

配电网接纳电动汽车充电能力的评估分析

刘新军¹, 周仁才², 章赞垚³, 吴善坤³

(1. 国网浙江省电力有限公司宁波市北仑区供电公司, 浙江 宁波 315800; 2. 国网宁波供电公司, 浙江 宁波 315000; 3. 国网浙江三门县供电有限公司, 浙江 台州 317100)

摘要: 研究区域配电网接纳电动汽车充电效率, 对解决配电网安全运行具有重要意义。选取包含办公楼、商业中心和居民小区的典型区域配电网, 首先分析电动汽车充电特性, 建立电动汽车充电负荷模型。然后讨论了不同规模的电动汽车对典型区域配电网谐波总畸变率、变压器负载情况、支路堵塞程度和母线电压偏移的影响情况, 分析限制大规模电动汽车接入典型区域配电网的影响因素。最后对典型区域配电网接纳电动汽车的充电能力进行评估, 并对今后配电网规划提出建议。

关键词: 电动汽车接入率; 配电网; 电压偏移; 谐波畸变率

Evaluation and analysis of electric vehicle charging capacity in distribution network

LUI Xinjun¹, ZHOU Rencai², ZHANG Yunyao³, WU Shankun³

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Ningbo Beilun District Power Supply Company, Ningbo 315800, China; 2. State Grid Ningbo Electric Power Supply Company, Ningbo 315000, China; 3. State Grid Zhejiang Sanmen Power Supply Co., Ltd., Taizhou 317100, China)

Abstract: The research of the charging capabilities of the regional distribution grid accepting electric vehicle has an important impact to distribution grid's safe operation. The typical regional distribution grid is selected as an example, selecting the reasonable power supply firstly. And then, by researching the impact of the different sizes of vehicles to transformer load condition of typical regional distribution network, branch blockage degree, bus voltage deviation and harmonic distort, the influencing factors are obtained which restricts large scale electric vehicles access to the distribution network of the typical area. The charging capacity of electric vehicles is evaluated in this typical area, and suggestions for future distribution network's planning are put forward.

Key words: electric vehicle access rate; distribution network; voltage drop; harmonic distortion rate

0 引言

大力发展电动汽车对改善环境污染问题和缓解全球化石能源的枯竭起着关键性作用。我国政府已经把电动汽车发展列为战略发展方向。从能源环境危机角度以及国家政策导向可以预见, 电动汽车的全面发展和普及将势不可

挡, 规模化电动汽车充电将给配电网带来重大考验。

目前对电动汽车充电研究大多集中在电动汽车充电负荷的建模与仿真计算、电动汽车接入对电力系统的影响以及电动汽车放电的控制与利用^[1]。文献[2]通过调研以及合理的假设

对不同类型的电动汽车电池起始SOC进行数学统计, 最终获得充电负荷曲线。文献[3]通过统计数据获得充电开始概率密度, 计算电动汽车充电负荷, 研究了电动汽车的配电网电压稳定裕度。文献[4]通过小区的人口密度基础建立仿真模型, 提出小区的供电方式。文献[5]对电动汽车的时空分布分析建立数学模型, 提出居民区接纳电动汽车的充电能力估计方法。文献[6]用蒙特卡洛仿真方法抽取电动汽车起始SOC, 分析电动汽车配电网变压器过载情况。最终得出高渗透率的电动汽车会使变压器过载和减小变压器寿命。文献[7]主要研究电动汽车充电对配电网电能质量的影响, 充电产生的谐波造成电压畸变等现象。

本文在此基础上, 考虑影响电动汽车的充电因素并建立电动汽车充电模型, 根据电动汽车停车位置选择电动汽车供电方式。通过接入不同渗透率的电动汽车, 对典型区域配电网变压器负载能力、支路堵塞程度、母线电压偏移以及谐波畸变率进行仿真计算, 对限制因素的影响程度进行比较, 评估典型区域配电网接纳电动汽车的充电能力。并提出适应大规模电动汽车接入发展的配电网改造的方案。

1 电动汽车的充电特性

1.1 单台充电桩模型

本文根据市面上最常见的电动汽车交流充电桩建立充电桩模型。单台充电桩主要由整流电路、滤波电路和DC/DC变换器等组成, 如图1所示。

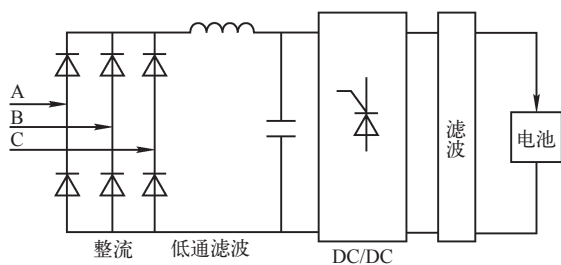


图1 电动汽车充电机模型

Fig. 1 Electric vehicle charger model

目前充电机类型多种多样。本文这种充电

机结构简单, 控制方便, 技术最为成熟, 是应用较多的充电机拓扑结构。

1.2 电动汽车充电模式

电动汽车充电功率的大小影响着配电网的安全稳定运行。根据国家“十三五”电动汽车专项规划, 电动汽车可分为三个充电等级, 如表1所示。一级充电需要用户长时间停泊进行电能充电, 适用于车载充电、家庭充电; 二级充电大多为充电桩充电, 适用于住宅、商场和学校等场所; 三级充电为快速充电, 10 min内可完成充电, 适用于充电站、高速公路充电等。

表1 电动汽车充电标准

Tab. 1 Charging standard of electric vehicle

充电等级	充电功率/kW
一级充电	1.5~3
二级充电	10~20
三级充电	40以上

电动汽车到达办公楼或者居民小区一般会停泊1 h以上, 用户多数会选择一级或者二级充电方式。考虑供电设施成本问题, 充电装置接在负荷终端, 由原有变压器供电, 对充电装置采用分散式供电, 如图2所示。

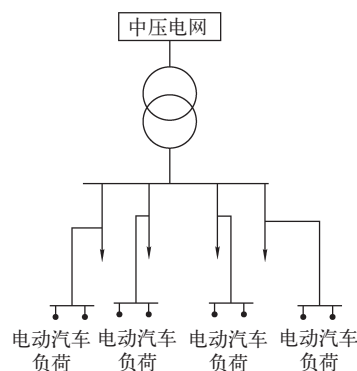


图2 充电装置供电方式

Fig. 2 Power supply mode of charging device

1.3 限制电动汽车接入配电网的影响因素

(1) 电压偏移

电压偏移是指在一定时间段内, 电压幅值缓慢变化而偏离额定值的程度^[8]。

$$\text{MAX}_{\psi}(\delta U) = \frac{U_{\text{re}} - U_{\text{N}}}{U_{\text{N}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中, δU 为电压偏移; U_{re} 为实际电压; U_N 为系统标称电压; ψ 为 380 V 母线集合。

当电动汽车大规模接入时, 将会严重危及配电网的安全运行。根据国标 GB/T 12325—2008 规定, 20 kV 以下电压偏移标准为标称电压的 $\pm 7\%$ 。

(2) 谐波

大量非线性电动汽车充电设备接入所产生的谐波, 对电网以及用电设备产生不可忽视的影响^[9]。根据国家标准 GB/T 14549—1993 的要求, 标准中谐波电压限值: 400 V 及以下母线电压总畸变率不得超过 5%; 10 kV 电压等级电压总畸变率不得超过 4%。

HRU_n 表示 n 次谐波电压含有率, 即

$$HRU_n = \frac{U_n}{U_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中, U_n 为第 n 次谐波电压有效值; U_1 为基波电压的有效值。

U_H 为谐波电压含量, 即

$$U_H = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2} \quad (3)$$

THD_U (Total Harmonic Distortion) 为电压谐总畸变率, 即

$$THD_U = \frac{U_H}{U_1} \times 100\% \quad (4)$$

(3) 支路堵塞程度

由于电动汽车随机较大, 大量电动汽车随机充电很有可能造成某条支路过负荷。支路堵塞程度是表征电动汽车大规模接入时, 该支路稳定运行所能承受的能力。当支路堵塞程度在 100% 范围内时, 负荷线路可以长时间稳定运行。当支路堵塞程度超过 120% 时, 由于线路过热等原因不能安全运行。同时支路堵塞程度越高, 配电网损耗越大, 经济性越差。

$$\eta = \text{MAX}_{\theta} \left(\frac{\sum_{i=1}^n I_i^{\text{load}} + \sum_{i=1}^n I_i^{\text{EV}}}{I_{\text{max}}} \times 100\% \right) \quad (5)$$

式中, η 为支路堵塞程度; I^{load} 为支路负荷运行稳态电流; θ 为支路下所有负荷的集合; I_i^{EV} 为

第 i 台电动汽车充电电流; σ 为所有电动汽车接入支路的集合; I_{max} 为支路承载的最大电流值。

(4) 变压器负载能力

变压器负载能力是表征当大规模电动汽车接入时, 变压器二次侧所能承受负载的情况。当 $\lambda > 75\%$ 时, 工作人员应当重点监视该变压器, 不可再接入大负荷。当 $\lambda > 100\%$ 时, 应考虑对变压器增容升级。

$$\lambda = \frac{\sum_{\varphi} S^{\text{load}} + \sum_{i=1}^n S_i^{\text{EV}}}{S_N} \times 100\% \quad (6)$$

式中, λ 为变压器负载能力; S^{load} 为单元负载容量; φ 为变压器二次侧下所有负载的集合; S_i^{EV} 为第 i 台电动汽车充电容量; S_N 为变压器额定容量。

2 限制电动汽车接入配电网的因素仿真分析

2.1 典型区域配电网模型

本文以包括办公楼、商业中心和居民小区的典型园区配电网为例, 园区建筑面积约为 32 万 m^2 , 可容纳大约 3 000 辆电动汽车停车位。园区由 10 kV 中心变电站对 6 组箱式变电站供电。整个园区由高压环网接线。应用 S9 系列干式变压器, 容量为 630 kV·A。空载损耗为 1 200 W, 负载损耗为 6 200 W, 空载电流为 1.1%, 阻抗电压为 4.5%。每组箱式变电站低压侧 400 V 系统有 10~14 个出线, 每条出线为一个负荷单元。每个 400 V 系统分别由交流中心、大门、南小门及部分路灯, 写字楼 A~D 座、园区综合楼、门诊部、南小门及部分路灯, 1~10 栋住宅楼、综合服务中心、换热站、水泵房、浴池、活动中心和体育场等负荷单元组成。园区峰值负荷达到 3 154.2 kW, 谷值负荷为 1 714.2 kW。本文基于 ETAP 对区域配电网进行仿真建模。10 kV 配电网如图 3 所示。

2.2 仿真结果

电动汽车接入率 Ac_{EV} 表示园区电动汽车充电数量总和占整个园区车辆总数的百分比, 表征停车位数量的限制, 即

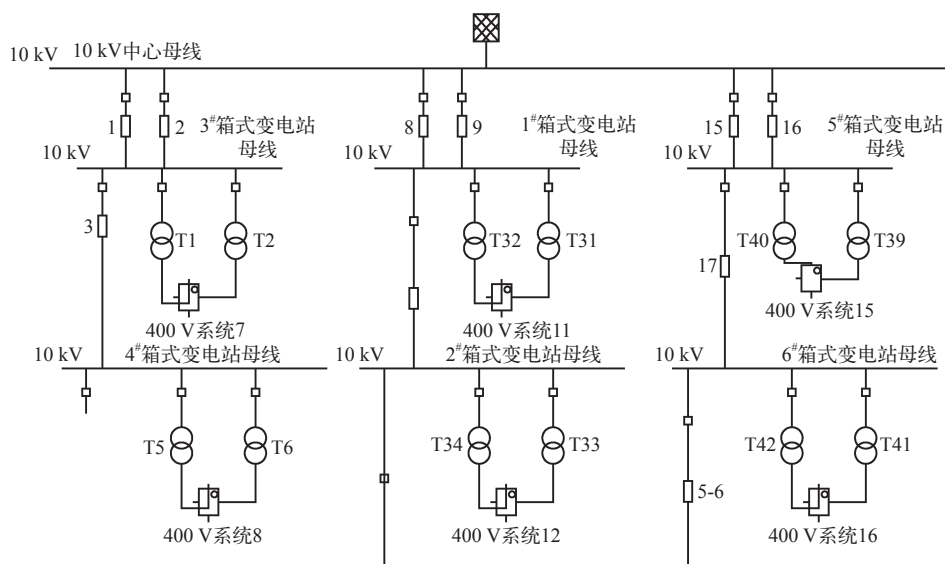


图3 区域10 kV配电网

Fig. 3 Regional 10 kV distribution network

$$Ac_{EV} = \text{MAX} \left(\frac{\sum N_{CEV}}{N} \right) \times 100\% \quad (7)$$

式中， N_{CEV} 为某一时刻园区电动汽车充电数量； N 为园区总容纳车辆的数量。

当配电网负荷峰值情况下，峰值负荷为3 154.2 kW。逐步增加电动汽车渗透率，应用ETAP计算园区配电网的谐波畸变率、电压偏移、变压器负载能力以及支路堵塞程度。计算结果如表2所示。

表2 配电网负荷峰值下限制因素的计算结果

Tab. 2 Calculation results of limiting factors under peak load of distribution net work

EV渗透率 (%)	总谐波畸变率 (%)		380 V 母线电压偏移 (%)	支路堵塞程度 (%)	变压器负载能力 (%)
	10 kV PCC	380 V 母线			
20	0.54	1.23	96.80	63.74	65.21
30	2.53	5.16	96.21	74.19	73.00
40	3.35	13.17	95.39	85.28	84.80
50	—	—	94.19	96.74	106.40

在园区配电网峰值运行，电动汽车渗透率20%的情况下，电网侧各个限制因素满足国家标准，园区配电网可安全可靠运行。当电动汽车渗透率增加到30%时，变压器低压侧母线谐波畸变率达到5.16%，已经超过国家标准，应考虑从充电桩内部消除谐波或对充电区域集

中消除谐波来增加电动汽车的接入。当电动汽车渗透率增加到40%时，变压器负载能力达到84.80%，应对变压器重点监视。当电动汽车渗透率增加到50%时，变压器负载能力已经达到106.40%，此时变压器负载能力已超过上限。

在变压器低压侧，采用无源滤波器对高次谐波集中滤波或利用充电桩内部消除谐波。消除了总谐波畸变率对电动汽车接入的限制。图4为除去谐波源、不同电动汽车渗透率下，变压器负载能力、母线电压偏移和支路堵塞程度三种限制因素的影响程度。

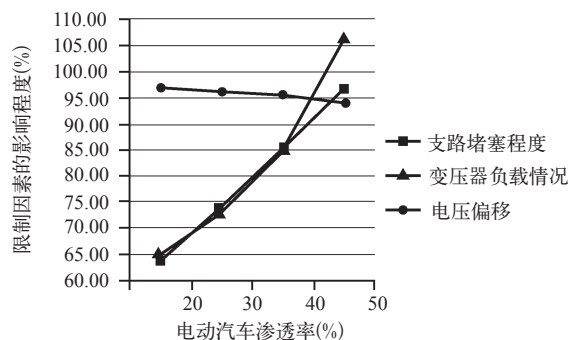


图4 三种限制因素对比

Fig. 4 Comparison of three limiting factors

从图4中可以看出，随着电动汽车渗透率的逐步增加，变压器负载情况变化最为明显，在电动汽车渗透率50%时，已经超过国家标准。而支路堵塞程度和电压偏移仍在允许范围内。

利用二分法量化电动汽车渗透率来逐步逼近变压器的最大负载能力。仿真计算结果如表3所示。

表3 配电网接纳电动汽车充电效率的计算结果

Tab. 3 Calculation results of charging efficiency of electric vehicle in distribution network

EV 渗透率	380 V 母线电压偏移	支路堵塞程度	变压器负载能力 (%)
40	95.39	85.28	84.80
45	94.86	90.57	97.71
48	94.53	92.11	99.50
50	94.19	96.74	106.40

当电动汽车渗透率为48%时，变压器负载能力为99.50%，已接近变压器负载能力的上限。此时母线电压偏移以及支路堵塞程度仍然满足标准，可安全稳定运行。如果不对变压器升级改造，由于变压器负载能力的限制，园区配电网可容纳电动汽车渗透率最大为48%。最大可接入电动汽车数量占园区所能容纳汽车数量的16%。

3 结束语

本文考虑典型区域配电网峰值情况下，对电动汽车大规模接入限制因素的总体评估。并通过ETAP仿真计算得出：随着电动汽车渗透率的增加，谐波的总畸变率最先超过国家标准，限制电动汽车的继续接入。采用无源滤波器对其高次谐波集中滤除后，继续增加电动汽车渗透率，变压器负载能力成为限制关键因素。而母线电压偏移和支路堵塞程度仍然满足国家标准。

针对配电网为稳定运行限制，可将电动汽车规模化发展分为三个阶段：①可利用充电桩内部消除谐波或者充电区域集中消除谐波来应对电动汽车接入；②随着电动汽车接入数量的进一步增加，通过改善配电网的供电方式，对配电网重新组态并且配电网与充电桩达成通信协议，实现智能充电；③随着电动汽车的普及，当前配电网框架无法进行大规模化电动汽车的接入，可通过对配电网变压器进行升级改造以及提高配电网电压等级等措施，保证配电网安全稳定运行。

参考文献

- [1] 胡泽春, 宋永华, 徐智威, 等. 电动汽车接入电网的影响与利用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 1-10.
- [2] 罗卓伟, 胡泽春, 宋永华, 等. 电动汽车充电负荷计算方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 35-42.
- [3] 郑颖, 孙近文, 张冲, 等. 考虑电动汽车接入的配电系统静态电压稳定裕度研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 20-26.
- [4] 颜湘武, 恩日, 海日, 等. 典型住宅小区接入电动汽车的供电方式研究[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 914-917.
- [5] 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), 27-34.
- [6] KELLY L, ROWE A, WILD P. Analyzing the of plug-in electric vehicles on distribution networks in British Columbia [C]. 2009 IEEE Electrical Power and Energy Conference, IEEE, 2009: 1-6.
- [7] GOMEZ J C, MORCOS M. Impact of EV battery charges on the power quality of distribution system[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2003, 18 (3): 975-917.
- [8] 刘清. 电动汽车的充电模式及充电站对电网电能质量的影响分析[J]. 中国高新技术企业, 2011(18): 43-46
- [9] 李娜娜, 何正友. 组合赋权法在电能质量综合评价中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(16): 128-134

作者简介



刘新军

刘新军 (1971—), 男, 工程师, 主要从事电气设计方面的工作。

(收稿日期: 2019-10-15) **EA**