

文章编号:1671-251X(2021)02-0006-07

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2020110035

基于故障电流变化率的大功率本安电源设计

康 骞^{1,2}, 许春雨^{1,2}, 田慕琴^{1,2}, 宋建成^{1,2}

(1. 太原理工大学 矿用智能电器技术国家地方联合工程实验室, 山西 太原 030024; 2. 太原理工大学 煤矿电气设备与智能控制
山西省重点实验室, 山西 太原 030024)



扫码移动阅读

摘要:针对现有本安电源存在的输出功率小、保护效果差、动态响应速度慢等问题,设计了一种基于故障电流变化率的大功率本安电源。将本安电源等效为电势电容(EC)电路,分析了 EC 电路短路故障特性;短路初始阶段火花放电电流迅速上升,电流变化率会发生突变。通过检测短路故障后电路中故障电流变化率的值,可以提前预知故障状态,在故障电流达到传统电流保护方法所设置的保护阈值之前便触发保护功能,并在短路故障的初始阶段切断输出回路,提高本安电源的输出功率。大功率本安电源包括开关电源和本安保护电路 2 个部分:开关电源采用反激变换结构,其控制电路以 UC3842 为核心,反馈电路以光耦与三端稳压器 TL431 为核心;本安保护电路基于故障电流变化率来限制火花放电的能量,主要包括故障检测电路、比较电路、自恢复电路、软启动电路、驱动电路。本安电源样机性能测试结果表明,交流输入电压在 90~265 V 波动时,本安电源功率因数不小于 0.96,输出直流电压纹波在 20 mV 以内,电源效率在 85% 以上。短路实验结果表明,本安电源在发生短路故障后的瞬态输出能量为 65 μ J,满足设计要求。

关键词:大功率本安电源;故障电流变化率;电势电容;开关电源;本安保护电路;反激变换;EC 电路中图分类号:TD611 文献标志码:A

Design of high-power intrinsically safe power supply based on fault current change rate

KANG Qian^{1,2}, XU Chunyu^{1,2}, TIAN Muqin^{1,2}, SONG Jiancheng^{1,2}

(1. National & Provincial Joint Engineering Laboratory of Mining Intelligent Electrical Apparatus Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;
2. Shanxi Key Laboratory of Mining Electrical Equipment and Intelligent Control, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to solve the problems of low output power, poor protection effect, and slow dynamic response speed of existing intrinsically safe power supply, a high-power intrinsically safe power supply based on fault current change rate is designed. The intrinsically safe power supply is equivalent to an EC circuit, and the short-circuit fault characteristics of the EC circuit are analyzed as follows: the spark discharge current rises rapidly at the initial stage of the short-circuit, and the current change rate changes suddenly. By detecting the value of change rate of the fault current in the circuit after a short-circuit fault, it is able to predict the fault state in advance, trigger the protection function before the fault current reaching the protection threshold set by the conventional current protection method, and cut off the output circuit at the initial stage of the short-circuit fault so as to increase the output power of the intrinsically safe power supply. The high power intrinsically safe power supply includes 2 parts: the switching power supply and the intrinsically safe protection circuit. The switching power supply adopts flyback converter

收稿日期:2020-11-18;修回日期:2021-01-25;责任编辑:胡娴。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577123)。

作者简介:康骞(1994—),男,山西太原人,硕士研究生,主要研究方向为矿用本安电源与电力电子技术,E-mail:kangqian1208@163.com。

引用格式:康骞,许春雨,田慕琴,等. 基于故障电流变化率的大功率本安电源设计[J]. 工矿自动化,2021,47(2):6-12.

KANG Qian,XU Chunyu,TIAN Muqin,et al. Design of high-power intrinsically safe power supply based on fault current change rate [J]. Industry and Mine Automation,2021,47(2):6-12.

structure. The core of the control circuit is UC3842, and the core of the feedback circuit is optocoupler and three-terminal regulator TL431. The intrinsically safe protection circuit limits the energy of spark discharge according to the change rate of the fault current, and mainly includes a fault detection circuit, a comparison circuit, a self-recovery circuit, a soft start circuit and a drive circuit. The performance test results of the intrinsically safe power supply prototype show that the power factor of the intrinsically safe power supply is not less than 0.96 when the AC input voltage fluctuating in the range of 90 to 265 V, the output DC voltage ripple is within 20 mV, and the efficiency of the power supply is above 85%. The short-circuit test results show that the transient output energy of the intrinsically safe power supply after a short-circuit fault is 65 μJ , which meets the design requirements.

Key words: high-power intrinsically safe power supply; fault current change rate; potential capacitance; switching power supply; intrinsically safe protection circuit; flyback converter; EC circuit

0 引言

煤矿井下存在大量易燃易爆的混合物,这就要求本安电源正常工作或发生故障时所产生的电火花或热效应均不能导致爆炸^[1]。随着煤矿井下电气设备自动化程度越来越高,井下安装的各种监测、控制、通信系统及设备越来越多,使得小功率本安电源不能满足实际生产需求^[2]。因此,在保证本质安全的前提下,最大程度地提高本安电源输出功率,是本安电源发展的重要分支^[3]。

文献[4-6]对复合电路、开关电路等非线性复杂电路的数学建模和本质安全开关变换器的本质安全理论进行了研究。文献[7]通过在回路中串联采样电阻进行故障识别,电路设计简单但效果一般。文献[8]采用集成芯片数控技术,设计了截止型短路保护电路,不仅简化了电路设计,还提高了电路稳定性,但其本质还是通过检测采样电阻两端电压的方式进行故障识别。文献[9]基于单片机控制技术设计了输出大电流的本安电源,同时增加了火花能量释放回路,但其电路设计复杂,实际应用较困难。文献[10]结合动态识别关断(Dynamic Arc Recognition and Termination, DART)技术和数字控制技术,通过检测电气系统动态参数设计了一种截止型本安保护电路,实现了动态参数的快速检测,同时提高了保护电路稳定性,但其电路结构复杂且缺少数学模型分析。

针对现有本安电源存在的输出功率小、保护效果差、动态响应速度慢等问题,本文设计了一种基于故障电流变化率的大功率本安电源,通过检测本安电源发生短路故障后的电流变化率,加快本安电源保护电路的保护速度,提升电源的本质安全性能。

1 基于故障电流变化率的短路故障检测原理

本安电源可等效为如图1所示的电势电容(Electric Potential Capacitance, EC)电路^[11]。EC电路发生短路故障前的电路模型如图1(a)所示。

在等效的开关电源电路模型中, E 为电源电势, R_0 为充电电阻, i_L 为负载电流。在等效的保护电路模型中, S_1 为保护开关器件,当遇到过流、过压及短路等故障时开关断开; R 为短路回路电阻,通常情况下 R 远小于 R_0 ,以避免火花放电过程中对电源电势 E 的影响^[6]。在等效的负载模型中, R_L 为电源负载, S_2 为短路开关,当 S_2 闭合时,电路发生短路故障。EC电路发生短路故障后的电路模型如图1(b)所示。等效的开关电源电路模型和保护电路模型与短路前相同。在等效的火花放电模型中,因为短路后火花放电电流和火花放电电压不能立刻突变,所以,用短路等效电感 L_s 等效^[12]。 U_h 为发生火花放电的建弧电压^[13], u_g 为火花放电时的输出端电压。

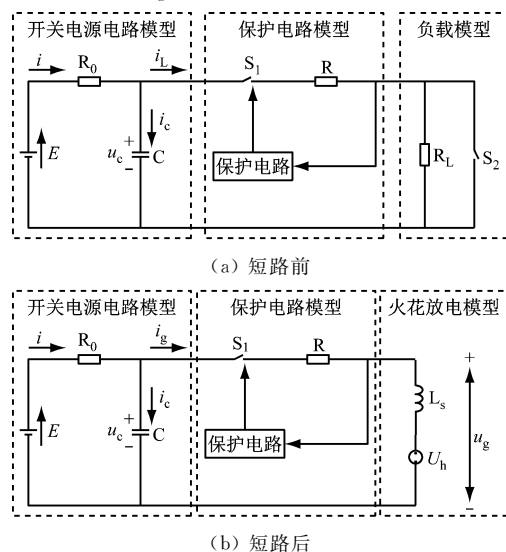


图1 本安电源等效模型

Fig. 1 Equivalent model of intrinsically safe power supply

由图1(b)可得

$$\begin{cases} i_c = C \frac{du_c}{dt} \\ u_c = Ri_g + L_s \frac{di_g}{dt} + U_h \\ E = R_0 i + u_c \\ i = i_g + i_c \end{cases} \quad (1)$$

式中: i_c 为电容电流; C 为滤波电容; u_c 为电容两端电压; t 为时间; i_g 为短路后火花放电电流。

由式(1)可得短路后火花放电电流 i_g 、火花放电电压 u_g 、火花放电功率 W_g 分别为

$$i_g = \frac{E - u_c}{R_0} - C \frac{du_c}{dt} \tag{2}$$

$$u_g = u_c - i_g R \tag{3}$$

$$W_g = \int_0^t u_g i_g dt \tag{4}$$

通过 Matlab 对 EC 电路短路后的火花放电模型进行仿真,仿真参数见表 1。

表 1 EC 电路主要参数

Table 1 Main parameters of EC circuit

参数	数值
电源电势 E/V	12
充电电阻 R_0/Ω	10
短路回路电阻 R/Ω	0.2
滤波电容 $C/\mu F$	100
短路等效电感 L_s/nH	300
建弧电压 U_h/V	1.1
额定负载电流 I_0/A	2

EC 电路短路后的火花电流与火花电压的变化曲线如图 2 所示。由图 2 可知,EC 电路在零时刻发生短路故障,短路后火花放电电流迅速上升,后缓慢下降,同时火花放电电压迅速下降。

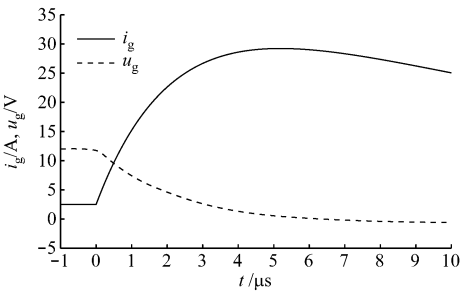


图 2 EC 电路短路后的火花电流与火花电压
Fig. 2 Spark current and spark voltage of EC short circuit

EC 电路短路后火花放电能量与放电时间的关系如图 3 所示。由图 3 可知,火花放电时间越长,所释放的火花能量越多,如果不能及时采取短路本安保护等有效措施,所释放的火花能量将有可能引燃煤矿井下的易燃易爆混合物,对井下作业人员的人身安全及各类设备的正常运行造成严重威胁。

基于上述对本安电源短路故障特性的分析可知,短路初始阶段火花放电电流迅速上升,电流变化率会发生突变。通过检测短路故障后电路中故障电流变化率的值,可以提前预知故障状态,在故障电流达到传统电流保护方法所设置的保护阈值之前便可以触发保护功能,并在短路故障的初始阶段切断输出回路。通过故障电流变化率检测,可提高电路的动态响应性能,加快保护速度,进一步提高本安电源

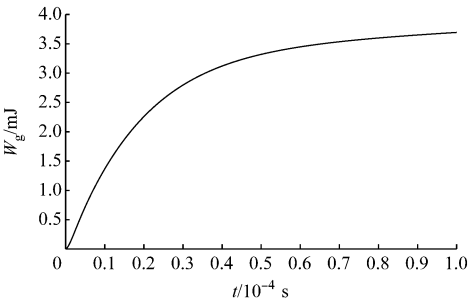


图 3 火花放电能量与放电时间的关系
Fig. 3 The relationship between spark discharge energy and discharge time of EC short circuit
的输出功率。

2 大功率本安电源总体设计

2.1 总体设计方案

大功率本安电源由开关电源和本安保护电路 2 个部分组成,如图 4 所示。开关电源部分通过电流控制型脉宽调制芯片 UC3842 控制 MOSFET 开关管的开通与关断时间比,保证输入电压在 90~265 V 变化时,维持稳定的直流输出。本安保护电路基于故障电流变化率来限制火花放电的能量,主要包括故障检测电路、比较电路、自恢复电路、软启动电路、驱动电路,其中故障检测电路包括过流过压检测电路、故障电流变化率检测电路。

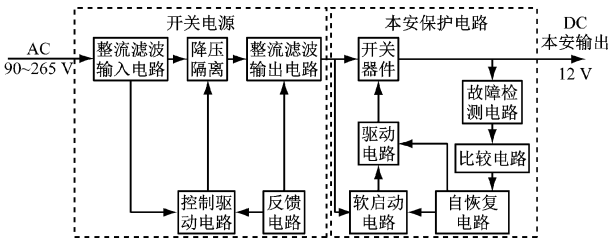


图 4 大功率本安电源总体方案
Fig. 4 Overall scheme of high-power intrinsically safe power supply

2.2 设计指标

根据 GB 3836. 4—2010《爆炸性环境 第 4 部分:由本质安全型“i”保护的的设备》相关规定^[14],结合煤矿井下直流设备的实际工作要求,得出本安电源的设计指标,见表 2。

表 2 本安电源设计指标

Table 2 Design index of intrinsically safe power supply

设计参数	数值
输入交流电压/V	90~265
输出额定电压/V	12
输出额定电流/A	2.0
输出额定功率/W	24
最大开路电压/V	12.2
效率/%	≥85
过流保护整定值/A	2.1
防爆等级	Exd[ib] I

3 开关电源主体设计

3.1 主电路设计

开关电源主电路部分主要由整流滤波输入电路、降压隔离电路、整流滤波输出电路组成,如图 5 所示。第 1 级电路为整流滤波输入电路,保险丝 F_1 和压敏电阻 R_v 用来抑制电源启动过程中的过电压、过电流,防止电源损坏。共模电感 L_1 、安规电容 CX_1 和 CX_2 — CY_4 起到抑制共模和差模噪声的作用。以上元器件构成电磁干扰 (Electromagnetic Interference, EMI) 滤波电路,主要用于保护电源,避免电源受电源输入线中的电磁干扰,同时抑制电源自身产生电磁干扰。EMI 滤波电路后接不控整流桥 BD_1 ,将输入交流电压整流为带有一定纹波的直流电压。第 2 级电路为降压隔离电路,通过大容值电解电容 C_5 降低直流电压纹波后,通过高频变压器 T_1 与 N 沟道 MOS 管 Q_1 将较高等级电压反激变换为较低等级电压。第 3 级电路为整流滤波输出电路,通过整流二极管 D_1 和滤波电容 C_6 输出所需直流电压, R_1 为假负载。因为反激变换结构电路设计简单,造价低廉,所以被广泛应用于低功率电源场合^[15]。

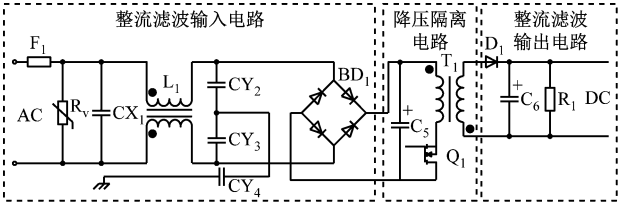


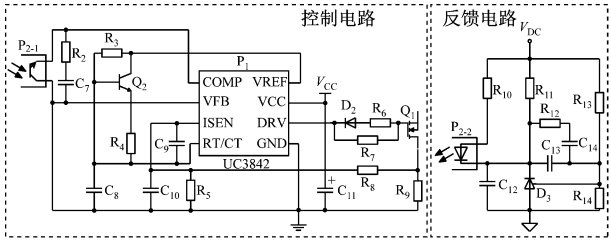
图 5 开关电源主电路

Fig. 5 Main circuit of switching power supply

3.2 控制电路及反馈电路设计

开关电源控制电路及反馈电路如图 6 所示。控制电路部分以电流型 PWM 集成控制芯片 UC3842 为核心, UC3842 用于产生 PWM 脉冲控制信号。电阻 R_2 、电容 C_7 构成 RC 补偿网络,用于消除稳态误差并与光耦组成反馈网络。电阻 R_3 、电容 C_8 分别为定时电阻和定时电容,用于使芯片内部振荡器产生一定频率的 PWM 波。三极管 Q_2 、电阻 R_4 、电容 C_9 构成斜坡补偿网络,保证电源在占空比大于 50% 时也可以正常工作。电容 C_{11} 为芯片启动电解电容。电阻 R_6 、电容 C_{10} 构成电流检测网络,起控制脉宽的作用。电阻 R_6 — R_9 、二极管 D_2 构成 N 沟道 MOS 开关管 Q_1 的驱动网络,控制其开通与关断。

反馈电路部分采用三端稳压器 TL431 与光耦结合方式,通过光耦 P_2 (P_{2-1} , P_{2-2}) 输出的电流变化控制芯片 P_1 ,使其工作频率相应发生变化,从而实现对输出电压的稳定调节。 V_{DC} 为电源输出电压,



R_{18}, R_{19} 两端电压也为 2.5 V , 通过 R_{18}, R_{19} 分压, A_2 的同相输入端电压为

$$u_1 = \frac{2.5R_{18}}{R_{18} + R_{19}} \tag{5}$$

比较器 A_2 的反相输入端电压为

$$u_2 = R_s i_s \tag{6}$$

通过 R_{18}, R_{19}, R_s 的选型匹配, 使得正常工作时 A_2 的同相输入端电压大于反相输入端电压, 即 $u_1 > u_2$, A_2 输出高电平, 主电路开关管导通。

当电路发生过压故障时, 因 R_{16}, R_{17} 分压, 使得 A_1 的反相输入端电压大于同相输入端电压, A_1 输出低电平, 主电路开关管截止; 当电路发生过流故障时, 电流检测采样电阻两端压降大于 A_2 同相输入端电压, 即 $u_1 < u_2$, A_2 输出低电平, 主电路开关管截止, 本安电源对外无输出。

4.2 故障电流变化率检测电路

由上文分析可知, 当本安电源发生严重短路故障后, 输出火花放电时间越长, 所释放的火花能量越多, 不利于本安电源功率的提升。基于短路故障后电流迅速上升、故障电流变化率会发生突变的特性, 可以通过检测短路故障后电流变化率的值提前预知故障状态, 从而提升电路的动态响应能力, 进一步提高本安电源的输出功率。

故障电流变化率检测电路如图 8 所示。运算放大器 A_3 和电阻 R_{21}, R_{22} 构成同相放大电路, 用来放大电压信号。运算放大器 A_4, A_5 与电阻 $R_{23} - R_{25}$ 和电容 C_{15} 构成逆函数型微分检测电路, 用来将运算放大器 A_3 输出的信号转换成微分信号。微分检测电路的输出信号 u_3 接比较器 A_6 反相输入端。当本安电源正常运行时, 负载电流 i_s 保持恒定不变, 微分检测电路几乎零输出; 当本安电源发生短路故障时, i_s 迅速上升, 微分检测电路输出为

$$u_3 = \frac{(R_{21} + R_{22})R_{24}R_{25}C_{15}}{R_{21}R_{23}} \frac{du_2}{dt} = R_s \frac{(R_{21} + R_{22})R_{24}R_{25}C_{15}}{R_{21}R_{23}} \frac{di_s}{dt} \tag{7}$$

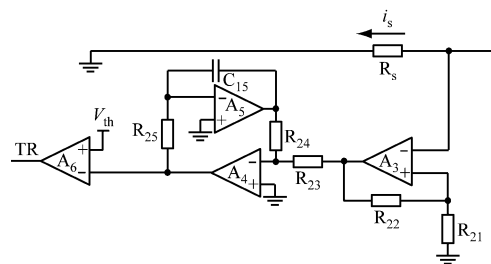


图 8 故障电流变化率检测电路

Fig. 8 Detection circuit of fault current change rate

当微分检测电路输出 u_3 大于设定阈值 V_{th} 时, A_6 输出低电平, 主电路开关管截止, 本安电源对外无

输出。

当主电路发生短路故障时, 传统本安电源短路保护电路直接将采样电阻 R_s 两端电压连接到比较电路, 当电路发生严重短路故障后, 比较器输出状态发生变化并触发自恢复电路, 通过驱动电路关断开关器件以达到保护的效果。传统本安电源短路保护方法结构简单, 成本低廉, 但采样检测时间较长, 实时性较差, 动态响应较慢, 发生短路后电流要达到预设的数值才能触发驱动电路动作, 不能迅速切断回路, 从而限制了本安电源输出功率的提升。

本文通过故障电流变化率检测电路继续对 R_s 两端电压 u_2 进行放大微分处理, 电路输出 u_3 为短路电流的微分函数。当 u_3 大于设定阈值时, 判定主电路发生短路故障, 自恢复电路和驱动电路快速切断主回路。故障电流变化率检测电路故障检测速度快, 能够在发生短路故障的初始阶段故障电流变化率急剧增大时迅速实现故障检测。

4.3 自恢复电路与驱动电路

自恢复电路与驱动电路如图 9 所示。自恢复电路由 555 定时器 P_3 、电阻 R_{26} 及电容 C_{16}, C_{17} 组成, 驱动电路由电阻 $R_{27} - R_{32}$ 、电容 C_{18} 、三极管 $Q_4 - Q_6$ 及 P 沟道 MOS 管 Q_3 组成。当电路发生输出故障时, 比较器翻转, 输出低电平。555 定时器接收到低电平信号即故障信号后, 输出由低电平翻转为高电平并开始计时。此时 Q_4, Q_5 导通, 电容 C_{18} 通过 Q_4 迅速释放储存的能量, Q_6 基极电压降低关断, 开关管 Q_3 栅极电压上升关断, 进而关断整个电路。定时器计时达到设定时间后尝试重启电路, 若故障消失, 则比较器输出低电平, 电路重新导通; 若故障仍然存在, 则电路再一次关断并重新计时, 直至故障清除。

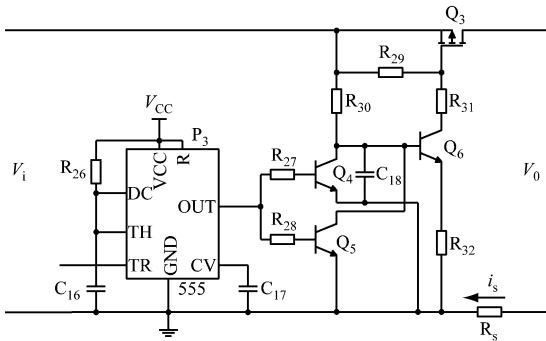


图 9 自恢复电路与驱动电路

Fig. 9 Self-recovery circuit and drive circuit

4.4 软启动电路

本安电源启动时, 主电路中的电流突然从零开始上升, 启动瞬间的电流变化率过大可能会造成故障电流变化率检测电路误将启动电流当作短路电流, 造成误动作, 导致本安电源无法启动。因此, 在

本安保护电路中设置软启动电路十分必要。

软启动电路由 P 沟道 MOS 管 Q_7 、电阻 R_{33} 、 R_{34} 和电容 C_{19} 构成,如图 10 所示。本安电源启动时,输入电压 V_i 通过电阻 R_{34} 对电容 C_{19} 进行充电, C_{19} 两端的电压缓慢上升;当 C_{19} 两端电压达到 R_{33} 上的分压时,充电结束。 C_{19} 两端电压接到 Q_7 的栅极与源级之间,电压缓慢上升, Q_7 由截止区到恒流区再到饱和区,其在恒阻区时能够起到较好的软启动作用^[16]。

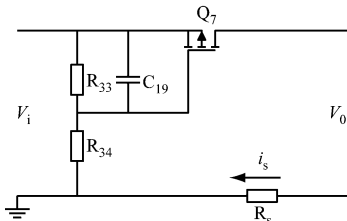


图 10 软启动电路
Fig. 10 Soft start circuit

5 大功率本安电源性能测试

为验证大功率本安电源的性能,搭建了如图 11 所示的本安性能测试平台。

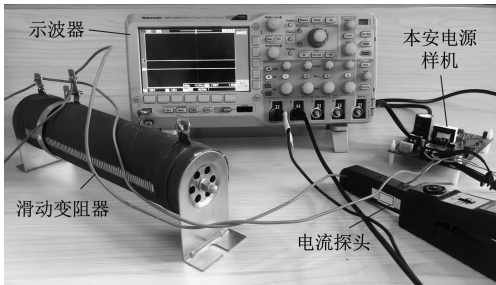


图 11 本安性能测试平台
Fig. 11 Intrinsically safe test platform

本安电源常规性能测试结果见表 3。从表 3 可看出,输入交流电压在 90~265 V 波动时,本安电源功率因数不小于 0.96,输出直流电压纹波在 20 mV 以内,电源效率在 85% 以上。

表 3 本安电源常规性能测试结果

Table 3 Routine performance test results of intrinsically safe power supply

输入电压/V	输出功率/W	功率因数	效率/%	纹波/mV
90	24	0.99	85.4	18.6
127	24	0.99	85.6	19.4
170	24	0.98	86.7	18.9
220	24	0.97	85.5	18.4
265	24	0.96	85.8	18.6

本安电源本安保护性能测试结果如下:额定输出电压为 12.0 V,额定输出电流为 2.0 A,过压保护值为 12.2 V,过流保护值为 2.1 A,保护性能良好。

根据 GB 3836.4—2010《爆炸性环境 第 4 部分:由本质安全型“i”保护的设 备》规定^[14],具有设备规定保护等级的电路输出电压稳定后应不能引起点燃,另外,当电路故障引起急剧短路时,短路瞬间所释放的能量应不超过下列响应设备类别的规定值:Ⅱ C 类设备为 20 μJ ,Ⅱ B 类设备为 80 μJ ,Ⅱ A 类设备为 160 μJ ,Ⅰ类设备为 260 μJ 。

根据上述规定,对本安电源样机进行短路实验,得到如图 12 所示的短路输出电流和短路输出电压波形。根据图 12 所示波形,通过式(4)可近似计算出短路瞬态输出能量为 65 μJ ,满足设计要求。

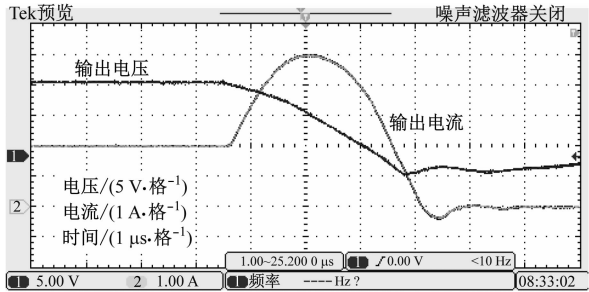


图 12 短路实验电流和电压波形

Fig. 12 Current and voltage waveforms of short circuit test

6 结论

(1) 将本安电源等效为 EC 电路,分析了 EC 电路短路故障特性,得出在本安电源发生短路故障的初始阶段,火花放电电流迅速上升,电流变化率会发生突变。通过故障电流变化率检测,可在发生短路故障的初始阶段切断输出回路,提高电路的动态响应性能,加快保护速度,进一步提高本安电源的输出功率。

(2) 大功率本安电源包括开关电源和本安保护电路 2 个部分。开关电源采用反激变换结构,提高了整机的转换效率,减小了负载效应,为本安保护电路设计奠定基础。本安保护电路基于故障电流变化率来限制火花放电的能量,能够快速准确检测本安电源输出故障,显著提高本质安全性能。

(3) 本安电源样机性能测试结果表明,交流输入电压在 90~265 V 波动时,本安电源功率因数不小于 0.96,输出直流电压纹波在 20 mV 以内,电源效率在 85% 以上。短路实验结果表明,本安电源在发生短路故障后的瞬态输出能量为 65 μJ ,满足设计要求。

参考文献(References):

[1] 于月森,戚文艳,伍小杰.软火花电路的本安特性及优化分析[J].煤炭学报,2014,39(10):2134-2040.
YU Yuesen, QI Wenyan, WU Xiaojie. Intrinsically

- safe characteristics and optimization analysis of soft-spark circuit[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(10):2134-2140.
- [2] 林引. 矿用本安型远程中继电源设计[J]. 工矿自动化, 2016, 42(11):19-22.
LIN Yin. Design of mine-used intrinsically safe remote relay power supply [J]. Industry and Mine Automation, 2016, 42(11):19-22.
- [3] 蔡广亮. 矿用大容量不间断本质安全电源的研究[D]. 太原:太原理工大学, 2014.
CAI Guangliang. Study on mining intrinsic safety uninterruptible DC power device with large capacity [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014.
- [4] 于月森, 谢冬莹, 李世光, 等. 本质安全电路技术综述[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(6):61-65.
YU Yuesen, XIE Dongying, LI Shiguang, et al. Summary of intrinsic safety electric circuit technology [J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(6):64-65.
- [5] 刘树林, 马一博, 文晓明, 等. 输出本安 Buck-Boost 变换器的最危险输出短路放电工况研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14):253-260.
LIU Shulin, MA Yibo, WEN Xiaoming, et al. Research on the most dangerous output short-circuit discharge conditions of output intrinsic safety Buck-Boost converters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14):253-260.
- [6] 刘树林, 钟久明, 樊文斌, 等. 电容电路短路火花放电特性及其建模研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(12):2123-2128.
LIU Shulin, ZHONG Jiuming, FAN Wenbin, et al. Short circuit discharge characteristics of the capacitive circuit and its mathematical model [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(12):2123-2128.
- [7] 房绪鹏, 于志学, 秦明, 等. 用于本质安全电源的新型截流型保护电路[J]. 工矿自动化, 2016, 42(12):56-58.
FANG Xupeng, YU Zhixue, QIN Ming, et al. A novel chopping current protection circuit for intrinsically safe power supply [J]. Industry and Mine Automation, 2016, 42(12):56-58.
- [8] 黄鹤松, 陈曦, 田成金, 等. 一种高性能矿用本质安全型电源设计[J]. 工矿自动化, 2019, 45(2):18-23.
HUANG Hesong, CHEN Xi, TIAN Chengjin, et al. Design of a high-performance mine-used intrinsically safe power supply [J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(2):18-23.
- [9] 张天兴, 夏春华, 刘艺平, 等. 基于单片机控制的矿用大电流高稳定数字本安电源[J]. 煤矿安全, 2018, 49(9):144-147.
ZHANG Tianxing, XIA Chunhua, LIU Yiping, et al. Mine-used large current and high stable digital intrinsic safe power supply based on single chip microcomputer control [J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(9):144-147.
- [10] 孟庆海, 李帅, 焦正国. 一种基于动态电弧识别及关断技术的截流型保护电路[J]. 电气技术, 2019, 20(7):23-27.
MENG Qinghai, LI Shuai, JIAO Zhengguo. A cut-off protection circuit based on dynamic arc recognition and termination technology [J]. Electrical Engineering, 2019, 20(7):23-27.
- [11] 于月森, 柳军停, 修俊瑞, 等. 截止型 EC 电路火花放电模型及其特性分析[J]. 煤炭学报, 2016, 41(9):2380-2387.
YU Yuesen, LIU Juntong, XIU Junrui, et al. Modeling and analysis on spark discharge of EC circuit with cut-off type protection [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(9):2380-2387.
- [12] 柳军停. 输出本质安全型 EC 电路放电特性及非爆炸本安评价研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2018.
LIU Juntong. Research on discharge characteristics of output intrinsically safe EC circuit and non explosive intrinsically safe evaluation [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [13] 赵永秀, 刘树林, 马一博. 爆炸性试验电感电路分断放电特性分析与建模[J]. 煤炭学报, 2015, 40(7):1698-1704.
ZHAO Yongxiu, LIU Shulin, MA Yibo. Analysis and modeling of inductor-disconnected-discharged characteristics based on explosive test [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7):1698-1704.
- [14] GB 3836.4—2010 爆炸性环境 第四部分:由本质安全型“i”保护的装置[S].
GB 3836.4-2010 Explosive atmospheres-part 4: equipment protection by intrinsic safety “i”[S].
- [15] 贲洪奇, 孟涛, 杨威, 等. 现代高频开关电源技术与应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2018.
BEN Hongqi, MENG Tao, YANG Wei, et al. Modern high frequency switching power supply technology and its application [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2018.
- [16] 聂剑. 一种软启动与防反接保护电路[J]. 电子产品世界, 2015, 22(增刊 1):56-59.
NIE Jian. A kind of soft starting and inversing input protection circuit [J]. Electronic Engineering & Product World, 2015, 22(Z1):56-59.