

基于虚拟电池技术的电动汽车充电设备测试系统

颜湘武,王丽娜,李艳艳,谷建成,张波,尹菲菲,张合川

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,河北 保定 071003)

摘要: 结合可控直流负载和动力电池组的优点,基于虚拟电池技术开发了一套电动汽车充电设备测试系统。该系统由可控交流电源、充电负载模块、测量装置、保护控制装置和中央控制系统组成,能够完成针对电动汽车充电设备(主要是车载充电机、非车载充电机及其充电模块)的功能性测试、电气性能测试、接口与通信测试、电能质量特性测试和附加功能性测试。对多台非车载及车载充电机的测试结果表明,所开发的测试系统实现了全面自动化测试,测试效率高。

关键词: 电动汽车; 电池; 充电; 测试; 虚拟电池技术; 试验平台

中图分类号: TM912;U 469.72

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.11.005

0 引言

随着环境问题日益突出和石油消耗量不断攀升,电动汽车在提高经济效益、减少环境污染和保障能源安全方面的优势越发凸显^[1-2]。近年来,在国家政策的激励下,充电设备作为电动汽车运行的配套设施,正处于大规模推广阶段。充电设备电气性能对动力电池寿命、充电经济性以及电网电能质量有着重要的影响^[3-5]。随着电动汽车产业发展,越来越多的高性能充电机被研发出来^[6-7]。虽然目前相关行业、企业标准中^[8-14],提出了关于电动汽车充电设备的测试内容和测试方法,为测试提供了参考,但没有制定相应测试细则和步骤,对应的国家标准尚未出台。因此有必要研究一套既能对充电设备进行性能测试又能为测试方法研究提供平台的自动化测试系统。

在电动汽车充电设备测试装置和试验方法方面,国内外学者进行了一定的研究。云南电力试验研究院研究了一种非车载充电机试验测试平台^[15],北京交通大学研究人员开发了基于计算机的“电气性能测试系统”^[16]。两者的特点是硬件平台分为交流输入、直流负载和测量装置3个部分,两者的直流负载部分分别采用了分级电阻和程控电子负载,其控制和测量方法简单,主要测试不同功率下的充电设备特性。H. Bai等在插入式电动汽车充电机设计中,使用320 V/44 A·h 锂电池组作为充电负载搭建测试平台,来验证所设计的大功率充电机的性能^[17]。该方法使用动力电池作为充电负载,由于动力电池包本身

的参数固定,所以只用于一些充电对象固定的充电机,无法作为一种通用的测试试验方法。Han Seung-Ho等开发了用于电动汽车快速充电机的测试装置QCTE,该测试装置将动力电池的充电曲线转换成充电需求,通过计算机发送到充电机,使充电机按照该需求进行充电,并可通过计算机完成自动测试过程^[18]。该方法不能模拟不同规格参数的动力电池组在不同充电条件下的充电特性。

通过比对以上测试平台和测试方法,可以看出,可控直流负载作为充电负载具有控制简单、可调整范围宽等优点,但存在不能模拟真实充电环境的缺点。利用动力电池组可以实现实际充电过程中的测试,但存在规格参数单一、购置价格高等缺点,不能满足任意充电机的多等级输出测试需求。本文将上述两者的优势相结合,根据电池充电特性的可模拟性并结合可控直流负载的高度可控性和可调性,研发了基于虚拟电池技术的电动汽车充电设备测试系统。另外,电动汽车充电设备测试所需设定的参数众多,流程控制复杂,所以在系统中实现了高度自动化测试,用以提高测试效率,降低人为出错率。同时,针对研究性方面的测试,系统提供了多种工况的模拟功能以及开放的接口,用以自定义测试流程 and 数据分析。

1 虚拟电池技术

1.1 基于虚拟电池技术的总体测试方案

利用虚拟电池技术^[19]的测试系统的内部结构见图1,其核心部分是动力电池模型,外围主要是与外部系统进行信息交互的功能接口。在使用电池模型进行测试时,首先设置电池模型参数(电池类型、串并联结构、额定容量、当前容量、散热方式、压缩时间系数、环境温度),用于构建电池模型的初始状态;然后根据电池参数辨识获得的模板数据、电池当前的充电状态及设定的充电参数(充电电流、电压值),计

收稿日期:2014-01-01;修回日期:2014-09-24

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011AA11A279);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014ZD30)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2011AA11-A279) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2014ZD30)

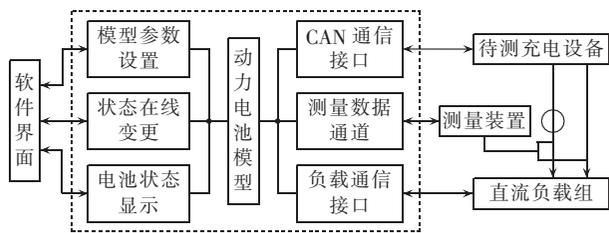


图 1 基于虚拟电池技术的测试方案

Fig.1 Scheme of test based on virtual battery technology

算下一时刻的充电状态;再根据计算的充电状态数据,设置直流负载参数,使之呈现电池充电特性。

在测试过程中可以通过状态在线变更软件界面修改电池参数(某一电池单体的欧姆内阻、电压、荷电状态 SOC(State Of Charge))来模拟电池的异常状态,以便测试充电机在异常状态下的响应能力。

1.2 电池管理系统与充电机之间的通信虚拟

正常充电过程中,电池管理系统 BMS(Battery Management System)通过控制器局域网 CAN(Controller Area Network)总线与充电机之间进行通信,充电机根据 BMS 发出的需求信息,自动调整其输出。但是在实际测试中,不能只根据动力电池的状态决定充电机的输出,而是要实现对充电机输出的大范围灵活设置。所以在系统中嵌入了车载充电机、非车载充电机与 BMS 之间的通信协议,通信结构由实际充电过程中充电机和 BMS 之间的通信转换为通过工控机进行中转的通信,如图 2 所示。工控机软件可模拟 BMS,向充电机发送虚拟的电池状态信息,从而控制充电机的输出。对于非车载充电机,实现了与之在通信握手阶段、参数配置阶段、充电阶段、充电结束阶段、错误处理阶段^[19]的通信过程。对于车载充电机,工控机软件按照生产企业提供的协议进行通信。通过软件界面可以发送虚拟电池单体过压、过温等信息到充电机,测试充电机对电池异常的响应。

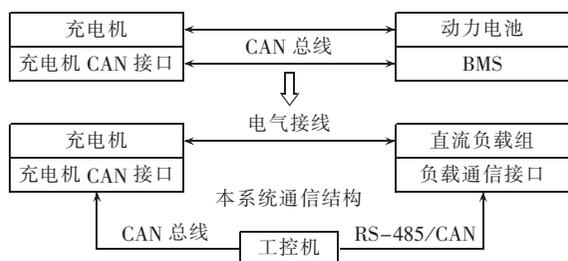


图 2 通信模拟方案

Fig.2 Scheme of communication simulation

1.3 电池模型

电动汽车动力电池类型主要包括锂离子电池、铅酸电池、镍氢电池。通过观察分析上述电池的充放电特性及静置特性,可以看出在充电后静置时,电压曲线出现骤降部分、平缓下凹部分以及渐近平稳部

分。骤降部分可以用欧姆电阻参数来模拟,平缓下凹部分以及渐近平稳部分用电容参数和电阻参数的组合来模拟。通过 MATLAB 拟合,发现使用二阶等效电路模型能提高模拟准确度,因此系统采用二阶电路等效模型^[20],如图 3 所示。模型的重要参数包括:开路电压 U_0 、欧姆内阻 R_0 、电化学极化电阻 R_1 、电化学极化电容 C_1 及时间常数 t_1 、浓差极化电阻 R_2 、浓差极化电容 C_2 及时间常数 t_2 。不同规格的电池组模型可以通过将若干单体电池模型进行串并联实现。这些参数随着 SOC、充电电压或者充电电流的不同而改变,在充电过程中需要进行实时计算。

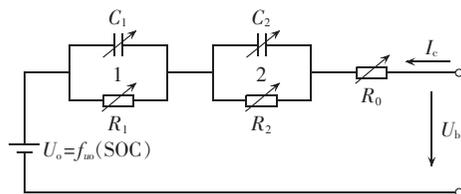


图 3 二阶等效电路模型

Fig.3 Second-order equivalent circuit model

工控机软件中存储有各类电池通过充电静置方法得到的电池单体在某一充电电流下、不同 SOC 下的上述参数的辨识结果,它们为实时状态参数计算提供模板数据。某磷酸铁锂电池单体在 6 A 充电电流下的参数辨识结果如表 1 所示。

表 1 磷酸铁锂电池单体在 6 A 充电电流下的参数辨识结果
Table 1 Results of parameter identification for LiFePO₄ battery with charging current of 6 A

SOC/%	U_0 /V	R_0 /mΩ	R_1 /mΩ	R_2 /mΩ	t_1 /s	t_2 /s
3.0	2.61	13.85	—	—	—	—
10.5	3.12	10.45	—	—	—	—
22.5	3.25	10.24	6.29	2.81	646	49.2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
96.8	3.35	10.10	39.75	15.78	445	49.7
98.8	3.36	10.41	—	—	—	—

1.4 电池模型充电状态参数实时计算过程

a. 利用安时法计算单体电池 SOC。

为了提高测试效率,缩短测试时间,采用压缩测试曲线的方法,定义时间系数 K_T 为:

$$K_T = \Delta t' / \Delta t \quad (1)$$

其中, Δt 为电池模型循环计算周期的实际时长; $\Delta t'$ 为所模拟的充电时长。

第 i 个电池单体在第 $k+1$ 个计算周期的荷电状态 $SOC_{i(k+1)}$ 为:

$$SOC_{i(k+1)} = SOC_{ik} + K_T I_{ck} \Delta t h / C_N \quad (2)$$

其中, i 表示第 i 个电池单体; h 为充电效率; C_N 为电池额定容量; I_{ck} 为第 k 个计算周期的充电电流。

b. 计算单体电池开路电压 U_0 。

开路电压是 SOC 的函数,采用 Gregory L. Plett

的“复合模型”计算第 i 个电池单体在第 $k+1$ 个计算周期的开路电压,方法如式(3)所示。

$$U_{oi(k+1)} = f_{uo}(\text{SOC}_{i(k+1)}) = K_0 - \frac{K_1}{\text{SOC}_{i(k+1)}} - K_2 \text{SOC}_{i(k+1)} + K_3 \ln \text{SOC}_{i(k+1)} + K_4 \ln(1 - \text{SOC}_{i(k+1)}) \quad (3)$$

其中, K_0, K_1, K_2, K_3, K_4 为已知拟合系数,对于不同类型的电池,拟合系数不同。

c. 单体电池参数的计算。

利用模板数据中存储的在不同 SOC 下的 R_0, R_1, R_2, t_1, t_2 的值,通过线性插值获取当前时刻第 i 个电池单体对应的参数 $R_{0i(k+1)}, R_{1i(k+1)}, R_{2i(k+1)}, t_{1i(k+1)}, t_{2i(k+1)}$ 。在计算 $R_{0i(k+1)}$ 时,应注意在不同的充电电流作用下, $R_{0i(k+1)}$ 的取值不同,通过实验发现充电电流越大,该值逐渐降低,因此在计算时引入欧姆电阻电流系数 K_i :

$$R_0 = K_i R_0^{\text{ref}} \quad (4)$$

其中, R_0^{ref} 为充电电流为参考值时的欧姆内阻。

d. 恒流充电方式下电池端电压的计算。

$$U_{pli(k+1)} = I_{ck} R_{li(k+1)} + (U_{pli} - I_{ck} R_{li(k+1)}) e^{K_T \Delta t / t_{1k}} \quad (5)$$

$$U_{p2i(k+1)} = I_{ck} R_{2i(k+1)} + (U_{p2i} - I_{ck} R_{2i(k+1)}) e^{K_T \Delta t / t_{2k}} \quad (6)$$

$$U_{bi(k+1)} = U_{oi(k+1)} + U_{pli(k+1)} + U_{p2i(k+1)} + I_{ck} R_{0i(k+1)} \quad (7)$$

$$U_{b(k+1)} = \sum_{i=1}^n U_{bi(k+1)} \quad (8)$$

其中, $U_{pli(k+1)}$ 为第 i 个电池单体在第 $k+1$ 个计算周期的电化极化电压; $U_{p2i(k+1)}$ 为第 i 个电池单体在第 $k+1$ 个计算周期的浓差极化电压; $U_{bi(k+1)}$ 为第 i 个电池单体在第 $k+1$ 个计算周期的单体端电压; $U_{b(k+1)}$ 为第 $k+1$ 个计算周期的电池组端电压; n 为电池组内电池串体个数。

e. 恒压充电方式下电池电流的计算。

U_b 已知,根据式(7)和式(8),电流的计算公式为:

$$I_{ck} = \frac{U_b - \sum_{i=1}^n (U_{oi} + U_{pli} + U_{p2i})}{\sum_{i=1}^n R_{0i}} \quad (9)$$

假设第 $k+1$ 个计算周期内的电流仍为 I_{ck} ,然后按式(2)计算 $\text{SOC}_{i(k+1)}$,根据式(3)计算 $U_{oi(k+1)}$,根据步骤 c 提供的方法,计算 $R_{0i(k+1)}, R_{1i(k+1)}, R_{2i(k+1)}, t_{1i(k+1)}, t_{2i(k+1)}$,随之计算 $U_{pli(k+1)}, U_{p2i(k+1)}$,再利用式(9)得出 $I_{c(k+1)}$ 。

f. 单体电池温度的计算。

电池充电过程中所产生的热量 Q_c 由电池化学反应热 Q_r (J)、极化生热 Q_p (J)、焦耳热 Q_j (J) 组成。计算公式如下:

$$Q_c = Q_r + Q_p + Q_j \quad (10)$$

$$Q_p + Q_j = I_c^2 R_{in} \Delta t \quad (11)$$

$$Q_r = -1.036 \times 10^{-2} Q_1 I_c t \quad (12)$$

其中, I_c 为充电电流; t 为时间; Q_1 为单位参与化学反应物质完全反应所产生的热; R_{in} 为充电时的等效输入电阻。

温度变化:

$$\Delta T = (Q_c / C - T_r) \quad (13)$$

$$T_r = f(T_b, T_{\text{env}})$$

式(10)~(13)中各变量均取第 i 个电池单体在第 $k+1$ 个计算周期的值。

当前单体电池温度:

$$T_{i(k+1)} = T_{ik} + \Delta T \quad (14)$$

其中, C 为电池热容量; T_r 为电池散热影响,它是进行计算时电池组温度 T_b 与环境温度 T_{env} 的函数。

利用虚拟电池技术模拟动力电池常规充电的自动化测试流程如图 4 所示。

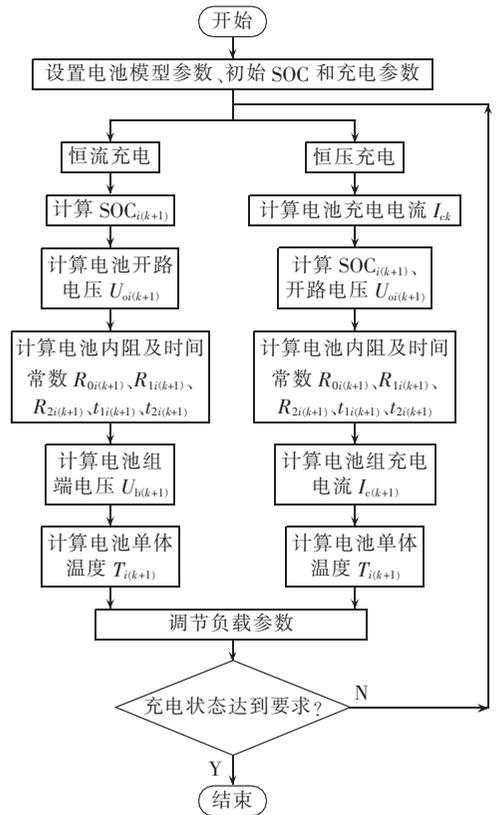


图 4 虚拟电池动态参数计算流程

Fig.4 Flowchart of dynamic parameter calculation for virtual battery

2 系统测试内容

通过参考关于充电设备技术规范的相关国家、行业及企业标准^[8-14],并结合研究性试验需求,确定电动汽车充电设备测试试验系统的测试内容包括以下几个方面。

a. 功能性测试项目: 充电功能、保护功能、限压和限流特性、辅助电源供电性能。

b. 电气性能测试项目: 输出电压误差、输出电流误差、稳压精度、稳流精度、纹波系数、效率、功率因数、负载调整率、电压调整率等。

c. 接口与通信测试项目: 接口信号分析测试^[21-24]、

BMS 与充电机通信测试。

d. 电能质量特性测试项目:输入电压不平衡度、输入电流谐波、输入电压波动与闪变。

e. 附加功能测试项目:结合对充电设备的电能质量问题、功效问题、稳定性问题以及充电设备技术规范问题等的研究性要求,测试平台还应提供自定义测试内容,用户根据需求,自行设定测试方法,进行开放性测试。

3 系统硬件平台

硬件平台的设计要考虑兼容车载充电机、非车载充电机以及充电模块参数,并且要解决测试的安全性和可控性问题。另外,该系统集科研性和实用性为一体,不仅要在虚拟电池状态下进行测试,也需要在直流负载或者动力电池组作为负载状态下进行测试。所以负载模块要考虑多种类型负载的接入。本文搭建的硬件平台由可控交流电源、充电负载模块、测量装置、保护控制装置、工控机以及它们之间的通信接口组成,结构组成如图 5 所示。

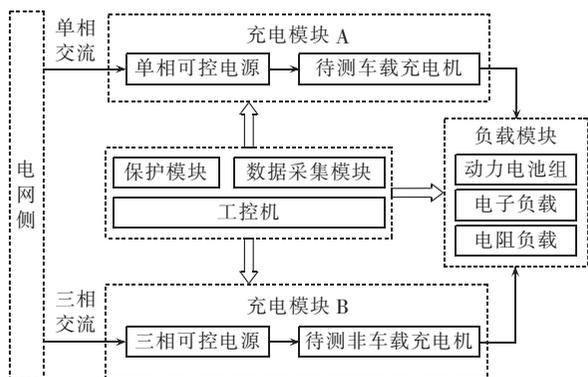


图 5 硬件平台结构

Fig.5 Structure of hardware platform

可控交流电源可以向待测充电设备提供可控的单相或三相交流电源,能够模拟电网各种电压、频率扰动。测量装置主要由测量仪表以及高分辨率的功率分析仪组成,为测试试验提供可靠的测量数据。保护控制装置主要由可编程控制器(PLC)与各类开关器件组成,可根据系统指令自动投切设备,同时对系统进行实时监控,在系统出现过流、过压或设备工作异常时切断回路,以保护系统设备。工控机配置有多个通信接口,与待测充电设备和 BMS 通过 CAN 总线通信,与单相数控电源、三相数控电源、电阻负载、可编程控制器之间通过 RS-485 接口通信,与电子负载间通过 RS-232 接口通信,与数据采集装置之间通过 TCP/IP 网络通信。中央处理单元实时监控测试设备的工作状态,控制测试自动有序进行,同时完成对测试数据的采集和存储。

4 系统软件部分

系统软件根据面向对象思想,用 Visual C# 语言编写,在数据管理方面采用 SQL Server 数据库,在数据分析模块采用 Visual C# 与 MATLAB 混合编程技术。系统软件由测试控制软件和系统管理软件两部分组成。系统管理软件部分的功能主要是编辑测试流程、监控测试、分析数据和生成报告。测试控制软件的主要功能是解析流程文件、控制测试执行、采集和存储测试数据。

a. 测试流程部分。

系统中每项测试是按照测试流程文件进行管理的,每项测试包含若干测试阶段,每一测试阶段中可设置的内容有:充电机充电方式(恒压、恒流、恒流限压、脉冲)、环境温度、交流电源调节方式、输入电压、输入频率、输出电压、输出电流、输出限制电流、输出限制电压、脉冲充电参数、负载类型、负载工作模式、负载调节方式、负载输出、虚拟电池参数和本阶段测试结束条件等。系统提供了流程自动生成功能,即用户通过选择相关标准规范,自动生成测试流程,还提供了开放的接口,用户可以自定义测试流程。系统将测试流程信息保存在可扩展标记语言(XML)文件中,便于测试时读取。

b. 测试执行控制部分。

在测试时,根据流程文件中的参数值远程配置测试设备和待测充电设备,并使用子线程方式,判断阶段结束或跳转条件,完成测试阶段的转换。在测试过程中一方面将测试数据进行显示,另一方面将数据存储到数据库中,便于后续分析。

c. 数据分析处理部分。

测试数据分析处理部分系统提供了自动分析和手动分析 2 种数据分析模式。前者是针对有规律的测试项,通过后台程序选取有效数据范围,统计指标测量值,并与相关标准进行比对,得出测试结论,并生成测试报告;后者是手动选取数据范围,进行指标数据分析,用于研究性测试。

5 应用试验

本文以车载充电机的充电模块(充电模块 A)以及非车载充电机充电模块(充电模块 B)的测试试验为例,说明该系统的应用情况。充电模块 A 参数:工作频率为 47~53 Hz,输入电压为 180~264 V,输出电压为 50~500 V,输出电流为 0~6.6 A,最大输出功率为 3.3 kW。充电模块 B 参数:频率范围为 49~51 Hz,输入电压范围为 187~253 V,输出电压范围为 100~750 V,输出电流范围为 2.5~12.5 A。

5.1 研究性测试

利用本系统可以进行多种研究性测试,如研究不同负载类型、虚拟电池时间系数、负载调节变化

率、不同充电阶段、输入电压扰动、输入频率扰动等因素对指标测量值的影响。由于篇幅原因,该部分只进行简要举例,用以说明系统功能。

5.1.1 不同负载类型对稳流精度测试的影响

选取充电模块 A,设定输入电压为 220 V,输入频率为 50 Hz,工作模式为恒流,输出电流为 5 A,负载选择电子负载、动力电池组和虚拟电池。虚拟电池参数:电池类型为磷酸铁锂电池,将 10 组电池进行串联(每组 10 个电池单体),额定容量为 25 A·h,额定电压为 320 V。稳流精度(正偏差,负偏差)测试结果如表 2 所示,可以看出,虚拟电池作为负载的测试结果与动力电池作为负载的结果最接近。

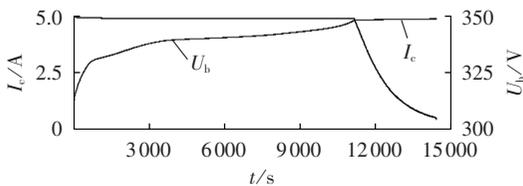
表 2 不同负载类型下的稳流精度

Table 2 Stabilized current precision for different load types

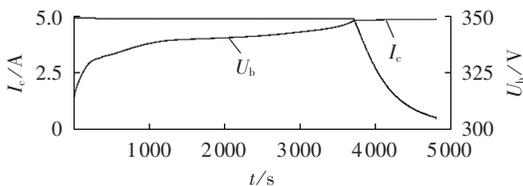
负载类型	工作模式	输出电压变化范围/V	稳流精度值/%
电子负载	渐变	330~345	1.019, -0.983
		330	1.100, -0.977
	恒压	335	1.111, -0.970
		340	1.222, -0.941
动力电池	—	335~339	1.045, -0.993
虚拟电池	—	335~345	1.060, -1.001

5.1.2 虚拟电池时间系数对稳压精度、稳流精度的影响

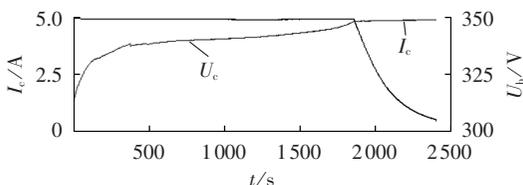
选取充电模块 A,设置为恒流限压充电模式,恒流值为 5 A,限压值为 350 V,虚拟电池的参数同 5.1.1 节,设置初始 SOC 为 10%,终止 SOC 为 90%。在不同时间系数下的充电曲线如图 6 所示。



(a) 时间系数为 1



(b) 时间系数为 3



(c) 时间系数为 6

图 6 虚拟电池在不同时间系数下的充电曲线

Fig.6 Charging curve of virtual battery for different time coefficients

利用上述曲线中恒压部分的数据计算稳压精度,恒流部分的数据计算稳流精度,得到的分析结果如表 3 所示。由表 3 可见,虚拟电池的不同时间系数对稳态测试结果的影响不是很大。另外通过对多台充电机在不同虚拟电池参数下,进行不同时间系数的多指标测试进行分析,发现时间系数小于 10 时,指标测量结果与真实电池测量结果相差不大。

表 3 充电模块 A 在不同时间系数下的测试结果

Table 3 Test results of charging module A for different time coefficients

时间系数	稳压精度/%	稳流精度/%
1	1.425	0.998
3	1.419	1.012
6	1.415	1.060

5.2 型式测试

系统可按照各标准规范中的要求,对充电设备进行型式测试,来发现产品存在的问题以及评价产品的合格程度。由于篇幅限制,对所能完成的测试不一列举,只选取典型测试进行举例。

5.2.1 稳定性指标测试

系统中稳压精度、稳流精度、输出电压误差、输出电流误差、输入电压谐波等指标,属于稳态指标,该部分的测试方法基本一致。列举稳压精度的测试对其方法进行说明。选择充电模块 A、B,参数设置如下。

a. 模块 A 参数:模块数为 1;输入频率为 48、49、50、51、52 Hz;输入电压为 187、209、220、231、253 V;输出电压为 100、200、300、400、490 V;电子负载;恒流工作模式;负载恒流输出为 0、2、4、6 A。

b. 模块 B 参数:模块数为 3(并联);输入频率为 49、49.5、50、50.5、51 Hz;输入电压为 187、203.5、220、236.5、253 V;输出电压为 550、600、650、700、750 V;电阻负载;恒电阻工作模式;负载电阻输出为 41.67、31.25、25 Ω 。

测试完成后,使用开发的软件对数据进行分析,结果如下。

a. 稳压精度指标 δ_U 与输出参数之间的关系。

对于充电模块 A,在输入电压 U_i 为 220 V、输入频率 f 为 50 Hz,且 U_d 、 I_d 变化时,分析结果如表 4 所示,可见,输出电压 U_d 越大, δ_U 越小,稳压精度越高;输出电流 I_d 越大, δ_U 相对较小, I_d 对 δ_U 的影响不大。

对于充电模块 B,在 U_i 为 220 V、 f 为 50 Hz,且 U_d 、负载阻值 R_d 变化时,分析结果如表 5 所示,可以看出, U_d 越大, δ_U 越小,稳压精度越高; I_d 对 δ_U 的影响不规律,且影响不大。

b. 输入电流谐波与输出参数之间的关系。

对于充电模块 A,在 U_i 为 220 V、 f 为 50 Hz 时,输入电流谐波总畸变率(THD)与 U_d 、 I_d 的关系见图 7。当输出电压为 490 V,输出电流分别为 2、4、6 A

表 4 模块 A 的稳压精度

Table 4 Stabilized voltage precision of module A

U_d/V	$\delta_U/\%$			
	$I_d=0\text{ A}$	$I_d=2\text{ A}$	$I_d=4\text{ A}$	$I_d=6\text{ A}$
100	5.277	5.582	5.077	3.608
200	2.612	2.532	2.710	2.659
300	1.602	1.567	1.543	1.603
400	1.193	1.244	1.342	1.368
490	1.119	1.116	1.049	0.936

表 5 模块 B 的稳压精度

Table 5 Stabilized voltage precision of module B

U_d/V	$\delta_U/\%$		
	$R_d=25\ \Omega$	$R_d=31.25\ \Omega$	$R_d=41.67\ \Omega$
550	0.543	0.533	0.524
600	0.471	0.486	0.493
650	0.493	0.480	0.446
700	0.459	0.441	0.423
750	0.395	0.390	0.382

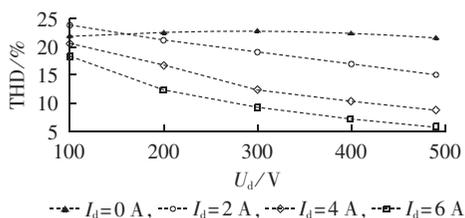


图 7 电流总谐波畸变率与充电模块 A 输出参数的关系

Fig.7 Relationship between THD and output parameters of module A

时,2~21 次谐波电流值与标准 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 $\leq 16\text{ A}$)》中规定值的比较结果如图 8 所示,图中 m 为谐波次数, I_m 为 m 次电流谐波有效值。

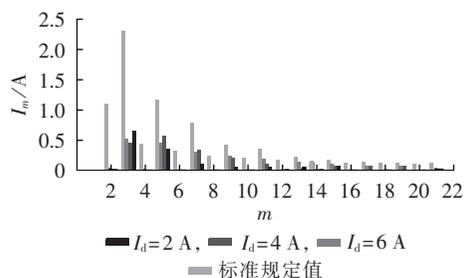


图 8 2~21 次谐波电流值

Fig.8 Harmonic currents, from 2nd to 21st order

由图 7 可以看出,输出功率越大,总谐波畸变率越小。由图 8 可以看出,输入电流中奇次谐波含量较高,但各次电流谐波值不一定随功率的增大呈现衰减趋势。

5.2.2 调整性指标测试

以电流调整率测试为例进行说明。测试方法: f 设定为 50 Hz , U_i 设定为 220 V , U_d 设定为 500 V , 负载选用电子负载,恒流工作模式,负载电流 I_d 在 $0\sim 6.5\text{ A}$ 内进行渐变,测试结果如图 9 所示。从图中

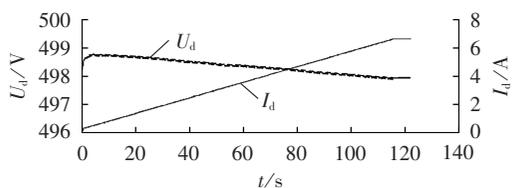


图 9 电流调整率测试中各参数变化情况

Fig.9 Parameter variation during current regulation test

可以看出, U_d 随着 I_d 的连续增大而减小, U_d 的变化范围为 $497.9\sim 498.8\text{ V}$, 差值为 0.9 V , 变化幅度较小。

6 结论

本文基于虚拟电池技术研制了以产品型式试验、充电设备测试方法研究、充电机性能研究为目的的测试试验系统。该系统适用于车载充电机、非车载充电机及其充电模块的电气性能测试,实现了测试的高度可控,重点实现了虚拟电池技术;系统自动化程度高,提高了测试效率,为电源测试提供了新方法。该系统已完成了对多台车载和非车载充电机的完整测试,证明了系统的高效性、科研性以及全面性。

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):2-10,29.
ZHAO Junhua,WEN Fushan,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):2-10,29.
- [2] 张文亮,武斌,李武峰,等. 我国纯电动汽车的发展方向及能源供给模式的探讨[J]. 电网技术,2009,33(4):1-5.
ZHANG Wenliang,WU Bin,LI Wufeng,et al. Discussion on development trend of battery electric vehicles in China and its energy supply mode[J]. Power System Technology,2009,33(4):1-5.
- [3] BERNDT D. VRLA batteries,advances and limitations[J]. Journal of Power Sources,2006,154(2):509-517.
- [4] 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(2):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(2):159-164.
- [5] 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]. Power System Technology,2011,35(1):170-174.
- [6] 陈良亮,张蓓蓓,周斌,等. 电动汽车非车载充电机充电模块的研制[J]. 电力系统自动化,2011,35(7):81-85.
CHEN Liangliang,ZHANG Beibei,ZHOU Bin,et al. Development of charging module of off-board charger for electric vehicle[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(7):81-85.

- [7] LU Y, CHENG K W, ZHAO W E. Power battery charger for electric vehicles[J]. Power Electronics on the Institution of Engineering and Technology, 2011, 4(5): 580-586.
- [8] 国家电网公司. Q/GDW233—2009 电动汽车非车载充电机通用要求[S]. 北京:中国电力出版社, 2008.
- [9] 国家能源局. NBT33001—2010 电动汽车非车载传导式充电机技术条件[S]. 北京:中国电力出版社, 2010.
- [10] 中华人民共和国工业和信息化部. QCT895—2011 电动汽车用传导式车载充电机[S]. 北京:[出版者不详], 2011.
- [11] 中国南方电网有限责任公司. Q/CSG11516.3—2010 电动汽车非车载充电机技术规范[S]. 广州:中国南方电网有限责任公司, 2010.
- [12] 深圳市市场监督管理局. SZDB/Z29.3—2010 电动汽车充电系统技术规范第 3 部分:非车载充电机[S]. 深圳:深圳市市场监督管理局, 2010.
- [13] 深圳市市场监督管理局. SZDB/Z29.4—2010 电动汽车充电系统技术规范第 4 部分:车载充电机[S]. 深圳:深圳市市场监督管理局, 2010.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T19826—2005 电力工程直流电源设备通用技术条件及安全要求[S]. 北京:中国标准出版社, 2005.
- [15] 丁心志, 毕志周, 曹敏, 等. 电动汽车非车载充电机技术与试验研究[J]. 电测与仪表, 2012, 49(556): 14-17.
DING Xinzhi, BI Zhizhou, CAO Min, et al. Technique analysis and experiment of electric vehicle off-board charger[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2012, 49(556): 14-17.
- [16] 顾越. 电动汽车充电机及其电气性能测试研究[D]. 北京:北京交通大学, 2012.
GU Yue. Electric vehicles charger and its electrical performance testing study[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [17] LU Y, CHENG K W E, ZHAO S W. Power battery charger for electric vehicles[J]. IET Power Electronics, 2011, 4(5): 580-586.
- [18] HAN Seungho, JEONG Moongyu, YANG Seungkwon, et al. Performance test for EV quick charger[C]//IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. [S.l.]: IEEE, 2012: 1516-1519.
- [19] YAN Xiangwu, LI Wei, GU Jiancheng, et al. A simulated system of battery-management-system to test electric vehicles charger [C]//Electric Vehicle Conference (IEVC). Greenville, SC, USA: IEEE, 2012: 1-5.
- [20] KIM Taesic, QIAO Wei. A hybrid battery model capable of capturing dynamic circuit characteristics and nonlinear capacity effects[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(4): 1172-1180.
- [21] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 20234.1—2011 电动汽车传导充电用连接装置, 第一部分:通用要求[S]. 北京:中国标准出版社, 2011.
- [22] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 20234.2—2011 电动汽车传导充电用连接装置, 第二部分:交流充电接口[S]. 北京:中国标准出版社, 2011.
- [23] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 20234.3—2011 电动汽车传导充电用连接装置, 第三部分:直流充电接口[S]. 北京:中国标准出版社, 2011.
- [24] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 27930—2011 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[S]. 北京:中国标准出版社, 2011.

作者简介:



颜湘武

颜湘武(1965—),男,湖南醴陵人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为新能源电力系统、现代电力变换、新型储能与节能(**E-mail**:xiangwu@ncepu.edu.cn);

王丽娜(1989—),女,河北沧州人,硕士研究生,主要研究方向为新能源电力系统(**E-mail**:wanglina_apple@163.com);

李艳艳(1988—),女,山东德州人,硕士研究生,主要研究方向为新能源电力系统(**E-mail**:lilyanyan@163.com);

谷建成(1968—),男,陕西西安人,高级工程师,硕士,主要研究方向为计算机过程控制(**E-mail**:gjc_hd@126.com);

张波(1981—),男,天津人,博士研究生,主要研究方向为新能源电力系统、现代电力变换(**E-mail**:adam166@163.com)。

EV charging equipment test system based on virtual battery technology

YAN Xiangwu, WANG Lina, LI Yanyan, GU Jiancheng, ZHANG Bo, YIN Feifei, ZHANG Hechuan

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Source,

North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Combined with the advantages of controllable DC load and power battery units, a test system based on virtual battery technology is developed for EV(Electric Vehicle) charging equipment, which is composed of controllable AC power source, load module, measuring device, protection & control device and central control system. It is used to test the functionality, electrical performance, interface & communication, power quality and additional functions of EV charging equipment, mainly the on-board charger, off-board charger and their charging modules. The test results of some on-board and off-board chargers show that, the developed system realizes the comprehensive and automatic tests with high efficiency.

Key words: electric vehicles; electric batteries; charging(batteries); testing; virtual battery technology; test platform