

报名序号：1316

论文题目：微电网日前优化调度

微电网日前优化调度

摘要

微电网是一种将分布式发电、储能装置及负载集成在一起的新型能源系统，为分布式电源接入系统提供了途径，也为大电网提供有益的补充。本文根据具体微电网情况，分别建立了适用于不同条件、考虑不同方面的微电网日前调度模型，给出了每种情况下的负荷构成、全天总供电费用和平均购电单价结果，并进行了比较分析。

对于问题 1，首先，考虑所有供电主体，分别用 0-1 变量表示蓄电池的充电功率、微网与主网交换功率，以各时刻功率平衡作为等式约束；之后，将各供电主体的供电功率视为定值约束，建立微电网经济评估模型。求解得两种情况下全天总供电费用分别为 1976.41、2275.17 元，负荷平均购电单价分别为 0.5976、0.1077 元，对应各时刻供电构成如表 1 所示。

对于问题 2，在问题 1 模型约束条件的基础上，增设可再生能源的供电量为变量，将其定值约束替换为范围约束，以平均负荷供电单价最小为目标函数，建立不计储能的功率宽约束最优日前调度模型。用 MATLAB 对其求解得全天总供电费用为 1785.15 元，负荷平均购电单价为 0.5397 元，各时刻供电构成如表 2 所示。并将结果与问题 1 进行了对比分析。

对于问题3，首先，以负荷平均供电单价最小为目标，在问题2的基础上，增设蓄电池荷电状态、使用寿命、充放电状态约束和微网交换功率约束，建立考虑储能及功率交换约束的最优日前调度模型。之后，分析各0-1状态变量之间的对应关系，用蓄电池荷电状态（SOC）来唯一对应蓄电池充放电功率及充放电状态，将之前的4组变量约简为1组，对模型进行简化。最后，将编码和算子分段，对遗传算法进行改进，用MATLAB求解得全天总供电费用为2256.02元，负荷平均购电单价为-0.0129元，各时刻供电构成如表4所示。并分析了蓄电池的调节作用。

对于问题4，在问题3的基础上，增设可再生能源供电量为变量，将其定值约束替换为范围约束；以SOC的变化来反映蓄电池的状态变量约束，建立多主体参与的最优日前调度模型。采用改进的遗传算法，由MATLAB求解得全天总供电费用为1752.28元，负荷平均购电单价为-0.2153元，各时刻供电构成如表5所示。并分析了可再生能源和蓄电池对调度过程的影响。前四问结果的对比如表6所示。

对于问题5，从用户、电网、可再生能源和蓄电池四个角度出发，用户角度考虑负荷的可平移性，分别建立目标函数反映负荷响应可再生能源和分时电价的程度；电网角度考虑微网自身负荷消纳能力和削峰填谷情况，分别以交换功率最小和负荷曲线平坦程度最大为目标建立目标函数；可再生能源角度考虑发电成本和发展政策补贴，修正总供电成本目标函数；蓄电池角度考虑其充放电深度和次数的约束，建立综合效益最优日前调度模型。根据量纲将目标函数进行聚类，通过线性加权约简为成本、功率和均衡度三类目标函数；通过归一化、综合权重设置，将多目标问题简化为单目标。采用改进的遗传算法，由MATLAB解得全天总供电费用为1472.10元，负荷平均购电单价为0.1548元，各时刻供电构成如表1所示。并分析了优化后所得调度方案在各方面的综合表现情况。

对于问题6，结合前5问的结果，提出了在进行日前优化调度时，需考虑不同利益主体间可能存在的博弈关系。

关键词：微电网；日前经济调度；遗传算法

1 问题重述

随着社会的发展，人们对能源需求量不断增加，而化石能源逐渐枯竭，可再生能源的推广迫在眉睫。近年来风力发电、光伏发电等分布式电源广泛接入微电网中，妥善管理微电网内分布式电源和储能装置的运行，可以有效保证微电网的经济、可靠运行。

在含有风机、光伏、蓄电池以及常规负荷的微电网中进行日前经济调度，即依据光伏、风电及负荷的日前预测情况，考虑分时电价并充分利用网络中的蓄电池等调控手段，从而实现配电网运行的经济性最优具有重要意义。

假设负荷及光伏、风机出力预测准确，考虑蓄电池的荷电状态的上下限、充放电状态、能量状态、单位时间充放电功率及充放电次数的限制，建立微电网的日前经济调度模型并进行求解。本文主要解决以下几个问题：

1.问题1要求分别对微网中无可在生能源和可再生能源全额利用是进行经济性评估，不考虑蓄电池的作用及微网与主网的交换功率约束，分别以上两种情况各时段的负荷供电构成、全天供电费用及负荷平均购电单价。

2.问题2、3、4要求考虑蓄电池的作用、微网与主网的交换功率约束及新能源的利用情况等因素，建立以平均负荷供电单价最小为目标函数的日前优化调度模型并进行求解，给出各时段的负荷供电构成、全天供电费用及负荷平均购电单价，并分析可再生能源的利用情况。

其中问题2要求在不计蓄电池作用及微网与主网的交换功率约束，允许弃风弃光情况下建立模型并求解；问题3要求在计及蓄电池作用及微网与主网的交换功率约束，不允许弃风弃光的情况下建立模型并求解；问题4要求在计及蓄电池作用、蓄电池作用及微网与主网的交换功率约束，允许弃风弃光的情况下建立模型并求解。

3.问题5要求考虑用户、电网、可再生能源和蓄电池的利益冲突，综合考虑四个主体的利益诉求，建立日前调度模型并求解，使综合效益最优。

4.问题6要求根据对问题1~5的理解，提出对微电网日前调度的认识。

2 模型假设

- 1) 假设微网与主网之间的能量交换可逆，且微网从主网获取电能和向主网回馈电能的电价分别用购电电价和售电电价表示。
- 2) 假设不考虑分布式电源及蓄电池向负荷供电时的功率损耗。

- 3) 假设负荷的总购电费用即为微网从主网购电的费用。
- 4) 假设蓄电池向负荷供电的成本即为其由充电至放电的成本 (0.2元/kWh)，其充电成本即为分布式电源的发电成本。
- 5) 假设不计蓄电池作用等同于不考虑蓄电池的充放电及其产生的费用。
- 6) 假设不考虑蓄电池既不充电又不放电的状态。
- 7) 假设问题2和问题4中不计弃风弃光造成的经济损失。
- 8) 问题5中假设负荷可平移，即负荷可响应可再生能源的出力及分时电价。
- 9) 问题5中假设考虑国家政策对于新能源发展的支持，对于微电网中可再生能源的消纳提供一定的补助。

3 符号说明

- C_{WT} ：风电机组的发电成本；
- $C_{WT,b}$ ：考虑补贴后风电机组的发电费用；
- ΔC_{WT} ：风电机组发电的补贴；
- C_{PV} ：光伏发电的发电成本；
- $C_{PV,b}$ ：考虑补贴后光伏电源的发电费用；
- ΔC_{PV} ：光伏电源发电的补贴；
- $C_p(t)$ ： t 时段微电网的购电电价；
- $C_s(t)$ ： t 时段微电网的售电电价；
- $C_{ex}(t)$ ： t 时段微电网与主网功率交换产生的费用
- C_{cha} ：蓄电池的充电费用；
- C_{dis} ：蓄电池的放电费用；
- $C_{bat}(t)$ ： t 时段蓄电池的充放电费用；
- C_{sum} ：负荷的全天总供电费用；
- $C_{avg.p}$ ：负荷平均购电费用；
- $C_{avg.s}$ ：负荷平均供电费用；
- $C_{sum.p}$ ：微网全天总购电费用；
- C_w ：弃风弃光造成的经济损失；
- $P_l(t)$ ： t 时段负荷消耗的功率；
- $P_{l,v}(t)$ ：考虑负荷平移后 t 时段负荷消耗的功率；

$\bar{P}_{l,v}$: 一个调度周期内负荷的平均值

$P_{WT}(t)$: t 时段微电网利用的风电机组发出的功率;

$P_{PV}(t)$: t 时段刻微电网利用的光伏电源发出的功率;

$P_p(t)$: t 时段微电网从主网购入的功率;

$P_s(t)$: t 时段微电网向主网回馈的功率;

$P_{ex}(t)$: t 时段微电网与主网交换的功率, 若为正则微网从主网购入功率, 若为负则微网向主网回馈功率;

$P_{ex.sum}$: 一个调度周期内微网与主网交换的总功率;

$P_{dis}(t)$: t 时段蓄电池的放电功率;

$P_{cha}(t)$: t 时段蓄电池的充电功率;

$P_{bat}(t)$: t 时段蓄电池的充放电功率, 若为正则蓄电池处于充电状态, 若为负则蓄电池处于放电状态;

$P_{WTmax}(t)$: t 时段风电机组实际最大可发功率;

$P_{PVmax}(t)$: t 时刻光伏电源实际最大可发功率;

$X(t)$: $X(t) \in \{0,1\}$, 蓄电池的充电状态标记, 1表示充电, 0表示不充电;

$Y(t)$: $Y(t) \in \{0,1\}$, 蓄电池放电的状态标记, 1表示放电, 0表示不放电;

$U_{e1}(t)$: $U_{e1}(t) \in \{0,1\}$, 微网从主网购电的标记, 1表示购电, 0表示不购电;

$U_{e2}(t)$: $U_{e2}(t) \in \{0,1\}$, 微网向主网售电的标记, 1表示售电, 0表示不售电;

Δt : 时间间隔;

T : 时段总数;

$S(t)$: t 时段蓄电池的SOC状态;

S_{min} : 蓄电池SOC状态的下限;

S_{max} : 蓄电池SOC状态的上限;

E_b : 蓄电池容量;

S_0 : 蓄电池初始的SOC状态;

S_T : 调度周期末蓄电池的SOC状态;

N_1 : 蓄电池充电次数限制;

N_2 : 蓄电池放电次数限制;

N_{cha} : 一个调度周期内蓄电池的实际充电次数;

N_{dis} : 一个调度周期内蓄电池的实际放电次数;

η_{WT} ：风电的利用效率；

η_{PV} ：光伏发电的利用效率；

σ ：日负荷曲线的方差；

4 问题分析

4.1 问题 1 的分析

问题1要求在蓄电池不作用、微网与主网交换功率无约束时，在无可再生能源和可在生能源全额利用两种情况下，对微电网运行的经济性进行评估。无可再生能源时，各时段的负荷功率完全由主网提供，全天的总供电费用即为一天中微网从主网购入电能的总费用，负荷平均购电单价即为一天中单位负荷从主网购入的电量产生的费用。可再生能源全额利用时，各时段的负荷功率有新能源及主网提供，全天总供电费用包括新能源的发电费用及微网从主网购入电能的费用，负荷平均购电单价即为单位负荷功率中从主网购入部分的电量产生的费用。

因此，问题1中可以通过建立各时段主网、可再生能源、蓄电池及负荷功率之间的等式约束（其中蓄电池功率为0，无可再生能源时可再生能源功率为0，可再生能源全额利用时其功率为该时段可再生能源的实际功率），从而求得分时段负荷的供电构成。根据各种供电方式产生的费用即可求得全天的总供电费用及负荷的平均购电单价。

4.2 问题 2、3、4 的分析

问题 2、3、4 要求分别针对不同的供电主体，以平均负荷供电单价最小为目标函数，提供最优的日前经济调度方案，并分析微电网的负荷供电构成及全天供电费用和平均购电单价等经济性指标。通过建立不同供电主体及负荷之间的功率等式约束，及平均负荷供电单价与个供电主体产生的费用之间关系的等式约束，从而建立以平均负荷供电单价为目标函数的线性规划模型。对这一模型进行求解即可求得最优日前经济调度方案。

问题 2 中不计蓄电池作用且微网与主网之间的交换功率无约束，允许弃风弃光，因此在不同主体之间功率的等式约束中，蓄电池出力为 0，可再生能源提供的功率在 0 到实际功率之间变化。

问题 3 较问题 2 计及蓄电池作用，并对微网与主网之间的交换功率进行约束，可再生能源全额利用，因此在功率的等式约束中，蓄电池出力不为 0，可再生能源提供的功率即为其实际功率，同时需要对微网与主网之间交换的功率进行限制。

问题 4 较问题 3 考虑了弃风弃光，因此应在问题 3 的基础上，考虑可再生能源的功率在 0 到实际功率之间变化。

问题 2、3、4 的数学模型基本相同，只需考虑对于不同供电主体的要求，在问题 2 中所建立模型的基础之上进行修改即可。

4.3 问题 5 的分析

问题 5 要求综合考虑微电网中的用户、电网、可再生能源及蓄电池等多个主体的利益诉求，提出最优的日前调度策略。因此在对微电网建立日前优化调度模型的过程中，不仅需要考虑到平均负荷供电单价，还应当综合考虑新能源的利用效率、蓄电池的使用寿命及微电网的内部消纳能力等因素，讨论日前经济调度方案对于以上四个主体利益的影响，并分析不同主体之间的利益冲突，建立不同利益主体在功率、经济性等方面的等式与不等式约束。由于问题 5 中涉及的利益主体众多且目标函数复杂，需要对模型进行简化，将多个目标函数转化为少量目标函数，并选择合理的算法进行求解，使得最终提出的日前调度方案在保证任一利益主体的利益不严重受损的前提下实现综合效益最优。

5 模型的建立与求解

5.1 微电网经济性评估模型

问题 1 认为蓄电池无作用，不考虑微网与主网功率交换的约束，要求分别对无可再生能源和可再生能源全额利用两种情况下微电网的经济性进行评估。本问题中，各供电主体的供电功率及负荷消耗的功率固定，因此微电网的经济性评估模型是一个确定性的评价模型。

5.1.1 模型的建立

(1) 功率平衡约束

考虑功率平衡的等式约束，各时段主网、蓄电池及可再生能源三个供电主体提供的功率应当恰好满足负荷的用电需要，即

$$P_l(t) = P_{WT}(t) + P_{PV}(t) + P_{ex}(t) - P_{bat}(t) \quad (1)$$

式中， $P_l(t)$ 、 $P_{WT}(t)$ 、 $P_{PV}(t)$ 分别代表 t 时段负荷消耗的功率、微电网利用的风电机组发出的功率。

式 (1) 中 $P_{bat}(t)$ 代表微电网利用的光伏电源发出的功率，即

$$P_{bat}(t) = X(t)P_{cha}(t) - Y(t)P_{dis}(t) \quad (2)$$

式中， $P_{cha}(t)$ 、 $P_{dis}(t)$ 分别代表 t 时段蓄电池的充电和放电功率， $X(t) \in \{0,1\}$ ，代表蓄电池的充电状态，1 表示充电，0 表示不充电； $Y(t) \in \{0,1\}$ ，代表蓄电池的放电状态，1 表示放电，0 表示不放电。

式 (1) 中 $P_{ex}(t)$ 代表微电网与主网交换的功率，即

$$P_{ex}(t) = U_{e1}(t)P_p(t) - U_{e2}(t)P_s(t) \quad (3)$$

式中， $P_p(t)$ 、 $P_s(t)$ 分别代表 t 时段微电网从主网购入和向主网回馈的功率， $U_{e1}(t) \in \{0,1\}$ ，代表微网从主网购电的状态，1 表示购电，0 表示不购电； $U_{e2}(t) \in \{0,1\}$ ，代表微网向主网售电的状态，1 表示售电，0 表示不售电。

(2) 全天总供电费用

微电网中主要有蓄电池、主网、可再生能源三个供电主体，因此其全天总供电费用可表示为：

$$C_{sum} = \sum_{t=1}^T (P_{WT}(t)C_{WT} + P_{PV}(t)C_{PV} + C_{bat}(t) + C_{ex}(t)) \quad (4)$$

式中， $C_{WT}(t)$ 、 $C_{PV}(t)$ 、 $C_{bat}(t)$ 、 $C_{ex}(t)$ 分别代表 t 时段风电机组的发电成本、光伏发电的发电成本、蓄电池的充放电成本及微网与主网功率交换产生的费用。

其中，

$$C_{ex}(t) = U_{e1}(t)P_p(t)C_p(t) - U_{e2}(t)P_s(t)C_s(t) \quad (5)$$

$$C_{bat}(t) = Y(t)P_{dis}(t)C_{dis} \quad (6)$$

式中， $C_p(t)$ 、 $C_s(t)$ 、 C_{dis} 分别代表 t 时段微电网的购电电价、售电电价和蓄电池的放电费用。

(3) 负荷平均购电单价

微电网的全天购电费用可表示为：

$$C_{sum.p} = \sum_{t=1}^T U_{e1}(t)P_p(t)C_p(t) - U_{e2}(t)P_s(t)C_s(t) \quad (7)$$

式中， T 代表调度周期中的时段总数， Δt 代表时间间隔。

负荷平均购电单价为单位负荷的全天购电费用，即

$$C_{avg.p} = \frac{C_{sum.p}}{\sum_{t=1}^T P_l(t)\Delta t} = \frac{\sum_{t=1}^T U_{e1}(t)P_p(t)C_p(t) - U_{e2}(t)P_s(t)C_s(t)}{\sum_{t=1}^T P_l(t)\Delta t} \quad (8)$$

(4) 蓄电池及可再生能源功率约束

问题1中认为微网中蓄电池不作用，则有

$$P_{bat}(t) = 0 \quad (9)$$

不考虑微网与主网之间交换功率的约束，则 $P_{ex}(t)$ 可在任意范围内变动。

①当考虑微电网中无可再生能源时，对于光伏和风机出力有：

$$\begin{cases} P_{PV}(t) = 0 \\ P_{WT}(t) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

②当考虑微电网中可再生能源全额利用时，对于光伏和风机出力有：

$$\begin{cases} P_{PV}(t) = P_{PV\max}(t) \\ P_{WT}(t) = P_{WT\max}(t) \end{cases} \quad (11)$$

式中， $P_{PV}(t)$ 、 $P_{WT}(t)$ 分别代表 t 时段微电网利用的光伏电源功率和风电机组功率， $P_{PV\max}(t)$ 、 $P_{WT\max}(t)$ 分别代表 t 时段光伏电源和风电机组的实际最大可发功率。

综上所述，问题 1 所示场景下，微电网的经济性评估模型分别为：

微网中无可再生能源时：

$$s.t. \begin{cases} P_l(t) = P_{WT}(t) + P_{PV}(t) + P_{ex}(t) - P_{bat}(t) \\ P_{bat}(t) = X(t)P_{cha}(t) - Y(t)P_{dis}(t) \\ P_{ex}(t) = U_{e1}(t)P_p(t) - U_{e2}(t)P_s(t) \\ P_{bat}(t) = 0 \\ P_{PV}(t) = 0 \\ P_{WT}(t) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

微网中可再生能源全额利用时：

$$s.t. \begin{cases} P_l(t) = P_{WT}(t) + P_{PV}(t) + P_{ex}(t) - P_{bat}(t) \\ P_{bat}(t) = X(t)P_{cha}(t) - Y(t)P_{dis}(t) \\ P_{ex}(t) = U_{e1}(t)P_p(t) - U_{e2}(t)P_s(t) \\ P_{bat}(t) = 0 \\ P_{PV}(t) = P_{PV\max}(t) \\ P_{WT}(t) = P_{WT\max}(t) \end{cases} \quad (13)$$

根据式 (12) 与式 (13) 所示的约束条件及式 (4)、式 (8) 即可分别求得微网中无可再生能源及可再生能源全额利用时，各时段的负荷供电构成、全天总供电费用及负荷的平均购电单价。

5.1.2 模型的求解

问题 1 模型不涉及目标函数，因此该模型的求解即为解线性方程组的求解。

无可再生能源时，在 $C_{WT}(t)$ 、 $C_{PV}(t)$ 、 $C_{bat}(t)$ 均为零值约束的条件下，将 (2)、(3)、(9)、(10) 式带入 (1) 式可得：

$$P_{ex}(t) = P_l(t) \quad (14)$$

即负荷所需电能全部来自微网与主网的电能交换（从主网购入）。

可再生能源全额利用时，在 $C_{WT}(t)$ 、 $C_{PV}(t)$ 为常值约束的条件下，将 (2)、(3)、(9)、(11) 式带入 (1) 式可得微网与主网的交换功率为：

$$P_{ex}(t) = P_l(t) - (P_{WT}(t) + P_{PV}(t)) \quad (15)$$

两种情况下的负荷构成如表 1 所示：

表 1 两种情况下的负荷构成

无可再生能源					可再生能源全额利用				
序号	负荷	风电	光电	主网电能交换	序号	负荷	风电	光电	主网电能交换
1	64.3	0	0	64.3	1	64.3	163.1	0	-98.8
2	65.5	0	0	65.5	2	65.5	201.47	0	-135.97
3	66.7	0	0	66.7	3	66.7	154.26	0	-87.56
4	66.9	0	0	66.9	4	66.9	140.29	0	-73.39
5	67.5	0	0	67.5	5	67.5	200.29	0	-132.79
6	67.7	0	0	67.7	6	67.7	250	0	-182.3
7	68	0	0	68	7	68	154.26	0	-86.26
8	68.2	0	0	68.2	8	68.2	125.64	0	-57.44
9	70.2	0	0	70.2	9	70.2	182.87	0	-112.67
10	71.9	0	0	71.9	10	71.9	211.67	0	-139.77
11	71.9	0	0	71.9	11	71.9	214.11	0	-142.21
12	71.9	0	0	71.9	12	71.9	224.41	0	-152.51
13	70.7	0	0	70.7	13	70.7	158.26	0	-87.56
14	70.7	0	0	70.7	14	70.7	135.45	0	-64.75
15	71.3	0	0	71.3	15	71.3	163.1	0	-91.8
16	72	0	0	72	16	72	175.49	0	-103.49
17	76.5	0	0	76.5	17	76.5	219.38	0	-142.88
18	77.6	0	0	77.6	18	77.6	250	0	-172.4
19	78.7	0	0	78.7	19	78.7	168.04	0	-89.34
20	78.8	0	0	78.8	20	78.8	124.56	0.06	-45.82
21	90.6	0	0	90.6	21	90.6	170.15	0.96	-80.51
22	93.8	0	0	93.8	22	93.8	201.47	2.11	-109.78
23	94.7	0	0	94.7	23	94.7	231.44	4.04	-140.78
24	94.8	0	0	94.8	24	94.8	250	6.54	-161.74
25	110.5	0	0	110.5	25	110.5	235.01	9.18	-133.69
26	113.1	0	0	113.1	26	113.1	227.59	13.4	-127.89
27	113.9	0	0	113.9	27	113.9	135.9	16.29	-38.29

28	114.3	0	0	114.3	28	114.3	106.25	20.19	-12.14
29	132.2	0	0	132.2	29	132.2	213.81	28.8	-110.41
30	145.4	0	0	145.4	30	145.4	250	34.78	-139.38
31	145.2	0	0	145.2	31	145.2	221.25	31.62	-107.67
32	145.1	0	0	145.1	32	145.1	204.14	39.61	-98.65
33	154.1	0	0	154.1	33	154.1	246.62	46.08	-138.6
34	157.4	0	0	157.4	34	157.4	250	53.66	-146.26
35	156.5	0	0	156.5	35	156.5	179.02	36.29	-58.81
36	155.5	0	0	155.5	36	155.5	144.06	49.64	-38.2
37	144	0	0	144	37	144	197.36	76.96	-130.32
38	142.2	0	0	142.2	38	142.2	227.91	66.81	-152.52
39	142.1	0	0	142.1	39	142.1	215.96	55.57	-129.43
40	142.1	0	0	142.1	40	142.1	218.44	88.62	-164.96
41	125.3	0	0	125.3	41	125.3	212.28	87.02	-174
42	118.9	0	0	118.9	42	118.9	210.15	54.04	-145.29
43	116.9	0	0	116.9	43	116.9	153.76	63.44	-100.3
44	115.9	0	0	115.9	44	115.9	124.77	101.59	-110.46
45	115.4	0	0	115.4	45	115.4	90.46	104.11	-79.17
46	115	0	0	115	46	115	57.35	90.68	-33.03
47	124.1	0	0	124.1	47	124.1	96.22	91.85	-63.97
48	127.1	0	0	127.1	48	127.1	114.66	66.78	-54.34
49	130.2	0	0	130.2	49	130.2	94.39	77.14	-41.33
50	131.6	0	0	131.6	50	131.6	86.98	63.76	-19.14
51	140.7	0	0	140.7	51	140.7	69.47	75.46	-4.23
52	141.8	0	0	141.8	52	141.8	55.77	110.46	-24.43
53	143.9	0	0	143.9	53	143.9	74.36	70.57	-1.03
54	145.5	0	0	145.5	54	145.5	83.41	103.15	-41.06
55	145.5	0	0	145.5	55	145.5	50.33	72.79	22.38
56	145.6	0	0	145.6	56	145.6	37.21	67.41	40.98
57	144.7	0	0	144.7	57	144.7	9.1	28.94	106.66
58	144.4	0	0	144.4	58	144.4	1.34	23.89	119.17
59	145.2	0	0	145.2	59	145.2	19.54	19.75	105.91
60	145.3	0	0	145.3	60	145.3	33.06	31.53	80.71
61	149.6	0	0	149.6	61	149.6	2.02	40.48	107.1
62	150.3	0	0	150.3	62	150.3	0	63.95	86.35
63	150.1	0	0	150.1	63	150.1	10.47	59.41	80.22
64	150	0	0	150	64	150	16.35	50.76	82.89
65	203.5	0	0	203.5	65	203.5	21.07	41.64	140.79
66	207.2	0	0	207.2	66	207.2	27.11	23.39	156.7
67	207	0	0	207	67	207	43.75	24.86	138.39
68	206.9	0	0	206.9	68	206.9	53.45	20.6	132.85
69	215.5	0	0	215.5	69	215.5	19.61	17.4	178.49
70	223.9	0	0	223.9	70	223.9	9.95	15.06	198.89
71	225	0	0	225	71	225	72.19	13.59	139.22
72	225.5	0	0	225.5	72	225.5	120.28	22.08	83.14
73	233.9	0	0	233.9	73	233.9	81.91	18.2	133.79
74	237.5	0	0	237.5	74	237.5	76.88	12.15	148.47
75	236.6	0	0	236.6	75	236.6	62.81	5.37	168.42
76	236.1	0	0	236.1	76	236.1	56.82	2.07	177.21
77	215.4	0	0	215.4	77	215.4	34.9	0	180.5
78	211	0	0	211	78	211	23.98	0	187.02

79	210.9	0	0	210.9	79	210.9	25.11	0	185.79
80	210.8	0	0	210.8	80	210.8	23.43	0	187.37
81	198	0	0	198	81	198	58.69	0	139.31
82	197.9	0	0	197.9	82	197.9	93.67	0	104.23
83	198.5	0	0	198.5	83	198.5	93.49	0	105.01
84	198.6	0	0	198.6	84	198.6	99.55	0	99.05
85	180.8	0	0	180.8	85	180.8	56.82	0	123.98
86	177.2	0	0	177.2	86	177.2	26.01	0	151.19
87	177.8	0	0	177.8	87	177.8	16.74	0	161.06
88	177.9	0	0	177.9	88	177.9	6.97	0	170.93
89	161.5	0	0	161.5	89	161.5	18.98	0	142.52
90	147.3	0	0	147.3	90	147.3	23.12	0	124.18
91	147.2	0	0	147.2	91	147.2	44.43	0	102.77
92	147.2	0	0	147.2	92	147.2	55.64	0	91.56
93	117.2	0	0	117.2	93	117.2	92.41	0	24.79
94	107.5	0	0	107.5	94	107.5	109.01	0	-1.51
95	62	0	0	62	95	62	73.42	0	-11.42
96	58.7	0	0	58.7	96	58.7	63.8	0	-5.1

不考虑蓄电池作用及微网与主网交换功率约束，且可再生能源全额利用时的负荷构成情况如图 1 所示：

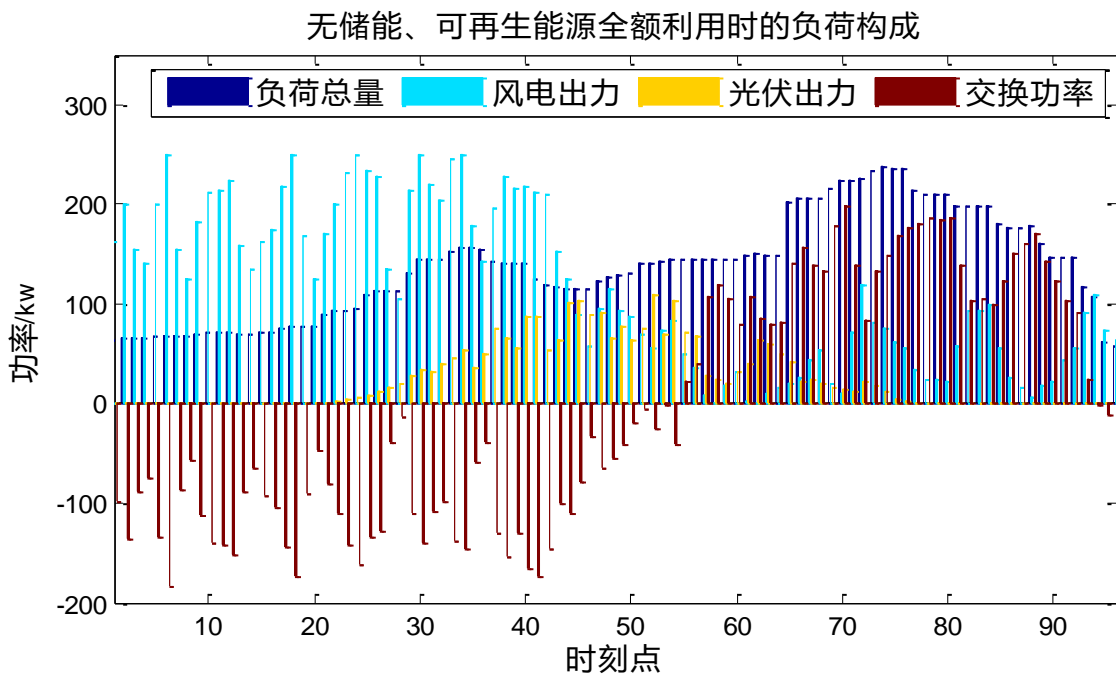


图 1 可再生能源全额利用时的负荷构成情况

由式 (4)、(8) 分别计算得：

(1) 无可再生能源时：

全天总供电费用为：1976.41 元；负荷平均购电单价为：0.5976 元/kWh。

(2) 无可再生能源时：

全天总供电费用为：2275.17 元；负荷平均购电单价为：0.1077 元/kWh。

5.2 不计储能的功率宽约束最优日前调度模型

问题 2 与问题 1 相较仍不考虑蓄电池的作用及微网与主网的功率交换约束，但是允许弃风弃光，即可再生能源的供电功率可在零到其实际出力的范围内变化。因此应在问题 1 中经济性评估模型的基础上进行修改，以平均负荷供电单价最小为目标函数，考虑功率平衡的等式约束及可再生能源功率的不等式约束，建立不计储能的功率宽约束最优日前调度模型并进行求解。

5.2.1 模型的建立

(1) 模型的约束条件

问题 2 中约束条件考虑的方面与问题 1 中基本相同。

仍需考虑蓄电池、可再生能源和主网三个供电主体提供的功率与负荷消耗功率之间的等式约束，即满足式 (1) ~ (3)。

不考虑蓄电池作用，则蓄电池供电功率为零，即满足式 (9)。

不考虑微网与主网之间的功率交换约束，则 $P_{ex}(t)$ 仍可在任意范围内变动。

允许弃风弃光，则各时段可再生能源的供电功率可在零到其实际可发功率的范围内变化，即

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

$$0 \leq P_{PV}(t) \leq P_{PV\max}(t) \quad (17)$$

(2) 模型的目标函数

问题 2 中要求以平均负荷供电单价最小为目标建立模型并求解，微网中平均负荷供电单价可表示为各供电主体的供电成本之和与全天总供电量之比，即

$$C_{avg.s} = \frac{C_{sum}}{\sum_{t=1}^T P_l(t)\Delta t} = \frac{\sum_{t=1}^T (P_{WT}(t)C_{WT} + P_{PV}(t)C_{PV} + C_{bat}(t) + C_{ex}(t))}{\sum_{t=1}^T P_l(t)\Delta t} \quad (18)$$

综上所述，可建立不计储能的功率宽约束最优日前调度模型，这是一个单变量线性规划模型：

$$\min C_{avg.s} = \frac{\sum_{t=1}^T (P_{WT}(t)C_{WT} + P_{PV}(t)C_{PV} + C_{bat}(t) + C_{ex}(t))}{\sum_{t=1}^T P_l(t)\Delta t} \quad (19)$$

$$s.t. \begin{cases} P_l(t) = P_{WT}(t) + P_{PV}(t) + P_{ex}(t) - P_{bat}(t) \\ P_{bat}(t) = X(t)P_{cha}(t) - Y(t)P_{dis}(t) \\ P_{ex}(t) = U_{e1}(t)P_p(t) - U_{e2}(t)P_s(t) \\ P_{bat}(t) = 0 \\ 0 \leq P_{PV}(t) \leq P_{PVmax}(t) \\ 0 \leq P_{WT}(t) \leq P_{WTmax}(t) \end{cases} \quad (20)$$

对该模型进行求解，即可获得平均负荷供电单价最小的最优日前经济调度方案。

5.2.2 模型的求解

由 MATLAB 求解得，各时段负荷的供电构成如表 2 所示：

表 2 问题 2 中各时段负荷的供电构成

序号	负荷	风电	光电	主网电能交换	序号	负荷	风电	光电	主网电能交换
1	64.3	0	0	64.3	49	130.2	94.39	35.81	0
2	65.5	0	0	65.5	50	131.6	86.98	44.62	0
3	66.7	0	0	66.7	51	140.7	69.47	71.23	0
4	66.9	0	0	66.9	52	141.8	55.77	86.03	0
5	67.5	0	0	67.5	53	143.9	74.36	69.54	0
6	67.7	0	0	67.7	54	145.5	83.41	62.09	0
7	68	0	0	68	55	145.5	50.33	72.79	22.38
8	68.2	0	0	68.2	56	145.6	37.21	67.41	40.98
9	70.2	0	0	70.2	57	144.7	9.1	28.94	106.66
10	71.9	0	0	71.9	58	144.4	1.34	23.89	119.17
11	71.9	0	0	71.9	59	145.2	19.54	19.75	105.91
12	71.9	0	0	71.9	60	145.3	33.06	31.53	80.71
13	70.7	0	0	70.7	61	149.6	2.02	0	147.58
14	70.7	0	0	70.7	62	150.3	0	0	150.3
15	71.3	0	0	71.3	63	150.1	10.47	0	139.63
16	72	0	0	72	64	150	16.35	0	133.65
17	76.5	0	0	76.5	65	203.5	21.07	0	182.43
18	77.6	0	0	77.6	66	207.2	27.11	0	180.09
19	78.7	0	0	78.7	67	207	43.75	0	163.25
20	78.8	0	0	78.8	68	206.9	53.45	0	153.45
21	90.6	0	0	90.6	69	215.5	19.61	0	195.89
22	93.8	0	0	93.8	70	223.9	9.95	0	213.95
23	94.7	0	0	94.7	71	225	72.19	0	152.81
24	94.8	0	0	94.8	72	225.5	120.28	0	105.22
25	110.5	0	0	110.5	73	233.9	81.91	18.2	133.79

26	113.1	0	0	113.1	74	237.5	76.88	12.15	148.47
27	113.9	0	0	113.9	75	236.6	62.81	5.37	168.42
28	114.3	0	0	114.3	76	236.1	56.82	2.07	177.21
29	132.2	132.2	0	0	77	215.4	34.9	0	180.5
30	145.4	145.4	0	0	78	211	23.98	0	187.02
31	145.2	145.2	0	0	79	210.9	25.11	0	185.79
32	145.1	145.1	0	0	80	210.8	23.43	0	187.37
33	154.1	154.1	0	0	81	198	58.69	0	139.31
34	157.4	157.4	0	0	82	197.9	93.67	0	104.23
35	156.5	156.5	0	0	83	198.5	93.49	0	105.01
36	155.5	144.06	0	11.44	84	198.6	99.55	0	99.05
37	144	144	0	0	85	180.8	56.82	0	123.98
38	142.2	142.2	0	0	86	177.2	26.01	0	151.19
39	142.1	142.1	0	0	87	177.8	16.74	0	161.06
40	142.1	142.1	0	0	88	177.9	6.97	0	170.93
41	125.3	212.28	0	-86.98	89	161.5	18.98	0	142.52
42	118.9	210.15	0	-91.25	90	147.3	23.12	0	124.18
43	116.9	153.76	0	-36.86	91	147.2	44.43	0	102.77
44	115.9	124.77	0	-8.87	92	147.2	55.64	0	91.56
45	115.4	90.46	24.94	0	93	117.2	92.41	0	24.79
46	115	57.35	57.65	0	94	107.5	107.5	0	0
47	124.1	96.22	27.88	0	95	62	62	0	0
48	127.1	114.66	12.44	0	96	58.7	58.7	0	0

不考虑蓄电池作用及微网与主网交换功率约束，且允许弃风弃光时的负荷构成情况如图 2 所示：

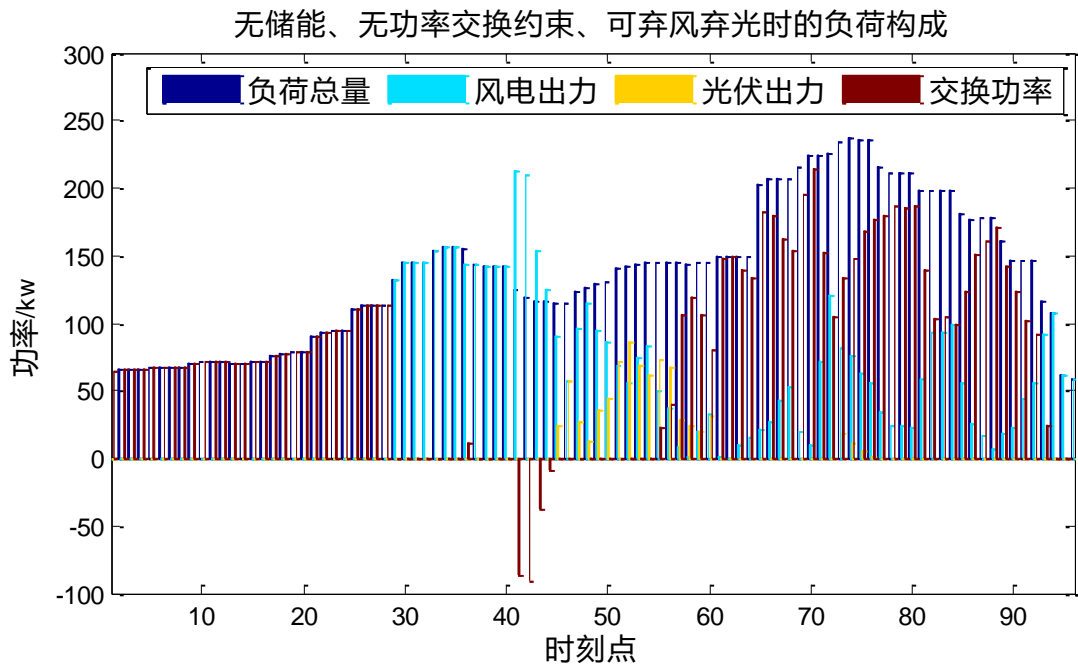


图 2 无储能、无功率交换约束、可弃风弃光时负荷构成情况

由式 (4)、(8) 计算得：

全天总供电费用为：1785.15 元；负荷平均购电单价为：0.5397 元/kWh。

5.2.3 模型结果的分析

本节要从可再生能源的利用情况及微网与主网的功率交换两个角度对模型的结果进行分析。

(1) 可再生能源的利用情况

风电、光伏出力的实际情况与其最大可供电功率的对比情况分别如图 3、图 4 所示：

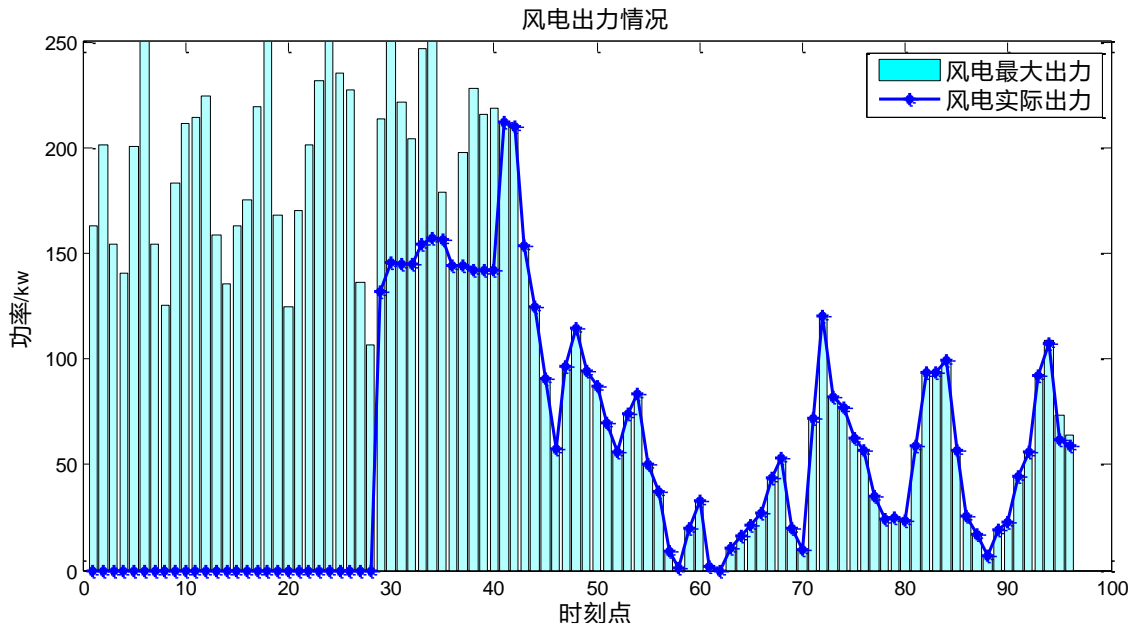


图 3 风电出力情况

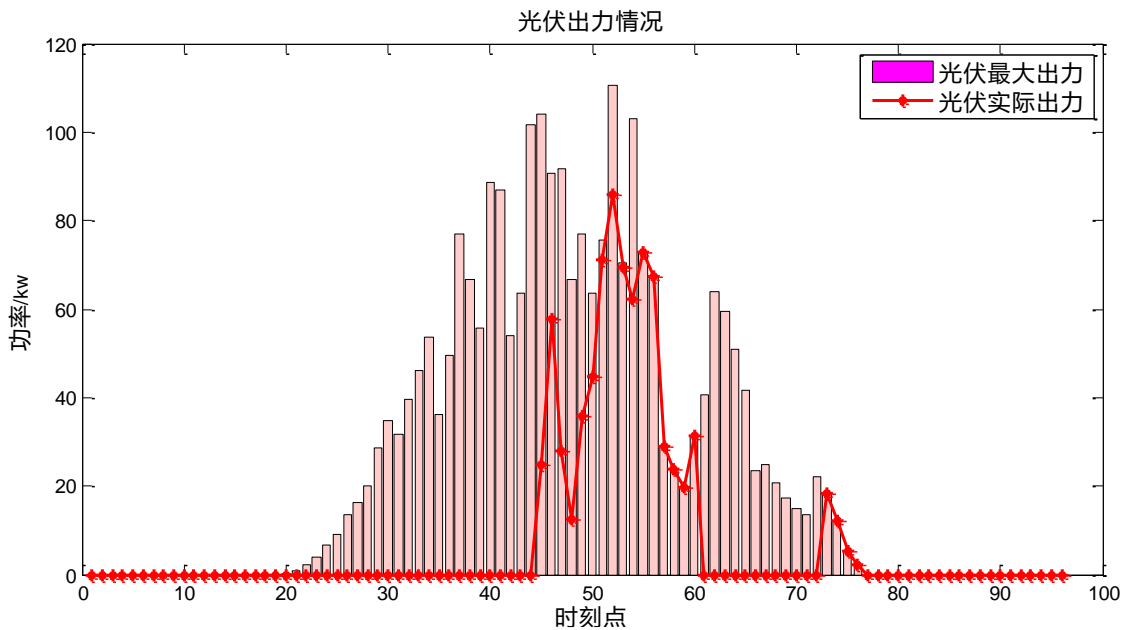


图 4 光伏出力情况

由图 3 可见，在 0:00-7:00 时间段内，风电几乎没有利用，弃风率非常高，而 11:00 以后风电几乎全部利用，利用率接近 100%。

由图 4 可见，光伏利用率一直较低，即使是在 8:00-13:00 太阳能充足的情况下，利用率也不到 50%。

计算的全天风电、光电的利用率分别为：46.01%，30.77%。由于风电发电成本较光电要低很多，因此在微网电量不足时，优先考虑接入风电和向主网购电，在电量缺额严重的情况下才会考虑光电的接入。

(2) 微网与主网交换功率情况

对比图 1 和图 2 可见，在允许弃风弃光的条件下，微网与电网之间的电量交换明显减少。微网主要在两个时间段向主网购电，分别为 0:00-7:00 购电电价低时段、13:00-23:00 负荷高峰时段。负荷总和与交换功率情况如图 5 所示：

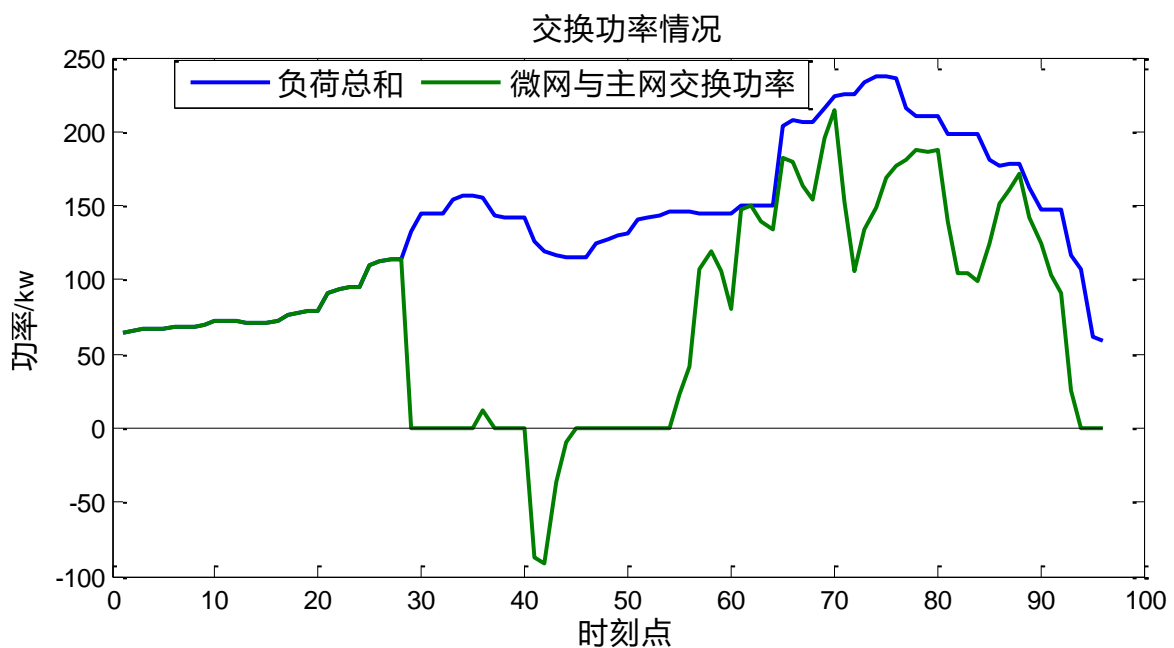


图 5 负荷总功率与微网主网交换功率情况对比

5.3 考虑储能及功率交换约束的最优日前调度模型

问题 3 与问题 2 相较考虑了蓄电池的作用及微网与主网之间功率交换的限制，不允许弃风弃光，即可再生能源应保证全额利用。因此应在问题 2 中最优日前经济调度模型的基础上进行修改，以平均负荷供电单价最小为目标函数，针对蓄电池建立模型，增设微网与主网之间功率交换的不等式约束，使可再生能源的供电功率为其最大可发功率，

建立考虑储能及功率交换约束的最优日前调度模型，并对模型进行求解。

5.3.1 模型的建立

(1) 功率平衡约束

问题3中首先应当满足不同供电主体与负荷之间功率平衡的等式约束，即满足式(1)~(3)。

(2) 蓄电池荷电状态 (SOC) 约束

考虑蓄电池的作用，因此应当针对蓄电池建立数学模型。首先，为防止蓄电池过充或过放，其荷电状态 (SOC, State of Charge) 应满足上下限约束，即

$$S_{\min} \leq S(t) \leq S_{\max} \quad (21)$$

式中， $S(t)$ 、 S_{\min} 、 S_{\max} 分别代表蓄电池 t 时段的 SOC 状态及其上、下限值。即当 SOC 到达电池最大值时，电池停止充电；当 SOC 到达最小值时，电池停止放电。

其次，本问题中单位时间间隔 Δt 内蓄电池充放电功率保持恒定，其 SOC 随时间变化情况可表示为：

$$S(t) = S_0 + \frac{\sum_{t=1}^T P_{cha}(t) X_t \Delta t - \sum_{t=1}^T P_{dis}(t) Y_t \Delta t}{E_b} \quad (22)$$

式中， S_0 代表蓄电池的初始 SOC 状态， E_b 代表蓄电池的容量。

为防止调度过程中蓄电池充放电能量不同造成恶性循环，应保证一个调度周期始末的净充放电能量为 0，即

$$S_0 = S_T \quad (23)$$

式中， S_T 代表调度周期末蓄电池的 SOC 状态。

(3) 蓄电池使用寿命约束

此外，从考虑蓄电池寿命角度，为防止充电速率不当对蓄电池使用寿命的损耗，需要对单位时间的充放电功率进行限制。问题3中，要求单位时间内蓄电池充放电最大功率为其额定容量的 20%，即

$$\begin{cases} 0 \leq P_{cha}(t) \leq 0.2E_b X(t) \\ 0 \leq P_{dis}(t) \leq 0.2E_b X(t) \end{cases} \quad (24)$$

在一个调度周期内，蓄电池的充放电次数也会对电池寿命造成影响，因此问题3中，充放电次数需满足下式：

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^T |X_{t+1} - X_t| \leq N_1 \\ \sum_{t=1}^T |Y_{t+1} - Y_t| \leq N_2 \end{cases} \quad (25)$$

式中， N_1 、 N_2 分别代表蓄电池充电和放电的次数限制值。

(4) 蓄电池充放电状态及功率约束

由于同一时刻蓄电池不能同时充电放电，因此同一时刻蓄电池的充放电状态及功率应满足：

$$X(t) \cdot Y(t) = 0 \quad (26)$$

而蓄电池充放电状态 $X(t)$ 、 $Y(t)$ 与其充放电功率 $P_{cha}(t)$ 、 $P_{dis}(t)$ 并非相互独立，应满足表 3 所示关系：

表 3 蓄电池充放电状态及功率关系

		P_{cha}		P_{dis}	
		1	0	1	0
X_t	1	○	×	×	○
	0	×	○	○	○
Y_t	1	×	○	○	×
	0	○	○	×	○

对表 1 进行分析，将式 (26) 所示约束扩展为以下四个约束条件：

$$\begin{cases} X(t) \cdot Y(t) = 0 & P_{cha}(t) \cdot Y(t) = 0 \\ P_{cha}(t) \cdot P_{dis}(t) = 0 & X(t) \cdot P_{dis}(t) = 0 \end{cases} \quad (27)$$

(5) 交换功率约束

问题 3 中要求主网和微网之间的交换功率不超过 150kW，因此需要建立微网与主网交换功率的不等式约束，即

$$-150 \leq P_{ex}(t) \leq 150 \quad (28)$$

(6) 可再生能源功率约束

在可再生能源全额利用情况下，光伏电源和风电机组的功率应满足式 (11)。

(7) 模型的目标函数

问题 3 仍以平均负荷供电单价最小为目标函数, 平均负荷供电单价如式(18)所示。

综上所述, 可建立考虑储能及功率交换约束的最优日前调度模型, 该模型为一个混合整数非线性规划模型^[1]:

$$\min C_{avg.s} = \frac{\sum_{t=1}^T (P_{WT}(t)C_{WT} + P_{PV}(t)C_{PV} + C_{bat}(t) + C_{ex}(t))}{\sum_{t=1}^T P_l(t)\Delta t} \quad (29)$$

$$s.t. \begin{cases} P_l(t) = P_{WT}(t) + P_{PV}(t) + P_{ex}(t) - P_{bat}(t) \\ P_{bat}(t) = X(t)P_{cha}(t) - Y(t)P_{dis}(t) \\ P_{ex}(t) = U_{e1}(t)P_p(t) - U_{e2}(t)P_s(t) \\ S_{min} \leq S(t) \leq S_{max} \\ S(t) = S_0 + \frac{\sum_{t=1}^T P_{cha}(t)X_t\Delta t - \sum_{t=1}^T P_{dis}(t)Y_t\Delta t}{E_b} \\ X(t) \cdot Y(t) = 0, P_{cha}(t) \cdot P_{dis}(t) = 0 \\ P_{cha}(t) \cdot Y(t) = 0, X(t) \cdot P_{dis}(t) = 0 \\ S_0 = S_T \\ 0 \leq P_{cha}(t) \leq 0.2E_b X(t), 0 \leq P_{dis}(t) \leq 0.2E_b X(t) \\ \sum_{t=1}^T |X_{t+1} - X_t| \leq N_1, \sum_{t=1}^T |Y_{t+1} - Y_t| \leq N_2 \\ -150 \leq P_{ex}(t) \leq 150 \\ P_{PV}(t) = P_{PVmax}(t), P_{WT}(t) = P_{WTmax}(t) \end{cases} \quad (30)$$

对此模型进行求解, 求得到在考虑蓄电池作用、微网与主网交换功率不超过 150kW、可再生能源全额利用的场景下, 平均负荷供电单价最小的最优日前经济调度方案。

5.3.2 模型的简化

问题 3 所建立的数学模型中涉及的变量数众多, 属于混合整数非线性规划问题, 求解难度较大, 因此需要对式(29)和式(30)所示的数学模型进行简化, 消除约束条件中的非独立变量。

式(27)所示蓄电池充放电功率及状态之间关系的约束条件中, $P_{cha}(t)$ 、 $P_{dis}(t)$ 、 $X(t)$ 、 $Y(t)$ 四个变量存在相关性, 属于非独立变量, 仅需满足四个约束条件中任意两个即可, 因此式(27)可简化为:

$$\begin{cases} X(t) \cdot Y(t) = 0 \\ P_{cha}(t) \cdot Y(t) = 0 \end{cases} \quad (31)$$

另外， $P_{cha}(t)$ 、 $P_{dis}(t)$ 、 $X(t)$ 、 $Y(t)$ 是描述 t 时段内充放电特征的变量，均可以利用 $t+1$ 时段和 t 时段蓄电池的 SOC 状态的变化来表征，即

$$P_{cha}(t) = \begin{cases} [S(t+1) - S(t)] E_b & S(t+1) > S(t) \\ 0 & S(t+1) \leq S(t) \end{cases} \quad (32)$$

$$P_{dis}(t) = \begin{cases} [S(t) - S(t-1)] E_b & S(t+1) < S(t) \\ 0 & S(t+1) \geq S(t) \end{cases} \quad (33)$$

$$X(t) = \begin{cases} 1 & S(t+1) > S(t) \\ 0 & S(t+1) \leq S(t) \end{cases} \quad (34)$$

$$Y(t) = \begin{cases} 1 & S(t+1) < S(t) \\ 0 & S(t+1) \geq S(t) \end{cases} \quad (35)$$

基于式 (1) ~ (3) 所示的功率等式约束，微网与主网的功率交换可以用负荷功率、蓄电池及可再生能源的供电功率表示，即

$$P_{ex}(t) = P_l(t) - (P_{WT}(t) + P_{PV}(t)) + (X(t)P_{cha}(t) - Y(t)P_{dis}(t)) \quad (36)$$

问题 3 中 $P_l(t)$ 、 $P_{WT}(t)$ 、 $P_{PV}(t)$ 均为固定值，而蓄电池的充放电功率 $P_{cha}(t)$ 、 $P_{dis}(t)$ 及充放电状态可用式 (32) ~ (35) 所示的表征 SOC 状态的唯一变量 $S(t)$ 表示，因此式 (36) 也可用唯一的独立变量 $S(t)$ 表示。

经过化简，将蓄电池的充放电功率及状态、微网与主网的交换功率均用蓄电池的 SOC 状态表征，问题 3 中的数学模型由含有多个变量转变为含有唯一变量，极大地降低了模型求解的难度和运算量。

5.3.3 模型的求解

问题 3 经过简化后的模型中，待求解的变量类型只有一个，即为各时刻蓄电池的 SOC 状态，共有 96 个时刻，即 96 个待求解变量；此外，存在与之对应的 0-1 变量。对于这种变量多、约束多的非线性规划模型的求解，常用方法有：分枝定界法、完全枚举法、动态规划法和遗传算法等。但当问题规模较大、且变量之间的相互关系复杂时，前三种方法计算量太大、求解难度高，有时甚至可能出现无法求解的情况。

遗传算法是一种基于自然选择和自然遗传学机理上的随机搜索算法，其特点是能保证种群不断进化，使所求解不断变优。

因此，选择用遗传算法进行求解，求解的目标是在很多最优解中，得到一个满足模型约束条件的最优解。

因模型数据规模较大，必须对遗传算法进行改进才能应用于微电网的日前优化调度问题。对此，我们通过对编码和算子分段来改进遗传算法，可以很好地适用于此模型的求解。

(1) 编码方法的改进

为减小染色体长度，采用十进制编码方式，每一个变量采用 4 位编码，则计算所得 SOC 的精度为 0.0001。对于 96 个变量，采用同一染色体进行编码，对于问题 3，染色体长度为 $4 \times 96 = 372$ 位。

因此将每一个染色体表示为

$$Ch_i = [s_1 \ s_2 \ s_3 \ s_4] \quad (37)$$

则 Ch_i 为每个变量（每个时刻）的四位编码。

一定数量的染色体个体组成了种群，一个种群即为最终所求解的结果，即为一组可行解。

一个个体可表示为

$$ind_i = [Ch_1, Ch_2, Ch_3, \dots, Ch_{227}] \quad (38)$$

ind_i 是一个一维向量。

一定数量的个体组成了种群，即一组解，种群是进行优化的对象。本题算法中，取一个种群包含 100 个个体，即

$$pop_i = [ind_1, ind_2, ind_3, \dots, ind_{50}] \quad (39)$$

pop_i 为一个大小为 100×96 的二维数组。

十进制编码会带来一些问题，将在下文交叉过程中进行分析、改进。

(2) 交叉方法的改进

把两个父代个体的部分结构加以替换重组而生成新个体的操作，即生成新的染色体。通过交叉，遗传算法的搜索能力得以飞跃提高。

由于编码是按照十进制进行编码，不能按照常规的交叉方式对染色体任意段进行重组。有以下三个主要原因：

①十进制编码后的染色体具有明显的分段意义，每 4 位代表着一个时刻蓄电池的

SOC 值，不同时刻之间进行的交叉没有实际意义。

②十进制编码每一位取值跨度大，若代表不同意义的编码段交叉，可能导致交叉位上编码大幅变化，不利于计算结果的收敛；

③每一个编码段实际上并不能取到所有的值。例如前 4 位代表 0:00 时刻，解码后的 SOC 取值只可能为 0.4000，同理，在蓄电池充放电功率的约束下，其后 4 位编码解码后的取值只可能在[0.35,0.45]的范围内。因此，若代表不同时刻的编码段交叉，很可能出现编码越限的情况，导致子代染色体不合要求。

对此，将算法改进为采用分段交叉的方式，交叉时只允许进行段内交叉，即令

$$S_1 = \{s_1|i = 1, 2, \dots, 100\}, S_2 = \{s_2|i = 1, 2, \dots, 100\}, \dots \quad (40)$$

这样，交叉只允许在集合 s_1 、 s_2 、 s_3 、 s_4 内分别进行。

(3) 变异方法的改进

对群体中的个体染色体的基因值作变动，即改变染色体的编码值。变异的目的是为了搜索全局最优解。由于初始化时已考虑到约束条件，淘汰了初始化时不合格的个体，为减少算法的计算量，只对代表每个时刻的 4 位编码中的后 3 位进行变异，即变异只在集合 s_2 、 s_3 、 s_4 内进行。

5.3.3.2 模型求解结果

用 MATLAB 对模型进行求解（具体程序见附录），其输出结果为一包含 372 个数值的向量，将其还原为 96 个点对应的 SOC。蓄电池荷电状态变化情况如图 6 所示：

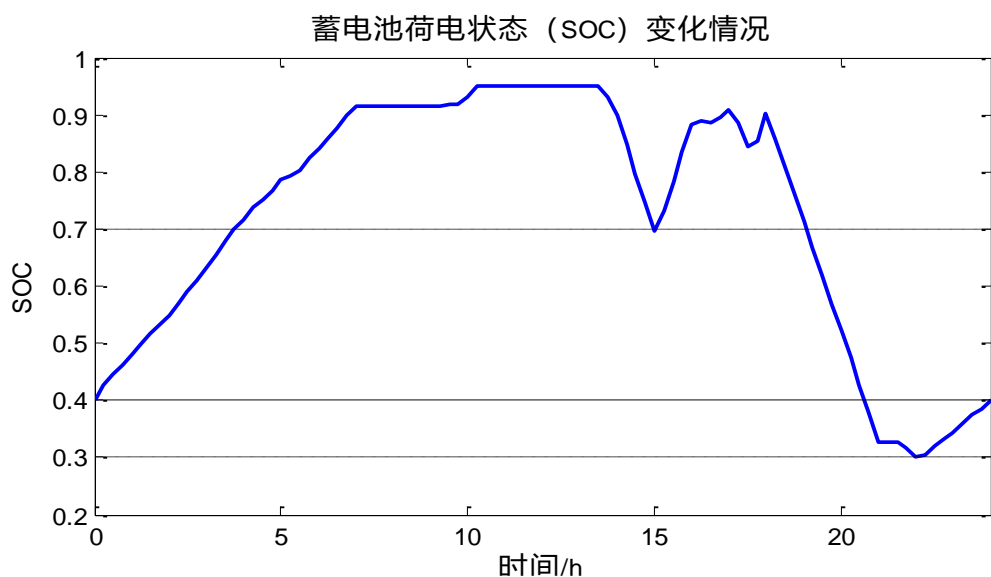


图 6 蓄电池荷电状态的变化情况
各时段负荷供电构成如表 4 所示：

表 4 问题 3 中各时段负荷供电构成

序号	负荷	风机	光伏	蓄电池	主网交换
1	64.3	163.1	0	30.13	68.67
2	65.5	201.47	0	25.65	110.32
3	66.7	154.26	0	17.14	70.42
4	66.9	140.29	0	24.21	49.18
5	67.5	200.29	0	17.61	115.18
6	67.7	250	0	23.11	159.19
7	68	154.26	0	19.87	66.39
8	68.2	125.64	0	21.03	36.41
9	70.2	182.87	0	25.61	87.06
10	71.9	211.67	0	23.41	116.36
11	71.9	214.11	0	23.24	118.97
12	71.9	224.41	0	26.71	125.8
13	70.7	158.26	0	26.17	61.39
14	70.7	135.45	0	32.56	32.19
15	71.3	163.1	0	23.41	68.39
16	72	175.49	0	20.01	83.48
17	76.5	219.38	0	24.57	118.31
18	77.6	250	0	17.93	154.47
19	78.7	168.04	0	18.98	70.36
20	78.8	124.56	0.06	21.2	24.62
21	90.6	170.15	0.96	9.08	71.43
22	93.8	201.47	2.11	11.68	98.1
23	94.7	231.44	4.04	26.2	114.58
24	94.8	250	6.54	21.1	140.64
25	110.5	235.01	9.18	18.21	115.48
26	113.1	227.59	13.4	24.13	103.76
27	113.9	135.9	16.29	25.12	13.17
28	114.3	106.25	20.19	20.45	-8.31
29	132.2	213.81	28.8	0	110.41
30	145.4	250	34.78	0	139.38
31	145.2	221.25	31.62	0	107.67
32	145.1	204.14	39.61	0	98.65
33	154.1	246.62	46.08	0	138.6
34	157.4	250	53.66	0	146.26
35	156.5	179.02	36.29	0	58.81
36	155.5	144.06	49.64	0	38.2
37	144	197.36	76.96	0	130.32
38	142.2	227.91	66.81	2.52	150
39	142.1	215.96	55.57	0	129.43
40	142.1	218.44	88.62	14.96	150
41	125.3	212.28	87.02	24	150

42	118.9	210.15	54.04	0	145.29
43	116.9	153.76	63.44	0	100.3
44	115.9	124.77	101.59	0	110.46
45	115.4	90.46	104.11	0	79.17
46	115	57.35	90.68	0	33.03
47	124.1	96.22	91.85	0	63.97
48	127.1	114.66	66.78	0	54.34
49	130.2	94.39	77.14	0	41.33
50	131.6	86.98	63.76	0	19.14
51	140.7	69.47	75.46	0	4.23
52	141.8	55.77	110.46	0	24.43
53	143.9	74.36	70.57	0	1.03
54	145.5	83.41	103.15	0	41.06
55	145.5	50.33	72.79	-22.38	0
56	145.6	37.21	67.41	-40.98	0
57	144.7	9.1	28.94	-60	-46.66
58	144.4	1.34	23.89	-60	-59.17
59	145.2	19.54	19.75	-60	-45.91
60	145.3	33.06	31.53	-60	-20.71
61	149.6	2.02	40.48	42.9	-150
62	150.3	0	63.95	60	-210.3
63	150.1	10.47	59.41	60	-210.1
64	150	16.35	50.76	60	-210
65	203.5	21.07	41.64	9.21	-150
66	207.2	27.11	23.39	-6.7	-150
67	207	43.75	24.86	11.61	-150
68	206.9	53.45	20.6	17.15	-150
69	215.5	19.61	17.4	-28.49	-150
70	223.9	9.95	15.06	-48.89	-150
71	225	72.19	13.59	10.78	-150
72	225.5	120.28	22.08	60	-285.5
73	233.9	81.91	18.2	-56.42	-77.37
74	237.5	76.88	12.15	-55.76	-92.71
75	236.6	62.81	5.37	-58.97	-109.45
76	236.1	56.82	2.07	-58.11	-119.1
77	215.4	34.9	0	-53.88	-126.62
78	211	23.98	0	-59.58	-127.44
79	210.9	25.11	0	-58.21	-127.58
80	210.8	23.43	0	-56.55	-130.82
81	198	58.69	0	-58.23	-81.08
82	197.9	93.67	0	-58.54	-45.69
83	198.5	93.49	0	-57.45	-47.56
84	198.6	99.55	0	-59.31	-39.74
85	180.8	56.82	0	0	-123.98

86	177.2	26.01	0	-1.19	-150
87	177.8	16.74	0	-11.06	-150
88	177.9	6.97	0	-20.95	-149.98
89	161.5	18.98	0	7.19	-149.71
90	147.3	23.12	0	16.15	-140.33
91	147.2	44.43	0	15.89	-118.66
92	147.2	55.64	0	12.11	-103.67
93	117.2	92.41	0	18.97	-43.76
94	107.5	109.01	0	18.9	-17.39
95	62	73.42	0	11.95	-0.53
96	58.7	63.8	0	18.84	-13.74

其负荷构成如图 7 所示。

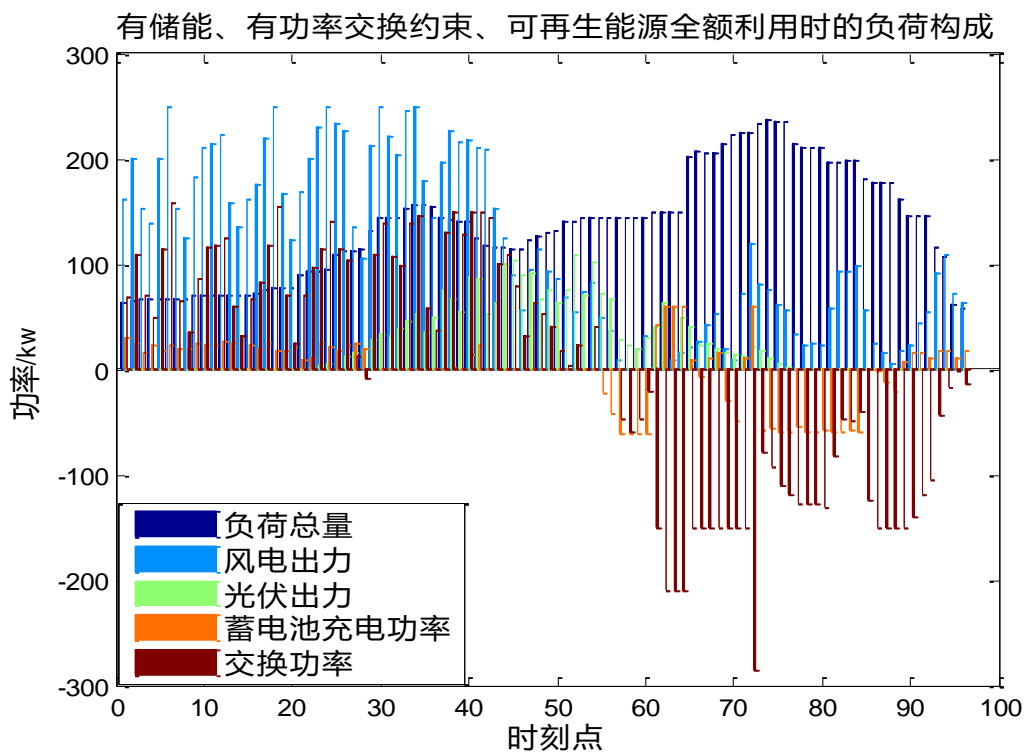


图 7 有储能及功率交换约束、可再生能源全额利用时负荷构成情况

由式 (4)、(8) 计算得：

全天总供电费用为：2256.02 元；负荷平均购电单价为：-0.0129 元/kWh。

5.3.4 模型结果的分析

问题 3 中考虑了蓄电池的作用，因此本文针对蓄电池参与后对于日前经济调度模型结果的影响进行了分析。

结合图 6 和图 7 可见，在 0:00-7:00 期间，可再生能源能满足负荷需求，且电网购

电成本较低，此时蓄电池更多处于充电状态；在 7:00-18:00 期间，由于电网功率交换成本较高，蓄电池电量变化不大，用以维持负荷平衡；而在 18:00-23:00 负荷高峰期时，蓄电池更多处于放电状态，满足负荷的用电需求。

问题 3 中全天总供电费用为 2256.02 元 < 2275.17 元，可见蓄电池参与调节后供电成本有所减少。负荷平均购电单价为 -0.0129 元，出现负值，说明此时从全天角度来看，微网是向主网输送电能，微网在新能源的消纳方面的表现更为出色。

在问题 3 提出的日前调度方案中，蓄电池充电 4 次，放电 3 次，满足了一个调度周期内其充放电次数的要求。

5.4 多主体参与的最优日前调度模型

问题 4 与问题 3 相较仍考虑蓄电池的作用及微网与主网交换功率的限制，但是允许弃风弃光。因此应在问题 3 中最优日前经济调度模型的基础上进行修改，以平均负荷供电单价最小为目标函数，仍需建立蓄电池的数学模型及微网与主网之间功率交换的不等式约束，另外，可再生能源的供电功率应在零到其实际最大可发功率的范围内变化。综合考虑以上因素，建立多主体参与的最优日前调度模型，并对模型进行求解。

5.4.1 模型的建立

(1) 模型的约束条件

问题 4 中约束条件考虑的方面与问题 3 中基本相同。

仍满足蓄电池、主网及可再生能源的供电功率与负荷消耗的功率之间的等式约束，即式 (1) ~ (3)。

考虑蓄电池的作用，需要满足蓄电池的荷电状态、充放电状态及次数、放电深度的约束条件，即满足式 (21) ~ (27)。

要求微网与主网的交换功率不超过 150kW，即满足式 (28)。

允许弃风弃光，则风电及光伏向微电网的实际供电功率应为可变量，可在零到其实际最大可发功率的范围内变化，即满足式 (11)。

(2) 模型的目标函数

问题 4 仍以平均负荷供电单价最小为目标函数，平均负荷供电单价如式 (18) 所示。

综上所述，可建立多主体参与的最优日前调度模型，该模型为一个混合整数非线性规划模型：

$$\min C_{avg.s} = \frac{\sum_{t=1}^T (P_{WT}(t)C_{WT} + P_{PV}(t)C_{PV} + C_{bat}(t) + C_{ex}(t))}{\sum_{t=1}^T P_l(t)\Delta t} \quad (41)$$

$$s.t. \begin{cases} P_l(t) = P_{WT}(t) + P_{PV}(t) + P_{ex}(t) - P_{bat}(t) \\ P_{bat}(t) = X(t)P_{cha}(t) - Y(t)P_{dis}(t) \\ P_{ex}(t) = U_{e1}(t)P_p(t) - U_{e2}(t)P_s(t) \\ S_{min} \leq S(t) \leq S_{max} \\ S(t) = S_0 + \frac{\sum_{t=1}^T P_{cha}(t)X_t\Delta t - \sum_{t=1}^T P_{dis}(t)Y_t\Delta t}{E_b} \\ X(t) \cdot Y(t) = 0, P_{cha}(t) \cdot P_{dis}(t) = 0 \\ P_{cha}(t) \cdot Y(t) = 0, X(t) \cdot P_{dis}(t) = 0 \\ S_0 = S_T \\ 0 \leq P_{cha}(t) \leq 0.2E_b X(t), 0 \leq P_{dis}(t) \leq 0.2E_b X(t) \\ \sum_{t=1}^T |X_{t+1} - X_t| \leq N_1, \sum_{t=1}^T |Y_{t+1} - Y_t| \leq N_2 \\ -150 \leq P_{ex}(t) \leq 150 \\ 0 \leq P_{PV}(t) \leq P_{PVmax}(t), 0 \leq P_{WT}(t) \leq P_{WTmax}(t) \end{cases} \quad (42)$$

对此模型进行求解，即可获得考虑蓄电池作用、微网与主网交换功率不超过 150kW、允许弃风弃光的场景下，平均负荷供电单价最小的最优日前经济调度方案。

5.4.2 模型的求解

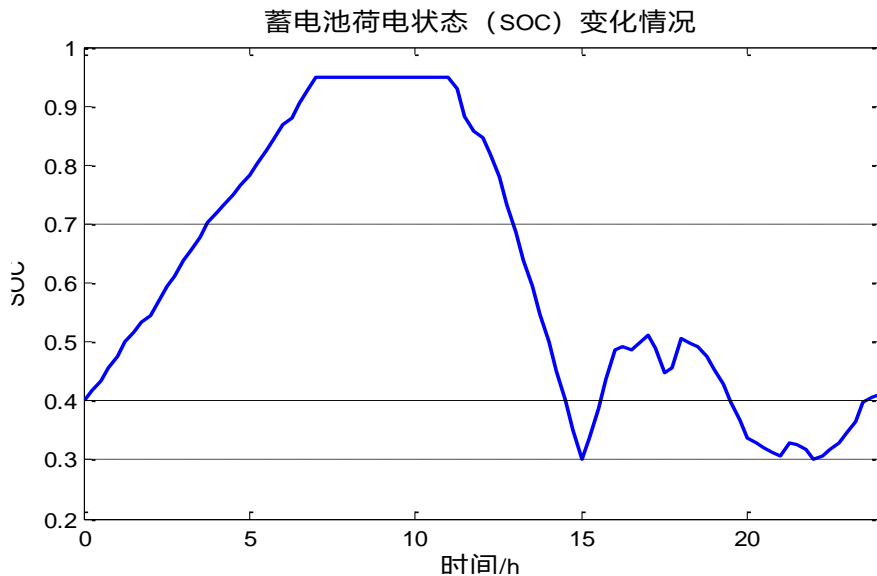


图 8 蓄电池荷电状态的变化情况

蓄电池荷电状态变化情况如图 8 所示。

各时段负荷供电构成如表 5 所示：

表 5 问题 4 中各时段负荷供电构成

序号	负荷	风机	光伏	蓄电池	售电量
1	64.3	0	0	22.11	86.41
2	65.5	0	0	17.53	83.03
3	66.7	0	0	29.11	95.81
4	66.9	0	0	23.21	90.11
5	67.5	0	0	28.71	96.21
6	67.7	0	0	19.68	87.38
7	68	0	0	21.23	89.23
8	68.2	0	0	12.11	80.31
9	70.2	0	0	25.11	95.31
10	71.9	0	0	34.51	106.41
11	71.9	0	0	21.62	93.52
12	71.9	0	0	31.23	103.13
13	70.7	0	0	18.75	89.45
14	70.7	0	0	29.61	100.31
15	71.3	0	0	30.01	101.31
16	72	0	0	19.11	91.11
17	76.5	0	0	14.41	90.91
18	77.6	0	0	21.31	98.91
19	78.7	0	0	19.23	97.93
20	78.8	0	0	21.64	100.44
21	90.6	0	0	23.57	114.17
22	93.8	0	0	23.71	117.51
23	94.7	0	0	25.18	119.88
24	94.8	0	0	31.11	125.91
25	110.5	0	0	13.07	123.57
26	113.1	0	0	28.71	141.81
27	113.9	0	0	30.01	143.91
28	114.3	0	0	24.41	138.71
29	132.2	132.2	0	0	0
30	145.4	145.4	0	0	0
31	145.2	145.2	0	0	0
32	145.1	145.1	0	0	0
33	154.1	154.1	0	0	0
34	157.4	157.4	0	0	0
35	156.5	156.5	0	0	0
36	155.5	155.5	0	0	0
37	144	144	0	0	0
38	142.2	142.2	0	0	0

39	142.1	142.1	0	0	0
40	142.1	142.1	0	0	0
41	125.3	212.28	0	0	-86.98
42	118.9	210.15	0	0	-91.25
43	116.9	153.76	0	0	-36.86
44	115.9	124.77	0	0	-8.87
45	115.4	90.46	0	-24.94	0
46	115	57.35	0	-57.65	0
47	124.1	96.22	0	-27.88	0
48	127.1	114.66	0	-12.44	0
49	130.2	94.39	0	-35.81	0
50	131.6	86.98	0	-44.62	0
51	140.7	69.47	15.32	-55.91	0
52	141.8	55.77	28.25	-57.78	0
53	143.9	74.36	12.23	-57.31	0
54	145.5	83.41	8.33	-53.76	0
55	145.5	50.33	43.28	-55.89	-4
56	145.6	37.21	52.38	-56.01	0
57	144.7	9.1	28.94	-60	46.66
58	144.4	1.34	23.89	-60	59.17
59	145.2	19.54	19.75	-60	45.91
60	145.3	33.06	31.53	-60	20.71
61	149.6	2.02	40.48	42.9	150
62	150.3	0	60.3	60	150
63	150.1	10.47	49.63	60	150
64	150	16.35	43.65	60	150
65	203.5	21.07	41.64	9.21	150
66	207.2	27.11	23.39	-6.7	150
67	207	43.75	24.86	11.61	150
68	206.9	53.45	20.6	17.15	150
69	215.5	19.61	17.4	-28.49	150
70	223.9	9.95	15.06	-48.89	150
71	225	72.19	13.59	10.78	150
72	225.5	120.28	15.22	60	150
73	233.9	81.91	18.2	-9.01	124.78
74	237.5	76.88	12.15	-8.11	140.36
75	236.6	62.81	5.37	-18.42	150
76	236.1	56.82	2.07	-27.21	150
77	215.4	34.9	0	-30.5	150
78	211	23.98	0	-37.02	150
79	210.9	25.11	0	-35.79	150
80	210.8	23.43	0	-37.37	150
81	198	58.69	0	-8.66	130.65
82	197.9	93.67	0	-11.54	92.69

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/497131064130006054>