

一种直流电源冲击电流抑制方法

周应旺 李杨晔

(中国融通集团第六十研究所, 南京 210016)

摘要 无人机机载电子设备因输入端容性负载特性, 在直流供电瞬间易引发强冲击电流, 导致电源系统稳定性降低并可能诱发系统级电磁兼容问题。本文针对瞬态冲击电流的抑制需求, 在系统分析传统浪涌抑制方案的基础上, 提出一种新型预充电电路抑制方法。通过构建可控预充电回路, 结合 RC 时间常数优化设计, 实现充电电流与时间常数的精准匹配, 在保障系统可靠性的同时显著降低成本。工程验证表明, 该方法可将上电冲击电流峰值抑制在额定工作电流范围内, 有效维持电源母线电压稳定性。研究成果为保障机载电子系统的电源品质提供了具有实用价值的解决方案, 特别适用于对供电质量与电磁兼容性要求严苛的无人机平台。

关键词: 无人机 (UAV); 机载设备; 冲击电流; 冲击电流抑制; 预充电电路

A method for inrush current suppression in DC power supplies

ZHOU Yingwang LI Yangye

(The 60th Research Institute of CRTIC, Nanjing 210016)

Abstract Due to the input capacitive load characteristics of unmanned aerial vehicle (UAV) onboard electronic equipment, a high inrush current is easily induced during DC power-on transients, leading to reduced stability of the power system and potential system-level electromagnetic compatibility (EMC) issues. To address the demand for suppressing transient inrush currents, this study proposes an innovative pre-charge circuit suppression method based on a systematic analysis of traditional surge suppression schemes. By constructing a controllable pre-charge circuit and optimizing the RC time constant design, precise matching between the charging current and time constant is achieved, significantly reducing implementation costs while ensuring system reliability. Engineering validation demonstrates that this method effectively suppresses the peak inrush current within the rated operational current range and maintains stable power bus voltage. The research provides an engineering-practical solution for ensuring power quality in onboard electronic systems, particularly suitable for UAV platforms with stringent requirements for power supply integrity and electromagnetic compatibility.

Keywords: unmanned aerial vehicle (UAV); onboard equipment; inrush current; inrush current suppression; pre-charge circuit

0 引言

无人机进入多电、全电发展阶段, 供配电系统对无人机发展的重要性不言而喻^[1]。无人机智能配电系统由电源转换单元、控制单元和配电中心组成, 负责机载设备和任务设备供电管理。电源转换单元将输入的三相交流电压转换为直流电压^[2], 并将应急电源及地面调试电源防反后汇入主汇流条; 控制

单元接收飞控计算机的控制指令, 通过控制器局域网 (controller area network, CAN) 总线发送对应设备的供配电控制指令, 同时采集设备的供电电压、电流与状态信息等, 通过串口通信反馈给飞控计算机进行监测; 配电中心采用固态功率控制器 (solid-state power controller, SSPC) 控制负载通断。SSPC 是指用来代替继电器的转换功能和断路器的电路保护功能的固态元器件, 是与固态配电系统相

配套的控制负载通断的开关装置，具有响应迅速、驱动功率小和无二次击穿的特点，SSPC通过检测负载电流来实现故障保护，比传统的断路器的热保护更为灵敏^[3-6]。为满足电磁兼容性要求及电压稳定性，无人机机载电子设备电源输入端通常并联电容器，SSPC控制负载上电瞬间，电容器相当于短路状态，产生的瞬时冲击电流超过额定电流的5倍^[7]，容易触发SSPC的过电流保护，影响电源电压稳定和干扰信号采集，甚至损坏电子器件。

航空活塞发动机作为无人机动力装置，为无人机及发电机提供动力。发动机冷却采用冷却液进行强制循环，及时带走缸头、缸体上发动机产生的热量。冷却装置包括液体散热器、温度压力传感器和散热风机等，其中散热风机为冷却装置进行强制散热，散热风机电源输入端并联有大容量电容器。本文所述智能配电系统具备多路多规格SSPC，负载能力包括5A、30A等，其中第一路SSPC即SSPC1的负载能力为5A，控制负载1上下电，第二路SSPC即SSPC2的负载能力为30A，控制冷却液散热风机上下电。测试过程中，当SSPC2给散热风机上电时产生冲击电流，其采样值波形如图1所示。SSPC2负载电流在负载接通后80 μ s内上升到150A，持续时间约10 μ s，是额定电流的5倍，触发SSPC2的过电流保护而关闭通道，并导致SSPC1供电电压出现异常，存在损坏机载设备的风险，影响智能配电系统正常工作。针对此现象，本文对其产生原因进行分析，介绍常用的冲击电流抑制方法，在此基础上，

提出一种采用预充电路进行冲击电流抑制的方法，并叙述其工作原理、电路组成与工作流程。搭建实物验证平台，以证明该方法能够有效抑制负载上电瞬时冲击电流，从而保证电源稳定性，解决设备自兼容问题。

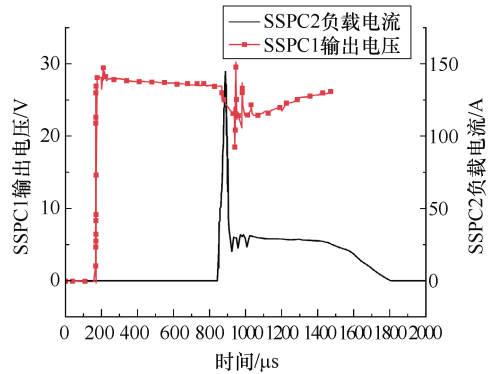


图1 冲击电流采样值波形

1 原理分析

某无人机的智能配电系统原理框图如图2所示，由主控模块、通信模块、SSPC模块与信号采集模块等组成，通过RS 422总线接收飞控计算机的负载供电控制命令，按预设逻辑控制SSPC接通或断开，完成无人机电子设备配电功能；同时，将智能配电系统的工作状态、负载参数及采集的电源参数通过RS 422总线上传至飞控计算机。产品实现时，SSPC1、SSPC2的控制电路在同一块SSPC电路板上，直流28V电源通过外部电源接口接入28V主汇流条，再经SSPC输出给后端负载。

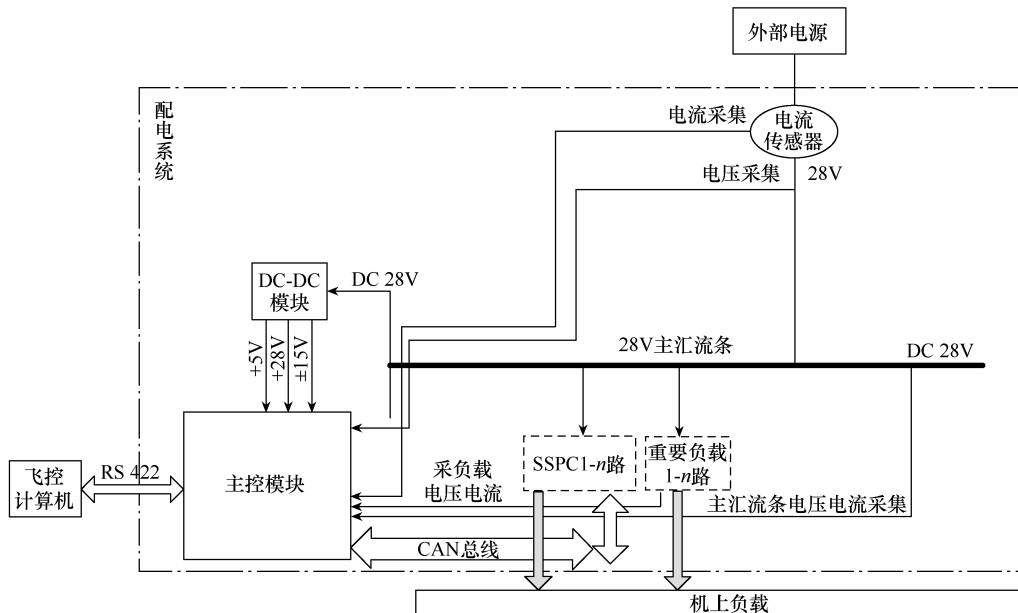


图2 某无人机智能配电系统原理框图

根据图1中的现象,对智能配电系统进行分析排查,采用CAN总线分析仪在主控模块与SSPC1间通信的CAN总线监测到SSPC1电流采样值异常,同时故障出现时SSPC1的输出电压波形呈现规律性的接通和关断,SSPC1输出电压波形如图3所示。测量到SSPC1关断后40ms再次接通,SSPC1重复上电3次后保护依旧动作,控制中心控制SSPC1关断,符合SSPC1负载过电流保护逻辑。由此可以确定,SSPC1负载电流采样异常,导致SSPC1执行负载过电流保护而限制电压输出。

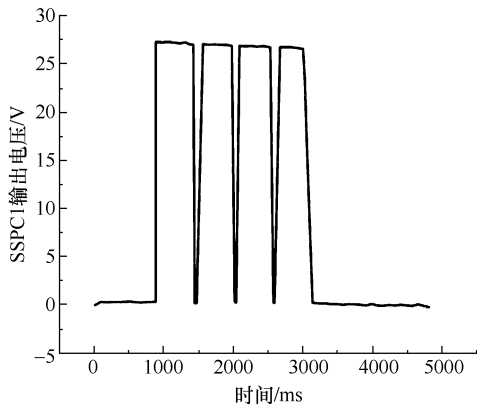


图3 SSPC1输出电压波形

智能配电系统设计SSPC1的额定负载能力为5A,对应输入单片机的电压采样值为0.1V,当电压采样值大于额定值1.3倍(即0.13V)时,判断SSPC1过电流,采用 I^2T 曲线进行SSPC1过电流保护。为进一步查明故障根本原因,观测SSPC1负载电流在SSPC2上电瞬间的变化情况。SSPC1电流采样波形如图4所示,图中MOSFET栅极-源极电压为SSPC2开关电路中金属-氧化物半导体场效应晶体管(metal-oxide semiconductor field-effect transistor,

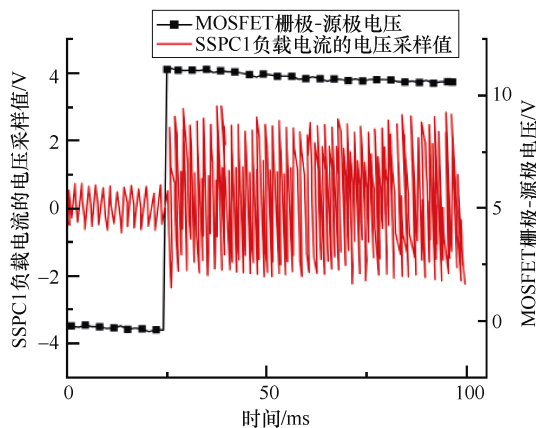


图4 SSPC1电流采样波形

MOSFET)栅极-源极两端电压,SSPC1负载电流以对应电压采样值表示。由图4可知,SSPC1负载电流电压采样值在SSPC2开关接通时刻开始振荡,波形峰-峰值约为5.0V,半波峰值超过2V。SSPC2开通瞬时冲击电流为150A,持续时间约10 μ s,如图1所示。由图4可知,SSPC1负载电流的电压采样值超过1V,即SSPC1电流超过50A,持续时间超过10ms时,智能配电系统判断SSPC1负载过电流10倍,执行快速过电流保护措施,因而出现如图3所示的输出电压波形。

根据对问题现象的描述、智能配电系统工作原理的介绍及测试数据的分析可知,智能配电系统SSPC1输出电压异常是由于SSPC2负载上电瞬时冲击电流产生空间电磁干扰,导致SSPC1负载过电流保护。针对此问题,需要从干扰源头进行解决,减小干扰源的电场强度。当SSPC2负载上电冲击电流减小到一定程度时,一方面可以避免因较大冲击电流导致SSPC2输出保护,使其正常工作;另一方面可以降低冲击电流产生的空间电磁干扰,保证SSPC1负载电流采样电路不会受到干扰,SSPC1输出电压正常。

2 冲击电流抑制

2.1 常见的冲击电流抑制方法

国内外减小浪涌电流的研究^[8-11]较多,目前常见的冲击电流抑制方法包括:①在线路中增加限流电抗器,此方法一定程度上限制了电流的上升率与最大电流,但非线性元件会产生额外的电磁干扰与谐波,影响系统稳定性^[12-13];②在母线上串联大电感或电阻^[14],此方法中大电感增加电源体积和质量,正常工作时电阻带来功率损失,适用于小电流场合;③在母线上串联负温度系数(negative temperature coefficient, NTC)热敏电阻^[15],连续开关机时会出现冲击电流抑制失效现象,仅适用于无连续开关机和小电流的场合;④在母线上串联可恢复熔断器^[16],此方法中熔断器响应时间较长,不适合做上电瞬间冲击电流抑制器;⑤在母线上串联MOSFET^[17-21],如图5所示,该方法利用MOSFET对冲击电流进行抑制,具有很快的反应速度和较小的损耗,具有更高的效率,但是该方法利用MOSFET的安全工作区抑制冲击电流,对安全工作区要求高,选型不当易损坏MOSFET,降低了系统可靠性。

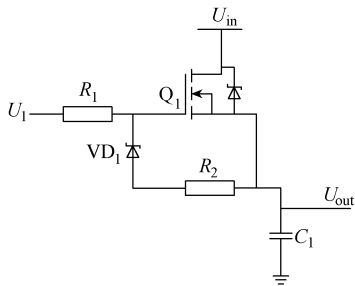


图5 母线串联 MOSFET

2.2 优化的冲击电流抑制方法

无人机要求机载电子设备可靠性高、质量轻、体积小与维护方便，在满足这些条件的前提下，本文在母线串联 MOSFET 进行冲击电流抑制的基础上，提出一种采用预充电路进行冲击电流抑制的方法。设计思路为预充电路输出端与 SSPC 输出端并联，配电中心接收到给负载供电指令时，先接通预充开关，通过限流电阻给容性负载充电，充满后控制 SSPC 接通给后端负载供电，同时关闭预充开关，通过预充电路将该通道的上电冲击电流抑制在额定电流以下。本文所提方法不仅可以精确抑制负载供电瞬时冲击电流，还对后端负载容量的大小、多路负载同时上电等具有很强的兼容性，提高了电源抗冲击能力，亦可应用于高压直流电源冲击电流抑制，降低 MOSFET 损坏率。

采用预充电路进行冲击电流抑制的电路原理如图 6 所示，预充电路由 R_3 、 R_4 、 Q_2 与 VD_2 组成，SSPC 开关电路由 R_1 、 R_2 、 Q_1 与 VD_1 组成。其中， R_1 与 R_3 分别为 MOSFET Q_1 与 Q_2 的驱动限流电阻，防止瞬间电流过大导致驱动模块损坏，同时起到消除信号振荡的作用，提高电路可靠性； VD_1 与 VD_2 为稳压二极管，用于钳位 MOSFET Q_1 和 Q_2 的栅极驱动电压； R_4 为功率限流电阻，用于控制预充电路充电电流大小及充电时间； R_2 为负载电流采样电阻，用于采集后端负载电流； C_1 为负载电源输入端滤波电容。

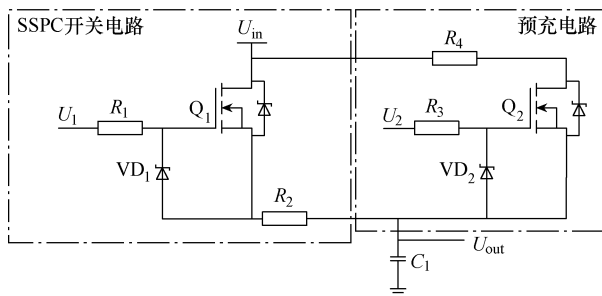


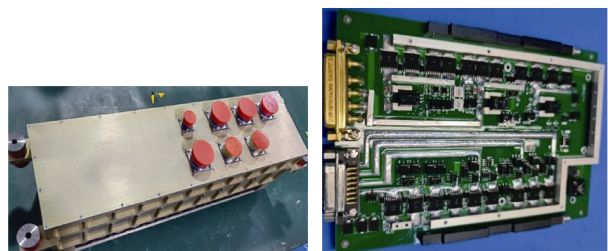
图6 采用预充电路进行冲击电流抑制的电路原理

电路工作流程为：当接收到 SSPC 开通控制指令时，通过时序控制预充开关 Q_2 导通，预充电路经限流电阻 R_4 给电容 C_1 充电，充电时间根据电容 C_1 值和电阻 R_4 值确定，并可根据负载电容值的大小调整充电电流和充电时间，当电容充满电后控制接通 SSPC 开关 Q_1 ，并关闭开关 Q_2 ，此时该通道的上电冲击电流被控制在额定电流以下，避免了电路误保护、电源损伤，延长了 MOSFET 使用寿命，解决了对其他信号的电磁干扰问题。

3 实验验证

为了验证所提出的采用预充电路进行冲击电流抑制的方法的有效性，使用前述某无人机智能配电系统进行测试，该智能配电系统具备交流转直流、设备供电功能，控制某型无人机机载设备供电，由接触器控制电路、主汇流条、SSPC 配电电路、主控制电路、信号采集电路等组成。

按照 2.2 节所述电路原理选取电路参数如下：MOSFET 选择高压小电流类型，电阻 R_1 与 R_3 为限流电阻，参数范围为 $50\sim 150\Omega$ ，阻值取 100Ω ；考虑电流转换为电压后的采样电压范围，并且尽可能减少功率损耗，采样电阻 R_2 阻值取 $2\text{m}\Omega$ ；预充电电流取 1 倍负载额定电流， R_4 阻值由预充电流与输入电压进行计算，计算得其阻值取 0.9Ω ；负载端滤波电容参数范围 $1\ 000\sim 4\ 700\mu\text{F}$ ，由短时预充时间要求选取实际负载电容 C_1 的容值为 $2\ 200\mu\text{F}$ ；根据 MOSFET 导通特性，控制信号 U_1 、 U_2 电压值为 12.5V ，输入电源 U_{in} 电压值为 28V ，测试实物如图 7 所示，测试环境如图 8 所示。



(a) 测试实物外观

(b) 测试实物内部电路

图7 测试实物

经实践验证，预充电路能很好地抑制电源上电冲击电流。瞬时冲击电流如图 9 所示，实测上电瞬间电流峰值为 30A ，限制在额定电流 40A 以内。MOSFET 开通时刻电压电流如图 10 所示，SSPC2 开

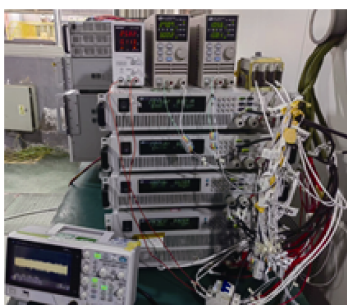


图8 测试环境

关电路中 MOSFET 栅极-源极两端电压在开通瞬间电压值为 12.5V; 与图 4 对比, SSPC1 采样电流不再有振荡现象, 从 CAN 总线数据监测到 SSPC1 的负载状态与初始设定值一致。上述测试结果表明, 采用预充电电路进行冲击电流抑制的方法有效。

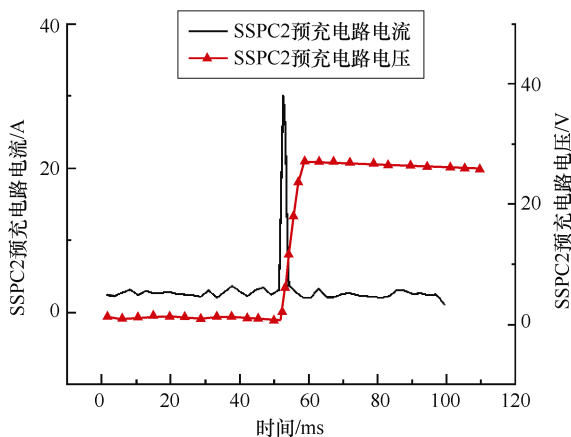


图9 瞬时冲击电流

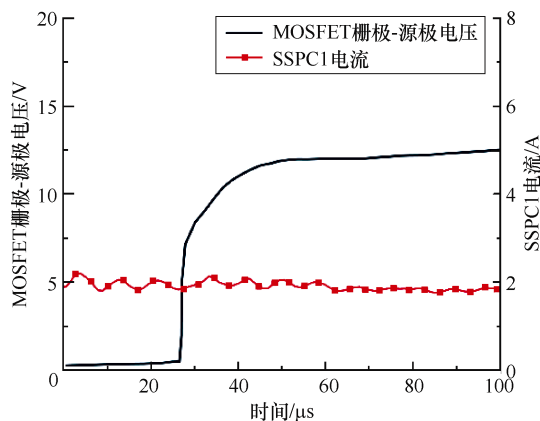


图10 MOSFET 开通时刻电压电流

4 结论

本文针对无人机智能配电系统中散热风机上电瞬间产生的冲击电流问题, 系统分析了其成因及潜在危害, 并对比了多种抑制方案的技术特性。基于

母线串联 MOSFET 架构, 本文创新性地提出了一种自适应预充电拓扑优化方法: 通过在 SSPC 输出端并联可控预充电电路, 结合负载电容参数的动态调节机制, 实现充电电流与时间常数的精准匹配。该设计在保证电路鲁棒性的同时, 将瞬态冲击电流峰值降低至额定电流范围内, 且硬件成本低于传统方案。经多工况工程验证, 该方法兼具拓扑简洁性与控制灵活性, 可有效提升机载电源系统的供电兼容性, 为航空电子设备的浪涌抑制提供了可复用的工程范式。

参考文献

- [1] 卓超然, 张笑天, 张雄, 等. 支撑电容可分离的直流变压器短路故障电流限流控制方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(2): 424-432.
- [2] 史晓阳. 航空用高功率因数可控升压整流器仿真研究[J]. 电气技术, 2019, 20(4): 12-15, 20.
- [3] 金静, 李建勋, 毕荣. 基于 DSC 的飞机电气负载管理中心设计[J]. 电源技术应用, 2012(8): 53-57.
- [4] 刘晓羽. 基于 SSPC 的负载自动管理技术[J]. 现代电子技术, 2015, 38(8): 104-108.
- [5] 潘江江, 李海伟, 张翔, 等. 基于 SSPC 模块化小型智能配电设计研究[J]. 电子测量技术, 2016, 39(10): 140-144.
- [6] 马敏, 刘鹏飞, 李新健. CAN 总线在现代飞机固态配电系统中的应用[J]. 电源技术, 2015, 39(12): 2740-2742.
- [7] 王威, 王勇. 直流电源冲击电流计算方法及抑制[J]. 电力电子技术, 2022, 56(3): 15-18.
- [8] JEON C, HEO K W, JUNG J H. Analysis and design of a current suppressor to mitigate the inrush current for a low-voltage DC distribution network[J]. Journal of Power Electronics, 2024, 24: 1095-1103.
- [9] MULLER L, KIMBALL J W. High gain DC-DC converter based on the Cockcroft-Walton multiplier[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(9): 6405-6415.
- [10] JIANG Taosha, CAIROLI P, RODRIGUES R, et al. Inrush current limiting for solid state devices using NTC resistor[C]//SoutheastCon 2017, Concord, NC, USA, 2017.
- [11] 何宏伟, 林维明. 一种具有快速动态响应的峰值电流控制[J]. 电气技术, 2014, 15(1): 22-25.
- [12] 王聪, 沙广林, 王俊, 等. 基于双重移相控制的双有

- 源桥 DC-DC 变换器的软开关[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 106-113.
- [13] 金莉, 刘邦银, 段善旭. 三电平双有源全桥 DC-DC 变换器回流功率最小的移相控制[J]. 电工技术学报, 2018, 33(24): 5864-5873.
- [14] 张乾, 王卫国. 星载开关电源浪涌电流抑制电路研究[J]. 电子技术应用, 2008, 34(12): 82-84.
- [15] 白璐, 黄晓燕. 一种新型大功率电源浪涌电流抑制电路的研究[J]. 数字技术与应用, 2017, 35(2): 140-142.
- [16] 谷金宏, 俎万民, 李继凯. 电子线路的浪涌保护[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2001, 29(4): 40-42.
- [17] 吕宏伟, 覃波, 付益. 直流电源浪涌电流抑制电路研究[J]. 广东通信技术, 2016, 36(3): 77-79.
- [18] 康弘俊, 王威. 一种新颖的直流电源冲击电流抑制电路[J]. 电力电子技术, 2021, 55(9): 28-30, 51.
- [19] 熊亚丽, 王威. 一种改进型直流电源冲击电流抑制电路[J]. 环境技术, 2023, 41(6): 66-70, 78.
- [20] 刘晓贞. 一种机载设备冲击电流抑制的方法[J]. 新型工业化, 2022, 12(4): 199-201.
- [21] 徐星星, 吴振. 用于机载 28VDC 设备的冲击电流抑制电路[J]. 电子技术与软件工程, 2021(4): 215-216.

收稿日期: 2025-01-06

修回日期: 2025-03-03

作者简介

周应旺(1985—), 男, 江西九江人, 硕士, 高级工程师, 从事无人机航电系统研究工作。

(上接第7页)

- [20] MORANDI A, ANEMONA A, ANGELI G, et al. The DRYSMES4GRID project: development of a 500 kJ/200 kW cryogen-free cooled SMES demonstrator based on MgB₂[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(4): 1-5.
- [21] 陈静. 基于 Ansys 的低电感叠层母排设计[J]. 电气技术, 2016, 17(6): 78-80.
- [22] RAHMOUNI O, AIT-AMAR S, DUCHESNE S, et al. Laminated busbar PDIV improvement using a new varnish-based insulation technology with micro/nano fillers[C]//2023 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), Quebec City, QC, Canada, 2023.
- [23] PAULSSON G, SAHLEN F, MARTENSSON E, et al. Ageing behaviour and temperature rise in end corona protection layer for high voltage machines subjected to converter-like voltages[C]//2017 INSUCON-13th International Electrical Insulation Conference (INSUCON), Birmingham, UK, 2017.
- [24] PASCHEN F. Ueber die zum funkenübergang in luft, wasserstoff und kohlendioxid bei verschiedenen drucken erforderliche potentialdifferenz[J]. Annalen Physik, 1889, 273(5): 69-96.
- [25] 张本栋, 江军, 李治, 等. 面向未来多电飞机的低气压下局部放电[J]. 航空学报, 2022, 43(7): 275-285.
- [26] 沈瑶, 刘兴杰, 梁英, 等. 基于硅橡胶分子链陷阱变化的复合绝缘子老化现象[J]. 电工技术学报, 2024, 39(17): 5545-5554.
- [27] 董章, 李思尧, 陈雅旒, 等. 基于组合赋权的电缆风险评估可视化[J]. 电气技术, 2023, 24(6): 57-63.
- [28] 李思尧, 董章, 陈雅旒, 等. 基于 NGO-VMD-HHT 的电缆局部放电信号特征量提取方法[J]. 电气技术, 2023, 24(11): 35-41, 47.
- [29] ACHEEN R, ABADIE C, LEBEY T, et al. Comparison of the electrical ageing under sinusoidal and square-wave stresses[C]//2018 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), San Antonio, TX, USA, 2018.
- [30] 李静, 易晨曦, 彭世东, 等. 高海拔环境下大容量直流空气断路器灭弧性能研究[J]. 电工技术学报, 2024, 39(3): 863-874.
- [31] 朱敏慧, 闵道敏, 高梓巍, 等. 直流电缆用交联聚乙烯绝缘的击穿概率及其尺度效应仿真[J]. 电工技术学报, 2024, 39(4): 1172-1184.
- [32] 杨德亮, 刘宏宇. 航空线缆局部放电试验研究[J]. 中国机械, 2024(3): 4-8.
- [33] 吴颜飞. 基于永磁同步电动机驱动系统传导电磁干扰模型的干扰预测和滤波器设计[J]. 电气技术, 2023, 24(8): 37-43, 49.
- [34] 项成恩, 潘捍宇, 涂忱胜, 等. 高压动力电缆电磁兼容研究[J]. 江西电力, 2023, 47(2): 18-23.
- [35] 胡国民, 付志斌. 电动汽车高压连接器 EMC 性能研究[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(1): 230-233.
- [36] 张泽权, 蔡新景. 基于 COMSOL 仿真的电力电缆局部放电检测传感器设计[J]. 电气技术, 2023, 24(4): 29-36.

收稿日期: 2024-10-21

修回日期: 2025-01-08

作者简介

张路(1983—), 男, 江苏无锡人, 硕士, 工程师, 主要从事发动机控制系统电气设计及验证工作。