

计及故障发生几率的发电机 主保护定量化设计

桂 林¹,王维俭¹,孙宇光¹,王祥珩¹,

李 婷²,陈家恒²,王 旭²,李 俊²,邹 颖²

(1. 清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100084;

2. 昆明勘测设计研究院, 云南 昆明 650051)

摘要: 以漫湾二期和景洪发电机主保护设计为例, 分析了 7 种主保护配置方案, 主要比较了其中性能较好的 2 种方案在发电机内部故障时的动作情况及不能动作故障类型, 说明在大中型水轮发电机主保护的定量化设计中, 除了引入故障的存在几率——发电机实际可能发生的同槽和端部交叉故障, 还应考虑内部短路的发生几率。由于不同的主保护配置方案均存在各自的保护死区, 在保护死区相差不大的主保护配置方案的抉择中, 应倾向于不能动作故障类型发生几率低的主保护配置方案, 同时综合考虑其他因素, 合理确定最终的主保护配置方案, 以兼顾设计的科学性和实用性。

关键词: 水轮发电机; 主保护配置方案; 定量化设计; 内部短路; 发生几率

中图分类号: TM 772

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)06-0001-04

0 引言

随着三峡、龙滩、拉西瓦、小湾、凤滩、紫坪铺等工程的相继建设和投入生产, 大中型水轮发电机主保护配置方案的定量化设计^[1-7]已逐步被电厂和设计院所接受, 并初见成效(凤滩电站正确动作的事例介绍见后)。

对比于常规的设计方法, 主保护配置方案定量化设计方法的不同之处体现在——在全面的内部短路分析计算的基础上、经定量化的设计过程完成其主保护方案的设计:

a. 依据电机厂提供的绕组连接图, 调查发电机的故障特点——定子绕组任两导线相邻即考虑其存在短路的可能, 从而确定发电机实际可能发生的同槽和端部交叉故障;

b. 通过全面的内部短路仿真计算, 清楚认识各种主保护方案的性能;

c. 依据“优势互补、综合利用”的设计原则, 在定量分析的基础上确定最终的主保护配置方案, 且兼顾设计的科学性和实用性。

由于发电机主保护的设计是一个工程优化设计问题, 设计的科学性和实用性涉及很广, 譬如发电机中性点侧引出的难易程度、分支电流互感器(TA)的安装条件、完成设计任务所需时间和代价等, 本文主要讨论内部短路的发生几率对最终主保护配置方案确定的影响。下面以漫湾二期和景洪发电机的设计过程为例进行说明。

1 漫湾二期和景洪发电机的基本情况

漫湾二期发电机采用分数槽叠绕组, 52 极, 定子槽数为 540, 每相 4 分支, 每分支 45 槽。发电机额定参数为: $P_N=300$ MW, $U_N=18$ kV, $I_N=10691.7$ A。

而景洪发电机采用整数槽波绕组, 80 极, 定子槽数为 720, 每相 4 分支, 每分支 60 槽。发电机额定参数为: $P_N=350$ MW, $U_N=18$ kV, $I_N=12474$ A。

2 漫湾二期和景洪发电机主保护及 TA 配置方案的对比分析

总结已有的偶数分支水轮发电机的设计经验^[6-7], 并考虑 TPY 级 TA 在发电机中性点侧的安装条件, 根据发电机中性点侧引出个数(1 个, 2 个, 直至 3 个)和每相分支 TA 数目的变化(2 个或 1 个), 共考虑了 7 种主保护配置方案。

方案 1 完全裂相横差+2 套不完全纵差保护(1 个中性点, 每相 2 个分支 TA)。

方案 2 完全裂相横差+1 套完全纵差保护(1 个中性点, 每相 2 个分支 TA)。

方案 3 不完全裂相横差+2 套不完全纵差保护(1 个中性点, 每相 2 个分支 TA)。

方案 4 完全裂相横差+2 套不完全纵差+1 套零序电流型横差保护(2 个中性点, 每相 2 个分支 TA)。

方案 5 完全裂相横差+1 套完全纵差+1 套零序电流型横差保护(2 个中性点, 每相 2 个分支 TA)。

方案 6 不完全裂相横差+2 套不完全纵差+2 套零序电流型横差保护(3 个中性点, 每相 2 个分支 TA)。

方案 7 2 套零序电流型横差+1 套不完全纵差保护(3 个中性点,每相 1 个分支 TA)。

对比上述 7 种主保护配置方案的性能,主要考虑性能较好的方案 4 和方案 6,下面详细说明。

方案 4 (代号 K01+10+222)如图 1 所示,将每相的 1、3 分支接在一起,形成中性点 o_1 ;将每相的 2、4 分支再接在一起,形成中性点 o_2 。在 o_1 - o_2 之间接一个电流互感器 TA_0 ,并在每相的 1、3 分支和 2、4 分支上装设分支电流互感器 TA_1 ~ TA_6 ,和 3 个机端相电流互感器 TA_7 ~ TA_9 ,以构成 1 套零序电流型横差、1 套完全裂相横差和 2 套不完全纵差保护。

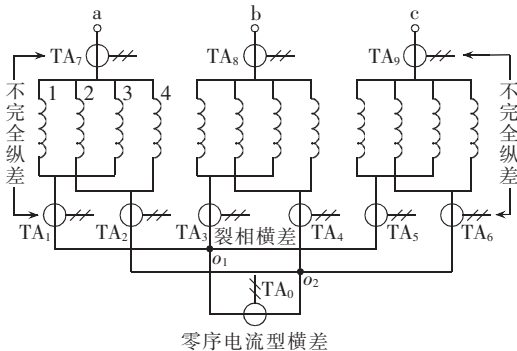


图 1 漫湾二期发电机主保护配置
方案 4(相隔引出,13-24)

Fig.1 The fourth main protection configuration
scheme of Manwanerqi generator
(Lead out 13-24)

方案 6(代号 K02+11+212)如图 2 所示,将每相的第 1 分支接在一起,形成中性点 o_1 ;将每相的 2、4 分支接在一起,形成中性点 o_2 ;再将每相的第 3 分支接在一起,形成中性点 o_3 。在 o_1 - o_3 、 o_2 - o_3 之间接 2 个电流互感器 TA_{01} 和 TA_{02} ,并在每相的 1 分支和 3 分支上装设分支电流互感器 TA_1 ~ TA_6 ,和 3 个机端相电流互感器 TA_7 ~ TA_9 ,以构成 2 套零序电流型横差、1 套不完全裂相横差和 2 套不完全纵差保护。

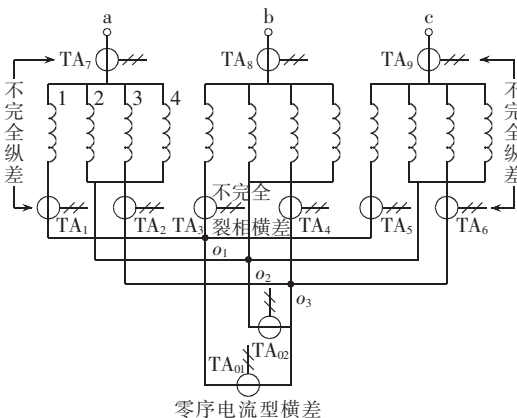


图 2 漫湾二期发电机主保护配置
方案 6(相隔引出,1-24-3)

Fig.2 The sixth main protection configuration
scheme of Manwanerqi generator
(Lead out 1-24-3)

表 1 列举了漫湾二期发电机内部故障时方案 4 和方案 6 动作情况的对比,方案 6 的拒动故障数(66+150)稍少于方案 4(12+228)、2 种及以上不同原理主保护灵敏动作故障数反而明显多于方案 4,似乎应优先选择方案 6。

表 1 漫湾二期发电机同槽和端部故障时方案 4
和方案 6 的动作情况及故障数

Tab.1 Operation conditions and fault times of the fourth
and sixth main protection configuration schemes of
Manwanerqi generator for slot and end faults

故障类型	主保护配置	几种主保护均不动作	只有 1 种主保护动作	2 种及以上原理不同主保护都动作
同槽故障	方案 4	12	192	336
	方案 6	66	36	438
端部故障	方案 4	228	180	3516
	方案 6	150	78	3696

进一步分析方案 4 和方案 6 不能动作的故障类型(如表 2、3 所示),发现:

a. 对于机端侧的大匝数同相不同分支匝间短路,两者均不能动作,这是因为将短路点稍作上移则故障不复存在;

b. 对于小匝数同相同分支匝间短路,方案 6 的灵敏度要优于方案 4,但是随着短路匝比的增加,方案 6 的灵敏度逐渐变差,这是因为随着短路匝数的增加,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,当其恰好被不完全裂相横差保护舍弃时,故障相其余几个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 2 漫湾二期发电机并网空载时对同槽故障方案 4
和方案 6 不能可靠动作故障数及其性质

Tab.2 Non-operation times and fault types of
Manwanerqi generator for slot faults

主保护配置	具体连接形式	不能可靠动作故障数	匝间短路						相间短路	
			相同分支							不同分支
			2 匝	3 匝	4 匝	5 匝	6 匝			
方案 4	K01+10+222_13-24	12	0	0	0	0	0	12	0	
方案 6	K02+11+212_1-3	66	30	24	0	0	0	12	0	

表 3 漫湾二期发电机并网空载时对端部故障方案 4
和方案 6 不能可靠动作故障数及其性质

Tab.3 Non-operation times and fault types of
Manwanerqi generator for end faults

主保护配置	具体连接形式	不能可靠动作故障数	匝间短路						相间短路	
			相同分支							不同分支
			1 匝	2 匝	3 匝	4 匝	5 匝			
方案 4	K01+10+222_13-24	228	228	0	0	0	0	0	0	
方案 6	K02+11+212_1-3	150	114	36	0	0	0	0	0	

由于大匝数同相同分支匝间短路较小匝数匝间短路压差大,故前者发生几率大;且引出 3 个中性点并布置 TPY 型分支 TA 将使发电机中性点侧铜环布置过于复杂。

因此,在漫湾二期发电机主保护设计中,不仅考虑了各种主保护配置方案不能动作故障数的多少,还在分析保护死区相差不大的主保护配置方案不能动作故障类型的基础上,计及了故障的发生几率,倾向于保护死区发生几率小的方案,从而确定图 1 所示的方案 4 为漫湾二期发电机主保护及 TA 配置方案。

在景洪发电机主保护配置方案的量化设计过程中,也出现了类似的情况,只不过由于 2 台发电机故障特点的不同^[8],景洪发电机方案 6 的拒动故障数虽略少于方案 4,但其对相间短路(发生在未装设 TA 分支间的中性点侧小匝数相间短路)存在保护死区,具体分析见参考文献[5-7]。

笔者对文献[9-10]中的相关数据进行了统计,13 年间 100 MW 及以上发电机本体故障中相间短路有 59 次,匝间短路有 16 次,分支开焊故障有 2 次,说明发电机本体故障中相间短路的发生几率要大于匝间短路(包括分支开焊),究其原因主要还是前者的故障点压差较大。

因此,对于景洪发电机,也推荐图 1 所示的方案 4 为其主保护及 TA 配置方案。

3 已投运的风滩发电机主保护设计回顾

曾对单机 200 MW 的风滩发电机(分数槽叠绕组)进行了主保护的量化设计,在选择方案时也同样计及了故障的发生几率,得到图 3 的方案 4,投运后的运行情况证明了设计的正确性,下面对其设计过

程作一个简要回顾^[7]。

由于篇幅原因,本文仅列举了风滩发电机性能较好的方案 2 和方案 4 的构成情况和不能动作故障数及其类型(如表 4、5 所示),通过对比发现方案 2 的 2 种及以上不同原理主保护灵敏动作故障数明显多于方案 4^[7],但方案 2 的不能动作故障数多,且更为严重的是其不能动作故障类型中存在发生几率较大的相间短路和大匝数同相同分支匝间短路,而方案 4 不能动作故障类型主要是发生几率较小的小匝数同相同分支匝间短路。

表 4 风滩发电机并网空载时对同槽故障方案 2 和方案 4 不能可靠动作故障数及其性质

Tab.4 Non-operation times and fault types of Fengtan generator for slot faults											
主保护 配置	具体连 接形式	不能可 靠动作 故障数	匝间短路								
			相同分支							不同 分支	相间 短路
			1 匝	2 匝	3 匝	4 匝	5 匝	6 匝			
方案 2	K02+11+ 212_1-3	95	2	44	0	39	0	2	6	2	
方案 4	K11+21+ 3_2	21	2	13	0	0	0	0	6	0	

表 5 风滩发电机并网空载时对端部故障方案 2 和方案 4 不能可靠动作故障数及其性质

Tab.5 Non-operation times and fault types of Fengtan generator for end faults									
主保护 配置	具体连 接形式	不能可 靠动作 故障数	匝间短路						相间 短路
			相同分支					不同 分支	
			1 匝	2 匝	3 匝	4 匝	5 匝		
方案 2	K02+11+ 212_1-3	174	69	11	42	20	8	2	22
方案 4	K11+21+ 3_2	71	68	0	1	0	0	2	0

另外,方案 4 的中性点引出方式非常简单,得到设计院和电厂的好评。

2005 年 5 月 30 日上午 11 时,由于线路出现永久性故障,风滩发电机甩负荷 200 MW,机组过速(录波有记录),在过速过程中,机组励磁并没消失。由于转子振动过大引起偏心,造成叠绕组的风滩发电机同相各分支之间的不平衡电流增大,不完全裂相横差和不完全纵差保护均灵敏动作;完全纵差保护未发生误动,因其不反应同相各分支之间的不平衡电流。

当天下午 5 时,该发电机又发生转子绕组多点接地故障,并导致转子匝间短路的发生。由于转子磁极磁场的不对称,同相各分支之间又产生了较大的不平衡电流,应该动作的不完全裂相横差和不完全纵差保护又灵敏动作,不该动作的完全纵差保护仍未误动。

现场实例证明,图 3(b)方案 4 所示的风滩发电机主保护方案的配置不仅灵敏,且有助于事故分析。

4 结论

大中型水轮发电机主保护配置方案的量化设计方法已逐步被电厂和设计院所接受,随着工程实

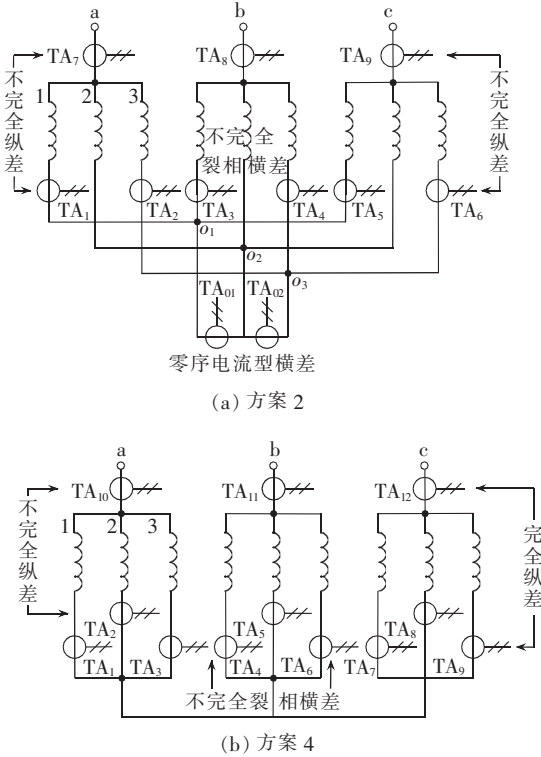


图 3 风滩发电机主保护配置方案的对比
Fig.3 The contrast between main protection configuration schemes of Fengtan generator

践经验的不断积累,在发电机主保护方案的设计中,除了引入故障的存在几率——定子绕组任两导线相邻即考虑其存在短路的可能,而且在保护死区相差不大的主保护配置方案的抉择中进一步考虑了故障的发生几率——倾向于不能动作故障类型发生几率低的主保护配置方案,使主保护配置方案的确定更加合理。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 王维俭,桂林,王祥珩. 论大型发电机微机主保护设计的科学性[J]. 电力自动化设备,2002,22(2):1-7.
WANG Wei-jian, GUI Lin, WANG Xiang-heng. On the scientific design of microcomputer-based main protection for large generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(2): 1-7.
- [4] 桂林,王维俭,孙宇光,等. 大中型发电机主保护配置方案量化及优化设计的重要性[J]. 电力自动化设备,2004,24(10):1-6.
GUI Lin, WANG Wei-jian, SUN Yu-guang, et al. Importance of quantitative and optimum design of main protection configuration scheme for large and medium generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(10):1-6.
- [5] 桂林,王祥珩,孙宇光,等. 大中型发电机主保护方案和配置的量化设计——发电机内部短路仿真软件的应用[J]. 电力系统自动化,2003,27(24):50-55.
GUI Lin, WANG Xiang-heng, SUN Yu-guang, et al. Quantitative design of main protection configuration scheme for large and medium generator—application of the internal faults simulation software[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(24):50-55.
- [6] 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.

GUI Lin, WANG Wei-jian, SUN Yu-guang, et al. Research summarization on design of main protection configuration scheme for hydro-generator on Three Gorges Right Bank Power Station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(13):69-75.

- [7] 桂林,孙宇光,王祥珩,等. 发电机内部故障仿真分析软件的应用实例[J]. 水电自动化与大坝监测,2003,27(6):33-40.

GUI Lin, SUN Yu-guang, WANG Xiang-heng, et al. Practical application of internal fault analysis software to power generators[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2003, 27(6): 33-40.

- [8] 白延年. 水轮发电机设计与计算[M]. 北京:机械工业出版社,1982.

- [9] 周玉兰. 1991-1994年发电机、变压器保护运行情况统计分析[J]. 电网技术,1995,19(10):60-62.

ZHOU Yu-lan. A statistic analysis of relay protection operation for generator and transformer from 1991 to 1994[J]. Power System Technology, 1995, 19(10):60-62.

- [10] 周玉兰,王玉玲,赵曼勇. 2004年全国电网继电保护与安全自动装置运行情况[J]. 电网技术,2005,29(16):42-48.

ZHOU Yu-lan, WANG Yu-ling, ZHAO Man-yong. Statistics of operation situation of protective relays and automation devices of power systems in China in 2004[J]. Power System Technology, 2005, 29(16):42-48.

(责任编辑:李玲)

作者简介:

桂林(1974-),男,安徽广德人,博士后,研究方向为大机组保护及故障分析(E-mail: guilin99@mails.tsinghua.edu.cn);

王维俭(1930-),男,江苏武进人,教授,长期从事大机组保护的教学和研究工作;

李婷(1952-),女,北京人,教授级高级工程师,长期从事电站监视、控制及二次设计工作;

陈家恒(1966-),男,云南昭通人,教授级高级工程师,长期从事水电站的电气设计工作。

Quantitative design of main protection scheme for hydro-generators considering occurrence probability of internal faults

GUI Lin¹, WANG Wei-jian¹, SUN Yu-guang¹, WANG Xiang-heng¹,

LI Ting², CHEN Jia-heng², WANG Xu², LI Jun², ZOU Ying²

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Kunming Hydroelectric

Investigation, Design and Research Institute, Kunming 650051, China)

Abstract: In the design of main protection for two hydro-generators in Manwanerqi and Jinghong power stations, seven possible main protection configuration schemes are analyzed, then the non-operation fault number and type of two schemes with better protection performance are further compared. According to above design work, the occurrence probability of internal faults should be considered in the quantitative design of main protection schemes for large and medium generators, while possible slot and end faults occurring on the stator winding are accounted for. As different main protection configuration schemes have their own non-operation fault types, the scheme with lower occurrence probability of non-operation fault types should be chosen first. Considering other factors, the final main protection configuration scheme is then determined to meet both scientific and practical requirements.

Key words: hydro-generator; main protection configuration scheme; quantitative design; internal fault; occurrence probability