

电动汽车充电设备特性的研究

李炳华¹, 朱心月², 王 成², 常 昊², 岳云涛²

(1. CCDI 悉地国际集团, 北京 100013; 2. 北京建筑大学, 北京 100044)

摘要: 通过采集交流充电桩和非车载充电机在充电过程中的实际运行数据, 从充电设备的负荷性质(感性、容性)、充电特性(充电电压、充电电流和充电功率)及谐波特征三方面对电动汽车的充电特性进行阐述。

关键词: 非车载充电机; 交流充电桩; 负荷性质; 充电特性; 谐波特征

Research on characteristics of electric vehicle charging equipment

LI Binghua¹, ZHU Xinyue², WANG Cheng², CHANG Hao², YUE Yuntao²

(1. CCDI Group, Beijing 100013, China; 2. Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: The actual operating data of AC charging piles and off-board chargers during the charging process are collected, the charging characteristics of electric vehicle are described from three aspects of the load characteristics (inductive loads, capacitive loads), charging characteristics (charging voltage, charging current, charging power) and harmonic characteristics of the charging equipment.

Key words: off-board chargers; AC charging piles; load characteristics; charging characteristics; harmonic characteristics

0 引言

我国国家标准 GB/T 19596—2017《电动汽车术语》定义了电动汽车, 即纯电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池电动汽车总称为电动汽车。IEC 61851-1《Electric vehicle conductive charging system - Part 1: General requirements》中定义电动汽车为主要用于在公共街道、公路或高速公路上使用的、由电动机驱动的车辆, 其驱动电流来源于可充电电池或其他便携式储能设备(可再充电, 使用的能源来自车辆外, 如居民区或公共电力设施)。IEC 标准注明该术语来源于 ISO, “电动道路车辆”术语通常被称为“电动车”^[1-3]。

电动汽车的组成包括电力驱动及控制系统、驱动力传动等机械系统和辅助工作装置

等。电力驱动及控制系统是电动汽车的核心, 也是区别于内燃机汽车的最大不同点。根据目前技术的发展方向或车辆驱动原理, 电动汽车主要划分为纯电动汽车(BEV)、混合动力汽车(HEV)和燃料电池汽车(FCEV), 如表1所示。

电动汽车充电设备是一种专为电动汽车动力电池充电的电力转换装置。非车载充电机固定安装在电动汽车外, 与交流电网连接, 输出可调的直流电, 直接为电动汽车动力电池提供电能。非车载充电机采用三相电源供电, 输出电压和输出电流宽范围可调, 大功率输出。

交流充电桩也是固定安装在电动汽车外, 与交流电网连接。由于其只具备电能输出功能, 需连接车载充电机为电动汽车动力电池提

表1 新能源汽车分类及其驱动能源

Tab. 1 New energy vehicle classification and driving energy

新能源汽车分类	技术特征
纯电动汽车 (BEV)	一种具备插入式充电功能的汽车，驱动能源全部来自于电池
插电式混合动力汽车 (PHEV)	一种具备插入式充电功能的汽车，驱动能源可以来自于电池或液体燃料
混合动力汽车 (HEV)	一种不具备插入式充电功能的汽车，驱动能源只能来自于液体燃料
燃料电池汽车 (FCEV)	一种不具备插入式充电功能，也不含有电驱动系统和电池的传统汽车，驱动能源只能来自于液体燃料

供电能。目前，国内主流的车载充电机功率为3.3 kW和6.6 kW。

非车载充电机和交流充电桩最大的区别在于交流充电桩需要连接电动汽车上的车载充电机为电动汽车动力电池进行充电，而非车载充电机可以直接为电动汽车动力电池充电。交流充电桩为一辆完全放电的电动汽车充满电需要8 h，甚至更长的时间，故称为“慢充”；而非车载充电机仅需要2~3 h，大功率非车载充电机充满80%电量仅需30 min，故称为“快充”^[4-6]。

1 充电特性研究

1.1 充电设备的负荷性质

充电设备内部电容器会向系统输送容性无功，在没有汽车充电时，有功功率为0，此时系统功率因数呈现容性。图1为某进口品牌180 kW非车载充电机在待机状态下的输入波形，电流超前电压，呈容性。

在对某实际工程非车载充电机进行空载测试时，发现120 kW充电设备内有8个模块，1个模块内有300 var的电容，故一个非车载充电机约有2.4 kvar的容性无功。通过表2数据可知，起动的充电模块越多，容性无功越大。

下面将从非车载充电机单独充电、交流充电桩单独充电以及非车载充电机和交流充电桩同时充电三个角度分析充电设备在充电过程中的负荷特性。

1.1.1 非车载充电机

图2为60 kW非车载充电机A枪为众泰E200

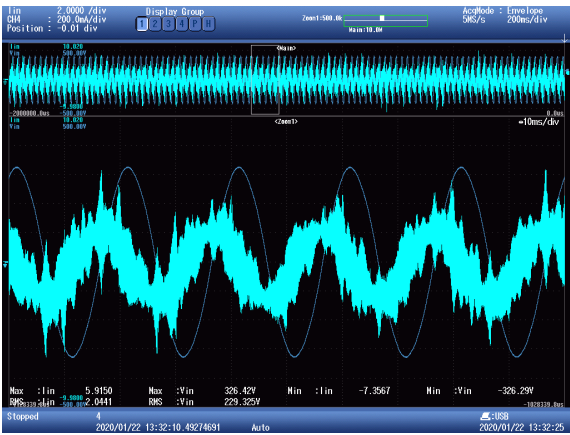


图1 180 kW非车载充电机在待机状态下输入波形

Fig. 1 180 kW input waveform of off-board charger in standby mode

表2 开启充电模块数量对无功功率的影响

Tab. 2 The influence of the number of charging modules on the reactive power

开启充电模块数量/个	无功功率/kvar	PF	负载特性
2	1.2	0.09	容性
4	2.1	0.07	
6	3.1	0.06	
8	4.1	0.06	
16	7.5	0.06	
35	15.1	0.06	

(电池电量80%) 充电时的充电曲线。

图3为60 kW非车载充电机B枪为北汽EC200 (电池电量较低) 充电时的充电曲线。

1.1.2 交流充电桩

图4为交流充电桩充电曲线。L1相接3.3 kW交流充电桩和7 kW交流充电桩分别为北汽EC180、北汽EU260进行充电；L2相接3.3 kW交流充电桩为北汽EC180进行充电；L3相无负载。

1.1.3 交直流混合充电

图5为交流充电桩和非车载充电机混合使用时的充电曲线。L1相接3.3 kW交流充电桩为北汽EC180进行充电；L2相接3.3 kW交流充电桩为北汽EC180进行充电；L3相无负载。60 kW非车载充电机为江淮VA50进行充电。

表3为不同负载下各相的相位角。

从表3中的数据可以看出，交直流同时充电时，三相均呈容性；交流充电桩充电时，L2、L3相呈感性；非车载充电机单独充电时，充电

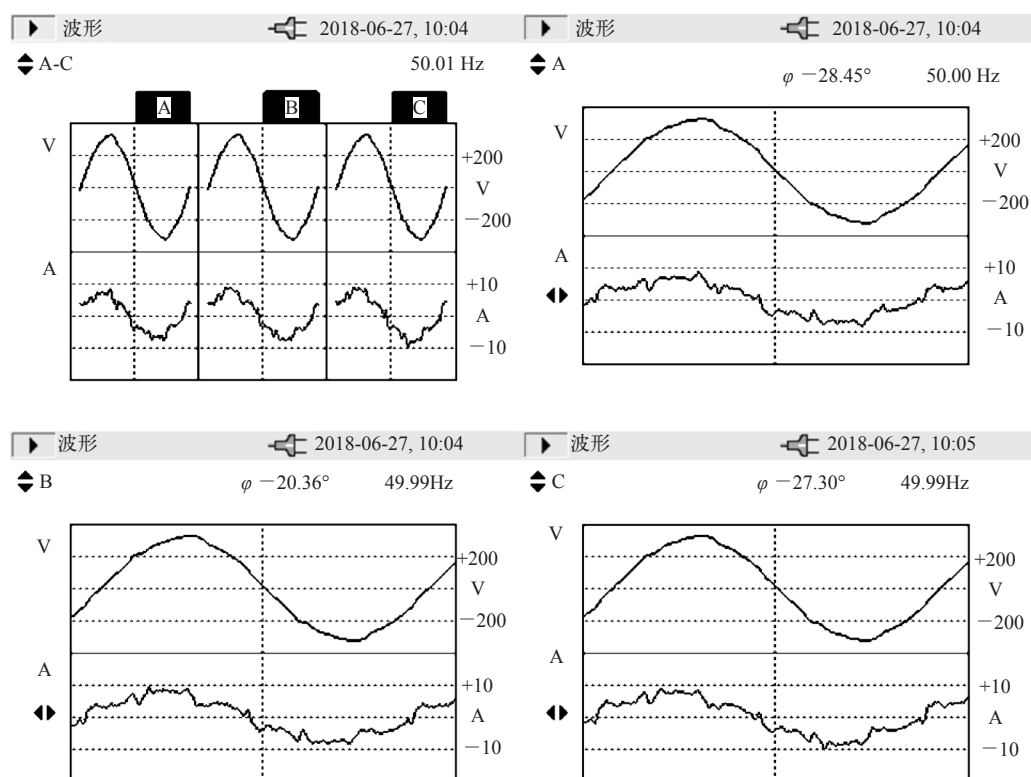


图2 非车载充电机众泰E200充电曲线

Fig. 2 Charging curve of off-board charger Zhongtai E200

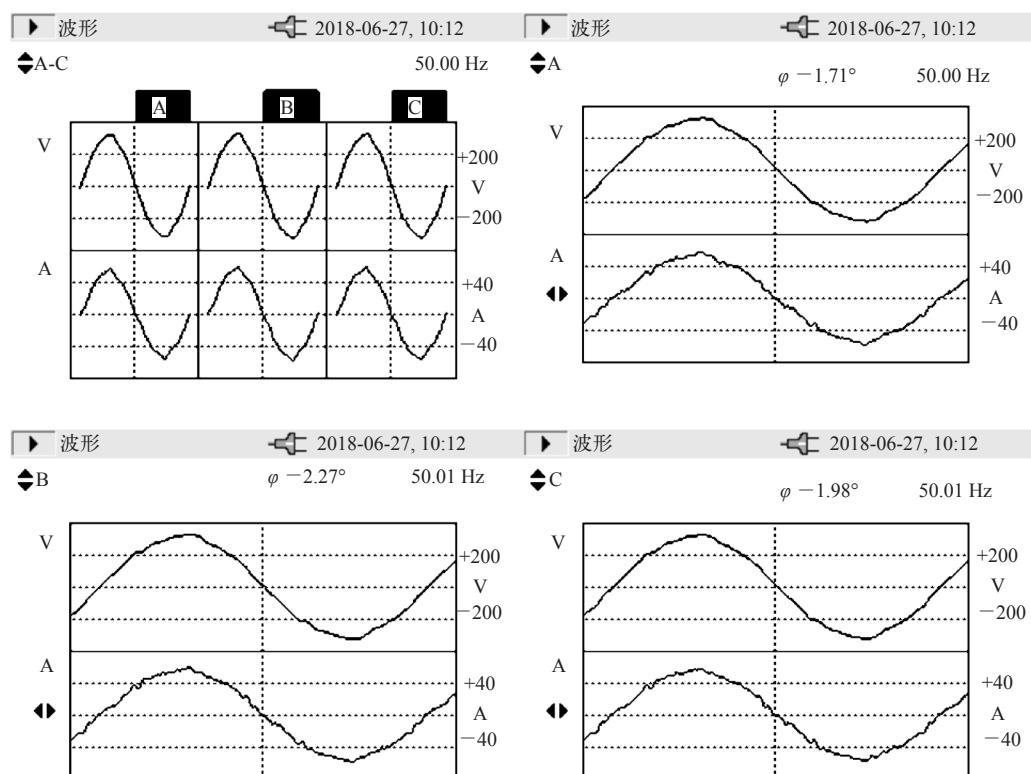


图3 非车载充电机北汽EC200充电曲线

Fig. 3 Charging curve of off-board charger Beiqi EC200

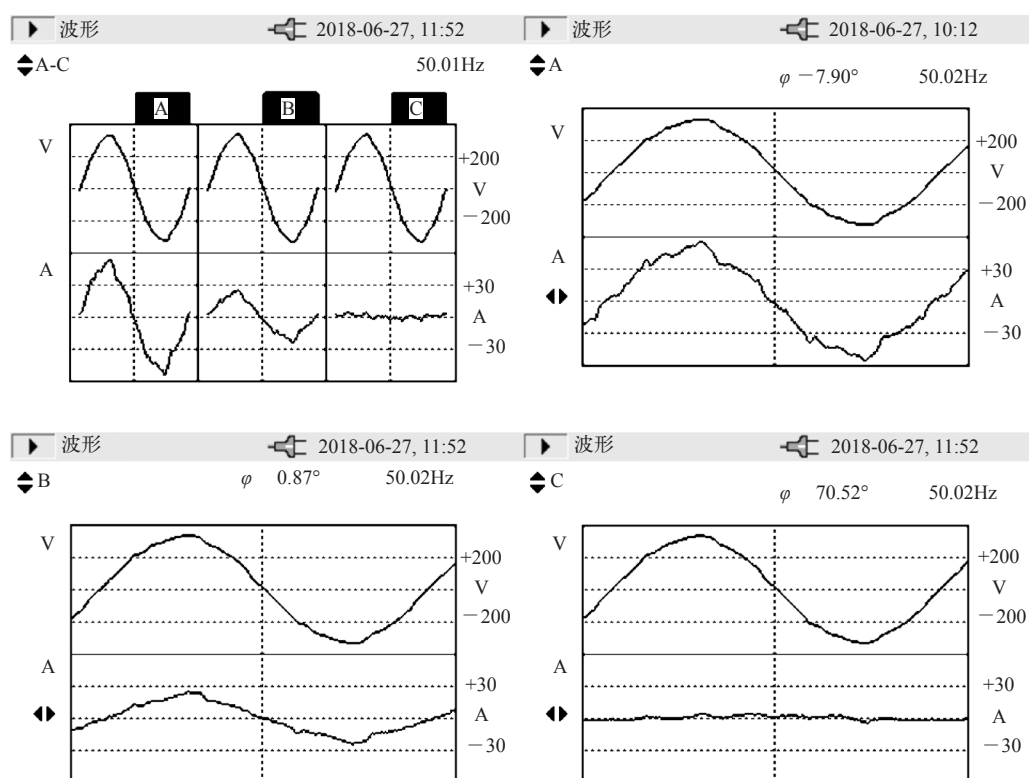


图4 交流充电桩充电曲线

Fig. 4 Charging curve of AC charging pile

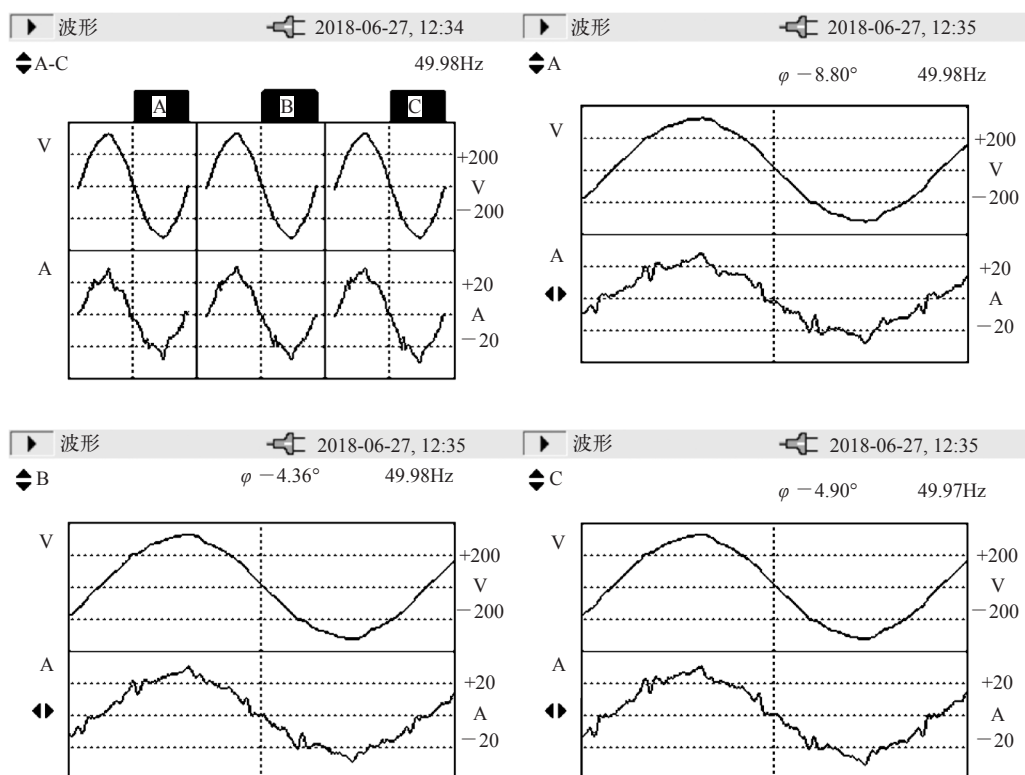


图5 交流充电桩和非车载充电机混合使用

Fig. 5 Mixed use of AC charging pile and off board charger

表3 不同负载下各相的相位角
Tab. 3 Phase angle of each phase under different loads

负载	相位角 $\varphi(^{\circ})$		
	L1	L2	L3
直流充电 60 kW A 枪	-28.45	-20.36	-27.3
交流待机 60 kW B 枪	-1.71	-2.27	-1.98
交流充电、直流待机	-7.9	0.87	70.52
交直流同时充电	-8.8	-4.36	-4.9

设备呈容性。

1.2 充电特性测试数据

近年来,国内外学者一直致力于寻找锂离子电池最优充电曲线,提出了多种锂离子电池充电方法,根据锂离子电池充电电流及电压的控制大小,可将电池充电方法分为以下几种:

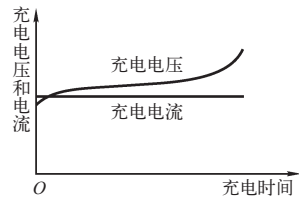
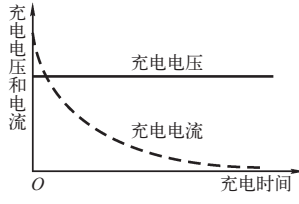
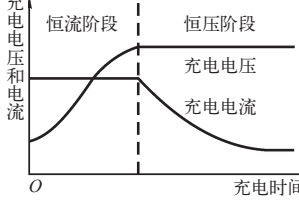
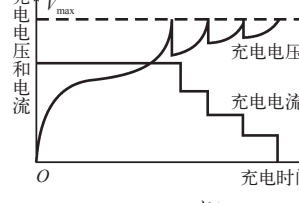
恒流充电 (Constant Current, CC)、恒压充

电 (Constant Voltage, CV)、恒流恒压充电 (CC-CV)、多段恒流充电 (MCC) 和脉冲充电 (Pulsed Charging, PC) 等^[7-9],如表4所示。

为了了解电动汽车在实际充电过程中的充电特性,下文将通过采集北京某公司某充电设备在充电过程中的运行数据,选取典型特征曲线分别从充电电压特性、充电电流特性和充电功率特性三方面说明交流充电桩和非车载充电机两大类充电设备的充电特性。其中,单相交流充电桩输入电压为 $220\text{ V} \pm 10\%$,输入频率为 $50/60\text{ Hz}$,输出电压为 $220\text{ V} \pm 10\%$,输出电流为 32 A ,为电动汽车车载充电机提供交流电源。非车载充电机 $60\text{ A}/500\text{ V}$,采用三相四

表4 不同充电方式下的充电曲线和特征

Tab. 4 Charging curve and characteristics under different charging modes

充电方式	充电曲线	特征
恒流充电 (CC)		充电过程中开关电源保持恒定输出电流对电池进行充电。这种模式一般只用于充电初期或用小倍率电流去硫化
恒压充电 (CV)		充电过程中开关电源保持恒定输出电压对电池进行充电。这种模式一般适用于充电中后期,电池端电压趋于稳定
恒流恒压充电 (CC-CV)		充电过程中结合恒流充电和恒压充电两个阶段对电池进行充电。这种模式有效地避免了恒压充电初始电流过大对电池造成的伤害,既解决了小倍率恒流充电时间过长、效率较低的问题,又有效避免了大倍率恒流充电后期的电池温升或过充,降低了对电池的损害
多段恒流充电 (MCC)		充电过程中在不同阶段选用不同的恒定电流对电池进行充电。这种方法充分考虑充电过程中电池的极化反应,既能保证电池在大电流下高速充电,又能控制极化反应对电池造成的伤害
脉冲充电 (PC)		充电过程中以脉冲电流的形式对电池进行充电。通过调整脉冲幅值和占空比来控制电池充入电量和间歇时间。短暂的停充或负脉冲可以消除电池极化现象,延缓电池老化

线AC 380 V (±15%) 输入电压, 输入频率为50/60 Hz, 输出可调的直流电, 输出电压为DC 500 V, 输出电流为60 A, 直接为电动汽车的动力电池充电。

1.2.1 充电电压特性

在对充电电压特性进行研究时, 发现充电电压存在一个动态波动过程, 但基本满足车辆需求的电压值。

(1) 交流充电桩

图6为交流充电桩的充电电压特性。在整个充电过程中, 交流充电桩输出电压不可调, 故始终维持在一个相对恒定的充电电压。

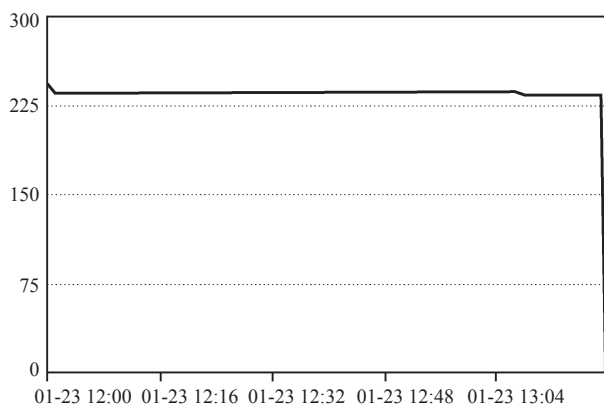


图6 交流充电桩充电电压特性

Fig. 6 Charging voltage characteristics of AC charging pile

(2) 非车载充电机

图7为非车载充电机的充电电压特性。在整个充电过程中, 非车载充电机的充电电压在充电过程中开始阶段快速上升, 然后进入缓慢上升阶段, 这是由车端BMS决定的。

1.2.2 充电电流特性

1972 年美国科学家J. A. Mas以充电时副反应产生气体最少为最大可接受充电的边界条件, 提出针对铅酸蓄电池在充电过程中的最佳充电曲线。马斯理想充电曲线如图8所示, 可以用以下公式来表达, 即

$$I = I_0 e^{-\partial t}$$

式中, I 为充电电流; I_0 为初始充电电流; ∂ 为充电接受比; I_0 和 ∂ 的值与电池类型、结构和使用程度有关。

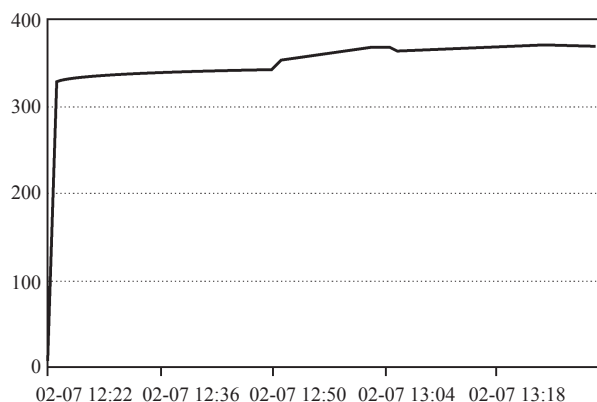


图7 非车载充电机充电电压特性

Fig. 7 Charging voltage characteristics of off board charger

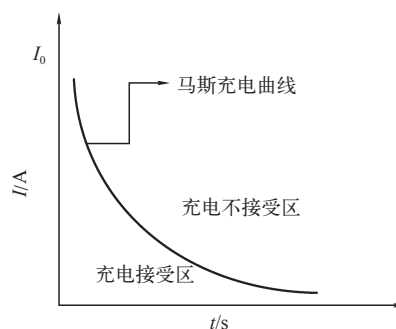


图8 马斯理想充电曲线

Fig. 8 Mas ideal charging curve

从图8中可以看出, 当充电电流大于最佳充电曲线时, 电池会产生大量析气, 不仅不能提高充电效率, 还会对电池造成伤害; 当充电电流小于最佳充电曲线时, 虽不会对电池造成伤害, 但会降低充电效率。虽然当年马斯的研究对象是铅酸蓄电池, 但马斯充电曲线可以定性指导锂电池充电技术的发展。现阶段对电池充电方法的研究主要是基于最佳充电曲线来开展的。

(1) 交流充电桩

图9为交流充电桩的充电电流特性。如图9a、b所示, 对于较老车型而言, 充电过程分为三个阶段, 满功率充电约2 h, 降功率充电约1 h, 最后以约3.5 A的充电电流充电50 min; 随着老车型保有量逐渐减小, 对于新车型而言, 如图9c、d所示, 多采用恒流充电, 且以32 A恒流充电居多。

(2) 非车载充电机

图10为非车载充电机的充电电流特性。GB/T 27930—2015《电动汽车非车载传导式充

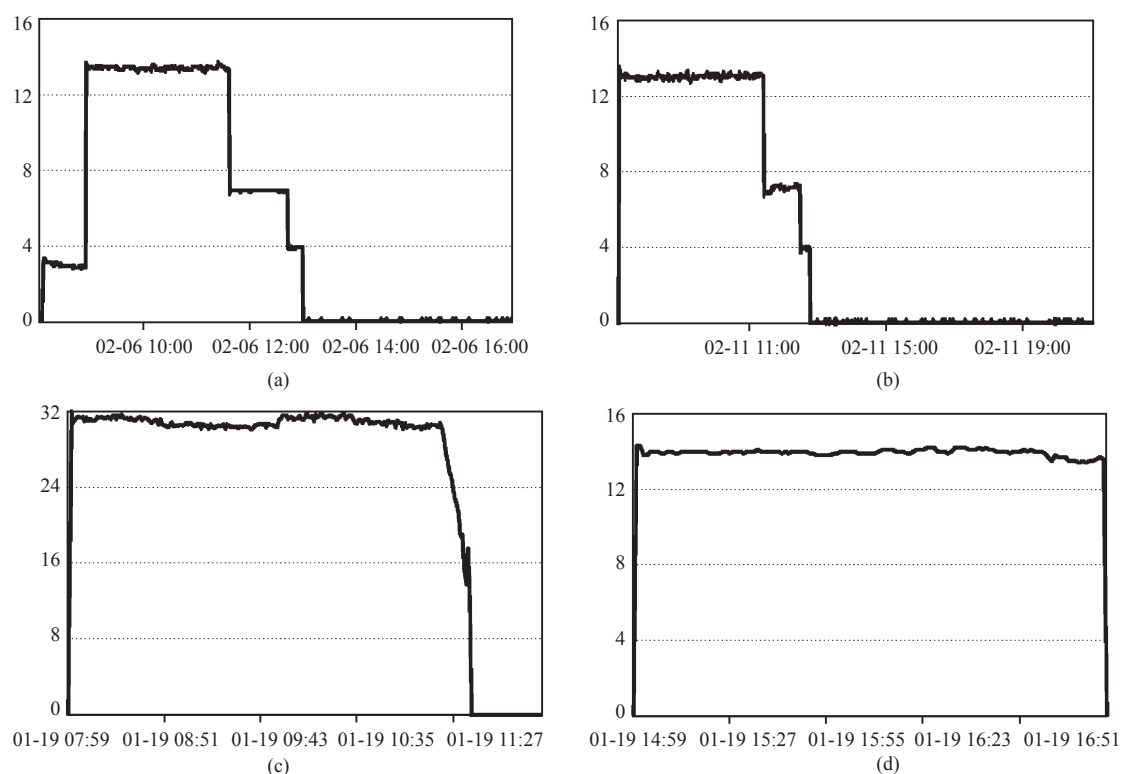


图9 交流充电桩的充电电流特性

Fig. 9 Charging current characteristics of AC charging pile

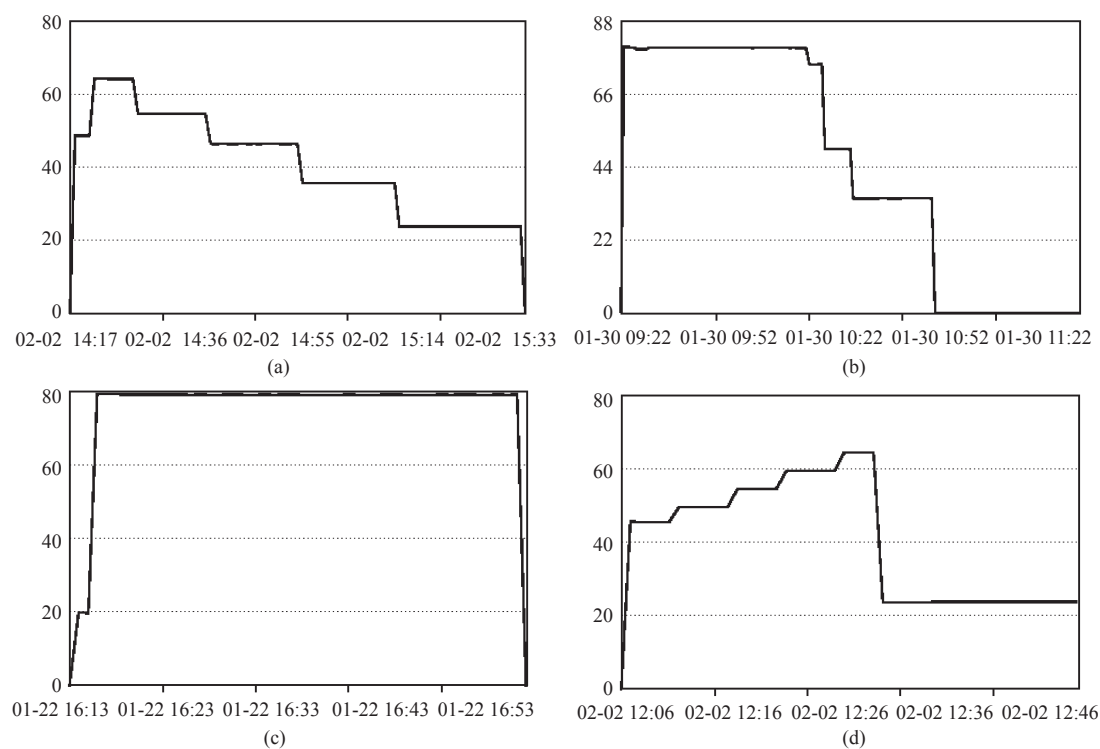


图10 非车载充电机充电电流特性

Fig. 10 Charging current characteristics of off-board charger

电机与电池管理系统之间的通信协议》要求通过BMS进行锂离子电池组的温度监控，如图10a

所示，在气温较低时，需要先预热再充电，新国标则不需要预热。图10b为北汽EU260等车型

的典型充电特征，这种充电电流分段减小的模式最大化逼近马斯充电曲线的大致规律。图10c

中，对于新车型（如BYD、威玛和特斯拉等）采用恒定电流充电，在电池容量达到约98%时，

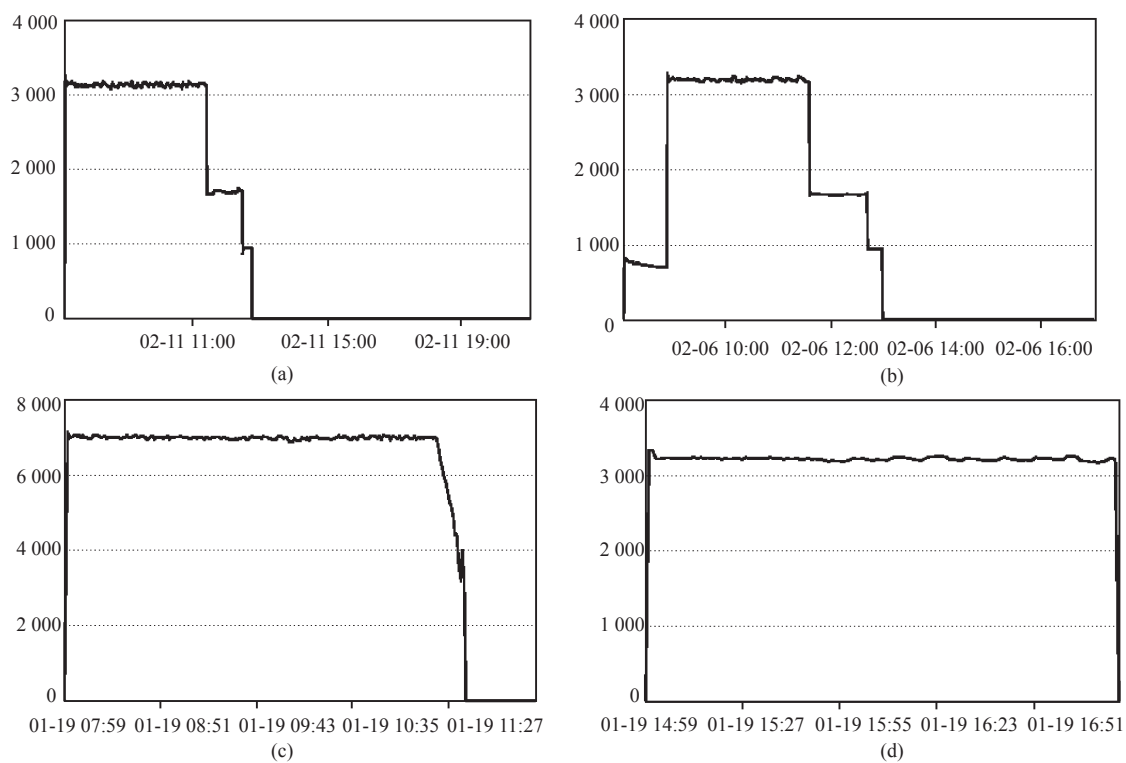


图11 交流充电桩充电功率特性

Fig. 11 Charging power characteristics of AC charging pile

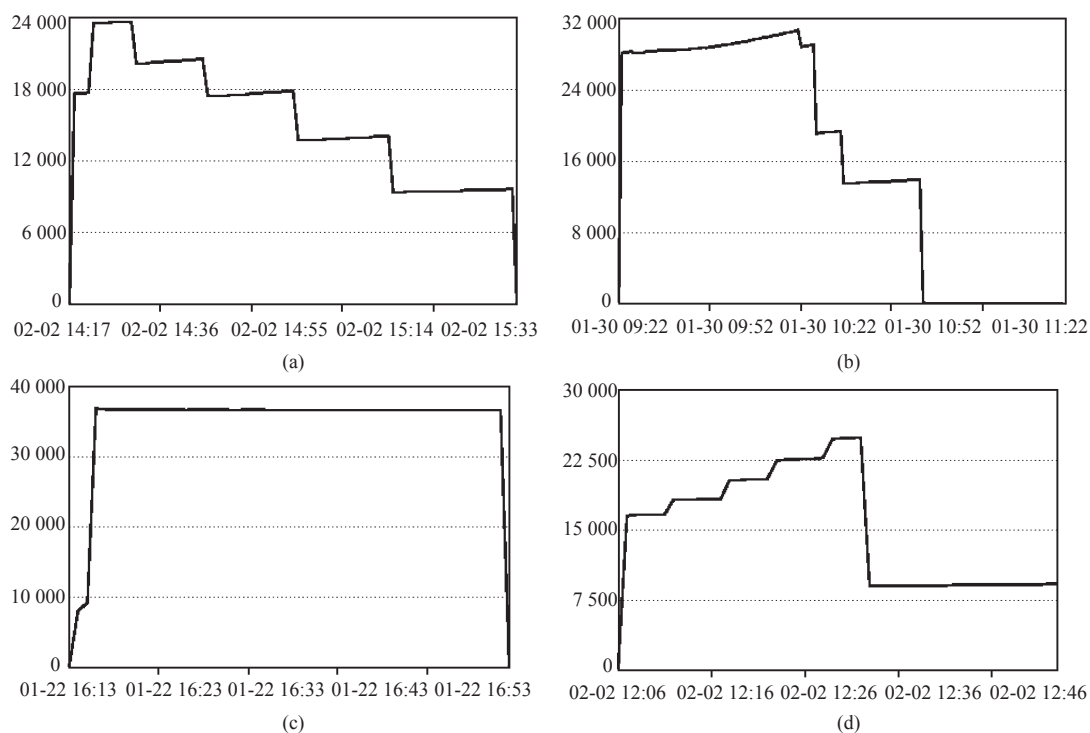


图12 非车载充电机充电功率特性

Fig. 12 Charging power characteristics of off board charger

充电电流开始快速下降,直至充电结束;图10d中的北汽车型,在天气较冷时,充电约30 min 电池容量就能达到95%,然后充电电流开始快速下降至20 A左右继续充电。

1.2.3 充电功率特性

经过前两部分对充电电压特性和充电电流特性进行分析可知,充电电压在充电过程中是一个动态变化过程,变化幅度不大,这就决定了充电功率特性基本由充电电流特性决定。

(1) 交流充电桩

图11为交流充电桩的充电功率特性。如图11a、b所示,对于较老的车型而言,充电过程分为三个阶段,满功率充电约2 h,降功率充电约1 h,最后以约1 kW充电50 min。如图11c、d所示,对于新车型而言,多采用恒功率充电,且采用7 kW恒功率充电居多。

(2) 非车载充电机

图12为非车载充电机的充电功率特性,充电规律参考非车载充电机充电电流特性。但值得注意的是,在这个过程中,由于充电电压逐渐上升,故充电功率在每个阶段内也是逐渐上升的。非车载充电机内部搭载多个功率模块,常见的功率模块为15 kW、20 kW。市面上主流的充电设备额定功率为60~90 kW,电动大巴车用充电设备额定功率一般为120 kW及以上。不同车企的不同车型其电动汽车的BMS均存在细微差别,并对充电功率特性产生影响。当非车载充电机充电能力大于电动汽车充电需求时,充电速度的决定权在于电动汽车的技术性能(容量、倍率、充电电压和电流等);反

之则由非车载充电机本身充电能力决定,充电设备额定功率越大,充电速度越快。在充电最后阶段都有降容充电的特点,只是降容开始的时间和降容次数有所不同。

1.3 充电设备的谐波特征

测试情况如下,测试数据如表5所示。

1) 60 kW非车载充电机A枪为众泰E200(电池电量80%)进行充电,充电电流为5 A。

2) 60 kW非车载充电机B枪为北汽EC200进行充电,采用分段充电,起始阶段充电电流为40 A,接近充满时12 A。

3) 60 kW非车载充电机A枪为北汽EU260进行充电,采用分段充电,起始阶段充电电流为60 A,接近充满时20 A。

4) L1相接3.3 kW交流充电桩和7 kW交流充电桩分别为北汽EC180、北汽EU260进行充电;L2相接3.3 kW交流充电桩为北汽EC180进行充电;L3相无负载。

5) 交流充电桩和非车载充电机混合使用。L1相接3.3 kW交流充电桩为北汽EC180进行充电;L2相接3.3 kW交流充电桩为北汽EC180进行充电;L3相无负载。60 kW非车载充电机为江淮VA50进行充电。

通过表5所示数据可得如下几个结论:

1) 无论交流充电桩还是非车载充电机,在充电电流较大时,谐波含量较小;在充电电流较小时,谐波含量较大。

2) 非车载充电机在充电初期采用大电流进行充电时,虽然谐波绝对值稍大,但谐波畸变率很小,对电网干扰也很小;在充电后期采用

表5 不同负载下负载电流和谐波畸变率

Tab. 5 Load current and harmonic distortion rate under different loads

负载	负载电流/A				谐波畸变率 (%)		
	A	B	C	N	A	B	C
众泰 E200	5	5	5		12.7	13.4	12.7
非车载充电机 60 kW	38	40	39		3.9	3.7	3.5
	11	12	12		10.4	9.7	10.4
	56	57	57		3	2.8	2.9
	23	23	23		4.7	5.2	5.1
交流充电直流待机	35	14	2	31	7.5	10.9	75
交、直流同时充电	16	18	18	2	13.2	9.6	9.7

小电流进行充电时,虽然谐波畸变率较高,但总电流较小,故谐波绝对值并不大。

3) 交流充电桩由于其为配电、保护、计量和控制等功能,因此,单个交流充电桩谐波含量也不大,且主要反映车载充电机的谐波情况。

4) 安装在多个充电桩的配电线路上,谐波畸变率的大小更多的取决于单相总电流的大小。总电流越大,谐波畸变率越低;总电流越小,谐波畸变率越高。

5) 含有单相交流充电桩的回路存在使用时的三相负荷不平衡,导致中性线上电流过大,在导线选择时需加以注意。

2 结束语

通过对交流充电桩和非车载充电机在充电过程中的实际运行数据进行分析,可得到如下结论:

1) 充电设备的负荷性质如表6所示。

表6 充电设备的负荷性质

Tab. 6 Load properties of charging equipment

负载情况	空载	带载
交流充电桩	容性	容性、或高感性
非车载充电机	容性	容性

2) 充电设备的充电特性。对于新车型而言,交流充电桩多采用恒功率充电,且以7 kW恒功率充电居多。对于非车载充电机,受电动汽车BMS的影响,当非车载充电机充电能力大于电动汽车充电需求时,充电特性的决定权在于电动汽车的技术性能;反之则由非车载充电机本身充电能力决定,充电设备额度功率越大,充电速度越快。在充电最后阶段都有降容充电的特点,只是降容开始的时间、降容系数和降容次数有所不同。

3) 充电设备的谐波特征。无论交流充电

桩还是非车载充电机,在充电电流较大时,谐波含量较小;在充电电流较小时,谐波含量较大。从数据来看,无论交流充电桩还是非车载充电机,谐波含量都不大。

参考文献

- [1] 电动汽车充电基础设施设计与安装:18D705-2[S].
- [2] 电动汽车术语:GB/T 19596-2017[S].
- [3] 电动汽车非车载传导式充电机与电池管理系统之间的通信协议:GB/T27930-2015[S].
- [4] 李炳华,贾佳,岳云涛,等.交流充电桩需要系数研究[J].智能建筑电气技术,2017,11(3):12-16,20.
- [5] 吴斌,孟焕平.住宅小区车库交流充电桩需要系数取值探讨[J].建筑电气,2017,36(12):3-8.
- [6] 龙海珊,孟焕平.电动汽车充电设施设计关键问题研究[J].建筑电气,2018,37(2):3-8.
- [7] 袁臣虎,唐静雅,刘晓明,等.锂电池全生命周期充电规划方法研究分析[J].电源技术,2019,43(10):1645-1648,1736.
- [8] 方浩然.动力锂离子电池分段优化充电方法与应用研究[D].济南:山东大学,2019.
- [9] 焦立春.电动汽车基于大电流快速充电的二次均衡研究[D].石家庄:河北科技大学,2019.

作者简介



李炳华

李炳华(1962-),男,教授级高工,主要研究方向为建筑电气。

(收稿日期:2020-02-10)EA