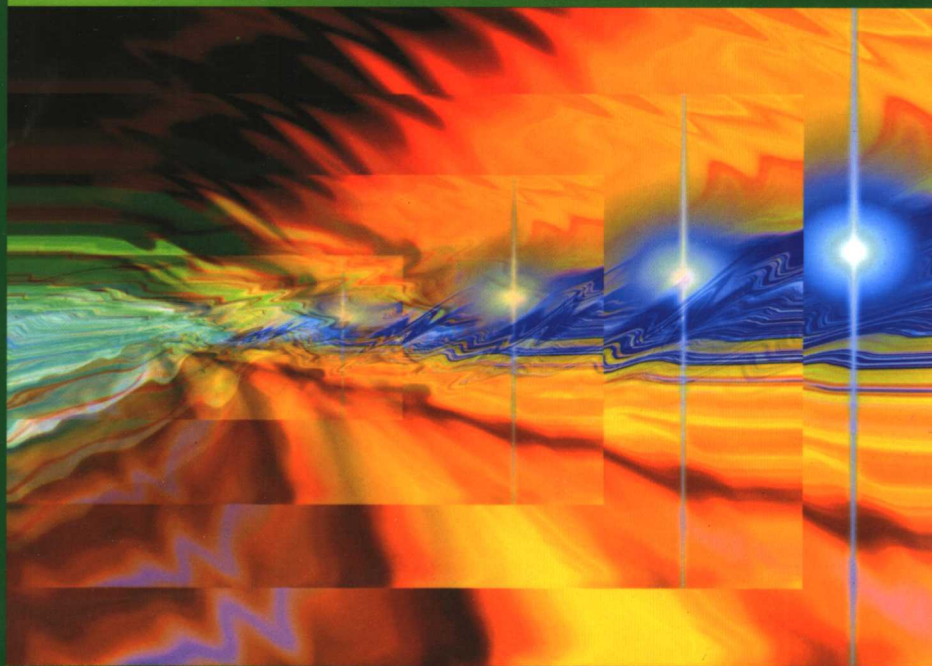


GAOYA DIANWANG JIDIAN BAOHU

高压电网继电保护 运行与设计

王梅义 编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

高压电网继电保护 运行与设计

王梅义 编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

这是一本以介绍高压电网继电保护运行与设计经验为主要内容的书。在长期的实践中,这些经验发挥着积极作用。此外本书从继电保护观点对世界上几次著名的大停电事故进行了评价,进一步说明了继电保护在保证电力系统安全方面中所扮演的重要角色。

本书可供电力系统中高压电网继电保护的运行、设计相关人员阅读,也可供高等院校的师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

高压电网继电保护运行与设计/王梅义编. —北京:
中国电力出版社, 2007

ISBN 978-7-5083-4887-2

I. 高... II. 王... III. ①高压电力系统-继电保护-运行②高压电力系统-继电保护-设计 IV. TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 125960 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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 2 月第一版 2007 年 2 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15 印张 367 千字

印数 0001—3000 册 定价 24.00 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

这是一本主要通过整理汇编过去出版的书籍而成的书，供有关的专业技术人员参考。

具有自己特点的中国高压电网继电保护的运行和设计经验是十分丰富的。中国人自己设计的电网继电保护，经过不断的运行总结和提高，对保证中国电力系统长期以来的安全运行，发挥了不可替代的重要作用。这是从解放以来，一批又一批从事电网继电保护的专业工作者，经过不断地学习、探索、总结和创造，才取得了今天这样令人自豪的成就。这些成就，是多年来有关运行、设计和制造部门的同行们通力协作，为了共同的事业无私奉献所取得的。这样的团队精神，无疑会长期不断地为保证我国的电网安全继续发挥积极的重要作用。

我国历次的继电保护技术讨论会的热闹非凡是出了名的，针锋相对乃至面红耳赤的热烈争论，总是会取得公认的有重要实践意义的结论，我国的继电保护技术水平，也因之而日益提高，继电保护对保证电网安全运行的作用也日趋完善。会上的争论，也不断地增进了继电保护工作者之间的友谊。作为过来人，此情此景，历历在目，不能忘怀。

1977年前后，原水利电力部生产司多次组织对“文化大革命”以来主要继电保护装置的运行情况进行总结分析。1978年，又组织全国各大区网、省局从事继电保护运行工作的专业负责人进行学习研讨，总结交流运行经验，历时三个月。在这样的前题下，1979年，几位志同道合者立意把他们解放以来在东北电网直接从事继电保护实际工作的经验和心得，结合了解到的全国各地的继电保护运行经验，整理成书，以供同行们参考。当年秋，作者们与该书编辑、审稿专家，在原广东省电力局的支持下，齐集广东新会，经过三个月的连续工作，完成了《高压电网继电保护运行技术》一书的定稿。1981年，该书正式出版。随即，原水利电力部生产司又组织全国各大区网、省局及各大区电力设计院从事继电保护专业的主要负责人员，以该书为主要参考材料，举办了全国继电保护技术研讨班，对高压电网继电保护的基本运行技术、运行管理要点，以及对主要成套继电保护装置的原理接线及技术要求，取得了共识。

此后，在相关上级的领导下，组织包括设计、科研和制造部门的有关人员联合进行设计，由各制造部门按“四统一”设计制作样机，并通过了由原水利电力部电力科学研究院谢葆炎同志负责的动态模拟试验。1985年，原水利电力部和原机械工业部联合召开了审查会，审定了“四统一”设计，并同意产品在电力系统中试点采用。1987年10月，两部召开全国会议，进行了产品鉴定，同意批量生产，在全国电网中推广采用。

参加“四统一”设计的有关单位有：原水利电力部电力规划设计院，电力科学研究院，原东北电力技术改进局，东北、西北和华东电力设计院，南京自动化设备厂、原机械工业部许昌继电器研究所、上海继电器厂等单位。

所谓的“四统一”设计是指：统一相关装置的技术条件及接线回路（包括零序电流方向保护、相间距离保护、高频闭锁保护、高频相差保护、自动重合闸等装置，以及操作箱和电压切换箱和高频保护用收发信机），统一元件符号和统一端子排编号。

其后，由相关同志编写了《四统一高压线路继电保护装置原理设计》一书，于1990年正式出版。

20世纪90年代中叶，在深入总结各地区继电保护运行和设计有关问题的基础上，经过多次组织各网、省局主要继电保护运行人员的广泛讨论，原电力工业部在1995年颁发了《电力系统继电保护反事故措施要点》，要求各基建、设计和生产运行部门执行。文件主要以正确处理变电所二次回路相关问题为重点。实践经验证明，变电所二次回路的某些缺陷，往往引起多台继电保护装置的同时误动作。文件同时也重申了运行与设计的一些基本原则。通过各电网运行工作者的努力，这些年因二次回路及高频收发信通道引发的继电保护不正确动作事故，得以大幅度降低。

上述两本书，《高压电网继电保护运行技术》的作者是：蒙定中、郑奎璋、谢葆炎、王大从和王梅义；《四统一高压线路继电保护原理设计》的作者是：翁子文、李国钧、冯匡一、**杨凤维**、董柏林和王梅义。

这两本书，出版年代已久，其中主要涉及当时采用的整流型和半导体元件和相应的具体接线回路等内容已基本过时，但是，其所论及的主要运行经验、设计原理与相关应用问题的考虑，对搞好今后的继电保护工作仍有现实意义，而“四统一”设计的技术原则，仍为制造部门所遵从。有读者希望，能将这两本书重新整理出版。这件事落在了我的头上。

在近年来的几次世界著名的大停电事故中，继电保护都扮演了重要角色。借此，也在本书中作了介绍。

书中有什么错误，恳请读者批评指正。

王梅义

2006年6月

前言

■ 第一章 故障计算及所用参数	1
第一节 对称分量法	1
第二节 高压电网故障计算的基本假定和网络参数	4
■ 第二章 零序电流保护	19
第一节 总论	19
第二节 线路保护中的零序功率方向问题	24
第三节 对零序电流方向保护的评价	25
第四节 线路零序电流方向保护的配置及其整定原则	27
第五节 合理安排变电所变压器中性点的接地运行方式	29
第六节 变压器零序电流保护和零序电压保护	30
■ 第三章 线路距离保护	35
第一节 相间距离保护的“四统一”设计	35
第二节 线路距离保护的电压回路断线闭锁问题	36
第三节 线路距离保护的振荡闭锁与防止过负荷误动作	43
第四节 对110kV线路距离保护的的特殊要求	58
第五节 $3I_0$ 极化多相补偿接地距离继电器	59
第六节 振荡过程中的母线电压、线路电流、有功功率及无功功率的表现形式	70
■ 第四章 线路纵联保护	72
第一节 方向纵联保护综述	72
第二节 高压线路高频闭锁纵联保护装置的“四统一”设计	79
第三节 高频相差保护“四统一”设计的技术性能要求	93
■ 第五章 自动重合闸	96
第一节 三相重合闸的设计原则	96
第二节 综合重合闸装置“四统一”设计的技术性能要求	101
第三节 重合闸方式选择及时间整定	118
■ 第六章 双回线的保护和分支线的保护及其重合闸	119
第一节 双回线的基本保护	119
第二节 双回线保护的的特殊问题	121
第三节 分支线路保护的的特殊问题	130

第四节	分支线的线路自动重合闸	132
本章附录	136
第七章	母线保护的应用和断路器失灵保护及母联保护	138
第一节	母线保护的应用	138
第二节	断路器失灵保护	139
第三节	母线联络断路器、旁路断路器的保护及其他	144
第八章	保护装置的试验	147
第一节	保护装置的试验问题	147
第二节	几种基本测试方法	148
第三节	试验项目和内容的安排	154
第四节	模拟试验设备	156
第五节	事故后检验	159
附录 8.1	模拟断路器原理接线	162
附录 8.2	同杆双回线的模拟	163
第九章	电力线载波通道与保护用收发信机	165
第一节	继电保护使用电力线载波通道的几个问题	165
第二节	220kV 线路相地耦合通道的有关传输衰耗值	173
第三节	与频道分配有关的电力线载波电话机性能指标	175
第四节	高频保护专用收发信机的技术特点	177
第五节	高频保护专用收发信机的主要性能	180
第六节	高频保护专用收发信机的应用问题	184
第十章	从继电保护观点评论几次著名的系统大停电事故	187
第一节	综述	187
第二节	1999 年 7 月 29 日台湾大停电事故	191
第三节	美国西部 1996 年 8 月 10 日大停电事故	194
第四节	2003 年 8 月 14 日美加大停电事故	203
附录	分析距离继电器运行性能的电压相量图法	209

第一章 故障计算及所用参数

第一节 对称分量法

故障计算是电力系统及其继电保护设计与运行分析的重要基础。自 20 世纪 30 年代以来，对称分量法一直成为故障计算的基本方法。现在已经有了计算电力系统故障包括各种复杂故障在内的计算机程序，故障计算已经非常方便。但是，对称分量法的应用，只有在规定的假定前提下才是正确的。不注意这一点，对从事继电保护运行分析和现场试验人员来说，就可能在具体的实际工作中引出严重的错误。

采用对称分量法有三个假定前提：

(1) 对称分量法的计算基础是运用叠加原理，而叠加原理的适用前提是线性回路。只有假定组成电网的设备参数线性，才可以用叠加原理来计算电网电流与电压。记住这个前提是重要的。例如，处理带有饱和参数的电网问题时，利用叠加原理要么只能是近似的，要么得出的结果完全不可用。

(2) 以事先确定的电压 U 和电流 I 的正方向为基础。

规定电压和电流的正方向，是进行一切向量计算和试验分析的根本前提，其重要性是第一位的。具体的正方向规定如下：

以由母线流向电网，即流出的电流方向为规定的电流正方向。

以由地到设备或线路端子的电位升，即电源电压为规定的电压正方向。

同时，由母线流出的电流和母线电压同相，规定为有功功率 P 的正方向。

以母线流出的电流落后母线电压 90° ，规定为无功功率 Q 的正方向。

在首先确定了正方向的定义之后，才有可能确定计算过程中电压、电流、有功功率和无功功率正负号的物理意义。对继电保护工作人员来说，只有这样，才有可能绘出有确定物理意义的向量图，因而正方向的确定特别重要。

值得说明的是无功功率 Q 的数值正负问题。对于一台发电机组，其正常输出功率是既输出有功功率 P 也输出无功功率 Q ，计算时，它输出的有功功率 P 的数值为正值是毫无疑问的，但输出的无功功率 Q ，应当如何表示？关键是选择以电压为坐标轴还是以电流为坐标轴来表示 Q 。若以电流为坐标轴，因为发电机组正常输出的电流落后于电压，即电压超前电流，应表示为 $+jQ$ ；若以电压为坐标轴，则因电流落后电压，应表示为 $-jQ$ 。以电压为坐标轴，因为它在运行中相对固定，无疑更为合适。而电流的大小及方向在运行过程往往不断变化，特别在故障过程中，其大小与方向的变化极大。

按前述定义，发电机组机端的正常输出功率应为 $P-jQ$ 。

但在有些计算中，却定义发电机组的正常输出功率为 $P+jQ$ 。应引起注意，以免在物理

概念上造成混乱。

按照如上的规定，正确的电流互感器二次、电压互感器二次的外接端子极性与保护装置的端子极性连接方式应当是：正电流流入保护盘的电流正极性端子，母线侧电压接入保护盘电压正端子。只有这样，才能确保二次回路的接线正确，和现场试验时对试验结果的正确判读。

(3) 各相回路的电网设备及线路参数完全对称。

在上述的三个前提下，任一 N 相系统的相电压和相电流都可以化分为 N 个对称的分量分别进行计算，然后由各分量计算的结果进行叠加，求得实际的相量原值。

以下专门讨论化分为正、负及零序分量的三相系统情况。

基本公式：以 I_A 、 I_B 、 I_C 分别表示 A 相电流、B 相电流及 C 相电流， I_{A1} 表示以 A 相为坐标轴的正序电流分量， I_{A2} 表示以 A 相为坐标轴的负序电流分量及 I_{A0} 表示以 A 相为坐标轴的零序电流分量，则有

$$I_{A0} = \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C)$$

$$I_{A1} = \frac{1}{3}(I_A + aI_B + a^2I_C)$$

$$I_{A2} = \frac{1}{3}(I_A + a^2I_B + aI_C)$$

$$I_A = I_{A0} + I_{A1} + I_{A2}$$

$$I_B = I_{A0} + a^2I_{A1} + aI_{A2}$$

$$I_C = I_{A0} + aI_{A1} + a^2I_{A2}$$

式中 $a = e^{j120^\circ}$ ； $a^2 = e^{-j120^\circ}$ ； $1 + a + a^2 = 0$ 。

电压的正、负及零序分量的三相系统情况与电流的表达式同样适用。

正序回路是正常的三相平衡电路，负序回路是反转的三相平衡电路，而零序回路则是三相完全一致的三相平衡电路。

在图 1-1 中，F1、F2 和 F0 分别是实体上的故障点在各序网中的故障点位置。

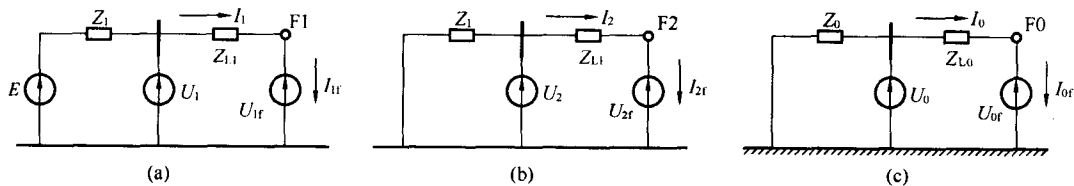


图 1-1 三相对称系统短路计算用序网络

(a) 正序网络；(b) 负序网络；(c) 零序网络

各序网络中的基本电压、电流关系式为：

母线电压
$$U_1 = E - I_1 Z_1 \tag{1-1}$$

$$U_2 = -I_2 Z_1 \tag{1-2}$$

$$U_0 = -I_0 Z_0 \tag{1-3}$$

故障点电压
$$U_{1f} = E - (Z_1 + Z_{L1}) I_1 \tag{1-4}$$

$$U_{2f} = -(Z_1 + Z_{L1})I_2 \tag{1-5}$$

$$U_{0f} = -(Z_0 + Z_{L0})I_0 \tag{1-6}$$

式 (1-1) ~ 式 (1-6) 中, 假定发电机的正序阻抗与负序阻抗相等, 线路的各序参数

$$Z_{L1} = Z_L - Z_M \tag{1-7}$$

$$Z_{L0} = Z_L + 2Z_M \tag{1-8}$$

$$C_1 = C_g + 3C_M \tag{1-9}$$

$$C_0 = C_g \tag{1-10}$$

式 (1-9) ~ 式 (1-10) 中, Z_L, Z_M ——各相自阻抗与相间互阻抗;

C_g, C_M ——各相对地电容与相间电容。

有几点值得特别说明:

1) 只有正序回路才有实体的电源。正常运行时的三相系统单线接线图就是正序回路。在正序回路中, 电源点电压最高, 经正序电流流过产生的压降后, 沿正序电流方向, 到故障点处的电压最低。

2) 只是因为发生了故障, 在回路中通过了负序电流和零序电流, 才在相应的序网络中产生了相应的电压。负序和零序回路中的能源完全由正序回路通过故障点提供, 因此, 负序和零序回路的电源点在故障点处。在故障点, 负序和零序电压在各自的序回路中有最高值, 通过负序和零序电流流向故障点产生的压降, 负序和零序电压逆各自电流方向到发电机处降为零。

由此, 任何的短路电流计算, 都必须取故障电流流入故障点为电流正方向, 故障点对中性点 (正序及负序回路) 或地 (零序回路) 的电压升为电压的正方向。

式 (1-2) 及式 (1-3) 说明, 假定 Z_1 与 Z_0 的相位角分别为 φ_1 及 φ_0 , 则 I_2 超前 U_2 的相位角为 $180^\circ - \varphi_1$ 及 I_0 超前 U_0 的相位角为 $180^\circ - \varphi_0$ 。这一关系, 在实用中值得特别注意。

用负序分量或零序分量可以做成专门的继电器。在高压电网中, 主要是因为大型变压器励磁电流的非线性特性, 会在母线电压中产生较大的谐波。特别在电网轻负荷条件下, 母线电压的某些增高, 会引起母线谐波电压的非线性大幅度上涨, 这是实际运行测量中不止一次发现的情况。而零序电压滤过器和负序电压滤过器也正是某些谐波的滤波器 (零序为 3、9 等次谐波, 负序为 5、11 等次谐波), 因而必须滤波, 尤以 3、5 次为最。

有了上述的基础, 就可以按故障类别来求各序电流、电压。

例如在图 1-1 中 F 点发生金属性的 A 相单相对地短路, 流过故障点的电流为 $I_A = I_{Af}, I_B = I_{Cf} = 0$, 可得 $I_{0f} + I_{1f} + I_{2f} = I_{Af}$

$$a^2 I_{1f} + a I_{2f} + I_{0f} = a I_{1f} + a^2 I_{2f} + I_{0f} = 0$$

$$\text{由} \quad 1 + a + a^2 = 0$$

$$\text{得} \quad I_{1f} = I_{2f} = I_{0f}$$

其计算网络如图 1-2。

其他各种类别的纵向故障, 都是按照故障点的各相电压、电流关系, 求得在故障点正、负与零序网络的应有连接方式, 即可据此求得故障点的各序电压、电流值, 并由此求得各相电压和电流的相量值。

当故障前有负荷电流时, 或者直接由图 1-2 求得故障后的各序电

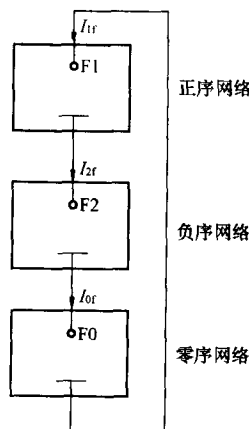


图 1-2 A 相金属性单相接地时的计算网络

流（其中正序电流为故障后的总电流），也可以用叠加原理，先求得故障点在故障前的正序电压，并以此为电源，利用图 1-2 求得各序电流的量，其中正序电流为故障分量，再与负荷电流叠加，即可求得故障后的正序总电流。

第二节 高压电网故障计算的基本假定和网络参数

一、高压电网实用故障计算的假设条件

研究电网继电保护的工作原理、配置、运行和整定，均需对故障电网的故障电流、故障电压等有关电气量进行计算分析。在大电力系统中，这些电气量的变化是一个比较复杂的过程，其影响因素甚多，要进行十分精确的计算甚为困难，也无此必要。在实用计算中，为了简化计算工作，可以在允许误差范围内，针对不同电压等级电网的特点，提出某些相应的假设条件。多年来，在实际运行中计算 110kV 及以上高压电网的稳态故障电流时，一般作了如下假设：

(1) 计算短路故障各电气量的故障分量时，均假定故障点故障前电压为额定电压（标么值为 1），同时不计变压器电压分接头在实际运行中的变动情况，并假定各级电网的实际运行电压均等于其标称电压（如 110kV、220kV 等），或某一选定的平均电压值。

在分析和整定保护元件需计及负荷电流的影响时，采用叠加原理，即以故障前负荷电流加故障分量电流。

(2) 在计算稳态电流的幅值时，忽略发电机、变压器、线路诸元件等值阻抗中的电阻部分，或者假定它们的阻抗角相等，而采用阻抗的绝对值。因为在 110kV 及以上高压电网中，综合等值阻抗的电阻部分与电抗部分相比，一般只占百分之十几到二十几，两者以向量相加后的阻抗值与电抗值相比，只差百分之几，线路电压愈高，差别愈小，因而，在实用计算中，可以用电抗值代替阻抗值，或者以阻抗绝对值代替阻抗相量，而不会带来大的误差。

(3) 发电机和其他同步电机的正序阻抗，可采用 $t=0$ 时的纵轴初瞬态电抗 X''_d 。发电机磁路正常在额定磁通下运行，略呈饱和状态，在计算初瞬态电流时，采用与此饱和状态相适应的 X''_d 饱和值较为适宜，但因为发电机阻抗仅占高压电网综合等值阻抗的一小部分，所以在实际上，无论采用饱和值或非饱和值，计算结果不会有有多大差别。

(4) 假定旋转电机的负序电抗 X_2 等于 X''_d 。这一假定对在系统容量中占有较大比重的隐极电机而言比较符合实际，对凸极电机，虽有较大出入，但它们只占少数且在电网综合阻抗中占较小部分，不会影响高压电网短路电流的基本状况。所以，为了简化起见，仍可以假设所有旋转电机的 X_2 均等于 X''_d 。

(5) 假设电网的三相系统完全对称。实际情况也基本如此。而且也只有这样，才可能利用对称分量法等以简化计算。

(6) 在计算短路电流时，多数情况下可以不计线路电容电流和变压器励磁电流的影响。这对计算结果一般不会产生较大误差。个别情况，例如设计和整定长线路差动纵联保护和整定分支线保护等，必须分别考虑电容电流和变压器励磁涌流的影响时，也只需局部地就有关部分适当加以考虑。

(7) 不计短路电流工频分量在短路故障后的衰减过程和强行励磁后的变化过程。因为：

1) 高压电网故障一般在电气上远离发电机, 因而发电机参数和励磁电压的变化对故障电流影响不明显。

2) 保护动作较快, 一般保护起动元件在一两个周波以内动作, 而故障电流工频分量在短路后的衰减需要有个过程, 来不及影响瞬时保护的動作状态。即使对延时动作的保护, 也因为一般均采用由瞬时动作的起动元件起动时间元件的方式, 起动元件一旦动作后, 只有当电流衰减到低于其返回值时, 才能返回。所以只要故障电流变化不过大, 就不致影响保护的動作状况。

(8) 在计算短路电流时, 只计算短路电流中的工频分量。但在研究保护动作特性和设计、整定及试验保护时, 则必须考虑直流分量的影响。从大量故障录波图中可见, 故障电流中有时存在直流分量, 在重合于故障元件时, 亦然。从理论上讲, 最不利的情况是电流波形 100% 偏移, 并且直流分量长时不衰减。此时, 电流的均方根值相当于无直流分量情况下的 $\sqrt{3}$ 倍。但实际上, 因为故障点的击穿需要有足够高电压, 故障不可能发生于正好电压过零的瞬间。同时 220kV 线路末端故障时的短路电路直流分量衰减时间常数相对地比出口故障时小得多, 故对一般动作较慢的反应电流有效值的继电器, 整定时可以不必精确计算直流分量, 而只在可靠系数中适当考虑其影响即可。但对动作时间更快的电流继电器, 则应要求元件本身具有抗直流分量的能力, 否则, 单靠大幅度提高保护定值的办法来消除直流分量的影响, 显然对改善电网保护性能不利。对以电流差动原理或电流比相原理构成的瞬时保护, 也必须考虑电流互感器因故障电流中存在直流分量可能导致铁心饱和时的保护动作性能。

(9) 以金属性短路为计算短路故障电流的条件。尽管在实际短路故障时, 故障点往往存在电弧电阻, 接地时还有接地电阻, 但在一般情况下, 它对短路电流绝对值并无较大影响, 不致使电流保护范围起较大变化, 因而只需在保护灵敏度上适当考虑包括这个因素即可。只是对短线路的距离保护, 以及其他与阻抗相角有较大关系的保护, 则必须考虑过渡电阻的影响。并且, 在设计和整定后备保护时, 还必须考虑可能发生类似导线对树放电的经高电阻接地的故障。这种故障, 有时过渡电阻高达 100 Ω 以上, 对故障等值阻抗起决定作用。此时, 虽可在动作时间上放宽对保护的要求, 但仍应以能最终切除故障为原则。

长期运行实践证明, 对于 110kV 及以上电网的稳态短路故障电流计算, 上述假定条件是可取的, 不但简化了计算, 而且其计算结果与大量故障录波照片所反映的实际电流值很接近。东北 220kV 电网一直利用故障当时录波器所录零序电流幅值, 对照按上述假设条件计算而得的接地故障零序电流曲线来判断故障点位置, 并以此指导巡线, 获得了很好的效果。

二、电网参数

电网中各电气元件的阻抗参数的正确性, 对继电保护工作性能往往影响较大。所以对继电保护工作所用的阻抗参数, 一般均要求实测。

根据对称分量法原理, 电网中各元件的阻抗参数, 可以分为正序、负序、零序三种阻抗值。

1. 发电机和其他同步电机的正序纵轴初瞬变电抗 X''_d 和负序电抗 X_2

发电机和其他同步电机的阻抗参数种类很多, 但就高压电网短路计算而言, 常用的阻抗参数只有纵轴初瞬变电抗 X''_d 与负序电抗 X_2 两种。发电机和其他同步电机的电阻很小, 可以忽略不计。

(1) 电网突然短路的初瞬间, 发电机定子绕组电流发生突然变化, 交变电流中的纵轴部

分产生纵轴磁通，穿过磁极与定子绕组铰链。根据闭合回路中磁链不能突变的原理，此时，定子绕组和阻尼绕组及等效阻尼绕组相当于闭路的变压器二次绕组，将出现感应电流，以产生相反的磁通来抵消定子电流所产生的磁通，这时，从定子侧所见的等效电抗，称为纵轴初瞬变电抗 X''_d ，其等值电路如图 1-3 所示。图中 X_s 为定子漏抗， X_{ad} 为纵轴电枢反应电抗，即定子绕组与转子绕组间的互感抗， X_{Dd} 为转子阻尼绕组或等效阻尼绕组的纵轴漏抗， X_{fd} 为转子励磁绕组的漏抗。

(2) 电网不对称短路时，定子绕组通过负序电流，产生转速与额定频率相同，但方向相反的旋转磁场。这个旋转磁场与转子间的相对速度将两倍于额定频率。由于转子磁极与定子负序磁场相对位置的周期性变化，一般认为从发电机定子侧所见的负序电抗 X_2 ，可以用纵轴初瞬变电抗 X''_d 与横轴初瞬变电抗 X''_q 的平均值来代表，即

$$X_2 = \frac{X''_d + X''_q}{2}$$

对隐极电机， $X''_d \approx X''_q$ ，所以， $X_2 \approx X''_d$ 。对凸极电机， $X''_q > X''_d$ ，但为了简化计算，仍可按 $X_2 = X''_d$ 计算。

调相机、大容量同步电动机与发电机情况基本相同，可以按发电机对待。

2. 双绕组变压器的正序阻抗参数

双绕组变压器的等值电路如图 1-4 (a) 所示，图中 R_I 和 R_{II} 分别代表一、二次绕组电阻标么值， jX_I 和 jX_{II} 分别代表一、二次绕组漏抗标么值， jX_μ 代表变压器一、二次绕组间的互感抗标么值， R_0 代表变压器铁损等值电阻标么值。一般变压器的互感抗及铁损电阻与一、二次绕组漏抗相比要大百倍甚至上千倍，可以忽略不计，因此其等值电路可以简化为图 1-4 (b)。

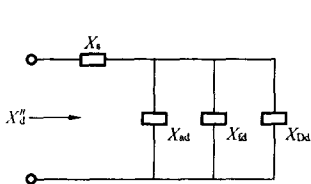


图 1-3 发电机纵轴初瞬变电抗等值电路

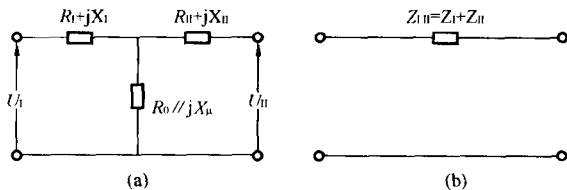


图 1-4 双绕组变压器正序等值阻抗
(a) 完整的等值电路；(b) 简化后的等值电路

变压器正序阻抗与负序阻抗相等，其值一般在变压器出厂时都根据实测值标明在铭牌上，短路电压比即以变压器额定容量为基准的正、负序阻抗标么值。

3. 双绕组变压器的零序阻抗参数

(1) 单相变压器组和外铁型三相变压器的零序阻抗与正序阻抗相等，只是要根据一、二次绕组接线方式是 Y_0 (中性点接地)、 Y (中性点不接地) 还是 Δ 等不同情况，来决定零序等值电路中各零序阻抗间的连接关系。双绕组变压器三相绕组连接方式与相对应的零序等值电路如表 1-1 所示，而正、负序等值电路则与连接方式无关，均如图 1-4 (b) 所示。

(2) 对于三柱式内铁型三相变压器，因为这种变压器的铁心没有闭合的零序磁路，零序磁通要经过空间和铁壳才能返回，零序磁阻较大，零序互感抗较小。一次为 Y_0 ，二次为 Δ 接线的三柱式内铁型双绕组三相变压器从 Y_0 侧看到的零序阻抗是 $Z_I + Z_{II} // Z_\mu$ ，一般约比

正序阻抗小 10%~30%，在计算零序故障电流，特别是计算零序分支系数时，必须采用零序电抗的实测值。最好由变压器制造厂在出厂试验时增加这一试验项目，并把它列为铭牌参数之一。

4. 三绕组变压器的阻抗参数

忽略变压器励磁电流不计，三绕组变压器正、负序等值电路如图 1-5 所示。

等值电路中的 Z_I 、 Z_{II} 和 Z_{III} 标么值，可以根据短路试验测得的两绕组间短路阻抗 $Z_{I II}$ 、 $Z_{II III}$ 和 $Z_{I III}$ 标么值换算而得

$$Z_I = \frac{Z_{I II} + Z_{II III} + Z_{I III}}{2} - Z_{II III} = \Sigma Z - Z_{II III}$$

$$Z_{II} = \Sigma Z - Z_{I III}$$

$$Z_{III} = \Sigma Z - Z_{I II}$$

式中 $Z_{I II}$ 、 $Z_{II III}$ 、 $Z_{I III}$ ——分别为变压器一、二次，二、三次和一、三次之间的短路阻抗标么值。

单相变压器和外铁型三相变压器的零序励磁电流很小，可以忽略不计，所以其零序标么阻抗等值电路基本与正负序相同。所不同者，其电路的连接方式需视绕组的连接方式和中性点接地方式而定。其对应于三相绕组各种连接方式的零序等值电路如表 1-2 所示，而正、负序等值电路则与变压器绕组连接方式无关，均如图 1-5 所示。

5. 三绕组三柱式内铁型三相变压器的零序阻抗

对三绕组三柱式内铁型三相变压器，其零序励磁电流不可忽略，零序励磁回路可作为假想的 Δ 绕组对待，因此它的等值电路可以与四绕组变压器一样，可用一有 6 个不同阻抗值和 8 个分支的四端网络^①表示，如图 1-6 所示。但如果变压器三个绕组中有一个绕组接成 Δ 方式，或者有一侧中性点不接地，则相当于图 1-6 中 I、II、III 三个端子中有一个处于与外界系统断开的状态，此时图 1-6 仍可以简化成三端网络，如表 1-2 所示。例如对 YN, yn, d 接线变压器，其零序等值电路的一次与一次侧电网直连，二次与二次侧电网直连，三次则与三次侧电网断开，但在内部，相当于与励磁阻抗合并后接于零位点。在这简化的三端网络中，对应于各侧的各零序阻抗分支 Z'_I 、 Z'_{II} 和 $Z'_{III//\mu}$ (Z'_I 、 Z'_{II} 、 $Z'_{III//\mu}$ 见表 1-2 注) 将与相应的正序阻抗分支 Z_I 、 Z_{II} 和 Z_{III} 在数值上有较大差别。实测零序阻抗参数时需要通过试验，算出 Z'_I 、 Z'_{II} 和 $Z'_{III//\mu}$ 值。

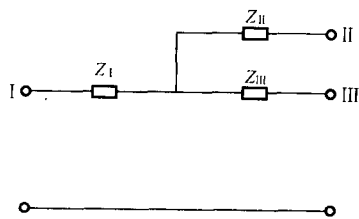


图 1-5 三绕组变压器正、负序等值电路

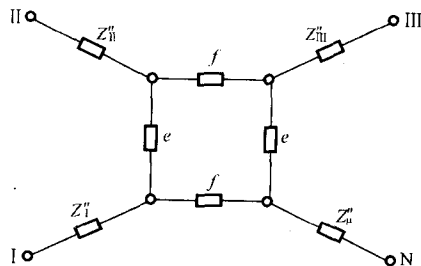


图 1-6 三绕组三柱内铁型三相变压器零序等值电路

① Edith Clarke, 《Circuit Analysis of A-C Power Systems》 Vol. II, 1950.

表 1-1

双绕组变压器零序等值电路

三相绕组连接方式	零序等值电路	
	单相或外铁型三相变压器	三柱式内铁型三相变压器

表 1-2

三绕组变压器零序等值电路

三相绕组连接方式	零序等值电路	
	单相或外铁型三相变压器	三柱式内铁型三相变压器 (简化)

注 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 ——分别为变压器一、二、三次正序等值阻抗标么值。

Z'_1 、 Z'_2 ——分别为三柱式内铁型三相变压器简化零序等值电路中对应于一、二次的标么阻抗。

$Z'_{3//\mu}$ ——三柱式内铁型三相变压器简化零序等值电路中对应于三次与励磁回路归并后的等值标么阻抗。

6. 自耦变压器及其等值阻抗

自耦变压器的一次绕组有较大一部分与二次共用，流过共用绕组部分的一、二次电流很大一部分将在绕组中相互抵消，只有较小一部分电流真正通过共用绕组。所以以同等允许温升条件衡量，生产自耦变压器要比生产同容量的普通变压器省铜、省铁，降低造价，尤其当一、二次电压等级比较接近时，这个优点更为显著。但是，自耦变压器一、二次绕组在电气上直接相连，一、二次之间的过电压和零序电流无法相互隔离，也带来了绝缘配合、零序保护配合等其他问题。另外，自耦变压器的阻抗比同容量的普通变压器小，而且由于绝缘的需要，中性点往往需要直接接地，用多了必然会大大增加电网的接地短路电流和短路容量，从而引出一系列困难问题，所以采用自耦变压器仍然需要因地制宜，不能一概而论。

自耦变压器，一般除共用的一、二次绕组以外，尚有第二个绕组，称三次绕组， Δ 接线，主要用以降低三次谐波电压和向更低电压等级的电网供电或用以连接无功补偿设备。

自耦变压器的阻抗等值电路，也可以用三端子 Y 电路表示。其一、二和三次阻抗同样可以用试验方法求得。除了阻抗值低于同容量三绕组变压器以外，基本与三绕组变压器相同，如表 1-3 第一行所示。

7. 中性点经小阻抗接地和不接地的自耦变压器的零序阻抗

对中性点经小阻抗接地的自耦变压器，当系统发生接地故障时，其中性点电压将等于变压器一次侧三倍零序电流（有名值）与变压器二次侧三倍零序电流（有名值）流过小阻抗所产生的综合电压。用标么阻抗表示的变压器等值电路列于表 1-3（第二行和第三行）。在绘制等值电路时，对中性点接地阻抗，可以选定以一次电压为基准，也可以选定以二次电压为基准。表 1-3 中分别画出了以两种不同电压为基准的等值电路， $Z_{N\text{I}}$ 表示以一次电压为基准的接地阻抗标么值， $Z_{N\text{II}}$ 表示以二次电压为基准的接地阻抗标么值。并且通过 $n_1 : 1$ (n_1 为变压器一、二次电压比) 理想变压器模拟接地阻抗与一、二次电流之间的相互影响。等值电路中 $3Z_{N\text{I}}$ (或 $3Z_{N\text{II}}$) 两端的电压降就是变压器中性点对地电压以一次电压为基准 (或以二次电压为基准) 的标么值。表 1-3 中也画出了没有 $n_1 : 1$ 理想变压器的等效 Y 电路。但此时变压器中性点对地电压当以一次侧电压为基准时，应为 $3Z_{N\text{I}} (I_1 - I_{\text{II}} n_1)$ ；而当以二次侧电压为基准时，应为 $3Z_{N\text{II}} (\frac{I_1}{n_1} - I_{\text{II}})$ 。

如果变电所内或变电所附近已有多台变压器中性点直接接地，由于限制短路容量等种种原因，而要求某一自耦变压器中性点不接地运行时，只需在上述带 $n_1 : 1$ 理想变压器的等值电路中将中性点接地阻抗 $Z_{N\text{I}}$ 或 $Z_{N\text{II}}$ 断开即可。但上述无 $n_1 : 1$ 理想变压器的等效 Y 电路将不适用，因为如果将该等效 Y 电路中有 $3Z_{N\text{I}}$ 或 $3Z_{N\text{II}}$ 的部分均以 ∞ 阻抗代入，变压器零序阻抗将成为 $\infty - \infty$ 形式的不定数。此时，可改用等值的谐振 Δ 电路来表示，如图 1-7 所示。 Δ 电路是由等效 Y 电路转换成 Δ ，并将 $Z_{N\text{I}}$ 或 $Z_{N\text{II}}$ 以 ∞ 代入而得

$$\left. \begin{aligned} Z_{(\text{I}\text{II})} &= n_1 Z_{\text{I}} + \frac{1}{n_1} Z_{\text{II}} + \frac{(n_1 - 1)^2}{n_1} Z_{\text{III}} \\ Z_{(\text{II}\text{III})} &= -\frac{n_1^2}{n_1 - 1} Z_{\text{I}} - \frac{1}{n_1 - 1} Z_{\text{II}} + (1 - n_1) Z_{\text{III}} \\ Z_{(\text{I}\text{III})} &= \frac{n_1}{n_1 - 1} Z_{\text{I}} + \frac{1}{n_1 (n_1 - 1)} Z_{\text{II}} + \frac{n_1 - 1}{n_1} Z_{\text{III}} \end{aligned} \right\} \quad (1-11)$$