

Research on Distribution Network Planning Considering Electric Vehicle Charging Station

Jun Guo¹, Li Liu²

¹CNOOC Energy Development Equipment Technology Co. Ltd., Tianjin

²State Grid Sichuan Electric Power Company Chengdu Longquanyi Power Supply Company, Chengdu Sichuan
Email: 839691312@qq.com

Received: Feb. 11th, 2020; accepted: Feb. 25th, 2020; published: Mar. 2nd, 2020

Abstract

A large number of electric vehicles will become a new type of load and put forward new requirements on the distribution network planning. The improvement of the electric vehicle charging facility network is an important factor in the development of electric vehicles. In this paper, a distribution network planning method considering electric vehicle charging stations is proposed. Firstly, the battery characteristics and operation rules of electric vehicles are introduced. Secondly, a Monte Carlo method based on probability distribution statistics is used to establish a load forecasting mathematical model, and a solution idea for solving the electric vehicle charging load is proposed. Then, considering the minimum total investment and operation cost of the new lines and electric vehicle charging stations in the distribution network as the goal, a mathematical model for distribution network planning including charging stations is constructed. Finally, the distribution network with a voltage level of 10 KV is taken as an example, and MATLAB and MATPOWER software were used for simulation by setting reasonable parameters. The simulation results of the numerical examples verify the rationality and effectiveness of the model.

Keywords

Electric Vehicle, Charging Station, Load Forecasting, Monte Carlo, Distribution Network Planning

考虑电动汽车充电站的配网规划研究

郭 骏¹, 刘 丽²

¹中海油能源发展装备技术有限公司, 天津

²国网四川省电力公司成都市龙泉驿供电公司, 四川 成都
Email: 839691312@qq.com

收稿日期: 2020年2月11日; 录用日期: 2020年2月25日; 发布日期: 2020年3月2日

摘要

大量的电动汽车将成为一种新型负荷对配电网规划提出新要求, 完善电动汽车充电设施网络是电动汽车发展中的重要因素, 本文提出了一种考虑电动汽车充电站的配网规划方法。首先, 介绍了电动汽车的电池特性和运行规律。其次, 采用基于概率分布统计的蒙特卡洛方法建立了负荷预测数学模型, 提出求解电动汽车充电负荷的解决思路。然后, 考虑以配电网中新建线路和电动汽车充电站的投资运行总成本最小为目标, 构建含充电站的配网规划数学模型。最后, 以电压等级为10 KV的配电网为算例, 通过设置合理的参数, 运用MATLAB和MATPOWER软件进行仿真。算例仿真结果验证了模型的合理性与有效性。

关键词

电动汽车, 充电站, 负荷预测, 蒙特卡洛, 配网规划

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 燃油汽车尾气排放和化石能源过度消耗引起的环境恶化问题不断加剧[1]。相比传统燃料汽车, 电动汽车(electric vehicle, EV)因其具有更加清洁高效的优点, 可降低有毒气体的排放, 同时减少人类对化石能源的依赖, 逐渐成为世界各国大力发展的新一代交通工具, 城市交通电气化也将因为电动车的推广和应用成为未来发展的必然趋势[2] [3]。随着充电站以及大量充电桩的逐步建立, 电动汽车必将成为一类新兴负荷, 其多变的充电需求会影响变电站规划和网架规划环节, 配电容量的设置和配电线路的选择也都会受到影响, 其中电动汽车体量大、负荷预测难的特点使其影响效果体现得更为明显[4]。配电网规划应完善对大量电动汽车的充电需求, 在确保自身运行安全与可靠的情况下, 使其投资与运行成本最低, 以满足新形势下配电网规划和运行需求。因此, 研究电动汽车充电站(electric vehicle charging station, EVCS)和配电网的协同规划具有重要意义。

目前, 国内外已有相关文献对充电站以及配电网的规划开展了研究。文献[5] [6] [7] [8]考虑电力公司和用户的利益、配电网线路可用裕度等不同因素, 提出了充电站的优化规划模型。文献[9]综合考虑了集中充电站地价、电力线路传输容量等因素, 同时在模型中纳入电网扩展因素, 有效解决了集中充电站接入电网的规划问题。文献[10]通过合理规划充电桩, 以最小化投运成本和有功损耗、最大化充电站车流量为目标, 建立了配电网与充电站的多目标优化规划方法。文献[11]通过离差最大化法和层次分析法用于确定充电站的选址地点, 在负荷波峰时段通过所建电价模型来保证车辆充电的有序性, 考虑配电网效益最优, 提出了优化规划方法。文献[12]将充电站和 DG 分别考虑, 二者相互独立地纳入配网规划的决策变量, 考虑风能、光能和电动汽车之间的规划, 给出了一种含 DG 和电动车的配电网潮流计算方法。文献[13]考虑分布式电源同时为配电网负荷和充电站供电, 建立了总成本最小、网络损耗最小和交通满意度最高的电动汽车充电站与分布式电源定容选址模型。文献[14]考虑了分时充电电价激励下充电行为的改变对规划的影响, 提出了一种电动汽车充电站的配电网协同规划方法, 最后结合遗传算法对模型进行了分析。然而, 这些文献的研究主要集中于充电站选址定容或者配电网规划, 而将两者协调规划建立优化规划的

研究还处于上升阶段, 少有考虑两者一同规划的方法, 很难实现配电网和充电站的综合效益最优, 所以研究充电站与配电网的联合规划方法十分有必要。

本文提出了一种考虑电动汽车充电站的配网规划方法。采用基于概率分布统计的蒙特卡洛方法建立了负荷预测数学模型, 同时在配电网辐射状约束以及电网安全运行约束的前提下, 为满足传统负荷以及电动汽车充电负荷的需求, 以线路新建、充电站新建为手段, 把充电站和配网线路投资运行成本之和最小为目标, 建立了包含充电站的配网规划数学模型。这些方法和模型将为实际电动汽车充电站的配网规划提供新的理论支持。

2. 电动汽车电池特性

电动汽车电池电量可以用电池荷电状态 SOC 说明:

$$S(t_2) = S(t_1) + \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{C_a(i_d)} i_d dt \quad (1)$$

式中, (i_d) 表示充电电流, 单位 A, $S(t_1)$ 和 $S(t_2)$ 分别表示 t_1 和 t_2 时刻电池的电荷状态; $C_a(i_d)$ 代表电池容量, 单位 A·h。

根据动力电池种类的不同, 充电负荷大小和负荷曲线也有差异。铅酸电池是使用较早的充电电池, 因其成本低廉而受到广泛使用, 后由于比能量数值低而发展受到一定限制。镍氢电池的可用寿命长于铅酸电池, 但价格是其四倍以上, 较为昂贵, 常用在混动电动车上。锂电池的单位千克供给能量高, 可输出较高功率, 充放电特性很好。另外, 锂电池的电压输出值高, 寿命周期长, 损失率低, 其清洁环保的特点是其他动力电池没有的好处。

为了计算得到电动汽车的充电负荷, 需要事先确定开始充电时刻的电池电量状态, 即起始 SOC, 取值 0 到 1 之间。电动汽车在一天的行驶过程中, 其电量比例以相应的速度下降。因此, 电动汽车 t 时刻的电量状态 $S(t)$ 可表示为:

$$S(t) = S_0(t_1) + \Delta S_t - \int_{t_0}^t v_{soc}(t) dt \quad (2)$$

式中, ΔS_t 为充电所导致的 SOC 增加值, $S_0(t_1)$ 为开始时刻的电池 SOC 值, $v_{soc}(t)$ 表示荷电量的瞬时下降速率。若电动汽车在行进过程中其 SOC 随时间下降到某个阈值, 则表示电动汽车具有充电要求, 需要在附近充电站补给电能。

3. 电动汽车充电负荷预测

3.1. 电动汽车的运行规律

电动汽车的运行规律一般包括出行时间、充电时刻、里程数、停放习惯和充电场所等, 其与电动汽车的负荷预测密切相关。电动汽车充电时刻服从高斯正态分布:

$$f_x = \begin{cases} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu_t)^2}{2\sigma^2}\right), & \mu_t - 12 < x < 24 \\ \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x+24-\mu_t)^2}{2\sigma^2}\right), & 0 < x < \mu_t - 12 \end{cases} \quad (3)$$

式中 μ_t 和 σ 分别表示期望和方差。

充电负荷计算需要根据充电方式和初始 SOC 确定充电时间。对于常规充电模式, 其充电时间表达式写为:

$$T = \frac{(1-s_1)C_{ap}}{P_1} \quad (4)$$

式中: s_1 表示起始 SOC, C_{ap} 表示电池的容量, P_1 表示充电功率。

对于快速充电模式, 可得到充电时间为:

$$T = \frac{(s_{22} - s_{20})C_{ap}}{P_2} \quad (5)$$

式中: s_{22} 表示充电结束时的总电量, s_{20} 表示起始 SOC, C_{ap} 表示电池的容量, P_2 表示充电功率。

起始 SOC 与电动汽车日行驶距离直接相关, 一般而言, 日行驶距离满足对数正态分布, 对应表达式可以写为:

$$g(d; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(d-\mu)^2}{2\sigma^2}}, d > 0 \quad (6)$$

式中: μ 和 σ 分别表示期望和方差。

初始 SOC 是求解充电用时的关键参数, 借助日行驶距离可以计算初始 SOC 值, 其表达式写为:

$$SOC = \left(1 - \frac{d}{d_m}\right) \times 100\% \quad (7)$$

式中: d 为每次充满电量后电动车实际行驶的公里数, d_m 为满电状态下电动车可以行驶的最大里程数目。

3.2. 电动汽车充电负荷的计算

不同种类的电动汽车具有不同的充电方式和充电时间, 目前, 电动出租车和电动私家车在电动汽车行业中占有比重较大。电动出租车日行驶距离在 350~400 km, 每天需要充电两次; 电动私家车一天通常只需要充电一次。电动出租车在快充模式下功率可达 40 KW, 其充电功率平均值通常为 30 KW; 电动私家车根据不同使用场景会选择常规充电或者快速充电, 常规充电模式下充电功率可达 6 KW, 快速充电模式下充电功率一般为 15 KW。

可采用基于概率分布统计的蒙特卡洛方法对电动汽车充电负荷进行预测。相比传统数学方法, 蒙特卡洛模拟可解决高维或多因素的复杂问题, 极大降低了问题求解的难度, 操作更为简洁方便, 能够处理许多传统数学方法难以解决的复杂问题。从一天中会存在若干集中充电时间段出发, 根据各种类型车辆的行驶规律, 抽取初始 SOC 以及假设车辆在各集中充电时段充电的概率, 计算各时段需要充电的电动车数量, 进而求得各时段每种电动车的负荷值, 以及一天中最大充电负荷的大小。

4. 考虑电动汽车充电站的配网规划模型

4.1. 目标函数

考虑以配电网中新建线路和电动汽车充电站的投资运行总成本最小为目标, 建立如下目标函数:

$$\min F = C_1 + C_2 \quad (8)$$

$$C_1 = \sum_{l \in D} M_l x_l + T \sum_{l \in D} O_l x_l \quad (9)$$

$$C_2 = \sum_{v \in V} y_v K_v S_v + T \sum_{v \in V} \chi y_v S_v \quad (10)$$

式中: C_1 为新建线路的投资和运行成本之和; C_2 为充电站的建设和运行成本之和; T 为规划期; D 为新建线路集合; M_l 为第 l 条线路的投资系数; O_l 为线路的年运行成本系数; V 为充电站备选站址集合; K_v 为充电站的投建成本系数; S_v 为充电站的投建容量; χ 为单位容量的年运行费用系数; x_l 为 0~1 逻辑变量, 取值为 1 表示新建第 l 条线路, 取值为 0 表示不新建第 l 条线路; y_v 为 0~1 逻辑变量, 取值为 1 表示待选充电站站址进行投建, 取值为 0 表示待选充电站站址不进行投建。

4.2. 约束条件

1) 潮流约束条件

$$\begin{cases} P_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (11)$$

式中: P_i 和 Q_i 表示节点 i 的注入有功和无功功率; V_i 表示节点 i 的电压幅值; G_{ij} 为支路电导; B_{ij} 为支路电纳; θ_{ij} 为节点 i, j 的电压相角差。

2) 节点电压幅值上下限约束

$$V_{i \min} \leq V_i \leq V_{i \max} \quad (12)$$

式中: $V_{i \max}$ 和 $V_{i \min}$ 表示第 i 个节点容许的电压上下限。

3) 线路容量约束

$$|S_l| \leq S_{l \max} \quad (13)$$

式中: S_l 表示线路 l 的传输功率; $S_{l \max}$ 表示线路 l 的传输功率上限。

4) 变电站容量约束

$$\begin{cases} \sum_{v \in V} P_v + \sum_{i \in N} P_i \leq P_{sub} \\ \sum_{v \in V} Q_v + \sum_{i \in N} Q_i \leq Q_{sub} \end{cases} \quad (14)$$

式中: N 表示传统负荷节点集合, V 表示充电站节点集合; P_{sub} 和 Q_{sub} 表示变电站提供的有功和无功功率; P_i 和 Q_i 表示传统负荷节点消耗的有功和无功功率; P_v 和 Q_v 为充电站 v 消耗的有功和无功功率。

5) 区域充电需求约束

$$\sum_{v \in V} y_v S_v \geq S_{demand} \quad (15)$$

式中: S_v 为待选充电站 v 的投建容量, S_{demand} 为规划区域的充电需求; y_v 为 0-1 逻辑变量, 取值为 1 表示待选站址进行投建, 取值为 0 表示待选站址不进行投建。充电站容量总和应该大于或等于充电负荷的总需求。

6) 网络辐射状约束

网架结构对于配电网而言至关重要, 配网规划结果必须满足网络的连通性和辐射状约束, 网架不能出现孤网或者环网结构。算例仿真时应用文献[15]所提配电网辐射状约束, 可表述为“新建的支路数与连通的负荷节点数相等”。

5. 算例仿真

假设某片区有电动车共 200 辆, 其中电动出租车与电动私家车各占一半, 采用快速充电模式, 充电功率设为 25 KW; 设每天早中晚有三个集中充电时段, 对应电动出租车充电时段概率为 0.2、0.5 和 0.3, 电动私家车充电时段概率为 0.1、0.2 和 0.7; 规定一辆车每日只充电一次, 且假设用户在电池荷电状态低于 0.8 时才会出现充电行为; 设起始 SOC 服从正态分布, 电动出租车起始 SOC 满足 $N(0.3, 0.1^2)$, 电动私家车起始 SOC 满足 $N(0.6, 0.1^2)$ 。充电负荷预测仿真流程如下:

- 1) 输入电动出租车和电动私家车各自的仿真数目 100 辆, 令算法循环次数为 100 次, 每次记为 j , 其初始值设为 1;
- 2) 按照电动出租车和电动私家车各自起始 SOC 服从的正态分布函数抽取 SOC;
- 3) 判断起始 SOC 是否满足充电条件, 即起始 SOC 是否大于 0 及小于 0.8, 若满足充电条件则累加计数一次; 若不满足则无充电行为, 即充电功率为 0;
- 4) 由上一步计数得出所有具有充电行为的电动车总数, 根据充电时段概率, 计算分布于各个集中充电时段充电的车辆数;
- 5) 计算两种车各时段的充电负荷, 判断循环是否达到 100 次, 若没有, 则继续; 若 $j=100$, 则求取运行 100 次后两类车各时段充电功率的平均值;
- 6) 将同一时段的电动出租车和电动私家车的充电功率平均值求和, 得到每个充电时段的总需求;
- 7) 比较各充电时段的充电总负荷, 得到一天中最大充电负荷的大小。

通过 MATLAB 仿真得到充电负荷预测结果如表 1 所示:

Table 1. Charge load prediction results

表 1. 充电负荷预测结果

充电时段	早(时段一)		中(时段二)		晚(时段三)	
	出租车	私家车	出租车	私家车	出租车	私家车
车辆类型	出租车	私家车	出租车	私家车	出租车	私家车
充电功率/KW	500	250	1249.8	495.25	749.75	1729.8
总计/KW	750		1745.05		2479.55	

由表 1 可知, 该区域最大充电功率出现在时段三, 该时段私家车充电功率明显大于出租车充电功率, 且总充电功率大小为 2479.55 KW, 约 2.48 MW。

以图 1 所示 10 KV 配电网为例, 对电动汽车充电站的配网规划进行仿真。虚线表示可能新建的线路, 该拓扑有 20 个节点, 节点 1 为变电站, 节点 2-15 和 17 为传统负荷节点, 设定节点 16、18、19 和 20 为充电站待选站址, 规划年限为 5 年。

该区域充电需求为 2.48 MW, 设电动汽车充电负荷功率因素为 0.9, 总充电负荷为 2.76 MVA。拟建设两种容量的充电站, 第一种为 0.89 MVA, 可满足 0.8 MW 的充电负荷, 第二种为 0.98 MVA, 可满足 0.88 MW 的充电负荷。

设定充电站待选节点 18 和节点 19 采用第一种容量类型, 充电站单位容量造价为 220 万元/MVA, 设定充电站待选节点 16 和节点 20 的采用第二种容量类型, 充电站单位容量造价分别为 180 万元/MVA 和 200 万元/MVA。设充电站单位容量年运行成本 1.4 万元/年, 线路年运行成本为 2 万元/年。要求电压幅值偏差为 $\pm 5\%$, 线路容量上限为 5MVA, 且仿真时, 设置变电站的起始容量数值很大, 即不考虑变电站的扩容。

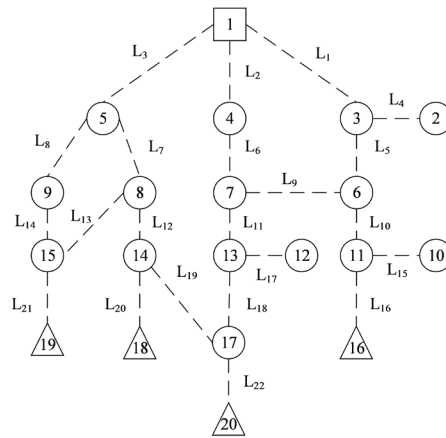


Figure 1. Example node diagram
图 1. 算例节点图

利用 MATLAB 和 MATPOWER 对算例进行求解。求解流程图如图 2 所示：

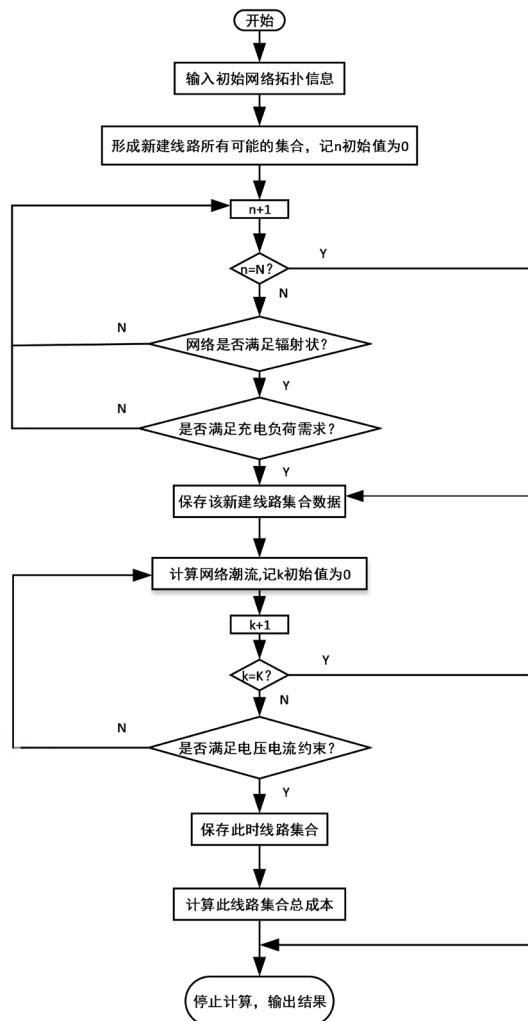


Figure 2. Flow chart of example solution
图 2. 算例求解流程图

仿真求解可得, 满足辐射状约束和充电负荷需求的线路集合有 508 种情况, 通过 MATPOWER 计算网络潮流, 满足电压上下限约束以及线路传输容量约束的有 65 种, 由于变电站容量初始值设定为一个较大的值, 所以变电站无需扩容。因此, 满足模型所有约束条件的线路集合共 65 种方案, 均新建线路为 18 条, 新建充电站数量为 3 个, 仿真运行可得算例配网规划的结果, 同时, 为验证本文所提方法的准确性, 选择了两个其他方案与最优方案进行比较, 如表 2 和表 3 所示。

Table 2. Planning results of different schemes

表 2. 不同方案的规划结果

规划方案	新建线路	充电站选址节点
最优方案	L ₁ -L ₇ 、L ₁₀ -L ₁₈ 、L ₂₀ 、L ₂₂	节点 16、18、20
方案一	L ₁ -L ₇ 、L ₁₀ -L ₁₅ 、L ₁₇ -L ₁₈ 、L ₂₀ -L ₂₂	节点 18、19、20
方案二	L ₁ -L ₇ 、L ₁₀ -L ₁₇ 、L ₁₉ -L ₂₁	节点 16、18、19

Table 3. Cost comparison of different schemes

表 3. 不同方案的成本比较

规划方案	成本		
	线路成本/万元	充电站成本/万元	总成本/万元
最优方案	8557	588.15	9145.15
方案一	9174	606.92	9780.92
方案二	9475	587.32	10062.32

对比方案可知, 本文规划所得最优解的总成本最小, 为 9145.15 万元, 新建线路包括 L₁-L₇、L₁₀-L₁₈、L₂₀、L₂₂, 投建的电动汽车充电站为节点 16、18、20, 对应的网络拓扑图如图 3 所示。其节点电压数据以及线路容量数据如表 4 和表 5 所示。

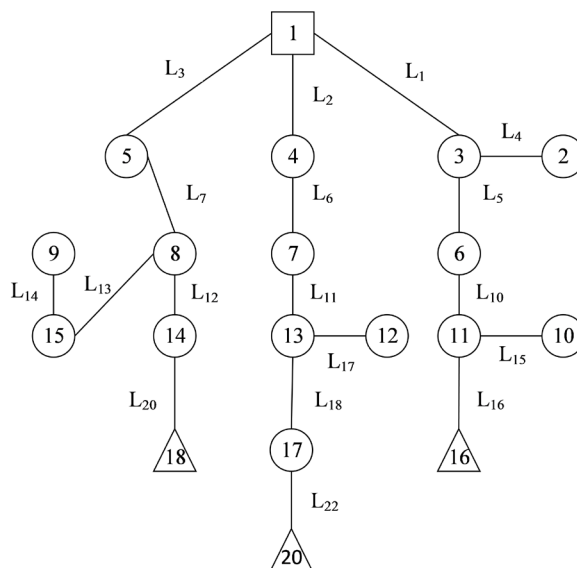


Figure 3. Topology diagram of optimal planning

图 3. 最优规划方案的拓扑图

Table 4. Load node voltage of the optimal planning scheme
表 4. 最优规划方案的负荷节点电压

负荷节点编号	2	3	4	5	6	7
电压(p.u.)	0.9877	0.9894	0.9872	0.9925	0.9771	0.9829
负荷节点编号	8	9	10	11	12	13
电压(p.u.)	0.9904	0.9869	0.9595	0.9633	0.9704	0.9721
负荷节点编号	14	15	16	17	18	20
电压(p.u.)	0.9839	0.9878	0.9612	0.9679	0.9790	0.9629

Table 5. Line transmission power of the optimal planning scheme
表 5. 最优规划方案的线路传输功率

支路编号	线路传输有功功率/MW	线路传输无功功率/MVar	线路传输容量/MVA
L ₁	2.6160	1.7946	3.1724
L ₂	2.0993	1.4117	2.5298
L ₃	1.8799	1.2421	2.2532
L ₄	0.2505	0.2253	0.3369
L ₅	2.0349	1.3243	2.4279
L ₆	1.9704	1.3168	2.3699
L ₇	1.4645	0.8945	1.7161
L ₁₀	1.6580	1.0504	1.9628
L ₁₁	1.7612	1.1621	2.1100
L ₁₂	0.9099	0.4721	1.0251
L ₁₃	0.4014	0.3107	0.5076
L ₁₄	-0.1999	-0.1499	0.2499
L ₁₅	0.3013	0.2307	0.3795
L ₁₆	0.8819	0.4269	0.9798
L ₁₇	0.2506	0.2303	0.3403
L ₁₈	1.1898	0.6811	1.3709
L ₂₀	0.8039	0.3890	0.8931
L ₂₂	0.8845	0.4283	0.9828

从表 4、表 5 数据可以看出, 负荷节点电压(p.u.)满足大于 0.95 小于 1.05 的约束范围; 线路传输容量满足小于 5MVA 的约束条件。

综上所述, 算例仿真的结果满足配电网辐射状结构、变电站容量约束、电动汽车充电需求以及电网安全运行约束, 验证了本文所提方法和模型的合理性与正确性。

6. 结论

本文提出了一种考虑电动汽车充电站的配网规划方法, 该方法采用基于概率分布统计的蒙特卡洛方法对电动汽车充电负荷进行预测, 同时在配电网辐射状约束以及电网安全运行约束的前提下, 以充电站投资和配网线路投资成本之和最小为目标, 建立了含充电站的配网规划数学模型, 使最终规划方案的投资成本达到了综合最优, 算例仿真结果表明, 当对含电动汽车充电站的配网进行规划时, 本文提出的方法和模型在满足约束条件的同时, 还可使规划方案的综合成本最小, 充分体现了本文提出的规划方法的

合理性和经济性。本文提出的方法和模型将为实际电动汽车充电站的配网规划提供新的理论支持和参考,然而,本文考虑的仅是单阶段静态配电网规划模型,还未推广为多阶段规划模型,同时在目标函数中也没有考虑用户便利性、网络损耗等因素,这将作为下一阶段研究的重点。

参考文献

- [1] 刘岩. 汽车尾气对环境污染与控制[J]. 广东蚕业, 2016, 50(11): 6-7.
- [2] 张文亮, 武斌, 李武峰, 等. 我国纯电动汽车的发展方向及能源供给模式的探讨[J]. 电网技术, 2009, 33(4): 1-5.
- [3] 唐现刚, 刘俊勇, 刘友波, 等. 基于计算几何方法的电动汽车充电站规划[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 31-37.
- [4] 连恒辉, 万凌云, 刘洪, 等. 电动汽车充放电对配电网规划的影响[J]. 电力建设, 2015, 36(7): 33-39.
- [5] 葛少云, 冯亮, 刘洪, 等. 考虑车流信息与配电网容量约束的充电站规划[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 582-589.
- [6] 郭春林, 肖湘宁. 电动汽车充电基础设施规划方法与模型[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 70-75.
- [7] 刘志鹏, 文福拴, 薛禹胜, 等. 电动汽车充电站的最优选址和定容[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3): 54-59.
- [8] 李宏仲, 王伟, 高宇男, 等. 考虑用户出行特性和配电网线路可用裕度的充电站规划[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(23): 69-86.
- [9] 高赐威, 张亮, 薛飞, 等. 考虑集中型充电站定址分容的电网规划研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 40-46.
- [10] 刘畅, 刘洪, 李香龙, 等. 考虑路网与配电网可靠性的电动汽车充电站多目标规划[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 28-34.
- [11] 艾圣芳. 考虑电动汽车 V2G 效应的配电网规划研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [12] 罗雯清. 计及风光储发电和电动汽车的配电网规划[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [13] 刘柏良, 黄学良, 李军, 等. 含分布式电源及电动汽车充电站的配电网多目标规划研究[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 450-456.
- [14] 段豪翔, 吕林, 向月. 计及分时充电电价激励的电动汽车充电站与配电网协同规划[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(1): 103-110.
- [15] 杜爱虎, 胡泽春, 宋永华, 等. 考虑电动汽车充电站布局优化的配电网规划[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 35-42.