

考虑配电网接纳能力的电动汽车充换电服务网 基础设施配置方案分析与评估

赵胜霞,刘俊勇,向月,黄媛

(四川大学电气信息学院,四川成都 610065)

摘要: 着眼于电动汽车充换电服务网的服务特性研究,从而建立各种评价指标,进行服务网基础设施配置分析与评估。首先充分考虑服务网与配电网的交互关系,建立了配电网最大接纳能力模型,对基础设施配置方案进行初步筛选;其次提出了配送效率、行驶可达性、服务可供性等服务网服务性能指标,对可行的方案进行有效评估,并经过多因素综合分析,选出最佳方案。最后通过设置不同容量、位置的充换电站配置方案进行仿真计算,并与已有方法对比分析,充分验证了所提指标的可行性与有效性。所提方法不仅能对现有充换电服务网进行评估,同时也可以为电动汽车充换电站的快速选址定容提供依据。

关键词: 电动汽车; 充换电服务网; 服务性能指标; 接纳能力

中图分类号: TM 761; U 469.72

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.06.014

0 引言

随着环境污染、能源枯竭等问题日益严重,电动汽车由于具有减少温室气体排放、节约燃油成本、增加可再生能源渗透率的潜力^[1-4],受到世界各国的广泛关注与研究^[5]。

电动汽车充换电服务网是一种融合了智能电网、物联网和交通网的复杂网络,它是电动汽车正常运行的支撑系统。电动汽车产业的推进依赖于充换电服务网发展,然而长期以来缺乏历史数据与经验参考,亦缺乏专门理论支撑与分析工具^[6],在拓扑结构、要素配置、功能构成、协调优化等方面鲜有定量分析。文献[7]通过电能供应模式和充换电需求分析设计了充换电服务网整体架构,结合电动汽车发展规划构建充换电设施建设规划设计模型与算法,得出了充换电设施布点规划、城际互联网络的方案。该文虽然提出了充换电服务网架构、充换电服务网管理系统,但是没有对服务网的结构、功能、要素等进行分析评价。文献[8]深入介绍了充换电服务网的结构体系,基于物联网将其分为3个层次,利用排队论计算得出服务时间、队长等信息。然而该方法只考虑了单一的充换电站服务内容,没有考虑服务网与配电网之间的关系。文献[9]根据复杂网络理论发展出续航风险距离、续航能量密度、网络服务能力等指标,用于体现换电站距离、电池分布等因素对于换电服务网络整体服务能力的影响。该方法从复杂网络的角度进行换电站配置的评估,但并未考虑

充电站类型、道路阻塞、电网承受能力等因素。

此外,充换电服务网作为配电网增供终端推动负荷增长的同时,对配电网的规划与建设有重大影响。文献[10]表明大规模电动汽车充电的集聚特性将会引起电网运行的安全问题。文献[11]指出当电动汽车在负荷高峰进行充电,产生的电量需求会使电力系统过载,使剩余电量储备增加,电网效率降低。文献[12]研究了电动汽车充电负荷的随机性,从而得出一种充电优化方法。由此看来,电动汽车充换电服务网的研究不仅是定义概念、配置充换电站等,还应该与配电网相交共同研究。

因此,本文考虑道路堵塞、服务半径、配电网接纳能力等多重因素,建立服务网特性分析与充换电站配置评估体系。通过设置不同的充换电站配置方案进行综合评估,首先考虑配电网的接纳能力,一旦电压越限则将该方案舍弃;对于满足电力电量平衡和安全运行的多种方案,进行指标分析,这些指标主要涉及充换电站位置、容量、客户服务便捷程度等方面,通过计算可以得到该服务网的服务特性。最后利用层次分析法确定相互影响的各指标权重,通过指标计算综合评分,对比不同配置方案结果。

1 充换电服务网

电动汽车充换电服务网是一种包含了智能电网、物联网和交通网的复杂网络,具备了信息化、智能化、网络化等属性。根据分层设计的理念,可将充换电服务网分为3层,从下到上依次为终端设备层、信息管理层、系统决策层,其系统架构如图1所示。系统决策中心根据国家政策、市场反馈情况制定相应的电动汽车运行政策以及执行价格等命令;信息管理层主要负责监控、收集基础设施的状态信息,进

收稿日期:2016-02-19;修回日期:2016-05-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51377111)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51377111)

行实时监控,对上下层级起到信息传递作用。本文主要研究在终端设备层展开,下文中的服务网都只是狭义的服务网。

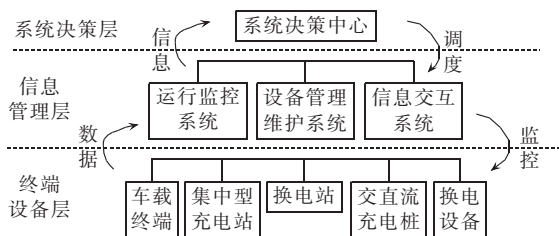


图 1 充换电服务网架构

Fig.1 Framework of charging/swapping service network

1.1 服务网与配电网交互

当电动汽车发展逐步规模化、充换电设施部署到一定数量后,必然形成一套与不同电压等级配电网紧密耦合的充换电服务网络。对于配电网而言,由于充换电负荷的间歇性、随机性、波动性、局部聚集效应等问题^[13],电动汽车成为一种具有流动特性的“动态”负荷,配电网难以满足充换电负荷的电力需求。对于充换电服务网,配电网对实时充换电负荷的支撑能力约束着充换电站落点与容量,从而制约着电动汽车的发展。因此对于充换电服务网与配电网的交互关系,需要结合配电网本身的运行指标以及服务网的特性指标来评估充换电服务网配置的合理性。

服务网中充换电站所在位置一般情况下属于配电网里重要的负荷节点,因此为便于计算,本文将充换电站所在节点投射在配电网中相近的节点处,形成服务网与配电网交互的双层网络,如图 2 所示。下层为交通道路网,上层为配电网,不同类型的充换电站处于不同重要程度的交通节点位置。电动汽车与电网直接关联的就是负荷,因此将充换电站作为负荷终端落点,接入到配电网的对应节点中,通过仿真计算得到不同充换电站配置方案对电网的影响。

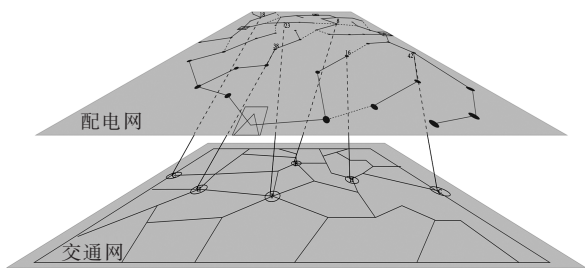


图 2 双网匹配图

Fig.2 Coordination between two networks

电网对规模化电动汽车接入的接纳能力主要通过候选对应节点可能接入的最大功率注入来体现。由于各个节点的电压有一定的约束范围,每条线路有自身物理传输极限,不同的充换电站配置方案会引发不同的功率注入,可能导致相关支路潮流或节点

电压幅值不在约束范围内,系统无法承担相应新增充换电负荷的需求。因此,在不改变配电网结构的情况下,需要评估充换电基础设施的配置情况是否能满足配电网的接纳能力,以此充分体现充换电服务网与配电网之间的协调关系。故而,配电网接纳能力^[14]可以通过节点可能接入的功率注入集群最大值反映:

$$\max \sum_{i \in \Omega} (P_{Li} + P_{LG}) \quad (1)$$

$$\text{s.t. } P_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (2)$$

$$Q_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (3)$$

$$|P_{ij}| \leq \bar{P}_{ij} \quad (4)$$

$$\varphi = \frac{U - U_N}{U_N} \times 100\% \leq \varphi_{\max} \quad (5)$$

其中, Ω 为充换电站接入配电网的节点集合; P_{Li} 为配电网中节点*i*的原始负荷; P_{LG} 为配电网中节点*i*可接入的负荷量; P_i 和 Q_i 分别为由节点*i*向网络注入的有功功率、无功功率; G_{ij} 、 B_{ij} 、 θ_{ij} 分别为节点*i*、*j*间的电导、电纳、相角差; U_i 、 U_j 分别为节点*i*、*j*的电压; P_{ij} 为支路潮流; $\bar{P}_{ij}$ 为支路潮流的上限^[15]; φ 反映了线路的实际电压*U*与额定电压 U_N 的偏差大小,偏移过大将直接影响供电电能质量,故通过设置 $\varphi_{\max}$ 来确定在配电网一定运行方式下的电压幅值允许波动范围。

通过采用式(1)~(5)预先对配电网一定运行方式下的最大接纳能力优化模型进行计算,可以获得节点*i*的最大允许充电功率注入量 $P_{LG}^{\max}$ 。由此,可以通过式(6)来判断某配置方案下的充换电服务网络注入功率是否满足该运行方式下的配电网最大接纳能力要求。

$$P_{cs}(i) \leq P_{LG}^{\max} \quad (6)$$

其中, $P_{cs}(i)$ 为位于节点*i*的充换电站容量。

若给出的充换电基础设施配置方案对应的运行情况不满足式(6),即认为该方案不满足当前配电网接纳能力。对于满足配电网接纳能力且接入配电网后不影响其安全稳定运行的配置方案,则进一步通过经济运行指标和服务性能指标来比较和评估。其中配电网的经济运行指标 ϕ 由总网损间接反映,由(7)体现:

$$\phi = \sum_{i=1}^n R_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} \quad (7)$$

其中, R_i 为节点*i*的电阻。当充换电站接入配电网后,不同的配置方案对应的网损不同,本文认为网损较高的方案较不经济。

1.2 服务网特性分析

电动汽车充换电站的地理位置、容量大小、客户服务时长、充换电方便程度等因素,都是充分反映服务网络服务特性的量,因此需要建立指标对其服务特性进行分析。

1.2.1 电池配送效率 f

集中型充电站不仅要为电动汽车提供快速充电服务,并且要在空闲时间为换电站的电池提供充电以及配送服务。因此,需要重点考虑往返充电站与换电站之间的电池配送车的行驶途径以及配送频率。

许多文献中对电动汽车充换电路径的选择并没有考虑交通道路的阻塞,因此本文采用含阻塞的有效路径算法;EGM 方法^[15]。假定节点 l 上有一个信息包需要被送到节点 j ,则对节点 l 的每一个邻居 i 定义一个到目的地 j 的有效距离:

$$d_{\text{eff}}^i = h d_{ij} + (1-h) c_i \quad (8)$$

其中, d_{ij} 为从 i 到 j 的最短距离; c_i 为 i 上积压的信息包数; h 为 0~1 之间的一个常数。很显然,当 $h=1$ 时, d_{eff}^i 的那个节点作为信息包的下一个中继站。按此步骤对 $i \rightarrow j$ 路线上其他中继站的选取做相同的处理。对于无标度网, $h=0.8$ 时效果最优。

由上述方法可以计算出充电站 i 与换电站 j 之间考虑道路阻塞的最短路径 L_{ij} , 配送车的平均速度为 v , 则配送效率为:

$$f = v / L_{ij} \quad (9)$$

1.2.2 行驶可达性 δ

行驶可达性是指电动汽车在任意位置想要到达最合适的充换电站补充电量的容易程度。电动汽车充满电后可供行驶的最大距离为 B , 从车所在点 a 到最合适的充换电站 i 的距离为 l_i (该距离为考虑了道路阻塞后的距离), 令行驶可达性为 δ , 则有:

$$\delta = \begin{cases} (B - l_i) / (B - L) \times 100\% & l_i \in [0, B - L] \\ 0 & l_i \in [B - L, \infty) \end{cases} \quad (10)$$

其中, L 为充满电后的电动汽车到达 a 点时所行驶的距离。由式 (10) 可知, 随着 l_i 的增大, 行驶可达性 δ 逐渐减小, 意味着该车越难到达合适的充换电站进行电量补充; 当 l_i 大于等于剩余行驶距离 $B - L$ 时, 行驶可达性为 0, 即电动汽车在消耗完自身电量时没能到达充换电站。

1.2.3 服务可供性 ξ

不同地点的充换电站因其容量不同, 因此对该站点附近电动汽车提供服务的能力也不同。已知一台电动汽车的电池容量为 q , 能行驶的最大距离为 B , 充电站的容量为 Q_i , 换电站的容量为 Q_j , 汽车从充满电到现在行驶的距离为 D , 则服务可供性 ξ 为:

$$\xi = \left\lfloor \frac{Q}{(D/B)q} \right\rfloor \quad (11)$$

其中, Q 为 Q_i, Q_j 的总称; $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整。由此可知, 充换电站的容量越大, 其服务能力越大, 即能为该片区更多的车提供充换电服务。设该区域的电动汽车密度为 p , 则各个充换电站的服务半径:

$$r = \xi / p \quad (12)$$

当电动汽车充满电后行驶的距离 D 越小, 即剩余的电量越充足, 到达某一充换电站充电后, 该充换电站剩余容量能够覆盖的服务面积就越广。

1.2.4 服务效率 η

服务效率是指电动汽车到达充换电站时接受充换电服务的快慢。这里利用排队论 $M/M/s/\infty$ 模型^[16], 即设顾客单个到达, 相继到达时间间隔服从参数为 λ 的负指数分布, 系统中共有 s 个服务台 (服务台数根据交通网络里节点的度来决定), 每个服务台的服务时间相互独立, 且电动汽车接受充换电服务的时间服从参数为 μ 的负指数分布。

(1) 平衡条件下顾客数为 n 的概率:

$$p_n = \begin{cases} \frac{\rho^n}{n!} p_0 & n = 1, 2, \dots, s \\ \frac{\rho^n}{s! s^{n-s}} p_0 & n \geq s \end{cases} \quad (13)$$

$$p_0 = \sum_{n=0}^{s-1} \frac{\rho^n}{n!} + \frac{\rho^s}{s! (1 - \rho_s)} \quad (14)$$

(2) 顾客到达系统需要等待的概率:

$$c(s, \rho) = \sum_{n=s}^{\infty} p_n = \frac{\rho^s}{s! (1 - \rho_s)} p_0 \quad (15)$$

(3) 平稳时平均排队长:

$$L_q = \frac{c(s, \rho) \rho_s}{1 - \rho_s} \quad (16)$$

平均队长:

$$L_a = L_q + \rho \quad (17)$$

(4) 平均逗留时间:

$$W = L_a / \lambda \quad (18)$$

平均等待时间:

$$W_q = L_q / \lambda = W - 1 / \mu \quad (19)$$

其中, s 为服务台数量; λ 为顾客平均到达率; $\rho = \lambda / \mu$ 为系统的服务强度; $\rho_s = \rho / s$ 为充电设施利用率。对于接受充换电服务的电动汽车客户而言, 充换电站里的设施多、充换电时间短、平均队长短, 则顾客等待的时间短, 顾客前来接受服务的概率就大。因此本文的服务效率定义如下:

$$\eta = 1 - c(s, \rho) / \lambda \quad (20)$$

即顾客等待的概率越小, 则该充换电站的服务效率越高。

2 综合评估框架

以服务网特性分析与充换电服务网基础设施配置评估为目的, 包含服务网和配电网的各种指标, 建立如图 3 所示的综合评估框架。通过设置不同的充换电站配置方案 (其不同在于地理位置和容量上的差异), 接入配电网中进行综合评估。

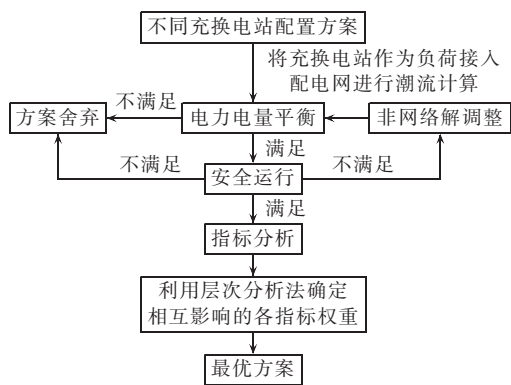


图 3 综合评估框架

Fig.3 Framework of comprehensive assessment

首先,考虑配电网的接纳能力,接纳能力主要通过候选对应节点可能接入的最大功率注入来体现,其中还包括根据潮流计算判断配置方案是否满足电压约束与支路潮流约束,一旦电压越限则表明电网不能接纳该位置或该容量的充换电站,应将该方案舍弃。但配电网本身可以升级或对其运行方式进行调整,如引入主动管理技术,从而使配置方案满足电网接纳能力。本文为简单起见,暂且不考虑这种通过配电网调整得到的类似于“非网络解”的充换电站配置方案。其次,对于满足电力电量平衡和安全运行的多种方案,进行指标分析。该指标包括配电网中的经济运行指标和服务网中的服务性能指标,通过计算可以得到该服务网的特性数据。由于这些指标从不同的方面对服务网展开分析,因此需要对所有指标进行一个综合评估,利用层次分析法^[17]确定相互影响的各指标权重,以服务能力最大化为目标,得到综合指标评估模型:

$$\max M_k = w_1 \sigma_k^* + w_2 f_k^* + w_3 \delta_k^* + w_4 \xi_k^* + w_5 \eta_k^* \quad (21)$$

其中, k 为候选方案序号; w_1 、 w_2 、 w_3 、 w_4 、 w_5 分别为各个指标的权重。

该综合评估指标考虑了网损 ϕ 、电池配送频率 f 、行驶可达性 δ 、服务可供性 ξ 和服务效率 η 的综合效果。令 $\sigma = 1/\phi$, 以与综合指标最大化优化趋势匹配, σ 越大, 即候选的配置方案网损越小。由于各个指标的数量级不同, 需要将其分别进行数量级归一化处理。以电池配送效率指标 f 的归一化为例, 采用下式进行数量级转化:

$$f_k^* = \frac{f_k - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} \quad (22)$$

其中, f_k 为第 k 个充换电基础设施配置方案的电池配送效率值, f_k^* 为 f_k 的归一化值; $f_{\min}$ 、 $f_{\max}$ 分别为所有候选方案的 f 指标最小值和最大值。其他指标归一化值同理可得。通过式(21)的综合指标评估模型可以筛选出较优方案。

本文提出评估框架的目的在于结合充换电服务

网和配电网的耦合关系所具有的特性,对候选规划方案进行性能计算评估。该框架融合多方面因素进行综合评估,使得筛选出的结果各个方面性能均衡。

3 算例分析

某地交通路网如图 4 所示,该网共有 45 个节点、65 条边。其中,最大度数为 5,是 15 号节点;度数为 4 的有 3 个节点,分别为 4、7、17 号节点;度数为 3 的有 31 个节点;度数为 2 的有 10 个节点。通过设置不同的充换电站容量和位置,设计了 3 个算例进行对比分析,从而可以得到该充换电服务网的整体评估情况。

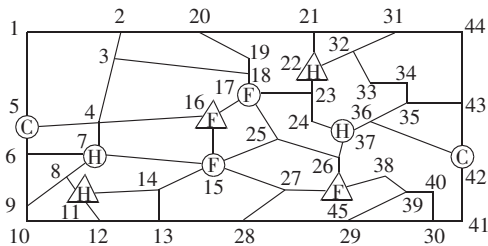


图 4 交通路网

Fig.4 Traffic network

算例 1 选择将换电站放置在 7 号和 37 号节点,将充电站放置在 15 号和 17 号节点,取同时充电率为 0.3,即接入配电网的充换电站负荷量为 30%。算例 2 充换电站的位置与算例 1 相同,但设定最恶劣情况,即接入配电网的充换电站负荷量为 100%。算例 3 中的集中型充电站设置情况与算例 1 相同,将换电站放置在 11 号和 22 号节点,快充站放置在 16 号和 45 号节点,接入配电网的充换电站负荷量为 30%。

配电网采用 54 节点系统,线路参数与负荷参数详见文献[18]。由式(1)~(5)可计算出配电网的最大接纳能力,即待加入充换电站的 18 号和 42 号节点最大可接入负荷为 6.32 MW,4、8、15、16、23、24、37、38 号节点最大可接入负荷分别为 3.8 MW、3.12 MW、4.2 MW、3.236 MW、2.544 MW、5.3 MW、0.91 MW、1.1 MW,如图 5 所示。

算例 1 中各个充换电站的负荷小于待接入负荷节点的最大可接入负荷量,且电压都在安全运行范围内,接入充换电站前的网损为 0.805 MW,而接入充换电站后的网损为 0.965 MW。

算例 2 中,根据式(6)可知,配电网 38 号节点接入的负荷量超过该节点最大可接入负荷,且有 2 个节点的电压超过了 5% 的阈值,其中越限最多的是 33 号节点,其电压偏移达到 -5.41%,如图 6 所示(电压为标幺值)。接入充换电站后的网损为 1.483 MW,由

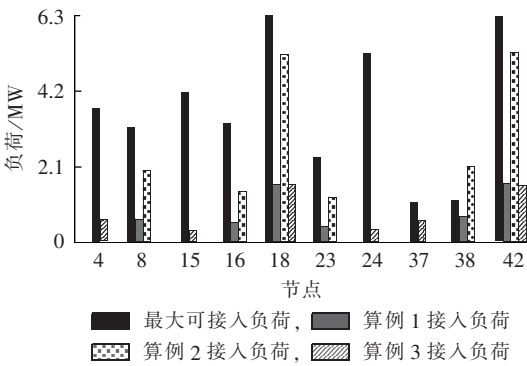


图 5 最大可接入负荷能力

Fig.5 Maximum load accommodation capability

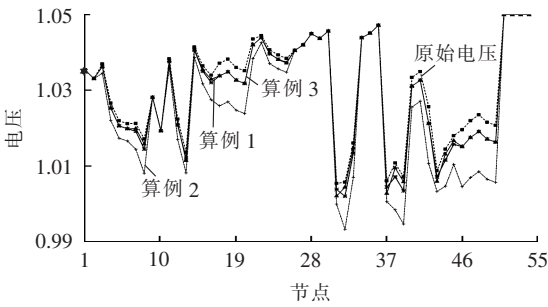


图 6 接入充换电站后的配电网电压分布情况

Fig.6 Node voltages of distribution network with charging/swapping stations

此可知算例 2 的充换电站接入配电网后不仅经济性低,而且影响配电网的安全稳定运行。因此,应当舍弃算例 2 中的充换电配置方案,不用进行服务性能指标计算。

算例 3 因其充换电站位置不同,接入的配电网位置也不同,其接入的负荷量在节点最大可接入负荷量范围内,且接入配电网后的电压也在安全运行的范畴内,网损为 0.953 MW。由此可知,算例 1 和算例 3 经计算都满足供电能力安全运行指标。

对于服务网服务性能指标计算,以比亚迪 E6 为例,已知其续航里程为 300 km,电池容量为 61.5 kW·h^[19]。考虑当前交通路网车流情况(见表 1),根据式(8)计算考虑阻塞的最短路径,并且取配送车在城市里的平均速度为 35 km/h,得到电池配送信息如表 2 所示。

假设该车从充满电出发到某一节点,共行驶了 200 km。且已知一组电池箱的额定电压是 80 V,电池组容量为 60 A·h^[20],则一个电池组的容量为 4.8 kW·h。单台充电机的充电功率为 96 kW^[21]。通过含阻塞的有效路径算法可以得到各个点到任意充换电站的行驶可达性如表 3 所示。

根据各个充换电站的容量设置情况(见表 4),由式(13)、(14)可以计算出充换电站的服务可供性和服务半径,其中调查收集到该区电动汽车的密度为 30 辆/km²,计算结果如表 5 所示。同时图 7 显示

表 1 道路车流量信息

Table 1 Information of vehicle flow

道路	单位路程车流量	道路	单位路程车流量	道路	单位路程车流量
1-2	15(6)	13-28	12(5)	27-45	10(4)
1-5	9(3)	14-15	5(3)	28-29	15(10)
2-3	3(1)	15-16	12(10)	29-30	10(3)
2-20	5(2)	15-27	6(1)	29-39	9(1)
3-4	4(2)	15-25	3(1)	30-40	6(4)
3-18	13(7)	16-17	7(4)	30-41	8(2)
4-5	6(5)	17-18	4(1)	31-32	6(2)
4-7	4(2)	17-25	13(9)	31-44	9(7)
4-16	10(3)	17-23	5(1)	32-33	5(4)
5-6	7(2)	18-19	4(2)	33-34	4(1)
6-7	14(6)	19-20	6(5)	34-35	4(2)
6-9	6(1)	20-21	11(7)	35-36	3(1)
7-8	2(1)	21-22	3(0)	35-43	4(1)
7-15	8(7)	21-31	8(3)	36-37	2(0)
8-9	8(3)	22-23	8(6)	36-42	14(10)
8-11	5(3)	22-32	3(1)	38-39	5(1)
9-10	3(2)	23-24	10(5)	38-45	9(2)
10-12	11(7)	24-37	7(2)	39-40	6(3)
11-12	7(4)	25-26	9(3)	41-42	6(2)
11-14	12(5)	26-37	3(1)	42-43	6(2)
12-13	9(5)	26-45	13(6)	43-44	14(5)
13-14	6(4)	27-28	7(2)		

注:单位路程流量指每 500 m 道路中汽车数量;A(B)中 A 代表该道路车流量上限,B 代表当前车流量。

表 2 电池配送计划

Table 2 Battery distribution plan

算例 1			算例 3		
起始-终点	最短路径	配送效率/(h·次 ⁻¹)	起始-终点	最短路径	配送效率/(h·次 ⁻¹)
5-7	5-4-7, 4.8 km	7.29	5-11	5-4-7-8-11, 7.9 km	4.43
42-37	42-43-35-36-37, 6.4 km	5.47	42-22	42-43-35-34-33-32-22, 11.5 km	3.04

表 3 行驶可达性

Table 3 Reachabilities

算例 1			算例 3		
充换电站	平均最短路径/km	行驶可达性/%	充换电站	平均最短路径/km	行驶可达性/%
5 号	12.80	87.2	5 号	12.80	87.2
7 号	9.82	90.2	11 号	12.39	87.6
15 号	8.54	91.5	16 号	11.05	88.9
17 号	10.96	89.0	22 号	11.89	88.1
37 号	10.14	89.9	42 号	13.68	86.3
42 号	13.68	86.3	45 号	11.47	88.5

了各个充换电站的服务覆盖面积,由图可知,充换电站的容量越大,能够服务的车辆也就越多,其覆盖的面积越广。

设定电动汽车按 Poisson 流^[16]到达,汽车充换电时间服从负指数分布,根据节点度的大小,设定度为 5 的充换电站平均每分钟到达 3 辆汽车,度为 4 的充换电站平均每分钟到达 2 辆汽车,度为 3 的充换电站

表 4 充换电站信息
Table 4 Information of charging/swapping stations

充换电站	充换电站设备	容量/(MW·h)
5 号集中型充电站	20 台充电机、10 台换电机、700 组电池	5.32
42 号集中型充电站	20 台充电机、10 台换电机、700 组电池	5.32
7 号换电站	8 台换电机、500 组电池	2.4
37 号换电站	6 台换电机、400 组电池	1.92
15 号快充站	16 台充电机	1.536
17 号快充站	14 台充电机	1.344
11 号换电站	6 台换电机、400 组电池	1.92
22 号换电站	6 台换电机、400 组电池	1.92
16 号快充站	12 台充电机	1.152
45 号快充站	12 台充电机	1.152

表 5 服务可供性
Table 5 Service availabilities

算例	站址	服务可供性/辆	服务半径/km
算例 1	5 号	121	4.03
	42 号	121	4.03
	7 号	55	1.83
	37 号	44	1.47
	15 号	35	1.167
	17 号	30	1
算例 2	11 号	43	1.92
	22 号	43	1.92
	16 号	26	1.152
	45 号	26	1.152

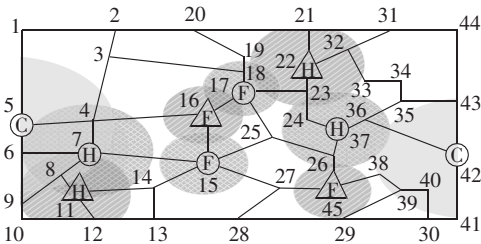


图 7 各个充换电站服务半径

Fig.7 Service radius of charging/swapping stations

平均每分钟到达 1 辆汽车。快充站的平均充电时间为 5 min,换电站的平均换电时间为 2 min。通过计算得到的各个充换电站服务效率指标如表 6 所示。综合各个充换电站平均顾客必须等候概率可得算例 1 的服务效率为 0.917,算例 3 的服务效率为 0.988。

由上可知,位于节点度数大的充换电站因该点交

表 6 服务效率指标
Table 6 Service efficiencies

项目	算例 1		算例 3	
	7 号换电站	15 号快充站	11 号换电站	16 号快充站
空闲的概率 p_0	0.0182	0.0000006	0.135	0.0067
平均队长 L_a	4.059	25.951	2.009	5.0042
平均排队长 L_q	0.059	10.951	0.009	0.0042
平均逗留时间 W/min	2.03	8.65	2.009	5.0042
平均等待时间 W_q/min	0.029	3.65	2.009	0.0042
汽车必须等待概率	0.059	0.73	0.018	0.0059

通繁忙、需要服务的车辆多且充电时间长,所以充换电设备的空闲概率低,电动汽车到达该充换电站后需要排队等候的概率大。所以为了降低排队概率、提高服务效率,需要增加充换电设施,或者对需要充换电的电动汽车进行控流处理。

对整个电动汽车充换电服务网,利用层次分析法计算各个指标,得到指标权重如表 7 所示。对用来计算指标权重的判断矩阵进行了一致性检验,一致性指标 $CI=0.095$,查找相应的平均随机一致性指标^[22]可以得到 $RI=1.12$,因此可以计算出一致性比例 $CR=CI/RI=0.0847<0.1$,即判断矩阵符合一致性要求,也即该指标的权重分析合理。

表 7 指标权重
Table 7 Index weights

第二层指标		第三层指标	
指标	指标权重	指标	指标权重
服务网	0.915	配送效率	0.106
		行驶可达性	0.356
		服务可供性	0.269
		服务效率	0.184
配电网	0.085	经济运行	0.085

由图 8 的指标权重分布图可知,配电网的性能指标和服务网的性能指标对整个服务网的影响程度各不相同,但就单个指标而言,行驶可达性和服务可供性 2 个指标占的比重最大,表明在充换电服务网的建设中,在满足配电网的接纳能力约束范围内,需要重点考虑电动汽车充换电的便捷程度以及充换电站容量等问题。

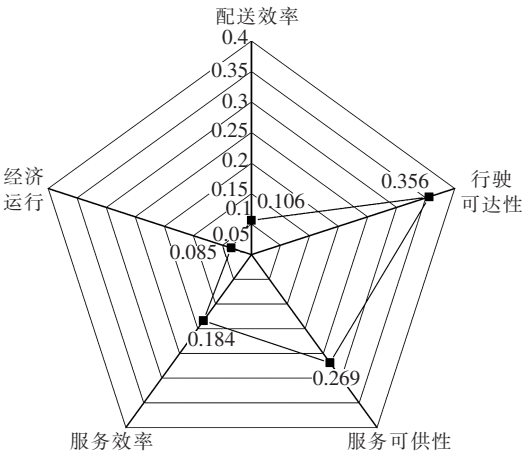


图 8 各指标权重分布图

Fig.8 Weight distribution of indexes

根据上文电池配送效率、服务可供性指标数值计算结果大小,取综合各项指标评估得分可得如表 8 所示结果。

由表 8 可知,3 个算例中,由于算例 2 的负荷超过了配电网的最大可接入负荷量,因此该方案直接被舍弃;余下的 2 个算例中,经过指标的综合性分

表 8 算例性能指标

Table 8 Calculated performances for cases

指标	算例 1	算例 2	算例 3
网损/MW	0.965	—	0.953
电池配送效率	6.38	—	3.735
行驶可达性	89.02%	—	87.77%
服务可供性	67.67	—	63.33
服务效率	0.917	—	0.988
综合指标	0.761	—	0.239

析,算例 1 的综合评分最高,即算例 1 中的充换电站配置方案使得服务网的服务能力更大。

为了对比分析本文评估框架的综合效果,采用文献[9]的方法计算本文算例,结果如表 9 所示。

表 9 基于文献[9]的网络服务能力
指标评估计算结果Table 9 Results of assessment based on
network service ability indexes of
reference[9] for cases

指标	算例 1 (5-7-15-17-37- 42 号充换电站)	算例 3 (5-11-16-22-42- 45 号充换电站)
最短路径/km	32	51.3
服务“容量”/(MW·h)	17.84	16.784
续航风险距离	0.119	0.206
续航能量密度	0.059 5	0.055 8
网络服务能力	0.5	0.271

文献[9]实质通过复杂网络理论提出网络服务能力概念,并建立相应指标进行评估决策。根据表 9 可以得知算例 1 比算例 3 的网络服务能力强,即根据文献[9]的方法,算例 1 的配置方案较优。该结果与本文的计算结果一致,充分反映了本文方法的有效性。此外,本文还考虑了配电网的接纳能力、道路阻塞、充电站类型等多方面因素进行综合评估。故而,本文的评估框架更加充实、全面。

综上,对于电动汽车充换电服务网的建设而言,选择交通流量大的节点进行充换电站建设必定能为更多车辆提供服务,但在现有的充换电设施数量上,整个充换电服务网的服务效率并不高。因此,需采纳加大快充站的充电功率、增加充换电设备数量、提升换电站的换电效率、加强配电网的供电能力等措施,使得整个充换电服务网络的服务能力得到提高,从而满足电动汽车快速发展的需求。

4 结论

电动汽车充换电服务网的研究具有重要意义,根据研究结果一方面可以选择较好的充换电站建设方案,促进电动汽车的快速增长;另一方面还可以充分调整电网配置,从而降低配电网的投资成本和损耗。本文考虑充换电服务网与配电网的交互关系,通过考虑配电网的接纳能力来初步分析服务网基础

设施配置方案的安全可行性,并且提出了配送效率、行驶可达性、服务可供性等系列指标来评估服务网的服务性能。通过 3 个不同容量、位置的充换电站设置方案的计算,以及与已有方法的对比分析,验证了该综合指标评估框架的可行性与有效性。综上,通过配电网接纳能力约束和服务网的服务性能指标分析,可以为服务网提供初步规划方案的快速筛选,并且能为已有服务网进行评估,从而更好地指导电动汽车充换电服务网的发展。

参考文献:

- [1] CHEN Changsong, DUAN Shanxu. Microgrid economic operation considering plugin hybrid electric vehicles integration [J]. Clean Energy, 2015, 3(2): 221-231.
- [2] WANG Lei, JR COLLINS E G, LI Hui. Optimal design and real-time control for energy management in electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(4): 1419-1429.
- [3] MULLAN J, HARRIES D, BRAUNL T, et al. The technical, economic and commercial viability of the vehicle-to-grid concept[J]. Energy Policy, 2012, 48: 394-406.
- [4] 苏粟, 孙晓明, 罗敏, 等. 面向居于配电网的电动汽车充电控制系统[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 19-23.
SU Su, SUN Xiaoming, LUO Min, et al. Charging control system of electric vehicles orientating to local distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 19-23.
- [5] 刘俊勇, 向月, 杨威, 等. 充换电服务网络及其与配电网协同规划关键技术分析与研究[J]. 电力建设, 2015, 36(7): 47-55.
LIU Junyong, XIANG Yue, YANG Wei, et al. Key technology analysis and study for charging and swapping service network and its coordinated planning with distribution network[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(7): 47-55.
- [6] ADOMATO B, PATIL R, FILIPI Z. Characterizing naturalistic driving patterns for plug-in hybrid electric vehicle analysis[C]// IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Dearborn, Michigan, USA: IEEE, 2009: 655-660.
- [7] 刘群峰. 电动汽车充换电服务网络规划研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
LIU Qunfeng. Research on the electric vehicle charging service network planning[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [8] XU Xiaohui, YAO Liangzhong, ZENG Pingliang, et al. Architecture and performance analysis of a smart battery charging and swapping operation service network for electric vehicles in China[J]. Clean Energy, 2015, 3(2): 259-268.
- [9] 薛飞, 雷宪章, 张野彪, 等. 基于复杂网络的电动汽车智能充换电服务网络评估方法[J]. 电网技术, 2012, 36(9): 20-24.
XUE Fei, LEI Xianzhang, ZHANG Yebiao, et al. A complex network-based method to evaluate smart charging and swapping network for electric vehicles[J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 20-24.
- [10] 郑竞宏, 戴梦婷, 张曼, 等. 住宅区式电动汽车充电站负荷集聚特性及其建模[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(22): 32-38.
ZHENG Jinghong, DAI Mengting, ZHANG Man, et al. Load cluster characteristic and modeling of EV charging station in residential district[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(22):

- 32-38.
- [11] 李俄收,吴文民. 电动汽车蓄电池充电对电力系统的影响及对策[J]. 华东电力,2010,38(1):109-113.
- LI Eshou,WU Wenmin. Influence and countermeasure of electric vehicle battery charging to power systems[J]. East China Electric Power,2010,38(1):109-113.
- [12] 杨秀菊,白晓清,李佩杰,等. 电动汽车规模化接入配电网的充电优化[J]. 电力自动化设备,2015,35(6):31-36.
- YANG Xiuju,BAI Xiaoqing,LI Peijie,et al. Charging optimization of massive electric vehicles in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(6):31-36.
- [13] 郭建龙,文福拴. 电动汽车充电对电力系统的影响及其对策[J]. 电力自动化设备,2016,35(6):1-9.
- GUO Jianlong,WEN Fushuan. Impact of electric vehicle charging on power system and relevant countermeasures [J]. Electric Power Automation Equipment,2016,35(6):1-9.
- [14] XIANG Yue,LIU Junyong,TANG Shuoya,et al. A traffic flow based planning strategy for optimal siting and sizing of charging stations[C]//IEEE PES 2015 Asia-Pacific Power and Energy Conference. Brisbane,Australia:IEEE,2015:1-5.
- [15] 何大韧,刘宗华,汪秉宏. 复杂系统与复杂网络[M]. 北京:高等教育出版社,2009:210-211.
- [16] 胡运权,郭耀煌. 运筹学教程[M]. 北京:清华大学出版社,2007:306-327.
- [17] 周黎莎,于新华. 基于网络层次分析法的电力客户满意度的模糊综合评价[J]. 电网技术,2009,33(17):191-197.
- ZHOU Lisha,YU Xinhua. Fuzzy comprehensive evaluation of power customer satisfaction based on analytic network process [J]. Power System Technology,2009,33(17):191-197.
- [18] 艾圣芳,林湘宁,万云飞,等. 考虑 V2G 模式的含多个电动汽车充电站有源配电网规划研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(34):122-128.
- AI Shengfang,LIN Xiangning,WAN Yuanfei,et al. Study of the active distribution network planning considering multiple electric vehicle charging stations participating in V2G application[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(34):122-128.
- [19] 国仁. 国产电动汽车与特斯拉差多少?[EB/OL]. (2014-02-27) [2016-02-19]. <http://zhangguoren.baijia.baidu.com/article/5426>.
- [20] 张伟华. 电动汽车充换电服务网络构成研究[D]. 北京:华北电力大学,2012.
- ZHANG Weihua. Electric vehicle charging and replacement of the battery service network constitute research[D]. Beijing:North China Electric Power University,2012.
- [21] 冯亮. 电动汽车充电站规划研究[D]. 天津:天津大学,2013.
- FENG Liang. Electric vehicle charging station planning [D]. Tianjin:Tianjin University,2013.
- [22] 刘新宪,朱道立. 选择与判断——AHP 决策[M]. 上海:上海科学普及出版社,1990:25.

作者简介:



赵胜霞

赵胜霞(1991—),女,四川广元人,硕士研究生,主要研究方向为电动汽车与电力系统交互影响分析(E-mail:shereezhao@126.com);

刘俊勇(1963—),男,四川成都人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力市场、电力系统稳定与控制、分布式发电及智能电网(E-mail:liujy@scu.edu.cn);

向月(1987—),男,重庆人,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统规划与优化运行、智能电网(E-mail:eeexxy@126.com)。

Analysis and assessment considering accommodation capability of distribution network for infrastructure deployment of EV charging/swapping service network

ZHAO Shengxia,LIU Junyong,XIANG Yue,HUANG Yuan

(School of Electrical Engineering and Information,Sichuan University,Chengdu 610065,China)

Abstract: Various assessment indexes focusing on the service performances of EV(Electric Vehicle) charging/swapping service network are established to analyze and assess its infrastructure deployment. The interaction between service network and distribution network is fully considered and a maximum accommodation capacity model of distribution network is built for the preliminary selection of infrastructure deployment plans. Different service performance indexes,such as reachability,availability,efficiency,etc.,are developed to effectively assess the feasible plans. The optimal plan is determined according to the multi-factor comprehensive analysis. The deployment plan of charging/swapping stations is simulated and calculated for different capacities and locations. The feasibility and effectiveness of the proposed indexes are verified by the comparison with an existing method. The proposed method can not only evaluate the existing service network but also provide a basis for the fast determination of capacity and location for EV charging/swapping stations.

Key words: electric vehicles; charging/swapping service network; service performance index; accommodation capability