



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

XIANDAI GAOYA DIANWANG
JIDIAN BAOHU YUANLI

现代高压电网 继电保护原理

李晓明 著



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>



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

TM77/33

2007

XIANDAI GAOYA DIANWANG
JIDIAN BAOHU YUANLI

现代高压电网 继电保护原理

李晓明 著
徐丙垠 杜松怀 主审



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

Electrical Engineering

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书是一本涉及电力系统高压电网继电保护工作原理的书。用简明的语言演绎继电保护深刻的基本思想和基本原理，各种继电器的分析都有详细的推导过程，既是教材，又是一本理论专题著作。本书分为上、下两篇，共十二章。上篇主要内容包括：继电保护基本任务、电力系统故障分析、相量图分析法、阻抗继电器、距离继电器、工频突变量测量原理。下篇主要内容包括继电保护基本要求、反应单端电气量的线路保护、反应两端电气量的线路保护、自动重合闸、变压器保护、母线保护。

本书可作为高等学校本科生和研究生的教材和参考书，也可供有继电保护理论基础继电保护专业技术人员阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代高压电网继电保护原理/李晓明著. —北京: 中国电力出版社, 2007

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 5555 - 9

I. 现... II. 李... III. 高压电力系统—继电保护—高等学校—教材 IV. TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 074553 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

*

2007 年 10 月第一版 2007 年 10 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 14.5 印张 352 千字
定价 23.00 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

本书承蒙中国电力出版社推荐，教育部组织专家评审，教育部批准，作为普通高等教育“十一五”国家级规划教材出版。

本书有以下特点：

(1) 注重继电保护与电路、电力系统故障分析等基础课程的传承关系，把继电保护测量原理与三相电路分析紧密联系，使继电保护有巩固的理论基础。

(2) 详细讨论了电力系统电压相量图的作图方法。用电压相量图分析距离继电器动作行为的概念更清楚，步骤更简便。电压相量图不仅可以用于分析距离继电器动作行为，还是研究电力系统故障量变化规律的有效手段。

(3) 用阻抗继电器与距离继电器分类的新方法组织距离保护测量元件的内容，明确了测量阻抗与阻抗继电器的关系，直接阻抗与距离继电器的关系；使阻抗继电器与距离继电器的理论分析更有条理、更系统。

(4) 提出了相差电流、继电器动作判据反差特性、电势分解法等新概念，提出了一系列继电保护新判据，丰富了继电保护内容。弘扬创新精神，开拓科研思路，提供了一些科研创新案例。

(5) 把继电保护各种测量元件集中到本书前六章，根据测量元件的工作原理分类讲解。这样，有利于读者掌握继电保护测量元件的共性，把握测量元件的分析方法。由于继电保护测量元件的工作原理、分析方法已经在本书前六章讲解，第七章至第十二章就可以集中讨论保护工作原理自身的内容，集中注意力于保护逻辑关系。

(6) 按速动段保护、延时速动段保护、后备保护来讲解反应单端电气量的线路保护，突出了三段式继电保护的精髓。

(7) 突出了“延时”这个非常重要的继电保护概念与技巧，展示了“延时”平衡继电保护四项基本要求的独特作用。

(8) 根据国家标准 GB/T4728.7—2000 序号 07-16-11，与序号 07-17-04 的说明，采用标准和通用的名词“延时”、“反延时”、“定延时”，替换“时限”、“反时限”、“定时限”。

本书汲取了作者二十多年来的教学经验与科研成果。在多年的教学和研究中，作者受到许多师长的教诲和恩泽，得到许多同事的鼓励与帮助，得到学生的信任与鞭策，得到许多朋友的爱护与支持。本书吸收了国内外继电保护同行的教学经验与科研成果。参考文献列举了部分资料，篇幅所限，不能一一列举。本书的写作得到王葵副教授的鼓励与支持。研究生周春生、李艳丽帮助绘制本书前六章的插图、帮助校对和修改前六章的文字打印错误。在此，一并致以衷心的感谢！

由于作者水平所限，书中难免有不妥和错误，恳请读者批评指正。

作者于山东大学

2007年5月

目 录

前言

上篇 故障分析与测量原理

第一章 继电保护基本任务	1
第二章 电力系统故障分析	4
第一节 电力系统数学模型	4
第二节 三相系统的等值变换	7
第三节 短路故障的分析	14
第四节 断线故障的分析	18
第五节 复杂故障的分析	23
第三章 相量图分析法	30
第一节 复数分式的轨迹	30
第二节 故障处 \dot{U}_{kA} 、 \dot{U}_{kB} 、 \dot{U}_{kC} 的相量	33
第三节 母线电压与补偿电压的相量	39
第四节 电压相量图的应用	42
第五节 电动势分解法	46
第四章 阻抗继电器	52
第一节 阻抗继电器的基本概念	52
第二节 阻抗继电器的动作方程	52
第三节 阻抗继电器的接线方式	60
第四节 一次系统对测量阻抗的影响	62
第五章 距离继电器	76
第一节 距离继电器的基本概念	76
第二节 正序电压极化的距离继电器	78
第三节 两极化量的距离继电器	83
第四节 三极化量的距离继电器	86
第五节 多相补偿接地距离继电器	89
第六节 多相补偿相间距离继电器	94
第六章 工频突变量测量原理	103
第一节 工频突变量的一般理论	103
第二节 工频突变量相差电流选相元件	106
第三节 工频突变量距离继电器	108
第四节 工频突变量方向继电器	110
第五节 负序分量与零序分量构成的距离继电器	116
第六节 工频突变量相位纵联保护	119

下篇 保护原理与方式结构

第七章 继电保护基本要求	121
第八章 反应单端电气量的线路保护	128
第一节 速动段保护	128
第二节 延时速动段保护	134
第三节 后备段保护	139
第四节 双侧电源线路的电流保护问题	147
第五节 中性点非有效接地电网的单相接地保护	152
第六节 方式结构与技术措施	157
第九章 反应两端电气量的线路保护	176
第一节 概述	176
第二节 纵联保护基本原理	176
第三节 信息通道	179
第四节 方式结构与技术措施	186
第十章 继电保护扩展功能	197
第十一章 变压器保护	205
第一节 变压器差动保护	205
第二节 励磁涌流的影响及技术措施	208
第三节 变压器气体保护	211
第十二章 母线保护	213
第一节 母线差动保护	213
第二节 断路器失灵保护	218
后记	220
参考文献	224

上篇 故障分析与测量原理

第一章 继电保护基本任务

电力是能量的一种表现形式。由于电能具有转换容易、输送方便、控制灵活以及洁净、经济等优点,已经成为工业、农业、国防、交通等部门不可缺少的动力,成为改善和提高人们物质文化生活的重要因素。

发电机、变压器、母线、输电线路以及用电设备按一定方式连接起来,构成电能的生产、输送、分配和使用,称之为电力系统。保证电力系统的安全运行,对国民经济有着至关重要的意义。由于自然环境、制造质量、运行维护水平以及人为操作不当等方面的原因,电力系统中的各种电气设备在运行中不可能一直保持正常状态。因此,需要为电力系统和电力系统中的各电气设备建立一个安全保障体系。电力系统安全自动装置,如自动重合闸、备用电源和备用设备自动投入、自动低频减载、电气制动及自动解列等,负责电力系统的整体安全。继电保护负责电力系统中各电气设备的安全。

电力系统的运行状态可分为三种:正常运行状态,不正常运行状态,故障状态。

当电力系统处于正常运行状态时,电力系统与各电力设备中的电流在设定的路径中流动;电力系统中所有电力设备的电气参数都在规定范围内;电力系统电能质量符号规定要求;电力系统结构有较高的可靠性;电力系统经济运行。

电力系统与各电力设备中的电流在设定的路径中流动,电力系统中某些电力设备的某些运行参数偏离规定范围,称为不正常运行状态。例如:①用电设备增加,使供电设备的负载超过额定值。②系统的电能储备不足,系统的负荷量过大,造成系统频率低于正常值。③无功分布不合理而造成的过电压等。由于供电设备和用电设备在设计时,都考虑了一定的安全系数,这些设备处于不正常运行状态时,不会马上造成设备的损坏。但是,如果电力设备长期工作在不正常运行状态,设备长期处在危险的边界,随着时间的积累,将缩短设备的使用寿命,或者发展成故障状态直接损坏设备。

电力系统或电力设备中的电流没有按设定的路径流动,电力设备的运行参数异常,称为故障状态。最严重和最常见的电气设备故障是各种短路故障,主要的短路形式有三相短路、两相短路、两相短路接地、单相接地短路。充分认识短路对电气设备和电力系统的危害,对继电保护工作是十分必要的。当电气设备发生短路时可能产生以下后果:

1) 短路电流流过故障点,引燃电弧,使故障设备烧毁。

2) 强大的短路电流不论流过故障还是非故障的电气设备时,都将引起发热现象,使电气设备过热损坏。任何一台电气设备都有电阻 R 存在,即使具有良好导电特性的铜导线也不例外。当电流流过电阻 R 时,将做功产生热量 $W = RI^2t$ (J)。短路电流很大,经过一段时间,电气设备将因为温度的升高而损坏或缩短使用寿命。

3) 强大的短路电流流过故障和非故障的电气设备时,电动力可能使电气设备产生机械变形而损坏。根据电磁场理论,通电导体的周围将产生磁场,磁场的大小与通电导体流过的电流成正比。当磁场中有另一通电导体存在时,两通电导体将产生相互作用力,作用力的

小与通电导体的电流大小成正比，与磁场强度成正比。可见，强大的短路电流将在绕组之间产生强大的机械力，使电气设备机械受损，扭曲变形。

4) 造成电能质量严重恶化，影响电力用户的正常生产，损害用户的产品质量。电能质量包含电压质量、频率质量和波形质量三个方面。发生短路时，短路点周围地区的电网电压严重低于正常值，将引起电动机转速的下降或停止，引起用户动力设备功率不足不能正常工作，直接造成用户产品的损坏。

5) 破坏电力系统的稳定性，引起发电机失步，甚至造成整个电力系统瓦解。由于电能不能储存，必须保持电能生产、输送、消费流程的平衡和连续性。电力系统发生短路，就打破了这种平衡。局部地区的电能过剩，另一局部地区的电能不足，电能过剩地区的发电机转子将加速，电能不足地区发电机转子减速，引起发电机失步，处理不当将造成整个电力系统的瓦解。

为了保护电力系统中的电力设备，继电保护的任务是：

1) 当电力设备正常运行时，继电保护装置不动作。

2) 当电力设备不正常运行时，保护该设备的继电保护装置发出告警信号，通知值班人员处理，使电力设备尽早恢复正常运行。当然，也可由自动装置代替人工处理。

3) 当电力设备故障时，保护该设备的继电保护装置在保证可靠性的前提下，尽可能快地给离故障设备尽可能近的断路器发出跳闸指令，把故障设备从电力系统中切除出去，避免电力设备的受损，尽可能缩小停电范围，保证其余电力系统继续安全运行。

实现上述任务的措施和装置统称为继电保护。电力系统继电保护还可通俗地表述为：用具有继电特性的自动化装置与相应的措施对电力系统中的各种电力设备实施保护的一门技术。

继电保护技术是一个庞大的体系，它主要由电力系统故障分析、继电保护原理、继电保护装置的设计与制造、继电保护装置的配置与定值的整定计算、继电保护装置的运行维护与管理、继电保护各种数据的统计与分析等构成。在继电保护这个庞大体系中，从电力系统电气量中获取故障信息并作出相应判断是最基础的工作。因此，电力系统故障分析和继电保护原理是继电保护的理论基础。

从继电保护的基本任务可知，继电保护就是要从电力系统的电气量中分辨出电力系统处于下列状态中的那一种：①正常运行状态；②不正常运行状态；③故障状态。如果是不正常运行状态，需要进一步了解不正常运行的性质和程度如何。如果是故障状态，需要进一步判断出故障的种类、位置等。获得的故障信息越多，越详细，越有利于继电保护作出正确与精密的判断。但是，要获得更多和更精细的信息，就需要更多高技术含量的设备，反而增加了出错误的环节，达不到继电保护可靠性要求。信息量的增多与精细，传输和处理这些信息将变得更为困难和复杂。增加处理信息的时间，可能影响继电保护速动性。因此，继电保护要考虑各方面的要求，平衡各方面的矛盾，达到满足工程需求的折中效果。不可强调某一方面的要求，而忽视其他方面的要求。例如：电压等级较低的线路，对电力系统全局影响较小，可选用信息量较少的电流保护。电压等级高一点的线路，对电力系统影响稍大，选用稍复杂一点的距离保护。超高压线路，对电力系统稳定性影响大，就要采用纵联保护。

继电保护的输出只有动作和不动作两种状态。例如，区内短路时，距离继电器动作；区外短路时，距离继电器不动作。正方向短路时，方向继电器动作；反方向短路时，方向继电器不动作。因此，继电保护作出动作的信息特征与作出不动作的信息特征要有尽可能大的反差。例如，比较相位原理的距离继电器在区外故障时，距离继电器极化量与工作量之间的夹

角为 0° ；区内短路时，距离继电器极化量与工作量之间的夹角为 180° 。短路点从区外向区内移动时，距离继电器工作量在临界点将发生 180° 的突然变化。因此，该距离继电器动作判据有优良的反差特性。动作判据有大的反差，可以提高判断速度，缩短继电保护动作时间，并可以获得比较强的抗干扰能力。否则，理论上可以区分两种故障状态，但实践中，稍有干扰信号的侵入，两种状态的分界就模糊了，继电保护不能做出正确和及时的判断。因此，继电保护动作判据的反差特性是衡量继电保护动作判据优劣的重要指标。继电保护动作判据的反差特性足够好时，继电保护作出的判断才可靠，才有实用价值。

第二章 电力系统故障分析

第一节 电力系统数学模型

电力系统由发电机、变压器、母线、输电线路等电力设备组成,是一个非常庞大和复杂的物理系统。对电力系统进行故障分析,首先要用数学的方法把这个系统描述出来,即建立电力系统的数学模型。但是,任何一种数学方法都无法把一个实际的物理系统准确无误地描述出来,电力系统的数学模型只能是实际电力系统在某些假设条件下的近似描述。愈逼真地反映物理系统,数学模型就愈复杂。数学模型愈复杂,理论分析就愈困难。因此,满足精确度要求的前提下,简化电力系统数学模型是十分需要的。模型取得恰当,既简化了理论分析过程,分析和计算结果又与实际情况接近。然而,模型也不能取得过于简化,忽略的因素过多,就不足以反映所需了解的真实情况,分析和计算结果会产生很大误差,有时甚至导致自相矛盾的结果。因此,如何构建电力系统数学模型是一件很重要的工作。

电力系统故障分析数学模型的繁简,要根据解决问题的性质决定。通常是在满足工程要求的条件下,采取一些合理的假设,略去次要因素,突出主要矛盾。先解决主要矛盾,后解决次要矛盾;先解决普遍的、共有的矛盾,后解决特殊的、个别的矛盾。在分析继电保护的動作行为时,首先考察该继电保护在简单的电力系统模型中的動作行为。只有在简单在电力系统模型中该继电保护有满意的動作特性,再考虑电力系统其他因素对该继电保护的影响。电力系统故障分析一般按以下几个层次逐步深入进行。

(1) 两侧电动势相等的双侧电源电力系统;电力系统各电气参数三相对称;电力系统各阻抗角相等(或者各阻抗角都是 90°);线路发生金属性短路。

线路保护在这样简化的电力系统中,必须具有良好的動作性能。

(2) 考察过渡电阻对线路保护的影响。输电线路发生纯金属性短路(如带地线合闸)的机率是很少的,大多数的短路在故障点有过渡电阻。相间短路往往是相与相经电弧放电形成的,其过渡电阻由电弧电阻构成。如果接地短路是导线经绝缘子串对杆塔放电,再经过杆塔接地,那么过渡电阻包括电弧电阻和杆塔接地阻抗;如果接地短路是导线经过其他物体(如树木)放电,或导线断线后与地面接触,那么过渡电阻还包括其他物体的电阻和大地电阻。

过渡电阻一般包括电弧电阻和杆塔接地电阻。实验研究证明,当短路电流值较大(100A以上)时电弧的电位梯度为常数,约 1.5kV/m 。因此电弧电阻上的压降为

$$U_{\text{arc}} = 1.5l(\text{kV})$$

式中 l ——电弧长度, m。

等效电弧电阻值为

$$R_{\text{arc}} = \frac{1050l}{I}(\Omega)$$

式中 I ——电弧电流的有效值, A。

由于架空输电线间的距离随线路电压的升高而增大,在电弧长度等于导线间最短距离的

条件下, 电弧电阻大约为

$$R_{\text{arc}} \approx \frac{50U}{I} (\Omega) \quad (2-1)$$

式中 U ——导线间的电压有效值, kV;

I ——电弧中的电流的有效值, A。

式(2-1)说明, 不论线路电压等级的高低, 电弧电阻上的压降都约为线路的额定电压值的5%。实际上110kV约为6%, 220kV约为4.7%, 500kV约为3.75%, 这是因为电压等级低的线路的绝缘水平主要是由大气过电压决定的。

电弧的惯性很小, 很容易被风吹长。电弧被风吹长引起电阻增加, 即

$$R_{\text{arc}} \approx \frac{50}{I} (U + 47vt) (\Omega)$$

式中 v ——风速, km/h;

t ——时间, s。

一般延时0.5~1s后, 电弧可能被风吹伸长到10~20m。在电弧较小的情况下, R_{arc} 可能由每相2~4 Ω 增加到5~10 Ω ; 相间由4~8 Ω 增加到10~12 Ω 。

每个杆塔的接地电阻, 在土壤电阻率较低的地区一般约为10 Ω ; 在电阻率较高的地区可达30 Ω , 甚至更高一些。在我国110kV及以上线路通常都有避雷线, 各杆塔实际上是由接地的避雷线(地线)连接在一起的, 所以故障时的接地电阻不是一个杆塔的接地电阻, 而是由避雷线连接的一串杆塔的等值接地阻抗(基本上是电阻性的)。此接地电阻一般小于3 Ω , 山区(土壤电阻率低)可达5 Ω 左右。一些高压输电线路的避雷线通过间隙接地, 在故障时靠近故障点的若干个杆塔的避雷线的间隙将被击穿, 直到避雷线上的电压低于放电电压(约12~15kV)为止。

一般情况, 输电线路相间短路的电弧电阻初始值可考虑为4~8 Ω 。短路后, 电弧伸长, 电弧电阻可能增加到10~20 Ω 。输电线路对杆塔放电造成的接地短路, 杆塔接地阻抗可考虑3~5 Ω , 加上电弧电阻后, 总的过渡电阻可考虑5~7 Ω 。对于输电线路经接地媒介物(如树枝等)放电的短路, 此时的过渡电阻将是一个较大的值, 可能有几十欧姆, 甚至高达100 Ω (220kV线路)和300 Ω (500kV线路)。

(3) 考察两侧电动势夹角摆开对线路保护的影响。当两侧电动势夹角摆开不太大时(如: $\delta < 45^\circ$), 电力系统处于正常输送负荷状态, 线路保护性能不应有太大的变化。当两侧电动势夹角摆动较大($\delta > 90^\circ$), 但是没有发生振荡($\delta < 180^\circ$), 电力系统处于短路后渐趋稳定的摇摆过程, 线路保护的性可能较大的变化。此时, 要求线路保护不误动。当两侧电动势夹角 δ 在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 之间变化时, 电力系统处于振荡状态。这时, 要求线路主保护不应误动, 后备保护不应拒动。

(4) 考察电力系统各种阻抗的阻抗角不相等对线路保护的影响。一般情况下, 发电机的阻抗角大于变压器的阻抗角, 变压器的阻抗角大于线路的正序阻抗角, 线路的正序阻抗角大于线路的零序阻抗角, 高压输电线路的正序阻抗角大于低压输电线路的正序阻抗角。

对于电力系统, 通常发电机的 $R < 0.05X$, 变压器的 $R \approx 0.1X$, 输电线路的 $R \approx (0.2 \sim 1)X$ 。

(5) 考察输电线路分布电容对线路保护的影响。输电线路的相与相之间和相与地之间

都存在着分布电容，这是因为平行的导线恰如一个中间以空气为介质的电容器的两极板。在电压等级不高，线路不长的情况下，其分布电容量很小，对输电线路的电流和电压影响不大，可忽略其对继电保护的影响。而在高压长距离输电电路上，尤其在分裂导线的输电电路上，分布电容大大增加，稳态的电容电流将引起输电线路中电压和电流幅值大小和相位的变化。当线路的负荷电流和短路电流较小时，电容电流的影响就很大。另外，分布电容在短路的暂态过程将引起高频自由振荡分量，对线路保护也将产生不利影响。表 2-1 列出几种电压等级的正序和零序容纳和 100km 线路三相不同时空载合闸产生的负序电流大小。

表 2-1 几种电压等级的正序和零序容纳

线路电压 (kV)	正序容纳 [1/($\Omega \cdot \text{km}$)]	零序容纳 [1/($\Omega \cdot \text{km}$)]	负序电流 (A)	
			二相断开	一相断开
220	2.7×10^{-6}	1.9×10^{-6}	10	12.7
330	3.5×10^{-6}	2.4×10^{-6}	20	25.1
500	3.86×10^{-6}	2.6×10^{-6}	32.2	48

(6) 考察电力系统电气参数不对称对继电保护的影响。220kV 以下高压输电线路一般是完全换位，因此可以用对称分量法进行故障分析。500kV 输电线路，由于换位困难，从经济出发，一般不换位。对称分量法用于 500kV 输电线路，在某些问题可能产生较大误差。因此，500kV 输电线路有必要采用不对称电气参数进行故障分析，以便得到正确结果。

电力系统中，所有静止电力设备的正序阻抗均等于负序阻抗。发电机与电动机是旋转电机，旋转电机的正序、负序和零序阻抗各不相同。发电机正序阻抗有次暂态阻抗、暂态阻抗和同步阻抗之分。凸极发电机的正轴线方向的阻抗和垂轴线方向的阻抗又不相同。在分析快速保护时，正序阻抗采取次暂态电抗 X''_d ，在分析后备保护时则采用同步电抗 X_d 。由于负序电流产生的旋转磁场与转子的旋转方向相反，且发电机转子正轴线方向与垂轴线方向阻抗不相同，所以正序阻抗不等于负序阻抗。还须指出：严格地讲，不同的短路类型发电机的负序阻抗必须取不同的值。这是因为在转子不对称情况下，会在定子绕组中引起一系列高次谐波分量，以负序基波电压和电流表示的电抗 X_2 与电流、电压中所包含的高次谐波的强弱有关，特别是与三次谐波的强弱程度有关。而定子电压和电流中高次谐波的含量又与不对称故障的形式有关。因此同一电机的负序阻抗 X_2 不是一个恒定的量值。在实用计算中，对于汽轮发电机和有阻尼绕组的水轮发电机，一般均采用 $X_2 = X''_d$ 。

在靠近旋转电机附近的地点短路时， $Z_{2\Sigma}/Z_{1\Sigma}$ 有较大的取值范围，其值约在 0.1~1.45 之间。当短路点远离旋转电机，旋转电机的阻抗小于静止电力设备的阻抗，可以认为 $Z_{2\Sigma}/Z_{1\Sigma} = 1$ 。

零序电流通过三相绕组时三相电流同相位，定子三绕组在空间相差 120° 电角度，因此零序电流所产生的合成磁场为零。零序电抗主要由定子绕组的零序漏磁通所决定，这些漏磁比正序（负序）电流的漏磁略小些，减小的程度与绕组的形式有关。因此，同步电机零序电抗 X_0 的数值有较大的变化范围，一般为 $X_0 = (0.15 \sim 0.6) X''_d$ 。

电机的负序与零序电抗的平均值见表 2-2。

表 2-2 电机的负序与零序电抗的平均值

同步电机的型式	中容量汽轮发电机	有阻尼绕组的水轮发电机	同步调相机和大型同步发动机	无阻尼绕组的水轮发电机
X_2	0.16	0.25	0.24	0.45
X_0	0.06	0.07	0.08	0.07

(7) 考察同杆并架多回线路对线路保护的影响。由于同杆并架多回线路共用一个杆塔，所需出线走廊窄，占用良田少，节省投资，得到很快发展。对于同杆并架双回线，需要考虑其中一回线发生接地短路时，两回线零序电流之间的相互影响，还需要考虑同杆双回线之间跨线故障。简单的数学模型可认为各回线自身三相是对称的，两回线之间有零序互感；精确一点的数学模型要应用六相序理论进行故障分析，十分复杂。

(8) 考察输电线路串补电容对线路保护的影响。输电线路串联补偿电容器，以减小输电线路的感抗，提高输电线路输送容量，提高电力系统的稳定性。串联补偿电容占输电线路感抗的百分数称作串联补偿电容的补偿度。一般补偿度在 30%~50% 范围内，也有高达 70% 的。串联补偿电容的安装位置大致有三种情况：①装于输电线路的某一侧；②装于线路中点；③装于变电所两母线之间。

串补电容的存在破坏了输电线路阻抗的均匀性。串补电容后的短路电流值反而大于串补电容前的短路电流。在系统发生短路时，短路电流在电容器的两端会产生很大的压降，可能将电容器损坏，为此在电容器上装有并联的保护间隙。当流过电容器的电流为线路额定电流的 1.5~4.5 倍时，保护间隙放电，将电容器短接。在不同运行方式和不同地点发生短路，保护间隙有时放电，有时不放电。在同一地点发生三相短路，由于三相电容保护间隙放电的离散性，可能某相的电容器被短接，而其他相的电容器没有短接，这给线路保护工作带来不利影响。

串补电容与系统中的电感和电阻构成串联 RLC 电路，在系统发生短路时，短路电流中将出现低于工频的周期性分量电流。在电力系统中，其衰减时间常数很大，是基本非周期分量衰减时间常数的 2 倍。该低频分量的频率可能接近工频，给滤波带来困难，对继电保护产生不利影响。

(9) 考虑电力系统并联电抗器对线路保护的影响。为了补偿高压输电线路的分布电容，限制系统过电压，常常在母线或线路侧并联电抗器。并联电抗器在故障中将产生附加的工频旁路电流和暂态分量电流，尤其是并联电抗器与分布电容产生的谐振频率分量要引起注意。

第二节 三相系统的等值变换

ABC 三相输电线路如图 2-1 所示。m 为测量点；k 为短路点。已知 A、B、C 三条线路的自阻抗分别为 Z_{aa} 、 Z_{bb} 、 Z_{cc} ，导线间的互感抗分别为 Z_{ab} 、 Z_{ac} 、 Z_{ba} 、 Z_{bc} 、 Z_{ca} 、 Z_{cb} ，而且有 $Z_{ab}=Z_{ba}$ 、 $Z_{ac}=Z_{ca}$ 、 $Z_{bc}=Z_{cb}$ 。根据电路理论，图 2-1 所示系统有如下关系。

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{mA} \\ \dot{U}_{mB} \\ \dot{U}_{mC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{U}_{kA} \\ \dot{U}_{kB} \\ \dot{U}_{kC} \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

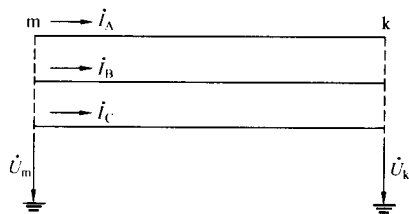


图 2-1 ABC 三相系统示意图

从式 (2-2) 可知, A、B、C 三相系统是一个相互关联的系统, 某一相的电气量发生变化, 必然会对另两相产生影响。在三相关联的系统中进行故障分析, 求解的过程往往很繁杂, 不容易掌握它们之间的变化规律。为此, 可以用坐标变换的方式, 把 ABC 三相系统的参数和电气量变换到另一个用 012 表示的三个序分量的系统中去。在 012 三个序分量表示的系统中, 某一序分量的电气量和参数发生变化, 不会对另两个序分量产生影响。这种通过坐标变换把相互关联三相系统的电气量和参数, 变换到另一个电气量和参数相互独立的三维系统的作法称为解耦。

下面讨论式 (2-2) 的解耦过程。为叙述方便, 式 (2-2) 记为

$$\mathbf{U}_{m,ABC} = \mathbf{Z}_{abc} \mathbf{I}_{ABC} + \mathbf{U}_{ABC} \quad (2-3)$$

已知有一常数矩阵

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

并且

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{mA} \\ \dot{U}_{mB} \\ \dot{U}_{mC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{m0} \\ \dot{U}_{m1} \\ \dot{U}_{m2} \end{bmatrix} = \mathbf{U}_{m,012} \quad (2-5)$$

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{kA} \\ \dot{U}_{kB} \\ \dot{U}_{kC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{k0} \\ \dot{U}_{k1} \\ \dot{U}_{k2} \end{bmatrix} = \mathbf{U}_{k,012} \quad (2-6)$$

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{I}_{012} \quad (2-7)$$

并且令

$$\mathbf{Z}_{012} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

则有

$$\begin{aligned} \mathbf{A} \mathbf{U}_{m,ABC} &= \mathbf{A} \mathbf{Z}_{abc} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{I}_{ABC} + \mathbf{A} \mathbf{U}_{k,ABC} \\ \mathbf{U}_{m,012} &= \mathbf{Z}_{012} \mathbf{I}_{012} + \mathbf{U}_{k,012} \end{aligned} \quad (2-9)$$

即

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{m0} &= Z_0 \dot{I}_0 + \dot{U}_{k0} \\ \dot{U}_{m1} &= Z_1 \dot{I}_1 + \dot{U}_{k1} \\ \dot{U}_{m2} &= Z_2 \dot{I}_2 + \dot{U}_{k2} \end{aligned} \right\} \quad (2-10)$$

根据式 (2-10) 可画出 012 序分量的电路结构如图 2-2 所示。

从式 (2-10) 和图 2-2 可见, 012 三个序分量是相互独立的。某一分量的参数和电气

量大小不会对另两个序分量产生影响。从式 (2-3) 至式 (2-10) 的过程就是解耦的过程。

由于 012 三个序分量之间没有耦合, 进行故障分析就比较方便, 概念也比较清晰。在 012 系统中, 计算出各待求量后, 经坐标逆变换得到 ABC 三相系统中的电流、电压量的计算公式为

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{m,ABC} &= \mathbf{A}^{-1} \mathbf{U}_{m,012} \\ \mathbf{U}_{k,ABC} &= \mathbf{A}^{-1} \mathbf{U}_{k,012} \\ \mathbf{I}_{m,ABC} &= \mathbf{A}^{-1} \mathbf{I}_{012} \end{aligned} \quad (2-11)$$

不难看出, 解耦的关键是正确选择坐标变换矩阵 \mathbf{A} 。 \mathbf{A} 矩阵必须满足式 (2-8) 的要求, 把 \mathbf{Z}_{abc} 的满元素矩阵变换为只有斜对角有参数, 其余为零的斜对角矩阵 \mathbf{Z}_{012} 。

研究表明, 满足解耦要求的常数矩阵 \mathbf{A} 不是唯一的, 常见的有如下几种。

(1) 对称分量法。对称分量法是科学家 C. L. Fortescue 在 1918 年首先提出的^[30], 现在获得了最广泛的应用。这种方法的前提条件是电力系统 ABC 三相参数必须对称, 即有

$$\begin{aligned} Z_1 &= Z_{aa} = Z_{bb} = Z_{cc} \\ Z_m &= Z_{ab} = Z_{ac} = Z_{ba} = Z_{bc} = Z_{ca} = Z_{cb} \end{aligned} \quad (2-12)$$

这样, 式 (2-2) 可写成如下形式

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{mA} \\ \dot{U}_{mB} \\ \dot{U}_{mC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_1 & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{U}_{kA} \\ \dot{U}_{kB} \\ \dot{U}_{kC} \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

$$\mathbf{Z}_{abc} = \begin{bmatrix} Z_1 & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_1 & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_1 \end{bmatrix} \quad (2-14)$$

选择

$$\mathbf{A} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (2-15)$$

$$\mathbf{A}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (2-16)$$

算子 a 代表 120° 相移, 算子 a^2 代表 240° 相移, 即

$$\begin{aligned} a &= e^{j120^\circ} \\ a^2 &= e^{j240^\circ} \end{aligned}$$

把式 (2-14)、式 (2-15) 和式 (2-16) 代入式 (2-8), 则有

$$\mathbf{AZ}_{abc}\mathbf{A}^{-1} = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix}$$

其中

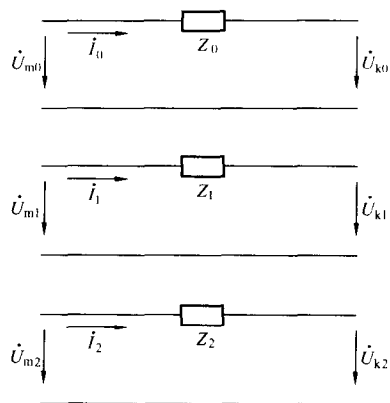


图 2-2 012 序分量电路图

$$\left. \begin{aligned} Z_0 &= Z_1 + 2Z_m \\ Z_1 &= Z_1 - Z_m \\ Z_2 &= Z_1 - Z_m \end{aligned} \right\} \quad (2-17)$$

Z_0 称为零序阻抗, Z_1 称为正序阻抗, Z_2 称为负序阻抗。从式 (2-17) 可以看出, 输电线路的零序阻抗大于正、负序阻抗, 输电线路的正序阻抗等于负序阻抗。

把式 (2-15) 代入式 (2-5) 可得

$$\begin{aligned} \dot{U}_{m0} &= \frac{1}{3}(\dot{U}_{mA} + \dot{U}_{mB} + \dot{U}_{mC}) \\ \dot{U}_{m1} &= \frac{1}{3}(\dot{U}_{mA} + a\dot{U}_{mB} + a^2\dot{U}_{mC}) \\ \dot{U}_{m2} &= \frac{1}{3}(\dot{U}_{mA} + a^2\dot{U}_{mB} + a\dot{U}_{mC}) \end{aligned} \quad (2-18)$$

可以看出, 式 (2-18) 的计算过程中是以 ABC 为排列顺序的, 因此把 A 相称之为参考相, 并且把以 A 相为参考相计算出来的 012 序分量称之为 A 相的 012 序分量, 并记为 \dot{U}_{A0} 、 \dot{U}_{A1} 、 \dot{U}_{A2} 。同理, 将以 B 相为参考相计算出的 012 序分量称为 B 相的 012 序分量, 并记为 \dot{U}_{B0} 、 \dot{U}_{B1} 、 \dot{U}_{B2} ; 将以 C 相为参考相计算出来的 012 序分量称为 C 相的 012 序分量, 并记为 \dot{U}_{C0} 、 \dot{U}_{C1} 、 \dot{U}_{C2} 。

从式 (2-5) 与式 (2-11) 不难得出如下关系式

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A0} &= \dot{U}_{B0} = \dot{U}_{C0} \\ \dot{U}_{A1} &= a\dot{U}_{B1} = a^2\dot{U}_{C1} \end{aligned} \quad (2-19)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A2} &= a^2\dot{U}_{B2} = a\dot{U}_{C2} \\ \dot{U}_A &= \dot{U}_{A0} + \dot{U}_{A1} + \dot{U}_{A2} \end{aligned}$$

$$\dot{U}_B = \dot{U}_{B0} + \dot{U}_{B1} + \dot{U}_{B2} \quad (2-20)$$

$$\dot{U}_C = \dot{U}_{C0} + \dot{U}_{C1} + \dot{U}_{C2}$$

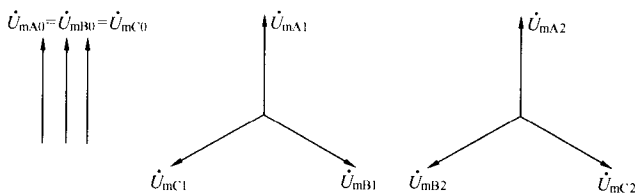


图 2-3 ABC 相的 012 序分量关系图

根据式 (2-19) 可作出相量图, 如图 2-3 所示。从图 2-3 可以看出 \dot{U}_{A0} 、 \dot{U}_{B0} 、 \dot{U}_{C0} 大小相等, 方向相同, 故称为零序分量。 \dot{U}_{A1} 、 \dot{U}_{B1} 、 \dot{U}_{C1} 大小相等, 相位相差 120° , 排列顺序与发电机旋转方向相同, 故称为正序分量。 \dot{U}_{A2} 、

\dot{U}_{B2} 、 \dot{U}_{C2} 大小相等, 相位相差 120° , 但排列顺序与正序分量相反, 故称为负序分量。

从图 2-3 可以看出, 不论是否参考相, 只要知道某一相的零序、正序、负序分量, 另两相的零序、正序、负序分量也就确定了。从式 (2-20) 可以看出, 不论是否参考相, 某相的电压就是该相的零序、正序、负序分量之和。这是对称分量法的显著优点。

由于电力系统中的电动势 \dot{E}_A 、 \dot{E}_B 、 \dot{E}_C 总是对称的, 用对称分量把 ABC 三相系统解耦成零序、正序、负序系统后, 只有正序网络中有电动势, 负序与零序网络中没有电动势, 这为故障分析和短路电流的计算提供了很大的方便。尤其是电力系统正常运行时, 电力系统中只有正序电压和正序电流, 没有负序电压和电流, 也没有零序电压和电流。这样, 三相系统就可以用一个序分量系统来表示。这是其他解耦方法都不具备的优点。

近年来的研究表明, Fortescue 提出的对称分量变换, 不是等功率变换, 即 ABC 三相系统中计算出的功率与零序、正序、负序网络计算出的功率不相等, 现说明如下。

从图 2-1 可知, 该系统的三相有功功率损耗为

$$\begin{aligned} P_{ABC} &= \operatorname{Re}[(\dot{U}_{mA} - \dot{U}_{kA})\dot{I}_A^* + (\dot{U}_{mB} - \dot{U}_{kB})\dot{I}_B^* + (\dot{U}_{mC} - \dot{U}_{kC})\dot{I}_C^*] \\ &= \operatorname{Re}[\dot{U}_{mkA}\dot{I}_A^* + \dot{U}_{mkB}\dot{I}_B^* + \dot{U}_{mkC}\dot{I}_C^*] \\ &= \operatorname{Re} \begin{bmatrix} \dot{U}_{mkA} \\ \dot{U}_{mkB} \\ \dot{U}_{mkC} \end{bmatrix}' \begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix}^* \end{aligned} \quad (2-21)$$

其中 \dot{I}_A^* 、 \dot{I}_B^* 、 \dot{I}_C^* 分别是 \dot{I}_A 、 \dot{I}_B 、 \dot{I}_C 的共轭复数。

把式 (2-11) 和式 (2-16) 代入式 (2-21), 经过化简, 可得

$$\begin{aligned} P_{ABC} &= 3\operatorname{Re} \begin{bmatrix} \dot{U}_{mk0} \\ \dot{U}_{mk1} \\ \dot{U}_{mk2} \end{bmatrix}' \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}^* \\ &= 3\operatorname{Re}(\dot{U}_{mk0}\dot{I}_0^* + \dot{U}_{mk1}\dot{I}_1^* + \dot{U}_{mk2}\dot{I}_2^*) \end{aligned} \quad (2-22)$$

式 (2-22) 表明:

- 1) 正序、负序、零序系统不存在相互之间的功率耦合。
- 2) Fortescue 变换不是一种功率不变的变换。

为了使坐标变换以后功率还能相等, 有人提出把式 (2-15) 与式 (2-16) 改进为

$$\mathbf{A} = \frac{\sqrt{3}}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (2-23)$$

$$\mathbf{A}^{-1} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (2-24)$$

这样, 把式 (2-11) 与式 (2-24) 代入式 (2-21), 可得

$$\begin{aligned} P_{ABC} &= \operatorname{Re}[\dot{U}_{mkA}\dot{I}_A^* + \dot{U}_{mkB}\dot{I}_B^* + \dot{U}_{mkC}\dot{I}_C^*] \\ &= \operatorname{Re}[\dot{U}_{mk0}\dot{I}_0^* + \dot{U}_{mk1}\dot{I}_1^* + \dot{U}_{mk2}\dot{I}_2^*] \end{aligned} \quad (2-25)$$

现在, 有些专家更喜欢用式 (2-23) 与式 (2-24) 表示的等功率对称分量法。

(2) $0\alpha\beta$ 分量法。三相对称系统的解耦, 除了对称分量法外, 较常用的还有 $0\alpha\beta$ 分量法 (也称为 Clark 变换)。 $0\alpha\beta$ 分量法通过 Clark 变换矩阵将 ABC 三相系统解耦为 0、 α 、 β 三个分量。Clark 变换矩阵为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (2-26)$$

$$\mathbf{A}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (2-27)$$