



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

DIANLI XITONG GUZHANG FENXI

电力系统故障分析

(第三版)

刘万顺 黄少锋 徐玉琴 编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



普通高等教
PUTONG GAODEI

TM711/55

2010

规划教材
HUA JIAOCAI

DIANLI XITONG GUZHANG FENXI

电力系统故障分析

(第三版)

刘万顺 黄少锋 徐玉琴 编
姜齐荣 尹项根 主审



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

全书共分8章, 主要内容包括故障分析的基本知识、同步电机的基本方程和对称故障分析、电力系统元件的各序参数和等值电路、简单不对称故障的分析计算、不对称故障时系统中各电气量值的分布计算、用计算机计算电力系统故障的方法、复故障计算和超高压远距离输电线的短路暂态过程。本书比较充分地反映了近年来在电力系统故障分析方面提出的问题和取得的科研成果, 概念准确、严谨、简明, 内容深入浅出。

本书可作为普通高等院校电力系统继电保护及自动化专业的教材, 又可作为电气信息类其他专业高年级本科生或研究生的教学参考书, 还可供从事电力系统继电保护自动化工作的研究人员和工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统故障分析/刘万顺, 黄少锋, 徐玉琴编. —3
版. —北京: 中国电力出版社, 2010

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5083-9691-0

I. 电… II. ①刘…②黄…③徐… III. 电力系统—
故障诊断—高等学校—教材 IV. TM711

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 201516 号

中国电力出版社出版、发行

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

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1986年11月第一版

2010年2月第三版 2010年2月北京第十次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 24印张 588千字

定价 38.50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

前 言

本书第二版问世已近十载,在此期间,有关电力系统故障分析(包括稳态分析与暂态分析)的理论、方法和技术又有了很大的发展,为此在第二版的基础上作一定的补充和修改是很有必要的,以使该书能比较充分地反映近年来在电力系统故障分析方面提出的问题和取得的科研成果,适应电力系统故障分析内容的需要。

本次修订保持了原书的基本内容,修订编写在概念介绍上力求准确、严谨、简明,说服力强;在有关理论讨论分析中,力求深入浅出,既便于自学,也易于讲授;在理论联系实际方面,力争从继电保护的角度叙述电力系统故障时电气量的有关特点及其影响因素;所举例题,力求典型性和实用性好,概念性强,能结合继电保护的有关内容。书中标注“*”的部分是选学及参考的内容,教师在授课当中可灵活掌握。

本书绪论和第一、二、七章及附录由刘万顺编写,第六、八章由徐玉琴编写,黄少锋编写了第三、四、五章,并对书稿进行了详细加工。

承蒙清华大学姜齐荣教授、华中科技大学尹项根教授审阅了全稿,并提出了宝贵的意见和建议,深表谢忱!

在修订过程中,曾得到杨奇逊院士、杨以涵教授、王祥珩教授、江世芳教授、刘沛教授、曹祥麟教授及张新国教授的热情关心与帮助,张新国教授在第二版的修订过程中起到了重要的作用,张海、李翀同志将第二版书稿的大部分内容转换成文档格式,还有不少兄弟院校和单位提供了资料,在此,一并致以谢意!

由于作者水平所限,书中难免有不妥和错误之处,恳请批评指正。

编 者

2009年8月

第三版前言

本书是在1986年出版的《电力系统故障分析》(简称86年版)教材的基础上进行修订编写的。86年版的教材由何之文编写第四、第五章,刘万顺编写其余六章及附录,并由刘万顺任主编。该书出版至今已有相当长的一段时间,其间有关电力系统故障分析方面的研究工作又取得了很大的进步。因此,在这次编写中,除了深入地吸取86年版教材多年使用的经验外,还力求充分反映当前电力系统故障分析计算的最新进展与最新成果。特别是,为了适应高压和超高压电力系统的发展,在应用电子数字计算机进行电力系统复故障的计算方面,以及对超高压电力系统故障暂态过程的数字仿真方面,都增加了一定的篇幅。本书注重基本概念和基本原理的阐述,突出重点,由浅入深,丰富实例,力求做到严格、简明、物理意义清晰,加强内容的科学性与系统性。与此同时,也顾及电力系统实际计算的需要,尽量给出了工程上的实用算法。书中标注“*”的部分是选学及参考的内容,教师在授课当中可灵活掌握。

本书由华北电力大学张新国编写第一、二、三、六章,刘万顺编写绪论及第四、五、七、八章和附录。全书由刘万顺主编。

本书经华中理工大学何仰赞教授详细审阅,提出了许多宝贵意见,谨致以衷心的感谢。

在编写过程中,曾得到贺家李教授、杨以涵教授、杨奇逊教授、周波教授及米麟书教授的热情关心与帮助,还有不少兄弟院校和单位积极地提供参考资料,在此,一并致以谢意。

由于作者水平所限,书中难免有不妥和错误之处,恳请读者批评指正。

编者

1998年7月

目 录

前言	
第二版前言	
绪论	1
第一章 故障分析的基本知识	6
第一节 电力系统各主要元件的等值电路	6
第二节 标幺制	8
第三节 网络变换及化简	20
第四节 由无限大功率电源供电的三相短路	27
第二章 同步电机的基本方程和对称故障分析	36
第一节 同步电机的原始方程	36
第二节 坐标变换及 dq0 系统	43
第三节 派克—戈列夫方程	48
第四节 同步电机的常用标幺制	55
第五节 运算电抗	59
第六节 同步电机三相短路暂态过程的分析	61
第七节 同步电机的暂态及次暂态参数	78
第八节 由发电机供电的三相短路实用计算	86
* 第九节 负荷影响	87
第三章 电力系统元件的各序参数和等值电路	94
第一节 不对称三相电路中对称分量法的应用	94
第二节 序阻抗的基本概念	101
第三节 发电机的等效电路与阻抗	102
第四节 负荷的等效电路与阻抗	105
第五节 变压器的等效电路与阻抗	106
第六节 架空线路的等效电路与阻抗	114
第七节 电缆的等效电路与阻抗	126
* 第八节 架空输电线的相序电容	127
第九节 电力系统相序网络的构成	134
第四章 简单不对称故障的分析计算	140
第一节 概述	140
第二节 横向不对称故障的分析计算	143
第三节 系统参数变更时不对称短路点各电气量的变化特点	154
第四节 短路点经过渡阻抗短路时横向不对称故障的分析计算	160
第五节 纵向不对称故障的分析计算	168

* 第六节	在 abc 系统中计算不对称故障	174
第七节	不同接地系统复合序网的统一	179
第五章	不对称故障时系统中各电气量值的分布计算	182
第一节	各序电气量分布计算的基本方法及其分布规律	182
第二节	单侧电源不对称短路时各相电压沿线路的分布规律	189
第三节	对称分量经变压器后的相位变换	193
第四节	短路点有过渡电阻时电流电压的分布及其变化规律	200
第六章	用计算机计算电力系统故障的方法	215
第一节	概述	215
第二节	电力系统故障计算用的等值网络及其节点方程	216
第三节	系统故障时网络电气量的计算	225
第四节	节点导纳矩阵 (Y) 的形成	236
第五节	求节点阻抗矩阵的方法	241
第六节	导纳型节点方程的常用解法	258
第七章	复故障计算	270
第一节	概述	270
第二节	双口网络的口参数方程	270
第三节	应用双口网络理论计算双重复故障	275
* 第四节	N 重复故障计算	295
第五节	小电流接地系统中两点异相接地故障计算	303
第八章	超高压远距离输电线的短路暂态过程	307
第一节	短路暂态过程中各种暂态分量的基本分析	308
第二节	用运算微积法计算三相短路暂态过程	317
第三节	用运算微积法计算不对称短路暂态过程	332
* 第四节	用状态方程解超高压输电线路短路暂态过程	336
* 第五节	超高压输电线路故障时行波暂态过程的数值计算	338
附录 A	计算任意时间短路电流周期分量有效值的计算曲线	353
附录 B	迭代计算过程中修正量 Δu、Δv 的推导	372
参考文献	374



绪 论

电力系统就是电能生产、变换、输送、分配和使用的各种电气设备,包括以电的或机械的方式连接在网络中的所有设备,按照一定的技术与经济要求所组成的一种网络。电力系统中的这些互联设备可以分为两类:一般将电能通过的设备称为电力系统的一次设备,如发电机、变压器、断路器、母线、输电线路、补偿电容器、电动机及其他用电设备等;对一次设备的运行状态进行监视、测量、控制和保护的设备称为电力系统的二次设备,如同步发电机的励磁调节器、调速器及继电保护等。二次设备通常经电压、电流互感器来获取与一次电气量成正比的信号。

电力系统的运行状态,一般可由运行参量来描述,或者说系统的运行参量是定量地确定了系统的运行状态,主要的运行参量包括功率、电压、电流、频率、电动势以及相量间的角位移等。

电力系统有两种基本的运行状态,即稳态与暂态。

电力系统稳态运行时,发电厂中原动机(带动发电机旋转的汽轮机或水轮机)的输入功率同发电机的输出功率相平衡,系统的频率和电压都是稳定的(是常数,或是随时间变化但幅值恒定的周期函数)。

然而,这种运行中的稳态并不是绝对不变的。当系统受到某种干扰时,上述功率的平衡即被打破,运行状态也将随之而变。由于系统中包含有许多惯性元件,运动状态的变化不能瞬时完成,而必须经历一个过渡状态,这种过渡状态称为暂态。

由于实际中的干扰总是有大有小,因之电力系统在经受干扰以后,其过渡的结局便有二种可能性:一种可能是,系统从原来的稳态过渡到另一种新的稳态后,其运行参数(电压和频率)相对于正常值的偏差能够保持在一定的允许范围内,系统仍能继续正常工作,例如负荷的增减、原动机的调整等。正常运行中的电力系统,实际上就是经常处于这种较小的变动的过程中。另一种可能是,当电力系统发生各种故障的时候,系统的运行将经历剧烈的变化,所趋于的状态,或者使其运行参数大大偏离正常值,以致电能质量严重变坏,或者更为严重,导致电力系统对用户的正常供电局部地甚至全部地遭到破坏,总之,不采取特别措施,系统就很难恢复正常运行,这就是电力系统运行的事故状态。这种状态的出现,将给工农业生产、国防建设以及人们的生活带来严重的恶果。

电力系统暂态过程通常可以分为电磁暂态和机电暂态来研究。在暂态过程刚刚开始的一段时间内,系统中的发电机以及其他转动机械的转速由于惯性作用还来不及变化,暂态过程主要取决于各元件的电磁参数,暂态过程的这一阶段称为电磁暂态。随着暂态过程的发展,转速已有了变化,于是暂态过程的情况将不仅与电磁参数有关,而且还和转动机械的机械参数(转速、角位移)有关,这种牵涉转速和角位移的暂态过程,称之为机电暂态过程。

“电力系统故障分析”这门课程主要是研究电力系统中由于故障所引起的电磁暂态过程,搞清楚暂态发生的原因、发展过程及后果,从而为预防及消除电力系统的故障准备必要的理论知识。

电力系统可能发生的故障类型比较多,常见的、对电力系统危害比较严重的有短路、断相以及各种复杂故障等,而短路故障则是电力系统中危害最严重的故障。因此,在以后的讨论中,将选择短路故障作为重点来分析。

一、短路的概念

所谓短路,是指电力系统正常运行情况以外的一切相与相之间或相与地之间的“短接”。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绝缘的。如果由于某种原因使其绝缘破坏而构成了通路,就称电力系统发生了短路故障。

产生短路的主要原因是电气设备载流部分的绝缘损坏。引起绝缘损坏的原因有各种形式的过电压(例如遭到雷击),绝缘材料的自然老化、脏污、直接机械损伤等。绝缘的破坏在大多数情况下是由于没有及时发现和消除设备中的缺陷,以及设计、安装和运行维护不良所致。运行人员带负荷拉隔离开关,或者线路检修后未拆除地线就加上电压等误操作,也会引起短路故障。此外,鸟兽跨接在裸露的载流部分以及风、雪、雹等自然现象所造成的短路也是屡见不鲜的。

总之,产生短路的原因有主观的也有客观的。但是,只要我们提高警惕,加强责任心,严格地按科学态度办事,就可以把短路故障的发生控制在一个很低的限度内。

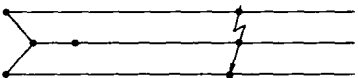
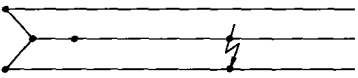
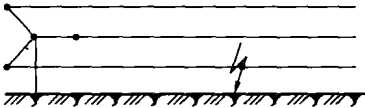
二、短路的种类

在三相系统中,三相同同时短接的情况称为三相短路。由于三相短路时,各相阻抗相同,三相对称,所以又称为对称短路。电力系统在同一地点所发生的不对称短路有两相短路、两相接地短路和单相接地短路。在发生此类短路时,三相系统将处于不对称的状态。


电力系统的运行经验表明,各类短路发生的次数在短路总次数中所占的百分比是不同的。其中单相接地短路较多,而相间短路则较少。但是不能由此就轻视相间短路的研究,特别是三相短路,虽然它发生的机会较少,但情况较严重,又是研究其他短路的基础,所以要予以足够的重视。单相接地短路如果不及时切除,就可能发展为两相接地短路,甚至三相短路。

各种短路的示意图和代表符号列于表 0-1。如果要强调故障相别,则在 K 符号的下标予以注明,如 $K_{BC}^{(1,1)}$ 表示 BC 两相接地短路。

表 0-1 各种短路的示意图和代表符号

短路种类	示意图	短路代表符号
三相短路		$K^{(3)}$
两相短路		$K^{(2)}$
单相接地短路		$K^{(1)}$

续表

短路种类	示意图	短路代表符号
两相接地短路		K ^(1,1)

三、短路的现象及后果

电力系统发生短路时，伴随短路所产生的基本现象是：电流剧烈增加，例如发电机出线端处三相短路时，电流的最大瞬时值可能高达额定电流的 10~15 倍，从绝对值来讲可达上万安培，甚至十几万安培；在电流急剧增加的同时，系统中各点的电压将大幅度下降，例如系统发生三相短路时，短路点的电压将降到零，短路点附近各点的电压也将明显降低。

由于短路时有上述现象发生，因而短路所引起的后果是破坏性的，具体表现在以下几个方面：

(1) 短路点的电弧有可能烧坏电气设备，同时很大的短路电流通过设备会使发热增加，当短路持续时间较长时，可能使设备因过热而损坏。

(2) 很大的短路电流通过导体时，要引起导体间很大的机械应力，如果导体和它们的支架不够坚固，则可能遭到破坏。

(3) 短路时，系统电压大幅度下降，对用户工作影响很大。系统中最主要的负荷是异步电动机，它的电磁转矩同它的端电压的平方成正比，电压下降时，电磁转矩将显著降低，使电动机停转，以致造成产品报废及设备损坏等严重后果。

(4) 当电力系统中发生短路时，有可能使并列运行的发电机或两个电网之间失去同步，破坏系统稳定。原因是系统中所发生的短路，相当于改变了电网的结构，必然会引起系统中功率分布的变化，于是同步发电机的输出功率也要跟着相应地发生变化。但是发电机的输入功率是由原动机的进汽量或进水量所决定的，不可能立即相应变化，因而发电机的输入和输出的功率可能出现不平衡，发电机的转速将发生变化，使得有些发电机转速升高、有些发电机转速降低，这就有可能引起并列运行的发电机失去同步，从而破坏系统的稳定性，使整个系统的正常运行遭到破坏，引起大片地区的停电。这是短路故障最严重的后果。

(5) 不对称接地短路所造成的不平衡电流，将可能产生零序不平衡磁通，会在邻近的平行线路内（如通信线路、铁道信号系统等）感应出很大的电动势。这将造成对通信的干扰，并危及设备和人身安全。

由上述可见，对短路过程的研究具有十分重要的意义。实际上，短路问题已成为电力系统技术方面的基本问题之一。在发电厂、变电站以及整个电力系统的设计和运行的许多工作中，都必须有短路计算的结果作依据，例如选择合理的电气接线图，选用有足够热稳定和机械强度的电气设备及载流导体，确定限制短路电流的措施，研制和合理地配置各种继电保护和自动装置，并正确地整定其参数等。因此深入掌握有关短路问题的理论及其计算方法是很有必要的。

四、断相故障及复杂故障

电力系统除了短路故障外还可能发生断相故障，以及各种类型的复杂故障。

所谓断相故障是指电力系统一相断开或两相断开的情况。这种情况也属于不对称性

故障。

在电力系统中的不同地点(两处或两处以上)同时发生故障的情况,称为复杂故障。这种情况又可视为多个简单不对称故障的复合,所以又称复故障。

随着电力系统的发展,发生这些故障的几率增大了。因此必须加强对于这些故障的分析和研究。

五、研究电力系统暂态过程的方法

研究电力系统暂态过程的方法归纳起来有两类,一类为物理模拟法,另一类为数学模拟法。这里仅就数学模拟法中的一般问题,即计算分析的主要步骤概括地作一介绍,至于更详细、更系统的论述,那是以后各章中所要讨论的内容。一般来讲,可以将分析暂态过程的方法分解为三个步骤:

第一是建立数学模型。所谓数学模型(或数学模式)即为表示电力系统暂态的数学方程式。要求数学模型既要简单又要合理。所谓合理就是要符合工程计算的实际情况,做到简要才能便于解算。为此,就需要将具体的系统根据内部的物理规律以及外部的影响条件加以简化或理想化,然后再将系统的运行状态表示为数学方程。一般情况下,所建立的数学方程是一组微分方程。实际上相同的系统暂态问题可能会用不同的数学模型表示。这样就涉及了数学模型的设计与选择问题,我们应当针对工程问题的实际情况以及所选用的计算工具,从数学模型中选择较简单的一种来表示电力系统的运行状态。当然,采用计算机技术之后,数学模型可以更精确一些。

第二是求解数学模型,即借助一定的计算工具和运用适当的计算方法去解所得的微分方程式,以确定暂态过程中各物理量的变化规律。由于电力系统及其暂态过程的复杂性,在进行分析计算时借助适当的计算工具是必要的。常用的计算工具主要有电子计算器、直流与交流计算台(是基于用建立系统模型的方法进行模拟计算的一类计算工具)、动模和各类电力系统数字实时仿真系统,以及计算机等。各种计算工具都有其特点和适用范围。这里需要特别提及的一点是,随着电力系统的不断扩大和复杂化,对于电力系统暂态计算的内容(例如超高压线路暂态过程与行波过程的计算、电力系统机网故障暂态全过程的数字仿真,以及交直流联合输电系统暂态的研究分析等),对解题的模型、计算的速度与精度都提出了更新和更高的要求,这些要求只有应用计算机才有可能实现。因此计算机已经成为电力系统暂态计算的强有力的计算工具,我们应当充分利用计算机的先进性。

第三是进行结果分析,就是将所得到的数学解答敷以物理内容,从物理上加以讨论和解释,并判断它是否相对地符合电力系统暂态的实际情况。此外,在不少情况下还需要在上述讨论分析的基础上,进一步确定工程实际中常用的一些暂态计算量,同时给出这些量的实用算法,以便于迅速而有效地解决工程技术的实际问题。

熟悉上述步骤中的各项要点,明确它们之间的密切关系,对于具体地进行电力系统暂态过程的分析研究是非常有益和必要的。

六、故障计算的基本假设

影响电力系统暂态过程的因素很多,例如磁路的饱和、各种物理过程的相互影响等,若在实际计算时把这些影响因素统统予以考虑,那是十分复杂的,有时是不可能的。另外,在许多情况下,这样做也没有必要。因此,通常是在满足工程要求的前提下,采取一些合理的假设,以便略去次要因素,突出主要矛盾,简化计算分析。当然,最后还需要经过实际验证

来证明假设的合理性，或证明误差较小。

不过，在实际计算中由于故障的情况及各种问题对计算分析的要求都可能不同，因而制订完全统一的假设也很难做到，所以只能对于具体的问题进行具体分析，弄清主次，从实际出发来恰当地确定。

对于各种短路、各类断相故障，对于系统中的各个元件，通常可采用以下几个基本的假设：

(1) 磁路的饱和、磁滞忽略不计。这样，系统中各元件的参数便都是恒定的，可以运用叠加原理。

(2) 除了不对称故障处以外，系统中的三相都可当作是对称的，因而在应用对称分量法时，对于每一序的网络可用单相等值电路进行分析。

(3) 各元件的电阻略去不计。从高压网络来看，通常发电机的（电阻） $R < 0.05x$ （ x 为电抗），变压器的 $R \approx 0.1x$ ，线路的 $R \approx (0.2 \sim 1)x$ ，各元件的电阻都比电抗小得多。即便短路回路的总电阻 $R_{\Sigma} = \frac{1}{3}x_{\Sigma}$ （ x_{Σ} 为回路的总电抗），略去电阻而求得的短路电流也仅增加5%左右，这在工程实际中是容许的。实际上，这个假设对电压计算值的影响很小。

另外，在略去电阻而求得短路电流之后，还可以进行短路电流的适当修正，此时，只需要进行一次复数计算。短路电流的修正过程可表示为：

$$I'_k = \left| \frac{jx_{\Sigma}}{R_{\Sigma} + jx_{\Sigma}} \right| I_k$$

式中 I_k ——略去电阻后所计算出来的短路电流；

I'_k ——接近实际值的短路电流。

如果 $R_{\Sigma} > \frac{1}{3}x_{\Sigma}$ ，即当短路是发生在电缆线路或截面很小的架空线上时，特别是在钢导线上时，电阻便不能忽略。此外，在计算暂态电流的衰减时间常数时，较小的电阻也必须计及。

(4) 短路为金属性短路。短路处相与相（或相与地）的接触，往往经过一定的电阻（如外物电阻、电弧电阻、接地电阻等），一般称之为“过渡电阻”。所谓金属性短路，就是不计过渡电阻的影响，认为过渡电阻等于零的理想情况。断相为完全断开。所谓完全断开，即是假定断相处的断口导纳等于零的理想情况。

一般情况下，在工程上是允许采用上面的这些假定的，只有在对某些继电保护进行分析计算时，才需要考虑它们的影响。在本书的第五章第四节还将专门讨论过渡电阻的影响。

必须指出，任何一条假设都是相对的、有条件的，在一种情况下不大起作用的因素，在另一种情况下则可能显示重大的甚至是决定性的影响。例如在低压电力系统中，参数的分布性可以不考虑，但在分析超高压远距离输电线路的暂态过程时，电气参数的分布性常常就需要考虑，否则在分析某些继电保护装置的动作情况时就可能得出错误的结论。因此，采取任一假设时，都不可忘记它运用的合理范围。当然，多考虑一些实际因素将使计算复杂化，但是随着计算机应用的发展和普及，这些复杂的计算问题是完全能够解决的。



第一章 故障分析的基本知识

本章将以无限大功率系统的三相短路为例,介绍暂态计算的具体步骤和方法,阐述有关故障计算的基本知识。进行短路分析计算的大体过程是首先根据已知的条件和要求建立电力系统的等值网络,然后化简网络,并对网络进行暂态过程的计算和分析。在建立电力系统的等值网络时,有两个方面的问题要解决:一个是要确定电力系统各元件的等值电路,另一个是要对各元件的参数进行换算。下面,首先讨论电力系统各主要元件的等值电路。

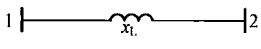
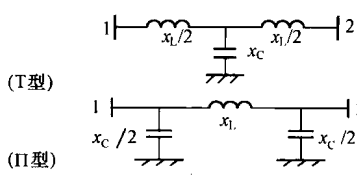
第一节 电力系统各主要元件的等值电路

一个元件的等值电路和在计算时所采用的具体假设有关。一般在进行短路的计算和分析时,为了简便和突出基本内容,我们将结合各元件的特定情况再引用一些合理的具体假设。在大小不同的三相电流作用下,一个元件可能呈现不同的电磁特性,因此,可能对应于不同的等值电路。需要强调的一点是,下面所讨论的等值电路是仅对三相对称运行状态而言的。为了简单明了,各元件的等值电路图或接线图较多地被画成单线图的形式。所谓单线图,是将三相系统以单相表示,而且省略了中性线之后得到的。各主要元件的等值电路列于表1-1中。

表 1-1 电力系统各主要元件的等值电路

设备符号	代表符号	等值电路
发电机		
变压器	双绕组 	
	三绕组或自耦 	
电抗器	普通电抗器 	
	分裂电抗器 	

续表

设备符号		代表符号	等值电路
输电线路	忽略分布电容	-----	
	考虑分布电容		

一、发电机

从电路计算的角度来看，发电机可用其相应的电动势和电抗来表示。三相短路时，基频电流所产生的旋转磁场和转子的旋转是同步的。因此，在计算短路瞬间的电气量时，可以采用发电机的暂态或次暂态参数；计算短路后的稳态情况时，可以采用发电机的同步稳态参数。

在这里，假定发电机的转子对称，即假定发电机的纵轴（d轴）与横轴（q轴）的参数是相等的，发电机可以用一个等值电路来表示。此外，短路瞬间系统中各发电机电动势之间的相位差，以及短路过程中发电机的摇摆现象也忽略不计，即认为在短路过程中系统内所有发电机的电动势相位均相同。在此假设下，计算所得的结果仅仅是短路点的电流数值稍稍偏大，而发电机之间电路中的电流数值稍稍偏小而已。

二、变压器

变压器的励磁电流较小（仅为额定电流的5%左右），一般可忽略不计。这样，对于双绕组变压器，可用一个漏抗支路表示；对于普通三绕组变压器（或自耦变压器），可用一个星形等值电路表示。

三、输电线路

在考虑分布电容的情况下（如超高压远距离输电线路），等值电路通常以T型或Π型双口网络表示。对于一般输电线路可将分布电容忽略不计，即假定 $C=0$ 或 \dot{I}_C 等于零，再考虑略去电阻（如绪论中所述）之后，输电线路即变为一个具有纯电抗的元件。

图1-1所示为一对称的三相输电线路（即各相的自感抗、各相之间的互感抗相等）。设输电线单位长度的自感抗为 x_L ，互感抗为 x_M ，当对称的正常三相电流通过时，以A相为例，可写出如下方程：

$$\Delta \dot{U}_a = j\dot{I}_a x_L + j\dot{I}_b x_M + j\dot{I}_c x_M = j\dot{I}_a (x_L - x_M) = j\dot{I}_a x_1 \quad (1-1)$$

式中， $x_1 = x_L - x_M$ 为输电线路单位长度上一相的等值电抗。应当指出，依据这一参数所画出的已是无互感的等值电路。

在短路电流的实用计算中，当不能确知输电线路的参数时，每相电抗的一次参数可选用下列的平均值：

6~220kV 架空线	0.4Ω/km
35kV 三芯电缆线路	0.12Ω/km
6~10kV 三芯电缆线路	0.08Ω/km

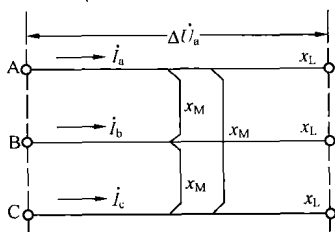


图 1-1 三相输电线路

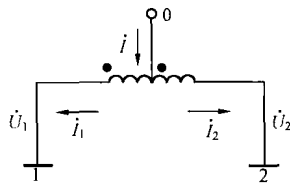


图 1-2 分裂电抗器

四、电抗器

电抗器是由电阻很小的电感线圈所构成。因此，等值电路可以用其电抗表示。普通的电抗器每相用一个电抗表示即可。下面着重介绍一下分裂电抗器。

分裂电抗器的结构与普通的电抗器差不多，只不过分裂电抗器在线圈中间有一个抽头，从而将线圈分成了匝数相等的两部分，如图 1-2 所示。中间抽头通常接在电源侧。正常工作时，两支路中的电流方向相反，两侧线圈间有电和磁的联系，一侧电流所产生的磁通在另一侧线圈中感应的电动势将促使电压损失减小，这是分裂电抗器的优点之一。设每一支路的自感抗（或称分裂电抗）为 x_s ，两支路间的互感比例系数为 m_0 ，互感抗为 $x_M = m_0 x_s$ ，电流 $\dot{i} = \dot{i}_1 + \dot{i}_2$ ，于是，电抗器每两个抽头间的电压为：

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{U}_{0-1} &= j\dot{i}_1 x_s - j(\dot{i} - \dot{i}_1) x_M = j(x_s + x_M) \dot{i}_1 + j\dot{i}(-x_M) \\ \Delta \dot{U}_{0-2} &= j\dot{i}_2 x_s - j(\dot{i} - \dot{i}_2) x_M = j(x_s + x_M) \dot{i}_2 + j\dot{i}(-x_M) \\ \Delta \dot{U}_{1-2} &= j(x_s + x_M)(-\dot{i}_1) + j(x_s + x_M) \dot{i}_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

根据式 (1-2) 即可得到如表 1-1 中所示的分裂电抗器等值电路。

五、负荷

对于负荷，一般只作近似估计，或当作恒定电抗，或当作某种临时的附加电源，视具体情况而定，详见第二章第九节。

第二节 标 幺 制

一、标幺制的概念

在电力系统故障的计算中，电流、电压、阻抗、功率等物理量，一般都不用它们的实际有名单位表示，而习惯于用相对单位（或称为标幺值）表示。用标幺值来表示一件事物的数量，并不是什么新鲜的东西，而是我们经常都会接触到的。例如，我们说某工厂今年的机床产量是去年的 115%。这就是说，把去年的产量当作 100，今年的产量就是 115；或者把去年产量当作 1，今年产量就是 1.15，这个 1.15 就是以去年产量作为比较基础的今年产量的标幺值。又例如，一台同步发电机额定电压为 10500V，额定电流为 1250A，它现在运行在某种状态，端电压为 10500V，电流为 1000A，这就是用实际的有名单位来说明它的运行状态。还可以用另一种方法，即用相对单位制来表示，以电机的额定电压 10500V 作为电压的一个单位，以额定电流 1250A 作为电流的一个单位，把用有名单位表示的上述电机运行参

数，同所选的相对单位进行比较，便得到用标么值表示的电压和电流的数值（为了区别于有名值，在字母右下角加*），分别为：

$$U_{G*} = \frac{10500}{10500} = 1$$

$$I_{G*} = \frac{1000}{1250} = 0.8$$

从上述两例可知，当用标么值来表示一个量时，就是把这个量的实际有名值同一个被选作比较基础的数值进行比较，而把作为比较基础的数值当作该量的一个单位。这个作为比较基础的数值称为基准值或基值。标么值定义如下：

$$* \quad \text{标么值(相对值)} = \frac{\text{实际有名值(任意单位)}}{\text{基准值(与实际有名值同单位)}} \quad (1-3)$$

因此，当我们说一个量的标么值时，还必须同时说明是以什么作为基值，否则，光说一个标么值是没有意义的。

用标么值表示一个量时，只要基准值选择恰当，就能更准确地反映事物的本质，反映数量同质量的辩证关系。在上述例子中，机床产量的标么值能说明该工厂机床产量的年增长速度；电压和电流的标么值能给人以电机运行状态的明确的概念，上例说明电压正好，电流不满载。所以，相对单位制（或标么值）不仅在工程技术上，而且在其他许多领域中都得到了广泛的应用。

二、三相系统基准的选择

采用标么制时，首先应选定基准值。一般说来，基准值是可以任意选择的。但是，为了计算方便，通常要求各个电气量的基准值之间应能满足它们所对应的有名值之间所具有的基本关系。

在故障计算中，对称的三相系统均化成星形等值电路表示，经常要用的几个物理量是线电压 U_{LL} 、线电流 I 、阻抗 $Z(z/\varphi)$ 和三相视在功率 $S_{(3)}$ 。众所周知，这四个电气量之间满足功率方程：

$$S_{(3)} = \sqrt{3}U_{LL}I \quad (1-4)$$

和欧姆定律：

$$U_{LL} = \sqrt{3}Iz \quad (1-5)$$

根据上述原则，所选这四个物理量的基准值也须满足功率方程和欧姆定律，即：

$$S_{(3)B} = \sqrt{3}U_{LLB}I_B \quad (1-6)$$

$$U_{LLB} = \sqrt{3}I_B z_B \quad (1-7)$$

式中 $S_{(3)B}$ ——基准三相视在功率，kVA 或 MVA；

U_{LLB} ——基准线电压，V 或 kV；

I_B ——基准电流，A 或 kA；

z_B ——基准相阻抗的模值， Ω 。

以式 (1-6) 和式 (1-7) 分别去除式 (1-4) 及式 (1-5) 的两边，则得其标么值系统中

的相应公式为:

$$\left. \begin{aligned} S_{(3)*} &= U_{LL*} I_* \\ U_{LL*} &= I_* z_* \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

式中 $S_{(3)*}$ ——三相视在功率的标么值;

U_{LL*} ——线电压的标么值;

I_* ——电流的标么值;

z_* ——一相阻抗(模值)的标么值。

可以看出,按照上述原则进行选择时,不但可使标么值系统中的公式关系简单,而且与有各单位制中的一相的公式相似,既易于记忆,又便于运用,这正是其优点所在。否则,基准值任意选,公式另搞一套,应用起来就显得不甚方便了。标么制的优点将在本节的部分予以归纳。

式(1-6)与式(1-7)的意义分别是:电压和电流都为基值时,功率也应为基值;基准电流在基准阻抗上的压降应等于基准电压。根据这两个表达式,在四个基准量中,如有两个基准量已经确定,其他两个基准量也就确定了。在电力系统故障的分析计算中,通常选择基准功率 $S_{(3)B}$ 和基准电压 U_{LLB} , 而基准电流 I_B 和基准阻抗的模值 z_B 的计算式可表示为:

$$\left. \begin{aligned} I_B &= \frac{S_{(3)B}}{\sqrt{3}U_{LLB}} \\ z_B &= \frac{U_{LLB}}{\sqrt{3}I_B} = \frac{U_{LLB}^2}{S_{(3)B}} \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

基准功率和基准电压虽说可以任意选,但是为了便于计算,基准功率 $S_{(3)B}$ 通常取 100MVA 或 1000MVA, 有时也可选为某电厂各机组容量之和。基准电压可以选为网络各级的额定电压或平均额定电压,常用的平均额定电压值列于表 1-2。

表 1-2 常用的平均额定电压值

U_N/kV	0.38	3	6	10	35	110	220	330	500
U_{av}/kV	0.40	3.15	6.3	10.5	37	115	230	345	525

于是,常用电气量的标么值计算公式如下:

$$\left. \begin{aligned} U_{LL*} &= \frac{U_{LL}}{U_{LLB}} \\ I_* &= \frac{I}{I_B} = \frac{I}{\frac{S_{(3)B}}{\sqrt{3}U_{LLB}}} = \frac{\sqrt{3}U_{LLB}I}{S_{(3)B}} \\ S_{(3)*} &= \frac{S_{(3)}}{S_{(3)B}} \\ x_* &= \frac{x}{z_B} = \frac{\sqrt{3}I_B x}{U_{LLB}} = \frac{S_{(3)B} x}{U_{LLB}^2} \\ R_* &= \frac{R}{z_B} = \frac{\sqrt{3}I_B R}{U_{LLB}} = \frac{S_{(3)B} R}{U_{LLB}^2} \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$