

PAC-4000A 发电厂自动电压调控系统动态模拟试验

张金平, 张辉, 汤飞, 熊敏, 董明会

(中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 介绍了 PAC-4000A 发电厂自动电压调控系统的动态模拟试验方案及其试验结果。发电厂自动电压调控系统是电网自动电压调控系统的有机组成部分, 以往受技术发展和试验条件的限制, 设备投运前对发电厂自动电压调控系统的原理、控制效果缺乏有效的检测方法。在介绍了 PAC-4000A 发电厂自动电压调控系统及其电压等级为 500 kV 的动模试验模型的基础上, 对试验设备进行了系统阻抗自动识别、等裕度调节算法试验、自动电压跟踪试验等实验内容, 达到了满意的控制效果。本试验提出的测试技术、方法也可为电力系统分布式控制系统的动模试验提供借鉴。

关键词: 发电厂自动电压调控系统; 动态模拟试验; 等裕度调节算法

Dynamic simulation test of PAC-4000A auto voltage control system for power plant

ZHANG Jin-ping, ZHANG Hui, TANG Fei, XIONG Min, DONG Ming-hui

(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: This paper introduces scheme and result of PAC-4000A power plant auto voltage control system dynamic simulation test. As an important part of grid auto voltage control system, formerly power plant auto voltage control system had no effective measure to check principal and control result before device operation because of technical and test condition limitation. Based on introduction of PAC-4000A power plant auto voltage control system and its 500kV dynamic simulation test model, this paper essentially describes test contents below, including plant external system equivalent resistance recognition, similar stable region adjust algorithm test, and auto bus voltage keeping test, etc. Test result shows this device has good performance. This test model system can also be promoted to other distributed control system dynamic simulation test.

Key words: power plant auto voltage control system; dynamic simulation test; similar stable region adjust algorithm

中图分类号: TM76; TM743 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)22-0077-06

0 引言

随着电力系统稳定机理研究的深入, 我国电网的电压稳定与控制问题引起了越来越多的重视。为提高系统的电压稳定裕度, 解决电网无功潮流不合理分布和大机组无功功率不合理分配的矛盾, 近年来, 全国各大省网纷纷建设全网自动电压控制系统 (AVC)。运行实践证明, 以分层分区、就地平衡为目标, 以调节并网发电机组无功出力、投切变电站电容器、电抗器、调整变压器分接头为主要手段的, 集安全性与经济性于一体的 AVC 系统已经在很多省网发挥了巨大作用^[1-7]。

电厂 AVC 自动电压调控系统是电网 AVC 系统的子系统, 它既能配合电网调度自动化系统, 实现对电网的无功优化, 显著减少线损, 提高电能质量, 又能实施电厂的独立控制, 以达到厂内降损节能, 优化无功出力和改善母线电压水平。通过协调控制每台发电机的无功出力, 电厂 AVC 系统可以实现对

高压母线电压的控制, 降低对网内无功补偿设备的要求。依据电压三级控制的理念, 发电厂自动电压调控系统属于一级电压控制范畴, 主要调节对象是发电机组励磁电压, 调节时间要求秒级, 如果参与全网电压三级协调控制, 则从接收电压控制指令到完成调节过程调节时间要求在 1 min 到 10 min 之间, 主要由 AVC 主站的优化计算周期要求确定^[8,9]。

据不完全统计, 目前国内已有十多个省网投入了 AVC 系统, 已投入和待投入的发电厂 AVC 系统有近百个之多。由于全网 AVC 系统是一个涉及全网的实时控制系统, 发电厂 AVC 系统的电压无功控制效果受全网电压无功水平的制约, 在电网大规模投入 AVC 系统之前很难检验某一电厂 AVC 系统的实际控制效果, 同时由于试验条件的限制, 各 AVC 系统制造商在产品的研制和出厂阶段很难甚至不可能搭建一个类似于实际控制环境的测试、仿真系统, 可能导致有缺陷的控制设备带病进入系统, 影响电网的安全稳定运行。

动态模拟试验是检验继电保护及自动装置原理及性能的重要手段,在发电厂 AVC 系统的检测上可以借鉴继电保护设备动模的相关经验。但是,不同于继电保护等单一设备的动模试验,发电厂 AVC 系统是一个以机组无功协调控制为目标,逻辑上包含上位机、下位机、后台机的完整系统,物理上采用分布式结构,连续实时的闭环控制系统,其建模和控制方式都与原继电保护装置的动模存在很大的不同^[10-12]。

1 发电厂 AVC 系统介绍

中国电力科学研究院 PAC-4000A 发电厂自动电压调控系统由上位机、下位机、后台机三个部分组成,上位机接收来自 AVC 主站(一般装设在省调)的调控目标,与实时监测的母线电压比较,根据控制策略实时给出各个发电机励磁电流调控目标,通过现场总线发送到各下位机;下位机对闭锁和约束条件进行校核后,经机组 DCS 进行励磁调节;后台机完成数据的分析和管理工作^[6,7,13]。

1.1 控制模式

发电厂 AVC 系统对电厂无功出力的控制通常分为两种模式,即全厂控制模式和单机控制模式。

单机控制模式:发电厂 AVC 系统直接接收 AVC 主站下发的每台机组的无功出力目标值,AVC 系统直接或通过 DCS 系统向发电机的励磁系统 AVR 发送增减磁信号以调节发电机无功出力,最终使各机组无功出力达到目标值。

全厂控制模式:发电厂 AVC 系统接收 AVC 主站下发的电厂变高侧母线(节点)电压控制目标值后,根据电压控制目标值,按照一定的控制策略,通过计算自动得出电厂需要承担的总无功功率,将总无功功率合理分配给对应每台机组,AVC 系统直接或通过 DCS 系统向发电机的励磁系统 AVR 发送增减磁信号以调节发电机无功出力,使电厂变高侧母线(节点)电压达到控制目标值,实现全厂多机组的电压无功自动控制^[13]。

1.2 控制算法

目前 AVC 系统采用的控制策略有:逐次逼近法、等裕度法、等功率因素法等。逐次逼近法是根据母线变化和无功变化方向一致这一原则,每次对机组励磁进行调节时,首先选取调节方向无功裕度大的进行调节,判断母线电压是否达到目标,直至母线电压达到调节范围内。等功率因素是根据电压指令折算出整个电厂所要发出的无功,根据保证机组功率因素大致相同的原则,确定每台机组的无功

出力水平,然后逐次调节机组的无功达到计算出的无功指标。在整个调节过程,一旦机组出现异常情况比如电气越限或者保护动作情况,该机组则退出调节,无功目标重新进行分配。等裕度法是根据电压指令折算出的无功在机组间进行无功分配,分配的原则是保证各个机组的无功出力在裕度上是大致接近的,所谓的无功裕度指的是无功出力占整台机组无功上下限差值的百分比^[7,14]。

本次动模试验中,重点验证了 AVC 系统的等裕度分配算法的有效性。

1.3 闭锁限制条件

发电厂 AVC 系统是一个满足安全约束条件下的优化控制,在正常运行情况,AVC 系统在调节过程中不满足安全约束条件时,应该停止对对应机组的调节。安全约束条件如下:

- 1) 机组有功、无功、机端电压、定子电流、励磁电流等电气量越限;
- 2) 机组开关位置、励磁系统异常(包含励磁退出、强励、欠励、故障、动作、手动方式等信号的或)、机组保护动作(保护动作合并信号);
- 3) RTU 通讯、上下位机通讯等;
- 4) 其它闭锁条件。

1.4 控制指标

AVC 控制精度^[15]:

母线电压-目标电压|<0.5 kV;

机端无功-目标无功|应根据机组的响应特性,控制在 2~10 Mvar 以内;

AVC 跟踪速度^[15]:

调节母线电压变化 1 kV 时间<300 s;

调节机组无功变化 10 Mvar 时间<60 s。

2 AVC 动模试验

2.1 被试系统

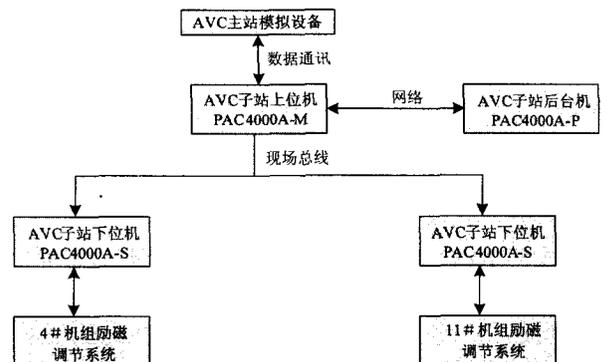


图 1 被试系统配置示意图

Fig.1 Tested system configuration

本实验中采用 AVC 系统控制两台发电机的无功出力, 从而将母线电压保持在系统需要的水平。AVC 上位机和两台下位机通过现场总线相连, 下位机把采集的机组电气量上送, 上位机把自身采集的电气量和下位机上送的各电气量进行汇总, 并选择合适的控制策略在机组间进行无功分配, 并通过下位机控制各个发电机的 AVR 以改善发电机无功出力及母线电压。被试系统配置如图 1 所示。

2.2 500 kV 动态模拟试验系统

500 kV 动态模拟试验系统配置: 两台发电机-升压变单元并接到 500 kV 母线上, 11#机组 $S_n=1050$ MVA, $U_n=19\ 000$ V, 4#机组: $S_n=350$ MVA, $U_n=11\ 000$ V, 母线通过 200 km。线路接入无穷大系统, 同时在线路末端接入 1#无穷大负荷和不同容量的负荷马达 M1、M2、M3。通过调整负荷马达可以达到调整发电机侧母线电压的目的。模拟系统如图 2 所示。

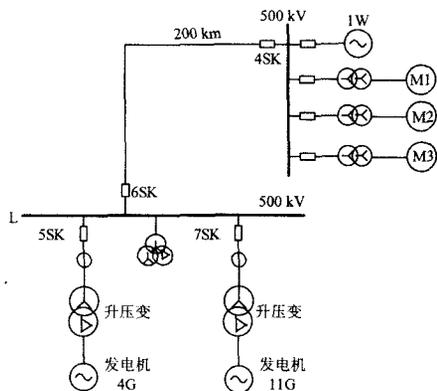


图 2 500 kV 动态模拟试验系统

Fig.2 500 kV dynamic simulation tested system

表 1 线路参数

Tab.1 Line parameter

	线路阻抗
模拟线路	0.028 Ω /km

表 2 发电机参数

Tab.2 Generator parameter

	S_n /MVA	$\cos\phi$	X_d	X_d'	X_d''
4#发电机	350	0.85	1.016	0.312	0.194
11#发电机	1 050	0.85	1.81	0.142	0.066

2.3 数据采集

根据实验方案, 实际接入的电气测量量有: 11#机端电压、11#机端电流、11#机组有功、11#机组无功、11#励磁电压, 4#机端电压、4#机端电流、4#机组有功、4#机组无功、4#励磁电压, 母线电压量测, 共 11 个测量点。

实际接入的开关量有: 11#机组开关位置信号、11#机组励磁异常信号、11#机组保护动作信号、4#机组开关位置信号、4#机组励磁异常信号、4#机组保护动作信号。

AVC 下位机输出的增减磁脉冲: 11#机组增磁脉冲节点、11#机组减磁脉冲节点、4#机组增磁脉冲节点、4#机组减磁脉冲节点。

试验系统信号传递如图 3 所示。

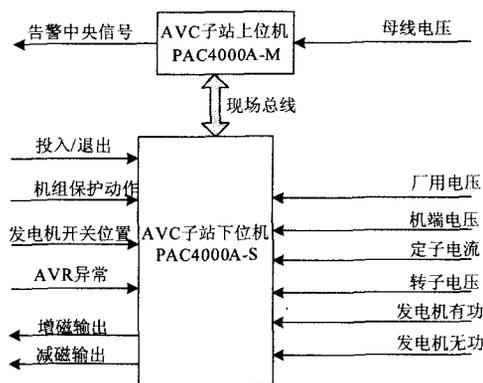


图 3 试验系统信号传递示意图

Fig.3 Data flow of tested system

2.4 AVC 子站定值

表 3 AVC 系统设定定值

Tab.3 AVC setting value

定值类型	定值
母线电压上限	536.9 kV
母线电压下限	490.7 kV
母线电压调节死区	0.37 kV
机组无功调节死区	3.5 Mvar
11#机组机端电压上限	12.5 kV
11#机组机端电压下限	9.5 kV
11#机组机端电流上限	32.2 kA
11#机组有功上限	892.5 MW
11#机组有功下限	178.5 MW
11#机组无功上限	245 Mvar
11#机组无功下限	7 Mvar
11#机组励磁电压上限	600 V
11#机组励磁电压下限	250 V
4#机组机端电压上限	7.5 kV
4#机组机端电压下限	5.0 kV
4#机组机端电流上限	21 kA
4#机组有功上限	297.5 W
4#机组有功下限	59.5 MW
4#机组无功上限	126 Mvar
4#机组无功下限	0 Mvar
4#机组励磁电压上限	300 V
4#机组励磁电压下限	25 V

实际工程中, 考虑到测量精度、通讯转换误差、

数据处理误差等因素，必须设置合理的调节死区及定值范围，这是保证 AVC 调节效果非常重要的一环。如果定值设置过大，则很难达到要求的控制精度；定值设置过小，则 AVC 系统将频繁反复振荡调节，同样不利于机组的运行安全。为了保证调节过程中各个电气元件的正常安全运行，AVC 调节定值设置如表 3。

3 试验内容

3.1 系统阻抗自动识别

在 AVC 子站系统对电压进行调节的过程中，AVC 主站通常给出的目标是电厂变高侧的母线电压，AVC 子站系统需要能够根据这一电压目标，利用系统阻抗折算出对应的无功目标。

在动模实验过程中通过调整机组的励磁电压，改变母线电压及无功，利用变化前后的母线电压和无功计算出系统阻抗^[13]。试验数据见表 4。

试验分析：根据 4 次实验记录，AVC 系统的自识别阻抗和系统阻抗计算值之间的误差在 5% 以内，满足工程应用的要求。

表 4 系统阻抗自动识别

Tab.4 External system equivalent resistance recognition

测试点 测试次数	11#机无功/Mvar	4#机无功/Mvar	母线电压/kV	AVC 识别阻抗/ Ω	阻抗计算值	误差
1	77.6	27.7	515.7		90.2	
2	117.0	67.5	532.4	110.9	108.5	2.27%
3	84.3	39.8	519.0	112.6	109.6	2.76%
4	99.4	52.7	524.8	89.24	92.0	-4.0%

3.2 等裕度调节算法

试验共进行了升高和降低母线电压两个过程，通过接收 AVC 主站给出的母线电压调节点值，AVC 系统计算模块会根据等裕度原则，计算出各个机组的无功目标，然后根据此无功目标进行调节，

当系统情况发生变化后，会重新进行无功目标的分配。表 5 记录了按照等裕度原则分配机组无功并调节的过程。表 6 记录了在调节过程中，4#机闭锁不调节，无功调节量转移至 11#机重新开始分配调节的过程^[13]。

表 5 等裕度调节算法试验

Tab.5 Similar stable region adjust algorithm test

	电压调节目标：513.4 kV 增磁调节		电压调节目标：504.5 kV 减磁调节	
	调节前	调节完成	调节前	调节完成
11#机组有功/MW	227.6	224.8	220.6	226.8
11#机组无功/Mvar	41.2	64.4	62.4	40.1
11#机组电压/kV	10.1	10.2	10.3	9.8
11#机组电流/kA	7.64	7.74	7.45	7.81
11#励磁电压/V	314	360	365	335
11#机无功裕度	0.832	0.737	0.745	0.836
4#机组有功/MW	77.6	77.3	76.7	77.6
4#机组无功/Mvar	20.6	34.7	26.6	14.4
4#机组电压/kV	5.8	5.9	5.9	5.8
4#机组电流/kA	4.62	4.79	4.59	4.54
4#励磁电压/V	50	55	55	50
4#机无功裕度	0.837	0.725	0.789	0.886
母线电压	505.9	512.9	512.2	504.7
	11#机组分配无功目标(Mvar) 66.1 4#机组分配无功目标(Mvar) 32.5		11#机组分配无功目标(Mvar)37.1 4#机组分配无功目标(Mvar) 15.1	
	母线调节误差(kV) 0.5 调节时间(s)11		母线调节误差(kV) 0.2 调节时间(s) 10	

表 6 调节过程中无功调节量转移试验

Tab.6 Reactive power reallocation test when adjusting

	电压调节目标: 518.8 kV 增磁调节			电压调节目标: 505.3 kV 减磁调节		
	调节前	4#机闭锁时	调节完成	调节前	4#机闭锁时	调节完成
11#机组有功/MW	236.3	236.6	236.6	242.5	242.2	242.2
11#机组无功/Mvar	46.8	56.0	93.2	53.8	33.0	23.6
11#机组电压/kV	10.0	10.1	10.3	10.2	10.1	10.1
11#机组电流/kA	8.04	8.06	8.06	8.15	8.09	8.06
11#励磁电压/V	350	360	390	365	360	340
11#机无功裕度	0.819	0.771	0.620	0.881	0.865	0.904
4#机组有功/MW	78.7	75.9	76.2	76.2	75.9	76.2
4#机组无功/Mvar	19.8	27.2	16.1	35.3	20.0	22.7
4#机组电压/kV	5.9	5.95	5.95	6.0	5.95	5.95
4#机组电流/kA	4.59	4.54	4.42	4.68	4.42	4.42
4#励磁电压/V	51	51.5	51	51.5	51	50
4#机无功裕度	0.843	0.785	0.812	0.820	0.840	0.820
母线电压	508.2	510.5	518.6	514.0	506.5	505.3
	11#机组分配无功目标(Mvar) 74.5 4#机组分配无功目标(Mvar) 35.6			11#机组分配无功目标(Mvar) 30.8 4#机组分配无功目标(Mvar) 12.6		
	增磁调节过程中, 4#机组闭锁, 闭锁时刻: 11#机组新无功目标(Mvar) 89.1 4#机组无功当前值(Mvar) 27.2			减磁调节过程中, 4#机组闭锁, 闭锁时刻: 11#机组新无功目标(Mvar) 23.3 4#机组无功当前值(Mvar) 20.0		
	母线电压误差(kV) 0.4 调节所耗时间(s) 13			母线电压误差(kV) 0.1 调节所耗时间(s) 17		

试验分析:

(1) 表 5 中主站下达电压目标后, AVC 系统可以 3.1 系统阻抗自动识别计算出的系统阻抗将电压目标转换为无功目标并分解至各台机组。无功目标到达后, 电压目标也同时到达, 电压目标的误差 < 0.5 kV, 无功目标误差 < 2 Mvar。

(2) 表 6 中, 在增磁开始时, 11#机及 4#机分配的无功分别为 74.5 Mvar 及 35.6 Mvar, 调节过程中, 当母线电压达到 510.5 kV 时, 4#机闭锁, 此时 4#机及 11#机无功分别为 27.2 Mvar 及 56 Mvar, 由于 4#机闭锁, 4#机所承担的无功调节余额 8.4 Mvar 被转移至 11#机, 11#机新的无功目标为 82.9 Mvar, 实际算法折算出的无功新分配额为 89.1 Mvar, 差额为 6.2 Mvar。同理可以分析减磁调节过程中 4#机闭锁时无功调节的变化情况。试验表明, 当机组运行工况变化导致某机组退出 AVC 调节时, AVC 系统能自动适应系统情况的变化进行调节。

(3) 两次实验中由于两机组是根据等裕度进行调节, 根据记录可以观察到两机组调节速率一致, 没有因为两机组无功出力偏差过大造成无功环流而引起的反复调节现象, 两次根据折算后的无功目标进行调节后, 母线电压被抬升到的电压水平在母线电压调节死区内, 调节速度满足指标要求。

3.3 电压自动跟踪

当 AVC 子站处于全厂模式下, 当主站下发电压指令后, AVC 子站系统能够根据该电压指令通过对机组进行增减磁把母线电压保持在指定目标电压偏差范围内。试验过程中, 通过改变负荷情况, 改变母线电压, 此时 AVC 子站系统能自动将母线电压调节到指定电压死区范围内。

限于篇幅的原因, 本文对于单机无功试验、高裕度优先调节算法、安全性试验和后台机功能试验等内容不再作介绍, 有兴趣的读者可参考文献[13]。

4 结论

本文提出了一种对发电厂自动电压调控系统进行动模试验的模型及试验方法和内容, 试验进行了系统阻抗自动识别、等裕度调节算法、自动电压跟踪等试验项目。试验结果表明, PAC-4000A 发电厂自动电压调控系统能有效地改善发电厂母线电压, 避免机组间的无功环流, 调节精度和时间满足控制指标的要求^[13,15]。

本试验提出的测试技术、方法可为电力系统分布式控制系统的动模试验提供借鉴。

参考文献

[1] 王梅义, 吴竞昌, 蒙定中. 大电网系统技术[M]. 北京:

- 中国电力出版社, 1995.
- [2] 周全仁.现代电网自动控制系统及其应用[M].北京: 中国电力出版社, 2004.
- [3] 李端超, 陈实, 等. 安徽电网自动电压控制(AVC)系统设计及实现[J].电力系统自动化, 2004, 28(8): 20-22. LI Duan-chao, CHEN Shi, et al. Anhui Electric Power Auto Voltage Control System Design and Realization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (8): 20-22.
- [4] 赵晋泉, 黄文英, 方朝雄, 等. 福建电网在线电压稳定监视和控制系统[J].电力系统自动化, 2007, 31(14): 102-106. ZHAO Jin-quan, HUANG Wen-ying, FANG Zhao-xiong, et al. Fujian Online Voltage Stability Monitoring and Control System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (14): 102-106.
- [5] 许文超, 郭伟, 李海峰, 等. AVC 应用于江苏电网的初步研究[J].继电器, 2003, 31 (5): 23-26. XU Wen-chao, GUO Wei, LI Hai-feng, et al. Preliminary Study on Automatic Voltage Control of the Electric Network in Jiangsu Province[J]. Relay, 2003, 31 (5): 23-26.
- [6] 郭玉金, 邹根华, 潘少云, 等. 发电厂自动电压控制(AVC)嵌入式方案研究[J].华中电力, 2008, 21(4): 29-31. GUO Yu-jin, ZOU Gen-hua, PAN Shao-yun, et al. Study on the Embedding Scheme of Automatic Voltage Control in Power Plant[J]. Huazhong Electric Power, 2008, 21(4): 29-31.
- [7] 何南强, 刘予丹. 具有自辨识功能的模糊自动电压无功控制装置[J].电网技术, 2000, 24 (4): 52-56. HE Nan-qiang, LIU Yu-dan. A Fussy Automatic Voltage and Reactive Power Control Device with Self-recognition[J]. Power System Technology, 2000, 24 (4): 52-56.
- [8] 孙宏斌, 张伯明, 郭庆来, 等. 基于软分区的全局电压优化控制系统设计[J].电力系统自动化, 2003, 27(8): 16-20. SUN Hong-bin, ZHANG Bo-ming, GUO Qing-lai, et al. Design for Global Optimal Voltage Control System Based on Soft Identification of Secondary Control Zones[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(8): 16-20.
- [9] Feng Dong, Badrul H. Chowdhury Secondary Voltage Regulation for Improved Power Plant Reactive Power Coordination[J]. Electric Power Components and Systems, 2007, 23 (10) 1181-1199.
- [10] 罗剑波, 宣筱青, 任建锋, 等. UFV-200F 失步解列装置的特高压电网实际参数动模试验[J].电网技术, 2008, 32 (18): 10-13. LUO Jian-bo, XUAN Xiao-qing, REN Jian-feng, et al. Application Verification of UFV-200F Out-of-Step Separation Device[J]. Power System Technology, 2008, 32 (18): 10-13.
- [11] 邱智勇, 陈建民, 高翔. 500 kV 继电保护故障信息处理系统动模试验方案[J].电网技术, 2006, 30(13): 85-89. QIU Zhi-yong, CHEN Jian-min, GAO Xiang. Dynamic Simulation Test Scheme of 500 kV Protective Relaying Fault Information Processing System[J]. Power System Technology, 2006, 30 (13): 85-89.
- [12] 肖晋宇, 谢小荣, 李建. 电网广域动态安全监测系统及其动态模拟试验[J].电网技术, 2004, 28 (6): 5-9. XIAO Jin-yu, XIE Xiao-rong, LI Jian. Wide-area Dynamic Security Monitoring System for Power Network and its Dynamic Simulation[J]. Power System Technology, 2004, 28 (6): 5-9.
- [13] 电力系统自动电压调控装置(AVC)动模试验测试报告[Z].电力工业电力设备及仪表质量检验测试中心, 2008.
- [14] Mendoza J E, Morales D A, Lopez R A, et al. Multiobjective Location of Automatic Voltage Regulators in a Radial Distribution Network Using a Micro Genetic Algorithm[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22 (1): 404-412.
- [15] 广东电网发电厂 AVC 自动电压控制系统技术规范(试行)[Z]. 2007.
- [16] 华北电网 AVC 系统管理规定(暂行)[Z].

收稿日期: 2009-02-11; 修回日期: 2009-04-24

作者简介:

张金平(1972-), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统稳定控制及自动装置研究; E-mail: zjp2000@epri.ac.cn

张辉(1962-), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统稳定控制及自动装置研究;

汤飞(1978-), 男, 工程师, 主要从事电力系统稳定控制及自动装置研究。