



国家电网公司
STATE GRID
CORPORATION OF CHINA

国家电网公司

继电保护培训教材

国家电力调度通信中心 编著

(下册)



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



国家电网公司
STATE GRID
CORPORATION OF CHINA

国家电网公司

继电保护培训教材

国家电力调度通信中心 编著

(下册)



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是国家电网继电保护培训教材，共分八章，内容包括：专业基础理论、电力系统运行及故障分析、输电线路保护及重合闸、元件保护、电力系统安全自动装置、二次回路、继电保护整定计算基础、继电保护相关知识，另外还有事故分析案例作为附录。

本书可作为从事电力系统继电保护工作的运行、维护、管理、设计、研发和教学人员的专业参考书和培训教材，也可供相关专业技术人员 and 高校电力专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

国家电网公司继电保护培训教材/国家电力调度通信中心编著.
北京: 中国电力出版社, 2009

ISBN 978-7-5083-8389-7

I. 国… II. 国… III. 电力系统-继电保护-技术培训-教材
IV. TM77

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 009758 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

*

2009年4月第一版 2009年5月北京第三次印刷
787毫米×1092毫米 16开本 51.25印张 1276千字
印数6001—9000册 上、下册定价共 150.00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

目 录

前言

上 册

第一章 专业基础理论	(1)
第一节 单相交流电路分析与计算	(1)
一、正弦交流电的基本概念 (1) 二、正弦交流电的相量表示法 (3) 三、单 一元件的交流电路 (4) 四、 <i>RLC</i> 串并联交流电路 (9) 五、交流电路的功率 及功率因数的提高 (13)	
第二节 三相交流电路分析与计算	(16)
一、对称三相交流电源 (16) 二、三相交流电源的连接 (17) 三、三相交流 电路分析 (20)	
第三节 非正弦周期电流电路	(25)
一、非正弦周期信号 (25) 二、非正弦周期函数的分解 (27) 三、非正弦周 期量的有效值、平均值及电路的平均功率 (27) 四、对称三相电路中的高次 谐波 (29)	
第四节 线性动态电路的时域分析	(32)
一、换路定律及初始值计算 (32) 二、 <i>RC</i> 串联电路的过渡过程 (33) 三、 <i>RL</i> 串联电路的过渡过程 (35) 四、一阶电路的三要素法 (38) 五、 <i>RL</i> 串联电路 的正弦响应 (39)	
第五节 电磁与磁路分析计算	(40)
一、磁场及基本物理量 (40) 二、铁磁物质的磁化 (42) 三、磁路及磁路定 律 (45) 四、交流铁芯线圈 (47)	
第六节 微机保护基础	(50)
一、简单逻辑元件介绍 (50) 二、微机保护装置硬件系统 (52) 三、微机保 护算法介绍 (64)	
第二章 电力系统运行及故障分析	(74)
第一节 电力系统正常运行时的电压、电流及功率传输	(74)
一、正常运行时的电流、 <i>K</i> 点电压 (74) 二、功率传输 (75) 三、电压降落 与电压损失 (77) 四、传输功率与电流、电压间的相量关系 (78) 五、测量 阻抗 (79)	
第二节 标幺制	(79)
一、标幺值 (79) 二、三相系统基准值选取 (80) 三、三相系统中标幺值计 算特点 (81)	
第三节 对称分量法应用	(82)

第四节	电力系统各元件序阻抗及其相应等值电路	(84)
一、	同步发电机 (84) 二、变压器 (85) 三、输电线路 (94) 四、电抗器 (100) 五、异步电动机 (101) 六、综合负荷 (103)	
第五节	电力系统横向短路故障分析	(103)
一、	三相短路故障分析 (103) 二、两相短路故障分析 (107) 三、单相接地故障分析 (113) 四、两相接地短路故障分析 (129) 五、正序等效定则 (138)	
第六节	三绕组自耦变压器接地中性点电流	(139)
一、	自耦变电器中压侧接地故障 (139) 二、自耦变压器高压侧接地故障 (140)	
第七节	电力系统纵向不对称故障分析	(141)
一、	单相断线分析 (141) 二、两相断线分析 (149)	
第八节	不对称短路故障时 YN, d 接线变压器两侧电流、电压关系	(152)
一、	基本概念 (152) 二、YN, d11 接线变压器 d 侧 ab 相短路 (153) 三、YN 侧 B 相接地短路 (155) 四、YN 侧 AC 相短路 (157)	
第九节	电力系统稳定和电力系统振荡	(159)
一、	电力系统稳定概念 (159) 二、提高电力系统暂态稳定水平的主要措施 (163)	
三、	电力系统振荡时电气量特点 (167)	
第三章	输电线路保护及重合闸	(173)
第一节	零序电流方向保护	(173)
一、	零序电流方向保护的基本原理 (173) 二、零序方向继电器的原理、实现方法、性能评述 (176) 三、零序方向继电器在非全相运行期间和在有串联补偿电容线路上的动作行为分析 (179) 四、零序电流和零序电压的获取 (182)	
第二节	距离保护	(183)
一、	距离保护的作用原理和时限特性 (183) 二、短路时保护安装处电压计算的一般公式及阻抗继电器的接线方式 (184) 三、过渡电阻产生的附加阻抗及对阻抗继电器工作的影响 (187) 四、阻抗继电器的工作电压 (193) 五、阻抗继电器的动作方程和动作特性 (196) 六、以正序电压为极化电压的阻抗继电器 (205) 七、方向阻抗继电器的暂态动作特性 (212) 八、工频变化量的阻抗继电器 (215) 九、分支电流 (助增电流和外汲电流) 对阻抗继电器工作的影响 (224) 十、交流失压对距离保护工作的影响以及断线闭锁原理 (226) 十一、系统振荡对距离保护的影响及振荡闭锁原理 (229) 十二、YN, d11 接线变压器三角侧短路, 星侧阻抗继电器的测量阻抗 (252) 十三、阻抗继电器在有串联补偿电容线路上发生短路时的动作行为分析及其对策 (255)	
第三节	纵联保护	(262)
一、	概述 (262) 二、闭锁式纵联方向保护 (265) 三、闭锁式纵联距离保护 (275) 四、超范围与欠范围允许式的纵联保护 (278) 五、光纤纵联电流差动保护 (284) 六、工频变化量方向继电器 (298) 七、基于暂态分量的能量积	

分方向元件 (305)	八、平行线路间互感对纵联零序方向保护的影响 (307)
第四节 自动重合闸	(310)
一、自动重合闸的作用及应用 (310)	二、自动重合闸方式及动作过程 (311)
三、自动重合闸的起动方式 (312)	四、自动重合闸动作时间整定中应考虑的问题 (313)
五、双侧电源线路三相跳闸后的重合闸检查条件 (315)	六、重合闸的前加速和后加速 (317)
七、重合闸的充电与闭锁 (318)	八、3/2 接线方式对重合闸和断路器失灵保护的要求 (320)
九、220 kV 及以上电压等级同杆并架双回线路的按相自动重合闸方式 (321)	
第五节 选相元件	(324)
一、概述 (324)	二、两相电流差突变量选相元件 (325)
三、工作电压突变量选相元件 (329)	四、比较零序电流与 A 相负序电流的相位结合阻抗元件动作行为的选相元件 (332)
五、低电压选相元件 (334)	
第六节 过电压保护及远方跳闸保护装置	(334)
一、概述 (334)	二、超高压远距离输电线路产生过电压的机理 (335)
三、工频过电压保护和过电压起动远跳 (349)	四、远方跳闸保护装置 (349)
第七节 继电保护通道	(352)
一、纵联保护的载波通道及高频通道衰耗简介 (352)	二、继电保护专用收发信机 (367)
三、光纤通道与接口 (371)	
参考文献	(387)

下 册

第四章 元件保护	(389)
第一节 变压器保护	(389)
一、变压器的故障和保护配置 (389)	二、纵差动保护 (390)
三、变压器纵差动保护需要解决的问题 (398)	四、其他差动保护 (407)
五、复合电压闭锁的 (方向) 过电流保护 (411)	六、零序电流 (方向) 保护 (416)
七、阻抗保护 (419)	八、变压器过励磁保护 (429)
九、变压器中性点间隙保护和零序电压保护 (432)	十、非电量保护 (434)
第二节 母线保护	(435)
一、概述 (435)	二、母线差动保护 (438)
三、母联死区保护、母联失灵保护、母联充电保护、母联过流保护 (451)	四、非全相运行保护 (456)
五、断路器失灵保护 (457)	
第三节 断路器保护	(461)
一、断路器保护装置的配置与应用范围 (461)	二、3/2 接线方式的断路器失灵保护 (461)
三、3/2 接线方式的自动重合闸 (463)	四、充电保护 (465)
五、死区保护 (466)	六、断路器三相不一致保护 (466)
七、瞬时跟跳回路 (466)	八、交流电压断线判别 (466)
九、跳闸位置异常告警 (466)	

第四节 并联电抗器保护	(467)
一、并联电抗器的纵差保护和电流速断保护 (467)	
二、并联电抗器匝间短路和单相接地短路保护 (468)	
三、主电抗器的过负荷保护及过电流、零序电流后备保护 (472)	
四、中性点电抗器的过电流保护、过负荷保护 (473)	
五、干式空心并联电抗器的保护 (473)	
第五节 并联电容器组保护	(474)
一、电容器组与断路器之间连接线、电容器组内部连线上的相间短路故障保护 (474)	
二、电容器内部故障保护 (474)	
三、多台电容器切除后的过电压保护 (475)	
四、电容器组为双星形接线时常用中性线不平衡电流保护 (476)	
五、电容器组的过负荷保护 (476)	
六、电容器组的过电压保护 (476)	
七、电容器组的低电压保护 (477)	
八、其他保护 (477)	
九、电容器组在系统运行中异常问题 (478)	
参考文献	(478)
第五章 电力系统安全自动装置	(479)
第一节 备用电源自动投入装置	(479)
一、概述 (479)	
二、对备用电源自动投入装置的要求 (479)	
三、微机式备用电源自动投入装置 (480)	
第二节 微机型自动按频率减负荷装置	(488)
一、概述 (488)	
二、电力系统低频运行的危害 (488)	
三、限制频率下降的措施 (489)	
四、电力系统负荷的静态频率特性 (489)	
五、电力系统频率动态特性 (490)	
六、自动按频率减负荷装置 (491)	
第三节 电力系统安全稳定控制装置	(497)
一、电力系统稳定控制的概念 (497)	
二、电力系统稳定控制的三道防线 (497)	
三、电力系统紧急控制的类型及其作用 (498)	
四、分布式稳定控制装置 (499)	
第四节 故障录波器及故障信息管理系统	(500)
一、故障录波器 (500)	
二、故障信息管理系统概述 (503)	
参考文献	(507)
第六章 二次回路	(509)
第一节 概述	(509)
第二节 二次回路的接线图	(509)
一、二次回路图纸的分类 (509)	
二、二次回路的读图方法 (513)	
三、二次回路标号 (513)	
四、二次回路连接导线截面的选择 (521)	
第三节 继电保护用电流互感器	(521)
一、电流互感器的一次参数 (522)	
二、电流互感器的二次额定电流 (522)	
三、电流互感器的额定输出容量 (522)	
四、电流互感器的 10% 误差校核 (523)	
五、电流互感器的其他参数 (526)	
第四节 继电保护用电压互感器	(528)

一、电压互感器的一次参数 (528)	二、电压互感器的二次额定电压 (529)
三、电流互感器的额定输出容量 (529)	四、电压互感器的误差 (529)
五、电压互感器的型式 (530)	
第五节 电流及电压的二次回路	(530)
一、电流、电压互感器接用位置的选择 (530)	二、常用电流、电压互感器二次回路接线方式 (532)
第六节 控制及信号的二次回路	(547)
一、控制回路 (547)	二、信号回路 (559)
第七节 装置间二次回路的连接	(566)
一、保护装置双重化的接线 (566)	二、保护的跳闸回路 (569)
三、母差保护的跳闸回路 (571)	四、断路器失灵保护的跳闸回路 (572)
五、纵联保护的切换回路 (573)	六、保护的远方跳闸 (575)
七、三相不一致保护的跳闸回路 (575)	八、开关量输入及输出部分 (576)
九、继电保护通信接口 (577)	十、时钟回路 (577)
十一、光纤通信及通道连接 (577)	
第八节 直流电源系统	(578)
一、直流系统的构成及要求 (578)	二、直流系统的绝缘检测 (581)
三、直流系统接地位置的检查 (583)	四、直流系统的其他问题 (584)
第九节 保护装置及二次回路抗干扰	(585)
一、干扰信号的分类 (586)	二、二次回路干扰电压的来源 (586)
三、二次回路的抗干扰措施 (589)	
参考文献	(595)
第七章 继电保护整定计算基础	(596)
第一节 概述	(596)
一、整定计算的目及任务 (596)	二、整定计算的基本要求 (597)
三、整定计算的工作步骤 (600)	四、整定计算参数选择及计算 (600)
五、整定计算运行方式选择 (601)	六、整定计算的配合方法 (603)
七、整定计算相关技巧和应注意的问题 (614)	八、整定计算定值管理 (614)
第二节 电流电压保护整定计算	(615)
一、概述 (615)	二、阶段式电流保护整定计算方法 (615)
三、阶段式电流电压保护整定计算方法 (617)	四、辅助定值整定及注意事项 (618)
五、整定计算案例 (619)	
第三节 零序电流保护整定计算	(622)
一、概述 (622)	二、阶段式零序电流保护整定计算方法 (623)
三、超高压电网零序电流保护整定计算方法 (625)	四、辅助定值整定及注意事项 (627)
五、整定计算案例 (627)	
第四节 距离保护整定计算	(631)
一、概述 (631)	二、接地距离保护整定计算方法 (632)
三、相间距离保护整定计算方法 (634)	四、辅助定值整定及注意事项 (634)
五、整定计算算	

例 (636)	
第五节 纵联保护整定计算	(640)
一、概述 (640) 二、纵联方向保护整定计算方法 (640) 三、纵联距离保护整定计算方法 (641) 四、纵联差动保护整定计算方法 (641) 五、辅助定值整定及注意事项 (641)	
第六节 变压器保护整定计算	(642)
一、概述 (642) 二、变压器主保护整定计算方法 (642) 三、变压器后备保护整定计算 (646) 四、变压器其他相关保护整定 (650) 五、辅助定值及注意事项 (651) 六、整定计算算例 (653)	
第七节 母线及断路器失灵保护整定计算	(657)
一、概述 (657) 二、母线差动保护整定计算方法 (657) 三、母联相关保护整定计算方法 (659) 四、断路器失灵保护整定计算方法 (659) 五、辅助定值及注意事项 (660)	
第八节 特殊运行方式下的影响	(660)
一、概述 (660) 二、系统运行方式变化的处理 (660) 三、保护停运的处理 (660) 四、其他问题 (661)	
第九节 整定计算工具	(663)
一、整定计算工具介绍 (663) 二、用计算机进行整定计算的核心工作原理 (667) 三、计算机整定使用中的相关问题 (668)	
参考文献	(669)
第八章 继电保护相关知识	(671)
第一节 一次设备基础知识	(671)
一、变电站的主接线 (671) 二、变压器 (675) 三、断路器 (680) 四、隔离开关 (682) 五、互感器 (683) 六、电抗器 (686) 七、消弧线圈 (687) 八、防雷及接地装置 (688)	
第二节 变电运行及事故处理基础	(689)
一、变电站倒闸操作概述 (689) 二、继电保护有关操作 (691) 三、事故处理的基本概念 (691)	
第三节 变电站综合自动化	(692)
一、电力系统自动化的特点及功能 (692) 二、变电站综合自动化的结构形式 (693) 三、监控系统的基本功能及实现方法 (695) 四、数据通信技术 (710) 五、串行通信接口和现场总线技术 (717) 六、工业以太网 (723) 七、信道和传输介质 (729) 八、站内通信系统 (732) 九、提高通信可靠性的手段 (733) 十、数字化变电站 (736)	
参考文献	(742)
附录 事故分析案例	(743)
案例 1. 一起零序互感引起的平行双回线跳闸事故分析	(743)

案例 2. 一起 220kV 线路保护异常跳闸的分析	(747)
案例 3. 220kV 某变电站 1 号主变压器差动保护误动原因分析	(750)
案例 4. 一起 220kV 变电站交流站用电全失事故	(753)
案例 5. 防跳回路异常造成的事故	(755)
案例 6. 辅助触点切断合闸电流引起干扰误跳三相	(756)
案例 7. 220kV 线路单相故障误跳三相	(758)
案例 8. 主变压器空投时差动保护误动	(761)
案例 9. 寄生回路造成保护误动	(763)
案例 10. 220kV 某站全站失电事故分析	(765)
案例 11. 二次回路接线错误造成保护拒动	(766)
案例 12. 500kV 某线短引线保护误动作原因分析	(768)
案例 13. 电缆线间绝缘降低重瓦斯保护误跳闸	(769)
案例 14. 变压器充电引起的母差误动事故	(771)
案例 15. 一起试验引起的保护误动	(774)
案例 16. 一起 500kV 母线失电事故分析	(775)
案例 17. 同杆线路纵联零序方向保护误动分析及措施研究	(780)
案例 18. 一起 500kV 双线误跳闸的事故分析	(787)
案例 19. 一起保护误动引起的重大电网事故的分析	(790)
案例 20. 某 220kV 变电站母线全停事故分析	(792)

元 件 保 护

第一节 变 压 器 保 护

一、变压器的故障和保护配置

(一) 变压器的故障和不正常运行工况

1. 变压器的故障

变压器故障可分内部故障和外部故障。

变压器内部故障指的是箱壳内部发生的故障，有绕组的相间短路故障、绕组的匝间短路故障、绕组与铁芯间的短路故障、变压器绕组引线与外壳发生的单相接地短路。此外，还有绕组的断线故障。

变压器外部故障指的是箱壳外部引出线间的各种相间短路故障和引出线因绝缘套管闪络或破碎通过箱壳发生的单相接地短路。

2. 变压器的异常运行方式

大型超高压变压器的不正常运行工况主要有过负荷、油箱漏油造成的油面降低、外部短路故障（接地故障和相间故障）引起的过电流。

对于大容量变压器，因铁芯额定工作磁密与饱和磁密比较接近，所以当电压过高或频率降低时，容易发生过励磁。

此外，对于中性点不直接接地运行的变压器，可能出现中性点电压过高的现象；运行中的变压器油温过高（包括有载调压部分）以及压力过高的现象。

(二) 变压器保护的配置

1. 瓦斯保护

容量在 0.8MVA 及以上的油浸式变压器和户内 0.4MVA 及以上的变压器应装设瓦斯保护。不仅变压器本体有瓦斯保护，有载调压部分同样设有瓦斯保护。

瓦斯保护用来反映变压器的内部故障和漏油造成的油面降低，同时也能反映绕组的开焊故障。即使是匝数很少的短路故障，瓦斯保护同样能可靠反应。

瓦斯保护有重瓦斯、轻瓦斯之分。一般重瓦斯动作于跳闸，轻瓦斯动作于信号。当变压器的内部发生短路故障时，电弧分解油产生的气体在流向油枕的途中冲击气体继电器，使重瓦斯动作于跳闸。当变压器由于漏油等造成油面降低时，轻瓦斯动作于信号。由于瓦斯保护反应于油箱内部故障所产生的气流（或油流）或漏油而动作，所以应注意出口继电器的触点抖动，动作后应有自保持措施。

2. 纵差动保护和电流速断保护

用来反映变压器绕组的相间短路故障、绕组的匝间短路故障、中性点接地侧绕组的接地故障以及引出线的接地故障。应当看到，对于变压器内部的短路故障，如星形接线中绕组尾部的相间短路故障、绕组很少匝间的短路故障，纵差动保护和电流速断保护是反映不了的，即存在保护死区；此外，也不能反映绕组的开焊故障。注意到瓦斯保护不能反映油箱外部的

短路故障，故纵差动保护和瓦斯保护均是变压器的主保护。

10MVA 及以上容量的单独运行变压器、6.3MVA 及以上容量的并联运行变压器或工业企业中的重要变压器，应装设纵差动保护。

对于2MVA 及以上容量的变压器，当电流速断保护灵敏度不满足要求时，应装设纵差动保护。

3. 反映相间短路故障的后备保护

用作变压器外部相间短路故障和作为变压器内部绕组、引出线相间短路故障的后备保护。根据变压器的容量和在系统中的作用，可分别采用过电流保护、复合电压起动的过电流（方向）保护、阻抗保护。

4. 反映接地故障的后备保护

变压器中性点直接接地时，用零序电流（方向）保护作为变压器外部接地故障和中性点直接接地侧绕组、引出线接地故障的后备保护。

变压器中性点不接地时，可用零序电压保护、中性点的间隙零序电流保护作为变压器接地故障的后备保护。

5. 过负荷保护

用来反映容量在0.4MVA 及以上变压器的对称过负荷。过负荷保护只需要用一相电流，延时作用于信号。

6. 过励磁保护

在超高压变压器上才装设过励磁保护，过励磁保护具有反时限特性以充分发挥变压器的过励磁能力。过励磁保护动作后可发信号或动作于跳闸。

7. 非电量保护

变压器本体和有载调压部分的油温保护；变压器的压力释放保护。

此外，还有变压器带负荷后起风冷的保护；过载闭锁带负荷调压的保护。

二、纵差动保护

（一）变压器纵差保护的作用及保护范围

变压器纵差保护作为变压器绕组故障时变压器的主保护，差动保护的保护区是构成差动保护的各侧电流互感器之间所包围的部分。包括变压器本身、电流互感器与变压器之间的引出线。

内部电气故障的危害是非常严重的，立即会造成严重的损坏。绕组和绕组端部的短路和接地故障通常可被差动保护检测出。对于在同一相绕组内导线间击穿的匝间故障，若短路的匝数较多，也可被检测出来。匝间故障是变压器电气保护中最难检测出来的绕组故障。

仅有几匝击穿的匝间小故障所引起的电流不能被检测出，一直要到其发展成接地故障为止。由于这个原因，重要的是差动保护要具有高灵敏度，这就要求有对外部故障时不会引起误动作的灵敏整定值。

故障的变压器快速切除也是重要的。由于差动保护为单元保护，因此可被用作快速跳闸，必须保证故障变压器有选择性的断开。差动保护绝不应在保护区外的故障下误动作。

（二）变压器纵差动保护的构成原理及接线

变压器纵差动保护涉及有电磁感应关系的各侧电流，它的构成原理是磁势平衡原理。

以双绕组变压器为例，如果两侧电流 i_1 、 i_2 都以流入变压器为正方向，则正常运行或外部故障时根据磁势平衡原理有

$$\dot{I}_1 W_1 + \dot{I}_2 W_2 = \dot{I}_e W_1 \quad (4-1)$$

式中： W_1 、 W_2 是 1 侧和 2 侧绕组的匝数。

$$\text{如果忽略励磁电流 } \dot{I}_e, \text{ 则 } \dot{I}_1 W_1 + \dot{I}_2 W_2 = 0. \quad (4-2)$$

如果变压器的变比和变压器星-角接线带来的相位差异都被正确补偿的话，则变压器在正常运行或外部故障时，流过变压器各侧电流的相量和为零。即：

$$\sum \dot{i} = 0 \quad (4-3)$$

亦即变压器正常运行或外部故障时，流入变压器的电流等于流出变压器的电流。两侧电流的相量和为零，此时，纵差动保护不应动作。

当变压器内部故障时，两侧电流的相量和等于短路点的短路电流。其纵差动保护动作，切除故障变压器。

图 4-1 画出了模拟型的变压器纵联差动保护的单相原理接线图。在微机型变压器保护中，已经不是这样的原理接线图了，各相电流分别进入保护装置，由软件算法实现纵联差动保护。但仍然可以用该图来分析纵联差动保护的原理。下面分正常运行或外部短路和内部短路两种情况说明变压器纵联差动保护的基本原理：

1. 正常运行与外部短路

如果变压器各侧以流入变压器的电流为正方向，如图 4-1 (a) 所示，差动继电器中的电流为 $\dot{I}_2 + \dot{I}'_2$ 。在正常运行如果负荷电流是从上往下流的或者如图 4-1 (b) 所示的发生外部短路时流过变压器的短路电流也是从上往下流的，此时图中的 \dot{I}'_1 、 \dot{I}'_2 电流的方向将与规定的电流正方向相反，流入差动继电器中的电流为 $\dot{I}_2 - \dot{I}'_2$ 。只要合理选择电流互感器的变比和接线方式，就可以使流入差动继电器中的电流为零，即 $\dot{I}_2 - \dot{I}'_2 = 0$ ，此时差动继电器不动作。

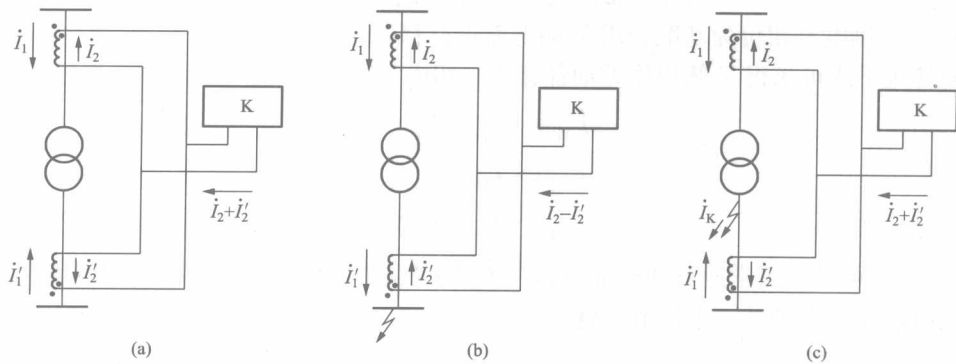


图 4-1 变压器纵差动保护的原理接线图

(a) 电流正方向的规定；(b) 正常运行与外部短路；(c) 内部短路

从上可以看出，如果变压器里只流过穿越性的电流（负荷电流或外部短路时流过变压器的短路电流）时差动继电器是不动作的。

2. 内部短路

当变压器内部发生短路时，如图 4-1 (c) 所示。由于两侧电源向故障点提供短路电流，这时电流的实际方向与规定的正方向一致，且幅值均较大。如果把短路电流 \dot{I}_K 也归算到 TA 二次侧的话，流入差动继电器的电流就等于短路电流，即 $\dot{I}_2 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_K \gg 0$ ，差动继电器

器可以动作切除故障。

从上可以看出, 变压器纵联差动保护的保护区是构成差动保护的 TA 所包含的范围, 只要在保护区内部有流出的电流, 例如内部短路的短路电流, 该电流将流入差动继电器成为差电流 (动作电流)。

(三) 数字式纵差动保护的构成

为了在正常运行或外部故障时流入差动继电器的电流为零, 应有相位校正和幅值校正 (幅值校正通常称电流平衡调整), 同时还应扣除进入差动回路的零序电流分量。在微机变压器保护中考虑到微机保护软件计算的灵活性, 由软件来进行相位校正和电流平衡调整是很方便的, 在这种情况下无论变压器是什么接线, 两侧电流互感器均可接成星形。这样电流平衡的调整更加简单, 电流互感器的二次负载又可得到下降。

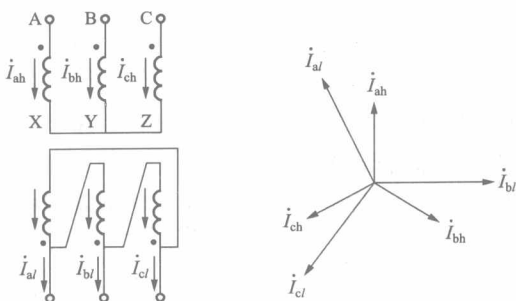


图 4-2 YN, d11 接线变压器正常情况下 Y, d 侧电流相位关系

图 4-2 示出了微机纵差动保护在正常情况下 Y, d 侧电流的相位情况。其中变压器 T 为 YN, d11 接线, 两侧电流互感器均为星形接线。

1. 相位校正

从图 4-2 可以看出, 在正常情况下 Y, d 侧同名相电流的相位相差 30° 。例如 i_{al} 超前于 i_{ah} 30° 。如果直接用这两个电流构成变压器纵差动保护, 即使它们的幅值相同也会产生很大的不平衡电流, 所以需要软件进行校正。校正方法有两种, 一种是以 Y 侧为基准, 将 d 侧电流进行移相, 使 d 侧电流相位与 Y 侧电流相位一致; 另一种是以 d 侧为基准, 使 Y 侧电流相位与 d 侧一致。

(1) 以 d 侧电流相位为基准, 用 Y 侧电流进行移相。

由软件按下式可求得 Y 侧用作差动计算的三相电流表达式为:

$$i_{AH} = (i_{ah} - i_{bh}) \quad (4-4)$$

$$i_{BH} = (i_{bh} - i_{ch}) \quad (4-5)$$

$$i_{CH} = (i_{ch} - i_{ah}) \quad (4-6)$$

由图 4-3 可见, 正常运行和外部短路时 i_{al} 与 i_{AH} 相位相同, 只要幅值相同用这两个电流构成的纵联差动保护其不平衡电流就为零。

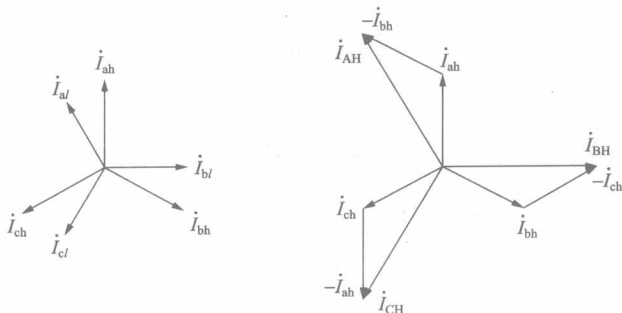


图 4-3 以 d 侧为基准的软件校正后 Y, d 侧电流相位

在模拟型变压器保护中，两相电流之差是靠变压器 Y 侧的差动 TA 接成三角接线来实现的，用三角接线的输出实现如式 (4-4) ~ 式 (4-6) 所示的两相电流之差。在微机型的变压器保护中，一般式 (4-4) ~ 式 (4-6) 所示的相位校正都在软件中实现，两侧的差动 TA 都是 Y 接线。当然也可以将相位校正用的两相电流之差靠变压器 Y 侧的差动 TA 接成三角接线来完成，在软件中只实现幅值校正。

(2) 以变压器 Y 侧电流相位为基准，用 d 侧电流进行移相。

由软件按下式可求得 d 侧用作差动计算的三相电流表达式为：

$$\dot{I}_{AL} = (\dot{I}_{al} - \dot{I}_{cl}) / \sqrt{3} \quad (4-7)$$

$$\dot{I}_{BL} = (\dot{I}_{bl} - \dot{I}_{al}) / \sqrt{3} \quad (4-8)$$

$$\dot{I}_{CL} = (\dot{I}_{cl} - \dot{I}_{bl}) / \sqrt{3} \quad (4-9)$$

由图 4-4 可见，正常运行和外部短路时 \dot{I}_{ah} 与 \dot{I}_{AL} 相位相同，只要幅值相同用这两个电流构成的纵联差动保护其不平衡电流就为零。

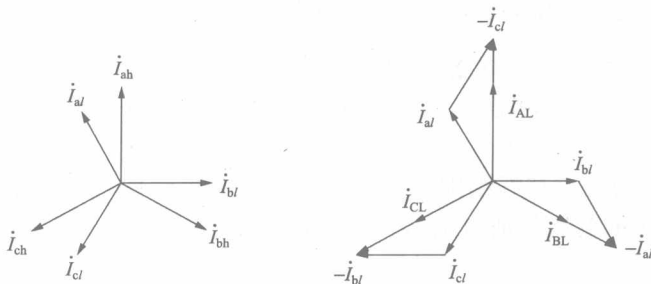


图 4-4 以 Y 侧为基准的软件校正后 Y, d 侧电流相位

2. 消除零序电流进入差动元件的措施

对于 YN, d 接线而且高压侧 Y 侧中性点接地的变压器，当高压侧线路上发生接地故障时，(对纵差保护而言是区外故障)，高压侧 Y 侧有零序电流流过，而由于变压器低压侧绕组为 d 联结，在变压器的低压侧 d 接线外无零序电流输出，两侧零序电流不能平衡。这样，若不采取相应的措施，在变压器高压侧系统中发生接地故障时，纵差保护将会误动。为使变压器纵差保护不误动，应对装置采取措施使零序电流不进入差动元件。

对于在变压器 Y 侧移相的变压器纵差保护无论是用软件实现还是用差动 TA 的三角接线实现，由于从 Y 侧通入各相差动元件的电流已经是相应的两相电流之差了，故已将零序电流滤去，所以没必要再采取其他措施。

对于用软件在变压器 d 侧进行移相的变压器纵差保护，应对 Y 侧的零序电流进行补偿，为此 Y 侧流入各相差动元件的电流应分别为：

$$\dot{I}_{AH} = \dot{I}_{ah} - \frac{1}{3}(\dot{I}_{ah} + \dot{I}_{bh} + \dot{I}_{ch})$$

$$\dot{I}_{BH} = \dot{I}_{bh} - \frac{1}{3}(\dot{I}_{ah} + \dot{I}_{bh} + \dot{I}_{ch})$$

$$\dot{I}_{CH} = \dot{I}_{ch} - \frac{1}{3}(\dot{I}_{ah} + \dot{I}_{bh} + \dot{I}_{ch})$$

因为 $\frac{1}{3}(\dot{I}_{ah} + \dot{I}_{bh} + \dot{I}_{ch})$ 为零序电流，故在 Y 侧系统中发生接地故障时，就不会有零序电

流进入各相差动元件。

3. 幅值校正

由于变压器的变比、各侧实际使用的 TA 变比之间不能完全满足一定的关系,在正常运行和外部故障时变压器两侧差动 TA 的二次电流幅值不完全相同,即使经过相位校正,从两侧流入各相差动元件的电流幅值也不相同,在正常运行或外部故障时无法满足 $\sum i = 0$ 的关系。

在实现变压器纵差保护时,采用“作用等效”的概念。即使两个不相等的电流产生的作用(对差动元件)相同。

在电磁型变压器纵差保护装置中(BCH型继电器),采用“安匝数”相同原理;而在晶体管保护及集成电路保护中,将差动两侧大小不同的两个电流通过变换器(例如电抗变换器)变换成两个完全相等的电压。

在微机型变压器保护装置中,采用在软件上进行幅值校正。引入了一个将两个大小不等的电流折算成作用完全相同的电流的折算系数,将该系数称作为平衡系数。将一侧电流作为基准,将另一侧电流乘以该侧的平衡系数,使正常运行或外部故障时经过相位校正和幅值校正以后两侧的电流幅值相等,满足 $\sum i = 0$ 的关系。

根据变压器的容量、接线组别、各侧电压及各侧差动 TA 的变比,可以计算出差动两侧之间的平衡系数。

设变压器的容量为 S_e ,接线组别为 YN, d11,两侧的电压(指的是线电压)分别为 U_Y 及 U_Δ ,两侧差动 TA 的变比分别为 n_Y 及 n_Δ ,若以变压器的 d 侧为基准侧,计算出变压器 Y 侧的平衡系数 K 。

(1) 差动 TA 的接线为 Δ/Y (用变压器绕组 Y 侧的差动 TA 为 Δ 接线进行移相)。

变压器绕组 Y 接线和 d 接线两侧流入差动元件的二次电流 I_Y 及 I_Δ 分别为

$$I_Y = \frac{\sqrt{3}S_e}{\sqrt{3}U_Y n_Y} = \frac{S_e}{U_Y n_Y} \quad (4-10)$$

$$I_\Delta = \frac{S_e}{\sqrt{3}U_\Delta n_\Delta} \quad (4-11)$$

如果以变压器 d 侧的电流 I_Δ 为基准,要使 $KI_Y = I_\Delta$,则变压器 Y 侧的平衡系数 K 为:

$$K = \frac{I_\Delta}{I_Y} = \frac{U_Y n_Y}{\sqrt{3}U_\Delta n_\Delta} \quad (4-12)$$

(2) 差动 TA 接线为 Y/Y,由软件在变压器高压侧(Y侧)移相。

变压器两侧流入差动元件的二次电流分别为

$$I_Y = \frac{S_e}{\sqrt{3}U_Y n_Y} \quad I_\Delta = \frac{S_e}{\sqrt{3}U_\Delta n_\Delta}$$

每相差动元件两侧的计算电流分别为:

高压侧:由式(4-4)~式(4-6)软件移相,得到的是两相电流之差 $I'_Y = \frac{S_e}{\sqrt{3}U_Y n_Y} \times$

$$\sqrt{3} = \frac{S_e}{U_Y n_Y}$$

低压侧: $I'_\Delta = \frac{S_e}{\sqrt{3}U_\Delta n_\Delta}$

如果以变压器 d 侧的电流 I'_Δ 为基准, 要使 $KI'_Y = I'_\Delta$, 则变压器 Y 侧的平衡系数 K 为:

$$K = \frac{I'_\Delta}{I'_Y} = \frac{U_Y n_Y}{\sqrt{3} U_\Delta n_\Delta} \quad (4-13)$$

可以看出: 式 (4-12) 与式 (4-13) 完全相同。

由上所述, 对于 YN, d 接线的变压器, 用改变变压器 Y 侧 TA 的接线方式移相或根据式 (4-4) ~ 式 (4-6) 用软件在高压侧移相, 差动元件两侧之间的平衡系数完全相同。该平衡系数只与变压器两侧的电压 (或者说变比) 及差动 TA 的变比有关, 而与变压器的容量无关。

(3) 差动 TA 接线为 Y/Y、由软件在变压器低压侧 (d 侧) 移相。计算变压器 d 侧的平衡系数。

变压器两侧流入差动元件的二次电流分别为

$$I_Y = \frac{S_e}{\sqrt{3} U_Y n_Y}, I_\Delta = \frac{S_e}{\sqrt{3} U_\Delta n_\Delta}$$

每相差动元件两侧的计算电流分别为:

$$\text{高压侧: } I'_Y = I_Y = \frac{S_e}{\sqrt{3} U_Y n_Y}$$

$$\text{低压侧: 由式 (4-7) ~ 式 (4-9) 软件移相, 得到 } I'_\Delta = \frac{S_e}{\sqrt{3} U_\Delta n_\Delta} \times \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3}} = \frac{S_e}{\sqrt{3} U_\Delta n_\Delta}$$

如果以变压器 Y 侧的电流 I'_Y 为基准, 要使 $KI'_\Delta = I'_Y$, 则变压器 d 侧的平衡系数 K 为:

$$K = \frac{I'_Y}{I'_\Delta} = \frac{U_\Delta n_\Delta}{U_Y n_Y} \quad (4-14)$$

Y/Y/ Δ 变压器纵差保护各侧之间的平衡系数见表 4-1。

表 4-1 Y/Y/ Δ 变压器纵差保护各侧之间的平衡系数 (以低压侧为基准值)

项目名称	各侧系数		
	高压侧 (H)	中压侧 (M)	低压侧 (L)
TA 接线	Y	Y	Y
TA 二次电流	$\frac{S_e}{\sqrt{3} U_h n_h}$	$\frac{S_e}{\sqrt{3} U_m n_m}$	$\frac{S_e}{\sqrt{3} U_L n_L}$
各相差动元件的计算电流	$\frac{S_e}{U_h n_h}$	$\frac{S_e}{U_m n_m}$	$\frac{S_e}{\sqrt{3} U_L n_L}$
对低压侧的平衡系数	$\frac{U_h n_h}{\sqrt{3} U_L n_L}$	$\frac{U_m n_m}{\sqrt{3} U_L n_L}$	1

说明: 表中列出的平衡系数是用软件在高压侧、中压侧移相或用改变高压侧、中压侧 TA 接线方式移相的条件下计算出来的。 S_e —变压器的额定容量; U_h 、 n_h —分别为高压侧额定电压及 TA 的变比; U_m 、 n_m —分别为变压器中压侧额定电压及 TA 的变比; U_L 、 n_L —分别为变压器低压侧额定电压及 TA 变比。表中没有列出用软件在低压侧 (d 侧) 移相时的平衡系数。

4. 差动元件的比率制动特性曲线

目前, 在变压器纵差保护装置中, 为提高内部故障时的动作灵敏度及可靠躲过外部故障的不平衡电流, 均采用具有比率制动特性曲线的差动元件。

不同型号的纵差保护装置, 其差动元件的动作特性不相同。差动元件的比率制动特性曲线有一段折线式, 两段折线式及三段折线式。