

EVs 聚合主动支撑的有源配电网协同调压策略

郁家麟¹, 吴金瑞², 屠晓栋¹, 刘维亮¹, 钟伟东¹

(1. 国网浙江省电力有限公司 嘉兴供电公司, 浙江 嘉兴 314033;

2. 南京邮电大学 自动化学院人工智能学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 针对配电网因“双碳”目标下分布式电源与柔性负荷规模化接入导致的系统过/欠电压问题, 提出了一种基于电动汽车(EVs)聚合主动支撑的有源配电网协同调压策略, 并充分利用了柔性负荷聚合的调节作用, 以支撑配电网安全高效运行。首先, 提出了基于“出行链”概念的EVs聚合预测模型, 以提高EVs聚合预测的精确性。其次, 针对多个节点存在的电压问题, 依据电压-功率灵敏度, 提出了一种基于“EVs聚合-光伏多功能逆变器-无功治理设备”的协同调压策略, 以促使节点电压的有效调节, 减少无功治理设备的配置成本并保证系统安全供电。最后, 通过不同方法的对比与多场景的测试, 验证了所提EVs聚合预测方法与协同调压策略的有效性。

关键词: 有源配电网; 电动汽车聚合; 出行链; 电压-功率灵敏度; 协同调压

中图分类号: TM73 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqc24472

Active Distribution Networks Cooperative Voltage Control Strategy with Active Support for EVs Aggregation

YU Jialin¹, GUO Jinrui², TU Xiaodong¹, LIU Weiliang¹, ZHONG Weidong¹

(1. *Jiaying Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Jiaying 314033, Zhejiang,*

China; 2. *College of Automation & College of Artificial Intelligence, Nanjing University of*

Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, Jiangsu, China)

Abstract: To address the issue of over/under voltage in the distribution network due to the scale access of distributed generators and flexible loads under the "double carbon" target, an active distribution networks cooperative voltage control strategy based on the active support of electric vehicles (EVs) aggregation was proposed, and the regulation effect of flexible load aggregation was fully utilized to support the safe and efficient operation of distribution networks. First, an EVs aggregation prediction model based on the concept of "travel chain" was proposed to improve the accuracy of EVs aggregation prediction. Then, aiming at the voltage problem of multiple nodes, according to the voltage-power sensitivity, a coordinated voltage regulation strategy based on "EVs aggregation, photovoltaic multifunctional inverter and reactive power management equipment" was proposed to promote the effective regulation of node voltage, reduce the configuration cost of reactive power control equipment, and ensure the safe power supply of the system. Finally, through the comparison of different methods and multi-scenario tests, the validity of the proposed EVs aggregation prediction method and the coordinated voltage regulation strategy was verified.

Key words: active distribution networks; electric vehicles (EVs) aggregation; travel chain; voltage-power sensitivity; cooperative voltage control

在“双碳”目标的推动下, 配电网应该积极主动地满足分布式电源(distributed generation, DG)的“应接尽接”的发展需求, 这促使了DG广泛地

接入电网, 进而导致传统配电网演变成新形态有源配电网^[1]。由于DG发电具有随机性与尖峰性的特点, 时常给配电网在安全运行过程中带来严

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(5400-202219152A-1-1-ZN)

作者简介: 郁家麟(1973—), 男, 本科, 高级工程师, Email: 25695192@qq.com

通讯作者: 吴金瑞(1998—), 男, 硕士研究生, Email: 2689341108@qq.com

重的电压影响^[2-4]。不仅如此,DG出力的波动性与间歇性同样会给母线电压带来频繁波动的危害,从而损害电力设备、使生产产品的质量受损,甚至给电网稳定运行带来严重事故^[5-6]。

为了解决上述电压波动给电网运行带来的影响,近年来众多学者进行了大量调研。文献[7]研究了有源配电网无功治理的原理及方式,以支撑电网可靠运行。文献[8]考虑到DG发电的不确定性,在配电网中使用电容器组对无功功率进行局部治理。文献[9]提出了在配电网低压用户侧安装无功治理设施的方法,以避免无功功率失衡带来的线路损耗与电压问题。文献[10]引入损耗灵敏度因子,提出了电网无功治理位置的最佳选择方案。上述文献研究针对有源配电网中电压问题集中在分散式电压的解决方法层面,也就是在电压不稳定处安装无功治理装置,但面对海量DG消纳下众多节点电压问题经常发生的情形,采用分散式电压解决方法不仅相关处理装置的数目多,严重的情况下电压治理难以得到高效解决^[11]。文献[12]为了使电压的稳定性逐步提高,提出了真双极多端柔性直流输电的协同控制策略。文献[13]考虑配电网线路电阻与电抗比较大的特点,设计了分布式协同电压控制算法。文献[14]针对DG规模化并网导致的电压问题,设计了基于有载调压变压器-静止同步补偿器的协调控制器,以提高配电网无功功率储备并增强电压稳定性。文献[15]引入动态博弈理论,提出了多区域电压协同控制策略,以解决电压控制多主体间的协调问题。上述文献研究通过采用从源、荷、储多方面协同调压控制策略、基于DG并网实现多功能的变换器、静止无功发生器等电压处理设备来实施无功调节,从而对众多节点电压进行综合有效治理^[11],该策略由于治理装置的调节水平不足,具有很强的局限性^[11]。

考虑上述问题,提出利用电动汽车(EVs)聚合调节的功能,联接并网的多功能光伏逆变器和补偿装置对电压实施协同治理,由于EVs聚合调节能力较大,这使得电压治理更加高效。然而,由于EVs负荷难以准确预测,一定程度上限制了其参与电网业务。文献[16]基于经验模态分解-模糊熵分解充电负荷,在此基础上通过神经网络,并结合集成学习策略训练模型再对其预测。基于历史数据分析车辆荷电状态(state of charge, SOC)、出行时间等特性,文献[17]建立随机森林分

类模型进行负荷预测。上述研究尚未充分考虑电动汽车出行过程中的多种因素,从而使预测结果的精准性难以得到进一步保证。

综上,提出了一种基于EVs聚合主动支撑的有源配电网协同调压策略,以保证配电网稳定运行。首先,提出基于“出行链”概念的EVs聚合预测模型。其中,挖掘EVs起始时间、停泊时间、充电方式等概率分布特性,提出基于蒙特卡洛算法EVs负荷预测方法,保证EVs聚合预测的精确性。然后,提出基于EVs聚合-光伏多功能逆变器-无功治理装置的协同调压策略。因为配电网隶属于电压水平较低的网络,它的线路阻抗数值相对较大,所以其节点功率的改变对电压治理均起到一定的作用^[11]。该控制策略基于分布式资源的聚合调节功能,通过无功治理设备的调节无功作用,考虑传输物理时延,根据电压-功率灵敏度,遵循灵敏度数值降序的方式,首先调节无功,然后有功来制定电压协同调节策略,确保新能源高渗透配电网电压快速有效治理^[11]。最后,根据算例仿真对调压策略的可行性进行验证。

1 基于“出行链”概念的EVs聚合预测模型

尽管EVs出行时间和路径具有很强的时空随机性,但每天其非下一次行驶的时间与空间均跟上一次的出行有很强的时空关联性。出于描述该时空关联性的目的,文中提出“出行链”的概念,具体是:通常情况下,EVs每日行驶起始地即是行程结束地,行程的往返构建整个“链条”,其中包括行程节点中时间、空间以及各种活动类型等信息^[18]。EVs出行链示意图如图1所示,实心点之间表示EVs日出行的一个完整过程,其出行过程与中间休息过程分别用虚线和实线代表^[19]。

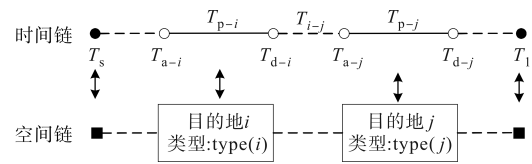


图1 出行链示意图

Fig.1 Schematic of the travel chain diagram

由图1可知,一个完整的出行链组成时间要素包括:起始、出行、停泊和结束时间^[18]。其中, T_{a-i} 为抵达*i*目的地时刻; T_{p-i} 为在*i*目的地的停泊时间; T_s, T_1 分别为起始时刻和返回时刻。时间要素在完整出行链中满足如下关系:

$$\begin{cases} T_{a-j} = T_{d-i} + T_{i-j} \\ T_{d-j} = T_{a-j} + T_{p-j} \end{cases} \quad (1)$$

式中: T_{a-j} 为抵达 j 目的地的时刻; T_{d-i}, T_{d-j} 分别为离开 i, j 目的地的时刻; T_{p-j} 为在 j 目的地的停泊时间; T_{i-j} 为从目的地 i 去往目的地 j 的行驶时间^[20]。

1.1 起始时间概率分布

EVs 的起始时间概率密度用 $f(t)$ 表示, 其规律服从正态分布, 表征为 $T \sim (\mu_s, \delta_s^2)$, 表达式^[21]如下所示:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \delta_s} \exp\left[-\frac{(t - \mu_s)^2}{2\delta_s^2}\right] \quad (2)$$

式中: μ_s, δ_s 分别为 EVs 起始时间的均值、标准差。

1.2 电池的 SOC 分布

EVs 充满电时, 电池的 SOC 为 1, EVs 放完电时, SOC 为 0。在耗电量不变的现状下, EVs 电池的 SOC 仅与其出行距离之间有较大关联, 具体关系接近于线性^[18]。假设 EVs 初始时刻为 T_0 , 荷电状态为 $SOC(T_0)$, 若 T 时刻到达下一个距离为 s 的目的地, 则 EVs 电池的 SOC 为 $SOC(T)$, 具体可表示为

$$SOC(T) = [SOC(T_0) - \frac{s}{T_{average}} (T - T_0)/D_{max}] \times 100\% \quad (3)$$

式中: $T_{average}$ 为日行驶时间均值; D_{max} 为最大行驶距离。

1.3 EVs 充电时长

EVs 充电时长 ΔT 依赖于充电功率 P_c 与荷电状态 SOC, 其表达式为^[22]

$$\Delta T = \frac{[SOC(T_0) - SOC(T)] \times C_{battery}}{\eta \times P_c} \quad (4)$$

式中: $C_{battery}$ 为电池容量; η 为充电效率^[19]。

1.4 EVs 状态转移概率

EVs 出行链空间分布是按时间顺序排列的, 除起始目的地外, 邻接的目的地两者是有关联的, 而不是邻接目的地两者是没有关联的^[18]。马尔科夫过程是用于描述这种具有无后效性随机过程的最佳方法^[23]。在空间上, EVs 停泊地点具有随机的特征, 没有显著的规律^[18]。

记 EVs 出行过程中的每个目的地为状态, 则目的地的变化就是状态的转换。若 EVs 目前所处的状态为 S_1 , 那么其后续状态就可能是 S_1, S_2, \dots, S_n 中的任何一个。从状态 S_a 到状态 S_b 的状态转移概率 P_{ab} 满足:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{ab} \leq 1 & a, b = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{b=1}^n P_{ab} = 1 & a = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (5)$$

假设 EVs 出行到 i 目的地记作事件 A_i , 其中 i 表示办公区 W、住宅区 H 和娱乐区 E 的任意一个, 则车辆从 i 目的地行驶到下一个 j 目的地之间的状态转移概率矩阵可表示为^[18]

$$P = [p_{ij}] = \begin{bmatrix} p_{WW} & p_{WH} & p_{WE} \\ p_{HW} & p_{HH} & p_{HE} \\ p_{EW} & p_{EH} & p_{EE} \end{bmatrix} \quad (6)$$

从 i 目的地单向行驶到 j 目的地的行驶距离基本服从对数正态分布, 则从 i 目的地到 j 目的地的行驶距离的概率密度 $D_{ij}(\mu_D, \delta_D^2)$ 为^[21]

$$D_{ij}(\mu_D, \delta_D^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \delta_D s} \exp\left[-\frac{(\ln s - \mu_D)^2}{2\delta_D^2}\right] \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned} \mu_D &= \ln(E_s) - \ln(1 + D_s/E_s^2)/2 \\ \delta_D &= \ln(1 + D_s/E_s^2) \end{aligned}$$

式中: E_s, D_s 分别为行驶距离的期望、方差。

用 $f_c(t)$ 表示起始充电时间的概率密度, 其基本服从分段正态分布^[19, 24]:

$$f_c(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \delta_i} \exp\left[-\frac{(t + 24 - \mu_i)^2}{2\delta_i^2}\right] & 0 \leq t \leq (\mu_i - 12) \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi} \delta_i} \exp\left[-\frac{(t - \mu_i)^2}{2\delta_i^2}\right] & (\mu_i - 12) < t \leq 24 \end{cases} \quad (8)$$

式中: μ_i, δ_i 分别为充电起始时间的均值和标准差。

1.5 EVs 负荷预测

首先, 基于区域功能来对预测地点进行划分, 例如公共区 W、住宅区 H 和娱乐区 E 等任意一个, 然后, 计算 EVs 停泊时相应电池的 SOC, 其次, 根据停泊地 SOC 选择其充电形式, 并对多种充电手段下 EVs 充电数量进行叠加, 得到其比例数目, 在此基础上, 基于蒙特卡洛方法对 EVs 充电负荷实施预测, 流程图如图 2 所示^[18]。

当第 n 辆 EVs 驶入 i 目的地时, 假设 EVs 初始充电时刻为 T_{is} , 充电时长为 ΔT , 根据 EVs 充电时长以及在快充、常规充电方式下 EVs 初始充电时刻的概率密度函数 F_s, F_c , 且两者的联合概率分布函数 F_{sc} 满足条件 $F_{sc} = F_s F_c$, 则 EVs 在 T 时间段内进行充电的概率为^[18]

$$F_{in}^T = F_{sc}(T_{is} \leq T, T_{is} + \Delta T \geq T) + F_{sc}(T_{is} \geq T, T_{is} + \Delta T - 24 \geq T) \quad (9)$$

在 T 时间段内,假设 $A_{ij}(T) \times F_{ck}$ 为采用常规充电方式的 EVs 数量, $A_{ij}(T) \times F_{fk}$ 为采用快速充电方式的 EVs 数量,则 EVs 总负荷为

$$Q_i = \sum_{j=1}^M [Q_{ijc}(T) + Q_{ijf}(T)] \quad (10)$$

其中

$$Q_{ijc}(T) = \sum_{k=1}^3 \sum_{n=1}^{A_{ij}(T) \times F_{ck}} F_n^T \times P_c \quad (11)$$

$$Q_{ijf}(T) = \sum_{k=1}^3 \sum_{n=1}^{A_{ij}(T) \times F_{fk}} F_n^T \times P_f \quad (12)$$

式中: Q_i 为 EVs 总负荷; M 为出行链长度; $Q_{ijc}(T)$, $Q_{ijf}(T)$ 分别为在 T 时段内常规充电与快速充电下的负荷; A_{ij} 为 EVs 从地点 i 行驶至地点 j 的事件;

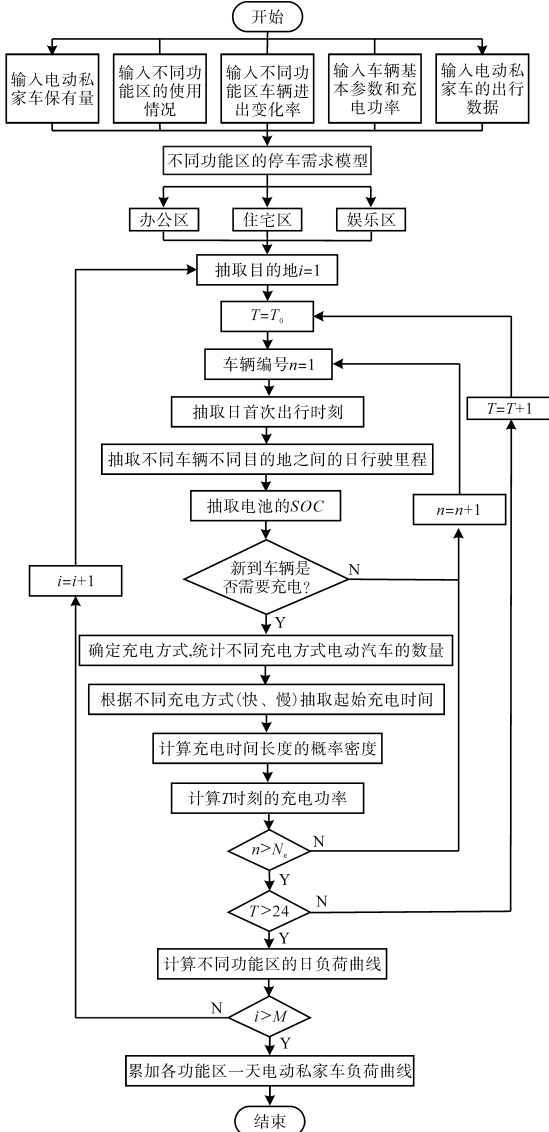


图2 电动汽车负荷预测流程图

Fig.2 Flow chart of EVs' loads forecasting

F_{ck}, F_{fk} 分别为在常规、快充充电方式下 EVs 在功能区 k 初始充电时刻的概率密度函数; F_n^T 为在 T 时段内电动汽车 n 在已知的不同充电方式下初始充电时刻的概率密度函数; P_c, P_f 分别为常规、快速充电功率。

2 EVs 聚合的配电网协同调压策略研究

设配电网有 N 个母线节点,其部分节点连接 EVs 聚合商,部分节点连接分布式光伏或无功治理设备,如图 3 所示。本节研究通过“EVs 聚合-光伏多功能逆变器-无功治理设备”的协同调压策略,保证配电网中众多节点电压得到有效管控。

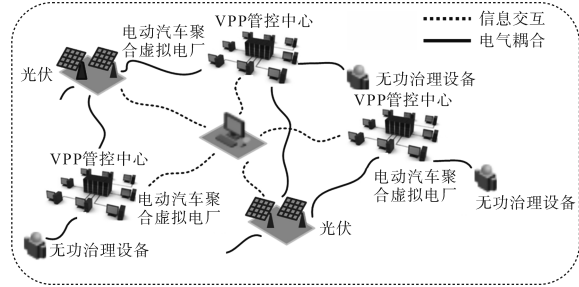


图3 电动汽车参与调压的场景示意图

Fig.3 Scene diagram of electric vehicles participating in voltage regulation

根据配电网网络拓扑和传输线参数给出各节点注入电流与电压的方程如下:

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_1 \\ \underline{V}_2 \\ \vdots \\ \underline{V}_i \\ \vdots \\ \underline{V}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \underline{\gamma}_{21} & \underline{Z}_{22} & \cdots & \underline{Z}_{2i} & \cdots & \underline{Z}_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{\gamma}_{i1} & \underline{Z}_{i2} & \cdots & \underline{Z}_{ii} & \cdots & \underline{Z}_{iN} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{\gamma}_{N1} & \underline{Z}_{N2} & \cdots & \underline{Z}_{N1} & \cdots & \underline{Z}_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{V}_{s1} \\ \underline{I}_2 \\ \vdots \\ \underline{I}_i \\ \vdots \\ \underline{I}_N \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中

$$\underline{I}_i = \left(\frac{\underline{S}_i}{\underline{V}_i} \right)^* = \left(\frac{\underline{P}_i + j\underline{Q}_i}{\underline{V}_i} \right)^*$$

式中: \underline{S}_i 为第 i 节点注入功率; $\underline{P}_i, \underline{Q}_i$ 分别为第 i 节点注入的有功、无功功率; \underline{V}_i 为第 i 节点的电压^[18]; \underline{Z}_{iN} 为第 i 节点与第 N 节点之间的线路阻抗; \underline{V}_{s1} 为第 1 节点的参考电压; $\underline{\gamma}_{i1}$ 为比例常数; \underline{I}_i 为第 i 节点注入电流; 上标“*”为共轭。

2.1 电压-功率灵敏度计算

根据潮流方程^[25]可求得:

$$H\Delta Q + R\Delta P = \Delta V \quad (14)$$

其中

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_1}{\partial Q_1} & \cdots & \frac{\partial V_1}{\partial Q_N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial V_N}{\partial Q_1} & \cdots & \frac{\partial V_N}{\partial Q_N} \end{bmatrix} \quad R = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_1}{\partial P_1} & \cdots & \frac{\partial V_1}{\partial P_N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial V_N}{\partial P_1} & \cdots & \frac{\partial V_N}{\partial P_N} \end{bmatrix}$$

$$\Delta Q = \begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta Q_N \end{bmatrix} \quad \Delta P = \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \vdots \\ \Delta P_N \end{bmatrix} \quad \Delta V = \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_N \end{bmatrix}$$

1)求 k 节点无功功率输出变化 ΔQ_k 对其节点电压的自灵敏度。假设除了 k 节点,其他节点注入电流为零,则由式(13)可得:

$$\underline{Y}_{k1}\underline{V}_{s1} + \underline{Z}_{kk}\underline{I}_k = \underline{V}_k \quad k = 2,3,\dots,N_g + 1 \quad (15)$$

其中

$$\underline{I}_k = \left(\frac{S_k}{\underline{V}_k}\right)^* = \frac{P_{k,sch} - jQ_k}{V_k^{re} - jV_k^{im}} \quad \underline{V}_{\gamma k} = \underline{Y}_{k1}\underline{V}_{s1}$$

式中: N_g 为可调资源总数; $P_{k,sch}$ 为 k 节点可调资源的有功功率;上标“re”,“im”分别为该变量的实部、虚部。

由式(14)可得:

$$(V_{\gamma k}^{re} + jV_{\gamma k}^{im})(V_k^{re} - jV_k^{im}) + (R_{kk} + jX_{kk})(P_{k,sch} - jQ_k) = V_k^2 \quad (16)$$

$$\frac{\partial V_k^{re}}{\partial Q_k} = \frac{V_{\gamma k}^{im} R_{kk} - V_{\gamma k}^{re} X_{kk} - 2V_k^{re} R_{kk}}{V_{\gamma k}^{re2} + V_{\gamma k}^{im2} - 2V_k^{re} V_{\gamma k}^{re} - 2V_k^{im} V_{\gamma k}^{im}} \quad (17)$$

$$\frac{\partial V_k^{im}}{\partial Q_k} = \frac{V_{\gamma k}^{im}}{V_{\gamma k}^{re}} \frac{V_{\gamma k}^{im} R_{kk} - V_{\gamma k}^{re} X_{kk} - 2V_k^{im} R_{kk}}{V_{\gamma k}^{re2} + V_{\gamma k}^{im2} - 2V_k^{re} V_{\gamma k}^{re} - 2V_k^{im} V_{\gamma k}^{im}} - \frac{R_{kk}}{V_{\gamma k}^{re}} \quad (18)$$

$$\frac{\partial V_k}{\partial Q_k} = \frac{V_k^{re} \partial V_k^{re} / \partial Q_k + V_k^{im} \partial V_k^{im} / \partial Q_k}{V_k} \quad (19)$$

式中: R_{kk}, X_{kk} 分别为第 k 节点的自电阻、自电抗。

2)求第 k 个节点无功功率输出变化 ΔQ_k 对第 j 个节点电压的互灵敏度^[18]。假设除了 k 节点,其他节点注入电流为零,则由式(14)可得:

$$(V_{\gamma j}^{re} + jV_{\gamma j}^{im})(V_k^{re} - jV_k^{im}) + (R_{jk} + jX_{jk})(P_{k,sch} - jQ_k) = (V_j^{re} + jV_j^{im})(V_k^{re} - jV_k^{im}) \quad (20)$$

$$\frac{\partial V_j^{re}}{\partial Q_k} = [V_k^{re} (V_{\gamma j}^{re} \frac{\partial V_k^{re}}{\partial Q_k} + V_{\gamma j}^{im} \frac{\partial V_k^{im}}{\partial Q_k}) + X_{jk} - V_j^{re} \frac{\partial V_k^{re}}{\partial Q_k} -$$

$$V_j^{im} \frac{\partial V_k^{im}}{\partial Q_k}] / V_k - [V_k^{im} (V_{\gamma j}^{re} \frac{\partial V_k^{re}}{\partial Q_k} - V_{\gamma j}^{im} \frac{\partial V_k^{im}}{\partial Q_k} -$$

$$R_{jk} - V_j^{im} \frac{\partial V_k^{re}}{\partial Q_k} + V_j^{re} \frac{\partial V_k^{im}}{\partial Q_k})] / V_k \quad (21)$$

$$\frac{\partial V_j^{im}}{\partial Q_k} = [(V_{\gamma j}^{im} - V_j^{im}) \frac{\partial V_k^{re}}{\partial Q_k} - (V_{\gamma j}^{re} - V_j^{re}) \frac{\partial V_k^{im}}{\partial Q_k}] / V_k^{re} +$$

$$(V_k^{im} \frac{\partial V_j^{re}}{\partial Q_k} - R_{jk}) / V_k^{re} \quad (22)$$

$$\frac{\partial V_j}{\partial Q_k} = (V_j^{re} \frac{\partial V_j^{re}}{\partial Q_k} + V_j^{im} \frac{\partial V_j^{im}}{\partial Q_k}) / V_j \quad (23)$$

3)求 k 节点有功功率输出变化 ΔP_k 对其节点电压的自灵敏度。假设除了 k 节点,其他节点注入电流为零,则由式(14)可得:

$$\frac{\partial V_k^{re}}{\partial P_k} = \frac{-V_{\gamma k}^{im} X_{kk} - V_{\gamma k}^{re} R_{kk} + 2V_k^{im} X_{kk}}{V_{\gamma k}^{re2} + V_{\gamma k}^{im2} - 2V_k^{re} V_{\gamma k}^{re} - 2V_k^{im} V_{\gamma k}^{im}} \quad (24)$$

$$\frac{\partial V_k^{im}}{\partial P_k} = \frac{V_{\gamma k}^{im}}{V_{\gamma k}^{re}} \frac{-V_{\gamma k}^{im} X_{kk} - V_{\gamma k}^{re} R_{kk} + 2V_k^{im} X_{kk}}{V_{\gamma k}^{re2} + V_{\gamma k}^{im2} - 2V_k^{re} V_{\gamma k}^{re} - 2V_k^{im} V_{\gamma k}^{im}} + \frac{X_{kk}}{V_{\gamma k}^{re}} \quad (25)$$

$$\frac{\partial V_k}{\partial P_k} = (V_k^{re} \frac{\partial V_k^{re}}{\partial P_k} + V_k^{im} \frac{\partial V_k^{im}}{\partial P_k}) / V_k \quad (26)$$

4)求 k 节点有功功率输出变化 ΔP_k 对 j 节点电压的互灵敏度。假设除了 k 节点,其他节点注入电流为零,则由式(14)可得:

$$\frac{\partial V_j^{re}}{\partial P_k} = [V_k^{re} (V_{\gamma j}^{re} \frac{\partial V_k^{re}}{\partial P_k} + V_{\gamma j}^{im} \frac{\partial V_k^{im}}{\partial P_k}) + R_{jk} - V_j^{re} \frac{\partial V_k^{re}}{\partial P_k} -$$

$$V_j^{im} \frac{\partial V_k^{im}}{\partial P_k}] / V_k - [V_k^{im} (V_{\gamma j}^{re} \frac{\partial V_k^{re}}{\partial P_k} - V_{\gamma j}^{im} \frac{\partial V_k^{im}}{\partial P_k} +$$

$$X_{jk} - V_j^{im} \frac{\partial V_k^{re}}{\partial P_k} + V_j^{re} \frac{\partial V_k^{im}}{\partial P_k})] / V_k \quad (27)$$

$$\frac{\partial V_j^{im}}{\partial P_k} = [(V_{\gamma j}^{im} - V_j^{im}) \frac{\partial V_k^{re}}{\partial P_k} - (V_{\gamma j}^{re} - V_j^{re}) \frac{\partial V_k^{im}}{\partial P_k}] / V_k^{re} +$$

$$(X_{jk} + V_k^{im} \frac{\partial V_j^{re}}{\partial Q_k}) / V_k^{re} \quad (28)$$

$$\frac{\partial V_j}{\partial P_k} = (V_j^{re} \frac{\partial V_j^{re}}{\partial P_k} + V_j^{im} \frac{\partial V_j^{im}}{\partial P_k}) / V_j \quad (29)$$

2.2 基于“EVs聚合-光伏多功能逆变器-无功治理设备”的协同调压策略

各母线节点所连接的EVs聚合商、光伏聚合商和无功治理装置,根据其节点的电压偏差数值,基于该节点电压无功灵敏度进行降序排列,然后根据各节点的无功调节量,并考虑到通信传输时延^[26]的影响,按顺序对其进行无功调节,如果电压问题还没有得到有效解决,再基于该节点电压有功灵敏度进行降序排列,然后根据各节点的有功调节能力,并兼顾到通信传输时延的影响,按顺序对其进行有功调节。具体调节策略如图4所示。

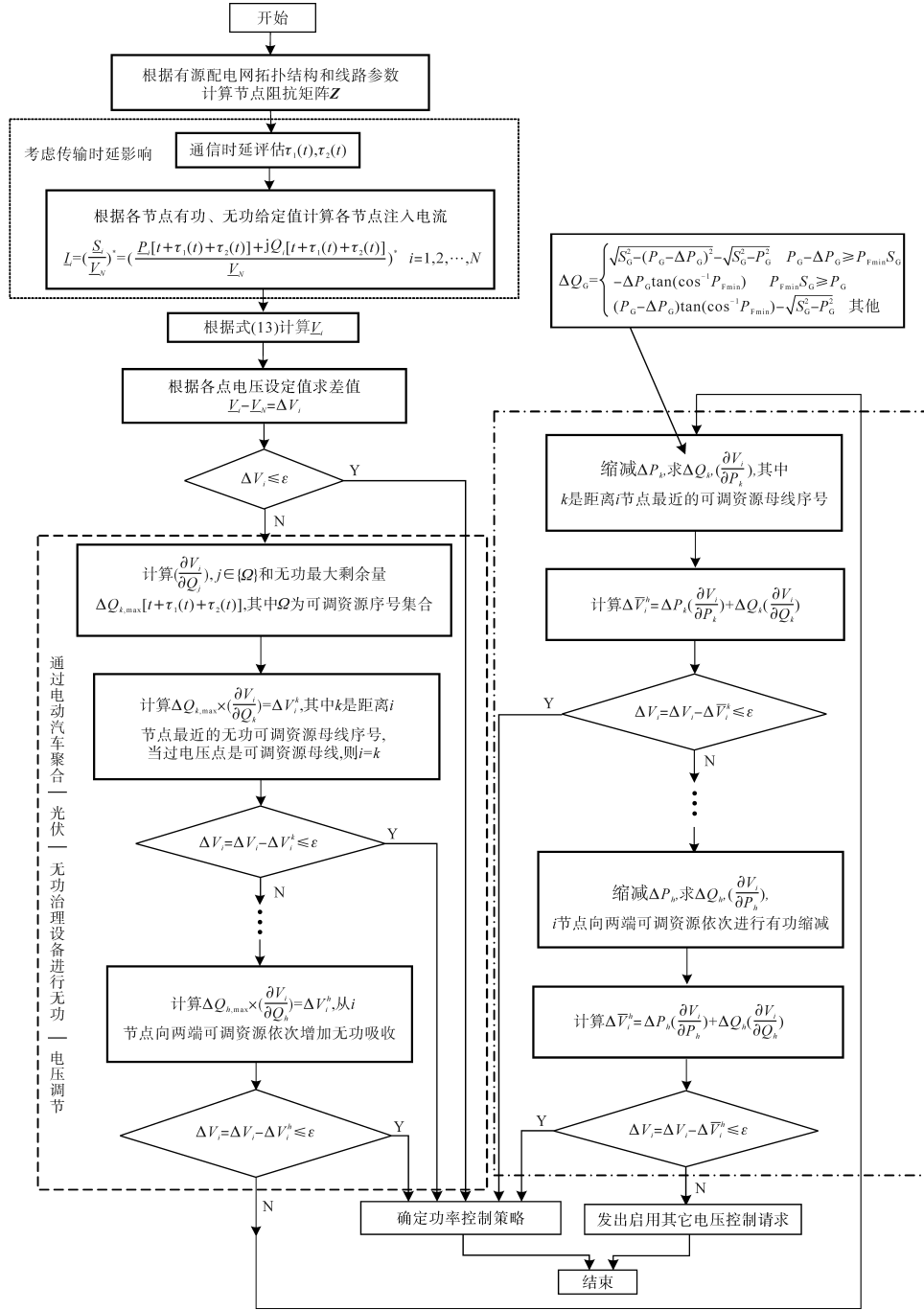


图4 所提出的协同调压策略

Fig.4 The proposed cooperative voltage regulation strategy

3 算例仿真

为了验证所提基于EVs聚合主动支撑的有源配电网协同调压策略的优越性,基于Matlab建立如图5所示的某地区有源配电网仿真测试模型进行实验。测试模型中,有源配电网的允许运行最高电压为 $1.05U_N$, U_N 为电网的额定电压^[27]。其中,各分布式光伏电源的配置相同,采用静止无功补偿装置作为无功治理设备进行有源配

网无功补偿,并假设各节点均接入一定数量EVs。不考虑网侧的有载调压变压器等调压作用,以电压-功率灵敏度矩阵为依据确定系统的功率协同调节方案。为了说明基于“出行链”概念的EVs聚合预测模型的优越性,本文采用图2所示的预测方法与传统的非支配排序遗传算法-II(non-dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II)优化预测方法^[28]进行对比分析。在算例中,随机选取南京市某充电站在2020年其中一个月充电

负荷的平均数值当作EVs的日负荷实际值^[29]。此外,本文所提预测方法与NSGA-II的参数设置借鉴文献[19,30]中的相关数据。

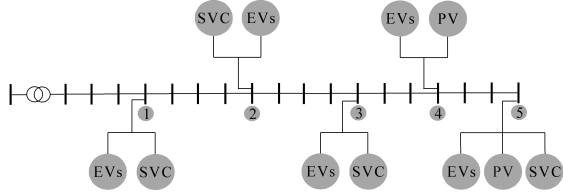


图5 有源配电网仿真测试模型

Fig.5 Test model of active distribution network simulation

3.1 EVs聚合预测方法的对比分析

在本节中,为了对提出的基于“出行链”概念的EVs聚合预测模型的精确性进行验证,使用基于“出行链”概念与蒙特卡洛算法相结合的预测方法对EVs聚合负荷进行预测,并与传统的NSGA-II优化预测方法进行比较。

为了更有效、直观地判断所提的EVs聚合预测方法的日负荷预测精度及与传统方法的预测效果的不同,采取绝对百分比误差(absolute percentage error, APE)指标 e_{APE} ^[31]、均方根误差(root mean square error, RMSE)指标 e_{RMSE} 、平均绝对误差(mean absolute error, MAE)指标 e_{MAE} 以及平均绝对百分比误差(mean absolute percentage error, MAPE)指标 e_{MAPE} ^[32]的比较来衡量各方法的预测精度,其表达式分别为

$$e_{APE} = \frac{|l_i - \tilde{l}_i|}{l_i} \times 100\% \quad (30)$$

$$e_{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_p} (l_i - \tilde{l}_i)^2}{N_p}} \quad (31)$$

$$e_{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} |l_i - \tilde{l}_i|}{N_p} \quad (32)$$

$$e_{MAPE} = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} |(l_i - \tilde{l}_i)/l_i|}{N_p} \times 100\% \quad (33)$$

式中: l_i, \tilde{l}_i 分别为第*i*个时间点的实际负荷值、预测负荷值; N_p 为预测样本中时间点的个数; e_{MAPE}, e_{RMSE} 分别为衡量预测值与真实值偏离的相对大小和绝对大小,它们的值越小,预测效果越好^[33]。

图6为不同预测方法下仿真区域内工作日EVs日负荷预测对比的情况。图7用箱形图来展示不同预测方法下EVs负荷数据的APE分布。表1给出了不同方法预测的性能对比情况。

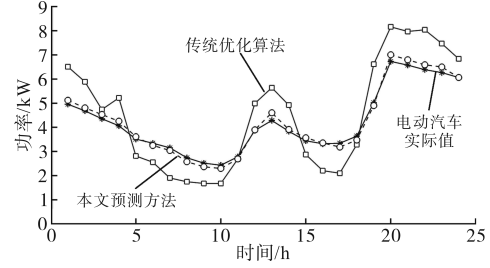


图6 工作日EVs日负荷预测对比图

Fig.6 Daily load prediction comparison chart of EVs in working day

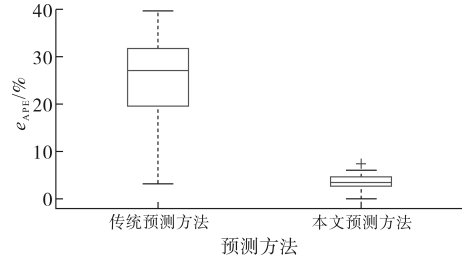


图7 不同预测方法下EVs负荷数据的APE分布

Fig.7 APE distribution of EVs load data under different prediction methods

表1 不同方法预测的性能对比

Tab.1 Prediction performance comparison of different methods

预测方法	e_{RMSE}/kW	e_{MAE}/kW	$e_{MAPE}/\%$
传统	1.10	1.02	24.96
本文	0.16	0.14	3.54

3.2 所提电压协同控制策略分析

为了研究“EVs聚合-光伏多功能逆变器-无功治理设备”的协同调压策略的有效性,在以下两种场景情况下对该电压调节策略进行测试并分析。

场景1:图5中有源配电网母线1、母线2、母线3同时出现过电压。基于“EVs聚合-光伏多功能逆变器-无功治理设备”的协同调压策略,图8给出了各母线节点的功率调节量。可以看到,由于这3个母线节点1,2和3的无功治理设备可允许调整的功率量较低,因此难以有效解决电压越限问题。基于电压功率灵敏度计算,母线节点1,2和3的电压穿越上限影响主要凭借这3个节点所连接的EVs聚合有功调节来对其处理。

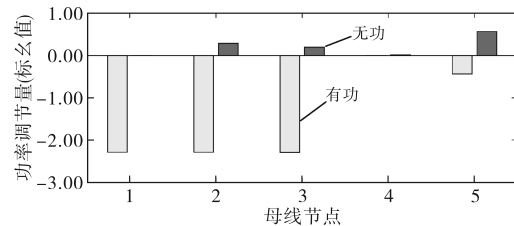


图8 各母线的功率调节量(场景1)

Fig.8 Power regulation of each bus (scenario 1)

图9为当母线节点1,2和3一同存在电压穿越上限时的电压调节结果图。可见,当调节时间

超过0.07 s时,这些节点电压从严重穿越上限的15%恢复到5%的电压允许的范围,随后各节点的电压就恒定在自身的额定数值上。因此,上述测试结果验证了文中电压调节方法在控制效率与准确性方面上都有着优异的效果。

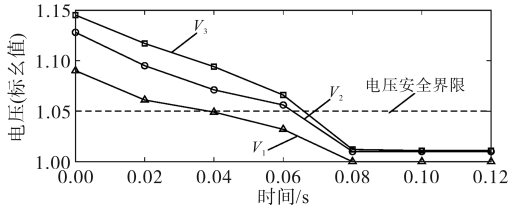


图9 场景1下电压调节结果

Fig.9 Voltage regulation results under scenario 1

场景2:图5中有源配电网母线2、母线3、母线4均存在电压越限问题。基于“EVs聚合-光伏多功能逆变器-无功治理设备”的协同调压策略,各母线节点的功率调节量的情况如图10所示。可以看到,因为母线节点4没有安装无功治理设备,所以该节点存在最大的EVs聚合的功率调节数值。

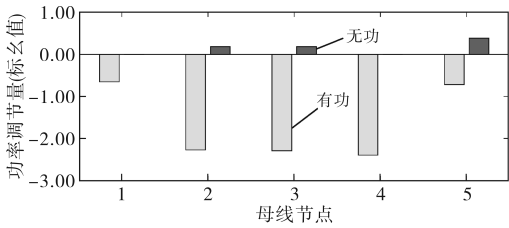


图10 各母线的功率调节量(场景2)

Fig.10 Power regulation of each bus (scenario 2)

图11为当母线节点2,3和4一同存在严重电压越限时的电压调节结果图。可见,当调节时间超过0.035 s时,这些母线节点电压从严重穿越上限的10%恢复到5%的电压允许的范围,随后各节点的电压就恒定在自身的安全界线以内。综上,测试结果证明了本文所提的协同调压策略在控制效率和限制电压越限作用上都有着优异的效果。

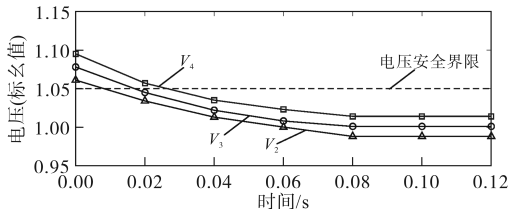


图11 场景2电压调节结果

Fig.11 Voltage regulation results under scenario 2

4 结论

针对配电网中因海量分布式新能源接入而

引起的严重电压越限问题,本文开发了一种基于EVs聚合主动支撑的有源配电网协同调压策略。

通过仿真分析,得出如下结论:

1)提出的基于“出行链”概念与蒙特卡洛算法相结合的EVs预测方法,实现了EVs随机出行下的准确预测。此外,与传统的预测方法作对比,采用多种误差指标验证了所提的EVs预测方法效果较好、性能更稳定。

2)通过挖掘利用EVs这一柔性负荷聚合调节潜力,结合光伏多功能逆变器和无功补偿装置实施功率协同调节,保障了众多节点电压的有效管控,在海量DG接入的情况下,这不仅提高了电压调节的经济效益与有效性能,而且又能轻易实施。根据算例测试与验证,结果显示在众多节点电压存在严重越限的情形下,所提出的协同调压策略可以将电网众多节点的越限电压迅速地控制到允许的范围之内。

综上所述,表明了所提出的协同调压策略的实用性和有效性。

本文所提出的协同调压策略对解决有源配电网中新能源大规模接入引起的电压波动问题提供了参考。下一步的研究工作将考虑加入分布式储能与其他柔性负荷作为电压可调节资源,进一步完善有源配电网协同调压策略。

参考文献

- [1] WASWA L, CHIHOTA M J, BEKKER B. A probabilistic conductor size selection framework for active distribution networks [J]. Energies, 2021, 14(19): 1-19.
- [2] 赵长乐, 刘天羽, 江秀臣, 等. 基于能源局域网的园区型微电网优化规划[J]. 分布式能源, 2019, 4(3): 28-34.
ZHAO Changle, LIU Tianyu, JIANG Xiuchen, et al. Optimal planning of park-type microgrid based on energy local area network[J]. Distributed Energy, 2019, 4(3): 28-34.
- [3] 田世明, 栾文鹏, 张东霞, 等. 能源互联网技术形态与关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3482-3494.
TIAN Shiming, LUAN Wenpeng, ZHANG Dongxia, et al. Technical forms and key technologies on energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3482-3494.
- [4] 王海军, 王磊. 基于分层MPC的风电场电压协调控制策略研究[J]. 电气传动, 2022, 52(1): 60-67, 80.
WANG Haijun, WANG Lei. Research on voltage coordination control strategy of wind farm based on hierarchical MPC[J]. Electric Drive, 2022, 52(1): 60-67, 80.
- [5] 郑晓莹, 陈政轩, 曾琮. 含分布式电源的配电网双层分区调压策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 90-97.
ZHENG Xiaoying, CHEN Zhengxuan, ZENG Cong. Double-

- layer partition voltage regulation strategy of a distribution network with distributed generation[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(6):90-97.
- [6] 杨重伟,梁旭,毛岚. 基于高比例光伏接入低压系统的电压控制研究[J]. *电气传动*, 2022, 52(8):60-67.
YANG Chongwei, LIANG Xu, MAO Lan. Review of the power quality problem and key treatment technology of regional power grid[J]. *Electric Drive*, 2022, 52(8):60-67.
- [7] 任罡. 含分布式电源的配电网无功补偿方法研究[J]. *电子技术与软件工程*, 2021(19):212-213.
REN Gang. Research on the reactive power compensation method of distribution network with distributed power supply[J]. *Electronic Technology & Software Engineering*, 2021(19):212-213.
- [8] NAJAFI A, ABOLI R, FALAGHI H, et al. Capacitor placement in distorted distribution network subject to wind and load uncertainty[J]. *Journal of Operation and Automation in Power Engineering*, 2016, 4(2):153-164.
- [9] 杨志强,刘帅,张鹏宇. 分布式高渗透无功功率补偿装置在配电网中的应用[J]. *吉林电力*, 2018, 46(3):6-9.
YANG Zhiqiang, LIU Shuai, ZHANG Pengyu. Application of distributed high permeability reactive power compensation device in distribution network[J]. *Jilin Electric Power*, 2018, 46(3):6-9.
- [10] 欧家祥. 基于损耗灵敏度因子优化配电网无功治理位置的方法研究[J]. *贵州电力技术*, 2014, 17(7):9-11.
OU Jiexiang. Study on the optimal capacitor location of distribution system based on loss sensitivity factor[J]. *Guizhou Electric Power Technology*, 2014, 17(7):9-11.
- [11] 贺春光,王涛,杨书强,等. 基于“先无功-后有功”功率补偿的配电网电压协同控制策略[J]. *工程科学与技术*, 2024, 56(2):26-36.
HE Chunguang, WANG Tao, YANG Shuqiang, et al. Voltage cooperative control strategy for distribution network based on “reactive power first-active power later” power compensation [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2024, 56(2):26-36.
- [12] 李周,詹若培,李亚州,等. 真双极多端柔性直流输电系统多目标协同控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(19):101-110.
LI Zhou, ZHAN Ruopei, LI Yazhou, et al. Multi-objective cooperative control strategy for true bipolar multi-terminal flexible DC transmission system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(19):101-110.
- [13] 乐健,周谦,王曹,等. 基于分布式协同的配电网电压和功率优化控制方法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(4):1249-1257.
LE Jian, ZHOU Qian, WANG Cao, et al. Research on distributed cooperative voltage and power optimization control method for distribution network[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(4):1249-1257.
- [14] ABACI K, YAMALI V, CHEN Z. Voltage stability improvement with coordinated ULTC-STATCOM controller and VSC-HVDC in high wind penetration cases[J]. *Electrical Engineering*, 2021, 103(2):837-851.
- [15] 徐玄浩,陈皓勇,华栋,等. 基于动态博弈理论的多区域电压协同控制方法[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(19):15-22.
XU Xuanhao, CHEN Haoyong, HUA Dong, et al. A multi-area voltage cooperative control method based on dynamic game theory[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(19):15-22.
- [16] 王毅,谷亿,丁壮. 基于模糊熵和集成学习的电动汽车充电需求预测[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(3):114-121.
WANG Yi, GU Yi, DING Zhuang. Prediction of electric vehicle charging demand based on fuzzy entropy and ensemble learning [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(3):114-121.
- [17] 邓艺璇,黄玉萍,黄周春. 基于随机森林算法的电动汽车充放电容量预测[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(21):181-188.
DENG Yixuan, HUANG Yuping, HUANG Zhouchun. Prediction of electric vehicle charge and discharge capacity based on random forest algorithm[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(21):181-188.
- [18] 齐航. 光伏发电及电动汽车充放电的预测方法研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2019.
QI Hang. Research on the prediction method of photovoltaic power generation and electric vehicle charging and discharging [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019.
- [19] 叶婷,邓星,黄堃,等. 电动汽车充换储一体化电站的优化调度策略及应用[J]. *电力需求侧管理*, 2021, 23(4):67-72.
YE Ting, DENG Xing, HUANG Kun, et al. Optimal dispatching strategy and application of electric vehicle charge-exchange-storage integrated power plant[J]. *Power Demand Side Management*, 2021, 23(4):67-72.
- [20] 褚浩然,郑猛,杨晓光,等. 出行链特征指标的提出及应用研究[J]. *城市交通*, 2006, 4(2):64-67.
CHU Haoran, ZHENG Meng, YANG Xiaoguang, et al. A study on trip-chain indices and their application[J]. *Urban Transport of China*, 2006, 4(2):64-67.
- [21] 苏小林,张艳娟,武中,等. 规模化电动汽车充电负荷的预测及其对电网的影响[J]. *现代电力*, 2018, 35(1):46-54.
SU Xiaolin, ZHANG Yanjuan, WU Zhong, et al. Forecasting the charging load of large-scale electric vehicle and its impact on the power grid[J]. *Modern Electric Power*, 2018, 35(1):46-54.
- [22] 王宇飞,张飞,郭俊超,等. 城市EV时空充电负荷预测及充电站规划研究[J]. *现代电力*, 2023, 40(2):239-248.
WANG Yufei, ZHANG Fei, GUO Junchao, et al. Research on spatio-temporal charging load prediction and charging station planning of urban electrical vehicles[J]. *Modern Electric Power*, 2023, 40(2):239-248.
- [23] 陈丽丹,聂涌泉,钟庆. 基于出行链的电动汽车充电负荷预测模型[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(4):216-225.
CHEN Lidian, NIE Yongquan, ZHONG Qing. A model for electric vehicle charging load forecasting based on trip chains[J].

- Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 216-225.
- [24] 潘胤吉,邱晓燕,吴甲武,等.基于马尔可夫决策过程的电动汽车充电行为分析[J].电力建设,2018,39(7):129-137.
PAN Yinji, QIU Xiaoyan, WU Jiawu, et al. Analysis on charging behaviors of electric vehicles based on Markov decision processes[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(7): 129-137.
- [25] ZHANG Zedong, OCHOA Luis F, VALVERDE Gustavo. A novel voltage sensitivity approach for the decentralized control of DG plants[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 1566-1576.
- [26] QU C, CHEN W, SONG J B, et al. Distributed data traffic scheduling with awareness of dynamics state in cyber physical systems with application in smart grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(6): 2895-2905.
- [27] 黄堃,刘澄,吕潇,等.计及本地负荷的分布式光伏并网电压协同控制策略[J].电网与清洁能源,2020,36(11):127-133.
HUANG Kun, LIU Cheng, LÜ Xiao, et al. Distributed photovoltaic grid-connected voltage coordination control strategy considering local load[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(11): 127-133.
- [28] 冯艾,刘继春,纪祥贞.基于NSGA-II的电动汽车协调充电策略研究[J].华东电力,2012,40(2):300-305.
FENG Ai, LIU Jichun, JI Xiangzhen. NSGA-II-based coordination charging strategy for electric vehicle[J]. East China Electric Power, 2012, 40(2): 300-305.
- [29] 安佳坤,杨书强,王涛,等.电动汽车聚合下的微能源互联网优化调度策略[J].中国电力,2023,56(5):80-88.
AN Jiakun, YANG Shuqiang, WANG Tao, et al. Optimal scheduling strategy for micro energy internet under electric vehicles aggregation[J]. Electric Power, 2023, 56(5): 80-88.
- [30] 冯士刚,艾芊.带精英策略的快速非支配排序遗传算法在多目标无功优化中的应用[J].电工技术学报,2007,22(12):146-151.
FENG Shigang, AI Qian. Application of fast and elitist non-dominated sorting generic algorithm in multi-objective reactive power optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(12): 146-151.
- [31] 庞传军,张波,余建明.基于LSTM循环神经网络的短期电力负荷预测[J].电力工程技术,2021,40(1):175-180,194.
PANG Chuanjun, ZHANG Bo, YU Jianming. Short-term power load forecasting based on LSTM recurrent neural network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(1): 175-180, 194.
- [32] 胡乙丹,姜吉祥,董霞.基于结合聚类与SVM参数寻优的短期电力负荷预测方法[J].电力信息与通信技术,2022,20(5):54-60.
HU Yidan, JIANG Jixiang, DONG Xia. A short-term power load forecasting method based on combining clustering and SVM parameter optimization[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2022, 20(5): 54-60.
- [33] 郭亦宗,冯斌,岳铂雄,等.负荷聚合商模式下考虑需求响应的超短期负荷预测[J].电力系统自动化,2021,45(1):79-87.
GUO Yizong, FENG Bin, YUE Boxiong, et al. Ultra-short-term load forecasting considering demand response in load aggregator mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(1): 79-87.

收稿日期:2022-07-08

修改稿日期:2022-09-01