

# 双向功率型直流充电桩互测方法及策略研究

李秉宇<sup>1</sup>, 常征<sup>2</sup>, 武光华<sup>1</sup>, 杜旭浩<sup>1</sup>, 冯胜涛<sup>3</sup>, 张进滨<sup>4</sup>

(1. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050000; 2. 国网河北省电力有限公司, 河北 石家庄 050000; 3. 国网河北省电力有限公司邯郸供电分公司, 河北 邯郸 056000; 4. 北京群菱能源科技有限公司, 北京 100176)

**摘要:** 为提升充电设施利用率、拓展充电设施对电网辅助服务能力, 直流充电设施支撑 V2G, V2B, V2H 等技术应用的需求日益明显。但由于其检测技术尚未开展系统研究, 若套用现有检测技术不但沿袭了当前技术的不足, 还舍弃了双向功率控制拓扑自身的优势。针对此问题, 提出了多个双向功率型直流充电设施互为源荷的测试方法及其控制策略。以两个双向功率型直流充电设施为例, 提出了背靠背互测的电路拓扑, 并分析了其工作模式; 引入模糊自适应 PI 控制提升动态响应能力; 搭建了 Matlab 仿真模型和基于 NI 实时仿真器的实验平台, 进行了验证。结果表明, 所提测试方法和控制策略能有效地实现双向充电设施的测试, 为相应产业提供了一定的参考依据。

**关键词:** 双向功率控制; 直流充电桩; 背靠背互测; 能量回馈; 模糊自适应 PI 控制

**中图分类号:** TM46 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed22118

## Research on Mutual Measurement Method and Strategy of Bi-direction Power Type DC Charging Piles

LI Bingyu<sup>1</sup>, CHANG Zheng<sup>2</sup>, WU Guanghua<sup>1</sup>, DU Xuhao<sup>1</sup>, FENG Shengtao<sup>3</sup>, ZHANG Jinbin<sup>4</sup>

(1. *Electric Power Research Institute of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, Hebei, China*; 2. *State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, Hebei, China*; 3. *State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd. Handan Power Supply Branch, Handan 056000, Hebei, China*; 4. *Beijing Qunling Energy Technology Co., Ltd., Beijing 100176, China*)

**Abstract:** In order to increase the utilization rate of charging facilities and expand the ability of charging facilities to provide auxiliary services to the grid, the demand for DC charging facilities to support the application of V2G, V2B, V2H and other technologies has become increasingly obvious. However, because its detection technology has not yet been systematically studied, if the existing detection technology is applied, not only the shortcomings of the current technology are followed, but the advantages of the bi-direction power control topology itself are abandoned. In response to these problems, a test method and control strategy for multiple bi-directional power DC charging facilities was proposed as the source and load of each other. Taking two bi-directional power DC charging facilities as an example, a back-to-back mutual test circuit topology was proposed and its working mode was analyzed. The fuzzy adaptive PI control was introduced to improve the dynamic response ability; the Matlab simulation model and the experimental platform based on the NI real-time simulator were built for verification. The results show that the proposed test method and control strategy can effectively realize the test of bi-directional charging facilities, which provide a certain reference for the corresponding industry.

**Key words:** bi-direction power control; DC charging pile; back to back mutual measurement; energy feedback; fuzzy adaptive PI control

在能源安全和环境污染问题的双重压力下, 电动汽车得到了大的发展<sup>[1]</sup>, 市场对充电桩的需求量急剧增长。充电桩作为电动汽车运行的

必要基础设施, 充电过程中的可靠性与安全性至关重要, 不符合规定的充电操作会对电池的使用寿命产生恶劣影响, 乃至发生安全事故<sup>[2-3]</sup>。因

此,应当对运行中的充电桩,对其可靠性进行定期现场巡检<sup>[4]</sup>。

考虑到充电桩庞大的数量级和分布程度,若采用传统的测试仪器,则需要在充电桩所在地完成设备的安装、调试等工作<sup>[5]</sup>,这无疑会给设备运营方带来额外损失;同时,为测试充电设施需配置相应的模拟负载,如电阻矩阵负载、真实电池负载等。采用电阻作为负载的测试方式无法体现电池的反电势特征,不能模拟电池的真实充电过程;而采用真实电池测试方法,电池电压不能连续调节,从而无法实现目前电压 200 ~ 750 V DC 全电压段直流充电桩测试,且浪费了大量电能,系统效率较低。

当前远程测试技术的研发也有大量报导<sup>[6-7]</sup>,主要缺陷是有车充电才能测,测试项目及参数受诸多约束,难以实现全覆盖。

文献[8]提出的充电桩检测平台覆盖了足够宽的电压范围,能够对一般充电桩进行常规测试,但其内部采用了大量测试仪表。文献[9]提出了可直接使用于充电桩所在地的检测平台,虽然将设备高度集成于集装箱内,提高了集成度,但仍需使用示波器、功率测试仪等传统测试装备,导致充电桩检测平台本身过于繁重。文献[10]提出了具有强移动性、高智能化的充电桩测试装置,虽然能响应上文中提出的便携化、智能化等测试要求,但仍无法为双向型充电设施提供检测服务。

因此,研究适用于双向功率控制的直流充电设施的新型检测技术具有显著的技术经济价值和市场前景。

本文针对此问题,提出了多个双向功率型直流充电设施互为源荷的测试方法及其控制策略:首先以两个双向功率型直流充电设施为例,提出了两台充电设施背靠背互测的电路拓扑,受测桩和负荷桩各自依据报文信息,通过控制前端变流器及闭锁后端桥臂 IGBT,完成互测的同时,实现了能量的流入与对等流出;此外,为提升系统的动态响应能力,应对参数失配等问题,充电设施前端采用模糊自适应 PI 控制;在 Matlab/Simulink 环境下搭建了仿真模型,并对测试方法及其拓扑的控制策略进行了验证;最后,搭建了基于 NI 实时仿真器的双向功率型直流充电桩互测硬件实验平台,对互测原理的有效性和正确性进行了验证,并对互测方法的应用进行了对比分析。

## 1 双向型直流充电桩互测技术原理

当前主流双向型直流充电桩后端拓扑一类为隔离双向全桥 DC/DC 变换,一类为 Buck-Boost 型 DC/DC 变换。前者可实现软开关控制、器件应力小、工作频率高,但器件较多、控制较复杂、成本较高<sup>[11]</sup>;后者控制简单、器件较少、成本低,但器件应力高、工作频率受限<sup>[12-13]</sup>。

综合考虑成本、可靠性、系统适应性等指标,本文针对图 1 所示的后端为 Buck-Boost 型 DC/DC 变换双向型直流充电桩进行互测方法工作原理说明,提出的直流充电桩互测方法原理拓扑如图 2 所示。

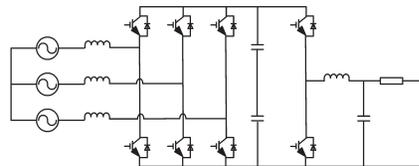


图1 充电桩后端为 Buck-Boost 型 DC/DC 变换

Fig.1 The rear end of charger is Buck-Boost DC / DC converter

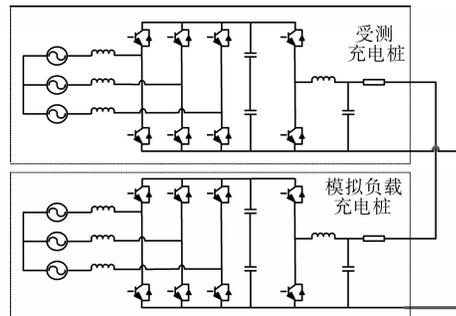


图2 充电桩背靠背互测原理拓扑

Fig.2 Topology of back-to-back mutual measurement principle of charging pile

由图 2 可知,两个直流充电桩直流输出侧相互连接,一个充电桩为受测桩,一个充电桩为模拟负荷。受测桩按对电池负载充电控制策略运行;模拟负荷桩按模拟电池受电后端电压变化特征及其吸收的有功功率逆变至电网的控制策略运行。

受测充电桩前端 PWM 整流器基于给定电压,控制整流直流输出电压,后端 Buck-Boost 斩波器工作于降压斩波模式,下桥臂的升压 IGBT 闭锁,根据模拟电池管理系统 (battery management system, BMS) 的报文系统上传的信息按定电流控制;模拟负荷桩后端 Buck-Boost 斩波器的上下桥臂 IGBT 全部闭锁,前端 PWM 整流器基于模拟的电池电压控制整流器直流输出电压,并将其从受测充电桩吸纳的有功功率反馈给电网。

完成测试后,受测桩改为模拟负荷桩,而原来设置为模拟负荷桩改为受测桩,这样便可以快速完成充电设施的互测。为使分析过程更加简洁,将图2主电路简化为图3所示的等效电路。

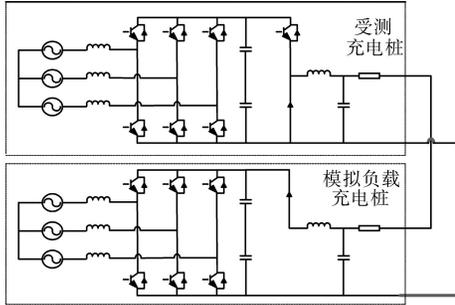


图3 互测等效电路

Fig.3 Mutual test equivalent circuit

本文提出的测试方法有如下特点:

- 1) 充电桩空闲待机状态下自动测试,不影响用户正常充电、无需人为现场干预,测试效率高;
- 2) 测试数据关联多元信息(季节、温度等),便于长期有序积累,形成充电设施运维的大数据;
- 3) 测试系统可远程监控,发现问题及时预警,生成检修方案,提高设备可用率。
- 4) 远程操作性。互测方法可支撑远程自动检测;现有测试方法仅支持现场操作。
- 5) 测试功率反馈电网,测试能效高。

## 2 双向型直流充电桩互测技术控制策略

整个测试系统分为受测桩和负荷桩两部分,分别采用不同的控制策略。

### 2.1 受测桩控制策略

由图2可知,受测桩控制策略包含两部分: PWM 整流器和 Buck-Boost 双向 DC/DC 变换,以下分别分析其控制策略。

#### 2.1.1 PWM 整流器

前端 PWM 整流器基于给定电压控制整流直流输出电压,控制框图见图4所示,其中上标“\*”代表给定变量。

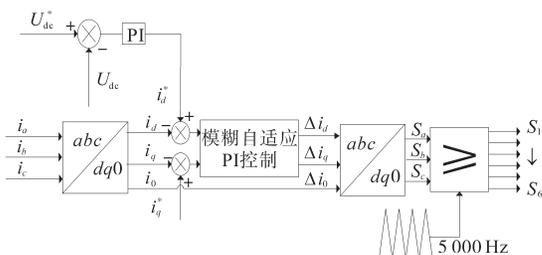


图4 受测桩整流器控制框图

Fig.4 Control block diagram of tested pile rectifier

图4中,整流器采用有功无功电流解耦控制。电流解耦控制可以更直观地对充电过程中的有功、无功功率分别进行控制<sup>[14]</sup>。 $i_q^*$  电流给定值与实际值的偏差  $\Delta i_d, \Delta i_q$  经过模糊自适应 PI 控制器再经过  $d, q, 0$  轴到  $a, b, c$  轴的坐标变换得到三相控制信号  $S_a, S_b, S_c$ , 与三角载波比较产生相位相差  $120^\circ$  的 SPWM 波,从而控制逆变电路工作。

为提高系统鲁棒性、应对参数失配等问题,本文将传统 PI 控制与模糊自适应控制结合,提出模糊自适应 PI 控制,结构如图5所示。

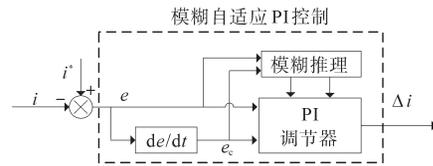


图5 模糊自适应 PI 控制结构

Fig.5 Fuzzy adaptive PI control structure

如图5所示,取常规方案的 PI 参数作为基准值,以实时误差  $e$  和误差变化率  $e_c$  作为模糊自适应 PI 控制的输入,根据预设的规则进行模糊推理,查询模糊矩阵表,在基准值上进行实时调整,既保证了控制策略的稳定性,又提升了其动态响应能力。模糊规则表如表1、表2所示。

表1  $K_p$  的模糊规则表

Tab.1 Fuzzy rule table of  $K_p$

$e$	$e_c$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NM	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表2  $K_i$  的模糊规则表

Tab.2 Fuzzy rule table of  $K_i$

$e$	$e_c$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	PS	ZO	ZO
NS	PM	NM	NS	PS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

将  $e, e_c$  定义为模糊集上的论域:  $[-3, 3]$ , 模糊

子集为{NB(负大), NM(负中), NS(负小), ZO(零), PS(正小), PM(正中), PB(正大)}。如图6所示,以*e*为例,除模糊子集NB, PB分别采用Z形、S形隶属函数,其余模糊子集均采用三角形隶属函数。

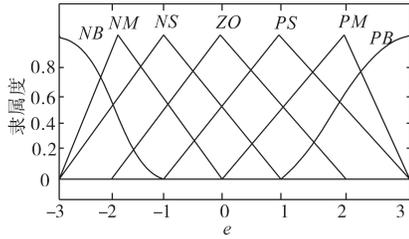


图6 *e*的隶属函数

Fig.6 Degree membership of *e*

根据各模糊子集的隶属度赋值表和各参数模糊控制模型,应用模糊合成推理设计PI参数的模糊矩阵表,查得修正参数代入下式进行计算,即可实现对PI参数的在线自我修正。

$$\begin{cases} K_p(k+1) = K_p(k) + \{e(k), e_c(k)\}_p \\ K_i(k+1) = K_i(k) + \{e(k), e_c(k)\}_i \end{cases} \quad (1)$$

### 2.1.2 Buck-Boost斩波器

受测桩后端 Buck-Boost 斩波器工作于降压斩波模式,下桥臂的升压 IGBT 闭锁,根据模拟 BMS 报文系统上传的信息按定电流控制,控制见图7所示。

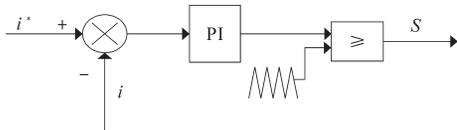


图7 受测桩降压斩波控制

Fig.7 Buck chopper control of tested pile

由图7可知,给定电流与实际电流的偏差经过PI调节器,其值与三角波进行比较,从而产生PWM波控制斩波器的导通和关断。

## 2.2 负载桩策略

模拟负荷桩后端 Buck-Boost 斩波器的上下桥臂 IGBT 全部闭锁,前端 PWM 逆变器基于模拟的电池电压控制逆变器直流母线电压,并将吸收的有功功率反馈至交流电网,在稳态情况下,电流给定值  $i_d^* < 0$ ,  $i_q^* = 0$ ,其控制策略和受测桩一致,如图5所示。

## 3 仿真研究

### 3.1 仿真参数选取

稳态条件下,忽略 PWM 变流器交流侧电阻,

其交流侧矢量关系如图8所示。其中,*E*为交流电网电动势矢量,*U*为PWM变换器交流侧电压矢量,*U<sub>L</sub>*为交流侧电感电压矢量,*I*为交流侧电流矢量。为不失一般性,矢量*U*端点位于圆轨迹M点处。

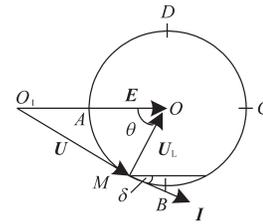


图8 变流器交流侧矢量关系

Fig.8 AC side vector relation of converter

设变流器交流侧功率因数角为δ,针对图8中的三角形  $O_1OM$ ,则  $\theta = 90^\circ - \delta$ ,由余弦定理可得

$$\begin{aligned} |U|^2 &= |E|^2 + |U_L|^2 - 2|E||U_L|\cos\theta \\ &= |E|^2 + |U_L|^2 - 2|E||U_L|\sin\delta \end{aligned} \quad (2)$$

将  $|U_L| = \omega L|I|$  ( $\omega$  为电网电压角频率,本文取 314 rad/s) 代入式(1),且考虑到  $U_m \leq MU_{dc}$  ( $M$  为 PWM 相电压最大利用率,采用三角波载波 SPWM 控制,  $M=1/2$ ,  $U_{dc}$  为直流侧电压),求解可得:

$$L \leq \frac{E_m \sin\delta + \sqrt{E_m^2 \sin^2\delta + \frac{1}{4}U_{dc}^2 - E_m^2}}{\omega I_m} \quad (3)$$

式中:*L*为直流侧滤波电感;*E<sub>m</sub>*为电网相电压的峰值;*I<sub>m</sub>*为交流侧基波相电流峰值。

对于直流侧电容*C*的选取,应在保证系统直流侧电压波动不超过限制的情况下做折中处理,尽量保证电容量小一点。在工程经验中,通常借助能量守恒原理,通过开关有功损耗来计算电容量大小:

$$C = \frac{\eta I_N}{\omega U_{dc} k} \times 10^6 \quad (4)$$

式中: $\eta$ 为补偿能量系数,文中取0.9;*I<sub>N</sub>*为额定相电流;*k*为直流侧电压波动系数,文中取0.05。

后端 Buck-Boost 斩波器通过输出电压及电感电流的纹波设计可得:

$$\begin{cases} L = \frac{U_m D_y}{\Delta i_L f} \\ C = \frac{I_o D_y}{\Delta U_o f} \end{cases} \quad (5)$$

式中:*L*为斩波器电感;*U<sub>m</sub>*为输入电压;*D<sub>y</sub>*为占空比; $\Delta i_L$ 为电感电流纹波;*f*为开关频率;*C*为斩波器

电容; $I_o$ 为输出电流; $\Delta U_o$ 为输出电压纹波。

在 Matlab 仿真环境下,仿真参数设置为:三相电源电压频率为 50 Hz,线电压有效值为 380 V,充电桩输出功率 9 kW。同时,根据上述公式,计算可得:整流电路交流侧电感 3.6 mH,直流输出侧平波电感 3.6 mH,直流母线电容 5 mF,直流输出侧稳压电容 10 mF。

### 3.2 负载桩模拟电池端电压 DC 500 V

负荷桩模拟电压为 500 V 的电池,即模拟桩直流侧电压给定值  $U_{dc}^*=500$  V,控制待测充电桩输出电流维持在 18 A。

交流电网电压、电流波形仿真结果如图 9 所示。

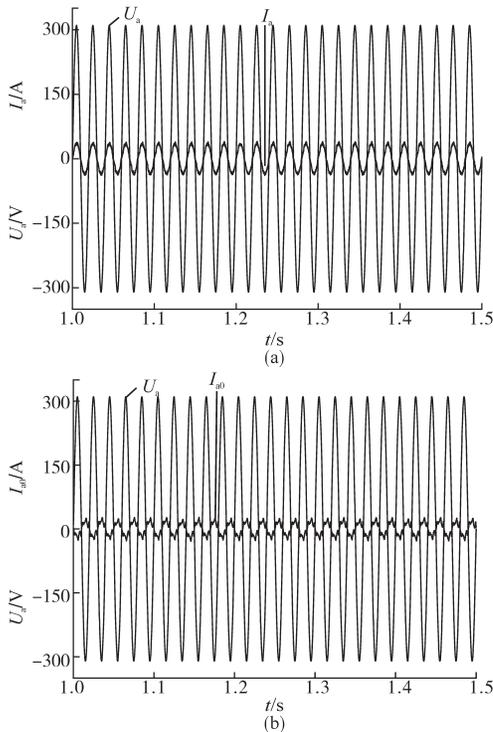


图 9 交流电压电流波形  
Fig.9 AC voltage current waveforms

图 9 波形分别为交流电网电压  $U_a$ 、电流  $I_a$ 、模拟负荷变流器入网电流  $I_{a0}$  波形,从仿真结果可以看出,电流  $I_a$ 、 $I_{a0}$  接近于正弦波, $I_a$  与  $U_a$  同相位时,待测充电桩整流器运行于单位功率因数; $I_{a0}$  与  $U_a$  相位相差 180°时,模拟负荷变流器工作于单位功率因数逆变状态,将电能回馈给电网。

端电压为 500 V DC 电池模拟仿真结果如图 10 所示。待测充电桩输出电压  $U_{dc}$  维持在 500 V,充电电流  $I_o$  维持在 18 A,输出功率  $P_o$  为 9 kW,模拟负荷充电桩输出功率  $P_b$  为 -9 kW,无功功率为 0,即实现了待测充电桩的输出功率全部回馈电网。

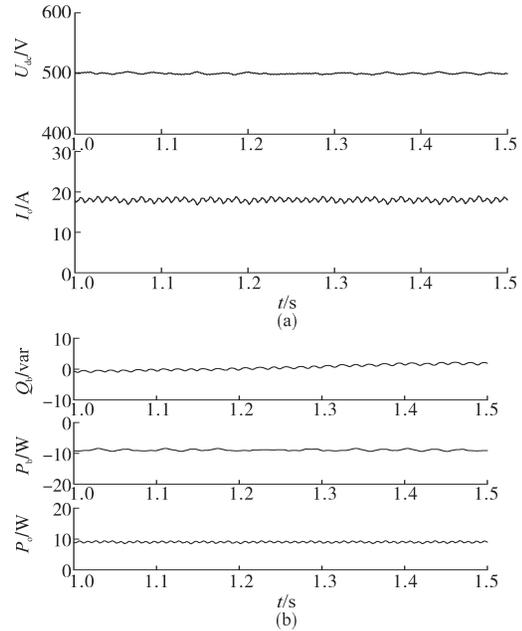


图 10 端电压为 500 V DC 电池模拟仿真图  
Fig.10 Simulation diagram of 500 V DC battery with terminal voltage

## 4 实验验证

针对本文提出的双向功率型直流充电桩互测方法,搭建了如图 11 所示的实验验证系统原理图。

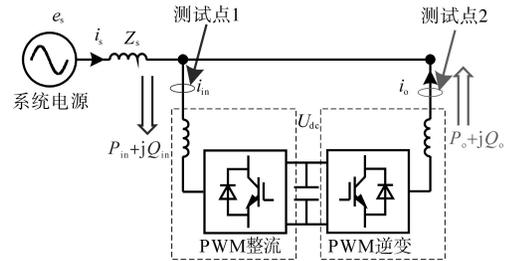


图 11 实验验证系统原理图

Fig.11 The schematic of testing verify system

图 11 中,系统主电路电源由 Chroma 公司生产的电网模拟器(型号 61860)提供,被测桩和负荷模拟桩由 NI 实时仿真器 PXIe-1082 通过实时仿真提供充放电控制和数据分析,测试点为两个 PWM 变流器的交流接入点。测量采用福禄克 Topaz2000 电能质量分析仪和横河电机示波记录仪 DL850。测试点并网实测数据如表 3 所示。

表 3 测试点并网实测数据

Tab.3 Grid connection measured data of test points

	功率因数	电流/A	总电流失真度/%
被测桩	0.98	58.4	4.2
负荷桩	0.99	50.7	5.5

图12、图13分别为被测桩、负荷模拟桩接入系统测试点电压、电流波形。

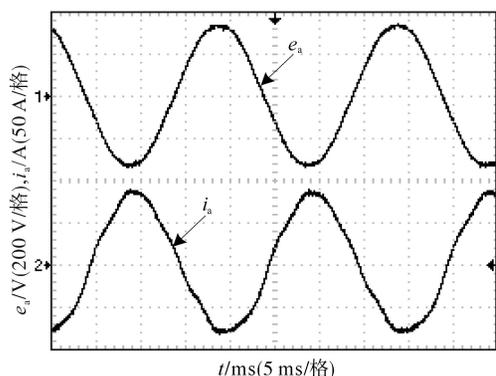


图12 被测桩接入系统测试点电压电流波形

Fig.12 The voltage and current waveforms of the tested piles when connected to system the measuring point

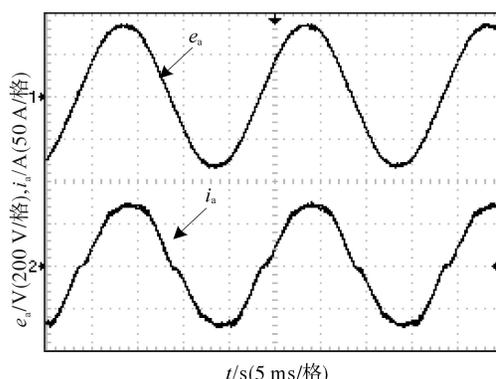


图13 负荷模拟桩接入系统测试点电压电流波形

Fig.13 The voltage and current waveforms of the load imitate piles when connected to system the measuring point

由图12、图13波形可知,被测桩和负荷模拟桩互测时均能达到高功率因数接入系统运行。

表4为被测桩、负荷模拟桩等充电设施充电功率、回馈功率、损耗功率的变化及对应效率实测数据。

表4 充电设施自测系统效率

Tab.4 Efficiency of self-testing system for the charging facilities

充电功率 $P_{in}/kW$	回馈功率 $P_o/kW$	损耗功率 $P_{loss}/kW$	运行效率 $\eta/\%$
25.45	22.15	3.29	87.04
37.94	33.39	4.547	88.02
46.34	41.41	4.933	89.35
54.14	49.17	4.97	90.82
58.34	53.3	5.671	91.36

图14为系统效率随充电功率变化曲线图,可见,随着充电功率增加,互测系统的效率是提升的。

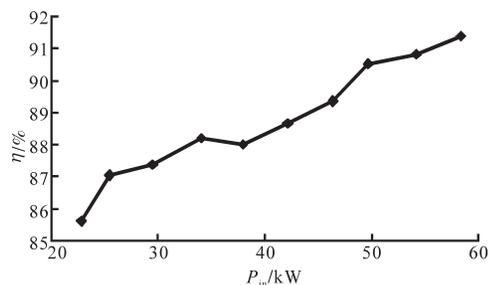


图14 系统效率随充电功率变化曲线图

Fig.14 Relationship curve between system efficiency and charging power

## 5 结论

研究双向功率控制的直流充电设施的新型检测技术具有显著的技术经济价值和市场前景。本文提出了适用于多个双向功率型直流充电设施互为源荷的测试方法及其控制策略:

1)受测充电桩前端PWM整流器基于给定电压控制整流直流输出电压,后端Buck-Boost斩波器工作于降压斩波模式,下桥臂的升压IGBT闭锁,根据模拟BMS报文系统上传的信息按定电流控制。

2)模拟负荷桩后端Buck-Boost斩波器的上下桥臂IGBT全部闭锁,前端PWM整流器基于模拟的电池电压控制整流器直流输出电压,并将吸收的有功功率反馈至交流电网。

3)该测试方法及控制策略能有效支撑远程自动检测,同时最大程度提升了充电设施灵活充电、电网支撑的可用性。

### 参考文献

[1] 吉昱营,张旭航.电动汽车充电系统的负载识别技术研究[J].电气传动,2020,50(1):109-112.  
Ji Yuying, Zhang Xuhang. Research on load identification technology of electric vehicle charging system[J]. Electric Drive, 2020, 50 (1): 109-112.

[2] 王艳华,缪金.充电桩发展现状及问题对策研究[J].中国市场,2016(41):45-51.  
Wang Yanhua, Miao Jin. Research on development status and problems of charging pile[J]. China Market, 2016 (41): 45 - 51.

[3] 朱彬,侯兴哲,孙洪亮,等.电动汽车充电设施自动检测平台设计[J].电测与仪表,2017,54(23):75-80.  
Zhu Bin, Hou Xingzhe, Sun Hongliang, et al. Design of automatic detection platform for electric vehicle charging facilities[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2017, 54 (23) : 75-80.

[4] 袁军,李波,刘志凯,等.基于虚拟仪器技术的电动汽车充电

- 桩综合测试系统[J].浙江电力,2018,37(6):36-41.
- Yuan Jun, Li Bo, Liu Zhikai, *et al.* Electric vehicle charging pile integrated test system based on virtual instrument technology[J]. Zhejiang Electric Power, 2018,37(6):36-41.
- [5] 周志坚,赵阳,马浩,等.高速公路电动汽车充电桩现场检测方法[J].智能电网,2016,4(4):432-436.
- Zhou Zhijian, Zhao Yang, Ma Hao, *et al.* On site detection method of electric vehicle charging pile on expressway[J]. Smart Grid, 2016,4(4):432-436.
- [6] 侯俊杰.电动汽车充电设备状态监测与远程故障诊断系统设计及实现[D].青岛:青岛科技大学,2019.
- Hou Junjie. Design and implementation of condition monitoring and remote fault diagnosis system for electric vehicle charging equipment[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2019.
- [7] 陈晓楠,张进滨,李超.基于云平台的充电设施远程检测与诊断方法研究[J].电工电气,2018(6):22-26.
- Chen Xiaonan, Zhang Jinbin, Li Chao. Research on remote detection and diagnosis method of charging facilities based on cloud platform[J]. Electrical engineering, 2018(6):22-26.
- [8] 胡春雨,陆翌,李翔,等.充电设备移动检测平台的研究与设计[J].电源技术,2016,40(3):697-699.
- Hu Chunyu, Lu Yi, Li Xiang, *et al.* Research and design of mobile detection platform for charging equipment[J]. Power Technology, 2016,40(3):697-699.
- [9] 韩统一,张华栋,黄德旭,等.一种电动汽车充电设施移动式集成测试方法[J].电气技术,2017(3):117-119.
- Han Tongyi, Zhang Huadong, Huang Dexu, *et al.* A mobile integrated test method for electric vehicle charging facilities[J]. Electrical Technology, 2017(3):117-119.
- [10] 刘秀兰,金渊,曾爽,等.便携式充电设备检测系统的研究与设计[J].电机与控制应用,2017,44(9):48-53.
- Liu Xiulan, Jin Yuan, Zeng Shuang, *et al.* Research and design of portable charging equipment detection system[J]. Motor and Control Applications, 2017,44(9):48-53.
- [11] 李乾.全桥隔离型双向DC-DC变换器研究[D].北京:北京交通大学,2018.
- Li Qian. Research on full bridge isolated bidirectional DC-DC converter[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [12] Ren X, Ruan X, Qian H, *et al.* Three-mode dual-frequency two-edge modulation scheme for four-switch Buck-Boost converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(2):499-509.
- [13] Zhang N, Batteredally S, Lim K C, *et al.* Analysis of the non-inverting Buck-Boost converter with four-mode control method [C]//IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2017:876-881.
- [14] 韩天成,王亮.三相PWM整流器解耦与非解耦控制的对比[J].电测与仪表,2015,52(12):92-96.
- Han Tiancheng, Wang Liang. Comparison of decoupling and non decoupling control of three-phase PWM rectifier[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2015,52(12):92-96.

收稿日期:2020-07-02

修改稿日期:2020-08-21