

基于能源区块链的设施农业负荷时移与 光伏就地消纳控制策略

陈正¹, 杨建华¹, 靳开元¹, 侯斌¹, 王维洲²

(1. 中国农业大学 信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 国网甘肃省电力有限公司, 甘肃 兰州 730050)

摘要:随着设施农业的发展,设置合适的控制策略以及利用新型农业负荷可以有效消纳农网的分布式发电功率。区块链因具有安全、共识、激励的特性逐渐受到能源领域的关注。利用设施农业负荷的可时移特性,在农业园区微能网层和温室层分别构建优化目标,提出了基于区块链技术的园区微能网控制策略。各温室以促进光伏就地消纳最大化为目标,基于区块链中共享的用能数据、设备参数、运行数据等信息,针对园区微能网中光伏出力波动、负荷时移、储能配置等提出了下一时段的运行策略。设定光伏消纳占比评价指标,评估各温室的消纳情况,在区块链中始终记录最优的负荷运行方案。算例结果表明,所提控制策略可有效提高园区分布式光伏的就地消纳程度,降低微能网的购电费用和网损,提高电网的电压质量。

关键词:能源区块链;设施农业;分布式光伏;就地消纳;可时移负荷;控制策略

中图分类号:TM 615;TK 01

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202101012

0 引言

区块链技术在现在科技中发挥着越来越重要的作用^[1]。将区块链应用于能源互联网,诞生了“能源区块链”的概念^[2],相关学者对其进行了电力交易^[3]、信息安全^[4]等方面新模式的探索。文献[5]构建了基于能源区块链的多微电网电力交易竞争博弈模型;文献[6]对区块链应用于居民用户参与需求响应的情景进行了研究;文献[7]研究了区块链应用于储能优化配置的问题,降低了频繁交易的成本;文献[8]利用区块链管理平台的数据信息,构建了基于区块链技术的微电网电力市场总体框架;文献[9]研究了区块链在电力能源交易中价格响应的可行性;文献[10-11]探究了应用区块链解决本地电能交易的问题。

目前,能源体系建设日益朝着多能互补、源-网-荷-储一体化控制和能源就地消纳等方向发展^[12]。设施农业具有多类型电源、多样化负荷、多种类储能以及交直流混联的系统,可以用于微能网中负荷时移和光伏就地消纳的研究^[13]。文献[14]研究了微电网中分布式电源容量和运行策略的混合优化问题。文献[15]在考虑微能网中电、气、热等多能源的场景下,研究了其相关的优化调度问题。

传统中心化优化方法无法考虑参与光伏消纳的各用户的主观意愿,而区块链具有开放共识、去中心化、交易透明、不可篡改等特点,可以弥补传统方法的不足。已有文献研究了区块链在车联网^[16]、电能

云网络传输^[17]等方面的应用。文献[18]研究了基于区块链的P2P能源贷款服务,文献[19]研究了区块链与5G和智能电网的关联性并进行了价值评估。目前,结合区块链的特征,考虑微电网的运行策略以及电力市场的交易场景,有必要将区块链技术应用于设施农业的温室微能网中,以便于有效消纳农村配电网中的分布式光伏。

本文首先分析了温室负荷的特性及储能配置情况,将园区内各温室视作等同主体,利用区块链的共识共享机制,基于区块链中共享的用能数据、设备参数、运行数据等信息,提出了促进园区光伏就地消纳最大化的控制策略,并在区块链中始终记录最优负荷方案,对消纳情况最优的温室进行奖励。算例分析结果表明:在进行温室中可时移负荷和分布式电源的协调控制后,可以就地消纳分布式光伏,实现温室中各能源系统的相互配合,提高供电质量,减少微能网与电网的电能交换并降低网损。

1 设施农业负荷分析

设施农业温室微能网的外部与配电网相连,内部主要由光伏电源、蓄水池、相变材料、沼气池和各类型负荷构成,结构示意图如图1所示。图中微能网与外部配电网相连接,当分布式光伏出力大于内部电负荷需求时,温室开启蓄水和蓄热等进行能量转换与存储。蓄水池利用水泵将水抽送至高处进行储存,粒子能供热机组对相变材料或水进行储热以供温室、沼气池使用。当分布式光伏出力不足或为0时,温室优先利用多形态储能单元,通过蓄水池进行自流灌溉,利用沼气池进行沼气灯照明及加热,释放相变蓄热器储存的热能用于保温。

收稿日期:2020-05-13;修回日期:2020-11-19

基金项目:国家电网公司科技项目(5227221900HC)

Project supported by the Science and Technology Project of SGCC(5227221900HC)

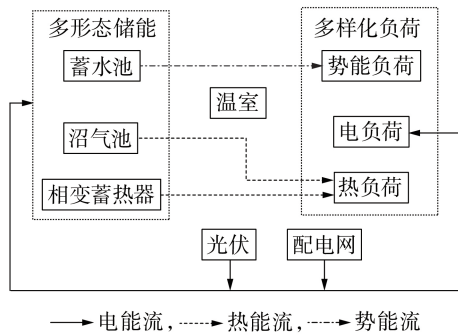


图1 光伏温室农业微能网系统的典型结构

Fig.1 Typical structure of agricultural micro-energy network system for photovoltaic greenhouse

从电能的角度而言,根据设施农业负荷的功能及其可时移特性,可将负荷分为可时移及不可时移负荷两大类。典型设施农业温室中各负荷分类及其特性如表1所示。

表1 温室中负荷分类及其特性

Table 1 Classification and characteristics of loads in greenhouse

负荷类型	用途	利用季节	时移特性	负荷特性	能耗 / kW
LED植物生长照明	增产育苗	四季	06:00—09:00、17:00—20:00持续	可中断	5
等离子固氮与水处理	增产防病	四季	09:00—18:00可间歇	可时移	2
沼气池热泵	沼气生产	冬	08:00—20:00可间歇	可时移、可中断	3
远红外加热	保温	春秋冬	20:00至次日06:00可间歇	可时移、可中断	2
粒子能供热	保温	春秋冬	00:00—24:00可间歇	可时移、可中断	8
物理杀虫	有机农业	四季	00:00—24:00可间歇	可时移	0.15
蓄水泵	蓄水	四季	00:00—24:00可间歇	可时移、可中断	2
水肥一体化	灌溉施肥	四季	08:00—18:00可间歇	可时移	2
空间电场	净化增产	四季	00:00—24:00可间歇	可时移、可中断	0.2
卷帘电机	保温	春秋冬	07:00—07:30、18:00—18:30不间断	不可控	2
棚内照明	日常工作	四季	18:00至次日06:00可间歇	可中断	0.15
智慧农业监测控制系统	监测控制	四季	00:00—24:00不间断	不可控	0.2
植物营养液循环回收	杀菌回收	四季	09:00—18:00可间歇	可时移	0.2
声波助长	增产	四季	06:00—19:00可间歇	可时移、可中断	0.3
换气扇	通风	春秋冬	00:00—24:00不间断	不可控	2

光伏温室设施农业微能网中存在多种形态的储能,通常包括蓄水池、沼气池和相变蓄热器3类,三者均可以作为可时移负荷的补充,通过能量搬移作用实现光伏电源的就地消纳,即在光伏峰值出力时段作为电负荷消纳电能并将其存储为其他形式的能量,而在其他时段作为电源为温室供热、作物浇水等提供电能。

分析表1中负荷的可时移特性可得如下结论。

(1)从用电负荷的可控特性方面来看,智慧农业监测控制系统24 h不间断供电,为不可控负荷,卷帘电机、换气扇也为不可控负荷,其他用电负荷均为可控负荷。

(2)从可控负荷的性质来看,LED植物生长照明与棚内照明为不可时移负荷,其他负荷均可以灵活调整使用时间,为可时移负荷。

(3)从单位面积的能耗来看,LED植物生长照明、远红外加热、粒子能供热等的能耗较大,可见温室的两大负荷需求为补光和供热。

(4)从负荷可时移特性来看,远红外加热与沼气池热泵、LED植物生长照明负荷在使用时间上有一定的互补性;等离子固氮与水处理、水肥一体化、植物营养液循环回收负荷可在09:00—18:00时段运行,声波助长负荷在06:00—19:00时段运行,物理杀虫、蓄水泵、空间电场的使用时段为00:00—24:00,这样能够有效削减用电负荷的高峰值,且白天开启的负荷可以有效消纳光伏发电功率。其他负荷根据自身的功率和用能情况进行适时开启。

温室中的负荷形式多样,可实现能量相互转化、相互补充,各负荷均有各自期望的最优运行情况,为能源区块链技术的引入提供了基本条件。

2 控制策略

2.1 能源区块链

能源区块链利用有序链接的加密区块来验证并存储相关的能源交易数据信息,使用共识机制进行分布决策及维护全网数据的一致性,利用智能合约自动完成有关数据信息的传递、相互验证或执行。

在研究设施农业微能网系统的光伏就地消纳控制策略时,主要利用到区块链技术的4个特性,如图2所示。

2.2 微能网的运营模式

在含分布式光伏的设施农业园区微能网中,含有分布式光伏、可时移负荷的各温室可基于区块链中共享的用能数据、设备参数、运行数据等信息,针对光伏消纳、负荷时移、就近消纳等提出下一时段的运行策略,所提运行策略将被发送至微能网中的所有温室,其他温室依据自身的负荷运行及储能情况在所有策略中选择最优运行策略。提出该策略的温

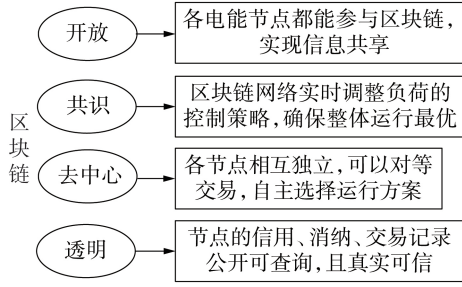


图2 能源区块链的特性

Fig.2 Attribute of energy blockchain

室将获得相应的奖励,同时微能网设定相应的指标对温室光伏消纳情况进行评估。在此运营模式下,各温室将调整可时移负荷并提出相应的运行策略,为微能网的最优运行提供参考方案。

园区微能网中进行光伏消纳、负荷时移、能量搬移等多个模块的运行策略协同优化,在优化用能行为的基础上合理安排各负荷的启停情况,进而确定电网、蓄水、蓄热等多能流系统的最优方案,基于区块链的温室微能网控制策略将呈现“链式优化”的特点。需要注意的是,应合理设置系统的运营费用价格,一方面避免价格过高给温室所有者、能源供应商等带来负担,另一方面也要防止价格过低导致系统运营费用较少,从而不能给参与决策的节点带来预期的激励效果。这与传统追求“费用最低”的运营模式有较大的区别。

2.3 电能的“虚拟存储”与区块链的“虚拟代币”

微能网通过控制、计量、通信等技术聚合分布式光伏、储能和可时移负荷,并利用区块链网络实现协调优化运行。能源区块链技术可支撑设施农业园区中的光伏就地消纳,所发电能无需远距离传输且不必通过传统中心化、集中式的模式,可促使能源就近消纳,降低线路损耗,提高能源效率。

当温室内的分布式光伏向配电网出售电能时,配电网会先进行确认,确认成功后智能合约将会生成相应的“虚拟代币”,并将代币提供给该温室。当园区内其他温室期望获得光伏能源时,需使用“虚拟代币”实现支付。

微能网可利用分散控制的方法实现电能的“虚拟存储”。在分散控制结构中,决策权完全下放到各温室,各温室可自主向微能网信息中心索取需要的的相关信息,如当前的源/荷功率信息、光伏的预测出力 and 线路参数等。对于电网而言,电能可在各温室都进行了一定量的“虚拟存储”,其数字化表示为区块链“虚拟代币”的数值。

2.4 光伏消纳占比

区块链网络要实时统计各节点的光伏消纳情况,因此需要设置合适的指标。本文以消纳光伏出力的占比为例,定义了各节点的光伏消纳占比指标

λ_i ,如式(1)所示。

$$\lambda_i = \frac{\min \{P_{Li}, P_{PVi}\}}{\max \{P_{Li}, P_{PVi}\}} \quad (1)$$

其中, P_{Li} 为温室成员*i*在某时段的负荷; P_{PVi} 为温室成员*i*的光伏在该时段的出力。 λ_i 可作为评估各温室消纳光伏情况的依据,其值越接近1,表明该温室的消纳情况越好。

若同时出现多个备选策略,则所有的温室成员在选择最优运行策略时要进行“投票”,各温室成员之间需要设置合适的权重。权重的计算公式如式(2)所示。

$$\eta_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^n \lambda_j} \quad (2)$$

其中, η_i 为温室成员*i*的投票权重; n 为参与投票的温室成员数量。

此外,为了使所有节点的光伏消纳占比或权重都保持在一定的水平,避免节点之间的差距越来越大,本文同时引入了累积光伏消纳占比指标 λ_{Ai} 和累积权重值 η_{Ai} ,表示在下一时段的指标值 λ_{Ai}^{t+1} 或权重 η_{Ai}^{t+1} 中应记入上一时段对应的指标值 λ_{Ai}^t 或权重值 η_{Ai}^t ,分别如式(3)和式(4)所示。

$$\lambda_{Ai}^{t+1} = \lambda_i^{t+1} + \mu_1 \lambda_{Ai}^t \quad (3)$$

$$\eta_{Ai}^{t+1} = \eta_i^{t+1} + \mu_2 \eta_{Ai}^t \quad (4)$$

其中, μ_1 、 μ_2 为设置的比例系数,可以根据不同的时段而动态调整。比例系数的设置原则是:确保累积光伏消纳占比 λ_{Ai}^t 和实时光伏消纳占比 λ_i^t 基本相同又有所区别,以实现在研究日时间维度上对各温室的消纳情况进行评估。

为了保证“投票”的公平性,若出现某个温室成员的权重值大于51%的情况,则采用另一种方法计算权重,即对参与投票的*n*个温室成员的光伏消纳占比指标按由大到小的顺序进行排序,排在第*i*位的温室成员的系数 c_i 如式(5)所示。

$$c_i = \log_{n+2}(n+2-i) \quad (5)$$

由式(5)可知,排名越靠前,则成员的系数 c_i 相差不大;排名越靠后,则成员的系数越小且差距越大。

此时各温室成员的权重 η_i 如式(6)所示。

$$\eta_i = \frac{c_i}{\sum_{j=1}^n c_j} \quad (6)$$

系数 c_i 同样能激励温室进行光伏消纳,且能避免单个成员权重过高的问题。

2.5 控制策略

以图3所示的设施农业园区为例,详述利用区块链思想所构建的控制策略。

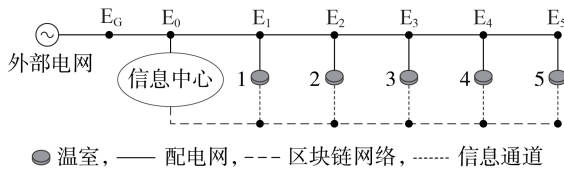


图3 设施农业园区的拓扑结构

Fig.3 Topology structure of facility agriculture park

各温室配置的可时移负荷略有差异,具体情况如表2所示。温室配置的光伏具有相同的容量,为15 kW,由于地理位置相近,则各温室的光伏出力曲线相同。

各温室依据自身情况适时开启可时移负荷,且均连入区块链网络,与其他温室进行信息交换与共享。以0.5 h为一个控制时段,并设定在光伏出力时段内进行控制策略的动态调整。所提控制策略的施流程如附录中图A1所示,具体步骤如下。

(1)在实施控制策略之前,先进行如下参数设置。对于整个园区微能网而言,设置其全局优化目标为网损最小、光伏消纳最大及区块链所带来的奖励费用最小,目标函数如式(7)所示。

$$\min \{ W_{\text{buy}} + W_{\text{loss}} + W_{\text{blo}} \} \quad (7)$$

其中, W_{buy} 为微能网的外购电能; W_{loss} 为网损电能; W_{blo} 为区块链“虚拟代币”电能。在电能单价不可控的情况下,该目标实际为微能网的实际支出费用,即微能网希望三者支付费用之和最小。

需要指出的是,式(7)所示微能网的目标函数与传统的中心化优化目标函数有一定的区别。式(7)中的 $\min$ 并不意味着对应的方案就是理论上微能网的最优方案,只是该典型日方案使得微能网的目标函数变得更好,微能网认为引入区块链技术更加有益。因此,在各时段层面,各温室通过比较光伏出力消纳情况获得较优方案;而在微能网层面,其可以根据一天的运行情况评估该日的方案是否有所提高。

对于温室而言,其希望能尽可能地就地消纳光伏,获得更大的光伏消纳占比指标,从而在区块链网络中处于有利地位。温室的目标函数如式(8)所示。

$$\min \{ E_{\text{pv}} - E_{\text{L}} \} \quad (8)$$

其中, E_{pv} 为单位时段内光伏发出的电能; E_{L} 为单位时段内温室消耗的负荷。

(2)当光伏开始出力时,温室响应就地消纳策略,积极调整自身可时移负荷的运行时段,适时开启储能以消纳光伏发电功率,形成不同的负荷运行备选方案。

(3)第1个时段完成后,计算所有温室的光伏消纳占比指标,根据其数值由大到小的顺序进行排序,并计算相应的“投票”权重值。若同时有多个备选负荷时移方案,则进入“投票”环节。备选方案 j 的加权总票数 A_j 如式(9)所示。

$$A_j = \sum_{i \in M} \eta_i \quad (9)$$

其中, M 为投票给备选方案 j 的成员集合。

(4)若某个备选方案被其他温室采纳,则提出该方案的温室对微能网是有贡献的,在区块链中记入相应的信息。对于拟采纳该备选方案的温室而言,若其负荷情况与方案提供的大致相同,则直接采用;若不相同,则无法直接采用,需根据方案中的负荷运行情况调整自身的可时移负荷优先级。负荷优先级向量 K 的定义如式(10)所示。

$$K = [k_1, k_2, \dots, k_i, \dots, k_m] \quad (10)$$

其中, k_i 为负荷 i 的运行优先级; m 为该温室内的负荷数量。

对于可时移负荷而言,其优先级越高,则在光伏出力较大时优先运行。新方案中的负荷运行情况会更新该温室的负荷优先级,待启用的前 L 个可时移负荷消耗的电能 E_{TS} 如式(11)所示。

$$E_{\text{TS}} = \sum_{i=1}^L k_i P_i \Delta t \quad (11)$$

其中, P_i 为负荷 i 的功率; Δt 为单位时段的时长,本文中为0.5 h。温室将根据式(11)及光伏出力情况对自身的负荷运行情况进行调整。

因此,新方案通常为可时移负荷的启停和储能设备的使用情况,温室的自我调整方案包括采用、不采用、更新自身可时移负荷的优先级3种。

若无新方案,则温室成员继续维持自身的负荷使用习惯,即所有成员均在各自认为最优的方案上

表2 各温室负荷配置情况

Table 2 Load allocation of each greenhouse

温室	负荷配置								
	LED植物生长照明	粒子能供热	等离子固氮与水处理	蓄水泵	物理杀虫	水肥一体化	空间电场	植物营养液循环回收	声波助长
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	0	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	0	1	1	1	1
4	0	1	1	1	1	1	0	1	1
5	1	1	1	0	1	1	1	1	0

注:负荷配置取值为0表示无该负荷,取值为1表示有该负荷。

运行。将光伏消纳占比指标最大的温室的负荷运行信息记入区块链供其他温室参考,从而动态调整自身的功率。

(5)进入下一时段,各温室的光伏消纳占比指标和“投票”权重值按一定的比例系数予以累积。

(6)该日结束后,分析区块链中记录的最优负荷运行情况,统计各温室获得指标最大的次数,计算微能网的外购电量和网损电量,并按时段数确定各时段奖励电量的上限,即为“虚拟代币”的数值。

在区块链体制下,各温室均需要评估光伏消纳情况,消纳占比指标值较大者将获得奖励,这就“迫使”所有温室均要动态调整自身的负荷,确保评估指标值更大,从而获得奖励和“投票”权重。这是一种由结果“倒逼”过程的决策方式,所有温室受到这一规则的管控,无形之中会一直调整自身的负荷运行情况。这与传统的中心化算法有较大的区别,是一种全新的思路,也体现了区块链“分布自治,协同优化”的特点。按照上述方式,微能网将动态调整光伏消纳状态并逐步向更好的方向发展,这是区块链“链式优化”的特征之一,如图4所示。

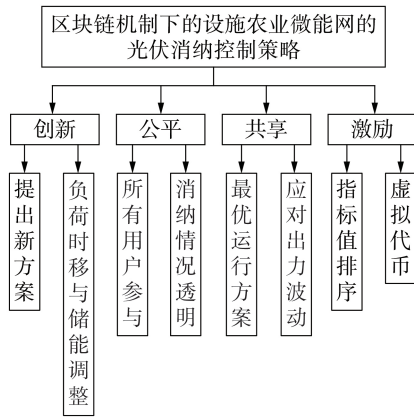


图4 所提控制策略的特征

Fig.4 Features of proposed control strategy

所提控制策略摒弃了传统“中心控制、集中优化”的理念,而是采用分布式的计算方法,使所有温室处于同一层次,公平竞争。在该情况下,温室始终具有较好的“自我革新性”,能自发地维持在接近目标的理想状态下运行。

2.6 约束条件

设施农业园区微能网在调整中需满足以下约束条件,保证相应变量在各时段的调整中均不能越限,若负荷运行方案导致电压或功率越限将被舍弃。

(1)功率平衡约束。

$$P_{PV}(t) - P_{exc}(t) + P_{grid}(t) = P_L(t) \quad (12)$$

其中, $P_{PV}(t)$ 、 $P_L(t)$ 分别为 t 时段的光伏出力、负荷需求,单位为 kW; $P_{exc}(t)$ 为 t 时段电能转化为其他形式能量的功率,单位为 kW; $P_{grid}(t)$ 为 t 时段电网向温室

输送的功率,单位为 kW。

(2)光伏出力约束。

$$0 \leq P_{PV}(t) \leq P_{PV, \max} \quad (13)$$

其中, $P_{PV, \max}$ 为光伏出力的最大值,单位为 kW。

(3)节点电压约束。

$$U_{i, \min} \leq U_i \leq U_{i, \max} \quad (14)$$

其中, U_i 为节点 i 的电压, $U_{i, \max}$ 、 $U_{i, \min}$ 分别为其上、下限,单位为 V。

(4)相变蓄热器功率约束。

$$0 \leq P_d \leq P_{d, \max} \quad (15)$$

其中, P_d 为相变蓄热器的功率, $P_{d, \max}$ 为其最大值,单位为 kW。

(5)与电网交换功率约束。

$$0 \leq P_{grid}(t) \leq P_{grid, \max} \quad (16)$$

其中, $P_{grid, \max}$ 为电网向温室输送功率的最大值,单位为 kW。

3 算例分析

以图3所示的设施农业园区为例进行算例仿真,5个温室的负荷情况见表2,所有温室均安装了相同容量的分布式光伏。线路参数见附录中表A1。

在各温室光伏出力相同的情况下,光伏消纳占比将仅随负荷功率的变化而变化。各温室有不同的负荷时移策略和运行方案,在各时段均会产生光伏消纳占比指标值最大的温室,其负荷时移策略可为其他温室提供参考。园区的光伏总功率以及时移前、后的负荷总功率如图5所示。由图可以看出,经时移调整后的负荷功率基本上与光伏出力一致,光伏消纳得到了明显的改善。

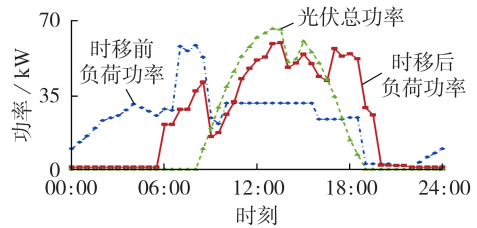


图5 园区的光伏功率与负荷功率

Fig.5 Photovoltaic power and load power of park

3.1 光伏消纳占比指标分析

由于各温室自身的用能需求有一定的差异,区块链中各温室的指标是实时变化的,统计各温室的指标变化情况如附录中图A2所示。由图可知,各温室之间的光伏消纳占比差距总体较小,且各时段指标值最大的温室均不相同,说明各温室在原有的负荷运行情况下均进行了一定程度的改进,以提高自身的光伏消纳占比。若采用累积光伏消纳占比的方法, μ_1 取值为 0.6, 得到各温室的累积光伏消纳占比如附录中图A3所示。由图可知,采用累积光伏消纳

占比指标后,各温室的指标数值仍相差不大,这是因为各温室在各时段的光伏消纳占比相差不大。但累积光伏消纳占比指标不仅与当前的消纳情况相关,也与之前的消纳情况相关,所以各时段累积光伏消纳占比指标值最大的温室与实时光伏消纳占比指标值最大的温室不一定相同。统计各温室指标值最大的时段数,结果如表3所示。

表3 各温室指标最大的时段数

Table 3 Period number of largest indicators for each greenhouse

温室	指标值最大的时段数	
	实时光伏消纳占比指标	累积光伏消纳占比指标
1	6	7
2	3	0
3	5	5
4	3	3
5	4	6

由表3可知,温室1获得实时光伏消纳占比指标值最大的时段数最多,表明温室1调整可时移负荷的调控手段较优,其他温室均有不少于3个时段的实时光伏消纳占比指标最大;对于累积光伏消纳占比指标而言,温室2的累积光伏消纳占比指标没有达到过最大,说明温室2虽在本时段积极调整负荷,但在下一时段没有根据光伏出力进行及时调整。总体而言,各温室调整负荷的方案虽有差异,但相差不大;所有温室的光伏消纳情况良好,均有机会通过进一步的负荷调整来缩小彼此之间的差距。

3.2 具体时刻分析

(1) 10:00时刻。

由于10:00时刻的光伏出力较强,统计此时温室1可控负荷与光伏出力之间的差值,发现光伏出力仍有裕度,于是率先在该时刻开启蓄水泵进行储水,此时区块链中记录的新方案信息如附录中图A4所示。其他温室在收到温室1的共享信息后,面临“是否参考”等选择,各温室可以结合自身的情况进行选择,结果如附录中图A5所示。光伏消纳占比情况如图6所示。10:00时刻,温室1利用蓄水泵储水促进了光伏的就地消纳,使得自身光伏消纳占比指标最大,这一控制策略将被记录至区块链网络中,供其他温室参考。

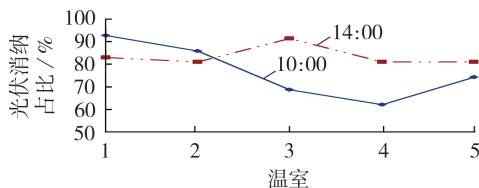


图6 各温室的光伏消纳占比指标值

Fig.6 Photovoltaic consumption ratio index value of each greenhouse

(2) 14:00时刻。

由图6可知,光伏出力在14:00时有明显的下降,因此要停用部分可时移负荷。此时温室3及时停止固氮设备、空间电场除雾设备等以降低负荷需求,紧密跟踪光伏出力波动,光伏消纳占比指标较大。

在控制时段内,各温室计算光伏出力与自身负荷需求之间的差值,并根据实际情况启停负荷。因此,针对光伏的出力波动,温室可及时调整负荷时移策略,从而最大化地就地消纳光伏。而区块链网络是所有温室共同参与、共同维护的数据库,各温室所提新方案、新策略不断加入该数据库,只要其中有一个温室采取应对措施,其他温室均会参考并调整自身的负荷功率。因此,区块链网络是动态更新的。

以温室4为例,其在实施所提控制策略前、后的负荷功率如图7所示。由图7可知,实施本文所提控制策略后,温室4的负荷有较大的改变,夜间负荷降低,可时移负荷集中到光伏出力较大的时段运行,促进了光伏的就地消纳;且负荷高峰得到降低,这在一定程度上有利于电网的安全运行。

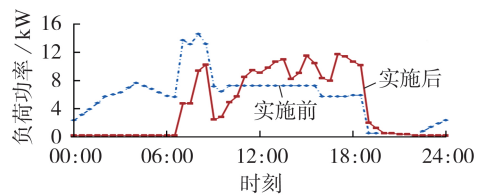


图7 温室4的负荷功率

Fig.7 Load power of Greenhouse 4

进行负荷时移后,温室4的最大光伏消纳占比指标值为0.949,出现在15:00,高于该日之前时刻的最大值0.866,且其他日15:00时刻的最大光伏消纳占比指标值为0.597。可见,在实施所提控制策略时,温室4积极调整自身的负荷功率,使其在15:00时最接近光伏出力,从而使光伏消纳情况最好,消纳占比指标值最大;相较于未实施控制策略的其他日,由于可时移负荷参与调度,温室4的光伏消纳水平得到了提高。其他温室的情况类似,不再赘述。综上,在设施农业微能网中实施所提控制策略能最大化地就地消纳光伏出力,降低电能损耗,减少微能网的外购电量,电能供应、传输和消纳这3个环节中呈现“链式优化”^[20]的特征。

各温室在经过一天的负荷动态调整之后,区块链中记录的最优负荷运行方案如图8所示。由图8可知,最优负荷功率已非常接近光伏出力。根据光伏的短时功率波动,负荷功率也进行了相对应的调整。若其他日的光伏出力与该日基本相同,则该最优运行方案可以沿用;若不相同,则各温室需重新调整可时移负荷,但总体思想保持不变。

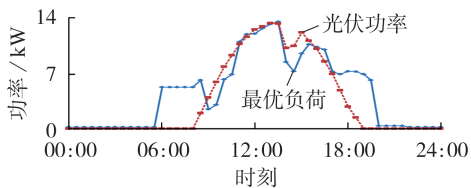


图8 区块链中记录的最优负荷运行方案

Fig.8 Optimal load operation scheme recorded in blockchain

3.3 优化结果分析

实施所提控制策略后,区块链的引入使得各温室之间相互比较,优化自身的负荷运行方案,促进园区光伏就地消纳。由于控制策略会记录负荷运行方案,而负荷时移只是改变用电时间,并不改变用电量,可以根据负荷调整前的运行情况以及光伏发电功率计算得到当日的购电量和电能损耗,并以此作为参考。本文中参考的电量数据为未实施控制策略的其他日的电量记录数据,如表4所示。

表4 电量计算结果

Table 4 Calculative results of electric energy

单位: kW·h

是否引入区块链网络	光伏消纳电量	配电网供电量	电能损耗
否	107.69	683.25	16.41
是	225.11	569.61	12.63

由表4可知,各温室积极响应控制策略,通过调整多类型可时移负荷的用能情况,显著提升了光伏消纳电量,同时减少了配电网的供电量,使得线路上的传输功率得到降低,从而减少了电能损耗。可见,区块链的引入对促进光伏消纳具有有效性。

从园区微能网的角度分析,由表4可知,其外购电量和电能损耗均有所减少。前已述及,微能网必须对各时段表现优异的温室成员进行奖励,会将“虚拟代币”发放给消纳占比指标值最大的温室。在本文算例中,若微能网将节省的外购电量和电能损耗均作为奖励发放给温室,则微能网在优化前、后的总电量不变,如式(17)所示。

$$E_i = (\Delta E_{\text{grid}} + \Delta E_{\text{loss}}) / T \quad (17)$$

其中, E_i 为各时段光伏消纳占比指标值最大的成员获得的奖励电量; ΔE_{grid} 、 ΔE_{loss} 分别为优化后节省的外购电量、电能损耗; T 为一天中实施控制策略的时段数,本文算例中 $T=21$ 。计算得到各时段光伏消纳占比指标值最大的温室可分得的电量为 $5.59 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。微能网可灵活奖励电量只要不高于 $5.59 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 则可认为引入区块链是有利的,可以节省电量费用。可见,引入区块链具有经济性。

引入区块链控制策略后,各温室进行负荷时移,除促进光伏就地消纳外,对电压也有一定的改善作用。以处在配电网末端的温室5为例进行分析,其

在实施控制前、后的电压曲线如图9所示。图中,电压为标么值。

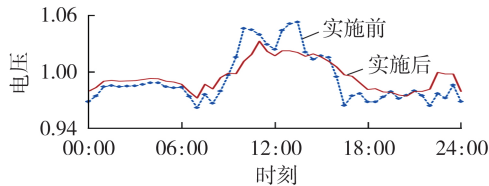


图9 实施控制前、后温室5的电压曲线

Fig.9 Voltage curves of Greenhouse 5 before and after implementation of control

由图9可知,在实施所提控制策略后,温室5的电压情况有较大的改善。进行负荷时移前,温室5在光伏出力较大时段的电压较高,最高达到 1.053 p.u. ,在夜间电压较低,最低值为 0.962 p.u. ,进行负荷时移后,白天电压最高值降为 1.032 p.u. ,夜间电压最低值升为 0.972 p.u. ;在中午光伏出力波动时段,未实施控制策略时,温室5的电压波动程度较大,实施控制策略后,立即进行负荷调整,降低了电压的波动水平,改善了电压质量。可见,引入所提控制策略可提高供电电能质量。

由以上分析可知,所提控制策略具有有效性、经济性和可靠性。各温室积极调整可时移负荷,使得光伏就地消纳最大化,减少了微能网外购电量和电能损耗,提高了电压质量;同时区块链中始终记录了最优负荷运行方案,便于各成员参考,以应对光伏出力变化和短时波动的影响。

在空间上,地理位置相近的温室能够获得接近的负荷方案和相应的光伏消纳占比指标;在时间上,区块链技术不仅能为各时段的负荷调整方案提供依据,也能在日的时间尺度上评判温室的光伏消纳情况。某温室在某日的负荷方案可以供其他温室在其他日进行参考,在以周、月为时间尺度时亦然。这样,区块链技术的长久优势便有所体现。综上可知,引入区块链技术对设施农业是可行的,可以有效促进园区分布式光伏的就地消纳。

4 结论

能源区块链理念与温室微能网能量优化调度、控制有高度的一致性,将区块链技术引入设施农业的发展中是可行的。本文将区块链与设施农业相结合,提出了基于区块链的设施农业协调控制策略,使得各温室根据分布式光伏出力,积极调整自身的可时移负荷,并配合相应的储能设备,实现光伏就地消纳最大化;提供了合适的评估指标,实时评价各温室的光伏消纳程度,选出最优负荷方案以供其他成员参考。利用区块链的去中心化、透明和可信任等特点弱化传统的电网中心调度思想,各温室间可共享

控制方案并提出最优控制方案,促进园区光伏就地消纳最大化。算例结果表明,本文所提基于区块链的设施农业园区控制策略对促进农村配电网分布式光伏的就地消纳有明显的作用,具有一定的经济性、有效性和可靠性。本文工作成果可为未来将区块链技术真正应用于分布式光伏与智慧农业、畜牧业协调发展等场景提供参考。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] ANDONI M, ROBU V, FLYNN D, et al. Blockchain technology in the energy sector: a systematic review of challenges and opportunities[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 100: 143-174.
- [2] 赵曰浩, 彭克, 徐丙垠, 等. 能源区块链应用工程现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(7): 14-22, 58.
ZHAO Yuehao, PENG Ke, XU Bingyin, et al. Status and prospect of pilot project of energy blockchain[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 14-22, 58.
- [3] 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.
- [4] 丁伟, 王国成, 许爱东, 等. 能源区块链的关键技术及信息安全问题研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(4): 1026-1035.
DING Wei, WANG Guocheng, XU Aidong, et al. Research on key technologies and information security issues of energy blockchain[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(4): 1026-1035.
- [5] 马天男, 彭丽霖, 杜英, 等. 区块链技术下局部多微电网市场竞争博弈模型及求解算法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 191-203.
MA Tiannan, PENG Lilin, DU Ying, et al. Competition game model for local multi-microgrid market based on block chain technology and its solution algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 191-203.
- [6] 陈冠廷, 张利, 刘宁宁, 等. 基于区块链的面向居民用户需求响应交易机制[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(8): 9-16.
CHEN Guanting, ZHANG Li, LIU Ningning, et al. Blockchain-based transaction mechanism for residential users demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(8): 9-16.
- [7] 朱西平, 付迁, 文红, 等. 区块链视角下多能源主体储能优化配置模型[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(8): 47-56.
ZHU Xiping, FU Qian, WEN Hong, et al. Optimal allocation model of multi-energy entity energy storage from perspective of blockchain[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(8): 47-56.
- [8] 武庚, 曾博, 李冉, 等. 区块链技术在综合需求侧响应资源交易中的应用模式研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3717-3728.
WU Geng, ZENG Bo, LI Ran, et al. Research on the application of blockchain in the integrated demand response resource transaction[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3717-3728.
- [9] RAHIMIYAN M, BARINGO L, CONEJO A J. Energy management of a cluster of interconnected price-responsive demands[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2): 645-655.
- [10] KANG J W, YU R, HUANG X M, et al. Enabling localized peer-to-peer electricity trading among plug-in hybrid electric vehicles using consortium blockchains[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(6): 3154-3164.
- [11] THAKUR S, BRESLIN J G. Peer to peer energy trade among microgrids using blockchain based distributed coalition formation method[J]. Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy, 2018, 3(5): 4-20.
- [12] 杨明通, 周步祥, 董申, 等. 区块链支持下的微网电力市场设计及调度优化[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(12): 155-161.
YANG Mingtong, ZHOU Buxiang, DONG Shen, et al. Design and dispatch optimization of microgrid electricity market supported by blockchain[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12): 155-161.
- [13] WANG Y Z, NIU H N, YANG L, et al. An optimization method for local consumption of photovoltaic power in a facility agriculture micro energy network[J]. Energies, 2018, 11(6): 1-20.
- [14] MORADI M H, ESKANDARI M, SHOWKATI H. A hybrid method for simultaneous optimization of DG capacity and operational strategy in microgrids utilizing renewable energy resources[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 56: 241-258.
- [15] ZHANG X, YANG J H, WANG W Z, et al. Optimal operation analysis of the distribution network comprising a micro energy grid based on an improved grey wolf optimization algorithm[J]. Applied Sciences, 2018, 8(6): 923-954.
- [16] SHARMA V. An energy-efficient transaction model for the blockchain-enabled Internet of Vehicles(IoV)[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(2): 246-249.
- [17] SAWA T. Blockchain technology outline and its application to field of power and energy system[J]. Electrical Engineering in Japan, 2019, 206(2): 11-15.
- [18] KIM M, SONG S, JUN M S. A study of block chain-based peer-to-peer energy loan service in smart grid environments[J]. Advanced Science Letters, 2016, 22(9): 2543-2546.
- [19] VALTANEN K, BACKMAN J, YRJOLA S. Blockchain-powered value creation in the 5G and smart grid use cases[J]. IEEE Access, 2019, 7: 25690-25707.
- [20] 曾鸣, 程俊, 王雨晴, 等. 区块链框架下能源互联网多模块协同自治模式初探[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3672-3681.
ZENG Ming, CHENG Jun, WANG Yuqing, et al. Primarily research for multi module cooperative autonomous mode of energy internet under blockchain framework[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3672-3681.

作者简介:



陈正

陈正(1995—),男,湖北孝感人,硕士研究生,研究方向为微电网与可再生能源发电技术(E-mail: 1074138355@qq.com);

杨建华(1963—),男,河南卫辉人,教授,通信作者,主要研究方向为电力系统规划与仿真、新能源发电技术等(E-mail: yang.haag@163.com);

靳开元(1996—),男,天津人,硕士研究生,研究方向为农村可再生能源发电技术;

侯斌(1994—),男,北京人,硕士研究生,研究方向为可再生能源发电与微电网技术;

王维洲(1967—),男,甘肃临洮人,高级工程师,硕士,研究方向为电力系统网损、新能源发电等。

(编辑 陆丹)

Control strategy of time-shift facility agriculture load and photovoltaic local consumption based on energy blockchain

CHEN Zheng¹, YANG Jianhua¹, JIN Kaiyuan¹, HOU Bin¹, WANG Weizhou²

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. State Grid Gansu Electric Power Co., Ltd., Lanzhou 730050, China)

Abstract: With the development of facility agriculture, the distributed generation power of agricultural network can be absorbed effectively by setting appropriate control strategies and using new agricultural load. Blockchain has gradually attracted the attention of energy field due to its characteristics of security, consensus and motivation. Based on the time-shift characteristic of facility agriculture load, optimization objectives are respectively constructed in the micro-energy network layer and the greenhouse layer in the agricultural park, and the control strategy of micro-energy network in the park is proposed based on the blockchain technology. With the goal of maximizing local consumption of photovoltaic in each greenhouse, based on the energy consumption data, equipment parameters, operation data, and so on, which are shared in the blockchain, the operation strategy for the next period is proposed responding to output power fluctuation of photovoltaic, time-shift load and configuration of energy storage in the micro-energy network. The evaluation index of photovoltaic consumption ratio is set to evaluate the consumption condition of each greenhouse, and the optimal load operation scheme is always recorded in the blockchain. The example results show that the proposed control strategy can effectively improve the local consumption of distributed photovoltaic in the park, reduce the power purchase cost and network loss of micro-energy network, and improve the voltage quality of the power grid.

Key words: energy blockchain; facility agriculture; distributed photovoltaic; local consumption; time-shift load; control strategy

(上接第32页 continued from page 32)

Review on planning and operation research of park energy internet

WANG Jiang, DENG Fengqiang, ZHANG Yongjun, SU Jieying, XIE Xiaoyu

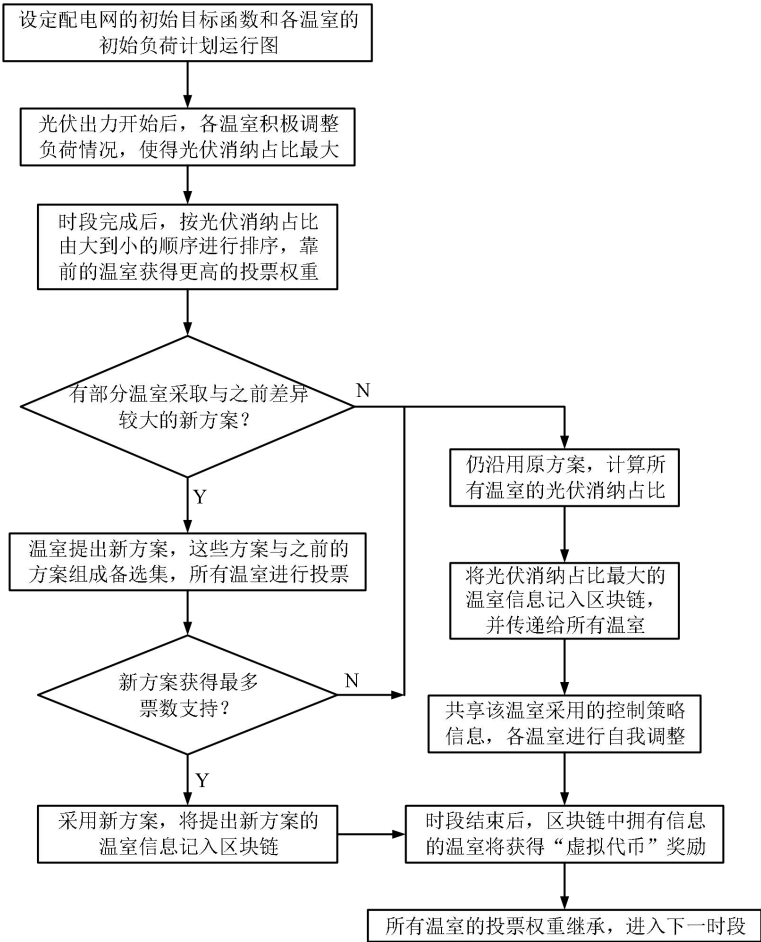
(Research Center of Smart Energy Technology, School of Electric Power,

South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: As a coordinated and complementary “generation-grid-load-storage-charging” energy system, park energy internet has the characteristics of multi-energy coupling and complementing, which contributes to the reduction of social energy costs as well as the improvement of energy efficiency. Firstly, the connotation and structural division of park energy internet are expounded. On this basis, the power balance model and power flow model of electricity-gas-heat network are discussed. Secondly, the research status of the park energy internet is reviewed from aspects of equipment planning, multi-energy flow optimal scheduling, load-side multi-type response and optimal scheduling considering energy storage. At last, the issues to be further studied are proposed, and the prospects of broad planning, intelligent optimization and interactive market of park energy internet are analyzed, so as to provide references for the future planning and operation research of park energy internet.

Key words: park energy internet; energy hub; planning; optimal scheduling

附录



图A1 控制策略流程图

Fig.A1 Flowchart of control strategy

表 A1 线路参数
Table A1 Line parameters

线路首端	线路末端	线路长度/km	线型
E ₀	E ₁	0.04	LJ-70
E ₁	E ₂	0.03	LJ-50
E ₂	E ₃	0.02	LJ-50
E ₃	E ₄	0.02	LJ-50
E ₄	E ₅	0.02	LJ-50

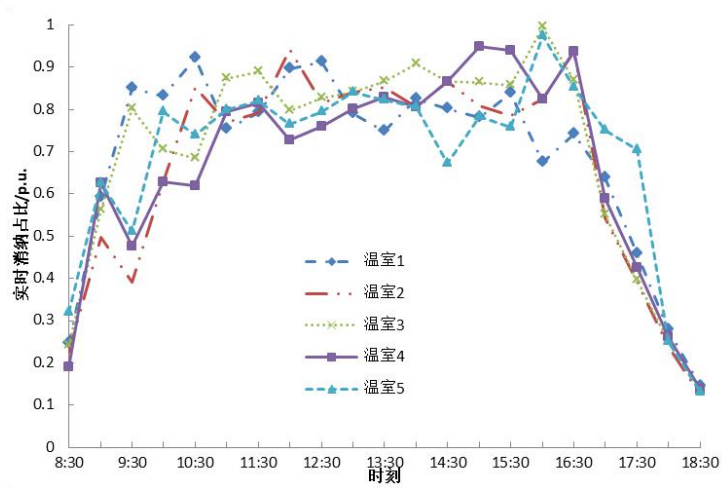


图 A2 各温室的光伏消纳占比

Fig.A2 Photovoltaic consumption proportion of each greenhouse

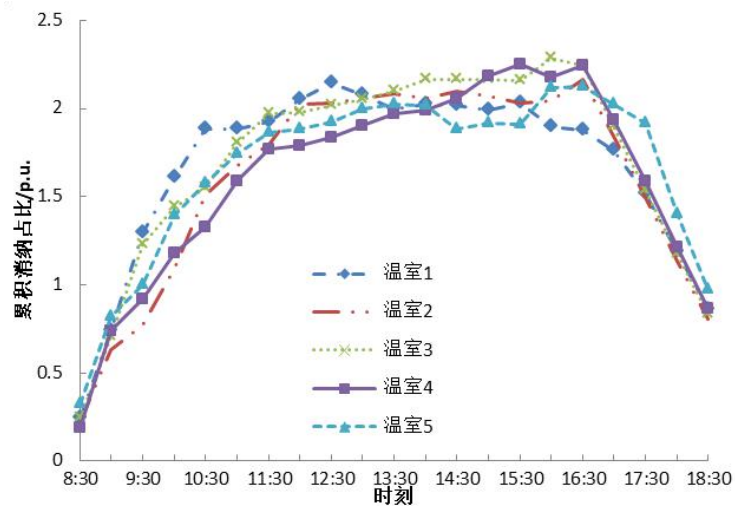


图 A3 各温室的累积光伏消纳占比

Fig.A3 Cumulative photovoltaic consumption proportion of each greenhouse

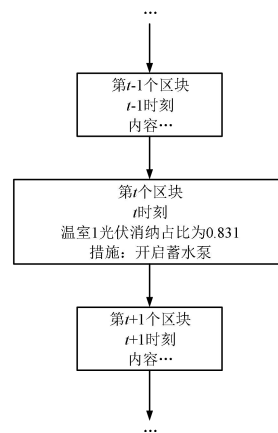


图 A4 10:00 时刻的区块链内容

Fig.A4 Content of blockchain at 10:00

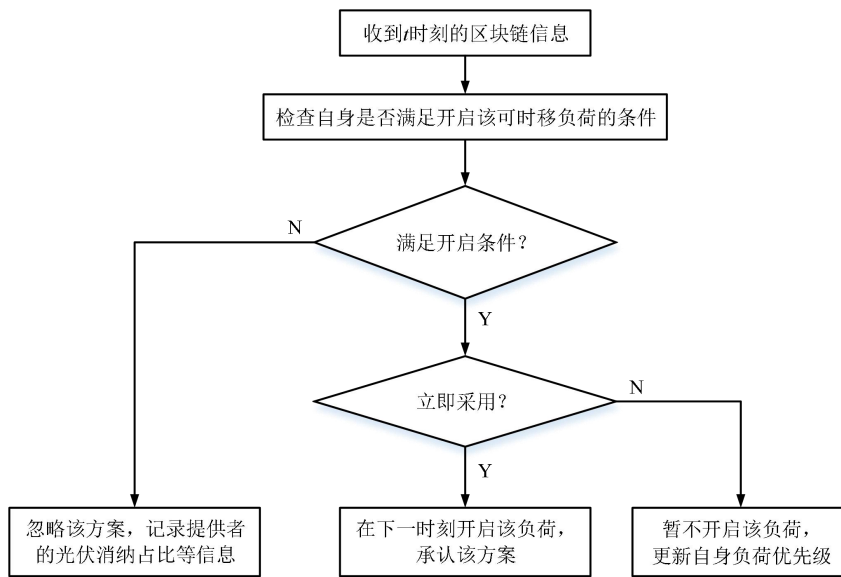


图 A5 其他温室的调整过程
Fig.A5 Adjustment process of other greenhouses