

基于电动汽车 V2G 的充放电策略优化研究

李飞 史轮 陈磊 申洪涛 吴一敌 武光华 申雪昀

国网河北省电力有限公司营销服务中心, 河北省石家庄, 050035;

摘要: 随着电动汽车规模增长, 其无序充电对配电网造成的峰荷压力愈加突出。社区作为私家车主要充电场景, 充电行为受用户出行随机性影响, 易产生负荷峰-峰现象。为提升电动汽车对电网的友好性, 本文构建了基于车网互动 (V2G) 与分时电价的充放电优化模型, 以峰谷差、网荷波动与用户成本为综合目标, 并提出改进骨干粒子群优化算法 (IBBPSO)。算法引入认知系数、高斯与柯西混合扰动及边界再分配机制, 并结合贝叶斯优化实现参数自适应调整。研究表明, 该策略可有效降低负荷峰谷差、提升负荷利用率并减少用户费用。

关键词: 电动汽车; 需求侧响应; 车网互动; 分时电价; 有序充放电

DOI: 10.69979/3041-0673.26.04.018

引言

随着可再生能源和自动驾驶技术的发展, 由于充电高峰负荷与社区用电高峰负荷重叠, 大范围的电动汽车无序充电可能会增加电力系统的峰谷差。如果管理不准确, 电动汽车与电网连接和断开的随机性会增加电网的不稳定性并影响其运行^[3]。本研究旨在缓解电网负荷曲线中的峰谷差异和波动, 同时努力减少用户产生的收费费用。

1 基于 V2G 与分时电价的有序充放电策略优化模型

1.1 基于 V2G 的分时定价收费模式

1.1.1 电网负荷峰谷差

$$H_{2obj} = [\max(P(t)) - \min(P(t))] \quad (5)$$

$$l_{i,j} = \begin{cases} N \left(\frac{a1l_{pbest_{i,j}} + a2l_{gbest_{i,j}}}{2}, |l_{pbest_{i,j}} - l_{gbest_{i,j}}| \right) & \text{if } U(0,1) < p, \\ l_{gbest_{i,j}} & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (9)$$

其中, $a1$ 和 $a2$ 是学习因子, 遵守 $a1 + a2 = 1$ 约束。 $U(0,1)$ 指从 0 到 1 的均匀分布, p 代表使用高斯抽样

$$l_j = \begin{cases} S_{\min}(j) + \text{rand}(S_{\max}(j) - S_{\min}(j))\alpha, & \text{if } x_j < S_{\min}(j) \\ S_{\max}(j) + \text{rand}(S_{\max}(j) - S_{\min}(j))\alpha, & \text{if } x_j > S_{\max}(j) \end{cases} \quad (10)$$

其中, S_{\max} 和 S_{\min} 是粒子的边界值。与高斯分布相比, 柯西分布包含了更大的值域。因

$$F(t) = F_{\text{base}}(t) + \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^N p(i,t) \quad (6)$$

其中, $F_{\text{base}}(t)$ 表示 t 时刻电网的基本负荷, $p(i,t)$ 表示电动汽车接入电网时带来的额外负荷。

1.1.2 电网负荷波动

$$H_{3obj} = \sum_t \left(F_{\text{base}}(t) + \sum_{i=1}^N p(i,t) - P_{av} \right)^2 \quad (7)$$

$$X_{av} = \frac{\sum_t \left(F_{\text{base}}(t) + \sum_{i=1}^N p(i,t) \right)}{T} \quad (8)$$

其中, X_{av} 表示整合电动汽车后电网的平均电力需求。

2 改进的骨干粒子群优化

为了加速算法收敛, 每个元素都有一个与全局最优 $lgbest_{i,i}$ 一致的内在概率。计算公式如下:

方法生成种群的概率。

此, 引入时间变异的柯西变异机制增强了解集的变异性。

3 基于贝叶斯优化的调整策略

在 BO 框架内考虑超参数集, 包括总体大小、迭代次数和适应度函数中的权重, 以进行自动调整:

$$\theta := [a, b, c, \text{numP}, \text{maxIter}] \quad (11)$$

本文选择高斯过程作为替代模型, 通过协方差函数 $k(\theta, \theta')$ 均值 $m(\theta)$ 来定义高斯过程的显著性。定义要评估的函数 $J(\theta)$ 。高斯过程的均值和协方差函数通常由以下表达式表征:

$$m(\theta) = E[J(\theta)] \quad (12)$$

$$k(\theta, \theta') = \text{cov}(J(\theta), J(\theta')) \quad (13)$$

$$EI(\theta) = (J(\theta^*) - m(\theta))\Phi\left(\frac{J(\theta^*) - m(\theta)}{\sigma(\theta)}\right) + \sigma\phi\left(\frac{J(\theta^*) - m(\theta)}{\sigma(\theta)}\right) \quad (15)$$

其中, 函数 $\Phi(\cdot)$ 表示统计概率密度, $\phi(\cdot)$ 表示累积分布, 利用这些, 通过最小化求取函数的期望值的过程来识别最佳采样点:

$$\theta^* = \arg \min_{\theta} EI(\theta) \quad (16)$$

通过引入时间成本函数 $f(t)_{\text{cost}}$, 新的目标函数变为:

$$J_{\theta} = H_{\text{obj}} + f(t)_{\text{cost}} \quad (17)$$

4 结论

本文提出的基于 V2G 和分时电价的协同充放电策略, 可有效降低峰谷差、减少用户成本并提升电网运行稳定性。未来可结合不同电池老化特性及多车型行为模型进一步提升策略的适用性。

参考文献

- [1] Niu S, Zhang R, Peng T, et al. Cooperative scheduling strategy for electric vehicles with Vehicle-to-Grid technology considering renewable energy generation[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2025, 193: 929-939.
- [2] Ye Y, Wenjun D, Wen W, et al. EV Senseless Orderly Charging Technology for High User Participation Rate in Residential Area[J]. World Electric Vehicle Journal, 2022, 13(7): 126-126.
- [3] Bahrami, S., Sheikhi, A., 2016. From demand response in smart grid toward integrated demand response in smart energy hub. IEEE Trans. Smart Grid 7 (2), 650-658.
- [4] S. Chandler, J. Gartner, D. Jones, Integrating electric vehicles with energy storage and

在本研究中, 我们选择具有预测能力的 SE 核函数。应用于随机变量的 SE 核函数具有以下特性:

$$k(\theta, \theta') = \sigma_j^2 \exp\left(-\frac{1}{2}(\theta - \theta')^T \Lambda^{-1}(\theta - \theta')\right) \quad (14)$$

其中, σ_j^2 表示函数 $J(\cdot)$ 的可变性度量, Λ 被定义为元素 $[C_1^2, C_2^2, \dots, C_D^2]$ 的对角矩阵, 其中每个 C_i 对应于 D 维空间中相应维度的特征长度。

采集功能的普遍选择是预期改进 (EI), 其制定如下:

grids: New technology and specific capabilities spur numerous applications, vol. 6, 2018, 38-43. 10.1109/MELE.2018.2849899.

[5] Pan, Z.; Yu, T.; Wang, K. Decentralized coordinated dispatch for real-time optimization of massive electric vehicles considering various interests. Proc. CSEE 2019, 39, 3528-3540.

[6] Chen, K.; Ma, Z.; Zhou, S. Charging control strategy for electric vehicles based on two-stage multi-target optimization. Power Syst. Prot. Control 2020, 48, 65-72.

[7] Wu, W.; Huang, J.; Fang, W.; Hong, H.; Chen, W.; Che, C.; Yang, L.; Han, Q. EV orderly charge discharge strategies for residents considering charge delay time. Power Demand Side Manag. 2020, 22, 83-88.

[8] Peng, X.; Yang, Y.; Meng, D. Research on Orderly Charging Control Strategy in Demand Response. In Proceedings of the IEEE 4th International Conference on Renewable Energy and Power Engineering, Beijing, China, 9-11 October 2021; pp. 216-220.

[9] Yang, Y.; Zhang, B.; Wang, W.; Wang, M.; Peng, X. Development pathway and practices for integration of electric vehicles and internet of energy. In Proceedings of the IEEE Sustainable Power and Energy Conference, Chengdu, China, 23-25 November 2020; pp. 2128-2134.

[10] 戴朝华, 杨帅, 叶圣永, 等. 供需双方博弈视角下的 V2G 优化策略[J]. 西南交通大学学报, 2025, 60(01): 166-174+193.