

·电动汽车与智能电网互动(V2G)优化控制技术专题·

基于PSO的电动汽车规模化充电接入配电网柔性负荷多目标优化控制*

庞松岭^{1,2} 范凯迪^{1,2} 窦洁^{1,2} 陈超^{1,2}

(1.海南电网有限责任公司电力科学研究院,海口 570226;2.智能电网与海岛微网联合实验室,海口 570110)

【摘要】为了降低电动汽车大规模接入配电网后产生的负荷波动和网损,提出了基于粒子群优化(PSO)算法的电动汽车规模化充电接入配电网柔性负荷多目标优化控制方法。首先,建立交通网-配电网耦合模型,并结合出行链模型分析用户的充电需求,搭建接入电动汽车能量状态预测模型;其次,以最小化配电网负荷波动标准差和网损作为优化目标,设计电动汽车规模化充电接入配电网柔性负荷多目标优化函数,同时引入分布熵设计惯性权重更新策略,优化PSO算法;最后,采用改进的PSO算法在函数约束条件的基础上实现配电网的柔性负荷控制。测试结果表明,所提出的方法可准确分析用户的充电需求,降低配电网负荷波动峰值及网损。

关键词:电动汽车 粒子群优化算法 出行链模型 优化控制策略

中图分类号:TM711 文献标志码:A DOI: 10.19620/j.cnki.1000-3703.20230588

Multi-Objective Optimization Control of Flexible Loads for Large-Scale Charging of Electric Vehicles Connected to Distribution Networks Based on PSO

Pang Songling^{1,2}, Fan Kaidi^{1,2}, Dou Jie^{1,2}, Chen Chao^{1,2}

(1. Electric Power Research Institute of Hainan Power Grid Co., Ltd., Haikou 570226; 2. Smart Grid and Island Microgrid Joint Laboratory, Haikou 570100)

【Abstract】In order to reduce load fluctuations and network losses caused by large-scale electric vehicles connected to the distribution network, this paper proposed a multi-objective optimization control method based on Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm for flexible loads of large-scale electric vehicle charging connected to the distribution network. Firstly, a coupling model between transportation network and distribution network was established, and combine it with the travel chain model to analyze users' charging needs, and a prediction model for the energy state of connected electric vehicles was established; Secondly, the minimized standard deviation of load fluctuations and network losses in the distribution network was taken as the optimization objective, and a multi-objective optimization function was established for the flexible load integration of large-scale charging of electric vehicles into the distribution network, meanwhile distribution entropy was introduced to design inertia weight update strategy and optimize PSO algorithm. Finally, the improved PSO algorithm was used to achieve flexible load control of the distribution network based on functional constraints. The test results show that the proposed method can accurately analyze the charging needs of users, and reduce the peak load fluctuation and network loss of the controlled distribution network.

Key words: Electric vehicles, Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm, Travel chain model, Optimize control strategies

【引用格式】庞松岭, 范凯迪, 窦洁, 等. 基于PSO的电动汽车规模化充电接入配电网柔性负荷多目标优化控制[J]. 汽车技术, 2024(6): 1-8.

PANG S L, FAN K D, DOU J, et al. Multi-Objective Optimization Control of Flexible Loads for Large-Scale Charging of Electric Vehicles Connected to Distribution Networks Based on PSO[J]. Automobile Technology, 2024(6): 1-8.

*基金项目:中国南方电网有限责任公司科技项目(073000KK52220001)。

1 前言

随着电动汽车保有量的不断增大,相应基础充电设施大幅增加,配电网受电动汽车充电的影响和冲击不断加剧^[1]。接入配电网的电动汽车是随机性较高的移动负荷,易造成负荷波动峰值过高、网损增加和线路过载等问题^[2-3]。为确保配电网的运行安全,需对规模化充电接入配电网的柔性负荷开展优化控制。

李景丽等^[4]利用蒙特卡洛方法预测电动汽车接入配电网后的充电负荷,结合粒子群优化算法实现了配电网负荷的优化控制,但该方法无法准确预测用户的充电需求,优化后配电网负荷波动仍较大。陈璐等^[5]通过分析电动汽车充电需求和配电网计入电动汽车需求后的实际运行情况控制电网负荷,但该方法未将交通网和配电网进行耦合优化,导致配电网的网损较大,负荷控制效果不理想。Iqbal等^[6]提出基于车辆和电网互动(Vehicle-to-Grid, V2G)策略的电动汽车接入微电网一次频率控制方法,但该方法的V2G策略未经过迭代更新优化求解,无法有效控制负荷。Zand等^[7]提出用于接入充电汽车的智能光伏电网负荷管理策略,构建能量计算模型,求解电网柔性控制阈值,柔性控制电动汽车负荷,但该方法在电动汽车的能量预测时未分析用户的充电需求,后续负荷控制效果不佳。

为解决配电网存在负荷波动、网损较大等问题,本文提出基于粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法的电动汽车规模化充电接入配电网柔性负荷多目标优化控制方法。首先构建交通网-配电网耦合模型,通过出行链模型分析用户充电需求,然后以接入电动汽车能量状态预测模型作为优化的基础数据,设计电动汽车规模化充电接入配电网柔性负荷多目标优化函数,并引入分布熵设计惯性权重更新策略,使用优化后的粒子群优化算法实现配电网的柔性负荷控制。

2 电动汽车能量状态预测模型

电动汽车规模化充电接入配电网后,柔性负荷控制需结合电动汽车的接入结构,充分分析充电节点在配电网和交通网中的分布规律及关联情况,建立交通网-配电网模型。通过该模型获得大规模负荷的接入状态,分析用户的充电需求,并对电动汽车能量状态进行预测,为后续控制奠定基础。

2.1 交通网-配电网耦合模型构建

2.1.1 交通网模型

依据复杂网络理论,以节点代替交通网中的道路交

叉口,以线代替交通网中的道路。在此基础上,构建交通网模型 V :

$$V=(S, \chi) \quad (1)$$

式中: $S=\{m_i|i=1,2,\dots,k\}$ 为交通网中节点的集合, k 为节点数量, m_i 为交通网中节点 i 的数量, $\chi=\{r_{ij}|i \neq j; i, j \in [1, 2, \dots, k]\}$ 为交通网中线的集合, r_{ij} 为节点 i 、节点 j 之间的连接属性(即关系)。

r_{ij} 的计算公式为:

$$r_{ij} = r_{ji} = \begin{cases} z_{ij} & \text{节点}i, j \text{直接相连} \\ 0 & i = j \\ +\infty & \text{节点}i, j \text{不直接相连} \end{cases} \quad (2)$$

式中: z_{ij} 为节点 i 、节点 j 之间的路径长度。

由此完成交通网模型的建立,联合配电网模型建立耦合模型,作为后续优化的基础模型。

2.1.2 配电网模型

通过配电网 H 中各类节点,建立配电网模型 Γ_H :

$$\Gamma_H=(M_H, R_H, X_H, N_H) \quad (3)$$

式中: $M_H=\{m_i^H|i=1,2,\dots,k\}$ 为充电站节点的集合, k 为充电站节点在配电网中的数量, m_i^H 为配电网 H 中充电站节点 i 的数量, $R_H=\{r_{ij}^H|i \neq j; j \in [1, 2, \dots, h]\}$ 为配电网中线路的集合, r_{ij}^H 为配电网线路节点 i 、节点 j 在配电网中存在的链接关系, h 为线路上节点的最大布置数量, $X_H=\{C_i|i=1,2,\dots,h\}$ 为线路阻抗^[8-9]的集合, C_i 为线路 i 对应的阻抗, $N_H=\{(A_t, W_t)|t=1,2,\dots,T\}$ 为由不同运行时刻节点在配电网中对应的无功负荷 W_t 和有功负荷 A_t 构成的集合^[10], t 为运行时刻, T 为总运行时间。

2.1.3 耦合模型

根据实际情况,将配电网模型与交通网模型进行耦合关联,搭建的耦合模型结构如图1所示。

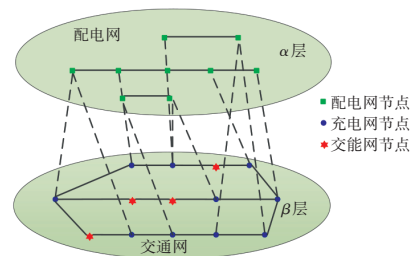


图1 耦合系统结构

利用交通网和配电网间节点的连线建立耦合点集合 Φ ,利用交通网和配电网的网络层建立连线集合层 η ,交通网和配电网的系统耦合模型为:

$$\begin{cases} \Phi = [R_{\Gamma_H} \in C_\alpha | S \in C_\alpha, M_H \in C_\beta, C_\alpha \neq C_\beta] \\ \eta = \{\kappa_{\Gamma_H} \in H_\alpha | H_\alpha = \{R_H, \chi\}\} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $R_{H,V}$ 为模型 V 与 Γ_H 耦合节点的集合, C_α 为点耦合 α 层构成的集合, C_β 为点耦合 β 层构成的点集合, $\kappa_{R_{H,V}}$ 为两个模型耦合线的集合, H_α 为线耦合 α 层构成的集合。

由此,完成交通网-配电网模型的搭建并以此作为电动汽车能量状态预测模型的基础。

2.2 接入电动汽车的电能预测

2.2.1 电动汽车出行链模型

配电网的负荷受充电需求的影响明显,因此,可通过电动汽车出行链模型,如图2所示^[11],分析用户的规模化充电需求,并结合交通网-配电网的节点分布情况预测接入的电动汽车的能量状态。

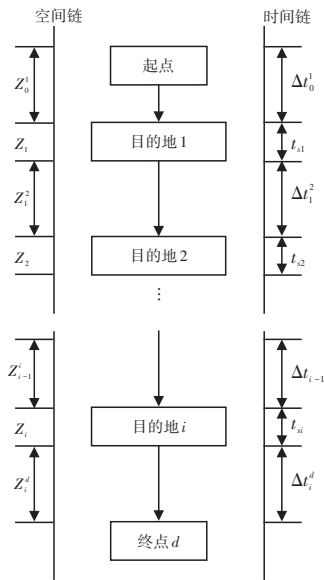


图2 出行链模型

图2中, Z_{i-1}^i 表示点 $(i-1)$ 与目的地 i 间的路径距离, Z_i^d 表示目的地 i 与终点 d 间的路径距离, t_{si} 表示电动汽车在目的地 i 处的停留时间, Δt_{i-1}^i 为电动汽车从目的地 $(i-1)$ 处行驶至目的地 i 所需时间, Δt_i^d 为目的地 i 至终点 d 所需时间,利用上述出行链模型可分析用户驾驶电动汽车的时空轨迹^[12]。

根据出行链模型中交通网-配电网节点和路线的分布,利用Dijkstra算法^[13]获取节点间最优路径,行驶时间 T_α 为:

$$T_\alpha = T_{0\alpha} [1 + \Phi(c_\alpha / D_\alpha)] \quad (5)$$

式中: $T_{0\alpha}$ 为零车流在道路 α 内行驶的时间, c_α 为道路 α 的车流量, D_α 为道路 α 对应的实际充电容量, Φ 为Dijkstra算法系数。

2.2.2 基于充电需求的能量预测模型

鉴于电动汽车的出行具有随机性,电动汽车接入配电网后属于随机性较强的移动负荷。以日出行链的出发时间 T_a 作为正态分布的正态随机变量,建立能量状态

预测函数 $g(T_a, v_s, \zeta_s)^{[14-16]}$:

$$g(T_a, v_s, \zeta_s) = \frac{\exp\left[-(T_a - v_s)^2 / 2\zeta_s^2\right]}{\sqrt{2\pi\zeta_s^2}} \quad (6)$$

式中: v_s 为 T_a 对应的均值, ζ_s 为 T_a 对应的能量需求概率密度。

通过概率密度函数分析电动汽车的充电需求,获得电动汽车的时空随机性能量状态预测结果,为电动汽车规模化充电接入配电网柔性负荷控制提供依据。

3 配电网柔性负荷多目标优化控制

3.1 多目标优化目标函数

3.1.1 最小化负荷标准差

电动汽车规模化充电接入后,配电网的稳定性与负荷波动峰谷差之间存在相关性^[17-18]。为了提高负荷柔性控制效果,避免线路过载,增强电网稳定性,本文提出最小化配电网的日负荷波动的标准差,建立目标函数 $\min G_1$:

$$\min G_1 = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^M (Z_{r,t} + Z_{c,t} - Z_{a,t})^2}{M}} \quad (7)$$

式中: $t=1,2,\dots,M$; M 为参加规模化充电的电动汽车总数量, $Z_{r,t}$ 为配电网在 t 时刻内的基础负荷, $Z_{c,t}$ 为充电汽车在 t 时间内配电网内峰值充电负荷, $Z_{a,t}$ 为每日配电网时间的平均负荷。

3.1.2 最小化网损

为保证充电负荷满足充电需求,需要降低配电网的网损^[19-20]。基于能量预测结果最小化网损,建立目标函数 $\min G_2$:

$$\min G_1 = \min a_{n,t} + \min \sum_{t=1}^{T_n} A_{n,t} - \Delta t \times g(T_a, v_s, \zeta_s) \quad (8)$$

式中: $a_{n,t}$ 为 t 时刻第 n 辆电动汽车在充电过程中的无功负荷, $A_{n,t}$ 为 t 时间第 n 辆电动汽车对应的充电有功负荷, Δt 为未充电时间。

3.2 约束条件

为确保配电网安全、稳定、高效地运行,满足用户的多元需求,在优化控制过程中需充分考虑以下约束条件:

a. 电池充电容量。电动汽车规模化接入后,电网负荷骤增,为保证充电负荷满足充电需求,防止超量充电、损耗电池寿命及浪费能源,需对电池充电容量进行约束。

设电动汽车中电池的实际容量为 W 、充电效率为 τ ,电池充电容量的约束条件为 $\tau \sum A_{n,t} \times \Delta t = W(1 - S_{\text{soc},n})$,其中, $S_{\text{soc},n}$ 为第 n 辆电动汽车的初始电池荷电状态。

b. 充电时间。电动汽车大规模接入配电网时,为避免各充电节点长时间集中供电,负荷超标而影响电网的稳定性,需要基于交通网-配电网模型,对充电时间建立目标函数为 $\frac{A_n}{\tau} \geq T_n \geq 0$ 的约束条件。其中, A_n 为第 n 辆电动汽车在充电状态下对应的有功负荷, T_n 为第 n 辆电动汽车处于充电状态的时间。

c. 负荷平衡约束。电动汽车规模化接入后,配电网负荷出现剧烈波动,无功负荷迅速增加,与有功负荷存在不平衡关系,导致电网效率降低、稳定性下降。故电网需要满足平衡条件,令有功负荷与无功负荷达到平衡:

$$\begin{cases} A_{n,t,i} - Z_{r,t,i} - Z_{c,t,i} = 0, \forall i \in \Phi \\ W_{n,i} - A_{n,t,i} = 0, \quad \forall i \in \Phi \end{cases} \quad (9)$$

式中: $W_{n,i}$ 为第 n 辆电动汽车在节点 i 的电源无功负荷。

为了保证充电负荷,节点 i 属于交通网-配电网耦合模型。

d. 电压偏移。充电时,节点的电压产生较大波动,增加了网损和负荷波动。在一定范围内,控制节点的电压偏移量可以保证电网电压在运行过程中的稳定性^[21-23]。为了降低节点的电压波动,将电压偏移量 $V_{i,t}$ 的约束条件设置为 $V_{i,\min} \leq V_{i,t} \leq V_{i,\max}$ 。其中, $V_{i,t}$ 为 t 时刻节点 i 的电压偏移量, $V_{i,\max}$ 、 $V_{i,\min}$ 分别为 $V_{i,t}$ 的最大、最小值。

e. 线路容量。为了防止线路超载,延长线路在配电网中的使用寿命,结合交通网-配电网耦合模型的线路配置和用户充电能量预测结果,使控制线路容量 D_l 与充电能量预测结果满足 $g(T_a, v_s, \zeta_s) \leq D_l \leq D_{l,\max}, l \in \eta$ 。其中, $D_{l,\max}$ 为控制线路的最大容量。

至此,通过目标函数和约束条件建立了多目标优化模型,求解出最优值即可完成优化。

3.3 柔性负荷多目标优化控制

上述负荷优化模型属于多目标优化,由于待优化的节点较多,可通过本文提出的方法求解,实现配电网柔性负荷的优化控制。为了提高模型的精度和效率,引入分布熵^[24-25],前期提高多目标优化函数找寻最优解的全局搜索能力,后期提高粒子的局部开发能力,防止出现局部极值,并利用当下的环境信息,不断更新惯性权重。求解负荷多目标优化函数的具体过程如下:

a. 不同节点的负荷优化目标在交通网-配电网节点耦合模型中的最大角线距离为 $L(t) = \min \|x_i(t), x_j(t)\|_2$ 。其中, $x_i(t)$ 、 $x_j(t)$ 分别为节点 i 、节点 j 的负荷标准差。

b. 设 $x_i(t)$ 、 $x_j(t)$ 在粒子优化种群中对应的方向矢量设为 $h(t)^T$,建立节点负荷多目标优化集合 $u(t) = L(t)h(t)^T x(t)$ 。其中, $x(t)$ 表示交通网-配电网节点耦合模型中的节点负荷标

准差。

c. 根据交通网-配电网节点耦合模型等量划分集合 $u(t)$,在各区间内统计节点的投影数量 $u_\phi(t)$ 。

d. 每次迭代过程中,计算节点负荷对应的分布熵 $E(t) = -\sum u_\phi(t) \cdot \ln u_\phi(t)$ 。

e. 根据分布熵 $E(t)$ 确定惯性权重 $\omega[E(t)] = \frac{1}{1 + 1.5 \exp[-2.6E(t)]}$ 。

f. 在 PSO 算法中,学习因子用于粒子速度的更新^[26-27]。本文采用学习因子异步更新策略对优化目标函数 $\min G_1$ 、 $\min G_2$ 的学习因子 c_1 、 c_2 展开更新,以获取配电网柔性负荷多目标优化函数的最优解:

$$\begin{cases} c_1 = \min G_1 + \frac{n(c_{1,\text{fin}} - c_{1,\text{ini}})\omega[E(t)]}{N_{\max}} \\ c_2 = \min G_2 + \frac{n(c_{2,\text{fin}} - c_{2,\text{ini}})\omega[E(t)]}{N_{\max}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: n 为迭代次数, $c_{1,\text{ini}}$ 、 $c_{1,\text{fin}}$ 分别为 c_1 对应的初始值和终值, $c_{2,\text{ini}}$ 、 $c_{2,\text{fin}}$ 分别为 c_2 对应的初始值和终值, N_{\max} 为对应的最大迭代次数。

g. 设置 PSO 算法的终止条件,令迭代次数 $n = N_{\max}$ 。如果满足该条件,将输出电动汽车规模化充电接入配电网柔性负荷多目标优化函数的最优解,实现负荷控制多目标优化控制,否则,返回步骤 b 进行后续流程。

4 测试与分析

4.1 测试说明

为了验证本文方法的有效性,以某市的电动汽车充电规划区域配电网作为测试对象,使用 MATLAB 2020a 完成试验,采集该配电网负荷和充电站分布网点等数据。在 OpenStreetMap(OSM) 开源地图中获取规划区域内道路交通网的数据,区域面积为 214 km²,共有 65 个路段,路口节点 32 个,区域配电网包括 4 个变电站,其供电电压为 10 kV,最大负荷容量为 50 MW;输电线路拓扑结构为网状结构,包括 5 条支路,总长 57 km,线路的单位长度阻抗为 0.358 Ω /km。

根据项目规划方案,区域内拟建设 10 个节点充电桩,每天至少为 4 辆车提供充电服务。据车管所数据显示,规划区域内需充电的电动汽车数量约为 15×10^4 辆,在该规模下,公共充电桩的额定负荷为 50~350 kW。每辆车的充电时间为 1~2 h,充电方式为直流充电。单辆电动车的充电参数如表 1 所示。

电动汽车的充电需求是优化控制配电网柔性负荷的关键,现将本文方法与文献[4]、文献[5]所提出的

方法进行比较,对区域内两辆不同行驶路线的电动汽车进行能量状态(初始能量相对值)预测,结果如图3所示。

表1 区域内电动汽车充电参数

参数		取值
电池参数	初始电池荷电量/ $\text{kW}\cdot\text{h}^{-1}$	22
	搭载电池容量/ $\text{kW}\cdot\text{h}^{-1}$	90
其他参数	充电效率/%	79
	额定负荷/ kW	3~300

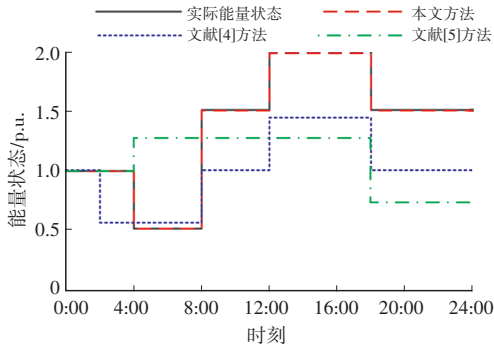


图3 能量状态预测结果对比

结果表明,文献[4]、文献[5]方法在某些时段内的能量状态预测结果与实测结果存在较大差异。本文方法在负荷控制过程中建立了包含交通网-配电网的耦合模型,分析了用户驾驶电动汽车时的实际充电需求,进而提高了电动汽车能量状态的预测精度,因此,可准确预测电动汽车的能量状态。

将本文方法、原始粒子群优化算法、文献[4]方法及文献[5]方法进行对比,多目标函数求解偏差的收敛结果如图4所示。本文方法通过分布熵优化了求解结果,使迭代训练仅50次即完成了收敛,未陷入局部最优解。其他方法虽然完成了收敛,但受局部最优解影响,在迭代70次后才完成收敛。电动汽车充电接入后,配电网24 h内负荷波动的控制结果如图5所示。

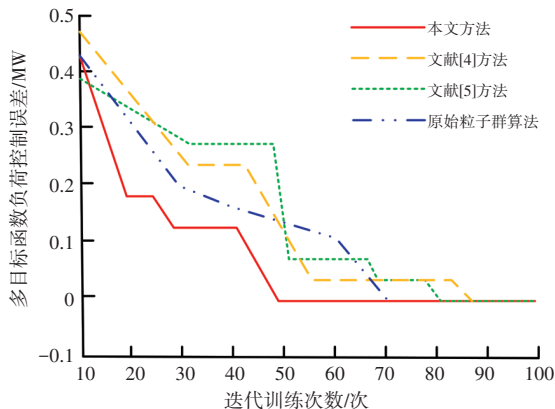
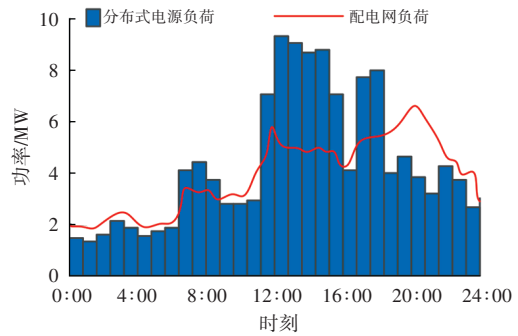
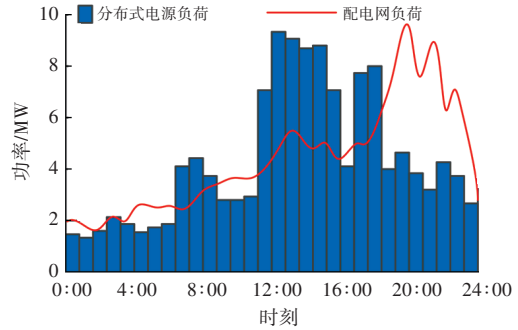


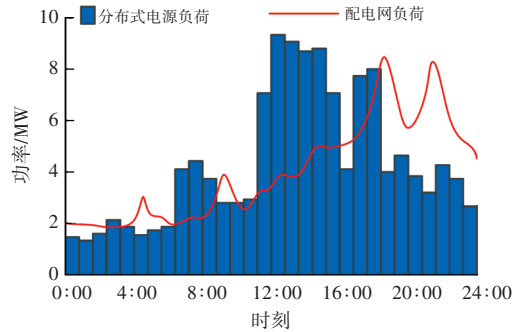
图4 收敛效果对比



(a)本文方法



(b)文献[4]方法



(c)文献[5]方法

图5 优化控制结果对比

区域内的配电网在12:00、20:00出现午高峰和晚高峰,负荷波动较大;而 15×10^4 辆电动汽车从8:00左右出发,在区域内经过约4 h的消耗,规模化接入充电时间也集中在12:00~18:00,使得峰值叠加,在晚高峰尤为严重,加重了负荷波动。

图5b、图5c中,充电功率产生了尖峰负荷,增大了配电网的负荷峰谷差,从而降低了电网运行的稳定性和安全性。而图5a负荷控制曲线与分布式充电桩电源出力情况的匹配度较高,负荷峰谷差值明显低于其他方法。结果表明,本文方法通过图3的负荷需求预测结果调节配电网柔性负荷,使充电负荷和电网负荷相对应,有效抑制了配电网负荷波动性,降低了负荷峰值。

4.2 对比分析

模拟电动汽车规模化充电接入配电网的实际场景,

设置场景如下:

场景1:电动汽车直接接入配电网系统。

场景2:电动汽车到达充电桩后,按有序充电方式接入配电网系统中进行充电。

将本文方法、文献[4]方法和文献[5]方法在上述场景进行负荷控制,各场景的网损情况如图6所示。

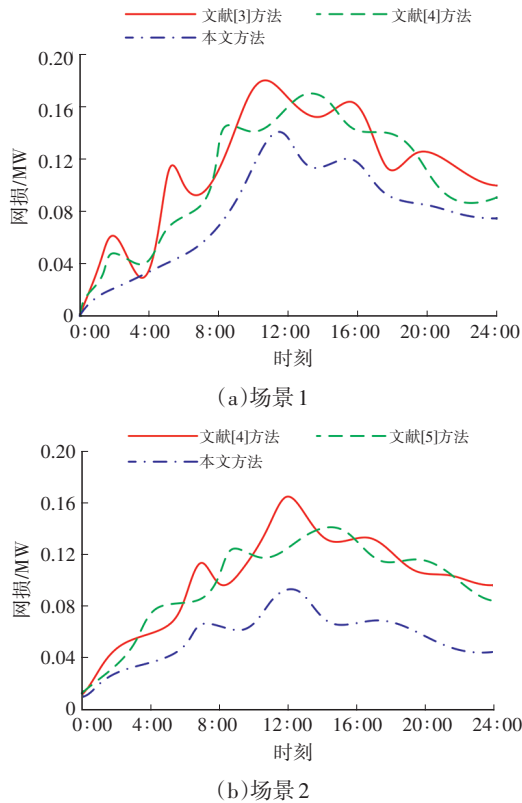


图6 不同场景下的网损

上述方法在场景2中的网损明显低于场景1,表明电动汽车的有序充电方式明显优于无序充电。而本文方法以配电网负荷标准差最小作为优化目标进行负荷控制,以此降低配电网的网损,因此,不同场景下本文方法的网损均低于其他方法,具有明显优势。

5 结束语

本文针对当前充电汽车接入配电网负荷控制方法中电动汽车能量状态预测精度低、负荷峰值高及网损大等问题,提出基于粒子群优化算法的电动汽车规模化充电接入配电网柔性负荷多目标优化控制方法。测试结果表明,该方法能够准确分析用户的充电需求,使控制后的配电网负荷波动峰值明显降低,有效减少网损,保证了配电网在接入电动汽车充电情况下运行的安全性和可靠性。未来,将在此基础上提升负荷控制效率,从而提高能源利用率,以保障电网的可高效、稳定运行,使电能补给更加安全便捷。

参 考 文 献

- [1] 张晶,康锦萍,李涛永,等.考虑电磁兼容特性下电动汽车直流充电桩测试装置的模块化设计及应用[J].电力自动化设备,2022,42(2):70-76.
ZHANG J, KANG J P, LI T Y, et al. Modular Design and Application of Field Test Device for DC Charging Pile of Electric Vehicle Considering EMC Characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(2): 70-76.
- [2] 许梦瑶,艾小猛,方家琨,等.考虑用户积极性的电动汽车与机组联合调频的两阶段随机优化调度模型[J].电网技术,2022,46(6):2033-2041.
XU M Y, AI X M, FANG J K, et al. Two-Stage Stochastic Optimal Scheduling Model for Joint Regulation of EV and Thermal Units Considering Users Enthusiasm[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2033-2041.
- [3] 张艺明,王辉,沈志伟,等.利用混合拓扑实现强抗偏移性能的紧凑型电动汽车无线充电系统[J].中国电机工程学报,2022,42(8):2979-2987.
ZHANG Y M, WANG H, SHEN Z W, et al. Misalignment-tolerant Compact Electric Vehicle Wireless Charging System by Using Hybrid Topology[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2979-2987.
- [4] 李景丽,杨旭晨,张琳娟,等.规模化电动汽车有序充电分层控制策略研究[J].电测与仪表,2021,58(5):168-175.
LI J L, YANG X C, ZHANG L J, et al. Research on Hierarchical Control Strategy of Orderly Charging of Large-scale Electric Vehicles[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(5): 168-175.
- [5] 陈璐,王璨,胡昊,等.三相不平衡配网下电动汽车有序充电控制策略[J].电气传动,2022,52(11):42-50.
CHEN L, WANG C, HU H, et al. Orderly Charging Control Strategy for Electric Vehicles in Three-Phase Unbalanced Distribution Network[J]. Electric Drive, 2022, 52(11): 42-50.
- [6] IQBAL S, AI X, JAN M, et al. V2G Strategy for Primary Frequency Control of an Industrial Microgrid Considering the Charging Station Operator[J]. Electronics, 2020, 9(4): 549-556.
- [7] ZAND M, NASAB M A, SANJEEVIKUMAR P, et al. Energy Management Strategy for Solid-State Transformer-Based Solar Charging Station for Electric Vehicles in Smart Grids [J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(18): 3579-3896.
- [8] KHORAMIKIA H, DEGHAN S M, HASANZADEH S. Droop Control Method Based on Fuzzy Adaptive Virtual Resistance for DC Microgrids[J]. International Journal of Power Electronics, 2021, 14(2): 197-215.
- [9] 李福志,郑卫宾,张文海,等.基于回路直流电阻测量的输电线路单相接地故障离线故障定位[J].中国电力,2021,54(2):140-146.

- LI F Z, ZHENG W B, ZHANG W H, et al. Fault Path Direct-Current Resistance Based Off-Line Single-Phase-To-Ground Fault Location[J]. Electric Power, 2021, 54 (2): 140-146.
- [10] 赵开联,唐岚,杨婧,等. 基于潮流追踪和功率灵敏度的线路过载紧急控制策略[J]. 电机与控制应用, 2021, 48 (11): 104-113.
- ZHAO K L, TANG L, YANG J, et al. Overload Emergency Control Strategy for Line Based on Power Flow Tracing and Power Sensitivity[J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(11): 104-113.
- [11] 王宜立,张蓉馨,杨再鹤,等. 基于双向出行链的电动汽车平抑电网波动策略[J]. 电力工程技术, 2023, 42(4): 50-60.
- WANG Y L, ZHANG R X, YAGN Z H, et al. Stabilizing Power Fluctuation Strategy Based on Two-Way Travel Chain of Electric Vehicle[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(4): 50-60.
- [12] 李瑶虹,陈良亮,刘卫东,等. 基于用户出行链和调控意愿的城市级私家电动汽车调控能力评估[J]. 电力建设, 2021, 42(5): 100-112.
- LI Y H, CHEN L L, LIU W D, et al. Regulation Ability Estimation of Private EVs at City Level Considering Users' Trip Chain and Regulation Willingness[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(5): 100-112.
- [13] 王晓梅,卢芳,卢京祥,等. 含分布式光伏和电动汽车的主动配电网电压一致性协同控制[J]. 电测与仪表, 2020, 57(11): 101-107+ 134.
- Wang X M, Lu F, Lu J X, et al. Consensus-Based Cooperative Voltage Control of Distributed Photovoltaic and Electric Vehicles in Active Distribution Network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(11): 101-107+ 134.
- [14] 曾林俊,许加柱,王家禹,等. 考虑区间构造的改进极限学习机短期电力负荷区间预测[J]. 电网技术, 2022, 46 (7): 2555-2563.
- ZENG L J, XU J Z, WANG J Y, et al. Short-Term Electrical Load Interval Forecasting Based on Improved Extreme Learning Machine Considering Interval Construction[J]. Power System Technology, 2022, 46(7): 2555-2563.
- [15] 张洁辉,许学研,池鸿源. 基于正态分布模型的无线机房用电异常预测方法[J]. 通信电源技术, 2021, 38(18): 183-185.
- ZHANG J H, XU X Y, CHI H Y. Prediction Method of Power Consumption Abnormality in Wireless Computer Room Based on Normal Distribution Model[J]. Telecom Power Technology, 2021, 38(18): 183-185.
- [16] 张卫国,宋杰,陈良亮,等. 满足电动汽车充电需求的台区柔性资源分布式协调控制[J]. 电测与仪表, 2021, 58 (7): 27-35.
- ZHANG W G, SONG J, CHEN L L, et al. Distributed Coordination Control of Station Flexible Resources Based on Electric Vehicle Charging Demand[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(7): 27-35.
- [17] 王楠,李省,杨小龙,等. 考虑载荷与网损均匀性的配电网拓扑多目标规划[J]. 现代电力, 2021, 38(6): 656-664.
- WANG N, LI S, YANG X L, et al. Multi Objective Topological Planning of Distribution Network Considering Load and Network Loss Uniformity[J]. Modern Electric Power, 2021, 38(6): 656-664.
- [18] 邓慧琼,张晓飞,郑玉焱,等. 基于回路分析的配电网电压及网损灵敏度分析方法研究[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2022, 38(1): 34-39+68.
- DENG H Q, ZHANG X F, ZHENG Y Y, et al. Research on the Sensitivity Analysis Method of Distribution Network Voltage and Network Loss Based on Loop Analysis[J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2022, 38(1): 34-39+68
- [19] 廖鑫,李婧,徐佳,等. 基于MDP及激励需求响应的电动汽车有序充电控制[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36 (5): 79-86.
- LIAO X, LI J, XU J, et al. Research on Coordinated Charging Control for Electric Vehicles Based on MDP and Incentive Demand Response[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(5): 79-86.
- [20] 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.
- [21] 叶健诚,叶建德,杨洪涛. 基于电压偏移序列的电池健康状态估计方法[J]. 电源技术, 2021, 45(1): 7-9+38.
- YE J C, YE J D, YANG H T. State of Health Estimation Method of Battery Based on Voltage Offset Sequences[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2021, 45(1): 7-9+38.
- [22] 张伟,黄卫民. 基于种群分区的多策略自适应多目标粒子群优化算法[J]. 自动化学报, 2022, 48(10): 2585-2599.
- ZHANG W, HUANG W M. Multi-Strategy Adaptive Multi-objective Particle Swarm Optimization Algorithm Based on Swarm Partition[J]. Acta Automatica Sinica, 2022, 48(10): 2585-2599.
- [23] 高波,彭程,路文梅. 基于改进粒子群优化算法的电网系统无功电压控制[J]. 计算机仿真, 2022, 39(9): 86-90.
- GAO B, PENG C, LU W M. Reactive Power and Voltage Control of Power Grid System Based on Improved Particle

- Swarm Algorithm[J]. Computer Simulation, 2022, 39(9): 86-90.
- [24] 王小刚, 闫光辉, 周宁. 多阶邻接分布熵下的复杂网络节点相似性分析方法[J]. 控制理论与应用, 2021, 38(6): 739-747.
- WANG X G, YAN G H, ZHOU N. Analysis Method of Nodes Similarity with Multi-Layer Adjacency Entropy[J]. Control Theory & Applications, 2021, 38(6): 739-747.
- [25] 徐蕙, 陈平, 李海涛, 等. MPSR-MKSVM电力负荷预测综合优化策略[J]. 电测与仪表, 2022, 59(1): 77-83.
- XU H, CHEN P, LI H T, et al. Comprehensive Optimization Strategy of Power Load Forecasting Based on MPSR-MKSVM[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(1): 77-83.
- [26] 史亮, 葛晓琳, 顾闻, 等. 考虑需求响应的电动汽车充电负荷研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(7): 42-47.
- SHI L, GE X L, GU W, et al. Research on Charging Loads of Electric Vehicles Considering Demand Response[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(7): 42-47.
- [27] 江友华, 屈靖洁, 曹以龙, 等. 考虑风电-负荷及综合需求响应不确定性的能量枢纽双层优化运行及配置方法[J]. 电测与仪表, 2022, 59(3): 117-124.
- JIANG Y H, QU J J, CAO Y L, et al. Double-Layer Optimal Operation and Configuration Method for Energy Hub Considering Uncertainty of Wind Power-Load and Integrated Demand Response[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(3): 117-124.
- (责任编辑 瑞 秋)
- 修改稿收到日期为2023年8月8日。

《汽车技术》征稿启事

《汽车技术》杂志是中国第一汽车集团有限公司主办的国内外公开发行的汽车前瞻与应用技术类月刊,为我国高质量科技期刊分级目录入选期刊、中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊、中文核心期刊、中国科技核心期刊、RCCSE中国核心学术期刊(A)、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)收录期刊、日本科学技术振兴机构数据库入选期刊、EBSCO学术数据库收录期刊、欧洲学术出版中心(EuroPub)数据库收录期刊。

《汽车技术》杂志以报道汽车整车及其零部件设计、研究、试验等方面的前瞻与应用技术为主,并兼有理论研究内容,是中国汽车行业核心学术和知识传播与共享的平台。

《汽车技术》将在国家提出的“创新、协调、绿色、开放、共享”发展理念的指引下,把握《节能与新能源汽车技术路线图》和“低碳化、信息化、智能化”的汽车技术主流发展趋势,努力在传统内燃机汽车高效动力系统、轻量化、低阻力领域,新能源汽车和互联智能汽车技术领域,大力吸收优质稿源,为广大科研和工程技术人员服务,为我国汽车工程技术创新能力提升贡献力量。

《汽车技术》欢迎高等院校师生、研发工程技术人员、技术管理人员及相关人员不吝赐稿,反映国家重点扶持项目、自然科学基金项目和其他重点项目等研究成果的稿件将被优先选择刊登。

投稿要求:

1. 文章字数最好控制在6 000~8 000字范围之内;
2. 请按科技论文要求撰写文章摘要,摘要中文字数控制在180字左右;
3. 文章必须附有公开发表的、体现本领域最新研究成果的参考文献,且在文中应标注文献引用处;
4. 文章主要作者应提供其简介,包括出生年、性别、职称、学历、研究方向及技术成果等;
5. 来稿的保密审查工作由作者单位负责,确保署名无争议,文责自负;
6. 请勿一稿多投;

7. 本刊使用网站投稿,请先登陆网站注册成功后投稿,详细投稿要求见本刊网站中“下载中心”栏的“作者指南”,网址:<http://qcjs.cbpt.cnki.net>。

《汽车技术》编辑部

汽车技术