

考虑配网潮流约束的高速公路快速充电站 校正规划方法

董晓红¹, 穆云飞¹, 于力², 靳小龙¹, 贾宏杰¹, 余晓丹¹

(1. 天津大学 智能电网教育部重点实验室, 天津 300072;

2. 南方电网科学研究院, 广东 广州 510000)

摘要:提出了一种考虑配网潮流约束的高速公路快速充电站校正规划方法。利用电动汽车充电需求预测模型得到高速公路上电动汽车充电需求点的时空分布信息;在此基础上,基于共享型最近邻居聚类算法构建高速公路快速充电站的选址模型,以确定快速充电站的站址方案;进而基于排队论理论和充电需求的时空分布构建快速充电站定容模型,以确定快速充电站的容量配置。对该规划方案下配网潮流约束进行判断,若不满足,则利用所提出的校正原则对规划方案进行修正,直到满足配网的潮流约束为止,以得到最终的快速充电站规划方案。通过典型算例验证了所提规划方法的有效性。

关键词:高速公路;快速充电站;电动汽车;聚类算法;选址定容模型;校正规划;潮流约束;配网

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.06.017

0 引言

电动汽车 EV(Electric Vehicle)具有清洁高效的优势,因此成为解决当今世界能源危机和环境污染的重要手段之一。近年来在各国政府和汽车企业的大力推动下,EV 得到快速发展。我国在 EV 科技发展“十二五”专项规划中指出到 2020 年我国要推广 EV 达到 500 万辆^[1]。EV 的续航能力是影响 EV 推广和普及的重要影响因素,而便利的充电基础设施网络可有效提升 EV 续航里程,解决 EV 用户的“里程焦虑”问题。据中国汽车工业协会统计,截至 2015 年底我国 EV 总共销售约 43.6 万辆^[2],而同期全国范围仅建成充换电站 3600 座,公共充电桩 4.9 万个^[3]。EV 与充电基础设施的不协调发展已成为制约 EV 未来普及的重要桎梏。为此,2015 年 10 月国务院办公厅发布了《关于加快电动汽车充电基础设施建设的指导意见》,该意见指出到 2020 年 EV 充电基础设施要能满足 500 万辆 EV 需求,确定了适度超前、有序建设的原则,同时特别强调要加快建设城际高速公路快充网络,到 2020 年形成覆盖大部分主要城市的城际快充网络,满足 EV 城际、省际间的出行需求^[4]。

为此,完善高速公路快速充电站(以下简称快充站)网络,满足 EV 用户出行需求,是 EV 产业发展的关键所在。近年来各国学者从不同角度对 EV 充电设施规划方法开展了大量研究。文献[5]建立了电池组配送模型,结合换电需求和物流配送建立了集中充电站运行状态的仿真模型,构建了以集中充电站的年费用最小为目标函数、以日换电需求和充电站规模为约束的容量规划模型。文献[6]建立了反映不同主体利益的集中型充电站多目标二层规划模型,以实现集中型充电站独立开发商和配电公司的利益均衡。文献[7]基于城市道路信息,利用伏罗诺伊图确定充电站的服务区并设计其容量。文献[8]提出了基于用户出行需求的 EV 充电站优化规划模型。文献[9]提出了一种混合整数非线性优化方法,从给定候选地址中确定城市路网中快充站站址和容量。文献[10]利用伏罗诺伊图和全寿命周期成本理论构建了两阶段规划模型。文献[11]基于出行链构建 EV 空间需求模型,利用免疫算法构建充电站选址模型。文献[12]提出了一种多目标协同规划方法,该规划方法使得年总投资和能量损失成本最小,同时快充站能够捕获最大的年交通流量。文献[13]提出了一种利用交通流量确定充电站的容量和基于成本的模型评估候选充电站站址方案经济性的充电站经济规划方法。

尽管对于充电基础设施的规划已有大量的研究成果,但充分考虑具有时空分布特征的 EV 充电需求的充电基础设施规划的研究还比较少。在文献[14]中,本文作者已提出一种高速公路快充站规划方法,利用 EV 充电需求时空预测模型 STM(Spatial-Temporal

收稿日期:2017-03-29;修回日期:2017-04-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51625702,51677124,51337005);国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2015AA-050403);天津市应用基础与前沿技术研究计划(15JCQNJC43-500);南方电网公司科技项目(KY2014-2-0024)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51625702,51677124,51337005),the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2015AA050403),Tianjin Research Program of Application Foundation and Advanced Technology(15JCQNJC43-500) and the Foundation of Science and Technology Project of CSG(KY2014-2-0024)

Model)得到的充电需求点,构建了高速公路快充站规划方法,但规划方法仅仅关注交通出行需求的满足度,未考虑配网的潮流约束^[14]。

快充站既是一种交通设施,也是配网重要组成部分。因此,EV 充电基础设施的规划问题属于典型的多学科交叉问题,也是未来能源互联网建设需要解决的关键问题之一^[15]。在规划过程中,需综合考虑快充站为 EV 提供充电服务的能力,以及其对配网的影响,即快充站的选址和定容方案要在满足 EV 用户充电需求和配网潮流的双重约束条件下,实现资源的最优配置。因此在文献[14]的基础上,本文提出了考虑配网潮流约束的高速公路快充站校正规划方法,使规划方案能够为 EV 用户提供更好的充电服务。

1 快充站规划问题描述

高速公路快充站站址和容量直接影响用户充电的便利程度,同时受到配网的约束。图 1 给出了快充站为其服务半径内 EV 用户提供充电服务的示意图。可见,快充站站址方案主要影响快充站与需要充电的 EV 距离的远近。快充站选址合理,则快充站与充电需求点距离近,更多 EV 能够在较短行驶距离内到达快充站接受便利的充电服务。而快充站的容量(即快充站充电机个数)方案主要影响快充站充电 EV 平均等待时间的长短,快充站充电机个数多,则 EV 用户排队等待时间短,可提供更加便利的充电服务。但考虑到成本和空间因素,快充站的容量不能无限增大,故每个快充站中需配置合理的充电机个数。如图 1 所示,高速公路一般为满足双向交通的 EV 充电需求设置 2 个快充站。由于这 2 个快充站在空间位置较近,本文提出的规划方法中假设将这 2 个快充站作为 1 个等效的快充站,2 个快充站

充电机个数总和为等效快充站的充电机个数,进而对快充站进行选址和定容。

从另一个角度看,快充站是配网的重要组成部分,其站址和容量分布也会在一定程度上影响 EV 充电负荷的时空分布。考虑到配网容量裕度空间分布的差异性,EV 充电负荷的时空变化必然会对某些配网薄弱区域带来一定冲击,故如何在现有配网网架结构基础上,通过快充站的合理分布来充分挖掘现有配网对 EV 充电负荷的承载能力,是至关重要的。

针对上述规划问题,本文提出了考虑配网潮流约束的高速公路快充站校正规划方法。该校正规划方法包括高速公路 EV 充电需求 STM、选址模型、定容模型和校正模型。

2 考虑配网潮流约束的快充站校正规划方法

2.1 高速公路 EV 充电需求预测模型

利用 STM,确定高速公路 EV 充电需求(即需要充电的 EV)的时空分布^[16]。

2.1.1 电池特性方面的不确定性建模

在电池特性方面的不确定性因素主要考虑 EV 类型、EV 电池容量、EV 的初始电量(即初始荷电状态 SOC_i)和续航里程。

EV 类型:按照欧盟 EV 市场的深入调研,EV 可以分为 L7e、M1、N1、N2 4 种类型^[17]。按照 EV 用途划分,EV 可分为非工作出行的 EV(HBO)、基于日常商业往来办公的 EV(NHB)、基于家庭和工作出行的 EV(HBW)^[17]。本文关注高速公路区域的快充站规划,故假设高速上出行的 EV 为 NHB 与 HBO 类型。

电池容量 C_r :根据欧盟 EV 电池数据库的统计,每种 EV 类型的电池容量的概率密度函数服从伽马分布或者正态分布^[17]。根据数据库所提供的不同类型 EV 电池容量数据,利用统计学分析,可以确定 L7e、M1、N1、N2 这 4 种类型 EV 容量的最优概率密度函数^[17]。

初始荷电状态 SOC_i :考虑到 EV 用户进入高速时往往具有“里程焦虑”的心理^[18],为了能够保障自身出行需求,通常希望电池满充后进入高速,故本文假设进入高速时每一辆 EV 拥有满充后的 SOC_i ,其取值范围是 $[0.8,0.9]$ (这是为了保护 EV 电池的寿命,防止过充^[17])。

最大续航里程 R_{mc} :根据 MERGE 数据库提供的不同类型 EV 的最大行驶里程的离散值,可通过多项式拟合获得 R_{mc} 与 C_r 之间的数学关系^[16]。根据对不同类型 EV 拟合容量和续航里程的数学关系,利用蒙特卡洛模拟 MCS(Monte Carlo Simulation)方法生成 C_r 之后,可以确定其 R_{mc} ^[16]。

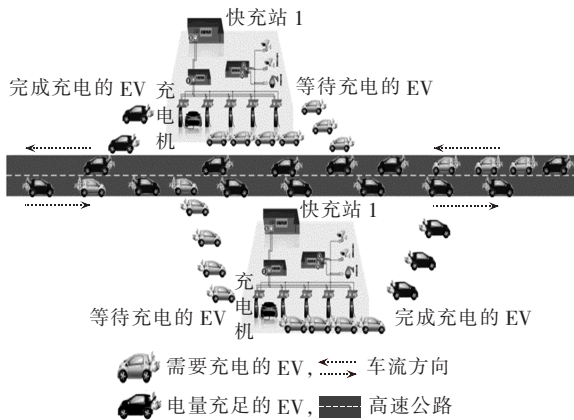


图 1 高速公路快充站为 EV 用户提供充电服务示意图

Fig.1 Schematic diagram of freeway FCS stations providing service for EVs

假设 EV 荷电状态(SOC)的变化和其行驶的距离成正比^[19]。根据式(1)可确定电池 SOC 达到需要充电的阈值之前可行驶的最大距离 R_{ac0} 。

$$R_{ac} = \eta(SOC_i - SOC_c)R_{mc} \quad (1)$$

其中, η 为能量等效系数, 主要是考虑 EV 加速和减速过程中引起的能量损失; SOC_c 为 EV 考虑充电的阈值。

根据式(2)可确定当 EV 的 SOC 达到 SOC_c 之后, EV 可继续行驶的最大距离 R_{sc} 。

$$R_{sc} = \eta \cdot SOC_c \cdot R_{mc} \quad (2)$$

2.1.2 交通行为不确定性建模

在交通行为方面的不确定性因素主要考虑起点-讫点 OD (Origin-Destination)、行驶速度、出发时间和行驶路径。

OD: 利用 OD 分析, 确定每辆 EV 的起点和讫点。OD 分析是智能交通领域普遍使用的方法^[20-21]。根据高速路上收费站的信息可以得到 OD 交通量矩阵^[22], 其中元素 o_{ij} 表示起点 i 和讫点 j 之间的交通量。将 OD 交通量矩阵转化为 OD 概率矩阵^[16], 进而可利用 MCS 来生成每辆 EV 的起点和讫点, 从而刻画 EV 的出行需求。

行驶速度 v : 由于主要是针对高速公路的 EV 充电需求点进行预测, 高速路上的行驶速度一般变化浮动较小, 所以本文假设 EV 用户以恒定速度 v 行驶, 其取值分布范围是 $[90, 120]$ km/h。

出发时间 t_s : 根据高速收费站统计的信息可以得到 EV 进入高速的时间分布。从而可以利用 MCS 生成每辆 EV 进入高速公路的时间, 即出发时间。

行驶路径: 根据最短路径算法 Floyd^[23], 确定 EV 起点和讫点之间的行驶路径和距离。

2.1.3 STM 流程

STM 具体流程如下。

步骤 1 假设进入高速公路的 EV 共有 M 辆, 利用 MCS 方法生成每一辆进入高速公路的 EV 类型 (L7e、M1、N1、N2)、电池容量和 SOC_i , 并利用式(1)确定 R_{ac0} 。

步骤 2 基于 OD 概率矩阵, 利用 MCS 生成进入高速公路的每辆 EV 的起点和讫点, 利用最短路径算法 Floyd 获得 EV 的行驶路径。然后生成 v 、 t_s 和行驶路径, 从而确定起点和讫点之间的距离 D_{od} 。

本文假设驶出高速之后 EV 可及时充电, 即城市区域充电设施充足。故本文只判断在高速公路行驶过程中是否会出现电量不足的情况, 在该过程中 EV 是否需要充电是由 R_{ac} 和 D_{od} 大小决定的。如果 $D_{od} \leq R_{ac}$, 则代表该 EV 不需要在高速公路上进行充电; 反之, EV 至少需要 1 次充电。

步骤 3 如果 EV 至少需要 1 次充电, 当 EV 的 SOC

从 SOC_i 达到 SOC_c 时, 可根据式(1)确定 EV 行驶的距离 R_{ac} 。根据 R_{ac} 和 v , 利用式(3)可计算相应 EV 行驶的时间 Δt 。根据式(4)确定充电次数 n 。

$$\Delta t = R_{ac} / v \quad (3)$$

$$n = \text{fix}(D_{od} / R_{ac}) \quad (4)$$

其中, fix 表示对 D_{od} / R_{ac} 向下取整数。

根据当 EV 的 SOC 从 SOC_i 达到 SOC_c 时确定的相应行驶时间 (Δt)、行驶路径和出发时间, 可确定 EV 需要充电的时间和位置。假设每次从需求充电到完成充电所需的时间相同, 可以确定充电结束时间, 进而更新出发时间。记录总共充电次数 n 、每次需要充电的位置和时间。

2.1.4 STM 实现

利用上述步骤进行 N 次仿真, 在每一次仿真中可以得到 K_g 个充电需求点, 通过式(5)可计算出 M 辆 EV 平均充电需求点个数 K_a 。对 N 次仿真得到的所有充电需求点进行 k -means 聚类^[24], 从而可得到 K_a 个充电需求点, 并将其作为候选站址。

$$K_a = \sum_{g=1}^N K_g / N \quad (5)$$

2.2 基于共享型最近邻居聚类算法的选址模型

2.2.1 确定快充站服务半径

快充站为其服务半径 SR (Service Radius) 内需要进行充电的 EV 提供充电服务。快充站 SR 的物理意义是在该范围内 EV 的 $SOC \leq SOC_c$ 时, 所余电量可满足行驶至该快充站。根据 STM 得到的 EV 充电需求点, 统计 EV 需要充电后能行驶的最大距离 R_{sc} 。利用中心极限定理^[25], 得到 R_{sc} 正态分布如式(6)所示。

$$\theta(R_{sc}, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-(R_{sc} - \mu)^2 / (2\sigma^2)} \quad (6)$$

其中, μ 和 σ 分别为 R_{sc} 正态概率密度函数的均值和标准差。

拟合 R_{sc} 的分布之后, 通过式(7)可确定 SR。

$$SR = \mu - b\sigma \quad (7)$$

其中, b 是显著性水平为 α 时, 通过查找标准正态分布函数表所对应的系数。

2.2.2 共享型最近邻居聚类算法

本文将 STM 确定的所有 EV 充电需求点作为快充站的候选站址。用共享型最近邻居 SNN (Shared Nearest Neighbor) 聚类算法^[26]确定快充站候选站址为其服务半径内的 EV 用户提供的充电服务便利性大小。具体步骤如下。

步骤 1 确定距离矩阵 D , 其中元素 d_{ij} 代表候选站址 i 与 j 之间的距离。

步骤 2 确定相似度矩阵 S 。定义候选站址 i 和候选站址 j 的相似度 s_{ij} , 如式(8)所示。 s_{ij} 越大, 代表两者越相似。

$$s_{ij} = \text{size}(N_N(i) \cap N_N(j)) \quad (8)$$

其中, $N_N(i)$ 、 $N_N(j)$ 分别为候选站址 i 与 j 在 SR 内需要充电的 EV 集合; size 表示求集合 $N_N(i)$ 和 $N_N(j)$ 交集中充电需求点的个数。

步骤 3 确定候选站址 i 为其 SR 内 EV 用户提供充电服务的便利性 l_i 。将相似度矩阵 S 按列求和得到候选站址 i 的 l_i , 如式(9)所示^[14]。 l_i 越大, 说明候选站址 i 周围的候选站址越密集, 即需要充电的 EV 越密集, 能够为其 SR 内的 EV 提供较好的充电服务。

$$l_i = \sum_{j=1}^{K_s} s_{ij} \quad 1 \leq i \leq K_a \quad (9)$$

2.2.3 基于 SNN 聚类算法的选址模型

以快充站提供最大 l 为目标, 构建选址模型, 并满足相邻站址距离约束^[27], 如式(10)所示。

$$SR \leq \min(D_{ij}) \leq 2 \times SR \quad (10)$$

其中, D_{ij} 为相邻快充站 i 与 j 之间的距离(km)。

选址模型确定站址方案的具体步骤如下。

步骤 1 将快充站的候选站址按 l 排序, 确定候选站址按 l 从大到小排序的队列 C_D 。

步骤 2 取 C_D 中第 1 个候选站址作为第 $i(i=1)$ 个快充站的站址。

步骤 3 判断 C_D 中第 $i(i \geq 2)$ 个候选站址与已确定各快充站之间的距离是否大于 SR; 如果满足, 则将第 i 个候选站址作为新确定的快充站, $i=i+1$, 直至遍历完所有的候选站址, 进而可得到充电站的站址方案。

2.3 基于排队论理论的定容模型

2.3.1 排队论理论

本文假设需要充电的 EV 是按照先到者先接受充电服务的原则进行充电。快充站需要充电的 EV 到达过程和充电服务时长可采用泊松分布和负指数分布来模拟^[28]。所以 EV 用户接受充电服务前站内 EV 用户最大平均等待时间 $t_{q\max}$ 可以利用排队论中 M/M/S 模型^[29]进行计算, 如式(11)~(14)所示。

$$t_{q\max} = L_q / \lambda_{\max} \quad (11)$$

$$L_q = \frac{(C_h \rho)^{C_h} \rho}{C_h! (1-\rho)^2} P_0 \quad (12)$$

$$P_0 = \left[\sum_{k=0}^{C_h-1} \frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda_{\max}}{\mu_1} \right)^k + \frac{1}{C_h!} \frac{1}{1-\rho} \left(\frac{\lambda_{\max}}{\mu_1} \right)^{C_h} \right]^{-1} \quad (13)$$

$$\rho = \lambda_{\max} / (C_h \mu_1) \quad (14)$$

其中, $\lambda_{\max}$ 为泊松分布的参数, 物理含义是单位时间到达快充站的 EV 峰值个数; C_h 为充电机个数; L_q 为站内等待充电服务的平均 EV 数; P_0 为充电机全部空闲的概率; ρ 为快充站充电机的平均使用率; μ_1 为指数分布的参数, 表示一个充电机单位时间内可完成充电的 EV 平均数。

假设 EV 遵循就近原则, 选择快充站进行充电。站址选定后, 可根据 STM 得到的充电需求分布确定每个快充站服务的充电需求时空分布, 从而可确定快充站的 $\lambda_{\max}$ 。

2.3.2 基于排队论的定容模型

根据排队论理论, 构建以最小充电机个数为目标的定容模型, 确定每个快充站的容量即充电机的个数, 如式(15)、(16)所示, 并满足快充站内 EV 用户平均等待时间小于阈值。

$$\min C_h \quad (15)$$

$$\text{s.t. } t_{q\max} \leq t_{\text{thr}} \quad (16)$$

其中, t_{thr} 为 EV 用户最大能接受的平均等待时间。

2.3.3 确定快充站充电功率

假设快充站接入配网时遵循就近原则, 将快充站接入距离该站最近的配网与路网耦合节点。式(17)是快充站各时段的充电功率 $P_{k,t}^{\text{fcs}}$ 。

$$P_{k,t}^{\text{fcs}} = \lambda_{k,t} C_h(k) p_{\text{rate}}^{\text{fcs}} / (C_h(k) \mu_1) \quad t \in T, k \in [1, n_{\text{fcs}}] \quad (17)$$

其中, n_{fcs} 为充电站个数; T 为仿真时间段; $p_{\text{rate}}^{\text{fcs}}$ 为充电机的额定功率; $\lambda_{k,t}$ 为快充站 k 第 t 个时间段到达的需要充电的 EV 个数。

2.4 校正模型

根据选址模型和定容模型, 可确定出不考虑配网潮流约束时的规划方案 Ω_{plan} 。若 Ω_{plan} 带来的充电负荷不满足配网潮流约束, 本文在选址模型的基础上提出了校正原则对 Ω_{plan} 进行调整, 即校正模型。针对不满足配网潮流约束的馈线, 通过调整其下属快充站, 使其接入相邻馈线, 从而使 EV 充电负荷在不同馈线间重新分配, 以达到改善配网潮流的目的, 进而使得该馈线潮流约束得到满足。调整 Ω_{plan} 中的快充站站址使其满足配网潮流约束时, 考虑到快充站 l 越大, 则其能够为 EV 提供的充电便利性越大, 故调整时要尽量不破坏较大 l 的快充站。

本文提出的校正原则是: 针对不满足配网潮流约束的馈线, 首先调整其下属 l 最小的快充站 i , 使其接入相邻馈线 f_m , 在满足约束式(10)的前提下确定校正后的站址方案, 并根据定容模型确定校正后的规划方案 Ω_{mp} 。分析 Ω_{mp} 中不满足配网潮流约束的馈线, 同样利用上述原则, 调整其下属的快充站, 直至快充站在满足约束式(10)前提下, 找到满足配网潮流约束的 Ω_{mp} 。若无法寻找到 Ω_{mp} , 则配网需要升级改造。

3 校正规划方法流程

根据前述 STM、选址模型、定容模型和校正模型, 本节给出校正规划方法的流程, 如图 2 所示。

步骤 1 利用结合 OD 分析和 MCS 的 STM 模型, 确定 EV 充电需求点的时空分布。

步骤 2 根据 EV 充电点的时空分布, 利用选址

模型确定快充站的站址方案。

步骤 3 根据步骤 2 确定的站址方案和步骤 1 确定的 EV 充电需求点的时空分布,利用定容模型确定站址方案中每个快充站的充电机个数,即容量方案,进而确定了不考虑配网潮流约束的规划方案 Ω_{plan} 。

步骤 4 判断规划方案 Ω_{plan} 是否满足配网潮流约束,若不满足,则利用本文提出的校正原则对该规划方案进行调整,以充分挖掘配网对 EV 负荷的承载能力,使其满足配网的潮流约束,得到最终满足配网潮流约束的规划方案。

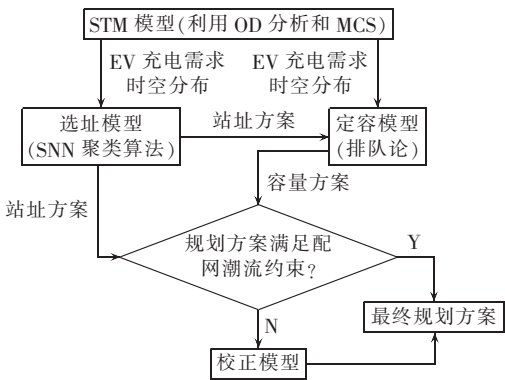


图 2 高速公路快充站校正规划方法流程图
Fig.2 Flowchart of freeway FCS planning and correction

4 算例及结果分析

4.1 算例系统

选取一段高速公路路段作为测试路网。该路段共有 6 个出入口并且每个出入口距离参考出入口 1 的距离分别为 0、10.4、57、82.7、109.1、114 km,如图 3 中三角形所示。假设该路段上的配网结构是在典型三馈线系统基础上的扩充,考虑到快充站的充电负荷较大和高速公路附近负荷密度较低,故将原馈线系统的额定电压提高为 35 kV。馈线系统的原始

数据如表 1 所示(表中线路电阻与电抗为标么值)。假设路网中的 6 个出入口分别与配网中节点 8、14、16、24、26、30 耦合,如图 3 所示。

表 1 馈线系统的原始数据
Table 1 Data of feeder system

线路	线路电阻	线路电抗	末节点有功功率/MW	末节点无功功率/Mvar	末节点无功补偿/Mvar	线路容量/kA
1	0.0285	0.0380	11.44	8.32	0	2.5
2	0.0304	0.0418	15.6	7.8	5.72	2.5
3	0.0342	0.0304	10.4	4.16	6.24	2.5
4	0.0152	0.0152	7.8	6.24	0	2.5
5	0.0418	0.0418	20.8	14.04	0	2.5
6	0.0304	0.0418	5.2	4.68	0	2.5
7	0.0418	0.0418	26	15.6	6.24	2.5
8	0.0418	0.0418	3.12	0.52	3.12	2.5
9	0.0304	0.0418	23.4	10.4	19.24	2.5
10	0.0152	0.0152	5.2	2.6	0	2.5
11	0.0418	0.0418	5.2	4.68	0	2.5
12	0.0342	0.0456	5.2	3.64	9.36	2.5
13	0.0342	0.0456	5.2	2.6	0	2.5
14	0.0304	0.0418	5.2	4.68	0	2.5
15	0.0152	0.0152	10.92	5.2	9.36	2.5
16	0.0418	0.0418	20.8	14.04	0	2.5
17	0.0304	0.0418	26	15.6	6.24	2.5
18	0.0418	0.0418	5.2	4.68	0	2.5
19	0.0418	0.0418	3.12	0.52	3.12	2.5
20	0.0304	0.0418	23.4	10.4	19.24	2.5
21	0.0152	0.0152	5.2	2.6	0	2.5
22	0.0418	0.0418	5.2	4.68	0	2.5
23	0.0342	0.0456	5.2	3.64	9.36	2.5
24	0.0342	0.0456	5.2	2.6	0	2.5
25	0.0304	0.0418	5.2	4.68	0	2.5
26	0.0152	0.0152	10.92	5.2	9.36	2.5
27	0.0152	0.0152				2.5
28	0.0152	0.0152				2.5
29	0.0152	0.0152				2.5
30	0.0342	0.0456				2.5
31	0.0152	0.0152				2.5
32	0.0152	0.0152				2.5
33	0.0342	0.0456				2.5

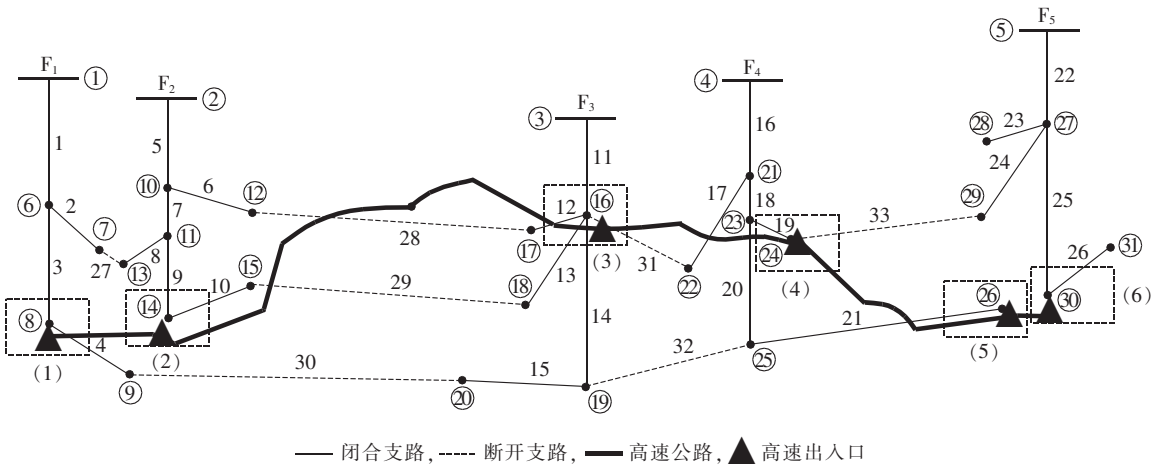


图 3 算例系统
Fig.3 Freeway for case study

假设从 6 个路口进入的 EV 数量占进入高速总汽车数量的 5%,OD 交通量矩阵采用文献[20]的数据。EV 类型(L7e、M1、N1 和 N2)的比例分别为 1.49%、87.51%、10% 和 1%^[31]。假设 HBO 和 NHB 的比例分别为 80% 和 20%。本文采用文献[31]中典型工作日两者的 t_s 概率分布。算例系统的仿真参数如下: $SOC_c=R(0.15,0.3)$, 其中 $R(x,y)$ 为在 $[x,y]$ 区间内的随机数; $\eta=1$; $N=1\,000$; $b=1.65$; $a=5\%$; $\mu_1=6$; $t_{thr}=30\text{ min}$; $p_{rate}^{fcs}=240\text{ kW}$ ^[30]。

为了验证考虑配网潮流约束的高速公路快充站校正规划方法的有效性,本文设置了 2 种场景:场景 1 为利用第 2 节给出的选址模型和定容模型确定不考虑配网潮流约束的规划方案;场景 2 为利用第 2 节给出的高速公路快充站校正规划方法确定考虑配网潮流约束的规划方案。

4.2 结果分析

场景 1 的规划方案是需要建设 6 座快充站,具体规划方案如表 2 所示。表 2 给出了快充站站址、充电机个数、峰值服务 EV 数、服务 EV 数、接入配网节点和该快充站的充电服务便利性。快充站规划方案接入配网后,造成配网馈线 2 中节点 14 电压在 19:00 时电压不满足电压约束,如图 4 中实线所示(图中电压幅值为标幺值)。

表 2 场景 1 的规划方案
Table 2 Planning scheme for Scene 1

编号	距离/ km	充电 机数	峰值服务 EV 数	服务 EV 数	接入配 网节点	充电服务 便利性
(1)	65.10	49	289	2 235	16	13679 776
(2)	82.47	44	259	1 870	24	10901 910
(3)	47.74	41	240	1 856	16	10422 140
(4)	30.41	32	184	1 467	14	6964 604
(5)	99.78	44	257	1 972	26	6463 818
(6)	13.10	42	246	1 667	14	4522046

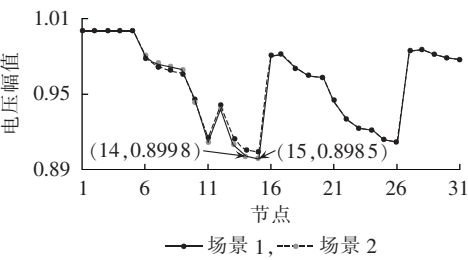


图 4 在 19:00 时配网节点电压分布

Fig.4 Voltage profile of distribution network at 19:00

根据本文提出的校正原则对场景 1 的规划方案进行修正,表 3 给出了场景 2 的规划方案。该规划方案满足配网的潮流约束,如图 4 中虚线所示。

表 3 与表 2 的规划方案相比,仅是第 6 个快充站发生变化,其他快充站没有改变。场景 1 的规划方案中快充站 6 接入的是馈线 2 中节点 14,但场景 2 快充站 6 接入的是馈线 1 中节点 8。因此可以通

表 3 场景 2 的规划方案
Table 3 Planning scheme for Scene 2

编号	距离/ km	充电 机数	峰值服务 EV 数	服务 EV 数	接入配 网节点	充电服务 便利性
(1)	65.10	49	289	2 235	16	13679 776
(2)	82.47	44	259	1 870	24	10901 910
(3)	47.74	41	240	1 856	16	10422 140
(4)	30.41	39	229	1 837	14	6964 604
(5)	99.78	44	257	1 972	26	6463 818
(6)	5.16	32	188	1 297	8	2832252

过调整快充站,使得 EV 充电负荷需求在不同馈线间重新分配,从而使得馈线满足潮流约束,进而使得规划方案满足配网的潮流约束。

由于仅改变快充站 6,在给定时空分布的充电需求时,空间相邻站址的充电需求进行了重新分配。即快充站 4 和快充站 6 服务的 EV 充电需求进行了重新分配,从而改变快充站的峰值服务 EV 数,进而在满足 EV 用户等待时间约束下,快充站 4 和 6 的充电机个数也发生了变化,但 EV 用户在站内的平均等待时间依然小于用户能够忍受的最大等待时间。

根据表 2 可知,场景 1 的规划方案中快充站 4 和 6 接入馈线 2。根据校正原则,先调整馈线 2 中 l 最小的快充站,即快充站 6,使其接入相邻馈线 1 中,故接入馈线 2 中的峰值充电功率由原来的 17.2 MW 变为 9.16 MW,从而使得馈线 2 满足潮流约束。

场景 1 的规划方案中快充站 6 为服务半径内 EV 用户提供的充电服务便利性 l 比场景 2 的规划方案中快充站 6 的大。换言之,通过选择提供次优充电服务的候选站址,使得规划方案满足配网的潮流约束。

5 结论与展望

本文提出了考虑配网潮流约束的高速公路快充站校正规划方法。该规划方法利用 STM 考虑 EV 的交通出行特征和电池特性,确定 EV 充电需求点的时空分布信息,并确定了快充站的候选站址空间;然后基于 SNN 聚类算法,以候选站址能够为 EV 用户提供最大的 l 为目标,确定了快充站的站址方案。在有限空间和成本的环境下,以 EV 用户平均等待时间小于其能够忍受的最大等待时间为约束,确定了相应快充站最小的充电机个数。根据确定的站址方案和容量方案(即规划方案),若规划方案不满足配网的潮流约束,通过调整快充站的站址使其满足配网潮流约束。最后通过一个典型算例验证了方法的有效性。

本文规划方法充分考虑了 EV 充电设施与配网之间的交互影响机理,在 EV 用户充电服务需求和配网的潮流约束之间寻求了一种有机平衡的规划方案,可充分挖掘配网对 EV 负荷的承载能力。尽管该

规划方案在一定程度上降低了快充站为 EV 用户提供的充电服务便利性,但可有效降低配网由于潮流越限而带来的改造建设成本。

参考文献:

- [1] 电动汽车科技发展“十二五”专项规划[R]. 北京:中华人民共和国科学技术部,2012.
- [2] 中国储能网新闻中心. 2015 年新能源汽车产销 340 471 辆和 331 092 辆[EB/OL]. [2016-02-16]. <http://www.escn.com.cn/news/show-300834.html>.
- [3] 前瞻经济学人. 2016 年中国充电桩产业发展现状以及趋势分析[EB/OL]. [2016-05-20]. <http://newsbjx.com.cn/html/20160602/738865.shtml>.
- [4] 关于加快电动汽车充电基础设施建设的指导意见[R]. 北京:国务院,2015.
- [5] 杨丽君,郭茜茜,闫鹏达. 考虑电池组配送的集中型充电站容量规划研究[J]. 电网技术,2016,40(5):1387-1393.
YANG Lijun, GUO Xixi, YAN Pengda. Study on capacity planning of large-scale centralized charging stations considering distribution scheme on battery pack[J]. Power System Technology, 2016, 40(5):1387-1393.
- [6] 所丽,向驰,唐巍,等. 均衡不同主体利益的集中型充电站多目标二层规划[J]. 电力系统自动化,2016,40(12):100-107.
SUO Li, XIANG Chi, TANG Wei, et al. Multi-objective bi-level programming of centralized charging station considering benefits balance for different subjects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12):100-107.
- [7] 赵书强,李志伟,党磊. 基于城市交通网络信息的电动汽车充电站最优选址和定容[J]. 电力自动化设备,2016,36(10):8-15.
ZHAO Shuqiang, LI Zhiwei, DANG Lei. Optimal EV charging station siting and sizing based on urban traffic network information[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10):8-15.
- [8] 陈静鹏,艾芊,肖斐. 基于用户出行需求的电动汽车充电站规划[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):34-39.
CHEN Jingpeng, AI Qian, XIAO Fei. EV charging station planning based on travel demand[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6):34-39.
- [9] PAYAM S B, ABBAS R G, HOSEIN K K. Optimal fast charging station placing and sizing[J]. Applied Energy, 2014, 125(214):289-299.
- [10] 张程嘉,刘俊勇,刘友波,等. 计及全寿命周期成本的两阶段电动汽车充电网络规划模型[J]. 电网技术,2016,40(12):3722-3731.
ZHANG Chengjia, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. Two-stage electric charging network planning model considering life cycle cost[J]. Power System Technology, 2016, 40(12):3722-3731.
- [11] 徐青山,蔡婷婷,刘瑜俊,等. 考虑驾驶人行为习惯及出行链的电动汽车充电站站址规划[J]. 电力系统自动化,2016,40(4):59-65.
XU Qingshan, CAI Tingting, LIU Yujun, et al. Location planning of charging stations for electric vehicles based on drivers' behaviors and travel chain[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(4):59-65.
- [12] YAO W, ZHAO J, WEN F, et al. A multi-objective collaborative planning strategy for integrated power distribution and electric vehicle charging systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4):1811-1821.
- [13] XIANG Y, LIU J, LI R, et al. Economic planning of electric vehicle charging stations considering traffic constraints and load profile templates[J]. Applied Energy, 2016, 178:647-659.
- [14] DONG X H, MU Y F, JIA H J, et al. Planning of fast EV charging stations on a round freeway[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(4):1452-1461.
- [15] 潘昭光,孙宏斌,郭庆来. 面向能源互联网的多能流静态安全分析方法[J]. 电网技术,2016,40(6):1627-1634.
PAN Zhaoguang, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Energy internet oriented static security analysis method for multi-energy flow[J]. Power System Technology, 2016, 40(6):1627-1634.
- [16] MU Y F, WU J Z, JENKINS N, et al. A spatial temporal model for grid impact analysis of plug-in electric vehicles[J]. Applied Energy, 2014, 114:456-465.
- [17] EU Merge Project. Deliverable 2.1: modelling electric storage devices for electric vehicles, 2010[EB/OL]. [2014-07-11]. http://www.ev-merge.eu/imagesstories/uploads/MERGE_WP2_D2.1.pdf.
- [18] 张家玮. 基于数据驱动的电动汽车行驶里程模型建立与分析[D]. 北京:北京交通大学,2015.
ZHANG Jiawei. Modeling and analyzing of driving mileage of electric based on data-driven[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [19] QIAN K, ZHOU C, ALLAN M, et al. Modeling of load demand due to EV battery charging in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 26(2):802-810.
- [20] DOBALS J, BENITEZ F G. An approach to estimating and updating origin-destination matrices based upon traffic counts preserving the prior structure of a survey matrix[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2005, 39(7):569-591.
- [21] HU S R, WANG C M. Vehicle detector deployment strategies for the estimation of network origin destination demands using partial link traffic counts[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2008, 9(2):288-300.
- [22] 王海燕,项乔君,陆键,等. 高速公路出入口 OD 矩阵推算方法[J]. 公共交通科技, 2005, 22(2):108-115.
WANG Haiyan, XIANG Qiaojun, LU Jian, et al. Method of expressway ramp OD matrix calculation[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(2):108-115.
- [23] CHAN T M. More algorithms for all-pairs shortest paths in weighted graphs[J]. SIAM Journal on Computing, 2010, 39(5):2075-2089.
- [24] 王振武,徐慧. 数据挖掘算法原理与实现[M]. 北京:清华大学出版社,2015:159-161.
- [25] RICE J. Mathematical statistics and data analysis[M]. 2nd ed. Belmont, California, USA: Duxbury Press, 1995:166-169.
- [26] 范先立. 区域交通状态聚类分析[D]. 广州:中山大学,2005.
FAN Xianli. Region traffic state clustering analysis[D]. Guangzhou: Zhongshan University, 2005.
- [27] LIU Z, WEN F, LEDWICH G. Optimal planning of electric-

vehicle charging stations in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2013,28(1):102-110.

[28] 葛少云,冯亮,刘洪,等. 考虑电量分布及行驶里程的高速公路充电站规划[J]. 电力自动化设备,2013,33(7):111-116.

GE Shaoyun,FENG Liang,LIU Hong,et al. Planning of charging stations on highway considering distribution and driving mileage[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(7): 111-116.

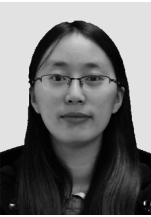
[29] 孙荣恒. 排队论基础[M]. 北京:科学出版社,2002:44-50.

[30] LUO Z W,HU Z C,SONG Y H,et al. Optimal coordination of plug-in electric vehicles in power grids with cost-benefit analysis—part II:a case study in China[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2014,28(4):3556-3565.

[31] WANG M,MU Y F,JIA H J,et al. A preventive control

strategy for static voltage stability based on an efficient power plant model of electric vehicles [J]. Journal of Modern Power Systems & Clean Energy,2015,3(1):103-113.

作者简介:



董晓红

董晓红(1989—),女,河北石家庄人,博士研究生,主要研究方向为电动汽车充电基础设施规划、电力系统稳定性分析(E-mail: dongxiaohong@tju.edu.cn);

穆云飞(1984—),男,河北石家庄人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统安全稳定、综合能源系统(E-mail:yunfeimu@tju.edu.cn)。

Freeway FCS planning and correction considering power-flow constraints of distribution network

DONG Xiaohong¹,MU Yunfei¹,YU Li²,JIN Xiaolong¹,JIA Hongjie¹,YU Xiaodan¹

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education,Tianjin University,Tianjin 300072,China;
2. Electric Power Research Institute,China Southern Power Grid,Guangzhou 510000,China)

Abstract: A method of freeway FCS(Fast Charging Station) planning and correction considering the power-flow constraints of distribution network is proposed. The EV(Electric Vehicle) charging demand prediction model is adopted to obtain the spatial-temporal distribution of freeway EV charging demand points,based on which,the SNN(Shared Nearest Neighbor) clustering algorithm is applied to build a location determination model for developing the freeway FCS location scheme and also the queuing theory is applied to build a capacity determination model for developing the freeway FCS capacity configuration. The obtained freeway FCS planning scheme is then judged by the power-flow constraints of distribution network and modified by the proposed correction principle until all these constraints are satisfied. Case study for a typical freeway verifies the validity of the proposed method.

Key words: freeway; fast charging station; electric vehicles; clustering algorithms; location and capacity determination model; correction planning; power-flow constraints; distribution network