

基于多代理的主动配电网自治运行技术

杨 洋, 吕 林

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 将多代理系统(multi-agent systems, MAS)引入分布式电源(distributed generation, DG)广泛接入的主动配电网,提出了一种基于多代理的主动配电网分布式自治运行技术。构建 Agent 模型对网络中的分布式电源和负荷进行代理,并考虑各类分布式电源的互补协调运行,设计分布式电源的出力协调规则,通过多代理的自治,动态地应对主动配电网中分布式电源出力和负荷需求的变化,实现分布式电源接入后主动配电网的自治平衡高效运行。最后,通过算例验证了该运行技术的可行性。

关键词: 主动配电网; 分布式电源; 多代理; 自治运行

Abstract: An autonomous operation technology based on multi-agent system is proposed for active distribution network with high penetration of distributed generation (DG). The agent model and the operation strategy of DGs are established considering the cooperative of different kind of DGs. This technology can dynamically respond to the change of DGs' output and load demands to achieve the autonomous, balanced and efficient operation through the autonomy of multi-agent system. Finally, the simulation results verify the feasibility of the proposed method.

Key words: active distribution network; distributed generation; multi-agent; autonomous operation

中图分类号: TM743 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)03-0039-06

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.03.009

0 引 言

由于分布式清洁能源的大力发展以及用户对供电可靠性、电能质量要求的提高,主动配电网应运而生。分布式电源具有很多潜在的优势,但是随着分布式电源在配电网中渗透率的不断提高,其分散性、随机性、波动性对系统电能质量、电压稳定等造成的负面影响也越来越突出,极大阻碍了分布式电源的充分利用。主动配电网作为智能配电网未来的发展趋势,是可以实现分布式电源在配电网中广泛接入及高度渗透的重要技术手段^[1]。主动配电网区别于传统配电网的一大显著特征表现在接入的 DG 具有分散性、不确定性和可控性,分布式能源将参与网络的运行调度而并非以往简单的被动连接,这将赋予主动配电网运行控制更加丰富的内容。因此,如何动态地、高效地管理能源供给和需求平衡,成为主动配电网一个重要的研究课题^[2]。

目前配电网的典型能量管理方式有集中式控制和分布式控制两种^[3]。集中式控制是对配电网所有电源与负荷进行统一的调度与管理^[4-7],需掌控

整个配电网的运行状态进行集中优化,对主动配电网的分布式特性、大量的控制数据以及灵活多变的控制方式则难以实现灵活、有效的调度,且无法适应多利益主体的参与。分布式控制是通过本地设备的自我管理协同运行达成能量管理目标^[8-10],该方式可以良好适应主动配电网中电源分散多变、网架结构灵活的特点,并有利于实现需求侧响应的接入与管理。

分布式管理中,研究最为广泛的一种是多代理系统。多代理系统具有良好的自主性和分布式计算特性,非常适合主动配电网分散而复杂的特点。多代理方法在电力系统中的研究日趋广泛,被用于电力系统分布式计算、电力系统运行控制、电力系统能量管理系统(EMS)、电力市场等多个方面的课题研究中^[11-14]。近来也出现在主动配电网运行管理方面。文献[15]提出了一种考虑分布式电源的配电网多代理管理系统:提出了配电网 5 类元件的多代理模型,对 DG 进行统一化建模,没有考虑各类型 DG 的不同特性;采用全分布式的机制,遵循基于相邻 Agent 通信的层层循环式通信机制,过多地设置母线、馈线等连接元件 Agent,导致了 Agent 通讯过

程的冗杂,降低了系统效率。文献[16]对主动配电网进行分区,并将含有分布式电源、储能系统及负荷的主动配电网局部自治区域作为整体,提出了自治区域的供蓄能力评估指标。文献[10]设计了微网内部的控制策略,采用了集中式和分布式控制结合,但策略相对复杂,并且对微网并网后的协调控制考虑不足,并网后进入一种相对被动的控制模式。

针对 DG 广泛接入的主动配电网,这里提出一种基于多代理系统的主动配电网分布式自治运行技术。考虑不同类型分布式电源的特性构建 Agent 模型,对网络中的分布式电源和负荷进行代理自治,并设计各类分布式电源的互补协调运行的出力协调规则,通过多代理的自治,动态地应对主动配电网中分布式电源出力和负荷需求的变化,实现分布式电源接入后主动配电网的自治平衡高效运行。

1 分布式电源多代理模型

主动配电网中包含各类型分布式电源和负荷集成,这里以光伏发电代表可再生清洁能源发电,微型燃气轮机代表小型分布式热力发电,蓄电池代表储能系统,对上述分布式电源构建 Agent 模型进行代理,加上负荷的多代理模型,网络中包含:光伏发电 Agent、微型燃气轮机 Agent、蓄电池 Agent 和负荷 Agent。对各 Agent 模型的具体描述如下:

1) 光伏发电 (photovoltaic, PV) Agent: 监视和控制光伏发电设备的功率水平及启停状态,保证设备的可靠安全运行。可自动获取环境信息并做出响应,也可与系统内其他 Agent 进行能量协调交互,发出信息或者获取信息,并根据收到信息做出响应。有最大功率点跟踪 (MPPT) 和电压控制 (VL) 两种行为模式,为保证清洁能源的最大利用, PV 尽量工作在 MPPT 模式,满足功率约束:

$$P_{PV}^{\min} \leq P_{PV} \leq P_{PV}^{\max} \quad (1)$$

$$P_{PV} \leq P_{PV}^{\text{MPPT}} \quad (2)$$

式中: P_{PV}^{\min} 为光伏发电的最小出力; P_{PV}^{\max} 为光伏发电的最大出力; P_{PV}^{MPPT} 为光伏发电的最大功率点跟踪出力; P_{PV} 为某时刻光伏发电的实际出力。

2) 微型燃气轮机 (micro-turbine, MT) Agent: 监视和控制微型燃气轮机的出力及启停状态,控制整流/逆变环节,保证设备的可靠安全运行。可自动获取环境信息并做出响应,也可与系统内其他 Agent

进行能量协调交互,发出信息或者获取信息,并根据收到信息作出响应。在间歇式分布式电源出力或储能系统功率不足时提供备用,其主要用在负荷高峰期补偿清洁能源发电及储能系统的差额。满足功率约束:

$$P_{MT}^{\min} \leq P_{MT} \leq P_{MT}^{\max} \quad (3)$$

式中: P_{MT}^{\min} 为微型燃气轮机的最小出力; P_{MT}^{\max} 为微型燃气轮机的最大出力; P_{MT} 为某时刻微型燃气轮机的实际出力。

3) 蓄电池 (battery storage, BS) Agent: 监视和控制蓄电池的出力、荷电状态 (state of charge, SOC) 状况,保证设备的可靠安全运行。可自动获取环境信息并做出响应,也可与系统内其他 Agent 进行能量协调交互,发出信息或者获取信息,并根据收到信息作出响应。实现对分布式电源出力的移峰填谷调节,进而为整个配电网提供功率支撑,需满足额定功率和 SOC 状况约束:

$$P_{BSch} \leq P_{BSch}^{\max} \quad (4)$$

$$P_{BSdis} \leq P_{BSdis}^{\max} \quad (5)$$

$$S_{\min} \leq S_{\text{soc}}(t) \leq S_{\max} \quad (6)$$

$$S_{\text{soc}}(t) = S_{\text{soc}}(t-1) - \eta P_t \times \Delta t / S_{\text{wh}} \quad (7)$$

式中: P_{BSdis}^{\max} 为蓄电池的最大放电功率; P_{BSch}^{\max} 为蓄电池的最大充电功率; S_{\min} 、 S_{\max} 为蓄电池的最小和最大荷电量; $S_{\text{soc}}(t)$ 、 $S_{\text{soc}}(t-1)$ 分别为 t 、 $(t-1)$ 时刻的蓄电池的荷电状态; P_t 为 t 时段蓄电池的输出功率; Δt 为时间间隔; S_{wh} 为额定瓦时容量; η 为充放电效率。

4) 负荷 Agent: 以满足用电需求、减少用电成本为目标,监视和控制负荷的开断情况、功率变化、管理负荷优先级等。将负荷按优先级分为重要负荷、普通负荷和可中断负荷:

$$pri_{\text{load}} = \begin{cases} 1, & \text{重要负荷} \\ 2, & \text{普通负荷} \\ 3, & \text{可中断负荷} \end{cases} \quad (8)$$

式中: pri_{load} 为负荷的优先级,由 1 至 3 优先级递减。

2 多代理主动配电网自治运行技术

2.1 主动配电网的分区

首先,将主动配电网按以下方式分区^[16]: 馈线上 2 个分段开关之间如果含有可控的分布式电源 (如蓄电池、微型燃气轮机) 则其分成一个独立的自治区域; 馈线上从分支开关到分支线路末端如果含

有可控的分布式电源则其分成一个独立的自治区域。这种分区方式可以很好地适应配电网运行时拓扑结构的变化,自治区域比较稳定,不会因为网络重构、运行方式的变化而发生改变。

2.2 自治运行技术框架

所提出的分布式自治运行技术框架分为2个层面,如图1所示,第1层是各区域内电源与负荷的自治运行平衡;第2层是区域间的协调互补平衡。



图1 自治运行技术框架

2个层面按图2所示的流程运作:首先,各元件Agent按照区域内自治策略,根据区域当前的供需情况设定自身运行模式,以快速达成区域内部的基本供需平衡,实现清洁能源的最大化利用和分布式电源的就地消纳;若区域内存在功率不平衡量,则该区域的区域协调Agent向其他区域的协调Agent发起能量协调请求,根据收到的回复和目标进行决策,与相应区域协调Agent达成能量协调协议;最后,相关区域协调Agent执行协议,达成该区域功率的供需平衡。

2.3 区域协调Agent模型

区域协调Agent负责记录和监视自治区域内元件的基本信息(名称、类型、容量、额定功率、约束等)和运行信息(潮流、电源输出功率、负荷需求等)。协调区域内各类型分布式电源发电以匹配负荷需求,实现清洁能源最大化利用。当区域内负荷的需求不能被满足时,按照负荷优先级由低到高切除负荷直至功率重新恢复平衡。代表区域与其他区域进行能量的交互协调,以解决所辖区域或其他区域的功率不平衡问题,具体的协调方式见2.5小节。

2.4 区域内自治运行规则

依据2.1节Agent模型,根据光伏的发电、蓄电池和微型燃气轮机的差异与互补特性,建立区域内部的自治运行规则。根据供需情况和各DG工况将区域运行情况分为8个场景,以清洁能源最大化利



图2 自治运行规则流程图

用为原则,设定各个场景的运行协作规则,动态地应对主动配电网中分布式电源出力和负荷需求的变化,实现各分布式发电单元与负荷在高峰、低谷的实时平衡互补以及清洁能源的最大化利用。区域内各Agent的具体自治运行规则如表1所示。各Agent根据从区域协调Agent获取区域当前的运行情况,依据该规则设定自身行为^[18],以此协调各类型DG出力以达到区域内功率的基本供需平衡。该规则有助于清洁能源的最大化利用和区域内DG的就地消纳,分布式电源的就地消纳可以大幅减少网络传输损耗与线路利用均衡率,减少高峰时期馈线主干的传输功率。

区域内按照该规则进行初次功率平衡,某些运行场景下DG的模式有2种备选项时,最后的选择由区域协调Agent进行区域间协调的交互结果决定,将在2.5小节介绍。

下面以第1种运行场景为例进行说明。当区域中蓄电池荷电状态小于最小荷电量,光伏发电的MPPT出力小于区域负荷需求,但差额小于区域微型燃气轮机最大出力时,光伏发电设定自身运行模式为“MPPT模式”,蓄电池设定自身运行模式为“无操作”,微型燃气轮机的模式存在“增大供电”及“维持原状”两个备选项,则微型燃气轮机最后的模式设定取决于下一小节区域管控Agent的交互结果。

2.5 区域间互补平衡协调规则

当区域内的有功不能自我平衡时,由区域协调

表 1 区域内自治运行规则

运行场景	控制策略		
	光伏发电 Agent	蓄电池 Agent	微型燃气轮机 Agent
$S_{soc} \leq S_{min}$ $P_{load} - P_{PV}^{MPPT} \leq P_{MT}^{max}$	MPPT 模式	无操作	增大供电或维持原状
$S_{min} \leq S_{soc} \leq S_{max}$ $P_{load} - P_{PV}^{MPPT} \leq P_{BS放}^{max}$	MPPT 模式	放电模式	维持原状
$S_{min} \leq S_{soc} \leq S_{max}$ $P_{load} - P_{PV}^{MPPT} \leq P_{BS充}^{max}$	MPPT 模式	极限放电模式	增大供电或维持原状
$S_{min} \leq S_{soc} \leq S_{max}$ $P_{PV}^{MPPT} - P_{load} \leq P_{BS充}^{max}$	MPPT 模式	充电模式	维持原状
$S_{min} \leq S_{soc} \leq S_{max}$ $P_{PV}^{MPPT} - P_{load} > P_{BS充}^{max}$	MPPT 模式或 VL 模式	极限充电模式	减少供电
$S_{soc} = S_{max}$ $P_{PV}^{MPPT} > P_{load}$	MPPT 模式或 VL 模式	停止充电	减少供电
$S_{min} \leq S_{soc} \leq S_{max}$ $P_{PV} = 0$ $P_{BS放}^{max} < P_{load}$	停止供电	极限放电模式	增大供电或维持原状
$S_{soc} \leq S_{min}$ $P_{PV} = 0$	停止供电	停止供电	增大供电或维持原状

注: P_{load} 为某时刻区域负荷的功率需求。

Agent 向其他区域协调 Agent 或配网中心协调 Agent 发出请求,并根据它们的回复进行决策。

1) 区域内供不应求

区域协调 Agent 向其他区域协调 Agent 请求增加向该区域的有功供给,收到回复后:若无可选来源,则向柔性负荷发出请求根据优先级由低到高切断负荷直至供求平衡;若有可选来源,则根据接收到的回复信息结合内部微型燃气轮机的可用出力情况进行决策。首先核算可行性(是否满足拓扑约束,潮流是否越限),再考虑清洁能源的最大利用和经济性将可行电源进行排序,对电源列表由上到下发起能量协调协议,直至满足需求或列表为空。若直到列表为空仍没满足有功需求,则向柔性负荷发出请求根据优先级由低到高切断负荷直至供求平衡。其中电源优先级和经济性按以下原则决定:

①电源优先级:各电源按清洁程度进行优先级排序,光伏优先级最高,蓄电池次之,微型燃气轮机最低。

②经济性:

$$\min C = C_{power} + C_{loss} \quad (9)$$

式中: C 为用电成本; C_{power} 为对应电源的电价成本;

C_{loss} 为对应电源的功率传输成本。

2) 区域内供过于求

区域协调 Agent 向其他区域协调 Agent 请求增加对该区域有功的消纳。

若无可选“负荷”,则限制光伏出力,使其工作在 VL 模式下;若有可选“负荷”,则根据接收到的回复进行决策。首先核算可行性(是否满足拓扑约束,潮流是否越限),再考虑负荷优先级和经济性将可行负荷进行排序,对负荷列表由上到下发起能量协调协议,直至满足需求或列表为空。若直到列表为空仍没满足需求,则限制光伏出力,使其工作在 VL 模式下。其中负荷优先级和经济性按以下原则决定:

①负荷优先级:各负荷按重要程度进行优先级排序,其中可中断负荷的优先级最低。

②经济性:即供电收益最高

$$\max E = E_{power} - E_{loss} \quad (13)$$

式中: E 为供电收益; E_{power} 为对应电源的电价收益; E_{loss} 为对应电源的功率传输成本。

3 算例分析

3.1 算例系统

建立如图 3 所示主动配电网典型结构,包含 1 条馈线 11 个节点。其包含的分布式发电单元及储能单元总个数为 4 个,类型及配置参数如表 2 所示。

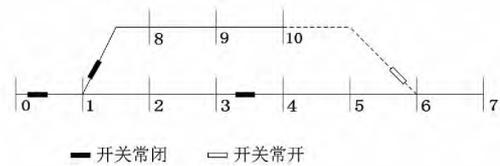


图 3 主动配电网算例接线图

表 2 分布式电源及储能配置

连接节点	类型	额定功率 /kW	容量 / (kW · h)
2	微型燃气轮机	400	
4	蓄电池	100	1 000
6	光伏 1	600	
8	光伏 2	600	

3.2 结果与分析

以 24 h 为例,分析经过该多代理系统协调控制后各元件的运行情况。

图 4 为仿真所需数据图,分别是光伏的 MPPT

出力值和负荷曲线。对比负荷曲线与光伏 MPPT 曲线不难发现 二者存在明显的供需不匹配 中午光伏出力高于负荷需求 而负荷的晚高峰光伏出力却为 0。

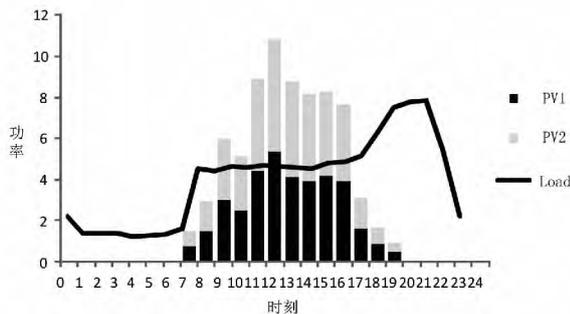


图 4 光伏发电 MPPT 值和负荷曲线

仿真的结果如图 5 所示。算例在 0~6 时刻负荷需求处于低谷,光伏出力为 0,蓄电池经过晚高峰放电后处于极限低荷电状态,负荷需求此时主要由区域内的微型燃气轮机供给,可实现自给自足;7~9 时刻,蓄电池仍处于极限低荷电状态,负荷需求与光伏出力同处于攀升阶段,负荷需求大于光伏出力,因此微型燃气轮机补足差额供电;10~15 时刻,光伏出力进入午高峰,远高于同时段的负荷需求,为满足清洁能源的最大化利用不弃光,向蓄电池充电对冗余的光伏电量进行存储,满足了区域内的供求平衡;16~17 时刻,光伏出力逐渐下降,略低于负荷需求,差额由微型燃气轮机进行补充;18~24 时刻,光伏出力下降至 0,负荷晚高峰到来,蓄电池经过光伏高峰的充电处于高荷电状态,负荷需求主要由蓄电池和微型燃气轮机供给。

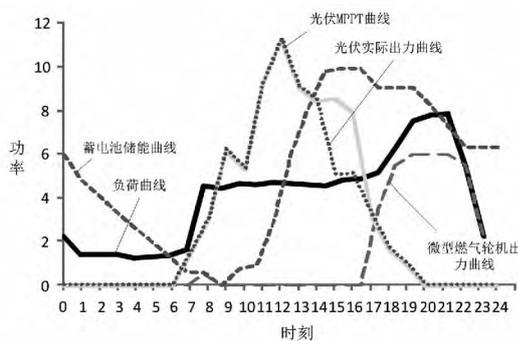


图 5 仿真结果

由上述分析可见,算例中各 Agent 根据多代理模型设定与自治运行规则,动态地应对主动配电网中分布式电源出力和负荷需求的变化,在保证清洁能源最大化利用和区域能源就地消纳的原则下高效地达成了有功功率供需平衡。蓄电池在有功平衡中起到了有效地补充和调节作用,微型燃气轮机为负荷高峰提供了功率支撑。

4 结 论

提出了一种基于多代理的主动配电网分布式自治运行技术。在考虑各类分布式电源特性的情况下,建立了分布式电源多代理模型;并进一步考虑各类分布式电源的互补协调运行,设计自治运行规则,在保证清洁能源最大化利用和区域能源就地消纳的原则下高效地达成了有功功率供需平衡。通过算例仿真验证了策略的可行性。

同时还有许多问题需要进一步研究与探讨:分布式电源的自治功能还有待进一步挖掘;该自治运行技术没有考虑电力市场的因素;运行管控与规划是相互影响的,同时分布式电源接入配电网的运行技术也依托于实际分布式电源设备的发展,需要在未来的研究中与时俱进。

参考文献

- [1] 尤毅,刘东,钟清,等.主动配电网优化调度策略研究[J].电力系统自动化,2014,38(9):177-183.
- [2] 范明天,张祖平,苏傲雪,等.主动配电系统可行技术的研究[J].中国电机工程学报,2013,33(22):12-18.
- [3] 陈昌松.光伏微网的发电预测与能量管理技术研究[D].武汉:华中科技大学,2011.
- [4] 茆美琴,金鹏,奚媛媛,等.基于多因子和合同网协调机制的微网多 Agent 混和能量管理方法[J].中国电机工程学报,2014,34(31):5542-5552.
- [5] 王瑞琪.分布式发电与微网系统多目标优化设计与协调控制研究[D].济南:山东大学,2013:1-116.
- [6] 王健,谢桦,孙健.基于机会约束规划的主动配电网能量优化调度研究[J].电力系统保护与控制,2014,42(13):45-52.
- [7] 杨为.分布式电源的优化调度[D].合肥:合肥工业大学,2010:1-50.
- [8] Josep Maria Guerrero, Mukul C Chandorkar, Lee Tzung-Lin, et al. Advanced Control Architectures for Intelligent Microgrids—Part I: Decentralized and Hierarchical Control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1254-1262.
- [9] Josep Maria Guerrero, Mukul C Chandorkar, Lee Tzung-Lin, et al. Advanced Control Architectures for Intelligent Microgrids—Part II: Power quality, Energy Storage, and AC/DC microgrids [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1263-1270.
- [10] 章健. MultiAgent 系统在微电网协调控制中的应用研究[D].上海:上海交通大学,2009:1-80.
- [11] S. D. J McArthur, E. M. Davidson, V. M. Catterson, et al.

Multi-agent Systems for Power Engineering Applications—Part I: Conception, Approaches, and Technical Challenges [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 1743–1752.

- [12] S. D. J. Mearthur, E. M. Davidson, V. M. Catterson et al. Multi-agent Systems for Power Engineering Applications—Part II: Technologies, Standards, and Tools for Building Multi-agent systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 1753–1759.
- [13] Wong S K, Kalam A. Development of a Power Protection System Using an Agent Based Architecture [C]. International Conference on Energy Management and Power Delivery, 1995, 1: 433–438.
- [14] 刘洪进, 袁斌, 戴宏伟, 等. 多代理系统及其在电力系统中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2010, 10(10): 45

(上接第 20 页)

网内电压、频率发生变化, 采取相应稳定控制策略和手段, 可以保证孤网稳定运行。

2) 由于网内主要以风电和水电组成, 风电不能随负荷变化而变化, 在电力平衡能力以及故障期间的电压支撑能力上都明显弱于水电。为保证孤网的稳定运行, 建议直接采取切除部分风电出力来维持系统稳定。

3) 在电网设备故障发生瞬间或故障切除瞬间, 风电机组机端母线频率变化幅度较大, 在 49.7 ~ 50.5 Hz 之间振荡。为保证电网安全稳定运行, 所以接入电网内的风电机组必须满足《风电场接入电力系统技术规定》要求, 才能保证电网设备故障后, 风电机组不脱网。

参考文献

- [1] 陈珩. 电力系统稳态分析 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1995: 223–229.
- [6] 张会参, 秦艳辉. 基于 SVC 的异步风力发电机并网系统的暂态稳定性研究 [J]. 电工电气, 2011(2): 4–7.
- [7] 宋伟伟, 李强, 袁越. 双馈风电机组接入地区电网后的电压稳定性分析 [J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(5): 36–40.
- [8] 田新首, 王伟胜, 迟永宁, 等. 双馈风电机组故障行为及对电力系统暂态稳定性的影响 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(10): 16–21.
- [9] 李东东, 王凯凯, 叶辰升. 采用双馈机组的风电场无功功率控制研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 37–42.
- [10] 王纯琦, 吐尔逊·依布拉音, 晁勤. 基于 Matlab 的含风电电网建模与仿真 [J]. 可再生能源, 2006(5): 61–64.

– 52.

- [15] Fenghui Ren, Minjie Zhang, Danny Sutanto. A Multi-agent Solution to Distribution System Management by Considering Distributed Generators [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1442–1451.
- [16] 于文鹏, 刘东, 余南华, 等. 主动配电网的局部自治区域供蓄能力指标及其应用 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 44–50.
- [17] 郝雨辰, 吴在军, 窦晓波, 等. 多代理系统在直流微网稳定控制中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 27–35.
- [18] 章健, 艾芊, 王新刚, 等. 多代理系统在微电网中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(24): 80–82.

(收稿日期: 2016-03-28)

- [2] 常喜强, 解大, 姚秀萍, 等. 新疆阿勒泰地区电网的频率动态过程仿真 [J]. 四川电力技术, 2008, 31(5): 35–38.
- [3] 徐行会, 贺仁睦, 孔祥云. 调速系统超速保护控制对电力系统稳定的影响 [J]. 现代电力, 2006, 23(6): 6–9.
- [4] 吴琛, 李玲芳. 云南电网主网高周切机方案研究 [J]. 云南电力技术, 2008, 36(2): 1–4.
- [5] 周川梅, 孙斌. 贵州主网及地区电网孤网运行安全稳定措施研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(19): 54–56.
- [6] 李付强, 沈卫东, 王彬. 大规模风电并网对京津唐电网的影响和对策分析 [J]. 电力技术, 2009, 10(10): 44–48.
- [7] GB/T 26399–2011 电力系统安全稳定控制技术导则 [S].

作者简介:

胡仁祥(1987) 硕士, 从事电网调度运行。

(收稿日期: 2016-01-30)

(上接第 25 页)

- [11] 卢锦玲, 石少通, 徐超, 等. 含大型风电场系统暂态电压稳定性分析 [J]. 华北电力大学学报, 2014, 41(1): 45–52.
- [12] 马敏. 风电接入对电网暂态稳定性及调峰能力的影响研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2010: 19–22.

作者简介:

- 李自明(1989) 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统及其自动化;
- 常喜强(1976) 高级工程师, 主要研究方向为电力系统分析与控制;
- 王海云(1973) 教授、硕士研究生导师, 主要研究方向为可再生能源发电与并网技术;
- 姚秀萍(1961) 客座教授、硕士生导师、高级工程师, 主要研究方向为电网调度运行、继电保护。

(收稿日期: 2016-01-19)