

DOI: 10.7667/PSPC170174

基于弹性负荷分时调度和多电源联合供电的微网经济运行

祖其武, 牛玉刚, 邹媛媛, 卿湘运

(华东理工大学化工过程先进控制和优化技术教育部重点实验室, 上海 200237)

摘要: 微网中负荷的供电特性各异, 这必将对分布式单元的调度以及微网的运行成本产生影响。提出了一种基于弹性负荷分时调度的微网能量管理策略。首先依据燃气轮机发电成本曲线及电网分时电价, 与接入的较大容量储能设备 ES2 协同供电, 减少微网对电网的依赖。其次根据各机组的发电成本函数, 建立相应的数学模型, 将优化目标转换为二次规划问题, 利用内点法优化各机组的功率输出。然后根据用户负荷的不同供电特性, 分别在三个调度区间上完成了弹性负荷的调度, 并分析了不同比例的两类用户对需求侧负荷管理的影响。最后通过算例仿真, 验证了所提控制策略的有效性, 提高了微网运行的经济性和可靠性。

关键词: 微网; 弹性负荷; 分时电价; 能量调度; 经济运行

Economic operation of microgrid based on elastic load sub-period dispatch and combined power supply of multiple energy

ZU Qiwu, NIU Yugang, ZOU Yuanyuan, QING Xiangyun

(Key Lab of Advanced Control and Optimization for Chemical Process, Ministry of Education, East China University of Science & Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: The power supply characteristics of the load have an impact on scheduling distributed energy and operation cost of the microgrid. A control strategy of microgrid energy scheduling based on the elastic load sub-period dispatch is proposed. Firstly, according to the generation cost profile of microgas turbine and the time of use price of power grid, a large capacity storage energy is integrated to combine power supply, which reduces the dependence on the power grid. Next, according to generation cost of DGs, their mathematical models are established, the optimization objective is converted to the quadratic programming problem, and the output power of DGs is optimized by the interior point method. Then concerning the different loads characteristics, this paper schedules two kinds of elastic load in three scheduling intervals, and also analyzes the effect on demand respond under different proportion of two types of users. Finally, the example simulation shows that the proposed control strategy is effective in ensuring the economic operation of the microgrid and enhancing the reliability of the system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61673174 and No. 61773162).

Key words: microgrid; elastic load; TOU price; energy scheduling; economic operation

0 引言

随着电能需求的日益增长, 接入电力系统中的负荷类型日益增多, 不同用户对电能的支付能力也有差别, 传统控制方式已经很难满足这种多目标多约束的控制要求^[1-2]。近年来, 微网因其能源的高效利用和控制方式的灵活多变, 受到诸多关注^[3-4]。

目前, 针对微网经济运行的研究主要集中于优

化机组的功率输出和需求侧负荷管理。文献[5-6]分别建立了基于智能算法的数学模型, 优化机组功率输出, 降低微网运行成本。而基于智能算法的优化结果随机性较大, 在实际应用中参考性不高。接入微网中负荷类型较多, 调控方式较灵活, 具有参与微网能量管理的潜力, 可借助经济激励的手段实现需求侧响应。文献[7]根据接入微网中用户的需求、服务持续时间及容许响应延迟的时间分布, 建立连续时间的 Markov 控制模型, 迭代优化负荷的弹性工作区间, 降低微网长期运行的代价。文献[8]考虑

用户受分时电价的激励, 对既定的工作区间上的负荷进行转移, 尽量避开用电高峰。文献[9]则将动态电价和需求响应应用于智能家居系统的能量管理中, 用户可灵活有效地调度可转移负荷, 既满足了用户舒适度, 也减少了用户的用电成本。以上文献虽然完成了对用户侧负荷的调度, 在一定程度上减少了用户的用电成本, 但并没有因不同类型用户的需求而采用不同的控制策略, 仍然可以进一步提高微网经济运行的潜力。针对微网中出现功率缺额问题, 文献[10]提出孤岛模式下, 优化燃气轮机组的功率输出, 实现系统供需平衡。文献[11]则通过考虑向电网购电的方式, 满足微网稳定运行。以上文献仅仅把燃气轮机或电网作为微网稳定运行的补充能源, 未考虑因电网电价或燃气轮机发电成本而产生供电成本的差别, 也就是说以上文献并未体现燃气轮机和电网联合调度的经济潜力。

本文提出了一种集中式的微网能量调度策略: 首先依据燃气轮机发电成本曲线和电网分时电价, 在配网侧由燃气轮机、电网及储能 ES2 联合供电, 提高微网运行的自治性; 其次根据分布式电源的发电成本建立对应的数学模型, 优化对各机组的实时功率输出, 降低微网发电成本; 最后针对两类用户的不同供电要求, 在三个调度区间上完成了对弹性负荷的调度以及分析了不同比例的两类用户负荷对需求侧负荷管理的影响。

1 基于集中式控制的微电网系统

1.1 微电网系统描述

该系统有光伏(PV)、风机(WT)、燃气轮机(MT)各一台, 储能设备(ES)两台及各类负荷(Load)若干等组成。

考虑到用户分散性, 且用户间缺少信息交互, 因此, 本文提出了一种集中式的微网控制模型。如图 1 所示, Operator 是微网的调度中心, 一方面收集分布式单元的实时功率和负荷信息, 由优化调度策略协调分布式单元功率输出和用户需求; 另一方面与电网进行能量与信息交互, 按照接收到的用户需求和新能源发电功率计算净负荷, 然后依据燃气轮机、电网和储能 ES2 的控制策略联合供电。

1.2 微电网控制模型

最小的调度时间设为 1 h, 如 00:00—00:59 视为第一个供电时段, 其他供电时段依此类推, 因此一天划分为 24 个供电时段。假设每个时段内发电单元的功率输出及用户需求保持不变。

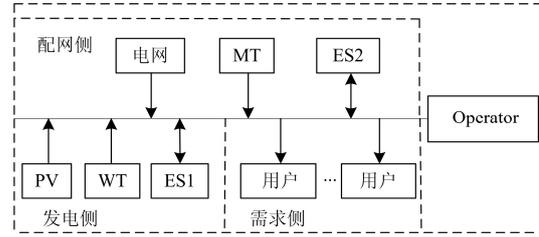


图 1 集中式微电网控制模型

Fig. 1 Centralized control model of the microgrid

1.2.1 需求侧模型

图 1 中的用户负荷包括弹性负荷(电动汽车等)和非弹性负荷(照明等)两类, 考虑用户负荷供电时段性, 负荷模型描述如式(1)所示。

$$\begin{cases} l_i = (s_i, e_i, y_i(t)) \\ D_{\min} \leq \sum_{t=s_i}^{e_i} r_i(t) \leq \sum_{t=s_i}^{e_i} y_i(t) \\ d_{\min} - b_i(t) \leq r_i(t) \leq d_{\max} - b_i(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: l_i 为第 i 个负荷模型; $[s_i, e_i]$ 为第 i 个负荷供电区间, 即从第 s 个时段开始到第 e 个时段结束; $y_i(t)$ 为弹性负荷根据用户以往用电习惯的日前预测值(可调度量), 单位是 kW; $r_i(t)$ 为弹性负荷经调度后的实际值; D_{\min} 为弹性负荷在给定调度区间内的最少供电量, 另外, 用户出于节约用电或线路电压不稳等因素的考虑。允许切除少量负荷; $b_i(t)$ 为非弹性负荷根据用户以往用电习惯的日前预测值(不可调度量); d_{\min} 和 d_{\max} 是允许用户进线线路容量的功率限值。例如, 电动汽车这类负荷, 用户在晚上上下班至次日上班前的这段时间, 需保证电动汽车充满电, 或因考虑节约成本, 只需保证电动汽车电量能够行驶到公司即可。

由于弹性负荷经调度后偏离预测值, 给用户造成了用电不舒适性, 不舒适度成本 $C_i(r_i(t); t)$ 为

$$C_i(r_i(t); t) = \beta_i \sum_{t \in T} (r_i(t) - y_i(t))^2 \quad (2)$$

式中: T 为调度周期; β_i 为不舒适成本系数。为了区分不同类型用户在需求侧负荷管理中的作用, 设不同类型用户的不舒适度成本系数取值不同。另外, 由于用户的切负荷行为造成了某程度的经济损失, 切负荷补偿成本 $C_{i,\text{cut}}(r_i(t); t)$ 为

$$C_{i,\text{cut}}(r_i(t); t) = \beta_{i,\text{cut}} \left(\sum_{t=s_i}^{e_i} y_i(t) - \sum_{t=s_i}^{e_i} r_i(t) \right) \quad (3)$$

式中, $\beta_{i,\text{cut}}$ 为切负荷补偿成本系数, 同样不同类型用户的切负荷补偿成本系数取值也不同。

1.2.2 发电侧模型

本系统中的新能源包括光伏和风电, 其机组发

电成本^[12] $C_j(P_j(t);t)$ 为

$$C_j(P_j(t);t) = \sum_{t \in T} (a_j + b_j P_j(t) + c_j P_j^2(t)) \quad (4)$$

式中: $j=1$ 表示光伏发电; $j=2$ 表示风力发电; $P_j(t)$ 表示 t 时刻新能源功率值; a_j 、 b_j 和 c_j 都是大于等于零的常数。新能源发电约束为

$$0 \leq P_j(t) \leq P_j^{\max}(t) \quad (5)$$

式中, $P_j^{\max}(t)$ 是新能源发电日前预测值。考虑到微网是一种小型的发电系统, 在满足本地用户需求的前提下, 其发电量少有剩余(仿真中有体现); 另外, 微网即使有能量剩余, 通常是午时光伏发电达到峰值, 或是夜间风力发电达到峰值此时电网处于用电低谷期, 若将少量电量回馈电网显得多余; 即使回馈电网, 也给电网带来谐波、脉冲电压、脉冲电流等, 对电网的运行控制造成影响。因此, 本文考虑新能源发电功率超出用户需求时, 通过改变风机转角或光伏输出的控制模式, 减少新能源功率输出。

储能惯性较小, 能够快速响应负荷变化, 既可以充电形式吸收过剩电能, 又以能放电形式补充电能。储能 ES1 主要协调新能源输出, 维持微网稳定运行。由于储能成本相对较高, 避免储能的频繁充放电影响其使用寿命, 引入储能容量租用模式^[4]概念, 储能充放电成本 $C_{es,1}(P_{es,1}(t);t)$ 如式(6)所示。

$$C_{es,1}(P_{es,1}(t);t) = \beta_{es} \sum_{t \in T} |P_{es,1}(t) - P_{es,1}(t-1)| \quad (6)$$

式中: β_{es} 为储能充放电成本系数; $P_{es,1}(t-1)$ 、 $P_{es,1}(t)$ 分别为上一时刻和当前时刻储能剩余功率。其充放电功率约束为

$$P_{es,1}(t) = P_{es,1}(t-1) + \eta_c P_{es,1}^c(t) - \frac{P_{es,1}^d(t)}{\eta_d} \quad (7)$$

$$0 \leq P_{es,1}^c(t) \leq P_{es,1}^{c \max} \quad (8)$$

$$0 \leq P_{es,1}^d(t) \leq P_{es,1}^{d \max} \quad (9)$$

$$\text{SOC}_{\min} \leq \text{SOC}_{es,1}(t) \leq \text{SOC}_{\max} \quad (10)$$

$$\text{SOC}_{es,1}(0) = \text{SOC}_{es,1}(T) \quad (11)$$

式(7)是储能状态方程, 式中, η_c 和 η_d 分别为储能充放电效率, $P_{es,1}^c(t)$ 和 $P_{es,1}^d(t)$ 分别为储能充放电功率。式(8)和式(9)分别为储能充放电功率约束, $P_{es,1}^{c \max}$ 和 $P_{es,1}^{d \max}$ 分别为储能充放电功率限值。式(10)为储能荷电状态(SOC)约束, SOC_{\max} 和 SOC_{\min} 为储能荷电状态限值。式(11)保证了储能当前调度周期起始时刻与前一个调度周期结束时刻荷电状态一致。

1.2.3 配网侧模型

图 1 中配网侧由电网、燃气轮机和储能 ES2 组成, 位于微网的中压网络上, 其中储能 ES2 不仅容量大于储能 ES1, 其控制策略也不同。

用电高峰期, 电网本身的电力需求很大, 若继续向微网输送电能, 无疑会增大电网供电压力。为缓解这种压力, 增加一台较大容量储能 ES2。储能 ES2 充放电成本依然满足式(6), 功率约束满足式(7)一式(11)。另外, 储能 ES2 的作用是缓解电网用电高峰期的压力, 故尽量使其运行在用电高峰期。荷电状态式(10)改写为

$$\text{SOC}_{\min} \leq \text{SOC}_{es,2}(t) \leq \text{SOC}_{\max} \quad 8 < t \leq 11, 17 < t \leq 22 \quad (12)$$

式中, (8, 11]、(17, 22] 为电网用电高峰时段。当储能 ES2 经历用电高峰后, 强制其充电至较高的荷电水平, 以备下次使用。此时储能荷电状态为

$$\begin{cases} \text{SOC}_{es,2}(t) \geq 0.1 \\ \text{SOC}_{es,2}(t+1) \geq 0.2 \\ \text{SOC}_{es,2}(t+2) \geq 0.3 \\ \text{SOC}_{es,2}(t+3) \geq 0.4 \\ \text{SOC}_{es,2}(t+4) \geq 0.5 \end{cases} \quad (13)$$

式中, t 为某一用电高峰结束时刻。图 2 为储能 ES2 荷电状态在 0.5 以下时, Operator 强制其以阶梯型充电状态, 直至其荷电达到较高水平。

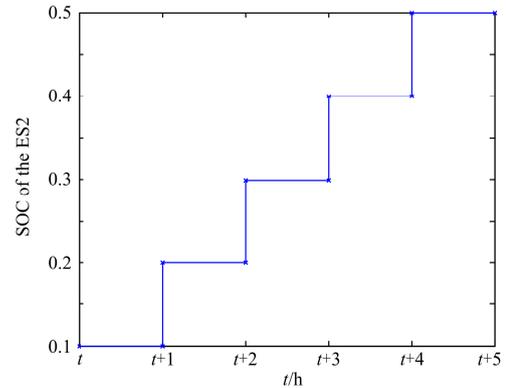


图 2 储能 ES2 强制充电状态

Fig. 2 Forced state of charge of the ES2

由上述分析可知, 储能充放电增加了充放电成本, 故储能 ES2 荷电状态达到 0.5 时, 就会停止充电。又因储能电量来源于电网或分布式电源, 停止充电会导致新能源发电装置弃风弃光。为避免能源浪费, 引入储能惩罚成本 $C_p(P_j(t);t)$ 强制充电, 如式(14)所示。

$$C_p(P_j(t);t) = \sum_{k=1}^2 \beta_p (P_j^{\max} - P_j) \quad (14)$$

式中, β_p 为储能的惩罚系数。

燃气轮机是一种输出稳定的分布式电源, MT 的接入减少了微网对电网的依赖, 提高了系统运行的可靠性。另外, 依据燃气轮机发电成本曲线、电网分时电价和储能 ES2 的控制策略实现联合供电。燃气轮机发电成本 $C_{MT}(P_{MT}(t); t)$ 为

$$C_{MT}(P_{MT}(t); t) = a + b \cdot P_{MT}(t) + c \cdot P_{MT}^2(t) \quad (15)$$

式中, a 、 b 和 c 为大于等于零的常数。MT 接收到协调任务时, 根据功率输出限值、机组爬坡速度和调度时间, 确定实际可输出功率范围为

$$\begin{cases} P_{MT\text{avt}}^{\min}(t) = \max\{P_{MT}^{\min}, P_{MT}(t) - R_d \Delta t\} \\ P_{MT\text{avt}}^{\max}(t) = \min\{P_{MT}^{\max}, P_{MT}(t) + R_u \Delta t\} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $P_{MT\text{avt}}^{\min}(t)$ 和 $P_{MT\text{avt}}^{\max}(t)$ 为机组 t 时刻可输出功率限值; P_{MT}^{\max} 和 P_{MT}^{\min} 表示 MT 发电功率限值; R_u 和 R_d 为机组爬坡速度。

当微网存在能量缺额时, 向电网购电是一个重要选择。Operator 根据净负荷值、燃气轮机发电成本、储能 ES2 荷电状态及当前电网电价, 决策出电网功率输出。电网购电成本 $C_{\text{grid}}(P_{\text{grid}}(t); t)$ 为

$$C_{\text{grid}}(P_{\text{grid}}(t); t) = C_b(t) P_{\text{grid}}(t) \quad (17)$$

式中, $C_b(t)$ 为 t 时电价。谷时段 23:00—07:00, 平时段 07:00—08:00、11:00—17:00 和 22:00—23:00, 峰时段 08:00—11:00 和 17:00—22:00。表 1 是电网电价。

表 1 电网分时电价

Table 1 Electricity price of power grid

电价/(¥/kW·h)	谷时段	平时段	峰时段
购电价格	0.17	0.49	0.83

微网与电网物理联络线功率约束为

$$0 \leq P_{\text{grid}}(t) \leq P_{\text{grid}}^{\max}(t) \quad (18)$$

微网稳定运行系统功率平衡约束为

$$\sum_{i=1}^m (r_i(t) + b_i(t)) + \sum_{k=1}^2 (-P_{\text{es},k}^{\text{d}}(t) + P_{\text{es},k}^{\text{c}}(t)) - P_{\text{PV}}(t) - P_{\text{WT}}(t) = P_{\text{MT}}(t) + P_{\text{grid}}(t) \quad (19)$$

2 微电网优化目标

2.1 目标函数

微网社区中用户分散且用户间缺少信息交互, 分布式计算的结果不能满足 Operator 对用户的有效调度。本文提出一种集中式控制策略, 用户只需通过智能电表将负荷功率、约束等信息发送给 Operator, Operator 根据本文控制策略集中调度。微网目标是满足负荷供电基础上, 协调各分布式单元

的功率输出, 并在弹性负荷供电区间上完成调度; 同时考虑电网、燃气轮机和储能 ES2 的控制策略, 实现多电源联合供电以平衡系统净负荷, 提高微网运行的自治性和经济性。

优化目标包括新能源发电成本、储能充放电、惩罚成本、电网购电成本、燃气轮机发电成本、用户不舒适度成本及切负荷补偿成本。目标函数为

$$\begin{cases} \min f = \min \left\{ \sum_{k=1}^2 C_{\text{es},k}(P_{\text{es},k}(t); t) + \sum_{i \in m} C_i(r_i(t); t) + \right. \\ \left. \sum_{j=1}^2 C_j(P_j(t); t) + \sum_{i \in m} C_{i,\text{cut}}(r_i(t); t) + C_{\text{MT}}(P_{\text{MT}}(t); t) + \right. \\ \left. \sum_{j=1}^2 C_p(P_j(t); t) + C_{\text{grid}}(P_{\text{grid}}(t); t) \right\} \\ \text{s.t. 式(1), 式(5), 式(7)—式(13), 式(16), 式(18), 式(19)} \end{cases} \quad (20)$$

式中, 优化变量包括 $r_i(t)$ 、 $P_j(t)$ 、 $P_{\text{es},k}(t)$ 、 $P_{\text{es},k}^{\text{c}}(t)$ 、 $P_{\text{es},k}^{\text{d}}(t)$ 、 $P_{\text{MT}}(t)$ 、 $P_{\text{grid}}(t)$, m 为用户的个数。

新能源每天发电各不相同, 季节性差异更大。因此, 穷举所有场景不现实也没有必要, 由场景缩减算法^[13]对场景数量缩减。以新能源每天输出为一个场景, 并依次编号, 由新能源以往发电数据统计场景概率 ξ_s , s 是场景变量, $\sum_{\bar{\Omega}} \xi_s = 1$, $\bar{\Omega}$ 是场景

集合, 场景数为 \bar{S} 。场景缩减算法如下所述。

Step 1: 定义空集合 Ω , 预设缩减后场景数为 S 。按式(21)计算初始场景集合 $\bar{\Omega}$ 任意两个场景间距离。

$$P_{lm}(t) \triangleq \|P_l(t) - P_m(t)\|, \forall l, m \in \bar{\Omega}, t \in T \quad (21)$$

式中: $P_l(t)$ 、 $P_m(t)$ 分别是第 l 、 m 个场景 t 时刻新能源功率输出。

Step 2: 初始迭代次数 $k=1$, 由式(22)计算每个场景与其他场景的概率权重距离。

$$z_l^k(t) = \sum_{l \neq m} \xi_m P_{lm}^k(t), \forall l \in \bar{\Omega} \quad (22)$$

得到最小概率权重距离 $u^k = \arg \min_u z_u^k(t)$, 定义新集合 $J^k = \bar{\Omega} / u^k$;

Step 3: 更新迭代次数 $k \leftarrow k+1$, 并按式(23)更新两个场景间距离。

$$P_{lm}^k(t) = \min \{P_{lm}^{k-1}(t), P_{lu^{k-1}}^{k-1}(t)\}, \forall l, m \in J^{k-1} \quad (23)$$

按式(24)更新每个场景概率权重距离。

$$z_l^k(t) = \sum_{j \in J^{k-1} / l} \xi_m P_{lm}^k(t), \forall l \in J^{k-1} \quad (24)$$

得到最小权重距离 $u^k = \arg \min_{u \in J^{k-1}} z_u^k(t)$, 并在

集合 J^k 中减去最小权重距离对应的场景 $J^k = J^{k-1} / u^k$ 。

Step 4: 直到缩减后场景数量为 S ，停止迭代。

Step 5: 令 $J = J^{S-S}$ 表示去除的场景集合，剩余场景数 $\{1, \dots, S\} / J$ 放在集合 Ω 中。计算新集合 Ω 中场景概率。 $\xi_l = \bar{\xi}_l + \sum_{m \in L(l)} \bar{\xi}_m$ ， $l \in \Omega$ ，其中， $L(l) = \{m \in J : l = l(m)\}$ ， $l(m) = \arg \min_{l \in J} P_m(t)$ ， $m \in J$ 此时，微电网日运行成本期望值为

$$E_{s \in \Omega}[f(s)] = \sum_{s \in \Omega} \xi_s f(s) \quad (25)$$

2.2 求解方法

文献[14]采用改进粒子群算法优化分布式单元及用户输出，即使对变量降维，变量维数依然很高，而且粒子种群数、迭代次数较大，导致算法收敛时间较长，且优化结果是次优解。

为了优化用户实时输出，本文采用集中调度的方式。观察式(6)和式(7)，改写储能充放电成本如式(26)所示。

$$C_{es,k}(P_{es,k}^c(t), P_{es,k}^d(t); t) = \beta_{es} \sum_{t \in T} (\eta_c P_{es,k}^c(t) + \frac{P_{es,k}^d(t)}{\eta_d}) \quad (26)$$

函数(20)变为凸优化问题，约束式(1)、式(5)、式(7)一式(13)、(16)、式(18)、式(19)也是凸的。因此，本文利用标准的内点法优化求解，使得目标快速收敛至最优解。

求解步骤如下所述。

Step 1: Operator 收集用户需求 and 新能源发电信息，并计算净负荷值；

Step 2: 当净负荷小于零，Operator 会检查储能 ES1 荷电状态约束，ES1 充电，若存在剩余功率则减少新能源输出；当净负荷大于零，Operator 检查 ES1 荷电状态约束，储能 ES1 放电，若存在缺额功率，由式(20)优化燃气轮机、电网和储能 ES2 供电量。

3 算例分析

3.1 参数设置

储能充放电效率分别为 $\eta_c = \eta_d = 0.96$ ，荷电状态限值为 $SOC_{\max} = 0.9$ ， $SOC_{\min} = 0.1$ ，充放电功率限值为储能容量的 20%，充放电成本系数 $\beta_{es} = 0.002$ ，储能惩罚成本系数 $\beta_p = 0.1$ ，储能初始状态和结束状态 $SOC(0) = SOC(T) = 0.5$ 。居民倾向于节约成本，而商铺倾向于舒适度， $\beta_1 = 0.004$ 、 $\beta_2 = 0.02$ 分别表示居民用户不舒适度成本系数和商铺不舒适度成本系数。同样， $\beta_{1,cut} = 0.02$ 、 $\beta_{2,cut} = 0.1$ 分别表示居民和商铺切负荷补偿成本系数。燃气轮机容量为

20 kW，机组增减速约束均为 5 kW·h，输出功率限值分别是 20 kW 和 0 kW。

居民负荷和商铺负荷数据均来源于 SCE 居民和小型商业动态负荷曲线，且弹性负荷和非弹性负荷各占一半。新能源功率输出及场景概率来源于香港天文台气象数据^[15](2012.09.01—2013.08.31)。

为简化优化过程，设每户居民负荷消耗相同，商铺负荷消耗也相同。用户选择 50 户，依据居民的用电习惯，一天分为三个调度区间。第一调度区间 P1 为 00:00—07:59，最低供电量为 5.805 kW，第二调度区间 P2 为 08:00—17:59，最低供电量为 6.871 kW，第三调度区间 P3 为 18:00—23:59，最低供电量 6.673 kW。商铺 30 户，依据商铺营业时间，一天分为三个调度区间。第一调度区间 P1 为 00:00—08:59，最低供电量为 7.92 kW，第二调度区间 P2 为 (09:00—15:59)，最低供电量为 5.187 kW，第三调度区间 P3 为 16:00—23:59，最低供电量为 9.599 kW。

3.2 算例结果

如表 2 所示，微网在不同联合调度策略下最优期望成本。实验 1 是常规微网调度策略，对比两组实验，本文所提联合调度策略充分发挥了微网经济性，且由于系统中配备了一个大容量储能 ES2，与燃气轮机和电网联合供电，是一种主动参与微网调度的形式。由于储能 ES2 控制策略，缓解了电网供电压力，即使在用电高峰期(电网电价较高)，微网也不再过度依赖电网供电，提高了电网及微网系统的运行可靠性。另外，避免了并离网模式的频繁切换，而造成的微网运行故障。

表 2 联合调度策略下的微网运行成本

Table 2 Microgrid operation cost under combined schedule

控制策略	燃气轮机和电网	本文所提调度策略
最优期望成本/元	79.0467	59.418

为更充分明确需求侧负荷管理在微网中的应用，进行了 10 组实验。如表 3 所示，随着微网社区中的商铺增多，调度难度也随之增加，因更多的店家追求舒适性，弹性负荷的实时调度变难，切负荷量减少。另外，当微网社区中商铺达到一定比例时，微网运行成本急剧增加。

如表 4 所示，当对弹性负荷分时调度(本文所提控制策略)，此时微网运行期望成本却小于微网全时段调度成本，这与理论分析是矛盾的。因为负荷分时供电，相当于缩小了优化问题解集，期望成本应不大于原问题解。从实际出发是合理的，因为负荷调度的跨度越大，用户不舒适度越大，式(2)和式(3)的值越大，增加了微网调度成本。例如，电动汽车

本该在夜间充电, 若全时段调度, 可能的调度结果是电动汽车次日早晨未充满, 导致居民不能准时上班, 则用户不舒适成本及切负荷补偿成本增加。

表 3 不同比例居民和商铺下的微网最优期望成本

Table 3 Optimal expected cost of microgrid in different proportion of residents and commercials

户数	实验1	实验2	实验3	实验4	实验5
居民	85	80	70	60	50
商铺	5	10	20	30	40
期望成本/元	96.658	102.178	113.505	125.076	137.352
户数	实验6	实验7	实验8	实验9	实验10
居民	40	30	20	10	5
商铺	50	60	70	80	85
期望成本/元	151.933	228.132	234.696	239.917	240.008

表 4 分时调度与全时段调度

Table 4 Sub-period and full-time dispatch

调度策略	分时调度	全时段调度
期望运行成本/元	59.4183	66.557

以场景一(即 $s=1$)为例, 对负荷的调度、新能源输出、储能充放电、燃气轮机及电网联合供电过程进行描述。

如图3所示, 因居民以成本最小为导向, 三个供电区间上弹性负荷实际调度曲线与预测曲线存在较大偏差。供电区间P1, 居民处于夜间休息, 用户采用切负荷手段减少用电需求, 实时负荷曲线基本保持在预测曲线以下。供电区间P2, 此时光照充足, 新能源输出增加, 弹性负荷提前供电。供电区间P3, 避开了用电高峰, 负荷水平相对较低, 且保证用户最小供电量, 部分负荷延迟供电。另外, P1时段负荷总量由 5.805 kW 下降至 5.5 kW, P2时段负荷总量由 6.871 kW 下降到 6.725 kW, P3时段用户切掉 0.373 kW 负荷。

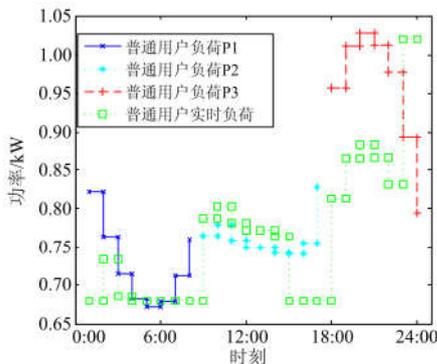


图 3 居民用户中弹性负荷的调度结果

Fig. 3 Scheduling results for elastic load of residents

如图4所示, 由于商铺倾向于舒适, 负荷基本保持着预测曲线趋势。商铺切负荷补偿成本较高, 在区间P1、P2上, 商铺负荷总量保持不变, 只有区间P3上, 此时新能源供电不足, 峰值电价较高, 商家选择切除少量负荷。

由图3、图4可知, 在9:00—15:00时段内, 两类负荷出现了实时负荷值高于预测值, 主要因为此时光照强度大, 微网有足够的能量满足用户需求。如图5所示, 即使在新能源发电不具优势的情况下, 仍然处于满发, 因为储能惩罚成本迫使储能充电消纳新能源(惩罚系数远大于充放电系数)。

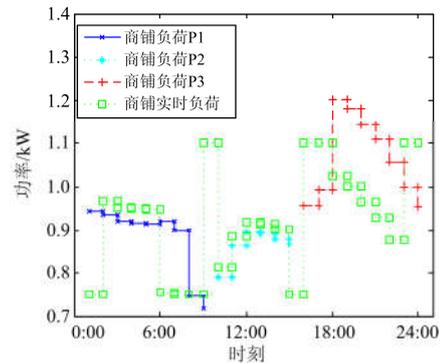


图 4 商业用户中弹性负荷的调度结果

Fig. 4 Scheduling results for elastic load of commercials

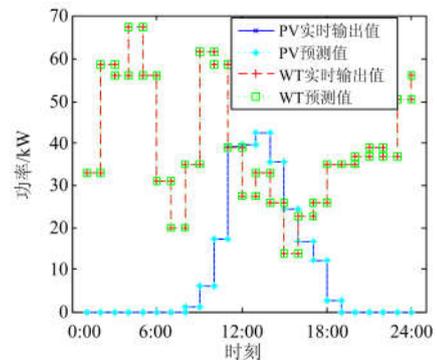


图 5 新能源输出功率

Fig. 5 Output power of the renewable energy

如图6所示, 储能充放电交替进行, 并未出现过充过放现象; 由于储能充放电成本限制, 储能并未一直运作, 延长了使用寿命。在06:00之前, 风能充足, 在满足负荷供电基础上, 储能充电吸收了部分能量。之后风能下降, 光照强度为零, 储能放电补充不足的电能。随着光照的增强, 储能重新充电; 傍晚, 储能放电补充因光照缺失造成的功率缺额; 最后储能将能量维持在50%, 以备次日运作。

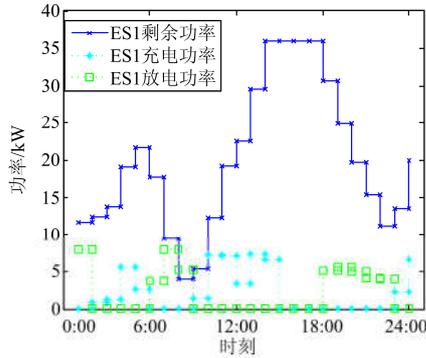


图 6 储能 ES1 的充放电状态
Fig. 6 Charge/discharge of ES1

图7为储能ES2的荷电状态，储能ES2的接入，协调燃气轮机和电网联合供电，其荷电状态保持在50%以上(峰值除外)。在22:00时之前，由于储能ES2经历了用电高峰期，按其控制策略强制充电至50%以上。

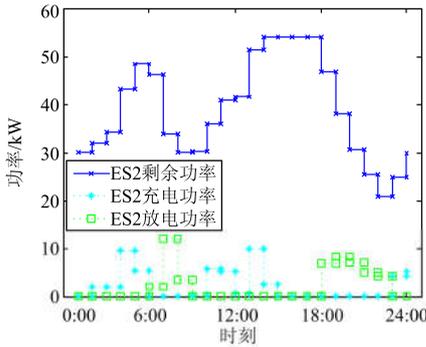


图 7 储能 ES2 的充放电状态
Fig. 7 Charge/discharge of ES2

图8可知，燃气轮机、储能ES2和电网协同供电。在02:00—13:00时段内，微网与电网间无能量交换，减少了微网对电网的依赖；傍晚，负荷需求增大，电网参与微网能量协调，燃气轮机和储能ES2起主导作用，在谷时段，电网以较低电价将能量输送到微网，避免能量浪费。另外，在06:00—11:00时段内，新能源充足，燃气轮机输出减少，在12:00—15:00时段内，情况相反。

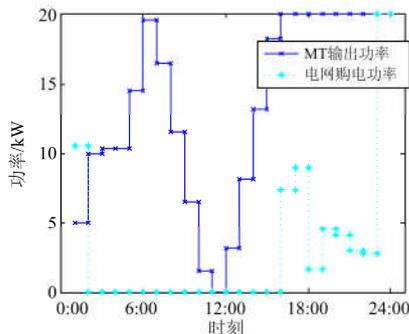


图 8 电网输出及燃气轮机输出

Fig. 8 Power output of power grid and power output of MT

4 结论

本文提出了一种基于弹性负荷分时调度的集中式控制策略，Operator 根据优化目标协调发电单元的功率输出，提高微网运行经济性。另外，Operator 依据燃气轮机发电成本、电网分时电价和储能 ES2 控制策略联合供电，决策出各机组的接入时间及接入功率，使机组主动参与到微网能量管理，减少了微网对电网的依赖，提高了微网运行的可靠性和自治性。该策略保证了多种类型用户的混合供电，在三个调度区间上完成了对弹性负荷的调度，分析了不同比例的居民和商铺对需求侧负荷管理的影响。

参考文献

- [1] 刘文, 杨慧霞, 祝斌. 微电网关键技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 152-155.
LIU Wen, YANG Huixia, ZHU Bin. Survey on key technologies of microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 152-155.
- [2] 王珺, 顾伟, 张成龙, 等. 智能社区综合能源优化管理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 89-97.
WANG Jun, GU Wei, ZHANG Chenglong, et al. Research on integrated energy management for smart community[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 89-97.
- [3] 王先齐, 吕智林, 汤泽琦. 基于分时电价机制的并网型微网多目标动态优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 9-18.
WANG Xianqi, LÜ Zhilin, TANG Zeqi. Multi-objective dynamic dispatching of grid-connected microgrid based on TOU power price mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 9-18.
- [4] 江润州, 邱晓燕, 李丹, 等. 含储能系统的多微网智能配电网系统经济运行[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3596-3602.
JIANG Runzhou, QIU Xiaoyan, LI Dan, et al. Economic operation of smart distribution network containing multi microgrids and energy storage system[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3596-3602.
- [5] 艾欣, 崔明勇, 雷之力. 基于混沌蚁群算法的微网环保经济调度[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2009, 36(5): 1-6.
AI Xin, CUI Mingyong, LEI Zhili. Environmental and economic dispatch of microgrid using chaotic ant swarm algorithms[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science), 2009, 36(5): 1-6.
- [6] 宋晓英, 王艳松. 基于协同进化遗传算法的微网经济

- 环保调度[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 85-89.
- SONG Xiaoying, WANG Yansong. Economic and environmental dispatch of microgrid using co-evolutionary genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 85-89.
- [7] 江琦, 路改香, 唐昊, 等. 智能电网弹性响应时间业务需求的接入控制[J]. 控制与决策, 2014, 29(7): 1311-1315.
- JIANG Qi, LU Gaixiang, TANG Hao, et al. Access control of demand requests with response time flexibility in smart grids[J]. Control and Decision, 2014, 29(7): 1311-1315.
- [8] ALI S Q, MAQBOOL S D, AHAMED T P I, et al. Load scheduling with maximum demand and time of use pricing for microgrids[C] // 2013 IEEE Global Humanitarian Technology Conference: South Asia Satellite (GHTC-SAS), August 23-24, 2013, Trivandrum, India: 234-238.
- [9] ASARE B B, KLING K L, RIBERIRO P F. Multi-agent system architecture for smart home energy management and optimization[C] // IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), October 6-9, 2013, Lyngby, Denmark: 1-5.
- [10] 丁明, 罗魁, 毕锐. 孤岛模式下基于多代理系统的微电网能量协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(5): 1-8.
- DING Ming, LUO Kui, BI Rui. An energy coordination control strategy for islanded microgrid based on a multi agent system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5): 1-8.
- [11] JIANG L B, LOW S. Multi-period optimal energy procurement and demand response in smart grid with uncertain supply[C] // 2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC), December 12-15, 2011, Orlando, USA: 4348-4353.
- [12] 艾芊, 章健. 基于多代理系统的微电网竞价优化策略[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 46-51.
- AI Qian, ZHANG Jian. Optimization bidding strategies of microgrids based on multi-agent system[J]. Power System Technology, 2010, 34(2): 46-51.
- [13] KUSKA N G, HEITSCH H, ROMISCH W. Scenario reduction and scenario tree construction for power management problems[C] // 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, June 23-26, 2003, Bologna, Italy: 7pp.
- [14] 祖其武, 牛玉刚, 陈蓓. 基于改进粒子群算法的微网多目标经济运行策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 57-63.
- ZU Qiwu, NIU Yugang, CHEN Bei. Study on multi objective economic operating strategy of microgrid based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 57-63.
- [15] WANG H, HUANG J W. Joint investment and operation of microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(2): 627-639.
-
- 收稿日期: 2017-02-13; 修回日期: 2017-05-19
- 作者简介:
- 祖其武(1991—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为微网经济运行与控制; E-mail: zuqw1991@163.com
- 牛玉刚(1964—), 男, 博士, 教授, 研究方向为随机系统、无线传感网络、微网控制; E-mail: acniuyg@ecust.edu.cn
- 邹媛媛(1980—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为预测控制、网络化控制、微网控制。E-mail: yyzou@ecust.edu.cn
- (编辑 姜新丽)