

# 电力市场环境下的微电网双层经济运营优化模型

谢敬东<sup>1</sup>, 陆文奇<sup>2</sup>, 吕志伟<sup>2</sup>

(1. 上海电力大学能源电力科创中心, 上海市杨浦区 200082; 2. 上海电力大学经济与管理学院, 上海市杨浦区 200082)

## Optimization Model of Bi-level Economic Operation of Microgrid in Electricity Market Environment

XIE Jingdong<sup>1</sup>, LU Wenqi<sup>2</sup>, LÜ Zhiwei<sup>2</sup>

(1. Energy and Power Science and Technology Center, Shanghai University of Electric Power, Yangpu Distric, Shanghai 200082, China; 2. College of Economics and Management, Shanghai University of Electric Power, Yangpu Distric, Shanghai 200082, China)

**摘要:** 随着清洁能源的快速发展, 微电网凭借其对分布式电源灵活高效的集成能力, 已成为智能电网的重要发展方向。电力市场环境下, 微电网如何协调优化好内外部资源, 取得最大经济利益对其生存和发展至关重要。为有效促进电力市场环境下微电网的经济优化运营, 提出了电力市场环境下的微电网双层经济调度优化模型。模型中上层考虑微电网参与售电侧市场和电力辅助服务市场竞争, 制定微电网市场交易计划, 优化微电网运营收益; 下层考虑微电网内部分布式电源优化调度, 协调内部各种资源最优分配, 使运行总成本最低。通过算例分析验证建立双层优化, 微电网可在电力市场竞争环境下获得更好的经济效益。

**关键词:** 微电网; 电力市场; 优化运行; 双层优化

**Abstract:** Along with rapid development of clean energy and relying on its flexible and efficient integration capability for distributed generation, the microgrid has become an important development direction of smart power grid. In the environment of electricity market, it is extremely important that how microgrid can well coordinate and optimize its internal and external resources to gain maximized economic benefit for its existence and development. To effectively promote economic and optimized operation of microgrid under the condition of electricity market, a bi-level economic dispatching optimization model for microgrid was proposed. In the upper level of the proposed model, following items such as making the microgrid participate the competition in the selling side of electricity market and the ancillary service market, drawing up the market trading plan for microgrid, optimizing the operation income of microgrid and so on were considered; in the lower level of the proposed model following items were considered: the optimized scheduling of distributed generations within the microgrid, coordinating the optimal allocation of various internal re-

sources to make the total operation cost the lowest. It is verified by analysis results of computation example that by means of establishing bi-level optimization the microgrid can obtain better economic benefit under the competition environment of electricity market.

**Keywords:** microgrid; electricity market; optimal operation; bi-level optimization

**DOI:** 10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0102

## 0 引言

微电网是由分布式电源、储能装置、能量转换装置、相关负荷和监控、保护装置汇集而成的小型发配电系统, 是一个能够实现自我控制、保护和管理的自治系统, 能够有效促进新能源消纳, 提高供电可靠性和电能质量<sup>[1-3]</sup>。随着电力市场改革和售电侧开放, 微电网的运营和电能交易模式发生了一定的改变, 即可以建立售电公司并以用户的身份参与电力市场<sup>[4]</sup>。因此, 在新环境下微电网的运营模式和优化调度将显著影响其运营效益, 具有重要的研究价值。

近年来, 国内外学者在微电网经济优化调度方面已开展了大量的研究工作, 并取得了一定的研究成果。文献<sup>[5-9]</sup>考虑了微电网的随机性、经济性和环保性等影响因素约束, 建立了以运行成本最低和污染最小为目标函数的优化模型; 文献<sup>[10-12]</sup>在微电网能量管理中计及蓄电池寿命损耗, 并通过优化调度提升微电网的经济性; 文献<sup>[13-14]</sup>提出了计及可控负荷响应能力的微电网自

治策略。以上研究主要针对微电网中分布式电源、储能设备和可控负荷进行优化调度,而对微电网参与电力市场竞争的潜力没有进行足够的发掘。文献[15]提出了微电网以供应函数投标方式参与电力市场竞争,采用均衡模型研究微电网参与投标竞争的多能源市场博弈问题。综上所述,现有相关文献较少涉及微电网参与电力市场竞争的优化调度问题。

基于以上背景,本文首先探讨电力市场改革和售电开放背景下微电网运营模式,从经济性角度出发建立微电网参与电力市场竞争的双层优化调度模型;最后通过算例验证策略的有效性和可行性。

## 1 电力市场环境下的微电网优化运营模式

微电网传统运行模式为“自发自用,余量上网”,能源供给收益是微电网的主要收益,缺乏经济性。随着电力市场改革,微电网的运营模式也发生了改变,微电网可以以用户的身份参与电力市场,包括售电侧市场和电力辅助服务市场。

### 1.1 参与售电侧市场

在开放的售电市场中,微电网运营商可形成售电公司,参与售电侧市场,通过微电网的建设运营,优化能源消费方式,提供更加高效、多样化的能源服务[16]。以微电网为主体的售电公司综合考虑发电成本、市场份额和用户满意度等多种因素,制定合适的售电电价,可将自发的电力售给配电网内的用户,多余电量可以在电力市场中进行交易,也可以从电力市场中购买电量。微电网参与售电侧市场如图1所示。

微电网运营商组建的售电主体以提供优质可靠的能源保证为基础,通过充分的市场竞争,可为微电网内的用户提供更为优质、高效的能源供给方式,从而降低能源供给成本,提高能源利用效率。

相比于传统的“自发自用,余量上网”模式,微网参与售电市场交易将减少与外部电网的不平衡能量交换,提高能源利用率,获得更多的收益。

### 1.2 参与电力辅助服务市场

电力辅助服务市场是相对于电能生产、输送和交易的主市场而言的,是指电力市场成员为保证电力系统安全、可靠运行和电力商品质量,在

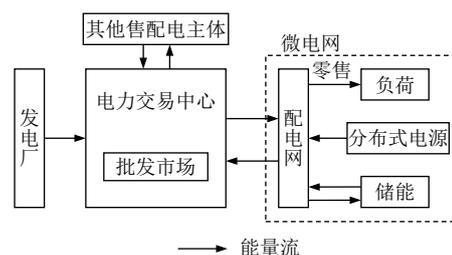


图1 微电网参与售电侧市场

Fig. 1 Microgrid participates in the selling side of electricity market

正常电能生产、输送、使用外所提供的额外服务[17]。辅助服务市场包括调峰、调频、无功和黑启动,本文仅考虑微电网参与调峰辅助服务市场。

微电网以用户的身份参与电力辅助服务市场[18],用电高峰时按市场需求,将多余电量作为调峰电量出售至电力辅助服务市场,不仅可以获得售电收益,也可以得到调峰补偿。谷段和平段储能优先考虑微电网内部新能源消纳,富裕能力可参与电力辅助服务市场,将储能充电视为调峰辅助服务,获得调峰收益。可控负荷与微电网签订合同,由微电网统一调度,微电网以可中断负荷身份参与电力辅助服务市场并获得收益[19-20]。

微电网参与电力辅助服务市场是优化自身的负荷特性,协调微电网内外资源,提升系统整体能源利用率的有效手段,实现大系统从局部到整体的多级最优化目标。

### 1.3 分布式电源优化调度

微电网中风力发电和光伏发电等可再生能源的输出功率受自然条件影响,不接受人工调控,因此优先利用风光出力[21]。储能系统在谷时吸收多余的电力,峰时发出电力,可有效减少弃风弃光率,提升电能质量。微型燃气轮机有效率高、污染小、电能质量高等特点,可以作为补充电源或应急电源。根据微电网参与电力市场的交易计划和风光出力预测,由微电网调度中心对储能和燃气轮机机组发布最优调度命令。

对微电网内部分布式电源优化调度,能够有效提高微电网供电可靠性和经济性,促进节能减排,实现环境、经济等综合效益最大化。

## 2 微电网优化运行模型

### 2.1 微电网结构

本文研究的微电网系统由风电机组、光伏机

组、蓄电池、燃气轮机以及负荷构成，微电网系统结构如图 2 所示。

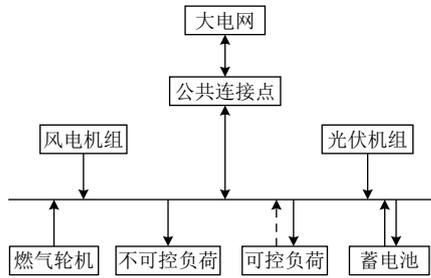


图 2 微电网系统结构

Fig. 2 Structure of the microgrid

### 2.2 总体架构

本文结合我国电力市场的实际情况及未来电力市场的发展方向，提出了电力市场环境下微电网的运营模式：①微电网参与批发市场，根据市场价格制定合适的电量交易计划。②微电网建立零售市场，将内部分布式电源发出的电量直接出售给配网中的用户。③微电网参与调峰辅助服务市场，根据市场需求用电高峰时出售调峰电力，同时作为可中断负荷获得调峰收益，平段和谷段储能从外部吸收电力。④优化调度微电网内各分布式电源出力。

考虑到微电网内可调单元众多，传统单层优化模型存在优化效果不佳的问题。本文利用双层优化构建电力市场环境下微电网的运行模型，在有效提高微电网经济效益的同时，协调优化各项指标。双层优化模型架构如图 3 所示。其中上层考虑的是微电网运营商的利益，其利润等于微电网参与售电侧市场收益、电力辅助服务市场收益之和，目标函数为微电网利润最大；下层目标函数为微电网内部分布式电源运行成本最低。

模型上下层通过功率和电量平衡建立连接，下层分布式电源的总出力等于上层微电网参与电力市场交易电量之和：

$$(P_{WT}(t) + P_{PV}(t) + P_{DE}(t) + P_{SB}(t))\Delta t = Q(t) + Q_{OS}(t) + Q_{DP}(t) - Q_{OB}(t) \quad (1)$$

式中： $P_{WT}(t)$ 、 $P_{PV}(t)$ 、 $P_{DE}(t)$ 分别为 $t$ 时刻风电机组、光伏机组、燃气轮机机组的功率； $P_{SB}(t)$ 为 $t$ 时刻蓄电池充电功率，放电为正，充电为负； $Q(t)$ 为 $t$ 时段微电网内部负荷需求电量； $Q_{OS}(t)$ 、 $Q_{OB}(t)$ 分别为 $t$ 时刻微电网参与电力市场的售、购电量； $Q_{DP}(t)$ 为 $t$ 时刻微电网参与深度调峰电量。

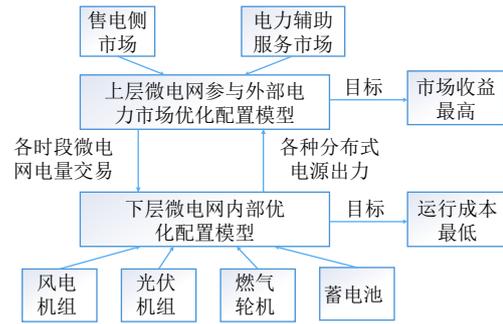


图 3 双层优化模型架构图

Fig. 3 Architecture of bi-level optimization model

### 2.3 上层模型

由于电力市场每 15 min 进行一次出清，本文设定上层模型调度周期为 15 min，即  $T = 96$ ， $\Delta t = 0.25$ 。上层优化模型的目标函数为微电网以用户的身份参与售电侧市场和电力辅助服务市场的收益最大：

$$\max f_1 = R_{ES} + R_{AS} \quad (2)$$

式中： $f_1$ 为微电网参加电力市场的收益； $R_{ES}$ 为微电网参与售电侧市场收益； $R_{AS}$ 为微电网参与辅助服务市场收益。

1) 售电侧市场收益。

$$R_{ES} = R_{OS} - C_{OB} + R_{IS} = \sum_{t=1}^T C_{OS}(t) Q_{OS}(t) - \sum_{t=1}^T C_{OB}(t) Q_{OB}(t) + \sum_{t=1}^T C_{IS}(t) Q(t) \quad (3)$$

式中： $R_{OS}$ 、 $C_{OB}$ 分别为微电网参与电力市场的售电收益和购电成本； $R_{IS}$ 为微电网向内部用户售电收益； $C_{OS}(t)$ 、 $C_{OB}(t)$ 分别为 $t$ 时刻微电网参与电力市场的售、购电价； $C_{IS}(t)$ 为 $t$ 时刻微电网向用户的售电电价。

2) 电力辅助服务市场收益。

$$R_{AS} = R_{SC} + R_{DP} + R_{IL} = \sum_{t=1}^T Q_{SC}(t) C_{SC}(t) + \sum_{t=1}^T Q_{DP}(t) (C_{DP}(t) + C_{OS}(t)) + Q_{IL,max} C_{EIL} + \sum_{t=1}^T C_{IL}(t) Q_{IL}(t) \quad (4)$$

式中： $R_{SC}$ 为储能吸收电量的调峰收益； $R_{DP}$ 为微电网参与深度调峰收益； $R_{IL}$ 为微电网参与电力需求侧响应收益； $P_{SC}(t)$ 为 $t$ 时刻微电网参与辅助服务市场储能吸收的电量； $C_{SC}(t)$ 为 $t$ 时刻辅助服务补偿价格； $C_{DP}(t)$ 为 $t$ 时刻深度调峰的补偿价格

;  $Q_{IL,max}$  为可控负荷最大容量;  $C_{EIL}$  为可控负荷单位容量补偿价格;  $C_{IL}(t)$  为  $t$  时刻可控负荷电量补偿价格;  $Q_{IL}(t)$  为  $t$  时刻可控负荷中断电量。

$$Q(t) = Q'(t) - Q_{IL}(t) \quad (5)$$

式中:  $Q'(t)$  为微电网内部需求响应前的原始负荷需求。

3) 约束条件。

① 可控负荷容量约束:

$$Q_{IL}(t) \leq Q_{IL,max} \quad (6)$$

② 深度调峰约束: 微电网参与深度调峰的电量不能超过其投标电量上限。

$$Q_{DP}(t) \leq Q_{DP,max} \quad (7)$$

式中:  $Q_{DP,max}$  是微电网参与深度调峰的投标电量上限。

上层可控变量:

$$x = \{Q_{OS}(t), Q_{OB}(t), Q_{SC}(t), Q_{IL}(t)\} \quad (8)$$

## 2.4 下层模型

本文中售电公司拥有的分布式电源包含风电机组、光伏机组、微型燃气轮机和储能系统, 其中储能和燃气轮机接受调控, 风电和光伏不接受调控。燃气轮机和储能运行速度快, 调度周期短, 本文设定其 5s 进行一次优化调度, 由于上下层模型调度频率不同, 下层模型需累计 15 min 发电功率与上层进行同步优化。下层模型的目标函数是最低的分布式电源运行成本:

$$\text{Min} f_2 = C_{WT} + C_{PV} + C_{DE} + C_{SB} \quad (9)$$

式中:  $f_2$  为微电网内部分布式电源一天的运行总成本;  $C_{WT}$ 、 $C_{PV}$ 、 $C_{DE}$ 、 $C_{SB}$  分别为微电网中光伏、燃气轮机、储能一天的运行总成本。

1) 风电机组成本。

$$\begin{aligned} C_{WT} &= \sum_{t=1}^T [C_{WT,DP}(t) + C_{WT,OM}(t)] \Delta t \\ &= \sum_{t=1}^T \left[ \frac{C_{WT,az}}{8760\tau_{WT}} \frac{r(1+r)^{n_{WT}}}{(1+r)^{n_{WT}} - 1} P_{WT}(t) \right. \\ &\quad \left. + K_{WT,OM} P_{WT}(t) \right] \Delta t \end{aligned} \quad (10)$$

式中:  $C_{WT,DP}(t)$ 、 $C_{WT,OM}(t)$  分别为风机投资折旧成本和运行维护成本;  $C_{WT,az}$  为风机单位容量安装成本;  $\tau_{WT}$  为风机容量因数;  $r$  为年利率;  $n_{WT}$  为风机寿命;  $K_{WT,OM}$  为风机单位运行维护成本系数。

2) 光伏机组成本。

$$\begin{aligned} C_{PV} &= \sum_{t=1}^T [C_{PV,DP}(t) + C_{PV,OM}(t)] \Delta t \\ &= \sum_{t=1}^T \left[ \frac{C_{PV,az}}{8760\tau_{PV}} \frac{r(1+r)^{n_{PV}}}{(1+r)^{n_{PV}} - 1} P_{PV}(t) \right. \\ &\quad \left. + K_{PV,OM} P_{PV}(t) \right] \Delta t \end{aligned} \quad (11)$$

式中:  $C_{PV,DP}(t)$ 、 $C_{PV,OM}(t)$  分别为光伏投资折旧成本和运行维护成本;  $C_{PV,az}$  为光伏单位容量安装成本;  $\tau_{PV}$  为光伏容量因数;  $r$  为年利率;  $n_{PV}$  为光伏寿命;  $K_{PV,OM}$  为光伏单位运行维护成本系数。

3) 燃气轮机机组成本。

$$\begin{aligned} C_{DE} &= \sum_{t=1}^T [C_{DE,DP}(t) + C_{DE,OM}(t) + C_{DE,fuel}(t) + C_E(t)] \Delta t \\ &= \sum_{t=1}^T \left[ \frac{C_{DE,az}}{8760\tau_{DE}} \frac{r(1+r)^{n_{DE}}}{(1+r)^{n_{DE}} - 1} P_{DE}(t) + K_{DE,OM} P_{DE}(t) \right. \\ &\quad \left. + K_{DE,fuel} P_{DE}(t) + \sum_{j=1}^J (C_{ej} + C_{pj}) \sigma_j P_{DE}(t) \right] \Delta t \end{aligned} \quad (12)$$

式中:  $C_{DE,DP}(t)$ 、 $C_{DE,OM}(t)$ 、 $C_{DE,fuel}(t)$ 、 $C_E(t)$  分别为燃气轮机投资折旧成本、运行维护成本、燃料费用及环境成本;  $C_{DE,az}$  为燃气轮机单位容量安装成本;  $\tau_{DE}$  为燃气轮机容量因数;  $n_{DE}$  为燃气轮机寿命;  $K_{DE,OM}$  为燃气轮机单位运行维护成本系数;  $K_{DE,fuel}$  为燃气轮机燃料成本系数;  $J$  为污染物类型总数;  $C_{ej}$  为燃气轮机排放第  $j$  种污染物所对应的单位环境价值;  $C_{pj}$  为燃气轮机排放第  $j$  种污染物的单位排放罚款;  $\sigma_j$  为燃气轮机排放第  $j$  种污染物 (污染物包括  $CO_2$ 、 $CO$ 、 $NO_x$ 、 $SO_2$ ) 的单位排放强度。

4) 蓄电池成本。

$$\begin{aligned} C_{SB} &= \sum_{t=1}^T [C_{SB,DP}(t) + C_{SB,OM}(t)] \Delta t \\ &= \sum_{t=1}^T \left( \frac{C_{SB,rep}}{2Q_{lifetime}} |P_{SB}(t)| + K_{SB,OM} |P_{SB}(t)| \right) \Delta t \end{aligned} \quad (13)$$

式中:  $C_{SB,DP}(t)$ 、 $C_{SB,OM}(t)$  分别为蓄电池折旧成本和运行维护成本;  $C_{SB,rep}$  为蓄电池置换成本;  $Q_{lifetime}$  为蓄电池全寿命周期内总充放电量, 是蓄电池额定容量、放电深度、总的循环次数三者的

乘积； $K_{SB,OM}$ 为蓄电池单位运行维护成本系数。

5) 约束条件。

① 微电网中分布式电源出力约束：

$$P_{DE,min} \leq P_{DE}(t) \leq P_{DE,max} \quad (14)$$

$$P_{SB,min} \leq P_{SB}(t) \leq P_{SB,max} \quad (15)$$

式中： $P_{WT,min}$ 、 $P_{WT,max}$ 分别为风机的出力上下限； $P_{PV,min}$ 、 $P_{PV,max}$ 分别为光伏的出力上下限； $P_{DE,min}$ 、 $P_{DE,max}$ 分别为燃气轮机的出力上下限； $P_{SB,min}$ 、 $P_{SB,max}$ 分别为蓄电池的出力上下限。

② 蓄电池功率平衡约束：蓄电池功率为输入功率和输出功率之和，输入功率为消纳微电网多余电力和参与辅助服务市场吸收的电力之和。

$$\begin{cases} P_{SB}(t) = P_{SB,in}(t) + P_{SB,out}(t) \\ P_{SB,in}(t) = (P(t) - P_{WT}(t) - P_{PV}(t) - P_{DE}(t)) - P_{SC}(t) \end{cases} \quad (16)$$

式中： $P_{SB,in}(t)$ 为蓄电池的充电功率，其值小于 0； $P_{SB,out}(t)$ 为蓄电池的放电功率，其值大于 0。蓄电池不能同时充放电，即 $P_{SB,in}(t) < 0$ 时， $P_{SB,out}(t) = 0$ ； $P_{SB,out}(t) > 0$ 时， $P_{SB,in}(t) = 0$ 。

③ 蓄电池状态约束：

$$\begin{cases} S_{SB}(t) = S_{SB}(t-1) - \eta P_{SB}(t) \Delta t \\ S_{SB,min} \leq S_{SB}(t) \leq S_{SB,max} \end{cases} \quad (17)$$

式中： $S_{SB}(t)$ 为蓄电池的剩余电量； $\eta$ 为蓄电池充放电效率； $S_{SB,min}$ 、 $S_{SB,max}$ 分别为蓄电池剩余容量的最小值与最大值。

④ 燃气轮机爬坡约束：

$$r_{down} \leq |P_{DE}(t) - P_{DE}(t-1)| \leq r_{up} \quad (18)$$

式中： $r_{up}$ 、 $r_{down}$ 分别是燃气轮机上、下爬坡率约束。

⑤ 下层可控变量：

$$y = \{P_{DE}(t), P_{SB}(t), P_{IL}(t)\} \quad (19)$$

### 3 算例分析

#### 3.1 基本参数

本文选取某微电网作为研究对象，调度周期为 1d。该微电网最大日负荷 6.05 MWh，微网中包含光伏机组 10 MW，风电机组 5 MW，燃气轮机机组 30 MW，储能 10 MWh。各分布式电源具体参数如表 1 所示。储能具体参数如表 2 所示。天然气价格为 0.25 元/kWh，燃气轮机污染物价值标准、罚款标准及污染物排放参考文献 [22]。燃气轮机爬坡率上下限为 18 MWh。

表 1 分布式电源参数

Table 1 Parameters of distributed generation

电源类型	安装成本/ (元/kW)	维修成本/ (元/kW)	寿命 /年	功率上限 /MW	功率下限 /MW
光伏机组	8000	0.001	25	10	0
风电机组	4500	0.029	20	5	0
燃气轮机	1300	0.05	10	30	3

表 2 蓄电池基本参数

Table 2 Basic parameters of storage battery

容量/MWh	10
剩余容量上限/MWh	9.5
剩余容量下限/MWh	3
功率/MW	2
循环次数	4000
安装成本/(元/kWh)	1500
维护成本/(元/kWh)	0.005

参见文献 [23]，假定电力市场购电价统一为 0.4 元/kWh，零售电价与电力市场售电价如图 4 所示。储能参与电力辅助服务市场收益为 0.05 万元/MWh，深度调峰出清电价与投标电量上限如图 5 所示。需求响应合同如表 3 所示。

图 6 为典型日微电网风光出力 and 负荷曲线。

本文采用 cplex 编程实现微电网优化运行程序进行仿真，传统的微电网经济运行模型（自给自足，余量上网）为方案 1，考虑微电网参与电力市场的双层运行模型为方案 2。

由于微电网在参与电力市场前，内外购售电基本没有价差，并且自发自用收益较低，本文忽略不计传统微电网购售电收益和自发自用收益，仅考虑上网电量收益，方案 1 运行模型如下：

$$\text{Max} f_3 = R_{FT} - f_2 \quad (20)$$

式中： $f_3$ 为传统微电网一天总收益； $R_{FT}$ 为传统微

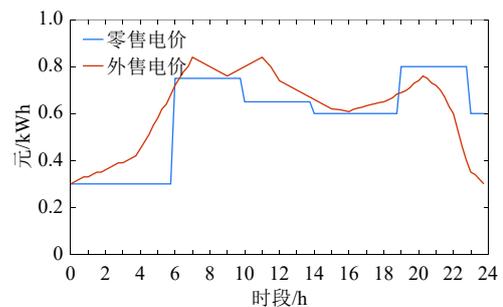


图 4 零售电价与外售电价

Fig. 4 Retail electricity price and out-sale electricity price

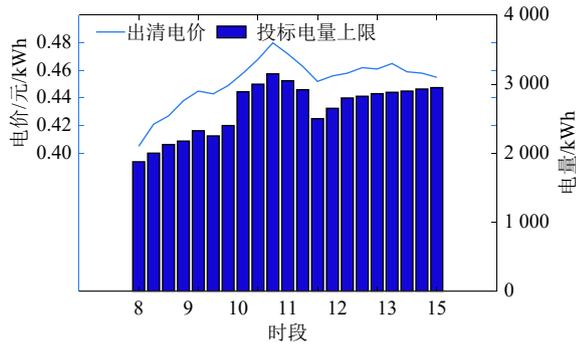


图5 深度调峰出清电价与投标电量上限

Fig. 5 In-depth peak shaving power tariffs and bidding power caps

表3 需求响应合同

Table 3 Demand response contract

最大可中断容量/MW	可中断时段	电量补偿/(元/kWh)	容量补偿/(元/kW)
1	9:00-11:00 18:00-20:00	0.35	0.015

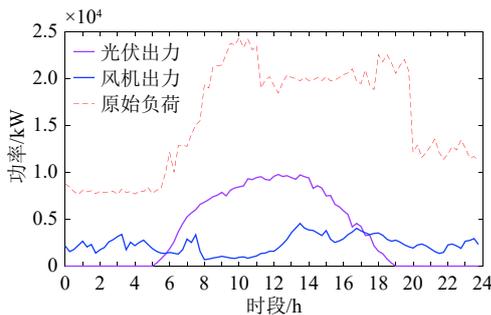


图6 典型日

Fig. 6 Typical day

电网上网收益。

表4为传统微电网的上网电价。

### 3.2 结果分析

方案1与方案2各微源出力优化结果如图7图8所示(蓄电池出力负值表示充电)。

图9为微电网在方案1和方案2模式下一天的成本与收益对比。

分析可知,方案1内部负荷最大峰谷差为

表4 上网电价

Table 4 Grid purchase price

电源	上网电价/(元/kWh)
风机	0.75
光伏	0.57
燃气轮机	0.391

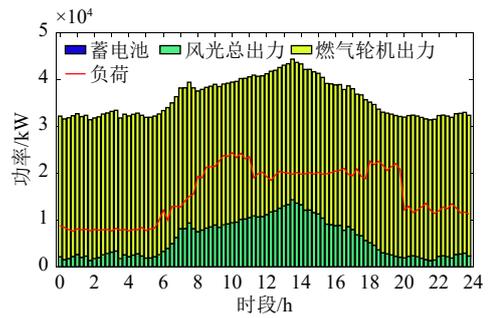


图7 方案1各微源出力

Fig. 7 Scheme 1 each micro-source output

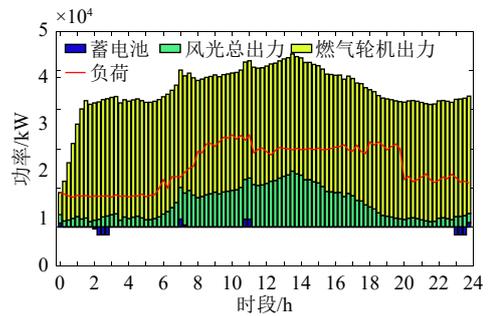


图8 方案2各微源出力

Fig. 8 Scheme 2 each micro-source output

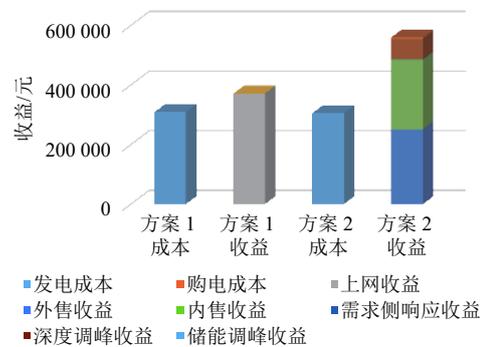


图9 方案1和方案2的成本与收益

Fig. 9 Costs and benefits of scheme 1 and scheme 2

0.413 MWh; 方案2内部负荷最大峰谷差为0.393 MWh,可控负荷削峰效果良好。两种运营模式下的微电网运行成本差别不大,但方案2模式下的微电网一天的收益比方案1多19万元,且收益来源更加多样化,其中,批发市场外售电收益和内部零售市场售电收益较多。微电网参与售电侧市场和电力辅助服务市场,不仅提高了自身收益、微电网调度灵活性,还能协调微电网内外资源,有效缓解外部电网的调峰压力。

传统运营模式下的微电网虽然投资建设了分布式电源和储能等设备,但是缺少合理的运营模

式, 经济效益较差。电力市场环境下的微电网运营模式通过参与批发市场、零售市场、电力辅助服务市场和需求侧响应, 能够实现微电网的投资回报和增值。

本文仅考虑单个微电网的运营模式, 若多个微电网在并网模式下联合运营, 可以提高总体的调峰能力, 扩大自身的盈利空间。

## 4 结论

1) 微电网参与电力市场竞争, 不仅能提高供电质量, 促进系统功率平衡, 还能提高微电网自身经济效益。

2) 通过对微电网的优化调度, 促进新能源消纳, 减少其建设运行成本, 扩大微电网的盈利空间。

3) 双层优化之间通过参数传递更新运行状态并交替求解, 有效协调内外资源, 验证了该模型的可行性和有效性。

本文仅从单个微电网角度考虑电力市场竞争, 并未考虑多个微电网共同参与电力市场, 后续研究将进一步建立多微网联合优化运行模型。

## 参考文献

- [1] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.  
YANG Xinfa, SU Jian, LÜ Zhipeng, *et al.* Overview on Micro-grid Technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70 (in Chinese).
- [2] Li Y, Nejabatkhah F. Overview of control, integration and energy management of microgrids [J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2014, 2(3): 212-222.
- [3] 鲁宗相, 王彩霞, 闵勇, 等. 微电网研究综述 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(19): 100-107.  
Lu Zongxiang, Wang Caixia, Min Yong, *et al.* Overview on microgrid research [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, 31(19): 100-107 (in Chinese).
- [4] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于印发《推进并网型微电网建设试行办法》的通知 [EB/OL]. (2017-07-17). [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201707/t20170724\\_962514.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201707/t20170724_962514.html)
- [5] Sanseverino E.R., Di Silvestre M.L., Ippolito M.G., *et al.* An execution, Monitoring and replanning approach for optimal energy management in microgrids [J]. *Energy*, 2011, 36(5): 3429-3436.
- [6] 陈达威, 朱桂萍. 微电网负荷优化分配 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(20): 45-49.  
Chen Dawei, Zhu Guiping. An investigation on optimal load distribution of microgrids [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, 34(20): 45-49 (in Chinese).
- [7] Kanchev H, Lu D, Colas F, *et al.* Energy management and operational planning of a microgrid with a PV-based active generator for smart grid applications [J]. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2011, 58(10): 4583-4592.
- [8] 童小娇, 易国伟, 周鹏, 等. 考虑功率调整优先策略的微网动态经济调度 [J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2173-2179.  
Tong Xiaojiao, Yi Guowei, Zhou Peng, *et al.* Dynamic economic dispatch for microgrid considering priority strategy of power adjustment [J]. *Power System Technology*, 2015, 39(8): 2173-2179 (in Chinese).
- [9] 李鹏, 郑苗苗, 陈安伟, 等. 基于文化基因算法的交直流混合微网优化运行 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(11): 3226-3234.  
LI Peng, ZHENG Miaomiao, CHEN Anwei, *et al.* Optimal Operation of Hybrid AC/DC Microgrid Based on Memetic Algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(11): 3226-3234 (in Chinese).
- [10] 沈玉明, 胡博, 谢开贵, 等. 计及储能寿命损耗的孤立微电网最优经济运行 [J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2371-2378.  
Shen Yuming, Hu Bo, Xie Kaigui, *et al.* Optimal economic operation of isolated microgrid considering battery life loss [J]. *Power System Technology*, 2014, 38(9): 2371-2378 (in Chinese).
- [11] 刘春阳, 王秀丽, 刘世民, 等. 计及蓄电池使用寿命的微电网经济调度模型 [J]. 电力自动化设备, 2015(10): 33-40.  
LIU Chunyang, WANG Xiuli, LIU Shimin, *et al.* Economic dispatch model considering battery lifetime for microgrid [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2015(10): 33-40 (in Chinese).
- [12] 钟宇峰, 黄民翔, 叶承晋. 基于电池储能系统动态调度的微电网多目标运行优化 [J]. 电力自动化设备, 2014, 34(6): 114-121.  
ZHONG Yufeng, HUANG Minxiang, YE Chengjin. Multi-objective optimization of microgrid operation based on dynamic dispatch of battery energy storage system [J]. *Electric Power Automation Equipment*,

- 2014, 34(6): 114 – 121 (in Chinese).
- [13] 郭帅, 刘鲁嘉, 杨萌, 等. 计及可控负荷的微网自治调度模型 [J]. 电网技术, 2017, 41(1): 48 – 54.  
Guo Shuai, Liu Lujia, Yang Meng, *et al.* Autonomous scheduling model for microgrid considering controllable loads [J]. *Power System Technology*, 2017, 41(1): 48 – 54 (in Chinese).
- [14] 童小娇, 尹坤, 刘亚娟, 等. 包含可控负荷的微电网经济调度 [J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 21 – 28.  
TONG Xiaojiao, YIN Kun, LIU Yajuan, *et al.* Economic dispatch for microgrid with controllable loads [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2015, 35(10): 21 – 28 (in Chinese).
- [15] 王晔, 张颖, 张少华. 微电网参与投标竞争的多能源市场博弈分析 [J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3184 – 3192.  
WANG Xian, ZHANG Ying, ZHANG Shaohua. Game Analysis of Multi-energy Market Considering Microgrid Bidding [J]. *Power System Technology*, 2019, 43(9): 3184 – 3192 (in Chinese).
- [16] 胡晨, 杜松怀, 苏娟, 等. 新电改背景下我国售电公司的购售电途径与经营模式探讨 [J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3293 – 3299.  
Hu Chen, Du Songhuai, Su Juan, *et al.* Preliminary research of trading approach and management modes of Chinese electricity retail companies under new electricity market reform [J]. *Power System Technology*, 2016, 40(11): 3293 – 3299 (in Chinese).
- [17] 何永秀, 陈倩, 费云志, 等. 国外典型辅助服务市场产品研究及对中国的启示 [J]. 电网技术, 2018, 42(9): 2915 – 2922.  
HE Yongxiu<sup>1</sup>, CHEN Qian<sup>1</sup>, FEI Yunzhi<sup>1</sup>, *et al.* Typical Foreign Ancillary Service Market Products and Enlightenment to China [J]. *Power System Technology*, 2018, 42(9): 2915 – 2922 (in Chinese).
- [18] 王雄飞, 鲁恒聪, 李根柱, 等. 泛在电力物联网背景下微网参与调峰辅助服务研究 [J]. 智慧电力, 2019, 47(9): 1 – 9.  
Wang Xiongfei, LU Hengcong, LI Genzhu, *et al.* Microgrid Participation in Peak-shaving Assistant Services under the Background of Ubiquitous Power Internet of Things [J]. *Smart Power*, 2019, 47(9): 1 – 9 (in Chinese).
- [19] Zhang Cuo, Xu Yan, Dong Zhaoyang, *et al.* Robust coordination of distributed generation and price-based demand response in microgrids [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, PP(99): 1 – 1.
- [20] 曾鸣, 杨雍琦, 向红伟, 等. 计及需求侧响应的电力系统鲁棒优化规划模型 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(17): 137 – 145.  
Zeng Ming, Yang Yongqi, Xiang Hongwei, *et al.* Robust optimization planning model of power system considering demand response [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(17): 137 – 145 (in Chinese).
- [21] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能电网的发展与挑战 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10 – 14.  
Wang Chengshan, Li Peng. Development and challenges of distributed generation, the microgrid and smart distribution system [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, 34(2): 10 – 14 (in Chinese).
- [22] 钱科军, 袁越, 石晓丹, 等. 分布式发电的环境效益分析 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(29): 11 – 15.  
QIAN Ke-jun, YUAN Yue, SHI Xiao-dan, *et al.* Environmental Benefits Analysis of Distributed Generation [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(29): 11 – 15 (in Chinese).
- [23] 张涛, 王成, 王凌云, 等. 考虑虚拟电厂参与的售电公司双层优化调度模型 [J]. 电网技术, 2019, 43(03): 218 – 227.  
ZHANG Tao, WANG Cheng, WANG Lingyun, *et al.* A Bi-level Optimal Dispatching Model of Electricity Retailers Integrated With VPPs [J]. *Power System Technology*, 2019, 43(03): 218 – 227 (in Chinese).

收稿日期: 2020-02-25

作者简介:

谢敬东 (1968), 男, 博士后, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 电力市场化改革, 智能微网等. E-mail: xie\_jd@shiep.edu.cn;

吕志伟 (1994), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力保底服务、电力市场监管等. E-mail: lvzhiwei0806@foxmail.com。