

考虑出行温度影响的电动汽车 充电功率需求分析

张新城¹, 刘志珍¹, 侯延进², 宗沙沙¹

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 齐鲁工业大学(山东省科学院) 山东省科学院能源研究所, 山东 济南 250014)

摘要:出行温度会通过多方面的干扰直接影响到电动汽车的具体能耗情况,从而导致在不同温度下其充电功率需求的差异。依据统计学原理,在大量样本支撑下,采用最小二乘法获取电动汽车单位公里电耗与出行温度的具体联系,提出一种计及出行温度的电动汽车充电功率计算模型。以北京市某小区配电网为例,采用蒙特卡洛模拟不同季节(温度)下电动汽车充电负荷的具体差异,分析不同季节下电动汽车负荷对区域电网产生的不同影响,为将来电动汽车充电行为的有序控制提供一种新的分季节调度思路。

关键词:电动汽车;充电功率;出行温度;最小二乘法;蒙特卡洛模拟

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.04.016 中图分类号:TM761 文章编号:1673-9140(2021)04-0124-08

Analysis of charging power demand of electric vehicles considering the influence of travel temperature

ZHANG Xincheng¹, LIU Zhizhen¹, HOU Yanjin², ZONG Shasha¹

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Energy Research Institute, Qilu University of Technology(Shandong Academy of Sciences), Jinan 250014, China)

Abstract: Travel temperature directly affects the specific energy consumption of electric vehicle through various interferences, resulting in the difference in charging power demand at different temperatures. According to the statistical principle, under the support of a large number of samples, the least squares method to obtain the specific relationship between the electric power consumption per km of electric vehicles and the travel temperatures in this paper. Then a power calculation model for electric vehicles considering the influence of travel temperature is proposed. The distribution network of a certain residential district in Beijing is taken as an example. Monte Carlo method is used to simulate the specific difference of electric vehicle charging load under different seasons (temperatures). The different impacts of EV load on the regional power grid in different seasons are analyzed to provide a new seasonal scheduling idea for the orderly control of EV charging behavior in the future.

Key words: electric vehicle; charging power; travel temperature; least squares; Monte Carlo simulation

收稿日期:2019-12-16;修回日期:2020-04-02

基金项目:山东省科技攻关计划(2019GGX104080)

通信作者:刘志珍(1967-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事充换电站对区域电网的影响、无线电能传输方面研究;E-mail:liuzhizhen@sdu.edu.cn

随着世界经济的飞速发展,负面问题也随之而来,如资源匮乏、环境质量下降等,因此,节能减排已成为世界性的主题。作为世界大多国家支柱产业之一的汽车工业,能源供应转型可能是保持其可持续发展的唯一出路,随着电动汽车(electric vehicle, EV)的逐渐普及以及充电设施建设的逐步完善,电动汽车正迎来属于自己的黄金时代^[1-2]。

随着电动汽车保有量的逐步攀升,未来电动汽车大规模接入电网将引发大量的附加充电需求,对电动汽车负荷进行准确预测是研究车网互联系统、充电设施选址定容等问题的基础所在。至今已有大量文献展开了相关的研究工作,并取得了显著的成果。文献[3-4]考虑了部分随机因素的概率分布,建立了电动汽车功率的统计学模型;文献[5-6]结合动态交通信息分别建立了一种考虑时空分布的电动汽车充电需求预测模型,并分析了其对配电网的影响;文献[7]计及光伏发电,构建了一种综合考虑发电成本、配网峰谷差和网损的两阶段协同优化调度模型。

电动汽车充电过程中的影响因素较为复杂,目前的研究大多将侧重点放在充电行为的时空随机性、用户的出行习惯等方面。然而,不同的出行温度会导致车辆在行驶过程中的多方面问题,从而对车辆的实际能耗产生明显的影响。文献[8]依托带有温度模拟的实验仓对不同温度下空调开启与否的电动汽车续航里程进行了测试,分析了温度对于电动汽车续航的影响;文献[9]分析了电动汽车锂电池在不同温度下化学活性的变化情况;文献[10]以试验数据为基础,分析了典型电动汽车动力电池在各种温度下的容量、功率变化等电池特性。以上研究均是单一地分析了温度变化给电动汽车能耗特性带来的某方面影响。文献[11]通过将温度因素转化为EV附加能耗,从而分析环境温度对EV负荷建模的影响。但温度在车辆行驶过程中的作用不仅局限于文中所述方面的影响,且在建模过程中对单位里程耗电量的定值估计较为笼统。

该文在考虑电动汽车负荷传统影响因素的同时,通过大量温度、能耗样本的匹配拟合,绕过温度对EV能耗的复杂作用过程,获取电动汽车单位公里电耗与不同出行温度的直接联系,进而分析其对

于车辆荷电状态水平和所需充电时长的影响。在蒙特卡洛算法的基础上,提出一种计及出行温度影响的电动汽车充电功率计算模型,同时,设计相应的算例对所提模型进行验证分析。

1 电动汽车充电需求特性分析

1.1 电池特性

当前电动汽车采用的动力电池以锂电池为主,虽然不同车型的电池容量、型号略有区别,但目前的充电特性大多相同,即采用“涓流—恒流—恒压”的三段式充电^[12]。对于目前广泛应用的常规交流充电,涓流和恒压过程所充电量相对于整个充电过程明显较低,故可忽略不计;在主要进行的恒流充电过程中,电池电流保持不变,端电压上升地微小而缓慢。因此,该文的动力电池充电过程近似为恒功率特性。

1.2 用户出行行为

用户的出行行为是具有明显随机性的影响因素之一,它决定了相应车辆的充电起止时间和日常行驶能耗。充电时间越集中,电网在一段时间内需提供的附加功率则越高,可能对区域配电变压器的容量造成一定冲击;车辆的每日行驶里程则会反映当日的电能消耗,从而影响电池的起始荷电状态水平和所需充电时间。将北京市2012—2013年度私家车历史行驶数据^[13]作为样本,经归一化处理后输入Matlab进行拟合,可以获得私家车用户每日的行程起止时间概率密度曲线,如图1所示,日行驶里程的概率密度曲线如图2所示。

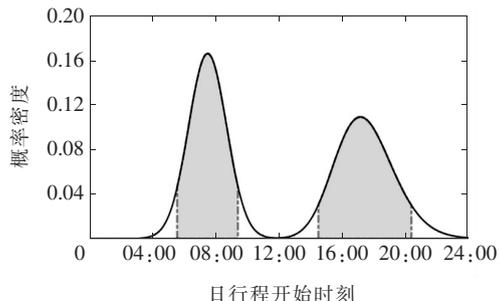


图1 用户日行程起止时间概率密度曲线
Figure 1 Probability density curve of start and end time for user daily travel

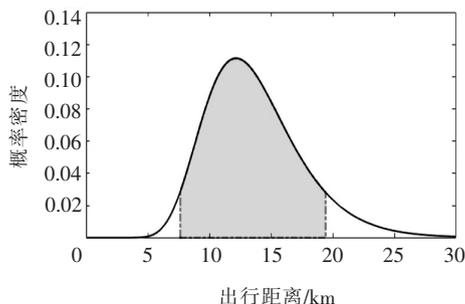


图2 私家车日行程里程概率密度曲线

Figure 2 Probability density curve of user daily mileage

在无充电规划的情况下,考虑到用户会在回家后立即开始充电,因此,可以将用户的下班返回时间作为汽车充电的开始时间,根据图1曲线右半部所示,电动汽车无序充电起始时刻的概率密度满足正态分布函数:

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

式中 t 为时间变量;期望值 $\mu_s = 17.47$;标准差 $\sigma_s = 3.41$ 。

由图2可以看出,车辆在具体行驶里程下的概率密度基本满足对数正态分布:

$$f_D(d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}d\sigma_D} \exp\left[-\frac{(\ln d - \mu_D^2)}{2\sigma_D^2}\right], d > 0 \quad (2)$$

式中 d 为行驶里程;期望值 $\mu_D = 13.7$;标准差 $\sigma_D = 3.9$ 。

1.3 出行温度与汽车能耗的关系

通过文献[10-11]等研究可以看出,温度对于电动汽车能耗的影响是一个涉及多方面的复杂问题,单从某一个或几个方面对车辆能耗计算进行优化是不够完备的。因此,该文通过分析大量的相关样本数据,运用统计学原理直接获取车辆单位公里电耗与温度的具体联系。

该文采用日本国土气象局发布的爱知县2012—2013年度原始气象数据和经日本“浮动车信息共享”平台采集到的492辆电动汽车(均为电动私

家车,车辆类型不完全一致,但整体能耗水平相当)车载记录仪全年的记录数据为基础样本^[14]。经整理后的样本数据如表1所示(样本量为39 685),具体概率分布情况如图3、4所示。

表1 样本数据汇总

Table 1 Summary of sample data

样本数据	出行温度/ ℃	出行能耗/ (kW·h)	每千米能耗/ (kW·h)
均值	18.349 5	0.752 1	0.1496
标准差	9.410 1	0.580 5	0.059 5
最小值	-5.500 0	0.052 5	0.007 7
最大值	36.600 0	11.440 0	2.203 1

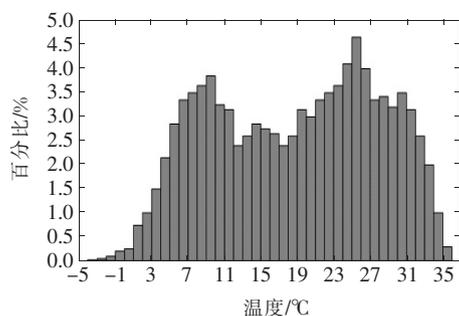


图3 出行温度概率分布情况

Figure 3 Probability distribution status of travel temperature

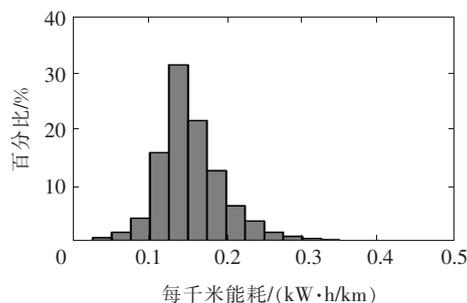


图4 车辆每千米能耗概率分布情况

Figure 4 Probability distribution status of vehicle energy consumption per km

通过分析以上数据可以发现,爱知县气候温度与中国北方城市比较接近,年气温为 $-5\sim 37\text{ }^{\circ}\text{C}$,四季分明且温度范围比较宽泛,适合作为分析中国北部城市的替代样本;电动汽车的每千米平均能耗水平约为 $0.1496\text{ kW}\cdot\text{h}$,且由图4可以看出其能耗分布接近于正态分布,在一定数值范围内均有比较高的取值概率,因此,找出能耗随温度变化的具体联

系对于电动汽车负荷的精确估计更加有利。

根据获取数据中单位公里能耗 E_i 与出行温度 T_i 的分布关系,采用最小二乘法曲线拟合原理^[15],将已知的若干个点 (T_i, E_i) 作为基础数据,求解与其距离平方和最小的曲线 $E=f(T)$,以表征单位公里能耗随温度的具体变化关系。最终数据整体呈不对称的“U”型分布,如图 5 所示。

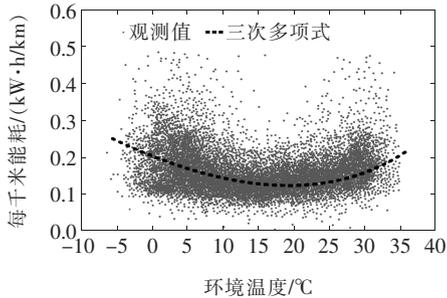


图 5 不同温度下车辆能耗分布曲线拟合

Figure 5 Curve fitting of vehicle energy consumption distribution at different temperatures

分别对样本数据做 1~4 次的函数拟合,经观察对比拟合结果,综合考虑曲线贴合程度和后续计算难度,最终选择对 $E=f(T)$ 进行 3 次函数拟合,得到二者的曲线关系为

$$E_i = \lambda_0 + \lambda_1 T_i + \lambda_2 T_i^2 + \lambda_3 T_i^3 \quad (3)$$

其中, λ 为对应项的影响因子,经拟合后分别取 $\lambda_0 = 0.226$; $\lambda_1 = 7.7 \times 10^{-3}$; $\lambda_2 = -8.4 \times 10^{-3}$; $\lambda_3 = 2.95 \times 10^{-6}$ 。

2 计及出行温度的 EV 负荷建模

2.1 温度对模型的影响

电池充电电量作为电动汽车负荷模型的关键因素,与其电池容量 Q 和具体荷电状态 (state of charge, SOC) 有直接的联系。电池的 SOC 通常表示为电池的当前电量与额定容量的比值,故电动汽车的常规充电需求可以表示为

$$Q_{\text{need}} = (1 - q_{\text{soc}})Q \quad (4)$$

式中 q_{soc} 为电动汽车接受充电时的起始 SOC 值; Q 为电池额定容量。

通过观察式(4)可以看出,电池所需充电电量由

其电池容量和起始 SOC 值直接决定,现对二者随温度的具体变化情况进行分析。温度对不同类型车载电池容量的影响^[11]如图 6 所示,可以看出,在该文所研究的温度区间内,各种类型的电池组都表现出比较优秀的温度性能,即使在 -10°C 的环境下也能保持近 90% 的相对可用容量。基于此,为简化计算,该文假设温度对电池容量不产生影响,即 Q 为一不变的常量。

因此,电动汽车的起始 SOC 值对于车辆的常规充电需求起着决定性的作用。在标准温度 (20°C) 下,某电动汽车厂商对于用户车辆接入充电时电池 SOC 值的调研数据^[16]如图 7 所示。

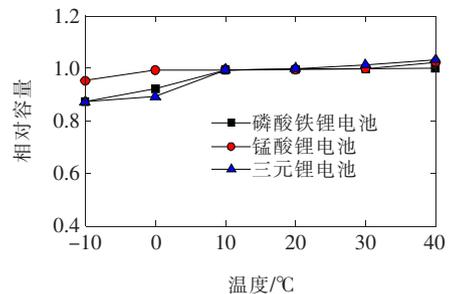


图 6 不同温度下各类电池类型的容量变化情况

Figure 6 Capacity change status of various battery types at different temperatures

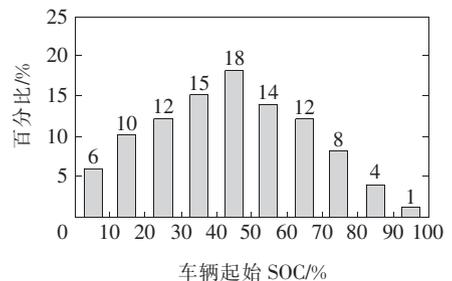


图 7 车辆起始 SOC 分布

Figure 7 Distribution of vehicle initial SOC

但是如文 1.3 节所述,不同的出行温度会从多方面影响到电动汽车的具体能耗,从而使其在不同温度下呈现出不同的初始 SOC 分布。结合 SOC 的定义,以车辆在不同温度下的平均行驶里程不变为前提,以标准温度下的 SOC 分布为基准,可以得到不同温度下车辆初始 SOC 的分布期望值为

$$\mu_{\text{soc}, T} = 1 - (1 - \mu_{\text{soc}, S}) \frac{E_T}{E_S} \quad (5)$$

式中 $\mu_{\text{SOC},T}$ 为温度等于 T °C 时的 SOC 分布期望; $\mu_{\text{SOC},S}$ 为标准温度下的 SOC 分布期望; E_T 、 E_S 分别为经式(3)计算所得温度在 T 、 20 °C 下的电动汽车单位公里电耗。

此外,在不同温度下,结合式(2)、(3)可以获得每辆电动汽车所需的具体充电时长:

$$T_c = \frac{dE}{P_c \eta_c} = \frac{d(\lambda_0 + \lambda_1 T_i + \lambda_2 T_i^2 + \lambda_3 T_i^3)}{P_c \eta_c} \quad (6)$$

式中 d 为车辆当日的行驶里程; E 为该车随温度变化的具体单位公里电耗; T_i 为具体的出行温度; P_c 、 η_c 分别为充电桩的充电功率和充电效率。

2.2 具体建模过程

该文采用蒙特卡洛算法对电动汽车的充电需求进行模拟,将出行温度、电动汽车数量、充电功率等均作为基础参量,据此确定车辆的起始 SOC 分布和充电时长需求等变量,在确定单台电动汽车充电功率需求的基础上,通过负荷曲线的累加获得电动汽车的总体功率需求。整体建模流程如图 8 所示。具体建模步骤如下:

1) 确定当前的温度范围、电动汽车的数量、充电功率等基础参量;

2) 根据式(1)、(2),利用蒙特卡洛算法随机抽取车辆的充电开始时刻和日行驶里程;

3) 结合当前设定的实际温度与式(5)、(6),产生电池初始 SOC 的随机数和对应的充电持续时间;

4) 将一天分为 96 个时间节点(每 15 min 为一个时段),确定每个时刻下的 EV 充电功率。

3 算例分析

3.1 算例参数设置

为验证所提方法的有效性,以北京市某居民区为参考对象进行相关的算例设计。

1) 该小区共拥有 300 住户,每户居民都拥有一辆汽车。据估计 2020 年中国新能源汽车占汽车销量的比例约为 20%,因此,假设当前该小区共有电动汽车 60 辆。

2) 通过观察北京市的历史温度数据,可以发现其年平均气温大约为 16.5 °C,年最高气温为 35 °C,最低气温为 -5 °C。因此,选取 -5~0、10~20、30~35 °C 分别作为冬、春秋、夏季的典型气温区间,从而计算不同出行温度下电动汽车的功率需求变化。

3) 采用常规的交流充电模式对电动汽车进行充电,固定单桩充电功率为 7 kW,充电效率为 0.9,充电电流为 16 A。且假设小区内充电桩均匀分散地接入三相线路,即充电行为不会造成系统的三相不平衡。

4) 根据式(1)利用蒙特卡洛抽样模拟电动汽车夜间起始充电时间。

3.2 仿真结果分析

利用蒙特卡洛法分别模拟不同季节(温度)下该小区电动汽车一天内的充电情况,设置最小迭代次数为 10^4 次。具体负荷曲线如图 9 所示,可以看出,出行温度对电动汽车充电负荷影响显著,密集的充电时间导致温度对于充电高峰的影响更为突出。

通过分析图 9 中曲线数据可知,冬季日时(温度在 -5~0 °C)电动汽车的充电负荷峰值比春秋季节(温度在 10~20 °C)时高出 32%,比夏季日(温度在 30~35 °C)时高出 11%。冬季日的 EV 总功率需求比春秋季节时多出 38%,比夏季日时多出 15%。

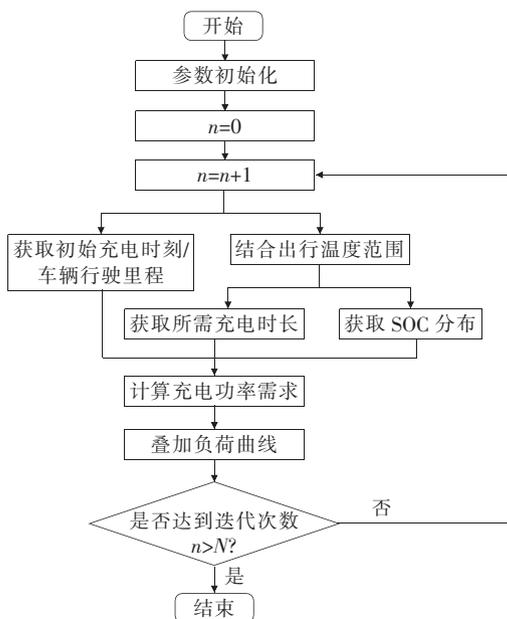


图 8 基于蒙特卡洛算法的电动汽车功率需求建模流程

Figure 8 Flow chart of EV power demand modeling based on Monte Carlo algorithm

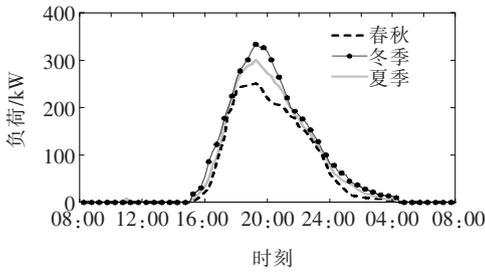


图 9 不同温度下电动汽车充电负荷曲线

Figure 9 Power charging curves of electric vehicles at different temperatures

不同季节下居民区基础负荷也随温度的变化而有所区别,夏季室外温度较高,人们趋向于减少户外活动,并长时间开启空调风扇等制冷家电;冬季温度较低,人们对取暖的需求增多,浴霸、空调等大功率电器阶段性投入使用。针对居民区的这一季节性规律,有必要将其与电动汽车在不同季节下的负荷特性相结合,观察不同季节下因温度变化导致的电动汽车负荷对区域电网造成的不同影响。分别选取该小区夏季(温度为 35 ℃)和冬季(温度为-5 ℃)某典型日下的基础负荷(用电住户均为 300 户),将其与对应温度下不同渗透率的电动汽车负荷叠加,观察小区的总体功率负荷曲线,如图 10、11 所示。

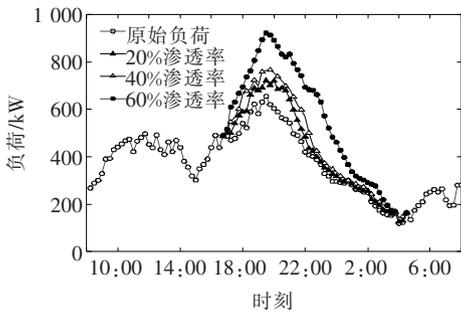


图 10 夏季日小区总体功率负荷曲线

Figure 10 Overall power load curve of residential area in summer

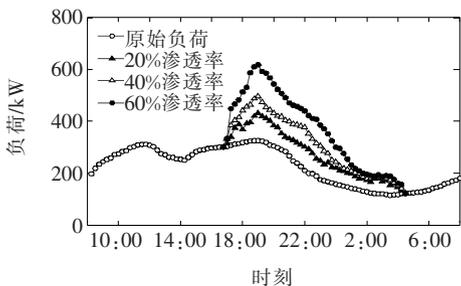


图 11 冬季日小区总体功率负荷曲线

Figure 11 Overall power load curve of residential area in winter

对比分析图 10、11 可以发现,夏季时由于居民区基础负荷的高峰值属性,导致叠加电动汽车负荷后小区整体负荷的峰值显著升高,当电动汽车渗透率超过一定值时总负荷峰值甚至会严重超出该区域的配变总容量;冬季时基础负荷曲线整体较低缓,但叠加电动汽车负荷后,总体负荷曲线波动变化剧烈,峰谷差率急剧上升,给区域电网的安全平稳运行带来严峻的考验。各季节下电动汽车负荷给小区电网带来的具体影响如表 2、3 所示。

表 2 不同季节下电动汽车负荷对小区峰谷属性的影响
Table 2 Impact of the EV load on peak-valley attributes of residential area under different seasons

电动汽车渗透率/%	总负荷峰值/kW		总负荷峰谷差/kW	
	夏季	冬季	夏季	冬季
20	722.9	433.6	586.6	311.9
40	767.8	496.3	628.1	374.6
60	922.1	619.3	786.5	497.6

表 3 不同季节下电动汽车负荷对小区负荷总量的影响
Table 3 Impact of the EV load on the total load of residential area under different seasons

电动汽车渗透率/%	小区负荷总量/(万 kW·h)	
	夏季	冬季
20	0.62	0.41
40	0.69	0.49
60	0.77	0.58

通过对表 2、3 数据的分析可知,在夏季由于大功率制冷设备的长时间启动,再叠加额外的 EV 充电负荷,使得小区整体耗电量对比冬季时高出甚多,且其负荷的尖峰值也远远大于冬季峰值。因此,在将来能够对电动汽车充放电行为进行整体调控时,应尽量利用 EV 可作为分布式电源的属性,结合 V2G(车联网)技术,在夏季的用电高峰期向电网反馈多余的能量,减少配电网用电压力;而冬季时小区整体用电量相对较少,在叠加 EV 负荷后,其峰值数值虽小于夏季,但由于此时负荷曲线幅值水平整体偏低,这就造成了峰谷差率的剧烈变化,将使小区配电变压器的高效利用率大打折扣,也不利于配电网的稳定运行。因此,在冬季 EV 负荷的调度过程中,

应更侧重于EV充放电时间的合理分配,使车辆尽量错峰错时进行充放电,达到平抑负荷波动的理想效果。

4 结语

针对出行温度对电动汽车具体能耗的影响,该文采用统计学手段获取车辆单位公里电耗与出行温度的直接联系。通过引入温度对汽车能耗、SOC分布和充电时长的干扰,建立起一种计及出行温度的电动汽车功率需求计算模型。以北京市某小区为对象设计了相应算例,通过仿真分析可以得到结论。

1)出行温度会对电动汽车充电负荷产生显著的影响,高温和低温天气均会导致车辆的充电需求明显升高,且低温下的影响程度比高温更加强烈。

2)由于居民区负荷自身具有季节性变化规律,再叠加相应季节温度下的电动汽车负荷,会给小区配电网带来不同方面的挑战:夏季日由于小区基础负荷本身的高峰值属性,与电动汽车负荷叠加后的“峰上加峰”现象将会给小区变压器的容量带来严重的冲击;冬季日小区本身低缓的基础负荷曲线叠加电动汽车的冲击性负荷后会令总负荷曲线剧烈波动,峰谷差显著上升,不利于配电网的安全运行。

3)考虑到不同季节下由于环境温度和生活习惯的差异,电动汽车负荷对区域配电网会造成不同方面的影响。因此,在电动汽车参与电网互动的控制策略方面有必要采取差异化的安排,这还需要开展大量更加深入细致的工作。

参考文献:

[1] 于会群,尹申,张浩,等.考虑电动汽车用户满意度的微网分层优化调度策略[J].中国电力,2020,53(12):83-91.
YU Huiqun, YIN Shen, ZHANG Hao, et al. Optimization strategy of microgrid hierarchical scheduling considering electric vehicles user satisfaction degree[J]. Electric Power, 2020, 53(12): 83-91.

[2] 郭磊,王克文,文福拴,等.电动汽车充电设施规划研究综述与展望[J].电力科学与技术学报,2019,34(3):

56-70.

GUO Lei, WANG Kewen, WEN Fushuan, et al. Review and prospect of charging facility planning of electric vehicles[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3): 56-70.

[3] 王睿,高欣,李军良,等.基于聚类分析的电动汽车充电负荷预测方法[J].电力系统保护与控制,2020,48(16):37-44.

WANG Rui, GAO Xin, LI Junliang, et al. Electric vehicle charging demand forecasting method based on clustering analysis[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 37-44.

[4] 田立亭,史双龙,贾卓.电动汽车充电功率需求的统计学建模方法[J].电网技术,2010,34(11):126-130.

TIAN Liting, SHI Shuanglong, JIA Zhuo. A statistical model for charging power demand of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 126-130.

[5] 李晓辉,李磊,刘伟东,等.基于动态交通信息的电动汽车充电负荷时空分布预测[J].电力系统保护与控制,2020,48(1):117-125.

LI Xiaohui, LI Lei, LIU Weidong, et al. Spatial-temporal distribution prediction of charging load for electric vehicles based on dynamic traffic information[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 117-125.

[6] 李磊,赵新,李晓辉,等.基于动态交通信息的电动汽车充电需求预测模型及其对配网的影响分析[J].电网与清洁能源,2020,36(3):107-118.

LI Lei, ZHAO Xin, LI Xiaohui, et al. Electric vehicle charging demand prediction model based on dynamic traffic information and its impacts on distribution networks[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(3): 107-118.

[7] 许翔泰,张仰飞,陈光宇,等.计及光伏发电的电动汽车充电优化调度研究[J].智慧电力,2019,47(10):44-50.

XU Xiangtai, ZHANG Yangfei, CHEN Guangyu, et al. Optimal scheduling of charging for electric vehicle considering photovoltaic power generation[J]. Smart Power, 2019, 47(10): 44-50.

[8] 解难,胡月昆,杨帆,等.环境温度对电动汽车续航里程

- 程影响的试验研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2018, 32(6): 21-25.
- XIE Nan, HU Yuekun, YANG Fan, et al. Research on the influence of ambient temperature on the driving mileage of electric vehicles[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science), 2018, 32(6): 21-25.
- [9] 曹怡, 胡晓斌, 冷崇富, 等. 基于混合储能技术电动汽车驱动性能研究[J]. 供用电, 2019, 36(2): 61-66.
- CAO Yi, HU Xiaobin, LENG Chongfu, et al. Research on driving performance of electric vehicle based on hybrid energy storage technology[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(2): 61-66.
- [10] 王瑞, 张维戈, 张言茹, 等. 基于动力电池海量数据的特性化压缩处理研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(1): 99-105.
- WANG Rui, ZHANG Weige, ZHANG Yanru, et al. Research on characteristic compression processing based on massive data of power battery[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(1): 99-105.
- [11] 罗浩成, 胡泽春, 张洪财. 环境温度对电动汽车充电负荷的影响分析[J]. 电力建设, 2015, 36(7): 69-74.
- LUO Haocheng, HU Zechun, ZHANG Hongcai. Effect analysis of ambient temperature on electric vehicle charging load[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(7): 69-74.
- [12] 罗卓伟, 胡泽春, 宋永华, 等. 换电模式下电动汽车电池充电负荷建模与有序充电研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 1-10.
- LUO Zhuowei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Study on charging load modeling and coordinated charging of electric vehicles under battery swapping modes[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 1-10.
- [13] Wang Hewu, Zhang Xiaobin, Wu Lvwei, et al. Beijing passenger car travel survey: implications for alternative fuel vehicle deployment[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2015, 20(5): 817-835.
- [14] Wang J B, Liu K, Yamamoto T, et al. Improving the estimation accuracy of electric vehicle energy consumption considering the effects of ambient temperature[J]. Energy Procedia, 2017, 105: 2904-2909.
- [15] 陶本藻, 邱卫宁, 张书毕, 等. 误差理论与测量平差[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2012: 67-89.
- [16] 杨勇. 小区电动汽车群有序充电策略优化[D]. 山东: 山东大学, 2016.
- (上接第 80 页 Continued from page 80)
- SU Jian, WANG Zhuo, CUI Yanyan, et al. Converter location research on source-grid coordinated medium voltage AC-DC hybrid distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(5): 59-65.
- [12] 杨宁, 霍炬, 杨明. 基于多层次信息交互的多目标粒子群优化算法[J]. 控制与决策, 2016, 31(5): 907-912.
- YANG Ning, HUO Ju, YANG Ming. Multi-objective particle swarm optimization algorithm based on the interaction of multi-level information[J]. Control and Decision, 2016, 31(5): 907-912.
- [13] 左一多. 多目标优化问题的粒子群算法及其性能分析[D]. 北京: 中国地质大学, 2013.
- [14] 吴小刚, 刘宗歧, 田立亭, 等. 基于改进多目标粒子群算法的配电网储能选址定容[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3405-3411.
- WU Xiaogang, LIU Zongqi, TIAN Liting, et al. Energy storage device locating and sizing for distribution network based on improved multi-objective particle swarm optimizer[J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3405-3411.
- [15] 李肇卿. 典型城市配电网故障抢修资源配置模式的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.