

基于模型预测控制的能源互联网系统 分布式优化调度研究

张彦¹, 张涛¹, 孟繁霖², 王锐¹, 刘亚杰¹, 郭波¹

(1. 国防科技大学信息系统与管理学院, 湖南省 长沙市 410073;

2. 杜伦大学计算与工程学院, 英国 杜伦 DH1 1EP)

Model Predictive Control Based Distributed Optimization and Scheduling Approach for the Energy Internet

ZHANG Yan¹, ZHANG Tao¹, MENG Fanlin², WANG Rui¹, LIU Yajie¹, GUO Bo¹

(1. College of Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan Province, China; 2. School of Computing Science and Engineering, Durham University, Durham DH1 1EP, UK)

ABSTRACT: Energy internet is a complex information and physical system, which comprises multiple energy local networks. Therefore, the optimization and scheduling for the energy internet is more complex than the energy local network, more factors are needed to consider and to coordinate due to the owners, scheduling objectives and the operation tasks for energy local networks are different. Moreover, each energy local network owner wants to maximize its own profit leads to the centralized optimization and scheduling scheme cannot effectively satisfy these demands. This paper proposes a hierarchical games based distributed energy management model for the energy internet, it can maximize the profit of the utility company by coordinating the generators and the energy storage units, and minimize the operation cost of each energy local network by coordinating its own dispatchable units. This distributed energy management model is integrated into the model predictive control framework to effectively reduce the negative impacts introduced by fluctuant renewable energy resources outputs and random load demand. Case studies show that the proposed approach is flexible and robust.

KEY WORDS: energy internet; energy local network; model predictive control; games theory; distributed optimization

摘要: 能源互联网系统包含多个能源局域网, 其优化调度方案的制定较单个能源局域网更加复杂, 需要考虑和协调的因素更多。同时, 由于各个能源局域网其所有者、调度目标和任务需求有所不同, 以及追求自身利益最大化的特性, 使得难以设计出一个满足各方利益的集中式优化调度方案。为此, 该文提出一种含主-从博弈的能源互联网系统分布式能量管理模型, 发电公司能够通过发电侧“源-储”协调最大化其发电收益, 各能源局域网能够通过协调内部各可控单元最

小化其运行成本。将这一分布式能量管理模型融入到模型预测控制架构中, 以有效应对可再生能源输出间歇性、波动性和负载需求不确定性带来的不利影响。通过不同的算例分析了该文所提方法的鲁棒性与可行性。

关键词: 能源互联网; 能源局域网; 模型预测控制; 博弈论; 分布式优化

0 引言

能源互联网是以电力系统为中心的能源系统与互联网理念和技术、高速高可靠性通信技术、先进测量体系及智能能量管理技术深度融合的复杂信息物理系统^[1-3]。其主要目的是实现横向的多能源互补, 纵向的“源-网-荷-储”协调, 通过形成面向社会的商业性和服务性平台, 提高可再生能源渗透率、降低传统化石能源比例, 增强用户需求响应能力, 降低用户用能成本的能源系统^[4-6]。

能源互联网是一个扁平化、互联化的“源-网-荷-储”体系, 包含多个能源局域网单元、独立发电单元、独立用电单元、独立储能单元等^[7]。这些能源互联网子单元由于其所有者、任务需求和调度目标各有所不同^[8-10], 且都有追求自身利益最大化的能力与驱动力, 使得传统的集中式优化调度方式很难应用于能源互联网系统的优化调度中。因此有必要引入分层协调为主的分布式能量管理技术^[5], 通过用户侧与发电侧的博弈, 最大化发电公司收益, 同时实现各能源局域网的运行成本的最小化。

文献[11]研究了多个微电网接入配电网的情

况,提出了多微电网与配电网联合运行调度模式,并建立了双层优化调度模型。文献[12]研究了多微电网系统的集中式协调调度架构,根据运行时段的不同执行不同的协调调度策略,包括:峰时段协调调度策略、平时段协调调度策略和谷时段协调调度策略。文献[13]研究了微电网与配电网协调运行模型,建立了集中式的微电网互动协调运行的机会约束模型。文献[14]研究了集中式的多微电网能量管理模型,并探讨了多微电网联合运行方式相对独立无协调关系运行的优势。

由于信息通信技术的发展以及需求侧管理的迫切要求,越来越多的文献研究分布式的智能电网和能源互联网优化调度方法。文献[15]提出了基于多代理系统的多微电网系统分布式分层控制框架,并建立了基于 JADE 的运行平台。文献[16]针对智能电网中用户存在不同运行目标、不同任务需求的情况,提出了基于非合作博弈的并行分布式需求侧管理调度方法。文献[17]在文献[16]基础上改进了开放电力市场中电价运行机制、优化求解模型以及智能负载的运行管理模型。文献[18]研究包含电动汽车的智能电网用户的分布式需求管理调度模型。文献[19]提出了一种基于重复博弈的能源互联网运营交易机制,以实现各能源发电商的发电量协同博弈。文献[20]提出了一种基于主从博弈的分布式优化调度策略以实现包含多微电网的智能电网系统的协调运行。但以上文献考虑的都是精确预测情况下的运行调度方案,没有考虑可再生能源输出具有随机性、间歇性与不确定性影响。

文献[21]提出了基于风险分析的多微电网日前随机规划的半分布式调度架构,在一定程度上降低了可再生能源预测不确定性的影响。文献[22]在文献[21]基础上,将微电网需求分为确定与不确定两部分,提出了一种适应性调度规划方法。文献[23]研究了包含多个微电网的配电系统优化调度问题,提出了一种双层博弈的分布式随机优化调度模型。以上文献尽管考虑了预测不确定性的影响,并引入了随机规划思想以降低不确定性的影响,但开环调度架构导致了其调度性能随着可再生能源渗透率增高会有较大幅度的下降。

本文在充分考虑需求侧、发电侧各参与方不同利益需求和可再生能源输出不确定性基础上,提出了基于模型预测控制(model predictive control, MPC)的能源互联网系统并行分布式优化调度方法。引入主从博弈模型分析能源互联网系统中需求侧与发

电侧间的博弈、各用户间的博弈等问题。所提出的并行分布式求解方法使得各用户不需要将自己的具体运行计划发送给其他用户,降低了各用户隐私泄露的风险,减少了对通信和信息处理的需求。同时,引入的迭代惩罚函数保证了各用户在博弈过程中不会随意、大幅度调整调度计划,加快了分布式优化方法的收敛速度。

1 能源互联网系统描述

本文研究的开放电力市场能源互联网系统如图1所示。主要包括以下几个部分:能源互联网系统运行调度中心、发电侧管控制中心、需求侧管控制中心、各发电企业(包含发电机组及企业所属储能系统)和能源局域网系统(包括独立用户)。

各能源局域网中可能包含分布式可控电源(小型柴油发电机组、微型燃气轮机等)、风力发电机组、光伏发电系统、电池储能系统、电动汽车、各种智能负载(功率可调负载、运行时间可调负载和功率与运行时间均可调负载等)等设备。它们都在能量路由器^[4-5](能源互联网中进行控制与管理的信息物理设备,其功能融合了能量管理系统(energy management system, EMS)与电力电子调频稳压等)的统一调度下协调运行。

由于大型发电厂博弈优化以确定最优发电计划与发电厂竞价方面的研究内容已经较为丰富^[24-25],研究成果较为成熟。因此本文不再考虑发电侧的博弈定价问题,主要集中于需求侧各能源局域网间博弈以及需求侧与发电侧间的博弈。同时,由于本文主要进行的是较高层次的能量管理与优化调度,因此假定能源互联网系统内各节点电压稳定,且线路间没有传输损耗。

2 基于主从博弈的能源互联网系统分布式能量管理模型

2.1 能源互联网优化调度主从博弈模型描述

在能源互联网智能能量管理模型中涉及多个决策主体,这些决策主体的地位不尽相同,其中部分策略需要提前给出以作为其余决策问题的已知条件的这类博弈问题称为主从博弈^[26],又称为 Stackelberg 博弈^[27],如图2所示。

根据主从博弈的定义,将上层参与者称为 Leader 层(即发电企业),下层参与者称为 Follower 层(即用户)。上/下层内部参与者之间可以同时决策,形成 Nash 博弈,而 Leader 层与 Follower 层之

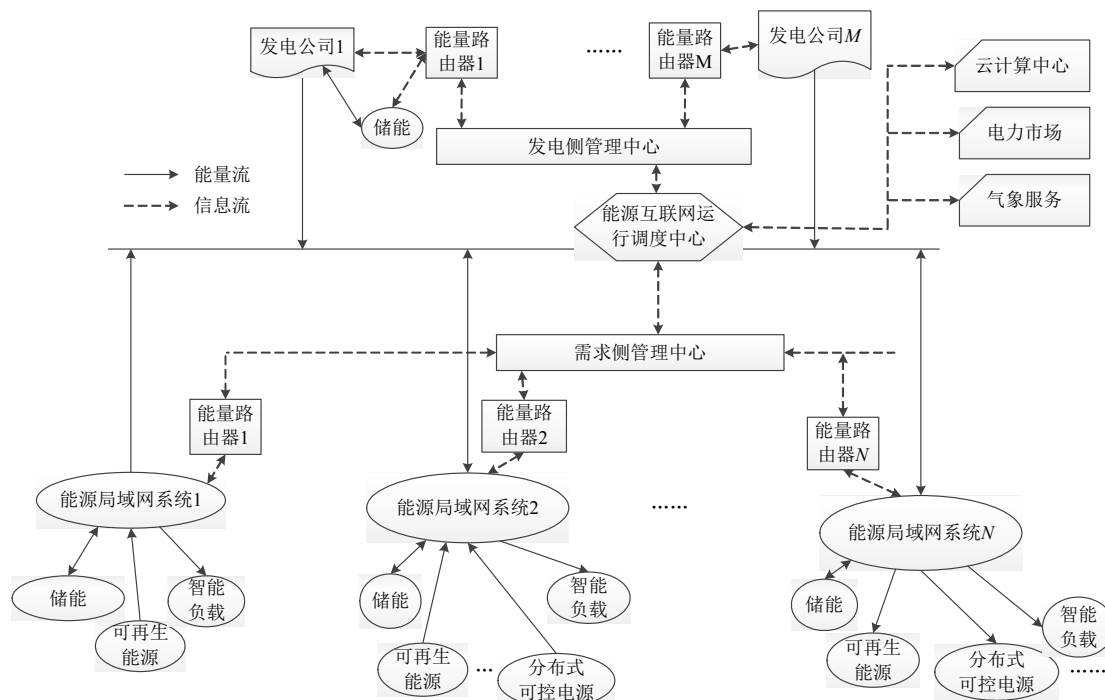


图 1 能源互联网系统结构框图

Fig. 1 Schematic of the energy local network

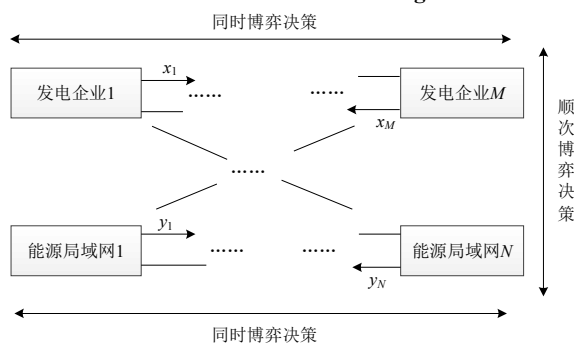


图 2 能源互联网主从博弈架构

Fig. 2 Structure of the Hierarchal Game for energy internet

间形成 Stackelberg 博弈。Follower 层的博弈决策结果作为 Leader 层博弈问题的约束条件。由于本文假设 Leader 只有一个发电企业，因此不考虑 Leader 层的博弈问题，仅考虑发电企业的最大化收益优化问题。

2.2 系统博弈决策模型

由于能源互联网系统能量管理模型是一个 Stackelberg 博弈，系统博弈决策包括 3 个子决策，即：用户侧内部博弈模型、发电侧内部博弈模型及发电侧与用户侧的博弈模型。但由于大型发电厂博弈优化研究已经较为丰富，本文暂时不考虑发电侧内部博弈问题，而是考虑发电企业与发电侧储能系统间的联合运行问题。因此，本文的能源互联网系统博弈决策模型包括两个子决策：即用户侧内部博弈模型及发电侧与用户侧的博弈模型。下面将对这

两个博弈模型分别进行描述：

2.2.1 用户侧内部博弈模型

1) 参与者。

如图 1 所示，参与者主要有用户侧的 N 个能源局域网。

2) 策略。

各能源局域网在各个时段 t 的购电功率 $P_{i,g}(t)$ 或卖电功率 $P_{i,gO}(t)$ 。购/卖电行为 $\delta_{i,g}(t)/\delta_{i,gO}(t)$ 及其功率受各能源局域网内所有可控单元配置的影响。

3) 收益。

能源局域网 i 在第 k 次系统博弈迭代的 t 时段收益可以用其运行成本 $C_i^k(t)$ 表示。成本越小，可以理解收益越大。

2.2.2 发电侧与用户侧的博弈

1) 参与者。

如图 1 所示，参与者主要有两个，即：发电侧能量管理中心及需求侧能量管理中心。

2) 策略。

发电侧管理中心的策略为发电企业的供电量 $P_u(t)$ ，包含发电企业机组发电功率 $P_{u,G}(t)$ 、储能系统运行功率(包含充电功率 $P_{u,BESSc}(t)$ 与放电功率 $P_{u,BESSd}(t)$)两部分。需求侧管理中心的策略为总的购电量，即各个能源局域网的购/卖电功率的和。根据系统供需平衡要求，任何时刻发电企业的供电功率都应等于需求侧总的购电功率。

3) 收益。

发电侧在第 k 次系统博弈迭代的 t 时段的收益可表示为其发电净利润 $C_u^k(t)$ ；与用户侧内部博弈模型同理，需求侧在第 k 次系统博弈迭代的 t 时段的收益可表示为总的运行成本 $\sum_{i=1}^N C_i^k(t)$ 。

需要说明的是，第 k 次系统博弈迭代是指第 k 次发电侧与用户侧的博弈，而系统博弈是建立在用户侧内部博弈完成的情况下的。

2.3 能源局域网用户的能量管理模型

由于能源互联网系统能量管理博弈模型中无论是在用户侧内部博弈模型还是发电侧与用户侧博弈模型都涉及到能源局域网的能量管理模型，因此有必要先建立各能源局域网的能量管理模型。

为了使所建立的能源局域网能量管理模型更具普适性，选择对一典型的能源局域网 i 进行能量管理建模。此能源局域网包含各种智能负载、储能设备及可再生能源发电设备，并且同一时刻的能源局域网购电电价、卖电电价有所差异。尽管没有单独建立的电动汽车模型，但电动汽车的几种工作模式可以用负载模型或储能模型表示。

2.3.1 智能负载模型

能源互联网中的智能负载主要包括以下 4 类^[7,16]：关键负载、功率可调负载、运行时间可调负载和运行时间与功率皆可调负载。下面将针对以上四种负载分类，分别建立能量管理模型。

对于能源局域网 i 的关键负载，第 k 次系统博弈迭代的时段 t 其负荷功率 $l_{i,b}^k(t)$ 和运行时间都不可调，但由于其运行功率存在一定的波动性与不确定性，为保证系统安全，要求 $l_{i,b}^k(t)$ 时刻都在额定功率 $l_{i,b}^{\max}$ 范围内运行。

$$0 \leq l_{i,b}^k(t) \leq l_{i,b}^{\max} \quad (1)$$

对于能源局域网 i 的功率可调负载，第 k 次系统博弈迭代的时段 t 其运行功率 $l_{i,f}^k(t)$ 不能高于其额定功率 $l_{i,f}^{\max}$ 。由于其功率可调，为保证设备的正常运行也要求其切负荷率 $\theta_{i,f}^k(t)$ 不能高于最大切负荷率 $\theta_{i,f}^{\max}$ 。

$$0 \leq \theta_{i,f}^k(t) \leq \theta_{i,f}^{\max}, \quad f \in F_i \quad (2)$$

$$0 \leq l_{i,f}^k(t) \leq l_{i,f}^{\max}, \quad f \in F_i \quad (3)$$

式中 F_i 表示能源局域网 i 内运行功率可调负载集合。

式(2)、(3)分别为功率可调负载切负荷率和运行

功率约束。

对于能源局域网 i 的某一运行时间可调负载设备 a ，在第 k 次系统博弈迭代中，需要保证其启动时间在最早启动时间 $T_{i,a}^{\text{start}}$ 之后，停止时间在最晚停止时间 $T_{i,a}^{\text{end}}$ 之前，同时需要保证设备一旦启动之后就不断运行直至任务完成。

$$\sum_{T_{i,a}^{\text{start}}}^{T_{i,a}^{\text{end}}} \delta_{i,a}^k(t) = T_{i,a}, \quad a \in A_i, t \in [T_{i,a}^{\text{start}}, T_{i,a}^{\text{end}} - T_{i,a}] \quad (4)$$

$$\sum_{\tau_{i,a}=t}^{T_{i,a}+t-1} \delta_{i,a}(\tau_{i,a}) \geq T_{i,a}[\delta_{i,a}(t) - \delta_{i,a}(t-1)] \quad (5)$$

式中： A_i 表示能源局域网 i 内运行时间可调负载集合； $\delta_{i,a}^k(t)$ 表示能源局域网 i 的时间可调负载设备 a 在第 k 次系统博弈迭代的运行状态，为布尔变量 (0/1)； $\delta_{i,a}^k(t)=1$ 表示负载 a 处于运行状态，反之 $\delta_{i,a}^k(t)=0$ 表示负载 a 处于停止状态； $T_{i,a}$ 表示可调负载 a 完成任务所需的运行时间； $\tau_{i,a}$ 为一辅助参数，以更好表示可调度负载 a 的运行约束。

式(4)为运行时间可调负载设备 a 的运行时段约束，式(5)为可调负载设备 a 运行过程约束，即一旦启动就必须一直运行到任务完成。

对于能源局域网 i 的某一运行时间与功率皆可调的负载设备 b ，不仅可以在最早启动时间 $T_{i,b}^{\text{start}}$ 与最晚停止时间 $T_{i,b}^{\text{end}}$ 之间调节运行时间，还可在最小功率 $l_{i,b}^{\min}$ 与最大功率 $l_{i,b}^{\max}$ 之间调节其运行功率 $l_{i,b}^k(t)$ ，但需要保证在其运行结束时总的能量消耗 $E_{i,b}$ 。

$$l_{i,b}^{\min} \delta_{i,b}^k(t) \leq l_{i,b}^k(t) \leq l_{i,b}^{\max} \delta_{i,b}^k(t), \quad b \in B_i \quad (6)$$

$$\sum_{\tau_{i,b}=t}^{T_{i,b}+t-1} l_{i,b}^k(\tau_{i,b}) \Delta t = E_{i,b}, \quad b \in B_i, t \in [T_{i,b}^{\text{start}}, T_{i,b}^{\text{end}} - T_{i,b}] \quad (7)$$

$$\sum_{\tau_{i,b}=t}^{T_{i,b}+t-1} \delta_{i,b}^k(\tau_{i,b}) \geq T_{i,b}[\delta_{i,b}^k(t) - \delta_{i,b}^k(t-1)] \quad (8)$$

式中： B_i 表示能源局域网 i 内运行时间与功率皆可调负载的集合； $\delta_{i,b}^k(t)$ 表示能源局域网 i 的可调负载设备 b 在第 k 次系统博弈迭代的 t 时段运行状态 (0/1)； $\tau_{i,b}$ 为一辅助参数，以更好表示可调度负载设备 b 的运行约束。

式(6)为可调负载 b 的运行功率约束，即一旦负载开始运行，其功率必须满足相关条件；式(7)为可调负载 b 的总运行时间约束，式(8)为可调负载 b 运行过程约束，即一旦启动就必须一直运行。

综上，能源局域网 i 内智能负载在第 k 次系统

博弈迭代的 t 时段总的功率需求 $l_i^k(t)$ 为:

$$l_i^k(t) = l_{i,B}^k(t) + \sum_{f=1}^{F_i} l_{i,f}^k(t)[1 - \theta_{i,f}^k(t)] + \sum_{a=1}^{A_i} l_{i,a}^k(t) + \sum_{b=1}^{B_i} l_{i,b}^k(t) \quad (9)$$

式中 F_i 、 A_i 和 B_i 分别表示能源局域网 i 内功率可调节负载、运行时间可调节负载以及运行时间与功率皆可调节负载的数量。

2.3.2 能源局域网与外部电网功率交互模型

开放电力市场中, 为了激励需求侧用户更高效的实现本地能源的本地利用, 对用户在同一时刻的买电与卖电价格差异化。而局域网用户间的购电、卖电电价会与系统电价保持一致^[28]。因此, 为了充分描述差异化电价模式下能源局域网 i 在第 k 次系统博弈迭代的 t 时段买电功率 $P_{i,gl}^k(t)$ 、卖电功率 $P_{i,go}^k(t)$ 的变化, 有必要建立单独的能源局域网与外部电网的功率交互模型。

$$0 \leq P_{i,gl}^k(t) \leq P_{i,gl}^{\max} \delta_{i,gl}^k(t) \quad (10)$$

$$0 \leq P_{i,go}^k(t) \leq P_{i,go}^{\max} \delta_{i,go}^k(t) \quad (11)$$

$$\delta_{i,gl}^k(t) + \delta_{i,go}^k(t) \leq 1 \quad (12)$$

式中: $P_{i,gl}^{\max}$ 、 $P_{i,go}^{\max}$ 分别表示能源局域网 i 的最大购电功率与最大卖电功率, 一般情况下 $P_{i,gl}^{\max} = P_{i,go}^{\max}$; $\delta_{i,gl}^k(t)$ 、 $\delta_{i,go}^k(t)$ 分别表示能源局域网 i 的购电、卖电行为状态, 均为布尔变量(0/1)。

式(10)、(11)分别表示能源局域网 i 的购电行为与卖电行为约束, 式(12)能源局域网 i 与外部电网交互运行约束, 即能源局域网在同一时刻不能与外部电网同时出现买电与卖电行为。

2.3.3 储能系统模型

$$E_{x,ESS}(t+1) = E_{x,ESS}(t) + \eta_{x,c} P_{x,ESSc}(t) \Delta t - 1 / \eta_{x,d} P_{x,ESSd}(t) \Delta t - \varepsilon_x \quad (13)$$

$$E_{x,ESS}^{\min} \leq E_{x,ESS}(t+1) \leq E_{x,ESS}^{\max} \quad (14)$$

$$\delta_{x,ESSc}(t) P_{x,ESSc}^{\min} \leq P_{x,ESSc}(t) \leq \delta_{x,ESSc}(t) P_{x,ESSc}^{\max} \quad (15)$$

$$\delta_{x,ESSd}(t) P_{x,ESSd}^{\min} \leq P_{x,ESSd}(t) \leq \delta_{x,ESSd}(t) P_{x,ESSd}^{\max} \quad (16)$$

$$\delta_{x,ESSc}(t) + \delta_{x,ESSd}(t) \leq 1 \quad (17)$$

式中: $x \in \{u, i\}$, 即这一模型既适合于能源局域网 i 内的储能系统, 也适合于发电企业的储能系统; $E_{x,ESS}(t)$ 为储能 x 在时段 t 的容量水平; $P_{x,ESSc}(t)$ 、 $P_{x,ESSd}(t)$ 分别表示储能 x 在时段 t 的充电与放电功率; $\eta_{x,c}$ 、

$\eta_{x,d}$ 分别表示储能 x 的充电与放电效率; ε_x 为储能的自放电率; Δt 为每一时段的时长。 $P_{x,ESSc}^{\min}$ 、 $P_{x,ESSc}^{\max}$ 分别表示储能 x 的最小、最大充电功率; $P_{x,ESSd}^{\min}$ 、 $P_{x,ESSd}^{\max}$ 分别表示储能 x 的最小、最大放电功率; $\delta_{x,ESSc}(t)$ 、 $\delta_{x,ESSd}(t)$ 分别表示储能 x 在时段 t 的充电、放电运行状态(0/1)。

式(13)为储能 x 的能量动态变化模型, 式(14)为储能 x 的容量变化约束模型, 式(15)、(16)分别为储能 x 的充电、放电功率约束模型。式(17)为储能 x 的运行状态约束模型, 即储能 x 不能在时段 t 同时进行充电与放电。

2.3.4 可再生能源输出约束模型

在优化调度模型中要求能源局域网 i 在 t 时段的光伏输出 $P_{i,pv}(t)$ 、风机输出 $P_{i,wind}(t)$ 都应在其额定运行范围之内。

$$0 \leq P_{i,pv}(t) \leq P_{i,pv}^{\max} \quad (18)$$

$$0 \leq P_{i,wind}(t) \leq P_{i,wind}^{\max} \quad (19)$$

式中 $P_{i,pv}^{\max}$ 、 $P_{i,wind}^{\max}$ 分别表示能源局域网 i 中光伏与风机额定容量。

2.3.5 能源局域网系统供需平衡约束模型

能源局域网 i 优化运行的前提是其内部的供需平衡时刻得到满足。即:

$$P_{i,gl}(t) - P_{i,go}(t) = l_i(t) - P_{i,pv}(t) - P_{i,wind}(t) + P_{i,ESSc}(t) - P_{i,ESSd}(t) \quad (20)$$

2.4 发电侧发电企业能量管理模型

2.4.1 发电机组运行模型

作为能源互联网系统的主电源, 发电机组在 t 时段的出力能力 $P_{u,G}(t)$ 需要满足发电侧用户的用能需求。

$$P_{u,G}^{\min} \leq P_{u,G}(t) \leq P_{u,G}^{\max} \quad (21)$$

式中: $P_{u,G}^{\min}$ 、 $P_{u,G}^{\max}$ 分别为发电机组的最小、最大输出功率, $P_{u,G}^{\min}$ 需要小于用户侧的最小用能需求, $P_{u,G}^{\max}$ 需要大于用户侧的最大用能需求。

本文采用文献[16]所示的简化电力市场电价模型。第 k 次博弈迭代 t 时段的基础电价 $\text{price}(t)^k$ 表示为发电机组发电成本与输出功率的偏微分函数^[17]。

$$\text{price}(t)^k = \partial C_{u,G}^k(t) / \partial P_{u,G}^k(t) \quad (22)$$

发电机组在第 k 次博弈迭代的 t 时段发电成本 $C_{u,G}^k(t)$ 为:

$$C_u^k(t) = a_{u,G} [P_{u,G}^k(t)]^2 + b_{u,G} P_{u,G}^k(t) \quad (23)$$

式中: $a_{u,G}$ 、 $b_{u,G}$ 分别为发电机组的二次、一次燃料成本系数。

根据投入产出模型, 发电企业的卖电价格 $p_{i,b}^k(t)$ 会比基础电价 $\text{price}(t)^k$ 稍高, 同时为了保证多电能源局域网用户的权益, 多电能源局域网的卖电电价 $p_{i,s}^k(t)$ 应该与此时的基础电价 $\text{price}(t)^k$ 相当。即:

$$p_{i,b}^k(t) = \rho_{i,b}(t) \text{price}(t)^k \quad (24)$$

$$p_{i,s}^k(t) = \rho_{i,s}(t) \text{price}(t)^k \quad (25)$$

式中: $\rho_{i,b}(t)$ 、 $\rho_{i,s}(t)$ 分别表示能源局域网 i 在时段 t 的买电、卖电价格因子, 且 $\rho_{i,b}(t) \geq 1 \geq \rho_{i,s}(t)$ 。

由于发电侧发电企业还拥有储能系统, 因此发电侧在 t 时段的实际供电功率 $P_u(t)$ 应表示为:

$$P_u(t) = P_{u,G}(t) - P_{u,BESSc}(t) + P_{u,BESSd}(t) \quad (26)$$

根据实际的供电系统, 要求 $P_u(t) \geq 0$ 。

2.4.2 系统供需平衡约束模型

在能源互联网优化调度模型中, 在任意时段 t 都需要满足需求侧与发电侧的供需平衡。

$$P_u(t) = \sum_{i=1}^N P_{i,gl}(t) - \sum_{i=1}^N P_{i,go}(t) \quad (27)$$

2.5 系统博弈收益博弈均衡

设计博弈模型时最关注的就是各决策者的收益以及博弈模型是否能够达到均衡。

2.5.1 需求侧能源局域网收益

第 k 次系统博弈迭代时需求侧能源局域网用户 i 在 t 时段的收益可表示为式(28)。

$C_i^k(t)$ 主要由以下几个部分构成: 能源局域网购电费用与卖电收益的差值, 储能运行费用, 功率与时间皆可调负载需求响应成本, 功率可调负载需求响应成本和运行时间可调负载需求响应成本。他们分别对应式(28)的每一行。

$$\left\{ \begin{aligned} C_i^k(t) &= p_{i,b}^k(t) P_{i,gl}^k(t) \Delta t - p_{i,s}^k(t) P_{i,go}^k(t) \Delta t - \\ &C_{i,BESS}^{O\&M} [P_{i,ESSc}^k(t) + P_{i,ESSd}^k(t)] + \sum_{b=1}^{B_i} \{c_{i,b}^t [\delta_{i,b}^k(t) - \\ &\delta_{i,b}^{base}(t)]^2 + c_{i,b}^p [l_{i,b}^k(t) - l_{i,b}^{base}(t)] \Delta t\} + \\ &\sum_{f=1}^{F_i} l_{i,f}(t) \theta_{i,f}^k(t) c_{i,f}^{curt} \Delta t + \sum_{a=1}^{A_i} c_{i,a}^{sf} [\delta_{i,a}^k(t) - \delta_{i,a}^{base}(t)]^2 \\ &\text{满足式(1)—(20)} \end{aligned} \right. \quad (28)$$

式中: $\delta_{i,b}^{base}(t)$ 、 $l_{i,b}^{base}(t)$ 分别为无优化情况下运行时间与功率皆可调负载设备 b 在时段 t 的运行状态(0/1)及运行功率; $\delta_{i,a}^{base}(t)$ 为无优化情况下运行时间

可调负载设备 a 在时段 t 的运行状态; $C_{i,BESS}^{O\&M}$ 为储能的运行维护成本因子; $c_{i,b}^t$ 、 $c_{i,b}^p$ 分别为可调负载设备 b 运行延迟和功率偏移情况下的惩罚成本因子; $c_{i,f}^{curt}$ 为功率可调负载 f 切负荷的费用惩罚因子; $c_{i,a}^{sf}$ 为可调度负载 a 运行延迟的惩罚成本因子。

2.5.2 发电侧发电企业收益

第 k 次系统博弈迭代时发电企业的收益可表示为:

$$\left\{ \begin{aligned} C_u^k(t) &= p_{i,b}^k(t) \sum_{i=1}^N P_{i,gl}^k(t) - p_{i,s}^k(t) \sum_{i=1}^N P_{i,go}^k(t) - \\ &C_u^k [P_{u,G}^k(t)] - C_{u,ESS}^{O\&M} [P_{u,ESSc}(t) + P_{u,ESSd}(t)] \\ &\text{满足式(21)及(24)} \end{aligned} \right. \quad (29)$$

式中: $C_{u,ESS}^{O\&M}$ 为发电企业储能的运行维护成本因子; N 为需求侧能源局域网用户的数量。

$C_u^k(t)$ 主要由两个部分组成, 即: 发电企业售电总收益(包括卖电收益与买电成本的差值)与发电企业总的运行成本(包括发电机组运行成本与发电企业储能系统运行成本之和)。

2.5.3 博弈均衡存在性

根据博弈均衡的定义^[29], 当各参与者都无法单独改变自身策略以获取更高收益时, 博弈模型达到均衡。即:

$$P(y_i^*, y_{-i}^*) \geq P(y_i, y_{-i}^*) \quad (30)$$

瓦尔拉斯的一般均衡理论^[30]认为价格或价值达成均衡的过程是一致的, 因此价格决定和价值决定是一回事, 且价格理论可以用边际效用价值论为基础。其认为^[31], 当开放市场中存在 X 种资源生产 Y 种商品时, 消费者、企业家和资源所有者能够获得一种收益平衡, 达到平衡时任何一方不可能通过调节自身价格或者产量获得更多收益。其第二关键福利(the second fundamental welfare theory)理论认为, 当此系统达到均衡时, 此时的价格服从边际价值关系。

本文所设计的能源互联网系统博弈优化调度模型满足瓦尔拉斯一般均衡理论中的相关假设条件, 并且博弈中的电价函数满足第二关键福利理论的相关条件约束。因此认为本文所提的博弈模型存在均衡点。

3 基于 MPC 的分布式优化调度模型

上节建立了基于博弈的能源互联网系统能量管理模型并确定了此博弈模型存在博弈均衡。本节将提出并行分布式计算方法求解上节所建立的博

弈优化模型，并构建基于模型预测控制的分布式优化调度模型。之所以为并行分布式计算，与计算机领域的概念有所差异，即所有能源局域网并列运行求解，并且是分布式的运行方式。

3.1 并行分布式求解方法

由于能源互联网系统能量管理模型中，各参与者都想追求自身收益的最大化，因此很难采用集中式的优化求解方法计算出博弈模型的均衡点。本文提出了基于并行分布式的博弈模型求解方法，该方法能够最大化的降低求解模型对通信带宽、数据传输量的要求，并且能够较快的实现博弈均衡。具体求解流程如图 3 所示。

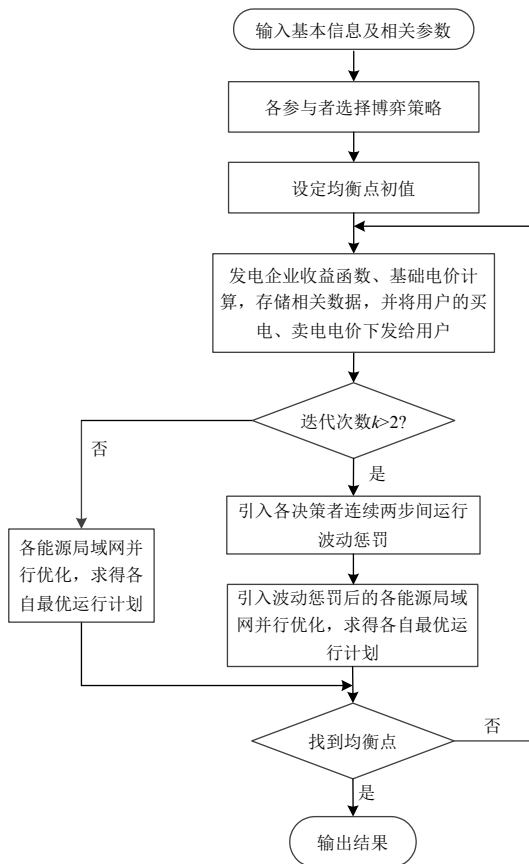


图 3 基于并行分布式的能源互联网能量管理博弈模型求解

Fig. 3 Parallel distributed optimization method for the energy management and games model of energy internet
其具体求解过程如下：

1) 输入能源互联网系统博弈决策模型所需要的原始数据与参数。包括各能源局域网用户可再生能源、储能、智能负载等设备的类型、数量等各参数，以及发电侧发电及企业机组运行参数、电价调节因子等。

2) 根据各参与者的系统配置以及运行目标，构建各参与者的博弈策略集、决策优化函数等。

3) 给定需求侧各能源局域网用户开始博弈时的初始状态值，并上传给能源互联网运行调度中心。

4) 发电侧管理中心根据能源互联网运行调度中心下发的需求值，求解式(29)的发电侧收益目标函数，以确定发电机组出力计划、储能充放电计划以及基础电价，存储相关数据并上传电价情况。

5) 判定系统博弈迭代次数是否大于等于 3 次，若大于 3 次则执行步骤 6，否则执行步骤 8。

6) 计算各用户在连续两步间的运行波动惩罚函数 Φ_i^k ，其表达式如(31)所示。

$$\lambda_i^k \left\{ \sum_{\tau=t+1}^{t+T} \left| P_{i,ESSd}^k(\tau) - P_{i,ESSc}^k(\tau) - [P_{i,ESSd}^{k-1}(\tau) - P_{i,ESSc}^{k-1}(\tau)] + \sum_{i=1}^N \sum_{\tau=t+1}^{t+T} \sum_{a=1}^{A_i} |l_{i,a}^k \delta_{i,a}^k(\tau) - l_{i,a}^{k-1} \delta_{i,a}^{k-1}(\tau)| + \sum_{i=1}^N \sum_{\tau=t+1}^{t+T} \sum_{b=1}^{B_i} |l_{i,b}^k(\tau) - l_{i,b}^{k-1}(\tau)| + \sum_{i=1}^N \sum_{\tau=t+1}^{t+T} \sum_{f=1}^{F_i} |l_{i,f}^k(\tau) - l_{i,f}^{k-1}(\tau)| \right\} \quad (31)$$

式(31)大括号中的第 1 项为所有能源局域网用户 i 的储能系统充放电计划调整量绝对值之和，第 2 项为用户 i 的所有运行时间可调负载的计划调整量绝对值之和，第 3 项为用户 i 的所有运行时间与功率皆可调负载的计划调整量绝对值之和，第 4 项为用户 i 的所有功率可调负载的计划调整量绝对值之和。 λ_i^k 为调整需求侧用户 i 博弈迭代收敛速度的费用因子。

7) 各需求侧能源局域网用户根据能源互联网系统运行调度中心下发的电价信息，各自独立并行的求解式(32)所示的目标函数，以确定其购/卖电计划、负载运行计划、储能充放电计划等，并存储相关数据，同时，需求侧管理中心上传需求侧总的购电计划。

$$\sum_{\tau=t}^{t+T} C_i^k(\tau) + \Phi_i^k \quad (32)$$

式(32)表明，第 k 次各能源局域网用户 i 的最优运行计划不仅由电价决定，也与 $k-1$ 迭代的运行调度计划密切相关。 λ_i^k 值的大小对博弈迭代的收敛速度有较大的影响。若 λ_i^k 值太小，则对运行调度计划波动的惩罚不够大，使得图 3 所示的求解流程可能一直无法实现收敛；若 λ_i^k 值太大，则运行调度计划波动惩罚的作用太明显，又会限制各用户的计划调整，从而增加实现收敛所需的迭代次数。

因此，综合考虑各方面因素，设计 λ_i^k 的取值表

达式为:

$$\lambda_i^k = k\pi_i \cdot \frac{1}{\gamma_i} \cdot \left(\frac{\sum_{\tau=t_x+1}^{t_x+T} \sum_{i=1}^N C_i^k(\tau)}{\sum_{\tau=t_x+1}^{t_x+T} C_i^k(\tau)} \right)^{1/2} \quad (33)$$

式中: π_i 为给定系统参数, 一般为常数; $1/\gamma_i$ 为能源局域网 i 的运行优化优先级, 其值由能源局域网中可再生能源渗透率、能源局域网主要功能(例如医院、学校等)等共同确定。 $1/\gamma_i$ 后面项用于表示能源局域网 i 的用电费用与整个需求侧用电费用的比值, 用于表达能源局域网 i 在优化调度调整中的影响力。

8) 各需求侧能源局域网用户根据能源互联网系统运行调度中心下发的电价信息, 各自独立并行的求解式(28)的目标函数, 以确定其购/卖电计划、负载运行计划、储能充放电计划等, 存储相关数据, 需求侧管理中心上传需求侧总的购电计划。

9) 判断系统博弈是否实现了博弈均衡。若已实现均衡则停止迭代求解并输出结果, 否则返回步骤 4。

判断系统博弈是否实现均衡的方法采用的是比较连续 3 次迭代的各参与者的运行调整值都保持在一定的阈值范围内^[16]。这些运行调整包括: 发电机组、发电侧储能系统、发电侧运行成本、需求侧储能系统、能源局域网可调度负载、能源局域网购成本等。

$$\sum_{\tau=t_x}^{t_x+T} |P_{u,G}^k(\tau) - P_{u,G}^{k-1}(\tau)| \leq \xi_1 \quad (34)$$

$$\sum_{\tau=t_x}^{t_x+T} |P_{u,ESSd}^k(\tau) - P_{u,ESSc}^k(\tau) - [P_{u,ESSd}^{k-1}(\tau) - P_{u,ESSc}^{k-1}(\tau)]| \leq \xi_2 \quad (35)$$

$$\sum_{\tau=t_x}^{t_x+T} |C_u^k(\tau) - C_u^{k-1}(\tau)| \leq \xi_3 \quad (36)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{\tau=t_x}^{t_x+T} |P_{i,ESSd}^k(\tau) - P_{i,ESSc}^k(\tau) - [P_{i,ESSd}^{k-1}(\tau) - P_{i,ESSc}^{k-1}(\tau)]| \leq \xi_4 \quad (37)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{\tau=t_x}^{t_x+T} \sum_{a=1}^{A_i} |l_{i,a}^k \delta_{i,a}^k(\tau) - l_{i,a}^{k-1} \delta_{i,a}^{k-1}(\tau)| \leq \xi_5 \quad (38)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{\tau=t_x}^{t_x+T} \sum_{b=1}^{B_i} |l_{i,b}^k(\tau) - l_{i,b}^{k-1}(\tau)| \leq \xi_6 \quad (39)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{\tau=t_x}^{t_x+T} \sum_{f=1}^{F_i} |l_{i,f}^k(\tau) - l_{i,f}^{k-1}(\tau)| \leq \xi_7 \quad (40)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{\tau=t_x}^{t_x+T} |P_{i,gl}^k(\tau) - P_{i,go}^k(\tau) - [P_{i,gl}^{k-1}(\tau) - P_{i,go}^{k-1}(\tau)]| \leq \xi_8 \quad (41)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{\tau=t_x}^{t_x+T} |C_i^k(\tau) - C_i^{k-1}(\tau)| \leq \xi_9 \quad (42)$$

式中: $t_x \{t+1, t+2\}$, 为一辅助参数, 帮助以简洁的形式表达连续三次迭代的运行计划调整量; ξ_1 、 ξ_2 、 ξ_3 、 ξ_4 、 ξ_5 、 ξ_6 、 ξ_7 、 ξ_8 、 ξ_9 分别为发电机组、发电侧储能系统、发电侧运行成本、需求侧储能系统、运行时间可调负载、运行时间及功率皆可负载、功率可调负载、能源局域网购/卖电计划和能源局域网购成本的均衡阈值, 当式(34)~(42)都满足时, 能源互联网系统博弈模型达到均衡。

式(34)表示发电机组在整个控制域内的出力计划调整量绝对值之和小于均衡阈值 ξ_1 , 式(35)表示发电侧储能系统在整个控制域内的充放电计划调整量绝对值之和小于均衡阈值 ξ_2 , 式(36)表示发电侧运行成本在整个控制域内的调整量绝对值之和小于均衡阈值 ξ_3 , 式(37)表示在整个控制域内需求侧所有用户的储能系统充放电计划调整量绝对值之和小于均衡阈值 ξ_4 , 式(38)表示在整个控制域内需求侧所有用户的运行时间可调负载的计划调整量绝对值之和小于均衡阈值 ξ_5 , 式(39)表示在整个控制域内需求侧所有用户的运行时间与功率皆可负载的计划调整量绝对值之和小于均衡阈值 ξ_6 , 式(40)表示在整个控制域内需求侧所有用户的功率可调负载的计划调整绝对值之和小于均衡阈值 ξ_7 , 式(41)表示在整个控制域内需求侧所有用户的购/卖电计划调整量绝对值之和小于均衡阈值 ξ_8 , 式(42)表示在整个控制域内需求侧所有用户的运行成本调整量绝对值之和小于均衡阈值 ξ_9 。

3.2 基于模型预测控制的分布式优化调度

基于主从博弈的能源互联网系统分布式能量管理模型的性能与可再生能源输出和负载需求预测的精度直接相关。但在实际运行过程中很难做到高精度的可再生能源输出功率的预测, 有必要设计一种能够有效降低预测不确定影响的优化调度方法。

MPC 是由 Richalet 等人在 1978 年提出的一种基于有限时域闭环优化控制的技术^[32], 它易于建模、鲁棒性好, 是复杂系统优化控制的有效途径, 已在制造业、化工和航空航天等领域得到广泛的应用。由于其在处理预测值不确定、约束条件多样性等问题方面具有较为突出的优势, 而在电力系统领域受到越来越多的关注^[31-34]。本节提出了基于模型

预测控制的能源互联网系统优化调度方案，如图 4 所示。

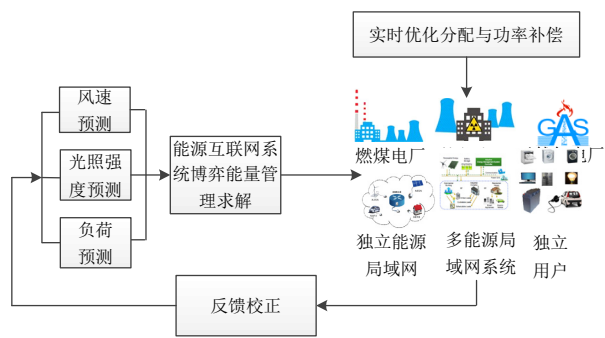


图 4 基于模型预测控制的能源互联网系统优化调度架构
Fig. 4 Structure of the energy internet optimization and scheduling based on model predictive control

其具体流程如下：

1) 在 t 时段运行即将结束时，运行预测模型，获得 $[t+1, \dots, t+T]$ 时段可再生能源输出和负载需求数据。

2) 依据图 3 所示的能源互联网博弈能量管理模型求解方法，确定 $[t+1, \dots, t+T]$ 内各能源局域网用户、发电企业的运行控制序列 $[u^*(t+1|t+1), u^*(t+2|t+1), \dots, u^*(t+T|t+1)]$ 。

其中， $u^*(t+1|t+1)$ 为以预测数据为基础求解的 $t+1$ 时段各可控单元运行计划，其展开形式为：

$$u^*(t+1|t+1) = [P_{u,G}^*(t+1), P_{ESSd}^*(t+1), P_{ESSc}^*(t+1), \delta_a^*(t+1), l_b^*(t+1), l_f^*(t+1), P_{gl}^k(t+1), P_{go}^k(t+1)]$$

由此， $u^*(t+1|t+1) \in R^{1 \times (2N_{EES} + N_f + N_a + N_b + 2N + 1)}$ ， N_{EES} 、 N_f 、 N_a 、 N_b 分别为能源互联网系统中储能系统、功率可调负载、运行时间可调负载、运行时间与功率可调负载的数量。

3) 发电侧与需求侧的所有决策参与者仅执行 $u^*(t+1|t+1)$ ，并且由于预测误差的影响，需要能源互联网运行调度中心参与实时优化分配与功率补偿的协调。

4) 将系统实际运行参数、状态参数、预测数据与实际数据的差值通过反馈校正模块，对能源互联网运行调度的各个模块进行参数调整。

5) 继续执行步骤 1 到 4，直到结束。

4 算例分析

本节将通过算例验证本文所提出的基于模型预测控制的能源互联网系统分布式优化调度方法的可行性与有效性。

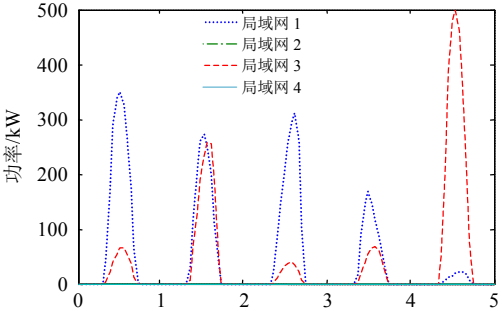
4.1 算例系统描述

本算例的能源互联网系统与图 1 拥有一个含传统发电机组和储能系统的发电企业，以及四个能源局域网。各能源局域网系统额定光伏、风电输出功率，额定交互功率，关键负载最大功率等参数如表 1 所示。光伏、风机和关键负载的历史数据^[38]如图 5 所示。假设每时段的功率可调负荷值为关键负荷值的 50%，能源局域网 1 至 4 的功率可调比率分别为 0.5, 0.4, 0.35, 0.3，对应的切负荷惩罚成本系数分别为 2.5, 1.8, 2.2, 2。设定各能源局域网包含 6

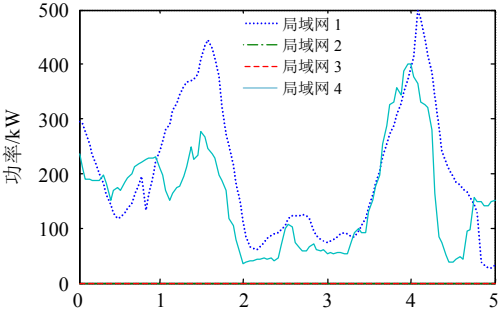
表 1 能源局域网参数

Tab. 1 Parameters for the energy local networks

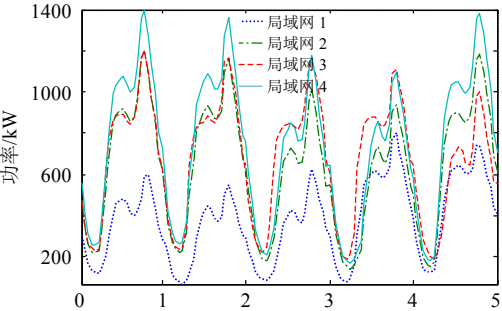
项目	光伏/kW	风电/kW	额定交互/kW	关键负载/kW
能源局域网 1	350	500	1500	800
能源局域网 2	0	0	2000	1200
能源局域网 3	500	0	2000	1200
能源局域网 4	0	400	2000	1400



(a) 光伏



(b) 风电



(c) 关键负载

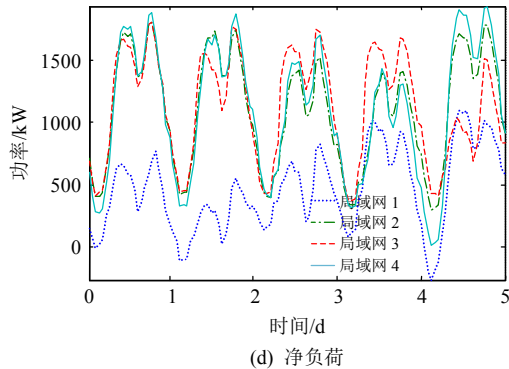


图 5 各能源局域网历史数据

Fig. 5 History data for the energy local networks

种时间可调负载，4 种时间与功率均可调负载，其参数分别如表 2、3 所示。

发电侧与需求侧所拥有的储能系统的参数如表 4 所示，各能源局域网储能系统自放电率为 0.05kW，维护成本为 0.1\$/(kW·h)，发电企业储能系统自放电率为 0.1kW，维护成本为 0.15\$/(kW·h)。且所有的储能系统充电效率与放电效率相同。仿真开始时刻的初始能量都位 0.5 倍额定容量，同时，要求每日初始时刻的储能容量处于初始能量水平

表 2 时间可调负载参数

Tab. 2 Parameters for shift-able loads

项目	功率/kW	运行区间/h	持续时间/h
负载 1	22	15~21	2
负载 2	28	14~23	4
负载 3	45	8~18	6
负载 4	37.5	6~24	8
负载 5	12	2~22	12
负载 6	60	8~22	7

表 3 时间功率皆可调负载参数

Tab. 3 Parameters for the schedulable loads

项目	计划 功率/kW	最大 功率/kW	最小 功率/kW	运行 时段/h	持续 时间/h
负载 1	25	15	35	6~24	9
负载 2	56	15	105	6~16	6
负载 3	20	5	45	2~24	12
负载 4	45	15	105	4~24	15

表 4 储能系统参数

Tab. 4 Parameters for energy storage system

项目	最大充/放 电功率/kW	最小充/放电 功率/kW	额定 容量/kW	最小 容量/kW	充放电 效率
局域网 1	250	5	500	100	0.95
局域网 2	200	8	600	120	0.95
局域网 3	150	6	500	100	0.95
局域网 4	200	4	600	120	0.95
发电企业	660	20	2000	200	0.9

附近 10%范围内。

4.2 算例结果与分析

本节所有实验都是通过 Matlab 2013a 联合 CPLEX 12.0 实现，电脑配置为 Intel(R) Core(TM) i5-3210M CPU@2.5GHz。

本文算例主要进行两个方面的评估验证工作：

- 1) 通过与传统开环日前规划 (day-ahead programming, DAP)调度方法^[7]进行对比，评估本文所提方法在处理预测不确定性方面的性能。DAP 调度方法就是传统电力系统优化调度中所采用的日前规划方法，此方法针对的是无分布式发电资源情况的电力系统，这一电力系统中的主要不确定量是负荷的需求，而负荷的预测相对较为准确。
- 2) 通过与无储能的能源局域网用户的情景进行对比，评估了储能系统在能源互联网系统优化调度中的重要作用。

4.2.1 不同调度策略性能比较

由于本文的重点是研究能量管理模型及其调度方法，本算例采用的是文献[35-37]所提出的风电、光伏和负载预测误差分布模型生成误差数据，并与图 5 所示的历史数据融合产生新的具有误差的预测数据用于预先调度阶段的能量管理。同时，由于预先调度阶段数据存在误差，需要在实时优化与功率补偿阶段进行实时的调整。

1) 预先调度阶段两种策略的性能。

预先调度阶段模型预测控制策略(简称为 MPC 策略)与开环日前规划策略(简称为 DAP 策略)下发电企业预先调度阶段的轨迹如图 6 所示。预期净负荷功率即系统无优化时的发电企业供电功率。优化后发电企业供电功率为机组运行功率与储能充放电功率的和。

图 6 中，预期净负荷功率的峰值为 $6.228 \times 10^3 \text{ kW}$ ，谷值为 487.1015 kW ，平均值功率为 $3.7756 \times 10^3 \text{ kW}$ ，峰均比为 1.65。DAP 策略下发电企业供电的峰值为 $5.61 \times 10^3 \text{ kW}$ ，谷值为 715.14 kW ，平均值功率为 $3.776 \times 10^3 \text{ kW}$ ，峰均比为 1.484。MPC 策略下发电企业供电的峰值为 $5.832 \times 10^3 \text{ kW}$ ，谷值为 468.75 kW ，平均值功率为 $3.766 \times 10^3 \text{ kW}$ ，峰均比为 1.549。因此，仅从发电企业供电功率的峰值、均值和峰均比等角度进行分析，预先调度阶段 DAP 策略的性能相对 MPC 策略有一定优势。

发电企业机组在 MPC 策略下的峰值为 $5.399 \times 10^3 \text{ kW}$ ，谷值为 1.129 kW ，平均值功率为 $3.775 \times 10^3 \text{ kW}$ ，峰均比为 1.430。发电企业机组在 DAP 策略

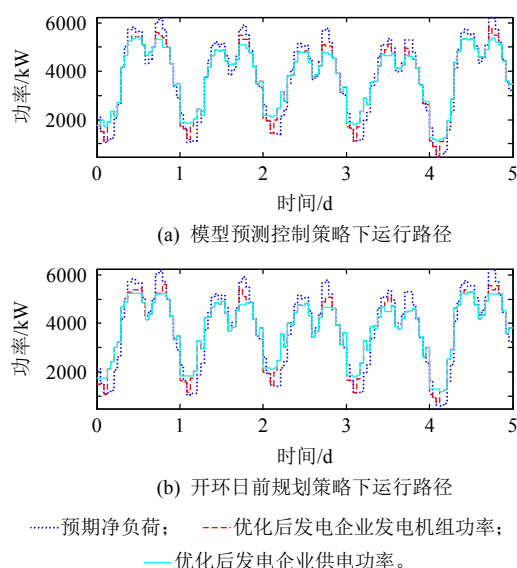


图 6 两种策略下发电企业供电、机组发电功率

Fig. 6 Power supplied by the utility company and

the power output of utility generators for the two strategies 下的峰值为 $5.308 \times 10^3 \text{ kW}$, 谷值为 1.203 kW , 平均值功率为 $3.789 \times 10^3 \text{ kW}$, 峰均比为 1.401。对比两种策略下的发电企业供电功率数据与机组发电数据可知, 在发电侧引入储能系统后, 有以下几个方面的性能提升: 1) 降低机组峰值功率, 提高机组的谷值功率; 2) 机组输出功率更加稳定, 波动性更小, 有效提高了发电机组的利用效率与运行成本; 3) MPC 策略下的机组峰均比值与 DAP 策略下的机组峰均比值的差距比 MPC 策略下的供电峰均比值与 DAP 策略下的供电峰均比值的差距有所减小。

图 7 中, 基于 MPC 策略的基础电价在 47(39.17%)个时段对基于 DAP 策略低, 但最高电价是由 MPC 策略产生的, 且 DAP 策略下的基础电价曲线比 MPC 策略下的基础电价曲线更加平坦。

各能源局域网在 MPC 策略下的预先调度阶段购电成本分别为 2.497×10^4 , 5.882×10^4 , 5.941×10^4 ,

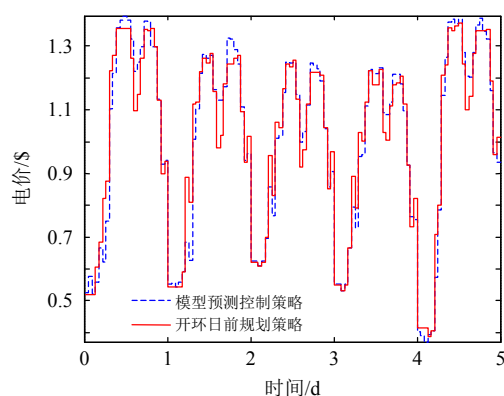


图 7 两种策略在预先调度阶段的基础电价

Fig. 7 Basic price of the two strategies in prescheduling stage

6.03×10^4 。同时, 各能源局域网在 DAP 策略下的预先调度阶段购电成本分别为 2.537×10^4 , 5.855×10^4 , 5.889×10^4 , 5.993×10^4 。对比可知, MPC 策略下能源局域网 1 的购电成本比 DAP 策略下的低, 其他 3 个能源局域网的 MPC 策略下购电成本均比 DAP 策略下的高。但是, 需求侧总的购电成本两种策略下的差异很小, 分别为 2.0346×10^5 和 2.0274×10^5 。

图 8 展示了两种策略下预先调度阶段发电企业储能系统和各能源局域网储能系统的运行轨迹。对 MPC 策略而言, 发电公司储能系统因其容量和功率都较大, 在整个仿真时域内充电 $6.224 \times 10^3 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 放电 $5.121 \times 10^3 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 它们间的差值为储能系统的自放电量和充放电过程中的额外消耗。能源局域网 1 中储能系统共充电 $2.468 \times 10^3 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 放电 $2.246 \times 10^3 \text{ kW} \cdot \text{h}$; 能源局域网 2 中储能系统共充电 $2.753 \times 10^3 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 放电 $2.508 \times 10^3 \text{ kW} \cdot \text{h}$; 能源局域网 3 中储能系统共充电 $1.909 \times 10^3 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 放电 $1.741 \times 10^3 \text{ kW} \cdot \text{h}$; 能源局域网 4 中储能系统共充电 $2.207 \times 10^3 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 放电 $1.958 \times 10^3 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。MPC 策略下预先调度阶段各能源局域网储能系统运行成本分别为 471.352, 526.114, 364.959 和 416.491\$。

对 DAP 策略而言, 发电公司储能系统充放电总量与 MPC 策略下的一样, 但具体轨迹有所区别。能源局域网 1 中储能系统共充电 $2.736 \times 10^3 \text{ kW} \cdot \text{h}$,

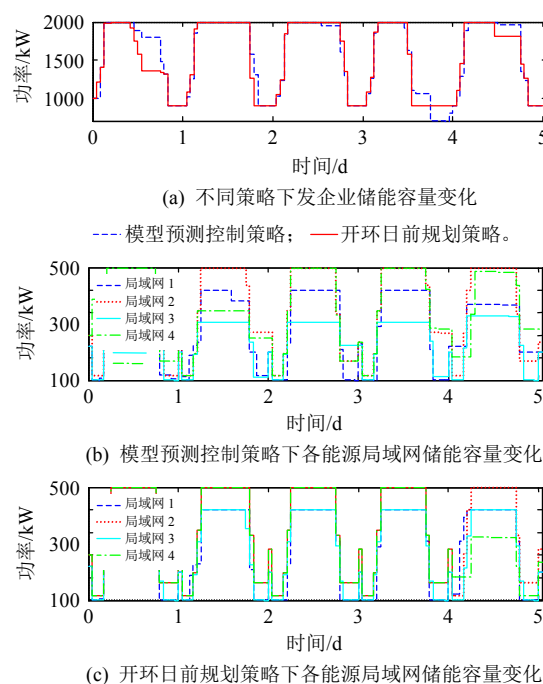


图 8 两种策略下能源互联网系统中各储能的容量变化

Fig. 8 Energy level varying of the energy storage system in the two strategies

放电 $2.487 \times 10^3 \text{ kW} \cdot \text{h}$; 能源局域网 2 中储能系统共充电 $3.31 \times 10^3 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 放电 $2.956 \times 10^3 \text{ kW} \cdot \text{h}$; 能源局域网 3 中储能系统共充电 $2.764 \times 10^3 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 放电 $2.51 \times 10^3 \text{ kW} \cdot \text{h}$; 能源局域网 4 中储能系统共充电 $2.992 \times 10^3 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 放电 $2.723 \times 10^3 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

比较两种策略下储能充放电数据可知, 储能系统的充放电量与其容量有一定关系, 但更重要的是与各能源局域网的系统配置有关。例如能源局域网 2 储能与能源局域网 4 储能的容参数几乎完全一致, 但能源局域网 2 储能充放电量明显比能源局域网 4 储能充放电量。同时, 储能系统的充放电轨迹也与具体的控制策略有关。同一能源局域网的储能在 MPC 策略下与在 DAP 策略下的运行轨迹有一定差异。并且, 发电企业储能和各能源局域网储能的运行轨迹趋势也存在较大变化。发电企业储能系统总是每天先充电再放电, 只有一个充放电循环, 而各能源局域网储能系统一般会先放电再充电, 至少两个充放电循环。

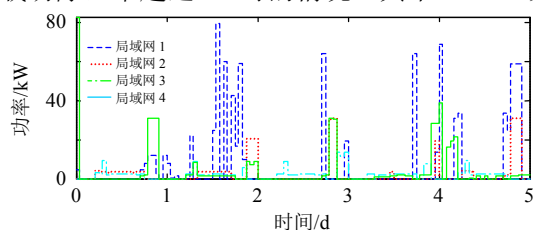
图 9 介绍了两种策略下各能源局域网功率可调负载切除情况。MPC 策略下, 能源局域网 1 共切除负载 $907.86 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 能源局域网 2 共切除负载 $333.476 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 能源局域网 3 共切除负载 $228.781 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 能源局域网 4 共切除负载 $476.128 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。DAP 策略下, 能源局域网 1 共切除负载 $72 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 能源局域网 2 共切除负载 $142 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 能源局域网 3 共切除负载 $0 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 能源局域网 4 共切除负载 $443 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。为排除因系统干扰或求解工具而造成的误差影响, 分析了各能源局域网功率可调负载切除比率超过 1% 时的情况。其中, MPC 策略

下, 能源局域网 1 共切除负载 $19.223 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 能源局域网 2 共切除负载 $57.883 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 能源局域网 3 共切除负载 $0 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 能源局域网 4 共切除负载 $146.387 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。DAP 策略下, 能源局域网 1 共切除负载 $71 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 能源局域网 2 共切除负载 $87.16 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 能源局域网 3 共切除负载 $0 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 能源局域网 4 共切除负载 $182.5 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

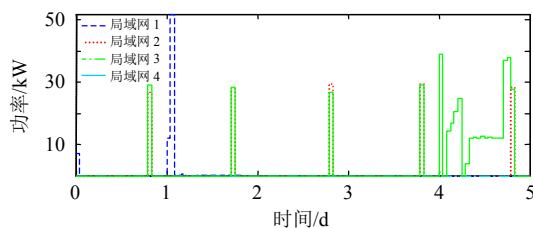
由以上分析可知, MPC 策略下在前后两种情况下的变化更大, 这是由于 MPC 是滚动迭代式的优化方法, 其每个时刻都要执行优化决策、滚动更新也在一定程度上增加了系统随机扰动造成的影响, 特别是优化算法中加入了一定的松弛条件的情况下(本文为设定 CPLEX 求解器允许有 1% 的误差)。

MPC 策略下预先调度阶段各能源局域网切负荷惩罚费用分别为 2.551×10^3 , 0.7045×10^3 , 0.55×10^3 和 0.818×10^3 。DAP 策略下各能源局域网切负荷惩罚费用分别为 87.449 , 0.347×10^3 , 0 和 983×10^3 。由功率可调负载的分析可知, 预先调度阶段开环日前规划策略在降低系统扰动对优化算法影响, 降低切负荷惩罚方面具有一定的优势。

图 10 介绍了两种策略下各能源局域网中时间与功率皆可调负载运行情况。MPC 策略下, 能源局域网 1 中各可调负载偏离期望运行轨迹的功率分别为: 400 、 1.158×10^3 、 2.893×10^3 、 $1.389 \times 10^3 \text{ kW}$, 没有负载延迟启动; 能源局域网 2 中各可调负载偏离期望运行轨迹的功率分别为: 762.88 、 1.577×10^3 、 2.971×10^3 、 $1.435 \times 10^3 \text{ kW}$, 其中负载 1 和负载 2 分



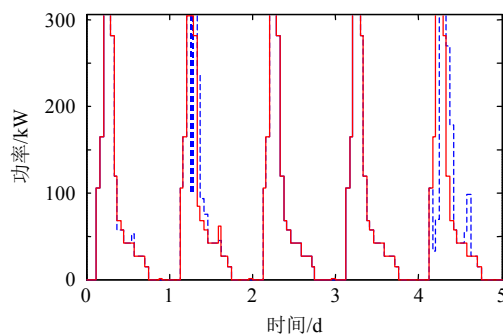
(a) 模型预测控制策略下各能源局域网切负荷功率



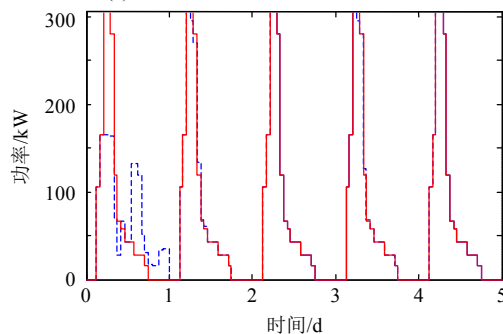
(b) 开环日前规划策略下各能源局域网切负荷功率

图 9 两种策略下各能源局域网的切负荷功率变化

Fig. 9 Curtailed power flexible loads of each energy local network



(a) 能源局域网 1 运行时间与功率可调负载



(b) 能源局域网 2 运行时间与功率可调负载

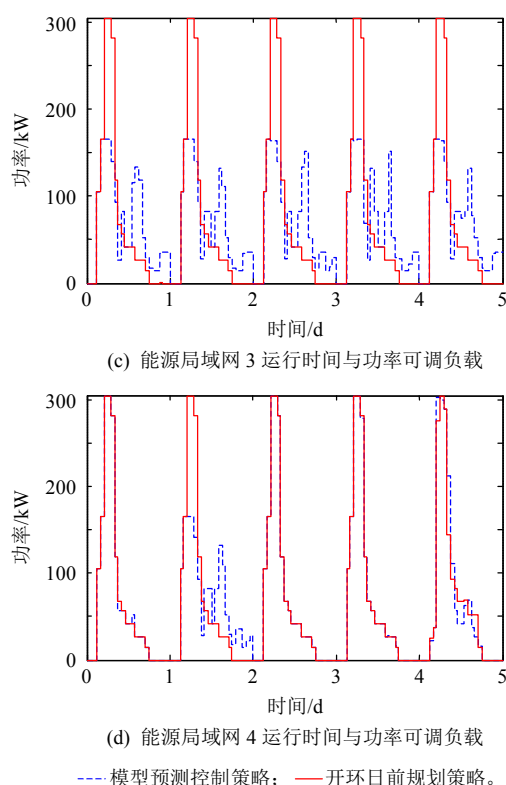


图 10 两种策略下各能源局域网的运行时间与功率皆可调负载运行轨迹

Fig. 10 Operation routines for

the schedulable loads of each energy local network

别在第一天延迟启动 10h 与 5h；能源局域网 3 中，各可调负载偏离期望运行轨迹的功率分别为：2.25、 2.803×10^3 、 2.852×10^3 、 1.428×10^3 kW，其中负载 1 和负载 2 分别在每天延迟启动 10h 与 5h；能源局域网 4 中，各可调负载偏离期望运行轨迹的功率分别为：770、 1.544×10^3 、 2.835×10^3 、 1.391×10^3 kW，其中负载 1 和负载 2 分别在第 2 天延迟启动 10h 与 5h。

DAP 策略下，能源局域网 1 中各可调负载偏离期望运行轨迹的功率分别为：400、 1.23×10^3 kW、 3.0×10^3 、 1.424×10^3 kW，没有负载延迟启动；能源局域网 2 中各可调负载偏离期望运行轨迹的功率分别为：400、 1.23×10^3 、 3.0×10^3 、 1.44×10^3 kW，同样没有负载延迟启动。能源局域网 3 的功率调节量和延迟时间与能源局域网 2 相同；能源局域网 4 中，各可调负载偏离期望运行轨迹的功率分别为：384.66、 1.227×10^3 、 2.75×10^3 、 1.377×10^3 kW，没有负载延迟启动。

MPC 策略下，各能源局域网由于对运行时间与功率可调负载的调节所受到的惩罚分别为：157.86、167.9、264.4\$ 和 225.21\$。DAP 策略下，各能源局域网由于对运行时间与功率可调负载的调节所受到的惩罚分别为：163.69、149.81、172.11\$ 和

204.23\$。由上分析可知，尽管大多数能源局域网的在 DAP 策略下的惩罚比在 MPC 策略下低，但相对 DAP 策略，MPC 策略下的运行时间与功率可调负载发的灵活性展现的更加充分，对电网调度与管理的作用更大。

预先调度阶段 MPC 策略与 DAP 策略下的时间可调负载的运行轨迹完全一致。能源局域网 1 中各负载均没有延迟启动；能源局域网 2 中负载 2 第 1 天延迟启动 4h，负载 4 在第 1、第 2 和第 5 这 3 天分别延迟启动 2h，负载 5 在第 1 天延迟启动 3h；能源局域网 3 中负载 2、负载 4 和负载 5 这 3 个负载每天都分别延迟启动 2h；第 4 个能源局域网中负载 2 和负载 5 分别在第 2 天延迟启动 2h，负载 4 在第 2、4 这 2 天分别延迟启动 2h。

2) 两种策略的实际运行性能。

由于可再生能源输出功率、负载需求无法实现精确预测，尤其是当可再生能源渗透率较高时，可再生能源输出随机性更强，预测精度更低。这就导致了预先优化调度阶段获得的系统调度方案在实际实施过程中会产生一定的偏差，导致 MPC 策略与 DAP 策略都会在实际运行阶段会产生一定的性能退化。由预先调度阶段 MPC 策略与 DAP 策略的性能对比分析可知，两种方案性能相差不大，DAP 策略略微占优，因此哪种方案在实际运行阶段的性能退化较小，其方案就会相对更优。

图 11 介绍了 MPC 策略与 DAP 策略下发发电机组功率输出情况。由图 11 可知，MPC 策略的优化调度方案在预先调度阶段和实时运行阶段的偏差

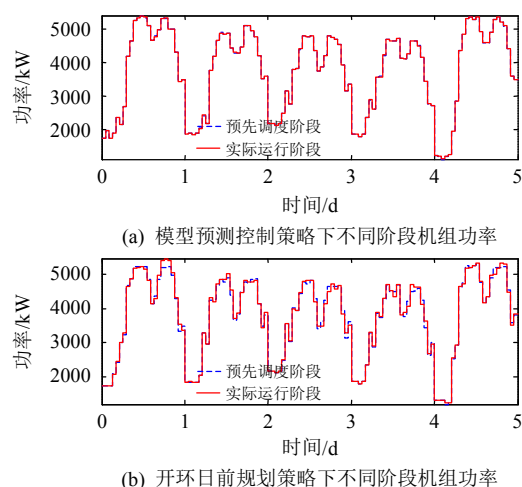


图 11 两种策略在预先调度阶段与实时运行阶段的发电机组输出

Fig. 11 Power output of the utility generators for the two strategies in prescheduling stage and the actual operation stage

较小, 整个仿真时域内需要启用快速响应的机组发电 597.93kW·h, 发电机组需要少发电 291.77kW·h; 与此同时, DAP 策略的优化调度方案由于其开环特性, 难以及时根据最新的系统状态数据和预测数据更新调度计划, 其在预先调度阶段和实时运行阶段的偏差较大, 整个仿真时域内需要启用快速响应的机组发电 $7.966\times10^3\text{kW}\cdot\text{h}$, 发电机组需要少发电 $3.375\times10^3\text{kW}\cdot\text{h}$ 。

综合分析 MPC 策略与 DAP 策略在预先调度阶段与实际运行下的情况可知, 尽管 MPC 策略在预先调度阶段的性能相对 DAP 策略有一定劣势, 但由于其滚动向前、预测模型和反馈校正特性, 使得其在实际运行过程中具有较好的性能。因为实时运行与功率补偿阶段的功率不足需要启动运行成本较高的快速响应机组进行快速补充, 能够及时调整系统优化调度方案的控制策略能在一定程度上降低由于预测误差引起的系统成本增加, 而实时运行与功率补偿阶段的功率多余需要能源互联网系统调度中心的调度其他负载紧急消纳, 这也对能源局域网的实时卖电收益造成了一定影响。

MPC 策略与 DAP 策略下各能源局域网各个阶段的运行成本如表 5 所示。

表 5 两种策略下各能源局域网运行成本分析

Tab. 5 Operation cost of each energy local network under these two strategies

局域网	预测控制规划成本		
	预先调度阶段 成本/(10 ⁴ \$)	实际运行 成本/(10 ⁴ \$)	实时运行阶段 调整成本/\$
1	2.714/2.614	2.739/2.823	161.58/2085.1
2	5.922/5.967	5.936/6.319	147.473/3519.7
3	5.949/5.94	5.97/6.208	212.06/2490.5
4	6.173/6.169	6.1926/6.449	192.88/2804

由表 5 可知, 预先调度阶段 MPC 策略下的各能源局域网运行成本与 DAP 策略下的各能源局域网运行运行成本相当, 差距较小。但由于 MPC 策略在降低预测不确定影响方面的优势, 其在实时运行与调整阶段的成本相对较低, 使得最终的运行成本方面 MPC 策略全面优于 DAP 策略。

4.2.2 储能作用分析

发电企业储能的影响在 4.2.1 节中已经进行了部分讨论, 作用非常明显, 降低了发电机组的运行成本, 提高了发电企业的收益。但由于发电企业储能的运行调度对各能源局域网购电、卖电价格的影响有限, 因此本节在进行储能的作用分析时主要讨

论各能源局域网的储能。同时, 由于本文主要研究的是基于 MPC 的能源互联网系统优化调度方法, 因此本节对储能作用的分析主要针对 MPC 策略。

图 11 介绍了 MPC 策略下需求侧有储能与无储能情况的发电机组功率输出情况。由图 12 可知, 尽管各能源局网系统所拥有的储能系统容量和功率等级较小, 但对系统基础电价却产生较大的影响。有储能情况下基础电价比没有储能情况下的基础电价波动更加平缓, 储能的“负载-电源”双重特性降低了出现尖峰电价的可能性, 对抑制尖峰电价的出现表现较为突出, 同时对抑制低谷电价情况的出现也有一定的作用。无储能情况下的发电公司供电峰值功率为 $6.557\times10^3\text{kW}$, 相对有储能情况有了较大的提高, 谷值为 471.778kW, 均值为 $3.771\times10^3\text{kW}$, 峰均值为 1.739, 也比有储能情况下提高了接近 0.2。

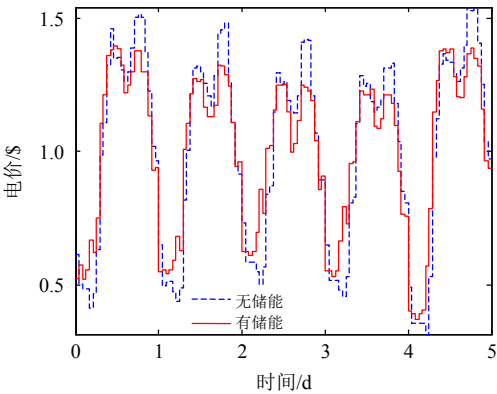


图 12 各能源局域网在有、无储能情况下的基础电价

Fig. 12 Basic electricity prices for the energy local networks with or without energy storage system

各能源局域网在有、无储能情况下的购电/卖电情况如图 13 所示。由图 13 可知, 对各能源局域网而言, 由于没有储能的能量转移作用, 其系统购电/卖电弹性受到了较大的限制。无储能情况下的电价高峰时段各能源局域网的购电功率通常比有储能情况下各能源局域网的购电功率大, 而在电价低谷时段各能源局域网的购电通常比有储能时各能源局域网的购电功率更小。且有储能情况下各能源局域网的购电/卖电功率曲线相对更加平缓, 波动更小。

各能源局域网在有、无储能情况下的运行成本如表 6 所示。由表可知, 尽管储能对各能源局域网运行成本的影响各不相同, 但总体而言, 储能系统的加入降低了各能源局域网的运行成本。之所以能源局域网 1 中有、无储能情况下的运行成本相差比较小, 一方面是由于本身能源局域网 1 中净负荷功率较低, 使得其总的运行成本相对较低, 其内部的

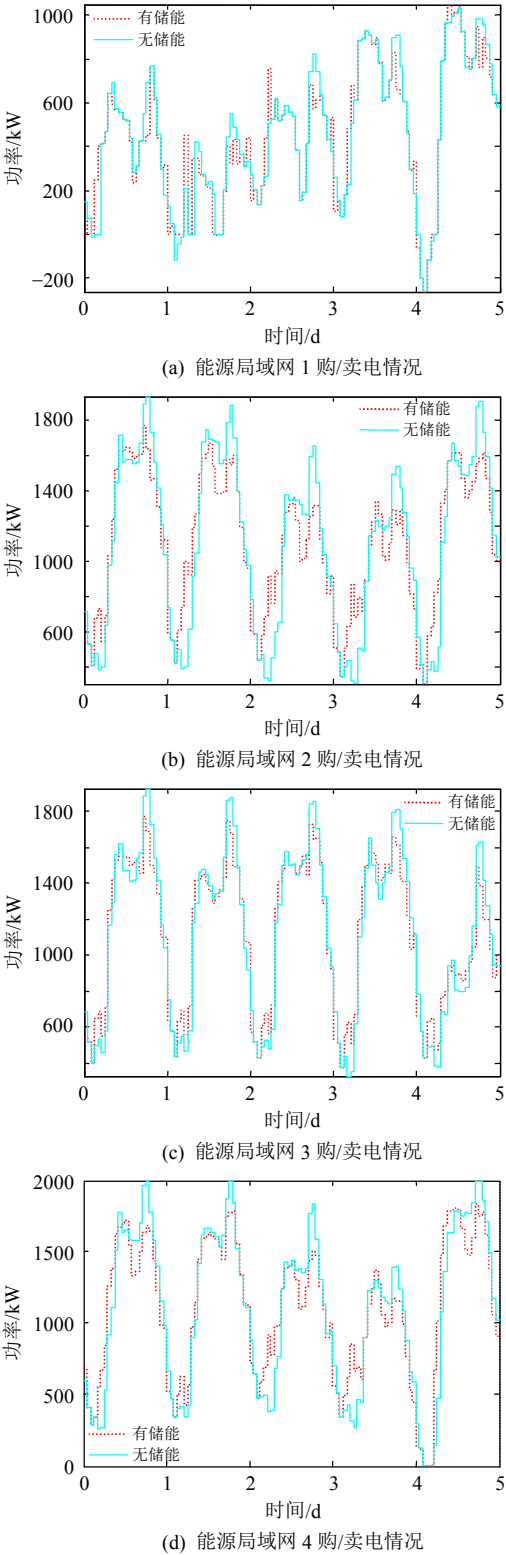


图 13 各能源局域网在有、无储能情况下的购/卖电
Fig. 13 Buying/selling power for the energy local networks with or without energy storage system

智能负载的调节能够有效弥补无储能带来的影响；另一方面是由于能源局域网的净负荷功率较小导致的其在整个能源互联网系统中的议价能力较低，储能能在能源局域网 1 中发挥的能力没有在其他能源局域网那么大。而能源局域网 2 由于没有可再生能

表 6 各能源局域网在有、无储能情况下运行成本分析
Tab. 6 Operation cost of each energy local network with or without energy storage

项目	有储能情况/(10 ⁴ \$)	无储能情况/(10 ⁴ \$)
1	2.739	2.818
2	5.936	6.354
3	5.97	6.244
4	6.1926	6.446

源的接入，且储能容量配置较高，使得有、无储能情况下运行成本的变化较为明显。

以上分析讨论的都是没有储能系统接入的情况下对能源互联网系统带来的负面影响，但储能的“负载-电源”双重特性也会增加能量管理模型优化求解的难度和系统运算量。下面将具体讨论有、无储能情况下的系统优化迭代次数的变化。

图 14 介绍了有、无储能情况下的系统优化迭代次数。由图 14 可知，无储能情况下并行分布式优化算法实现收敛所需的迭代次数在绝大多数情况下都远远小于有储能的情况下所需的迭代次数。

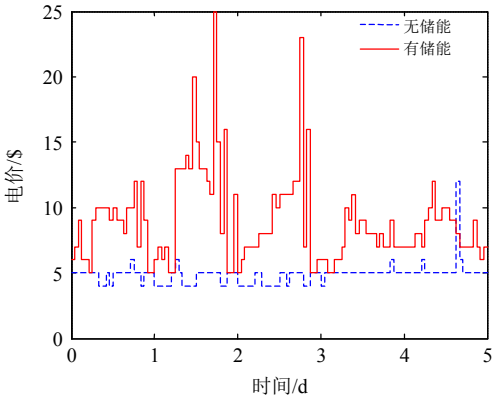


图 14 有、无储能优化算法实现收敛所需的系统迭代次数
Fig. 14 Iterations needed to achieve the optimization equilibrium with or without energy storage system

5 结论

本文介绍了融合主从博弈理论的基于模型预测控制能源互联网系统并行分布式优化调度方法。发电侧、需求侧在主从博弈框架下，通过发电企业内部、需求侧各能源局域网以及发电侧与需求侧之间的协同优化，在满足系统安全性、运行可靠性基础上，实现能源互联网系统的优化运行。

构建了发电企业内部的“源-储”协同优化管理模型，以及需求侧能源局域网考虑需求响应、多种智能负载不同运行特性、储能充放电和购/卖电价格差异的智能能量管理模型。设计的并行分布式求解模型能够在较短时间以较少的运行迭代次数

对能源互联网系统博弈能量管理模型求解,并能有效降低各能源局域网用户隐私泄露的风险。通过与开环日前规划策略的比较验证了本文所提出方法的有效性与可行性。通过与无储能能源局域网运行调度结果的对比,表明储能作用的计算结果逻辑上与实际中的期望保持一致。

参考文献

- [1] 马钊,周孝信,尚宇炜,等. 能源互联网概念、关键技术及发展模式探索[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3014-3022.
Ma Zhao, Zhou Xiaoxin, Shang Yuwei, et al. Exploring the concept, key technologies and development model of energy internet[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3014-3022(in Chinese).
- [2] 查亚兵,张涛,黄卓,等. 能源互联网关键技术分析[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(6): 702-713.
Zha Yabing, Zhang Tao, Huang Zhuo, et al. Analysis of energy internet key technologies[J]. Scientia Sinica: Informationis, 2014, 44(6): 702-713(in Chinese).
- [3] Huang A Q, Crow M L, Heydt G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the energy internet[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 133-148.
- [4] 曹军威,杨明博,张德华,等. 能源互联网—信息与能源的基础设施一体化[J]. 南方电网技术, 2014, 8(4): 1-10.
Cao Junwei, Yang Mingbo, Zhang Dehua, et al. Energy internet: an infrastructure for cyber-energy integration [J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(4): 1-10(in Chinese).
- [5] 张涛,张福兴,张彦. 面向能源互联网的能源管理系统研究[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 146-155.
Zhang Tao, Zhang Fuxing, Zhang Yan. Study on energy management system of energy internet[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 146-155(in Chinese).
- [6] 孙宏斌,郭庆来,潘昭光. 能源互联网: 理念、架构与前沿展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 1-8.
Sun Hongbin, Guo Qinglai, Pan Zhaoguang. Energy internet: concept, architecture and frontier outlook [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 1-8(in Chinese).
- [7] 张彦,张涛,刘亚杰,等. 基于模型预测控制的家居能源局域网最优能量管理研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3656-3666.
Zhang Yan, Zhang Tao, Liu Yajie, et al. Optimal energy management of a residential local energy network based on model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3656-3666(in Chinese).
- [8] 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[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3): 681-691(in Chinese).
- [9] 孙秋野,滕菲,张化光,等. 能源互联网动态协调优化控制体系构建[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3667-3677.
Sun Qiuye, Teng Fei, Zhang Huaguang, et al. Construction of dynamic coordinated optimization control system for energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3667-3677(in Chinese).
- [10] 刘敦楠,曾鸣,黄仁乐,等. 能源互联网的商业模式与市场机制(二)[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3057-3063.
Liu Dunnan, Zeng Ming, Huang Renle, et al. Business models and market mechanisms of E-net(2)[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3057-3063(in Chinese).
- [11] 龚正宇,刘继春,武云霞,等. 含风光储的多微网接入配网的联合调度策略[J]. 可再生能源, 2014, 32(11): 1665-1670.
Gong Zhengyu, Liu Jichun, Wu Yunxia, et al. Joint dispatching strategy for connecting multiple micro-grids with WT/PV/ST to distribution network[J]. Renewable Energy Resources, 2014, 32(11): 1665-1670(in Chinese).
- [12] 何祥兴. 含多微网的配电网优化调度研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
He Xiangxing. Study on the optimal dispatching for distribution network with multi-microgrids[D]. Changsha: Hunan University, 2014(in Chinese).
- [13] 艾欣,许佳佳. 基于互动调度的微网与配电网协调运行模式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 143-149.
Ai Xin, Xu Jiajia. Study on the microgrid and distribution network co-operation model based on interactive scheduling[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 143-149(in Chinese).
- [14] Huber M, Sanger F, Hamacher T. Coordinating smart homes in microgrids: a quantification of benefits[C]// Proceedings of the 2013 4th IEEE/PES Innovative Smart Grid Technologies Europe(ISGT Europe). Lyngby: IEEE, 2013: 1-5.
- [15] 丁明,马凯,毕锐. 基于多代理系统的多微网能量协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 1-8.
Ding Ming, Ma Kai, Bi Rui. Energy coordination control of multi-microgrid based on multi-agent system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 1-8(in Chinese).
- [16] Yang Peng, Chavali P, Gilboa E, et al. Parallel load schedule optimization with renewable distributed generators in smart grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(3): 1431-1441.
- [17] Chavali P, Yang Peng, Nehorai A. A Distributed algorithm

- of appliance scheduling for home energy management system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(1): 282-290.
- [18] Tan Zhao, Yang Peng, Nehorai A. Distributed demand response for plug-in electrical vehicles in the smart grid[C]//Proceedings of the 2013 IEEE 5th International Workshop on Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing(CAMSAP). St. Martin: IEEE, 2013: 468-471.
- [19] 徐鸣飞, 余海涛, 陈辉, 等. 重复博弈在能源互联网运营交易机制中的应用[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3064-3071.
- Xu Mingfei, Yu Haitao, Chen Hui, et al. Application of repeated game theory in operation and transaction mechanism of energy internet[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3064-3071(in Chinese).
- [20] Asimakopoulou G E, Dimeas A L, Hatziaargyriou N D. Leader-follower strategies for energy management of multi-microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4): 1909-1916.
- [21] Fathi M, Bevrani H. Statistical cooperative power dispatching in interconnected microgrids[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(3): 586-593.
- [22] Fathi M, Bevrani H. Adaptive energy consumption scheduling for connected microgrids under demand uncertainty[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1576-1583.
- [23] Wang Zhaoyu, Chen Bokan, Wang Jianhui, et al. Coordinated energy management of networked microgrids in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(1): 45-53.
- [24] 潘虹, 陈奇志, 魏杰, 等. 基于博弈论的发电厂多代理报价系统[J]. 电网技术, 2009, 33(11): 76-82.
- Pan Hong, Chen Qizhi, Wei Jie, et al. A power plant bidding system based on multi-agent and game theory [J]. Power System Technology, 2009, 33(11): 76-82(in Chinese).
- [25] 曾勇红, 王锡凡. 发电厂出力与报价均衡的随机博弈模型[J]. 电网技术, 2006, 30(21): 7-10.
- Zeng Yonghong, Wang Xifan. Stochastic game model of active power-bidding equilibrium of generation companies [J]. Power System Technology, 2006, 30(21): 7-10(in Chinese).
- [26] 梅生伟, 魏韡. 智能电网环境下主从博弈模型及应用实例[J]. 系统科学与数学, 2014, 34(11): 1331-1344.
- Mei Shengwei, Wei Wei. Hierarchal game and its applications in the smart grid[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2014, 34(11): 1331-1344(in Chinese).
- [27] Von Stackelberg H. The theory of the market economy [M]. London, England: William Hodge, 1952.
- [28] 赵敏, 沈沉, 刘锋, 等. 基于博弈论的多微电网系统交易模式研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 848-857.
- Zhao Min, Shen Chen, Liu Feng, et al. A game-theoretic approach to analyzing power trading possibilities in multi-microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 848-857(in Chinese).
- [29] Osborne M J, Rubinstein A. A course in game theory[M]. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1994.
- [30] Li Na, Chen Lijun, Low S H. Optimal demand response based on utility maximization in power networks[C]// Proceedings of 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Detroit, MI, USA: IEEE, 2011: 1-8.
- [31] Weber T A. Oxford handbook on pricing management [M]. New York: Oxford University Press, 2010.
- [32] Richalet J, Rault A, Testud J L, et al. Model predictive heuristic control: applications to industrial processes [J]. Automatica, 1978, 14(5): 413-428.
- [33] Chen Chen, Wang Jianhui, Heo Y, et al. MPC-based appliance scheduling for residential building energy management controller[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(3): 1401-1410.
- [34] Parisio A, Glielmo L. Stochastic model predictive control for economic/environmental operation management of microgrids[C]//Proceedings of 2013 European Control Conference(ECC). Zürich, Switzerland: IEEE, 2013: 2014-2019.
- [35] Arriagada E, López E, Roa C, et al. A Stochastic economic dispatch model with renewable energies considering demand and generation uncertainties[C]// Proceedings of 2013 IEEE Grenoble PowerTech (POWERTECH). Grenoble: IEEE, 2013: 1-6.
- [36] Doherty R, O'Malley M. A new approach to quantify reserve demand in systems with significant installed wind capacity[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 587-595.
- [37] 李丰. 考虑大规模风电接入系统的发电优化调度模型及方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- Li Feng. Study on optimal generation scheduling models and methods of large-scale wind power integrated into power system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013(in Chinese).
- [38] ELIA, Belgium's electricity transmission system operator. Grid data, [EB/OL]. [2014-08-20]. <http://www.elia.be/en/grid-data>.



张彦

收稿日期: 2016-12-05.

作者简介:

张彦(1988), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向为能源互联网智能能量管理、优化调度, 及基于模型预测控制的能源互联网系统分析, zy331214534@126.com.

(责任编辑 李泽荣)

Model Predictive Control Based Distributed Optimization and Scheduling Approach for the Energy Internet

ZHANG YAN¹, ZHANG Tao¹, MENG Fanlin², WANG Rui¹, LIU Yajie¹, GUO Bo¹

(1. National University of Defense Technology; 2. Durham University)

KEY WORDS: energy internet; energy local network; model predictive control; games theory; distributed optimization

Energy Internet (EI) is a complex cyber-physical system which comprises energy system and internet technologies, high speed and high reliability communication technologies, advanced metering infrastructures and smart energy management technologies, and the electricity power system is as the center. The main purpose of EI is to achieve a multi-energy complementary in terms of the energy application and the coordination of “generations-networks-loads-storages”, increase the penetration level of renewable energy resources, reduce the proportion of traditional fossil fuels, enhance the user’s demand side management ability, and deduce the energy using costs.

The EI is a flat and interconnected “generations-networks-loads-storages” system, including multiple energy local networks, independent generation units, independent load units and independent energy storages, as shown in Fig. 1. These individual entities have different owners, different missions and different objectives; and further as rational entities they all want to maximize their own objective. Therefore, the traditional centralized optimization and scheduling method is not suitable for the energy management of EI, a new method which combines distributed technique and hierarchical approach should be introduced. According to the games among the demand side units and generation units, the revenue of the utility companies is maximized and meanwhile the operation costs of users are minimized.

This paper proposes a model predictive control (MPC) based distributed optimization and scheduling method for EI with considering the individual’s objective and forecast uncertainties. A hierarchal games model is introduced to analyze the games among the user side and utility side and the games among the users. A parallel

distributed solving procedure is proposed to reduce the communication burden of the system and deduce the probability of infringing user’s privacy, as shown in Fig.2. Furthermore, the penalty function proposed can reduce the random fluctuation of dispatchable units in consecutive iterations effectively.

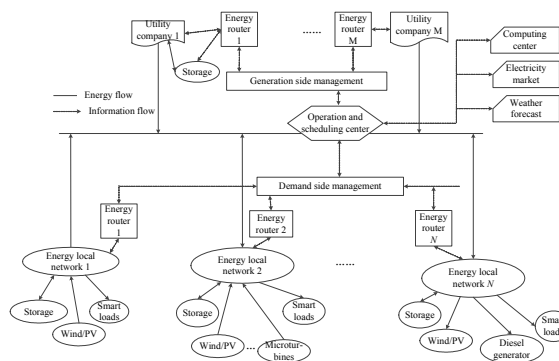


Fig. 1 Schematic of the energy internet

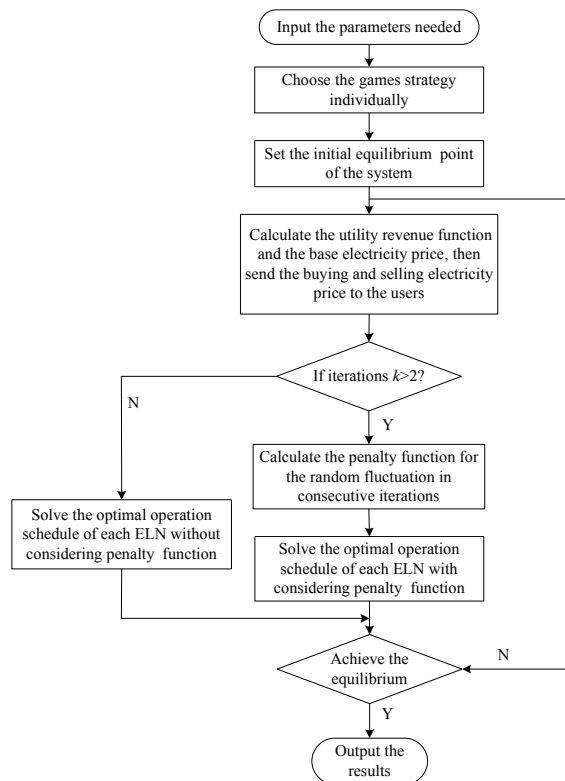


Fig. 2 Parallel distributed optimization method for the energy management and games model of energy internet