

考虑路网与配电网可靠性的电动汽车充电站多目标规划

刘畅¹, 刘洪², 李香龙³, 张晶¹, 李康¹, 张静¹, 张旭²

(1. 中国电力科学研究院, 北京 100192; 2. 天津大学 智能电网教育部重点实验室, 天津 300072;

3. 国网北京市电力公司, 北京 100031)

摘要: 提出一种考虑城市路网和配电网交互的电动汽车充电站规划方法。首先, 构建了综合考虑城市路网和配电网可靠性的电动汽车充电站规划问题的数学模型; 然后, 通过博弈论思想进行博弈仿真, 利用所得电动汽车行驶特性开展城市路网可靠性评估, 并利用电动汽车的充放电特性度量其对配电网供电可靠性的支撑作用; 在此基础上, 提出以路网节点为待选站址的优化方法; 最后, 结合实际城市路网和配电网构造典型算例, 通过算例分析验证所提方法的有效性和实用性。

关键词: 配电网; 电动汽车; 充电站规划; 多目标规划; 城市路网; 可靠性

中图分类号: TM 761; U 469.72

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.08.004

0 引言

电动汽车在解决能源紧缺和环境污染问题中具有不可比拟的优势, 因而得到了社会各界广泛的关注。国家政策导向也日益明显, 电动汽车正得到大力推广。但是由于续航里程的限制, 电动汽车不能满足长时间、远距离的行驶要求, 其推广受到了阻碍。因此大规模推广电动汽车必须以合理的充电基础设施建设作为前提, 以满足用户充电需求。

目前, 国内外已有众多学者对电动汽车充电站的优化规划问题进行了研究。文献[1]以我国电动汽车充电站的发展现状为基础, 分析了影响电动汽车充电站规划的因素和相关原则。文献[2]建立了配电系统与电动汽车充电网络的多目标优化模型, 以系统网损与投资成本之和最小、充电站截获的交通流量最大为目标。文献[3]提出了一种基于用户出行需求的充电站规划方法, 规划时兼顾电动汽车群体和电站运营商的利益。文献[4]在考虑选址定容、负荷预测、充电站便利性与经济性等方面的基础上, 提出了电动汽车充电站选址定容、规划方案校核和评估的方法。文献[5]将汽车的活动与二氧化碳排放量相结合, 强调了节能环保问题。文献[6]提出了一种考虑配电网潮流约束的高速公路快充站校正规划方法, 在电动汽车用户充电服务需求和配电网潮流约束间寻求一种有机平衡。文献[7]提出一种基于地理信息的电动汽车充电站选址和定容的方法。以上研究在充电站优化规划的数学模型和优化方法方面各有特色, 对于本文研究有一定的参考价值。然而电动汽车

作为一种交通工具, 是城市路网的参与者, 城市路网会影响电动汽车能否满足用户的出行需求, 即能否顺利到达既定目的地; 电动汽车也是一种充放电设备, 是配电网的参与者, 配电网会受到电动汽车充放电特性的影响。因此, 电动汽车充电站的规划需要综合考虑城市路网和配电网的可靠性。

目前, 评估配电网可靠性的常用方法主要有解析法和模拟法 2 类: 解析法包括网络化简法^[8-10]和状态枚举法^[11]; 模拟法包括状态空间法^[12-13]和蒙特卡洛法^[14]等。评价路网可靠性的常用方法主要有图论解析法^[15]、博弈论技术^[16-17]、蒙特卡洛模拟方法^[18]、微观交通仿真方法^[19]等。与配电网可靠性需要重点考虑负荷特征类似, 城市路网可靠性评估与车流情况联系紧密, 而路网中车流的模拟需要考虑不同电动汽车用户行驶行为间的相互影响, 利用博弈论思想并引入破坏者概念^[20]对表述这一影响具有重要作用。

为此, 本文构建了综合考虑城市路网和配电网可靠性的电动汽车充电站规划问题的数学模型。通过博弈论思想进行博弈仿真得到电动汽车的行驶特性, 进而利用该特性评估城市路网的可靠性, 通过电动汽车的充放电特性度量其对配电网供电可靠性的支撑作用。进一步, 结合充电站综合效益以路网节点为待选站址提出优化方法得到规划结果。

1 数学模型

1.1 模型解析

电动汽车充电站的优化规划需要考虑电动汽车能否正常行驶、充电站投资运营方的综合效益和电动汽车充放电对配电网的影响 3 个方面, 因此模型中应分别分析电动汽车用户、投资运营方、配电网 3 个主体。

对于电动汽车用户而言, 其能否顺利到达既定目的地是最敏感的问题。电动汽车用户是城市路网的

收稿日期: 2017-02-03; 修回日期: 2017-06-28

基金项目: 国家电网公司科技项目(电动汽车广域充换电服务网络规划关键技术研究及应用)(YD71-16-006)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(Research and Application of Key Technologies for Wide Area Charging Service Network Planning of Electric Vehicle)(YD71-16-006)

参与者,城市路网会影响电动汽车能否正常发挥其交通功能,即能否顺利到达目的地。因此,考虑到电动汽车用户方的意愿,城市路网的可靠性应作为约束条件。

对于投资运营而言,要实现其含投资成本和运营收益的综合效益最大化。从全寿命周期的角度分析,充电站投资运营方的目标函数应主要考虑充电站的建设成本、运营收益、残值等。

对于配电网而言,电动汽车既是充电设备也是放电设备。电动汽车作为充电设备时,其通过充电桩接入配电网,在回家过程中的充电行为会加重充电时刻配电网的负载,有可能影响配电网的安全可靠运行,因此必须考虑配电网的容量限制和安全运行,并以此作为约束条件;电动汽车作为放电设备时,其回家后可以在居民用电高峰期放电,改善配电网的可靠性,减少缺供负荷及电量,并以此为目标函数。

1.2 目标函数

前文提到,电动汽车在用户回家后的时段可以提高配电网的可靠性,因此,充电站的规划应该追求电动汽车回家后时段配电网的可靠性最大。另外,充电站建设作为一种投资行为,其规划要追求含投资成本和运营收益的综合效益最大。

1.2.1 电动汽车放电阶段配电网可靠性最大

选取缺供电量作为配电网可靠性评估的指标。因此该目标函数简明地表示为:

$$\max E_{\text{d}} = E_{\text{dn}} \quad (1)$$

整个区域配电网的缺供电量 E_{dn} 的表达式为:

$$E_{\text{dn}} = \sum_q E_{\text{dn},q} \quad (2)$$

$$E_{\text{dn},q} = \sum_{j \in I(q)} p_j \lambda_j t_{jq} L_{jq} \quad (3)$$

其中, $E_{\text{dn},q}$ 为负荷区域节点 q 的缺供电量; p_j 为元件 j 发生故障时相应自动开关装置的可靠动作率; λ_j 为元件 j 的年平均破坏性故障率; t_{jq} 为元件 j 发生故障时造成负荷区域节点 q 的停电时间,也可以理解为元件 j 的故障修复时间; L_{jq} 为元件 j 故障时造成负荷区域节点 q 的平均停电负荷; $I(q)$ 为负荷区域内所有节点的集合,当发生故障时将引起负荷区域节点 q 的持续停电。

1.2.2 充电站综合效益最大

本文以考虑充电站收益与用户成本的综合年费用最大作为电站优化规划的目标函数,表达式为:

$$\max B = -P_{\text{sc}} + P_{\text{so}} + P_{\text{sr}} \quad (4)$$

其中, P_{sc} 为充电站建设成本的年费用; P_{so} 为充电站运营收益的年费用; P_{sr} 为充电站退出运行时残值的年费用。

a. 充电站建设成本年费用。

$$P_{\text{sc}} = \sum_j (m_j a_c + b_j) \frac{r(1+r)^z}{(1+r)^z - 1} \quad (5)$$

其中, m_j 为充电站 j 的充电机配置数量; a_c 为充电机的单价; b_j 为充电站 j 的固定投资费用; r 为折现率; z 为运行年限。

b. 充电站运营收益年费用。

$$P_{\text{so}} = \frac{8760}{N_t} \sum_k \sum_j \sum_i A (Q_{\text{max}} - Q_{i,j,k}) C_{i,j,k} \quad (6)$$

其中, N_t 为模拟的周期,单位为 h; A 为充电单价; Q_{max} 和 $Q_{i,j,k}$ 分别为电动汽车的最大电量和模拟周期内第 k 时段位于充电站 j 的电动汽车 i 的剩余电量值; $C_{i,j,k}$ 为该车的充电判断标识,充电时取 1,否则取 0。

c. 充电站残值年费用。

$$P_{\text{sr}} = \sum_j (m_j a_c + b_j) \varepsilon \frac{r}{(1+r)^z - 1} \quad (7)$$

其中, ε 为充电站残值对于投资建设成本的折算系数,一般取 5%。

1.3 约束条件

电动汽车充电站的规划要满足电动汽车用户的出行需求,为用户提供便利的充电服务,使电动汽车可以顺利到达目的地,因此充电站规划要保证路网的可靠性。另外,用户在回家途中可能的充电行为不能影响配电网的安全可靠运行,因此充电站规划也需要满足配电网方面的基本约束。

1.3.1 路网可靠性约束

保证路网可靠性是为了满足电动汽车用户的出行需求,采用电动汽车用户在选择行驶路径时产生的缺失距离作为城市路网可靠性评估指标。

$$E_{\text{m},k} = \sum_{i \in L(k)} p_{si} q_i R_{ik} \quad (8)$$

其中, $E_{\text{m},k}$ 为用户在选择路段 k 的情况下产生的缺失距离; $L(k)$ 为规划区域路段集合; p_{si} 为路段 i 被破坏者(破坏者使得电动汽车在行驶过程中产生的缺失距离最大化,其含义在车流模拟部分详细说明)攻击后,用户选取同一区域内另一路段 k 的概率; q_i 为路段 i 被破坏者攻击的概率; R_{ik} 为路段 i 被破坏者攻击后,用户选择新路段 k 行驶产生的实际行驶距离 R_{real} 与按预期选择路段 k 所需行驶距离 R 之差,其表达式如式(9)所示。

$$R_{ik} = \begin{cases} R - R_{\text{real}} & R \geq R_{\text{real}} \\ 0 & R < R_{\text{real}} \end{cases} \quad (9)$$

通过确定路网中各节点被破坏者攻击后产生的缺失距离,可以得到电动汽车行驶过程中城市路网的可靠性。所以整个区域路网的缺失距离可以表示为:

$$E_{\text{m}} = \sum_k E_{\text{m},k} \quad (10)$$

1.3.2 电动汽车充电阶段配电网可靠性约束

a. 变电站最大负荷约束。

$$\sum_{j \in J_i} P_{Ij} + \sum_{k \in K_i} P_{Sk} \leq S_i e(S_i) \cos \varphi \quad (11)$$

其中, J_i 为变电站 i 所供负荷节点集合; K_i 为变电站 i

供电范围内作为充电站接入点的负荷节点集合; S_i 为变电站 i 的容量; $e(S_i)$ 为变电站 i 的负载率; $\cos \varphi$ 为功率因数; P_{lj} 为配电网节点 j 的有功负荷; P_{sk} 为节点 k 接入充电站的容量。

b. 节点电压幅值的上下限约束。

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} \quad i=1,2,\dots,M \quad (12)$$

其中, U_i 为配电网节点 i 的电压幅值; $U_i^{\max}$ 和 $U_i^{\min}$ 分别为节点 i 电压幅值的上、下限; M 为所研究的配电网的节点数目。

c. 馈线最大电流约束。

$$|I_{ij}| \leq I_{ij\max} \quad i,j=1,2,\dots,M \quad (13)$$

其中, I_{ij} 和 $I_{ij\max}$ 分别为配电网中馈线 $i-j$ 的电流和允许流过的最大电流。

d. 充电站接入点容量约束。

$$P_{cij} \leq P_{j\max} \quad (14)$$

其中, P_{cij} 为接入电网节点 j 的充电站 i 的最大充电功率; $P_{j\max}$ 为电网节点 j 所能允许的最大接入功率,这主要是由节点 j 处的负荷和所在线路的传输能力决定。

2 车流模拟

电动汽车将城市路网、配电网和用户三者联系起来。电动汽车的行驶可以看作是受用户主观意愿影响的电量在路网上的流动行为。因此,有必要对电动汽车做车流模拟。车流模拟的情景为:回家过程中可能充电,回家后可能放电。

对于用户回家过程中,考虑道路拥堵等原因,存在电动汽车用户可能无法按照习惯路径回家因而行驶路程更长、需要进行电能补充的情况。此时,路网可靠性会受到影响,且对于用户产生的充电需求是否得到满足需要考虑配电网的可靠性。这与数学模型中采用电动汽车充电阶段路网可靠性和配电网可靠性为约束条件对应。

对于用户回家后,考虑的情景是:在电动汽车用户已经回家即完成行驶功能后,如果电网发生故障导致转供线路负载率过高,且客观上同时具备电动汽车向电网放电的技术条件(设备可以实现车网互动(V2G))和经济条件(电网付出一定的成本),则用户可以利用电动汽车的剩余电量放电以提升配电网的供电可靠性并获取一定的收益;否则电动汽车回家后将不必放电。这对应 1.2 节中数学模型以电动汽车在放电阶段配电网可靠性最大和变电站综合效益最大为目标函数。

2.1 路径选择

本文结合博弈论思想,引入破坏者概念,对复杂城市路网的可靠性进行博弈仿真从而得到电动汽车的行驶路径。破坏者是指在路网正常运行情况下,通

过攻击路网中的节点,给路网中的电动汽车用户带来不同程度的损失。本文中破坏者造成的后果是使得电动汽车在行驶过程中产生的缺失距离最大化。电动汽车用户和城市破坏者竞争博弈,博弈仿真分为 2 个环节,具体过程如下。

2.1.1 博弈第一环节

博弈第一环节主要针对电动汽车用户。该环节主要解决电动汽车用户如何依靠城市路网提供的信息进行最佳行驶路径选择的问题。

选取路网中第 i 个起讫点 OD(Origin Destination) 对路网交通量的分布,由于各电动汽车用户的路网行驶成本一致,即电动汽车用户选择的路径相同,都会选择成本最小的路径。对于任意一个电动汽车用户 a 而言,其有若干条可选择的路径,同时认为选择路径是电动汽车用户 a 与其他 n_i-1 个电动汽车用户的博弈行为。那么,对于所有 n_i 个电动汽车用户而言,路网交通量的分布等同于所有电动汽车用户追求最小成本且无合作的混合博弈。考虑电动汽车用户 a 选择路径为 j ,记为纯策略 c_{aj} ,那么混合路径策略是 c_{aj} 的一个凸函数,且有 $S_a = \sum_j c_{aj} P_{aj}$,其中 P_{aj} 为电动汽车用户 a 选择路径 j 的概率。把 (S_a, c_{aj}) 称为策略 S_{strk} ,即电动汽车用户 a 选择路径 j 而其他 n_i-1 个电动汽车用户采用一组混合博弈策略 S_a 。因此电动汽车用户 a 选择路径的行驶距离为:

$$D_a = \sum_j P_{aj} D_a(k) \quad (15)$$

其中, $D_a(k)$ 为在策略 S_{strk} 条件下的行驶距离。对电动汽车用户进行博弈仿真,得到混合博弈最小值表达式为:

$$\min D_s = \sum_l \sum_k q_k \int_0^{v_l} d_{lk}(x) dx \quad (16)$$

其中, l 为各路段; q_k 为电动汽车用户选择策略 S_{strk} 的概率; $\int_0^{v_l} d_{lk}(x) dx$ 为选择策略 S_{strk} 后电动汽车的行驶路径, $d_{lk}(x)$ 为电动汽车在路网中的单位行驶距离,具体表达式如式(17)所示。

$$d_{lk}(v_l) = \beta_u \left(\frac{c_{lk}}{v_l} \right)^{\gamma_u} D_{lk} \quad (17)$$

其中, β_u 和 γ_u 为路段 u 上的延迟系数; c_{lk} 为在策略 S_{strk} 情况下对应路段 l 的车流量容量,当路网未被破坏者攻击时, c_{lk} 和正常道路容量相同,被破坏者攻击后, c_{lk} 和衰减后的容量相同; D_{lk} 为在策略 S_{strk} 情况下对应路段 l 的实际距离; v_l 为考虑路径选择后路段 l 的车流量,表达式如式(18)所示。

$$v_l = \sum_j a_{lj} h \quad (18)$$

其中, a_{lj} 为路段 l 被选择的概率,当路段 l 被选择时有 $a_{lj} = 1$,当其他路段被选择时有 $a_{lj} = 0$; h 为选择路径 j 时路段 l 的车流量。

2.1.2 博弈第二环节

博弈第二环节主要针对破坏者。假设破坏者在攻击路网节点的过程中会导致路网中的电动汽车用户改变行驶路径,但并不直接控制电动汽车用户对路线的具体选择,通过博弈第一环节的车流量分布,选取对电动汽车用户造成最大损失的节点。在此选取第 n_i+1 个博弈者作为破坏者。

破坏者选择破坏节点的概率由城市路网中的车流量决定,即破坏者更倾向于攻击车流量比较集中的区域,这样破坏者对电动汽车用户造成的损失可以达到较大程度。因此,在电动汽车用户选取策略 S_{strk} 的情况下,破坏者攻击某一行车路段 r 的概率表达式为:

$$\theta_{kr} = \sigma h_m^{\alpha_k} \prod_{m \in I(r)} h_m^{\alpha_k} / \left(\prod_{m \in I(r)} D_{rm}^2 \right) \quad (19)$$

其中, σ 为修正系数; m 为与节点 k 有关的节点; h_m 为节点 m 的车流量; α_k 为在电动汽车用户选择策略 S_{strk} 后的车流量均衡系数,反映了破坏者对路网进行攻击行为后,产生影响效果的严重程度。遭到攻击后电动汽车用户由选择路径 j 改为选择路径 l , α_{jl}^k 的表达式为:

$$\alpha_{jl}^k = \sum_j P_{aj} g_{jk}(h_j) + \sum_k \sum_{j \rightarrow l} \sum_l h_j^l \frac{\partial g_{jk}(h_j)}{\partial h_j} q_{sk} \quad (20)$$

θ_{kr} 反映的是在确定交通流量的情况下,破坏者会优先选取其中最大值 $\theta_{k, \max(r)}$ 对应的城市路网位置进行破坏的概率。式(19)、(20)的具体函数关系和推导过程详见文献[21]。每当有破坏者攻击某一条路段时,该路段的容量立刻变为 0,同时和该节点相邻的节点都无法通过电动汽车。具体在车流量矩阵 h_0 中的表现为和 $\theta_{k, \max(r)}$ 在同一行、同一列的所有数据均为 0。

每当有路段受到破坏者攻击之后,电动汽车用户选择策略 S_{strk} 的情况都必须进行重新评估,对策略的选择概率 q_{sk} 进行修正,其模型如下:

$$q_{sk,r}^{(N+1)} = \theta_{kr}^{(N)} q_{sk,r}^{(N)} \quad (21)$$

其中,上标 N 和 $N+1$ 分别表示修正前和修正后。

经过修正之后,再次进行博弈第一环节仿真,得到新的车流量分布和电动汽车用户行车路线。

2.2 充电需求判断

在预先设定的行程路径受到破坏者攻击的情况下,用户必须改变行驶路线才有可能到达目的地。但是由于电动汽车电池特性的限制,路网受到破坏者攻击后,将出现以下 2 种情况:

a. 虽然用户单程行驶距离增大,但在回家途中仍不需要充电,只是回家后向配电网的放电量有所减少;

b. 用户在回家途中需要进行充电,但回家途中没有充电站,导致用户无法顺利回家。

出现情况 **b** 时,用户产生充电需求,为了保证用

户顺利完成行驶过程,必须建立充电设施。考虑到充电的便捷性,计划在路网节点建设充电站。进一步,在破坏者对某一路网节点进行攻击之后,对于某种充电站建设方案,需要计算该区域城市路网中的电动汽车进行缺失距离和充电站综合效益,并且检验该方案下配电网的可靠性。

3 优选流程

本文采用经典多目标算法——非支配排序遗传算法(NSGA-II)对规划模型进行求解,具体求解流程如图 1 所示。

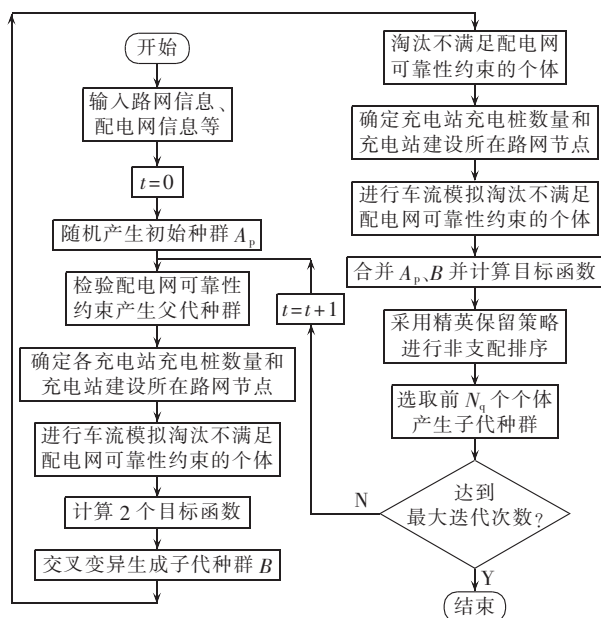


图 1 模型求解流程图

Fig.1 Flowchart of model solver

本文利用逼近理想解排序法(TOPSIS)对 Pareto 前沿中的个体进行排序,得到问题的最优解。设定“最佳方案”与“最劣方案”,归一化后越逼近“最佳方案”的解被视为越理想的解。

4 算例分析

4.1 算例信息

某地区的实际城市路网和配电网模拟见图 2。

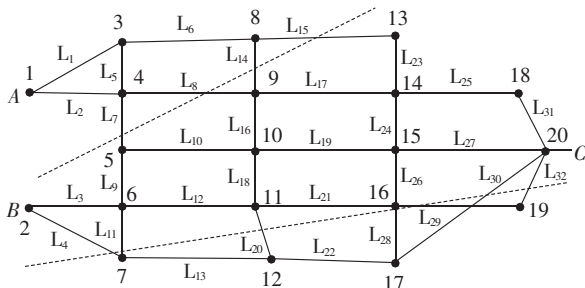


图 2 城市路网和配电网模拟示意图

Fig.2 Schematic diagram of urban road network and distribution network

图 2 中虚线代表配电网中的 10 kV 线路,实线代表城市道路。区域 A 和 B 表示电动汽车用户的行驶出发地,区域 C 表示电动汽车用户的行驶目的地,区域节点间相应的城市道路长度见表 1。

表 1 城市道路长度
Table 1 Urban road lengths

道路	长度/km	道路	长度/km	道路	长度/km
L ₁	1.04	L ₁₂	0.88	L ₂₃	0.62
L ₂	0.58	L ₁₃	1.50	L ₂₄	1.87
L ₃	0.78	L ₁₄	0.52	L ₂₅	1.96
L ₄	1.35	L ₁₅	1.35	L ₂₆	0.98
L ₅	0.52	L ₁₆	0.62	L ₂₇	1.93
L ₆	0.78	L ₁₇	1.96	L ₂₈	1.82
L ₇	0.65	L ₁₈	0.57	L ₂₉	1.77
L ₈	0.79	L ₁₉	1.14	L ₃₀	1.94
L ₉	1.87	L ₂₀	0.78	L ₃₁	1.87
L ₁₀	1.28	L ₂₁	1.97	L ₃₂	1.83
L ₁₁	0.57	L ₂₂	1.45		

假定该区域内的电动汽车平均分布在区域 A 到区域 C 与区域 B 到区域 C 的路径上,平均每天充电车辆为 100 台,每辆车的电池容量为 24 kW·h,在满电的状态下能够行驶 135 km(假定电动汽车电池电量的最低限度为 0),一年按 365 d 计算,充电单价

为 0.8 元/(kW·h),贴现率为 6%,使用年限为 10 a。各节点建设维护费用、原始缺供电量和约束条件见表 2(表中节点电压幅值上下限约束为标么值,后同)。

4.2 优化结果

以下所列的节点为加装后可以支持电动汽车顺利返回家中的节点,计算得到每个节点建设充电站后电动汽车放电阶段缺供电量的变化、综合效益和各约束条件的满足情况。计算结果见表 3,其中“—”表示满足约束条件,写明数值的表示不满足约束条件。

分析表 3 可知:节点 13、18 建设充电站既不满足约束条件也不能改善缺供电量;节点 17 建设充电站满足约束条件但不能改善缺供电量;节点 11、15 建设充电站可以改善缺供电量但不满足约束条件;节点 12、14、16、19 建设充电站既满足约束条件也能改善缺供电量,还要考虑建设充电站年投入产出效益最大。因为所求模型是多目标函数,所以利用 TOPSIS 对节点 12、14、16、19 进行排序,理想度由大到小排序为 16、12、19、14。因此选择最理想的节点 16 建设充电站。

表 2 各节点建设维护费用、原始缺供电量和约束条件
Table 2 Construction & maintenance cost,original power shortage and constraints of each node

充电站节点	建设及维护总费用/万元	原始缺供电量/MW	缺失距离/km	变电站容量约束/(MV·A)	节点电压幅值上下限约束	馈线最大电流约束/A	充电站接入点容量约束/MW
19	20	7.4	11.3	2×50	0.95~1.05	4.8	6.8
18	18	7.7	11.6	2×50	0.95~1.05	4.9	6.9
17	17	5.4	8.5	2×50	0.95~1.05	4.1	6.1
16	21	7.7	11.6	2×50	0.95~1.05	4.9	6.9
15	22	6.9	10.5	2×30	0.95~1.05	4.6	6.6
14	18	5.3	8.4	2×50	0.95~1.05	4.1	6.1
13	19	5.8	9.1	2×30	0.95~1.05	4.3	6.3
12	15	6.6	10.2	2×50	0.95~1.05	4.5	6.5
11	23	7.9	11.8	2×50	0.95~1.05	5.0	7.0

表 3 可建充电站节点目标函数和约束条件满足情况
Table 3 Objective function and constraint conditions of each possible charging station

新增充电站节点	目标函数		约束条件				
	缺供电量的变化量/MW	综合效益/万元	缺失距离/km	变电站容量约束/(MV·A)	节点电压幅值上下限约束	馈线最大电流约束/A	充电站接入点容量约束/MW
19	-2.1	115.87	—	—	—	—	—
18	1.5	116.70	11.7	—	—	5.0	—
17	1.6	117.80	—	—	—	—	—
16	-3.1	130.71	—	—	—	—	—
15	-1.2	116.98	—	—	—	—	7.2
14	-2.2	143.46	—	—	—	—	—
13	1.6	152.34	9.9	75	1.08	4.8	6.4
12	-1.5	138.60	—	—	—	—	—
11	-1.9	147.92	—	—	1.07	—	—

5 结论

电动汽车的大量推广必须以合理的充电设施建设为基础。本文结合博弈论相关知识,引入城市破坏

者确定电动汽车行驶路径,建立了以充电站综合效益最大和电动汽车放电对配电网可靠性改善最大为目标,并保证路程可靠性和电动汽车充电阶段配电网可靠性的数学模型,最后对充电站规划方案进行优选。

结果表明本文方法可以对综合考虑城市路网与配电网的电动汽车充电站规划提出有效的解决方案。

参考文献:

- [1] 徐凡,俞国勤,顾临峰,等. 电动汽车充电站布局规划浅析[J]. 华东电力,2009,37(10):1678-1682.
XU Fan,YU Guoqin,GU Linfeng,et al. Tentative analysis of layout of electrical vehicle charging stations[J]. East China Electric Power,2009,37(10):1678-1682.
- [2] 姚伟锋,赵俊华,文福拴,等. 配电系统与电动汽车充电网络的协调规划[J]. 电力系统自动化,2015,39(9):10-18.
YAO Weifeng,ZHAO Junhua,WEN Fushuan,et al. Coordinated planning for power distribution system and electric vehicle charging infrastructures[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(9):10-18.
- [3] 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.
- [4] 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.
GUO Chunlin,XIAO Xiangning. Planning method and model of electric vehicle charging infrastructure[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(13):70-75.
- [5] FOLEY A,GALLACHÓIR B Ó. Analysis of electric vehicle charging using the traditional generation expansion planning analysis tool WASP-IV[J]. Journal of Modern Power Systems & Clean Energy,2015,3(2):240-248.
- [6] 董晓红,穆云飞,于力,等. 考虑配网潮流约束的高速公路快速充电站校正规划方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):124-131.
DONG Xiaohong,MU Yunfei,YU Li,et al. Freeway FCS planning and correction considering power-flow constraints of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(6):124-131.
- [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):8-15,23.
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):8-15,23.
- [8] 赵华,王主丁,谢开贵,等. 中压配电网可靠性评估方法的比较研究[J]. 电网技术,2013,37(11):3295-3302.
ZHAO Hua,WANG Zhuding,XIE Kaigui,et al. Comparative study on reliability assessment methods for medium voltage distribution network[J]. Power System Technology,2013,37(11):3295-3302.
- [9] 林济铿,王旭东,郑卫洪,等. 基于网络化简的计及开关故障配电网可靠性评估[J]. 电力系统自动化,2009,33(9):32-36.
LIN Jikeng,WANG Xudong,ZHENG Weihong,et al. Distribution network reliability evaluation based on network simplification and switching fault analysis[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(9):32-36.
- [10] 许丹,唐巍. 基于电源通路的中压配电网可靠性评估[J]. 中国电机工程学报,2009,29(增刊):44-49.
XU Dan,TANG Wei. Reliability evaluation of MV distribution network based on power access path[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(Supplement):44-49.
- [11] 李卫星,李志民,刘迎春. 复杂辐射状配电系统的可靠性评估[J]. 中国电机工程学报,2003,23(3):69-73,79.
LI Weixing,LI Zhimin,LIU Yingchun. Evaluation of complex radial distribution system reliability[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(3):69-73,79.
- [12] 葛少云,王浩鸣. 基于系统状态转移抽样的含分布式电源配电网可靠性评估[J]. 电力系统自动化,2013,37(2):28-35.
GE Shaoyun,WANG Haoming. Reliability evaluation of distribution networks including distributed generations based on system state transition sampling[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(2):28-35.
- [13] 葛少云,王浩鸣,王源山,等. 含分布式风光蓄的配电系统可靠性评估[J]. 电力系统自动化,2012,36(5):16-23.
GE Shaoyun,WANG Haoming,WANG Yuanshan,et al. Reliability evaluation of distribution system including distributed wind turbines,photovoltaic arrays and batteries[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(5):16-23.
- [14] 葛少云,王浩鸣,徐栋. 基于蒙特卡洛模拟的分布式风光蓄发电系统可靠性评估[J]. 电网技术,2012,36(4):39-44.
GE Shaoyun,WANG Haoming,XU Li. Reliability evaluation of distributed generating system including wind energy,solar energy and battery storage using monte carlo simulation[J]. Power System Technology,2012,36(4):39-44.
- [15] 邓亚娟,杨云峰,马荣国. 基于复杂网络理论的公路网结构特征[J]. 中国公路学报,2010,23(1):98-104.
DENG Yajuan,YANG Yunfeng,MA Rongguo. Highway network structure characteristics based on complex network theory[J]. China Journal of Highway and Transport,2010,23(1):98-104.
- [16] 徐国光,黎志成. 博弈理论对公路网可靠性设计的研究[J]. 公路,2007(4):131-133.
XU Guoguang,LI Zhicheng. Research on the reliability design based on the game theory of the expressway networks[J]. Highway,2007(4):131-133.
- [17] 朱顺应,王伟,邓卫,等. 交通网络可靠度及其通路算法研究[J]. 中国公路学报,2000,13(1):91-94.
ZHU Shunying,WANG Wei,DENG Wei,et al. Research on traffic network reliability and access algorithm[J]. China Journal of Highway and Transport,2000,13(1):91-94.
- [18] 韩飞. 基于蒙特卡洛法的黄延高速公路边坡稳定性分析[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版),2008,10(6):139-141,145.
HAN Fei. Stability analysis on the slope of Huangling-Yan'an highway based on monte carlo method[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology(Natural Science Edition),2008,10(6):139-141,145.
- [19] 臧志刚,陆锋,李海峰,等. 7种微观交通仿真系统的性能评价与比较研究[J]. 交通与计算机,2007,25(1):66-70.
ZANG Zhigang,LU Feng,LI Haifeng,et al. Performance evaluation and comparison of seven microscopic transportation simulation systems[J]. Computer and Communications,2007,25(1):66-70.
- [20] 安实,张涛,张昕明,等. 基于博弈论的高速公路网络关键路段识别方法[J]. 交通信息与安全,2015,33(3):53-58,64.
AN Shi,ZHANG Tao,ZHANG Xinming,et al. Vital link identification of freeway network based on game theory[J]. Journal of Transport Information and Safety,2015,33(3):53-58,64.
- [21] 陈钢铁. 危险品运输网络的可靠性博弈分析及减灾系统研究

[D]. 成都:西南交通大学,2009.
CHEN Gangtie. Dangerous goods transport network reliability game analysis and mitigation system studied [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2009.

作者简介:

刘 畅(1978—),男,河北承德人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电动汽车充换电技术(E-mail:liuchang3@epri.sgcc.com.cn);
刘 洪(1979—),男,天津人,副教授,博士,通信作者,



刘 畅 主要研究方向为城市电网规划与评估、分布式电源与电动汽车接入、能源互联网等(E-mail:liuhong@tju.edu.cn);
李香龙(1980—),男,河北易县人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电动汽车与新能源(E-mail:lx10_0@163.com);
张 晶(1983—),男,辽宁朝阳人,高级工程师,博士,主要研究方向为电动汽车充换电技术及动力电池技术(E-mail:zhangjing1@epri.sgcc.com.cn)。

Multi-objective EV charging station planning with consideration of road network reliability and distribution network reliability

LIU Chang¹,LIU Hong²,LI Xianglong³,ZHANG Jing¹,LI Kang¹,ZHANG Jing¹,ZHANG Xu²

(1. China Electric Power Research Institute,Beijing 100192,China;

2. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education,Tianjin University,Tianjin 300072,China;

3. State Grid Beijing Electric Power Company,Beijing 100031,China)

Abstract: An EV(Electric Vehicle) charging station planning method considering the interaction between urban road network and distribution network is proposed. A mathematical EV charging station planning model is established,which considers the urban road network reliability and the distribution network reliability comprehensively. Game simulation based on the game theory is carried out to obtain the driving characteristics of EVs for evaluating the reliability of urban road network. The charging/discharging characteristics of EVs are adopted to measure their supporting effect on the reliability of distribution network. An optimal method is proposed,which takes the road network nodes as the candidate sites of charging station. A typical example based on the actual urban road network and distribution network is constructed and case study verifies the validity and practicability of the proposed method.

Key words: distribution network; electric vehicles; charging station planning; multi-objective planning; urban road network; reliability