

(2014年)

继电保护原理及控制技术的 研究与探讨——发电侧

中国电机工程学会继电保护专业委员会◎编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

(2014年)

继电保护原理及控制技术的 研究与探讨——发电侧

中国电机工程学会继电保护专业委员会◎编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书为中国电机工程学会继电保护专业委员会 2014 年发电侧保护和控制学术研讨会的会议论文集，收录了 106 篇关于发电侧保护和控制技术的专业论文，内容涵盖了发电厂保护和控制、机网协调、分布式发电以及 IEC 61850 应用及经验等多个继电保护领域。内容丰富、涵盖面广、实用性强，对今后发电侧保护与控制研究具有较高的参考价值和借鉴意义。本书可为相关专业专家、学者以及相关工程技术人员提供参考。

图书在版编目（C I P）数据

继电保护原理及控制技术的研究与探讨：发电侧：2014年 / 中国电机工程学会继电保护专业委员会编. -- 北京：中国水利水电出版社，2014. 11
ISBN 978-7-5170-2695-2

I. ①继… II. ①中… III. ①继电保护—学术会议—文集 IV. ①TM77-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第266231号

书 名	继电保护原理及控制技术的研究与探讨——发电侧(2014 年)
作 者	中国电机工程学会继电保护专业委员会 编
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales@ waterpub. com. cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京时代澄宇科技有限公司
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 38. 75 印张 991 千字
版 次	2014 年 11 月第 1 版 2014 年 11 月第 1 次印刷
定 价	128. 00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

十一月的南京，天高云淡，秋风飒爽。中国电机工程学会继电保护专业委员会发电侧保护和控制学术研讨会在南京顺利召开。会议由中国电机工程学会继电保护专业委员会主办，南京南瑞继保电气有限公司承办。

电源是电力系统非常重要的一部分，更是智能电网不可或缺的一个重要部分。经济发展、可再生能源利用、低碳、节能、环保、安全，不仅向常规电厂提出了更高要求，同时也促进了多种能源发电技术的发展。智能电网的出现和建设，也给发电侧提出了新的要求。如何保证发电侧安全可靠稳定运行，与智能电网配合协调，是当前保护和控制面临的一个重大挑战。为此，中国电机工程学会继电保护专委会决定举办专题学术研讨会，研讨发电侧保护和控制的新的挑战、新技术，探讨智能电网下发电侧保护控制的新问题，交流各种保护和控制技术的解决方案、运行维护经验。

大会得到了电力各界的热烈响应，征得论文 120 余篇，经专家教授评审，最终确定 106 篇论文入选本届会议。

在论文编辑出版过程中，我们得到了有关单位和人员的大力支持和帮助。借此机会，对积极组织、推荐论文的各发电公司、设计院、电科院、高校、设备制造厂等单位的领导、工作人员和所有提交论文的作者表示衷心的感谢。

本届会议是在中国电机工程学会继电保护专业委员会的直接领导下召开的，电机工程界的前辈和多位专家学者给予了细致的关怀和指导。南京南瑞继保电气有限公司领导十分关注本届会议的召开，给予了大力支持。中国水利水电出版社对本论文集的出版给予了热情的支持和帮助，在此一并致谢。

编者

2014 年 11 日

目 录

前言

100MW 及以下水轮发电机主保护配置方案的优化设计研究

..... 桂 林 李荷婷 陈健国 邹 键 王祥珩 (1)

600MW 机组高起始无刷励磁系统调节新方法

——串联柔性电阻方法在盘山电厂应用 孟为群 贾宪武 张 伟 段海超 吴 龙 (10)

大型发电机组变压器后备保护存在问题及解决方案 张健康 粟小华 (16)

同步发电机转子匝间短路故障在线监测的研究评述与展望 郝亮亮 桂 林 陈 俊 (24)

零序电压型与注入式定子接地保护的灵敏度分析

..... 陈 俊 汤炳章 张琦雪 严 伟 沈全荣 (37)

大型燃机电厂 SFC 逻辑控制盘国产化冗余方案 蔡晓铭 冯桂青 石祥建 (41)

全光纤式光学电流互感器的裂相横差保护在沙河电站抽水蓄能机组上的应用

..... 李德敏 杨海学 赵苏彦 蒋立宪 王 凯 (46)

国内外核电站发电机—变压器组保护装置差异性分析 檀松朴 林春来 (51)

重型燃气轮发电机保护的配置 于增波 周鸿博 (56)

某 2×300MW 火力发电厂 6kV 电缆故障导致全厂停电的原因分析与经验教训

..... 张红亮 (60)

国产微机保护在 CPR1000 核电机组上的应用 何其伟 姬生飞 潘仁秋 陈佳胜 (64)

新型相位比较式失步保护方法的实现 刘万斌 刘小波 (70)

旋转型转子接地保护系统研究及应用

..... 王 光 王 钧 陈 俊 张琦雪 于海波 刘 乐 (77)

IEC61850 技术在水电厂厂用电系统中的应用

..... 侯 炜 高 健 张灵凌 严 伟 邹 颖 王淑超 牛洪海 (83)

和应涌流对发电机差动保护的影响及应对措施 许 峰 李军保 陈 俊 王 凯 (89)

发电机失磁保护整定计算的探讨 杨宏宇 蒋一泉 单 华 蒋 琛 (94)

三阻抗元件型发电机失步保护在田湾核电站的应用与创新 张亚峰 李 聪 米国政 (101)

浅析燃气轮发电机定子接地保护 于增波 周鸿博 (107)

一起单相接地短路引起主变差动保护动作的思考

——发电机 3U₀ 定子接地保护的改进方案 魏 军 刘万斌 (112)

江苏沙河抽水蓄能电站发电电动机主保护优化分析 ... 杨海学 赵苏彦 蒋立宪 王 凯 (116)

基于可靠性理论的抽水蓄能机组检修策略优化计算模型研究 巩 宇 (121)

燃气轮机启动过程中的继电保护处理方案探讨 姬生飞 房 康 牛元超 (128)

火电厂高压变频系统中的电机保护方案研究 奚 君 (135)

发电机定子匝间短路保护方案 龚恺恺 朱颖俊 (142)

发电机过激磁保护反时限曲线的选择与优化 梁乾兵 夏 天 董玉玲 徐卫星 (146)

汽轮发电机转子匝间监测装置的研制及应用

..... 李华忠 任洪磊 张琦雪 王 光 陈 俊 (151)

滩坑发电机内部故障分析及主保护优化设计研究

..... 干建丽 桂 林 陈 俊 张景林 王祥珩 (156)

一起典型发电机转子交流侧接地故障排查和分析

..... 程 骁 吕晓勇 王 光 徐 金 陈 俊 (164)

发电厂电流互感器相关故障的应对措施 焦国强 (169)

浅谈 ABB 励磁系统转子过电压保护 林长鹏 (172)

广蓄电厂机组保护闭锁技术国产化研究与应用 李贻凯 (177)

大型燃气轮发电机组保护若干问题探讨 王 凯 许 峰 陈 俊 王 光 (183)

大型水电站具有 GIL 出线的线路保护及 TA 配置设计方案探讨 王伟华 (189)

高渗透率 DG 接入配电网对继电保护的影响及解决思路

..... 严 伟 席康庆 徐光福 朱中华 (196)

智能化技术在电厂升压站的应用 潘仁秋 杨 健 孙 亮 何海波 (202)

一种改进的发电侧电流突变量选相方案 黄 涛 陆于平 (207)

景洪水电站备用电源自投系统的研制及应用 魏 巍 石 勇 牛洪海 (213)

浅谈某厂励磁系统 TV 断线判别的改造 夏志凌 黄 龙 (217)

ABB UFES 快速灭弧器在火力发电厂的应用 葛宗琴 (222)

双 Y 型绕组电动机差动保护研究 查晓毅 张袁丰 (228)

提高水电机组 AGC 与一次调频调节性能的关键技术问题探究与改进 唐亚波 (233)

大型发电机电压互感器高压熔断器“慢熔”故障分析及处理 苏汉章 (238)

某电厂 1 号炉乙排粉机变频器直流过电压故障的处理与防范 卜紫薇 (245)

国产励磁系统在进口 225MW 燃气发电机组上的应用

..... 车 伟 娄季献 吴 龙 (249)

PSVR 100 发电机励磁调节装置在谏壁电厂三机励磁中的成功应用 姜伟民 (255)

新型跨接器过电压保护回路设计介绍 韩 兵 车 伟 施一峰 吴 龙 (262)

国产 SFC 设备在江苏沙河抽水蓄能电站的应用研究

..... 闫 伟 袁江伟 司红建 石祥建 吴 龙 刘为群 (266)

静止变频器 (SFC) 启动机组泵工况过程浅析 王 熙 刘 聪 冯刚声 (273)

国产大型静止变频器 (SFC) 系统设计及应用

..... 徐 峰 高苏杰 张亚武 衣传宝 石祥建 刘为群 (279)

SFC 启动的抽水蓄能机组励磁系统研制及应用 施一峰 车 伟 (284)

1000MW 机组 PCS—9400 分布式智能励磁系统应用

——励磁系统状态检测及状态评估新技术 慈学敏 王彦杰 施一峰 吴 龙 (289)

ABB Unitrol 5000 励磁系统专用高灵敏度发电机 TV 断线监测装置研制及应用

..... 李军保 裴丽秋 (294)

730MW 机组并行三通道多冗余切换技术应用 刘兰海 郑 雷 吴 龙 (299)

励磁系统采样 TA 故障引发机组跳闸处理方法 林长鹏 (303)

自动电压控制系统在电厂中的应用 谭春力 (306)

发电机同期回路优化设计	杨长存	(312)
厂用电二次系统检修中需要注意的问题	张 峰 潘铁山	(315)
脱硝系统稀释风机过电流问题的分析研究	秦绍俊	(318)
浅谈漫湾电厂 AGC 优化策略	李天平 盛 蕊	(323)
电厂 NCS 系统网络优化探讨与应用	任晓骏 熊忠群	(327)
发电厂生产管理区主要业务分析及接入方案的设计与研究	刘梦欣 储真荣 杨 鹏	(334)
IEC61850 标准在发电机变压器组保护装置中的应用	张为越 崔殿彬	(343)
基于 DFR 的核电站中压事件记录系统	陈佳胜 钟守平 陈 俊	(349)
核岛中压电动机馈线保护整定方法	车 皓 李 嘉	(354)
火电机组有功功率变送器暂态性能分析	杨 涛 黄晓明 宣佳卓	(360)
浅谈变压器智能在线监测装置的使用	曹小燕	(365)
基于智能控制装置 PCS—9821 的 GIS 智能汇控柜在三峡地下电站的应用	王 慧	(369)
基于 WEBGIS 平台的电网台风预警系统研究	黄山峰 金岩磊	(375)
智能变电站顺序控制功能的研究与应用	滕井玉	(380)
应用于智能站的中低压线路光纤纵差保护装置	徐 舒 余群兵 丁 力 徐光福 柴铁洪	(386)
分布式光伏运行监控系统设计探讨	邹国惠 罗奕飞 张春合 徐光福 严 伟 徐 浩 赵云峰	(391)
分布式电源接入对配网过流保护及距离保护的影响和应对策略	赵月灵 程秋秋 代 莹 张庆伟 张春雷 王高明	(398)
分散式新能源并网方案设计及技术研究	杜振华 赵 靖 王志华 王 立	(405)
基于永磁同步发电机的风力发电系统的数学建模	刘永生 牛洪海 魏 巍 陈 俊	(410)
风电场升压站中性点接地方式分析	王 威	(418)
分布式光功率预测方案研究	徐 浩 吴智刚 黄宏盛 翟剑华 王小平 赵玉灿	(422)
大型并网光伏电站光伏组件的维护	郭少刚 张存峰 周 国 王丰绪	(426)
不同容量光伏发电场综合自动化监控系统组网方案探讨	何海波 杨 健 孙 亮 姬生飞	(433)
分布式光伏发电监控与管理	张 琪 徐 浩	(438)
风电场侧 AVC 系统实现方法及应用	王小平 黄宏盛 徐 浩 黄 伟 翟剑华 李陶旺	(445)
并网风电场调度自动化信息平台的优化与探究	李 焱 刘梦欣	(451)
大型并网光伏电站 AGC/AVC 应用	黄 伟 刘永朝 金岩磊 周 敬 唐儒海 王小平	(457)
分布式光伏发电接入对配网主变中性点过电压的影响研究	何俊峰	(462)
基于 SCADA 的多风电场远程监控系统的设计	张海超	(468)
电力生产信息计算平台架构设计	秦冠军 张军华 金岩磊 葛立青 黄山峰	(472)
微网协调控制保护装置的研制及 RTDS 仿真验证	徐光福 何俊峰 郭 勇 王景霄 张春合 余群兵	(479)
基于 IEC61850 的二次设备台账管理系统	滕井玉	(488)
TV 一次保险熔断引起的高频保护误动原因分析研究	胡小燕	(494)

基于负荷曲线的变压器运行能力在线评价与预警	尹 凯	葛立青	王 永	张代新	(500)
一种基于 EMS 实时数据及故障录波数据的故障分析系统	刘焕志	祁 忠			(507)
利用短路电流校验差动保护的技术应用	杨长存	方 浩			(515)
“两渡” 直流投产后严重故障下南方电网的失步特性分析	常宝立	涂 亮	方胜文	俞秋阳	柳勇军 (520)
区域保护控制系统研究及应用	施永健	周继馨			(528)
稳定控制装置在镇海电厂的应用	高 军				(539)
基于可视化配置平台的标准化稳控切负荷执行站实施方案	洪丽强	徐 柯	常东旭	任祖怡	(545)
预制舱在太原南智能站中的应用	王 凯				(552)
一种测试继电保护装置跳闸出口接点性能的新方法	施静辉	张延冬	于 哲		(560)
基于预估信息的配电网自适应电流保护方法	李 伟	杨国生	李仲青	王兴国	(564)
一种基于 PSD—BPA 的复杂故障下的临界切除时间自动计算方法	常宝立	徐光虎	李 敏	何俊峰	夏彦辉 梅 勇 (571)
降低凝泵电机电耗	杨长存	任池银			(576)
自动电压调控系统 AVC 控制码转换计算研究	师淑英	苏荣芳	刘春雷		(580)
双端远方备自投技术研究及应用	施永健	陈智远			(584)
IEC/TR 61850—90—5 关键技术概述及工程实施展望	陈玉林	胡绍谦	杨 贵	刘明慧	(588)
数字化变电站网络流量分析与丢帧控制	李广华	冯亚东	周 强	王自成	(596)
220kV 线路保护标准化设计改造	高 军				(603)
分布式电源接入配电网继电保护策略研究	张 嵩				(607)

100MW 及以下水轮发电机主保护配置方案的优化设计研究

桂 林¹, 李荷婷¹, 陈健国², 邹 键², 王祥珩¹

- (1. 清华大学电机系电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084;
2. 三峡梯调通信中心成都调控中心, 四川 成都 610041)

【摘 要】 单机容量在 100MW 及以下的中小型水轮发电机主保护方案的设计不能简单沿用传统设计方案（完全纵差 + 零序电流型横差保护）。本文以 60MW 那邦冲击式发电机、90MW Soubre 混流式发电机和 58MW 沙坪二级贯流式发电机主保护的定量化设计为例，并结合已有的大中型水轮发电机主保护定量化及优化设计的经验，说明应根据中小型发电机定子绕组形式所决定的内部故障特点的不同，来决定是沿用传统设计方案还是在其基础上增设裂相横差保护。上述设计思路可供水电设计院和相关监理公司参考。

【关键词】 中小型水轮发电机；主保护设计；内部短路计算；绕组形式；故障特点

0 引言

随着中国水电“十二五”规划的逐步落实和中国水电“走出去”战略的加快实施，国内外水电领域出现了一批单机容量在 100MW 及以下的中小型机组，受各种客观条件的制约，其发电机主保护方案的设计无法都采用基于全面内部故障分析的定量化设计方法^[1-4]，发电机主保护的设计一般都沿用传统设计方案——完全纵差保护 + 零序电流型横差保护。

下面以那邦水电站（3 × 60MW，冲击式水轮发电机）、Soubre 水电站（3 × 90MW，混流式水轮发电机）和沙坪二级水电站（6 × 58MW，贯流式水轮发电机）发电机主保护的定量化设计为例，并结合已有的大中型水轮发电机主保护定量化及优化设计的经验，对 100MW 及以下水轮发电机主保护配置方案的优化设计提出合理化建议，供水电设计院和相关监理公司参考。

1 那邦发电机主保护定量化设计过程

那邦水电站位于云南省德宏州盈江县西部勐乃河上，电站总装机容量 180MW（3 × 60MW）；其发电机采用分数槽（ $q = 26/5$ ）半波绕组（定子绕组节距为 $y_1 = 14$ 、 $y_2 = 17$ ），10 极，定子槽数为 156，每相 2 分支，每分支 26 个线圈。

那邦发电机额定参数为： $P_N = 60\text{MW}$ ， $U_N = 10.5\text{kV}$ ， $I_N = 3770.45\text{A}$ ， $\cos\varphi_N = 0.875$ ， $I_{f0} = 480\text{A}$ ， $I_{fN} = 795\text{A}$ 。

1.1 那邦发电机的故障特点及典型故障特征

根据对东方电气集团四川东风电机厂有限公司提供的发电机定子绕组展开图的分析，该发电机定子绕组实际可能发生的内部短路见表 1 和表 2。

表 1 中，定子槽内上、下层线棒间短路共 156 种（等于定子槽数）。通过对同槽故障的分析

发现，没有同相同分支匝间短路；同相不同分支匝间短路 108 种，占 69.23%；相间短路 48 种，占 30.77%。

表 1 那邦发电机 156 种同槽故障

同相同分支匝间短路	同相不同分支匝间短路	相间短路 48 种	
		分支编号相同	分支编号不同
0	108	48	0

表 2 中，定子绕组端部交叉处短路共 4524 种。通过对端部交叉故障（简称为端部故障）的分析发现，同相同分支匝间短路 630 种，占 13.93%，其中最小短路匝数为 5 匝（对应的短路匝比为 19.23%），有 120 种，最大短路匝数为 26 匝（对应的短路匝比为 100%），有 6 种；同相不同分支匝间短路 702 种，占 15.52%；相间短路 3192 种，占 70.56%。

表 2 那邦发电机 4524 种端部交叉故障

同相同分支匝间短路 630 种				同相不同分支 匝间短路	相间短路 3192 种	
短路匝数	5 匝	6 ~ 21 匝	26 匝		分支编号相同	分支编号不同
故障数	120	504	6	702	1572	1620

从表 1 和表 2 可以看出，那邦发电机所采用的分数槽半波绕组使得实际可能发生的内部短路中不存在小匝数同相同分支匝间短路，将有利于主保护方案性能的提高^[5-6]。

1.2 运用“多回路分析法”确定传统设计方案的合理性

通过全面的内部短路仿真计算，可以得到那邦发电机故障时每一支路电流的大小和相位（包括两中性点间的零序电流的大小），以此为基础进行主保护方案的灵敏度分析，又能清楚地认识到每种保护的长处（能灵敏反应哪些短路）和短处（不反应哪些短路），从而在定量分析的基础上确定最终的主保护配置方案。

那邦发电机采用图 1 所示的传统设计方案（无需装设分支 TA），对于实际可能发生的 4680 种内部故障没有保护死区，对 3240 种内部故障（占内部故障总数的 69.23%）有两种及以上原理不同的主保护灵敏动作；由于完全纵差保护不反应匝间短路，故传统设计方案的双重化指标不高，考虑到微机保护装置是用软件来实现继电器的功能，可适当降低对双重化指标的要求。

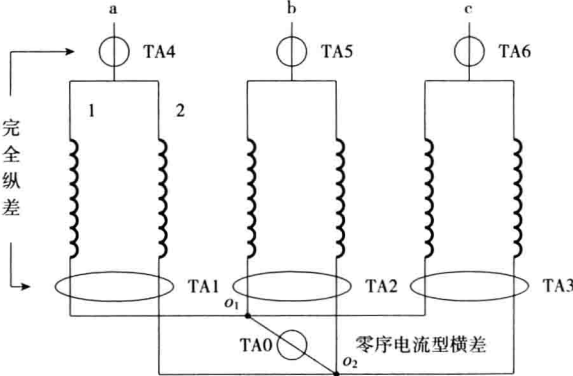


图 1 那邦发电机内部故障主保护及 TA 配置方案

2 Soubre 发电机主保护定量化设计过程

Soubre 水电站位于非洲科特迪瓦共和国萨桑德拉河上的 Naoua 瀑布处，总装机容量 270MW ($3 \times 90\text{MW}$)；其发电机采用分数槽 ($q = 29/7$) 叠绕组 (定子绕组节距为 $y_1 = 11$)，56 极，定子槽数为 696，每相 4 分支，每分支 58 个线圈。

Soubre 发电机额定参数为： $P_N = 90\text{MW}$ ， $U_N = 10.5\text{kV}$ ， $I_N = 5822\text{A}$ ， $\cos\varphi_N = 0.85$ ， $I_{f0} = 837\text{A}$ ， $I_{fN} = 1572\text{A}$ 。

2.1 Soubre 发电机的故障特点及典型故障特征

根据对阿尔斯通水电设备（中国）有限公司提供的发电机定子绕组展开图的分析，该发电机定子绕组实际可能发生的内部短路见表 3 和表 4。

表 3 Soubre 发电机 696 种同槽故障

同相同分支匝间短路 420 种				同相不同分支 匝间短路	相间短路 240 种	
短路匝数	2 匝	3 匝	4 ~ 7 匝		分支编号相同	分支编号不同
故障数	88	68	264	36	120	120

表 4 Soubre 发电机 6429 种端部交叉故障

同相同分支匝间短路 948 种				同相不同分支 匝间短路	相间短路 5448 种	
短路匝数	1 匝	2 ~ 3 匝	4 ~ 6 匝		分支编号相同	分支编号不同
故障数	360	304	284	33	2720	2728

表 3 中，定子槽内上、下层线棒间短路共 696 种（等于定子槽数）。通过对同槽故障的分析发现，同相同分支匝间短路 420 种，占 60.34%，其中最小短路匝数为 2 匝（对应的短路匝比为 3.45%），有 88 种，最大短路匝数为 7 匝（对应的短路匝比为 12.07%），有 20 种；同相不同分支匝间短路 36 种，占 5.17%；相间短路 240 种，占 34.48%。

表 4 中，定子绕组端部交叉处短路共 6429 种。通过对端部交叉故障的分析发现，同相同分支匝间短路 948 种，占 14.75%，其中最小短路匝数为 1 匝（对应的短路匝比为 1.72%），有 360 种，最大短路匝数为 6 匝（对应的短路匝比为 10.34%），有 20 种；同相不同分支匝间短路 33 种，占 0.51%；相间短路 5448 种，占 84.74%。

由于 Soubre 发电机采用的是叠绕组且绕组节距接近整距，使得同槽故障中大多数属于同相故障（若为整距绕组，则同槽故障均为同相故障），且同槽故障中的同相同分支匝间短路只可能发生在相邻 N、S 极下的线圈间，从而导致同相同分支匝间短路的短路匝数不大；端部故障中的同相同分支匝间短路则可能发生在同一极下的相邻线圈之间，对应的短路匝数更小；而 Soubre 发电机由于转速低，每分支线圈数反而很多（由 58 个线圈串联而成），使得同相同分支匝间短路的短路匝比（短路匝数/每分支线圈数）很小，主保护灵敏度问题突出^[5-6]。

2.2 运用“多回路分析法”确定最终的主保护配置方案

由于篇幅限制，主要对比一下传统设计方案与推荐的定量化设计方案的差异。

2.2.1 传统设计方案——完全纵差保护（代号 3）+一套零序电流型横差保护（代号 01）

按照传统设计方法（基于概念、经验和定性分析），大型水轮发电机需配置完全纵差保护，以对付实际可能发生的相间短路；由于还存在匝间短路的可能，故需增设横差保护，零序电流型横差保护由于结构简单、功能全面而被优先选择。

Soubre 发电机传统设计方案的构成如图 2 所示，在 $o_1 - o_2$ 之间接一个电流互感器 TA0，以构成一套零序电流型横差保护；利用每相机端和中性点侧的相电流互感器 TA1 ~ TA6，可构成一套完全纵差保护。

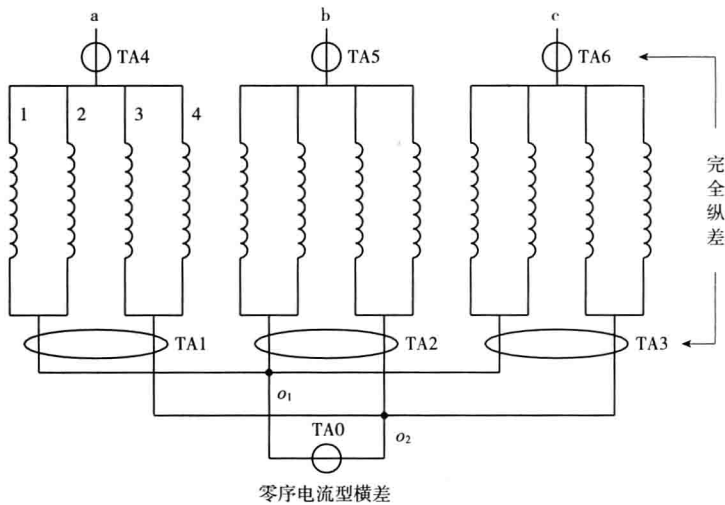


图 2 Soubre 发电机传统设计方案（相邻连接，12 - 34）

传统设计方案的性能见表 5，不能动作故障数为 1079 种（占故障总数的 15.14%），双重化指标为 79.79%。

表 5 Soubre 发电机同槽和端部故障时传统设计和定量化设计方案的动作情况

故障类型	构成形式	几种主保护均不动作	只有 1 种主保护动作	2 种及以上主保护都动作
同槽故障数	K01 + 3_ 12 - 34	290	166	240
	K01 + 3_ 13 - 24	269	187	240
	K01 + 3_ 14 - 23	299	163	234
	K01 + 10 + 3_ 12 - 34	178	130	388
	K01 + 10 + 3_ 13 - 24	137	168	391
	K01 + 10 + 3_ 14 - 23	187	130	379
端部故障数	K01 + 3_ 12 - 34	789	195	5445
	K01 + 3_ 13 - 24	796	192	5441
	K01 + 3_ 14 - 23	798	439	5192
	K01 + 10 + 3_ 12 - 34	686	134	5609
	K01 + 10 + 3_ 13 - 24	632	220	5577
	K01 + 10 + 3_ 14 - 23	695	134	5600

2.2.2 定量化设计方案——完全纵差保护（代号 3）+ 一套零序电流型横差保护（代号 01）+ 完全裂相横差保护（代号 10）

经主保护定量化设计过程，推荐方案如图 3 所示，将每相的 1、3 分支接在一起，形成中性点 o_1 ；再将每相的 2、4 分支接在一起，形成中性点 o_2 。在 o_1 、 o_2 之间接一个电流互感器 TA0，以构成一套零序电流型横差保护；并在每相的 1、3 分支组和 2、4 分支组上装设分支电流互感器 TA1 ~ TA6，且有机端相电流互感器 TA7 ~ TA9，以构成一套完全裂相横差保护和一套完全纵差保护（其中性点侧相电流取自每相已有的两个分支组 TA）。

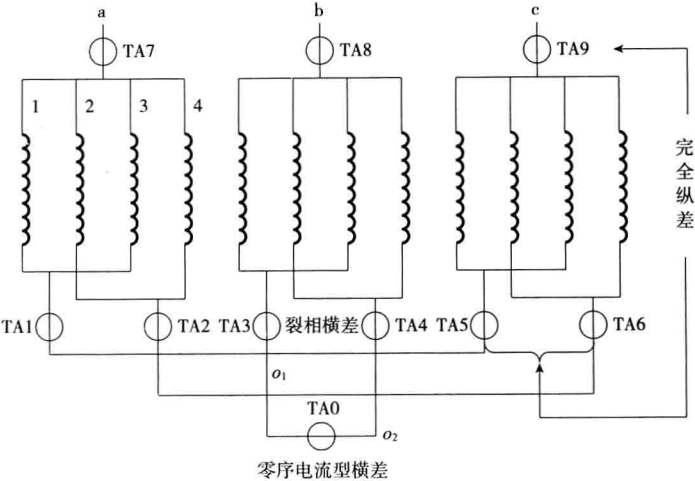


图 3 Soubre 发电机内部故障主保护及 TA 配置推荐方案（相隔连接，13-24）

对于 Soubre 发电机实际可能发生的 7125 种内部故障，图 3 所示推荐方案不能动作故障数有 769 种，占内部故障总数的 10.79%，不能动作的故障类型大多为短路匝比不大于 5% 的小匝数同相同分支匝间短路；对 5968 种内部故障（占内部故障总数的 83.76%）有两种及以上原理不同的主保护灵敏动作，见表 5。

由于 Soubre 发电机定子绕组形式所决定的故障特点中小匝数匝间短路问题突出，即使采用更加复杂的中性点引出方式并增设分支 TA（图 4），其不能动作故障数也高达 608 种，占内部故障总数的 8.53%。

通过进一步的分析发现，相比于图 3 所示推荐方案，图 4 所示方案不能动作故障类型中发生几率大的大匝数同相同分支匝间短路数反而增大了（见表 6 和表 7），究其原因在于随着短路匝数的增加，故障相故障分支与非故障分支的中性点侧电流大小和相位相差越来越大，故障分支中性点侧电流对故障相不平衡度的影响越来越显著，当故障分支恰好为被舍弃的分支时，故障相其余分支之间的不平衡度就很小了，必然导致故障相不完全裂相横差保护灵敏度的降低。

表 6 Soubre 发电机同槽故障时各种主保护配置方案不能动作故障数及其性质

主保护方案	不能动作故障数	同相同分支匝间短路						同相不同分支匝间短路	相间短路
		2 匝	3 匝	4 匝	5 匝	6 匝	7 匝		
推荐方案	137	76	40	4	6	0	2	9	0
可能方案	138	41	24	27	20	13	6	7	0

表 7 Soubre 发电机端部故障时各种主保护配置方案不能可靠动作故障数及其性质

主保护方案	不能动作故障数	同相同分支匝间短路						同相不同分支匝间短路	相间短路
		1 匝	2 匝	3 匝	4 匝	5 匝	6 匝		
推荐方案	632	360	176	60	22	6	2	6	0
可能方案	470	246	98	43	48	23	6	6	0

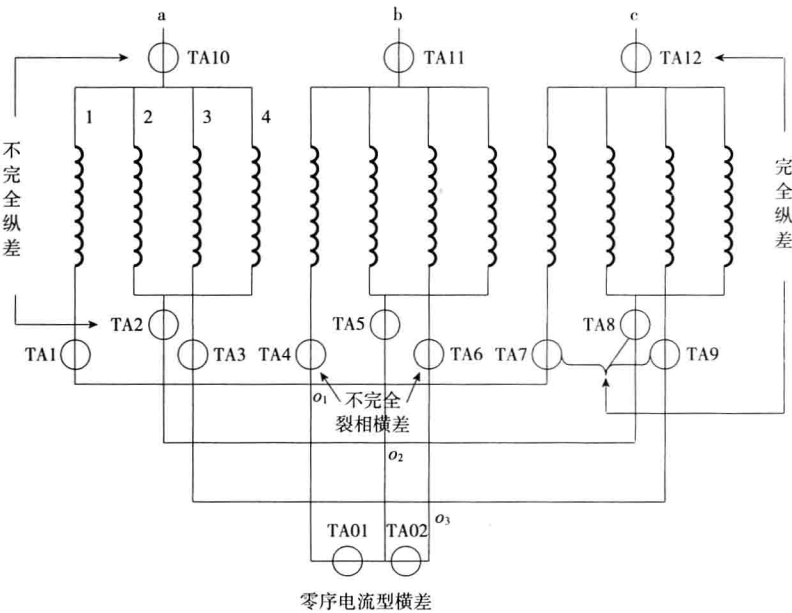


图 4 Soubre 发电机内部故障主保护及 TA 配置可能方案（相隔连接，1-24-3）

一般来说，完全裂相横差保护反应匝间短路的能力要优于零序电流型横差保护，因为完全裂相横差反应的是一相两部分之间的不平衡，而零序电流型横差则是将三相绕组分成两部分、反应流过中性点连线的不平衡电流；对于小匝数同相同分支匝间短路，不完全裂相横差保护的灵敏性与完全裂相横差保护的灵敏性相差不大，甚至要好于完全裂相横差，但是随着短路匝比的增加，不完全裂相横差保护的灵敏性逐渐变差。

3 沙坪二级发电机主保护定量化设计过程

沙坪二级水电站为大渡河干流 22 级规划的第 20 个梯级电站，上游为沙坪一级水电站，下游为龚嘴水电站；电站共安装 6 台 58MW 的灯泡贯流式机组（单机容量为国内最大）；其发电机采用分数槽（ $q=5/2$ ）波绕组（定子绕组节距为 $y_1=6$ 、 $y_2=9$ ），68 极，定子槽数为 510，每相 2 分支，每分支 85 个线圈。

沙坪二级发电机额定参数为： $P_N=58\text{MW}$ ， $U_N=10.5\text{kV}$ ， $I_N=3447.6\text{A}$ ， $\cos\varphi_N=0.925$ ， $I_{f0}=586.2\text{A}$ ， $I_{fN}=955.6\text{A}$ 。

3.1 沙坪二级发电机的故障特点及典型故障特征

根据对东方电气集团东方电机有限公司提供的发电机定子绕组展开图的分析，该发电机定子绕组实际可能发生的内部短路见表 8 和表 9。

表 8 沙坪二级发电机 510 种同槽故障

同相同分支匝间短路 184 种				同相不同分支 匝间短路	相间短路 306 种	
短路匝数	36 匝	37 ~ 65 匝	66 匝		分支编号相同	分支编号不同
故障数	4	176	4	20	198	108

表 9 沙坪二级发电机 6630 种端部交叉故障

同相同分支匝间短路 1728 种				同相不同分支 匝间短路	相间短路 4794 种	
短路匝数	1 匝	2 ~ 66 匝	67 匝		分支编号相同	分支编号不同
故障数	24	1674	30	108	3028	1766

表 8 中，定子槽内上、下层线棒间短路共 510 种（等于定子槽数）。通过对同槽故障的分析发现，同相同分支匝间短路 184 种，占 36.08%，其中最小短路匝数为 36 匝（对应的短路匝比为 42.35%），有 4 种，最大短路匝数为 66 匝（对应的短路匝比为 77.65%），也有 4 种；同相不同分支匝间短路 20 种，占 3.92%；相间短路 306 种，占 60%。

表 9 中，定子绕组端部交叉处短路共 6630 种。通过对端部交叉故障的分析发现，同相同分支匝间短路 1728 种，占 26.06%，其中最小短路匝数为 1 匝（对应的短路匝比为 1.18%），有 24 种，最大短路匝数为 67 匝（对应的短路匝比为 78.82%），有 30 种；同相不同分支匝间短路 108 种，占 1.63%；相间短路 4794 种，占 72.31%。

通常情况下，贯流式发电机由于水头低（极数多）、容量小（分支数少），使得每分支线圈数反而很多，导致同相同分支匝间短路多为小短路匝比，主保护灵敏度问题突出；而沙坪二级发电机所采用的绕组形式^[5-6]，使得同槽故障中不存在小匝数同相同分支匝间短路、端部故障中小匝数同相同分支匝间短路所占比率不大（表 8 和表 9），将有利于发电机主保护性能的提高。

3.2 运用“多回路分析法”对比不同主保护配置方案的性能

受限于篇幅，主要对比一下传统设计方案与增设裂相横差保护的定量化设计方案的差异。

通过表 10 可以看出，在传统设计方案的基础上增设裂相横差保护（需将相应的中性点侧相 TA 改为分支 TA），不能动作故障数减少了 94 种（占内部故障总数的 1.32%），双重化指标提高了 26.67%。

表 10 沙坪二级发电机同槽和端部故障时传统设计和定量化设计方案的动作情况

故障类型	构成形式	几种主保护均不动作	只有 1 种主保护动作	2 种及以上主保护都动作
同槽故障数	K01 + 3	0	204	306
	K01 + 10 + 3	0	0	510
端部故障数	K01 + 3	152	1712	4766
	K01 + 10 + 3	58	106	6466

4 大中型水轮发电机主保护定量化及优化设计经验^[7-10]

分析对比已有的 300 多台大中型水轮发电机主保护的定量化设计结果，不难发现：

(1) 采用叠绕组的高转速水轮发电机, 譬如鲁德巴 ($2 \times 230\text{MW}$, 20 极)、瓦屋山 ($2 \times 130\text{MW}$, 18 极)、仙游抽蓄 ($4 \times 300\text{MW}$, 14 极)、清远抽蓄 ($4 \times 320\text{MW}$, 14 极)、仙居抽蓄 ($4 \times 375\text{MW}$, 16 极)、洪屏抽蓄 ($4 \times 300\text{MW}$, 12 极) 和深圳抽蓄 ($4 \times 300\text{MW}$, 14 极) 发电机, 经量化设计过程均取得了良好的保护性能, 其主保护配置方案的不能动作故障率 (不能动作故障数/内部故障总数) 分别仅为 0.27%、0.0%、0.08%、0.16%、0.27%、0.0% 和 0.17%。

(2) 采用波绕组的高转速水轮发电机也取得了良好的保护性能, 譬如溧阳抽蓄电站 ($6 \times 250\text{MW}$, 20 极) 发电机主保护配置方案无保护死区。

(3) 采用叠绕组的低转速水轮发电机, 即使采用与上述高转速水轮发电机相同的主保护配置方案, 也难以取得良好的保护性能, 譬如桥巩 ($4 \times 57\text{MW}$, 72 极, Alstom 机组)、岩滩扩机工程 ($2 \times 300\text{MW}$, 84 极) 和梨园 ($4 \times 600\text{MW}$, 64 极) 发电机主保护配置方案的不能动作故障率分别高达 15.48%、11.14% 和 9.70%, 究其原因在于发电机定子绕组形式所决定的内部故障中小匝数同相同分支匝间短路所占比率太大。

5 结语

(1) 传统设计方案仅凭概念、经验和定性分析来确定, 未经全面的内部短路分析计算及主保护量化设计过程, 分支的分组及主保护方案的选取难免存在盲目性。

(2) 对于高转速中小型水轮发电机, 无论其定子绕组是采用叠绕组还是波绕组, 均可沿用传统设计方案, 无需增设分支 TA。

(3) 对于低转速中小型水轮发电机, 若其定子绕组采用叠绕组, 需在传统设计方案 (完全纵差 + 零序电流型横差保护) 的基础上增设裂相横差保护, 以改善对于小匝数同相同分支匝间短路的灵敏性。

(4) 对于采用波绕组的低转速中小型水轮发电机, 在传统设计方案的基础上增设裂相横差保护, 同样有利于主保护性能的改善。

参考文献:

- [1] 高景德, 王祥珩, 李发海. 交流电机及其系统的分析 [M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [2] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用 [M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [3] 桂林. 大型发电机主保护配置方案优化设计的研究 [D]. 北京: 清华大学, 2003.
- [4] 桂林. 大型水轮发电机主保护量化设计过程的合理简化及大型汽轮发电机新型中性点引出方式的研究 [D]. 清华大学博士后研究报告, 2006.
- [5] 白延年. 水轮发电机设计与计算 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [6] 许实章. 交流电机的绕组理论 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [7] 桂林, 王维俭, 孙宇光, 等. 三峡右岸发电机主保护配置方案设计研究总结 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (13): 69-75.
- [8] 桂林, 王祥珩, 孙宇光, 等. 巨型水轮发电机定子绕组设计建议——由发电机主保护量化设计引出的反思 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (4): 45-48.
- [9] 桂林, 王祥珩, 孙宇光, 等. 叠绕组水轮发电机内部故障特点与主保护性能分析 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (7): 70-74.
- [10] 桂林, 王祥珩, 孙宇光, 等. 向家坝和溪洛渡水电站发电机主保护设计总结 [J]. 电力自动化设备, 2010, 30 (7): 30-33.

作者简介：

桂 林（1974— ），男，博士，副教授，研究方向为大机组保护及故障分析。

李荷婷（1990— ），女，硕士研究生，研究方向为发电机故障分析及其保护。

陈健国（1963— ），男，本科，高级工程师，研究方向为梯级运行调度。

邹 键（1964— ），女，本科，高级工程师，研究方向为梯级水电站发变组继电保护定值整定及运行管理。

王祥珩（1940— ），男，博士，教授，博士生导师，研究方向为电机分析与控制、电机故障及保护、电气传动及其自动化等。