

DOI: 10.7667/PSPC170285

# 电动汽车充电站选址对电压稳定影响的研究

杨田<sup>1,2</sup>, 刘晓明<sup>1,3</sup>, 吴其<sup>1,4</sup>, 周璐<sup>5</sup>

(1. 沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870; 2. 辽宁省节能监察中心, 辽宁 沈阳 110004;  
3. 天津工业大学天津市电能新技术重点实验室, 天津 300387; 4. 特变电工(沈阳)高压开关研究所,  
辽宁 沈阳 110025; 5. 辽宁科技学院电气与信息工程学院, 辽宁 本溪 117004)

**摘要:** 为研究电动汽车充电站选址对电压稳定性的影响, 提出一种基于电气介数的分析方法。通过定量分析充电站接入高电气介数和低电气介数节点后系统电压分布的变化, 结合基于 PV 曲线的电压稳定裕度指标探讨了电气介数对系统电压稳定性的影响。研究发现节点的电气介数越大其消纳新增负荷能力越强, 增加等量负荷的条件下, 电气介数越大的节点承受电压变化的范围更大, 系统的电压稳定性越好。仿真结果表明, 充电站选址于高介数节点有助于消纳新增的充电负荷, 提升全网的负荷水平, 维持系统的电压稳定, 降低发生电压崩溃的可能。

**关键词:** 电压稳定; 电动汽车; 充电站选址; 电气介数; 复杂网络理论

## Research on impacts of electric vehicle charging station location on voltage stability

YANG Tian<sup>1,2</sup>, LIU Xiaoming<sup>1,3</sup>, WU Qi<sup>1,4</sup>, ZHOU Lu<sup>5</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;  
2. Energy-Saving Monitoring Center of Liaoning Province, Shenyang 110004, China; 3. Tianjin Key Laboratory of  
Advanced Electrical Engineering and Energy Technology, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;  
4. TBEA (Shenyang) High Voltage Switchgear Research Institution, Shenyang 110025, China; 5. School of Electrical  
Engineering and Information Technology, Liaoning Institute of Science and Technology, Benxi 117004, China)

**Abstract:** In order to research the impact of Electric Vehicle (EV) charging station location on voltage stability of power grid, an analysis method based on electric betweenness is proposed. The variation of system voltage distribution after respectively connecting the high electric betweenness and low electric betweenness nodes into EV charging station is quantitatively analyzed, and then the impacts of electric betweenness on voltage stability are discussed based on voltage stability margin index of PV curve. It finds that node electric betweenness is in direct proportion to its capacity of absorbing new loads, the nodes with higher electric betweenness can bear greater range of voltage variations when the same quantity of load is increased, and the system voltage stability is much better. Simulation results show that EV charging station locating on higher electric betweenness node is helpful for absorbing new charging load, enhancing load level of all level, maintaining system voltage stability, and reducing the risk of voltage collapse.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51337001 and 51377106).

**Key words:** voltage stability; electric vehicle (EV); charging station location; electric betweenness; complex network theory

## 0 引言

随着以石油为代表的化石能源的日渐枯竭, 发展电动汽车产业已成为缓解能源和环境压力, 实现可持续发展的重要举措<sup>[1]</sup>。随着电动汽车产业的快

速发展, 可以预见电动汽车接入电网(vehicle to grid, V2G)的规模将不断扩大。

建设充电装置是规模化 V2G 的基础, 充电装置分为集中建设的充电站和分布式的充电桩。充电站效率高, 充电速度快; 充电桩安装简便, 投资少<sup>[2-4]</sup>。对于电力系统, 两种充电模式都可视为节点(母线)在一段时间内负荷需求带有随机性的变化。充电站的功率更大, 因而负荷需求波动更剧烈, 对系统稳

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51337001); 国家自然科学基金项目(51377106)

定的冲击更大, 本文将充电站作为主要研究对象。

电力系统中发电机产生的无功功率和负荷所消耗的无功功率能达到平衡, 且平衡点具有维持各负荷节点电压的能力, 则可视作系统电压稳定; 一旦平衡被打破, 就会引起系统中某些节点的电压下降, 严重情况下就会导致电压崩溃<sup>[5]</sup>。随着电动汽车的渗透率的快速增长, 电力系统不仅需要建设更多的充电装置以满足负荷增长的需求, 更应重视电动汽车的充放电行为在时间与空间上带有随机性与不确定性。这种负荷不确定性增长会对系统负荷平衡产生巨大影响, 进而威胁系统电压的稳定。

目前在充电站选址研究中普遍采取综合考虑成本最优化、交通便捷、网损最低等因素的多目标优化方法<sup>[6]</sup>, 却忽视了充电站选址对负荷分布与电压稳定的影响。由于系统各节点的输电容量裕度是不一致的, 导致增加等量负荷条件下, 裕度大的节点电压会保持稳定, 裕度低的节点则可能过载而引发电压失稳<sup>[7]</sup>, 因此在充电站规划选址问题中, 需要合理地选择输电容量裕度大的节点接入, 以避免负荷过载, 有助于系统的稳定运行。

节点的输电容量裕度由电网的拓扑结构与节点连接的线路的输电能力决定<sup>[8]</sup>, 电气介数是量化节点和线路在全网潮流传输中所起的作用的指标, 节点输电容量裕度与电气介数成正比。由于电气介数可以作为量化节点或线路的输电容量裕度的指标, 已在识别关键线路等领域得到广泛应用<sup>[9]</sup>。

为研究电动汽车充电站选址对电力系统电压稳定性的影响, 本文提出一种基于电气介数的分析方法。首先, 建立充电站负荷模型; 其次, 计算系统各负荷节点的电气介数, 分别选择高介数、低介数和随机节点作为选址方案, 利用连续潮流方法(Continuation Power Flow, CPF)得到各选址方案的电压稳定指数, 量化充电站负荷模型接入节点后对系统电压稳定性的影响; 然后, 分析充电负荷分布在高(和低)介数节点电压稳定指数差异, 评估充电站选址对系统电压稳定性的影响。以 IEEE57 节点系统和 IEEE118 节点系统为仿真算例, 验证了方法的有效性。

## 1 电动汽车充电站负荷模型

电动汽车在电网中某一节点充电会增加该处的负荷需求, 因此电动汽车充电站模型实际是一种负荷模型, 取决于电动汽车的数量和充电方式等因素。电动汽车的充电方式由电池特性决定, 目前主流的充电方式为“恒流-恒压”两段式, 即电动汽车电池首先以大小恒定的电流进行充电, 直至电压达到某

一标准, 然后在此电压下进行恒电压充电, 这种方式按照充电时间不同可以分为大功率的快速充电和低功率的慢速充电。表 1 为几种典型的插电式混合动力汽车(Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV)和纯电动汽车(Blade Electric Vehicle, BEV)的电池充电特性<sup>[10]</sup>。表 1 中, \*\*EVX 中 X 表示某类电动汽车电池容量所支持的最大行驶里程(英里), 例如 BEV80 表示最大行驶里程为 80 英里的纯电动汽车。

表 1 电动汽车充电特性

Table 1 Charging load characteristics of EVs

	电动汽车类型			
	PHEV3	PHEV4	PHEV6	BEV80
电池容量/kWh	8	17	18	48
快速充电功率/kW	8	17	18	48
慢速充电功率/kW	1.6	3.4	3.6	9.6

设在电网某一节点同时充电的电动汽车数量为  $N$ (辆), 其中 PHEV30、40、60 和 BEV80 的比例分别为  $a_1\%$ 、 $a_2\%$ 、 $a_3\%$ 、 $a_4\%$ , 采取快速充电方式的占 95%, 其余采取慢速充电。式中,  $N$  等于区域内的电动汽车保有量  $N_{ev}$ (辆)与该时刻充电比例  $\eta$  之积<sup>[11]</sup>。

$$N = \eta \times N_{ev} \quad (1)$$

电动汽车保有量  $N_{ev}$  与电网负荷峰值  $P_{max}$ (kW) 成正比:

$$N_{ev} = 0.4176 P_{max} \quad (2)$$

此时该节点的充电功率为

$$P = \frac{N \times (7.68a_1 + 16.32a_2 + 17.28a_3 + 46.08a_4)}{100} \quad (3)$$

## 2 电压稳定裕度指标

本文提出一种电压稳定裕度指标, 用于量化研究充电站接入系统后负荷分布发生变化对电压稳定性的影响程度。指标利用 PV 曲线计算, PV 曲线的极值点代表了系统的最大负载, 相当于潮流计算的雅可比矩阵的奇异解, 操作点和极值点间的相对距离为节点的电压稳定裕度指标。

### 2.1 利用连续潮流法计算 PV 曲线

连续潮流法是分析静态电压稳定性的工具<sup>[12-13]</sup>, 它利用在潮流方程的基础上引入一个负荷增长系数来克服雅可比矩阵奇异, 解决了当参数改变接近极限值时, 潮流方程出现鞍结分岔点的问题。这一方法是从初始的稳定点开始, 沿相应的负荷变化方向对下一工作点进行估计、校正和参数化, 直至得到全过程的 PV 曲线。连续潮流方程为<sup>[13]</sup>

$$f(x) - \lambda b = 0 \quad (4)$$

式中:  $x$  为待求变量;  $\lambda$  为负荷增长比例;  $b$  为负荷

的增长模式。局部参数法的方程为

$$\delta = \delta_0, \delta \in (V, \lambda) \quad (5)$$

式中:  $V$  为母线 PV 曲线上特定点的变量值;  $\delta$  为局部变化较大的变量;  $\delta_0$  为  $\delta$  的预测值。在 PV 曲线平坦部分, 应选取  $\delta$  为局部参数; 在 PV 曲线鼻尖附近, 应选取  $V$  为局部参数。式(4)和式(5)组成含局部参数方程的扩展连续潮流方程, 在增加 1 个方程的同时增加了 1 个变量, 可通过形成扩展雅可比矩阵运用牛顿-拉夫逊法等求解。图 1 为利用连续潮流法得到的 IEEE9 节点系统 PV 曲线。

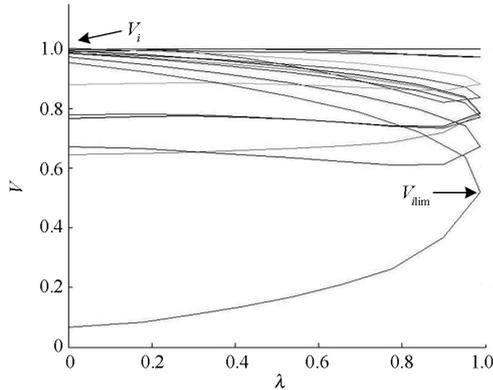


图 1 IEEE9 系统 PV 曲线图  
Fig. 1 IEEE9 system PV curve

图 1 中纵轴为各节点电压幅值  $V$ , 横轴为在某个操作点下的负荷需求比例  $\lambda$ 。

### 2.2 电压稳定裕度指标

如图 1 所示,  $V_i$  为节点  $i$  初始电压,  $V_{lim}$  为该节点静态极限电压, 各节点的极限电压不同。电压稳定裕度指标是经过归一化后的  $V_i$  与  $V_{lim}$  的相对差距。指标量化的是节点负荷增长过程中的电压稳定程度, 便于对各节点电压稳定程度进行比较, 节点的电压稳定裕度指标为

$$f(V_i) = \left| \frac{V_{lim} - V_i}{V_i} \right|, \quad i=1, 2, 3, \dots, n \quad (6)$$

式中,  $n$  为非联络节点的 PQ 节点数目。 $f(V_i)$  的值越大代表该节点在负荷不断增长过程中, 节点承受电压变化的范围较大, 即其电压稳定裕度较大; 电压稳定性越好, 发生电压崩溃的可能性较小。对于  $f(V_i)$  较小的节点发生电压崩溃的可能性较大。整个系统的电压稳定性指标为各节点  $f(V_i)$  之和, 即

$$F(V) = \sum_{i=1}^n \left| \frac{V_{lim} - V_i}{V_i} \right|, \quad i=1, 2, 3, \dots, n \quad (7)$$

$F(V)$  的值越大代表系统的电压稳定性越好, 反

之则说明稳定性越差。

## 3 基于电气介数的电压稳定性分析方法

### 3.1 充电站选址对电压分布的影响

充电站会改变系统负荷分布, 进而改变系统电压分布,  $f(V_i)$  和系统  $F(V)$  也随之发生变化。选择 IEEE9 节点系统作为算例, 系统的负荷峰值为 315 000 kVA。由式(2)可知, 该区域内电动汽车保有量为  $N_{ev}=131\,544$ , 假设该区域内只有一处充电站, 某时刻充电比例  $\eta=1\%$ , 该时段汽车充电数量  $N=1315$ , 其中  $a_1=65$ 、 $a_2=13$ 、 $a_3=17$ 、 $a_4=5$ , 采取快速充电方式的占 95%, 其余慢速充电, 则该时段充电功率为  $P=16.25$  MVA。

系统 5、7、9 号节点为负载节点, 分别选择这 3 个节点作为充电站的选址, 即将充电功率  $P$  作为负荷增量分别加载至每个节点, 计算接入充电站后的  $f(V_i)$ , 图 2 横轴为节点的编号, 纵轴为利用式(6)、式(7)得到的三种选址方案下的  $f(V_i)$ 。

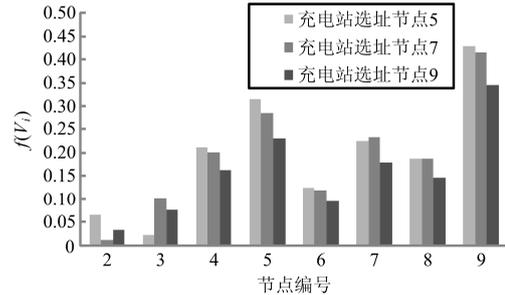


图 2 节点负荷变化后的各节点  $f(V_i)$   
Fig. 2 Node  $f(V_i)$  after node load changing

如图 2 所示, 对整个系统而言, 每次增加负荷是等量的, 但选址不同造成了整个系统负荷分布的不同, 每次增加负荷后的各节点  $f(V_i)$  并不相同, 系统  $F(V)$  也发生变化, 表 2 为在不同负荷分布下的  $F(V)$ 。

表 2 不同负荷分布下的  $F(V)$

Table 2 $F(V)$ at different load distribution	
充电站选址方案	$F(V)$
充电站选址节点 5	1.4916
充电站选址节点 7	1.4385
充电站选址节点 9	1.1609

### 3.2 电气介数

将电网的传输容量比作一个盛水的木桶的容量, 潮流水平可以视为桶里的水, 水量超过了桶的容量就会溢出, 即发生过载。如表 2 所示, 增加等量的充电负荷,  $F(V)$  最小值为 1.1609, 出现在选址在 9 号节点的情况下, 说明该选址方案下系统电压稳定性最差, 发生电压崩溃的可能性最大。9 号节

点就是系统的“短板”，“短板”决定了水桶的容量。合理地倾斜木桶，“扬长避短”，就能够装更多的水。在电力系统中合理地分配负载，降低传输容量裕度最小线路的负载水平可以避免过载，有助于系统电压稳定<sup>[7,14]</sup>。

为避免过载，充电站应优先选址于传输容量裕度大的节点上，因此需要分析各节点的传输容量裕度。节点的传输容量裕度由网络的拓扑结构和线路阻抗等因素决定，本文使用电气介数作为量化传输容量裕度的指标。电气介数借鉴了复杂网络理论中“介数”的概念。复杂网络理论对介数的定义为<sup>[15]</sup>：复杂网络中，节点间的信息或能量总是通过节点间加权最短路径或最有效路径传播，介数为节点或边通过的最短路径或最有效路径次数，介数量化了该节点或边在信息或能量传播过程中的作用。

电气介数通过潮流方程来计算支路占每对“发电-负荷”节点间产生的“潮流元”的利用份额，量化了各支路在全网潮流传播中所起的作用，其物理背景更易于接受，结果更符合电力系统实际<sup>[16]</sup>。

电气介数分为线路电气介数和节点电气介数，线路的电气介数计算方法如下：

- (1) 随机选择一个发电节点和一个负载节点，并分别注入一对大小相等、方向相反的有功功率；
- (2) 计算注入功率后各线路上传输的有功功率；
- (3) 所有“发电-负荷”节点对在某一线路上传输的有功功率之和就是线路的电气介数，表征在潮流传输中的重要程度。

线路的电气介数计算公式如式(8)。

$$B_c(m, n) = \left| \sum_{i \in G, j \in L} w_{ij} P_{mn}(i, j) \right| \quad (8)$$

式中： $m$ 、 $n$ 是线路两端的节点； $G$ 、 $L$ 分别是发电节点集合和负荷节点集合； $P_{mn}(i, j)$ 表示发电节点  $i$  和负荷节点  $j$ ，分别注入单位有功功率  $P_i=1$  和  $P_j=-1$  时线路  $m-n$  上产生的有功功率； $w_{ij}$ 是从发电节点  $i$  向负荷节点  $j$  传输电能大小的权重， $w_{ij} = \min(S_i, S_j)$ ，其中  $S_i$ 是节点  $i$  的额定发电容量， $S_j$ 是节点  $j$  的最大负荷需求。

由式(7)可以得到节点电气介数公式如式(9)。

$$B_c(k) = \begin{cases} \frac{1}{2} \sum_{l \in F(k)} B_c(k, l) & k \notin L, k \in G \\ \frac{1}{2} \left( \sum_{l \in F(k)} B_c(k, l) + \sum_{i \in L} w_{ki} \right) & k \in G \\ \frac{1}{2} \left( \sum_{l \in F(k)} B_c(k, l) + \sum_{i \in G} w_{ik} \right) & k \in L \end{cases} \quad (9)$$

式中： $G$ 为发电节点； $L$ 为负荷节点和联络节点集； $F(k)$ 是与节点  $k$  连接的边的集合。表3为IEEE9节点系统按式(9)计算的各节点电气介数，并依据升序排列的结果。

表3 IEEE9节点系统各节点电气介数

Table 3 Node electric betweenness of IEEE9 bus system

序号	节点编号	电气介数	序号	节点编号	电气介数
1	1	97.08	6	5	907.33
2	4	347.25	7	6	911
3	9	541.63	8	2	1326.3
4	7	607.32	9	8	1917.63
5	3	836.22			

表3中5、7、9号节点为负载节点，节点5电气介数最大。由表2可知：充电站选址在节点5时系统的  $F(V)$ 最大；节点9电气介数最小，选址在节点9时系统的  $F(V)$ 最小。

### 3.3 电压稳定性分析方法

为了验证上述结果是否反映了电气介数会影响系统的  $F(V)$ ，或仅是个例。本文提出一种分析方法：通过分别将充电负荷作为增量加载至电气介数排名最大的  $n$  个、最小的  $n$  个和随机选择的  $n$  个节点上，计算三种选址方案的  $F(V)$ ，研究电气介数对系统电压稳定性产生的影响。图3为该分析方法流程图。

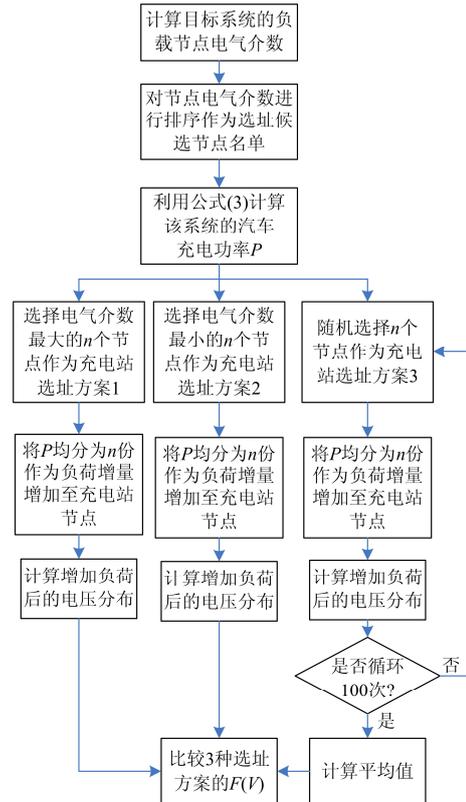


图3 电压稳定分析方法流程图

Fig. 3 Flow chart of voltage stability analysis

## 4 算例分析

以 IEEE57 节点系统和 IEEE118 节点系统为仿真算例, 利用图 3 的分析流程, 研究充电站选址对目标系统电压稳定性的影响问题。

### 4.1 IEEE57 节点系统

系统共有 35 个负载节点, 15 个联络节点。该系统的负荷峰值为 428 800 kVA, 由式(2)可知, 该区域内电动汽车保有量为  $N_{ev}=179\ 067$  辆。设某时段充电比例  $\eta=1\%$ , 该时段汽车充电数量  $N=1791$  辆, 其中  $a_1=65$ 、 $a_2=13$ 、 $a_3=17$ 、 $a_4=5$ , 则此时充电功率为  $P=2212.4$  kVA。

按照式(8)和式(9)计算 IEEE57 系统各负载节点的电气介数并排序。表 4 为负载节点按照电气介数升序排列的结果。

表 4 IEEE57 节点系统负载节点电气介数

Table 4 Node electric betweenness of IEEE57 bus system

序号	节点编号	电气介数	序号	节点编号	电气介数
1	20	231.63	19	27	4040.61
2	33	384.28	20	41	5308.12
3	30	591.86	21	52	6363.1
4	31	612.79	22	28	6440.52
5	19	908.42	23	47	7406.51
6	57	977.88	24	18	7439.68
7	32	1628.4	25	49	7559.02
8	42	1762.29	26	10	7874.72
9	54	2133.36	27	5	12 478.05
10	35	2286.09	28	38	15 333.77
11	50	2419.3	29	29	16 611.6
12	56	2631.55	30	44	19 194.51
13	25	2720.95	31	14	37 076.34
14	51	3213.03	32	16	41 344.93
15	55	3267.14	33	17	47 146.77
16	43	3540.84	34	13	59 150.07
17	23	3742.53	35	15	96 031.07
18	53	3770.73			

按照图 3 所示流程, 设  $n=10$ , 即分别选择表 4 中电气介数排名最大的 10 个节点(即节点 20、33、30、31、19、57、32、42、54、35)、最小的 10 个节点(即节点 15、13、17、16、14、44、29、38、5、10)和随机挑选的 10 个节点, 作为 3 种充电站选址方案, 分别将充电功率  $P$  平均增加在各方案选择的 10 个节点上, 计算三种方案的电压分布和  $F(V)$ 。利用同样的方式计算当  $n=5$  时三种方案的电压分布和  $F(V)$ 。表 5 为三种选址方案的  $F(V)$ 。

表 5 不同负荷分布下的  $F(V)$

Table 5  $F(V)$  at different load distribution

充电站选址方案	$n=10$ 时, $F(V)$	$n=5$ 时, $F(V)$
电气介数最小的 $n$ 个节点	5.6671	4.5934
电气介数最大的 $n$ 个节点	6.8681	6.7859
随机选择的 $n$ 个节点	6.0677	6.3164

### 4.2 IEEE118 节点系统

IEEE118 节点系统共有 118 个节点, 其中 54 个负载节点, 19 个联络节点。该系统的负荷峰值为 1433 MVA, 由式(2)可知, 该区域内电动汽车保有量为  $N_{ev}=598\ 421$  辆。设某时段充电比例  $\eta=1\%$ , 该时段汽车充电数量  $N=5984$  辆, 其中  $a_1=65$ 、 $a_2=13$ 、 $a_3=17$ 、 $a_4=5$ , 则此时充电功率为  $P=73\ 934.9$  kVA。

按照式(8)和式(9)计算得到的系统各负载节点的电气介数, 表 6 为负载节点按电气介数升序排列的结果。

表 6 IEEE118 节点系统负载节点电气介数

Table 6 Node electric betweenness of IEEE118 bus system

序号	节点编号	电气介数 ( $\times 10^4$ )	序号	节点编号	电气介数 ( $\times 10^4$ )	序号	节点编号	电气介数 ( $\times 10^4$ )
1	114	25.12	19	86	10.16	37	106	24.13
2	97	26.24	20	79	11.14	38	51	24.41
3	2	37.01	21	57	12.04	39	22	25.07
4	117	42.36	22	67	12.72	40	39	25.2
5	53	43.81	23	78	13.11	41	101	25.49
6	14	46.72	24	48	13.27	42	82	25.92
7	115	47.67	25	95	13.97	43	102	29.07
8	33	47.89	26	20	14.52	44	47	30.56
9	16	48.12	27	1	15.67	45	45	34.19
10	43	49.24	28	28	16.01	46	93	37.61
11	118	54.76	29	96	16.81	47	88	43.57
12	58	57.7	30	109	17.61	48	83	46.5
13	29	66.52	31	7	17.95	49	60	49.39
14	35	68.22	32	50	19.47	50	75	54.83
15	41	79.87	33	108	19.77	51	11	66.32
16	13	79.98	34	21	21.49	52	94	70.02
17	98	80.02	35	3	22.27	53	23	78.81
18	52	89.07	36	84	23.75	54	17	84.23

按照图 3 所示流程, 设  $n=10$ , 即分别选择表 6 中介数排名最大的 10 个节点(即节点 114、97、2、117、53、14、115、33、16、43)、最小的 10 个节点(即节点 17、23、94、11、75、60、83、88、93、45)和随机挑选的 10 个节点, 作为三种充电站选址

方案, 分别将充电功率  $P$  平均增加在各方案的 10 个节点上, 计算三种方案的电压分布和  $F(V)$ 。利用同样的方式, 计算当  $n=5$  时三种方案的电压分布和  $F(V)$ 。表 7 为三种选址方案的  $F(V)$ 。

表 7 不同负荷分布下的  $F(V)$ Table 7  $F(V)$  at different load distribution

充电站选址方案	$n=10$ 时, $F(V)$	$n=5$ 时, $F(V)$
电气介数最小的 $n$ 个节点	3.5507	3.5072
电气介数最大的 $n$ 个节点	3.7653	3.6508
随机选择的 $n$ 个节点	3.6437	3.5481

### 4.3 结果分析

由表 5 和表 7 可知, 当  $n=10$  或  $n=5$  时, 其  $F(V)$  的分布是相同的, 即充电站选址于电气介数最大的 10 个或 5 个节点上时, 其  $F(V)$  分别是各方案中最大的; 当充电站选址于电气介数最小的 10 个或 5 个节点上时, 其  $F(V)$  分别是各方案中的最小的; 充电站选址于随机选择的节点时, 其  $F(V)$  介于两者之间。计算结果表明, 新增等量负荷的条件下, 节点的电气介数越大其  $F(V)$  越大, 即系统承受电压变化的范围较大, 则电压稳定性越好; 反之, 当节点的电气介数越小, 随着负荷的增加, 系统承受电压变化的范围较小, 电压失稳的可能性更大。

仿真结果证明, 相较于低电气介数节点, 高电气介数节点对负荷的增长具有更好的鲁棒性。原因在于高电气介数节点的输电容量裕度更大, 消纳新增负荷能力更强。电网中电气介数低的节点是影响负荷水平的“短板”, 这种结构上的缺陷会降低电网的实际输电能力。仿真结果证明, 有针对性地进行充电站选址, 通过合理调整充电负荷的分布可以实现“扬长避短”的目的, 有助于提高系统电压稳定性水平。因此在充电站选址中, 应该将候选节点的电气介数作为选址的重要前提。

## 5 结论

充电站选址于不同节点会导致负荷分布发生变化, 进而对系统电压稳定造成不同程度的影响。针对这一问题, 本文定量分析了充电站接入高电气介数和低电气介数节点后系统电压分布的变化, 研究了充电站选址对系统电压稳定性的影响。研究发现, 在增加等量充电负荷的条件下, 选址节点的电气介数越大, 其承受电压变化的范围较大, 电压稳定指数  $F(V)$  较大, 即系统电压稳定性受到的影响越小。反之, 节点的电气介数越小, 在增加等量负荷的条件下, 系统电压稳定指数  $F(V)$  越小, 即电压稳

定性较差。研究结果表明, 充电站选址于高介数节点有助于消纳充电负荷, 在提升全网的负载水平的前提下, 可以更好地维持系统的电压稳定, 降低发生电压崩溃的可能性。

### 参考文献

- [1] 张祥文, 江星星, 王龙, 等. 配电网接纳电动汽车能力评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 14-20.  
ZHANG Xiangwen, JIANG Xingxing, WANG Long, et al. Research on assessment methods of distribution network's ability of admitting electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 14-20.
- [2] WANG Guibin. Traffic-constrained multiobjective planning of electric-vehicle charging stations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2363-2372.
- [3] 黄贵鸿, 雷霞, 芦杨, 等. 考虑用户满意度的电动汽车用户侧最优智能充放电策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 40-47.  
HUANG Guihong, LEI Xia, LU Yang, et al. Optimus smart charge-discharge tactics in electric vehicle user profile considering user's satisfaction[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 40-47.
- [4] 许庆强, 寇英刚, 马建伟, 等. 电动汽车充换电设施典型设计方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 118-124.  
XU Qingqiang, KOU Yinggang, MA Jianwei, et al. Research on typical design scheme of charging/battery swap infrastructure for electric vehicle[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 118-124.
- [5] 林舜江. 负荷动特性的建模及其对电压稳定的影响研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2008.  
LIN Shunjiang. Studies on dynamic load characteristic modeling and its influence to voltage stability[D]. Changsha: Hunan University, 2008.
- [6] 王贵斌. 包括可再生能源发电的配电系统中电动汽车优化调度和充电站规划[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.  
WANG Guibin. Optimal dispatch and charging station planning of electric vehicles in distribution systems with renewable generation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [7] 刘利民, 刘俊勇, 魏震波, 等. 基于协同效应分析的输电线路脆弱评估方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(5): 30-37.  
LIU Limin, LIU Junyong, WEI Zhenbo, et al. Transmission line vulnerability assessment based on

- synergetic effect analysis[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2016, 36(5): 30-37.
- [8] 马静, 王希, 王增平. 基于线路运行介数的过负荷脆弱性评估[J]. *电网技术*, 2012, 36(6): 47-50.  
MA Jing, WANG Xi, WANG Zengping. Operation betweenness based assessment on overload vulnerability[J]. *Power System Technology*, 2012, 36(6): 47-50.
- [9] 徐林, 王秀丽, 王锡凡. 电气介数及其在电力系统关键线路识别中的应用[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(1): 33-39.  
XU Lin, WANG Xiuli, WANG Xifan. Electric betweenness and its application in vulnerable line identification in power system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(1): 33-39.
- [10] 黄润. 电动汽车入网对电网负荷影响的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.  
HUANG Run. Impacts of electric vehicles charging on the load of power system[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [11] 郑颖. 高渗透率电动汽车接入下的配电网静态稳定性分析及有序充电策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.  
ZHENG Ying. Research on the static stability of the distribution network considering plug-in electric vehicles with high penetration and coordinated charging[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2014.
- [12] 赵维娟. 基于潮流算法的静态电压稳定性分析方法研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2014.  
ZHAO Weijuan. Research on static voltage stability analysis method based power flow algorithm[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014.
- [13] 张伯明, 陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [14] HUANG Junhui, GE Shaoyun, HAN Jun, et al. A diagnostic method for distribution networks based on power supply safety standards[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2016, 1(1): 63-70. DOI 10.1186/s41601-016-0020-2.
- [15] NEWMAN M E J. 网络科学引论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [16] 王凯. 基于复杂网络理论的电网结构复杂性和脆弱性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.  
WANG Kai. Research on structural complexity and vulnerability of power grids based on complex network theory[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.

收稿日期: 2017-03-02; 修回日期: 2017-04-28

作者简介:

杨田(1981—), 男, 博士研究生, 研究方向为能源互联网、智能电网、智能电器; E-mail: yangtt0327@163.com

刘晓明(1968—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为能源互联网、智能电网、智能电器、高电压与绝缘技术、现代高压电器设计理论及应用; E-mail: liuxiaoming@tjpu.edu.cn

吴其(1981—), 女, 博士研究生, 工程师, 研究方向为能源互联网、智能电器、高电压与绝缘技术、现代高压电器设计理论及应用。E-mail: wuq\_2009@163.com

(编辑 魏小丽)