

# 计及电动汽车的微电网储能单元容量优化\*

余岳, 粟梅, 孙尧, 韩华

(中南大学信息科学与工程学院 长沙 410083)

**摘要:** 微电网和电动汽车(EV)各具优点,微电网中接入EV将成为一种新的EV入网模式。微电网系统中,由于可再生能源发电出力的随机性与不可控性,需要使用蓄电池作为储能装置,保证系统稳定运行。对于不同的能源配置系统,需要不同容量的蓄电池与之匹配。电动汽车接入微电网后,在一定条件下能作为一种储能装置补充微电网原有储能单元,有可能减少微电网储能单元所需的容量,从而减小微电网投入成本,提高微电网的经济性。从微电网的经济调度出发,以电动汽车参与微电网运行调度为背景,建立了一种计及电动汽车的微电网储能蓄电池容量的优化模型。针对建立的模型,通过2种算例和2种不同的EV接入模式,采用改进混合整数规划求解出微电网的最佳储能单元容量。

**关键词:** 微电网; 电动汽车; 储能单元; 容量优化

中图分类号: TM715 TH86 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 480.40

## Capacity optimization of energy storage unit in microgrid considering electric vehicle

Yu Yue, Su Mei, Sun Yao, Han Hua

(School of Information Science & Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Micro-grid and electric vehicle (EV) have the advantage for each of them. Micro-grid accessing EV will become a new network mode for EV to access the grid. In micro-grid system, due to the randomness and uncontrollability of the renewable energy generation output, storage batteries are needed as the energy storage device to ensure the stability of the system. Different energy source configuration systems need storage batteries with different capacity to match with. Under certain conditions, when EV is accessed into micro-grid the energy storage device in EV can be added to supplement the original storage unit in the micro-grid; it is possible to reduce the required capacity of the energy storage unit in the micro-grid, thereby reduce the investment cost of the micro-grid, and improve the economy of the micro-grid. Starting from the economic dispatch of the micro-grid and considering that EV is involved in the micro-grid operation, a capacity optimization model of the micro-grid energy storage battery is established. Based on the established model, with two different EV accessing modes and 2 example scenarios, the improved mixed integer programming method is adopted to solve the optimal capacity of the energy storage units in the micro-grid.

**Keywords:** micro-grid; electric vehicle (EV); energy storage unit; capacity optimization

## 1 引言

为了充分利用各地丰富的清洁和可再生能源,向用户提供“低碳电力”,实现我国“节能减排”的目标,将分布式发电、供电系统以微电网<sup>[1]</sup>的形式接入到大电网运行<sup>[2-3]</sup>,或者独立运行<sup>[4]</sup>,是一种发挥分布式发电、供电非常有效的方式<sup>[5]</sup>。

近年,为了减少污染气体的排放和对石油资源的依赖,电动汽车(electric vehicle, EV)的使用受到广泛关注。EV是以电池为动力<sup>[6]</sup>,能降低汽车尾气的排放,提高能源效率,是解决能源和环境问题的有效手段。基于两者的优点,微电网中接入EV有可能成为一种缓解当前能源需求与环境保护的有效模式<sup>[7]</sup>。

在微电网中,分布式电源与传统电源具有很大的差别,其主要特点在于诸如风、光等可再生能源输出功率的

收稿日期: 2013-12 Received Date: 2013-12

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61174125)资助项目

不确定性与难以调控性。为了确保系统的安全稳定运行,储能单元系统(ESS)成为微电网系统的重要组成部分<sup>[8]</sup>。

ESS的容量优化配置是微电网优化配置的一个研究重点。研究人员已经对微电网ESS容量优化配置的问题做出了诸多相关研究。但是,EV接入微电网后,由于EV自身具有储能装置,EV接入时,相当于微电网增加了额外的ESS。虽然,充电完成后的EV,本质上最终是从微电网吸取功率,增加系统总的负载,但是,如果EV内部储能装置在接入微电网后,能参与微电网优化调度,那么在一定条件下EV也能充当微电网ESS<sup>[9]</sup>,成为微电网的优化调度对象,进而补充微电网原有ESS,也有可能减少原有微电网ESS的容量,从而节约ESS的投入成本。因此,在EV接入微电网后,微电网ESS的容量优化配置成为一个新的研究内容。

文献[10-11]考虑包含太阳能与风能两种输出完全随机的电源的条件下电池容量优化的数学模型;文献[12]中,研究基于客户的使用时间(TOU)率的ESS容量优化问题;文献[13]将储能单元作为优化变量,并计算首次投入成本与日平均运行成本,折合至目标函数中,进行求解;文献[14]则采用一种混合整数规划算法,从工程实际的角度快速地求取储能单元容量最优值,但是上述文献未考虑接入EV后ESS的优化;EV接入微电网后的优化中,文献[15]对以电动汽车换电站和电池储能电站作为储能单元的微电网分别进行建模和讨论,结果表明,电动汽车作为储能装置,通过协调优化,可以降低微电网的储能装置投入,使微电网更具经济性,但并没有分析微电网ESS容量的配置问题;文献[16]是在分布式发电系统中接入EV后,建立3个目标优化函数和EV的模型,对储能单元容量优化配置在3种不同EV接入模式下进行研究,但是文献只建立了离网运行模型,未对EV接入后的并网运行条件下ESS的优化进行研究。

本文以含有光伏、风力和微型燃气轮机发电的并网和离网运行微电网接入EV为研究对象,建立了一种接入EV的并网和离网运行微电网ESS容量的优化模型,通过分析EV是否参与系统调度2种情况,并采用改进混合整数规划算法求解。通过求解建立的模型,对比相关研究成果,证明EV参与优化调度能够减少ESS的投入,并确定了ESS的最小容量。

## 2 系统储能单元优化配置模型

### 2.1 光伏发电与风力发电出力数学模型

光伏出力模型参考文献[17]。根据天气预测获得日照下电流变化的温度系数、太阳辐射和光伏电池温度参考值、光伏阵列倾斜面上的总太阳辐射、光电池温度,然后计算出光伏出发电输出功率 $P_{pv}$ 。风速满足两参数WeiBull分布<sup>[18]</sup>。根据风速的概率密度函数得出风速 $v$ ,然后计算风力

发电系统输出功率 $P_w$ <sup>[19]</sup>。

### 2.2 储能单元电池模型

为了简化分析,本文中假设电池在整个充放电过程中,电池两端电压基本维持不变<sup>[20]</sup>。电池的工作状态分为充电和放电2种状态,电池放电时满足:

$$SOC_{\text{batt}}(t+1) = SOC_{\text{batt}}(t) - \Delta t \frac{P_{\text{batt}}^{\text{d}}}{\eta_{\text{d}}}, \forall t \quad (1)$$

电池充电时满足:

$$SOC_{\text{batt}}(t+1) = SOC_{\text{batt}}(t) + \Delta t P_{\text{batt}}^{\text{c}} \eta_{\text{c}}, \forall t \quad (2)$$

式中: $SOC_{\text{batt}}(t)$ 为 $t$ 时段的储能状态; $P_{\text{batt}}^{\text{c}}$ 和 $P_{\text{batt}}^{\text{d}}$ 分别为 $t$ 时段电池的充、放电功率, $\eta_{\text{c}}$ 和 $\eta_{\text{d}}$ 分别为 $t$ 时段充放电的效率。

储能单元的成本包括首次投入成本和年度维护成本。实际工程中,储能单元由蓄电池组构成,蓄电池组又由单个电池基本单元构成,因此,储能单元的首次投入成本 $C_{\text{ef}}$ 包含电池组的购买成本和安装成本,单位为“元/千瓦时”。用 $l$ 表示电池的使用寿命, $r$ 表示金融年利率,那么储能单元的年化成本 $C_{\text{ev}}$ 系数可以表示为:

$$C_{\text{ev}} = [r(1+r)^l / ((1+r)^l - 1)] C_{\text{ef}} \quad (3)$$

储能单元的年度维护成本系数用 $C_m$ 表示。容量为 $E_{\text{ss}}$ 的电池组储能单元,折合至每天的运行总成本表示为:

$$TC = (C_{\text{ev}} \cdot E_{\text{ss}} + C_m \cdot E_{\text{ss}}) / 365 \quad (4)$$

### 2.3 EV模型

本文假设接入微电网的EV都可以调度,而且EV都以充满电的状态离开微电网。行驶一天后重新接入电网,再充电时的初始状态为:

$$SOC_{\text{ev}} = (1 - l_{\text{d}}/L_r) \times 100\% \quad (5)$$

式中: $l_{\text{d}}$ 为电动汽车在充满电的状态下一天行驶的实际路程, $L_r$ 为电动汽车在充满电的状态下可行驶的最大路程。每天行驶路程 $l_{\text{d}}$ 近似满足对数正态分布:

$$f(l) = \frac{1}{l\sigma_l \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln l - \mu_l)^2}{2\sigma_l^2}\right) \quad (6)$$

EV的工作状态分为充电和放电2种状态<sup>[21]</sup>,EV放电时满足:

$$SOC_{\text{ev}}(t+1) = SOC_{\text{ev}}(t) - \Delta t P_{\text{ev}}^{\text{d}} / \eta_{\text{d}}, \forall t \quad (7)$$

电池充电时满足:

$$SOC_{\text{ev}}(t+1) = SOC_{\text{ev}}(t) + \Delta t P_{\text{ev}}^{\text{c}} \eta_{\text{c}}, \forall t \quad (8)$$

式中: $SOC_{\text{ev}}(t)$ 为 $t$ 时段的电池储能状态, $P_{\text{ev}}^{\text{c}}$ 和 $P_{\text{ev}}^{\text{d}}$ 分别为 $t$ 时段电池的充放电功率, $\eta_{\text{c}}$ 和 $\eta_{\text{d}}$ 分别为 $t$ 时段充放电的效率, $t$ 为时段长度。

### 2.4 微电网运行优化目标函数

微电网经济运行的目标为微型燃气轮机燃料费用以及从公网取电费用最小<sup>[22]</sup>。目标函数可表示为:

$$\min F = \sum_{t=0}^T [C_u P_u(t) + C_i P_i(t) - C_s P_s(t)] \Delta t + TC \quad (9)$$

式中:  $P_u(t)$ 、 $P_l(t)$ 、 $P_s(t)$  分别表示微电网在  $t$  时段从公网吸收的功率、微型燃气轮机供给的功率、微电网在  $t$  时段向公网输出的功率, 本文中  $\Delta t$  取值为 1 小时;  $C_u$ 、 $C_l$ 、 $C_s$  分别表示从公网取电成本系数、微型燃气轮机发电成本、向公网售电利润系数, 单位均为“元/千瓦时”。 $TC$  由式(4)求取, 表示储能单元折合至每天的运行总成本。

离网运行时微电网在从公网吸收的功率  $P_u$  和向公网输出的功率  $P_s$  为零。

### 2.5 约束条件

忽略损耗, 系统运行时满足如下约束条件。

#### 1) 功率平衡约束条件

$$P_u(t) + P_l(t) - P_s(t) + P_{batt}(t) + P_{ev}(t) = P_{load}(t) - P_{pv}(t) - P_{wt}(t), \forall t \quad (10)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_s(t) \\ 0 \leq P_u(t) \end{cases}, \forall t \quad (11)$$

式中:  $P_{pv}(t)$  是根据当天每小时的温度和光辐射量, 并结合文献[17]求得;  $P_{wt}(t)$  根据文献[18]和[19]求得。如同式(9), 离网运行时微电网在从公网吸收的功率  $P_u$  和向公网输出的功率  $P_s$  为零。

#### 2) 微型燃气轮机的出力约束

$$P_t^{min} \leq P_l(t) \leq P_t^{max}, \forall t \quad (12)$$

式中:  $P_t^{min}$ 、 $P_t^{max}$  为燃气轮机最小输出功率和最大输出功率。

#### 3) 储能电池单元约束

假设在整个充放电过程中, 电池两端电压基本维持不变, 电池的出力还需要满足下列不等式约束:

$$0 \leq P_{batt}^d(t) \leq P_{batt}^{dmax}, \forall t \quad (13)$$

$$0 \leq P_{batt}^c(t) \leq P_{batt}^{cmax}, \forall t \quad (14)$$

电池容量限制约束为:

$$SOC_{batt}^{min} \leq SOC_{batt}(t) \leq E_{SS}, \forall t \quad (15)$$

式中:  $P_{batt}^{dmax}$ 、 $P_{batt}^{cmax}$ 、 $SOC_{batt}^{min}$ 、 $E_{SS}$  分别为电池最大放电功率、电池最大充电电功率、电池最小电荷状态、电池最大电荷状态即电池容量。

#### 4) EV 约束条件

$$SOC_{ev}^{min} \leq SOC_{ev}(t) \leq SOC_{EV}^{max}, \forall t \quad (16)$$

$$0 \leq P_{ev}^d(t) \leq P_{ev}^{dmax}, \forall t \quad (17)$$

$$0 \leq P_{ev}^c(t) \leq P_{ev}^{cmax}, \forall t \quad (18)$$

式中:  $P_{ev}^{dmax}$ 、 $P_{ev}^{cmax}$ 、 $SOC_{ev}^{min}$ 、 $SOC_{EV}^{max}$  分别为 EV 电池最大放电功率、EV 电池最大充电电功率、EV 电池最小电荷状态、EV 电池最大电荷状态。

## 3 优化算法

### 3.1 改进混合整数规划算法

改进混合整数规划算法的流程如图 1 所示。算法详

细步骤如下:

- 1) 根据微网规模设置  $E_{SSmax}$ 。根据工程实际设定  $\Delta E_{SS}$  和其他参数。
- 2) 设置  $E_{SS}$  初始值。
- 3) 求解式(9)。
- 4) 如果当前  $E_{SS} < E_{SSmax}$ , 设置  $E_{SS} = E_{SS} + \Delta E_{SS}$ , 转至第 3 步继续求解。直到  $E_{SS} \geq E_{SSmax}$  完成求解。

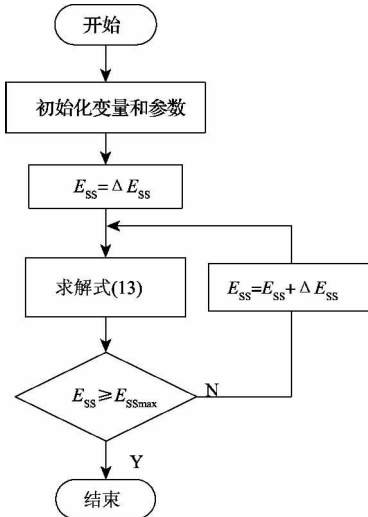


图 1 改进混合整数规划算法流程图

Fig. 1 Flowchart of the improved mixed integer programming algorithm

### 3.2 PSO 算法

求解式(9)时, 将  $E_{SS}$  作为一个变量处理, 系统为 6 变量的非线性优化问题。可以采用 PSO 算法进行求解。

## 4 算例分析

### 4.1 算例方案 1

以某地区的并网型微电网为例进行计算和分析。微电网包含光伏阵列、风电场、微型燃气轮机和蓄电池。光伏阵列最大输出功率 400 kW; 风机额定输出功率 200 kW; 微型燃气轮机最大输出功率总和 300 kW, 发电成本为 0.89 元/千瓦时。

储能单元采用铅酸蓄电池, 电池的成本为 500 元/千瓦时, 年维护费用为 30 元/千瓦时; 金融年利率  $r = 0.033$ , 电池寿命  $l$  设为 3 年。

假设微电网中接入 20 辆 EV, 车载锂电池总容量为  $EVSOC_{max} = 400 \text{ kW} \cdot \text{h}$ , 最大充放电功率 80 kW,  $EVSOC_{min} = 80 \text{ kW} \cdot \text{h}$ , 为了与 EV 一个充电周期配合, 系统起始优化时间从每日 13 时开始, 至次日 13 时结束。EV 接入微电网的初始 SOC 由式(5)求取。

除 EV 外, 该地区总的负载为 600 kW。24 h 内, 光伏

出力  $P_v$ 、风力发电出力  $P_w$ 、负载  $P_{load}$  预测值如图 2 所示, 电网电价如表 1 所示。根据算例当中微网规模, 设置  $E_{SS_{max}}$  为  $600 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ,  $\Delta E_{SS}$  设置为  $50 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

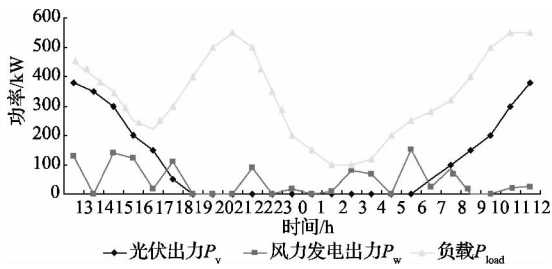


图 2 24 h 微源与负荷的预测功率(算例 1)

Fig. 2 DGs and the forecasted power of the load in 24 hours (example scenario 1)

表 1 24 h 不同时段电价

Table 1 The electricity price in different periods within 24 hours 元/千瓦时

时段	峰时段 8-11 时、 18-21 时	平时 6-8 时、 11-18 时、21-22 时	谷时段 22 时 - 次日 6 时
购电电价	1.143	0.685	0.333
售电电价	0.800	0.500	0.200

4.1.1 算例求解

1) EV 不参与调度

EV 不参与调度 相当于微电网中额外增加与 EV 充电功率相当的负载。假设 EV 每日 19 时开始接入微电网, 次日 7 时驶离, 接入微电网后, EV 开始均匀充电。此算例条件下, 式(10)中  $P_{ev}$  和式(9)中  $E_{SS}$  作为常量处理, 然后对式(1)~(18)所组成的优化模型进行优化, 采用如图 1 所示的混合整数规划算法求解, 储能单元优化配置结果如图 3 所示, 系统运行成本最优值为 3 523.77 元时的储能单元配置为  $300 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。图 4 为系统储能单元容量配置为  $300 \text{ kW} \cdot \text{h}$  时系统的优化调度结果。

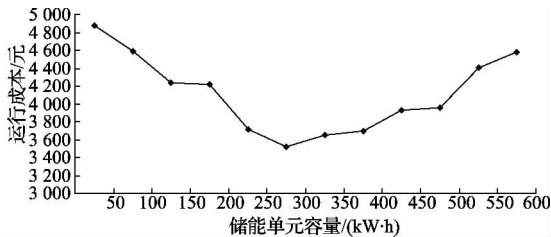


图 3 EV 不参与调度条件下混合整数规划求解结果(算例 1)

Fig. 3 The solved results of the improved mixed integer programming method under the scheduling condition without EV (example scenario 1)

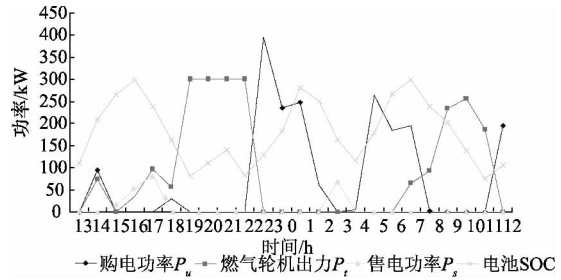


图 4 300 kW·h 电池容量配置系统调度结果 (EV 不参与调度)(算例 1)

Fig. 4 The scheduling results for the 300 kW·h energy storage system (under the scheduling condition without EV, example scenario 1)

将式(9)中  $E_{SS}$  作为优化变量, 对式(1)~(18)所组成的优化模型进行优化, 使用 PSO 算法求解。系统运行总成本最优结果为 3 473.28 元, 系统储能单元配置为  $267.6 \text{ kW} \cdot \text{h}$ , 系统优化调度结果如图 5 所示。

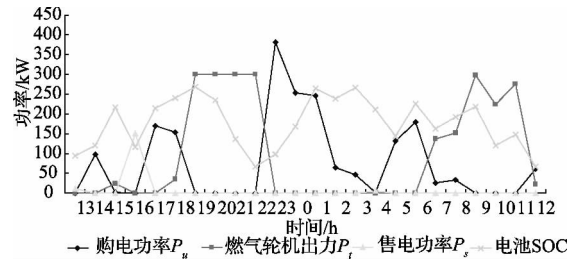


图 5 EV 不参与调度条件下 PSO 求解结果

Fig. 5 System optimization results with PSO under the scheduling condition without EV

2) EV 参与调度

EV 参与调度 在一定条件下相当于微电网中额外增加储能单元。采用如图 1 所示的混合整数规划算法求解, 储能单元优化配置结果如图 6 所示, 系统运行成本最优值为 3 378.73 元时的储能单元配置为  $200 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。图 7 为系统储能单元优化容量配置为  $200 \text{ kW} \cdot \text{h}$  时系统的优化调度结果。

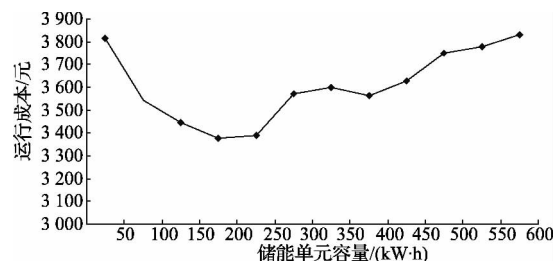


图 6 EV 参与调度条件下混合整数规划求解结果(算例 1)

Fig. 6 The solved results of the improved mixed integer programming method under the scheduling condition with EV (example scenario 1)

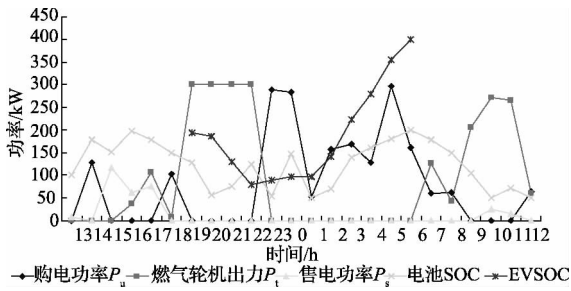


图 7 200 kW·h 电池容量配置系统调度结果 (EV 参与调度) (算例 1)

Fig. 7 The scheduling results for the 200 kW·h energy storage system (under the scheduling condition with EV, example scenario 1)

使用 PSO 算法求解。系统运行总成本最优结果为 3 375.9 元,系统储能单元配置为 243.9kW·h,系统优化调度结果如图 8 所示。

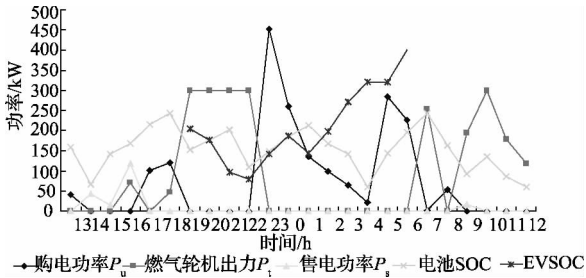


图 8 EV 参与调度条件下 PSO 算法优化结果

Fig. 8 System optimization results with PSO under the scheduling condition with EV

4.1.2 算例结果分析

对比 2 种方法优化,由表 2 分析可知:1) EV 不参与调度,以负荷的形式接入微电网,系统中负荷增大,则运行费用增大;2) 可调度 EV 作为辅助储能单元向负荷供电,则减少电池储能单元容量的需求,从而减小系统综合成本;3) 改进混合整数规划算法的优化结果相对于 PSO 算法不是全局最优解。但是实际工程当中储能电池一般由若干个小的固定容量电池基本单元组成,例如 10 kW 一个单元或是 50 kW 一个单元,改进混合整数规划算法在对储能单元优化配置场合具有工程选型实际意义。

表 2 算例 1 结果对比

Table 2 Result comparison for different methods (example scenario 1)

EV	优化方法	储能单元容量配置	
		kW·h	系统运行成本/元
不参与调度	改进混合整数规划	300.0	3 523.77
	PSO 算法	267.6	3 473.28
参与调度	混合整数规划	200.0	3 378.73
	PSO 算法	243.9	3 375.90

4.2 算例方案 2

参照文献 [16] 的离网微电网算例参数,光伏阵列最大输出功率 80 kW; 风机额定输出功率 1 200kW; 微型燃气轮机最大输出功率总和 60 kW,发电成本为 0.89 元/千瓦时。

储能单元电池的成本为 546 元/千瓦时,年维护费用为 30 元/千瓦时; 金融年利率  $r=0.033$ , 电池寿命  $l$  设为 3 年。

假设微电网中接入 40 辆 EV,车载锂电池总容量为  $EVSOC_{max} = 800 \text{ kW}\cdot\text{h}$ ,单台 EV 最大充放电功率 3.6 kW,  $EVSOC_{min} = 160 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。

除 EV 外,该地区总的负载为 800 kW。24 h 内,光伏出力  $P_v$ 、风力发电出力  $P_w$ 、负载  $P_{load}$  预测值如图 9 所示。根据算例当中微网规模,设置  $E_{SS,max}$  为 600 kW·h,  $\Delta E_{SS}$  设置为 50 kW·h。

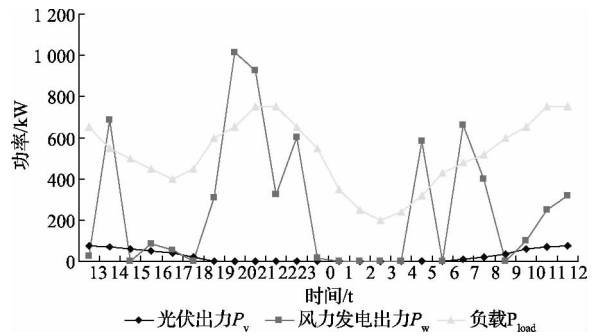


图 9 24h 微源与负荷的预测功率(算例 2)

Fig. 9 DGs and the forecasted power of the load in 24 h (example scenario 2)

4.2.1 算例求解

1) EV 不参与调度

采用如图 1 所示的改进混合整数规划算法求解,储能单元优化配置结果如图 10 所示,系统运行成本最优值为 6 862.142 元时的储能单元配置为 400 kW·h。图 11 为系统储能单元容量配置为 400 kW·h 时系统的优化调度结果。

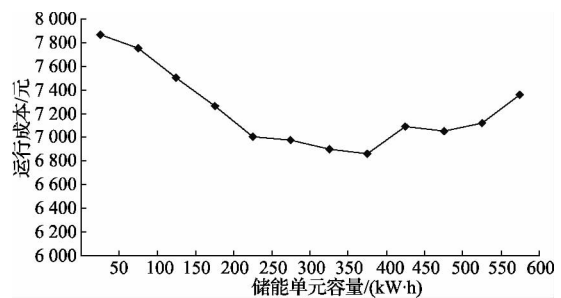


图 10 EV 不参与调度条件下混合整数规划求解结果(算例 2)

Fig. 10 The solved results of the improved mixed integer programming method under the scheduling condition without EV (example scenario 2)

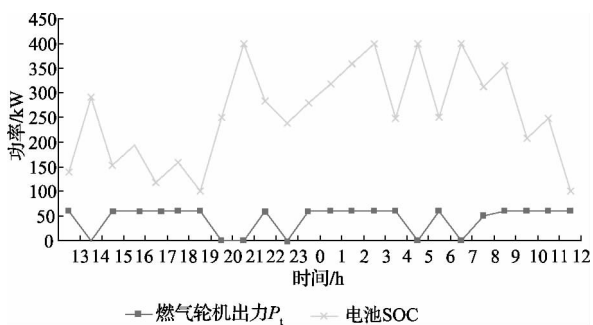


图 11 400 kW·h 电池容量配置系统调度结果 (EV 不参与调度) (算例 2)

Fig. 11 The scheduling results for the 400 kW·h energy storage system (under the scheduling condition without EV, example scenario 2)

2) EV 参与调度

EV 参与调度 在一定条件下相当于微电网中额外增加储能单元。采用如图 1 所示的改进混合整数规划算法求解,储能单元优化配置结果如图 12 所示,系统运行成本最优值为 6 402. 554 元时的储能单元配置为 300 kW·h。图 13 为系统储能单元优化容量配置为 300kW·h 时系统的优化调度结果。

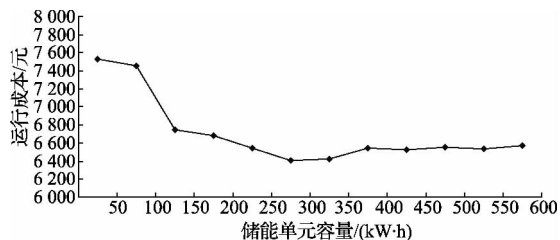


图 12 EV 参与调度条件下混合整数规划求解结果(算例 2)

Fig. 12 The solved results of the improved mixed integer programming method under the scheduling condition with EV (example scenario 2)

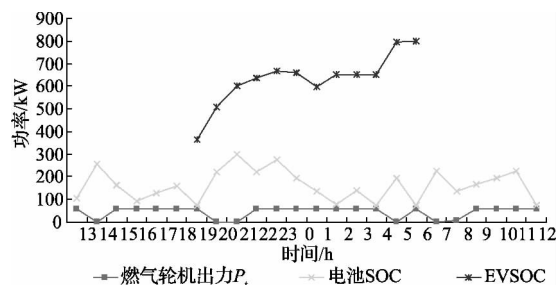


图 13 300 kW·h 电池容量配置系统调度结果 (EV 参与调度) (算例 2)

Fig. 13 The scheduling results for the 300 kW·h energy storage system (under the scheduling condition with EV, example scenario 2)

4.2.2 算例结果分析

文献[16]分别在 EV 参与调度和不参与调度的方案下,对 4 个不同的目标函数运用禁忌搜索法在离网模式下进行了求解,对比其中 EV 参与调度时系统  $E_{ss}$  的配置算例,禁忌搜索离网模型系统  $E_{ss}$  容量配置为 300.55 kW·h;本文采用的模型,EV 在在离网工作状态下参与调度,系统  $E_{ss}$  容量配置为 300 kW·h,在相近微电网算例参数条件下,EV 参与调度时 2 种不同模型优化后  $E_{ss}$  基本相近。相比参考文献,本文采用的模型适合离网与并网运行,更具有适应性;改进混合整数规划法求解时,系统  $E_{ss}$  为设定值,即为已知量,相比禁忌搜索和 PSO 算法,优化模型的求解变量减少一个,因此能够简化求解过程,提高求解效率。

5 结 论

本文从微电网接入 EV 的经济调度出发,提出微电网储能单元容量优化配置模型,分析在 EV 参与调度和不参与调度 2 种情况下,参考已有研究成果,运用改进混合整数规划算法对模型进行求解,研究计算了不同情况下的蓄电池最优容量配置,得出了以下结论为研究 EV 接入微电网提供参考:1) EV 作为辅助储能单元参与微电网运行调度,可以减少微电网储能单元容量的需求,从而减小微电网综合成本;2) 改进混合整数规划算法求解过程简单,提高求解效率,对电池容量优化配置场合具有工程指导意义。

参考文献

[1] LASSETER R H. Microgrid [C]. Power Engineering Society Winter Meeting 2002: 305-308.  
 [2] 戴上,张焰,祝达康. 含有微电网的配电网规划方法[J]. 电力系统自动化 2012 34(22): 41-45.  
 DAI SH ZHANG Y ZHU D K. Distribution network planning method containing micro-grid [J]. Automation of Electric Power Systems 2011 34(22): 41-45.  
 [3] 王成山,王守相. 分布式发电供能系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化 2008 32(20): 1-4 31.  
 WANG CH SH, WANG SH X. Study on some key problems related to distributed generation systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 1-4 31.  
 [4] ZELAZO D, DAI R, MESBAHI M. An energy management system for off-grid power systems [J]. Energy, 2012 42: 321-330.  
 [5] 冬雷,廖晓钟,刘广忱,等. 分布式风光互补发电系统及其多目标优化控制策略研究[J]. 仪器仪表学报,

- 2005 26(8):2553-2556.
- DONG L, LIAO X ZH, LIU G CH et al. Multi-index optimization control strategy based on distributed PV and wind energy complementary generation system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005 26(8):2553-2556.
- [6] 王占国,文锋,盛大双,等. 新型充放电均衡一体化电池管理系统研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2012 26(5):431-436.
- WANG ZH G, WEN F, SHENG D SH et al. New battery management system of integrated charging and discharging balance[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument 2012 26(5):431-436.
- [7] 茆美琴,孙树娟,苏建徽. 包含电动汽车的风/光/储微电网经济性分析[J]. 电力系统自动化, 2011 35(14):30-35.
- MAO M Q, SUN SH J, SU J H. Economic analysis of a microgrid with wind/photovoltaic storages and electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011 35(14):30-35.
- [8] CHEN S, GOOI H. Scheduling of energy storage in a grid-connected pv/battery system via simplorer [C]. Proc. TENCON IEEE Region 10 Conf., 2009:1-5.
- [9] 徐国金,吴健,温家鹏,等. 基于误差分析的电池组高精度测量系统的设计[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(9):1989-1997.
- XU G J, WU J, WEN J P et al. Design of a battery group high-precision measurement system based on error analysis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(9):1989-1997.
- [10] WANG X, VILATHGAMUWA D M, CHOI S. Determination of battery storage capacity in energy buffer for wind farm [C]. IEEE Trans. Energy Convers. 2008 23(3):868-878.
- [11] VENU C, RIFFONNEAU Y, BACHA S, et al. Battery storage system sizing in distribution feeders with distributed photovoltaic systems [C]. Proc. IEEE Bucharest PowerTech, 2009.
- [12] LEE T Y, CHEN N. Determination of optimal contract capacities and optimal sizes of battery energy storage systems for time-of-use rates industrial customers [J]. IEEE Trans. Energy Convers., 1995, 10(3):562-568.
- [13] BAHRAMIRAD S, DANESHI H. Optimal sizing of smart grid storage management system in a microgrid [J]. IEEE Trans. Energy Convers., 2011.
- [14] CHEN S X, GOOI H B, WANG M Q. Sizing of energy storage for microgrids [J]. IEEE Trans. Smart Grid, 2012 3(1):142-151.
- [15] 曹一家,苗轶群,江全元,等. 含电动汽车换电站的微电网孤岛运行优化[J]. 电力自动化设备, 2012 32(5):1-6.
- CAO Y J, MIAO Y Q, JIANG Q Y, et al. Optimal operation of islanded microgrid with battery swap stations [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5):1-6.
- [16] 吴红斌,郭彩云. 计及电动汽车的分布式发电系统中储能单元的优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(增刊1):15-21.
- WU H B, GUO C Y. Capacity optimization of energy storage unit in distribution generation system considering electric vehicle [J]. Proceeding of CSEE, 2012 32(Suppl. 1):15-21.
- [17] 金鹏,艾欣,许佳佳. 基于序列运算理论的孤立微电网经济运行模型. 中国电机工程学报, 2012 32(25):52-59.
- JIN P, AI X, XU J J. An economic operation model for isolated microgrid based on sequence operation theory [J]. Proceedings of the CSEE 2012 32(25):52-59.
- [18] KARKI R, HU P, BILLINTON R. A simplified wind power generation model for reliability evaluation [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(2):533-540.
- [19] 吴忠强,庄述燕,韩延光. 直驱永磁风电系统能量成形与最大风能捕获[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(2):344-351.
- WU ZH Q, ZH SH Y, HAN Y G. Energy shaping and maximum wind energy capture in direct-drive permanent-magnet wind power system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013 34(2):344-351.
- [20] 申彩英,夏超英. 基于改进型动态规划算法的串联混合动力汽车控制策略[J]. 控制理论与应用, 2011 28(3):427-432.
- SHEN C Y, XIA CH Y. Control strategy of series hybrid electric vehicle based on improved dynamic programming [J]. Control Theory & Applications, 2011, 28(3):427-432.
- [21] 王笑天,杨志家,王英男,等. 双卡尔曼滤波算法在锂电池SOC估算中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2013 34(8):1732-1738.
- WANG X T, YANG ZH J, WANG Y NAN et al. Application of dual extended Kalman filtering algorithm in the state-of-charge estimation of lithium-ion battery [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013 34(8):1732-1738.
- [22] CHAOUACHI A, KAMEL R M, ANDOULSI R, et al. Multiobjective intelligent energy management for a microgrid [J]. IEEE Trans. Ind. Electron., 2013, 60(4):1688-1699.

## 作者简介



余岳, 2007 年于中南大学获得硕士学位, 现为中南大学博士研究生, 主要研究方向为微电网运行优化、电力电子与电力传动。

E-mail: 68613367@qq.com

**Yu Yue** received his M. Sc. degree from Central South University in 2007. Now, he is a Ph. D. candidate in Central South University. His main research interest is micro-grid operation optimization, and power electronics and power drive.



粟梅, 分别于 1989、1992 和 2005 年获中南大学学士、硕士和博士学位, 现为中南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为矩阵变换器、电机调速驱动、风力发电系统。

E-mail: sumeicsu@mail.csu.edu.cn

**Su Mei** received her B. Sc., M. Sc., and Ph. D. degrees all from Central South University, in 1989, 1992 and 2005, respectively. She is a professor and Ph. D. supervisor in Central South University now. Her research interests include matrix converter, adjustable speed drive, and wind energy conversion system.



韩华 (通讯作者), 1998 年于中南大学获得硕士学位, 2008 年于中南大学获得博士学位, 现为中南大学副教授, 主要研究方向为可再生能源发电, 电力电子装置控制。

E-mail: hua\_han0523@csu.edu.cn

**Han Hua** (Corresponding author), received her M. Sc. and Ph. D. degrees from Central South University, Changsha, China, in 1998 and 2008, respectively. She has been an Assistant Professor with the School of Information Science and Engineering, Central South University, China. Her current research interests include renewable energy power generation system, and power electronic equipment