

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.04.002

电动汽车动力电池与风电协同利用的 优化调度策略研究*

李雪亮¹ 吴奎华¹ 冯亮¹ 杨波¹ 李昭¹ 李雪² 陈豪杰²

(1. 国网山东省电力公司经济技术研究院 济南 250021;
2. 上海大学机电工程与自动化学院上海市电站自动化技术重点实验室 上海 200072)

摘要:针对如何通过电动汽车与风电协同利用实现负荷曲线削峰填谷问题,主要研究电动汽车动力电池与风电协同优化调度策略。首先建立包含电动汽车、风电和电网负荷需求的电动汽车风电协同利用模型;然后考虑电动汽车作为交通工具和其动力电池的特性,提出了可用时间、电池剩余容量和充放电功率3个约束条件;进一步采用线性递减惯性权值的改进粒子群算法(PSO)进行求解;最后,实验分析了常规、反调峰和正调峰3种风电出力以及不同风电渗透率对模型的影响,以及参与电网互动的电动汽车数量对模型的影响,验证了电动汽车风电协同模型的有效性,实现了对负荷曲线削峰填谷。

关键词: 电动汽车;风电;粒子群算法;削峰填谷

中图分类号: TM74;TN711.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4054

Optimization scheduling strategy research on synergistic utilization of electric vehicle batteries and wind power

Li Xueliang¹ Wu Kuihua¹ Feng Liang¹ Yang Bo¹ Li Zhao¹ Li Xue² Chen Haojie²

(1. Economic & Technology Research Institute, State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250021, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Power Station Automation Technology, School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Aiming at the problem of how to collaborate between electric vehicle batteries and wind power to achieve the peak load shifting of load curve, the optimization scheduling strategy of synergistic dispatch between electric vehicle batteries and wind power is mainly investigated in this paper. Firstly, the synergistic dispatch model including electric vehicles, wind power and power load demand is established, and three constraint conditions of the available time, the residual capacity of battery and the charge-discharge power are proposed by considering the characteristics of transportation and power battery of electric vehicles. This optimization model is then solved by the improved particle swarm optimization (PSO) algorithm. Finally, the simulation experiments analyze the factors affecting the synergistic optimization model by considering three kinds of wind power outputs including normal and peak-regulation and different wind power penetration and the number of electric cars to participate in power grid interaction, and the effectiveness of the synergistic optimization model to achieve of the peak load shifting is also confirmed.

Keywords: electric vehicles; wind power; particle swarm optimization (PSO) algorithm; peak load shifting

1 引言

随着化石能源日益枯竭并且造成的环境污染持续恶

化,可再生的清洁能源受到日益重视,而风电作为一种无污染的清洁能源已经在国内外得到快速地发展。中国风电建设统计评价报告指出:截止到2015年底,全国核准风电项目容量21 689万kW,其中已经并网容量

12 671 万 kW,由此可见风电已经成为我国能源的重要组成部分。然而,由于风速的随机、间歇和波动性^[1],造成风电具有不稳定性,需要建设大量的配套设施^[2],这给风电的快速发展和运行带来了巨大的挑战。

目前,不仅风电快速地接入电网,而且国家从政策和资金两个方面大力鼓励新能源汽车的发展,使得越来越多的电动汽车在城市中得到普及^[3],然而,大量的电动汽车的并网充电势必会给电网带来新的冲击。因此,考虑电动汽车的充电和 95% 时间闲置可作为储能装置^[4],Kempton 和 Letendre 提出了电动汽车与电网互动技术^[3](vehicle to grid, V2G),其核心思想就是当大量电动汽车闲置时将其动力电池作为分布式储能装置,以实现电网与电动汽车的双向互动^[5-6],从而解决电网效率低,分布式可再生能源波动的问题^[7-10]。

风电的快速发展,需要建设配套的储能设施,而大量电动汽车闲置时又可作为储能装置,因此,如何开展风电与 V2G 的协同调度正吸引大量的学术界和工业界研究人员的极大关注。如文献[11]提出一种考虑电动汽车充放电地点的分散性和时间随机性的区域电动汽车充放电控制策略;文献[12]提出了电动汽车充放电优化调度方案并用改进的粒子群算法(PSO)进行求解,但是认为 24 h 可用,忽略了电动汽车作为交通工具的基本职能;文献[13]提出了一种区域电网电动汽车充电与风电协同调度策略,然而没有考虑电动汽车在负荷需求高峰期能够作为电源的特性;文献[14]研究了风电电动汽车协同利用对电网风电接纳能力的影响,分析了电动汽车数量、充电模式对其影响,但是没有考虑风电出力情形对接纳能力的影响。以上研究初步考虑了风电与电动汽车的协调利用,但还缺乏深入考虑电动汽车充放电时间等特性,深入开展风电与电动汽车的协调利用研究。

为了解决风电与电动汽车协同利用实现负荷曲线削峰填谷问题,本文首先建立了电动汽车参与电网互动与风电出力协同利用的模型,提出了电动汽车的可用时间、电池剩余容量和充放电功率 3 个约束条件,然后采用线性递减惯性权值的改进 PSO 算法进行求解,最后实验验证了电动汽车风电协同模型的有效性,实现了对负荷曲线削峰填谷。

2 风电—电动汽车参与电网互动协同作用的优化建模

首先考虑典型的日负荷曲线并结合风电和电动汽车特性,根据负荷曲线的方差函数值最小原则建立了优化的目标函数,然后着重分析电动汽车参与电网互动的约束条件,接下来进行详细分析。

2.1 目标函数

本文选取国内某省一日的典型负荷曲线,按照每两个整点之间作为一个时间段,将 1 d 分成 24 个时间段,进一步考虑每个时间段内的负荷功率、风电场发电功率、电动汽车参与电网互动功率等因素,根据负荷曲线的方差函数值最小原则建立以下目标函数:

$$\min F = \sum_{t=1}^{24} (P_t^{\text{load}} - \sum_{i=1}^{N_{\text{wind}}} P_{i,t}^{\text{wind}} - \sum_{j=1}^{N_{\text{EV}}} \gamma_j P_{j,t}^{\text{EV}} - P_{\text{av}})^2 \quad (1)$$

$$P_{\text{av}} = P_{\text{Larv}} - P_{\text{Warv}} - P_{\text{Earv}} \quad (2)$$

$$\begin{cases} P_{\text{Larv}} = (\sum_{t=1}^{24} P_t^{\text{load}})/24 \\ P_{\text{Warv}} = (\sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^{N_{\text{wind}}} P_{i,t}^{\text{wind}})/24 \\ P_{\text{Earv}} = (\sum_{j=1}^{N_{\text{EV}}} \gamma_j P_{j,t}^{\text{EV}})/24 \end{cases} \quad (3)$$

式中: t 表示 24 个时间段, P_t^{load} 为负荷功率, P_t^{wind} 为风电场发电功率, P_t^{EV} 为电动汽车参与电网互动功率,其中 γ 的正(负)值表示充(放)电, N_{wind} 表示风电场的个数, N_{EV} 表示电动汽车数量, P_{Larv} 是负荷功率的平均值, P_{Warv} 是 1 d 内风力发电功率的平均值, P_{Earv} 是 1 d 内电动汽车参与电网互动的平均值。在实际风电与电动汽车协同调度中,将风电场作为一个整体考虑,故 $\sum_{i=1}^{N_{\text{wind}}} P_{i,t}^{\text{wind}}$ 可简化为 P_t^{wind} ,同理电动汽车也作为一个整体考虑,可将 $\sum_{j=1}^{N_{\text{EV}}} \gamma_j P_{j,t}^{\text{EV}}$ 简化为 $\gamma_t P_t^{\text{EV}}$,式(1)进而可转化为:

$$\min F = \sum_{t=1}^{24} (P_t^{\text{load}} - P_t^{\text{wind}} - \gamma_t P_t^{\text{EV}} - P_{\text{av}})^2 \quad (4)$$

以上获得了风电—电动汽车参与电网互动协同作用的目标函数,接下来考虑电动汽车充放电以及作为交通工具特性等分析其存在的约束条件。

2.2 电动汽车参与电网互动的约束条件

电动汽车具有充放电以及交通工具特性,在参与电网互动时不可避免地受到一定的约束。电动汽车首先应当满足于用户出行,故其首要约束是可用时间;其次,电动汽车是以直接消耗蓄电池中的电能以获得动力的一种交通工具,故电池的可用容量是其第二约束;最后,动力电池有使用寿命,为了最大限度延长其使用寿命,必须对充放电的电流和功率进行约束,此外,大量电动汽车充放电,对其承载的线路是否可以容纳也具有一定要求,概括为电动汽车充放电的功率约束。因此,电动汽车参与电网互动受到的约束条件主要包括电动汽车的可用时间、动力电池的可用容量和充放电功率。

1) 电动汽车的可用时间约束

目前家用电动汽车主要起到通勤作用,故本文考虑

此种情况,并且一般上下班的通勤时间为 7:00~8:00 和 17:00~18:00,在这两个时间段电动汽车不参与电网互动。

考虑电动汽车的动力电池能够对电网日负荷进行削峰填谷,故在电网峰期,电动汽车不充电以免加剧电网峰值,而是在电网谷期充电。根据一个有峰谷期的典型电网日负荷峰谷特性,设 22:00~7:00 为单向的对动力电池进行充电,直至电池满电荷状态;11:00~14:00 及 18:00~22:00 为用电高峰期,只允许在可用容量范围内放电;其余时间段允许电动汽车与电网双向互动。

2) 动力电池的可用容量约束

考虑电动汽车动力电池的特性,其可用容量约束为:

$$S_{SOCmin} \leq S_{SOC} \leq S_{SOCmax} \quad (5)$$

$$S_{SOC} = S_{SOC} + \sum_{i=1}^n \Delta Q_{ij} \quad (6)$$

式中: S_{SOCmin} 为考虑单程通勤出行以及电池自身约束的电池总容量值,考虑电池寿命,一般这个值不低于电池满电荷状态的 20%,故在此选取电池荷电状态 (state of charge, SOC) 的 40%; S_{SOC} 为一个判断变量,电动汽车参与电网互动后的电池累计总容量值, S_{SOC} 初始默认取值为 S_{SOCmin} , S_{SOCmax} 为满电池荷电状态下的电池总容量值, ΔQ_{ij} 为电动车 i 在 j 时间段内的充(放)电容量值。

3) 充放电功率约束

由于电动汽车动力电池的充电电压值固定为单相 220 V 或者三相 380 V,因此,约束主要体现在充放电电流值的大小。充电电流最大值取 $I_{iN}/3$,放电电流最大值取 $2I_{iN}$,即:

$$\begin{cases} 0 \leq I_{iC} \leq I_{iN}/3 \\ 0 \leq I_{iD} \leq 2I_{iN} \end{cases} \quad (7)$$

考虑单台电动汽车充电线路的功率不能超过 15 kW,则:

$$-15 \leq P_{ij} \leq 15 \quad (8)$$

综合式(5)和(6),可得:

$$P_{ijmax} \leq P_{ij} \leq P_{ijmin} \quad (9)$$

$$\begin{cases} P_{ijmax} = \min(15, V_{iD} \cdot 2I_{iN}) \\ P_{ijmin} = \max(-15, -V_{iC} \cdot I_{iN}/3) \end{cases} \quad (10)$$

式中: I_{iN} 为不同车型的额定值,同一车型则为 I_N ; I_{iC} 为电动车 i 的充电电流值; I_{iD} 为电动车 i 的放电电流值; P_{ij} 为电动车 i 在 j 时间段的充(放)电功率,正(负)表示放(充)电; V_i 表示电动车 i 充电的额定电压值,单相为 220 V,三相为 380 V。

3 基于改进粒子群优化算法的模型求解

以考虑风电和电动汽车特性及其约束,建立了优化目标函数,接下来运用改进的粒子群优化算法。

3.1 PSO 算法

PSO^[15-18] 是一种群体进化的智能优化算法,该算法最早由来自美国的两位博士 Kennedy 和 Eberhart 在 1995 年提出,源于对鸟类飞行觅食行为的研究,即鸟类通过集体协作,优化觅食过程,简洁、高效的获取食物。PSO 算法正是通过类似方法来实现优化,是一种基于迭代进化的优化方法。

PSO 算法首先在允许解的范围内设一组粒子作为初始解,默认每个粒子都代表适应度极值优化问题的一个潜在最优解,用位置、速度和适应度值 (Fitness) 3 项指标表示该粒子特征,其中适应度值由目标函数,也就是适应度函数计算得到,其值的好坏表示粒子的优劣,根据目标,有时要求其值越大越好,亦有时要求其值越小越好。粒子在解空间范围内运动,通过跟踪个体极值 P_{best} 和群体极值 G_{best} 更新个体位置。个体极值 P_{best} 是指个体所经历位置中计算得到的适应度值最优位置,群体极值 G_{best} 是指种群中的所有粒子搜索到的适应度最优位置。

假设在一个 D 维的搜索空间中,由 n 个粒子组成的种群 $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$,其中第 i 个粒子表示为一个 D 维的向量 $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iD})^T$,代表第 i 个粒子在 D 维搜索空间中的位置,亦代表问题的一个潜在解。根据目标函数即可计算出每个粒子位置 X_i 对应的适应度值。第 i 个粒子的速度 $V_i = (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{iD})^T$,其个体极值为 $P_i = (P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{iD})^T$,种群的群体极值为 $P_g = (P_{g1}, P_{g2}, \dots, P_{gD})^T$ 。在每次迭代过程中,粒子通过个体极值和群体极值更新自身的速度和位置,即:

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 r_{id1}^k (P_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_{id2}^k (g_{id}^k - x_{id}^k) \quad (11)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (12)$$

式中: ω 为惯性权重; $d = 1, 2, \dots, D$; $i = 1, 2, \dots, n$; k 为当前迭代次数; V_{id} 为粒子的速度; c_1 和 c_2 是非负的常数,称为学习因子或者加速度因子; r_1 和 r_2 是分布于 $[0, 1]$ 区间的随机数。因为 PSO 产生的初始解是随机机并从默认的初试附近开始搜索,但是为了防止搜索的效率低下,一般需要设置位置和速度的限定区间,即设置位置区间 $[-X_{max}, X_{max}]$ 和速度区间 $[-V_{max}, V_{max}]$ 。

3.2 基于权重改进的 PSO 算法

在 PSO 算法中,惯性权重是一个能体现粒子继承先前的速度一个参数,Shi 等人^[19]最先将其引入 PSO 算法,通过分析指出惯性权重值较小有利于局部搜索,较大则更有利于全局搜索。为了解决算法的局部搜索与全局搜索问题,Shi 等人^[9]提出了一种惯性权重改进的 PSO 算法,即线性递减惯性权重 (linear decreasing inertia weight, LDIW),即:

$$\omega(t) = \omega_{start} - \frac{t \cdot (\omega_{start} - \omega_{end})}{T_{max}} \quad (13)$$

式中: ω_{start} 为初始惯性权重, ω_{end} 为迭代进化计算过程达到最大迭代时的惯性权重, t 为当前迭代代数, T_{max} 为最大迭代次数。

3.3 电动汽车参与电网互动的约束条件处理

由于以上提出的约束条件不能直接在编程中应用, 需要对其进行处理, 通常有两种方法: 1) 直接修改法; 2) 罚函数法。但是在实践中发现罚函数需要通过反复试验才能确定惩罚因子, 因此本文采用直接修改法, 编程时直接写入约束条件, 得到最优的解, 最大限度的保留 PSO 算法产生的最优值。由于本问题的解决属于多维、多约束条件, 因此直接把电动汽车视为一个整体, 而不是单一的进行分析。对于可用时间约束, 通过时间段来判断是否满足判断; 然后对于随机产生的粒子位置进行 PSO 智能算法的自修改, 根据约束条件判断新的粒子位置是否符合约束, 如果不满足, 则需要按照式 (13)、(15) 进行修改, 取约束极值, 则:

$$P_{j\min} \leq P_j \leq P_{j\max} \quad (14)$$

$$\begin{cases} P_{j\max} = \min(a \cdot S/\Delta t, (S_{\text{SOCmax}} - S_{\text{SOC-1}})/\Delta t) \\ P_{j\min} = -\max(b \cdot S/\Delta t, (S_{\text{SOCmax}} - S_{\text{SOC-1}})/\Delta t) \end{cases} \quad (15)$$

$$S = \sum_{i=1}^n S_{iN} \quad (16)$$

式中: a 为放电系数且由放电电流值决定, b 为充电系数, S 为所有电动汽车的电池总容量, $S_{\text{SOC-1}}$ 为上一时间段结束后的电池容量值, 并且满足 $S_{\text{SOCmax}} - S_{\text{SOC-1}} \geq 0$, 否则认为电池满电状态, 禁止在充电, 在规定时间内 (22:00 ~ 7:00) 亦禁止放电; Δt 表示一个时间段, 为 1 h。

3.4 算法求解流程

PSO 改进算法求解详细流程如下。

- 1) 确定基本参数值, 初始化粒子的位置和速度。
- 2) 根据时间约束条件进行时段选择。
- 3) 根据式 (14) ~ (16) 约束条件, 通过越限条件是否满足, 以此确定是否需要粒子位置进行修改。
- 4) 根据目标函数, 进行粒子的适应度值计算, 并记录粒子个体的最好位置以及整个粒子群体最好位置。
- 5) 根据式 (11) 和 (12) 更新粒子速度和位置。
- 6) 检查粒子个体的速度是否超过约束限定的极值, 如果超出限值范围, 则需要将速度修改为限值, 并重复步骤 2)。
- 7) 重新根据适应度函数计算粒子群的适应度, 更新并记录粒子个体的最优位置以及整个种群的最优位置。
- 8) 判断种群的迭代进化优化计算是否达到设置的最大迭代次数, 是则停止计算, 输出最优的个体位置, 以及适应度值; 否则返回步骤 5)。

4 算例分析

为了验证本文所提优化目标模型, 采用某省的典型日负荷数据、某典型风力发电数据包括正调峰、反调峰和常规风力发电 3 种情形、以及电动汽车动力电池容量为 25.6 kW · h/台 (数量为百万等级, 将之视为一个整体) 组成仿真系统进行分析计算。在 1 d 中 24 个时间段, 考虑 3 种风电情形, 分析不同数量等级电动汽车参与电网互动对风电接纳能力的影响; 同时考虑不同风电渗透率下, 分析电动汽车参与电网互动调度的影响。

典型的夏季日负荷曲线如图 1 所示。3 种风力发电情形的功率曲线如图 2 所示, 反调峰——风电出力高峰在需求的低谷时间段; 正调峰——风电出力高峰在需求的高峰时间段; 常规——风电出力全天平稳。相对于图 1 中日负荷曲线, 图 2 中的风电出力渗透率约为 5%。

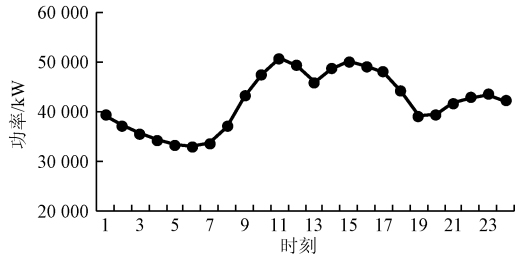


图1 典型的夏季日负荷曲线

Fig. 1 A typical summer daily load curve

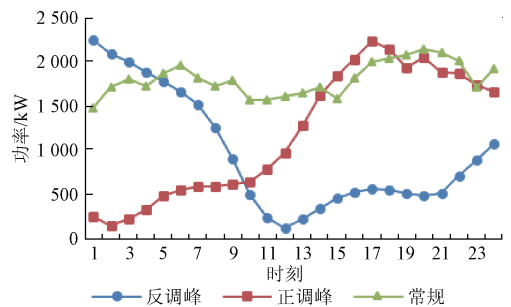


图2 3种风力发电情形的风电功率曲线

Fig. 2 Wind power curves of three wind power situations

针对以上日负荷、风电等数据, 采用粒子群算法进行优化计算。计算环境为 intel 2.6 GHz, 16 Gbytes RAM, Microsoft Windows 10, MATLAB 2014R。PSO 中相关参数设为粒子数 N 取 20; 学习因子 $c_1 = c_2 = 2$; 惯性权重按照性能最优进行取值为 $\omega_{\text{start}} = 0.9$, $\omega_{\text{end}} = 0.4$; 最大迭代次 T_{max} 为 10 000 次; 维数 D 设置 24 维, 以此来对应 24 个时间段; 剩余电量系数设置 R 为 0.4 用来保证一次通勤, 也是默认的 0:00 时的电池剩余电量系数, 其中 20% 是一次通勤耗电量, 20% 是电池寿命最佳的保留电量。

接下来从不同数量等级电动汽车对风电的接纳能力和一定数量等级电动汽车对不同风电渗透率的接纳能力两个方面进行仿真实验验证。

4.1 不同数量等级的电动汽车对风电的接纳能力

首先分别对3种典型风力发电情形,采用5个数量等级的电动汽车参与电网互动进行对比,得到电动汽车数量对风电并网后的负荷曲线影响。在20%、10%、5%三种渗透率下,依次给出常规、反调峰和正调峰3种风电出力的V2G调度结果以及相对应的目标函数适应度值。

1)20% 风电渗透率下,常规、反调峰和正调峰风电出力的V2G调度结果以及相应的目标函数适应度值分别如图3~5和表1~3所示。

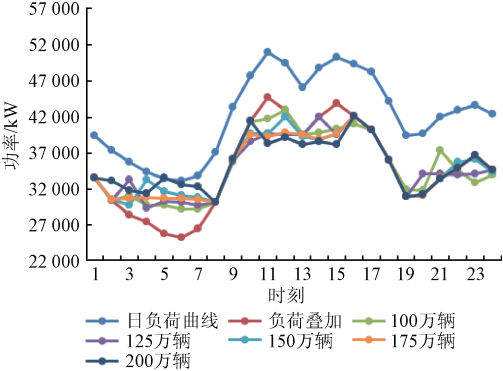


图3 常规情形下电动汽车数量对其影响

Fig.3 The impact of the number of electric vehicles under the conventional situation

表1 常规情形下 EVs 数量等级对应的目标函数值
Table 1 The objective function values corresponding to quantity grade of EVs under the conventional situation

EV 数量(万辆)	100	125	150	175	200
适应度值	5.04×10^8	4.71×10^8	3.80×10^8	3.68×10^8	3.00×10^8

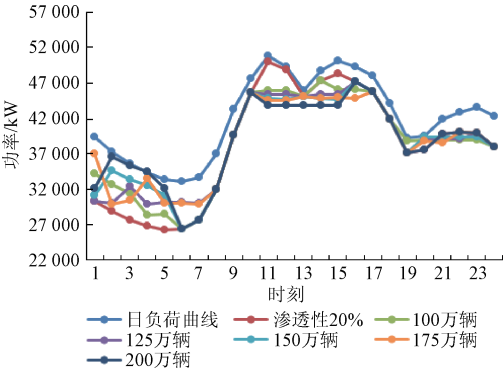


图4 反调峰情形下电动汽车数量对其影响

Fig.4 The impact of the number of electric vehicles under anti-peaking situation

表2 反调峰情形 EVs 数量等级对应的目标函数值
Table 2 The objective function values corresponding to quantity grade of EVs under anti-peaking situation

EV 数量(万辆)	100	125	150	175	200
适应度值	1.08×10^9	9.86×10^8	8.98×10^8	8.02×10^8	7.77×10^8

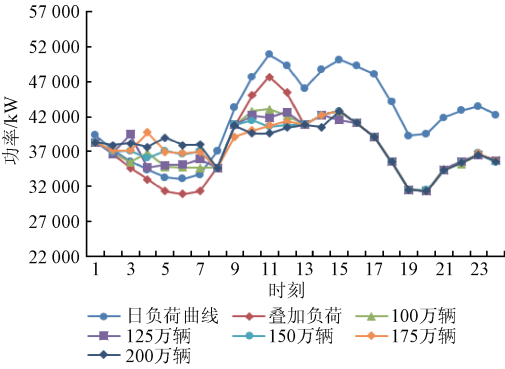


图5 正调峰情形下电动汽车数量对其影响

Fig.5 The impact of the number of electric vehicles under positive peaking situation

表3 正调峰情形 EVs 数量等级对应的目标函数值
Table 3 The objective function values corresponding to quantity grade of EVs under positive peaking situation

EV 数量(万辆)	100	125	150	175	200
适应度值	3.06×10^8	2.82×10^8	2.43×10^8	2.35×10^8	2.16×10^8

2)10% 风电渗透率下,常规、反调峰和正调峰风电出力的V2G调度结果以及相应的目标函数适应度值分别如图6~8和表4~6所示。

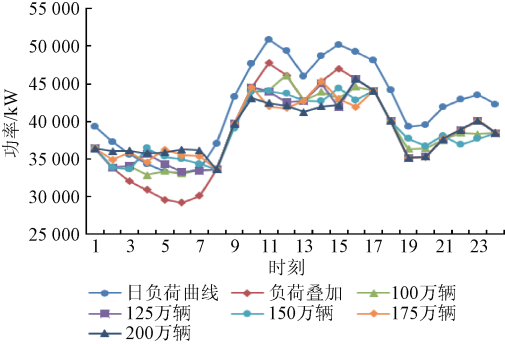


图6 常规情形下电动汽车数量对其影响

Fig.6 The impact of the number of electric vehicles under the conventional circumstance

表4 常规情形下 EVs 数量等级对应的目标函数值
Table 4 The objective function values corresponding to quantity grade of EVs under the conventional situation

EV 数量(万辆)	100	125	150	175	200
适应度值	4.59×10^8	4.19×10^8	3.44×10^8	3.14×10^8	2.72×10^8

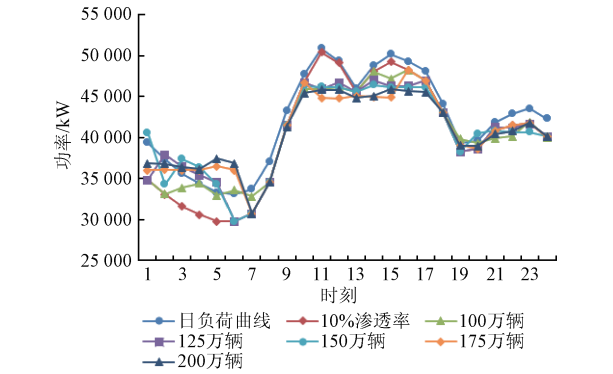


图 7 反调峰情形下电动汽车数量对其影响

Fig. 7 The impact of the number of electric vehicles under anti-peaking situation

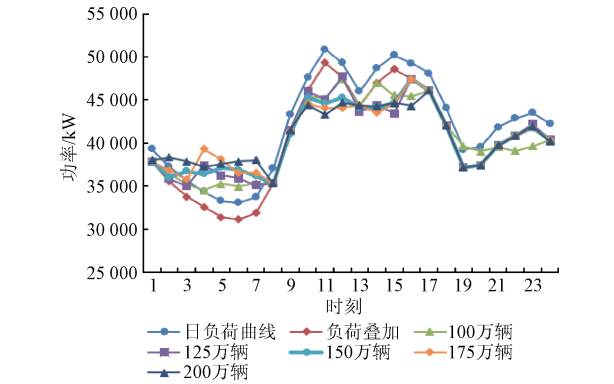


图 9 常规情形下电动汽车数量对其影响

Fig. 9 The impact of the number of electric vehicles under the conventional situation

表 5 反调峰情形 EVs 数量等级对应的目标函数值
Table 5 The objective function values corresponding to quantity grade of EVs under anti-peaking situation

EV 数量(万辆)	100	125	150	175	200
适应度值	7.01×10^8	6.72×10^8	6.26×10^8	5.16×10^8	4.49×10^8

表 7 常规情形下 EVs 数量等级对应的目标函数值
Table 7 The objective function values corresponding to quantity grade of EVs under the conventional situation

EV 数量(万辆)	100	125	150	175	200
适应度值	4.46×10^8	4.15×10^8	3.41×10^8	3.09×10^8	2.53×10^8

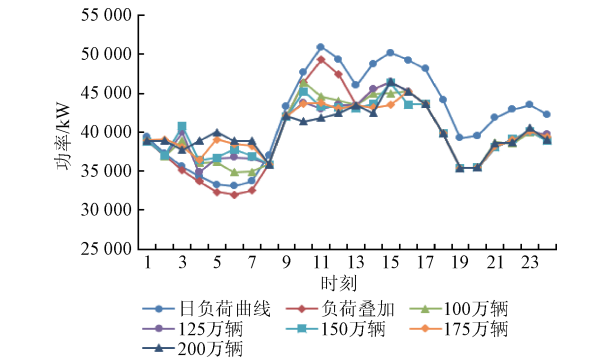


图 8 正调峰情形下电动汽车数量对其影响

Fig. 8 The impact of the number of electric vehicles under positive peaking situation

表 6 正调峰情形 EVs 数量等级对应的目标函数值
Table 6 The objective function values corresponding to quantity grade of EVs under positive peaking situation

EV 数量(万辆)	100	125	150	175	200
适应度值	3.45×10^8	3.06×10^8	2.65×10^8	2.41×10^8	2.20×10^8

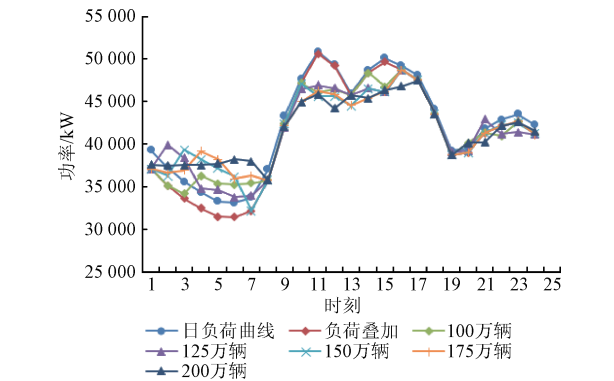


图 10 反调峰情形下电动汽车数量对其影响

Fig. 10 The impact of the number of electric vehicles under anti-peaking situation

表 8 反调峰情形 EVs 数量等级对应的目标函数值
Table 8 The objective function values corresponding to quantity grade of EVs under anti-peaking situation

EV 数量(万辆)	100	125	150	175	200
适应度值	5.66×10^8	5.44×10^8	4.69×10^8	3.93×10^8	3.28×10^8

3)5% 渗透率下,常规、反调峰和正调峰风电出力的 V2G 调度结果以及相应的目标函数适应度值分别如图 9~11 和表 7~9 所示。

从图 3~11 可以发现一个明显的趋势,即在负荷需求高峰期,电动汽车动力电池参与电网互动可以有效的降低电网负荷值,达到“削峰”作用,同时在负荷需求低

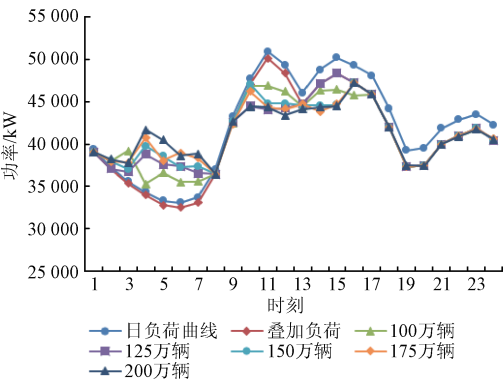


图 11 正调峰情形下电动汽车数量对其影响
Fig. 11 The impact of the number of electric vehicles under positive peaking situation

表 9 正调峰情形 EVs 数量等级对应的目标函数值
Table 9 The objective function values corresponding to quantity grade of EVs under positive peaking situation

EV 数量(万辆)	100	125	150	175	200
适应度值	3.92×10^8	3.44×10^8	2.89×10^8	2.53×10^8	2.23×10^8

谷期,大量电动汽车进行充放电可以拉高电网负荷值,达到“填谷”作用,整体上实现对日负荷曲线“削峰填谷”的作用。进一步根据表 1~9 也可以发现,随着电动汽车参与电网互动的数量越多,目标函数的适应度呈现一个减小的趋势。

但是风电的不同出力情形,不同渗透率对整个 V2G 调度影响又有些微小的差别。对比分析 3 种情形,可以发现在正调峰情形下的调度最为简单,结果也最好,这是因为该风电出力结果对原始负荷的低谷期影响不大,但对负荷需求高峰期又可以提供大量的风电,不足的可以由 V2G 快速响应,实现整个负荷曲线的平稳变化。

4.2 一定数量等级的电动汽车对不同风电渗透率的接纳能力

在给定数量等级的电动汽车参与电网互动研究对不同风电渗透率的接纳能力中,由于图 3~11 已经展示,故不重复给出。针对常规、反调峰和正调峰 3 种情形,在不同渗透率和一定数量等级电动汽车下,目标函数适应度值汇总表 10,以 200 万辆电动汽车参与电网互动为例,100 万辆、125 万辆、150 万辆及 175 万辆则不重复给出。

表 10 不同风电出力情形对应的目标函数适应度值
Table 10 The objective function fitness values under different wind output situations

	5% 渗透率	10% 渗透率	20% 渗透率
常规情形	2.53×10^8	2.72×10^8	3.00×10^8
反调峰情形	3.28×10^8	4.49×10^8	7.77×10^8
正调峰情形	2.23×10^8	2.20×10^8	2.16×10^8

根据表 10 可以发现风电的常规出力和反调峰出力情形,风电的渗透率越大调度越困难,其目标函数的适应度值越大,而正调峰则相反,这是因为在正调峰时,风电出力在负荷需求高峰期,渗透率越大越能够满足负荷的高峰需求;而负荷需求低谷期变化时,随着风电渗透率的增加,负荷曲线的峰谷值可以减小,这是因为 V2G 调度更为简单,结果也更好。

5 结 论

本文主要研究了电动汽车动力电池与风电协同优化调度策略。首先建立了电动汽车参与电网互动与风电出力协同利用的模型,并提出了电动汽车的可用时间、电池剩余容量和充放电功率 3 个约束条件,然后采用线性递减惯性权值的改进 PSO 算法进行求解,最后实验验证了电动汽车风电协同模型的有效性,实现了对负荷曲线削峰填谷,为风电与电动汽车充电网络的规划和调度策略提供理论依据和技术支撑。由于风电的随机性和波动性,进一步结合风电预测进行风电与电动汽车的协调优化是一项将来十分值得研究的工作。

参考文献

[1] 迟永宁,刘燕华,王伟胜,等. 风电接入对电力系统的影响[J]. 电网技术,2007,31(3):81-85.
CHI Y N,LIU Y H,WANG W SH,et al. Study on impact of wind power integration on power system[J]. Power System Technology,2007,31(3):81-85.

[2] 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):750-753.
DONG L,LIAO X ZH,LIU G CH,et al. Multi-index optimization control strategy based on distributed PV and wind energy complemental generation system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2005,26(8):750-753.

[3] 王锡凡,邵成成,王秀丽,等. 电动汽车充电负荷与调度控制策略综述[J]. 中国电机工程学报,2013,33(1):1-10.
WANG X F,SHAO CH CH,WANG X L,et al. Survey of electric vehicle charging load and dispatch control strategies[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(1):1-10.

[4] KEMPTON W, TOMIC J. Vehicle-to-grid power implementation:From stabilizing the grid to support large scale renewable energy[J]. Journal of Power Source,2005,144(1):280-294.

[5] HUTSON C, VENAYAGAMOORTHY G K,CORZINE K A. Intelligent scheduling of hybrid and electric vehicle

- storage capacity in a parking lot for profit maximization in grid power transactions [C]. IEEE Energy 2030 Conference, 2008:1-8.
- [6] LOPES J A P, SOARES F J, ALMEIDA P M R. Identifying management procedures to deal with connection of electric vehicles in the grid [C]. IEEE Bucharest Power Tech: Innovative Ideas toward the Electrical Grid of the Future, 2009:1-8.
- [7] 吴顺风, 江明, 杨晨悦, 等. 分布式电源并网后的自适应负载反孤岛方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(1):52-57.
- WU SH F, JIANG M, YANG CH Y, et al. Adaptive load anti-islanding method of grid-connected distributed power system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(1):52-57.
- [8] 刘波, 邱晓燕. 主动配电网储能优化规划[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(5):1180-1186.
- LIU B, QIU X Y. Optimized energy storage planning of active distribution network [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(5):1180-1186.
- [9] TURTON H, MOURA F. Vehicle-to-grid systems for sustainable development: an integrated energy analysis[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2008, 75(8):1091-1108.
- [10] KEMPTON W, LETENDRE S. Electric vehicles as a new power source for electric utilities [J]. Transportation Research (Part D), 1997, 2(3):157-175.
- [11] SOARES J, CANIZES B, MORAIS H, et al. Multi-objective parallel particle swarm optimization for day-ahead vehicle-to-grid scheduling [C]. Computational Intelligence Applications In Smart Grid (CIASG), IEEE, 2013:138-145.
- [12] 韩海英, 和敬涵, 王小君, 等. 基于改进粒子群算法的电动车参与负荷平抑策略[J]. 电网技术, 2011, 35(10):165-169.
- HAN H Y, HE J H, WANG X J, et al. An improved particle swarm optimization-based load response strategy with participation of vehicle to grid [J]. Power System Technology, 2011, 35(10):165-169.
- [13] 于大洋, 宋曙光, 张波, 等. 区域电网电动汽车充电与风电协调调度的分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14):24-29.
- YU D Y, SONG SH G, ZHANG B, et al. Synergistic dispatch of PEVs charging and wind power in chinese regional power grids [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14):24-29.
- [14] 黄海丽, 周杨. 风电电动汽车协同利用对电网风电接纳能力的影响[J]. 山东电力技术, 2014, 41(3):1-7.
- HUANG H L, ZHOU Y. Impact by synergistic dispatching of the PEV and wind power on the wind power integration in power grid [J]. Shandong Electric Power, 2014, 41(3):1-7.
- [15] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C]. Proceedings of IEEE Conference on Neural Networks, IEEE, 1995:1942-1948.
- [16] EBERHART R, KENNEDY J. A new optimizer using particle swarm theory [C]. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, IEEE, 1995:39-43.
- [17] EBERHART R C, SHI Y H. Particle swarm optimization: developments, applications and resources [C]. Proceedings of the IEEE Conference on Evolutionary Computation, IEEE, 2001:81-86.
- [18] 沈鑫, 曹敏, 周年荣, 等. 多微网配电系统协调优化调度度和经济运行研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(4):568-576.
- SHEN X, CAO M, ZHOU N R, et al. Research on coordinated optimal scheduling and economic operation of multi-microgrid distribution system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(4):568-576.
- [19] SHI Y H, EBERHART R C. Empirical study of particle swarm optimization [C]. Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation, IEEE, 1999:1945-1950.

作者简介



李雪亮, 高级工程师, 研究方向为智能电网规划。

Li Xuiliang is a senior engineer. His main research interest includes smart grid planning.



吴奎华, 高级工程师, 研究方向为配电网规划及规划信息化。

Wu Kuihua is a senior engineer. His main research interest includes distribution network planning and planning informationization.



冯亮, 高级工程师, 研究方向为智能配电网规划及电动汽车充电设施规划。

Feng Liang is a senior engineer. His main research interest includes smart distribution network planning and electric vehicle charging infrastructure planning.



杨波, 工程师, 研究方向为电网规划设计技术。

Yang Bo is an engineer. His main research interest includes electric power network planning and designing technology.



李昭, 工程师, 研究方向为中低压配网规划技术。

Li Zhao is an engineer. His main research interest includes Mid & Low-voltage distribution network planning technology.



李雪, 副教授, 研究方向为电力系统分析与运行。

E-mail: lixue@i.shu.edu.cn

Li Xue is an associate professor. Her main research interest includes power system analysis and operation.



陈豪杰 (通讯作者), 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与运行。

E-mail: chenhaojiewarren@hotmail.com

Chen Haojie (Corresponding author) is a M. Sc. candidate. His main research interest includes power system analysis and operation.

是德科技助力中国电信 NB - IoT 测试

芯片、模块和终端厂商验证和优化产品设计的功耗性能、射频指标和互操作性以满足运营商需求

是德科技 (NYSE: KEYS) 日前宣布其蜂窝物联网 (Cellular-IoT) 测试解决方案支持中国电信窄带蜂窝物联网 (NB-IoT) 测试方案, 加速芯片和模块标准认证流程。是德科技提供的 NB-IoT 综合测试仪器 E7515A 在一致性和功耗测试等方面展示了强大的功能, 目前也是唯一一家能够同时提供这些测试方案的厂家。

NB-IoT 是 3GPP 定义的基于窄带的蜂窝物联网技术, 通过利用现有的网络基础设施, 移动运营商可以快速部署基于物联网的各种应用和服务。NB-IoT 相对于其他的技术在物联网方面具有显著优势, 全球众多运营商也纷纷宣布了支持该技术。

NB-IoT 技术的革新也对新设备在功耗性能等方面带来了全新的挑战。为了应对 NB-IoT 的部署、商用潜在的问题, 运营商制定了针对 NB-IoT 的测试来保证用户体验。是德科技和中国电信就 NB-IoT 测试进行了密切的合作, 并于近期展开了测试验证。

“是德科技的基于 UXM 的解决方案是市场上首个支持 NB-IoT 和 Cat M1 射频指标和功耗测试的解决方

案。和中国电信的以及其他产业先锋的合作让是德科技成为提供从产品设计、验证、互操作性和运营商认证的全套蜂窝物联网测试解决方案供应商。”是德科技无线运营商和实验室部门高级总监 Garrett Lees 表示。

是德科技无线解决方案

从 WLAN 到 LTE-Advanced 以及最新的 5G 技术, 是德科技专注于提供最丰富的解决方案选择, 帮助客户解决业界最棘手的设计与测试问题。借助是德科技最先进的电子测量解决方案以及功能强大的台式和模块化硬件与软件, 工程师能够获得更深入的设计与测试洞察, 覆盖从仿真到研发、从验证到制造以及从一致性测试到部署的整个流程。专家工程师深厚的蜂窝与 WLAN 标准制定经验, 加上全球数以百计的应用工程师, 是德科技能够凭借精湛的技术与经验帮助客户应对挑战。如需了解更多信息, 请访问 www.keysight.com/find/UXM 和 www.keysight.com/find/cellular。如欲浏览包括应用指南、CD 和其他丰富资料的知识库, 请访问 www.keysight.com/find/lte-a-insight。