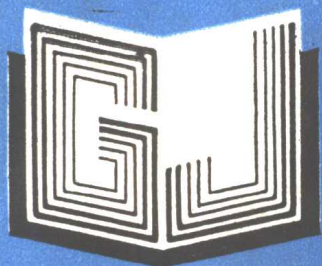
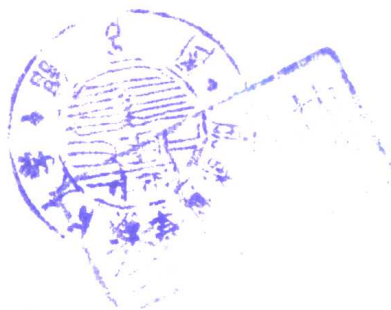


978147

TM77
7431



高等学校教材



电力系统继电保护的计算机整定计算

东北电力学院 陈永琳 主编



高等学校教材

电力系统继电保护的
计算机整定计算

东北电力学院 陈永琳 主编

水利电力出版社

(京)新登字115号

内 容 提 要

本书对应用计算机进行电力系统继电保护整定计算所涉及的问题作了系统介绍。内容包括网络模型、电力系统故障分析计算、高压电网继电保护整定计算原则与程序设计方法以及电力系统继电保护数据管理等内容。书中介绍了国内外的一些实用的最新研究成果。

本书为“电力系统继电保护及自动运动技术”专业的选修课教材，也可供生产及设计部门的工程技术人员参考。

高等学校教材

电力系统继电保护的计算机整定计算

东北电力学院 陈永琳 主编

*

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

北京市地矿局印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 10.75印张 244千字
1994年10月第一版 1994年10月北京第一次印刷

印数 0001—2960册

ISBN 7-120-02022-6/TM·546

定价 6.20元

前 言

本书是根据能源部制定的1990~1992年高等学校教材编审出版规划而编写的高等学校“电力系统继电保护及自动运动技术”专业的电力系统“继电保护的计算机整定计算”选修课教材。

本书以利用计算机进行电力系统继电保护整定计算为主线,系统地介绍了整定计算所涉及的故障分析方法、高压电网各种保护的实用整定计算原则及其程序设计方法。本书力求反映当前国内外电网继电保护计算机整定计算的动向与新成就。从新颖、实用出发,努力使教材内容与我国当前电网继电保护整定计算的实践紧密结合。本书除能满足大学继电保护专业课的教学需要外,还可供生产及设计部门从事继电保护整定计算的工作人员阅读和参考。

全书共六章,第六章由东北电力学院孙辉编写,其余各章由东北电力学院陈永琳编写,陈永琳任主编。

本书承蒙华中理工大学言昭副教授主审,对原稿提出了许多有益的意见与建议。此外,本书在编写过程中还得到了电力系统有关部门及兄弟院校的帮助,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者的水平所限,书中难免有错误和不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

1993年1月

1993.1.10

目 录

前言	
绪论	1
第一章 电力系统网络方程	5
1-1 标么制与电力网络主要元件的参数	5
1-2 电力系统节点导纳方程	15
1-3 线性方程组的求解	25
1-4 电力系统节点阻抗方程	33
第二章 网络结构变更时节点方程的求解	40
2-1 概述	40
2-2 网络结构变更时修正节点导纳矩阵的方法	40
2-3 补偿法与支路追加法	41
2-4 操作非互感支路的计算	43
2-5 操作互感支路的计算	46
第三章 电力系统故障的分析计算	59
3-1 电力系统简单故障的计算	59
3-2 电力系统非全相振荡的计算	72
3-3 电力系统复故障的电路方程与端子方程	76
3-4 电力系统复故障的计算	79
3-5 计算电力系统复故障应注意的问题	86
第四章 高压电网继电保护整定计算原则	91
4-1 整定计算的一般规定	91
4-2 零序电流保护的整定计算	95
4-3 三段式相间距离保护的整定计算原则	103
4-4 接地距离保护的整定计算原则	105
4-5 高频保护的整定计算	108
第五章 保护整定计算的程序设计	113
5-1 概述	113
5-2 零序电流保护整定计算的程序设计	116
5-3 保护整定计算的原始信息及计算结果	132
5-4 66kV及以下电力系统继电保护整定计算程序的特点	139
第六章 电力系统继电保护的数据管理	145
6-1 数据库的基本知识	145
6-2 电力系统继电保护的数据管理系统设计原理	148
6-3 ORACLE关系数据库系统在继电保护数据管理中的应用	152
参考文献	168

结 论

继电保护装置是电力系统不可分割的一部分。当系统由于自然的、人为的或设备故障等原因，使电网的某处发生故障或不正常状态时，继电保护装置能迅速将故障部分切除，以保证电力系统运行的稳定性，并最大限度地使电网的非故障部分继续可靠地供电。国内外的无数实例证明，继电保护装置是电力系统安全运行的保证。然而无数事实也说明，几乎凡是涉及停电范围较广的大型系统事故，都与继电保护装置的不正确动作有直接或间接的关系。因此，合理配置与正确使用继电保护装置，是保障电网安全运行的重要条件。

一、对继电保护装置的基本要求

从电网安全运行的角度出发，电网对继电保护装置提出了严格的要求，要求动作于跳闸的继电保护必须满足可靠性、选择性、灵敏性和速动性这四点。

1. 可靠性

可靠性是指在保护装置规定的保护范围内发生故障时，继电保护装置应能可靠动作而不会拒绝动作，在其它不应动作的情况下，应能可靠不动作而不会发生误动作的性能。

可靠性是四性要求的前提，在设计、制造和整定、维护保护装置时都必须给以充分的考虑。为了提高保护装置动作的可靠性，在满足系统运行要求的前提下，应当选用最简单的保护方式，采用高质量的元件和尽可能简单的接线方式构成性能良好的装置，并应采取必要的检测、闭锁和双重化保护等措施。此外，保护装置还应便于整定计算、调试和运行维护。

可靠性可用保护装置的正确动作率来衡量，它综合地反映了继电保护全面工作的效果，即

$$\text{正确动作率} = \frac{\text{正确动作次数}}{\text{总动作次数}}$$

2. 选择性

选择性是指电力系统发生故障时，故障设备的保护装置能正确动作切除故障；当故障设备的保护或断路器拒动时，与故障设备相邻的保护装置能动作切除故障，以尽量减少停电范围的性能。

为了保证选择性，相邻设备有配合要求的保护装置或同一保护内两个元件（例如：起动元件与跳闸元件或闭锁元件与动作元件）之间的灵敏性与动作时间均应符合相互配合的关系。

在某些情况下，从系统稳定的要求出发，必须尽可能快地切除故障时，可使保护无选择性的动作，但必须采取其它的补救措施（例如采用自动重合闸或备用电源自动投入等措施），以保证被无选择性切除的非故障设备恢复供电。

保护装置的选择性依靠合理的继电保护方案和正确的整定值，以使各级保护间存在良

好的配合关系。

3. 灵敏性

灵敏性是指保护装置对其保护范围内故障的反映能力。保护装置的灵敏性一般用灵敏系数 K_{lm} 来衡量，其定义根据保护动作类型的不同分为以下两类：

(1) 对反映故障时参数值增大而动作的保护装置：

$$K_{lm} = \frac{\text{预定保护范围末端金属性短路时加于保护中故障参数的最小计算值}}{\text{保护装置的整定值}}$$

(2) 对反映故障时参数量值降低而动作的保护装置：

$$K_{lm} = \frac{\text{保护装置的整定值}}{\text{预定保护范围末端金属性短路时加于保护中故障参数的最大计算值}}$$

故障参数（电流、电压、阻抗等）的最大、最小计算值应采用常见的最不利的运行方式、短路类型和短路点来进行计算。在个别情况下，如相间距离保护，还应考虑弧光电阻的影响。此外，当一套保护中有多个测量元件且灵敏系数不同时，应以其中灵敏系数最低者为该套保护的灵敏系数。

各类保护装置的灵敏系数不应小于表0-1中所列的数值。

表 0-1 各类保护的灵敏系数

保护分类	保护类型	组成元件	灵敏系数	备注	
主保护	带方向和不带方向的电流保护或电压保护	电流元件和电压元件	1.3~1.5	200公里以上线路不小于1.3；50~200km线路不小于1.4；50km以下线路不小于1.5。 对110kV及以上线路，整定时间不超过1.5s	
		零序或负序方向元件	2.0		
	距离保护	起动元件	负序和零序增量或负序分量元件	4	距离保护第三段动作区末端故障灵敏系数大于2 线路末端短路电流应为阻抗元件精确工作电流2倍以上。200km以上线路不小于1.3；50~200km线路不小于1.4；50km以下线路不小于1.5。整定时间不超过1.5s
			电流和阻抗元件	1.5	
		距离元件	1.3~1.5		
	保护	平行线路的横联差动方向保护和电流平衡保护	电流和电压起动元件	2.0	分子表示线路两侧均未断开前，其中一侧保护按线路中点短路计算的灵敏系数 分母表示一侧断开后，另一侧保护按对侧短路计算的灵敏系数
1.5					
零序方向元件			4.0		
			2.5		
高频方向保护	跳闸回路中的方向元件	跳闸回路中的方向元件	3.0	个别情况下灵敏系数可为1.3	
		跳闸回路中的电流和电压元件	2.0		
		跳闸回路中的阻抗元件	1.5		
高频相差保护	跳闸回路中的电流和电压元件	跳闸回路中的电流和电压元件	2.0		
		跳闸回路中的阻抗元件	1.5		

保护分类	保护类型	组成元件	灵敏系数	备注
主保护	发电机、变压器、线路和电动机的纵联差动保护	差电流元件	2.0	
	母线的完全电流差动保护	差电流元件	2.0	
	母线的不完全电流差动保护	差电流元件	1.5	
	发电机、变压器、线路和电动机的电流速断保护	电流元件	2.0	按保护安装处短路计算
后备保护	远后备保护	电流电压及阻抗元件	1.2	按相邻电力设备和线路末端短路计算（短路电流应为阻抗元件精确工作电流2倍以上）
		零序或负序方向元件	1.5	
	近后备保护	电流电压及阻抗元件	1.3~1.5	按线路末端短路计算
		负序或零序方向元件	2.0	
辅助保护	电流速断保护		>1.2	按正常运行方式下保护安装处短路计算

注 1. 主保护的灵敏系数除表中注出者外，均按保护区末端计算。

2. 保护装置如反应故障时增长的量，灵敏系数为金属性短路计算值与保护整定值之比；如反应故障时减少的量，则为保护整定值与金属性短路计算值之比。

3. 各种类型保护中接于全电流和全电压的方向元件，灵敏系数不作规定。

4. 本表内未包括的其他类型保护装置，灵敏系数另作规定。

4. 速动性

速动性是指保护装置应能尽快地切除故障。其目的是提高电力系统运行的稳定性、限制故障设备的损坏程度，缩小故障波及范围，提高自动重合闸或备用电源自动投入的成功率等。

由于故障切除时间等于保护装置动作时间与断路器动作时间之和，因此为了保证速动性，既要采用快速动作的保护装置又要采用快速动作的断路器。目前常用的瞬时动作的整套保护的动作为：

电流电压速断保护	0.06~0.1s
距离保护	0.1~0.25s
高频保护	0.04~0.15s
纵差与横差保护	0.06~0.1s

二、应用计算机进行保护定值计算的必要性及其发展前景

为了满足电网对继电保护提出的四性要求，充分发挥继电保护装置的效能，必须合理地选择保护的定值，以保持各保护之间的相互配合关系。因此做好电网继电保护定值的整定计算工作是保证电力系统安全运行的必要条件。

从电网继电保护整定计算的角度出发，需要考虑的因素是多方面的，其中电网的接线方式和运行方式对定值计算的影响最大。随着电网的发展，电网规模愈来愈大，接线方式

和运行方式日趋复杂。其中大环、小环相互重叠，长线、短线交错连接的状况已经比较普遍。这些都给保护定值的整定计算工作带来了困难。为了合理协调保护的灵敏性、选择性、速动性和可靠性这四者间的关系，以使各保护达到最佳的配合状态，就必须对电网的各种运行方式及多种故障情况进行反复而周密的计算。

以往，由于保护定值的计算主要依靠人工并辅以专用计算工具（如各种类型的短路计算台）的方式进行，其计算量太大，计算时间太长（例如东北电力系统每进行一次全网零序保护的整定计算，占用的时间长达2~3个月），无法满足生产的需要。计算时，在运行方式的选择上，只能计算少数一二种有代表性的运行方式而不能考虑所有可能的运行方式；在算法上，对一些复杂的计算，往往要做若干简化或根本不予考虑（如多回平行线间的零序互感、变压器变比的改变、多重复故障的计算、非全相运行和非全相振荡的计算等）；在保护范围和保护相互间配合计算上，只能作较粗的处理；……。所有这些不仅使保护定值的计算精度受到限制，无法适应电网运行方式的变化，很难保证定值的整定与配合为最佳。

从70年代开始，保护定值的整定计算开始向利用数字计算机的方向发展。其基本方法是将过去保护定值计算中有关各种故障的分析计算，改由通用数字计算机来完成。这种方式在算法上虽然可以计算很多以往用计算台难以计算的问题，使定值计算的速度和精度都发生了质的变化，但是人工利用通用短路电流程序的定值计算方法，仍然需要计算者用人工方式调整计算内容、查找计算结果、并用人工方法最后算出保护的定值。

为了从根本上把保护整定计算人员从繁杂的计算中解放出来，为了进一步提高整定计算的精度和效率，70年代中期，我国有关部门陆续开展了应用计算机进行电网继电保护整定计算的研究工作，并推出了一批相应的软件。目前，这项工作已取得了很大进展，很多网局及设计部门已在生产和设计工作中广泛的使用这些软件，并在生产中发挥了巨大效益。实践证明，用计算机进行整定计算可以大幅度提高计算速度，确保定值准确可靠，充分发挥保护装置的效能，防止人为因素产生的误整定，为电力系统的安全运行提供了可靠的保证。

人工智能是一门新兴的边缘学科，它的出现引起了许多学科的日益重视，并展现出越来越重要的实用意义。近年来，国内外也展开了把人工智能技术引入保护整定计算工作的研究。人工智能最大的特点是它可以模拟人的思维过程，把专家经验性的知识存放于机器侧，让机器自动地去完成整定计算中有时出现必须用人工干预才能完成的工作。使定值计算也具有专家级的推理思维能力，使定值计算的水准达到一个新的高度。目前虽然这个课题的研究才刚刚开始，很多专家在定值计算中的经验还有待进一步收集和整理，但初步研究表明，用人工智能技术处理定值的整定计算，可以进一步完善程序的功能，使定值计算更加完美，而且人工智能还可以给用户提供一个良好的使用环境，用户不仅可以向程序咨询，还可以作为培训整定计算新手的一种有效手段。显然人工智能在继电保护整定计算中将得到广泛应用。

第一章 电力系统网络方程

已知的电力系统网络，可以利用支路方程、节点方程或回路方程来描述。由于节点方程具有易于形成，便于随电路连接状态的变化而对其进行修正的优点，因此，当前电力系统的分析计算，通常乐于采用节点方程的方法。

电力系统节点方程有节点导纳方程和节点阻抗方程两类，它们都是在等值网络的基础上形成的。因此，利用计算机对电力系统进行分析计算，第一步工作就是制定电力系统的等值电路，计算各元件的标么参数，并把与等值电路有关的信息输入计算机。为此，本章将从标么制与电力系统网络主要元件的参数入手，讨论电力系统节点导纳方程与节点阻抗方程。

1-1 标么制与电力网络主要元件的参数

一、标么制

就电力系统分析计算而言，常用的物理量有：三相功率 $S = P + jQ$ 、线电压 U 、线电流 I 、相阻抗 $Z = R + jX$ 和相导纳 $Y = G + jB$ 。为了把这些物理量用标么值来表示，首先要选定用以测量相应各物理量的基准值：

S_b 基准三相功率 (MVA)

U_b 基准线电压 (kV)

I_b 基准线电流 (kA)

Z_b 基准相阻抗 (Ω)

Y_b 基准相导纳 (S)

由于以上五个物理量的基准值需要满足以下三个方程

$$\text{三相电路功率方程} \quad S_b = \sqrt{3} U_b I_b \quad (1-1)$$

$$\text{三相电路欧姆定律} \quad Z_b = U_b / \sqrt{3} I_b \quad (1-2)$$

$$\text{阻抗与导纳的关系} \quad Y_b = 1/Z_b \quad (1-3)$$

因此，五个基准值只能任意选定两个。通常计算者乐于选定基准三相功率 S_b 为一个便于计算的数字：如100MVA；选定基准线电压 U_b 为该电压等级的额定线电压或平均线电压，当 S_b 和 U_b 选定后，其余各物理量的基准值可由式(1-1)~式(1-3)推出，即

$$\left. \begin{aligned} I_b &= S_b / \sqrt{3} U_b \\ Z_b &= U_b^2 / S_b \\ Y_b &= S_b / U_b^2 \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

各物理量的基准值确定后，其标么值就很容易得出：

$$\left. \begin{aligned}
 U_{\cdot(b)} &= U/U_b \\
 I_{\cdot(b)} &= I/I_b \\
 S_{\cdot(b)} &= \frac{P}{S_b} + j \frac{Q}{S_b} = P_{\cdot(b)} + jQ_{\cdot(b)} \\
 Z_{\cdot(b)} &= \frac{R}{Z_b} + j \frac{X}{Z_b} = R_{\cdot(b)} + jX_{\cdot(b)} \\
 Y_{\cdot(b)} &= \frac{G}{Y_b} + j \frac{B}{Y_b} = G_{\cdot(b)} + jB_{\cdot(b)}
 \end{aligned} \right\} (1-5)$$

上述公式给出了同一电压等级各元件的标么参数的计算公式。然而电力系统一般都具有多种电压等级，各电压等级线路通过变压器相互连接成一个统一体。对于这种电路，在进行计算时，需要把不同电压等级的各元件参数换算到同一电压等级。具体方法是，先选定一个基本电压等级，然后根据变压器的变比，把其它电压等级的参数换算到基本电压等级来。

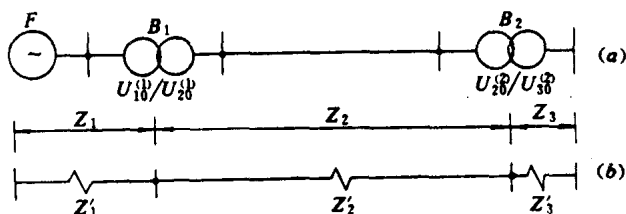


图 1-1 由变压器耦合的电力系统

图 1-1(a) 给出了由两台变压器 B_1 , B_2 将三个电压等级的线路连接起来的系统，图中 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 分别代表各电压等级所有元件的阻抗之和。变压器的变比如图所示，若取第一个电压等级为基本电压等级，将 Z_2 和 Z_3 换算到基本电压等级后，其等值电路如图 1-1(b) 所示。图中

$$\left. \begin{aligned}
 Z'_2 &= Z_2 \left(\frac{U_{10}^{(1)}}{U_{20}^{(1)}} \right)^2 \\
 Z'_3 &= Z_3 \left(\frac{U_{20}^{(2)}}{U_{30}^{(2)}} \right)^2 \left(\frac{U_{10}^{(1)}}{U_{20}^{(1)}} \right)^2
 \end{aligned} \right\} (1-6)$$

式中 $U_{10}^{(1)}/U_{20}^{(1)}$ 、 $U_{20}^{(2)}/U_{30}^{(2)}$ —— 变压器 B_1 、 B_2 的变比。

如果图 1-1(b) 所示的阻抗用标么值表示，则应先确定基本电压等级的基准参数，如取基准功率和基准电压，分别为 S_b 和 U_{1b} ，则各阻抗的标么值将等于

$$\left. \begin{aligned}
 Z_{1\cdot(b)} &= Z_1 \frac{S_b}{U_{1b}^2} \\
 Z_{2\cdot(b)} &= Z'_2 \frac{S_b}{U_{1b}^2} = Z_2 \frac{S_b}{\left(U_{1b} \frac{U_{20}^{(1)}}{U_{10}^{(1)}} \right)^2} \\
 Z_{3\cdot(b)} &= Z'_3 \frac{S_b}{U_{1b}^2} = Z_3 \frac{S_b}{\left(U_{1b} \frac{U_{20}^{(1)}}{U_{10}^{(1)}} \frac{U_{30}^{(2)}}{U_{20}^{(2)}} \right)^2}
 \end{aligned} \right\} (1-7)$$

若令

$$U_{2b} = U_{1b} \frac{U_{20}^{(1)}}{U_{10}^{(1)}} \quad (1-8)$$

显然, U_{2b} 是第一电压等级的基准电压换算到第二电压等级的电压。它就是基准电压确定后, 在第二电压等级观察到的基准电压值, 称 U_{2b} 为第二电压等级的基准电压。

同理, 第三电压等级的基准电压为:

$$U_{3b} = U_{1b} \left(\frac{U_{20}^{(1)}}{U_{10}^{(1)}} \right) \left(\frac{U_{30}^{(2)}}{U_{20}^{(2)}} \right) \quad (1-9)$$

由于变压器只能变换电压, 不能变换功率, 所以在不同电压等级观察到的基准功率都相同, 即全系统有统一的基准功率 S_b 。

按照这种方法, 当确定了全系统的基准功率和某一电压等级的基准电压后, 按照变压器的变比, 即可确定各电压等级的基准电压和其它物理量的基准值。将各电压等级有关物理量的实际值, 分别除以该电压等级各自的基准值, 就可以得到各物理量的标么值。此时, 式(1-7)可改写为:

$$\left. \begin{aligned} Z_{1,(b)} &= Z_1 \frac{S_b}{U_{1b}^2} \\ Z_{2,(b)} &= Z_2 \frac{S_b}{U_{2b}^2} \\ Z_{3,(b)} &= Z_3 \frac{S_b}{U_{3b}^2} \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

应用这种方法, 进行不同电压等级标么值的计算, 概念清楚, 等值电路简单, 这是它的优点。但是考虑到电力系统的实际情况, 这种方法有以下两个明显的缺点:

(1) 当系统中某一变压器变比改变时, 其它电压等级的基准电压可能受其影响也要发生连锁变化。这样, 等值电路中大多数元件的标么值都要重新计算, 这显然是不方便的。

(2) 对于有变压器耦合的环网系统, 有些电压等级的基准电压若按不同方向推算, 会得到不同的基准电压。这给等值电路的制定带来了困难。如在图1-2所示的环网系统中, 若取 $U_{1b} =$

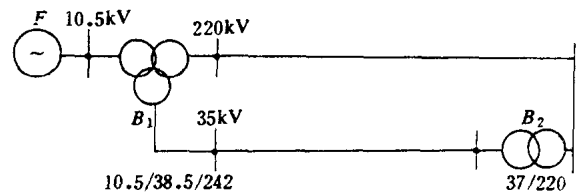


图 1-2 变压器耦合的环网系统

10.5kV, 按变压器 B_1 的变比, 可以推出35kV侧的基准电压为

$$U_{2b} = 10.5 \times \frac{38.5}{10.5} = 38.5 \text{ (kV)}$$

220kV侧的基准电压, 若按 B_1 的变比推算, 为

$$U_{3b} = 10.5 \times \frac{242}{10.5} = 242 \text{ (kV)}$$

若从 U_{2b} 出发按 B_2 的变比推算, 其基准电压为

$$U'_{3b} = 38.5 \times \frac{220}{37} = 228.9 \text{ (kV)}$$

显然 $U_{3b} \neq U'_{3b}$ 。

为了解决上述困难，在工程计算中通常事先指定各电压等级的基准电压。例如，取额定电压或平均电压为该电压等级的基准电压。这样，在近似计算时，由于不考虑变压器的实际变比，而认为变压器的变比等于各电压等级的额定电压或平均电压之比。因此各元件标么值的计算十分简单，均可按式 (1-10) 计算。通常继电保护的整定计算就属于这种情况。但在对计算精度有较高要求或分析保护动作前的运行情况时，往往需要考虑变压器的实际变比。此时由于各电压等级的基准电压均已指定，一般支路（指输电线等非变压器支路）的计算仍可按式 (1-10) 进行。只是变压器本身参数的计算要复杂一些，具体方法在讨论变压器参数时介绍。

二、变压器的参数和等值电路

变压器属于三相对称的静止电器，按照对称分量法，它的正序和负序参数相同，零序参数与变压器的接线及结构有关，详细情况在“电力系统”及“电力系统故障分析”等课程中均有介绍。这里实际是变压器各序参数计算的归纳，重点放在非标准变比变压器参数算法的讨论上。

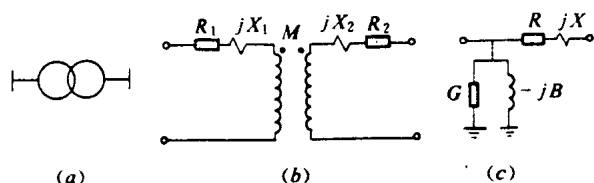


图 1-3 双绕组变压器的正、负序等值电路

1. 变压器的正、负序参数及等值电路

图 1-3 给出了双绕组变压器的正、负序等值电路，其绕组电阻 R 和漏抗 X ，可由短路实验提供的短路功率 ΔP_d 和短路电压百分数 $U_d\%$ 求出：

$$\left. \begin{aligned} R_{\cdot(b)} &= \frac{\Delta P_d}{S_e} \times \frac{U_e^2}{S_e} \times \frac{S_b}{U_b^2} \\ X_{\cdot(b)} &= \frac{U_d\%}{100} \times \frac{U_e^2}{S_e} \times \frac{S_b}{U_b^2} \end{aligned} \right\} \quad (1-11)$$

变压器激磁回路的参数，由开路实验提供的空载电流百分数 $I_0\%$ 和空载损耗 ΔP_0 求出：

$$\left. \begin{aligned} G_{\cdot(b)} &= \frac{\Delta P_0}{S_e} \times \frac{S_e}{U_e^2} \times \frac{U_b^2}{S_b} \\ B_{\cdot(b)} &= \frac{I_0\%}{100} \times \frac{S_e}{U_e^2} \times \frac{U_b^2}{S_b} \end{aligned} \right\} \quad (1-12)$$

在式 (1-11) 和式 (1-12) 中， S_e 和 U_e 为变压器的额定容量和额定电压； S_b 和 U_b 为计算时选定的基准功率和基准电压。计算中，如果取 U_e 为原边绕组的额定电压，则 U_b 应为变压器原边所在电压等级的基准电压；如果 U_e 取副边绕组的额定电压，则 U_b 应取副边绕组所在电压等级的基准电压。在电力系统计算中，特别是在继电保护的整定计算中，电力变压器的绕组电阻 R 和激磁回路的参数 G 与 B 对计算结果影响很小，可以略去不计。因此，这里重点讨论变压器绕组的漏抗 X ，特别是当变压器分接头不在额定位置时，其绕组漏抗

X 的计算方法。为了说明问题，现以图1-3(b)所示之等值电路为基础进行讨论。

令 U_{1e} 和 U_{2e} 分别为变压器原、副边绕组的额定电压， U_{10} 和 U_{20} 为原、副边绕组分接头（通常只在一侧有分接头）所在位置的电压。当变压器原、副边绕组分接头均在额定位置时，原、副边绕组的漏抗分别为 X_1 和 X_2 。若该变压器铭牌提供的短路电压百分数为 $U_d\%$ ，则它与绕组漏抗的关系是

$$\frac{U_d\%}{100} = (X_1 + X_2) \frac{S_e}{U_{1e}^2} = (X'_1 + X_2) \frac{S_e}{U_{2e}^2} \quad (1-13)$$

式中

$$X'_2 = X_2 \left(\frac{U_{1e}}{U_{2e}} \right)^2; \quad X'_1 = X_1 \left(\frac{U_{2e}}{U_{1e}} \right)^2$$

当变压器某一侧分接头所在位置电压，例如 U_{10} 不同于额定电压 U_{1e} 时，由于变压器绕组的漏抗与变压器绕组的匝数平方成正比，此时变压器漏抗的实际值将与额定值不同。令 $U_{10} = mU_{1e}$ 、 $U_{20} = U_{2e}$ ，则变压器从“1”侧观察到的漏抗有名值为

$$\begin{aligned} m^2 X_1 + X_2 \left(\frac{U_{10}}{U_{20}} \right)^2 &= m^2 X_1 + m^2 X_2 \left(\frac{U_{1e}}{U_{2e}} \right)^2 \\ &= m^2 (X_1 + X'_2) \end{aligned}$$

若取 U_{10} 为变压器原边绕组所在电压等级的基准电压，则其漏抗的标么值为

$$m^2 (X_1 + X'_2) \frac{S_e}{U_{10}^2} = (X_1 + X'_2) \frac{S_e}{U_{1e}^2} = \frac{U_d\%}{100} \quad (1-14)$$

同理，从副边绕组看变压器漏抗的标么值为

$$\left[m^2 X_1 \left(\frac{U_{20}}{U_{10}} \right)^2 + X_2 \right] \frac{S_e}{U_{20}^2} = (X'_1 + X_2) \frac{S_e}{U_{2e}^2} = \frac{U_d\%}{100} \quad (1-15)$$

式(1-14)和式(1-15)表明：当变压器分接头不在额定位置时，只要取变压器分接头所在位置的电压为基准电压，从两侧看变压器漏抗的标么值就相等，并恒等于短路电压百分值除以100。这样，变压器绕组漏抗的有名值从原、副边看，分别为

$$X_T = \frac{U_d\%}{100} \times \frac{U_{10}^2}{S_e} \quad \text{与} \quad X'_T = \frac{U_d\%}{100} \times \frac{U_{20}^2}{S_e} \quad (1-16)$$

有了式(1-16)，不难求出给定基准电压变压器的漏抗标么值的计算方法。

例如图1-4所示变压器，若给定的基准电压在“1”侧为 U_{1b} ，在“2”侧为 U_{2b} ，给定基准功率为 S_b ，则从“1”侧看变压器漏抗的标么值为

$$X_{T,(b)} = \frac{U_d\%}{100} \times \frac{U_{10}^2}{S_e} \times \frac{S_b}{U_{1b}^2} \quad (1-17)$$

从“2”侧看，漏抗的标么值为

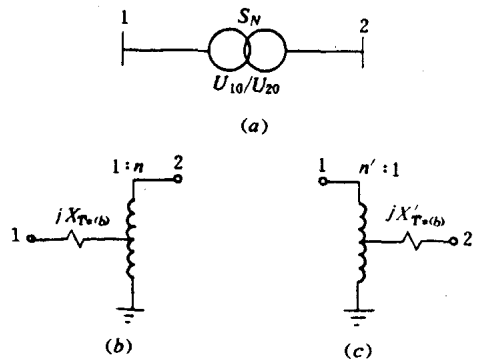


图 1-4 非标准变比双绕组变压器的等值电路

$$X'_{T \cdot (b)} = \frac{U_d \%}{100} \times \frac{U_{20}^2}{S_e} \times \frac{S_b}{U_{2b}^2} \quad (1-18)$$

比较式(1-17)与式(1-18),不难看出:当 $\frac{U_{10}}{U_{20}} \neq \frac{U_{1b}}{U_{2b}}$ 时, $X_{T \cdot (b)} \neq X'_{T \cdot (b)}$,即当变压器两侧所指定的基准电压之比与变压器两侧分接头所在位置电压之比(即变压器的实际变比)不同时,同一台变压器,从不同侧看,其漏抗的标么值不同。这种变压器通常被称为非标准变比变压器。

由于从不同侧看,非标准变比变压器的标么电抗值有所不同,因此在制做等值电路时,要引入理想变压器。理想变压器的等值电路如图1-4(b)或(c)所示。

在图1-4(b)中,从“1”侧看变压器标么电抗为 $X_{T \cdot (b)}$,从“2”侧看应为 $X'_{T \cdot (b)}$,因此该理想变压器的变比应该是

$$n = \sqrt{\frac{X'_{T \cdot (b)}}{X_{T \cdot (b)}}} = \frac{U_{20}}{U_{10}} = \frac{U_{2b}}{U_{1b}} = \frac{U_{20 \cdot (b)}}{U_{10 \cdot (b)}} \quad (1-19)$$

即理想变压器的变比等于其两侧分接头的标么电压之比。同理,图1-4(c)所示理想变压器的变比 n' 为

$$n' = \frac{U_{10 \cdot (b)}}{U_{20 \cdot (b)}} \quad (1-20)$$

三绕组变压器的等值电路如图1-5所示,其参数计算可以参照双绕组变压器的方法进行。由于三绕组变压器各绕组容量比有不同的组合以及变压器的额定容量和各绕组的额定容量可能不同,因此在利用制造厂提供的短路实验数据时,要注意实验时所依据的容量与变压器的额定容量是否相同。当不同时,应先将实验数据进行容量换算,然后再用与双绕组变压器类似的方法进行计算。

图 1-5 三绕组变压器的等值电路

对于非标准变比的三绕组变压器,也可按照类似于非标准变比的双绕组变压器的方法进行计算。只是这里在等值电路中有可能要用两个理想变压器,其理想变压器变比仍等于两侧分接头标么电压之比。下面通过例题说明三绕组变压器漏抗的具体算法。

【例】某三绕组变压器的参数如图1-6所示,其中短路电压百分数均已换算到额定容量。若取 $S_b = 100\text{MVA}$, $U_{1b} = 230\text{kV}$, $U_{2b} = 37\text{kV}$, $U_{3b} = 10.5\text{kV}$,试求变压器的漏抗及相应的等值电路。

解 (1) 计算变压器以额定值为基准的漏抗标么值:

$$X_{1 \cdot (e)} = \frac{1}{2} (0.18 + 0.11 - 0.07) = 0.11$$

$$X_{2 \cdot (e)} = 0.18 - 0.11 = 0.07$$

$$X_{3 \cdot (e)} = 0.11 - 0.11 = 0$$

(2) 计算以给定基准值为基准的标么漏抗 (以“3”侧为基准侧):

$$X_{1 \cdot (b)} = 0.11 \times \frac{11^2}{60} \times \frac{100}{10.5^2} = 0.2012$$

$$X_{2 \cdot (b)} = 0.07 \times \frac{11^2}{60} \times \frac{100}{10.5^2} = 0.128$$

$$X_{3 \cdot (b)} = 0$$

(3) 求理想变压器变比:

$$n_{31} = \frac{U_{10 \cdot (b)}}{U_{30 \cdot (b)}} = \frac{\frac{220}{230}}{\frac{11}{10.5}} = 0.913$$

$$n_{32} = \frac{U_{20 \cdot (b)}}{U_{30 \cdot (b)}} = \frac{\frac{37}{37}}{\frac{11}{10.5}} = 0.9545$$

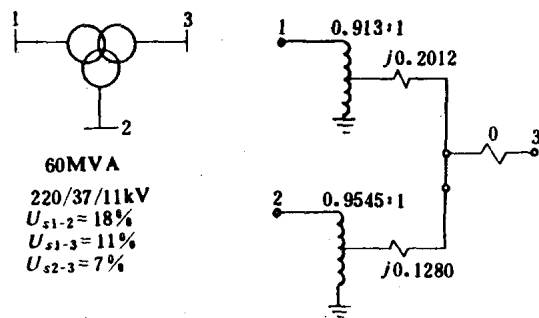


图 1-6 三绕组变压器的计算实例

2. 变压器的零序参数和等值电路

变压器的零序参数和等值电路与变压器的结构和接线方式有关。对于单相变压器组或四柱式三相变压器,其绕组的零序漏抗和激磁阻抗与正序的相同,只是需根据各绕组的接线方式来决定零序等值电路中各零序阻抗间的连接关系。对于三柱式三相变压器,因为它的铁芯没有闭合的零序磁路,零序磁通要通过铁壳才能返回,因此其零序激磁回路阻抗较小,不允许忽略,故其零序阻抗与正序的不同,必须采用零序电抗的实测值。各类变压器的零序等值电路,可从有关专业书籍中查得。

三、输电线路的参数和等值电路

1. 输电线路各序参数的计算

经过完全换位的架空输电线路,可以当作三相对称的静止电路来处理。根据电工基础的理论分析,无架空地线的输电线路各相序的阻抗为

$$\left. \begin{aligned} Z_1 = Z_2 &= \left(r_1 + j0.1445 \lg \frac{D_m}{r'} \right) \\ Z_0 &= \left(r_1 + 0.15 + j0.4335 \lg \frac{D_s}{\sqrt[3]{r' D_m^2}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1-21)$$

式中 r_1 ——单位长度导线电阻 (Ω/km)；

r' ——导线的等值半径 (几何平均半径) (cm)；

D_m ——三相导线的几何平均距离 (cm)；

D_g ——导线—大地的等效深度 (cm)。

式 (1-21) 表明, 无架空地线的输电线路, 其零序电抗几乎是正序电抗的三倍; 由于大地电阻的影响, 每相零序等值电阻约增大 $0.15\Omega/\text{km}$ 。对于其它类型的输电线路, 也可根据电工基础的理论推出相应的各序阻抗的计算公式。然而, 一般说来, 由于输电线路的阻抗要受到沿线地质条件和杆塔结构变化的影响, 难以用公式计算, 尤其是零序参数受地质条件影响更大, 因此工程上常常采用实测的方法得到输电线路各序的参数。对于缺乏资料且要求不高的场合, 可以采用以下的经验数据来估算:

各类单导线架空输电线的正、负序电抗为 $X_1 = X_2 = 0.4\Omega/\text{km}$

零序电抗分别按以下情况选取:

无架空地线的单回线 $X_0 = 3.5X_1$

无架空地线的双回线 $X_0 = 5.5X_1$

钢质架空地线的单回线 $X_0 = 3.0X_1$

钢质架空地线的双回线 $X_0 = 4.7X_1$

良导体架空地线的单回线 $X_0 = 2.0X_1$

良导体架空地线的双回线 $X_0 = 3.0X_1$

从上述典型数据可以看出, 架空输电线路的相序参数有以下几个特点:

- (1) 正、负序参数相等, 而且受架设方式影响较小。
- (2) 同杆双回输电线每回线路的零序电抗明显大于单回输电线的零序电抗。
- (3) 架空地线使输电线的零序电抗明显减小。

造成上述情况的原因是由于三相线路间的互感和三相线路与架空地线间的互感, 这些互感只在零序的情况下才显得突出。在正序和负序的情况下, 由于三相电流在空间产生的磁场是相互抵消的, 因此可以忽略它们的影响。

2. 平行线路的互感及其等值电路

线路间的互感, 除了在同杆平行架设的双回线路中存在之外, 在一些相邻近的平行线路间也存在。为此有必要讨论一下互感电路的一般处理方法。

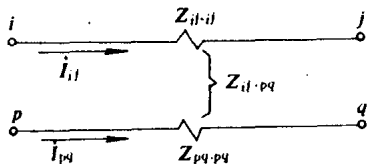


图 1-7 平行输电线的零序等值电路

设有两条如图 1-7 所示之平行线路, 支路 ij 的零序自阻抗为 $Z_{ij \cdot ij}$, 支路 pq 的零序自阻抗为 $Z_{pq \cdot pq}$, 支路 ij 与 pq 间的互阻抗为 $Z_{ij \cdot pq} = Z_{pq \cdot ij}$ 。由此, 图 1-7 (a) 所示之电路可以用如下支路阻抗方程来描述

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{ij} \\ \dot{U}_{pq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{ij \cdot ij} & Z_{ij \cdot pq} \\ Z_{pq \cdot ij} & Z_{pq \cdot pq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{ij} \\ \dot{I}_{pq} \end{bmatrix} \quad (1-22)$$

简记为

$$U_b = Z_b I_b$$