

不同控制条件下的全局电网无功电压闭环控制仿真

周华锋¹, 王彬², 顾慧杰¹, 郭庆来², 赵旋宇¹, 孙宏斌², 汤磊²

(1. 中国南方电网电力调度控制中心, 广东 广州 510623; 2. 清华大学电机系电力系统国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 结合工程实践, 建立了网省地全局电网闭环控制仿真系统。介绍该仿真系统的数据流程及功能框图, 使用单断面仿真和连续断面仿真两种方式模拟了无控制、独立控制、协调控制等不同控制条件下的电网运行状态变化, 研究分析不同的控制条件对系统网损、电压稳定裕度、联络关口无功等指标的影响。仿真结果表明: 通过对各级自动电压控制系统控制目标和控制行为的协同, 可有效避免控制振荡, 消除网间不合理的无功流动。

关键词: 电力系统; 多控制中心; 协调控制; 闭环仿真; 自动电压控制

Simulation for global power system voltage closed-loop control with different control conditions

ZHOU Hua-feng¹, WANG Bin², GU Hui-jie¹, GUO Qing-lai², ZHAO Xuan-yu¹, SUN Hong-bin², TANG Lei²

(1. China Southern Power Grid Dispatching Control Center, Guangzhou 510623, China; 2. State Key Lab of Power Systems, Dept of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Combining with engineering practice, this paper develops the closed-loop control simulation system. The data flow and functional diagram of simulation system are introduced. The single section simulation method and continuous section simulation method are used to simulate the running state of power system, with three different control conditions, including no control, independent control and coordinated control. By the contrast analysis, this paper researches the influence of control condition to system loss, voltage stability margin and tie line reactive power. The simulation results indicate that the coordination among multi-level hierarchical control systems can effectively avoid the control oscillation and reduce the irrational reactive power flow between the higher power system and the lower power system.

This work is supported by National High Technology Research and Development Program of China (No. 2013BAA01B03), National Science Fund for Distinguished Young Scholars (No. 51025725), National Natural Science Foundation of China (No. 51277105), State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (No. LAPS13007), and Key Research Program of China Southern Power Grid Company (No. K-ZD2012-014).

Key words: power system; multi-level hierarchical control centers; coordination control; closed loop simulation; automatic voltage control

中图分类号: TM76

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)14-0138-08

0 引言

随着电网规模的扩大和调度自动化水平的提高, 单纯依靠人工控制已经难以满足驾驭电网的要求, 在各控制中心内建设自动控制系统来实施一系列的自动控制已成共识^[1-7]。以自动电压控制(Automatic Voltage Control, AVC)为例, AVC系统以控制中心

内电网为控制对象, 考虑控制中心内电网的运行约束, 以控制中心内无功电压调节设备为控制手段, 通过解析法或者规则法给出使本控制中心内电网运行状态更优的控制策略, 并通过闭环控制作用于电力系统。AVC系统的投入对保证电网的安全优质经济运行发挥了重要作用^[8-19]。

为了验证自动控制系统的有效性, 在AVC系统投入实际闭环运行之前, 需要在对AVC控制策略进行仿真分析验证。传统的算例仿真方式存在如下局限性:

(1) 从控制对象来分析, 每个电网有其自身的运行和控制特点, 适用于标准算例系统的控制策略

基金项目: 国家科技支撑计划(2013BAA01B03); 国家杰出青年科学基金(51025725); 国家自然科学基金(51277105)资助项目; 新能源电力系统国家重点实验室开放课题(LAPS13007); 南方电网公司科技项目(K-ZD2012-014)

并不证明能完全适用于实际电力系统, 所以要针对应用电力系统采用实际现场数据进行仿真来验证其控制效果。

(2) 从控制时间来分析, 作为闭环控制系统, 不但要关心 AVC 系统对电力系统当前运行状态的反应, 还需要关心电力系统对控制策略的响应执行情况以及 AVC 系统对控制后电力系统运行状态的反应。因此, 有别于传统的控制策略开环验证方式或者控制策略单步闭环控制验证方式, 有必要采用闭环控制连续仿真的方式验证 AVC 控制策略。

(3) 从全局电网角度分析, 电网互联一体, 但是调度分层分区进行, 每个 AVC 系统只能依据本控制中心内的局部电力系统信息进行控制决策, 需要验证其控制策略施加于全局电网后是否依然可行有效。

从 2006 年起, 南方电网各网省地控制中心开始了 AVC 系统建设^[20-21], 为了解决电网互联与控制独立之间的矛盾, 2013 年, 南方电网开始了网省地一体化协调电压控制系统的建设。基于现场实际数据, 本文建立了南方电网网省地全局电力系统, 通过连续潮流仿真了不同控制条件下南方电网的运行状态变化, 通过控制对比验证了网省地协调电压控制系统的有效性。

1 功能结构及数据流程

图 1 介绍了网省地协调电压控制仿真系统的数据交互流程。其中, SCADA 模拟数据发生器用于模拟产生网省地一体化全局电网的实时运行状态。

从图 1 可以看出, 整个交互包括与以自治控制为目的的控制中心内数据交互 (图 1 中圈①, ②, ③所示), 还包括以协调控制为目的的控制中心间协调数据交互 (图 1 中圈④, ⑤所示)。

表 1 给出了仿真系统的数据交互内容、数据流方向以及仿真中采用的交互方式。

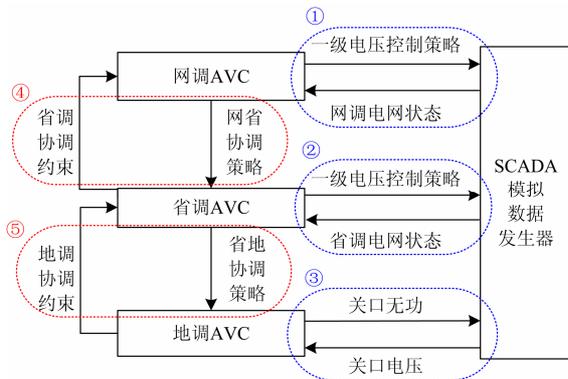


图 1 仿真系统结构

Fig. 1 Structure of simulation system

表 1 各模拟系统的信息交互内容

Table 1 Exchanged data information of simulation systems

数据类型	交互方式	生成方	接收方
电网状态数据	C/S 交互	数据发生器更新当前电网状态数据	网/省/地调 AVC 系统通过数据接口更新本网电网状态
省调关口协调运行约束	文件 FTP	由省调 AVC 生成特定名称和格式的数据文件并上传	网调 AVC 主机周期获取各省调关口的协调约束, 供网省协调模块决策使用
网省协调控制指令	文件 FTP	由网调 AVC 生成特定名称和格式的数据文件并上传	省调 AVC 主机周期获取网省协调控制指令并解析到 SVC 库中, 供其控制使用
省地协调控制指令	文件 FTP	省调 AVC 生成特定名称和格式的初始化数据文件并上传	地调 AVC 的配网潮流程序响应省地协调控制指令进行周期计算
地调关口无功指令	C/S 交互	地调 AVC 周期将关口无功转化为功率调节指令并发送	数据发生器更新网省模型中对应等值负荷的无功值, 保证全局电网的状态一致性

整个仿真系统分为数据发生器、网调 AVC、省调 AVC、地调 AVC 等四个子系统组成, 本节介绍各模拟子系统的流程和功能框图。

表 2 给出了仿真平台中各模拟系统的信息交互内容与实现功能。

表 2 各模拟系统的实现功能

Table 2 Functions of simulation systems

对象	输入	输出	实现功能
数据发生器	全局输电网模型 实时连续断面 仿真控制策略	电网实时 仿真状态	电网连续仿真 执行控制策略
网调 AVC 系统	全局输电网模型 电网实时状态 省调协调约束	网调控制策略 网省协调策略	网调直控网控制 网省协调决策
省调 AVC 系统	省网小模型 省网实时状态 网省协调策略 地调协调约束	省调控制策略 省地协调策略 省调协调约束	省调直控网控制 提出网省协调约束 省地协调决策
地调 AVC 系统	辐射网初始状态 关口根节点电压 关口无功设定值	地调无功结果 省地协调约束	地调配网潮流计算 执行省地协调策略 提出省地协调约束

图2~图5给出了仿真平台中各模拟系统的数据流程框图。

(1) 数据发生器

数据发生器的数据流程如图2所示。

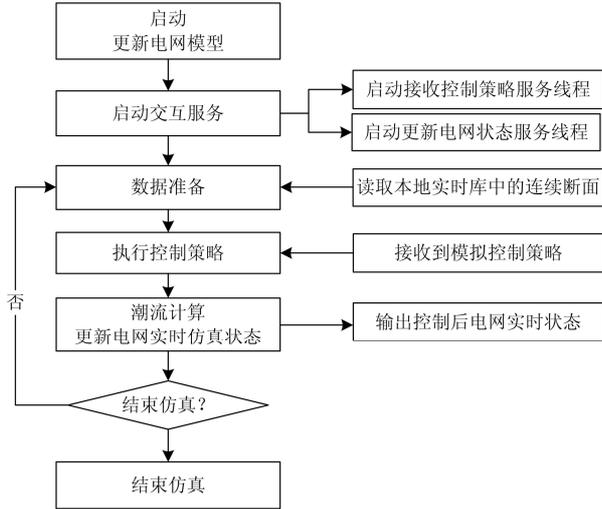


图2 数据发生器功能流程
Fig. 2 Sketch map of data generator

数据发生器用于模拟实际电力系统的作用，主要功能包括通过连续断面的潮流仿真来模拟电网运行状态的变化和响应执行模拟控制策略两种^[22]。

(2) 网调 AVC 主机

网调 AVC 的数据流程如图3所示。

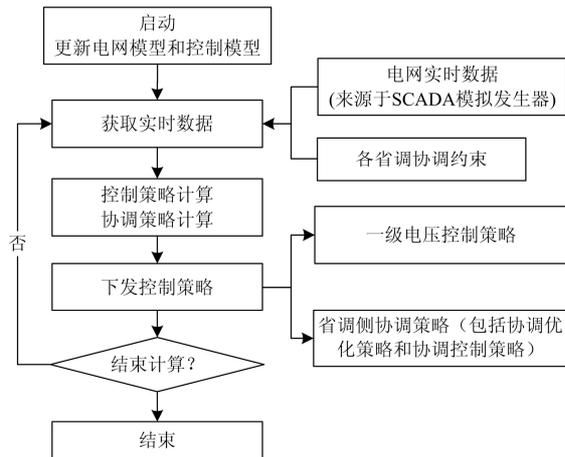


图3 网调 AVC 控制流程
Fig. 3 Sketch map of regional AVC system

网调 AVC 用于模拟网级控制中心，主要功能包括基于网调局部信息进行网调电网控制^[23]、作为协调上级进行网省协调控制等。

(3) 省调 AVC

省调 AVC 子系统的数据流程如图4所示。

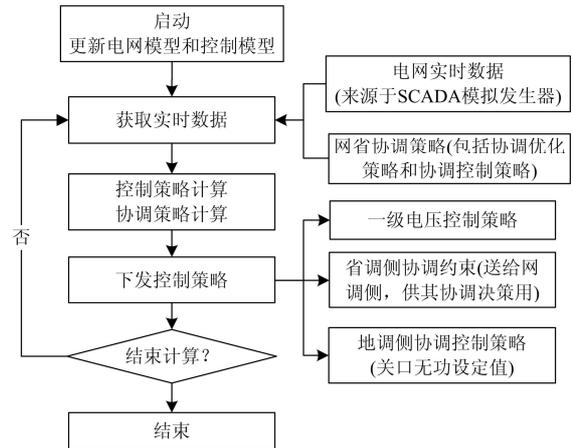


图4 省调 AVC 控制流程
Fig. 4 Sketch map of provincial AVC system

省调 AVC 用于模拟省级控制中心，主要功能包括基于省调局部信息进行省调电网控制、作为协调下级进行网省协调、作为协调上级进行省地协调^[24]等。

(4) 地调 AVC

地调 AVC 子系统的数据流程如图5所示。

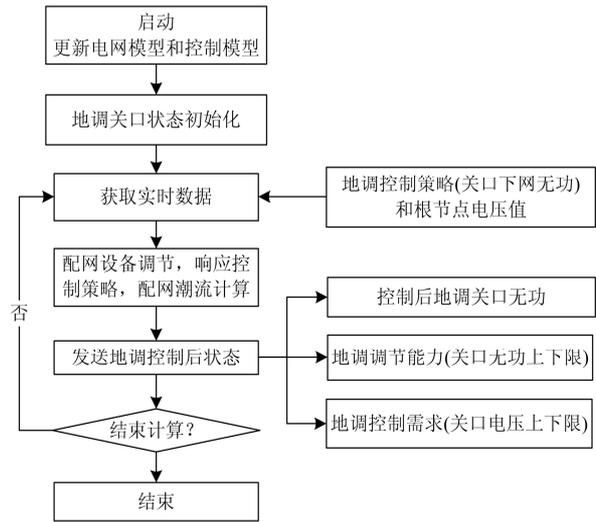


图5 地调 AVC 控制流程
Fig. 5 Sketch map of district AVC system

地调 AVC 用于模拟地区控制中心，主要功能包括基于地调局部信息进行地调电网控制、作为协调下级进行省地协调等。

2 单断面连续仿真效果

本文首先以单个现场数据断面为例，依次施加网省地独立控制和网省地协调控制，通过连续闭环控制对比分析各种控制条件下的控制效果。

整个控制过程分为三个阶段：

(1) 初态: 网省运行状态不优、同时网调母线存在电压越限现象。

(2) 独立控制阶段: 网/省/地各级 AVC 分别独立地进行控制, 直至控制稳态。

(3) 协调控制阶段: 当独立控制到达稳态后, 施加网省地协调控制。

2.1 软分区/网省关口分组结果

对南方电网直控电网进行分区, 结果如表 3 所示。

表 3 南方电网分区信息

Table 3 Soft zoning results of China Southern Power Grid

网调软分区	包含区域	分区内厂站数
GD	GD	10
ZDGD	GD、ZD	38
ZDGDW	GD、ZD	20
ZDYX	GX、ZD	21
ZDZ	GZ、ZD	29
ZDYN	YN、ZD	34

根据省调 220 kV 的网架结构对网省协调关口进行分组, 结果如表 4 所示。

表 4 区域关口信息统计

Table 4 Gate grouping results of China Southern Power Grid

区域	主变数	关口组数
GZ	15	9
GD	68	16
GX	26	10
YN	27	11
ZD	51	25

可见, 虽然南方电网的网省关口主变有 187 座, 但通过拓扑分析后, 生成的协调关口组为 71 组, 这说明网省电网间确实存在电磁环网, 同时也说明了省调 220 kV 网络为分区解环运行。

本文选择位于 GD 省调的某一网省协调关口为观察对象来进行对比分析, 其结构如图 6 所示。

2.2 实验过程

测试在基态时由于 BJ 站附近若干母线电压越上限, 网调给出降压指令 (越限部分对于省调属于非建模范畴), 网、省调在独立控制和协调控制下的网损、500 kV 下网无功和关口无功流动情况。

2.3 实验过程记录

图 7 描述了控制过程中 BJ 站母线电压的变化情况。

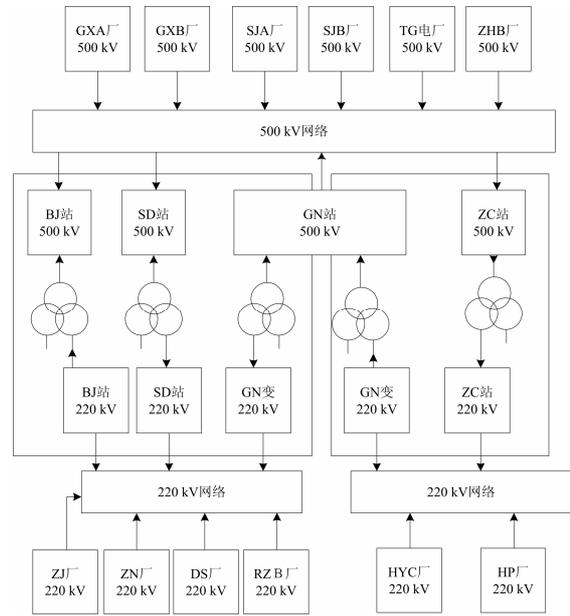


图 6 实验用协调关口示意图

Fig. 6 Structure of gate for contrast experiment

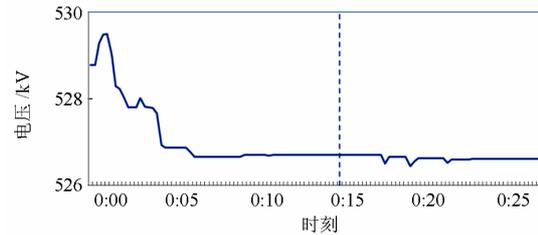


图 7 BJ 站 500 kV 母线电压变化曲线

Fig. 7 Changing curve of 500 kV bus voltage in BJ Substation

实验中, BJ 站 500 kV 母线的上限为 528 kV, 通过自动电压控制, BJ 站 500 kV 母线由基态的电压越限 (529.0) 恢复到限值范围之内 (527.0)。

图 8 描述了控制过程中网调发电机机端电压的变化情况。

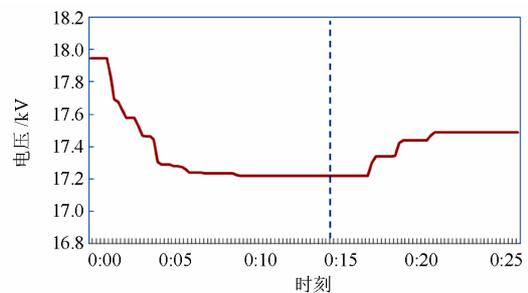


图 8 网调发电机机端电压变化曲线

Fig. 8 Changing curves of generator voltage in regional power grid

图 9 描述了控制过程中省调发电机无功的变化情况。

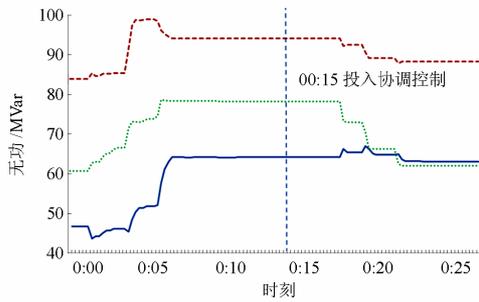


图 9 省调发电机无功变化曲线

Fig. 9 Changing curves of generator reactive power in provincial power grid

可见，在独立控制阶段，为了消除电压越限，网调侧发电机机端电压降低；在协调控制阶段，为了减少省调侧的倒送无功，网调发电机电压抬高，省调发电机机端电压降低。

图 10 描述了控制过程中网省地全局电网的网损变化情况。

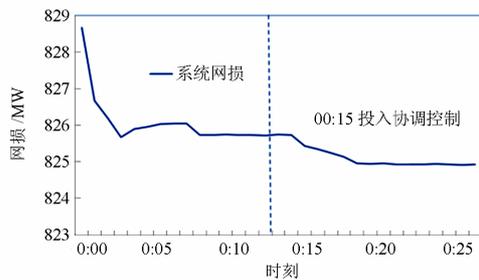


图 10 全局电网网损变化曲线

Fig. 10 Changing curve of system loss

在独立控制阶段，网省地进行分别独立控制，各自降低了网内网损，从而降低了全局电网的系统网损。

在协调控制阶段，降低了网省之间的交换无功，从而使得全局电网网损得到进一步降低。

图 11 描述了控制过程中网省交换无功之和的变化情况。

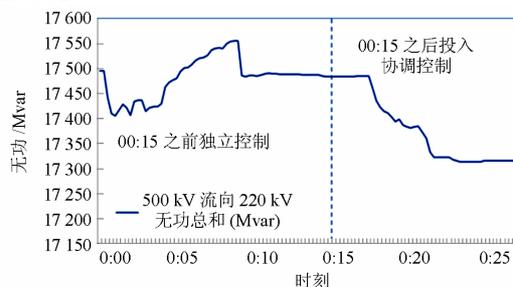


图 11 网省交换无功变化曲线

Fig. 11 Changing curve of reactive power exchange

在独立控制阶段，500 kV 流向 220 kV 的无功

先下降再升高，然后再次下降，出现无功波动的原因是由于网调优化目标和省调优化目标不一致。

在协调控制阶段，由于对网省之间的控制目标和控制行为进行了协同，使得网省之间交换无功呈单调下降趋势。

2.4 实验分析

在网省地独立控制条件下，网省地各级 AVC 的控制目标不一致，将可能会出现控制后的电压波动以及不合理的无功流动现象；通过网省地协调电压控制，协调网省地各级 AVC 的控制目标和控制行为，避免控制震荡，消除不合理的电压越限和不合理的无功流动，并使得全局电网网损得到进一步降低。

3 全天断面连续仿真效果

图 12 给出了南方电网的实际日负荷变化曲线。

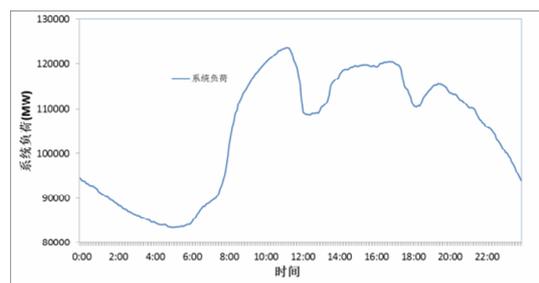


图 12 系统负荷变化变化曲线

Fig. 12 Changing curve of system active power

本节通过系统网损、联络线无功以及系统电压稳定裕度三个指标分别说明在不控制、独立控制以及双向互动协调控制三种控制条件下的控制效果。

3.1 网损控制效果对比

表 5 给出了系统平均网损对比情况。

表 5 系统网损情况对比

Table 5 Comparison of system loss

系统网损	全部/MW	低谷时段/ MW	高峰时段/ MW
无控制	797	670	861
独立控制	782	661	844
协调控制	774	656	832

可以看出，随着控制条件的提升，系统网损显著降低，提高了电网运行的经济性指标。

3.2 联络线无功控制效果对比

增加控制中心间的互动协调优化控制后，全局电网无功电压控制将尽量保证无功就地平衡，减少联络线无功传输。

表 6 给出了各时段联络线平均无功对比情况。

表 6 联络线无功情况对比

Table 6 Comparison of tie line reactive power

联络线无功	全部/Mvar	低谷时段/Mvar	高峰时段/Mvar
无控制	134	163	106
独立控制	125	150	99
协调控制	95	117	72

可以看出:

(1) 低谷时段的联络线传输无功大于高峰时段的联络线传输无功, 这是由于低谷时段, 负荷较轻, 网调 500 kV 主网充电无功较大, 需要由各省调来吸收部分充电无功。

(2) 独立控制前后, 虽然全网联络线无功有所降低, 但降低量并不大; 通过协调控制, 各控制中心 AVC 系统的控制目标保持一致和控制过程保持同步, 从而使得控制中心间的无功交换有了显著的降低。

3.3 电压稳定裕度控制效果

为保证电网安全, 通过无功电压控制, 保证无功就地平衡, 减少无功远距离传输, 从而增加系统电压稳定裕度。

表 7 给出了各时段系统平均电压稳定裕度^[25-26]对比情况。

表 7 电压稳定裕度情况对比

Table 7 Comparison of voltage stability margin

电压稳定裕度	全部/MW	低谷时段/MW	高峰时段/MW
无控制	14 647	18 616	12 631
独立控制	15 682	19 627	13 679
协调控制	16 289	19 943	14 140

可以看出, 随着控制条件的提升, 系统电压稳定裕度显著增加, 提高了电网运行的电压安全指标。

3.4 省地协调控制效果

表 8 为在峰谷各时段, 系统 AVC 省地协调模块投入前后, 系统网损率的变化情况。

表 8 系统网损率对比

Table 8 Comparison of system loss rate

网损率	协调前	协调后	减少
低谷时期	1.012%	1.001%	0.011%
高峰时期	1.021%	1.012%	0.009%

从控制效果来看, 省网平均网损率由协调前的 1.022% 降低为协调后的 1.016%, 省网系统网损平均减少 3.33 MW。

省地协调模块充分利用了地调关口内的无功调节手段, 改善省网的无功电压分布情况, 减少 220 kV 网络内的无功流动。因此有利于降低全网网损。

表 9 电压稳定裕度情况对比

Table 9 Comparison of voltage stability margin

电压稳定裕度	协调前/MW	协调后/MW	裕度增加/MW
低谷时期	26 979.61	28 230.66	1 251. 05
高峰时期	28 220.58	28 947.55	726. 97

从控制效果来看, 省调系统的平均负荷裕度由协调前的 27 791 MW 增加为协调后的 28 699 MW, 增加 908.15 MW。

由于系统电压稳定的主要危险点集中在电网末端(即负荷侧), 地调无功调节手段的投入有利于改善电网的本地无功平衡状态, 增加了末端网络的电压支撑能力, 因此有利于提高整体电压稳定裕度。

4 总结

本文结合南方电网实践, 建立了南方电网网省地全局电网闭环控制仿真系统, 使用单断面仿真和连续断面仿真两种方式模拟了无控制、独立控制、协调控制等不同控制条件下的电网运行状态变化, 研究分析不同的控制条件对系统网损、电压稳定裕度、联络关口无功等指标的影响, 仿真结果表明: 通过对各级自动电压控制系统控制目标和控制行为的协同, 可有效避免控制振荡, 消除网间不合理的无功流动, 使得全局电网无功电压分布更优。

参考文献

- [1] 陈宁, 于继来. 兼顾系统调频需求的分布式风电分散自治调控策略[J]. 电工技术学报, 2008, 23(11): 123-130.
CHEN Ning, YU Ji-lai. Strategy for decentralized autonomous regulation of distributed wind power considering system frequency regulation demand[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(11): 123-130.
- [2] 武诚, 徐政, 常勇. 高压侧电压控制对电力系统小扰动稳定性的影响[J]. 电工技术学报, 2009, 24(1): 146-152.
WU Cheng, XU Zheng, CHANG Yong. Effects of high side voltage control on the small signal stability of power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(1): 146-152.
- [3] 余涛, 周斌, 陈家荣. 基于多步回溯 $Q(\lambda)$ 学习的互联电网随机最优 CPS 控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(6): 179-186.
YU Tao, ZHOU Bin, CHEN Jia-rong. Stochastic optimal CPS control for interconnected power grids using

- multi-step backtrack $Q(\lambda)$ learning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(6): 179-186.
- [4] 邓卫, 唐西胜, 裴玮, 等. 含风电微型电网电压稳定性分析及控制技术[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 56-62. DENG Wei, TANG Xi-sheng, PEI Wei, et al. Voltage stability and control technologies of micro-grid with wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 56-62.
- [5] 张伯明, 孙宏斌, 吴文传, 等. 智能电网控制中心技术的未来发展[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 21-28. ZHANG Bo-ming, SUN Hong-bin, WU Wen-chuan, et al. Future development of control center technologies for smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17): 21-28.
- [6] 张慎明, 姚建国. 调度员培训仿真系统的现状和发展趋势[J]. 电网技术, 2002, 26(7): 60-66. ZHANG Shen-ming, YAO Jian-guo. Current simulation and development trend of dispatcher training simulator[J]. Power System Technology, 2002, 26(7): 60-66.
- [7] 辛耀中. 新世纪电网调度自动化技术发展趋势[J]. 电网技术, 2001, 25(12): 1-10. XIN Yao-zhong. Development trend of power system dispatching automation technique in 21st century[J]. Power System Technology, 2001, 25(12): 1-10.
- [8] ARCIDIACONO V, CORSI S, NATALE A, et al. New developments in the applications of ENEL transmission system automatic voltage and reactive control[R]. Paris, France: CIGRE, 1990.
- [9] 唐建惠, 张立港, 赵晓亮. 自动电压控制系统 (AVC) 在发电厂侧的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(4): 32-35. TANG Jian-hui, ZHANG Li-gang, ZHAO Xiao-liang. Application of the auto-voltage-control in power plants[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(4): 32-35.
- [10] 谢锋, 王学民. 电厂侧 AVC 子站安全约束控制策略优化[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16): 147-149. XIE Feng, WANG Xue-min. Security constraints control strategy optimization of AVC sub-station system in power plant[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(16): 147-149.
- [11] 钟毅, 陈蕊. 地区电网 AVC 系统设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(23): 41-44. ZHONG Yi, CHEN Rui. Design and realization of AVC system about area power system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(23): 41-44.
- [12] 王宽, 郑勇, 陈佑健. 考虑电压稳定的自动电压闭环控制[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(12): 31-34. WANG Kuan, ZHENG Yong, CHEN You-jian. Automatic voltage close-loop control with voltage stability[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(12): 31-34.
- [13] 丁晓群, 陈晟, 许杏桃. 全网无功电压优化集中控制系统在泰州电网的应用[J]. 电网技术, 2000, 24(12): 21-24. DING Xiao-qun, CHEN Sheng, XU Xing-tao. Application of optimization and centralized control system for reactive power/voltage in Taizhou power network[J]. Power System Technology, 2000, 24(12): 21-24.
- [14] 郭庆来, 孙宏斌, 张伯明, 等. 江苏电网 AVC 主站系统的研究和实现[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(22): 83-87. GUO Qing-lai, SUN Hong-bin, ZHANG Bo-ming, et al. Research and development of AVC system for power networks of Jiangsu Province[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(22): 83-87.
- [15] 李端超, 陈实, 吴迪, 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, WU Di, et al. Design and implementation of automatic voltage control system for Anhui power network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(8): 20-22.
- [16] CORSI S, POZZI M, SABELLI C, et al. The coordinated automatic voltage control of the Italian transmission grid - part I: reasons of the choice and overview of the consolidated hierarchical system[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(4): 1723-1732.
- [17] CORSI S, POZZI M, SFORNA M, et al. The coordinated automatic voltage control of the Italian transmission grid-part II: control apparatuses and field performance of the consolidated hierarchical system[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(4): 1733-1741.
- [18] 王智涛, 胡伟, 夏德明, 等. 东北 500 kV 电网 HAVC 系统工程设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(17): 85-88. WANG Zhi-tao, HU Wei, XIA De-ming, et al. Design

- and application of HAVC system in the 500 kV power grid of northeast China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(17): 85-88.
- [19] SUN Hong-bin, GUO Qing-lai, ZHANG Bo-ming, et al. An adaptive zone division based automatic voltage control system with applications in China[J]. IEEE Trans on PWRS, 2013, 28(2): 1816-1828.
- [20] 陈晓兵, 周群, 王庆红, 等. 广西电网无功电压优化控制系统[J]. 电网技术, 2007, 31(增刊 1): 34-38.
CHEN Xiao-bing, ZHOU Qun, WANG Qing-hong, et al. Voltage/optimization control system of Guangxi power grid[J]. Power System Technology, 2007, 31(S1): 34-38.
- [21] 李钦, 温柏坚. 广东电网电厂 AVC 子站建设研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(21): 38-42.
LI Qin, WEN Bai-jian. Research of the construction of AVC substation of power plant of Guangdong Power Grid[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(21): 38-42.
- [22] STOTT B, ALSICA O. Fast decoupled load flow[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1997, 93(3): 859-869.
- [23] 王彬. 多级控制中心无功电压协调优化控制[D]. 北京: 清华大学, 2011.
WANG Bin. A study on reactive power and voltage coordinated optimal control for multi-level hierarchical control centers[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.
- [24] 王彬, 郭庆来, 孙宏斌, 等. 双向互动的省地协调电压控制[J]. 电力系统自动化, 2010, 29(10): 36-40.
WANG Bin, GUO Qing-lai, SUN Hong-bin, et al. Bidirectional interaction based provincial coordinated voltage control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 29(10): 36-40.
- [25] SHIRMOHAMMADI D, HONG H W, SEMLYEN A, et al. A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1988, 3(2): 753-761.
- [26] FLUECK A J, DONDETI J R. A new continuation power flow tool for investigating the nonlinear effects of transmission branch parameter variations[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(1): 223-227.

收稿日期: 2013-10-08; 修回日期: 2013-11-20

作者简介:

周华锋(1977-), 男, 博士, 高工, 主要研究方向为电力自动化系统运行管理, 下一代电力自动化系统研究;

王彬(1984-), 男, 通信作者, 博士, 研究方向为调度自动化和无功电压优化控制; E-mail: wb1984@tsinghua.edu.cn

顾慧杰(1985-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统调度自动化。