

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



DIANLI XITONG ZANTAI FENXI

电力系统 暂态分析

(第三版)

李光琦 编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

- | | |
|----------------------|------------|
| 走进电世界 | 李裕能 |
| 电路 | 唐巍 |
| 电路(少学时) | 张长富 |
| 电工学(上册) | 张文生 |
| 电工学(下册) | 张文生 |
| 电工电子技术 | 李海 |
| 电工电子技术 | 蔡旭 |
| 电工电子技术(上册) | 郑宗亚 |
| 电工电子技术(下册) | 郑宗亚 |
| 电工学实验指导书 | 娄娟 |
| 数字电子技术基础 | 王义军 |
| 模拟电子技术基础 | 韩学军 |
| 数字电子技术 | 朱传琴 |
| 模拟电子技术 | 方舒燕 |
| 数字电路实验及课程设计 | 郁汉琪 |
| 工程电磁场(附光盘) | 杨宪章 |
| 电力电子技术 | 石新春 |
| 电力电子技术 | 李先允 |
| 电力电子技术习题集 | 李先允 |
| 电力市场(第二版) | 杜松怀 |
| 电机与拖动(第二版) | 刘启新 |
| 电机学 | 曾令全 |
| 信号与系统 | 胡钊 |
| 信号与系统分析 | 吴冰 |
| 信号分析与处理 | 杨育霞 |
| 数字信号处理 | 张长森 |
| 单片机原理及应用 | 许珉 |
| PLC应用技术要点与题解 | 弭洪涛 |
| 电子信息工程概论 | 叶树江 |
| 电力系统电磁兼容技术 | 李景禄 |
| 电力工程基础 | 温步瀛 |
| 电力系统分析基础 | 韦钢 |
| 电力系统暂态分析(第三版) | 李光琦 |
| 农村电力网规划 | 朴在林 |

ISBN 978-7-5083-4825-4



9 787508 348254 >

定价: 23.00元

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



DIANLI XITONG ZANTAI FENXI

电力系统 暂态分析

(第三版)

李光琦 编
刘万顺 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”规划教材。本书共两篇、八章，主要内容有：第一篇电力系统电磁暂态过程分析（电力系统故障分析）和第二篇电力系统机电暂态过程分析（电力系统稳定性）两部分内容。

第一篇共五章，包括第一章为基本知识；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计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，包括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“发电厂及电力系统”、“电力系统及其自动化”专业的专业课程教材，也可作为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/李光琦编.—3版.—北京：中国电力出版社，2007.1

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5083-4825-4

I. 电... II. 李... III. 电力系统暂态—分析
—高等学校—教材 IV. TM711

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 110580 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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

1985 年 12 月第一版

*

2007 年 1 月第三版 2007 年 1 月北京第二十二次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15.5 印张 380 千字

印数 116411—119410 册 定价 23.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换)

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

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，西安交通大学沈赞垠，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。

由于编者的水平有限，书中有错误和不妥之处请读者批评指正。

编者

1984年10月

目 录

前言	
第二版前言	
第一版前言	
绪论	1
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本知识	3
第一节 故障概述	3
第二节 标幺制	5
第三节 无限大功率电源供电的三相短路电流分析	10
习题	16
第二章 同步发电机突然三相短路分析	17
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及其分析	17
第二节 同步发电机空载下三相短路后内部物理过程以及短路电流分析	18
第三节 同步发电机负载下三相短路交流电流初始值	26
第四节 同步发电机的基本方程	33
第五节 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	45
第六节 自动调节励磁装置对短路电流的影响	60
习题	62
第三章 电力系统三相短路电流的实用计算	63
第一节 短路电流交流分量初始值计算	63
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	73
第三节 其他时刻短路电流交流分量有效值的计算	79
习题	85
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	86
第一节 对称分量法	86
第二节 对称分量法在不对称故障分析中的应用	88
第三节 同步发电机的负序和零序电抗	91
第四节 异步电动机的负序和零序电抗	93
第五节 变压器的零序电抗和等值电路	94
第六节 输电线路的零序阻抗和电纳	101
第七节 零序网络的构成	116

习题	118
第五章 不对称故障的分析计算	119
第一节 各种不对称短路时故障处的短路电流和电压	119
第二节 非故障处电流、电压的计算	131
第三节 非全相运行的分析计算	136
第四节 计算机计算程序原理框图	141
习题	146

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	148
第一节 概述	148
第二节 同步发电机组的机电特性	150
第三节 自动调节励磁系统的作用原理和数学模型	162
第四节 负荷特性	167
第五节 柔性输电装置特性	169
习题	175
第七章 电力系统静态稳定	176
第一节 简单电力系统的静态稳定	176
第二节 小干扰法分析简单系统静态稳定	178
第三节 自动调节励磁系统对静态稳定的影响	184
第四节 多机系统的静态稳定近似分析	196
第五节 提高系统静态稳定性的措施	199
习题	202
第八章 电力系统暂态稳定	203
第一节 电力系统暂态稳定概述	203
第二节 简单系统的暂态稳定性	204
第三节 发电机组自动调节系统对暂态稳定的影响	215
第四节 复杂电力系统的暂态稳定计算	218
第五节 提高暂态稳定性的措施	224
习题	229
附录 A 同步电机绕组电感系数	230
附录 B 同步电机的标么值	232
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	236
附录 D 常用网络变换的基本公式	238
参考文献	239

绪 论

电力系统是由发电机、变压器、输电线路、用电设备（负荷）组成的网络，它包括通过电的或机械的方式连接在网络中的所有设备。电力系统中的这些互连元件可以分为两类：一类是电力元件，它们对电能进行生产（发电机）、变换（变压器、整流器、逆变器）、输送和分配（电力传输线、配电网）、消费（负荷）；另一类是控制元件，它们改变系统的运行状态，如同步发电机的励磁调节器、调速器以及继电器等。

电力系统的运行状态由运行参量来描述，或者说运行参量定量地确定系统的运行状态。运行参量包括功率、电压、电流、频率以及电动势相量间的角位移等等。系统元件参数由系统元件的物理性质决定，代表元件的特性，如电阻、电抗、电导、输入阻抗和转移阻抗、变压器变比、时间常数和放大倍数等。系统元件参数直接影响运行参量的大小。

电力系统的运行状态有两种，即稳态和暂态。当电力系统处于稳态时，严格地说，其运行参量并不是常量，而是持续地在某一平均值附近变化的量，但这种变化是很小的，因而实际上可以认为运行参量是常量。有关电力系统稳态运行中的问题，在《电力系统稳态分析》一书中讲授，不是本书的讲述范围。

电力系统在运行中常常受到各种突然的扰动，这些扰动使电力系统处于暂态过程之中，这时运行参量可能发生较大的变化。暂态过程中运行参量的变化可能会造成对系统的危害。例如：由于断路器操作引起的过电压可能会危及设备的绝缘；短路故障引起比正常电流大得多的短路电流，其热效应也可能损坏设备，而且短路故障改变了网络结构，因而改变了各发电机的输出功率，造成各发电机组输入功率和输出功率不平衡，有可能引起发电机组互相失去同步等等。因此，必须对电力系统的各种暂态过程进行分析研究，以确保电力系统安全运行。值得注意的是，电力系统是一个统一体，在暂态过程中各种运行参量都在变化，互相影响，互相制约。

电力系统中的转动元件，如发电机和电动机，其暂态过程主要是由于机械转矩和电磁转矩（或功率）之间的不平衡而引起，通常称为机电过程。在变压器、输电线等元件中，由于并不牵涉角位移、角速度等机械量，故其暂态过程称为电磁过程。如前所述，电力系统受到扰动后，各种暂态过程是同时进行的，但实践证明，我们可以针对需要解决的实际工程技术问题，采用一些合理的假设，忽略一些互相影响的因素，抓住过程中的主要矛盾进行研究。这样不仅便于研究，更重要的还在于能够更好地掌握过程的本质。

本课程的主要研究对象是交流电力系统中发生短路故障后的电磁暂态过程以及电力系统受到各种扰动后的机电暂态过程（稳定问题），这是电力系统中普遍遇到的问题，是本专业学生必须掌握的。研究电磁暂态过程的重点在于分析短路故障后电网中电流、电压的变化，在一般情况下可以不计发电机组间角位移的变化（即各发电机组转速不变），这是因为机械运动过程比电磁过程要慢得多。稳定问题的重点在于分析发电机组转子运动规律，可以对一些电磁运行参量的变化规律作某些近似的假设。有关雷电及操作引起的输电线路及变电所中电磁暂态过程的问题，由高压工程的有关书籍讨论。另外，有关直流输电系统的暂态过程

则由直流输电方面的专业书籍讨论。

在学习本课程前，学生必须较好地掌握《电路》、《电机学》和《自动控制原理》等课程的基本知识。在学习本课程时，应特别注意掌握过程的物理本质，另一方面还要熟练掌握一些基本的工程计算的方法及其有关的假设。

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本知识

第一节 故障概述

在电力系统的运行过程中,时常会发生故障,其中大多数是短路故障(简称短路)。

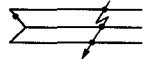
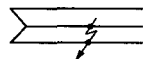
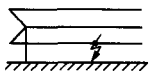
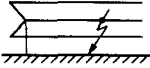
所谓短路,是指电力系统正常运行情况以外的相与相之间或相与地(或中性线)之间的连接。在正常运行时,除中性点外,相与相或相与地之间是绝缘的。表1-1示出三相系统中短路的基本类型。电力系统的运行经验表明,单相短路接地占大多数。三相短路时三相回路依旧是对称的,故称为对称短路;其他几种短路均使三相回路不对称,故称为不对称短路。上述各种短路均是指在同一地点短路,实际上也可能是在不同地点同时发生短路,例如两相在不同地点接地短路。

产生短路的主要原因是电气设备载流部分的相间绝缘或相对地绝缘被损坏。例如:架空输电线的绝缘子可能由于受到过电压(例如由雷击引起)而发生闪络或由于空气的污染使绝缘子表面在正常工作电压下放电;其他电气设备,发电机、变压器、电缆线路等的载流部分的绝缘材料在运行中损坏;鸟兽跨接在裸露的载流部分以及大风或导线覆冰引起架空线路杆塔倒塌所造成的短路也是屡见不鲜的;此外,运行人员在线路检修后未拆除地线就加电压等误操作也会引起短路故障。电力系统的短路故障

大多数发生在架空线路部分。总之,产生短路的原因有客观的,也有主观的,只要运行人员加强责任心,严格按规章制度办事,就可以把短路故障的发生控制在一个很低的限度内。

短路对电力系统的正常运行和电气设备有很大的危害。在发生短路时,由于电源供电回路的阻抗减小以及突然短路时的暂态过程,使短路回路中的短路电流值大大增加,可能超过该回路的额定电流许多倍。短路点距发电机的电气距离愈近(即阻抗愈小),短路电流愈大。例如在发电机端发生短路时,流过发电机定子回路的短路电流最大瞬时值可达发电机额定电流的10~15倍,在大容量的系统中短路电流可达几万甚至几十万安培。短路点的电弧有可能烧坏电气设备。短路电流通过电气设备中的导体时,其热效应会引起导体或其绝缘的损坏;另一方面,导体也会受到很大的电动力的冲击,致使导体变形,甚至损坏。因此,各种电气设备应有足够的热稳定性和动稳定性,使电气设备在通过最大可能的短路电流时不致损坏。

表 1-1 短路类型

短路种类	示意图	符号
三相短路		$f^{(3)}$
两相短路		$f^{(2)}$
单相短路接地		$f^{(1)}$
两相短路接地		$f^{(1,1)}$

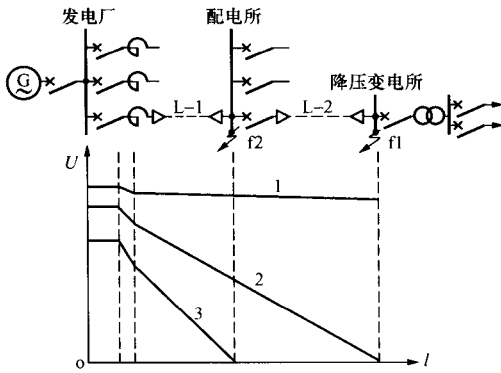


图 1-1 正常运行和短路故障时各点的电压

短路还会引起电网中电压降低，特别是靠近短路点处的电压下降得最多，结果可能使部分用户的供电受到破坏。图 1-1 中示出了一简单供电网在正常运行时和在不同地点 (f_1 和 f_2) 发生三相短路时各点电压变化的情况。折线 1 表示正常运行时各点电压的大致情况。折线 2 表示 f_1 点短路后的各点电压。 f_1 点代表降压变电所的母线，其电压降至零。由于流过发电机和线路 $L-1$ 、 $L-2$ 的短路电流比正常电流大，而且几乎是纯感性电流，因此发电机内电抗压降增加，发电机端电压下降。同时短路电流通过电抗器和

$L-1$ 引起的电压降也增加，以致配电所母线电压进一步下降。折线 3 表示短路发生在 f_2 点时的各点电压。电网电压的降低使由各母线供电的用电设备不能正常工作，例如作为系统中最主要的电力负荷异步电动机，它的电磁转矩与外施电压的平方成正比，电压下降时电磁转矩将显著降低，使电动机转速减慢甚至完全停转，从而造成产品报废及设备损坏等严重后果。

系统中发生短路相当于改变了电网的结构，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，引起大片地区停电。这是短路造成的最严重的后果。

不对称接地短路所引起的不平衡电流产生的不平衡磁通，会在邻近的平行的通信线路内感应出相当大的感应电动势，造成对通信系统的干扰，甚至危及设备和人身安全。

为了降低发生短路的概率，电力系统必须采取合理的防雷措施、降低过电压水平、采用合适的配电装置，以及加强对运行维护的管理。为了减少短路对电力系统的危害，可以采取限制短路电流的措施，例如图 1-1 中所示的在线路上装设电抗器。但是最主要的措施是迅速将发生短路的部分与系统其他部分隔离。例如在图 1-1 中 f_1 点短路后可立即通过继电保护装置自动将 $L-2$ 的断路器迅速断开，这样就将短路部分与系统分离，发电机可以照常向直接供电的负荷和配电所的负荷供电。由于大部分短路不是永久性的而是暂时性的，就是说当短路处和电源隔离后，故障处不再有短路电流流过，则该处可能迅速去游离，有可能重新恢复正常，因此现在广泛采取重合闸的措施。所谓重合闸就是当短路发生后断路器迅速断开，使故障部分与系统隔离，经过一定时间再将断路器合上。对于暂时性故障，系统就因此恢复正常运行；如果是永久性故障，断路器合上后短路仍存在，则必须再次断开断路器。

短路问题是电力技术方面的基本问题之一。在发电厂、变电所以及整个电力系统的设计和运行工作中，都必须事先进行短路计算，以此作为合理选择电气接线、选用有足够热稳定性和动稳定度的电气设备及载流导体、确定限制短路电流的措施、在电力系统中合理地配置各种继电保护并整定其参数等的重要依据。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。

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，在本篇中将一并介绍。

在电力系统也可能同时发生多起不对称故障的情况，如一相断线并触地，称为复杂故障，可参考其他书籍，本书不作介绍。

第二节 标么制

在电力系统故障分析计算中，大多应用标么制。标么制中各种物理量都用标么值（即相对值）来表示，使运算步骤简单，数值简明便于分析。

一、标么值

标么值的一般数学表达式为

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

对于任一物理量均可以用标么值表示。例如电阻、电抗的标么值分别为

$$\left. \begin{aligned} R_* &= \frac{R}{Z_B} \\ X_* &= \frac{X}{Z_B} \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

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、视在功率的标么值分别为

$$\left. \begin{aligned} P_* &= \frac{P}{S_B} \\ Q_* &= \frac{Q}{S_B} \\ S_* &= \frac{S}{S_B} \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

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

二、基准值的选取

基准值的选取有一定的随意性，下面仅以三相电路说明之。

在三相电路中，物理量 U 、 I 、 S 、 Z 间有以下两个基本关系，即

$$\left. \begin{aligned} U &= \sqrt{3} Z I \\ S &= \sqrt{3} U I \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

式中： U 为线电压； S 为三相功率； I 为相电流； Z 为相阻抗。

如果选定各量基准值满足下列关系

$$\left. \begin{aligned} U_B &= \sqrt{3} Z_B I_B \\ S_B &= \sqrt{3} U_B I_B \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

将式 (1-4) 除以式 (1-5) 中的对应项后可得

$$\left. \begin{aligned} U_* &= Z_* I_* \\ S_* &= U_* I_* \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

式 (1-6) 表明, 在标么制中三相电路的关系式类似于单相电路。

在式 (1-5) 中含有四个基准值, 可以任选两个, 一般先选定电压和功率的基准值, 则电流和阻抗基准值分别为

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

$$Z_B = \frac{U_B}{\sqrt{3}I_B} = \frac{U_B^2}{S_B} \text{ (}\Omega\text{)} \quad (1-8)$$

其中, S_B 单位为 MVA, U_B 单位为 kV。

三、基准值改变时标么值的换算

电力系统中各种电气设备如发电机、变压器、电抗器的阻抗参数均是以其本身额定值为基准值的标么值或百分值给出的, 而在进行电力系统计算时, 必须取统一的基准值, 因此要求将原来的以本身额定值为基准值的阻抗标么值换算到统一的基准值。

若电抗 X 对应不同的基准值的标么值分别为

$$\left. \begin{aligned} X_{*(B)} &= X \frac{S_B}{U_B^2} \\ X_{*(N)} &= X \frac{S_N}{U_N^2} \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

式中: 下标 B 表示统一基准值及其对应的标么值; 下标 N 表示设备额定值以及对应的标么值。

由式 (1-9) 可得 $X_{*(B)}$ 与 $X_{*(N)}$ 间的转换关系为

$$X_{*(B)} = X_{*(N)} \left(\frac{U_N}{U_B} \right)^2 \left(\frac{S_B}{S_N} \right) = X_{*(N)} \left(\frac{U_N}{U_B} \right) \left(\frac{I_B}{I_N} \right) \quad (1-10)$$

发电机的铭牌参数一般给出其额定电压、额定功率以及以额定值为基准值的电抗标么值, 可用式 (1-10) 计算其对应统一基准值的电抗标么值。

对于变压器一般给出其额定电压、额定功率以及短路电压百分数等。其短路电压百分数和电抗标么值的关系为

$$U_s(\%) = \frac{\sqrt{3}I_N X_T}{U_N} \times 100\% = \frac{S_N}{U_N^2} X_T \times 100\% = X_{T*(N)} \times 100\% \quad (1-11)$$

式中: X_T 为变压器电抗的有名值。故变压器转换为统一基准值的电抗标么值为

$$X_{T*(B)} = \frac{U_s(\%)}{100} \left(\frac{U_N}{U_B} \right)^2 \left(\frac{S_B}{S_N} \right) \quad (1-12)$$

电抗器在系统中用来限制短路电流而不是用于变换能量, 故对于电抗器一般给出的是 U_N 、 I_N 和电抗百分数 $X_R(\%)$ 等参数。电抗百分数 $X_R(\%)$ 与标么值间关系为

$$X_R(\%) = \frac{\sqrt{3}I_N X_R}{U_N} \times 100\% = X_{R*(N)} \times 100\% \quad (1-13)$$

换算为统一基准值的标么值为

$$X_{R*(B)} = \frac{X_R(\%)}{100} \left(\frac{U_N}{U_B} \right) \left(\frac{I_B}{I_N} \right) \quad (1-14)$$

【例 1-1】 一台额定电压 13.8kV、额定功率为 125MW、功率因数为 0.85 的发电机，其电抗标幺值为 0.18（以发电机额定电压和功率为基准值）。试计算以 13.8kV 和 100MVA 为电压和功率基准值的电抗标幺值，并计算电抗的实际值。

解

$$X_{*(B)} = X_{*(N)} \left(\frac{U_N}{U_B} \right)^2 \left(\frac{S_B}{S_N} \right) = 0.18 \left(\frac{13.8}{13.8} \right)^2 \times \left(\frac{100}{125} \right) = 0.122$$

$$X = X_{*(N)} \frac{U_N^2}{S_N} = 0.18 \times \frac{13.8^2}{125} = 0.233(\Omega)$$

四、变压器联系的不同电压等级电网中各元件参数标幺值的计算

以图 1-2 为例。该图为一包含两台变压器和三段不同电压等级的系统。当用有名值进行计算时，总是把具有磁耦合的电路变为仅有电联系的电路，也就是把不同电压等级中各个元件的

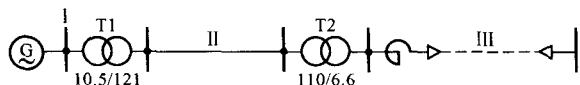


图 1-2 有三段不同电压等级的系统图

参数（如电抗）归算到一个电压等级，然后按一般电路计算，最后将计算结果（如电流和电压等）再折算回到各段，即得各段的有名值。

用标幺值计算时，也就是在各元件参数的有名值归算到同一个电压等级后，在此基础上选定统一的基准值求各元件参数的标幺值的。下面分别介绍准确计算法和一种近似计算法。短路电流计算一般采用近似计算法。

（一）准确计算法

假设在图 1-2 中已选定第 I 段作为基本段，其他各段的参数均向这一段归算，然后选择功率基准值和电压基准值分别为 S_B 和 U_{B1} 。各元件的电抗标幺值计算如下。

（1）发电机。发电机就在基本段，其电抗有名值不需归算，故有

$$X_G = X_{G*(N)} \frac{U_{GN}^2}{S_{GN}}$$

$$X_{G*(B)} = X_G \frac{S_B}{U_{B1}^2} = X_{G*(N)} \frac{U_{GN}^2}{S_{GN}} \times \frac{S_B}{U_{B1}^2}$$

（2）变压器 T1。它也是在基本段，其 10.5kV 侧的电抗有名值也不需归算，其值为

$$X_T = X_{T*(N)} \frac{U_{TN}^2}{S_{TN}}$$

显然， U_{TN} 为 10.5kV。电抗的标幺值为

$$X_{T*(B)} = X_T \frac{S_B}{U_{B1}^2} = X_{T*(N)} \frac{U_{TN}^2}{S_{TN}} \times \frac{S_B}{U_{B1}^2}$$

（3）第 II 段的输电线路。其电抗有名值必须先归算到第 I 段，即

$$X'_L = k_1^2 X_L$$

式中： k_1 为变压器变比（10.5/121）。

其标幺值为

$$X_{L*(B)} = X'_L \frac{S_B}{U_{B1}^2} = k_1^2 X_L \frac{S_B}{U_{B1}^2}$$

这个表达式还可变换成下面的形式

$$X_{L*(B)} = X_L \frac{S_B}{\left(\frac{U_{B1}}{k_1}\right)^2} = X_L \frac{S_B}{U_{B2}^2}$$

此式表明线路电抗 X_L 可以不归算至第 I 段, 而是将第 I 段的电压基准值归算到第 II 段 (U_{B2}), 用统一的功率基准值和本段的电压基准值来计算标么值。后面将可见到, 这一结论可以推广到任一段电抗标么值的计算。

(4) 变压器 T2。其 110kV 侧的电抗有名值为

$$X_T = X_{T*(N)} \frac{U_{TN}^2}{S_{TN}}$$

其中 $U_{TN} = 110\text{kV}$, 将其归算至第 I 段, 则

$$X'_T = k_1^2 X_{T*(N)} \frac{U_{TN}^2}{S_{TN}}$$

其标么值为

$$X_{T*(B)} = X'_T \frac{S_B}{U_{B1}^2} = k_1^2 X_{T*(N)} \frac{U_{TN}^2}{S_{TN}} \times \frac{S_B}{U_{B1}^2} = X_{T*(N)} \frac{U_{TN}^2}{S_{TN}} \times \frac{S_B}{U_{B2}^2}$$

(5) 电抗器。这里应用前面的结论, 先求得第 III 段的电压基准值

$$U_{B3} = \frac{U_{B2}}{k_2} = \frac{U_{B1}}{k_1 k_2}$$

式中: k_2 为变压器 T2 的变比 (110/6.6)。

利用式 (1-14) 可得相对于统一基准值的电抗器电抗标么值为

$$X_{R*(B)} = \frac{X_R(\%) }{100} \left(\frac{U_N}{U_{B3}}\right) \left(\frac{I_{B3}}{I_N}\right) = \frac{X_R(\%) }{100} \left(\frac{U_N}{U_{B3}}\right) \left(\frac{\sqrt{3}U_{B3}}{I_N}\right) \frac{S_B}{U_{B3}^2}$$

式中: I_{B3} 为第 III 段的电流基准值。

由于各段功率基准值相同, 而电压基准值不同, 因而电流基准值不同。

读者可以用将电抗器有名值归算至第 I 段后求其标么值的方法, 验证上面给出的结果。

(6) 第 III 段的电缆线路。其电抗标么值为

$$X_{L*(B)} = X_L \frac{S_B}{U_{B3}^2}$$

由上面的推导过程可以看出, 各段元件用本段电压基准值进行计算的方法要简便得多。

(二) 近似算法

上面介绍的准确算法是按变压器实际变比计算的。在近似计算中可不按实际变比, 而假定变压器的变比为各电压等级的额定电压的平均值之比。以图 1-2 中第 II 段 110kV 电网为例, 其升压变压器的二次侧额定电压为 121kV, 降压变压器一次侧的额定电压为 110kV, 所以其平均额定电压为 $\frac{121+110}{2} \approx 115\text{kV}$ 。第 I 段 10kV 和第 III 段 6kV 电网的平均额定电压分别为 10.5kV 和 6.3kV。根据上述假定, 在图 1-2 所示系统中即认为变压器 T1 的变比为 10.5/115, 变压器 T2 的变比为 115/6.3。这样一来, 如果选取第 I 段电压基准值 U_{B1} 为 10.5kV, 则 U_{B2} 为 115kV, U_{B3} 为 6.3kV, 即各段的电压基准值就是各自的平均额定电压值, 则发电机、变压器的电抗标么值就不需按电压归算了。

表 1-2 列出对应我国电网额定电压的平均额定电压值。