

电力系统

继电保护原理 与实用技术

江苏省电力公司 编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

电力系统 继电保护原理 与实用技术

江苏省电力公司 编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是总结江苏省电力公司多年培训实践的结果,该书集中了多位专家、教授和现场技术人员的集体智慧,反映了继电保护技术最新应用成果,具有一定的超前性。本书理论联系实际,既有继电保护基础理论,又结合继电保护规程、规定和反措,讲解电网继电保护运行知识;基础理论的编写有别于一般教科书,电网故障分析紧紧围绕继电保护装置展开,为保护动作行为分析提供坚实理论基础;附录的精选典型案例,对综合、灵活应用继电保护各知识点,提高继电保护人员综合分析和解决问题的能力大有裨益。全书共分四篇和一个附录。第一篇电力系统故障分析及其运行:故障分析基础知识、电力系统横向短路故障分析、电力系统纵向不对称故障分析、线路简单故障分析和变压器两侧电气量关系、电力系统稳定和电力系统振荡。第二篇线路保护及重合闸:线路纵联保护、线路距离保护、零序电流方向保护、线路自动重合闸、选相元件。第三篇变压器保护和母线保护:变压器保护、母线保护。第四篇互感器及二次回路:互感器、二次回路、直流系统、二次回路的干扰。附录:继电保护不正确动作案例。

本书可供从事继电保护运行管理、调试、设计、施工、制造等部门的专业人员使用,也可作为发供电单位相关专业管理人员的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统继电保护原理与实用技术/江苏省电力公司
编. —北京:中国电力出版社, 2006
ISBN 7-5083-4205-4

I. 电... II. 江... III. 电力系统-继电保
护-教材 IV. TM77

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 026125 号

中国电力出版社出版、发行

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

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2006年6月第一版 2006年11月北京第二次印刷
787毫米×1092毫米 16开本 38印张 935千字

印数 5001—8000册 定价 70.00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)

编 委 会

主 任：费圣英

副主任：冯 军 黄卫国 马苏龙 葛国平

肖开进

委 员：鲁庭瑞 王培华 甄玉林 顾文银

刘华伟 倪 春 刘金官 顾晓峰

主 编：肖开进 鲁庭瑞

副主编：顾文银 倪 春

参 编：陈月亮 陈懋华 翟学锋 浦南楨

许正亚 洪佩孙 李玉海 王文雄

夏盛铭 曹 良 吴 奕 王 展

严国平 余荣云 卜广金 徐 宁

周 卫 汪 萍 周秀霞 鞠宇平

陈永才 武歌平 余 涛 支叶青

汤大海 季 健 王中元

序 言

在大电网的安全、稳定运行中，继电保护所起到的作用是不言而喻的。因此，不断提高继电保护人员素质和继电保护技术及其装置运行管理水平，是电力企业的一项重要工作。为了体现技术发展现状，给继电保护人员培训提供系统、实用的培训教材，造就一支能力强、业务精、能打硬仗的继电保护专业队伍，江苏省电力公司组织编写了《电力系统继电保护原理与实用技术》一书。

这本书总结多年培训实践的结果，集中了多位专家、教授和现场技术人员的集体智慧，反映了继电保护技术最新应用成果，具有一定的超前性。全书以能力的培养为主，全面提升继电保护、变电运行、调度员等专业人员的技术、技能水平；突出实用性、完整性和先进性，适合集中培训与自主学习。它的出版必将有助于有关电力专业的学习和培训工作，有助于提高电网运行、检修、管理人员应用继电保护基础理论解决生产运行中实际问题的能力，有助于电力系统运行、管理人员以及有关设计、研制人员提高业务素质，从而提高继电保护装置的运行管理水平。

希望通过学习《电力系统继电保护原理与实用技术》，使电网运行、检修岗位涌现出更多专家；更希望通过不断总结经验，不断提高运行、检修水平，为电网安全稳定经济运行作出贡献。

葛立美

前 言

随着社会的发展,人民生活水平的不断提高,社会对电力的依赖程度越来越大。为适应大电网发展的需要,相继出现的超高压电网和大容量机组,使电网结构日益复杂,确保电网安全稳定运行对电力系统继电保护技术和管理水平提出了更高的要求。随着继电保护新技术、新原理、新装置不断出现,继电保护新人员不断补充,迫切需要一本系统阐述继电保护原理与实用技术的培训教材。为适应继电保护形势发展的需要,不断提高继电保护人员素质和继电保护技术及装置的运行管理水平,培养一支高素质的管理队伍和技术队伍,江苏省电力公司组织有关专家和继电保护专业人员编写了《电力系统继电保护原理与实用技术》一书。

本书结合江苏电网继电保护实际,总结归纳多年培训经验,理论联系实际,注重继电保护新技术的应用,充分反映现场继电保护人员需要,体现了“有用、实用”的原则。本书适合从事继电保护运行管理、调试、设计、施工、制造等部门的专业人员,从事电网运行管理的相关专业人员以及发供电单位相关专业运行管理人员使用。

本书注重理论联系实际,既有继电保护基础理论,又结合继电保护规程、规定和反措,讲解电网继电保护运行知识;基础理论的编写有别于一般教科书,电网故障分析紧紧围绕继电保护装置展开,为保护动作行为分析提供坚实的理论基础;附录中的精选典型案例,对综合、灵活应用继电保护各知识点,提高继电保护人员综合分析和解决问题的能力大有裨益。

本书编写过程中得到了江苏省电力公司领导的关心支持,江苏电力调度交易中心、江苏省电力公司人力资源部等有关部室、江苏省电机工程学会继电保护专委会、江苏省电力试验研究院、江苏省电力公司生产技能培训中心、保护装置生产厂家、有关高校等单位的专家、教授以及江苏省电力公司有关继电保护专家、各市供电公司继电保护整定和装置专工参与了编写和审定工作。在本书编写、出版过程中,参与编写和审定工作的专家们以高度的责任感和严谨的作风,一丝不苟,废寝忘食,多次审改才最终定稿。在本书即将出版之时,谨对所有参与和支持本书编写、出版的专家同志们表示崇高的敬意。

由于编者水平有限,错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2005年12月5日

目 录

序言

前言

第一篇 电力系统故障分析及其运行

第一章 故障分析基础知识	2
第一节 概述	2
第二节 标么制	4
第三节 网络化简和电流分布系数	10
第四节 对称分量法应用	13
第五节 电力系统各元件序阻抗及其相应的等值电路	22
第六节 电力系统相序网络组成	49
第七节 电力系统三相短路暂态分析	51
第二章 电力系统横向短路故障分析	57
第一节 三相短路故障分析	57
第二节 两相短路故障分析	62
第三节 单相接地短路故障分析	75
第四节 两相接地短路故障分析	102
第五节 横向短路故障综合特点	119
第六节 发电机匝间短路故障分析	125
第七节 变压器匝间短路故障分析	130
第八节 三绕组自耦变压器公共绕组零序电流和接地中性点电流	133
第三章 电力系统纵向不对称故障分析	146
第一节 纵向不对称故障分析方法	146
第二节 单相断线分析	149
第三节 两相断线分析	158
第四节 单相、两相断线时电气量特点	161
第五节 串联补偿电容保护间隙击穿时的复合序网	163
第六节 单相重合闸的潜供电流	165
第七节 电压互感器回路断线	169
第四章 线路简单复故障分析和变压器两侧电气量关系	174
第一节 线路单相接地一侧先单相跳闸时电气量特点	174

第二节	线路非全相运行健全相单相接地时电气量特点	179
第三节	变压器两侧电流、电压对称分量关系	184
第四节	不对称短路故障时变压器两侧电流、电压相量关系	188
第五章	电力系统稳定和电力系统振荡	198
第一节	电力系统稳定概念	198
第二节	提高电力系统暂态稳定水平的主要措施	202
第三节	电力系统振荡时电气量变化特点	206
第四节	振荡和短路时电气量特点	211

第二篇 线路保护及重合闸

第六章	线路纵联保护	218
第一节	概述	218
第二节	闭锁式纵联距离保护	221
第三节	闭锁式纵联方向保护	234
第四节	允许式纵联保护	239
第五节	纵联电流差动保护	245
第六节	输电线高频通道	249
第七节	纵联保护光纤通道	251
第八节	纵联保护的运行	256
第七章	线路距离保护	262
第一节	概述	262
第二节	以阻抗测量方式构成的距离保护保证进行正确故障测量的措施	273
第三节	阻抗继电器	294
第四节	距离保护在运行中的一些问题	347
第八章	零序电流方向保护	359
第一节	概述	359
第二节	零序功率方向继电器	361
第三节	零序电流方向保护的运行	366
第九章	线路自动重合闸	379
第一节	自动重合闸的作用和要求	379
第二节	自动重合闸的分类与应用	381
第三节	自动重合闸装置的实现	385
第四节	自动重合闸的运行	389
第十章	选相元件	398
第一节	概述	398
第二节	序电流选相	399
第三节	相间电流突变量选相	401
第四节	补偿电压突变量选相	404

第五节 其他原理的选相元件·····	407
--------------------	-----

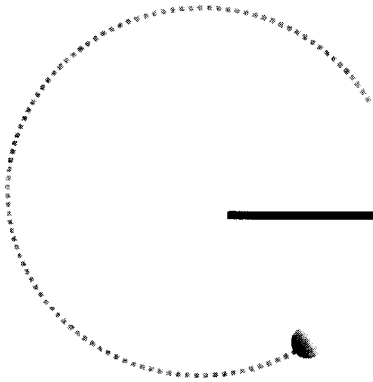
第三篇 变压器保护和母线保护

第十一章 变压器保护 ·····	410
第一节 概述·····	410
第二节 故障量经变压器的传递·····	412
第三节 变压器纵差保护·····	418
第四节 其他差动保护·····	436
第五节 差动保护 TA 断线·····	441
第六节 变压器的后备保护·····	442
第七节 变压器过励磁保护·····	450
第八节 变压器中性点间隙保护·····	453
第九节 三绕组自耦变压器保护的特点·····	455
第十节 非电量保护·····	458
第十一节 零序及负序功率方向元件动作方向正确性检查·····	460
第十二章 母线保护 ·····	468
第一节 概述·····	468
第二节 母线差动保护·····	470
第三节 母联过流及充电保护·····	484
第四节 母联断路器失灵保护及死区保护·····	485
第五节 断路器非全相运行保护·····	486
第六节 断路器失灵保护·····	487
第七节 母线保护的整定计算·····	491

第四篇 互感器及二次回路

第十三章 互感器 ·····	496
第一节 概述·····	496
第二节 电流互感器·····	496
第三节 电压互感器·····	514
第四节 电流—电压变换器·····	524
第十四章 二次回路 ·····	526
第一节 概述·····	526
第二节 断路器的控制回路·····	527
第三节 信号回路·····	537
第四节 微机监控系统中信号功能的实现·····	542
第十五章 直流系统 ·····	545
第一节 直流系统的构成及要求·····	545

第二节	直流系统的绝缘检测	548
第三节	直流系统接地位置的检查	551
第四节	直流系统的其他问题	552
第十六章	二次回路的干扰	555
第一节	概述	555
第二节	干扰信号的分类	555
第三节	干扰电压的来源	556
第四节	二次回路抗干扰措施	559
附录	继电保护不正确动作案例	563
附录一	辅助触点切断跳闸电流引起干扰误跳三相	564
附录二	辅助触点切断合闸电流引起干扰误跳三相	567
附录三	若干起主变压器重瓦斯保护误动跳闸	569
附录四	电流回路两点接地引起的事故	573
附录五	运行人员操作不当引起 500kV 主变压器跳闸	575
附录六	110kV 变电所内桥备投拒动	577
附录七	220kV 线路单相故障误跳三相	579
附录八	主变压器空投时差动保护误动	582
附录九	线路高频保护误动与异常	586
附录十	寄生回路造成保护误动	594
参考文献		596



第一篇

电力系统故障分析 及其运行



第一章

故障分析基础知识

第一节 概 述

一、故障的概念

电力系统的故障一般分为简单故障和复合故障。简单故障指的是电力系统正常运行时某一处发生短路或断相故障的情况，而复合故障则是指两个或两个以上简单故障的组合。

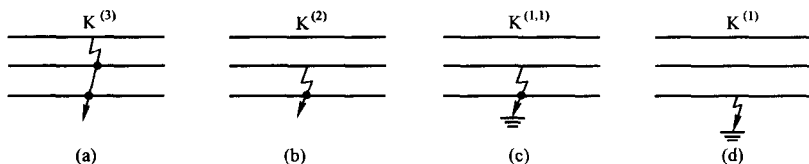


图 1-1 短路故障类型

(a) 三相短路；(b) 两相短路；(c) 两相接地短路；(d) 单相接地短路

短路故障（横向故障）指的是电力系统正常运行情况以外相与相之间或相与地之间的短路，图 1-1 示出了三相系统中短路故障的类型。(a) 为三相短路，用符号 $K^{(3)}$ 表示；(b) 为两相短路，用符号 $K^{(2)}$ 表示；(c) 为两相接地短路，用符号 $K^{(1,1)}$ 表示；(d) 为单相接地短路，用符号 $K^{(1)}$ 表示。其中三相短路为对称短路，其余为不对称短路。

引起短路故障的主要原因是各种形式的过电压，绝缘材料自然老化、脏污，直接机械损伤造成电气设备载流部分的绝缘损坏。线路对树枝放电、大风引起的碰线、鸟兽、树枝等物掉落在导线上以及雪、雹等自然现象也能引起短路故障。此外，运行人员带负荷拉隔离开关或检修线路后忘拆除地线就加上电压等误操作也是引起短路故障的原因之一。大量的运行实践表明，短路故障中单相接地最多，相间短路较少。

断相故障（纵向故障）是指一相或两相断开的非全相运行状态。线路单相接地短路时，两侧故障相断路器跳闸；断路器合闸过程中三相触头不同时接通；断路器一相或两相偷跳、偷合；输电线一相或两相断线等均会造成非全相运行。非全相运行时，系统处于不对称状态。

二、线路故障的分析

大量统计资料表明，高压电网的短路故障中，线路故障约占 90% 左右，母线、变压器和高压配电装置等故障约占 10%。对于线路 (220kV) 故障，某电力系统 20 年的统计数字如下：

单相接地短路	510 次 (87.9%)
两相接地短路	34 次 (5.8%)

两相短路	8次 (1.4%)
三相短路	11次 (1.9%)
断线	8次 (1.4%)
转换性故障	4次 (0.7%)
非全相运行中又发生单相接地短路	5次 (0.9%)

可以看出, 线路短路故障中单相接地短路占绝大多数, 所以线路短路故障开始发生时, 绝大多数的故障可能是单相接地, 考虑到故障常具有转变扩展性质, 单相短路故障很容易发展为多相短路故障。从这点出发, 缩短故障切除时间, 可避免多相短路故障对电力系统造成的严重影响, 并使单相重合闸充分发挥作用; 同时, 缩短故障切除时间, 也可减轻故障点设备的损伤程度, 提高系统的暂态稳定性。

两相接地短路故障比单相接地短路故障少得多, 但比三相短路故障多, 这合乎故障发展的特点。上述统计资料表明, 对中性点直接接地的高压电力系统, 单相和两相接地的短路故障占了绝大多数, 所以反应接地短路故障的保护担负着十分重要的任务, 任何情况下, 应保证反应接地短路故障的保护有较好的性能并可靠投入运行。

三相短路故障有两种类型: 第一种是发展性三相短路, 由单相、两相故障发展为三相短路故障。应当指出, 大多数三相短路故障属于这种类型, 在短路初瞬电力系统是不对称的; 此外, 发展为三相短路故障的时间不是固定的, 有长有短。第二种是三相同时性的对称短路, 主要由雷害造成。例如当线路杆塔接地电阻较大、架空地线保护耐雷水平较低而雷击架空地线时, 塔顶电位突然升高, 大大超过绝缘子的绝缘强度, 其结果是向三相导线闪络, 造成三相短路。当然, 这种情况较多在山区线路上发生, 因为山区线路的杆塔位置多选择在山顶或山坡比较高耸的地方, 容易遭受雷击。另外, 断路器三相触头同时接通情况较好时, 合闸送电于忘拆接地线的输电线也表现为三相同时性对称短路, 在三相同时性对称短路时, 电力系统一直处于对称状态。

运行实践表明, 三相短路故障比两相短路故障多, 占有一定比例, 且三相短路故障对电力系统影响最严重。所以, 对三相短路故障应予足够重视。

两相短路故障, 发生原因较为特殊, 所以所占比例较小。如大风造成的导线异常摆动, 在两相导线摆动靠近时引起闪络, 发生两相短路。这种短路故障的特点是, 只有保护动作迅速时才能跳闸, 如保护运作时间较长或短路电流较大的一侧先跳闸后, 故障可能自行消除。此外, 这种故障会连续发生, 有时一天内一条线路会连续发生多次。船桅与过江导线相碰, 飞机与导线相碰, 换位杆塔上连接两不同相的绝缘子间发生闪络, 阻波器引线烧断等均会引起两相短路故障。如不迅速切除, 两相短路故障可能发展为两相接地短路或三相短路故障。

装设单相重合闸的线路发生单相接地短路时, 在两侧断路器跳闸后, 线路处于非全相运行过程中, 健全相仍然可能发生单相接地故障。在设计保护和考虑单相重合闸时, 应注意这一故障情况。

在分析短路故障时, 还应注意如下三点:

第一是故障的转换性。所谓转换性故障, 指的是在短时间内, 一种故障转换为另一种性质不同的故障。如 A 相接地后, 由于雷害, 短时间内 B 相又发生接地。有时可能出现 A 相接地后, 发展为 AB 相短路而接地消失的现象。也有可能故障开始时是两相短路, 短时间内转换为两相接地短路。在分析短路故障时, 应充分注意转换性故障的特点。

第二是故障的重复性。输电线路发生故障，在重合闸成功的短时间内，在同一地点又发生故障的可能性较大，尤其是大气条件恶劣的情况下更是如此。

第三是故障点的过渡电阻。过渡电阻由弧光电阻和过渡物电阻组成。对相间短路故障来说，过渡电阻主要是弧光电阻。对接地短路故障来说，过渡物电阻是接地电阻。接地电阻比弧光电阻要大得多，一般可将弧光电阻忽略而只计接地电阻。对接地电阻可作如下说明：

(1) 杆塔上因绝缘子闪络而发生的接地短路故障，接地电阻是杆塔本身的接地电阻，如有架空地线，则是架空地线并联杆塔接地电阻的综合值。

(2) 输电线直接对树枝、竹杆、农作物等放电引起的接地短路故障或带电导线断落于接地电阻很大的石头、建筑物或其他物体上，这种短路故障的接地电阻较大，可达几十欧姆甚至数百欧姆。

所以，在分析接地短路故障时，不应忽略接地电阻的影响。通常在继电保护中，考虑短路点接地电阻值：220kV 线路为 100Ω ，330kV 线路为 150Ω ，500kV 线路为 300Ω 。

三、短路的现象及后果

电力系统发生短路时，因系统的总阻抗要减小，所以故障回路的电流剧烈增加，同时伴随着电压大幅度降低，特别是靠近短路点的母线电压降得更低，甚至为零（如三相短路）。

短路的后果是破坏性的，表现在以下几个方面：

(1) 短路电流的热效应可能使设备过热而损坏，特别是短路点电弧会烧坏电气设备，短路电流的电动力效应也可能使设备受到破坏。

(2) 系统电压大幅度降低，影响用户的正常工作，甚至使电动机停转、用电设备断电等。

(3) 短路是对电力系统的一个严重冲击，可能使并列运行的发电厂失去同步，破坏系统稳定运行，引起大面积停电的严重后果。

(4) 不对称接地短路的零序电流所产生的零序磁通会干扰附近的通信线路。

由上述可见，短路故障的后果是严重的，所以分析研究短路故障，对电力系统安全可靠运行有着重要的现实意义。对继电保护和自动装置来说，分析短路故障就更必要了。

四、故障分析的基本假设

在满足一般工程要求的前提下，采取一些合理的假设分析故障是必要的，以便略去次要因素，突出主要问题，简化分析。电力系统故障分析的基本假设如下：

(1) 不计磁路饱和、磁滞的影响。这样系统中各元件的参数是恒定的，可以应用叠加原理。

(2) 系统是三相对称系统。不对称仅存在于不对称故障处，因而应用对称分量法时，可将各序的网络用单相等值电路进行分析。

(3) 各元件序参数的阻抗角可认为相等，进而可认为系统综合序阻抗的阻抗角相等。

(4) 在进行短路电流大小计算时，一般可略去各元件的电阻。

(5) 负荷只作近似估计，或作为恒定阻抗，或当作临时附加电源，视情况而定。

第二节 标 么 制

在短路故障分析中，可以用有名值进行计算分析，如电压单位用 kV、电流单位用 kA、

阻抗单位用 Ω 、功率单位用 W 等。实际工程计算中，常采用标么值进行计算分析，使计算过程简化，这称为标么制。

一、标么值

标么值就是各物理量对基准值的相对数值，是无单位的，其表示式为

$$\text{标么值} = \frac{\text{有名值(任意单位)}}{\text{基准值(与有名值同单位)}}$$

在短路故障分析中，常用到的电气物理量有 U 、 I 、 Z 、 S ，其基准值分别为 U_B 、 I_B 、 Z_B 、 S_B ，于是标么值为 $U_* = U/U_B$ 、 $I_* = I/I_B$ 、 $Z_* = Z/Z_B$ 、 $S_* = S/S_B$ 。

二、三相系统基准值选取

(一) 同一电压级中的基准值

在标么制中，基准值的选取是重要的。在三相系统中， U_B 、 I_B 、 Z_B 、 S_B 有如下关系

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

$$U_B = \sqrt{3} I_B Z_B \quad (1-2)$$

式中 U_B 、 I_B ——线电压、线（相）电流的基准值；

Z_B ——每相阻抗的基准值；

S_B ——三相容量的基准值。

在上述四个基准值中，由于存在式（1-1）、式（1-2）的关系，所以只要选取两个基准值，通常是 S_B 和 U_B ，其余两个基准值也就随之确定了，如下式所示

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

$$Z_B = \frac{U_B}{\sqrt{3} I_B} = \frac{U_B^2}{S_B} \quad (1-4)$$

S_B 和 U_B 的选取，原则上可以是任意的，但为了计算的方便，一般 S_B 选取某一发电厂的总容量或系统总容量（较多选取 100MVA 或 1000MVA）。对于 U_B 可以选取该电压级的额定电压，但在故障分析中，通常选取的是该电压级的平均额定电压 U_{av} 。各电压级的平均额定电压如表 1-1 中所示（ U_N 为电网额定电压）。例如，110kV 级， $U_B = 115kV$ ；220kV 级， $U_B = 230kV$ 。对于发电机，电压级的基准电压取发电机的额定电压。

表 1-1 各电压级的平均额定电压

$U_N(kV)$	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

当基准值选定后，各电气量的标么值可作如下计算

$$S_* = S/S_B \quad (1-5)$$

$$U_* = U/U_{av} \quad (1-6)$$

$$I_* = \frac{I}{I_B} = \frac{I}{\frac{S_B}{\sqrt{3} U_{av}}} = \frac{\sqrt{3} U_{av} I}{S_B} \quad (1-7)$$

$$Z_* = \frac{Z}{Z_B} = Z \frac{S_B}{U_{av}^2} \quad (1-8)$$

注意，式(1-5)中的 S 应为三相容量，如是单相容量，则 S_B 也应为单相容量基准值；式(1-6)中的 U 应为线电压，如是相电压，则 U_{av} 也应为相电压基准值。

(二) 不同电压级基准值间关系

电力系统中存在不同电压级的线路段，由升压变压器或降压变压器相耦联，并且这些变压器的变比一般是不等的。在故障分析中，为了方便，可假设系统中所有变压器的变比等于两侧平均额定电压之比（这样假设，误差在工程允许误差范围内）。在图1-2中，变压器变比为 U_{av1}/U_{av2} 。不



图1-2 变压器两侧基准值间关系

同电压级通过变压器耦联着，所以两侧的基准值有着一定的关系。

由于功率通过变压器不会发生变化，所以电力系统中基准容量选定后，各电压级的基准容量也随之确定下来并等于选定的基准容量。在图1-2中， $S_{B1} = S_{B2} = S_B$ ；基准电压当然1侧是 U_{av1} ，2侧是 U_{av2} 。由于 S_B 、 U_B 确定下来，1侧和2侧的 I_{B1} 、 Z_{B1} 及 I_{B2} 、 Z_{B2} 根据式(1-3)、式(1-4)可确定

$$I_{B1} = \frac{S_B}{\sqrt{3}U_{av1}} \quad (1-9)$$

$$Z_{B1} = \frac{U_{av1}^2}{S_B} \quad (1-10)$$

$$I_{B2} = \frac{S_B}{\sqrt{3}U_{av2}} \quad (1-11)$$

$$Z_{B2} = \frac{U_{av2}^2}{S_B} \quad (1-12)$$

如有更多的电压级，情况也是相同的，即基准容量仍为 S_B ，各电压级的电压基准值仍为该级的平均额定电压。

各电压级的 S_B 、 U_B 确定后，根据式(1-5)~式(1-8)可求得各电压级电气量的标么值，需注意的是电压基准值要采用元件所处电压级的平均额定电压。

三、电力系统各元件阻抗标么值计算

电力系统中各元件阻抗标么值在同一基准容量 S_B 下才有意义。

(一) 发电机

通常给出 S_N (MVA)、 U_N (kV)和 X''_d (或 X'_d 、 X_d 、 X''_q)。给出的 X''_d 是以本发电机额定阻抗为基准值的标么值（其他电抗值情况相同），为此将 X''_d 写成 $X''_{*(N)}$ 。为了折算到选定的基准容量 S_B ，首先应求出电抗的实际有名值： $X''_{*(N)} \times \frac{U_N}{\sqrt{3}I_N} = X''_{*(N)} \frac{U_N^2}{S_N}$ 。而基准阻抗为

$Z_B = \frac{U_{av}^2}{S_B}$ ，于是折算到 S_B 的发电机阻抗标么值为

$$X''_{*(B)} = X''_{*(N)} \left(\frac{U_N}{U_{av}} \right)^2 \frac{S_B}{S_N} \quad (1-13)$$

考虑到发电机总处在额定电压附近运行，可取 $U_N = U_{av}$ ，于是式(1-13)改写为

$$X''_{*(B)} = X''_{*(N)} \frac{S_B}{S_N} \quad (1-14)$$

(二) 变压器

通常给出 S_N (MVA)、 U_N (kV) 和 $U_k\%$ ，而短路电压 $U_k\%$ 即是变压器阻抗对额定阻抗的标么值，考虑到变压器的 U_N 与 U_{av} 差别不大 (取 $U_{av} = U_N$)，所以有

$$X_{T*(B)} = U_k\% \frac{S_B}{S_N} \quad (1-15)$$

比较式 (1-14) 和式 (1-15)，变压器和发电机具有相同的阻抗标么值计算公式。在同一 S_B 和 $X''_{*(N)}$ 、 $U_k\%$ 下，发电机、变压器容量愈小，相应的阻抗标么值愈大；反之，容量愈大，阻抗标么值愈小。

对于三绕组变压器，设高、中、低三侧分别以 1、2、3 表示，如将各绕组两两看成一个双绕组变压器，令各绕组两两间的短路电压分别为 $U_{k(1-2)}\%$ 、 $U_{k(1-3)}\%$ 、 $U_{k(2-3)}\%$ ，则可求得各绕组的短路电压为

$$\left. \begin{aligned} U_{k1}\% &= \frac{1}{2} [U_{k(1-2)}\% + U_{k(1-3)}\% - U_{k(2-3)}\%] \\ U_{k2}\% &= \frac{1}{2} [U_{k(1-2)}\% + U_{k(2-3)}\% - U_{k(1-3)}\%] \\ U_{k3}\% &= \frac{1}{2} [U_{k(2-3)}\% + U_{k(1-3)}\% - U_{k(1-2)}\%] \end{aligned} \right\} \quad (1-16)$$

于是，由式 (1-15) 求得各绕组的等值阻抗标么值为

$$\left. \begin{aligned} X_{T1*(B)} &= U_{k1}\% \frac{S_B}{S_N} \\ X_{T2*(B)} &= U_{k2}\% \frac{S_B}{S_N} \\ X_{T3*(B)} &= U_{k3}\% \frac{S_B}{S_N} \end{aligned} \right\} \quad (1-17)$$

升压结构和降压结构的三绕组变压器，虽然绕组的排列次序不同，但等值电路是完全相同的。只是升压结构的三绕组变压器低压绕组在中间（高压绕组在外层，中压绕组在里层），故 $U_{k(1-2)}\%$ 较大而已；同样，降压结构的三绕组变压器中压绕组在中间（高压绕组在外层，低压绕组在里层），故 $U_{k(1-3)}\%$ 较大，排在中层的绕组，其等值电抗较小或具有不大的负值。

三绕组自耦变压器的等值电路完全和三绕组变压器相同，只是因为自耦变压器第三绕组的额定容量 S_{N3} 总是小于变压器的额定容量 S_N ，所以短路电压要归算到额定容量（三绕组变压器的 $U_k\%$ 制造厂家已归算到额定容量），如下式所示

$$\left. \begin{aligned} U_{k(1-3)}\% &= U'_{k(1-3)}\% \frac{S_N}{S_{N3}} \\ U_{k(2-3)}\% &= U'_{k(2-3)}\% \frac{S_N}{S_{N3}} \end{aligned} \right\} \quad (1-18)$$

其中“'”表示未归算值。然后按三绕组变压器的公式求出其阻抗标么值。

分裂绕组变压器，可有效限制发电机电压系统和厂用电系统的短路电流。一般分裂绕组变压器有一个高压绕组（标号为 1）、两个相同的低压（分裂）绕组（标号为 2、3），其短路阻抗 $X_{k(1-2)}$ 、 $X_{k(1-3)}$ 、 $X_{k(2-3)}$ [或短路电压 $U_{k(1-2)}\%$ 、 $U_{k(1-3)}\%$ 、 $U_{k(2-3)}\%$ ，可将短路电压