

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210383

# 考虑配电网综合运行风险的充电桩接纳能力评估与优化

曲大鹏<sup>1</sup>, 范晋衡<sup>1</sup>, 刘琦颖<sup>1</sup>, 刘轩<sup>2</sup>, 邓文扬<sup>2</sup>

(1. 广东电网有限责任公司广州供电局, 广东 广州 510620; 2. 广州市奔流电力科技有限公司, 广东 广州 510670)

**摘要:** 为解决配电网的建设速度与 EV 的普及速度失配问题, 进行了配电网充电负荷接纳能力评估方法与优化策略研究。首先, 以充电桩接纳能力来衡量配电网的充电负荷接纳能力, 从配电网侧、充电桩侧和用户侧分析了配电网充电桩接纳能力影响因素。其次, 建立基于充电桩数量的充电负荷评估模型, 基于充电桩数和车桩比计算充电负荷, 进而利用充电负荷和配电网耦合关系分析配电网运行风险。再次, 综合考虑电压和电流越限风险以及配变过载风险建立配电网综合运行风险, 以作为充电桩接纳能力的量化指标。然后, 从电网侧提出网络重构、配电网扩容和双馈线共同供电等措施来改善配电网的充电桩接纳能力。最后, 通过仿真分析验证了所提出充电桩接纳能力评估模型和优化措施的有效性。

**关键词:** 充电桩; 电动汽车; 接纳能力; 风险; 配电网

## Assessment and optimization of charging pile acceptance capacity considering the comprehensive operational risk of a distribution network

QU Dapeng<sup>1</sup>, FAN Jinheng<sup>1</sup>, LIU Qiying<sup>1</sup>, LIU Xuan<sup>2</sup>, DENG Wenyang<sup>2</sup>

(1. Guangzhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510620, China;

2. Guangzhou Power Electrical Engineering Technology Co., Ltd., Guangzhou 510670, China)

**Abstract:** To solve the problem of mismatch between the construction of a grid and the popularity of electric vehicles (EVs), this paper conducts research on the assessment method and optimization strategies of charging load acceptance capacity of a distribution network. First, the charging load acceptance capacity of the distribution network is measured by the charging pile acceptance capacity, and the factors influencing that capacity of the distribution network are analyzed from the distribution network, charging pile and user sides. Secondly, a charging load assessment model based on the number of charging piles is established. The charging load is calculated based on the number of charging piles and vehicle-to-pile ratio, and then the coupling relationship between charging load and distribution network is used to analyze the operational risk of the distribution network. Furthermore, a comprehensive operational risk of the distribution network is established by taking into account the voltage and current crossing risk and the distribution transformer overload risk as a quantitative indicator of the charging pile acceptance capacity. This is proposed as a quantitative indicator of charging pile acceptance capacity. Then, from the grid side, strategies such as network reconstruction, distribution network expansion, and two feeders jointly supplying power are proposed to improve the charging pile acceptance capacity. Finally, through simulation analysis, the effectiveness of the charging pile acceptance capacity evaluation model and optimization strategy is verified.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51777077).

**Key words:** charging pile; electric vehicle; acceptance capacity; risk; distribution network

## 0 引言

近年来, 在碳减排和环境保护需求的驱动下,

电动汽车(Electric Vehicle, EV)发展迅猛, 巨大的充电负荷增量给城市配电网的规划建设带来极大的挑战<sup>[1-4]</sup>。当配电网的建设情况与 EV 的普及速度失配时<sup>[5]</sup>, 充电负荷的接入将给配电网的安全运行造成显著的风险。因此, 如何基于电网安全性评估和优化配电网的充电负荷接纳能力<sup>[6]</sup>, 为充电桩的建设

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51777077); 广东电网有限责任公司广州供电局科技项目资助(GZHKJXM20180072)

提供指导，是实现 EV 快速普及必须解决的问题。

为此，文献[7]以电压越限为约束评估在不同 EV 负荷分布下配电网的接纳能力。文献[8]以线路负载率和变压器负载率作为评价指标，衡量现状态和规划态下接纳 EV 负荷的能力；文献[9]从节点电压偏移和网络功率损耗的概率分布特性评估配电网接纳 EV 负荷的能力。同时，在改善配电网接纳 EV 负荷能力方面，文献[10]采用网络重构来实现配电网充电负荷承载能力的优化；文献[11]采用最优充电的方法来提高配电网的 EV 负荷接纳能力；文献[12]以最小化运行成本和最大化接纳 EV 充电能力为目标，建立配电系统接纳 EV 能力的评估和优化模型。

然而当前该领域研究还没有考虑大规模 EV 负荷接入配电网造成的运行风险问题。实际上，当 EV 充电规模较大时，电压越限<sup>[13]</sup>、线路电流越限<sup>[14]</sup>和配变过载等问题难以避免，因此配电网运行风险能够反映配电网接纳充电负荷的压力<sup>[15]</sup>，综合上述风险因素建立配电网运行风险指标来评估配电网充电负荷接纳能力具有实际意义。

同时，目前针对配电网充电负荷接纳能力的评估主要以接入 EV 数量为指标<sup>[10,16]</sup>。但从电网的角度来看，EV 的接入受用户主观因素影响，且电网与 EV 用户仍处于“弱联系”关系，其接入数量随机性高且难以控制<sup>[17]</sup>，因此评估的 EV 接入数量极限值对于“新基建”战略下新一轮充电桩建设规划<sup>[18]</sup>的指导作用并不大。而充电桩与电网直接相连，是未来电网对于充电负荷控制的最低层级，采用可接纳充电桩数(Number of Acceptable Charging Piles, NACP)作为充电负荷接纳能力的评估指标，其量化评估结果的可靠性更高，对“新基建”战略下电网新一轮充电桩建设的指导意义更大。

另一方面，大量电动汽车集中充电可能使配电网的运行状态接近载荷极限，而大型充电站的规模化则增加了这种风险的概率<sup>[15]</sup>。因此对于大型的充电站，充电站负荷功率较大，只通过单馈线供电可能会导致该馈线发生严重越限<sup>[19]</sup>。基于此，为减轻单馈线的负荷负担，提高配电网的充电负荷接纳能力，除了采用网络重构等措施外，电网公司还可以采用双馈线向大型充电站供电。

本文从配电网侧、充电桩侧和用户侧分析影响配电网充电桩接纳能力的因素；建立基于充电桩数量的配电网充电负荷评估模型，通过充电桩数和车桩比来估计 EV 数量，从而计算充电负荷；利用充电负荷和配电网耦合关系分析配电网运行风险，以此作为指标来衡量配电网的充电桩接纳能力；从电网侧提出网络重构、配电网扩容和双馈线供电等策略

来改善配电网接纳能力。最后通过仿真验证了本文方法和模型的有效性。

### 1 配电网充电桩接纳能力影响因素

配电网充电桩接纳能力影响因素复杂多样，总体上可以分为配电网侧、充电桩侧和用户侧因素，如表 1 所示。分析配电网充电桩接纳能力影响因素，可为接纳能力的评估提供合理的约束和条件。

表 1 充电桩接纳能力影响因素  
Table 1 Influencing factors of the acceptance capacity of charging piles

影响因素	约束和条件
配电网侧影响	网架结构
	配变和线路容量
充电桩侧影响	充电桩快慢充比例配置
	充电桩接入方式和位置
	充电桩繁忙度
用户侧的影响	充电行为特性
	电动汽车类型

#### 1.1 配电网侧影响

##### 1.1.1 网架结构

不同的接线模式下配电网的坚强程度不同，不同的接线方法有不同的网架结构，对配电网的充电桩接纳能力也会有影响，因此可以通过配电网的网架结构优化来改善其充电桩接纳能力。

##### 1.1.2 配变和线路容量

不同配变配置下配电网接纳的充电桩数量不同。一般情况下，上级配变容量越大，配电网充电桩接纳能力越强。配电网变压器容量是限制充电桩接入数量的重要因素。另外，线路容量也是制约充电桩接纳数量的重要因素。

#### 1.2 充电桩接入情况的影响

##### 1.2.1 充电桩快慢充比例配置

交流慢充方式往往功率不大，对电网的冲击性影响也较小。对于慢充桩，其充电功率较小，配电网能够接纳的充电桩数更多。快速充电方式在一定数量的 EV 同时充电时会大大增加电网的负荷压力，对电网产生明显的影响。对于快充桩，其充电功率较大，配电网能够接纳的充电桩数更少。

##### 1.2.2 充电桩接入方式和位置

充电桩接入配电网方式主要有集中接入方式和

分散接入方式。不同接入方式下配电网的充电桩接纳能力有较大差异。以充电站负荷形式集中接入配电网时, 充电负荷比较集中, 容易引起局部线路过载。当某区域主要是以分散充电桩的形式为 EV 提供充电服务时, 充电负荷比较零散地接入配电网, 受充电桩分布位置的影响较大。

### 1.2.3 充电桩繁忙度

充电桩的利用率越小, 相同桩数下充电负荷越小, 对电网造成的冲击越小。为了反映各时段充电桩的利用情况, 定义充电桩繁忙度为同时处于充电状态的充电桩占比。假设某区域有  $N_{ch}$  个充电桩, 若  $t$  时刻共有  $N_u(t)$  个桩处于充电状态, 则  $t$  时刻该区域充电桩的繁忙度为

$$\rho_{ch}(t) = N_u(t) / N_{ch} \quad (1)$$

一天中最大的充电桩繁忙度可反映充电桩的最大利用率, 基于此定义充电桩的最大繁忙度为

$$\rho_{ch,m} = \max(\rho_{ch}(t)) \quad (2)$$

## 1.3 用户侧的影响

### 1.3.1 充电行为特性

充电负荷特性受用户充电行为特性影响较大, 用户充电行为越集中, 则充电负荷越集中, 对配电网的造成的冲击越大。

### 1.3.2 EV 类型及比例

不同类型 EV 的充电行为特性差异明显, 相应车桩比配置也差异较大。因此当不同区域的 EV 类型比例不同时, 配电网的 NACP 会有差异。

## 2 基于车桩比的配电网充电负荷评估模型

配电网的接纳能力与充电负荷直接相关, 与充电桩数量并没有直接的关系, 因此首先需要研究充电负荷与充电桩数量的关系。一般情况下 EV 保有量与充电桩数量具有一定的比例, 定义为车桩比, 通过充电桩数量和车桩比可以得到 EV 保有量, 再考虑 EV 用户的充电行为即可评估充电负荷, 可为评估配电网的充电桩接纳能力提供条件。

### 2.1 基于车桩比和充电桩数的 EV 服务数量估计

#### 2.1.1 分散充电桩的 EV 服务数量估计

假设某馈线的供电区域内分散充电桩共有  $N_{ch,s}$  个, 其车桩比为  $k_{vps}$ , 则分散充电桩服务的 EV 数量可估算为

$$N_{EV,s} = \lceil k_{vps} N_{ch,s} \rceil \quad (3)$$

式中,  $\lceil \cdot \rceil$  表示取整。

#### 2.1.2 集中充电站的 EV 服务数量估计

假设某馈线供电区域内充电站  $g$  某类充电桩共

有  $N_{ch,f}^q$  个, 其车桩比为  $k_{vp,f}^q$ , 则充电站  $g$  该类充电桩服务的 EV 数量可估算为

$$N_{EV,f}^q(g) = \lceil k_{vp,f}^q N_{ch,f}^q \rceil \quad (4)$$

式中:  $N_{EV,f}^q(g)$  为充电站  $g$  第  $q$  类充电桩服务的 EV 数;  $N_{ch,f}^q$  和  $k_{vp,f}^q$  分别为充电站  $g$  第  $q$  类充电桩的数量及其车桩比。

则充电站  $g$  服务的 EV 数量  $N_{EVz}(g)$  可估算为

$$N_{EVz}(g) = \sum_{q=1}^{q_0} N_{EV,f}^q(g) \quad (5)$$

式中,  $q_0$  为充电站  $g$  充电桩类型数。

## 2.2 计及充电桩数的配电网充电负荷评估方法

得到的 EV 服务数量和充电桩数量后, 根据用户的出行和充电行为概率分布, 采用蒙特卡洛抽样方法<sup>[20]</sup>生成各用户的起始 SOC、出行时间等参数, 即可确定用户的充电情况, 进而求解充电负荷。

已知用户的充电开始时间  $t_{c0}$  及充电时长  $T_{c1}$ , 则用户的充电结束时间为:  $t_w = t_{c0} + T_{c1}$ , 在时段  $[t_{c0}, t_w]$  内, EV 用户的充电状态为“在充电中”, 记为 1, 反之记为 0。

$$s_i^{uz}(t) = \begin{cases} 1 & t \in [t_{c0}, t_w] \\ 0 & \text{other} \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $s_i^{uz}(t)$  为第  $i$  个用户在  $t$  时刻的充电状态。

### 2.2.1 分散充电桩的充电负荷计算

对于在分散充电桩充电的 EV, 通过蒙特卡洛抽样生成其充电状态, 可计算该馈线供电区域内分散充电桩各个时段的在充桩数和繁忙度为

$$N_{u,s}(t) = \sum_i^{N_{EV,s}} s_{i,s}^{uz}(t) \quad (7)$$

$$\rho_{ch,s}(t) = N_{u,s}(t) / N_{ch,s} \quad (8)$$

式中:  $N_{u,s}(t)$  和  $\rho_{ch,s}(t)$  为时刻  $t$  分散充电桩的在充桩数和繁忙度;  $s_{i,s}^{uz}(t)$  为第  $i$  个在分散充电桩充电的 EV 在  $t$  时刻的充电状态。

则分散充电桩在时刻  $t$  的充电功率为

$$P_{ch,s}(t) = N_{u,s}(t) P_{s0} \quad (9)$$

式中,  $P_{s0}$  为分散充电桩的额定充电功率。

### 2.2.2 充电站充电负荷计算

假设某馈线供电区域内充电站  $g$  内某类充电桩有  $N_{ch,k}^q$  个, 其每天服务的 EV 数为  $N_{EV}^q(g)$ , 对这些用户通过蒙特卡洛抽样生成其充电状态, 则该类充电桩各个时段的在充桩数和繁忙度为

$$N_{u,k}^q(g,t) = \sum_i^{N_{EV}^q(g)} s_{i,k}^{uz}(t) \quad (10)$$

$$\rho_{ch,k}^q(g,t) = N_{u,k}^q(g,t) / N_{ch,k}^q \quad (11)$$

式中:  $N_{u,k}^q(g,t)$  和  $\rho_{ch,k}^q(g,t)$  为时刻  $t$  充电站  $g$  第  $q$  类充电桩的在充桩数和繁忙度;  $s_{i,k}^{uz}(t)$  为充电站  $g$  第  $i$  辆在该类充电桩充电的 EV  $t$  时刻的充电状态。

充电站  $g$  内该类充电桩在时刻  $t$  的充电功率为

$$P_{ch,k}^q(g,t) = N_{u,k}^q(g,t) P_{k0}^q \quad (12)$$

式中,  $P_{k0}^q$  为该类充电桩的的额定充电功率。

则充电站  $g$  在时刻  $t$  的充电功率为

$$P_{ch,kz}(g,t) = \sum_{q=1}^{q_0} P_{ch,k}^q(g,t) \quad (13)$$

### 3 充电桩接纳能力量化模型和优化措施

配电网的安全运行是限制配电网接纳 EV 负荷能力和制约其提升效果的最主要因素, 因此本文将配电网综合运行风险作为评估和优化充电桩接纳能力的边界约束。

#### 3.1 基于配网运行风险的 NACP 评估

##### 3.1.1 配电网综合运行风险指标

充电负荷接入配电网, 除了可能造成节点电压越限和线路电流越限外, 还可能造成配电变压器过载。为综合考虑上述风险, 本文在文献[15]考虑电压和电流越限风险的基础上, 考虑配变过载风险。

根据文献[15], 节点电压和支路电流的损失严重程度  $S$  为

$$S = \frac{e^{\mu w} - 1}{e - 1} \quad (14)$$

式中:  $w$  为损失量;  $\mu$  为放大系数, 用于调整损失严重度的灵敏性。

因此配变的过载损失严重程度  $S_{pb}$  可通过式(15)进行计算。

$$S_{pb} = \frac{e^{\mu w_p} - 1}{e - 1} \quad (15)$$

$$w_p = \begin{cases} 0, & f_p \leq f_{m0} \\ f_p - f_{m0}, & f_p > f_{m0} \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $w_p$  为配变负载率的损失量;  $f_p$  为配变的负载率;  $f_{m0}$  为配变过载的负载率限值。

本文综合各节点的电压越限风险、各支路的电流越限风险和配变的过载风险来评估配电网综合运行风险为

$$H_{wmax} = \max(H_w(t)), \quad t = 1, 2, \dots, 24 \quad (17)$$

$$H_w(t) = \beta_1 H_v(t) + \beta_2 H_1(t) + \beta_3 H_p(t) \quad (18)$$

$$\begin{cases} H_v(t) = \frac{1}{z_1} \sum S_{v-i}(t) & i=1, 2, \dots, z_1 \\ H_1(t) = \frac{1}{z_2} \sum S_{1-i}(t) & i=1, 2, \dots, z_2 \\ H_p(t) = S_p(t) \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $H_{wmax}$  为一天中的最大综合运行风险;  $H_w(t)$  为  $t$  时刻的综合运行风险;  $\beta_1 - \beta_3$  为权重系数;  $H_v(t)$  和  $H_1(t)$  分别为  $t$  时刻的平均电压越限风险和平均电流越限风险;  $S_{v-i}(t)$  为  $t$  时刻节点  $i$  的电压损失严重程度;  $S_{1-i}(t)$  为  $t$  时刻支路  $i$  的电流损失严重程度;  $H_p(t)$  和  $S_p(t)$  为  $t$  时刻配变过载风险和过载损失严重程度;  $z_1$  和  $z_2$  分别为配网的节点数和支路数。

##### 3.1.2 配电网 NACP 评估方法

为考虑用户充电行为的不确定性, 本文采用蒙特卡洛模拟<sup>[20]</sup>方法对各用户的出行行为抽样  $M$  次, 计算每次抽样的风险, 统计各次抽样的平均风险为

$$H_{0max} = \frac{1}{M} \sum_j H_{wmax}^j \quad (20)$$

式中:  $H_{0max}$  为最大综合运行风险均值;  $H_{wmax}^j$  为第  $j$  次抽样的最大综合运行风险。

将充电负荷以某种形式接入配电网的某个或某些节点, 当最大综合运行风险均值刚好超过配电网能承受的限值  $H_{limit}$  时对应的接入配电网的充电桩数(NACP)为

$$N_{chmax} = N_0 (H_{0max} = H_{limit}) \quad (21)$$

式中:  $N_{chmax}$  为配电网的 NACP;  $N_0$  为接入该配电网的充电桩数。

给定最大综合运行风险均值的限值  $H_{limit}$ , 采用混合逼近法<sup>[21]</sup>调节接入配电网的充电桩数, 使得最大综合运行风险均值接近限值, 即可得到 NACP。

#### 3.2 基于配电网充电桩接纳能力的优化措施

从配电网侧角度, 电网公司可以通过网络重构、配电网扩容以及双馈线共同供电等措施来改善配电网的充电桩接纳能力。

##### 3.2.1 配电网网络重构优化

配电网网络重构优化是当配网接入充电负荷后运行风险过大或无法接纳新规划建设充电桩/站时进行配电网架构优化来提高配电网的接纳能力。

配电网的网络架构对潮流分布有影响, 不同网络架构下充电负荷接入配网造成的运行风险不同。因此, 可通过网络重构来优化配电网充电桩接纳能力。配电网网络重构可通过支路交换法来进行, 主要

思路为在辐射状网络的基础上, 每次闭合一条支路形成单环网, 并断开环路另一条支路, 实现配电网接纳能力的进一步改善并保证电网的辐射状运行, 重复该过程直到配电网接纳能力不能再增大为止。

### 3.2.2 配电网扩容

配电网扩容包括变压器扩容和线路扩容。变压器扩容需要保证变压器不发生过载, 线路扩容需要保证配电母线和线路不发生电压越限和电流越限。当配电网容量已经无法接纳新规划建设充电桩/站时, 可通过配电网扩容来提高配电网的接纳能力, 从而解决配电网建设速度与 EV 普及速度失配问题。

表 1 为各 110 kV/10 kV 配电变压器的参数<sup>[22]</sup>。根据新增配变容量可计算新配电变压器的容量大小, 进而选择合适的变压器型号。

表 2 配电变压器参数

Table 2 Distribution transformer parameters

额定容量/kVA	空载损耗/kW	负载损耗/kW	空载电流/%	短路阻抗/%	变压器单价/万元
6 300	10.5	36	0.80	10.5	41.9
8 000	12	45	0.80	10.5	53.2
10 000	14.2	53	0.74	10.5	66.5

10 kV 配电系统常用线型如文献[21,23]所示。根据不同配电线路型号的阻抗参数、载流量和辅线成本可以选择合适的配电线路型来进行线路更换。

### 3.2.3 采用双馈线共同供电

采用双馈线共同供电是在充电站规划建设阶段通过两条馈线共同向充电站供电, 从而增大充电站充电桩接纳数量, 为建设大型充电站提供一种思路。大型充电站由双馈线共同供电的场景中, 假设大型充电站通过两台或两台以上 10 kV/400 V 专变分别接入两条 10 kV 馈线(分别记为馈线 1 和馈线 2), 设定充电站的每个充电桩都固定接入其中一条馈线, 这样两条 10 kV 馈线都固定接入该充电站的部分充电桩。接入馈线的充电负荷大小由接入该馈线的充电桩的充电情况决定。

设馈线 1 的负荷容量为  $S_1$ , 馈线 2 的负荷容量为  $S_2$ 。接入充电负荷前, 馈线 1 的平均负载率为  $f_{p10}$ , 馈线 2 的平均负载率为  $f_{p20}$ 。则为了使接入充电站负荷后馈线 1 和馈线 2 的负载更加均衡, 固定接入馈线 1 和馈线 2 的充电桩数量的比例应与两条馈线的冗余容量成正比。则固定接入馈线 1 和馈线 2 的充电桩数量的比例为

$$\lambda_{zh} = \frac{(f_{m0} - f_{p10})S_1}{(f_{m0} - f_{p20})S_2} \quad (22)$$

式中,  $f_{m0}$  为馈线过载的负载率限值, 一般取 0.9。

## 4 仿真算例

### 4.1 参数设置

仿真网络选取 IEEE33 节点配电系统, 线路选取 LGJ-120, 如文献[15]所示, 配电变压器容量为 8 000 kVA。常规负荷为商业区的典型常规负荷, 如图 1 所示, 常规负荷峰值设为 4 MW。当所有节点电压和支路电流以及配变负载率的损失量皆为 0.05 p.u.时, 配电网运行风险为 35, 可作为配电网运行风险的限值。蒙特卡洛抽样次数  $M$  取 100。权重系数  $\beta_1 - \beta_3$  皆取 1/3。

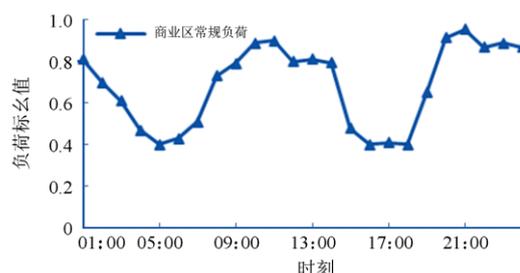


图 1 商业区常规负荷曲线

Fig. 1 Curve of conventional load in commercial districts

各类 EV 的参数设置如表 3 所示, 充电行为概率分布参考文献[24]。设公交车有专用的充电站, 一桩双枪二位, 白天采用双枪快充, 晚间采用单枪慢充, 公交车的车桩比为 2:1。出租车采用快充方式, 与私家车共用充电站, 假设商业区有两座充电桩数相同的充电站为出租车和私家车提供充电服务。出租车需要一天两充, 根据目前实际的车桩比, 出租车的车桩比可设为 5:1。对于私家车, 可假设分散充电桩都采用慢充, 充电站都采用快充, 分散充电桩均衡地接入配电网各节点。私家车快充桩和慢充桩的车桩比差异较大, 可设置多组不同的车桩比进行对比研究。

表 3 各类 EV 参数

Table 3 Parameter settings of various EVs

EV 类型	充电功率/kW		电池容量/kWh	续航里程/km
	慢充	快充		
公交车	60	108	324	250
出租车	—	60	82	400
私家车	7	60	40	200

### 4.2 配电网充电桩接纳能力评估

#### 4.2.1 各类 EV 充电桩接纳能力分析

将私家车快充桩的车桩比设为 20:1, 慢充桩的车桩比设为 3:1。私家车和出租车的两座公用充电

站分别接入节点 7 和节点 12。公交车专用充电站接入节点 10。为研究配电网对各类 EV 接纳能力的区别, 分别对只接入单类型 EV 时配电网的 NACP 进行评估, 如表 4 所示。同时对各类 EV 不同保有量比例下的 NACP 进行评估, 如表 5 所示。

表 4 不同 EV 类型下的 NACP

Table 4 NACP under different EV types

情景	常规负荷峰值功率/MW		
	3.5	4	4.5
只接入公交车充电桩	22	18	14
只接入出租车充电桩	54	45	33
只接入私家车充电桩	151	126	98

表 5 不同 EV 保有量比例下的 NACP

Table 5 NACP under different EV ownership ratios

私家车快慢 桩配置比例	保有量比例(电动公交车:出租车:私家车)			
	1:1:20	1:1:15	1:1:10	1:1:5
1:1	84	68	54	39
1.5:1	77	64	51	38
2:1	72	60	49	37

由表 4 和表 5 可知, 由于公交车和出租车的日耗电量较大, 充电活动更加频繁, 充电功率更大, 且充电时间较为集中, 接入配电网造成的冲击比私家车更大, 因此只接入私家车时配电网的 NACP 相对更多。相比于出租车, 公交车的快充电功率更大, 充电负荷更为集中, 与常规负荷高峰更为重叠, 因此 NACP 更少。总体上, 常规负荷功率峰值每增加 0.5 MW, 只接入公交车时 NACP 减少 4 个左右, 只接入出租车时 NACP 减少 8~9 个, 在快慢充电桩数为 2:1 的条件下, 只接入私家车配电网的 NACP 大约要减少 26 个。因此当公交车和出租车保有量占比增大时, 配电网的 NACP 明显减小。同时, 私家车慢充电桩的配置比例越大, 配网的 NACP 越多。

#### 4.2.2 不同接入位置下配电网的 NACP

在商业区只接入私家车时, 私家车快充桩的车桩比设为 20:1, 慢充电桩的车桩比设为 3:1。设快慢充电桩的比例为 2:1。两座充电站分别接入以下位置, 配电网的 NACP 如表 6 所示。

由表 6 可知, 在越靠近配电网末端的节点接入充电站负荷, NACP 越小。这说明随着充电站负荷

表 6 不同接入位置下的 NACP

Table 6 NACP under different access positions

充电站负荷接入位置	充电站接入节点	配电网的 NACP
配电网首端	节点 3 和节点 5	205
配电网中间位置	节点 8 和节点 10	135
配电网末端	节点 17 和节点 19	51

接入位置向配电网末端节点靠近时, 充电负荷作用于配电网更容易造成严重的越限问题, 因此配电网运行风险不断增大, 充电桩接纳能力不断变弱。极端情况下, 接入首端的 NACP 是接入末端时的 4 倍, 差距很大。因此建议条件允许情况下尽可能将充电站负荷接入配电网首端。

#### 4.2.3 不同车桩比下配电网的 NACP

在商业区只接入私家车, 设快慢充电桩的比例为 2:1, 两座充电站分别接入节点 7 和节点 12。不同车桩比下配电网的 NACP 如表 7 所示。

表 7 不同车桩比下的 NACP

Table 7 NACP under different vehicle-to-pile ratios

快充桩 车桩比	慢充电桩 车桩比	快充桩最 大繁忙度	慢充电桩最 大繁忙度	配电网的 NACP
10:1	2:1	0.214	0.365	240
	3:1	0.215	0.519	237
	4:1	0.218	0.611	234
	5:1	0.219	0.732	230
20:1	2:1	0.423	0.398	131
	3:1	0.447	0.589	126
	4:1	0.422	0.714	122
	5:1	0.433	0.922	119
30:1	2:1	0.616	0.389	88
	3:1	0.652	0.539	86
	4:1	0.678	0.861	83
	5:1	0.665	0.912	81

由表 7 可知, 慢充电桩和快充桩的车桩比越大, 充电桩的繁忙度越大, 配电网的 NACP 越少。可以得出, 充电桩的利用程度越高, 相同充电桩数下充电负荷越大, 配电网的 NACP 越少。因此, 在无明显影响用户充电便捷性且能够满足 EV 充电需求的前提下, 适当减小充电桩数量的配置裕度, 可提高充电桩的利用程度。

同时, 由于快充桩的充电功率更大, 其接入配电网造成的冲击比慢充电桩也更大, 当快充桩的车桩比增大时, 配电网 NACP 下降程度比慢充电桩车桩比增大时要大, 因此在充电设施建设过程中需要合理规划快慢充电桩的配置比例。

### 4.3 配电网充电桩接纳能力优化

#### 4.3.1 网络重构优化分析

在商业区只接入私家车时, 在两座充电站接入节点 8 与节点 9(场景一)和接入节点 18 与节点 19(场景二)时, 进行 NACP 评估。优化前后配电网断开支路和 NACP 分别如表 8 和表 9 所示。

表 8 场景一的优化结果

Table 8 Optimization results of scene 1

场景	重构前	重构后
断开支路	9-22、10-16、13-23、 19-34、26-30	8-9、10-16、12-13、 29-30、33-34
NACP	156	200

表 9 场景二的优化结果

Table 9 Optimization results of scene 2

场景	重构前	重构后
断开支路	9-22、10-16、13-23、 19-34、26-30	9-22、10-16、12-13、18-19、 29-30
NACP	51	154

由表 8 和表 9 可知,进行配电网重构优化后,配电网的 NACP 明显增大了,因此通过网络重构能够非常有效地增强配电网的充电桩接纳能力。同时,当充电负荷接入不同的节点时,本文提出的基于配电网充电桩接纳能力的网络重构方法能够提供不同的网络重构方案,以使配电网的充电桩接纳能力最强,具有一定的灵活性。另外,对比两种接入方式下的优化效果,显然在充电负荷接入更脆弱的节点时,配电网的充电桩接纳能力改善潜力更大,网络重构效果更好。

#### 4.3.2 配电网扩容优化分析

只接入私家车,快慢充电桩数的比例为 2:1,私家车快充桩的车桩比设为 20:1,慢充桩的车桩比设为 3:1。充电站负荷分别接入节点 7 和节点 12。改变配变容量和线路线型,配电网 NACP 如表 10 所示。

表 10 扩容优化结果

Table 10 Optimization results of capacity increase

配电变压器容量/kVA	配电路线型	NACP	限制条件
6 300	LGJ-120	126	电流越限
	LGJ-150	149	电流越限
	LGJ-185	152	变压器过载
	LGJ-240	152	变压器过载
8 000	LGJ-120	126	电流越限
	LGJ-150	149	电压和电流越限
	LGJ-185	179	电压越限
	LGJ-240	203	电压越限
10 000	LGJ-120	126	电流越限
	LGJ-150	149	电压和电流越限
	LGJ-185	179	电压越限
	LGJ-240	203	电压越限

由表 10 可知,在配电变压器容量较小、配电线路负荷承载能力较强时,容易出现变压器过载,

配电变压器容量成为约束配电网充电桩接纳能力的主要因素;在配电变压器容量较大、配电线路负荷承载能力较弱时,容易出现电流越限,配电线路负荷承载能力成为约束配电网充电桩接纳能力的主要因素。因此,在配电容量较小和配电线路负荷承载能力较弱时,通过合理的配电变压器和线路更换能够明显地改善配电网的充电桩接纳能力。需要注意的是,当配电变压器和线路容量足够大时,不容易发生配变过载和电流越限,电压越限成为约束配电网充电桩接纳能力的主要因素,此时可以通过无功补偿等措施来改善配电网的运行质量。

#### 4.3.3 双馈线共同供电效果分析

以只接入公交车为例,在其接入单馈线和双馈线的场景下,评估配电网的 NACP。双馈线都为 IEEE33 节点配电系统,馈线的负荷容量一致。馈线 1 和馈线 2 的常规负荷峰值分别设为 4 MW 和 2.5 MW,两者的基础负荷平均负载率分别为 0.4 和 0.25,则固定接入馈线 1 和馈线 2 的充电桩数量比例为 0.77。充电站的专变都接入馈线的节点 10。公交车均衡地按照充电桩数比例接入两条馈线下的充电桩,并以风险最严重的馈线的最大综合运行风险达到临界值作为评估标准。评估结果如表 11 所示,其中充电站由双馈线均衡供电场景是固定接入馈线 1 和馈线 2 的充电桩数量相等时的场景。

表 11 双馈线供电的优化效果

Table 11 Optimal effect when two feeders supplying power

场景	充电站接入 馈线 1	充电站接 入馈线 2	双馈线均 衡供电	充电桩数量 合理分配
NACP	18	24	35	42

由表 11 可知,相比于充电站接入单馈线的场景,充电站通过两个专变接入两条馈线,充电站负荷被分为两部分,接入单馈线的充电负荷极大地减小了,能够减轻单馈线的负荷负担,避免配电网出现电压越限等故障,可大幅提高配电网的 NACP。另一方面,与充电站由双馈线均衡供电相比,考虑馈线负载差异进行充电桩接入数量合理分配后,能够更加充分利用两条馈线的接纳能力,提高配电网的 NACP,并为建设大型充电站提供参考。

## 5 结论

1) 本文通过车桩比将充电桩数量和充电负荷耦合起来,以充电负荷接入配电网导致的综合运行风险为指标提出了配电网充电桩接纳能力的评估和优化方法。相比于 EV 数量接纳能力评估方法,可为充电设施的规划配置提供更为直接的参考。

2) 配电网接纳能力受网侧、桩侧和用户侧等多方面影响。私家车占比和慢充桩占比越大,车桩比越小,常规负荷比重越小,充电负荷接入位置越靠近配电网首端,配电网的NACP越大。其中,常规负荷功率每增加0.5 MW,公交车、出租车、私家车充电桩的接纳数分别减少4、9、26个,配电网接纳三类桩数量比约为7:2.5:1,NACP基本与车桩比成反比,配网首端的NACP可达到末端的4倍。

3) 电网可采取网络重构、扩容和双馈线共同供电等方法来改善充电桩接纳能力,效果十分明显。双馈线共同供电能够减轻单馈线的负荷负担,使得NACP提高100%;通过充电桩接入馈线数量的合理分配,能进一步提高接纳能力。

参考文献

[1] 姚颖蓓, 陆建忠, 傅业盛, 等. 华东地区电动汽车发展趋势及用电需求预测[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 141-145.  
YAO Yingbei, LU Jianzhong, FU Yesheng, et al. Electric vehicle development trends and electricity demand forecast in East China[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 141-145.

[2] HUANG Zhao, FANG Baling, DENG Jin. Multi-objective optimization strategy for distribution network considering V2G enabled electric vehicles in building integrated energy system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 48-55.

[3] 欧名勇, 陈仲伟, 谭玉东, 等. 基于峰谷分时电价引导下的电动汽车充电负荷优化[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(5): 54-59.  
OU Mingyong, CHEN Zhongwei, TAN Yudong, et al. Optimization of electric vehicle charging load based on peak-to-valley time-of-use electricity price[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(5): 54-59.

[4] 臧海祥, 舒宇心, 傅雨婷, 等. 考虑多需求场景的城市电动汽车充电站多目标规划[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 59-80.  
ZANG Haixiang, SHU Yuxin, FU Yuting, et al. Multi-objective planning of an urban electric vehicle charging station considering multi demand scenarios[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 59-80.

[5] 范苏纯, 黄向敏, 张勇军, 等. 计及有序充电的配电变压器扩展规划建模[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(7): 62-70.  
FAN Suchun, HUANG Xiangmin, ZHANG Yongjun, et al. Modeling of expansion planning for distribution transformer considering orderly charging[J]. Automation of Electric

Power Systems, 2021, 45(7): 62-70.

[6] 徐荆州, 葛磊蛟, 杨昌海, 等. 考虑用户便捷性和配网接纳能力的EV充电站选址定容[J]. 电力工程技术, 2020, 39(4): 112-119, 142.  
XU Jingzhou, GE Leijiao, YANG Changhai, et al. Location and capacity selection method of EV charging stations considering transportation convenience and distribution network capacity[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(4): 112-119, 142.

[7] HOOG J D, MUENZEL V, JAYASURIYA D C, et al. The importance of spatial distribution when analysing the impact of electric vehicles on voltage stability in distribution networks[J]. Energy Systems, 2015, 6(1): 63-84.

[8] 郭毅, 胡泽春, 张洪财, 等. 居民区配电网接纳电动汽车充电能力的统计评估方法[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2458-2464.  
GUO Yi, HU Zechun, ZHANG Hongcai, et al. A statistical method to evaluate the capability of residential distribution network for accommodating electric vehicle charging load[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2458-2464.

[9] 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.

[10] 陈卫, 杨波, 张兆云, 等. 计及电动汽车充电站接入的配电网承载能力评估与优化[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 27-35, 45.  
CHEN Wei, YANG Bo, ZHANG Zhaoyun, et al. Distribution networks supportability evaluation and optimization considering electric vehicles charging stations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 27-35, 45.

[11] DE HOOG J, ALPCAN T, BRAZIL M, et al. Optimal charging of electric vehicles taking distribution network constraints into account[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1): 365-375.

[12] 李强, 邓卿, 林鸿基, 等. 计及灵活性的配电系统接纳电动汽车能力评估与提升策略[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(3): 37-46.  
LI Qiang, DENG Qing, LIN Hongji, et al. Assessment and enhancement of accommodation capability for electric vehicles by a distribution system with flexibility resources[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3): 37-46.

[13] 吴帆, 邬智江, 吴杰康, 等. 基于CVaR分析的新能源

- 配电网电压风险评估模型[J]. 电力工程技术, 2019, 38(4): 131-137.
- WU Fan, WU Zhijiang, WU Jiekang, et al. Risk assessment model for distribution network with renewable energy based on CVaR analysis[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(4): 131-137.
- [14] 雷加智, 龚庆武. 基于改进点估计法的输电线路过负荷风险评估[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(4): 67-72.
- LEI Jiazhi, GONG Qingwu. Transmission line overload risk assessment based on improved point estimation methods[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4): 67-72.
- [15] 杨景旭, 羿应棋, 张勇军, 等. 基于加权分布熵的配电网电动汽车并网运行风险分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(5): 171-179.
- YANG Jingxu, YI Yingqi, ZHANG Yongjun, et al. Operation risk analysis of electric vehicle integrated to grid in distribution network based on weighted distribution entropy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5): 171-179.
- [16] 杨景旭, 张勇军. 基于有序充电启动机制和补贴机制的充电负荷接纳能力优化[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(11): 122-130.
- YANG Jingxu, ZHANG Yongjun. Optimization of charging load acceptance capacity based on ordered charging start-up mechanism and subsidy mechanism[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11): 122-130.
- [17] 徐杨杨, 张新松, 陆胜男, 等. 多重随机特性下的电动汽车充电网络机会约束规划[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 30-39.
- XU Yangyang, ZHANG Xinsong, LU Shengnan, et al. Chance constrained optimization of an electric vehicle charging network with multiple stochastic characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 30-39.
- [18] 梁永亮, 吴跃斌, 马钊, 等. 新一代低压直流供用电系统在“新基建”中的应用技术分析与发展展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 13-24, 394.
- LIANG Yongliang, WU Yuebin, MA Zhao, et al. Application and development prospect of new generation of LVDC supply and utilization system in “new infrastructure”[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 13-24, 394.
- [19] WANG B, DEGHANIAN P, WANG S, et al. Electrical safety considerations in large-scale electric vehicle charging stations[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(6): 6603-6612.
- [20] 李丹奇, 郑建勇, 史明明, 等. 电动汽车充电负荷时空分布预测[J]. 电力工程技术, 2019, 38(1): 75-83.
- LI Danqi, ZHENG Jianyong, SHI Mingming, et al. Prediction of time and space distribution of electric vehicle charging load[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(1): 75-83.
- [21] 王亮, 王程程, 王栋. 储能式现代有轨电车供电仿真软件研究[J]. 电气化铁道, 2016(2): 40-43.
- [22] 黄伟, 高怡芳, 张勇军, 等. 计及不确定性的分布式光伏接入配电网极限容量评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 9-16.
- HUANG Wei, GAO Yifang, ZHANG Yongjun, et al. Evaluation of ultimate capacity for distributed photovoltaic access distribution network considering uncertainty[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 9-16.
- [23] 闫丽梅, 刘广成, 张艳, 等. 基于改进最小生成树算法的油田电网网架优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 117-122.
- YAN Limei, LIU Guangcheng, ZHANG Yan, et al. Research on frame optimization of oil-field power grid based on improved minimum spanning tree algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 117-122.
- [24] 吴国沛, 莫一夫, 张勇军, 等. 计及调度-用户两侧差异化需求的电动汽车可调度潜力评估[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(2): 68-75.
- WU Guopei, MO Yifu, ZHANG Yongjun, et al. Schedulable potential evaluation of electric vehicles considering the different requirements of dispatchers and users[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(2): 68-75.

收稿日期: 2021-04-10; 修回日期: 2021-06-22

作者简介:

曲大鹏(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事综合能源投资管理, 侧重电动汽车与新能源领域研究; E-mail: 13925096815@139.com

范晋衡(1988—), 男, 本科, 助理工程师, 从事电气工程自动化、电力通信与信息、新能源研究应用工作; E-mail: 1866477735@139.com

刘琦颖(1992—), 女, 本科, 助理工程师, 从事电气工程自动化、新能源应用工作。E-mail: 490301744@qq.com

(编辑 葛艳娜)