

# 电动汽车车载充电机接入住宅区配电网谐波研究

魏大钧, 孙波, 张承慧

(山东大学 控制科学与工程学院, 山东 济南 250061)

**摘要:** 分析了车载充电机接入小区低压配电网产生的谐波特征。基于 Simulink 平台建立了含车载充电机的住宅区传统三相配电网和新型单相配电网仿真模型, 结合对配电变压器阻抗特性的研究, 对比分析了 2 种配电模式下不同数量电动汽车接入充电产生谐波的变化规律。结果表明: 随着车载充电机接入数量增多, 2 种配电模式下的谐波电流变化平缓, 但电压畸变率均明显增大; 在相同数量充电机接入情况下, 配电容量越大, 系统电压畸变越小; 单相配电的电压谐波畸变较三相配电可增幅 70% 以上, 对谐波耐受力较差。

**关键词:** 电动汽车; 车载充电机; 充电; 住宅区配电; 谐波分析; 变压器容量

**中图分类号:** TM 76; U 469.72

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.02.003

## 0 引言

随着石油资源紧缺与汽车污染等问题的加剧, 发展电动汽车已是势在必行<sup>[1]</sup>。而大规模无序充电行为将会严重影响电网的安全、经济运行, 因此研究电动汽车调度策略<sup>[2-3]</sup>与充电设施规划<sup>[4-5]</sup>至关重要。

目前电动汽车电能补给模式可分为常规充电、快速充电和电池更换 3 种。从长期来看, 随着电动汽车的逐步普及, 利用安装在住宅小区、停车场内的交流充电桩进行常规充电应是电动汽车充电的主流模式。但车载充电机为非线性负载, 其大规模接入将给小区配电网带来很大的谐波。因此, 合理规划小区配电, 以减小车载充电机带来的谐波影响, 对电动汽车的普及具有重要意义<sup>[6]</sup>。

受电动汽车内部空间所限, 车载充电机功率较

小, 一般为单相交流输入, 而目前国内对电动汽车充电谐波问题的研究则主要集中在采用大功率地面直流充电机的充电站上。文献[7]根据某一型号的充电机参数建立了充电机(站)的 MATLAB 仿真模型, 对不同数量充电机接入电力系统的谐波进行了仿真分析预测。文献[8]分析了不同结构充电机对电网的 5、7 次谐波电流影响, 提出了电动汽车充电站电能质量在线监测及谐波治理方案。文献[9]利用电磁暂态仿真工具 PSCAD/EMTDC 搭建了 3 种充电机仿真模型, 主要对含不同整流结构的充电机接入电力系统谐波进行了分析和比较, 并研究了多台充电机不同时投入对系统的谐波影响。文献[10]建立了单个充电机的谐波分析数学模型, 利用概率统计学大数定律和中心极限定律, 进一步建立多谐波源谐波分析模型, 研究多个充电机产生的谐波电流及概率特性。文献[11]建立了充电机的动态线性小信号模型, 研究输入电压、充电电流、输出滤波器等参数与充电机环路特性的关系, 以期对充电机的控制环路设计提供依据, 但并未涉及充电机谐波特性的分析。综上, 现有研究多基于直流充电机及充电站, 缺少针对大规模车载充电机接入住宅区配电网的谐波分析,

收稿日期: 2013-06-24; 修回日期: 2013-12-17

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(61034007); 国家自然科学基金资助项目(61104034, 61273097); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20120131130007)

Project supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China(61034007), the National Natural Science Foundation of China(61104034, 61273097) and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education(20120131130007)

## Optimal time-of-use price model considering satisfaction degree of electric vehicle owners

GAO Yajing<sup>1</sup>, WANG Chen<sup>2</sup>, LÜ Mengkuo<sup>1</sup>, LIANG Haifeng<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Shenzhen 518124, China)

**Abstract:** The random charging model and V2G(Vehicle to Grid) discharging model of EV(Electric Vehicle) are analyzed and the demand response model of EV owners to price variation is built. An optimal TOU(Time-Of-Use) price scheme is proposed to influence the charging/discharging behaviour of EV owners, which balances between the profit of grid and the EV owners' profit and satisfaction. Case verification shows that, the optimal TOU price obtained from the proposed scheme guides effectively the EVs charging in valley period and discharging in peak period, taking care of EV owners' satisfaction while improving load curve.

**Key words:** electric vehicles; V2G; time-of-use price; satisfaction degree; models

更没有考虑配电变压器容量与谐波的关系。

本文针对建有交流充电桩的住宅小区,基于 Simulink 平台建立了含车载充电机的住宅区传统三相配电网和新型单相配电网仿真模型,详细对比分析了 2 种配电模式下不同数量电动汽车接入充电产生谐波的变化规律,并结合配电变压器阻抗测算理论,研究了变压器容量对谐波的影响。

## 1 车载充电机建模及仿真

### 1.1 车载充电机模型

车载充电机首先对输入单相交流电进行不控整流,再经有源功率因数校正(APFC)环节及全桥隔离型 DC-DC 变换器输出为动力电池充电。

车载充电机的整流桥等非线性结构将导致输入电流波形严重畸变,引发大量高次谐波,使输入交流电压与电流产生附加相移,降低系统输入端功率因数。本文选用平均电流模式 Boost-PFC 实现电流电压双闭环控制<sup>[12]</sup>;内环电流环可迅速、精确地校正电流误差,提高功率因数;外环电压环则保证得到稳定的直流输出电压。

实际中车载充电机多采用恒流恒压充电模式<sup>[13]</sup>,即起始阶段为恒流充电,当蓄电池电压升至规定的终止电压后转为恒压充电,此时电流将缓慢下降至充电完成。本文运用闭环 PI 调节分别实现恒流与恒压过程,通过逻辑控制环节完成两过程间的切换,从而模拟完整的充电过程。车载充电机仿真结构图如图 1 所示。

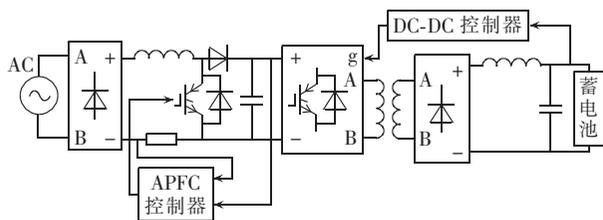


图 1 车载充电机仿真模型

Fig.1 Simulation model of EV on-board charger

### 1.2 仿真分析

为验证模型有效性,利用 Simulink 的 Battery 模块模拟锂离子蓄电池,进行充电仿真试验。结果显示前述控制方法可实现恒流恒压充电,且平均电流模式 Boost-PFC 有效提高了系统输入端功率因数。图 2 为经 APFC 后的交流侧输入电压  $u_s$  与电流  $i_s$  波形,电压、电流间的相角为零,可保持单位功率因数。

车载充电机交流输入电流有效值一般不大于 16 A,最大输出功率不超过 4 kW<sup>[14]</sup>,其单相整流结构在交流侧主要产生 3 次谐波电流。对输入电流进行快速傅里叶变换 FFT(Fast Fourier Transform)分析所得基波电流有效值为 15 A,电流谐波总畸变率

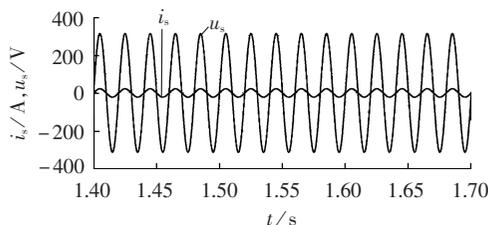


图 2 车载充电机交流侧电压与电流

Fig.2 AC-side voltage and current of EV on-board charger

THD(Total Harmonic Distortion)为 4.18%,满足小于 5%的要求<sup>[15]</sup>。其中各次谐波含有率见表 1。

表 1 单台车载充电机各次谐波电流含有率  
Tab.1 Harmonic current ratios of an EV on-board charger

谐波次数	谐波电流含有率/%	谐波次数	谐波电流含有率/%
基波	100	7	0.11
3	2.76	11	0.11
5	0.24	13	0.08

将输入电流各次谐波有效值与国家标准 GB 17625.1—2003 中规定的 A 类设备谐波电流限值<sup>[16]</sup>相比较,结果如表 2 所示。数据显示其各次谐波电流数值均远低于国标限值,APFC 充分抑制了输入电流谐波畸变,有效提高了系统功率因数。

表 2 各次谐波电流测量数值与国标限值的比较

Tab.2 Comparison of different order harmonic currents between measurement and national limit

谐波次数	充电机谐波电流/A	最大允许谐波电流/A
3	0.420	2.30
5	0.037	1.14
7	0.020	0.77
9	0.006	0.40
11	0.020	0.33
13	0.012	0.21

综上所述,本文设计的单台车载充电机模型可真实模拟蓄电池恒流恒压充电过程,并完全符合系统对接入负载的谐波限值要求,可用于充电机接入配电网的仿真。

## 2 车载充电机接入小区配电网谐波分析

### 2.1 配电变压器阻抗分析

车载充电机接入住宅区配电网产生的谐波电流与系统阻抗相互作用,导致输入电压波形同样发生畸变,进而影响系统内其他负载的正常运行。而阻抗的大小则与配电变压器的各类参数相关,特别是配电变压器的容量。因此,需对不同容量配电变压器的阻抗特性进行研究。

单相变压器模型的电气结构如图 3 所示。其中  $R_1$ 、 $L_1$  及  $R_2$ 、 $L_2$  分别为一、二次绕组的电阻与电感,  $R_m$ 、 $L_m$  为励磁支路的阻抗。而变压器的铭牌参数则一

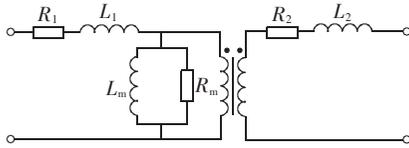


图 3 单相变压器电气结构

Fig.3 Electrical model of single-phase transformer

般包括短路阻抗  $U_k$ 、短路损耗  $P_k$ 、空载电流  $I_0$ 、空载损耗  $P_0$ 、额定容量  $S_N$  及高压侧额定电压  $U_N$ 。仿真时要求输入模型中所有参数的标么值,显然由铭牌参数无法直接给定,应进行进一步的测算。

本文采用简化的等效电路模型来计算变压器参数,即假设  $R_1=R_2, L_1=L_2$ ,从而将变压器二次侧折算到一次侧,所得等效电路结构如图 4 所示。

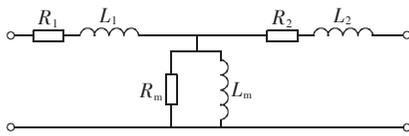


图 4 单相变压器等效模型

Fig.4 Equivalent model of single-phase transformer

根据变压器短路试验,结合图 4 等效电路与变压器铭牌参数,可通过式(1)—(5)计算变压器阻抗<sup>[17]</sup>。

$$Z_k^* = \frac{U_k}{I_k^*} = U_k \quad (1)$$

$$R_k^* = \frac{P_k^*}{(I_k^*)^2} = P_k^* = \frac{P_k}{S_N} \quad (2)$$

$$L_k^* = \sqrt{(Z_k^*)^2 - (R_k^*)^2} \quad (3)$$

$$R_1^* = R_2^* = \frac{R_k^*}{2} \quad (4)$$

$$L_1^* = L_2^* = \frac{L_k^*}{2} \quad (5)$$

其中,\*表示取参数的标么值; $Z_k^*$ 、 $R_k^*$ 、 $L_k^*$ 分别为阻抗、电阻与电抗;短路电流  $I_k^*$ 取额定值,即  $I_k^*=1$ 。将变压器铭牌数据中的短路损耗  $P_k$ 与短路阻抗  $U_k$ 代入即可求得变压器一、二次侧的电阻  $R_1, R_2$ 与电感  $L_1, L_2$ 数值。另一方面,依据等效电路与空载试验,还可通过式(6)确定励磁支路的电阻  $R_m$ 与电感  $L_m$ 。

$$\begin{cases} \sqrt{\left(R_1 + \frac{L_m^2 R_m}{R_m^2 + L_m^2}\right)^2 + \left(L_1 + \frac{R_m^2 L_m}{R_m^2 + L_m^2}\right)^2} = \frac{U_N}{I_0} \\ (I_0^*)^2 R_1 + \left(\frac{L_m}{\sqrt{R_m^2 + L_m^2}}\right)^2 R_m = P_0 \end{cases} \quad (6)$$

其中,空载电流  $I_0 = I_0 \frac{S_N}{U_N}$ ;所有变量均为有名值,求出  $R_m, L_m$ 后还需折算为标么值。

由式(1)—(6)可知,配电变压器的阻抗与其容量密切相关,其中一、二次绕组电阻更是由容量直接决定,这将导致在同样的谐波电流影响下,不同容量的配电变压器所引发的电压畸变率有所差别,即体现为系统对谐波电流的耐受程度不同。

值得注意的是,对于三相变压器而言,等效电路是指一相的等效电路,上述计算过程同样完全适用,但所有物理量必须采用一相的数值,才能获得三相配电变压器每相的阻抗参数。

### 2.2 三相配电系统谐波分析

我国现有三相住宅区配电系统大多采用 10 kV 进线,经 10 kV/0.4 kV 电压等级的配电变压器后为用户供电。为抑制高次谐波电流,配电变压器一般使用 Dyn11 型联结方式<sup>[18]</sup>,中性点直接接地。低压侧为星形连接,每相与中性线间均可构成一个单相 220 V 回路为用户供电。对于可接入多台车载充电机的三相配电网而言,交流充电桩与传统家用负荷一同并联安装在低压侧,为车载充电机提供单相交流输入。建立含多台车载充电机的小区三相配电网模型如图 5 所示。为了便于仿真,模型中省略了传统负荷,且没有加入无功补偿装置。

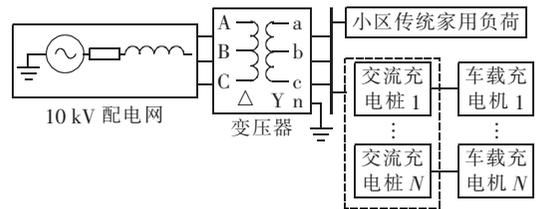


图 5 含多台车载充电机的小区三相配电网模型

Fig.5 Model of three-phase residential distribution network with EV on-board chargers

现有小区配电变压器容量设置普遍存在“大马拉小车”的情况,造成电能浪费。已有研究提出通过变压器降容及过载运行等方式提高配电变压器经济性<sup>[19]</sup>。但是,这些配电方案均未考虑大量车载充电机接入的可能性。据此,以低压侧 a 相为例,针对不同标准容量的 10 kV 级 S9 系列配电变压器(参数详见表 3),经 FFT 测量不同数量车载充电机同时接入情况下低压侧电流与电压总谐波畸变如表 4 所示。

表 4 数据显示,随着车载充电机接入数量的增加,系统电压谐波畸变率明显升高,但增大幅度却逐渐减缓。另一方面,电流总谐波畸变率虽有所增加,但其并不等于各台车载充电机产生的谐波电流代数和,且整体趋势变化平缓,这是由于各台充电机彼此之间发生了谐波抵消效应<sup>[20]</sup>。由此,进一步分析了 1 000 kV·A 容量下各次谐波电流含有率随车载充电机台数的变化情况(见图 6)。

表 3 三相配电变压器参数

Tab.3 Parameters of three-phase distribution transformer

额定容量/ (kV·A)	短路 阻抗/%	空载 电流/%	空载 损耗/kW	短路 损耗/kW
500	4.0	1.0	0.96	5.10
800	4.5	0.8	1.40	7.50
1000	4.5	0.7	1.70	10.3

表 4 车载充电机接入三相系统的电压与电流畸变

Tab.4 Voltage and current distortions caused by connecting EV on-board chargers to three-phase system

充电机台数	500 kV·A		800 kV·A		1 000 kV·A	
	电压畸变率/%	电流畸变率/%	电压畸变率/%	电流畸变率/%	电压畸变率/%	电流畸变率/%
1	2.69	10.69	1.97	10.66	1.58	10.52
2	5.19	10.70	3.79	10.73	3.12	10.80
3	7.47	10.84	5.55	10.79	4.56	10.73
4	9.63	10.87	7.22	10.81	5.92	10.77
5	11.66	10.91	8.77	10.87	7.22	10.79
6	13.55	11.00	10.34	10.91	8.53	10.87
7	15.29	11.07	11.79	10.89	9.74	10.85
8	17.05	11.13	13.07	11.01	10.85	10.92
9	18.46	11.13	14.39	11.02	11.98	10.97
10	19.96	11.15	15.69	11.10	13.08	10.97

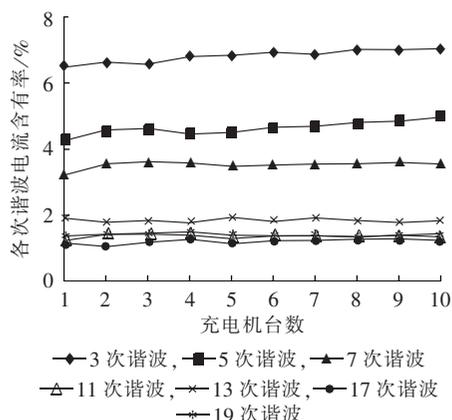


图 6 各次谐波含有率随车载充电机台数变化(三相)

Fig.6 Variation of harmonic current ratios along with number of EV on-board chargers(three-phase)

由图 6 可知,随着车载充电机台数增加,各次谐波电流总体变化不明显,其中 3、5、7 次谐波含量呈缓慢上升趋势,而 11、13、17、19 次谐波含有率基本维持不变。当接入充电机台数相同时,3、5 次谐波数值明显高于其他次谐波数值。

进一步分析表 4 数据可知,在接入相同数量车载充电机的情形下,配电变压器容量越大,电压畸变率越低。在第 2.1 节分析已指出,随着配电变压器容量增大,等效阻抗将逐渐减小,使得同样的谐波电流在变压器低压侧引发的电压畸变降低。结合国家标准 GB/T14549—93<sup>[21]</sup>与表 4 数据可得出,配电变压器容量越大,允许同时接入的车载充电机数量越多。因此,变压器降容将使得小区在未来接入大量车载充电机后,较之前产生更大的电压谐波,反而不利于系统的安全稳定运行。

### 2.3 单相配电系统谐波分析

与国外电网相比,目前我国低压配电网普遍存在线损负荷高、电压质量差等问题。针对这一状况,且考虑到居民生活用电多为单相电,已有研究提出拟在未来居民住宅小区内推广使用单相配电变压

器。经试点实例验证,在负荷分散、密度小、无三相电力用户的条件下使用单相变压器,可显著降低低压线损,提高供电质量。据此,为了分析电动汽车常规充电对该种新型配电模式的谐波影响,建立含车载充电机的单相配电网模型如图 7 所示,同样,为便于仿真忽略了传统负荷及无功补偿设备。



图 7 含多台车载充电机的小区单相配电网模型

Fig.7 Model of single-phase residential distribution network with EV on-board chargers

与三相配电网模型类似,将多台充电机并联在单相配电变压器的低压侧,针对不同标准容量的 10 kV 级 D9 油浸式单相配电变压器(参数见表 5),通过式(1)~(6)分别确定其阻抗参数,经 FFT 法测量不同数量车载充电机接入对低压侧的谐波影响,所得数据见表 6。

表 5 单相配电变压器参数

Tab.5 Parameters of single-phase distribution transformer

额定容量/ (kV·A)	短路 阻抗/%	空载 电流/%	空载 损耗/kW	短路 损耗/kW
50	3.5	2.3	0.15	0.95
80	3.5	2.0	0.20	1.40
100	3.5	1.9	0.24	1.65

表 6 车载充电机接入单相系统的电压与电流畸变

Tab.6 Voltage and current distortions caused by connecting EV on-board chargers to single-phase system

充电机台数	50 kV·A		80 kV·A		100 kV·A	
	电压畸变率/%	电流畸变率/%	电压畸变率/%	电流畸变率/%	电压畸变率/%	电流畸变率/%
1	10.07	4.30	6.77	4.67	5.56	4.66
2	17.87	4.02	12.38	4.24	10.40	4.31
3	23.97	3.66	17.22	4.00	14.67	4.14
4	28.94	3.37	21.52	3.78	18.34	3.98
5	33.09	3.16	24.95	3.57	21.61	3.73
6	36.62	2.93	28.17	3.40	24.57	3.64
7	39.65	2.81	30.96	3.29	27.35	3.50
8	42.32	2.66	33.48	3.17	29.62	3.38
9	44.64	2.51	35.73	2.97	31.84	3.17
10	46.72	2.37	37.84	2.92	33.81	3.09

通过第 2.1 节对配电变压器的阻抗分析,单相配电变压器的低压侧等效电阻较三相变压器最大增长超过 50%。因此,对于相同的谐波电流,车载充电机接入必将导致单相配电系统产生更为严重的电压谐波畸变,正如表 6 数据所显示。同时对比表 4 可知,在接入相同数量充电机情形下,单相配电的电压谐波畸变较三相配电系统可增大 70% 以上,这也印证了关于配电变压器阻抗分析的结论。另一方面,随着

充电机数量增多,单相系统的电压总谐波畸变率增大幅度较三相系统也明显加快。但与三相系统不同的是,电流总谐波畸变率却逐渐降低,充电机间的谐波抵消现象更为明显,其各次谐波电流含有率随充电机数量变化如图 8 所示。

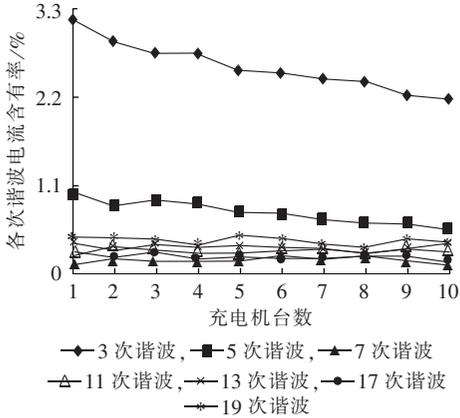


图 8 各次谐波含有率随车载充电机台数变化 (单相)  
Fig.8 Variation of harmonic current ratios along with number of EV on-board chargers (single-phase)

由图 8 可知,随着充电机同时接入数量增加,3、5 次谐波电流含有率下降趋势明显,7、11、13、17、19 等高次谐波含量变化较平缓。3 次谐波电流数值明显高于其他各次谐波,整体谐波含有量较三相系统降低了约 60%。

单相配电变压器因其损耗小、成本低、结构简单及架设便利等特点受到业界的青睐。但是其输出电压单一,只能应用于照明与小型电机,具有较大的局限性。更为重要的是,单相变压器小容量的特点,致使其对谐波的承受力较差,对于未来拟为电动汽车提供充电服务的住宅小区,接入同样数量的车载充电机将会给单相配电系统带来较三相配电系统更大的电压谐波污染,不仅无法起到节能与降低线损的效果,还会严重影响电气设备的正常工作,导致系统无法正常运行。

单相配电变压器的使用在我国刚刚起步,仍需借鉴国外成功的案例与经验,针对我国居民小区的实际情况,因地制宜地推广单相配电供电模式。而对于可为电动汽车充电的住宅小区而言,则不适宜单纯采用单相配电模式。

### 3 结论

a. 本文通过 Simulink 平台设计了通用车载充电机模型,可实现恒流恒压充电过程并符合系统对于接入负载的谐波要求。基于该模型分别建立了含车载充电机的小区三相与单相配电网模型,使用快速傅里叶变换法测量了低压侧谐波。该方法同样适用于可为电动汽车提供常规充电服务的其他区域配

网谐波分析。

b. 随着车载充电机接入数量增多,系统的电压总谐波畸变率明显升高,但是由于多台充电机彼此间的谐波抵消作用,各次谐波电流含有率和总电流谐波畸变率变化平缓,甚至有所减小。当接入充电机台数相同时,单相配电系统电压谐波畸变较三相配电而言更为严重。通过配电变压器阻抗特性分析,对于同样的谐波电流,配电变压器容量越大,系统等效阻抗值越低,产生的电压谐波畸变越小,系统对谐波电流的承受力越强。

c. 单相配电模式容量小,对谐波电流的承受力差,未来拟为电动汽车提供车载充电服务的住宅小区不适宜采用该种配电模式。对于现行的三相配电系统,还需根据其同时接入的充电车辆数目进行配电容量改造,以减小系统电压谐波畸变。若短期内无法实现变压器增容,可以考虑在低压母线上加装谐波治理装置以抑制车载充电机的谐波电流。

### 参考文献:

- [1] 赵俊华,文福拴,杨爱民,等. 电动汽车对电力系统的影响及其调度与控制问题[J]. 电力系统自动化,2011,35(14):2-10.  
ZHAO Junhua,WEN Fushuan,YANG Aimin,et al. Impacts of electric vehicles on power systems as well as the associated dispatching and control problem[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(14):2-10.
- [2] 王建,吴奎华,刘志珍,等. 电动汽车充电对配电网负荷的影响及有序控制研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(8):47-52.  
WANG Jian,WU Kuihua,LIU Zhizhen,et al. Impact of electric vehicle charging on distribution network load and coordinated control[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(8):47-52.
- [3] 苗铁群,江全元,曹一家. 考虑电动汽车及换电站的微网随机调度研究[J]. 电力自动化设备,2012,32(9):18-24.  
MIAO Yiqun,JIANG Quanyuan,CAO Yijia. Microgrid stochastic dispatch considering electric vehicles and battery swap stations [J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(9):18-24.
- [4] 曾正,赵荣祥,杨欢,等. 电动汽车高渗透率的应对策略及换电站的最优规划[J]. 电力自动化设备,2012,32(9):7-12.  
ZENG Zheng,ZHAO Rongxiang,YANG Huan,et al. Responsive schemes to high penetrations of electric vehicles and optimal planning of battery swap stations[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(9):7-12.
- [5] 冯超,周步祥,林楠,等. Delphi 和 GAHP 集成的综合评价方法在电动汽车充电站选址最优决策中的应用[J]. 电力自动化设备,2012,32(9):25-29.  
FENG Chao,ZHOU Buxiang,LIN Nan,et al. Application of comprehensive evaluation method integrating Delphi and GAHP in optimal siting of electric vehicle charging station[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(9):25-29.
- [6] 何明杰,彭春华,曹文辉,等. 考虑电动汽车规模化入网的动态经济调度[J]. 电力自动化设备,2013,33(9):82-88.  
HE Mingjie,PENG Chunhua,CAO Wenhui,et al. Dynamic economic dispatch considering large-scale integration of electric ve-

- icles[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(9): 82-88.
- [7] 黄梅, 黄少芳, 姜久春. 电动汽车充电机(站)接入电力系统谐波分析[J]. 北京交通大学学报, 2008, 32(5): 85-88.  
HUANG Mei, HUANG Shaofang, JIANG Jiuchun. Harmonic study of electric vehicle chargers[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2008, 32(5): 85-88.
- [8] 陈新琪, 李鹏, 胡文堂, 等. 电动汽车充电站对电网谐波的影响分析[J]. 中国电力, 2008, 41(9): 31-36.  
CHEN Xinqi, LI Peng, HU Wentang, et al. Analysis of impacts of electric vehicle charger on power grid harmonic[J]. Electric Power, 2008, 41(9): 31-36.
- [9] 李娜, 黄梅. 不同类型电动汽车充电机接入后电力系统的谐波分析[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 170-174.  
LI Na, HUANG Mei. Analysis on harmonics caused by connecting different types of electric vehicle chargers with power network[J]. Electric Power, 2011, 35(1): 170-174.
- [10] 卢艳霞, 张秀敏, 蒲孝文. 电动汽车充电站谐波分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(3): 51-54.  
LU Yanxia, ZHANG Xiumin, PU Xiaowen. Harmonic study of electric vehicle chargers[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2006, 18(3): 51-54.
- [11] 李晶, 姜久春. 纯电动汽车充电机系统稳定性研究[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(9): 13-17.  
LI Jing, JIANG Jiuchun. System stability of battery charger for battery electric vehicle[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(9): 13-17.
- [12] 胡萍. 平均电流型有功功率因数校正技术的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.  
HU Ping. The research on active power factor correction technology with average current mode[D]. Chengdu: Southeast Jiaotong University, 2011.
- [13] 章桐, 贾永轩. 电动汽车技术革命[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 145-160.
- [14] CLEMENT-NYNSI K, HAESSEN E, DRIESEN J. The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 371-380.
- [15] 徐海明. 电动汽车充电站运行与维护技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012: 51-68, 127-129.
- [16] 全国电磁兼容标准化技术委员会. GB17625.1—2003 电磁兼容限值 谐波电流发射限值(设备每相输入电流 $\leq 16A$ )[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2003.
- [17] 王希平, 李文才, 李燕, 等. 基于 Simulink 配电变压器模型的建立及仿真[J]. 自动化技术与应用, 2009, 28(9): 124-126.  
WANG Xiping, LI Wencai, LI Yan, et al. The building and emulation of distribution transformer model based on Simulink[J]. Techniques of Automation and Applications, 2009, 28(9): 124-126.
- [18] 中国机械工业联合会. GB50052—2009 供配电系统设计规范[S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2009.
- [19] 曹杰, 黄淑芹. 新建住宅小区供电方案的优化设计[J]. 电力需求侧管理, 2008, 10(3): 55-56.  
CAO Jie, HUANG Shuqin. Optimal design on power supply scheme of new residential quarters[J]. Power Demand Side Management, 2008, 10(3): 55-56.
- [20] 张谦, 韩维健, 俞集辉, 等. 电动汽车充电站仿真模型及其对电网谐波影响[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 159-164.  
ZHANG Qian, HAN Weijian, YU Jihui, et al. Simulation model of electric vehicle charging station and the harmonic analysis on power grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 159-164.
- [21] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会. GB/T14549—93 电能质量 公用电网谐波[S]. 北京: 国家技术监督局, 1993.

#### 作者简介:



魏大钧

魏大钧(1988-), 男, 山东济南人, 博士研究生, 研究方向为电动汽车与电网协调控制(E-mail: tonywei7991\_cn@sina.com);

孙波(1981-), 男, 山东潍坊人, 副教授, 博士, 通讯作者, 研究方向为电动汽车优化控制、智能充电(E-mail: sunbo@sdu.edu.cn);

张承慧(1963-), 男, 山东德州人, 长江学者特聘教授, 博士研究生导师, 研究方向为控制理论及应用、电气传动自动化、新能源与电力电子技术。

## Harmonics caused by connecting EV on-board chargers to residential distribution network

WEI Dajun, SUN Bo, ZHANG Chenghui

(School of Control Science and Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

**Abstract:** The characteristics of harmonics caused by connecting EV(Electric Vehicle) on-board chargers to residential distribution network are analyzed. The models for simulating the connection of EV on-board chargers to traditional three-phase and new single-phase distribution networks are built based on Simulink platform and, combined with the analysis of distribution transformer impedance characteristics, the variation of generated harmonics along with the number of connected EV chargers is compared between two distribution models. Results show that, the harmonic current changes gently while the voltage distortion rate increases significantly along with the increase of charging EV number for both models; with the same number, the greater the distribution capacity is, the smaller the voltage distortion will be; the harmonic voltage distortion of single-phase distribution is greater than that of three-phase distribution, with growth of 70% above and showing lower tolerance to harmonics.

**Key words:** electric vehicles; on-board charger; charging; residential distribution; harmonic analysis; transformer capacity