

WFBZ-01 型发变组保护的误动分析及改进

杨晓东, 李国栋

(华北电力大学电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 北京 102206)

摘要: 通过对纵差动保护、基波零序电压型定子接地保护、发电机匝间保护等保护原理的分析, 结合 WFBZ-01 型发变组保护的实际运行动作情况, 主要进行了 3ω 定子接地保护误动分析和失步保护误动分析, 给出了 WFBZ-01 型发变组保护在双重化配置、组屏、出口回路问题等方面的具体改进措施。

关键词: WFBZ-01; 发变组保护; 误动; 3ω ; 失步

Misoperation analysis and improvement of WFBZ-01 protection in generation-transformer group

YANG Xiao-dong, LI Guo-dong

(Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control under Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Based on the analysis of protection principles of longitudinal differential protection, fundamental zero sequence voltage stator earth fault protection and generator inter-turn protection, and with the operation of WFBZ-01 protection in generation-transformer group, this paper mainly analyses the misoperation of 3ω generation stator earth fault protection and out-of-step protection, and gives specific improvement of WFBZ-01 protection in generation-transformer group in double allocation problems, group screen problems and outlet loop issues.

Key words: WFBZ-01; protection in generation-transformer group; misoperation; 3ω ; out-of-step

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)12-0094-05

0 引言

随着国民经济的不断增长, 电力系统发电机的单机容量不断增长, 目前 300~600 MW 火电机组已成为电网主力机组, 1 000 MW 火电机组也已经服役。机组容量的增加对继电保护的可靠性提出更高的要求, 目前国内微机保护的发展相当成熟, 而且已处于世界领先行列, 但由于设备特性差异和运行状况不同, 在实际运行中, 设备异常、故障时的保护装置测量数据与理论值一些差异, 造成了保护装置误动甚至拒动。本文介绍了由国电南自与东南大学联合研制的 WFBZ-01 型保护的原理和调试方法, 并根据其在某发电厂 2x600 MW 大型发电机-变压器组上的应用情况, 对运行中遇到的问题, 进行了保护动作行为的分析, 并提出了具体的改进措施。

1 WFBZ-01 型发变组保护原理

1.1 基波零序电压型定子接地保护

基波零序电压型定子接地保护简单可靠, 但在

定子绕组中性点附近总有一定大小的保护动作区, 即灵敏性较差。如果发电机定子绕组第一次发生的接地故障位于中性点附近的保护动作死区, 且没有被检测发现, 当再发生第二次接地故障时, 实际上已是相间短路或匝间短路, 将造成发电机组的严重损伤, 因此, 大型机组要求单相接地保护无动作死区, 即 100% 的保护区。利用三次谐波电压型定子绕组单相接地保护与基波零序电压型定子接地保护可以实现这一要求。

1.2 发电机匝间保护

匝间保护是发电机保护的一个难点, 正确动作率一直很低。虽然短路点的电流很大, 对主设备安全的危害非常大, 但从保护安装处却很难反应。许多原理的保护存在灵敏度不足、可靠性不高及对内外部故障暂态过程敏感等问题。目前主要的原理有横差保护(单元件横差、裂相横差即三元件横差)、不完全横差、纵向零序电压、转子二次谐波与负序(或负序增量)功率方向等。横差保护和不完全纵差保护是用于匝间故障较好的保护, 但要求发电机中

性点有 4 个或 6 个及以上的引出端子,在许多情况下(尤其是汽轮发电机组)难以使用。

负序(负序增量)功率方向作为区分发电机内部与外部不对称故障的判别元件,曾经由于负序方向元件暂态特性的不完善而引起较多的误动。因为发电机和系统的负序阻抗主要成分是电感分量,时间常数很大,引起负序分量暂态时间长、电流和电压的全量变化不同步等诸多因素在负序分量突变,尤其是在第 2 次突变(如区外故障切除)时,影响尤为明显。故障切除时,电压可以发生突变,而电流不能突变,所以保护可能因为故障时非周期分量的影响将方向判错而误动。但是目前,国内已有多家电厂采用 ΔP_2 保护,改进了这一问题,运行情况良好。

2 运行情况介绍

该保护装置在两年的时间内,工作状态比较稳定。由于具有完善的功能,微机保护的硬件故障可及时报警,无须人为检查,维护量较少。#1 发变组保护装置于 2002 年 5 月投入使用, #2 发变组保护 2003 年 7 月投入使用,近两年的运行过程中,两套保护的全部动作情况如表 1。

表 1 WFBZ-01 微机保护动作情况

Tab. 1 Operation results of WFBZ-01 type microcomputer-based protection

保护类型	动作次数	正确动作次数	误动次数	误动原因
3 ω 定子接地保护	3	0	3	原理缺陷
3U ₀ 定子接地保护	1	1	0	
逆功率保护(程序跳闸保护)	3	2	1	主汽门关闭判据开关量接反
热工保护(机跳电保护)	21	21	0	
定子断水保护	1	0	1	热工无延时
失磁保护	1	1	0	
失步保护	1	0	1	原理缺陷
定子匝间保护	1	1	0	电压互感器层间绝缘瞬时不良

3 动作行为分析

3.1 3 ω 定子接地保护误动行为分析

该电厂 #1、#2 发电机经接地变压器高阻接地,发电机 3 ω 定子接地保护输入信号取自发电机机端 PT 和发电机中性点变压器二次抽头。在 #1 机组试

运行过程中,发电机零起升压及与系统解列时,该保护经常误动发信号(当时 3 ω 定子接地保护投信号)。

负荷下工况检查:发电机有功为 500 MW 时,3 ω 保护的动作为 2.6 V,制动量为 11.2 V,保护未动。当发电机负荷减到 80 MW, 40 MW 及 0 时,保护的动作为与制动量值基本不变,保护无异常。

发电机解列后的检查:机端电压不变时,3 ω 保护动作,不能复归,经检查动作为 2.6 V 升到 19 V,而制动量基本没变(为 11 V 左右)。

发电机零起升压:当发电机电压由 0 升到 6.5 kV 时,3 ω 保护动作,此时,动作为大于制动量,且随着发电机电压的升高,动作为大于制动量的值越来越大;当发电机电压为 13.75 kV 时,动作为 19 V,制动量为 11 V。3 ω 保护一直动作。在发电机零起升压及并网后的各种工况下测量了机端 PT 开口处和中性点消弧线圈二次侧的 3 次谐波电压,测量结果如表 2。

表 2 测量结果记录

Tab.2 Records of measurement results

发电机工况	U _{N3} /V	U _{S3} /V	U _{S3} /U _{N3}	夹角
U=4.6 kV	0.66	0.53	0.830	2
U=8.9 kV	1.24	1.02	0.822	2
U=11.37 kV	1.60	1.30	0.813	3
U=13.6 kV	2.00	1.63	0.815	2
U=15.75 kV	2.70	2.21	0.818	3
U=20.02 kV	3.16	2.60	0.823	3
并网后 P=0, Q=0	2.54	1.46	0.574	1
P=60 MW, Q=60 Mvar	3.25	1.85	0.570	2
P=60 MW, Q=100 Mvar	3.48	1.89	0.570	2
P=60 MW, Q=120 Mvar	3.56	2.00	0.570	2
P=60 MW, Q=200 Mvar	3.79	2.16	0.570	2
P=60 MW, Q=260 Mvar	3.84	2.25	0.580	3
Q=100 Mvar, P=100 MW	3.29	1.89	0.570	2
Q=100 Mvar, P=280 MW	2.80	1.61	0.570	7
Q=100 Mvar, P=374 MW	2.43	1.43	0.580	5
Q=100 Mvar, P=400 MW	2.25	1.31	0.580	5
Q=100 Mvar, P=100 MW	2.17	1.26	0.580	11

从表 2 可以得出如下测量结论:

a) 发电机机端及中性点的 3 次谐波在并网前随着发电机电压的升高而增大;并网前,随无功负荷的增加而增大,随着有功的增大而略有减小。

b) 随发电机工况的变化机端 3 次谐波电压与

中性点的 3 次谐波电压之间的相位差基本保持不变, 且同相。一般为 $2^\circ \sim 5^\circ$, 最大相角差为 11° 。

c) 发电机并网前后中性点 3 次谐波电压基本保持不变, 而机端 3 次谐波电压下降很多; 反之, 发电机解列前后, 中性点 3 次谐波电压基本维持不变, 而机端 3 次谐波电压升高很多(约 0.8 V)。因此并网前后机端 3 次谐波电压变化大是保护误动的原因。

U_{S3} 、 U_{N3} 是由发电机 3 次谐波电势产生的 3 次谐波电流分别在机端阻抗及中性点容抗上产生的电压降, 发电机并网前 C_s 很小, 容抗大, 故 U_{N3} 大, 当并网后由于 C_s 增大很多(主要是开关附加电容), 容抗很小, 故 U_{N3} 降低很多。这与误动情况与试验结果相符。

基于试验及上述原理分析可见, 大型发电机对地分布电容很大, 发电机并网前后一次参数(主要是对地电容)变化很大, 使机端 3 次谐波电压变化很大, 因此, 既要保证发电机在各种工况下 3ω 保护的灵敏度(使不低于 3 k), 又要确保并网前后的动作可靠性, 单纯用调试的方法是不可能的。

3.2 失步保护误动分析

当电厂 220 kV 系统电压高, 开启#2 机组, 进相无功 45 Mvar 运行, 失步保护动作, #2 机组全停。

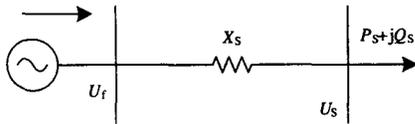


图 1 系统简化示意图

Fig.1 Schematic diagram of electric system

一台机组通过 X_s 接到 $U_s=1$ 的无穷大电源母线上, 送出 P_s+jQ_s 的功率, 如图 1 所示, 电流方向指向无穷大电源母线为正方向, 机端向母线侧的测量阻抗表示为:

$$Z = \frac{U_s^2}{(P_s - jQ_s)} + jX_s$$

当 Q_s =常数, P_s 变化时, 上式表示为:

$$\begin{aligned} Z &= (U_s^2/2jQ_s) \times [(P_s + jQ_s) - (P_s - jQ_s)] / (P_s - jQ_s) + jX_s = \\ &= (U_s^2/2jQ_s) \times (e^{j2\varphi-90^\circ} - 1) + jX_s = \\ &= j(U_s^2/2jQ_s + X_s) + (U_s^2/2jQ_s) \times e^{j(2\varphi-90^\circ)} \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $\varphi = \tan^{-1}(Q_s/P_s)$ 。

式(1)是圆方程式, 圆心和半径分别为

$$Z_c = j(U_s^2/2jQ_s + X_s) \quad (2)$$

$$R_c = U_s^2/2jQ_s \quad (3)$$

由式(2)、(3)在阻抗平面上做圆, 因为圆在 $Q_s=C$

条件下得到, 称之为等无功圆。当 $Q_s>0$ 时, 圆位于 $Z=jX_s$ 的上方; 当 $Q_s<0$ 时, 圆位于 $Z=jX_s$ 的下方。

由上面的分析, 机组进相运行时, 由机端向母线侧观测到的阻抗圆位于 $Z=jX_s$ (此处 $X_s=X_T$) 的下方, 设定机组带有功负荷 P_s , 受燃料燃烧等因素的影响, P_s 不可能恒等, 将发生波动, 见表 3, 由此可以看出, 其有功功率的变化达 6 MW。调整 P_s 为零时, 实际上 P_s 将在 $-P_0 < P_s < P_0$ 范围内变化。

表 3 DCS 记录的#2 机组的追忆记录数据

Tab.3 Recording data by DCS of unit 2

	追忆点	有功功率 /MW	无功功率 /Mvar
故障前	第 1 个追忆点	58.98	40.92
	第 2 个追忆点	62.22	40.92
	第 3 个追忆点	59.19	41.46
	第 4 个追忆点	59.17	41.46
	第 5 个追忆点	59.70	40.92
	第 6 个追忆点	58.44	41.00
	第 7 个追忆点	60.12	41.37
	第 8 个追忆点	60.96	41.00
	第 9 个追忆点	60.96	41.02
	第 10 个追忆点	58.55	41.37
故障后	第 1 个追忆点	60.54	40.65
	第 2 个追忆点	59.40	40.56
	第 3 个追忆点	59.40	40.56
	第 4 个追忆点	58.56	40.30
	第 5 个追忆点	61.17	42.07
	第 6 个追忆点	59.91	40.65
	第 7 个追忆点	59.91	40.65
	第 8 个追忆点	59.07	41.37
	第 9 个追忆点	56.25	40.69
	第 10 个追忆点	60.45	42.48

如图 2 所示, 当 P_s 由 $P_0(P_0>0)$ 变化到 $-P_0$ 或由 $-P_0$ 变化到 P_0 , 阻抗特性穿过 0~4 区, 且在 1~4 区的停留时间满足定值要求时, 失步保护将会动作。

设 $P_s=P_0$ 时, 对应二次侧阻抗 $Z=Z_1$ 、 $P_s=-P_0$ 时, 对应二次侧阻抗 $Z=Z_2$, 设 $\beta=\tan^{-1}(P_0/Q)$, 则 $\psi_1=\beta$, $\psi_2=180^\circ-\beta$ 。

而 $Z_1-Z_2=R_1-R_4$, 则有:

$$R_1 - R_4 = 100 \times (U_s^2/Q_s) \times \sin(2\beta) \quad (4)$$

由 $\sin(2\beta) = 2\tan\beta/1 + \tan^2\beta$, $\tan\beta = P_0/Q_s$ 得:

$$(2 \times P_0/Q_s) / [1 + (P_0/Q_s)^2] = (R_1 - R_4) \times Q_s / (100 \times U_s^2) \quad (5)$$

即有:

$$K \times (P_0/Q_s)^2 - 2 \times P_0/Q_s + K = 0 \quad (6)$$

其中: $K = \frac{(R_1 - R_4) \times Q_s}{100 \times U_s^2}$ 。

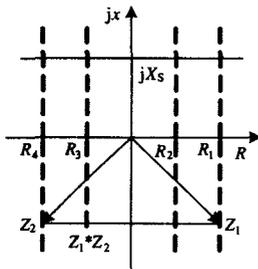


图2 发电机进相运行特性

Fig.2 Operate character of generator in lead-phase

解得:

$$\frac{P_0}{Q_s} = [1 - \sqrt{1 - K^2}] / K \quad (7)$$

式(7)即为对应给定 Q_s 的 P_s 波动范围, 当 P_s 在 $-P_0 < P_s < P_0$ 范围内变化时, 机端测量阻抗由 $Z_1 \rightarrow Z_2$ 变化 (或 $Z_2 \rightarrow Z_1$ 变化), 失步保护即可能动作。

设机组进相 30 Mvar, 对于电厂#1、2 机组, 由式(7)得 $P_0=0.944$;

设机组进相 50 Mvar, 对于电厂#1、2 机组, 由式(7)得 $P_0=2.620$;

设机组进相 100 Mvar, 对于电厂#1、2 机组, 由式(7)得 $P_0=10.510$ 。

因此, 机组进相轻载运行时失步保护误动的可能性很大。可采用在保护装置中增加小电流或小有功功率闭锁单元的方法, 以及在机组进相轻载运行时闭锁单元的方法, 使得失步保护闭锁。

4 WFBZ-01 型保护存在的问题和改进方法

4.1 双重化配置问题

线路保护早已经实现双主双后配置, 为线路保护的运行管理提供了方便, 大大提高了保护的正确动作率。近年来, 双主双后配置逐渐应用到主设备保护领域。

大型发变组微机保护的应用一直滞后于线路和其他主设备保护, 主要原因是一些发变组微机保护基本上是分立式保护的翻版, 可靠性和安全性没有得到根本提高。WFBZ-01 型发变组保护只有差动保护、失磁保护采用了双重化配置, 无法达到反措的要求, 这是该保护的最大缺点。

对于 600 MW 机组, 其中短路保护例如匝间保护、定子接地保护、转子接地保护等, 对应的短路故障差动保护不能反应, 如因回路或装置故障, 保护功能退出, 发电机不能运行; 发电机其他故障专用保护例如失步保护、频率保护、过电压保护、过

励磁保护、转子表层过负荷保护等, 它们分别保护机组不同的故障, 但是不能相互代替, 这几种保护如因回路或装置故障, 保护功能退出, 发电机只能短时间带缺陷运行, 这种缺陷对于 600 MW 机组来说, 风险太大。如机组停止运行, 不考虑间接损失, 直接损失数目巨大。

双主双后保护方案具有运行方便, 安全可靠; 设计简洁, 二次回路清晰; 调试和维护方便的优点, 是大机组微机保护的选型趋势。

4.2 组屏问题

在 WFBZ-01 型发变组保护中, 非电量保护和其他电量保护共同存在于同一个 CPU 中, 不符合反措中规定的发变组保护中非电量保护应采用独立回路。因为主变、厂变等非电量保护的操作回路均为强电即直流 110 V 操作回路较多, 且由于瓦斯保护、变压器压力释放保护等回路暴露于室外, 外部干扰多, 最好单独组屏。

4.3 保护出口回路的改进

通过实例分析, 将电厂 600 MW 发变组保护的出口方式进行了如下改进:

a) 将解列灭磁、解列出口分别与全停出口短接, 也就是原动作于解列灭磁、解列的保护改为动作于全停, 即断开 220 kV 及 6 kV 侧断路器、灭磁、关闭主汽门, 联跳线路保护、启动失灵保护(变压器压力释放、瓦斯保护不启动失灵)。关主汽门出口通过压板连接。

b) 将发电机失磁 t2、失磁 t3、对称过负荷反时限、负序过流反时限等保护出口由解列改为程序跳闸。

c) 将减出力出口改为发信号至电气后备盘, 信号发出时, 由运行值班人员根据负荷与失磁情况手动调节。

通过改进, 近两年的运行中, 保护几次动作均正确出口, 未发生任何异常情况, 这说明对保护出口的改进是成功的。

目前仍然存在的问题是装置的主汽门关闭保护动作时按全停方式出口, 仍然有去关闭主汽门的动作, 如此便形成了一个循环, 不利于事故后的原因分析, 我们认为应该考虑一个出口方式给主汽门关闭保护, 此方式只跳 220 kV 开关、启动快切, 跳灭磁开关。这样就可以分辨出当只有主汽门关闭保护动作而没有其他保护动作时是电气保护动作引起还是热工保护动作引起关主汽门。

5 结论

本文进行了 WFBZ-01 微机型发变组保护装置

的原理分析,通过WFBZ-01微机发变组保护在大机组上的实际运行情况以及相关实验分析,我们得到下面的几点结论:

(1) 既要保证发电机在各种工况下 3ω 保护的 动作灵敏度,又要确保并网前后的动作可靠性,单纯用调试的方法是不可能的,这还需要对装置本身进行改进。

(2) 机组进相轻载运行时失步保护误动的可能性很大。可采用在保护装置中增加小电流或小有功功率闭锁单元的方法,以及在机组进相轻载运行时闭锁单元的方法,使得失步保护闭锁。

(3) 具体改进措施:双主双后配置可以大大提高了保护的 正确动作率;实施单独组屏方案可以有效解决非电量保护和其他电量保护相冲突的问题;出口回路的进一步改进将会大大提高机组安全。

为了 WFBZ-01 微机型发变组保护装置的进一步优化,还需要生产厂家和运行单位在实践中不断的摸索、总结和改进,以提高装置的调试和运行水平。

参考文献

[1] 陆于平,等,WFBZ-01 型发变组保护技术说明书[Z].1999.
LU Yu-ping,et al.Technology Specification of WFBZ-01 Protection in Generation-transformer Group [Z].1999.

[2] 吴济安,等.WFBZ-01 型微机发变组保护运行总结[J].东北电力技术,1996,(1):33-36.
WU Ji-an,et al.Summary of WFBZ-01 Protection in Generation-transformer Group[J].Northeast Electric Power Technology,1996,(1):33-36.

[3] 陆于平,等. WFBZ-01 型微机发变组保护(上) [J].电力自动化设备,1996,(3):48-53.
LU Yu-ping,et al. WFBZ-01 Protection in Generation-transformer Group (1)[J].Electric Power Automation Equipment, 1996,(3):48-53.

[4] 陆于平,等. WFBZ-01 型微机发变组保护(下) [J].电力自动化设备,1996,(4):33-38.
LU Yu-ping,et al.WFBZ-01 Protection in Generation-transformer Group (2) [J]. Electric Power Automation Equipment, 1996,(4):33-38.

[5] 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.
WANG Wei-jian , HOU Bing-yun . The Oretical Foundation for Large-scale Units Relay (2nd Edition) [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1989.

[6] 王春, 张为民.WFBZ-01型保护在调试运行中遇到的问题及解决方法[J]. 东方电气评论,2001, 15 (3): 156-160.
WANG Chun, ZHANG Wei-min. The Problems in Debugging and Resolving Method of WFBZ-01 Type

Protection[J]. Dongfang Electric Review, 2001, 15 (3): 156-160.

[7] 杨文超,等,大型发电机组定子接地保护 $3U_0$ 定值整定的探讨[J].继电器,2006, 35(4): 18-21.
YANG Wen-chao , et al. Discussion about Stator Grounded Protection $3U_0$ Setting in Large Power Plant[J]. Relay, 2006, 35(4): 18-21.

[8] 陈岱,王雅君.WFBZ-01 发变组微机保护的缺陷与改进方法[J].湖南电力,2006, 26(1): 30-32.

[9] 王春,鲁俊兵.WFBZ-01 型微机发电机-变压器组保护在漫湾发电厂的应用[J].电力自动化设备,2001, 21(3): 44-48.
WANG Chun , LU Jun-bing . The Application of WFBZ-01 Microcomputer-Based Protection for Generator-Transformer Unit in Manwan Power Plant [J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(3): 44-48.

[10] 尹相根,陈德树,张哲,等,故障分量差动保护,电力系统自动化[J].1999, 23(11): 13-17.
YIN Xiang-gen, CHEN De-shu, ZHANG Zhe, et al. Fault Component Based Digital Differential Protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(11): 13-17.

[11] 袁荣湘,等.采样值电流差动保护原理的研究[J],电力自动化设备,2000, 20(1): 1-3.
YUAN Rong-xiang, et al. Study on the Principle of Current Differential Protection Based on Sampled Values[J]. Electric Power Automation Equipment, 2000, 20(1): 1-3.

[12] 史世文.元件保护国内外发展综述[J].电力系统自动化,1996,20(4):54-59.
SHI Shi-wen. Development of the Protection of Domestic and Foreign Component[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996,20(4):54-59.

[13] 王维俭.发电机-变压器继电保护应用[M].北京:中国电力出版社,1998.
WANG Wei-jian . Generators - transformer Relay Application[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.

[14] 殷建刚,彭丰.发电机失磁保护的典型配置方案[J].继电器,2002, 30(3): 33-36.
YIN Jian-gang, PENG Feng. Fault Component Based Digital Differential Protection[J]. Relay, 2002, 30(3): 33-36

收稿日期:2008-07-12; 修回日期:2009-05-11
作者简介:

杨晓东(1981-),男,博士研究生,主要研究方向为电力系统分析、运行与控制、电能质量与电力市场;
李国栋(1985-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统分析、电能质量。E-mail:lgd0901@126.com