

# 微电网利益相关者合作运营的双层规划模型<sup>①</sup>

龙勇<sup>1</sup>, 刘超<sup>1,2\*</sup>, 汪於<sup>1</sup>

(1. 重庆大学经济与工商管理学院, 重庆 400044; 2. 重庆师范大学新闻与传媒学院, 重庆 401331)

**摘要:** 微电网建设和运营涉及众多利益相关者, 他们的目标和利益诉求各不相同、并相互制约, 项目运营成功的关键是找到一种多方合作机制, 协调各方利益. 针对该问题提出了微电网利益相关者合作运营的双层规划模型: 上层规划以电力调度时社会成本最低为目标, 获取最大社会福利; 下层规划以微电网运营成本最低为目标, 获取最大运营商利润. 给出了求解算法并通过算例分析证明了模型的可行性和有效性. 最后得出结论: 在提出的上下级相互交叉作用的合作机制下, 微电网内的绿色能源发电可以有效提高电力市场需求并降低用户电价, 增加微电网运营商利润并减少碳排放, 提高全社会福利.

**关键词:** 微电网; 利益相关者; 合作; 双层规划模型; 碳排放

**中图分类号:** F224.3   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1007-9807(2019)05-0069-14

## 0 引言

微电网(microgrid)也称为微网, 是由微电源、负荷、储能系统和控制装置构成, 能够实现自我控制、保护和管理的自治系统, 它既可以与外部电网并网运行, 也可以孤立运行<sup>[1]</sup>. 微电网可以使用光伏、风能、潮汐、生物质等绿色可再生能源发电, 在满足微网内用户需求的同时, 还可以向主电网输送电能. 微电网项目可以有效提高可再生能源利用率, 减少环境污染和二氧化碳排放. 但是, 参与微电网投资建设与运营管理的利益相关者众多, 他们具有不同的利益诉求, 这使得微电网的商业化运营成为复杂的技术性和经济性难题, 微电网的运营管理与调度也成为目前电力技术经济与管理领域关注的热点问题.

微电网投资建设和运营管理过程中, 一般涉及到政府、电网公司、发电商、微电网投资商、运营商、用户等利益相关者, 他们之间不仅存在利益依赖同时也存在利益分歧. 政府希望通过微电网提

高可再生能源的利用, 减少化石能源的使用和二氧化碳的排放, 同时希望通过微电网项目促进电力市场改革和创新; 电网公司的目标是按照国家对电力部门改革的要求, 参与微电网的建设, 对微电网并网提供技术支持, 实现用电的安全与稳定; 发电商的目标是根据政府制定的环境政策以及用户的需求调整发电出力, 获取利润; 微电网运营商(包括投资商和运营商, 考虑到项目建设的特殊性, 采用投资商自营方式), 它制定与电网公司能量流动的调度策略, 通过收取微电网用户电费获得利润; 微电网用户的目标是使用稳定经济的电能. 由于人和组织都具有行为复杂性, 这使得微电网各利益方相互制约, 一方对某一目标的追求可能会损害另一方的利益. 利益的分歧会对微电网的效益产生重大影响, 甚至影响整个电网的稳定与发展. 微电网利益相关者关系非常复杂, 他们对微电网项目的控制权不同、影响力不同、退出成本也不同, 这就导致合作很难达成. 那么能否找到一个机制, 提高微电网多个利益方参与项目的可能

① 收稿日期: 2017-04-26; 修订日期: 2018-09-30.

基金项目: 国家社会科学基金重点资助项目(14AZD130).

通讯作者: 刘超(1978—), 男, 安徽定远人, 博士生, 讲师, Email: 3321976@qq.com

性? 如何让他们达成共识, 形成利益诉求妥协的一种模式?

为了解决这个问题, 需要提出能综合考虑多方需求的优化模型, 但是回顾已有的研究, 发现相关的文献比较有限. 相关的研究主要集中在以下几点: 第一, 研究微电网的电能交易机制问题. 例如 Koltsaklis 等<sup>[2]</sup> 运用混合整数线性规划对微电网运营成本进行建模. Wang 等<sup>[3]</sup> 提出二阶段能源管理模型, 第一阶段运用均值方差 Markowitz 理论评估微电网运营成本风险, 第二阶段最大限度地减少前 1 日和实时电力市场的不平衡性. Grover-Silva 等<sup>[4]</sup> 提出微电网经济优化模型, 讨论了光伏 (PV) 的随机性和负荷的不确定性对微电网经济性的影响. Rabiee 等<sup>[5]</sup> 提出了改进的帝国竞争算法 (ICA), 研究微电网运行方式对环境以及经济性的影响. 史开拓等<sup>[6]</sup> 提出基于“时前市场”的多轮成对随机匹配市场交易机制, 利用“虚拟单元”解决供需不平衡时的电能交易问题. Jimeno 等<sup>[7]</sup> 提出基于多代理系统技术的微电网能源管理系统 (EMS). Khodaei 和 Shahidehpour<sup>[8]</sup> 提出微电网优化模型, 研究电力系统的可靠性和经济性. 孔祥玉等<sup>[9]</sup> 提出基于多智能体竞价均衡的微电网优化方法, 该方法采用多智能体模拟微电网内的竞价, 并支持微电网与传统大电网之间的互动. 第二, 微电网的调度问题. 例如王成山等<sup>[10]</sup> 研究不同场景下的光蓄微电网调度策略, 将动态经济调度方法应用于由光伏发电系统和蓄电池组成的微电网. 赵金利<sup>[11]</sup> 基于微电网的购电成本、售电收益和分布式电源发电成本提出考虑配电网互动容量需求的微电网优化调度模型. 刘一欣等<sup>[12]</sup> 研究多微电网参与下的配电侧电力市场竞争模型, 模型上层以配电市场购电成本最小为目标, 下层以微电网的运营收益最大为目标. Quashie 等<sup>[13]</sup> 提出基于分销系统运营商 (DSO) 管理的双层规划模型, 上层目标为最小微电网运营成本, 下层目标为确保 DSO 电力供应的可靠性. Chaouachi 等<sup>[14]</sup> 提出的多目标智能能源管理系统可以减少微电网运行成本和对环境的影响. Asimakopoulou 等<sup>[15]</sup> 提出的双层优化模型模拟了微电网和大型发电单元的竞争. 刘振国等<sup>[16]</sup> 提出适用于并网型微电网系统和独立型微电网系统的双层优化模型, 上层专注微电网系统经济性能, 下层专注系统

日运行费用最低. 第三, 研究发电和能源使用的碳排放问题. 例如: Feijoo 和 Das<sup>[17]</sup> 讨论了碳排放造成的社会成本. 王素凤等<sup>[18]</sup> 基于技术进步、电力价格、燃料价格、碳价、补贴政策和投资项目的碳减排率等多重不确定因素, 构建了发电商减排投资的实物期权模型, 他们认为合作减排有利于发现碳减排率较高的项目, 进而刺激发电商的投资行为. Battistelli 和 Conejo<sup>[19]</sup> 认为要提高减排量就会增加电力成本, 损害用户利益, 而减少电力消耗又会降低经济活动, 并减少化石燃料发电厂的市场份额和发电的利润. 石莹等<sup>[20]</sup> 构建以经济动力学与能源成本最优控制的耦合模型, 对比分析了有无碳排放目标的中国能源成本和能源技术发展的演化趋势. 张国兴等<sup>[21]</sup> 在对京津冀 1981 年以来节能减排政策措施进行量化处理的基础上, 建立针对节能减排政策措施有效性的计量模型, 分析了京津冀节能减排政策措施的演变状况, 并探究京津冀节能减排政策措施对其节能减排效果影响的差异性. 张新华等<sup>[22]</sup> 研究了碳排放约束下电力上网的机制, 并得出发电商碳减排投资以后的上网电价, 对寡头发电商的投资行为有显著影响的结论.

以往的研究多数以微电网运营的经济性为重点, 通过优化模型对微电网运营成本和收益以及电力调度成本进行建模, 得出的结论不完全相同, 没有正面描述微电网运营管理过程中, 多个利益相关者利益诉求不同时建立合作的复杂问题. 本文借鉴前人的研究成果, 提出了双层规划经济模型, 对微电网运营商和电网公司之间的电能交易问题进行建模, 上层目标是电网公司电力调度最优, 减少碳排放, 寻求社会福利最大化; 下层目标是微电网运营的利益相关者收益最大化. 文中给出了求解过程并通过算例证明了模型的可行性和有效性. 模型还分析了一定的二氧化碳排放政策约束下 (碳排放成本和排放上限) 微电网绿色能源发电对电力市场电价、电力需求、电力市场绿色发电所占比例造成的影响. 相比于以往的研究, 本文提出的模型可以描述政府、电网公司、发电商、微电网运营商、用户等多个利益相关者的利益与分歧, 对多个目标进行全局优化解, 获取均衡策略, 对政府节能减排政策的制定以及微电网的运营有一定的参考价值.

### 1 问题描述

当前较为成熟的理论模型是美国 PJM 电力市场模型,它的总体定位是建立有效的趸售市场来平衡市场各成员(包含微电网)的利益. 本文以此作为研究基础构建一个电力市场,结构如图 1 所示. 在这个电力市场中,智能电网由 1 个区域独立系统运营商(ISO)进行控制和调配,采用节点边际电价(LMP)进行定价(发电商按所在节点 LMP 收费,负荷按所在节点 LMP 付费). 发电商向 ISO 提交线性供给函数,为了满足节点负荷的需求,ISO 按照发电商的报价从高到低以节点边际电价采购电能. 微电网在整个智能电网中得到了充分的运用并且广泛分布在不同的节点上. 微电网的运营容易受到太阳辐照度和风速等气候条件以及用户需求的影响,它通过绿色能源发电、电池的充放电以及和主电网进行能量交换来满足自身需求从而实现利益最大化. 微电网运营商在规划期内(比如 24 小时)制定有效的运营策略,并且向电力市场提供分时竞价策略. 这个运营策略包括了微电网的绿色能源发电量、电池充放电策略以及和 ISO 进行电能交易的数量(微电网作为价格接受者). 政府制定碳排放的成本与排放上限有利于环保,会推高化石燃料发电的成本,还原化石燃料发电造成环境污染要付出代价的经济本质.

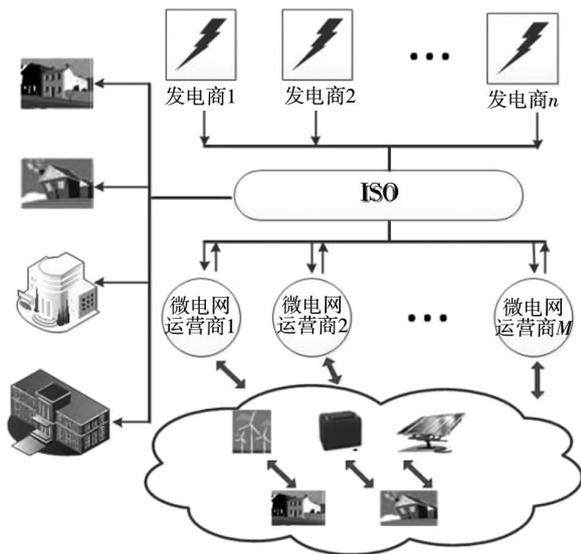


图 1 电力市场结构图  
Fig. 1 Structure of the electricity market

### 2 模型设计

Bracken 和 McGill 在 1973 年提出的双层规划模型(bi-level)可以研究比较复杂的,非平衡经济市场竞争问题,它可以比较准确地描述上级下级之间交叉相互作用,模型中不同层次的决策者控制着不同的决策变量,上层的决策情况能影响下层决策的选择和目标实现,下层也对上层的决策产生影响<sup>[23]</sup>. 从某种程度上说,他们共同决策. 模型一般形式如下

$$\begin{aligned} & \min_{X,Y} Z_{DC}(X,Y) \\ & \text{s. t. } G_i(X,Y) = 0 \\ & \quad G_j(X,Y) \leq 0 \\ & \quad Y \in \arg \min_V \{ Z_{PC}(X,V) : g_i(X,V) = 0, \\ & \quad \quad \quad g_j(X,V) \leq 0 \} \end{aligned}$$

假定电力市场的参与方可以没有限制地进行博弈,追求各自的利益. 将电网最优调度获得最大化社会福利问题作为模型上层,微电网运营商利润最大作为模型下层. 图 2 是微电网和智能电网之间的相互作用示意图.

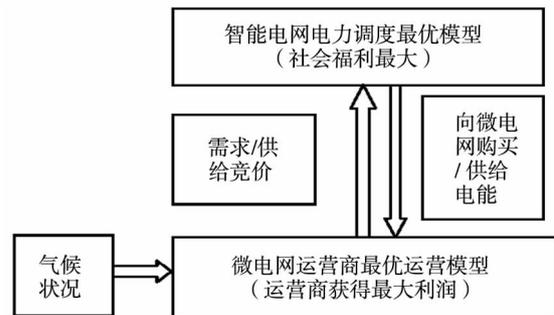


图 2 微电网和智能电网之间的相互作用

Fig. 2 Interaction between microgrid and smart grid

假定微电网可以在任何时间和主电网进行任何数量的电能交易,电网中微电网数量和规模的增长不会导致额外用电量的增加. 模型如下.

#### 2.1 上层优化模型

直流最优潮流(DCOPF)因其关系简明且无收敛问题,在电力规划和运营中得到了广泛应用. 参考文献[7,17,19]使用 DCOPF 方法研究了发电商的电力调度,在此基础上,加入碳排放和排放的社会成本约束可得到上层模型

$$\min_Q \sum_i C_i(Q_i) + \sum_j D_j(Q_j) + \sum_i (Q_i \gamma_i) \pi +$$

$$\sum_m \{MC_m(Q_{mg}^s) - MD_m(Q_{gm}^{(t)})\} \quad (1)$$

目标函数式(1)表示电力运营时获取最小的总社会成本,此时获得的社会福利最大,它是化石燃料发电机成本、排放成本、采购微电网电能成本之和,再减去节点负荷的收益和微电网作为负荷的收益.电力运营的社会总成本会随着碳排放的增加而增加.

式(1)中,  $C_i(Q_i) = \alpha_i Q_i + \beta_i Q_i^2$  表示发电商  $i$  的二次型的生产成本函数,  $Q_i$  表示发电商  $i$  的发电出力,  $\alpha_i$  和  $\beta_i$  为生产成本函数系数,非负<sup>[24]</sup>. 假设每个发电商向 ISO 提交线性供应函数,即  $P_i = \alpha'_i + \beta'_i Q_i$ , 参考文献[17,24-25]证明为了达到最优,  $\alpha'_i$  应等于真实的成本系数  $\alpha_i$ ,  $\beta'_i$  应等于  $\beta_i$ , 即  $P_i = \alpha_i + \beta_i Q_i$ ,  $\alpha_i$  和  $\beta_i$  表示发电商供应函数的截距和斜率;  $-D_j(Q_j) = -d_j Q_j - b_j Q_j^2 = d_j(-Q_j) - b_j(-Q_j)^2$  表示负荷  $j$  消耗了  $-Q_j(-Q_j \geq 0)$  单位的电量获得的实际效用,为了便于计算,将负荷的效用当作负成本<sup>[19]</sup>;  $Q_i \gamma_i \pi$  表示燃料发电机的排放成本,  $\gamma_i$  表示第  $i$  台燃料发电机的排放系数 ( $t/(kW \cdot h)$ ),  $\pi$  表示碳排放的社会成本(SCC),即碳排放的惩罚;线性函数  $MC_m(Q_{mg}^s)$  表示电网向微电网购买电能的成本;  $MD_m(Q_{gm}^{(t)})$  表示微电网向电网输送电能的收益,  $Q_{mg}^s$  表示 ISO 从微电网实际购买的电能,  $Q_{gm}^{(t)}$  表示微电网一期从电网购买的电能.

约束:

1) 电网线路传输容量约束

$$-C_l^{\min} \leq \sum_n Q_n \varphi_{nl} \leq C_l^{\max}, \forall l(\varepsilon_l^-, \varepsilon_l^+) \quad (2)$$

式中  $n$  表示电网中的节点,  $l$  表示电力传输线,  $\varphi_{nl}$  表示节点  $n$  在传输线  $l$  的功率传输分布因子(PTDF),即节点对之间的传输功率变化时引起的支路潮流变化量;  $C_l^{\min}$ ,  $C_l^{\max}$  分别表示传输线  $l$  通过电流的下限和上限.

2) 电力平衡约束

$$\sum_i Q_i + \sum_j Q_j + \sum_m (Q_{mg}^s - Q_{gm}^{(t)}) = 0, (\mu) \quad (3)$$

式中  $Q_{mg}^s$  表示 ISO 的采购决策,即向微电网实际采购的电能;  $Q_{gm}^{(t)}$  表示  $t$  时期电网向微电网出售的电能.该式表示电网中功率要平衡,即总需求等于总产出.

3) 电网的碳排放上限约束

$$\sum_i \gamma_i Q_i \leq Cap(\lambda) \quad (4)$$

式中  $Cap$  表示碳排放的上限,单位  $t$ .

4) 发电商的出力约束

$$Q_i - R_i^{\text{lo}} \geq 0, \forall i(\tau_i) \quad (5)$$

$$Q_i^{\text{up}} - R_i \geq 0, \forall i(\nu_i) \quad (6)$$

式中最大出力  $Q_i^{\text{up}}$  指安装时的出厂容量,最小出力  $R_i^{\text{lo}}$  指发电机能够维持可靠运行的最小状态.

5) ISO 采购微电网电能的约束

$$0 \leq Q_{mg}^s \leq \hat{Q}_{mg}^{(t)}, \forall m(\nu m) \quad (7)$$

式中  $\hat{Q}_{mg}^{(t)}$  表示  $t$  时期微电网可以卖出的最大电能, ISO 从微电网购买的电量由  $\hat{Q}_{mg}^{(t)}$  限定.电网公司在采购微电网的电能时,要考虑微电网内部的电力供应和功率平衡.

6) 非负约束

$$Q_i \geq 0, \forall i(\pi_i) \quad (8)$$

$$-Q_j \geq 0, \forall j(k_j) \quad (9)$$

以上约束右边括号表示对偶变量(二元变量或者影子价格).

## 2.2 下层优化模型

假定微电网和 ISO 进行电能交易时只能作为价格接受者,并以一定数量的电能投标,那么下层微电网就会根据上层 ISO 的决策选择关闭和开启一定的机组,在保证微网内电力供应的同时寻求最小运营成本,获得最大利润,下层模型也可称为能源管理系统(EMS),模型如下

$$\min_Q \sum_t \sum_{m \in M} \sum_{i \in G_m} MCO_i^{(t)} Q_{im}^{(t)} + SC_i^{(t)} A_{im}^{(t)} + p_m^{(t)} (Q_{gm}^{(t)} - Q_{mg}^{(t)}) + S_m Q_{sm}^{(t)} \quad (10)$$

式中  $MCO_i^{(t)}$  表示  $t$  时期微电网第  $i$  个发电单元每发电 1 kWh 的运营和维护成本;  $M$  表示电网中的微电网数量;  $G_m$  表示第  $m$  个微电网中发电单元数量;  $Q_{im}^{(t)}$  表示第  $m$  个微电网的第  $i$  发电单元  $t$  时期的发电量;  $SC_i^{(t)}$  表示第  $i$  个发电单元  $t$  时期运行产生的单位成本;  $A_{im}^{(t)}$  表示第  $m$  个微电网第  $i$  个发电单元的工作状态,如果发电单元工作,  $A_{im}^{(t)} = 1$ ,不工作  $A_{im}^{(t)} = 0$ ;  $p_m^{(t)} (Q_{gm}^{(t)} - \hat{Q}_{mg}^{(t)})$  表示微电网和 ISO 进行能源交易的成本,  $p_m^{(t)}$  表示通过 OPF 模型计算出的微电网  $m$  在  $t$  时期的节点电价(LMP),  $Q_{gm}^{(t)}$  表示  $t$  时期 ISO 销售给微电网  $m$  的电能,  $\hat{Q}_{mg}^{(t)}$  表示

$t$  时期微电网  $m$  向 ISO 售电的投标数量;  $S_m$  表示微电网  $m$  电池每存储 1 kWh 的成本,  $Q_{sm}^{(t)}$  表示  $t$  时期末微电网  $m$  存储的电能.

目标函数式 (10) 表示微电网总成本最小, 总成本是发电单元运维成本、发电单元运行产生的固定成本、微电网与 ISO 进行电能交易的成本以及微电网电池存储成本<sup>[4,26]</sup> 的线性函数.

约束:

1) 微电网电力平衡约束

$$\sum_{i \in G_m} Q_{im}^{(t)} + Q_{gm}^{(t)} + \beta_m^{\text{out}} Q_{bm}^{(t), \text{out}} = \sum_{l \in m} Q_{lm}^{(t)} + Q_{bm}^{(t), \text{in}} + \hat{Q}_{mg}^{(t)}, \quad \forall m \in M, t \quad (11)$$

式中  $\beta_m^{\text{out}}$  表示微电网  $m$  电池的放电损失率,  $Q_{bm}^{(t), \text{out}}$  表示  $t$  时期微电网  $m$  电池释放的电能,  $Q_{lm}^{(t)}$  表示  $t$  时期微电网  $m$  中  $l$  负荷的电能需求,  $Q_{bm}^{(t), \text{in}}$  表示  $t$  时期微电网  $m$  向其电池输入的电能. 每一期的电能总输入等于总输出, 即每一期发电单元生产的电能加上从电网公司购买的电能加上储能电池释放的电能等于微电网自身的电力需求加上向储能电池输入的电能加上销售给电网公司的电能报价数量.

2) 电池最大输出约束

$$Q_{bm}^{(t), \text{out}} \leq \beta_m Q_{sm}^{(t-1)}, \quad \forall m \in M, t \quad (12)$$

式中  $Q_{bm}^{(t), \text{out}}$  由电池储能衰变因子  $\beta_m$  和上一期 ( $t-1$  期) 电池所存储的电能决定. 电能从电池中释放出来既可以满足自身需求, 也可以销售给 ISO.

3) 微电网在每期末的存储约束

$$Q_{sm}^{(t)} = \beta_m Q_{sm}^{(t-1)} - Q_{bm}^{(t), \text{out}} + \beta_m^{\text{in}} Q_{bm}^{(t), \text{in}}, \quad \forall m \in M, t \quad (13)$$

式中  $\beta_m^{\text{in}}$  表示电池充电损耗率, 即电池充电时损耗所占百分比, 它受环境温度、电池使用寿命、放电的强度等因素影响, 取值 10% ~ 20%. 本期末电池存储的电能  $Q_{sm}^{(t)}$  等于上一期末 ( $t-1$ ) 期存储的电能  $Q_{sm}^{(t-1)}$  乘以电池储能衰变因子  $\beta_m$ , 减去本期电池输出的电量, 再加本期电池充入的电能  $\beta_m^{\text{in}} Q_{bm}^{(t), \text{in}}$ .

4) 微电网发电单元最大出力和最小出力约束

$$A_{im}^{(t)} Q_{im}^{(t), \text{min}} \leq Q_{im}^{(t)} \leq Q_{im}^{(t), \text{max}} A_{im}^{(t)}, \quad \forall i \in G_m, m \in M, t \quad (14)$$

式中  $Q_{im}^{(t), \text{max}}$  表示微电网  $m$  第  $i$  个发电单元的最大

出力;  $Q_{im}^{(t), \text{min}}$  表示微电网  $m$  第  $i$  个发电单元的最小出力. 由于本文微电网的发电单元只采用光伏和风力发电, 所以发电出力主要受气候影响.

理论上, 风力发电的功率为

$$P_{\text{WT}} = \begin{cases} 0 & v < v_{ci} \text{ 或 } v \geq v_{co} \\ k_1 v + k_2 & v_{ci} \leq v \leq v_N \\ P_N & v_N \leq v \leq v_{ci} \end{cases}$$

$$k_1 = \frac{P_N}{v_N - v_{ci}}, \quad k_2 = -k_1 v_{ci}$$

式中  $v$  为目标高度处的风速,  $v_{ci}$  为切入风速,  $v_{co}$  为切出风速,  $v_N$  为额定风速,  $P_N$  为风机额定输出功率. 光伏发电的功率取决于光伏电池的效率, 环境温度和太阳光照强度会影响光伏电池效率, 在此不做详细介绍.

5) 微电网向 ISO 投标数量约束

$$\hat{Q}_{mg}^{(t)} \leq \sum_i Q_{im}^{(t)} + \beta_m Q_{sm}^{(t-1)}, \quad \forall m \in M, t \quad (15)$$

本期微电网向 ISO 的投标数量不能超过本期微电网生产的电能加上一期储能电池中剩余的电能. 微电网运营商可以在电价较低时存储电能, 电价较高时出售电能.

6) 微电网电池存储约束

$$Q_{sm}^{(t)} \leq Q_{sm}^{\text{max}}, \quad \forall m \in M, t \quad (16)$$

式中  $Q_{sm}^{\text{max}}$  表示微电网  $m$  电池最大存储容量. 假定微电网同一期只存在充电和放电两种情况, 模型计算时采用一个小时的步长, 因此忽略存储容量的衰减.

7) 电池充电和放电以及电能约束

$$Q_{bm}^{(t), \text{out}} \leq \beta_m Q_{sm}^{\text{max}} A_{dm}^{(t)}, \quad \forall m \in M, t \quad (17)$$

$$Q_{bm}^{(t), \text{in}} \leq \beta_m Q_{sm}^{\text{max}} A_{cm}^{(t)}, \quad \forall m \in M, t \quad (18)$$

$$A_{dm}^{(t)} + A_{cm}^{(t)} \leq 1, \quad \forall m \in M, t \quad (19)$$

式中  $A_{dm}^{(t)}$  表示微电网  $m$  电池的放电状态, 如果放电,  $A_{dm}^{(t)} = 1$ , 如果不放电,  $A_{dm}^{(t)} = 0$ ;  $A_{cm}^{(t)}$  表示微电网  $m$  电池的充电状态, 如果充电,  $A_{cm}^{(t)} = 1$ , 如果不充电,  $A_{cm}^{(t)} = 0$ . 假定微电网在同一时期不充电就放电.

8) 微电网向 ISO 购买电能和销售电能的约束

$$\hat{Q}_{mg}^{(t)} \leq \left( Q_{sm}^{\text{max}} + \sum_{i \in m} Q_{im}^{(t), \text{max}} \right) A_{mg}^{(t)}, \quad \forall m \in M, t \quad (20)$$

$$Q_{gm}^{(t)} \leq \left( Q_{sm}^{\text{max}} + \sum_{i \in m} Q_{im}^{\text{h}} \right) A_{gm}^{(t)}, \quad \forall m \in M, t \quad (21)$$

$$Y_{gm}^{(t)} + Y_{mg}^{(t)} \leq 1, \forall m \in M, t \quad (22)$$

式中  $A_{mg}^{(t)}$  表示微电网  $m$  向 ISO 的售电状态, 如果售电,  $A_{mg}^{(t)} = 1$ , 如果不售电,  $A_{mg}^{(t)} = 0$ .  $A_{gm}^{(t)}$  表示微电网  $m$  从 ISO 购电的状态, 如果购电,  $A_{gm}^{(t)} = 1$ , 如

果不购,  $A_{gm}^{(t)} = 0$ . 约束中  $M$  决定了微电网从 ISO 购买电能和销售电能数量的逻辑限制. 参考文献 [17] 给出了如何求  $M$ .

归纳上述思路, 微电网运营的双层规划模型为

$$\left. \begin{aligned} & \min_{X, Y} Z_{DC}(X, Y), \\ & X = (Q_{mg}^g, Q_{gm}^{(t)}), Y = (Q_{im}^{(t)}, A_{im}^{(t)}, Q_{gm}^{(t)}, \hat{Q}_{mg}^{(t)}, Q_{sm}^{(t)}) \\ & \text{s. t. } -C_l^{\min} \leq \sum_n Q_n \varphi_{nl} \leq C_l^{\max}, \forall l (\varepsilon_l^-, \varepsilon_l^+) \\ & \sum_i Q_i + \sum_j Q_j + \sum_m (Q_{mg}^g - Q_{gm}^{(t)}) = 0, (\mu) \\ & \sum_i \gamma_i Q_i \leq Cap(\lambda) \\ & Q_i - R_i^{lo} \geq 0, \forall i (\tau_i) \\ & Q_i^{up} - R_i \geq 0, \forall i (v_i) \\ & 0 \leq Q_{mg}^g \leq \hat{Q}_{mg}^{(t)}, \forall m (vm) \\ & Q_i \geq 0, \forall i (\pi_i) \\ & -Q_j \geq 0, \forall i (k_i) \end{aligned} \right\} \left. \begin{aligned} & Z_{PC}(X, Y): \sum_{i \in Gm} Q_{im}^{(t)} + Q_{gm}^{(t)} + \beta_m^{out} Q_{bm}^{(t), out} = \sum_{l \in m} Q_{lm}^{(t)} + Q_{bm}^{(t), in} + \hat{Q}_{mg}^{(t)}, \forall m \in M, t \\ & Q_{bm}^{(t), out} \leq \beta_m Q_{sm}^{(t-1)}, \forall m \in M, t \\ & Q_{sm}^{(t)} = \beta_m Q_{sm}^{(t-1)} - Q_{bm}^{(t), out} + \beta_m^{in} Q_{bm}^{(t), in}, \forall m \in M, t \\ & A_{im}^h Q_{im}^{(t), \min} \leq Q_{lm}^{(t)} \leq Q_{im}^{(t), \max} A_{im}^{(t)}, \forall i \in Gm, m \in M, t \\ & \hat{Q}_{mg}^{(t)} \leq \sum_i Q_{im}^{(t)} + \beta_m Q_{sm}^{(t-1)}, \forall m \in M, t \\ & Q_{sm}^{(t)} \leq Q_{sm}^{\max}, \forall m \in M, t \\ & Q_{bm}^{(t), out} \leq \beta_m Q_{sm}^{\max} A_{dm}^{(t)}, \forall m \in M, t \\ & Q_{bm}^{(t), in} \leq \beta_m Q_{sm}^{\max} A_{cm}^{(t)}, \forall m \in M, t \\ & A_{dm}^{(t)} + A_{cm}^{(t)} \leq 1, \forall m \in M, t \\ & \hat{Q}_{mg}^{(t)} \leq (Q_{sm}^{\max} + \sum_{i \in m} Q_{im}^{(t), \max}) A_{mg}^{(t)}, \forall m \in M, t \\ & Q_{gm}^{(t)} \leq (Q_{sm}^{\max} + \sum_{i \in m} Q_{lm}^h) A_{gm}^{(t)}, \forall m \in M, t \\ & A_{gm}^{(t)} + A_{mg}^{(t)} \leq 1, \forall m \in M, t \end{aligned} \right\} Y \in \arg \min_Y \quad (23)$$

### 3 模型求解

#### 3.1 求解方法

参考文献[27]的解法, 利用下层优化问题的 KKT 条件代替下层优化问题, 从而把双层规划转化为单层优化问题. 对给定的  $X$ , 下层优化的 KKT 条件为

$$\frac{\partial Z_{PC}}{\partial Y} + \lambda_e' \frac{\partial g_e}{\partial Y} + \lambda_i' \frac{\partial g_i}{\partial Y} = 0, \quad (24)$$

$$g_e = 0, \lambda_i g_i = 0, \lambda_i \geq 0$$

式中  $\lambda_e, \lambda_i$  是表示拉格朗日乘子的列向量, 其长度为下层中等式约束个数与不等式约束的个数. 在  $Z_{PC}, g_e, g_i$  都是  $Y$  的凸函数时, KKT 条件是约束优化问题取最优的充分必要条件, 即式(24)存在唯一解. 当存在关于  $Y$  的非凸函数时, KKT 条件仅

是约束优化问题取最优的必要条件而不是充分条件,此时由式(24)表示的 KKT 条件可能求得多个  $Y$  值. 此时,为了求得问题的全局最优解,可以由多个起始点并行求解式(24)表示的 KKT 条件,得到多个  $Y$  值,然后取使  $Z_{pc}(X, Y)$  最小的  $Y$  值,即

$$Y = \arg \min_{Y_i} Z_{pc}(X, Y), i = 1, \dots, n \quad (25)$$

式中  $Y_i$  为从第  $i$  个起点出发, KKT 条件式的解;  $n$  为不同的起点个数,当下层为关于  $Y$  的凸优化时,取  $n = 1$ . 把式(25)简记为

$$Y = f_k(X) \quad (26)$$

则双层规划等价于下式的单层优化

$$\begin{aligned} \min_X & Z_{DC}(X, f_k(X)) \\ \text{s. t. } & G_e(X, f_k(X)) = 0 \\ & G_i(X, f_k(X)) \leq 0 \end{aligned} \quad (27)$$

对式(27)利用并行基因算法求解得到最优解  $X^*$ , 令  $Y^* = f_k(X^*)$ , 则  $(X^*, Y^*)$  为双层规划问题的近似全局最优解,在下层为关于  $Y$  的凸优化时,  $(X^*, Y^*)$  为双层规划的全局最优解. 对式(27)使用并行基因算法求解,需要对  $X$  进行编码与解码,而约束条件可以通过增强型拉格朗日乘子解决.

### 3.2 算例

假定某地区配备简单的智能电网,由 25 个节点组成,其中 12 个微电网节点、2 个传统发电机节点. 为了简化模型,假设这 12 个微电网只装备了太阳能发电单元和风能发电单元,配备存储电池和相关的充放电策略. 系统结构图见图 3.

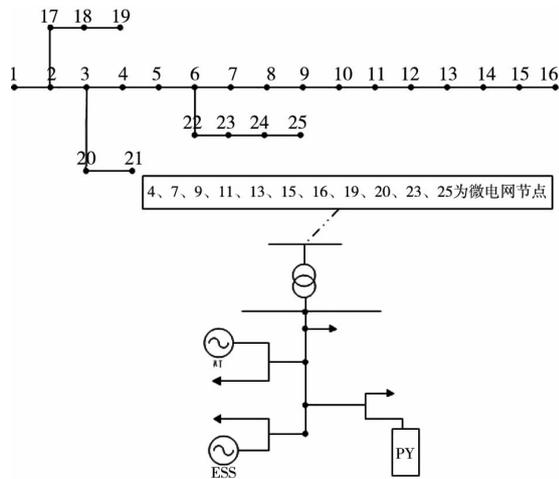


图 3 系统结构图

Fig. 3 Power system topology

气候条件参考了风资源和光资源较好的中国

某地区 2016 年某日的气象数据. 风速、太阳辐射量、环境温度时序图如图 4.

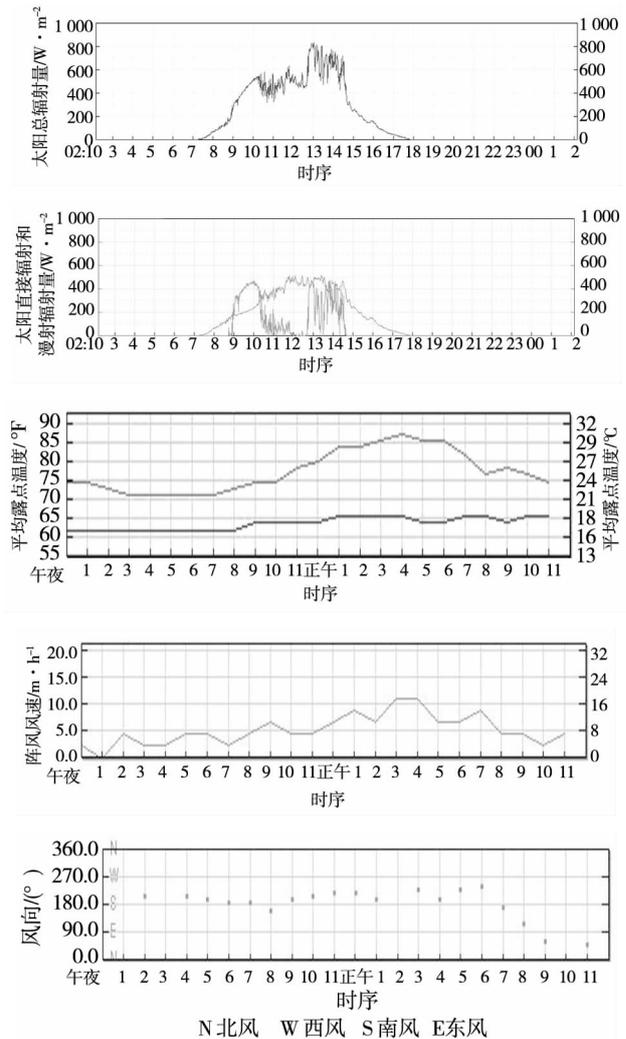


图 4 某地太阳辐射、风速、环境温度时序图

Fig. 4 Timing diagram of solar radiation, wind speed and ambient temperature in a certain place

常规发电机发电成本计算方法前文已经阐述<sup>[17,24]</sup>. 可再生能源发电的成本采用平准化成本 (LCOE), 国际通用的度量方法是包含可再生能源发电的建设成本、运维成本、生命周期发电量以及融资成本,但一般不包括并网和传输成本. 目前可再生能源发电的成本高于传统化石能源发电成本,可以对可再生能源发电进行补贴来提高其竞争力. 调研资料<sup>[28,29]</sup>中可再生能源发电成本的计算结果不尽相同,用三角分布(最小值,众数,最大值)来表示调研资料和文献的统计结果,风力发电平准化成本为(0.51,0.57,0.61) ¥/(kW·h),太阳能发电平准化成本为(0.8,0.98,1.2) ¥/(kW·h). 微电

网储能设备的运行成本参考了国际可再生能源机构(IRENA)给出的结果.微电网作为负荷的电力需求参考了文献[30].

碳排放上限(Cap)和碳排放的社会成本(SCC)的值参考了文献[17,21,35],见表1列出的4种排放控制方案.

表1 排放控制方案  
Table 1 Emission control plan

排放控制方案	SCP1	SCP2	SCP3	SCP4
$SCC/¥ \cdot (tCO_2)^{-1}$	140	140	290	290
$Cap/(tCO_2)$	200	350	200	350

将上文中的算例作为样本,为了便于计算,假定微电网只作为负荷(不考虑发电和存储容量),在一定的排放上限和排放成本的限制下,每一期的LMP通过前文介绍的DCOPF模型进行优化获得.图5给出了分时LMP与可再生能源发电成本的比较.

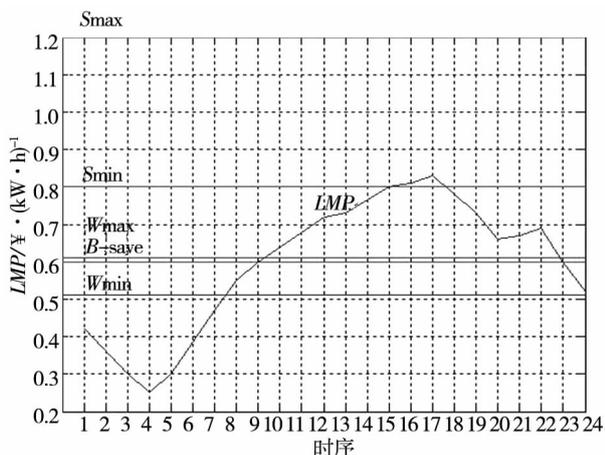


图5 样本中太阳能和风能发电的平准化成本与分时节点边际电价(LMP)

Fig.5 Leveling cost of solar and wind power generation in the sample and locational marginal price (LMP)

## 4 结果分析

根据分时节点边际电价,电能需求以及观测到太阳福照度和风速数据,运用模型就可以优化微电网每一期生产、存储的电能以及和ISO的能量流动.模型对ISO的调度与微电网的运营进行了24h(24期)的规划,根据需要也可以进行其他时间长度的规划.运用MATLAB软件可以很快的求出模型的解.

图6是算例中12个微电网(每个微电网有50个用户)累计的24h运营的优化结果.

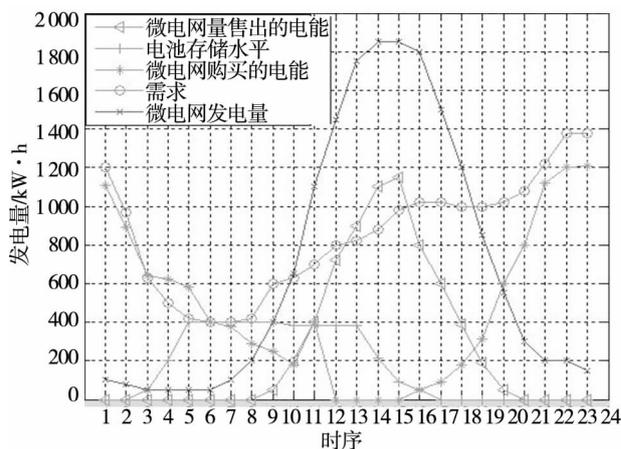


图6 微电网24h运营

Fig.6 Microgrid 24-hour operation plan

从图中可以看出:清晨时分,太阳辐射和风速最低,微电网内绿色能源发电量最低,但从图5可以看出边际节点电价(LMP)也最低,所以微电网向ISO购买电能满足自身的需求并对微电网储能设备进行充电;下午时分,太阳辐射和风速达到最大,绿色能源发电也达到当天最高水平,此时,微电网绿色能源发电除了满足自身需求,还可以将多余的电能出售给ISO满足智能电网的需求.从图6中标线可以看出,绿色能源发电最大时,从ISO购电量最小,向ISO售电量最大.向ISO出售绿色电能将有助于减少化石燃料发电数量,智能电网整体电能供给的增加也降低了电力系统边际价格(实际支付给发电厂商的系统边际电价),电价的降低也带了智能电网整体需求增加.下一节,重点分析由于微电网的绿色发电带来电能供给的增加给电力系统边际价格带来的实际影响,并加入碳排放上限和碳排放成本两个因素进行分析.

### 4.1 合作机制下排放上限和排放成本对SMP的影响分析

图7是峰时(10:00至18:00)在表1的4种排放控制方案下,微电网规模(微电网用户数量)的增长对微电网电价(SMP)造成的降幅.这个降幅是利益相关者合作机制下,微电网仅作为负荷(既没有发电,也没有储能)时和微电网作为电源向ISO供电时的电价的差.

当微电网规模较小时,4种方案差别不大,微

电网电价  $SMP$  减少的幅度也不大,这是因为由微电网输入到主网中的绿色能源较少. 随着微电网规模的增加,SCP1 方案下可获得最大的降幅,当微电网的规模达到 1 000 个用户时,SCP1 方案可以对  $SMP$  电价带来  $11.5 \text{ ¥}/(\text{MW}\cdot\text{h})$  (2.53%) 的降幅. 而更严格的碳排放政策(更低的排放上限和更高的排放成本),如 SCP3,可能会影响到化石能源发电,从而让绿色发电在市场中占有更大的比重. 这是因为更严格的碳排放政策增加了化石能源发电的成本(低排放上限,惩罚更高),从发电商向 ISO 提交的线性供给函数  $P_i = \alpha_i + \beta_i Q_i$  可知,成本增加,供给线上升,整体需求减少,电价增加,产生新均衡点. 而更严格的排放政策不会增加绿色能源发电的成本,它的成本相对化石能源来说更低了,市场规律使得绿色能源发电占有的市场比例上升. 从图 7 中也可以看到,SCP3 虽然是最严格的碳排放政策,可是给  $SMP$  电价带来的降幅不如 SCP1,原因是化石燃料发电供给线的上升带来的新均衡点价格更高,需求更低,虽然绿色能源发电的供给可以抵消一些市场供给的下降,但是电力市场总体电能供给相对于原来的均衡点还是不足. 总的来说,碳排放政策等环境政策的实施,会增加化石能源发电的成本,导致电力市场电价上升,但同时,微电网的绿色能源发电由于不受  $SCC$  和  $Cap$  的影响,它的绿色发电供给会抵消一部分由于排放政策导致的价格上升. 图 9 中给出了进一步的说明.

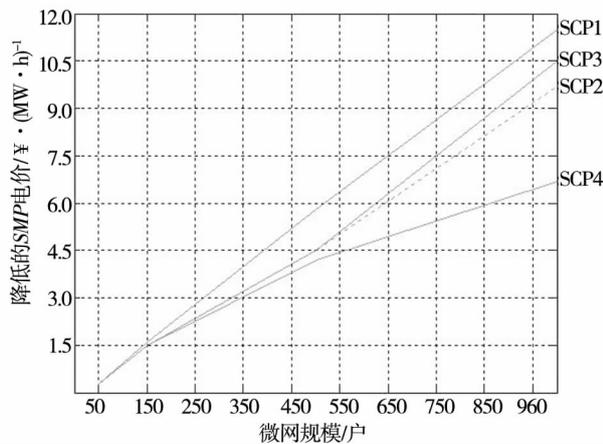


图 7 不同规模的微电网和排放控制方案在高峰时期引起的  $SMP$  电价下降量

Fig. 7  $SMP$  reductions caused by different sides of microgrid and emission control plan during peak periods

#### 4.2 各利益方合作机制下排放上限和排放成本对电力市场需求的影响分析

图 8 是高峰时期微电网绿色发电引起  $SMP$  电价下降从而引发的总需求的增长图. 从图 8 可以看出,有了微电网的绿色发电机和存储设备后,表 1 的 4 种排放方案下,电力需求都增加了,这个电力需求指的是负荷节点的需求,而不是微电网自身的用电需求. 因此,在碳排放环境约束和市场供需共同引导消费的情况下,微电网的绿色发电有利于获得更低的电价,并在高峰时期增加电力市场的电力需求. 有些文献指出,微电网可以在高峰时段削峰填谷,减少电力拥堵,这也和本文的研究相符合. 但是,高  $SCC$  相对于低  $SCC$  会增加更多的化石能源发电成本,使得整个电力市场的供给不足,电价上升,从而导致高  $SCC$  时微电网绿色发电提高电力需求的量不如低  $SCC$  时多,从图 8 中可见,SCP1 提高的需求量要高于 SCP3,SCP2 提高的需求量要高于 SCP4. 而更高的排放上限 ( $Cap$ ) 会允许更多的化石燃料发电,相应的电力市场对微电网的绿色发电需求变小了,绿色发电导致电力市场电价下降的量就少了(见图 8 的 SCP2 相对于 SCP1,SCP4 相对于 SCP3). 从图 8 中可以看出,SCP1 和 SCP2 比较接近, $Cap$  的增加没有明显的改变需求增长曲线,而  $SCC$  的变化使得 SCP1 和 SCP3 差距比较明显,所以碳排放成本对需求的影响要大于排放上限对需求的影响.

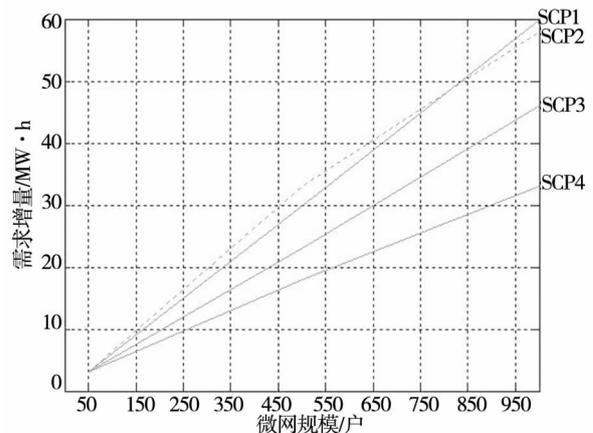


图 8 高峰时期微电网绿色发电引起  $SMP$  电价下降从而引发的总需求的增长图

Fig. 8 Growth of total demand caused by the decline in  $SMP$  tariffs caused by green power generation in the microgrid during peak periods

为了简化研究,图 9 的电力市场均衡图没有

考虑碳排放上限 ( $Cap$ ) 的影响. 如图所示: 原有的电力市场均衡在  $Q$  点, 受到碳排放社会成本的作用, 发电成本增加, 电价增加, 需求减少, 均衡点由原来的  $Q$  点向左上方移动到新的位置. 当  $SCC1 = 140 \text{ ¥/tCO}_2$  时, 均衡点  $Q \rightarrow Q_1$ ; 当  $SCC = 290 \text{ ¥/tCO}_2$  时, 均衡点  $Q \rightarrow Q_2$ . 微电网的绿色能源发电加入电力市场后带来了成本和化石能源发电接近的电能供给 (上文提到, 在考虑奖励和惩罚后, 绿色发电成本和化石燃料发电的成本就接近了), 供给增加有助于均衡点向原来位置移动 ( $Q_1, Q_2 \rightarrow Q$ ). 从图9可以看出:  $SCC1 \leq SCC2$ , 供给线  $SCC1$  线比供给线  $SCC2$  线位置低,  $SCC2$  导致供给函数下降的程度要少于  $SCC1$  导致供给函数下降的程度, 即  $\Delta SMP_2 \leq \Delta SMP_1$ . 因此,  $SCC2$  下绿色发电引起的需求增长要小于  $SCC1$ , 即  $\Delta Q_2 \leq \Delta Q_1$ , 这也进一步解释了高  $SCC$  时微电网绿色发电提高电力需求的量不如低  $SCC$  时多的结论.

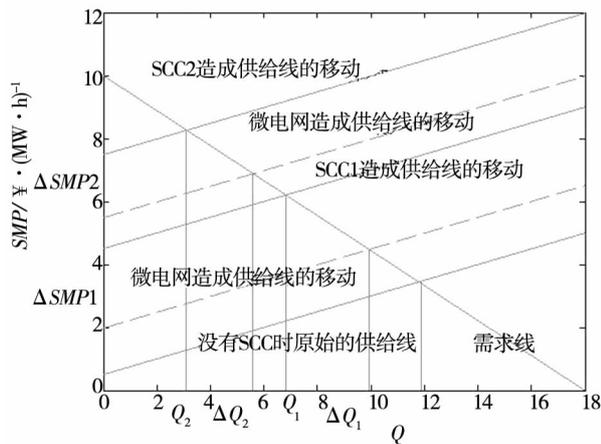


图9 排放成本和微电网绿色发电对电力市场均衡的影响图

Fig. 9 Emission cost and microgrid green power generation impact on electricity market equilibrium

因此, 碳排放和环境保护的政策应该循序渐进, 不能一刀切, 在微电网利益相关者没有达成合作的情况下, 仅制定严格的减排标准, 会减少电力用户的需求, 影响经济的发展.

#### 4.3 排放上限、排放成本、微电网对碳排放和绿色能源普及率的在各利益方合作机制下的影响分析

表2 是不同规模的微电网在4种排放控制方案下获得的减排量, 这个减排量是微电网不发电和微电网发电时24 h所有发电商碳排放量的差. 减排效果也反应了微电网绿色能源发电水平. 表

1的4个排放控制方案的  $Cap$  和  $SCC$  值各不同, 所以不同方案下电力需求、电力调度、电价和排放的均衡解也不相同. 显然, 小型规模的微电网(50户)对碳排放没有产生显著的影响, 这是因为其绿色能源发电能力有限, 较大规模的微电网对减排的影响就比较显著了.

表2 减排量

Table 2 Emission reductions

微网 规模/户	排放控制方案			
	SCP1	SCP2	SCP3	SCP4
	减排量 / $\text{tCO}_2 \cdot 24 \text{ h}^{-1}$			
50	0.08	0.49	2.27	4.85
150	0.47	2.88	20.16	34.57
500	1.71	10.02	65.48	121.43
1000	3.37	20.45	133.8	230.42

从表2的数据可以看出, 更高的  $SCC$  (SCP3和SCP4) 会产生更高的减排量, 因为它会增加化石燃料的发电成本, 从而将发电商的供给函数向上移动, 新的均衡点下电价增加, 需求减少, 发电商生产的电能减少, 减排量上升 (图9中也有反映). SCP4导致的需求增长率最低 (对应于微电网发电引起的  $SMP$  电价降低量最少), 但它的减排量最高, 这是因为微电网的绿色发电供应在负荷电力需求的上升中占了更高的比例. 虽然SCP3和SCP4具有相同的  $SCC$ , 但是SCP4相对于SCP3具有更高的排放限制, 所以它相对SCP3来说需求增长的幅度较小.

从前两节可以得出结论: 微电网的绿色能源发电有助于降低电力价格和增加电力市场需求. 从图7可以看出, 微电网的绿色能源发电, 增加了电力需求, 使得供给线向下移动, 如果移动的位置接近原来的供给线, 则减排效果不显著. 如  $SCC1$  (SCP1和SCP2) 向原始  $SCC$  移动, 均衡点  $Q_1$  向  $Q$  移动, 电力需求又达到实施  $SCC$  之前的水平, 减排量减少了. 这个结论从表2中也得到了印证, SCP1和SCP2减排量少于SCP3和SCP4.

表3 是不同规模微电网在不同排放控制方案下的绿色能源普及率 (微电网绿色能源发电在总的电力消费量中所占比重). 随着社区微电网规模的增大, 绿色能源普及率增加了. 1000户规模的微电网在SCP3方案时达到最大普及率28.01%. 绿色能源的普及率也可以通过提高碳的

社会成本来增加(见 SCP3, SCP4). 从表中还可以看出,对于相同的排放成本,随着排放上限  $Cap$  的增加,绿色能源普及率会降低(SCP4 和 SCP3 比较).

表3 绿色能源普及率

Table 3 Green energy penetration rate

微网 规模/户	排放控制方案			
	SCP1	SCP2	SCP3	SCP4
	普及率(%)			
50	0.32	0.21	0.62	0.56
150	2.59	1.81	5.19	4.49
500	8.51	5.69	15.49	14.28
1000	15.31	10.47	28.01	25.02

## 5 结束语

微电网运营和管理的过程中,涉及了政府、电网公司、发电商、微电网运营商、用户等多个利益相关者,他们的利益诉求各不相同,相互制约,这就造成了运用一般的数学优化方法不能描述其中的复杂性.本文提出基于节能减排社会福利最大化及微电网运营成本最小,利润最大化的双层规

划模型,可以在一定的约束下寻找全局优化解.

主要的研究结果如下:1)建立了可求解的双层规划模型,使得微电网利益相关者有了合作的空间.政府和电网公司作为上层的领导者应该完善相应的政策,鼓励有条件的地区大力发展微电网,加快电力技术创新,并充分利用微电网削峰填谷的能力,使其成为常规供电最有益的补充;2)较好的体现利益相关者合作的协调机制,促进微电网产业的发展.微电网运营商作为下层追随者应该不断的进行技术创新降低发电成本,积极参与电力市场,影响政府和电网公司,双方在合作的基础上才能发挥微电网项目的最大效益,提高社会福利.

为了简化模型的计算,本文没有考虑太阳能和风能的随机性,只是取了某一段时间的平均值.模型中也没有考虑其他绿色能源发电,如热电联产和生物能发电.另外,计算时还忽略了电能传输过程中的网损以及化石燃料发电的最大和最小出力的约束.未来的研究可以根据实际情况,将这些因素加入到模型之中.

## 参考文献:

- [1] Kim H M, Wei W, Kinoshita T. A new modified CNP for autonomous microgrid operation based on multiagent system[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2011, 6(1): 139 - 146.
- [2] Koltsaklis N E, Giannakakis M, Georgiadis M C. Optimal energy planning and scheduling of microgrids[J]. Chemical Engineering Research & Design, 2018, 131(3): 318 - 332.
- [3] Wang D, Qiu J, Reedman L, et al. Two-stage energy management for networked microgrids with high renewable penetration [J]. Applied Energy, 2018, 226(9): 39 - 48.
- [4] Grover-Silva E, Heleno M, Mashayekh S, et al. A stochastic optimal power flow for scheduling flexible resources in microgrids operation[J]. Applied Energy, 2018, 229(11): 201 - 208.
- [5] Rabiee A, Sadeghi M, Aghaei J. Modified imperialist competitive algorithm for environmental constrained energy management of microgrids[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 202(11): 273 - 292.
- [6] 史开拓, 刘念, 张建华, 等. 多运营主体的微电网随机匹配交易机制[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 587 - 594. Shi Kaituo, Liu Nian, Zhang Jianhua, et al. Random matching trading mechanism in microgrid of multi-operators[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 587 - 594. (in Chinese)
- [7] Jimeno J, Anduaga J, Oyarzabal J, et al. Architecture of a microgrid energy management system[J]. European Transactions on Electrical Power, 2011, 21(2): 1142 - 1158.
- [8] Khodaei A, Shahidehpour M. Microgrid-based co-optimization of generation and transmission planning in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1582 - 1590.
- [9] 孔祥玉, 曾意, 陆宁, 等. 基于多智能体竞价均衡的微电网优化运行方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(6): 1626 - 1634.

- Kong Xiangyu, Zeng Yi, Lu Ning, et al. Optimal bidding management for agent-based microgrid operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(6): 1626 – 1634. (in Chinese)
- [10] 王成山, 洪博文, 郭力. 不同场景下的光蓄微电网调度策略[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1775 – 1782.  
Wang Chengshan, Hong Bowen, Guo Li. Dispatch strategies of PV-battery microgrid in different scenarios[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1775 – 1782. (in Chinese)
- [11] 赵金利, 宿洪智, 李鹏, 等. 基于灵敏度分析的微电网互动运行成本计算方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 208 – 214.  
Zhao Jinli, Su Hongzhi, Li Peng, et al. Cost calculation based on sensitivity analysis for interactive operation of microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 208 – 214. (in Chinese)
- [12] 刘一欣, 郭力, 王成山. 多微电网参与下的配电侧电力市场竞争价博弈方法[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2469 – 2476.  
Liu Yixin, Guo Li, Wang Chengshan. Optimal bidding strategy for microgrids in electricity distribution market[J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2469 – 2476. (in Chinese)
- [13] Quashie M, Marnay C, Bouffard F, et al. Optimal planning of microgrid power and operating reserve capacity[J]. Applied Energy, 2018, 210(1): 1229 – 1236.
- [14] Chaouachi A, Kamel R M, Andoulsi R, et al. Multiobjective intelligent energy management for a microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 60(4): 1688 – 1699.
- [15] Asimakopoulou G E, Dimeas A L, Hatzigiorgiou N D. Leader-follower strategies for energy management of multi-microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4): 1909 – 1916.
- [16] 刘振国, 胡亚平, 陈炯聪, 等. 基于双层优化的微电网系统规划设计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, (8): 124 – 133.  
Liu Zhenguo, Hu Yaping, Chen Jiongcong, et al. A planning and design method for microgrid based on two-stage optimization[J]. Power System Protection and Control, 2015, (8): 124 – 133. (in Chinese)
- [17] Feijoo F, Das T K. Design of Pareto optimal CO<sub>2</sub> cap-and-trade policies for deregulated electricity networks[J]. Applied Energy, 2014, 119(4): 371 – 383.
- [18] 王素凤, 杨善林, 彭张林. 面向多重不确定性的发电商碳减排投资研究[J]. 管理科学学报, 2016, 19(2): 31 – 41.  
Wang Sufeng, Yang Shanlin, Peng Zhanglin. Research on the power producer's carbon abatement investment in view of multiple uncertainties[J]. Journal of Management Sciences in China, 2016, 19(2): 31 – 41. (in Chinese)
- [19] Battistelli C, Conejo A J. Optimal management of the automatic generation control service in smart user grids including electric vehicles and distributed resources[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 111(2): 22 – 31.
- [20] 石莹, 朱永彬, 王铮. 成本最优与减排约束下中国能源结构演化路径[J]. 管理科学学报, 2015, 18(10): 26 – 37.  
Shi Ying, Zhu Yongbin, Wang Zheng. The cost-effective path of energy mix evolution for China under the emissions budgets[J]. Journal of Management Sciences in China, 2015, 18(10): 26 – 37. (in Chinese)
- [21] 张国兴, 叶亚琼, 管欣, 等. 京津冀节能减排政策措施的差异与协同研究[J]. 管理科学学报, 2018, 21(5): 111 – 126.  
Zhang Guoxing, Ye Yaqiong, Guan Xin, et al. Difference and collaboration in Jing-Jin-Ji's energy saving and emission reduction policy measures[J]. Journal of Management Sciences in China, 2018, 21(5): 111 – 126. (in Chinese)
- [22] 张新华, 卢灿华, 陈志伟. 碳调度模式下火力发电商的碳减排投资策略分析[J]. 中国管理科学, 2017, 25(11): 179 – 188.  
Zhang Xinhua, Lu Canhua, Chen Zhiwei. Analysis on carbon abatement investment strategy for thermal power generation-

- companies in carbon dispatching mode[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2017, 25(11): 179–188. (in Chinese)
- [23] 韩 强, 刘正林. 基于总量控制的工业领域能源分配双层规划模型[J]. *中国管理科学*, 2013, 21(2): 168–174.  
Han Qiang, Liu Zhenglin. Bi-level programming model for industrial energy allocation based on total amount control[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2013, 21(2): 168–174. (in Chinese)
- [24] Hu X, Ralph D. Using EPECs to model bilevel games in restructured electricity markets with locational prices[J]. *Operations Research*, 2007, 55(5): 809–827.
- [25] Quashie M, Bouffard F, Marnay C, et al. On bilevel planning of advanced microgrids[J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2018, 96(3): 422–431
- [26] Bahramara S, Moghaddam M P, Haghifam M R. A bi-level optimization model for operation of distribution networks with micro-grids[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2016, 82(11): 169–178.
- [27] 胡小平, 赵 梅, 何建敏. PGAs 求解双层规划及其在分销系统优化设计中的应用[J]. *系统工程*, 2008, 26(6): 16–21.  
Hu Xiaoping, Zhao Mei, He Jianmin. Solving bi-level programming by PGAs and its application to the optimal design for distribution system[J]. *Systems Engineering*, 2008, 26(6): 16–21. (in Chinese)
- [28] 马翠萍, 史 丹, 丛晓男. 太阳能光伏发电成本及平价上网问题研究[J]. *当代经济科学*, 2014, 36(2): 85–94.  
Ma Cuiping, Shi Dan, Cong Xiaonan. The research on the generation cost of solar photovoltaic electricity and a pathway to grid parity[J]. *Modern Economic Science*, 2014, 36(2): 85–94. (in Chinese)
- [29] U. S. Energy Information Administration. Wind and Solar Data and Projections from the U. S. Energy Information Administration: Past Performance and Ongoing Enhancements[EB/OL]. <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/supplement/renewable/pdf/projections.pdf>, 2016–03
- [30] Colmenar-Santos A, Campiñez-Romero S, Pérez-Molina C, et al. Profitability analysis of grid-connected photovoltaic facilities for household electricity self-sufficiency[J]. *Energy Policy*, 2012, 51: 749–764.
- [31] Lei X, Yan W, Peng P, et al. An optimal purchase and sale power model considering microgrids[J]. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2015, 25(2): 246–261.
- [32] Taha A F, Hachem N A, Panchal J H. A quasi-feed-in-tariff policy formulation in micro-grids: A bi-level multi-period approach[J]. *Energy Policy*, 2014, 71: 63–75.
- [33] Lv T, Ai Q, Zhao Y. A bi-level multi-objective optimal operation of grid-connected microgrids[J]. *Electric Power Systems Research*, 2016, 131(2): 60–70.
- [34] 付秋芳, 忻莉燕, 马士华. 惩罚机制下供应链企业碳减排投入的演化博弈[J]. *管理科学学报*, 2016, 19(4): 56–70.  
Fu Qiufang, Xin Liyan, Ma Shihua. Evolutionary game of carbon-emission-reduction investment in supply chains under a contract with punishment mechanism[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2016, 19(4): 56–70. (in Chinese)
- [35] 张国兴, 张振华, 管 欣, 等. 我国节能减排政策的措施与目标协同有效吗? ——基于1 052 条节能减排政策的研究[J]. *管理科学学报*, 2017, 20(3): 161–181.  
Zhang Guoxing, Zhang Zhenhua, Guan Xin, et al. Is the synergy between measures and objectives of energy conservation and emission reduction policies in China effective? —Research on 1 052 energy conservation and emission reduction policies[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2017, 20(3): 161–181. (in Chinese)
- [36] 潘成蓉, 龙 勇, 何 攻. 微电网与大电网合作动因及影响因素分析[J]. *生态经济*, 2016, 32(3): 97–100+112.  
Pan Chengrong, Long Yong, He Gong. Reasons and factors of cooperation between micro-gird and large grid[J]. *Ecological Economy*, 2016, 32(3): 97–100+112. (in Chinese)
- [37] 龙 勇, 汪谷腾, 孟卫东, 等. 微电网与大电网的竞合关系及其对社会福利效应的影响[J]. *重庆大学学报*, 2014,

37(7): 147 – 152.

Long Yong, Wang Guteng, Meng Weidong, et al. The competing relationship of micro-grid and large-grid and its impact on social welfare effects[J]. Journal of Chongqing University, 2014, 37(7): 147 – 152. (in Chinese)

## A bi-level programming model cooperatively operated by the microgrid stakeholders

*LONG Yong*<sup>1</sup>, *LIU Chao*<sup>1,2\*</sup>, *WANG Yu*<sup>1</sup>

1. School of Economics and Business Administration, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. School of Journalism and Communication, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China

**Abstract:** The construction and operation of microgrid involve multiple stakeholders, whose goals and interests are different and mutually-restrained. Therefore, the key factor for a project's successful operation is to find a multiparty cooperation mechanism to balance the interests of all parties. To solve this problem, a bi-level programming model of cooperative operation of microgrid stakeholders is proposed, where the upper level programming aims at realizing the least social cost in power dispatching to achieve the largest social welfare, and where the lower level programming objective is to achieve the least cost of microgrid operation to maximize the operators' profit. The algorithm of the model is proposed and, through the algorithm analysis, the model is validated. The conclusion is that, under the mutually interacted cooperation mechanism between the upper level and the lower level, the green energy generation of the microgrid can effectively increase the demand for power, lower the price of power users, increase the operators' profit, reduce carbon emission, and improve the welfare of the whole society.

**Kew words:** microgrid; stakeholder; cooperation; bi-level programming model; carbon emissions