

DOI: 10.7667/PSPC180429

## 基于 MILP 模型的多主体平衡的微网日前最优调度

郝超超<sup>1</sup>, 李晓明<sup>1</sup>, 刘胜<sup>1</sup>, 孙顺祥<sup>1</sup>, 董子凡<sup>1</sup>, 刘恒<sup>2</sup>

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 孝感供电公司, 湖北 孝感 432100)

**摘要:** 新能源微电网作为一种综合能源系统, 有利于解决能源短缺和环境污染的问题, 具有十分广阔的应用前景。为了实现多主体利益的平衡, 同时考虑源-网-荷-储的交互影响, 建立了以运行成本和单位购电价格为目标的混合整数规划(MILP)模型。首先对微网中起到平衡作用的蓄电池主体模型进行适当简化, 通过实验方法获得蓄电池寿命损耗费用。其次基于 MILP 模型分析了蓄电池与不同利用率的新能源对调度成本的影响。以第十届电工数模竞赛试题为例进行仿真分析, 结果表明该模型能有效提高资源利用率并降低运行成本, 实现综合效益的提升。

**关键词:** 新能源微网; 混合整数规划; 多主体; 平衡优化

### Day-ahead optimal dispatch for multi-agent balanced micro grid based on MILP model

HAO Chaochao<sup>1</sup>, LI Xiaoming<sup>1</sup>, LIU Sheng<sup>1</sup>, SUN Shunxiang<sup>1</sup>, DONG Zifan<sup>1</sup>, LIU Heng<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Xiaogan Power Supply Company, Xiaogan 432100, China)

**Abstract:** Microgrid is now conducive to solve the problems of energy storage and environment pollution as a comprehensive energy system, which has a bright future for application. A Mixed Inter Programming (MILP) model is presented in this paper with the modeling purpose of operating cost and unit power purchase price, which considers the interaction among source-grid-load-storage and aims to keep the balance among multi-subject interests. Firstly, the main battery model is appropriately simplified for its important balancing role in microgrid, and the cost of battery lifetime loss is obtained through experiments. Next, the influence of battery on dispatching cost is analyzed based on MILP model compared with that of new energy of different utilization factors. The system benefits of proposed model are verified by analyzing the case in 10th EMCM, the simulation result demonstrates that the proposed model can improve utilization rate of resources, reduce operating cost and increase comprehensive benefits.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277134).

**Key words:** new energy micro grid; mixed integer programming; multi-agent; equilibrium optimization

## 0 引言

随着全球能源互联网的概念逐渐推向市场, 含有风能、太阳能等可再生能源的微网具有能源利用效率高、环境污染小、供电可靠性高等特点, 逐渐得到广泛的应用。新能源微网是未来能源互联网在配网建设中的有机组成<sup>[1-2]</sup>。虽然多数研究模型在一定程度上实现了电源与网架结构的协调规划, 但在优化过程中建立的负荷模型通常忽略了需求侧响应的重要作用<sup>[3-4]</sup>, 这就从本质上忽略了源-网-荷-储可能存在的交互影响, 可能导致无法得到最优的规划方案。

微电网的能量管理是非常复杂的 MILP 问题, 且是一个多目标的控制系统, 目前对于微电网的日前调度优化, 如何改进调度优化方法以及深入优化调度模型都有待进一步研究。

文献[5-8]提出一种短时预测调度, 滚动优化未来一段时间内的能源调度方案。该方案的优点在于可以提高对预测微网负荷的频数, 修正负荷预测中误差带来的影响。但选取不同步长得到的优化结果不同, 求解的结果具有局限性, 且选取多大的步长以抵消修正预测的误差, 尚未解释清楚。但分布式控制方案提出: 电池的荷电状态(SOC)需要兼顾下一调度周期的需求, 将其作为全局优化的条件, 能够进一步完善微网的经济调度。文献[9]提出基于博

基金项目: 国家自然科学基金资助(51277134)

弈论的源-网-荷多层博弈经济调度方法, 以发电运行成本最小、网损最小和电压偏移合格率最高为目标的多目标优化调度模型, 该方法可以提高配电网对可再生能源的消纳能力, 提升系统经济性。

此外, 关于微网中蓄电池调度模型, 由于蓄电池寿命的影响因素十分复杂, 不同的文献进行了不同程度的简化。文献[10-15]从蓄电池容量优化的角度为微网经济调度提出了一种可行的方案, 但这些方案未对可再生资源的利用情况加以分析, 新能源的利用效率情况还有待研究。文献[16]则是从蓄电池的放电效率和蓄电池的循环深度进行建模, 推导了反映蓄电池一次充放电损耗的数学模型, 并引入权重因子对该数学模型进行简化, 对蓄电池使用寿命与日前调度的问题进行了研究。

基于以上研究成果, 从实际的角度出发, 配网以及微网还存在用户、电网、新能源及蓄电池等多个主体, 如何均衡各方利益也成为新能源微网优化调度的一个重要研究方向。

基于以上考虑, 本文将微网分为蓄电池、新能源、电网微网及用户共 3 个主体进行规划。对于蓄电池主体, 将从两方面进行考虑, 一方面是蓄电池一次充放电损耗以及循环使用次数, 另一方面是蓄电池的核电状态要满足下一个调度周期的需求。对于新能源主体, 将分析新能源利用比例对微网日前调度产生的影响。对于电网微网及用户主体, 建立基于 MILP 调度模型以实现多主体平衡的日前优化调度, 进一步将微网调度模型精细化。然后综合仿真建模, 并利用实际数据对该模型进行了仿真验证。

## 1 典型微网模型的构建

根据可再生能源接入电力系统方式的不同, 分为大规模接入和分布式接入, 而分布式接入主要用于微网。微网是由分布式电源、储能装置、能量转换装置、负荷、监控和保护装置构成的小型发配电系统。图 1 展示了一个含有风机、光伏电池、储能装置以及常规负荷的微网系统。

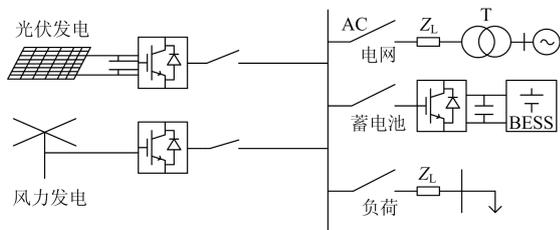


图 1 典型微网模型构成

Fig. 1 Typical microgrid model

新能源微网在满足各电源运行约束和负荷需求的基础上, 还需要满足能源利用率的提升, 并可对未来 24 h 的出力调控进行优化, 实现经济最优。系统的总成本包括风机和光伏发电成本、蓄电池的成本以及并网运行的微网系统同外部电网电能交换的成本。

### 1.1 风机及光伏发电模型构建

根据气象局发布的日前气象、辐射、温度数据可以计算得到太阳能光伏发电的功率输出<sup>[17]</sup>为

$$P_{PV} = P_{PST} \frac{G_T}{G_{GST}} [1 + k(T_c - T_r)] \quad (1)$$

式中:  $P_{PV}$  为太阳能光伏发电的输出功率;  $P_{PST}$  为标准测试下的最大测试功率;  $G_{GST}$  为标准测试光强大小;  $G_T$  为实际光强;  $k$  为温度系数;  $T_c$  和  $T_r$  分别为太阳能电池板的工作温度和参考温度。

风力发电的功率输出曲线可通过风速预测和风速-功率曲线拟合的方式获取, 通过气象局获取得到风速信息或者拟合预测风速信息, 根据式(2)获得任意风速的功率输出<sup>[18]</sup>为

$$P_{wv}(v) = \begin{cases} 0, v \leq v_0 \text{ 或 } v \geq v_m \\ av^3 + bv^2 + cv + d, v_1 \leq v \leq v_2 \\ P_{wm}, v_2 \leq v \leq v_m \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $P_{wv}$  为风速的输出功率;  $v$  的 3 种风速分别代表切入、切出以及额定风速;  $P_{wm}$  为额定功率;  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  代表根据风机拟合的参数。

### 1.2 蓄电池储能模型的简化

蓄电池在微网的调度中起到“削峰填谷”的重要作用, 不同的优化模型中对蓄电池调度模型的处理方式也不相同。文献[19]中在每个调度周期内, 蓄电池只能循环调度一次, 定期加以更换, 从而建立优化调度模型。该模型侧重于将蓄电池作为一个固定更换的设备进行考虑, 以达到简化蓄电池模型的目的, 但对于精细化的日前调度而言, 并不能很好地满足需求。文献[16]则是从蓄电池使用成本及寿命的角度出发, 推导出了蓄电池一次放电损耗费用和放电的深度以及循环次数存在密不可分的联系, 应用该模型可以很好地解决多次循环的日前经济调度, 其一次放电损耗费用如式(3)所示。

$$C_{cd} = \frac{k_0(1 - k_1 SOC + k_2 SOC^2)}{\Gamma_R} C_{cr} \quad (3)$$

式中:  $C_{cd}$  为蓄电池一次放电售卖损耗费用;  $SOC$  为蓄电池的荷电状态;  $\Gamma_R$  为蓄电池可供使用吞吐量;  $C_{cr}$  为蓄电池的初始投入费用;  $k_0$ 、 $k_1$  和  $k_2$  均为常数。

通过式(3)可以看到, 当一个调度周期内的循环次数增加, 该蓄电池求解模型的求解次数将变为  $N!+N^2!$ , 增加了模型的求解难度, 因此必须对蓄电池一次放电损耗费用进行简化。蓄电池的一次放电损耗可以通过实际的运行数据获取。本文给出了一种实验方案。

通过以下条件对某实验蓄电池进行仿真实验, 获得平均一次放电寿命损耗费用范围:

1) 限制一次调度周期内该蓄电池的充放电次数  $N$ ;

2) 考虑到充放电深度对电池寿命的影响, 适当限制充放电的功率大小;

3) 为了方便蓄电池的管理, 考虑对蓄电池下一周期的调度, 要求结束对蓄电池使用时, 其  $SOC$  的大小接近初始值。

通过上述实验可以获得该类型蓄电池放电循环寿命的损耗数据, 获得蓄电池一次放电的寿命损耗费用的范围。取其均值作为该蓄电池一次放电寿命损耗, 这样就简化了蓄电池模型。

## 2 基于 MILP 模型的多主体平衡新能源微网日前调度模型研究

根据新能源微网日前调度研究的方向, 总结出 3 种优化指标或方案的最优调度模型, 其优化目标分别是: (1) 以清洁能源全部利用或者说尽可能利用为目标; (2) 以全网运行成本以及等效单位购电成本最低为目标; (3) 考虑蓄电池寿命为目标。也即 3 种方案中存在 3 个主体, ① 以清洁能源的使用为主体, ② 以电网微网以及用户的用电成本为主体, ③ 以蓄电池的耐久使用为主体。本文将对这 3 个主体进行分析, 建立了一个更加精细的模型, 实现多主体利益平衡, 可以实现源-网-荷-储的利益最大化。

### 2.1 对蓄电池组主体的调度方案研究

为了防止蓄电池的充电以及放电深度过大, 需要对充放电的荷电状态进行限制, 如式(4)所示。

$$SOC_{\min} \leq SOC_t \leq SOC_{\max} \quad (4)$$

式中,  $SOC_t$ 、 $SOC_{\max}$ 、 $SOC_{\min}$  分别代表蓄电池在  $t$  时段的核电状态以及  $SOC$  状态的上下限, 当达到上(下)限时, 充电(放电)过程中止。

在单位时间间隔  $\Delta t$  内, 蓄电池的充放电功率视为恒定状态, 由此可以定义荷电状态的表达式如式(5)所示。

$$SOC_t = SOC_0 + \frac{\sum_{t=1}^T P_{\text{cha},t} X_t \Delta t - \sum_{t=1}^T P_{\text{dis},t} Y_t \Delta t}{E_b} \quad (5)$$

式中:  $SOC_0$  为调度初始蓄电池的荷电状态;  $P_{\text{cha},t}$  和  $P_{\text{dis},t}$  分别为蓄电池在  $t$  时段的充放电功率大小;  $X_t$  和  $Y_t$  则分别代表了蓄电池的充电和放电状态;  $\Delta t$  为单位时间间隔;  $T$  为时段总数。其中:

$$X_t, Y_t \in \{0, 1\}$$

考虑同一时间间隔  $\Delta t$  内, 蓄电池的充放电状态不能同时存在, 因此, 蓄电池的充放电状态需要满足式(6)的约束。

$$0 \leq X_t + Y_t \leq 1 \quad (6)$$

为了计算蓄电池一次放电损耗费用的大小, 对 1.2 节中提出的实验条件进行模型化。

1) 基于以下两点原因限制调度始末蓄电池状态保持一致: (1) 有利于方便蓄电池的日常管理, 方便下一周期的调度; (2) 方便估算一次充放电损耗费用, 使得估算结果在可靠范围内。如式(7)所示。

$$SOC_0 = SOC_T \quad (7)$$

2) 考虑蓄电池的使用寿命与充放电功率大小有关, 限制单位时间内充放电最大功率, 如式(8)所示。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{cha},t} \leq \eta_1 E_b X_t \\ 0 \leq P_{\text{dis},t} \leq \eta_2 E_b Y_t \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\eta_1$  和  $\eta_2$  为充放电限制系数;  $E_b$  为蓄电池容量。

3) 考虑蓄电池一个调度周期内的充放电次数对电池寿命的影响, 需要对一个调度周期内蓄电池充放电次数进行限制, 充放电次数需要满足式(9)。

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^T |X_{t+1} - X_t| \leq N_1 \\ \sum_{t=1}^T |Y_{t+1} - Y_t| \leq N_2 \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $N_1$  和  $N_2$  分别为蓄电池充电和放电的限制次数。

则对蓄电池主体调度的目标函数如式(10)所示。

$$F_1 = \min \sum_{t=1}^T (\overline{C_{cd}} P_{\text{dis},t} \Delta t) \quad (10)$$

式中,  $\overline{C_{cd}}$  表示一次放电寿命损耗成本的平均值(由具体实验给出)。

该目标的约束条件由式(1)一式(9)给出。

### 2.2 对清洁能源主体的调度方案研究

对于清洁能源的使用, 目前优化配置持有以下两种观点, 一种是可再生能源的全部利用, 另一种则是弃风弃光情况下的资源利用。

第一种方案计算得到的优化配置既不经济也不环保, 而第二种没有进一步研究风光等清洁能源的使用比率以及如何配比使得能源利用的效率达到最大化。

在新能源微网建设过程中, 需要进一步研究不同能源渗透率下微网优化结果, 以达到清洁能源调度与成本平衡的目的。

定义风电和光电的利用率, 如式(11)所示。

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \sum_{t=1}^T P'_{wind,t} \Delta t / \sum_{t=1}^T P_{wind,t} \Delta t \\ \varepsilon_2 = \sum_{t=1}^T P'_{solar,t} \Delta t / \sum_{t=1}^T P_{solar,t} \Delta t \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$  分别表示风电和光电的利用率;  $P'_{wind,t}$  和  $P'_{solar,t}$  分别表示允许弃风弃光条件下单位时间内预测利用风电功率和光电功率大小;  $P_{wind,t}$  和  $P_{solar,t}$  则分别代表预测的实际风电和光电的功率大小。

对风能光能的优化目标函数如式(12)所示。

$$F_2 = \min \sum_{t=1}^T (k_{wind} P'_{wind,t} + k_{solar} P'_{solar,t}) \quad (12)$$

式中,  $k_{wind}$  和  $k_{solar}$  代表风电和光电的发电成本。

其约束条件如式(13)所示, 分别表示其清洁能源利用率以及允许弃风弃光的条件。

$$\text{s.t.} \begin{cases} \varepsilon_i \geq \alpha_i, i \in \{0,1\} \\ P'_{wind,t} \leq P_{wind,t} \\ P'_{solar,t} \leq P_{solar,t} \end{cases} \quad (13)$$

### 2.3 对电网微网及用户主体的调度方案研究

电网微网及用户的利益是相同的, 是因为当总用电成本降低, 单位等效的平均购电费用也随之下降。

从 2.1 节和 2.2 节的分析可以看到, 上述主体还有部分售电功率未纳入到计算中, 本文将这部分功率流向归入电网微网及用户主体的分析中。微网与电网的交换功率并不需要明确指出微网向电网售电的组成成分, 微网向电网购电的流向也不需要明确指出, 因此将这些复杂的关系分成两个组成单元, 分别是微网向电网的售电功率, 记为  $P_{sell,t}$ , 微网从电网的购电功率, 记为  $P_{buy,t}$ 。

因此对电网微网及用户的优化目标函数如式(14)所示。

$$F_3 = \min \sum_{t=1}^T (k_{buy,t} P_{buy,t} \Delta t - k_{sell,t} P_{sell,t} \Delta t) \quad (14)$$

式中,  $k_{buy,t}$  和  $k_{sell,t}$  分别代表了不同时刻的售电和购电电价。

考虑到电网和微网的稳定, 需要限制微网和电

网交换功率的大小, 即如式(15)所示。

$$P_{buy,t} + P_{sell,t} \leq P_{ex} \quad (15)$$

式中,  $P_{ex}$  表示交换功率的限制值。

### 2.4 功率平衡约束条件

上面提到的 3 个主体需要满足式(16)所示的功率平衡方程。

$$P_{load,t} = P_{buy,t} - P_{sell,t} + P'_{wind,t} + P'_{solar,t} + P_{cha,t} - P_{dis,t} \quad (16)$$

式中,  $P_{load,t}$  为精确预测下负荷的大小。

### 2.5 目标函数以及模型求解

通过上面对多主体利益诉求的分析, 本文从 3 个不同的角度将优化模型进一步深入改进, 使得结果更加接近工程实际, 联立式(10)、式(12)和式(14)可以得到日运行成本最低的目标函数, 如式(17)所示。

$$F = F_1 + F_2 + F_3 \quad (17)$$

其运行条件分别由  $F_1$ 、 $F_2$  和  $F_3$  的条件给出。通过上述分析得出该优化问题是一类混合整数规划 (MILP) 模型, 该类问题的难点在于决策变量规模庞大, 可以采用松弛变量法<sup>[20]</sup>以及神经网络算法等方案去解决。神经网络算法求解小规模该类问题速度快, 但对于一些规模较大的该类问题给出的结果往往不够精细。本文在 Matlab 上结合专门解决此类问题的数学软件 yalmip+gurobi 求解该模型, 取得了很好的效果。

## 3 算例分析

选取第十届电工赛某地区微网对该模型加以验证, 其中风能、光能以及负荷预测的结果如图 2 所示。

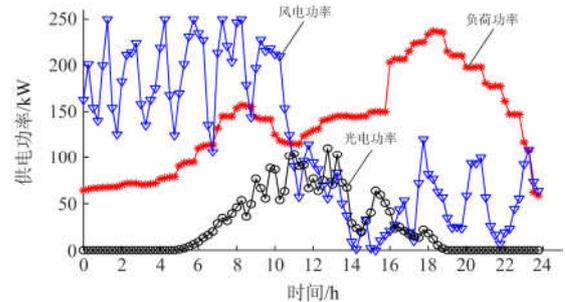


图 2 各时段供电功率预测

Fig. 2 Prediction of power supply in different periods

并以 15 min 为模型求解间隔计算该微网日前最优调度模型, 比较在不允许弃风弃光、不使用蓄电池情况下以及合理配置风光电能利用率等情况下运行成本的差异。

### 3.1 模型参数设置

1) 该微网模型的具体容量及发电成本参数如

表 1 所示。

表 1 某微网模型参数设置

Table 1 Parameter setting of a microgrid model

| 类型    | 容量/kW | 发电成本/(元/kWh) |
|-------|-------|--------------|
| 风力发电机 | 250   | 0.52         |
| 光伏电池组 | 150   | 0.75         |
| 蓄电池   | 300   | 0.2          |

注：蓄电池指的是一次放电寿命损耗费用。

2) 蓄电池的设置条件如表 2 所示。

表 2 蓄电池参数设置

Table 2 Battery parameter setting

|                             |             |
|-----------------------------|-------------|
| 电池 SOC 运行范围                 | [0.3, 0.95] |
| 初始 SOC 范围                   | 0.4         |
| 充放电限制系数 $\eta_1$ 、 $\eta_2$ | 20%、20%     |
| 充放电次数 $N_1$ 、 $N_2$         | 8、8         |

3) 微电网和电网的交换功率限制值为 150 kW。

4) 由于该地区实行分时电价政策，其具体电价变化曲线如图 3 所示。

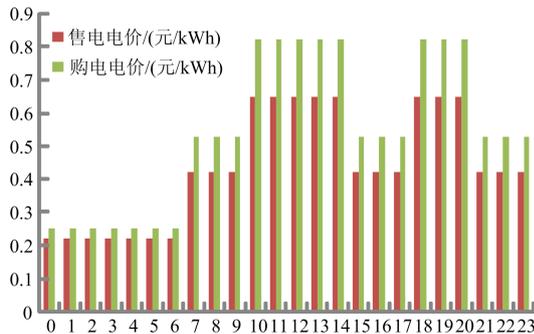


图 3 微网售电及购电电价分布表

Fig. 3 Distribution list of electricity sale and purchase price of microgrid

### 3.2 模型求解结果对比

本文计算所使用的处理器为 AMD A10-5800K APU with Radeon(tm) HD Graphics 3.80 GHz，使用的工具箱为 Matlab+yalmip+gurobi 最新版本。

为了说明本文模型相较传统的集中优化模型的优化改进情况，对传统的几种模型进行求解。

第一步先求解不考虑限制能源利用率情况下优化结果。

分别计算 4 种情况下全天总供电费用、平均购电费用、计算用时以及风、光电能源利用率。4 种情况分别如下。

1) 不采用蓄电池，且微网与电网的交换功率无限制(这里不限制交换功率是为了满足供电的需要，即类似电网一条支路处理)，无清洁能源和清洁能源

全额利用。

2) 不采用蓄电池，且微网与电网的交换功率无限制，允许弃风弃光。

3) 考虑蓄电池以及限制电网和微网的交换功率，清洁能源全部利用。

4) 考虑蓄电池以及限制电网和微网的交换功率，允许弃风弃光。

求解的结果记录在表 3 中。

表 3 不计及能源利用率下的计算结果

Table 3 Calculation results without considering energy efficiency utilization

| 条件             | 平均购电费用/元 | 总供电费用/元 | 风能利用率/% | 光能利用率/% | 用时/s    |
|----------------|----------|---------|---------|---------|---------|
| 不用清洁能源         | 1976.4   | 1976.4  | 0       | 0       | 0.014 8 |
| 全额用清洁能源        | 0.687 9  | 2 275.2 | 100     | 100     | 0.014 8 |
| 允许弃风弃光         | 0.542 0  | 1 792.4 | 43.99   | 30.77   | 1.022 6 |
| 使用蓄电池/全额利用清洁能源 | 0.668 3  | 2 210.5 | 100     | 100     | 8.711 1 |
| 使用蓄电池/允许弃风弃光   | 0.524 1  | 1 733.5 | 46.17   | 35.06   | 6.472 9 |

结合表 3 可以分析得到以下信息。

第一，从上述 4 个模型计算用时可以看到，当问题从 LP 问题上升到 MILP 问题时，计算时间陡然增加，这是因为 MILP 问题求解变量占用内存空间随着决策变量规模增加呈现几何式增长。

第二，通过对上述 4 种类型的平均购电费用以及总供电费用的对比可以明显看出，全额使用风、光电能既不经济也达不到优化的目的。而在允许弃风弃光情况下，购电单价和总供电费用有着明显地下降，这意味着清洁能源的参与有利于降低供电费用。此外，蓄电池的参与有利于供电单价进一步下降，说明在该微网模型的优化中使用蓄电池有明显的经济效益。

第三，但从风能、光能的利用率上看，即便是最优的调度方案中，风、光能源的利用率并不高，根据 2015 年对新能源微网的定义，微电网的清洁能源利用率需要到达 50%以上，因此目前的优化方案并没有充分考虑清洁能源的利用率对优化结果的影响。

本文进一步研究了不同比率下的清洁能源利用率对电网平均购电单价以及总供电费用的影响。考虑到各方的利益平衡，本文以表 3 中第 3 种情况为界限作为求解结果好坏的判别依据(平均费用小于此种情况对于蓄电池的寿命损耗较小，并且说明

了蓄电池对降低费用的作用), 部分求解结果如表 4 所示。

表 4 不同能源利用率下的优化结果

Table 4 Optimization results under different energy utilization rates

| 风能利用率/% | 光能利用率/% | 平均购电费用/元 | 总供电费用/元 |
|---------|---------|----------|---------|
| 50      | 50      | 0.530 2  | 1 753.6 |
|         | 60      | 0.532 1  | 1 759.9 |
|         | 70      | 0.534 6  | 1 768.1 |
|         | 80      | 8.711 1  | 1 787.1 |
| 53      | 50      | 0.532 7  | 1 762.0 |
|         | 60      | 0.534 6  | 1 768.2 |
|         | 70      | 0.537 1  | 1 776.4 |
| 56      | 80      | 0.542 9  | 1 795.5 |
|         | 50      | 0.538 8  | 1 782.0 |
|         | 60      | 0.540 7  | 1 788.3 |
| 60      | 70      | 0.543 2  | 1 796.5 |
|         | 80      | 0.549 0  | 1 815.6 |
|         | 50      | 0.547 9  | 1 812.1 |
|         | 60      | 0.549 8  | 1 818.4 |
|         | 70      | 0.552 3  | 1 826.6 |
|         | 80      | 0.558 0  | 1 845.6 |

对比表 3 中第 4 类情况与表 4 的计算结果, 以  $\varepsilon_1=\varepsilon_2=50\%$  为例, 可以看到在单位电价仅仅提高 1.93% 及购电总费用提高 1.16% 的情况下, 风光能利用率分别提高了 3.83% 和 14.96%。而和表 3 情况 3 相比, 风光能利用率提高了 6.01% 和 19.23%。由此可以看出适应地提高运行成本, 可以有效提高能源的利用效率, 做到一定程度上的平衡。在本例中, 当风能利用率控制在 50%~56%, 光能利用率控制在 50%~70% 之间时, 可以起到很好地平衡各方面利益的作用。

表 5 记录了不同蓄电池能源利用率情况下的寿命损耗费用信息。

表 5 不同情况下蓄电池寿命损耗成本对照

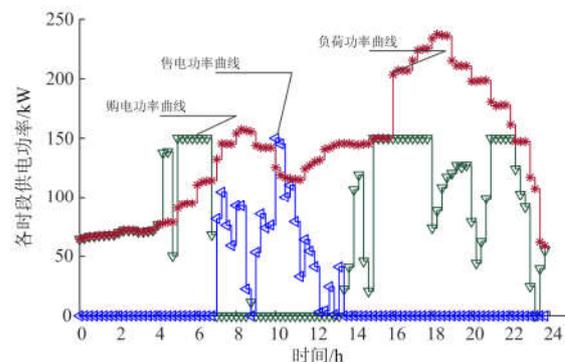
Table 5 Battery life loss cost control under different conditions

| 风能( $\varepsilon_1$ )/光能( $\varepsilon_2$ )利用率 | 蓄电池寿命损耗/元 |
|--|-----------|
| $\varepsilon_1=\varepsilon_2=1$                | 55.583    |
| $\varepsilon_1=0.46, \varepsilon_2=0.35$       | 43.997    |
| $\varepsilon_1=0.50, \varepsilon_2=0.50$       | 43.997    |
| $\varepsilon_1=0.53, \varepsilon_2=0.60$       | 43.997    |
| $\varepsilon_1=0.56, \varepsilon_2=0.60$       | 43.997    |
| $\varepsilon_1=0.50, \varepsilon_2=0.70$       | 55.446    |

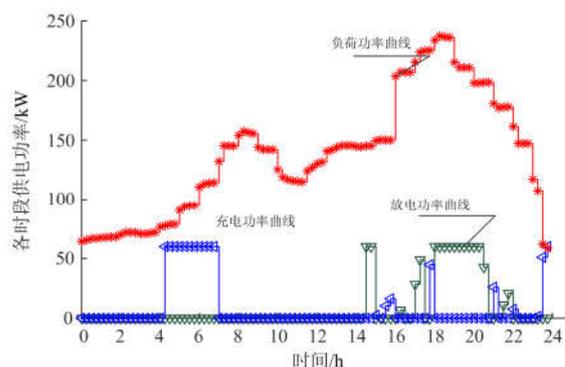
从表 5 可以看出, 在一定范围内调整能源利用率可以让蓄电池维持在一个成本最优化的状态(这个状态有利于其使用寿命的延长), 而当利用率提升

到某个水平时, 其损耗成本则接近全额利用时的调用成本, 所以将能源利用率调整到一个合适的水平, 可以起到很好利用蓄电池进行微网调节的作用, 同时也能兼顾其寿命使用情况。

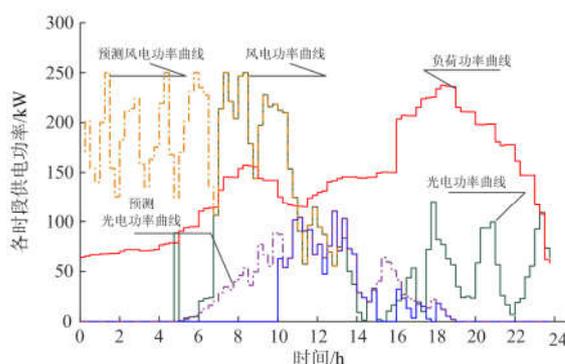
图 4(a)—图 4(c) 中展示了在  $\varepsilon_1=0.56, \varepsilon_2=0.60$  情况下, 各时段的供电情况。



(a) 微网售电及购电电价分布表



(b) 蓄电池的充放电曲线



(c) 清洁能源的功率曲线

图 4 各时段负荷供电构成

Fig. 4 Load power supply structure in each period

## 4 总结

本文基于 MILP 构建了一个更加精细的微网调度模型, 该模型在提高微网新能源利用效率的同时,

降低了运行成本, 兼顾了蓄电池的使用寿命, 实现了源-网-荷-储的利益平衡。主要结论如下:

1) 蓄电池的存在有利于降低微网的调度费用, 但蓄电池的寿命损耗往往未纳入到微网调度计算中, 或者未考虑一个调度周期内的循环次数对微网运行的影响。本文通过实验方案简化了蓄电池一次损耗费用的计算, 并在模型中考虑多次循环条件下蓄电池的调度问题;

2) 新能源微网的主要供电来源应当由微网自身承担, 但目前的优化调度中几乎没有研究微网新能源的利用率对微网的调度优化的影响。本文通过建模研究了不同配比下的新能源利用率对优化调度成本的影响以及和蓄电池的配合情况, 以达到最优化的调度方案, 并通过计算给出了最优调度方案中新能源的配比运行范围等信息。在不损害各方利益的前提下, 与传统的优化调度相比, 对微网日前调度模型进行平衡规划, 取得了很好的效果。

### 参考文献

- [1] 茆美琴, 丁勇. 微网未来能源互联网系统中的有机细胞[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(19): 1-11.  
MAO Meiqin, DING Yong. Organic cell microgrid energy internet system in the future[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41 (19): 1-11.
- [2] 秦红霞, 王成山, 刘树, 等. 智能微网与柔性配网相关技术探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 17-23.  
QIN Hongxia, WANG Chengshan, LIU Shu, et al. Discussion on the technology of intelligent micro-grid and flexible distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 17-23.
- [3] 李东东, 徐连连, 刘翔, 等. 考虑可削减负荷参与的含风光储微网经济优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 35-41.  
LI Dongdong, XU Lianlian, LIU Xiang, et al. Optimal dispatching of microgrid considering the participation of reducible loads, distributed generators (DG) and energy storage units[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 35-41.
- [4] 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.
- [5] 黄杨, 胡伟, 闵勇. 考虑日前计划的风储联合系统多目标协调调度[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4743-4751.  
HUANG Yang, HU Wei, MIN Yong, et al. Multi-objective coordinative dispatch for wind-storage combined systems considering day-ahead generation schedules[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4743-4751.
- [6] 马宇辉, 刘念. 用户侧微电网的能量管理方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 158-168.  
MA Yuhui, LIU Nian. Survey on energy management method of community micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 158-168.
- [7] MEHLERI E D. A model predictive control framework for residential microgrids[J]. Computer Aided Chemical Engineering, 2012, 30(4): 327-331.
- [8] 肖浩, 裴玮, 孔力. 基于模型预测控制的微电网多时间尺度协调优化调度[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 7-14.  
XIAO Hao, PEI Wei, KONG Li. Multi time scale coordinated optimal scheduling of microgrid based on model predictive control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 7-14.
- [9] 王甜婧, 许阔, 朱永强. 主动配电网的源-网-荷多层博弈经济调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 10-19.  
WANG Tianjing, XU Kuo, ZHU Yongqiang. Economic dispatch strategy of active distribution network based on source-network-load multi-layer game[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 10-19.
- [10] 王成山, 于波, 肖峻, 等. 平滑可再生能源发电系统输出波动的储能系统容量优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 1-8.  
WANG Chengshan, YU Bo, XIAO Jun, et al. Capacity optimization method for energy storage system with smooth renewable energy generation system output fluctuation[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 1-8.
- [11] MAJD A A, SAMET H, GHANBARI T. Research on optimal configuration strategy of energy storage capacity in grid connected microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 359-369. DOI: 10.1186/s41601-017-0063-z.
- [12] 吴雄, 王秀丽, 王建学. 微网经济调度问题的混合整数规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 1-8.  
WU Xiong, WANG Xiuli, WANG Jianxue. Mixed integer programming method for microgrid economic dispatch problem[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 1-8.
- [13] 许丹, 丁强, 潘毅, 等. 基于经济调度的微电网蓄电池容量优化[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17):

- 55-59.  
XU Dan, DING Qiang, PAN Yi, et al. Capacity optimization of microgrid based on economic dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 55-59.
- [14] 牛铭, 黄伟, 郭佳欢, 等. 微网并网时的经济运行研究[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 38-42.  
NIU Ming, HUANG Wei, GUO Jiahuan, et al. Research on economic operation of microgrid in grid connection[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 38-42.
- [15] 刘舒, 李正力, 王翼, 等. 含分布式发电的微电网中储能装置容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 78-84.  
LIU Shu, LI Zhengli, WANG Yi, et al. Optimal capacity allocation of energy storage in micro-grid with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 78-84.
- [16] 杨艳红, 裴玮, 邓卫, 等. 计及蓄电池储能寿命影响的微电网日前调度优化[J]. 电工技术学报, 2015, 30(22): 172-180.  
YANG Yanhong, PEI Wei, DENG Wei, et al. The date of the micro grid and battery storage life before impact scheduling optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(22): 172-180.
- [17] OSTERWALD C R. Translation of device performance measurements to reference conditions[J]. Solar Cells, 1986, 18(3-4): 269-279.
- [18] 罗文, 王莉娜. 风场短期风速预测研究[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 68-74.  
LUO Wen, WANG Lina. Short-term wind speed forecasting for wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 68-74.
- [19] 赵晶晶, 李振坤, 朱兰, 等. 储能系统在微网中的优化配置与成本分析[J]. 华东电力, 2011, 39(10): 1615-1618.  
ZHAO Jingjing, LI Zhenkun, ZHU Lan, et al. Optimal allocation and cost analysis of energy storage system in microgrid[J]. East China Electric Power, 2011, 39(10): 1615-1618.
- [20] 孟志青, 胡奇英, 杨晓琪. 一种求解整数规划与混合整数规划非线性罚函数方法[J]. 控制与决策, 2002, 17(3): 310-314.  
MENG Zhiqing, HU Qiyong, YANG Xiaoyi. A nonlinear penalty function method for integer programming and mixed integer programming[J]. Control and Decision, 2002, 17(3): 310-314.

---

收稿日期: 2018-04-16; 修回日期: 2018-05-11

作者简介:

郝超超(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制等; E-mail: 425660489@qq.com

李晓明(1955—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统运行与控制、电能质量、智能电网等。E-mail: xmli@whu.edu.cn

(编辑 许威)