



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



POWER SYSTEM TRANSIENT ANALYSIS

电力系统暂态分析

(第四版)

方万良 李建华 王建学 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

电力系统暂态分析

(第四版)

方万良 李建华 王建学 编
刘涤尘 主审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。全书共两篇、八章。主要内容有：第一篇讲述电力系统电磁暂态过程分析（电力系统故障分析），第二篇讲述电力系统机电暂态过程分析（电力系统稳定性）。

第一篇共五章，第一章为基本知识；第二章介绍同步电机突然三相短路的物理过程及近似的短路电流表达式，第三章介绍电力系统三相短路的实用算法和计算程序框图，第四章介绍用对称分量法分析不对称故障的原理和电力系统各元件各序分量的参数，第五章为典型的不对称故障的分析和计算。第二篇共三章，第六章介绍电力系统各元件的机电特性，第七、八章则分别分析了电力系统的静态和暂态稳定性。

本书是高等学校电气类专业的专业课程本科教材，也可作为高职高专院校师生和从事电力工程的工程技术人员的参考书。

图书在版编目（CIP）数据

电力系统暂态分析 / 方万良, 李建华, 王建学编. —4 版. —北京: 中国电力出版社, 2017. 7 (2017. 9 重印)

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

ISBN 978-7-5123-9570-1

I. ①电… II. ①方…②李…③王… III. ①电力系统—暂态特性—分析—高等学校—教材
IV. ①TM712

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 166971 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 雷 锦 (010-63412530)

责任校对: 常燕昆

装帧设计: 张 娟

责任印制: 吴 迪

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

版 次: 1985 年 12 月第一版 2017 年 7 月第四版

印 次: 2017 年 9 月北京第四十八次印刷

开 本: 787 毫米 × 1092 毫米 16 开本

印 张: 19

字 数: 468 千字

定 价: 40.00 元

版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

前 言

《电力系统暂态分析》第一版由西安交通大学李光琦教授编写，由中国电力出版社于1985年12月出版。其后又分别于1997年1月和2007年1月修订出版了第二版和第三版。三版总印数约28万册。本书为第四版。本次修订经李光琦教授授权，由方万良、李建华和王建学完成。其中，第一、二章由李建华编写；第三、四、五章由王建学编写；方万良编写了绪论和第六、七、八章，并进行了全书的统稿工作。

考虑到本科生与研究生培养目标的边界和教学的课时限制，本次修订仍保持李光琦教授原版的基本框架，侧重于内容的易读性和可理解性，同时在个别知识点上增加了少许内容。

科学与技术的发展依赖于人类对已有知识的筛选传承。希望本书能继续起到它传承电力系统暂态分析方法和知识的作用。本书由武汉大学刘涤尘教授主审，提出了许多宝贵意见，在此表示由衷感谢。由于编者对电力系统暂态分析问题的研究尚需深入，本书可能存在解得不透、说得不明的地方，欢迎读者批评指正。

编 者

2016年10月

第一版前言

本书系根据 1982 年 12 月电力系统教材编审组扩大会议上通过的“电力系统暂态分析”编写大纲编写的。

编写中考虑了编者在西安交通大学讲授多遍该课的教学经验，参考了国内外有关书籍，并吸取了前一轮教材《电力系统工程基础》和《电力系统》的使用经验。

由于同步电机在突然短路后的暂态行为、参数及其分析方法往往是学生学习时的难点，而这些内容对于电力工作者来说又是必不可少的基础，对此，编者在本书中，首先在电机学的基础上进一步阐明同步电机突然短路后的物理过程和其近似解。接着建立同步电机的基本方程，并用它来分析短路过程和各种参数，其中逐步采取了近似的步骤，最后得到与前面近似解的一致结果。对于暂态电动势和次暂态电动势采用了比较简明的方法说明其意义。

在应用对称分量法分析不对称故障方面，书中强调了应用对称分量后，各分量间便无耦合；对于零序参数和等值网络着重从概念上加以说明；较详细地阐述了叠加原理的应用。

对于稳定问题，编者首先说明了电机机电暂态和电磁暂态过程的联系，然后以单机对无限大系统的稳定问题为重点，就其各个方面作了详尽的讨论，使学生能更好地掌握稳定问题的基本概念和分析方法。其中考虑到自动调节系统对系统稳定的重要作用，加强了有关调节系统的内容。对于多机系统稳定分析，只是在简单系统的基础上作了自然的延伸，这样可以在不增加教材篇幅的条件下，使学生对多机系统稳定问题有初步的认识，并知道还有不少问题有待进一步研究。

考虑到计算机数值计算方法已普遍应用于电力系统的分析计算，书中每个方面均介绍了相应的计算程序的原理框图。

本书经华中工学院何仰赞同志详细审阅。此外，西安交通大学沈赞坝，上海交通大学黄家裕，上海电力专科学校陆敏政等同志均对书稿提出了不少宝贵意见。在编写过程中还得到过清华大学陈寿孙同志的帮助，云南工学院张瑞林同志也提出过很好的意见。在此一并致谢。

限于编者水平，书中疏漏与不妥之处请读者批评指正。

编者

1984 年 10 月

第三版前言

在修订本书时编者总结了使用本教材七年来的经验，并征求了使用本书的部分院校的意见，力求使本书第二版较第一版的质量有较大的提高。

在修改过程中，作者注意了使全文的物理概念和公式推导、分析的描述更加清晰、简明，并对以下几方面的内容作了较大的调整。

(1) 第二章同步发电机突然三相短路分析。在这章的第一节改变了传统的叙述方法，在叙述了同步发电机突然三相短路的物理过程后，随即介绍了短路电流的近似公式和暂态电动势等概念，即将物理概念和实用计算相结合，使本节可以作为完整独立的部分。教学时数不够的院校可仅讲授第一节而省略后两节。在应用同步发电机基本方程分析短路电流部分，将原来在两节中分别讲述的空载和负载条件下的短路计算合并为第三节，减少了重复，使之更加简明。

(2) 在第三章短路电流的实用计算方面适当增加了计算机计算部分。

(3) 在有关机电暂态过程的最后三章中加强了自动调节励磁系统及其对系统稳定性的影响部分。

(4) 第六章介绍各元件机电特性时，为了节省篇幅而略去了调速器的数学模型。对负荷特性的介绍则更加全面。

(5) 在第七章分析静态稳定中，删去了不连续调节励磁部分，而增加了电力系统稳定器等内容，以适应系统发展的状况。

(6) 在第八章有关复杂系统暂态稳定的内容里，增加了便于与自动调节励磁系统接口的交轴暂态电动势为常数的发电机模型。

华中理工大学何仰赞教授对修订稿进行了详细的审阅，并提出了许多宝贵意见，在此表示衷心感谢。

编者

1993年6月

第三版前言

本次修订仍然保持了原书的基本内容体系，同时着重进行了以下两方面的调整：一方面是进一步增强和改进对基本原理的分析说明，另一方面是反映电力系统新技术及新分析方法的发展。以下作简要说明：

(1) 在第二章同步发电机突然三相短路分析中加强了与“电机学”相关内容的衔接；将突然短路瞬时交流分量与稳态时的磁链图形、电压平衡方程和相量图作对比性描述。第一节至第三节从物理过程的分析到实用计算公式的获得，可以作为完整独立部分。如果学时不够可以略去第四、五节的较严格分析方法。

第四、五节除了介绍用同步电机基本方程分析突然三相短路外，还用例题和习题介绍基本方程更广泛的应用。

(2) 对于第三章的短路电流实用计算，仅保留了运算曲线的最基本内容，简要介绍了国际电工委员会（IEC）IEC909 标准应用计算系数计算短路电流的方法。

(3) 考虑到超高压线路的发展，在第四章补充了输电线路零序电纳部分，但不一定要讲授。

(4) 第五章不对称故障分析中，对于非全相运行的分析进行了改进，因而与第三章的内容配合更好。

(5) 在第六章增加了柔性输电装置基本原理的介绍，在讲授时可以从简。

(6) 在第七章静态稳定分析中，通过例题对于自动调节励磁系统作了更加详细的说明。

(7) 第八章扩大了等面积定则的应用，此外还指出了用直接法分析暂态稳定的基本性质。

(8) 在全书各章中改进了例题，此外，各章后的习题给读者以启发和训练。

本书在修订过程中，西安交通大学肖惕教授给予了大力帮助，李建华教授协助提供了相关参考资料。在此表示衷心感谢。

编者

2006年4月

目 录

前言	
第一版前言	
第二版前言	
第三版前言	
绪论	1
思考题	3
第一篇 电力系统电磁暂态过程分析 (电力系统故障分析)	
第一章 电力系统故障分析的基础知识	4
第一节 故障概述	4
第二节 标幺制	6
第三节 无限大功率电源供电的三相短路电流分析	15
习题	21
第二章 同步发电机突然三相短路分析	23
第一节 同步发电机在空载情况下定子突然三相短路后的电流波形分析	23
第二节 同步发电机稳态运行情况及暂态参数	25
第三节 同步发电机空载突然三相短路电流分析	34
第四节 同步发电机负载下三相短路交流电流初始值	41
第五节 同步发电机的基本方程	44
第六节 应用同步发电机基本方程 (拉氏运算形式) 分析突然三相短路电流	62
第七节 自动调节励磁装置对短路电流的影响	78
习题	81
第三章 电力系统三相短路电流的实用计算	82
第一节 短路电流交流分量初始值计算	82
第二节 计算机计算复杂系统短路电流交流分量初始值的原理	95
第三节 其他时刻短路电流交流分量有效值的计算	102
习题	105
第四章 对称分量法及电力系统元件的各序参数和等值电路	107
第一节 对称分量法	107
第二节 对称分量法在不对称故障分析中的应用	110
第三节 同步发电机的负序、零序电抗	113
第四节 异步电动机的负序和零序电抗	115
第五节 变压器的零序电抗	115

第六节	输电线路的零序阻抗和电纳	123
第七节	零序网络的构成	134
	习题	136
第五章	不对称故障的分析计算	138
第一节	各种不对称短路时故障处的短路电流和电压	138
第二节	非故障处电流、电压的计算	152
第三节	非全相运行的分析计算	158
第四节	计算机计算程序原理框图	164
	习题	170

第二篇 电力系统机电暂态过程分析 (电力系统的稳定性)

第六章	电力系统稳定性问题概述和各元件机电特性	172
第一节	概述	172
第二节	同步发电机组的机电特性	174
第三节	自动调节励磁系统的作用原理和数学模型	189
第四节	负荷特性	194
第五节	柔性输电装置特性	198
	习题	205
第七章	电力系统小干扰稳定性分析	206
第一节	简单电力系统的静态稳定	206
第二节	小干扰法分析简单系统静态稳定	209
第三节	自动励磁调节系统对静态稳定的影响	218
第四节	多机系统的静态稳定近似分析	230
第五节	提高系统小干扰稳定性的措施	234
	习题	239
第八章	电力系统暂态稳定	240
第一节	电力系统暂态稳定概述	240
第二节	简单系统的暂态稳定性	243
第三节	发电机组自动调节系统对暂态稳定的影响	255
第四节	复杂电力系统的暂态稳定计算	257
第五节	提高暂态稳定性的措施	268
	习题	276
附录 A	同步电机绕组电感系数	278
附录 B	同步电机的标么值	281
附录 C	同步电机电磁暂态过程中定子交流分量的时间常数	286
附录 D	常用网络变换的基本公式列表	288
附录 E	架空线路的零序电容 (电纳)	289
	参考文献	296

绪 论

电力系统暂态分析是一个十分宽泛的题目，进一步又细分为电力系统电磁暂态分析和电力系统机电暂态分析。本课程主要介绍后者且只涉及电磁暂态的一少部分内容。机电暂态分析的内容也十分庞大。一方面，各种特殊的机电暂态问题，如低频振荡、次同步谐振等，本身就构成专门的研究领域；另一方面，现代电力系统的动态元件种类快速增加，直流输电（HVDC）、柔性输电（FACTS）、新型能源等不断介入电力系统，电力系统暂态分析的内容和方法也在不断发展。受学习课时的限制，本课程介绍的是最基本的内容，是进一步学习的基础。

电力系统的基本功能是为社会可靠地提供质优价廉的电力。作为一种商品，电力也有其质量指标。这些指标通常包括电压幅值、频率、波形和可靠性。近代社会对电能质量还提出了更高的要求，即在电能生产过程中要对自然环境友好。电力系统在正常运行时，如何满足电压、频率和波形的质量指标问题在“电力系统稳态分析”课程中讨论。可靠性是指系统保持对各类负荷正常、不间断供电的能力，包括冗余性和安全性两个基本问题。在电力系统规划设计中主要解决冗余性问题，而本课程则主要解决电力系统运行中的安全性问题。安全性又进一步区分为元件安全与系统安全。元件安全主要由电力系统的电磁暂态过程分析解决，系统安全性通常是指电力系统发生单个元件的故障后不致使系统由于失去稳定性而丧失对大量用户的供电服务。由于现代社会生产和生活对电力的高度依赖，即便是局部地区的供电异常或者非计划中断也将对该地区的社会生产和生活带来不利影响，有时甚至产生严重的社会经济和政治损失。

火力、水力、核能、风力和太阳能等各种一次能源由相应的发电设备转换成电能经输电、配电网送达用户。电力系统中将其他能量转换为电能的主要设备是同步发电机（太阳能除外，尽管太阳能发电正在迅速发展，但目前系统中的份额还很小），因而发电机（此后在本书中除非特别说明，发电机指同步发电机）是电力系统中的电源。发电机转子由原动机拖动作旋转运动。转子的动力矩由原动机提供，阻力矩由定子绕组的电磁力矩和转子的机械阻尼（风阻力和机械摩擦力）共同提供。发电机正常运行时转速必须保持在额定值附近。由转动学可知，对于一台发电机，当且仅当转子的动力矩与阻力矩相等时，转子保持匀速旋转。在电力系统中有成百上千台经电力网连接的发电机同时运行，每一台发电机都以其额定转速旋转时整个系统才能正常供电。

电力系统中将电能转换为其他能量的用电器是电力系统的负荷。对于电源而言，在电能输送过程中输变电设备中的电能损耗也是负荷。显然，接入电力系统的负荷种类千千万万，每个用电器从电力系统吸收的有功功率的大小是随机变化的。例如，电力机车的爬坡运行与下坡运行，车床的进刀与退刀，冰箱、空调、电梯、声控照明的随机起停等。对于电力负荷取用有功功率大小的随机变化，为了保持系统中所有发电机的转速维持在额定值，发电机的原动机出力必须给予相应的反应。因此，电力系统的发电、输电、配电和用电四个环节是同时进行的。发电机转子的机械旋转运动与电力网（包括发电机定子绕组）中的电气量相互作用

用而使电力系统在数学上是一个动力学系统。电力系统的正常工作状态称为稳态,即所有发电机转子都以其额定转速旋转。在这种状态下所有转子上的阻力矩与动力矩平衡,系统各节点的电压和频率为常数。

不难理解,由于电力负荷的随机性和时变性等各种因素,在物理上电力系统几乎不存在绝对的稳态运行状态,而是各电气量持续地在某一平均值附近变化。但是在工程上既无必要也无可能对系统运行状态的缓慢、微小变化进行暂态过程的分析。因此,在电力系统分析研究领域,从数学上将电力系统的运行状态分为稳态和暂态。在电力系统稳态分析中认为电力系统稳态运行时所有系统参数和运行参数不随时间变化而保持常数。对应地,只要物理系统的运行参数不随时间发生大幅度的、剧烈的变化,即认为系统是稳态运行。因此,电力系统的稳态是相对的。通常,在电力系统运行方式的优化调整过程中,总是控制调整速度而使系统缓慢地从一个稳态过渡到另一个稳态。从物理上讲,在这种过渡期间电力系统也经历着暂态过程,但是由于这期间系统的运行参数变化十分缓慢,因而工程上一般无需分析这种暂态过程。

电力系统中涉及能量转换和传输的通道由原动机、发电机、变压器(换流器)、输电线路、用电设备(负荷)按照电的、磁的和机械的方式连接而成。运行中的电力系统,如果系统内部的任何一个关键设备或者输电线路突然故障,即导致系统的网络拓扑结构突然变化,从而使发电机转子的动力矩与阻力矩失去平衡,这时系统即从稳态运行进入暂态过程。处于暂态过程中的电力系统,系统的电压、频率和设备流过的电流等运行参数不再像稳态运行时那样保持常数而是随时间大幅度变化。在这种情况下,对用户而言,由于系统提供的电能质量恶化而可能使用电设备不能正常工作甚至损坏;对系统自身而言,某些电气设备可能由于承受不了过电压和/或过电流而遭到破坏。在电力系统暂态分析研究领域,把引发系统进入暂态过程的事件称为扰动。在什么时刻、什么位置、发生什么类型的扰动是不可预知的。由于电力系统覆盖的地域十分辽阔,构成电力系统的设备众多,电力系统在长期运行过程中必然会遭到各种扰动。这就意味着,长期、连续运行的电力系统必然会经历暂态过程。因此,在电力系统规划设计时和在电力系统运行调度时都必须通过电力系统暂态分析来校核系统的建设和运行方案,以确保系统受到较大概率的扰动后不发生恶性后果。这就必须研究电力系统暂态分析的方法。

电力系统在暂态过程中,发电机的机械运动暂态过程和电力网中的电磁暂态过程同时进行并且相互影响,显然理论上应该统一进行分析,但这将使问题的数学规模急剧增大,从而使分析十分困难。工程上,鉴于系统对不同扰动的暂态过程的特点不同,以及进行暂态过程分析的目的不同,而将电力系统暂态分析划分为电磁暂态分析和机电暂态分析。在进行电磁暂态过程分析时,忽略发电机的机械运动暂态过程,而主要关心电力网中的电磁暂态过程;相反,在进行机电暂态过程分析时,近似处理电力网中的电磁暂态过程,而主要关心系统中发电机之间的相对运动情况。电磁暂态过程分析主要应用于设备安全校核,机电暂态过程主要应用于系统安全校核。

电力系统暂态分析知识是从事电力系统规划设计、运行、控制和继电保护配置的必备知识。在电力系统暂态分析课程中涉及的电磁暂态分析,主要应用于电力系统继电保护的计算整定和发电厂、变电站设计中的设备选择,因此主要介绍系统发生短路和断线故障后系统各元件电压、电流的周期分量起始值的计算方法,而对于电磁暂态过程只作简单介绍以建立电

磁暂态过程的基本概念。用于电力系统设备设计制造和发电厂、变电站设计中的内部（操作）过电压、外部（雷击）过电压保护的电磁暂态分析是一个专门的研究领域，由“电力系统电磁暂态分析”课程介绍。电力系统机电暂态过程分析主要关注系统受到扰动后，并经过可能的一系列控制操作后，系统是否可以经过一段时间过渡到原来的或者一个新的稳态。电力系统承受扰动后，经过暂态过程恢复稳态运行的能力称为电力系统暂态稳定性。因此，机电暂态过程分析也称为电力系统暂态稳定性分析。另外，由于电力系统不存在数学意义上的、绝对的稳态，换言之，电力系统时时刻刻都在遭受一些相对较小的扰动，因此，稳态运行的电力系统必须能够承受这一类扰动而不偏离原有的稳态运行状态。电力系统承受这类扰动而自保持原有稳态运行状态的能力强弱被定义为电力系统小干扰稳定性。分析电力系统小干扰稳定性进而通过电力系统自动控制装置提高系统小干扰稳定性是电力系统机电暂态分析的重要内容。

在暂态过程中，由于电力系统的主要电气运行量电压、电流是随时间而剧烈变化的，因此，电力系统暂态分析的数学模型是微分方程。电力系统暂态分析的主要内容也围绕系统数学模型的建立和微分方程的求解方法展开。电力系统的暂态过程发展十分迅速，因此，对系统暂态特性的改善措施必须依赖于自动控制装置。这样，电力系统暂态分析的数学模型将既包括所有电能通路上的元件，也包括各种自动控制装置。

思考题

1. 现代社会有哪些系统是时间上连续运行的系统？
2. 电气设备的制造质量优劣和运行维护好坏对电力系统连续运行有何影响？
3. 电力系统在稳态运行时，变电站母线电压的瞬时值是随时间变化的正弦波。但是为什么在潮流计算中并不涉及时间变量？
4. 火力发电厂、水力发电站的同步发电机的结构有何不同？
5. 同步发电机发电的基本原理是什么？
6. 在“电路”课程中介绍的线性电路的过渡过程是否一定会结束？
7. 如果在确定电力系统的一个稳态运行方式时，经暂态分析发现该稳态运行点受到一个常见扰动后系统的暂态过程持续发展而不能达到稳态，那么，该稳态运行方式是否应该实施？
8. 数学上关于线性常微分方程的定义是什么？
9. 非线性常微分方程是否一定存在解析解？
10. 在电力系统潮流计算问题中，发电机的数学模型是什么？
11. 在电力系统潮流计算问题中，负荷的数学模型是什么？

第一篇 电力系统电磁暂态过程分析 (电力系统故障分析)

第一章 电力系统故障分析的基础知识

第一节 故障概述



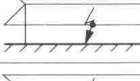
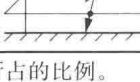
在电力系统长期运行过程中，由于各种原因总会随机地发生短路、断线等故障，其中发生概率最高的是短路故障。因此，故障分析的重点是对短路故障的分析。所谓短路，是指电力系统中相与相之间或相与地之间的非正常连接。在电力系统正常运行时，除中性点外，相与相或相与地之间是电气绝缘的。如果由于某些原因使相与相或相与地之间构成通路，电力系统就发生了短路故障。

短路故障的计算与分析，主要是短路电流的计算和分析。短路电流的大小及其变化规律不仅与短路故障的类型有关，而且与电源特性、网络元件的电气参数有关。本章将讨论标幺值、无限大功率电源（简称无限大电源）发生三相短路的物理过程及短路电流计算，同时给出短路电流的冲击电流、最大有效值的概念。同步发电机机端突然发生三相短路的短路电流的变化规律，以及在多机电力系统中发生三相短路情况下短路电流起始值的分析和计算方法将在第二、第三章中作详细介绍。

一、短路类型

在三相系统中，可能发生的短路有三相短路（ $f^{(3)}$ ）、两相短路（ $f^{(2)}$ ）、两相短路接地（ $f^{(1,1)}$ ）、以及单相接地短路（ $f^{(1)}$ ），见表 1-1。

表 1-1 短路类型

短路种类	示意图	符号	发生概率 (%)
三相短路		$f^{(3)}$	5
两相短路		$f^{(2)}$	10
单相接地短路		$f^{(1)}$	65
两相接地短路		$f^{(1,1)}$	20

注 发生概率指不同故障种类在所有故障中所占的比例。

三相短路时系统三相电路仍然是对称的，称为对称短路，其他几种短路均使三相电路不对称，称为不对称短路。虽然三相短路发生的概率最小，但它对电力系统的影响比较严重，三相短路计算将是本章和下一章讨论的重点。

二、短路发生的原因

电力系统短路故障发生的原因很多,既有客观的,也有主观的。终极的原因是电气设备载流部分相与相之间或相与地之间的绝缘遭到破坏。电力系统短路故障大多数发生在架空线路部分,架空线路的绝缘子可能由于受到雷电过电压而发生闪络,或者由于绝缘子表面的污秽而在正常工作电压下放电;有时因鸟兽跨接在裸露的载流部分,引起相间或相对地短路;或者因为大风或在导线上覆冰,引起架空线路杆塔倒塌而造成短路;再如发电机、变压器、电缆等设备中载流部分的绝缘材料在长期使用后损坏,造成短路。此外,线路检修后,在未拆除地线的情况下运行人员就对线路送电而发生的误操作,也会引起短路故障。

三、短路故障的危害

(1) 发生短路时,由于供电回路的阻抗减小以及突然短路时的暂态过程,使短路回路中的电流急剧增加,短路点及附近电气设备流过的短路电流可能达到额定值的几倍甚至十几倍,短路点距发电机的电气距离愈近,短路电流越大。例如,在发电机机端发生短路时,流过定子绕组的短路电流最大瞬时值可能达到发电机额定电流的10~15倍。在大容量的电力系统中,短路电流可达几万安甚至几十万安。

(2) 在短路初期,电流瞬时值达到最大时(称为冲击电流),将引起导体及绝缘的严重发热甚至损坏;同时,电气设备的导体间将受到很大的电动力,可能引起导体或线圈变形以致损坏。

(3) 短路将引起电网中的电压降低,特别是靠近短路点处的电压下降最多,这将影响用户用电设备的正常工作。例如,负荷中的异步电动机,由于其最大电磁转矩与电压的平方成正比,当电压降低时,电磁转矩将显著减小,当电压下降到额定电压的70%以下时,异步电动机转速急剧下降使电动机转速变慢甚至完全停转,从而造成废品及设备损坏等严重后果。

(4) 系统中发生的短路改变了电网的正常结构,必然引起系统中功率分布的变化,则发电机输出功率也相应地变化。但是发电机的输入功率是由原动机的进汽量或进水量决定的,不可能立即发生相应变化,因而发电机的输入和输出功率不平衡,发电机的转速将变化,这就有可能引起并列运行的发电机失去同步,破坏系统的稳定,造成系统解列,引起大面积停电。这是短路造成的最严重的后果。

(5) 不对称接地短路所引起的不平衡电流将在线路周围产生不平衡磁通,导致在邻近平行的通信线路中可能感应出相当大的感应电动势,造成对通信系统的干扰,甚至危及通信设备和人身安全。

四、短路故障分析的内容和目的

由于电力系统在运行中总会发生故障,所以在设计和建设电力系统时就将其承受故障的能力纳入考虑范围并且采取合适的措施减小故障发生后对设备和系统造成的不利影响。在发电厂、变电站及整个电力系统的设计和运行中,需要合理地选择电气接线、配电设备和断路器,正确地设计继电保护以及选择限制短路电流的措施等,而这些工作都必须以短路故障的计算结果作为依据。短路分析的主要内容包括故障后电流的计算、短路容量(短路电流与故障前电压的乘积)的计算、故障后系统中各点电压的计算以及其他的一些分析和计算,如故障时线路电流与电压之间的相位关系等。为此,掌握短路发生以后的物理过程以及计算短路时各种运行参量(电流、电压等)的计算方法是非常必要的。短路电流的计算结果可应用于

设置继电保护的整定值，校验电气设备的热稳定和动稳定，应用短路电流计算结果进行继电保护设计和整定值计算，选择开关电器、串联电抗器、母线、绝缘子等电气设备的设计，制定限制短路电流的措施等。此外，在进行接线方案的比较和选择时也必须进行短路电流的计算。

五、限制短路故障危害的措施

为了减少短路故障对电力系统的危害，电力系统设计和运行时，都要采取各种积极措施消除和减小故障发生的概率。一方面必须采取限制短路电流的措施，合理设计网络接线，如在线路上装设电抗器，限制短路电流；另一方面是一旦故障发生，必须尽可能快地切除故障元件，将发生短路的部分与系统其他部分隔离开来，使无故障部分恢复正常运行。这就要依靠继电保护装置迅速检测出系统的故障或不正常的运行状态，并有选择地使最接近短路点的、流过短路电流的断路器断开。同时，采用合理的防雷设施，降低过电压水平，使用结构完善的配电装置和加强运行维护管理等方法。

系统中大多数的短路都是瞬时性的，因此架空线路普遍采用自动重合闸装置，即当发生短路时断路器迅速跳闸，经过一定时间（几十毫秒到几百毫秒）后断路器自动重合闸。对于瞬时性故障，重合闸后系统立即恢复正常运行；如果是永久性故障，重合闸后故障仍然存在，则再次使断路器跳闸。220kV 及以上的线路发生单相短路的几率比较高，因此广泛采用单相重合闸。发生单相短路时，只断开故障相断路器，其他两相暂时继续运行，如果单相重合不成功，即发生的故障是永久性故障时，三相立即同时断开，线路退出运行。有关自动重合闸的内容可参考讲述电力系统自动装置等的书籍和资料。

电力系统的短路故障有时也称为横向故障，因为它是相对相（或相对地）的故障。还有一种称为纵向故障的情况，即断线故障，例如，一相断线使系统发生两相运行的非全相运行情况。这种情况往往发生在当一相上出现短路后，该相的断路器断开，因而形成一相断线。这种一相断线或两相断线故障也属于不对称故障，它们的分析计算方法与不对称短路的分析计算方法类似，将在第三章中介绍。

系统中只有一处发生故障称为简单故障，同时发生不止一处故障的情况称为复杂故障，简称复故障。相对于简单故障发生的概率，复故障发生的概率低得多。本书只介绍简单故障的分析方法，它是分析复故障的基础。

第二节 标 幺 制

在电力系统计算中，一般采用标幺制。在标幺制下，各种物理量都用标幺值（即相对值）来表示，因而使不同电压等级的电气量的数量级都在 1 左右。与有名制相比，标幺制具有计算表达式简洁、运算步骤简单、计算结果便于分析等优点。

一、标幺值

在电力系统计算中，各元件的参数及其他电气量可以用有单位的有名值进行计算，也可以用一种没有量纲的标幺值进行计算，特别是在应用计算机对大规模系统进行计算时常采用标幺值。

一个物理量的标幺值是它的有名值与选定的基准值之比，即

$$\text{标幺值} = \frac{\text{有名值(有单位的物理量)}}{\text{基准值(与有名值同单位)}} \quad (1-1)$$

显然，标幺值是一个无量纲的量。

对于任一物理量均可以用标幺值表示。例如，电阻、电抗的标幺值分别（标幺值常用下标“*”表示）为

$$\begin{cases} R_* = \frac{R}{Z_B} \\ X_* = \frac{X}{Z_B} \end{cases} \quad (1-2)$$

式中： R 、 X 为电阻、电抗的有名值， Ω ； Z_B 为阻抗基准值， Ω 。

又如有功功率、无功功率、视在功率的标幺值分别为

$$\begin{cases} P_* = \frac{P}{S_B} \\ Q_* = \frac{Q}{S_B} \\ S_* = \frac{S}{S_B} \end{cases} \quad (1-3)$$

式中： P 为有功功率，MW； Q 为无功功率，Mvar； S 为视在功率，MV·A； S_B 为功率基准值，MV·A。

二、基准值的选取

当选定的基准值不同时，对同一个物理量的有名值而言，其标幺值也不同。因此当说到一个物理量的标幺值时，必须同时说明它的基准值是什么。不同基准值的标幺值之间的运算是毫无意义的。

标幺值计算的关键在于基准值的选取。从理论上讲，基准值可以任意选取，然而如果无规则地随意选取，则将使采用标幺制来分析计算不仅毫无优点而且十分繁琐。但是，按照下边介绍的一些简单规则选取基准值将使标幺制有很多优点。

首先，各种物理量的基准值之间应满足它们对应的物理量之间的各种关系。例如，三相电路中常用的基本关系为

$$S = \sqrt{3}UI \quad (1-4)$$

$$U = \sqrt{3}ZI \quad (1-5)$$

$$Y = 1/Z \quad (1-6)$$

式中： S 为三相电路的视在功率； U 、 I 分别为线电压和线电流； Y 、 Z 分别为元件的导纳和阻抗。

相应地，基准值也应满足以下公式

$$S_B = \sqrt{3}U_B I_B \quad (1-7)$$

$$U_B = \sqrt{3}Z_B I_B \quad (1-8)$$

$$Y_B = \frac{1}{Z_B} \quad (1-9)$$

由于不同物理量的基准值之间必须满足电路定律，所以，并非所有物理量的基准值都可随意选取。 S_B 、 U_B 、 I_B 、 Y_B 、 Z_B 五个基准值之间具有式(1-7)~式(1-9)三个关系式，因此只要其中的两个选定以后，其他三个便不再能任意决定。在电力系统中，输电线路和电气设备的额定电压总是已知的，且设备的视在功率也是已知的，故在标幺值计算中约定先选定

基准容量 S_B 和基准电压 U_B , 其他基准值则应按式 (1-7)~式 (1-9) 的关系导出, 即

$$\begin{cases} I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3}U_B} \\ Z_B = \frac{U_B}{\sqrt{3}I_B} = \frac{U_B^2}{S_B} \\ Y_B = \frac{1}{Z_B} = \frac{S_B}{U_B^2} \end{cases} \quad (1-10)$$

已知各量的基准值后, 其标么值计算如下:

(1) 三相有功功率、无功功率和视在功率取同一个基准值 S_B , 称为三相功率的基准值, 简称功率基准值。由于基准值必须满足电路基本定律, 所以全系统的功率基准唯一。这样, 功率的标么值为

$$S_* = \frac{P+jQ}{S_B} = \frac{P}{S_B} + j\frac{Q}{S_B} = P_* + jQ_*$$

(2) 线电压及其实部和虚部都取同一基准值 U_B , 称为线电压基准值, 简称电压基准值。于是, 线电压的标么值为

$$\dot{U}_* = \frac{\dot{U}}{U_B} = \frac{U_R + jU_I}{U_B} = U_{R*} + jU_{I*}$$

(3) 线电流及其实部和虚部取同一基准值 I_B , 称为线电流基准值, 简称电流基准值。从而线电流的标么值为

$$\dot{i}_* = \frac{\dot{i}}{I_B} = \frac{I_R + jI_I}{I_B} = I_{R*} + jI_{I*}$$

(4) 阻抗及其中的电阻和电抗取同一基准值 Z_B , 称为阻抗基准值。相应的阻抗标么值为

$$Z_* = \frac{Z}{Z_B} = \frac{R + jX}{Z_B} = R_* + jX_*$$

(5) 导纳及其中的电导和电纳取同一基准值 Y_B , 称为导纳基准值。相应的导纳标么值为

$$Y_* = \frac{Y}{Y_B} = \frac{G + jB}{Y_B} = G_* + jB_*$$

显然, 对于功率因数和用弧度表示的电压相位、电流相位、阻抗角和导纳角等, 由于它们是没有量纲的物理量, 因此, 它们本身便是标么值。

(6) 采用上述基准值之后, 可以使标么制下的电路公式更为简洁或保持不变。显然, 标么制下的三相电路关系成为

$$S_* = U_* I_* \quad (1-11)$$

$$U_* = Z_* I_* \quad (1-12)$$

$$Y_* = 1/Z_* \quad (1-13)$$

(7) 其他基准值。除了上述基准值 S_B 、 U_B 、 I_B 、 Z_B 和 Y_B 以外, 有时还根据需要来定义和采用其他基准值。例如, 定义相电压的基准值为 $U_{B\phi}$ 用来计算相电压的标么值, 单相功率的基准值 $S_{B\phi}$ 用于计算单相功率的标么值等。但在 S_B 和 U_B 选定后, 这些基准值同样随之而定, 如 $S_{B\phi} = S_B/3$ 和 $U_{B\phi} = U_B/\sqrt{3}$ 等。显然, 这样定义后三相功率的标么值与单相功率的标么值相等, 线电压标么值与相电压标么值相等, 线电流标么值与相电流标么值相等。故在采用标么值计算时不用再考虑三相还是单相, 线电压还是相电压, 它们的标么值是相同的, 只