车载充电机直流注入式绝缘监测电路应用研究

曾磊　邓亮斌　王日金　周浩

（株洲中车时代电气股份有限公司，株洲 412007）

【摘要】针对车载充电机（OBC）绝缘监测电路在逆变输出前无法实现绝缘监测，且易因容性负载导致绝缘监测误报的问题，利用电流镜加入直流电压分量搭建绝缘监测电路实现对OBC逆变输出端的绝缘监测，并对电路设计中关键电子元器件参数选型设计进行分析，通过搭建仿真电路和样机开展仿真和试验验证。结果表明，该方案能够在OBC逆变输出前完成自检，并有效避免容性负载引起的绝缘监测误报。

关键词：车载充电机　绝缘监测　电流镜　直流分量

中图分类号：TM461；U463.6　　**文献标志码：**A　　**DOI：** 10.20104/j.cnki.1674-6546.20260175

Research on DC Injection-Based Insulation Monitoring Circuit for On-Board Charger

Zeng Lei, Deng Liangbin, Wang Rijin, Zhou Hao

(CRRC Zhuzhou Electric Locomotive Research Institute Co., Ltd., Zhuzhou 412007)

【**Abstract**】To address the issues that the insulation monitoring circuit of the On-Board Charger (OBC) cannot perform insulation monitoring before inverter activation and is prone to false alarms caused by capacitive loads, and an insulation monitoring circuit is developed by introducing a DC voltage component via a current mirror to monitor the insulation at the OBC inverter output. The parameter selection and design of critical electronic components in the circuit are analyzed. Simulation and experimental verifications are carried out by building simulation circuits and prototypes. The results show that the proposed scheme can complete self-check before OBC inverter output and effectively avoid false insulation monitoring alarms caused by capacitive loads.

Key words: On-Board Charger (OBC), Insulation monitoring, Current mirror, DC component

【**引用格式**】曾磊, 邓亮斌, 王日金, 等. 车载充电机直流注入式绝缘监测电路应用研究[J]. 汽车工程师, 2026(9): 43-48.

ZENG L, DENG L B, WANG R J, et al. Research on DC Injection-Based Insulation Monitoring Circuit for On-Board Charger[J]. Automotive Engineer, 2026(9): 43-48.

1　前言

电动汽车的车载充电机（On-Board Charger，OBC）是实现交直流能量双向转换的核心部件，正面临日益复杂的大功率充放电工况。当OBC处于充电工况时，其绝缘监测功能由外部充电设备（如充电桩）实现[1-2]。当OBC工作在放电工况时，交流输出侧的绝缘介质容易受到高频开关应力、温升老化及机械振动等多重因素影响，导致绝缘电阻退化甚至击穿失效，存在安全隐患[3-5]。

现有针对电动汽车绝缘监测的研究主要集中于高压电池，采用不平衡电桥法测得的绝缘电阻与实际值通常存在偏差。匡芳等通过大量试验数据对比，验证了该方法的精度仅在测量值与假设条件完全一致的情况下才能满足要求[6]。为解决传统不平衡电桥法在计算直流系统接地等效电阻时复杂度高的问题，Li等提出了一种融合改进不平衡电桥法与漏电流传感器法的复合检测策略[7]。韩军亮等[8]在不平衡电桥法的基础上通过控制桥式电路建立关于绝缘电阻的线性方程组，并求解获得绝缘电阻值。当前OBC逆变输出的绝缘监测方案多采用直接监测交流输出的方式，将零线和火线两侧对地（机壳）的Y电容视为阻抗元件，结合绝缘电阻建立等效平衡桥电路模型。当零线或

火线任意一端出现绝缘失效或退化时，失效的一端对机壳的交流电压会因失去平衡而降低，而另一端对机壳的交流电压会升高，利用电阻分压实现两端交流采样，经整流滤波后，由微控制单元（Micro Control Unit，MCU）分别监测两端的电压变化[9]。然而，在对地绝缘电阻较小时，此类方案难以精确测量零线、火线两侧对地（机壳）的绝缘电阻，且易受容性负载影响，无法实现逆变输出前的绝缘性监测[10]。翔鑫等[11]利用序电流检测法和双频直流注入法解决了不平衡电桥难以准确监测绝缘电阻下降的问题，并实现了接地支路的精确定位。

为规避容性负载的影响，本文利用电流镜在逆变输出端注入直流分量，当任意一端出现绝缘电阻退化或失效时，监测输出电压变化情况，从而在逆变输出前实现自检，以期为同类OBC产品的绝缘监测电路设计提供参考。

2　电路分析与设计

2.1　电路原理分析

本文设计的绝缘监测电路由低通滤波、电流镜采样和稳压滤波输出电路组成，设计框图如图1所示。首先，采用电流镜在交流分量中叠加直流分量以实现绝缘监测，并通过由限流电阻和滤波电容组成的低通滤波电路滤除交流分量[12]。随后，利用电流镜采样电路对输出端进行电流采样，并将采样电流转换为采样电压。该电流镜采样电路由2个参数对称的PNP三极管及若干电阻、电容构成[13]。最后，稳压滤波输出电路对采样信号进行稳压输出，供MCU采集。

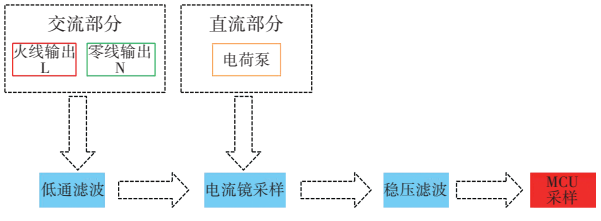


图1　绝缘监测电路设计框图

本文设计的绝缘电阻监测等效电路模型如图2所示。当零线或火线的任意一端发生绝缘失效时，均会形成直流回路。绝缘阻值的变化将引起直流回路中电流的变化，进而将采样电流转换为采样电压进行监测。图中，R_{ins}为逆变输出端对地等效失效电阻，R_3、R_5为逆变输出端X电容的放电电阻，继电器（Relay）用于在OBC充电工况下实现直流低压端与交流端的电气隔离，R_4为交流滤波电阻，C_1为滤波电容，V_1和V_2为参数对称的PNP开关管，R_1、R_2为开关管发射极的限流电阻，R_6为电流镜采样电阻，C_2为采样输出滤波电容。电流镜电路将2个PNP管的基极相连，发射极也相连，由于两管的基极与发射极之间的导通压降相等，当交流侧一端出现绝缘失效时，V_1和V_2导通，有：

$$I_{b1}=I_{b2} \tag{1}$$

式中：I_{b1}、I_{b2}分别为开关管V_1、V_2的基极电流。

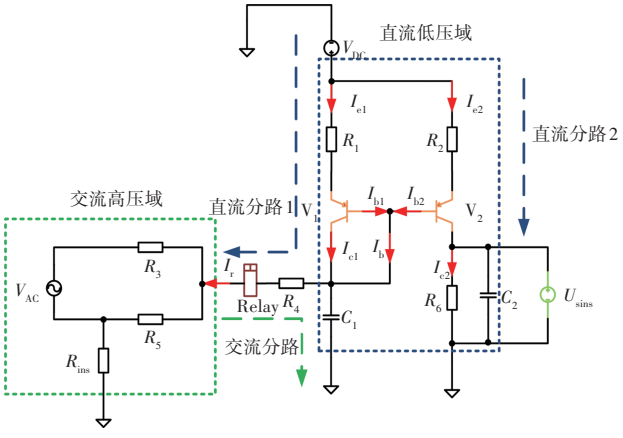


图2　绝缘监测等效电路

V_1和V_2工作于开关管放大区，满足：

$$I_{c1}=\beta_1 I_{b1} \tag{2}$$

$$I_{c2}=\beta_2 I_{b2} \tag{3}$$

式中：β_1、β_2分别为开关管V_1、V_2的电流放大倍数，I_{c1}、I_{c2}分别为V_1、V_2的集电极电流。

开关管V_1、V_2满足$\beta_1=\beta_2$，结合式（1）可得：

$$I_{c1}=I_{c2} \tag{4}$$

本文设计的绝缘检测电路部分等效电路参数如表1所示。当OBC正常逆变输出时，继电器闭合，直流分路1导通，绝缘电阻R_{ins}、直流输入电压V_{DC}与采样电流I_{e1}的关系满足：

$$I_{e1}\approx I_{c1}=I_{c2}=\frac{V_{DC}-V_{be}}{R_1+R_4+R_{ins}+\dfrac{R_3\times R_5}{R_3+R_5}} \tag{5}$$

表1　绝缘检测等效电路参数

参数	取值
逆变输出电压有效值V_{AC}/V	220
X电容放电电阻R_3/kΩ	23.5
X电容放电电阻R_5/kΩ	23.5
开关管V_1、V_2导通压降V_{be}/V	0.7

同时，直流分路2导通，采样电压U_{sins}与绝缘电阻R_{ins}的关系为：

$$U_{sins}=I_{c2}\times R_6=\frac{V_{DC}\times R_6}{R_1+R_4+R_{ins}+\dfrac{R_3\times R_5}{R_3+R_5}} \tag{6}$$

当交流侧一端出现绝缘失效时，其绝缘电阻R_{ins}与采样电流、采样电压的关系为：

$$I_{e1}\approx I_{c1}=I_{c2}=\frac{V_{DC}-V_{be}}{R_1+R_4+R_{ins}+R_5} \tag{7}$$

$$U_{sins}=I_{c2}\times R_6=\frac{V_{DC}\times R_6}{R_1+R_4+R_{ins}+R_5} \tag{8}$$

2.2 电路设计

根据采样电压与绝缘电阻间的关系设计电路参数。其中：低通滤波电路主要用于滤除逆变输出端的交流分量；电流镜电路用于注入直流分量，并将采样电流转换为采样电压；电荷泵电路为电流镜采样电路提供直流工作电压。

2.2.1 低通滤波电路设计

逆变输出电压有效值V_{AC}=220 V，X电容放电电阻R_3=R_5=23.5 kΩ，其中，纹波电压Δu和截止频率f分别满足：

$$\Delta u=V_{AC}\times\left|\frac{\dfrac{-\mathrm{j}}{2\pi f\times C_1}}{\dfrac{-\mathrm{j}}{2\pi f\times C_1}+R_4+\dfrac{R_3\times R_5}{R_3+R_5}}\right|\leqslant 0.1\ \mathrm{V} \tag{9}$$

$$f=\frac{1}{2\pi\times\left(R_4+\dfrac{R_3\times R_5}{R_3+R_5}\right)\times C_1}\leqslant 50\ \mathrm{Hz} \tag{10}$$

式中：j为虚部单位。

为满足电路正常工作时交流高压域与直流低压域之间接触电流的安全要求[14]，还需满足：

$$\frac{V_{AC}}{R_4}\leqslant 3.5\ \mathrm{mA} \tag{11}$$

结合式(9)~式(11)，确定电阻R_4=2 MΩ、电容C_1=2.2 μF。

2.2.2 电流镜采样电路设计

电流镜采样电路的核心在于保证开关管V_1和V_2的基极与发射极间导通压降相等，即R_1=R_2。当一端发生绝缘失效时，直流回路1首先导通，为电容C_1充电，随后直流回路2导通，为电容C_2充电，所以检测电压的建立时间为两者充电时间之和。为保证在2 s内完成绝缘电阻检测，根据直流回路的电容充放电公式，有：

$$\begin{cases}t_1=4R_1C_1\leqslant 1\ \mathrm{s}\\ t_2=4R_2C_2\leqslant 1\ \mathrm{s}\\ t=t_1+t_2\end{cases} \tag{12}$$

式中：t_1、t_2分别为直流回路1、直流回路2的充电时间，t为绝缘检测完成的时间。

结合电容C_1确定电阻R_1=100 kΩ、R_2=100 kΩ、C_2=2.2 μF，代入式(12)计算可得到绝缘检测所需时间t≈1.76 s，满足设计要求。

2.2.3 电荷泵电路设计

电荷泵电路产生直流电压分量V_{DC}，如图3所示，利用二极管的单向导电性和电容两端电压不能突变的特性实现升压。其中，V_{Pulse}为周期性脉冲信号，工作频率为40 kHz，用于控制二极管的导通与关断[15-16]。

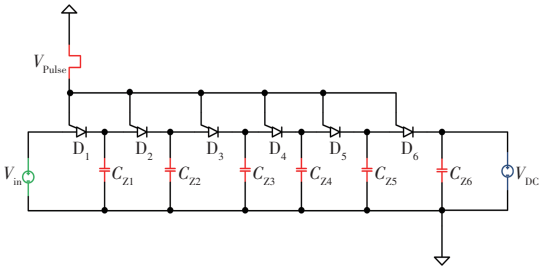


图3 电荷泵电路示意

二极管的导通压降V_f=1.3 V，输入电压V_{in}(车载电池电压)为12 V，电荷泵输出电压V_{DC}为：

$$V_{DC}=6\times(V_{in}-V_f) \tag{13}$$

直流回路2的采样输出电压需在MCU检测电压范围内。根据式(6)，考虑绝缘电阻R_{ins}为0时，MCU检测的最大电压为5 V，应满足：

$$U_{sins}=\frac{V_{DC}\times R_6}{R_1+R_4+\dfrac{R_3\times R_5}{R_3+R_5}}\leqslant 5\ \mathrm{V} \tag{14}$$

为保证最大检测精度，取电阻R_6=165 kΩ。

3 仿真与试验验证

3.1 仿真验证

为验证所设计绝缘监测电路参数的准确性与合理性，基于上述电路参数搭建仿真模型进行分析。仿真覆盖绝缘良好、Y电容失衡及逆变输出前检测3种工况，同时评估绝缘失效检测时间及采样电压与绝缘电阻间的关系。

在绝缘良好(即绝缘电阻无穷大)且忽略逆变输出端容性负载失衡的条件下，仿真得到的采样电压结果如图4所示。采样电压始终维持在0 V，与理论设计一致。

在逆变输出的一端与地之间分别接入10 nF、20 nF、30 nF、40 nF的Y电容，仿真结果如图5所示。监测电压基本稳定在0 V左右，表明Y电容失衡不会影响绝缘检测电路的正常工作。

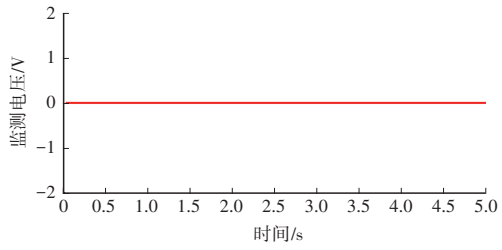


图4　绝缘良好条件下采样电压仿真结果

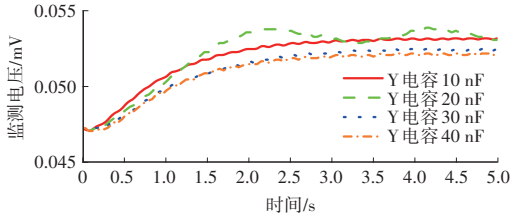


图5　Y电容失衡条件下采样电压仿真结果

在不考虑逆变输出端容性负载失衡影响的情况下,于逆变输出前接入100 kΩ绝缘电阻,并于1 s后启动逆变输出。仿真结果如图6所示,逆变输出前、后的采样电压分别约为4.62 V、4.65 V,基本保持稳定,验证了逆变输出前绝缘检测的可行性。

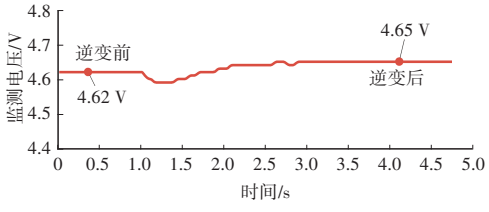


图6　逆变输出前绝缘检测仿真

为最大程度保障人员安全,绝缘故障需在较短时间内被检测到,以便系统快速响应并切断电源,因此须验证绝缘失效检测时间。系统工作1 s后,将绝缘电阻调整为100 kΩ,监测电压的变化情况如图7所示。由图7可知,绝缘失效检测时间约为1.6 s,满足理论设计要求。

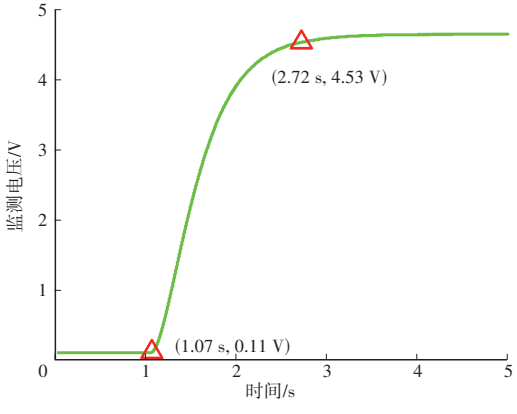


图7　绝缘失效检测时间仿真结果

分别调整绝缘电阻为100 kΩ、200 kΩ、300 kΩ、400 kΩ、500 kΩ,稳定后得到其与采样输出电压的关系如图8所示。可见,绝缘电阻越小,稳定后的采样电压越大。

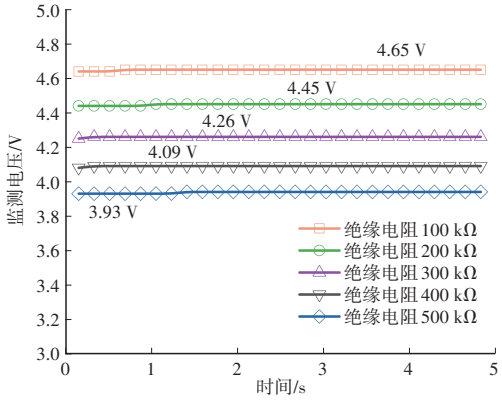


图8　采样输出电压与绝缘电阻的关系

3.2　试验验证

为验证本文提出的绝缘监测方案的可行性和有效性,基于上述参数搭建了测试电路开展试验,如图9所示。其中,直流稳压源用于控制继电器闭合及电荷泵电路输入,交流源用于模拟OBC逆变输出,示波器和万用表用于监测采样输出电压,色环电阻用于模拟绝缘失效。

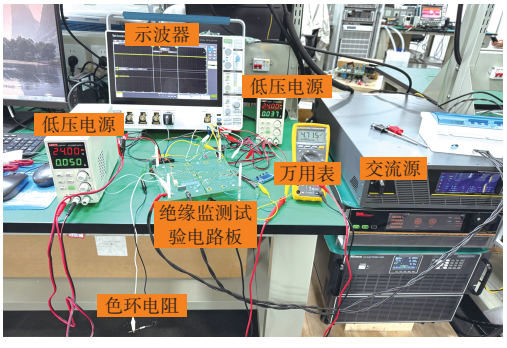


图9　测试场景

在测试中,未在零线或火线的任一端与地之间接入电阻,以模拟绝缘良好的工况,交流源输出设置为有效值220 V、频率50 Hz。测试波形如图10所示,采样监测电压为0 V,与理论分析和仿真验证的结果一致。

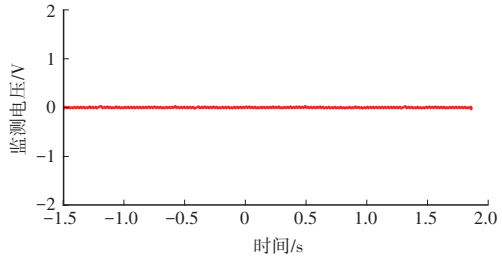
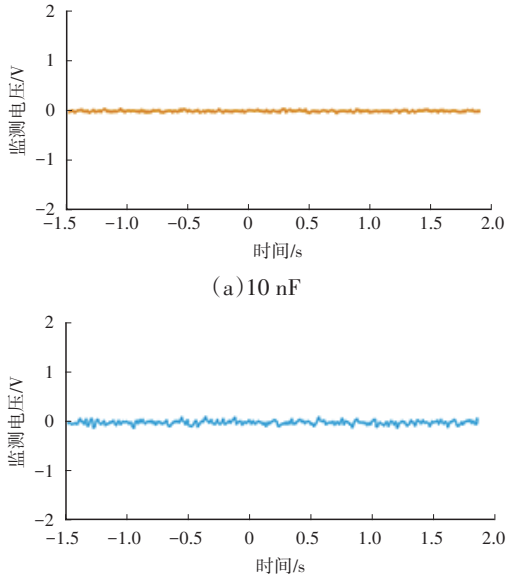


图10　绝缘良好条件下采样电压试验结果

在零线与地之间分别接入10 nF和20 nF的Y电容进行测试,调整交流源输出有效值为220 V、输

出频率为50 Hz，测试结果如图11所示。试验结果表明，Y电容失衡不影响绝缘监测。



（a）10 nF

（b）20 nF

图11　不同容值Y电容失衡条件下采样电压试验结果

保持交流源输出有效值为220 V、频率为50 Hz，在输入端与地之间接入100 kΩ的电阻，通过示波器监测采样输出电压从绝缘良好状态过渡至绝缘失效后电压稳定时的变化波形，如图12所示，检测时间约为1.63 s，能够在较短时间内完成绝缘监测。

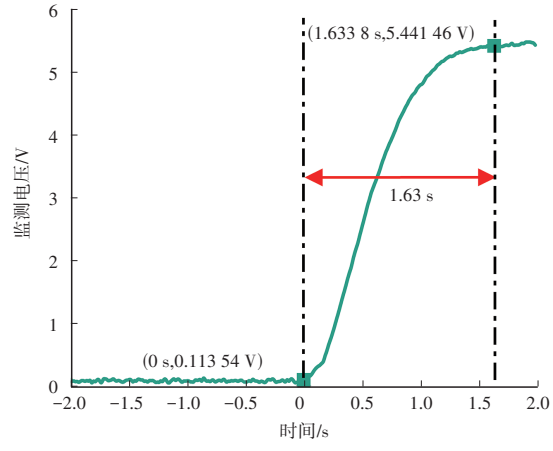


图12　绝缘失效检测时间试验结果

在输入端火线与地之间分别接入10 kΩ、100 kΩ、200 kΩ、300 kΩ、400 kΩ、500 kΩ的色环电阻以模拟绝缘失效，并采用示波器监测输出电压，结果如图13所示。试验数据如表2所示，试验值与仿真值及理论计算值之间存在一定误差，主要原因包括：实际搭建电路中的电阻存在偏差，较理论值偏小；电流镜电路和电荷泵电路中实际使用的开关管压降低于理论值，导致采样电压偏大。

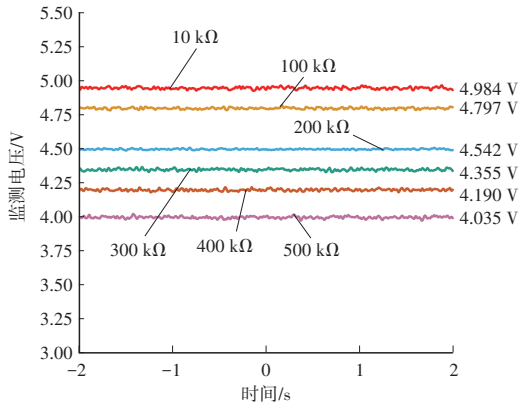


图13　不同绝缘阻值条件下采样电压试验结果

表2　试验结果与仿真计算和理论计算结果对比

绝缘电阻/kΩ	采样电压 U_{sins}/V		
	理论值	仿真值	实测值
10	4.946	4.96	4.948
100	4.670	4.65	4.797
200	4.471	4.45	4.542
300	4.288	4.26	4.355
400	4.119	4.09	4.190
500	3.963	3.93	4.035

4　结束语

本文提出了一种在OBC逆变输出端叠加直流分量以实现绝缘监测的方法，分析了其电路原理，并对相关电路进行了参数设计和理论计算。随后，通过搭建仿真电路验证了该方案的合理性和有效性，并通过试验进一步确认了其准确性与可行性。验证结果表明，该方法能够实现对电动汽车OBC逆变输出端的绝缘安全监测，不受容性负载影响，可在逆变输出前完成绝缘检测，具有设计简单、成本低的优点。该方案仍存在阻值监测分辨率较低、检测时间较长等问题，后续研究将进一步优化电路参数，以提高绝缘监测精度并缩短检测时间。

参　考　文　献

[1] 付国良, 蓝贤平, 黄妍琼, 等. 车载充电机交流传导发射测试方法研究[J]. 汽车工程师, 2025(7): 24-28.
FU G L, LAN X P, HUANG Y Q, et al. Research on Testing Methods for Conducted Emission of AC Power Lines from On-Board Charger[J]. Automotive Engineer, 2025(7): 24-28.

[2] 中国电力企业联合会. 电动汽车传导充电系统第1部分：通用要求: GB/T 18487.1—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
China Electricity Council. Electric Vehicle Conductive

Charging System—Part 1: General Requirements: GB/T 18487.1—2023[S]. Beijing: China Standards Press, 2023.

[3] 刘元治, 宋希龙, 王伯军, 等. 电动汽车电网适应性测试技术概述[J]. 汽车文摘, 2024(8): 48-55.
LIU Y Z, SONG X L, WANG B J, et al. An Overview of Grid Adaptability Testing Technologies for Electric Vehicles[J]. Automotive Digest, 2024(8): 48-55.

[4] METWLY M Y, HE J B, ABDEL-KHALIK A S. Integrated On-Board Battery Charger with Galvanic Isolation Based on 6-Phase SPM Synchronous Machine for Electric Aircraft [C]// 50th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Chicago, IL, USA: IEEE, 2024.

[5] 吴佳琦, 张谦, 吴小汉, 等. 电动汽车与电网互动的关键问题研究综述[J]. 汽车工程学报, 2022, 12(4): 411-430.
WU J Q, ZHANG Q, WU X H, et al. A Review of Key Issues in Electric Vehicle and Power Grid Interaction[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2022, 12(4): 411-430.

[6] 匡芳, 陈林, 刘宏达, 等. 电动汽车绝缘电阻计算方法的对比研究[J]. 汽车工程学报, 2018, 8(6): 438-445.
KUANG F, CHEN L, LIU H D, et al. Comparative Study on Methods of Calculating Insulation Resistance of Electric Vehicles[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2018, 8(6): 438-445.

[7] LI Z H T, ZHANG L T, SHEN C Q, et al. Ground Fault Detection in Substation DC System Based on Improved Unbalanced Bridge Method[C]// 2024 Second International Conference on Cyber-Energy Systems and Intelligent Energy (ICCSIE). Shenyang, China: IEEE, 2024.

[8] HAN J L, XU H B, ZHENG Z H. Study and Implementation of Grounding Insulation Resistance Detection System for the Solar Inverter[C]// 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering. Yichang, China: IEEE, 2011: 838-841.

[9] SAKAI K, TODA K, MATSUMORI H, et al. Comparative Study on Non-Isolated Integrated On-Board Chargers for BEV/PHEV[C]// 2025 IEEE Energy Conversion Conference Congress and Exposition (ECCE). Philadelphia, PA, USA: IEEE, 2025: 1-5.

[10] KIM B, KIM M, CHOI S. Single-Stage Electrolytic Capacitor-Less AC-DC Converter with High Frequency Isolation for EV Charger[C]// 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia). Hefei, China: IEEE, 2016: 234-238.

[11] CHENG X X, WU S. Research on Intelligent On-Line Insulation Monitoring Device of Ship's AC Power Grid[C]// 2010 International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application. Changsha, China: IEEE, 2010: 219-222.

[12] WANG L, LI L, FAN L J, et al. Research on the Insulation Detection Technology of the AC Cable in Distributed Photovoltaic Power Station Considering Photovoltaic Inverter[C]// 2022 2nd International Conference on Electrical Engineering and Mechatronics Technology (ICEEMT). Hangzhou, China: IEEE, 2022: 291-295.

[13] 李海鸥, 方厚辉. 一种双极型基本电流镜的改进电路[J]. 现代电子技术, 2003(5): 74-75+78.
LI H O, FANG H H. A New Bipolar Transistor Current Circuit[J]. Modern Electronic Technique, 2003(5): 74-75+78.

[14] 中华人民共和国工业和信息化部. 电动汽车用传导式车载充电机: GB/T 40432—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Conductive On-Board Charger for Electric Vehicles: GB/T 40432—2021[S]. Beijing: China Standards Press, 2021.

[15] 闫良, 闫英敏, 杨凤彪. 倍压整流电路的分析和仿真[J]. 电子设计工程, 2017, 25(8): 119-123.
YAN L, YAN Y M, YANG F B. Analysis and Simulation of Voltage Doubling Rectifier Circuit[J]. Electronic Design Engineering, 2017, 25(8): 119-123.

[16] LIU X Q, SUN Z H, PENG K. Design and Experimental Research of a Portable High Frequency Power Generator [C]// International Conference on Advanced Manufacturing Technology and Manufacturing Systems (ICAMTMS 2022). Shijiazhuang, Hebei, China: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2022.

（责任编辑　斛　畔）

修改稿收到日期为2026年7月7日。