



低碳目标下计及电动汽车 V2G 的虚拟电厂优化调度方法

于卓, 门进宝, 王军, 吕海, 欧阳红
(北京中电普华信息技术有限公司, 北京 100192)

摘要: 促使风电、光伏等分布式能源和电动汽车保有量快速增长。考虑电动汽车到电网 (vehicle to grid, V2G) 能量互动对多元化能源发电出力随机性及波动性的平抑作用, 以及提升风/光电的消纳水平, 采用虚拟电厂 (virtual power plant, VPP) 技术实现对二者的统一协调管理, 进而结合电动汽车全生命周期碳排放数量和分布式能源运行时碳排放数量, 构建电动汽车参与的虚拟电厂整体多目标优化模型, 采用粒子群优化算法对该模型进行求解, 从而优化系统运行成本及碳排放成本。在结合真实数据配置的算例模型上进行实验分析, 实验结果表明, 提出的优化模型可以有效调度虚拟电厂各要素, 充分发挥电动汽车 V2G 入网充放电带来的运行和碳排放收益, 可以为低碳目标背景下电网系统的安全稳定运行提供技术参考。

关键词: 低碳目标; 虚拟电厂; 电动汽车入网; 分布式能源; 粒子群优化

中图分类号: TM73

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024175

Optimal dispatch method of virtual power plant considering electric vehicle V2G under the low carbon target

YU Zhuo, MEN Jinbao, WANG Jun, LYU Hai, OUYANG Hong
Beijing Zhongdian Puhua Information Technology Co., Ltd., Beijing 100192, China

Abstract: The low carbon target strategy has promoted the rapid growth of distributed energy resources, such as wind power and photovoltaics, and the increase of electric vehicles ownership. Considering the smoothing effect of vehicle to grid (V2G) on the output fluctuation of distributed energy generation, and improving the wind/photovoltaic consumption level, the virtual power plant (VPP) technology was used to achieve unified management of the two, and then the carbon emission of the whole life cycle of electric vehicles and distributed energy generation were combined to establish an optimization model targeting at optimizing the cost of system operation and the cost of carbon emission. The model was solved by particle swarm optimization algorithm. Imental analysis based on example model combined with real vas conducted. The experimental analysis results show that the optimization model can effectively schedule all elements of VPP, and use the charging and discharging of electric vehicles to improve the operation and

收稿日期: 2023-11-29; 修回日期: 2024-06-19

通信作者: 吕海, lvhailvhai@qq.com

基金项目: 企业科技计划项目 (No.52680021N00W)

Foundation Item: Enterprise Technology Plan Project (No.52680021N00W)



carbon emission benefits. It may provide a technical reference for the safe and stable operation of the grid system under the background of the low carbon target.

Key words: low carbon target, virtual power plant, electric vehicles on the grid, distributed energy, particle swarm optimization

0 引言

新型电力系统要求加快建设以风电和光伏为代表的绿色清洁能源^[1]。随着以风能和太阳能为代表的可再生能源的大规模部署并网发电,绿色可再生能源的渗透率越来越高;另外,电动汽车活跃量呈爆发式增长,特别是中国已经连续多年成为电动汽车全球最大市场,配电网源、荷两侧不平衡的问题凸显出来,亟需各类储能设备参与电网调度,保障新型电力系统安全可靠运行^[1-3]。虚拟电厂(virtual power plant, VPP)基于智能电网提供的通信和配电网等基础设施的支持,通过对分布式电源、可控负荷、电动汽车以及其他各类储能系统的聚合和协调管理,构建一个有序的虚拟集合体保障电力市场和电网高效可靠运行,进而实现源网荷储的优化配置,提高电力系统的安全性和可靠性^[3]。

近年来,大规模电池储能系统是智能电网、分布式电源并网和电力负荷移峰填谷的关键技术,得到快速发展^[4-6]。而随着电动汽车充放电技术的发展,特别是电动汽车到电网(vehicle to grid, V2G)能源互动技术的应用,电动汽车所具有的负荷和储能的双重属性受到学术界和产业界的关注^[7]。利用集群电动汽车的有序放电作为虚拟电池,实现以风电和光伏为代表的分布式能源的移峰填谷,以及提高风电和光电的消纳水平,这方面取得了许多研究成果^[4-5]。文献[8]分析了电动汽车参与目前电力市场所面临的通信技术难点。文献[9]探讨了风电机组和电动汽车聚合在一起作为虚拟灵活储能设备并网的可能性。文献[10]提出了一种基于计及电动汽车V2G备用服

务的交易模型,并以综合电价为优化目标进行了实验分析。文献[11]考虑风电的波动性和V2G入网充放电的随机性,以VPP发电总利润最大化为目标建立了鲁棒性调度模型。文献[12]对比分析了V2G的控制策略和商业模式。文献[13]基于电动汽车的行为特征划分群组,并结合用户满意度给出了一种延时充放电的策略。

以上文献对含电动汽车V2G的VPP优化调度和参与电力市场的商业模式进行了较为详细的研究,但均缺少对于低碳目标背景下的VPP模型构建及有序运作策略的探讨。文献[14]虽然提出了低碳目标背景下VPP的优化调度模型,但未对V2G充放电这一关键要素进行分析。

碳排放配额已经成为电力市场主体所关心的核心要素。根据《碳排放权交易管理办法(试行)》的规定,碳排放配额分配以免费分配为主,可以根据国家有关要求适时引入有偿分配^[15]。本文在考虑电动汽车全生命周期碳排放成本和分布式电源发电出力时的碳排放成本的基础上,建立了以VPP整体运行成本和碳排放成本为目标函数、以VPP源荷供需平衡为约束的多目标优化模型,并结合真实数据配置仿真算例对所提出的优化模型的有效性进行了实验验证。

本文主要创新点如下。

(1) 本文建立了计及电动汽车V2G的VPP电源出力模型。

(2) 本文在考虑电动汽车全生命周期碳排放成本和分布式电源发电出力时的碳排放成本的基础上,提出了VPP碳排放成本模型。

(3) 本文提出了以VPP总体运行成本和碳排放成本为目标函数的多目标优化模型,并利用算

例仿真实验验证了本文模型以及优化调度方法的有效性。

1 低碳目标下VPP的整体架构

本文研究的VPP汇聚源、荷两侧多种类型成员,包括基础负荷、电动汽车、光伏发电、风电机发电、可控分布式电源等,VPP整体架构示意图如图1所示,其中电动汽车具有源、荷双属性。构建以源、荷供需平衡为约束条件的VPP控制中心,以VPP多维元素有序运行成本和VPP整体的碳排放成本等多目标的最小化为优化目标,统一管理源荷两侧,实现整体运行可靠、效率优化、智能调控。VPP各成员聚合成一个虚拟的统一整体参与电力市场,从而保障新型电力系统高效安全运转。

2 VPP各元素建模

2.1 基础负荷

基础负荷在使用过程中比较稳定,VPP模型中的基础负荷由日前负荷预测和预测误差两部分组成,以当前 t 时段为例,基础负荷的日前负荷预测表示为 $l(t)$,预测误差表示为 $e^{\text{load}}(t)$,不妨假设预测误差符合正态分布,即:

$$e^{\text{load}}(t) \sim N(\sigma^2(t)) \quad (1)$$

考虑VPP中基础负荷的实际组成多种多样,难以详细计算其碳排放数量,本文重点关注其运行过程中的电力能耗,并将其碳排放数量核算到VPP模型中电力出力侧的碳排放数量。

2.2 电动汽车

电动汽车通过V2G技术入网,既可以作为负荷,需要电网充电,又可以利用电池储能向电网放电,即具有消费和生产的双重属性,而为了保障出行需求,其消费属性优于生产属性,电动汽车入网充放电时,电动汽车需要停留较长时间,这与每台电动汽车的出行规律密切相关,为了简化模型,不妨假设电动汽车群体在VPP激励机制的引导下可有序参与VPP运行时的整体优化调度。

为了保障电动汽车的出行需求,以及满足电动汽车电池本身充放电技术的约束,其电池的荷电状态(state of charge, SoC)的变化范围应在0.2~1,因此, t 时段电动汽车入网可放电的状态 $N_{\text{ev}}(t)$ 满足:

$$N_{\text{ev}}(t) = \begin{cases} 0, \text{SoC}(t) \leq 0.2 \\ 1, \text{SoC}(t) > 0.2 \end{cases} \quad (2)$$

其中,SoC(t)为 t 时段电动汽车电池荷电状态。电动汽车通过V2G技术入网充放电,不妨假设V2G接入点的输出和输入功率均大于电动汽车电池的

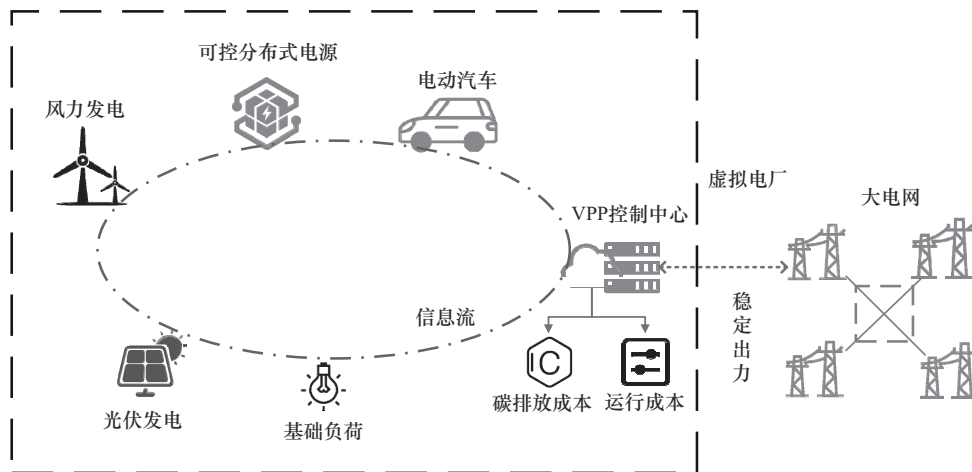


图1 VPP整体架构示意图



最大充放电功率，电动汽车电池充放电功率不受接入点功率的约束，而是由电池充放电阶段和电池荷电状态等决定。

电动汽车电池充放电功率示意图如图2所示，电池充放电过程分为恒压和恒流两个阶段。对于充电过程，当荷电状态大于某一常量值（图2中 SoC^c 位置）时，为了保护电池，充电过程由恒压切换至恒流模式；相对应地，对于放电过程，当荷电状态大于某一常量值（图2中 SoC^d 位置）时，放电过程由恒流切换至恒压模式。基于以上分析可得电动汽车电池在 t 时段的最大充电功率 $P_{\text{EV},c}^{\max}(t)$ 和最大放电功率 $P_{\text{EV},d}^{\max}(t)$ 分别为：

$$P_{\text{EV},c}^{\max}(t) = \begin{cases} P_{\text{EV}}^{\max}, & 0 \leq \text{SoC}(t) < \text{SoC}^c \\ P_{\text{EV}}^{\max} \frac{1 - \text{SoC}(t)}{1 - \text{SoC}^c}, & \text{SoC}^c \leq \text{SoC}(t) \leq 1 \end{cases} \quad (3)$$

$$P_{\text{EV},d}^{\max}(t) = \begin{cases} P_{\text{EV}}^{\max} \frac{\text{SoC}(t)}{\text{SoC}^d}, & 0 \leq \text{SoC}(t) < \text{SoC}^d \\ P_{\text{EV}}^{\max}, & \text{SoC}^d < \text{SoC}(t) \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

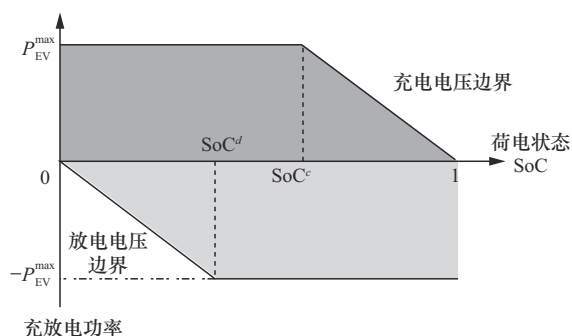


图2 电动汽车电池充放电功率示意图

电动汽车生产过程中的碳排放数量占电动汽车全生命周期碳排放数量的比重超过45%^[16]，对于已知型号电动汽车，其生产过程中的碳排放数量可以近似为定值，记作 C_{ev} ；其充电过程中的碳排放数量与第2.1节中的基础负荷的碳排放强度一致，而其放电过程中的碳排放数量为0。考虑将生产过程中的碳排放数量 C_{ev} 分配到VPP模型中的每次优化调度中，则第 k 辆电动汽车在VPP调度周期 T 过程中需要分配的碳排放数量 C_k 可以由

式(5)计算。

$$C_k = \frac{\sum_{t=1}^T (P_k^c(t) \times \Delta t^c \times (1 - \eta^c) + P_k^d(t) \times \Delta t^d \times (1 - \eta^d))}{2 \times \text{LC} \times E^r} \cdot C_{\text{ev}} \quad (5)$$

其中， $P_k^c(t)$ 、 Δt^c 和 η^c 分别为 t 时段电动汽车的电池充电功率、充电时长和充电损失系数， $P_k^d(t)$ 、 Δt^d 和 η^d 分别为 t 时段电动汽车的电池放电功率、放电时长和放电损失系数，LC为最大等效满充放电圈数， E^r 为电池额定功率。

2.3 光伏发电

光伏发电出力主要与光伏面板所接收到的光照强度相关，基于光伏发电过程中的光电转换原理， t 时段的光伏发电出力 $P_g(t)$ 可表示为：

$$P_g(t) = \alpha_g S_g \phi(t) \quad (6)$$

其中， α_g 为光伏发电系数， S_g 为光伏面板的面积， $\phi(t)$ 为光照强度。统计研究结果表明，光照辐射强度可以用Beta分布表示，如式(7)所示。

$$f(\phi) = \begin{cases} \frac{\phi^{\delta-1} (1-\phi)^{\eta-1}}{\int_0^1 \phi^{\delta-1} (1-\phi)^{\eta-1} d\phi}, & \delta \geq 0, \eta \geq 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

其中， δ 和 η 为Beta分布的形状参数，可基于光照历史数据求得。

本文暂不考虑光伏组件生产和安装过程中的碳排放数量，基于光伏发电的原理可知，光伏发电运行过程中的碳排放量可视为0，这也是降低温室气体排放的环保理念下，光伏发电快速发展的主要因素之一。

2.4 风电机组

风机发电出力与当前时刻的风速密切相关，统计研究结果表明，风电机组所在位置的风速可以用韦伯分布来表示^[17]。分别用 v_{in} 、 v_r 和 v_{out} 表示风电机组的切入风速、额定风速和切出风速，受风电机组技术参数的限制，当实时风速低于 v_{in} ，或者高于 v_{out} 时，风电机组不工作，出力为

0; 当风速在 $v_{in} \sim v_r$ 范围内时, 风电机组的出力将随着风速的增大而逐渐升高; 当风速在 $v_r \sim v_{out}$ 范围内时, 风电机组将以额定功率出力。假设 t 时刻的风电机组出力为 $P_W(t)$, 风速为 $v(t)$, 则二者关系可以由式 (8) 表示。

$$P_W(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq v(t) < v_{in}, v(t) > v_{out} \\ 0.5\pi r^2 \rho v(t)^3, & v_{in} \leq v(t) < v_r \\ P_W^r, & v_r \leq v(t) \leq v_{out} \end{cases} \quad (8)$$

其中, r 为风机涡轮转子半径, ρ 为空气密度, P_W^r 为风电机组额定功率。

由于风力发电机组本身的特点, 在不考虑风机生产和安装过程中的碳排放数量的前提下, 通常将其碳排放成本设为 0。

2.5 可控分布式电源

本文 VPP 模型中的可分布式电源采用微型燃气轮机发电^[18]。假设分布式燃气轮机组的发电效率为 φ_{ng} , 则燃气轮机组的发电出力 $P_{ng}(t)$ 可由式 (9) 表示。

$$P_{ng}(t) = \varphi_{ng} \times LHV \times V_{ng}(t) \quad (9)$$

其中, LHV 为天然气的热值, 一般取 34 MJ/m^3 , $V_{ng}(t)$ 表示 t 时段燃气轮机消耗的天然气体积。

燃气轮机的碳排放强度为 $\tau_{ng} \text{ g/(kW} \cdot \text{h)}$, 则碳排放数量为:

$$c_{ng}(t) = \tau_{ng} \times P_{ng}(t) \quad (10)$$

一般情况下 τ_{ng} 取值范围为 390~500。

2.6 碳排放成本模型

根据国家目前施行的碳排放权相关规定以及各省 (区市) 的碳排放交易市场规则, 我国主要实行以免费分配为主的碳排放配额分配方法, 而超额部分则须进入交易市场购买碳配额或者碳信用。考虑免费分配方法中的基准线法在国内应用最多^[14], 故本文采用基准线法对 VPP 的碳排放配额进行建模, 如式 (11) 所示。

$$C_q = \sum_{t=1}^{24} \lambda P(t) \quad (11)$$

其中, $P(t)$ 为 t 时段 VPP 的总发电出力, λ 为单位

发电出力的碳排放配额。VPP 的碳排放成本 C_e 可以由 VPP 运行过程中的碳排放数量减去免费分配的碳排放配置推得, 如式 (12) 所示。

$$C_e = \rho \times \left(\sum_{t=1}^T c_{ng}(t) + \sum_{k=1}^M C_k - C_q \right) \quad (12)$$

其中, T 为 VPP 调度周期, 本文讨论日前优化调度, 则 $T=24$, M 为参与入网充放电的电动汽车数量, C_k 为第 k 辆入网充放电的电动汽车在优化调度过程中须分配的碳排放数量, 可由式 (5) 计算获得, $c_{ng}(t)$ 为 t 时段燃气轮机的碳排放数量, ρ 为碳交易成交单价。若 C_e 为负值, 则其为碳排放收益; 若 C_e 为正值, 则其为碳排放成本。

3 优化调度策略

本节首先给出 VPP 优化调度的目标函数, 实现 VPP 整体运行成本最小 (或运行收益最大), 同时考虑 VPP 整体的碳排放成本最小, 接下来给定 VPP 模型中的各个约束条件, 然后通过粒子群算法求解 VPP 优化调度模型。

3.1 目标函数

本文以 VPP 整体运行成本最小以及碳排放成本最小为优化目标, 目标函数为:

$$\begin{aligned} \min F &= \{F_1, F_2\} \\ F_1 &= c \times \sum_{t=1}^T (l(t) + e^{\text{load}}(t) + \\ &\quad \sum_{k=1}^M (P_k^c(t) \times \Delta t^c - P_k^l(t) \times \Delta t^l) - \\ &\quad P_g(t) - P_w(t) - [P_{ng}(t) \times \omega] + \psi \times e^{\text{VPP}}(t)) \\ F_2 &= C_e \end{aligned} \quad (13)$$

其中, c 为向外部电网购买电能的价格; ω 为燃气轮机启动参数, 取值为 0 或者 1; $e^{\text{VPP}}(t)$ 为 t 时间段内日前预测误差; ψ 为惩罚系数。

3.2 约束条件

(1) 可控分布式电源发电功率约束

VPP 模型的可控分布式电源以微型燃气轮机为主, 燃气轮机启动之后, 其发电功率受到轮机



额定的最小和最大功率的限制,运行时发电功率需位于最小和最大发电功率之间,用 $P_{ng}^{\min}$ 和 $P_{ng}^{\max}$ 分别表示燃气轮机的最小和最大发电功率,则有如式(14)所示不等式约束。

$$P_{ng}^{\min} \leq P_{ng}(t) \leq P_{ng}^{\max} \quad (14)$$

(2) 电动汽车充放电约束

电动汽车依托自身装备的可充放电电池实现入网充放电,因此,在VPP优化调度时候,不仅需要保障电动汽车出行对于自身电池荷电状态的需求,还受到电池技术参数的限制,电池放电深度对储能电池寿命影响较大。用 $SoC^{\min}$ 和 $SoC^{\max}$ 分别表示电动汽车所装备的电池荷电状态技术参数的下限和上限。一般来说,为了保证电池使用寿命, t 时段的电池荷电状态 $SoC(t)$ 须满足如式(15)所示不等式。

$$SoC^{\min} \leq SoC(t) \leq SoC^{\max} \quad (15)$$

同时,电动汽车的充放电功率也须满足电池技术参数中对于充放电功率的限用,用负值表示电动汽车放电功率,用正值表示电动汽车充电功率,则在 t 时段,第 k 辆电动汽车的充放电功率 $P_{EV,k}(t)$ 须满足如式(16)所示不等式。

$$P_{k,d}^{\max} \leq P_{EV,k}(t) \leq P_{k,c}^{\max} \quad (16)$$

其中, $P_{k,d}^{\max}$ 和 $P_{k,c}^{\max}$ 分别表示第 k 辆电动汽车所配备电池的最大放电功率(放电取负值)和最大充电功率,电动汽车电池的最大放电功率和最大充电功率参见式(3)和式(4)。

3.3 模型求解

粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法属于进化计算的一种,常用于求解最优化问题。其初始时从随机生成的粒子群出发,通过粒子之间的信息共享,不断迭代寻找最优解^[19-20]。本文采用PSO算法求解上文建立的VPP优化调度模型,在具体实现中采用MATLAB自带的PSO工具箱实现。首先对上文的VPP调度优化模型进行适当变形,并用式(17)表示。

$$\begin{aligned} \min F(X) \\ \text{s.t. } X \in R, X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \end{aligned} \quad (17)$$

其中, $F(X) = \{f_1(X), f_2(X)\}$, $R = \{X | r(X) \geq 0\}$, $r(X) = (r_1(X), r_2(X), \dots, r_m(X))^T$,而 $f_1(X)$ 和 $f_2(X)$ 分别为目标函数整理所得, $r(X)$ 为不等式约束整理所得。PSO求解详细步骤如下。

步骤1 R 可行域上初始化 N 个粒子和速度。

步骤2 基于 $f_1(X)$ 和 $f_2(X)$,分别计算目标函数值,均选择前 $\frac{N}{2}$ 个粒子组成新的粒子群,并将最优粒子作为粒子群中的共享信息。

步骤3 利用共享信息更新粒子位置和飞行速度,更新后的所有粒子合并组成新的粒子群。

步骤4 重复步骤2和步骤3,直至满足终止条件,并把步骤2中最后获得的最优粒子作为最优解。

4 算例分析

本文以厦门翔安区部署的公共充电桩的实际运行数据结合该区部分具备参与约时需求响应和绿色能源消纳等业务能力的相关资源,配置VPP模型,从而评估文中提出的VPP优化调度方法的有效性。为充分评估电动汽车V2G技术给VPP优化调度带来的影响,不妨在VPP模型中配置足够数量的可调度电动汽车,进而讨论参与入网放电的电动汽车的比例对于分布式能源发电出力的消纳水平的影响,然后分析在入网放电的电动汽车比例固定时,以VPP整体运行成本最低和以碳排放成本最低为目标的优化调度结果。

4.1 算例配置

本文设计的VPP模型包括1个光伏机组、4个风力机组、3个燃气轮机机组,总装机容量分别为2 MW、6 MW和1.5 MW,基础负荷上限为2 MW,以及2个V2G接入点和1 000辆电动汽车,风机型号为GoldWind-GW-1.5_70,光伏面板采用倾角41°固定式安装,时间跨度均为

2020年1月1日至2020年12月31日,基于该一年跨度的历史数据对风电和光伏日前出力进行预测,风电和光伏日前出力预测结果如图3所示。电动汽车相关技术参数来自文献[21]中的数据,所有电动汽车的电池容量为80 kW·h,电荷状态变化范围为0.2~0.95。电动汽车入网充放电基于车辆历史出行数据,电动汽车在某地停留时长的条件概率如图4所示,图4展示了基于历史数据统计出的车辆到达某地后,继续停留时长的条件概率。

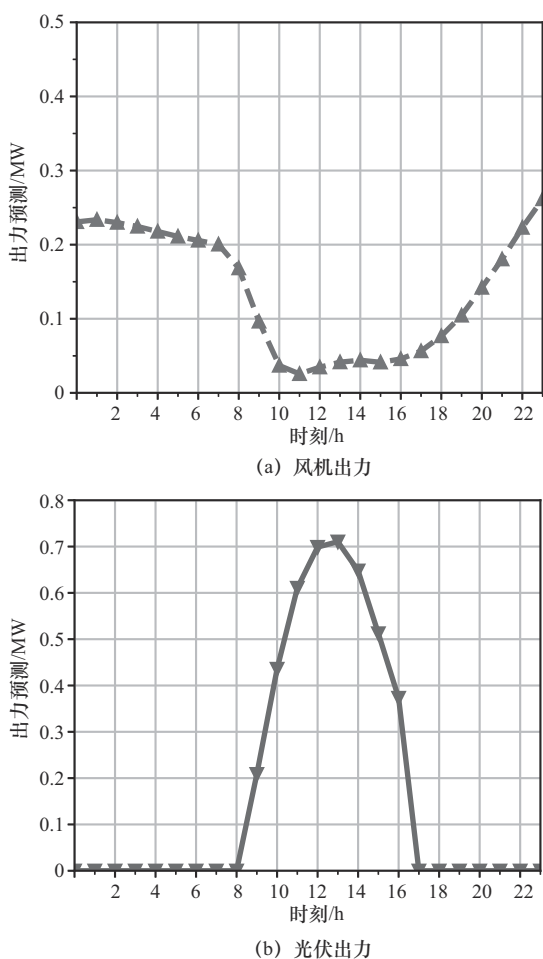


图3 风电和光伏日前出力预测结果

4.2 优化算法分析

VPP模型采用PSO优化算法,相关参数设置为:粒子群数目为60,迭代次数为150,学习因子均取1.326,惯性权重因子 w 为0.8。算法基于

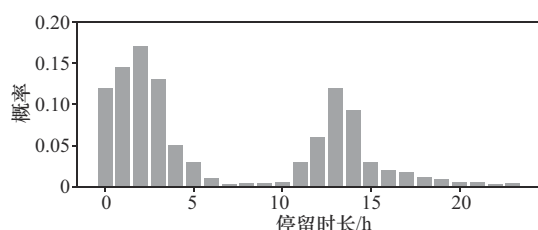


图4 电动汽车在某地停留时长的条件概率

上述参数进行结果评估。

(1) 电动汽车参与比例的影响

本节评估电动汽车入网充放电参与比例 ratio_{EV} 对于VPP调度算法的影响, ratio_{EV} 指的是到达V2G接入点的所有电动汽车中,电池荷电满足放电条件的汽车所占比例。 ratio_{EV} 为0则表明所有电动汽车均无法提供放电服务,而 ratio_{EV} 为100%则表明所有到达V2G接入点的汽车均可提供放电服务。由于VPP模型中配置可再生能源日前预测出力小于基础负荷上限,VPP优化调度过程中显然需要分布式电源(燃气轮机)和V2G放电出力来实现削峰填谷,而V2G放电在运行成本和碳排放成本方面均小于燃气轮机,因此随着 ratio_{EV} 由10%增长到100%,V2G参与放电出力的贡献逐步增加,VPP整体取得不小的运行收益和碳排放收益(即运行成本和碳排放成本为负值),不同V2G参与占比条件下,VPP运行收益和碳排放收益对比如图5所示。

电动汽车100%参与放电条件下,V2G放电出力与削峰填谷需求对比如图6所示。图6展示了在V2G参与放电占比达到100%时,VPP模型

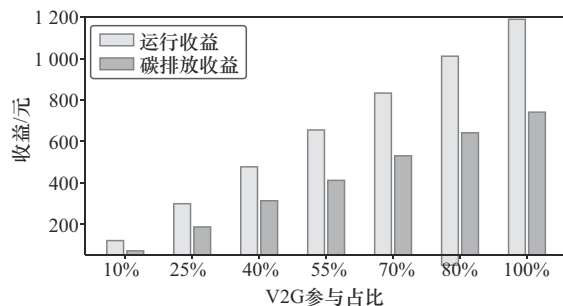


图5 不同V2G参与占比条件下,VPP运行收益和碳排放收益对比



中削峰填谷需求和V2G放电出力情况,需要注意的是, ratio_{EV} 取值为100%时,仅表明所有到达V2G接入点的电动汽车可以提供放电出力,但由于受到电动汽车出行规律的影响,电动汽车通过V2G技术参与放电出力的实际占比较小,但从图6中可以看到,V2G放电出力很好地平抑了风、光等分布式能源随机性、间歇性出力带来的电力系统的波动性,尤其是夜间时间段和中午时间段,电动汽车出行需求减少,V2G参与放电出力的概率增大,这种平抑作用更加明显。

(2) 不同调度目标下的结果对比

V2G固定比例后不同调度目标下优化调度结果对比见表1,其中多目标条件下,采用差分进化算法和粒子群优化算法分别进行求解,从表1中数据可得,两种优化算法均表明,多目标条件下的总运行成本略高于以运行成本最小为目标的优化调度,但大幅度降低了碳排放成本。

表1 V2G固定比例后不同调度目标下优化调度结果对比

目标	运行成本/元	碳排放成本/元
碳排放成本最小(粒子群优化)	2 733.19	512.46
运行成本最小(粒子群优化)	2 476.02	829.98
多目标(差分进化)	2 608.14	693.55
多目标(粒子群优化)	2 590.26	691.29

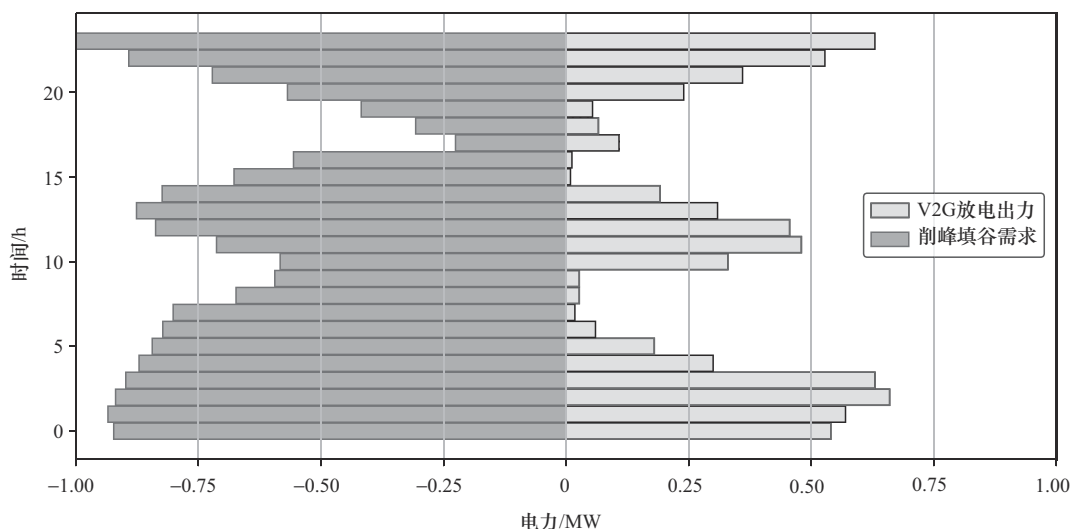


图6 电动汽车100%参与放电条件下,V2G放电出力与削峰填谷需求对比

5 结束语

考虑电动汽车入网充放电对分布式能源发电出力波动性的平抑作用,以及提升风/光电的消纳水平,本文采用虚拟电厂实现对二者的统一协调管理,进而结合电动汽车全生命周期碳排放成本和分布式电源运行时碳排放成本,建立以运行成本和碳排放成本为目标的优化模型并采用粒子群优化算法对模型进行了求解。

本文结合真实数据配置了一个VPP模型,包括风力机组、光伏发电、电动汽车、可控分布式电源和基础负荷等,在该VPP上的仿真实验验证了本文提出的VPP优化调度算法的有效性。随着电动汽车保有量的持续增长,计及V2G技术的VPP可以为低碳背景下新型电力系统的安全稳定运行提供技术参考。

参考文献:

- [1] 张素香, 刘雯静, 赵子岩, 等. 科技创新驱动电力行业高质量发展[J]. 电信科学, 2021, 37(12): 144-152.
ZHANG S X, LIU W J, ZHAO Z Y, et al. Technological innovation drives the high-quality development of the power industry[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(12): 144-152.
- [2] VARGAS S A, ESTEVES G R T, MAÇAIRA P M, et al. Wind power generation: a review and a research agenda[J]. Journal of Cleaner Production, 2019(218): 850-870.
- [3] GHAVIDEL S, LI L, AGHAEI J, et al. A review on the virtual power plant: components and operation systems[C]//Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [4] LUO F J, DONG Z Y, MENG K, et al. Short-term operational planning framework for virtual power plants with high renewable penetrations[J]. IET Renewable Power Generation, 2016, 10(5): 623-633.
- [5] KOOHI-FAYEGH S, ROSEN M A. A review of energy storage types, applications and recent developments[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 27: 101047.
- [6] 程乐峰, 余涛, 张孝顺, 等. 机器学习在能源与电力系统领域的应用和展望[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 15-31.
CHENG L F, YU T, ZHANG X S, et al. Machine learning for energy and electric power systems: state of the art and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 15-31.
- [7] 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 J, WU J M, CHEN D C, et al. Multi-objective optimization scheduling of virtual power plant with electric vehicles[J]. Electric Power Science and Engineering, 2015, 31(2): 50-54.
- [8] HU B, WANG H, NIU T, et al. Multi-time-scale coordinated optimal dispatch of virtual power plant under unreliable communication[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022, 1(1): 1-10.
- [9] LUND H, KEMPTON W. Integration of renewable energy into the transport and electricity sectors through V2G[J]. Energy Policy, 2008, 36(9): 3578-3587.
- [10] 张谦, 史乐峰, 任玉珑, 等. 计及V2G备用服务的交易模式[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 59-67, 219.
ZHANG Q, SHI L F, REN Y L, et al. The reserve trading model considering vehicle-to-grid reserve[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 59-67, 219.
- [11] 卢志刚, 王荟敬, 赵号, 等. 含V2G的虚拟电厂双层逆鲁棒优化调度策略[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1245-1252.
LU Z G, WANG H J, ZHAO H, et al. Strategy of bilevel inverse robust optimization dispatch of virtual power plant containing V2G[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1245-1252.
- [12] 刘敦楠, 王梅宝, 李根柱, 等. 电动汽车参与电力市场的商业模式研究[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(5): 516-524.
LIU D N, WANG M B, LI G Z, et al. Business model for optimal electric vehicle participation in electricity market[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(5): 516-524.
- [13] ARGADE S G, ARAVINTHAN V, ESRA BÜYÜKTAHTAKIN I, et al. Performance and consumer satisfaction-based bi-level tariff scheme for EV charging as a VPP[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(11): 2112-2122.
- [14] 赵晋辉, 李玉凯, 韩佳兵, 等. “双碳”目标背景下面向并网型微电网的虚拟电厂优化调度[J]. 新型工业化, 2022, 12(7): 1-7.
ZHAO J H, LI Y K, HAN J B, et al. Optimal scheduling of virtual power plants in grid-connected microgrid under the background of “double carbon” target[J]. The Journal of New Industrialization, 2022, 12(7): 1-7.
- [15] KONG Y, ZHAO T, YUAN R, et al. Allocation of carbon emission quotas in Chinese Provinces based on equality and efficiency principles[J]. Journal of Cleaner Production, 2019(211): 222-232.
- [16] HUSSAIN M A, BRANDAUER W, LEE M J. Mobility-aware vehicle-to-grid (V2G) optimization for uniform utilization in smart grid based power distribution network[J]. Mobile Networks and Applications, 2019, 24(5): 1701-1712.
- [17] LI Y M, HAN N, LI T T. Research on carbon emissions of electric vehicles throughout the life cycle assessment taking into vehicle weight and grid mix composition[J]. Energies, 2019, 12(19): 3612.
- [18] WAIS P. Two and three-parameter Weibull distribution in available wind power analysis[J]. Renewable Energy, 2017, 103: 15-29.
- [19] BHUIYAN ERPHAN A, ZAHID H M, MUYEEN S M, et al. Towards next generation virtual power plant: technology review and frameworks[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 150: 111358.
- [20] GARCÍA-GONZALO E, FERNÁNDEZ-MARTÍNEZ J L. A brief historical review of particle swarm optimization (PSO)[J]. Journal of Bioinformatics and Intelligent Control, 2012, 1(1): 3-16.
- [21] ZHAO S H, LI K, YANG Z L, et al. A new power system active rescheduling method considering the dispatchable plug-in



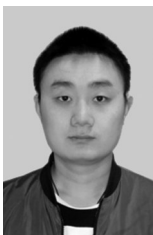
electric vehicles and intermittent renewable energies[J]. Applied Energy, 2022, 314: 118715.

- [22] FARZIN H, FOTUHI-FIRUZABAD M, MOEINI-AGHTAIE M. A practical scheme to involve degradation cost of lithium-ion batteries in vehicle-to-grid applications[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(4): 1730-1738.

[作者简介]



于卓 (1980-), 男, 博士, 北京中电普华信息技术有限公司高级工程师, 主要研究方向为虚拟电厂、物联网及其安全、区块链、信息安全等。



门进宝 (1992-), 男, 北京中电普华信息技术有限公司工程师, 主要研究方向为智能电网、虚拟电厂、信息安全等。



王军 (1988-), 男, 北京中电普华信息技术有限公司工程师, 主要研究方向为物联网及其安全、安全密钥等。



吕海 (1992-), 男, 北京中电普华信息技术有限公司工程师, 主要研究方向为虚拟电厂、电力物联网、区块链、信息安全等。



欧阳红 (1967-), 男, 北京中电普华信息技术有限公司高级工程师, 主要研究方向为物联网及其安全、安全密钥、智能电网、信息安全等。