

隔离技术在储能系统高压设计中的应用

徐志华¹ 梁新田²

(1. 中铁电气工业有限公司保定铁道变压器分公司, 河北 保定 071051;
(2. 北京天启鸿源新能源科技有限公司, 北京 100167)

摘要 为探讨隔离技术在储能系统高压设计中的应用, 本文重点分析光电隔离、磁隔离和电容隔离技术的特点及其在不同应用场景中的表现。通过技术对比、应用分析和案例研究, 详细阐述隔离技术在提高系统安全性、减少电磁干扰、实现信号和能量传输, 以及便于高压环境下的测量和控制等方面的应用效果。结果表明, 通过合理选择隔离技术可以有效提升高压储能系统的安全性和可靠性, 为高压储能系统的设计和优化提供了理论依据和实践指导。

关键词: 储能系统 (ESS); 高压设计; 隔离技术; 光电隔离; 磁隔离; 电容隔离

Application of isolation technology in high voltage design of energy storage system

XU Zhihua¹ LIANG Xintian²

(1. Baoding Railway Transformer Branch Company of China Railway Electric Industries Co., Ltd, Baoding, Hebei 071051;
2. Beijing Tianqi Hongyuan New Energy Technology Co., Ltd, Beijing 100167)

Abstract This paper aims to explore the application of isolation technology in high voltage design of energy storage systems (ESS), with a focus on analyzing the characteristics of optical isolation, magnetic isolation, and capacitive isolation technologies and their performance in different application scenarios. By combining technical comparison, application analysis, and case studies, this paper elaborates in detail on the application of isolation technology in improving system safety, reducing electromagnetic interference, achieving signal and energy transmission, and facilitating measurement and control in high voltage environments. The results indicate that reasonable selection of isolation technologies can effectively improve the safety and reliability of high voltage energy storage systems, providing theoretical basis and practical guidance for the design and optimization of high voltage energy storage systems.

Keywords: energy storage system (ESS); high voltage design; isolation technology; optical isolation; magnetic isolation; capacitive isolation

0 引言

随着全球能源结构转型和可再生能源的快速发展, 电化学储能系统在电力系统中扮演着越来越重要的角色。储能系统规模不断扩大, 提高系统电压成为提升效率和降低成本的重要手段。高压设计可以减小系统电流, 从而降低导线损耗和设备成本^[1]。例如, 将系统电压从 DC 1 000V 提高到 DC 1 500V, 可以使系统效率提高 0.5%~1%, 同时使系统成本

降低 10%~15%。

然而, 高压设计也带来了一系列挑战, 尤其是在安全性、绝缘要求、电磁干扰和测量精度方面。

1) 安全性: 高压系统存在更高的电击风险和短路风险。根据 IEC 61140 标准, DC 1 500V 以上的系统被归类为高压系统, 需要采取特殊的安全措施^[2]。

2) 绝缘要求: 高压环境下对材料和结构的绝缘要求更高。例如, 最大工作电压 DC 1 500V 的储能系统, 绝缘电阻试验电压要求 DC 2 500V, 耐压试

验电压要求直流有效值为 $3\ 820\text{V}^{[3-5]}$ 。

3) 电磁干扰: 高压系统产生的电磁干扰更强, 可能影响控制和通信系统。研究表明, DC $1\ 500\text{V}$ 系统的电磁干扰强度比 DC $1\ 000\text{V}$ 系统高 $30\%\sim 50\%$ 。

4) 测量难度: 高压环境下的精确测量变得更加困难。例如, 传统的霍尔效应传感器在高压环境下可能出现饱和问题。

隔离技术作为解决上述问题的关键手段, 引起了学术界和工业界的广泛关注。本文旨在探讨隔离技术在储能系统高压设计中的应用, 重点分析光电隔离、磁隔离和电容隔离技术的特点、优势及其在不同应用场景中的表现, 以期通过系统性研究为高压储能系统的设计和优化提供理论依据和实践指导。

1 隔离技术概述

隔离技术是指在电路中创建一个物理和电气隔离的界面, 以阻止电流流动, 同时允许能量或信息在隔离界面两侧传递。低电压到高电压电信号隔离电路如图 1 所示。

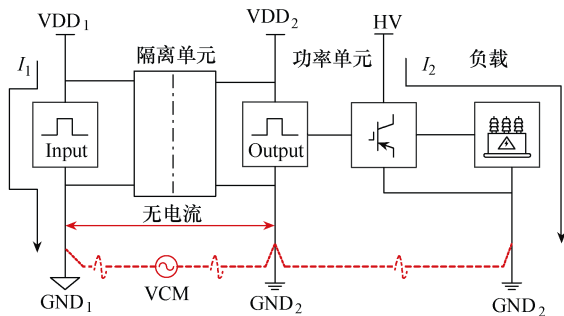


图 1 低电压到高电压电信号隔离电路

当 GND₁ 从 GND₂ 断开时, I₁ 与 I₂ 实现电隔离。由于 GND₁ 和 GND₂ 之间未共用一个 GND, 因此没有通过隔离栅共享直流接地电流^[6]。

隔离技术在解决高压设计挑战中扮演着关键角色, 它可以:

1) 提高系统安全性, 防止高压对低压侧的危害。例如, 使用隔离技术可以将 DC 5kV 以上的高压信号安全地转换为低压控制信号。

2) 减少电磁干扰, 提高系统的电磁兼容性。研究表明, 采用光电隔离可以将共模瞬态抗扰度 (common mode transient immunity, CMTI) 提高到 $15\text{kV}/\mu\text{s}$ 以上。

3) 实现高低压之间的信号和能量传输。例如, 通过磁隔离技术 DC-DC 变换器转变效率可达到

98%以上。

4) 便于高压环境下的测量和控制。例如, 使用隔离型模数转换器 (analog to digital converter, ADC) 可以在 DC $1\ 500\text{V}$ 系统中实现 0.1% 的测量精度。

2 隔离方法

在储能系统高压设计中, 主要应用的隔离技术包括光电隔离、磁隔离和电容隔离。

2.1 光电隔离

光电隔离利用光电耦合器实现电信号的传输, 工作原理是将电信号转换为光信号, 通过光学介质传输后再转换回电信号。光电隔离具有以下特点:

1) 隔离电压高, 常见光耦可实现直流有效值 $2.5\sim 5\text{kV}$ 的电压隔离。例如, Everlight 公司的 EL101X—G 系列光耦可提供有效值为 5kV 的工作电压隔离。有些经过特殊设计的光耦, 隔离电压甚至可达到有效值 20kV 以上。

2) 抗干扰能力强, 光信号传输不受电磁干扰影响。典型的光耦可以实现 $15\text{kV}/\mu\text{s}$ 以上的共模瞬态抗扰度。

3) 传输速度快, 高速光耦可实现数十 Mbit/s 的传输速率。例如, Silicon Labs 的 Si8621 系列数字隔离器可实现 150Mbit/s 的数据传输速率。

4) 功耗低, 典型光耦功耗在 mW 级别。例如, Texas Instruments 公司的 ISO 7741 系列数字隔离器在 1Mbit/s 传输速率下的功耗仅为 $1.5\text{mW}/\text{通道}$ 。

2.2 磁隔离

磁隔离技术利用变压器原理, 通过磁场耦合实现能量和信号的传输。主要特点包括:

1) 功率传输能力强, 可实现大功率隔离传输。例如, 使用磁隔离技术的 DC-DC 转换器可以实现数百 kW 的功率传输。

2) 隔离电压高, 特殊设计可达到数十 kV 的隔离电压。例如, ABB 公司的电力电子牵引变压器 (power electronic traction transformer, PETT) 技术可实现有效值 15kV 的隔离电压。

3) 双向传输, 可实现能量和信号的双向传输。这在双向 DC-DC 转换器中尤为重要。

4) 效率高, 在功率传输中可实现很高的效率。例如, 采用 GaN 器件和纳米晶材料的高频变压器可以实现 98% 以上的效率。

2.3 电容隔离

电容隔离利用电容器的特性, 通过电场耦合实

现信号传输。其特点包括：

1) 结构简单，实现方式相对简单，成本较低。例如，Texas Instruments 的 ISO674x 系列电容隔离器的成本比同等性能的光耦低 30%左右。

2) 传输速度快，可实现高速信号传输。例如，Maxim Integrated 的 MAX2256x 系列电容隔离器可实现 200Mbit/s 的数据传输速率。

3) 功耗低，静态功耗几乎为零。例如，Maxim Integrated 的 MAX1493x 系列电容隔离器的静态功耗低至 1μW。

4) 隔离电压受限，通常难以实现很高的隔离电压。大多数商用电容隔离器的隔离电压有效值在 2.5~5kV 范围内。

3 隔离技术应用

在高压储能系统中，不同应用场景所需的隔离方法不尽相同。下面说明如何在设计中选择可靠性高、低成本的隔离方案。

3.1 信号隔离

在高压储能系统中，信号隔离是保证控制系统安全和可靠运行的关键，在直流侧和交流侧的设计中都有广泛应用，主要包括：

1) 电压和电流测量。高压侧的电压和电流信号都需要通过隔离技术传输到低压侧控制系统。例如，在一个 DC 1 500V 的储能系统中，可以使用隔离放大器实现电压测量。研究表明，采用光电隔离技术的隔离放大器可以实现 0.1%的测量精度，同时提供有效值 15kV 的隔离电压。具体来说，Texas Instruments 的 AMC1301 隔离放大器可以在±250mV 的输入范围内实现 0.075%的精度，隔离电压有效值高达 7kV。

2) 控制信号传输。控制系统需要向高压侧的功率电子设备发送控制信号，光电隔离技术在这一方面表现出色。例如，在一个 5MW/10MW·h 的储能系统中，采用光纤隔离技术传输脉宽调制 (pulse width modulation, PWM) 信号，可以实现 5ns 的信号延迟，有效保证了系统的控制精度。Avago Technologies 的 ACPL—W346 隔离门驱动器可以提供 2A 的峰值输出电流，传播延迟仅为 60ns，非常适合 IGBT 和 SiC MOSFET 的驱动应用。

3) 通信接口隔离。高压储能系统通常需要与外部系统进行数据交换，电容隔离技术具有优势。例如，国产品牌纳芯微电子研发的控制器局域网

(controller area network, CAN) 收发器 NSIP1042，采用集成片上 DC-DC 隔离电源的电容隔离技术，可以实现 5Mbit/s 的通信速率，绝缘电压有效值高达 5kV，CMTI 高达 150kV/μs，同时隔离电源可提供一定的输出功率，反馈 PWM 信号通过基于自研电容隔离技术的数字隔离器反馈至初级。高集成技术可以帮助用户简化应用电路并提高系统可靠性。集成隔离电源的数字隔离器如图 2 所示。

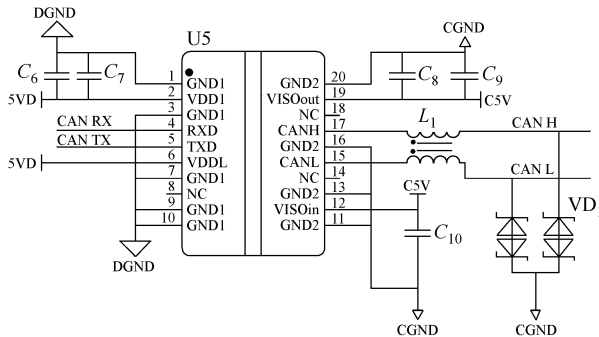


图 2 集成隔离电源的数字隔离器

3.2 功率隔离

在高压储能系统中，功率隔离主要应用于储能变流器主回路的 DC-DC 和 DC-AC 转换，以及控制回路的辅助电源中，实现高、低压之间的能量传输。

1) 高频变压器

在高压储能系统的 DC-DC 转换器中，高频变压器是实现功率隔离的关键元件。研究表明，采用纳米晶材料的高频变压器可以在 100kHz 的开关频率下实现 98%以上的变换效率，同时提供有效值为 10kV 的隔离电压^[7-8]。例如，Hitachi Metals 的 FINEMET 纳米晶软磁材料可以在 100kHz 下实现低至 80W/kg 的核心损耗，非常适合高频高效变压器的设计。图 3 为双向 DC-DC 原理框图。

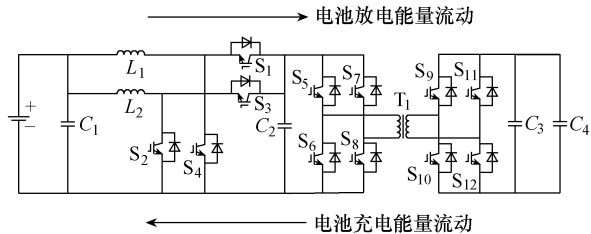


图 3 双向 DC-DC 原理框图

2) 无线充电系统

对于大规模储能系统，无线充电技术可以提供更灵活的充电方案。磁耦合隔离技术发挥重要作用^[9]。例如，一个基于磁耦合的 50kW 无线充电系统可以实现 92%的传输效率，工作频率为 85kHz，

隔离距离可达 200mm。WiTricity 公司的 DRIVE 11 系统可以提供 11kW 的充电功率，效率高达 94%。

3.3 驱动电路隔离

在高压储能系统中，储能变流器功率半导体器件的驱动电路需要可靠的隔离保护。

1) IGBT 驱动

对于高压 IGBT 模块，其栅极驱动电路需要高性能的隔离技术。研究表明，采用光电隔离技术的 IGBT 驱动器可以实现 20ns 的传输延迟，隔离电压有效值达到 5kV，有效保证了 IGBT 的快速、可靠开关^[10]。例如，Power Integrations 的 SCALE—2 2SC0435T2A0—17 驱动器可以驱动 1 700V/3 300V 的 IGBT 模块，提供 4W 的输出功率，隔离电压有效值高达 5.5kV。图 4 为使用光电耦合器作信号隔离驱动 IGBT 的电路。

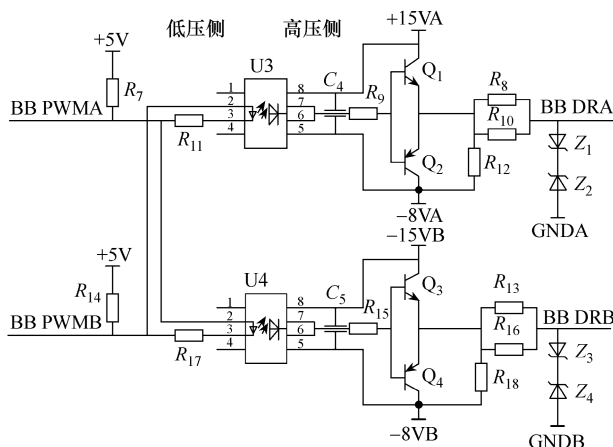


图 4 使用光电耦合器作信号隔离驱动 IGBT 的电路

2) SiC MOSFET 驱动

随着 SiC MOSFET 在高压储能系统中的应用增多，对驱动电路的隔离要求随之提高。SiC MOSFET 通常需要更高的栅极电压和更快的开关速度。研究表明，采用磁隔离技术的 SiC MOSFET 驱动器可以实现 10ns 以下的传输延迟，隔离电压有效值达到 10kV，满足了 SiC MOSFET 的高性能驱动需求^[11]。例如，CREE 公司的 CRD—001 驱动器专为 SiC MOSFET 设计，可提供 -5~+20V 的栅极电压，上升时间小于 13ns，下降时间小于 16ns，非常适合高频高压应用场合。

4 隔离技术的性能比较与选择

在高压储能系统设计中，选择合适的隔离技术对系统的性能和可靠性至关重要。三种主要隔离技术的性能对比见表 1。

表 1 三种主要隔离技术的性能对比

性能指标	光电隔离	磁隔离	电容隔离
隔离电压	高 (有效值 2.5~20kV)	很高 (有效值可达数十 kV)	中等 (有效值 2.5~5kV)
传输速度	快 (可达 150Mbit/s)	中等 (可达 50Mbit/s)	很快 (可达 1Gbit/s)
功耗	低 (mW 级)	中等 (取决于功率)	很低 (μW 级)
抗干扰能力	强	中等	弱
功率传输能力	弱	强	弱
成本	中等	高	低

基于上述对比，可以得出以下选择建议：

1) 对于信号隔离，尤其是在高干扰环境下，光电隔离是首选。例如，在高压变流器的控制电路中，可以使用 Avago Technologies 的 ACPL—C87B 系列光耦，它提供峰值 1.414kV 的隔离电压和 15kV/μs 的共模瞬态抗扰度。

2) 对于功率隔离，特别是大功率应用，磁隔离是最佳选择。例如，在 MW 级储能系统的 DC-DC 转换器中，可以使用基于 Hitachi Metals FINEMET 材料的高频变压器，实现高效率、高隔离电压的功率传输。

3) 对于需要高速数据传输的场景，如高速数字接口，电容隔离可能更适合。例如，在储能系统的数据采集单元中，可以使用 Texas Instruments 的 ISO774x 系列数字隔离器，它提供高达 100Mbit/s 的数据速率和有效值为 5kV (DW 封装) 的隔离电压。

4) 在一些特殊应用中，可能需要结合使用多种隔离技术。例如，在大型储能系统的电池管理系统 (battery management system, BMS) 中，可以使用光电隔离进行电压测量，使用磁隔离实现电源隔离，使用电容隔离进行高速数据通信^[12-13]。

5 应用案例分析

某个额定容量为 3.44MW/6.88MW·h 的电网侧锂离子电池储能系统中，采用 0.5C 磷酸铁锂电池和模块化储能变流器 (power conversion system, PCS)。每个预制舱 3.44MW·h，内置 10 个电池簇，每个电池簇的关键参数见表 2。

在研发样机测试过程中，出现变流器功率单元故障和控制板采样回路及主控芯片损毁的现象。控制板损毁状态如图 5 所示。

表 2 储能系统簇级参数

设备	参数	数值
电池簇	电芯单体容量/(A·h)	280
	PACK 内电芯数量/个	64
	一簇内 PACK 数量/个	6
	一簇内电芯数量/个	384
	一簇内电池能量/(MW·h)	0.344
	额定直流电压/V	1 228.8
储能变流器	直流电压范围/V	1 050~1 500
	直流最大电流/A	195
	交流额定功率/kW	186
	交流额定电流/A	156
	额定电网电压/V	690
	电网频率范围/Hz	50/60
	充放电转换时间/ms	≤20
	最高效率/%	99
通信规约	IEC 61850、Modbus-TCP	

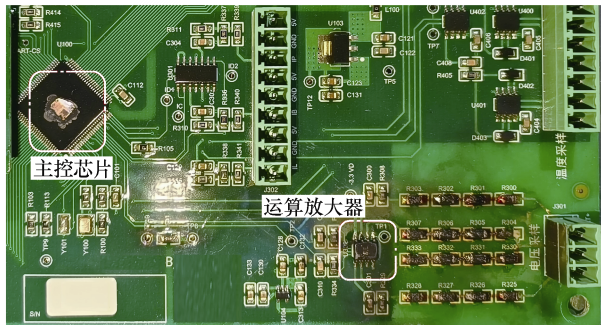


图 5 控制板损毁状态

在故障排查过程中，使用示波器测量电池簇正负极相对于电池架接地点 PE 的电压。当启动储能变流器时，示波器触摸屏功能出现异常，触控失效，且观测到电池簇负极对 PE 电压值（通道 C1）最小约-1.5kV，电池簇正极对 PE 电压值（通道 C2）最大约 1.275kV，正负极的 BMS 在线绝缘检测值都低至 1.2MΩ 左右，明显超出正常工作范围。电池簇对地电压波形如图 6 所示。

基于上述现象，推断过高的共模电压是导致系统故障的主要原因：由于控制板供电和电压采样回路未将主控芯片和电池簇端高压侧隔离，共模瞬态抗扰度差，从而造成采样不稳定，控制失效甚至损坏，进而出现变流器功率单元故障。为解决这一问题，对系统设计进行以下优化：

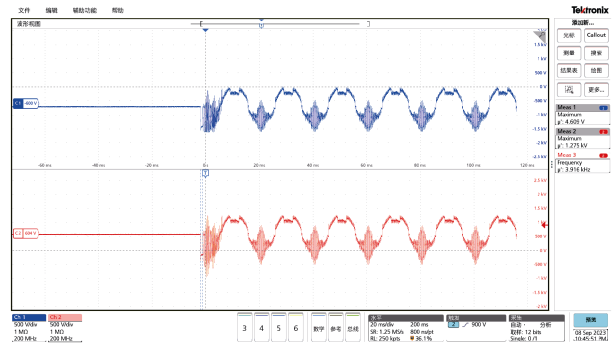


图 6 电池簇对地电压波形

1) 供电电源隔离。在控制电源 AC 220V 前端增装隔离变压器，利用磁隔离技术实现功率隔离，以有效降低共模干扰。

2) 采样电路隔离。改进控制板电压采样回路设计，引入高性能的隔离放大器 NSI1311，基于 NOVOSENSE 电容隔离技术，实现主电路与电压采样电路的信号隔离。该器件最高 5 000V 绝缘电压有效值，高共模瞬态抗扰度 150kV/μs 可确保即使在大功率开关的情况下，其也能提供精准而可靠的测量结果，同时低失调和增益漂移可确保整个温度范围内的精度。图 7 为隔离放大器高压采样电路。

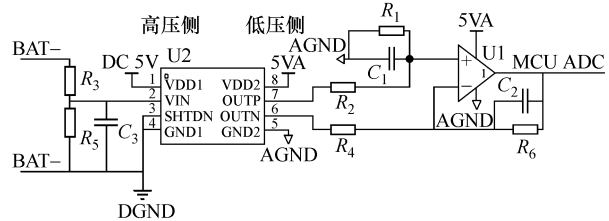


图 7 隔离放大器高压采样电路

以上优化措施旨在提高系统的电气隔离性能，增强抗干扰能力，从而提升整个储能系统的可靠性和安全性。从实际的运行状况来看，问题得到有效解决，电池簇正负极相对于电池架接地点 PE 的电压降至 121V，BMS 在线绝缘检测值达到 9.6MΩ。

6 结论

本文通过技术对比、应用分析和案例研究，详细探讨了隔离技术在储能系统高压设计中的应用。研究表明，隔离技术的选择需要综合考虑隔离电压、传输速度、功耗、抗干扰能力、功率传输能力和成本等因素。在实际应用中，往往需要结合使用多种隔离技术来满足系统需求。案例分析中，本文针对一个 3.44MW/6.88MW·h 的大型储能系统出现的控制板损毁和变流器功率单元故障问题进行了深入研

究。通过增加应用隔离技术进行优化设计,使系统的电气隔离性能和抗干扰能力显著提升,电池簇对地电压和绝缘检测值恢复正常。这一案例充分说明在高压储能系统设计中,合理选择并应用隔离技术对提高系统安全性和可靠性至关重要。未来研究将进一步关注这些优化措施的长期效果,包括系统性能提升的定量分析和长期可靠性测试,以持续完善高压储能系统的设计方案。

参考文献

- [1] 许梦阳, 郑蓬, 贺春. GW级储能电站能量管理系统关键技术试验研究[J]. 电气技术, 2023, 24(7): 56-63.
- [2] Devices for isolation for high voltage: IEC 61140—2016[S].
- [3] 电力储能用电池管理系统: GB/T 34131—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [4] 电化学储能系统储能变流器技术要求: GB/T 34120—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- [5] 程正年, 汤海松, 马锷, 等. 一种直流绝缘诊断装置及其检测方法[J]. 电气技术, 2024, 25(3): 58-62.
- [6] Addressing high-voltage design challenges with reliable and affordable isolation technologies[Z]. Texas Instruments, 2021.
- [7] ZHANG Haitao, ZHANG Yunjie. Recent advances in DC-DC converters for electric vehicles[J]. MATEC Web Conf., 2023, 386: 02008.
- [8] 杨向真, 王锦秀, 孔令浩, 等. 电压不匹配运行条件下双有源桥变换器的效率优化方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(24): 6239-6251.
- [9] 杨庆新, 张献, 章鹏程. 电动车智慧无线电能传输云网[J]. 电工技术学报, 2023, 38(1): 1-12.
- [10] SCALETM-2 IGBT gate drivers[Z]. Power Integrations, Inc., 2022.
- [11] 林华梁, 彭松. 配电终端绝缘性能自动测试系统的研究与应用[J]. 电气技术, 2023, 24(5): 65-70.
- [12] 李建林, 李雅欣, 刘海涛, 等. 计及储能电站安全性的功率分配策略研究[J]. 电工技术学报, 2022, 37(23): 5976-5986.
- [13] 夏向阳, 陈贵全, 刘俊翔, 等. 储能系统直流侧纹波电流对锂离子电池寿命影响分析及优化控制策略[J]. 电工技术学报, 2023, 38(22): 6218-6229.
- [12] 杨拯, 温才权, 刘炜, 等. 500kV GIS变电站隔离开关操作对二次电缆的影响[J]. 南方电网技术, 2022, 16(6): 147-155.
- [13] 林海明, 魏美玲, 张源, 等. 一种电力安装用电缆引线装置[P]. 中国: CN218040474U, 2022-12-13.
- [14] 王圣昌, 徐剑峰, 王晓飞. 变电站电缆敷设及二次接线的工艺改进[J]. 流体测量与控制, 2024, 5(4): 62-65.
- [15] 王世超, 王世全, 许靖, 等. 一种高效电缆引线器[P]. 中国: CN217984301U, 2022-12-06.
- [16] 罗玉堂, 侯雁峰, 段志珍, 等. 多功能二次电缆抓取工具改进分析[J]. 集成电路应用, 2024, 41(1): 150-151.
- [17] 宋大成, 张健, 陈卫宇, 等. 一种电缆引线器[P]. 中国: CN220273173U, 2023-12-29.
- [18] 李扬. 高速强力电磁铁的设计与仿真[D]. 北京: 清华大学, 2012.
- [19] 洪晓玮, 陈勇. 一种新型电磁吸附式爬壁机器人的研制[J]. 机械科学与技术, 2021, 40(3): 337-343.

收稿日期: 2024-09-23

修回日期: 2024-10-21

作者简介

徐志华(1982—), 女, 河北省石家庄市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事变压器设计及电器可靠性研究工作。

收稿日期: 2024-09-20

修回日期: 2024-10-22

作者简介

简川黔(1995—), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向为继电保护。

(上接第68页)