

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2519188

面向风机变桨系统的双冗余热拔插电源系统^{*}

陈柏轩 黄君艺 宫萍萍

(广西大学电气工程学院 南宁 530004)

摘要: 针对风力发电机变桨系统电源缺少实时监控,且故障时更换步骤繁杂的问题,提出一种基于单片机控制的可热拔插双模块开关电源系统方案,实现了在不停机状态下的故障电源更换。该方案采用模块化双电源冗余架构,电源基于反激电路设计并进行模块化设计,具备 20~80 V 宽电压输入范围和最大 24 V/3 A 的稳定输出,集成 STM32 单片机与 TPS2491 热拔插芯片,电源故障时自动切换,支持故障电源的快速拔插更换。并搭建基于 Bootstrap5 框架开发的监控平台,实现电源的智能监控管理。实验结果表明,该系统在电源故障时切换时间短(满载工况下 ≤ 10 ms)、电压暂降小。同时,监控平台实现电源状态的实时监控、故障报警及运行数据分析,提升变桨系统供电可靠性。

关键词: 热拔插;宽电压输入;模块化设计;双电源冗余;单片机控制;智能监控

中图分类号: TN86 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4031

Dual redundant hot-swappable power supply system design for wind turbine pitch systems

Chen Boxuan Huang Junyi Gong Pingping

(School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: To address the lack of real-time monitoring for wind turbine pitch control system power supplies and the cumbersome replacement procedures during failures, this paper proposes a hot-swappable dual-module switching power supply system based on microcontroller control. This solution enables faulted power supply replacement without system shutdown. This solution adopts a modular dual-power-supply redundant architecture. The power supply is designed based on a flyback circuit with modular components, featuring a wide input voltage range of 20~80 V and a stable output of up to 24 V/3 A. It integrates an STM32 microcontroller and TPS2491 hot-swap chip, enabling automatic switching during power failures and supporting rapid hot-swap replacement of faulty units. A monitoring platform developed using the Bootstrap5 framework was established to achieve intelligent power supply monitoring and management. Experimental results demonstrate that the system achieves short switching times (≤ 10 ms under full load conditions) and minimal voltage dips during power failures. Concurrently, the monitoring platform enables real-time power status monitoring, fault alerts and operational data analysis, thereby enhancing the power supply reliability of the variable pitch system.

Keywords: hot swappable; wide voltage input; modular design; dual power redundancy; microcontroller control; intelligent monitoring

0 引言

风电作为实现“双碳”目标的关键可再生能源,风力发电机变桨控制系统的供电可靠性直接影响风机运行安全与发电效率。开关电源(switching power supply, SPS)因其高效、可靠的特点,广泛应用于风机变桨系统及工业控制领域^[1]。与传统的线性电源相比,开关电源具有更高的能效

和更小的体积,适用于对功率密度、体积、效率和成本有严格要求的应用场景^[2-3]。近年来,随着氮化镓(GaN)和碳化硅(SiC)功率器件的应用,开关电源的性能得到了进一步提升^[4-5]。这些新型材料的开关损耗低、性能高,极大推动了开关电源在高频、大功率和宽输入电压 DC-DC 变换器领域中的应用^[6-9]。同时,数字控制技术的引入和控制策略的改进,不仅提升了开关电源的稳定性,还增强了电源管理灵活

收稿日期:2025-06-24

^{*} 基金项目:广西重点研发计划(桂科 AB25069322)、广西自然科学基金重点项目(2018GXNSFDA8008)资助

性与智能化水平^[10-13]。

在热拔插领域, Scrimizzi 等^[14]优化金属氧化物场效应管 (metal-oxide-semiconductor field effect transistor, MOSFET) 的沟槽工艺设计, 提高线性模式下的电流均匀性和热稳定性, 从而在不依赖外部电路的情况下, 直接解决热拔插中的浪涌电流和热失控问题, 这种对器件构造进行优化能有效解决热拔插过程中的浪涌电流冲击和热失控, 但是会提高器件的制造成本; Zhou 等^[15]在研究分布式控制系统 (distributed control system, DCS) 热拔插时, 通过动态潜在通路分析技术, 分析并解决 DCS 在热拔插中的风险, 并提出一种热拔插技术的改进措施; 张雪梅等^[16]利用热拔插芯片设计了热拔插保护电路, 实现了数据采集卡的热拔插功能; Nieto 等^[17]对传统反激式拓扑电路进行改进, 结合专用芯片进行均流控制来实现热拔插, 这种方式能够带来高能效和高增益, 却不适用于大功率场景。当前, 热拔插电源技术主要应用于服务器供电等大功率场景, 而在小型控制系统中, 电源维护仍依赖断电、拆线、重新接线等繁琐流程。以风力发电为例, 风机变桨控制系统对供电可靠性和运维效率要求极高, 一旦电源故障将导致风机停机, 造成重大经济损失。此外, 现有系统多依赖人工巡检, 缺乏实时状态监控, 运维效率低。

针对上述问题, 本文提出一种基于单片机控制的双电源模块化可热拔插电源系统。该系统电源采用模块化设计, 连接至基于 STM32 单片机设计的智能切换模块, 允许电源在故障时直接热拔插更换, 避免传统维护中的断电与重新接线过程。同时, 智能切换模块可实现双电源自动切换, 并结合故障监测与实时报警功能, 将运行状态上传至上位机系统, 提高运维效率。此外, 单片机的引入为电源后续的功能扩展提供了灵活的支持, 为工业电源系统的智能控制和维护方案优化提供了新的思路。

1 模型分析

电源采用反激式拓扑作为电源模块的核心电路架构, 其模型电路如图 1 所示。

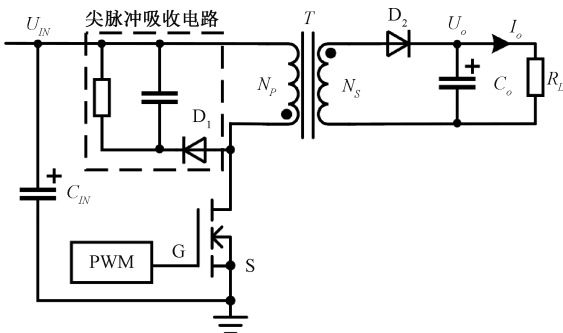


图 1 反激变换器模型电路

Fig. 1 Flyback converter model circuit

该电路原理基于反激变换器的能量转换机制, 通过高

频变压器实现电能的存储与传递。当开关管的脉宽调制信号 (pulse width modulation, PWM) 驱动信号为高电平时, 开关管导通, 反激变换器初级线圈电感 L_p 中的电流从最小值 I_{LPmin} 开始线性上升, 当 $t = T_{on}$, 初级线圈电流达到最大值 I_{LPmax} 。由于次级线圈感应电压的极性与初级线圈电压相反, 次级回路中的二极管 D_2 截止, 次级线圈电流 $I_{LS} = 0$, 在 T_{on} 时间内, 反激变换器初级线圈的作用相当于储能电感。在不考虑磁芯损耗和线圈寄生电阻引起的损耗时, 磁芯存储的能量为:

$$E = \frac{1}{2} L_p I_{LPmax}^2 \quad (1)$$

当开关管的 PWM 驱动信号为低电平时, 开关管截止, 次级线圈感应电压的极性反向, 二极管 D_2 导通, 反激变换器次级线圈电感 L_s 中的电流 I_{LS} 从峰值 I_{LSmax} 开始线性下降。当 $t = T_{off}$ 时, 次级线圈电流 I_{LS} 降至最小值 I_{LSmin} , 存储在变压器磁芯中的能量被释放, 并传递至负载。根据能量守恒原则, 存在:

$$E = \frac{1}{2} L_s I_{LSmax}^2 = \frac{1}{2} L_p I_{LPmax}^2 \quad (2)$$

由式(2)可得:

$$\frac{L_p}{L_s} = \left(\frac{I_{LSmax}}{I_{LPmax}} \right)^2 \quad (3)$$

反激变换器主要有连续导通模式 (continuous conduction mode, CCM) 和非连续导通模式 (discontinuous current mode, DCM) 两种工作模式, 两种工作模式下各关键节点的电压波形及主要元件的电流波形如图 2 所示。

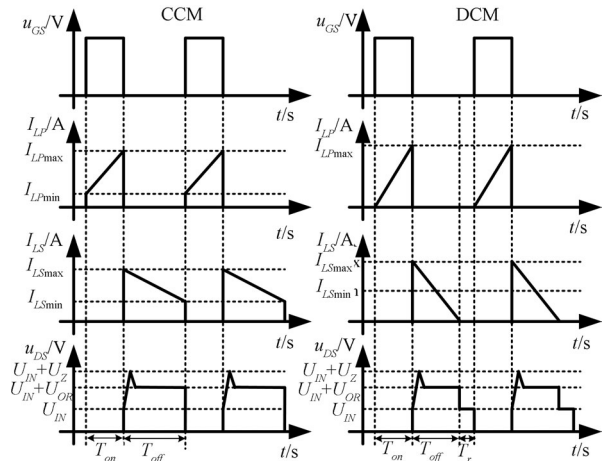


图 2 反激变换器在 CCM 模式和 DCM 模式的波形
Fig. 2 Waveforms of flyback converter in CCM mode and DCM mode

本系统设计的电源工作在 CCM 模式, 由反激变换器模型可知 PWM 占空比为:

$$D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} = \frac{U_{off}}{U_{on} + U_{off}} \quad (4)$$

其中,

$$\begin{cases} U_{on} = U_{IN} - U_{sw} \\ U_{off} = n(U_O - U_D) \end{cases} \quad (5)$$

当输入电压 U_{IN} 远大于开关管导通压降 U_{sw} 时, $U_{ON} \approx U_{IN}$, 此时:

$$D = \frac{U_{off}}{U_{on} + U_{off}} = \frac{n(U_O + U_D)}{U_{IN} - U_{sw} + n(U_O + U_D)} \approx \frac{n(U_O + U_D)}{U_{IN} + n(U_O + U_D)} \quad (6)$$

由此可知,反激变换器的输出电压为:

$$U_O = \frac{D}{n(1-D)} U_{IN} - U_D \quad (7)$$

可见,当输入电压 U_{IN} 变化时,调节占空比 D 就能控制输出电压 U_O 保持稳定。

2 电源系统结构设计

2.1 系统结构

系统结构如图3所示,系统采用双电源冗余架构,由STM32单片机与TPS2491热拔插芯片协同工作,以实现智能切换控制。每个电源模块输出端均连接一个TPS2491芯片构成的防浪涌保护电路。当检测到主电源模块故障时,STM32控制切换电路在毫秒级时间内完成切换,同时支持在不断电状态下对故障模块进行热拔插更换,从而有效保障供电连续性。在正常工作状态下,电源模块1作为主供电单元为负载供电,同时STM32实时采集并监测供电回路的电压、电流等关键参数,并将数据上传至中控系统。

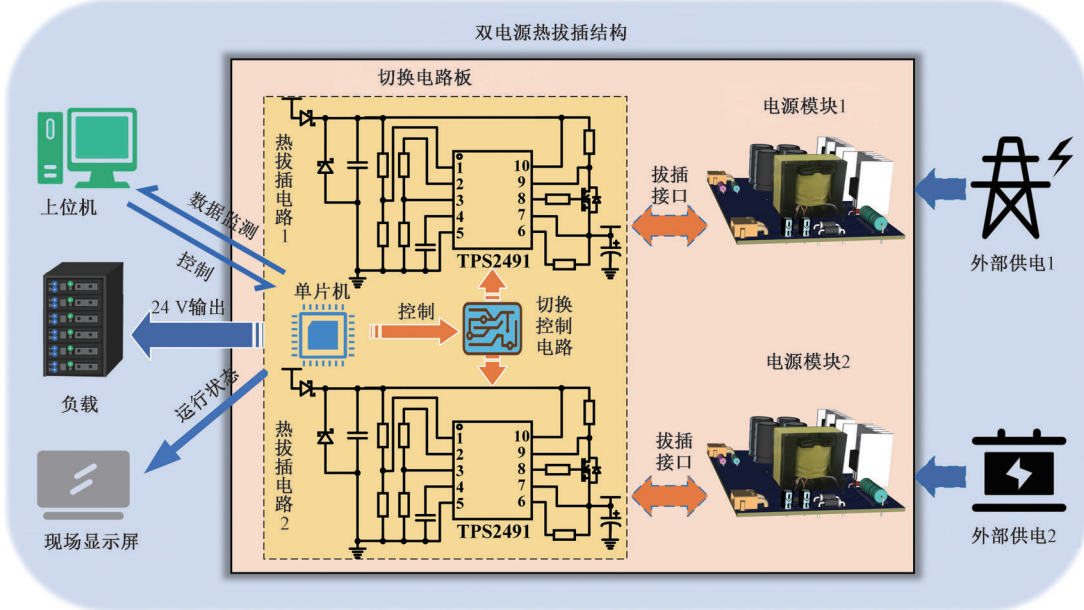


图3 电源系统结构图

Fig. 3 Power supply system structure diagram

电源模块的切换逻辑如图4所示,当检测到电源模块1出现异常时,STM32输出控制信号迅速关断由TPS2491芯片驱动 MOSFET,并启动电源模块2的TPS2491芯片,实现电源模块的切换。同时,故障将触发报警信号,并将该信号上传至中控系统以便进一步处理。

需要指出的是,即使故障模块在更换后恢复正常,系统仍维持当前供电状态,不会立即回切至原模块。仅当前供电模块出现异常时,系统才会再次触发切换控制信号,将负载重新分配至另一模块。该控制策略有效实现了双电源模块的均衡使用,确保二者始终处于互为热备份的工作状态,从而提升系统的长期运行可靠性。

2.2 电源模块设计

针对风机发电系统经降压后产生的宽范围输入电压(20~80V),单个电源模块采用反激式电路设计,在额定工况下可实现最大24V/3A的输出。单个电源模块原理

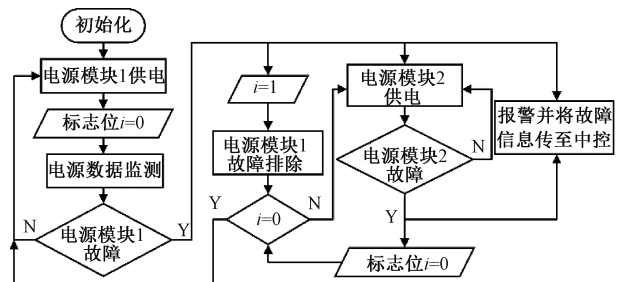


图4 电源切换逻辑流程图

Fig. 4 Power switching logic flowchart

如图5所示,该电路主要由MOSFET、高频变压器、输出整流滤波等关键元件构成,通过对变压器参数与反馈环路的优化设计,该电路能够在宽输入电压范围内保持稳定的输出特性。

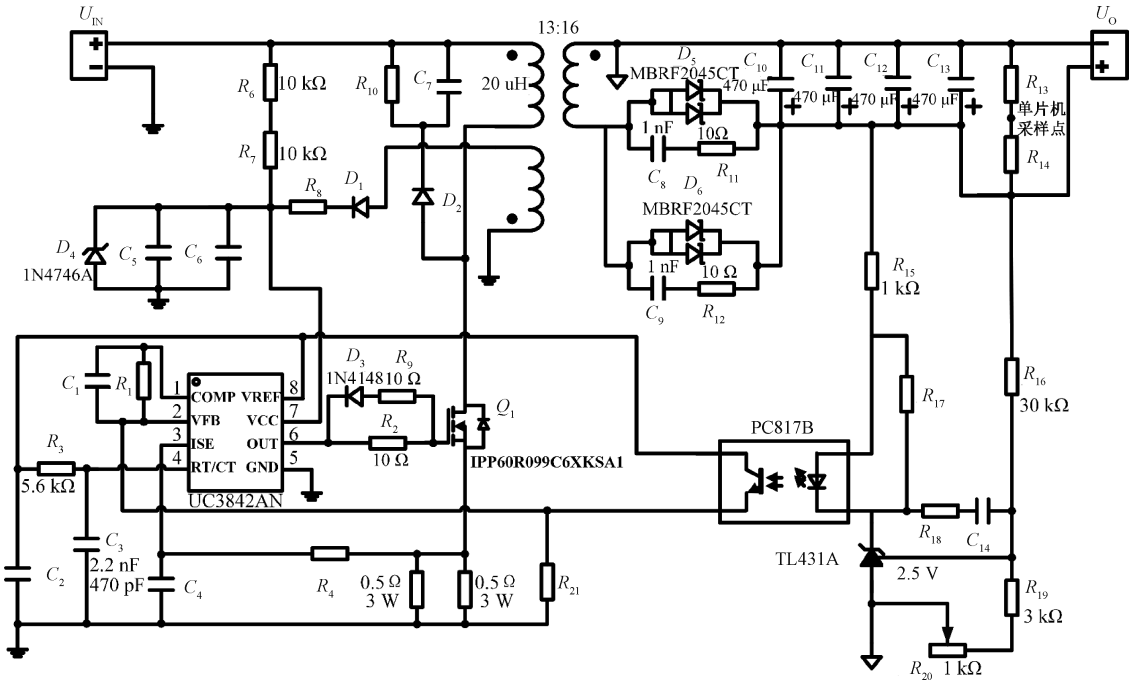


图 5 单块电源反激电路原理图

Fig. 5 Schematic diagram of single block power supply flyback circuit

反激电路通过调节 PWM 占空比实现输出电压的稳定控制,其反馈控制环路由光耦 PC817B 和稳压器 TL431A 构成,将输出电压状态反馈至 UC3842 芯片的 2 号引脚。UC3842 内部误差放大器将反馈电压与基准参考电压进行比较,并据此动态调节 6 号引脚输出 PWM 的占空比,从而实现输出电压的精确稳压控制,使系统输出稳定维持在 24 V。同时,模块的输入与输出接口均采用可拔插式接口,连接至防浪涌保护电路的输入接口,以实现系统的热拔插功能,从而提升系统的维护效率和操作安全性。

2.3 防浪涌电路设计

为实现电源模块的热拔插功能,本系统基于 TPS2491 热拔插芯片设计了一种具备浪涌电流抑制功能的保护电路。该电路能够有效限制电源模块在接入或断开时因大电流而产生的冲击与电弧问题,从而避免对电源模块和负载造成损坏。通过该电路实现电源模块的热拔插功能,系统可在不断电条件下快速完成故障电源模块的更换,确保变桨系统的供电连续性和可靠性,从而避免风机停机带来的重大损失。

防浪涌电路如图 6 所示,TPS2491 热拔插芯片实时监测输入电压和负载电流状态,根据电流的大小控制外部 MOSFET,实现受控的“软起动”,确保在电源模块插入或移除时的安全运行。

TPS2491 芯片首先检测输入电压是否在正常范围内,若正常则缓慢导通外部 MOSFET 以限制浪涌电流,避免电压跌落。在工作过程中,芯片持续监测电流和电压,当

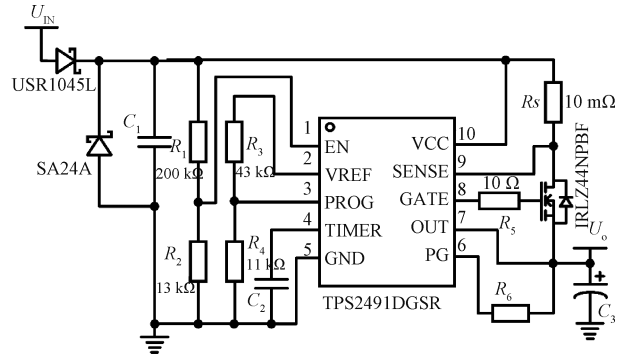


图 6 防浪涌电路

Fig. 6 Hot unplug anti-surge circuit

电流超过设定值或电压超出阈值时,芯片会立即关闭 MOSFET 以断开负载,实现过流、过压及欠压保护。故障解除后,芯片可自动或手动复位以恢复正常工作。其核心保护机制是通过外部检测电阻 R_s 监测 MOSFET 的电流,当检测电阻两端的电压大于 50 mV 时,芯片调节 MOSFET 的栅极电压以限制电流。其电流限值公式为:

$$I_{LIM} = \frac{50 \text{ mV}}{R_s} \quad (8)$$

其中, R_s 为采样电阻(单位为 Ω); I_{LIM} 为流过 MOSFET 的最大电流(单位为 A)。热拔插电路流过的电流为电源模块的电流,最大为 3 A,考虑到容差,将热拔插电路最大电流设为 5 A,采样电阻的阻值应为:

$$R_s = \frac{50 \text{ mV}}{5 \text{ A}} = 10 \text{ m}\Omega \quad (9)$$

采样电阻最大功率为:

$$P_{\max} = (I_{\max})^2 \cdot R = 0.25 \text{ W} \quad (10)$$

考虑到容差,此处选择最大功率 1 W,精度 1%,1 206 封装的合金采样电阻。

TPS2491 芯片会根据电流的大小调节 MOSFET 的导通情况,为减小 MOSFET 的开关功耗和导通功耗,应选择栅极电荷 Q_g 和导通电阻 $R_{DS(on)}$ 较小的 MOSFET。综合成本与功耗因素,本电路选用栅极电荷 $Q_g = 48 \text{ nC}$,导通电阻 $R_{DS(on)} = 25 \text{ m}\Omega$,型号为 IRLZ44NPBF 的 MOSFET。

此外,为保证 MOSFET 工作在安全的功率范围,通过设定 PROG 引脚电压值以限制其功率。其功率限值公式为:

$$V_{PROG} = \frac{P_{LIM}}{10 \times I_{LIM}} \quad (11)$$

其中, V_{PROG} 为 PROG 引脚的电压(单位为 V); P_{LIM} 为 MOSFET 的最大功率(单位为 W)。为确保 MOSFET 安全工作,通过合理选取电阻 R_3 和 R_4 ,将 PROG 引脚电压设为 0.8 V,根据式(11),此时 MOSFET 的功率被限制在 40 W。

3 电源实验分析

本方案的开关电源系统实物如图 7 所示,该系统由两个基于反激电路的开关电源模块和一个控制模块组成。其中,电源模块支持 20~80 V 的宽电压输入,控制模块集成了防浪涌保护电路,数据采集单元及 STM32 单片机,单片机实时采集电源工作参数并将数据上传至中控系统。

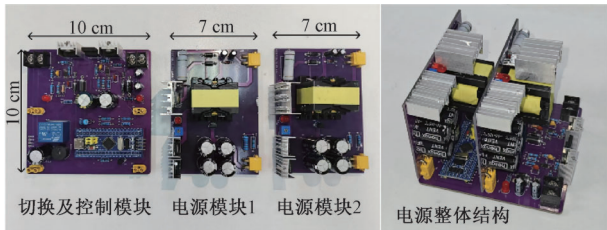


图 7 电源实物图

Fig. 7 Physical drawing of power supply

实验平台实物图如图 8 所示,包括待测试电源、三相调压器、整流滤波模块、可编程直流电源和电子负载、示波器及电流探头。三相调压器的输出经整流滤波后给电源供电,可编程直流电源和电子负载用于测试电源在阶跃变化的输入电压和负载电流条件下输出电压稳定性。同时,利用示波器观察输入电压、输出电压及输出电流的变化情况。

本文实验分为两个部分。第 1 部分为电源模块性能测试,包括测量输出电压纹波以及在不同工况下输出电压的稳定性。第 2 部分对电源模块的切换时间进行分析。

在室温 25℃ 环境下对电源性能进行测试。当输入电压为 80 V,空载输出电压纹波如图 9 所示。利用电子负载

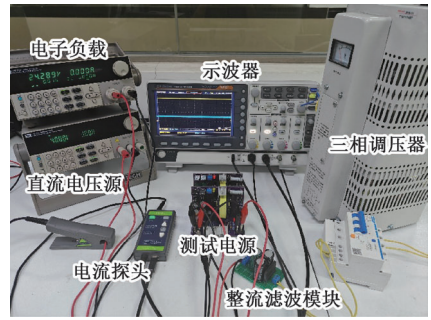


图 8 实验平台实物图

Fig. 8 Physical drawing of the experimental platform

测试电源在不同输出功率时的波纹情况如表 1 所示,实验结果表明,在不同负载条件下,电源纹波均不超过 1%,能够满足风机变桨系统的供电要求。

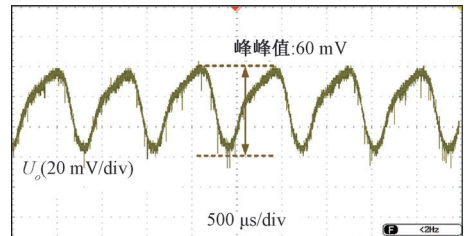


图 9 空载时输出电压纹波

Fig. 9 Output voltage ripple at no load

表 1 不同负载下输出电压纹波

Table 1 Output voltage ripple at different loads

| 负载大小/W | 纹波/mV | 电压值/V |
|--------|-------|-------|
| 0 | 60 | 24.13 |
| 24 | 100 | 23.97 |
| 48 | 150 | 23.71 |
| 72 | 190 | 23.64 |

注:可利用电位计将输出电压手动调回 24 V。

风力发电机自身发电降压后作为变桨系统电源的输入电压,其范围为 20~80 VDC,输入电压变化实验在该电压范围内进行测试。其输出电压波形如图 10 所示,当输入电压在 20~80 V 之间波动时,输出电压均能够保持稳定,从而保证风机变桨系统供电的可靠性与稳定性。

输入电压发生阶跃变化时,其输出电压、电流波形如图 11 所示,图 11(a)为输入电压从 20 V 阶跃至 80 V 时输出电压波形,图 11(b)为输入电压从 80 V 瞬间下降至 20 V 时输出电压波形。实验结果表明,当输入电压发生阶跃升降时,输出电压出现轻微波动。风机变桨系统控制器 24 V 供电电容差范围为 20.4~28.8 V,输出电压波动远小于容差范围,因此能够保证对变桨系统供电的稳定性。

输入电压为 80 V 时,负载连续变化时输出电压的波形如图 12 所示。实验中,负载电流在 0~3 A 范围内连续变化,在此过程中输出电压保持稳定。

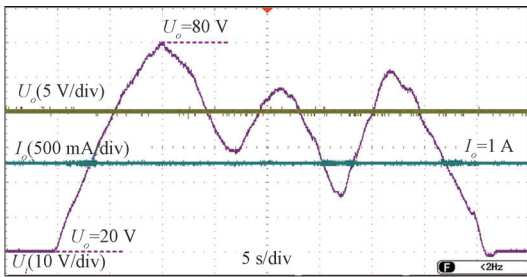
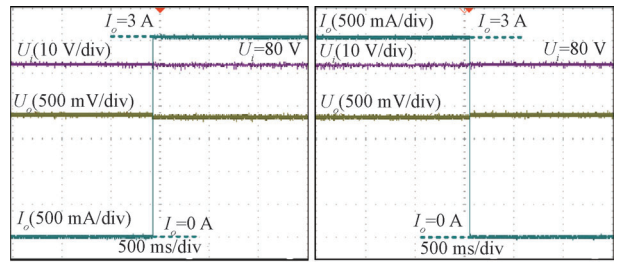


图 10 不同输出电压下输出电压的波形

Fig. 10 Output voltage waveform at different voltages



(a) 输出电流阶跃测试

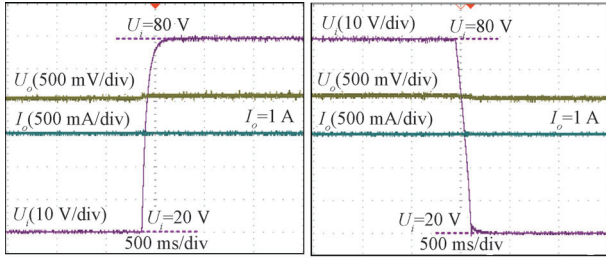
(a) Output current step test

(b) 输出电流跌落测试

(b) Output current drop test

图 13 负载电流突变时输出电压波形

Fig. 13 Output voltage waveform during load current transient



(a) 输入电压阶跃测试

(a) Input voltage step test

(b) 输入电压跌落测试

(b) Input voltage sag test

图 11 输入电压突变时输出电压的波形

Fig. 11 Output voltage waveform during input voltage transient

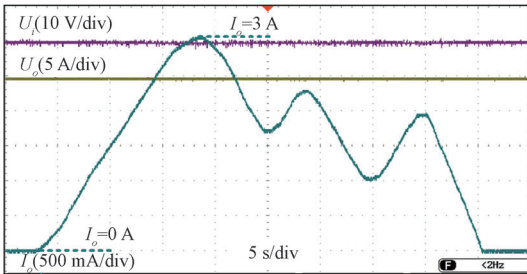


图 12 负载电流连续变化时输出电压的波形

Fig. 12 Output voltage waveform under dynamic load

负载电流发生阶跃变化时输出电压波形如图 13 所示。输出电流从 0 A 阶跃至 3 A 瞬间,输出电压会出现约 220 mV 的跌落,随后恢复稳定。在输出电流从 3 A 跌落至 0 A 时,输出电压出现约 200 mV 的阶跃,之后同样恢复稳定。原因在于反激电源负载瞬间增大或减小时,输出电压在负载影响下出现瞬间跌落或阶跃。随着输出电压反馈至 UC3842 芯片,芯片通过调节开关管 PWM 占空比使输出电压重新恢复平稳。在整个过程中,输出电压的波动幅值远小于风机变桨系统允许的电压变化范围,能够保证系统供电的稳定性。

风机变桨系统在正常运行过程中,其环境温度通常维持在 35℃~45℃。为验证电源在极端高温条件下的工作性能,本实验将高温性能测试环境设定为 50℃ 以上,且测试过程中最高环境温度超过 70℃,以充分模拟极端工况下的允许状况。

高温环境实验如图 14 所示,将待测电源置于金属箱内,并放置于户外阳光直射条件下,以模拟高温工况。实验过程中,当金属箱内部温度升至 50℃ 以上时,开始进行电源高温性能测试。实验过程通过红外热成像模块实时监测环境温度,环境热成像如图 15 所示。

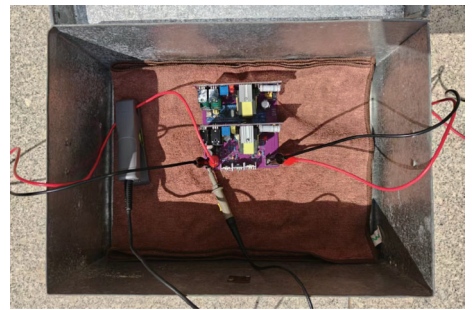


图 14 高温环境实验

Fig. 14 High-temperature environment test

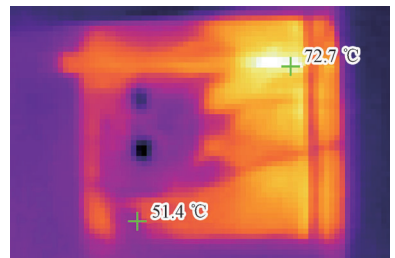


图 15 高温环境实验热成像图

Fig. 15 Thermal imaging map for high-temperature environment

在 50℃ 环境中,将负载电流分别设定为 1、2 和 3 A,并各持续运行 1 h。实验结果表明,在不同负载的长时间供电条件下,电源均能够保持输出电压的稳定性。

在 50℃ 环境中,输入电压和输出电流分别发生突变时,其输出电压波形分别如图 16、17 所示。实验结果表明,输入电压和输出电流发生阶跃变化时,输出电压仍能保持稳定,验证了系统在高温条件下的电压稳定性与负载适应性。

风机变桨系统控制器电源最低容错电压为 20.4 V(额定电压的 85%),为保证供电稳定,本实验将输出电压降低

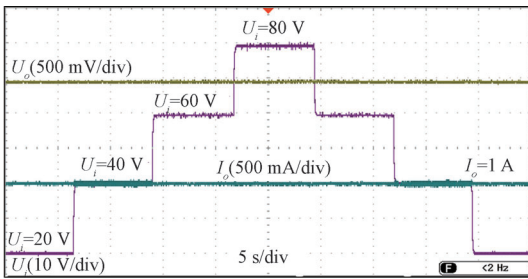


图 16 高温环境下输入电压突变时输出电压波形
Fig. 16 Output voltage waveform during input voltage transient in high-temperature environment

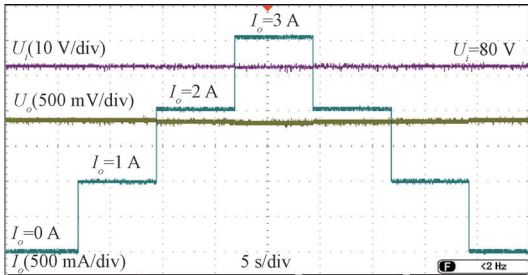


图 17 高温环境下负载电流突变时输出电压波形
Fig. 17 Output voltage waveform during sudden load current changes in high-temperature environment

至 21.6 V (额定电压的 90%) 后再次恢复至 24 V 所需的时间定义为切换时间, 根据风机变桨系统要求, 切换时间需小于 10 ms。

在实验中, 通过手动拔出正在供电的电源模块, 模拟单块电源模块发生故障的情况。不同负载下的切换波形如图 18 所示。实验结果表明, 在空载条件下, 电源切换时间和压降幅度均较小, 随着负载电流的增加, 切换时间与压降呈现正相关趋势。在满载工况下, 切换时间为 9 ms (变桨系统实际掉电时间约 5 ms), 满足风机变桨系统的电源切换要求。

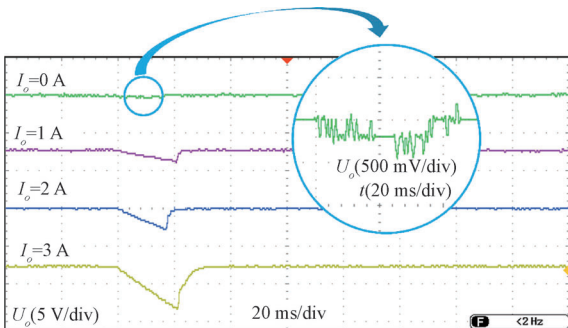


图 18 不同负载下电源模块切换输出电压波形
Fig. 18 Power module switching output voltage waveforms under different loads

不同负载条件下电源切换时间如表 2 所示。

表 2 不同负载下电源故障时的切换速度
Table 2 Switching speed during power supply failure under different loads

| 负载大小/W | 切换时间/ms |
|--------|---------|
| 0 | — |
| 24 | — |
| 48 | 4 |
| 72 | 9 |

注: “—”表示切换过程中输出电压未跌落至 21.6 V 以下。

4 监控系统搭建

本方案搭建的监控系统整体分为数据采集层、传输层、处理层和应用层。数据采集层由 STM32 单片机实现高精度数据采集, 实时监测电压、电流等关键参数; 传输层负责实现数据与上位机的数据交互, 支持光纤通信及 LoRa、NB-IoT 等多种无线传输方式, 兼容多种通讯协议, 能够适应风机分布广、数量多、地势复杂的应用场景; 数据处理层将采集的数据保存至上位机数据库, 并对其进行数据的检查、分类与存储; 应用层通过可视化人机界面展示电源模块的状态信息, 实现对各风机变桨系统电源的实时监控。

监控系统界面设计如图 19 所示。前端采用 Bootstrap4/5 开发框架, 后端基于 PHP7 架构实现与 MySQL 数据库的数据交互, 通过高德地图程序编程接口 (application programming interface, APD) 实现设备地理信息定位, 并结合开源可视化图库表 Apache ECharts 完成实时数据可视化。

系统结合高德地图与基于位置的定位服务 (location based service, LBS), 根据风机经纬度坐标数据在地图上标注其地理位置, 并支持多级缩放功能。针对每台风机 3 个桨叶的变桨控制系统, 采用可热拔插的双模块电源进行供电, 从而确保供电的可靠性。电源模块的运行状态通过图像化方式进行可视化展示: 绿色表示电源模块处于正常供电状态, 橙色表示待机准备状态, 红色则表示电源模块发生故障。

当电源模块发生故障时, 系统能够在毫秒级内无缝切换至另一模块, 确保变桨系统供电不受影响。同时, 监控界面将弹出对应电源模块的警告窗口, 提醒运维人员及时更换故障电源模块。通过监控界面的交互式查询功能, 运维人员可通过点击电源模块或警告窗口, 获取详细的数据参数与日志信息, 为故障诊断和维护决策提供充分的数据支持。

监控系统的历史数据分析界面如图 20 所示。该界面支持查看两个电源模块电压、电流的历史数据, 用户可通过缩放时间轴选择不同时间段的电源参数, 便于精确定位故障发生时间。通过对电源的长期运行数据进行分析, 可评



图 19 风机变桨系统电源监控平台

Fig. 19 Wind turbine pitch system power monitoring platform

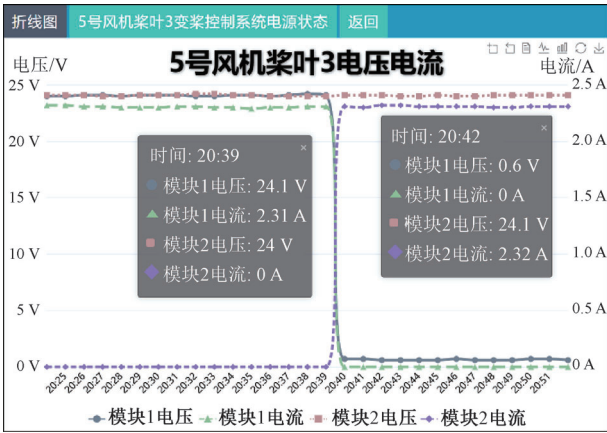


图 20 电源电压电流实时数据

Fig. 20 Power supply voltage and current real-time data

估电源模块的供电稳定性、负载波动特性等关键指标,为预防性维护提供数据依据。

5 结 论

本文提出一种具备热拔插功能的双电源冗余开关电源系统方案,该方案不仅实现了双电源冗余架构,还具备实时监测与智能控制功能。通过硬件实物平台测试,验证了采用该双电源结构能够在不同负载条件及温度环境下均能保持供电的稳定性,故障时能够实现快速切换,且切换时间能够保障风机变桨系统的供电可靠性要求。相较

于传统开关电源在发生故障时通常需要停机更换,本系统结合热拔插功能可实现故障电源的快速更换,有效避免因变桨系统掉电而导致的停机风险。所搭建的监控系统可实时监测电源运行状态,提高运维效率。这种结合电源冗余、热拔插技术和智能监控的一体化设计方案,为风机变桨控制系统和其他控制系统提供了高可靠性的供电解决方案。

参考文献

[1] 张纯亚,何林,章治国. 开关电源技术发展综述[J]. 微电子学, 2016, 46(2): 255-260,272.
ZHANG CH Y, HE L, ZHANG ZH G. Review of the development of switching power supply technology[J]. Microelectronics, 2016, 46(2): 255-260,272.

[2] 刘建国,杨依忠,丁瀚. 175℃反激式高温直流开关电源设计[J]. 半导体技术, 2025, 50(5): 497-505.
LIU J G, YANG Y ZH, DING H. Design of a 175℃ flyback high-temperature DC switching power supply[J]. Semiconductor Technology, 2025, 50(5): 497-505.

[3] TUMMALA S K, DURAISWAMY L. Switched mode power supply: A high efficient low noise forward converter design topology[C]. 2022 IEEE 2nd International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SeFeT), Hyderabad, India, 2022: 1-5.

[4] 于雁南,付学良,李明通,等. 基于氮化镓器件的 LLC

- 谐振变换器效率优化[J]. 桂林理工大学学报, 2025, 45(2): 260-265.
- YU Y N, FU X L, LI M T, et al. Efficiency optimization of LLC resonant converter based on gallium nitride devices[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2025, 45(2): 260-265.
- [5] 陈之勃, 陈永真. 碳化硅 MOSFET 与硅 MOSFET 的应用对比分析[J]. 电源学报, 2018, 16(1): 95-98.
- CHEN ZH B, CHEN Y ZH. Comparative analysis of the application of silicon carbide MOSFET and silicon MOSFET[J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(1): 95-98.
- [6] 刘凡, 罗萍, 唐太龙, 等. 宽输入电压降压型 DC-DC 转换器发展综述[J]. 微电子学, 2023, 53(5): 897-903.
- LIU F, LUO P, TANG T L, et al. Review on the development of wide input voltage step-down DC-DC converters [J]. Microelectronics, 2023, 53 (5): 897-903.
- [7] 游梦然, 华凯, 何凯琳, 等. 宽范围输入电流馈电 DC/DC 变换器研究[J]. 电力电子技术, 2023, 57(9): 103-107.
- YOU M R, HUA K, HE K L, et al. Research on wide range input current feed DC/DC converter[J]. Power Electronics Technology, 2023, 57 (9): 103-107.
- [8] 魏沁成, 曾敏. 一种高精度宽范围的大功率开关电源设计[J]. 电子测量技术, 2023, 46(23): 26-29.
- WEI Q CH, ZENG M. Design of a high-precision wide-range high-power switching power supply [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(23): 26-29.
- [9] 郭强, 张帆云, 李海啸, 等. 高效四开关 Buck-Boost 变换器多模式控制策略[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(11): 101-116.
- GUO Q, ZHANG F Y, LI H X, et al. Multi-mode control strategy for high-efficiency four-switch Buck-Boost converter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(11): 101-116.
- [10] 许刚. 新型智能开关电源设计与实现[J]. 现代电子技术, 2023, 46(16): 135-138.
- XU G. Design and implementation of new intelligent switching power supply [J]. Modern Electronic Technology, 2023, 46(16): 135-138.
- [11] 于玉军, 王亚君, 陈垚. 小型高效数字式双向 DC/DC 变换器设计[J]. 电子器件, 2020, 43(5): 1029-1034.
- YU Y J, WANG Y J, CHEN Y. Design of small and high efficiency digital bidirectional DC/DC converter [J]. Electronic Devices, 2020, 43(5): 1029-1034.
- [12] 崔楠, 许家群. Buck 变换器导通模式转换滑模 PI 混合控制策略[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(5): 254-262.
- CUI N, XU J Q. Sliding mode PI hybrid control strategy for commutation mode switching in buck converters [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(5): 254-262.
- [13] 张逸, 孙金林, 丁世宏, 等. 基于复合自适应的 Buck 变换器预设性能控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(4): 85-93.
- ZHANG Y, SUN J L, DIND SH H, et al. Preset performance control of buck converter based on composite adaptive strategy[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38 (4): 85-93.
- [14] SCRIMIZZI F, MISTRETTA C, GAMBINO G. Wide SOA MOSFET technology for hot swap and inrush current limiter solutions[C]. 2021 AEIT International Conference on Electrical and Electronic Technologies for Automotive, 2021: 1-6.
- [15] ZHOU J, HAN L, MA W G, et al. Research on the risk of hot-swapping in safety-class DCS based on sneak circuit analysis[C]. 2024 Global Reliability and Prognostics and Health Management Conference, 2024: 1-5.
- [16] 张雪梅, 王玉宏. 基于 TPS2491 的热拔插保护电路设计[J]. 电子设计工程, 2014, 22(17): 63-66.
- ZHANG X M, WANG Y H. Hot-swappable protection circuit design based on TPS2491 [J]. Electronic Design Engineering, 2014, 22(17): 63-66.
- [17] NIETO J L M, ESREADA J H R, SEGURA E J J, et al. High gain isolated DC-DC converter with current sharing for hot swap for photovoltaic panels[C]. 2022 IEEE International Power and Renewable Energy Conference, 2022: 1-5.

作者简介

陈柏轩, 硕士生导师, 主要研究方向为嵌入式系统与人工智能。

E-mail: boboc01@126.com

黄君艺, 硕士研究生, 主要研究方向为开关电源设计与控制。

E-mail: 863804701@qq.com

宫萍萍(通信作者), 博士, 主要研究方向为电力电子系统与微电网系统。

E-mail: gongpp@gxu.edu.cn