

引文格式: 闫福录, 杨俊, 贾燕冰, 等. 基于鸚鵡算法和分相电压质量的电动汽车充电策略研究[J]. 太原理工大学学报, 2026, 57(2): 333-346.

YAN Fulu, YANG Jun, JIA Yanbing, et al. Electric vehicle charging strategy based on parrot algorithm and split-phase voltage quality[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2026, 57(2): 333-346.

基于鸚鵡算法和分相电压质量 的电动汽车充电策略研究

闫福录¹, 杨俊¹, 贾燕冰², 张世亮², 魏丽峰¹, 史斌斌¹, 荀之¹

(1. 国网山西省电力公司临汾供电公司, 山西 临汾; 2. 太原理工大学 电气与动力工程学院, 山西 太原)

摘要:【目的】配电网中电动汽车充电桩多为单相负荷, 大规模电动汽车随机接入使得配电网分相电压质量等问题凸显。针对电动汽车的大量无序接入问题, 提出一种基于鸚鵡优化算法和分相电压质量的双层电动汽车充电引导策略, 以配电网分相电压谐波、分相电压偏差和三相电压不平衡建立多目标双层优化模型。【方法】模型内层采用鸚鵡优化算法计算电动汽车各相并网功率, 外层构建了基于前推回代法的分相谐波潮流算法, 代入内层优化的并网功率, 以使电动汽车并网后配电网的分相电压质量最优。【结果】算例结果表明, 所提电动汽车充电策略, 可以有效改善配电网三相电压不平衡、分相电压偏差以及分相谐波电压问题, 实现新能源消纳, 提升配电网运行能效。

关键词: 电压质量; 电动汽车; 充电策略; 鸚鵡优化算法; 分相接入

中图分类号: TM73 **文献标识码:** A

DOI: 10.16355/j.tyut.1007-9432.20240462

文章编号: 1007-9432(2026)02-0333-14

Electric Vehicle Charging Strategy Based on Parrot Algorithm and Split-phase Voltage Quality

YAN Fulu¹, YANG Jun¹, JIA Yanbing², ZHANG Shiliang², WEI Lifeng¹, SHI Binbin¹, XUN Zhi¹

(1. Linfen Power Supply Company, State Grid Shanxi Electric Power Company, Linfen, Shanxi, China; 2. College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi, China)

Abstract: 【Purposes】The electric vehicle (EV) charging stations within distribution networks are predominantly of single-phase loads. The widespread and random connection of EVs exacerbates issues related to split-phase voltage quality within the distribution grid. Aiming at the problem of massive disordered access of EVs, a two-layer electric vehicle charging guidance strategy based on parrot optimization algorithm and split-phase voltage quality is proposed. Split-phase voltage harmonics, split-phase voltage deviation, and three-phase voltage imbalance within the distribution network are included as objectives in the model. 【Methods】In the inner layer, an improved parrot optimization algorithm was used. Simultaneously, in the outer layer, a split-phase harmonic current algorithm based on the forward-back generation method was constructed. This algorithm substitutes the optimized grid-connected power obtained in the inner layer to achieve the optimal split-phase voltage quality af-

收稿日期: 2024-06-06; 修回日期: 2024-08-27

基金项目: 国网山西省电力公司科技项目(5205L0230005)

第一作者: 闫福录, 硕士, 高级工程师, 主要从事配电网优化运行、电力营销工作, (E-mail) 3576565046@qq.com

通信作者: 贾燕冰, 教授, 博士生导师, 主要从事综合能源系统运行与控制、新能源电力系统优化运行等研究, (E-mail) jiayanbing@tyut.edu.cn

ter the grid connection of EVs. **【Results】**Example results demonstrate that the proposed EV charging strategy is effective in ameliorating three-phase voltage imbalance, split-phase voltage deviation, and split-phase harmonic voltage issues within the distribution network. Additionally, it enhances the utilization of new energy and the overall energy efficiency of distribution network operations.

Keywords: voltage quality; electric vehicles; charging strategy; parrot optimization algorithm; split-phase connection

“双碳”目标的提出,推动了电动汽车快速发展。2023年6月,国务院印发通知,要求到2030年,基本建成高质量、高覆盖、大规模的基础充电设施体系,全力配合电动汽车相关产业的发展,保障电动汽车车主充电需求^[1]。随着单相慢充为主的电动汽车大规模并入电网,配电网三相电压不平衡^[2]、分相电压偏差^[3]、分相谐波问题等电压问题日益凸显^[4],甚至引起配电终端设备跳闸,降低配网可靠性和用户满意度。考虑电动汽车单相充电所引起的分相电压质量问题,研究电动汽车的充电策略,对于提升配电网的电压质量和运行可靠性具有重要意义。

电动汽车数量的大规模增长形成的充电高峰给局部配网的供电能力和运行安全带来了挑战^[5]。文献[6]探讨了电动汽车充电机对无功调压的作用;文献[7]研究了电动汽车在削峰填谷方面的潜力,通过有序充电有效减小负荷峰谷差;文献[8]兼顾电网负荷波动与用户出行需求,通过分区域分时电价引导电动汽车在谷时充电;文献[9]通过电动汽车和风电两者协同调度降低负荷波动;文献[10]考虑用户侧参与电网侧调峰的意愿,提出一种动态分时定价方法,优化电动汽车负荷;文献[11]提出了聚合商非合作充电博弈模型,解决动态定价机制下电动汽车竞争性充电的问题。上述研究提出的有序充电方法,均以等效的单相系统为基础建模,欠缺对三相不平衡问题的考量。

为解决三相负荷不平衡问题,文献[12]提出了以三相电流不平衡度和换相次数最小为目标的换相模型;文献[13]考虑三相电压不平衡度和线损最小,并通过有正态分布交叉算子改进的NSGA-3优化求解。然而由于电动汽车负荷波动频繁,采用换相开关的方式会导致换相开关动作频繁,增大换相过程中换相失败风险并带来电压闪变问题^[14],为此文献[15-17]分别考虑网损、无功损耗、三相平衡提出了电动汽车三相负荷平衡有序充电模型,在确定电动汽车充电策略时考虑分相负荷不平衡的影响。而随着分布式新能源大规模单相接入,确定电动汽

车接入策略时,除考虑三相充电负荷不平衡外,还需考虑单相分布式电源的波动性和不确定性的影响,尽可能提升配电网的电压质量,减少用户负荷、分布式新能源切相造成的损失。

目前大部分文献的多目标优化算法多采用改进粒子群算法^[10]、遗传算法^[12]和差分进化算法^[18]等,亦或受生物群体启发,采用鲸鱼优化算法^[19]、麻雀搜索算法^[20]和灰狼优化算法^[21]等。上述算法一方面依赖初始参数的设置,参数的选择对算法性能有显著影响,另一方面缺乏足够的多样性,难以在保证全局搜索能力的同时提升局部搜索的精度和效率,易陷入局部最优。本文基于驯化的鸚鵡,提出一种新型鸚鵡优化算法(Parrot Optimizer, PO),与遵循探索与开发行为的传统元启发式算法相比,PO群体中的个体在每次迭代期间都会随机表现出觅食、停留、交流与远离陌生人四种行为之一,其多种种群行为和随机结构与传统算法区分开来,增强了种群多样性,有效地降低了陷入局部最优的风险,同时保证求解的准确性。

综上,针对电动汽车大规模随机接入引起的电压质量问题,本文提出计及分相电压质量的电动汽车充电策略,以配电网全天所有节点的三相电压不平衡度、分相最大电压偏差及并网点电压谐波畸变率最小为目标,通过隶属度函数设定多目标函数权重系数,设计双层算法进行求解。外层提出了三相前推回代的分相谐波潮流模型求解节点分相电压,内层通过新型PO优化算法求解电动汽车分相充电策略,控制其接入的分相。算例结果表明所提考虑分相电压质量的电动汽车充电策略,有效提高了电动汽车大规模接入时配电网的电压质量,保障电网安全可靠运行。

1 电动汽车充电策略及数学模型

1.1 电动汽车充电策略

目前对于电动汽车充电优化引导方面多假定电力系统三相对称,将三相系统等效为单相系统分析。而随着电动汽车数量的增加,电动汽车单相并

网充电使得电力系统不平衡问题日益严重。同时,配电网侧单相并网的分布式风电并网功率逐步增大,风电出力夜间高白天低,与夜间大规模单相接入的私家车在时间上具有强互补性。确定电动汽车充电策略时,考虑电动汽车和风电的分相接入和互补特性,在风电出力高峰的分相接入更多的电动汽车负荷,将有助于满足充电需求的同时平衡风电出力。除了电网不平衡外,由于电动汽车和风电均由电力电子变换器并网,会有谐波注入电网,因此除了考虑电网不平衡外,充电策略还应考虑每相注入的谐波,保证每相谐波均不超标。由于配电网负荷较重,当终端集中接入电动汽车负荷时,会出现节点电压偏低的问题。由此可见,随着电动汽车和分布式风电并网,会引起配电网中电压不平衡、谐波、电压偏差问题,而分布式风电发电不可控,需要全消纳,故本文通过电动汽车充电策略研究,以改善新形势下配电网节点电压质量问题。

通过选取电压不平衡、分相电压偏差、分相电压谐波电压质量指标作为优化目标,制定分相充电策略,调控电动汽车到最优的分相充电桩并网充电,实现对分相电压质量的优化,同时消纳新能源出力,保证保障电网安全经济运行。

电动汽车分相充电流程如图1所示。各充电站将预约的总充电负荷上报电力系统控制中心;电力系统控制中心根据收集的各相充电负荷及风电出力功率,建立电动汽车分相充电模型,并将充电方案下发到各充电站;各充电站根据电力系统控制中

心下发的充电方案进行期望充电负荷的分配,实现电动汽车充电选相。

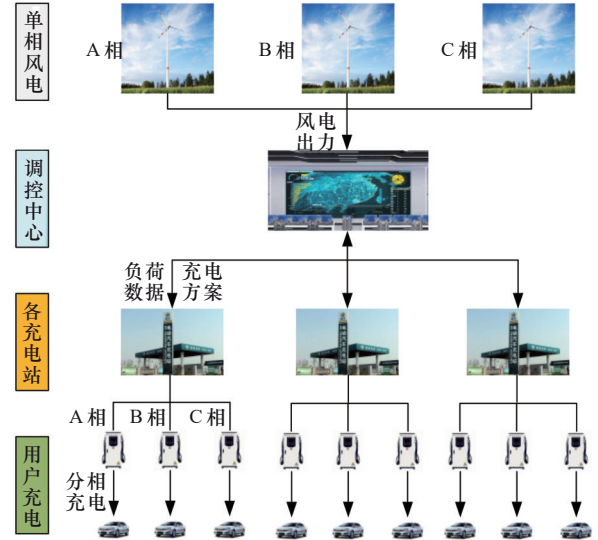


图1 电动汽车分相充电流程图

Fig.1 EV split-phase charging flowchart

1.2 电动汽车充电模型

电动汽车充电负荷大小与起始充电时刻、日行驶里程和充电时长相关,美国联邦公路管理局在全网公布的2017年和2018年的全国家庭旅行调查(NHTS)数据^[22],反映了车辆一天中的行驶规律分布。

1) 电动汽车起始充电时刻概率密度

起始充电时刻与电动汽车用户的出行特性相关,用户倾向于在出行结束后选择充电。

$$f_s(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right] & \mu_s - 12 \leq x \leq 24, \\ \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x + 24 - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right] & 0 \leq x \leq \mu_s - 12. \end{cases} \quad (1)$$

式中, x 为充电开始时刻, μ_s 、 σ_s 分别为充电开始时刻的期望和方差,取值分别为17.6和3.4。

2) 电动汽车日行驶里程概率密度

日行驶里程用于计算行驶后的剩余电量,一般与充电时间之间正相关。

$$f_d(x) = \frac{1}{x\sigma_d \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu_d)^2}{2\sigma_d^2}\right]. \quad (2)$$

式中, μ_d 、 σ_d 分别为 $\ln x$ 的期望和方差,取值分别为3.20和0.88。

3) 电动汽车充电时长

由电动汽车充电开始时刻的荷电状态计算充

电时长,通过上述式(1)和式(2)推导的充电时长如下。

$$T_{EV} = \frac{(1 - SOC_{ks})E_{EV}}{\eta_{EV}P_{EV}}. \quad (3)$$

$$SOC_{ks} = SOC(t_2). \quad (4)$$

$$SOC(t_2) = SOC(t_1) - \frac{d}{d_m} \times 100\%. \quad (5)$$

式中, T_{EV} 为电动汽车从开始到充满所需时间; SOC_{ks} 为充电开始时刻的SOC(剩余电量百分比,state of charge); E_{EV} 为电池容量大小; η_{EV} 为充电效率; P_{EV} 为充电功率; $SOC(t_1)$ 为出行起始的SOC; $SOC(t_2)$ 为出行结束的SOC; d 为行驶距离, d_m 为最

大行驶里程。

将单辆电动汽车负荷叠加可得到 t 时刻总的电动汽车负荷量。

$$P_{EV,t} = \sum_{z=1}^{N_{EV}} P_{EV}(z, t). \quad (6)$$

式中, N_{EV} 为电动汽车总数, $P_{EV}(z, t)$ 为第 z 辆电动汽车 t 时刻的充电功率。

1.3 风电出力模型

针对风速的波动性, 分析大量实际数据可得风速服从双参数 Weibull 分布, 概率密度函数如下。

$$f(v) = \frac{b_v}{a_v} \left(\frac{v}{a_v} \right)^{b_v-1} \exp \left[- \left(\frac{v}{a_v} \right)^{b_v} \right]. \quad (7)$$

式中, v 、 a_v 、 b_v 分别代表风速、尺度参数和形状参数, a_v 和 b_v 由各时段风速的期望值和方差确定。

$$b_v = \left(\frac{\delta}{\mu} \right)^{-1.086}. \quad (8)$$

$$a_v = \frac{\mu}{\Gamma \left(1 + \frac{1}{b_v} \right)}. \quad (9)$$

式中, μ 和 δ 分别表示一段时间内风速的期望和标准差。风电出力大小由风速决定, 关系如下所示。

$$P_F(v) = \begin{cases} 0, & v \leq v_i, \\ \frac{P_{F,r}}{v_r - v_i} (v - v_i), & v_i < v < v_r, \\ P_{F,r}, & v_r < v \leq v_0, \\ 0, & v > v_0. \end{cases} \quad (10)$$

式中, $P_F(v)$ 为风速 v 下的输出功率, $P_{F,r}$ 为风机的额定功率; v_i 、 v_r 和 v_0 分别为切入风速、额定风速和切出风速。

2 计及电压质量的电动汽车充电引导策略

本身呈辐射状的低压配电网, 用户分散且数量众多, 难以从最末端的电力用户上解决电压质量问题^[23], 而电动汽车的单相无序接入可能会出现电网电压质量问题加剧的情况。因此, 本文针对电动汽车接入情况, 选择合适的电压质量指标作为目标函数, 得到电动汽车分相充电策略, 从源头上降低电动汽车随机并网产生的电压质量问题, 有效提高电网运行的稳定性。

2.1 电压质量分析

电压质量包含三相不平衡等多个指标^[24], 选取合适的指标衡量电动汽车对配电网的影响有着重

要意义。

电动汽车充电负荷作为有功负荷, 主要与配电网有功功率交互, 电动汽车接入配电网的模型如图 2 所示。假设节点 k 为电动汽车充电并网点, 为了简化计算过程, 忽略线路中的损耗。由于电动汽车充电时, 功率因数较高, 可以忽略其无功功率作用, 则简化后节点 k 的电压为:

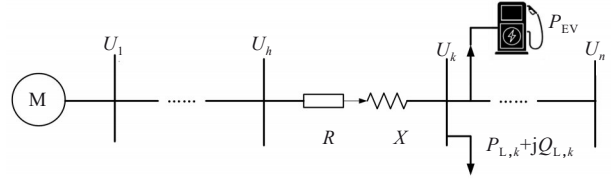


图 2 电动汽车并网示意图

Fig.2 Schematic diagram of EV access to the grid

$$U_k = \left(U_h - \frac{\sum_{m=k}^n (P_{L,m} + P_{EV}) R + \sum_{m=k}^n Q_{L,m} X}{U_h} \right) < \left(U_h - \frac{\sum_{m=k}^n P_{L,m} R + \sum_{m=k}^n Q_{L,m} X}{U_h} \right). \quad (11)$$

式中: U_h 为节点 h 的电压, R 和 X 为线路的阻抗, $P_{L,m}$ 和 $Q_{L,m}$ 为节点 m 基础负荷的有功和无功功率, P_{EV} 为接入电动汽车负荷的有功功率, n 为线路节点总数。

分析上式可得, 电动汽车充电负荷并网后会降低整体线路的节点电压, 并且充电功率越大, 降低程度越大。当电动汽车随机单相接入后, 该相电压降低而其他相电压不变, 从而发生三相电压不平衡, 影响配电网的三相平衡运行。若只关注并网点处负荷的三相平衡, 无法兼顾整体配电网的负荷平衡。而以系统所有节点三相电压不平衡最小为目标时, 并网点整体负荷较少的相位将接入更多负荷, 造成该相电动汽车负荷的集中接入, 加大了分相电压偏差。所以需要兼顾分相最大电压偏差最小, 保证不发生电压越限。此外, 电动汽车作为典型的非线性负载, 通过充电站与电力系统相连, 充电站内部的整流装置在电动汽车充电时对配电网注入大量谐波^[25], 因此需要分析分相接入对电压谐波的影响。相比之下, 慢速充电的电动汽车对电压影响是缓慢变化的, 电压暂降和电压波动与闪变的时间尺度较小, 在分相充电过程中考虑意义不大。综上本文选取台区配电网三相电压不平衡、分相最大电压偏差和并网点分相电压谐波畸变率作为目标函数考虑电动汽车分相充电策略。

2.2 目标函数

本文建立考虑分相电压质量的电动汽车充电多目标优化模型,以台区全天所有节点的三相电压不平衡度、分相最大电压偏差和并网点分相电压谐波畸变率最小为目标制定电动汽车分相充电策略。

2.2.1 三相电压不平衡度

利用对称分量法将相电压分解为正、负、零序电压。三相不平衡目标如下所示:

$$f_1 = \sum_t \sum_i U_{VUF,i,t} \times 100\% . \quad (12)$$

$$U_{VUF,i,t} = \left| \frac{U_{2,i,t}}{U_{1,i,t}} \right| = \left| \frac{U_{a,i,t} + \alpha^2 U_{b,i,t} + \alpha U_{c,i,t}}{U_{a,i,t} + \alpha U_{b,i,t} + \alpha^2 U_{c,i,t}} \right| . \quad (13)$$

式中: $U_{VUF,i,t}$ 为节点 i 在时刻 t 的电压不平衡度, $U_{1,i,t}$ 、 $U_{2,i,t}$ 分别为节点 i 在时刻 t 的正序、负序电压, $U_{a,i,t}$ 、 $U_{b,i,t}$ 、 $U_{c,i,t}$ 分别为节点 i 在时刻 t 的 a 、 b 、 c 三相电压, $\alpha = e^{j120^\circ}$, m 、 n 分别为节点总数和时刻数。

2.2.2 分相最大电压偏差

由于基础负荷三相不均以及单相分布式风电的接入,配电网整体三相负荷不一致,再叠加电动汽车充电负荷后,负荷较重的节点电压偏差可能会越限。为保证每个节点各相的电压偏差符合要求,以三相中最大的电压偏差最小作为目标。通过潮流计算的节点电压值得到三相最大电压偏差,如下式所示:

$$f_2 = \delta U_{i,t} = \sum_t \sum_i \max \frac{|U_{y,i,t} - U_{y,i,t}^*|}{U_{y,i,t}^*} \times 100\% . \quad (14)$$

式中: $U_{y,i,t}$ 为节点 i 在时刻 t 的 y 相实时电压, $U_{y,i,t}^*$ 为节点 i 在时刻 t 的 y 相的标称电压, $y=a, b, c$ 。

2.2.3 并网点三相电压谐波

电动汽车作为非线性负载,由于充电桩上整流装置的存在,充电时在并网点产生电压谐波,通过电压总谐波畸变率衡量:

$$f_3 = THD_u = \sum_t \sum_i \frac{U_{y,i,t}^H}{U_{y,i,t}^1} \times 100\% . \quad (15)$$

$$U_{y,i,t}^H = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (U_{y,i,t}^h)^2} . \quad (16)$$

式中: THD_u 为谐波总畸变率; $(U_{y,i,t}^h)$ 为并网点 i 在 t 时刻 y 相的第 h 次谐波电压; $U_{y,i,t}^H$ 为并网点 i 在 t 时刻 y 相的谐波电压含量; $U_{y,i,t}^1$ 为并网点 i 在 t 时刻 y 相的基波电压。

其中,传统的谐波潮流计算运行时间较长,本文采用线性分析法简化计算谐波潮流^[24],具体流程不再赘述。

2.2.4 隶属度函数求取最优解

由于电动汽车并网充电会对电网造成多类型的电压质量问题,结合 Pareto 对结果进行全面评估,选择隶属度最大值作为优化结果^[26]。隶属度函数如下所示:

$$\delta_{i,j} = \begin{cases} 1, & \beta_{i,j} = \beta_j^{\min}, \\ \frac{\beta_j^{\max} - \beta_{i,j}}{\beta_j^{\max} - \beta_j^{\min}}, & \beta_j^{\min} < \beta_{i,j} < \beta_j^{\max}, \\ 0, & \beta_{i,j} = \beta_j^{\max}. \end{cases} \quad (17)$$

式中: $\beta_{i,j}$ 为第 i 个变量、第 j 个目标函数解, $\beta_j^{\max}$ 和 $\beta_j^{\min}$ 为 Pareto 前沿面上第 j 个目标函数的最大和最小值, $\delta_{i,j}$ 为 $\beta_{i,j}$ 对应隶属度函数值。将解集中各个变量的隶属度函数求解后,由下式确定最优解。

$$\delta_{i,best} = \max \left(\sum_{j=1}^{N_j} \delta_{i,j} \right) \rightarrow \beta_{i,best} . \quad (18)$$

式中: $\delta_{i,best}$ 为最大隶属度值, $\beta_{i,best}$ 为 $\delta_{i,best}$ 对应的目标函数值, N_j 为目标函数个数。

2.3 约束条件

为了保证电动汽车实际并网充电的可行性,需要添加三类约束:潮流计算平衡约束、电动汽车充电约束和其他约束。

2.3.1 潮流约束

$$\begin{cases} P_i' = U_i' \sum_{j=1}^N U_j' (G_{ij} \cos \theta_{ij}' + B_{ij} \sin \theta_{ij}'), \\ Q_i' = U_i' \sum_{j=1}^N U_j' (G_{ij} \sin \theta_{ij}' - B_{ij} \cos \theta_{ij}'). \end{cases} \quad (19)$$

式中: P_i' 、 Q_i' 分别为 t 时刻节点 i 注入有功和无功功率; U_i' 、 U_j' 分别 t 时刻为节点 i 和 j 的电压幅值; G_{ij} 、 B_{ij} 和 θ_{ij}' 分别为节点 i 和 j 之间的电导、电纳和相角差; N 为配电网的总节点数。

2.3.2 电动汽车充电约束

1) 充电功率约束

$$0 \leq (P_{EV_i}^{z,y})_t \leq (\bar{P}_{EV_i}^{z,y})_t . \quad (20)$$

式中: $P_{EV_i}^{z,y}$ 为节点 i 在 y 相第 z 辆电动汽车充电功率, $(\bar{P}_{EV_i}^{z,y})_t$ 为节点 i 在 y 相第 z 辆电动汽车最大功率,用下式表示:

$$(\bar{P}_{EV_i}^{z,y})_t = \begin{cases} (P_{EV_i}^{z,y})_{\max}, & t \in [t_{in}^z, t_{de}^z] \\ 0, & t \notin [t_{in}^z, t_{de}^z] \end{cases}, t \in D . \quad (21)$$

式中: $(P_{EV_i}^{z,y})_{\max}$ 为节点 i 在 y 相第 z 辆电动汽车最大充电功率, t_{in}^z 、 t_{de}^z 为节点 i 在 y 相第 z 辆电动汽车的接入和离开时刻。

2) 电池容量约束

$$\text{SOC}_i^{\min} \leq \text{SOC}_i \leq \text{SOC}_i^{\max} \quad (22)$$

式中: $\text{SOC}_i^{\min}$ 、 $\text{SOC}_i^{\max}$ 分别为第 i 辆电动汽车最小和最大电池剩余容量。

3) 电量平衡约束

$$\eta_i^{z,y} \sum_{t=t_{in}}^{t=t_{de}} (P_{EV_i}^{z,y})_t \Delta T = E_i^{z,y} ((\text{SOC}_i^{z,y})_T - (\text{SOC}_i^{z,y})_t). \quad (23)$$

式中: $\eta_i^{z,y}$ 为节点 i 在 y 相的电动汽车 z 的充电效率; $E_i^{z,y}$ 为节点 i 在 y 相的电动汽车 z 的电池容量; $(\text{SOC}_i^{z,y})_T$ 为节点 i 在 y 相的电动汽车 z 在 T 时间周期后剩余电量, $(\text{SOC}_i^{z,y})_t$ 为 t 时刻节点 i 在 y 相接入的第 z 辆电动汽车的剩余电量。

2.3.3 其他约束

1) 电压约束

$$U_i^{\min} \leq U_i(t) \leq U_i^{\max}. \quad (24)$$

式中: $U_i^{\min}$ 、 $U_i^{\max}$ 分别为节点 i 的最小和最大允许电压幅值。

2) 电流约束

$$I_i(t) \leq I_i^{\max}. \quad (25)$$

式中: $I_i^{\max}$ 为第 i 条支路流过电流的最大值。

3) 充电桩数量约束

由于每相充电桩的数量是固定的,在充电过程中每相选入的电动汽车数量是有限的。

$$0 \leq M_i^y \leq N_i^y. \quad (26)$$

式中: M_i^y 为节点 i 在 y 相接入的电动汽车数量, N_i^y 为节点 i 在 y 相充电桩数量上限。

3 双层求解流程

三相不平衡潮流计算是得到电压质量指标的基础,在每一时刻电动汽车充电并网时,均需通过三相潮流计算得到电压质量数据。根据第 1 节中建立的电动汽车负荷和风电出力模型,采用蒙特卡洛模拟(Monte Carlo Simulation, MCS)得到日电动汽车负荷和风电出力,在确定系统基础参数和约束条件后通过外层三相潮流,计算电动汽车接入时的配电网电压质量,然后传递到内层结合目标函数,由 PO 算法求解得到不同充电策略,并返回到外层计算对各电压质量的改善情况,最终由隶属度函数得到最优分相充电策略。双层算法流程如图 3 所示。

3.1 算法外层

算法外层主要结合内层传递的电动汽车负荷,

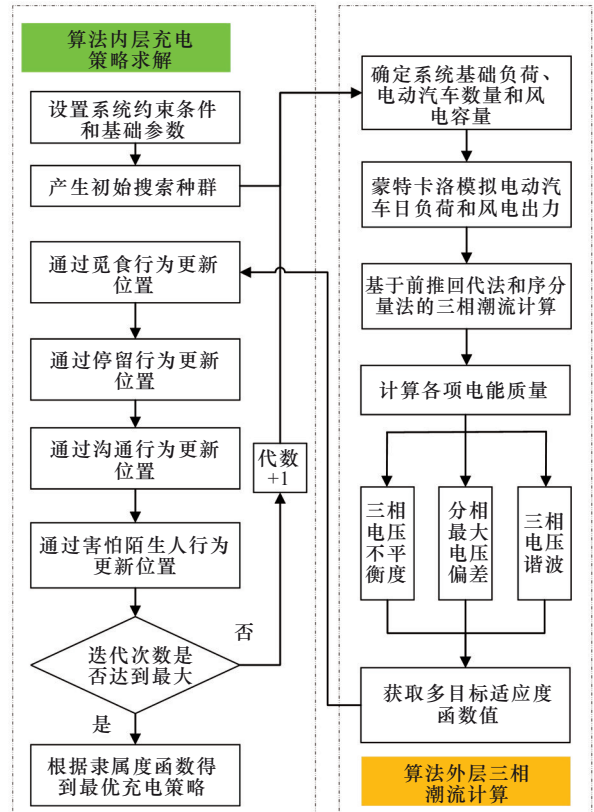


图 3 双层优化算法流程

Fig.3 Bilayer optimization algorithm flow

通过潮流计算求解不同充电策略下配电网电压质量。由于不平衡配电网本身三相参数不对称、三相负荷不平衡的特点,加之单相电动汽车和风电的无序并网充电,不能简单地对三相网络采用等效单相潮流计算方法。本文基于前推回代法进行三相潮流计算^[27]分相电压质量,方法如下:

1) 确定系统初始状态

给定系统电网线路、负荷参数、电动汽车并网数量,通过 MCS 得到电动汽车日负荷大小。

2) 建立导纳矩阵和初始节点电压

依据配电网基础线路情况,建立正、负、零序节点导纳矩阵,分别表示为 Y_1 、 Y_2 、 Y_0 。设节点 k 的初始正、负、零序电压分别为 U_k^1 、 U_k^2 、 U_k^0 ,取正序电压幅值为 1.0 p. u., 负序和零序电压幅值为 0。

3) 注入节点电流的计算方法

$$\dot{I}_{kd,it}^{1,2,0} = T \dot{I}_{kd,it}^{a,b,c}. \quad (27)$$

$$\dot{I}_{kd,it}^{a,b,c} = \frac{\dot{S}_y^*}{\dot{U}_y^*}. \quad (28)$$

$$T = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (29)$$

式中, $\dot{I}_{kd,it}^{1,2,0}$ 为正、负、零三序电流向量; $\dot{I}_{kd,it}^{a,b,c}$ 为 a 、 b 、 c

三相电流; T 为相序转换矩阵; $\dot{S}_y^*$ 为节点三相负荷矩阵; $\dot{U}_y^*$ 为节点三相电压矩阵。

4)注入电流和功率更新情况

$$\dot{I}_{k,it}^{1,2,0} = \sum \dot{I}_{kd,it}^{1,2,0} + \sum \dot{I}_{kl,it}^{1,2,0}. \quad (30)$$

式中, $\dot{I}_{kd,it}^{1,2,0}$ 为负荷序注入电流; $\dot{I}_{kl,it}^{1,2,0}$ 为配电网线路上的序注入电流。

$$\dot{S}_{k,it}^{1,2,0} = \sum \dot{S}_{kd,it}^{1,2,0} + \sum \dot{S}_{kl,it}^{1,2,0}. \quad (31)$$

式中, $\dot{S}_{kd,it}^{1,2,0}$ 为负荷序注入电流; $\dot{S}_{kl,it}^{1,2,0}$ 为配电网线路上的序注入电流。

5)迭代生成电压

基于单相前推回代法得到下一次正序的迭代节点电压,结合节点电压方程得到下一次无序和零序的节点电压,生成 $it+1$ 次各节点相电压。

$$\dot{U}_{it+1}^{a,b,c} = T^{-1} \dot{U}_{it+1}^{1,2,0}. \quad (32)$$

6)判断收敛

以第 it 次和第 $it+1$ 次迭代的各相电压差最大值 ΔU 作为迭代结束的标志,自步骤3)开始进行下一次迭代。当满足下列迭代条件时,输出结果;当不满足时,则重复步骤3)-6)。

$$\Delta U = \max |\dot{U}_{it+1}^{a,b,c} - \dot{U}_{it}^{a,b,c}| < \epsilon. \quad (33)$$

7)计算各项电压质量指标

由各相节点电压计算三相电压不平衡度、分相最大电压偏差和电压谐波等电压质量指标结果,并传递到算法内层。

3.2 算法内层

算法内层接收外层传递的电压质量,由PO优化算法计算最优分相充电策略。PO算法包含觅食、停留、交流和对陌生人的恐惧四种行为,首先随机生成一组预定义的候选解决方案,利用一系列行为,导航最优解决方案附近的位置或发现最佳解决方案的位置。同时每次迭代动态随机变化个体的行为,其中交流行为保证个体间的社会交流和信息传递,从而使得每个解决方案都会动态调整其位置,并受目前最优解决方案的影响,持续到满足预定的条件为止。PO算法增强了种群随机性和多样性,在全局搜索阶段保持高效的搜索能力,同时在局部搜索阶段迅速收敛到最优解,显著提升了整体收敛能力。

1)种群初始化

种群规模为 N ,最大迭代次数 Max_{iter} ,搜索空间上下限为 b_u 和 b_l ,可以显示为:

$$X_w^0 = b_l + \text{rand}(0,1) \cdot (b_u - b_l). \quad (34)$$

式中, $\text{rand}(0,1)$ 为 $[0,1]$ 范围内的随机数,并且 X_w^0 表示第 w 个鸚鵡的初始位置。

2)觅食行为

在PO觅食行为中,通过观察食物位置或者是主人位置来估计食物的大致位置,然后飞向各自的位置,其中位置运动遵循下式:

$$X_w^{d+1} = (X_w^d - X_{\text{best}}) \cdot \text{Levy}(\text{dim}) + \text{rand}(0,1) \cdot \left(1 - \frac{t}{\text{Max}_{\text{iter}}}\right)^{\frac{2d}{\text{Max}_{\text{iter}}}} \cdot X_{\text{mean}}^d. \quad (35)$$

式中, X_w^d 为当前位置, X_w^{d+1} 表示更新后的位置, X_{best} 表示初始化到当前搜索到的最佳位置,也表示主人的当前位置, $\text{Levy}(\text{dim})$ 为Levy分布,用于描述鸚鵡飞行, d 表示当前迭代次数, X_{mean}^d 为当前种群的平均位置。上式前半项表示根据自己相对于主人的位置进行移动,后半项表示观察整个种群的位置,以进一步确定食物的方向。

当前种群的平均位置 X_{mean}^d 由下式表示:

$$X_{\text{mean}}^d = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X_k^d. \quad (36)$$

根据下列公式中的规则可以得到Levy分布,其中 γ 赋值为1.5。

$$\begin{cases} \text{Levy}(\text{dim}) = \frac{\mu \sigma}{|v|^{\frac{1}{\gamma}}}, \\ \mu \sim N(0, \text{dim}), \\ v \sim N(0, \text{dim}), \\ \sigma = \left(\frac{\Gamma(1+\gamma) \cdot \sin(\frac{\pi\gamma}{2})}{\Gamma(\frac{1+\gamma}{2}) \cdot \gamma \cdot 2^{\frac{1+\gamma}{2}}} \right)^{1+\gamma}. \end{cases} \quad (37)$$

3)停留行为

PO的停留行为主要包括突然飞到主人身体的任何部位并静止一段时间,可表示为:

$$X_w^{d+1} = X_w^d + X_{\text{best}} \cdot \text{Levy}(\text{dim}) + \text{rand}(0,1) \cdot \text{ones}(1, \text{dim}). \quad (38)$$

式中, $\text{ones}(1, \text{dim})$ 表示维度 dim 的全1向量, $X_{\text{best}} \cdot \text{Levy}(\text{dim})$ 表示飞往主人的过程, $\text{rand}(0,1) \cdot \text{ones}(1, \text{dim})$ 表示随机停留在主人身体的某一部位。

4)沟通行为

沟通行为主要为群体内的密切交流,行为包括飞向鸟群和不飞向鸟群的沟通。在PO中,假设这两种行为发生的概率相等,并使用当前种群的平均位置来象征群体的中心,可以表示为:

$$X_w^{d+1} = \begin{cases} 0.2\text{rand}(0,1) \cdot (1 - \frac{d}{\text{Max}_{\text{iter}}}) \cdot (X_w^d - X_{\text{mean}}^d), P \leq 0.5, \\ 0.2\text{rand}(0,1) \cdot \exp(-\frac{d}{\text{rand}(0,1)\text{Max}_{\text{iter}}}) \cdot (X_w^d - X_{\text{best}}^d), P > 0.5. \end{cases} \quad (39)$$

式中, $P \leq 0.5$ 时表示个人加入鸚鵡群体进行交流, $P > 0.5$ 表示个体在交流后立即飞出的过程。

个体通常与不熟悉的个体保持距离, 与主人一起寻找安全的环境, 可用下公式表示:

(5) 对陌生人行行为的恐惧

$$X_w^{d+1} = X_w^d + \text{rand}(0,1) \cdot \cos(0.5\pi \cdot \frac{d}{\text{Max}_{\text{iter}}}) \cdot (X_{\text{best}}^d - X_w^d) - \cos(\text{rand}(0,1) \cdot \pi) \cdot (\frac{2}{\text{Max}_{\text{iter}}})^{\frac{2}{\text{Max}_{\text{iter}}}} \cdot (X_w^d - X_{\text{best}}^d). \quad (40)$$

式中, 前半项表示重新定向以飞向主人的过程, 后半项表示远离陌生人的过程。

6) 算法内层计算流程

① 初始化种群。根据电动汽车初始接入情况, 和算法外层电压质量的传递结果, 通过式(12)、(14)和(15)计算多目标适应度函数值。

② 觅食行为。通过式(35)的觅食行为更新种群位置。

③ 保持行为。通过式(38)的保持行为更新种群位置。

④ 沟通行为。通过式(39)的沟通行为更新种群位置。

⑤ 远离陌生人行行为。通过式(40)的远离模式人行行为更新种群位置。

⑥ 迭代次数。判断是否满足最大迭代次数, 若未满足, 将不同电动汽车充电策略返回到外层继续进行三相潮流计算, 重复步骤①—⑤, 直到满足要求。

⑦ 最终结果。由隶属度函数计算得到 Pareto 解集中最优分相充电策略。

4 算例分析

4.1 基础数据

采用修改的 IEEE-33 节点系统, 验证本文所提考虑分相电压质量的电动汽车充电策略的有效性。分别在配电网的 17 节点和 31 节点接入 1 200 辆、800 辆电动汽车, 在 12 个节点共接入 3.36 MW 分布式风电, 三相均有接入且容量比例为 6:4:5, 接入位置如图 4 所示, 电动汽车及风电出力如图 5 所示。系统基准容量和基准电压分别设置为 $S_{\text{base}} = 100 \text{ MVA}$ 、 $U_{\text{base}} = 12.66 \text{ kV}$, 网络的基础有功负荷为 11.145 MW, 无功负荷为 6.9 Mvar, 33 个节点及并网点基础负荷如图 6 所示。

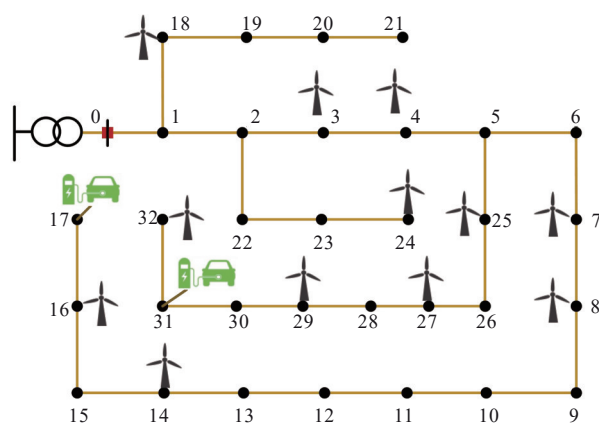


图 4 IEEE-33 节点示意图

Fig.4 IEEE-33 node schematic diagram

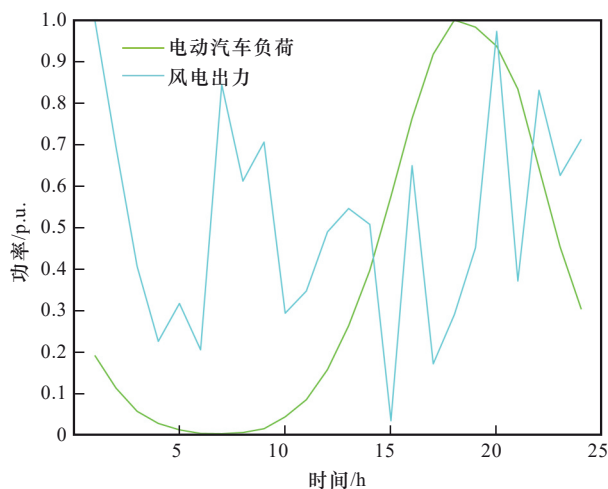


图 5 电动汽车负荷与风电出力值

Fig.5 EV load and wind power output

4.2 电动汽车充电并网结果

图 7 中(a)和(b)分别为无序和本文充电策略情况下并网点电动汽车三相负荷接入情况。电动汽车无序接入时, 三相电动汽车负荷不均匀接入三相, 在 C 相接入的电动汽车负荷最大, 与基础负荷叠加后加剧了系统三相负荷不均匀的程度; 而考虑充电策略, 电动汽车负荷以三相不平衡度、分相最大

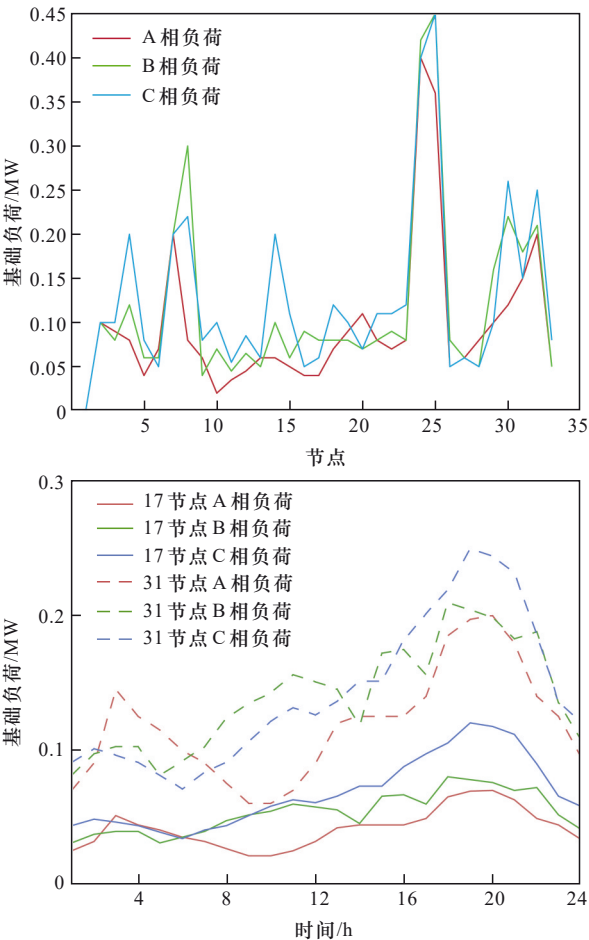


图6 配电网各节点与并网点三相基础负荷图

Fig.6 Three-phase base load diagrams for distribution network nodes and access points

电压偏差和并网点电压谐波最小为目标,在 A 相接入较多电动汽车负荷,以平衡基础三相负荷。

为了充分反映本文充电策略对提升配电网电压质量的有效性,设置 6 种场景进行分析对比。场景 1,电动汽车平均接入三相充电;场景 2,电动汽车无序接入三相充电;场景 3,按照本文三个电压质量最小为目标的分相充电接入;场景 4,仅考虑三相电压不平衡度最小;场景 5,仅考虑分相最大电压偏差最小;场景 6,仅考虑并网点电压谐波畸变率最小。通过 PO 优化算法求解得到多目标函数值,选择隶属度函数计算最大值作为最优解。为便于理解和分析计算结果,采用平均值和最大值反映电压质量的改善情况,不同场景下的配电网电压质量情况如表 1 所示。

分析表 1 中场景 1、2、3 的结果可知,电动汽车平均和无序接入时,各项指标均有所增加,这是因为平均和无序充电下未能平抑新能源出力,与基础电网负荷叠加后加剧了三相负荷差。而本文充电策略下的电动汽车并网充电对电压质量水平有明

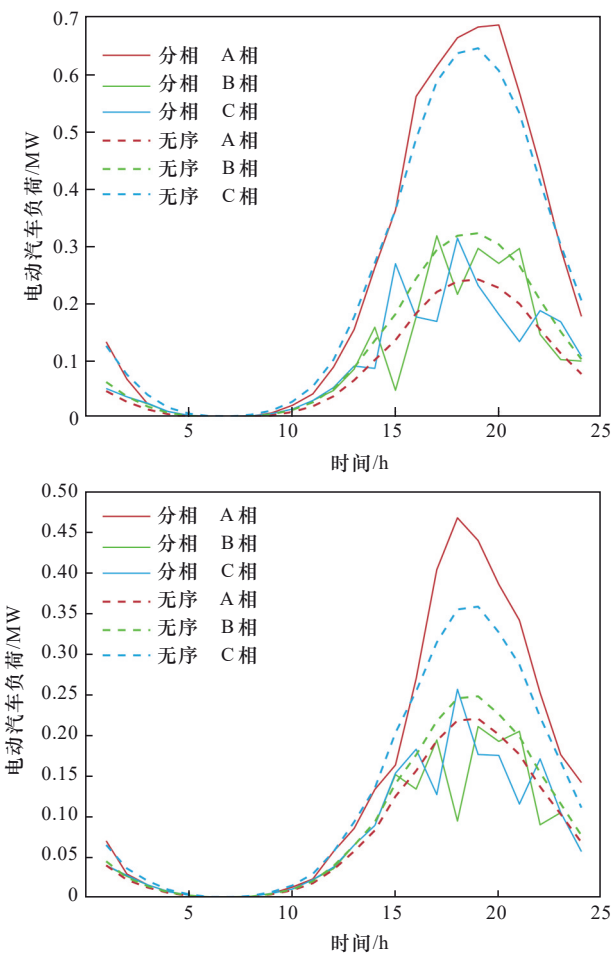


图7 分相接入前后并网点三相电动汽车负荷分布

Fig.7 Load distributions of three-phase EV at access points before and after split-phase access

表 1 不同场景接入下配电网整体电压质量

Table 1 Overall voltage qualities of distribution network under different scenario accesses

场景	三相电压不平衡/%		分相最大电压偏差/%		并网点电压谐波/%	
	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值
1	0.58	2.65	3.93	8.43	0.17	0.39
2	0.67	3.67	4.14	10.68	0.18	0.61
3	0.37	1.83	3.72	7.17	0.17	0.48
4	0.44	1.92	3.68	6.61	0.17	0.50
5	0.53	1.96	3.88	8.05	0.17	0.33
6	0.43	1.91	3.71	6.74	0.17	0.48

显改善,系统电压不平衡度均值相较平均接入情况降低了 25.86%,较无序接入情况降低了 35.82%;最大分相电压偏差平均值较平均接入情况降低了 5.59%,较无序接入情况降低了 10.39%;并网点电压谐波均值较无序接入情况降低了 5.56%。在最大值方面,平均和无序接入下的三相不平衡度和电压偏差均大于国标限制的 2% 和 7%,产生不同程度的越限,并且无序接入比平均接入的越限程度更

大,而采用本文充电策略,能够保证电压质量符合国标要求。由此可见电动汽车并网充电时,无序选择充电桩充电会造成严重的电压质量越限情况,简单的平均选桩也无法满足新能源接入下的电压质量要求,有必要对电动汽车分相充电,保证大部分时段电压质量符合要求。

分析场景 4、5、6 可知,在以单个目标最优求解时,均能有效改善系统整体电压质量,对应单项电压质量目标可以实现最优,最大三相电压不平衡、三相电压偏差和并网点电压谐波畸变率分别为 1.83%、6.61% 和 0.33%,但相应地其他两项电压质量会有不同程度的增加。相比之下,本文的充电策略能够实现三项电压质量综合最优。

4.3 接入点电压质量改善情况

从上文可以看出电动汽车分相接入后对系统全天总的电压质量有所改善。本节具体分析所提模型对接入节点各个时刻电压质量的影响,并验证

本文充电策略对系统电压质量提升的有效性。

电动汽车三种接入情况下系统与并网点三相电压不平衡度如图 8 所示。由图 8(a)、(b)、(c)可以明显看出电动汽车平均和无序接入导致多个节点在多个时刻产生三相不平衡度越限,本文充电策略极大降低了配电网全天尤其是晚上用电高峰时刻的三相不平衡度;由图 8(d)可以看出在本文充电策略下,17 节点和 31 节点全天的三相不平衡度整体下降,17 节点较平均充电平均降低 27.09%,较无序充电平均降低 34.10%;31 节点较平均充电平均降低 22.03%,较无序充电平均降低 26.00%。在采用本文所提充电策略后,全天尤其是在电动汽车负荷接入较多的时刻,三相电压不平衡度明显下降,并不再发生越限情况,这是因为通过分相充电在并网点将电动汽车负荷选择接入到负荷较低和风电出力较大的相位,实现三相总负荷的平衡。

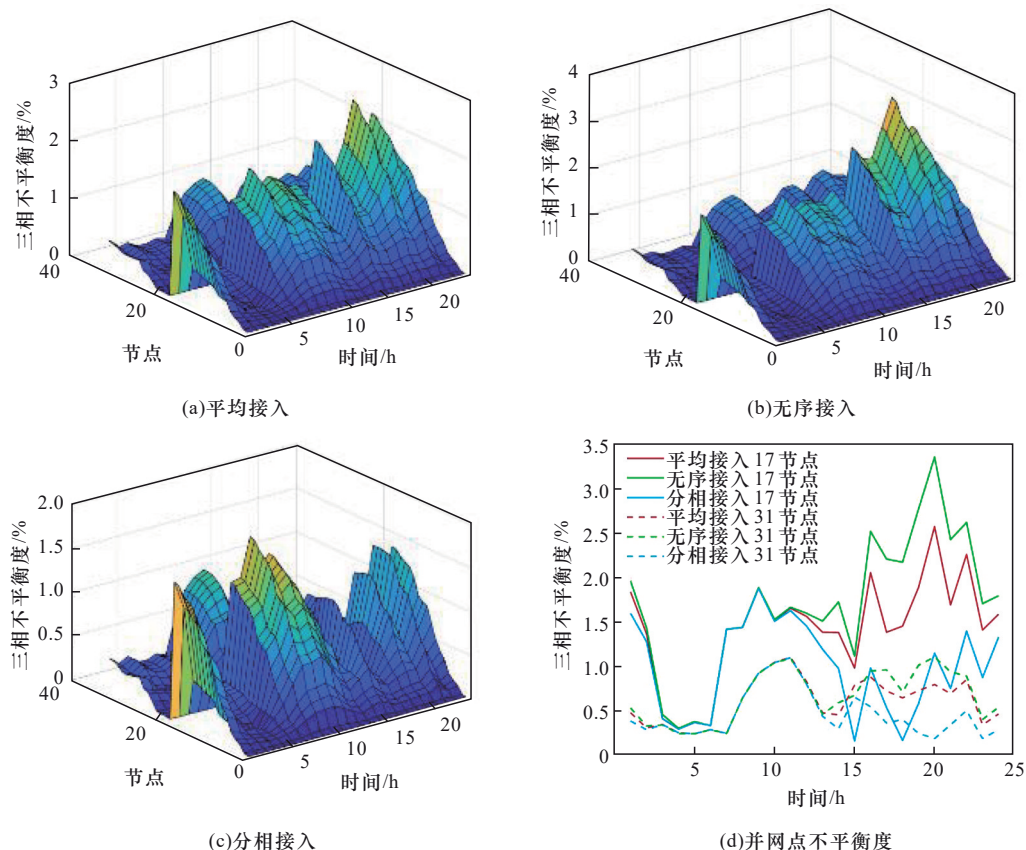


图 8 电动汽车分相接入前后整体三相不平衡度

Fig.8 Overall three-phase unbalances before and after split-phase access for EV

电动汽车分相接入前后并网点电压偏差如图 9 所示。从图 9(a)和(c)可以看出分相接入后将 17 节点分相最大电压偏差从平均和无序的 10.68% 和 8.43% 降低到 6.74%,而 31 节点则从平均和无序

的 5.25% 和 6.11% 降低到 4.35%;由图 9(b)和(d)可得,分相后在系统负荷小和风电出力大的分相接入较多电动汽车负荷,使三相负荷相对接近,从而三相电压偏差相较无序接入更加均匀,并且在电动

汽车负荷量越大的时刻对电压偏差降低越为明显,并网后配电网各时刻电压偏差符合国标要求。

电动汽车分相和无序接入前后系统电压谐波如图10(a)和(b)所示,分别为17和31节点分相接入前后三相电压谐波。谐波大小主要与电动汽车

接入负荷大小相关,随着无序充电C相电动汽车负荷最大到有序充电A相电动汽车负荷最大的转变,电压谐波畸变率也从C相最大转变为A相最大,并且在合理分配电动汽车负荷情况下,谐波最大值有所下降,整体谐波畸变率也有所降低。

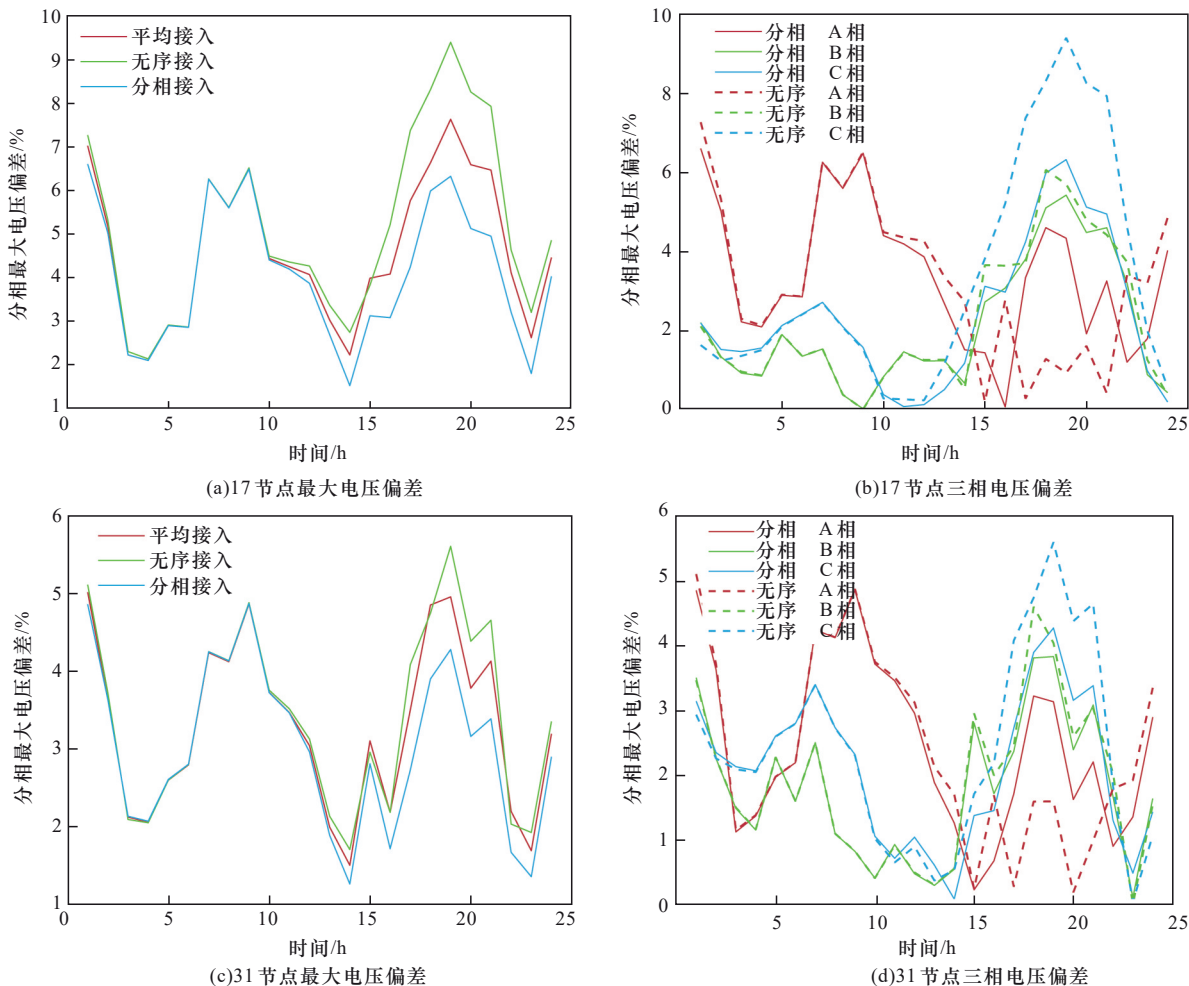


图9 并网点分相接入前后电压偏差

Fig.9 Voltage deviations before and after split-phase access at access points

4.4 不同数量电动汽车下充电策略影响分析

为了验证不同数量电动汽车接入下本文充电策略对电压质量的优化,计算1 000~5 000辆电动汽车在17节点无序接入和分相接入时的电压质量变化,无序接入三相电动汽车数量按照0.7:0.9:1.4并网,分相接入采取本文充电策略方法,风电仍然采用上述接入方式,结果如图11所示。

结果表明,电动汽车平均和无序接入下最大三相电压不平衡度、分相最大偏差和并网点电压谐波畸变率随电动汽车数量的增加而增大,其中无序接入造成严重的越限情况。而平均接入虽然能够一定程度降低电压质量,但由于风电的存在,无法有效消纳其出力,仍然产生一定程度越限。而分相接

入时三个电压质量均有所改善,并且三相电压不平衡度保持稳定水平,不发生越限。这是因为更多的电动汽车负荷接入到A相以平衡三相负荷差,证明了电动汽车负荷在合理分相并网时不仅不会增大三相负荷不平衡的压力,还能够消纳新能源出力,降低三相电压不平衡度,并且保证电压偏差和电压谐波也有所降低。

5 结语

为提升含电动汽车和分布式风电配电网的电压质量,本文提出一种计及分相电压质量的电动汽车充电策略,结合分相电压谐波、分相电压偏差和三相电压不平衡三个指标,分析本文充电策略对电

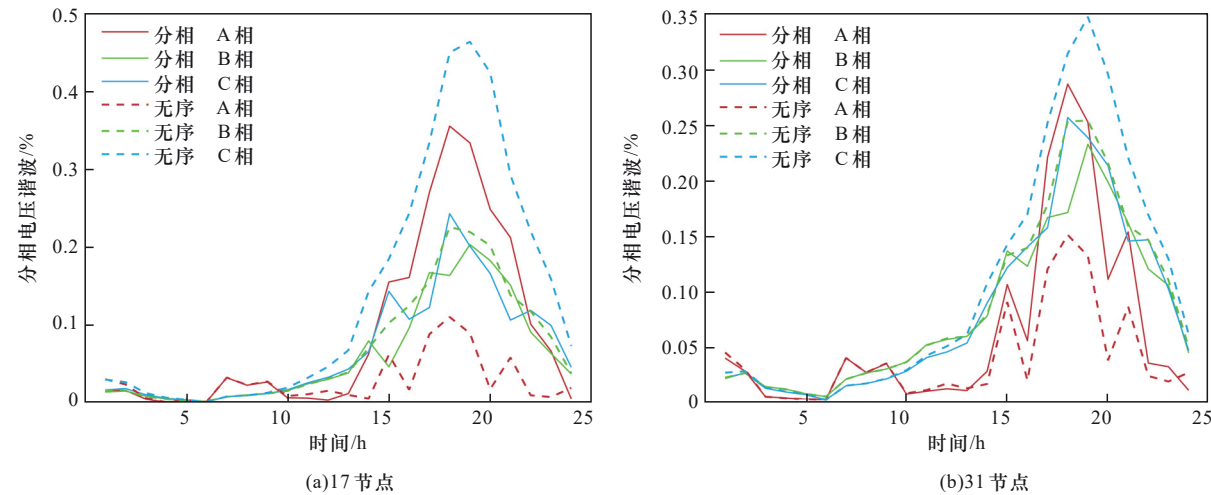


图 10 分相接入前后并网点三相电压谐波
Fig.10 Three-phase voltage harmonics at access points before and after split-phase access

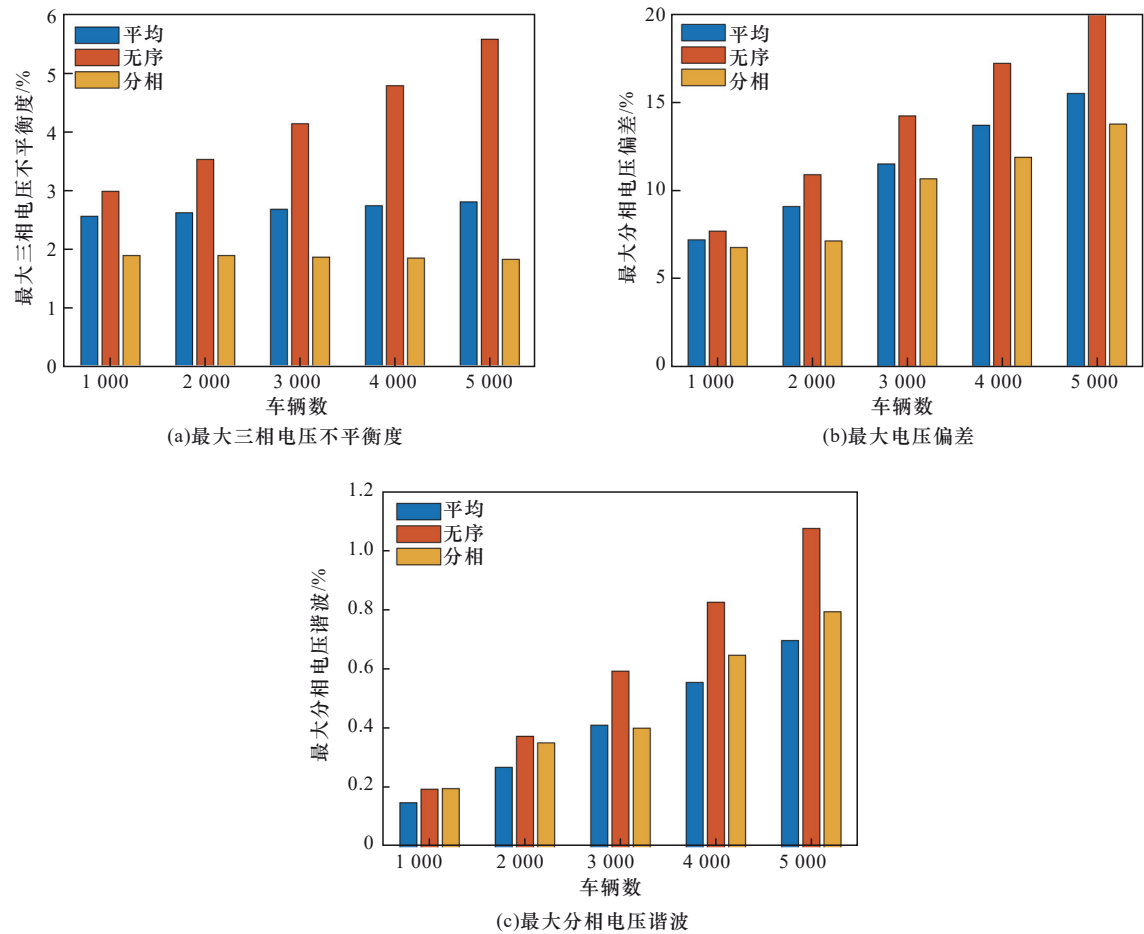


图 11 不同数量电动汽车分相接入前后 17 节点电压质量

Fig.11 Voltage qualities at 17 node before and after split-phase access with different numbers of EVs that are accessed

压质量改善情况,得出结论如下。

1)外层采用基于序分量法的三相潮流计算,结合前推回代法计算系统三相电压和电压质量指标,并将结果传递给内层。内层采用新型 PO 算法,以三个电压质量指标最小为目标,根据 Pareto 前沿优

化得到各相充电功率,与外层循环传递得到最优充电策略。

2)相比于无序充电,本文所提充电策略对分相电压谐波、分相电压偏差和三相电压不平衡分别降低 5.56%、10.39%、35.82%,并且全时刻满足国标

要求,提升了系统电压质量。

3)随着电动汽车数量的增加,电动汽车分相接入相比于平均和无序接入起到一定改善作用,证明了电动汽车负荷在合理分相并网时不仅能够缓解三相负荷不平衡的压力,还有助于消纳新能源

出力。

本文所提的电动汽车充电策略适用于充电站的充电分相控制。未来可以进一步考虑电动汽车主非完全理性充电情况以及研究电动汽车充电分相引导电价等。

参考文献:

- [1] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于进一步构建高质量充电基础设施体系的指导意见[EB/OL]. [2023-06-19]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202306/cotent_6887167.htm.
- [2] 程湘,田昊,周群,等. 考虑相位不平衡的智能换相开关控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(6):48-55.
CHENG X, TIAN H, ZHOU Q, et al. Control strategy of intelligent commutation switch considering phase imbalance[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6):48-55.
- [3] 曾梦隆,韦钢,朱兰,等. 交直流配电网中电动汽车充换储一体站规划[J]. 电力系统自动化,2021,45(18):52-60.
ZENG M L, WEI G, ZHU L, et al. Planning of electric vehicle charging-swapping-storage integrated station in AC/DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(18):52-60.
- [4] 黄存强,王玉,米金梁,等. 基于有源功率因数校正的电动汽车直流充电系统接入对电网谐波的影响研究[J]. 高电压技术,2023,49(S1):239-246.
- [5] 赵黄江,向月,刘俊勇,等. 基于改进配电网安全域的规模化电动汽车并网影响分析[J]. 电力自动化设备,2021,41(11):66-73.
ZHAO H J, XIANG Y, LIU J Y, et al. Analysis on impact of large-scale electric vehicles integration based on improved security region of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(11):66-73.
- [6] 王伟杰,黄海宇,徐远途,等. 电动汽车参与主动配电网电压调控的策略研究[J]. 广东电力,2023,36(10):93-104.
WANG W J, HUANG H Y, XU Y T, et al. Strategy research on electric vehicles participating in active distribution network voltage regulation[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(10):93-104.
- [7] 李怡然,张姝,肖先勇,等. V2G模式下计及供需两侧需求的电动汽车充放电调度策略[J]. 电力自动化设备,2021,41(3):129-135.
LI Y R, ZHANG S, XIAO X Y, et al. Charging and discharging scheduling strategy of EVs considering demands of supply side and demand side under V2G mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3):129-135.
- [8] 王岩庆,王骁,丛若晨,等. 考虑配电网运行安全的出行电动汽车充电引导策略[J]. 高电压技术,2023,49(5):2131-2139.
WANG Y Q, WANG X, CONG R C, et al. Charging guidance strategy of traveling electric vehicle considering the operation safety of distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5):2131-2139.
- [9] 胡俊杰,赖信辉,郭伟,等. 考虑电动汽车灵活性与风电消纳的区域电网多时间尺度调度[J]. 电力系统自动化,2022,46(16):52-60.
HU J J, LAI X H, GUO W, et al. Multi-time-scale scheduling for regional power grid considering flexibility of electric vehicle and wind power accommodation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(16):52-60.
- [10] 张良,孙成龙,蔡国伟,等. 基于PSO算法的电动汽车有序充放电两阶段优化策略[J]. 中国电机工程学报,2022,42(5):1837-1852.
ZHANG L, SUN C L, CAI G W, et al. Two-stage optimization strategy for coordinated charging and discharging of EVs based on PSO algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5):1837-1852.
- [11] 王一飞,王秀丽,黄晶,等. 动态电价机制下电动汽车竞争性充电的阻塞管理模型[J]. 电力系统自动化,2023,47(12):103-110.
WANG Y F, WANG X L, HUANG J, et al. Congestion management model for competitive charging of electric vehicles under dynamic electricity price mechanism[J]. Automation of Electric Power systems, 2023, 47(12):103-110.
- [12] 方恒福,盛万兴,王金丽,等. 配电台区三相负荷不平衡实时在线治理方法研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(9):2185-2193.
FANG H F, SHENG W X, WANG J L, et al. Research on the method for real-time online control of three-phase unbalanced load in distribution area[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9):2185-2193.
- [13] 丁石川,崔康,杭俊,等. 基于改进NSGA-3和不平衡潮流的配电网相序优化[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(3):46-55.
DING S C, CUI K, HANG J, et al. Phase sequence optimization of a distribution network based on improved NSGA-3 and unbalanced power flow[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3):46-55.

- [14] 陈家超,李钦豪,唐渊,等.考虑光伏选相投切的低压配电网三相平衡优化[J].电力自动化设备,2022,42(4):71-78.
CHEN J C,LI Q H,TANG Y,et al. Three-phase balance optimization of low-voltage distribution network considering photovoltaic phase selection and switching[J]. Electric Power Automation Equipment,2022,42(4):71-78.
- [15] 占恺峤,胡泽春,宋永华,等.考虑三相负荷平衡的电动汽车有序充电策略[J].电力系统自动化,2015,39(17):201-207.
ZHAN K Q,HU Z C,SONG Y H,et al. A coordinated charging strategy for electric vehicles three-phase load balance[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(17):201-207
- [16] 苏海锋,赵可为,李岩,等.规模化电动汽车三相负荷平衡充电选线装置与仿真分析[J].电力自动化设备,2018,38(6):103-108.
SU H F,ZHAO K W,LI Y,et al. Three-phase load balancing charging line selection device and simulation analysis of large-scale electric vehicle[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(6):103-108.
- [17] 符杨,孟祥浩,苏向敬,等.考虑逆变器无功支撑和三相选择的不平衡主动配电网电动汽车有序充电控制[J].电力自动化设备,2020,40(12):1-12.
FU Y,MENG X H,SU X J,et al. Coordinated charging control of PEV considering inverter's reactive power support and three phase switching in unbalanced active distribution networks[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(12):1-12.
- [18] 赵云龙,车仁飞,陈家辉.基于差分进化算法的配电网智能换相策略[J].山东大学学报(工学版),2021,51(5):107-113,121.
ZHAO Y L,CHE R F,CHEN J H,et al. Intelligent commutation system of distribution network based on differential evolution algorithm[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science),2021,51(5):107-113,121.
- [19] 张公凯,陈才学,郑拓.改进鲸鱼算法在电动汽车有序充电中的应用[J].计算机工程与应用,2021,57(4):272-278.
ZHANG G K,CHEN C X,ZHENG T. Application of improved whale optimization algorithm in ordered charging of electric vehicle[J]. Computer Engineering and Applications,2021,57(4):272-278.
- [20] 闫丽梅,罗晴川.基于改进麻雀搜索算法的电动汽车充电站规划[J].广东电力,2022,35(9):56-66.
YAN L M,LUO Q C. Electric vehicle charging station planning based on improved sparrow search algorithm[J]. Guangdong Electric Power,2022,35(9):56-66.
- [21] 金志刚,胡怡,李根,等.面向“代客加电”服务的电动汽车充电引导策略[J].电力系统保护与控制,2022,50(14):76-84.
JIN Z G,HU Y,LI G,et al. Charging guiding strategy for electric vehicles oriented to a valet charging service[J]. Power System Protection and Control,2022,50(14):76-84.
- [22] Federal Highway Administration. National household travel survey(2017) [DB/OL]. (2019-04-23) [2024-12-17]. <https://nhts.ornl.gov>.
- [23] 陈子辉,吴智影,刘贺,等.电压偏差及三相不平衡对电缆线路损耗的影响[J].广东电力,2020,33(5):125-132.
CHEN Z H,WU Z Y,LIU H,et al. Influence of voltage deviation and three-phase unbalance on cable line loss[J]. Guangdong Electric Power,2020,33(5):125-132.
- [24] 李彦晨,贾燕冰,谢栋,等.计及电能质量影响的配电网风储优化配置[J].电网技术,2023,47(6):2391-2404.
LI Y C,JIA Y B,XIE D,et al. Optimal configuration of wind turbine and energy storage system in distribution network considering influence of power quality[J]. Power System Technology,2023,47(6):2391-2404.
- [25] 蒙绍新,钱科军,王航,等.考虑谐波的电动汽车充电策略及对配电网电缆载流能力和热寿命的影响[J].高电压技术,2020,46(4):1269-1280.
MENG S X,QIAN K J,WANG H,et al. Impact of EV charging strategies on ampacity and thermal life of distribution cables with consideration of harmonic distortions[J]. High Voltage Engineering,2020,46(4):1269-1280.
- [26] 王子辉,贾燕冰,李彦晨,等.计及电能质量影响的主动配电网光储容量优化[J].电网技术,2024,48(2):607-620.
WANG Z H,JIA Y B,LI Y C,et al. Optimal capacity configuration of photovoltaic and energy storage system in active distribution network considering influence of power quality[J]. Power System Technology,2024,48(2):607-620.
- [27] HUANG J,WANG X L,WANG Y F,et al. A game-theoretic approach for electric vehicle aggregators participating in phase balancing considering network topology[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2020,15(1):743-756.

(编辑:杨 鹏)