

报名序号：2891A

论文题目：微电网日前优化调度

微电网日前优化调度

摘 要

针对微电网日前优化调度问题，本文以 matlab 数据处理为基础，建立非线性规划模型，运用贪心算法对问题 1 到问题 6 进行了解答。

对于问题 1 根据成本、功率、单价、时段之间的关系，以及发电与负荷相等的原则，得到无可再生能源和可再生能源全额利用时负荷的供电构成，及无可再生能源时全天总供电费用 1976.41 元，平均购电单价 0.5976 元/kWh，可再生能源时全额利用全天总供电费用 2275.17 元，平均购电单价 0.6654 元/kWh。

对于问题 2 以平均负荷供电单价为目标，分析可再生能源发电成本与购电价格和售电价格的关系，得到可再生能源发电成本小于售电价格时应全额利用，大于购电价格时应不利用，介于两者之间时，只给负荷供电，不向电网售电，计算出允许弃风弃光时最优的负荷供电构成，全天总供电费用为 1785.15 元，平均购电单价为 0.5349 元/kWh，弃风率为 53.99%，弃光率为 69.23%，得出可再生能源的利用不充分的结论。

对于问题 3 以平均负荷供电单价为目标，在可再生能源全额利用的条件下考虑蓄电池的作用，建立了非线性规划模型，用贪心算法进行求解，并证明了所得解为全局最优解，得到了最优的负荷供电构成，全天总供电费用为 2209.88 元，平均购电单价为 0.6171 元/kWh，得出蓄电池参与调节后降低了成本的结论。

对于问题 4，问题 4 与问题 3 求解思路在很大程度上相似，步骤存在很多相同部分，所以我们重点进行不同部分的分析。相比较而言，区别在于允许弃风弃光，多出两个变量，但仍为非线性规划模型，还是利用贪心算法求解，全天总供电费用为 1733.56 元，平均购电单价为 0.4803 元/kWh，得出了蓄电池参与调节后提高了可再生能源的利用率和并降低了成本的结论

对于问题 5 对微网中用户、电网、可再生能源和蓄电池四个利益主体的利益诉求进行分析，以电力系统运行的四个基本要求为依据，提出了科学合理的策略。

对于问题 6 基于上述结果，比较并分析了各种情况下的经济性和环保性，对微电网日前优化问题进行了进一步的阐述。

关键词：微电网；优化调度；非线性规划；贪心算法

1. 问题的重述

要求妥善管理微电网内部分布式电源和储能的运行,实现微电网经济、技术、环境效益的最大化。日前经济调度问题是指在对风机出力、光伏出力、常规负荷进行日前(未来 24 小时)预测基础上,考虑电网侧的分时电价,充分利用微网中的蓄电池等可调控手段,使微电网运行的经济性最优。

1) 经济性评估方案:

若微网中蓄电池不作用,且微网与电网交换功率无约束,在无可再生能源和可再生能源全额利用两种情况下,分别计算各时段负荷的供电构成(kW)、全天总供电费用(元)和负荷平均购电单价(元/kWh)。

2) 最优日前调度方案一:

若不考虑蓄电池作用,且微网与电网交换功率无约束,以平均负荷供电单价最小为目标(允许弃风弃光),分别计算各时段负荷的供电构成(kW)、全天总供电费用(元)和平均购电单价(元/kWh),分析可再生能源的利用情况。

3) 最优日前调度方案二:

若考虑蓄电池作用,且微网与电网允许交换功率不超过 150kW,在可再生能源全额利用的条件下,以负荷平均供电单价最小为目标,建立优化模型,给出最优调度方案,包括各时段负荷的供电构成(kW)、全天总供电费用(元)和平均购电单价(元/kWh),分析蓄电池参与调节后产生的影响。

4) 最优日前调度方案三:

若考虑蓄电池作用,且微网与电网允许交换功率不超过 150kW,以负荷供电成本最小为目标(允许弃风弃光),建立优化模型,给出最优调度方案,包括各时段负荷供电构成(kW)、全天总供电费用(元)和平均购电单价(元/kWh),分析可再生能源的利用情况以及蓄电池参与调节后产生的影响。

5) 微网中涉及多个利益主体,如用户、电网、可再生能源和蓄电池,利益诉求具有一定的冲突,在不使任一主体的利益严重受损前提下,试制定科学合理的策略,使得综合效益达到最优。

6) 通过上述问题的求解,对微电网日前优化调度的认识,阐明观点和依据。

2. 问题的分析

2.1 问题 1 的分析

要求微网中蓄电池不作用,则为无储能情况,且微网与电网交换功率无约束,只需考虑可再生能源产生功率以及微网与电网交换的功率。显然,光伏和风机产能为可再生能源,主网提供的电能为不可再生能源。

2.1.1 无可再生能源

微网运行过程中,风机和光伏能源不作用,即为负荷功率全部由主网提供,消耗电能费用按不同时间段微网从主网购电价格收取。

2.1.2 可再生能源全额利用

微网运行过程中,若较负荷所需功率不足,不足部分向主网购买;若剩余,

则剩余部分售卖给主网。由各时段的可再生能源成本、购售电价格计算所得最后的供电构成以及消耗的费用。

2. 2 问题 2 的分析

要求平均电荷供电单价最小，即电荷供电成本最低，且允许弃风弃光，同时平均电荷供电单价是全天微网从主网购买电能的开支以及微网售卖给主网电能的收入两部分对全天总供电电荷能量的比值，因此要综合考虑各方面因素。

为了使总成本最低，我们先将可再生能源发电的价格分别与各时段电网售价以及购电价格进行对比，将风机、光伏发电划分为全部不弃、全部弃、全部自给三种情况：

表 1 可再生能源发电价格与购电价格对比

发电价格小于电网售价	全部不弃
发电价格大于电网购价	全部弃
发电价格大于电网售价但小于电网购价	全部自给（可再生能源只发电用来给负荷消耗，不发电售卖给电网）

通过上述划分，整理得到各时段的可再生能源的发电状态，进而求得可再生能源发电的费用，再通过负荷所需为各项代数和，得到微网与主网各时段的交换功率，将上述光伏、电机发电，交换功率求和即为全天最低总供电费用。

2. 3 问题 3 的分析

根据题意，考虑蓄电池作用，微网与单位允许交换功率不超过 150kw，可再生能源全额利用，以负荷平均供电单价最小为目标，建立非线性规划模型，则需统筹考虑各种约束条件得到最优调度方案。

先从功率方面考虑，显然负荷所消耗的与蓄电池提供的功率之和等于可再生能源全额利用与交换功率之和，而对于微网和电网交换功率，受约束即存在最大交换功率。

其次，对于电池而言，存在充放电次数的约束，单位时间内充、放电最大功率有上下限，且要求在调度周期始末能力状态相等，结合题目给出的初状态，列出优化方程，计算得到最优调度的各项参数。

由于非线性规划模型求全局最优解较为困难，采用贪心算法对问题进行求解。

2. 4 问题 4 的分析

问题 4 与问题 3 求解思路在很大程度上相似，步骤存在很多相同部分，所以我们重点进行不同部分的分析。

与问题 3 相比，区别在于允许弃风弃光，但仍为非线性规划模型，还是利用贪心算法求解，但相对问题 3 会更加繁琐，但结果更优。

2. 5 问题 5 的分析

微电网涉及多个利益主体，利益诉求存在冲突，在满足电力系统运行四个基本要求的基础上，用户希望总成本最低，电能质量好；电网希望售电利最大，且电网稳定性高等；可再生能源发电厂希望尽可能多的赚取利润；蓄电池希望充放电次数较少，充放电所获利润最大。由此，对其进行全面分析可得到最优的综合效益。

2. 6 问题 6 的分析

微电网日前优化调度对于保障系统供电的可靠性、提高电力用户供电质量、减少环境污染、提高能源利用效率等方面具有重要意义，且微电网实现了负荷需求侧管理以及可再生能源的最大化利用。影响微电网优化调度的主要因素是微电网运行维护的经济性，其次是环保性，而采用双向能量交流的分时电价运行策略能够有效地反应市场需求，大大降低微电网的运营成本。也就是说终端用户不仅能从主网直接购买用电，同时还可以从储能、发电设备中获取可再生清洁能源，例如光能、风能等。

3. 模型的假设与符号说明

3. 1 模型的假设

- (1) 题目中所给的预测数据准确无误
- (2) 假设主网为无穷大电网
- (3) 不考虑微网中无功功率的平衡
- (4) 不考虑蓄电池、可再生能源发电对电能质量的影响
- (5) 忽略网损

3. 2 符号说明

符号	含义
P_{Ni}	第 i 个时间段与主网交换的功率 (kW)
P_{Li}	第 i 个时间段的负荷功率 (kW)
P_{Fi}	第 i 个时间段的风机功率 (kW)
P_{Si}	第 i 个时间段的光伏功率 (kW)
P_{Ci}	第 i 个时间段的蓄电池功率 (kW)
P_{Nmax}	微网与主网交换的最大功率 (kW)
P_{Fmaxi}	第 i 个时间段风机的最大功率 (kW)
P_{Smaxi}	第 i 个时间段光伏的最大功率 (kW)

SP_{Ci}	第 i 个时间内的蓄电池容量 (kVA)
$Q_F\%$	全天弃风率
$Q_S\%$	全天弃光率
W	全天总供电费用 (元)
W_N	全天微网与电网总交换费用 (元)
W_F	全天风机发电费用 (元)
W_S	全天光伏发电费用 (元)
\bar{W}	全天微网平均成本 (元)
ω_{Gi}	第 i 个时间段的购电价格 (元)
ω_{Mi}	第 i 个时间段的售电价格 (元)
ω_{Ni}	第 i 个时间段的交换价格 (元)
ω_F	风机的发电价格 0.52 元/kWh
ω_S	光伏的发电价格 0.75 元/kWh
Δt	0.25 小时
A_L	负荷平均购电单价 (元/kWh)
x_i	第 i 个时间段的主网功率状态变量
N_1	充电次数
N_2	放电次数

4. 模型的准备

4.1 贪心算法

4.1.1 贪心算法的原理

贪心算法（又称贪婪算法）是指，在对问题求解时，总是做出在当前看来是最好的选择。也就是说，不从整体最优上加以考虑，他所做出的是在某种意义上的局部最优解。

贪心算法不是对所有问题都能得到整体最优解，关键是贪心策略的选择，选择的贪心策略必须具备无后效性，即某个状态以前的过程不会影响以后的状态，只与当前状态有关

贪心算法的基本思路是从问题的某一个初始解出发一步一步地进行，根据某个优化测度，每一步都要确保能获得局部最优解。每一步只考虑一个数据，他的选取应该满足局部优化的条件。若下一个数据和部分最优解连在一起不再是可行解时，就不把该数据添加到部分解中，直到把所有数据枚举完，或者不能再添加算法停止。

4.1.2 贪心算法的步骤

- (1) 建立数学模型来描述问题；
- (2) 把求解的问题分成若干个子问题；
- (3) 对每一子问题求解，得到子问题的局部最优解；
- (4) 把子问题的解局部最优解合成原来解问题的一个解。

5. 模型的建立与求解

5.1 问题 1 的模型建立与求解

5.1.1 无可再生能源的模型建立与求解

微网中蓄电池不作用，与电网交换功率无约束，且无可再生能源，所以供电构成：

$$P_{Ni} = P_{Li}, P_{Fi} = P_{Si} = P_{Ci} = 0 \quad (1)$$

微网与主网最大交换功率为：

$$\begin{aligned} \text{购电时, } P_{N \max} &= \max\{P_{Ni}\} = 237.5 \\ \text{售电时, } P_{N \max} &= \min\{P_{Ni}\} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

由公式（1）得到各时段负荷的供电构成结果，详见附录 1，由数据得到图形如下：

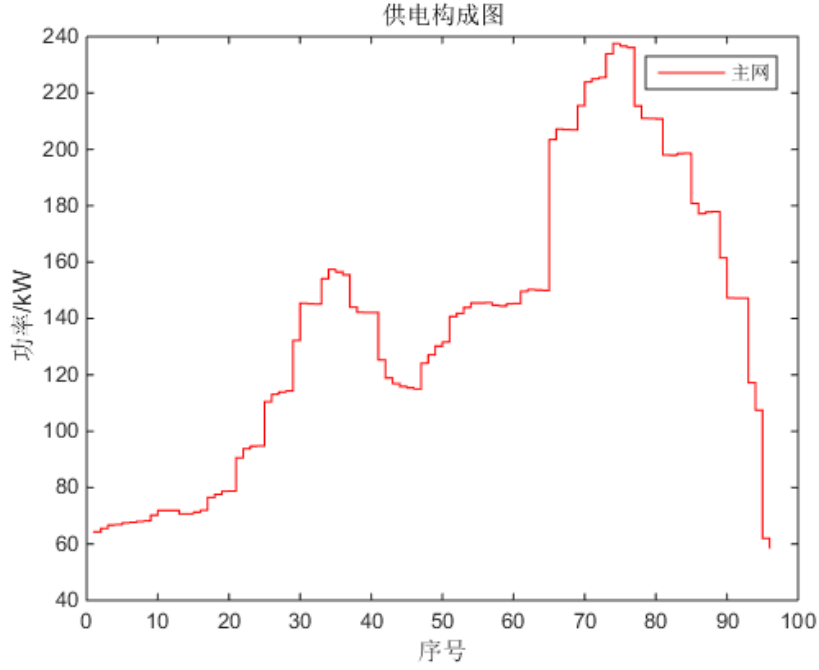


图 1 无可再生能源各时段负荷的供电构成图

其中，风机成本、光伏成本为：

$$W_F = \left(\sum_{i=1}^{96} P_{Fi} \omega_{Fi} \right) \Delta t = 0, \quad W_S = \left(\sum_{i=1}^{96} P_{Si} \omega_{Si} \right) \Delta t = 0 \quad (3)$$

由各时段购电价格不同，得到全天总供电费用；

$$W_1 = \left(\sum_{i=1}^{96} P_{Ni} \omega_{Gi} \right) \Delta t = 1976.41 \quad (4)$$

平均成本为总供电费用比全天负荷消耗功率：

$$\bar{W}_1 = \frac{W_1}{\sum_{i=1}^{96} P_{Li}} = 0.5976 \quad (5)$$

负荷平均购电单价为全天负荷各时段从电网购买电能的费用之和比全天负荷各时段购买的电能：

$$A_{L_1} = \frac{\sum_{i=1}^{96} P_{Ni} \omega_{Gi}}{\sum_{i=1}^{96} P_{Ni}} = 0.5976 \quad (6)$$

5.1.2 可再生能源的全额利用的模型建立与求解

题中要求可再生能源全额利用：

$$P_{Fi} = P_{F_{max}i}, \quad P_{Si} = P_{S_{max}i} \quad (7)$$

微网中可再生能源全额利用，则若较负荷所需功率不足，不足部分向主网购买；若剩余，则剩余部分售卖给主网，供电构成：

$$P_{Ni} = P_{Li} - P_{Fi} - P_{Si} , P_{Ci} = 0 \quad (8)$$

微网与主网最大交换功率为：

$$\begin{aligned} \text{购电时, } P_{N\max} &= \max\{P_{Ni}\} = 198.89 \\ \text{售电时, } P_{N\max} &= \min\{P_{Ni}\} = -182.3 \end{aligned} \quad (9)$$

由公式（8）及题目所给数据，得到各时段负荷的供电构成结果，详见附录 2，由数据得到图形如下：

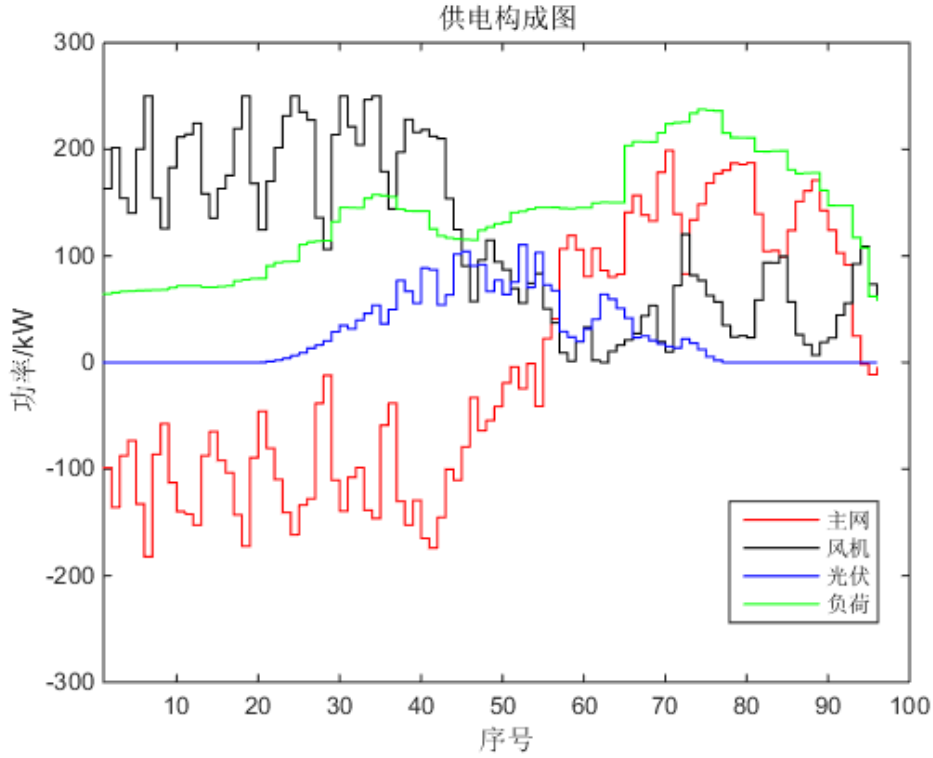


图 2 可再生能源全额利用各时段负荷的供电构成图

在数据处理过程中，主网提供功率会出现负值，即微网对电网售电。为了简化接下来的计算过程，我们引入状态变量 x_i 以表征微网是售电还是购电，若售电，则 $x_i = 0$ ；若购电，则 $x_i = 1$ 。

$$x_i = \begin{cases} 1, & P_{Ni} = P_{Li} - P_{Fi} - P_{Si} > 0 \\ 0, & P_{Ni} = P_{Li} - P_{Fi} - P_{Si} < 0 \end{cases} \quad (10)$$

由各时段可再生能源功率不同，负荷功率不同，状态变量不同，购电、售电价格不同，得到全天总供电费用：

$$W_{F2} = \left(\sum_{i=1}^{96} P_{F \max i} \omega_{Fi} \right) \Delta t = 1447.22 \quad (11)$$

$$W_{S2} = \left(\sum_{i=1}^{96} P_{S \max i} \omega_{Si} \right) \Delta t = 471.86 \quad (12)$$

$$W_{N2} = \left(\sum_{i=1}^{96} P_{Ni} \omega_{Gi} x_i - \sum_{i=1}^{96} P_{Ni} \omega_{Mi} (1 - x_i) \right) \Delta t = 356.09 \quad (13)$$

$$W_2 = W_{F2} + W_{S2} + W_{N2} = 2275.17 \quad (14)$$

平均成本为：

$$\bar{W}_2 = \frac{W_2}{\sum_{i=1}^{96} P_{Li}} = 0.6879 \quad (15)$$

负荷平均购电单价：

$$A_{L2} = \frac{\sum_{i=1}^{96} P_{Ni} \omega_{Gi} x_i}{\sum_{i=1}^{96} P_{Gi} x_i} = 0.6654 \quad (16)$$

5.2 问题 2 的模型建立与求解

为使平均负荷供电单价最低，我们先将可再生能源发电的价格分别与各时段电网售价以及购电价格进行对比，将风机、光伏发电划分为全部不弃、全部弃、全部自给三种情况，如下表：

表 2 可再生能源发电价格与购电价格对比

发电价格小于电网售价	全部不弃
发电价格大于电网购价	全部弃
发电价格大于电网售价但小于电网购价	全部自给（可再生能源只发电用来给负荷消耗，不发电售卖给电网）

根据风机、光伏发电价格以及主网购电、售电价格得到下表：

表3 各时段风机、光伏发电状态

时段	风机发电状态	光伏发电状态
1—28	全弃	全弃
29—40	自给	全弃
41—60	不弃	自给
61—72	自给	全弃
73—84	不弃	自给
85—96	自给	全弃

通过表格得到各时段的可再生能源的发电状态，整理得到三种风机、光伏发电状态：

(1) 风机全弃、光伏全弃时各时段风机、光伏的发电功率：

$$P_{Fi} = 0, P_{Si} = 0 \quad (17)$$

(2) 风机自给，光伏全弃时各时段风机、光伏的发电功率：

$$P_{Fi} = \min(P_{Li}, P_{Fmaxi}), P_{Si} = 0 \quad (18)$$

(3) 风机不弃、光伏自给时各时段风机、光伏的发电功率：

$$P_{Fi} = P_{Fmaxi}, P_{Si} = \min[\max(P_{Li} - P_{Fi}, 0), P_{Smaxi}] \quad (19)$$

由负荷所需功率为各项代数和，得到微网与主网各时段的交换功率：

$$P_{Ni} = P_{Li} - P_{Fi} - P_{Si} \quad (20)$$

微网与主网最大交换功率为：

$$\begin{aligned} \text{购电时, } P_{Nmax} &= \max\{P_{Ni}\} = 213.95 \\ \text{售电时, } P_{Nmax} &= \min\{P_{Ni}\} = -91.25 \end{aligned} \quad (21)$$

由公式(20)以及题目所给数据，得到各时段负荷的供电构成结果，详见附录3，由数据得到图形如下：

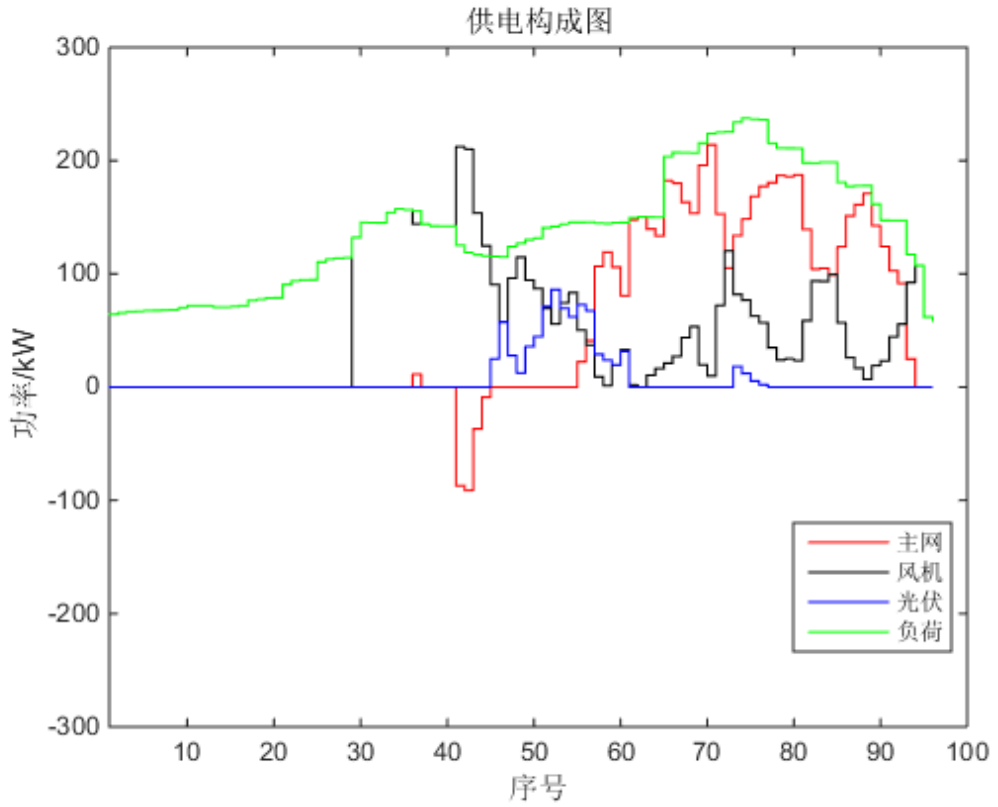


图3 最优日前调度方案一各时段负荷的供电构成图

全天风机、光伏发电的费用：

$$W_{F3} = \sum_{i=1}^{96} P_{Fi} \omega_{Fi} = 665.83 \quad (22)$$

$$W_{S3} = \sum_{i=1}^{96} P_{Si} \omega_{Si} = 145.19 \quad (23)$$

则全天微网与主网交换功率的费用：

$$W_{N3} = \sum_{i=1}^{96} P_{Ni} \omega_{Ni} x_i = 974.13 \quad (24)$$

将上述各费用求和即为全天总供电费用：

$$W_3 = W_{F3} + W_{S3} + W_{N3} = 1785.15 \quad (25)$$

平均成本：

$$\bar{W}_3 = \frac{W_3}{\sum_{i=1}^{96} P_{Li}} = 0.5397 \quad (26)$$

平均购电单价：

$$A_{L3} = \frac{\sum_{i=1}^{96} P_{Ni} \omega_{Ni} x_i}{\sum_{i=1}^{96} P_{Ni} x_i} = 0.5349 \quad (27)$$

弃风弃光率：

$$Q_F \% = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{96} P_{Fi}}{\sum_{i=1}^{96} P_{F \max i}} \times 100\% = 53.99\% \quad (28)$$

$$Q_S \% = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{96} P_{Si}}{\sum_{i=1}^{96} P_{S \max i}} \times 100\% = 69.23\% \quad (29)$$

弃风弃光率结果表明，以平均负荷供电单价最小为目标，考虑经济成本最低的情况下，弃风弃光率高，可再生能源利用不充分。

5.3 问题3的模型建立与求解

先从功率方面考虑，显然负荷所消耗的与蓄电池提供的功率之和等于可再生能源全额利用功率与交换功率之和：

$$P_{Li} + P_{Ci} = P_{Ni} + P_{Fi} + P_{Si} \quad (30)$$

而对于微网和电网交换功率，受约束即存在最大交换功率：

$$-150 \leq P_{Ni} \leq 150 \quad (31)$$

其次，对于电池而言，存在充放电次数的约束：

$$N_1 \leq 8 \quad (32)$$

$$N_2 \leq 8$$

由于蓄电池的充放电存在时间间隔，因此时间段内蓄电池充放电容量变化量为：

$$SP_{Ci} = \sum_{j=1}^i P_{Cj} \quad (33)$$

且对于蓄电池充放电功率不同， X_t, Y_t 的取值不同：

$$\begin{cases} P_{Ci} > 0 & X_t = 1 & Y_t = 0 \\ P_{Ci} = 0 & X_t = 0 & Y_t = 0 \\ P_{Ci} < 0 & X_t = 1 & Y_t = 0 \end{cases} \quad (34)$$

单位时间内充放电最大功率有额定容量的约束 ($E_b = 300$):

$$-0.2E_b \leq P_{Ci} \leq 0.2E_b \quad (35)$$

$$0.3 \leq \frac{SP_{Ci}\Delta t}{E_b} + S_0 \leq 0.95 \quad (36)$$

且要求在调度周期始末能力状态相等, 由题中公式 (4) 得:

$$\sum_{i=1}^{96} P_{Ci} = 0 \quad (37)$$

结合题目给出的初状态 ($S_0 = 0.4$):

$$-120 \leq SP_{Ci} \leq 660 \quad (38)$$

得到最后的优化模型:

$$\begin{aligned} \min \quad & W_4 = W_C + W_{N4} + W_{F4} + W_{S4} \quad (39) \\ \text{s.t.} \quad & \left. \begin{aligned} & W_C = \frac{\sum_{i=1}^{96} |P_{Ci}|}{2} \times 0.2 \times \Delta t \\ & W_{N4} = \left[\sum_{i=1}^{96} (P_{Ni} \omega_{Gi} x_i - P_{Ni} \omega_{Mi} (1 - x_i)) \right] \\ & W_{F4} = \left(\sum_{i=1}^{96} P_{Fi} \omega_{Fi} \right) \Delta t \\ & W_{S4} = \left(\sum_{i=1}^{96} P_{Si} \omega_{Si} \right) \Delta t \\ & P_{Li} + P_{Ci} = P_{Ni} + P_{Fi} + P_{Si} \\ & -150 \leq P_{Ni} \leq 150 \\ & N_1 \leq 8 \\ & N_2 \leq 8 \\ & -60 \leq P_{Ci} \leq 60 \\ & \sum_{i=1}^{96} P_{Ci} = 0 \\ & -120 \leq SP_{Ci} \leq 660 \\ & x_i = \begin{cases} 1, & P_{Ni} = P_{Li} - P_{Fi} - P_{Si} > 0 \\ 0, & P_{Ni} = P_{Li} - P_{Fi} - P_{Si} < 0 \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (40) \end{aligned}$$

由于上述模型求解较为困难, 用一般的解法难以求得全局最优解, 结合实际问题, 我们采用贪心算法对其求解。贪心算法求解的思路是先给出贪心策略, 在此策略指导下每一步都采取局部最优解的解法, 并证明该局部最优解即为全局最优解。

为使负荷平均供电成本最低, 应令蓄电池带来的放电收入与充电成本之差最大, 在可再生能源供电充足时, 蓄电池的放电收入等于售电价格, 充电成本为售电价格+0.2, 在供电不充足时放电收入等于购电价格, 充电成本为购电价格+0.2。

分析各时段电价可得，在充电成本为 $0.65+0.2$ 和 $0.85+0.2$ 无论何时放电都不会盈利，而其他时段充电，然后在放电收入为 0.82 时放电都是盈利的，而分析数据可得在放电收入为 0.82 时段负荷许需求足够大，可以使蓄电池的电量放电至放电下限，所以我们采取的贪心策略 1 为：在满足各种约束的前提下，尽可能多在放电收益为 0.82 时放电

同时，在充电成本为 $0.22+0.2$ 时是最低的，所以采取贪心策略 2：在满足各种约束的前提下，尽可能多在充电成本为 0.42 时充电。

根据贪心策略 2，在 1~55 时段应充满电，在 38, 40, 41 时段只是强制充电，在 1~28 时段充满其余电量，可以令 6~24 段充电功率为 32.5537 ，既可满足贪心策略 2，又能满足 6~24 段的强制充电约束，还能使充电次数最小。

根据贪心策略 1，在 56~60 时段应以最大功率放电，73~84 时段应该放电至下限（预留 85~88 的强制放电量），61~72 时段除在 66, 69, 70 时段满足强制放电外，其余时段以最大功率充电，85~96 时段在 85 段以最大功率充电，86~88 段强制放电后，电池电量达到下限（ $S_t=0.3$ ），在 89~96 段内，由于 94~96 段可再生能源充足，充电成本低，在这三时段充电功率为 40kW 即可充电回初始状态 $S_t=0.4$ 。

证明全局最优：考虑各时段采取其他策略能否得到更优的解。

(1) 在 1~28 时间段内，由主网购电充入蓄电池，蓄电池电量此时成本最低，所以在此阶段充电至充电上限就是最优解。

(2) 在 29~40 时间段内，可以有另一种情况，蓄电池先放电再充电，之后在购电价格为 0.82 时再放电，盈利最大为 $0.08+0.20=0.28$ 元/kWh，但是贪心策略 2，此时段仅强制放电，之后在购电价格为 0.82 时再放电，盈利最大约为 0.37 元/kWh。所以贪心策略 2 是最优解。

(3) 在 41~60 时间段内，考虑到另一种情况，在 41~60 时间段内放电，在 61~72 时间段内充电然后在 73~84 时间段内再放电也能赚钱，但是 61~72 时间段充电功率已达上限。所以在 41~54 时段内不放电，在 55~60 时段放电，是最优解

(4) 在 61~72 时间段内，蓄电池尽可能充电，之后在 73~84 时间段内放电还能赚钱，但是蓄电池并充不满，所以这就是最优解

(5) 在 73~84 时间段内，充电成本高，放电利润最大，充电的成本即使是上阶段 $0.73/\text{kWh}$ ，仍然存在利润，所以尽量放电（预留 85~88 的强制放电量）就是最优解。

(6) 在 85~96 时间段内，85 全充电，86、87、88 强迫放电，之后蓄电池为 0.3 ，需要充电使 $S_t=0.4$ ，由于 94、95、96 供电充足，且充电成本低，故此三时刻充电就是最优解。

综上所述，不可能再找到其他策略得到更优的解，所以我们采取的贪心策略即为全局最优解。

根据贪心算法得到蓄电池充放电功率 P_{Ci} 各时段的数值，而后根据已知数据和公式 (30) 得到各时段负荷供电构成，详细数据见附录 4，图如下：

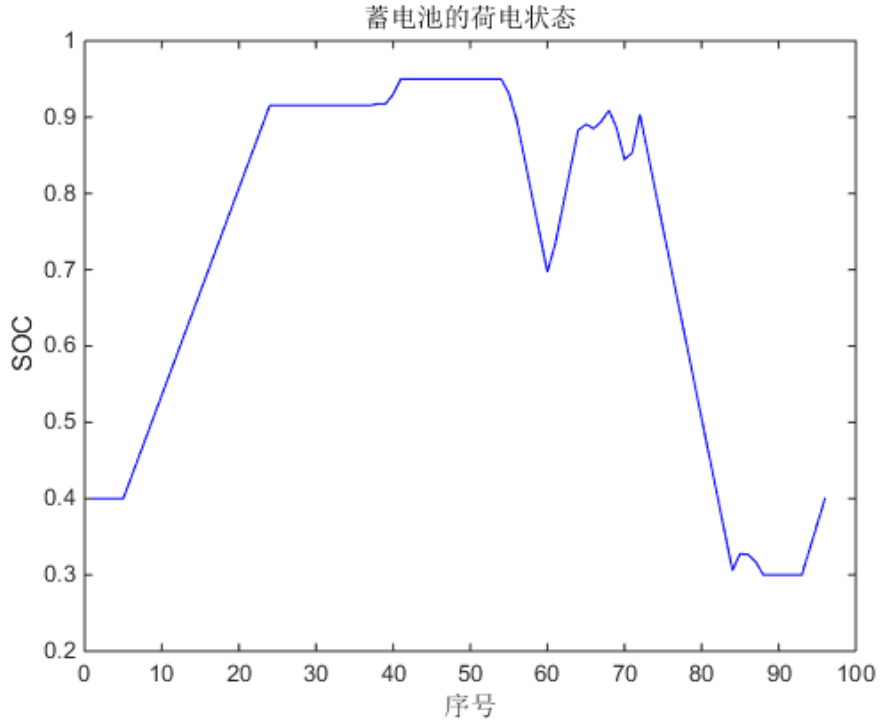


图 4 最优日前调度方案二蓄电池荷电状态图

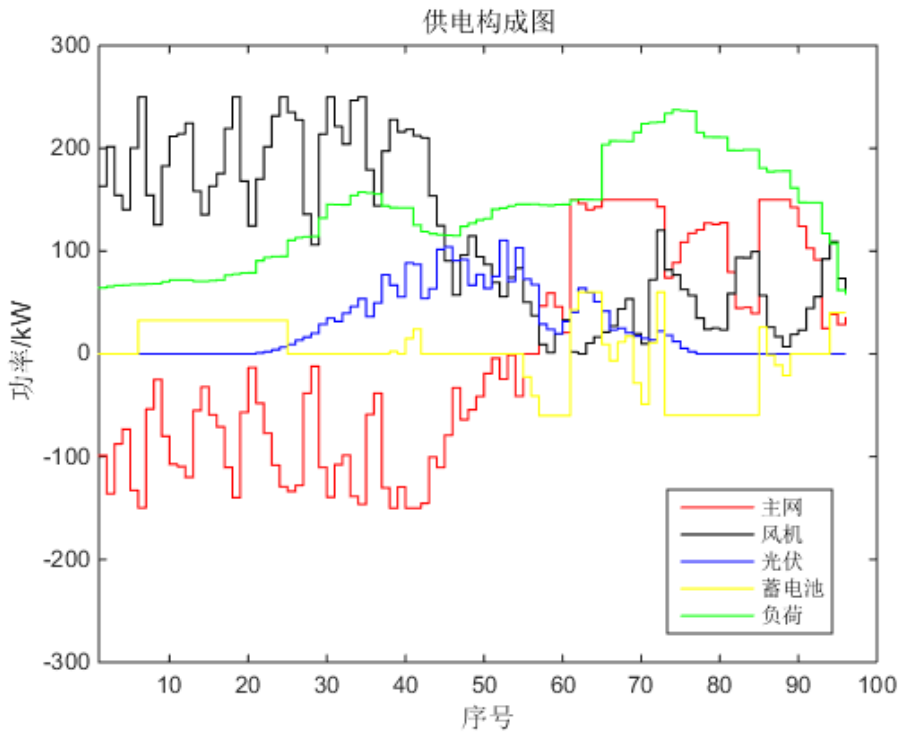


图 5 最优日前调度方案二各时段负荷的供电构成图

根据公式 (40) 得到蓄电池充放电费用, 风机、光伏发电成本, 微电网与电网交换电能费用、全天供电总费用、平均购电单价以及与电网交换最大功率、平均成本:

$$\begin{aligned}
W_C &= 56.88 \\
W_{F4} &= 1447.22 \\
W_{S4} &= 471.86 \\
W_{N4} &= 233.92 \\
W_4 &= W_C + W_{N4} + W_{F4} + W_{S4} = 2209.88
\end{aligned} \tag{41}$$

$$\bar{W}_4 = \frac{W_4}{\sum_{i=1}^{96} P_{Li}} = 0.6682 \tag{42}$$

$$\begin{aligned}
\text{购电时, } P_{N\max} &= \max\{P_{Ni}\} = 150 \\
\text{售电时, } P_{N\max} &= \min\{P_{Ni}\} = -150
\end{aligned} \tag{43}$$

$$A_{L4} = \frac{\sum_{i=1}^{96} P_{Ni} \omega_{Ni} x_i}{\sum_{i=1}^{96} P_{Ni} x_i} = 0.6171 \tag{44}$$

5.4 问题4的模型建立与求解

问题4与问题3求解思路在很大程度上相似，步骤存在很多相同部分，所以我们重点进行不同部分的模型求解。

问题4较问题3由于可以弃风弃光，多出两个变量 P_{Fi} 和 P_{Si} ，因此会多出两个约束条件：

$$\begin{aligned}
0 &\leq P_{Fi} \leq P_{F\max i} \\
0 &\leq P_{Si} \leq P_{S\max i}
\end{aligned} \tag{45}$$

同时蓄电池充放电功率 P_{Ci} 则优化方程中 P_{Fi} 和 P_{Si} 取值会不同，得到的调度方案较问题3更优。

由于上述模型求解更为困难，在第三问分析的基础上仍采用贪心算法求解。

在第2、3问分析的基础上，由于可以弃光弃风，电池的充电量是难以满足的，而55~60和73~84时段利润最大并且负荷过大，蓄电池尽最大可能放电也难以满足负荷需求，所以在其余时刻应尽量减小蓄电池的放电，并及时充电，使电池尽可能多的在55~60和73~84时段放电。风机为电池充电仍盈利0.09元/kWh，而用光伏充电则亏损，所以我们制定了以下贪心策略：

在1~28时段显然不用可再生能源，应由主网供电，并将蓄电池充满。

在29~40时段应该用风电自给，依照功率差额由主网提供。

在41~60时段应该风电全发，供电不足再用光伏，再不足由蓄电池补充，最后再由主网补充。

在61~72时段应该风电和主网供给负荷需求，若有剩余功率尽可能多给蓄电池充电，若不足则由光伏补齐功率，光伏仍不足则强制放电。

在73~96时段的策略同第3问，除预留85~88时段强迫放电的容量外，放电

至下限，再由 94~96 时段充电至初始状态 $S_t=0.4$ 。

证明全局最优：考虑各时段采取其他策略能否得到更优的解。

(1)在 1~28 时间段内，由主网购电充入蓄电池，蓄电池电量此时成本最低，所以在此阶段充电至充电上限就是最优解。

(2)在 29~40 时间段内，可以有另一种情况，蓄电池在此时段先放电再充电，之后在购电价格为 0.82 的时段再放电，但是 55~60 和 73~84 时段有足够多的负荷消耗电池电量，且之前充电功率已达最大，在此时放电不如在购电价格 0.82 时放电赚的多，也不能补上此时的放电量，所以该时段放电不比贪心算法解更优。

(3)在 41~60 时间段内，风电全发无争议，光伏只能自给，若多发，无论售电还是为电池充电都是亏损。另一种情况，若不由光伏供给负荷而由电池供给负荷，则在 73~84 时段电池电量出力不足，因为后面充电功率已达最大，也不能补充此时段的放电量，光伏全用仍不够，只能从主网购买，价格很贵，不如此时用光伏供给，电池电量留给 55~60 和 73~84 时段，所以贪心策略就是最优解。

(4)在 61~72 时间段内，另一种情况，若光伏不出力，用蓄电池出力，不如将蓄电池出力留给 73~84 时段出力。光伏多出力给蓄电池供电也亏损，所以光伏供给负荷是最优解。风电和主网为电池供电盈利，故也为最优解

(5) 73~96 与第 3 问情况相同，最优性的证明同第 3 问。

综上所述，不可能再找到其他策略得到更优的解，所以我们采取的贪心策略即为全局最优解。

根据贪心算法得到蓄电池充放电功率 P_{Ci} 、 P_{Fi} 和 P_{Si} 各时段的数值，而后根据已知数据和公式 (30) 得到各时段负荷供电构成，详细数据见附录，图如下：

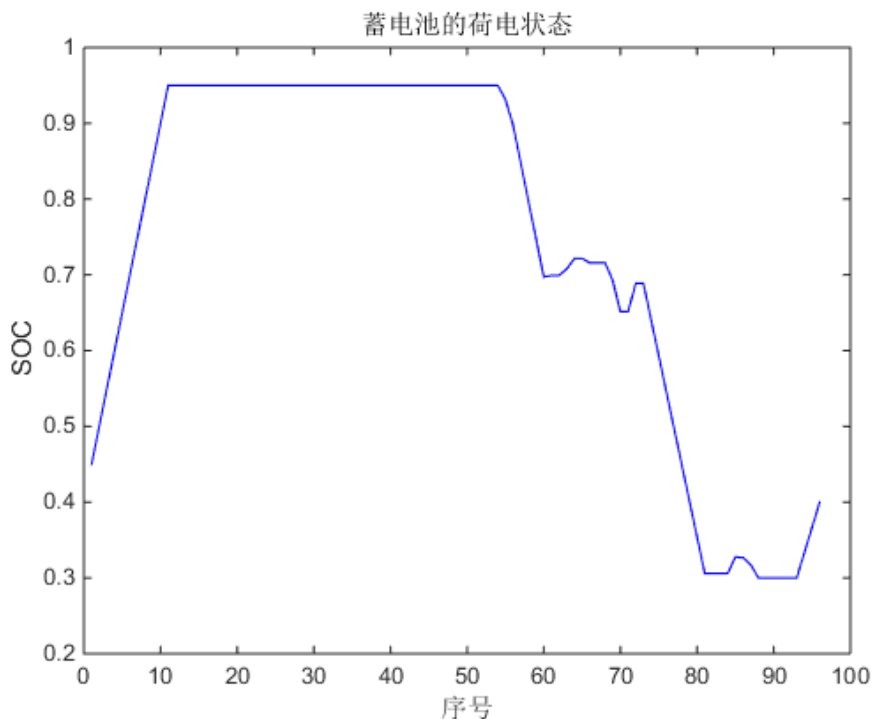


图 6 最优日前调度方案三蓄电池的荷电状态图

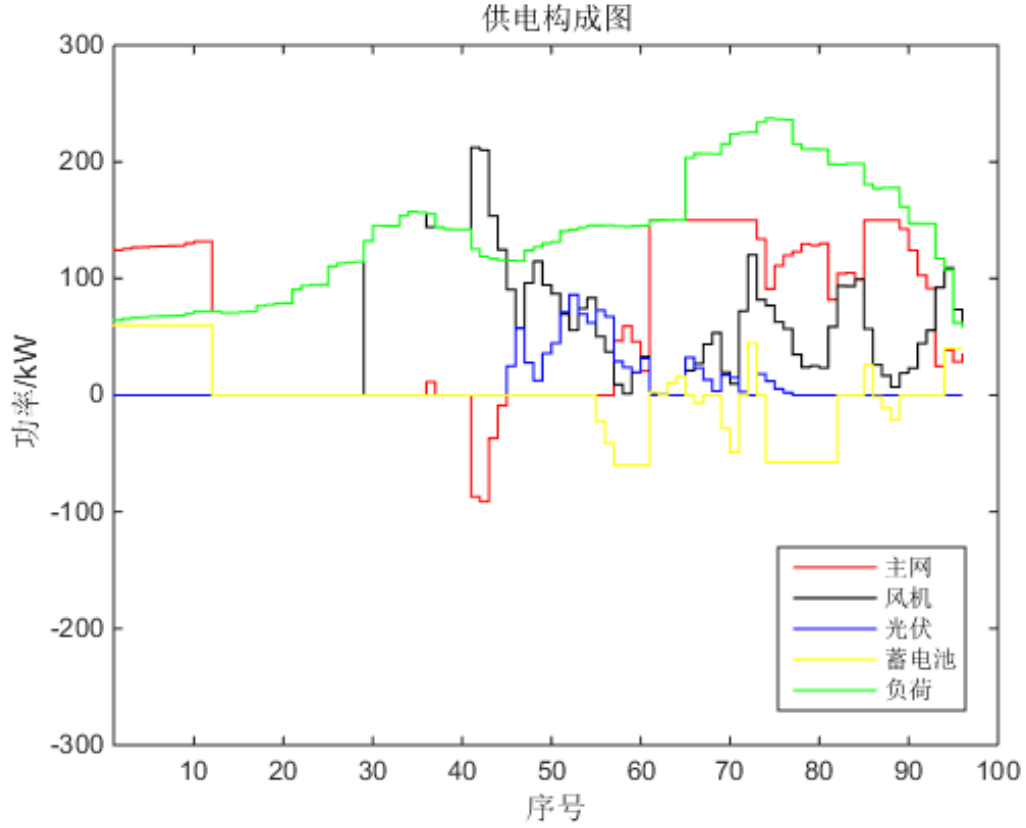


图 7 最优日前调度方案三各时段负荷的供电构成图

根据公式 (40) 得到蓄电池充放电费用, 风机、光伏发电成本, 微电网与电网交换电能费用、全天供电总费用、平均购电单价以及与电网交换最大功率、平均成本:

$$\begin{aligned}
 W_C &= 44 \\
 W_{F5} &= 668.18 \\
 W_{S5} &= 165.45
 \end{aligned} \tag{46}$$

$$\begin{aligned}
 W_{N5} &= 928.72 \\
 W_5 &= W_C + W_{N5} + W_{F5} + W_{S5} = 1733.56
 \end{aligned}$$

$$\bar{W}_5 = \frac{W_5}{\sum_{i=1}^{96} P_{Li}} = 0.5241 \tag{47}$$

$$\text{购电时, } P_{N\max} = \max\{P_{Ni}\} = 150 \tag{48}$$

$$\text{售电时, } P_{N\max} = \min\{P_{Ni}\} = -91.25$$

$$A_{L5} = \frac{\sum_{i=1}^{96} P_{Ni} \omega_{Ni} x_i}{\sum_{i=1}^{96} P_{Ni} x_i} = 0.4803 \tag{49}$$

综合前 4 问得到的结果，整理得到下表，表中充放电次数第一栏为充电次数，第二栏为放电次数。

表 4 前 4 问结果整合表

分类	储能	与电网的功率限制	充放电次数		与电网交换的最大功率 (kW)		风机成本 (元)	光伏成本 (元)	总成本 (元)	平均成本 (元)
无可再生能源	无储能	自由	0	0	0	237.5	0	0	1976.41	0.5976
可再生能源全部接纳	无储能	自由	0	0	-182.3	198.89	1447.22	471.86	2275.17	0.6879
	有储能	[-150kW, 150kW]	8	5	-150	150	1447.22	471.86	2209.88	0.6682
可再生能源选择性接纳	无储能	自由	0	0	-91.25	213.95	665.83	145.19	1785.15	0.5397
	有储能	[-150kW, 150kW]	6	5	-91.25	150	668.18	165.45	1733.56	0.5241

5.5 问题 5 的模型建立与求解

微电网中涉及多个利益主体。

用户希望总成本最低，电能质量好；电网希望售电利润最大，且电网稳定性高等；可再生能源发电厂希望尽可能多的赚取利润；蓄电池希望充放电次数较少，充放电所获利润最大。

由于电力系统运行有四个基本要求：可靠性、电能质量、经济性、环保性，其中可靠性要求可靠地持续供电，电能质量的保证需要满足电网运行的各项条件，这两条要求各运行参数严格满足约束，这是最重要的。经济性要求成本最低，环保性要求可再生能源发电量增大。

首先，微电网与电网紧密互联，实现了电网与用户的双赢。微电网可以充分利用电网的分时电价、可再生能源的清洁优势、蓄电池的储存能源，发挥其优化调度功能，最大限度地降低用户的能源消耗总成本。接入微电网后，智能电网就能真正为用户提供电力安全双保险。电网故障后，微电网能实现孤岛运行模式，避免给用户带来损失。而电网用电需求激增时，微电网也可发挥调节作用，为电网送电。微电网自带的发电设备也能够提供电网所需的调频、调峰、电压支持能力，从而降低了电网的运行成本。

其次，我国拥有丰富的新能源或可再生能源可供开发和利用。分布式发电系统的微电网研究直接促进新能源的利用与开发，对于新能源的开发和普及有重要的意义。有利于国家经济与环境的和谐发展。

最后，在保障电网安全运行的同时，提升可再生能源利用率。由于电网消纳

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/737132105130006054>