

复杂微电网控制中的随机博弈与优化研究

周洪, 要若天, 余昶, 雷忠诚

(武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 由大量分布式能源、储能设备以及动态负荷集成的复杂微电网, 具有出力-负荷双随机特性。旨在结合随机博弈优化理论, 讨论综合能源微电网中的各种决策和优化控制问题。首先, 分析了未来复杂微电网的特点和体系结构; 其次, 重点阐述了综合能源微电网中多种决策群体的博弈形式和交互方式; 然后, 基于微电网不同的拓扑结构和群体的随机特性, 归纳了影响网络博弈的主要因素; 最后, 给出一种随机博弈优化策略及其控制方法架构。通过深入探讨不同形式下的微电网同步、稳定性及博弈优化等关键问题, 为进一步促进清洁能源消纳和供需互动、维护电网稳定提供了新的思路。

关键词: 微电网; 复杂网络; 博弈论; 优化控制

中图分类号: TM732

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.202027

Research on stochastic game and optimization in complex microgrid control

ZHOU Hong, YAO Ruotian, YU Chang, LEI Zhongcheng

School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China

Abstract: A microgrid which integrated by a large scale of distributed generators, storage equipment and dynamic loads has stochastic characteristics in both the power generation and the demand-side. The purpose was to discuss various decision-making and optimal control approaches in the integrated energy microgrid based on a stochastic game. Firstly, the characteristic and architecture of the future complex microgrid were investigated. Secondly, the form and interact of the group game were explained in details, respectively. Then, the stochastic characteristics of different players and the topology that affecting the game on complex microgrids were presented. Finally, a stochastic game optimization approach and its control architecture was proposed. By discussing the key issues of microgrid synchronization, stability and game optimization in different perspectives, the new ideas for promoting clean energy consumption, supply-demand side interaction and maintaining the stability of power grids were provided.

Key words: microgrid, complex network, game theory, optimal control

1 引言

分布式微电网具有灵活的扩展性和连续供电能力, 在高效利用清洁能源的基础上, 其通过与传统电网联合运作, 为未来复杂微电网技术的发展奠定了坚实的基础。同时, 作为现代数学的新分支, 运筹学中的博弈论近年来逐渐在各类工程领域崭

露头角^[1-2]。通过在复杂微电网系统中构建博弈群体和博弈形式, 可以针对微电网中各种供需互动^[3-4]、多目标优化^[5-6]和能量管理^[7-9]提供有效的解决方案。将博弈论引入复杂微电网的控制和优化, 可以在促进可再生能源消纳的前提下保证电网整体的稳定性和经济性, 在当下和未来都具有相当广泛的应用前景。

收稿日期: 2020-05-20; 修回日期: 2020-06-14

通信作者: 要若天, yaoruotian@whu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61873195)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61873195)

复杂微电网系统深度融合了现代智能电网技术、智能控制技术、云计算和先进互联网技术,将综合能源微电网中的多元主体进行互联互通,利用电力数据感知实现多层次一体化的微电网协同优化。面向未来的复杂微电网包含大量分布式能源发电机(distributed generator, DG)、储能系统(energy storage system, ESS)以及电动汽车等动态负荷,其发电间歇性和用电随机性会导致电网的调度性降低^[10]。2019年7月,中华人民共和国国家发展和改革委员会和国家能源局联合印发了《关于深化电力现货市场建设试点工作的意见》,该文件明确指出要完善的现货交易机制,以灵活的市场价格信号引导电力生产和消费,加快放开发电计划,激发市场主体活力,提升电力系统调节能力,促进能源清洁低碳发展。

得益于最新的信息技术,复杂网络下的微电网集群使用户设备之间的无缝连接和直接通信成为可能。然而,可再生能源、ESS、智能电表和柔性负载的大规模接入为电力工程设计、电网控制运行和能源管理等方面带来了技术和理论挑战。为确保电网的安全、经济和优质运行,探讨多元主体大规模接入复杂微电网的稳定性和优化控制问题,本文结合当前多智能体系统、基于人工智能的控制优化、大数据云计算等,揭示了复杂微电网系统的能源管理和控制优化的最新进展。其次,本文综合运用复杂网络系统、图论模型和随机博弈优化理论,

前瞻性地阐述了未来复杂微电网中的复杂体系和结构,聚焦电力市场中的博弈群体和供需侧交互形式,给出了随机博弈的应用模式和优化控制策略。

2 复杂微电网中的博弈论

利用分布式控制算法对大规模 DG、ESS 和随机负荷进行有效调度和控制,维护“源-网-荷-储”协调互动的稳定性和经济性,是复杂微电网优化的核心理念^[11-12]。复杂微电网通常位于电力需求侧,既可与配电网并网运行,也可切换到孤岛模式,为保证其稳定、高效地自主运行,保障清洁能源的优先消纳^[13],需要新一代的优化方法和控制体系^[14]。目前,复杂微电网控制涉及的博弈优化领域包括:能源需求预测与成本博弈^[15-17]、负载均衡中的非合作博弈^[18]、微电网建模和分析中的博弈^[19]、电价激励与能源消纳中的博弈^[20-21]、基于多智能体的储能和发电控制博弈^[22-23]、需求与负荷侧管理博弈^[12, 24]。

2.1 高度智能化的复杂电网及其体系结构

复杂智能电网的基础架构以电力系统为主体,广泛集成高速通信系统和智能信息系统,三者相辅相成^[11-12, 25],其体系结构如图1所示。作为智能化的综合能源系统,电力系统层除了传统的发、配、用电系统,还集成了分布式综合能源发电机;通信系统层用于建立不同系统之间、智能设备之间的信息交换;信息系统层用于存储和处理需求侧管理信息,并与企业管理系统进行数据交互。

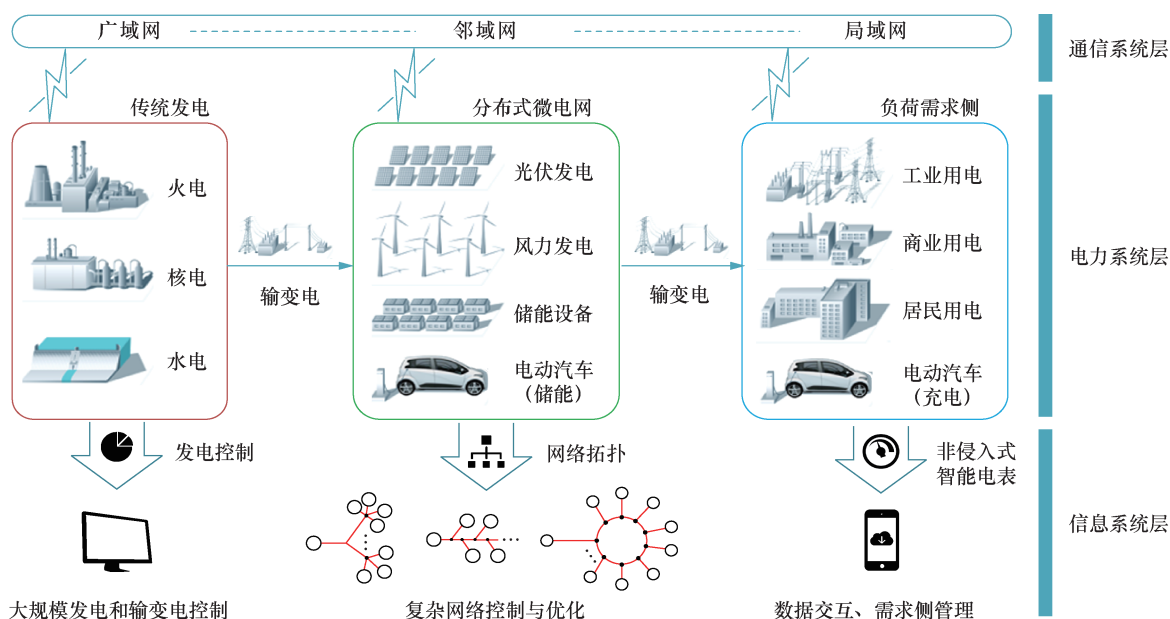


图1 复杂智能电网的体系结构

因大量配备分布式 DG 和 ESS, 电力消费者正逐渐转变为电力“产消者”, 不仅可以消耗电能, 还可以额外产生电能并反向出售上网, 为用户和企业提供电力服务, 以降低用电成本^[26]。DG、ESS、可控负荷与电网系统之间具有双向能量和信息流, 同时也可作为复杂微电网中的智能群体进行互连。其中, 分布式 DG 通过逆变器与交流电网相连, 通过逆变器的分布式下垂控制确保电压的频率和相位稳定, 以及电网整体的经济运行^[27], 并且, 微电网控制器必须能够实时适应未知的、可变的负荷和多种网络拓扑^[28]。

鉴于现代城市的迅猛发展, 未来居民的能源需求仍将保持快速增长, 为确保能源的高效利用和系统的最佳运行, 需求侧管理 (demand side management, DSM) 应运而生^[12, 25]。为促进综合能源的高效利用, 必须基于实时信息对数据进行分析, 并根据系统的目标和约束条件来优化调度。智能电表的大规模装备可以获取多维电力数据和用户行为信息^[29], 内嵌的模式识别、数据挖掘以及人工智能技术可以充分发挥信息系统的作用, 实现工业敏感用户负荷监测、需求侧管理和动态定价等电力服务^[12, 30-31]。

复杂微电网系统必须在 DG 发电不确定和用户用电随机的情况下保证电力的连续供应, 并保持微电网的稳定可靠^[31-32]。为了提升系统鲁棒性, 避免因中央控制器故障而导致的集中控制系统崩溃, 可采用基于多智能体系统 (multi-agent system, MAS) 的分层控制架构来进行能量管理和分布式优化, 从而促进功率平衡和效率优化^[22-23]。得益于分布式控制的可扩展性, 人们可以将各种即插即用组件无缝地添加或替换到系统中^[9, 33]。

复杂网络系统的同步和稳定性理论也被大量应用到复杂微电网系统的分析中。复杂网络系统由多个子系统或个体组成, 子系统的局部交互使整个系统在宏观层面呈现出高度的协调性和有序性, 以及更高层次的智能水平^[34]。随着大量智能传感设备、通信设备、嵌入式计算设备和综合能源组件形成信息互联, 电网逐渐成为一个集感知、分布式控制和信息服务为一体的复杂电力网络^[28]。复杂系统理论及其群体行为的演化, 涉及社会学、数学、控制理论、人工智能以及计算机科学等多个领域。随着分布式 DG 和动态负载的数量急剧增加, 电力系统状态随着组件数量的增加呈指数增长, 整个复杂

微电网系统的动力学特性会呈现高阶、多维、强耦合的特点, 系统容易陷入“维数灾”^[35]。因此, 本文在复杂微电网系统中引入随机博弈理论, 通过寻求随机模型的最优解, 解决系统中的多目标决策和优化问题。

2.2 复杂微电网中的博弈形式及其特征

复杂微电网中的博弈论方法包含不同的优化目标。经典博弈论起源于数学家 Neumann J V 和经济学家 Morgenstern O^[36]的著作《博弈论与经济学行为》(The theory of games and economic behaviour)。博弈论有 3 个基本要素: 参与者、策略集以及所选策略对应的效用或收益。1950 年, Nash J F^[37]开创性地提出了策略均衡概念 (又称纳什均衡), 纳什均衡描述了理性的个体在交互的过程中会达到这样的状态: 在该状态下, 没有任何个体可以通过单方面改变自身的策略而增加其收益。由于复杂微电网中的电力用户既是产消者又是消费者, 因此成本与政策激励对个体的决策有深远的影响。应用于复杂微电网中的博弈论有两个主要分支: 合作博弈与非合作博弈。

2.2.1 复杂微电网中的合作博弈

合作博弈揭示了合作的存在性、交易机制和利益分配, 其研究如何为独立决策者提供激励, 促使他们形成联盟, 从而提高该联盟在博弈中的地位和收益^[38]。合作博弈包括纳什博弈和联盟博弈, 纳什博弈研究的是如何达到均衡状态, 而联盟博弈研究的是如何形成稳定的合作联盟^[39]。两种博弈本质上都是研究参与者如何决定与谁合作, 以及在何种合作激励和公平规则下进行合作。

基于合作博弈的复杂微电网本地电能调度方法, 可构建策略激励来促使微电网之间进行局部电能交换, 在确保整体效用最大化的同时满足各自的电力需求^[40]。当电能供应短缺时, 用户优先选择具有额外电能的相邻微电网进行电力交易, 这有利于促进清洁能源的优先消纳。基于点对点 (peer-to-peer, P2P) 的能源交易^[16-17]可以使在社区微电网中来自产消者的富余电能被自主定价销售, 吸引其他用户购买。因此, 用户们彼此合作, 优化定价策略, 可最小化该联盟内部的用电总成本^[17]。这种局部电力交易可利用拍卖理论算法计算每个有效联盟的最大效用, 并确定相应的交易策略, 然后采用夏普利值 (Shapley value) 法公平分配各联盟成员的收益, 引入联盟合并和分裂算法, 并在所有可能的联

盟组合中寻找最优分割^[40]。对于以双向数字通信为基础的分布式 DSM 系统来说,可以通过合适的动态定价方案,促使用户错峰使用高功率家用电器,降低微电网负载需求中的峰均比 (peak-to-average ratio, PAR),以实现系统的优化调度。另外,随着电动汽车和大规模充电站的普及,可转移负荷的动态调度方法将变得更加重要^[41],通过动态价格激励,促进能源消费者之间达到能耗调度博弈的纳什均衡,在“削峰填谷”的基础上尽可能地降低每个用户的能源开支^[9]。

2.2.2 复杂微电网中的非合作博弈

非合作博弈分为静态博弈和动态博弈^[42]。在静态博弈中,时间或信息概念不影响参与者的策略选择,且参与者只采取一次行动。相比之下,动态博弈中的参与者可获取其他参与者的决策信息,可以不止一次地行动,并且时间在决策中扮演着核心角色。由于决策过程受利益因素影响,非合作博弈可以被用来分析多个理性对立个体的战略决策过程。非合作博弈可以被视为分布式决策过程,该过程允许参与者在不需要任何策略协调或通信的情况下优化自身行动中耦合的目标函数^[38]。

非合作并不总是意味着参与者之间不进行合作,而是合作时参与者之间不存在通信或策略协调。因此可以采取激励措施,以便在非合作环境中加强参与者之间的合作,进一步提升个体效用。对于多个电力企业和消费者群体之间的博弈,电力企业可以通过给出实时电价 (real-time pricing, RTP) 信息来激励和调动消费者的能源使用行为^[18]。消费者为节约成本,将根据电价差异从不同的电力供应商购电,或根据 RTP 调整能源使用方案,因此用户自身效用取决于每个电力企业设定的 RTP 以及由调度负荷引起的成本。对于电力企业来说, RTP 的制定也取决于其他电力企业的售电价格和用户的随机用电行为。因此,使用非合作博弈理论框架分析这些复杂的互动,构建多个参与者之间的斯塔克伯格 (Stackelberg) 模型^[42-43],实现参与者的双向通信交互,可以获得消费者对电价策略的最佳需求响应。并且,通过分布式算法获取电力企业和消费者的本地信息,可以最大化双方效用^[43]。

在现实环境中,复杂微电网必然会受到分布式 DG 发电的间歇性、ESS 充放电效率、负荷随机接入退出或电网拓扑结构切换的影响。因此需要在保持复杂微电网同步和稳定的前提下,兼顾博弈群体

交互的影响并考虑随机性特征,进一步分析微观点交互的形式。

3 复杂微电网中的网络博弈与群体交互

受电网拓扑结构、DG 发电和 DSM 策略影响,电力系统会产生大量随机信息^[12, 19]。因此本节对这些随机性信息进行归纳,深入分析其演化动力学性质与群体交互特征。

3.1 电力网络博弈中的拓扑结构

大规模分布式发电网络由大量配备 DG 单元的用户组成,这些产消者 (节点) 被称为理性的用户^[21],其试图使自己的收益最大化。网络的拓扑结构由图论模型来描述^[2],目前常用的星形、环形、树形和蛛网形拓扑如图 2 所示。其中,蛛网形拓扑具有辐条和环条,可以被视为星形、树形和环形拓扑的结合。

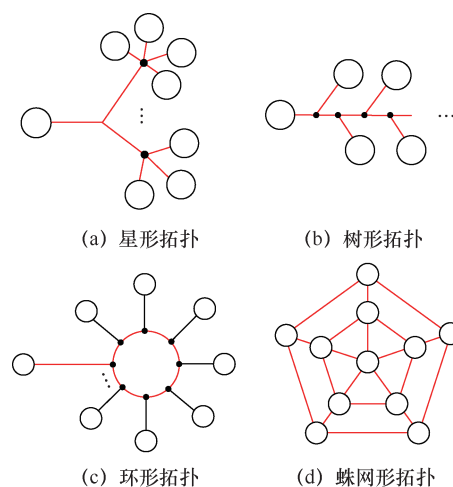


图2 几种典型的复杂网络拓扑结构

在特定复杂网络拓扑结构下的群体可以表示为 $G=(V, E, W)$ 。其中 $V=\{v_1, \dots, v_n\}$ 是总数为 N 的个体的集合, E 为边集, $W=(w_{ij})_{n \times n}$ 表示网络的权重矩阵,用来描述各节点之间的交互强度。在复杂网络中,聚类系数描述了网络中节点的聚集程度,度分布表示各个节点存在的邻居节点比例,紧密的节点簇之间通常拥有更紧密的联系^[44]。对于随机图模型来说,自 Erdős P 和 Rényi A^[45]的研究开始,至今已经发展了大量的复杂网络模型。其中, Watts D J 和 Strogatz S H^[46]提出的小世界网络模型表明,向规则网络中添加少量随机连接会形成一个小路径网络。为解释随机网络中出现的可伸缩性, Barabási A L 和 Albert R^[47]提出了优先连接模型,他们指出新生节点将根据受欢迎程度进行成比例的连接,这种概

率模型可以再现复杂网络中宏观的拓扑结构属性,但它并不能反映微观节点的动态演化^[48]。

因此,可以从电力网络的拓扑结构或图谱特性的角度出发,研究其网络的动力学特性。例如,一阶 Kuramoto 振子同步理论可以被应用于暂态稳定分析^[49],复杂电网中发电机节点的动力学模型可以用二阶类 Kuramoto 振子建模^[50]。特别地,从代数图论的角度推导出电网频率同步的充分条件,这种方法还可以被推广到其他物理网络模型中^[49]。随着大量智能设备和功率转换技术的运用,电网系统融合了网络组件和物理组件,因此复杂微电网也被视为一种网络物理系统^[51]。

3.2 随机博弈中的复杂群体交互特征

DG 单元的出力会受天气影响而出现随机性和间歇性,同样,电动汽车的大规模动态接入也存在随机性,并在一定情况下与用户的个体行为相关联^[41]。由于微电网可能受到噪声或随机性的影响,研究者需要寻求随机博弈优化模型来平抑波动,以缩减电力成本、降低电力损耗等^[33]。为了研究 DG 发电的随机性、ESS 的缓冲效果、消费者行为模式和电动汽车的移动性,需要在系统级信息管理中引入不同微电网群体的随机模型来模拟智能电网的运行情况^[19]。基于电价激励的复杂微电网供需侧博弈交互架构如图 3 所示,将微电网集群中的用户及用户设备的随机需求响应(demand response, DR)信息发送至微电网运营商,微电网运营商再结合自身发电成本、运营成本、交易成本以及电力损耗等制定实时电价,以此来激励微电网用户调整个人用电需求,促进其参与需求响应。

复杂微电网中群体的随机性主要体现在以下几方面。

(1) 对于复杂微电网中各组件的随机模型来说,需要考虑发电集群中 DG 出力的间歇性、用户能源需求、电动汽车移动性和设备停用等特征。配备 ESS 的缓冲模型不仅在电力系统运行中引入了更多的状态变量,还需要考虑整个时间段的状态转换,因此需要针对 ESS 设计高效的电池管理方案^[52-53]。

(2) 对于融入了大量可再生能源的批量发电和输电系统来说,需要研究概率潮流、机组组合、经济调度、最优潮流以及发电控制。传统的负荷预测方法已经不能满足高随机性负荷的预测要求,当出现动态负荷聚集性接入/退出时段与高峰时段叠加时,则会形成新的负荷高峰,加重电网系统运行的负担,影响系统的稳定运行^[54-55]。

(3) 对于大规模电动汽车动态接入微电网来说,需要考虑这类高动态储能负荷对电网供需互动的影,制定动态定价激励方案。电动汽车通勤计划的随机性,将在充电基础设施的选择和区域用电需求方面,影响现有系统向充电站输送电力的决策^[41, 53, 56]。

(4) 对于出力-负荷的双随机性来说,亟须依靠通信网络促进发电节点与负荷节点之间的协作和交互,以便在随机切换负荷策略时,复杂微电网能自主地对柔性负荷、储能设备以及 RTP 进行动态调节,实现微电网的稳定性控制和实时调度。利用随机博弈模型对发电机组的最优出力、用户需求功率、激励策略以及最优转移功率进行建模,可以降低发电成本和转移功率,提升电网企业增值服务的利润^[23, 31, 57]。

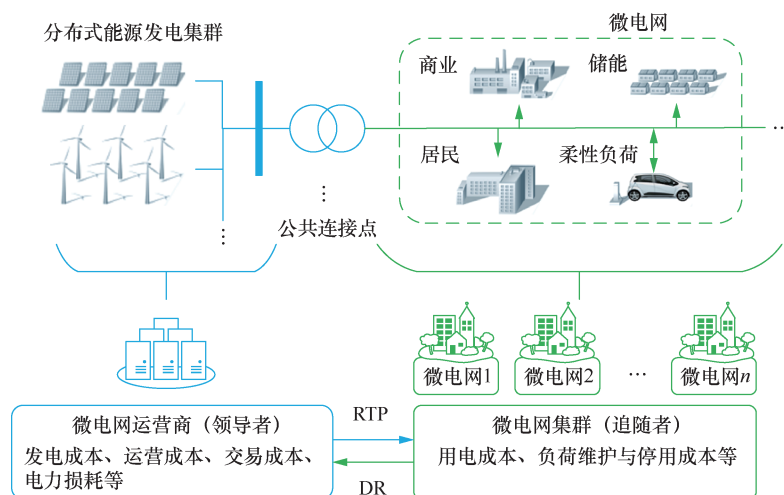


图3 基于电价激励的复杂微电网供需侧博弈交互架构

4 随机博弈优化策略与控制方法架构

为克服需求侧主体的高复杂性、高动态性问题,促进复杂微电网系统和需求侧的规划和运行,本文给出了一种随机博弈优化策略及其控制方法架构,为复杂微电网中存在的决策问题、复杂行为演化问题和随机优化问题提供了解决方案。

4.1 复杂微电网中多群体的随机博弈优化策略

随机博弈优化策略及其控制方法架构如图4所示,其通过在复杂随机网络图模型下构建多决策群体模型,对智能电网中的互动主体的复杂网络行为进行行为推演,构建个体效用函数并证明其纳什均衡存在性。该策略综合描述了DG随机发电的优化调度、包含ESS的能量管理方案、计及电动汽车互动的微电网优化调度以及消费者行为模式,并研究了需求侧参与调节频率的控制方法。

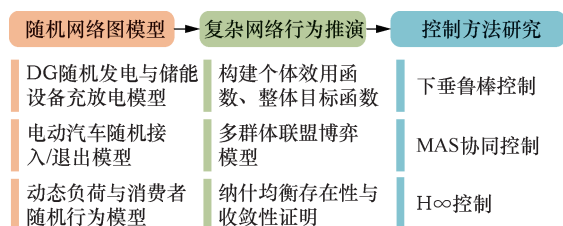


图4 随机博弈优化策略及其控制方法架构

(1) DG 随机发电的优化调度

并网模式下的风机和光伏发电设备的输出功率存在不确定性,因此电价成本会随之波动。通过优化目标函数^[31],利用需求响应规划(demand response planning, DRP)模拟随机的能源成本函数,可以将DG发电的市场价格、发电量和负荷用电的概率性质用鲁棒随机模型进行描述,然后采用帕累托最优法(Pareto optimality)求解^[58]。为研究与动态系统相关的可控随机负载,可构建关于单一市场与多个用户的两级随机微分博弈框架的DSM模型,并利用智能电表进行策略和信息的互联互通^[59]。在顶层,市场向用户提供精确到每小时的电价向量;在底层,配备智能电表的用户通过响应市场设定的价格、管理可控负荷来参与需求响应。通过求解随机哈密顿-雅可比-贝尔曼(Hamilton-Jacobi-Bellman)方程,可以得到各用户的最优闭环控制策略和纳什均衡解。这种方法不仅能降低总负荷的PAR,维持局部电网的稳定性,还能最大限度地降低用户的用电成本。

(2) 包含ESS的能量管理方案

用户通过安装ESS储能设备,在谷时储备电能,在峰时为负载供电,这可以进一步节约用电成本,缓解电网峰值负荷。非合作博弈理论适当地结合DSM策略可以模拟未来复杂微电网中ESS的能量管理问题,促进新能源消纳,并激励用户自主地调度家用负载、调整用电计划^[33]。与集中式算法相比,分布式算法可以降低整体用电成本和电力系统的PAR,且仅需要供电方和消费者之间通过定价信息进行交互。研究表明装备ESS能降低用电总成本和PAR,进一步地,仅向部分用户提供ESS也能维护局部电网的稳定性^[53]。还有研究模拟了多个ESS之间的自主交互^[21],利用双重拍卖市场模型构建一个拥有多个买家和多个卖家的电力市场。此时富余的储能单元能在自身效用、电池寿命、存储效率之间进行权衡,然后自主地分配一定电量进行反向出售,并允许根据当前的市场状况制定RTP信息。

对于大规模储能电站与电网之间的互动来说,可以将储能电站作为领导者,根据储能容量和电价决定建设容量,电网作为跟随者依据储能容量调整电价。通过卡罗需-库恩-塔克(Karush-Kuhn-Tucker)最优性条件,将双层规划问题转化为可直接求解的混合整数规划问题,令储能电站与电网进行动态博弈直至实现均衡^[60]。

(3) 计及电动汽车互动的微电网优化调度

聚焦于微电网中电动汽车充电(grid to vehicle, G2V)的成本博弈,每个电动汽车车主都试图最小化其充电成本。利用Stackelberg博弈构建的分布式成本分摊模型可以降低峰值能源需求和总能源成本,并通过多种方式实现拓扑扩展,进而达到纳什均衡^[61]。为了有效地管理大型电动汽车充电站,保证电力系统的效率和供电可靠性,一种基于马尔可夫链的电动汽车充电决策随机博弈被用于建模电力企业、充电站和车主之间的交互^[41],其确立了配电损耗最小的RTP方案。同时,车主可以实现在用电高峰到来之前选择更高的充电功率来快速充电。

电动汽车接入建筑(vehicle to building, V2B)的运行模式实现了可移动储能设备向智能建筑反向传输能量,进而参与需求侧响应。基于随机动态规划的电动汽车ESS管理框架可以降低总能源成本以及峰值电力需求,但放电过程应考虑对汽车电池寿命的影响^[9]。

(4) 消费者行为模式

参考文献[62]针对多用户模型设计了基于 RTP 信息的负荷调度学习 (load scheduling learning, LSL) 算法, 将用户对自身用电成本和随机负荷需求的决策建模为一个马尔可夫决策过程, 研究电力公司定价与用户消费之间的长期互动与状态演化。在不完全信息随机博弈中, 利用马尔可夫最佳均衡 (Markov perfect equilibrium, MPE) 对用户的最优负荷调整策略进行逼近。LSL 算法可以降低整个电网总负载的 PAR 和用户的预期成本, 且允许从过去的决策结果中学习, 实现用户侧柔性负荷的在线调度。

4.2 控制方法架构应用模式

微电网中的主要电能来源于风力 (wind turbine, WT) 或光伏 (photovoltaic, PV) 发电机等分布式可再生能源, 电能产生后被存入 ESS 中, 经逆变器并入交流微电网。一方面需要在安全运行的前提下精准控制逆变器, 制定充放电计划和电价调整策略; 另一方面, 由于 DG 出力的间歇性和电动汽车使用的不确定性, 必须在保证调度策略符合系统的稳定性和负载需求的前提下, 进一步提升电网经济性。图 5 展示了复杂微电网的物理、网络化模型及控制方法, 通过对节点特征进行建模, 构建随机博弈优化模型, 根据最优调度方案生成控制信号控制物理微电网中的柔性负荷, 并利用价格激励引导用户进行供需互动。

图 6 为分布式交流微电网的控制结构与通信示意, 包括 DG、ESS、电动汽车充放电以及普通用户负载 4 个主体。整个系统由独立的分布式本地控制

器来执行基本的有功、无功功率分配, 底层控制器分别对应 $DG\{1, \dots, n\}$ 的逆变器。

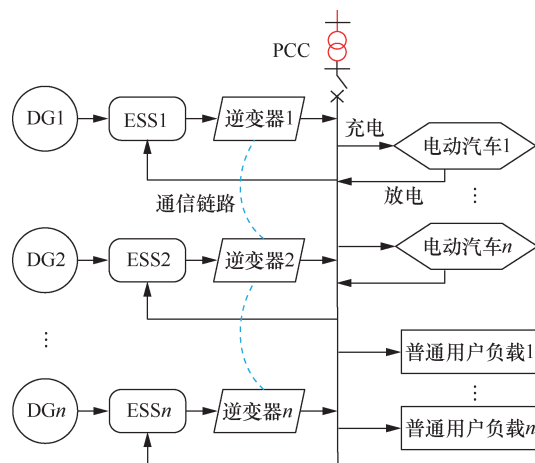


图6 分布式交流微电网的控制结构与通信示意

对于分布式能源发电的总成本来说, 主要考虑的因素包括发电成本、出力间歇性、设备损耗以及服务费用等, 其中发电成本包括逆变器成本、环境成本以及发电上网费用等。由于用户进行电量交易时, DG 本身不具备直接与普通用户负载进行电能交换的能力, 因此普通用户需要通过微电网运营商购买电能, 此时会产生一定的过网服务费。此外用户还应承担因自身负荷接受调控和停用造成的效用损失。

可充放电的电动汽车可以被认为是一个频率调节器^[63]。在设计充放电控制策略时, 应兼顾其电动汽车的移动储能特性与电池充放电寿命, 使电动汽车能最大限度地参与微电网需求响应和频率调节, 从而改善直流母线的电压质量。再者, 基于 MAS 一致性协同功率控制来调度电动汽车的充放

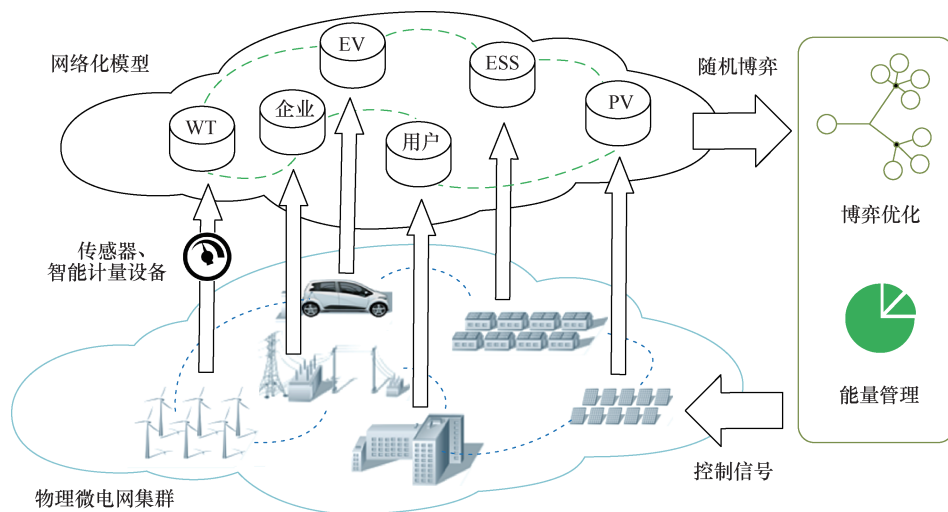


图5 复杂微电网的物理、网络化模型及控制方法

电,可以实现分布式控制单元与电网的能量、信息双向交换^[64]。考虑到电动汽车随机充放电对微电网运行的影响,针对电动汽车聚合器的协调分段式下垂充电控制(coordinated sectional droop charging control, CSDCC)策略被用于协同控制微电网的稳定性^[56]。结合电动汽车和充电站的能源管理和调度策略,可依据充电状态来确定充电服务价格,实现充电站运行成本最小化和微电网效益最大化。

5 结束语

本文从随机博弈理论的角度详细地阐述了复杂微电网中的供需互动、决策问题和控制方法。通过分析其体系架构、多群体博弈交互形式和各组件的随机模型,给出了被应用于复杂微电网系统的一种随机博弈优化策略及其控制方法架构。

目前在微电网体系下探讨的随机博弈控制与优化问题,其范围还局限于局部微电网,且多以对静态模型的研究为主。而且现阶段研究的博弈形式较为基础,模型尚不能反映实际情况。在未来智慧能源互联网体系下,需要逐步引入动态博弈模型,深入研究天气因素干扰下的分布式发电出力随机性、动态可转移负荷的调度方法以及用户侧各种随机现象等多方博弈。特别是要针对大量电动汽车动态随机入网和退网,在维护电网全局的稳定性和经济性的基础上,根据实际情况探讨具有通信时延和干扰的随机博弈优化问题,引导复杂微电网良性发展。

参考文献:

- [1] PAGAN N, DÖRFLER F. Game theoretical inference of human behavior in social networks[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 5507-5512.
- [2] ESFAHANI M M, HARIRI A, MOHAMMED O A. A multi-agent-based game-theoretic and optimization approach for market operation of multimicrogrid systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(1): 280-292.
- [3] 李昊飞, 余涛, 瞿凯平, 等. 综合负荷聚合商参与的配电-气能源系统供需互动均衡模型[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(19): 32-45.
LI H F, YU T, QU K P, et al. Equilibrium model of supply and demand interaction in distribution-gas energy system with the participation of comprehensive load aggregator[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(19): 32-45.
- [4] MAHARJAN S, ZHU Q, ZHANG Y, et al. Dependable demand response management in the smart grid: a stackelberg game approach[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2013, 4(1): 120-132.
- [5] 李力行, 苗世洪, 余璟, 等. 源荷双侧不确定因素影响下基于Rubinstein 博弈的电网双层定价模型[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(S2): 729-741.
LI L X, MIAO S H, YU J, et al. A two-layer pricing model for power grid based on Rubinstein game under the influence of bilateral uncertainties of source load[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(S2): 729-741.
- [6] 黄南天, 包佳瑞琦, 蔡国伟, 等. 多主体联合投资微电网源-储多策略有限理性决策演化博弈容量规划[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(4): 1212-1225.
HUANG N T, BAO J R Q, CAI G W, et al. Game capacity planning for the evolution of rational decision making for multi-agent joint investment in microgrid sources-storage-many strategy[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2020, 40(4): 1212-1225.
- [7] 杨楠, 黄禹, 董邦天, 等. 基于多主体博弈的电力-天然气综合能源系统联合规划方法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(22): 6521-6532.
YANG N, HUANG Y, DONG B T, et al. Research on joint planning method of electricity-natural gas integrated energy system based on multi-agent game[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2019, 39(22): 6521-6532.
- [8] 李宏仲, 王磊, 林冬, 等. 多主体参与可再生能源消纳的 Nash 博弈模型及其迁移强化学习求解[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(14): 4135-4150.
LI H Z, WANG L, LIN D, et al. Nash game model of multi-subject participation in renewable energy consumption and its solution of transfer reinforcement learning[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2019, 39(14): 4135-4150.
- [9] WU X H, HU X S, YIN X F, et al. Stochastic optimal energy management of smart home with PEV energy storage[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(3): 2065-2075.
- [10] 李咸善, 陈敏睿, 程杉, 等. 基于双重激励协同博弈的含电动汽车微电网优化调度策略[J]. *高电压技术*, 2020: 1-11.
LI X S, CHEN M R, CHENG S, et al. Optimal scheduling strategy of electric vehicle microgrid based on double excitation cooperative game[J]. *High Voltage Engineering*, 2020: 1-11.
- [11] 陈思远, 白昱阳, 张俊, 等. 基于区块链和通证经济的跨国跨洲电力市场机制设计[J]. *智能科学与技术学报*, 2019, 1(1): 96-105.
CHEN S Y, BAI Y Y, ZHANG J, et al. Design of transnational and trans-continental power market mechanism based on block chain and communication economy[J]. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2019, 1(1): 96-105.
- [12] ALLAHVIRDIZADEH Y, MOGHADDAM M P, SHAYANFAR H. A survey on cloud computing in energy management of the smart grids[J]. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2019, 29(10): e12094.
- [13] 王侨侨, 曾君, 刘俊峰, 等. 面向微电网源-储-荷互动的分布式多目标优化算法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(5): 1421-1432.
WANG Q Q, ZENG J, LIU J F, et al. Research on distributed multi-objective optimization algorithm for source-storage-load interaction in micro power grid[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2020, 40(5): 1421-1432.
- [14] DELABAYS R, JACQUOD P, DÖRFLER F. The kuramoto model on oriented and signed graphs[J]. *SIAM Journal on Applied Dynamical Systems*, 2019, 18(1): 458-480.
- [15] TUSHAR W, YUEN C, MOHSENIAN-RAD H, et al. Transforming energy networks via peer-to-peer energy trading: the potential of game-theoretic approaches[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*,

- 2018, 35(4): 90-111.
- [16] STEVANONI C, DE GREVE Z, VALLEE F, et al. Long-term planning of connected industrial microgrids: a game theoretical approach including daily peer-to-microgrid exchanges[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 2245-2256.
 - [17] TUSHAR W, SAHA T K, YUEN C, et al. A motivational game-theoretic approach for peer-to-peer energy trading in the smart grid[J]. Applied Energy, 2019, 243: 10-20.
 - [18] YU M M, HONG S H. A real-time demand-response algorithm for smart grids: a stackelberg game approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 879-888.
 - [19] LIANG H, TAMANG A K, ZHUANG W H, et al. Stochastic information management in smart grid[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(3): 1746-1770.
 - [20] JADHAV A M, PATNE N R, GUERRERO J M. A novel approach to neighborhood fair energy trading in a distribution network of multiple microgrid clusters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 1520-1531.
 - [21] WANG Y P, SAAD W, HAN Z, et al. A game-theoretic approach to energy trading in the smart grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(3): 1439-1450.
 - [22] ZHAO B, XUE M D, ZHANG X S, et al. An MAS based energy management system for a stand-alone microgrid at high altitude[J]. Applied Energy, 2015, 143: 251-261.
 - [23] KHAN M R B, JIDIN R, PASUPULETI J. Multi-agent based distributed control architecture for microgrid energy management and optimization[J]. Energy Conversion & Management, 2016, 112: 288-307.
 - [24] CHEN Y, MEI S W, ZHOU F Y, et al. An energy sharing game with generalized demand bidding: model and properties[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 11(3): 2055-2066.
 - [25] KYRIAKARAKOS G, PIROMALIS D D, DOUNIS A I, et al. Intelligent demand side energy management system for autonomous poly-generation microgrids[J]. Applied Energy, 2013, 103: 39-51.
 - [26] LIU N, CHENG M Y, YU X H, et al. Energy-sharing provider for PV prosumer clusters: a hybrid approach using stochastic programming and stackelberg game[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(8): 6740-6750.
 - [27] AOLARITEI L, BOLOGNANI S, DORFLER F. Hierarchical and distributed monitoring of voltage stability in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6705-6714.
 - [28] MOLZAHN D K, DORFLER F, SANDBERG H, et al. A survey of distributed optimization and control algorithms for electric power systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(6): 2941-2962.
 - [29] 龚迅, 王俊, 王湘艳, 等. 基于演化博弈的区域电-气互联综合能源系统用户需求侧响应行为分析[J]. 中国电机工程学报, 2019: 1-11.
 - DOU X, WANG J, WANG X Y, et al. User demand side response behavior analysis of regional power-gas interconnection integrated energy system based on evolutionary game[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2019: 1-11.
 - [30] 王飞跃, 张军, 张俊, 等. 工业智联网: 基本概念、关键技术与核心应用[J]. 自动化学报, 2018, 44(9): 1606-1617.
 - WANG F Y, ZHANG J, ZHANG J, et al. Industrial intelligent networking: basic concepts, key technologies and core applications[J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 44(9): 1606-1617.
 - [31] KHALILI T, NOJAVAN S, ZARE K. Optimal performance of micro-grid in the presence of demand response exchange: a stochastic multi-objective model[J]. Computers and Electrical Engineering, 2019, 74: 429-450.
 - [32] FOROUZANDEHMEHR N, HAN Z, ZHENG R. Stochastic dynamic game between hydropower plant and thermal power plant in smart grid networks[J]. IEEE Systems Journal, 2016: 1-9.
 - [33] ZENG J, WANG Q Q, LIU J F, et al. A potential game approach to distributed operational optimization for microgrid energy management with renewable energy and demand response[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(6): 4479-4489.
 - [34] DORFLER F, SIMPSON-PORCO J W, BULLO F. Electrical networks and algebraic graph theory: models, properties, and applications[J]. Proceedings of the IEEE, 2018, 106(5): 977-1005.
 - [35] WEISS G, DÖRFLER F, LEVRON Y. A stability theorem for networks containing synchronous generators[J]. Systems & Control Letters, 2019, 134: 104561.
 - [36] NEUMANN J V, MORGENSTERN O. The theory of games and economic behaviour[M]. Princeton: Princeton University Press, 1944.
 - [37] NASH J F. Equilibrium points in n-person games[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1950, 36(1): 48-49.
 - [38] RAJASEKHAR B, PINDORIYA N, TUSHAR W, et al. Collaborative energy management for a residential community: a non-cooperative and evolutionary approach[J]. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence, 2019, 3(3): 177-192.
 - [39] AGHAJANI S, KALANTAR M. A cooperative game theoretic analysis of electric vehicles parking lot in smart grid[J]. Energy, 2017, 137: 129-139.
 - [40] MEI J, CHEN C, WANG J H, et al. Coalitional game theory based local power exchange algorithm for networked microgrids[J]. Applied Energy, 2019, 239: 133-141.
 - [41] LIU Y, DENG R L, LIANG H. A stochastic game approach for PEV charging station operation in smart grid[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(3): 969-979.
 - [42] TUSHAR W, ZHANG J A, SMITH D B, et al. Prioritizing consumers in smart grid: a game theoretic approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 5(3): 1429-1438.
 - [43] YU M M, HONG S H. Supply-demand balancing for power management in smart grid: a stackelberg game approach[J]. Applied Energy, 2016, 164: 702-710.
 - [44] 苏奇. 复杂网络上的合作演化 and 博弈动力学研究[D]. 北京: 北京大学, 2020.
 - SU Q. Research on cooperative evolution and game dynamics in complex networks[D]. Beijing: Peking University, 2020.
 - [45] ERDŐS P, RÉNYI A. On random graphs I[J]. Publicationes Mathematicae, 1959, 4: 3286-3291.
 - [46] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of small world networks[J]. Nature, 1998, 393(6684): 440-442.
 - [47] BARABÁSI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286(5439): 509-512.
 - [48] LATORA V, NICOSIA V, RUSSO G. Complex networks: principles, methods and applications[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
 - [49] DORFLER, BULLO. Topological equivalence of a structure-preserving power network model and a non-uniform Kuramoto model of coupled oscillators[C]// Decision & Control & European Control Conference. Piscataway: IEEE Press, 2011.

- [50] SIMPSON-PORCO J W, DORFLER F, BULLO F. Droop-controlled inverters are kuramoto oscillators[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2012, 45(26): 264-269.
- [51] VACCARO A, LOIA V, FORMATO G, et al. A self-organizing architecture for decentralized smart microgrids synchronization, control, and monitoring[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2015, 11(1): 289-298.
- [52] SEN S, KUMAR V. Microgrid control: a comprehensive survey[J]. Annual Reviews in Control, 2018, 45: 118-151.
- [53] SOLIMAN H M, LEON-GARCIA A. Game-theoretic demand-side management with storage devices for the future smart grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(3): 1475-1485.
- [54] XI L, LI Y D, HUANG Y H, et al. A novel automatic generation control method based on the ecological population cooperative control for the islanded smart grid[J]. Complexity, 2018, 2018: 1-17.
- [55] DORFLER F, SIMPSON-PORCO J W, BULLO F. Breaking the hierarchy: distributed control and economic optimality in microgrids[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2016, 3(3): 241-253.
- [56] ZHU X W, XIA M C, CHIANG H D, et al. Coordinated sectional droop charging control for EV aggregator enhancing frequency stability of microgrid with high penetration of renewable energy sources[J]. Applied Energy, 2018, 210: 936-943.
- [57] WANG H W, HUANG T W, LIAO X F, et al. Reinforcement learning in energy trading game among smart microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(8): 5109-5119.
- [58] 刘可真, 王骞, 赵明, 等. 基于多方合作博弈及梯级化的电能替代效益分析[J]. 电网技术, 2020, 44(2): 711-718.
- LIU K Z, WANG Q, ZHAO M, et al. Analysis of electric energy substitution benefits based on multi-party cooperative game and cascade[J]. Power System Technology, 2020, 44(2): 711-718.
- [59] FOROUZANDEHMEHR N, ESMALIFALAK M, MOHSENIAN-RAD H, et al. Autonomous demand response using stochastic differential games[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(1): 291-300.
- [60] 李至骛, 陈来军, 刘当武, 等. 基于主从博弈的储能电站容量电价定价方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(2): 519-526.
- LI Z A, CHEN L J, LIU D W, et al. The pricing method of electricity charge for energy storage power station capacity based on master-slave game[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 519-526.
- [61] MONDAL A, MISRA S. Game-theoretic green electric vehicle energy networks management in smart grid[C]// IEEE International Conference on Advanced Networks & Telecommunications Systems. Piscataway: IEEE Press, 2016.
- [62] BAHRAMI S, WONG V W S, HUANG J W. An online learning algorithm for demand response in smart grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017: 1.
- [63] KAUR K, SINGH M, KUMAR N. Multi objective optimization for frequency support using electric vehicles: an aggregator-based hierarchical control mechanism[J]. IEEE Systems Journal, 2017: 1-12.
- [64] 李志伟, 赵书强, 刘应梅. 电动汽车分布式储能控制策略及应用[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 116-124.
- LI Z W, ZHAO S Q, LIU Y M. Distributed energy storage control strategy and application of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 116-124.

[作者简介]



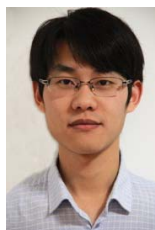
周洪 (1962—), 男, 博士, 武汉大学电气与自动化学院教授、博士生导师, 主要研究方向为复杂微电网控制、分布式能源系统等。



要若天 (1992—), 男, 武汉大学电气与自动化学院博士生, 主要研究方向为智能电网控制与博弈优化、微电网能源管理系统等。



余昶 (1990—), 男, 武汉大学电气与自动化学院博士生, 主要研究方向为分布式微电网控制、复杂网络理论等。



雷忠诚 (1991—), 男, 武汉大学电气与自动化学院博士后, 主要研究方向为复杂系统网络化控制、远程控制系统等。