

一起600 MW水轮发电机定子绕组损毁的故障分析

亓劼

(构皮滩发电厂,贵州 遵义 564408)

摘要:某大型水电站1台600 MW发电机组在开机未并网期间突然发生发电机差动保护、定子接地保护动作,导致开机失败。通过对此次故障前后的保护动作记录及故障录波数据分析,对损伤的发电机定子线棒、铁心和导致故障的转子磁极挡块进行检修处理,彻底解决了本次故障。从继电保护专业,对该故障的检修处理过程进行了分析并提出了改进建议。

关键词:水轮发电机;600 MW;纵联差动保护;接地保护;启停机保护

中图分类号:TM 312 **文献标志码:**B **文章编号:**1674-1951(2018)12-0016-04

0 引言

发电机纵联差动保护,是一种比较发电机两端电流大小和方向的保护,是发电机相间短路的主保护。纵联差动保护能灵敏地反应内部相间短路状态动作出口,而在正常运行和区外故障时可靠不动作^[1],从而达到保护元件的目的。

发电机定子绕组单相接地故障是发电机一种常见的电气故障。定子绕组单相接地,流过故障点的电容电流还可能产生电弧烧毁定子铁心,进一步造成匝间短路或相间短路,使发电机遭受更严重破坏,破坏的严重程度取决于短路电流大小和持续时间长短^[1]。

启停机保护用于反应发电机低转速运行时的定子接地及相间故障。该保护主判据为发电机差流与机端零序电压,辅以发电机频率为闭锁条件,即发电机频率超过45 Hz后保护闭锁^[2]。

1 故障描述

1.1 差动保护原理

某水电站装机容量大且处于“西电东送”的关键节点,全电站共安装5台600 MW水轮发电机组,总装机容量3000 MW。该水电厂为保护发电机配置有发电机纵联差动保护作为主保护,保护动作方程如下,

$$\begin{cases} I_d > K_{bl} \times I_r + I_{cdqd} \\ K_{bl} = K_{bl1} + K_{blr} \times (I_r / I_e) \\ I_d > K_{b12} \times (I_r - nI_e) + b + I_{cdqd} (I_r \geq nI_e) \\ K_{blr} = (K_{b12} - K_{bl1}) / (2 \times n) \\ b = (K_{bl1} + K_{blr} \times n) \times nI_e \\ I_r = \frac{|\dot{I}_1 + \dot{I}|}{2} \\ I_d = |\dot{I}_1 - \dot{I}_2| \end{cases}$$

式中: I_d 为差动电流; I_r 为制动电流; I_{cdqd} 为差动电流启动定值; I_e 为发电机额定电流; \dot{I}_1, \dot{I}_2 分别为机端、中性点电流; K_{bl} 为比率差动制动系数; K_{blr} 为比率差动制动系数增量; K_{bl1} 为起始比率差动斜率,取0.05; K_{b12} 为最大比率差动斜率,取0.5; n 为最大比率制动系数时的制动电流倍数,装置内部固定取4^[1]。

1.2 故障过程

2014-02-15 T 09:39:00,该厂根据电网调度要求,启动#4发电机并网,09:39:00上位机下发开机令,09:41:42励磁自动投入。09:41:55,当发电机电压上升到80%额定电压(U_e)时,现场听到发电机内部发出一声异响,同时发电机A/B套保护差动、不完全差动、裂相横差、单元件横差保护动作,跳开发电机灭磁开关,紧急停机动作,关停发电机。

发生故障的机组额定容量600 MW,额定电压18 kV,额定功率因数0.9,三相8分支绕组波绕,中性点通过接地变压器接地,发电机和主变压器组成单元接线。水轮机由哈尔滨电机有限责任公司生产,发电机由东方电机有限责任公司生产,故障机组于2009年8月投入运行。截止至故障时累计运行18575.89 h。保护动作前的一次设备运行状态为:500 kV系统各串开关均为完整串运行,系统频率50.01 Hz;500 kV母线电压为538.1 kV;厂用电系统运行正常,全厂自动发电控制(AGC)功能投入,运行在调频模式;全厂总有功给定值710 MW,有功实发值712 MW,无功实发值-20.1 MV·A;由于保护动作时该机组未并网(负荷为0 MW),故本次保护动作未造成甩负荷。

故障发生后,发电机机坑内出现大量浓烟,现场人员佩戴安全防护工具后进入机坑内检查无明显着火部位,待浓烟排出后对发电机整体进行全面检查,发现发电机X方向定子下部线圈6根线棒局部烧损、断裂,相邻线棒表面有电弧灼伤痕迹,2处铁心

局部烧损。随后对转子磁极间挡块、拉杆、阻尼环软连接等部位进行了排查,在发电机下风洞地面上发现 1 块有烧损痕迹的方形金属物体,后经确认该金属物为发电机转子下部磁极挡块。

2 故障原因分析

在进行故障检查及处理的同时,现场专业人员就继电保护与故障录波装置开展本次故障分析。该水电站故障机组保护装置为南瑞继保公司 RCS - 985GW 型发电机保护装置,按双重化配置分为 A、B 套,两者在发电机完全差动启动定值整定为 $0.25I_e$,完全差动速断定值整定为 $4.00I_e$;不完全差动保护 1 启动定值整定为 $0.25I_e$,不完全差动 1 速断定值整定为 $4.00I_e$;不完全差动保护 2 启动定值整定为 $0.25I_e$,不完全差动 2 速断定值整定为 $4.00I_e$;裂相横差保护启动定值整定为 $0.25I_e$,裂相横差保护速断定值整定为 $4.00I_e$;单元件横差定值整定为 $1.07A$,单元件横差高定值整定为 $5.36A$ 。

2.1 发电机差动录波分析

调取发电机保护 A 套装置动作时发电机差动录波图(如图 1 所示)和发电机保护 B 套装置动作时发电机差动录波图(如图 2 所示)进行分析。

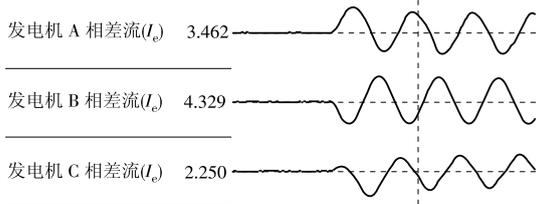


图 1 发电机保护 A 套装置动作时发电机差动录波

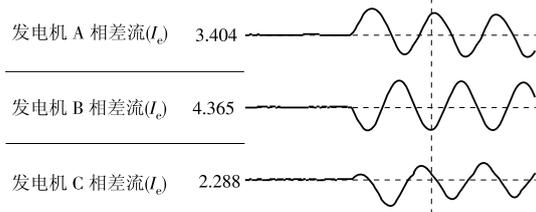


图 2 发电机保护 B 套装置动作时发电机差动录波

在发电机 A 套、B 套保护装置动作时,发电机保护 A 套发电机完全差动差流值最大达 $4.329I_e$ (B 相)、发电机保护 B 套发电机完全差动差流值最大达 $4.365I_e$ (B 相),超过发电机 A 套、B 套保护装置完全差动速断定值整定($4.00I_e$),故发电机 A 套、B 套保护装置完全差动速断动作。

2.2 发电机不完全差动录波分析

调取发电机保护 A 套装置动作时发电机不完全差动录波图(如图 3 所示)、发电机保护 B 套装置动作时发电机不完全差动录波图(如图 4 所示)进

行分析。

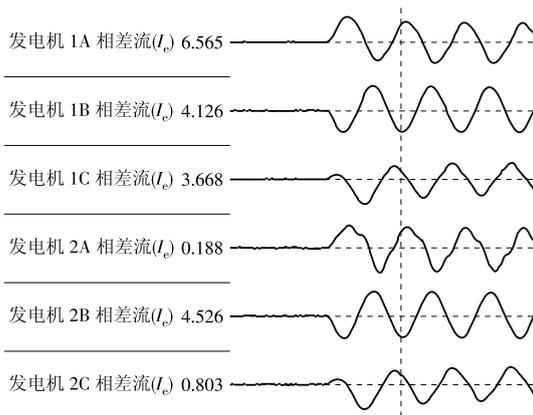


图 3 发电机保护 A 套装置动作时发电机不完全差动录波

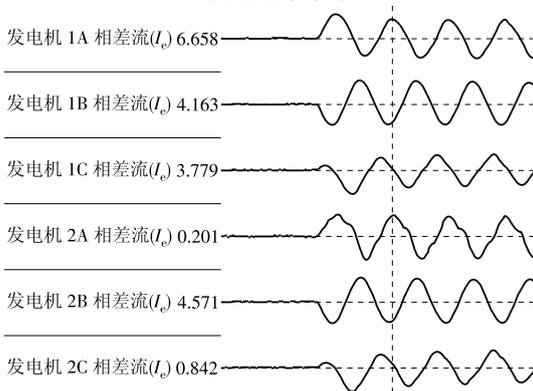


图 4 发电机保护 B 套装置动作时发电机不完全差动录波

在发电机 A 套、B 套保护装置动作时,发电机保护 A 套发电机不完全差动 1 差流值最大达 $6.565I_e$ (A 相)、发电机保护 A 套发电机不完全差动 2 差流值最大达 $4.526I_e$ (B 相);发电机保护 B 套发电机不完全差动 1 差流值最大达 $6.658I_e$ (A 相)、发电机保护 B 套发电机不完全差动 2 差流值最大达 $4.571I_e$ (B 相),超过发电机 A 套、B 套保护装置不完全差动 1、不完全差动 2 速断定值整定为 $4.00I_e$,故发电机 A 套、B 套保护装置不完全差动 1、不完全差动 2 速断动作。

故障时,一次侧发电机中性点一分支 A 相最大故障电流为 $69450A$,发电机中性点一分支 B 相最大故障电流为 $42800A$,发电机中性点一分支 C 相最大故障电流为 $36813A$;发电机中性点二分支 A 相最大故障电流为 $2138A$,发电机中性点二分支 B 相最大故障电流为 $47313A$,发电机中性点二分支 C 相最大故障电流为 $8188A$ 。

2.3 发电机裂相横差录波分析

调取发电机保护 A 套装置动作时发电机裂相横差录波(如图 5 所示)和发电机保护 B 套装置动作时发电机裂相横差录波(如图 6 所示)进行分析。

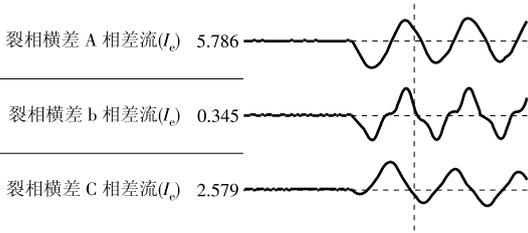


图 5 发电机保护 A 套装置动作时发电机裂相横差录波

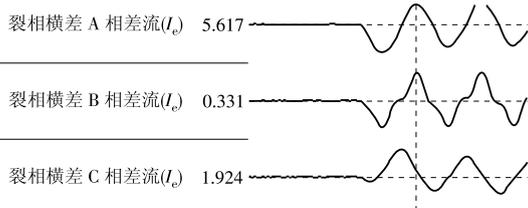


图 6 发电机保护 B 套装置动作时发电机裂相横差录波

在发电机 A 套、B 套保护装置动作时,发电机保护 A 套发电机裂相横差差流值最大达 $5.786I_e$ (A 相)、发电机保护 B 套发电机裂相横差差流值最大达 $5.617I_e$ (A 相),超过发电机 A 套、B 套保护装置裂相横差速断定值整定为 $4.00I_e$,故发电机 A 套、B 套保护装置裂相横差速断动作。

该厂发电机保护装置单元件横差保护采用相电流比率制动的横差保护原理,其动作方程为

$$\begin{cases} I_d > I_{hczd} & I_{max} \leq I_{ezd} \\ I_d > \left(1 + K_{hczd} \frac{I_{max} - I_{ezd}}{I_{ezd}}\right) I_{hczd} & I_{max} > I_{ezd} \end{cases}$$

式中: I_{hczd} 为横差电流定值; I_{max} 为机端三相电流中最大相电流; I_{ezd} 为发电机额定电流; K_{hczd} 为制动系数,取 1.07。

由于发电机 A 套、B 套保护装置动作时,发电机在“空载”态,未并网带负荷,故发电机 A 套、B 套保护装置采集机端电流值均为 0 A,即 $I_{max} \leq I_{ezd}$,故单元件横差动作方程选择为 $I_d > I_{hczd}$ 。

2.4 发电机单元件横差电流录波分析

调取发电机保护 A 套装置动作时发电机单元件横差电流录波图(如图 7 所示)、发电机保护 B 套装置动作时发电机单元件横差电流录波图(如图 8 所示)分析。

在发电机 A 套、B 套保护装置动作时,发电机保护 A 套发电机单元件与发电机保护 B 套发电机单元件的横差电流最大值均超过发电机 A 套、B 套保护装置单元件横差保护定值(1.07 A),超过单元件横差保护高定值段定值(5.36 A),故发电机 A 套、B 套保护装置单元件横差保护动作、单元件横差高定值段保护动作。故障时发电机一分支、二分支中性

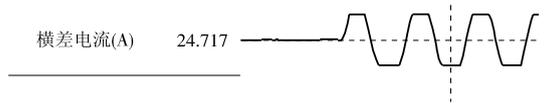


图 7 发电机保护 A 套装置动作时发电机单元件横差电流录波

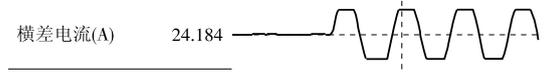


图 8 发电机保护 B 套装置动作时发电机单元件横差电流录波

点连线最大故障电流为 25 243 A。

2.5 发电机零序电压及三次谐波录波分析

调取发电机保护 A 套装置动作时发电机零序电压及三次谐波录波图(如图 9 所示)、发电机保护 B 套装置动作时发电机零序电压及三次谐波录波图(如图 10 所示)分析。

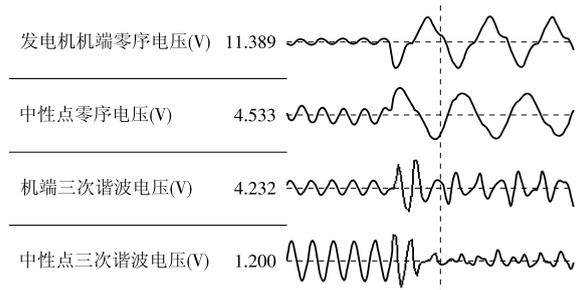


图 9 发电机保护 A 套装置动作时发电机零序电压及三次谐波录波

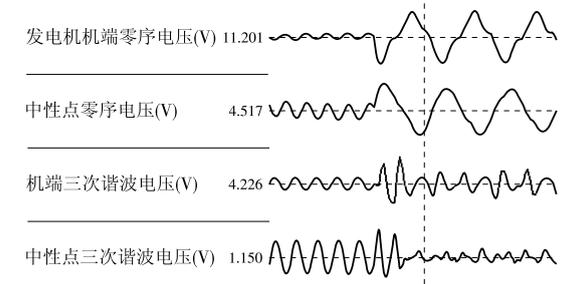


图 10 发电机保护 B 套装置动作时发电机零序电压及三次谐波录波

在发电机 A 套、B 套保护装置动作时,发电机机端及中性点出现零序电压,发电机 A 套保护装置采集发电机机端零序电压值为 11.389 V,采集发电机中性点零序电压值为 4.533 V;发电机 B 套保护装置采集发电机机端零序电压值为 11.201 V,采集发电机中性点零序电压值为 4.517 V,故判断定子回路中出现接地故障。

2.6 发电机机端电压波形图分析

调取发变组故障录波装置在故障发生时的发电机机端电压波形图(如图 11 所示)分析。

在故障发生前发电机机端 B 相电压值出现突然下降,发电机机端 B 相电压值为 52.9902 V(图

当前采样点:左=24 285,右=24 385,最大=382 836

1.发电机机端电压 $U_a=[L=52.876\ 3\text{ V}], \angle 1.33^\circ, [R=51.776\ 0\text{ V}], \angle -0.34^\circ$

2.发电机机端电压 $U_b=[L=52.990\ 2\text{ V}], \angle -118.83^\circ, [R=41.767\ 3\text{ V}], \angle -120.07^\circ$

3.发电机机端电压 $U_c=[L=52.966\ 9\text{ V}], \angle 121.53^\circ, [R=48.120\ 0\text{ V}], \angle 122.10^\circ$

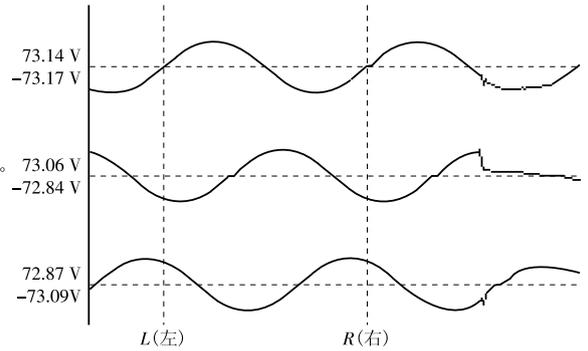


图 11 故障录波装置在故障发生时发电机机端电压波形

11 左侧竖线处),三相电压相序正确,相角正确;发电机机端 B 相电压值为 41.767 3 V(图 11 右侧竖线处),三相电压相序正确,相角正确,A 相电压、C 相电压值随之下降。

综上所述,本次故障的原因为发电机转子 #3 磁极下端部磁极挡块运行中脱落,脱落的挡块在机组旋转惯性力的作用下击中发电机定子线圈,造成绝缘损坏,定子线棒靠近中性点侧 B 相出现接地故障,随后演变为相间短路故障,导致接地点附近发电机定子线棒及铁心烧损。

3 故障处理

本次故障之后,该电站共用 76 d 时间对有损坏的定子线棒拆除、清扫、下线安装、穿芯螺栓换绝缘套、重新进行铁损试验。对引发故障的转子磁极下端部磁极挡块重新进行了满焊,并在该处增焊了挡板,避免今后在机组运行过程中磁极挡块再次脱落造成的一次设备损坏。技术管理上定期就该部位进行状态评估,且在 2015 年对其余同类型机组该处进行了焊接反措。

4 故障分析后的思考与建议

从此次发电机故障过程及继保录波现象进行分析,当发电机处于开机过程,转速已达到额定转速,且处于空载状态时,磁极挡块在运行中脱落击中定子线圈导致定子接地故障及相间短路故障。在定子线圈损坏期间,若故障电流未达到发电机纵联差动保护动作值,则继电保护不动作。而当前国内大多数大型水轮发电机继电保护均配置了启停机保护,当以启停机保护的差流为判据,发电机在启动过程中发生相间短路故障,发电机励磁系统在机组未到额定转速时便投入励磁,此时启停机保护在判断出相间短路故障后动作。由于发电机启动或停机过程中,定子电压频率很低,因此启停机保护采用了不受频率影响的算法,保证了启停机过程中对发电机的保护。

水轮发电机启停机保护整定情况可作如下参考:

- (1) 频率闭锁定值 $f_{op} = 0.9 \times 50 = 45$ (Hz);
- (2) 定子接地保护定值 $U_{op} = 10\text{ V}, t = 2\text{ s}$;
- (3) 发电机差流启停机定值按额定频率,大于满负荷运行时的差动回路中的不平衡电流整定 $I_{op} = K_{rel} I_{unb} = 0.3 I_e$;
- (4) 动作出口,跳发电机出口开关、灭磁开关,发电机停机。

不平衡电流整定 I_{op} 根据工程实际经验取 $0.3 I_e$,时间定值无延时。

对于零序过电压启停机保护,配置了灵敏度更高的定子接地保护动作,跳闸延时。考虑到发电机差动保护的差流算法与启停机保护的差流算法略有不同,发电机差动保护在频率未达到 45 Hz 前仍有可能测算不准确^[3]。

5 结束语

此次故障主要是由于发电机转子磁极在设计上的隐患和安装施工时发电机内部挡块焊接工艺细节的疏忽造成的,后果相当严重。故障过程中启停机保护灵敏地反映出磁极处挡块脱落至定子线圈,从而减小了定子线圈因故障电流的损伤。虽然文中描述的故障为小概率事件,但发电机差动仍无法完全替代发电机启停机差动保护判据。因此,在大型水轮发电机继电保护整定配置启停机保护是很有必要的。

参考文献:

- [1] 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,2002.
- [2] 中国华电集团公司电气及热控技术研究中心. 电力主设备继电保护的理论与实践及运行案例[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009.
- [3] 国家电力调度通信中心. 继电保护实用技术问答[M]. 北京:中国电力出版社,2000.

(本文责编:陆华)

作者简介:

开劼(1984—),男,山东淄博人,工程师,从事电气二次专业管理工作(E-mail:33427423@qq.com)。