

基于区块链技术的能源局域网储能系统自动需求响应

杨晓东¹, 张有兵¹, 卢俊杰¹, 赵波², 黄飞腾¹, 戚军¹, 潘红武³

(1. 浙江工业大学信息工程学院, 浙江省 杭州市 310023; 2. 国网浙江省电力公司电力科学研究院, 浙江省 杭州市 310014; 3. 国网浙江省电力公司湖州供电公司, 浙江省 湖州市 313000)

Blockchain-based Automated Demand Response Method for Energy Storage System in an Energy Local Network

YANG Xiaodong¹, ZHANG Youbing¹, LU Junjie¹, ZHAO Bo², HUANG Feiteng¹, QI Jun¹, PAN Hongwu³

(1. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang Province, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, Zhejiang Province, China;

3. State Grid Huzhou Municipal Electric Power Company, Huzhou 313000, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: As a novel form of data structure, blockchain technology has been applied in the field of energy internet. The characteristics of decentralization, intelligent contract and cooperative autonomy of blockchain technology meet the demands of automatic demand response (ADR) of energy local network (ELN). A blockchain-based ADR (BADR) method for energy storage system in an ELN was proposed to do some related research on the beneficial application pattern of blockchain technology in energy field. The structure of ELN was described from the blockchain perspective. Based on the congestion price algorithm, the decentralized ADR method was developed, and the response executors can rely on this rule-based ADR method to response the system compensation needs independently. On this basis, the intelligent contracts among the response executors were established to ensure the efficient implementation of energy trading and profit distribution. Case studies based on a certain workspace grid-connected ELN system demonstrate the rationality and effectiveness of the proposed approach.

KEY WORDS: blockchain; energy storage system; automatic demand response; energy local network; power compensation; renewable energy source

摘要: 区块链技术作为一种新颖的数据结构组织形式,在能源互联网领域的应用研究已经逐渐兴起,并崭露头角。区块

链技术去中心化、智能合约、协同自治等特质,吻合了能源局域网(energy local network, ELN)自动需求响应(automatic demand response, ADR)项目的诉求,为此基于区块链技术提出 ELN 储能系统的 ADR 方法,探索区块链技术在能源领域的有益应用模式。研究了区块链视角下的 ELN 表征形式;借鉴拥塞价格算法,发展了去中心化的 ADR 准则,响应主体能够依托该既定准则自主响应系统补偿需求;在此基础上,建立了响应主体间的智能合约,以保障能量交易与利益分配的高效执行。以某办公区域 ELN 为例进行了仿真分析,算例结果验证了所述 ADR 方法的合理性、有效性。

关键词: 区块链; 储能系统; 自动需求响应; 能源局域网; 功率补偿; 可再生能源

0 引言

现阶段,一次能源日渐枯竭、信息技术高度发达、气候变化加剧等是当前全球共同面对的多态现状,给能源、互联网、交通等领域的发展带来了深刻的影响和挑战^[1-2]。在能源结构方面,新能源发电、低碳交通和信息技术深度结合的能源互联网(energy internet, EI)^[3]为各类清洁能源灵活接入以及规模化利用的实现提供了一种可能的解决方案^[4-5]。能源局域网(energy local network, ELN)是 EI 的一类典型子网,主要服务于一定区域内的终端用户与就地接入的分布式能源。与 EI 一致,其内涵是希望通过高效集成利用多种能源,实现随机波动的可再生能源(renewable energy source, RES)在系统内的消纳与利用^[6]。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51407160); 浙江省自然科学基金项目(LY16E070005)。

Project supported by National Natural Science Foundation of China (51407160); Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (LY16E070005).

风、光等 RES 的出力伴随其高渗透率接入而日益增强的不确定性将会在很大程度上制约 RES 的高效利用^[7]。电动汽车(pure electric vehicle, PEV)作为一种低碳交通工具在需求侧规模化接入 ELN 系统时,其移动储能特性将对系统的规划、运行等产生深刻影响^[8-9]。因此,在含风、光等 RES 的 ELN 背景下,开展以 PEV 集群和储能蓄电池(battery energy storage, BES)为控制对象的电力需求响应(demand response, DR),是更好地匹配 RES 出力及提高系统经济性的重要手段。自动化系统与人工设定相结合的自动需求响应(automatic demand response, ADR)项目是能量管控技术发展的高级阶段,能够简化复杂的 DR 业务过程,也是实现用电智能化的关键环节^[10]。

目前,针对 ELN 系统能量管控的研究已有很多。文献[11]考虑综合价格机制建立了一种针对商业微电网的两阶段随机需求侧管理模型,并分别讨论了 BES 和 PEV 配置量对系统运行成本的影响。文献[12]综合考虑动态电价模型和用户满意度约束,提出一种基于混合整数规划架构的 ADR 方法来实现智能家庭的能量管理,结果表明了该集中式控制方法在降低用电成本和削峰方面的有效性。文献[13-14]提出采用集中式的随机规划方法来进行需求侧管理。文献[15]以物流配送 PEV 为优化对象构建微电网优化运行框架,并以最小化系统运行总成本为目标实现了 RES 出力波动的平抑。文献[16]面向含高渗透率风电和规模化 PEV 集群的智能配电公司,构建了随机经济调度模型,基于 PEV 集群和 BES 的潜力来应对风电的随机性。该类集中式管控方法主要存在以下缺陷:1)用户隐私难以保障、需要太多交互信息和求解困难;2)存在信息安全问题;3)多是在一定统计概率基础上进行,难以做到对可调度资源的实时管控。

为了克服上述缺陷,自发的分布式管理方案开始逐渐受到学者们的广泛关注,目前文献中对该类方案的研究尚不多。文献[17]针对含 PEV 集群、光伏发电系统的智能楼宇群构建了能量管理模型,并基于博弈论方法实现了需求侧资源的自动需求响应。文献[18]采用博弈方法建立了一种分布式的自动需求侧管理策略,保障了用户的隐私。文献[19]基于双层微分博弈理论研究了空调和 BES 的 ADR 模型。该类研究通常基于博弈论或模型预测控制等方法实现受控源的自管控,虽然能解决集中式管控方法的缺陷,却需要较长的均衡时间、可扩展性弱;

且优化过程中仍需要对 RES 出力进行预测,优化效率还存在提升的空间。

灵活、高效、分布自治、倾向自平衡^[6]等是一种有效管控策略下 ELN 所应包含的重要特征。区块链技术是一种公开透明、去中心化的可靠数据库^[20],拥有去中心化、智能合约、协同自治等典型特征,与 ELN 管控策略的去中心化、实时高效等诉求吻合(后文将详细介绍),这使得区块链技术有潜力成为 ELN 管控中重要的技术解决方案之一。现阶段,区块链技术已在能源、市场交易等领域得到了探索性的研究和应用^[21-22]。文献[23]尝试用区块链技术解决交易双方信任问题,并提出一种弱中心化管理的电力交易方法。文献[24]研究了区块链技术在工业 4.0 时代电力市场中的应用。这些文献均为本文工作的开展提供了有益参考。

本文面向含 PEV 集群、风光发电系统、BES 的 ELN 系统,以实现含高渗透率 RES 的 ELN 系统内部自主供需平衡、提升 RES 消纳水平为目的,针对 PEV 集群和 BES 组成的储能系统(energy storage system, ESS),探索一种基于区块链技术的 ADR 解决方案,期望为区块链技术在能源领域的应用提供一种有益尝试、初探。

1 储能系统的 ADR

1.1 能源局域网

本研究面向并网型能源局域网开展储能系统的自动需求响应项目,ELN 系统架构如图 1 所示。

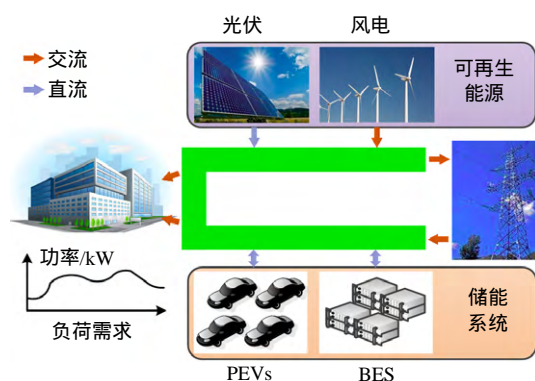


图1 能源局域网结构

Fig. 1 Architecture of the energy local network

所述 ELN 系统中,供电侧由风能、光能、BES 及大电网构成,需求侧由常规负荷及 PEV 集群组成。在所提 ADR 方法的作用下,需求侧的 PEV 集群和供电侧的 BES 作为受控对象协调配合,在 RES 出力高于常规负荷水平情况下积极响应系统需求依照自身水平进行充电,而在情况反过来时进行一

定程度的放电。在并网条件下,ELN 系统中富余的电能可依照一定电价倒送大电网,同时在系统内存在电量缺额时向电网购电,以满足系统的绝对功率平衡。

1.2 ADR 的需求分析

ADR 项目中,移动储能 PEV 集群和 BES 作为响应主体,以主动、实时调整自身功率需求的方式来响应 ELN 系统供电侧与需求侧间的功率缺额,能够增加系统运行的灵活性、最大限度地促进 RES 在系统内的消纳与利用。

ELN 系统作为能源互联形势下分布式能源与信息技术的融合产物,对 ADR 项目的有效实施提出了新的需求:

1) 一方面 ELN 系统有接入更多分布式新能源的趋势;另一方面需求侧负荷形式呈现多样化,需求侧响应、PEV 等新型负荷等将直接参与系统的管控,凡此种种都将促使系统的调度运行从集中式过渡到去中心化。

2) 为促进供需两侧各主体的广泛参与和公平竞争,保障 ELN 系统的灵活、生态、多元化发展,需要构建主体多元、竞争有序的电力交易格局,建立市场化能量共享交易服务平台。

3) ELN 实时调度的实现,伴随着交易的多元、高频化发展,要确保交易的执行力和可靠性、利益分配的公平有效性,需要借助智能化、合约化的新手段。

2 区块链技术与 ADR 的契合度

2.1 区块链技术

区块链由按时序生成的区块链接组成,每个区块均存放着电子形式的数据记录,并通过特定信息与上一区块相链接^[25]。作为一种新颖的数据结构组织形式,区块链通过去中心化和去信任的方式来维护不断增长的数据记录,并通过密码学技术让区块的数据记录之间有所关联。

区块链技术作为一种特殊的分布式数据记录、存储与呈现方式,极有潜力成为未来数据库的架构范式,其拥有以下 4 个主要优势:去中心化、去信任、可追溯性、智能合约化。

去中心化。区块链系统中没有中心化的硬件或管理机构^[26],而是采用分布式集体运作的方法,构建了庞大复杂的点对点网络,部分节点的损坏或失去不会影响到系统的完整性。

去信任。区块链技术采用了可信任的数学算法

规范了交易的行为,系统中节点之间的数据交换无需相互信任,整个系统的交易行为公开透明,任意节点都能查到真实可靠的交易数据记录。

可追溯性。区块链中的数据前后相连形成了一个不可篡改的时间戳^[27],便于查找交易数据;区块链系统中保存有所有交易数据记录,并通过区块上特定标记,使得整个链式传递过程是清晰的,有利于交易的监管。

智能合约化。区块链技术采用计算机语言取代法律条款的合约,自动执行节点交易时需要遵循的准则,可以提高合同签订、执行的效率并降低成本。

2.2 契合度分析

能源区块链可推动能源互联网产业的升级和完善^[28],区块链技术的引入将对我国分布式能源接入系统产生巨大作用。《中共中央国务院关于进一步深化电力体制改革的若干意见》^[29]指出了电力体制改革的重要性和紧迫性,研究区块链技术下的储能系统 ADR 会对市场化改革带来积极影响。

随着能源互联网和电力市场的发展,无需人工介入、自发调节负荷的 ADR 是 ELN 系统能量管控的主要发展趋势,其与区块链理念的契合度主要体现在以下 3 个方面:

1) 去中心化思想的体现。区块链技术支撑海量用户的点对点直接交易,信息公开透明,并且依托于分布式的记账、传播、存储等技术,形成无需中心的可信任的分布式系统。区块链这种对等以及去中心化的特质,能够为响应主体自主做出最优决策、能源的高效利用的实现提供重要的技术支撑。

2) 强调市场化的发展。区块链技术作为新一代信息技术,可能会从根本上改变市场交易的行为方式,其公开、去中心化的特点有利于透明化的市场格局的形成。区块链在市场交易方面的优势,能够促进需求侧多方位参与能源系统的交易与互动,结合其信息的透明对称性、可信性,有利于实现 ADR 项目自主供需平衡水平的提升以及市场化机制作用的发挥。

3) 重视智能化、合约化。智能合约是部署在区块链上的去中心化、可信共享的程序代码,基于此,各类社会系统功能均可封装在去中心化可信的区块链上自动执行^[30]。ADR 项目中的决策、交易行为等有智能化发展的趋势,基于区块链的智能合约能够规范储能系统的电力交易行为,自动保障交易及利益分配的公平、高效执行。

3 区块链在系统中的应用

本节将区块链技术应用到 ELN 储能系统的 ADR 项目中,提出一种储能系统(blockchain-based automated demand response, BADR)方法,旨在提升 ELN 系统内 RES 的消纳水平。

3.1 区块链下的 ELN

3.1.1 节点及其运作方式

由于区块链本身依附于节点之上,因此,确定节点是使用区块链技术的前提之一。BES 和 PEV 集群作为储能系统的组成部分,其和智能电表的差额计算单元在 ADR 项目中均被视为节点,构成的节点网络如图 2 所示。

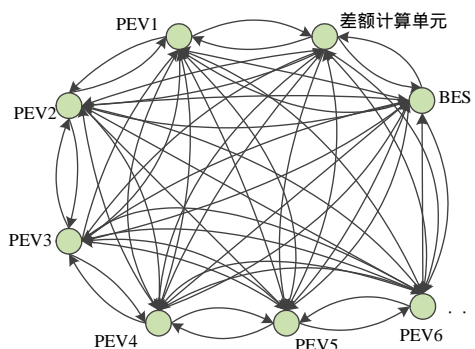


图2 节点网络

Fig. 2 Network of the nodes

节点分为全节点和轻节点,由于本研究中区块链的信息量相对不大并可以定期重置,将储能系统中的全部节点设置为全节点类型。全节点具有计算能力,但只有差额计算单元自带能测量 ELN 系统实时功率的智能电表。

节点中,设 PEV 规模为 n 、集合为 N , PEV 集群与 BES 组成的响应主体集合为 N^+ 。BES 可视为全时段接入、无出行电量需求的一类特殊的“PEV 动力电池”。当 $i \leq n$ 时,响应主体指 PEV 动力电池,当 $i > n$ 时,响应主体指 BES。响应主体的模型和约束条件参考文献[31]建立。

对于 $\forall i \in N^+$, 其状态空间表示为:

$$X_i = [T_i^{\text{in}}, T_i^{\text{left}}, S_i^{\text{ini}}, S_i^{\text{E}}, Q_i^{\text{nom}}, P_i^{\text{maxc}}, P_i^{\text{maxd}}] \quad (1)$$

式中: T_i^{in} 、 T_i^{left} 分别表示响应主体 i 接入 ELN 的时间和预期离开时间; S_i^{ini} 、 S_i^{E} 分别表示响应主体的起始荷电状态(state of charge, SOC)和离开 ELN 时的期望 SOC, SOC 表示电池剩余能量与电池容量的比值,因此有 $0 \leq S_i^{\text{ini}} \leq 1$ 、 $0 \leq S_i^{\text{E}} \leq 1$; Q_i^{nom} 表示响应主体储能容量; P_i^{maxc} 、 P_i^{maxd} 分别表示额定充、放电功率。

节点结构如图 3 所示,节点信息主要包含 IP

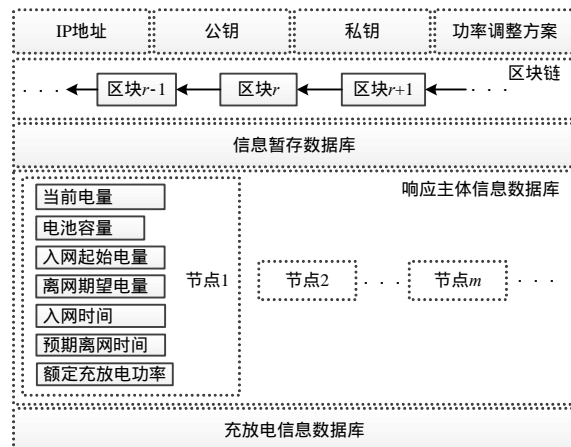


图3 节点结构

Fig. 3 Architecture of the node

地址、私钥、公钥、功率调整方案、区块链、信息暂存数据库、响应主体信息数据库和充放电信息数据库等。其中,信息暂存数据库用于暂存接收到的信息;充放电信息数据库用于存放所有节点的充放电状态和充放电功率;响应主体信息数据库则存放所有入网节点的状态空间参数。

节点的运作方式遵循以下几条规则:

1) 当有响应主体入网时,会成为一个新的节点,拥有自己的 IP 地址、计算并生成自己的私钥和公钥。

2) 响应主体入网后,将自己的各项参数上传到响应主体信息数据库,并连同公钥向全网广播,同时从节点网络的其他节点处下载区块链和响应主体信息数据库。

3) 各节点每隔 Δt 新建一个空的区块。

4) 借助智能电表给出的实时功率,差额计算单元每隔 Δt 计算并保存补偿需求量,并向全网广播。

5) 接收到新的补偿需求量之后,各节点结合自身情况按式(2)自主响应系统需求,形成功率调整方案。

$$P_{i,k+1} = P_{i,k} + \phi_i (UL_{i,k} - P_{i,k} \nu RTP_k) \quad (2)$$

式中: ϕ_i 是一个影响算法收敛速度的参数; $UL_{i,k}$ 表示 k 时段响应主体 i 的充/放电迫切水平参数, νRTP_k 表示 k 时段的虚拟价格信号。 $UL_{i,k}$ 和 νRTP_k 将在 3.2 节详细介绍。

3.1.2 区块结构

前已述及,区块链是各节点共有的数据账本,由区块按时间顺序首尾链接而成。各节点每隔 Δt 将接收到的交易数据和代码封装到一个带有时间戳的数据区块中,并链接到当前最长的主区块链上,生成最新的区块^[30]。一个新的区块包含区块头和区

块体两个主要部分，区块结构如图 4 所示。区块头部分封装了当前区块的版本号、前一区块的地址、时间戳、Merkle 根以及该时段对应的系统补偿需求量。区块体部分封装了包含能量交互信息和对应哈希值的二叉 Merkle 树和交易数据库。

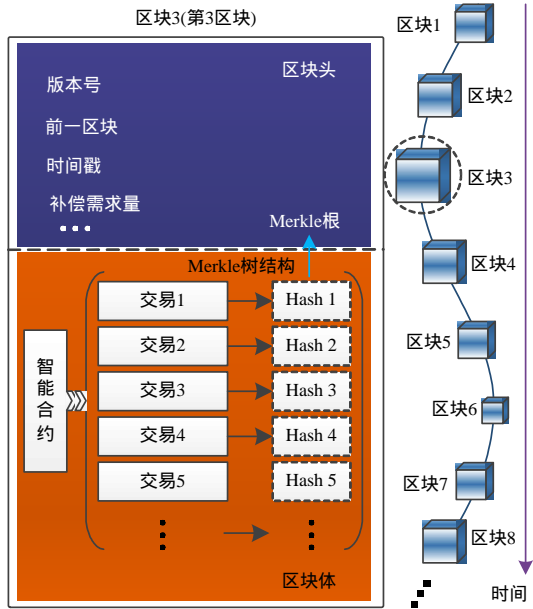


图 4 区块结构

Fig. 4 Architecture of the block

由于文中区块链所在节点为全节点，区块体中所有哈希值分支均被保留。最底层的哈希值分支与交易数据库中的各个交易相对应，交易中除了包括交易对象、交易内容，还内嵌有与交易相对应的智能合约。

3.2 去中心化的 BADR 过程

本节建立了一种去中心化的储能系统 BADR 方案：ELN 系统不依赖中心机构的集中式管理、也不通过施用目标函数的方式来制定响应主体的功率调整方案，而是根据系统的实时运行情况及参数，各响应主体根据既定准则自动调整自身功率需求。

在本文针对的含高渗透率可再生能源 ELN 系统环境下，供给侧供应量与需求侧使用量之间的功率差额即为系统所需的补偿需求量，要求响应主体共同出力补偿。文中，记 k 时段的补偿需求量为 P_k^{com} ，由差额计算单元负责计算，计算方式如下：

$$P_k^{\text{com}} = P_k^{\text{WT}} + P_k^{\text{PV}} - P_k^{\text{load}} + P_k^{\text{PEV, nocont}} \quad (3)$$

式中： P_k^{WT} 、 P_k^{PV} 分别为 k 时段的风机、光伏出力； P_k^{load} 是 k 时段的常规负荷功率； P_k^{com} 的正、负分别表示当前功率补偿状态需求是从电网充电(grid to vehicle, G2V)还是将电能反送至电网(vehicle to grid, V2G)； $P_k^{\text{PEV, nocont}}$ 表示未处于响应状态下的所

有 PEV 储能充电功率之和。

3.2.1 拥塞价格背景

拥塞价格算法(congestion pricing algorithm, CPA)^[32]的表达式如下：

$$f(k) = a[\sum x_{i,k} / C_k]^\gamma \quad (4)$$

式中： a 、 γ 为常数； C_k 表示 k 时段的网络流量； $x_{i,k}$ 表示用户 i 在 k 时段的流量。

CPA 最初使用在互联网流量控制领域，期望实现一种机制：愿意付出更多的用户将得到更多的网络流量，流量调整方式为：

$$x_i(k + \Delta t) = x_i(k) + \phi_i[w_i(k) - x_i(k)f(k)] \quad (5)$$

式中： $w_i(k)$ 表示用户 i 的愿意付出的程度。

本文借鉴 CPA 建立去中心化的响应主体 ADR 方案，核心理念为响应能力大的响应主体将提供更多的补偿供应量。依托于该理念，基于响应主体的补偿供应量和系统所需补偿需求量来构建虚拟实时价格模型：

$$vRTP_k = a[\sum_{i=1}^{[N^+]} P_{i,k} / P_k^{\text{com}}]^\gamma.$$

ELN 系统内部功率供需平衡的实现需要满足条件：处于响应状态的响应主体功率之和等于系统补偿需求功率，即 $\sum_{i=1}^{[N^+]} P_{i,k} = P_k^{\text{com}}$ ，考虑到移动储能 PEV 的交通工具属性，上述条件通常难以严格成立。因此，引入一个满足 $0 < \varepsilon_k \leq 1$ 的乘子 ε_k 将 $vRTP_k$ 进一步调整为(设 $a=1$)：

$$vRTP_k = [\sum_{i=1}^{[N^+]} P_{i,k} / (\varepsilon_k P_k^{\text{com}})]^\gamma \quad (6)$$

3.2.2 BADR 过程

节点网络中，各响应主体基于区块链技术对系统补偿需求量进行自动响应。ELN 系统中，对于任意响应主体 i ($i \in N^+$)，其响应能力的大小直接取决于自身当前电池状况及预期的离网时间等。例如，某响应主体的当前 SOC 水平较高，那么相对于其他 SOC 水平较低的响应主体，它将更愿意参与响应系统 V2G 的需求，且响应能力更大；反之，当某响应主体的预期离网时间较接近时，相较于其他预期离网时间较晚的响应主体，它响应系统 V2G 需求的意愿将更小，且响应能力更小。考虑到系统补偿量有正、负两种状态，进一步，本文用充、放电迫切水平分别表征响应主体响应系统 G2V、V2G 补偿需求的能力。

对于移动储能 PEV 而言，当系统具有 V2G 需求时，即 $P_k^{\text{com}} < 0$ ，其迫切水平可根据当前仍需补

充的电量以及剩余入网时长等信息来表征,具体如下:

$$UL_{i,k}^{V2G} = \frac{P_i^{\max} \eta_{i,k}^p (T_i^{\text{left}} - T_k) - E_{i,k}}{Q_i^{\text{nom}}} \quad (7)$$

式中: T_k 表示当前 k 时段; $E_{i,k}$ 表示响应主体 i 在 k 时段仍需补充的能量, 表征形式为 $E_{i,k} = (S_i^E - S_{i,k}) Q_i^{\text{nom}}$, 其中, $S_{i,k}$ 表示响应主体 i 在 k 时段的 SOC 水平; $\eta_{i,k}^p$ 表示功率交换效率, 与功率交换方向有关: 当 $P_{i,k} \geq 0$ 时, $\eta_{i,k}^p = \eta^{c, \text{PEV}}$, $P_{i,k} < 0$ 时, $\eta_{i,k}^p = 1/\eta^{d, \text{PEV}}$, 其中, $\eta^{c, \text{PEV}}$ 、 $\eta^{d, \text{PEV}}$ 分别表示 PEV 电池的充、放电效率。

从逻辑上来看, 如果某响应主体的 V2G 迫切水平很高, 那么反过来它会更倾向于不愿意接受 G2V 充电功率。因而, 当需要 G2V 功率 ($P_k^{\text{com}} \geq 0$) 时, 第 i 辆 PEV 在 k 时段的迫切水平可定义为:

$$UL_{i,k}^{G2V} = \frac{1}{UL_{i,k}^{V2G}} \quad (8)$$

特别地, 考虑到系统中的 BES 将一直处于连网状态, 没有预期离网时间的概念, 因此, BES 的充、放电迫切水平仅由其当前剩余电量决定:

$$\begin{cases} UL_{i,k}^{V2G} = S^{\max, \text{BES}} - S_{i,k} \\ UL_{i,k}^{G2V} = S_{i,k} - S^{\min, \text{BES}} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $S^{\min, \text{BES}}$ 、 $S^{\max, \text{BES}}$ 分别为允许的 BES 荷电状态上、下限。

为保证移动储能 PEV 这一类响应主体能够在预期离网时间达到期望 SOC 水平, 考虑以电池阈值来衡量响应主体是否有必要响应系统补偿需求 P_k^{com} 。

$$\varphi_{i,k}^{\text{resid}} = \frac{E_{i,k}}{P_i^{\max} \eta_{i,k}^p (T_i^{\text{left}} - T_k)} \quad (10)$$

由上式可知, $\varphi_{i,k}^{\text{resid}} = 0$ 表示 PEV 储能已完成充电; $\varphi_{i,k}^{\text{resid}} = 1$ 表示车辆若在离网前持续充电的话, 依然能完成充电。为保证移动储能 PEV 用户的自身需求, 考虑设定一个阈值 (φ^{TH}), 当下式成立时:

$$0 < \varphi_{i,k}^{\text{resid}} \leq \varphi^{\text{TH}} \quad (11)$$

移动储能 PEV 将响应 P_k^{com} , 并依照既定准则自动调整响应功率; 否则, 移动储能 PEV 将不再响应补偿需求量 P_k^{com} , 转以额定功率持续进行充电, 该类移动储能 PEV 即是处于不响应状态的移动储能 PEV。

结合上述前提, 响应主体的实时功率自动调整既定准则可以表述为以下几点:

1) 当响应主体的电池阈值满足式(11)时:

若系统处于 G2V 需求状态, 即 $P_k^{\text{com}} \geq 0$, 依照式(12)调整功率需求:

$$P_{i,k+1} = P_{i,k} + \phi_i (UL_{i,k}^{G2V} - P_{i,k} \text{vRTP}_k) \quad (12)$$

若系统处于 V2G 需求状态, 即 $P_k^{\text{com}} < 0$, 依照式(13)调整功率需求:

$$P_{i,k+1} = P_{i,k} + \phi_i (-UL_{i,k}^{V2G} - P_{i,k} \text{vRTP}_k) \quad (13)$$

2) 当响应主体的电池阈值超过设定阈值 φ^{TH} , 即 $\varphi_{i,k}^{\text{resid}} > \varphi^{\text{TH}}$ 时: 以额定功率进行充电, $P_{i,k+1} = P_i^{\max}$ 。

3.3 智能合约

3.3.1 储能租用合约

智能合约是运行在区块链数据账本之上、由计算机自动执行的程序。作为智能合约的一种, 储能租用合约侧重于将响应主体放电的过程转化为该主体作为虚拟发电资源被需求侧租用的过程, 指的是该响应主体作为出租方与承租方负荷之间的租用合约。合约的运作机理示意如图 5 所示。

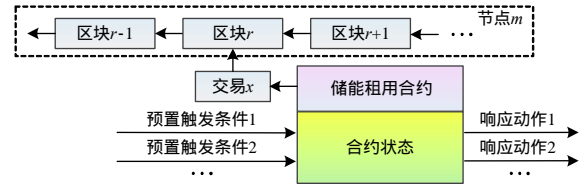


图5 储能租用合约运作机理示意图

Fig. 5 Rationale of rental contract of ESS

储能租用相当于转让储能电池的使用权, 因此出租储能电池的一方应向获得使用权的一方收取租金, 文中将该租金称作储能租用费。合约中, 承租方是通过支付储能租用费来获得储能的使用权, 而用作虚拟发电资源的响应主体通过出租自身的使用权来获得储能租用费。

储能租用合约在 ADR 项目中包含无合约执行、合约签订、合约执行中、合约达成、合约不完全达成等五个状态, 储能租用合约状态机示意如图 6 所示。

其中, 合约签订并通过验证后便会记入区块, 进入合约执行状态。在合约执行过程中, 租用合约会每隔 Δt 检查一次合约双方的状态, 自动判断合约达成的条件是否满足。当出租方再次处于充电模式或有一方的响应主体到达预期离网时间时, 合约自动达成, 储能租用费用自动完成从承租方到出租方

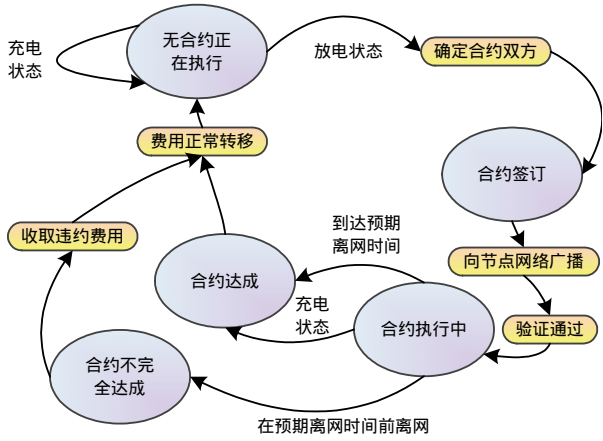


图 6 储能租用合约状态机示意图

Fig. 6 Mechanism of rental contract of ESS

的转移；若在合约执行过程中，有一方的响应主体在合约规定的预期离网时间之前离网，则先从这一方收取一定的违约费用，再完成租用费的转移。

3.3.2 智能合约的运作

确定合约的双方是签订合约的前提条件。考虑到智能合约运行的效率问题，本文采用了一种操作方便、计算量较小的确认方式，具体规则如下：

各节点确定自身的充放电状态和功率后向全网广播，并接收其他节点广播的信息；各节点更新自身的充放电信息数据库后，将所有放电节点的放电功率及所有充电节点的充电功率分别按照从大到小的顺序和与充/放电功率成正比的长度排列成如图 7 所示的放电列表和充电列表。若补偿需求量为正，则将其排在放电表的最前位；反之，将其排在充电表的最前位。各放电节点依据自己在列表中的位置，找到对应的充电节点，从而确定合约的双方。以图 7 为例，补偿需求量为负值，排放于充电列表首位；放电节点 D 与充电节点 A、B 各签订一份储能租用合约。

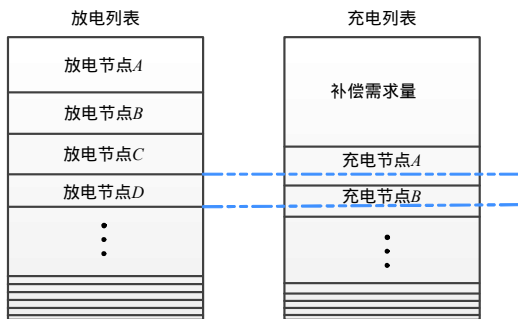


图 7 充放电对照列表

Fig. 7 Comparison between charging and discharging state of the nodes

3.3.3 电费的调整与价值转移的实现

在储能租用合约中，电费的调整是通过储能租

用费的转移来实现的。考虑到正常充放电费用和电能损失，单次储能租用费 R_i^{rent} 组成如下：

$$R_i^{\text{rent}} = (c_i^{\text{cd}} | \eta_{i,k}^{\text{p}} = 1) + c_i^{\text{loss}}, \quad \forall i \in N \quad (14)$$

式中： c_i^{loss} 表示电能损失费用； $c_i^{\text{cd}} | \eta_{i,k}^{\text{p}} = 1$ 表示不考虑充、放电效率条件下的理想充放电费用。

在合约执行过程中，若合约双方中有一方的响应主体在合约规定的预期离网时间之前离网，则需要收取一定的违约费用，再完成储能租用费用的转移。合理的违约费用 PC_i 应该与储能租用费有关：

$$PC_i = \mu R_i^{\text{rent}} \quad (15)$$

式中 μ 为常数。

4 算例分析

4.1 算例描述及仿真结果分析

对于不同类型的 ELN，其所接入 PEV 集群的出行规律及基本负荷特性不尽相同，文献[33]的研究表明，办公楼区域的车辆出行规律以及负荷特性与风、光伏发电功率曲线有较好的协调潜力。

本文以某办公区域 ELN 为例验证所提 BADR 方法的有效性。该 ELN 系统的光伏、风机装机容量分别为 2 000 kW、1400kW，服务的 PEV 规模为 100 辆。该地区典型工作日常规负荷水平及光伏、风机出力曲线如图 8 所示。简单起见，考虑将 PEV 集群分成 20 组，每组 PEV 具有相同的初始 SOC、入网时间和预期离网时间。初始 SOC 水平在 25%~50% 之间均匀分布，预计入网时间在早上 5:00 至 10:07 之间分配，预计离网时间在 18:00 至 23:07 之间分配。储能蓄电池配置容量 2 000 kW·h。其他参数设置如表 1 所示。

仿真程序在 Windows 7，Intel(R) Core™ i7 CPU@2.9GHz，4GB 内存的计算机中的 Matlab 环境下实现。仿真计算时间长度为 24 h，时间间隔 Δt 为 0.1 h。

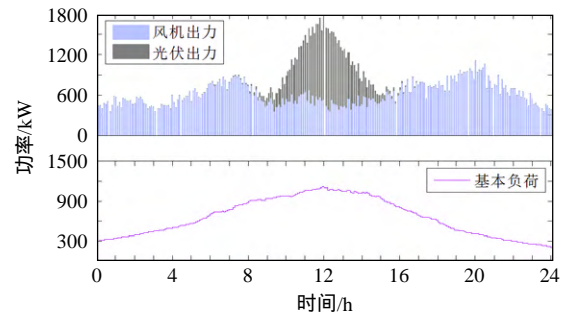


图 8 典型工作日基本负荷水平及光伏、风机出力曲线
Fig. 8 Load and RES output curves of the typical workday

表1 参数设置

Tab. 1 Parameter settings

参数	数值	参数	数值
动力电池容量/(kW·h)	24.15	BES 初始 SOC	0.45
动力电池额定充、 放电功率/kW	5.06	BES 额定充、 放电功率	0.2 倍的 蓄电池容量
动力电池充、放电效率	0.95	BES 的 SOC 边界	[0.45, 0.9]
PEV 的 SOC 边界	[0.2, 0.9]	BES 充、放电效率	0.95
PEV 期望 SOC	0.9	γ	2
ϕ	0.04	放电补偿 价格/(元/(kW·h))	0.6

根据所提 BADR 模型及上述参数设置,得到功率补偿结果如图 9 所示、PEV 集群和 BES 分别的补偿结果如图 10 所示、响应系统需求的 PEV 数量的仿真结果如图 11 所示。

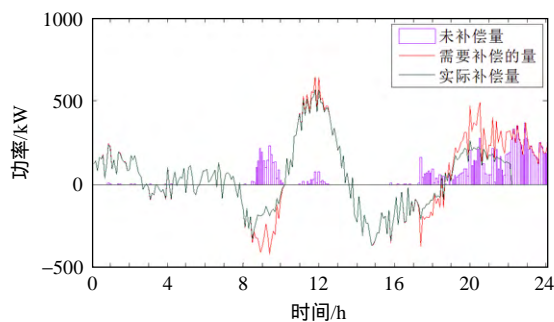


图9 待补偿量与实际补偿量值、未补偿量

Fig. 9 Curves of desired and actual compensation power, and uncompensated power of the system

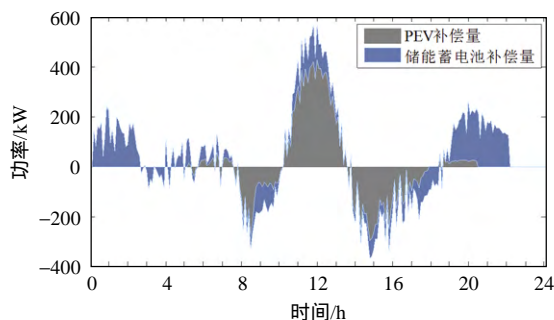


图10 实际补偿电量中 PEV 及储能蓄电池分别补偿量

Fig. 10 Exact amount of power compensation variations of the PEV fleet and the BES

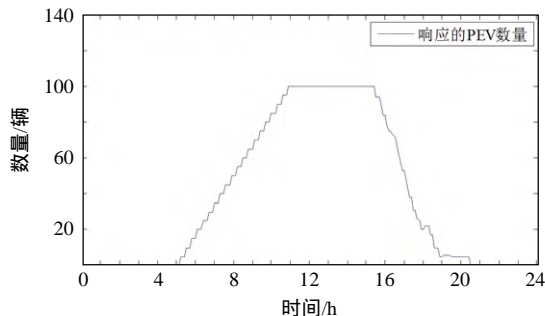


图11 响应系统需求的 PEV 数量的仿真结果

Fig. 11 Number of responsive PEVs

对以上计算结果分析可以得到以下结论:

1) 在所提 BADR 方法下,系统中待补偿电量与响应主体实际补偿电量的曲线基本吻合;但是,夜间 20:00 之后系统中未补偿电量相差略微明显,这是由于部分在网 PEV 因下班因素转变到离网状态,使得储能系统容量下降,从而降低了系统的实时补偿能力。

2) 系统中作为响应主体的 PEV 及 BES 在一天内的出力趋势均能与系统补偿需求保持步调一致。具体来看,PEV 集群在入网至离网的时间段内响应系统当前需求的出力高于 BES;而随着 PEV 在下班时段逐渐离网,其响应出力明显大幅下降,此时,系统补偿量则以 BES 出力为主,但由于 BES 容量有限且需要满足充放电循环约束^[31],在 PEV 逐渐离网后的 19:00—24:00 时段系统未补偿量仍较大。

3) 所提 BADR 方法能够很好的协调系统内的可用储能资源,精确引导规模化 PEV 集群、BES 的充放电行为,充分发挥 PEV 辅助储能作用,有效减少了供需不平衡电量,从而提高 ELN 系统独立运行的稳定性。

4.2 响应主体 ADR 功率分析

4.2.1 满意度分析

在满足系统调节目的的过程中,PEV 用户的充电需求也应当得到满足。随机抽取 PEV1 和 PEV2,图 12 为两车在预期离网时间和中途变更预期离网时间两种情况下的 SOC 水平变化曲线。

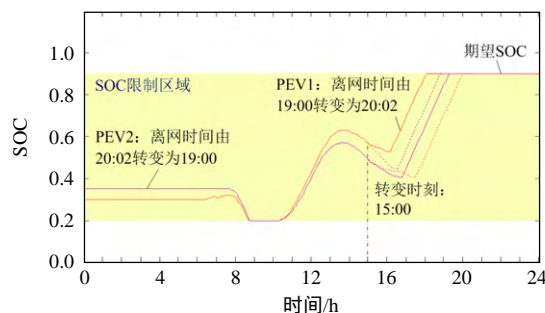


图12 充电期间 PEV1 和 PEV2 的 SOC 变化

Fig. 12 SOC of PEV1 and PEV2

由图 12 可见,两种情况下,PEV1 和 PEV2 均能在预期离网时间到之前充电至期望 SOC、完成充电计划,且其 SOC 值全程处于[0.2, 0.9]之间,满足动力电池特性要求。综上证明,所提 BADR 方法有能力满足 PEV 用户的充电需求,并在此基础上引导 PEV 辅助满足系统需求。

4.2.2 迫切性水平对响应主体 ADR 功率的影响

进一步,为明确呈现所提 BADR 方法中,响应

主体迫切性水平与响应功率之间的关系,对比 PEV 集群中某两辆 PEV 一天内基于迫切性水平调节响应功率的具体情况,如图 13 所示。

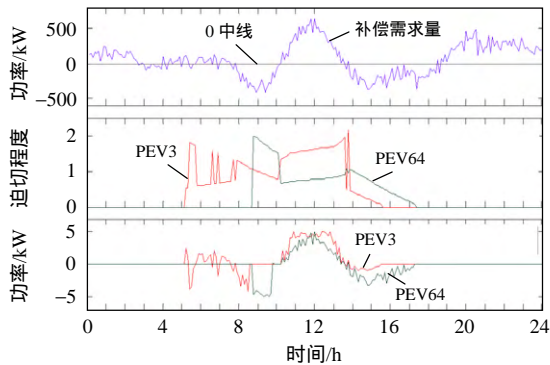


图 13 迫切程度与 PEV 功率变化关系曲线

Fig. 13 Relationship between the urgency value and the power of PEV

通过对图 13 的分析,可以得到以下结论:

1) 整体看来,在两辆 PEV 入网的时段内,功率分布趋势均与系统补偿需求保持一致。

2) 对比两 PEV 响应功率的具体情况可知,在两者的共同入网时段内,PEV3 响应补偿需求量的充电功率普遍大于 PEV64、放电功率均小于 PEV64,结合两 PEV 的迫切程度及系统补偿需求量曲线可知主要原因在于 PEV3 的 G2V 迫切性水平高于 PEV64、而其 V2G 迫切性水平普遍低于 PEV64,即响应能力大的响应主体提供了更多的补偿供应量。

3) 所提 BADR 方法,能够凭借响应主体状态和系统的补偿需求量等信息转换并计算响应主体的 G2V/V2G 迫切性水平,进而以此为基础、基于系统功率补偿需求量等参数按照既定准则制定各响应主体的功率调整方案。

4.2.3 BADR 中区块链的应用实例

本节举例说明 BADR 方法中区块链技术的应用。BADR 过程中,17:30 各节点的充放电功率计算结果如表 2 所示;根据 3.3.2 节所述的智能合约运行规则,确定合约双方以及交易电量,并以 Merkle 树的形式对交易进行记录,记录结果如图 14 所示。

BADR 方法通过使用储能租用合约的方式,能够在没有第三方机构的参与下,自动实现各节点响应过程中的价值转移。作为储存在区块链上的程序,储能租用合约能在规定时间内根据条件自动触发,不仅解决了交易的安全问题,还解决了交易双方之间的信任问题,带来了交易成本低的优势。

表 2 17:30 各节点的充放电功率计算结果

Tab. 2 Power of each node in 17:30

节点名称	充放电功率/kW	节点名称	充放电功率/kW
1	0	12	0
2	0	13	0
3	0	14	0
4	0	15	0
5	-1.188 9	16	-7.384 1
6	0	17	-10.537 6
7	0	18	0.356 2
8	0	19	0.004 3
9	0	20	0
10	0	21(BES)	-101.188 0
11	0	22(差额计算单元)	191.807 9

注:方便举例起见,表中设每组 PEV 为一个节点。

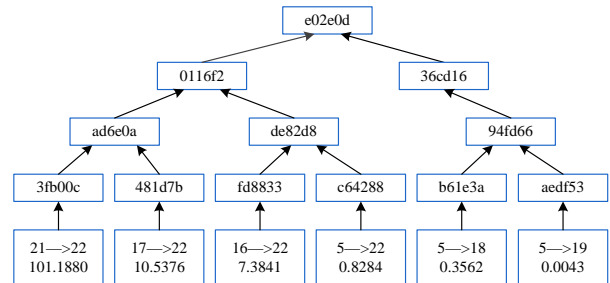


图 14 应用实例的 Merkle 树

Fig. 14 Merkle Tree of the application example

4.3 案例对比分析

模式 1: 无序充电模式,充电设施为接入的响应主体提供持续的恒功率充电服务,直到用户离开为止,如果在此之前响应主体已经充满,则停止充电;

模式 2: 仅充电优化下的 BADR 运行模式,即不考虑 PEV 的 V2G 功能,此时,有 $0 \leq P_{l,k} \leq P_l^{\max c}$ 。

模式 3: 考虑 V2G 功能的 BADR 运行模式。

分别就以上 3 种运行模式下的 ELN 负荷特性和供需两侧经济性进行计算和比较。3 种模式下的系统总负荷、净负荷曲线分别如图 15、图 16 所示。

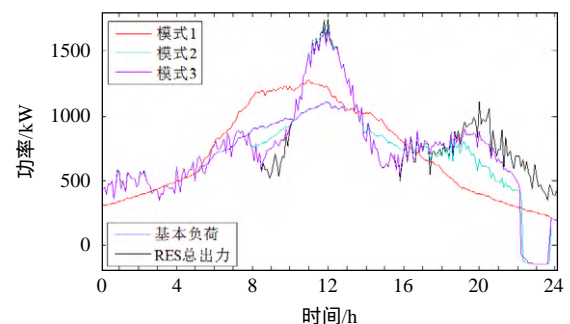


图 15 3 种模式下的 ELN 系统总负荷曲线

Fig. 15 Curves of total load under 3 modes and RES output

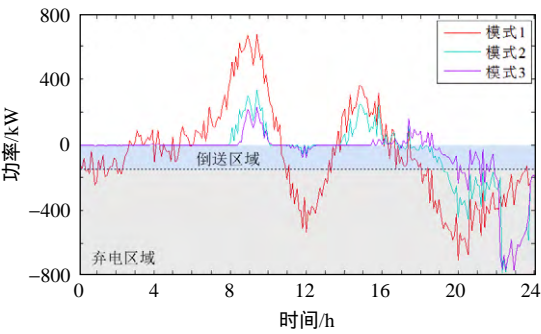


图 16 3 种模式下的 ELN 系统净负荷曲线

Fig. 16 Curves of net load under 3 modes

具体地,3 种模式下 ELN 负荷特性相关统计数据如表 3 所示。

表 3 负荷特性相关统计数据

Tab. 3 Simulation results about net load under 3 modes

模式	净负荷 峰谷差/kW	净负荷 波动率/kW ²	RPR ^[34)] /%	RES 自 消纳率/%
1	1 021.04	310.64	—	90.40
2	483.60	100.43	79.26	92.69
3	381.09	68.51	85.56	95.37

综合图 15、16 和表 3 可知,相较于模式 1,模式 2、模式 3 下的日总负荷曲线与 RES 出力曲线更为匹配,在净负荷峰谷差、净负荷波动率等负荷特性方面均有很大改善,提高了系统的供需平衡程度:RES 自消纳率分别提升了 2.53 % 和 5.50 %。

根据文献[35-36]中的经济性计算模型,3 种模式下,ELN 系统供需两侧的经济性相关统计数据如表 4,PEV 集群成本组成、电能损失量等对比如图 17 所示。

表 4 经济性数据统计

Tab. 4 Simulation results of economy in ELN system

	模式 1	模式 2	模式 3
倒送量/kWh	1 186.62	832.53	642.14
购电量/kWh	5 021.13	661.04	272.63
交互成本/元	4 445.62	257.26	-38.81
运维费用/元	470.33	533.99	529.93
新能源补贴/元	11 095.32	11 130.52	11 319.40
DR 补偿/元	0	791.03	1 126.43
总成本/元	-6 032.37	-9 287.98	-9 525.87
车均成本/(元/车 次)	14.45	6.68	10.56

对以上计算结果分析可以得到以下结论:

1) 由表 4,相比与无序模式,模式 2、3 下的 ELN 系统总成本分别下降了 53.97 % 和 57.91 %,可见,以储能系统的 ADR 为手段提升 ELN 系统内部的供需平衡能力,是降低系统的交互电量、提高 RES 自消纳率、进而降低 ELN 系统总成本的有效

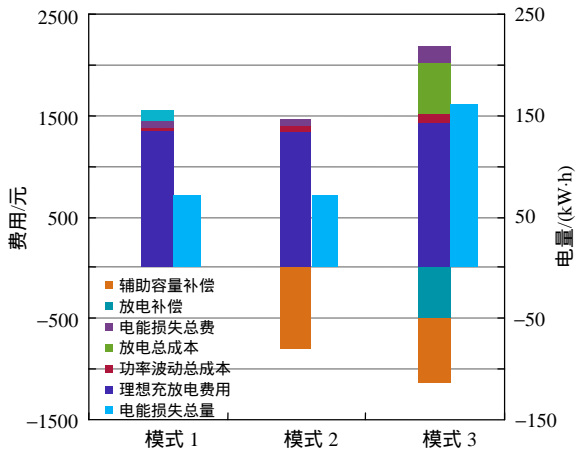


图 17 3 种模式下 PEV 集群成本组成和电能损失量对比

Fig. 17 Cost structure and energy loss of
PEVs under 4 modes

方式。

2) 对比模式 2 和模式 3,考虑 V2G 功能使模式 3 在负荷特性方面更具优势,但 PEV 参与 V2G 过程带来了过高的功率波动成本、放电成本和电能损失费用,使得模式 3 在需求侧经济性方面不容乐观,这显著凸显了储能系统辅助服务的挖掘需求与当前电池技术水平不足的矛盾。

3) 对比供、需两侧成本可知,结论 2) 所述的矛盾可通过平衡供需两侧的利益分配(即合理管控 DR 补偿力度)来缓解。

为进一步展示 BADR 方法运行的高效性,统计其在不同响应主体规模下的仿真计算时间,并与文献[31]中的集中式管理方法对比,结果如图 18 所示。

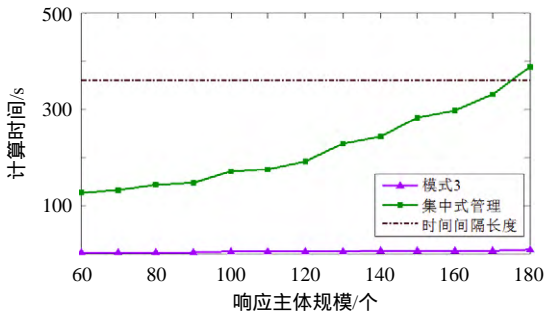


图 18 响应主体规模对仿真计算时间的影响

Fig. 18 Computational times vs. number of
controlled executors

图中可见,所提方法的计算负担随响应主体规模呈线性增长;而集中式管理方法的计算负担会随响应主体规模迅速增加,当规模达到 180 时,计算时间超过时间间隔 Δt ,导致该方法无法应用于实时管理。

4.4 随机场景分析

本节分析所提 BADR 优化方法在 RES 出力、

负荷需求随机下的性能表现。采用随机场景分析方法对分布式风、光出力波动、间歇性对优化结果产生的影响进行量化分析。

根据已有的对负荷需求、风光可再生能源输出功率随机性的研究结论^[35], 设风机、光伏的功率输出值及负荷需求满足式(16)所示的模型。

$$P_{n,k} = \bar{P}_{n,k} (1 + e_n^{\max} \cdot R_n \{-1,1\}) \quad (16)$$

式中: $n=1,2,3$, 分别表示风机、光伏或负荷需求; $\bar{P}_{n,k}$ 为 k 时段的历史数据; $R_n \{-1,1\}$ 为一个处于-1和1之间的随机数; e_n^{\max} 为风机、光伏或负荷需求的最大不确定性百分比:

$$e_n^{\max} = J \cdot e_n^{\text{basic}}, \quad n=1,2,3 \quad (17)$$

式中: e_n^{basic} 表示风机、光伏或负荷需求的基本不确定性百分比; J 表示不确定度等级; 参数取值如表5所示。

表5 不确定性参数设置

Tab. 5 Parameters needed for simulation

参数	基本不确定性水平百分比/%			不确定度等级 J
	风机	光伏	负荷需求	
数值	3	2	1	1~11

为平衡计算时间和计算精度, 随机场景生成个数设为 600 次。3 种运行模式在不同不确定度等级下, ELN 系统相关负荷特性、经济性指标对比的仿真结果如图 19 所示。

通过对图 19 的分析, 可以得到以下结论:

1) 随着不确定度 J 的增大, 3 种模式下的系统净负荷波动率及两侧成本均值均呈上升趋势(模式 1 下的 PEV 集群总成本除外), 表明 RES 出力及负荷需求的随机性会给系统运行经济性、负荷特性等带来不利影响, 且随不确定性的增加而加剧。

2) 所提去中心化的 BADR 方法能够实时地响应系统补偿需求、充分发挥储能系统在互动响应中的协调作用, 具有一定应对不确定性环境的能力, 并提高了系统负荷水平及经济性。

3) 对比模式 2 可知, 模式 3 下的系统负荷特性最优, 但其在 PEV 集群的经济性方面却表现不佳, 原因在于降低单位净负荷波动率为系统带来的收益, 是目前所无法精确计算的。对于此, 本文建议的改善方法有 2 条: 完善 ADR 项目的考核、补偿机制; 确保 ADR 项目执行效果与收益的匹配;

利益分配的管控: 合理的增加 DR 补偿力度, 可保障响应主体的响应意愿; 例如, 放电补偿系数对两侧经济性影响的仿真结果如图 20 所示。图中可

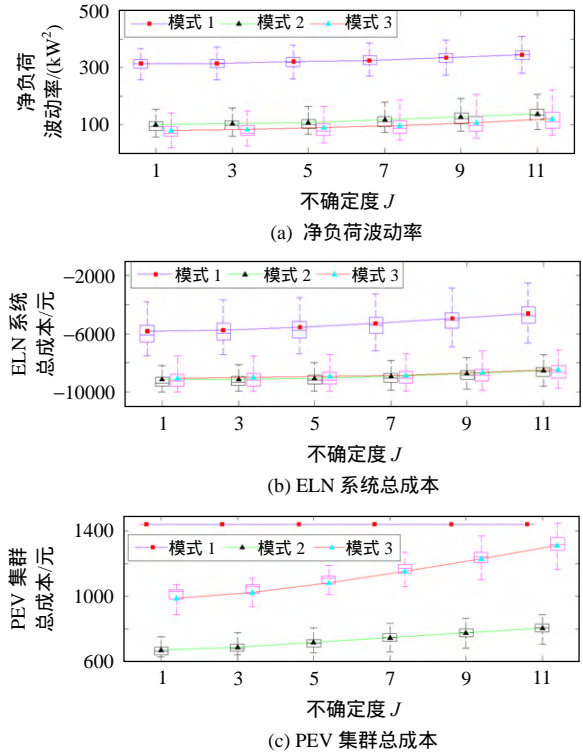


图 19 各不确定度下仿真结果的对比

Fig. 19 Comparison results of under 3 modes considering uncertainties

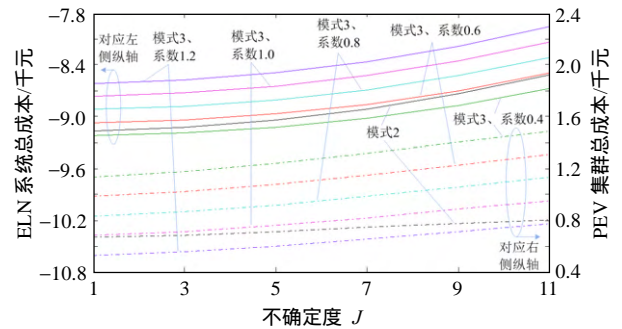


图 20 放电补偿系数对两侧经济性的影响

Fig. 20 Relationship between compensation coefficient and costs of demand side and supply side considering uncertainties

见: 放电补偿系数不会对模式 2 造成影响; 模式 3 中, 随着补偿系数的增大(从 0.4 以 0.2 为间隔增大至 1.2), PEV 集群总成本均值持续降低、ELN 系统总成本均值单调增加。对比补偿系数对模式 2、模式 3 两侧经济性影响的曲线可以看出, 补偿系数的合理设置是管控利益分配的关键参数之一。

5 结论

面向并网型 ELN 系统, 本文针对含蓄电池和 PEV 集群的储能系统提出一种去中心化的 BADR 方法, 试图探索区块链技术在 ADR 项目中的应用优势。根据算例仿真分析, 得出的结论有:

1) 所提 BADR 方法能够在满足用能需求满意度的同时,协调系统内的可用储能资源,使负荷水平曲线最大程度跟踪新能源出力,改善系统供需平衡度,适用于大规模分散的储能系统。

2) 通过对 PEV 集群各成本及 ELN 系统运行成本精细分析显示,所提 BADR 方法能够有效提高供需两侧的经济性,降低双边成本。但实际应用过程中,还需要通过完善补偿机制、合理分配利益等手段保障多参与主体的组织协同,从而提高系统运行灵活性。

3) 本文是区块链技术应用用于 ADR 项目的起步性研究、尝试,主要研究集中于 ELN 系统中电力能源的去中心化管控,未来将加强电、气、热等多种能源形式间的互济互补,考虑源、多种用能类型的柔性负荷间的互动响应做进一步研究。还将着眼于建立净负荷水平改善所带来的收益的量化模型。

参考文献

- [1] 曾鸣,杨雍琦,李源非,等.能源互联网背景下新能源电力系统运营模式及关键技术初探[J].中国电机工程学报,2016,36(3):681-691.
Zeng Ming, Yang Yongqi, Li Yuanfei, et al. The preliminary research for key operation mode and technologies of electrical power system with renewable energy sources under energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3): 681-691(in Chinese).
- [2] 王毅,张宁,康重庆.能源互联网中能量枢纽的优化规划与运行研究综述及展望[J].中国电机工程学报,2015,35(22):5669-5681.
Wang Yi, Zhang Ning, Kang Chongqing. Review and prospect of optimal planning and operation of energy hub in energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5669-5681(in Chinese).
- [3] Rifkin J. The third industrial revolution: how lateral power is transforming energy, the economy, and the world [M]. New York: Palgrave Macmillan, 2011.
- [4] 盛万兴,段青,梁英,等.面向能源互联网的灵活配电系统关键装备与组网形态研究[J].中国电机工程学报,2015,35(15):3760-3769.
Sheng Wanxing, Duan Qing, Liang Ying, et al. Research of power distribution and application grid structure and equipment for future energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3760-3769(in Chinese).
- [5] 刘振亚.全球能源互联网[M].北京:中国电力出版社,2015:71-100.
Liu Zhenya. Global energy internet[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015: 71-100(in Chinese).
- [6] 宋永华,林今,胡泽春,等.能源局域网:物理架构、运行模式与市场机制[J].中国电机工程学报,2016,36(21):5776-5787.
Song Yonghua, Lin Jin, Hu Zechun, et al. Energy distribution network: infrastructure, operation mode and market mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5776-5787(in Chinese).
- [7] Zhang Zhong, Wang Jiaxue, Ding Tao, et al. A two-layer model for microgrid real-time dispatch based on energy storage system charging/discharging hidden costs[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(1): 33-42.
- [8] 杨晓东,张有兵,赵波,等.供需两侧协同优化的电动汽车充放电自动需求响应方法[J].中国电机工程学报,2017,37(1):120-129.
Yang Xiaodong, Zhang Youbing, Zhao Bo, et al. Automated demand response method for electric vehicles charging and discharging to achieve supply-demand coordinated optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 120-129(in Chinese).
- [9] Karfopoulos E L, Panourgias K A, Hatziaargyriou N D. Distributed coordination of electric vehicles providing V2G regulation services[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 2834-2846.
- [10] 张晶,孙万珺,王婷.自动需求响应系统的需求及架构研究[J].中国电机工程学报,2015,35(16):4070-4076.
Zhang Jing, Sun Wanjun, Wang Ting. Studies on requirements and architecture for automated demand response system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4070-4076(in Chinese).
- [11] Wang Yubo, Wang Bin, Chu Chicheng, et al. Energy management for a commercial building microgrid with stationary and mobile battery storage[J]. Energy and Buildings, 2016, 116: 141-150.
- [12] Althaher S, Mancarella P, Mutale J. Automated demand response from home energy management system under dynamic pricing and power and comfort constraints [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 1874-1883.
- [13] Yao Enxin, Samadi P, Wong V W S, et al. Residential demand side management under high penetration of rooftop photovoltaic units[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(3): 1597-1608.
- [14] Margellos K, Oren S. Capacity controlled demand side management: a stochastic pricing analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 706-717.
- [15] Yang Hongming, Pan Hao, Luo Fengji, et al. Operational

- planning of electric vehicles for balancing wind power and load fluctuations in a microgrid[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(2): 592-604.
- [16] Ghasemi A, Mortazavi S S, Mashhour E. Hourly demand response and battery energy storage for imbalance reduction of smart distribution company embedded with electric vehicles and wind farms[J]. Renewable Energy, 2016, 85: 124-136.
- [17] Ma Li, Liu Nian, Wang Lingfeng, et al. Multi-party energy management for smart building cluster with PV systems using automatic demand response[J]. Energy and Buildings, 2016, 121: 11-21.
- [18] Mohsenian-Rad A H, Wong V W S, Jatskevich J, et al. Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(3): 320-331.
- [19] 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.
- [20] Tschorsch F, Scheuermann B. Bitcoin and beyond: a technical survey on decentralized digital currencies [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(3): 2084-2123.
- [21] Prisco C. An energy blockchain for European prosumers [EB/OL]. (2016-05-02). <https://bitcoinmagazine.com/articles/an-energy-blockchain-for-european-prosumers-1462218142/>.
- [22] Nguyen C. An indie, off-the-grid, blockchain-traded solar power market comes to brooklyn [EB/OL]. (2016-03-18). <http://motherboard.vice.com/read/the-plan-to-power-brooklyn-with-a-blockchain-based-microgrid-transactive-solar>.
- [23] 邵雪, 孙宏斌, 郭庆来. 能源互联网中基于区块链的电力交易和阻塞管理方法[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3630-3638.
- Tai Xue, Sun Hongbin, Guo Qinglai. Electricity transactions and congestion management based on blockchain in energy internet[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3630-3638(in Chinese).
- [24] Sikorski J J, Haughton J, Kraft K. Blockchain technology in the chemical industry: machine-to-machine electricity market[J]. Applied Energy, 2017, 195: 234-246.
- [25] Nakamoto S. Bitcoin: a peer-to-peer electronic cash system[J]. Consulted, 2009.
- [26] 张宁, 王毅, 康重庆, 等. 能源互联网中的区块链技术: 研究框架与典型应用初探[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4011-4022.
- Zhang Ning, Wang Yi, Kang Chongqing, et al. Blockchain technique in the energy internet: preliminary research framework and typical application[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4011-4022(in Chinese).
- [27] 林小驰, 胡叶倩雯. 关于区块链技术的研究综述[J]. 金融市场研究, 2016, 45(2): 97-109.
- Lin Xiaochi, Hu Yeqianwen. A summary of blockchain technology[J]. Financial Market Research, 2016, 45(2): 97-109(in Chinese).
- [28] 曾鸣, 欧阳邵杰. 能源互联网与能源区块链 [EB/OL]. [2016-8-31]. http://www.360doc.com/content/16/1224/00/35130481_617203847.shtml.
- Zeng Ming, Ouyang Shaojie. Energy internet and energy blockchain [EB/OL]. [2016-8-31]. http://www.360doc.com/content/16/1224/00/35130481_617203847.shtml(in Chinese).
- [29] 中共中央国务院. 关于进一步深化电力体制改革的若干意见 [EB/OL]. (2015-03-15). <http://smartgrids.ofweek.com/2015-03/ART-290010-8480-28942130.html>.
- CPC Central Committee and State Council. The CPC Central Committee and State Council of the several opinions on further deepening the reform of electric power system [EB/OL]. (2015-03-15). <http://smartgrids.ofweek.com/2015-03/ART-290010-8480-28942130.html>(in Chinese).
- [30] 袁勇, 王飞跃. 区块链技术发展现状与展望[J]. 自动化学报, 2016, 42(4): 481-494.
- Yuan Yong, Wang Feiyue. Blockchain: the state of the art and future trends[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(4): 481-494(in Chinese).
- [31] 杨晓东, 张有兵, 任帅杰, 等. 含高渗透率光伏发电并网型微网中的电动汽车优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 15-23.
- Yang Xiaodong, Zhang Youbing, Ren Shuaijie, et al. Optimal scheduling scheme of electric vehicles in grid-connected microgrid with high penetration photovoltaic power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 15-23(in Chinese).
- [32] Fan Zhong. A distributed demand response algorithm and its application to PHEV charging in smart grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1280-1290.
- [33] Kumar K N, Sivaneasan B, Cheah P H, et al. V2G capacity estimation using dynamic EV scheduling [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 1051-1060.
- [34] van der Kam M, van Sark W. Smart charging of electric

vehicles with photovoltaic power and vehicle-to-grid technology in a microgrid ; a case study[J] . Applied Energy , 2015 , 152 : 20-30 .

- [35] 任帅杰,杨晓东,张有兵,等.不确定性环境下基于可调度能力的微电网优化运行实时控制策略[J/OL].中国电机工程学报, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20170308.0904.001.html> .

Ren Shuaijie ,Yang Xiaodong ,Zhang Youbing ,et al .A real time optimization strategy for microgrid integrated with schedulable ability and uncertainties[J/OL] .Proceedings of the CSEE , <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20170308.0904.001.html>(in Chinese) .

- [36] 杨晓东,张有兵,翁国庆,等.基于虚拟电价的电动汽车充放电优化调度及其实现机制研究[J].电工技术学报, 2016 , 31(17) : 52-62 .

Yang Xiaodong , Zhang Youbing , Weng Guoqing , et al . Virtual time-of-use tariffs based optimal scheduling and implementation mechanism of electric vehicles charging and discharging[J] . Transactions of China Electrotechnical Society , 2016 , 31(17) : 52-62(in

Chinese) .



杨晓东

收稿日期:2017-03-02。

作者简介:

杨晓东(1990),男,博士研究生,主要研究方向为新能源并网、电动汽车入网、需求侧管理、电力系统通信, yang_xd90@163.com ;

张有兵(1971),男,教授,博士生导师,博士,主要研究方向为智能电网、分布式发电及新能源优化控制、电动汽车入网、电力系统通信、电能质量监控,本文通讯作者, youbingzhang@zjut.edu.cn ;

赵波(1977),男,教授级高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统分析、分布式电源、微电网技术及其在工程中的应用, zhaobozju@163.com。

(责任编辑 李泽荣)