

清江水布垭电站发电机定子绕组主保护分析

胡嘉武

(湖北清江水电开发有限责任公司, 湖北 宜昌 443000)

摘要: 针对清江水布垭电站 46 万 kW 发电机定子绕组结构及其综合差动主保护方式动作行为进行计算分析和评价, 重点阐述了定子绕组匝间故障及分支断线时保护动作的灵敏度, 指出该主保护方式优于其他组合主保护方式, 现有保护定值个别之处有待商榷, 保护仍有死区, 保护动作原因综合分析较复杂。该文对大型水轮发电机的故障分析有一定的借鉴作用。

关键词: 大型水轮发电机; 定子绕组; 主保护; 分析

Analyzing stator windings main protection of generator for Qingjiang Shuibuya hydropower station

HU Jia-wu

(Hubei Qingjiang Hydropower Development Ltd Co., Yichang 443000, China)

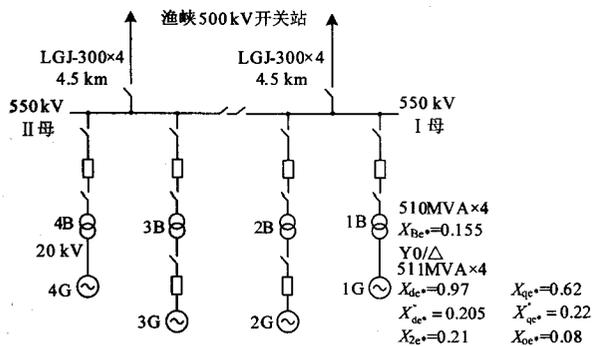
Abstract: For Qingjiang Shuibuya Hydropower Station 460,000 kW power generator stator windings structure and its integrated differential main protection, this paper carries out actions behavior analysis and evaluation. It focuses on protection sensitivity of the stator winding inter-turn faults and branches broken fault, and points out that the main protection is superior to other one and in existence the starting value of the individual worth discussing, there are still dead zone for the protection and a comprehensive analysis of the reasons for protection action is rather complicated. The paper has some value on the large-scale hydro-generator failure analysis.

Key words: large-scale hydro-generator; stator windings; main protection; analyzing

中图分类号: TM772 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)20-0104-04

0 引言

清江水布垭电站额定装机容量 $4 \times 460 = 1840$ MW, 为湖北清江梯级水电开发的龙头电站, 2007 年 7 月~2008 年 8 月 1#~4# 机组已相继投产发电。该电站在华中电网中担负着调峰、调频的重要作用。电站电气主接线简图见图 1。



注: 正常情况下 500 kV I 母和 II 母间的隔离刀断开

图 1 电站电气主接线简图

Fig.1 Electrical main wiring diagram of the station

1 发电机定子绕组结构及分布

电站发电机采用整数槽叠绕组, 40 极, 定子槽数 480, 每相 5 分支, 每分支 32 匝, 占 64 槽 (含上、下槽)。发电机额定参数为: $U_N = 20$ kV, $I_N = 14755$ A, $\cos \varphi_N = 0.9$ 。

根据对生产厂家设计制造的发电机定子绕组分析, 该发电机定子绕组实际可能发生的内部同槽短路如表 1 所示。

表 1 水布垭电站发电机定子绕组 480 种可能同槽故障
Tab.1 Generator stator windings 480 may be the same trough fault of the station

同相同分支匝间短路 210 种		同相不同分支匝间短路 30 种 (物理匝数 29.5)		相间短路 240 种	
短路匝数	3 匝	5 匝	短路电位匝数	27 匝	29 匝
故障数	105	105	故障数	15	15
				分支编号相同	分支编号不同
				220	20

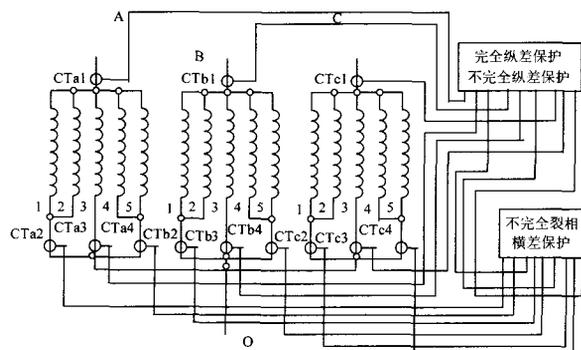
由于发电机采用叠绕组, 每个分支集中分布于电机内圆的某一区域, 同相的 5 个分支沿电机内圆连续分布, 使得定子绕组实际可能发生的内部短路中同相不同分支匝间短路所占比率很小, 但发电机端部各相各分支引线同槽均为同相不同分支(三相共 15 槽), 其短路电位匝数为 29 匝。

定子绕组端部连接在工艺上采取了如下措施:

(1) 发电机端部和中性点处各相引线通过有绝缘支架的环管引出, 其各引出环管之间及环管与绕组端部引线之间间隙相当大; (2) 各极之下叠绕组之间的跳连接线通过平行同槽跳线连接, 每匝线棒引线之间及同槽跳线之间均有明显间隙, 跳线与绕组端部引线之间较高的绝缘垫块相隔; (3) 不同槽跳线相互之间间隙相当大。由以上工艺措施可知, 定子绕组端部发生短路故障的可能性极小。虽然这种故障机率极小, 同时大部分故障后果与同相匝间短路、相间短路故障类似, 但极端情况下将发生发电机端各相之间和发电机端与发电机中性点的严重短路后果和发电机同相同分支 1 匝之间的不易检测的短路后果。

2 发电机定子绕组主保护配置及定值

发电机保护采用 DRS 型产品。发电机定子绕组主保护由发电机纵差、不完全裂相横差、不完全纵差保护组成, 保护完全按双重化配置, 其配置系统图如图 2 所示。图 2 中, 电流互感器 CT1 变比为 20000/1, CT2、CT4 变比为 8000/1, CT3 变比为 4000/1。



注: 图中只画出一套保护装置、电流互感器及其连线, 另一套按完全相同方式配置。

图 2 发电机定子绕组主保护配置系统图

Fig.2 The main protection system of generator stator windings

保护定值参照文献[3]计算整定。发电机纵差、不完全裂相横差、不完全纵差保护定值均为 $0.3 I_N$, 取近似值二次侧电流为 0.2 A, 制动系数均取 0.5。

3 系统相关参数

按发电机额定值取基准值, 即取基准容量 $S_j=460/0.9$ MVA, 发电机母线侧基准电压 $U_{jF}=20$ kV, 为使变压器不出现非基准变比, 500 kV 线路基准电压取为 $U_{jL}=U_{jF} \times k_{(变比)}=550$ kV。

发电机、变压器参数额定标么值如图 1 所示。

根据华中网调继电保护处所提供的“水布垭电厂发变组保护整定方案”: 全网大方式, 电站 500 kV 母联断开, 系统等值到任一台机变高压侧(不包括该台机变) $X_s=0.006876$ pu (以 100 MVA、525 kV 为基准的 pu)。按本文所拟基准容量、基准电压折算, 该等值电抗为 0.032 022。

4 发电机定子绕组主保护动作行为分析

4.1 发电机定子绕组主保护构成

图 2 中, 各相的 CT1~CT4 及相应的保护装置组成发电机完全纵差保护, 各相的 CT2、CT4 及相应的保护装置组成发电机不完全裂相横差保护, 各相的 CT1、CT3 及相应的保护装置组成发电机不完全纵差保护。

发电机完全纵差保护功能众所周知。

发电机不完全裂相横差保护采集发电机中性点侧每相二组即 1、2 分支和 4、5 分支的电流, 能反应定子相间短路、定子匝间短路及分支断线故障。

发电机不完全纵差保护具备完全纵差功能, 同时反应发电机内部匝间短路及分支断线故障。

4.2 发电机空载时主保护动作行为分析

定子绕组任一相任一分支发生同相同分支 1、3、5 匝短路故障时, 参照文献[1](3-4-1)式进行计算, 结果列于表 2。

可见, 当发电机任一相任一分支发生同相同分支 1 匝短路故障时, 不完全裂相横差保护、不完全纵差保护均不能动作; 当发电机任一相第 3 分支发生同相同分支 3 匝短路故障时, 不完全纵差保护能够可靠动作, 1、2、4、5 分支中任一分支发生同相同分支 3 匝短路故障时, 不完全裂相横差保护不能可靠动作; 当发电机任一相任一分支发生同相同分支 5 匝短路故障时, 相应的不完全裂相横差保护、不完全纵差保护均能可靠动作。

4.3 发电机满载时主保护动作行为分析

定子绕组任一相任一分支发生同相同分支 1、3、5 匝短路故障时, 参照文献[1]第一版 P118~P120 进行分析。分析得知, 发电机满载时主保护灵敏度低于发电机空载时主保护相应灵敏度。带负载运行时, 发电机内部电磁关系较空载时更趋复杂, 满载理论分析所假设条件与实际情况出入较大(可能高于实际情况), 故笔者认为在实用计算中只考虑空

载时保护灵敏度满足要求即可。

当发生同槽同相不同分支匝间短路(30种)时,此时短路电位匝数为27匝、29匝,由以上分析可推知,不完全裂相横差保护、不完全纵差保护均能可靠动作。

4.4 发电机任一分支断线故障分析

根据文献[1]第二章第六节和文献[2]中附录C进行分析计算,结果列于表3。由表3可知:

系统阻抗变化对保护动作值基本无影响;

当发电机第3分支断线时,保护能在较小负荷电流下动作;当发电机其它分支断线时,保护需在较大负荷电流下才能动作。

表2 发电机空载时同相同分支匝间短路故障相计算结果

Tab.2 Calculation result of no-load generator with the same phase and same branch of the turn to turn short-circuit fault

并联分支数 $n=5$, 非故障分支次暂态电势 $E''=1$	1匝短路	3匝短路	5匝短路
1个分支的短路匝数比 α	0.031 25	0.093 75	0.156 25
1、2、4、5分支中任一分支发生同相同分支短路故障时,不完全裂相横差保护装置所流入电流	0.059140(A) << 0.2 A; 保护不能动作	0.196825(A) \approx 0.2 A; 保护不能可靠动作	0.365350(A); 灵敏度为 1.826750 > 1.5, 保护可靠动作
1、2、4、5分支中任一分支发生同相同分支短路故障时,不完全纵差保护装置所流入电流	0.023655(A) << 0.2 A; 保护不动作	0.078730(A) << 0.2 A; 保护不动作	0.146140(A) < 0.2 A; 保护不能动作
第3分支发生同相同分支短路故障时,不完全裂相横差保护装置所流入电流	0; 保护不动作	0; 保护不动作	0; 保护不动作
第3分支发生同相同分支短路故障时,不完全纵差保护装置所流入电流	0.094620(A) < 0.2 A; 保护不能动作	0.314920(A); 灵敏度为 1.5746 > 1.5, 保护可靠动作	0.584560(A); 灵敏度为 2.922800 >> 1.5, 保护可靠动作

表3 发电机任一分支断线故障计算结果(标么值)

Tab.3 The broken fault results of any generator branch (the per-unit value)

	2台机共母运行(系统大方式)	1台机运行(系统大方式)	1台机运行(视系统电抗为 ∞)	依据文献[2]中附录C计算
故障相电流(\dot{I}_a 为故障前三相对称负荷电流)	0.992964 \dot{I}_a	0.992969 \dot{I}_a	0.993859 \dot{I}_a	0.8 \dot{I}_a
某相第1、2、4、5分支断线后,不完全裂相横差保护可能动作负荷电流值	$I_a \geq 0.436839$	$I_a \geq 0.436837$	$I_a \geq 0.436446$	$I_a \geq 0.542207$
某相第3分支断线后,不完全纵差保护可能动作负荷电流值	$I_a \geq 0.273025$	$I_a \geq 0.273023$	$I_a \geq 0.272779$	$I_a \geq 0.338880$

表3注:1)最小方式中视系统电抗为 ∞ 只是为分析方便而假设,实际最小运行方式下系统电抗 $\ll \infty$;

2)按文献[2]分析三种运行方式对保护动作结果没影响。

5 电站发电机定子绕组主保护评价

5.1 综合差动保护方式优于其他组合保护方式

对于负序功率方向原理的匝间短路保护,参照文献[1]P108~P111,负序方向继电器本身动作需要的负序功率为

$$\frac{0.5}{\sqrt{3} \times 100 \times 1} + 3 \times (0.03)^2 \times 0.21 \approx 0.003454$$

按负序方向保护最灵敏时求可能动作短

$$\text{路匝比 } \alpha, \text{ 此时负序功率 } S_2 = \frac{1}{3} \left(\frac{\alpha}{5\sqrt{0.21}} \right)^2 \frac{1}{4} \approx$$

0.015873 α^2 , 即 $\alpha \geq 0.466479$, 需有匝数至少为 $0.466479 \times 32 \approx 15$ 才可能使保护动作;发电机在并网以前,负序方向保护将失去作用。可见,负序方向保护灵敏度大大低于综合差动保护方式。对于故障分量负序方向保护,同样有克服阈值 ε_p 、 ε_i 、 ε_u 和并网前保护失去作用的问题。

对于零序电压原理的匝间短路保护,参照文献[1]P111~P113和文献[3]4.1.7,考虑其动作电压取为2~3V,按2V进行校核,有 $\alpha \geq 0.02^n = 0.1$ (n 为并联分支数),即需有匝数 $\geq 0.1 \times 32 = 3.2$ (要求匝数

≥ 4)才可能使保护动作,其灵敏度依然低于综合差动保护方式,且其必须有专用电压互感器(发电机中性点不能接地),还需增设负序方向闭锁元件,且存在二种保护元件配合问题,同时在发电机启动过程中将失去保护作用。

转子二次谐波电流保护整定计算十分复杂,必须增设负序功率方向保护以区分内外故障(同样存在二种保护元件配合问题),且需加短延时,同时亦需实测相关值,该保护方式更不能与综合差动保护方式相比。

5.2 不完全裂相横差保护灵敏度有待商榷

根据文献[2]第一章第二节的分析,一般情况下,可取 $0.05 I_N / n_{LH} < i_{op.min} < 0.2 I_N / n_{LH}$, 其中 n_{LH} 为电流互感器变比,最小动作电流 $i_{op.min} = K_{rel} i_{unb.0} = 1.5 \sim 2.0 i_{unb.0}$, 最大负荷时的不平衡电流 $i_{unb.0}$ 由现场实测 ≤ 0.02 A, 故 $i_{op.min}$ 只要 $> 2.0 \times 0.02 = 0.04$ A 就可以了,实际定值为 0.2 A $\gg 0.04$ A。

求发电机端(保护区外)实际短路的最大短路周期分量。经计算,不计发电机中性点处接地阻抗时最大短路电流为单相接地短路电流,其值 $I_{1*} \approx 6.1$ 。按文献[2](1-2-6)式,最大外部短路电流

下的最大动作电流 $i_{op,max} = K_{rel} K_{st} K_{aper} f_i I_{k,ou,max} / n_{ba} =$

$$1.5 \times 0.5 \times 2 \times 0.1 \times 6.1 \times \frac{460 \times 1000 \times 1}{0.9 \times \sqrt{3} \times 20 \times 20000} \approx 0.68(A),$$

实际此点的定值为 $0.2 + (6.1 - 1) \times 0.5 = 2.75(A) \gg 0.68(A)$ 。

按空载时同槽同相同分支 3 匝匝间短路保护灵敏度满足要求认可该保护灵敏度满足要求,即可取不完全裂相横差保护动作值为 $0.196825/1.5 \approx 0.13 A$,当负荷电流 \leq 额定电流时仍有 $0.13 A \gg 0.04 A$,当发电机端(保护区外)发生最大故障短路时仍有 $0.13 + (6.1 - 1) \times 0.5 = 2.68(A) \gg 0.68(A)$ 。参考文献[3],考虑由于定子与转子间气隙不同,使各分支定子绕组电流也不相同,产生第二种不平衡电流,其 $i_{op,min}$ 取 $0.15 \sim 0.30 I_N / n_{LH}$,今 $0.13 / (\frac{460 \times 1000 \times 1}{0.9 \times \sqrt{3} \times 20 \times 20000}) \approx 0.176217$ 仍处 $0.15 \sim 0.30$ 之间。

为使同槽同相同分支 3 匝匝间短路时保护灵敏度满足要求,笔者认为不完全裂相横差保护定值取 $0.13 A$ 为宜。

5.3 综合差动保护方式仍有死区

由前计算分析可知,发电机端部发生同相同分支 1 匝匝间短路时,其短路电流 \ll 保护定值,保护不能动作;发电机负荷电流低于某值时,某分支断线保护亦不能动作。由此说明,综合差动保护方式虽然优于其他组合保护方式,但其仍不可避免地存在保护死区。

5.4 综合差动保护方式分析计算较为复杂

综合差动主保护方式虽然结构简单,但发电机定子绕组不同分支发生故障时,主保护中各保护装

置的感受量是不一致的;可推知,定子绕组发生相间故障和同相不同分支故障时,主保护中各保护装置的感受量亦是不一致的。这就要求我们在进行工程实际故障综合分析时,需根据保护动作量和实际故障波形进行认真分析,准确分析出故障原因及症结所在。

本文主要根据文献[1,2]进行的分析计算是近似的实际工程处理方法,按该文献所述较为精确的发电机定子绕组内部故障的理论计算方法为多回路分析法,但该法所必需的原始资料和参数太多,且计算过程繁杂必须利用计算机编程完成,这在实际工程处理中是难以实现的,因而本文的分析计算只是从工程实用角度分析故障量及保护动作量的基本趋势。

参考文献

- [1] 王维俭,侯炳蕴.大型机组继电保护理论基础(第二版)[M].北京:水利电力出版社,1989.
- [2] 王维俭.电气主设备继电保护原理与应用[M].北京:中国电力出版社,1996.
- [3] DL/T 684-1999,大型发电机变压器继电保护整定计算导则[S].
- [4] 何仰赞,等.电力系统分析[M].武汉:华中工学院出版社,1987.
- [5] 华北电力学院.电力系统故障分析[M].水利电力出版社,1984.

收稿日期:2008-11-08; 修回日期:2008-11-24

作者简介:

胡嘉武(1956-),男,高级工程师,工学硕士,从事水电厂技术管理工作。E-mail:hujw@qdc.com.cn

(上接第 68 页 continued from page 68)

DING Shu-wen, ZHANG Cheng-xue, GONG Qing-wu. An Improved Half-wave Fourier Algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(5): 18-20.

- [4] 胡志坚,张承学,陈允平,等.滤除衰减非周期分量的微机保护算法研究[J].电网技术,2001,25(3):7-11.

HU Zhi-jian, ZHANG Cheng-xue, CHEN Yun-ping, et al. Study on Protective Algorithm for Elimination of Decaying Aperiodic Component[J]. Power System Technology, 2001, 25(3): 7-11.

- [5] 李斌,李永丽,贺家李.一种提取基波分量的高精度快速滤波算法[J].电力系统自动化,2006,30(10):39-43.

LI Bin, LI Yong-li, HE Jia-li. Accurate and Fast Filtering Algorithm for Fundamental Component[J]. Automation

of Electric Power Systems, 2006, 30(10): 39-43.

- [6] 高婧,郑建勇,潘震东.电力系统微机保护中改进傅氏算法综合性能研究[J].继电器,2002,30(10):16-20.
- GAO Jing, ZHENG Jian-yong, PAN Zhen-dong. Study of Improved Fourier Algorithm for Microprocessor-based Protection in Power System[J]. Relay, 2002, 30(10): 16-20.

收稿日期:2008-11-09; 修回日期:2009-02-11

作者简介:

邹智慧(1983-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统微机保护;E-mail:zouzhihui2002@163.com

李啸隼(1959-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为控制系统计算机辅助设计、电力系统动态仿真及计算机实时控制、电力系统非线性控制、电力系统预测控制。