

# 基于空载误强励灭磁对发电机过电压保护整定的研究

吴跨宇<sup>1</sup>, 周平<sup>2</sup>, 高春如<sup>3</sup>, 杨涛<sup>1</sup>

(1. 浙江省电力试验研究院, 浙江 杭州 310014; 2. 浙江浙能嘉兴发电有限公司, 浙江 平湖 314201;  
3. 望亭发电厂, 江苏 苏州 215155)

**摘要:** 为研究发电机过电压保护设定值在空载误强励灭磁过程中对发电机本体和灭磁系统安全性的影响, 分别对采用自并励励磁的 300 MW 和 600 MW 汽轮发电机组在不同发电机过电压保护设定值下进行空载误强励灭磁仿真。对比仿真结果可见, 过电压保护设定值较低时相应的发电机最高定子电压、灭磁电流、灭磁电阻能耗和灭磁时间也较小, 有利于发电机本体和灭磁系统的安全。为论证降低过电压保护定值的可行性, 分析说明了该定值降低后并不影响励磁系统 V/Hz 限制、发电机过激磁保护和发电机正常运行。基于以上结论, 提出了减小发电机过电压保护整定值和增设发电机空载专用过电压保护的建议。

**关键词:** 汽轮发电机; 自并励励磁; 空载误强励; 过电压保护; 过激磁; 灭磁; 整定

## Research on generator over-voltage protection setting based on no-load fault forcing excitation

WU Kua-yu<sup>1</sup>, ZHOU Ping<sup>2</sup>, GAO Chun-ru<sup>3</sup>, YANG Tao<sup>1</sup>

(1. Zhejiang Provincial Electric Power Test and Research Institute, Hangzhou 310014, China;  
2. Zhejiang Zheneng Jiaying Power Generation Co., Ltd, Pinghu 314201, China; 3. Wangting Power Plant, Suzhou 215155, China)

**Abstract:** This paper simulates the de-excitation process of self shunt excitation 300 MW and 600 MW turbine generators on no-load fault forcing excitation condition with different over-voltage protection setting in order to study different setting value's effect on the security of generator and its de-excitation circuit. According to the simulation, generator's maximum stator voltage, de-excitation current, resistor's exhaust energy and de-excitation time would be reduced with smaller setting value. It is beneficial to the security of generator and its de-excitation circuit. After testifying that the smaller over voltage protection setting would not go against the V/Hz limit in AVR, over excitation protection and generator normally operation to demonstrate the feasibility of decreasing setting value, this paper puts forward to decrease the generator over-voltage protection setting values and subjoin an additional over-voltage protection specified for generator no-load condition.

**Key words:** turbine generator; self shunt excitation; no-load fault forcing excitation; over-voltage protection; over excitation; de-excitation; setting

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)02-0098-04

## 0 引言

发电机空载误强励往往是由励磁系统故障引起, 易导致发电机转子过负荷、定子过激磁和过电压<sup>[1]</sup>。对于无发电机出口断路器的发变组单元则会同时导致高厂变、主变的过激磁和过电压。空载误强励发生后, 励磁控制器中各限制往往已失效, 此时主要依靠定子过电压保护快速动作跳灭磁开关灭磁, 防止事故扩大。过电压保护的定值不仅需要考虑发电机、变压器的过电压和过激磁能力。实际动作过程中如果切除时间过长, 导致励磁电流和转子储能过大, 将使灭磁系统的灭磁能力面临严峻考验, 威胁转子绕组的安全。

《导则》<sup>[2]</sup>建议的过电压保护定值汽轮发电机为  $1.3U_{gn}$ , 0.5 s。但采用自并励励磁的发电机如果发生空载误强励, 其机端电压在过电压保护启动后是一个快速上升的动态值, 根据发电机稳态过电压能力整定的定值显然过高。考虑到励磁技术形态的变化和现代继电保护装置日趋成熟, 误动作概率大大降低<sup>[3]</sup>。从保护主设备和灭磁回路安全的角度出发, 降低过电压保护定值的可行性值得探讨。

## 1 发电机空载严重灭磁工况-空载误强励

### 1.1 空载误强励及其危害

励磁系统强励是发电机并网运行时因遭受较大扰动如短路故障而导致发电机电压大幅降低时, 励

磁整流桥全开放输出最大励磁电压的特殊运行方式。发电机强励对保证发电机有功功率送出以提高暂态稳定性和维持系统电压水平以提高电压稳定性有重要作用, 同时也为继电保护装置正确判断并切除故障提供条件。但是由于励磁系统故障或人为误操作引起的误强励, 则会导致严重后果。

自并励励磁系统的整流桥交流电源来自并联于发电机机端的励磁变压器, 如图 1 所示。在发生空载误强励时将出现机端电压-励磁电压-励磁电流-机端电压的正反馈。由于发电机未并网, 机端电压的上升得不到系统电压的牵制, 在正反馈作用下, 励磁电流和机端电压将同时快速上升。随着励磁电流升高, 铁芯磁路进入深度饱和, 等效电抗减小, 加上阻尼绕组去磁效应, 励磁电流将以比机端电压更快的速度上升。

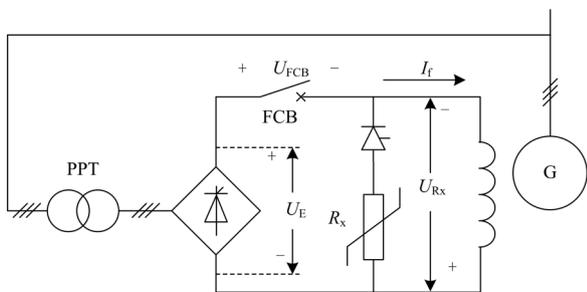


图 1 自并励励磁系统灭磁主回路

Fig.1 De-excitation main circuit of self shunt excitation

在定子侧, 发电机铁芯易出现局部漏磁磁密过高而发热甚至烧损, 同时使发变组单元接线的主变和高厂变过励磁和过磁通。而过电压将对因发热而降级的绝缘带来更严重威胁。

在转子侧, 要保证灭磁瞬间励磁电流  $I_f$  顺利转移进入灭磁电阻  $R_x$  进行灭磁, 图 1 必须满足式(1)。

$$U_{FCB} - U_E \geq U_{R_x} \quad (1)$$

式中:  $U_{FCB}$  为灭磁开关弧压;  $U_E$  为整流桥输出电压;  $U_{R_x}$  为当前转子电流下的非线性灭磁电阻电压。

由于灭磁开关是在误强励时跳闸, 整流桥往往在跳闸瞬间不仅不能通过逆变提供反向电压, 反而输出了正向强励电压  $U_E$ , 大大提高了对灭磁开关的弧压要求。一旦开关弧压不能满足要求, 无法实现转子电流的转移, 长时间在弧压下通流必将导致灭磁开关烧毁, 引起事故扩大。

由于空载误强励发生后转子电流急剧上升, 灭磁开关跳开瞬间, 转子电流已远大于发电机额定励磁电流, 过大的转子电流亦对灭磁开关的断流能力提出严峻挑战<sup>[4]</sup>。同时, 一大部分高转子电流带来的巨大转子磁场能量要在灭磁电阻上快速消耗, 如

果灭磁电阻容量不足亦会引起灭磁失败。

## 1.2 两例误强励事故

(1) 1997 年 9 月, 某发电厂 3 号机组启动升压过程中, 脉冲触发板故障导致整流桥全开放。由于励磁  $V/Hz$  限制失效, 过激磁保护动作时间太长。导致发电机严重过电压, 变压器严重过激磁, 直至变压器空载电流超过  $0.7I_n$ , 由发变组纵差动保护动作后灭磁<sup>[5]</sup>。

(2) 2006 年 1 月, 采用全进口自并励励磁系统的某电厂新投产 600 MW 汽轮发电机组, 在进行 PSS 试验时出现误强励。灭磁开关跳开前最大励磁电流约为 3 倍发电机额定励磁电流。跳开瞬间来自灭磁开关的电弧导致整流桥的交流侧铜排短路, 进而事故扩大, 励磁控制柜和邻近整流柜烧毁, 几乎整套励磁系统报废。

上述事例可见: 空载误强励必将导致发电机电压快速上升, 并且容易引起灭磁失败。因此必须认真分析空载误强励与过电压保护动作的配合。

## 2 空载误强励仿真分析

### 2.1 空载误强励仿真及主要参数

利用 Matlab/Simulink 搭建结构如图 2 所示的汽轮发电机空载误强励灭磁仿真系统<sup>[6]</sup>。

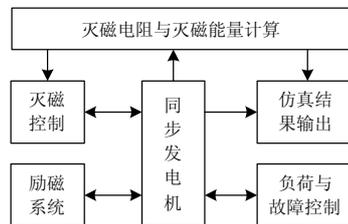


图 2 Matlab/Simulink 灭磁仿真系统示意图

Fig.2 De-excitation simulation system of Matlab/Simulink

仿真采用 ABB 公司 Unitrol5000 励磁配套的 M&I 公司 SiC 非线性灭磁电阻, 600 MW 和 300 MW 汽轮发电机分别采用 5 组和 3 组并联。M&I 公司提供的单组特性公式和典型参数如式(2)所示。

$$U = 35 \times I_f^{0.4} \quad (2)$$

5 组并联后的灭磁电阻阻值计算公式为式(3)。

$$R_{R_x} = 35 \times (I_f / 5)^{0.4} / I_f = 18.3857 \times I_f^{0.4} \quad (3)$$

其中,  $I_f$  为实时灭磁电流有名值。空载误强励发生后的励磁电压则由式(4)决定。

$$U_E = 1.35 \times U_g \times k_{PPT} \times \cos 15^\circ - I_f \times Z_{PPT} \times \frac{3}{\pi} \quad (4)$$

其中:  $U_E$  为励磁整流桥电压;  $U_g$  为发电机机端电压;  $K_{PPT}$  为励磁变变比;  $15^\circ$  为整流桥最小触发角;  $Z_{PPT}$  为励磁变短路阻抗折算值。

### 2.2 空载误强励仿真结果及其分析

采用自并励励磁系统 600 MW 汽轮发电机组空载误强励灭磁仿真波形如图 3 所示。

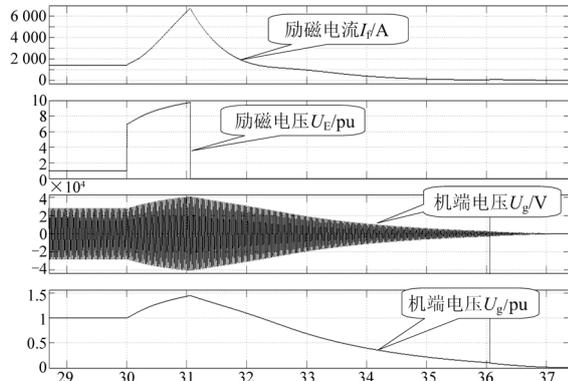


图 3 发电机空载误强励灭磁仿真波形

Fig.3 De-excitation simulation of no-load forcing excitation

图 3 可见，误强励开始时， $U_E$  瞬间因整流桥全开放而达到高限值。 $I_f$  开始快速增长进而引起  $U_g$  快速上升。由于  $U_g$  与  $U_E$  构成正反馈， $U_E$  随着  $U_g$  上升而上升直至过电压保护动作灭磁。开关跳开后，加在转子绕组上的励磁电压瞬间下降为 0，随着灭磁电阻的接入， $I_f$  和  $U_g$  开始下降。同时，由于阻尼绕组作用， $U_g$  下降速度稍慢于  $I_f$ ，直至阻尼绕组电流衰减完， $U_g$  衰减为残压，灭磁完成。灭磁过程中对基于实时  $I_f$  计算得到的灭磁电阻功率进行积分，得到灭磁能量。

不同过电压保护参数设定值下的灭磁仿真结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 600 MW 机组空载误强励灭磁计算结果

Tab.1 De-excitation simulation of 600 MW generator

$U_{gset}$ ( $U_{gn}$ )	DelayT/ s	$I_{fmax}$ / A	$U_{gmax}$ / pu	Energy/ MJ	$U_g$ to $0.2U_{gn}$ / s
1.3	0.5	6 706	1.45	2.33	5.13
1.3	0.3	5 582	1.39	1.87	4.81
1.2	0.5	5 414	1.39	1.81	4.76
1.2	0.3	4 236	1.33	1.37	4.39

表 2 300 MW 机组空载误强励灭磁计算结果

Tab.2 De-excitation simulation of 300 MW generator

$U_{gset}$ ( $U_{gn}$ )	DelayT/ s	$I_{fmax}$ / A	$U_{gmax}$ / pu	Energy/ MJ	$U_g$ to $0.2U_{gn}$ / s
1.3	0.5	5 254	1.43	1.27	3.89
1.3	0.3	4 216	1.40	0.99	3.60
1.2	0.5	4 251	1.40	0.99	3.61
1.2	0.3	3 153	1.34	0.73	3.29

应该注意到，表 1 和表 2 中过电压保护切除故障时实际发电机电压已经大大高于保护的启动值，严重威胁定子绝缘安全。而且表 1、2 中的数据还不考虑保护固有动作时间和灭磁开关分闸时间。而仿真结果显示，过电压保护的启动值降低或延时时间减小，均使得故障切除过程中发电机最高电压、最大灭磁电流和灭磁能量明显减小。因此，如果能适当降低过电压保护定值，则同时降低了对灭磁开关和灭磁电阻等灭磁回路组件的要求，从而有利于主设备的安全和发电机灭磁的安全、可靠进行。

### 3 V/Hz 限制、过激磁保护与过电压保护

#### 3.1 励磁系统 V/Hz 限制与过电压保护

为防止发电机和变压器过激磁，励磁系统均设有 V/Hz 限制<sup>[7]</sup>。以 Unitrol5000 励磁系统为例，V/Hz 限制主要由 V/Hz 比值和电压最大值  $U_{max}$  两个参数决定，均为瞬时动作。根据浙江电网励磁参数情况，V/Hz 限制为考虑与过激磁保护配合，一般设定值在 1.05~1.08 pu 之间，而  $U_{max}$  定值一般设为  $1.1U_{gn}$ 。

正常运行的励磁系统 V/Hz 限制会限制发电机最大电压小于  $1.1U_{gn}$ 。因此实际运行中，过电压保护整定值即使减小到  $1.2U_{gn}$ ，也远高于 V/Hz 限制定值。由于误强励往往是由励磁系统故障造成，V/Hz 限制已经失效，此时已进入保护装置发挥作用的阶段。因此，适当降低过电压保护定值不会影响与励磁系统 V/Hz 限制的正确配合。

#### 3.2 过激磁保护与过电压保护配合

以某电厂采用 G60 保护装置的 600 MW 汽轮发电机为例<sup>[8]</sup>，过激磁保护二段反时限特性见式 (5)。

$$T = \frac{TMD}{\left(\frac{V}{F}/Pickup\right)^2 - 1} \quad (5)$$

整定值  $TMD=0.95$ ， $Pickup=1.06$ ，由此得到过激磁曲线与发电机过激磁能力如表 3 所示。

表 3 过激磁允许时间及保护动作时间对照表

Tab.3 Over excitation capacity and protection

$U^*/f^*$	允许时间/s	过激磁保护延时/s
1.06	长期	长期
1.07	60	50
1.10	20	12.4
1.15	10	5.4
1.19	7.5	3.6
1.20	/	3.4
1.25	5	2.4
1.30	/	1.9

不同定值发电机过激磁能力损失时间见表 4。

表 4 不同过压保护定值下发电机过激磁损失时间

Tab.4 Over excitation loss of different protection setting

定值 ( $U_{gn}$ )	定值/s	过激磁动作时间/s	损失过激磁能力/s
1.3	0.5	1.9	1.4
1.3	0.3	1.9	1.6
1.2	0.5	3.4	2.9
1.2	0.3	3.4	3.1

由表 3 和表 4 可见, 降低过电压保护定值只对发电机高于过电压保护启动电压部分过激磁能力产生影响, 并不影响低于过电压保护启动定值电压以下的过激磁能力发挥。

实际在并网运行后, 发电机频率基本在额定频率。而发电机电压受励磁控制和系统电压影响, 不可能长时间远高于额定值。发电机并网后如果出现非暂态的过电压运行, 大都是由于励磁误强励所引起。因此, 当发电机电压达到保护启动值时, 电气系统必然已经出现不可逆转的故障, 已经不需要发挥过电压保护定值以上的过激磁能力。发电机尽快解列、灭磁是对发变组最大保护。而当系统出现故障需要无功功率支持时, 往往是母线电压大大低于额定值才要求发电机强励。即使特殊情况下出现发电机短时过激磁运行时, 由于 V/Hz 限制作用, 电压也不会大于  $1.1U_{gn}$ 。因此, 过电压保护定值降低不会影响发电机发挥过激磁能力对系统的支持。

#### 4 过电压保护整定建议

前已述及《导则》<sup>[2]</sup>中规定, 对于汽轮发电机组, 过电压保护定值一般为  $1.3U_{gn}$ , 延时 0.5 s。国内各个电厂基本上按此原则整定(个别单位整定为  $1.20\sim 1.25U_{gn}$ , 延时 0.3~0.5 s)。这一整定值是沿袭了过去中小型发电机多采用直流励磁机的设定值。然而, 自并励励磁特性显著不同于交直流励磁机励磁的一点是在过电压保护启动延时过程中, 由于静止整流桥时间常数要远小于交直流励磁机, 再加机端正反馈作用, 发生空载误强励时的转子电流和机端电压上升迅速, 容易导致转子绕组过负荷、过电压和定子绕组严重过电压的情况。

减小过电压保护电压启动值和延时时间, 有利于降低发电机和单元接线的主变、高厂变在空载误强励过程中的过激磁和过电压程度。灭磁时有更小的强励电压以降低对灭磁开关的弧压要求。更小的转子电流不仅降低了对灭磁开关断流能力和灭磁电阻容量的要求, 同时也减小了对应的灭磁电阻电压从而进一步降低了开关弧压要求。因此, 降低过

电压保护定值有利于灭磁的安全可靠进行。

综上计算分析, 同时考虑到当前微机化继电保护装置日趋成熟可靠, 为更好保障发电机、变压器及灭磁系统的安全, 对采用自并励励磁系统的大型汽轮发电机(水轮发电机和采用其他励磁形式的汽轮发电机可作参考)过电压保护整定提出以下建议:

(1) 建议正常运行中过电压保护启动电压值在考虑发电机过电压和过激磁能力的基础上, 可以减小到  $1.2 U_{gn}$  或者  $1.25U_{gn}$ 。同时为防止发电机暂态过程中定子过电压保护误动, 仍然保留延时时间, 整定为 0.2~0.3 s。

(2) 建议增设针对空载误强励的专用过电压保护, 在并网前该保护投入, 并网后退出。由于发电机空载运行无需考虑非正常停运风险, 因此启动值取  $1.1U_{gn}$ , 延时 0.1 s。而对于机组启动试验或其他特殊试验, 则可根据实际情况临时调整该保护定值设置。

#### 5 结语

通过灭磁仿真和分析, 提出了采用自并励励磁的大型汽轮发电机发生空载误强励时, 过电压保护整定值过高易导致定子过电压和灭磁电流过大, 从而严重威胁定子绝缘安全和灭磁主回路中的灭磁开关和灭磁电阻的安全。分析了励磁系统 V/Hz 限制、发电机过激磁保护特性及其与发电机过电压保护的配合, 得出了降低过电压保护启动电压和延时时间不影响保护与限制的配合, 基本不影响发电机过激磁能力的正常发挥。

建议降低采用自并励励磁系统发电机的过电压保护启动值和延时时间, 建议增设专用于防止空载误强励的过电压保护。在保证发电机能力得到充分发挥的基础上, 对提高发电机-主变等主设备运行安全性和灭磁主回路安全性、可靠性具有非常积极的意义, 可供继电保护整定计算人员参考。

#### 参考文献

- [1] 龙俊平. 发电机励磁误强励原因探讨[J]. 继电器, 2006, 34(19): 71-74.  
LONG Jun-ping. Discussion on the causes of the faulty forced excitation of the generator[J]. Relay, 2006, 34(19): 71-74.
- [2] DL/T 684-1999 大型发电机变压器继电保护整定计算导则[S].
- [3] 陈利芳, 陈天禄. 浅谈自并励励磁系统在大容量机组中的应用[J]. 继电器, 2007, 35(1): 81-84.  
CHEN Li-fang, CHEN Tian-lu. Application of self-excitation mode in large capacity generator unit[J]. Relay, 2007, 35(1): 81-84.

(下转第 124 页 continued on page 124)

岛运行后, 保护最长动作时间不超过0.6 s, 远小于规定的孤岛保护允许动作时间 (2 s); 而且, 该保护方案简单方便, 易于实现, 对电网电能质量负面影响小。因此, 本文提出的载波闭锁式孤岛保护能够很好地解决DG并网系统的孤岛检测问题。

本课题还将对载波信号的传输特性和信号的注入接收方式等进行进一步分析, 以选择最优方式进行载波信号的可靠传输, 并对载波闭锁式孤岛保护方案的可行性进行实验验证。

参考文献

[1] 曹海燕, 田悦新. 并网逆变器孤岛控制技术[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(9): 72-74.  
CAO Hai-yan, TIAN Yue-xin. Islanding control for grid-connected inverters[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(9): 72-74.

[2] 顾和荣, 赵清林, 伞国成, 等. 三相并网逆变器有源孤岛检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(12): 44-47.  
GU He-rong, ZHAO Qing-lin, SAN Guo-cheng, et al. Active islanding detection for three-phase grid-connected inverters[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(12): 44-47.

[3] 袁玲, 郑建勇, 张先飞. 光伏发电并网系统孤岛检测方法的分析与改进[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(21): 72-75.  
YUAN Ling, ZHENG Jian-yong, ZHANG Xian-fei. Analysis and improvement of islanding detection method for grid-connected photovoltaic inverters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(21): 72-75.

[4] 鹿婷, 段善旭, 康勇. 逆变器并网的孤岛检测方法[J]. 通信电源技术, 2006, 23(3): 38-41.  
LU Ting, DUAN Shan-xu, KANG Yong. Anti-islanding

schemes of grid-connected inverters[J]. Telecom Power Technologies, 2006, 23(3): 38-41.

[5] 高金辉, 李迎迎, 苏军英. 一种新颖的孤岛检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 122-124.  
GAO Jin-hui, LI Ying-ying, SU Jun-ying. The reasearch on a novel islanding detection method[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 122-124.

[6] Roop M E, Aaker K, Haigh J, et al. Using power line communication to prevent islanding[C]. //Photovoltaic Specialists Conference, 2000. Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE. 2000: 1675-1678.

[7] Roberto Benato, Roberto Caldon, Francesco Cesena. Application of distribution line carrier-based protection to prevent DG islanding: an investigating procedure[C].// IEEE Power Tech Conference, 2003.

[8] Roberto Benato, Roberto Caldon. Distribution line carrier: analysis procedure and Applications to DG[J]. IEEE Trans Power Del, 2007, 22(1): 575-583.

[9] Willis H L, Rashid M H. Protective relaying principles and applications[J]. Taylor & Francis Group, LLC, 2006.

[10] Zhihong Ye, Yu Zhang, Pengwei Du, et al. Evaluation of anti-islanding schemes based on nondetection zone concept[J]. IEEE Trans Power Electronics, 2004,19(5): 1171-1176.

收稿日期: 2010-01-26; 修回日期: 2010-04-19

作者简介:

樊淑娴 (1984-), 女, 博士研究生, 研究方向为分布式发电系统的逆变并网技术; E-mail: fanshuxian@163.com

徐丙垠 (1961-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力线路故障监测、配电自动化、智能配电网;

马士聪 (1980-), 男, 博士, 主要研究方向为配电网故障定位和暂态分析。

(上接第 101 页 continued from page 101)

[4] ANSI/IEEE C37.18-1979, IEEE standard enclosed field discharge circuit breakers for rotating electric machinery[S].

[5] 孙孜平, 高春如, 沈俭, 等. 自动励磁调节器整定计算的探讨[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(3): 68-71.  
SUN Zi-ping, GAO Chun-ru, SHEN Jian, et al. Discussion on setting calculation of AVR[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(3): 68-71.

[6] 吴跨宇, 竺士章, 陈新琪. 发电机严重故障工况灭磁仿真分析[J]. 大电机技术, 2009(5): 49-52.  
WU Kua-yu, ZHU Shi-zhang, CHEN Xin-qi. De-excitation simulation for generator catastrophic failure[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2009(5): 49-52.

[7] 高春如. 大型发电机组继电保护整定计算与运行技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

[8] 杨涛, 刘栋. G60发电机保护在大型机组中的应用与运行分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 112-115.  
YANG Tao, LIU Dong. Application and running analysis of G60 relay in large-scaled generating unit[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(11): 112-115.

收稿日期: 2010-01-31; 修回日期: 2010-07-21

作者简介:

吴跨宇 (1979-), 男, 硕士, 工程师, 从事发电机励磁和电力系统分析工作; E-mail: wu\_kuayu@zj.sgcc.com.cn

周平 (1975-), 男, 本科, 工程师, 从事发电厂继电保护检修和管理工作。