



DIQUDIANWANG JIDIANBAOHU  
ZHENGDINGJISUAN

# 地区电网继电保护 整定计算

---

中国南方电网电力调度通信中心 编著  
广东省电力调度中心



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内 容 提 要

本书理论联系实际，既有继电保护基础理论，又结合继电保护整定相关规程、规定和反措，讲解继电保护整定计算知识。全书主要介绍电力系统继电保护整定的相关理论基础知识和相对应的继电保护整定计算实例以及整定细则。全书内容包括电力系统故障分析及基础理论、继电保护整定基础知识、线路保护整定计算及其重合闸、变压器保护整定计算、母线及断路器保护、35kV及以下保护、备用电源自投装置、故障录波装置。

本书可作为地调继电保护整定计算人员的学习、培训教材用书。书中内容如有与现行规程规定、企业标准冲突部分，以现行规程规定、企业标准为准。

## 图书在版编目(CIP)数据

地区电网继电保护整定计算/中国南方电网电力调度通信中心，广东省电力调度中心编著. —北京：中国电力出版社，2010.10

ISBN 978-7-5123-0928-9

I. ①地… II. ①中… ②广… III. ①电力系统-继电保护-计算 IV. ①TM77

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 192370 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2010 年 12 月第一版 2010 年 12 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 22.5 印张 548 千字

印数 0001—3000 册 定价 48.00 元

## 敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失  
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

# 《地区电网继电保护整定计算》

## 编 委 会

主 任 汪际锋

副主任 张文峰 赵曼勇 唐卓尧

委 员 周红阳 黄明辉 刘之尧 余 江 陈志光

曾耿晖 王 莉

主 编 刘之尧

副主编 曾耿晖

编 写 曹 杰 陈莉莉 宛玉健 李晓华 邱 建

根据《全国电力供需与经济运行形势分析预测报告》，2010年年底全国装机容量将达到9.5亿kW。目前，中国南方电网有限责任公司统调装机容量超过1.4亿kW，系统同步负荷突破1亿kW，西电东送“八交五直”13条通道的最大输电能力逾2300万kW，网、省、地、县等各级电网之间联系日益紧密，相互影响越来越大，对全网一体化运行管理的要求越来越高；特高压直流、海底电缆、数字化变电站等新技术、新设备应用层出不穷，调度系统知识密集、技术密集的特点进一步突显。按照电网规划，到“十二五”期末，南方电网将形成“十交九直”19条西电东送通道，最大输电能力达4300万kW，大量交直流线路以及大型火电、核电、水电机组投产，电网结构与运行特性将更复杂，驾驭难度更大，对一、二次系统的协调运行水平和各级调度人员的能力和素质，都提出了更高的要求。

继电保护是电网的安全卫士，是电网必不可少的重要组成部分。大电网运行实践表明，继电保护的可靠运行，对保证电网安全稳定有着极其重要的作用，而整定计算是决定继电保护能否正确动作的一个关键环节。地区电网处于大电网的负荷侧，对于维护主网安全、提高供电可靠率有着至关重要的作用。只有不断提升地区电网调度人员的素质和能力，提高地区电网继电保护工作水平，才能驾驭好、运行好大电网，进一步提高大电网一体化运行水平。

在总结多年电网运行和继电保护工作经验的基础上，中国南方电网有限责任公司电力调度通信中心组织专家编写了《地区电网继电保护整定计算》。本书理论结合实际，针对性强、实用性好，是地区电网继电保护整定计算人员很好的学习参考资料。相信本书的出版，将对提高继电保护运行水平、促进学习型调度机构建设，起到积极的推动作用，进而为全网提高科学调度水平、实现公司战略目标培养更多的人才。

祁造才

2010年9月

地区电网作为现代大型电力系统的负荷侧，对保证电力供应、提高供电可靠性有着至关重要的作用。为进一步提高地区电网整定人员的技术水平和业务能力，中国南方电网电力调度通信中心和广东电网电力调度通信中心组织专家编写了《地区电网继电保护整定计算》。

本书是各编写专家在总结多年整定计算实践经验的基础上进行编写的，讲解了继电保护基础理论以及整定计算的相关规程、规定和反措，并结合实例、循序渐进地讲解了继电保护整定计算的全过程。全书在内容取材上力求理论结合实际，包括电力系统故障分析及基础理论、继电保护整定基础知识，线路保护及其重合闸、变压器保护、母线及断路器保护、35kV及以下保护、备用电源自投装置、故障录波装置等地、县调技术人员在工作中所涉及的继电保护装置的整定计算方法及实用技巧，充分体现了“学习培训、注重实用”的原则。

本书由刘之尧担任主编，汪际锋审定，赵曼勇统稿。其中，基础理论部分主要由李晓华、邱建编写，线路保护部分由陈莉莉编写，变压器保护部分由宛玉健编写，短路电流计算实例由陈莉莉、刘匀、谢颖宁编写，其余部分由曹杰编写。

本书的编写、出版得到了不少专家的鼓励和支持，吸收了许多宝贵意见。在此，谨对所有支持和参与本书编写、出版的专家表示衷心的感谢。

由于涉及内容广泛，时间仓促，书中难免有不妥或错误之处，恳请读者批评指正。

编者

2010年9月

# 目 录

## 地区电网继电保护整定计算

序  
前言

<b>第1章 电力系统故障分析及基础理论</b>	1
1.1 电力系统短路的暂态过程	1
1.2 电力系统各元件的序阻抗和等值电路	12
1.3 电力系统故障的分析和计算	38
1.4 系统振荡及其对继电保护的影响	101
<b>第2章 继电保护整定基础知识</b>	106
2.1 整定计算的基本原则	106
2.2 整定计算的有关要求	110
2.3 整定系数	116
2.4 零序互感对继电保护的影响	126
2.5 继电保护用电流互感器、电压互感器	128
<b>第3章 线路保护整定计算及其重合闸</b>	138
3.1 距离保护基本原理及其整定计算	138
3.2 零序电流保护基本原理及其整定计算	147
3.3 纵联保护基本原理及其整定计算	150
3.4 纵联保护通道及其应用	153
3.5 自动重合闸基本原理及其整定	162
3.6 选相元件	164
3.7 其他定值整定	165
<b>第4章 变压器保护整定计算</b>	168
4.1 差动保护整定	168
4.2 220kV 变压器后备保护整定	175
4.3 110kV 变压器后备保护整定	185

<b>第5章 母线及断路器保护</b> .....	188
5.1 保护原理 .....	188
5.2 保护整定计算原则及注意事项 .....	199
<b>第6章 35kV 及以下保护</b> .....	205
6.1 35kV/10kV 线路及母联保护 .....	205
6.2 并联电容器保护 .....	209
6.3 并联补偿电抗器保护 .....	212
6.4 接地变压器保护 .....	213
6.5 站用变压器保护 .....	214
<b>第7章 备用电源自动投入装置</b> .....	215
7.1 概述 .....	215
7.2 对备自投装置的要求 .....	215
7.3 微机式备自投装置原理 .....	215
7.4 保护整定计算原则及注意事项 .....	216
<b>第8章 故障录波装置</b> .....	218
8.1 原理及功能简介 .....	218
8.2 录波装置整定原则 .....	218
<b>第9章 电网短路电流计算实例</b> .....	220
9.1 电网实例 .....	220
9.2 短路电流计算 .....	222
<b>第10章 线路保护整定计算实例及整定细则</b> .....	234
10.1 整定配合计算实例 .....	234
10.2 线路保护整定细则 .....	257
<b>第11章 变压器保护整定计算实例及整定细则</b> .....	284
11.1 整定计算实例 .....	284
11.2 整定计算细则 .....	295

<b>第12章 母线及断路器保护整定实例及整定细则</b> .....	317
12.1 整定计算实例 .....	317
12.2 整定计算细则 .....	320
<b>第13章 35kV 及以下保护整定实例及整定细则</b> .....	324
13.1 整定计算实例 .....	324
13.2 整定计算细则 .....	328
<b>第14章 备用电源自投装置整定实例及整定细则</b> .....	341
14.1 整定计算实例 .....	341
14.2 整定计算细则 .....	341
<b>第15章 故障录波装置接入原则及整定细则</b> .....	344
15.1 故障录波装置录波量接入原则 .....	344
15.2 故障录波装置录波量整定细则 .....	344
<b>参考文献</b> .....	347

# 电力系统故障分析及基础理论

## 1.1 电力系统短路的暂态过程

### 1.1.1 短路故障的暂态过程

短路是电力系统的严重故障。所谓短路，是指一切不正常的相与相之间或相与地（对于中性点接地的系统）发生通路的情况。

产生短路的原因很多，主要有如下几个方面：

(1) 元件损坏，例如绝缘材料的自然老化，设计、安装及维护不良所带来的设备缺陷发展成短路等。

(2) 气象条件恶化，例如雷击造成的闪络放电或避雷器动作，山火引起线路对地短路故障，架空线路由于大风或导线覆冰引起电杆倒塌等。

(3) 违规操作，例如运行人员带负荷拉开关，线路或设备检修后未拆除接地线就加上电压等。

(4) 其他，例如挖沟损伤电缆，鸟兽跨接在裸露的载流部分等。

在三相系统中，可能发生的短路有三相短路、两相短路、两相短路接地和单相接地短路。三相短路也称为对称短路，系统各相与正常运行时一样仍处于对称状态。其他类型的短路都是不对称短路。

电力系统的运行经验表明，在各种类型的短路中，单相短路占大多数，两相短路较少，三相短路的机会最少。三相短路虽然很少发生，但情况较严重，应给予足够的重视。况且，从短路计算方法来看，一切不对称短路的计算，在采用对称分量法后，都归结为对称短路的计算。因此，对三相短路的研究是有其重要意义的。

随着短路类型、发生地点和持续时间的不同，短路的后果可能只破坏局部地区的正常供电，也可能威胁整个系统的安全运行。短路的危险后果一般有以下的一个方面：

(1) 短路故障时短路点附近的支路中出现比正常值大许多倍的电流，由于短路电流的电动力效应，导体间将产生很大的机械应力，可能使导体及其支架遭到破坏。

(2) 短路电流使设备发热增加，短路持续时间较长时，设备可能过热以致损坏。

(3) 短路时系统电压大幅度下降，对用户影响很大。系统中最主要的电力负荷是异步电动机，它的电磁转矩同端电压的平方成正比，电压下降时，电动机的电磁转矩显著减小，转速随之下降。当电压大幅度下降时，电动机甚至可能停转，造成产品报废、设备损坏等严重后果。

(4) 当短路发生地点离电源不远而持续时间又较长时，并列运行的发电厂可能失去同步，破坏系统稳定，造成大片地区停电。这是短路故障的最严重后果。

(5) 发生不对称短路时,不平衡电流能产生足够的磁通在邻近的电路内感应出很大的电动势,这对于架设在高压电力线路附近的通信线路或铁道信号系统等会产生严重的影响。

在电力系统和电气设备的设计和运行中,短路计算是解决一系列技术问题所不可缺少的基本计算,这些问题主要是:

(1) 选择有足够机械稳定性和热稳定度的电气设备,例如断路器、互感器、绝缘子、母线、电缆等,必须以短路计算作为依据。这里包括计算冲击电流以校验设备的电动力稳定度,计算若干时刻的短路电流周期分量以校验设备的热稳定度;计算指定时刻的短路电流有效值以校验断路器的断流能力等。

(2) 为了合理地配置各种继电保护和自动装置并正确整定其参数,必须对电力网中发生的各种短路进行计算和分析。在这些计算中不但要知道故障支路中的电流值,还必须知道电流在网络中的分布情况。有时还要知道系统中某些节点的电压值。

(3) 在设计和选择发电厂和电力系统电气主接线时,为了比较各种不同方案的接线图,确定是否需要采取限制短路电流的措施等,都要进行必要的短路电流计算。

(4) 进行电力系统暂态稳定计算,研究短路对用户工作的影响等,也包含有一部分短路计算的内容。

此外,确定输电线路对通信的干扰,对已发生故障进行分析,都必须进行短路计算。

在实际工作中,根据一定的任务进行短路计算时,必须首先确定计算条件。所谓计算条件,一般包括:短路发生时系统的运行方式、短路的类型和发生地点、以及短路发生后所采取的措施等。从短路计算的角度来看,系统运行方式指的是系统中投入运行的发电、变电、输电、用电的设备的多少以及它们之间相互连接的情况,计算不对称短路时,还应包括中性点的运行状态。对于不同的计算目的,所采用的计算条件是不同的。

### 1.1.2 恒电势源电路(无穷大电源)的三相短路

无限大功率电源是一种理想电源,它具有两个特点:一是电源提供的功率被看作是无穷大,即使在短路情况下引起的功率急剧变化也不引起系统频率的变化,即系统频率恒定;二是电源的内阻抗为零,即相当一恒压源,从而在短路时电源内部没有过渡过程。在实际中并不存在真正的无限大功率电源,但如果电源的内阻抗小于短路回路总阻抗的5%~10%,则短路时电源电压的变化很小,则可近似认为其为一无限大功率电源。

无限大功率电源供电系统在某点K发生三相短路时的电路图如图1-1所示。短路前电路处于稳态,每相的电阻和电感分别为

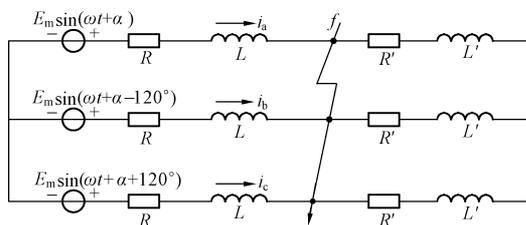


图 1-1 简单三相电路短路

$R+R'$ 和 $L+L'$ 。由于电路对称,只写出一相(a相)的电势和电流如下

$$\left. \begin{aligned} e &= E_m \sin(\omega t + \alpha) \\ i &= I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi') \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

其中

$$I_m = \frac{E_m}{\sqrt{(R+R')^2 + \omega^2(L+L')^2}}$$

$$\varphi' = \tan^{-1} \frac{\omega(L+L')}{R+R'}$$

当 f 点发生三相短路时, 这个电路即被分成两个独立的电路, 其中左边的一个仍与电源相连接, 而右边的一个则变为没有电源的短接电路。在短接电路中, 电流将从它发生短路瞬间的初始值衰减到零。在与电源相连的左侧电路中, 每相的阻抗已变为  $R + j\omega L$ , 其电流将由短路前的数值逐渐变化到由阻抗  $R + j\omega L$  所决定的新稳态值, 短路电流计算作要是对这一电路进行的。

假定短路在  $t=0$  时刻发生, 短路后左侧电路仍然是对称的, 可以只研究其中的一相, 例如 a 相。为此, 我们写出 a 相的微分方程式如下

$$Ri + L \frac{di}{dt} = E_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (1-2)$$

式 (1-2) 的解就是短路的全电流, 由两部分组成: 第一部分是方程式的特解, 它代表短路电流的强制分量; 第二部分是方程式对应的齐次方程式 (1-3) 的一般解, 它代表短路电流的自由分量。

$$Ri + L \frac{di}{dt} = 0 \quad (1-3)$$

短路电流的强制分量与外加电源电势有相同的变化规律, 也是恒幅值的正弦交流, 习惯上称为周期分量, 并记为  $i_p$ , 它用式 (1-4) 表示

$$i_p = I_{pm} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) \quad (1-4)$$

$$I_{pm} = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{\omega L}{R} \right)$$

式中:  $I_{pm}$  是短路电流周期分量的幅值;  $\varphi$  是电路的阻抗角;  $\alpha$  是电源电势的初始相角, 即  $t=0$  时的相位角, 亦称合闸角。

短路电流的自由分量与外加电源无关, 它是按指数规律衰减的直流, 亦称为非周期电流, 记为

$$i_{ap} = Ce^{pt} = C \exp(-t/T_a) \quad (1-5)$$

式中:  $p = -R/L$  是特征方程  $R + pL = 0$  的根;  $T_a = -1/p = L/R$  是决定自由分量衰减快慢的时间常数;  $C$  是积分常数, 由初始条件决定, 即为非周期电流的初始值  $i_{ap0}$ 。

这样, 短路的全电流可以表示为

$$i = i_p + i_{ap} = I_{pm} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) + C \exp(-t/T_a) \quad (1-6)$$

根据电路的开闭定律, 电感中的电流不能突变, 短路前瞬间 (以下标 [0] 表示) 的电流  $i_{[0]}$  应等于短路发生后瞬间 (以下标 0 表示) 的电流  $i_0$ 。将  $t=0$  分别代入短路前和短路后的电流算式, 应得

$$I_m \sin(\alpha - \varphi') = I_{pm} \sin(\alpha - \varphi) + C \quad (1-7)$$

因此

$$C = i_{ap0} = I_m \sin(\alpha - \varphi') - I_{pm} \sin(\alpha - \varphi) \quad (1-8)$$

$$i = I_{pm} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) + [I_m \sin(\alpha - \varphi') - I_{pm} \sin(\alpha - \varphi)] \exp(-t/T_a) \quad (1-9)$$

这就是 a 相短路电流的算式。如果用  $\alpha - 120^\circ$  或  $\alpha + 120^\circ$  去代替公式中的  $\alpha$ , 就可以得到 b 相或 c 相短路电流的算式。

周期分量的有效值的大小与合闸角  $\alpha$  无关, 而非周期分量的大小与合闸角  $\alpha$  有关。当  $\alpha$

取不同值时，非周期分量之值也不同，可能最大，也可能为零，从而总的短路电流的大小也相差很大。从实际工程考虑，最关心的是在什么情况下短路电流取得最大值以及最大短路电流是多大。

当电路的参数已知时，短路电流周期分量的幅值是一定的，而短路电流的非周期分量则是按指数规律单调衰减的直流，因此，非周期电流的初值越大，暂态过程中短路全电流的最大瞬时值也就越大。由前面的讨论可知，使非周期电流有最大初值的条件应为：①相量差  $\dot{I}_m - \dot{I}_{pm}$  有最大可能值；②相量差  $\dot{I}_m - \dot{I}_{pm}$  在  $t=0$  时与时间轴平行。这就是说，非周期电流的初值既同短路前和短路后电路的情况有关，又同短路发生的时刻（或合闸角  $\alpha$ ）有关。在电感性电路中，符合上述条件的情况是：电路原来处于空载状态，短路恰好发生在短路周期电流取幅值的时刻。如果短路回路的感抗比电阻大得多  $\omega L \gg R$ ，就可以近似地认为  $\varphi \approx 90^\circ$ ，则上述情况相当于短路发生在电源电势刚好过零，即  $\alpha=0$  的时刻。

将  $I_m = 0$ ， $\varphi=90^\circ$  和  $\alpha=0$  代入公式，使得

$$i = -I_{pm} \cos \omega t + I_{pm} \exp(-t/T_a) \tag{1-10}$$

电流的波形图示于图 1-2。短路电流最大可能的瞬时值称为短路冲击电流，以  $i_{im}$  表示。由图可见，短路电流的最大瞬时值在短路发生后约半个周期出现。若  $f=50\text{Hz}$ ，这个时间约为短路发生后 0.01s。由此可得冲击电流的算式如下

$$\begin{aligned} i_{im} &= I_{pm} + I_{pm} \exp(-0.01/T_a) \\ &= [1 + \exp(-0.01/T_a)] I_{pm} = k_{im} I_{pm} \end{aligned} \tag{1-11}$$

式中： $k_{im} = 1 + \exp(-0.01/T_a)$  称为冲击系数，它表示冲击电流为短路电流周期分量幅值的倍数。当时间常数  $T_a$  的数值由零变到无限大时，冲击系数的变化范围是  $1 \leq k_{im} \leq 2$ 。在实用计算中，当短路发生在发电机电压母线时，取  $k_{im} = 1.9$ ；短路发生在发电厂高压侧母线时，取  $k_{im} = 1.85$ ；在其他地点短路时，取  $k_{im} = 1.8$ 。

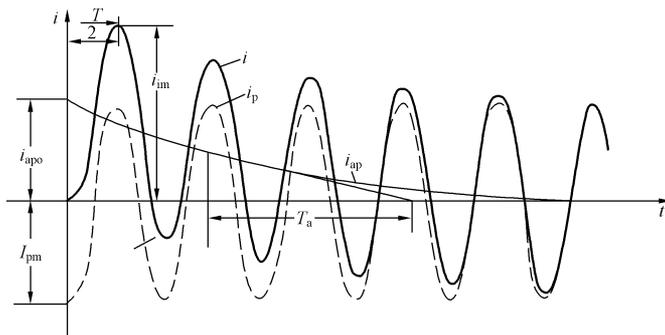


图 1-2 非周期分量有最大可能值时的短路电流波形图

冲击电流主要用来校验电气设备和载流导体的电动力稳定度，以保证设备在短路时不致因短路电流产生的冲击力而发生变形或损坏。

在短路过程中，任一时刻  $t$  的短路电流有效值  $I_t$ ，是指以时刻  $t$  为中心的一个周期内瞬间电流的均方根值，即

$$I_t = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} i_t^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} (i_{pt} + i_{apt})^2 dt} \tag{1-12}$$

式中： $i_t$ ， $i_{pt}$  和  $i_{apt}$  分别为  $t$  时刻短路电流，它的周期分量和非周期分量的瞬时值。

在电力系统中，短路电流周期分量的幅值，只有当由无限大功率电源供电时才是恒定的，而在一般情况下则是衰减的（如图 1-2 所示）。利用式（1-12）进行计算是相当复杂的。为了简化计算，通常假定：非周期电流在以时间  $t$  为中心的一个周期内恒定不变，因而它在时间  $t$  的有效值就等于它的瞬时值，即： $I_{\text{apt}} = i_{\text{apt}}$ 。对于周期电流，也认为它在所计算的周期内是幅值恒定的，其数值即等于由周期电流包络线所确定的  $t$  时刻的幅值。因此， $t$  时刻的周期电流有效值应为： $I_{\text{pt}} = \frac{I_{\text{pmt}}}{\sqrt{2}}$ 。

根据上述假定条件，式（1-12）就可以简化为： $I_t = \sqrt{I_{\text{pt}}^2 + I_{\text{apt}}^2}$ 。

短路电流的最大有效值出现在短路后的第一个周期。在最不利的情况下发生短路时  $i_{\text{ap0}} = I_{\text{pm}}$ ，而第一个周期的中心为  $t = 0.01\text{s}$ ，这时非周期分量的有效值为

$$I_{\text{ap}} = I_{\text{pm}} \exp(-0.01/T_a) = (k_{\text{im}} - 1) I_{\text{pm}} \quad (1-13)$$

将这些关系代入式（1-12），便得到短路电流最大有效值  $I_{\text{im}}$  的计算公式为

$$I_{\text{im}} = \sqrt{I_{\text{p}}^2 + [(k_{\text{im}} - 1) \sqrt{2} I_{\text{p}}]^2} = I_{\text{p}} \sqrt{1 + 2(k_{\text{im}} - 1)^2} \quad (1-14)$$

当冲击系数  $k_{\text{im}} = 1.9$  时， $I_{\text{im}} = 1.62 I_{\text{p}}$ ；当  $k_{\text{im}} = 1.8$  时， $I_{\text{im}} = 1.51 I_{\text{p}}$ 。

最大有效值电流主要用于校验电气设备的断流能力。

有些情况下需要用到短路功率（亦称短路容量）的概念。短路容量等于短路电流有效值同短路处的正常工作电压（一般用平均额定电压）的乘积，即

$$S_t = \sqrt{3} V_{\text{av}} I_t \quad (1-15)$$

用标幺值表示时，有

$$S_{*t} = \frac{\sqrt{3} V_{\text{av}} I_t}{\sqrt{3} V_{\text{B}} I_{\text{B}}} = \frac{I_t}{I_{\text{B}}} = I_{*t} \quad (1-16)$$

式（1-16）表明，短路功率的标幺值与短路电流标幺值相等。

短路容量主要用来校验开关的切断能力。之所以将短路容量定义为短路电流和工作电压的乘积，是因为一方面开关要能切断这样大的电流，另一方面，在开关断流时其触头应经受住工作电压的作用。在短路的实用计算中，常只有周期分量电流的初始有效值来计算短路功率。

从上述分析可见，为了确定冲击电流、短路电流非周期分量、短路电流的有效值以及短路功率等，都必须计算短路电流的周期分量。实际上，大多数情况下短路计算的任务也只是计算短路电流的周期分量。在给定电源电势时，短路电流周期分量的计算只是一个求解稳态正弦交流电路的问题。

### 1.1.3 同步发电机的三相短路分析

同步发电机的突然三相短路与无限大电源三相短路的根本差别在于同步发电机的内部存在磁场耦合，在扰动下电源内部有过渡过程，因而在过程中不能保持其端电压不变，而且由于发电机定子和转子间的旋转运动和各绕组间的相互影响，使得发电机内部的过渡过程十分复杂。同步发电机三相短路分析可为电力系统三相短路电流的实用计算打下基础。

同步电机由多个磁耦合关系的绕组构成，定子绕组同转子绕组之间存在相对运动，同步电机突然短路的暂态过程要比恒电势源电路复杂得多，其冲击电流可能达到额定电流的十几倍。这样大的冲击电流对电机本身和有关电气设备都可能产生严重的影响。

同步电机稳态对称运行（包括稳态对称短路）时，电枢磁势的大小不随时间而变化，而

在空间以同步转速旋转，它同转子没有相对运动，因此不会在转子绕组中感应电流。突然短路时，定子电流在数值上发生急剧变化，电枢反应磁通也随着变化，并在转子绕组中感应电流，这种电流又反过来影响定子电流的变化。定子和转子绕组电流的互相影响是同步电机突然短路暂态过程区别于稳态电路的显著特点。

对突然短路暂态过程进行物理分析的理论基础是超导体闭合回路磁链守恒原则。所谓超导体就是电阻为零的导体，超导体闭合回路具有维持它所环链的磁链不变的特性。从电压的观点来看，磁链的跃变意味着  $d\psi/dt$  为无限大，即要有电势为无限大的电源，实际上这是不可能的。根据楞次定则，任何闭合线圈在突然变化的瞬间，都能维持磁链不变。而理想的超导体回路，则能永久维持磁链不变。在实际的电机里，所有绕组都不是超导体的，加上绕组之间存在着相当复杂的互感耦合关系，因此，突然短路时的物理现象将要复杂得多。在进行分析时，我们将对每一个绕组应用磁链守恒原则，以确定每一个绕组在突然短路暂态过程中将出现哪些电流分量，分清哪些是自由电流，哪些是强制电流，然后确定每一个自由分量将按什么规律衰减，从而对短路电流的本质有较深的理解。以下对无阻尼绕组同步发电机突然三相短路过程进行分析。在分析中认为同步发电机是理想化的，电机的转速不变，各种参数都用标么值表示。

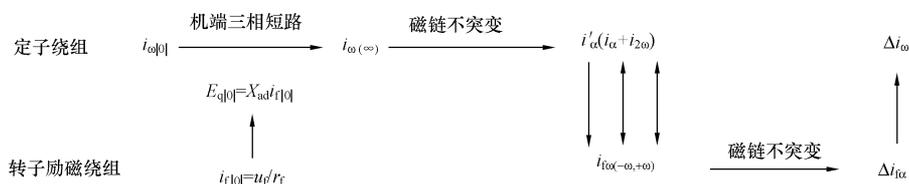
(1) 短路前：同步发电机处于正常稳态运行状态。发电机励磁绕组建立的励磁电流为  $i_{f|0|} = u_f/r_f$ 。式中  $u_f$  为励磁电压， $r_f$  为励磁绕组电阻。 $i_{f|0|}$  为直流，它产生的磁链由两部分组成：一是只交链励磁绕组自身的漏磁链  $\psi_{f\sigma}$ （下标  $\sigma$  代表漏磁），一是同时交链定子绕组的主磁链  $\psi_{fd}$ （下标  $d$  代表直轴，因为励磁绕组产生的励磁方向为正向  $d$  轴）。这个主磁链随转子的旋转切割定子绕组，在定子绕组中感应出空载电势  $E_{f|0|} = x_{ad}i_{f|0|}$ 。发电机带负荷后，定子绕组中有基频交流电流  $i_{\omega|0|}$  流过。这就是短路前处于正常稳态运行时发电机定子和转子中的电流情况。

(2) 短路稳态后：设发电机端三相短路，时间足够长后便进入短路后的稳态。此时转子励磁绕组中的电流仍为  $i_{f|0|}$ ，而定子绕组中的电流为  $i_{\omega(\infty)} = E_{q|0|}/x_d$ 。式中  $x_d$  为发电机的直轴同步电抗。显然  $i_{\omega(\infty)} \neq i_{\omega|0|}$ 。

(3) 短路瞬间：发电机端三相短路后，发电机供电回路的阻抗减小，定子绕组的基频周期电流要发生变化，最终变为稳态短路电流  $i_{\omega(\infty)}$ 。定子电流的变化将引起定子绕组磁链的变化。但在短路瞬间磁链不能突变，于是定子绕组中必然要产生一个直流性质的自由电流  $i'_a$ ，在空间形成一个附加的静止磁场，以抵消定子绕组中磁链的变化。由于发电机转子呈现的磁路在直轴和交轴两个方向上不一样，从而自由电流  $i'_a$  将以两倍基频（即  $2\omega$ ）脉动（因转子在空中旋转一周时  $d$  轴和  $q$  轴将两度经过该磁场）。于是  $i'_a$  可分解成一个真正的直流  $i_a$  和一个两倍基频的交流  $i_{2\omega}$ 。转子励磁绕组以同步速旋转切割由  $i_a$  形成的在空间静止的磁场，从而感应出一个基频交流分量  $i_{f\omega}$ 。由于励磁绕组是单相绕组， $i_{f\omega}$  产生的是一个脉动磁场，因此可分解为两个大小相等、方向相反的一  $\omega$  和 +  $\omega$  旋转磁场。由于转子自身以同步速  $\omega$  旋转，因而对在空间静止的定子绕组而言，一  $\omega$  旋转磁场实为静止磁场，与定子绕组中  $i_a$  形成的磁场相对应；+  $\omega$  旋转磁场实为以二倍同步速旋转的磁场，与定子绕组中二倍基频交流  $i_{2\omega}$  形成的磁场相对应。与此同时，电流  $i_{f\omega}$  的出现要引起转子励磁绕组磁链的变化。励磁绕组为保持自身磁链不突变，也要产生一个直流性质的自由电流分量  $\Delta i_{fa}$ ，它的出现相当于增加了一部分励磁电流，因而要在定子绕组中感应出一个基频电流分量  $\Delta i_{\omega}$ 。这就是短路瞬间

发电机定子和转子绕组中的电流情况。综上，在短路瞬间定子绕组中共有四个电流分量，即稳态短路电流  $i_{\omega(\infty)}$ 、附加的基频交流分量  $\Delta i_{\omega}$ 、直流分量  $i_{\alpha}$  和两倍基频交流分量  $i_{2\omega}$ 。

为便于理解，将上述分析过程表示如下：



为便于分析，可将上述众多的电流分量进行适当分类和分组。

按电流性质，可分为强制分量和自由分量两大类，显然  $i_{f|0|}$  和  $i_{\omega(\infty)}$  为强制分量，不衰减，在短路稳定后依然存在；其余电流分量均为自由分量，将衰减至零。另外，电流分量也可分为周期分量和非周期分量两大类，显然定子绕组中的  $i_{\omega(\infty)}$  和  $\Delta i_{\omega}$  为周期分量， $i_{\alpha}$  为非周期分量， $i_{2\omega}$  看上去属周期分量，但实质上是由直流性质的电流  $i'_{\alpha}$  分解而来，故归为非周期分量或单独归为倍频分量；励磁绕组中  $i_{f\omega}$  为周期分量， $\Delta i_{fa}$  为非周期分量。

按电流间的关系可分为三组：第一组为  $i_{f|0|}$  和  $i_{\omega(\infty)}$ ，其中励磁电流  $f_{f|0|}$  起主导作用， $i_{\omega(\infty)}$  由其产生，二者均不衰减；第二组为  $i_{\alpha}$ 、 $i_{2\omega}$  和  $i_{f\omega}$ ，其中定子绕组的电流  $i_{\alpha}$  和  $i_{2\omega}$  起主导作用， $i_{f\omega}$  由其产生，三者均为自由分量，将衰减至零，衰减的速度取决于定子绕组此时的时间常数  $T_a$ ；第三组为  $\Delta i_{fa}$  和  $\Delta i_{\omega}$ ，其中转子励磁绕组中电流  $\Delta i_{fa}$  起主导作用， $\Delta i_{\omega}$  由其产生，二者均为自由分量，将衰减至零，衰减的速度取决于励磁绕组此时的时间常数  $T'_d$ 。

值得指出的是，以上的分析和分组是为了便于理解而引入，实际上每个绕组中只有一个总电流，且须符合换路定律，不发生突变。

利用以上分析可推导采用工程分析方法后的同步发电机短路电流（包括时间常数的）的表达式，其产生的误差在工程允许范围内，具体推导过程略。如考虑电阻引起的衰减后，短路电流的表达式为

$$\begin{aligned}
 i_{\alpha}(t) = & \left[ \left( \frac{E'_{q|0|}}{x''_d} - \frac{E'_{q|0|}}{x'_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} + \left( \frac{E'_{q|0|}}{x'_d} - \frac{E_{q|0|}}{x_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d}} + \frac{E_{q|0|}}{x_d} \right] \cos(t + \theta_0) \\
 & + \frac{E'_{d|0|}}{x''_q} e^{-\frac{t}{T'_q}} \sin(t + \theta_0) - \frac{U_{|0|}}{2} \left( \frac{1}{x''_d} + \frac{1}{x''_q} \right) e^{-\frac{t}{T_a}} \cos(\delta_0 - \theta_0) \\
 & - \frac{U_{|0|}}{2} \left( \frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x''_q} \right) e^{-\frac{t}{T_a}} \cos(2t + \delta_0 + \theta_0)
 \end{aligned} \quad (1-17)$$

同步发电机短路电流的表达式尽管很复杂，但与无限大电源短路电流相比较，仍然是由周期分量和非周期分量两部分组成。不同之处在于，对无限大电源系统，短路电流周期分量的有效值不衰减；而对同步发电机，周期分量的有效值衰减：起始值为  $E'_{|0|} / x''$ ，称为次暂态电流。阻尼绕组中的电流衰减完毕后，进入暂态阶段，近似取为  $E'_{q|0|} / x'_d$ ，称为暂态电流。进入稳态后，周期分量的有效值为  $E_{q|0|} / x_d$ ，称为稳态短路电流。

各种电抗按大小排列，有如下关系： $x_d > x_q > x'_d > x''_d (x''_q)$ 。

空载电势  $E_q$ 、虚构电势  $E_Q$ 、暂态电势  $E'_q$ 、暂态电抗后电势  $E'$ 、次暂态电势  $E''$ 、 $E''_d$  和  $E''_d$  的稳态运行相量图如图 1-3 所示。

各电势的关系总结见表 1-1：

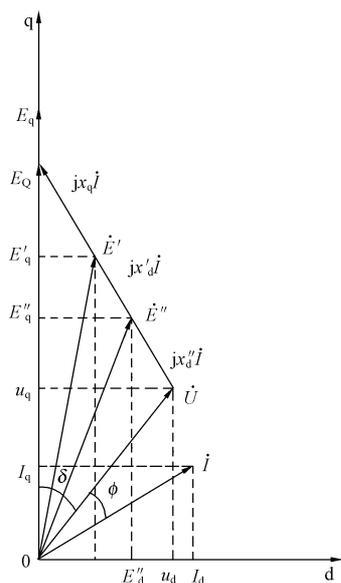


图 1-3 稳态运行相量图

表 1-1 各电势的关系

符 号	名 称	基本方程	用 途
$E_q = x_{ad} i_f$	空载电势	$E_q = u_q + x_d i_d$	$I_{\infty} = \frac{E_{q 0 }}{x_d}$
$E'_q = \frac{x_{ad}}{x'_1} \psi_f$	直轴暂态电势	$E'_q = u_q + x'_d i_d$	$I' = \frac{E'_{q 0 }}{x_d}$
$E''_q \propto \psi_f, \psi_D$	直轴次暂态电势	$E''_q = u_q + x''_d i_d$	$I''_{\infty} = \frac{E''_{q 0 }}{x_d}$
$E''_d \propto \psi_Q$	交轴次暂态电势	$E''_d = u_d - x''_q i_q$	$I''_q = \frac{E''_{d 0 }}{x_q}$
$E'$	暂态电抗后电势	$\dot{E}' = \dot{U} + j \dot{I} x'_d$	$I' \approx \frac{E'_{ 0 }}{x_d}$
$E''$	次暂态电势	$\dot{E}'' = \dot{U} + j \dot{I} x''_d$	$I'' \approx \frac{E''_{ 0 }}{x_d}$

按大小排列，在一般情况下，有： $E_q > E_Q > E' > E''$ 。

以上分析的短路电流都是考虑在同步发电机端口处发生三相短路，若距发电机端口一段距离发生短路，只要在各表达式中将发电机各电抗加上外部的等值电抗进行计算即可。同时，以上分析推导都是在发电机带负荷的情况下进行的，如果为空载短路，只须取  $\delta_0 = 0$ 、 $E_{q|0|} = E'_{q|0|} = E''_{q|0|} = U_{|0|}$ 、 $E''_{d|0|} = 0$  代入相应的短路电流表达式中计算。

#### 1.1.4 电力系统实用短路计算

短路后的瞬间各电气量剧烈变化，可采用微分方程分析，即建立系统的微分方程模型（暂态模型），根据短路条件求解微分方程组。短路后进入稳态各电气量幅值、相位、频率均不再变化，可采用对称分量法等相量分析方法（类似于稳态计算），求解代数方程组。

计算电力系统三相短路电流有两类方法：一类是较为准确的数字仿真方法。全系统采用电磁暂态模型；将每台发电机用 Park 方程描述，负荷用相应的微分方程表示，网络部分用一些代数方程描述，是微分方程、代数方程的混合方程组，无法采用解析分析的方法，必须采用数值解法；全系统计算规模大，计算时间长；存在数值计算的稳定性问题；计算结果的可信度问题（误差问题）。所以有另一类方法，实用计算法。正如在无穷大功率电源和同步发电机三相短路分析中已指出的，其核心是抓住短路电流的关键量，即周期分量起始值。只要求出了它，冲击电流  $i_{im}$ ，短路电流有效值  $I_t$  和短路功率  $S_t$  均可得到。上小节分析时已指出，在求取同步发电机三相短路电流周期分量起始值时，只需要将其表示为由次暂态电势  $E''_{|0|}$  和次暂态电抗  $x''$  串联组成的次暂态模型即可。这样就一个非常复杂的电磁暂态问题简化为稳态电路问题，这就是故障分析法的特点之一，即暂态分析稳态化。由于只计算周期分量，因此电力系统短路计算属于稳态计算，只涉及代数方程。问题被大大简化。本节就介绍电力系统三相短路电流的这种实用计算方法，工程中所讲的短路电流就指周期分量起始值，也称次暂态电流，记作  $I''$  或  $I_t$ 。

由上述介绍可见，电力系统三相短路电流的实用计算由两步组成：第一步，形成求次暂态电