

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181106

电动汽车快充对配电网的风险研究

侯慧¹, 徐焘¹, 柯贤彬², 薛梦雅¹, 李正天³, 王成智⁴

(1. 武汉理工大学自动化学院, 湖北 武汉 430070; 2. 国网电科院武汉南瑞有限责任公司, 湖北 武汉 430074;
3. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430070; 4. 国网湖北省电力公司运检部, 湖北 武汉 430077)

摘要: 电动汽车快速充电行为将会对电网产生巨大的影响, 探讨电动汽车快充对电网的安全风险具有重要意义。考虑电动汽车接入对电网的影响, 从多方面风险指标体系出发, 建立立体化的风险指标。通过 K-L 变换进行信息融合, 并运用基于多属性决策的节点重要性综合评价方法进行综合评价, 得到各电动汽车占有率下的电网综合风险排序。研究结果表明: 通过综合风险评估方法得到, 不考虑电动汽车带来的经济收益时, 电动汽车随着占有率的增大, 对电网带来的风险越来越大; 当考虑电动汽车带来的经济收益后, 电网的风险会在某个区间相对更大, 对某一区域的快充电动汽车容纳数量具有一定的指导意义。

关键词: 电动汽车; 快速充电; 风险指标; K-L 变换; 综合评价

Research on risks of electric vehicle charging to distribution network

HOU Hui¹, XU Tao¹, KE Xianbin², XUE Mengya¹, LI Zhengtian³, WANG Chengzhi⁴

(1. Institute of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Wuhan Nanrui Electric Co., Ltd., State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China; 3. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430070, China; 4. Operation and Maintenance Department, State Grid Hubei Electric Power Company, Wuhan 430077, China)

Abstract: The rapid charging behavior of electric vehicles will have a huge impact on the power grid. It is of great significance to investigate the fast charge of electric vehicles on the safety risk of power grids. Considering the impact of electric vehicle access on the power grid, a multi-faceted risk indicator system is established to establish three-dimensional risk indicators. Information fusion is performed through K-L transformation, and a comprehensive evaluation method of nodal importance based on multi-attribute decision-making is used to evaluate comprehensively. The comprehensive risk ranking of the grid under the share of electric vehicles is got. The results of the study show that through comprehensive risk assessment methods, excluding the economic benefits brought by electric vehicles, electric vehicles will become more and more dangerous with the increase in occupancy rate; when electric vehicles are considered after the economic benefits, the risk of the power grid will be relatively larger in a certain interval, which has a certain guiding significance for the number of fast-charged vehicles in a certain area.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. E070403).

Key words: electric vehicle; rapid charging; risk index; K-L transform; comprehensive evaluation

0 引言

电动汽车的随机充电行为将对电力系统的安全稳定运行带来新的挑战^[1-3], 为保证高渗透率电动汽车环境下智能电网的可靠性和安全性, 电动汽车大量接入电网后的风险值得研究。

电动汽车接入电网产生的影响因素主要是配电网的安全可靠性以及用户与电网侧的经济性。在进行风险评估时, 考虑电力系统的评估方法, 文献[4]总结了电力系统风险评估大体经历了确定性评估、概率评估和风险评估等三个阶段。确定性评估主要是对电力系统长期以来的运行进行统计, 达到对电网某个固定时段的风险分析; 而概率评估方法则利用了概率计算的方法, 根据历史数据对后面的风险

进行预测分析。文献[5-7]风险评估阶段在综合考虑电力系统各种不确定因素的基础上,将风险指标定义为事故的概率与事故对系统产生后果的乘积,是更有效的风险评估方法。文献[8-10]研究了风险评估的计算方法,通常包括状态枚举法、蒙特·卡罗方法等。但这些方法只适用于一些特定的风险指标计算,不能对一些事件的综合风险进行评估。

在电动汽车接入的电力系统风险指标体系构建方面,一些文献对电动汽车接入的电力系统风险指标进行总结,文献[11-13]提出了电动汽车对电力系统影响的评估方法和步骤,并建立了发、输、配电网的评估指标体系,但仅建立了框架,未对电动汽车入网后的风险做进一步的具体计算分析。文献[14-15]研究电动汽车随机接入对电力系统的电压和潮流带来的风险,然而,没有进行多方面的风险考虑。

针对以往的风险评估考虑不够全面、使用的方法不能达到综合评估的效果,本文将从多方面风险指标体系出发,研究电动汽车与电网的融合带来的风险问题,建立立体化的风险指标,并运用综合评价理论对各电动汽车占有率下的电网风险进行综合评估,指导电动汽车在电网中的安全可靠运行。

1 研究工具及求解算法

1.1 K-L 变换基本理论

K-L 变换是一种利用正交变换来降低维度或者压缩数据的方法^[16],在保证分类精度的条件下,选择能代表原始数据信息的主分量,达到简化计算的目的。

假设原始数据的特征矩阵为 \mathbf{X} , 其大小为 $M \times N$, M 表示特征参数的维数, N 表示样本的个数,原理如下:

矩阵 \mathbf{X} 的协方差矩阵用 \mathbf{C} 表示,必存在矩阵 \mathbf{P} 能将矩阵 \mathbf{C} 转化为对角阵 \mathbf{D} , 即

$$\mathbf{P}\mathbf{P}^T = \mathbf{P}^T\mathbf{P} = \mathbf{I} \quad (1)$$

$$\mathbf{P}^T\mathbf{C}\mathbf{P} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M) = \mathbf{D} \quad (2)$$

式中: \mathbf{I} 为单位阵; 对角阵 \mathbf{D} 包含 \mathbf{C} 的 M 个不同特征值; 因 \mathbf{P} 为正交阵, 所以有

$$\mathbf{C}\mathbf{P} = \mathbf{P}\mathbf{D} \quad (3)$$

矩阵 \mathbf{P} 中任意一维向量 p_j 是矩阵 \mathbf{C} 对应于特征值 λ_j 的特征向量, 并且不同特征值所对应的特征向量之间相互归一正交。因此, K-L 变换式定义为^[17]

$$\mathbf{Y} = \mathbf{P}^T\mathbf{X} \quad (4)$$

式中: 矩阵 \mathbf{P}^T 代表某一分量的占比; 矩阵 \mathbf{Y} 表示变换处理后的各个主分量大小。在协方差矩阵 \mathbf{C} 中, 其中几个较大的特征值对应的特征向量包含了

矩阵 \mathbf{X} 的主要信息。通过主成分累积贡献率 γ_k 来选择特征向量的个数, 其中主成分贡献率 ρ_j 和 γ_k 的公式为

$$\rho_j = \frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^M \lambda_j} \quad j=1, 2, \dots, M \quad (5)$$

$$\gamma_k = \sum_{j=1}^k \rho_j \quad j=1, 2, \dots, M \quad (6)$$

式中, k 为将要选择的特征向量的维数, 当主成分累积贡献率 $\gamma_k \geq 85\%$ 时, 新的矩阵代表了主要信息, 可以实现信息的融合。

1.2 基于多属性决策的节点重要性综合评价

基于多属性决策的节点重要性综合评价方法适用于多种影响因素下对某个事件的重要性进行评价计算^[18], 其方法如下:

网络中含有 N 个节点, 决策方案矩阵为 $\mathbf{A} = \{A_1, \dots, A_N\}$, 评价节点重要性的指标有 M 个, 属性集合记为 $S = \{S_1, \dots, S_M\}$, 第 i 个节点的第 j 个指标记作 $A_i(S_j)$, 得到决策矩阵并进行处理。

$$r_{ij} = \begin{cases} A_i(S_j)/A_i(S_j)^{\max} & \text{效益型指标} \\ A_i(S_j)/A_i(S_j)^{\min} & \text{成本型指标} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $A_i(S_j)^{\max} = \max\{A_i(S_j) | 1 \leq i \leq N\}$; $A_i(S_j)^{\min} = \min\{A_i(S_j) | 1 \leq i \leq N\}$ 。

将决策矩阵进行标准化后得到新矩阵 $\mathbf{R} = (r_{ij})_{N \times M}$, 根据熵技术法计算各属性所占权重, 第 j 个指标的权重 $w_j (j=1, \dots, M)$, $\sum w_j = 1$, 加权矩阵为

$$\mathbf{Y} = (y_{ij}) = (w_j r_{ij}) \quad (8)$$

对加权矩阵决策处理, 正理想决策为 A^+ , 负理想决策为 A^- 。

$$\begin{cases} A^+ = \{\max(y_{i1}, \dots, y_{im})\} = \{y_1^{\max}, \dots, y_m^{\max}\} \\ A^- = \{\min(y_{i1}, \dots, y_{im})\} = \{y_1^{\min}, \dots, y_m^{\min}\} \end{cases} \quad (9)$$

矩阵元素 A_i 到 A^+ 和 A^- 的距离分别为

$$\begin{cases} D_i^+ = [\sum_{j=1}^m (y_{ij} - y_j^{\max})^2]^{1/2} \\ D_i^- = [\sum_{j=1}^m (y_{ij} - y_j^{\min})^2]^{1/2} \end{cases} \quad (10)$$

各电动汽车占有率下风险贴适度 Z 为

$$Z = D_i^- / (D_i^- + D_i^+), \quad 0 \leq Z \leq 1 \quad (11)$$

2 电动汽车快充综合风险评估

2.1 电动汽车快速充电风险指标构建

本文对电动汽车快速充电对电网的影响进行分

析, 从多方面考虑来建立风险指标体系。风险指标体系如表 1 所示。

表 1 电动汽车对配电网风险的指标体系
Table 1 Electric vehicle's risk index system for distribution network

	短期安全性 指标	长期安全可 靠性指标	电网高效 性指标	经济性指标
配电网	电压偏差、 电流负载率	负荷方差、 节点失效率	平均负 荷率	网损、充电桩总容 量、负荷损失

2.1.1 短期安全性指标

电动汽车快速充电会给电网带来短期安全风险, 影响指标有电压偏移和电流负载率, 其计算方法如下。

1) 电压偏移。电动汽车在充电时, 其所用到的充电桩会产生大量的无功功率, 这会对电能质量如电压偏移产生影响, 严重时还会影响系统的安全稳定运行。

节点 i 的电压偏移为

$$U\% = \frac{|U_i - U_0|}{U_0} \times 100\% \quad (12)$$

式中: U_i 为节点 i 的电压; U_0 为系统未接入负荷时的电压。

2) 电流负载率。电流负载率为线路出现的最大负荷与线路最大承载负荷的比, 可用线路出现的最大电流与额定电流的比表示, 电流计算公式为

$$I_j = \sqrt{((P_{j,0} + P_j)^2 + (Q_{j,0} + Q_j)^2) / (U_j^2)} \quad (13)$$

式中: $P_{j,0}$ 、 $Q_{j,0}$ 分别为节点 j 的原始有功负荷和无功负荷; P_j 、 Q_j 分别为节点 j 接入的有功负荷与无功负荷; U_j 为节点 j 的电压。额定电流计算为电力系统在电压取最大时的电流承载值。

2.1.2 长期安全可靠性指标

电动汽车在电网中快速充电, 电网负荷会出现不同的波动, 在长期过程中, 电网负荷方差会带来网损等经济损失; 同时, 电网节点负荷可能超过额定值会造成设备停运。所以, 长期安全可靠性风险指标有电网负荷方差和设备停运率, 其计算方法如下。

1) 电网负荷方差。电网负荷方差影响电网的损耗, 负荷方差计算方法如下。

在一定的电动汽车数量下, 设每时刻的放电负荷为 x_t (t 从 1 到 24), 电网负荷方差为

$$f_1(x_t) = \left\{ \sum_{t=1}^{24} [(x_t + P_{\text{load}}(t) - \mu)^2] \right\} / 24 \quad (14)$$

式中: $P_{\text{load}}(t)$ 为第 t 小时的电网负荷, 由原始的总

负荷曲线可以得到; μ 为计及电动汽车充电负荷的电网等效负荷平均值。

2) 节点失效率。考虑配电网的故障率, 假设配电网中元件 i 强迫停运率为 P_i , j 为抽取的天数, 使用蒙特卡罗方法抽取随机数得到矩阵元素 R_{ij} , 描述系统的运行状态, 得到状态矩阵 S_{ij} 。

$$S_{ij} = \begin{cases} 0, & R_{ij} > P_i (\text{工作状态}) \\ 1, & 0 < R_{ij} < P_i (\text{失效状态}) \end{cases} \quad (15)$$

如果当所有元件 h 中有至少 n 个元件发生故障时系统才发生故障, 可得系统状态矩阵为

$$S_{ij}^l = \begin{cases} 0, & 0 < \sum_{i=1}^h S_{ij} < n \text{ 系统工作状态} \\ 1, & \sum_{i=1}^h S_{ij} > n \text{ 系统故障状态} \end{cases} \quad (16)$$

当电动汽车接入后, 假设仿真天数为 l , 电网节点出现过负荷时视为节点失效, 通过模拟得到仿真期间节点的过负荷次数为 m , 节点失效率包括节点元件失效率和因电动汽车接入节点过负荷的失效, 则各节点的失效率 $P(i)$ 为

$$P(i) = \frac{\sum_{j=1}^l S_{ij}^l + m}{l} \quad (17)$$

2.1.3 电网高效性指标

电动汽车快速充电会影响电网高效性, 影响指标有平均负荷率, 其计算方法如下。

平均负荷率的计算为一段时间内使用的平均负荷除以系统承载容量, 系统承载容量计算为电压最大下限时的系统接入最大负荷容量。本文中计算时, 取 24 h 进行计算, 平均负荷率为

$$P\% = \omega / P_c \quad (18)$$

式中: ω 为系统 24 h 的平均负荷; P_c 为系统可承载容量。

2.1.4 经济性指标

电动汽车快速充电会影响电网经济性, 影响指标有线路网损、充电桩总容量及节点负荷损失, 其计算方法如下。

1) 线路网损。电动汽车接入电网后, 由于负荷增大, 影响电网潮流分布, 影响电网损耗。考虑电动汽车在一天 24 h 产生的电能损耗, 网损表达式为

$$\sum_{t=1}^{24} R_l (I_{l,t}^{a2} + I_{l,t}^{b2}) \Delta t \quad (19)$$

式中: R_l 为线路 l 的电阻; $I_{l,t}^{a2} + I_{l,t}^{b2}$ 为线路 l 的电流; Δt 为时间间隔。

2) 充电桩总容量计算。电网在规划充电桩满足的充电负荷需求时,用充电桩备用容量来表示^[19]。考虑电动汽车充电情况,接入时间假设为 24 h;置信度一般为 90%、95%或 99%,最后是容量的分布函数,对每一时刻 t ,原始负荷和电动汽车充电负荷都服从正态分布,设置信度 β 为 95%, f_t 为负荷的分布函数,此时的风险备用为

$$\alpha(t) = \max \{ \alpha t : \Pr(f_t > \alpha t) > \beta \} \quad (20)$$

计算出该时刻的备用容量后,除以一个固定的备用率 θ , d_t 为每一时刻的负荷权重,考虑不同时刻电动汽车随机充电所需负荷的变化,充电桩的备用容量为

$$\varphi = \sum_{t=1}^T d_t \times \frac{\alpha t}{\theta} \quad (21)$$

将每一时刻的权重与容量进行加权得到最终的备用容量,由于容量与每时刻的负荷成正比, L_t 表示 t 时刻的负荷,故可得

$$d_t = L_t / (L_1 + L_2 + \dots + L_T) \quad (22)$$

3) 节点负荷损失。当电动汽车接入后,节点 i 处电动汽车充电负荷为 $P_C(i)$,用户负荷为 $P_L(i)$,节点的额定容量为 $P_G(i)$ 。配电网节点失效存在两种情况:当节点由于元件失效出现故障后,该节点全部负荷将会损失;当节点未出现故障时,节点失负荷为充电总负荷与节点额定容量之差。设节点负荷损失设为 $P_{Loss}(i)$,则

$$P_{Loss}(i) = \begin{cases} P_G(i) & \text{节点失效} \\ P_C(i) + P_L(i) - P_G(i) & \text{节点正常} \end{cases} \quad (23)$$

2.2 综合风险评估

2.2.1 综合评价理论

综合评价是一种从客观事实出发的观点,但综合评价存在一些不可避免的主观性,作为一种评价手段综合评价与评价模型以及计算过程是无关系的,应该综合考虑各种因素选择最适合的模型来进行评价。处理过程包括:确定评价目的、建立评价指标体系、确定各指标权重系数、选择评价模型、计算综合评价值并进行排序或分类^[20]。

2.2.2 综合风险评估过程

本文研究电动汽车接入后在各种电动汽车占有率下的电网风险。评价目的为对风险进行排序;建立的评价指标体系为短期安全性指标、长期安全可靠性指标、电网高效性指标和经济性指标;确定各指标权重系数时使用熵技术法;选择的评价模型为K-L变换及基于多属性决策的节点重要性综合评价方法;最后计算各种电动汽车占有率下配电网风险

综合评价值并进行排序。综合风险评价流程如图 1 所示。

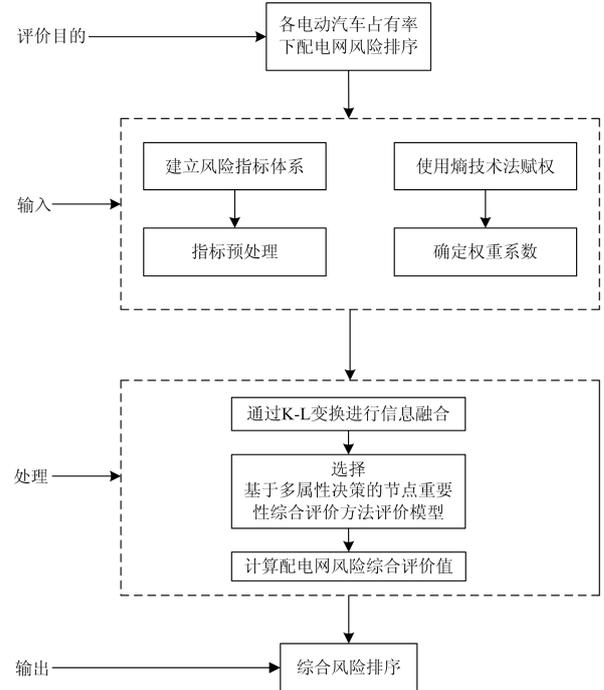


图 1 综合风险评价流程图

Fig. 1 Comprehensive risk assessment flow chart

3 算例分析

电动汽车进行快速充电时,假设电动汽车接入 IEEE-33 节点系统中的 3 节点,同时该节点处于 IEEE-RBTS BUS6 系统中。在 IEEE-33 节点系统中进行潮流计算,得出电压偏差、电流负载率、负荷方差、平均负荷率、网损、充电桩总容量等风险指标。在 IEEE-RBTS BUS6 系统中,可计算设备停运率和停运后的负荷损失。

根据电动汽车快充标准充电电压为 440 V,充电电流为 63 A^[21],电动汽车快速充电功率为 27.7 kW·h,假设取充电时间为 1 h,用户数量为 3 000,电动汽车占有率从 20%到 50%,以 3%为间隔,得到 11 组电动汽车占有率值,风险指标有 8 组值。

假设电动汽车到达充电站的时间与汽油车到达加油站的时间相同^[22],计算电压偏移、负载率,选择 24 h 中电压偏移和电流负载率最大值作为风险指标。假设 20%电动汽车占有率条件下经济效益为 a ,则各电动汽车占有率下的经济效益与电动汽车数量成比例。这些指标中电压和负载率是效益型指标,越小越好;其他指标为成本型指标,越大越好。根据各指标对电网风险的作用进行归一化处理后,得到风险值如表 2 所示。

表 2 各电动汽车占有率下的风险指标归一化处理

Table 2 Normalization processing of risk index under the occupancy rate of each electric vehicle

EV 占有率	50%	47%	44%	41%	38%	35%	32%	29%	26%	23%	20%
电压偏移	1.000	0.754 7	0.528 3	0.339 6	0.150 9	-0.037 7	-0.245 3	-0.434 0	-0.622 6	-0.811 3	-1.000 0
负载率	1.000	0.763 2	0.527 7	0.336 7	0.145 8	-0.045 2	-0.236 2	-0.439 8	-0.618 1	-0.809 0	-1.000 0
网损/(kW·h)	1.000	0.796 6	0.473 3	0.276 5	0.205 8	-0.106 2	-0.292 1	-0.475 1	-0.653 3	-0.828 4	-1.000 0
负荷方差	1.000	0.772 5	0.551 0	0.335 6	0.126 3	-0.076 8	-0.273 7	-0.464 5	-0.649 2	-0.827 7	-1.000 0
平均负荷率	-1.000	-0.839 9	-0.635 5	-0.431 1	-0.226 6	-0.022 2	0.182 3	0.386 7	0.591 1	0.795 6	1.000 0
设备停运	1.000	0.995 2	0.997 1	0.595 6	-0.204 6	-0.198 8	-0.190 2	-0.608 1	-0.993 3	-0.996 2	-1.000 0
负荷损失	1.000	0.557 9	0.180 8	-0.201 5	-0.477 6	-0.589 8	-0.682 6	-0.981 4	-0.990 7	-1.000 0	-0.998 3
充电桩总容量	1.000	0.270 9	0.129 7	-0.011 5	-0.152 8	-0.294 0	-0.435 2	-0.576 4	-0.717 6	-0.858 8	-1.000 0
经济收益	-1.000	-0.800	-0.600 0	-0.400 0	-0.200 0	0.000 0	0.200 0	0.400 0	0.600 0	0.800 0	1.000 0

这些指标中有相互关联的指标, 为消除特征向量之间的相关性, 降低电动汽车风险指标输入的维数, 采用 K-L 变换将电动汽车接入配电网的风险特征向量进行降维, 进行信息融合, 得到主分量特征矩阵, 矩阵 d 值如式(24)所示。

$$d = \begin{bmatrix} -0.1663 & -0.1874 & 2.9888 \\ -0.0515 & 0.3753 & 2.2165 \\ 0.0542 & 0.6064 & 1.5879 \\ -0.1535 & 0.6188 & 0.8665 \\ -0.5942 & 0.3415 & 0.0643 \\ -0.3633 & 0.4110 & -0.4381 \\ -0.1464 & 0.4646 & -0.8956 \\ -0.3234 & 0.4153 & -1.5872 \\ -0.3284 & 0.2022 & -2.1576 \\ -0.0824 & 0.1979 & -2.5762 \\ 0.1672 & 0.1863 & -2.9882 \end{bmatrix} \quad (24)$$

矩阵中行数代表电动汽车占有率由 50% 到 20% 的变化, 列数为风险指标进行信息融合后的指标分量, 然后将三个主分量进行多属性决策, 利用基于多属性决策的节点重要性综合评价方法计算得到各电动汽车占有率下风险贴进度。

不考虑电动汽车带来的经济收益的风险评估, 进行综合评估后得到电动汽车占有率从 50% 到 20% 的综合风险 Z 值变化, 如表 3 所示。

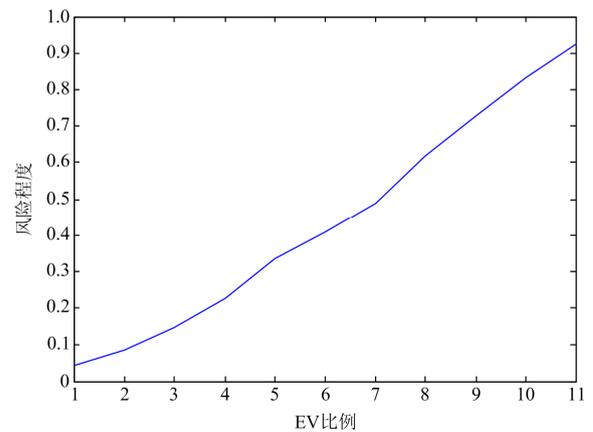
由表 3 可得各种电动汽车占有率下风险程度变化曲线如图 2 所示。

由图 2 可直观地看出, 在不考虑电动汽车带来的经济收益时, 随着电动汽车占有率的变大, 电动汽车进行快充带来的经济风险也随之增大。

当考虑电动汽车带来的经济收益时, 得到电动汽车占有率从 50% 到 20% 的综合风险 Z 值变化, 如表 4 所示。

表 3 不考虑电动汽车带来的经济收益的各电动汽车占有率下 Z 值变化Table 3 Z value change under the occupancy rate of each electric vehicle when not consider the economic benefits of electric vehicles

EV 占有率	50%	47%	44%	41%	38%	35%
Z 值	0.926 4	0.832 9	0.730 8	0.619 1	0.490 4	0.408 5
EV 占有率	32%	29%	26%	23%	20%	—
Z 值	0.335 9	0.227 0	0.147 7	0.085 2	0.042 2	—

图 2 不考虑电动汽车带来经济收益的 Z 值变化Fig. 2 Z value change when not consider the economic benefits of electric vehicles表 4 考虑电动汽车带来的经济收益的 Z 值变化Table 4 Z value change when considering the economic benefits of electric vehicles

EV 占有率	50%	47%	44%	41%	38%	35%
Z 值	0.835 7	0.858 9	0.771 7	0.653 4	0.508 9	0.436 8
EV 占有率	32%	29%	26%	23%	20%	—
Z 值	0.373 2	0.264 6	0.164 8	0.129 1	0.127 7	—

由表 4 可得各种电动汽车占有率下风险程度变化曲线, 如图 3 所示。

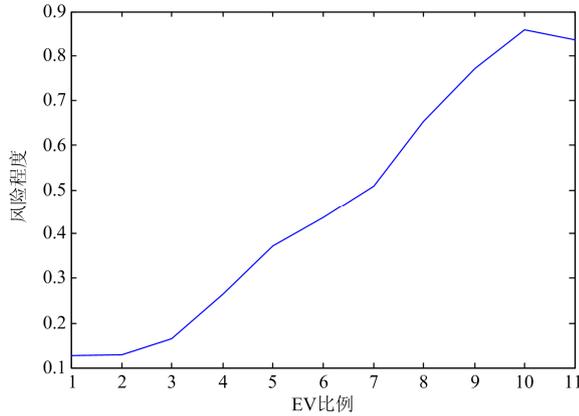


图 3 考虑电动汽车带来经济收益的 Z 值变化
Fig. 3 Z value change when considering the economic benefits of electric vehicles

由图 3 可得, 在考虑电动汽车带来的经济收益时, 在一定范围内, 随着电动汽车占有率的变大, 电动汽车进行快充带来的经济风险也随之增大; 在某个区间内, 电动汽车占有率增大, 综合风险没有变大, 因为考虑电动汽车数量增大带来的经济效益, 对风险增大具有减缓作用, 由此规律可引导电动汽车进行快充数量的选择。

4 结论

考虑电动汽车快速充电对配电网的影响, 从不同角度建立配电网风险指标, 计算不同电动汽车占有率下, 配电网的风险指标矩阵, 并对风险矩阵先进行信息融合, 提取主分量信息, 进一步使用基于多属性决策的节点重要性综合评价方法进行综合风险评估。得到结论: 不考虑电动汽车带来的经济收益时, 电动汽车随着占有率的增大, 对电网带来的风险越来越大; 当考虑电动汽车带来的经济收益后, 电网的风险会在某个区间相对更大, 对某一区域的快充电动汽车容纳数量具有一定的指导意义, 指导电动汽车在电网中友好接入。对电动汽车接入电网的风险评估, 需进一步考虑电动汽车快速充电行为对电网带来的安全风险并进行实时预估。

参考文献

[1] 胡泽春, 宋永华, 徐智威, 等. 电动汽车接入电网的影响与利用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 1-10.
HU Zechun, SONG Yonghua, XU Zhiwei, et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 1-10.

[2] 赵俊华, 文福拴, 杨爱民, 等. 电动汽车对电力系统的影响及其调度与控制问题[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 2-10.
ZHAO Junhua, WEN Fushuan, YANG Aimin, et al. Impacts of electric vehicles on power systems as well as the associated dispatching and control problem[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 2-10.

[3] KONG L, HAN J, XIONG W, et al. A review of control strategy of the large-scale of electric vehicles charging and discharging behavior[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 199: 1-7.

[4] 张毅明, 张忠会, 姚峰, 等. 基于风险理论的电力系统元件风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 73-78.
ZHANG Yiming, ZHANG Zhonghui, YAO Feng, et al. The risk assessment of power system components based on the risk theory[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(23): 73-78.

[5] 王成亮. 电力系统运行风险概率评估模型和算法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
WANG Chengliang. Study on model and algorithm for probabilistic evaluation of power system operational risk[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.

[6] FOUAD A, AZHOU Q, VITTAL V. System vulnerability as a concept to assess power system dynamic security[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(2): 1009-1015.

[7] CHEN L, LI J, CAI J. Research of risk-based security assessment of power system[C] // 2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), July 6-9, 2011, Weihai, China: 1335-1340.

[8] 周家启, 赵霞. 电力系统风险评估方法和应用实例研究[J]. 中国电力, 2006, 39(8): 77-81.
ZHOU Jiaqi, ZHAO Xia. Models and methods applied to risk assessment of power systems[J]. Electric Power, 2006, 39(8): 77-81.

[9] LI W. Risk assessment of power systems: models, methods, and applications[M]. John Wiley & Sons, 2014.

[10] ZHANG L Y, DING L J, XIAO X Y, et al. Risk assessment of power system cascading failure considering hidden failures and violation of temperature[J]. Advance Materials Research, 2011, 354: 1083-1087.

[11] 田立亭, 张明霞, 汪奂伶. 电动汽车对电网影响的评估和解决方案[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 43-49.
TIAN Liting, ZHANG Mingxia, WANG Huanling.

- Evaluation and solutions for electric vehicles' impact on the grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 43-49.
- [12] ZHAO J H, WEN F S, DONG Z Y, et al. optimal dispatch of electric vehicles and wind power using enhanced particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2012, 8(4): 889-899.
- [13] 殷自力, 郑佩祥, 陈宇星, 等. 含电动汽车和分布式电源的配电网的可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 77-83.
YIN Zili, ZHENG Peixiang, CHEN Yuxing, et al. Reliability evaluation for distribution network with electric vehicle and distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 77-83.
- [14] 王龙宇, 刘灿, 王丙东, 等. 考虑微网充电站影响的输电网络风险评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 114-121.
WANG Longyu, LIU Can, WANG Bingdong, et al. Risk based assessment method for transmission system considering the influence of micro-grid charging station[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 114-121.
- [15] 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.
- [16] 杨健, 杨静宇, 高建贞. 基于并行特征组合与广义 K-L 变换的字符识别[J]. 软件学报, 2003, 14(3): 490-495.
YANG Jian, YANG Jingyu, GAO Jianzhen. Handwritten character recognition based on parallel feature combination and generalized K-L expansion[J]. Journal of Software, 2003, 14(3): 490-495.
- [17] DING Shifei, JIN Fengxiang. Information characteristics of discrete K-L transform based on information entropy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2003, 13(3): 729-732.
- [18] 于会, 刘尊, 李勇军. 基于多属性决策的复杂网络节点重要性综合评价方法[J]. 物理学报, 2013, 62(2): 54-62.
YU Hui, LIU Zun, LI Yongjun. Key nodes in complex networks identified by multi-attribute decision-making method[J]. Chinese Journal of Physics, 2013, 62(2): 54-62.
- [19] 薛志英. 基于风险理论的含风电电力系统短期充裕性评估与决策[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
XUE Zhiying. Risk theory based short term adequacy evaluation and decision making for power systems with wind power[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [20] 苏为华. 我国多指标综合评价技术与应用研究的回顾与认识[J]. 统计研究, 2012, 29(8): 98-107.
SU Weihua. Review and recognition on the research multi-indicators comprehensive evaluation in China[J]. Statistical Research, 2012, 29(8): 98-107.
- [21] 豪彦. 《电动汽车传导充电用连接装置》标准将发布[J]. 汽车与配件, 2011(35): 34-39.
HAO Yan. The standard for connecting devices for conductive charging of electric vehicles will be released[J]. Automobiles & Parts, 2011(35): 34-39.
- [22] 张洪财, 胡泽春, 宋永华, 等. 考虑时空分布的电动汽车充电负荷预测方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1): 13-20.
ZHANG Hongcai, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. a prediction method for electric vehicle charging load considering spatial and temporal distribution[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 13-20.

收稿日期: 2018-08-28; 修回日期: 2018-09-29

作者简介:

侯 慧(1981—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为能源互联网、电动汽车智能充电导航、电力系统分析、稳定和控制等; E-mail: husthou@126.com

徐 焘(1995—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电动汽车智能充电导航; E-mail: 1768871679@qq.com

柯贤彬(1993—), 男, 硕士, 主要研究方向为电动汽车智能充电导航、电力系统分析。E-mail: 1169271991@qq.com

(编辑 魏小丽)