

SVC 与 STATCOM 在大容量输电通道上的应用比较

丁理杰, 杜新伟, 周惟婧

(四川电力科学研究院, 四川 成都 610054)

摘要: 静止无功补偿器 (SVC) 和静止同步补偿器 (STATCOM) 都是无功补偿的重要装置, 在故障下的电压支撑、提高暂态稳定极限、阻尼功率振荡等方面对两者进行分析比较。仿真指出在输电通道上安装大容量无功补偿装置, 单个节点上安装 SVC 和 STATCOM 对维持节点电压的能力一般, STATCOM 好于 SVC; 在提高暂态稳定极限方面, STATCOM 的效果好于 SVC; 在增强系统阻尼效果上, 同容量的 STATCOM 明显优于 SVC, 同调节范围时两者阻尼控制效果基本一致; STATCOM 响应速度高于 SVC, 但响应速度对控制效果影响不大。

关键词: SVC; STATCOM; 电压支撑; 稳定极限; 阻尼控制

Comparison of application of SVC and STATCOM to large capacity transmission path of power system

DING Li-jie, DU Xin-wei, ZHOU Wei-jing

(Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610054, China)

Abstract: Both SVC (Static Var Compensators) and STATCOM (Static synchronous Compensator) are important equipments of reactive compensation, which are comprehensively compared from the aspects of voltage supporting on fault, improving the transient stability limit, and damping low frequency oscillation. The simulation results show that when high capacity static reactive compensation device is placed on transmission path of electric power system and SVC and STATCOM are equipped on single nodes, firstly, SVC and STATCOM do not have excellent ability to support node voltage, but STATCOM does better than SVC; secondly, STATCOM is much better than SVC in improving the transient stability limit; thirdly, for controlling damping low frequency oscillation, STATCOM is superior to SVC as they have the same capacity, and performs similarly with SVC as the two have the same controllable scope. Lastly, dynamical response speed affects the control result little though STATCOM responses much faster than SVC.

Key words: SVC; STATCOM; voltage supporting; stability limit; damping control

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)24-0077-05

0 引言

静止无功补偿器 (Static Var Compensator, SVC) 和静止同步补偿器 (Static synchronous Compensator, STATCOM) 采用电力电子开关器件, 能够快速调节注入系统的无功电流。SVC 是目前应用较普遍的无功补偿装置, 技术比较成熟, 通过控制晶闸管的开通来改变阻抗特性, 从而提供大小不等的无功功率。而 STATCOM 是最近发展的新型无功补偿装置, 通过控制可关断器件的通断来向系统提供无功^[1]。随着 FACTS 技术的广泛应用和智能电网的兴起, SVC 和 STATCOM 受到越来越多的关注。

大容量 SVC 和 STATCOM 主要应用于输电系统, 输电系统对静止型无功补偿装置的主要需求如下^[2-3]:

1) 故障下的电压支撑;

2) 提高静态及暂态稳定极限;

3) 阻尼功率振荡。

SVC 装置和 STATCOM 装置在技术性能上均能够满足上述技术需求。已有文献研究表明 STATCOM 的输出特性、损耗、响应时间、谐波、谐振等方面优于 SVC^[4]。输电系统选择静止型补偿装置时, 除考虑装置技术性能外, 还重点考虑装置的价格、成熟性等因素。尽管 STATCOM 在技术性能上好于 SVC, 但 STATCOM 装置的价格高于 SVC 装置, 其技术复杂程度也更高, 因此在输电系统中 SVC 所占据的份额远大于 STATCOM 装置, 其比例约为 6.7:1。

四川水电资源和用电负荷的分布, 以及四川电网在全国互联电网的位置, 决定了四川水电大功率、远距离的输电格局。这种输电格局, 使四川电网, 特别是川电外送通道的安全稳定问题存在长期性和

复杂性。随着全国特高压互联电网的兴起，四川水电外送规模加大，四川电网动态无功补偿不足和低频振荡问题日益突出。本文以 2009 年四川电网丰大运行方式为基础，站在输电通道上安装大容量 SVC 和 STATCOM 的角度，分别比较了 SVC 和 STATCOM 在故障下的电压支撑、提高暂态稳定极限、阻尼功率振荡三方面对四川电网稳定性的影响。

1 故障下电压控制能力

通过快速、连续地调节 SVC/STATCOM 无功出力，可实时改善系统节点电压，文献[5]等的研究成果表明在负荷终端安装 SVC/STATCOM 能有效提高系统电压支撑能力，防止电压崩溃。为检验输电通道上无功补偿注入对节点电压的影响，选取四川电网某 500 kV 站 35 kV 侧安装静止无功补偿装置。当 35 kV 侧注入幅值为 1 p.u.的正弦无功电流 I ，500 kV 侧电压 V_c 的输出响应约为：

$$V_c - V_{c0} \approx -0.003I \quad (1)$$

其中， V_{c0} 为 500 kV 侧初始电压。输入输出灵敏度幅值只有 0.003 p.u. (约 1.6 kV)，可见在输电通道上单一节点加装有限容量的 SVC/STATCOM，对控制系统电压的能力有限。

进一步以 150 Mvar SVC 和 ± 150 Mvar STATCOM 安装输电通道上作比较。两者的差别分别是：(1) 装置响应速度上，SVC 取 0.05 s，STATCOM 取 0.02 s；(2) SVC 输出为导纳限制，而 STATCOM 输出为电流限制。

500 kV 线路三相永久短路故障后结果如图 1 所示。第一摆低谷电压 STATCOM 可提高 0.004 5 pu (2.4 kV)，SVC 可提高 0.0037 pu (1.9 kV)。可见，在输电通道上，STATCOM 和 SVC 对故障后维持电压稳定有一定作用，STATCOM 略优于 SVC，但单个节点安装 SVC/STATCOM 对维持系统电压的效果不显著。

2 提高系统稳定极限

系统加装 STATCOM 后，可以提高系统功角特性曲线，增大静态稳定极限；系统故障时，运用合适的控制策略，可以减少加速面积，增大减速面积，提高系统暂态稳定极限^[6]。

(1) 暂稳极限比较

为比较 SVC/STATCOM 对系统暂稳极限影响，在四川水电送出通道安装动态无功补偿装置，安装容量仍取 150 Mvar。图 2 给出了未使用补偿情况下川西水电送出通道一回线三永故障，0.1 s 故障切除

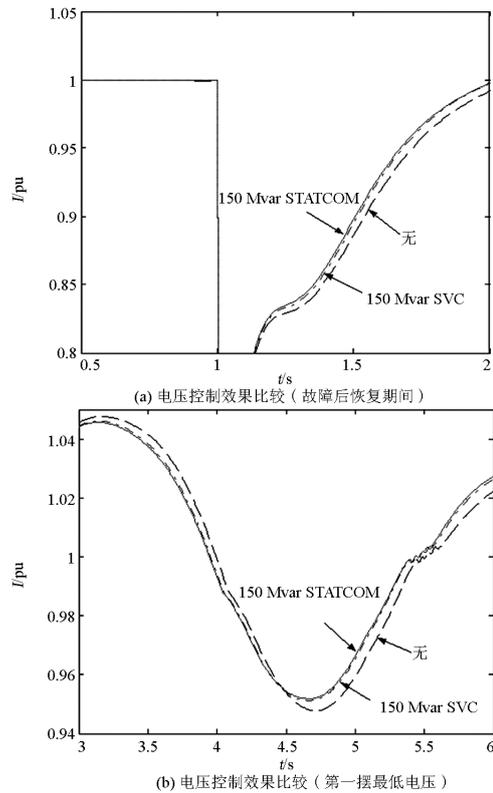


图 1 电压控制效果比较

Fig.1 Bus voltage

后断面功率的动态变化情况，当断面功率达到 2 509 MW 时，出现功角失步现象。图 3、图 4 给出了加装 150 Mvar SVC 和 STATCOM 后的断面功率变化，当加装 150 Mvar SVC 后，暂稳极限为 2 518 MW；当加装 ± 150 Mvar STATCOM 后，暂稳极限为 2 525 MW，此时临界稳定。根据仿真可得，采用快速无功动态补偿可以提高输电系统的暂态稳定极限，STATCOM 提高暂稳极限约 0.11 MW/Mvar，而 SVC 约为 0.07 MW/Mvar。在提高暂稳极限方面，STATCOM 优于 SVC。

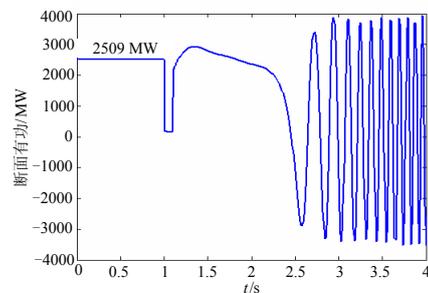


图2 不加无功补偿时的失稳曲线

Fig.2 Unstable example without compensator

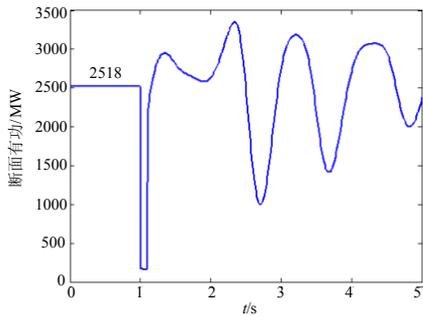


图 3 加装 150 Mvar SVC 时的临界稳定曲线
Fig.3 Boundary stability with 150 Mvar SVC

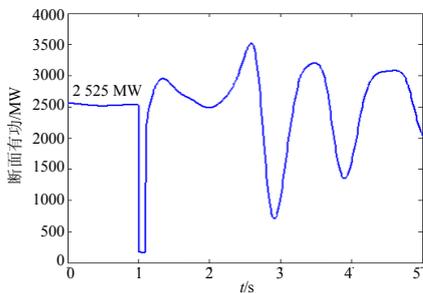


图 4 加装 150 Mvar STATCOM 时的临界稳定曲线
Fig.4 Boundary stability with 150Mvar STATCOM

(2) 装置响应时间影响

进一步考虑 SVC/STATCOM 装置响应时间对暂稳极限影响。以 SVC 为例, 当 SVC 的输出时延达到 100 ms, 加装 150 Mvar SVC 后断面暂稳极限为 2 516 MW。可见, 装置响应时间 (20~100 ms) 引起的暂稳极限变化小于 2 MW, 影响不大。

(3) 强补投入影响

系统处于暂态过程时, 若能快速响应主网一次电压 (500 kV) 和断面潮流的突变, 及时调整无功补偿装置输出, 形成快速强补, 则能进一步增大减速面积, 提高暂稳极限。强补的逻辑框图如图 5。

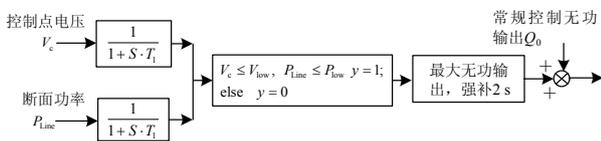


图 5 暂态强补逻辑框图

Fig.5 Logic diagram for transient high compensation

取参数 $V_{low} = 0.8, P_{low} = 10$, 加入强补功能后, 安装 150 Mvar SVC 后暂稳极限提高到 2 526 MW, 比无强补提高 8 MW; 安装 ± 150 Mvar STATCOM 后暂稳极限则提高到 2 530 MW, 比无强补提高 5 MW。可见, SVC 和 STATCOM 的强补快速投入对提高暂稳极限有一定意义。

(4) 短时过载能力

为进一步提高系统第一摆稳定性, 可利用无功补偿装置的短时过载能力提高无功输出。STATCOM 具有较好的短时过电流能力, 根据厂家设计资料, 其 1.5 倍额定电流允许过载时间 2 s, 1.15 倍过载允许时间 30 min。文中仿真取 1.4 倍额定值, 强补 1 s, 则断面暂稳极限可提高到 2537 MW。由于 SVC 输出等效电容受固定电容大小影响, 无法提供更多容性补偿, 因此, 考虑到 STATCOM 的短时过载能力, 在提高系统暂稳极限上, STATCOM 明显优于 SVC。

表 1 给出了加装 SVC 和加装 STATCOM 及考虑强补时对暂稳极限影响。

表 1 单位动态无功补偿对提高暂稳极限效果

Tab.1 Transmission limit addition per compensator

方式	提高极限/ MW/Mvar	
150 Mvar 无功补偿	SVC	STATCOM
	0.07	0.11
1 s 强补	SVC	STATCOM
	0.11	0.15
STATCOM 短时过载	0.2 (1.4 I _c , 1 s)	

3 阻尼功率振荡

STATCOM 通过快速地控制注入节点的无功功率来控制节点电压在一定范围内变化, 实时改变线路输送功率, 不仅可以阻尼低频的功率振荡, 还可以阻尼次同步振荡和超同步振荡。通过控制 SVC/STATCOM 的无功输出以改变发电机的有功输出从而增加系统的阻尼是对发电机控制中 PSS 概念的发展。若 SVC/STATCOM 的无功输出包含和发电机转速差 $\Delta\omega$ 成正比的一部分, 就会增大阻尼系数^[7]。与发电机励磁控制不同, $\Delta\omega$ 、 ΔP_e 、 Δf 等量不能从安装点直接测得, 需要通过广域测量信号或算法辨识得到。

设计阻尼控制器的主要难点是要得到系统区域间振荡模式及其对应的留数, 以作为确定 SVC/STATCOM 输入量和控制器相位补偿量的依据。但是利用传统的解析法对大系统的特征值进行分析存在困难。为此, 本项目采用了 Prony 分析方法, 研究阻尼控制器的参数设计、输入信号、安装位置。Prony 分析方法通过指数函数辨识, 能直接提取出振荡信号的跟踪特征, 为振荡模式的确定和阻尼分析提供基础。

在 SVC/STATCOM 预安装点施加一小扰动输入, 可得到输出变量 (如区域联络线功率、区域发

电机间角速度差、功角差等) 响应, 利用 prony 分析方法, 就能得到输入-输出的传递函数 $G(s)$ 。在四川电网分别考虑在成德环网及川电外送通道上安装 SVC/STATCOM, 广域输入信号分别考虑 500 kV 水电送出通道线路有功功率。

(1) 广域输入信号选择

以蜀州侧安装无功补偿为例, 分析送出断面上黄万线、南谭线、洪板线作为广域信号输入的效果。Prony 分析结果如表 2 所示。

表 2 不同输入信号留数

输入信号	主导特征根	留数模
南谭线	-0.067+2.3876i	0.074 9
黄万线	-0.072+2.3876i	0.099 8
洪板线	-0.067+2.3876i	0.099 9

Prony 法分析结果可知, 川渝电网和华中主网存在频率 0.38 Hz, 阻尼比 2.8% 的低频振荡模式。洪板线有功作为广域信号输入具有最大的留数模, 说明采用洪板线有功作为输入时, 系统可观性最好。

(2) 预安装点选择

根据以上分析结果, 以洪板线有功作为广域输入信号, 分别在成德环网及川电外送通道上安装 SVC/STATCOM, Prony 分析结果如表 3 所示。

表 3 不同安装点留数

安装点位置	主导特征根	留数模
尖山	-0.074++2.3876i	0.099 9
蜀州	-0.067+2.3876i	0.099 9
龙王	-0.076+2.3876i	0.102 8
谭家湾	-0.075+2.3876i	0.099 6
洪沟	-0.05+2.3876i	0.055
黄岩	-0.05+2.3876i	0.049 9

在不同的 500 kV 电网节点扰动下, Prony 法分析再次验证了川渝电网与华中主网间存在 0.38 Hz 的低频振荡。通过主导特征根下的留数分析可知, 在成德环网上安装 SVC/STATCOM 有着较好的可控性, 其中龙王效果相对最好。

(3) 控制参数选择

根据以上可观性、可控性分析, 选择在 500 kV 龙王站 35 kV 侧安装 150 Mvar SVC/STATCOM, 以洪板线有功作为输入信号, 经 prony 分析得传递函数 $G(s)$, 进一步分析得到如表 4 结果。

表 4 不同输入时的 prony 结果

Tab.4 Residues on different input signals

输入信号号	安装位置	主导特征根	留数模	初始相位	补偿相位
洪板线	龙王	-0.076+2.3876i	0.102 8	136°	54°

为比较 SVC 与 STATCOM 对阻尼系统振荡能力, 在 PSASP 6.2 中采用自定义建模方法, 建立 SVC/STATCOM 阻尼控制器的通用控制模型如图 6 所示。

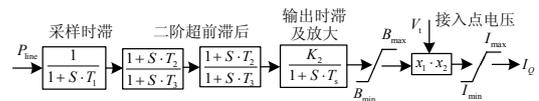


图 6 阻尼控制模型

Fig.6 Model of damping control

二阶超前滞后环节参数可采用式 (2) 计算^[8], 参数计算结果如表 5 所示。

$$\phi = 180 - \phi_0$$

$$\alpha = \frac{T_3}{T_2} = \frac{1 - \sin(\frac{\phi}{2})}{1 + \sin(\frac{\phi}{2})} \quad (2)$$

$$T_2 = \frac{1}{\omega\sqrt{\alpha}}$$

$$T_3 = \alpha T_2$$

表 5 阻尼控制器参数

Tab.5 Parameters of damping controller

参数	T_1	T_2	T_3	K_p	T_s	B_{max}	B_{min}	I_{max}	I_{min}
SVC	0.02	0.73	0.24	5	0.05	1.5	0	99	-99
STM	0.02	0.73	0.24	5	0.02	99	-99	1.5	-1.5

(4) 同容量 STATCOM 和 SVC 比较

根据表 5 参数, 150 Mvar SVC 可调容量为 0~150 Mvar, ± 150 Mvar STATCOM 的调节容量为 -150 Mvar~+150 Mvar。川渝断面 500 kV 线路三永故障, 0.1 故障切除, STATCOM 和 SVC 的控制效果如图 7 所示, 阻尼计算结果如表 6 所示。同容量时, 由于 STATCOM 可调范围是 SVC 的 2 倍, STATCOM 的阻尼效果远远好于 SVC。

表 6 同容量 STATCOM 和 SVC 阻尼比

Fig.6 Damping ratios of STATCOM and SVC with same capacity

无功补偿	无 SVC/STATCOM	SVC	STATCOM
阻尼比	0.8%	2.0%	4.2%

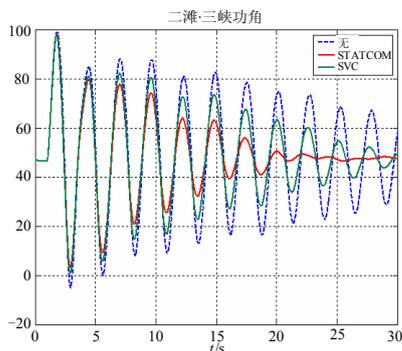


图 7 同容量 STATCOM 和 SVC 阻尼效果比较
Fig.7 Comparison of STATCOM and SVC in damping control with same capacity

(5) 同调节范围 STATCOM 和 SVC 比较

选取 SVC150 Mvar, STATCOM 则采用混合模型, 即 75 Mvar 固定电容加上 ± 75 Mvar STATCOM, 则 SVC 和混合型 STATCOM 的调节范围都是 0~150 Mvar。结果如图 8 所示, 当 SVC 与 STATCOM 调节容量相同, 则阻尼效果基本一致。

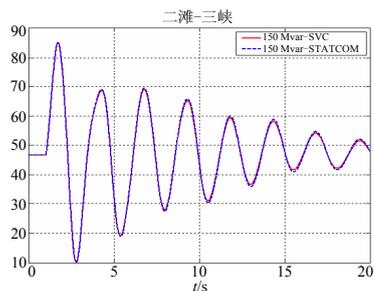


图 8 同调节范围 SVC 与 STATCOM 比较
Fig.8 Comparison of STATCOM and SVC in damping control with same controllable capacity

(6) 装置响应时间影响

在上述仿真中, SVC 装置输出响应时间取为 50 ms, STATCOM 响应时间取为 20 ms。为分析装置响应时间对阻尼功率振荡影响, 取 SVC 触发时滞为 100 ms, 仿真发现, 装置时滞常数大小 (20~100 ms) 对阻尼控制效果影响不大 (如图 9 所示)。

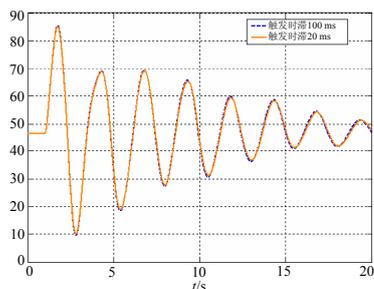


图 9 触发延时对阻尼效果影响
Fig.9 Effect of time delay to damping control

4 结论

本文以 2009 年四川电网丰大运行方式为基础, 对输电通道上安装大容量 SVC/STATCOM 的效果进行了分析, 得到:

(1) 有限容量的 SVC/STATCOM 对维持故障后节点电压的效果一般, 同容量的 STATCOM 略好于 SVC。为更好控制故障后节点电压, 需多个节点安装动态无功补偿装置。

(2) 在提高暂稳极限方面, STATCOM 的效果明显好于 SVC, 特别是利用 STATCOM 输出电流的短时过载能力可进一步提高系统暂稳极限。

(3) 在增强系统阻尼效果上, 同容量的 STATCOM 明显优于 SVC; 同调节范围时两者阻尼控制效果基本一致。

(4) STATCOM 响应速度高于 SVC, 但在维持节点电压、提高暂稳极限、增强阻尼效果方面, 响应速度对控制效果影响不大。

参考文献

- [1] 王平, 何源森, 邱宇峰, 等. 电力系统输电通道大容量静止无功补偿系统研究及其应用[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(10):10-18.
WANG Ping, HE Yuan-sen, QIU Yu-feng, et al. Research and application of high capacity static var system for transmission path of electric power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(10):10-18.
- [2] 周建丰, 顾亚琴, 韦寿祺. SVC 与 STATCOM 的综合比较分析[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(12): 57-60.
ZHOU Jian-feng, GU Ya-qin, WEI Shou-qi. Comprehensive comparative analysis of SVC and STATCOM[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(12): 57-60.
- [3] 管秀鹏, 孙元章, 赵国梁, 等. 南方电网西电东送暂态功率传输极限研究[J]. 电网技术, 2004, 28(2): 1-5.
GUAN Xiu-peng, SUN Yuan-zhang, ZHAO Guo-liang, et al. Research on transient power transfer limit of power transmission from west China to east China via south China electric power grid[J]. Power System Technology, 2004, 28(2): 1-5.
- [4] 刘文华, 宋强, 滕乐天, 等. 暂态电压稳定与新型动态无功补偿装置[J]. 电工技术学报, 2007, 2(7): 18-23.
LIU Wen-hua, SONG Qiang, TENG Le-tian, et al. Transient voltage stability and static synchronous compensator[J]. Transactions of China Electrical Society, 2007, 2(7): 18-23.
- [5] 陆超, 崔文进, 李红军, 等. 京沪穗电网暂态电压稳定问题与 STATCOM 应用[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(11):9-13.

(下转第 87 页 continued on page 87)

- [4] LIU You-fei, NI Yi-xin, Wu F F. Existence, uniqueness, stability of linear supply function equilibrium in electricity markets[C]. //Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting. 2004: 249-254.
- [5] XU Lin, YU Yi-xin. Transmission constrained linear supply function equilibrium in power markets: method and example[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 3 (3) : 1349-1354.
- [6] YUAN Zhi-qiang, LIU Dong, JIANG Chuan-wen. Analysis of equilibrium about bidding strategy of suppliers with future contracts[J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48 (3) : 1016-1020.
- [7] NIU Hui, Ross Baldick, ZHU Gui-dong. Supply function equilibrium bidding strategies with fixed forward contracts[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20 (4) : 1859-1867.
- [8] 张少华, 王晔, 李渝曾. 考虑远期合同交易的发电市场分段线性供应函数均衡模型[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (21) : 17-21.
ZHANG Shao-hua, WANG Xian, LI Yu-zeng. Piecewise linear supply function equilibrium model for power generation markets with forward contracts[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (21) : 17-21.
- [9] 王瑞庆, 李渝曾, 张少华. 考虑金融期权的电力市场供应函数均衡分析[J]. 华东电力, 2007, 35 (12) : 6-8.
WANG Rui-qing, LI Yu-ceng, ZHANG Shao-hua. Supply function equilibrium in electricity markets with financial option contracts[J]. East China Electric Power, 2007, 35 (12) : 6-8.
- [10] Ettore Bompard, Ma Yuchao, Roberto Napoli, et al. The demand elasticity impacts on the strategic bidding behavior of the electricity producers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22 (1) : 188-197.
- [11] 胡军峰, 李春杰, 赵会茹, 等. 基于博弈论的电力需求价格弹性与发电市场均衡关系[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (1) : 89-94.
HU Jun-feng, LI Chun-jie, ZHAO Hui-ru, et al. The relationship between price elasticity of demand and generation market equilibrium analysis based on game theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (1) : 89-94.
- [12] 张晓东, 高波. 基于供给函数均衡模型的区域电力现货市场模拟分析[J]. 电网技术, 2005, 29 (13) : 80-84.
ZHANG Xiao-dong, GAO Bo. Simulation of a real spot market based on supply function equilibrium model[J]. Power System Technology, 2005, 29 (13) : 80-84.
- [13] 宋宏坤, 汤玉东, 唐国庆, 等. 考虑需求侧竞价的发电公司竞价策略分析[J]. 电力自动化设备, 2007, 27 (6) : 43-47.
SONG Hong-kun, TANG Yu-dong, TANG Guo-qing, et al. Analysis of power generation enterprise bidding strategies considering demand-side bidding[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27 (6) : 43-47.
- [14] 陈晓明, 余贻鑫, 许琳. 计及输电约束和需求方投标的线性供给函数均衡点的求解算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (8) : 17-23.
CHEN Xiao-ming, YU Yi-xin, XU Lin. Linear supply function equilibrium with demand side bidding and transmission constrain[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (8) : 17-23.

收稿日期: 2009-12-13; 修回日期: 2010-04-15

作者简介:

周建中 (1959-), 男, 教授, 研究方向为人工智能与电力系统自动化; E-mail: prof.zhou.hust@263.net

李清清 (1983-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力市场; E-mail: kaiser_lee@yahoo.cn

李超顺 (1983-), 男, 博士研究生, 研究方向为人工智能。

(上接第 81 页 continued from page 81)

- LU Chao, CUI Wen-jin, LI Hong-jun, et al. Problems and solutions of transient voltage stability load of China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(11): 9-13.
- [6] 王仲鸿, 姜齐荣, 沈东. 关于新型静止无功发生器模型参数及暂态控制模型选择的讨论[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(24): 43-45.
WANG Zhong-hong, JIANG Qi-rong, SHEN Dong. Determination of the model and parameters of the static reactive compensation in controller designing[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (24): 43-45.
- [7] 刘隽, 李兴源, 汤广福. SVC 电压控制与阻尼调节间的相互作用机理[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 12-17.
LIU Jun, LI Xing-yuan, TANG Guang-fu. Interrelations between SVC voltage control and damping control[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 12-17.
- [8] 常勇, 徐政. SVC 广域辅助控制阻尼区域间低频振荡[J]. 电工技术学报, 2006, 21(12): 40-46.
CHANG Yong, XU Zheng. SVC supplementary controller based on wide area signals to enhance damping of inter-area oscillation[J]. Transactions of China Electrical Society, 2006, 21(12): 40-46.

收稿日期: 2010-04-16; 修回日期: 2010-06-29

作者简介:

丁理杰 (1981-), 男, 博士, 主要研究方向为电力系统稳定及控制. E-mail: ding_lj@163.com