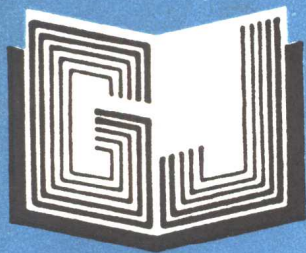
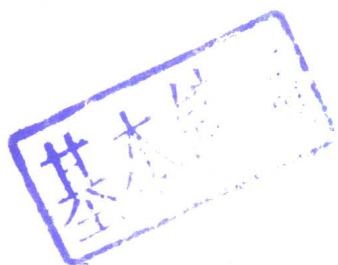


974529

TN713
1062



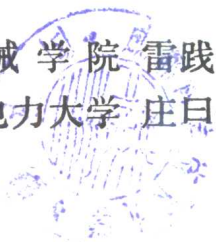
高等学校教材



短路电流计算

(不对称短路)

陕西机械学院 雷践仁 合编
武汉水利电力大学 庄白平



713
62



高等学校教材

短路电流计算

(不对称短路)

陕西机械学院 雷践仁
武汉水利电力大学 庄日平 合编

水利电力出版社

(京) 新登字115号

内 容 提 要

本书是高等学校水利水电工程专业电类选修课教材之一，也可供相近专业及有关工程技术人员参考。

本书共分八章，主要介绍电力系统不对称短路电流实用计算的基本理论和方法。第一章介绍短路计算的主要目的、要求及基本方法；第二章介绍三相短路的计算步骤和注意事项；第三章介绍对称分量法及电力系统不对称状态的基本关系式；第四章介绍电力系统元件的各序参数及其等效电路；第五章对各种简单不对称短路及其计算进行了较深入的分析；第六章介绍电压和电流对称分量在网络中的分布及经变压器的变换；第七章介绍不对称短路计算的运算曲线法；第八章对电力系统非全相运行的计算作了简单介绍。

为便于读者自学，书中编排有相应的例题和习题。

高 等 学 校 教 材

短 路 电 流 计 算

(不对称短路)

陕 西 机 械 学 院 雷 践 仁

武 汉 水 利 电 力 大 学 庄 曰 平 合 编

水利电力出版社出版

(北京三里河8号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

北京樱花印刷厂印刷

787×1092毫米 16开本 6.25印张 139千字

1994年6月第一版 1994年6月北京第一次印刷

印数 001—740 册

ISBN7-120-00817-X/TM·339

定价3.00元

前 言

本书是根据高等学校水利水电类专业教学委员会电类课程教学组审查批准的短路电流计算（不对称短路）教学大纲编写的，为水利水电动力工程专业的选修课教材，也可供相近专业及有关工程技术人员参考。通过本课程的学习，使读者掌握电力系统不对称短路计算的基本理论和实用方法，为电气工程设计计算打好基础。

本书正文共分八章，书末附有习题。由陕西机械学院雷践仁副教授编写第一、二、八章；武汉水利电力大学庄曰平副教授编写第三、四、五章；华北水利电力学院冯金光同志编写第六、七章及习题。由雷践仁、庄曰平合编，雷践仁统稿，并由浙江大学马大强教授主审。

承河海大学季一峰副教授、江苏农学院陈锦基副教授、陕西机械学院孙超图副教授对本书编写大纲提出宝贵意见，在此谨致谢意。

尽管在编写过程中，吸取总结了编者多年的教学经验，力求做到通俗易懂，例题配合恰当，以便读者自学，并注意到结合动力类专业特点，以便与“水电站电气部分”课程中的有关内容相衔接，但由于水平所限，错误在所难免，望读者多提宝贵意见。

编 者

1993年6月

目 录

前 言

第一章 概述	1
一、短路计算的主要目的和对它的基本要求	
二、短路实用计算方法简述	
第二章 三相短路的计算	9
一、运算曲线在三相短路电流计算中的应用	
二、冲击电流、全电流有效值、全电流最大有效值和短路容量的计算	
三、等效网络的变换和化简	
四、电流和电压分布的计算	
第三章 对称分量法及电力系统不对称状态的基本关系式	25
一、对称分量法	
二、电力系统不对称状态的基本关系式	
第四章 电力系统元件的各序参数及其等效电路	32
一、发电机	
二、变压器	
三、输电线	
四、电力系统各序网络的制定	
第五章 不对称短路的分析与计算	45
一、单相接地	
二、两相接地	
三、两相短路	
四、正序等效定则	
第六章 电压和电流对称分量在网络中的分布和经变压器后的相位变换	58
一、网络中电流和电压的分布	
二、电流和电压对称分量经变压器后的相位变换	
第七章 不对称短路计算的运算曲线法	69
一、用运算曲线计算不对称短路的原理	
二、计算方法	
第八章 非全相运行计算简介	86
一、一相断开	
二、两相断开	
习题	91
参考文献	95

第一章 概 述

我们知道，在电力系统设计和运行的许多工作中，都必须有短路计算的结果（主要指电流、电压及容量等电气量）作依据。因此，掌握短路时各电气量的实用计算方法，具有十分重要的意义。

电力系统短路的类型主要有三相短路 $[d^{(3)}]$ 、两相短路 $[d^{(2)}]$ ，在大接地电流系统中还有一相接地短路 $[d^{(1)}]$ 和两相接地短路 $[d^{(1,1)}]$ 。三相短路属对称故障，其余属不对称故障。

除不对称短路外，电力系统的不对称故障还有一相或两相断开的情况，称为非全相运行。

在同一时刻，电力系统内仅有一处发生上述某一种类型的故障，称为简单故障。同时有两处或两处以上发生故障，或在同一处同时发生两种或两种以上类型的故障，称为复故障（复杂故障）或多重故障。电力系统中常见的复故障，如在小接地电流系统中，由于不同相在电网的不同地点同时接地而造成的相间短路；在断相故障出现的同时，由于断相处导线落下又造成短路等等。

由于工程中的许多实际问题，可以通过对简单故障的计算来解决。同时，复故障可看成是简单故障的组合，分析时将以简单故障为基础。所以，本书的讨论将局限于简单故障。

在“水电站电气部分”课程中，已对三相短路的分析计算方法作了系统的阐述。本书将以此为起点，侧重讨论不对称短路的分析及实用计算方法。但是，考虑到对称短路的分析计算是不对称短路分析计算的基础，这部分内容有必要加强，故在本书中进行适当的复习和补充。

一、短路计算的主要目的和对它的基本要求

在电力系统电气工程的设计和运行中，短路计算的目的主要用以解决下列问题：

- （1）电气主接线方案的比较与选择，或确定是否需要采取限制短路电流的措施；
- （2）电气设备及载流导体的动、热稳定校验和开关电器、管型避雷器等的开断能力的校验；
- （3）接地装置的设计；
- （4）继电保护装置的设计与整定；
- （5）输电线对通信线路的影响；
- （6）故障分析。

对短路计算的要求应视欲解决的问题而定，主要包括对系统运行方式、短路计算点、短路类型等基本计算条件的要求，以及对计算项目及其准确度的要求等。

通常取实际可能的严重情况（针对计算的具体目的而言）为短路的计算条件。因为短路计算的结果，几乎全部被用来衡量系统、设备或装置在故障时的工作性能。系统、设备和装置经受住了严重情况下的考验，在不严重的情况下就没有问题了。

应当指出,实际可能的严重情况不应包含在运行中实际上不可能遇到的或极为罕见的最严重情况。例如,在计算最大短路电流时所用的接线方式,应是可能发生最大短路电流的正常接线方式(即最大运行方式),而不应采用仅在切换过程中可能并列运行的接线方式。又如,对于带电抗器的出线回路,为校验其断路器的开断能力和动、热稳定性,短路计算点一般应取在电抗器后等等。否则,有可能使工程的费用大幅度增加,不符合安全性、可靠性和经济性应统筹兼顾的工程设计原则。

有时存在几种情况,计算前尚无法判断哪一个严重。此时需对几种情况分别进行计算。例如,一般认为三相短路的情况严重。但在发电机出口两相短路,或在中性点直接接地系统以及自耦变压器等回路中发生单相(或两相)接地短路时,有可能比三相短路的情况更为严重。此时需对几种短路类型进行计算。

计算项目同样与计算目的密切相关。就以电气设备的选择而言,一般需计算短路点及其附近某些支路的起始次暂态短路电流 I'' 、冲击电流 i_{ch} (或全电流最大有效值 I_{ch})、短路切除时刻及其一半时刻的周期分量电流 I_t 及 $I_{t/2}$ (或稳态短路电流 I_∞)、短路容量 S_d (或 S_d')等。通常, I'' 、 S_d' 用以校验开关电器的开断电流或开断容量, i_{ch} 或 I_{ch} 用以校验动稳定, I'' 、 $I_{t/2}$ 、 I_t (或 I'' 、 I_∞)用以校验热稳定。而对继电保护的设计及整定而言,常常需要计算最大及最小运行方式下,不同类型、不同地点短路时,在网络各支路的电流和各节点的电压、电流及各电压的各序对称分量,甚至各电量的变化过程。但通常不需计算短路电流的非周期分量。

对计算准确度的要求,并非愈高愈好。因为准确度要求愈高,则需采用的计算方法愈繁;而从工程的实际情况来讲,还应考虑可能性和必要性的问题。例如在规划设计或初步设计阶段,计算的原始资料数据本身常常就是粗略值,不可能也没有必要对短路计算的准确度提出较高的要求。最简单的计算方法有时仅能确定短路电流的数量级,但这常常却是以解决实际问题。因此,对计算准确度的要求,应具体问题具体分析。一般地说,在继电保护的设计和整定计算中,以及故障分析的计算中,需要得到较高的准确度。

二、短路实用计算方法简述

算法简单、准确度合适,可以说是对所有实用计算方法的基本要求。但是,分析一个复杂系统,这两者往往有矛盾。协调和解决它们的矛盾,便促使了实用计算方法的发展。

任何一个系统,无论其结构的复杂程度如何,都可以看成是由某一种或几种方式相连接的若干元件(或环节)所组成。整个系统的运动规律,可以用反映各个元件自身特性和彼此连接方式的微分方程组(即数学模型)来描述。

人们自然会想到,通过建立并解算系统的完整数学模型的途径来求得问题的精确解答。但是,对于电力系统短路问题来说,这样做实在太困难了。

同步发电机是电力系统中的主要元件,对电力系统的动态特性起着决定性的作用。我们只要粗略地考察一下同步发电机的情况及其对电力系统的影响,就不难知道企图精确分析计算短路问题的复杂程度了。

在电力系统中,每同步发电机都配备一套励磁系统为其转子的励磁绕组提供工作电流,还配备相应的原动机(水轮机或汽轮机等)以提供机械能,组成原动-发电机组(或称发电机组)。发电机本体、励磁系统(包括主励磁系统和励磁调节器)和原动机系统(包括原动机主系统及调速器)之间既然有联系,必然会存在相互的影响和制约。对它们之间

的相互关系和动态特性加以数学描述,将得到发电机组的数学模型。比较完整的发电机组的数学模型是包含各种电磁量和机械量参数的四十几阶非线性微分方程。如果以这种所谓精确的微分方程为基础来建立电力系统的数学模型,那么,一个仅包含50台发电机组的电力系统,其数学模型的阶数将剧增到2000阶以上。这样高阶的非线性微分方程组,甚至超过了目前某些电子数字计算机的解题范围,其计算难度就不言而喻了。

为了简化计算过程,必须抓住主要矛盾,正确处理那些对计算结果影响较大的因素,忽略一些次要因素。这样做可能会降低计算的准确度。因此,在计算前首先需要根据计算的性质和目的,进行合理的化简,以便在保证所需准确度的前提下,使计算方法简化。

短路对电力系统的作用,属于随机的突发性大干扰。电力系统的电磁量和机械量将由此产生一变化过程,称为暂态过程。由于发电机组及其他转动机械的机械惯性作用远大于电力系统各元件的电磁惯性作用,因而在暂态过程刚刚开始的一段时间内,电磁量的变化非常显著,而机械量还来不及变化,暂态过程主要地决定于电力系统各元件的电磁特性,这一阶段称为电磁暂态过程。随着时间的推移,机械量(转速、角位移)已有了变化,于是暂态过程的情况将不仅与电磁特性有关,而且还与旋转元件的机械特性有关,这种涉及机械量的暂态过程,称为机电暂态过程。

可见,电力系统的短路问题,可分为电磁暂态和机电暂态来研究。研究电磁暂态时,机械量的变化可以忽略。研究机电暂态时,某些对机械量的变化无作用或作用甚微的电磁量(如短路电流中的非周期分量、高次谐波分量以及负序、零序分量),由于它们对电机的转子不产生转矩或者所产生的转矩的平均值为零,同样可以不予计算,从而使暂态研究得以简化。另外,从实用的角度来看,也有必要分别进行电磁暂态和机电暂态的研究。因为许多工程问题只要求知道短路时电磁暂态的情况就够了。而在分析电力系统的稳定性问题时,则把重点放在发电机组转子运动规律的研究上,需要进行机电暂态过程的研究。

本书讨论的短路实用计算方法,属于电磁暂态研究的范畴。下面介绍一下实用计算中常用的主要假设及其对简化计算的作用和影响。

(1) 假设在短路发生后的整个电磁暂态过程中,电力系统中所有发电机无摇摆现象,它们的电势相位相同,频率始终保持为正常运行时的值不变。

这一假设的实质就是忽略了暂态过程中机械量的变化所造成的影响,从而使暂态过程中电量的计算简化为单纯的电路计算,每台发电机都可以当作是独立的电源。这就是说,可以认为发电机在单独供电的网络中发生短路时所供给的短路电流,与在同其它多台发电机联合供电的网络中发生短路时供给的短路电流,遵循相同的变化规律。再加上发电机电势的相位相同这个更进一步的假设,就可以根据计算的需要,将电势变化规律相同或相似的发电机,直接合并为一个等效的发电机。

在短路开始的瞬间,由这一假设所引起的计算误差是很小的。因为短路刚刚发生时,连自动励磁调节器都来不及动作,更不用说各发电机组的转速(对应于电势的频率)和不同发电机组间的角位移差(对应于电势的相位差)会有什么变化了。并且,各发电机此刻的电势,采用的是所谓次暂态电势,它们可以根据短路前的工况来求得,其间的相位差实际上并不大,完全可以忽略。这一假设是符合短路开始瞬间的实际情况的。

但是,随着短路过程的发展,各发电机组对短路干扰的响应出现了明显的差异。这一假设就不大符合实际情况了,可能引起较大的计算误差。

(2) 假设电机的磁路未饱和, 所有元件的电抗都是线性的。

根据该假设, 可以在分析计算过程中应用叠加原理, 把由多种因素同时作用引起的总效应, 看成是各个因素单独作用引起的效应的叠加。例如, 多个电源的作用可看成是各个电源单独作用的叠加。故障时系统中各支路的电流或各节点的电压, 可以看成是正常运行时的值 (称为正常分量——负载的作用) 与故障引起的增量 (称为故障分量——故障的作用) 的叠加。而故障分量又可以看成是非周期分量、基波周期分量及高次谐波周期分量 (该分量通常忽略不计) 的叠加。对于不对称故障, 故障的基波周期分量还可以看成是故障的各序对称分量 (正序、负序、零序) 的叠加等等。

应当指出, 所谓线性元件, 是指它的阻抗值与流过它的电流大小无关, 并不是说阻抗值一定不能随时间变化。例如, 发电机的直轴电抗在暂态过程中就是随时间而变化的 (由 $x_d'' \rightarrow x_d' \rightarrow x_d$), 但仍可以看作是线性电抗。

由于将系统中各元件的参数线性化, 比较符合输电线、电抗器、变压器等元件的实际, 而对发电机就不那么符合了。因而, 短路处距发电机越远, 计算的误差就越小。

(3) 假设电力系统的三相, 除故障点可能不对称外, 其余部分的结构是对称的, 每一相的自电感及对其它相或其它回路 (如旋转电机的转子回路) 的互电感都是对称的。

据此, 可以把不对称故障点作特殊处理, 将它暂时划到系统的外电路中去; 再根据上述线性化假设, 利用对称分量法分析系统内部的特性; 最后, 再结合外电路 (故障点) 求出具体解。

由于发电机的转子回路并不对称, 特别是凸极机的转子铁芯也不对称, 这种情况必然要在定子的各相中反映出来。因此, 该假设不大符合发电机的实际情况, 其影响如同假设 (2) 的一样, 短路点距发电机越远, 计算的误差就越小。

(4) 各元件的电阻一般略去不计。

这样可以避免或减少复数运算, 将网络简化成犹如直流电路那样。但在计算短路电流非周期分量衰减时间常数时应计及电阻。此外, 当回路的总电阻大于总电抗的三分之一时, 也应计及电阻, 但可以不用复阻抗而用绝对值 $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ 来进行计算。又当输电线路导线截面较小时, 计算线路短路过程中的母线残余电压时需计及线路的电阻。

(5) 变压器的励磁电流略去不计。

相当于励磁阻抗断开, 简化了变压器的等效电路。但在零序网络中, 三相三柱式变压器的励磁回路一般不允许断开 (见第四节)。

(6) 对长度小于300km的线路, 其电容略去不计。

(7) 负载只作近似的估计。

由于运算曲线已经考虑了负载的影响, 因此在用运算曲线法计算短路时, 除了大型调相机和电动机 (特别是靠近短路点的) 需要计及外, 其它负载不再参加计算。这样可使计算大大简化。

必要时, 也可以分别计算短路时的故障分量和短路前的正常分量 (负载), 然后再叠加。

由于短路处的正常分量电流为零, 因此, 短路处的短路电流中只含有故障分量, 不计负载所引起的误差较小。

必须指出, 任何一条假设都是相对的、有条件的。因此, 采用任一假设时, 都不可忽

视它的适用范围。

我们知道，三相短路计算的首要任务是求解暂态过程中的周期分量电流。那么，不对称短路计算的情况将是如何的呢？根据上述假设，电力系统可以用具有线性电阻、电感和正弦电势电源的电路来等效。因此，无论是三相对称短路，还是其它各种不对称短路，都可以看成是等效电路中的换路，总的计算原则应该是一样的。这就是说，各种短路计算的首要任务都是求解暂态过程中的周期分量电流。

在忽略电阻的情况下，周期分量电流（即强迫分量电流）取决于回路的电抗和电源的电势。电力系统中的静止元件（变压器、输电线路、电抗器等）是无源元件，它们对不同序电流所呈现的电抗虽然可能不同，但都是恒定不变的，特性比较简单。但是，发电机的情况就要复杂得多。它是旋转的有源元件，由于内部物理过程的差异，故从外向里看，对不同相序电流呈现的电抗不仅不同，而且其中的正序电抗是随暂态过程的发展而变化的（直轴电抗由 $x_d'' \rightarrow x_d' \rightarrow x_d$ ，交轴电抗由 $x_q'' \rightarrow x_q' \rightarrow x_q$ ），但负序和零序电抗恒定不变。它只产生正序电势（由于转子只依正序方向而旋转的缘故），不产生负序和零序电势。在暂态过程中，电势也是随时间而变化的，变化的规律与发电机的型式、励磁方式和距短路点的远近以及负载情况等诸多因素有关。变化全过程的计算相当复杂。通常只有短路开始瞬间和稳定后这两个特定条件下的电势（次暂态和稳态电势）才能够依据比较简单的数据和解析式计算出来。

因此，欲用比较简单的步骤计算短路后任意时刻的电流，需另寻途径。

从以上分析可知，短路计算的难度集中到发电机上。如果我们把发电机的短路电流事先绘制成曲线，用查曲线的方法来求解则较简单了。这种曲线称为运算曲线，它应反映在短路后不同时刻的周期分量电流与回路电抗的关系。

由于发电机的容量和类型繁多，直接用有名值来绘制运算曲线，显然是不现实的。

分析和试验的结果表明，当采用以发电机的额定值为基准的标么值来表示电流和电抗时，可在相当宽的范围内，对类型及励磁方式大概一致的发电机所作的运算曲线是基本相同的。因而可以用概率统计方法绘出通用的平均运算曲线。曲线采用的电抗称为计算电抗，记作 x_{js} 。

根据我国电力建设的规划，按常用典型机组的参数和不同容量机型的分布，用概率统计方法制订的汽轮发电机、水轮发电机和系统（ $x_{js} \geq 1$ 且火电、水电分别占系统总容量的75%和25%）的短路电流运算曲线分别示于图1-1、图1-2和图1-3。这些曲线均考虑了负荷及自动电压调节器的作用，也考虑了发电机电抗在暂态过程中的变化对短路电流的影响。

这样，在计算三相短路时，发电机就可以用一个内电抗为 x_d'' 的电源来等效，它的特性就是对应的运算曲线。如果计算出了 x_{js} ，就能够方便地求得任意时刻的短路电流了。

实际上，这些运算曲线不但可以用来计算三相短路，同时还可以用来计算各种不对称短路。由于它考虑的因素较多，计算的准确度较高，并且使用方法简单，所以得到广泛应用。

当 $x_{js} > 3$ 时，发电机的内电抗 x_d'' 不超过 x_{js} 的10%（因为 $x_d'' < 0.3$ ）。这意味着短路点距电源的电气距离较远，电源电压在整个暂态过程中的变化很小。在这种情况下，可以认为电源的容量为无限大，应按无限大容量电源供电回路短路的情况来计算。

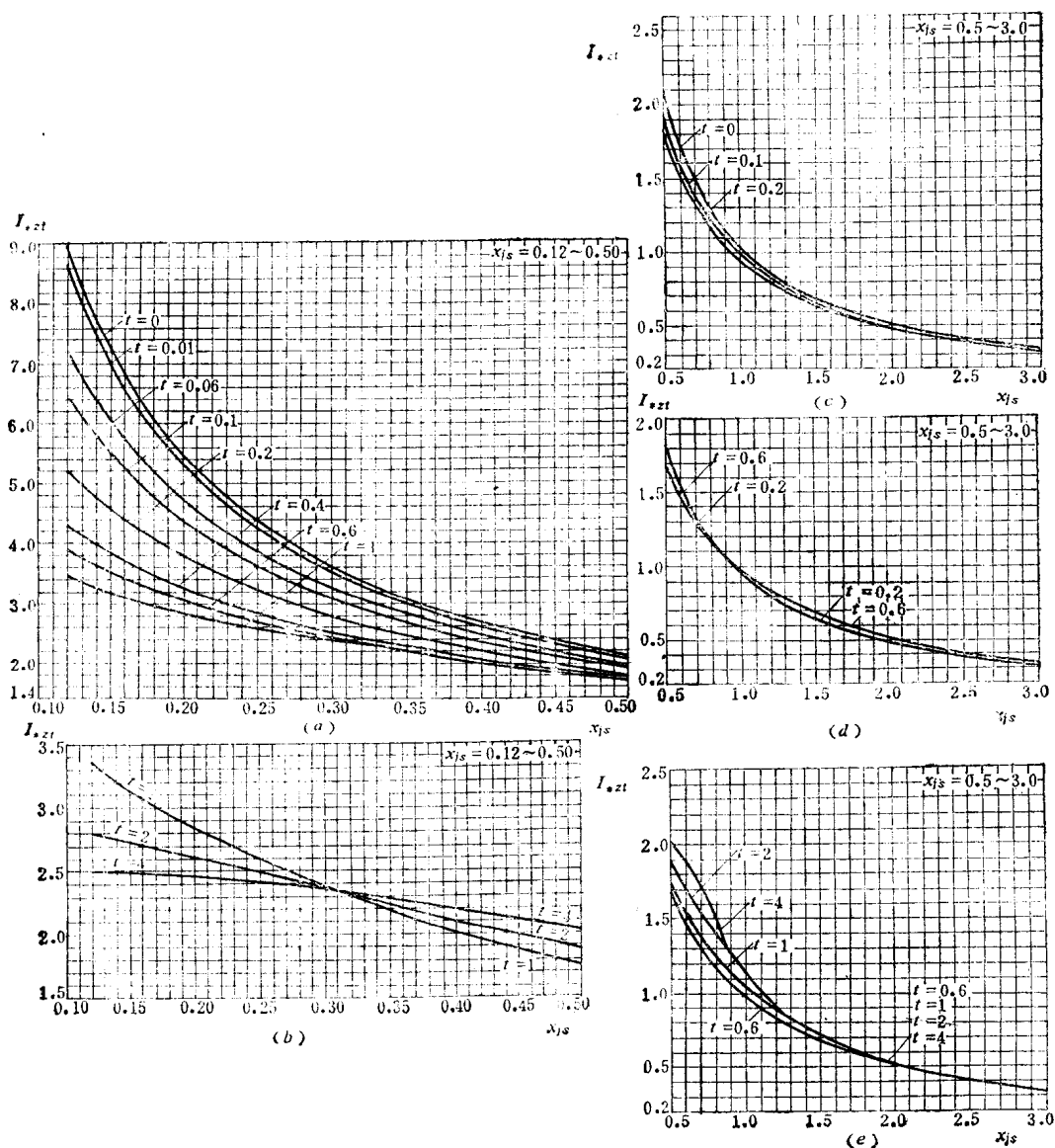


图 1-1 汽轮发电机运算曲线

(a) $x_{js}=0.12\sim0.50$, $t=0''\sim1''$; (b) $x_{js}=0.12\sim0.50$, $t=1''\sim4''$; (c) $x_{js}=0.5\sim3.0$, $t=0''\sim0.2''$; (d) $x_{js}=0.5\sim3.0$, $t=0.2''\sim0.6''$; (e) $x_{js}=0.5\sim3.0$, $t=0.6''\sim4''$

三相短路电流周期分量的工程计算，往往只要求计算出起始值（起始次暂态短路电流）。这一电流的解析计算并不困难，只需将各同步发电机用次暂态电抗 x_d'' 和次暂态电势 E'' 来等效（ x_d'' 已知， E'' 可根据短路前的工况求得或采用平均值），然后进行网络的稳态电流计算即可。这种方法也可推广用于不对称短路起始周期分量电流的计算中。在实用计算中的应用也很普遍。

短路处的周期分量电流求出后，就可以求解短路处的其他电量，以及根据网络的接线

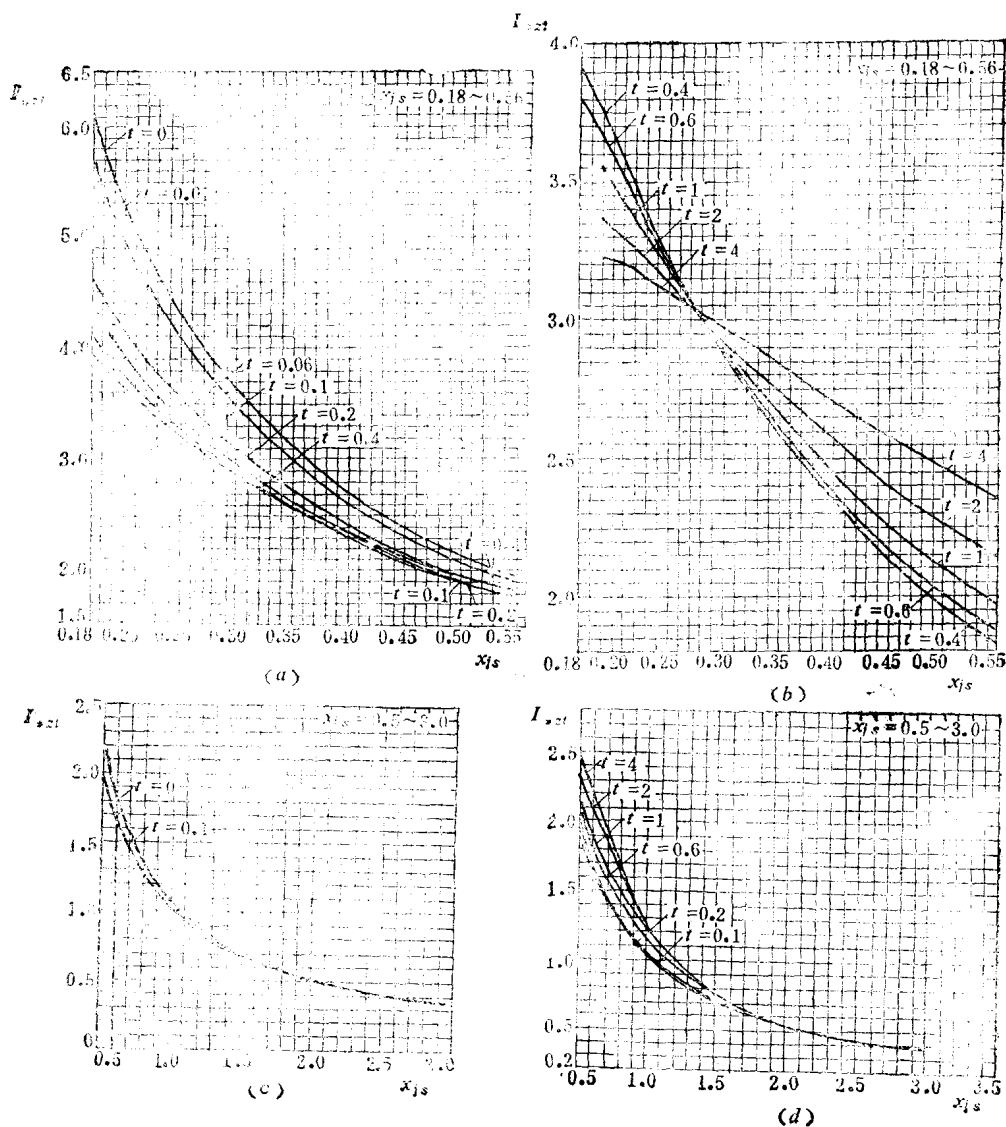


图 1-2 水轮发电机运算曲线

(a) $x_{js}=0.18\sim0.56$, $t=0''\sim0.4''$; (b) $x_{js}=0.18\sim0.56$, $t=0.4''\sim4''$; (c) $x_{js}=0.5\sim3.0$, $t=0''\sim0.1''$; (d) $x_{js}=0.5\sim3.0$, $t=0.1''\sim4''$

和参数求解网络中电流和电压的分布。

对于复杂的电力系统，尽管作了上述假设和化简，短路计算的工作量仍然是很繁重的。因此，借助一定的计算工具进行计算是非常必要的。计算尺是最先在笔算中使用的计算工具（现被计算器所替代）。为了减轻笔算的工作量，后来采用了基于建立系统物理模型的方法构成的模拟计算装置——直流与交流计算台。电子数字计算机的发展和普及，为电力系统的暂态计算提供了强有力的工具，并随之出现了先进的计算方法。目前已经能够对巨大的电力系统（几百个以至几千个节点的电力系统）的多重复杂故障进行详细的计

算, 为生产运行和设计工作提供完备的数据。可见, 计算方法与计算工具是相得益彰, 协同发展的。

作为各种计算工具和计算方法应用的基础, 本书仅结合笔算程序来讨论短路实用计算的基本原理。

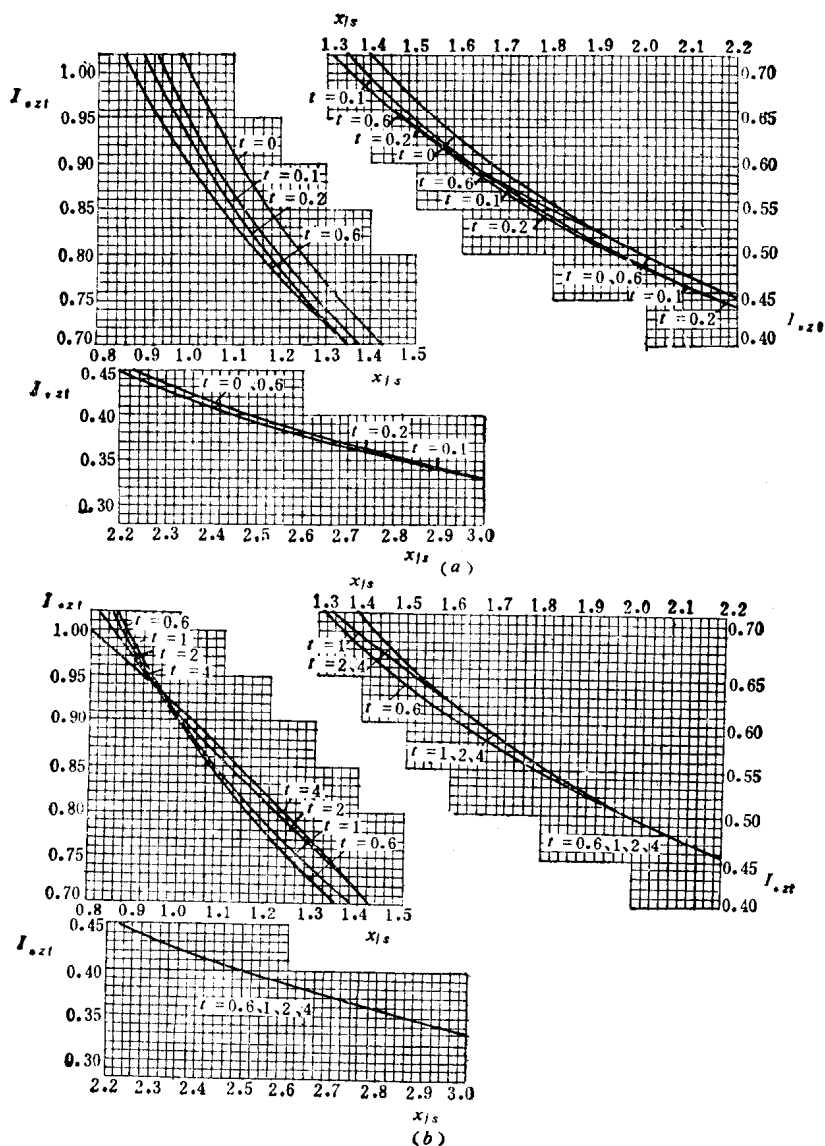


图 1-3 系统运算曲线
(a) $t = 0'' \sim 0.6''$; (b) $t = 0.6'' \sim 4''$

第二章 三相短路的计算

三相短路的实用计算方法，已在“水电站电气部分”课程中作了系统的阐述。本节作为复习，并补充一些在工程计算中遇到的问题，以便为以后的内容奠定必要的基础。

如前所述，电力系统短路的计算，首先需求出流过短路点的周期分量故障电流，然后再计算其他短路电量。

一、运算曲线在三相短路电流计算中的应用

运算曲线的应用，可分为同一变化计算法和个别变化计算法两种。

1. 同一变化计算法

同一变化计算法认为系统内的各发电机所供给的短路电流周期分量在短路过程中按同一规律变化，可以用一个容量等于各发电机额定容量之和的等效发电机来进行计算。其步骤是：

(1) 根据电力系统的接线和计算目的，绘制计算电路图。

计算电路图是一种简化了的系统单线图，通常仅考虑与短路计算有关的元件即流过短路电流的线路、变压器、电抗器和同步发电机等，其参数标注于设备符号之旁或统一给出。根据计算目的确定的短路计算点也需表示在图中。对于远离短路计算点的系统部分，用相应的等效发电机表示即可，不必画出其详细的内部接线。

(2) 根据计算电路图绘制等效网络。

短路计算用的等效网络，是将计算电路图中元件的电抗用折算后的电抗表示，电势用小圆圈表示，并略去中性线的单相电路示意图。图中各电抗符号旁边写一分子式，分子填写电抗的顺序编号，分母填写折算后的电抗标么值。由于发电机的电抗采用直轴次暂态电抗 x_d' 进行折算，故该网络又称为次暂态网络。

折算电抗时必须以统一选定的 S_i 、 U_i 为基准。其中基准容量 S_i 对所有元件是相同的，为便于计算，通常取 S_i 为100MVA或1000MVA，有时取为各电源的额定容量之和。基准电压 U_i 在不同电压级是不同的，作为近似计算，通常分别取为各自的平均额定电压 U_{av} 。

电力系统各元件电抗标么值的折算公式列于表2-1和表2-2。

(3) 化简等效网络，求出等效发电机对短路点的组合电抗 x_x 。

由于各短路点的短路计算是分别进行的，所以化简网络必须根据各短路点分别进行。

(4) 将 x_x 折算为计算电抗 x_{is} 。

$$x_{is} = x_x \frac{S_{ex}}{S_i} \quad (2-1)$$

式中 S_{ex} ——等效发电机的额定容量，其值等于各发电机的额定容量之和。

若制订等效网络时选 $S_i = S_{ex}$ ，则 $x_{is} = x_x$ 。

(5) 欲求 t 时刻的短路电流周期分量，由 x_{is} 查对应发电机 t 时刻的运算曲线，得到 t 时刻的短路电流周期分量标么值 I_{*is} 。

若系统以火电为主，查汽轮发电机的运算曲线；以水电为主，查水轮发电机的运算曲

表 2-1

常用设备电抗换算公式

元件名称	厂家所给参数	有名值 (Ω)	标 么 值 (以 S_j 、 $U_j=U_p$ 为基值)
发 电 机	x_{F0} (标么值)	$x_F = \frac{U_e^2}{S_e} x_{F0}$	$x_{*F} = \frac{x_F}{x_j} \approx x_{F0} \frac{S_j}{S_e}$
变 压 器	$x_B(\%) = u_d(\%)$ ①	$x_B = \frac{u_d(\%)}{100} \times \frac{U_e^2}{S_e}$	$x_{*B} = \frac{x_B}{x_j} \approx \frac{u_d(\%)}{100} \times \frac{S_j}{S_e}$
电 抗 器	$x_k(\%)$	$x_k = \frac{x_k(\%)}{100\sqrt{3}} \frac{U_e}{I_e}$	$x_{*k} = \frac{x_k}{x_j} \approx \frac{x_k(\%)}{100} \times \frac{U_e}{\sqrt{3} I_e} \frac{S_j}{U_j^2}$
线 路	$x_0(\Omega/\text{km})$ $l(\text{km})$	$x_l = x_0 l$	$x_{*l} = \frac{x_l}{x_j} = x_0 l \frac{S_j}{U_j^2}$
系统电抗	已知系统短路容量 S		$x_{*st} = \frac{S_j}{S}$
	与系统连接的断路器的 开断容量 S_{dn}		$x_{*st} = \frac{S_j}{S_{dn}}$
从基值 S_{j1} 换算到基值 S_{j2}	x_{*j1}		$x_{*j2} = x_{*j1} \frac{S_{j2}}{S_{j1}}$

注 表内各代号有名值的单位有 $x(\Omega)$ 、 $U(\text{kV})$ 、 $I(\text{kA})$ 、 $S(\text{MVA})$ 、 $l(\text{km})$ 。

① 该式适用于双绕组变压器。

线；若 $x_{js} > 1$ ，一般可查系统的运算曲线。

$t=0$ 时的值 $I_{*st=0}$ 即为起始次暂态短路电流 I''_* ； $t>4\text{s}$ 时的值 $I_{*st>4}$ 可认为等于 4s 时的值 $I_{*st=4}$ 。

当 $x_{js} > 3$ 时，按无限大容量电源计算， $I''_* = I_{*st} = 1/x_{js}$ 。

(6) 将 t 时刻的短路电流折算到所在电压级的有名值 I_{st} 。

$$I_{st} = I_{*st} I_{e\Sigma} = I_{*st} \frac{S_{e\Sigma}}{\sqrt{3} U_p} \quad (2-2)$$

式中 U_p —— I_{st} 所在电压级的平均额定电压， kV ；

$S_{e\Sigma}$ ——等效发电机的额定容量， MVA ；

$I_{e\Sigma}$ ——折算到所在电压级 U_p 的等效发电机额定电流， kA 。

当电源可按无限大容量来计算时，考虑到 $U_i = U_p$

$$\begin{aligned} I_{st} &= \frac{I_{e\Sigma}}{x_{is}} = \frac{1}{x_{is}} \times \frac{S_{e\Sigma}}{\sqrt{3} U_p} = \frac{1}{x_{is} \frac{S_{e\Sigma}}{S_j}} \times \frac{S_{e\Sigma}}{\sqrt{3} U_p} \\ &= \frac{1}{x_s} \times \frac{S_j}{\sqrt{3} U_i} = \frac{1}{x_s} \times I_j \end{aligned} \quad (2-3)$$

同一变化计算法使用起来很方便，但由于基本上没有考虑系统内各发电机的类型及至短路点电气距离远近的差别，所以可能有较大的计算误差。在要求准确度较高的计算中，特别在含有无限大容量电源的情况下，不宜应用同一变化计算法，而宜应用考虑了这些差别的个别变化计算法。

表 2-2

变压器及电抗器的等值电抗计算公式表

设备名称	接 线 图	等值电抗计算公式	符 号 说 明
三绕组 变压器或 自耦变 压器		$x_1 = \frac{1}{2}(u_{d12} + u_{d13} - u_{d23})$ $x_2 = \frac{1}{2}(u_{d12} + u_{d23} - u_{d13})$ $x_3 = \frac{1}{2}(u_{d13} + u_{d23} - u_{d12})$	x_1 ——高压绕组电抗 x_2 ——中压绕组电抗 x_3 ——低压绕组电抗 u_{d12} ——高、中压绕组间的短路电压 u_{d13} ——高、低压绕组间的短路电压 u_{d23} ——中、低压绕组间的短路电压
分裂电 抗器		$x_m = f_0 x_n$ $x_1 = x_2 = x_n + x_m = (1 + f_0) x_n$	x_m ——互感电抗 x_n ——支分裂电抗 f_0 ——互感系数, 取0.4~0.6
双绕组 低压双分 裂变压器		$x_1 = x_{12} - \frac{x_{2'2''}^2}{4}$ $x_{2'}' = x_{2''}'' = \frac{x_{2'2''}^2}{2}$	x_{12} ——高压绕组与总的低压绕组间的穿越电抗 $x_{2'2''}$ ——分裂绕组间的分裂电抗
三绕组 低压双分 裂变压器		$x_1 = \frac{1}{2}(x_{12} + x_{13} - x_{23})$ $x_2 = \frac{1}{2}(x_{12} + x_{23} - x_{13})$ $x_3 = \frac{1}{2}(x_{13} + x_{23} - x_{12} - x_{3'3''})$ $x_{3'}' = x_{3''}'' = \frac{1}{2}x_{3'3''}$	x_{12} ——高、中压绕组间的穿越电抗 $x_{3'3''}$ ——分裂绕组间的分裂电抗 $x_{13}' = x_{13}'', x_{23}' = x_{23}''$ 为不分裂绕组与分裂绕组间的穿越电抗

2. 个别变化计算法

个别变化计算法是将计算电路图中所有发电机按其类型和距短路点电气距离远近分成几组, 每组的发电机用一个容量等于它们的额定容量之和的等效发电机来代替, 求出各等效发电机分别对短路点供给的短路电流有名值, 其和即为短路点的短路电流(有名值)。计算步骤是:

(1) 绘制计算电路图, 制订等效网络(与同一变化计算法相同)。

(2) 将所有发电机按上述原则分成几组, 一般分成两组或三组即可满足要求。

如将无限大容量电源作为一组, 同类型且至短路点电气距离相差不大的发电机或虽类型不同但至短路点电气距离较远的发电机作为一组, 直接接在短路点的发电机作为一组。

化简网络, 求出各组的等效发电机对短路点的转移电抗 x_{*1d} 、 x_{*2d} 、...

(3) 分别求出各等效发电机对短路点的计算电抗。

$$\left. \begin{aligned} x_{js1} &= x_{*1d} \frac{S_{e1}}{S_j} \\ x_{js2} &= x_{*2d} \frac{S_{e2}}{S_j} \\ &\dots\dots \end{aligned} \right\} \quad (2-4)$$

式中 x_{js1} 、 x_{js2} 、 $\dots$ ——等效发电机 1、2、 $\dots$ 分别对短路点的计算电抗；

S_{e1} 、 S_{e2} 、 $\dots$ ——等效发电机 1、2、 $\dots$ 的额定容量。

(4) 由 x_{js1} 、 x_{js2} 、 $\dots$ 分别查相应的运算曲线，得各等效发电机分别供给短路点的周期分量短路电流的标么值 I_{*s1} 、 I_{*s2} 、 $\dots$ 。

(5) 求各等效发电机在 t 时刻分别供给短路点的周期分量短路电流有名值（折算到所在电压级）。

$$\left. \begin{aligned} I_{s1} &= I_{*s1} \frac{S_{e1}}{\sqrt{3} U_p} \\ I_{s2} &= I_{*s2} \frac{S_{e2}}{\sqrt{3} U_p} \\ &\dots\dots \end{aligned} \right\} \quad (2-5)$$

(6) 短路点在 t 时刻的总短路电流周期分量有名值 I_{st} ，

$$I_{st} = I_{s1} + I_{s2} + \dots \quad (2-6)$$

应用个别变化算法时必须注意，查曲线所得的电流标么值一般不允许直接相加，因为各等效发电机的容量不一定相等；式 (2-5) 中的 U_p 必须是欲求电流 I_{st} 所在电压级的值，如计算短路点的短路电流，必须取短路点所在电压级的 U_p 。此外，式 (2-6) 中的 I_{s1} 、 I_{s2} 、 $\dots$ 必须是同一时刻的值。

为了求出短路电流在网络中的分布情况，或计算某些节点的电压，有时需要用标么值表示短路点的短路电流。此时可先将各等效发电机供给的短路电流折算为统一基准的标么值，然后再相加。

3. 非“标准参数”发电机的修正

当发电机的参数与制订运算曲线时采用的“标准参数”有较大差异，且需提高计算准确度时，周期分量电流可按下述方法进行修正。

(1) 励磁系统强励倍数 K_q （最大励磁电压与额定励磁电压之比）引起的修正。

当实际发电机的强励倍数与制定运算曲线时所采用的数值 1.8 有较大差别时，可用校正系数 ΔK_i 进行修正。

$$I'_{*st} = I_{*st} + (K_q - 1.8) \Delta K_i I_{*st} \quad (2-7)$$

式中 I'_{*st} ——经过修正后的周期分量电流；

I_{*st} ——从运算曲线查得的周期分量电流；

ΔK_i ——强励校正系数，见表 2-3 和表 2-4。

在用式 (2-7) 时必须注意到周期分量电流总是受到发电机端电压不大于额定电压的限制，即

$$I'_{*st} \leq \frac{1}{x_{js} - x_d''} \leq K_{i\max} I_{*st} \quad (2-8)$$

式中 x_{js} ——电源对短路点的计算电抗（以电源容量为基准）；