

高等学校教材

电力系统暂态分析

西安交通大学 李光琦 编

水利电力出版社

高等学校教材

电力系统暂态分析

西安交通大学 李光琦 编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 17印张 380千字

1985年12月第一版 1985年12月北京第一次印刷

印数00001—11810册 定价3.50元

书号 15143·5881

内 容 提 要

本书包括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。着重阐明有关现象的物理过程和基本的分析方法,并由此引出工程上的实用计算法和应用计算机计算的数值解法。

第一篇共五章(第一章~第五章),第一章为基本知识。第二章先介绍同步电机突然三相短路的物理过程,接着介绍同步电机的基本方程,并用来分析突然短路过程。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(第六章~第八章),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,结合单机对无限大系统,将稳定性的基本概念、物理过程和分析方法作了详尽的讨论,并推论到多机系统的计算程序。最后对提高稳定的措施也作了全面的介绍。

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。

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多遍讲授该课的教学经验，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種参数，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。对于暂态电势和次暂态电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。

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

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 标么制.....	5
一、标么值.....	5
二、基准值的选取.....	6
三、基准值改变时标么值的换算.....	6
四、变压器联系的不同电压等级网络中各元件参数标么值的计算.....	7
五、频率、角速度和时间的基准值.....	10
第三节 无限大功率电源供电的三相短路电流分析.....	11
一、暂态过程分析.....	11
二、短路冲击电流和最大有效值电流.....	15
第二章 同步发电机突然三相短路分析.....	18
第一节 同步发电机在空载情况下突然三相短路的物理过程.....	18
一、突然三相短路后定子短路电流和转子绕组中电流分量.....	18
二、短路瞬时磁通分布、暂态电抗和次暂态电抗.....	21
三、短路电流波形和近似公式.....	22
第二节 同步发电机的基本方程、参数及等值电路.....	25
一、同步发电机的基本方程和坐标转换.....	25
二、同步发电机稳态运行方程和等值电路.....	39
三、同步发电机的暂态电抗和次暂态电抗.....	41
第三节 应用同步发电机基本方程分析空载情况下突然三相短路后的电流.....	45
一、无阻尼绕组的电机空载情况下突然三相短路后的电流.....	45
二、有阻尼绕组的电机空载情况下突然三相短路后的电流.....	54
第四节 同步发电机在负载情况下突然三相短路的分析.....	60
一、无阻尼绕组电机.....	61
二、有阻尼绕组电机.....	66
第五节 自动调节励磁装置对短路电流的影响.....	69
第三章 电力系统三相短路的实用计算.....	72
第一节 周期电流起始值的计算.....	72
第二节 应用运算曲线求任意时刻短路点的短路电流周期分量.....	82

一、运算曲线的制定	82
二、应用运算曲线计算短路电流的方法	83
第三节 转移阻抗及其求法	87
第四节 异步电动机对短路电流的影响	88
一、起始次暂态电流的计算	89
二、冲击电流的计算	90
第五节 计算机计算复杂网络短路电流周期分量的原理	90
一、等值网络	91
二、用节点阻抗矩阵的计算原理	92
三、用节点导纳矩阵的计算原理	93
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	96
第一节 对称分量法	96
第二节 对称分量法在不对称故障分析中的应用	99
第三节 同步发电机的负序和零序电抗	102
一、同步发电机不对称短路时的高次谐波电流	102
二、同步发电机的负序电抗	103
三、同步发电机的零序电抗	104
第四节 异步电动机的负序和零序电抗	104
第五节 变压器的零序电抗和等值电路	105
一、双绕组变压器	105
二、三绕组变压器	108
三、自耦变压器	109
第六节 输电线路的零序阻抗和等值电路	113
一、单回路架空输电线的零序阻抗	115
二、双回路架空输电线的零序阻抗	117
三、有架空地线的单回路架空输电线的零序阻抗	118
四、有架空地线的双回路架空输电线的零序阻抗	120
五、电缆线路的零序阻抗	121
第七节 零序网络的构成	122
第五章 不对称故障的分析计算	124
第一节 各种不对称短路时故障处的短路电流和电压	124
一、单相接地短路	124
二、两相短路	126
三、两相短路接地	130
四、正序增广网络的应用	138
五、应用运算曲线求故障处正序短路电流	138
第二节 非故障处电流、电压的计算	140
一、计算各序网中任意处各序电流、电压	140
二、对称分量经变压器后的相位变化	140

第三节 非全相运行的分析计算	146
一、一相断线	149
二、两相断线	149
三、应用叠加原理的分析方法	151
第四节 计算机计算程序原理框图	154

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	158
第一节 概述	158
第二节 同步发电机组的机电特性	160
一、同步发电机组转子运动方程	160
二、发电机的电磁转矩和功率	162
三、电势变化过程的方程式	170
第三节 自动调节励磁系统的作用原理和框图	171
一、主励磁系统	172
二、自动调节励磁装置	174
第四节 自动调节转速系统的作用原理和框图	175
一、原动机的特性	175
二、自动调节转速装置	176
第五节 异步电动机组的机电特性	178
一、异步电动机组转子运动方程	178
二、机械负载的转矩	179
三、异步电动机的电磁转矩	179
第七章 电力系统静态稳定	181
第一节 简单电力系统的静态稳定	181
第二节 负荷的静态稳定	183
第三节 小干扰法分析简单系统静态稳定	186
一、小干扰法分析一台机连至无限大系统的静态稳定	186
二、阻尼作用对静态稳定的影响	190
第四节 自动调节励磁系统对静态稳定的影响	194
一、不连续调节励磁对静态稳定的影响	194
二、自动连续调节励磁对静态稳定的影响	197
三、调节励磁对静态稳定影响的综述	204
第五节 多机系统的静态稳定近似分析	205
第六节 提高系统静态稳定性的措施	209
一、采用自动调节励磁装置	209
二、减小元件的电抗	209
三、改善系统的结构和采用中间补偿设备	211
第八章 电力系统暂态稳定	212

第一节	电力系统暂态稳定概述	212
第二节	简单系统的暂态稳定性	213
	一、物理过程分析	213
	二、等面积定则	216
	三、发电机转子运动方程的求解	221
第三节	发电机自动调节系统对暂态稳定的影响	229
	一、自动调节励磁系统对暂态稳定的影响	229
	二、计及自动调节励磁系统作用时的暂态稳定分析	231
第四节	复杂电力系统的暂态稳定计算	239
	一、假设发电机暂态电势和机械功率为常数，负荷为恒定阻抗的近似算法	239
	二、等值发电机	243
第五节	提高暂态稳定性的措施	243
	一、故障的快速切除和自动重合闸装置的应用	243
	二、提高发电机输出的电磁功率	245
	三、减少原动机输出的机械功率	247
	四、系统失去稳定后的措施	247
附录I	同步电机的标么值	251
附录II	常用网络变换的基本公式	255
附录III	短路电流运算曲线	256
参考书目	262

绪 论

电力系统是由发电机、变压器、输电线路、负荷组成的网络，它包括通过电的或机械的方式连在网络中的设备。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）和消费（负荷）电能，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，而是持续地变化，但围绕某一平均值附近的变化是很小的，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》中讲授。

电力系统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；短路故障引起较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，其运动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，故所研究的过程为电磁过程。发电机组调速器中的过程则称为机械过程。如前所述，电力系统受到扰动后，三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计算短路故障后网络中电流、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站中电磁暂态过程的问题，由高电压工程的有关书籍讨论。另外，有关直流输电系统暂态过程，由直流输电的专门书籍讨论。

在学习本课程前学生必须较好地掌握《电路》、《电机学》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)

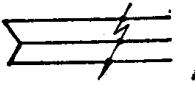
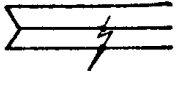
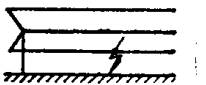
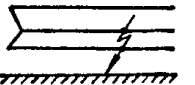
第一章 电力系统故障分析的基本知识

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示出在输电线上发生各种短路的情况。在三相系统中短路的基本类型有三相短路、两相短路、单相短路接地和两相短路接地。三相短路时三相回路依旧是对称的,故称为对称短路;其它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,实际上也可能在不同地点同时发生短路,例如两相在不同地点接地短路。

表 1-1

短 路 种 类	示 意 图	符 号	发生的机率约
三相短路		$f^{(3)}$	5%
两相短路		$f^{(2)}$	10%
单相短路接地		$f^{(1)}$	65%
两相短路接地		$f^{(1,1)}$	20%

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。再如其它电气设备,发电机、变压器、电缆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风、雪等自然现象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，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，导体也受到很大电动力的冲击，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度和机械稳定度（或称动稳定度），使电气设备在通过最大可能的短路电流时不致损坏。

短路还会引起网络中电压降低，特别是靠近短路点处电压下降得最多，结果可能使部分用户的供电受到破坏。图1-1示出一简单供电网络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。

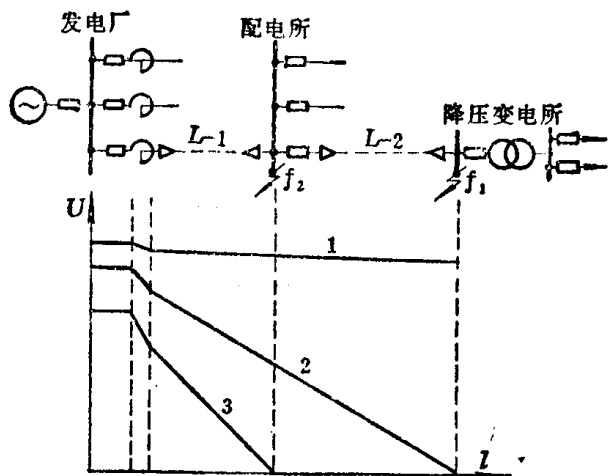


图 1-1 正常运行和短路故障时各点的电压

折线2表示 f_1 点短路后的各点电压的情况。 f_1 点代表降压变电站的母线，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 点时的情形。网络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，使电动机转速慢下来甚至最后完全停转，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网络的结构，必然引起系统中功率分布的变化，发电机输出功率也相应地变化。图1-1中，无论 f_1 或 f_2 点短路，发电机输出的有功功率都要下降。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，不可能立即相应变化，因而发电机的输入功率大于输出功率，发电机的转速将增大，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，产生不平衡磁通，会在邻近的平行的通讯线路内感应出相当大的电势，造成对通讯系统的干扰，甚至危及设备和人身安全。

为了减小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中示出

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它部分隔离。例如在图1-1中 f_1 点短路后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。重合闸就是当短路发生后断路器迅速断开，被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、变电站以及整个电力系统的设计和运行工作中，都必须有短路计算的结果作依据。例如：选择合理的电气结线图；选用有足够热稳定性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；在电力系统中合理地配置各种继电保护并整定其参数等等。为此，掌握短路发生以后的物理过程以及计算短路时的各种运行参量（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和不对称短路的分析计算方法是类似的，在本篇中将一并介绍。

在电力系统中的不同地点（两处以上）同时发生不对称故障的情况，称为复杂故障，本书不作具体介绍。

第二节 标 幺 制

在电力系统故障分析计算中，大多应用标幺制。特别是应用于近似计算方法中，标幺制中各种物理量都用标幺值（即相对值）来表示，使运算步骤简单，数值简明便于分析。

一、标幺值

标幺值的一般数学表达式为：

$$\text{标幺值（相对值）} = \frac{\text{实际值（有单位的物理量）}}{\text{基准值（与实际值同单位）}} \quad (1-1)$$

对于任一物理量均可以标幺值表示。例如电阻、电抗的标幺值分别为：

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

式中 R 、 X 为电阻、电抗的实际值（ 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：

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

式中 P 、 Q 、 S 为有功功率（MW），无功功率（Mvar）和视在功率（MVA）实际值， 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：

$$U = \sqrt{3} Z I; \quad S = \sqrt{3} U I \quad (1-4)$$

式中 U 为线电压， S 为三相功率。如果选定各量基准值满足下列关系：

$$U_B = \sqrt{3} Z_B I_B; \quad S_B = \sqrt{3} U_B I_B \quad (1-5)$$

将式(1-4)除以式(1-5)中的对应项后可得：

$$U_* = Z_* I_*; \quad S_* = U_* I_* \quad (1-6)$$

式(1-6)表明，在标幺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：

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

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

其中 S_B 单位为MVA， U_B 单位为kV。

三、基准值改变时标幺值的换算

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幺值或百分值给出的，而在进行电力系计算时，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幺值换算到统一基准值。

若电抗 X 对应不同的基准值的标幺值分别为：

$$X_{*(B)} = X \frac{S_B}{U_B^2}; \quad X_{*(N)} = X \frac{S_N}{U_N^2} \quad (1-9)$$

式中下标 B 表示统一基准值及其对应的标幺值；下标 N 表示设备额定值以及对应的标幺值。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幺值，可用式(1-10)计算其对应统一基准值的电抗标幺值。

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幺值的关系为：

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

式中 X_T 为变压器电抗的实际值。故变压器转换为统一基准值的电抗标幺值为

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

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 $X_B \%$ 等参数。电抗百分数 $X_B \%$ 与标幺值间关系为

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

换算为统一基准值的标么值为

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

【例题 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, 其电抗标么值为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么值, 并计算电抗的实际值。

解:

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

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

四、变压器联系的不同电压等级网络中各元件参数标么值的计算

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。当用实际值(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参数(如电势和电抗)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, 即得各段的实际值。

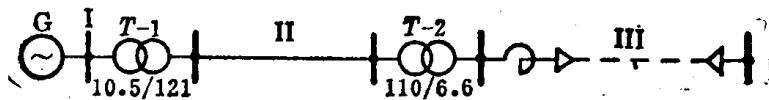


图 1-2 有三段不同电压等级的系统图

用标么值计算时, 也就是在各元件参数的实际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么值的。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, 其它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} 。各元件的电抗标么值计算如下:

1. 发电机 发电机就在基本段, 其电抗实际值不需归算, 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 T-1 它也是在基本段, 其10.5kV侧的电抗实际值也不需归算, 其值为:

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

显然, U_{TN} 为 10.5kV。电抗的标么值为:

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

3. 第 II 段的输电线路 其电抗实际值必须先归算到第 I 段, 即

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

其中 k_1 为变压器变比 (10.5/121)。其标么值为:

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

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 T-2 其 110kV 侧的电抗实际值为:

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

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

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

其标么值为:

$$X_{T*(B)} = X'_T \frac{S_B}{U_{B1}^2} = k_1^2 X_{T*(N)} \frac{U_{TN}^2}{S_{TN}} \times \frac{S_B}{U_{B(1)}^2} = X_{T*(N)} \frac{U_{TN}^2}{S_{TN}} \times \frac{S_B}{U_{B2}^2}$$

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

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

其中 k_2 为变压器 T-2 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

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

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实际值归算至第 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

上面介绍的准确计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网络为例，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，所以其平均值为 $\frac{121+110}{2} \approx 115\text{kV}$ 。第III段 6kV 网络的平均值为 6.3 kV。根据上述假定，在图1-2所示系统中即认为变压器T-1的变比为10.5/115，变压器T-2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10.5千伏，则 U_{B2} 为 115 千伏， U_{B3} 为 6.3千伏，即各段的电压基准值就是各自的平均电压值，发电机，变压器的电抗标么值就不需按电压归算了。

【例题1-2】 计算图1-3 (a) 输电系统的等值电路的参数标么值。

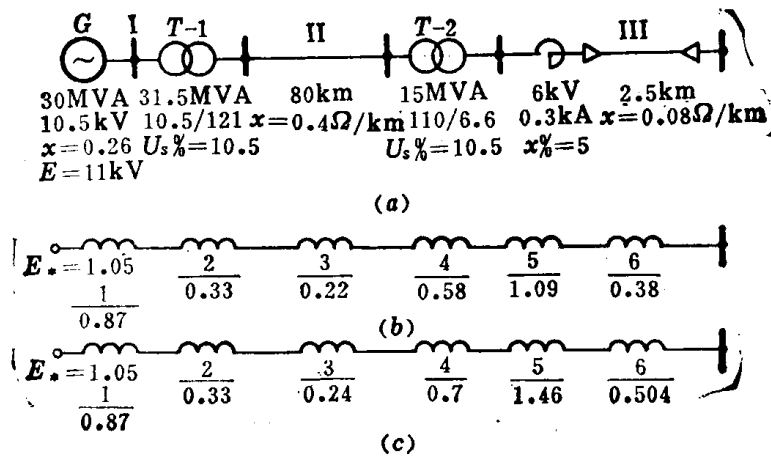


图 1-3 例题1-2计算用图

(a)接线图; (b)准确计算等值电路; (c)近似计算等值电路

解:

(1) 准确计算法

选第II段为基本段，并取 $U_{B2} = 121\text{kV}$, $S_B = 100\text{MVA}$ ，其它两段的电压基准值分别为

$$U_{B1} = k_1 U_{B2} = \frac{10.5}{121} \times 121 = 10.5\text{kV}$$

$$U_{B3} = \frac{U_{B2}}{k_2} = 121 \frac{1}{\frac{110}{6.6}} = 7.26\text{kV}$$

各段的电流基准值为

$$I_{B1} = \frac{S_B}{\sqrt{3} U_{B1}} = \frac{100}{\sqrt{3} \times 10.5} = 5.5\text{kA}$$

$$I_{B2} = \frac{S_B}{\sqrt{3} U_{B2}} = \frac{100}{\sqrt{3} \times 121} = 0.484\text{kA}$$