

DOI: 10.7500/AEPS201211031

考虑交通网络流量的电动汽车充电站规划

王 辉¹, 王贵斌¹, 赵俊华¹, 文福拴¹, 李 捷²

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027; 2. 福建省电力有限公司营销部, 福建省福州市 350003)

摘要: 充电站的合理选址和定容对电动汽车的规模化应用具有重要意义。考虑到充电站具有城市交通公共服务设施以及普通用电设施的双重属性,以俘获的交通流量最大、配电系统网络损耗最小以及节点电压偏移最小为目标,建立了充电站最优规划的一个多目标决策模型。首先,采用超效率数据包络分析评价方法,确定归一化后各个目标函数合理的权重系数,把多目标优化问题转换成单目标优化问题。之后,采用改进的二进制粒子群优化算法求解该单目标优化模型。最后,以 33 节点配电系统以及 25 节点交通网络为例,说明了所发展的模型和方法的基本特征。

关键词: 电动汽车; 充电站规划; 交通流量; 超效率数据包络分析; 改进的二进制粒子群优化算法

0 引言

发展电动汽车产业是减少温室气体排放和降低对化石燃料依赖的一种重要举措。随着电动汽车技术,特别是电池技术的发展,以及一些国家在政策上的大力支持,电动汽车在过去的十多年间得到了快速发展^[1]。

电动汽车充电站能够为电动汽车提供充电、维修等服务,是发展电动汽车产业所需要的重要设施。充电站规划主要包括选址和定容,其规划合理与否不仅影响电动汽车用户出行的便利从而影响电动汽车的推广使用,还会影响配电系统的电能质量。在最近几年中,国内外在充电站规划方面已经做了一些初步的研究工作。文献[2]分析了影响电动汽车充电站规划的多方面因素,并对其布局规划提出了原则性建议。文献[3]提出了基于地理因素和服务半径的两阶段充电站选址方法,采用伏罗诺伊(Voronoi)图对充电站的充电服务区域进行划分,并建立了以规划期内充电站建设总成本和网损费用为优化目标的充电站规划模型。文献[4]基于排队论建立了充电设施服务系统排队模型。文献[5]考虑了规划区内电动汽车换电需求分布不均匀问题,并以投资和运行成本最小为目标,建立了换电站最优规划模型。文献[6]运用动态交通网络思想建立了

考虑硬时间窗约束的确定充电站选址和容量的充电站规划模型。文献[7]提出了基于排队论的充电站配置方法,建立了公共充电站布局的优化模型。

现有的相关文献多数将充(换)电站视做普通的用电设施进行规划,而忽视了其提供公共服务的特性。事实上,电动汽车充电站具有两方面属性。首先,充电站是一种城市交通公共服务设施,其功能类似于加油站^[8-9],都是为车辆提供服务;其次,充电站是一种用电设施,其规划建设要考虑对配电系统诸多方面的影响,如电力网络改建、网损、节点电压质量等。因此,如何在满足相关约束条件的情况下,使充电站能够为更多的车主提供便利服务,且尽量减少对配电系统的负面影响,就是一个亟须研究的重要问题。

基于上述考虑,本文借鉴分布式电源选址思想^[10-13],融合电力设施规划方法^[14]与城市交通服务设施选址理论^[15-17],综合考虑充电站的两方面属性,建立了考虑交通网络流量的充电站多目标规划模型,并采用数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)方法^[18]确定各个目标的权重,把多目标规划问题转化为单目标问题。之后,采用改进的二进制粒子群优化(binary particle swarm optimization, BPSO)算法求解该单目标优化模型。最后,以 33 节点配电系统^[19]和 25 节点交通网络^[17]为例对所发展的模型与方法作了说明。

1 电动汽车交通流量分析

在交通领域,针对服务设施选址问题,现有的大多数研究工作主要针对网络节点上的用户,优化目标一般给定为设施投资建设成本或用户到服务设施

收稿日期: 2012-11-06; 修回日期: 2013-01-22。

国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2013CB228202);国家自然科学基金资助项目(51107114, 51177145);福建省电力有限公司电力科学研究院科研项目(12-110107-013)。

的旅行成本。电动汽车在道路上行驶,充电需求不是集中在节点上,而是在交通网络中流动,故可以采用交通流量模拟电动汽车的充电需求,而充电站规划可借鉴交通领域的截流选址模型^[20]。

现有的截流选址模型一般假定:只要在某条线路/路径上有服务设施,则该条线路上的所有顾客流均被俘获。就充电站规划问题而言,考虑到电动汽车行驶里程限制,在单一节点上建设充电站未必能够满足汽车在日常线路上来回行驶需求(即该线路上的交通流量不能被完全俘获),需要考虑在某个节点组合上建设充电站为电动汽车提供充电服务。以图1为例进行说明。

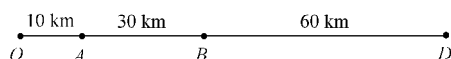


图1 一条往返路径的示例
Fig.1 An example of round-trip

电动汽车从出发点 O 到目的地 D 。这里假设只要电动汽车经过充电站,即可充满,暂不考虑充电站容量和充电时间等条件限制。对不同的电动汽车最大行驶里程 L ,存在以下几种情况。

- 1) L 大于 200 km,在任意一个点建设充电站都可满足电动汽车充电需求。
- 2) L 小于 200 km 但大于 180 km,在 A 或 B 点建设充电站均可满足充电需求。
- 3) L 小于 180 km 但大于 120 km,仅 B 点建设充电站可满足充电需求。
- 4) L 小于 120 km 但大于 60 km,任何单独一点上建设充电站都不能满足充电需求,需在 2 个或 2 个以上节点上建设充电站。
- 5) L 小于 60 km,任何节点以及节点组合上建设充电站均不能满足电动汽车充电需求。

本文借鉴截流选址模型,采用交通流量模拟充电需求,并计及电动汽车续航里程等因素约束,选择适当的交通节点建设充电站,使得充电站组合俘获的交通流量总和最大(即为尽量多的用户提供充电服务)。

2 充电站最优规划模型

充电站规划不仅要考虑用户充电的方便性,还需要综合考虑充电站接入配电系统后对电能质量的影响和系统运行的安全性与经济性,因此是一个典型的多目标优化决策问题。

一般而言,重要交通节点(如火车站、汽车站、大型超市和大型居民区等)也是电力系统的重要负荷节点。基于这样的背景,本文假设配电系统部分节

点在地理上与交通网络重要节点重合(这里所谓的“重合”指两者同处于一块小区域中,未必严格在一个地理点上),而配电系统线路和交通网络道路则未必重合。此外,由于充电站需要满足车辆行驶中的充电需要,同时也是规模较大的负荷节点,因此将充电站的候选位置设定在交通网络和配电系统的重合节点。图2为配电系统和交通网络节点重合示例。

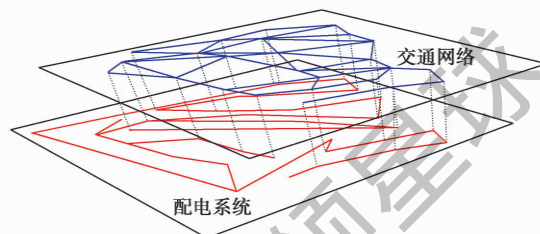


图2 配电系统和交通网络节点重合示意图
Fig.2 Geographic overlapping of buses in distribution network and nodes in traffic network

在上述背景下,本文以俘获交通流量最大、配电系统网损最小以及节点电压偏移最小为目标构建充电站规划的多目标优化决策模型。

2.1 目标函数

1) 俘获的交通流量

假设当电动汽车经过充电站时,不管此时电池剩余电量水平,车主都会接受充电服务直至充满。考虑到汽车全球定位系统(GPS)导航和车主的行车经验,这里假设电动汽车车主会选择从出发点到目的地之间的最短路径作为日常行驶线路,最短路径及其通过节点可以通过 Floyd 算法^[21]求出;每条路径上电动汽车行驶产生的交通流量可以通过重力空间互动模型^[17]求得。目标函数及重力空间互动模型分别如式(1)和式(2)所示。

$$\max f_1 = \sum_{q \in Q} f_q y_q \quad (1)$$

$$F_q = \frac{W_O W_D}{1.5 d_q} \quad (2)$$

式中: q 为电动汽车从出发地 O 到达目的地 D 之间的最短路径; Q 为最短路径的全集,假设交通网络系统中有 n 个节点,考虑到对称性,且不考虑环路,则共有 $n(n-1)/2$ 条最短路径; f_q 为路径 q 上的交通流量; W_O 为路径 q 起点 O 的权重; W_D 为路径 q 终点 D 的权重; d_q 为路径 q 的长度; y_q 表示路径 q 上的交通流量是否被俘获,如果是,则为 1,否则为 0。

2) 配电系统网损

电动汽车充电站接入配电系统后,系统的潮流分布将会发生改变,随之将引起配电系统网络损耗发生变化。网络损耗不但与原始负荷有关,还与电动汽车充电站的建设位置和容量大小有关。配电系

统网损最小目标可描述如下:

$$\min f_2 = P_{\text{Loss}}(U_{ik}P_{Si,k}, U_{ik}Q_{Si,k}) \quad (3)$$

式中: P_{Loss} 为配电系统网损; $P_{Si,k}$ 和 $Q_{Si,k}$ 分别为在第 i 个节点建设的第 k 种类型充电站的有功容量和无功容量; U_{ik} 表示是否在节点 i 建设第 k 种类型的电动汽车充电站, 1 和 0 分别表示建设和不建设, 这里假设充电站有 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 MW 共 4 种容量类型可选。

3) 节点电压偏移

充电站的接入将会导致配电系统中的节点电压轮廓发生变化。这里提出电压偏移指标, 用于计算系统节点电压与平衡节点电压偏差。计算公式如下:

$$\min f_3 = \sum_{i=1}^{N-1} \gamma_i \left(\frac{|V_i - V_0|}{V_0} \right) \quad (4)$$

式中: N 为系统中节点数目; V_0 为平衡节点电压; V_i 为节点 i 的电压; γ_i 为权重因子, 根据节点的重要性而定, 这里定义 $\gamma_i = P_i / P_{\text{Load}}$, 即认为节点的重要性与该节点负荷大小正相关, P_i 为节点 i 的原始负荷, P_{Load} 为配电系统总负荷。

2.2 约束条件

1) 节点组合约束

假设电动汽车在行驶过程中, 不能偏离其最短路径 q , 且充满电后电动汽车最大行驶里程为 L 。如果出发点有充电站, 则剩余可行驶里程设置为 L ; 如果没有, 则可以假设剩余可行驶里程为 $0.5L$, 原因如下: 若剩余可行驶里程为 $0.5L$, 且能够在电量耗尽前到达离起始点最近的充电站充电, 则返回时仍能在该充电站充满电, 且返回到出发点后, 剩余可行驶里程不小于 $0.5L$ 。

这里给出如下 2 个定义: ①若节点组合 h (此时假设包含在组合 h 中的所有节点都已建设充电站) 能给最短路径 q 上的电动汽车提供充电服务, 使其能够从出发地到达目的地, 并有充足的电量返回出发地, 则称该组合为有效节点组合; ②有效节点组合所包括的所有节点都建设充电站时, 则称该有效节点组合开放。很明显, 只有当线路 q 上至少存在一个有效节点组合 h , 且该组合开放时, 线路 q 上的交通流量才被俘获。

$$y_q = \begin{cases} 1 & \sum_{h \in H_q} a_{qh} v_h \geq 1 \\ 0 & \sum_{h \in H_q} a_{qh} v_h = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: a_{qh} 表示线路 q 上的节点组合 h 是否有效, 取值 1 和 0 分别表示有效和无效; v_h 表示组合 h 是否开放, 取值 1 和 0 分别表示开放和不开放; H_q 表示

线路 q 上所有有效的节点组合, 其确定算法在下文给出。

2) 充电站带负荷能力约束

为了满足电动汽车用户充电需求, 规划区域内的充电站额定容量应不小于电动汽车的最大充电负荷需求。

$$\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{k=1}^m U_{ik} P_{Si,k} - W_{\text{max}} \geq 0 \quad (6)$$

式中: W_{max} 为综合考虑了车主出行特征, 以及电动汽车数量、电池容量等因素计算得出的最大充电负荷需求; m 为充电站的种类。

3) 充电站建设个数约束

考虑到城市土地资源一般比较紧张, 为了避免资源闲置所引起的浪费, 应限制规划区内充电站个数, 即

$$\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{k=1}^m U_{ik} = M \quad (7)$$

式中: M 为允许建设的充电站个数。

4) 单个节点的充电站类型个数约束

现实中一个节点最多只能建设一种类型的充电站, 即

$$\sum_{k=1}^m U_{ik} \leq 1 \quad (8)$$

5) 线路输电功率约束

$$P_l \leq P_{l\text{max}} \quad (9)$$

式中: P_l 为配电线路 l 的传输功率; $P_{l\text{max}}$ 为线路 l 允许的传输功率上限。

采用罚函数处理不等式约束:

$$F(P_l) = \begin{cases} K_l (P_l - P_{l\text{max}})^2 & P_l > P_{l\text{max}} \\ 0 & P_l \leq P_{l\text{max}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: K_l 为给定的充分大的常数。

6) 功率平衡约束

$$P_{\text{SUB}} = P_{\text{Loss}} + \sum_{i=1}^{N-1} P_{Di} + \sum_{i=1}^{N-1} U_{ik} P_{Si,k} \quad (11)$$

式中: P_{SUB} 为平衡节点注入功率; P_{Di} 为节点 i 的原始有功负荷。

7) 系统潮流等式约束

$$\begin{cases} -P_{Di} - U_{ik} P_{Si,k} = V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ -Q_{Di} - U_{ik} Q_{Si,k} = V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (12)$$

式中: Q_{Di} 为节点 i 的原始无功负荷; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为节点导纳矩阵的实部和虚部; θ_{ij} 为支路 ij 的相角差。

联合式(1)一式(12), 构成了电动汽车充电站多

目标规划模型。所建模型为非线性混合整数规划问题,传统优化方法难以求解。这里采用超效率 DEA 评价方法来确定各个目标的权重系数^[22],利用线性加权方法把多目标规划问题转换成单目标问题,采用改进的 BPSO 算法求解转换后的单目标优化问题。

3 求解方法

3.1 有效节点组合的确定

采用下述算法^[16]确定能够给线路 q 充电的有效节点组合 H_q 。

1) 初始化。应用 Floyd 算法产生交通网络系统中所有起点 O 至终点 D 的最短路径 q ,并存储这些最短路径长度以及最短路径所经过的节点;建立一个空的主列表 H 用于存储所有线路 q 的有效节点组合 H_q 。

2) 产生路径 q 上所有可能候选组合。以图 1 为例,可能的组合为: $\{O\}, \{A\}, \{B\}, \{D\}, \{O, A\}, \{O, B\}, \{O, D\}, \{A, B\}, \{A, D\}, \{B, D\}, \{O, A, B\}, \{O, B, D\}, \{O, A, D\}, \{A, B, D\}, \{O, A, B, D\}$ 。

3) 从候选组合中删除因电动汽车行驶距离限制而无效的节点组合。具体步骤如下。

步骤 1: 从起点 O 开始,如果 O 上有充电站,则将电动汽车剩余可行驶里程设置为最大行驶里程 L ;如果 O 上没有充电站,则将剩余可行驶里程设为 $0.5L$ 。

步骤 2: 移向路径 q 上的下一个节点,剩余可行驶里程为原剩余可行驶里程减去已行驶里程。依次检查如下 5 种可能情况。

① 若剩余可行驶里程小于或等于 0,即电量耗尽,从线路 q 候选集合中去除此组合,返回 3) 检查下一个候选组合。

② 如果节点是终点 D ,则考虑如下 2 种情况:如果终点 D 上有充电站,则该组合有效,将其储存到主列表中,返回 3) 检查下一个候选组合;如果终点 D 上没有充电站,则返回步骤 2。此时,电动汽车开始由终点返回。

③ 如果节点是起点 O ,则电动汽车没有耗尽电量而成功返回,此候选充电站组合就为 q 的有效组合,将其储存并返回 3) 检查下一个候选组合情况。

④ 如果节点上有充电站,则将剩余可行驶里程设为电动汽车最大可行驶里程 L ,并返回步骤 2。

⑤ 在其他情况下,返回步骤 2。

步骤 3: 当路径 q 上有效节点组合筛选完毕后,转到 4)。

4) 除去线路 q 的有效节点组合中是其他有效组合超集的组合,如 $\{A, B\}$ 是 $\{A\}$ 的超集。具体方法如下:将有效组合按照节点数量降序排序;从第 1 个有效组合开始检查,如果它是后面任何一个组合的超集,则去掉此组合;检查下一个组合,重复此过程直至路径 q 的所有有效组合检查完毕。

5) 记录路径 q 的所有有效组合 h ,以及 h 中的每个节点 k ,并存放在 2 个关系系数矩阵 a 和 b 之中。如果 h 组合可以给路径 q 充电,则 a_{qh} 为 1,否则为 0;如果节点 k 在组合 h 中,则 b_{hk} 为 1,否则为 0。对于 q 的所有有效节点组合 h :如果该节点组合没有出现在主列表中,则将该组合加入到主列表中,并置 a_{qh} 和 b_{hk} 均为 1;如果该节点组合已经存在于主列表中,设置 a_{qh} 为 1。

6) 对所有路径 q 重复 2) 至 5)。

3.2 目标函数权重系数的确定

把多目标规划转换为单目标规划时的一种常用方法是对各目标函数加权求和,这样如何确定适当的权重系数就是一个关键的问题。

超效率 DEA 是一种通过数学规划比较多输入多输出的决策单元相对效率,进而对决策单元进行效率评价(即评价决策单元优劣)的方法^[23]。本文采用超效率 DEA 模型确定目标函数权重,以目标函数的权重系数向量 $[\alpha_d, \beta_d]$ 为决策单元,其中 α_d 为输入量的权重系数向量, β_d 为输出量的权重系数向量,将在此权重向量下优化得到的最小化目标值和最大化目标值分别作为决策单元的输入和输出。对于本文的充电站多目标规划问题,其权重系数向量可表示为:

$$[\alpha_d, \beta_d] = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \beta_{11} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \beta_{21} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_{d1} & \alpha_{d2} & \beta_{d1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

对俘获的交通流量、配电系统网络损耗以及节点电压偏移作归一化处理,即 $f_2/(\min f_2), f_3/(\min f_3)$ 作为决策单元的输入量,将 $(\min -f_1)/(-f_1)$ 作为决策单元的输出量。基于超效率 DEA 模型评价该 d 个决策单元,并采用 MATLAB 软件包中的线性规划工具箱求解。根据它们的相对效率 E_k 的大小排序,最大值所对应的决策单元相对于其他决策单元更为有效,即在等量投入下该决策单元能够有更多的产出。

选取 E_k 最大值所对应的决策单元作为归一化后各个目标函数的权重系数。采用线性加权转化得到的单目标函数表达式为:

$$\min F = \alpha_{k1} \frac{f_2}{\min f_2} + \alpha_{k2} \frac{f_3}{\min f_3} + \beta_{k1} \frac{\min -f_1}{-f_1} \quad (14)$$

3.3 求解步骤

步骤 1:采用 Floyd 算法计算交通网络中所有起点 O 到终点 D 的最短路径 q , 识别路径 q 通过的节点;采用重力空间互动模型计算路径 q 上的交通流量。

步骤 2:根据 3.1 节算法的步骤确定每条路径 q 上的有效节点组合 H_q 。

步骤 3:分别以上述 3 个目标函数中的每一个作为单个目标函数,不考虑另外 2 个目标函数,求取这 3 种情况下的最优解。

步骤 4:采用伪随机数发生器产生的一组权重向量,把多目标优化问题转化为单目标问题,采用 BPSO 算法^[24-25]求解。

步骤 5:把求得的优化变量值代入 3 个目标函数中,得到 3 个目标值。采用超效率 DEA 方法进行评价,将 2 个最小化目标值作为决策单元的输入,将一个最大化目标值作为决策单元的输出;根据最终评价结果从一组权重向量中选出一个最有效的权重向量作为各目标的最终权重系数。

步骤 6:确定电动汽车充电站的最优选址和容量。

4 算例分析

4.1 确定规划区内最大充电负荷

电动汽车最大充电负荷与电动汽车数量、充电功率、电池容量以及车主使用习惯等因素密切相关。由于电动汽车尚未大规模推广使用,无法获得反映车主使用习惯的可靠统计数据。这里以已有燃油车辆的相关数据进行分析。

根据美国交通部在 2009 年对全美私家车辆出行情况的调查统计结果(2009 National household travel survey)^[26],首先利用文献[27]所提出的方法对电动汽车日行驶里程、最后一次出行返回时间(起始充电时间)等统计结果进行拟合分析。之后,以 1 min 为步长,采用蒙特卡洛仿真方法可求出 1 d 当中单台电动汽车充电功率的平均值。

假设电动汽车的充电功率在 3~4 kW 间服从均匀分布,且充电功率因数为 1;给定蒙特卡洛抽样次数为 5 000,仿真结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出,在 19 h 时,单台电动汽车的充电功率均值达到最大,为 0.606 kW。假设规划区内有 1 000 辆电动汽车,考虑到电动汽车未来的发展趋势,规划应具有一定的前瞻性,故给定规划区内最大充电负荷为 0.8 MW。

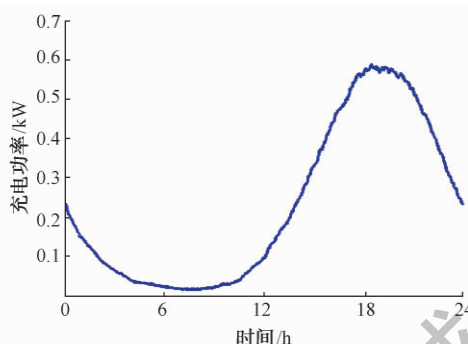


图 3 单台电动汽车充电功率平均值
Fig. 3 Mean value of charging power of a single electric vehicle

4.2 结果与分析

以 33 节点配电系统以及 25 节点交通网络来说明所发展模型和方法的可行性与有效性。这里采用如下假设:交通网络节点 1,2,⋯,25 与配电系统节点 1,2,⋯,25 重合,配电系统中节点 1,2,⋯,25 之间的实际道路连通状况如附录 A 图 A1 中的交通网络所示。

需要说明,对于配电系统和交通网络不重合的节点,即交通网络节点和配电系统节点在地理位置上不耦合,这相当于本文所发展的模型的一个简化情形,所提出的算法仍然适用。

有 0.1,0.2,0.3,0.4 MW 共 4 种充电站候选容量;要求建设的充电站个数给定为 4;给定电动汽车最大行驶里程 L 为 120 km;根据各交通节点的繁忙程度设置节点权重,如表 1 所示^[17]。

表 1 交通节点权重系数
Table 1 Weights of various traffic nodes

节点	权重	节点	权重	节点	权重
1	0.54	10	0.54	19	0.80
2	0.80	11	0.05	20	0.27
3	0.27	12	0.54	21	0.27
4	0.27	13	0.05	22	0.54
5	0.27	14	0.54	23	0.05
6	0.07	15	0.27	24	1.34
7	0.05	16	0.27	25	0.05
8	0.54	17	0.27		
9	0.27	18	1.07		

在不考虑另外 2 个目标函数的情况下,依次单独优化 3 个目标,可得网损最小值为 0.190 7 MW、节点电压偏移最小值为 0.044 8 (标么值)、俘获的交通流量最大值为 1.394 7 (占总交通流量的 45.8%)。

假设每个目标函数的权重变化范围为 0.1~0.8,步长为 0.1,这样总计 36 组权重向量,采用线性加权求和方法把多目标决策问题转换为单目标问

题;之后,利用改进 BPSO 算法求解转化后的单目标优化问题,并把求得的优化变量值代入各个目标函数中,分别求出在不同权重向量下各个目标函数的值。最后,采用超效率 DEA 方法评价 36 组权重向量的有效性,以确定最为有效的一组权重向量。几组典型决策单元的计算结果和评价结果列于表 2,36 组决策单元的完整结果见附录 A 表 A1。

表 2 典型决策单元计算和 DEA 评价结果

Table 2 Computational and DEA evaluation results of some typical decision-making units

决策单元	$[\alpha_d, \beta_d]$	f_1	f_2	f_3	DEA 评价价值
9	[0.2, 0.1, 0.7]	0.237 5	0.050 5	1.384 3	1.016 2
11	[0.2, 0.3, 0.5]	0.229 6	0.049 6	1.324 5	0.985 1
12	[0.2, 0.4, 0.4]	0.215 2	0.048 0	1.231 4	0.975 1
22	[0.4, 0.1, 0.5]	0.225 7	0.049 1	1.324 5	1.006 8
28	[0.5, 0.2, 0.3]	0.215 2	0.048 0	1.231 4	0.975 1

从表 2 可以看出,决策单元 9 和 22 的超效率 DEA 评价价值都大于 1,均为有效决策单元,但决策单元 9 的相对效率更高,故采用决策单元 9 所对应的权重系数 0.2, 0.1 和 0.7 分别作为目标函数 f_1 , f_2 和 f_3 的权重系数最为合理。求解由 3 个目标函数线性加权后形成的单目标优化问题得到的最优规划结果为:在配电系统中的节点 18, 24, 8, 14 分别建设容量为 0.1, 0.1, 0.2, 0.4 MW 的充电站。附录 A 图 A1 中配电系统(节点 26 为平衡节点)可以看出,容量大的充电站建在配电系统馈线的较前端,这样可以有效减少网络损耗和电压偏移;从交通网络可以看出,充电站多处在交通枢纽位置,通过交通流量较大,规划的充电站能够给更多电动汽车提供便捷充电服务。

在确定了充电站站址和容量后,这里进一步分析电动汽车最大行驶里程 L 对充电站俘获交通流量的影响,结果如图 4 所示。

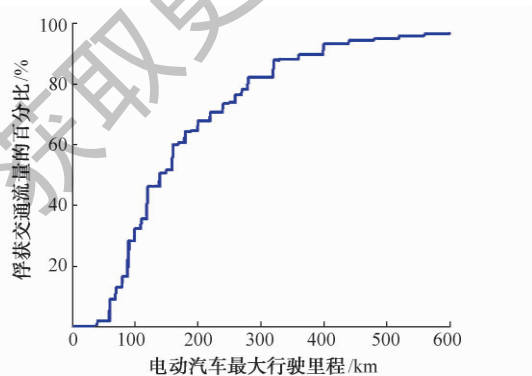


图 4 不同行驶里程下充电站可俘获的交通流量比例
Fig. 4 Percentages of flows captured by charging stations for different traveling distances

从图 4 可以看出,在充电站站址确定的情况下,电动汽车的最大行驶里程越大,给定数量的充电站能够服务的车辆越多。在目前充电设施网络还不完善的情况下,提高电动汽车的电池续航里程,使得给定数量的充电设施能够为更多车辆提供充电服务以满足其行驶需求,这对发展电动汽车产业至关重要。

5 结语

在综合考虑充电站作为城市公共服务设施和基本用电设施两方面属性的基础上,本文建立了充电站多目标规划模型,并采用超效率 DEA 评价方法来确定各目标权重,把多目标优化问题转化为单目标问题求解。之后,采用改进的 BPSO 算法求解该单目标优化模型。最后,通过算例说明了所发展的模型与方法的基本特征。

需要指出,本文的研究假设了电动汽车是沿着去目的地的最短路径行驶的。实际上,车主未必能够准确识别最短路径,有时最短路径上可能存在交通阻塞而无法行驶,如何适当考虑这些实际因素将是下一阶段的研究重点。

附录见本刊网络版(<http://aeprs.sgepri.sgcc.com.cn/aeprs/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] SCHNEIDER K, GERKENSMEYER C, KINTNER-MEYER M, et al. Impact assessment of plug-in hybrid vehicles on Pacific Northwest distribution systems[C]// Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting, July 20-24, 2008, Pittsburgh, PA, USA: 1-6.
- [2] 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.
- [3] 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.
LIU Zhipeng, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Optimal siting and sizing of electric vehicle charging stations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(3): 54-59.
- [4] 李如琦, 苏浩益. 基于排队论的电动汽车充电设施优化配置[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 58-61.
LI Ruqi, SU Haoyi. Optimal allocation of charging facilities for electric vehicles based on queuing theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 58-61.
- [5] 熊虎, 向铁元, 荣欣, 等. 电动汽车电池更换站布局的最优规划[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(9): 1-6.
XIONG Hu, XIANG Tieyuan, RONG Xin, et al. Optimal allocation of electric vehicle battery swap stations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(9): 1-6.

- [6] 任玉珑,史乐峰,张谦,等. 电动汽车充电站最优分布和规模研究[J]. 电力系统自动化,2011,35(14):53-57.
REN Yulong, SHI Lefeng, ZHANG Qian, et al. Optimal distribution and scale of charging stations for electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 53-57.
- [7] 熊虎,向铁元,祝勇刚,等. 电动汽车公共充电站布局的最优规划[J]. 电力系统自动化,2012,36(23):65-70.
XIONG Hu, XIANG Tieyuan, ZHU Yonggang, et al. Electric vehicle public charging stations location optimal planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(23): 65-70.
- [8] 宋亚辉. 城市电动汽车充电设施布局规划研究[D]. 北京:北京交通大学,2011.
- [9] 崔静. 我国城市加油站布局研究[D]. 青岛:中国石油大学,2008.
- [10] 刘志鹏,文福拴,薛禹胜,等. 计及可入网电动汽车的分布式电源最优选址和定容[J]. 电力系统自动化,2011,35(18):11-16.
LIU Zhipeng, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Optimal siting and sizing of distributed generators considering plug-in electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(18): 11-16.
- [11] ALARCON R A, AULT G, GALLOWAY S. Multi-objective planning of distributed energy resources: a review of the state-of-the-art [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(5): 1353-1366.
- [12] HUNG D Q, MITHULANANTHAN N, BANSAL R C. Analytical expressions for DG allocation in primary distribution networks [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2010, 25(3): 814-820.
- [13] ACHARYA N, MAHAT P, MITHULANANTHAN N. An analytical approach for DG allocation in primary distribution network [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2006, 28(10): 669-678.
- [14] 王成山,刘涛,谢莹华. 基于混合遗传算法的变电站选址定容[J]. 电力系统自动化,2006,30(6):30-34.
WANG Chengshan, LIU Tao, XIE Yinghua. Substation locating and sizing based on hybrid genetic algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(6): 30-34.
- [15] LIM S, KUBY M. Heuristic algorithms for siting alternative-fuel stations using the flow-refueling location model [J]. European Journal of Operational Research, 2010, 204(1): 51-61.
- [16] KIM J, KUBY M. The deviation-flow refueling location model for optimizing a network of refueling stations [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(6): 5406-5420.
- [17] HODGSON M J. A flow capturing location-allocation model [J]. Geographical Analysis, 1990, 22(3): 270-279.
- [18] SHI L, DING H L, XU Z. Determination of weight coefficient for power system restoration [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2012, 27(2): 1140-1141.
- [19] SINGH D, MISRA R K, SINGH D. Effect of load models in distributed generation planning [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(4): 2204-2211.
- [20] 张曦. 需求多元化的网络截流设施选址问题研究[D]. 武汉:华中科技大学,2011.
- [21] 胡桔州. Floyd 最短路径算法在配送中心选址中的应用[J]. 湖南农业大学学报:自然科学版,2004,30(4):382-384.
HU Juzhou. An algorithm for distribution center based on the Floyd-shortest-path [J]. Journal of Hunan Agricultural University: Natural Sciences, 2004, 30(4): 382-384.
- [22] 梁娟,林元庆. 具有多目标结构评价功能的多目标决策方法[J]. 中国管理科学,2004,12(专辑):118-121.
LIANG Juan, LIN Yuanqing. The multi-objective decision-making model with flexible objective structure [J]. Chinese Journal of Management Science, 2004, 12 (Special Issue): 118-121.
- [23] 魏权龄. 数据包络分析[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [24] 刘波,张焰,杨娜. 改进的粒子群优化算法在分布式电源选址和定容中的应用[J]. 电工技术学报,2008,23(2):103-108.
LIU Bo, ZHANG Yan, YANG Na. Improved particle swarm optimization method and its application in the siting and sizing of distributed generation planning [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(2): 103-108.
- [25] 刘涌,侯志俭,蒋传文. 求解机组组合问题的改进离散粒子群算法[J]. 电力系统自动化,2006,30(4):35-39.
LIU Yong, HOU Zhijian, JIANG Chuanwen. Unit commitment via an enhanced binary particle swarm optimization algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(4): 35-39.
- [26] Federal Highway Administration, U. S. Department of Transportation. 2009 national household travel survey [EB/OL]. [2011-09-15]. <http://nhts.ornl.gov>.
- [27] 田立亭,史双龙,贾卓. 电动汽车充电功率需求的统计学建模方法[J]. 电网技术,2010,34(11):126-130.
TIAN Liting, SHI Shuanglong, JIA Zhuo. A statistical model for charging power demand of electric vehicles [J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 126-130.

王 辉(1987—),男,硕士研究生,主要研究方向:电动汽车充电站规划、智能电网。E-mail: whjetli@gmail.com

王贵斌(1986—),男,博士研究生,主要研究方向:电动汽车优化调度、新能源并网和电力系统运行与控制。E-mail: wgbzju@gmail.com

赵俊华(1980—),男,助理研究员,主要研究方向:电力系统分析与计算、智能电网、计算智能方法在电力系统中的应用、电力经济与电力市场。E-mail: fuxiharp@gmail.com

文福拴(1965—),男,通信作者,特聘教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统故障诊断与系统恢复、电力经济与电力市场、智能电网与电动汽车。E-mail: fushuan.wen@gmail.com

(编辑 孔丽蓓)

(下转第 98 页 continued on page 98)

- CHEN Chi, FENG Dengguo, XU Zhen. Research on database transaction recovery log and intrusion response[J]. Journal of Computer Research and Development, 2010, 47(10): 1797-1804.
- [6] 郑吉平, 秦小麟, 钟勇, 等. 基于 SPN 模型的可生存性 DBMS 中恶意事务修复算法的研究[J]. 计算机学报, 2006, 29(8): 1480-1486.
- ZHENG Jiping, QIN Xiaolin, ZHONG Yong, et al. SPN model based malicious transaction repair algorithms in survivable DBMS[J]. Chinese Journal of Computers, 2006, 29(8): 1480-1486.
- [7] YU M, ZANG W, LIU P. Recovery of data of integrity under multi-tier architectures[J]. Information Security, 2010, 4(4): 344-351.
- [8] 许凯宁, 程新功, 刘新锋, 等. 基于 CIM 设计的电力系统状态估计模型[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(24): 123-128.
- XU Kaining, CHENG Xingong, LIU Xinfeng, et al. Model design of electric system state estimation based on CIM[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(24): 123-128.
- [9] 杨萌. 基于 CIM 模型企业电网分析平台数据库及数据接口研究[D]. 陕西: 西安电子科技大学, 2009.
- 张少敏(1965—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向: 电力信息化及信息安全。E-mail: zhangshaomin@126.com
- 李志雄(1987—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力信息化及信息安全。
- 王保义(1964—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 主要研究方向: 电力信息网络及信息安全。E-mail: wangbaoyi@126.com
- (编辑 章黎)

A Data Integrity Recovery Method in Real-time Database for Smart Grid

ZHANG Shaomin, LI Zhixiong, WANG Baoyi

(School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract : As one of the cores of the dispatching automation system, the real-time database management system (DBMS) plays an important role in the safe operation of the smart grid. Nevertheless, with the increase of the openness of the smart grid, the data security in the real-time database, especially the integrity of the security issues, is becoming a matter of ever-increasing concern. An algorithm for the integrity restoring of the data in the real-time database that conforms to the IEC 61970 standard, i. e., RDIR algorithm, is proposed. With this method, after the data integrity is destroyed, the real-time database has only to roll back the malicious and affected transactions rather than all the transactions. Moreover, the undo conflict due to the transaction undo in the recovery process can be avoided, thus reducing the database recovery time and improving the survivability of the real-time database system.

This work is supported by Hebei Higher Education Science Research Plan Funding Subject (No. Z2012077, No. Z2010290).

Key words : smart grid; IEC 61970; real-time database; data integrity; RDIR algorithm

(上接第 69 页 continued from page 69)

Optimal Planning for Electric Vehicle Charging Stations Considering Traffic Network Flows

WANG Hui¹, WANG Guibin¹, ZHAO Junhua¹, WEN Fushuan¹, LI Jie²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China ;

2. Sales Department of Fujian Electric Power Company Limited, Fuzhou 350003, China)

Abstract : Reasonable siting and sizing of charging stations are important for extensive applications of electric vehicles. A multi-objective decision-making model for the optimal planning of electric vehicle charging stations is developed, with the dual attributes of charging stations as public service facilities of urban traffics and ordinary electric facilities taken into account. Three objective functions are defined to respectively maximize the captured traffic network flow, minimize the network loss, and to minimize the average voltage deviation. The well-established super-efficiency data envelopment analysis is employed to determine the appropriate weights among the three objective functions, and in this way the multi-objective optimization problem is transformed into a single-objective programming one. Then, the enhanced binary particle of swarm optimization (BPSO) is used to solve the single-objective programming model. Finally, a 33-node test feeder and a 25-node traffic network are utilized to illustrate the essential features of the developed model and the effectiveness of the presented method.

This work is supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2013CB228202), National Natural Science Foundation of China (No. 51107114, No. 51177145) and Electric Power Research Institute of Fujian Electric Power Company Limited (No. 12-110107-013).

Key words : electric vehicle; charging station planning; traffic network flow; super-efficiency data envelopment analysis; enhanced binary particle swarm optimization algorithm