

面向新能源接入的电网设备资源优化调度策略

李院霞¹, 梁栋¹, 杨晓茹¹, 陈建东¹, 苏宏伟²

(1. 国网甘肃省电力公司临夏供电公司, 甘肃 临夏 731199;

2. 湖北安源安全环保科技有限公司, 湖北 武汉 430040)

摘要: 随着传统能源数量的减少, 新能源逐渐被引入到电网设备中, 而这也给电网带来了一些问题。为了提升电网设备在面对不确定干扰时的处理能力, 提出一种基于需求响应资源的多目标资源优化配置模型, 并对其求解方法进行设计。为了让优化更加科学, 设计融合电转气技术和储能的双层优化模型。研究结果显示, 在方案3中, 负荷预测曲线的最大值为4 856 kW, 响应后负荷曲线的最大值为4 687 kW, 可见需求响应资源能够对电网负荷进行一定程度的降低, 为接入新能源的电网设备资源优化提供了方法上的指引。

关键词: 电网; 新能源; 优化调度; 灵活性; 优化配置模型; 粒子群优化算法

中图分类号: TP18; TM73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-7241(2025)09-0049-06

Optimal Dispatching Strategy of Power Grid Equipment Resources for New Energy Access

LI Yuanxia¹, LIANG Dong¹, YANG Xiaoru¹, CHEN Jiandong¹, SU Hongwei²

(1. State Grid Gansu Linxia Power Supply Company, Linxia 731199, China;

2. Hubei Anyuan Safety & Environmental Protection Technology Co., Ltd., Wuhan 430040, China)

Abstract: With the decline of traditional energy sources, new energy gradually introduces into power grid equipment, which also brings some problems to the power grid. In order to improve the processing ability of power grid equipment in the face of uncertain interference, a multi-objective resource optimization configuration model based on demand response resources is innovatively proposed, and its solution method is designed. In order to make the optimization more scientific, a double-layer optimization model integrating electric to gas technology and energy storage is designed. The research results show that in scheme 3, the maximum value of the load prediction curve is 4 856 kW, and the maximum value of the load curve after response is 4 687 kW. It can be seen that demand response resources can reduce the load of the power grid to a certain extent. The significance of the research is to provide methodological guidance for optimizing the resources of power grid equipment connected to new energy.

Keywords: power grid; new energy; optimal dispatch; flexibility; optimize the configuration model; particle swarm optimization algorithm

0 引言

随着地球环境的恶化和不可再生能源的减少, 新能源等可再生能源开始进入大众的视野, 其中最具代表性的便是风能^[1]。随着新能源的广泛装置, 其自身也面临着一些新的问题, 如备用剩余过多、装置备用的价格昂贵、灵活性资源配置和新能源的并网速度不匹配等^[2]。微电网能够对新能源进行有效利用, 并接入大量的新能源。然而, 微电网灵活性相关的研究也存在一定的不足, 如高排放、燃料成本高、投资成本高等^[3]。需求响应资源可以通过一定的手段来实现调峰调频, 也可以对电网的灵活性进行提升。电转气技术可以对新能源进行消纳利用, 有良好的应用未来^[4-5]。基于这些问题, 本文创新性地提

出了一种基于需求响应资源的多目标资源优化配置模型, 并采用优化后的粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 来完成求解。为了让优化更加科学, 又设计了融合电转气技术和储能的双层优化模型, 利用遗传算法和优化后 PSO 算法的融合来完成求解。本研究的创新点有两个, 第一个是在多目标资源优化配置模型中引入了需求响应资源, 第二个是结合了电转气技术和储能。本文旨在提升接入新能源电网设备在面对不确定干扰时的处理能力, 增强微电网的经济性和灵活性。

1 面向新能源接入的电网设备资源优化配置设计

1.1 多目标资源优化配置模型的构建及求解算法设计

随着电网中新能源规模的不断扩大, 电网的结构也

*基金项目: 甘肃省电力公司专项研究项目 (W23FZ2714022)

收稿日期: 2024-01-11

越来越繁杂。新能源作为可再生能源之一,其自身的随机性会增加电网的不确定性^[6-7]。微电网是当下能够对可再生能源进行有效使用的方式之一,因此研究从微电网入手来研究在新能源接入下的电网资源优化调度和配置。微电网主要包含两种类型,分别为并网型微电网和独立性微电网^[8]。基于需求响应的独立微电网结构如图1所示。

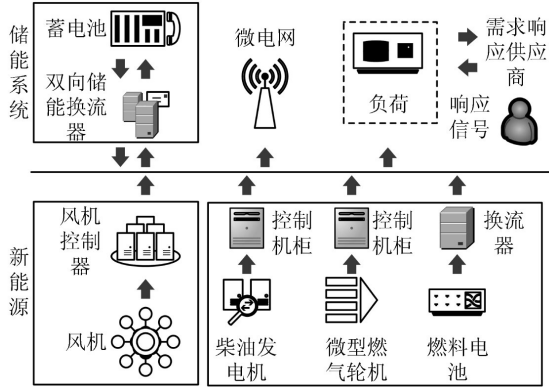


图1 基于需求响应的独立微电网结构

从图1可以看出,独立微电网主要涉及储能系统、微电网、负荷、需求响应供应商、新能源和可控分布式电源。其中,可控分布式电源涉及燃料电池、柴油发电机和微型燃气轮机等。储能装置可以完成调峰及吸收新能源,而储能模型如式(1)所示^[9]。

$$\begin{cases} SOC_{m,t}^{in} = (1 - \delta_{SB})SOC_{m,t-1} - \Phi \\ SOC_{m,t}^{out} = (1 - \delta_{SB})SOC_{m,t-1} - \Gamma \end{cases} \quad (1)$$

式中, Φ 取值为 $P_{SB,t}^m \Delta t \frac{\eta_g}{S_{SB}}$, Γ 取值为 $\frac{P_{SB,t}^m \Delta t}{S_{SB} \eta_c}$ 。SB为蓄电池,

$SOC_{m,t}$ 和 $SOC_{m,t}^{in}$ 分别代表SB的荷电状态和充电,充电时 $P_{SB,t}^m \leq 0$, δ_{SB} 表示SB的自放电率, t 表示时段, η_c 和 η_g 分别为SB的放充电效率, $SOC_{m,t}^{out}$ 和 S_{SB} 分别表示SB的放电和容量,放电时 $P_{SB,t}^m > 0$, m 为SB的序号, $P_{SB,t}^m$ 为SB在 t 时段的额定功率, $SOC_{m,t-1}$ 表示 $t-1$ 时段第 m 个SB的荷电状态。

由于需求响应调度成本使用的是阶梯补偿机制,可见需求响应资源的调度成本是相对较低的,因此研究将其引入到微电网的优化中。为了更好地对微电网的资源进行调节,研究对其运行对策进行了设计,确定了资源调度的优先级。目标函数分为成本型和指标型,其中成本目标函数如式(2)所示。

$$\min F_1 = C_T + C_{lcurt} + C_{oper} + C_{envi} + C_{res} \quad (2)$$

式中, F_1 代表成本目标函数, C_T 表示每一个发电机组的容量配置成本, C_{lcurt} 表示需求侧响应补偿费用, C_{oper} 表示不同发电机组的运行成本, C_{envi} 为环境污染成本, C_{res} 代表弃风惩罚费用。 C_T 、 C_{lcurt} 和 C_{oper} 的计算如式(3)所示。

$$\begin{cases} C_T = \frac{[C_{MD}Q_{MD} + C_{MT}Q_{MT} + C_{FC}Q_{FC} + C_{SB}Q_{SB}]\theta}{365} \\ C_{lcurt} = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T C_{lcurt,t} \\ C_{oper} = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T (K_{MD}P_{1,t} + K_{MT}P_{2,t} + K_{FC}P_{3,t})\Delta t \end{cases} \quad (3)$$

式中, θ 取值为 $\frac{r(1+r)^{Na}}{(1+r)^{Na} - 1}$, r 代表真实贷款利率, Na 代表

不同分布式电源机组的寿命, MT 为微型燃气轮机, FC 为燃料电池, MD 为柴油发电机, C_{MD} 、 C_{MT} 、 C_{FC} 和 C_{SB} 分别为 MD 、 MT 、 FC 和 SB 的单位容量配置成本, S 为总场景数。 Q_{MD} 、 Q_{MT} 、 Q_{FC} 和 Q_{SB} 分别为 MD 、 MT 、 FC 和 SB 的配置总容量。 K_{MD} 、 K_{MT} 和 K_{FC} 分别代表 MD 、 MT 和 FC 的单位发电量的燃料成本。 $\frac{1}{S}$ 代表各场景的概率。 $P_{i,t}$ 为在 t 时刻的实际出力, i 的取值为 $[1, 3]$, $C_{lcurt,t}$ 为负荷补偿费用。 C_{envi} 和 C_{res} 的计算如式(4)所示。

$$\begin{cases} C_{envi} = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T \sum (P_{1,t}V_{MD,h} + P_{2,t}V_{MT,h} + P_{3,t}V_{FC,h})\Delta t \\ C_{res} = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T V_W A_{W,t} \Delta t \end{cases} \quad (4)$$

式中, V_W 代表单位弃风电量的惩罚费用, $V_{MD,h}$ 、 $V_{MT,h}$ 和 $V_{FC,h}$ 分别表示 MD 、 MT 和 FC 的单位发电量所造成污染气体的惩罚成本, $h \in \{NO_2, CO_2, CO, SO_2\}$ 。 $A_{W,t}$ 表示系统在 t 时段的弃风功率, 灵活性指标目标函数如式(5)所示。

$$\begin{cases} \max F_2 = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \frac{S_{\Omega, \tau_s}^u + S_{L, \tau_s}^u + S_{store, \tau_s}^u}{\max(P_{Fr,t} - 1)} \\ \max F_3 = \frac{\sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T (P_{W,t} - A_{W,t})}{\sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T P_{W,t}} \end{cases} \quad (5)$$

式中, F_2 和 F_3 分别为上调和下调灵活性裕度指标。 τ_s 表示负荷高峰出现的时段。 $P_{W,t}$ 为风电出力预测值之差, $P_{Fr,t}$ 为灵活性需求容量, S_{store, τ_s}^u 表示储能装置供给的上调灵活性裕度, S_{Ω, τ_s}^u 代表发电侧各电源机组供给的上调灵活性裕度, S_{L, τ_s}^u 为负荷供给的上调灵活性裕度。

针对多目标模型的求解,选用了优化后的粒子群算法(improved PSO, IPSO)。研究对粒子群算法的速度迭代方程进行了优化,并采用小生境技术来对最佳粒子进行挑选。此外,在最后求解时,也使用了模糊熵权法和模糊隶属度函数,并对多目标问题进行转变拆解。利用IPSO算法求解多目标问题的主要步骤包含在小生境技术的支持下获取最优个体、构建决策矩阵和优属度矩阵、求得熵权和模糊熵权、构建多目标模糊隶属度函数和求解

总体最优。

1.2 双层资源优化配置模型的构建及求解算法设计

可再生能源发电技术(power to gas, P2G)即电转气技术,其相关的设备可以和微型燃气轮机进行联合^[10]。为了让优化更加科学,研究采用了双层优化模型,分别解决配置和运行问题。研究设计了融合P2G和储能的模型,并通过该模型来对可再生能源和新能源进行消纳。基于P2G技术的独立微电网系统结构如图2所示。

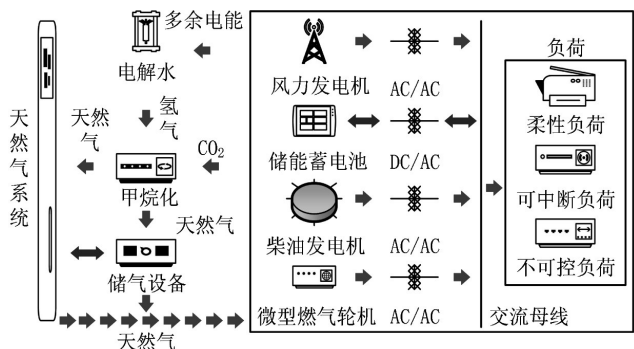


图2 基于P2G技术的独立微电网系统结构

在图2中,基于P2G技术的独立微电网系统涉及天然气系统、独立型微电网、电解水、甲烷化和储气设备。电解水和甲烷化是P2G操作的重要组成部分,而P2G设备在系统中是柔性负荷。P2G设备的配置和运行模型如式(6)所示^[11]。

$$C_{P2G} = C_{P2G}^T S_{P2G} \frac{(1+r_1)^{N_1}}{365 \left[(1+r_1)^{N_1} - 1 \right]} + \sum_{t=1}^T \left(\alpha C_{CO_2} P_{P2G,t}^{in} \eta_{P2G} - C_{gas} \frac{P_{P2G,t}^{in} \eta_{P2G}}{L_{gas}} \right) \quad (6)$$

式中, T 表示调度周期, C_{P2G} 代表P2G设备的日投资运行成本, $P_{P2G,t}^{in}$ 代表P2G设备在 t 时刻的输入功率, C_{P2G}^T 表示P2G设备和储气设备的配置成本。 α 为单位天然气生成的二氧化碳系数。 N_1 表示电转气设备的使用寿命, L_{gas} 、 η_{P2G} 和 S_{P2G} 分别为天然气低热值、P2G设备的效率和储气设备的容量, r_1 为电转气设备的年折旧率, C_{CO_2} 和 C_{gas} 分别为二氧化碳和天然气的价格。双层规划即外层优化和内层优化,其中外层优化模型如式(7)所示。

$$\min F_1 = C_T + C_{oper} + C_{lcurt} \quad (7)$$

此时 C_T 的计算如式(8)所示。

$$\left\{ \begin{aligned} C_T &= \frac{[C_{MD} Q_{MD} + C_{MT} Q_{MT} + C_{SB} Q_{SB}] \Theta}{365} + \\ &\left(C_{P2G}^T S_{P2G} + C_{P2G}^{T'} S_{P2G}' \right) \frac{(1+r_1)^{N_1}}{365 \left[(1+r_1)^{N_1} - 1 \right]} \end{aligned} \right. \quad (8)$$

式中, C_{P2G}^T 和 S_{P2G}' 分别为储气设备的单位容量成本和单位

容量。此时 C_{oper} 和 C_{lcurt} 的计算如式(9)所示。

$$\left\{ \begin{aligned} C_{oper} &= v \\ C_{lcurt} &= \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T C_{lcurt,t} \end{aligned} \right. \quad (9)$$

此时 F_2 和 F_3 的计算如式(10)所示。

$$\left\{ \begin{aligned} \max F_2 &= \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \frac{S_{\Omega, \tau_s}^u + S_{L, \tau_s}^u + S_{store, \tau_s}^u}{\max(P_{Fr,t} - 1)} \\ \max F_3 &= \frac{\sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T (P_{W,t} - A_{W,t})}{\sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T P_{W,t}} \end{aligned} \right. \quad (10)$$

外层优化模型的约束条件如式(11)所示。

$$\left\{ \begin{aligned} Q_{SB}^{\min} &\leq Q_{SB} \leq Q_{SB}^{\max} \\ S_{P2G}^{\min} &\leq S_{P2G} \leq S_{P2G}^{\max} \\ 0 &\leq P_{LF,t} \leq \alpha P_{LF,t} \end{aligned} \right. \quad (11)$$

内层优化模型如式(12)所示。

$$\min f_1 = C_o + C_{envi} + C_{res} + C_{P2G} \quad (12)$$

式中, C_o 代表MD和MT的燃料成本以及P2G设备的运行成本, C_{P2G} 为P2G设备的维护成本。此时, C_o 和 C_{envi} 的计算如式(13)所示。

$$\left\{ \begin{aligned} C_o &= \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T (K_{MD} P_{1,t} + K_{MT} P_{2,t} + \Xi - \Upsilon) \Delta t \\ C_{envi} &= \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T \sum (P_{1,t} V_{MD,h} + P_{2,t} V_{MT,h}) \Delta t \end{aligned} \right. \quad (13)$$

式中, Υ 取值为 $C_{gas} \frac{P_{P2G,t}^{in} \eta_{P2G}}{L_{gas}}$, $h \in \{NO_2, CO_2, CO, SO_2\}$, Ξ

的取值为 $\alpha C_{CO_2} P_{P2G,t}^{in} \eta_{P2G}$ 。此时, C_{res} 和 C_{P2G} 的计算如式(14)所示。

$$\left\{ \begin{aligned} C_{res} &= \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \sum_{t=1}^T V_W A_{W,t} \Delta t \\ C_{P2G} &= C_{P2G}^m P_{P2G,t}^{in} \end{aligned} \right. \quad (14)$$

式中, C_{P2G}^m 代表P2G设备的单位功率维护成本。内层优化模型的一部分约束条件如式(15)所示。

$$\left\{ \begin{aligned} P_{P2G}^{\min} &\leq P_{P2G,t}^{in} \leq P_{P2G}^{\max} \\ SOC_{P2G,t}^{\min} &\leq SOC_{P2G,t}^s \leq SOC_{P2G,t}^{\max} \end{aligned} \right. \quad (15)$$

式中, SOC_{P2G}^{\min} 和 SOC_{P2G}^{\max} 分别为储气设备荷电状态的最小和最大。内存优化模型另一部分的约束条件如式(16)所示。

$$\left\{ \begin{aligned} P_{L,t} - P_{LF,t} &= \sum_{i \in \pi} P_{i,t} + P_{W,t} + \sum_{m=1}^M P_{SB,m}^m, P_{n,t} \geq 0 \\ P_{L,t} - P_{LF,t} &= P_{P2G,t}^{in} - \sum_{m=1}^M P_{SB,m}^m + P_{W,t} - A_{W,t}, P_{n,t} < 0 \end{aligned} \right. \quad (16)$$

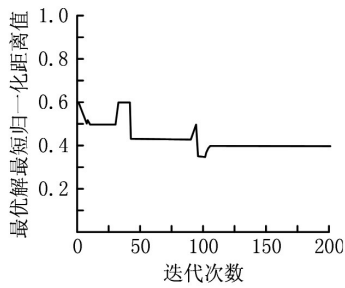
式中, P_{P2G}^{\min} 和 P_{P2G}^{\max} 分别为P2G设备的最小和最大输入功率, $P_{n,t}$ 表示净负荷。针对双层优化模型的求解,结合IPSO算

法和遗传算法(genetic algorithm, GA),并将其用在外层优化模型上。对于内层优化模型,采用CPLEX软件来进行求解^[12]。

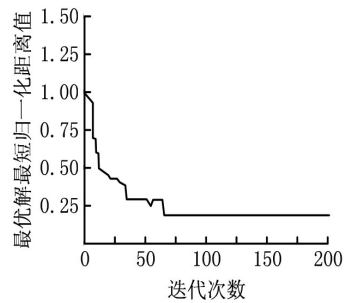
2 面向新能源接入的电网设备资源优化配置结果分析

2.1 多目标资源优化配置结果分析

为了对不同因素在系统灵活性上的影响进行分析,研究对这些因素进行了优化配置。此外,研究的调度周期被设置为1 d,且每过2个小时进行一次数据采集。针对IPSO算法有效性的验证,研究选用了PSO算法来进行对比实验。IPSO算法和PSO算法的收敛速度对比如图3所示。



(a) PSO算法的收敛变化



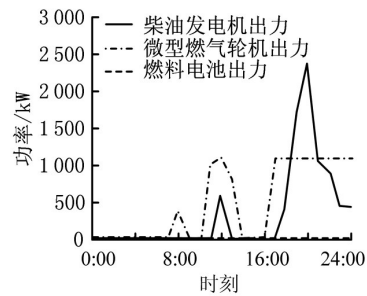
(b) IPSO算法的收敛变化

图3 IPSO算法和PSO算法的收敛速度对比

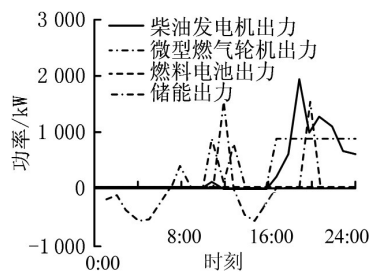
通过图3(a)可以看出,PSO算法在迭代了近112次后才趋于平缓,且最小值为0.42。由图3(b)可知,IPSO算法在迭代了近67次后才趋于平稳,且最小值为0.21。由此可知,相较于PSO算法,IPSO算法有更快的收敛速度和更好的结果,而这也验证了IPSO算法的有效性。为了对微电网系统中的灵活性资源进行对比,研究对微电网使用的灵活性资源配置进行了设置。方案1是只采用微型燃气轮机、燃料电池和柴油发电机,方案2是在方案1的基础上增加了蓄电池,方案3是在方案2的基础上增加了需求响应资源。不同方案的出力对比如图4所示。

由图4(a)可知,在方案1中,柴油发电机出力的最大值为2 500 kW,出现在晚间8点。微型燃气轮机出力的最大值为1 080 kW,出现在中午12点,以及从下午5点一直

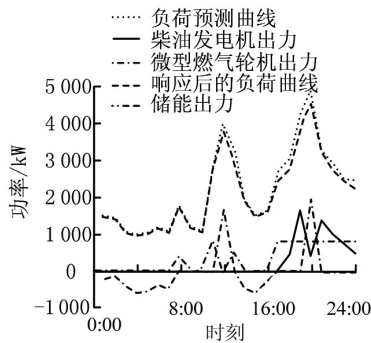
持续到晚间12点。燃料电池出力在一天中的取值皆为0 kW。通过图4(b)可以看出,在方案2中,柴油发电机出力的最大值为2 000 kW,出现在晚间7点。微型燃气轮机出力的最大值为800 kW,出现在上午11点,以及从下午5点一直持续到晚间12点。燃料电池出力在1 d中的取值也皆为0 kW。储能出力的最大值为1 500 kW,最小值为-508 kW。通过图4(c)可以得知,在方案3中,柴油发电机出力的最大值为1 500 kW,出现在晚间7点。微型燃气轮机出力的最大值为810 kW,出现在中午11点,以及从下午5点一直持续到晚间12点。储能出力的最大值为1 989 kW,最小值为-515 kW。负荷预测曲线的最大值为4 856 kW,最小值为998 kW。响应后负荷曲线的最大值为4 687 kW,最小值为998 kW。由此可知,需求响应资源能够对电网负荷进行一定程度的降低。



(a) 方案1发电机组的最优出力



(b) 方案2发电机组和储能最优出力



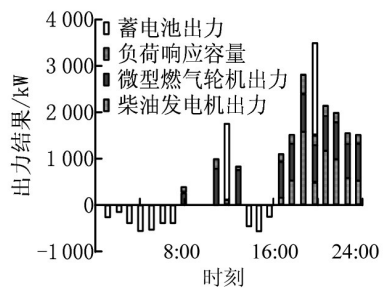
(c) 方案3发电机组、储能最优出力和需求响应曲线

图4 不同方案的出力对比

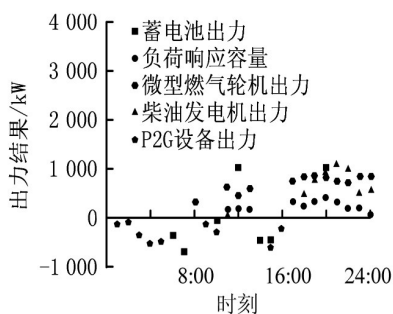
2.2 双层资源优化配置结果分析

为了验证融合P2G和储能联合规划双层优化模型的性能,研究对其进行了仿真分析,并对其相应的运行参数

进行了设置。其中,安装容量的最大值为2 100 kWh,功率最大值为110 kW。GA-IPSO算法也进行了将近200次的迭代。为了对P2G在灵活性资源上的影响进行分析,研究也设置了3种方案。方案1是涉及柴油发电机、微型燃气轮机、蓄电池和需求响应资源的单层优化,方案2是涉及柴油发电机、微型燃气轮机、蓄电池和需求响应资源的双层优化,方案3是在方案2上添加了P2G设备和储气罐,涉及P2G和储能的双层规划。不同方案不同类别的灵活性资源出力对比如图5所示。



(a) 方案2各类灵活性资源出力



(b) 方案3各类灵活性资源出力

图5 不同方案不同类别的灵活性资源出力对比

由图5(a)可以看出,在方案2中,蓄电池出力的最大值为1 992 kW,最小值为-510 kW。微型燃气轮机出力的最大值为850 kW,最小值为251 kW。柴油发电机出力的最大值为1 761 kW,最小值为127 kW。负荷响应容量的最大值为501 kW,最小值为89 kW。通过5(b)可以得知,在方案3中,蓄电池出力的最大值为1 002 kW,最小值为-510 kW。微型燃气轮机出力的最大值为752 kW,最小值为389 kW。柴油发电机出力的最大值为1 765 kW,最小值为94 kW。负荷响应容量的最大值为492 kW,最小值为101 kW。P2G设备出力的最大值为-113 kW,最小值为-511 kW。由此可知,P2G设备联合储能可以在一定程度上减小蓄电池的使用容量,而储能和需求响应可以在一定程度上减小电源机组的配置成本。不同方案下的储能荷电状态对比如图6所示。

由图6可知,方案1的储能荷电的最大值为0.9,对应时间是早上7点到早上9点。最小值为0.1,对应的时间为晚上8点到晚上12点。方案2的储能荷电的最大值为

0.9,对应的时间为早上10点到12点,以及下午的3点到晚上7点。最小值为0.1,对应的时间为凌晨1点到上午5点。由此可知,P2G联合储能共同出力可以对风电实现消纳和运用。

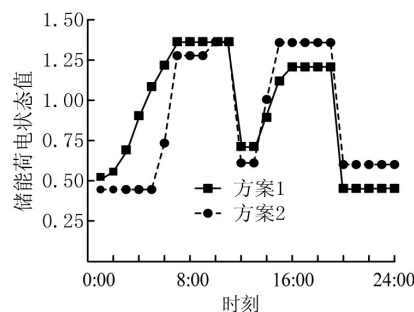


图6 不同方案下的储能荷电状态对比

3 结束语

为了提升电网设备在面对不确定干扰时的处理能力,研究创新性地提出了一种基于需求响应资源的多目标资源优化配置模型。为了让优化更加科学,研究又设计了融合电转气技术和储能的双层优化模型。研究结果显示,PSO算法在迭代了将近112次后才趋于平缓,且最小值为0.42。IPSO算法在迭代了将近67次后才趋于平稳,且最小值为0.21。由此可知,IPSO算法性能更好。在方案3中,负荷预测曲线的最大值为4 856 kW,响应后负荷曲线的最大值为4 687 kW。由此可知,需求响应资源能够对电网负荷进行一定程度的降低。在方案2中,负荷响应容量的最大值为501 kW,最小值为89 kW。在方案3中,负荷响应容量的最大值为492 kW,最小值为101 kW。P2G设备出力的最大值为-113 kW,最小值为-511 kW。由此可知,P2G设备联合储能可以在一定程度上减小蓄电池的使用容量,而储能和需求响应可以在一定程度上减小电源机组的配置成本。然而,研究也存在一定的不足,如需求响应在现阶段还存在一定的不确定性,而这也是后续研究可以完善的地方。

参考文献:

[1] KEYNIA F, MEMARZADEH G. A new financial loss/gain wind power forecasting method based on deep machine learning algorithm by using energy storage system[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2022, 16(5): 851-868.
[2] 张旺, 吴雪, 徐佳琪, 等. 含新能源风电接入的配电网电能质量研究[J]. 微型电脑应用, 2023, 39(3): 91-95.
[3] 梁宏涛, 王莹, 刘红菊, 等. 基于注意力机制的CNN-BiGRU短期光伏发电功率预测[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(6): 259-265.
[4] 陈丽光, 何绍洋, 钟永城, 等. 粒子群算法下考虑停电成本

(下转第78页)