

大型汽轮发电机定子单相接地的继电保护评述

党晓强, 邵能灵, 王海田, 黄彬

(上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 介绍了大型汽轮发电机定子单相接地3种保护技术的基本原理和适用范围, 着重分析了造成双频式保护误动的各种具体情况, 并提出部分针对性的防范措施。同时简单评述了汽轮发电机定子单相接地保护的选择性问题。最后对大型汽轮发电机定子单相接地保护技术的前景做了展望。

关键词: 大型汽轮发电机; 定子单相接地; 继电保护误动

A review on single phase to ground protection for huge turbine-generators

DANG Xiao-qiang, TAI Neng-ling, WANG Hai-tian, HUANG Bin

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The principle theory of protection for huge turbine-generators' single-phase ground and their application scope are briefly reviewed. The analysis mainly focuses on two-frequency ground protection's malfunction. Some corresponding countermeasures are proposed. Selective scheme for turbine-generators' single-phase ground are discussed, and the new development trend for the single-phase ground is predicted lastly.

Key words: huge turbine-generator; stator ground fault; relay protection's malfunction

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)02-0131-05

0 引言

大型汽轮发电机在电力系统中地位重要, 其定子结构和制造工艺复杂、铁芯检修困难, 被要求装设灵敏性和可靠性较高的100%的定子接地保护。定子单相接地是汽轮发电机最常见的故障, 绕组线棒与铁芯间的绝缘被破坏形成单相接地, 接地电流经故障点、对地电容、定子绕组构成通路。由于大型汽轮发电机采用中性点不接地、或中性点经消弧线圈或配电变压器接地方式, 定子单相接地稳态并不产生大的故障电流, 相应接地保护通常只发信号而不跳闸, 但单机容量的增大使三相定子绕组对地电容增加, 对应的单相接地电流也增大, 容易使定子绕组的绝缘和定子铁芯烧坏, 也容易发展成危害更大的定子绕组相间或匝间短路。

针对大型汽轮发电机定子单相接地通常装设双频式100%保护, 该保护是对基波零序电压保护和三次谐波电压型保护的统称。实践证明双频式定子接地保护配置在可靠性和灵敏性方面并非尽如人

意, 有代表性的如出现过多次的双水内冷发电机由漏水引发进而绝缘降低扩大接地故障的事例^[1-3]。本文具体结合双频式100%保护的误动进行分析, 从源头上阐述造成保护误动的原因, 并提出一些防范措施。同时对外加电源方式的定子接地保护和定子单相接地保护的选择性问题做了简单评述, 最后展望了大型汽轮发电机定子单相接地保护技术的发展前景。

1 基波零序电压保护

1.1 基波零序电压保护原理

大容量机组常按发电机—变压器组单元接线与电网相连, 发电机与系统中其他元件没有电联系, 接地电容电流较小, 所以通过检测机端或中性点处零序电压来判断接地故障, 基于零序电压进行保护。

设A相接地发生在定子绕组距中性点 α 处, α 表示由中性点到故障点的绕组占全部绕组匝数的百分数, 如图1。则机端各相对地电压 \dot{U}_{dA} 、 \dot{U}_{dB} 、 \dot{U}_{dC} :

$$\dot{U}_{dA} = (1-\alpha)\dot{E}_A \quad (1)$$

$$\dot{U}_{dB} = \dot{E}_B - \alpha\dot{E}_A \quad (2)$$

基金项目: 上海市教委曙光计划资助项目(07SG11); 新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET20820356)

$$\dot{E}_{dc} = \dot{E}_c - \alpha \dot{E}_A \quad (3)$$

因此故障点的零序电压为：

$$\dot{U}_{d0(\alpha)} = \frac{1}{3}(\dot{U}_{dA} + \dot{U}_{dB} + \dot{U}_{dC}) = -\alpha \dot{E}_A \quad (4)$$

上式表明，金属性接地故障点的零序电压将随故障点位置的不同而改变，接地点距离中性点越远保护越灵敏。如果经过渡电阻 R_f 单相接地，则 R_f 越大，保护死区越大。当中性点接地方式不同时，零序电压保护在定子绕组不同故障点所容许的过渡电阻不同，即单相接地的灵敏度不同，也会从而影响到保护范围。

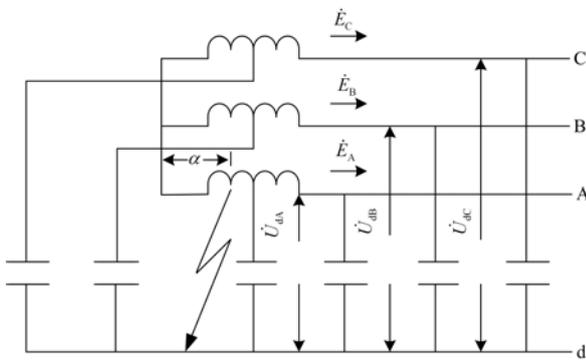


图1 定子单相接地电路图

Fig.1 Circuit of stator's single phase ground

1.2 不平衡电压的影响

发电机正常运行时，零序电压互感器的测量会存在一定的不平衡电压，从而造成一定的保护死区。其来源主要有3点：1) 发电机定子绕组感生的三次谐波电势，通常需要采取在继电器内前置三次谐波滤波环节，使其主要输出基波零序电压；2) 由于发电机三相绕组对地电容不完全对称，中性点会存在一定的位移电压；3) 电压互感器饱和引起的测量误差和机端三相PT各相间的变比误差，主要是PT一次绕组对开口三角绕组之间的变比误差。因此零序保护的動作电压 $U_{d0(\alpha)}$ 应按躲过正常运行时中性点单相电压互感器或机端三相电压互感器开口三角绕组的最大不平衡电压整定。大型汽轮发电机基波零序过电压保护在整定时最小整定为5V，動作死区为中性点侧5%，動作区为95%。

1.3 区外接地故障的影响

大型汽轮发电机的主变高压侧系统和其高压厂用变低压系统发生单相接地故障都有引起保护误动的先例，需要考虑这些因素对保护的影响。1) 大型发变组在高压变高、低压绕组之间存在耦合电容，当高压侧发生单相接地短路时，高压侧的零序电动

势可以通过该耦合电容传递到发电机侧，如果此值较高则有可能造成发电机零序保护误动。解决的措施有在保护中引入高压侧零序电压作为制动量，在变压器高压侧接地时将保护闭锁，如果能够在保护延时方面采取措施躲过，也可以不设该闭锁，或牺牲部分灵敏度，提高動作电压。2) 对于高压厂用变压器低压侧6kV系统发生的单相接地，也会通过高压变较大的耦合电容传递过电压，由于故障产生的零序电压较低，传递电压也比较低，可以通过调整电压定值来保障躲过传递电压值或增加相关外部制动电压量。由于厂用6kV系统接地故障引起的传递过电压值理论计算复杂，误差较大，所以对定值的校核可采用模拟试验的方法来进行。

2 三次谐波电压保护

2.1 三次谐波电压保护原理

三次谐波电压定子接地保护原理是基于发电机正常运行时定子感生的电动势中含有2%~10%的三次谐波电势 E_3 ，而单相接地故障前后发电机中性点与机端处三次谐波电压变化特点不同构成的，其保护动作区为中性点侧20%~50%，正可以消除基波零序电压保护的死区。正常运行时中性点三次谐波电压 $|\dot{U}_{N3}|$ 比机端三次谐波电压 $|\dot{U}_{S3}|$ 大，而靠近中性点附近定子接地时则 $|\dot{U}_{N3}|$ 比 $|\dot{U}_{S3}|$ 小。假定将定子每相对地电容等效集中在发电机的机端 S 和中性点 N ，分别为 $\frac{1}{2}C_{0F}$ ，将机端断路器引出线、变压器和电压互感器等外接元件对地电容 C_{0W} 也等效置于机端，当接地发生在 α 处，其三次谐波电动势及对地电容等值电路如图2所示。

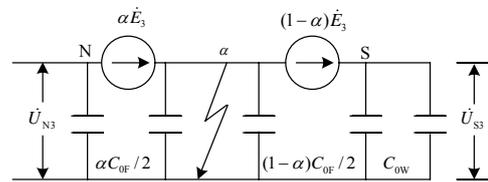


图2 单相接地时三次谐波电动势分布的等值电路

Fig.2 Equivalent circuit of third harmonic voltage in stator's single phase ground

α 表示由中性点到故障点的绕组占全部绕组匝数的百分数，此时不论发电机中性点是否经消弧线圈接地，均近似有如下关系：

$$\begin{cases} \dot{U}_{N3} = \alpha \dot{E}_3 \\ \dot{U}_{S3} = (1-\alpha) \dot{E}_3 \end{cases} \quad (5)$$

可以看出当 $\alpha \leq 50\%$ 时, $|\dot{U}_{S3}| \geq |\dot{U}_{N3}|$, 且越接近中性点, 灵敏度越高。三次谐波电压单相接地保护通常有两种判据, 一种是 $|\dot{U}_{S3}| > \beta |\dot{U}_{N3}|$, 另一

种是 $|\dot{K}_p \dot{U}_{N3} - \dot{U}_{S3}| > K_b |\dot{U}_{N3}|$, 其中 β 、 \dot{K}_p 和 K_b 为调整系数。前一种判据在中性点经配电变压器接地的方式下容易误动, 在经过渡电阻 R_f 单相接地的情况下, 灵敏度不高, 很少采用。后一种形式的判据在实质上减小了保护的制动量, 因此具有较高的灵敏度, 故在国内被广泛采用。

2.2 保护难以调试对误动作的影响

三次谐波电压保护与机组的运行工况有关, 且随着定子绕组对地电容的增大, 灵敏度下降。保护难以调试的问题出在保护的原理上, 很难给出通用方法去克服, 通常的解决方法都是结合具体事例进行分析的。在 $|\dot{K}_p \dot{U}_{N3} - \dot{U}_{S3}| > K_b |\dot{U}_{N3}|$ 形式的保护判据中, 调整系数不易调节, 体现在3方面。1) 由于理论上在正常运行条件下, 应该使得 $\dot{K}_p \dot{U}_{N3} - \dot{U}_{S3}$ 的数值很小, 近似等于零, 要求 \dot{K}_p 的调整准确迅速。而在一定的采样时间内, 存在三次谐波电压幅值和相位暂态微小突变的可能, 自动跟踪调整系数向量 \dot{K}_p 由此可能出现不稳定异常, 使得保护性能受到影响。2) 由于机端断路器引出线侧对地电容的存在, 使得汽轮发电机在并网前后机端三次谐波变化很大, 这将使得 $\dot{K}_p \dot{U}_{N3} - \dot{U}_{S3}$ 可能出现较大不平衡动作量, 为此而增大 K_b 的数值又将影响保护动作的灵敏度。3) 随着发电机运行方式的改变, \dot{U}_{S3} 和 \dot{U}_{N3} 的大小和相位差也会发生相应一定的变化, 由于其变化规律复杂, 至今仍有待研究, 也会给保护的制动带来隐患。而且据了解, 少量超临界汽轮发电机气隙磁场正弦度较好, 定子绕组本体三次谐波电压极小, 如河北某电厂600 MW火电机组, 正常运行时其机端电压互感器开口三角的三次谐波电压甚至小于0.05 V, 使得三次谐波电压定子接地保护将难于开展。

2.3 主变高压侧三次谐波电动势 \dot{E}_{3H} 的影响

文献[1]和文献[10]指出并阐述了前述 \dot{U}_{S3} 和 \dot{U}_{N3} 的变化与主变压器高压侧三次谐波电动势 \dot{E}_{3H} 有关, 这里考虑 \dot{E}_{3H} 的影响, 在一定简化的条件下

基于上述文献内容做如下分析。

主变压器铁心磁路的饱和使得各相电动势中存在三次谐波 \dot{E}_{3H} , 因为 \dot{E}_{3H} 的大小和相位随变压器铁心饱和程度而改变, 而铁心饱和程度与变压器运行工况有关。因此运行方式的改变将影响 \dot{U}_{S3} 和 \dot{U}_{N3} , 可能造成三次谐波电压式定子接地保护误动或拒动。

变压器高低压绕组之间存在耦合电容, 每相高低压绕组间的电耦合由各相电动势 \dot{E}_{3H} 和首末两端为 $C_M/2$ 的耦合电容表示, 则三次谐波零序等效电路如图3所示。

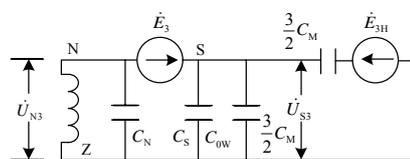


图3 发电机—变压器组三次谐波等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of third harmonic voltage in generator-transformer's normal operation

设 $\dot{E}_{3H} = 0$ 时有 \dot{U}_{SG} 和 \dot{U}_{NG} , $\dot{E}_3 = 0$ 时候有 \dot{U}_{ST} 和 \dot{U}_{nT} , 则实际 \dot{U}_{S3} 和 \dot{U}_{N3} 为:

$$\begin{cases} \dot{U}_{S3} = \dot{U}_{SG} + \dot{U}_{ST} \\ \dot{U}_{N3} = \dot{U}_{NG} - \dot{U}_{nT} \end{cases} \quad (6)$$

设 $\dot{U}_{ST} = \dot{U}_{nT} = \gamma \dot{E}_{3H}$, γ 为复系数, $C_G = C_N + C_S$ 为每相对地电容。在发电机中性点绝缘 $Z = \infty$, 且不计机端外接元件对地电容时, 有 $C_S = C_N = \frac{3}{2} C_G$ 和 $\dot{U}_{SG} = \dot{U}_{NG} = \dot{E}_3/2$ 。这时 \dot{E}_{3H} 经高低压绕组间耦合电容 C_M 传递到发电机的三次谐波零序电压 \dot{U}_{ST} , 由下述参数关系决定:

$$\dot{U}_{ST} = \dot{U}_{nT} = \gamma \dot{E}_{3H} = \frac{C_M/2}{C_G + C_M/2} \dot{E}_{3H} \quad (7)$$

由式(6), 可以看出, \dot{E}_{3H} 对 \dot{U}_{S3} 的影响不同于对 \dot{U}_{N3} 的影响, 由于 \dot{E}_{3H} 的出现, 将有:

$$\dot{U}_{S3} = \frac{\dot{E}_3}{2} + \gamma \dot{E}_{3H} \quad (8)$$

$$\dot{U}_{N3} = \frac{\dot{E}_3}{2} - \gamma \dot{E}_{3H} \quad (9)$$

假设 \dot{E}_{3H} 与 \dot{E}_3 同相位, 则该发电机在正常运行

时, 由于 \dot{E}_{3H} 的影响, 已有 $|\dot{U}_{S3}|/|\dot{U}_{N3}| > 1.0$, 满足保护动作条件, 所以 \dot{E}_{3H} 的影响不容忽视。

从前面分析可以看出 \dot{E}_{3H} 对 \dot{U}_{S3} 和 \dot{U}_{N3} 的影响除与本身有关外, 还与 C_M 和 C_G 相关。所以在量化考虑 \dot{E}_{3H} 对保护的影响时, 要具体分析及测试 \dot{E}_{3H} 、 C_M 和 C_G 的大小, 并按照公式 (6) 估算出 \dot{E}_{3H} 对保护的实际控制影响, 进而再考虑保护的整定。文献 [1] 和文献 [10] 指出对于升压变压器高压侧电压在 220 kV 及以下 (C_M 比较大) 的汽轮发电机组, \dot{E}_{3H} 对 \dot{U}_{S3} 和 \dot{U}_{N3} 的影响决不可忽视。

2.4 电压互感器引起 \dot{U}_{N3} 丢失的影响

在三次谐波保护的误动作中, 有一部分是由发电机中性点电压互感器接触不良导致 \dot{U}_{N3} 丢失引起的误动。从三次谐波动作判据可以看出, \dot{U}_{N3} 主要是起制动的的作用, 如果 \dot{U}_{N3} 丢失, 保护必然误动。为防止丢失 \dot{U}_{N3} 引起保护的误动, 对现有三次谐波电压式保护的改进措施是增加 PT 断线闭锁装置。但保护装置因此复杂起来, 降低了动作可靠性, 也有误闭锁接地保护造成故障未能及时切除而进一步扩大的事例出现。

3 外加电源方式的定子接地保护

大型汽轮发电机采用外加低频电源的 100% 定子单相接地保护近年逐步普及起来, 要求对其装设注入式定子接地保护已成为一种趋势。其优点主要在于动作不受运行方式和起停机影响、灵敏度高, 抗干扰强, 能准确反映绝缘下降。叠加电源频率比较常用的是 12.5 Hz 与 20 Hz 两种信号, 其工作原理根据正常运行时整个三相定子回路对地是绝缘的, 叠加产生的低频电流很小, 而发生单相接地故障时这种对地绝缘就被破坏, 低频电流突然增大, 保护动作。因为信号是外加的, 不受接地位置的限制, 能独立完成 100% 定子接地保护。其存在问题主要是外加电源的可靠性和装置本身的复杂性与经济性, 还有就是中性点接地方式的不同和外加电源内阻的计及会影响保护的灵敏度, 改进的办法有采用电流突变量作为判据和引入电流平衡原理等方法。目前国内汽轮发电机单相接地保护对 20 Hz 产品应用较多, 反映出的保护误动问题比较少。

4 定子单相接地保护的选择性问题

前述讨论的保护措施无法区分接地故障是发生

在大型汽轮发电机机壳内定子绕组上还是机壳外的三相端部系统 (包括与定子绕组连接的主变、断路器、引线和电压互感器一次绕组等), 该问题的解决涉及到在具体范围内对故障进一步准确处理, 所以选择性具备实际意义。目前理论上比较成熟的选择性接地保护包括有基于人为增大零序电流的功率方向保护和基于故障行波的零序功率选择性保护, 其中投入运行的有基于零序电流功率的选择性保护, 但由于人为增大接地故障电流对发电机定子铁芯不利, 使本来轻微的定子接地故障恶化了, 保护出口也由发信号改为故障跳闸, 因而未能获得推广。将发电机定子绕组单相接地时产生的故障行波用于选择性保护有试运行, 其原理简洁清晰, 主要困难在于行波信号难于精确捕捉, 对行波信号进行准确判别的手段乏力, 因此如何提高它的可靠性始终是研制该保护装置要完善的首要问题, 将小波变换模极大值理论与故障行波的极性结合分析将会对上述选择性问题的有所突破。

5 结束语

大型汽轮发电机对定子绕组单相接地保护的灵敏性和可靠性要求很高, 已有的单相接地保护方案欠完善。本文结合双频式 100% 定子接地保护的基本原理, 具体分析了保护误动的内在原因, 提出了解决问题的部分防范措施。文中同时简单评述了外加信号电源方式的定子接地保护和定子单相接地保护的选择性问题。另外保护回路的接线错误也曾造成过不少接地保护的误动, 也是需要注意的地方。

双频式和外加低频电源方式定子单相接地保护与先进的信号处理技术和传感器件结合是提高其可靠性与灵敏度的完善途径。结合信号处理技术利用单相接地产生的故障行波信息进行选择性保护甚至识别故障的发生进行 100% 保护可以拓宽保护范围, 提高保护质量。将状态监测思路与人工智能技术引入到发电机的故障分析和保护中, 有可能拓宽机组安全运行的柔性。相关领域新技术的发展为大型汽轮发电机优质的保护提供了很大的发展空间。

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] 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, 2001.
- [3] 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(6):50-54.
- [4] 王维俭, 桂林. 主设备保护技术发展的回顾与前瞻[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (12): 5-7.
WANG Wei-jian, GUI Lin. Review and Prospect of Technology Development of Protection for Electric Main Equipment[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (12): 5-7.
- [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.
ZHANG Chang-yan, YUAN Ai-fang, YANG Zhao-yang, et al. Setting Value Principle and Method of Stator Earth Fault Protection[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (17): 65-70.
- [6] 刘金涛, 毕大强, 齐军, 等. 由两次区外故障谈定子接地保护定值的校核[J]. 继电器, 2005, 33 (21): 18-20, 64.
LIU Jin-tao, BI Da-qiang, QI Jun, et al. Discussion About Settings Checking of Ground Fault Protection from Two External Ground Faults [J]. Relay, 2005, 33(21): 18 -20, 64.
- [7] 邓祖前. 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): 77-79, 85.
DENG Zu-qian. Analysis and Processing on an Operation of the Stator Ground Protection of a Set of Gas-generator[J]. Relay, 2007, 35 (7): 77-79, 85.
- [8] 张琦雪, 何其伟, 徐峰, 等. 汽轮发电机3次谐波电压随负荷变动的理论分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (21): 61-64.
ZHANG Qi-xue, HE Qi-wei, XU Feng, et al. Theoretical Analysis of the 3rd Harmonic Voltage of Turbo-generator with Load Changes[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (21): 61-64.
- [9] 陈俊, 陈佳胜, 张琦雪, 等. 超超临界机组发电机定子和转子接地保护方案[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (20): 101-103.
CHEN Jun, CHEN Jia-sheng, ZHANG Qi-xue, et al. Generator Stator and Rotor Earth Fault Protection Scheme of Ultra-supercritical Generating Unit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (20): 101-103.
- [10] 王维俭, 鲁华富. 三次谐波电压式定子接地保护的运行和改进 [J]. 中国电力, 1995, 28 (11): 46-49, 53.
WANG Wei-jian, Lü Hua-fu. Development and Operation of Stator Ground Protection Based on the Third-harmonic Voltage Criterion[J]. Electric Power, 1995, 28 (11): 46-49, 53.
- [11] 卢琪, 熊伟, 行生. 提高三次谐波电压式定子接地保护动作可靠性的研究[J]. 陕西电力, 2007, 35(6): 42-44.
LU Qi, XIONG Wei, XING Sheng. Study on Improving Reliability of Stator Ground Protection with Third-Harmonic Voltage Criterion[J]. Shanxi Electric Power, 2007, 35(6): 42-44.
- [12] TAI Neng-ling, Stenze L. Differential Protection Based on Zero-sequence Voltages for Generator Stator Ground Fault[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007, 22(1): 116-121.
- [13] 徐金兵, 楼国才. 发电机100%定子接地保护误动作分析[J]. 中国电力, 2007, 40 (5): 67-70.
XU Jin-bing, LOU Guo-cai. Analysis of Mal-operation for 100% Grounding Protection of Generator Stator[J]. Electric Power, 2007, 40 (5): 67-70.
- [14] 张灿斌. 汽轮发电机三次谐波电压定子接地保护的误动分析[J]. 广东电力, 2004, 17(3): 26-28, 41.
ZHANG Can-bin. Analysis on Misaction of 3 ω Stator Ground Protection for Steam Turbine-generators[J]. Guangdong Electric Power, 2003, 17(3): 26-28, 41.
- [15] 石秀刚. 三种不同原理定子接地保护的应用[J]. 山东电力技术, 2003, (3): 52-54.
SHI Xiou-gang. The Stator Ground Protection Application Study of Three Kinds of Different Principles[J]. Shandong Electric Power, 2003, (3): 52-54.
- [16] 张琦雪, 陈佳胜, 陈俊, 等. 大型发电机注入式定子接地保护判据的改进[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 66-69.
ZHANG Qi-xue, CHEN Jia-sheng, CHEN Jun, et al. Improvement on Criteria of Stator Earth Fault Protection with Voltage Injection for Large-sized Generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (3): 66-69.
- [17] 党晓强. 大型发电机内部故障在线诊断及其行波应用新原理, 博士学位论文[D]. 成都: 四川大学, 2006.
DANG Xiao-qiang. New Principles for Online Large Generator's Internal Faults Identification and Application of the Traveling Waves, Doctoral Dissertation[D]. Chengdu: Sichuan University, 2006.
- [18] 王维俭, 王祥珩, 王赞基. 大型发电机变压器内部故障分析与继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

收稿日期: 2008-01-22; 修回日期: 2009-11-13

作者简介:

党晓强 (1975-), 男, 博士后, 讲师, 从事电力系统继电保护方面的教学和研究工作; E-mail: nike0680@163.com

邵能灵 (1972-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事电力系统继电保护和电力市场方面的教学和研究;

王海田 (1974-), 男, 博士研究生, 从事电机与电器方面的研究工作。