

基于 AP 聚类算法的充电站/光伏电站 一体化规划方法

陈泫光¹, 刘俊勇¹, 李林果², 梅亦蕾², 籍雁南²

(1. 四川大学 电气工程学院, 四川 成都 610065; 2. 国网四川省电力公司成都供电公司, 四川 成都 610041)

摘要: 文章基于熵权法构建光伏出力特性指标权重, 利用 AP 聚类算法生成典型场景。同时, 计入电动汽车负荷时空分布特性及需求响应能力, 建立了负荷联动时空响应模型。基于分时电价与光伏典型场景出力, 优化电动汽车充电时序及空间布局, 满足充电站距离约束、系统网络约束等前提下, 提出了以充电站年总成本最小、用户满意度指标最优的充电站/光伏电站一体化规划方法。最后, 通过算例仿真, 基于对各个场景下经济性与满意度等指标的权衡考量, 求得了充电站/光伏电站一体化规划方案。

关键词: 充电站规划; 电动汽车; AP 聚类; 用户满意度

中图分类号: TK51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)10-1371-10

0 引言

电动汽车可以促进清洁能源消纳、助力“双碳”目标实现^[1], 但完善充电站配套设施是推动电动汽车发展的重要基础^[2]。电动汽车负荷时空需求、用户满意度以及大规模分布式能源接入带来的源、荷双重不确定性等因素均为充电站规划带来了一定的挑战^[3]。

已有文献对电动汽车有序充电管理及充电站选址定容等问题展开研究。文献[4]考虑风光等不确定性, 提出了以经济性最优为目标的充/换电站-风-光-储三阶段规划方法。文献[5]考虑光伏出力与充电站负荷的随机性, 提出了基于机会约束的充电站与光伏电站联合规划模型。文献[6]通过分析风光荷资源不确定性, 提出了一种综合考虑分布式电源与电动汽车充电站接入配电网影响的充电站协调规划方法。文献[7]针对新能源出力的随机性, 建立了计及需求响应的电动汽车充电站多时间尺度随机优化调度模型, 提升了源荷双侧多时间尺度协调配合能力。上述文献主要研究了新能源接入电网后, 综合考虑源荷时空分布及资源特性, 提出了风光储与充电站联合优化调度与协同规划方法。文献[8]考虑分布式电源与电动汽车接入电网带来的波动性问题, 提出了一种基于时空需求响应特性的分布式电源与充电站的多

目标协调优化配置方法。文献[9]基于典型光伏出力曲线和电动汽车用户行为特征与充电习惯, 提出了一种考虑电动汽车有序充电的光储充电站联合规划的选址定容方法, 在满足用户需求的同时有效增强了配电网运行的稳定性。文献[10]基于V2G模式下的峰谷电价有序充放电模式, 建立了以能源利用率最大化和系统投资、运行成本最小化为目标函数的光伏、充电站联合规划模型, 有效缓解了电网压力, 有效提升能源效率。上述文献考虑电动汽车不同运行模式与行为特征, 提出了兼顾经济性、稳定性与用户满意等多项关键指标的新能源、储能与充电站一体化的选址定容方法。文献[11]考虑大规模电动汽车的实时优化调度, 计入多重关联因素, 构造了基于电动汽车分群的实时联合优化调度模型。文献[12]基于电动汽车多场景下的时空负荷预测, 计入投资及运行成本, 建立了上层优化选址、下层最短路径优化的一体化选址定容模型。文献[13]基于K-means聚类算法对电动汽车的空间分布进行分析, 提出了基于图论的集中型充电站服务范围 and 站点选址方法。文献[14]考虑充电站投资效益和用户主体满意度, 建立了一种以上层成本最低和下层满意度最优为目标的 双层规划模型, 实现了投资成本和用户满意度的有效折衷。上述文献基于对电动汽车负荷

收稿日期: 2023-01-21。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB0905200)。

通信作者: 刘俊勇(1963-), 男, 博士, 教授, 研究方向电力系统分析及电力市场。E-mail: 287944219@qq.com

需求、出行轨迹及效益分析,提出了兼顾充电站投资主体与用户主体的电动汽车充电站规划方法。以上研究对基于新能源典型场景下,综合考虑碳排放成本、投资效益和用户满意度等评价指标的规划方法研究较少,对计及源荷特性及协调互动能力的规划方法研究较少。

本文基于现有研究成果及不足,分析光伏历史数据,基于熵权法构建了光伏出力特性指标,利用 AP 聚类算法生成典型场景。计入电动汽车负荷时间和空间的分布特性,构建了时空需求响应模型,考虑分时电价和光伏典型出力曲线,优化电动汽车充电管理模式。进一步地,计及系统建设成本、运行成本、碳排放成本等总成本最小,排队等待时间等满意度指标最优,提出了兼顾经济性和用户满意度的充电站/光伏电站一体化规划模型。通过算例仿真,电动汽车需求响应后的经济指标及用户满意度得到了明显提升,基于对多方案的经济性与满意度综合考量,求得了充电站/光伏电站一体化规划方案,验证了所提方法的有效性。

1 基于熵权法改进的 AP 聚类算法的光伏典型场景生成

传统聚类算法需输入聚类数目,导致聚类结果受到主观因素干扰;部分算法随机选取聚类中心或搜索方向,可能导致聚类结果陷入局部最优。AP 聚类算法整个过程不需要人为干预,故更具客观性^[15]。

1.1 光伏特性指标选取

光伏在不同场景下的出力曲线具有一定差异性,出力特性可以反映其出力内部规律,本文提取了多个特征指标,并对其进行权重赋值,实现数据降维的同时保证了对曲线形态的准确描述^[16]。

1.1.1 发电时段属性

光伏出力受光照影响较大,本文根据光伏可出力时段长度表征发电时段属性,即:

$$N_T = \sum_{t=1}^T n_t, \{n_t=1, P_{PV,t}>0; n_t=0, P_{PV,t}=0\} \quad (1)$$

式中: $N_T, P_{PV,t}$ 分别为光伏有出力的时段数和光伏出力; n_t 为 t 时段光伏的出力情况,当该时段光伏有出力时, n_t 值为1,反之则为0。当光伏出力时段较长时,说明该场景下的光照时间较长。

1.1.2 日平均出力

光伏日平均出力为

$$\bar{P}_{PV} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T P_{PV,t} \quad (2)$$

式中: \bar{P}_{PV} 为光伏的日平均出力; T 为1d的总时段。

光伏的平均出力大小可以反映该场景下的气象状况。若平均出力较大,则表明天气较好;若平均出力较小,则表明光照强度较低,当天可能为阴天或雨天。

1.1.3 日最大出力

光伏日最大出力为

$$P_{PV}^{\max} = \max\{P_{PV,1}, P_{PV,2}, \dots, P_{PV,t}\} \quad (3)$$

1.1.4 光伏日最大波动

光伏出力两点间最大波动比例为

$$K_{PV} = \max \left| \frac{P_{PV,t} - P_{PV,t-1}}{P_{PV}^{\max}} \right| \quad (4)$$

波动率 K_{PV} 越大,表示光照波动越大;波动率越小,表示该场景下的光照变化较为平稳。

1.1.5 特性指标权重配置

为了保证特征指标和聚类效果的准确性,光伏出力特性指标的权重配置合理性较为重要。本文采用熵权法对其进行赋权^[17],具体步骤如下。

①设置初始权重向量为 $\mathbf{W}=[\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k]$, k 为特性指标个数。

②生成新的聚类中心后,计算每个特性指标对聚类中心的贡献度。

$$V' = \sum_{i=1}^k \omega_i (X_r - m_j) \quad (5)$$

式中: m 为聚类中心个数; m_j 为第 j 个聚类中心的光伏特性指标的值($j=1, 2, \dots, m$); X_r 为在第 j 类中任意选择的出力特性指标值。由于此处采用距离来衡量贡献度,值越小越好。形成一个有 m 个评价对象、 k 个评价指标的矩阵 $\mathbf{V}=[v_{ij}]_{m \times k}$ 。第 i 个指标的客观权重为 ω'_i , ($0 \leq \omega'_i \leq 1, \sum_{i=1}^k \omega'_i = 1$)。

1.2 相似度矩阵改进的 AP 聚类算法

相似度矩阵是基于光伏特性指标改进的欧氏距离公式求得的,改进的欧氏距离公式为

$$D_{pq} = \sqrt{\sum_{k=1, \dots, m_\omega} \omega'_k (x_{pk} - x_{qk})^2} \quad (6)$$

式中: D_{pq} 为用户 p 和 q 基于光伏出力特性指标基础上的欧式距离公式; m_ω 为特性指标数; ω'_i 为对

应的特性指标所占权重。

聚类过程中,吸引力度和归属度会在各个节点之间相互传递。算法通过迭代过程不断更新各个节点的吸引度和归属度,直到产生 k 个聚类中心,根据相似度最大原理将其余的数据分配到相应的类别中。吸引力矩阵 R :其中 $r(i,k)$ 描述数据对象 k 适合作为数据对象 i 的聚类中心的程度,以数据 i 为主体,表示的是从 i 到 k 的消息,是 k 对 i 的吸引力。归属度矩阵 A :其中 $a(i,k)$ 描述了数据对象 i 选择数据对象 k 作为其据聚类中心的适合程度,以数据 i 为主体,表示从 k 到 i 的消息,描述的是 i 对于 k 的归属度。本文所用 AP 聚类算法流程如图 1 所示。

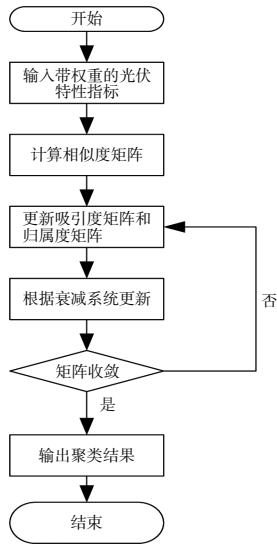


图 1 改进的 AP 聚类算法流程图

Fig.1 The flow chart of improved AP clustering

2 充电站/光伏电站一体化规划模型

经济性与用户满意度是影响充电站规划的重要指标。从经济效益考虑,避免充电站建设过多并优化电动汽车时空分布可以提高充电站利用率;同时提升清洁能源消纳量,降低碳排放成本。但上述可能会导致充电距离过远,等待时间过长等问题,降低用户满意度。基于光伏典型场景聚类结果,根据电动汽车负荷需求与充放电特性,本文提出了兼顾经济性与用户满意度指标的充电站/光伏电站一体化规划模型。

2.1 充电站/光伏电站建模

2.1.1 电动汽车负荷模型

基于电动汽车时空转移特性,优化其充电时

间和充电位置,考虑优化前后区域内电动汽车 1 d 内的负荷总需求量和数量不变,其模型为

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{J^{EV}} P_{j,t}^{EV,DR} = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{J^{EV}} P_{j,t}^{EV} \quad (7)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{J^{EV}} n_{j,t}^{EV,DR} = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{J^{EV}} n_{j,t}^{EV}$$

式中: J^{EV} 为充电站数量; $P_{j,t}^{EV,DR}$, $P_{j,t}^{EV}$ 分别为 j 站点处 t 时段需求响应前和需求响应后电动汽车的总充电功率; $n_{j,t}^{EV,DR}$, $n_{j,t}^{EV}$ 分别为需求响应前和需求响应后 j 站点 t 时段电动汽车的充电数量。

考虑充电站设置充电桩的实际数量及功率限制,各个节点可接入电动汽车的数量及负荷量限制在一定范围之内,其具体约束为

$$n_{j,\min}^{EV} \leq n_{j,t}^{EV,DR} \leq n_{j,\max}^{EV} \quad (8)$$

$$E_{j,\min}^{EV} \leq P_{j,t}^{EV,DR} \leq E_{j,\max}^{EV}$$

式中: $n_{j,\min}^{EV}$, $n_{j,\max}^{EV}$ 分别为 j 站点 t 时段允许接入的电动汽车最小和最大数量; $E_{j,\min}^{EV}$, $E_{j,\max}^{EV}$ 分别为 t 时刻 j 节点允许接入的最小和最大充电功率。

2.1.2 距离约束

电动汽车充电站的规划需考虑到实际地理位置分布,充电站之间距离过近会导致资源过于集中,分配不合理,故需要考虑合理的间距,其距离约束为

$$D_{m-n} \geq D_{\min} \quad (9)$$

$$D_{m-n} = \sqrt{(X_m - X_n)^2 + (Y_m - Y_n)^2}$$

式中: D_{m-n} , D_{\min} 分别为充电站之间的距离和最小距离; (X_m, Y_m) , (X_n, Y_n) 分别为充电站 m, n 坐标位置。

2.1.3 功率约束

①功率平衡约束

配网负荷主要由本地光伏和主网购电满足,主网均为火电和清洁能源,且各节点电量是均匀来自本地光伏和主网,可以求得电动汽车消耗的光伏和主网电量,其模型为

$$P_{PV,j,t}^{EV} = \eta P_{EV,j,t} + (1-\eta) P_{PV,j,t}, \eta = \begin{cases} 1, & P_{EV,j,t} < P_{PV,j,t} \\ 0, & P_{EV,j,t} \geq P_{PV,j,t} \end{cases} \quad (10)$$

$$P_{\text{grid},t}^{\text{EV}} = \sum_{j=1}^{n_{\text{EV}}} (P_{\text{EV},j,t} - P_{\text{PV},j,t}^{\text{EV}}) \quad (11)$$

式中： $P_{\text{PV},j,t}^{\text{EV}}$ 为 j 站点消纳的光伏电量； $P_{\text{EV},j,t}$ 、 $P_{\text{PV},j,t}$ 分别为 j 站点电动汽车负荷和光伏出力； $P_{\text{PV},t}^{\text{EV}}$ 、 $P_{\text{grid},t}^{\text{EV}}$ 分别为电动汽车来自光伏和主网的电量； n_{EV} 为充电站数量。

②潮流约束

$$\begin{cases} P_i - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ Q_i - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \\ U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \\ S_j \leq S_{j,\max}, j=1, 2, \dots, L \end{cases} \quad (12)$$

式中： P_i 、 Q_i 分别为节点 i 注入的有功和无功功率； U_i 、 U_j 分别为节点 i 、 j 的电压； G_{ij} 、 B_{ij} 分别为支路 ij 的电导、电纳； θ_{ij} 为节点 i 与 j 之间的电压相角差； $U_{i,\min}$ 、 $U_{i,\max}$ 分别为节点 i 的电压上、下限； S_j 、 $S_{j,\max}$ 分别为支路 j 的容量与最大限制容量。

2.2 目标规划模型

影响充电站经济性指标的因素主要有投资成本、维护成本、电量购买成本和碳排放成本等。电动汽车用户满意的主要取决于用户到充电站的电量损失、时间损失等。基于上述充电站经济性与用户满意度的综合考虑，提出了充电站/光伏电站一体化规划模型。

2.2.1 经济性成本

计入充电站的设备投资成本、建设成本、运行成本、碳排放成本等，年总成本为

$$\min C = C_L^{\text{EV}} + C_P^{\text{EV}} + C_Y^{\text{EV}} + C_Q^{\text{EV}} + C^{\text{Loss}} \quad (13)$$

式中： C_L^{EV} 、 C_P^{EV} 、 C_Y^{EV} 、 C_Q^{EV} 、 C^{Loss} 分别为距离成本、充电成本、年投资成本、碳排放成本、网损成本。

①年投资成本

年投资成本包括等年值成本和维护成本。

$$C_Y^{\text{EV}} = \sum_{j=1}^{n_{\text{EV}}} \left[(C_m n_{m,j} + C_{B,j} + C_{PV,j}) \frac{r_0 (1+r_0)^{y_s}}{(1+r_0)^{y_s} - 1} + C_{M,j} \right] \quad (14)$$

式中： n_{EV} 为充电站的数量； r_0 为年平均折旧率； y_s 为最高使用年限； C_m 为充电桩的单价； $n_{m,j}$ 为充电站 j 的充电桩个数； $C_{B,j}$ 、 $C_{M,j}$ 分别为充电站的建设成本和年维护成本。

②购电成本

充电站电量来自主网和配网光伏，配网光伏无法满足充电站负荷需求时，从主网购电；当光伏存在盈余时可进行售电，具体表达式为

$$C_P^{\text{EV}} = \sum_{t=1}^T P_{\text{EV},j,t}^{\text{Net}} [(1-\gamma)\gamma_{\text{grid},t} + \gamma\lambda_{\text{PV},t}], \quad \{\gamma=1, P_{\text{EV},j,t}^{\text{Net}} < 0; \gamma=0, P_{\text{EV},j,t}^{\text{Net}} \geq 0\} \quad (15)$$

式中： $\lambda_{\text{PV},t}$ 、 $\gamma_{\text{grid},t}$ 分别为光伏电价和主网电价。

③充电距离成本

电动汽车需行驶到充电站过程中会消耗电能，即：

$$C_L^{\text{EV}} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{n_{\text{EV}}} \lambda_{ij} L_{ij} P_{q,w} c_0, \quad \sum_{j=1}^{n_{\text{EV}}} \lambda_{ij} = 1 \quad (16)$$

式中： λ_{ij} 为电动汽车 i 在充电站 j 充电； L_{ij} 为电动汽车 i 到充电站 j 的距离； $P_{q,w}$ 为电动汽车百公里耗电电量； c_0 为电动汽车充电平均电价； I 为电动汽车总数量。

④电动汽车碳排放成本

文中考虑将电力生产过程中产生的碳排放量分摊至负荷侧，以此激励电动汽车消纳清洁能源，电动汽车产生的碳排放为

$$C_Q = \lambda_Q \sum_{t=1}^T Q_t^{\text{EV}} \quad (17)$$

$$Q_t^{\text{EV}} = K_{\text{grid}}^T \cdot \frac{P_{\text{grid},t}^{\text{EV}}}{P_{\text{grid},t}^{\text{T}} + P_{\text{grid},t}^{\text{CE}}} \cdot P_{\text{EV},t}^{\text{grid}} \quad (18)$$

式中： Q_t^{EV} 为充电产生的碳排放量； K_{grid}^T 为火电的碳排放强度，取 $0.85 \text{ kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ； $P_{\text{grid},t}^{\text{T}}$ 、 $P_{\text{grid},t}^{\text{CE}}$ 分别为整个配网来自主网火电、风光等清洁能源出力。

⑤配电网网损成本

$$C^{\text{Loss}} = c^{\text{Loss}} \sum_{t=1}^T \sum_{ij \in E^{\text{Line}}} \tilde{I}_{ij,t}^2 r_{ij} \Delta t \quad (19)$$

式中： c^{Loss} 为网络损耗的单位成本； T 为优化调度的时段数量； E^{Line} 为潮流支路集合； $\tilde{I}_{ij,t}$ 为时间 t 支路 ij 电流的平方； r_{ij} 为支路 ij 之间的电阻； Δt 为优化调度的时间间隔。

2.2.2 用户满意度指标

充电站是为电动汽车进行充电服务，充电站位置、数量规划是否合理，直接影响充电距离和等待时间，从而用户对充电站的体验感。本文计入用户充电距离和充电耗费时间等多项评估指标，建

立了充电站用户满意度评价模型。

①充电耗时时间

用户充电耗时时间包括前往充电站消耗的时间和排队时间为

$$t_{ij} = L_{ij} / \bar{V}_{ij} + t_{ij}^d \quad (20)$$

式中: t_{ij} , t_{ij}^d 分别为驾驶至充电站的时间和在充电站的排队时间; L_{ij} 为 i 用户至充电站 j 的距离, 为驾驶平均速度。

②用户满意度

根据用户所耗费的时间评价其满意度指标, 得出充电站的效用值^[18]为

$$F = \max \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M f_{ij} \quad (21)$$

式中: F 为所有充电站的总效用值; f_{ij} 为用户 i 接受充电站服务的效用值。

2.2.3 函数求解方法

采用 min-max 标准化方法对上述年总成本、用户满意度等多个目标进行归一化处理^[19], 即:

$$y^b = (y^a - y_{\min}) / (y_{\max} - y_{\min}) \quad (22)$$

式中: y^a 为目标函数的真实值; y^b 为目标函数经归一化处理后得到的值; y_{\max} , y_{\min} 分别为上述目标函数的最大值和最小值, 进行归一化处理, 采用加权法转化为单目标问题。

本文中目标函数式(13), (20)的权重系数选取分别为 0.55, 0.45。

2.3 充电站/光伏一体化规划方法

基于上述 AP 聚类生成的光伏典型场景和电动汽车负荷空间需求响应模型, 计入投资成本、维护成本、电量购买成本和碳排放成本等经济成本和用户满意度, 建立电动汽车充电站/光伏电站一体化规划模型, 实现充电站的合理规划与负荷时空优化。规划方法如图 2 所示。

3 算例分析

3.1 基础数据

算例选取某规划区域为例, 该城区有 5 个片区, 住宅区 2 个(A1, A2), 商业区 1 个(B1), 工业区 2 个(C1, C2)。选用 IEEE33 节点进行该区域配电系统充电站规划如图 3 所示。节点分布情况如图 4 所示, 实心圆代表电网节点, 星号代表充电站候选位置。配电系统的电压等级为 10 kV, 拟建 6~9 座充电站, 每个充电站的充电桩数量为 15~

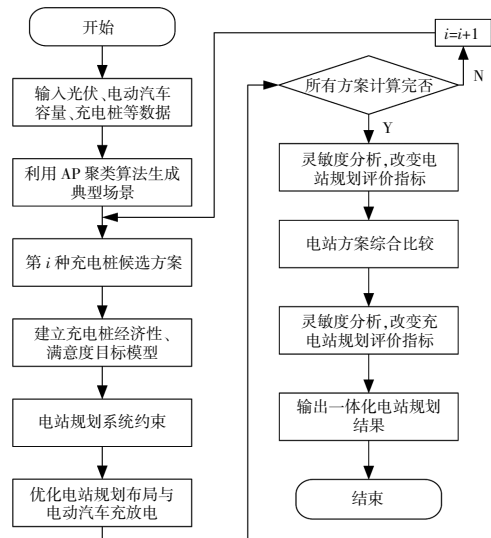


图 2 电动汽车充电站规划流程图

Fig.2 Planning flowchart of EV charging station

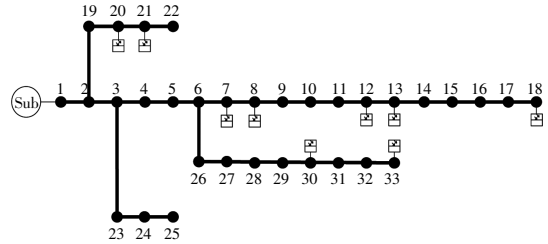


图 3 IEEE33 节点配电系统图

Fig.3 IEEE33 node power distribution system diagram

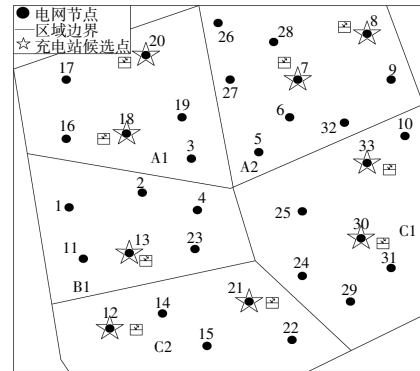


图 4 充电站选址规划图

Fig.4 Charging station site selection plan

25。电动汽车电池额定容量为 40 kW·h, 充电桩额定充电功率均为 8 kW, 百公里耗电量取 13 kW·h, 主网电价选取分时电价如表 1 所示。

表 1 分时电价
Table 1 Time-of-use tariff

分段	时刻	电价/元·(kW·h) ⁻¹
谷时段	0<=t<9	0.36
峰时段	9<=t<13, 17<=t<21	1.12
平时段	13<=t<17, 21<=t<24	0.70

3.2 结果分析

3.2.1 充电站规划方案

根据上述基本数据和规划模型进行求解,从候选点中得到各个区域的电动汽车充电站规划结果如表 2 所示。表中给出了充电站和光伏的 7 个规划节点,以及相应的充电桩数量和装机容量。

表 2 充电站/光伏一体化规划投资
Table 2 Planning investment of charging station/PV integrated station

片区	节点	充电桩	光伏装机	充电桩费用	固定费用	维护费用	光伏投资
		个	kW	万元	万元	万元	万元
	21	1	750	115	86.25	28.75	375
工业	30	2	800	110	82.5	27.5	400
	33	3	800	90	67.5	22.5	400
住宅	7	4	750	100	75	25	375
	18	5	800	110	82.5	27.5	400
	20	6	800	100	75	25	400
商业	13	7	800	115	86.25	28.75	400
小计		148	5 500	740	555	185	2 750
总投资/万元				4 230			

3.2.2 典型场景生成与负荷分析

分析周围光伏一年的出力历史数据,提取光伏出力特性指标并采用熵权法配置权重,如表 3 所示。

表 3 负荷特性指标权重
Table 3 Weight of PV characteristic index

特性指标	权重
出力时段	0.217
平均出力	0.266
最大出力	0.274
最大波动	0.243

利用 AP 聚类算法求得典型场景如图 5 所示。场景 1,2,3 分别对应阴天、晴天、雨天。图 6 表示住宅、商业和工业不同片区的电动汽车负荷,图 7 表示不同充电站的负荷曲线。

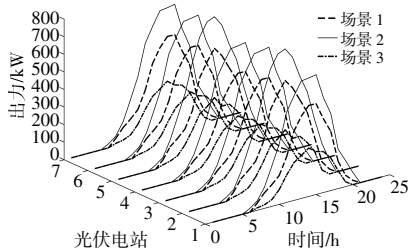


图 5 不同场景下光伏电站出力
Fig.5 Output of PV in different scenarios
由图 5 可以看出,3 个不同场景下,7 个光伏

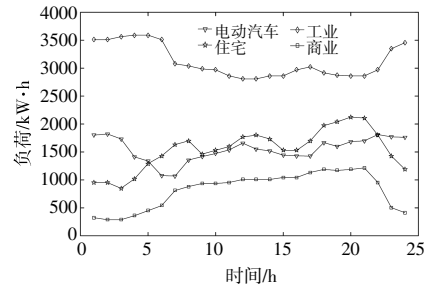


图 6 负荷需求曲线
Fig.6 Load demand curve

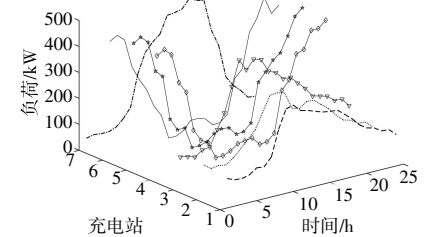


图 7 充电站电动汽车负荷需求
Fig.7 Load demand of EV at charging stations

电站的出力大小、波动性等指标存在明显的差异性,故需要对不同场景下的优化运行进行分析。电动汽车的出行流动会造成不同时间和空间需求量存在差异,处于商业片区的充电负荷多集中在白天,住宅区大多集中在夜晚,工业区则较为平稳。

3.2.3 充电站规划结果分析

①电动汽车无序充电典型场景分析

基于光伏典型场景,开展充电站与光伏电站配套规划,光伏出力首先满足充电站负荷需求,盈余流入配电网,若无法满足充电站负荷需求,则从电网购电。图 8,9 中展示了场景 1 的优化结果。可以看出其主网购电需求:9:00-18:00 主要来自配电网光伏,碳排放量较低;其余时段由主网购电满足,碳排放量随非清洁能源用量变大而增加。

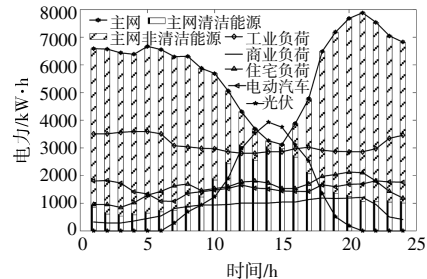


图 8 场景 1 无序充电下充电站优化运行结果
Fig.8 Optimized results of charging stations with disorderly charging

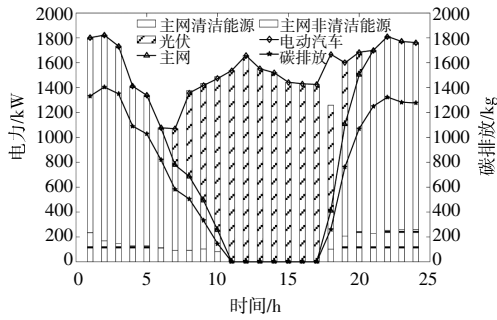


图9 电动汽车电力及碳排放优化结果

Fig.9 Power supply sources of EV in different scenarios

无序充电模式下,各个场景下日运行成本如表4所示。购电成本、碳排放成本和光伏收益为场景2优于场景1优于场景3,这是因为场景2下光伏出力最大,故电动汽车负荷需求大部分由光伏满足,同时剩余的光伏电量可以出售获取利润。场景3碳排放成本高、充电距离成本较少,由于天气原因导致光伏出力小、电动汽车充电量减少且大多选择就近充电。

表4 无序充电模式下电站运行成本

Table 4 Operation cost of power station in disordered charging mode

场景	购电成本/元	清洁能源成本/元	非清洁能源成本/元	充电距离成本/元	网损成本/元	碳成本/元	光伏收益/万元	年运行成本/万元
场景1	12 984	1 927	11 057	169	1 223	856	5 436	97.9
场景2	10 422	1 410	9 012	136	1 275	675	10 645	37.3
场景3	16 199	2 688	13 510	98	1 170	926	711	114.9

② 计入电动汽车有序充电典型场景分析

考虑电动汽车负荷的灵活性,计入电碳成本、排队时间等多项指标,实现有序充电管理,平衡各个站点的充电压力。求得各个场景下优化结果如图10~12所示。

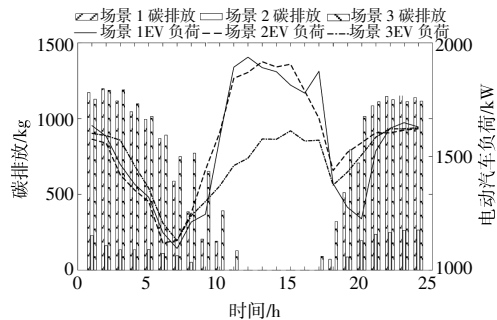


图10 不同场景下电动汽车负荷及碳排放

Fig.10 Load of EV and carbon emissions in different scenarios

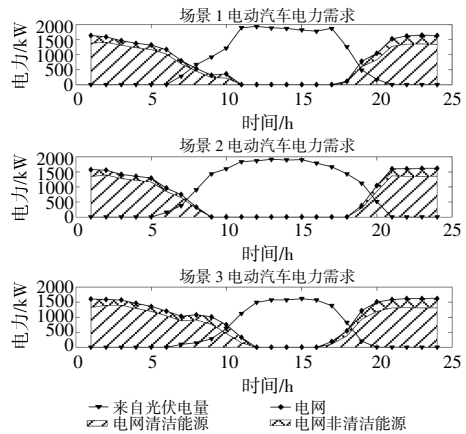
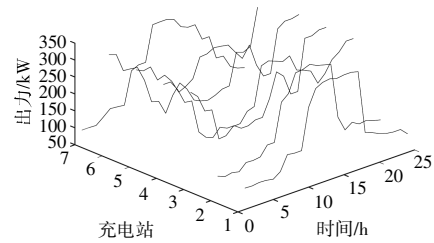
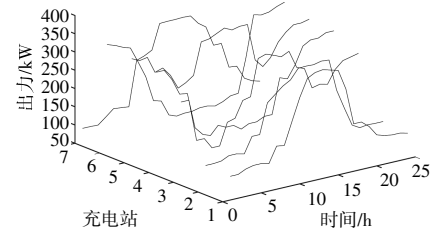


图11 不同场景下光伏出力

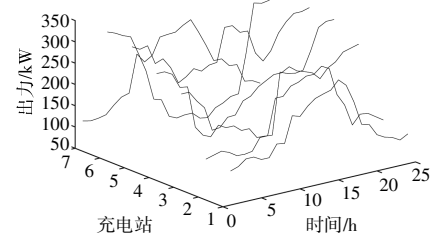
Fig.11 Power supply sources of EV in different scenarios



(a)场景1



(b)场景2



(c)场景3

图12 不同场景下各充电站负荷需求

Fig.12 Load demand of charging station in different scenarios

由图10可以看出:场景3电动汽车负荷明显低于场景1,2;各场景下的充电负荷均在10:00~17:00处于高峰,此时光伏整体出力较大且主网电价较高,可以促进光伏消纳,降低碳排放成本。由图11可以看出,场景3下电动汽车负荷大部分来自主网,碳排放量较高。由图12可知:充电站3处于边界,夜晚充电负荷曲线同样较高,分摊了住宅区充电负荷压力;充电站5处于住宅区和商业

区边界,分摊了白天商业区充电负荷压力。

结合上述分析,求得电动汽车有序充电模式下,各个场景下每日各项经济运行指标如表5所示。

表5 有序充电模式下电站运行成本
Table 5 Plant operating costs in orderly charging mode

场景	主购电成本/元	清洁能源成本/元	非清洁能源成本/元	充电距离成本/元	网损成本/元	碳成本/元	光伏收益/万元	年运行成本/万元
场景1	11 017	1 895	9 122	186	1 154	650	4 230	87.7
场景2	9 048	1 556	7 492	156	1 198	580	9 423	31.1
场景3	14 176	2 438	11 738	112	1 104	788	571	101.4

由表5可以看出,有序充电模式下促进了充电站对光伏的消纳,同时车主会为减少排队时间而选择不同的充电站,增加电动汽车的充电行驶距离,但整体来看,有序充电模式下各个场景的充电站运行成本明显降低。

根据上述研究,表6分析了不同模式下充电站各项经济指标。当充电站年投资成本相同时,有序充电模式下年运行成本更低,同时有序充电可以促进充电站对光伏的消纳,降低碳排放成本,网络损耗明显下降。同时综合表4,6,有序充电模式下,虽然电动汽车的行驶距离增加了,但是通过有序化管理排队等待时间减少,满意度得到了提升。

表6 不同模式下充电站综合指标对比
Table 6 Comparison of comprehensive indicators of charging stations in different modes

模式	年总成本/万元	年投资成本/万元	年运行成本/万元	碳成本/万元	满意度
无序充电	589.5	339.4	250.1	28.1	53.8
有序充电	559.6	339.4	220.2	23.2	675.2

表8 不同规划方案经济性与满意度对比
Table 8 Comparison of economics and satisfaction of different planning schemes

方案	充电站布局	年总成本/万元	碳成本/万元	满意度
方案1	7(16),18(17),20(15),21(18),30(16),33(16),13(15)	511.6	35.8	486.8
方案2	7(23),18(22),20(18),21(20),30(22),33(20),13(23)	559.4	23.2	675.2
方案3	7(23),8(20),12(13),18(22),20(18),21(20),30(22),33(20),13(23)	620.3	12.1	738.5

由表8可以看出,随着充电站和充电桩数量的增加,用户充电便捷,满意度得到了提升,但同时成本明显增加。且方案2比方案1年总成本高47.8万元,增加9.3%,满意度提升188.4,提升

③不同模式下配电网节点电压分析

本文分析了充电站/光伏电站接入后,电动汽车无序充电和有序充电不同模式下对各个节点电压的影响。场景2下电站接入节点电压的变化如图13所示。表7求得了不同场景下33个配网节点电压的标准差。从图表分析中可以看出,有序充电管理可以有效改善电压质量,电压偏移范围减小,且电压整体稳定性更好。

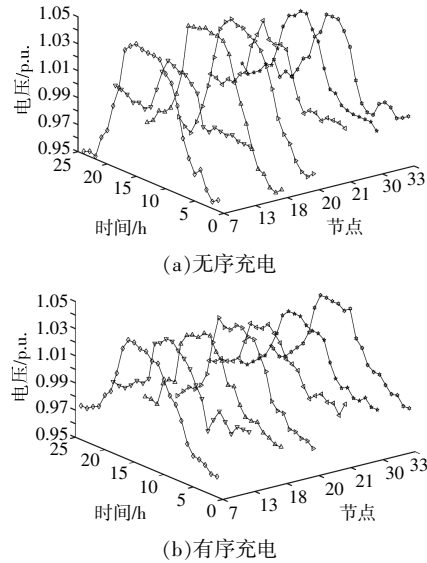


图13 场景2不同模式下节点电压分析
Fig.13 Analysis of node voltage under different modes

表7 配电网节点电压分析
Table 7 Node voltage analysis of distribution network

不同场景	无序充电	有序充电
场景1	0.027 5	0.021 4
场景2	0.028 4	0.021 8
场景3	0.269 0	0.021 2

3.3 充电站不同规划方案对比

有序充电模式下,调整充电站和充电桩数量约束,得到的不同规划的指标如表8所示。

38.7%;方案3比方案2年总成本高60.9万元,提升10.9%,满意度提升63.3,提升9.4%。

4 结论

本文利用熵权法构建光伏特性指标权重,采

用 AP 聚类算法生成典型出力场景。计入分时电价及电动汽车负荷时空需求响应能力,提出了兼顾经济性与用户满意度的充电站/光伏电站一体化多目标规划模型。通过算例仿真,得到了以下结论。

①基于熵权法改进的 AP 聚类算法生成光伏典型场景,有效改善因维数较多导致的局部收敛及聚类时间较长等问题,生成的典型场景能准确体现光伏出力的特性,有助于实现充电站/光伏电站的精准规划。

②计入电动汽车时空需求响应能力及光伏出力特性曲线,实现有序充电管理,可有效提升清洁能源利用率,降低碳排放,改善一体化电站的运行成本及用户满意度。

③基于典型场景开展一体化电站的选址定容规划,增加一体化电站建设数量有助于提高用户满意度,但会导致经济性指标降低,且两者之间为非线性关系。应根据规划区实际需求对经济性与满意度进行权衡考量,求得更具针对性与合理性的规划方案。

参考文献:

- [1] 檀勤良,代美,梅书凡.考虑电动汽车碳配额及需求响应的电力系统调度研究[J].电网与清洁能源,2021,37(7):79-86.
- [2] Chen Q,Wang F,Hodge B M,et al. Dynamic price vector formation model based automatic demand response strategy for PV-assisted EV charging station [J].IEEE Transactions on Smart Grid,2017,8(6):2903-2915.
- [3] 王凌云,吴小婷,李黄强,等.柔性电动汽车和分布式电源的协同优化调度研究 [J]. 可再生能源,2020,38(2):252-258.
- [4] 刘晋源,吕林,高红均,等.促进电动汽车和清洁能源发展的充/换电站-风-光-储协调规划 [J]. 电测与仪表,2020,57(1):89-98.
- [5] 裴文杰,汪泓,谭阳红,等.含光伏分布式电源配电网的电动汽车充电站机会约束规划[J].电力系统及其自动化学报,2017,29(6):45-52.
- [6] 吴万禄,韦钢,谢丽蓉,等.含分布式电源与充电站的配电网协调规划 [J]. 电力系统保护与控制,2014,42(15):65-73.
- [7] 谭维玉,雷雨,李军,等.计及动态分时电价的电动汽车参与电网调度研究[J].可再生能源,2020,38(11):1515-1522.
- [8] 刘丽军,吴桐,陈贤达,等.基于时空特性以及需求响应的 DG 和 EV 充电站多目标优化配置[J].电力自动化设备,2021,41(11):48-56.
- [9] 李景丽,时永凯,张琳娟,等.考虑电动汽车有序充电的光储充电站储能容量优化策略[J].电力系统保护与控制,2021,49(7):94-102.
- [10] Zheng X Q, Yao Y P. Multi-objective capacity allocation optimization method of photovoltaic EV charging station considering V2G [J]. Journal of Central South University, 2021, 28(2):481-493.
- [11] 陈岩,靳伟,王文宾,等.基于电动汽车分群的“风-网-车”联合消纳调度策略 [J]. 中国电力,2021,54(4):107-118.
- [12] 何晨可,韦钢,朱兰,等.电动汽车充换放储一体化电站选址定容[J].中国电机工程学报,2019,39(2):479-489,645.
- [13] 冯瑛敏,赵新,任国岐,等.城市集中型充电站规划方法[J].电力系统及其自动化学报,2018,30(8):58-61.
- [14] 徐方维,谭洋洋,杨洪耕,等.兼顾不同角色利益的集中型充电站优化布局 [J]. 高电压技术,2017,43(4):1256-1262.
- [15] 李春燕,蔡文悦,赵溶生,等.基于优化 SAX 和带权负荷特性指标的 AP 聚类用户用电行为分析[J].电工技术学报,2019,34(S1):368-377.
- [16] 钱乙卫,田浩,刘财华,等.考虑概率分布的分布式光伏无功下垂控制策略[J].发电技术,2024,45(2):273-281.
- [17] 邓燕国,王冰,曹智杰,等.基于熵权法与 GRA-ELM 的配电网空间负荷预测 [J]. 电力工程技术,2021,40(4):136-141.
- [18] 谭洋洋,杨洪耕,徐方维,等.基于投资收益与用户效用耦合决策的电动汽车充电站优化配置[J].中国电机工程学报,2017,37(20):5951-5960.
- [19] 周保中,刘敦楠,张继广,等.“风光火一体化”多能互补项目优化配置研究[J].发电技术,2022,43(1):10-18.

Integrated planning method of charging station/PV integrated station based on AP clustering algorithm

Chen Xuanguang¹, Liu Junyong¹, Li Linguo², Mei Yilei², Ji Yannan²

(1.School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2.Chengdu Power Supply Company of State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, China)

Abstract: The weight of PV (photovoltaic) output characteristic index is constructed based on entropy weight method, and the typical scenarios are generated by AP (adaptive clustering) clustering algorithm. Considering the time-space distribution characteristics of EV (electric vehicle) load and demand response ability, the load linkage time-space response model is established. Based on the optimization of charging sequence and spatial layout of EV, the multi-objective planning method for charging station/PV station is proposed with meeting the distance constraints of charging stations and network constraints, which target the minimum annual total cost of charging station and the optimal index of user satisfaction. Case study, the integrated planning scheme of charging station/PV station is obtained based on the trade-off between economy and satisfaction in each scenario.

Keywords: charging station planning; electric vehicle; AP clustering algorithm; customer satisfaction