

# 有大规模风电场接入的电力系统在线紧急协调电压稳定控制

陈中, 高山, 王海风

(东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 研究了大规模风电场接入输电系统后对并网系统暂态电压稳定性的影响以及如何通过在线协调控制提高系统电压稳定性。基于大规模风电场的弱连接、不可控性、不确定性等特点, 提出了基于第三类控制和多代理信息系统的在线紧急协调机制, 基于该协调机制对系统中控制装置实施紧急在线协调, 使其能够有效应对大规模分布系统对并网系统电压稳定性的影响。通过一个示例系统表明, 在风电场功率变化较大时, 通过在线协调紧急控制机制对区域内部和邻近区域的有效协调控制, 能够有效提高系统的电压稳定性, 验证了该协调机制的可行性。

**关键词:** 风电场; 协调控制; 多代理系统; 第三类控制

## On-line collaborative stability control of power system integrated with large-scale wind farms

CHEN Zhong, GAO Shan, WANG Hai-feng

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** This paper studies the impact of large-scale wind farms on the stability of its integrated power system and demonstrates that negative impact can be eliminated effectively via the proposed on-line collaborative control of existing power system controllers in the power system. Firstly the weakly-connected, uncontrollable and unexpected characteristics of wind farms are presented that conventionally can be compensated by installing larger capacity energy storage units in the power system. The paper proposes an on-line collaborative control method based on the theory of multi-agents system and the third-category control. Online emergent collaborative control in system control device can be implemented by using the proposed method, which can reduce the impact of large scale distribution system on the voltage stability of interconnected system. A case shows that when the power of wind farms changes largely, the effectively collaborative control on inner area and adjacent area by using on-line collaborative control mechanism can enhance system voltage stability effectively. The feasibility of coordination mechanism is verified.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50707004).

**Key words:** wind farms; collaborative control; multi-agents system; third-category control

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)18-0008-05

## 0 引言

近年来, 风能的研究、开发和应用在世界各国得到了前所未有的重视。我国是一个能源紧缺的国家, 开发风能是我国未来电力系统发展的大趋势, 开展对大规模风电场的研究具有巨大的战略意义。

风电场由大量风电机组成, 风能的大规模利用, 必然要通过输电系统将能量大规模地送至外部电力系统。而风电场运行方式具有不可预测性, 比如风电场风力的波动和消失, 并且系统自身不具备通常发电系统所具有的各种控制手段。所以, 风能给现代电力发展提供了新的机会, 同时也向已存在的电力系统的安全运行提出了挑战, 如何解决大规模风

电场对系统稳定性的影响已经成为风能能否大规模利用的瓶颈。

目前国际上对大规模风电场对系统影响的规律已经开始了探索。文献[1]介绍了包含 100 台以上 100 kW 风电机组成的大型风电场通过输电线路弱连接入电力系统后对系统电压稳定性造成的冲击, 发现风电场在输出功率达到一定值后, 系统电压会失去稳定。文献[2]基于气象数据对风力发电场提供的能量进行较为准确的估计, 在风电场与系统并网时基于估计值进行合理的运行计划分配, 保证系统稳定。文献[3]对由风电场和水轮机组成的风电场连接并网系统后的影响进行了研究, 发现在故障后必须有部分风车与系统断开才能保证系统的稳定。文献[4]对爱尔兰大规模风电系统并联接入系统后研

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50707004)

究发现,风电系统瞬时输入功率和系统负荷总需求的比值对系统的稳定性影响非常大,运行人员一般应该把比值控制在30%以下,可以保守地维护系统稳定。已开展的工作对稳定性规律有了一定认识,但是对于如何有效解决稳定仍处于探索之中。

应对大规模风电场对并网系统电压稳定性影响的有效技术手段是在系统中装设大规模的储能装置,一旦需要,可以紧急调动储能装置吸收或释放能量,满足电力系统安全运行的要求。需要强调的是,电压稳定是本地负荷稳定问题,但在本地控制不能满足要求的场景下,如果有邻近区域的及时的补充以支撑电压,能有效避免电压崩溃事故。本文提出一种目的同于大规模的储能装置,但是思路完全不同的技术手段,即通过电力系统中已有的控制装置的紧急在线协调,提高这些控制器的覆盖范围和效率,充分调动系统中已有的控制手段的潜能,使其能够有效应对大规模风电场对并网系统的影响,保证系统的安全运行。

本文首先介绍了大规模风电场的特点,然后对基于第三类控制和多代理系统的在线紧急协调控制机制进行了详细描述。最后通过实例系统进行的仿真结果验证了协调控制系统的可行性和有效性。

## 1 大规模风电场特点

大规模风电场是由大量发电机组成的发电系统,具有不同于普通电力系统的特点。

大规模风力发电场处在远离主要负荷的边远地区,不像普通的分布式电源,都处在负荷中心,要充分利用能源,必须要和输电系统连接,将能量送至负荷中心。而由于环保和投资的影响,不可能架设较多的连接线路,这就决定了风电场和主电力系统很有可能是弱连接。这种弱连接系统,当风电场规模较大时,导致稳定问题发生概率大大增加。

风电场中的风力发电机一般都是异步电机,当风速过低和过快时风力发电机都会停机,而即使处在一定风速范围内时,风力机的输出功率也是随着风速的变化而变化。而异步电机没有励磁装置,输出电压也是自身不可控的。因此不可控性是大规模风电场不同于常规电力系统的重要因素之一。

风电场能量来源——风能是随机性的,尽管在总体上满足一定的统计规律,比如通过天气预报、常年统计,能够对某一个时段内有一个全局上的认识,但是针对每一个具体的暂态时刻,风力输出功率都是随机不可预测的,而这种不确定性对系统的稳定性影响可能非常大,比如系统发生级联故障已经处于临界稳定状态范围时,正是风电场能量的不确定性决定了系

统的稳定性。当风电场和主系统处在弱连接,风能所占比重较大时对稳定性影响更为明显。

因此风电场所具有的弱连接、不可控、不确定的特点决定了在其与主系统并网运行时将会对整个系统的稳定性产生不利的影 响,甚至会导致主系统产生崩溃。同时对并网系统又不能采用常规的电力系统控制方法,文献[5]通过装设常规SVC(Static Var Compensator)以跟踪风力发电的无功随机需求,提高接入系统的电压稳定性。文献[6-7]通过装设超导储能装置SMES(Superconducting Magnetic Energy Storage)以实时对并网风电场的有功和无功输出变化加以跟踪补偿,能够明显降低风电波动时对电网的冲击,但同时文献[7]也指出SMES必须有足够的容量以调节风电场有功无功的输出,否则调节效果并不明显。本文拟通过系统中已有控制器的协调控制,充分提高相关控制器的利用效率,以满足大规模并网系统的电压稳定性要求。

## 2 协调控制机制

本文针对如何应对风电场对并网系统稳定性的影响,提出一种目的同于大规模的储能装置,但是思路完全不同的技术手段,即通过电力系统中已有的控制装置的紧急在线协调,提高这些控制器的反应时间、利用效率和影响范围,充分调动系统中已有的控制器的调节能力,使其能够有效地应对大规模风电场对并网系统电压稳定的影响,保证系统的安全运行。

### 2.1 在线协调框架

在并网系统处于紧急状态时,各个控制器需要互相“谈话”,综合信息以实施协调控制,同时又必须根据自身情况实时调整控制策略,就控制要求而言,控制器的在线协调机制既要求有信息的集中控制,又要求有控制器的分散控制,因此普通的集中控制和分散控制已经不能满足要求。

文献[8]提出处于集中控制和分散控制之间的“第三类”控制方法,基本框架如图1所示,可以看出:系统中任一本地装置仍然取本地反馈信号,就控制信号而言,不涉及远程传输,控制是分散的;但是本地装置之间设置了信息的快速交换,通过对交换的信息加以处理和综合,指导本地控制器的行为,又有了信息的综合。同时在第三类控制框架中,本地装置不仅要求能反馈本地信号,而且要求能与信息交换管理中心和其他的控制器进行信息交换,能自身进行电压调整。而多代理具有的自治性、可通信性、反应性和针对环境性的优点也满足了本地装置的要求。因此就实施控制的理念而言,多代理

系统技术和第三类控制技术是十分适合嵌入在线紧急协调机制中的，其基本框架如图 2 所示。并且该协调机制也得到了部分应用<sup>[9]</sup>。

在该协调机制中，信息交换管理中心作为协调控制中的管理者，在系统处于稳态时，通过信息慢速交换通道得到各个本地代理上传信息，基于全面信息的处理决定控制策略，比如根据灵敏度计算选择参与协调控制的控制代理，并且将控制策略下发至每一个相关代理，在暂态时，信息中心不再对本地代理下发指令，而只是负责通过信息慢速交换通道接收上传数据。信息中心会根据上传数据在每一个周期协调策略做出调整。

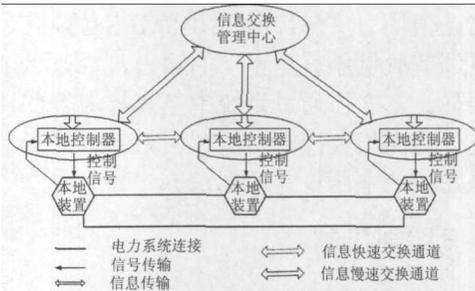


图 1 第三类基本框图

Fig.1 Framework of third-category control

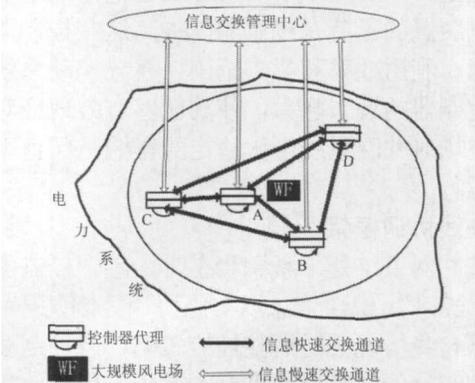


图 2 基于多代理系统和第三类控制的在线协调控制框架

Fig.2 Framework of collaborative on-line control based on third category control and multi-agent system

各个本地控制代理都作为执行者，在稳态时通过信息慢速交换通道向信息中心上传本地控制信息，接收信息中心的下传信息；在暂态时，基于信息快速通道，各个代理通过信息转发和群发，制定协调策略。以图 2 为例，在稳态时，信息中心通过信息计算将对系统起较大支撑作用的本地控制代理 A、B、C、D 作为防线内的协调代理。在暂态时，假设代理 A 感受到了防线系统即将失稳，立即根据稳态协调协议通过信息快速交换信道向防线内代理 B、C、D 群发求助信息；代理 B 接受到 A 求助信息后，向其他各个被求助代理 C、D 转发求助信息和自身状态信息，同

理代理 C、D 也向代理 B 转发信息；代理 B 接收到被求助代理 C、D 的转发信息后，结合代理 A 求助信息，通过信息融合，制定协调控制策略。

这种以多代理系统和第三类控制为支撑的在线协调控制框架有别于普通的集中协调控制，因为它参与控制的本地控制器不是固定的，是由信息中心根据稳态场景协调策略指定的；同时在暂态时刻，只通过各个代理之间的交互信息进行直接协调而不需要通过信息控制中心下发命令间接协调，这样不仅节省了通讯时间，也减低了通讯出错的概率。

### 2.2 协调量化指标

系统在处于超紧急状态时，各个被求助代理在接收到求助代理的求助信息和其他被求助代理的状态信息后，必须有效、迅速地制定协调策略。协调指标必须考虑求助代理自身电压水平，求助代理自身稳定水平，被求助代理对求助代理的控制性能，被求助代理自身电压调节性能等，本文基于上述因素，协调指标如式 (1) 定义：

$$Eing_i = k1 \cdot k2 \cdot k3 \cdot k4 \cdot \Delta E_{fdi} \quad (1)$$

$Eing_i$  为第  $i$  个被求助代理的协调指标。

$$k1 = \Delta V / |V| \quad (2)$$

式中： $\Delta V$  为求助代理电压偏差； $|V|$  为电压幅值。因此  $k1$  考虑了求助代理电压水平因素， $k1$  越大，代表电压偏差越大，需要的协调帮助也越大。

$$k2 = 1 / (1 + \Delta s_d + \Delta \dot{s}_d) \quad (3)$$

如果求助代理为电动机负荷，转差  $s$  是稳定性的重要因素，如果  $s$  不断地趋向于临界转差  $s_{cr}$ ，则稳定性水平越差，同样趋向临界转差  $s_{cr}$  的速度越快，稳定性水平越差，定义  $\Delta s_d = s_{cr} - s$ ， $\Delta \dot{s}_d$  为  $\Delta s_d$  的变化速率，因此  $k2$  考虑了求助代理电压稳定水平的因素， $k2$  越大，代表转差越接近临界转差，电压稳定水平越低，需要的电压协调帮助越大。

$$k3 = \rho_i / \sum_{j=1}^n \rho_j \quad (4)$$

式中： $\rho_i$  为第  $i$  个被求助代理对求助代理的电压控制性能，基于被求助代理无功电压对求助代理电压的灵敏度指标求取； $n$  为被求助代理个数。因此  $k3$  考虑了被求助代理的控制性能因素， $k3$  越大，被求助代理的控制性能越好，给予的协调帮助也越大。

$$k4 = \Delta E_{fdi} / \sum_{j=1}^n \Delta E_{fdj} \quad (5)$$

式中： $\Delta E_{fdi}$  为第  $i$  个被求助代理的调节备用，定义

为:  $\Delta E_{fdi} = E_{fmaxi} - E_{fi}$ ,  $E_{fmaxi}$  为代理调节能力极值 (AVR 为励磁极值, STATCOM 为功率极值);  $E_{fi}$  为运行点值 (AVR 为励磁值, STATCOM 为功率值)。因此  $k4$  考虑了被求助代理自身电压调节备用,  $k4$  越大, 运行点离极值越大, 备用越大, 给予的协调帮助越大。

因此, 协调指标  $Eing$  综合考虑了求助代理的运行状况和被求助代理的控制性能, 能较好地实现协调控制。

### 3 算例

本文通过图 3 所示系统验证紧急协调控制机制的有效性和可行性。两区四机系统通过联络线 L 与外接系统相连, 并且在 N5 弱连接了风电场 (WF) 和补偿装置 (STATCOM)。两区四机系统加上风电场组成了协调防线区域。

算例 1: 1.0 s 时联络线 L 断线, 如果风电场风速如图 4 所示波动很小, 通过各个控制器的自身电压调整, 整个区域电压稳定, 电压曲线如图 5 所示。

算例 2: 1.0 s 时线路 L 断线, 如果风电场风速如图 4 所示, 突然增大了 30%, 通过各个控制器的自身调整, 和补偿装置的动态补偿, 已经不能消除风电场对整个区域的影响, 整个区域电压失去稳定, 电压曲线如图 6 所示。

算例 3: 基于算例 2, 通过本文提出的协调机制以保持电压稳定, 协调周期为 200 ms。

在稳态时, 信息管理中心决定防线区域内的协调控制代理包括: AVR1 本地代理、AVR2 本地代理、AVR3 本地代理、AVR4 本地代理、STATCOM 本地代理、L7 本地代理、L9 本地代理。

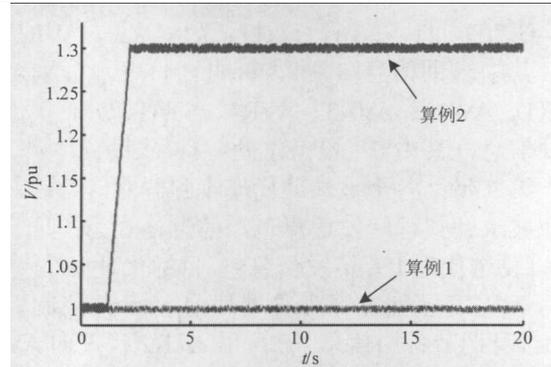
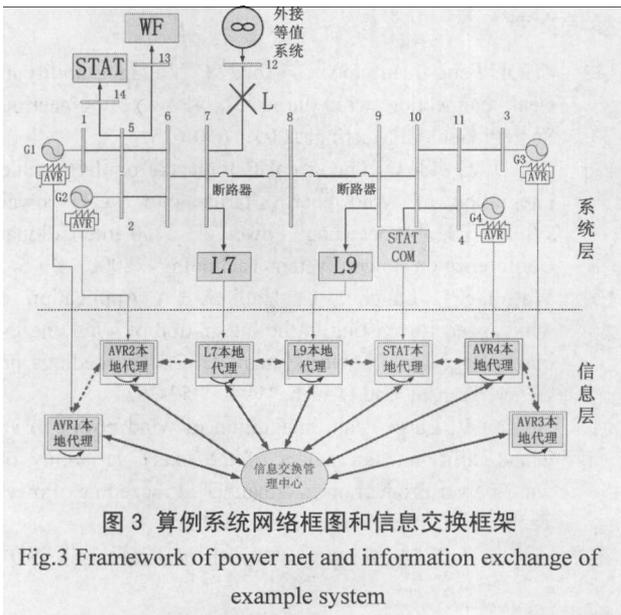


图 4 算例 1 中风电场风速变化图  
Fig.4 Power change in distributed system in case 1

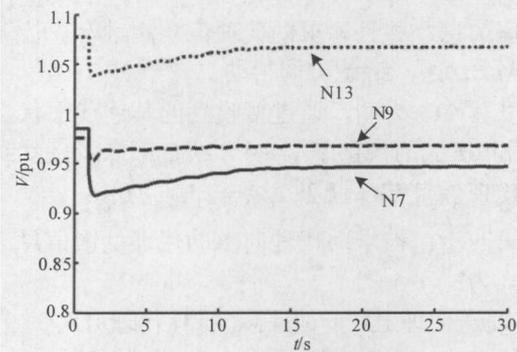


图 5 算例 1 中电压曲线  
Fig.5 Voltage curve in case 1

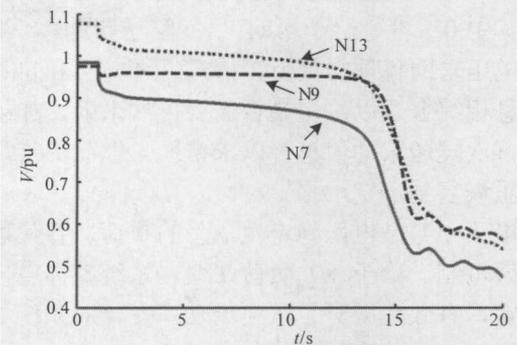


图 6 算例 2 中电压曲线  
Fig.6 Voltage curve in case 2

暂态时, 各个相关代理通过协调控制, 保持系统稳定, 具体过程如下。

第一步: 负荷代理 L7 在 9 s 判断出电压即将失稳 (关于失稳判据, 将另文介绍), 按照稳态代理范围立即向防线内各个代理群发信息, 要求 AVR1、AVR2、AVR3、AVR4、STATCOM 控制代理给予协调帮助。信息格式为:

[发送代理 ID 求助信息包 目标代理 ID]

求助信息包内容包括求助信息, 自身电压偏差信息  $k1$ , 自身电压稳定信息  $k2$ 。以 AVR3 代理信息为例:

[L7ID, {1, 1, 1, 1, 1}, k1, k2, AVR3ID]

其中求助信息{1, 1, 1, 1, 1}表示分别对应 AVR1、AVR2、AVR3、AVR4、STATCOM 代理的求助信息, 其中 0: 没有求助; 1: 求助。

第二步: 各个被求助代理收到群发信息后, 向其他被求助代理转发信息包, 信息格式为:

[发送代理 ID 转发信息包 目标代理 ID]

转发信息包内容为求助信息、自身控制性能  $\rho$ 、自身调节备用信息  $\Delta E_{fd}$ , 以 AVR2 代理向 AVR3 代理转发信息为例, 具体内容为:

[AVR2ID, 1,  $\rho$ ,  $\Delta E_{fd}$ , AVR3ID]

第三步: 各个代理接收到信息转发的其他被求助代理信息, 并且和求助代理信息相融合, 计算控制策略  $Eing$ , 给予协调帮助。

以 AVR3 为例, 通过接收到的其他代理状态信息  $\rho$  和  $\Delta E_{fd}$ , 计算  $k3$ 、 $k4$ , 结合第二步接受到的求助代理信息  $k1$ 、 $k2$ , 综合计算  $Eing$ 。

第四步: 被求助代理向求助代理反馈信息, 信息格式为:

[发送代理 ID 反馈信息 目标代理 ID]

以 AVR3 代理信息为例:

[AVR3 代理 ID, 1, L7 代理 ID]

其中反馈信息表示分别对应代理的是否给予帮助, 其中 0: 没有给予帮助; 1: 给予帮助。

电压求助代理得到反馈信息后, 并且和自身电压信息相综合, 以决定是否再次求助, 如果需要, 再次发送求助信息, 以求帮助。以此类推, 直至电压恢复到一定水平。

由于 L7 是电压稳定性最差的负荷, 各代理基于协调机制, 给予 L7 负荷帮助, 系统整体电压保持稳定, 有效地应对了风电场功率变化对系统稳定性的影响。具体电压曲线如图 7 所示。

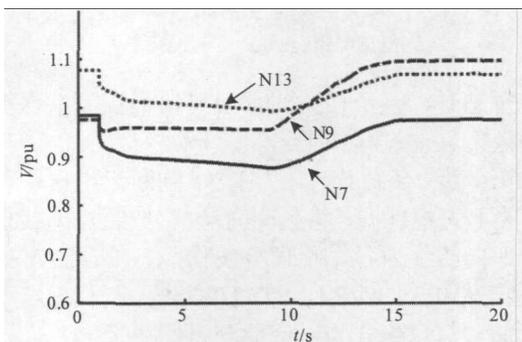


图 7 算例 3 中电压曲线  
Fig. 7 Voltage curve in case 3

电压求助时, AVR1、AVR2 已没有电压调节能力协调指标  $Eing=0$ ; 而 AVR3、AVR4、STATCOM 具有调节能力, 在 9 s 时基于在线协调, 不断调整协调指标, 给予最快、最优的电压支撑, 在 15 s 时, 负荷电压水平已经稳定, 协调指标也趋于平稳, 各个代理的电压调节能力也趋于稳定。具体过程如图 8 所示。

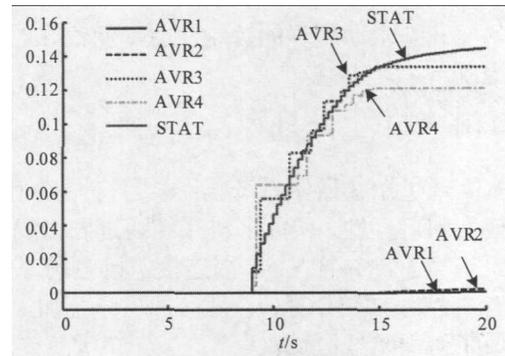


图 8 被求助代理协调指标  
Fig.8 Coordination index of each helped agent

### 4 结论

本文详细研究大规模风电场接入输电系统后对电力系统电压稳定性的影响。电压稳定是负荷稳定问题, 区域性很强, 但在本地控制不能满足要求的场景下, 需要邻近区域的及时的补充, 进行电压和无功支撑, 以避免发生电压崩溃事故。论文通过在线协调控制机制对区域内部和邻近区域的有效协调控制, 提高系统电压稳定性。

仿真结果表明, 在风电场功率变化较大时, 通过本文提出的在线协调紧急控制能够明显提高系统的稳定性。

### 参考文献

- [1] ZHOU Feng-quan, Joos G, Abbey C. Voltage stability in weak connection wind farms[C]. //Power Engineering Society General Meeting. 2005: 610-615.
- [2] Wiik J, Gjefde O, Gjengedal T. Impacts from large scale integration of wind energy farms into weak power systems[C]. // Proceedings PowerCon 2000 International Conference on Power System Technology. 2000: 49-54.
- [3] Watson S J, Landberg L, Halliday J A. Application of wind speed forecasting to the integration of wind energy into a large scale power system[J]. IEE Proceedings on Gener, Transm, and Distrib, 1994: 357-362.
- [4] Watson R. Large scale integration of wind power in an island utility-an assessment of the likely variability of wind power production in Ireland[J]. Proceedings Power Tech, 2001 IEEE Porto. 2001: 6-11.

( 下转第 18 页 continued on page 18 )

LIU Ming-bo, YANG Yong. Optimal reactive power planning incorporating steady state voltage stability constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (5) : 21-25.

[11] de souza A C Z, Honorio L M, Torres G L. Increasing the loadability of power systems through optimal-local-control actions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19 (1) : 188-194.

[12] He R, Taylor G A, Song Y H. Multi-objective optimal reactive power flow including voltage security and demand profile classification[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2008, 30 (5) : 327-336.

[13] 刘明波, 曲绍杰, 马冠雄. 含静态电压稳定裕度约束的无功优化[J]. 华南理工大学学报, 2009, 37 (2) : 107-112.

LIU Ming-bo, QU Shao-jie, MA Guan-xiong. Reactive power optimization with constraints of static voltage stability margin[J]. Journal of South China University of Technology, 2009, 37 (2) :107-112.

[14] Kessel P, Glavitsch H. Estimating the voltage stability of a power system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1986, PWRD1 (3) : 346-354.

[15] Tiranuchit A, Thomas R J. A posturing strategy against voltage instabilities in electric power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3 (1) : 87-93.

[16] 李华强, 刘亚梅, Yorino N. 鞍结分岔与极限诱导分岔的电压稳定性评估[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25

(24) : 56-60.

LI Hua-qiang, LIU Ya-mei, YORINO N. Voltage stability assessment for saddle node bifurcation and limit induced bifurcation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (24) :56-60.

[17] Wei H, Sasaki H, Kunbkawa J et al. An interior point programming for optimal power flow problems with a novel data structure[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13 (3) : 870-877.

[18] Deb K, Mohan M, Mishra. Evaluating the  $\epsilon$ -domination based multi-objective evolutionary algorithm for a quick computation of pareto-optimal solutions[J]. Evolutionary Computation, 2005, 13 (4) : 501-525.

[19] 刘劲松, 刘福田, 刘俊. 地震层析成像 LSQR 算法的并行化[J]. 地球物理学报, 2006,49 (2) : 540-545.

LIU Jin-song, LIU Fu-tian, LIU Jun. Parallization of LSQR algorithms used in seismic tomography[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006,49 (2) : 540-545.

收稿日期: 2009-09-16; 修回日期: 2009-11-26

作者简介:

张安安 (1977-), 男, 博士研究生, 工程师, 主要研究方向为电压稳定与控制; E-mail: ananzhang@yahoo.cn

杨洪耕 (1949-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电能质量、电压稳定与控制;

贺星棋 (1978-), 男, 博士研究生, 工程师, 研究方向为电力系统稳定及运行。

(上接第 12 页 continued from page 12)

[5] Palsson M P, Toftveaag T, Uhlen K, et al. Large-scale wind power integration and voltage stability limits in regional networks[C]. //Power Engineering Society Summer Meeting. 2002: 762-769.

[6] 吴俊玲, 吴畏, 周双喜. 超导储能改善并网风电场稳定性的研究[J]. 电工电能新技术, 2004, 23(3): 59-63.

WU Jun-ling, WU Wei, ZHOU Shuang-xi. Study on SMES unit for improving the stability of power system connected with wind farms[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2004, 23(3) : 59-63.

[7] Zhou F, Joos G, Abbey C, et al. Use of large capacity SMES to improve the power quality and stability of wind farms[C]. // Power Engineering Society General Meeting. 2004: 2025 - 2030.

[8] WANG Hai-feng. The "Third-Category" method and multi-agent system theory in power system applications[C]. //IEEE General Meeting. San Francisco (USA): 2005.

[9] 陈中, 杜文娟, 王海风, 等. 电压稳定后紧急控制多代理系统框架[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (12) : 33-37.

CHEN Zhong, DU Wen-juan, WANG Hai-feng, et al. Framework of multi-agent system in post-emergency voltage stability control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (12) : 33-37.

收稿日期: 2009-10-09; 修回日期: 2009-11-12

作者简介:

陈中 (1975-), 男, 博士, 主要研究方向为电力系统稳定运行与控制, FACTS 的应用研究; E-mail: chenzhong\_seu@163.com

高山 (1974-), 男, 副教授, 主要研究方向为电力系统稳定运行与控制, FACTS 的应用研究;

王海风 (1960-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析和控制。