

基于混合整数二阶锥优化的 高速路沿线 充电设施网-站协调规划方法

张节潭¹, 谢 睿^{2,3}, 郭树锋⁴, 孟祥甫⁵, 魏 韡^{2,3}, 梅生伟^{2,3}

(1. 青海省光伏发电并网技术重点实验室, 国网青海省电力公司电力科学研究院, 青海 西宁 810008;
2. 清华大学电机系, 北京 100084; 3. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 清华大学,
北京 100084; 4. 青海省光伏发电并网技术重点实验室, 国网青海省电力公司经济技术
研究院, 青海 西宁 810008; 5. 国网西宁供电公司电动汽车服务分公司, 青海 西宁 810008)

摘要: 电动汽车由于在节约化石能源、保护环境方面的突出优点, 未来将得到更广泛的应用, 因此电动汽车充电站及供电网络的规划成为重要的研究课题。本文提出一种高速路沿线电动汽车充电设施和电网协调规划的两阶段方法, 在给定交通负荷的基础上, 第一阶段通过聚类算法确定充电站的选址和容量; 第二阶段通过数学规划模型确定电网规划方案, 包括发电机和线路的数量。电网规划问题中使用了交流潮流模型, 可以精确考虑电网运行状态。基于凸松弛方法可将电网规划转化为混合整数二阶锥优化问题, 采用商业软件求解。算例验证了本文所提方法的可行性。

关键词: 充电站; 规划; 电力系统; 潮流

DOI: 10. 12067/ATEEE1704006 **文章编号:** 1003-3076(2018)03-0001-09 **中图分类号:** TM715

1 引言

近年来, 化石能源消耗与城市环境污染问题受到广泛关注。电动汽车由于其清洁环保的优势, 保有量正在稳步提高。电动汽车的普及离不开快速便捷的充电服务, 而充电站的选址与运行也将对电网运行产生影响。因此, 有必要研究充电设施的合理规划, 包括充电站的选址定容和电网的升级改造。

电动汽车充电设施的规划与交通网和电网都有密切的联系, 涉及多学科交叉。现有研究通常侧重于充电站的规划问题, 较少关注电网规划, 或在建模时对电网进行了简化。例如, 文献[1, 2]采用加权伏罗诺伊图划分充电站服务区域, 其中文献[1]考虑了配电网约束条件, 用粒子群算法求解充电站定容选址的最大收益模型; 文献[2]计及路网中车流信息, 在定容部分使用了排队模型。文献[3]提出了考虑交通网车流量的电动汽车充电站的多目标优化模型。文献[4]提出了描述电动汽车充电行为的一种时空模型, 可用于分析充电站对电网的影响。

文献[5]提出了一种考虑碳排放的充电站多目标规划。文献[6]构建了以投资成本、系统网损、服务范围为目标, 并考虑交通配流均衡的网-站协调规划模型。文献[7]协调换充、慢充、快充电站, 并且使用熵的概念, 定量描述充电站与充电需求的重合程度。文献[8]采用引力关系, 考虑充电站和电动汽车数量之间、便捷性和充电次数之间的相互影响, 建立最大化收益的选址规划模型。文献[9]研究了高速路网中的充电站, 采用两阶段法, 先用路网信息与电动汽车续航里程确定候选站址, 再考虑充电需求与成本确定站址与容量。文献[10]提出了一种在无阻塞环形高速公路沿线规划充电站的方法, 通过对交通状况的模拟得到充电点的空间分布, 然后采用聚类算法得出充电站的选址, 并计算充电站负荷, 以此定容。文献[11]基于道路信息, 分析充电站设置是否满足需求, 用线性方程近似描述电网潮流, 将未满足的充电需求、充电站费用和配电网费用作为联合成本, 建立了一个混合整数线性规划模型。

本文提出一种高速路沿线电动汽车充电设施规

收稿日期: 2017-04-05
基金项目: 国网青海省电力公司科技项目(522807150011)
作者简介: 张节潭(1980-), 男, 青海籍, 高工, 博士, 研究方向为电力系统优化规划及新能源并网技术;
谢 睿(1996-), 女, 江西籍, 博士研究生, 研究方向为优化理论与电气化交通网络。

划的两阶段方法。第一阶段根据给定的交通负荷,通过聚类算法确定充电站的选址和容量;第二阶段基于第一阶段得到的充电负荷,建立电网升级的优化模型。模型中考虑了准确的交流潮流分布,采用凸松弛理论和整数规划技巧可将电网规划转化为混合整数二阶锥优化问题,进而采用商业软件求解,得到发电机和线路升级的最优方案。

与现有文献相比,本文主要有以下两方面的创新:①本文方法同时考虑了充电站规划、电网升级和发电设备扩容问题;②本文电网规划方法较同类文献中基于近似潮流分布的模型更为准确。应当指出,当前运行环境下,电动汽车充电站供电网络中发电设备数量较少;在未来能源互联网背景下,电网中可能出现较多的燃气机组和热电联产机组,考虑发电设备扩容具有一定的前瞻性。此外,本文主要研究辐射状电网的规划问题,此类电网的交流最优潮流问题一般具有精确的凸松弛模型,易于分析计算;对于环状电网,所提方法亦可采用直流潮流模型对电网规划问题进行建模。

2 交通模型与充电站规划

本文基于文献[10]提出的方法建立交通需求模型,用于充电站选址和定容。可分为三个步骤:①根据电动汽车参数分布、起讫点(Origin-Destination, OD)分析和起始时间分布等信息,进行蒙特卡洛模拟,计算电动汽车充电点(指电量消耗至恰好需要充电的时间和地点)的分布;②应用 SNN 算法(Shared Nearest Neighbor clustering algorithm)对充电点聚类,得出充电站选址;③根据聚类点电动汽车的电池信息,得到每个充电站的负荷曲线。以负荷峰值为基准,应用排队模型,对充电设施投资与用户等待时间做联合优化,得到每个充电站最优充电设施的数量,即充电站容量。与文献[10]相比,本文方法在充电站选址时,考虑了电网节点的地理分布,即充电站只能选在电网节点位置。

2.1 计算充电点的空间-时间分布

2.1.1 电动汽车续航能力建模

根据实际电动汽车续航能力,将其分成4种类型(L7e、M1、N1和N2,分别是重型四轮车、载客车辆、轻型载货车辆和商用载货车辆^[12]),用给定的概率分布(带上下界的正态分布或伽马分布)描述各种类型电动汽车的电池最大容量 Cap 。正态分布和伽马分布的概率密度函数分别为:

$$f(x | \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

$$g(x | \alpha, \beta) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (2)$$

式中, μ 和 σ 为正态分布的参数; α 和 β 为伽马分布的参数。电动汽车最大行驶路程 Ran_{mc} 与 Cap 的关系通过拟合给出,它们大致成正比。

假设电池存储电量与行驶路程是线性关系。令 SOC_i 表示高速公路入口处电池存储电量的百分数, SOC_e 表示电动汽车需要充电时电池电量的百分数, Ran_{ac} 表示电动汽车从进入高速公路到需要充电能行驶的路程, Ran_{sc} 表示电动汽车在 SOC_e 下能行驶的路程。则有:

$$Ran_{ac} = \eta (SOC_i - SOC_e) Ran_{mc} \quad (3)$$

$$Ran_{sc} = \eta \cdot SOC_e \cdot Ran_{mc} \quad (4)$$

式中, η 为一个效率参数,用于考虑电动汽车在加速减速过程中的能量消耗。

2.1.2 交通行为建模

假设用户选择起点到终点间的最短路径,且电动汽车以平均速度 v 行驶。

用 OD 矩阵来描述用户的起点与终点。设高速公路上共有 m 个出入口, OD 矩阵 A (m 阶方阵) 中元素 a_{ij} 表示从入口 i 到出口 j 的电动汽车的数量。由 A 可以得到概率 OD 矩阵 P (m 阶方阵), 其中每个元素 p_{ij} 表示从入口 i 到出口 j 的电动汽车数量占总数量的比例, 满足

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m p_{ij} = 1 \quad (5)$$

行驶开始时间 t_s 由实际调查数据得到的分布描述。

2.1.3 蒙特卡洛模拟

使用蒙特卡洛模拟计算充电点的空间时间分布。对每一次模拟, 首先按给定概率分布产生电动汽车类型、 Cap 、 SOC_i 和 SOC_e , 根据 Ran_{mc} 与 Cap 的拟合结果计算 Ran_{mc} , 进而计算 Ran_{ac} 。然后, 按概率 OD 矩阵产生起点与终点, 按分布产生 t_s , 计算出要行驶的路程 D_{od} 。假设电动汽车电量到达 SOC_e 即充电, 充电后电量为 SOC_i , 计算行驶过程中充电点的空间与时间坐标, 每次行驶中充电点数量等于 D_{od}/Ran_{ac} 向 0 取整。大量重复这样的模拟, 得到充电点的空间时间分布。

2.2 充电站选址

先确定充电站服务半径 SR , 原则是保证每辆电

动汽车在 SOC_c 的状态下能行驶到最近的充电站。根据 2.1.3 节的 Ran_{sc} 分布,在指定置信水平下即可得出 SR 。

以下采用修改的 SNN 聚类算法,在候选站点集合中确定充电站选址。可根据实际情况选择候选站点,例如将电网节点作为候选站点。没有候选站点的情况下可直接采用充电点集合作为下述算法中的候选站点集合。

设 n_{cs} 为候选站点总数,令 $CS(k)$ 表示第 k 个候选站点,定义 $NN(k)$ 为与候选站点 k 距离小于 SR 的充电点的集合, $1 \leq k \leq n_{cs}$ 。定义相似性矩阵 S (n_{cs} 阶方阵),其元素满足 $s_{kk} = 0, s_{kl} = |NN(k) \cap NN(l)|, 1 \leq k \leq n_{cs}, 1 \leq l \leq n_{cs}, k \neq l$, 其中 $|NN(k) \cap NN(l)|$ 表示集合 $NN(k) \cap NN(l)$ 中元素的个数。

定义相似性向量 L (n_{cs} 阶向量),其中

$$l_k = \sum_{l=1}^{n_{cs}} s_{kl} \quad 1 \leq k \leq n_{cs} \quad (6)$$

较大的 l_k 值提示候选站点 k 应该成为充电站。

利用充电点空间坐标与候选站点位置计算得矩阵 S 和向量 L 。然后开始聚类过程,将 L 从大到小排序得到候选站点的排列 L' ,取 L' 的第一个候选站点放入充电站集合 SS 中,与此点距离小于 SR 的充电点放入聚类集 $C(1)$ 中。再处理排序第二的候选站点,如果它与 SS 中已有的任意点的相似性是 0,则将它放入 SS 中,同时也产生了聚类集 $C(2)$;如果它与 SS 中某点相似性大于 0,则不操作。按照这种方法,依排序处理所有的点,得到 SS 以及 $|SS|$ 个聚类集。最后,用一个事先指定的下界 d 检查每个聚类集的大小,过小的聚类集对应的聚点将从 SS 中删去。最终 SS 就是充电站集合。

2.3 充电设施数量优化

将 2.2 节获得的聚类集恢复时间坐标,即可计算每个充电站充电负荷的时间分布。以下假设充电设施数量满足高峰时期的负荷需求。

2.3.1 排队模型

对每个充电站应用排队模型,假设需要充电的电动汽车相互独立,是一个标准的排队问题。按照排队理论,如下关系成立:

$$L_s = L_q + \frac{\lambda}{\mu_2} = \frac{(c\rho_c)^c \rho_c}{c!(1-\rho_c)^2} P_0 + \frac{\lambda}{\mu_2} \quad (7)$$

$$P_0 = \left[\sum_{k=0}^{c-1} \frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda}{\mu_2} \right)^k + \frac{1}{c!} \frac{1}{1-\rho_c} \left(\frac{\lambda}{\mu_2} \right)^c \right]^{-1} \quad (8)$$

$$\rho_c = \frac{\lambda}{c\mu_2} \quad (9)$$

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda} \quad (10)$$

式中, L_s 为平均排队长度; W_q 为平均等待时间; c 为充电设施数量; λ 为泊松分布参数,代表高峰小时到达的需充电电动汽车数量; μ_2 为指数分布参数,代表充电设施平均服务速率。

2.3.2 优化模型

假设所有充电设施是相同的,均能给任意电动汽车提供充电服务。优化时考虑设施成本与用户等待成本。假设设施成本与设施数量是线性关系,令 C_s 表示折算到每小时的单位设施成本,则

$$C_s = V_c \frac{i_r (1 + i_r)^p}{(1 + i_r)^p - 1} \frac{1}{8760} \quad (11)$$

式中, V_c 为每台充电设施生命周期总成本; i_r 为利率; p 为生命周期。设 C_w 为一个用户等待 1h 的成本, t_w 为等待时间上限,则优化模型为:

$$\begin{cases} \min z = C_s c + C_w L_s \\ \text{s. t. } W_q < t_w \end{cases} \quad (12)$$

实际上 c 应该有上界,因此求解这个问题时,可以直接求出所有可能的目标函数值,并检查约束条件是否满足,从而得到最优解。

3 电网规划模型

3.1 支路潮流模型

设有向图 $G = (N, E)$ 表示电网的结构, N 的元素是顶点,代表电网中的节点; E 的元素是边,代表电网中的线路。顶点标号从 0 开始,顶点 0 表示平衡节点。用 $i \rightarrow j$ 、 (i, j) 或 $i-j$ 表示从顶点 i 到顶点 j 的边,边的方向为参考方向。令 $z_{ij} = r_{ij} + jx_{ij}$ 表示 $i \rightarrow j$ 的线路阻抗。令 I_{ij} 表示 $i \rightarrow j$ 的电流, $S_{ij} = P_{ij} + jQ_{ij}$ 表示 $i \rightarrow j$ 的始端功率, V_i 表示节点 i 的电压, $s_i = p_i + jq_i$ 表示节点 i 的注入功率。由文献[13],支路潮流模型可表示为:

$$V_i - V_j = z_{ij} I_{ij}, \forall (i, j) \in E \quad (13)$$

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^*, \forall (i, j) \in E \quad (14)$$

$$\sum_{k:j \rightarrow k} S_{jk} - \sum_{i:i \rightarrow j} (S_{ij} - z_{ij} |I_{ij}|^2) = s_j, \forall j \in N \quad (15)$$

式(13)为支路压降方程,式(14)定义了支路首节点的功率注入,式(15)为节点功率平衡条件。支路潮流模型式(13)~式(15)为以 S_{ij} 、 I_{ij} 、 V_j 、 s_0 、 $(i, j) \in E$ 为变量的非线性方程组。

3.2 凸松弛模型

为了能够有效地求解基于支路潮流模型的最优潮流问题,对支路潮流方程组做松弛化处理。

记 $l_{ij} = |\mathbf{I}_{ij}|^2, v_i = |\mathbf{V}_i|^2$ 。将式(14)代入式(13)得:

$$\mathbf{V}_j = \mathbf{V}_i - \mathbf{z}_{ij} \frac{\mathbf{S}_{ij}^*}{\mathbf{V}_i} \quad (16)$$

故

$$v_j = \mathbf{V}_j \mathbf{V}_j^* = v_i + |\mathbf{z}_{ij}|^2 l_{ij} - (\mathbf{z}_{ij} \mathbf{S}_{ij}^* + \mathbf{z}_{ij}^* \mathbf{S}_{ij}) \quad (17)$$

由式(14)得:

$$P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 = |\mathbf{S}_{ij}|^2 = \mathbf{S}_{ij} \mathbf{S}_{ij}^* = v_i l_{ij} \quad (18)$$

再将式(15)按实部、虚部分解,得如下方程组:

$$p_j = \sum_{k:j \rightarrow k} P_{jk} - \sum_{i:i \rightarrow j} (P_{ij} - r_{ij} l_{ij}), \forall j \in N \quad (19)$$

$$q_j = \sum_{k:j \rightarrow k} Q_{jk} - \sum_{i:i \rightarrow j} (Q_{ij} - x_{ij} l_{ij}), \forall j \in N \quad (20)$$

$$v_j = v_i - 2(r_{ij} P_{ij} + x_{ij} Q_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) l_{ij}, \forall (i, j) \in E \quad (21)$$

$$l_{ij} = \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{v_i}, \forall (i, j) \in E \quad (22)$$

以 $P_{ij}, Q_{ij}, l_{ij}, v_j, s_j, s_0, (i, j) \in E$ 作为变量时,式(19)~式(21)是线性的,非线性仅存在于式(22)中。将式(22)改写为如下不等式:

$$l_{ij} \geq \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{v_i}, \forall (i, j) \in E \quad (23)$$

式(23)为旋转二阶锥约束,它等价于标准二阶锥约束:

$$\left\| \begin{bmatrix} 2P_{ij} \\ 2Q_{ij} \\ l_{ij} - v_i \end{bmatrix} \right\|_2 \leq l_{ij} + v_i, \forall (i, j) \in E \quad (24)$$

将式(19)~式(21)与式(23)称为松弛的支路潮流模型,可行域为多面体与二阶锥的交集,故为凸集,并将如下最优潮流问题记为 OPF-Cr:

$$\min \{f(x) \mid x \in X_{Cr}, x^1 \leq x \leq x^u\} \quad (25)$$

式中, x 为优化变量,可行域 X_{Cr} 为凸集,满足式(19)~式(21)及式(23); x^u 和 x^1 分别为优化变量的上界和下界;线路潮流约束可表示为二次不等式约束:

$$P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \leq S_i^2, \forall (i, j) \in E \quad (26)$$

式(26)不改变模型的凸性。文献[14]指出,只要目标函数对于节点注入功率是凸的单调增函数,且线路中不同时存在反向的有功和无功潮流,不等式(23)在最优解处即为有效约束,即二阶锥松弛是

精确的。

3.3 电网升级优化模型

电网升级优化模型中作如下假定:

(1)每个充电站都是电网中某节点上的负荷,负荷功率 $p_i^d, q_i^d, \forall i \in N$ 已知。

(2)电网的网络结构与线路参数已知,节点 0 是平衡节点。

(3)对 E 中的指定边,可以增加线路的条数,增加的线路参数与该边原有线路参数相同。

(4)对 N 中的指定顶点,可以增加发电设备来改变该节点发电功率的上下限。

令 N_{ij} 表示 $i \rightarrow j$ 线路总条数,取值为正整数, n_i^g 表示节点 i 新增发电设备数量, $\tilde{\mathbf{S}}_{ij} = \tilde{P}_{ij} + j \tilde{Q}_{ij}$ 表示节点 i 新增发电设备数量, \tilde{l}_{ij} 表示 $i \rightarrow j$ 其中一条线路的始端复功率, \tilde{l}_{ij} 表示 $i \rightarrow j$ 其中一条线路中电流幅值的平方, $r_{ij}^0 + jx_{ij}^0$ 表示 $i \rightarrow j$ 其中一条线路的阻抗。仍延用 $P_{ij}, Q_{ij}, l_{ij}, r_{ij}, x_{ij}$ 表示线路 $i \rightarrow j$ 的物理量,例如 P_{ij} 表示 $i \rightarrow j$ 各条线路始端总有功功率, l_{ij} 表示 $i \rightarrow j$ 各条线路总电流的平方, r_{ij} 表示 $i \rightarrow j$ 各条线路等效总电阻。则有:

$$P_{ij} = N_{ij} \tilde{P}_{ij} \quad (27)$$

$$Q_{ij} = N_{ij} \tilde{Q}_{ij} \quad (28)$$

$$l_{ij} = (N_{ij})^2 \tilde{l}_{ij} \quad (29)$$

$$r_{ij} = \frac{1}{N_{ij}} r_{ij}^0 \quad (30)$$

$$x_{ij} = \frac{1}{N_{ij}} x_{ij}^0 \quad (31)$$

式中, $(i, j) \in E$ 。

电网升级后折算到单位时间的运行成本为:

$$F = \sum_{i \in N} [a_i^{(2)} (p_i^g)^2 + a_i^{(1)} p_i^g] + \rho \sum_{0 \rightarrow j} N_{0j} \tilde{P}_{0j} + \sum_{(i,j) \in E} \frac{Pr_{ij}^1}{\kappa} (N_{ij} - 1) + \sum_{i \in N} \frac{Pr_i^g}{\kappa} n_i^g \quad (32)$$

式中, $a_i^{(1)}$ 和 $a_i^{(2)}$ 为节点 i 发电费用参数, p_i^g 为节点 i 有功发电功率,第一项为发电费用; ρ 为输电网电价,与之相乘的和式表示与平衡节点相连的线路中的有功潮流,故第二项表示从输电网购电的总成本; Pr_{ij}^1 为每条线路投资成本, Pr_i^g 为单位发电容量投资成本, κ 为成本折算系数, n_i^g 为节点 i 新增发电设备数量,故后两项分别为折算到单位时间的电网线路投资和发电设备投资。

升级后电网的支路潮流模型为:

$$p_j = \sum_{k:j \rightarrow k} N_{jk} \tilde{P}_{jk} - \sum_{i:i \rightarrow j} (N_{ij} \tilde{P}_{ij} - r_{ij}^0 N_{ij} \tilde{l}_{ij}) \quad (33)$$

$$q_j = \sum_{k:j \rightarrow k} N_{jk} \tilde{Q}_{jk} - \sum_{i:i \rightarrow j} (N_{ij} \tilde{Q}_{ij} - x_{ij}^0 N_{ij} \tilde{l}_{ij}) \quad (34)$$

$$v_j = v_i - 2(r_{ij}^0 \tilde{P}_{ij} + x_{ij}^0 \tilde{Q}_{ij}) + [(r_{ij}^0)^2 + (x_{ij}^0)^2] \tilde{l}_{ij} \quad (35)$$

$$\tilde{l}_{ij} \geq \frac{(\tilde{P}_{ij})^2 + (\tilde{Q}_{ij})^2}{v_i} \quad (36)$$

式中, $(i, j) \in E$ 。设 Δp_i^m 和 Δq_i^m 分别为新增发电设备的有功和无功容量,则升级后变量上下界约束变为:

$$\underline{p}_i^g \leq p_i^g \leq \overline{p}_i^g + \Delta p_i^m n_i^g, \forall i \in N \quad (37)$$

$$\underline{q}_i^g \leq q_i^g \leq \overline{q}_i^g + \Delta q_i^m n_i^g, \forall i \in N \quad (38)$$

$$\underline{v}_i \leq v_i \leq \overline{v}_i, \forall i \in N \quad (39)$$

$$\underline{l}_{ij} \leq \tilde{l}_{ij}, \forall (i, j) \in E \quad (40)$$

$$\tilde{P}_{ij} \geq 0, \tilde{Q}_{ij} \geq 0, \forall (i, j) \in E \quad (41)$$

式(32)~式(41)组成电网升级优化模型,该模型是一个混合整数非线性规划问题,非线性存在于乘积项 $N_{ij} \tilde{P}_{ij}$ 、 $N_{ij} \tilde{Q}_{ij}$ 和 $N_{ij} \tilde{l}_{ij}$ 。以下步骤将该问题写成一个混合整数二阶锥规划。以 $N_{ij} \tilde{P}_{ij}$ 为例,令

$$N_{ij} = 1 + \sum_{n=0}^{N_L} 2^n z_{ijn}, \forall (i, j) \in E \quad (42)$$

式中, $z_{ijn} \in \{0, 1\}$; N_L 为根据 N_{ij} 的可能范围选取的一个正整数。令

$$p_{ijn} = \tilde{P}_{ij} z_{ijn}, \forall (i, j) \in E \quad (43)$$

式(43)等价于线性不等式组:

$$\begin{cases} 0 \leq p_{ijn} \leq \overline{P}_{ij} z_{ijn} \\ 0 \leq \tilde{P}_{ij} - p_{ijn} \leq \overline{P}_{ij} (1 - z_{ijn}) \end{cases} \quad (44)$$

式中, \overline{P}_{ij} 为事先给定的一个足够大的常数,可以理解为 \tilde{P}_{ij} 的一个上界; $z_{ijn} \in \{0, 1\}$, 当 $z_{ijn} = 0$ 时,第一行不等式使 $p_{ijn} = 0$, 此时第二行不等式成立; 当 $z_{ijn} = 1$ 时,第二行不等式使 $p_{ijn} = \tilde{P}_{ij}$, 此时第一行不等式也成立。因此式(43)与式(44)等价。同理有:

$$\begin{cases} 0 \leq q_{ijn} \leq \overline{Q}_{ij} z_{ijn} \\ 0 \leq \tilde{Q}_{ij} - q_{ijn} \leq \overline{Q}_{ij} (1 - z_{ijn}) \end{cases} \quad (45)$$

$$\begin{cases} 0 \leq l_{ijn} \leq \overline{l}_{ij} z_{ijn} \\ 0 \leq \tilde{l}_{ij} - l_{ijn} \leq \overline{l}_{ij} (1 - z_{ijn}) \end{cases} \quad (46)$$

由此得到电网升级优化的混合整数二阶锥优化模型:

$$\min F = \sum_{i \in N} [a_i^{(2)} (p_i^g)^2 + a_i^{(1)} p_i^g] +$$

$$\rho \sum_{0 \rightarrow j} (\tilde{P}_{0j} + \sum_{n=0}^{N_L} 2^n p_{0jn}) + \sum_{(i,j) \in E} \frac{Pr_{ij}^1}{\kappa} \sum_{n=0}^{N_L} 2^n z_{ijn} + \sum_{i \in N} \frac{Pr_i^g}{\kappa} n_i^g$$

s. t.

$$p_j^g - p_j^d = \sum_{k:j \rightarrow k} (\tilde{P}_{jk} + \sum_{n=0}^{N_L} 2^n p_{jkn}) - \sum_{i:i \rightarrow j} [\tilde{P}_{ij} + \sum_{n=0}^{N_L} 2^n p_{ijn} - r_{ij}^0 (\tilde{l}_{ij} + \sum_{n=0}^{N_L} 2^n l_{ijn})]$$

$$q_j^g - q_j^d = \sum_{k:j \rightarrow k} (\tilde{Q}_{jk} + \sum_{n=0}^{N_L} 2^n q_{jkn}) - \sum_{i:i \rightarrow j} [\tilde{Q}_{ij} + \sum_{n=0}^{N_L} 2^n q_{ijn} - x_{ij}^0 (\tilde{l}_{ij} + \sum_{n=0}^{N_L} 2^n l_{ijn})]$$

$$v_j = v_i - 2(r_{ij}^0 \tilde{P}_{ij} + x_{ij}^0 \tilde{Q}_{ij}) + [(r_{ij}^0)^2 + (x_{ij}^0)^2] \tilde{l}_{ij}$$

$$\tilde{l}_{ij} \geq \frac{(\tilde{P}_{ij})^2 + (\tilde{Q}_{ij})^2}{v_i}$$

$$\underline{p}_j^g \leq p_j^g \leq \overline{p}_j^g + \Delta p_j^m n_j^g$$

$$\underline{q}_j^g \leq q_j^g \leq \overline{q}_j^g + \Delta q_j^m n_j^g$$

$$\underline{v}_j \leq v_j \leq \overline{v}_j, \tilde{l}_{ij} \leq \overline{l}_{ij}, \tilde{P}_{ij} \geq 0, \tilde{Q}_{ij} \geq 0$$

$$0 \leq p_{ijn} \leq \overline{P}_{ij} z_{ijn}, 0 \leq \tilde{P}_{ij} - p_{ijn} \leq \overline{P}_{ij} (1 - z_{ijn})$$

$$0 \leq q_{ijn} \leq \overline{Q}_{ij} z_{ijn}, 0 \leq \tilde{Q}_{ij} - q_{ijn} \leq \overline{Q}_{ij} (1 - z_{ijn})$$

$$0 \leq l_{ijn} \leq \overline{l}_{ij} z_{ijn}, 0 \leq \tilde{l}_{ij} - l_{ijn} \leq \overline{l}_{ij} (1 - z_{ijn})$$

$$n_j^g \geq 0, z_{ijn} \in \{0, 1\}, \forall j \in N, (i, j) \in E$$

4 案例

环形高速公路的各出入口距离参考点的路程如表1所示,4种类型的电动汽车的比例、电池最大容量 Cap 分布信息如表2所示。

该环形高速公路日平均行驶电动汽车 17297 辆。 Ran_{mc} 与 Cap 的关系由表3数据插值得到。电动汽车行驶开始时间在一天中的分布如图1所示。概率 OD 矩阵如图2所示。有关充电站选址定容的其他参数值设定如表4所示。

假设候选站点是所有的出入口与相邻两个出入口间的三等分点处。应用第2节的方法,进行充电站选址与充电设施数量优化,结果如表5所示,其中编号、数量、位置、峰值分别代表充电站编号、充电设

施数量、充电站位置、每小时充电车辆数峰值。

表1 出入口位置

Tab. 1 Entrance and exit

编号	路程/km	编号	路程/km	编号	路程/km
1	0	17	169	33	365
2	9	18	186	34	384
3	18	19	195	35	402
4	28	20	208	36	427
5	41	21	215	37	439
6	56	22	221	38	449
7	78	23	229	39	460
8	84	24	237	40	492
9	94	25	269	41	508
10	105	26	279	42	523
11	115	27	287	43	538
12	132	28	302	44	551
13	137	29	317	45	563
14	148	30	328	46	577
15	155	31	339	全长	612
16	162	32	351		

表2 电动汽车比例与Cap分布信息

Tab. 2 Distribution of Cap

电动汽车类型	L7e	M1	N1	N2
分布类型	伽马分布	伽马分布	正态分布	正态分布
分布参数	$\alpha=10.8$ $\beta=0.8$	$\alpha=4.5$ $\beta=6.3$	$\mu=23.0$ $\sigma=9.5$	$\mu=85.3$ $\sigma=28.1$
上限/(kW·h)	15.0	72.0	40.0	120.0
下限/(kW·h)	5.0	10.0	9.6	51.2

表3 Ran_{mc} 与Cap的关系

Tab. 3 Relationship between Ran_{mc} and Cap

Cap/(kW·h)	Ran_{mc}/km	Cap/(kW·h)	Ran_{mc}/km
0	0	40	225
10	70	50	270
20	125	70	375
31	175		

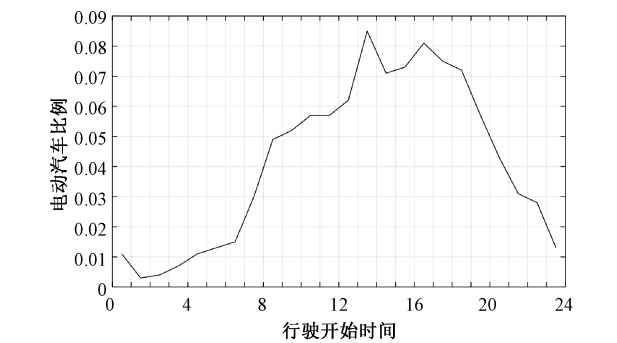


图1 电动汽车行驶开始时间分布

Fig. 1 Travel starting time of electric vehicles

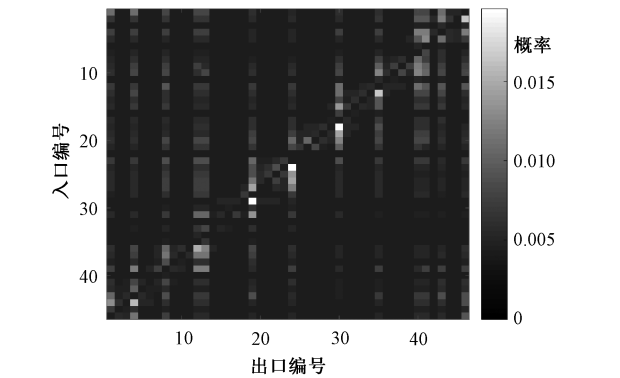


图2 概率OD矩阵

Fig. 2 Probability OD matrix

表4 仿真参数

Tab. 4 Parameters for simulation

参数	数值	参数	数值
SOC_i	均匀分布 $R(0.80 \sim 0.90)$	SOC_e	均匀分布 $R(0.15 \sim 0.30)$
$v/(\text{km/h})$	90	η	0.95
SR/km	15	d	90
$V_c/¥$	240000	i_r	0.10
$p/\text{年}$	6	$C_w/(¥/\text{h})$	17
t_w/min	20		

表5 充电站选址与充电设施数量优化结果

Tab. 5 Planning result of charging stations

编号	数量	位置/km	峰值	编号	数量	位置/km	峰值
1	28	21	128	9	25	321	113
2	24	84	108	10	18	351	74
3	22	115	94	11	17	384	69
4	25	150	113	12	14	446	54
5	22	180	94	13	17	497	69
6	30	215	138	14	22	528	94
7	30	248	138	15	27	559	123
8	26	282	118	16	31	600	143

SR 的取值会影响充电站个数, SR 越小表示充电站的服务半径越小, 因此规划结果中的充电站个数越大。不同 SR 时充电站数量如表 6 所示。

表6 充电站数量

Tab. 6 Number of charging stations

SR/km	充电站数量	SR/km	充电站数量
14	18	16	15
15	16	17	13

该地区电网结构如图 3 所示。根据计算出的充电站选址位置, 将每个充电站作为某一节点上的负荷, 充电站与节点关系如表 7 所示。线路参数如表 8 所示。

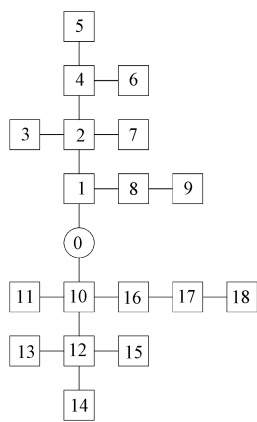


图 3 电网结构

Fig. 3 Power network

表 7 充电站与节点

Tab. 7 Charging stations and buses

充电站编号	节点编号	充电站编号	节点编号
1	1	9	17
2	2	10	16
3	3	11	15
4	7	12	14
5	4	13	12
6	5	14	13
7	6	15	9
8	18	16	8

表 8 电网线路参数

Tab. 8 Parameters of lines

线路	r^0 (pu)	x^0 (pu)	$(Pr^1/\kappa)/\text{¥}$
0-1	0.081	0.061	127
1-2	0.115	0.080	92
2-3	0.127	0.083	92
2-4	0.122	0.083	88
4-5	0.119	0.078	91
4-6	0.131	0.084	84
2-7	0.120	0.080	90
1-8	0.066	0.042	166
8-9	0.123	0.077	90
0-10	0.135	0.081	83
10-11	0.107	0.073	100
10-12	0.127	0.083	86
12-13	0.119	0.078	91
12-14	0.122	0.083	88
12-15	0.106	0.075	99
10-16	0.114	0.079	90
16-17	0.120	0.080	91
17-18	0.120	0.080	91

假设平衡节点电压 $V_0 = 1.04\text{pu}$, 电价 $\rho = \text{¥}3000$ 。除平衡节点外其他节点原有负荷为 $p_i^{d0} = 0.02\text{pu}$, $q_i^{d0} = 0.01\text{pu}$, $\forall i \in N$ 。节点 1、2、4、10、12

和 16 已有发电装置并且可以增加发电装置,参数如下: $p_i^g = 2.0\text{pu}$, $q_i^g = 0.4\text{pu}$, $\Delta p_i^m = 1.0\text{pu}$, $\Delta q_i^m = 0.2\text{pu}$, $a_i^{(1)} = \text{¥}2000$, $a_i^{(2)} = \text{¥}150$, $Pr_i^g/\kappa = \text{¥}500$, $i = 1, 2, 4, 10, 12, 16$ 。要求节点电压幅值 $0.95\text{pu} \leq V_i \leq 1.05\text{pu}$, $\forall i \in N$, 单条线路电流幅值 $I_{ij} \leq 1.1\text{pu}$, $\forall (i, j) \in E$ 。

对 17297 辆电动汽车的日充电需求进行仿真。根据表 5 中的各充电站每小时充电车辆数峰值,计算各充电站最大负荷,进而求出 p_i^d 和 q_i^d , $i \in N$ 。进一步求解电网升级优化模型,结果如表 9 和表 10 所示,其中百分数指日充电需求。

表 9 线路增加条数

Tab. 9 Lines expansion

线路	50%	100%	150%	线路	50%	100%	150%
0-1	0	0	0	0-10	0	0	0
1-2	0	0	0	10-11	0	0	0
2-3	0	0	1	10-12	0	0	1
2-4	0	0	0	12-13	0	0	1
4-5	0	1	2	12-14	0	0	0
4-6	0	1	2	12-15	0	0	1
2-7	0	0	1	10-16	0	0	2
1-8	0	1	2	16-17	1	3	6

表 10 发电装置增加

Tab. 10 Generator expansion

节点	50%	100%	150%	节点	50%	100%	150%
1	0	0.19	1.27	10	0	0	0
2	0	0	0.70	12	0	0	0
4	0	0	1.10	16	0	0	0

经检验,表 9 和表 10 的结果均使式(23)中等号成立,即凸松弛是精确的。由表 9 和表 10 可知,随需求增大,线路和发电装置增加量也变大,这一点符合直观。

改变线路的建设费用参数,则规划结果随之改变。当线路建设成本参数 Pr^1 降低而发电设备投资参数 Pr^g 不变时,规划结果倾向于通过新增线路而不是发电设备来满足负荷需求,如表 11 所示。

表 11 新增线路与新增发电设备量

Tab. 11 Lines expansion and generator expansion

Pr^1 (%)	总新增线路	总新增发电设备 (%)
100	9	19
75	10	18
50	13	14

采用对比实验的方法讨论本文创新点的价值。将以上参数设定记为情形 1,情形 2 设置为不能增加发电装置,其他参数与情形 1 相同。设置意图是

讨论发电设备扩容的必要性。为了检验精确潮流模型的优势,将情形 3 的参数设为和情形 1 相同,但使用文献[15]中线性近似的潮流模型:

$$p_j = \sum_{k:j \rightarrow k} P_{jk} - \sum_{i:i \rightarrow j} P_{ij}, \forall j \in N \tag{47}$$

$$q_j = \sum_{k:j \rightarrow k} Q_{jk} - \sum_{i:i \rightarrow j} Q_{ij}, \forall j \in N \tag{48}$$

$$v_j = v_i - 2(r_{ij}P_{ij} + x_{ij}Q_{ij}), \forall (i,j) \in E \tag{49}$$

$$\begin{cases} -\bar{S}_{ij} \leq P_{ij} \leq \bar{S}_{ij}, -\bar{S}_{ij} \leq Q_{ij} \leq \bar{S}_{ij} \\ -\sqrt{2}\bar{S}_{ij} \leq P_{ij} + Q_{ij} \leq \sqrt{2}\bar{S}_{ij} \\ -\sqrt{2}\bar{S}_{ij} \leq P_{ij} - Q_{ij} \leq \sqrt{2}\bar{S}_{ij} \\ \forall (i,j) \in E \end{cases} \tag{50}$$

式中, $\bar{S}_{ij} = \sqrt{\bar{l}_{ij} \bar{v}_i}$, $\forall (i,j) \in E$ 。针对情形 1~情形 3,在不同的日充电需求下求解规划模型,结果如表 12 所示。

表 12 不同情形下的规划结果

Tab. 12 Planning results under different scenarios				
日充电需求百分数		50%	100%	150%
情形 1	新增线路条数	2	9	25
	最优值	10847	23058	38095
情形 2	新增线路条数	2	11	59
	最优值	10847	23164	40797
情形 3	新增线路条数	2	9	20
	最优值	10441	21933	35976

对比情形 1 和情形 2,在 50% 日充电需求下它们结果相同,此时没有发电设备扩容的需求。但是,在 100% 和 150% 日充电需求下,情形 2 和情形 1 相比需要新增的线路更多,最优值更大。这说明增加发电装置有一定补充作用,本文提供了一种综合考虑线路升级和发电设备扩容的规划方法,与仅升级线路相比有利于降低总成本。情形 3 和情形 1 的结果有显著差异,说明在这个算例中,使用精确的潮流模型是有必要的。

5 结 论

对于高速公路沿线电动汽车充电设施规划问题,本文提出了针对充电站选址定容及其供电网络升级的两阶段方法。本文所提方法综合考虑了交通流量信息和电网最优潮流,所得结果能够较为准确地反映实际情况。应当指出,充电站的建设和电网升级实际上是耦合的,如何将两个阶段的问题综合考虑值得进一步研究。

参考文献 (References):

[1] 唐现刚, 刘俊勇, 刘友波, 等 (Tang Xiangang, Liu Junyong, Liu Youbo, et al.). 基于计算几何方法的电动汽车充电站规划 (Electric vehicle charging station planning based on computational geometry method) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2012, 36 (8): 24-30.

[2] 葛少云, 冯亮, 刘洪, 等 (Ge Shaoyun, Feng Liang, Liu Hong, et al.). 考虑车流信息与配电网络容量约束的充电站规划 (Planning of charging stations considering traffic flow and capacity constraints of distribution network) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2013, 37 (3): 582-588.

[3] 王辉, 王贵斌, 赵俊华, 等 (Wang Hui, Wang Guibin, Zhao Junhua, et al.). 考虑交通网络流量的电动汽车充电站规划 (Optimal planning for electric vehicle charging stations considering traffic network flows) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2013, 37 (13): 63-69.

[4] Mu Y, Wu J, Jenkins N, et al. A spatial temporal model for grid impact analysis of plug-in electric vehicles [J]. Applied Energy, 2014, 114 (2): 456-465.

[5] 陈光, 毛召磊, 李济沅, 等 (Chen Guang, Mao Zhao-lei, Li Ji yuan, et al.). 计及碳排放的电动汽车充电站多目标规划 (Planning of electric vehicle charging stations considering carbon emission) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2014, 38 (17): 49-53.

[6] 姚伟峰, 赵俊华, 文福拴, 等 (Yao Weifeng, Zhao Junhua, Wen Fushuan, et al.). 配电系统与电动汽车充电网络的协调规划 (Coordinated planning for power distribution system and electric vehicle charging infrastructures) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2015, 39 (9): 10-19.

[7] 吴健生, 李小舟 (Wu Jiansheng, Li Xiaozhou). 基于最大熵理论的多类型电动汽车充换电站规划 (Coordinated planning of multi-type electric vehicle charging stations based on maximal entropy theory) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (9): 29-32.

[8] 程宏波, 肖永乐, 王勋, 等 (Cheng Hongbo, Xiao Yongle, Wang Xun, et al.). 基于引力模型的电动汽车充电站选址规划 (Site planning of electric vehicles charging station based on gravity model) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and

- Energy), 2016, 35 (5): 61-66.
- [9] 贾龙, 胡泽春, 宋永华, 等 (Jia Long, Hu Zechun, Song Yonghua, et al.). 高速路网上电动汽车充电站布点优化 (Planning of electric vehicle charging stations in highway network) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2015, 39 (15): 82-89.
- [10] Dong X, Mu Y, Jia H, et al. Planning of fast EV charging stations on a round freeway [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7 (4): 1452-1461.
- [11] Zhang H, Moura S J, Hu Z, et al. PEV fast-charging station siting and sizing on coupled transportation and power networks [J/OL]. IEEE Transactions on Smart Grid. DOI 10.1109/TSG.2016.2614939.
- [12] EU Merge Project. Deliverable 2.1: Modelling electric storage devices for electric vehicles [EB/OL]. http://www.ev-merge.eu/files/images/stories/uploads/MERGE_WP2_D2.1.pdf.
- [13] Farivar M, Low S H. Branch flow model: Relaxations and convexification [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28 (3): 2554-2572.
- [14] Huang S, Wu Q, Wang J, et al. A sufficient condition on convex relaxation of AC optimal power flow in distribution networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 31 (2): 1359-1368.
- [15] Chen X, Wu W, Zhang B, et al. Data-driven DG capacity assessment method for active distribution networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32 (5): 3946-3957.

Coordinated planning of charging stations and power grid along highways based on MISOCP

ZHANG Jie-tan¹, XIE Rui^{2,3}, GUO Shu-feng⁴, MENG Xiang-fu⁵,
WEI Wei^{2,3}, MEI Sheng-wei^{2,3}

- (1. Qinghai Key Lab of Photovoltaic Grid Connection Technology, State Grid Qinghai Electric Power Company Electric Power Research Institute, Xining 810008, China; 2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. Qinghai Key Lab of Photovoltaic Grid Connection Technology, State Grid Qinghai Electric Power Company Economic Technology Research Institute, Xining 810008, China; 5. State Grid Xining Power Supply Company EV Service Branch, Xining 810008, China)

Abstract: Electric vehicles are experiencing a rapidly growing market share due to their prominent advantages in fossil energy conservation and environment protection. Therefore, planning the charging facilities and power grid along highways has become an important issue. This paper proposes a two-stage method for coordinated planning on-road electric vehicle charging stations and their energy supply grid. Given the traffic demand data, the first stage determines the location and capacity of public charging stations through a clustering algorithm; the second stage optimizes the expansion strategy of the power distribution system, including the number of generators and branches that should be invested in, with the electrical power demand passed from the first stage. The nonlinear alternating power flow model is employed, which provides accurate operating status of the power grid. Based on the emerging convex relaxation method, the network expansion problem can be converted to a mixed integer second-order cone program (MISOCP) via integer algebra technique, which is compatible with off-the-shelf solvers. Finally, the proposed method is validated on a test system.

Key words: electric charging station; planning; electric power system; power flow