

王维俭 侯炳蕴 编著

大型机组继电保护理论基础

第 二 版

水利电力出版社

大型机组继电保护理论基础

第 二 版

王维俭 侯炳蕴 编著

水利电力出版社

大型机组继电保护理论基础

第二版

王维俭 侯炳蕴 编著

*

水利电力出版社出版、发行

(现中国电力出版社)

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

北京市京东印刷厂印刷

*

787×1092 毫米 16 开本 35.75 印张 809 千字

1982 年 12 月第一版

1989 年 9 月第二版 1996 年 2 月北京第三次印刷

印数 11031—13570 册

ISBN 7-120-00788-2/TM · 216

定价 40.80 元

内 容 提 要

本书对大型发电机和变压器继电保护技术及其有关问题做了比较全面的论述。第一版出版后,受到读者欢迎,对促进大型机组继电保护技术的发展起到了良好的作用,现根据读者要求和近年来生产实践的成功经验以及理论研究成果,对第一版的内容进行了大量修改和补充,有些章节完全更换了新内容。

本书共分十章,包括:绪论,故障电量分析和计算,发电机内部短路保护,变压器内部故障保护,短路故障的后备保护,定子接地保护,励磁回路接地保护,低励和失磁保护,发电机负序电流保护,异常运行保护。

本书可供科研、设计、制造和运行部门以及大专院校继电保护专业的工程技术人员和教师阅读,也可供本专业的研究生和高年级学生参考。

第 二 版 前 言

自本书第一版发行以后，国内外大型发电机组保护技术在生产实践和理论研究方面又取得了新的进展。第二版在下列章节作了重大修改：

1. 发电机定子绕组内部故障的理论计算采用我国首创的“多回路分析法”；定子绕组开断的实用计算也全部改写。

2. 增加了多分支“分布中性点”大型水轮发电机内部故障保护的改进方案。

3. 对变压器励磁涌流作了更为翔实的分析计算，并补充了和应（sympathetic）涌流问题。

4. 将电流互感器的暂态分析和差动保护用电流互感器的选择，合并并在“变压器内部故障保护”一章中介绍。

5. 对汽轮发电机定子绕组三次谐波电压作了改写，并增加了水轮发电机定子绕组三次谐波电压的内容。

6. 增写了“切换采样式”转子一点接地保护。

7. 对低励失磁故障过程的反映系统电压变化的等压边界作了改写，新增了“变励磁电压判据”的内容。

8. 新增了“利用稳定判据的失步保护”、“频率异常保护”、“起停机保护”、“意外加电压保护”和“断口闪络保护”。

9. 电力系统的异常工况可能引起汽轮机发电机组旋转轴系的损伤，严重威胁大型机组的安全运行。在第二版第一章绪论中作了初次介绍。

对大型机组安全运行十分重要的故障预测问题，有待于进一步研究，因此未能在第二版中给予充实提高。变压器内部故障的分析计算，考虑到第一版中有关内容实用意义不大，因而大部分已删去，新的理论分析和实用计算方法尚待进一步研究。

作者深感大型机组继电保护理论基础薄弱，亟需广大同行共同努力，以期尽快满足电力系统大容量发电机组建设的迫切需要。

袁季修高级工程师详细审阅书稿并提出宝贵意见，作者深表谢意。

编著者

1988.5.

目 录

第二版前言

第一章 绪论	1
第一节 发电机单机容量的发展趋势	1
第二节 大型机组故障的统计和分析	2
第三节 大容量发电机的特点及其对继电保护的要求	4
一、设计方面(4) 二、结构和工艺方面(6) 三、运行方面(6)	
第四节 大型机组继电保护配置的讨论	7
一、要求和可能配置的保护装置(7) 二、保护装置的控制对象(8) 三、短路保护的配置(8) 四、异常运行保护的配置(13) 五、水轮发电机保护配置的特点(14)	
第五节 电力系统扰动对大型发电机组的影响问题	14
一、必须从系统的整体出发,讨论大机组的安全和保护(14) 二、国内外由电力系统异常工况所引起的大机组严重故障事例(15) 三、发电机组扭振应力问题的简单综述(16)	
第二章 故障电量的分析和计算	22
第一节 计及过渡电阻时不对称短路的分析和计算	22
一、短路点过渡电阻对短路计算的影响(22) 二、不对称短路时电压电流的分布和变化(24)	
第二节 稳态短路计算法	28
第三节 考虑系统影响的大型机组短路电流计算曲线	35
第四节 自并励式发电机的短路电流计算	37
一、自并励式发电机短路电流的周期分量计算式(38) 二、 $T_{d\prime}$ 的分析讨论和实用计算(40) 三、自并励式发电机的不对称短路实用计算(45)	
第五节 发电机定子绕组内部故障的分析和计算	47
一、发电机定子绕组内部故障分析方法评述(47) 二、发电机定子绕组内部故障的理论计算——多回路分析法(48) 三、发电机内部短路的实用计算(57) 四、发电机转子二次谐波电流的实用计算(58)	
第六节 定子绕组开断的实用计算	60
第七节 变压器内部短路的分析	63
一、变压器匝间短路故障的新情况(63) 二、变压器匝间短路的理论分析方法(65) 三、变压器Y ₀ 侧单相接地短路的分析(65)	
第八节 自耦变压器外部短路的计算特点	67
一、自耦变压器外部接地短路计算(67) 二、自耦变压器的正(负)序等效电路及其参数(71) 三、三相三柱芯式变压器的零序磁路(72) 四、三绕组自耦变压器的零序等效电路及其参数测定(73) 五、 x_{00} 呈现负值的讨论(74) 六、三绕组全星形自耦变压器零序参数实例(76)	
第九节 分裂绕组变压器的短路计算	79

一、三相三柱径向布置双分裂绕组变压器的等效电路及参数 (81)	二、三相三柱轴向布置双分裂绕组变压器的等效电路及参数 (82)	三、单相双柱双分裂绕组变压器的等效电路及参数 (85)
第十节 系统振荡的电气量分析.....	87	
一、系统振荡的电流电压 (87)	二、系统振荡的阻抗轨迹 (91)	三、短路伴随系统振荡的电流电压 (94)
第三章 发电机内部短路保护.....	98	
第一节 概述.....	98	
第二节 纵差保护灵敏度的提高.....	98	
第三节 发电机的匝间短路保护.....	103	
一、发电机定子绕组的匝间短路 (103)	二、单元件式横差保护 (104)	三、负序功率方向匝间短路保护 (108)
四、零序电压匝间短路保护 (111)	五、转子二次谐波电流的定子匝间短路保护 (113)	六、定子匝间短路保护小结 (114)
第四节 多分支“分布中性点”接线方式的水轮发电机保护.....	115	
一、多分支“分布中性点”发电机保护系统的二次交流回路 (116)	二、正常运行和外部短路时继电器的动作情况 (117)	三、气隙偏心时继电器的动作情况 (117)
四、发电机内部相间短路时继电器的动作情况 (118)	五、发电机一相匝间短路时继电器的动作情况 (119)	六、并联分支数 n 为奇数时发电机保护的二次交流回路 (121)
七、匝间短路保护横差继电器动作死区的实用计算校验 (121)	八、气隙偏心时气隙不均继电器的动作试验 (124)	九、多分支“分布中性点”水轮发电机保护方案的改进 (124)
第五节 发电机内部故障的预测装置.....		
一、局部过热的“故障预测”装置工作原理 (126)	二、有机涂料的应用 (128)	三、转子运行工况的预测 (128)
第四章 变压器内部故障保护.....	130	
第一节 概述.....	130	
第二节 变压器励磁涌流的波形分析.....	131	
一、单相变压器励磁涌流的分析 (131)	二、三相变压器空载合闸时的励磁涌流 (133)	三、并联运行变压器的和应 (Sympathetic) 涌流 (145)
第三节 三相涌流经电流互感器的传变.....	147	
一、电流互感器的励磁电流 i_m (148)	二、 LH 不饱和时涌流 i_1 的传变 (148)	三、在涌流 i_1 作用下, 电流互感器什么时候开始饱和 (149)
四、 LH 饱和后涌流 i_1 的传变 (149)	五、变压器差动保护防止涌流误动的措施 (152)	
第四节 外部短路时差动保护不平衡电流的分析.....	153	
一、稳态正弦电流下的不平衡电流 (154)	二、暂态过程中的不平衡电流 (154)	
第五节 内部短路时差动保护的分析.....	158	
第六节 变压器过电压 (过励磁) 对差动保护的影响.....	165	
第七节 变压器匝间短路保护.....	166	
一、变压器匝间短路保护的现状 (166)	二、负序功率方向保护 (167)	三、检测漏磁变化的变压器匝间短路保护 (168)

第八节 变压器局部放电的检测装置	172
第九节 差动保护用电流互感器的暂态特性和选择	174
一、励磁电流 i_m (174) 二、饱和倍数 n_s (175) 三、暂态磁密系数 K (178) 四、二次暂态电流 i_s (182) 五、 $i_m \gg i_s$ 的情况 (186) 六、差动保护用电流互感器的选择 (187)	
第五章 短路故障的后备保护	193
第一节 概述	193
一、大型机组对后备保护的要求 (193) 二、相邻母线和线路对后备保护的要求 (194)	
三、后备保护的配置 (194) 四、后备保护装置 (195)	
第二节 时限电流速断保护	196
一、用于消除差动保护死区 (196) 二、用作机端短路的后备保护 (197) 三、振荡电流的影响 (198)	
第三节 阻抗保护	198
一、利用同名相全电流全电压的阻抗保护 (198) 二、利用正序和负序电流电压的全阻抗保护 (200) 三、阻抗保护的整定值 (204) 四、阻抗保护的行为分析 (205)	
第四节 自并励发电机的后备保护	213
第五节 零序保护	215
一、中性点直接接地运行变压器的零序保护 (215) 二、中性点可能接地或不接地运行变压器的零序保护 (216)	
第六章 发电机定子单相接地保护	221
第一节 概述	221
第二节 发电机的中性点接地方式	222
一、中性点经单相电压互感器(YH)接地 (223) 二、中性点经配电变压器高阻接地 (225)	
三、中性点经消弧线圈接地(欠补偿方式) (227) 四、中性点经消弧线圈谐振接地 (229)	
第三节 正常运行和单相接地故障时的基波零序电压和电流	232
一、正常运行时 (232) 二、单相接地故障时 (234) 三、两个计算实例 (238)	
第四节 汽轮发电机的定子三次谐波电压	239
一、发电机定子三次谐波电压的产生 (239) 二、汽轮发电机三次谐波匝电势的分布 (242)	
三、汽轮发电机三次谐波电压的分布 (242)	
第五节 水轮发电机的定子三次谐波电压	252
一、水轮发电机定子三次谐波等效电路的建立 (252) 二、正常运行时定子三次谐波电压的分布 (255) 三、单相接地故障时水轮发电机三次谐波电压的分布 (257) 四、扩大单元接线方式水轮发电机单相接地故障时三次谐波电压的分布 (259)	
第六节 基波零序电压型定子接地保护	262
第七节 三次谐波电压型定子接地保护	263
一、以 $ \dot{U}_0 > \dot{U}_0 $ 为动作条件的定子接地保护 (264) 二、以 $K_s \dot{U}_0 < \dot{U}_0 $ 为动作条件的定子接地保护 (266) 三、以 $K_s \dot{U}_0 < \dot{U}_0 - \dot{U}_0 $ 为动作条件的定子接地保护 (267) 四、以 $K_s \dot{U}_0 < \dot{U}_0 - \dot{U}_0 $ 为动作条件的定子接地保护 (269)	
第八节 三次谐波电压型定子接地保护在水轮发电机上的应用	271
一、发-变组单元接线方式 (271) 二、扩大单元接线方式 (274)	

第九节 外加电源方式的定子接地保护	275
一、外加直流电源的定子接地保护 (276) 二、外加20Hz交流电源的定子接地保护 (280)	
三、外加100Hz交流电源的定子接地保护 (281)	
第十节 定子接地保护灵敏度的标准问题	282
第七章 发电机励磁回路接地保护	285
第一节 概述	285
第二节 励磁回路一点接地保护	286
一、电桥式一点接地保护 (286) 二、迭加直流电压式一点接地保护 (288) 三、迭加交流电压式一点接地保护 (290) 四、迭加方波电压式一点接地保护 (299) 五、切换采样式一点接地保护 (302)	
第三节 励磁回路两点接地保护	304
一、电桥式两点接地保护 (304) 二、利用高频阻抗的两点接地保护 (305) 三、利用定子二次谐波电压的两极汽轮发电机励磁回路两点接地保护 (307) 四、利用定子1/2次谐波电压的四极汽轮发电机励磁回路两点接地保护原理 (315)	
第八章 低励、失磁保护	318
第一节 概述	318
第二节 低励和失磁过程中各电气量的表达式	320
一、各电气量的求解方法 (320) 二、 $u_{fd}=0$ 失磁过程中各电气量的分析 (321) 三、 $u_{fd}=u_{fd0}$ 低励过程中各电气量的分析 (329)	
第三节 研究低励和失磁过程的同步发电机等效电路	331
一、凸极同步发电机的等效电路 (332) 二、隐极同步发电机的等效电路 (334) 三、等效电路的比较 (337)	
第四节 低励、失磁后的物理过程	338
一、失磁过程举例 (338) 二、失磁过程中定子电流的变化 (342) 三、失磁过程中定子电压的变化 (345) 四、失磁过程中有功功率的变化 (346) 五、失磁过程中无功功率的变化 (354) 六、失磁过程中励磁回路电流电压的变化 (357) 七、励磁回路的状态对失磁过程的影响 (363)	
第五节 低励、失磁过程的阻抗特性	366
一、失磁过程在阻抗 (或导纳) 平面上的描述 (366) 二、在阻抗 (或导纳) 平面上的等有功轨迹 (371) 三、隐极同步发电机在阻抗 (或导纳) 平面上的静稳边界 (373) 四、凸极同步发电机在阻抗 (或导纳) 平面上的静稳边界 (376) 五、异步阻抗的分析 (379) 六、在阻抗 (或导纳) 平面上的等压边界 (384)	
第六节 低励、失磁保护的主要判据及其检测元件	388
一、低励、失磁保护的主要判据 (388) 二、绝对值比较式低励、失磁继电器 (391) 三、相位比较式低励、失磁继电器 (397) 四、凸极同步发电机低励、失磁继电器的整定特点 (403) 五、低励、失磁继电器的讨论 (404) 六、等压边界的检测元件 (405)	
第七节 非正常运行方式下低励、失磁继电器的运行特性	408
一、机端两相短路故障 (408) 二、变压器高压侧两相短路故障 (411) 三、变压器高压侧单相接地短路故障 (413) 四、系统振荡 (416) 五、长线充电 (420) 六、自同期过程 (422)	

七、电压回路断线 (423)	
第八节 低励、失磁保护的辅助判据及其检测元件	427
一、辅助判据 (427) 二、等励磁电压判据 (427) 三、变励磁电压判据 (436) 四、负序分量的运用 (442) 五、延时的运用 (443) 六、电压回路断线闭锁 (443) 七、闭锁元件的讨论 (445)	
第九节 低励、失磁保护装置的构成	446
一、凸极同步发电机的低励、失磁保护装置 (446) 二、隐极同步发电机的低励、失磁保护装置 (448) 三、调相机的低励、失磁保护装置 (451)	
第九章 发电机负序电流保护	455
第一节 概述	455
第二节 发电机长期承受负序电流的能力	456
第三节 发电机短时承受负序电流的能力	456
一、判据 (457) 二、要求 (459)	
第四节 发电机在任意时间内承受负序电流的能力	460
一、三段法 (461) 二、修正常数法 (462)	
第五节 暂态过程中负序电流热效应 I^2t 的计算	463
一、负序电流产生的热效应 A_1 (463) 二、非周期分量电流产生的热效应 $A_{1\beta}$ (465) 三、灭磁过程残余电流产生的热效应 A_m (467) 四、综合热效应的讨论 (468)	
第六节 对判据 $I^2t \leq A$ 试验验证的述评	468
第七节 发电机负序电流保护的构成	470
第八节 负序电流滤波器的分析	473
一、利用感抗移相的负序电流滤波器 (474) 二、利用电容移相的负序电流滤波器 (477) 三、一相断线后负序电流滤波器的特性 (479)	
第九节 反时限元件的分析	482
一、两级充电式反时限元件 (482) 二、平方-积分器式反时限元件 (487)	
第十章 异常运行保护	492
第一节 概述	492
第二节 过励磁保护	492
一、变压器的过励磁 (492) 二、发电机的过励磁 (496) 三、过励磁保护 (496)	
第三节 发电机过电压保护	497
第四节 发电机过负荷保护	499
一、发电机的过负荷 (499) 二、定子绕组的过负荷保护 (500) 三、励磁绕组的过负荷保护 (500)	
第五节 发电机失步保护	501
一、装设失步保护的必要性 (501) 二、对失步保护的要求 (502) 三、测量振荡中心电压的失步保护 (503) 四、利用双阻抗元件的失步保护 (511) 五、利用稳定判据的失步保护 (516)	
第六节 电流互感器的断线保护	521

第七节 逆功率保护	524
第八节 频率异常保护	526
第九节 非全相运行保护	528
第十节 起停机保护	529
第十一节 意外加电压保护	530
第十二节 断口闪络保护	531
附录 A 电机多回路分析法的电感系数	533
附录 B 分数次谐波气隙磁场在三相对称的单独线圈组成的“部分绕组”中产生的正、负、零序电势	535
附录 C 关于 $\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{j\omega \sin(\omega_0 t + \alpha)}{\omega^2 - j4\omega_0 \omega - \omega_0^2} d\omega = 0$ 的证明	536
附录 D 变压器匝间短路的漏磁分析	537
附录 E 大型机组在有限系统中失磁的分析计算	540
附录 F 同步发电机的转子运动方程式	544
附录 G 考虑转子热传导的表面温升公式	548
附录 H 系统振荡阻抗轨迹通用圆图	553
参考文献	556

第二节 大型机组故障的统计和分析^{[1]、[3]、[4]、[84]}

大型机组比中、小型机组有着明显的经济效益,但也带来一些新问题,这主要是事故相对多了,特别是在大型机组投入运行的初期,由于缺乏经验,问题更多,这虽然是事物发展的一般规律,但是由于大型发电机组在整个国民经济活动中的重要地位,应该给予十分重视,其中一项必不可少的工作就是努力提高大型机组的继电保护水平。

以故障停机率 $P\%$ 表示设备的故障严重程度,定义为

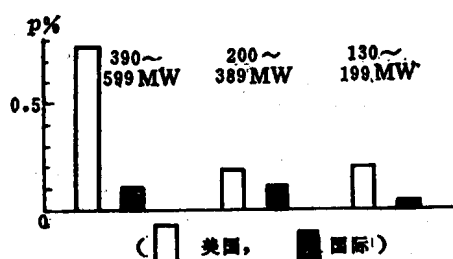


图 1-2-1 1973~1974年汽轮发电机故障停机率

$$P\% = \frac{\text{故障停机总小时数}}{\text{统计时间总小时数}} \times 100\%$$

美国大型机组故障停机率的统计资料见表1-2-1。由表可见,容量超过39万kW后,故障停机率的增加是十分惊人的,这主要是由于对大型机组的制造、安装、运行维护缺乏经验造成的。在1973~1974年日本日立制作所根据很多国家提供的资料作出的统计如图1-2-1所示,故障停机率 $P\%$ 已大幅度下降,但39万kW以上的大型机组的故障停机率还是比中、小型机组为高。

表 1-2-1 1960~1970 年美国大型机组故障停机率

容量(万kW) \ 故障部分	机	炉	电	单元
13~20	0.5	2.0	0.1	2.8
20~39	1.0	2.7	0.2	4.2
39~60	1.7	4.7	0.8	8.0
60以上	5.0	7.5	4.1	16.7

我国发电机组的故障情况与美国不同,对10万kW及以上发电机的火力发电厂设备故障进行调查,按锅炉、汽机、电气及其他四项分类,1983和1984两年的统计资料如表1-2-2。^[84]

由表1-2-2可以清楚地看到,电气故障是大型机组设备故障中最的一种,为此必须有性能完善的继电保护装置,以便最大限度地减轻机组的损伤和保持系统的安全运行。

我国1971~1977年发电机故障率(台次/百台·年)如表1-2-3所示。虽然故障率有所下降,但故障机组累计容量却有所增长,主要原因是新投产的10万kW及以上的大型发电机比较多,它们的故障率相当高,尤其是1975~1977年间双水内冷发电机的故障台次占全部0.6万kW及以上发电机故障总台次的45.7%,以1975~1977年为例,5万kW及以上发电机故障共82台次,其中10万千瓦及以上发电机故障有32台次,可见十分重视大型机组的

表 1-2-2 我国具有十万kW及以上发电机的火力发电厂设备故障统计表

年 份	分 类 项 目	锅 炉	汽 机	电 气	其 他	合 计
1983	故障次数 及百分比	86 32.6%	45 17%	108 41%	25 9.5%	264 100%
1984	故障次数 及百分比	95 36.7%	47 18.1%	109 42.1%	8 3.1%	259 100%
1983~ 1984 两年 平均值	故障次数 及百分比	90.5 34.6%	46 17.6%	108.5 41.5%	16.5 6.3%	261.5 100%

表 1-2-3 发 电 机 故 障 率 统 计

年 份	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977
故 障 率 (台次/百台·年)	9.23	4.82	4.34	5.46	4.2	3.5	4.1

继电保护是完全必要的。

近年来10万kW及以上大型发电机的各种故障情况如表1-2-4。

表 1-2-4 1982~1985年10万kW及以上发电机故障情况

年 份 故 障	1982		1983		1984		1985		合 计	
	次 数	%	次 数	%	次 数	%	次 数	%	次 数	%
相间短路	0	0	2	6.1	1	3.7	1	7.7	4	4.2
失 磁	16	72.6	22	66.7	19	70.4	9	69.2	66	69.4
机端短路	1	4.6	4	12.1	0	0	0	0	5	5.3
单相接地	1	4.6	4	12.1	3	11.1	3	23.1	11	11.6
匝间短路	1	4.6	0	0	1	3.7	0	0	2	2.1
其它故障	3	13.6	1	3	3	11.1	0	0	7	7.4
合 计	22	100	33	100	27	100	*13	100	95	100
发电机总台数	192		212		251		*221		876	
故 障 率 (台次/百台·年)	11.46		15.57		10.76		*5.88		10.8	

* 不包括华北系统。

从1982~1985年的统计资料可见,大型发电机组的故障率仍然相当高,特别是失磁故障几乎占全部故障的70%,应引起各方面的重视。

70年代高压变压器的故障率有明显增加,主要原因是220kV、容量较大的变压器广泛采用纠结式绕组,匝间绝缘厚度为1.35mm(自耦变压器)或0.95mm(非自耦变压器),绝缘水平和工艺水平不能满足纠结式绕组匝间电压较高的要求,因而高压绕组匝间绝缘破坏故障有所上升,匝间短路保护应予以重视。我国变压器故障统计见表1-2-5。

有效材料利用率提高的直接后果是机组的惯性常数 H 明显降低(表1-3-1),使发电机易于失步,因此大型发电机组更有装设失步保护的必要。

表 1-3-1 汽 轮 发 电 机 组 惯 性 常 数 的 变 化

机 型	$\cos \varphi$	GD'	$H(s)$	(%)
TQN-100-2	0.85	13	2.72	100
QFQS-200-2	0.85	23	2.4	88.2
QFS-300-2	0.85	29.5	2.06	75.7
QFSSQ-600-2	0.85	49	1.70	62.5

有效材料利用率提高的另一后果是发电机的热容量($WS/^\circ C$)与铜损、铁损之比显著下降。例如20万kW及更小的发电机的定子绕组对称过负荷能力为1.5倍额定电流、允许持续运行120s,转子绕组过负荷能力为2倍额定励磁电流、持续运行30s;对于60万kW汽轮发电机,定子绕组过负荷能力规定为1.5倍额定电流、30s,转子绕组过负荷能力为2倍额定电流、10s。转子表层承受负序过负荷的能力($I_2 t$),中小型机组(间接冷却方式)为30(汽轮发电机)或40(水轮发电机),直接冷却方式的大型机组一般为3~8。为了在确保直接冷却方式大型机组安全运行的条件下充分发挥机组的过负荷能力,定子绕组和转子绕组的过负荷保护、转子的负序保护都不能再沿用以往的定时限继电器,代之而起的是反时限特性的过负荷继电器和负序电流继电器。

2. 电机参数的变化

电机参数的变化主要表现在 x_d 、 x'_d 、 x''_d 等电抗普遍增大,定子绕组和转子绕组的电阻相对减小,其结果是:

(1) 短路电流水平相对下降,要求继电保护更灵敏。

(2) 定子回路时间常数 T_d 和比值 T_d/T'_d 显著增大,使定子非周期电流的衰减大大变慢(中小型机组 $T_d \approx 0.10 \sim 0.16s$,我国60万kW汽轮发电机 T_d 设计值约为0.345s,而西德的60万kW汽轮发电机的 T_d 高达0.70s),严重地恶化保护用电流互感器的工作特性,也加重了不对称短路时转子表层的附加发热,使负序保护进一步复杂化。非周期电流的长期存在使暂态短路电流在若干周期内不通过“零”点,可能使断路器的断流条件恶化,国外有人据此提出使保护动作增长延时以便与短路电流过零点的时间相配合,这个措施显然与大型机组保护的快速性要求直接违背,而且三相电路的短路电流未必各相都是较长时间偏于时间轴的一侧,因此这个问题尚待研究。

(3) 由于 x_d 的增大,使发电机的静稳储备系数 K_{sh} 减小^①,例如一般中小型机组 $K_{sh} \approx 1.5$,而QFSS-200-2型机组降为0.7,因此在系统受到扰动或发电机发生失磁故障时,很容易失去静态稳定,有关保护必需注意这种情况的发生。

(4) 由于 x'_d 、 x''_d 、 x_d 等参数的变大,使发电机平均异步转矩大大降低,例如一般

① $K_{sh} = \frac{P_m - P_s}{P_s}$, $P_m = \frac{EU'_d}{x_d}$, $P_s = P_m \sin \delta_s$, 中小型机组 $P_m/P_s \approx 2.5$; QFSS-200-2 $P_m/P_s \approx 1.7$ 。

中小型汽轮发电机的平均异步转矩的最大值可达额定转矩的 $2\sim 3$ 倍,而大型机组却只有近于甚至低于额定值,因此大型机组失磁异步运行的滑差大,从系统吸收感性无功多,允许异步运行的负载小、时间短,所以大型机组更需要性能完善的失磁保护。

(5) 由于 x_d' 增大,使大型机组在满载突然甩负荷时,变压器过励磁现象比中小型机组严重。

二、结构和工艺方面

这是电机制造上的特点,大型发电机不同于中小型机组的地方有:

(1) 由于大型机组的材料利用率高,就必须采用复杂的冷却方式,如氢内冷、水内冷等,实际运行说明这些直接冷却方式的发电机,故障率增加了。在铁芯通风方面,不仅有辐向通风槽,还有轴向通风槽、大齿横向通风槽(挠性槽)等,使铁芯检修困难,转子承受负序分量的能力降低,这将直接影响定子单相接地保护和负序反时限保护的设计方案。

(2) 单机容量的增大,汽轮发电机轴向长度与直径之比明显加大,这将使机组运行的振动加剧,匝间绝缘磨损加快,有时还可能引起冷却系统的故障,因此希望装设灵敏的匝间短路保护和漏水保护(对水内冷机组)。振动的加剧还将使气隙磁场产生不稳定的畸变。

(3) 单机容量的增大,使低速水轮发电机的直径特别庞大,例如美国大古力第三电站61.5万kVA的发电机转子直径超过18m,但水轮发电机的气隙大小与其容量大小、机组尺寸并无多大关系,一般为15~25mm,气隙大小的改变将影响同步电抗和励磁系统的工作,转子的偏心将使气隙不均而加剧振动,为此要求装设气隙不均保护,监视气隙的变化情况。

(4) 大型低速水轮发电机的定子绕组并联分支数多,每个分支电流不太大,但每相总电流很大,中性点三相引出方式是一个重要问题。若采用“分布中性点”(即将各分支的三相先分别接成分支中性点,然后将所有分支中性点接成一个总的发电机中性点引出机体外)或中性点侧没有引出三相六端子,则匝间短路的横差保护必须设计新方案。大型汽轮发电机的定子绕组,虽然并联分支数不多(2或4),但同样基于电机制造上的考虑,可能不在中性点侧引出三相六端子,也需有新的匝间短路保护。

三、运行方面

(1) 由于单机容量大,发电机保护的拒动或误动均将造成十分严重的后果,所以大型机组继电保护的技术指标要求更高。

(2) 大型机组的励磁系统更为复杂,故障几率也多,因此发电机的过电压或失磁故障和变压器的过激磁故障的可能性大了。如果采用可控硅自并励系统,还要着重考虑后备保护灵敏度的问题。

(3) 对于异常工况的运行(例如低频运行、起动过程、失步、逆功率等),大型机组要求装设相应的保护继电器。

(4) 大型汽轮发电机组的起停机特别费时费钱,以停机7~8h的热起动为例,10万kW机组约2h,30万kW机组就得7h。一台15万kW机组起动一次约损耗408百万大卡,

折合标准煤58t。另外大型机组的突然跳闸,有可能给主机和辅机造成程度不同的某些损伤。因此不在必需的情况下,不使大型汽轮发电机组频繁起停,更不轻易紧急跳闸停机,这在设计保护方案和出口电路时应注意。

(5)大型机组多系发电机-变压器单元制接线,机端和厂用分支一般均不设高压断路器。在发电机失磁后机端电压严重下降,在设计保护时必须注意厂用电的安全。

综上所述,发电机单机容量的增大要求大型机组的继电保护进一步完善化,即提高原有保护的性能、探索多功能保护的新原理、研制故障预测保护装置,应用计算技术,以致使保护与电力系统的安全监视和综合自动控制相结合。

第四节 大型机组继电保护配置的讨论

一、要求和可能配置的保护装置

大型发电机的造价高昂,结构复杂,一旦发生故障遭到破坏,其检修难度大,检修时间长,要造成很大的经济损失。例如,一台30万kW汽轮发电机,因励磁回路两点接地使大轴和汽缸磁化,为退磁停机一个月以上,姑且不论检修费用和对国民经济造成的间接损失,仅电能损失就近千万元。大机组在电力系统中占有重要地位,特别是单机容量占系统容量很大比例的情况下,大机组的突然切除,会给电力系统造成很大的扰动。

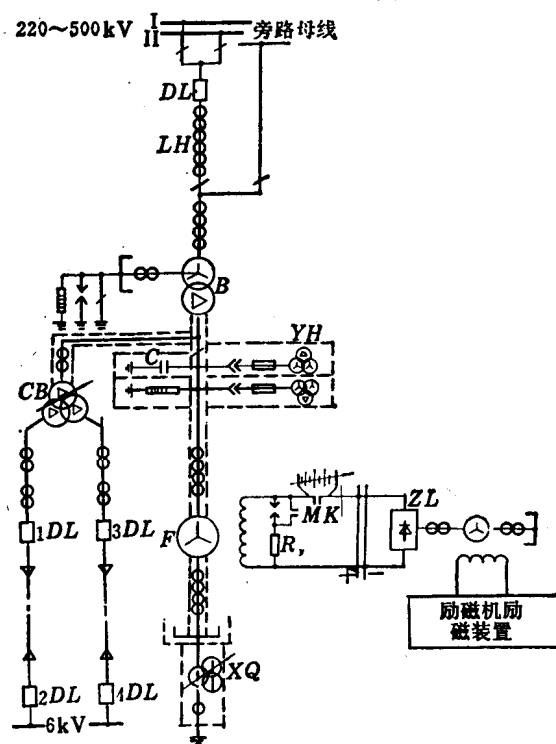


图 1-4-1 汽轮发电机双绕组变压器组的一次接线图 (50~60万kW)