

电动汽车充电负荷对配电变压器寿命损失的影响研究

配电变压器实际承载的电动汽车充电负荷与供区内的充电车位数密切相关。依据Mamdani推理方法及重心法得出各用地适应性评分,各功能区域土地分配规律。基于电动汽车空间分布特性,将车位数量作为蒙特卡洛模拟电动汽车充电负荷计算方法中的一个约束条件。考虑了工作日和节假日负荷差异性,得出不同功能区的充电负荷对于配电变压器寿命影响规律。并通过Matlab仿真分析验证了该理论的正确性,为配电变压器寿命损失的评估、配电运行方式维护及老城区配电扩容提供了参考。

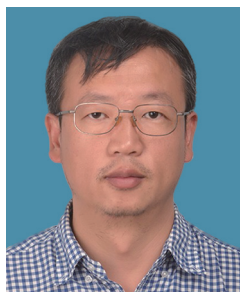
唐 岚 王 飞 刘雪莹/昆明理工大学电力工程学院

0 引言

随着环境恶化,能源形势变得越来越严峻,世界各国已经出现了环境、能源问题制约经济可持续发展的现象。能源供需、温室气体排放和经济增长三者之间的互相影响和制约受到世界各国的普遍关注,电动汽车发展也成为各国关注的焦点^[1-2]。电动汽车充电对电网的影响主要在配电网方面^[3-4],电动汽车基数较少时,对配电网的影响较小,但是从国内外发展现状及趋势来看,电动汽车数量迅速增长造成局部的集中充电负荷增大,使得其对配电网的影响不容忽视。负荷预测是配电网经济运行的基础。在电动汽车普及程度较低时,负荷预测工作可以根据以往的数据和一些常规方法来进行预测。然而随着电动汽车占比增大,且电动汽车种类多,流动性强,起始荷电状态(State of Charge,

SOC)的不同给电动汽车负荷的预测带来很大的麻烦,体现出了充电负荷计算的复杂性。

依据电动汽车出行需求的蒙特卡洛模拟方法和采用排队理论分析充电站的充电负荷的概率分析方法,是目前国内外针对充电负荷计算建模研究的主要方法。文献[5]通过建立充电功率的统计学模型,主要考虑日行驶里程以及起始充电时间等因素,运用蒙特卡洛方法求得单台充电功率需求的期望和标准差,进而得到多台总体功率需求的计算方法。文献[6]给出了多种类型电动汽车的充电模式,考虑了SOC服从正态分布,通过实地调研讨论了不同车型对应的充电行为,并基于蒙特卡洛模拟进行了全国电动汽车的负荷预测。文献[7-11]以排队论为原理,进行充电负荷计算,其中文献[7,11]从SOC和车辆到达充电站时间的随机分布为出发点,提出二阶段泊松分布电动汽车充电站集聚模型,进行充电站集聚特性的模拟。文献[7]将小区停车场视为一个充电站展开分析。而文献[8]通过对高速车流量统计进行分析高速充电负荷,该模型较为适用于集中停车场、充电站的负荷建模,对大量的电动汽车接入配电网充电进行分析时,有一定局限性。文献[9]建立服务时间模型,得到不同场景下充电站负荷建模方法。文献[10]提出了根据SOC、行驶特性及时间特性等因素基于蒙特卡洛模拟计算,并分析了私家车的充电负荷。文献[11]提出了基于出行链结构的居民区私家车充



唐 岚/副教授

关键词/Keywords

电动汽车充电负荷·
变压器寿命损失·
模糊逻辑·
蒙特卡洛模拟·

云南省教育厅重点科学基金资助项目(2015C001Z),
昆明理工大学人才培养研究项目(KKZ3201304036)。

电负荷计算方法，并对居民区私家车充电负荷进行分析。

上述文献，要么是从整个配电网的运行角度分析了电动汽车充电负荷的时空特性；要么给出了SOC、起始充电时间和汽车行驶特性等对负荷的影响，并没有从实际接入设备的层面进行具体分析，考虑在停车高峰期是否有电动汽车没有充电位置，以及充电场所的多样性等因素。本文将根据电动汽车的空间分布特性，将车位数量作为基于蒙特卡洛模拟的电动汽车充电负荷计算方法中的一个约束条件，来计算不同功能区域中工作日和节假日的充电负荷，根据计算得到的充电负荷进行配电变压器寿命损失的计算。由于配电变压器的容量较小，所带片区较小，所以要进行各功能区域的划分，本文主要划分为商业区、居住区和公务区。

1 基于停车需求的电动汽车空间分布

Mamdani方法在模糊逻辑推理方法中是一种普遍使用的重要方法。本文采用Matlab中的模糊工具箱进行推理计算，具体的Mamdani模糊推理规则下文中给出。

1.1 各功能区域评价系统的建立及土地分配

根据商业类用地选择影响因素，商业类用地的主要影响因素有2个，即：交通因素C1；区位因素C2。C1代表距离主干线的距离，C2代表距离市中心的距离^[12]。对C1、C2的语言评价为“proximity”（接近性）水平的高低，对于商业用地选址，距离交通主干线越近，并且距离市中心越近，其用地条件越好。由于距离上的远近无法进行精确上的定义，所以以语言变量近（close）、远（far）作为评价的基本词。相应的程度副词有“Very”、“More than”和“Fairly”。若根据相应的评价基本词和程度副词定义模糊集为Vc、c、Fc和f，分别表示为距离上的非常近、近、较近和远，则可以给出商业区中交通因素和区位因素相应的隶属度函数如图1所示。商业区距离市中心距离的隶属度函数和图1相

同。对于商业用地的适合度（Suitability）评价因子同样可以先做模糊化处理并定义模糊集为VS、MS、FS、US和VUS，分别表示为很适合、更为适合、较适合、不适合和很不适合。相应的隶属度函数如图2所示。

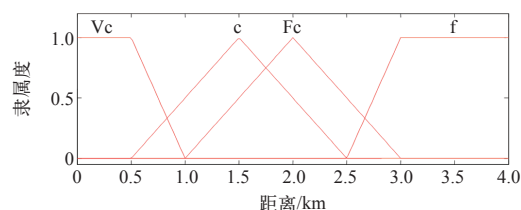


图1 距离主干线距离的隶属度函数

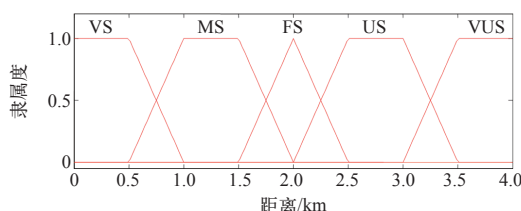


图2 商业区适应度评价隶属度函数

在对各类功能区域进行适应度评价时，由于各功能区的空间属性不同，所以必须考虑不同用地所侧重的空间属性。一般商业区是一个地区发展程度的标志，其首选地就是市中心附近，并且兼顾考虑市民出行的方便性。所以以距离交通主干线越近并且距离市中心越近，其用地条件越好为原则制定相应的模糊规则。即商业区用地适合性模糊推理规则如表1所示。

表1 商业用地的模糊知识库

C1 C2	Vc	c	Fc	f
Vc	VS	MS	US	US
c	MS	FS	US	VUS
Fc	FS	US	VUS	VUS
f	US	VUS	VUS	VUS

限于篇幅原因居住区和公务区的模糊推理规则将略去，适应度评价隶属度函数如图3、图4所示。

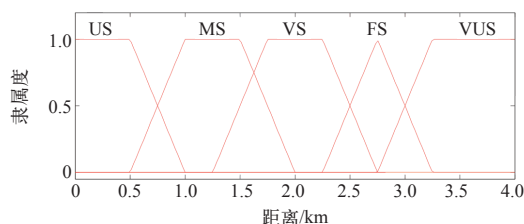


图3 居住区适应度评价隶属度函数

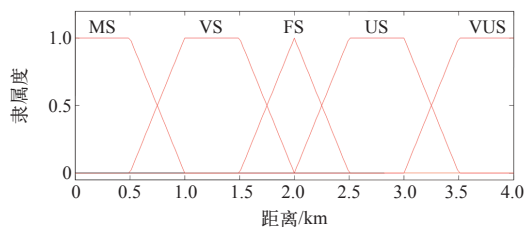


图4 公务区适应度评价隶属度函数

以某城市的30 km²区域为例,该区域可划分为如图5所示的30个小区,且面积均为1 km×1 km。该片区北面、西面为主要干线道路,蓝色区域为市中心。根据上文中各功能区域给出的各空间属性因素的梯形、三角模糊隶属度函数,将各小区内不同功能区与主要干线道路距离、市中心的距离值进行模糊化处理,根据Mamdani模糊推理方法和模糊推理规则以及重心法^[13]得出适应性评分 R_{ij} (小区*i*中*j*类用地的适应度评分,其中*i*=1,2,⋯,30,表示30个小区, *j*=1,2,3,分别表示商业区用地、居住区用地和公务区用地)。根据不同用地适应度评分比值求得各功能区域土地分配如图5所示。具体计算公式如式(1)。部分区域适应度评分和土地分配如表2所示。

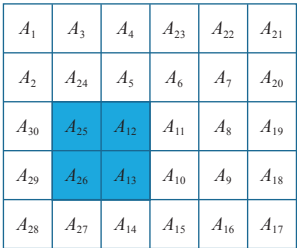


图5 地块划分

表2 各功能区适应度评分和土地分配

A_i	R_{i1}	R_{i2}	R_{i3}	X_{i1}/km^2	X_{i2}/km^2	X_{i3}/km^2
A_1	0.8	0.48	0.05	0.6	0.36	0.04
A_3	0.8	0.54	0.07	0.57	0.38	0.05
A_6	0	0	1	0	0	1
A_8	0	1	0	0	1	0
A_{17}	0.2	0.2	0.2	0.33	0.33	0.33
A_{29}	1	0	0	1	0	0

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^3 R_{ij} X = 1 \\ x_{ij} = R_{ij} X \end{cases} \quad (1)$$

1.2 基于停车需求的电动汽车空间分布计算

基于土地利用的停车需求预测模型主要包括停车生成率模型和用地与交通影响分析模型。由于用地与交通影响分析模型建立在停车需求与交通因素相关的基础上,交通影响函数很难确定,所以本文将运用停车生成率模型与已有的土地分配相结合,求得各功能区停车场车位配建数量。

停车生成率模型是建立在土地利用性质与建筑物配建停车位指标的关系上的。该区域总停车需求量等于各功能区域停车需求量总和,即

$$P_i = \sum_{j=1}^n \beta_{ij} \times x_{ij} \quad i=1,2,\cdots,3 \quad (2)$$

式中, P_i 为*i*区总停车需求量; β_{ij} 为*i*区*j*类区域单位用地面积停车需求量(建筑物配建停车位指标); x_{ij} 为*i*区*j*类区域用地面积。

该模型作为停车需求预测中比较严格和科学的方法,目前在大部分城市停车规划中应用较多,尤其是计算大型建筑物的配建停车位指标时更为实用。所以在某城市已知建筑物配建停车位指标 β_{ij} 和某类功能区用地面积 x_{ij} 时,可以根据停车生成率模型求出该区域停车需求量 P_i ,确定该区域停车场车位数量。

根据2012版《北京地区建设工程规划设计通则》中的停车泊位要求得到各功能区的配建停车位指标和不同类型车位换算系数如表3、表4所示。

表3 功能区的配建停车位指标

建筑类别	单位	换算系数
商业区	车位/100 m ² 建筑面积	0.7
居住区	车位/户	1.2
公务区	车位/100 m ² 建筑面积	0.65

表4 各类车型车位换算系数

车型	小型车	中型车	大型车
换算系数	1.0	2.0	2.5

根据2006年城市居住区规划设计规范、行政办公楼设计技术标准和2012版《北京地区建设工程规划设计通则》给出的一系列标准,要求多层行政办公楼建筑区域的容积率不小于1.2,高层行政办公楼建筑区域的容积率不小于2.1,商业区用

地的容积率一般取2~5。容积率指建设项目地上总建筑面积计算值与建设用土地面积的比值，即容积率=地上总建筑面积计算值/建设用地面积。居住区的建筑配比是按每户3.5人给出的，如表5所示。

本文商业区、公务区容积率的选择分别为3.0、2.0；居住区以表5中的大城市高层为标准进行计算、换算结果为54.25 m²/户，用地面积按80%

表5 居住区人均建筑用地配比

层数	大城市	中等城市	小城市
多层	16~21	16~22	16~25
多层、中高层	14~18	15~20	15~20
多层、高层	12.5~16	13~16	13~16

比例计算。根据电动汽车不同渗透率得到电动汽车车位在各功能区域的空间分配如表6所示（部分小区）。

表6 电动汽车空间分布

A_i	10%渗透率			20%渗透率			30%渗透率		
	β_{11} 车位	β_{12} 车位	β_{13} 车位	β_{21} 车位	β_{22} 车位	β_{23} 车位	β_{31} 车位	β_{32} 车位	β_{33} 车位
A_1	1 008	531	42	2 016	1 062	84	3 024	1 593	126
A_3	957	561	52	1 914	1 122	104	2 871	1 683	156
A_6	0	0	1 040	0	0	2 080	0	0	3 120
A_8	0	1 475	0	0	2 950	0	0	4 425	0
A_{17}	554	487	343	1 108	974	686	1 662	1 461	1 029
A_{29}	1 680	0	0	3 360	0	0	5 040	0	0

2 各功能区域电动汽车充电负荷特性

电动汽车充电影响因素很多，包括电动汽车行驶特性、充电时段的不确定性、SOC的随机性、充电时长的不同、充电类型的不同以及该区域电动汽车车位总数量。根据《电动汽车传导充电用连接装置》规定，表7、表8给出了国内电动汽车不同充电接口参数、不同类型的车辆参数^[14]。

表7 国内电动汽车不同充电接口参数

充电接口	额定电压/V	额定电流/A
交流充电接口	220（单相）	16/32
	380（三相）	32/63
直流充电接口	750	125/250

表8 国内不同类型电动汽车参数

车型	电池容量/kW·h	充电方式	充电功率/kW
私家车	24	常规/快充	3.52/38.4
公务车	60	常规/快充	7.04/57.1
公交车	180	常规/快充	39.6/91.7

2.1 电动汽车充电负荷计算方法

以 A_6 、 A_8 、 A_{17} 和 A_{29} 区域为例，在已知充电时段、充电时段内电动汽车充电事件发生的概率为 P ，该区域电动汽车车位总数量、起始电荷状

态SOC服从正态分布（公交车SOC服从正态分布 $N(0.5, 0.12)$ ，私家车SOC服从正态分布 $N(0.6, 0.12)$ ，公务车SOC服从正态分布 $N(0.4, 0.12)$ ），充电模式以恒功率充电，假设每次充电均充满^[6,15]，将车位数量作为基于蒙特卡洛模拟的电动汽车充电负荷计算方法中的一个约束条件。基于蒙特卡洛模拟方法计算电动汽车充电负荷，具体流程图如图6所示。限于篇幅原因只给出 A_8 区域具体的参数设置，如表9、表10所示。

表9 居住区工作日充电负荷计算参数设置

充电时段	充电概率 P	每分钟车流量	充电时长/h	充电负荷/kW
18: 01~24: 00	0.8	7	6.8	3.52
24: 01~12: 00	0.2	1	6.8	3.52
12: 01~14: 00	0.6	3	6.8	3.52
14: 01~18: 00	0.6	1	6.8	3.52

表10 居住区节假日充电负荷计算参数设置

充电时段	充电概率 P	每分钟车流量	充电时长/h	充电负荷/kW
18: 01~02: 00	0.8	6	6.8	3.52
02: 01~10: 00	0.2	1	6.8	3.52
10: 01~18: 00	0.8	2	6.8	3.52

2.2 电动汽车充电负荷仿真结果及分析

基于蒙特卡洛模拟的充电负荷仿真结果如图7

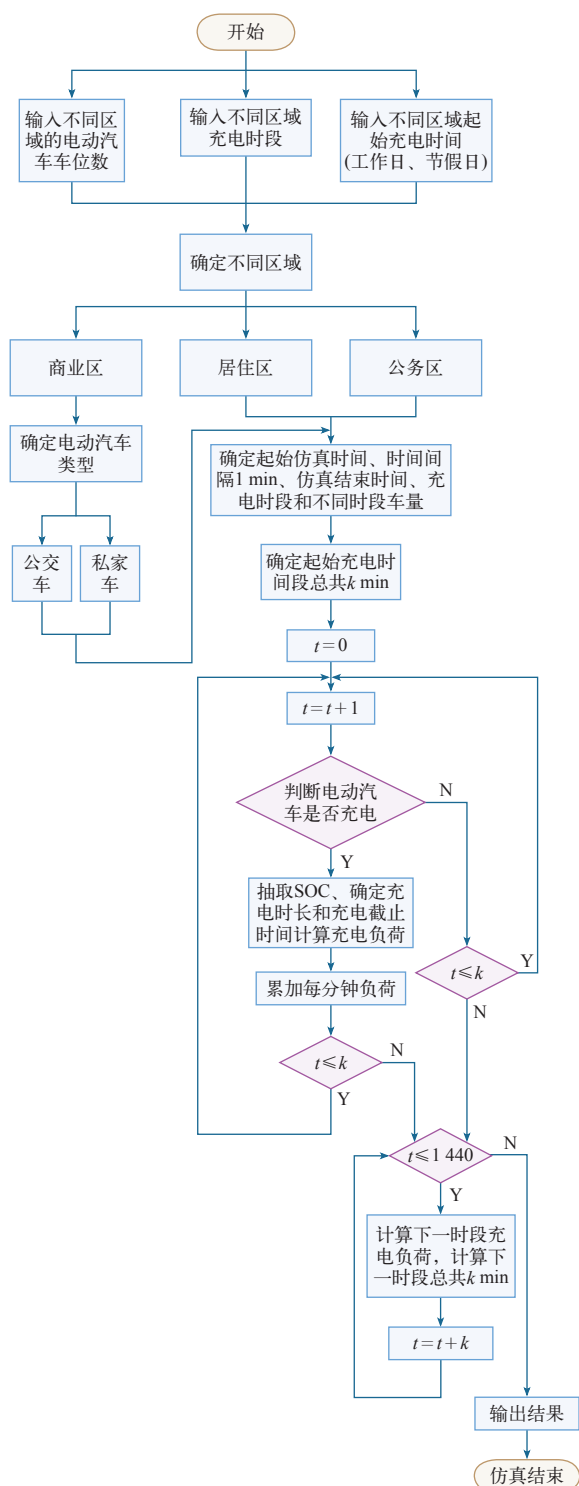


图6 基于蒙特卡洛模拟的充电负荷计算流程图所示。

图7为工作日和节假日商业区 A_{29} 区域单日充电负荷曲线，工作日商业区的仿真起始时间为12:01，结束时间为第二天12:00；节假日商业区的仿真起始时间为10:01，结束时间为第二天

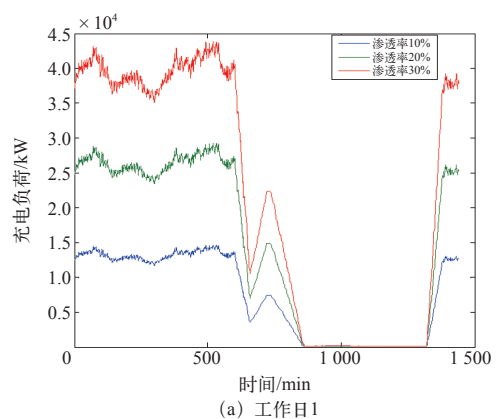
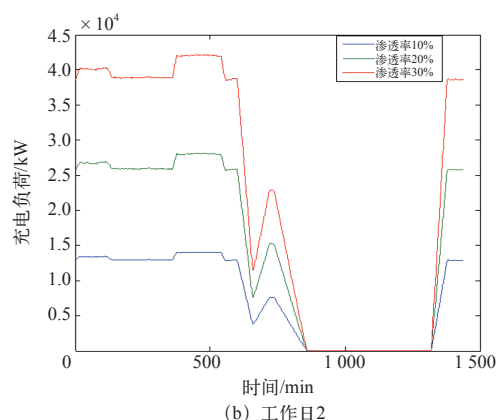
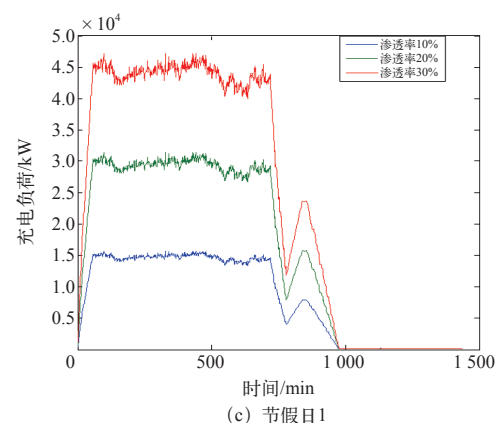
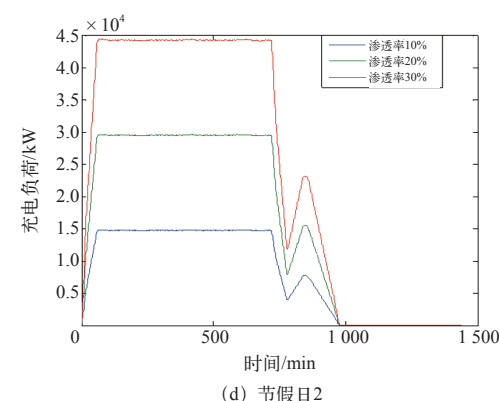


图7 商业区工作日与节假日充电负荷

10:00。工作日单日充电负荷曲线的峰值时间段出现在第387~544 min之间、具体时间段为18:28~21:05,持续时间大约3 h,负荷波动大约500 kW;节假日单日充电负荷曲线的峰值时间段出现在第60~721 min之间,具体时间段为11:01~22:02,持续时间大约11 h,负荷波动大约700 kW。由图7很明显看出商业区工作日电动汽车充电负荷会有一个午高峰和一个晚高峰,主要原因是工作日人们下班后去购物造成的。节假日充电负荷会有一个持续高峰时段,主要是因为节假日大多数人会选择去商业区购物、娱乐,高峰时段充电负荷的波动较大,主要原因是商业区主要以快充为主,持续的负荷高峰对商业区配电网的运行有一定的影响。

图8为工作日和节假日居住区 A_8 区域单日充电负荷曲线,居住区的仿真起始时间为18:01,结束时间为第二天18:00。工作日单日充电负荷曲线的峰值时间段出现在第198~366 min之间,具体时间段为21:19~24:07,持续时间大约3 h,负荷波动大约100 kW;节假日单日充电负荷曲线的

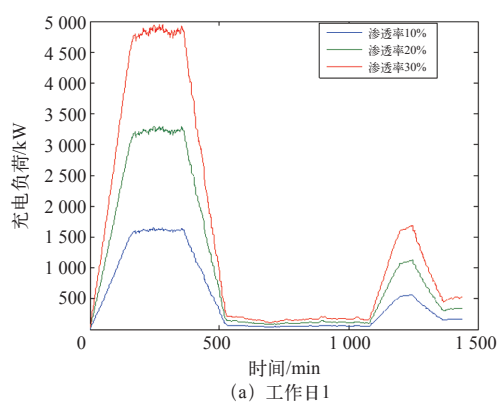
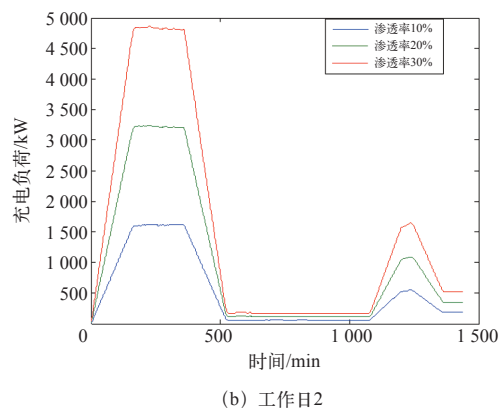
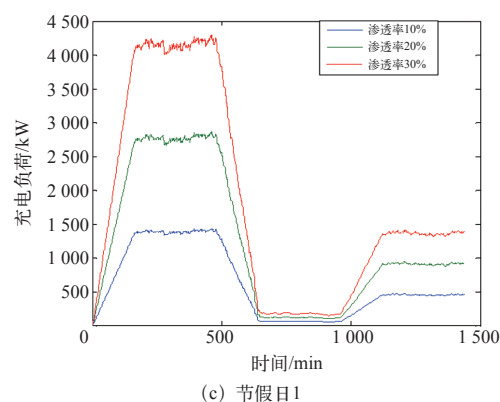
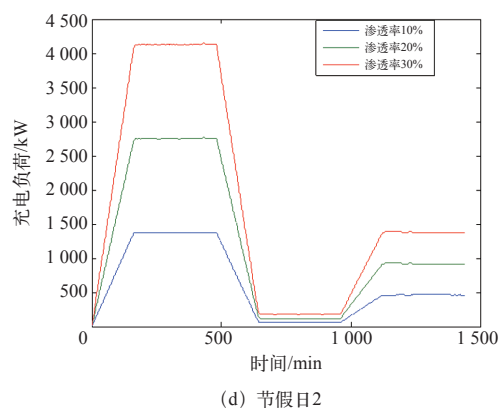
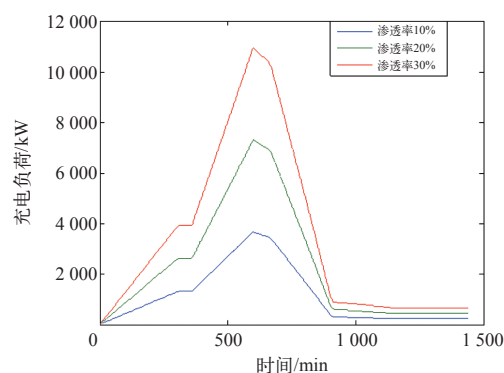


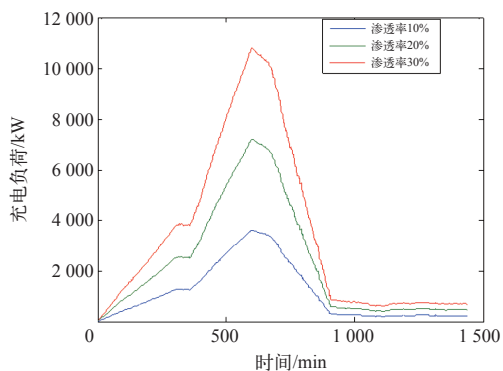
图8 居住区工作日与节假日充电负荷

峰值时间段出现在第164~490 min之间,具体时间段为20:45~02:11,持续时间大约5 h,负荷波动大约80 kW。由图8很明显看出居住区工作日电动汽车充电负荷会有一个明显的晚高峰和一个短时间的午高峰;节假日充电负荷会有一个较长时间的持续高峰时段,但峰值会比工作日低,主要是因为节假日大多数人会选择去商业区购物、娱乐,晚上回家时间没有那么集中。如果其晚高峰峰值时间段和居住区基础负荷晚高峰时间段基本相同,则充电负荷叠加基础负荷后对居住区配电网会有很大的影响。

图9为公务区 A_6 区域单日充电负荷曲线,公务区的仿真起始时间为10:01,结束时间为第二天10:00,单日充电负荷曲线的峰值时间段出现在第573~673 min之间,具体时间段为19:34~21:14,持续时间大约2 h,负荷波动大约150 kW。由图9可知公务区电动汽车充电负荷会有一个晚高峰,由于公务区的工作性质,其峰值时间段和公务区基础负荷基本不会叠加,对配电网的影响不会有



(a) 负荷1



(b) 负荷2

图9 公务区充电负荷

商业区和居住区那么明显，但是电动汽车充电负荷作为迅速增长的新增负荷，对配电变压器的寿命损失会有一定的影响。

3 充电负荷对配电变压器寿命损失影响

3.1 充电负荷对配电变压器寿命损失计算方法

选取GB/T 1094.7—2016《油浸式电力变压器负载导则》中适用于任意的时变负载系数 K 的微分方程解法，并将微分方程转换成差分方程进行仿真计算不同功能区域叠加充电负荷后每分钟对配电变压器寿命的损失，从而得到一天的寿命损失曲线^[16-18]。

一天环境温度的选取方法是根据一天环境温度的变化趋势，将一天的环境温度曲线划分时间段线性化，一天环境温度的选取以18:01为起始时间，截止时间为第二天18:00。起始环境温度 $\theta_{a1} = 20^\circ\text{C}$ 。具体一天的环境温度曲线如图10所示。

本节只介绍居住区充电负荷对配电变压器寿命损失的计算。根据新建住宅小区供配电设施建

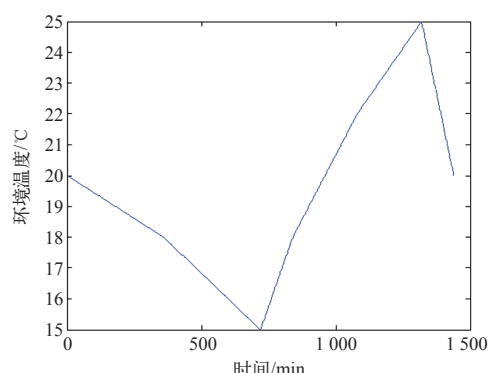


图10 一天环境温度变化曲线

设标准可知居住区每户容量配置宜一般按以下原则配置：建筑面积在 $81 \sim 120 \text{ m}^2$ 的住宅，基本配置容量每户 6 kW ；建筑面积 $120 \sim 150 \text{ m}^2$ 的住宅，基本配置容量每户 8 kW ；建筑面积 150 m^2 以上的住宅，基本配置容量每户 12 kW 。居住区配电变压器容量配置为配电变压器配置容量 $= \Sigma (\text{低压用电负荷} \times K_p)$ ，配置系数按表11选取。

表11 配置系数 K_p 选取

序号	变压器供区内用户数	配置系数 K_p
1	72户及以下	0.7
2	72户以上300户以下	0.6
3	300户及以上	0.5
4	低压供电公建设施	0.8

以 A_8 区域单台容量为 $800 \text{ kV} \cdot \text{A}$ 的油浸式配电变压器为例计算其寿命损失，功率因数选取0.92，按基本配置容量每户 6 kW ，根据已给数据得到该配电变压器的供电范围为246户。根据电动汽车空间分布的计算方法得到该配电变压器所带区域的电动汽车车位数及其与 A_8 区域电动汽车位数的比值，结合求得的 A_8 区域居住区平均日私家电动汽车充电负荷可以得到 $800 \text{ kV} \cdot \text{A}$ 的油浸式配电变压器所带区域的平均日充电负荷曲线。

3.2 居住区配电变压器寿命损失计算及分析

根据居民生活规律，假设 $800 \text{ kV} \cdot \text{A}$ 的油浸式配电变压器所带区域的一天基础负荷变化（不带电动汽车负荷）如表12所示。

居住区工作日和节假日的基础负载系数曲线是在每个时段内每分钟抽取一个均匀分布的随机数，该随机数的范围为每个时段对应的负载系数

表12 居住区基础负荷参数设置

工作日		节假日	
时间段	负载系数区间	时间段	负载系数区间
18: 01~24: 00	0.8~0.9	18: 01~02: 00	0.8~0.85
24: 01~02: 00	0.65~0.7	02: 01~10: 00	0.46~0.48
02: 01~11: 00	0.46~0.48	10: 01~14: 00	0.65~0.7
11: 01~14: 00	0.7~0.8	14: 01~18: 00	0.68~0.72
14: 01~18: 00	0.55~0.6		

区间,从而可以获得一天的基础负载系数曲线。叠加800 kV·A的油浸式配电变压器所带区域的平均日充电负荷曲线。仿真起始时间为18:01,结束时间为第二天18:00,仿真结果如图11~图14所示。

根据图12可以计算得到工作日居住区基础负载对变压器一天的寿命损失为32.3 min。叠加电动汽车负荷后,在电动汽车渗透率为10%、20%和30%时的配电变压器一天的寿命损失分别为50.1 min、81.1 min和136.2 min。相当于叠加电动汽车充电负荷后配电变压器寿命损失增加了55%、151%和321%。

根据图14可以计算得到节假日居住区基础负

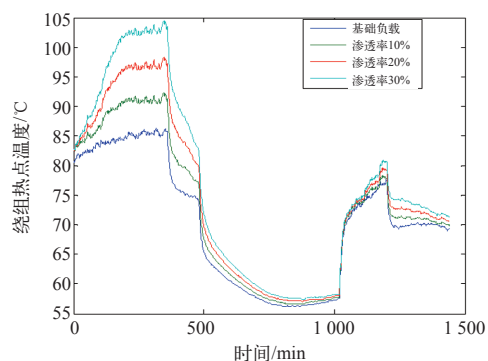


图11 工作日居住区配电变压器绕组热点温度

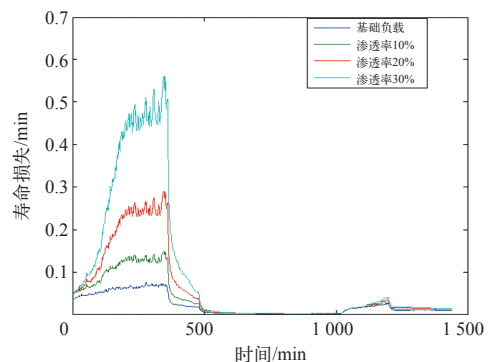


图12 工作日居住区一天配电变压器寿命损失

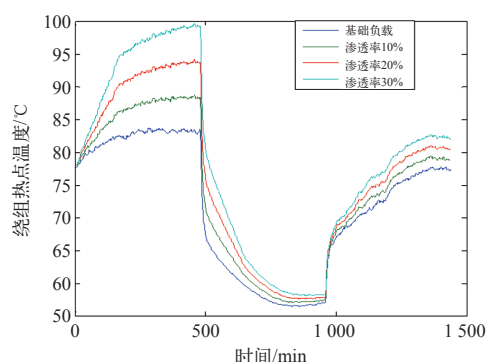


图13 节假日居住区配电变压器绕组热点温度

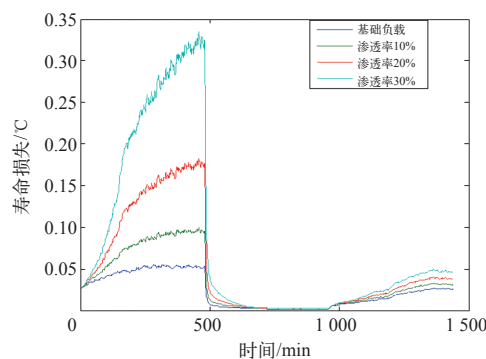


图14 节假日居住区一天配电变压器寿命损失

载对变压器一天的寿命损失为33.86 min。叠加电动汽车负荷后,在电动汽车渗透率为10%、20%和30%时的配电变压器一天的寿命损失分别为49.63 min、78.1 min和123.8 min。相当于叠加充电负荷后配电寿命损失增加了47%、131%和266%。

4 结束语

本文将车位数量作为基于蒙特卡洛模拟的电动汽车充电负荷计算方法中的一个约束条件,计算分析了商业区、居住区和公务区的单日充电负荷的峰值时间段。如果充电负荷的峰值时间段和基础负荷的峰值时间段基本吻合,则将加大各功能区负荷峰谷差,通过有效的措施进行削峰填谷,可以减少充电负荷对配电网的影响,提升配电网的经济运行。

通过居住区充电负荷对配电变压器寿命损失的仿真分析,当电动汽车渗透率达到30%时,寿命损失增加了2~3倍,可明显看出电动汽车充电负荷对变压器寿命损失影响很大。通过分析仿真得出的结论对今后配电变压器寿命损失的评估、配电变压器运行维护和老城区配电变压器的扩容以

及新城区的配电变压器选取问题提供数据支撑。

参考文献

- [1] 程如烟. 各国政府支持电动汽车发展的最新举措和动向 [J]. 科技进步与对策, 2011, 28 (15): 157-160.
- [2] Chen Ruyan. New measures taken by main countries to develop electric vehicles [J]. Science & Technology Progress and Policy, 2011, 28 (15): 157-160.
- [3] 吴憩棠. 我国“十城千辆”计划的进展 [J]. 新能源汽车, 2009, 1 (24): 15-19.
- [4] 王建, 吴奎华, 刘志珍, 等. 电动汽车充电对配电网负荷的影响及有序控制研究 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33 (8): 47-52.
- [5] Robert C, Green II, Wang Lingfeng, et al. The impact of plug-in hybrid electric vehicles on distribution networks: a review and outlook [C]. IEEE Power & Engineering Society General Meeting Minneapolis; IEEE, 2010: 1-10.
- [6] 田立亭, 史双龙, 贾卓, 等. 电动汽车充电需求的统计学建模方法 [J]. 电网技术, 2010, 34 (11): 126-130.
- [7] 罗卓伟, 胡泽春, 宋永华, 等. 电动汽车充电负荷计算方法 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35 (14): 36-42.
- [8] 郑竞宏, 戴梦婷, 张曼, 等. 住宅区式电动汽车充电站负荷集聚特性及其建模 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (22): 32-38.
- [9] Bae Sungwoo, Kwasinski Alexis. Spatial and temporal model of electric vehicle charging demand [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3 (1): 394-403.
- [10] Alizadeh M, Scaglione A, Davies J, et al. A scalable stochastic model for the electricity demand of electric and plug-in hybrid vehicles [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5 (2): 848-860.
- [11] 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.
- [12] 陈丽丹, 聂涌泉, 钟庆. 基于出行链的电动汽车充电负荷预测模型 [J]. 电工技术学报, 2015, 30 (4): 216-225.
- [13] 余贻鑫, 张崇见, 张弘鹏. 空间电力负荷预测小区用地分析 (二)——模糊推理在小区用地分析中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (7): 28-31.
- [14] Lee C C. Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller, Part II [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1990, 20 (2): 419-435.
- [15] 陈鹏, 孟庆海, 赵彦锦. 基于蒙特卡洛法的电动汽车充电负荷计算 [J]. 电气工程学报, 2016, 11 (11): 40-46.
- [16] 刘青, 戚中译. 考虑空间运动特性的规模化电动汽车接入电网负荷预测模型 [J]. 现代电力, 2015, 32 (1): 76-82.
- [17] 高鹏, 杨亚奇, 米康民. 变压器绕组热点温度在线测量的研究 [J]. 山西电力, 2013 (2): 31-33.
- [18] IEEE/ANSI C57. 91-1995 IEEE guide for loading mineral-oil-immersed transformers [S].
- [19] IEEE C57.91-2011 IEEE guide for loading mineral-oil-immersed transformers and step-voltage regulators [S].
- [20] 唐西胜, 邓卫, 李宁宁, 等. 基于储能的可再生能源微网运行控制技术 [J]. 电力自动化设备, 2012, 32 (3): 99-103.
- [21] Tang Xisheng, Deng Wei, Li Ningning, et al. Control technologies of micro-grid operation based on energy storage [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32 (3): 99-103.
- [22] 李鹏, 窦鹏冲, 李雨薇, 等. 微电网技术在主动配电网中的应用 [J]. 电力自动化设备, 2015, 35 (4): 8-16.
- [23] LI Peng, DOU Pengchong, LI Yuwei, et al. Application of microgrid technology in active distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35 (4): 8-16.
- [24] Barton J P, Infield D G. Energy storage and its use with intermittent renewable energy [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19 (2): 441-448.

(收稿日期: 2017-02-10) **EA**