

计及需求响应的风电-电动汽车协同调度多目标优化模型

侯建朝¹, 胡群丰¹, 谭忠富²

(1. 上海电力学院 经济与管理学院, 上海 200090; 2. 华北电力大学 经济与管理学院, 北京 102206)

摘要: 随着大规模风电并网, 调度和弃风问题严重, 且电动汽车无序、随机性入网也可能增加发电侧资源的负担。针对此问题, 建立计及需求响应的风电与电动汽车协同调度的多目标优化模型, 通过价格机制引导电动汽车入网, 以负荷方差和车主支付费用最小为目标, 并协调优化发电侧资源消纳风电。采用 NSGA-II 算法求解模型, 基于模糊决策理论求取其 Pareto 解集的折中解。算例分析表明: 通过价格机制引导电动汽车入网能够削减负荷峰谷差和车主的支付费用; 同时降低了火电机组的运行费用, 尤其是火电机组的启停费用; 不同的分时电价浮动比例对电动汽车入网的影响不同。

关键词: 电动汽车; 风电; 联动调度; 需求响应; NSGA-II; 电价浮动

中图分类号: TM 732; TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.07.004

0 引言

风电具有随机、波动性特点, 并网后将增大电网的调度压力, 并且风电并网消纳的问题严重^[1]; 同时, 电动汽车无序、大规模入网也将增大电网的调度压力^[2]。近些年电动汽车 V2G (Vehicle to Grid) 技术受到了广泛关注和研究^[3-5], 通过该技术可为电网和车主互动双赢建立新的桥梁, 并且可以配合风电等新能源的并网, 提高了可再生能源利用率。另一方面, 电动汽车与风电都具有符合低碳发展要求的潜力, 符合我国可持续发展的规划需求, 有重要的研究意义。由于电动汽车更具有社会性, 所以有必要深入研究如何合理安排电动汽车参与含有风电的电网调度, 探讨发电侧资源和负荷侧资源互动的新模式。

电价响应作为需求响应的一种重要形式, 以电价为信号引导或改变用户用电方式, 达到增加用户收益和利于电网的目的。目前国内外对电价机制引导车主入网配合风电并网消纳的研究还较少, V2G 的实现大多是电动汽车车主被动地接受电网的调控, 目前自动调控技术的实现有一定的困难, 因此电价机制引导成为主要的优选策略^[6]。在市场条件下, 通过价格杠杆引导用户充放电行为, 将更有利于加快我国电动汽车的普及速率和提高普及效果。在发电侧和负荷侧互动的情况下, 更多的灵活的电动汽车积极参与电网调度规划, 为智能电网发展和电力低碳可持续发展打下基础。

文献[7-10]详细研究了通过电价引导电动汽车

有序充电的策略, 但是并没有考虑电动汽车放电的分布情况。文献[11-13]从电网侧角度出发直接调控电动汽车接入电网来构建电力系统经济调度模型, 但是并未计及负荷侧车主的满意度, 不能广泛提高车主的积极性。文献[14-15]从电网利益和考虑车主满意度的角度出发, 建立电动汽车车主对电价变化的需求响应模型, 并改善了负荷曲线, 但并没有考虑将电动汽车配合优化含有风电等可再生能源并网的电源侧的模式。不同的求解算法, 对目标的求解效果不同, 文献[16]通过遗传算法求解以峰谷差率最小为目标的优化模型; 文献[17]采用交叉遗传粒子群算法以 5 辆电动汽车作为优化对象, 将车主费用和负荷波动通过加权方法化成单目标进行求解, 但是不同的权重对目标的影响是不同的。

在上述背景下, 本文建立了计及需求响应的风电与电动汽车协同调度的多目标优化模型, 通过价格机制引导电动汽车入网, 以平移负荷波动和降低车主支付费用为目标并协调优化发电侧资源, 通过模糊决策理论求取具有多目标求解能力的 NSGA-II 算法 Pareto 解集的折中解, 并且对不同模式的电价响应进行了对比分析。

1 风电-电动汽车协同调度多目标优化模型

1.1 目标函数

现有文献大多是引入电动汽车来对风电的波动性进行削峰填谷, 然后将平滑后的风电调度并网, 以减少对电网的影响, 这样虽然能够减少对电网的冲击, 但是并不能减少并网后的负荷高峰低谷差, 因此本文联动调度风电和电动汽车协同并网, 以并网后的负荷方差最小为优化目标, 这样既能缓和风电并网对电网的冲击, 又能减小负荷波动性。考虑到电动汽车的社会性, 应兼顾到电动汽车车主的利益, 让车主积极参与电网调度, 因此也应建立电动汽车车

收稿日期: 2015-05-29; 修回日期: 2016-05-23

基金项目: 上海市哲学社会科学项目(中国省区电力生产碳排放和电力消费隐含碳排放差异及其驱动因素研究)(2012-BJB006)

Project supported by Shanghai Philosophy and Social Science Project(Research on the Provincial Differences of Carbon Dioxide Emissions in Electricity Production and Carbon Dioxide Emissions Embodied in Electricity Consumption in China and its Driving Factors)(2012BJB006)

主支付费用最小的目标函数,通过联动调度配合发电侧资源进行优化求解,以单位时间内电动汽车入网功率为优化变量,为此,本文建立以下 3 个目标函数。

a. 目标函数 1: 负荷方差最小。

$$\min f_1 = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T (p_{i,\text{load}} + p_{i,\text{ev}} - p_{i,\text{wind}} - p_{\text{av}})^2 \quad (1)$$

其中, T 为一个调度周期,本文取为 24 h,以单位时间为时间跨度; $p_{i,\text{load}}$ 、 $p_{i,\text{wind}}$ 分别为 i 时刻预测的基础负荷和风电功率; $p_{i,\text{ev}}$ 为 i 时刻电动汽车入网的功率,其值为正时,表示电动汽车入网充电,其值为负时,表示电动汽车入网放电; p_{av} 为调度周期内的平均负荷,可以表示为 $p_{\text{av}} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T (p_{i,\text{load}} + p_{i,\text{ev}} - p_{i,\text{wind}}) / 24$ 。由于本文研究的是如何引导电动汽车入网减小风电并网给系统带来的更大的负荷波动,因此定义本文模型和算例中的负荷、基础负荷分别指代某个地区的风电并网后的负荷和预测的基础负荷。

b. 目标函数 2: 车主的支付费用最小。

$$\min f_2 = \sum_{i=1}^T (p_{i,\text{ev}} C_i + C_i^b) \quad (2)$$

其中, C_i 为电动汽车 i 时刻的充放电价格; C_i^b 为 i 时刻的电池损耗成本,电池损耗成本为充放电能折合的电池费用率 C_d 乘以实际的充放电电量^[18-20]。实际电动汽车充放电电量即为本文所求的优化变量,因此 i 时刻损耗成本可以表达为 $|p_{i,\text{ev}}| C_d$,为了简化计算,验证本文模型的可行性和有效性,可以设电池寿命按使用 1500 次且每次平均达到电池容量 80% 计算,此时的 C_d 为 0.42 元/(kW·h)^[20]。为了便于对比分析,本文设定同一时刻电动汽车从电网充电价格和向电网馈电补贴价格相同。

c. 目标函数 3: 火电机组运行费用最小。

$$\min f_3 = \sum_{i=1}^T \sum_{n=1}^N [F_n(p_{in}) + C_{in} I_{in} (1 - I_{(i-1)n})] \quad (3)$$

其中, N 为火电机组台数; p_{in} 为 i 时刻第 n 台火电机组的出力; $F_n(p_{in})$ 为 i 时刻第 n 台火电机组的燃煤费用,可以表示为 $F_n(p_{in}) = a_n + b_n p_{in} + c_n p_{in}^2$, a_n 、 b_n 、 c_n 为第 n 台火电机组的燃煤费用系数; I_{in} 为 i 时刻第 n 台火电机组的开停机状态, $I_{in} = 1$ 表示开机状态, $I_{in} = 0$ 表示停机状态; C_{in} 为 i 时刻第 n 台火电机组的开停机费用,可以表示为式(4)。

$$C_{in} = \begin{cases} C_{n,\text{h}} & T_{n,\text{down}} < X_{in,\text{down}} < H_{n,\text{down}} \\ C_{n,\text{c}} & X_{in,\text{down}} > H_{n,\text{down}} \end{cases} \quad (4)$$

$$H_{n,\text{down}} = T_{n,\text{down}} + T_{n,\text{cs}} \quad (5)$$

其中, $C_{n,\text{c}}$ 为第 n 台火电机组的冷启动费用; $C_{n,\text{h}}$ 为第 n 台火电机组的热启动费用; $T_{n,\text{down}}$ 为第 n 台火电机组的最小允许停机时间; $X_{in,\text{down}}$ 为 i 时刻第 n 台火电机组的连续停机时间; $T_{n,\text{cs}}$ 为第 n 台火电机组的冷启动时间。这里没有考虑火电机组的停机费用。

1.2 约束条件

a. 系统约束。

$$\sum_{n=1}^N p_{in} + p_{i,\text{wind}} = p_{i,\text{load}} + p_{i,\text{ev}} \quad (6)$$

b. 电动汽车约束。

电动汽车充放电功率约束为:

$$-N_{i,\text{park}} p_d \leq p_{i,\text{ev}} \leq N_{i,\text{park}} p_c \quad (7)$$

其中, p_c 、 p_d 分别为单辆电动汽车充、放电功率; $N_{i,\text{park}}$ 为 i 时刻停驶的电动汽车数量。

电动汽车电池储存容量约束为:

$$\alpha N_{\text{ev}} q_{\text{ev},\text{max}} \leq Q_i \leq \beta N_{\text{ev}} q_{\text{ev},\text{max}} \quad (8)$$

其中, β 、 α 分别为电池储存容量的上、下限极值参数,为了保证电动汽车电池的寿命,应防止深度充放电,并且应该满足一部分的余额,因此调度中应设置电动汽车电池剩余容量的上下限约束; $q_{\text{ev},\text{max}}$ 为单辆电动汽车最大储存容量; N_{ev} 为电动汽车总数量。下一时刻电动汽车剩余的储存容量在单位时间内满足调度中心充放电调度后还应同时满足电动汽车的行驶消耗。因此有:

$$Q_{i+1} = Q_i + \eta p_{i,\text{ev}} \Delta t - Q_{i,\text{drive}} \quad (9)$$

$$Q_{i,\text{drive}} = (1 - \mu_i) N_{\text{ev}} Q_{\text{km}} v_{\text{ev}} \Delta t \quad (10)$$

其中, η 为电动汽车充放电效率; Δt 为单位时间; $Q_{i,\text{drive}}$ 为 i 时刻电动汽车满足行驶需求所消耗的电池容量; μ_i 为 i 时刻电动汽车停驶的概率; Q_{km} 为电动汽车每 km 消耗的电池容量; v_{ev} 为电动汽车的平均行驶速率。

c. 火电机组约束。包括火电机组的上下限约束、火电机组的爬坡约束、火电机组的最小允许开停机时间约束、火电机组的旋转备用约束。

$$\begin{cases} p_{n,\text{min}} \leq p_{in} \leq p_{n,\text{max}} \\ p_{in} - p_{(i-1)n} \leq \xi_{\text{up}}, \quad p_{(i-1)n} - p_{in} \leq \xi_{\text{down}} \\ T_{n,\text{up}} \leq T_{in,\text{up}}, \quad T_{n,\text{down}} \leq T_{in,\text{down}} \\ \sum_{n=1}^N p_{n,\text{max}} I_{in} + p_{i,\text{wind}} > p_{i,\text{ev}} + p_{i,\text{load}} + R_i \end{cases} \quad (11)$$

其中, $p_{n,\text{max}}$ 、 $p_{n,\text{min}}$ 分别为第 n 台火电机组有功出力的上、下限值; ξ_{up} 、 ξ_{down} 分别为第 n 台火电机组有功出力的上升速率和下降速率极限值; $T_{n,\text{up}}$ 、 $T_{n,\text{down}}$ 分别为第 n 台火电机组的最短允许运行时间和最短允许停机时间; $T_{in,\text{up}}$ 、 $T_{in,\text{down}}$ 分别为 i 时刻第 n 台火电机组连续运行时间和连续停机时间; R_i 为 i 时刻系统的旋转备用需求,一般设定为总负荷的 10%。

2 风电-电动汽车协同调度多目标优化模型求解

2.1 NSGA-II 算法

由于本文为多目标优化模型,NSGA-II 算法在求解多目标优化模型方面有优势,所以本文采用 NSGA-II 算法进行优化模型的求解。NSGA-II 算法是

由 Deb 等学者针对 NSGA 算法的缺点改进而来,通过引入快速非支配排序技术,提高了算法的速度,同时引入精英保留算子和拥挤距离算子,保证了种群的多样性,改进后的算法能获得分布均匀、多样性良好的 Pareto 解集^[21]。

本文为电动汽车在电价响应下入网使负荷方差最小和车主费用最少,同时配合发电侧资源最优化的多目标问题,通常此类多目标优化问题是在一组约束条件下,使得多个目标函数都趋于最优,可以表示为:

$$\begin{cases} \min \mathbf{f}(\mathbf{x})=[f_1(\mathbf{x}),f_2(\mathbf{x}),\cdots,f_m(\mathbf{x})] \\ \text{s.t. } h_i(\mathbf{x})=0 \quad i=1,2,\cdots,Q \\ g_j(\mathbf{x})\leq 0 \quad j=1,2,\cdots,J \end{cases} \quad (12)$$

其中, m 为目标函数的个数; Q 、 J 分别为等式约束和不等式约束的个数。

多目标优化问题中,其实不存在一组解使得所有目标函数同时达到各自的最优值,在优化变量求解时,各个目标函数值一般是互相矛盾的,目标函数之间是互相牵制的过程,所以,多目标优化问题只能求得非支配解集或 Pareto 解集。

2.2 模糊求解

决策者需要从 Pareto 的解集中选取一个最终解。因此可以通过模糊理论来求解多目标的最优折中解^[22-23]。常用的模糊满意度函数有偏小型满意度函数、中间型满意度函数、偏大型满意度函数。本文在求解电动汽车车主费用支出和负荷峰谷差最小化的博弈中,追求的是最小化目标函数,宜选用偏小型模糊隶属度函数表示,使得目标函数值越小模糊满意度函数值越接近于 1。有以下定义:

$$\omega_i=\begin{cases} 1 & f_i\leq f_i^{\min} \\ \frac{f_i^{\max}-f_i}{f_i^{\max}-f_i^{\min}} & f_i^{\max}>f_i>f_i^{\min} \\ 0 & f_i\geq f_i^{\max} \end{cases} \quad (13)$$

$$\omega=\frac{1}{m}\sum_{i=1}^m\omega_i \quad (14)$$

其中, ω_i 等于 0、1 时分别表示对第 i 目标函数值完全不满意和完全满意; f_i 为目标函数; $f_i^{\max}$ 、 $f_i^{\min}$ 分别为第 i 个目标函数的最大值和最小值。然后采用式 (13)求得标准化 Pareto 解集中解的标准化满意度,通过式 (14)比较选取出具有最大 ω 值的 Pareto 最优解作为最优折中解。

3 算例分析

3.1 参数设置

为了验证上述模型的合理性和有效性,本文以 10 台火电机组^[24]、1 个风电场、10000 辆电动汽车参与调度的算例进行仿真求解。以 24 h 为调度周期,单位时间为时间跨度。本文模型中的电池和电动汽车为同型号,参数如表 1 所示;电动汽车停驶概率函

数如图 1 所示,为了计算简便,本文设定调度周期初始时刻的电动汽车电池剩余容量为总的电池最大容量的 50%。本文在 MATLAB 平台对优化模型进行仿真研究。

表 1 电池和电动汽车参数
Table 1 Parameters of battery and EV

参数	取值
电池最大储存容量 $q_{ev,max}$	30 kW·h
电池深度放电下限参数 α	0.2
电池深度充电上限参数 β	0.8
电动汽车充放电效率 η	0.95
电动汽车充放电功率 p_c,p_d	5 kW
电动汽车平均行驶速率 v_{ev}	40 km/h
电动汽车每 km 消耗的容量 Q_{km}	0.2 kW·h

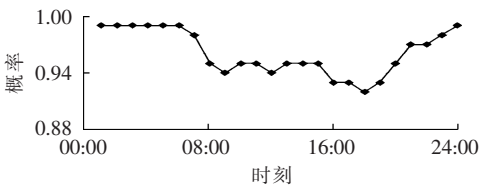


图 1 调度周期内电动汽车的停驶概率
Fig.1 EV parking probability in dispatch period

合适的分时电价依赖于合适的峰平谷时段划分,只有合理的风电和峰平谷时段划分才能体现较好的需求侧管理作用,基于某个地区的风电和基础负荷的波动情况,本文采用基于 k 均值聚类算法的划分方法对峰平谷时段进行了有效划分。本文中风电并网后的负荷曲线的峰平谷时段划分情况如下:峰时段为 08:00—14:00、19:00—21:00,平时段为 05:00—08:00、14:00—15:00、18:00—19:00、21:00—22:00,谷时段为 22:00 至次日 05:00、15:00—18:00。

表 2 风电和基础负荷的 24 h 预测值
Table 2 Predicted hourly wind powers and basic loads

时刻	基础负荷/MW	风电/MW	时刻	基础负荷/MW	风电/MW
01:00	700	180	13:00	1400	70
02:00	750	155	14:00	1300	110
03:00	850	95	15:00	1200	125
04:00	950	125	16:00	1050	180
05:00	1000	175	17:00	1000	185
06:00	1100	150	18:00	1100	210
07:00	1150	140	19:00	1200	165
08:00	1200	95	20:00	1400	200
09:00	1300	40	21:00	1300	115
10:00	1400	20	22:00	1100	80
11:00	1450	85	23:00	900	20
12:00	1500	95	24:00	800	80

3.2 结果分析

3.2.1 不考虑电动汽车电价响应入网的对比分析
为了对比是否考虑电动汽车电价响应入网的效果,本文首先按照算例中的数据对风电并网前后的

优化结果进行了对比和分析。从表 3 中可以看出,风电并网后火电机组的总费用明显减少,这也是我国推动新能源发展、减少一次能源消耗的鼓励政策推动原因所在;如果从总费用的两部分,即启停的费用和燃料的费用角度来看,火电机组启停的费用明显增加,这也证明了以风电等为代表的新能源虽有很大的发展前景,但是它们具有的波动性等不确定性性质在并网后给系统带来了不利影响,火电机组不得不通过留有足够的调峰备用和频繁的启停来平衡新能源发电的波动性;同时调度周期内负荷方差增加了 8949 MW²,明显表明风电的并网对系统的影响是很大的。如何在最大限度接纳风电的同时减少风电对系统的影响,并且减少一次能源的消耗,就需要通过引入负荷侧的资源参与调度,利用负荷侧的资源来平抑风电的波动性,形成电源侧的资源和负荷侧的资源互动的新模式。

表 3 风电并网前后优化结果比较

Table 3 Comparison of optimization results between before and after grid-connection of WP

条件	负荷方差/ MW ²	启停 费用/元	燃料 费用/元	总费用/元
风电不并网	50190	40900	5 598 900	5 639 800
风电并网	59139	54900	4 912 100	4 967 000
结果变化	8949(↑)	14000(↑)	686 800(↓)	672 800(↓)

3.2.2 考虑电动汽车电价响应入网的对比分析

将电动汽车通过电价响应引入到含有风电的电力系统优化调度中,就形成了通过调度负荷侧资源来配合含有风电并网的新模式。本文中电价按基础电价即平时段电价 0.71 元/(kW·h)上下浮动 30% 制定,即峰时段电价为 0.923 元/(kW·h),谷时段电价为 0.497 元/(kW·h)。图 2 为电动汽车入网前后负荷曲线,图 3 为调度周期内电动汽车根据电价响应的充放电功率分布,可以看出,在负荷高峰时段停驶的电动汽车车主会选择高价放电,以获得收入,在负荷低谷时段停驶的电动汽车车主会选择低价充电,以获得为满足行驶需要和在电价高峰时段放电的容量储备的准备。达到了在电价响应下,电动汽车车主会在满足自身需求的情况下,根据电价杠杆效

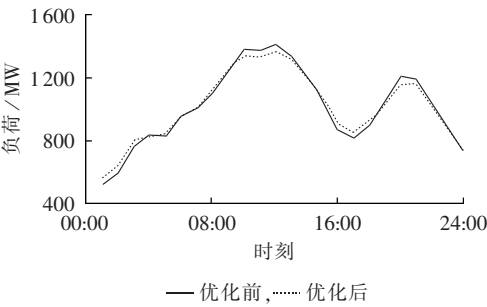


图 2 电动汽车并网前后负荷曲线

Fig.2 Comparison of load curve between before and after grid-connection of EV

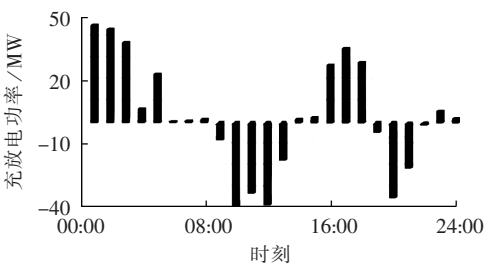


图 3 电动汽车充放电功率分布

Fig.3 Distribution of EV charging/discharging power

应自主进行充放电的目的,不仅平移了负荷高峰低谷差,同时还获得了一定收入,为电动汽车车主进行自身电池的更换和维修留下了备用资金,必然将提高电动汽车车主参与电网调度的积极性。表 4 为电动汽车入网前后的优化结果,可以看出负荷方差减少了 17.2%,减轻了电网调度压力,同时火电机组的启停机费用也明显下降,配合了含有风电并网的发电侧资源的优化目的。

表 4 电动汽车入网前后优化结果

Table 4 Comparison of optimization results between before and after grid-connection of EV

条件	负荷方差/ MW ²	启停 费用/元	燃料 费用/元	总费用/元
电动汽车并网前	59139	54900	4 912 100	4 967 000
电动汽车并网后	48972	45900	4 914 700	4 960 600
结果变化	10167(↓)	9000(↓)	2600(↑)	6400(↓)

3.2.3 不同模式下的电动汽车电价响应对比分析

由于电价的制定不同,车主的充放电选择倾向性也不同,有必要考虑电价浮动对优化结果的影响。所以,为了便于形成更加完善的电价政策理论,需要对峰谷电价浮动进行敏感性分析。本节按基础电价即平时段电价上下浮动 40%、50%、60% 与 3.2.2 节浮动 30% 的模式作对比分析,且不考虑尖峰时段的电价制定。表 5 为 4 种模式下的峰平谷分时电价的制定结果,图 4 为电动汽车车主对不同模式电价响应下的充放电功率分布,在优化求解中可以看出,在电价杠杆作用下,电动汽车车主对某些时刻的敏感程度已经不强烈,但是在追求负荷方差最小和车主费用最小化的博弈中,还是能很好地引导车主将闲置的电动汽车在夜间负荷低谷时段进行充电,在负荷高峰时段进行放电。

电动汽车在不同电价响应下的敏感程度是不同的,图 5 为不同模式下电动汽车车主支付费用和负荷方差的优化结果,可以看出在电价上下浮动制定的越大,利益的驱动下,更多的电动汽车车主会在负荷高峰及电价较高时段进行更多的放电,在负荷低谷及电价较低时段进行更多的充电,这不仅减少了费用支出,而且系统负荷方差也减小得更多;同时满足了调度中心引入负荷侧的电动汽车参与调度而减

表 5 不同模式的分时电价
Table 5 Time-of-use price for different modes

模式	电价/[元·(kW·h) ⁻¹]		
	峰时段	平时段	谷时段
1	0.923	0.71	0.497
2	0.994	0.71	0.426
3	1.065	0.71	0.355
4	1.136	0.71	0.284

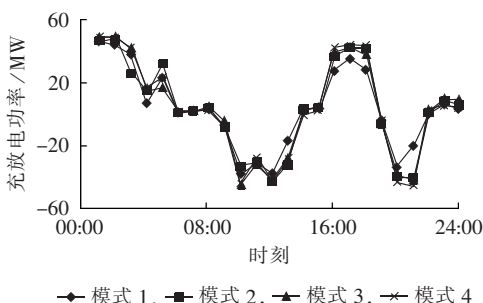


图 4 不同模式下的电动汽车充放电功率分布
Fig.4 Distribution of EV charging/discharging power for different modes

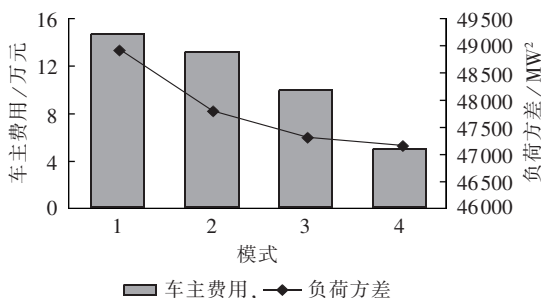


图 5 不同模式下的优化结果

Fig.5 Optimization results for different modes

少负荷波动性的目的。

4 结论

本文建立了计及需求响应的风电与电动汽车协同调度的多目标优化模型,通过价格机制引导电动汽车入网,以负荷方差和车主支付费用最小为目标并且协调优化发电侧资源,形成了发电侧资源和负荷侧资源协调优化配合风电并网消纳的新模式,得出以下结论:

a. 电价响应下电动汽车车主能够自主选择时段进行充放电,这不仅削减了高峰低谷差,而且减少了车主费用支出,必然能够调动电动汽车车主参与电网调度的积极性,将有利于提高电动汽车的普及速率,为电动汽车和电网互动提供了参考;

b. 基于模糊决策理论和 NSGA-Ⅱ 算法对算例进行了仿真求解,降低了含有风电并网消纳的火电机组的运行费用,特别是大幅降低了火电机组的启停费用,同时,不同的分时电价浮动比例对电动汽车入网的影响不同;

c. 本文验证了电动汽车车主能够在需求响应下

积极参与含有风电的电网调度,但是本文没有考虑风电的随机性特点,如何将风电的随机性与电动汽车有效联动调度配合优化含有风电并网消纳的发电侧资源,是下一步需要研究的内容。

参考文献:

[1] 薛禹胜,雷兴,薛峰,等. 关于风电不确定性对电力系统影响的评述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):5029-5040.
XUE Yusheng,LEI Xing,XUE Feng,et al. A review on impacts of wind power uncertainties on power systems[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(29):5029-5040.

[2] 胡泽春,宋永华,徐智威,等. 电动汽车接入电网的影响与利用[J]. 中国电机工程学报,2012,32(4):1-10.
HU Zechun,SONG Yonghua,XU Zhiwei,et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems [J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(4):1-10.

[3] SABER A Y,VENAYAGAMOORTHY G K. Intelligent unit commitment with vehicle-to-grid—a cost-emission optimization[J]. Journal of Power Sources,2010,195(3):898-911.

[4] KIVILUOMA J,MEIBOM P. Influence of wind power,plug-in electric vehicles,and heat storages on power system investments [J]. Energy,2010,35(3):1244-1255.

[5] 陆凌蓉,文福拴,薛禹胜,等. 计及可入网电动汽车的电力系统机组最优组合[J]. 电力系统自动化,2011,35(21):16-20.
LU Lingrong,WEN Fushuan,XUE Yusheng,et al. Unit commitment in power systems with plug-in electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(21):16-20.

[6] 项顶,宋永华,胡泽春,等. 电动汽车参与 V2G 的最优峰谷电价研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(31):15-25.
XIANG Ding,SONG Yonghua,HU Zechun,et al. Research on optimal time of use price for electric vehicle participating V2G [J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(31):15-25.

[7] 张振夫,黄小庆,曹一家,等. 考虑分时电价的电动汽车充电负荷计算[J]. 电力自动化设备,2014,34(2):24-29.
ZHANG Zhenfu,HUANG Xiaoqing,CAO Yijia,et al. Charging load calculation considering TOU for electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(2):24-29.

[8] 徐智威,胡泽春,宋永华,等. 充电站内电动汽车有序充电策略[J]. 电力系统自动化,2012,36(11):38-43.
XU Zhiwei,HU Zechun,SONG Yonghua,et al. Coordinated charging of plug-in electric vehicles in charging stations[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(11):38-43.

[9] 徐智威,胡泽春,宋永华,等. 基于动态分时电价的电动汽车充电站有序充电策略[J]. 中国电机工程学报,2014,34(22):3638-3646.
XU Zhiwei,HU Zechun,SONG Yonghua,et al. Coordinated charging strategy for PEV charging stations based on dynamic time-of-use tariffs[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(22):3638-3646.

[10] ZHANG Huiying,AI Xin,GAO Zili,et al. Study on orderly charging management of EVs based on demand response[C]// Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 2014 IEEE Conference and Expo. Beijing,China:IEEE,2014:1-5.

[11] 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,2011,35(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,2011,35(20):22-29.

[12] 蔡德福,钱斌,陈金富,等. 含电动汽车充电负荷和风电的电力

- 系统动态概率特性分析[J]. 电网技术,2013,37(3):590-596.
- CAI Defu,QIAN Bin,CHEN Jinfu,et al. Analysis on dynamic probabilistic characteristic of power grid connected with electric vehicle charging load and wind power[J]. Power System Technology,2013,37(3):590-596.
- [13] 李惠玲,白晓民,谭闻,等. 基于智能电网的动态经济调度研究[J]. 电网技术,2013,37(6):1547-1554.
- LI Huiling,BAI Xiaomin,TAN Wen,et al. Research on dynamic economic dispatch based on smart grid[J]. Power System Technology,2013,37(6):1547-1554.
- [14] 高亚静,王辰,吕孟扩,等. 计及车主满意度的电动汽车最优峰谷分时电价模型[J]. 电力自动化设备,2014,34(2):8-12.
- GAO Yajing,WANG Chen,LÜ Mengkuo,et al. Optimal time-of-use price model considering satisfaction degree of electric vehicle owners[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(2):8-12.
- [15] 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.
- [16] 葛少云,黄镠,刘洪. 电动汽车有序充电的峰谷电价时段优化[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(10):1-5.
- GE Shaoyun,HUANG Liu,LIU Hong. Optimization of peak-valley TOU power price time-period in ordered charging mode of electric vehicle[J]. Power System Protection and Control,2012,40(10):1-5.
- [17] 魏大钧,张承慧,孙波,等. 基于分时电价的电动汽车充放电多目标优化调度[J]. 电网技术,2014,38(11):2972-2977.
- WEI Dajun,ZHANG Chenghui,SUN Bo,et al. A time-of-use price based multi-objective optimal dispatching for charging and discharging of electric vehicles[J]. Power System Technology,2014,38(11):2972-2977.
- [18] 陆凌蓉,文福控,薛禹胜,等. 电动汽车提供辅助服务的经济性分析[J]. 电力系统自动化,2013,37(14):43-49.
- LU Lingrong,WEN Fushuan,XUE Yusheng,et al. Economic analysis of ancillary service provision by plug-in electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(14):43-49.
- [19] 罗卓伟,胡泽春,宋永华,等. 大规模电动汽车充放电优化控制及容量效益分析[J]. 电力系统自动化,2012,36(10):19-26.
- LUO Zhuowei,HU Zechun,SONG Yonghua,et al. Coordinated charging and discharging of large-scale plug-in electric vehicles with cost and capacity benefit analysis[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(10):19-26.
- [20] WHITE C D,ZHANG K M. Using vehicle-to-grid technology for frequency regulation and peak-load reduction[J]. Journal of Power Sources,2011,196(8):3972-3980.
- [21] 江岳春,王志刚,杨春月,等. 微网中可控负荷的多目标优化策略[J]. 电网技术,2013,37(10):2875-2880.
- JIANG Yuechun,WANG Zhigang,YANG Chunyue,et al. Multi-objective optimization strategy of controllable load in microgrid[J]. Power System Technology,2013,37(10):2875-2880.
- [22] 栗然,申雪,钟超,等. 考虑环境效益的分布式电源多目标规划[J]. 电网技术,2014,38(6):1471-1478.
- LI Ran,SHEN Xue,ZHONG Chao,et al. Multi-objective planning of distributed generation considering environmental benefit[J]. Power System Technology,2014,38(6):1471-1478.
- [23] 鞠立伟,李欢欢,陈致宏,等. 基于两步制自适应求解算法的风电-电动汽车多种并网模式效益对比分析模型[J]. 电网技术,2014,38(6):1492-1498.
- JU Liwei,LI Huanhuan,CHEN Zhihong,et al. A benefit contrastive analysis model of multi grid-connected modes for wind power and plug-in hybrid electric vehicles based on two-step adaptive solving algorithm[J]. Power System Technology,2014,38(6):1492-1498.
- [24] TING T O,RAO M V C,LOO C K. A novel approach for unit commitment problem via an effective hybrid particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2006,21(1):411-418.

作者简介:



侯建朝

侯建朝(1973—),男,河南柘城人,副教授,博士研究生,主要研究方向为电力能源经济和管理(E-mail:hdshuoyu@126.com);

胡群丰(1990—),男,河南周口人,硕士研究生,主要研究方向为电动汽车与需求侧管理。

Multi-objective optimization model of collaborative WP-EV dispatch considering demand response

HOU Jianchao¹, HU Qunfeng¹, TAN Zhongfu²

(1. School of Economics and Management, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The large-scale grid-connection of WP(Wind Power) brings serious WP dispatch and discard problem while the disordered and random grid-connection of EVs(Electric Vehicles) may increase the burden on generation-side resources,aiming at which,a multi-objective optimization model of collaborative WP-EV dispatch considering demand response is established. It adopts the price mechanism to guide the grid-connection of EVs,takes the minimum load fluctuation and minimum EV payment as its objectives,and coordinates them with the optimization of generation-side resources to accommodate WP. NSGA-II algorithm is applied to solve the model and its compromise solution of Pareto set is obtained based on the fuzzy decision theory. Case analysis shows;the difference between peak and valley loads and the payment of EV owners are reduced;the operating cost of thermal power unit is lowered,especially its startup/shutdown cost;different floating proportions of time-of-use price have different effects on the grid-connection of EVs.

Key words: electric vehicles; wind power; collaborative dispatch; demand response; NSGA-II; price floating