

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181532

基于配电网概率潮流计算的电动汽车充电站规划策略

张永明¹, 姚志力², 李菁², 杜振东¹, 王志新², 徐世泽¹, 吴笛¹, 黄忠华¹

(1. 浙江华云电力工程设计咨询有限公司, 浙江 杭州 310014;

2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 大规模电动汽车接入会导致配电网潮流分布发生变化, 给配电网的运行带来风险。采用半不变量和Gram-Charlier级数计算考虑电动汽车充电负荷的配电网动态概率潮流。根据节点电压和支路潮流的越限严重程度, 定义评价充电站对配电系统潮流影响的综合指标, 提出了确定充电站最优电气接入点的方法。IEEE33节点配电系统的仿真计算结果表明, 采用上述方法选择充电站的电气接入点可以降低配电网节点电压和支路潮流越限的风险, 有助于通过充电设施的优化布局对电动汽车的充电行为进行引导和优化。

关键词: 配电网运行风险; 电动汽车; 充电站; 概率潮流; 半不变量法

Electric vehicle charging station planning strategy based on probabilistic power flow calculation of distribution network

ZHANG Yongming¹, YAO Zhili², LI Jing², DU Zhendong¹, WANG Zhixin², XU Shize¹, WU Di¹, HUANG Zhonghua¹

(1. Zhejiang Huayun Electric Power Engineering Design & Consultation CO., LTD., Hangzhou 310014, China;

2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The access of a large number of electric vehicle loads will change the distribution of power flow in the distribution network and threaten the stability of the power grid. Based on the semi-invariant and Gram-Charlier series, this paper calculates the dynamic probability flow of the distribution network considering the charging load of electric vehicles. On this basis, a comprehensive index evaluating the influence of the charging station on the power flow of the power distribution system is defined based on the risk indicator of branch overload and bus voltage violation, and a method for determining the optimal electrical access point of the charging stations is proposed. The simulation results of IEEE33 node power distribution system show that using this method to select the electrical access point of the charging stations can reduce the risk of branch overload and bus voltage violation. It can be used to guide the charging behavior of electric vehicles through an optimized layout of the charging facility.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0904604), The Technical Standards of Shanghai Science and Technology Commission (No. 18DZ2205700) and Shanghai Minhang District Industry University Research Cooperation Project (No. 2017MH271).

Key words: operational risks of distribution power grid; electric vehicles; charging station; probabilistic load flow; cumulant method

0 引言

电动汽车因其能耗低、环保等特点, 近年来受到各国政府、社会的极大关注。在相关政策的推动

下, 电动汽车保有量呈不断上升的态势。随着电动汽车数量的增加, 电网充电负荷需求相应增加, 这为电网稳定运行带来一定压力。此外, 由于充电负荷具有较大的时空分布随机性, 因此进一步增加了配电网安全运行的不确定因素^[1]。分析电动汽车充电负荷对配电网的影响, 对电动汽车充电站接入点进行规划^[2], 从而对电动汽车的充电行为进行引导, 有助于降低充电负荷接入引起的配电网运行风险。

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2018YFB0904604); 上海市科委技术标准专项(18DZ2205700); 上海市闵行区产学研合作计划(2017MH271)

不同于确定性潮流计算, 概率潮流计算方法考虑了潮流计算过程中随机变量的概率分布, 计算得到配电网电压和潮流的概率分布, 进而可以分析负荷的随机性对电网运行状态造成的影响, 为评估电网运行风险和规划发展决策提供参考依据^[3-5]。

目前已有一些针对电动汽车充电负荷接入对配电网潮流分布及电压质量影响的研究, 这些研究从不同角度探讨了电动汽车充电负荷的特性, 分别建立了含电动汽车充电负荷的潮流模型并对配电网运行情况进行了分析。文献[6-9]建立了电动汽车功率需求模型, 在考虑电动汽车充电负荷随机性的基础上计算了电动汽车整体充电负荷需求, 设计了充电负荷对配电网影响的评估策略; 文献[10-12]考虑了电动汽车充电负荷的时空分布特性、配电网供电区域等因素来分配负荷、建立潮流模型, 并对配电网的实际运行情况进行评估; 文献[13-17]建立了含有可再生能源发电和电动汽车的电力系统概率潮流模型, 研究了此系统的动态概率特性。

此外, 在计及配电网安全稳定运行的电动汽车充电站规划和负荷调度方面也有一些研究。研究从经济性、系统稳定性等目标出发, 探讨对电动汽车充电负荷进行规划与引导的方法。文献[18-19]以削峰填谷和经济运行为目标研究电动汽车充电负荷优化调度方法; 文献[20]基于节点电压和线路有功功率的变化量设计评价充电站对配电系统影响的指标, 提出确定充电站最优电气接入点的方法; 文献[21]提出了一种考虑电动汽车充放电功率不确定性和分布式电源出力不确定性的电源优化布置方法。

本文以降低电动汽车充电负荷接入带来的配电网运行风险为目标, 研究了电动汽车充电站接入点规划方法。在以往研究的基础上, 考虑了电动汽车充电负荷的随机性, 基于半不变量法计算考虑电动汽车充电负荷的配电网概率潮流, 随后根据节点电压和支路潮流越限严重程度, 定义了配电网运行风险综合评价指标, 给出了确定充电站在配电网中最优电气接入点的方法, 并以 IEEE33 节点配电系统为例, 对上述方法进行了说明。

1 计及电动汽车充电负荷的配电网概率潮流计算

1.1 电动汽车充电功率动态分布模型

根据电动汽车的开始充电时刻、充电功率大小和充电时长构建电动汽车充电功率动态分布模型, 取慢充模式下的私家车为研究对象^[8]。

电动汽车充电开始时刻近似服从正态分布, 概

率密度函数如下。

$$f_s(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu_s)^2}{2\sigma_s^2}} & (\mu_s - 12) < t \leq 24 \\ \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{-(t+24-\mu_s)^2}{2\sigma_s^2}} & 0 < t \leq (\mu_s - 12) \end{cases} \quad (1)$$

式中: t 为开始充电的时刻; $\mu_s = 17.6$; $\sigma_s = 3.4$ 。

考虑电动汽车慢充模式, 使用单相交流电源, 认为充电功率 P_c 服从均匀分布, 取 3.5~7 kW, 概率密度函数为

$$f(P_c) = \begin{cases} 1 & x \in [3.5, 7] \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

电动汽车日行驶里程 d 服从对数正态分布, 概率密度函数为

$$f(d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} d \sigma_d} \exp\left[-\frac{(\ln d - \mu_d)^2}{2\sigma_d^2}\right] \quad (3)$$

式中, $\mu_d = 3.2$ 、 $\sigma_d = 0.88$ 。

电动汽车充电时长为

$$T_c = \frac{dW_{100}}{100P_c} \quad (4)$$

式中, W_{100} 为电动汽车每百公里耗电量, 其数值取 13~18 kW·h, 认为服从均匀分布。

假设电动汽车日常行驶距离与充电功率两个随机变量相互独立, 则充电时长的概率密度函数为

$$f(T_c) = \int_{3.5}^7 \frac{1}{\sqrt{2\pi} T_c \sigma_d} e^{-\frac{(\ln T_c - \ln(W_{100}/100) + \ln p - \mu_d)^2}{2\sigma_d^2}} dp \quad (5)$$

根据以上概率分布, 采用蒙特卡洛法进行仿真, 得到电动汽车一天的充电功率动态概率分布模型。根据中心极限定理, 大量电动汽车的总体充电负荷 P_{EV} 在各时刻近似服从正态分布。 t 时刻充电负荷的概率密度函数如式(6)^[12]。

$$f_t(P_{EV}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \lambda_{EVt} \mu_{EVt}} e^{-\frac{(P_{EV} - \mu_{EVt})^2}{2\lambda_{EVt}^2 \mu_{EVt}^2}} \quad (6)$$

式中: μ_{EVt} 为总体充电负荷的期望值; λ_{EVt} 为总体充电负荷的变异系数。

1.2 含电动汽车的配电网动态概率潮流计算

电动汽车充电负荷具有一定的随机性, 通过在潮流的基础值上叠加相应的随机量来建立动态概率潮流模型。动态概率潮流变量可表示为式(7)。

$$W(t) = P(t) + \Delta(t) \quad (7)$$

式中: $W(t)$ 为动态变量; $P(t)$ 为基础函数; $\Delta(t)$ 为随机波动成分。

配电网在 t_0 时刻的节点电压扰动状态量 ΔX 和

支路潮流波动量 ΔZ 的概率分布的计算过程为: 先根据节点原始负荷和电动汽车充电负荷的随机变量求得对应的各阶半不变量。然后进行潮流计算, 得到雅克比矩阵 J_0 和灵敏度矩阵 T_0 。再根据式(8)、式(9)计算对应的各阶半不变量动态概率模型。最后用 Gram-Charlier 级数计算相应的概率分布^[22-25]。

$$\Delta X^{(k)} = J_0^{-l(k)} \Delta Y^{(k)} \quad (8)$$

$$\Delta Z^{(k)} = T_0^{-l(k)} \Delta Y^{(k)} \quad (9)$$

式中: ΔX 为节点电压半不变量; ΔZ 为支路潮流半不变量; ΔY 为节点注入功率半不变量。

2 电动汽车充电站电气接入点规划

2.1 配电网运行风险评价指标

配电网运行风险指标如式(10)。

$$R(Y_i) = P(Y_i) \cdot S(Y_i) \quad (10)$$

式中: $R(Y_i)$ 为配电网运行风险指标; Y_i 为配电网特定运行状态; $P(Y_i)$ 为该状态发生的概率; $S(Y_i)$ 为该运行状态的故障的严重度。根据《Q/GDW 1903-2013 输变电设备风险评估导则》计算严重度指标^[26]。

(1) 节点电压越限严重度

母线电压越限可能会导致切负荷动作, 此外, 在电压越限比较严重的情况下, 可能引发电压崩溃致使全网瘫痪。电压越限严重度如图 1 所示。电动汽车充电负荷接入配电网后节点电压有越下下限的风险。电压越限严重度评价指标计算公式如下。

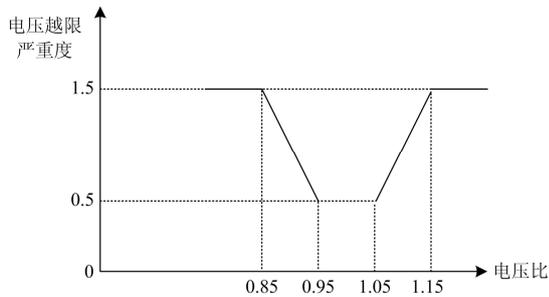


图 1 电压越限严重度

Fig. 1 Voltage overrun severity

$$P_i(V) = P(V_i < V) = F(V) \quad (11)$$

$$S_1(V) = \begin{cases} 1.5 & RV \leq 0.85 \\ 10(1 - RV) & 0.85 < RV \leq 0.95 \\ 0 & 0.95 < RV \leq 1.05 \\ 10(RV - 1) & 1.05 < RV \leq 1.15 \\ 1.5 & RV > 1.15 \end{cases} \quad (12)$$

$$R_{Vi} = \int P_i(V) S_1(V) dV \quad (13)$$

式中: $P_i(V)$ 为节点 i 电压等于 V 的概率; V_i 为节点 i 的电压幅值; $F(V)$ 为节点电压累积分布函数; $S_1(V)$ 为电压越限严重度; RV 为实际电压与基准电压之比; R_{Vi} 为节点 i 电压越限严重度评价指标。

(2) 支路潮流越限严重度

当支路潮流接近或超过其功率上限时, 会导致设备工作状态恶化, 使得设备潜在的故障风险上升。与此同时, 设备的保护装置可能处在动作的边缘状态, 这也增加了设备故障退出运行的可能性。潮流越限严重度如图 2 所示。

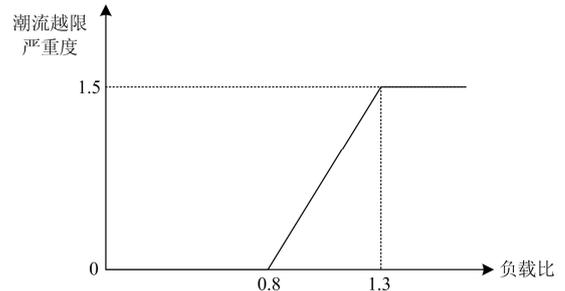


图 2 潮流越限严重度

Fig. 2 Trend overrun severity

电动汽车充电负荷接入配电网后支路潮流有越上限的风险。潮流越限严重度评价指标计算公式如下。

$$P_{ij}(S) = P_{ij}(S_{ij} < S) = F(S) \quad (14)$$

$$S_2(S) = \begin{cases} 0 & RL < 0.8 \\ 5(RL - 0.8) & 0.8 \leq RL < 1.3 \\ 2.5 & RL \geq 1.3 \end{cases} \quad (15)$$

$$R_{Sij} = \int P_{ij}(S) S_2(S) dS \quad (16)$$

式中: $P_{ij}(S)$ 为支路 ij 潮流等于 S 的概率; S_{ij} 为支路 ij 潮流; $F(S)$ 为支路潮流累积分布函数; $S_2(S)$ 为潮流越限严重度; RL 为实际输送功率与功率限额之比; R_{Sij} 为支路 ij 潮流越限严重度评价指标。

(3) 配电网运行风险综合评价指标

为综合反映电动汽车充电负荷对配电网安全性的影响, 定义综合评价指标为

$$R = \frac{\sum R_{Vi}}{N} \cdot \frac{\sum R_{Sij}}{M} \quad (17)$$

式中: R_{Vi} 为节点 i 电压越限严重度评价指标; R_{Sij} 为支路 ij 潮流越限严重度评价指标; N 、 M 分别为配电网节点和支路总数。

2.2 电动汽车充电站电气接入点规划

对电动汽车充电站在配电网中的最优电气接

入点进行求解。首先采用半不变量法计算不同充电站布局下的配电网概率潮流，然后选择配电网运行风险指标最小的方案为最优解。采用粒子群算法对上述问题进行求解^[27-28]。计算流程如图 3 所示。

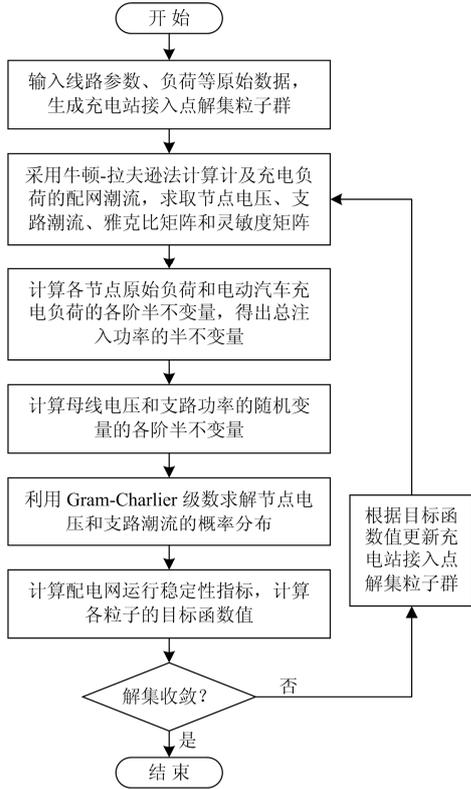


图 3 电动汽车充电站电气接入点规划算法流程

Fig. 3 Electric vehicle charging station electrical access point planning algorithm flow

算法具体步骤如下：

(1) 输入配电网拓扑结构、线路参数、节点负荷等原始数据。根据一定规则生成充电站接入点的解集粒子群，设置粒子数，随机生成粒子初始位置，将粒子速度设为 0，将粒子的历史最优位置设为当前位置。

(2) 考虑充电站节点接入的充电负荷，采用牛顿-拉夫逊法计算系统潮流，计算节点电压、支路潮流的基础函数，并得到雅克比矩阵和灵敏度矩阵。

(3) 计算各节点原始负荷和电动汽车充电负荷的各阶半不变量，根据半不变量可加性计算节点总注入功率的半不变量。

(4) 根据式(8)、式(9)计算节点电压和支路功率的随机变量的各阶半不变量。

(5) 用 Gram-Charlier 级数求解节点电压扰动状态量和支路潮流波动量的概率分布，结合节点电压和支路潮流对应的基础函数值求出其概率分布。

(6) 针对各粒子，根据节点电压和支路潮流的概率分布计算电压和潮流越限严重度风险指标，得出配电网运行风险综合评价指标，并将其作为粒子的目标函数值。

(7) 判断循环计算得到的解集是否收敛。若解集收敛，则结束循环，输出最优解。否则根据粒子群的个体极值和全局极值计算新的粒子速度和位置，更新充电站接入点的解集粒子群。

3 算例分析

以 IEEE33 节点系统为例对上述电动汽车充电站接入点规划方法进行说明，配电网系统接线如图 4 所示，基准电压和基准功率分别为 12.66 kV 和 10 MVA。

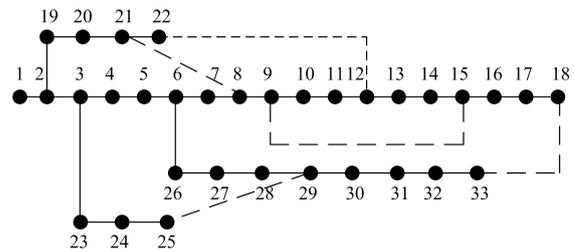


图 4 IEEE33 节点配电系统拓扑图

Fig. 4 IEEE33 node power distribution system topology

3.1 电动汽车充电功率的动态随机分布

根据电动汽车充电功率动态分布模型，得到电动汽车充电功率 24 h 正态概率分布如图 5 所示。

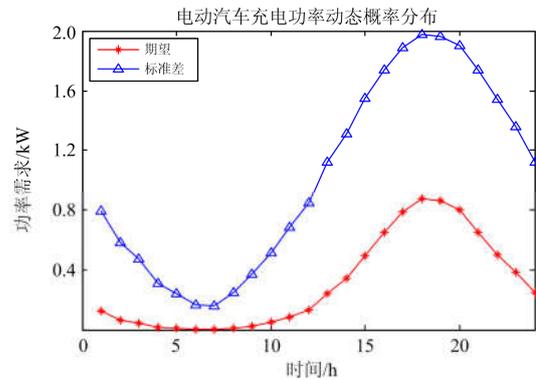


图 5 电动汽车充电功率动态概率分布

Fig. 5 Electric vehicle charging power dynamic probability distribution

图 6 为该配电网接入 30 万辆电动汽车前后该配电网的日负荷曲线变化对比图。从图中可以看出，电动汽车的充电高峰时段与原始负荷中的晚高峰时段有重叠，即电动汽车充电负荷接入配电网后会增加负荷曲线的峰谷差，增加晚高峰时段的系统负荷，使得配电网面临的安全运行风险上升。

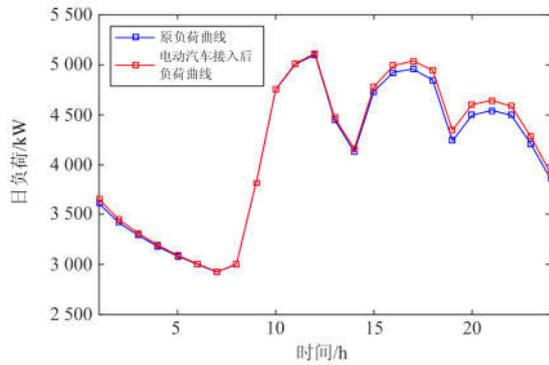


图 6 电动汽车接入前后负荷曲线

Fig. 6 Load curve before and after electric vehicle access

3.2 电动汽车接入点选择

假设 33 节点配电网需接入电动汽车 450 辆, 接入 4 座充电站, 每座充电站最多可接入的电动汽车为 150 辆或 75 辆。考虑到电动汽车充电负荷在空间上的分散性, 充电站也应散落分布在配电网的各区域, 因此设定两座充电站接入点的间隔大于 8。根据电动汽车充电功率动态分布模型, 最大充电功率出现在 20:00 左右, 根据此场景下充电负荷对系统潮流的影响, 求解 4 座充电站的最佳接入点。根据上述条件随机生成原始充电站分布方案, 并与优化后的结果比较。表 1、表 2 分别为优化前、优化后的充电站分布以及接入充电负荷后充电站节点处的电压变化情况。

表 1 原始充电站分布

Table 1 Original charging station distribution

节点	车辆数量/辆	电压越限严重度	
		接入前	接入后
10	150	0	0.27
18	150	0.50	0.61
23	75	0	0
32	75	0.27	0.46

表 2 优化后的充电站分布

Table 2 Optimized charging station distribution

节点	车辆数量/辆	电压越限严重度	
		接入前	接入后
7	75	0	0
16	75	0.36	0.45
22	150	0	0
33	150	0.29	0.49

图 7、图 8 显示了不同电动汽车充电站布局下配电网各节点电压标幺值和各支路有功功率标幺值的变化。从图中可看出在辐射状配电网中, 离根节点越远的节点处电压下降越明显, 电压越限风险越

高; 而越靠近根节点的线路负荷增加越大, 易出现潮流越限风险。在使用优化算法调整充电站布局后, 电压、潮流整体波动量都有所降低, 充电负荷接入对配电网运行安全性的影响变小。

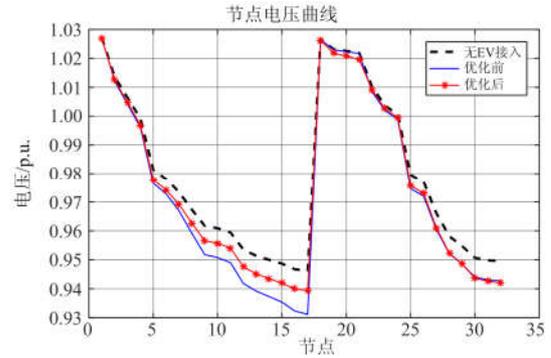


图 7 配电网各节点电压

Fig. 7 Voltage of each node of the distribution network

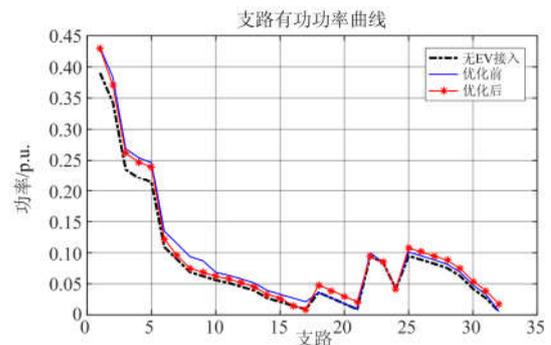


图 8 配电网各支路有功功率

Fig. 8 Active power of each branch of the distribution network

从图 7、图 8 中可以看出, 配电网中电压越限风险最大的节点是节点 18, 潮流越限风险最大的线路是支路 1-2。图 9、图 10 分别为充电站布局优化前后节点 18 的电压累积分布曲线和线路 1-2 的有功累积分布曲线。

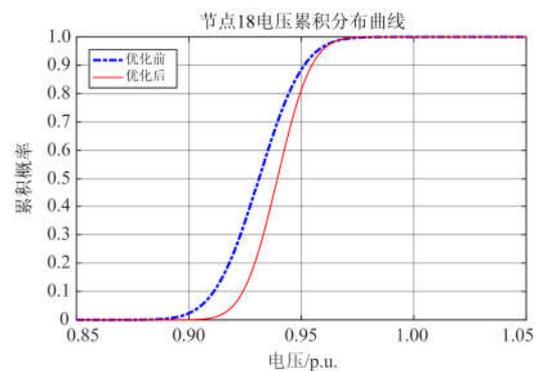


图 9 节点 18 电压累积分布曲线

Fig. 9 Voltage cumulative distribution curve of node 18

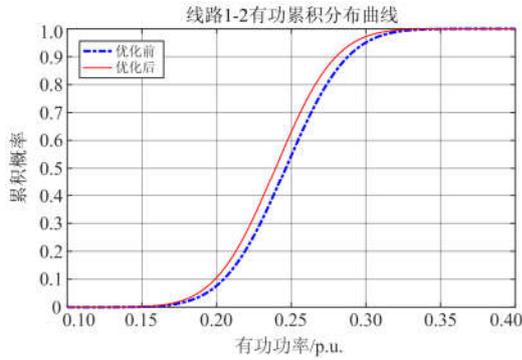


图 10 支路 1-2 有功功率累积分布曲线

Fig. 10 Active power cumulative distribution curve of branch 1-2

从图 9、图 10 中可以看出, 优化后节点 18 电压值升高, 电压越限风险降低; 支路 1-2 有功功率下降, 潮流越限风险降低。表 3 为优化前后配电网的 5 个运行风险评价指标的变化情况。

表 3 优化前后配电网运行风险评价指标

Table 3 Evaluation index of operational risks of distribution power grid before and after optimization

指标	总体节点电压越限严重度	总体支路潮流越限严重度	配电网运行风险综合评价指标	节点 18 电压越限严重度	支路 1-2 潮流越限严重度
优化前	6.29	2.22	0.12	0.64	1.40
优化后	5.15	2.04	0.10	0.52	1.38

从表 3 可以看出, 对充电站进行优化布局后配电网运行风险综合评价指标下降了 16.7%。节点 18 电压越限严重度评价指标下降了 18.8%。支路 1-2 潮流越限严重度评价指标下降了 1.43%。配电网运行安全性有所提升。

4 结论

根据电动汽车起始充电时刻、每日行驶里程等因素构建了电动汽车充电功率动态分布模型。采用半不变量法计算考虑电动汽车充电负荷的配电网概率潮流。以此为基础, 提出了以降低电动汽车充电负荷接入带来的配电网运行风险为目标的电动汽车充电站电气接入节点规划方法。然后以 IEEE 33 节点配电系统为例进行仿真计算, 对方法的有效性进行验证。

算例结果显示, 大量电动汽车充电负荷接入配电网会改变系统原有的潮流分布, 给配电网的安全稳定运行带来风险。而采用本文提出的方法选择充电站的电气接入点可以降低配电网节点电压越限和

支路潮流越限的风险, 减少电动汽车充电负荷接入带来的配电网运行风险, 有利于通过充电设施的优化布局对电动汽车的充电行为进行引导和优化。

参考文献

- [1] 马玲玲, 杨军, 付聪, 等. 电动汽车充放电对电网影响研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 140-148.
MA Lingling, YANG Jun, FU Cong, et al. Review on impact of electric car charging and discharging on power grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 140-148.
- [2] 王汉华, 陈永进. 电动汽车充电设施接入配电网的最优布点规划[J]. 广东电力, 2018, 31(4): 72-78.
WANG Hanhua, CHEN Yongjin. Optimal layout planning for electric vehicle charging facilities to access distribution network[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(4): 72-78.
- [3] 尹钰. 配电系统概率潮流计算方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
YIN Yu. Research on calculation method of distribution network probabilistic load flow[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [4] 李雪, 李渝曾, 李海英. 几种概率潮流算法的比较与分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(3): 12-17.
LI Xue, LI Yuceng, LI Haiying. Comparison and analysis of several probabilistic power flow algorithms[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2009, 21(3): 12-17.
- [5] 莫超, 吴杰康, 简俊威, 等. 考虑源-荷随机协调特性的配电网概率潮流多目标优化方法[J]. 广东电力, 2018, 31(1): 74-81.
MO Chao, WU Jiekang, JIAN Junwei, et al. Multi-objective optimization method for probabilistic power flow in distribution network considering source-load stochastic coordination characteristics[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(1): 74-81.
- [6] 罗庆, 黄民翔. 计及电动汽车的配电网概率潮流计算及接纳能力分析研究[J]. 机电工程, 2015, 32(11): 1498-1503.
LUO Qing, HUANG Minxiang. Probabilistic load flow calculation and accommodated capacity analysis for distribution grid containing electric vehicle[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(11): 1498-1503.
- [7] 张乐平, 许燕灏, 胡红, 等. 电动汽车对电网影响的评价指标与评估方法[J]. 电力建设, 2013, 34(8): 46-51.

- ZHANG Leping, XU Yanhao, HU Hong, et al. Evaluation indices and method for electric vehicles impact on power grid[J]. *Electric Power Construction*, 2013, 34(8): 46-51.
- [8] 胡文平, 巫伟南, 郝婉梦, 等. 含电动汽车的配电网运行风险评估[J]. *现代电力*, 2016, 33(2): 45-50.
- HU Wenping, WU Weinan, HAO Wanmeng, et al. Operation risk assessment on distribution system with the integration of electric vehicles[J]. *Modern Electric Power*, 2016, 33(2): 45-50.
- [9] SUN S, YANG Q, YAN W. Optimal temporal-spatial PEV charging scheduling in active power distribution networks[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 2(2): 379-388. DOI: 10.1186/s41601-017-0065-x.
- [10] 张祥文, 江星星, 王龙, 等. 配电网接纳电动汽车能力评估方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(12): 14-20.
- ZHANG Xiangwen, JIANG Xingxing, WANG Long, et al. Research on assessment methods of distribution network's ability of admitting electric vehicles[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(12): 14-20.
- [11] 邵尹池, 穆云飞, 余晓丹, 等. “车-路-网”模式下电动汽车充电负荷时空预测及其对配电网潮流的影响[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(18): 5207-5219.
- SHAO Yinchu, MU Yunfei, YU Xiaodan, et al. A spatial-temporal charging load forecast and impact analysis method for distribution network using EVs-traffic-distribution model[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(18): 5207-5219.
- [12] 杨田, 刘晓明, 吴其, 等. 电动汽车充电站选址对电压稳定影响的研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(5): 31-37.
- YANG Tian, LIU Xiaoming, WU Qi, et al. Research on impacts of electric vehicle charging station location on voltage stability[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(5): 31-37.
- [13] 吴晨曦, 文福拴, 陈勇, 等. 含有风电与光伏发电以及电动汽车的电力系统概率潮流[J]. *电力自动化设备*, 2013, 33(10): 8-15.
- WU Chenxi, WEN Fushuan, CHEN Yong, et al. Probabilistic load flow of power system with WFs, PVs and PEVs[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2013, 33(10): 8-15.
- [14] 蔡德福, 钱斌, 陈金富, 等. 含电动汽车充电负荷和风电的电力系统动态概率特性分析[J]. *电网技术*, 2013, 37(3): 590-596.
- CAI Defu, QIAN Bin, CHEN Jinfu, et al. Analysis on dynamic probabilistic characteristic of power grid connected with electric vehicle charging load and wind power[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(3): 590-596.
- [15] 隋冰彦, 侯恺, 贾宏杰, 等. 基于最大熵原理的含风电和电动汽车电力系统概率潮流[J]. *电网技术*, 2016, 40(12): 3696-3705.
- SUI Bingyan, HOU Kai, JIA Hongjie, et al. Probabilistic trend of power system including wind power and electric vehicle based on maximum entropy principle[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(12): 3696-3705.
- [16] 孙国强, 李逸驰, 沈海平, 等. 含电动汽车和分布式电源的配电网动态概率潮流计算[J]. *华东电力*, 2014, 42(6): 1104-1109.
- SUN Guoqiang, LI Yichi, SHEN Haiping, et al. Dynamic probabilistic power flow calculation of distribution network with electric vehicle and distributed power supply[J]. *East China Electric Power*, 2014, 42(6): 1104-1109.
- [17] ROMERO-RUIZ, PÉREZ-RUIZ, MARTIN, et al. Probabilistic congestion management using EVs in a smart grid with intermittent[J]. *Electric Power Systems Research*, 2016, 137: 155-162.
- [18] 任杰, 车长明, 李建祥, 等. 含电动汽车接入的配网潮流计算及调度策略[J]. *电子技术应用*, 2015, 41(10): 136-138.
- REN Jie, CHE Changming, LI Jianxiang, et al. Power flow calculation and scheduling strategies for distribution grids with electric vehicle integration[J]. *Application of Electronic Technique*, 2015, 41(10): 136-138.
- [19] 所丽, 唐巍, 白牧可, 等. 考虑削峰填谷的配电网集中型充电站选址定容规划[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(7): 1052-1060.
- SUO Li, TANG Wei, BAI Muke, et al. Locating and sizing of centralized charging stations in distribution network considering load shifting[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(7): 1052-1060.
- [20] 郭建龙, 文福拴, 袁军, 等. 电动汽车充电站在配电系统中电气接入点的最优选择[J]. *电力建设*, 2017, 38(1): 1-7.
- GUO Jianlong, WEN Fushuan, YUAN Jun, et al. Optimal selection of electrical connecting nodes of electric vehicle charging stations in distribution systems[J]. *Electric Power Construction*, 2017, 38(1): 1-7.
- [21] 王满商, 李正明, 汪洋. 考虑电动汽车不确定性因素的配电网分布式电源优化布置[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(1): 67-72.

- WANG Manshang, LI Zhengming, WANG Yang. Distribution network distributed power supply configuration considering the uncertainties of electric vehicle[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 67-72.
- [22] 卫鹏, 刘建坤, 周前, 等. 基于半不变量和 Gram-Charlier 级数展开法的随机潮流算法[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1): 34-38.
- WEI Peng, LIU Jiankun, ZHOU Qian, et al. A probabilistic power flow algorithm based on semi-variable and Gram-Charlier series expansion[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 34-38.
- [23] 余昆, 曹一家, 陈星莺, 等. 含分布式电源的地区电网动态概率潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 20-25.
- YU Kun, CAO Yijia, CHEN Xingying, et al. Dynamic probability power flow of district grid containing distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 20-25.
- [24] 王涛, 王淳, 李成豪. 基于 Copula 函数及 Rosenblatt 变换的含相关性概率潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(21): 18-24.
- WANG Tao, WANG Chun, LI Chenghao. Probabilistic load flow calculation based on Copula function and Rosenblatt transformation considering correlation among input variables[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(21): 18-24.
- [25] 韩磊, 宋莉. 基于半不变量的配电网概率潮流建模及方法[J]. 陕西电力, 2017, 45(4): 44-49.
- HAN Lei, SONG Li. Probabilistic tidal current modeling and method based on semi-invariant distribution network[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(4): 44-49.
- [26] 国家电网公司. 输变电设备风险评估导则: Q/GDW 1903—2013[S]. 北京: 中国电力出版社, 2014
- State Grid Corporation of China. Guidelines for risk assessment of power transmission and transformation equipment: Q/GDW 1903—2013[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2014
- [27] 张顶学, 关治洪, 刘新芝. 一种动态改变惯性权重的自适应粒子群算法[J]. 控制与决策, 2008, 23(11): 1253-1257.
- ZHANG Dingxue, GUAN Zhihong, LIU Xinzhi. Adaptive particle swarm optimization algorithm with dynamically changing inertia weight[J]. Control and Decision, 2008, 23(11): 1253-1257.
- [28] 金义雄, 程浩忠, 严健勇, 等. 改进粒子群算法及其在输电网规划中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 46-50.
- JIN Yixiong, CHENG Haozhong, YAN Jianyong, et al. Improved particle swarm optimization method and its application in power transmission network planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 46-50.

收稿日期: 2018-12-07; 修回日期: 2019-07-03

作者简介:

张永明(1967—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统可靠性研究; E-mail: 439746008@qq.com

姚志力(1996—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为微电网规划和设计; E-mail: yz18217185269@163.com

李菁(1993—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光伏发电控制, 电机控制与系统节能; E-mail: 1119811043@qq.com

王志新(1964—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为风电、光伏发电控制, 电机控制与系统节能。E-mail: wangzxin@sjtu.edu.cn

(编辑 魏小丽)