

# 基于 PCS-985B 的发电机定子接地保护应用及整定

张伟伟, 徐静, 张婷昉  
(华能南通电厂, 江苏南通 226003)

**摘要:**结合发变组保护改造工程,介绍了基于 PCS-985B 装置的 100%定子接地保护的配置方案和整定计算等应用,结合实测数据论证了整定的合理性,并对 PCS-985B 装置零序电压接口与现场设备不完全匹配的问题进行了讨论,提出了解决方法。

**关键词:**定子接地;整定计算;零序电压;三次谐波电压

**中图分类号:**TM307

**文献标志码:**B

**文章编号:**1009-0665(2014)01-0035-03

定子接地故障是常见的发电机故障。发电机定子接地后,接地电流经故障点、三相对地电容、三相定子绕组而构成通路。当接地电流较大时,能在故障点引起电弧,造成定子绕组和铁心烧伤,甚至扩大为相间或匝间短路,导致发电机严重损坏<sup>[1]</sup>。近年来,就曾发生过由于发电机定子接地故障时,定子接地保护拒动或动作时间过长而导致主设备严重损坏的事故。而与此同时,定子接地保护误动导致机组非停的事件也时有发生<sup>[2]</sup>。因此,工程上研究如何更加优化配置和整定定子接地保护,对确保发电机组安全稳定运行具有重要意义。结合 350 MW 机组发变组保护改造,从工程应用的角度阐述了由基波零序电压保护和三次谐波保护构成的 100%定子接地保护的配置方案、整定计算等应用。

## 1 定子接地保护配置方案及二次接线

### 1.1 100%定子接地保护配置方案

350 MW 机组发变组保护改造工程采用基波零序电压和三次谐波电压保护相结合,共同构成 100%定子接地保护的配置方案。PCS-985B 装置对零序电压的三次谐波滤除比达 100%,基波零序电压保护范围达到定子绕组的 85%~95%,在中性点附近存在死区;三次谐波电压保护在中性点附近有较高灵敏度,与基波零序电压保护相互配合,构成 100%定子接地保护<sup>[3]</sup>。

### 1.2 保护二次接线

定子接地保护的二次接线主要采集以下电气量:(1)发电机中性点零序电压,作为基波零序电压保护的主判据,取自中性点接地变压器二次侧;(2)机端零序电压,作为基波零序电压保护的辅助判据,取机端 PT(电压互感器)开口三角或自产零序电压;(3)主变高压侧零序电压,作为基波零序电压保护的闭锁判据,取自主变高压侧 PT 开口三角绕组;(4)机端及

中性点三次谐波电压,作为三次谐波保护判据。

### 1.3 零序电压接口不匹配问题解决方案

该发电机中性点接地变压器变比为 14 400:240,当机端发生定子接地时,中性点零序电压二次值最大可达 221 V,与 PCS985B 装置电压互感器(TV)电压采样插件的额定电压 100 V 不太匹配。针对该问题,有以下 2 种方案。

(1)更改发电机中性点接地变压器变比。若将变比改大从而降低二次电压,可解决电压不匹配问题,但将导致中性点接地电阻一次值放大,可能无法满足发电机抑制过电压的技术要求<sup>[3]</sup>。若二次侧电阻同时改变,从而保持一次值和功率不变,则理论上能满足抑制过电压的要求,但实施起来较为复杂,且实际上改变了一次系统参数。

(2)在中性点接地变压器二次侧接地电阻上加装抽头。该方法在不改变一次系统参数的情况下,通过电阻分压调整输入到装置的二次电压,电阻特性的改变可能影响分压比。

该发电机中性点接地电阻为多片叠加式陶瓷体线性电阻,阻值特性非常稳定,且增加中间抽头也很方便,因此采用第 2 种方案。更改后,输入到保护装置的电压为接地变压器二次侧电压的一半,即发电机中性点一、二次电压变比为 14 400:120。

## 2 基波零序电压定子接地保护整定

### 2.1 定子接地电流计算

由于发电机侧为中性点经高阻接地系统,当发生定子接地故障时,流过故障点的电流为通过发电机及连接设备对地电容构成回路的电容电流  $I_C$ ,以及与中性点接地电阻构成回路的电阻电流  $I_R$  之和,等效电路如图 1 所示。图中: $R_n$  为中性点接地变压器二次侧电阻的一次值; $C_{g\Sigma}$  为机端每相对地总电容,包括发电机绕组、机端外接电容器、主变低压侧以及单元变高压侧对地电容等; $R_g$  为接地过渡电阻; $U_{od}$  为故障点电压,由式

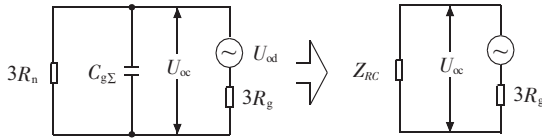


图1 定子绕组单相接地等效

(1) 计算:

$$U_{od} = \alpha U_{ph} \quad (1)$$

式中:  $U_{ph}$  为发电机相电压;  $\alpha$  为中性点至故障点匝数所占每相绕组总匝数的百分比。接地故障电流  $I_0$  为:

$$3I_0 = 3\alpha U_{ph} / \sqrt{(R_{RC} + 3R_g)^2 + X_{RC}^2} \quad (2)$$

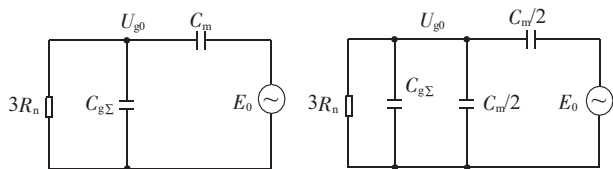
式中:  $R_{RC}$  为  $Z_{RC} = 3R_{Rn} // (-jX_{Cg\Sigma})$  的实部,  $X_{RC}$  为  $Z_{RC}$  的虚部。

根据 DL/T 684—2012<sup>[4]</sup>, 300 MW 以上机组定子绕组单相接地故障电流允许值为 1 A。可算得当定子绕组金属性接地 ( $R_g=0$ ) 故障且  $3I_0 \leq 1$  A 时,  $\alpha \leq 0.174$ , 即当定子绕组距中性点 17.4% 处发生金属性接地时, 故障电流将超过安全电流, 因此必须配备定子接地保护, 以较短延时动作于跳闸停机。

## 2.2 基波零序过电压保护整定计算

基波零序过电压保护设灵敏段和高定值段。灵敏段取中性点零序电压作为主判据, 同时受机端零序电压及主变高压侧零序电压闭锁, 动作值  $U_{op, sen}$  按躲过正常运行时最大不平衡基波零序电压  $U_{unb, max}$  整定。实测机组正常运行时  $U_{unb, max}$  的值非常小 (0.2 V), 考虑到保护的可靠性, 根据文献[4], 灵敏段定值一般按 5%~10%  $U_{0n}$  整定,  $U_{0n}$  为机端金属性接地时中性点或机端的零序电压二次值。该工程  $U_{0n}$  为 110.7 V, 整定灵敏段定值为 7.5 V (对应一次值为 900 V)。

为防止区外故障时定子接地保护误动, 必须校验系统高压侧接地短路时, 通过升压变压器高低压侧绕组间耦合电容  $C_m$  传递到发电机的零序电压  $U_{g0}$  大小。传递电压计算用近似简化电路如图 2 所示。



(a) 主变高压侧中性点不接地时 (b) 主变高压侧中性点接地时

图2 计算传递电压的近似简化电路

图中:  $E_0$  为系统侧接地短路时产生的基波零序电动势, 一般可取<sup>[4]</sup>:

$$E_0 \approx 0.6U_{ln} / \sqrt{3} \quad (3)$$

$C_m$  的大小由变压器制造厂提供, 若未提供, 可用以下公式近似计算<sup>[4]</sup>:

$$C_m = K_{M0} \times \sqrt{S_n} \times 10^{-4} \quad (4)$$

式中:  $S_n$  为变压器额定容量;  $K_{M0}$  与额定电压有关。当主变高压侧中性点不接地时, 传递到机端的零序电压  $U_{g0}$  最大为:

$$U_{g0} = E_0 \frac{3R_n // (-jX_{Cg\Sigma})}{3R_n // (-jX_{Cg\Sigma}) + (-jX_{cm})} \quad (5)$$

求得  $U_{g0}$  二次幅值为 13.5 V > 7.5 V, 即  $U_{g0}$  可能引起基波零序过电压保护误动作。同理可计算当主变高压侧中性点接地时,  $U_{g0}$  最大为 6.7 V < 7.5 V, 不会引起误动作。

定值上无法躲过主变高压侧接地故障时, 高低压侧绕组耦合电容传递到发电机的零序电压, 若要求基波零序过电压保护以较短延时动作, 必须采取防止误动的措施。该工程采用主变高压侧零序电压闭锁措施, 即当主变高压侧零序电压大于定值时, 闭锁基波零序过电压灵敏段。闭锁电压定值  $U_{0, Lock}$  整定如下。

由图 2 等效电路, 计算出当高压侧故障, 耦合到机端的零序电压为  $U_{op, sen}$  时, 对应的高压侧零序电压  $U_{0, H}$ , 再根据高压侧 TV 变比求出零序电压二次值  $U_{0, Hs}$ 。整定为:

$$U_{0, Lock} = K_{rel} \times U_{0, Hs} \quad (6)$$

式中:  $K_{rel}$  为可靠系数。当主变高压侧中性点不接地或直接接地方式时,  $U_{Hs}$  分别为 93 V, 193 V, 取两者最小值, 考虑可靠系数 0.7, 最后整定高压侧零序电压闭锁定值为 60 V。

PCS-985B 基波零序电压定子接地保护灵敏段动作于跳闸时, 还需经机端零序电压闭锁, 闭锁定值不需整定, 保护装置根据系统参数中机端、中性点 TV 的变比自动转换。零序电压高定值段只取中性点零序电压作为判据, 定值上躲过主变高压侧接地故障时传递到机端的零序电压最大值可整定为 15%~25%  $U_{0n}$ , 该工程对应为 17~27 V, 最终整定为 25 V。

发电机定子接地保护是主保护, 由于基波零序过电压保护灵敏段采取了高压侧零序电压闭锁措施来防止传递过电压误动, 故在时间上可整定较短延时。根据文献[4], 动作延时一般取 0.3~1 s。该工程灵敏段和高定值段动作延时都整定为 0.5 s, 动作于停机。

## 2.3 保护范围及灵敏度校验

灵敏段最大保护范围为:

$$\alpha_{min, sen} = U_{op, sen} / U_{0n} \quad (7)$$

该工程  $\alpha_{min, sen}$  为 0.068, 即接触电阻为零时, 灵敏段最大可保护机端往中性点方向 93.2% 定子绕组的接地故障。同理, 可算得高定值段最大保护范围  $\alpha_{min, hi}$  为 0.226。设保护动作可靠系数为:

$$K_{rel} = U_{oc} / U_{op} \quad (8)$$

式中:  $U_{oc}$  为故障时机组施加给保护的测量零序电压;

$U_{op}$  为基波零序电压保护的動作整定值。由等效图及式(2)可得:

$$U_{oc} = I_0 Z_{RC} = \frac{\alpha U_{ph} Z_{RC}}{3R_g + Z_{RC}} \quad (9)$$

其幅值为:

$$U_{oc.M} = \frac{\alpha U_{ph} Z_{RC.M}}{\sqrt{(3R_g + R_{RC})^2 + X_{RC}^2}} = K_{rel} U_{op} \quad (10)$$

则接地过渡电阻为:

$$R_g = [\sqrt{(\alpha U_{ph} Z_{RC.M} / K_{rel} U_{op})^2 - X_{RC}^2} - R_{RC}] / 3 \quad (11)$$

式中: $Z_{RC.M}$  为  $Z_{RC}$  幅值。若  $K_{rel}$  取 1.1, 当  $\alpha$  为 0.174, 即接地电流为最大安全电流时, 由式(11)可算出灵敏段動作最大过渡电阻(即灵敏段最小灵敏度<sup>[5]</sup>)  $R_{gsen.min}$  为 3.6 k $\Omega$ 。同理, 当发电机机端接地故障( $\alpha$  为 1)时, 灵敏段動作最大过渡电阻(即灵敏段最大灵敏度)  $R_{gsen.max}$  为 29.4 k $\Omega$ ; 高定值段最大灵敏度  $R_{ghi.max}$  为 7.6 k $\Omega$ 。可见, 该工程整定后的基波零序电压定子接地保护最大保护范围超过 93% 定子绕组, 且当发电机发生超过安全电流的接地故障时, 有较高灵敏度。

### 3 三次谐波电压定子接地保护整定

#### 3.1 保护原理及判据

如果把发电机对地电容等效地看作集中在发电机的中性点和机端, 且每相的电容大小都是  $C_g/2$ , 并将发电机机端引出线、升压变压器、厂用变压器以及电压互感器等设备的每相对地电容  $C_w$  也等效在机端, 并设三次谐波电动势为  $E_3$ , 其等效电路如图 3 所示<sup>[6]</sup>。

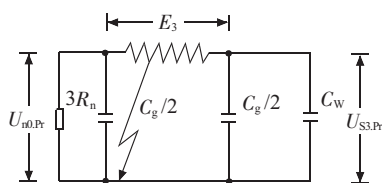


图 3 发电机三次谐波电压分布等效电路

发电机正常运行时, 机端中性点三次谐波电压(二次值)比为:

$$\left| \frac{U_{S3}}{U_{n3}} \right| = \left| \frac{3U_{S3.Pr} \cdot \frac{n_n}{n_s}}{U_{n3.Pr} \cdot \frac{n_n}{n_s}} \right| = \frac{3 \times [(1/3R_n)^2 + (3\omega \times C_g/2)^2]^{1/2}}{3\omega(C_g/2 + C_w)} \cdot \frac{n_n}{n_s} \quad (12)$$

当在距发电机中性点  $a$  处接地故障时, 该比为:

$$\left| \frac{U_{S3}}{U_{n3}} \right| = 3 \times \frac{(1-\alpha)E_3}{\alpha E_3} \cdot \frac{n_n}{n_s} = \frac{3(1-\alpha)}{\alpha} \cdot \frac{n_n}{n_s} \quad (13)$$

式中: $U_{S3.Pr}$ ,  $U_{S3}$  分别为机端三次谐波电压一、二次值;  $U_{n3.Pr}$ ,  $U_{n3}$  分别为中性点三次谐波电压一、二次值;  $n_s$ ,  $n_n$  分别为机端和中性点 TV 变比;  $R_n$  为中性点接地电

阻。正常运行时, 机端中性点三次谐波电压比与发电机两侧 TV 变比、中性点接地电阻、发电机及机端连接设备对地电容有关, 是一个相对恒定的值; 当中性点附近绕组发生金属性接地故障时, 该比值将只与接地点位置有关, 故障点越靠近中性点, 比值越大。三次谐波保护就是利用故障前后机端中性点三次谐波的这种变化规律构成的 100% 定子接地保护。

PCS-985B 装置提供了 2 种方案的三次谐波定子接地保护, 原理如下:

$$\left| \frac{U_{S3}}{U_{n3}} \right| > K_{3wzd} \quad (14)$$

$$\left| \dot{U}_{n3} - \dot{k}_t \times \dot{U}_{S3} \right| > K_{re} \times U_{n3} \quad (15)$$

式(14)为三次谐波比率判据,  $K_{3wzd}$  为三次谐波电压比整定值。式(15)为三次谐波电压差动判据,  $\dot{k}_t$  为自动跟踪调整系数向量, 正常运行时由软件计算得到, 修正后的机端中性点三次谐波电压相等, 方程的左侧即动作量接近 0, 从而在接地故障时获得最大的相对变化量;  $K_{re}$  为三次谐波制动系数定值, 其取值只取决于计算误差, 可以很小, 从而大大提高灵敏度。

#### 3.2 保护整定

将参数代入式(12)可算得正常运行时发电机端中性点三次谐波电压比为 0.615。开机时实测三次谐波电压比并网前最大为 0.608, 并网后最大为 0.599, 与计算值基本相符。由于发电机出口无断路器, 并网前后三次谐波电压比变化不大。

三次谐波比率判据的定值  $K_{3wzd}$  按正常运行时机端中性点最大三次谐波比整定, 考虑可靠系数 1.2~2.0, 最后整定并网前后  $K_{3wzd}$  都为 1.0。三次谐波电压差动判据的  $K_{re}$  值按厂家推荐取经验值 0.3。根据文献[4], 三次谐波电压定子接地保护一般延时动作于信号, 该工程整定延时 3 s, 出口动作于信号。

由式(13),  $K_{3wzd}$  为 1.0 时, 三次谐波比率定子接地保护的最大保护范围为 0.61, 即中性点往机端方向 61% 的绕组, 能满足可靠保护中性点附近 25% 绕组的要求。三次谐波差动定子接地保护理论上可实现全绕组接地保护, 保护范围达 100%, 且灵敏度更高。

### 4 结束语

定子接地保护是发电机的重要保护之一, 工程上合理配置和整定定子接地保护, 对确保发电机组安全稳定运行有非常重要的意义。从工作实际出发, 详细阐述了基于南瑞继保 PCS-985B 装置的 100% 定子接地保护的配置、整定和实现。通过理论计算、实测数据以及现场经验相结合的方法, 重点阐明了定子接地保护

要标志,灵活的产品在线升级功能不仅为用户提供极大的方便,而且减少了现场维护时间和维护费用。文中结合智能电网保护测试装置的特点,提出了基于网络与内部总线的程序在线升级解决方案,不增加任何硬件成本,仅通过软件架构即可实现该功能,具有一定的通用性和一定的推广使用价值。该程序在线升级方案已在智能电网保护测试装置上实现,结果证明,该方法简单可靠,使用方便、快捷。

#### 参考文献:

- [1] 王治国,李兴建,王言国. 基于统一建模的继电保护测试装置开发研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(19):180-181.
- [2] 孟志强,朱良焱,石瑜. 基于 IAP 和 USB 技术的嵌入式程序升级方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2009,36(6):41-42.
- [3] 李忠安,沈全荣,王言国,等. 电力系统智能装置自动化测试系统的设计[J]. 电力系统自动化,2009,33(8):77-80.
- [4] 胡红兵,李丽君,韩民畴. 继电保护装置自动化测试系统的设

计与实现[J]. 江苏电机工程,2013,32(2):54-56.

- [5] Philips Semiconductors LPC2119/2129/2194/2292/2294US-ER-MANUAL [C/OL]. [2004].<http://www.semiconductors.philips.com>.

#### 作者简介:

- 王治国(1978),男,河南周口人,工程师,从事电力系统继电保护及自动化测试工作;
- 于哲(1979),男,山西运城人,工程师,从事电力系统继电保护及自动化测试工作;
- 王言国(1977),男,江苏徐州人,系统分析师,从事软件工程师工作;
- 周强(1979),男,湖北武穴人,工程师,从事电力系统控制保护平台软件开发工作;
- 李兴建(1977),男,山东潍坊人,高级工程师,从事电力系统继电保护仿真测试工作;
- 沈全荣(1965)男,江苏吴江人,研究员级高级工程师,从事电力系统继电保护研究、开发和管理工作的。

## Research on Online Upgrade Technology of Smart Relay Tester Program

WANG Zhiguo, YU Zhe, WANG Yanguo, ZHOU Qiang, LI Xingjian, SHEN Quanrong  
(Nanjing NARI-Relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** A brief analysis of the characteristics of Smart Protection Tester is presented. Based on the analysis, a general online upgrade solution for protection device smart card program is proposed and designing details of the program is described. The scheme adopts the mechanism of that the upgrade program and application program are completely separated. Through internal data bus and device network, online upgrading is realized. The proposed method is easy to be implemented, and has been applied into practical engineering projects.

**Key words:** intelligent protection; testing device; data bus; online upgrade

(上接第 37 页)

整定中的保护范围、灵敏度、可靠性等问题,为工程应用提供参考和借鉴。

#### 参考文献:

- [1] 梁少华,申建彬,张杰,等. 发电机注入式定子接地保护方案改造及现场应用[J]. 江苏电机工程,2013,32(1):34-36.
- [2] 张保会,尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京:中国电力出版社,2005:219-224.
- [3] 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,1996:131-133,134-137.
- [4] 电力行业继电保护标准化技术委员会. DL/T 684-2012 大型发

电机变压器继电保护整定计算导则[S].

- [5] 张长彦,原爱芳,杨兆阳,等. 发电机定子绕组接地保护整定原则[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(17):65-70.
- [6] 焦斌,周平. 大型发电机三次谐波定子接地保护的探讨[J]. 电力建设,2010,31(2):101-105.

#### 作者简介:

- 张伟伟(1983),男,江苏南通人,工程师,从事电气检修工作;
- 徐静(1985),女,江苏南通人,助理工程师,从事电气检修工作;
- 张婷昉(1985),女,江苏无锡人,助理工程师,从事电气检修工作。

## Application and Setting of Stator Ground Fault Protection Based on PCS-985B

ZHANG Weiwei, XU Jing, ZHANG Tingfang  
(Huaneng Nantong Power Plant, Nantong 226003, China)

**Abstract:** The configuration program and setting calculation of the 100% stator ground fault protection based on the NARI PCS-985B equipment are introduced by taking the reform project of generator-transformer-unit protection as an example, and the field testing data validates the correctness of setting calculation. Besides this, the problem of mismatching between the zero-sequence voltage interface of PCS-985B equipment and field device is discussed, and reasonable solution to the problem is provided.

**Key words:** stator ground fault; setting calculation; zero-sequence voltage; three harmonic voltage