

HAVC系统变电站多目标优化控制策略

谢邦鹏, 张雪敏, 梅生伟

(清华大学 电力系统国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 变电站电压无功控制是电网混成自动电压控制(hybrid automatic voltage control, HAVC)系统的重要组成部分, 其控制措施一般包括变电站有载调压变压器(OLTC)的调节和站内电容电抗器的投切等. 变电站电压无功控制器设计是一个典型的多目标优化问题, 即在调控过程中, 既要控制无功及电压尽量接近设定值, 又必须使OLTC的调节次数和电容电抗器的投切次数尽量少. 因此, 本文首先建立了HAVC系统变电站电压无功控制的多目标优化模型, 然后求解该多目标优化问题得到变电站电压无功优化控制策略. 对东北电网沙岭变电站的仿真分析证明了所提出的控制策略的有效性和正确性.

关键词: 混成自动电压控制; 电压无功控制; 多目标优化

中图分类号: TM761+.1 **文献标识码:** A

Multi-objective optimal control strategy design for substations in HAVC system

XIE Bang-peng, ZHANG Xue-min, MEI Sheng-wei

(State Key Lab of Power Systems, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Voltage and reactive power control for a substation is an important part of the power grid hybrid automatic voltage control(HAVC) system. In substations, on-load tap changer(OLTC), shunt capacitors and reactors are widely used as control measures. The design of voltage and reactive power controller in substations is a typical multiobjective optimal problem. That is, the voltage of the secondary bus should trace the desired value as closely as possible, and the number of regulations of OLTC and capacitors should be minimized to protect the equipment. In this paper, a multiobjective optimal model for substation voltage and reactive power control system is built, and the corresponding algorithm is proposed. Based on this algorithm, a multi-objective optimal control strategy of substation HAVC system is designed. The simulation results of Shaling substation in Northeast China demonstrate the effectiveness and correctness of this strategy.

Key words: hybrid automatic voltage control(HAVC); voltage and reactive power control(VQC); multi-objective optimal control

1 引言(Introduction)

现代电力系统通常采用自动电压控制(AVC)调节电网的电压和无功水平, 以保持电压稳定, 维护电压质量^[1]. 混成自动电压控制(HAVC)系统是传统AVC系统的革新和升级. 与传统AVC系统不同的是, HAVC系统以离散事件为驱动主体, 同时考虑电压稳定性、网络损耗以及电压动态性能3项优化指标, 从而实现系统的电压无功优化控制^[2~4].

HAVC系统首先对全网的电压无功运行状态进行分析与计算, 然后通过对电网内受控电厂发电机组和变电站OLTC及电容电抗器的调控, 达到调节全网电压水平和无功分布, 进而提高全网的安全性和经济性的目的^[4]. 因此, 变电站OLTC和电容

电抗器是HAVC系统的重要调控手段. HAVC系统进行变电站电压无功调控时, 与传统AVC系统类似, 通常采用由主站下发电压设定值到变电站的电压无功控制(voltage and reactive power control, VQC)系统, 然后由VQC系统对站内OLTC、电容电抗器组进行调控的方式. 传统的变电站VQC系统通常采用“九区图”^[1]、“十七区图”^[5]等控制策略. 但是, 传统VQC的控制策略是当变电站电压或无功已经运行在给定范围之外时投切电容电抗或调节分接头, 因此无法实现HAVC系统或传统AVC系统主站命令的精确调节, 而且容易发生控制振荡.

文[6,7]中设计了一种基于“改进的九区图”的变电站混成自动电压控制策略, 该控制策略解决

了传统九区图控制的振荡问题,并且可以在变电站VQC系统接收到HAVC主站下发的调节指令时,根据指令内容计算变电站内OLTC和电容电抗器组的调控量,从而对所控电压和无功进行较精确的调节,文[8]对指令到达时刻计算控制量的算法进行了改进.但是,文[6~8]的控制策略是只在收到HAVC主站调节指令时动作,因此电压和无功仍然会有较大的波动,而且没有考虑控制目标的跟踪与无功设备调控次数的协调问题,有可能对OLTC、电容电抗器进行不必要的调控.

本文在文[6~8]的基础上,致力于研究变电站电压无功控制系统的优化控制策略,即使用指令驱动和多目标优化的思想,以尽量少的OLTC调节和电容电抗器投切次数实现尽量高精度的电压无功控制.本文首先建立了该问题的多目标优化数学模型,然后给出了求解该问题的算法流程,之后用东北电网沙岭500kV变电站的数据对该算法进行了验证.

2 多目标优化控制策略设计(Design of multi-objective optimal control strategy)

2.1 多目标优化控制系统模型(Model of multi-objective optimal control system)

变电站的无功补偿设备一般都安装在主变压器的三次侧.如果有多台主变压器并联运行,为了避免产生环流,变压器的分接头位置应该尽量相同,因此可以将其等效为一个变压器,相应地无功补偿设备折算后接入该等效变压器.如果主变压器没有并联运行,则分别对每个主变及接入该主变的无功设备进行建模.总之,变电站一般都可以简化为一个或若干个如图1所示的等值电路^[6~8].

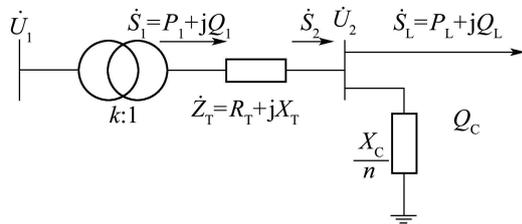


图1 变电站等值电路图

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of substation

图1中: \dot{U}_1 和 \dot{U}_2 分别代表变电站一次侧和二次侧电压; \dot{S}_1 、 \dot{S}_2 和 \dot{S}_L 分别代表变电站一次侧、二次侧和负荷功率; \dot{Z}_T 是变压器等值阻抗; k 是变压器变比; Q_C 为折算到变压器二次侧的并联电容器(或电抗器)吸收的无功; X_C 是电抗值(电容器为负,电抗器为负); n 是投入电容电抗的组数.

变电站VQC系统一般通过控制变压器的变比 k 和电容器组的投入组数 n 调节二次侧电压 \dot{U}_2 和一次侧无功功率 Q_1 ,使二次侧电压值 U_2 接近给定的

设定值 U_{cmd} ,并且将一次侧无功功率 Q_1 控制在一定的范围内.假设图1中OLTC的分接头在一次侧,则调高分接头位置时 k 增大,反之则 k 减小.又假设一次侧电压 \dot{U}_1 和负荷有功功率 P_L 在调节过程中保持不变,则 k 、 n 、 U_2 和 Q_1 之间的关系式为

$$f(k, n, U_2, Q_1) = \begin{bmatrix} (1 - \frac{nX_T}{X_C})U_2^2 - \frac{U_1}{k}U_2 + P_L R_T + Q_L X_T \\ Q_1 - Q_L + \frac{n}{X_C}U_2^2 - \frac{X_T}{U_2^2}[P_L^2 + (Q_L - \frac{n}{X_C}U_2^2)^2] \end{bmatrix} = 0. \quad (1)$$

其中: $k = 1 \pm m \times h\%$, m 为OLTC分接头的位置, $h\%$ 为OLTC每调节一档所带来的电压变化比率.

HAVC主站一般对所控的变电站下发电压指令,即给定二次侧电压目标值 U_{cmd} .因此,变电站电压无功控制系统的调控目标是,既希望电压偏差 $|U_{\text{cmd}} - U_2|$ 尽可能小,又要让OLTC和电容器调节次数 Δm 与 Δn 尽可能少,因为过多的调节对OLTC和电容器都不利.该多目标优化问题的数学模型可以写为

$$\begin{aligned} \min \{ & |U_{\text{cmd}} - U_2|, \Delta m, \Delta n \}, \\ \text{s.t. } & f(m_0 + \Delta m, n_0 + \Delta n, U_2, Q_1) = 0, \\ & U_{\min} < U_2 < U_{\max}, \\ & Q_{\min} < Q_1 < Q_{\max}, \\ & m_{\min} \leq m_0 + \Delta m \leq m_{\max}, \\ & n_{\min} \leq n_0 + \Delta n \leq n_{\max}. \end{aligned} \quad (2)$$

其中: m_0 和 n_0 分别是OLTC的初始位置和并联电容器组的初始投入数, m_{\min} 和 m_{\max} 分别是OLTC分接头的最低档和最高档, n_{\min} 和 n_{\max} 是并联电容器的最小和最大组数.

2.2 多目标优化控制算法及控制策略设计(Multi-objective optimal control algorithm and the design of control strategy)

变电站的电压无功控制系统在执行HAVC系统指令时,需要求解式(2)的多目标优化问题.为此,选用一个统一的指标 M 对3个指标进行折算,从而将多目标优化问题转化为单目标优化问题^[9],进而进行求解.指标 M 可看作是一个经济性指标,即如果电压目标差值 $|U_{\text{cmd}} - U_2|$ 越大,所带来的经济损失越大;OLTC的调节量和电容器组的投切数越多,相应的设备损耗和检修费用也就越多^[8].假设

$$M_1 = a \times |U_{\text{cmd}} - U_2|, \quad (4)$$

$$M_2 = b \times \Delta m, \quad (5)$$

$$M_3 = c \times \Delta n, \quad (6)$$

$$M = M_1 + M_2 + M_3 =$$

$$a|U_{\text{cmd}} - U_2| + b\Delta m + c\Delta n. \quad (7)$$

其中: a, b, c 分别是选定的3个目标各自的权重系数, 这些权重系数可根据变电站实际的成本核算或是通过仿真实验确定. 指标 M 将多目标优化问题(2)转化为下述单目标优化问题:

$$M = a|U_{\text{cmd}} - U_2| + b\Delta m + c\Delta n, \quad (8)$$

$$\text{s.t. } f(k, n_0 + \Delta n, U_2, Q_1) = 0,$$

$$k = 1 \pm (m_0 + \Delta m) \times h\%,$$

$$U_{\min} < U_2 < U_{\max}, \quad (9)$$

$$Q_{\min} < Q_1 < Q_{\max},$$

$$m_{\min} \leq m_0 + \Delta m \leq m_{\max},$$

$$n_{\min} \leq n_0 + \Delta n \leq n_{\max}.$$

式中 Δm 和 Δn 是控制变量. 在实际的变电站中, OLTC的分接头档位和电容器组总组数一般都不会太大. 因此, 可以首先针对 Δm 和 Δn 的各种组合分别计算出 U_2 (Q_1 不满足要求的情况可排除), 然后使用计算出的 U_2 分别计算出对应的 M , 最后对所有 M 进行比较, 即可得到最优解, 计算流程如图2所示.

如果变电站电压无功控制系统的控制目标不是二次侧电压, 而是一次侧无功功率时, 也可以使用类似的思路进行计算, 只需要使用新的目标值偏差量代替这里的二次侧电压偏差量即可.

基于以上多目标优化算法, HAVC系统变电站多目标优化控制策略的设计原理可以用图3表述.

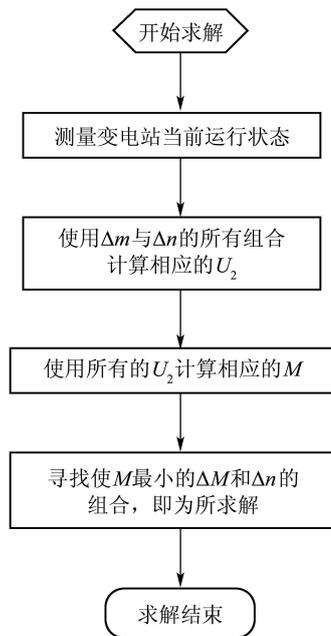


图 2 变电站电压无功多目标优化控制算法计算流程
Fig. 2 Flow chart of multi-objective optimal control algorithm in substation VQC system

变电站电压无功控制系统的运行模式主要分为两种, 一种是当HAVC主站下发新指令, 控制目标值变化时, 对变电站进行调节的情况; 另一种是没有新

的HAVC指令到达, 使系统状态维持在当前设定目标值附近的情况.

当有新的HAVC指令到达时, 需要启动上述的多目标优化控制算法计算流程, 立刻对系统运行状态进行调节, 以便满足新接收的HAVC指令设定值的要求.

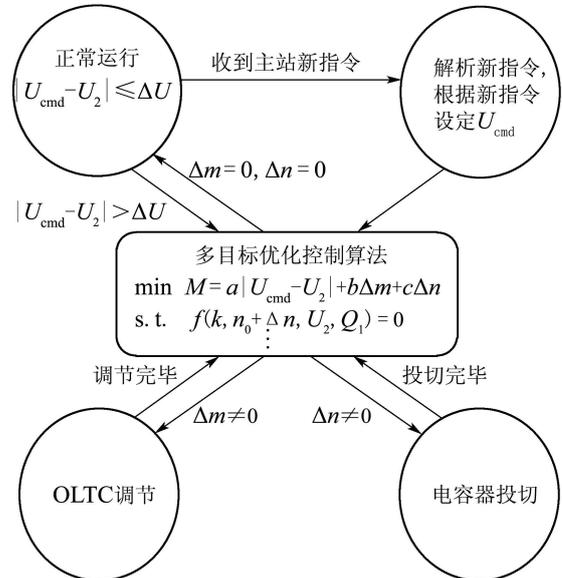


图 3 HAVC系统变电站多目标优化控制策略

Fig. 3 Multi-objective optimal control strategy of substation HAVC system

若HAVC指令所设定的控制目标值与当前运行状态相差较远, 则多目标优化控制算法计算出的OLTC、电容器组调节数会比较多. 在计算时, 由于忽略了负荷的变化等, 因此计算结果必然会有一定误差. 为了尽量减小该误差, 应在单次调节后, 重新计算调节指令, 以便以最小的调节量最精确地将系统状态控制到HAVC指令值附近. 例如, 如果初次计算出需要调高两档OLTC并投入一组电容器, 则应在调高一档OLTC后, 使用采集到的实际运行数据重新计算, 根据重新计算的结果继续进行调节. 每调节一步后都使用新的实际测量到的系统状态进行校正的方式, 可以得到最精确的调节结果.

当没有新的HAVC指令, 系统需要将所控的电压维持在可接受范围内. 由于负荷、高压母线电压等会发生波动, 所以当被控电压与目标电压的差值大于OLTC和电容器组调节引起的最小电压变化量 ΔU 时, 应使用多目标优化控制算法对系统状态进行分析. 如果计算结果需要进行调节时, 则进行相应的OLTC、电容器组操作. 一般来说, 这样计算出的OLTC、电容器组调节量不会很大, 但如果总调节量超过一档时, 仍应每次只调节一步, 调节后再使用实际测量值重新计算, 最终根据重新计算得到的结果决定是否需要进行进一步调节.

3 仿真分析(Simulations)

本文利用东北电网的沙岭500 kV变电站运行数据对所设计的HAVC系统变电站多目标优化控制策略和文[6]的控制策略进行对比分析(文[7,8]的控制策略设计思路与文[6]类似). 沙岭变电站参数如下所述:

变电站OLTC参数为

额定容量: 750 MVA;

额定电压: $525 \text{ kV} \pm 8 \times 1.5\% / 220 \text{ kV} / 66 \text{ kV}$;

OLTC台数: 2台(并联运行).

并联电容器组参数为

额定容量: 20 MVar(1.3152 μ F);

电容器组数: 6(每台OLTC接有3组);

OLTC分接头初始位置为0, 并联电容器组初始投入组数为1.

对并联变压器折算后的等效阻抗为

$$Z_T = 0.0002 + j0.0177(\text{p.u.}). \quad (10)$$

在定220 kV侧电压控制模式下, 电压的调节死区是 $\pm 5 \text{ kV}$, 无功可接受范围是

$$Q_{\min} = 0 \text{ MVar}, Q_{\max} = 150 \text{ MVar}. \quad (11)$$

沙岭变电站2006年4月17日负荷曲线如图4所示, 当天高压母线电压曲线及不加控制时的低压母线电压曲线如图5所示.

分别使用文[6]的控制策略与本文的HAVC系统变电站多目标优化控制策略对沙岭变电站的电压无功进行控制, 其中本文的多目标优化控制策略选用不同的控制目标权重系数 a, b, c . 假定当日HAVC系统给出的变电站低压母线电压设定值每两小时变更

一次, 仿真得到的当日平均电压差 ΔU_{avg} , OLTC总调节量 Δm_{sum} 和电容器组总投切量 Δn_{sum} 如表1所示.

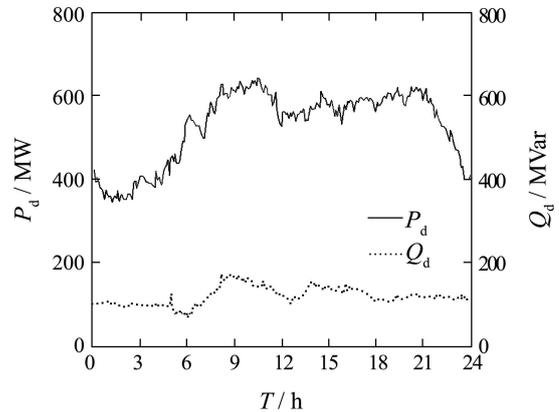


图4 沙岭变电站当天负荷曲线

Fig. 4 Load curve of Shaling substation

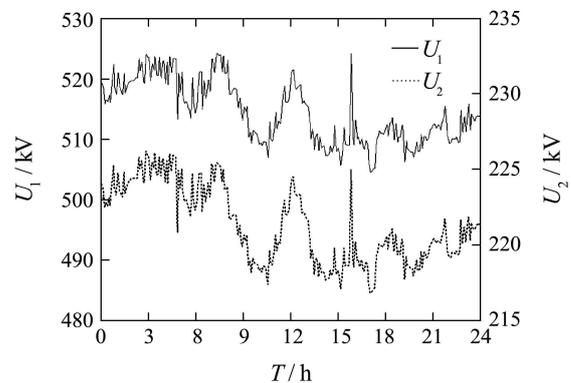


图5 高压母线电压及不控时低压母线电压曲线

Fig. 5 Voltage curve of U_1 & U_2 (without control)

表1 不同控制策略下平均电压差、OLTC调节量和电容投切量比较

Table 1 Simulation results with different control strategy

控制策略	控制参数			$\Delta U_{\text{avg}}/\text{kV}$	$\Delta m_{\text{sum}}/\text{级}$	$\Delta n_{\text{sum}}/\text{次}$
	a	b	c			
多目标 优化控 制策略	5	1	4	0.3968	26	97
	5	3	6	0.9082	46	10
	5	5	8	0.9564	40	4
	5	7	9	1.0001	32	4
	5	9	10	1.0439	24	4
文[6]控制策略				1.5673	7	5

从表1的仿真结果可以看出, 与文[6]的控制策略相比, 本文所设计的控制策略可以显著减小当日平均电压差, 让所控电压更接近于目标电压. 不过控制效果改善的代价是OLTC和电容器组的调节次数也有所增加. 所以, 需要选用合适的控制目标权重系数, 使控制效果满足要求的同

时, OLTC和电容器组的调节次数也在可接受的范围之内, 从而达到多目标优化的目的. 这里设定 $a = 5, b = 7, c = 9$, 分别使用文[6]的控制策略和本文的控制策略, 仿真出当日低压母线电压曲线如图6所示, 高压母线无功曲线如图7所示.

图6中: 折线 U_{cmd} 为当天HAVC系统给出的变

电站低压母线电压设定值, 仿真中假定每两小时变更一次; 虚线 $U_2\text{-ref6}$ 为使用文[6]的电压控制策略进行控制后的低压母线电压曲线; 实线 $U_2\text{-multi}$ 为使用本文设计的HAVC系统变电站多目标优化控制策略进行控制后的结果. 图7中, 虚线和实线分别为使用文[6]和本文两种控制策略得到的高压母线无功曲线.

从图6和图7可以看出, 两种控制策略都可以将高压母线无功控制在设定范围之内; 在 U_{cmd} 变动的时刻(即收到新的HAVC调节指令时), 都可以将所控电压调节到很靠近目标电压的状态. 但使用本文所设计的控制策略时, 与文[6]的控制策略相比, 两次调节指令之间的时间段里, 低压母线电压波动明显减小, 基本都在电压设定值的 $\pm 2\text{ kV}$ 范围之内, 且当日OLTC总共调节32级, 电容器组共投切4次, 都在可接受范围之内.

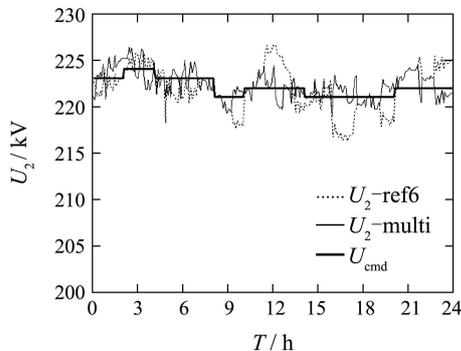


图 6 受控后的变电站低压母线电压曲线

Fig. 6 Voltage curve of low-voltage bus(with control)

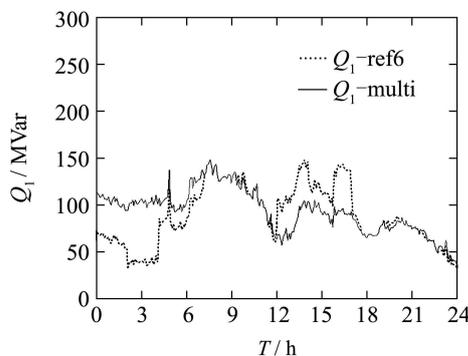


图 7 受控后的变电站高压母线无功曲线

Fig. 7 Reactive power curve of high-voltage bus (with control)

4 结论(Conclusions)

本文提出了一种HAVC系统变电站电压无功控制多目标优化算法, 该算法同时考虑减小电压控制偏差、减少OLTC调节量、减少电容电抗器投切量这3个目标, 可对变电站内的电压无功设

备进行优化控制. 基于该算法, 设计了HAVC系统变电站多目标优化控制策略, 该控制策略可与电网HAVC系统主站协调配合, 使变电站满足电网HAVC系统的调节要求. 仿真结果证明, 与已有控制方法相比, 该控制策略可明显改善变电站的电压无功运行情况.

参考文献(References):

- [1] 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.
(ZHOU Quanren. *Introduction and Application of Automatic Control System in Modern Power Grid*[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.)
- [2] 胡伟, 梅生伟, 卢强, 等. 东北电网混成自动电压控制的研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(1): 69–73.
(HU Wei, MEI Shengwei, LU Qiang, et al. Research on hybrid automatic voltage control of Northeast China power grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2004, 28(1): 69–73.)
- [3] 胡伟, 张雪敏, 梅生伟, 等. 静态混成自动电压控制的研究[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(6): 902–908.
(HU Wei, ZHANG Xuemin, MEI Shengwei, et al. Static hybrid automatic voltage control systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(6): 902–908.)
- [4] XIE B P, HU W, XIA D M, et al. The development and field experiment of power plant subsystem of the HAVC system[C] //2006 International Conference on Power System Technology, Chongqing. [S.l.]: [s.n.], 2006: 1–6.
- [5] 王远璋. 变电站综合自动化现场技术与运行维护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
(WANG Yuanzhang. *Field Technique and Operation Maintenance of Comprehensive Automatic System in Substation*[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.)
- [6] 王智涛, 梅生伟, 胡伟. 变电站混成自动电压控制策略研究[J]. 电工电能新技术, 2006, 25(4): 5–8.
(WANG Zhitao, MEI Shengwei, HU Wei. Study on hybrid automatic voltage control strategy of substation[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2006, 25(4): 5–8.)
- [7] 王智涛. 大电网混成自动电压控制理论及其工程实现的研究[D]. 北京: 清华大学, 2006.
(WANG Zhitao. *Study on Theory and Engineering Implementation of Hybrid Automatic Voltage Control for Large Scale Power Systems*[D]. Beijing: Tsinghua University, 2006.)
- [8] MEI S W, XIE B P, CHE W Y, et al. Hybrid automatic voltage control strategy and its application to Northeast China 500 kV power grid[J]. *European Transactions on Electrical Power*, 2009, 19(3): 355–367.
- [9] 徐玖平, 李军. 多目标决策的理论与方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
(XU Jiuping, LI Jun. *Multiple Objective Decision Making Theory and Methods*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.)

作者简介:

谢邦鹏 (1982—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统多目标趋优控制等, E-mail: xiebangpeng@gmail.com;

张雪敏 (1979—), 女, 博士, 助研, 研究方向为电力系统分析与控制等, E-mail: zxm01@mails.thu.edu.cn;

梅生伟 (1964—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统分析与控制等, E-mail: meishengwei@mail.thu.edu.cn.