

中华人民共和国国家标准

GB/T 15544.1—2013/IEC 60909-0:2001
代替 GB/T 15544—1995

三相交流系统短路电流计算 第 1 部分：电流计算

Short-circuit current calculation in three-phase a.c.systems—
Part 1: Calculation of currents

(IEC 60909-0: 2001, Short-circuit current calculation
in three-phase a.c.systems—
Part 0: Calculation of currents, IDT)

2013-12-17 发布

2014-08-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会 发布

订单号: 0100200901067978 防伪编号: 2020-0901-1201-5240-4877 购买单位: 西安英诺威电气有限公司

西安英诺威电气有限公司 专用

目 次

前言	III
引言	IV
1 概述	1
1.1 范围	1
1.2 规范性引用文件	1
1.3 术语和定义	2
1.4 符号、上角标与下角标	5
2 短路电流特性:计算方法	8
2.1 概述	8
2.2 计算假设	9
2.3 计算方法	10
2.4 最大短路电流	13
2.5 最小短路电流	13
3 电气设备的短路阻抗	13
3.1 概述	13
3.2 馈电网络阻抗	13
3.3 变压器的阻抗	14
3.4 架空线和电缆的阻抗	17
3.5 限流电抗器的阻抗	17
3.6 同步电机的阻抗	18
3.7 发电机变压器组的阻抗	19
3.8 异步电动机	20
3.9 静止变频器驱动电动机	22
3.10 电容与非旋转负载	23
4 短路电流计算	23
4.1 概述	23
4.2 对称短路电流初始值 I''_k	24
4.3 短路电流峰值 i_p	29
4.4 短路电流非周期分量 $i_{d.c.}$	31
4.5 对称开断电流 I_b	32
4.6 稳态短路电流 I_k	35
4.7 异步电动机机端短路	38
4.8 短路电流的热效应	39
附录 A (规范性附录) 系数 m 和 n 的计算公式	41

订单号: 0100200901067978 防伪编号: 2020-0901-1201-5240-4877 购买单位: 西安英诺威电气有限公司

西安英诺威电气有限公司 专用

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地面的电流；
- 第 5 部分：算例。

本部分为 GB/T 15544 的第 1 部分。

本部分按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本部分代替 GB/T 15544—1995《三相交流系统短路电流计算》，与 GB/T 15544—1995 相比，除编辑性修改外主要技术变化如下：

- 删除了适应范围中“标称电压 380 V~220 kV”的限制(见 1.1,1995 年版的 1.2)；
- 删除了术语和定义中的“不对称开断电流”(见 1995 年版的 3.9.2)；
- 增加了术语和定义中的“热等效短路电流”(见 1.3.23)；
- 修改了电压系数的推荐值(见表 1,1995 年版的表 1)；
- 修改了发电机变压器组的阻抗修正系数计算方法(见 3.7,1995 年版的 10.3.2.7 和 10.3.2.8)；
- 增加了网络变压器的阻抗修正系数(见 3.3.3)；
- 修改了发电机阻抗中的电阻分量的计算方法(见 3.6.1,1995 年版的 10.3.2.6)；
- 删除了计算 R/X 值的方法 A 中“支路短路电流之和占总短路电流的 80%”的条件(见 1995 年版的 9.1.3.2)；
- 增加了变压器低压侧短路高压侧单相断开时的电流计算(见 4.6.5)；
- 增加了异步电动机机端三相短路时的短路电流计算公式(见表 3,1995 年版的表 2)；
- 增加了短路电流热效应的计算方法(见 4.8)；
- 增加了“在高压直流输电系统中,计算交流系统短路电流时应特别考虑电容器组与滤波器的影响”(见 3.10)。

本部分采用翻译法等同采用 IEC 60909-0:2001《三相交流系统短路电流计算 第 0 部分：电流计算》。

与本部分中规范性引用的国际文件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 311.1—2012 绝缘配合 第 1 部分：定义、原则和规则(IEC 60071-1:2006, MOD)
- GB/T 2900.73—2008 电工术语 接地与电击防护(IEC 60050-195:1998, MOD)
- GB/T 2900.74—2008 电工术语 电路理论(IEC 60050-131:2002, MOD)
- GB/T 2900.83—2008 电工术语 电的和磁的器件(IEC 60050-151:2001, 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：国家电力调度通信中心、中国电力科学研究院、西安交通大学。

本部分主要起草人：印永华、李明节、汤涌、卜广全、周济、张彦涛、郭强、张东霞、肖惕、姜树德、陈迅、赵强、张文朝、李晶、申旭辉。

引 言

为便于采用 IEC 60909 标准和今后增补、修订标准的方便,经全国短路电流计算标准化技术委员会 (SAC/TC 424) 研究决定,将 GB/T 15544 改编为系列标准:修订后的 GB/T 15544.1 等同采用 IEC 60909-0; GB/T 15544.2 等同采用 IEC 60909-1; GB/T 15544.3 等同采用 IEC 60909-2; GB/T 15544.4 等同采用 IEC 60909-3; GB/T 15544.5 等同采用 IEC 60909-4。

西安英诺威电气有限公司

三相交流系统短路电流计算

第 1 部分: 电流计算

1 概述

1.1 范围

GB/T 15544 的本部分适用于额定频率为 50 Hz 或 60 Hz 的低压、高压三相交流系统中的短路电流计算。

当系统标称电压为 500 kV 及以上,并且含有远距离交流输电线路时,需特殊考虑。

本部分提出的短路点等效电压源法,是一种简洁实用的短路电流计算方法,其计算结果一般情况下具有可接受的精度。如果能够得到相同的计算精度,不排斥采用其他计算方法,如叠加法。用叠加法计算得到的短路电流,依赖于某一特定潮流,因此不一定是最大短路电流。

本部分涉及的短路形式包括平衡短路故障和不平衡短路故障。

对于人为或意外发生的一个线路导体与大地间短路,以下两种情况的物理特性和影响不同(导致不同的计算目的),必须明确加以区分:

- 在中性点直接接地或经阻抗接地的系统中,导体对地短路;
- 在中性点不接地或谐振接地系统中,发生一处导体对地短路故障,该短路故障的计算不在本部分研究范围内。

在中性点不接地或谐振接地系统中,同时发生两个独立单相接地短路故障时,短路电流的计算参照 IEC 60909-3。

短路电流和短路阻抗也可通过系统试验、系统分析仪器测量或通过数字计算机确定。在现有低压系统中,能够在预期的短路点通过测量得到短路阻抗。

短路阻抗的计算通常基于电力设备的额定参数以及系统的拓扑结构,这种方法的优点是既可应用于现有系统,也可应用于规划系统。

通常情况下,应计算两种不同幅值的短路电流:

- 最大短路电流,用于选择电气设备的容量或额定值;
- 最小短路电流,用于选择熔断器、设定保护定值或校核感应电动机启动。

注:假设三相短路电流是由于三相同时短路而产生。由于三相不在同一瞬间短路,在短路电流中可能出现较大的非周期分量的研究不属于本部分范围。

本部分不适用于受控条件(短路试验站)下人为短路和飞机、船舶用电气设备的短路计算。

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。

IEC 60038: 2002 IEC 标准电压(IEC standard voltages)

IEC 60050-131: 1978 国际电工词典 第 131 章:电和磁路(International Electrotechnical Vocabulary—Chapter 131: Electric and magnetic circuits)

IEC 60050-151: 1978 国际电工词典 第 151 章:电和磁的器件(International Electrotechnical Vocabulary—Chapter 151: Electric and magnetic devices)

IEC 60050-195: 1998 国际电工术语 第 195 部分:接地与电击防护(International

Electrotechnical Vocabulary—Part 195: Earthing and protection against electric shock)

IEC 60056:1987 高压交流断路器(High-voltage alternating-current circuit-breakers)

IEC 60071-1:1993 绝缘配合 第1部分:定义、原则和原理(Insulation coordination—Part 1: Definitions, principles and rules)

IEC 60781:1989 低压辐射电网短路电流计算应用导则(Application guide for calculation of short-circuit currents in low-voltage radial systems)

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)

IEC/TR2 60909-1 三相交流系统短路电流计算 第1部分:按照 IEC 60909-0 进行短路电流计算应用的系数(Short-circuit currents 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 60909-0)

IEC/TR3 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.systems—Part 3: Currents during two separate simultaneous single phase line-to-earth short circuits and partial short-circuit currents flowing through earth)

IEC 60909-4 三相交流系统短路电流计算 第4部分:短路电流计算示例(Short-circuit currents calculation in three-phase a.c.systems—Part 4: Examples for the calculation of short-circuit currents)

IEC 60949:1988 考虑非绝热加热效应的热允许短路电流计算(Calculation of thermally permissible short-circuit currents, taking into account non-adiabatic heating effects)

IEC 60986:1989 额定电压从 1.8/3(3.6)kV~18/30(36)kV 电缆短路温度限制手册[Guide to the short-circuit temperature limits of electrical cables with a rated voltage from 1.8/3(3.6)kV to 18/30(36)kV]

1.3 术语和定义

IEC 60050-131 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

1.3.1

短路 short circuit

两个或多个导电部分之间意外或有意的导电通路,使得这些导电部分间的电位差等于或接近于零。

1.3.1.1

相间短路 line-to-line short circuit

两个或多个线路导体之间意外的或有意的导电通路,可伴随或不伴随对地短路。

1.3.1.2

单相接地短路 line-to-earth short circuit

在中性点直接接地或者通过阻抗接地的系统中,一个线路导体与大地之间意外或有意的导电通路。

1.3.2

短路电流 short-circuit current

在电路中,由于故障或不正确连接造成短路而产生的过电流。

注:需区别流过短路点的短路电流和电网支路中的短路电流(见图 3)。

1.3.3

预期(可达到的)短路电流 prospective (available) short-circuit current

电源不变,将短路点用阻抗可忽略的理想连接代替时,流过短路点的电流(见 1.1 注)。

1.3.4

对称短路电流 symmetrical short-circuit current

不计非周期分量时的预期(可达到的)短路电流(见 1.3.3)对称交流分量的有效值。

1.3.5

对称短路电流初始值 initial symmetrical short-circuit current
 I''_k

系统非故障元件的阻抗保持为短路前瞬间值时的预期(可达到的)短路电流(见 1.3.3)的对称交流分量有效值(见图 1 和图 2)。

1.3.6

对称短路视在功率初始值 initial symmetrical short-circuit (apparent) power
 S''_k

对称短路电流初始值 I''_k (见 1.3.5)与系统标称电压 U_n (见 1.3.13)和系数 $\sqrt{3}$ 三者相乘的积。即：

$$S''_k = \sqrt{3} U_n I''_k。$$

注：在本部分中，对称短路视在功率初始值 S''_k 不用于计算。如果 S''_k 不考虑以上有关短路计算的规定，如用于计

算电网馈线在 Q 点的内部阻抗，那么该定义应采用以下形式： $S''_{kQ} = \sqrt{3} U_{nQ} I''_{kQ}$ 或 $Z_Q = \frac{c U_{nQ}^2}{S''_{kQ}}$

1.3.7

短路电流的衰减直流(非周期)分量 decaying (aperiodic) component of short-circuit current
 $i_{d.c.}$

短路电流上下包络线间的平均值，该值从初始值衰减到零值(见图 1 和图 2)。

1.3.8

短路电流峰值 peak short-circuit current
 i_p

预期(可达到的)短路电流的最大可能瞬时值(见图 1 和图 2)。

注：短路电流峰值的大小与短路发生的时刻有关。三相短路电流峰值 i_p 的计算只对会出现最大短路电流的某相和某一瞬间进行。不考虑连续发生的故障。三相短路指三相同步短路。

1.3.9

对称开断电流 symmetrical short-circuit breaking current
 I_b

在开关设备的第一对触头分断瞬间，短路电流对称交流分量在一个周期内的有效值。

1.3.10

稳态短路电流 steady-state short-circuit current
 I_k

瞬态过程结束后的短路电流有效值(见图 1 和图 2)。

1.3.11

对称堵转电流 symmetrical locked-rotor current
 $I_{L,R}$

在额定电压 U_{rM} 和额定频率下，异步电动机转子堵转时的最大对称电流有效值。

1.3.12

等效电路 equivalent electric circuit

用理想元件组成的网络来描述一个电路性能的模式。

1.3.13

系统标称电压 nominal system voltage
 U_n

用于电力系统标志的电压(线电压),电力系统的某些运行特性与此电压有关。

1.3.14

等效电压源 equivalent voltage source

$$\frac{cU_n}{\sqrt{3}}$$

为计算正序系统短路电流,而加于短路点的理想电压源。在网络中,等效电压源是唯一的有源电压。

1.3.15

电压系数 voltage factor

c

等效电压源与被 $\sqrt{3}$ 除的系统标称电压 U_n 之比,该值在表1中给出。

注:鉴于以下原因必须引入电压系数 c :

- 电压随时间、地点变化;
- 变压器分接开关的变化;
- 根据2.3.1计算短路电流时忽略负载与电容;
- 发电机与电动机的超瞬态特性。

1.3.16

同步电机的超瞬态电势 subtransient voltage of a synchronous machine

E''

短路瞬间,在超瞬态电抗 X''_d 后起作用的同步电机对称内电势的有效值。

1.3.17

远端短路 far-from generator short circuit

预期(可达到的)短路电流对称交流分量的值在短路过程中基本保持不变的短路(见图1)。

1.3.18

近端短路 near-from generator short circuit

至少有一台同步电机供给短路点的预期对称短路电流初始值超过这台发电机额定电流两倍的短路;或异步电动机反馈到短路点的电流超过不接电动机时该点的对称短路电流初始值 I''_k 的5%的短路(见图2)。

1.3.19

短路点F的短路阻抗 short-circuit impedances at the short-circuit location F

1.3.19.1

三相交流系统的正序短路阻抗 positive-sequence short-circuit impedance of a three-phase a.c. system

$Z_{(1)}$

从短路点看的三相交流系统的正序系统的等值阻抗[见2.3.2与图5a)]。

1.3.19.2

三相交流系统的负序短路阻抗 negative-sequence short-circuit impedance of a three-phase a.c. system

$Z_{(2)}$

从短路点看的三相交流系统的负序系统的等值阻抗[见2.3.2与图5b)]。

1.3.19.3

三相交流系统的零序短路阻抗 zero-sequence short-circuit impedance of a three-phase a.c. system

$Z_{(0)}$

从短路点看的三相交流系统的零序系统的等值阻抗[见2.3.2与图5c)]。

1.3.19.4

三相交流系统的短路阻抗 short-circuit impedance of a three-phase a.c. system

Z_k

用作三相短路电流计算的三相交流系统的正序等值短路阻抗 $\underline{Z}_{(1)}$ (见 1.3.19.1) 的简略表示符号。

1.3.20

电气设备的短路阻抗 short-circuit impedance of electrical equipment

1.3.20.1

电气设备的正序短路阻抗 positive-sequence short-circuit impedance of electrical equipment

$\underline{Z}_{(1)}$

当由对称的正序电压系统供电时,线对中性点电压同电气设备相应相的短路电流之比(见第 2 章与 IEC 60909-4)。

注:如果负序阻抗和零序阻抗不可能与正序阻抗混淆时,表示正序阻抗的下标可以省略。

1.3.20.2

电气设备的负序短路阻抗 positive-sequence short-circuit impedance of electrical equipment

$\underline{Z}_{(2)}$

当由对称的负序电压系统供电时,线对中性点电压同电气设备相应相的短路电流之比(见第 2 章与 IEC 60909-4)。

1.3.20.3

电气设备的零序短路阻抗 zero-sequence short-circuit impedance of electrical equipment

$\underline{Z}_{(0)}$

当用三条并联的导线作为电流流出线,第四根导线和/或大地作为汇集流回线,设备由交流电压供电时,线对地电压与电气设备相连的一个相的短路电流之比(见第 2 章与 IEC 60909-4)。

1.3.21

同步电机的超瞬态电抗 subtransient reactance of a synchronous machine

X''_d

短路瞬间超瞬态过程中的有效电抗。计算短路电流时,用饱和值。

注:当以欧姆为单位的电抗 X''_d 除以同步机的额定阻抗 $Z_{TG} = U_n^2/S_{TG}$ 时,其标么结果用小写字母 $x''_d = X''_d/Z_{TG}$ 表示。

1.3.22

断路器的最小延时 minimum time delay

t_{min}

从短路开始至开关设备第一对触头分离间的最短时间间隔。

注:时间 t_{min} 指瞬动继电器的可能最快动作时间与断路器的最短分离时间之和,不包括跳闸机构的可调延迟时间。

1.3.23

热等效短路电流 thermal equivalent short-circuit current

I_{th}

具有与实际短路电流相同热效应与相同持续时间的电流的有效值。该电流可包含最终衰减为零的直流分量。

1.4 符号、上角标与下角标

计算时可用有名值或相对值,因此标准中列出的公式没有注明单位。用有名值计算时,本部分都用法定计量单位。字母下划一横线表示复数,如 $\underline{Z} = R + jX$ 。

1.4.1 符号

A 非周期分量 $i_{d.c.}$ 的初始值

a 复数运算符

α	不平衡短路电流与三相短路电流之比
c	电压系数
$c \frac{U_n}{\sqrt{3}}$	等效电压源(有效值)
E''	同步电机的超瞬态电势
f	频率(50 Hz)
I_b	对称开断电流(有效值)
I_k	稳态短路电流(有效值)
I_{kP}	在复励发电机端短路时的稳态短路电流
I''_k	对称短路电流初始值(有效值)
I_{LR}	异步电动机转子堵转时的对称电流
I_r	电气设备的额定电流
I_{th}	热等效短路电流
$i_{d.c.}$	短路电流中的非周期分量
i_p	短路电流峰值
K	阻抗校正系数
m	非周期分量的热效应系数
n	交流对称分量的热效应系数
p	异步电动机的极对数
p_G	发电机电压调节范围
p_T	变压器电压调节范围
P_{krT}	变压器的负载损耗
P_{rM}	异步电动机的额定功率($P_{rM} = S_{rM} \cos \varphi_{rM} \eta_{rM}$)
q	用于计算异步电机开断电流的系数
q_n	标称截面
R 和 r	电阻有名值和相对值
R_G	同步电机的电阻
R_{Gf}	计算 i_p 时的同步电机的假想电阻
S''_k	对称短路功率初始值(视在功率)
S_r	电气设备的额定视在功率
t_{min}	断路器最小延时
t_r	变压器额定变比(分接开关位于主位置), $t_r \geq 1$
T_k	短路电流持续时间
U_m	设备最高电压有效值, 线电压
U_n	系统标称电压, 线电压(有效值)
U_r	设备的额定电压, 线电压(有效值)
u_{kr}	变压器额定短路电压百分数
u_{kR}	限流电抗器额定短路电压百分数
u_{Rr}	变压器额定短路电压阻性分量百分数
u_{Xr}	变压器额定短路电压感性分量百分数
$U_{(1)}$ 、 $U_{(2)}$ 、 $U_{(0)}$	正序、负序与零序电压
X 和 x	电抗有名值和相对值
X_d 和 X_q	直轴同步电抗和交轴同步电抗

西安英诺威电气有限公司 专用

X_{dP}	考虑励磁影响后,在复励发电机端稳态短路时的发电机计算电抗
X''_d 和 X''_q	直轴超瞬态电抗和交轴超瞬态电抗(二者均为饱和值)
x_d	不饱和同步电抗,相对值
x_{dsat}	饱和同步电抗,相对值,为饱和空载短路比的倒数
Z 和 z	阻抗有名值和相对值
Z_k	三相交流系统的短路阻抗
$Z_{(1)}$	正序短路阻抗
$Z_{(2)}$	负序短路阻抗
$Z_{(0)}$	零序短路阻抗
η	异步电动机效率
κ	短路电流峰值计算系数
λ	稳态短路电流的计算系数
μ	对称短路开断电流的计算系数
μ_0	真空绝对导磁率, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} H/m$
ρ	电阻率
φ	相位角
θ_c	短路结束时的导体温度
01	正序参考中性点
02	负序参考中性点
00	零序参考中性点

1.4.2 下角标

(1)	正序
(2)	负序
(0)	零序
a.c.	交流
d.c.	直流
f	假想值
k 或 k3	三相短路
k1	单相短路
k2	两相不接地短路
k2E 和 kE2E	两相接地短路
K	采用阻抗修正系数 K_T 、 K_G 、 K_S 或 K_{SO} 计算得到的阻抗
max	最大值
min	最小值
n	标称值
r	额定值
rsl	结果
t	转换值
AT	厂用变压器
B	母线
E	接地
F	短路点

G	发电机
HV	高压, 变压器高压绕组
LV	低压, 变压器低压绕组
L	相线
LR	堵转转子
La、Lb、Lc	三相交流系统的 a、b、c 相线
M	异步电动机或异步电动机组
M	断开异步电动机(组)或不考虑异步电动机(组)
MV	中压, 变压器中压绕组
N	三相交流系统的中性线
P	端, 极
Q	馈电网络联结点
R	限流电抗器
S	发电机变压器组(发电机与有载调压变压器)
SO	发电机变压器组(发电机与固定变比变压器或无载调压变压器)
T	变压器

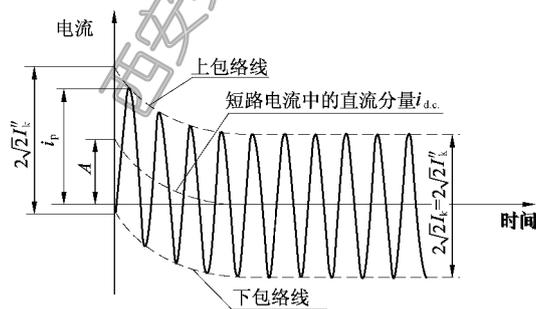
1.4.3 上角标

"	初始(超瞬态)值
'	单位长度电阻或电抗
b	短路前

2 短路电流特性: 计算方法

2.1 概述

进行完整的短路电流计算, 须确定短路点的电流随时间变化的函数, 而该函数与短路前的瞬时电压相对应(见图 1 和图 2)。



说明:

I''_k —— 对称短路电流初始值;

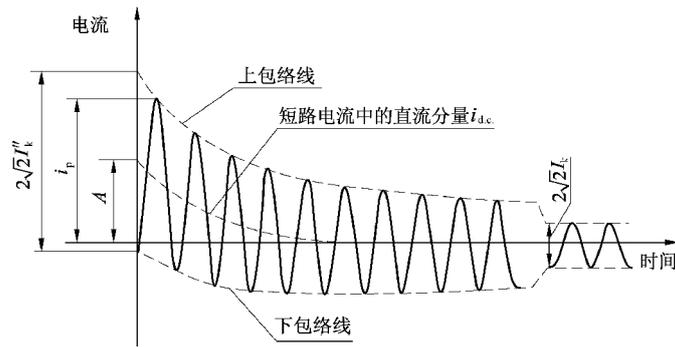
i_p —— 短路电流峰值;

I_k —— 短路电流稳态值;

$i_{d.c.}$ —— 短路电流的非周期(直流)分量;

A —— 非周期分量初始值。

图 1 远端短路时的短路电流示意图



说明:

I''_k —— 对称短路电流初始值;

i_p —— 短路电流峰值;

I_k —— 短路电流稳态值;

$i_{d.c.}$ —— 短路电流的非周期(直流)分量;

A —— 非周期分量初始值。

图 2 近端短路时的短路电流示意图

实际上,绝大多数情况下无需这样确定短路电流。从实际应用角度出发,特别值得注意的是短路电流对称交流分量与短路后瞬间出现的短路电流峰值 i_p 。 i_p 在电压过零点短路的情况下出现,其值与频率 f 和 X/R 有关,还与交流分量的衰减有关。

在网状电网中,有若干个非周期分量衰减时间常数,因此在计算 i_p 和 $i_{d.c.}$ 时不可能给出计算精度高的简易方法。在 4.3 中,给出了 i_p 的推荐计算方法,并且具有足够的准确度。

2.2 计算假设

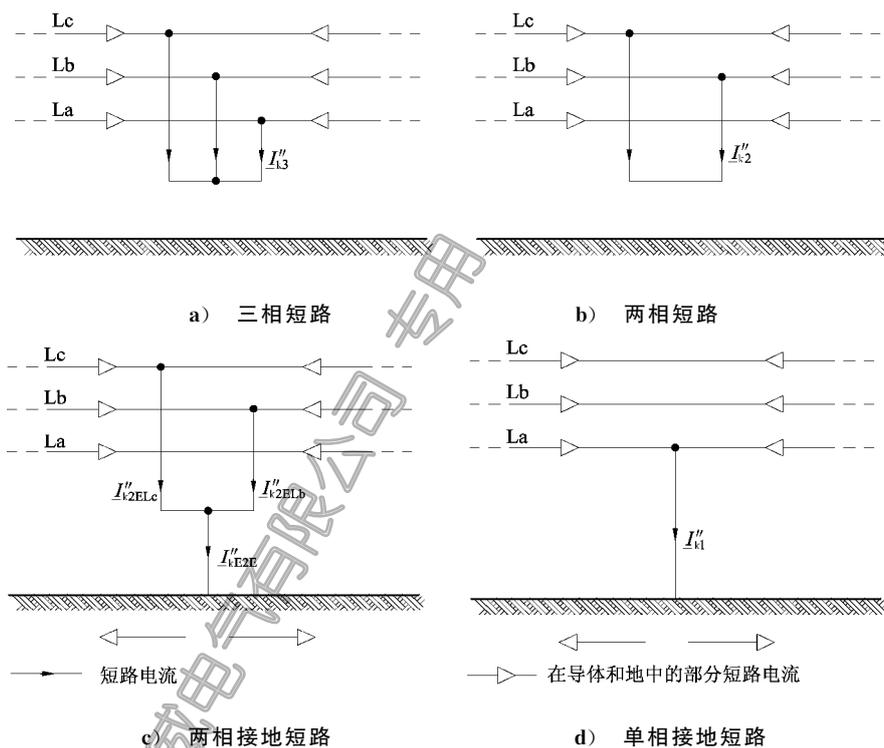
计算最大与最小短路电流时都应以下面条件为基础:

- 短路类型不会随短路的持续时间而变化,即在短路期间,三相短路始终保持三相短路状态,单相接地短路始终保持单相接地短路;
- 电网结构不随短路持续时间变化;
- 变压器的阻抗取自分接开关处于主分接头位置时的阻抗,计算时允许采用这种假设,是因为引入了变压器的阻抗修正系数 K_T ;
- 不计电弧的电阻;
- 除了零序系统外,忽略所有线路电容、并联导纳、非旋转型负载。

尽管这些假定对于电力系统来讲不是严格成立,但是可以给出准确度能普遍接受的结果。

对于图 3 所示的平衡短路和不平衡短路,可用对称分量法计算其短路电流。

计算多电压等级系统的短路电流时,必须将阻抗值从一个电压等级归算至另一个电压等级下。高一级或次级电网中的设备阻抗应除以或乘以变压器额定变比 t_r 的平方,电压与电流也按照额定变比进行转换。采用标么制时,若系统中每台变压器的变比满足 $U_{rTHV}/U_{rTLV}=U_{nHV}/U_{nLV}$,则没有必要进行转换,但通常情况下该条件不能满足(见 IEC/TR3 60909-2 与 IEC 60909-4 中的示例)。



注：图中箭头方向为任意选定的电流流向。

图 3 短路类型及短路电流

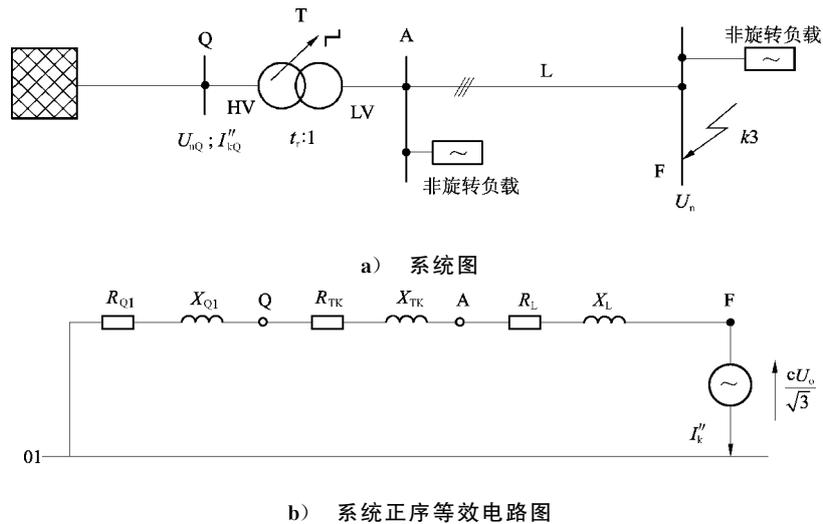
2.3 计算方法

2.3.1 短路点等效电压源

对于远端和近端短路都可用一等效电压源计算短路电流。用等效电压源计算短路电流时，短路点用等效电压源 $cU_n/\sqrt{3}$ 代替，该电压源为网络的唯一的电压源，其他电源（如同步发电机、同步电动机、异步电动机和馈电网络的电势）都视为零，并以自身内阻抗代替。

用等效电压源计算短路电流时，可不考虑非旋转负载的运行数据、变压器分接头位置和发电机励磁方式，无需进行关于短路前各种可能的潮流分布的计算。除零序网络外，线路电容和非旋转负载的并联导纳都可忽略。

图 4 为一单侧电源馈电并用等效电压源计算短路网络的一个算例。等效电压源 $cU_n/\sqrt{3}$ 中的电压系数 c 根据表 1 选用，计算最大值用最大电压系数，最小值用最小电压系数。



注：正序系统的阻抗编号(1)省略,01 标出正序系统的参考中性点。馈电网络与变压器阻抗为相对于 LV 侧的阻抗,并且后者经过系数 K_T 修正。

图 4 由等效电压源计算对称短路电流初始值 I''_k 的示意图

表 1 电压系数

标称电压 U_n	电压系数	
	c_{max}^a	c_{min}
低压 $100\text{ V} \leq U_n \leq 1\,000\text{ V}$ (IEC 60038:2002,表 1)	1.05 ^c 1.10 ^d	0.95
中压 $1\text{ kV} < U_n \leq 35\text{ kV}$ (IEC 60038:2002,表 3)	1.10	1.00
高压 $35\text{ kV} < U_n^b$ (IEC 60038:2002,表 4)	1.10	1.00

^a $c_{max}U_n$ 不宜超过电力系统设备的最高电压 U_m 。
^b 如果没有定义标称电压,宜采用 $c_{max}U_n = U_m$ 、 $c_{min}U_n = 0.90 \times U_m$ 。
^c 1.05 应用于允许电压偏差为 +6% 的低压系统,如 380 V/400 V。
^d 1.10 应用于允许电压偏差为 +10% 的低压系统。

2.3.2 对称分量法的应用

计算三相交流系统中由平衡或不平衡短路产生的短路电流时,应用对称分量法可以使计算过程大大简化。用对称分量法时,假定电气设备具备平衡的结构,从而系统阻抗平衡,对于不换位线路,短路电流计算结果也具有可接受的精度。

应用对称分量法,将不平衡短路的系统分解为三个独立的对称分量系统,网络中各支路的电流可由 $\underline{I}_{(1)}$ 、 $\underline{I}_{(2)}$ 和 $\underline{I}_{(0)}$ 三个对称序分量电流叠加得到。以线路导体 La 相为参考,各相电流 \underline{I}_{La} 、 \underline{I}_{Lb} 和 \underline{I}_{Lc} 计算式(1)和式(2):

$$\begin{cases} \underline{I}_{La} = \underline{I}_{(1)} + \underline{I}_{(2)} + \underline{I}_{(0)} \\ \underline{I}_{Lb} = \underline{a}^2 \underline{I}_{(1)} + \underline{a} \underline{I}_{(2)} + \underline{I}_{(0)} \\ \underline{I}_{Lc} = \underline{a} \underline{I}_{(1)} + \underline{a}^2 \underline{I}_{(2)} + \underline{I}_{(0)} \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

$$\underline{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}; \underline{a}^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \dots\dots\dots (2)$$

本部分涉及以下类型的不平衡短路：

- a) 两相间短路；
- b) 两相接地短路；
- c) 单相接地短路。

应用本部分时，应注意区分短路点 F 的短路阻抗与电气设备的短路阻抗，用对称分量法时，还应考虑序网阻抗。

计算短路点 F 的正序或负序阻抗时，在短路点 F 施加正序电压或负序电压，电网内所有同步电机和异步电动机都用自身的相应序阻抗替代，根据图 5a) 或图 5b) 即可确定 F 点的正序或负序短路阻抗 $\underline{Z}_{(1)}$ 或 $\underline{Z}_{(2)}$ 。

旋转设备的正序和负序阻抗可能不相等，在计算远端短路时，通常令 $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$ 。

在短路线和共用回线（如接地系统、中性线、地线、电缆外壳和电缆铠装）之间施加一交流电压，根据图 5c) 即可确定 F 点的零序短路阻抗 $\underline{Z}_{(0)}$ 。

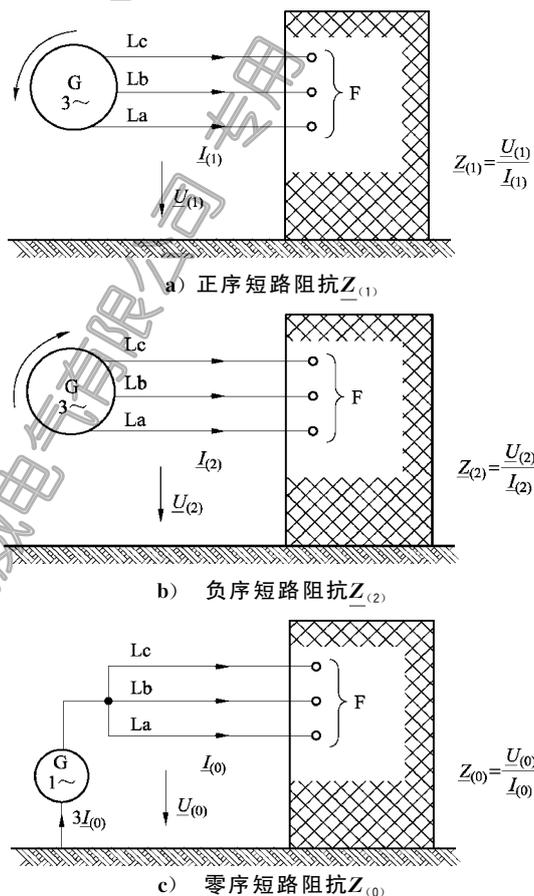


图 5 短路点 F 处三相交流系统的短路阻抗

计算中、高压电力系统中不平衡短路电流时，在如下情况下应该考虑线路零序电容和零序并联导纳：中性点不接地系统、中性点谐振接地系统或接地系数高于 1.4 的中性点接地系统。

在计算低压电网的短路电流时,在正序系统、负序系统和零序系统中可忽略线路(架空线路和电缆)的电容。

在中性点接地的电力系统中,在不计线路零序电容情况下,短路电流计算值要比实际短路电流略大。其差值与电网结构有关。

除特殊情况外,零序短路阻抗与正序短路阻抗、负序短路阻抗不等。

2.4 最大短路电流

计算最大短路电流时,须考虑以下条件:

- a) 选用表 1 中的最大短路电流系数 c_{\max} ;
- b) 选择电网结构(包括恰当的解环方案),考虑电厂与馈电网络可能的最大贡献;
- c) 用等值阻抗 Z_Q 等值外部网络时,应使用最小值;
- d) 与 3.8 和 3.9 情况相符情况下,应计及电动机影响;
- e) 线路电阻采用 20 °C 时的数值 R_{L20} 。

2.5 最小短路电流

计算最小短路电流时,须考虑以下条件:

- a) 选用表 1 中的最小短路电流电压系数 c_{\min} ;
- b) 选择电网结构,考虑电厂与馈电网络可能的最小贡献;
- c) 不计电动机影响;
- d) 线路电阻 R_L 采用较高温度的数值,与 R_{L20} 的关系可由式(3)确定。

$$R_L = [1 + \alpha (\theta_c - 20 \text{ }^\circ\text{C})] \cdot R_{L20} \dots\dots\dots (3)$$

式中:

- R_{L20} ——导线在 20 °C 时的阻值;
- θ_c ——短路结束时的导线温度,单位为摄氏度(°C);
- α ——铜、铝和铝合金的温度系数,取 0.0041/°C。

注:关于 θ_c 见 IEC 60865-1、IEC 60949 与 IEC 60986。

3 电气设备的短路阻抗

3.1 概述

对于馈电网络、变压器、架空线路、电缆线路、电抗器和其他类似电气设备,它们的正序和负序短路阻抗相等,即 $Z_{(1)} = Z_{(2)}$ 。计算设备零序阻抗时,在零序网络中,假设三相导体和返回的共用线间有一交流电压 $\underline{U}_{(0)}$,共用线流过三倍零序电流 $3 \underline{I}_{(0)}$,设备零序阻抗满足: $Z_{(0)} = \underline{U}_{(0)} / \underline{I}_{(0)}$ 。

计算发电机(G)、变压器(T)、发电机变压器组(S)的阻抗时,引入校正系数 K_G 、 K_T 以及 K_S 或者 K_{S0} 。

注:引入阻抗校正系数的示例在 IEC 60909-4 中给出。

3.2 馈电网络阻抗

如图 6a)所示,由电网向短路点馈电的网络,仅知节点 Q 的对称短路电流初始值 I''_{kQ} ,则 Q 点的网络阻抗 Z_Q (正序短路阻抗)宜由式(4)确定。

$$Z_Q = \frac{c U_{nQ}}{\sqrt{3} I''_{kQ}} \dots\dots\dots (4)$$

如果 R_Q/X_Q 已知,则 X_Q 应按照式(5)计算:

西安英诺威电气有限公司 购买单位: 西安英诺威电气有限公司 2020-0901-1201-5240-4877 防伪编号: 0100200901067978 订单号: 0100200901067978

$$X_Q = \frac{Z_Q}{\sqrt{1 + (R_Q/X_Q)^2}} \dots\dots\dots (5)$$

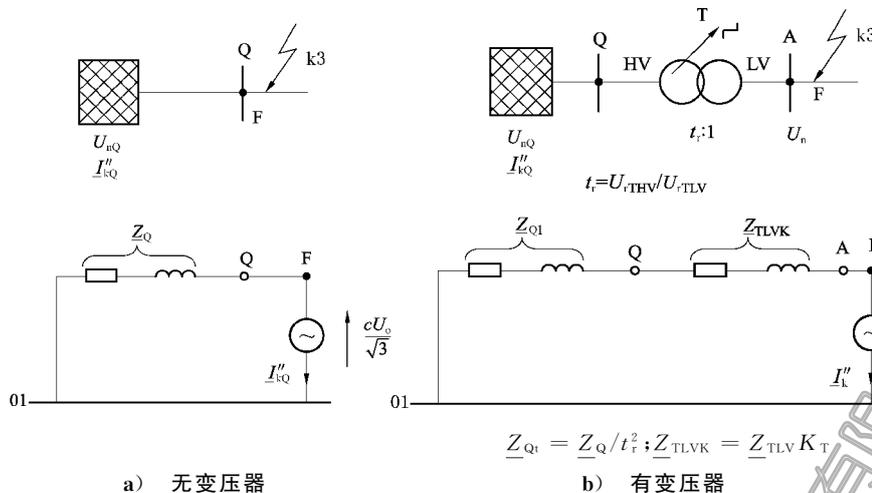


图 6 馈电网络及其等效电路示意图

如图 6b) 所示, 如果电网经过变压器向短路点馈电, 仅知节点 Q 的对称短路电流初始值 I''_{kQ} , 则 Q 点的正序网络阻抗归算到变压器低压侧的值 Z_{Qt} 可由式(6)确定。

$$Z_{Qt} = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3} I''_{kQ}} \cdot \frac{1}{t_r^2} \dots\dots\dots (6)$$

式中:

- U_{nQ} —— Q 点的系统标称电压;
- I''_{kQ} —— 流过 Q 点的对称短路电流初始值;
- c —— 电压系数, 见表 1;
- t_r —— 分接开关在主分接位置时的变压器额定变比。

若电网电压在 35 kV 以上时, 网络阻抗可视为纯电抗(略去电阻), 即 $Z_Q = 0 + jX_Q$ 。计算中若计及电阻但具体数值不知道, 可按 $R_Q = 0.1X_Q$ 和 $X_Q = 0.995Z_Q$ 计算。

变压器高压侧母线的对称短路电流初始值 I''_{kQmax} 与 I''_{kQmin} 应由供电公司提供或根据本部分计算得到。

根据变压器的绕组连接方式和中性点接地方式, 有时需考虑馈电网络的零序等值阻抗。

注: 示例见 IEC 60909-4:2000 表 1 的第 6、8 项。

3.3 变压器的阻抗

3.3.1 双绕组变压器的阻抗

双绕组变压器的正序短路阻抗 $Z_T = R_T + jX_T$ 按式(7)、式(8)、式(9)计算:

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \dots\dots\dots (7)$$

$$R_T = \frac{u_{Rr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2} \dots\dots\dots (8)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \dots\dots\dots (9)$$

式中:

- U_{rT} —— 变压器高压侧或低压侧的额定电压;

I_{rT} —— 变压器高压侧或低压侧的额定电流；

S_{rT} —— 变压器的额定容量；

P_{krT} —— 变压器负载损耗；

u_{kr} —— 阻抗电压，%；

u_{Rr} —— 电阻电压，%。

电阻分量 u_{Rr} 能够根据变压器流过额定电流 I_{rT} 时的绕组总损耗 P_{krT} 计算得到。

R_T/X_T 通常随着变压器容量的增大而减小。计算大容量变压器短路阻抗时，可略去绕组中的电阻，只计电抗，只是在计算短路电流峰值或非周期分量时才计及电阻。

计算 $Z_T = R_T + jX_T = Z_{(1)} = Z_{(2)}$ 所必需的数据，可从设备铭牌值获得。零序短路阻抗 $Z_{(0)T} = R_{(0)T} + jX_{(0)T}$ 可从铭牌值或设备制造厂得到。

注：作为网络变压器或者电厂升压变的双绕组变压器实际数据在 IEC/TR3 60909-2 中给出。用于计算不对称短路的零序阻抗在 IEC 60909-4 中给出

3.3.2 三绕组变压器的阻抗

图 7 所示三绕组变压器的短路阻抗 Z_H 、 Z_M 、 Z_L ，按式(10)计算(换算到 H 侧)：

$$\begin{cases} Z_{HM} = \left(\frac{u_{RrHM}}{100\%} + j \frac{u_{XrHM}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rTH}^2}{S_{rTHM}} & \text{(L 侧开路)} \\ Z_{HL} = \left(\frac{u_{RrHL}}{100\%} + j \frac{u_{XrHL}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rTH}^2}{S_{rTHL}} & \text{(M 侧开路)} \\ Z_{ML} = \left(\frac{u_{RrML}}{100\%} + j \frac{u_{XrML}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rTH}^2}{S_{rTML}} & \text{(H 侧开路)} \end{cases} \dots\dots\dots(10)$$

其中：
$$u_{Xr} = \sqrt{u_{kr}^2 - u_{Rr}^2}$$

代入式(10)可得 Z_H 、 Z_M 、 Z_L 。

$$\begin{cases} Z_H = \frac{1}{2} (Z_{HM} + Z_{HL} - Z_{ML}) \\ Z_M = \frac{1}{2} (Z_{HM} + Z_{ML} - Z_{HL}) \\ Z_L = \frac{1}{2} (Z_{HL} + Z_{ML} - Z_{HM}) \end{cases} \dots\dots\dots(11)$$

式中：

U_{rTH} —— 变压器额定电压；

S_{rTHM} —— H、M 间的额定容量；

S_{rTHL} —— H、L 间的额定容量；

S_{rTML} —— M、L 间的额定容量；

u_{RrHM} 、 u_{XrHM} —— H、M 间的电阻电压和电抗电压，%；

u_{RrHL} 、 u_{XrHL} —— H、L 间的电阻电压和电抗电压，%；

u_{RrML} 、 u_{XrML} —— M、L 间的电阻电压和电抗电压，%。

三绕组变压器的零序阻抗可从制造厂获得。

注：三绕组变压器阻抗示例见 IEC/TR3 60909-2。更多信息见 IEC 60909-4。

西安英诺威电气有限公司 购买单位：西安英诺威电气有限公司 2020-0901-1201-5240-4877 防伪编号：0100200901067978

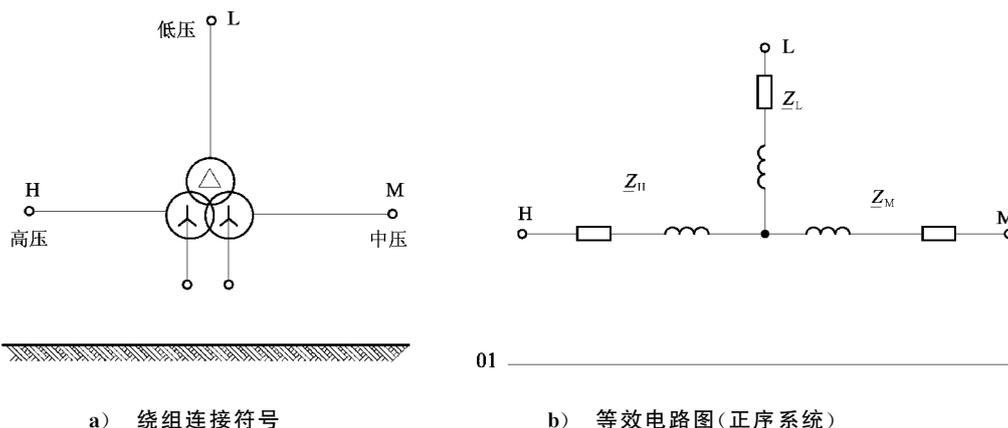


图 7 三绕组变压器

3.3.3 网络变压器的阻抗校正系数

网络变压器是指连接两个或多个不同电压等级电网的变压器，区别于发电机变压器组中的升压变压器。

对于有载调节或不可有载调节分接头的双绕组变压器，计算短路阻抗时应引入阻抗校正系数 K_T ，即： $\underline{Z}_{TK} = K_T \underline{Z}_T$ ，其中 $\underline{Z}_T = R_T + jX_T$ 。

$$K_T = 0.95 \frac{c_{\max}}{1 + 0.6x_T} \dots\dots\dots (12a)$$

式中， x_T 为变压器的相对阻抗， $x_T = X_T / (U_{rT}^2 / S_{rT})$ ， c_{\max} 根据表 1 由变压器低压侧电网的标称电压决定。该校正系数不应用于发电机变压器组中的升压变压器（见 3.7）。

如果能够确定短路前网络变压器的长期运行工况，则阻抗校正系数可用式(12b)替代式(12a)。

$$K_T = \frac{U_n}{U^b} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + x_T (I_T^b / I_{rT}) \sin \phi_T^b} \dots\dots\dots (12b)$$

式中：

- c_{\max} —— 根据表 1 由网络变压器低压侧电网的标称电压决定；
- $x_T = X_T / (U_{rT}^2 / S_{rT})$ ；
- U^b —— 短路前最高运行电压；
- I_T^b —— 短路前最高运行电流；
- ϕ_T^b —— 短路前的功率因数角。

双绕组变压器的负序短路阻抗和零序短路阻抗也应引入该校正系数。变压器中性点接地阻抗 \underline{Z}_N 无需引入该校正系数，直接取 $3 \underline{Z}_N$ 接入零序网络即可。

对于有载调节或不可有载调节分接头的三绕组变压器，使用 K_{THM} 、 K_{THL} 和 K_{TML} 三个阻抗校正系数：

$$\begin{cases} K_{THM} = 0.95 \frac{c_{\max}}{1 + 0.6x_{THM}} \\ K_{THL} = 0.95 \frac{c_{\max}}{1 + 0.6x_{THL}} \\ K_{TML} = 0.95 \frac{c_{\max}}{1 + 0.6x_{TML}} \end{cases} \dots\dots\dots (13)$$

再由式(10)确定的阻抗 \underline{Z}_{HM} 、 \underline{Z}_{HL} 和 \underline{Z}_{ML} ，计算校正后的阻抗值 $\underline{Z}_{HMK} = K_{THM} \underline{Z}_{HM}$ 、 $\underline{Z}_{HLK} = K_{THL} \underline{Z}_{HL}$ 和 $\underline{Z}_{MLK} = K_{TML} \underline{Z}_{ML}$ 。根据式(11)得出校正后的各绕组短路阻抗 \underline{Z}_{HK} 、 \underline{Z}_{MK} 、 \underline{Z}_{LK} 。

购买单位：西安英诺威电气有限公司
 防伪编号：2020-0901-1201-5240-4877
 订单号：0100200901067978

三绕组变压器的负序短路阻抗和零序短路阻抗也应引入该校正系数。变压器中性点接地阻抗不需要校正。

注：不同接地方式下的负序与零序等值电路在 IEC 60909-4:2000 的表 1 中第 4~7 项给出。通常零序阻抗 $Z_{(0)H}$ 、 $Z_{(0)M}$ 或 $Z_{(0)L}$ 数值接近正序阻抗 $Z_{(1)H}$ 、 $Z_{(1)M}$ 或 $Z_{(1)L}$ 。式(13)的校正系数应用于负序、零序等值电路的实例在 IEC 60909-4:2000 的 2.2 给出。如果在特殊情况下，例如自动有载调节分接头变压器的处于 $+p_T$ 位置时的短路电压 u_{k+} 与处于 $-p_T$ 位置时的短路电压 u_{k-} 均明显大于 u_{kr} ，则不必引入校正系数 K_T 。

3.4 架空线和电缆的阻抗

架空线和电缆的正序短路阻抗 $Z_L = R_L + jX_L$ 可按导线有关参数计算，如导体截面积和中心距。

正序阻抗 $Z_{(1)} = R_{(1)} + jX_{(1)}$ 和零序阻抗 $Z_{(0)} = R_{(0)} + jX_{(0)}$ 的测量，见 IEC 60909-4。有时可通过 $R_{(0)L}/R_L$ 和 $X_{(0)L}/X_L$ 比率估算零序阻抗(见 IEC 60909-2)。

高、低压电缆的正序和零序阻抗 $Z_{(1)}$ 、 $Z_{(0)}$ 的大小与国家的制造工艺水平和标准有关，相关数值可参见 IEC 60909-2，或从手册或制造厂给出的数据中得到。

导线温度高于 20 °C 时，按式(3)计算电阻。

导线平均温度 20 °C 时的架空线单位长度有效电阻 R'_L 可根据电阻率 ρ 和标称截面 q_n ，用式(14)计算：

$$R'_L = \frac{\rho}{q_n} \dots\dots\dots (14)$$

式中：

ρ ——材料电阻率，单位为欧姆平方毫米每米($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)，铜： $\rho = (1/54)\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ，铝： $\rho = (1/34)\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ，铝合金： $\rho = (1/31)\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ；

q_n ——导线标称截面，单位为平方毫米(mm^2)。

对于换位架空线，单位长度的电抗 X'_L ，可按式(15a)计算：

$$X'_L = 2\pi f \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4n} + \ln \frac{d}{r} \right) = f\mu_0 \left(\frac{1}{4n} + \ln \frac{d}{r} \right) \dots\dots\dots (15a)$$

式中：

d ——导线间的几何均距或相应的导线的中心距离，其值为 $d = \sqrt[3]{d_{La}d_{Lb}d_{Lc}d_{Lc}d_{Lb}d_{La}}$ ；

r ——单导线时，指导线的半径；分裂导线时， $r = \sqrt[n]{nr_0R^{n-1}}$ ，其中 R 为分裂导线半径， r_0 为每根导线半径(见 IEC 60909-2)；

n ——分裂导线数，单导线时为 1；

μ_0 ——真空绝对磁导率， $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-4} \text{ H/km}$ 。

系统额定频率为 50 Hz 时，式(15a)化简为式(15b)。

$$X'_L = 0.0628 \left(\frac{1}{4n} + \ln \frac{d}{r} \right) \Omega/\text{km} \dots\dots\dots (15b)$$

3.5 限流电抗器的阻抗

假设电抗器为几何对称，它们的正序、负序和零序阻抗相等。

$$Z_R = \frac{u_{kR}}{100\%} \frac{U_n}{\sqrt{3} I_{rR}} \text{ 且 } R_R \ll X_R \dots\dots\dots (16)$$

式中：

u_{kR} ——额定阻抗电压，铭牌值给出，%；

I_{rR} ——额定电流，铭牌值给出；

U_n ——系统标称电压。

3.6 同步电机的阻抗

3.6.1 同步发电机

在部分工业电网或低压电网中,发电机不经过变压器,而是直接接入电网。这种情况下,计算对称短路电流初始值时,发电机正序阻抗应按式(17)计算。

$$\underline{Z}_{GK} = K_G \underline{Z}_G = K_G (R_G + jX''_d) \quad \dots\dots\dots (17)$$

其中校正系数

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + x''_d \sin\varphi_{rG}} \quad \dots\dots\dots (18)$$

式中:

c_{\max} ——最大电压系数;

U_n ——系统标称电压;

U_{rG} ——发电机额定电压;

\underline{Z}_{GK} ——经过校正的超瞬态阻抗;

\underline{Z}_G ——超瞬态阻抗 $\underline{Z}_G = R_G + jX''_d$;

φ_{rG} ——发电机额定功率因数角度,即 I_{rG} 和 $\underline{U}_{rG}/\sqrt{3}$ 的夹角;

x''_d ——发电机的相对电抗,即 $x''_d = X''_d/Z_{rG} = X''_d/(U_{rG}^2/S_{rG})$ 。

引入式(18)的校正系数 K_G 是因为用等效电压源 $cU_n/\sqrt{3}$ 代替了同步发电机超瞬态电抗后的超瞬态电势 E'' (见图 8)。

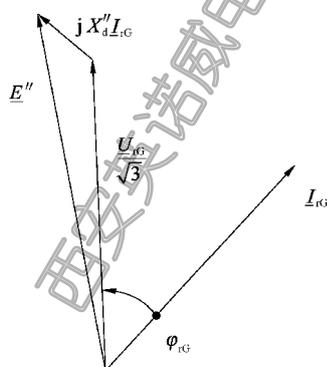


图 8 额定工况下同步发电机的相角图

计算比较准确的峰值电流 i_p 时,可采用以下假想电阻 R_{Gf} :

- a) $U_{rG} > 1 \text{ kV}$ 、 $S_{rG} \geq 100 \text{ MVA}$ 的发电机, $R_{Gf} = 0.05X''_d$;
- b) $U_{rG} > 1 \text{ kV}$ 、 $S_{rG} < 100 \text{ MVA}$ 的发电机, $R_{Gf} = 0.07X''_d$;
- c) $U_{rG} < 1 \text{ kV}$ 的发电机, $R_{Gf} = 0.15X''_d$ 。

除了非周期分量的衰减外,系数 0.05、0.07 和 0.15 的选取还计及短路后第一个半周波内对称短路电流分量的衰减。无需考虑温度对 R_{Gf} 的影响。

注: R_{Gf} 只用于计算峰值短路电流 i_p ,不能用于式(64)计算短路电流的非周期分量 $i_{d.c.}$ 。同步发电机定子的有效电

阻通常比给定的 R_{Gf} 小得多,计算 $i_{d.c.}$ 应采用厂家提供的 R_G 值。

如果发电机端电压与 U_{rG} 不同,则计算三相短路电流时可用 $U_G = U_{rG}(1 + p_G)$ 代替式(18)中的 U_{rG} 。

同步发电机负序短路阻抗,也应引入式(18)确定的校正系数 K_G ,即:

$$\underline{Z}_{(2)GK} = K_G(R_{(2)G} + jX_{(2)G}) = K_G \underline{Z}_{(2)G} \approx K_G \underline{Z}_G = K_G(R_G + jX''_d) \quad \dots\dots\dots(19)$$

如果 X''_d 与 X''_q 不相等,则应使用 $X_{(2)G} = (X''_d + X''_q) / 2$ 。

同步发电机的零序短路阻抗,也应引入式(18)确定的校正系数 K_G ,即:

$$\underline{Z}_{(0)GK} = K_G(R_{(0)G} + jX_{(0)G}) \quad \dots\dots\dots(20)$$

发电机中性点阻抗不需校正。

在发电机低励状态下运行时(如系统中含有电缆或长架空线路、抽水蓄能电站等),计算最小短路电流,需特殊考虑,其计算方法不在本部分范围内(见 IEC/TR2 60909-1:2002 中 2.2.1)。

3.6.2 调相机和同步电动机

计算对称短路电流初始值 I''_k 、短路电流峰值 i_p 、对称开断电流 I_b 与短路电流稳态值 I_k 时,调相机与同步发电机的处理方法相同。

同步电动机如果采用了电压调节器,则其处理方法与同步发电机相同;如果未采用电压调节器,则需另外考虑。

3.7 发电机变压器组的阻抗

3.7.1 分接头可有载调节的发变组

发电机变压器组(S)可有载调节分接头情况下,计算变压器高压侧的短路电流,应采用式(21)计算发电机变压器组的短路阻抗[见图 11c)]。

$$\underline{Z}_S = K_S(t_r^2 \underline{Z}_G + \underline{Z}_{THV}) \quad \dots\dots\dots(21)$$

其中,校正系数见式(22):

$$K_S = \frac{U_{nQ}^2}{U_{rG}^2} \cdot \frac{U_{rTLV}^2}{U_{rTHV}^2} \cdot \frac{c_{max}}{1 + |x''_d - x_T| \sin\varphi_{rG}} \quad \dots\dots\dots(22)$$

式中:

- \underline{Z}_S —— 发电机变压器组高压侧的短路阻抗校正值;
- \underline{Z}_G —— 发电机超瞬态阻抗 $\underline{Z}_G = R_G + jX''_d$ (无校正系数 K_G);
- \underline{Z}_{THV} —— 变压器归算到高压侧的短路阻抗;
- U_{nQ} —— 变压器高压侧电网的系统标称电压;
- U_{rG} —— 发电机额定电压;
- φ_{rG} —— 发电机额定功率因数角度,即 I_{rG} 和 $U_{rG} / \sqrt{3}$ 的夹角;
- x''_d —— 发电机的相对电抗,即 $x''_d = X''_d / Z_{rG} = X''_d / (U_{rG}^2 / S_{rG})$;
- x_T —— 分接头位于主位置时的变压器相对电抗, $x_T = X_T / (U_{rT}^2 / S_{rT})$;
- t_r —— 变压器额定变比, $t_r = U_{rTHV} / U_{rTLV}$ 。

若长期运行经验能够确定变压器高压侧最低运行电压满足 $U_{Qmin}^b \geq U_{nQ}$,则式(22)中的 U_{nQ}^2 可用 $U_{Qmin}^b \cdot U_{nQ}$ 替代。另外,若需计算流过变压器的最大局部短路电流,则仍用原式(22)。

若发电机机端运行电压 U_G 恒大于 U_{rG} ,则应用 $U_{Gmax} = U_{rG}(1 + p_G)$ 代替式(22)中的 U_{rG} ,例如取 $p_G = 0.05$ 。

在发电机过励条件下,式(22)校正系数 K_S 适用于计算发电机变压器组的正序、负序和零序短路阻

抗。变压器中性点接地阻抗无需校正。

在发电机欠励条件下(特别在抽水蓄能电厂),计算不对称接地故障[图 3c)与图 3d)]的短路电流时,按照式(22)确定的 K_s 可能得到非保守的结果。此时可考虑其他计算方法,如叠加法。

计算发电机变压器组高压侧短路时,无需考虑发电厂内由辅助变压器供电的异步电动机的影响。

注: IEC 60909-4 中有相关信息。

3.7.2 分接头不可有载调节的发变组

发电机变压器组不能有载调节分接头情况下,计算变压器高压侧的短路电流,应使用式(23)计算发电机变压器组的短路阻抗[见图 11c)]。

$$\underline{Z}_{SO} = K_{SO} (t_r^2 \underline{Z}_G + \underline{Z}_{THV}) \quad \dots\dots\dots (23)$$

其中,校正系数见式(24):

$$K_{SO} = \frac{U_{nQ}}{U_{rG} (1 \pm p_G)} \cdot \frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} \cdot (1 \pm p_T) \cdot \frac{c_{max}}{1 + x''_d \sin \varphi_{rG}} \quad \dots\dots\dots (24)$$

式中:

\underline{Z}_{SO} ——不能有载调节分接头的发电机变压器组折算到高压侧的短路阻抗校正值;

\underline{Z}_G ——发电机超瞬态阻抗 $\underline{Z}_G = R_G + jX''_d$ (无校正系数 K_G);

\underline{Z}_{THV} ——变压器归算到高压侧的短路阻抗;

U_{nQ} ——变压器高压侧电网的系统标称电压;

U_{rG} ——发电机额定电压;

φ_{rG} ——发电机额定功率因数角度,即 I_{rG} 和 $U_{rG}/\sqrt{3}$ 的夹角;

x''_d ——发电机的相对电抗,即 $x''_d = X''_d/Z_{rG} = X''_d/(U_{rG}^2/S_{rG})$;

x_T ——分接头位于主位置时的变压器相对电抗, $x_T = X_T/(U_{rT}^2/S_{rT})$;

t_r ——变压器额定变比, $t_r = U_{rTHV}/U_{rTLV}$;

$1 \pm p_T$ ——变压器分接头位置。

当变压器采用无载分接开关,并将分接头长期置于非主位置时使用 $1 \pm p_T$ 。需计算流经变压器的最大短路电流时,取 $1 - p_T$ 。

校正系数 K_{SO} 适用于计算发电机变压器组的正序、负序和零序短路阻抗。变压器中性点接地阻抗无需校正。该校正系数不受短路前发电机的过励或欠励运行条件影响。

计算发电机变压器组高压侧短路时,无需考虑发电厂内由辅助变压器供电的异步电动机的影响。

3.8 异步电动机

3.8.1 概述

中压或低压异步电动机贡献初始对称短路电流 I''_k 、峰值短路电流 i_p 、对称开断电流 I_b ;不平衡短路时,也会贡献稳态短路电流 I_k 。

计算最大短路电流时应考虑中压异步电动机的影响(见 2.4、2.5)。发电厂辅助设备、化工工业电网、炼钢工业电网等系统中的低压异步电动机也应考虑。

低压供电系统中的异步电动机的贡献不大于对称短路电流初始值 I''_{kM} 的 5%时,异步电动机的影响可以忽略。

$$\sum I_{rM} \leq 0.01 I''_{kM} \quad \dots\dots\dots (25)$$

式中:

$\sum I_{rM}$ ——由短路点所在网络直接供电(不经过变压器)的电动机额定电流之和;

I''_{kM} ——无电动机时的对称短路电流初始值。

计算短路电流时,按照电路图或工艺流程,不会同时投入的中、低压电动机应予以忽略。

电动机的正序和负序短路阻抗 $Z_M = R_M + jX_M$ 由式(26)计算:

$$Z_M = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}}{\sqrt{3}I_{rM}} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} \quad \dots\dots\dots (26)$$

式中:

U_{rM} ——电动机额定电压;

I_{rM} ——电动机额定电流;

S_{rM} ——电动机的额定视在功率, $S_{rM} = P_{rM} / (\eta_{rM} \cos\varphi_{rM})$;

I_{LR}/I_{rM} ——转子堵转电流与电动机额定电流之比。

若 R_M/X_M 已知,则按式(27)计算 X_M :

$$X_M = \frac{Z_M}{\sqrt{1 + (R_M/X_M)^2}} \quad \dots\dots\dots (27)$$

关于 R_M/X_M ,可参考以下数据:

$R_M/X_M = 0.10$,适用于每对电极的功率 $P_{rM} \geq 1\text{MW}$ 的中压电动机;

$R_M/X_M = 0.15$,适用于每对电极的功率 $P_{rM} < 1\text{MW}$ 的中压电动机;

$R_M/X_M = 0.42$,适用于电缆连接的低压电动机群。

根据 4.2 计算短路电流初始值时,在正序和负序系统中异步电动机用式(26)计算得到的阻抗替代。感应电动机的零序阻抗,必要时(见 4.7)可从厂家获得。

3.8.2 通过变压器接入网络的异步电动机

直接通过双绕组变压器接入电网的中压、低压异步电动机,在满足式(28)条件时,可以忽略对供电连接点 Q(见图 9)短路电流的贡献。

$$\frac{\sum P_{rM}}{\sum S_{rT}} \leq \frac{0.8}{\left| \frac{c100 \sum S_{rT}}{\sqrt{3}U_{nQ}I''_{kQ}} - 0.3 \right|} \quad \dots\dots\dots (28)$$

式中:

$\sum P_{rM}$ ——需考虑的中低压异步电动机的额定功率之和;

$\sum S_{rT}$ ——给电动机直接供电的变压器额定容量之和;

I''_{kQ} ——忽略电动机时 Q 点对称短路电流初始值;

U_{nQ} ——Q 点的系统标称电压。

西安英诺威电气有限公司 专用

西安英诺威电气有限公司 购买单位: 西安英诺威电气有限公司 2020-0901-1201-5240-4877 防伪编号: 0100200901067978

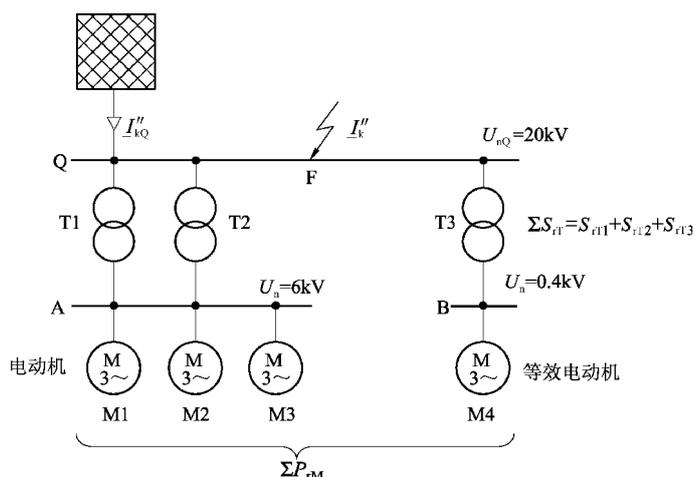


图 9 估算异步电机对总短路电流贡献的示例

低压电动机通常通过不同长度与截面的电缆与母线连接。为简化计算,多台电动机及其连接电缆可合并为单台等效电动机(见图 9 中的 M4)。

对于等效异步电动机,可以参考以下数据:

- Z_M , 按照式(26)计算的阻抗;
- I_{rM} , 被等效的所有电动机额定电流之和;
- $I_{LR}/I_{rM} = 5$;
- $R_M/X_M = 0.42$, 从而 $\kappa_M = 1.3$;
- P_{rM}/p 单对极额定功率, 若任何数据未知, 可取 0.05 MW, 其中 p 为极对数。

如图 9 所示母线 B 上的短路, 如果满足 $I_{rM4} \leq 0.01I''_{kT3}$, 则可以忽略低压电动机组 M4 贡献的短路电流。其中, I_{rM4} 为等效电动机 M4 的额定电流; I''_{kT3} 为没有等效电动机 M4 情况下, 变压器 T3 低压侧的对称短路电流初始值。

若中压网络发生短路(图 9 所示短路点 Q 或 A), 为根据式(26)简化计算 Z_M , 可用 T3 变压器低压侧额定电流 I_{rT3LV} 代替等效电动机 M4 的额定电流 I_{rM4} 。

对于三相绕组变压器, 不允许按照等式(28)进行估算。

3.9 静止变频器驱动电动机

只有在发生三相短路, 且短路瞬间利用电动机的转动惯量和静止变频器进行反馈制动(短暂的逆变运行), 才计及静态变频器驱动的电动机(如轧钢机的驱动电动机)对对称短路电流初始值 I''_k 和短路电流峰值 i_p 的反馈影响。不计对开断电流 I_b 和稳态短路电流 I_k 的影响。

计算短路电流时, 静止变频器供电的电动机与常规异步电动机的处理方法相同。计算时使用以下数据:

- Z_M , 按照式(26)计算的阻抗;
- U_{rM} , 静止变频器变压器电网侧额定电压, 没有变压器时, 取静止变频器额定电压;
- I_{rM} , 静止变频器变压器电网侧额定电流, 没有变压器时, 取静止变频器额定电流;
- $I_{LR}/I_{rM} = 3$;
- $R_M/X_M = 0.10$, $X_M = 0.995Z_M$ 。

计算短路电流时不考虑其他类型的静止变频器。

3.10 电容与非旋转负载

第2章给出的计算方法,允许忽略线路电容、并联导纳及非旋转负载的影响,零序系统除外。

计算峰值短路电流时,无论短路何时发生,并联电容器的放电电流都可忽略。

对于串联补偿电容器,如果配备与之并联的限压保护装置,并且在发生短路时动作,则计算短路电流时也可忽略串联补偿电容器的影响。

在高压直流输电系统中,计算交流系统短路电流时应特别考虑电容器组与滤波器的影响。

4 短路电流计算

4.1 概述

远端短路情况下,可认为短路电流为以下两个分量之和:

- 交流分量,短路期间幅值恒定;
- 非周期分量,初始值为 A ,最终衰减为零。

图1为远端短路时短路电流示意图。对称交流分量 I''_k 、 I_b 和 I_k 均为有效值,且大小几乎相等。

在图4所示经变压器单馈入短路的系统中,如果变压器电抗 X_{TLVK} 与电源等值电抗 X_{Qt} 满足 $X_{TLVK} \geq 2X_{Qt}$,则此种情况往往视为远端短路。 X_{Qt} 根据3.2计算, $X_{TLVK} = K_T X_{TLV}$ 根据3.3计算。

近端短路情况下,可认为短路电流为以下两个分量之和:

- 交流分量,短路期间幅值衰减;
- 非周期分量,初始值为 A ,最终衰减为零。

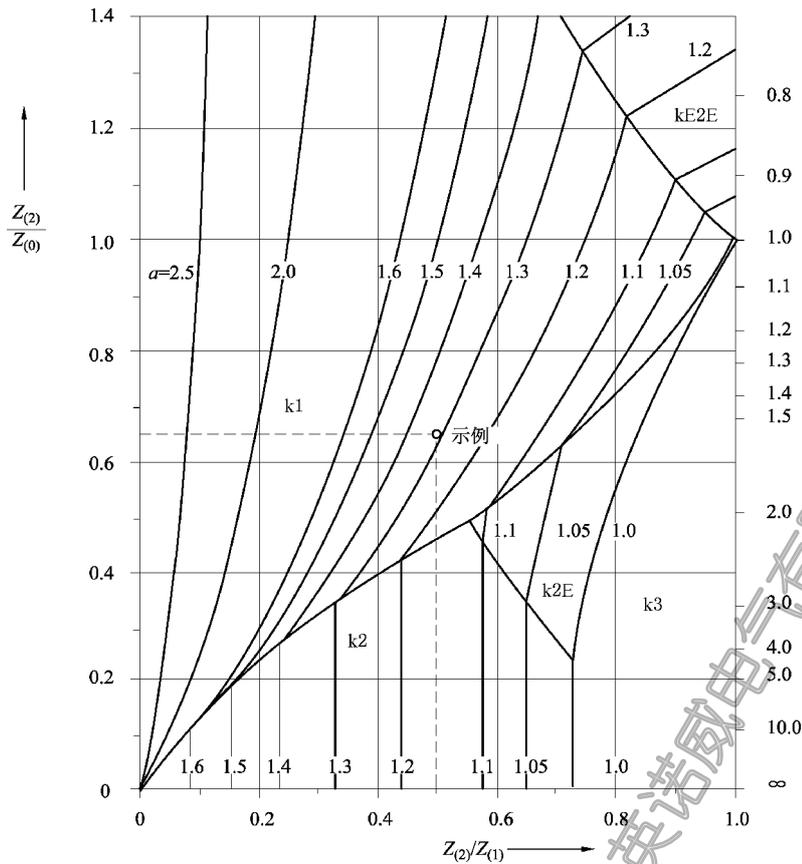
在计算由发电机、发电机变压器组和电动机(发电机附近短路与/或电动机附近短路)馈入的短路电流时,不仅需要计算初始对称短路电流 I''_k 和峰值短路电流 i_p ,还需要计算对称短路开断电流 I_b 和稳态短路电流 I_k 。这种情况下,对称短路开断电流 I_b 小于初始对称短路电流 I''_k 。通常,稳态短路电流 I_k 小于对称短路开断电流 I_b 。

图2为近端短路时短路电流示意图。在某些特殊情况下,可能在短路发生几个周波后,短路电流才出现过零点。在同步电机的直流时间常数大于超瞬态时间常数时,便可能出现这种情况。该现象不在本部分研究范围内。

短路电流非周期分量 $i_{d.c.}$ 根据4.4进行计算。

计算初始对称短路电流时,可取 $Z_{(2)}$ 、 $Z_{(1)}$ 。

导致最高短路电流的短路方式,取决于系统的正序、负序与零序阻抗值。图10为 $Z_{(1)}$ 、 $Z_{(2)}$ 、 $Z_{(0)}$ 阻抗角相等情况下,造成最大短路电流的短路方式示意图。该图用于定性分析,不能取代计算。



说明:

$$a = \frac{\text{不平衡短路电流}}{\text{三相短路电流}}$$

图 10 最大短路电流的短路方式

计算短路点的对称短路电流初始值 I''_k 、对称开断电流 I_b 与稳态短路电流 I_k 时,可通过网络化简将系统等值为短路点的短路阻抗 Z_k 。但该方法不能用于计算短路电流峰值 i_p ,计算 i_p 需区分电网有无并行支路(见 4.3.1.1 和 4.3.1.2)。

对于采用熔断器或限流断路器保护的变电站,首先计算无保护装置时的对称短路电流初始值。由计算得到的对称短路电流初始值与熔断器或限流断路器的特性曲线确定开断电流。以此作为下游变电站的峰值短路电流。

短路点可有一个或多个馈入源,如图 11、图 12 和图 14 所示。在计算辐射状电网对称短路时,每个电源馈入的短路电流可独立计算(图 12 或图 13),因此计算最为简单。

对于电源分布在网状电网,如图 14 所示,以及所有情况下的不对称短路,则有必要通过网络化简计算短路点的短路阻抗 $Z_{(1)} = Z_{(2)}$ 和 $Z_{(0)}$ 。

4.2 对称短路电流初始值 I''_k

通常 $Z_{(0)}$ 大于 $Z_{(1)} = Z_{(2)}$,最高短路电流出现在三相短路时。但在零序阻抗较低的变压器附近短路时, $Z_{(0)}$ 可能低于 $Z_{(1)}$ 。这种情况下,最高初始对称短路电流为两相短路接地时的电流 I''_{kE2E} (见图 11, $Z_{(2)}/Z_{(1)} = 1, Z_{(2)}/Z_{(0)} > 1$)。

4.2.1 三相短路

通常情况下,三相短路时采用等效电压源 $cU_n/\sqrt{3}$ 和短路阻抗 $Z_k = R_k + jX_k$ 通过等式(29)计算对

称短路电流初始值 I''_k 。

$$I''_k = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad \dots\dots\dots(29)$$

等效电压源 $cU_n/\sqrt{3}$ 施加在短路点(见图 4),电压系数 c 按表 1 确定。

4.2.1.1 单馈入短路

由单一电源馈入的远端短路[图 11a)],可应用式(29)计算短路电流。其中:

$$R_k = R_{Qt} + R_{TK} + R_L \quad \dots\dots\dots(30)$$

$$X_k = X_{Qt} + X_{TK} + X_L \quad \dots\dots\dots(31)$$

式中, R_k 与 X_k 分别为图 11a)对应的正序网络串联电阻与电抗之和。 R_L 为计算最大短路电流时的线路电阻,即导体温度为 20 °C 时的导线电阻。

变压器的修正阻抗 $Z_{TK} = R_{TK} + jX_{TK} = K_T(R_T + jX_T)$, 从式(7)~式(9)或从式(10)~式(11)得到。校正系数 K_T 由式(12)或式(13)计算。

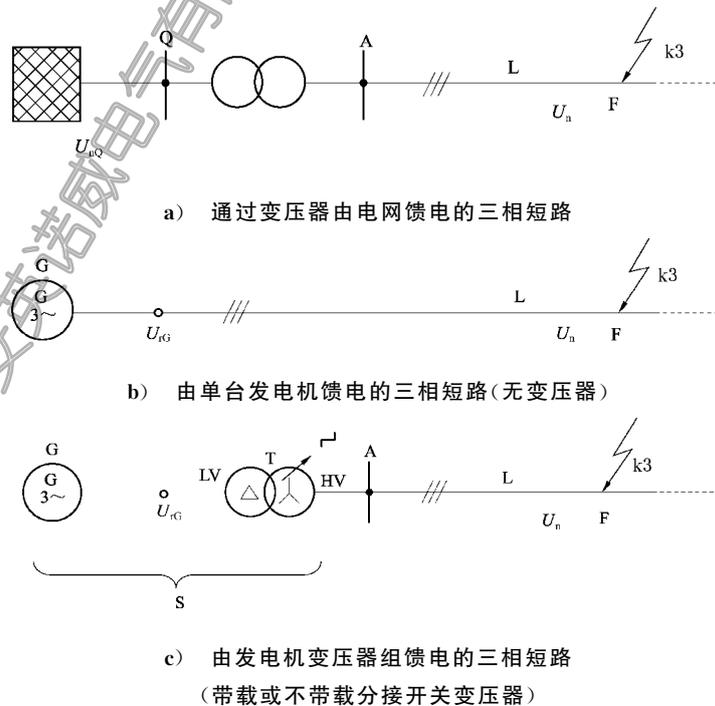


图 11 单电源馈电的三相短路示例

若电阻 R_k 小于 $0.3X_k$, 可忽略。馈电网络阻抗 $Z_{Qt} = R_{Qt} + jX_{Qt}$ 折算到变压器短路点侧(图 4 中为 LV 侧)。

由单一发电机或单一发电机变压器组馈电的情况,如图 11b)、图 11c)所示,计算对称短路电流初始值,须计算发电机或发电机变压器组的短路阻抗校正值(见 3.6.1 与 3.7),并与线路阻抗 $Z_L = R_L + jX_L$ 串联。

图 11b)中的短路阻抗见式(32):

$$Z_k = Z_{GK} + Z_L = K_G(R_G + jX''_d) + Z_L \quad \dots\dots\dots(32)$$

图 11c)中的短路阻抗见式(33):

$$Z_k = Z_S + Z_L = K_S(t_r^2 Z_G + Z_{THV}) + Z_L \quad \dots\dots\dots(33)$$

Z_{GK} 应由式(17)计算。 Z_S 由式(21)或式(23)以及式(22)或式(24)确定的 K_S 或 K_{S0} 计算。发电机阻抗应采用额定变比 t_r 折算至高压侧。变压器阻抗 $Z_{THV} = R_{THV} + jX_{THV}$ 由式(7)~式(9)计算,并折算到高压侧,不考虑修正系数 K_T 。

4.2.1.2 辐射状电源馈电的短路

由多个辐射电源馈入短路电流(如图 12 所示),短路点 F 处的短路电流为各分支短路电流之和。根据式(29)和 4.2.1.1,可确定各分支短路电流。

短路点 F 处短路电流为各支路短路电流的向量之和(见图 12):

$$I_k = \sum_i I''_{ki} \dots\dots\dots (34)$$

在本部分要求的精度范围内,通常可取各分支短路电流的绝对值之和作为短路点 F 的短路电流。在 4.2.1.5 中给出的计算网状电网短路电流的方法也适用于辐射状电网,且具有通用性,适于计算机求解。

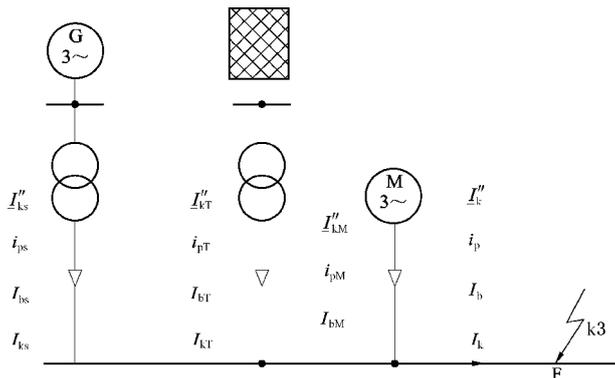


图 12 辐射状电网示例

4.2.1.3 分接头可有载调节的发电机变压器组内的短路电流

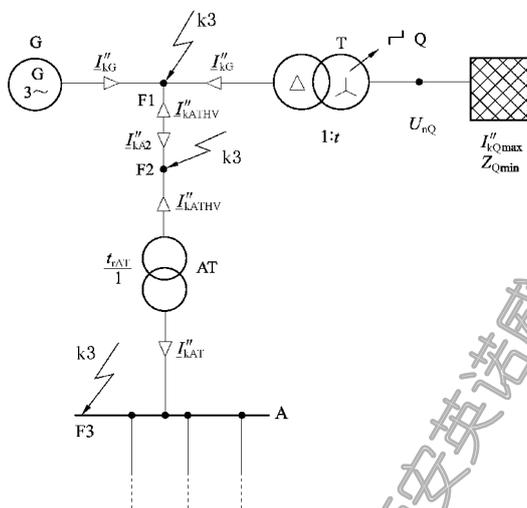


图 13 发电厂内的三相短路

在发电机变压器组有带载分接开关的情况下,如图 13 所示,计算短路点 F1 处的局部对称短路电流初始值 I''_{kG} 与 I''_{kT} 可按照式(35)计算:

$$I''_{kG} = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3} K_{G,S} Z_G} \dots\dots\dots (35)$$

其中:

订单号: 0100200901067978 防伪编号: 2020-0901-1201-5240-4877 购买单位: 西安英诺威电气有限公司

西安英诺威电气有限公司 专用

$$K_{G.S} = \frac{c_{\max}}{1 + x''_d \sin\varphi_{rG}} \dots\dots\dots (36)$$

$$I''_{kT} = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3} \left| Z_{TLV} + \frac{1}{t_r^2} Z_{Qmin} \right|} \dots\dots\dots (37)$$

式中：

- Z_G —— 发电机超瞬态阻抗, $Z_G = R_G + jX''_d$;
- x''_d —— 超瞬态电抗标么值, $x''_d = X''_d / Z_{rG} = X''_d / (U_{rG}^2 / S_{rG})$;
- Z_{TLV} —— 按照式(7)~式(9)计算的折算到低压侧的变压器阻抗;
- t_r —— 额定变比;
- Z_{Qmin} —— 对应于 I''_{kQmax} 的馈电网络阻抗最小值。

I''_{kQmax} 为应取发电机变压器组运行寿命内可能出现的最大值。

计算注入短路点 F2(如厂用变高压侧)的局部短路电流 I''_{kF2} 时,可采用式(38)：

$$I''_{kF2} = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3}} \left[\frac{1}{K_{G.S} Z_G} + \frac{1}{K_{T.S} Z_{TLV} + \frac{1}{t_r^2} Z_{Qmin}} \right] = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3} Z_{rs1}} \dots\dots\dots (38)$$

其中：

$$K_{T.S} = \frac{c_{\max}}{1 - x_T \sin\varphi_{rG}} \dots\dots\dots (39)$$

$K_{G.S}$ 由式(36)确定。

发电机变压器组高压侧配备带载分接开关,式(35)~式(39)假定发电机端电压为 U_{rG} 。若发电机端电压为 $U_G = U_{rG} (1 \pm p_G)$,则须用式(40)~式(44)取代式(35)~式(39)。

计算 F1 或 F2 点的总短路电流值,还需考虑中压与低压厂用电动机馈入的局部短路电流 I''_{kATHV} 。

4.2.1.4 分接头不可有载调节的发电机变压器组内的短路

对于不可有载调节分接头的发电机变压器组,应按式(40)计算图 13 中的局部短路电流：

$$I''_{kG} = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3} K_{G.SO} Z_G} \dots\dots\dots (40)$$

其中：

$$K_{G.SO} = \frac{1}{1 + p_G} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + x''_d \sin\varphi_{rG}} \dots\dots\dots (41)$$

$$I''_{kT} = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3} \left| Z_{TLV} + \frac{1}{t_r^2} Z_{Qmin} \right|} \dots\dots\dots (42)$$

式中, Z_G 、 x''_d 、 Z_{TLV} 和 Z_{Qmin} 见 4.2.1.3。

图 13 中的局部短路电流 I''_{kF2} 可通过式(43)计算：

$$I''_{kF2} = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3}} \left[\frac{1}{K_{G.SO} Z_G} + \frac{1}{K_{T.SO} Z_{TLV} + \frac{1}{t_r^2} Z_{Qmin}} \right] = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3} Z_{rs1}} \dots\dots\dots (43)$$

其中：

$$K_{T.SO} = \frac{1}{1 + p_G} \cdot \frac{c_{\max}}{1 - x_T \sin\varphi_{rG}} \dots\dots\dots (44)$$

$K_{G.SO}$ 由式(41)确定。

图 13 中 F3 点短路时,式(38)或式(43)确定的短路阻抗 Z_{rs1} 用于计算局部短路电流 I''_{kAT} 。图 13 中厂用变压器的阻抗采用 3.3.3 中 K_T 进行校正。

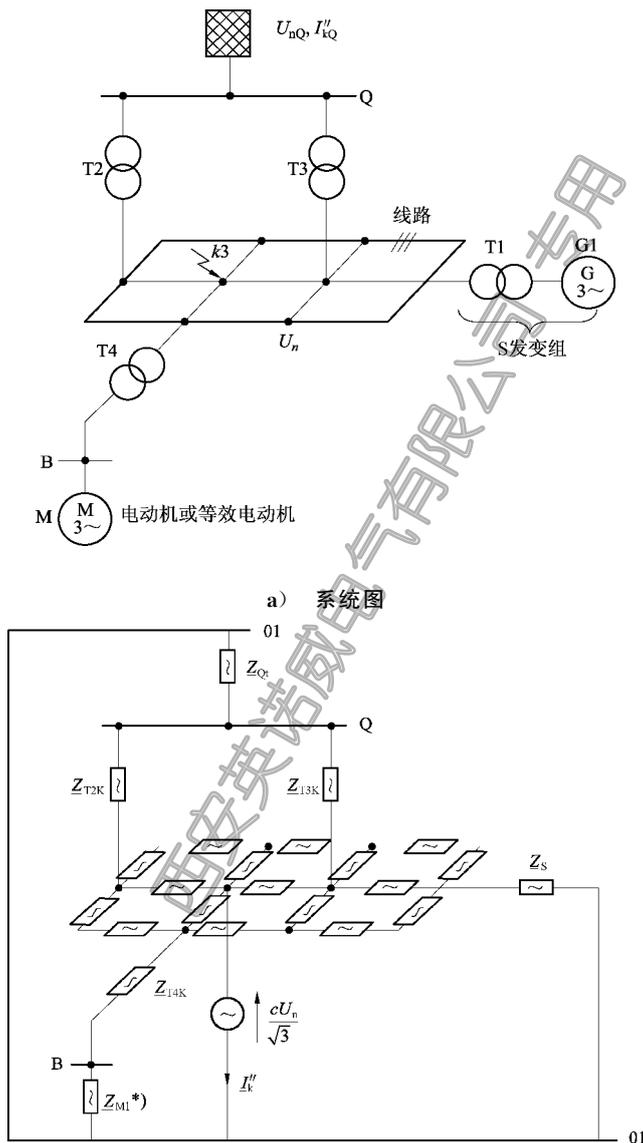
计算 F1 或 F2 点(图 13)的总短路电流值,还需考虑中压与低压厂用电动机馈入的局部短路电流 I''_{kATHV} 。

4.2.1.5 网状电网中的短路

计算网状电网中的三相短路电流(如图 14 所示),需使用电气设备的正序短路阻抗,通过网络化简(串联、并联、星角变换等)计算短路点的短路阻抗。

经过变压器连接的阻抗,必须通过额定变比的平方进行折算。如果两个系统之间并列的多台变压器额定变比(t_{rT1} 、 t_{rT2} ... t_{rTn})稍有差别,则可采用其算术平均值。

按式(29),采用等效电压源 $cU_n/\sqrt{3}$ 计算对称短路电流初始值。



说明:

Z_M ——电动机或等效电动机的阻抗。

b) 在短路点施加等效电压源 $cU_n/\sqrt{3}$ 的等效电路图

图 14 网状电网示例

4.2.2 两相短路

两相短路时[见图 3b)],按以式(45)计算对称短路电流初始值。

$$I''_{k2} = \frac{cU_n}{|\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)}|} = \frac{cU_n}{2|\underline{Z}_{(1)}|} = \frac{\sqrt{3}}{2}I''_k \quad \dots\dots\dots(45)$$

在短路初始阶段,无论远端短路还是近端短路,负序阻抗与正序阻抗大致相等,因此式(45)中假定 $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$ 。

近端短路时,在瞬态和稳态过程阶段 $\underline{Z}_{(2)}$ 与 $\underline{Z}_{(1)}$ 将不再相等。

4.2.3 两相接地短路

两相接地短路时[见图 3c)],须区分电流 I''_{k2EL2} 、 I''_{k2EL3} 和 I''_{kE2E} 。

远端短路时, $\underline{Z}_{(2)}$ 与 $\underline{Z}_{(1)}$ 近似相等,若 $\underline{Z}_{(0)}$ 小于 $\underline{Z}_{(2)}$,则两相接地短路时的电流 I''_{kE2E} 通常大于其他故障类型的对称短路电流初始值 I''_k 、 I''_{k2} 、 I''_{k2E} 与 I''_{k1} 。

由式(46)与式(47)计算 I''_{k2EL2} 、 I''_{k2EL3} :

$$I''_{k2EL2} = -jcU_n \frac{\underline{Z}_{(0)} - a\underline{Z}_{(2)}}{\underline{Z}_{(1)}\underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)}\underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(2)}\underline{Z}_{(0)}} \quad \dots\dots\dots(46)$$

$$I''_{k2EL3} = jcU_n \frac{\underline{Z}_{(0)} - a^2\underline{Z}_{(2)}}{\underline{Z}_{(1)}\underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)}\underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(2)}\underline{Z}_{(0)}} \quad \dots\dots\dots(47)$$

由式(48)计算流经地和/或接地线的短路电流 I''_{kE2E} 。

$$I''_{kE2E} = -\frac{\sqrt{3}cU_n \underline{Z}_{(2)}}{\underline{Z}_{(1)}\underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)}\underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(2)}\underline{Z}_{(0)}} \quad \dots\dots\dots(48)$$

远端短路时,若考虑 $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$,则电流绝对值按式(49)~式(51)计算。

$$I''_{k2EL2} = cU_n \frac{|\underline{Z}_{(0)}/\underline{Z}_{(1)} - a|}{|\underline{Z}_{(1)} + 2\underline{Z}_{(0)}|} \quad \dots\dots\dots(49)$$

$$I''_{k2EL3} = cU_n \frac{|\underline{Z}_{(0)}/\underline{Z}_{(1)} - a^2|}{|\underline{Z}_{(1)} + 2\underline{Z}_{(0)}|} \quad \dots\dots\dots(50)$$

$$I''_{kE2E} = \frac{\sqrt{3}cU_n}{|\underline{Z}_{(1)} + 2\underline{Z}_{(0)}|} \quad \dots\dots\dots(51)$$

4.2.4 单相接地短路

单相接地短路[见图 3d)]时,短路电流交流分量初始值 I''_{k1} ,按式(52)计算:

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3}cU_n}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)}} \quad \dots\dots\dots(52)$$

远端短路时,若考虑 $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$,则电流绝对值计算如下:

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3}cU_n}{|2\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}|} \quad \dots\dots\dots(53)$$

若 $\underline{Z}_{(0)}$ 小于 $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$,则单相短路电流 I''_{k1} 大于三相短路电流 I''_k ,但小于 I''_{kE2E} 。然而,满足 $1 > \underline{Z}_{(0)}/\underline{Z}_{(1)} > 0.23$ 条件下, I''_{k1} 为被断路器切断的最大电流。

4.3 短路电流峰值 i_p

4.3.1 三相短路

4.3.1.1 辐射状电源馈电的三相短路

由辐射状电网(如图 11、图 12 所示)馈电的三相短路,各馈电支路对短路电流峰值的贡献均可表

示为：

$$i_p = k \sqrt{2} I''_k \quad \dots\dots\dots (54)$$

系数 k 由 R/X 或 X/R 决定, 可通过图 15 查曲线或通过式(53)计算得到：

$$k = 1.02 + 0.98e^{-3R/X} \quad \dots\dots\dots (55)$$

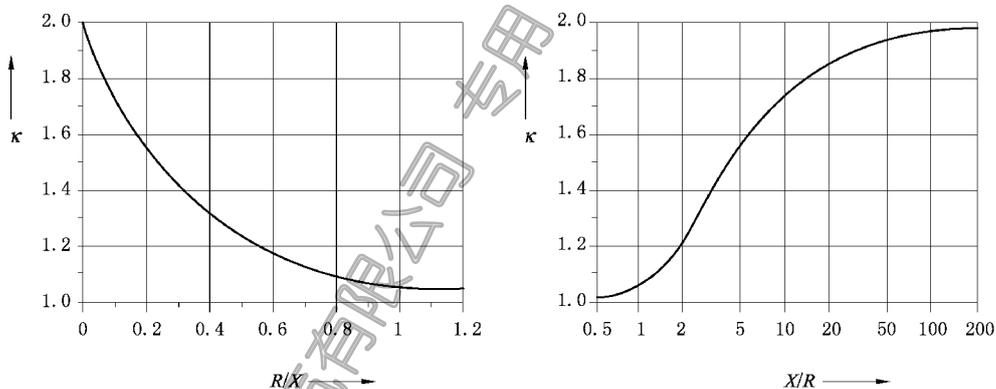


图 15 串联支路中系数 k 与 R/X 或 X/R 的函数关系

式(54)与式(55)假定短路发生于电压过零时刻, 并在大约半个周波后(见 IEC/TR2 60909-1:2002, 图 24)短路电流达到峰值 i_p 。对于同步电机, 应使用假想电阻 R_{Gf} (见 3.6.1)。

短路点 F 处的短路电流峰值 i_p , 可表示为辐射状电网各支路的局部短路电流峰值之和：

$$i_p = \sum_i i_{pi} \quad \dots\dots\dots (56)$$

在图 12 所示算例中：

$$i_p = i_{pS} + i_{pT} + i_{pM} \quad \dots\dots\dots (57)$$

4.3.1.2 网状电网中的三相短路

按式(54)计算网状电网中的短路电流峰值 i_p , 其中系数 k 应根据要求的计算精度, 选用以下三种方法之一：

a) 单一 R/X 或 X/R

取网络中最小 R/X 或最大 X/R 值, 由图 15 查得系数 k 。

选取最小 R/X 或最大 X/R 值时, 只需考虑短路点标称电压下流过局部短路电流的分支回路以及与短路点相连的变压器分支回路。任一分支可能是由多个支路串联组成。

b) 短路点阻抗的 R/X 或 X/R

通过网络化简得到短路点的等值阻抗 $\underline{Z}_k = R_k + jX_k$, 采用比值 R_k/X_k 计算系数 k , 并乘以 1.15 倍以弥补其偏差。

$$i_{p(b)} = 1.15k_{(b)} \sqrt{2} I''_k \quad \dots\dots\dots (58)$$

若所有分支回路的 R/X 均小于 0.3, 则不必使用系数 1.15。在低压电网中, 乘积 $1.15k_{(b)}$ 的限值为 1.8, 在中压、高压电网中为 2.0。

系数 $k_{(b)}$ 由图 15 根据 R_k/X_k 比值确定。短路点 F 处的等值阻抗 $\underline{Z}_k = R_k + jX_k$ 是在额定频率 50 Hz 或 60 Hz 时计算得到。

c) 等效频率法

计算等效频率 $f_c = 20$ Hz(额定频率 $f = 50$ Hz)或 $f_c = 24$ Hz(额定频率 $f = 60$ Hz)时短路点的等值

阻抗 \underline{Z}_c 。按式(59)计算 R/X 或 X/R 。

$$\begin{cases} \frac{R}{X} = \frac{R_c}{X_c} \cdot \frac{f_c}{f} \\ \frac{X}{R} = \frac{X_c}{R_c} \cdot \frac{f}{f_c} \end{cases} \dots\dots\dots (59)$$

式中：

- $\underline{Z}_c = R_c + jX_c$ ——为取等效频率 f_c 时从短路点看的系统阻抗；
- R_c ——阻抗 \underline{Z}_c 实部(通常与工频时的电阻 R 不等)；
- X_c ——阻抗 \underline{Z}_c 虚部(与工频时的电抗 X 不等)。

系数 k 由图 15 根据比值 R/X 或 X/R 查得,或由式(55)求得。对于网状电网,建议采用方法 c) (见 IEC 60909-1)。采用方法 c 时,各阻抗校正系数 K_T 、 K_G 、 K_S 或 K_{S0} 均与工频时的计算值相同。

4.3.2 两相短路

两相短路时的短路电流峰值可表示为：

$$i_{p2} = k \sqrt{2} I''_{k2} \dots\dots\dots (60)$$

应根据系统结构按照 4.3.1.1 或 4.3.1.2 计算系数 k 。为简化计算,可采用与三相短路相同的 k 值。当 $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$ 时,短路电流峰值 i_{p2} 小于三相短路时的短路电流峰值 i_p ,其关系如式(61)所示。

$$i_{p2} = \frac{\sqrt{3}}{2} i_p \dots\dots\dots (61)$$

4.3.3 两相接地短路

对于两相接地短路,短路电流峰值可表示为：

$$i_{p2E} = k \sqrt{2} I''_{k2E} \dots\dots\dots (62)$$

应根据系统结构按照 4.3.1.1 或 4.3.1.2 计算系数 k 。为简化计算,可采用与三相短路相同的 k 值。只有当 $\underline{Z}_{(0)}$ 远小于 $\underline{Z}_{(1)}$ (小于 $\underline{Z}_{(1)}$ 的 1/4)时,才需计算 i_{p2E} 。

4.3.4 单相接地短路

对于单相接地短路,峰值短路电流可表示为：

$$i_{p1} = k \sqrt{2} I''_{k1} \dots\dots\dots (63)$$

应根据系统结构按照 4.3.1.1 或 4.3.1.2 计算系数 k 。为简化计算,可采用与三相短路相同的 k 值。

4.4 短路电流非周期分量 $i_{d.c.}$

如图 1、图 2 所示,短路电流的最大非周期分量 $i_{d.c.}$,可按式(64)计算。

$$i_{d.c.} = \sqrt{2} I''_k e^{-2\pi \cdot f t R/X} \dots\dots\dots (64)$$

式中：

- I''_k ——对称短路电流初始值；
- f ——额定频率,单位为赫兹(Hz)；
- t ——时间,单位为秒(s)；
- R/X ——按照 4.3.1.1 或 4.3.1.2 中的方法 a)或方法 c)求出的比值(见 3.6.1 注)。

计算 $i_{d.c.}$ 时,发电机电枢电阻应取 R_G ,而不是 R_{Gf} 。

对于网状电网, R/X 或 X/R 由 4.3.1.2 中的方法 c)确定,等效频率 f_c 应根据额定频率 f 与时间 t 的乘积选取,如下表所示：

西安英诺威电气有限公司 购买单位：西安英诺威电气有限公司 防伪编号：2020-0901-1201-5240-4877 订单号：0100200901067978

$f \cdot t$	<1	<2.5	<5	<12.5
f_c/f	0.27	0.15	0.092	0.055

4.5 对称开断电流 I_b

一般来说,短路点 t_{\min} 时刻的开断电流包括对称开断电流 I_b 与非周期分量 $i_{d.c.}$, $i_{d.c.}$ 由式(64)确定。

注:对于部分近端短路, t_{\min} 时的 $i_{d.c.}$ 可能大于电流 I_b 的峰值,从而造成短路电流失去过零点。

4.5.1 远端短路

对于远端短路,对称开断电流 I_b 等于对称短路电流初始值 I''_k 。

$$I_b = I''_k \quad \dots\dots\dots (65)$$

$$I_{b2} = I''_{k2} \quad \dots\dots\dots (66)$$

$$I_{b2E} = I''_{k2E} \quad \dots\dots\dots (67)$$

$$I_{b1} = I''_{k1} \quad \dots\dots\dots (68)$$

4.5.2 近端短路

4.5.2.1 单馈入的三相短路

在如图 11b)、图 11c)所示的单电源馈电系统或如图 12 所示的辐射状馈电系统中,发生近端三相短路,采用式(70)确定的系数 μ 表示对称开断电流的衰减,即:

$$I_b = \mu I''_k \quad \dots\dots\dots (69)$$

系数 μ 与 t_{\min} 和 I''_{kG}/I_{rG} 有关,可根据 I''_{kG}/I_{rG} 比值和选择 t_{\min} 确定, I_{rG} 为发电机额定电流。式(70)中的 μ 值适用于旋转励磁机或静止整流励磁装置的同步发电机(用静止整流励磁装置励磁时,其最小延时 t_{\min} 应小于 0.25s,最高励磁电压小于 1.6 倍额定负载下的励磁电压)。对于其他情况,若实际数值未知,可取 $\mu = 1$ 。

当短路点与发电机之间有升压变压器时[图 11c)],变压器高压侧局部短路电流 I''_{kS} 应根据变压器变比折算到发电机出口侧, $I''_{kG} = I''_{kS}$ 。即 I''_{kG} (I''_{kG} 为发电机端的短路电流)和 I_{rG} (I_{rG} 为发电机额定电流)应为归算到同一电压下的值。系数 μ 按式(70)计算。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{对 } t_{\min} = 0.02 \text{ s 时, } \mu = 0.84 + 0.26e^{-0.26I''_{kG}/I_{rG}} \\ \text{对 } t_{\min} = 0.05 \text{ s 时, } \mu = 0.71 + 0.51e^{-0.30I''_{kG}/I_{rG}} \\ \text{对 } t_{\min} = 0.10 \text{ s 时, } \mu = 0.62 + 0.72e^{-0.32I''_{kG}/I_{rG}} \\ \text{对 } t_{\min} \geq 0.25 \text{ s 时, } \mu = 0.56 + 0.94e^{-0.38I''_{kG}/I_{rG}} \end{array} \right. \quad \dots\dots\dots (70)$$

计算电动机的 μ 值时,用 I''_{kM}/I_{rM} 替代 I''_{kG}/I_{rG} 。

当 $I''_{kG}/I_{rG} \leq 2$,式(70)中 μ 值取 1。系数 μ 也可按图 16 查曲线,对于相邻最小延时 t_{\min} 曲线间对应的 μ 值,可用线形插值求取。

图 16 也适用于具有最短延时 $t_{\min} \leq 0.1$ s 的复式励磁的低压发电机。 $t_{\min} > 0.1$ s 的低压发电机开断电流计算不属于本部分范围;发电机厂商可提供相关信息。

购买单位: 西安英诺威电气有限公司
防伪编号: 2020-0901-1201-5240-4877
订单号: 0100200901067978

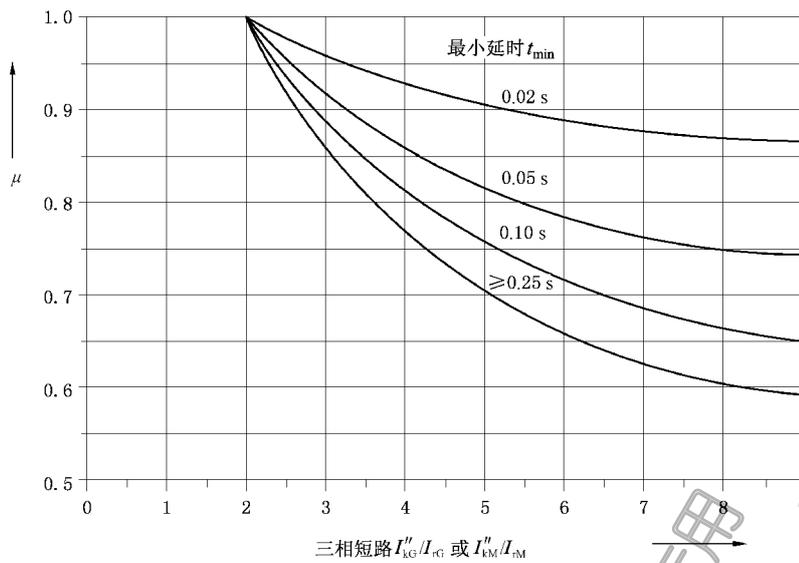


图 16 对称开断电流 I_b 的计算系数 μ

4.5.2.2 辐射状电源馈电的三相短路

对于辐射状电网(图 12)发生三相短路,短路点的对称开断电流为各支路开断电流之和。

$$I_b = \sum I_{bi} \dots\dots\dots (71)$$

对于图 12 示例:

$$I_b = I_{bS} + I_{bT} + I_{bM} = \mu I''_{kS} + I''_{kT} + \mu q I''_{kM} \dots\dots\dots (72)$$

式中, I''_{kS} 、 I''_{kT} 、 I''_{kM} 为各支路对短路点短路电流 I''_k 的贡献电流;系数 μ 由式(70)或由图 16 确定。对于异步电动机,用 I''_{kM}/I_{rM} 替代 I''_{kG}/I_{rG} (见表 3)。

异步电动机对称开断电流的计算系数 q , 可视为最小延时 t_{min} 的函数。

$$\begin{cases} \text{对 } t_{min} = 0.02 \text{ s 时, } q = 1.03 + 0.12 \ln(P_{rM}/p) \\ \text{对 } t_{min} = 0.05 \text{ s 时, } q = 0.79 + 0.12 \ln(P_{rM}/p) \\ \text{对 } t_{min} = 0.10 \text{ s 时, } q = 0.57 + 0.12 \ln(P_{rM}/p) \\ \text{对 } t_{min} \geq 0.25 \text{ s 时, } q = 0.26 + 0.10 \ln(P_{rM}/p) \end{cases} \dots\dots\dots (73)$$

式中:

P_{rM} ——为额定功率,单位为兆瓦(MW);

p ——为极对数。

如果式(73)的计算结果大于 1,则取 $q = 1$ 。系数 q 也可通过图 17 确定。

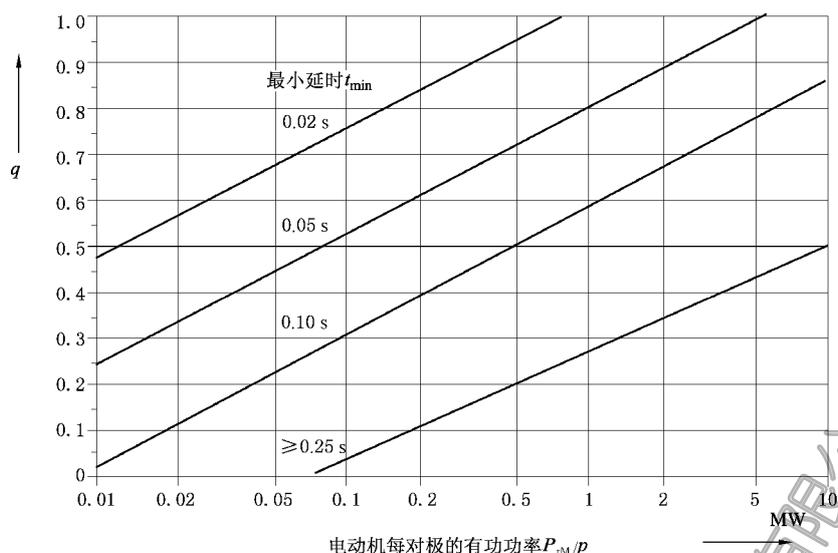


图 17 异步电动机对称开断电流计算系数 q

4.5.2.3 网状电网中的三相短路

先计算开断时刻短路点的电流,然后各支路中流过的局部短路电流即可求出。网状电网中对称开断短路电流 I_b 按式(74)计算。

$$I_b = I''_k \quad \dots\dots\dots (74)$$

按式(74)算出的电流 I_b 比实际值要大。更精确的计算可采用式(75)、式(76)和式(77)。

$$\underline{I}_b = \underline{I''}_k - \sum_i \frac{\Delta U''_{Gi}}{cU_n/\sqrt{3}} (1 - \mu_i) \underline{I''}_{kGi} - \sum_j \frac{\Delta U''_{Mj}}{cU_n/\sqrt{3}} (1 - \mu_j q_j) \underline{I''}_{kMj} \quad \dots\dots\dots (75)$$

$$\underline{\Delta U''}_{Gi} = j X''_{diK} \underline{I''}_{kGi} \quad \dots\dots\dots (76)$$

$$\underline{\Delta U''}_{Mj} = j X''_{Mj} \underline{I''}_{kMj} \quad \dots\dots\dots (77)$$

式中:

- μ_i 、 μ_j ——用 I''_{kGi}/I_{rGi} 或 I''_{kMj}/I_{rMj} 根据式(70)计算或按图 16 查出的值;
- q_j ——根据式(73)求得的电动机反馈的对称开断电流衰减系数;
- $cU_n/\sqrt{3}$ ——为短路点等效电压源;
- $\underline{I''}_k$ 、 \underline{I}_b ——分别为对称短路电流初始值及考虑所有馈电网络、同步电机和异步电动机影响时的对称开断电流;
- $\underline{\Delta U''}_{Gi}$ 、 $\underline{\Delta U''}_{Mj}$ ——分别为同步电机(i)和异步电机(j)的初始机端电压降落;
- X''_{diK} ——同步电机(i)的校正超瞬态电抗: $X''_{diK} = K_v X''_{di}$, $K_v = K_G$ 、 K_S 或 K_{SO} ;
- X_{Mj} ——异步电动机(j)的电抗;
- $\underline{I''}_{kGi}$ 、 $\underline{I''}_{kMj}$ ——分别为同步电机(i)和异步电机(j)的对称短路电流初始值,在电机机端测得。

式(76)与式(77)中的 $\underline{I''}$ 与 $\underline{\Delta U''}$ 均为从机端测得的量,且应归算至同一电压。

如果短路位置远离电动机,即 $\mu_j = 1$,则取 $1 - \mu_j q_j = 0$,与 q_j 无关。

4.5.2.4 不平衡短路

对于不平衡短路,不考虑发电机磁通的衰减,应用式(66)、式(67)或式(68)。

4.6 稳态短路电流 I_k

稳态短路电流 I_k 的计算精度低于对称短路电流初始值 I''_k 的计算精度。

4.6.1 单馈入三相短路

仅由一台发电机或发电机变压器组馈电的近端三相短路[见图 11b)或图 11c)], 稳态短路电流 I_k 受发电机励磁系统、电压调节装置与饱和等因素影响。

同步发电机、同步电动机或调相机若采用并励静止励磁装置, 则在机端短路时同步机不会贡献电流 I_k 。但若机端与短路点之间有阻抗存在, 则同步机可能会贡献电流 I_k 。在发电机变压器组的情况下, 若短路发生在变压器高压侧, 发电机可能会贡献电流 I_k [见图 11c)]。

4.6.1.1 最大稳态短路电流

计算最大稳态短路电流时, 假定将同步发电机设定至最大励磁状态, 采用式(78)计算。

$$I_{k\max} = \lambda_{\max} I_{rG} \dots\dots\dots (78)$$

若发电机采用并励静止励磁装置, 机端短路时, 机端电压以及发电机励磁电压均会瞬间降为零, 这种情况下 $\lambda_{\max} = \lambda_{\min} = 0$ 。

隐极机或凸极机的系数 λ_{\max} 根据图 18 或图 19 求得, 图中饱和电抗 x_{dsat} 为机组空载短路比的倒数。

曲线簇 I 中的 λ_{\max} 曲线是在额定负载、额定功率因数下, 对于隐极机[图 18a)]是在励磁顶值为 1.3 倍额定励磁时绘制的, 对于凸极机[图 19a)]是在励磁顶值为 1.6 倍额定励磁时绘制的。

曲线簇 II 中的 λ_{\max} 曲线是在额定负载、额定功率因数下, 对于隐极机[图 18b)]是在励磁顶值为 1.6 倍额定励磁时绘制的, 对于凸极机[图 19b)]是在励磁顶值为 2.0 倍额定励磁时绘制的。

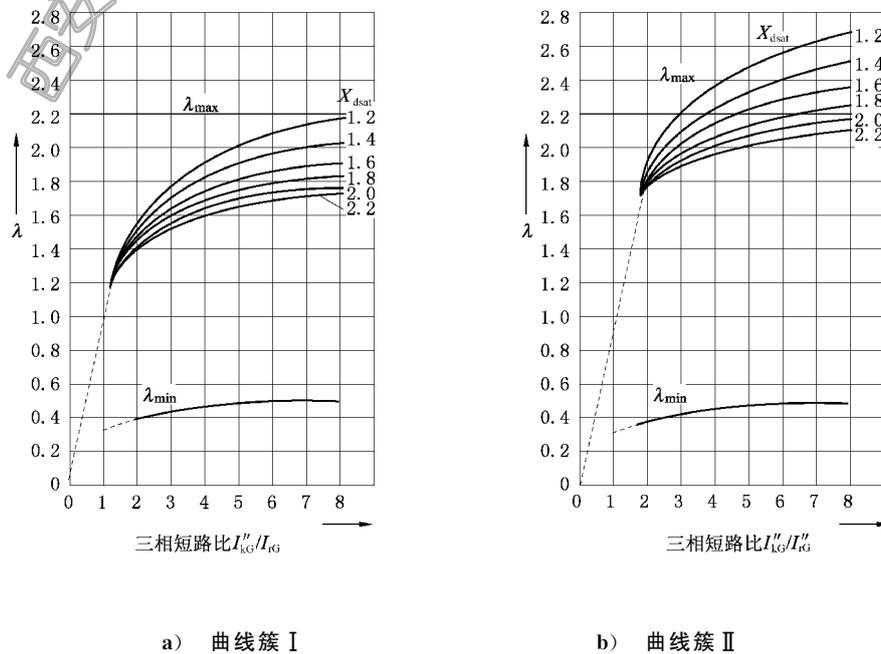


图 18 隐极机的 λ_{\max} 与 λ_{\min} 系数

西安英诺威电气有限公司 购买单位: 西安英诺威电气有限公司 2020-0901-1201-5240-4877 防伪编号: 0100200901067978 订单号: 0100200901067978

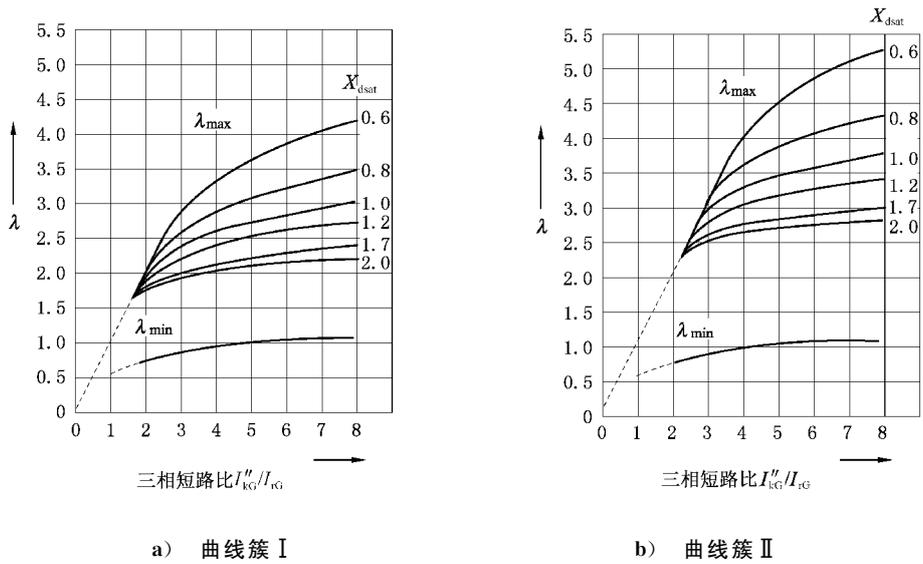


图 19 凸极机的 λ_{\max} 与 λ_{\min} 系数

在采用并励静止励磁装置的情况下,如果短路发生在机组变压器高压侧或电网中,并且短路期间励磁电压在机端电压下降时达到顶值,也可应使用曲线簇 I 或曲线簇 II。

注:对于远端短路时 $I''_{kG}/I_{rG} \leq 2$, λ_{\max} 曲线簇可根据 IEC/TR2 60909-1:2000 中式(87)计算。

4.6.1.2 最小稳态短路电流

对于如图 11b)或图 11c)所示的单电源馈电短路,为计算稳态短路电流最小值,假定同步机为恒定的空载励磁状态,用式(79)计算。

$$I_{k\min} = \lambda_{\min} I_{rG} \dots\dots\dots (79)$$

其中, λ_{\min} 可从图 18 与图 19 查得。计算最小稳态短路时,按表 1 采用 $c = c_{\min}$ 。

对于由一台或多台相近的复式励磁发电机并联馈电的近端短路,其最小稳态短路电流根据式(80)计算。

$$I_{k\min} = \frac{c_{\min} U_n}{\sqrt{3} \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \dots\dots\dots (80)$$

发电机的有效计算电抗为:

$$X_{dP} = \frac{U_{rG}}{\sqrt{3} I_{kP}} \dots\dots\dots (81)$$

其中, I_{kP} 为复式励磁发电机端口三相短路时的稳态短路电流,该值可从制造厂取得。

4.6.2 辐射状电网三相短路

对于辐射状电网中(图 12)的三相短路,短路点的稳态短路电流为各支路稳态短路电流贡献之和。

$$I_k = \sum_i I_{ki} \dots\dots\dots (82)$$

对于图 12 示例,则有:

$$I_k = I_{kS} + I_{kT} + I_{kM} = \lambda I_{rGt} + I''_{kT} \dots\dots\dots (83)$$

其中, λ (λ_{\max} 或 λ_{\min}) 由图 18 与图 19 确定; I_{rGt} 为发电机折算到变压器高压侧的额定电流。

对于馈电网络或与变压器串联的馈电网络(见图 12),可认为 $I_k = I''_k$ (远端短路)。异步电动机端口发生三相短路时,其稳态短路电流为零。

计算 $I_{k\max}$ 或 $I_{k\min}$ 时,采用表 1 中的系数 c_{\max} 或 c_{\min} 。

西安英诺威电气有限公司 购买单位: 西安英诺威电气有限公司 防伪编号: 2020-0901-1201-5240-4877 订单号: 0100200901067978

4.6.3 网状电网三相短路

在含多个馈电源的网状电网中,稳态短路电流可由式(84)、式(85)近似计算。

$$I_{k\max} = I''_{k\max M} \dots\dots\dots (84)$$

$$I_{k\min} = I''_{k\min} \dots\dots\dots (85)$$

$I''_{k\max}$ 根据 2.4 与 4.2.1.5 计算, $I''_{k\min}$ 根据 2.5 与 4.2.1.5 计算。

式(84)与式(85)在远端短路与近端短路情况下均适用。

4.6.4 不平衡短路

不平衡短路情况下,采用式(86)~式(89)计算稳态短路电流。

$$I_{k2} = I''_{k2} \dots\dots\dots (86)$$

$$I_{k2E} = I''_{k2E} \dots\dots\dots (87)$$

$$I_{kE2E} = I''_{kE2E} \dots\dots\dots (88)$$

$$I_{k1} = I''_{k1} \dots\dots\dots (89)$$

计算最小稳态短路电流时,根据表 1 采用 $c = c_{\min}$, 见 2.5。

4.6.5 变压器低压侧短路高压侧单相断开

当变压器高压侧采用熔断器作为进线保护时,低压侧发生的短路可能在断路器切除故障之前造成一相熔断器断开。这会导致局部短路电流太小,从而不能使其他保护装置动作,特别是在出现最小短路电流的情况下。电气设备由于短路持续存在而承受过应力。图 20 为造成这种情况的示例。

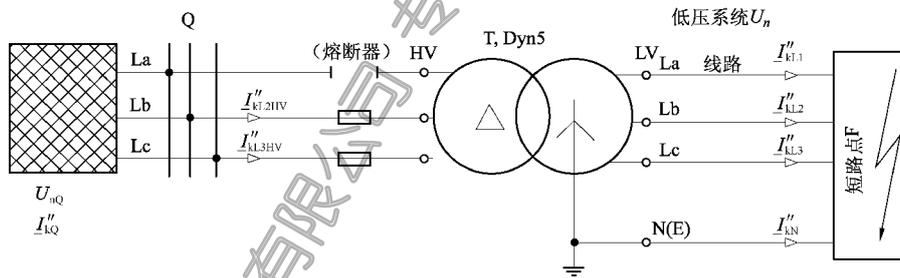


图 20 变压器低压侧短路高压侧单相断开

如图 20 所示,变压器低压侧的短路电流 $I''_{k1.1}$ 、 $I''_{k1.2}$ 、 $I''_{k1.3}$ 与 I''_{kN} 可通过式(90)计算。变压器高压侧的局部短路电流 $I''_{k1.2HV} = I''_{k1.3HV}$ 也可由式(90)在系数 α 取适当值时计算。由于短路属于远端短路,所有情况下 $I''_{kv} = I_{kv}$ 。

$$I''_{kv} = \alpha \frac{cU_n}{\sqrt{3} |Z_{Qt} + K_T Z_T + Z_L + \beta(K_T Z_{(0)T} + Z_{(0)L})|} \dots\dots\dots (90)$$

式中:

v ——表示低压侧 La、Lb、Lc、N(E)与高压侧的 LbHV、LcHV;

$Z_{Qt} + K_T Z_T + Z_L$ ——为折算到低压侧的正序系统阻抗, $Z_T = Z_{TLV}$;

$K_T Z_{(0)T} + Z_{(0)L}$ ——为折算到低压侧的零序系统阻抗;

α 、 β ——表 2 中给出的系数。

任何两相间短路时的短路电流均较小,表 2 中没有列出。

表 2 式(90)中的系数 α 、 β

F 点短路 (见图 20)	三相短路	两相接地短路		单相短路
低压侧短路导体	La、Lb、Lc La、Lb、Lc、N(E)	La、Lc、N(E)	La、Lb、N(E) Lb、Lc、N(E)	Lb、N(E) ^a
系数 β	0	2	0.5	0.5
系数 α (低压侧) 计算电流				
$I''_{kl,a}$	0.5	1.5	—	—
$I''_{kl,b}$	1.0	—	1.5	1.5
$I''_{kl,c}$	0.5	1.5	—	—
I''_{kN}	—	3.0	1.5	1.5
系数 α (高压侧) 计算电流 $I''_{kl,v}$ $I''_{kl,bHV} = I''_{klcHV}$	$\frac{1}{t_r} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{1}{t_r} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{1}{t_r} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{1}{t_r} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$
^a 其他单相短路时,如 La、N(E)或 Lc、N(E)由变压器开路阻抗决定电流较小,予以忽略。				

图 20 所示的变压器低压侧或高压侧的短路电流均不大于在高压侧有完整连接时的对称或不对称短路电流(图 10),因此式(90)仅用于计算最小短路电流。

4.7 异步电动机机端短路

异步电动机机端三相短路及两相短路的情况下,电动机贡献的短路电流 I''_{kM} 、 i_{pM} 、 I_{bM} 和 I_{kM} 的计算如表 3 所示。在接地系统中发生单相短路时,电动机的影响不能忽略。电动机的阻抗取 $Z_{(1)M} = Z_{(2)M} = Z_M$ 与 $Z_{(0)M}$ 。如果电动机中性点未接地,则零序阻抗 $Z_{(0)M} = \infty$ 。

表 3 异步电动机机端短路时的短路电流

短路	三相短路	两相短路	单相短路
交流对称分量 初始值	$I''_{k3M} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_M}$ (91)	$I''_{k2M} = \frac{\sqrt{3}}{2}I''_{k3M}$ (92)	见 4.7
峰值短路电流	$i_{p3M} = \kappa_M \sqrt{2}I''_{k3M}$ (93)	$i_{p2M} = \frac{\sqrt{3}}{2}i_{p3M}$ (94)	$i_{p1M} = \kappa_M \sqrt{2}I''_{k1M}$ (95)
	中压电动机: $\kappa_M = 1.65$ (对应 $R_M/X_M = 0.15$),每对极有功功率 < 1MW $\kappa_M = 1.75$ (对应 $R_M/X_M = 0.10$),每对极有功功率 ≥ 1 MW 有电缆连接线的低压电动机: $\kappa_M = 1.3$ (对应 $R_M/X_M = 0.42$)		
对称开断电流	$I_{b3M} = \mu q I''_{k3M}$ (96)	$I_{b2M} = \frac{\sqrt{3}}{2}I''_{k3M}$ (97)	$I_{b1M} = I''_{k1M}$ (98)
	μ 按式(70)或图 16 计算,依据 I''_{kM}/I_{rM} q 按式(73)或图 17 计算		
稳态短路电流	$I_{k3M} = 0$ (99)	$I_{k2M} = \frac{\sqrt{3}}{2}I''_{k3M}$ (100)	$I_{k1M} = I''_{k1M}$ (101)

西安英诺威电气有限公司 购买单位: 西安英诺威电气有限公司 防伪编号: 2020-0901-1201-5240-4877 订单号: 0100200901067978

4.8 短路电流的热效应

焦耳积分 $\int i^2 dt$ 用来度量短路电流在系统中阻性元件产生的热量。在本部分中,采用系数 m 计算短路电流非周期分量的热效应,采用系数 n 计算短路电流交流分量的热效应(见图 21、图 22)。

$$\int_0^{T_k} i^2 dt = I''_k{}^2(m+n)T_k = I_{th}^2 T_k \quad \dots\dots\dots (102)$$

热等效短路电流为:

$$I_{th} = I''_k \sqrt{m+n} \quad \dots\dots\dots (103)$$

对于一系列相互独立的三相短路电流,应采用式(104)、式(105)计算焦耳积分或热等效短路电流。

$$\int i^2 dt = \sum_{i=1}^{i=r} I''_{ki}{}^2(m_i+n_i)T_{ki} = I_{th}^2 T_k \quad \dots\dots\dots (104)$$

$$I_{th} = \sqrt{\frac{\int i^2 dt}{T_k}} \quad \dots\dots\dots (105)$$

其中:

$$T_k = \sum_{i=1}^{i=r} T_{ki} \quad \dots\dots\dots (106)$$

式中:

I''_{ki} —— 每个三相短路的短路电流交流对称分量初始;

I_{th} —— 热等效短路电流;

m_i —— 每个短路电流非周期分量的热效应系数;

n_i —— 每个短路电流交流分量的热效应系数;

T_{ki} —— 每个短路的短路电流持续时间;

T_k —— 短路电流持续时间之和。

计算焦耳积分与热等效短路电流时应说明与之对应的各短路持续过程。

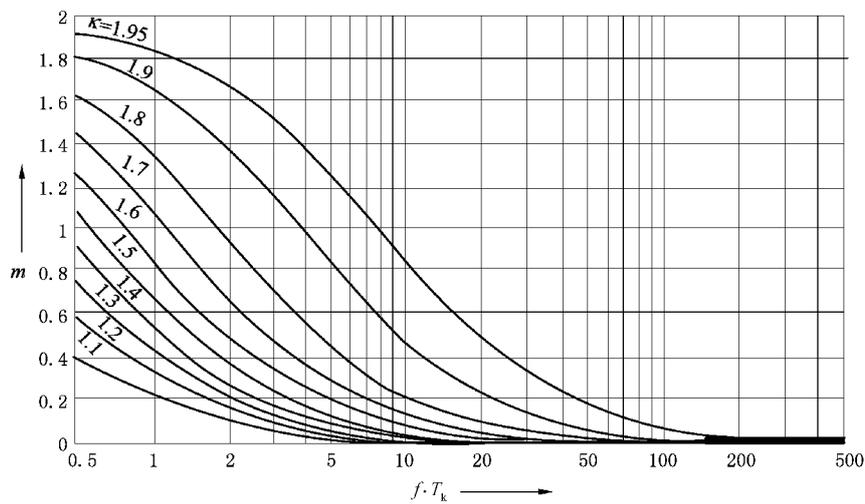


图 21 短路电流非周期分量的热效应系数 m

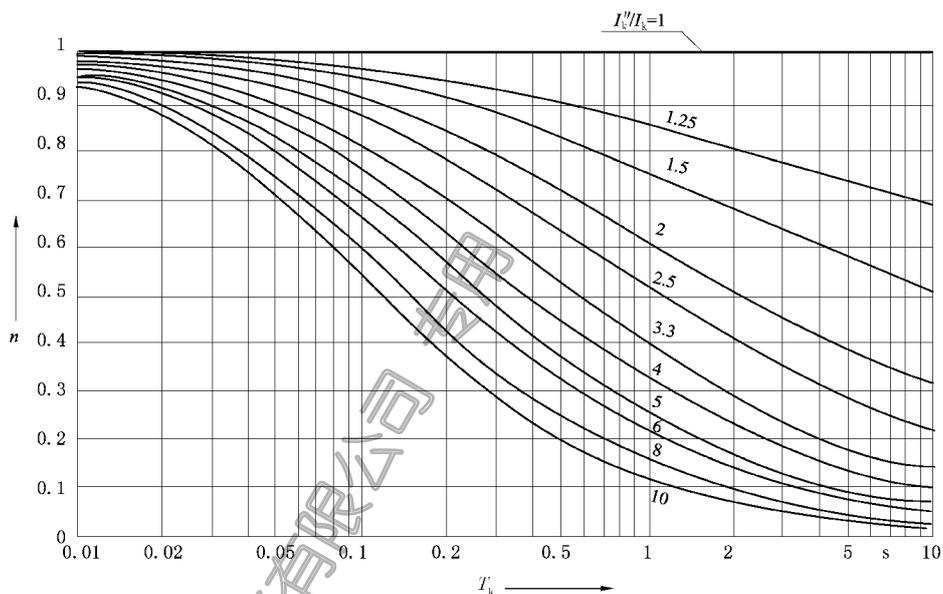


图 22 短路电流交流分量的热效应系数 n

系数 m_i 由图 21 通过 $f \cdot T_{ki}$ 确定, 系数 κ 由 7.3 计算。系数 n_i 由图 22 通过系数 T_{ki} 以及 I''_{ki}/I_{ki} 确定, 其中 I_{ki} 为每个短路的稳态短路电流。

当发生多个间断性的短路时, 由此造成的焦耳积分为式(104)确定的各短路电流焦耳积分之和。

配电网中发生短路时(远端短路), 通常取 $n = 1$ 。

对于短路持续时间大于或等于 0.5s 的远端短路, 可近似取 $m + n = 1$ 。

如果需要计算不对称短路的焦耳积分或热等效短路电流, 则使用相应的不对称短路电流代替 I''_{ki} 。

当回路采用熔断器或限流断路器保护时, 其焦耳积分可限制在由式(102)或式(104)计算出的值以内, 焦耳积分由限流装置的特性决定。

附 录 A
(规范性附录)
系数 m 和 n 的计算公式

图 21 中的系数 m 的计算公式为:

$$m = \frac{1}{2fT_k \ln(\kappa - 1)} [e^{4/T_k \ln(\kappa - 1)} - 1]$$

图 22 中的系数 n 的计算公式为:

$$\frac{I''_k}{I_k} = 1: n = 1$$

$$\frac{I''_k}{I_k} \geq 1.25:$$

$$n = \frac{1}{(I''_k/I_k)^2} \left[1 + \frac{T'_d}{20T_k} (1 - e^{-20T_k/T'_d}) \left(\frac{I''_k}{I_k} - \frac{I'_k}{I_k} \right)^2 + \frac{T'_d}{2T_k} (1 - e^{-2T_k/T'_d}) \left(\frac{I'_k}{I_k} - 1 \right)^2 \right. \\ \left. + \frac{T'_d}{5T_k} (1 - e^{-10T_k/T'_d}) \left(\frac{I''_k}{I_k} - \frac{I'_k}{I_k} \right) + \frac{2T'_d}{T_k} (1 - e^{-T_k/T'_d}) \left(\frac{I'_k}{I_k} - 1 \right) \right. \\ \left. + \frac{T'_d}{5.5T_k} (1 - e^{-11T_k/T'_d}) \left(\frac{I''_k}{I_k} - \frac{I'_k}{I_k} \right) \left(\frac{I'_k}{I_k} - 1 \right) \right]$$

其中:

$$\frac{I'_k}{I_k} = \frac{I''_k/I_k}{0.88 + 0.17I''_k/I_k}$$

$$T'_d = \frac{3.1s}{I'_k/I_k}$$

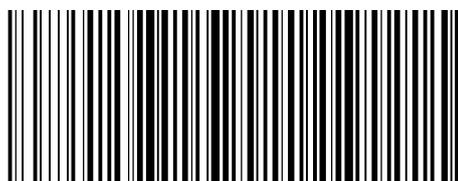
西安英诺威电气有限公司 专用

 **版权声明**

中国标准在线服务网(www.spc.org.cn)是中国标准出版社委托北京标科网络技术有限公司负责运营销售正版标准资源的网络服务平台,本网站所有标准资源均已获得国内外相关版权方的合法授权。未经授权,严禁任何单位、组织及个人对标准文本进行复制、发行、销售、传播和翻译出版等违法行为。版权所有,违者必究!

中国标准在线服务网
<http://www.spc.org.cn>

标准号: GB/T 15544.1-2013
购买者: 西安英诺威电气有限公司
订单号: 0100200901067978
防伪号: 2020-0901-1201-5240-4877
时 间: 2020-09-01
定 价: 55元



GB/T 15544.1-2013

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
三相交流系统短路电流计算
第 1 部分: 电流计算

GB/T 15544.1—2013/IEC 60909-0:2001

*

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.gb168.cn

服务热线: 400-168-0010

010-68522006

2014年6月第一版

*

书号: 155066·1-48782

版权专有 侵权必究