

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230118

计及电动汽车和柔性负荷的微电网能量调度

颜湘武, 王庆澳, 卢俊达, 卜劲勇, 沈钟毓, 贾焦心, 孙邵彬

(河北省分布式储能与微网重点实验室(华北电力大学), 河北 保定 071003)

摘要: 针对近年来电动汽车(electric vehicle, EV)数量的不断增加和分布式发电的快速发展对电网造成巨大冲击的问题, 提出了综合考虑电动汽车和柔性负荷等可控资源的优化调度方案, 降低微电网运行成本并减少了对电网的冲击。首先建立考虑电动汽车和各种柔性负荷的“源-网-荷-储”微电网典型拓扑结构。然后对微电网中可调节资源进行建模, 并考虑不同渗透率及电动汽车数量下峰谷平时段的重新划分, 求解不同渗透率、储能容量及电动汽车数量下微电网的最低运行成本, 同时确定最优微电网配置方案。最后通过仿真验证表明, 所提优化方案可以在微电网运行成本降低 8.1%的同时, 将联络线功率波动维持在 50 kW 以内并且保持较高的柔性负荷用户满意度。

关键词: 电动汽车; 柔性负荷; 用户满意度; 优化调度; 峰谷平时段划分

Microgrid energy scheduling with electric vehicles and flexible loads

YAN Xiangwu, WANG Qing'ao, LU Junda, BU Jinyong, SHEN Zhongyu, JIA Jiaoxin, SUN Shaobin

(Hebei Provincial Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Microgrid

(North China Electric Power University), Baoding 071003, China)

Abstract: In response to the increasing number of electric vehicles (EVs) and the rapid development of distributed generation in recent years, which has caused a significant impact on the power grid, this paper proposes an optimal scheduling scheme that comprehensively considers controllable resources such as electric vehicles and flexible loads, reducing the operating costs of micro power grids and reducing the impact on the power grid. First, a typical "source-grid-load-storage" microgrid topology considering electric vehicles and various flexible loads is established. Then, it models the adjustable resources in the microgrid, considers the redistribution of peak and valley periods under different permeabilities and different numbers of electric vehicles, calculates the minimum operating cost of the microgrid under different permeabilities, energy storage capacities, and numbers of electric vehicles, and determines the optimal microgrid configuration scheme. Finally, simulation results show that the proposed optimization scheme can reduce the operating cost of the microgrid by 8.1%, while maintaining contact line power fluctuations to 50 kW or less and maintaining high user satisfaction with flexible loads.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52207102).

Key words: electric vehicle; flexible load; user satisfaction; optimized scheduling; peak-valley period division

0 引言

近年来, 新能源发电的快速发展使得电网的调峰压力不断增加, 而电动汽车数量的迅速增加也使得电网调峰压力进一步加大^[1-2]。此外, 随着需求响应技术的发展, 电力系统中柔性负荷的占比也大大提高, 因此, 如何整合柔性负荷和电动汽车等可调节资源实现微网系统的整体优化成为了目前研究的

重要内容^[3]。

文献[4]建立了计及电动汽车的交直流微电网优化调度模型, 并将模型转化为混合整数二阶锥凸优化问题求解, 算例结果表明电动汽车作为移动储能可以进行削峰填谷, 提高微网运行经济性。文献[5]提出了针对电动汽车有序充放电的微电网经济调度方案, 通过引导电动汽车有序充放电, 以较低的发电成本实现了良好的环境效益。文献[6]针对换电重卡短时接入微网所带来的经济性和安全性问题, 建立了考虑微网经济性和联络线功率波动性的

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52207102)

多目标调度模型，在减少微电网与上级电网交换功率波动性的同时，使微网获得最大的净利润。文献[7]从负荷聚合商角度考虑，结合光伏出力特点和需求响应形式提出的电动汽车调度策略提高了电动汽车与光伏的协同性，实现了增收减排。文献[8]针对并网微电网实现资源协同优化，建立了考虑需求响应和碳排放额度的微网分层优化调度模型并对用户满意度进行评估。文献[9]针对孤立乡村能源供给问题，建立了孤立多能互补建筑能源系统优化模型，结果表明，考虑柔性负荷后，系统运行费用和储能电池的容量都得以降低。以上文献大多单独考虑电动汽车或柔性负荷，综合考虑柔性负荷、储能和电动汽车的研究较少。

文献[10]提出了考虑可调控负荷的发电一体化综合调度策略，建立了以发电系统收益最大和用户侧收益最大为目标的调度模型以实现发电资源的整体优化，不过该文献主要在经济层面实现优化，未考虑到自身新能源的消纳情况和对电网的影响。

文献[11-16]通过对柔性负荷进行优化调度，实现微电网经济运行和提高新能源消纳率等目标，但并未考虑柔性负荷调控后对用户满意度造成的影响。

针对上述研究现状以及实际需求，本文先建立计及电动汽车和柔性负荷的“源-网-荷-储”微网一般性拓扑结构；然后以微电网运行成本最低为目标，考虑联络线功率波动，搭建“源-网-荷-储”协同调度模型并求解，确定微电网的最佳配置；最后经过仿真验证，所提模型在降低系统运行成本的同时，能够维持联络线功率稳定并且保持较高的用户满意度。

1 “源-网-荷-储”微网拓扑结构

如图 1 所示，建立“源-网-荷-储”协同控制微网拓扑结构，其包括光伏发电系统、储能系统、电动汽车充放电系统、微网内部刚性负荷和柔性负荷以及微网控制系统。

微网控制系统可以根据微网内部电能调度需要，监控微网内部各系统，控制着微网内部的能量流动以及微网与外部电网的能量交换。

微网中各建筑物的屋顶、电动汽车车棚可以铺设光伏电池板，除此之外，空旷区域建筑物阳面的玻璃幕墙也可粘贴光伏发电薄膜以增大光伏发电容量。

微网中的电动汽车可以看作一种移动的储能装置^[17]，通过微网控制系统的统一调度，可以辅助储能系统完成削峰填谷，降低微网运行成本等功能。

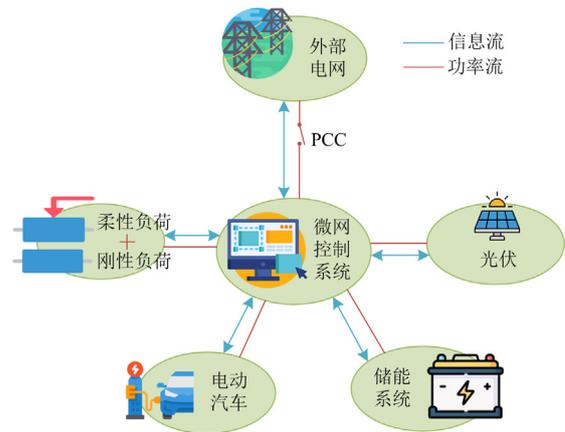


图 1 “源-网-荷-储”协同控制微网拓扑结构
Fig. 1 Topology of "source-network-charge-storage" collaborative control microgrid

根据微网内部负荷特性的不同将微网的负荷分为刚性负荷和柔性负荷^[18]。柔性负荷可以进行灵活调度以提高微网运行效益，在满足一定的约束条件下，柔性负荷可根据微网控制系统向其发出的操作命令来参与微网的调度优化，同时微网运营商也需要按约定的激励费用进行补偿。

2 微电网可调节资源建模

2.1 电动汽车充放电建模

根据文献[19]和大量统计数据可知，EV 开始充电时刻的概率密度函数服从正态分布，如式(1)所示。

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right], & \mu-12 < t \leq 24 \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(t+24-\mu)^2}{2\sigma^2}\right], & 0 < t \leq \mu-12 \end{cases} \quad (1)$$

式中： μ 、 σ 分别为正态分布的均值和标准差； t 为 EV 开始充电时刻。

EV 开始充电时刻概率分布图如图 2 所示。

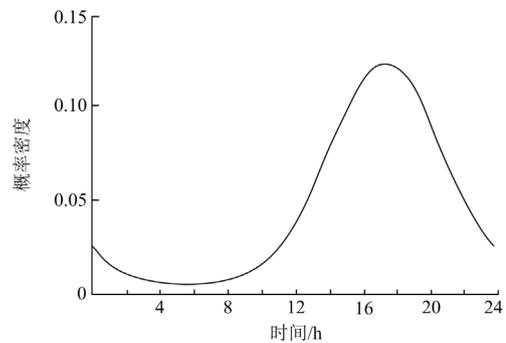


图 2 EV 开始充电时刻概率分布图
Fig. 2 Probability distribution of EV starting charging

EV 停止充电时刻的概率密度函数服从对数正态分布, 其分布函数如式(2)所示。

$$f'(t') = \frac{1}{t' \sqrt{2\pi\sigma'}} \exp\left[-\frac{(\ln t' - \mu')^2}{2\sigma'^2}\right] \quad (2)$$

式中: μ' 、 σ' 分别为对数正态分布的均值和标准差; t' 为 EV 停止充电时刻。

EV 停止充电时刻概率分布图如图 3 所示。

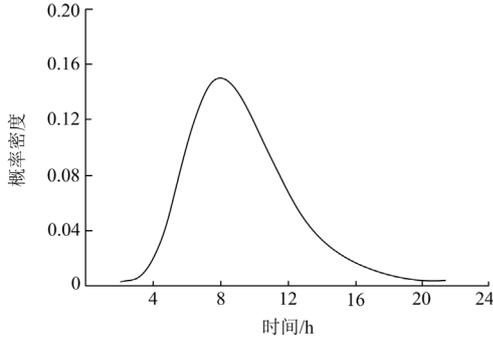


图 3 EV 停止充电时刻概率分布图

Fig. 3 Probability distribution of EV charging stop time

经数据统计, 电动汽车用户期望电量满足对数正态分布, 如式(3)所示。

$$f_s(x) = \frac{1}{x \sqrt{2\pi\sigma_s}} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right] \quad (3)$$

式中: μ_s 、 σ_s 分别为对数正态分布的均值和标准差; x 为 EV 用户的期望电量。

假设从 EV 开始充电时刻至停止充电时刻, 微网可以调用电动汽车储能电池并支付相应补贴, 同时在停止充电时刻 EV 储能电池荷电状态(state of charge, SOC)要达到预期 SOC, 每辆电动汽车的充放电功率在一定范围内可调。

采用蒙特卡洛抽样方法, 由式(1)一式(3)可以建立 EV 的充放电模型。

2.2 柔性负荷建模

1) 可平移负荷

可平移负荷是指负荷曲线可以进行整体平移的负荷。可平移负荷通常包括生产流程受约束、生产班次能调整的工业负荷和户用的洗衣机、消毒柜、洗碗机等负荷。电力调度部门可以与此类用户签订合同或达成协议, 完成需求响应。

可平移负荷数学模型可表示^[20]为

$$\Delta P_{\text{shift}}(t) = f_{\text{shift}}[t + \Delta t(\Delta \delta_{\text{shift}}(t))] - f_{\text{shift}}(t) \quad (4)$$

$$\sum_{t=1}^T \Delta P_{\text{shift}}(t) = 0 \quad (5)$$

式中: $\Delta P_{\text{shift}}(t)$ 为 t 时段平移功率; $\Delta \delta_{\text{shift}}(t)$ 为 t 时段相关经济性指标变化量; Δt 为负荷平移时段;

$f_{\text{shift}}(t)$ 为初始负荷曲线; T 为调度周期。

2) 可转移负荷

可转移负荷是指在用电总量保持不变的情况下, 可以灵活调节用电功率和用电时段的负荷。一般采用分时电价对可转移负荷进行激励, 促使用户参与调度。

可转移负荷数学模型可表示为

$$\Delta P_{\text{trans}}(t) = f_{\text{trans}}(\Delta \delta(t), P_{\text{trans}}(t), e_{\text{trans}}(t)) - f_{\text{trans}}(t) \quad (6)$$

$$\sum_{t=1}^T \Delta P_{\text{trans}}(t) = 0 \quad (7)$$

式中: $\Delta P_{\text{trans}}(t)$ 为 t 时段转移功率; $\Delta \delta(t)$ 是 t 时段相关经济性指标变化量; $P_{\text{trans}}(t)$ 为 t 时段的基础负荷; $e_{\text{trans}}(t)$ 为自转移弹性系数, 取值 0~1; $f_{\text{trans}}(t)$ 为可转移负荷初始负荷曲线。

3) 可削减负荷

可削减负荷是指在一定时间范围内可以对用电功率进行一定范围调节的负荷。可削减负荷的用电功率通常可调, 比如空调和数量可以灵活调整的照明等负荷。

可削减负荷数学模型如式(8)所示。

$$\Delta P_{\text{cut}}(t) = f_{\text{cut}}(P_{\text{cut}}(t), \Delta \delta(t), e_{\text{cut}}(t)) - f_{\text{cut}}(t) \quad (8)$$

式中: $\Delta P_{\text{cut}}(t)$ 为 t 时段削减功率; $P_{\text{cut}}(t)$ 为 t 时段的基础负荷; $e_{\text{cut}}(t)$ 为 t 时段自削减弹性系数, 取值 0~1; $f_{\text{cut}}(t)$ 为可削减负荷初始负荷曲线。

2.3 储能寿命损耗模型

首先通过大量实验, 可以得到储能的放电深度(depth of discharge, DOD)-循环寿命曲线。该曲线是在不同 DOD 下, 储能不断进行充放电实验得到。比如在放电深度 $D_{\text{dod}} = 80\%$ 的情况下, 将储能从 SOC 为 100% 放电至 20%, 再从 20% 充电至 100% 记为一次充放电循环, 重复该过程直至储能容量衰减至额定容量的 80%, 记录总循环次数。该函数曲线一般可拟合为

$$N_{\text{life}}(D_{\text{dod}}) = \mu_1 \exp(-\mu_2 \cdot D_{\text{dod}}) \quad (9)$$

式中: N_{life} 为储能循环寿命; μ_1 、 μ_2 均为拟合函数对应的系数。

假设储能电池每次相同放电深度下寿命损耗相同, 同时充放电过程产生的寿命损耗也相同, 则可以得到储能由 SOC 为 S 充电至 100% 的寿命损耗, 如式(10)所示。

$$L_{\text{loss}}(S, 1) = \frac{1}{2N_{\text{life}}(1-S)} \quad (10)$$

式中, S 为 SOC 的大小。

则储能电池寿命损耗系数 $\lambda_{\text{loss}}(S)$ 为

$$\lambda_{\text{loss}}(S) = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{L_{\text{oss}}(S, S + \Delta S)}{\Delta S \cdot E_{\text{rated}}} = -\frac{1}{E_{\text{rated}}} \cdot \frac{dL_{\text{oss}}(S, 1)}{dS} = -\frac{1}{2E_{\text{rated}}} \cdot \left(\frac{1}{N_{\text{life}}(1-S)} \right)' \quad (11)$$

式中: E_{rated} 为储能额定容量; ΔS 为储能 SOC 的变化量; “'” 表示求导。储能电量由 $S(t-1)$ 变至 $S(t)$ 所产生的寿命损耗为

$$L_{\text{oss}}(t) = \left| \int_{S(t-1)}^{S(t)} \lambda_{\text{loss}}(S) d(S \cdot E_{\text{rated}}) \right| = |F(S(t)) - F(S(t-1))| \quad (12)$$

式中, $F(S(t))$ 是储能寿命损耗系数的原函数。

$$F(S) = \int_0^S \lambda_{\text{loss}}(S) \cdot E_{\text{rated}} dS = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{N_{\text{life}}(1)} - \frac{1}{N_{\text{life}}(1-S)} \right) \quad (13)$$

由于 $F(S)$ 并非线性函数, 所以利用分段线性化得到电池储能寿命线性模型。

$$F(S) \approx F(S^{\min}) + \sum_{\lambda=1}^N \varphi_S^\lambda \cdot \Delta_S^\lambda \quad (14)$$

$$\sum_{\lambda=1}^N \Delta_S^\lambda = S - S^{\min} \quad (15)$$

$$\bar{\Delta}_S = \frac{(S^{\max} - S^{\min})}{N} \quad (16)$$

$$\varphi_S^\lambda = \frac{F(S^{\min} + \lambda \cdot \bar{\Delta}_S) - F(S^{\min} + (\lambda-1) \cdot \bar{\Delta}_S)}{\bar{\Delta}_S} \quad (17)$$

$$\Delta_S^\lambda = \max \left\{ \min \left\{ S - S^{\min} - (\lambda-1) \cdot \bar{\Delta}_S, \bar{\Delta}_S \right\}, 0 \right\} \quad (18)$$

式中: N 为分段数; λ 为分段序号; $\bar{\Delta}_S$ 为每段长度上限; φ_S^λ 为分段斜率; Δ_S^λ 为相应分段长度; S^{\max} 、 S^{\min} 分别为储能 SOC 的最大、最小值。由此可以得到储能寿命损耗模型^[21]。

根据 LI TEL48-170C 磷酸铁锂电池的寿命特性, 可以得到该储能的循环寿命拟合曲线, 如式(19)所示。

$$N_{\text{life}}(D_{\text{dod}}) = 21870 \times \exp(-1.957 D_{\text{dod}}) \quad (19)$$

经过计算可以得到, 当 N 取 5 时, 有较好的求解精度及求解速度, 因此本文 N 取 5。

2.4 峰谷平时段划分

本文引入模糊隶属度函数对峰谷平时段进行划分。图 4 为模糊半梯状函数分布图。如图 4 所示, l_{\min} 和 l_{\max} 分别代表负荷曲线上的最低点和最高点。采用偏大型半梯状分布函数计算各时刻的峰隶属度 u_{ft} , 采用偏小型半梯状分布函数计算各时刻的谷隶

属度 u_{gt} ^[22]。考虑光伏出力与用户侧负荷构成净负荷, 对净负荷曲线进行时段划分, 如式(20)所示。

$$\begin{cases} u_{\text{ft}} = \frac{L(t) - L_{\min}}{L_{\max} - L_{\min}} \\ u_{\text{gt}} = \frac{L_{\max} - L(t)}{L_{\max} - L_{\min}} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $L(t)$ 为 t 时刻净负荷大小; L_{\max} 、 L_{\min} 分别为净负荷曲线上的峰、谷值。

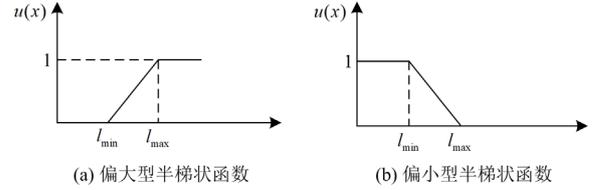


图 4 模糊半梯状函数分布图

Fig. 4 Distribution of fuzzy semi-ladder function

其中某一时刻的峰隶属度越大, 表明该时刻峰特征越明显; 谷隶属度越大, 表明该时刻谷特征越来越明显。将得到的峰、谷隶属度进行降序排序后, 取前 T_f 个峰隶属度所对应的时刻为峰时段; 取前 T_g 个谷隶属度所对应的时刻为谷时段; 其余时刻为平时段。 T_f 、 T_g 分别为峰时段个数和谷时段个数。

3 微电网优化调度模型

基于第 2 节所建立的可调节资源模型, 建立微电网“源-网-荷-储”协同调度的优化模型。

3.1 目标函数

微电网运行成本包括微网与外部电网交易成本 C_{ex} 、光电的发电成本 C_{DG} 、微电网调度成本 C_{em} , 对柔性负荷的补偿成本 C_{lc} 以及对电动汽车用户的补偿成本 C_{ev} 。

$$\min f = C_{\text{ex}} + C_{\text{em}} + C_{\text{DG}} + C_{\text{lc}} + C_{\text{ev}} \quad (21)$$

式中各部分成本由附录 A 式(A1)计算。

3.2 约束条件

3.2.1 功率平衡约束

$$P_g(t) + P_{\text{pv}}(t) = P_{\text{es}}(t) + P_{\text{n}}(t) + P_{\text{ld}}(t) + P_{\text{ev}}(t) \quad (22)$$

式中: $P_g(t)$ 为 t 时段外网向微网传输的功率值; $P_{\text{pv}}(t)$ 为 t 时刻光伏发电功率; $P_{\text{es}}(t)$ 为 t 时刻储能系统充电量, $P_{\text{es}}(t) > 0$ 表示储能充电, $P_{\text{es}}(t) < 0$ 表示储能放电; $P_{\text{n}}(t)$ 为 t 时段柔性负荷功率值; $P_{\text{ld}}(t)$ 为 t 时段刚性负荷功率值; $P_{\text{ev}}(t)$ 为 t 时段电动汽车充电总功率值。

3.2.2 电网交互功率约束

$$-P_g^{\max} \leq P_g(t) \leq P_g^{\max} \quad (23)$$

式中, P_g^{\max} 为微网和外部电网交互功率上限。

3.2.3 微网联络线峰谷差约束

$$\max P_g(t) - \min P_g(t) \leq P_{g,\max} \quad (24)$$

式中: $\max P_g(t)$ 、 $\min P_g(t)$ 分别为微网联络线交换功率的峰值和谷值; $P_{g,\max}$ 为微电网允许的联络线峰谷差最大值。

3.2.4 储能约束

1) 储能容量约束

$$S^{\min} \leq S(t) \leq S^{\max} \quad (25)$$

2) 储能运行约束

$$\begin{cases} \mu_{\text{ch}}^{\text{es}}(t) + \mu_{\text{dis}}^{\text{es}}(t) \leq 1 \\ 0 \leq P_{\text{ch}}(t) \leq \mu_{\text{ch}}^{\text{es}}(t) \cdot P_{\text{ch}}^{\max} \\ 0 \leq P_{\text{dis}}(t) \leq \mu_{\text{dis}}^{\text{es}}(t) \cdot P_{\text{dis}}^{\max} \end{cases} \quad (26)$$

式中: $\mu_{\text{ch}}^{\text{es}}(t)$ 、 $\mu_{\text{dis}}^{\text{es}}(t)$ 分别为 t 时段储能的充电和放电状态, 为 0-1 变量; $P_{\text{ch}}(t)$ 、 $P_{\text{dis}}(t)$ 分别为 t 时段储能的充放电功率; P_{ch}^{\max} 、 P_{dis}^{\max} 分别为储能充放电功率的最大值。

3) 储能能量平衡约束

$$S(T) = S(0) \quad (27)$$

该约束可以使储能初始时刻 SOC 与最终时刻 SOC 一致, 以便于循环使用储能。

3.2.5 柔性负荷约束

1) 可平移负荷约束

$$\begin{cases} P^{\text{shift}}(t) = P_{\text{in}}^{\text{shift}}(t) \\ P_{\text{out}}^{\text{shift}}(t) = P_{\text{in}}^{\text{shift}}(t + \sigma) = P^{\text{shift}0}(t) \\ \sigma \leq \sigma_{\max} \end{cases} \quad (28)$$

式中: $P^{\text{shift}}(t)$ 为负荷平移后在 t 时段的功率值; $P^{\text{shift}0}(t)$ 为负荷未平移时在 t 时段的功率值; $P_{\text{in}}^{\text{shift}}(t)$ 、 $P_{\text{out}}^{\text{shift}}(t)$ 分别为可平移负荷在 t 时段移入和移出的功率; σ 为平移的跨度时长; σ_{\max} 为可平移负荷的最大平移跨度时长。

2) 可转移负荷约束

$$\begin{cases} P_{\text{out}}^{\text{trans}}(t) = \mu^{\text{trans}}(t) \cdot \alpha^{\text{trans}}(t) \cdot P^{\text{trans}0}(t), t \in \phi^{\text{trans}} \\ \sum_{t=1}^T P_{\text{out}}^{\text{trans}}(t) \Delta t = \sum_{t=1}^T P_{\text{in}}^{\text{trans}}(t) \Delta t \\ \sum_{t=1}^T \mu^{\text{trans}}(t) \leq N_{\text{max}}^{\text{trans}} \\ P^{\text{trans}'}(t) = P^{\text{trans}0}(t) + P_{\text{in}}^{\text{trans}}(t) - P_{\text{out}}^{\text{trans}}(t) \end{cases} \quad (29)$$

式中: $\alpha^{\text{trans}}(t)$ 为可转移负荷的转移系数, 取值为 0~1; $\mu^{\text{trans}}(t)$ 为 0-1 状态变量, 表示可转移负荷是

否参与转移功率; $P^{\text{trans}0}(t)$ 、 $P^{\text{trans}'}(t)$ 分别为可转移负荷转移前后功率值; ϕ^{trans} 为负荷可进行转移的时段的集合; $P_{\text{out}}^{\text{trans}}(t)$ 、 $P_{\text{in}}^{\text{trans}}(t)$ 分别为负荷在 t 时段转出和转入功率; $N_{\text{max}}^{\text{trans}}$ 为负荷最大转移次数。

3) 可削减负荷约束

$$\begin{cases} \Delta P^{\text{cut}}(t) = \mu^{\text{cut}}(t) \cdot \alpha^{\text{cut}}(t) \cdot P^{\text{cut}0}(t) \\ |\alpha^{\text{cut}}(t) - \alpha^{\text{cut}}(t-1)| \leq R_{\text{max}}^{\text{cut}} \\ T^{\text{cut}} \leq T_{\text{max}}^{\text{cut}} \\ P^{\text{cut}'}(t) = P^{\text{cut}0}(t) - \Delta P^{\text{cut}}(t) \end{cases} \quad (30)$$

式中: $\Delta P^{\text{cut}}(t)$ 为可削减负荷在 t 时段的削减功率值; $\alpha^{\text{cut}}(t)$ 为负荷在 t 时段的削减系数; $\mu^{\text{cut}}(t)$ 为状态变量, 表示负荷是否参与削减; $R_{\text{max}}^{\text{cut}}$ 为负荷最大允许削减速率系数; $P^{\text{cut}0}(t)$ 、 $P^{\text{cut}'}(t)$ 分别为负荷削减前、后 t 时段的功率值; T^{cut} 为负荷参与削减的总时长; $T_{\text{max}}^{\text{cut}}$ 为负荷可以参与削减的最大时长。

3.2.6 电动汽车约束

1) 电动汽车电池容量约束

$$\begin{cases} S_{\text{ev},i}^{\min} \leq S_{\text{ev},i}(t) \leq S_{\text{ev},i}^{\max} \\ S_{\text{ev},i,\text{final}} = S_{\text{ev},i,\text{want}} \end{cases} \quad (31)$$

式中: $S_{\text{ev},i}(t)$ 为 t 时段电动汽车 i 的 SOC 值; $S_{\text{ev},i}^{\min}$ 、 $S_{\text{ev},i}^{\max}$ 分别为电动汽车 i 储能电池的最低和最高 SOC 值; $S_{\text{ev},i,\text{final}}$ 为电动汽车 i 充电最后时刻储能电池的 SOC 值; $S_{\text{ev},i,\text{want}}$ 为电动汽车 i 的用户期望储能电池 SOC 值。

2) 电动汽车电池运行约束

$$\begin{cases} \mu_{i,\text{ch}}^{\text{ev}}(t) + \mu_{i,\text{dis}}^{\text{ev}}(t) \leq 1 \\ 0 \leq P_i^{\text{evcha}}(t) \leq \mu_{i,\text{ch}}^{\text{ev}}(t) \cdot P_{i,\text{ch}}^{\text{ev},\max} \\ 0 \leq P_i^{\text{evdis}}(t) \leq \mu_{i,\text{dis}}^{\text{ev}}(t) \cdot P_{i,\text{dis}}^{\text{ev},\max} \end{cases} \quad (32)$$

式中: $\mu_{i,\text{ch}}^{\text{ev}}(t)$ 、 $\mu_{i,\text{dis}}^{\text{ev}}(t)$ 分别为第 i 辆电动汽车充放电状态; $P_i^{\text{evcha}}(t)$ 、 $P_i^{\text{evdis}}(t)$ 分别为第 i 辆汽车在 t 时段的充放电功率; $P_{i,\text{ch}}^{\text{ev},\max}$ 、 $P_{i,\text{dis}}^{\text{ev},\max}$ 分别为第 i 辆汽车充放电功率的最大值。

4 算例分析

微电网中各项参数可见附录 B 表 B1 和表 B2。由于本文所构建的模型属于混合整数线性规划(mixed integer linear programming, MILP)模型, 数学模型逻辑清晰, 收敛性较强, 通过数学精确算法便可求得最优解。因此本文利用 Matlab R2019b 调用 YALMIP 工具箱中的 CPLEX 求解器进行求解, 求解过程在 R5-4600H 3.0 GHz 电脑中进行。

4.1 不同渗透率下储能容量和电动汽车数量对运行成本的影响

不同光伏渗透率下的储能容量大小和电动汽车数量对运行成本的影响如图 5—图 7 所示，储能容量过小时，将无法保证在光伏渗透率较高且电动汽车数量较多时满足联络线峰谷差约束，因此在渗透率为 50%和渗透率为 80%时储能容量最低值分别为 900 MVA 和 1800 MVA。

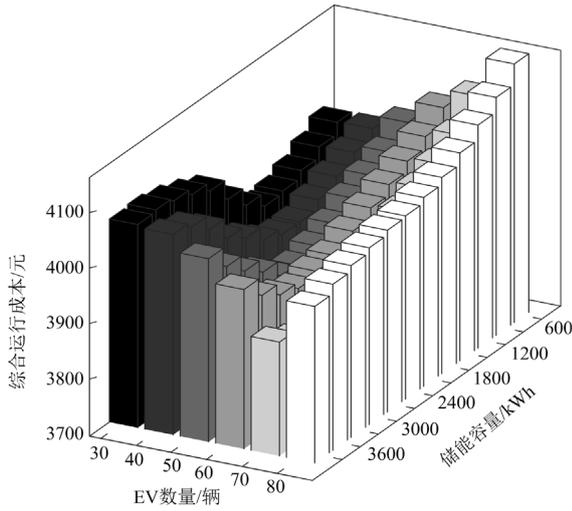


图 5 光伏渗透率为 20%下不同储能容量和电动汽车数量的优化结果

Fig. 5 Optimization results of different energy storage capacities and the number of electric vehicles when PV permeability is 20%

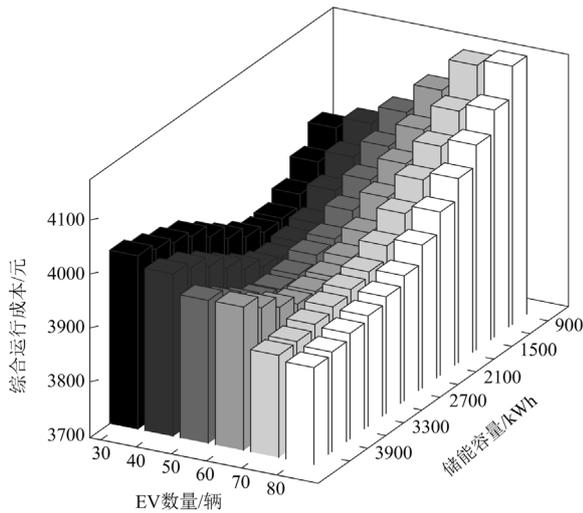


图 6 光伏渗透率为 50%下不同储能容量和电动汽车数量的优化结果

Fig. 6 Optimization results of different energy storage capacities and the number of electric vehicles when PV permeability is 50%

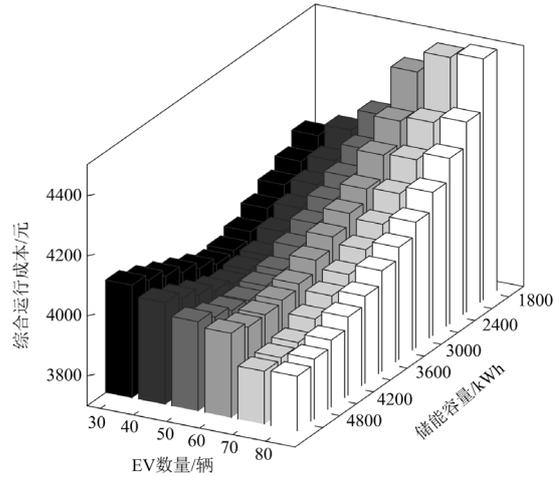


图 7 光伏渗透率为 80%下不同储能容量和电动汽车数量的优化结果

Fig. 7 Optimization results of different energy storage capacities and the number of electric vehicles when PV permeability is 80%

从整体上看，无论光伏渗透率是 20%、50%还是 80%，在同一电动汽车数量下，总是存在一最佳储能容量，即当储能小于该容量时，运行成本与储能容量负相关，当储能大于该容量时，运行成本与储能容量正相关，而且在电动汽车增多或光伏渗透率提高后，最低运行成本所对应的最佳储能容量会逐渐提高。因为在储能容量过小时，储能容量不足以满足微电网的调度需要；而储能容量过大时微电网也无法充分利用储能而导致储能成本的有效增加，所以当微电网中的电动汽车数量与光伏的渗透率确定后，存在可以使运行成本最低的最佳储能容量。而当电动汽车的数量或光伏渗透率增加后，净负荷曲线的峰谷差也增加，所以需要更大的储能容量以满足调度需要。

图 8、图 9 分别为不同 EV 数量和不同光伏渗透率下的最佳储能容量和最低运行成本。从图 9 中可以看出，当光伏渗透率为 50%时的运行成本整体上低于其为 20%和 80%时的成本，而在 EV 数量为 80 辆时运行成本最低。因此本文选定光伏渗透率为 50%，EV 容量为 80 辆，此时储能容量为 4500 MVA。此时微电网净负荷如图 10 所示，峰谷平时段划分如表 1 所示。

4.2 求解结果

本文设置以下 3 种情形。

Case1: EV 即到即以最大功率充电，充至期望 SOC 值；柔性负荷作为不可调度的刚性负荷，即不对微电网进行任何调度。

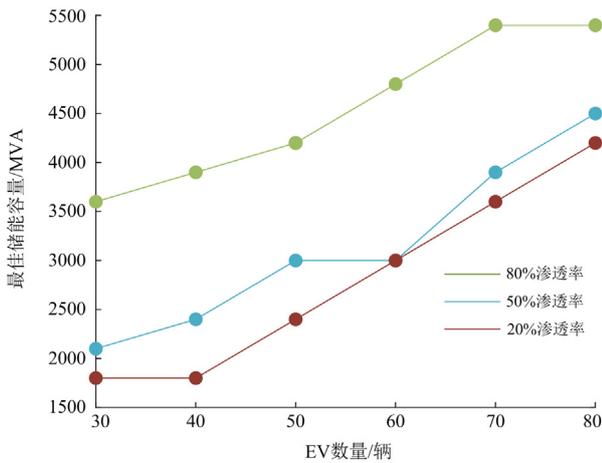


图 8 不同情形下储能容量对比

Fig. 8 Comparison of energy storage capacity under different scenarios

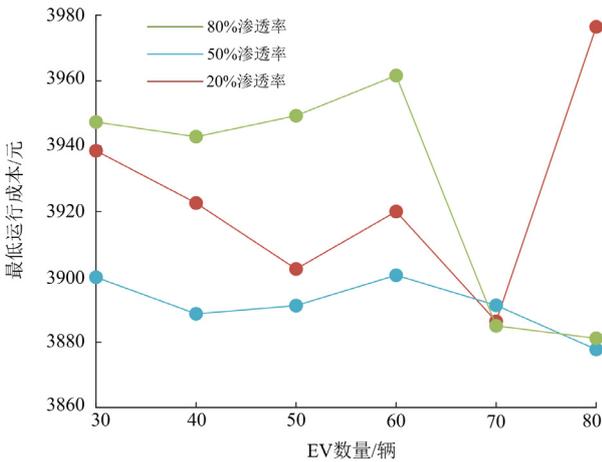


图 9 不同情形下运行成本对比

Fig. 9 Comparison of operating costs under different scenarios

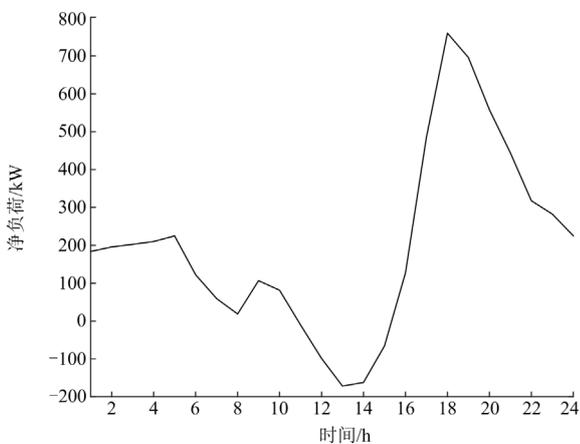


图 10 最优配置下微电网净负荷

Fig. 10 Microgrid net load under optimal configuration

表 1 最优配置下微电网峰谷平时段划分

Table 1 Peak and valley division of microgrid under optimal configuration

时段	区间
峰	05:00—06:00、17:00—24:00
平	00:00—05:00、06:00—07:00、09:00—11:00、16:00—17:00
谷	07:00—09:00、11:00—16:00

Case2: 在 Case1 的基础上加入储能并对微电网进行以运行成本最低为目标的优化调度。

Case3: 在 Case2 的基础上同时对微网中储能、柔性负荷、电动汽车以微电网运行成本最低为目标进行优化调度。

在 Case1 或 Case2 下, 由于 EV 用户大多在 16~21 h 对电动汽车进行充电, 所以会在 16~21 h 形成较高的用电峰值, 造成联络线功率波动较大, 对外部电网造成较大冲击, 如图 11 所示。

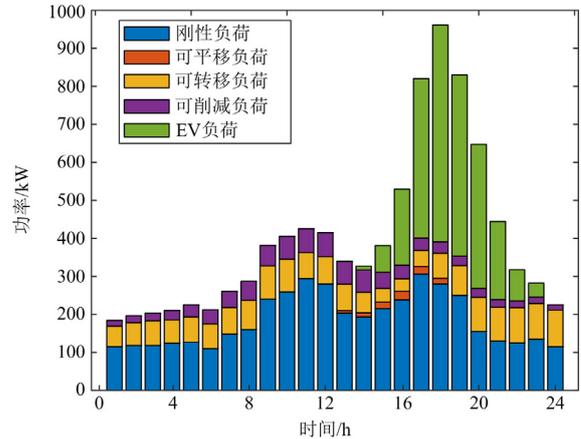


图 11 Case1 或 Case2 下各负荷功率

Fig. 11 Power of each load of Case1 or Case2

图 12 为 Case3 经优化后微网内各种负荷的调度结果, 可以明显看出经过优化后在 Case1 16~21 h 的 EV 充电高峰被转移到其他时段, 总负荷波动较 Case1 更平缓; 从经济性角度来看, 部分可转移负荷被转移至 7~8 h 分时电价低谷阶段, 可以降低微电网运行成本。

图 13—图 15 分别为 3 种情形微电网运行优化结果, 可以看出 Case1 联络线的功率峰值可在 17~19 h 达到 800 kW。而对于 Case2, 储能能在 11~15 h 光伏发电高峰进行充电消纳光伏, 在 EV 充电高峰进行放电, 所以联络线功率维持在了 200 kW 左右, 如图 14 所示。而当柔性负荷和电动汽车参与调度后, EV 充电高峰被转移并且柔性负荷也被集中到电价低谷时段; 除此之外, 在 7~8 h 电动汽车储能进行放电以满足储能充电需求和柔性负荷用电需

求, 联络线功率维持在 200 kW 左右的同时进一步降低了微电网运行成本, 如图 15 所示。总体来看通过对电动汽车等可调节资源进行优化调度, 提高了

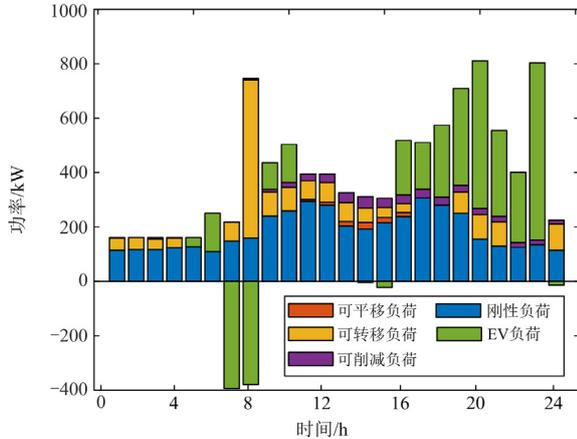


图 12 Case3 各负荷功率

Fig. 12 Power of each load of Case3

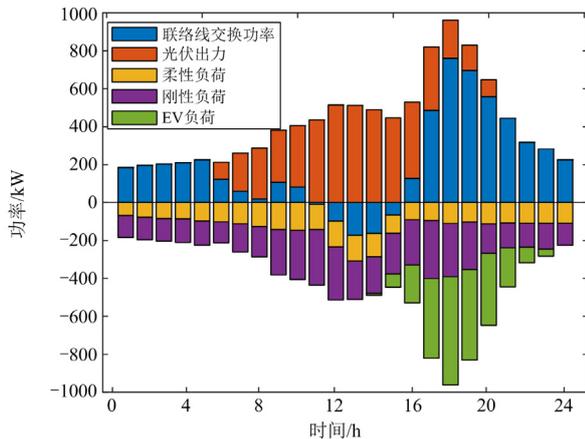


图 13 Case1 微网运行情况

Fig. 13 Operation of Case1 microgrid

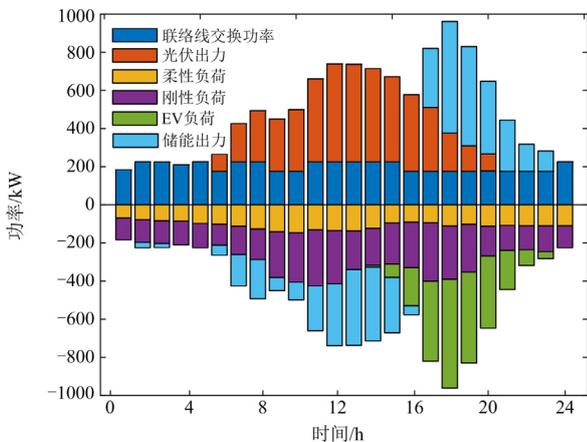


图 14 Case2 微网运行情况

Fig. 14 Operation of Case2 microgrid

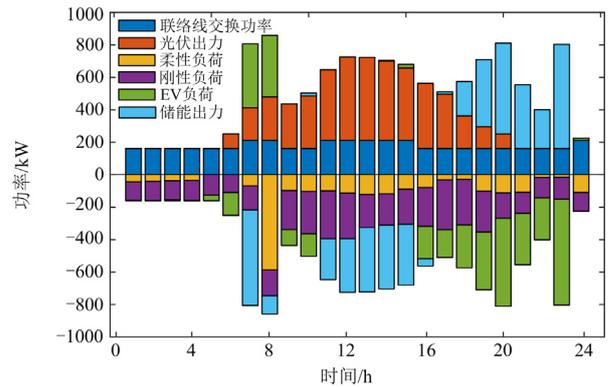


图 15 Case3 微网运行情况

Fig. 15 Operation of Case3 microgrid

总负荷与风光出力的协同性, 稳定维持了联络线功率, 有助于新能源就地消纳和微网稳定运行。

4.3 成本分析

各情形优化结果经济性对比如表 2 所示, 可以发现, Case1 微电网运行成本为 4218.0 元, Case2 和 Case3 的微电网运行成本分别为 3958.3 元和 3877.8 元, Case2 和 Case3 的微电网运行成本分别相比于 Case1 下降了 6.2%和 8.1%。同时从图 13—图 15 可得, Case1 联络线功率波动为 932.4 kW, 而 Case2 和 Case3 的联络线功率波动为 50 kW。Case1 虽没有相应的储能和柔性负荷的调度成本, 但需要花费更多的成本从电网购电并且需要将光伏高发时刻的 508.13 kWh 电能低价售卖给外部电网, 而 Case2 和 Case3 通过储能的削峰填谷, 不仅完全消纳光伏所发电量, 将联络线波动控制在 50 kW 以内, 还大大降低了购电成本。除此之外, Case3 在 Case2 的基础上引导用户参与能量调度, 进一步降低了与电网的交易成本, 使总运行成本相比 Case2 进一步下降。总体来看, 通过对微网中的“源-网-荷-储”进行协同优化调度可以促进光伏就地消纳, 降低对电网稳定性的影响, 同时降低微网运行成本。

表 2 不同情形下经济性对比结果

Table 2 Economic comparison results under different circumstances

情形	1	2	3
与电网交易成本/元	4204.62	2678	2355.6
光伏发电成本/元	2121.3	2121.3	2121.3
微网调度成本/元	0	236.53	265.1
储能损耗成本/元	0	1030.4	1089
与电动汽车用户交易成本/元	-2107.9	-2107.9	-2198.1
柔性负荷补贴成本/元	0	0	246.3
就地光伏消纳率/%	89.2	100	100
总成本/元	4218.0	3958.3	3877.8

4.4 用户满意度评价

由于负荷种类较多, 用户需求存在差异。例如柔性负荷在参与优化运行时, 需要用户对自身的用电习惯做一定程度的改变, 对用户的舒适度产生一定的影响。用户满意度综合考虑用户舒适度和经济性, 可以综合反映用户用电体验。数学表达式^[23]为

$$m_n = 1 - \mu_c \frac{\sum_{t=1}^T |\Delta P_t|}{\sum_{t=1}^T P_t} + \mu_e \frac{\sum_{t=1}^T C_t}{\sum_{t=1}^T F_t^0} \quad (33)$$

式中: m_n 为柔性负荷(除可平移负荷外)的用户综合满意度; $|\Delta P_t|$ 为调度前后的柔性负荷功率改变量绝对值; P_t 为优化前功率值; C_t 为柔性负荷参与优化调度的补偿收益; F_t^0 为柔性负荷优化前的电费支出; μ_c 为舒适性系数, μ_c 取值 0.4; μ_e 为经济性系数。对于可削减负荷, μ_e 取值 0.6; 对于可转移负荷, 因其移出移入的用电总量相等, 故 μ_c 取值 0.2, μ_e 取值 0.6。

考虑到可平移负荷参与调度时负荷是作为整体进行平移的特性, 用户综合满意度很大程度上受平移时差 ΔT_{shift} 的影响, 如式(34)所示。

$$m_{n\text{shift}} = 1 - \mu_c \frac{\Delta T_{\text{shift}}}{T} + \mu_e \frac{\sum_{t=1}^T C_t}{\sum_{t=1}^T F_t^0} \quad (34)$$

式中, $m_{n\text{shift}}$ 为平移负荷的用户综合满意度。

表 3 给出了 3 种柔性负荷的优化结果分析, 3 种柔性负荷的用户综合满意度均接近 1 或大于 1, 这表明参与优化调度前后, 柔性负荷用户用电综合体验相差不大或有所提升, 一定程度上也说明了柔性负荷补偿的合理性。

表 3 柔性负荷优化结果

Table 3 Flexible load optimization results

柔性负荷类型	参与调度总功率/kW	补偿费用/元	用户综合满意度
可平移负荷	93	3	0.9506
可转移负荷	504.43	119.765	0.969
可削减负荷	443.4	123.6	1.005

5 结论

本文综合考虑微电网中的柔性负荷、电动汽车等可控资源, 提出了“源-网-荷-储”微网协同优化调度方案, 提高了微电网运行经济性, 同时稳定了联络线功率且保持了用户较高的用电体验。

1) 本文考虑微电网中不同光伏渗透率和不同

电动汽车数量下低谷平时段的重新划分, 通过求解不同渗透率、储能容量及电动汽车数量下微电网的最低运行成本确定最优微电网配置方案, 为后期研究微电网的优化配置提供了理论基础。

2) 本文所提综合考虑柔性负荷、电动汽车的“源-网-荷-储”微网能量调度方案通过利用柔性负荷的能量跨时空转移特性和引导电动汽车有序充电, 可有效缓解 EV 在用电高峰时段进行集中充电对外部电网造成的冲击, 辅助储能完成削峰填谷, 稳定了联络线功率并将运行成本降低了 8.1%; 同时相较于单独对储能进行调度可以进一步降低微网运行成本, 并且保证较高的用户满意度。为研究微电网的安全经济运行提供了新思路。

3) 本文所提调度方案可以通过对用户进行经济补偿维持用户综合满意度, 验证了所提方案具有一定的科学性和合理性。

附录 A

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{\text{ex}} = \sum_{t=1}^T (C^b(t)P_{\text{g-m}}(t) + C^s(t)P_{\text{m-g}}(t))\Delta t \\ C_{\text{DG}} = \sum_{t=1}^T C^{\text{PV}} P_{\text{pv}}(t)\Delta t \\ C_{\text{em}} = \sum_{t=1}^T C^{\text{ER}} P^{\text{in}}(t)\Delta t + \sum_{t=1}^T L_{\text{loss}}^{\text{es}}(t)C_{\text{B}}\Delta t \\ C_{\text{lc}} = C^{\text{shift}}\sigma^{\text{shift}} + \sum_{t=1}^T C^{\text{trans}}(t)\Delta P^{\text{trans}}(t)\Delta t + \\ \quad \sum_{t=1}^T C^{\text{cut}}(t)\lambda^{\text{cut}}(t)\Delta t \\ C_{\text{ev}} = \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T C^{\text{ev}} |P_i^{\text{ev}}(t)|\Delta t - \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T C^{\text{evb}}(t)P_i^{\text{evcha}}(t)\Delta t + \\ \quad \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T C^{\text{evs}}(t)P_i^{\text{evdis}}(t)\Delta t \end{array} \right. \quad (\text{A1})$$

式中: $P_{\text{g-m}}(t)$ 、 $P_{\text{m-g}}(t)$ 分别为 t 时段微电网和外部电网的传输功率, 其中, $P_{\text{g-m}}(t)$ 取正值, $P_{\text{m-g}}(t)$ 取负值; $C^b(t)$ 、 $C^s(t)$ 为 t 时段微电网从外部电网购入和售卖电能的价格; $P_{\text{pv}}(t)$ 为光电 t 时段发电功率预测值; C^{PV} 为光伏的单位电能发电成本; $P^{\text{in}}(t)$ 为 t 时段流经微电网控制系统的功率; $L_{\text{loss}}^{\text{es}}(t)$ 为 t 时段造成的储能损耗; C_{B} 为储能总投资成本; C^{ER} 为微电网控制系统损耗系数; $\Delta P^{\text{trans}}(t)$ 为可转移负荷在 t 时段移出的功率; σ^{shift} 为平移时长; $\lambda^{\text{cut}}(t)$ 为 t 时段可削减负荷削减比例系数; C^{shift} 、 $C^{\text{trans}}(t)$ 、 $C^{\text{cut}}(t)$ 分别为可平移负荷补偿价格、可转移负荷补偿价格以

及可削减负荷补偿价格; I 为电动汽车数量; $|P_i^{ev}(t)|$ 为 t 时段电动汽车 i 的充放电功率绝对值; $P_i^{evcha}(t)$ 、 $P_i^{evdis}(t)$ 分别为 t 时段电动汽车 i 充放电功率; C^{ev} 为电动汽车储能电池补偿系数; $C^{evb}(t)$ 、 $C^{evs}(t)$ 分别为电动汽车用户向微网购电价格和售电价格, 本文假设 $C^{evb}(t)$ 、 $C^{evs}(t)$ 分别等于微网从外部电网的购电价格与售电价格。

附录 B

表 B1 微电网的模型参数

Table B1 Parameters of microgrid model

参数	数值
最大削减次数 N_{max}^{cut}	16
最大削减速率系数 R_{max}^{cut}	0.1
可削减负荷补偿价格 $C^{cut}(t)$ /元	$40C_n(t)$
C^{ER} /(元/kWh)	0.02
S^{max} 、 S^{min}	0.95、0.1
单位容量储能投资成本/(元/kWh)	2500
EV 电池额定容量/kWh	50
$S_{ev,j}^{max}$ 、 $S_{ev,j}^{min}$	0.95、0.1
$P_{i,ch}^{ev,max}$ /kW、 $P_{i,dis}^{ev,max}$ /kW	10、5
C^{ev} /(元/kWh)	0.1

表 B2 柔性负荷分时补偿成本价格 $C_{fl}(t)$

Table B2 Time-sharing compensation cost price of

$C_{fl}(t)$ flexible load

时段	00:00—07:00	07:00—10:00	10:00—15:00	15:00—18:00	18:00—21:00	21:00—24:00
价格/(元/kWh)	0.15	0.3	0.65	0.3	0.65	0.3

参考文献

[1] 程杉, 汪业乔, 廖玮霖, 等. 含电动汽车的新能源微电网多目标分层优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(12): 63-71.
CHENG Shan, WANG Yeqiao, LIAO Weilin, et al. Bi-level multi-objective optimization of a new energy microgrid with electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(12): 63-71.

[2] 陈岩, 靳伟, 王文宾, 等. 基于电动汽车分群的“风-网-车”联合消纳调度策略[J]. 中国电力, 2021, 54(4): 107-118.
CHEN Yan, JIN Wei, WANG Wenbin, et al. Scheduling strategy for “wind-network-vehicle” joint accommodation based on electric vehicle clustering[J]. Electric Power, 2021, 54(4): 107-118.

[3] MURTY V, KUMAR A. Multi-objective energy management in microgrids with hybrid energy sources

and battery energy storage systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(2): 1-20.

[4] 任昊, 邱晓燕, 张志荣, 等. 含电动汽车的交直流混合微电网优化调度[J]. 电气传动, 2022, 52(15): 23-30.
REN Hao, QIU Xiaoyan, ZHANG Zhirong, et al. Study on optimal dispatching of AC/DC hybrid micro grid with electric vehicle[J]. Electric Drive, 2022, 52(15): 23-30.

[5] 王璟, 王利利, 郭勇, 等. 计及电动汽车的微电网经济调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 111-117.
WANG Jing, WANG Lili, GUO Yong, et al. Microgrid economic dispatch method considering electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 111-117.

[6] 颜湘武, 卢俊达, 贾焦心, 等. 含循环换电负荷及充电站的微电网多目标优化调度[J/OL]. 华北电力大学学报(自然科学版): 1-12[2022-12-20]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.tm.20220725.1809.002.html>.
YAN Xiangwu, LU Junda, JIA Jiaoxin, et al. A multi-objective optimal dispatch of microgrid with cyclic swapping loads and charging stations[J/OL]. Journal of North China Electric Power University: 1-12[2022-12-20]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.tm.20220725.1809.002.html>.

[7] 梁海峰, 谭杰, 曹煜祺, 等. 考虑碳排放的电动汽车与光伏协同的调度策略[J/OL]. 华北电力大学学报(自然科学版): 1-9[2022-12-30]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.TM.20221019.1749.004.html>.
LIANG Haifeng, TAN Jie, CAO Yuqi, et al. Cooperative scheduling strategy of electric vehicle and photovoltaic considering carbon emission[J/OL]. Journal of North China Electric Power University: 1-9[2022-12-30]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.TM.20221019.1749.004.html>.

[8] 周孟然, 王旭, 邵帅, 等. 考虑需求响应和碳排放额度的微电网分层优化调度[J]. 中国电力, 2022, 55(10): 45-53.
ZHOU Mengran, WANG Xu, SHAO Shuai, et al. Hierarchical optimal scheduling of microgrid considering demand response and carbon emission quota[J]. Electric Power, 2022, 55(10): 45-53.

[9] 刘艳峰, 刘正学, 罗西, 等. 基于柔性负荷的孤立多能互补建筑能源系统优化设计[J]. 太阳能学报, 2022, 43(6): 24-31.
LIU Yanfeng, LIU Zhengxue, LUO Xi, et al. Design of isolated multi-energy complementary building energy system based on flexible load[J]. Acta Energetica Sinica, 2022, 43(6): 24-31.

[10] 侯慧, 徐焘, 肖振锋, 等. 计及可控负荷的发电一体化综合优化调度[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4294-4304.
HOU Hui, XU Tao, XIAO Zhenfeng, et al. Generation and load integrated optimal scheduling considering adjustable

- load[J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4294-4304.
- [11] 彭春华, 刘兵, 左丽霞, 等. 计及分类需求响应的孤岛微网并行多目标优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 60-68.
PENG Chunhua, LIU Bing, ZUO Lixia, et al. Parallel multi-objective optimal dispatch of island micro-grid considering load classified demand response[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 60-68.
- [12] 李燕青, 张登岳, 陈玉轩, 等. 计及可转移负荷的微电网优化调度[J]. 智慧电力, 2019, 47(5): 51-58.
LI Yanqing, ZHANG Dengyue, CHEN Yuxuan, et al. Optimal dispatch of microgrid considering transferable load[J]. Smart Power, 2019, 47(5): 51-58.
- [13] 胡荣, 张宓璐, 李振坤, 等. 计及可平移负荷的分布式冷热电联供系统优化运行[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 715-721.
HU Rong, ZHANG Milu, LI Zhenkun, et al. Optimal operation for CCHP system considering shiftable loads[J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 715-721.
- [14] 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.
- [15] ZHU Lan, ZHOU Xueying, ZHANG Xiaoping, et al. Integrated resources planning in microgrids considering interruptible loads and shiftable loads[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(4): 802-815.
- [16] 孟国情, 邱晓燕, 张明珂, 等. 计及柔性负荷和换电站的综合能源系统优化调度[J/OL]. 电子测量技术: 1-9 [2023-04-25]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2175.TN.20220527.1627.014.html>.
MENG Guoqing, QIU Xiaoyan, ZHANG Mingke, et al. Optimal dispatch of integrated energy system considering flexible loads and battery swapping station[J/OL]. Electronic Measurement Technology: 1-9[2023-04-25]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2175.TN.20220527.1627.014.html>
- [17] 张延宇, 饶新朋, 周书奎, 等. 基于深度强化学习的电动汽车充电调度算法研究进展[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(16): 179-187.
ZHANG Yanyu, RAO Xinpeng, ZHOU Shukui, et al. Research progress of electric vehicle charging scheduling algorithms based on deep reinforcement learning[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 179-187.
- [18] 杨明杰, 胡扬宇, 千海霞, 等. 计及碳排放的综合能源配网日前与日内多时间尺度优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 96-106.
YANG Mingjie, HU Yangyu, QIAN Haixia, et al. Optimization of day-ahead and intra-day multi-time scale scheduling for integrated power-gas energy system considering carbon emission[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 96-106.
- [19] 田立亭, 史双龙, 贾卓. 电动汽车充电功率需求的统计学建模方法[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 126-130.
TIAN Liting, SHI Shuanglong, JIA Zhuo. A statistical model for charging power demand of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 126-130.
- [20] 韩笑. 考虑多源协同的主动配电网优化调度研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
HAN Xiao. Research on optimal dispatching of active distribution networks considering multi-source cooperation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [21] 赵诣, 方陈, 冯冬涵, 等. 考虑电池储能寿命损耗的风光储微网随机日前调度策略[J]. 电气工程学报, 2022, 17(3): 210-218.
ZHAO Yi, FANG Chen, FENG Donghan, et al. Stochastic day-ahead scheduling optimization for wind-PV-ES microgrid considering battery life loss[J]. Journal of Electrical Engineering, 2022, 17(3): 210-218.
- [22] 董清, 董梁悦, 卜劲勇, 等. 考虑光伏渗透率和时段划分的光储优化运行[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(5): 120-128.
DONG Qing, DONG Liangyue, BU Jinyong, et al. Optimized operation of light storage considering photovoltaic permeability and time division[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(5): 120-128.
- [23] 焦世青. 基于电能路由器的交直流混合微网能量优化方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
JIAO Shiqing. Research on energy optimization method of hybrid AC/DC microgrid using electric energy router[D]. Changsha: Hunan University, 2020.

收稿日期: 2023-02-07; 修回日期: 2023-05-23

作者简介:

颜湘武(1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为新能源电力系统分析与控制、现代电力变换、新型储能与节能等; E-mail: xiangwuy@ncepu.edu.cn

王庆澳(1999—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为能量管理系统; E-mail: wangqao_wy@163.com

卢俊达(1998—), 男, 博士研究生, 研究方向为微电网优化调度。E-mail: lujd777@163.com

(编辑 张颖)