

[虚拟电厂]

考虑电动汽车负荷聚合的虚拟电厂参与需求响应调度研究

文/董龙 张磊 赵素娟 马玖福 李贺
国网甘肃省电力公司张掖供电公司

电动汽车具有节能减排、绿色环保等优势，但大量电动汽车无序充电会对电网造成不利影响。为了促进风光消纳，减小电动汽车对电网的不利因素，需要建立环保、低碳、稳定和高效的调度目标。首先对虚拟电厂各部分进行建模，其次分析电动汽车复合聚合特性，建立考虑电动汽车负荷聚合的虚拟电厂双层优化模型，并进行算例分析。结果表明考虑电动汽车负荷聚合参与需求响应调度，既满足了电动汽车用户用电需求，又降低了电动汽车峰时段集中入网充电负荷对虚拟电厂造成的影响，提高虚拟电厂运行的经济性与稳定性。

“双碳”目标下，清洁能源迅速发展，但是分布式清洁能源较为分散，随机性与波动性强，无法作为独立主体参与电力市场。虚拟电厂（Virtual Power Plant, VPP）通过聚合分布式能源与可调节负荷，提高虚拟电厂运行稳定性，促进新能源的消纳。其中电动汽车负荷随机波动性强，大规模电动汽车无序充电会导致局部电网供需不平衡。对大规模电动汽车进行聚合与调度，是当前研究的热点。推动电动汽车发展也是我国实现节能减排和战略发展的重要手段，得到了国家广泛支持。预计到2025年，我国电动汽车保有量将达到1 600万台，充电桩数量也将达到480万台。

国内外学者在虚拟电厂的构成与运行优化方面展开了大量的研究。针对虚拟电厂的经济调度而言，文献[1-3]目标函数为虚拟电厂的效益最大，考虑风电、光伏出力的不确定性，构建含风电、光伏的虚拟电厂经济调度模型。文献[4]目标函数为虚拟电厂经济效益最大，考虑了电动汽车无序充电对电网造成的冲击影响。文献[5]针对虚拟电厂运行特点及电动汽车负荷特性，研究电动汽车参与虚拟电厂调度的影响。

电动汽车负荷会引起电网的波动性增强，给电网运行带来冲击。文献[6-8]通过电动汽车有序充电措施，能够有效减少电动汽车负荷对电网的冲击，但没有考虑电动汽车的储能特性；文献[9]表明电动汽车入网技术可实现电动汽车向电网放电，考虑电动汽车储能特性，电动汽车作为储能能够为电网提供辅助服务，使电动汽车车主获得部分收益。

针对大规模新能源和电动汽车并网对电网造成的冲击问题，构建含有风电、光伏、燃气轮机和电动汽车的虚拟电厂模型，分析电动汽车负荷聚合特性，建立考虑电动汽车负荷聚合的虚拟电厂参与需求响应调度的双层优化模型。最后，基于MATLAB进行仿真求解，进行算例分析。结果表明，考虑电动汽车负荷聚合参与需求响应调度，可以降低电动汽车不确定性对电网造成的冲击，保证虚拟电厂供电可靠性，提高了虚拟电厂经济效益。

虚拟电厂的组成

虚拟电厂的组成单元包含风电机组、光伏机组、负荷及电动汽车等，如图1所示。风电、光伏机组和电动汽车将自身的状态信号发送至虚拟电

厂,然后调度中心通过优化模型实现最优的调度方案,保证风光消纳,提高运营效益。其中风力发电、光伏发电会受到风速波动、光照辐射量的影响,其出力具有间歇性;车主的出行习惯导致电动汽车接入具有随机性。这些不确定性不利于VPP的灵活控制和协调互补,给经济型、安全运行带来风险。

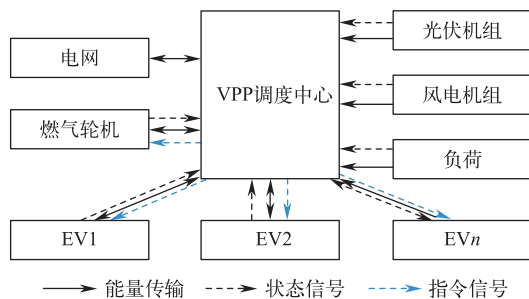


图1 虚拟电厂示意图

风电机组出力概率分布

风电机组的出力与风速具有实时关联,采取预测风速的办法间接地预测风电机组的出力,其风速分布概率密度函数进场采用Weibull分布进行模拟,表达式为

$$\begin{cases} f_{WT}(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \\ k = \left(\frac{\sigma_v}{v}\right)^{-1.086} \\ c = \frac{\bar{v}}{\Gamma(1+1/k)} \end{cases} \quad (1)$$

式中, v 为风速; k 为风速频谱特性; σ_v 为风速的方差; c 为尺度参数; Γ 为伽玛函数。

风力发电机组的功率表达式为

$$P_{WT} = \begin{cases} 0 & v \leq v_{cin}, v \geq v_{cont} \\ \frac{P_{rate}(v - v_{cin})}{(v_{rate} - v_{cout})} & v_{cin} \leq v \leq v_{rate} \\ P_{rate} & v_{rate} \leq v \leq v_{cont} \end{cases} \quad (2)$$

式中, v_{cin} 为切入风速; v_{rate} 为风电机组额定风速; v_{cont} 为风电机组的切出风速; P_{rate} 为风电机组额定功率。

风机出力大小取决于风速,当 $v \leq v_{cin}$, $v \geq v_{cont}$ 时,风机处于停机状态。而 $v_{cin} \leq v \leq v_{rate}$ 时,风电机组将并网发电,其输出功率与风速呈线性关系。当

$v_{rate} \leq v \leq v_{cont}$ 时,为了满足并网需求,风电机组将采取控制发电机转速或桨叶节距角的方式来稳定输出功率。

光伏发电出力该概率分布

光伏发电单元的传输功率 P_{PV} 表达式为

$$P_{PV} = P_{STC} \frac{G_{ING}}{G_{STC}} [1 + k_1 (T_c - T_r)] \quad (3)$$

式中, P_{STC} 为光伏单元的最大输出功率; k_1 为组件的温度系数; T_c 为光伏面板温度; T_r 为参考温度; G_{ING} 为标准测试条件下的辐射强度; G_{STC} 为估计输出下的辐射强度。

太阳辐射强度近似看成Beta分布,其概率密度关系表示为

$$f(\text{lux}) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} (1 + \text{lux})^{\beta-1} (\text{lux})^{\alpha-1} \quad (4)$$

式中, lux 为当地当前太阳辐射强度; α 和 β 为Beta分布的形状参数, $\alpha > 0$, $\beta > 0$ 。

储能系统模型

在虚拟电厂运行中,出力单元包括风电、光伏等,但其功率会产生较大幅度的随机性、波动性,因此通过可控储能来提高清洁能源出力的可靠、稳定性。储能系统在虚拟电厂运行中能够发挥其特性。

储能系统 t 时刻剩余电量和饱和电量的比值为荷电状态 $\text{SOC}(t)$,荷电状态常使用百分数表示,范围为 $0 \sim 1$ 。 $\text{SOC}(t)=1$ 表示电池电量饱和, $\text{SOC}(t)=0$ 表示电池电量完全放电,为了保证电池不过度放电,一般要求荷电状态始终保持在10%以上。储能系统荷电状态表达式为

$$\text{SOC}(t) = \frac{E_f - E_d}{E_f} \times 100\% \quad (5)$$

式中, $\text{SOC}(t)$ 为 t 时刻储能系统荷电状态; E_f 为储能系统荷电饱和时的电量; E_d 为放电电量。

储能系统充放电荷电状态计算式为

$$\text{SOC}(t) = \text{SOC}(t-1) + \left(P_{ch}(t)\eta_{ch} + \frac{P_{dis}(t)}{\eta_{dis}} \right) \times \frac{\Delta t}{C} \quad (6)$$

式中, $P_{ch}(t)$ 、 $P_{dis}(t)$ 为 t 时刻储能系统的充放电功率; η_{ch} 、 η_{dis} 为储能系统充放电效率; Δt 为时间步

长； C 为储能系统的总容量。

电动汽车负荷聚合模型

近年来，电动汽车数量有较大规模的增长。当大量电动汽车集中入网时，其充电负荷会给电力系统带来一定的冲击，电动汽车较其他负荷还具有移动储能特性。因此，大量电动汽车可同时作为源荷参与虚拟电厂的调度控制。

根据激励手段以及参与形式的不同，针对电动汽车充放电需求响应的策略目前主要有两种。第一类为基于电动汽车充电电价的需求响应策略，该策略是通过调整充电价格来影响电动汽车用户的充电行为，目前采用的策略包括分时电价和实时电价等充电电价定制策略。通过增加电动汽车用户充电经济性的方式引导用户充电需求的改变或偏移，达到虚拟电厂需求的效果。第二类是基于激励价格的需求响应方式。该策略是虚拟电厂以合同的形式制定相应的奖励策略，电动汽车用户根据虚拟电厂的需求选择补点或并网放电的参与形式获得经济补偿。电动汽车有序充放电流程图如图2所示。

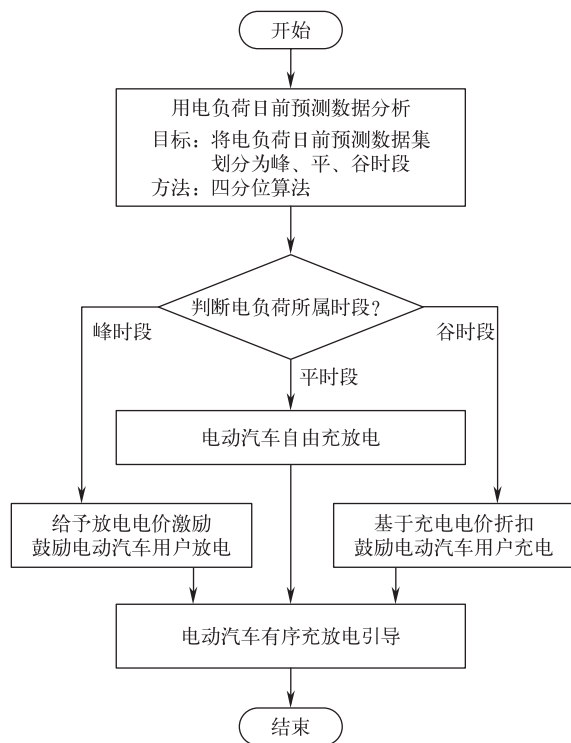


图2 电动汽车有序充放电流程图

若电动汽车每天离家时的电池续航里程为 d_s ，最大续航里程为 d_m ，车主返回时的荷电状态为

$$\text{SOC}_{\text{EV}} = \left(\frac{d_s - d}{d_m} \right) \times 100\% \quad (7)$$

若车主在每天结束行程后就开始以恒定功率充电至结束，导致电网的负荷出现的“峰上加峰”现象。

利用蒙特卡罗法对居民区的电动汽车出行分布进行抽样，可以较好模拟电动汽车出行规律，其分布函数为

$$f(x_t) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t_h - \mu_t)^2}{2\sigma_t^2}} & \mu_t - 12 \leq t_h \leq 24 \\ \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t_h + 24 - \mu_t)^2}{2\sigma_t^2}} & 0 \leq t_h \leq \mu_t - 12 \end{cases} \quad (8)$$

式中， t_h 为住宅用户返程时间； μ_t 为期待值，取17.6； σ_t 为标准差，取3.2。

电动汽车的日行驶里程数 d 的概率密度函数服从对数正态分布 $d \sim \text{In}N(\mu_d, \sigma_d^2)$ ，表达式为

$$f(d) = \frac{1}{d\sigma_d \sqrt{2\pi}} \left[\exp - \frac{(\ln d - \mu_d)^2}{2\sigma_d^2} \right] \quad (9)$$

出行时间分布概率密度曲线如图3所示，行驶里程值概率密度曲线如图4所示。

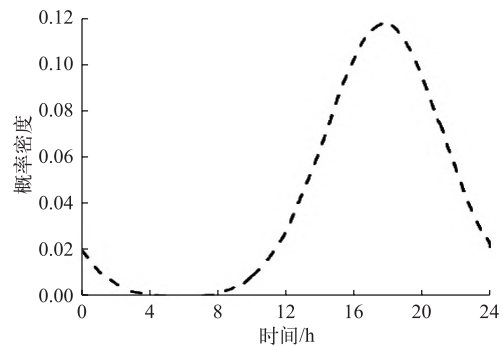


图3 出行时间分布概率密度曲线

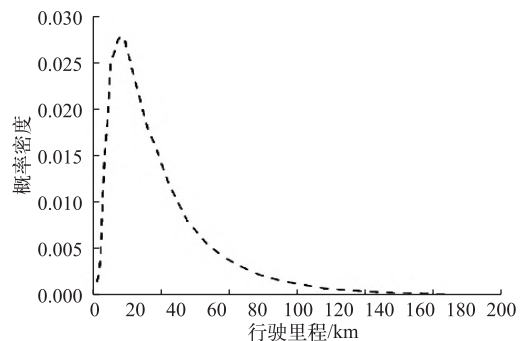


图4 行驶里程值概率密度曲线

电动汽车聚合时考虑出行规律的随机性，对出

行时间、返回时间和行驶里程等进行抽样,总结电动汽车随机出行规律,对第*i*辆电动汽车建立如下模型。

电动汽车约束表达式为

$$0 \leq P_{EV,i}(t) \leq P_{EV,max} \quad (10)$$

$$S_{SOCEV,i}(t) = S_{SOCEV,i}(t-1) + \eta_{EV} P_{EV,i}(t) \quad (11)$$

$$S_{SOCEV,min} \leq S_{SOCEV}(t) \leq S_{SOCEV,max} \quad (12)$$

$$0.95 \times C_i \leq S_{SOCEV,last,i}(t) \leq C_i \quad (13)$$

聚合电动汽车功率表达式为

$$P_{EV,sum}(t) = \sum_{i=1}^{N_i} P_{EV,i}(t) \quad (14)$$

电动汽车聚合功率区间波动范围为

$$P_{EV,sum}(t) \leq [P_{EV,sum}(t)] \leq \overline{P_{EV,sum}(t)} \quad (15)$$

考虑电动汽车负荷聚合的虚拟电厂运行策略中,电动汽车作为负荷,或者储能单元,在满足用户出行需求的前提下充分发挥电动汽车的储能潜力。在早高峰时段(07:00—9:00)和晚高峰时段(16:00—19:00)将有大量电动汽车离网。在满足这部分负荷的用电需求条件下,由虚拟电厂控制并网电动汽车,与燃气轮机共同作用,减小新能源发电波动性与随机性。

考虑电动汽车负荷聚合的虚拟电厂双层优化模型

1. 双层模型运行策略

建立考虑电动汽车负荷聚合的虚拟电厂双层优化模型。在上层虚拟电厂调度中,以综合成本最小,新能源消纳率最大为目标函数,预测次日风光出力情况,对虚拟电厂各单元运行情况进行优化。下层虚拟电厂调度中,考虑电动汽车需求响应以电动汽车充放电成本最小为目标函数。双层模型运行策略如图5所示。

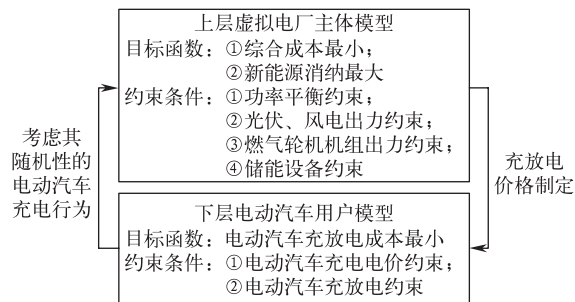


图5 考虑电动汽车负荷聚合的虚拟电厂双层模型运行策略

虚拟电厂各出力单元运行策略:

1) 风电、光伏出力单元运行策略。优先消纳风电、光伏出力,虚拟电厂出力偏差由虚拟电厂中电动汽车、燃气轮机组以及主电网来补足。

2) 电动汽车基于电价需求响应的充电策略。由电价需求响应方式引导电动汽车充电负荷进行转移,减小电动汽车集中入网引起的“峰上加峰”现象。

3) 电动汽车放电策略。根据电动汽车电池的负荷特性,在满足电动汽车用户用电需求的前提下调控电动汽车出力来补足虚拟电厂出力偏差。若电动汽车与燃气轮机出力仍无法完全补足虚拟电厂出力偏差,虚拟电厂则需要承受高额购电费用从主电网购电来完全补足虚拟电厂出力偏差。

2. 上层模型

目标函数①综合成本最小。

虚拟电厂参与系统调度后,系统需要综合考虑虚拟电厂及其他机组发电成本,以系统的运行最小为目标函数,系统调度模型目标函数为

$$\min f(t) = C^g(t) + C^{om}(t) + C^{vp}(t) \quad (16)$$

系统调度模型调度周期为一天。 $f(t)$ 为*t*时段系统的运行总成本,目标函数内包有3个部分,分别为发电成本 $C^g(t)$ 、运维成本 $C^{om}(t)$ 和需求响应成本 $C^{vp}(t)$ 。

(1) 虚拟电厂发电成本

$$C^g(t) = \sum_{n=1}^N (a_n P_{Gnk}^2 + b_n P_{Gnk} + c_n) \quad (17)$$

式中, N 为常规机组的数量; P_{Gnk} 为机组*n*在*k*时段的出力; a_n 、 b_n 、 c_n 分别为燃料耗费曲线参数。

(2) 虚拟电厂运行维护成本

虚拟电厂的运维成本是指为了保证机组正常运行所花费的成本,具体表达式为

$$C^{om}(t) = \sum_{i \in \{WT, PV, ES\}} P_i(t) \theta_i + \sum_{i \in \{WT, PV, ES\}} P_{loss}^{tbi}(t) \theta_{tbi} + G_{P2G}(t) \theta_{P2G} \quad (18)$$

(3) 需求响应成本

$$C^{vp}(t) = G(t) J^s(t) \quad (19)$$

式中, $G(t)$ 为*t*时段虚拟电厂对系统的出力; $J^s(t)$ 为*t*时段虚拟电厂对系统的批发电价。

目标函数②新能源消纳最大。

新能源消纳率指虚拟电厂中风光实际消耗与实际出力的比值,表达式为

$$\omega_{re}' = \frac{P_{WT-co}(t) + P_{PV-co}(t)}{P_{WT}(t) + P_{PV}(t)} \quad (20)$$

式中, $\omega_{re}(t)$ 为 t 时刻新能源的消纳率; $P_{WT-co}(t)$ 、 $P_{PV-co}(t)$ 为风力发电与光伏发电的实际消纳值; $P_{WT}(t)$ 、 $P_{PV}(t)$ 为风力发电与光伏发电的实际出力值。

3. 约束条件

在考虑系统最优时约束条件包括等式约束和不等式约束。

(1) 功率平衡约束

$$P'(t) = P_{PV}(t) + P_{WT}(t) + P_{gt}(t) + P_{EV, sum}(t) + P_{vpp}(t) \quad (21)$$

(2) 光伏出力约束

$$P_{PV, min} \leq P_{PV}(t) \leq P_{PV, max} \quad (22)$$

(3) 风电机组出力约束

$$P_{WT, min} \leq P_{WT}(t) \leq P_{WT, max} \quad (23)$$

式中, $P_{WT, min}$ 、 $P_{WT, max}$ 分别为风电机组出力最大值、最小值。

(4) 储能设备约束

$$\begin{aligned} SOC(t) = & S_{SOC}(t-1) + \\ & \left\{ \left(\eta_c + \frac{1}{\eta_{disc}} \right) P_{si}(t) + \left(\eta_c - \frac{1}{\eta_{disc}} \right) P_{si}(t) \right\} \frac{\Delta T}{2} \end{aligned} \quad (24)$$

$$SOC_{min} \leq SOC_n \leq SOC_{max} \quad (25)$$

式中, η_c 、 η_{disc} 分别为储能系统充、放电效率; SOC_{min} 、 SOC_{max} 分别为储能系统荷电上限、下限。

4. 下层模型

目标函数为充电成本最小, 即

$$\min f_2 = \sum_{t=1}^T c_{buy}(t) [P_{EV, sum}(t)] \quad (26)$$

电动汽车充电电价约束

电动汽车的充电电价需要维持在合理的范围内, 满足最大值、最小值约束。

$$\lambda_{ev, min} \leq \lambda_{ev, t} \leq \lambda_{ev, max} \quad (27)$$

式中, $\lambda_{ev, min}$ 和 $\lambda_{ev, max}$ 为电动汽车充电电价的最小值和最大值。

电动汽车充放电功率计算公式为

$$P_{ev_ch}(t) = \sum_{n=1}^{N_{ev_ch}(T)} M_{ev_ch, n}(t) P_{ev_ch, n}(t) \quad (28)$$

$$P_{ev_dis}(t) = \sum_{n=1}^{N_{ev_dis}(T)} M_{ev_dis, n}(t) P_{ev_dis, n}(t) \quad (29)$$

式中, $P_{ev_ch}(t)$ 、 $P_{ev_dis}(t)$ 分别为虚拟电厂中电动汽

车 t 时刻总充电、放电功率; $N_{ev_ch}(T)$ 、 $N_{ev_dis}(T)$ 分别为虚拟电厂中 t 时刻的处于充、放电状态的电动汽车数量; $P_{ev_ch, n}(t)$ 、 $P_{ev_dis, n}(t)$ 分别为虚拟电厂中第 n 辆电动汽车 t 时刻充、放电功率。 $M_{ev_ch, n}(t)$ 、 $M_{ev_dis, n}(t)$ 分别为第 n 辆电动汽车充-放电功率对应的0~1变量。

$$0 \leq P_{ev_ch, n}(t) \leq P_{ev_ch, max} \quad (30)$$

$$0 \leq P_{ev_dis, n}(t) \leq P_{ev_dis, max} \quad (31)$$

式中, $P_{ev_ch, max}$ 、 $P_{ev_dis, max}$ 分别为电动汽车最大充、放电功率限制。

$$\begin{cases} M_{ev_ch, n}(t) + M_{ev_dis, n}(t) \leq 1 \\ M_{ev_ch, n}(t), M_{ev_dis, n}(t) \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (32)$$

$$P_{ev_ch, n}(t) = P_{ev_dis, n}(t) = 0, t \notin (t_{arr, n}, t_{dep, n}) \quad (33)$$

式中, $t_{arr, n}$ 、 $t_{dep, n}$ 分别为第 n 辆电动汽车的出行结束时刻、出行开始时刻。

$$\begin{aligned} SOC_{ev, n}(t) = & SOC_{ev, n}(t-1) + \\ & \left(P_{ev_ch, n}(t) \eta_{ev_ch} + \frac{P_{ev_dis, n}(t)}{\eta_{ev_dis}} \right) \times \frac{\Delta t}{C} \end{aligned} \quad (34)$$

$$SOC_{ev, min}(t) \leq SOC_{ev, n}(t) \leq SOC_{ev, max}(t) \quad (35)$$

$$SOC_{ev, n}(dep) \geq SOC_{ev, n, demand}(dep) \quad (36)$$

式中, $SOC_{ev, n}(t)$ 为第 n 辆电动汽车 t 时刻荷电状态; η_{ev_ch} 、 η_{ev_dis} 分别为电动汽车充、放电效率; C 为电动汽车电池容量; Δt 为优化调度时间步长; $SOC_{ev, min}(t)$ 、 $SOC_{ev, max}(t)$ 分别为电动汽车荷电状态的最大、最小值; $SOC_{ev, n}(dep)$ 、 $SOC_{ev, n, demand}(dep)$ 分别为第 n 辆电动汽车出行开始时刻的荷电状态 and 期望荷电状态。

算例分析

虚拟电厂由1个40 MW风电场、1个30 MW光伏电厂、2个15 MW的燃气轮机组和1 000台电动汽车组成, 各设备具体参数见表1。将一天24 h划分为峰、平、谷时段, 各时段具体划分及对应电价见表2。

表1 各设备出力单元具体参数

电源类型	出力/MW		运行管理成本/ (元/MW·h)	燃料成本/ (元/MW·h)
	上限	下限		
风力发电	40	0	32.5	0.0
光伏发电	30	0	11.5	0.0
燃气轮机	15	5	110	168.6

表2 各类时段划分及对应动态分时电价

时段	虚拟电厂售电电价	电动汽车需求响应后电价	主电网购电价格
峰时段 11:00—14:00 17:00—22:00	0.58	0.58	1.12
平时段 07:00—10:00 14:00—17:00	0.51	0.55	1.01
谷时段 00:00—06:00 22:00—24:00	0.34	0.44	0.64

虚拟电厂需要对风电、光伏出力情况进行分析，优化可控电源的实时出力。虚拟电厂中风电、光伏的预测出力和实际出力对比如图6、图7所示。由图6、图7可得，各个时段风电、光伏的预测出力和实际出力之间是存在出力偏差的，风电预测误差为12.78%，光伏预测误差为9.45%，通常风、光出力预测平均绝对误差小于15%。

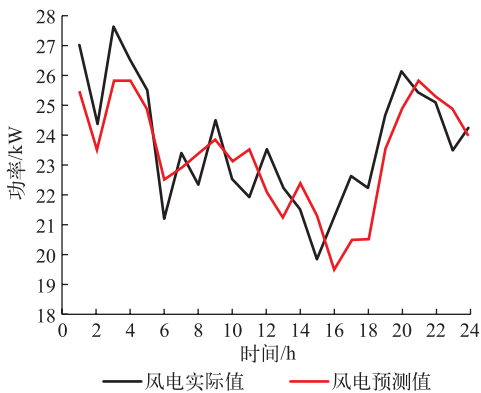


图6 风电实际出力与预测出力

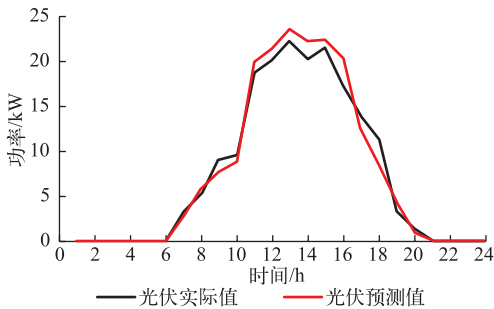


图7 光伏实际出力与预测出力

电动车各类成本信息见表3。虚拟电厂电动汽车数量为1 000辆，初始荷电状态荷正态分布 $N(0.5, 0.12)$ ，电动汽车最大充电功率 $P_{ev_ch,max}$ 、放电功率 $P_{ev_dis,max}$ 为10 kW，充放电效率 η_{ev_ch} 、 η_{ev_dis} 为90%，出行开始时期望荷电状态0.85，为

防止电动车过度充电，规定其最大、最小荷电状态 $SOC_{ev,min}(t)$ 、 $SOC_{ev,max}(t)$ 为0.2、0.9。

表3 电动汽车成本信息

电源类型	电动汽车充电管理成本/[元/(MW·h)]	电动汽车放电管理成本/[元/(MW·h)]	电动汽车电池置换成本/元
电动汽车	84.3	84.3	78 591

场景设置

场景一：电动汽车无序充电。

场景二：电动汽车有序充电，参与虚拟电厂调度。

无序充电时的电动汽车在网数量（场景一）与电动汽车基于电价参与需求响应充电方式（场景二）对比如图8所示。

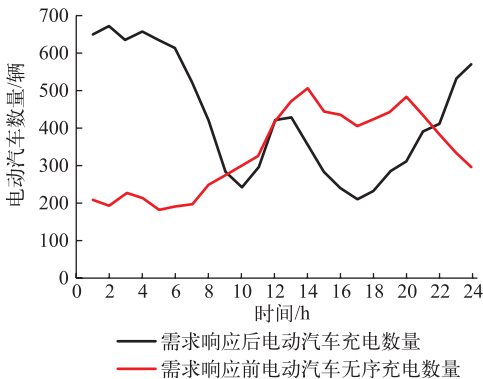


图8 参与需求响应前后电动汽车数量

无序充电时电动汽车负荷（场景一）与电动汽车基于电价参与需求响应时电动汽车负荷（场景二）对比如图9所示。

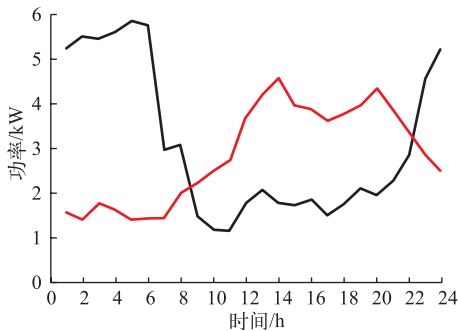


图9 参与需求响应前后电动汽车负荷

场景二下，峰时段时，电动汽车充电数量减少，电动汽车充电负荷对比无序充电负荷减少了

13.78 MW；平时段时，电动汽车充电负荷对比无序充电负荷减少了8.40 MW，需求响应后虚拟电厂经济收益增加了835.04元；谷时段时，电动汽车充电数量增加，电动汽车充电负荷对比无序充电负荷增加了28.51 MW；由此可得电动汽车参与需求响应能够削减高峰时段电动汽车充电负荷转移至低谷时段中。电动汽车用户主动参与需求响应可改变电动汽车充电时间及充电功率，既增加了虚拟电厂经济收益，又能减少大量电动汽车集中充电造成的“峰上加峰”现象。

虚拟电厂运行过程中计划出力与实际出力之间存在出力偏差，虚拟电厂需要向系统缴纳相应的惩罚成本。图10是电动汽车不参加虚拟电厂调度时虚拟电厂计划出力与实际出力对比图，整体出力偏差为8.56%。图11是电动汽车参与虚拟电厂调度时虚拟电厂计划出力与实际出力对比图，整体偏差为4.96%。通过对比图可知，电动汽车参加虚拟电厂调度有利于减小虚拟电厂出力偏差，提高虚拟电厂内部调度灵活性，减少虚拟电厂惩罚成本。

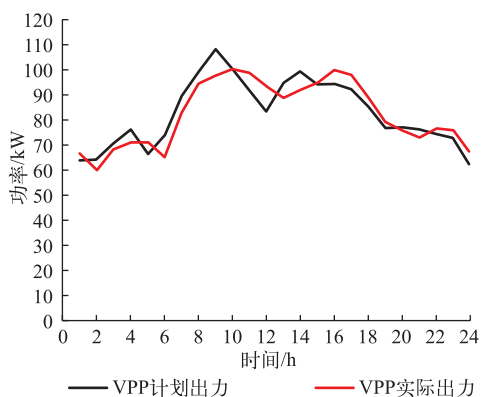


图10 电动汽车不参加需求响应时，虚拟电厂计划出力与实际出力

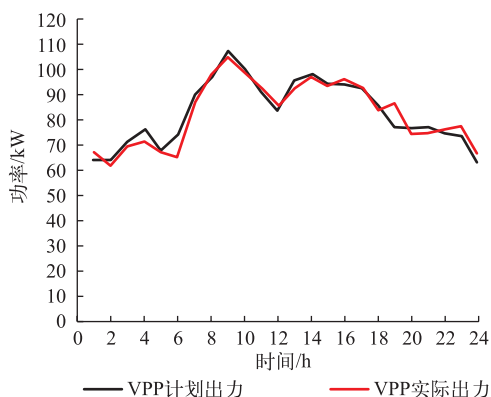


图11 电动汽车参与需求响应时，虚拟电厂计划出力与实际出力

结束语

针对大规模新能源和电动汽车并网对电网造成的冲击等问题，本文分析了电动汽车聚合特性，构建考虑电动汽车负荷聚合的虚拟电厂双层优化模型，对电动汽车无序充电与电动汽车有序充电两种场景进行了对比分析。考虑电动汽车负荷聚合参与虚拟电厂需求响应时，在满足电动汽车用电负荷需求的前提下，减少电动汽车集中入网充电负荷对虚拟电厂造成的影响。对虚拟电厂而言，考虑电动汽车聚合可以提高风电、光伏消纳率，提高虚拟电厂供电可靠性，保证虚拟电厂经济效益。EA

（收稿日期：2024-01-18）

参考文献

- [1] 高明，曾平良，李亚楼，等．考虑需求侧响应的虚拟电厂优化调度[J]．电力科学与工程，2020，36(11)：45-52．
- [2] 潘华，梁作放，薛强中，等．基于分时电价的含风-光-气-储虚拟电厂经济调度[J]．太阳能学报，2020，41(8)：115-122．
- [3] 孙晶琪，王愿，郭晓慧，等．考虑环境外部性和风光出力不确定性的虚拟电厂运行优化[J]．电力系统自动化，2022，46(8)：50-59．
- [4] 应飞祥，徐天奇，李琰，等．含电动汽车充电站商业型虚拟电厂的日前调度优化策略研究[J]．电力系统保护与控制，2020，48(21)：92-100．
- [5] 薛东．考虑电动汽车接入的虚拟电厂优化运行研究[D]．合肥：合肥工业大学，2020．
- [6] 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．
- [7] 佟晶晶，温俊强，王丹，等．基于分时电价的电动汽车多目标优化充电策略[J]．电力系统保护与控制，2016，44(1)：17-23．
- [8] 葛少云，王龙，刘洪，等．计及电动汽车入网的峰谷电价时段优化模型研究[J]．电网技术，2013，37(8)：2316-2321．
- [9] 李博彤，唐锴．计及电动汽车储能特性的微电网规划模型与算法[J]．电力建设，2017，38(2)：60-65．