

文章编号: 2095-2163(2023)02-0060-10

中图分类号: TM732

文献标志码: A

基于需求侧响应的广义储能容量配置方法研究

郭永强¹, 温拥军², 邓坤¹, 黄世超¹, 杜纤¹

(1 贵州大学 电气工程学院, 贵阳 550025; 2 浦江光远电力建设有限公司, 浙江 浦江 322200)

摘要: 微电网作为新能源消纳的有效形式,对风光资源的消纳产生了重要的促进作用。但是,由于风光发电的不确定性以及波动性,导致微电网内部弃风弃光以及失负荷问题严重。广义储能结合需求侧资源及传统储能的双重优势,为解决上述问题提供了新思路。因此,本文提出一种考虑需求侧响应的广义储能配置方法。本文介绍了广义储能的模型,建立了广义储能配置的双层模型。模型上层以惩罚成本最小为目标,发挥需求侧资源的优势,降低微电网弃风、弃光及失负荷功率;在上层的基础上,下层以微电网净现值最大为目标,得到广义储能的配置方案。通过对3种不同策略的比较,证明了需求侧参与响应时,可实现用户与电网的双赢。

关键词: 需求侧响应; 广义储能配置; 电动汽车; 混合储能

Research on generalized storage capacity allocation method considering demand side response

GUO Yongqiang¹, WEN Yongjun², DENG Kun¹, HUANG Shichao¹, DU Xian¹(1 School of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;
2 Pujiang Guangyuan Electric Power Construction Co., Pujiang Zhejiang 322200, China)

【Abstract】 As an effective form of new energy absorption, micro-grid plays an important role in promoting the absorption of wind-solar resources. However, due to the uncertainty and fluctuation of wind and solar power generation, the problem of wind abandonment and load loss in micro-grid is serious. Generalized Energy Storage combines the double advantages of demand-side resources and traditional energy storage, and provides a new way to solve these problems. Therefore, a generalized energy storage allocation method considering demand side response is proposed. Firstly, the generalized energy storage model is introduced. Then, a two-layer model of generalized energy storage allocation is established. The upper layer aims to minimize the penalty cost, taking advantage of demand-side resources to reduce the abandonment of wind and light in micro-grid and to maximize the net present value (NPV) of micro-grid, a generalized energy storage scheme is proposed based on the upper layer. Finally, through the comparison of three different strategies, it is proved that when the demand side participates in the response, the win-win between the user and the grid can be achieved.

【Key words】 demand side response; generalized energy storage configuration; electric vehicles; hybrid energy storage

0 引言

微电网可以提高分布式电源的利用效率,其内部的分布式电源以风能和太阳能为主,由于风能和太阳能的出力随机性较大,加之反调峰特性,导致微电网内部的失负荷率和弃风弃光率增加。因此,微电网内部配置储能形成风光储联合微电网,储能可以吸收弃风弃光功率在负荷高峰时段放电为微电网提供支撑。文献[1]为了平抑风电、光伏的出力波

动,以风光储系统中的混合储能(Hybrid Energy Storage System, HESS)系统为研究对象,提出一种基于变分模态分解和神经网络的 HESS 容量配置方法。文献[2]针对风光互补系统日内局部功率波动问题,构建风光负荷功率波动量的概率密度函数,设定储能设备的额定充放电功率,进而得到储能系统的额定容量。文献[3]分析了风能和太阳能发电不同时间尺度的功率波动特性,基于平滑新能源输出波动、跟踪计划发电、削峰填谷、参与系统调频等策

作者简介: 郭永强(1992-),男,硕士研究生,主要研究方向:微电网广义储能配置;温拥军(1979-),男,学士,中级工程师,主要研究方向:电力系统规划研究;邓坤(1996-),男,硕士研究生,主要研究方向:混合储能配置;黄世超(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向:综合能源系统负荷预测;杜纤(1996-),女,硕士研究生,主要研究方向:电动汽车充放电调度。

收稿日期: 2022-04-16

哈尔滨工业大学主办 ◆ 学术研究与应

略,研究了储能系统的控制方法。文献[4]针对由锂电池和超级电容组成的混合储能系统,提出了量化储能介质频率特性的方法;建立了储能介质频率特性与小波变换分解层数的关系,用于优化分解层数。文献[5]提出了一种计及储能系统全寿命周期成本与收益的双层优化配置模型。其中,外层为年均成本最小,内层为储能全寿命周期成本最小,采用遗传与模拟退火相结合的算法求解储能的容量。文献[6]针对高比例可再生能源接入独立运行的微电网,由于出力与负荷波动产生的能源浪费问题,提出了储能容量优化的双层模型。其中,外层模型求解微电网规划投资问题,内层考虑运行过程中的运行成本、储能寿命损耗以及污染气体排放问题。文献[7]针对风电接入的区域综合能源系统,提出了热电耦合的配置方案,建立了储热、储电与区域风电功率的联系。该模型有利于储能资源的优化配置并且降低了成本。文献[8]建立了考虑负荷裕度的综合能源系统储能双层优化配置模型。下层利用储能对系统负荷裕度均衡度进行优化,上层结合负荷裕度进行储能容量优化配置,该模型在实现储能优化配置的同时,也实现了对负荷裕度的均衡。但是,以上储能配置方法较少考虑需求侧资源,导致需求侧资源利用不足,储能配置容量偏大。

需求侧资源作为微电网重要的组成部分,合理的参与微电网响应可以提高储能配置的经济性,增加微电网的收益。文献[9]针对分布式光伏、储能系统以及需求侧响应的光伏微电网,提出了以光伏发电消纳最大为目标的考虑微电网用电成本的配置方法。结果表明,借助储能系统和需求侧响应,可以有效提高分布式光伏的消纳率。文献[10]考虑空调-建筑物系统的热储备能力,将其等效为一种虚拟储能装置参与需求响应。文献[11]在规划模型中以社会经济效益和系统可靠性的最大化为目标,考虑了电池储能系统和需求响应之间的相互作用,采用改进的重力搜索算法计算优化的容量配置。文献[12]针对含固定储能和具有存储热能、势能和电能的可控负载,提出了广义配置的二层优化模型。其中,外层采用遗传算法搜索广义储能的配置方案,内层根据动态规划算法得到广义储能的最优运行策略,通过内外层交替进行广义储能容量的优化配置。文献[13]针对广义储能资源和分布式电源的联合规划问题,提出了包含实际储能、可平移负荷、可转移负荷和可削减负荷的响应模型。文献[14]针对大规模电动汽车对电网的平均用电量和峰值的影

响,提出了电动汽车集成商基于使用时间价格的车到网调度策略,优化了电动汽车的协调充电。

基于对以上文献的分析和研究发现,将需求侧资源纳入传统储能配置方案,可以充分发挥需求侧资源以及传统储能资源的双重优势。需求侧资源和传统储能组成广义储能系统,相比于传统的储能系统更加灵活和经济。基于以上研究成果,本文提出了一种考虑需求侧响应的广义储能配置方法。

1 广义储能模型

1.1 电动汽车充放电模型

微电网内EV的电池特性及用户的出行特性,决定了EV负荷的大小。文献[15-17]的研究成果表明,可采用以下概率密度函数,来描述电动汽车的相关参数。

(1)停驶时间。假设微电网内所有EV用户在结束一天的行程后,通过智能充电桩进行充电。采用正态分布来描述EV的停驶时间,表达式如式(1)所示:

$$f_i(x) \sim N(\mu_i, \sigma_i) \quad (1)$$

其中, μ_i, σ_i 分别为EV用户停驶时间的期望和标准差。

(2)行驶里程。现有研究表明,行驶里程 S (单位:km)可近似为对数正态分布^[14],其概率密度函数如式(2)所示:

$$f_s(x) \sim LN(\mu_s, \sigma_s) \quad (2)$$

其中, μ_s, σ_s 分别为EV用户日行驶里程的期望和方差。

(3)初始荷电状态。采用标准正太分布描述微电网内EV的初始荷电状态 SOC_1 ,其概率密度函数如式(3)所示:

$$f_{soc_1}(x) \sim N(\mu_{soc_1}, \sigma_{soc_1}) \quad (3)$$

其中, $\mu_{soc_1}, \sigma_{soc_1}$ 为EV初始荷电状态的期望和方差。

(4)最低荷电状态。最低荷电状态 SOC_2 ,由EV电池的荷电状态下限 $SOC_{ev, \min}$ 以及用户的行驶里程 S 共同决定。计算方法如式(4)所示:

$$SOC_2 = SOC_{ev, \min} + \frac{S \times W}{E} \quad (4)$$

其中, $SOC_{ev, \min}$ 取0.1; W 为EV每公里耗电量(单位: $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{km}$); E 为EV电池的额定容量。

(5)期望荷电状态。EV用户的期望荷电状态 SOC_3 ,采用均匀分布进行抽样,其概率密度函数如式(5)所示:

$$f_{SOC_3}(x) \sim U(a, b) \quad (5)$$

其中, a, b 分别为 EV 用户期望荷电状态的下限和上限。

(6) 离网时间

$$f_e(x) \sim N(\mu_e, \sigma_e) \quad (6)$$

其中, μ_e, σ_e 分别为电动汽车离网时间的期望和标准差。

1.2 空调模型

空调作为最常见的柔性负荷, 能够将电能转换成热能或制冷进行短暂的存储。目前研究中, 常采用等值热力学 (Equivalent Thermal Parameter, ETP) 模型来描述温控负荷^[18]。

1.2.1 等效热模型

空调作为温控负荷的典型代表, 其热动力过程可用等效参数模型进行模拟。模型图^[19-20]如图1所示。

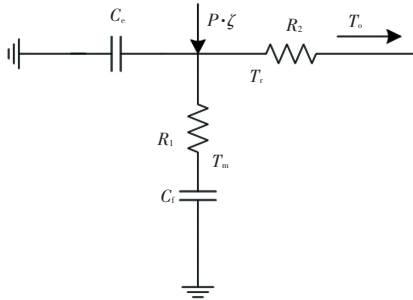


图1 热动力等效参数模型

Fig. 1 Thermodynamic equivalent parameter model

图中, $P \cdot \zeta$ 为空调机组的制冷/制热量; P 为空调机的制冷/制热功率 (单位: kW); ζ 为空调机组能耗比, 无量纲; C_e 为空气的比热容 (单位: J/°C); C_f 为建筑物围护结构的比热容 (单位: J/°C); T_o 为室外空气温度 (单位: °C); T_r 为室内空气温度 (单位: °C); T_m 为建筑物围护结构的温度 (单位: °C)。

上述模型简化后, 可以得到如式(7)所示的室内温度 T_r 计算公式:

$$\begin{cases} T_r^{k+1} = T_o^{k+1} - (T_o^{k+1} - T_r^k) e^{-\frac{\Delta t}{RC}}, \lambda = 0 \\ T_r^{k+1} = T_o^{k+1} - \zeta \cdot PR - (T_o^{k+1} - \zeta \cdot PR - T_r^k) e^{-\frac{\Delta t}{RC}} \\ \lambda = 1 \end{cases} \quad (7)$$

其中, T_r^{k+1} 为 $k+1$ 时刻的室内温度 (单位: °C); T_o^{k+1} 为 $k+1$ 时刻的室外温度 (单位: °C); T_r^k 为 k 时刻室内的温度 (单位: °C); R 为等效热阻 (单位: °C/W); C 为等效热容 (单位: J/°C); Δt 为时间间隔; λ 为空调启停状态变量, $\lambda = 0$ 为停止, $\lambda =$

1 为启动。

1.2.2 空调控制模型

文献[20]中采用 TSV 值作为衡量人体热舒适度的标准之一, 本文采用该方法建立室内温度变化控制模型。TSV 模型的表达如式(8)所示:

$$TSV = 0.208T_r - 5.276 \quad (8)$$

1.3 混合储能模型

混合储能 (Hybrid Energy Storage) 是由蓄电池和超级电容器组成的储能系统, 该系统可以发挥蓄电池和超级电容器两方面的优势。以下公式给出蓄电池的模型, 电容器模型同理。

(1) 荷电状态计算

蓄电池荷电状态计算方法如式(9)所示:

$$SOC_b^k = \begin{cases} SOC_b^{k-1} + \frac{P_{b,k-1} \frac{\Delta t}{60} \eta_b}{E_{bat}}, P_{b,k-1} > 0 \\ SOC_b^{k-1} + \frac{P_{b,k-1} \frac{\Delta t}{60}}{\eta_b E_{bat}}, P_{b,k-1} \leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

其中, SOC_b^k 为蓄电池在时段 k 的荷电状态; SOC_b^{k-1} 为蓄电池在时段 $k-1$ 的荷电状态; $P_{b,k-1}$ 为蓄电池在时段 $k-1$ 的功率, $P_{b,k-1} > 0$ 表示蓄电池充电; $P_{b,k-1} < 0$ 表示蓄电池放电; Δt 为计算时间间隔 (本文取 5min); η_b 为蓄电池的充放电效率 (本文取 0.9); E_{bat} 为蓄电池的额定容量。

(2) 荷电状态约束

$$SOC_b^{\min} \leq SOC_b^k \leq SOC_b^{\max} \quad (10)$$

其中, SOC_b^{\min} 为蓄电池的最低荷电状态, SOC_b^{\max} 为蓄电池的最高荷电状态。

(3) 功率约束

$$\begin{cases} -P_{bat} \leq P_{b,k} \leq P_{bat} \\ -P_{cap} \leq P_{c,k} \leq P_{cap} \end{cases} \quad (11)$$

其中, P_{bat} 为蓄电池的额定功率, P_{cap} 为电容器的额定功率。

(4) 储能循环约束

为了保证混合储能系统的循环利用, 必须使混合储能的荷电状态在一个控制周期结束时回到初始值。

$$\begin{cases} SOC_b(0) = SOC_b(24) \\ SOC_c(0) = SOC_c(24) \end{cases} \quad (12)$$

其中, $SOC_b(0)$ 为蓄电池初始荷电状态; $SOC_b(24)$ 为蓄电池终止荷电状态; $SOC_c(0)$ 为电容器初始荷电状态; $SOC_c(24)$ 为电容器终止荷电

状态。

(5) 储能初始荷电状态确定

$$SOC_b(0) = SOC_b^{\max} - \frac{\max(E_{b,acc,m})}{E_{bat}}, m = 1 \cdots K \quad (13)$$

其中, $SOC_b(0)$ 为蓄电池初始荷电状态; SOC_b^{\max} 为蓄电池的最高荷电状态; $\max(\cdot)$ 表示取变量的最大值; $E_{b,acc,m}$ 为蓄电池在时段 m 的累积容量。

(6) 累积容量计算方法

$$\begin{cases} E_{b,acc,m} = \sum_{k=1}^m P_{b,k} \frac{\Delta t}{60} \eta_b^{|P_{b,k}|}, m = 1 \cdots K \\ E_{c,acc,m} = \sum_{k=1}^m P_{c,k} \frac{\Delta t}{60} \eta_c^{|P_{c,k}|}, m = 1 \cdots K \end{cases} \quad (14)$$

其中, m 为控制时段; K 为整个控制周期的总时段数; η_b 为蓄电池的充放电效率; η_c 为电容器的充放电效率; $\frac{P_{b,k}}{|P_{b,k}|}$ 和 $\frac{P_{c,k}}{|P_{c,k}|}$ 的值为 1 或 -1, 当 $P_{b,k}$ 或 $P_{c,k} > 0$ 时, 值为 1, 表示充电效率, 反之表示放电效率。

1.4 氢储能模型

氢储能系统由电解槽、储氢罐以及燃料电池装置组成。在此, 本文采用文献[21-23]建立的氢储能模型对上述装置进行建模。

(1) 电解槽模型

$$Q_E = \eta_E \times P_E \times \xi \times \frac{\Delta t}{60} \quad (15)$$

其中, Q_E 表示制氢量(单位: Nm^3); η_E 为电解槽的效率; P_E 为电解槽的输入功率(单位: kW); ξ 为消耗 $1 kW \cdot h$ 电能的制氢量(单位: $Nm^3/kW \cdot h$)。

(2) 储氢罐模型

$$Q_{Tank}(k) = Q_{Tank}(k-1) + Q_E(k-1) - \frac{P_{FC}(k)\mu\Delta t}{\eta_{FC}\eta_{Tank}60} \quad (16)$$

其中, $Q_{Tank}(k)$ 表示 k 时刻储氢罐的容量; $P_{FC}(k)$ 为燃料电池 k 时刻的输出功率; μ 为燃料电池生产 $1 kW \cdot h$ 电能所需氢气量; Δt 为时间间隔, 本文取 $5 min$; η_{FC} 为燃料电池的工作效率; η_{Tank} 为储氢罐的效率。

2 微电网广义储能双层配置模型

并网型风光储联合微电网由风光发电、不可控负荷、可控负荷(电动汽车、空调负荷)以及储能系统(混合储能、氢储能)构成。其中可控负荷和储能系统组成广义储能。如图 2 所示, 微电网通过联络线与大电网连接。图中实线表示功率流, 虚线表示信息流, 箭头表示功率流和信息流的方向。控制中心可以采集各个单元的功率以及荷电状态信息, 并对设备进行控制; 广义储能设备可以进行功率的双向流动。

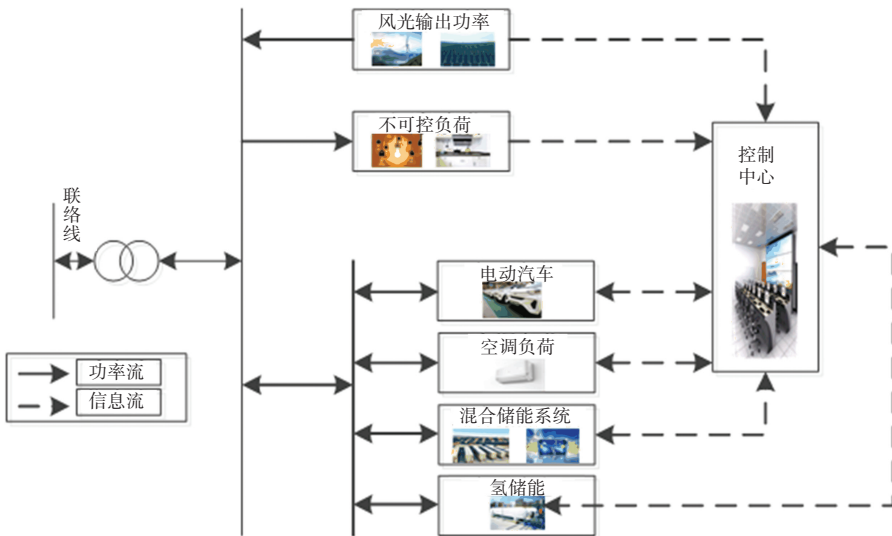


图 2 并网型风光储联合微电网结构图

Fig. 2 Micro-grid combined wind-solar and storage structure of grid-connected

2.1 基于惩罚费用最小的柔性负荷响应模型

由于微电网内部风光发电功率、负荷功率具有不确定性,当微电网用电高峰时,内部风光出力不足以满足负荷的需求,此时需要从大电网购电。如果微电网与大电网的传输功率超出联络线功率的约束,必然导致微电网内部失负荷。同理,风光高发时段,若微电网送入大电网的功率超出联络线限制,必然导致弃风弃光,造成能源浪费。为了消纳多余的风光功率同时减少微电网内的失负荷功率,本文发挥可控负荷的灵活性,通过需求侧响应减少弃风弃光以及失负荷。因此建立了惩罚费用最小的柔性负荷响应模型,最大限度消纳风光、减少失负荷。

2.1.1 目标函数

通过空调和电动汽车的灵活用电特性,使得微电网内部失负荷惩罚成本及弃风弃光惩罚成本最小。目标函数的表达如式(17)所示:

$$\min C_{\text{loss}} = \min \sum_{k=1}^K \left(C_{\text{punish}} P_{\text{loss},k} \frac{\Delta t}{60} + C'_{\text{punish}} P_{\text{cast},k} \frac{\Delta t}{60} \right) \quad (17)$$

其中, $k = 1 \cdots K$ 表示采样时段(本文以一天24h为一个计算周期,采样时间间隔 $\Delta t = 5\text{min}$); C_{loss} 为惩罚成本,包括失负荷惩罚成本和弃风弃光惩罚成本; C_{punish} 为单位容量($\text{kW} \cdot \text{h}$)的失负荷惩罚成本; $P_{\text{loss},k}$ 为 k 时段的失负荷功率(kW); C'_{punish} 为单位容量($\text{kW} \cdot \text{h}$)的弃风弃光惩罚成本; $P_{\text{cast},k}$ 为 k 时段的弃风弃光功率(kW)。

2.1.2 约束条件

(1) 功率平衡约束

$$P_w + P_{\text{pv}} = P_{\text{load}} + P_{\text{ev}} + P_{\text{ac}} + P_{\text{net}} + P_{\text{loss}} + P_{\text{cast}} + P_b + P_c + P_{\text{hs}} \quad (18)$$

其中, P_{load} 为不可控负荷功率; P_{ev} 为电动汽车功率,当 $P_{\text{ev}} > 0$ 时表示电动汽车吸收功率, $P_{\text{ev}} < 0$ 时表示电动汽车发出功率; P_{ac} 为空调的功率; P_{net} 为联络线的功率,当 $P_{\text{net}} > 0$ 时微电网向大电网售电, $P_{\text{net}} < 0$ 时微电网从大电网购电; P_{loss} 为失负荷功率; P_{cast} 为弃风弃光功率; P_b 为蓄电池功率; P_c 为电容器功率。由于第一阶段混合储能和氢储能不参与动作,故功率为0。

(2) 联络线功率约束

$$-P_{\text{net,max}} \leq P_{\text{net},k} \leq P_{\text{net,max}} \quad (19)$$

其中, $P_{\text{net},k}$ 为 k 时段联络线的功率, $P_{\text{net,max}}$ 为联络线的传输功率上限。

(3) 电动汽车充放电功率约束

$$P_{\text{ev},i,k} = L_{\text{ch},i}^k \times P_{\text{ev},n,i} + L_{\text{dis},i}^k \times (-P_{\text{ev},n,i}) \quad (20)$$

$$\begin{cases} L_{\text{ch},i}^k = \begin{cases} 1, & \text{charge} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \\ L_{\text{dis},i}^k = \begin{cases} 1, & \text{discharge} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \\ L_{\text{ch},i}^k + L_{\text{dis},i}^k < 2 \end{cases} \quad (21)$$

其中, $P_{\text{ev},i,k}$ 为电动汽车 i 在 k 时刻的充放电功率; $P_{\text{ev},n,i}$ 为电动汽车 i 的额定功率; $L_{\text{ch},i}^k$ 为电动汽车充电标志, $L_{\text{ch},i}^k = 1$ 表示充电, $L_{\text{ch},i}^k = 0$ 表示其它状态(放电、停止状态或未接入); $L_{\text{dis},i}^k$ 为电动汽车放电标志, $L_{\text{dis},i}^k = 1$ 表示放电, $L_{\text{dis},i}^k = 0$ 表示其它状态(充电、停止状态或未接入)。

电动汽车的运行分为3种状态:充电 ($L_{\text{ch},i}^k, L_{\text{dis},i}^k$) = (1,0)、放电 ($L_{\text{ch},i}^k, L_{\text{dis},i}^k$) = (0,1)、其它状态 ($L_{\text{ch},i}^k, L_{\text{dis},i}^k$) = (0,0)。

(4) 电动汽车可调度判断

$$M_{i,k} = \begin{cases} 1, & T_{\text{ch}} < T_{\text{stop}} \\ 0, & T_{\text{ch}} \geq T_{\text{stop}} \end{cases} \quad (22)$$

其中, $M_{i,k}$ 为电动汽车 i 在 k 时段的可调度标志; T_{ch} 为由当前容量充至期望容量所需要的时间; T_{stop} 为电动汽车剩余停留时间。

(5) 电动汽车充放电转移约束

$$\begin{cases} 1, & P_{\text{net},k} < 0 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (23)$$

其中, $P_{\text{net},k} < 0$ 表示微电网从大电网吸收功率。当峰、平时段微电网从大电网吸收功率且有电动汽车充电时,为了减少电动汽车的充电费用,将电动汽车转移至谷时段充电。

(6) 室内温度约束

$$T_{\text{min}} \leq T_{r,i}^k \leq T_{\text{max}} \quad (24)$$

其中, $T_{r,i}^k$ 为空调 i 在时刻 k 的温度值; T_{min} 为室内温度下限; T_{max} 为室内温度上限。

2.1.3 电动汽车及空调响应策略

(1) 电动汽车响应策略。若 EV 所属时段为峰、平时段,且微电网从大电网买电,电动汽车停止充电并转移至谷时段充电。若 EV 停止充电后微电网依旧存在失负荷功率,则电动汽车参与放电。放电过程中, EV 当前电池容量与最低容量之差大的优先放电,且放电过程电池荷电状态不小于其荷电状态下限;充电过程中,当前荷电状态与期望荷电状态之差大的优先充电。

(2) 空调响应策略。若该时段存在弃风弃光功率,则将空调用户的温度下限调低,增加空调制冷时

间,消纳弃风弃光功率;若该时段存在失负荷功率,则将空调用户温度上限调高,减少空调负荷的用电时间;其它时段空调用户正常工作。

2.2 微电网净现值最优的广义储能配置模型

微电网内部柔性负荷的响应可以在一定程度上发挥储能的功能,对减少失负荷功率以及促进微电网内部弃风弃光的消纳产生积极的作用。但是,由于受到柔性负荷数量以及用户行为习惯的限制,单纯依靠微电网内部柔性负荷响应,不能完全解决微电网内部失负荷及弃风弃光的问题。因此需要配置混合储能设备以及氢储能设备,对弃风弃光进行消纳,同时为微电网提供功率支撑,以消除失负荷功率。

2.2.1 目标函数

$$\max NPV = \max \sum_{y=1}^{R_{\text{proj}}} \frac{C_{\text{in}}(y) - C_{\text{out}}(y)}{(1 + \varepsilon)^y} \quad (25)$$

其中, NPV 为净现值; $C_{\text{in}}(y)$ 为微电网第 y 年的售电收益; $C_{\text{out}}(y)$ 为微电网第 y 年的支出费用; R_{proj} 为规划年限(本文设定为 10 年); ε 为贴现率(本文设定为 5%)。

(1) 售电收益

$$C_{\text{in}} = 365(C_{\text{load}} + C_{\text{ev}} + C_{\text{ac}} + C_{\text{net}} + C'_{\text{loss}} + C_{\text{penalize}} + C_{\text{gas}}) \quad (26)$$

其中, C_{load} 为微电网向不可控负荷售电的收益; C_{ev} 为微电网向电动汽车售电的收益; C_{ac} 为微电网向空调负荷售电的收益; C_{net} 为微电网与大电网交互的收益; C'_{loss} 为微电网内失负荷而减少的收益; C_{penalize} 为微电网内失负荷而产生的惩罚成本,该成本用于补贴被微电网切除负荷的用户; C_{gas} 为微电网氢储能系统售氢的收益。

(2) 储能成本

$$C_{\text{out}} = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 + C_7 \quad (27)$$

其中, C_1, C_2, C_3 分别为混合储能的配置成本、置换成本、运行成本; C_4, C_5, C_6 为氢储能的配置成本、置换成本、运行维护成本; C_7 为储能响应后失负荷惩罚成本。其各个成本的计算表达式如式(28)~式(34)所示:

$$C_1 = (\gamma_1 P_{\text{cap}} + \gamma_2 E_{\text{cap}} + \gamma_3 P_{\text{bat}} + \gamma_4 E_{\text{bat}}) T_1 \quad (28)$$

其中, γ_1, γ_2 为电容器的功率成本与容量成本; γ_3, γ_4 为蓄电池的功率成本和容量成本; T_1 为初始投资成本决策变量,第一年为 1,其它年份为 0。

$$C_2 = (\gamma_1 P_{\text{bat}} + \gamma_2 E_{\text{bat}}) T_2 \quad (29)$$

其中, T_2 为混合储能置换成本决策变量。

$$C_3 = \lambda_1 E_{\text{cap}} + \lambda_2 E_{\text{bat}} \quad (30)$$

其中, λ_1, λ_2 分别为蓄电池与电容器单位容量的运行维护成本。

$$C_4 = x_1 C_{\text{el}} + x_2 C_{\text{ht}} \quad (31)$$

其中, x_1 为电解槽个数; C_{el} 为单个电解槽价格; x_2 为储氢罐个数; C_{ht} 为单个储氢罐价格。

$$C_5 = C_{\text{R,el}} + C_{\text{R,ht}} = C_{\text{el}} x_1 \mathbf{M}_1 + C_{\text{ht}} x_2 \mathbf{M}_2 \quad (32)$$

其中, $C_{\text{R,el}}, C_{\text{R,ht}}$ 分别为电解槽与储氢罐的置换成本, $\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2$ 分别为电解槽与储氢罐的置换决策矩阵。

$$C_6 = C_{\text{OM,el}} x_1 + C_{\text{OM,ht}} x_2 \quad (33)$$

其中, $C_{\text{OM,el}}, C_{\text{OM,ht}}$ 分别为电解槽与储氢罐的运行维护成本。

2.2.2 约束条件

约束条件包括储能电池约束,式(10)~式(12),功率平衡约束,式(18),以及电解槽和储氢罐功率约束,式(34)~式(35):

$$0 \leq P_{\text{E},k} \leq x_1 P_{\text{el}} \quad (34)$$

其中, $P_{\text{E},k}$ 为电解槽在 k 时刻的输入功率; x_1 为微电网配置的电解槽个数; P_{el} 为单个电解槽额定功率。

$$0 \leq Q_{\text{Tank},k} \leq x_2 Q_{\text{ht}} \quad (35)$$

其中, $Q_{\text{Tank},k}$ 为 k 时刻储氢罐的容量; x_2 为微电网配置的储氢罐个数; Q_{ht} 为单个储氢罐的额定容量。

2.2.3 混合储能功率分配方法

由粒子群生成的混合储能最大功率值,确定了需要储能响应的功率曲线 $X(k)$,采用小波包变换对 $X(k)$ 进行 N 层变换,得到 2^N 个分量,根据蓄电池和电容器的响应特性去顶频率分界点 f 。小于分界点的分量记为 $X_1(k)$,其余分量记为 $X_h(k)$,由蓄电池响应低频分量,电容器响应高频分量。其表达方式如式(36)所示:

$$\begin{cases} X(k) = X_1(k) + X_h(k) \\ P_b(k) = X_1(k) \\ P_c(k) = X_h(k) \end{cases} \quad (36)$$

其中, $X(k)$ 为需要混合储能响应的功率,即 $P_h(k), X_1(k), X_h(k)$ 分别为小波包分解得到蓄电池和电容器需要响应的功率。

2.2.4 计算流程如图3所示。

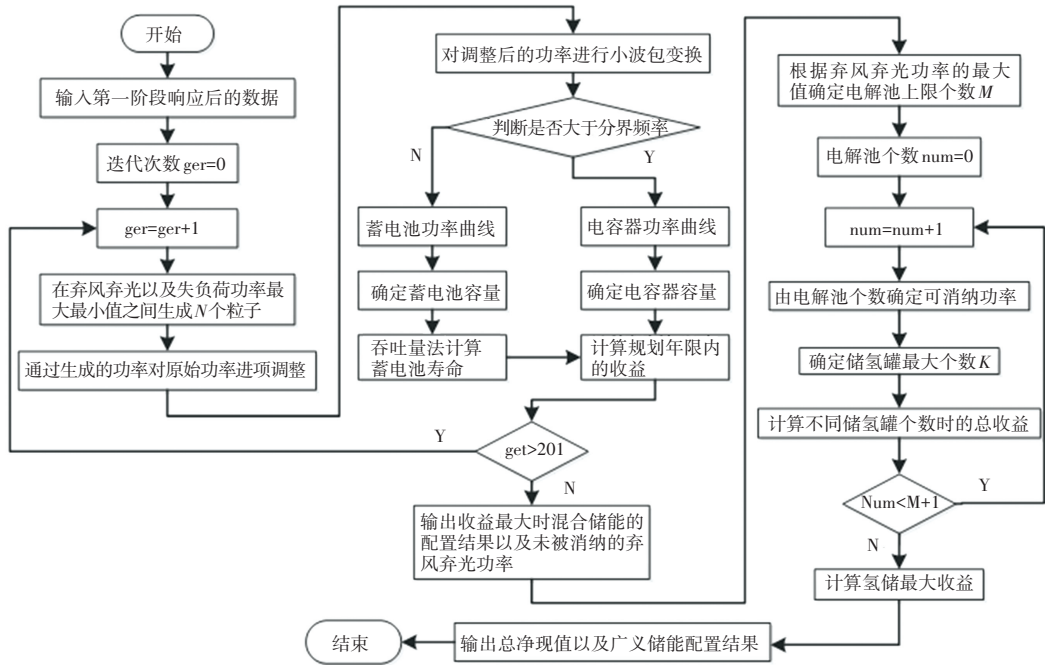


图3 第二阶段计算流程图

Fig. 3 The flow chart of phase two calculation

3 算例分析

3.1 算例场景设置

为了对本文提及的广义储能配置策略进行仿真验证,对仿真场景进行如下设置:

(1) 微电网内部电动汽车数量为400台,电动汽车的充放电效率为90%,电动汽车的容量为 $32 \text{ kW} \cdot \text{h}$; $\mu_t = 17.5$, $\sigma_t = 3.7$; $\mu_s = 3.7$, $\sigma_s = 0.92$; $\mu_{\text{SOC}_1} = 0.4$, $\sigma_{\text{SOC}_1} = 0.1$; $\mu_e = 8$, $\sigma_e = 2$;

(2) 电动汽车用户停驶后,即时与充电桩进行连接充电;

(3) 微电网内部的充电桩数量足够多。充电桩的充电方式为慢充,充放电功率为7 kW;

(4) 广义储能配置基于分时电价背景,电价分为峰、平、谷3个时段,其具体价格见表1;

表1 分时电价时段及价格

Tab. 1 Time-of-use period and price

价格	峰时段	平时段	谷时段
	[8:00-12:00] [16:00-20:00]	[12:00-16:00] [20:00-24:00]	[24:00-8:00]
购电价格/ (元/(kW·h))	1.2	0.8	0.4
售电价格/ (元/(kW·h))	0.8	0.6	0.3

注:购电是指用户的购电价格以及微电网向大电网的购电价格;售电是指微电网向大电网的售电价格。电动汽车向微电网放电的价格为购电价格。

(5) 假设电动汽车用户都愿意参与微电网内部的充放电响应,并通过分时电价的差额减少充电费用,则微电网内部不在另行支付电动汽车用户参与响应的费用;

(6) 微电网内部的空调个数为200台,空调的额定功率为1 500 W;

(7) 联络线功率约束为1 500 kW。

为了对本文所提的广义储能策略进行验证,并更好的说明所提策略的有效性,分别对比了3种不同策略下储能的配置结果以及规划期内的净现值。

策略一:微电网内电动汽车负荷和空调负荷无响应,电动汽车负荷以及空调负荷属于不可控负荷;

策略二:空调负荷不参与微电网的控制,电动汽车仅进行充电转移,不对微电网进行放电;

策略三:空调负荷以及电动汽车负荷参与微电网响应,电动汽车可以通过充电桩向微电网放电。

3.2 仿真结果对比分析

3.2.1 不同策略惩罚成本对比

微电网内负荷曲线如图4所示。

由图4可以看出,微电网内部电动汽车负荷与不可控负荷用电时间重合,导致微电网内部负荷峰值增加。空调负荷主要集中在中午时段,本文场景设置为夏季,空调工作在制冷模式。文中第一阶段的目标是通过微电网内部电动汽车的响应和空调负

荷的响应减少惩罚成本, 即减少微电网内部的失负荷功率以及弃风弃光功率, 3 种策略下第一阶段的弃风弃光惩罚成本见表 2。

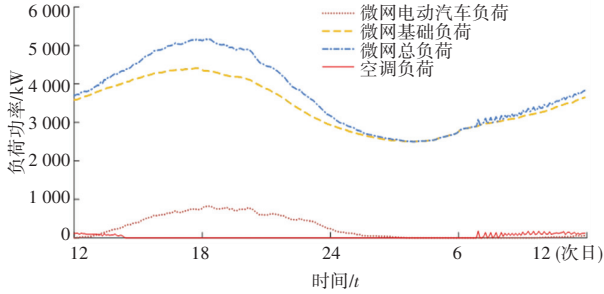


图 4 微电网内负荷曲线图

Fig. 4 Load curve in micro-grid

表 2 第一阶段 3 种策略惩罚成本

Tab. 2 Penalty costs of three strategies in phase one

策略	惩罚成本(万元)
策略一	2.219 92
策略二	0.623 04
策略三	0.217 88

计算惩罚成本时, 取失负荷惩罚成本为 5 元/kW·h, 弃风弃光的惩罚成本为峰、平、谷电价的均值 0.8 元/kW·h。由表 2 可知, 采用策略一(空调负荷与电动汽车负荷都不参与响应)时, 微电网内部的惩罚成本为 2.219 92 万元; 采用策略二(空调负荷参与响应、电动汽车只进行充电转移)时, 微电网内部的惩罚成本为 0.623 04 万元, 相比于策略一降低了 71.93%; 采用策略三(空调负荷与电动汽车都参与响应且电动汽车参与放电)时, 微电网内部的失负荷惩罚成本为 0.217 88 万元, 相比于策略二降低了 65.03%。由此可见, 微电网内部负荷的响应可以减少失负荷功率, 同时可以消纳多余的风光功率。

3.2.2 不同策略响应后的不平衡功率

3 种策略下微电网内部的弃风弃光功率与失负荷功率曲线如图 5 所示。由图 5 可知: 采用策略一时, 微电网内部失负荷功率最大值大概为 1 300 kW, 弃风弃光功率的最大值超过 1 000 kW; 采用策略二时, 微电网内部失负荷功率最大值减少到 500 kW 左右, 弃风弃光功率最大值也相应下降到 1 000 kW 以下; 而采用策略三负荷响应后, 微电网内部的失负荷功率则减为 0 kW。通过 3 种策略的功率曲线对比发现, 微电网内部的负荷参与响应时, 可以降低弃风弃光功率以及失负荷功率的峰值。微电网内部负荷的响应, 发挥了传统储能的充放电功能, 因此作为广义储能的一部分, 可以与传统储能配合, 使微电网

更加安全稳定地运行。

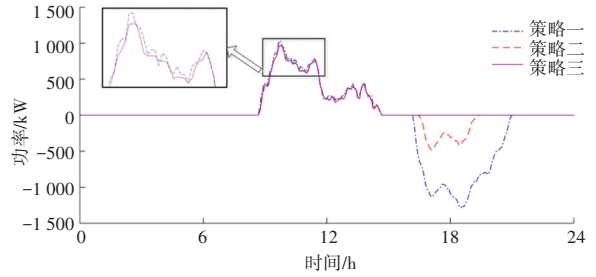


图 5 3 种策略下弃风弃光与失负荷功率曲线

Fig. 5 Power curve of wind-solar abandonment energy and lost load under three strategies

3.2.3 需求侧资源响应结果分析

某电动汽车用户的荷电状态变化曲线如图 6 所示。

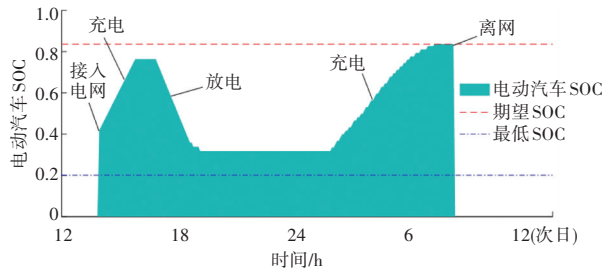


图 6 某电动汽车荷电状态变化曲线

Fig. 6 The charge state curve of an electric vehicle

由图 6 可知, 电动汽车在峰时段放电, 在谷时段充电, 通过电价差来减少充电费用。在峰时段放电获得收益的同时可以减少失负荷功率, 谷时段以低价充电的同时, 可以消纳一部分弃风弃光功率。电动汽车在放电的过程中以最低荷电状态为下限, 最低荷电状态可以保证电动汽车的正常出行需求。在电动汽车次日离网时, 其荷电状态已经达到了电动汽车的期望荷电状态。表 3 为 3 种策略下电动汽车用户一天内的充电费用。

表 3 3 种策略下电动汽车的充电费用

Tab. 3 Charging costs of electric vehicles under three strategies

策略	总费用/元
策略一	6 114.7
策略二	2 843.4
策略三	1 966.8

由表 3 可知, 策略一中微电网内电动汽车用户不参与响应时, 一天内电动汽车用户总的充电费用为 6 114.7 元; 策略二中电动汽车用户转移充电时间, 一天内的充电成本降至 2 843.4 元, 相比于策略一下降了 53.5%; 策略三中电动汽车在峰时段放电, 一天内的充电成本下降至 1 966.8 元, 相比于策略二

下降了30.8%。由此可见,策略三在减少微电网失负荷功率的同时可以增加电动汽车用户的收益。

空调负荷响应前后,某用户室内温度的变化曲线如图7所示。

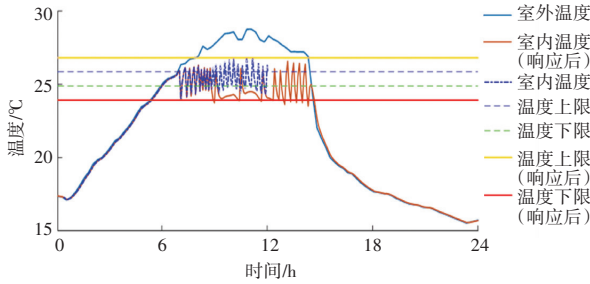


图7 空调响应前后某用户室内温度变化曲线

Fig. 7 Indoor temperature curve of a customer before and after response of air conditioner

由图7可知,当微电网存在弃风弃光时,处于制冷模式的空调降低温度下限,以消纳多余的风光功率,减少弃风弃光。响应后用户的室内温度保持在合理范围内。响应前后空调的负荷曲线如图8所示。

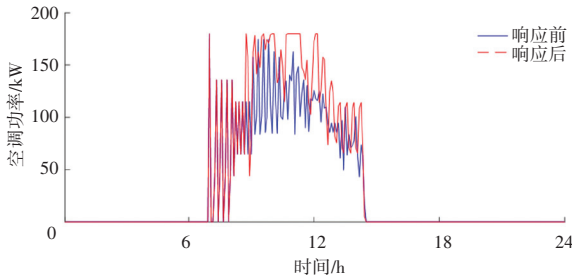


图8 响应前后空调负荷的功率曲线

Fig. 8 Power curve of air conditioner load before and after response

由图8可知,响应后的功率明显高于响应前的功率。空调负荷的响应消纳了部分弃风弃光,在一定程度上减少了弃风弃光功率。

3.2.4 广义储能配置结果分析

需求侧响应在一定程度上减少了微电网内的不平衡功率,但不能完全消除。因此第二阶段的广义储能配置以第一阶段微电网内柔性负荷响应后的弃风弃光功率以及失负荷功率为基础进行配置。其中策略三的幅频特性曲线如图9所示。文章以微电网内部净现值最大为目标,采用粒子群算法求解3种策略下净现值最大时的储能配置结果。3种策略得到广义储能配置的结果见表4。

由图9的幅频特性曲线可以看出,弃风弃光功率以及失负荷功率主要集中在 $0 \sim 0.8 \times 10^{-3}$ Hz之间,其余范围内的能量较少。结合蓄电池的响应特

性,取分界频率为 $f_d = 8.33 \times 10^{-3}$ 。

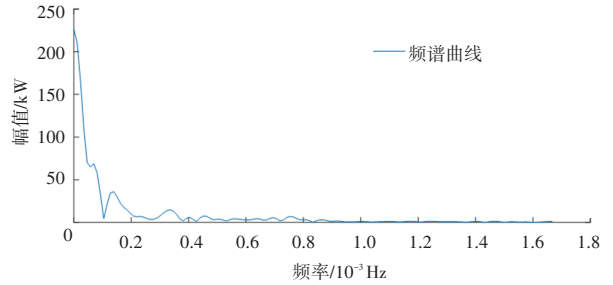


图9 策略三响应后弃风弃光以及失负荷功率曲线

Fig. 9 Wind-solar abandonment and lost load power curve after response of strategy three

表4 3种策略下储能配置结果与净现值

Tab. 4 The results of energy storage allocation and NPV under three strategies

策略	策略一	策略二	策略三
P_{bat} /kW	1 243.26	485.53	480.53
P_{cap} /kW	66.03	50.37	26.67
E_{bat} /kW · h	5 343.36	2 472.59	2 391.54
E_{cap} /kW · h	5.69	4.20	2.70
x_1 /台	0	6	5
x_2 /台	0	1	1
NPV /万元	19 795.63	20 007.01	20 055.89

由表4可知,策略三的净现值最大,较策略二的净现值多48.88万元;策略三广义储能的配置容量均小于策略二,且策略三中电动汽车用户的充电成本相较于策略二下降了30.8%。

从整个微电网系统来看,广义储能的收益更大。策略一中,弃风弃光功率被完全消纳用于减少失负荷功率,因此不需要配置电解池和储氢罐,所以配置台数为0。需求侧资源作为重要的储能资源可以减少微电网对传统储能的依赖,增加微电网收益的同时减少自身的用电费用。

4 结束语

本文建立了基于电动汽车以及空调负荷响应的并网型微电网广义储能容量配置模型,分两阶段优化广义储能的功率和容量。第一阶段充分发挥柔性负荷的灵活充放电特性,最大程度减少微电网内部的弃风弃光功率以及失负荷功率,以惩罚成本最小为目标,并充分考虑了用户的舒适度和出行特性。第二阶段在第一阶段柔性负荷响应的基础上,配置混合储能和氢储能,得到了净现值最优的配置方案。需求侧资源的响应可以减少传统储能的配置数量,发挥需求侧资源的储能特性,有利于微电网的经

济性。

参考文献

- [1] 吴倩,王洋,王琳媛,等. 计及波动平抑与经济性的风光储系统中混合储能容量优化配置[J]. 电测与仪表, 2022,59(4):112-119.
- [2] 姚天亮,郑昕,吴兴全,等. 平抑风光互补系统短时复合功率波动的储能容量配置研究[J]. 电网与清洁能源,2016,32(10):120-127.
- [3] S. Xuewei et al. Research on Energy Storage Configuration Method Based on Wind and Solar Volatility [C]//2020 10th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES), 2020: 464-468.
- [4] 程龙,张方华. 用于混合储能系统平抑功率波动的小波变换方法[J]. 电力自动化设备,2021,41(3):100-104,128.
- [5] 李涛,许苑,陈健等. 计及全寿命成本和收益的微电网储能优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(3):46-51, 58.
- [6] 张悦,刘文泽. 考虑功率波动及储能寿命的微电网储能容量优化配置[J]. 电测与仪表, 2021, 58(10):59-66.
- [7] 赵瑞锋,王海柱,郭文鑫,等. 含风电接入的区域综合能源系统电/热储能配置[J]. 南方电网技术,2022,16(4):68-77.
- [8] 刘书琪,顾洁,赖柏希,等. 考虑负荷裕度的区域综合能源系统储能双层优化配置[J]. 电力自动化设备,2022,42(7):150-158.
- [9] 彭政,崔雪,王恒,等. 考虑储能和需求侧响应的微网光伏消纳能力研究[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(22):63-69.
- [10] 王怡岚,童亦斌,黄梅,等. 基于需求侧响应的空调负荷虚拟储能模型研究[J]. 电网技术,2017,41(2):394-401.
- [11] YUAN X, YANG F, XU J, et al. Configuration Optimization of Wind-Solar-Storage System considering Demand Response [C]// 2018 5th International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), 2018:1-6.
- [12] 茆美琴,刘云晖,张榴晨,等. 含高渗透率可再生能源的配电网广义储能优化配置[J]. 电力系统自动化,2019,43(8):77-85.
- [13] 程林,齐宁,田立亭. 考虑运行控制策略的广义储能资源与分布式电源联合规划[J]. 电力系统自动化,2019,43(10):27-35, 43.
- [14] SHARMA S, JAIN P, BHAKAR R, et al. Time of Use Price based Vehicle to Grid Scheduling of Electric Vehicle Aggregator for Improved Market Operations [C]// 2018 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), 2018:1114-1119.
- [15] 李蓓,赵松,谢志佳,等. 电动汽车虚拟储能可用容量建模[J]. 山东大学学报(工学版),2020,50(6):101-111.
- [16] 刘春阳,王秀丽,刘世民,等. 计及蓄电池使用寿命的微电网经济调度模型[J]. 电力自动化设备,2015,35(10):29-36.
- [17] 蓝达成,崔双喜,樊小朝,等. 计及蓄电池寿命的微电网优化调度模型[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版),2021,46(2):72-81.
- [18] 王东,曾沅,穆云飞,等. 基于温控负荷控制技术的新能源优化利用方法[J]. 电网技术,2015,39(12):3457-3462.
- [19] 杨杰. 基于需求侧响应的温控负荷与电动汽车联合优化运行研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2020.
- [20] 韩露杰. 基于空调负荷集群的需求侧响应控制策略研究[D]. 杭州:杭州电子科技大学,2019.
- [21] 许传博,赵云灏,王晓晨,等. 碳中和愿景下考虑电氢耦合的风光场站氢储能优化配置[J]. 电力建设,2022,43(1):10-18.
- [22] 张长云,黄景光,李振兴,等. 极地环境含风氢储混合微电网容量优化配置[J]. 电力工程技术,2022,41(1):108-116.
- [23] 李彦哲,郭小嘉,董海鹰,等. 风/光/储微电网混合储能系统容量优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报,2020,32(6):123-128.
- [11] MOHAMMED M A, GANI M A, HAMED R I. Solving vehicle routing problem by using improved genetic algorithm for optimal solution[J]. Journal of Computational Science, 2017:255-262.

(上接第59页)

- [10] 王超,高扬,刘超,等. 基于回溯搜索优化算法求解带时间窗和同时送取货的车辆路径问题[J]. 计算机集成制造系统,2019,25(9):2237-2247.