

DOI: 10.7667/PSPC152166

# 考虑交互功率与可再生能源功率波动的 微电网调度优化模型

杨晓东, 陈宇, 张有兵, 陈春成, 马鑫军, 戚军

(浙江工业大学信息工程学院, 浙江 杭州 310014)

**摘要:** 电动汽车的发展普及与 V2G (Vehicle to Grid)思想的提出, 对微电网系统的经济、安全运行带来了新的挑战, 如何合理调度电动汽车有序充放电, 促进微电网的经济、平稳运行成为当下的研究热点。针对含电动汽车的风光储并网型微电网环境, 构建了最小化微电网与外部电网交互功率和平抑可再生能源功率波动的多目标调度优化模型。通过对某商业区域微电网运行算例的仿真求解, 从微电网运行经济效益、日交互电量以及出力功率平均变化量等方面验证了所建模型的合理性和正确性。算例结果表明, 以微电网为平台集成利用具有一定出行规律的电动汽车与可再生能源是一种理想的协同利用模式, 既可以提高微电网运行的经济效益, 又能有效改善微电网的交互功率和出力波动。

**关键词:** 并网型微电网; 电动汽车; 交互功率; 可再生能源功率波动; 调度优化; 出力调整

## Scheduling optimization model for microgrid considering interactive power and renewable energy output fluctuation

YANG Xiaodong, CHEN Yu, ZHANG Youbing, CHEN Chuncheng, MA Xinjun, QI Jun

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** With the popularization and application of electric vehicles (EVs) and the presentation of vehicle-to-grid (V2G), the charging load has a great influence on the security and economy of the microgrid operation. On this basis, how to make reasonable control strategy for plug-in EVs and ensure the safety operation of microgrid becomes a problem to be solved. Based on the wind-solar-battery grid-connected microgrid with EVs, a multi-objective optimization model is proposed to minimize the interactive power between microgrid and the main power grid and balance the fluctuation of wind-solar power output. Taking a microgrid in a certain commercial area as an example, the reasonability and the validity of the proposed optimization model is verified in several key aspects of microgrid, such as the economic operation, daily interactive energy and average variation of the output. Simulation results show that the integration of EVs with regular patterns and renewable energy resources in the microgrid environment, which can not only realize the economic operation but also improve the interactive power and output fluctuation, is an ideal coordinated mode.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51407160) and Natural Science Foundation of Zhejiang Province (No. LY16E070005).

**Key words:** grid-connected microgrid; electric vehicles (EVs); interactive power; power fluctuation of the renewable energy; scheduling optimization; output adjustment

## 0 引言

近年来, 随着电网规模的扩大, 电网运行的稳定性和安全性趋于下降, 分布式电源虽具有环保和

高效等优点, 但是其接入成本高, 控制困难, 为此, 微电网应运而生<sup>[1]</sup>。微电网的全称是分布式能源系统, 是将可再生能源发电装置、负载、储能装置及控制装置等系统地结合在一起, 向用户供给电能和热能的小型发配供电系统<sup>[2]</sup>。由于微电网具有低成本、低污染和能源利用率高等特点, 是目前国内外电网研究的热点课题。但是由于风光发电具有不稳

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51407160); 浙江省自然科学基金资助项目(LY16E070005)

定性和间歇性<sup>[3-4]</sup>,使其不能像传统发电模式那样满足电网调度要求的灵活性,单纯依靠储能蓄电池将大幅增加工程造价,此外,储能蓄电池有电池循环次数较少,充放电效率低等缺陷。电动汽车(Electric Vehicles, EVs)接入电网(Vehicle to Grid, V2G)概念的提出提供了一种有效的解决方案,通过有序充放电调度,可以实现移峰填谷、提高可再生能源利用率、减少固定储能投资等功能<sup>[5]</sup>。

风光发电的出力特性导致其规模化利用将给系统带来巨大挑战,为了满足系统的安全、经济运行以及供电电能质量要求,已出现严重的弃风弃光现象<sup>[6]</sup>。微电网中如何调度储能以优化系统出力、促进可再生能源就地消纳是解决问题的关键。目前,国内外学者已针对可再生能源与电动汽车的集成利用进行了大量探讨。文献[7-8]介绍了一种合理的电动汽车建模方法,为本文建立电动汽车模型提供了基础;文献[9]表明电动汽车集群连入任何一个人口稠密城市的高层建筑后均可高效地用于分布式电力存储;文献[10-11]从电动汽车车主角度考虑电动汽车的影响,基于分时电价控制电动汽车有序充放电,减少了电动汽车运行成本、提高了用户满意度,但是并没有考虑电动汽车对微电网运行的影响。文献[12-13]利用电动汽车为可再生能源发电提供储能,以平抑其输出功率波动,提高了微电网运行的稳定性与可靠性,但是并未考虑提高可再生能源利用率与微电网的经济性;文献[14-16]研究了电动汽车的能量管理方式对微电网储能容量优化配置的影响,结果表明对电动汽车的合理调度可以提高微电网的可靠性,降低微电网的配置成本;文献[17-18]构造了基于电动汽车的经济调度模型和策略,分析了电动汽车群的加入对微电网的经济性,结果证明电动汽车的有序充放电能够有效降低微电网运行费用,提高经济效益;文献[19]则对经济调度进行了更细致的分析,研究了在电动汽车与微电网相结合的情况下,建立了减小发电成本、增加环境效益和降低综合费用的多目标优化模型,不足之处在于未考虑与主网相连时的供电质量及可再生能源功率波动等因素。

基于上述分析,本文以含电动汽车集群的风光储并网型微电网为研究对象,旨在构建V2G模式下的微电网调度优化模型,以充分利用可再生能源、提高可再生能源的供电质量。综合考虑微电网与外部电网交互功率和可再生能源功率波动对微电网进行的多目标调度优化,通过对某商业区域微电网运行算例的仿真求解,从微电网运行经济效益、日交互电量以及出力功率平均变化量等方面验证了所建

模型的合理性和正确性。

## 1 微电网系统模型

本文的研究针对由风机、光伏阵列、储能蓄电池、电动汽车组成的分布式风光储并网型微电网系统,该系统实行“自发自用、余量上网、电网调剂”的运行策略,其架构如图1所示。在该结构中,中央控制系统用于获取联络线的负荷信息,一面用于向系统内的充电设施发布实时负荷信息,一面接受各充电设施的计划负荷予以整合来实时更新负荷信息。当电动汽车接入微电网,中央控制系统能够获取当前的负荷信息、可再生能源出力等信息,并以此为基础对该电动汽车进行充放电规划。

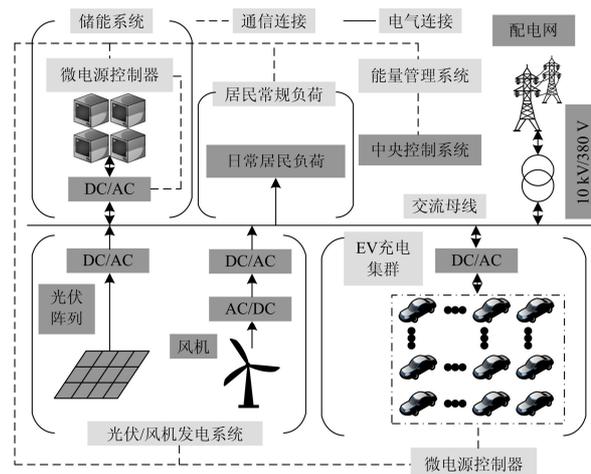


图1 风光储-电动汽车并网型微电网结构

Fig. 1 Structure of the wind-solar-battery microgrid with EVs

### 1.1 光伏阵列模型

本文将连续的时间进行离散化,优化时段等分成 $T$ 个时段,时间间隔为 $\Delta t$ 。标准额定条件(额定太阳辐照度 $G_{ST}$ 为 $1\,000\text{ W/m}^2$ 、相对大气光学质量为AM1.5、电池温度 $T_{ST}$ 为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ )下 $k$ 时段的光伏发电功率 $P_{PV}(k)$ 用式(1)计算<sup>[20]</sup>。

$$P_{PV}(k) = P_{ST} \frac{G_C}{G_{ST}} [1 + \nu(T_C - T_{ST})] \quad (1)$$

式中: $P_{ST}$ 为标准额定条件下光伏额定输出功率; $G_C$ 为工作点的辐照度; $\nu$ 为功率温度系数; $T_C$ 为工作点的电池温度。

### 1.2 风力发电模型

已有的研究工作普遍表明风速服从Rayleigh分布或Weibull分布<sup>[13]</sup>,本文假设风速服从Rayleigh分布。风电机组最大输出功率和风速的函数关系描述如下:当风速低于某一阈值(驱动风速)时风力涡轮机处于停止状态,此时的输出功率为0;当风速

大于切入风速而小于额定风速时, 输出功率可近似表示为风速的线性函数; 当风速大于额定风速而小于切出风速时, 输出功率为一个常数。因此风机发电输出功率可表示为

$$P_W(k) = \begin{cases} 0, & V_k < v_{in}, V_k > v_{out} \\ aV_k + b, & v_{in} \leq V_k \leq v_r \\ \omega_r, & v_r < V_k \leq v_{out} \end{cases} \quad (2)$$

$$a = \frac{\omega_r}{v_r - v_{in}} \quad (3)$$

$$b = -\frac{v_{in}\omega_r}{v_r - v_{in}} \quad (4)$$

式中:  $V_k$  表示  $k$  时段风速;  $v_r$  为额定风速;  $v_{in}$  为切入风速;  $v_{out}$  为切出风速;  $\omega_r$  为风机额定输出功率。

### 1.3 储能蓄电池模型

为简化建模, 假设储能蓄电池在充放电过程中, 两端电压维持不变, 因此蓄电池模型建立如下。

$$S_B(k) = S_B(k-1) + P_{bat}(k)\eta_B(P_{bat}(k))\Delta t/C_{bat} \quad (5)$$

$$S_{Bmin} \leq S_B(k) \leq S_{Bmax} \quad (6)$$

$$-P_{Bd} \leq P_{bat}(k) \leq P_{Bc} \quad (7)$$

$$S_B(1) = S_B(T) \quad (8)$$

式中:  $S_B(k)$  与  $S_B(k-1)$  分别为  $k$  时段和  $k-1$  时段的蓄电池荷电状态(State of Charge, SOC);  $P_{bat}(k)$  为  $k$  时段蓄电池交互功率,  $P_{bat}(k) > 0$  时表示充电,  $P_{bat}(k) < 0$  时表示放电,  $P_{bat}(k) = 0$  表示浮充;  $C_{bat}$  为蓄电池容量;  $S_{Bmax}$ 、 $S_{Bmin}$  分别为蓄电池的荷电状态上、下限;  $P_{Bc}$ 、 $P_{Bd}$  分别表示蓄电池额定充、放电功率;  $\eta_B(P_{bat}(k))$  为  $k$  时段充放电的效率。

$$\eta_B(P_{bat}(k)) = \begin{cases} \eta_B^c, & P_{bat}(k) \geq 0 \\ 1/\eta_B^d, & P_{bat}(k) < 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $\eta_B^c$ 、 $\eta_B^d$  分别表示蓄电池充、放电效率。

式(6)、式(7)表示蓄电池需满足荷电状态约束与额定功率约束; 考虑到蓄电池在调度周期间变换的状态继承, 为了保证蓄电池在调度周期间连续有效工作, 式(8)表示其能量状态在调度周期始末相等。

### 1.4 电动汽车模型

设该微电网系统接入的车辆集合为  $N$ , 则车辆规模为  $n \triangleq |N|$ 。电动汽车的主要用途是满足用户的出行需求, 根据用户的行车特点, 各车辆的情况有所不同, 对于任意车辆  $l \in N$ , 设其入网的时间为  $T_{in,l}$ , 离开时间为  $T_{out,l}$ 。V2G 模式下, 任一  $k$  时段, 电动汽车  $l$  与配网的功率交换用  $P^l(k)$  表示,  $P^l(k) > 0$  表示车辆  $l$  处于充电状态,  $P^l(k) < 0$  表示处于放电状态,  $P^l(k) = 0$  为浮充状态, 且当  $k \notin [T_{in,l}, T_{out,l}]$  时,  $P^l(k) = 0$ 。

本文假设参与调度的电动汽车动力电池均为

锂电池。根据锂电池的充放电相关特性, 作适当简化, 在单个时段内, 视锂电为恒功率充放电, 则其荷电状态和对应的充放电功率近似呈线性关系:

$$S^l(k) = S^l(k-1) + P^l(k)\eta^l(P^l(k))\Delta t/C_s^l \quad (10)$$

式中:  $S^l(k)$  与  $S^l(k-1)$  为  $k$  时段和  $k-1$  时段的电动汽车荷电状态;  $C_s^l$  为电动汽车电池容量;  $P^l(k)$  为  $k$  时段电动汽车的交互功率;  $\eta^l(P^l(k))$  为  $k$  时段充放电的效率, 与功率交换方向有关。

$$\eta^l(P^l(k)) = \begin{cases} \eta^c, & P^l(k) \geq 0 \\ 1/\eta^d, & P^l(k) < 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $\eta^c$ 、 $\eta^d$  分别表示电动汽车充、放电效率。

## 2 微电网调度优化模型

### 2.1 目标函数

为了有效利用可再生能源, 改善供电质量, 从而促进微电网的稳定运行, 可以从两个角度考虑对微电网出力的优化: 其一, 最小化微电网与外电网的交互功率, 使微电网出力与负荷尽可能贴合, 这样不仅可以提高可再生能源利用率, 还能够提高微电网的可靠性能, 保证其平稳运行; 其二, 平抑微电网的输出功率波动, 改善可再生能源利用效率。

据此, 本文综合考虑最小化交互功率与平抑可再生能源功率波动构建微电网调度优化模型。考虑到所选取的目标函数之间单位一致, 故采用加权处理的方法来进行微电网的多目标调度优化。具体方法为

$$\min f = \{f_1, f_2\} = \omega_1 f_1 + \omega_2 f_2 \quad (12)$$

式中:  $f_1$  只考虑最小化微电网与外电网交互功率;  $f_2$  只考虑平抑可再生能源功率波动;  $\omega_1$  与  $\omega_2$  为目标权重系数, 满足  $\omega_1 \geq 0$ 、 $\omega_2 \geq 0$  且  $\omega_1 + \omega_2 = 1$ , 本文中取  $\omega_1 = \omega_2 = 0.5$  进行讨论。

#### 2.1.1 目标 1: 最小化交互功率

由于可再生能源出力的不确定性, 在其高于负荷功率时会造成能源浪费, 或是在低于负荷功率时出现可再生能源供给不足的问题, 需要从外电网购电, 导致可再生能源的潜力无法完全发挥。目标 1 以最小化微电网与主网的交互功率为目标, 调整微电网出力, 如式(13)所示。

$$\begin{cases} \min f_1 = \sum_{k=1}^T [P_{out}(k) - L_B(k)]^2 \\ P_{out}(k) = P_W(k) + P_{Pv}(k) + P_{bat}(k) + \sum_{l=1}^n P^l(k) \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $P_{out}(k)$  表示微电网出力;  $L_B(k)$  表示基本负荷。

#### 2.1.2 目标 2: 平抑可再生能源功率波动

可再生能源出力会受到天气、温度等各种偶然

性因素的影响, 导致出力曲线不稳定, 影响其利用效率, 此时目标函数为

$$\min f_2 = \sum_{k=2}^T [P_{\text{out}}(k) - P_{\text{out}}(k-1)]^2 \quad (14)$$

式中,  $P_{\text{out}}(k)$  和  $P_{\text{out}}(k-1)$  分别表示  $k$  时段和  $k-1$  时段的微电网出力。

## 2.2 约束条件

### (1) 电动汽车荷电状态约束

过充电与过放电都会导致锂电池寿命的缩短, 因此需要将受控电动汽车第  $k$  时段的荷电状态  $S^l(k)$  限定在一定范围内。

$$S_{\min} \leq S^l(k) \leq S_{\max} \quad (15)$$

式中,  $S_{\max}$  和  $S_{\min}$  分别为动力电池荷电状态的上、下限。

### (2) 电动汽车充放电需求约束

电动汽车离开时的荷电状态必须达到车主的期望值。

$$S_0^l + \frac{\sum_{k=1}^T P^l(k) \eta(P^l(k)) \Delta t}{C_S^l} \geq S_E^l \quad (16)$$

式中:  $S_0^l$  表示电动汽车初始 SOC;  $S_E^l$  表示电动汽车的期望 SOC。

### (3) 功率平衡约束

为了维持整个微电网的有序运作, 防止过载和空载状况的发生, 微电网输出与负载之间要满足功率平衡约束。

$$P_W(k) + P_{PV}(k) + P_{\text{grid}}(k) = L_B(k) + P_{\text{bat}}(k) + \sum_{l=1}^n P^l(k) \quad (17)$$

式中,  $P_{\text{grid}}(k)$  为  $k$  时段微电网与外电网的交互功率, 功率为正表示从电网购电, 功率为负表示向电网倒送电。

### (4) 倒送功率约束

过大的电力倒送会对电力系统稳定性造成不利影响, 因此需要对倒送功率有所限制。

$$P_{\text{grid,out}}(k) \leq P_{\text{grid,out}}^{\max}(k) \quad (18)$$

式中:  $P_{\text{grid,out}}(k)$  为微电网向外电网的倒送功率;  $P_{\text{grid,out}}^{\max}(k)$  为倒送功率允许最大值。

## 3 微电网运行性能评价指标

### 3.1 微电网运行经济效益

微电网日运行经济效益即微电网运行过程中产生的日净收益, 具体表示为

$$D_{\text{WK}} = D_{\text{RES,sub}} - D_{\text{EV}} - D_{\text{grid}} - D_{\text{om}} - D_{\text{bat}} \quad (19)$$

式中:  $D_{\text{WK}}$  为微电网日运行经济收益;  $D_{\text{RES,sub}}$  为可

再生能源补贴;  $D_{\text{EV}}$  为电动汽车用户补偿费用;  $D_{\text{grid}}$  为与外电网交互成本;  $D_{\text{om}}$  为系统日运行维护成本;  $D_{\text{bat}}$  为储能蓄电池投资成本。

### (1) 可再生能源补贴

$$\begin{cases} D_{\text{RES,sub}} = (Q_{\text{RES}} - Q_p) \rho_{\text{RES,sub}} \\ Q_{\text{RES}} = Q_w + Q_{\text{pv}} \end{cases} \quad (20)$$

式中:  $Q_{\text{RES}}$  为可再生能源发电量, 包括风机日出力总量  $Q_w$  和光伏日出力总量  $Q_{\text{pv}}$ ;  $Q_p$  为弃电量;  $\rho_{\text{RES,sub}}$  为风光系统发电单位能量(kW·h)补贴价格。

### (2) 电动车用户补偿

$$D_{\text{EV}} = Q_{\text{EV}} \rho_{\text{EV,sub}} \quad (21)$$

式中:  $Q_{\text{EV}}$  为电动车用户日负荷转移总量;  $\rho_{\text{EV,sub}}$  为电动汽车转移单位能量的补偿价格。

### (3) 与外电网交互成本

$$D_{\text{grid}} = Q_{\text{grid,in}} \rho_{\text{grid,in}} - Q_{\text{grid,out}} \rho_{\text{grid,out}} \quad (22)$$

式中:  $Q_{\text{grid,in}}$  为日购电电量;  $\rho_{\text{grid,in}}$  为购电电价;  $Q_{\text{grid,out}}$  为日倒送电量;  $\rho_{\text{grid,out}}$  为倒送电价。

### (4) 系统维护运行成本

$$D_{\text{om}} = Q_w \varphi_{w,om} + Q_{\text{pv}} \varphi_{\text{pv,om}} + Q_{\text{bat}} \varphi_{\text{bat,om}} \quad (23)$$

式中:  $Q_{\text{bat}}$  为蓄电池交互总电量;  $\varphi_{w,om}$ 、 $\varphi_{\text{pv,om}}$  和  $\varphi_{\text{bat,om}}$  分别为风机、光伏和蓄电池的运行维护系数。

### (5) 电池投资成本

$$D_{\text{bat}} = \frac{1}{365} \kappa_{\text{bat}} C_{\text{bat}} \frac{i(1+i)^y}{(1+i)^y - 1} \quad (24)$$

式中:  $\kappa_{\text{bat}}$  为蓄电池单位容量投资成本;  $i$  为折现率;  $y$  为系统寿命期望值。

## 3.2 日交互电量

微电网与外电网的日交互电量, 包括在微电网自身出力不足时从外电网购买的电量和出力富余时向电网倒送的电量。

$$Q_{\text{grid}} = |Q_{\text{grid,in}}| + |Q_{\text{grid,out}}| \quad (25)$$

式中,  $Q_{\text{grid}}$  为微电网与外电网间的交互电量。

## 3.3 出力平均变化量

平抑可再生能源功率波动的目标是改善注入功率不稳定和计划外功率波动的情况, 可再生能源输出功率波动的改善效果可以用功率波动的平均变化量来评价。

$$\delta = \frac{1}{T-1} \sum_{k=2}^T |P_{\text{out}}(k) - P_{\text{out}}(k-1)| \quad (26)$$

式中,  $\delta$  为平均变化量。

## 4 算例分析

### 4.1 算例初始参数设置

本文以商业型办公楼微电网为例, 验证本文所

提调度优化模型的有效性。设时间间隔  $\Delta t = 0.5 \text{ h}$  将一天划分为 48 个时段;设置峰时段为早上 7 点至晚上 9 点,电价为 1.2 元/kW·h;谷时段为晚上 9 点至次日早上 7 点,电价为 0.4 元/kW·h;设电动汽车的补偿价格为 0.8 元/kW·h;根据国家相关政策,可再生能源发电补贴为 0.67 元/kW·h<sup>[21]</sup>,光伏倒送电价为 0.4 元/kW·h<sup>[22]</sup>。

电动汽车初始 SOC 参数服从均值为 0.7,标准差为 0.1 的正态分布;已掌握的 EV 日停驶数目分布统计数据如图 2 所示;电动汽车 SOC 范围为 0.1~0.9 之间;额定充、放电功率均为 7 kW;车辆动力电池的能量转化效率为 0.92;容量为 60 kW·h。

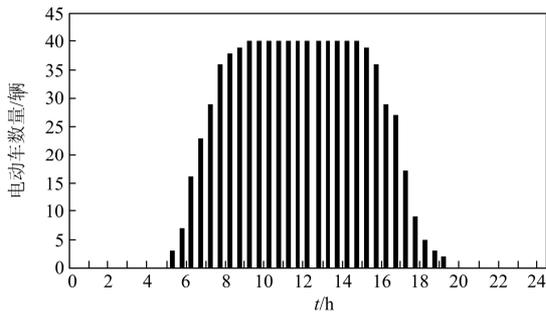


图 2 微电网内 EV 停驶数目

Fig. 2 Number of the parked EVs in microgrid

设置光伏装机容量为 750 kW,风机装机容量 200 kW,启动风速 3 m/s,额定风速 8 m/s,停机风速 25 m/s;光伏发电运行维护系数 0.009 6 元/kW·h;风电机组运行维护系数 0.029 6 元/kW·h<sup>[23]</sup>;最大倒送功率设为 100 kW。

典型工作日基本负荷<sup>[9]</sup>、可再生能源发电功率预测曲线如图 3 所示。

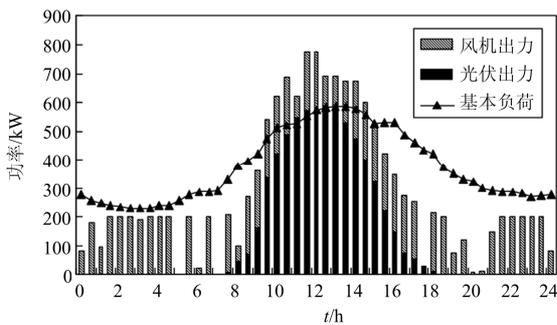


图 3 典型工作日预测曲线

Fig. 3 Forecasted power curves on workdays

储能蓄电池运维系数 0.055 89 元/kW·h,投资建设成本 1 226 元/kW·h;蓄电池 SOC 上、下限设定为 0.9 和 0.4;充、放电功率与容量比均为 0.15;蓄电池的能量转化效率为 0.92。

## 4.2 仿真结果分析

### (1) 蓄电池与电动汽车出力比较

图 4 分别表示 40 辆电动汽车、400 kW·h 蓄电池和 2 400 kW·h 蓄电池接入微电网优化后的功率曲线。从曲线可以看出,白天时段由于大量电动车相继接入,在阳光最充足时系统对出力的调整功能达到最大,在这种情况下微电网电动汽车与储能蓄电池调度效果相当,提高可再生能源利用率的效果十分显著;夜间时段,只含蓄电池的微电网拥有更高的输出功率,即对微电网出力的调度效果更好,原因在于相比于具有一定出行规律的电动汽车,蓄电池具有更大的调度区间。

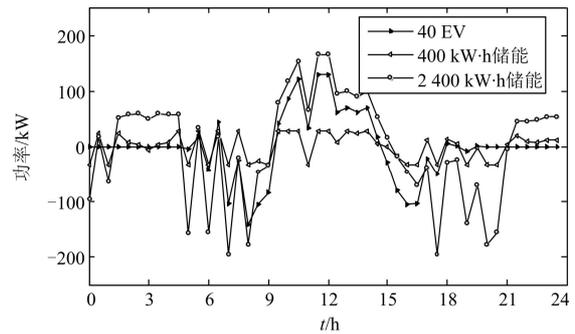


图 4 不同方案下调度优化后储能及电动汽车功率曲线

Fig. 4 Optimized power curves of the battery and EVs under different solutions

### (2) 调度结果分析

图 5 为基本负荷、风光出力曲线、加入 40 辆电动汽车与 400 kW·h 蓄电池以及加入 2 400 kW·h 蓄电池调度优化后的等效出力曲线。可见电动汽车的接入,使得 10:00 到 16:00 之间过剩的新能源出力几乎被完全消纳;相比之下,加入 2 400 kW·h 蓄电池调度优化后的微电网出力曲线则更为平缓,但在对可再生能源的消纳上,两种方案的效果相当。

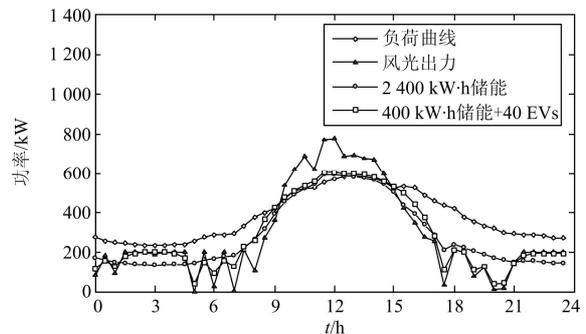


图 5 不同配置下调度优化后微电网出力曲线

Fig. 5 Optimized output curves of microgrid under different configurations

(3) 波动性分析

图 6 为风光出力以及加入电动汽车和蓄电池调度优化后的微电网出力功率波动情况。图中显示加入大规模蓄电池后, 经过调度优化的微电网出力仅有少许波动, 大大提高了微电网运行的安全稳定性能; 电动汽车配合少量蓄电池在主要停驶时段依然有非常好的效果, 能够有效改善微电网出力波动。

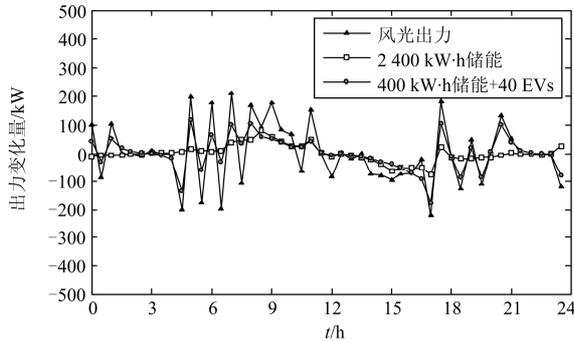


图 6 微电网出力波动

Fig. 6 Fluctuation curves of the microgrid output

(4) 交互功率分析

图 7 为调度优化前后微电网与主网交互功率曲线。可以看出加入蓄电池或电动汽车后, 微电网与电网间的交互功率大幅度降低, 并且交互功率波动性得到有效改善, 对微电网的稳定运行具有积极的促进作用。

综上, 随着 V2G 技术的发展, 具有一定出行规律的电动汽车发挥分布式移动储能作用可以替代部分固定储能蓄电池, 可有效减少当前能源架构的一些不利影响。

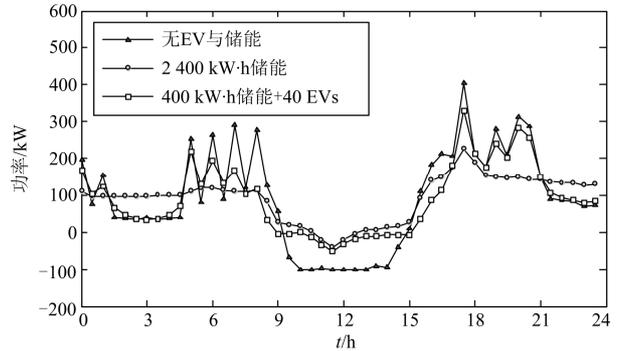


图 7 微电网与主网交互功率曲线

Fig. 7 Curves of the interactive power between microgrid and power system

4.3 微网的运行性能评价指标分析

4.3.1 经济性分析

表 1 为 5 个方案下, 经济效益方面的运行结果比较。方案 1 中只有分布式发电系统; 方案 2 在风光发电系统上, 接入 40 辆电动汽车; 方案 3 为配置了 400 kW·h 蓄电池的风光储微电网; 方案 4 为在方案 3 的基础上, 接入电动汽车集群; 方案 5 为配置 2 400 kW·h 蓄电池的风光储微电网。

表 1 不同方案下微电网经济效益对比

Table 1 Comparison of economic efficiency under different solutions

方案	蓄电池容量/kW·h	电动汽车规模/辆	微电网出力/kW·h	电网出力/kW·h	倒送量/kW·h	电动汽车补偿/元	可再生能源补贴/元	运维成本/元	电网交互成本/元	蓄电池成本/元	经济效益/元
1	0	0	7 045.28	2 686.03	496.93	0	4 283.43	141.84	2 324.89	0	1 816.70
2	0	40	6 950.36	2 341.49	208.60	454.80	4 580.57	141.84	2 011.20	0	1 972.73
3	400	0	7 002.74	2 621.18	427.88	0	4 358.08	156.08	2 227.55	152.88	1 821.57
4	400	40	6 917.88	2 265.99	100.61	454.80	4 652.92	152.71	1 940.45	152.88	1 952.08
5	2 400	0	6 865.97	2 261.66	44.37	0	4 690.60	201.87	1 848.58	917.26	1 722.90

对比方案 2 和方案 5, 由于蓄电池成本较高, 方案 5 的经济效益大大降低, 比调度前下降了 93.8 元, 而方案 2 通过发挥电动汽车的移动储能作用, 尽管需要支付 454.80 元的补偿费用, 仍比方案 5 多产生了 249.83 元的经济效益; 此外, 对于电动汽车车主来说, 由于避免了在电价峰时段充电支付高昂电费, 获得了一定收益。可见电动汽车的有序充放电对提高微电网与电动汽车主经济性具有显著的效果。

对比方案 2 与方案 4, 方案 4 中微电网的经济效益比方案 2 少 20.65 元, 蓄电池的增加开始降低系统的经济性, 因此应当合理控制蓄电池容量, 以达到最佳的经济效益。

4.3.2 交互电量比较

表 2 为各方案下微电网的日交互电量。数据直观地反映了微电网出力与基本负荷之间的相似度。对比方案 3 与方案 4, 方案 3 的交互电量比调度前减少了 820.40 kW·h, 方案 4 则减少了 880.97 kW·h, 两者的日交互电量都有大幅度下降且下降幅度相当, 可见以有序调度为手段发挥电动汽车集群的储能作用可以有效降低微电网储能容量要求。

4.3.3 波动性比较

表 3 为各方案下微电网出力的平均变化量和最大变化量, 其中最大变化量指优化时段内变化量的最大值。对比方案 4 与方案 5 可知, 相较于电动汽

车，蓄电池对平抑可再生能源出力波动具有更好的效果，因此，为了改善系统出力波动性、促进微电网平稳运行，系统仍需配置一定容量的蓄电池。

表2 微电网日交互电量

Table 2 Daily interactive energy of microgrid

方案	蓄电池容量/kW·h	电动汽车规模/辆	日交互电量/kW·h
1	0	0	3 187.00(0%)
2	400	0	3 049.06(4.33%↓)
3	400	40	2 366.60(25.74%↓)
4	2 400	0	2 306.03(27.56%↓)

表3 微电网出力变化量

Table 3 Output variation of microgrid

方案	蓄电池容量/kW·h	电动汽车规模/辆	平均变化量/kW	最大变化量/kW
1	0	0	161.38(0%)	445.57(0%)
2	0	40	114.59(28.99%↓)	350.72(21.29%↓)
3	400	0	119.29(26.08%↓)	359.85(19.24%↓)
4	400	40	89.49(44.55%↓)	326.34(26.76%↓)
5	2 400	0	42.80(73.48%↓)	159.26(64.26%↓)

#### 4.4 灵敏度分析

图8为不同电动汽车规模下微电网的经济效益与储能配置容量的关系。从图中可以看出，在不含电动汽车时，随着蓄电池容量的增加，微电网的经济效益存在小幅度上升，在蓄电池容量达到1 400 kW·h时经济效益达到最大值，之后开始下降；而在接入大规模电动汽车后，蓄电池数量的增加不再提高经济效益。一方面说明应合理配置储能容量以获得良好的经济效益，另一方面证明了V2G模式下电动汽车的优化调度可以有效减少微电网储能配置需求。

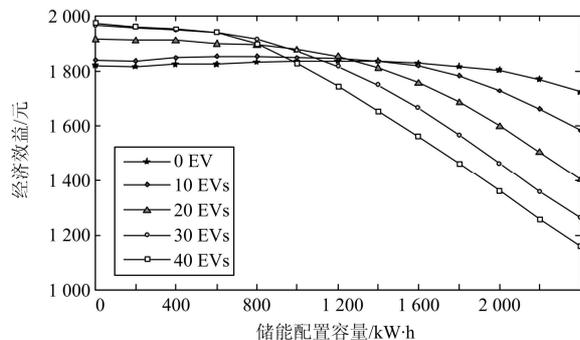


图8 不同电动汽车规模下经济效益与储能配置容量的关系

Fig. 8 Relationship of economic efficiency and battery configured capacity under different EV scales

图9为不同电动汽车规模下微电网和主网的交互电量与储能配置容量的关系。从40EVs曲线可以

看出本文所设置的参数下日交互电量最小能够降低到2 225 kW·h，此时微电网出力曲线最为理想，在大规模电动汽车接入的情形下，配置适量的蓄电池可以有效降低交互电量，提高微电网与电力系统运行的安全可靠性能。

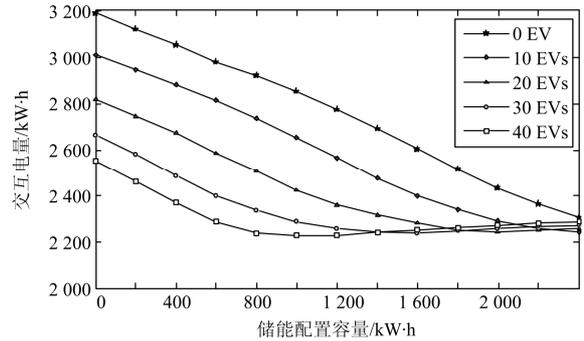


图9 不同电动汽车规模下日交互电量与储能容量的关系

Fig. 9 Relationship of daily interactive energy and battery configured capacity under different EV scales

图10为不同电动汽车规模下平均功率变化量与储能配置容量的关系。由图可知平均变化量始终随蓄电池容量的增加而减小，直至收敛到一固定值，而电动汽车规模对微电网波动性的影响较小，因此，为减少微电网出力波动，需配置适量蓄电池。

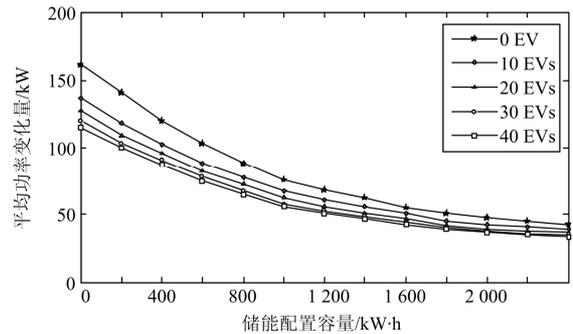


图10 不同电动汽车规模下平均功率变化量与储能容量的关系

Fig. 10 Relationship of average power variation and battery capacity under different EV scales

综上所述，合理配置蓄电池与电动汽车、有序规划电动汽车充放电，发挥二者的协同作用可以提高可再生能源利用率、改善风光储微电网的经济效益、平抑可再生能源波动、促进微电网的安全、稳定运行。

#### 5 总结

本文面向风光储并网型微电网环境，综合考虑微电网与外部电网交互功率和可再生能源功率波动建立多目标调度优化模型。算例结果表明：

(1) 采用所提调度优化模型,能够在满足电动汽车用户充电需求的前提下,有效发挥电动汽车集群的分布式储能作用、显著改善微电网输出功率特性。

(2) 以微电网为平台集成利用具有一定出行规律的电动汽车与可再生能源,以合理规划电动汽车充放电过程为手段辅助微电网运行,能够提高微电网运行经济性、减小微电网与主网的交互功率、平抑可再生能源功率波动,促进微电网经济、平稳运行。

### 参考文献

- [1] 吕忠, 周强, 蔡雨昌. 含分布式电源的 DEIWO 算法配电网无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 69-73.  
LÜ Zhong, ZHOU Qiang, CAI Yuchang. Reactive power optimization in distribution network with distributed generation on DEIWO algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 69-73.
- [2] 曹智平, 周力行, 张艳萍, 等. 基于供电可靠性的微电网规划[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 10-15.  
CAO Zhiping, ZHOU Lixing, ZHANG Yanping, et al. Micro-grid planning based on supply reliability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 10-15.
- [3] 康云龙, 郭红霞, 吴捷, 等. 分布式电源及其接入电力系统时若干研究课题综述[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 43-47.  
KANG Yunlong, GUO Hongxia, WU Jie, et al. Characteristics of distributed generation system and related research issues caused by connecting it to power system[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 43-47.
- [4] 黄银华, 李常春, 罗方旋, 等. 大规模风电接入对福建电网调峰的影响[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(12): 96-100, 125.  
HUANG Yinhua, LI Changchun, LUO Fangxuan, et al. Impact of large-scale wind farm connected with fujian power grid on peak load regulation[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(12): 96-100, 125.
- [5] 路欣怡, 刘念, 陈征, 等. 电动汽车光伏充电站的多目标优化调度方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 46-56.  
LU Xinyi, LIU Nian, CHEN Zheng, et al. Multi-objective optimal scheduling for PV-assisted charging station of electric vehicles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 46-56.
- [6] 朱向东. 目前中国风电弃风现状及对策[J]. 能源与节能, 2012(10): 30, 67.  
ZHU Xiangdong. Current situation and countermeasure of current china's wind power abandon wind[J]. Energy and Energy Conservation, 2012(10): 30, 67.
- [7] 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.
- [8] 党杰, 汤奕, 宁佳, 等. 基于用户意愿和出行规律的电动汽车充电负荷分配策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 8-15.  
DANG Jie, TANG Yi, NING Jia, et al. A strategy for distribution of electric vehicles charging load based on user intention and trip rule[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 8-15.
- [9] KUMAR K, N, SIVANEASAN B, CHEAH P H, et al. V2G capacity estimation using dynamic EV scheduling[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 1051-1060.
- [10] 孙近文, 万云飞, 郑培文, 等. 基于需求侧管理的电动汽车有序充电策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 64-69.  
SUN Jinwen, WAN Yunfei, ZHENG Peiwen, et al. Coordinated charging and discharging strategy for electric vehicles based on demand side management[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 64-69.
- [11] 孙晓明, 王玮, 苏粟, 等. 基于分时电价的电动汽车有序充电控制策略设计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 191-195.  
SUN Xiaoming, WANG Wei, SU Su, et al. Coordinated charging strategy for electric vehicles based on time-of-use price[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 191-195.
- [12] 赵博, 朱金大, 张卫国. 考虑规模化电动汽车入网的电网调频控制策略[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(12): 73-76.  
ZHAO Bo, ZHU Jinda, ZHANG Weiguo. Frequency regulation strategy of the grid considering large scale electric vehicles to grid[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(12): 73-76.
- [13] 赵俊华, 文福拴, 薛禹胜, 等. 计及电动汽车和风电出力不确定性的随机经济调度[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(20): 22-29.  
ZHAO Junhua, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Power system stochastic economic dispatch considering uncertain outputs from plug-in electric vehicles and wind generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(20): 22-29.
- [14] 余岳, 粟梅, 孙尧, 等. 计及电动汽车的微电网储能单元容量优化[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(6): 1261-1268.

- YU Yue, SU Mei, SUN Yao, et al. Capacity optimization of energy storage unit in microgrid considering electric vehicle[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(6): 1261-1268.
- [15] 张明锐, 谢青青, 李路遥, 等. 考虑电动汽车能量管理的微网储能容量优化[J]. 中国电机工程学报, 2015, 18(12): 4663-4673.
- ZHANG Mingrui, XIE Qingqing, LI Luyao, et al. Optimal sizing of energy storage for microgrids considering energy management of electric vehicles[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 18(12): 4663-4673.
- [16] 张颖达, 刘念, 张建华, 等. 含电动汽车充电站的风光互补系统容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(15): 126-134.
- ZHANG Yingda, LIU Nian, ZHANG Jianhua, et al. Optimum sizing of a stand-alone hybrid PV/wind generation system integrated with electric vehicle charging stations[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(15): 126-134.
- [17] 苏粟, 蒋小超, 王玮, 等. 计及电动汽车和光伏—储能的微网能量优化管理[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 164-171.
- SU Su, JIANG Xiaochao, WANG Wei, et al. Optimal energy management for microgrids considering electric vehicles and photovoltaic-energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 164-171.
- [18] 茆美琴, 孙树娟, 苏建徽, 等. 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 Meiqin, SUN Shujuan, SU Jianhui, et al. Economic analysis of a microgrid with wind/photovoltaic/storages and electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 30-35.
- [19] 吴红斌, 侯小凡, 赵波, 等. 计及可入网电动汽车的微网系统经济调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 77-84.
- WU Hongbin, HOU Xiaofan, ZHAO Bo, et al. Economical dispatch of microgrid considering plug-in electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 77-84.
- [20] 杨晓东, 张有兵, 任帅杰, 等. 含高渗透率光伏发电并网型微网中的电动汽车优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 15-23.
- YANG Xiaodong, ZHANG Youbing, REN Shuaijie, et al. Optimal scheduling of electric vehicles charging and discharging in grid-connected microgrid with high photovoltaic power penetration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 15-23.
- [21] 北极星太阳能光伏网. 中国 8 省 15 市光伏补贴政策一览[EB/OL].
- [22] 百度文库. 自发自用余电上网享受国家补贴[EB/OL]. <http://www.energy.sh.cn/news/news166.html>.
- [23] 丁明, 张颖媛, 茆美琴, 等. 包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4): 7-14.
- DING Ming, ZHANG Yingyuan, MAO Meiqin, et al. Economic operation optimization for microgrids including Na/S battery storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 7-14.

收稿日期: 2015-12-12; 修回日期: 2016-03-08

作者简介:

杨晓东(1990-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为新能源并网、电动汽车入网、需求侧管理、电力系统通信;  
E-mail: yang\_xd90@163.com

陈宇(1995-), 男, 本科, 主要研究方向为电动汽车入网、分布式发电与微电网;

张有兵(1971-), 男, 通信作者, 博士, 教授, 主要研究方向为智能电网、分布式发电及新能源优化控制、电动汽车入网、电力系统通信、电能质量监控. E-mail: youbingzhang@zjut.edu.cn

(编辑 周金梅)