

巨型风电并网系统的协同自律控制

卢 强¹, 盛成玉², 陈 颖¹

(1. 清华大学电机系电力系统国家重点实验室, 北京 100084; 2. 陕西省地方电力智能配电网研究中心, 陕西 西安 710061)

摘要: 巨型风电场并网发电的调度和控制是我国电力系统发展亟需解决的关键难题之一. 本文提出了风-水-气协同自律控制的理念和理论, 给出了消纳巨型风电的两种基本调度和控制策略, 即基于智能调度自动化系统(smart energy manage system, SEMS)的集中式控制和基于协同自律控制的调度策略. 本文对比分析了上述两种控制策略的适用情景, 指出后者更加合理和高效. 进一步, 本文探讨了发展基于协同自律控制的风-水-气联合调度系统所需关键技术, 试图为解决我国巨型风电并网发电调度难题给出一种方略.

关键词: 大规模风电; 风-水-气联合调度; 智能调度自动化系统; 分散自律控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Coordinated autonomous control strategy for power systems with large-scale wind power plants

LU Qiang¹, SHENG Cheng-yu², CHEN Ying¹

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

2. Research Center for Distribution Power Grid of Shaanxi Local Powe, Xi'an Shaanxi 710061, China)

Abstract: The operation and control of large-scale wind power plants is a critical problem in the development of power systems in China. Basic theory about the joint operation of wind-hydro-gas generators is proposed. Two control strategies, the strategy based on smart energy management system(SEMS) and the strategy based on coordinated autonomous control theory, are also described. For the high reliability and efficiency, the strategy based on coordinated autonomous control theory is recommended strongly. Finally, a discussion about key technologies for the implementation of the joint operation system of wind-hydro-gas generators is presented, which may be useful for further researches on the high performance operation of large-scale wind power plants.

Key words: large-scale wind power plants; joint operation of wind-hydro-gas generators; smart energy management system(SEMS); coordinated autonomous control

1 引言(Introduction)

众所周知, 风能是一种清洁可再生能源. 在我国广袤的陆地与海洋, 蕴藏着丰富的风力资源. 由于风力所天然具有的随机波动性, 使得接纳巨型风力发电场送出电力的系统的频率平稳性受到严重威胁. 因此, 如何让电力系统从根本上提高接纳风电的能力已经成为智能电力系统和智能电网建设中亟需解决的重要课题.

风电并入电网主要有两种形式: 其一是分布式并网, 即若干台风电机组并入某地方电网(如某省网)的35 kV以下配电网, 并与配电网中的小型水电站组成风-水组合体, 统一接受该省网的智能调度; 其二是巨型风电场并网, 通常指其容量达到1000 MW, 甚至10 GW以上的风电场, 通过高压交流或直流输电线路输送接入110 kV及以上电压等级的电网^[1,2]. 我国的风力资源呈陆海多区分布且每区风能高度集中的态势.

我国已建的内蒙百万千瓦级以及甘肃酒泉千万千瓦级的风电场, 是迄今地球上出现的空前巨大的集中风电场. 其并网运行问题自然就成为电力工作者从未遇到过的一项科技大挑战. 正如以上所提到的, 由于风功率具有难以预测的间歇性和随机波动性, 因此, 孤立考虑单一风电场的控制不能有效解决风电的大幅波动引起的相关电力系统的频率波动超标问题. 考虑多种能源注入功率协同控制是解决巨型风电场并网问题的有效途径. 例如, 利用大中型水电、燃气发电站的协控来抚平巨型风电场的功率波动, 以避免风功率波动引起的相关电力系统频率波动的超限.

本文首先介绍风-水-气联合调度的理论基础, 进而提出基于智能调度自动化系统(SEMS)集中控制的风-水-气联合调度策略和基于协同自律控制的风-水-气联合调度策略, 并对这两种策略进行了比较, 接着对解决巨型风电并网问题的协同自律控制的关键技术问题进行了探讨.

2 风-水-气联合调度的理论基础(Theory of joint operation of wind-hydro-gas power generators)

风-水-气联合调度的指导理论是电力混成控制论(hybrid control theory of power systems, HCTPS), 其主导思想是: 将运行中的电力系统的一切不满足要求和不满意的状态都分类地定义为事件, 通过控制使得系统回归至无事件运行状态, 则系统的各项指标(稳定性、电能质量和经济性)一定是足够满意的^[3~5].

HCTPS一个主要特征就是“事件驱动”, 即“事件启动控制, 控制消除事件”. 相对于控制论中已有的“时间基”(time base), 这种控制方式亦可称之为“事件基”(event base). 风-水-气协同自律控制系统将风电功率波动幅值越过规定标准定义为一个事件, 通过调节水力发电和燃气发电的出力以消除该事件从而保证该区域电力系统潮流和频率平稳.

图1展示出一个其容量超过1000 MW甚至10 GW 的巨型风力发电场向电力系统A输电的情态. 现在的问题是当电力系统A内部没有足够容量的水电或/和燃气电与之匹配, 当风电功率 P_w 发生超标波动时, 如何保持电力系统A的潮流和频率平稳?

可通过两种调控策略来解决上述问题: 一是基于A电力系统SEMS的集中调控策略; 二是基于协同

自律控制的调控策略. 下面分别对这两种调控策略加以阐述.

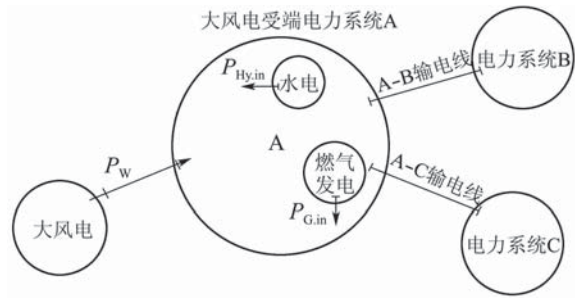


图1 风-水-气联合调度概念图
Fig. 1 Wind power transferring to power system A

3 基于SEMS集中控制的风-水-气联合调度策略(Joint operation strategy based on SEMS)

3.1 智能调度自动化系统(SEMS)(Smart energy management system)

SEMS是基于简述于第1节的电力混成控制论而构建的. SEMS对电力系统内所有可控资源(包括发电机、电容器、电控器、变压器分接头和各种FACTS设备等)进行运行状态多指标趋优的全自动闭环调控^[6], 其结构如图2所示.

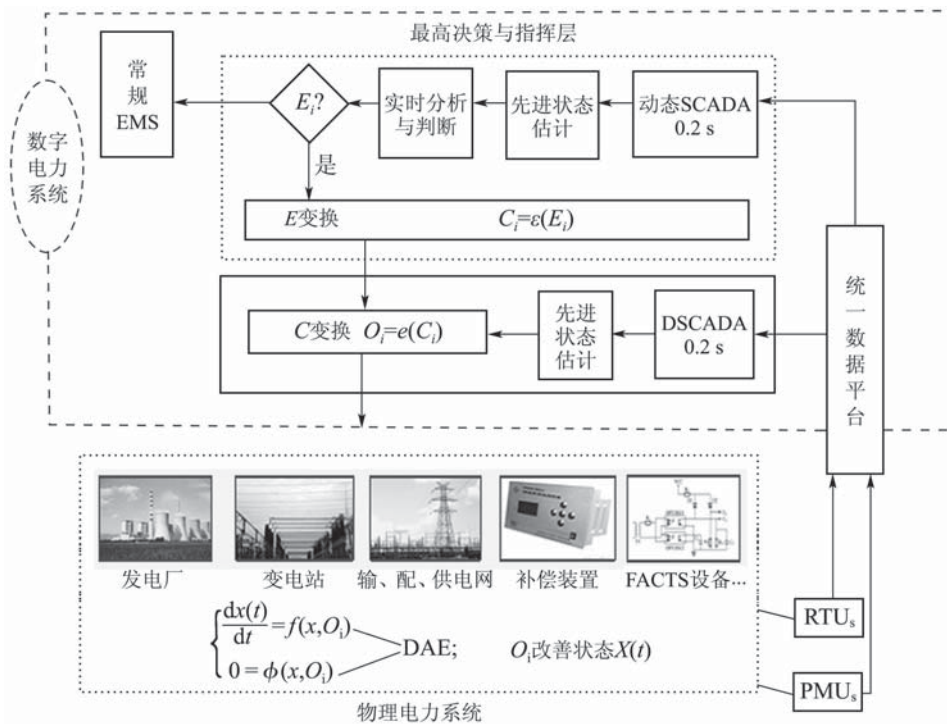


图2 自趋优调度自动化系统(SEMS)结构图
Fig. 2 Architecture of the SEMS

如上述, SEMS的核心理念是“事件驱动”. 其最高决策和指挥层从物理电力系统获得事件分

析所需要的数据和信息, 并将电力系统的实时状态与优化标准指标体系作比较、分析, 以此来判断

是否形成“事件”。若是, 则将该事件变换为对应的控制指令, 并下达给指令执行装置. 最终, 通过控制指令的执行, 消除相应的“事件”, 使电力系统回归到正常运行状态.

3.2 基于SEMS集中控制的风-水-气联合调度策略(Centralized control of wind-hydro-gas hybrid power based on SEMS)

如果如第1节所述, 接纳大风电的电力系统A的内部无足够的容量的水电或燃气电与输入的风电功率匹配, 则必须在A系统的外部配以足够容量的水电或/和燃气电与之协同, 一般说来, 外协配的水电和燃气电的容量约为输入风电总装机容量的1/3至1/2(视A系统内可调的水电和燃气电的容量以及外送的风电场是属于多风系或单一风系而定). 在以上必要条件具备的情况下, 依靠A系统的智能调度自动化系统(SEMS)来集中控制风-水-气发电站的出力(如图3所示). 其中: $|\Delta P_W| = |P_W(T + \Delta T) - P_W(T)|$ 为风电出力一分钟变化量的绝对值, $\Delta P_{Hy} = P_{Hy}(T + \Delta T) - P_{Hy}(T)$ 为注入电力系统A的水电功率一分钟的变化量, $\Delta P_G = P_G(T + \Delta T) - P_G(T)$ 为注入电力系统A的燃气电功率一分钟变化量. 依据图3给出的集中式调控方案, P_G 和 P_{Hy} 统一接受电力系统A的智能调度自动化系统SEMS(A)的调控. 当风电出力 P_W 在 $[T, T + \Delta T]$ 时间间隔内变化 ΔP_W , 则电力

系统A中的电功率的变化 ΔP_W 和频率变化 Δf 以及频率的变化率 $\frac{df}{dt}$ (以 f 记之)亦随之变化. 当这些数据中之一超过优化标准指标体系给出的阈值时, 即相应形成一类“风电波动过大事件” E_W , 即

$$E_W = \{E_{\Delta P_W}, E_{\Delta f}, E_f\}, \quad (1)$$

SEMS会自动将 E_W 变换成控制命令 C_W , 即

$$C_W = \xi(E_W). \quad (2)$$

再将式(2)的 ξ 变换得到的控制命令 C_W 传送到相应水电站或/和燃气发电站端的智能受控机(我国已有成熟技术), 再将 C_W 变换为一组具体操作指令 O_W 以调控 P_G 或/和 P_{Hy} , 从而使 E_W 消失. 如此可将A系统的频率波动范围限制在 $\pm 2\%$ 之内.

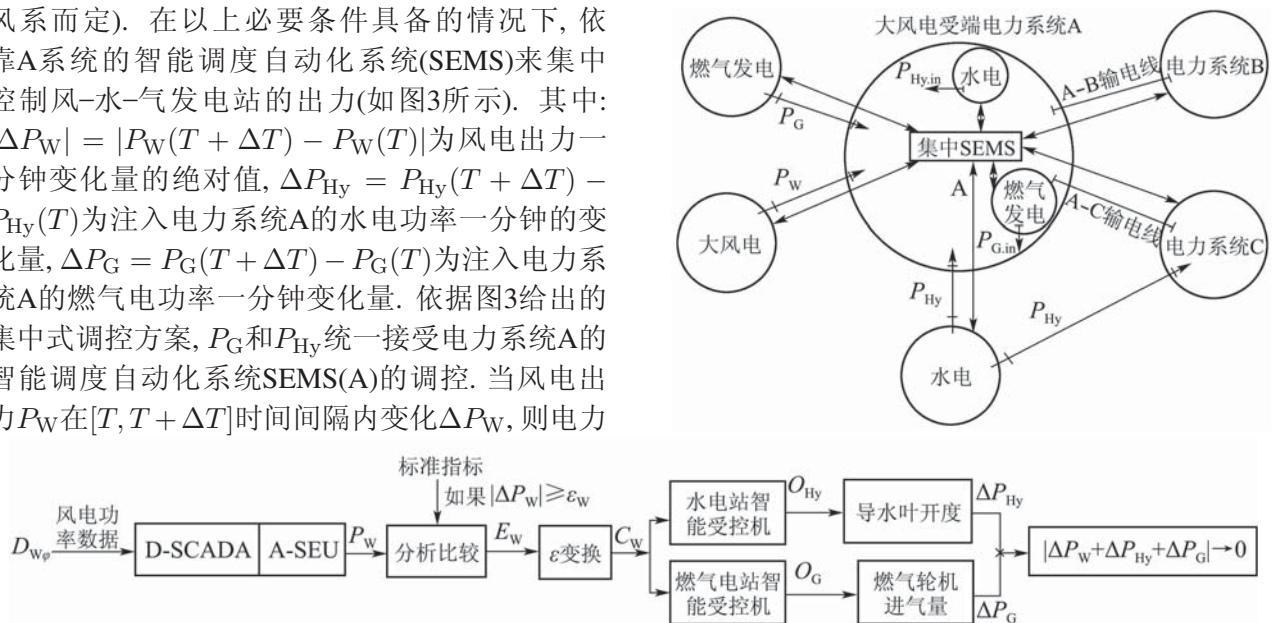


图 3 基于SEMS集中控制的调度策略
Fig. 3 Centralized control strategy based on SEMS

4 基于协同自律控制的风-水-气联合调度策略(Joint operation strategy based on coordinated autonomous control)

4.1 协同自律分散控制系统(Coordinated autonomous systems)

由具有多种类型子系统整组而成的相对独立的控制系统叫做协同自律控制系统(coordinated autonomous systems). 协同自律分散控制系统具有协同性(coordination)和自律可控性(autonomous controllability)两大特征. 这些不同类型的子系统可以在“相对独立的控制系统”作用下, 在满足物理条件和经济性约束下对于某种以求达到的目的而言具有互补性; 例如核电站与风电就因其不满足物理条件的约束而缺乏互补性; 又如抽水蓄

能电站因其在调节的时间响应尺度上不能满足物理条件的约束亦缺乏与风电功率随机波动的互补性; 而大型燃煤电站因其不满意经济性(节能降耗)约束也不能认为具有互补性. 此处的“自律可控性”是指上述“多种类型的子系统”的“协同性”能够在为了它们专门建制的“相对独立的控制系统”作用下得以实现^[7].

4.2 基于协同自律控制的风-水-气联合调度策略(Coordinated autonomous control of wind-hydro-gas generators)

基于协同自律控制的风-水-气联合调度策略如图4所示, 其特点是巨型风电场以及其协同调控的水电站或/和燃气轮机电站在将它们的状态信息

传送到电力系统A的智能调通中心的同时,也将它们的信息传送至自律控制系统的数据共享平台。

自律控制系统有其自身的SCADA和状态估计单元,再由其分析、比较单元判断风电出力的变化的绝对值 $|\Delta P_w|$ 以及A系统的频率变化和频率的变化率 $\Delta \dot{f}$ 是否大于标准指标体系设定的阈值 ϵ_w 。

若是,则形式风电变化出力过量事件 E_w ,自律控制系统自动将 E_w 变换为自律控制命令 C_w ,在一般情况下, C_w 是一个二维向量,即 $C_w = [C_{Hydro} \ C_{Gas}]^T$,以控制相关水电站或/和燃气机组的出力,从而平滑电力系统A的频率波动,使其小于 $\pm 2\%$ 。至于电力系统A内部的水电站和燃气发电站的控制则仍由电力系统A的SEMS执行。

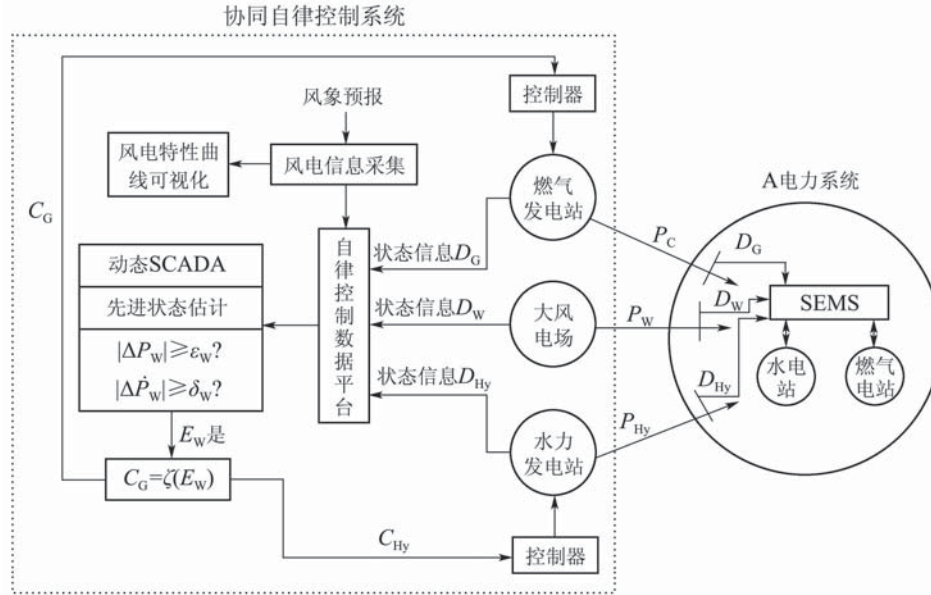


图4 基于协同自律控制的调度方案

Fig. 4 Coordinated autonomous control of wind-hydro-gas generators

5 两种控制策略比较(Comparison of two control strategies)

基于集中控制的调度策略或基于协同自律控制的调度策略均可抚平因巨型风电的功率波动所带来的系统功率和频率波动。

采用集中控制策略时,大型风电场、水电站、燃气发电站以及A电力系统内部各发电机组与负荷及潮流的信息都需要上传到受端电力系统的SEMS的数据共享平台,毫无疑问该平台上接收和存储的是海量数据和信息。SEMS根据这些数据和信息对系统中所有事件进行分析和处理。采用这种调度策略时,SEMS需要获得并分析全网各类信息,求解全局趋优化问题。可见,执行集中控制策略会加大调度自动化系统的执行负担,会在一定程度上降低A电力系统SEMS的总体调控效率,特别是平滑风电功率波动造成不良影响的效率。

但实际上为了平稳风电出力的过度被动所需要的信息是极为有限的,同时分析与判别的算法亦十分简单。将一个非常简单的相对独立的控制系统混入一个复杂调控系统中必然是既会降低为平稳风电出力波动所带给A系统不良影响的协同控制的效率,又会降低本来就很复杂的A系统的智

能调控效率,故这不被认为是一种明智之举。

采用协同自律控制策略时,大型风场、以及与其匹配的水电和燃气发电的调控由自律控制系统完成。自律控制系统只需少量信息即可完成协调控制,有利于调控的可靠性与高效性。巨型风电、水电和燃气发电的信息亦同时被传送到受端电力系统的SEMS,这样既是A电力系统SEMS系统能够全面了解系统状态,又减轻了SEMS的调控负担。

采用协同自律控制策略的另一个优点是,当有多个风电场同时向受端电力系统供电时,每个风电场已与相关的水电站或/燃气发电站组成协同发电系统,而每一个协同发电体由一个独立的协同自律控制系统进行调控。从受端电力系统的角度看,相当于有多个风-水-气联合发电系统同时向其供电,其中每一个联合发电体都可保证其本身输出功率平稳。这种情况下,若其中一个联合发电系统的自律控制中心出现故障,不会影响到其余联合发电系统,从而不会对整个系统的功率平衡和频率稳定造成太大影响。

综上所述,采用基于协同自律控制的风-水-气联合调度策略更为高效和可靠。

6 实现巨型风电并网系统协同自律控制所需的关键技术(Key technologies)

本节以下内容请参见图4.

6.1 动态SCADA (Dynamic SCADA)

现有的SCADA数据更新时间为3s~6s,属于准稳态范畴.考虑风功率的随机波动特性,该更新速率已经无法满足实时调控要求.因此,需要从数据采集的实时化、数据处理的高可信化以及基础平台的标准化入手,研建巨型风电并网系统的动态SCADA基础平台.

实现动态SCADA基础平台所需的关键技术环节包括:巨型风电并网系统调度的基础数据采集与共享平台、动态RTU(DRTU)、通信接口标准、高速时间数据库以及动态SCADA单元等.其中,DRTU的研发是最大的难点.DRTU的轮询周期应比传统RTU提高一个数量级,并且需要注以时标,来保证数据的实时性和统一性.

6.2 新型状态估计(Advanced state estimation)

实现风-水-气协同自律控制,需要研究新型状态估计技术以提高分析和控制所需信息的准确和可信性.传统的EMS中所采用的状态估计系统主要任务是根据电网基础量测设施和SCADA系统提供的实时信息,由于量测、传输等多种原因,这些数据中不可避免地夹杂一定数量的错误数据(通常称为不良数据或坏数据),故需有具备不良数据检测、识别等功能的称之为状态估计单元,以给出电网运行状态的较为准确可信的估计值.应该指出,传统的状态估计方法,主要建立在残差概念基础上.但是,对某测点而言,其残差最小,只能说明该测点估计值与量测值较为接近,而不能说明该测点估计值与真值较为接近.而且,由于量测误差客观存在,片面追求估计值与量测值最为接近,也不一定能达到使估计值接近真值效果.因而,以测点残差加权平方和或其他形式的和最小作为状态估计准则,或基于残差分布某些规律来对不良数据进行识别,未必是最恰当的.

针对这一问题,需要提出新的状态估计理论,建立系统真值未知情况下状态估计结果评价指标.然后,在此基础上,可提出可使状态估计结果评价指标达到最高、且收敛性好、维护简单的新型状态估计方法.本文作者所在的学术团队已完成这项技术的研发.

6.3 风功率高精度预测(Prediction technology for wind power)

风力预测、预报及其可视化服务是更好地达成协同自律调度目标所需要的.

实现风功率的预测,关键在于有效利用现代数值天气预报技术,结合较粗分辨率的大尺度背景环流场初始信息、高时空分辨率的中小尺度天气

预报模型和湍流模型以及高精度的地形地貌数据,给出尽可能精确的风力预报,并通过多元统计学模型计算得出风功率预测结果.

此外,风功率预测系统最好能够对超短期风力发电功率预报进行补充和修正,并且对各种灾害性天气(如强阵风、雷暴等)做出预警,有助于提高调度的预见性和机组检修计划的安排.

7 结论(Conclusion)

基于混成控制的风-水-气组合调度方法有助于解决电力系统平稳消纳巨型风电的难题.本文阐述了相关的理论基础,并给出了具体的实现策略,即基于SEMS系统的集中调控和基于协同自律的调控.

需要指出的是,虽然上述两种联合调度策略的基础都是混成控制方法,但其实现方式存在差异.其中,基于协同自律控制利用较少信息实现有效控制,可分散的处理多个风-水-气发电设施集群,具有更高的调控及时性和可靠性,是本文着重推荐的方案.

进一步,本文探讨了实现协同自律控制调控系统所需关键技术,对解决现时我国巨型风电友好地接入电力系统问题具有现实意义.

参考文献(References):

- [1] ACKERMANN T. *Wind Power in Power Systems*, Chicester[M]. UK: John Wiley & Sons Ltd, 2005.
- [2] HEIER S. *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*[M]. 2nd edition. Chicester, UK: John Wiley & Sons Ltd, 2006.
- [3] 卢强. 数字电力系统(DPS)[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(9): 1-4. (LU Qiang. Digital power systems[J]. *Automation of electric power systems*, 2000, 24(9): 1-4.)
- [4] 卢强, 戚晓耀, 何光宇. 智能电网与智能广域机器人[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 1-5. (LU Qiang, QI Xiaoyao, HE Guangyu. Smart grid and smart wide area robot[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2011, 31(10) 1-5.)
- [5] HE G Y, SUN Y Y, CHANG N C, et al. On engineering implementation of the digital power system[J]. *Science in China(Series E): Technological Sciences*, 2008, 51(11): 2021-2030.
- [6] LU Q, HE G Y, MEI S W, et al. Advanced EMS and its trial operation in Shanghai power system[J]. *Science in China(Series E): technological Sciences*, 2008, 51(2): 220-224.
- [7] 森欣司. 自律分散系统入门: 从系统概念到应用技术[M]. 北京: 科学出版社, 2008.

作者简介:

卢强 (1936—), 男, 教授, 中国科学院院士, 瑞典皇家工程科学院外籍院士, IEEE最高等级会员(IEEE Fellow), 从事电力系统分析与控制研究, E-mail: luqiang@tsinghua.edu.cn;

盛成玉 (1962—), 男, 高级工程师, 陕西省地方电力集团有限公司总工程师, 研究方向包括智能配电网、分布式发电等, E-mail: shengchengyu@163.com;

陈颖 (1979—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统动态仿真、并行和分布式计算, E-mail: chen_ying@mail.tsinghua.edu.cn.