

含电动汽车的虚拟电厂鲁棒随机优化调度

孙国强¹, 袁 智¹, 耿天翔², 王 运², 卫志农¹, 臧海祥¹

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏省南京市 211100; 2. 国网宁夏电力公司, 宁夏回族自治区银川市 750001)

摘要: 随着电动汽车和分布式电源接入电网的比例不断提升, 虚拟电厂为有效解决电动汽车、分布式电源并网提供了新思路。由于可调度充放电的电动汽车数量和分布式电源出力存在明显的不确定性, 因此虚拟电厂优化调度时必须考虑这些不确定性。在此背景下, 采用场景模拟技术处理风电出力的不确定性, 形成经典场景。针对可调度电动汽车数量的随机性与不确定性, 利用鲁棒优化方法建立了原模型的对偶模型, 构建含电动汽车的虚拟电厂鲁棒随机优化调度模型。算例分析证明了所提模型具有实用性和有效性, 在优化调度模型中考虑不确定性的影响, 可减小实际日运行成本, 提高优化策略的鲁棒性。结果表明鲁棒系数和置信水平影响了日运行成本, 通过合理制定燃气轮机等常规机组的发电计划可以减小日运行成本。

关键词: 虚拟电厂; 电动汽车; 分布式电源; 不确定性; 鲁棒随机优化

0 引言

电动汽车作为一种新型的交通工具, 其大规模应用在缓解全球能源短缺、环境污染及气候变化等危机方面具有显著的优势^[1-3]。与此同时, 随着新能源革命的不断深入, 以风电、光伏为主要形式的分布式电源得到了快速的发展, 到 2020 年中国风电机组装机容量预计将达到 200 GW^[4]。然而, 大规模电动汽车接入电网充电时将会产生新一轮的负荷增长, 加剧电网负荷峰谷差, 且作为一类移动负荷增加了电网运行的控制难度。另一方面, 各类分布式电源在地理位置上分布不均匀, 易受天气等自然因素影响, 其出力的间歇性和不确定性对电力系统的功率平衡、网络损耗等产生负面作用。

虚拟电厂(virtual power plant, VPP)的提出为解决上述问题提供了新的思路。VPP 并不改变各类分布式电源并网的方式, 而是通过先进的协调控制技术、智能计量技术及信息通信技术聚合各类分布式电源、电动汽车、储能系统等不同类型的元件, 通过上层的软件算法实现多个分布式能源的协调优化运行, 从而促进资源合理优化配置及利用^[5]。通过 VPP 聚合电动汽车和风电场参与电网运行, 利用

电动汽车中电池装置具有分布式储能单元的特性, 对电动汽车和风电场进行协调优化调度, 一方面可以有效缓解电动汽车无序充放电和风电场风电出力不确定性给电网产生的负面影响, 提高电动汽车和风电的接入容量; 另一方面丰富了电力系统的运行和控制手段, VPP 可以参与削峰填谷、提供频率稳定和备用容量等辅助服务。

目前, 在 VPP 的调度模型和策略方面, 国内外学者已开展了一定的研究。文献[6-7]根据合作博弈理论, 研究了含风光水 VPP 单独调度、与配电公司联合调度模型。文献[8]研究了 VPP 经济调度模型, 通过利用可控负荷抑制风电出力的不确定性提高收益。文献[9]研究了在电力市场背景下 VPP 中期优化调度模型, 模型中考虑了市场电价和分布式电源出力不确定性。文献[10]研究了基于机会约束规划的 VPP 经济调度模型, 采用机会约束规划处理分布式电源出力、负荷预测误差等多个随机变量。文献[11]以 VPP 作为分布式能源的能量管理方式, 研究了计及大规模分布式光伏的储能系统优化配置模型。

截至目前, 国内外学者对含电动汽车和风电场的 VPP 优化调度问题研究较少。文献[12]研究了含电动汽车 VPP 竞价策略问题, 在日前能量市场和调节市场背景下建立 VPP 联合竞价鲁棒优化模型。文献[13-14]研究了电动汽车参与下的 VPP 多目标优化调度, 模型中考虑了 VPP 运行对环境的影响。上述文献对 VPP 优化调度模型和策略的研究均取

收稿日期: 2016-05-23; 修回日期: 2016-09-08。

上网日期: 2016-11-08。

国家自然科学基金资助项目(51277052); 中国博士后科学基金资助项目(2015M571653); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2015B02714)。

得了一定的研究成果,但对含电动汽车的 VPP 调度问题研究较少。在处理 VPP 调度模型中的不确定性时多采用随机规划法和备用整定法,该类方法以不确定性因素准确的概率分布信息为前提,计算量较大;而鲁棒优化的方法应用较少。在应用鲁棒优化方法时,鲁棒系数对 VPP 优化调度的影响及如何在给定的风险偏好水平下确定鲁棒系数有待进一步研究。

在上述背景下,本文考虑由电动汽车、风电场和燃气轮机组组成 VPP,以最小化日运行成本为目标函数,计及可调度电动汽车数量和风电场风电出力的不确定性,构建含电动汽车和风电场 VPP 鲁棒随机优化调度模型。最后,通过算例分析证明提出的 VPP 鲁棒随机优化调度模型具有有效性和实用性,优化调度结果具有可靠性和经济性。同时,分析了 VPP 及电动汽车对日运行成本及环境的影响。

1 VPP 随机调度模型

1.1 VPP 与电网交互模式

本文利用 VPP 先进的协调控制技术、智能计量技术和信息通信技术聚合电动汽车,通过电动汽车集中控制器参与电网运行,可以有效地克服大量电动汽车无序充放电给电网产生的负面影响,与常规充电站、换电站相比具有更大的优势。为了积极引导用户注册电动汽车为 VPP 可调度的, VPP 会向用户提供优惠用电政策及相应的补贴。当用户注册后,须在约定的时间段内将其电动汽车连接到集中控制器的充放电设施上,服从 VPP 的调度安排。

VPP 中包含的集中控制器作为电动汽车与电网交互的接口,具有服务用户和电网的双重职责。含电动汽车的 VPP 与电网的交互模式如附录 A 图 A1 所示。图 A1 中,电动汽车集中控制器根据可调度电动汽车的用户需求、行驶数据和出行习惯等历史数据进行充放电功率预测, VPP 控制协调中心整合负荷预测、分布式电源出力预测及电动汽车集中控制器的充放电功率预测进行优化调度,制定发电机组的发电计划、电动汽车集中控制器充放电计划及与配电公司交换功率计划,电动汽车集中控制器根据控制协调中心下发的调度指令对可调度电动汽车进行有序充放电。

VPP 控制协调中心通过协调分配内部各分布式电源的出力,对内满足终端用户功率需求、对外稳定输出。然而,各分布式电源机组出力、电动汽车集中控制器处的充放电功率均存在明显的随机性和不确定性,导致 VPP 控制协调中心制定的调度计划与实际运行状况存在一定的偏差。因此,为了实现经

济效益的最大化或运行成本的最小化, VPP 控制协调中心在制定调度计划时应充分考虑不确定性因素,通过制定合理的调度方式削弱这些不确定性因素的影响。

1.2 随机调度数学模型

1.2.1 目标函数

风电场风电出力的随机性和不确定性取决于风电场所在地区风速的随机性,而风速易受天气因素、地形状况等因素的影响。虽然风电出力存在随机性和不确定性,大量统计数据表明风速服从威布尔分布^[15]。为了考虑风电出力不确定性对 VPP 调度计划的影响,首先采用场景抽样生成与缩减技术随机产生风速场景,其次根据风电机组的风功率曲线计算得到风电机组输出功率,即风电出力场景^[16-17]。

VPP 日运行成本主要来自燃气轮机的能耗成本、从配电公司的购电成本及可调度电动汽车的充放电成本,同时由于风电机组利用风能等自然资源发电,风电机组发电的能耗成本近似为零,假设电动汽车的充放电成本相等。本文在电力市场环境以最小化日运行成本为目标函数对 VPP 进行优化调度。基于上述分析,本文所描述问题的目标函数为:

$$\min_{\Phi_{SO}} C = \sum_{s=1}^S p(s) \sum_{t=1}^T \left(\sum_{m=1}^M c_{m,t} P_{m,t,s} + c_{g,t} P_{g,t} + \sum_{j=1}^J c_{j,t} P_{j,t,s} \right) \quad (1)$$

$$\Phi_{SO} = [P_{m,t,s}, P_{g,t}, x_{j,t,s}^{\text{ch}}, x_{j,t,s}^{\text{dch}}, p_{j,t,s}^{\text{ch}}, p_{j,t,s}^{\text{dch}}, E_{j,t,s}] \quad (2)$$

式中: C 为 VPP 日运行成本函数; S 为风电出力场景集; $p(s)$ 为场景 s 对应发生的概率; T 为调度周期内总时段数; M 为燃气轮机机组数; J 为电动汽车集中控制器数; $c_{m,t}$, $c_{g,t}$, $c_{j,t}$ 分别为燃气轮机、购电和电动汽车充(放)电成本; $P_{m,t,s}$, $P_{g,t}$, $P_{j,t,s}$ 分别为 t 时段燃气轮机出力、购电量和电动汽车充放电功率; Φ_{SO} 为决策变量组成的向量; 布尔变量 $x_{j,t,s}^{\text{ch}}$ ($x_{j,t,s}^{\text{dch}}$) 表示等值电动汽车是否充(放)电,为 1 表示充(放)电,反之为 0; $E_{j,t,s}$ 为电池中剩余电量; $p_{j,t,s}^{\text{ch}}$ 和 $p_{j,t,s}^{\text{dch}}$ 分别为电池充放电功率。

1.2.2 约束条件

1) 电动汽车的约束条件

当电动汽车集中控制器包含的可调度电动汽车数量较大时,对每一辆电动汽车进行精确建模分析会使调度问题变得十分复杂,因此在实际调度中此建模方式不可取。考虑到直接调度及控制的复杂性,本文以电动汽车集中控制器作为电动汽车与电网之间交互的接口,假设任一电动汽车集中控制器代表一辆等值电动汽车^[18]。等值电动汽车正常运

行时满足如下约束条件:

$$x_{j,t,s}^{\text{ch}} + x_{j,t,s}^{\text{dch}} \leq 1 \quad \forall j, t, s \quad (3)$$

$$p_{j,t,s}^{\text{ch}} \leq P_j^{\text{ch,max}} x_{j,t,s}^{\text{ch}} \quad \forall j, t, s \quad (4)$$

$$p_{j,t,s}^{\text{dch}} \leq P_j^{\text{dch,max}} x_{j,t,s}^{\text{dch}} \quad \forall j, t, s \quad (5)$$

$$P_{j,t,s} = p_{j,t,s}^{\text{ch}} x_{j,t,s}^{\text{ch}} + p_{j,t,s}^{\text{dch}} x_{j,t,s}^{\text{dch}} \quad \forall j, t, s \quad (6)$$

$$S_{\text{OCj},t,s} = S_{\text{OCj},t-1,s} +$$

$$\frac{\eta_{\text{ch}} p_{j,t,s}^{\text{ch}} x_{j,t,s}^{\text{ch}} - \frac{p_{j,t,s}^{\text{dch}} x_{j,t,s}^{\text{dch}}}{\eta_{\text{dch}}}}{E_j^{\text{max}}} \quad \forall j, t, s \quad (7)$$

$$S_{\text{OCj}}^{\text{min}} \leq S_{\text{OCj},t,s} \leq S_{\text{OCj}}^{\text{max}} \quad \forall j, t, s \quad (8)$$

$$p_{j,t,s}^{\text{ch}} \eta_{\text{ch}} \leq E_j^{\text{max}} - E_{j,t,s} \quad \forall j, t, s \quad (9)$$

$$\frac{1}{\eta_{\text{dch}}} p_{j,t,s}^{\text{dch}} \leq E_{j,t,s} \quad \forall j, t, s \quad (10)$$

式中: E_j^{max} 为电池容量; η_{ch} 和 η_{dch} 分别为电池充放电效率; $P_j^{\text{ch,max}}$ 和 $P_j^{\text{dch,max}}$ 分别为电池充放电功率的上限值; $S_{\text{OCj},t,s}$ 为电池的荷电状态; $S_{\text{OCj}}^{\text{max}}$ 和 $S_{\text{OCj}}^{\text{min}}$ 分别为荷电状态的上、下限值。

2) 其他物理约束

$$P_m^{\text{min}} \leq P_{m,t,s} \leq P_m^{\text{max}} \quad \forall m, t, s \quad (11)$$

$$P_{m,t,s} - P_{m,t+1,s} \leq R_{\text{Dm}} \quad \forall m, t, s \quad (12)$$

$$P_{m,t+1,s} - P_{m,t,s} \leq R_{\text{Um}} \quad \forall m, t, s \quad (13)$$

$$|P_{g,t}| \leq P_{g,t}^{\text{max}} \quad \forall t \quad (14)$$

$$0 \leq P_{w,t,s} \leq P_{w,t,s}^{\text{max}} \quad \forall w, t, s \quad (15)$$

$$P_j^{\text{min}} \leq P_{j,t,s} \leq P_j^{\text{max}} \quad \forall j, t, s \quad (16)$$

式中: P_m^{max} 和 P_m^{min} 分别为燃气轮机 m 的出力上、下限; R_{Um} 和 R_{Dm} 分别为机组的向上和向下爬坡率; $P_{g,t}^{\text{max}}$ 和 $P_{g,t}^{\text{min}}$ 分别为 VPP 购电的上、下限; $P_{w,t,s}^{\text{max}}$ 为风电场最大风电出力; P_j^{max} 和 P_j^{min} 分别为等值电动汽车充放电功率的上、下限。

3) 功率平衡约束

$$\sum_{m=1}^M P_{m,t,s} + P_{g,t} + \sum_{j=1}^J P_{j,t,s} + P_{w,t,s} = \sum_{l=1}^L P_{l,t} \quad \forall t, s \quad (17)$$

式中: $P_{w,t,s}$ 为风电场风电出力; L 为 VPP 内部终端用户数; $P_{l,t}$ 为终端用户的功率需求。

2 VPP 鲁棒随机调度模型

2.1 鲁棒优化理论

鲁棒优化作为一种处理不确定性因素的方法, 将不确定性的所有可能取值限定在一个确定性的集合内, 鲁棒优化的最优解对集合内任一元素可能造成的恶劣影响具有一定的抑制性^[19-20]。近年来, 鲁棒优化方法在电力系统领域已有了一些应用报道^[21-22]。

鲁棒优化中“不确定集合”的选取是处理问题的关键。目前, “不确定集合”多选取为盒式、椭圆、多

面体等形式, 当选取盒式集合时, 鲁棒优化称为盒式集合鲁棒优化, 以最小化线性规划问题为例, 即

$$\begin{cases} \min \mathbf{cx} \\ \text{s.t. } \mathbf{Ax} \leq \mathbf{b} \\ \mathbf{l} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{u} \end{cases} \quad (18)$$

式中: 决策变量 $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$, 决策变量上、下限分别为 $\mathbf{u}$, $\mathbf{l} \in \mathbf{R}^n$; 目标函数系数向量 $\mathbf{c} \in \mathbf{R}^n$; $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{m \times n}$ 和 $\mathbf{b} \in \mathbf{R}^m$ 分别为不等式约束的系数矩阵。

为了不失一般性, 假设有且仅有系数矩阵 $\mathbf{A}$ 中的元素含随机变量, 由鲁棒优化理论可知, 系数矩阵 $\mathbf{c}$ 和 $\mathbf{b}$ 中的随机变量均可以转化为系数矩阵 $\mathbf{A}$ 中的随机参数^[22]。假设系数矩阵 $\mathbf{A}$ 中元素 a_{ij} 为随机变量, 均值为 $\bar{a}_{ij}$, $a_{ij} \in [a_{ij}^{\text{L}}, a_{ij}^{\text{U}}]$ 。引入变量 $t_{ij}^{\text{B}} = \bar{a}_{ij} - a_{ij}^{\text{L}}$, $t_{ij}^{\text{F}} = a_{ij}^{\text{U}} - \bar{a}_{ij}$ 。假设问题(18)中任意两个不等式约束之间的随机变量线性无关, 记 A_i 为系数矩阵 $\mathbf{A}$ 中第 i 行中随机变量的集合, $|A_i|$ 为集合中元素个数。由鲁棒优化理论可知, 对约束 i 引入鲁棒系数 Γ_i , 满足 $\Gamma_i \leq |A_i|$, 改变 Γ_i 的取值可以调整解违背含有不确定参数约束的概率水平, 约束 i 中随机变量的取值范围与鲁棒系数 Γ_i 存在集合关系, 即

$$S_i(\Gamma_i) = \left\{ \mathbf{a}_i \mid a_{ik} \in [\bar{a}_{ik} - \beta_{ik} t_{ik}^{\text{B}}, \bar{a}_{ik} + \beta_{ik} t_{ik}^{\text{F}}], \right. \\ \left. 0 \leq \beta_{ik} \leq 1, \sum_{k \in A_i} \beta_{ik} \leq \Gamma_i \right\} \quad (19)$$

式中: $\mathbf{a}_i$ 为系数矩阵 $\mathbf{A}$ 中第 i 行随机变量矩阵; a_{ik} 为集合中第 k 个元素; 变量 β_{ik} 由鲁棒系数 Γ_i 决定。

根据对偶原理, 系数矩阵 $\mathbf{A}$ 中含随机变量的最小化线性规划问题(18)可以等价转化为对应的鲁棒对等模型(见附录 A)^[19,23-24]。鲁棒对等模型为确定性线性规划模型, 可以采用线性规划的相关方法进行求解, 同时通过调节鲁棒系数 Γ_i , 可以协调目标函数最优解与解的鲁棒程度的关系。

为了使违反约束 $\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq b_i$ 的概率不超过 ϵ_i , 鲁棒系数 Γ_i 需要满足约束:

$$\Gamma_i \geq 1 + \Phi^{-1}(1 - \epsilon_i) \sqrt{n_i} \quad (20)$$

式中: Φ^{-1} 为标准正态分布的累积分布函数的逆函数; n_i 为约束 i 中所含不确定参数的个数。

2.2 鲁棒随机模型

VPP 随机调度模型中并未考虑等值电动汽车充放电功率的不确定性。受每一辆电动汽车用户需求、行驶数据和出行习惯的影响, 等值电动汽车的出行规律具有随机性和不确定性, 可以采用随机变量描述。由中心极限定理可得, 等值电动汽车的出行规律可以采用正态分布模型描述^[25-26]。正态分布模型中可以通过给定置信水平确定参数的置信区间, 可以将随机变量等值电动汽车与电网的交互功率

(即等值电动汽车的充放电功率)描述为确定性功率均值与功率波动的总和,即

$$P = \mu_P + \Delta\sigma_P \quad (21)$$

其中确定性功率均值 μ_P 可由电动汽车集中控制器处可调度电动汽车的历史数据分析得到,随机变量 $\Delta\sigma_P$ 反映了交互功率偏离功率均值的程度。

由式(21)可知,等值电动汽车与电网的交互功率为一个满足一定置信水平的置信区间内变化的不确定量,因此可以通过鲁棒优化法处理等值电动汽车与电网的交互功率的不确定性。

当计及等值电动汽车充放电功率的不确定性时,等值电动汽车的充放电功率分为充电和放电两种情况,利用 2.1 节鲁棒对等模型转化原理得出原模型的对偶模型,即含电动汽车的 VPP 鲁棒随机调度模型为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{\Phi_{RS}} C = \sum_{s=1}^S p(s) \sum_{t=1}^T \left(\sum_{m=1}^M c_{m,t} P_{m,t,s} + c_{g,t} P_{g,t} + \sum_{j=1}^J c_{j,t} P_{j,t,s} \right) \\ \text{s.t.} \quad \text{式(11)至式(15)} \\ P_{j,t,s} - \mu_{j,t} X + z_{dj,t,s} \Gamma_{dj,t} + P_{dj,t,s} \leq 0 \\ \quad \quad \quad \forall j,t,s, \mu_{j,t} > 0 \\ P_{j,t,s} \geq 0 \quad \forall j,t,s, \mu_{j,t} > 0 \\ P_{j,t,s} - \mu_{j,t} X + z_{cj,t,s} \Gamma_{cj,t} + P_{cj,t,s} \leq 0 \\ \quad \quad \quad \forall j,t,s, \mu_{j,t} > 0 \\ P_{j,t,s} \geq P_j^L \quad \forall j,t,s, \mu_{j,t} > 0 \\ z_{dj,t,s} + P_{dj,t,s} \geq \sigma_d Y \quad \forall j,t,s \\ z_{cj,t,s} + P_{cj,t,s} \geq \sigma_c Y \quad \forall j,t,s \\ X \leq Y \\ X = 1 \\ Y \geq 0 \\ P_{dj,t,s}, P_{cj,t,s}, z_{dj,t,s}, z_{cj,t,s} \geq 0 \quad \forall j,t,s \end{array} \right. \quad (22)$$

$$\Phi_{RS} = [P_{m,t,s}, P_{g,t}, P_{j,t,s}, z_{dj,t,s}, P_{dj,t,s}, z_{cj,t,s}, P_{cj,t,s}, X, Y] \quad (23)$$

式中:变量 $z_{dj,t,s}, P_{dj,t,s}, z_{cj,t,s}, P_{cj,t,s}, X, Y$ 为等价转化过程中引入的辅助决策变量,无具体物理意义,且 $z_{dj,t,s}$ 和 $P_{dj,t,s}$ 对应放电状态, $z_{cj,t,s}$ 和 $P_{cj,t,s}$ 对应充电状态;参数 σ_d 和 σ_c 为交互功率偏离预测均值的偏差系数; Φ_{RS} 为决策变量组成的向量。

为了调节优化调度决策方案的鲁棒性,引入鲁棒系数 $\Gamma_{dj,t}, \Gamma_{cj,t}$,取值范围为 $[0, 1]$ 。当 $\Gamma_{dj,t} = 0$ 且 $\Gamma_{cj,t} = 0$ 时,式(22)模型为确定性模型,不考虑交互功率不确定性的影响;当 $\Gamma_{dj,t} = 1$ 且 $\Gamma_{cj,t} = 1$ 时,式(22)模型为 VPP 鲁棒随机优化调度的最保守形

式。通过调节鲁棒系数 $\Gamma_{dj,t}, \Gamma_{cj,t}$,可以协调目标函数最优解与解的鲁棒程度的关系。

3 算例分析

3.1 系统参数

为了验证本文提出的 VPP 鲁棒随机优化调度模型的有效性,考虑由电动汽车、风电场和燃气轮机组组成 VPP,燃气轮机参数如附录 A 表 A1 所示;风电场风电机组的预测出力如附录 A 表 A2 所示,利用场景模拟技术产生 20 个风电出力场景集;终端用户的负荷数据如附录 A 图 A2 所示^[27];VPP 与配电公司实施实时电价政策,实时电价和电动汽车的充放电电价如附录 A 图 A3 所示^[28]。假设 VPP 中包含 2 个电动汽车集中控制器,其中电动汽车集中控制器 1 含有 200 辆注册可调度电动汽车,电动汽车集中控制器 2 含有 100 辆注册可调度电动汽车。假设可调度电动汽车中的电池型号相同,电池参数取自雪佛兰沃蓝达电动汽车,分别为充电上限值为 $14 \text{ kW} \cdot \text{h}$,放电下限值为 $4 \text{ kW} \cdot \text{h}$,充放电功率为 2.1 kW ,充放电效率为 90% ,电动汽车正常行驶时的耗油量为 12.846 km/L 。基于德国某电动汽车示范工程,利用统计分析得出调度周期内各时刻服从 VPP 调度的电动汽车数量如附录 A 图 A4 所示,根据电动汽车的用户需求、行驶数据和出行习惯等历史数据可以得出电动汽车集中控制器处等值电动汽车与电网的交互功率^[29]。在鲁棒随机优化模型中,选取等值电动汽车与电网交互功率预测值的置信水平为 β 的置信区间构建不确定集;假设 VPP 与配电公司功率交换的上限为 1000 kW 。

3.2 优化结果及分析

在 GAMS 软件平台中利用 CPLEX 求解器对上述鲁棒随机优化模型进行求解。

图 1 给出了不同置信水平下 VPP 日运行成本与鲁棒系数之间的关系。

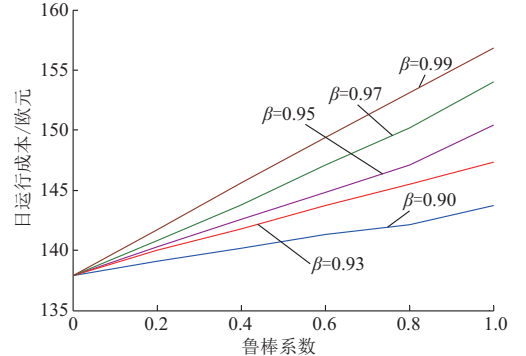


图 1 置信水平对日运行成本与鲁棒系数关系的影响
Fig.1 Confidence level on relationship between operation costs and robust coefficients

从图 1 可以看出,置信水平越高,日运行成本与鲁棒系数的关系曲线越陡,即在鲁棒随机模型中,不确定区间集合范围较大时,鲁棒系数的较小变化就会对目标函数产生较大的影响。当置信水平较低时,鲁棒系数的变化对目标函数的影响并不明显。为了得出一般性的结论,下文算例部分在置信水平 $\beta=0.95$ 的前提下对 VPP 鲁棒随机模型进行讨论。

在不同约束违反概率水平下 VPP 下一交易日运行成本及相关参数值如表 1 所示。由鲁棒优化理论可知,VPP 优化调度决策方案的经济风险与约束违反概率水平相关,约束违反概率值越小,决策方案经济风险越小。从表 1 中可以看出,随着约束违反概率值的减小,VPP 日运行成本逐渐增大。这是因为,当鲁棒系数增大时,即认为等值电动汽车与电网交互功率的实际值与预测值之间的偏差增大,为了满足 VPP 内部功率需求的平衡,调度决策方案趋于保守,相应的日运行成本增大。

表 1 不同约束违反概率下的日运行成本及相关参数
Table 1 Operation costs and parameter values under different constraint violation probabilities

场景	Γ	约束违反 概率/%	ϵ	分位数		日运行 成本/欧元
				z_ϵ	$-z_{1-\epsilon}$	
1	0	84.13	15.87	0.999 8	-0.999 8	137.9
2	0.2	78.81	21.19	0.799 8	-0.799 8	140.3
3	0.4	72.57	27.43	0.599 9	-0.599 9	142.6
4	0.6	65.54	34.46	0.399 9	-0.399 9	144.8
5	0.8	57.93	42.07	0.200 1	-0.200 1	147.1
6	1.0	50.00	50.00	0	0	150.4

在 $\Gamma_{dj,t} = 1$ 且 $\Gamma_{cj,t} = 1$ 的前提下,附录 A 图 A5、图 2 分别给出了鲁棒随机模型的最优决策方案和鲁棒随机模型与随机模型最优决策方案的差值关系。

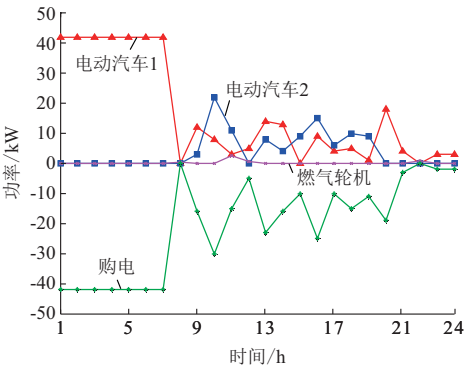


图 2 鲁棒随机模型与随机模型最优决策方案的差值
Fig.2 Difference values of optimal dispatching between robust stochastic model and stochastic model

从图 2 可以看出,鲁棒优化法对 VPP 最优调度决策方案中等值电动汽车与电网的交互功率及从配

电公司的购电量影响较大,相反对燃气轮机的出力影响较小,这表明交互功率的变化对燃气轮机出力计划影响不大,燃气轮机的最优出力在不确定环境下具有较强的鲁棒性。这对制定燃气轮机等常规机组的发电计划具有工程指导意义,可以避免由于机组频繁启停操作而产生的运行成本,降低 VPP 日运行成本。

附录 A 图 A6、图 3 分别给出了不同风电场景下燃气轮机的出力和鲁棒随机模型与随机模型中燃气轮机出力差值的关系。定义不同场景下风电出力为其预测值的 ϵ 倍,从图中可以看出,由于 VPP 的购电量与风电场景无关,为了满足内部功率平衡约束,燃气轮机的出力随着风电场景的变化而变化。当风电出力较小时,燃气轮机工作在最大发电功率状态;当风电出力较大时,燃气轮机发电功率减小,这表明燃气轮机可有效平抑风电出力的不确定性,避免因为购电量的增加导致 VPP 的日运行成本增大。另一方面,在不同风电场景下,鲁棒随机模型与随机模型中燃气轮机出力差值较小,近似为 0,这与图 3 得出的结论相一致。

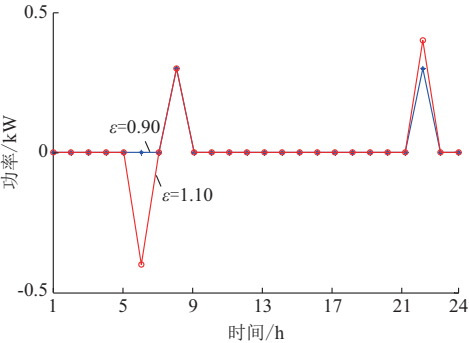


图 3 不同风电场景下优化解的差值
Fig.3 Difference values under different wind scenarios

3.3 效益分析

为了进一步分析 VPP 及电动汽车的经济效益与环境效益,针对 5 种运行方式进行分析比较,分别如下。

方式 1:电动汽车行驶时消耗汽油,负荷功率需求由配电公司直接提供。

方式 2:电动汽车行驶时消耗汽油,VPP 聚合风电场及终端负荷参与电网运行。

方式 3:电动汽车行驶时消耗电能,负荷功率需求由配电公司直接提供。

方式 4:电动汽车行驶时消耗电能,VPP 聚合风电场及终端负荷参与电网运行。

方式 5:电动汽车行驶时消耗电能,VPP 聚合风电场、电动汽车及终端负荷参与电网运行。

电动汽车行驶时消耗的汽油、燃气轮机及常规发电都会排放 CO₂ 和 NO_x 等有害气体,有害气体的排放参数如附录 A 表 A3 所示^[14],5 种运行方式下日运行成本和 CO₂ 和 NO_x 排放量如表 2 所示。

表 2 不同运行方式下的运行成本及排放量

Table 2 Costs and emissions under different schemes

方式	电动汽车	VPP	成本/欧元	CO ₂ /kg	NO _x /kg
1	×	×	560.17	4 917.10	13.63
2	×	✓	422.49	2 727.19	3.59
3	✓	×	332.37	4 020.21	16.75
4	✓	✓	133.43	1 469.86	5.08
5	✓	✓	136.61	1 467.18	5.19

从表中可以看出,方式 2 的日运行成本、CO₂ 和 NO_x 排放量与方式 1 相比均减小,且 CO₂ 和 NO_x 的减小量十分显著,这是因为常规发电的单位发电量对应的 CO₂ 和 NO_x 排放量远远大于燃气轮机等分布式发电。在方式 3 和 4 中电动汽车行驶消耗电能,与方式 1 相比,日运行成本、CO₂ 和 NO_x 排放量均减小,且方式 4 在有害气体减排方面更具优势;由于燃气轮机、常规发电的 NO_x 排放量远远高于电动汽车,在方式 3 和 4 中电动汽车行驶时消耗电能,因此 NO_x 排放量有所增加。方式 5 与方式 4 相比,电动汽车电池中的剩余电量可以回送给电网,但是由于电池存在充放电效率和折旧成本,VPP 日运行成本、CO₂ 和 NO_x 排放量变化较小。从表 2 可以看出,通过 VPP 聚合电动汽车、终端用户等参与电网运行兼具经济效益和环境效益。

4 结论

本文建立了含电动汽车、风电场和燃气轮机 VPP 优化调度的鲁棒随机模型,通过算例分析可以得到以下结论。

- 1)应用随机规划法处理风电出力的不确定性,应用鲁棒优化法处理电动汽车与电网交互功率的不确定性,可以增强 VPP 调度策略的鲁棒性,降低 VPP 的实际日运行成本。
- 2)鲁棒随机优化的优化结果受鲁棒系数和置信水平的影响。置信水平越高,鲁棒系数的较小变化会对优化结果产生较大的影响。在一定置信水平下,鲁棒系数越大,即认为实际值偏离预测值越严重,优化结果越保守,VPP 日运行成本越大。
- 3)VPP 中燃气轮机等常规机组可以缓解电动汽车与电网交互功率、风电出力等不确定性对优化调度的影响,通过合理制定燃气轮机等常规机组的发电计划可以减小 VPP 日运行成本,提高 VPP 运

行的利润。

4)通过 VPP 聚合电动汽车、风电场、终端用户参与电网运行兼具经济效益和环境效益,VPP 为各类分布式电源的接入提供了一种新方法。

本文提出的优化模型可进一步在以下方面进行扩展:①建立计及网络约束的鲁棒随机优化调度模型,分析网络对 VPP 优化调度的影响;②模型中加入环境指标,建立考虑碳排放约束的 VPP 优化调度模型。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参 考 文 献

[1] WANG G B, ZHAO J H, WEN F S, et al. Dispatch strategy of PHEVs to mitigate selected patterns of seasonally varying output from renewable generation[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2015, 6(2): 627-639.

[2] 胡泽春,宋永华,徐智威,等.电动汽车接入电网的影响与作用[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] REDDY K S, PANWAR L K, KUMAR R, et al. Distributed resource scheduling in smart grid with electric vehicle deployment using fireworks algorithm[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(2): 188-199.

[4] 刘琳.新能源风电发展预测与评价模型研究[D].北京:华北电力大学,2013.

[5] 卫志农,余爽,孙国强,等.虚拟电厂的概念与发展[J].电力系统自动化,2013,37(13):1-9.

WEI Zhinong, YU Shuang, SUN Guoqiang, et al. Concept and development of virtual power plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 1-9.

[6] 邹云阳,杨莉.基于经典场景集的风光水虚拟电厂协同调度模型[J].电网技术,2015,39(7):1855-1859.

ZOU Yunyang, YANG Li. Synergetic dispatch models of a wind/PV/hydro virtual power plant based on representative scenario set [J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1855-1859.

[7] 董文略,王群,杨莉.含风光水的虚拟电厂与配电公司协调调度模型[J].电力系统自动化,2015,39(9):75-81. DOI: 10.7500/AEPS20140719007.

DONG Wenlue, WANG Qun, YANG Li. A coordinated dispatching model for a distribution utility and virtual power plants with wind/photovoltaic/hydro generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 75-81. DOI: 10.7500/AEPS20140719007.

[8] MOHAMMADI J, RAHIMI-KIAN A, GHAZIZADEH M S. Aggregated wind power and flexible load offering strategy[J]. IET Renewable Power Generation, 2007, 5(6): 439-447.

[9] PANDZIC H, KUZLE I, CAPUDER T. Virtual power plant

mid-term dispatch optimization[J]. Applied Energy, 2013, 101: 134-141.

[10] 范松丽, 艾芊, 贺兴. 基于机会约束规划的虚拟电厂调度风险分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4025-4034.
FAN Songli, AI Qian, HE Xing. Risk analysis on dispatch of virtual power plant based on chance constrained programming [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4025-4034.

[11] 韦立坤, 赵波, 吴红斌, 等. 虚拟电厂下计及大规模分布式光伏的储能系统配置优化模型[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 66-74. DOI: 10.7500/AEPS20150205006.
WEI Likun, ZHAO Bo, WU Hongbin, et al. Optimal allocation model of energy storage system in virtual power plant environment with a high penetration of distributed photovoltaic generation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 66-74. DOI: 10.7500/AEPS20150205006.

[12] 杨甲甲, 赵俊华, 文福拴, 等. 含电动汽车和风电机组的虚拟发电厂竞价策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 92-102. DOI: 10.7500/AEPS20140212010.
YANG Jiajia, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. Development of bidding strategies for virtual power plants considering uncertain outputs from plug-in electric vehicles and wind generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 92-102. DOI: 10.7500/AEPS20140212010.

[13] 罗捷, 吴俊明, 陈德超, 等. 电动汽车参与下的虚拟电厂多目标优化调度[J]. 电力科学与工程, 2015, 31(2): 50-54.
LUO Jie, WU Junming, CHEN Dechao, et al. Multi-objective optimization scheduling of virtual power plant with electric vehicles[J]. Electric Power Science and Engineering, 2015, 31(2): 50-54.

[14] ARSLAN O, KARASAN O E. Cost and emission impacts of virtual power plant formation in plug-in hybrid electric vehicle penetrated networks[J]. Energy, 2013, 60: 116-124.

[15] 王成山, 郑海峰, 谢莹华, 等. 计及分布式发电的配电系统随机潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 39-44.
WANG Chengshan, ZHENG Haifeng, XIE Yinghua, et al. Probabilistic power flow containing distributed generation in distribution system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24): 39-44.

[16] 丁明, 吴义纯, 张立军. 风电场风速概率分布参数计算方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 107-110.
DING Ming, WU Yichun, ZHANG Lijun. Study on the algorithm to the probabilistic distribution parameters of the wind speed in wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 107-110.

[17] 孙元章, 吴俊, 李国杰, 等. 基于风速预测和随机规划的含风电场电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(4): 41-47.
SUN Yuanzhang, WU Jun, LI Guojie, et al. Dynamic economic dispatch considering wind power penetration based on wind speed forecasting and stochastic programming [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(4): 41-47.

[18] DALLINGER D, KRAMPE D, WIETSCHER M. Vehicle-to-grid regulation reserves based on a dynamic simulation of mobility behavior[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2011, 2(2): 302-313.

[19] BERTSIMAS D, SIM M. The price of robustness [J]. Operations Research, 2004, 52(1): 35-53.

[20] 魏韡, 刘锋, 梅生伟. 电力系统鲁棒经济调度: (一) 理论基础[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 37-43.
WEI Wei, LIU Feng, MEI Shengwei. Robust and economical scheduling methodology for power systems: Part one theoretical foundations [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 37-43.

[21] 刘斌, 刘锋, 王程, 等. 考虑风电场灵活性及出力不确定性的机组组合[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 730-736.
LIU Bin, LIU Feng, WANG Cheng, et al. Unit commitment considering flexibility and uncertainty of wind power generation [J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 730-736.

[22] 谢鹏, 彭春华, 于蓉. 大规模间歇式电源接入电网多目标鲁棒优化调度[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1479-1484.
XIE Peng, PENG Chunhua, YU Rong. Multi-objective robust optimized scheduling of power grid connected with large-scale intermittent power sources[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1479-1484.

[23] KANG S C. Robust linear optimization using distributional information[D]. Boston: Boston University, 2008.

[24] BARINGO L, CONEJO A J. Offering strategy via robust optimization [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2011, 26(3): 1418-1425.

[25] 赵俊华, 文福拴, 薛禹胜. 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. 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.

[26] HAN S, HAN S, SEZAKI K. Estimation of achievable power capacity from plug-in electric vehicles for V2G frequency regulation: case studies for market participation [J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2011, 2(4): 632-641.

[27] GUPTA R A, NAND K G. A robust optimization based approach for microgrid operation in deregulated environment [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 93: 121-131.

[28] OMEL, Spain and Portugal [EB/OL]. [2015-08-20]. <http://www.omelholding.es>.

[29] MiD-2008. Mobilitat in Deutschland [EB/OL]. [2015-08-20]. <http://www.dlr.de/cs/>.

孙国强(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 电力系统运行分析与控制. E-mail: hhusunguoqiang@163.com

袁 智(1991—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力系统运行与控制. E-mail: yuanzhihu@163.com

耿天翔(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 电力调度运行.

(编辑 孔丽蓓)

Robust Stochastic Optimal Dispatching of Virtual Power Plant Containing Plug-in Electric Vehicles

SUN Guoqiang¹, YUAN Zhi¹, GENG Tianxiang², WANG Yun², WEI Zhinong¹, ZANG Haixiang¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. State Grid Ningxia Electric Power Company, Yinchuan 750001, China)

Abstract: With unceasing increase of plug-in electric vehicles and distributed generators integrated into power grid, virtual power plant (VPP) provides an idea for solving grid-integration problems of plug-in electric vehicles and distributed generators. The uncertainties containing the number of dispatchable plug-in electric vehicles and the output of distributed generators should be considered in optimal dispatching of VPP. Given this background, the uncertainty of wind output is described by typical scenarios produced by scenario generation and reduction techniques. Considering the uncertain and stochastic nature of dispatchable plug-in electric vehicles, a dual model of the original one is constructed based on robust optimization, and a robust stochastic optimal dispatching model of a VPP including plug-in electric vehicles is proposed. Case study shows the effectiveness and feasibility of the proposed model, and the consideration of uncertainties in optimal dispatching model reduces daily operation cost and improves the robustness of the optimal schemes. The results show that confidence level and robust coefficients have effects on operation costs. Operation costs can be reduced by making rational generation plan of conventional generating units such as gas turbine.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277052), Post-doctoral Science Foundation of China (No. 2015M571653) and Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2015B02714).

Key words: virtual power plant; plug-in electric vehicles; distributed generator; uncertainty; robust stochastic optimization