

一起定子接地故障及匝间故障引发的继电保护动作行为分析

王大鹏¹, 王涛¹, 周宏斌², 康勇², 孙秀敏², 陈珩³

(1. 山东电力研究院, 山东 济南 250002; 2. 潍坊发电厂, 山东 潍坊 261201;
3. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 介绍了一起现场发生的典型定子接地故障和匝间故障时继电保护装置的動作行为情况。通过对故障录波数据、继电保护装置的動作行为及现场测量数据的详细分析, 提出了改进的建议。建议重视对发电机中性点接地变压器的测量, 包括数值误差和角度误差, 如果误差较大建议安装保护专用变压器。建议继电保护工作者重视定子接地保护的二次回路, 同时对于定子接地保护的動作时限问题慎重考虑。建议对于2Y结构6个出线头的发电机, 装设横差保护。

关键词: 定子接地; 匝间故障; 继电保护動作行为

Analysing the action of protection about stator fault and fault between turns

WANG Da-peng¹, WANG Tao¹, ZHOU Hong-bin², KANG Yong², SUN Xiu-min², CHEN Heng³

(1. Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250002, China; 2. Weifang Power Plant, Weifang 261201, China;
3. Department of Electric and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: In this paper, the reaction of the protection device to the stator earth fault and interturn fault is presented. By analyzing the fault recorder data, the acting behavior of the protection device and the on-site measured data, the unique advice is proposed, suggesting that special attention should be drawn to the measurement of the earth transformer at the neutral point of generators, especially to the measurement of its amplitude error and angular error. Attention also should be paid to the secondary circuit of the stator earth protection and the setting of its trip delay. In addition, the importance of a transverse differential protection in terms of a generator with double-star stator structure is explained.

Key words: stator fault; interturn fault; action of protection

中图分类号: TM77 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2008)22-0082-06

0 引言

2007年某电网中共发生定子接地保护動作情况六起, 其中两起是由于发电机发生了定子接地故障, 定子接地保护動作正确動作; 三起是由于二次回路的问题引起定子接地保护動作, 还有一次是定子接地三次谐波发信号。在这六次動作过程中, 以本次事故最为典型, 所以本文详细介绍了事故发生的过程, 进行了继电保护動作行为分析, 提出改进建议和防范措施, 供大家参考。

1 概述

某厂#4机系上海发电机厂引进美国西屋公司技术制造的QFSN-660-2型水氢氢冷却方式发电机, 额定功率660 MW, 额定电压20 kV, 2Y结构。该机于2007年投产后一个月发生了定子绕组环形

引线过热损坏而导致非正常停机的事故。本次事故#4发电机先后发生定子接地故障和匝间故障, 该机继电保护装置采用南瑞继保公司的RCS-985保护装置, 双重化配置, 動作过程中, 定子接地保护先启动, 1s钟后匝间保护启动。由于動作时间的不同, 最后由匝间保护動作于跳闸, 两套保护均正确動作。但本次事故中的继电保护動作行为值得我们思考, 如果保护能够更早一些動作, 定子引线事故将不会扩展为定子线圈事故, 至少可以减少受损线棒的个数。所以定子接地保护和匝间保护的動作行为值得我们分析思考。

2 部分参数

2.1 部分PT、CT参数

机端PT变比

$$11.55 \text{ kV} / \frac{100}{\sqrt{3}} \text{ V} / \frac{100}{3} \text{ V}$$

专用 CT 变比

$$11.55 \text{ kV} / \frac{100}{\sqrt{3}} \text{ V} / \frac{100}{3} \text{ V}$$

中性点接地变压器电压变比

$$20 \text{ kV} / 220 \text{ V} / 100 \text{ V}$$

系统接线如下面的简化图 1 所示(未标出厂变、励磁变等设备)。

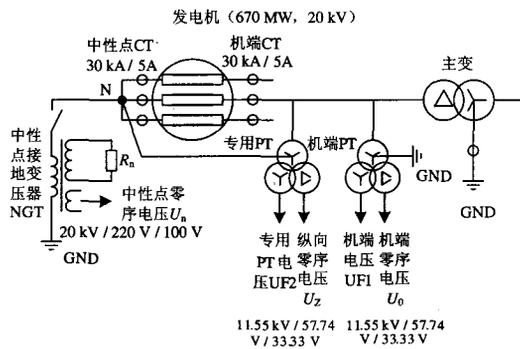


图 1 系统接线简化图

Fig.1 Schematic diagram of the generator system

如图 1 所示,发电机中性点经接地变压器接地,变压器二次侧带负载电阻,变压器高压侧额定电压为 20 kV,低压侧有两组,220 V 绕组接负载电阻,100 V 绕组作为中性点零序 PT (20 kV / 100 V)。

2.2 定子接地保护定值

零序电压定值	10.00 V
零序电压高定值	25.00 V
零序电压保护延时	1.50 s
并网前三次谐波比率定值	2.30
并网后三次谐波比率定值	2.30
三次谐波差动定值	0.50
三次谐波保护延时	1.50 s

2.3 匝间保护定值

纵向零序电压定值	3.00 V
纵向零序电压高定值	10.00 V
零序电压保护延时	0.20 s

3 故障及设备检查情况

2007 年 7 月 4 日 16:20, #4 机负荷维持在 650 MW, 运行人员发现发电机内冷水压力升高, 水压从 0.23 MPa 逐渐上升到 0.4 MPa, 检查内冷水各阀

门状态正确, 内冷水箱水位 60 cm, 均正常。16:26, #4 锅炉 MFT, 首出原因为“发电机故障”, 发变组保护柜“匝间保护”动作, 厂用电切换正常。同时发现#4 机组跳闸后内冷水压力升高到 0.8 MPa, 检查发现发电机下部四个液位计均满水。跳机时汽侧测温元件接线板处漏氢着火。16:06 发电机绝缘过热装置曾发出装置报警信号。

调 DCS 和发变组故障录波器的有关记录:

16h20m43s, 发电机电压 A 相 11.39 kV, B 相 11.39 kV, C 相 11.39 kV, 发电机电流 A 相由 20228 A 升至 20908 A, B 相由 20348 A 升至 21096 A, C 相由 20261 A 降至 18959 A, 发电机负序电流由 50 A 左右增大到 446 A, 同时发电机#7 瓦振动由 78 μm 增大到 150 μm 左右, 内冷水压力由 0.25 MPa 逐渐升高到 0.4 MPa 左右。

16h21m40s, 负序电流逐步增长至约 1300 A, 发电机相电压 A 相升至 12.17 kV, B 相升至 11.78 kV, C 相降至 9.03 kV, 线电压基本无变化。机组跳闸时负序电流突增到约 3457 A, 跳机时发电机绝缘过热装置也发出报警信号。

16h25m40s, 发电机漏氢检测装置检测到定子内冷水箱内出现氢气, 并逐渐上升, 氢气湿度开始增大。

16h26m43s, 发电机“定子接地保护”启动, 1 s 后“匝间保护”启动, 由于“定子接地保护”动作时间延时 1.5 s, “匝间保护”动作时间延时 0.2 s, 故发变组保护柜显示“匝间保护”跳闸。跳闸时, 发电机相电压 A 相升至 12.42 kV, B 相升至 13.17 kV, C 相降至 8.26 kV, 出现零序电压(二次 21 V), 出现较小零序电流。

停机后测量发电机定子绝缘, A 相绝缘为 130 MΩ, B、C 相绝缘为零; 测量定子直流电阻, A、B 相可以测出, C 相无法测出。测量转子绝缘为零。

经过发电机专业人员分析, 该厂#4 机发生事故的过程为: 首先由于气堵致使 C 相并联绕组中的 2W₂ 引线烧断, 连接线烧断后, 2W 支路开路, 此时 C 相负荷全部转移到 1W 分支, 导致 1W 支路电流达额定电流的 200%, 根据国标要求, 在 1W 支路承受 2 倍额定电流的情况下, 其允许时间根据上式其值为不大于 12.5 s。由于整个过程持续时间比较长(大约 6 min), 造成整个分支的绕组快速升温过热, 使定子线棒绝缘严重受损, 逐步发展为接地和匝间短路, 导致发电机定子线棒汽侧端部受损严重和转子严重污染。

4 继电保护动作情况

采用双重化配置, A 柜、B 柜均正确动作。动作报文以保护 A 屏的报文为例, 如图 2。

发变组保护装置为南瑞继保的 RCS-985 装置, 跳闸报告

RCS-985B311 3.11 装置跳闸报告				
报告序号	起动时间	相对时间	动作元件	动作相别
118	2007年07月04日16时28分45秒815毫秒	1249 ms	外部保护 TJ1跳闸出口, TJ4跳闸出口4 TJ5跳闸出口5, TJ6跳闸出口6 TJ8跳闸出口8, TJ9跳闸出口9 TJ11跳闸出口11, TJ12跳闸出口12 相间高定值段 外部重动跳闸	
119	2007年07月04日16时56分35秒398毫秒	015 ms	外部重动跳闸 TJ1跳闸出口, TJ4跳闸出口4 TJ5跳闸出口5, TJ6跳闸出口6 TJ8跳闸出口8, TJ9跳闸出口9 TJ11跳闸出口11, TJ12跳闸出口12	
120	2007年07月04日16时59分26秒295毫秒	015 ms	外部重动跳闸 TJ1跳闸出口, TJ4跳闸出口4 TJ5跳闸出口5, TJ6跳闸出口6 TJ8跳闸出口8, TJ9跳闸出口9 TJ11跳闸出口11, TJ12跳闸出口12	

开入变位报告

RCS-985B311 3.11 装置开入变位报告		
报告序号	报告时间	开入变位报告
105	2007年06月30日16时16分17秒678毫秒	断路器A跳位 1 → 0
106	2007年06月30日16时20分26秒049毫秒	投误上电保护 1 → 0
107	2007年06月30日16时20分28秒347毫秒	投启停机保护 1 → 0
108	2007年07月04日16时28分45秒815毫秒	定子接地启动 0 → 1
109	2007年07月04日16时28分46秒854毫秒	发电机保护启动 0 → 1
110	2007年07月04日16时28分46秒858毫秒	主变后备启动 0 → 1
111	2007年07月04日16时28分47秒133毫秒	断路器A跳位 0 → 1

自检报告

RCS-985B311 3.11 装置自检报告		
报告序号	报告时间	开入变位报告
100	2007年06月24日16时42分17秒101毫秒	恢复正常
101	2007年06月24日20时40分38秒265毫秒	外部重动1开入信号
102	2007年06月28日05时36分36秒922毫秒	恢复正常
103	2007年06月28日06时08分32秒344毫秒	外部重动1开入信号
104	2007年06月28日06时08分45秒465毫秒	恢复正常
105	2007年06月28日06时19分46秒703毫秒	三次谐波电压比率信号
106	2007年06月28日06时19分49秒633毫秒	恢复正常
116	2007年07月01日21时40分27秒248毫秒	恢复正常
117	2007年07月02日08时46分30秒505毫秒	A厂变启动风冷
118	2007年07月04日16时28分43秒470毫秒	三次谐波电压比率信号 A厂变启动风冷
119	2007年07月04日16时28分47秒508毫秒	外部重动1开入信号 三次谐波电压比率信号 A厂变启动风冷
120	2007年07月04日16时28分49秒638毫秒	外部重动1开入信号 三次谐波电压比率信号
121	2007年07月04日16时28分51秒188毫秒	外部重动1开入信号
122	2007年07月04日16时28分55秒815毫秒	外部重动1开入信号 保护板长期启动
123	2007年07月04日16时28分58秒003毫秒	外部重动1开入信号

图 2 RCS985 保护装置报告

Fig.2 Reports from the protection device RCS985

上述报文显示:

1) 自检报告显示: 2007 年 06 月 28 日 19

分 46 秒 703 毫秒时刻, 发出一次“三次谐波电压比率信号”, 持续了约 3 s 时间, 于 06 时 19 分 49 秒

633 毫秒恢复正常。

2) 自检报告显示: 2007 年 07 月 04 日 16 时 28 分 43 秒 470 毫秒时刻, 再次发出“三次谐波电压比率信号”, 并至少持续到 28 分 49 秒 638 毫秒, 持续 6 s 以上。

3) 开入变位报告显示: 2007 年 07 月 04 日 16 时 28 分 45 秒 815 毫秒时刻, “定子接地启动 0 -> 1”, 事后对录波波形的分析可知该启动对应于“基波零序电压的定子接地保护”。

4) 开入变位报告显示: 在“定子接地启动”后约 1 s, 于 28 分 46 秒 854 毫秒时“发电机保护启动 0 -> 1”。对照跳闸报告和故障录波波形, 该启动为“匝间保护启动”。

5) 开入变位报告显示: 2007 年 07 月 04 日 16 时 28 分 46 秒 858 毫秒时刻“主变后备启动 0 -> 1”; 28 分 47 秒 133 毫秒时刻“断路器 A 跳位 0 -> 1”, 说明此时机组断路器已跳开; 28 分 47 秒 507 毫秒

6) 跳闸报告显示: 相对于“2007 年 07 月 04 日 16 时 28 分 45 秒 815 毫秒”时刻, 经过 1 249 ms, 匝间保护动作跳闸; 经过 1 251 ms, 匝间保护高定值段保护动作; 经过 1 710 ms 外部重动 1 跳闸。

根据报文得到的动作时序示意图如图 3 所示(时间没有按照等比例绘制)。

基波零序电压定子接地保护延时定值为 1.5 s, 匝间保护延时定值为 0.2 s, 从动作时序上看, 基波零序电压定子接地保护延时还没有到 1.5 s 时, 匝间保护就启动并经过约 0.2 s 后动作于跳闸。

注: 6 月 28 日的“三次谐波比率信号”可能已预示到发电机定子绕组存在绝缘隐患。

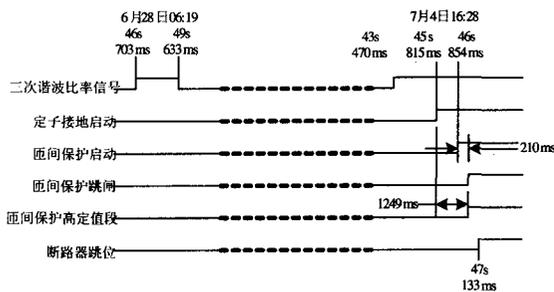


图 3 动作时间时序示意图

Fig.3 Schematic diagram of the trip sequence

5 动作波形及数据分析

5.1 定子接地故障分析

(1) 定子接地故障的确定

根据打印的报文, 启动后 1~2 周波内的各电压值:

表 1 启动后两周波内的各电压值

Tab.1 Voltages in two cycles after pickup

各路波形幅值 (启动后 1~2 之间的一个周波内有数值)			
发电机 A 相电压 (U_{FA1})	060.71 V	发电机 B 相电压 (U_{FB1})	066.84 V
发电机 C 相电压 (U_{FC1})	044.54 V	专用 TV A 相电压 (U_{FA2})	057.70 V
专用 TV B 相电压 (U_{FB2})	056.59 V	专用 TV C 相电压 (U_{FC2})	055.86 V
发电机过励磁 (U_f)	00.984	发电机机端零序电压 (U_0)	021.81 V
发电机中性点零序电压 (U_N)	010.67 V	发电机纵向零序电压 (U_L)	002.43 V
机端三次谐波电压 (U_{F3})	005.36 V	中性点三次谐波电压 (U_{N3})	000.45 V
三次谐波电压差值 (U_{FN3})	001.95 V		

从表 1 数值我们可以看到: 发电机中性点零序电压 $U_N = 10.67 \text{ V} > \text{定值 } 10.0 \text{ V}$, 与此同时发电机机端零序电压 $U_0 = 21.81 \text{ V} > 10.0 \text{ V} \times 1.732 = 17.32 \text{ V}$ 。满足基波零序电压定子接地保护启动条件。零序电压未达到高定值段。

机端与中性点三次谐波电压的比率满足: $U_{F3} / U_{N3} = 5.36 \text{ V} / 0.45 \text{ V} = 11.9 > \text{定值 } 2.3$ 。

三次谐波电压差值满足: $U_{FN3} = 1.95 \text{ V} > \text{定值 } 0.5 \text{ V}$ 。

从基波零序电压、三次谐波电压的判据都明确判别出此时已发生定子接地故障。由于启动后延时尚未到 1.5 s, 定子接地保护未跳闸。

为什么要设 1.5 s 呢? 根据整定计算导则规定: 发电机中性点经配电变压器高阻接地时, 接地故障电流大于 $\sqrt{2} I_C$, 一般情况下均将大于允许值, 所以单相接地保护应带时限动作于停机, 其时限应与系统接地保护相配合。

(2) 接地故障位置的估算

由于 C 相电压明显降低, 可判断接地故障发生在 C 相。若故障是金属性接地故障, 则健全相 A 相和 B 相的电压应该相等或接近。从数据上看, B 相电压略大于 A 相电压, 可知此接地故障不是金属性接地故障, 存在一定的过渡电阻。由于不知道接地过渡电阻的具体数值, 无法较为准确地计算接地位置。考虑到 A 相电压与 B 相电压相差不算很大, 近似认为是金属性接地故障, 则故障位置:

$$\alpha = \frac{U_0}{100 \text{ V}} = \frac{21.81}{100} = 21.8\%$$

即 C 相绕组在距离中性点 20% 附近出现了接地故障。

(3) 中性点电压偏低的问题

根据提供的机端 PT 变比, 以及中性点接地变电压变比参数, 机端零序电压应当是中性点零序电压的 1.732 倍, 机端零序电压 $U_0 = 21.81 \text{ V}$ 时, 中性

点零序电压 U_N 应当为 $U_N = \frac{U_0}{1.732} = \frac{21.81 \text{ V}}{1.732} = 12.59 \text{ V}$,

而实际测量得到的电压仅为 10.67 V, 明显偏低。

机端 PT 用于电压测量，可以认为电压变比是比较准确的。中性点零序电压通过接地变压器的 100 V 电压抽头得到，准确性值得怀疑。若接地变压器电压变比是在变压器空载状况下设计的变比，则当变压器外接负载电阻 R_n 时，由于存在短路阻抗，低压侧电压必定比空载情况下更低。实际变比已不是 20 kV/100 V 了。

如果 20 kV/100 V 的变比准确，对于本次事故，那么当机端 $U_0 > 17.32$ V 时，中性点 $U_N > 10$ V，保

护就可以启动。基波零序电压定子接地保护可以更早的启动，可以大大减少对定子的损伤。

5.2 匝间故障分析

在定子接地故障初期，由于是 C 相并联绕组中的 $2W_2$ 引线烧断，并未发生匝间故障，纵向零序电压 $U_Z = 2.43$ V < 定值 3 V。之后，纵向零序电压明显增大。通过 RCS-985 软件读取匝间保护跳闸时刻的电流、电压值，为看清不同时段的波形，将三段波形分开，并标注了相对启动时刻的时间。

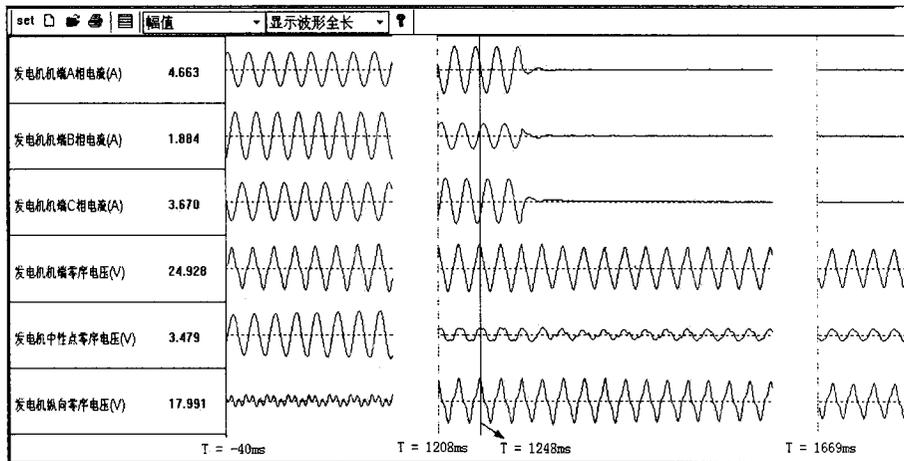


图 4 保护跳闸时刻电流、电压值

Fig.4 Voltages and currents at the trip moment

从 RCS-985 软件读取对应于跳闸时刻 ($T = 1248$ ms) 的各个量: $I_A = 4.663$ A, $I_B = 1.884$ A, $I_C = 3.670$ A, $U_0 = 24.928$ V, $U_N = 3.479$ V, $U_Z = 17.991$ V。

(1) 匝间保护高定值段核算

$U_Z = 17.991$ V > 电压高定值 10 V。匝间保护高定值段动作。

(2) 匝间保护灵敏段核算

发电机额定电流 (二次值) 为

$$I_e = \frac{21.49 \text{ kA}}{30 \text{ kA} / 5 \text{ A}} = 3.582 \text{ A}.$$

发电机 A 相电流最大，且 $I_A > I_e$ 。

从 RCS-985 软件寻找电流波形过零点对应的相对时标，以此计算三相电流的相位关系。具体寻找过零点的过程略，寻找结果如表 2 所示。

计算发电机负序电流:

$$I_2 = \frac{1}{3} | I_A + e^{j240\text{deg}} \cdot I_B + e^{j120\text{deg}} \cdot I_C | = 3.190 \text{ A}$$

表 2 电流过零点时标

Tab.2 Time marks of the currents at the zero crossing point

相别	过零区间 时标/ms	过零点时 标/ms	相对时 差/ms	相对 角度/(°)
A 相电 流	130.86~ 130.96	130.91	0	0
B 相电 流	138.13~ 138.24	138.20	7.29	131.2
C 相电 流	142.03~ 142.14	142.09	11.18	201.2

匝间保护灵敏段动作方程为:

$$\begin{cases} U_Z > \left(1 + \frac{I_m}{I_e}\right) U_{Z\text{SET}} \\ I_m = 3I_2 & I_{\text{max}} < I_e \\ I_m = (I_{\text{max}} - I_e) + 3I_2 & I_{\text{max}} \geq I_e \end{cases}$$

将数据代入上式，

$$I_m = (4.663 - 3.582) + 3 \times 3.190 = 10.651 \text{ A}$$

$$\left(1 + \frac{I_m}{I_c}\right) \times U_{z_{set}} = \left(1 + \frac{10.651}{3.582}\right) \times 3.0 = 11.92 \text{ V}$$

$$U_z = 17.991 \text{ V} > 11.92 \text{ V}$$

匝间保护灵敏段动作。

(3) 跳闸后匝间故障持续

从录波波形上看,发电机匝间故障后,保护跳闸正确出口,跳闸后发电机电流很快降到零,灭磁开关也跳开,转子电压先降为零,后变为负值(转子电流经灭磁电阻续流,转子电压为负);但是由于转子时间常数较大,转子电流下降相对较慢,发电机电压衰减较慢,跳闸后的几个周波内的电压甚至看不出有明显的衰减,因此匝间故障会持续,并严重损伤发电机。

6 分析结论

(1) 经过分析,本次#4发电机的故障为C相定子单相接地故障转化为较为严重的匝间故障,故障特征明显,经发电机解体检查后证实:励端C相并联分支中的2W₂环形引线在188°和212.29°绝缘夹板之间的部分导线被烧断。

(2) 在前面我们分析出存在中性点零序电压测量值偏低的情况,建议在发电机中性点对地另外安装20 kV/100 V的单相PT用作测量发电机中性点电压;或者适当调整定子接地基波零序电压定值。接地变压器电压变比是在变压器空载状况下设计的变比,当变压器外接负载电阻R_n时,不仅存在着数值的误差,还存在有角度差。对于本次事故,如果20 kV/100 V的变比准确,基波零序电压定子接地保护可以更早地启动跳闸,大大减少发电机的损失。

(3) 建议继电保护工作者重视定子接地保护的二次回路,同时对于定子接地保护的動作时限配合问题,可以考虑与主保护配合,而从定值上躲过系统接地对定子接地保护的影响。

(4) 建议对于2Y结构6个出线头的发电机,装设横差保护。如果此台发电机装有横差保护,在定子引线事故转变为匝间故障之前时就会跳闸,就不会损伤发电机定子绕组,避免事故扩大化。

参考文献

[1] 邓祖前,等. 关于一起汽轮发电机定子接地保护动作的分析与处理[J]. 继电器, 2007, 35(7):84-86,92.

- DENG Zu-qian, et al. Analysis and Processing on an Operation of the Stator Ground Protection of a Set of Gas-generator[J]. Relay, 2007, 35(7):84-86,92.
- [2] 桂林,王祥珩,孙宇光,等. 大型汽轮发电机新型中性点引出方式的研究[J]. 电力系统自动化, 2006,30(1):60-63.
- GUI Lin, WANG Xiang-heng, SUN Yu-guang, et al. Study on New Leading-out Mode of Neutral Points of Large Turbo-generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006,30(1):60-63.
- [3] 杨文超,张立港,李江军. 大型发电机组定子接地保护3U₀定值整定的探讨[J]. 继电器, 2007, 35(4):31-34.
- YANG Wen-chao, ZHANG Li-gang, LI Hong-jun. Discussion About Stator Grounded Protection 3U₀ Setting in Large Power Plant[J]. Relay, 2007, 35(4):31-34.
- [4] 张琦雪,席康庆,陈佳胜,等. 大型发电机注入式定子接地保护的现场应用及分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(11):107-111.
- ZHANG Qi-xue, XI Kang-qing, CHEN Jia-sheng, et al. Field Application and Analysis of the Stator Earth Fault Protection with Voltage Injection for Large-sized Generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(11):107-111.
- [5] 李玉海,张小庆,徐敏. 关于定子接地保护的几个问题[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(11):50-54.
- LI Yu-hai, ZHANG Xiao-qing, XU Min. Study on Stator Earth Fault Protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(11):50-54.
- [6] 陈亚军,卢伟辉. 瑞明电厂2号发电机中性点接地方式特性及定子接地保护分析[J]. 广东电力, 2007, (2):58-60,78.
- CHEN Ya-jun, LU Wei-hui. Characteristics of Neutral-point Earthing Way and Analysis of Stator Ground Fault Protection of Unit 2 Generator in Ruiming Power Plant[J]. Guangdong Electric Power, 2007, (2):58-60,78.

收稿日期:2008-01-14; 修回日期:2008-04-02

作者简介:

王大鹏(1970-),女,副教授,研究方向为电力系统继电保护及其自动化; E-mail:sddkywdp@tom.com

王涛(1975-),男,工程师,研究方向为电力系统自动化技术;

周宏斌(1972-),男,工程师,研究方向为电力系统继电保护及其自动化。