

DOI: 10.7667/PSPC150939

# 消弧线圈接地机组的定子基波零序电压保护误动分析

王昕<sup>1</sup>, 李乃永<sup>2</sup>, 苏欣<sup>3</sup>, 张国辉<sup>1</sup>, 孙运涛<sup>1</sup>, 刘学思<sup>4</sup>, 赵峰<sup>5</sup>

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250002; 2. 国网山东省电力公司, 山东 济南 250002;

3. 国网山东济南供电公司, 山东 济南 250002; 4. 华能国际电力股份有限公司德州电厂, 山东 德州 253024;

5. 华能威海发电有限责任公司, 山东 威海 264205)

**摘要:** 为了分析传递电压对机组定子接地保护的影响, 以消弧线圈接地机组的定子接地保护误动为例, 分析了传递电压自由振荡过程, 得出传递电压延时衰减特性是导致保护误动的主要原因。通过对传递电压特征频率的研究, 提出了一种快速判别机组补偿方式的方法, 并通过 PACAD 仿真进行了验证。针对定子接地保护误动原因, 完善了保护的传递电压闭锁逻辑, 实现了在不牺牲保护快速性及灵敏性的前提下消除了传递电压的影响。实践证明, 采取措施以后效果良好。

**关键词:** 零序电压; 定子接地; 定值计算; 消弧线圈; 仿真; 发电机保护

## Analysis on earth fault protection malfunction of generator with arc suppression coil grounding

WANG Xin<sup>1</sup>, LI Naiyong<sup>2</sup>, SU Xin<sup>3</sup>, ZHANG Guohui<sup>1</sup>, SUN Yuntao<sup>1</sup>, LIU Xuesi<sup>4</sup>, ZHAO Feng<sup>5</sup>

(1. Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250002, China; 2. Shandong Electric Power Company, Jinan 250002, China;

3. Jinan Power Supply Company, Jinan 250002, China; 4. HUANENG Dezhou Power Plant, Dezhou 253024, China;

5. HUANENG Weihai Power Plant, Weihai 264205, China)

**Abstract:** By the case study on the protection malfunction of the unit with a neutral arc suppression coil grounding, the influence of transitive voltage on the stator earth fault protection is analyzed. The free oscillation of the transitive voltage is the main cause of the malfunction. By analyzing the characteristic frequency of the transitive voltage, a convenient method of estimation of compensation mode for the unit is proposed, which is proved by PSCAD simulation. As for the malfunction of the stator earth fault protection, the protection blocking logic is improved. The influence of transitive voltage is eliminated without sacrificing the rapidity and sensitivity of the protection. Practical application shows that it is effective by adopting the proposed measure.

**Key words:** zero sequence voltage; stator earth fault; protection setting; arc suppression coil; simulation; unit protection

## 0 引言

发电机定子接地保护的快速动作对遏制发电机电气故障的发展起着重要作用。近年, 某电网多次发生由系统接地故障引起的消弧线圈接地机组定子接地保护误动事件, 电厂内的多台机组同时受到影响, 甚至有导致多台机组同时跳闸的危险, 严重威胁到电网的安全运行。本文通过对一起经消弧线圈接地机组定子接地保护误动事件的分析, 阐明了传递电压自由振荡过程对定子接地保护的影响, 用 PSCAD 仿真对分析结果进行了仿真验证, 并提出了针对性的建议, 对保障机组和电网安全稳定运行具有实际意义。

## 1 事故简介

某火力发电厂, 多台机组采用经消弧线圈接地方式运行, 单机额定功率均为 300 MW, 机组采用单元接线, 通过 220 kV 升压站联入系统。机组保护采用国产发变组保护装置, 配置的基波零序电压定子接地保护均采用防传递电压闭锁逻辑。

1 号机组在正常运行中突然跳机, 经检查一次设备未发现异常, 录波数据显示(如图 1 所示)1 号发电机出现较大幅值零序电压, 导致定子接地保护动作跳机。2 号机组在 1 号机组跳机同时也出现了零序电压, 但因幅值未达到保护动作定值, 定子接地保护未动作。本次事件险些造成多台机组误动的电网事故。



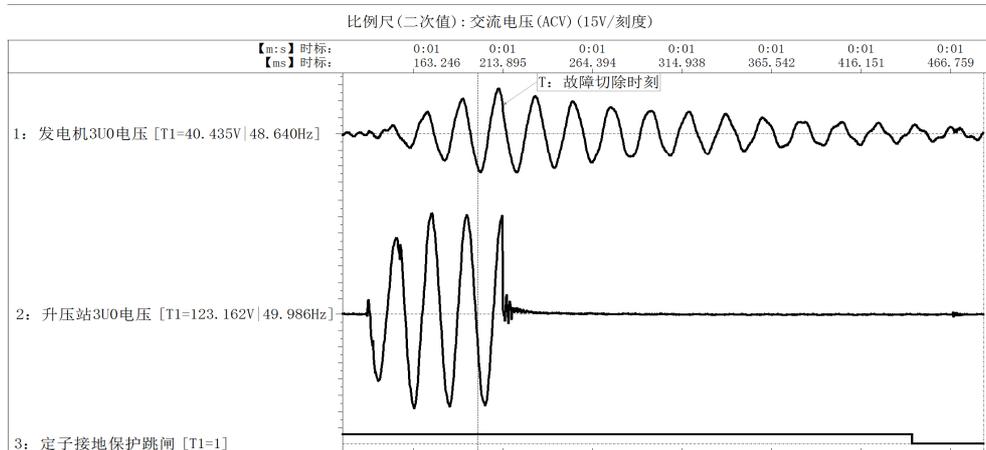


图 1 1号机组故障录波图

Fig. 1 Fault recorder wave form of 1 unit

## 2 事故分析

### 2.1 故障录波分析

如图 1 故障录波所示, 220 kV 系统侧出现较大零序电压, 由此可推断系统发生了接地故障, 又因 220 kV 系统与发电机零序电压同时刻出现, 可初步判断机组定子接地保护动作是由于系统发生接地故障所导致。

根据以往保护误动统计及事故处理经验, 系统接地故障可以引起发电机零序电压异常的原因主要有机组 PT 回路多点接地和传递电压两种原因。因此, 分析工作主要从这两个方向进行。

图 2 所示波形为, 系统故障时, 因发电机 PT 二次回路多点接地, 故障电流窜入 PT 二次回路后引起零序电压异常的典型波形。其波形特点为电气

量频率为工频 50 Hz, 且发电机受干扰零序电压随一次故障的消失而立即消失<sup>[1-2]</sup>。从图 1 可知, 系统故障时发电机与系统侧的零序电压并不是同时消失, 发电机零序电压在一次故障消失后继续存在, 且逐步衰减, 并且由故障录波数据测得机端零序电压在衰减过程中其频率为 47 Hz 左右, 并不为工频 50 Hz。

因此, 根据以上分析, 可以基本排除 PT 回路多点接地导致发电机零序电压异常的原因, 进而可以初步断定, 本次误动由传递电压导致的可能性较大。

### 2.2 保护误动分析

机组系统侧发生接地短路时, 零序电压将通过变压器高、低压绕组间的耦合电容传递到发电机侧, 传递电压计算模型如图 3 所示<sup>[3]</sup>。

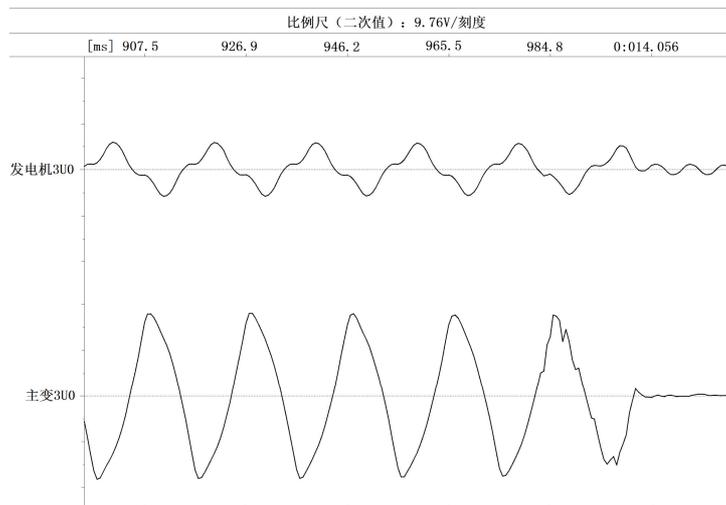


图 2 PT 回路多点接地产生的零序电压录波

Fig. 2 3U0 waveform caused by multi-ground in PT secondary loop

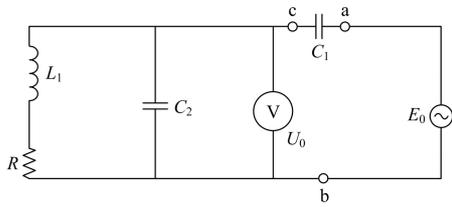


图3 计算传递电压的近似简化电路

Fig. 3 Schematic diagram of transitive voltage calculation

其中,  $E_0$  为变压器高压侧接地故障产生的零序电压;  $C_1$  为主变高低压绕组间的等效耦合电容;  $C_2$  为发电机系统对地单相等效电容, 包括发电机、变压器绕组等电气设备的对地电容;  $L_1$  和  $R$  分别为发电机中性点消弧线圈的等效电感和电阻, 电压表  $V$  处测得电压  $U_0$  为发电机端传递零序电压。

1号机组发变组保护装置的零序基波电压定子接地保护配置有防传递电压闭锁逻辑。在系统故障时, 传递电压可能导致定子接地保护误动的情况下, 定子接地保护将被闭锁, 以防止误动发生。但为何保护采取了防误动措施后, 定子接地保护仍然会误动?

RCS-985装置的定子接地保护锁逻辑如图4所示, 保护用系统侧  $3U_0$  电压来检测系统有无接地故障, 当有接地故障时装置将闭锁定子接地保护功能; 当系统故障消失后装置则立即开放定子接地保护。从图1故障录波图中得知, 系统发生接地故障, 产生  $3U_0$  电压, 这时定子接地保护应被闭锁。当系统接地故障切除后, 系统  $3U_0$  消失, 但是发电机  $3U_0$  电压幅值依然存在, 此时定子接地保护已处于开放状态, 当  $3U_0$  的幅值及持续时间大于保护定值时, 定子接地保护误动跳机, 显然闭锁逻辑没有考虑传递电压的这种延时衰减特性。

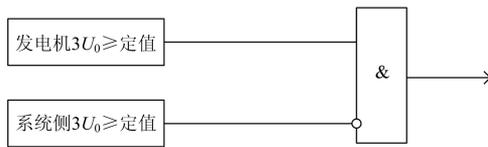


图4 定子接地保护逻辑

Fig. 4 Logic of stator earth fault protection

### 3 传递电压特征分析

#### 3.1 系统接地到切除的过程分析

图3所示等效电路中, 如果忽略电路中的电阻, 发电机系统可等效为消弧线圈  $L_1$  与发电机对地等效电容  $C_2$  并联后再与升压变等效耦合电容  $C_1$  串联而形成的电路, 如图3电路 a-b 端口左边部分所示。当系统发生接地故障时, 如同在电路 a-b 端接入交

流电压源  $E_0$ , 电压源的幅值等于系统接地故障时的零序电压, 其频率为 50 Hz。此时, 发电机机端的传递电压是机组固有特征频率(图1 a-b 端左边部分电路)与接地零序电压频率(图1 a-b 端右部分电路)形成的混频波形, 混频电压幅值计算可参考文献[4], 传递电压频率可用公式(1)计算。

$$f = \frac{f_1 + f_2}{2} \quad (1)$$

式中:  $f$  为传递电压频率;  $f_1$  为图1 a、b 端左部分电路的固有特征频率;  $f_2$  为系统侧零序电压  $E_0$  频率。

#### 3.2 机组跳机后的过程分析

定子接地保护将机组断路器跳开后, 发电机不再与系统相联, 升压变等效耦合电容  $C_1$  分支处于开路状态而不起作用, 这时机组参数等效电路变为消弧线圈  $L_1$  与发电机对地等效电容  $C_2$  并联电路, 如图3 c-b 端口左侧电路所示。此时的传递电压频率主要取决于  $L_1$  与  $C_2$  并联回路的特征频率。

由图1所示, 当系统接地故障切除后,  $E_0$  电压源作用消失, 因 LC 电路自由振荡的特点, 发电机传递电压并没有随系统接地故障的切除而消失, 而是进入自由振荡状态并逐步衰减, 这就是导致定子接地保护传递电压闭锁逻辑失效引起误动的主要原因。

#### 3.3 发电机消弧线圈补偿方式诊断

采用单元接线消弧线圈接地的发电机应采用欠补偿运行方式<sup>[5]</sup>。机组在过补偿方式下运行时传递电压系数将大于 1, 甚至趋于无穷大, 系统发生接地故障时, 传递电压轻者将导致定子接地保护误动, 重者将威胁发电机绝缘安全<sup>[3]</sup>。

在不知发电机一次参数的情况下, 可利用 LC 电路分析理论和机组跳机后传递电压频率特征来定性判断发电机消弧线圈的补偿方式。

当定子接地保护误动跳机后, 利用故障录波数据可测得跳机后传递电压自由振荡的特征频率, 并由并联谐振电路特性分析可知, 当电路工作频率大于电路固有的特征频率时电路呈容性, 反之电路呈感性。因此, 通过比较机组在跳闸后传递电压的特征频率可以快捷的判断发电机消弧线圈的补偿方式, 电路呈容性即可定性推断发电机消弧线圈处于欠补偿状态, 呈感性处于过补偿状态。

在本次误动事件中, 由故障录图2测得, 机组断路器跳开后传递电压特征频率为 47 Hz 左右, 因为机组正常运行或接地故障时的电气量频率为 50 Hz, 即工作频率为 50 Hz, 大于等效并联电路的特征频率, 因此确定电路呈容性, 可定性判断该机组消弧线圈处于欠补偿运行方式。

在实际的定子接地保护误动分析中, 发现部分发电机的消弧线圈处于过补偿状态, 在系统单相接地时发电机机端出现了较高幅值的传递电压, 这也是导致定子接地保护误动的主要原因之一。

#### 4 传递电压计算与仿真

以本次误动事件为例进行仿真计算, 主要电气实测参数为: 发电机中性点消弧线圈电感  $L_1$  16.31H; 发电机系统单相对地电容  $C_2$  0.232 uF, 升压变(242/20 kV, 360 MVA)高低压绕组单相等效耦合电容  $C_1$  0.008 uF, 高压侧中性点不接地。

图 3 所示等效电路的固有特征频率计算如下, 为简化计算, 忽略电路中的电阻参数。

$$Z = \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{j\omega L_1 \cdot \frac{1}{j\omega C_2}}{j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_2}} = \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{j\omega L_1}{1 - \omega^2 L_1 C_2} = -j \frac{1 - \omega^2 L_1 (C_2 + C_1)}{\omega C_1 (1 - \omega^2 L_1 C_2)} \quad (2)$$

式中:  $Z$  为电路的等效阻抗;  $\omega$  为角频率。

令分子、分母为零, 电路特征频率为

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1(C_2 + C_1)}} \quad (3)$$

将参数代入式(3), 计算电路特征频率为 46.46 Hz, 用式(1)计算故障期间传递电压频率为 48.32 Hz, 计算频率与图 1 传递电压频率 48.64 Hz 基本一致。

根据发电机实测参数, 计算发电机机端发生单相接地时补偿电感电流  $I_L$ 、接地电容电流  $I_C$ 。

$$I_L = \frac{U_L}{\sqrt{3} \times 2\pi f \times L_1} = \frac{20 \text{ kV}}{\sqrt{3} \times 314 \times 16.31} = 2.25 \text{ A} \quad (4)$$

$$I_C = \sqrt{3} \times U_L \times 2\pi f \times C_2 = \sqrt{3} \times 20 \text{ kV} \times 314 \times 0.232 \times 10^{-6} = 2.54 \text{ A} \quad (5)$$

式中,  $U_L$  为发电机线电压 20 kV, 如再考虑消弧线圈中电阻, 实际补偿电流将小于计算值。根据计算结果确定, 发电机消弧线圈处于欠补偿方式, 与用传递电压振荡频率进行的判定结果一致。

利用 PSCAD 软件对电路进行数字仿真, 图 5 为系统侧零序电压与发电机传递过电压的仿真波形。如图所示, 故障期间传递电压频率为 48.87 Hz, 传递电压特征与图 1 所示故障录波基本一致。

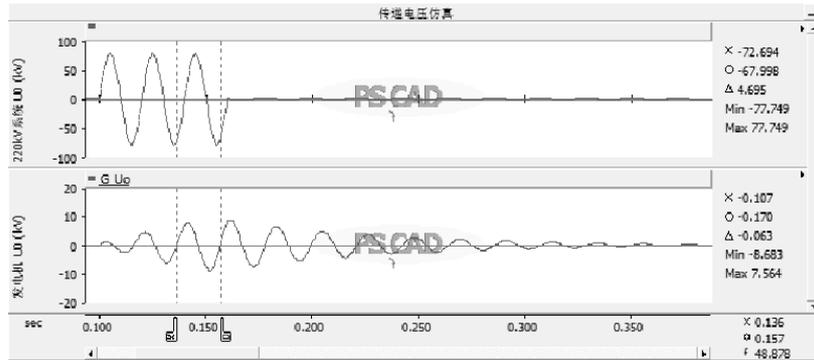


图 5 传递电压仿真波形

Fig. 5 Waveform of transitive voltage simulation

## 5 建议

### 5.1 正确选择消弧线圈档位

1) 机组调试时应验证消弧线圈档位的正确性

在基建调试阶段应对消弧线圈的补偿效果进行测试, 对于单元接线的机组, 应确保消弧线圈工作在欠补偿方式, 经补偿后如发电机接地故障的容性电流小于规程规定值, 可不跳闸停机, 宜将定子接地保护投报警<sup>[5]</sup>。

2) 机组投运后禁止随意调节消弧线圈档位

经消弧线圈接地的发电机在正常运行中, 容易出现三相电压不平衡现象, 并伴随零序电压出现,

为消除该现象, 部分电厂随意调节消弧线圈分接头, 极易导致消弧线圈工作在错误的补偿方式下, 引起传递电压过高现象<sup>[6-8]</sup>。

3) 定子保护误动后应对补偿方式进行判别

发电机定子接地保护误动后, 在不确定一次设备参数的情况下可利用故障录波数据确定传递电压自由振荡频率, 对消弧线圈的补偿方式进行定性判断, 确保消弧线圈在正确的补偿方式下工作。

### 5.2 定子接地保护逻辑完善

目前, 国内机组保护普遍采用图 4 所示的传递电压闭锁逻辑。当系统发生接地故障并消除后, 因传递电压自由振荡、延时衰减的特性, 闭锁逻辑无

法防止定子接地保护误动，因此定子接地保护在整定时仍然按照电压、延时定值躲过传递电压而整定<sup>[9]</sup>。而实际传递电压幅值较高，根据故障录波数据统计，发电机机端 PT 开口三角绕组测得的传递电压的有效值可达 40V 至 50V，如要将定子接地保护的电压定值与传递电压进行配合，必定缩减了接地保护的 保护范围，牺牲了保护的 动作灵敏性；如将保护动作时间与系统后备保护进行配合，这样又牺牲了保护动作的快速性。

本文建议对系统零序电压闭锁增加延时开放逻辑。如图 6 所示，在系统接地故障切除，系统零序电压消失后，定子接地保护可整定  $t_2$  延时开放，延时  $t_2$  应确保能躲过传递电压衰减过程。采用  $t_2$  延时开放逻辑后，发电机定子接地保护的电压定值整定时可不必考虑传递电压的影响，延时按照正常延时  $t_1$  整定。

当发电机定子接地时，保护可以按照短延时  $t_1$  快速而灵敏地切除故障；当系统接地，在故障切除后，定子接地保护将经  $t_2$  延时开放，以躲过传递电压延时衰减特性的影响。采取该措施以后效果良好，有效防止了传递电压的影响。

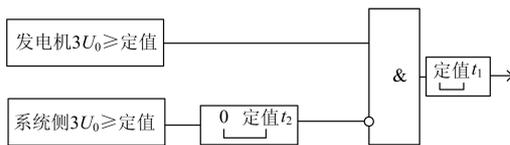


图 6 定子接地保护逻辑

Fig. 6 Logic of stator earth fault protection

## 6 结论

经消弧线圈接地单元接线的机组发生定子接地保护误动时，应首先利用录波数据对机组补偿方式进行定性判别，确保机组在欠补偿方式下运行。因为经消弧线圈接地机组的传递电压具有混频特性，在系统故障切除后传递电压呈现自由振荡状态，幅值衰减过程较长，目前保护装置普遍采用的系统零序电压闭锁判据未能有效防止基波零序电压定子接地保护的误动，在机组保护整定计算中应引起注意。

### 参考文献

[1] 王昕, 刘世富, 王庆玉, 等. 电压互感器二次短路引起发电机定子接地保护动作分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(6): 130-133.  
WANG Xin, LIU Shifu, WANG Qingyu, et al. Analysis on stator ground fault protection trip caused by ground fault in voltage transformer circuit[J]. Automation of

Electric Power Systems, 2013, 37(6): 130-133.  
[2] 苏治, 韩广瑞, 潘向华, 等. 接地故障电流入侵差动保护导致其误动作的实例分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 135-139.  
SU Zhi, HAN Guangrui, PAN Xianghua, et al. Analysis of differential protection malfunction caused by earth current invasion[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 135-139.  
[3] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2002.  
[4] 催家佩, 孟庆炎, 陈永芳, 等. 电力系统继电保护与安全自动装置整定计算[M]. 北京: 中国电力出版社, 1993.  
[5] 水力电力部西北电力设计院. 电气工程电气设计手册(电气一次部分)[M]. 北京: 中国电力出版社, 1989.  
[6] 贾晨曦, 杨龙月, 杜贵府. 全电流补偿消弧线圈关键技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 145-154.  
JIA Chenxi, YANG Longyue, DU Guifu. Review of key technologies on full current compensation arc suppression coil[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 145-154.  
[7] 王玘, 何正友, 张姝. 基于零序电荷-零序电压关系的谐振接地系统单相接地故障特征分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 18-24.  
WANG Qi, HE Zhengyou, ZHANG Shu. Characteristics analysis of single-phase ground fault in resonant grounding system based on zero-sequence charge-voltage relationship[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(11): 18-24.  
[8] 李涛, 苗晓鹏, 李晓波. 基于恒定零序电压幅值的消弧线圈调谐新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(9): 86-90.  
LI Tao, MIAO Xiaopeng, LI Xiaobo. A new tuning method of arc suppression coil based on the constant zero-sequence voltage amplitude[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(9): 86-90.  
[9] 电力行业继电保护标准化技术委员. DL/T 684-2012 大型发电机变压器继电保护整定计算导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2012.

收稿日期: 2015-06-05

作者简介:

王昕(1977-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 高工, 研究方向为继电保护; E-mail: 13864116877@139.com

李乃永(1980-), 男, 博士研究生, 高工, 研究方向为继电保护、新能源;

张国辉(1977-), 男, 硕士研究生, 高工, 研究方向为继电保护。

(编辑 张爱琴)