

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2020.08.004

基于区块链的分布式微电网交易与能源调度研究

Energy trading and scheduling on micro-grid based on blockchain technology

李云波¹, 张子立², 张晋宾³, 罗喜伶^{1,4}

LI Yunbo¹, ZHANG Zili², ZHANG Jinbin³, LUO Xiling^{1,4}

(1.北京航空航天大学 杭州创新研究院,杭州 310051;2.谢菲尔德大学 电子和电气工程系,谢菲尔德 S1 4DE;

3.电力规划设计总院,北京 100120;4.北京航空航天大学 电子信息工程学院,北京 100191)

(1.Hangzhou Innovation Research Institute, Beihang University, Hangzhou 310051, China; 2.Department of Electronic and

Electrical Engineering, the University of Sheffield, Sheffield S1 4DE, UK; 3.Electric Power Planning & Engineering

Institute, Beijing 100120, China; 4.College of Electronic and Information Engineering,

Beihang University, Beijing 100191, China)

摘要:分布式微电网作为能源互联网中重要的组成部分,可优化分布式可再生能源的利用,通过与分布式数据中心的融合,又可降低数据中心对传统非清洁能源的依赖和碳足迹。但是由于潜在的安全和隐私问题会引起能源市场的不透明性和不确定性,从而导致可再生能源的使用率和交易率低下。引入了一种机遇式的任务调度策略,通过对数据中心计算负载的动态调整,优化可再生能源的利用率,且在此基础上提出了基于区块链的动态智能合约的制定方法,以有效降低用户的经济开销并提高运营商的经济收益。最后,通过实际的光伏发电数据与数据中心的负载数据对上述方法进行评估。仿真试验证明,上述方法对提高分布式可再生能源的利用率及调节买卖双方的经济收支表现出良好的效果。

关键词:微电网;分布式计算;电力交易;可再生能源;能源区块链;数据中心

中图分类号:TK-9

文献标志码:A

文章编号:1674-1951(2020)08-0024-08

Abstract: As an important part of energy internet, micro-grid can facilitate the integration of distributed renewable energy and the fusion of data centers. Furthermore, it can reduce carbon footprint by reduce the traditional energy consumption of data centers. However, the potential security and privacy issues caused by opacity and uncertainty of energy market leads to a lower renewable energy utilization and transaction rates. An opportunistic task scheduling strategy was introduced to improve the utilization of renewable energy by dynamically adjusting the workload of data centers. In addition, a dynamic smart contract formulation based on blockchain technology was proposed, which effectively reduces the expenses of users and boost the interests of the operators. Finally, the strategy was verified upon power generation data from PV cells and workload data from data centers. The simulation test shows that the method above can significantly improve the utilization of renewable energy and optimize the revenue for both users and sellers.

Keywords: micro-grid; distributed computing; energy trading; renewable energy; energy blockchain; data center

0 引言

随着经济和社会的不断发展,人类对能源的需求与日俱增,越来越多的国家颁布了相关政策,将分布式电源产销者纳入电力市场交易,允许个人或企业安装分布式发电装置,充分利用分布式可再生能源(如风力发电、光伏发电等)解决能源需求的紧

缺问题^[1]。分布式发电在全世界电力系统中正逐步渗透,这不仅给新能源带来了机遇,也对现有的电力市场交易系统提出了新的挑战。作为新的电网形式之一,微电网是由分布式发电机组组成的小型且相对独立的电网结构,其电力系统层次结构较少,参与者操作也相对独立,因此更适合分布式市场^[2]。同时,微电网可以有效地管理其内部的电能平衡,消纳本地的可再生能源^[3],从而减轻公共电网的负担。随着云计算与人工智能的快速发展,作为其基础设施的数据中心在全球范围内快速增长,这些数

收稿日期:2020-06-20;修回日期:2020-07-25

基金项目:国家自然科学基金项目(U1733115)

据中心对电力的需求也达到了前所未有的水平。在最近新的研究报告中^[4],2012—2018年间,人工智能对算力的需求量增长约30万倍,快速增长的算力带来了惊人的能耗。2012年,全球数据中心的数量约为509 147个^[5],仅1年的能耗就约等于30个核电厂的电能产出。另一项研究表明,2016年在全球范围内数据中心消耗了约91 TW·h的电力,约等于2个纽约的能耗^[6],且数据中心的数量和能耗仍在快速上升中。这种情况引起了社会对环境和经济的极大关注。一种降低数据中心能耗的方法是将数据中心安置在电厂附近,以此来最小化电力传输损耗。例如,美国卡罗莱纳州西北部拥有丰富的煤矿资源和核电资源,以低电价吸引数据中心来本州建设。目前,该州设有来自于谷歌、脸书及苹果等公司的超大型数据中心,每个数据中心有60~100 MW的电量需求^[7]。尽管如此,在数据中心总能耗分布中,此类超大型数据中心的能耗只占全球数据中心总能耗的一小部分,而中小型数据中心总能耗占比超过50%^[8]。出于经济、环境或市场原因,越来越多的公司开始选择更为环保的可再生能源^[7]。虽然可再生能源可以降低能源成本,但可再生能源大多是间歇性供能且随时间和外部环境而波动,这些特性将导致能源需求与可再生能源供给不能完全匹配^[9]。

为了方便可再生能源在分布式微电网中交易,同时提高可再生能源的利用率,将区块链技术引入微电网交易平台是目前实现微电网电能交易安全稳定的方法^[10]。电能产销者通过微电网能够直接将电能出售给消费者,由于微电网内具有众多小规模、分散的电能交易,买卖双方需要建立合适的、安全可靠的代币及电能交易平台来保障交易过程中电能产销者和消费者之间的交易安全。区块链是一种开放式的、拥有共识算法的链式分布式账簿,是一种去中心化的、透明的、不可篡改的分布式记账的数据结构^[11],其网络中所有节点都有同等的地位,都能进行数据的处理、存储和校验。将区块链技术网络^[12]与微电网电能交易结合有许多优点:首先,在微电网中进行电能交易时,区块链技术使用非对称加密、数字签名等方式保证了交易数据的不可篡改和安全性;交易过程中,交易数据的透明化和去中心化让任何一个节点都能在数据遭到恶意删除或损坏后进行数据恢复,让产销双方的交易更加稳定可靠;在交易结算时引入智能合约,在交易前买卖双方签署智能合约,一旦合约生效则无法更改或进行人为干预,降低了引入第三方信任机构进行交易和代币结算的成本,从而实现安全可靠、

值得信任的端到端(P2P)交易及结算^[10]。

为了提高分布式可再生能源在微电网中的利用率并基于可再生能源价格平衡买卖双方的经济开销,本文提出一种基于区块链智能合约的分布式计算与电能的交易框架,描述了装备光伏设备的数据中心构架与计算模型。针对光伏能源难以有效匹配数据中心能耗需求的问题^[13],以优化全局光伏能源利用率为目标,提出了基于区块链的电能交易方法。在此基础上,通过设计动态智能合约的制定方法和基于启发式的机遇性任务调度方法,实现降低用户经济开销与提高产销方(数据中心)经济收益的目标。最后对上述方法进行仿真验证,结果显示上述方法能有效地提高可再生能源的利用率,并提升买卖双方的经济收益。

1 新型分布式数据中心

1.1 配备光伏与储能设备的边缘数据中心

边缘数据中心(中小型数据中心)指主要面向边缘计算而设计的微型数据中心,通常由5~150台服务器构成。每台服务器拥有受限的中央处理器(CPU)和内存资源。每个数据中心连通微电网并配备有光伏供电系统,其中部分数据中心还配备有具有储能供能的能源存储设备。如果光伏设备所产生的电能无法被数据中心完全消化,额外的部分可以存入储能设备以备未来有需要时使用,如图1所示。此外,每台服务器拥有独立的电源切换开关,可以灵活地切换于传统能源(微电网)、光伏设备与储能设备之间。每台服务器每次只能选取单一源头供能,无法同时使用3个以上供能端口。

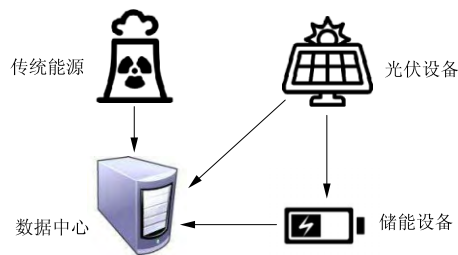


图1 配备光伏与储能设备的边缘数据中心

Fig. 1 Edge computing data center integrated with PV cells and ESD

1.2 能源存储设备模型

太阳能光伏板可以直接供能给数据中心和储能设备。储能设备中采用的电池为铅酸电池和锂电池,表1列出了2种电池的相应属性。在不充分考虑经济预算的情况下,锂电池在各方面性能都优于铅酸电池。因此,本文中采用性能更好的基于锂

电池类型的储能设备以降低充电时的能量损耗。电池容量是有限的,这里用参数 C 来代表能源存储设备的最大容量,单位为 $\text{W}\cdot\text{h}$ 。 $C(t)$ 代表能源存储设备在 t 时刻可以调用的能源。为了保证能源存储设备寿命周期长,本文对电池设定了严格的放电深度(DoD)条件和充电阈值,存储的能源不能超过设定的阈值,即 ηC ($0 < \eta < 1$)。在此约束下,储能设备可用电量 $C_{\text{available}}(t)$ 无法达到最大容量,即 $0 \leq C_{\text{available}}(t) \leq \eta C$ 。

表 1 储能设备中的电池属性^[14-16]Tab. 1 Battery characteristics of the ESD^[14-16]

项目	铅酸电池	锂电池
放电深度/%	80	80
单位时间充电量/电池总容量/%	12.5	25.0
电池效能/%	75	85
单日自放电容量/电池总容量/%	0.3	0.1
放电率/充电率	10	5
价格/[元·(kW·h) ⁻¹]	1 200	3 150

1.3 储能设备与数据中心功耗关系分析

通常光伏设备会将当前无法消费的电量存入储能设备中,当所充电量达到一定阈值后,可以根据需求对边缘数据中心供电。在本文设计的系统中,充电和放电为 2 个独立的进程,不能同时进行。 λ 表示充电速率,由电池总容量 C 来描述,例如 $\lambda = 0.25C$,表示每小时最大充电量为电池总容量的 1/4,其值由能源存储设备的电池类型和容量共同决定。设在给定的时间区间 $[t_i, t_j]$ 内从光伏设备处获取的电量为 $E(t_i, t_j)$ (单位为 $\text{W}\cdot\text{h}$),通过下式计算储能设备在该时间区间内能够存储的电量 $E_{\text{in}}(t_i, t_j)$:

$$E_{\text{in}}(t_i, t_j) = \min(E(t_i, t_j), \lambda(t_j - t_i), C_{\text{available}}(t_i)) \times \sigma, \quad (1)$$

式中: σ 为常量,是电池的能效参数。

在一个连续时间区间 $[t_i, t_j]$ 内,储能设备总放电量 $E_{\text{out}}(t_i, t_j)$ 定义为

$$E_{\text{out}}(t_i, t_j) = \min(\mu(t_j - t_i), \eta C - C_{\text{available}}(t_i)) - E_{\text{selfdischarge}}(t_j - t_i), \quad (2)$$

式中: $E_{\text{selfdischarge}}(t_j - t_i)$ 指由于电池特性而造成的自放电电量, $\text{W}\cdot\text{h}$; μ 表示放电速率,由电池总容量 C 来描述,例如 $\mu = 1.25C$ 表示每小时最大放电量是电池总容量的 1.25 倍。光伏设备作为可再生能源供给源,由于其具有不稳定性 and 间歇性,文中设定 1 h 为 1 个预测周期(T),以最大限度保证预测精准度。

$w(t)$ 表示边缘数据中心负载, $\text{kW}\cdot\text{h}$; $g(t)$ 表示当前时刻的光伏设备产电量, $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。通过观察图 2

中的 a_1, a_2 和 b_1, b_2 区域,可知光伏设备无法提供足够电量的时候,对于不具备储能设备的边缘数据中心,需要从微电网中购买电量 E_{need} , 定义为

$$E_{\text{need}} = \sum_t (w(t) - g(t), \forall w(t) > g(t)), t \in T, \quad (3)$$

当边缘数据中心所需的电量小于当前光伏设备产电量,则光伏设备所产生的额外电量可定义为

$$E_{\text{surplus}} = \sum_t (g(t) - w(t), \forall w(t) \leq g(t)), t \in T. \quad (4)$$

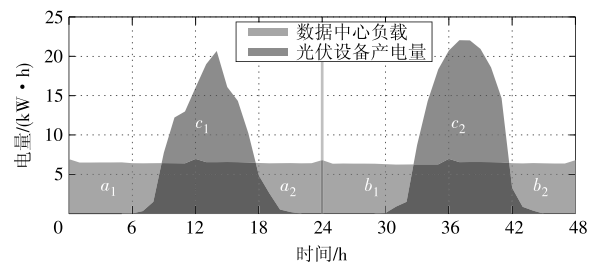


图 2 数据中心负载与光伏设备产电量

Fig. 2 Workload of the data center and power generation data from PV cells

对于图 2 中的前 24 h,需要向微电网购买的电量为 $E_{\text{need}} = (a_1 + a_2)$; 当 $w(t) \leq g(t)$ 时,额外的电量 $E_{\text{surplus}} = c_1$ 需要被存入储能设备中。当光伏设备的产电量随时间变化而衰减时,首先由储能设备供电,当储能设备放电量到达最低阈值时,后续所需电量从微电网购买。

理想情况下,由光伏设备产生的没有被消耗的电量 $E_{\text{surplus}} = c_1$ 会被全部存入电池中,并且 $c_1 > (a_2 + b_1)$ 以便完全覆盖光伏设备无法发电的时间片。首先,储能设备由于锂电池在充电时的能量损耗至少为 15%,所以光伏能源应尽可能直接使用,不宜将过多的可再生能源转存到储能设备中,造成可再生能源的二次损耗。在实际情况下,由于光伏设备和储能设备都会受到成本限制,无法完全且充分地给数据中心 24 h 供电,即 $c_1 < (a_2 + b_1)$ 。

传统交易模式中,装备有光伏设备的边缘数据中心可以进一步降低数据中心对传统能源的依赖,降低传统非清洁能源对环境造成的恶化,更重要的是能够降低自身在电能方面的经济支出,进一步降低运营成本。同时,从图 2 能够看出,光伏设备日发电量会有一部分无法充分利用,从而进一步造成能源浪费。这部分电能可以通过储能设备存储,也可以通过交易的形式低价出售给电网。

2 基于区块链智能合约的电能交易方法

分布式场景中,传统基于中心集中调度的方法不适用于具有自产电的分布式数据中心。因此,基

于区块链技术的去中心化交易方法使用户与数据中心直接交易成为可能。本节着重描述了区块链核心的智能合约技术,设计了基于智能合约的面向用户与数据中心的拍卖流程。针对光伏设备产电量与计算负载可能不匹配的情况,设计了面向订单转移的动态智能合约的制定方法,进一步优化分布式可再生能源的利用率。在此基础上,提出了优化综合售电价的任务调度方法以进一步降低用户经济开销。

2.1 智能合约

区块链是一种可信的分布式数据存储模式,保证在一个安全可信的环境中实现对事务的高效记录。在区块链中,智能合约扮演着重要的角色,是由多个区块链的参与方共同签署的数字合约。智能合约允许在没有第三方的情况下自动进行交易,产生的交易记录可被追踪且不可逆转和篡改。本文以保护用户隐私和保障交易效率为前提,通过设计智能合约以实现微电网与装备有光伏发电设备的数据中心的安全高效交易。本文提出的基于智能合约的交易系统模型如图3所示。每个数据中心都安装有独立的太阳能板,数据中心为计算资源和能源的综合产销方,用户为消费方。

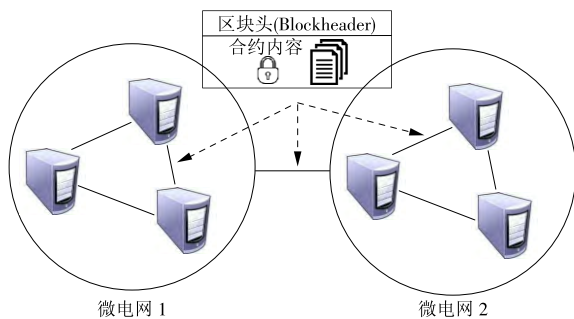


图3 基于智能合约的交易系统模型

Fig. 3 Trading system model based on smart contract

在初始化阶段,每个用户 $user_i$ 获得其专属的数字证书 $certificate_i$, 通过绑定数字证书 $certificate_i$ 与用户 ID_i , 保证用户 ID_i 的唯一性和可靠性。在每个用户加入区块链网络时,获得其对应的私钥和公钥 (SK_i, PK_i) 及钱包地址 $address_i$ 。同理,装备有光伏发电设备的边缘数据中心拥有数字钱包地址 $address_{DC_i}$, 当前可支配电量 E_{DC_i} 及对应的私钥和公钥 (SK_{DC_i}, PK_{DC_i}) 。

用户 $user_i$ 账户还包括当前余额 $credit_i$, 信誉值 RV_i 。为了保证信息在传输过程中的完整性和真实性,区块链运用了非对称加密技术,

$$H(m) = D_{PK_i}(S_{SK_i}(Hash(m))), \quad (5)$$

式中: $H(m)$ 表示消息 m 通过特定的哈希函数 $Hash()$

所生成的哈希摘要, S_{SK_i} 是融合了交易发起人 $user_i$ 数字签名的私钥, D_{PK_i} 是其公钥的解码函数。在区块链中创建智能合约的流程如下,首先用户 $user_i$ 与边缘数据中心 DC_i 在区块链网络中实现了一致性过程后,智能合约完成签署并且可以被所有区块链的用户看到。每一个智能合约维护这一个拥有多个状态变量的集合,包括买卖双方的钱包地址 $(address_i, address_{DC_i})$, 用户所需的计算资源和能源 (dR_i, dE_i) , 还有对应的价格 p_i , 事务时间 t_{trans} , 交易时间戳 $timestamp$, 以及惩罚金 $penalty_i$ 。为了确保智能合约正确地实现,用户 $user_i$ 与边缘数据中心 DC_i 都应该从自己的钱包转移一定数额的定金到合约地址以预防恶意欺诈者。

在区块链网络中完成一致性计算后,智能合约自动执行在数据中心端的计算和金融支付。智能合约会验证边缘数据中心的光伏设备是否如期产生了合约协定的电量,并且核定该电量被数据中心使用的状态。在这之后,系统周期性地更新状态到区块链上,包括用户支付的余额、卖方所剩的电量及其他状态变量。当完成任务执行后,更新双方信誉值 RV_i 。如果光伏设备没有产生预期的电量,根据其具体策略对智能合约进行补充,如果能够在指定时间内执行任务,则不会触发惩罚金 $penalty_i$; 相反,如果无法在指定时间内完成任务,则会支付智能合约中注明的惩罚金 $penalty_i$ 到用户的数字钱包。

2.2 基于智能合约的拍卖流程

由于在区块链网络中存在着多个卖方和买方,优化全局能源买方经济平均支出和卖方经济平均收入,本质是提高全局能源的使用率,使光伏设备产生的电能被充分利用,从而实现优化买卖双方经济效益的目的。在任务开始前,用户根据任务计算量预估自身任务所需的计算资源和相应能耗,制定购买计划。数据中心根据预测模型预测下一时间片的自身产能,并制定出售计划。用户和数据中心在区块链网络中广播自己的计划。

拍卖函数在指定时间内收集完当前时间片所有用户的购买计划和数据中心的出售计划后,进入拍卖流程。拍卖函数首先从用户购买计划中提取用户期望的价格 p_{user_i} 并从高到低进行排序,从数据中心出售计划中提取数据中心期望的出售价格 p_{DC_i} 。如果排序过程中遇到相同的报价,则 p_{user_i} 根据其对应的信誉值 RV_i 按从高到低的顺序进行排序。然后根据用户的报价逐一进行匹配,对于用户 i 报价

p_{user_i} , 从数据中心期望售价列表中寻找 $p_{DC_i} \leq p_{user_i}$ 的所有项, 并按照价格从低到高进行排序, 选取前 k 项 (本文中 $k=3$), 并通过随机函数 $Random()$ 从中抽取 1 项。被选中的 DC_i 与 $user_i$ 拍卖成功, 即低于用户最高容忍价格并高于数据中心最低期望价格。然后从拍卖列表中删除对应项, 拍卖流程继续直至所有用户购买成功。如果仍有用户的购买计划未成功配对, 则该用户在下一时间片需更改购买计划并重新提交。

2.3 面向订单转移的动态智能合约的制定方法

由于太阳能这一类清洁能源的供能具有不稳定性和间歇性, 在某些极端天气的情况下, 会造成当前数据中心光伏设备的产电量不及预期。针对此问题, 本文提供 2 种策略。

(1) 数据中心直接从微电网购买更为昂贵的传统非清洁能源, 以保证某些对完成时延非常敏感的任务; 但是数据中心会因此而承担一部分预期收益外的违约金, 即从电网购买的电量的价格。

(2) 如果当前任务对任务完成时间具有一定的时间容忍度, 例如数据中心 DC_i 可以通过区块链网络查询当前太阳能充裕地区的数据中心的最低报价, 并将这部分任务迁移到选定的数据中心 DC_j , 其中包含一部分由于任务迁移所需支付的网络费用。具体方法为当前数据中心 DC_i 与迁移目标数据中心 DC_j 签订新的智能合约, 智能合约中会约定支付时间和费用, 费用将在数据中心 DC_j 任务执行完成后支付; 或者在约定的时间周期内, 数据中心 DC_j 将自己部分未完成任务迁移至数据中心 DC_i 中执行, 即以计算时间为单位进行偿还, 若产生差额, 按当前数据中心的定价结算。因此, 不论是 DC_i 对 DC_j 的直接支付, 抑或是 DC_j 以计算时间进行偿还, 都能避免数据中心从电网购买价格高昂的能源, 从而降低数据中心的能源开销。此外, 数据中心可以通过此方法, 在即便自身太阳能不足的情况下, 也能实现通过较低的报价以获得更多用户。

3 优化综合售电价的任务调度方法

本节具体描述了数据中心计算模型与能源调度方法, 以实现提高光伏能源利用率与提升买卖双方经济效益的目标。

数据中心的任务调度在时间上是离散的, 因此对资源的优化操作是周期性的, 本文将其设为与能源拍卖过程相同的周期, 即 1 h。为了实现对清洁能源的优化利用及降低售电价格, 本文设计了一种基于启发式的机遇性任务调度算法。通过对用户提

交的任务资源需求及时限进行分类, 将任务分为优先任务和非优先任务。优先任务定义为其在执行过程中不能中断的任务, 这类任务对资源拥有更高的使用权限。而非优先任务即只在数据中心拥有充裕且更为经济实惠的清洁能源时运行, 在用户有限的预算和任务完成时间内实现一个较优的平衡。当 2 种任务同时到达数据中心时, 数据中心的任务调度节点会根据当前可支配的光伏能源及任务的优先级来执行任务。当光伏设备提供的清洁能源不足时, 通过定义函数 $Gap(t)$ 来对任务进行执行或挂起操作:

$$Gap(t) = E_{in}(t, t+1) - \sum_i E_{task_i}, \quad (6)$$

式中: $E_{in}(t, t+1)$ 表示光伏设备在下一个时间周期能够获取的预测电量, $kW \cdot h$; $\sum_i E_{task_i}$ 表示当前所有正在执行的任务所消耗的电量, 包括优先任务和非优先任务, $kW \cdot h$ 。当 $Gap(t) \geq 0$ 时, 意味着当前数据中心有额外的光伏能源, 通过对当前队列中非优先任务所需电量的预估, 并基于首次适合下降 (First-Fit Decreasing, FFD) 算法对队列中非优先任务进行排序, 然后依照能量预算依次执行。在 FFD 算法执行结束后, 如果依然存在部分任务未被执行, 这类任务会在下一时间周期在同类任务中获得更高的执行权重。当 $Gap(t) < 0$ 时, 代表当前站点的光伏设备供电量不足以支撑所有当前运行的任务。此时会将正在执行任务中的非优先任务进行排序, 筛选出对完成时限容忍度更高的任务, 然后将这部分任务挂起, 使得 $Gap(t) \geq 0$, 避免数据中心从电网购买价格更为昂贵的电量。通过此方法, 数据中心可以向非优先类任务提供更低的报价。

4 仿真分析

为了最大限度地还原真实场景, 本文采用的数据中心负载数据和光伏设备产电数据皆来源于真实数据。本文仿真中假设一共存在 10 个微电网, 每个微电网设有 3 个数据中心, 每个数据中心由 5 台相同类型的服务器构成。由于数据中心体量较小, 通常选用自然冷却 (Free Cooling) 技术结合小功率空调的方法散热, 将其功耗设为一个较小的变量。因此, 数据中心总功耗主要由服务器集群决定, 而服务器功耗主要由 CPU 和图形处理器 (GPU) 的频率决定。仿真中服务器功耗模型通过法国 Grid'5000 测试平台的真实测量值配合相应的数学模型联合构建。其中服务器 Dell PowerEdge R720 的配置为 6 核 Intel Xeon E5-2630 processors (2.3

GHz), 32 GB 内存与 600 GB 硬盘。数据中心的服务器资源使用率及对应功耗见表 2。

表 2 服务器资源使用率及对应功耗
Tab. 2 Unitization and power consumption rates of the server

资源使用率/%	功耗/W
0	97
20	152
40	170
60	188
80	201
100	220

仿真中用户数据采用法国云服务公司 Easyvirt 自 2014 年 3 月 26 日至 7 月 5 日的真实数据,其中包含 787 个优先任务和 3 148 个非优先任务。每个任务由用户自定义的计算资源需求和价格期望构成。优先任务平均持续时间为 12 h,非优先任务平均持续时间为 6 h,且对完成时间存在延迟容忍度。

在光伏设备方面,采用法国南特大学的小型光伏场收集的真实数据作为输入。该小型光伏场由 8 块相同的太阳能板 HIP-240-HDE4 和 1 台 SMA Sunny Boy 1200 变压器构成。每块太阳能板理论产电的峰值功率为 240 W。仿真数据取自晴天较多的 1 周(2015 年 6 月 22 日至 6 月 28 日)^[17]。储能设备方面,由于受成本和需求控制,且电能存储过程中存在一定的电能转换损失,容量不宜设置过大^[18-23]。因此,本仿真采用容量合理的基于锂电池的储能设备。电价方面,光伏设备产电量的价格为 0.4 元/(kW·h),从电网购电的价格为 1.0 元/(kW·h)。

配备光伏设备的数据中心能耗和光伏设备产电量如图 4 所示。由图 4 可知,即使在智能合约的帮助下,仍然存在部分光伏能源未被充分利用的情况,从而只能将其低价出售给电网。

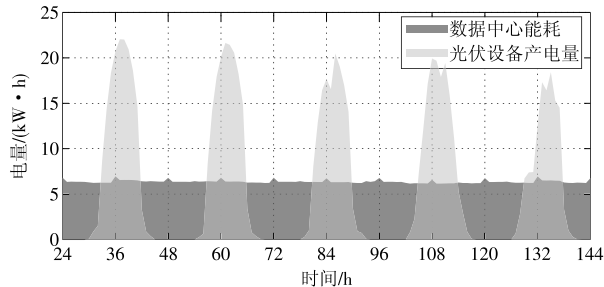


图 4 配备光伏设备的数据中心能耗和光伏设备产电量
Fig. 4 Energy consumption of a data center with PV cells and power generated by the cells

基于智能合约和机遇式任务调度算法的数据中心能耗和光伏设备产电量(不含储能设备)如图 5 所示。由图 5 可知,基于动态智能合约制定的优化

综合售电价的任务调度方法,可以提高光伏能源的利用率,但仍然存在部分光伏能源未被利用。

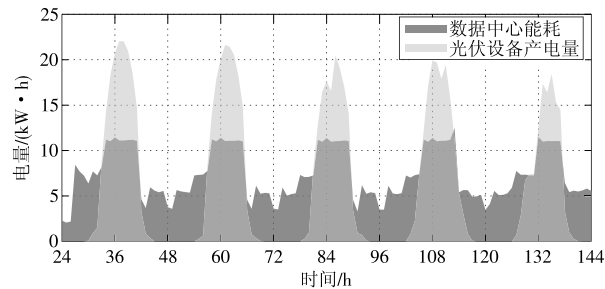


图 5 基于智能合约和机遇式任务调度算法的数据中心能耗和光伏设备产电量(不含储能设备)

Fig. 5 Data center energy consumption and power generated by PV cells (without ESD) based on smart contract and opportunistic task scheduling

基于智能合约和机遇式任务调度算法的数据中心能耗和光伏设备产电量(含储能设备)如图 6 所示。由图 6 可知,通过搭配小型经济型的储能设备,光伏能源能够被完全利用。并且基于机遇式的任务调度算法能够尽可能提高光伏能源的直接利用率,降低将光伏能源存储到储能设备的电量,从而将储能过程中的电量损失降到最低。

较之传统仅基于智能合约的方法,本文提出的基于智能合约和机遇式任务调度算法,在控制设备成本的前提下,有效提高了数据中心的经济收益。优化后数据中心每小时增加的经济收益如图 7 所示。

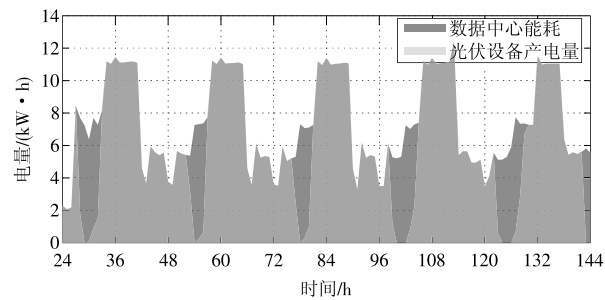


图 6 基于智能合约和机遇式任务调度算法的数据中心能耗和光伏设备产电量(含储能设备)

Fig. 6 Energy consumption of a data center and power generated by its cells (with ESD) based on smart contract and opportunistic task scheduling

同时根据仿真结果发现即使充分利用光伏能源,仍然存在光伏能源产量不能满足数据中心当前负载能耗需求的情况。因此,本文提出的基于面向订单转移的动态智能合约的制定方法,将这部分任务全部迁移至一个地处丰富光伏产能地区的数据中心。迁移(目标)数据中心收益如图 8 所示。任务迁移完成后,不仅为目标数据中心提高其可再生资源的利用率,还避免了能量存入储能设备时造成的

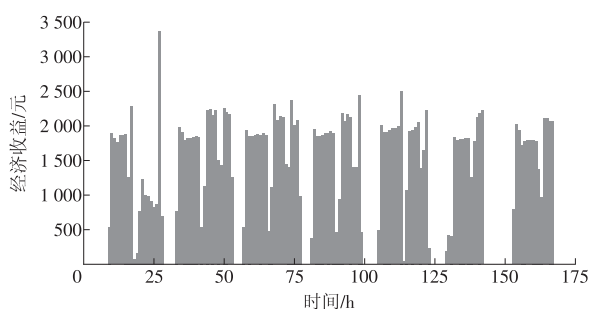


图7 优化后数据中心增加的经济收益

Fig. 7 Additional income of the optimized data center

能量损失,同时提高了数据中心的经济收益,降低了用户的经济开销。

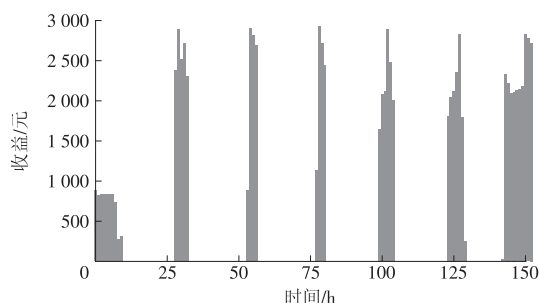


图8 迁移(目标)数据中心收益

Fig. 8 Income of the (targeted) data center migration

任务的迁移会带来一定的经济开销(成本),如图9所示。基于任务迁移和动态智能合约的制定方法,总迁移成本仅为59.23元,而168 h(1周)能够为当前数据中心带来额外的8 863.51元收益。因此,基于面向订单转移的动态智能合约的制定方法能够有效提高可再生能源的使用效率和产销方经济收益。

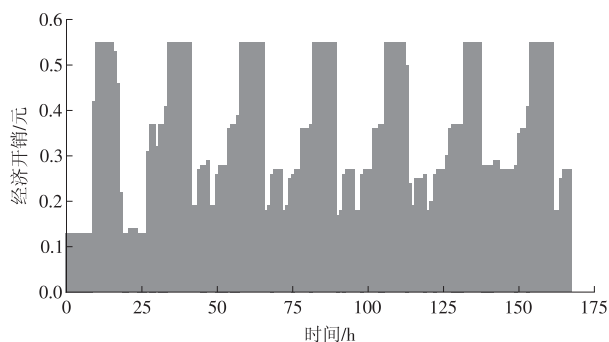


图9 任务迁移带来的经济开销

Fig. 9 Task migration cost

5 结论

针对配备有光伏设备的分布式边缘数据中心,本文提出一种基于智能合约的分布式电能交易方法,在保证交易安全性的前提下,提高分布式光伏能源的全局利用率,提高数据中心的经济收益。在此基础上,针对光伏设备产电量与数据中心负载不

匹配的问题,提出了一种基于机遇式的任务调度方法和动态智能合约的制定方法,进一步提高了光伏能源的利用率与交易双方收益。

参考文献:

- [1] 吉斌,莫峻,谭建成.高比例光伏电能产消电力需求响应机制设计[J].电网技术,2018,42(10):3315-3323.
JI Bin, MO Jun, TAN Jiancheng. Design of power demand response mechanism for high proportion of photovoltaic prosumer [J]. Power System Technology, 2018, 42 (10) : 3315-3323.
- [2] MENGELKAMP E, NOTHEISEN B, BEER C, et al. A blockchain - based smart grid: Towards sustainable local energy markets [J]. Computer Science - Research and Development, 2018, 33(1-2): 207-214.
- [3] 秦金磊,孙文强,朱有产,等.微电网中基于区块链的电能交易方法[J/OL].电力自动化设备:1-8[2020-06-04].
<https://doi.org/10.16081/j.epae.202005032>.
QIN Jinlei, SUN Wenqiang, ZHU Youchan, et al. Energy transaction method of microgrid based on blockchain[J/OL]. Electric Power Automation Equipment: 1-8 [2020-06-04].
<https://doi.org/10.16081/j.epae.202005032>.
- [4] SCHWARTZ R, DODGE J, SMITH N A, et al. Green AI[EB/OL].(2019)[2020-05-03].<https://arxiv.org/abs/1907.10597>.
- [5] GLANZ J. Power, pollution and the internet[EB/OL].(2012)[2020-05-03].
<https://www.nytimes.com/2012/09/23/technology/data-centers-waste-vast-amounts-of-energy-belying-industry-image.html>.
- [6] ZIK O, SHAPIRO A. Coal computing: How companies misunderstand their dirty data centers [EB/OL]. (2016)[2020-05-03].
http://web.luxresearchinc.com/hubfs/White_Papers/Coal_Computing_-_How_Companies_Misunderstand_Their_Dirty_Data_Centers_-_Lux_Research_White_Paper_-_February_2016.pdf.
- [7] International Greenpeace. How dirty is your data? [EB/OL]. (2011-04-21)[2020-05-03].
<https://www.greenpeace.org/international/publication/7196/how-dirty-is-your-data>.
- [8] DELFORGE P, WHITNEY J. Data center efficiency assessment scaling up energy efficiency across the data center industry: Evaluating key drivers and barriers [EB/OL]. (2014-08)[2020-05-03].
<https://www.nrdc.org/sites/default/files/data-center-efficiency-assessment-IP.pdf>.
- [9] ORGERIE A-C, ASSUNCAO M, LEFEVRE L. A survey on techniques for improving the energy efficiency of large-scale distributed systems[J]. ACM Computing Surveys, 2014, 46(4).
- [10] 秦金磊,孙文强,李整,等.基于区块链和改进型拍卖算法的微电网电能交易方法[J].电力自动化设备,2020,40(8):2-10.
QIN Jinlei, SUN Wenqiang, LI Zheng, et al. Energy

- transaction method of microgrid based on blockchain and improved auction algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(8): 2-10.
- [11] ZHENG Z B, XIE S A, DAI H N, et al. Blockchain challenges and opportunities: A survey [J]. International Journal of Web & Grid Services, 2018, 14(4): 352-375.
- [12] 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.
- [13] BELOGLAZOV A, ABAWAJY J, BUYYA R. Energy-aware resource allocation heuristics for efficient management of data centers for Cloud computing [J]. Future Generation Computer Systems, 2012, 28(5): 755-768.
- [14] WANG D, REN C G, SIVASUBRAMANIAM A, et al. Energy storage in data centers: What, where, and how much? [J]. ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review, 2012, 40(1): 187-198.
- [15] CHEN H S, CONG T N, YANG W, et al. Progress in electrical energy storage system: A critical review [J]. Progress in Natural Science, 2009, 19(3): 291-312.
- [16] DIVYA K C, OSTERGAARD J. Battery energy storage technology for power systems—An overview [J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79(4): 511-520.
- [17] Traces available online [EB/OL]. [2020-06-20]. <http://photovolta2.univ-nantes.fr>.
- [18] 李艳红, 王兴兴. 光储充综合能源系统设计及优化[J]. 华电技术, 2019, 41(11): 76-79.
- LI Yanhong, WANG Xingxing. Design and optimization of solar energy storage and charging in integrated energy systems [J]. Huadian Technology, 2019, 41(11): 76-79.
- [19] 王晗雯, 鲁胜, 周照宇. 光伏-混合储能微电网协调控制及经济性分析[J]. 华电技术, 2020, 42(4): 31-36.
- WANG Hanwen, LU Sheng, ZHOU Zhaoyu. Coordinated control and economic analysis on a PV-hybrid energy storage micro-grid system [J]. Huadian Technology, 2020, 42(4): 31-36.
- [20] 陈建国, 张国民. 分布式电站光伏汇流箱布置优化策略[J]. 华电技术, 2019, 41(3): 18-22.
- CHEN Jianguo, ZHANG Guomin. Optimization strategy for locating of combiner box for distributed photovoltaic power station [J]. Huadian Technology, 2019, 41(3): 18-22.
- [21] 孙思宇, 于成琪, 孙涛, 等. 冷热电三联供分布式能源系统研究进展[J]. 华电技术, 2019, 41(11): 26-31, 56.
- SUN Siyu, YU Chengqi, SUN Tao, et al. Advance in study on CCHP distributed energy system [J]. Huadian Technology, 2019, 41(11): 26-31, 56.
- [22] 张伟波, 谢玉荣, 杨帆, 等. 多能互补分布式综合供能系统及典型开发方案研究[J]. 发电技术, 2020, 41(3): 245-251.
- ZHANG Weibo, XIE Yurong, YANG Fan, et al. Research on multi-energy complementary distributed integrated energy supply system and typical [J]. Power Generation Technology, 2020, 41(3): 245-251.
- [23] 李志伟, 赵书强, 刘金山. 基于机会约束目标规划的风-光-水-气-火-储联合优化调度[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 214-223.
- LI Zhiwei, ZHAO Shuqiang, LIU Jinshan. Coordinated optimal dispatch of wind-photovoltaic-hydro-gas-thermal-storage system based on chance-constrained goal programming [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 214-223.

(本文责编: 张帆)

作者简介:

李云波(1987—),男,四川成都人,工学博士,从事分布式(图)计算与存储系统、分布式机器学习、边缘计算、绿色计算和融合可再生能源的信息系统基础设施架构的相关研究(E-mail: yunbo.li@buaa.edu.cn)。