''_{kQmax} = 38 \text{ kA}$ ($c_{max} = 1.1$); $R_Q/X_Q = 0.1$; $X_{(0)Q}/X_Q = 3$; $R_{(0)Q}/X_{(0)Q} = 0.15$

Q2: $U_{nQ} = 110 \text{ kV}$; $I''_{kQmax} = 16 \text{ kA}$ ($c_{max} = 1.1$); $R_Q/X_Q = 0.1$; $X_{(0)Q}/X_Q = 3.3$; $R_{(0)Q}/X_{(0)Q} = 0.2$

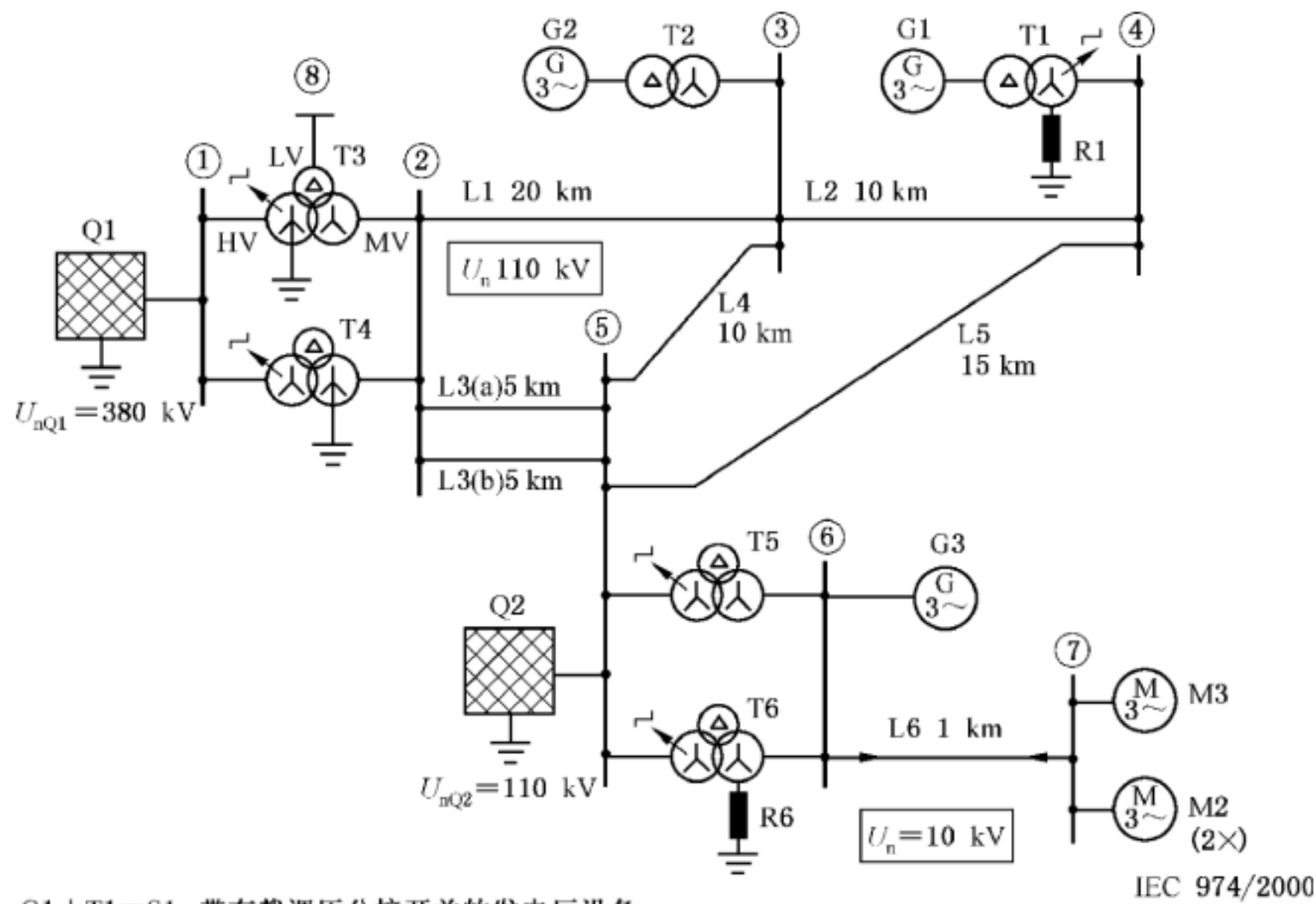
发电厂设备:

S1: $U_{rG} = 21 \text{ kV}$; $S_{rG} = 150 \text{ MVA}$; $x''_d = 0.14 \text{ p.u.}$; $x_{dsat} = 1.8 \text{ p.u.}$; $\cos\varphi_{rG} = 0.85$; $R_G = 0.002 \Omega$

仅在过励磁区域运行

$U_{rTHV}/U_{rTLV} = 115 \text{ kV}/21 \text{ kV}$; $S_{rT} = 150 \text{ MVA}$; $u_{kr} = 16\%$; $u_{Rr} = 0.5\%$; Ynd5

$p_T = \pm 12\%$; $X_{(0)T}/X_T = 0.95$; $R_{(0)T}/R_T = 1.0$



G1+T1=S1: 带有载调压分接开关的发电厂设备
G2+T2=S2: 带有载调压分接开关的发电厂设备
具有谐振接地R6的10 kV网络: 消弧线圈
母线①~⑧ 和短路位置

图 16 380 kV/110 kV /30 kV/10 kV 高压交流测试网络

S2:

$U_{rG} = 10.5 \text{ kV}$; $S_{rG} = 100 \text{ MVA}$; $p_G = \pm 7.5\%$; $x''_d = 0.16 \text{ p.u.}$;

$x_{dsat} = 2.0 \text{ p.u.}$; $\cos\varphi_{rG} = 0.9$; $R_G = 0.005 \Omega$

$U_{rTHV}/U_{rTLV} = 120 \text{ kV}/10.5 \text{ kV}$; $S_{rT} = 100 \text{ MVA}$; $u_{kr} = 12\%$; $u_{Rr} = 0.5\%$; YNd5

无分接开关或空载抽头。

$X_{(0)T}/X_T = 1.0$; $R_{(0)T}/R_T = 1.0$

发电机:

G3: $U_{rG} = 10.5 \text{ kV}$; $S_{rG} = 10 \text{ MVA}$; $p_G = \pm 5\%$ (为便于计算,假定 $U_G = U_{rG}$);

$$x_d''=0.1\text{p.u.}; \quad x_{\text{dsat}}=1.8\text{p.u.}; \quad \cos\varphi_{\text{rG}}=0.8; \quad R_{\text{G}}=0.018 \Omega$$

网络变压器:

T3=T4: 三绕组网络变压器 YNyn,d5,有载调压分接开关位于高压侧, $p_{\text{T}}=\pm 16\%$ 。
星点接地:T3 位于高压侧,T4 位于中压侧。

$$\begin{aligned} U_{\text{rTHV}} &= 400 \text{ kV}; & U_{\text{rTMV}} &= 120 \text{ kV}; & U_{\text{rTLV}} &= 30 \text{ kV}; \\ S_{\text{rTHV}} &= 350 \text{ MVA}; & S_{\text{rTMV}} &= 350 \text{ MVA}; & S_{\text{rTLV}} &= 50 \text{ MVA}; \\ u_{\text{krHVMV}} &= 21\%; & u_{\text{krHVLV}} &= 10\%; & u_{\text{krMVLV}} &= 7\%; \\ u_{\text{RrHVMV}} &= 0.26\%; & u_{\text{RrHVLV}} &= 0.16\%; & u_{\text{RrMVLV}} &= 0.16\%; \\ X_{(0)\text{TMV}}/X_{\text{TMVHV}} &= 2.1; & R_{(0)\text{TMV}}/R_{\text{TMVHV}} &= 1.0(\text{见 } 2.2). \end{aligned}$$

T5=T6: 三绕组网络变压器 YNyn,d5,此处视为双绕组变压器,即 $u_{\text{kr}}=u_{\text{krHVMV}}$ (见图 16 及 2.2)

$$U_{\text{rTHV}}/U_{\text{rTMV}}=115 \text{ kV}/10.5 \text{ kV}; \quad S_{\text{rT}}=31.5\text{MVA}; \quad u_{\text{kr}}=12\%; \quad u_{\text{Rr}}=0.5\%$$

异步电机:

M1: $U_{\text{rM}}=10 \text{ kV}; P_{\text{rM}}=5 \text{ MW}; \cos\varphi_{\text{rM}}=0.88; \eta_{\text{rM}}=97.5\%; I_{\text{LR}}/I_{\text{rM}}=5; p=1(1 \text{ 对极})$

M2: 两个并联电机,每个电机有 $P_{\text{rM}}=2 \text{ MW}$;

$$U_{\text{rM}}=10 \text{ kV}; P_{\text{rM}}=2 \text{ MW}; \cos\varphi_{\text{rM}}=0.89; \eta_{\text{rM}}=96.8\%; I_{\text{LR}}/I_{\text{rM}}=5.2; p=2$$

电抗器:

R1: $X_{\text{R1}}=22 \Omega; R_{\text{R1}} \ll X_{\text{R1}}$ (短路限制电抗器);

R6: 用于中性点谐振接地的 10 kV 网络的消弧线圈

最短延时:

$$t_{\text{min}}=0.1 \text{ s}, \text{用于计算 } \mu \text{ 及 } q。$$

架空线及电缆的参数如表 10 所示。

表 10 架空线及电缆

No.	l	$\underline{Z}'_{(1)} = \underline{Z}'$	$\underline{Z}'_{(0)}$	备注
	km	Ω/km	Ω/km	
L1	20	$0.12 + j0.39$	$0.32 + j1.26$	单回线路数据
L2	10	$0.12 + j0.39$	$0.32 + j1.26$	
L3(a)	5	$0.12 + j0.39$	$0.52 + j1.86$	
L3(b)	5	$0.12 + j0.39$	$0.52 + j1.86$	
L4	10	$0.096 + j0.388$	$0.22 + j1.10$	
L5	15	$0.12 + j0.386$	$0.22 + j1.10$	
L6	1	$0.082 + j0.086$	—	10 kV 电缆

6.2.2 电气设备的短路阻抗

表 11 列出了正序及零序系统中电气设备的短路阻抗,这些阻抗根据 GB/T 15544.1 采用 6.2.1 给出的数据计算获得,包括阻抗校正因子 $K_{\text{G}}, K_{\text{S}}$ 和 K_{T} 。下标 t 表示归算到 110 kV 侧的数值(见图 16)。三绕组变压器 T3=T4 的阻抗校正因子如 2.2 中范例所示。

表 11 电气设备(见图 16)归算到 110 kV 侧阻抗 $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}$

元件	正序 \underline{Z}	零序 $\underline{Z}_{(0)}$	备注
Q1	$\underline{Z}_{Q1} = 0.631\ 933 + j6.319\ 335$	—	
Q1t	$\underline{Z}_{Q1t} = 0.056\ 874 + j0.568\ 740$	—	
Q2	$\underline{Z}_{Q2} = 0.434\ 454 + j4.344\ 543$	$\underline{Z}_{(0)Q2} = 2.867\ 398 + j14.336\ 991$	
T3=T4	$\underline{Z}_{T3AMV} = 0.045\ 714 + j8.096\ 989^a$ $\underline{Z}_{T3BMV} = 0.053\ 563 + j0.079\ 062^a$ $\underline{Z}_{T3CMV} = 0.408\ 568 + j20.292\ 035^a$	$\underline{Z}_{(0)T4MV} = 0.107\ 281 + j18.195\ 035^c$	$K_{TAB} = 0.928\ 072^b$ $K_{TAC} = 0.985\ 856^b$ $K_{TBC} = 1.002\ 890^b$
T5=T6	$\underline{Z}_{T5MV} = 2.046\ 454 + j49.072\ 241^a$	—	$K_T = 0.974\ 870$
S1	$\underline{Z}_{S1} = 0.498\ 795 + j26.336\ 676$	$\underline{Z}_{(0)T1} = 0.439\ 059 + j13.340\ 874^d$	$K_S = 0.995\ 975$
S2	$\underline{Z}_{S2} = 1.203\ 944 + j35.340\ 713$	—	$K_S = 0.876\ 832$
G3	$\underline{Z}_{G3} = 0.017\ 790 + j1.089\ 623$	—	$K_G = 0.988\ 320$
G3t	$\underline{Z}_{G3t} = 2.133\ 964 + j130.705\ 301$	—	
M1	$\underline{Z}_{M1} = 0.341\ 497 + j3.414\ 968$	—	
M1t	$\underline{Z}_{M1t} = 40.964\ 124 + j409.641\ 243^e$	—	
M2(2)	$\underline{Z}_{M2} = 0.412\ 137 + j4.121\ 368$	—	两台并列电动机
M2t(2)	$\underline{Z}_{M2t} = 49.437\ 719 + j494.377\ 190^e$	—	2 MW
L1	$\underline{Z}_{L1} = 2.4 + j7.8$	$\underline{Z}_{(0)L1} = 6.4 + j25.2$	双回线
L2	$\underline{Z}_{L2} = 1.2 + j3.9$	$\underline{Z}_{(0)L2} = 3.2 + j12.6$	
L3(DL)	$\underline{Z}_{L3} = 0.3 + j0.975$	$\underline{Z}_{(0)L3} = 1.3 + j4.65$	
L4	$\underline{Z}_{L4} = 0.96 + j3.88$	$\underline{Z}_{(0)L4} = 2.2 + j11.0$	
L5	$\underline{Z}_{L5} = 1.8 + j5.79$	$\underline{Z}_{(0)L5} = 3.3 + j16.5$	
L6	$\underline{Z}_{L6} = 0.082 + j0.086$	—	电缆
L6t	$\underline{Z}_{L6t} = 9.836\ 281 + j10.316\ 100$	—	
R1	—	$\underline{Z}_{(0)R1} = 0.0 + j66.0$	$\underline{Z}_{(0)R1} = 3\underline{Z}_{R1}$
G3	$\underline{Z}_{G3} = 0.017\ 790 + j1.089\ 623$	—	$K_G = 0.988\ 320$
G3t	$\underline{Z}_{G3t} = 2.133\ 964 + j130.705\ 301$	—	

注:结果表示到小数逗号后的六位数,最后一位进行了四舍五入。

^a 归算到中压侧(标号 MV)的等效阻抗及经过正的数值(GB/T 15544.1—2013 的图 7)。

^b 校正因子计算,见 2.2(GB/T 15544.1—2013 中的 3.3.3)。

^c 采用 K_{TBC} 加以校正,见 2.2(GB/T 15544.1—2013 中的 3.3.3)。

^d 采用 $K_S = 0.995\ 975$ 加以校正。

^e \underline{Z}_{M1t} 与 \underline{Z}_{M2t} 并联:(22.401 898+j224.018 979) Ω 。

6.3 结果

表 12 及表 13 中根据 GB/T 15544.1 计算出的短路电流结果是以 2.2 给出的数据为基础。这些结果给出了小数点后的四位数, I_b 及 I_k 在小数点后只有三位数的情况除外。最后的数字加以了四舍五入。

在使用该测试网络对数字程序加以测试时,其结果应与表 12 及表 13 中给出的结果相同;对于 i_p 取决于获得系数 κ 的方法。如果有所偏差,该偏差应如 6.1 所述在 $\pm 0.02\%$ 范围以内。

6.3.1 三相短路电流

表 12 列出了在母线①~⑧(短路位置 F)出现三相短路情况下的短路电流 I''_k, i_p, I_b 及 I_k 。

表 12 结果 I''_{k1} , i_p , I_b 及 I_k

F	U_n kV	I''_{k1} ^a kA	$i_p(50)$ ^b kA	$i_p(20)$ ^c kA	I_b ^d kA	I_k ^e kA
①	380	40.644 7	100.576 6	100.567 7	40.645 ^f	40.635
②	110	31.783 1	80.824 9	80.607 9	31.570	31.663
③	110	19.673 0	45.824 9	45.811 1	19.388	19.623
④	110	16.227 7	36.804 1	36.842 7	16.017	16.196
⑤	110	33.189 4	83.626 6	83.403 3	32.795	32.997
⑥	10	37.562 9	99.191 0	98.143 4	34.028	34.356
⑦	10	25.589 5	51.386 4	51.689 9	23.212	22.276
⑧	30	13.577 8	36.920 1	36.922 7	13.578 ^g	13.573

^a $c = c_{max} = 1.1$ 。
^b 没有系数 1.15 的 $\kappa = f(R_k/X_k)$ [见 GB/T 15544.1—2013 的 4.3.1.2b) 及表 11], 这两种情况应考虑到电缆 L6 与异步电动机串联组成一个公共支路, 架空线 $R/X \approx 0.3$ 。而在位置 7 出现短路的情况下 L6 为支路, 因此必须使用系数 1.15。将 $i_{p(50)}$ 乘以 1.15。
^c 通过 20 Hz 方法计算 κ (GB/T 15544.1—2013 中的 4.3.1.2)。
^d 通过 GB/T 15544.1 中的式 (75) 及 $t_{min} = 0.1$ s 计算 I_b 。
^e $I_k = I''_{kM}$ (GB/T 15544.1—2013 中的 4.6.3)。
^f 远离发电机及远离电动机短路 $I_b = I''_k$ (GB/T 15544.1—2013 中的 4.5.1)。
^g 远离电动机短路 $\mu_{Mj} = 1 * 1 - \mu_{Mj} q_{Mj} = 0$ (GB/T 15544.1—2013 中的 4.5.2.3)。

6.3.2 线路对地短路电流

表 13 列出了母线②~⑤在线路对地短路情况下的短路电流 I''_{k1} 及 i_{p1} 。由短路位置 F 处正序阻抗 (通过 20 Hz 方法) 得到的 $\kappa_{(1)}$ 来计算经过 $\kappa_{(1)}$ 校正的峰值短路电流 i_p 。利用短路位置处的 $\kappa_{(012)} = [R_{(0)} + R_{(1)} + R_{(2)}] / [X_{(0)} + X_{(1)} + X_{(2)}]$ (通过 20 Hz 方法) 得到经过 $\kappa_{(012)}$ 校正的峰值短路电流 i_p 。

表 13 I''_{k1} 及 i_{p1} 的结果

F	U_n kV	I''_{k1} ^a kA	i_p with $\kappa_{(1)}$ ^b kA	i_p with $\kappa_{(012)}$ ^c kA	$X_{(0)} / X_{(01)}$ ^d —
②	110	15.972 2	40.508 6	39.964 1	3.961
③	110	10.410 6	24.242 4	24.263 5	3.666
④	110	9.049 8	20.546 3	21.041 5	3.394
⑤	110	17.045 2	42.833 7	41.430 3	3.823

^a $I''_{k1} = I_{b1} = I_{k1}$ (见 GB/T 15544.1—2013 中的 4.5.2.4 和 4.6.4), $c = c_{max} = 1.1$ 。
^b 通过找到短路位置处正序系统阻抗的 20 Hz 方法来得到具有 $\kappa_{(1)}$ 的 $i_{p1} = \kappa_{(1)} \sqrt{2} I''_{k1}$ [见 GB/T 15544.1—2013 中的 4.3.1.2c) 及方法 (c)]。
^c 通过 20 Hz 方法计算 $\kappa_{(012)}$, 应考虑到短路位置处的串联零序、正序及负序阻抗。
^d 仅作为了解: $X_{(0)} / X_{(1)} = 3.4 \dots 4.0 \rightarrow I''_{k1} / I''_k = 0.56 \dots 0.5$, 接地故障系数 ≤ 1.4 。



GB/T 15544.5-2017

版权专有 侵权必究

*

书号: 155066 · 1-59237