

国家电力调度通信中心 组编

发电机变压器 继电保护应用

第二版



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

发电机变压器 继电保护应用

第二版

王维俭 编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是一本电气主设备继电保护的培训教材,由国家电力调度通信中心组织编写。全书共分十一章,第一、二、三章介绍发电机和变压器内部短路的主保护和后备保护,着重讨论了不完全纵差保护和灵敏零序电流型横差保护,阐述了标积制动式纵差保护与比率制动式纵差保护的关系、故障分量纵差保护和普通纵差保护的不同。第四、五章介绍定子绕组和转子绕组的各种接地保护,特别对它们的误动问题作了分析并介绍相关的防误动的有效方法。第六、七章介绍失磁和失步保护,对它们的整定计算给予了特别关注。第八章专门讨论了转子本体表层因负序电流烧伤的主保护—转子表层负序过负荷保护。第九章介绍发电机和变压器的过励磁故障和相应的保护。第十章综述了发电机、变压器其他各种异常工况保护。第十一章介绍大型发电机—变压器组的继电保护配置方案的特点。

全书密切结合实际应用,简明扼要地介绍了基本原理、整定计算和容易发生的问题。

本书主要用作电气主设备继电保护方面的培训教材,也可供发电厂、变电站运行、设计和安装调试主设备继电保护技术人员作自学教材,还可作为继电保护专业师生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

发电机变压器继电保护应用/王维俭编. —2版.

北京:中国电力出版社,2005

ISBN 7-5083-1898-6

I.发... II.王... III.①发电机—继电保护—技术培训—教材②变压器—继电保护—技术培训—教材
IV.TM77

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第122222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>)

北京同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1998年3月第一版

2005年1月第二版 2005年1月北京第四次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 17.25印张 384千字

印数11101—14100册 定价28.00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)

一 版 前 言

随着电力工业的迅速发展,我国发电机、变压器单机容量不断增大,同时继电保护技术亦进一步提高。但发电机、变压器保护在运行中的正确动作率长期偏低,对此,电力部非常重视,组织由科研、制造、设计、运行等部门专家组成的工作组,对全国大机组保护装置运行情况进行调研,基本摸清了情况,并提出了对策,其中加强人员培训工作是一项具有深远意义的措施。为此,我中心委托清华大学王维俭教授编写本书,为专业培训提供教材。

本书内容着重实际应用,尽量避免繁琐冗长的数学推导,力求物理概念准确、清晰,适用于电力系统继电保护专业管理人员、工程技术人员和现场工作人员。内容上删繁就简,加强实用部分,削减理论分析。读者若欲深究,可参阅有关文献资料。为照顾不同层次读者的需要,书中少量内容(标以*号)可暂不阅读。

我们期望读者结合专业工作实践提出宝贵意见,以利修正错误,共同提高。

王维俭教授毕生从事继电保护专业教学,近年又经常参加电力系统继电保护专业人员培训工作,课堂教学和现场培训工作经验均十分丰富。应我中心之邀,王维俭教授总结其理论知识和实践经验,不辞劳苦,在短时间内完成书稿,其敬业精神令人钦佩。

本书承华东电业管理局调度局继电保护科林敏成高工严谨审阅,并提出宝贵意见,在此表示诚挚谢意。

国家电力调度通信中心

一九九七年十二月八日

二 版 前 言

自本书第一版出版发行,迄今已近六年,在此期间,国内大型发电工程(如三峡、二滩、秦山核电二期等)均已完成设计并已经或即将投入运行,其中积累的技术经验十分丰富宝贵,值得认真总结。与此同时,国内同行在主设备保护方面的研究开发和运行实践也取得了可喜的成绩,所有这些知识和经验,为本书第二版的产生提供了条件。随着技术的发展和运行经验的积累,本书第一版中某些观点或意见也被证明是错误的或片面的,趁此改写之际,有必要负责改正,以免误传。

共有四位博士细致认真地审阅本书书稿,提出了很多重要的修改意见,没有他(她)们的鼎力相助,本书就不可能及时出版发行,在此表示衷心诚挚的感谢。他(她)们是:

孙宇光博士审阅第二章;

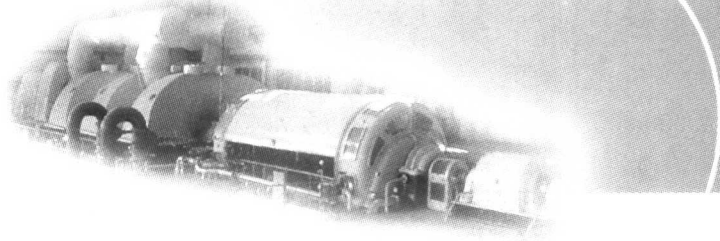
毕大强博士审阅第四章发电机定子绕组单相接地保护;

张琦雪博士审阅第四章发电机中性点接地方式部分;

桂林博士审阅第一、三等章节。

编者谨识

2003年12月



目 录

一版前言

二版前言

第一章 发电机内部短路主保护		1
第一节	概述	1
第二节	比率制动式纵差保护	1
	一、比率制动式纵差保护的基本原理 (3) 二、发电机比率制动式纵差保护的整定计算 (4) 三、比率制动式发电机纵差保护的安装调试注意问题 (6)	
第三节	不完全纵差保护	9
	一、传统 (完全) 纵差保护不反应匝间短路和开焊故障的原因 (9) 二、汽轮发电机不完全纵差保护 (9) 三、水轮发电机不完全纵差保护 (10)	
第四节	标积制动式纵差保护	11
第五节	横 (联) 差 (动) 保护	12
	一、裂相横差保护 (12) 二、零序电流型横差保护 (14)	
第六节	故障分量纵差保护	17
	一、重叠原理的应用和平衡相似网络的建立 (17) 二、平衡相似网络的应用和故障分量纵差保护原理的确立 (18) * 三、故障分量纵差保护的运行分析 (19) * 四、故障分量比率制动式纵差保护的整定计算 (23)	
第七节	综合差动保护	24
第八节	故障分量负序方向保护	25
	一、基本原理 (25) * 二、故障分量负序方向保护 (简称 ΔP_2 保护) 的运行分析 (26) * 三、故障分量负序方向保护的整定计算 (29)	
第九节	纵向基波零序过电压保护	31
* 第十节	发电机内部短路主保护灵敏度分析	33
	一、发电机额定参数和计算必要资料 (34) 二、发电机内部故障的几种计算类型 (34) 三、内部故障计算的电流、电压参数 (35) 四、发电机内部故障主保护的整定值设定 (35) 五、内部故障主保护灵敏度 K_{sen} 计算结果 (37) 六、对二滩电站发电机内部故障主保护方案的评价 (37)	
第十一节	大型发电机主保护配置方案的定量化设计方法	40
	一、发电机主保护设计实例故障统计分析 (40) 二、定子绕组短路计算和主保护灵敏度分析 (41) 三、零序横差保护的选型、发电机中性点侧引出方式的确定和电流互感器的配置 (44) 四、实现主保护的双重化 (45)	

五、发电机主保护和电流互感器配置方案的对比和抉择 (46) 六、不同发电机组应有不同的主保护配置方案 (46) 七、结论 (47)

第二章 变压器内部故障主保护

18

- 第一节 概述 48
- 一、变压器纵差保护与发电机纵差保护的不同 (48) 二、单相变压器励磁涌流的产生机理 (51) 三、三相变压器的励磁涌流 (52) 四、励磁涌流最大值 (峰值) 的近似计算 (55) 五、变压器两侧短路电流的分析计算 (57) 六、自耦变压器的短路和过负荷分析计算 (60) 七、自耦变压器中性点直接接地 (65) 八、自耦变压器中性点经小电抗接地 (68)
- 第二节 变压器纵差保护的整定计算 69
- 一、各侧电流互感器和中间电流互感器变比的选择 (69) 二、比率制动特性的整定 (70) 三、差动速断保护的定值整定 (71) 四、变压器差动保护防止励磁涌流引起误动的措施 (73)
- 第三节 变压器纵差保护在设计运行中应注意的问题 74
- 一、电流互感器二次端子极性接反或二次回路接线错误 (74) 二、空载合闸试验 (74) 三、纵差保护电流互感器二次回路断线 (74) 四、纵差保护二次电流回路的接地 (75) 五、运行中操作不当 (75) 六、变压器纵差保护的整定计算工作 (75) *七、由一次系统参数引起的纵差保护区内短路高次谐波问题 (75) *八、空载合闸与变压器匝间短路同时出现 (76) 九、变压器纵差保护用电流互感器的选型 (76) *十、并联变压器的和应涌流 (78) 十一、2次谐波制动比的测试问题 (79) 十二、变压器微机纵差保护的几个实用问题 (80)
- 第四节 与励磁涌流无关的变压器主保护 82
- 一、分侧纵差保护 (82) 二、零序差动保护 (83) *三、与励磁涌流无关的变压器内部短路微机保护 (88)

第三章 发电机、变压器后备保护

91

- 第一节 概述 91
- 第二节 相间短路后备保护 92
- 一、过电流保护 (92) 二、低压起动的过电流保护 (93) 三、复合电压起动的过电流保护 (94) 四、负序电流和单相式低电压起动的过电流保护 (95) 五、低阻抗保护 (96) 六、相间短路后备保护方向元件的设置 (98) 七、相间短路后备保护动作时间的整定 (98) 八、相间短路后备保护的其他问题 (100)
- 第三节 接地短路后备保护 103
- 一、中性点直接接地的普通变压器接地后备保护 (103) 二、中性点可能接地或不接地运行的变压器接地后备保护 (104) 三、自耦变压器的接地后备保护 (106)



第四章 定子绕组单相接地保护

108

- 第一节 定子绕组单相接地故障与发电机中性点接地方式 108
- 一、单相接地故障电流的允许值 (108) * 二、单相接地故障的过电压 (109) 三、大型发电机中性点接地方式的综合评估 (110)
- 第二节 单相接地时的基波零序电压及其接地保护 111
- 一、机端 A 相经过渡电阻 R_f 发生接地故障 (发电机中性点不接地) (111)
- 二、A 相定子绕组任一点发生金属性接地故障 (112) 三、基波零序电压型定子绕组单相接地保护 (113) 四、300MW 汽轮发电机中性点接地方式的技术改造 (115) 五、发电机定子单相接地基波零序电压保护误动作实例 (116) 六、发电机中性点接地方式和基波零序电压接地保护算例 (119)
- 第三节 发电机单相接地故障时 3 次谐波电压及其定子绕组接地保护 ... 122
- 一、发电机正常运行时的 3 次谐波电压 $\dot{U}_{30}$ (机端) 和 $\dot{U}_{N0}$ (中性点) (122)
- 二、发电机单相接地故障时的 $\dot{U}_s$ 和 $\dot{U}_N$ (126) 三、3 次谐波电压型定子绕组单相接地保护方案 (128) 四、3 次谐波电压型单相接地保护整定计算实例 (133) 五、3 次谐波电压型发电机单相接地保护在使用中应注意的问题 (139)
- 第四节 双频式定子接地保护的新应用 141
- 一、与定子接地保护有关的一次系统 (图 4-21) (141) 二、BP91301.01 定子接地主保护 (141) 三、BP91301.02 型定子接地后备保护 (146)
- 第五节 外加电源方式的定子绕组单相接地保护 147
- * 第六节 选择性发电机单相接地行波保护 149
- * 第七节 大型发电机中性点接地方式和单相接地保护的最新研究 151



第五章 发电机励磁回路接地保护

158

- 第一节 概述 158
- 一、发电机励磁回路故障的成因和形式 (158) * 二、励磁回路两点接地时轴系和汽轮机的磁化 (159) 三、发电机励磁回路接地保护的现状 (159)
- 第二节 励磁回路一点接地保护 160
- 一、电桥式一点接地保护 (160) 二、叠加直流电压式一点接地保护 (162)
- 三、叠加交流电压式一点接地保护 (164) 四、切换采样式一点接地保护 (169)



第六章 低励失磁保护

174

- 第一节 概述 174
- 第二节 失磁过程中的机端阻抗特性 177
- 一、低励失磁过程中机端阻抗轨迹 (177) 二、失磁初始阶段 (静稳破坏前) 机端阻抗轨迹——等有功阻抗圆 (177) 三、静稳极限机端阻抗轨迹

	——静稳极限阻抗圆和滴状阻抗曲线 (178)	四、发电机失磁后最终转入异步运行时的异步边界阻抗圆 (181)
第三节	失磁过程中的励磁电压 u_e 变化特性	181
	一、励磁绕组 (LE) 短路造成失磁故障 (182)	二、消弧栅式灭磁开关 (SD) 跳闸的失磁故障 (182)
	三、对常数电阻放电的灭磁开关跳闸的失磁故障 (182)	四、励磁绕组 LE 经整流桥闭路的失磁故障 (183)
	五、直流励磁机的交流电源消失引发失磁故障 (183)	
第四节	低励失磁保护的常用动作主判据	184
	一、失磁保护系统侧主判据——三相同步低电压判据 (184)	二、异步边界阻抗动作判据 (185)
	三、静稳极限阻抗动作判据 (186)	四、静稳极限励磁电压动作判据 (u_e-P 动作判据) (187)
第五节	低励失磁保护主判据的误动问题	188
	一、外部经过渡电阻发生不对称短路 (189)	二、系统振荡 (190)
	三、长线充电 (193)	四、发电机自同步过程 (194)
	五、TV 电压回路断线 (194)	
第六节	低励失磁保护装置的构成示例	195
	一、水轮发电机 (195)	二、汽轮发电机 (196)
	三、调相机 (198)	

第七章 失步保护

200

第一节	概述	200
	一、装设失步保护的必要性 (200)	二、对失步保护的基本技术要求 (201)
第二节	双阻抗元件型失步保护	201
	一、基本原理 (201)	二、整定计算 (204)
* 第三节	三阻抗元件型失步保护	205
	一、基本原理 (205)	二、整定计算 (207)

第八章 转子表层负序过负荷保护 (反时限负序电流保护)

210

第一节	发电机长期承受负序电流的能力	210
第二节	发电机短时承受负序电流的能力	211
	一、发电机短时负序转子发热常数 A (211)	二、电力系统运行对 A 值的要求 (212)
	三、判据 $I_2^2 t > A$ 的运行实践和修正 (213)	
第三节	转子表层负序过负荷保护的构成	214
第四节	反时限负序电流保护运行中的问题	217
	一、并接于电流互感器二次端口的非线性电阻质量问题 (217)	二、小密封中间继电器质量问题 (217)
	三、互感器二次断线引起误动 (218)	四、负序反时限特性的最短延时 (219)

第九章 发电机变压器过励磁保护

220

第一节	过励磁故障的起因和后果	220
-----	-------------	-----

第二节	发电机、变压器的过励磁能力	222
第三节	过励磁保护的動作判据和動作特性	223
	一、两段式定时限过励磁保护 (223) 二、过励磁反时限保护之一 (223)	
	* 三、过励磁反时限保护之二 (225)	
第四节	过励磁保护装置原理	226
	一、 U/f 的测量电路 (226) 二、反时限电路 (227)	
第五节	反时限过励磁保护的整定计算	227
第十章 发电机、变压器异常工况的其他保护		229
第一节	对称过负荷保护	229
	一、定子绕组过负荷保护 (229) 二、转子绕组过负荷保护 (230) 三、普通变压器过负荷保护 (230) * 四、自耦变压器过负荷保护 (230)	
第二节	过电压保护	234
第三节	在盘车状态下的误合闸保护 (误上电保护)	234
第四节	非全相运行保护 (三相不一致跳闸回路)	235
第五节	断路器断口闪络保护	237
第六节	启动和停机保护	238
第七节	逆功率保护	239
第八节	频率异常保护	240
* 第九节	轴电流保护	242
	一、轴电流的产生及其对发电机组的影响 (242) 二、轴电流保护装置 (243)	
第十一章 大型发电机—变压器组继电保护的总体配置		244
第一节	概述	244
第二节	大型发电机—变压器组继电保护配置的原则	245
第三节	大型汽轮发电机—变压器组继电保护的配置示例	245
第四节	大型水轮发电机—变压器组继电保护配置方案的特点	247
附录 A	汽轮发电机定子绕组在定子槽中的分布	248
附录 B	发电机定子绕组和变压器绕组内部故障分析计算用原始资料	253
附录 C	保护用电流互感器的选择	257
附录 D	变压器、互感器极性标注和相量分析	262
主要参考文献		264

发电机内部短路主保护

本章讨论的发电机内部短路将包括定子绕组不同相之间的相间短路、同相不同分支之间和同相同分支之间的匝间短路，兼顾定子绕组开焊故障^[1]，但不包括各种接地故障。后者将在第四章和第五章讨论。



第一节 概 述

述

根据国家电力调度通信中心和中国电力科学研究院的全国调查，我国 1995 ~ 2002 年 100MW 及以上发电机保护正确动作率如表 1-1 所示。

表 1-1 1995 ~ 2002 年 100MW 及以上发电机保护正确动作率统计表

年 份	1995 年	1996 年	1997 年	1998 年	1999 年	2000 年	2001 年	2002 年
动作总次数	517	529	551	502	616	648	878	772
正确动作次数	467	488	521	467	596	629	862	759
正确动作率 (%)	90.33	92.25	94.65	93.03	96.75	97.07	98.18	98.32

不难看出，发电机保护的正确动作率呈上升趋势，成绩显著，这是全国主设备保护运行、设计、制造人员共同努力的结果。

应该特别指出：发电机完全纵差保护在 1998 ~ 2002 年运行中共动作 55 次，正确动作率仅为 70.91% (39 次)，实在太低。误动的原因有运行维护不良、误接线、误整定和制造质量问题。与此同时，不完全纵差保护的正确动作率却为 100%。

1998 ~ 2002 年统计资料表明，100MW 及以上发电机发生定子绕组匝间短路 31 次，正确动作 21 次，正确动作率为单元件横差保护 100%，纵向 $3U_0$ 保护 58.33%。这份资料也告诉我们，发电机定子绕组发生匝间短路是可能的。还应指出，由于自 20 世纪 80 年代以来从国外引进的大型发电机组大多没有装设匝间短路保护，所以这些发电机组定子绕组只有在匝间短路发展为相间短路后才由纵差保护跳闸，统计资料将其视为相间短路。可以断言，定子绕组匝间短路的实际次数将大于统计数据。



第二节 比率制动式纵差保护

纵（联）差（动）保护是比较被保护设备各引出端电气量（例如电流）大小和相位的一种保护。以图 1-1 为例，设被保护设备有 n 个引出端，各个端子的电流相量如图所示，定义流入为电流正向，则当被保护设备没有短路（这里仅指相间短路，通常称为“横向故障”，不包括定子绕组的匝间短路或分支开焊，后者称为“纵向故障”）时，恒有

$$\sum_{i=1}^n \dot{I}_i = 0 \quad (1-1)$$

当被保护设备本身发生相间短路时，设短路电流为 $\dot{I}_{k.in}$ ，则有

$$\sum_{i=1}^n \dot{I}_i = \dot{I}_{k.in} \quad (1-2)$$

由此可见，以被保护设备诸端子电流 $\dot{I}_i$ 的相量和 ($\sum \dot{I}_i$) 为动作参数的电流继电器，在被保护设备正常运行或外部发生各种短路时，该继电器中理论上没有动作电流，保护可靠不误动；当被保护设备本身发生相间短路时，巨大的短路电流全部流入该继电器，保护灵敏动作。这就是纵差保护的基本原理，它只反映被保护设备本身的相间短路，理论上与外部短路无关，当然也就可以用最快速度、高灵敏地切除被保护设备本身的相间短路，但对与之相邻的其他设备短路不能有后备保护作用。

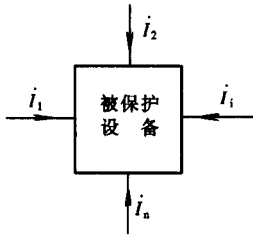


图 1-1 纵差保护原理示意图

一次电流 $\dot{I}_i$ 必须经电流互感器 (TA) 才能引入电流继电器，设互感器的电流变比为 n_a ，正常运行或外部短路电流经互感器传变后，由于互感器的误差 (主要是饱和影响)，虽然式 (1-1) 成立，但诸二次电流 $\dot{I}'_i$ 的相量和 $\sum_{i=1}^n \dot{I}'_i \neq 0$ ，此即不平衡电流 $\dot{I}'_{unb}$ ，实际工程计算时有

$$\dot{I}'_{unb} = \sum_{i=1}^n \dot{I}'_i \approx K_{aper} K_{st} f_i I_{k.ou.max} / n_a \quad (1-3)$$

式中 $I_{k.ou.max}$ ——外部最大短路电流 (周期性分量)；

f_i ——电流互感器幅值误差，工程中要求不大于 10%，故取 $f_i = 0.1$ ；

K_{st} ——电流互感器的同型系数。发电机纵差保护用互感器是同一型号的，取 $K_{st} = 0.5$ ；

K_{aper} ——考虑外部短路暂态非周期分量电流对互感器饱和的影响，一般取为 1.5 ~ 2.0，称为非周期系数。●

为防止纵差保护在外部短路时误动，继电器动作电流 $\dot{I}'_{op}$ 应躲过不平衡电流 $\dot{I}'_{unb}$ ，即

$$\dot{I}'_{op} = K_{rel} \dot{I}'_{unb} = K_{rel} K_{aper} K_{st} f_i I_{k.ou.max} / n_a \quad (1-4)$$

式中 K_{rel} ——可靠系数，取 1.3 ~ 1.5。

在整定计算动作电流时， $I_{k.ou.max}$ 应采用机端三相短路次暂态工频电流，设 $X''_d \approx 0.2$ ，

● 本书互感器二次电流均用 $\dot{I}'$ 表示。第 i 个端子的二次电流表示为 $\dot{I}'_i$ 。

● 非周期分量电流对 TA 饱和的作用很大，取 $K_{aper} = 1.5 \sim 2.0$ 偏小，为此式 (1-4) 中 K_{rel} 宜取较大值 1.5。

则 $I_{k.ou.max} = 1/X''_d = 5$; 取 $f_i = 0.1$, $K_{st} = 0.5$, $K_{aper} = 2.0$, $K_{rel} = 1.5$, 则有动作电流标幺值为 $\dot{I}'_{op*} = 0.75 = 75\%$ 。该保护在纵差保护区内发生机端两相金属性短路 (电流为 $I_{k.min}^{(2)} = 0.866/X''_d$) 时, 保护灵敏度为

$$K_{sen} = I_{k.min}^{(2)} / (n_a \dot{I}'_{op}) = 0.866 / (0.2 \times 0.75) = 5.77$$

从表面上看, 发电机纵差保护灵敏度很高, 实际上发电机定子绕组中性点附近发生短路时, 若短路匝数很少、特别是经过过渡电阻短路时, 流入纵差保护的电流并不大, 保护存在动作死区。因此在确保外部短路不误动的前提下, 尽量减小纵差保护的動作电流, 仍然是必要的。下面就讨论对发电机内部短路有较高灵敏度、外部短路能可靠不误动的比率制动式纵差保护。

一、比率制动式纵差保护的基本原理

纵差保护動作电流 $\dot{I}'_{op}$ 按式 (1-4) 计算, 其值较大, 有可能在发电机内部相间短路时拒动。式 (1-4) 是在最大外部短路电流 $I_{k.ou.max}$ 下以保护不误动为条件来整定计算動作电流的, 当外部短路电流小于 $I_{k.ou.max}$ 时, 纵差保护動作电流可以比式 (1-4) 的计算值小些, 仍可保证不误动。这就提出一个新的思路: 能否让 $\dot{I}'_{op}$ 随外部短路电流的增大而增大?

如图 1-2 所示, 发电机每相首末两端电流各为 $\dot{I}_1$ 和 $\dot{I}_2$, 注意, $\dot{I}_2$ 正向定义与图 1-1 相反, 纵差保护继电器的差动线圈匝数为 W_d , 制动线圈匝数为 $W_{res.1}$ 和 $W_{res.2}$, 若有

$$W_{res.1} = W_{res.2} = 0.5 W_d$$

互感器一、二次绕组极性和一、二次电流正向定义如图 1-2, 此时, 差动继电器的動作安匝为 $(\dot{I}'_1 - \dot{I}'_2) W_d$ 、制动安匝为 $(\dot{I}'_1 W_{res.1} + \dot{I}'_2 W_{res.2}) = 0.5 (\dot{I}'_1 + \dot{I}'_2) W_d$ 。为了方便, 直接以电流表示:

$$\text{差动电流} \quad \dot{I}'_d = \dot{I}'_1 - \dot{I}'_2 = (\dot{I}_1 - \dot{I}_2) / n_a \quad (1-5)$$

$$\text{制动电流} \quad \dot{I}'_{res} = 0.5 (\dot{I}'_1 + \dot{I}'_2) = (\dot{I}_1 + \dot{I}_2) / 2n_a \quad (1-6)$$

当发电机本身无故障, 机外 (纵差保护区外) 发生短路时, $\dot{I}_1 = \dot{I}_2 = \dot{I}_k$, $\dot{I}'_d = 0$, $\dot{I}'_{res} = \dot{I}_k / n_a = \dot{I}_k / n_a$, 制动电流很大, 差动电流理论上为零, 保护可靠制动。外部短路电流 I_k 越大, 制动电流 I'_{res} 越大, 而差动电流仅为不平衡电流 I'_{unb} , 后者由式 (1-3) 决定。既然继电器制动电流 I'_{res} 随外部短路电流线性增大, 纵差保护的動作电流 I'_{op} 也就随外部短路电流相应增大, 如图 1-3 所示, I'_{op} 随外部短路电流 I_k 增大而增大的性能, 通常

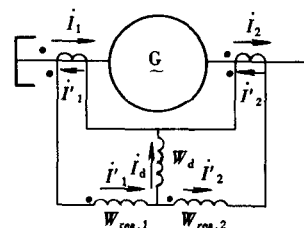


图 1-2 发电机比率制动式纵差保护原理图

称为“比率制动特性”（折线 BC）。

当发电机正常运行时，各相电流不大于互感器一次额定电流 I_{1n} ，这时纵差保护的不平衡电流 I'_{unb} 不应由式（1-3）计算，按照国际标准，继电保护用电流互感器（P 级）在额定电流下，5P 级和 10P 级幅值误差分别为 $\pm 1\%$ 和 $\pm 3\%$ ， I'_{unb} 很小，完全不需要比率制动特性，只用最小动作电流 $I'_{op,0}$ 即可避越负荷状态下的不平衡电流，如图 1-3 中的水平线 AB。

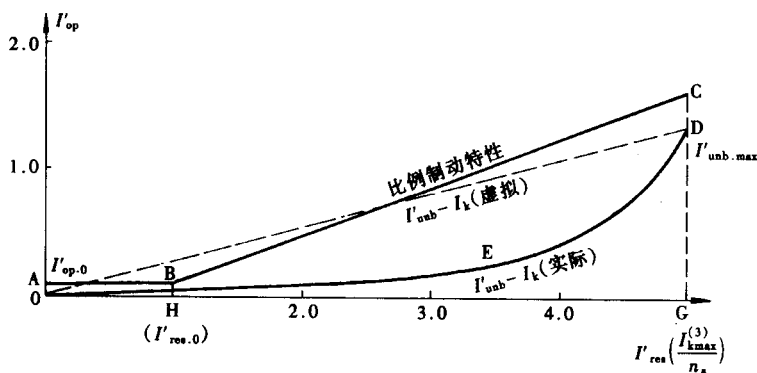


图 1-3 发电机纵差保护的比率制动特性

二、发电机比率制动式纵差保护的整定计算

需要整定计算的是图 1-3 中的 A、B、C 三点。

1. 最小动作电流 $I'_{op,0}$ (A 点)

A 点整定原则是保证最大负荷状态下保护不误动。如前所述，在额定负荷电流下，5P 级互感器的幅值误差为 $\pm 1\%$ ，设一个互感器幅值误差为 -1% ，另一个为 $+1\%$ ，负荷状态下不平衡电流不大于 2% ，考虑可靠系数为 2，可取 $I'_{op,0} = 2 \times 2\% = 4\%$ 。

10P 级互感器幅值误差为 $\pm 3\%$ ，可取 $I'_{op,0} = 2 \times 6\% = 12\%$ 。

所以选取以下定值是充分安全的：

$$I'_{op,0} = 0.10 \sim 0.20 I_{gn} / n_a, (I_{gn} \text{ 为发电机额定电流}) \quad (1-7)$$

对于特殊情况，如由于各种实际条件而使负荷状态下不平衡电流异常增大，经实测不平衡电流， $I'_{op,0}$ 可适当取较大值。但无根据地增大 $I'_{op,0}$ 是有害的和完全不必要的，性能正常的发电机比率制动式纵差保护装置无需由增大 $I'_{op,0}$ 来防止发电机正常运行条件下的保护误动作，相反应该尽可能减小 $I'_{op,0}$ 来达到最大限度缩小保护动作死区。对那些因 TA 二次负载设计选择不当，造成在正常运行时就有较大 I'_{unb} 的情况，也不应盲目增大 $I'_{op,0}$ ，而应解决二次负载的均衡问题。

2. 比率制动特性起始点（拐点）B

图 1-3 中 B 点横坐标电流 $I'_{res,0}$ 应小于或等于发电机额定电流 I_{gn} 的二次值，当外部短路电流 I_k 大于 I_{gn} 时，继电器呈现比率制动特性， I_k 越大，保护的動作电流 I'_{op} 就越大。

$$I'_{res,0} = (0.8 \sim 1.0) I_{gn} / n_a \quad (1-8)$$

注意到 I_{gn} 小于 TA 一次额定电流 I_{In} , 所以 $I'_{res.0}$ 实际只有 I_{In} 的 60% ~ 80%。

3. 最大外部短路电流 $I_{k.max}^{(3)}$ 下的 C 点

在 $I_{k.max}^{(3)}$ 下, 纵差保护的最大不平衡电流由式 (1-3) 决定, 即图 1-3 中的 D 点, 保护的最大动作电流, 可按式 (1-4) 计算, 即 C 点。

可用最大制动系数 $K_{res.max}$ 确定 C 点, 按定义有

$$K_{res.max} = I'_{op.max} / I'_{res.max} = K_{rel} K_{aper} K_{st} f_i \quad (1-9)$$

若取 $K_{rel} = 1.5$, $K_{aper} = 2.0$, $K_{st} = 0.5$, $f_i = 0.10$, 则有

$$K_{res.max} = 0.15$$

讨论: 在采用不考虑暂态特性的 P 级 TA 时, 特别是两侧 TA 的二次负荷不平衡时, 采取非周期系数 $K_{aper} = 1.5 \sim 2.0$ 不能认为已具有足够的避越暂态不平衡电流的能力, 国内多次正常同期操作时发电机纵差保护误动的事例, 都提醒我们 $K_{aper} = 1.5 \sim 2.0$ 还不够大, 定值整定计算时宜适当取较大值。例如取制动特性直线的斜率 m 为 0.25。以 $I_{op.0} = 0.15$, $I_{res.0} = 1.0$, $I_{res.max} = 5$, $m = 0.25$, 则有 $m = \frac{I_{op.max} - 0.15}{5 - 1} = 0.25$, 因此

$$I_{op.max} = 0.25 \times 4 + 0.15 = 1.15$$

而按式 (1-9) 可得

$$I_{op.max} = K_{res.max} I_{res.max} = 0.15 \times 5 = 0.75 < 1.15$$

所以选取斜率 $m = 0.25$, 相当于将最大制动系数由 0.15 提高到

$$K_{res.max} = I_{op.max} / I_{res.max} = 1.15 / 5 = 0.23$$

为躲开暂态不平衡电流创造有利条件。

按上述方法整定了 A、B、C 点, 比率制动特性完全确定。对于这种比率制动式发电机纵差保护的灵敏度校验, 即以机端两相金属性短路 (发电机不与系统并列) 计算保护灵敏度, 一定满足灵敏系数大于 2.0 的要求, 不用再算。

设选定 $I'_{op.0} = 0.10$, $I'_{res.0} = 1.0$, $K_{res.max} = 0.15$, 对这样整定的发电机纵差保护, 有人提出疑义: 在图 1-4 中 B 点附近, 根据制动系数定义, $K_{res.B} = (I'_{op} / I'_{res})_B = 0.1 / 1.0 = 0.1 < 0.15$, 认为 B 点可能因 K_{res} 小而使保护误动, 并建议采用增大 $I'_{op.0}$ 到 0.15 (如图 1-4 中的 A' 点), 或者是 A、C 点维持不变、作直线 OC 交水平线 AB 于 B' 点, 比率制动特性由原来的 ABC 变成 A'B'C 或者 AB''C。特性 A'B'C 无根据地扩大 $I'_{op.0}$, 特性 AB''C 使 $I'_{res.0} < I_{gn} / n_a$, 这些都有损于内部短路时的灵敏度 (扩大动作死区)。

为了正确整定发电机纵差保护的比率制动特性, 必须建立两个基本概念, 即:

(1) 外部短路时纵差保护因互感器引起的不平衡电流 I_{unb} 与外部短路电流 I_k 的关系应是图 1-3 中的曲线 OED, 而不是虚直线 OD, OD 虚线反映的是不平衡电流随外部短路电流线性增大, 这是不真实的。比率制动特性 ABC 虽与直线 OD 相交, 但它完全位于 OED 曲线之上, 不会因外部短路而误动。

(2) 最大制动系数 $K_{res.max}$ 只在最大外部短路电流 $I_{k.ou.max}$ 下是必需的, 当 $I_k < I_{k.ou.max}$

时, K_{res} 可以小于 $K_{res.max}$ 。若不平衡电流完全由互感器产生, 则比率制动特性只要满足在最大外部短路电流下的 $K_{res.max}$ 和最大负荷状态下的 $I'_{op.0}$, 纵差保护就一定不会误动。

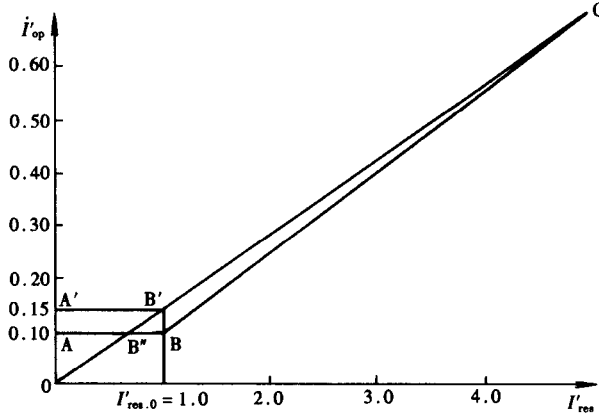


图 1-4 发电机比率制动式纵差保护的整定讨论

三、比率制动式发电机纵差保护的安装调试注意问题

1995~2000 年间, 我国 100MW 及以上发电机保护共动作 3363 次, 正确动作 2539 次, 正确动作率仅 75.5%, 误动原因主要是运行维护管理上的问题。为了提高纵差保护正确动作率, 除了改善装置的元器件质量和静态继电器的抗干扰能力外, 必须注意在安装和运行工作中不出现下述错误。

1. 电流互感器的选型和极性问题

即将出版的保护用电流互感器的选型导则, 明确提出 300MW 及以上发电机应采用考虑暂态特性的 TPY 型电流互感器。运行经验多次表明, 互感器电流端子极性错接是纵差保护误动原因之一。

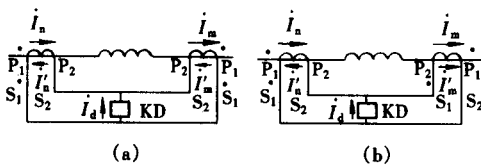


图 1-5 纵差保护二次原理接线
(a) 正确接线; (b) 错误接线

如图 1-5 所示, 互感器的一次端子以 P_1 、 P_2 表示, 二次端子以 S_1 、 S_2 表示, P_1 和 S_1 为同极性端, 常以 “.” 表示。

继电保护工作中, 习惯定义一次和二次电流 $\dot{i}$ 和 $\dot{i}'$ 的正向如图 1-5, 当 $\dot{i}$ 由 P_1 端子流入时, $\dot{i}'$ 将由 S_1 端子流出 (减极性标注法)。之

所以这样定义电流的正向是因为只有这样定义才有

$$\dot{i}_n W_1 - \dot{i}'_n W_2 \approx 0 \text{ (不计励磁)}$$

和

$$\dot{i}_m W_1 - \dot{i}'_m W_2 \approx 0 \text{ (不计励磁)}$$

式中 W_1 、 W_2 ——互感器一次和二次匝数。

由上二式可得

$$\dot{i}_n = \dot{i}'_n W_2 / W_1$$

$$\dot{I}_m = \dot{I}'_m W_2 / W_1$$

这就表明, 当如图 1-5 (a) 所示定义互感器一、二次电流正向时, 一次电流 $\dot{I}_n$ 、 $\dot{I}_m$ 和二次电流 $\dot{I}'_n$ 、 $\dot{I}'_m$ 在相位上完全一致, 因此在作相量分析时, 一次电流的分析就是二次电流的分析, 实际工作变得方便了, 这正是采用“减极性标注法”的优点。

图 1-5 (b) 表示 m 侧互感器二次端子接错了, 在发电机正常运行或外部短路时, $\dot{I}_n = \dot{I}_m = \dot{I}$, $\dot{I}'_n = -\dot{I}'_m = \dot{I}'$, 此时纵差保护有差动电流为

$$\dot{I}'_d = \dot{I}'_n - \dot{I}'_m = 2\dot{I}' = 2\dot{I} / n_a$$

纵差保护必将误动。

2. 电流互感器的二次负载问题

电流互感器的精度与二次负载阻抗 Z_2 密切相关, 在电流大小一定时, Z_2 越大, 二次电压越高, 互感器饱和越严重, 误差也就越大。严格校核在外部最大短路电流条件下, 使互感器的幅值误差不超过 10% 的最大允许二次阻抗值, 应大于实际二次负荷阻抗 (包括二次连接电缆阻抗)。对于大容量发电机, 互感器变比很大, 二次匝数很多, 因此在 Z_2 中必须计及互感器二次绕组本身的阻抗。

测量仪表切勿串接于纵差保护用互感器二次电流回路中, 这不仅是因为仪表和保护对互感器的精度要求不同, 而且由于非保护工作人员在差动回路中进行工作, 容易造成纵差保护的误动。

由于大型发电机纵差保护特别重要, 因此在模拟式保护中它的互感器 (TA) 不能与其他后备保护或异常运行保护公用, 但微机型保护装置则强调 TA 资源共享。

3. 二次电流端子连接要牢固

由于比率制动式纵差保护的動作电流较小, 任一侧互感器二次端子开路, 必然引起保护误动跳闸, 同时还可能引发很高的二次过电压 (因为 di/dt 非常大), 有时甚至造成火灾, 后果十分严重, 因此二次电流端子一定要拧紧, 有的单位还在安装时加用弹簧垫圈。装在大型水轮发电机机壳内的差动保护用电流互感器二次端子, 在用螺丝拧紧后还用特种化学涂料固定, 以防运行中由于机组振动而松开。

为防止大型发电机组电流互感器二次开路过电压, 曾经推荐使用非线性压敏电阻, 在互感器正常运行时, 二次电压不高, 该电阻阻值很大, 近于开路, 完全不影响继电保护的正常工作; 当互感器二次开路引起过电压时, 非线性电阻阻值急剧下降, 有效扼制了过电压数值。实际运行表明: 由于该非线性电阻质量不合格, 性能不稳定, 经过一段时间运行后, 阻值逐步下降, 互感器二次电流被分流, 三相非线性电阻特性变化不可能一致, 将产生虚假的二次负序电流 (一次三相电流对称), 造成负序电流等保护误动作; 如果一相两侧互感器的非线性电阻特性变化不一致, 则纵差保护可能误动。通过 1996 年全国主设备继电保护运行情况的调研和讨论, 决定在非线性电阻质量不合格的现实条件下, 不再要求装设防止大机组互感器二次开路过电压的非线性压敏电阻, 这时二次开路使纵差保护动