

# 某 35 kV 变电站主变误跳闸事故分析与处理

王光中, 郝建宏, 沈鸿彦, 王淑君

(许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 介绍了一起变电站主变差动保护误动作原因的分析与处理过程。厂家和电力公司技术人员在变电站对差动保护设备进行了详细检查, 并结合保护动作数据, 对跳闸事故进行了缜密分析, 发现引起主变保护误动作的原因如下: (1) 电流相序为负相序; (2) 高压侧电缆绝缘有问题; (3) 回路极性接反。然后采取了针对性的措施, 排除了缺陷和隐患, 保证了该地区电网的稳定运行。

**关键词:** 差动保护; 不平衡电流; 负序系统

## The analysis and solving of a main transformer's false tripping in a 35 kV substation

WANG Guang-zhong, HAO Jian-hong, SHEN Hong-yan, WANG Shu-jun  
(XJ Electric Co., Ltd, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** This paper introduces the analysis and fault finding of a differential relay false tripping of the main transformer in a substation. Technicians checked differential relay of substation, analyzed wave recording data, and finally found some defects and hidden trouble which affected the safe operation of the power system. Namely, current phase sequence was reverse sequence, cables insulation of high side was in trouble, and current polarity was wrong. It also takes some measures to eliminate the defects in the operation, which can ensure the safe and stable operation of power system.

**Key words:** differential relay; unbalanced current; negative sequence system

中图分类号: TM772 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2010)05-0127-05

## 0 引言

2009年4月28日04:47:52左右,某35kV变电站发生短路故障,速断保护动作跳闸。在跳闸的同时,2#变差动保护动作跳开两侧开关,2#变差动保护动作原因不明确。另外,据运行单位反映,2#变自投运以来,差动保护多次发生区外故障误动作现象,至今未找到原因。

## 1 现场检查情况

### 1.1 事故相关运行方式的了解

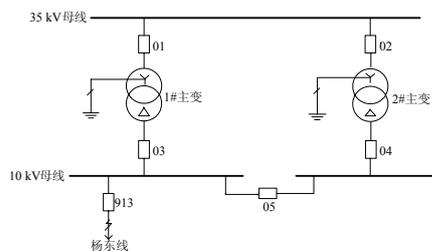


图1 2#主变差动保护动作时的运行方式

Fig.1 The operating mode as the 2# transformer's differential relay tripping

该站现有2台35kV/10kV变压器, Y/Δ-11绕组类型。35kV母线采用单母接线, 10kV母线采用单母分段接线。35kV侧为电源端, 10kV侧为负荷端。综合自动化系统采用PSU-2000系统, 主变差动保护均采用PSU-2302型保护装置, 差动保护电流回路为全星形接线(图1)。

### 1.2 值班记录

2009年4月28日04:47:52, 杨东线发生短路, 速断保护动作, 动作电流20A; 2#变差动保护动作, 动作电流 $I_{cd}=10.88A$ 。

### 1.3 1#变带负荷时的数据测量

(1) 在1#变正常运行时, 以高压侧PT上 $U_{AB}$ 为基准相位, 用嵌型表对二次电流回路进行测量, 数据如下:

差动保护高压侧电流:  $i_A=0.894\angle 230^\circ A$ ,  $i_B=0.925\angle 344^\circ A$ ,  $i_C=1.021\angle 109^\circ A$ ,  $i_N\approx 0A$ ;

差动保护低压侧电流:  $i_a=1.076\angle 79^\circ A$ ,  $i_b=1.015\angle 196^\circ A$ ,  $i_c=1.076\angle 318^\circ A$ ,  $i_n\approx 0A$ ;

后备保护高压侧电流:  $i_A=0.898\angle 231^\circ A$ ,  $i_B=0.901\angle 347^\circ A$ ,  $i_C=0.929\angle 113^\circ A$ ;

后备保护低压侧电流:  $i_a=1.082\angle 260^\circ A$ ,  $i_b=$

$0.996 \angle 16^\circ \text{ A}$ ,  $i_c = 1.015 \angle 138^\circ \text{ A}$ 。

(2) 在 1#变正常运行时保护装置显示不平衡电流为 0.57 A。

### 1.4 2#变跟 1#变并列运行带负荷时的数据测量

(1) 在 2#变正常运行时，以高压侧 PT 上  $U_{AB}$  为基准相位，用嵌型表对保护电流回路进行测量，数据如下：

差动保护高压侧电流： $i_A = 0.347 \angle 119^\circ \text{ A}$ ,  $i_B = 0.358 \angle 237^\circ \text{ A}$ ,  $i_C = 1.021 \angle 331^\circ \text{ A}$ ,  $i_N = 0.128 \angle 195^\circ \text{ A}$ ；

差动保护低压侧电流： $i_a = 0.605 \angle 141^\circ \text{ A}$ ,  $i_b = 0.609 \angle 260^\circ \text{ A}$ ,  $i_c = 0.622 \angle 170^\circ \text{ A}$ ,  $i_n \approx 0 \text{ A}$ ；

后备保护高压侧电流： $i_A = 0.249 \angle 73^\circ \text{ A}$ ,  $i_B = 0.367 \angle 172^\circ \text{ A}$ ,  $i_C = 0.374 \angle 293^\circ \text{ A}$ ,  $i_N = 0.144 \angle 15^\circ \text{ A}$ ；

后备保护低压侧电流： $i_a = 0.643 \angle 79^\circ \text{ A}$ ,  $i_b = 0.678 \angle 196^\circ \text{ A}$ ,  $i_c = 0.645 \angle 319^\circ \text{ A}$ 。

(2) 2#变正常运行时检查保护装置显示不平衡电流为 0.68 A。

### 1.5 保护设备检查

(1) 对保护定值进行检查，没有发现装置定值的平衡系数不正确。

(2) 对保护运行实时参数检查，1#变、2#变均存在较大的不平衡电流。

(3) 对 2#变差动保护性能进行测试，保护特性正常，且能正常跳开主变两侧开关。

### 1.6 相关电气设备检查

(1) 检查 2#主变高压侧后备 CT，发现 CT 抽头实取 150/5，与设计整定值 100/5 不符。

(2) 检查电缆绝缘，发现 2#主变高压侧后备 CT 差动 C 相电缆线芯绝缘不好。

## 2 主变保护问题分析与处理

### 2.1 Y / $\Delta$ -11 变压器纵向差动保护原理

变压器纵向差动保护应用基尔霍夫电流定律，即：在电路中，在任何时刻，对于任意节点，所有支路的电流的代数和恒等于零。只不过，变压器纵向差动保护把变压器当作节点，把各侧同相电流当作支路电流而已。流入保护中的电流为二次电流，由于变压器两侧存在电压等级的差异和 CT 变比的不同，一般通过平衡系数或补偿线圈来纠正使之符合基尔霍夫电流定律，如图 2 所示。

而对于 Y /  $\Delta$ -11 型变压器，由于存在相位的差异，严格来说，两侧所谓的同名相是不同相的。因此，如采用纵差保护，不仅需要消除两侧电压等级的差异和 CT 变比的差异，还要消除两侧相位的

差异。

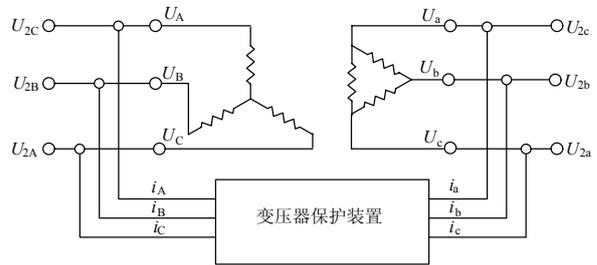


图 2 变压器绕组电气回路示意图

Fig.2 The transformer's electrical circuit

实际应用中，常采用两种方式补偿两侧相位的差异：一种是通过 CT 回路接成  $\Delta$ /Y 星角转换来补偿；一种是 CT 回路接成全星形，通过变压器保护的软件来完成  $\Delta$ /Y 星角转换补偿。

### 2.2 关于星角转换原理

#### (1) 变压器绕组星角转换原理

Y /  $\Delta$ -11 变压器由于两侧绕组类型不同，两侧的存在一定相位差异。假设  $U_A, U_B, U_C$  分别为高压侧各相电压， $U_a, U_b, U_c$  分别为低压侧各相电压，则两侧各相存在以下关系：

$$\begin{cases} U_a = (U_A - U_B) / \sqrt{3} \\ U_b = (U_B - U_C) / \sqrt{3} \\ U_c = (U_C - U_A) / \sqrt{3} \end{cases} \quad (1)$$

不妨假定  $U_A, U_B, U_C$  相角为  $90^\circ, 330^\circ, 210^\circ$ ，做向量图（如图 3 (a) 所示）。

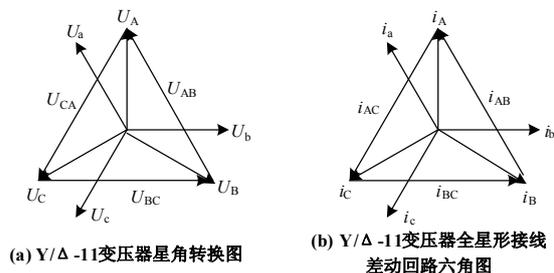


图 3 Y /  $\Delta$ -11 型星角转换向量图

Fig.3 Y /  $\Delta$ -11 type star angle conversion vector map

显然低压侧各相超前高压侧  $30^\circ$ ，以 A 相为例，高压侧  $\angle A = 90^\circ$ ，低压侧  $\angle a = 120^\circ$ 。如果让高低压侧模拟钟表指针从 0 点顺时针方向旋转，高压侧 A 相处于 12 点钟位置，低压侧 a 相处于 11 点钟位置，也就是所谓的 11 点钟变压器绕组接线，即 Y /  $\Delta$ -11 型，如图 3 (b) 所示。

变压器纵差保护的相位补偿同样采用星角转换原理, 把高压侧各相通过 Y / Δ-11 转换使之与低压侧同名相相符。

$$\begin{cases} i'_A = (i_A - i_B) / \sqrt{3} \\ i'_B = (i_B - i_C) / \sqrt{3} \\ i'_C = (i_C - i_A) / \sqrt{3} \end{cases} \quad (2)$$

则  $i'_A$  与  $i_a$  为同名相,  $i'_B$  与  $i_b$  为同名相,  $i'_C$  与  $i_c$  为同名相。

式中:  $i_A$ 、 $i_B$ 、 $i_C$  为高压侧二次电流;  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  为低压侧二次电流;  $i'_A$ 、 $i'_B$ 、 $i'_C$  为高压侧转换后的二次电流。

### (2) 变压器保护的星角转换

如果变压器差动保护采用同极性原理, 即差动 CT 同名端一侧指向变压器, 一侧指向母线, 则上述公式②中的  $i'_A$ 、 $i'_B$ 、 $i'_C$  和  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  分别的同名相同相位。

反之, 如果变压器差动保护采用反极性原理, 即差动 CT 同名端都指向变压器, 则上述公式②中的  $i'_A$ 、 $i'_B$ 、 $i'_C$  和  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  分别的同名相反相位。该站变压器差动保护装置 PSU-2302 采用反极性原理。

## 2.3 负序网络的星角转换

### (1) 负序网络的星角转换

在图 2 中, 如果引入负序电源, 假设 A、C 互换, 成为负相序。

$$U_A = U_{2C}, U_B = U_{2B}, U_C = U_{2A}$$

$$U_a = (U_A - U_B) / \sqrt{3} = (U_{2C} - U_{2B}) / \sqrt{3}$$

$$U_b = (U_B - U_C) / \sqrt{3} = (U_{2B} - U_{2A}) / \sqrt{3}$$

$$U_c = (U_C - U_A) / \sqrt{3} = (U_{2A} - U_{2C}) / \sqrt{3}$$

由于 Y / Δ-11 型变压器物理特性不变, 低压侧也互换 a、c 相, 使之与高压侧同名端, 低压侧为负序系统, 则

$$U_{2a} = (U_{2A} - U_{2C}) / \sqrt{3}$$

$$U_{2b} = (U_{2B} - U_{2A}) / \sqrt{3}$$

$$U_{2c} = (U_{2C} - U_{2B}) / \sqrt{3}$$

以正常矢量代入, 换相后, 相当与 1 点接线。所以负序网络经过 Y / Δ-11 星角转换为 1 点钟, 即: Y / Δ-1 星角转换, 这正是正、负序接线在星角转换应用中的不同之处, 如图 4 所示。

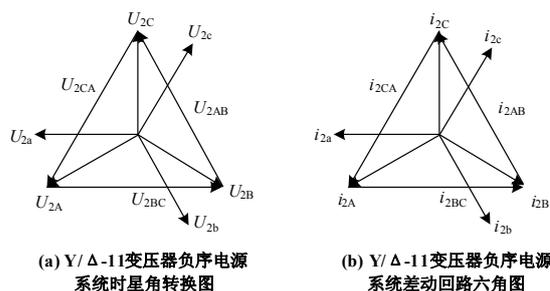


图 4 星角转换向量图

Fig.4 Star angle conversion vector map

### (2) 负序网络在保护中经星角转换的差流平衡问题

如果 Y / Δ-11 型变压器 CT 为全星形接线, 对于流入保护中的高压侧电流调整为负序  $i_{2A}$ 、 $i_{2B}$ 、 $i_{2C}$ , 则经保护软件星角转换产生的电流  $i'_{2a}$ 、 $i'_{2b}$ 、 $i'_{2c}$ , 低压侧有与之同名相的  $i''_{2a}$ 、 $i''_{2b}$ 、 $i''_{2c}$ , 才能保证差动保护中差电流的平衡, 如图 5 (a) 所示。

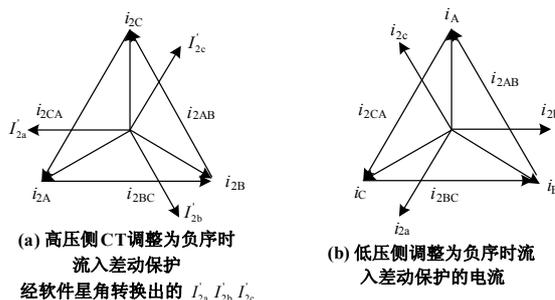


图 5 向量比较图

Fig.5 Vector comparison

我们不妨将低压侧 CT 流入保护中的负序电流  $i_{2a}$ 、 $i_{2b}$ 、 $i_{2c}$  做向量图, 如图 5 (b), 在向量图 6 (b) 中, 使  $i_{2a}$ 、 $i_{2b}$ 、 $i_{2c}$  反向, 发现  $-i_{2b}$ 、 $-i_{2c}$ 、 $-i_{2a}$  分别与经保护软件星角转换产生的电流  $i'_{2a}$ 、 $i'_{2b}$ 、 $i'_{2c}$  同相位, 即

$$i'_{2a} = -i_{2b}$$

$$i'_{2b} = -i_{2c}$$

$$i'_{2c} = -i_{2a}$$

将低压侧  $-i_{2a}$ 、 $-i_{2b}$ 、 $-i_{2c}$  调相为  $-i_{2b}$ 、 $-i_{2c}$ 、 $-i_{2a}$  顺序, 会有

$$\begin{cases} i'_{2a} = i''_{2a} = -i_{2b} \\ i'_{2b} = i''_{2b} = -i_{2c} \\ i'_{2c} = i''_{2c} = -i_{2a} \end{cases} \quad (3)$$

如果高压侧 CT 的电流  $i_{2A}$ 、 $i_{2B}$ 、 $i_{2C}$  流入保护中顺序为黄 1、绿 2、红 3，则低压侧的中电流  $-i_{2b}$ 、 $-i_{2c}$ 、 $-i_{2a}$  流入保护中顺序为绿 1、红 2、黄 3，符合上述公式 (3)，变压器差动保护才可以正常运行。（对于反极性原理的保护：需将低压侧  $-i_{2b}$ 、 $-i_{2c}$ 、 $-i_{2a}$  的接线绿 1、红 2、黄 3 倒极性改为  $i_{2b}$ 、 $i_{2c}$ 、 $i_{2a}$  即可，如图 7 所示）。

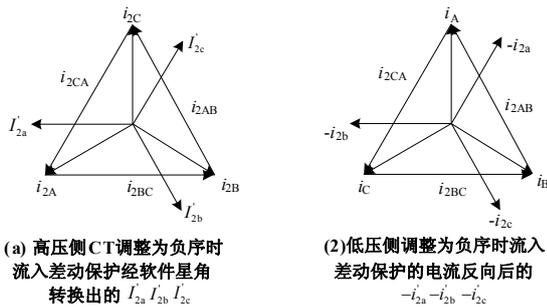


图 6 向量比较图

Fig.6 Vector comparison

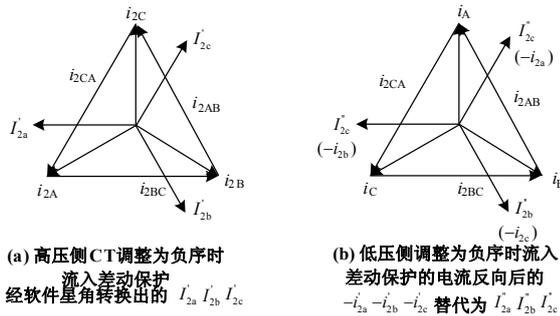


图 7 向量比较图

Fig.7 Vector comparison

### 2.4 1#主变差动保护不平衡电流问题的处理

观察测量的后备保护电流数据，全为负序量，同名相间为 11 点钟接线，则变压器一次侧相序为正序量，只不过二次侧接成负序量了。再观察两侧的差动电流，同为负序量。

$$\begin{aligned} \angle i_{2A} = 230^\circ & \quad \text{则} \angle i'_{2a} = \angle i_{2A} - 30^\circ = 200^\circ \\ \angle i_{2B} = 344^\circ & \quad \text{则} \angle i'_{2b} = \angle i_{2B} - 30^\circ = 314^\circ \\ \angle i_{2C} = 109^\circ & \quad \text{则} \angle i'_{2c} = \angle i_{2C} - 30^\circ = 79^\circ \\ \angle i_{2a} = 79^\circ & \quad \approx \angle i''_{2c} = \angle i'_{2c} = 79^\circ \\ \angle i_{2b} = 196^\circ & \quad \approx \angle i''_{2a} = \angle i'_{2a} = 200^\circ \\ \angle i_{2c} = 318^\circ & \quad \approx \angle i''_{2b} = \angle i'_{2b} = 314^\circ \end{aligned}$$

检查保护装置差动回路接线，高压侧 CT 的电流

$i_{2A}$ 、 $i_{2B}$ 、 $i_{2C}$  流入保护中顺序为黄 1、绿 2、红 3，则低压侧的中电流  $i_{2a}$ 、 $i_{2b}$ 、 $i_{2c}$  流入保护中顺序为绿 1、红 2、黄 3，符合上述公式 (3)，变压器差动回路接线没问题。

那么问题出在什么地方呢？我们重新计算平衡系数：

高压侧 CT 设计变比 100/5，低压侧 CT 设计变比 300/5。

$$\text{则 } K_1 = \frac{\sqrt{3} * k_{pt1} * k_{ct1}}{k_{pth} * k_{cth}} = \frac{\sqrt{3} * 0.1 * 60}{0.35 * 20} = 1.48$$

如果低压侧 CT 变比取 200/5 抽头，则

$$K_1 = \frac{\sqrt{3} * k_{pt1} * k_{ct1}}{k_{pth} * k_{cth}} = \frac{\sqrt{3} * 0.1 * 40}{0.35 * 20} = 1$$

再检查保护定值， $K_1$  整定为 1 发现原来的变比取错了，更正后，带负荷检查保护装置差流已显示为零。

### 2.5 2#主变保护问题的处理

#### (1) 高后备保护 A 电流偏差问题

对高后备相关电缆摇绝缘，绝缘正常，可排除电缆绝缘因素对 A 电流偏差的影响。高后备保护电流数据为： $i_A = 0.249 \angle 73^\circ$  A， $i_B = 0.367 \angle 172^\circ$  A， $i_C = 0.374 \angle 293^\circ$  A。

$$\text{仔细比较 } i_B \approx i_C \quad \text{而} \quad \frac{i_B}{i_A} = \frac{0.367}{0.249} = 1.47 \approx 1.5$$

倍。

其它两相电流幅值均比 A 相大 1.5 倍，估计 A 相 CT 抽头不正确。实际整定 CT 变比为 100/5，不妨设正确的两相的一次电流为  $x$  A，设 A 相的 CT 变比为  $Y/5$ 。

$$\text{计算 } \frac{x}{0.378} = \frac{100}{5}, \text{ 得出 } x = 7.56 \text{ A.}$$

$$\text{将一次电流代入公式 } \frac{7.56}{0.249} = \frac{y}{5} \text{ 计算得出}$$

$$y = 151.8 \approx 150.$$

可以推断 CT 抽头错成 150/5 了，再检查 CT 抽头实际接线如此，修正后带负荷再检查该相后备电流恢复正常。

#### (2) 2#变差动保护不平衡电流问题

对于 2#变差动回路，我们仔细检查相关电气回路和设备，当对高压侧电缆摇绝缘时，发现 A 相电缆绝缘性能降低明显。调整电缆后，再带负荷测量数据：

差动保护高压侧电流:  $i_A = 0.311 \angle 54^\circ$  A,  $i_B = 0.318 \angle 166^\circ$  A,  $i_C = 0.324 \angle 297^\circ$  A,  $i_N \approx 0$  A;

差动保护低压侧电流:  $i_a = 0.554 \angle 80^\circ$  A,  $i_b = 0.561 \angle 206^\circ$  A,  $i_c = 0.588 \angle 320^\circ$  A,  $i_n \approx 0$  A;

$\angle i_{2A} = 54^\circ$  则  $\angle i'_{2a} = \angle i_{2A} - 30^\circ = 24^\circ$

$\angle i_{2B} = 166^\circ$  则  $\angle i'_{2b} = \angle i_{2B} - 30^\circ = 136^\circ$

$\angle i_{2C} = 297^\circ$  则  $\angle i'_{2c} = \angle i_{2C} - 30^\circ = 267^\circ$

$\angle -i_{2a} = 80^\circ + 180^\circ = 260^\circ \approx \angle i''_{2c} = \angle i'_{2c} = 267^\circ$

$\angle -i_{2b} = 206^\circ + 180^\circ = 26^\circ \approx \angle i''_{2a} = \angle i'_{2a} = 24^\circ$

$\angle -i_{2c} = 320^\circ + 180^\circ = 140^\circ \approx \angle i''_{2b} = \angle i'_{2b} = 136^\circ$

我们再改变保护装置差动回路接线, 高压侧 CT 的电流  $i_{2A}$ 、 $i_{2B}$ 、 $i_{2C}$  流入保护中顺序为黄 1、绿 2、红 3, 则低压侧的中电流  $-i_{2a}$ 、 $-i_{2b}$ 、 $-i_{2c}$  流入保护中顺序为绿 1、红 2、黄 3, 符合上述公式 (3), 确凿无误后, 再带负荷检查, 保护装置中的不平衡电流显示为零。

至此, 2#变问题已全部解决。

### 3 结论及反措建议

#### 3.1 结论

此次事故发生后, 厂家和运行单位技术人员经过认真检查分析后认为: 2#变保护此次误动作主要跟以下因素有关:

(1) 全站电流系统接成负序系统, 致使回路变的很复杂而难理解, 容易出错。

(2) 高压侧电缆绝缘不好, N 回路分流。

(3) 变压器差动保护采用反极性原理, 而回路

极性接反。

正是以上几个因素的存在, 当发生区外故障时, 致使 2#变差动保护不平衡电流太大, 保护装置动作而跳闸。

同时, 检查还发现了其他一些问题。譬如: 1#变平衡系数计算有误, 2#变高后备 A 相 CT 变比有误等问题, 均一一处理。

#### 3.2 反措处理建议

通过对 2#变跳闸事故的分析 and 处理, 发现一些影响电网安全运行的缺陷和隐患, 我们采取了相应的处理措施。鉴于国家电网继电保护标准都是以正序系统为基础而应用的, 建议该站二次电气回路采用比较通行的正序系统, 这样才能保证电网的安全稳定运行。

#### 参考文献

- [1] 王梅义. 电网继电保护应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [2] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护典型故障分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [3] 贺家李. 电力系统继电保护原理(增订版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [4] 吴必信. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.

收稿日期: 2009-05-29; 修回日期: 2009-06-24

作者简介:

王光中(1971-), 男, 本科, 讲师, 从事电工电子、电力系统等专业教学工作; E-mail: wgz5653@126.com

郝建宏(1971-), 女, 本科, 工程师, 从事电力系统继电保护产品设计和调试工作;

沈鸿彦(1974-), 男, 硕士, 工程师, 从事电力系统自动化产品设计、调试及应用。

(上接第 114 页 continued from page 114)

组恒速, 以方便机组并网; 若故障一时不能排除, 机组应及时进行停运处理。电气人员应加强对发电机相关设备技术监督和定期工作, 掌握同类型机组的故障处理方法, 制定相应的防范措施, 对存在隐患的设备坚决进行整治和消除, 全面提高发电机安全运行水平。

#### 参考文献

- [1] 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. Generator and Transformer Relay Protection Application[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.

收稿日期: 2009-03-18; 修回日期: 2009-04-10

作者简介:

吴建福(1976-), 男, 本科, 工程师, 主要从事电厂电气设备管理工作。E-mail: Wujianfu126@126.com