

文章编号:1671-251X(2019)01-0057-08

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2018050095

本安电源过压、过流保护次序选择研究

鲍常军¹, 李吉平², 耿文晶³, 于志学⁴, 崔世杰⁵

- (1. 国网内蒙古东部电力有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010020;
2. 国网内蒙古东部电力有限公司 经济技术研究院, 内蒙古 呼和浩特 010020;
3. 国网内蒙古东部电力有限公司 电力科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010020;
4. 中国移动通信集团山东有限公司 潍坊分公司, 山东 潍坊 261000;
5. 山东科技大学 电气与自动化工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要:过压-过流保护和过流-过压保护是本安电源过压、过流保护次序的2种形式,为研究不同的保护次序形式对本安电源安全性能的影响,建立了本安电源火花放电等效模型,确定了影响保护次序选择的本质安全性能因素。在发生过压、过流或同时发生过压与过流3种情况下,分别比较研究了2种保护次序的保护电路的性能,研究结果表明,在本安电源的设计中,过压、过流保护次序的选择并不是随机任意的,而是有原则可循的:过压保护电路的类型决定了本安电源过压、过流保护次序的选择,在设计中,首先要判断过压保护电路的类型,如果过压保护电路的类型是短路型,本安电源保护电路应设计成过流-过压的保护次序,否则应设计成过压-过流保护次序,过压-过流保护次序的保护电路截止关断时间更短,其保护效果更好,本安电源的安全性能更高。

关键词:本安电源;过压保护;过流保护;保护次序选择;保护电路类型;截止关断时间

中图分类号:TD608 文献标志码:A

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20181226.1651.001.html>

Sequences selection research on over-voltage and over-current protection for
intrinsic safety power supply

BAO Changjun¹, LI Jiping², GENG Wenjing³, YU Zhixue⁴, CUI Shijie⁵

- (1. State Grid East Inner Mongolia Electric Power Supply Co., Ltd., Hohhot 010020, China;
2. Economic Technology Research Institute, State Grid East Inner Mongolia Electric Power Supply Co., Ltd., Hohhot 010020, China; 3. Electric Power Research Institute, State Grid East Inner Mongolia Electric Power Supply Co., Ltd., Hohhot 010020, China; 4. Weifang Branch, China Mobile Group Shandong Company Limited, Weifang 261000, China; 5. College of Electrical and Automation Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: Over-voltage and over-current protection are two forms of over-voltage and over-current protection sequences of intrinsic safety power supply. In order to study the influence of different protection sequence forms on safety performance of intrinsic safety power supply, an equivalent model of spark discharge of intrinsic safety power supply was established, and essential safety performance factors affected the selection of the protection sequences were determined. The protection performance of two protection

收稿日期:2018-05-30;修回日期:2018-11-01;责任编辑:张强。
基金项目:山东科技大学研究生科技创新项目(2017SDKDYC17035)。
作者简介:鲍常军(1973—),男,内蒙古赤峰人,高级工程师,研究方向为电气及自动化,E-mail:2713816@163.com。通信作者:于志学(1990—),男,山东潍坊人,硕士,研究方向为电源设计与优化,E-mail:2247224056@qq.com。
引用格式:鲍常军,李吉平,耿文晶,等. 本安电源过压、过流保护次序选择研究[J]. 工矿自动化,2019,45(1):57-64.
BAO Changjun, LI Jiping, GENG Wenjing, et al. Sequences selection research on over-voltage and over-current protection for intrinsic safety power supply[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(1): 57-64.

sequences was compared and studied when happened over-voltage, over-current and over-voltage over-current. The research results show that in the design of intrinsic safety power supplies, the selection of over-voltage and over-current protection sequence is not random and arbitrary, but there are principles to follow: the type of over-voltage protection circuit determines the sequences of over-voltage and over-current protection of intrinsic safety power supplies. In design, the first step is determining the type of over-voltage protection circuit, if the type of over-voltage protection circuit is short circuit type, protection circuit of intrinsic safety power should be designed to protection sequences of over-current-over-voltage, otherwise it should be designed as over-voltage and over-current protection sequence, the protection circuit of the over-voltage and over-current protection sequence has a shorter turn-off time, the protection effect is better and the safety performance of the intrinsic safety power supply is higher.

Key words:intrinsic safety power supply; over-voltage protection; over-current protection; protection sequences selection; type of protection circuit; cut-off time

0 引言

目前,煤炭我国的能源消费中的占比为 70% 左右。煤炭开采受到多种灾害事故的威胁,其中电气设备引起的瓦斯爆炸事故占较大多数^[1]。煤矿井下用于检测、控制、监控、通信的各种电气设备无处不在,其能够正常工作必须依靠安全可靠的电源。本安电源由于安全程度高、成本低、体积小、重量轻等优点日益成为研究的热点^[2]。

近些年来对本安电源的研究主要集中在 2 个方面:电源内部本安设计和保护电路设计。文献[3-5]系统地研究了 3 种常见的非隔离变换器 Buck、Boost、Buck-Boost 的本质安全特性,通过优化电容、电感参数,使该部分达到本质安全。而非隔离变换器的电源不能直接应用于煤矿井下,有关电源内部本安设计的研究目前多局限于理论研究。为此,文献[6]将本安型电源设计成由一个隔离开关变换器(AC-DC)、若干非隔离开关变换器(DC-DC)和保护电路组成,把前面的隔离开关变换器部分称作一次电源,把后面非隔离开关变换器部分称作二次电源,把一次电源设计成非本安型,把二次电源设计成本安型,但其整体的安全功能主要是依靠保护电路实现。电源需要有较大的整流、滤波电容,该部分很难达到本安要求,所以就目前而言,绝大多数本安电源的安全性能是由多重化保护电路输出限能实现的^[7]。关于本安电源保护电路设计的文献较多,其均提出本安型电源至少要设计有两重化的过压、过流保护电路^[6-10],但对过压、过流保护次序的选择却没有专门的研究。事实上不同保护次序的选择并不是随机、任意的,本文通过对本安电源过压、过流保护次序进行优化研究,试图得出一般性的结论,希望为本安电源的设计者提供借鉴。

1 本安电源过压、过流保护次序的 2 种形式

过压型保护电路和过流型保护电路可对矿用电源的输出电流和电压进行限制,以避免在过电压或过电流的情况下产生火花,点燃井下的可燃性气体,从而造成设备损坏或者人员伤亡。在本安电源的设计中必须面临的一个问题是先过压保护还是先过流保护,这就涉及到本安电源过压、过流保护次序。

本安电源过压、过流保护次序分为 2 种形式:过压-过流保护和过流-过压保护。过压-过流保护次序,即先过压保护再过流保护;过流-过压保护次序,即先过流保护再过压保护。煤矿井下的电气设备大都属于“ib”等级,需要双重化的保护电路^[11],且本安型电源一般采用后端保护模式^[12],本安电源过压-过流保护和过流-过压保护 2 种保护次序形式如图 1、图 2 所示。

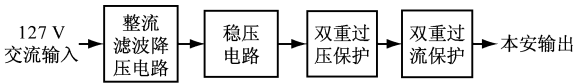


图 1 本安电源过压-过流保护次序形式

Fig. 1 Protection sequence form of over-voltage and over-current for intrinsic safety power supply

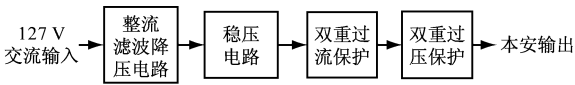


图 2 本安电源过流-过压保护次序形式

Fig. 2 Protection sequence form of over-current and over-voltage for intrinsic safety power supply

2 本安电源的火花放电等效模型

要想研究 2 种不同保护次序对本安电源的影响,首先必须建立本安电源火花放电等效模型,确定影响本安电源本质安全性能的因素,并结合过压、过流保护电路的特点,对本安电源过压、过流保护次序的选择进行优化研究。

开关电源可以等效为容性电路^[13]。要分析影响本安电源的本质安全因素,首先建立本安电源容性电路火花放电模型。不同于简单电容电路在经由限流电阻自然模式下的放电,本安电源容性电路火花放电是指在当发生故障时保护电路迅速响应、开关(管)瞬间关断情况下的截止模式放电。本安电源容性电路火花放电不仅要考虑电源电势,还要考虑电容向火花间隙提供火花放电能量。本安电源容性电路火花放电的等效模型如图 3 所示。

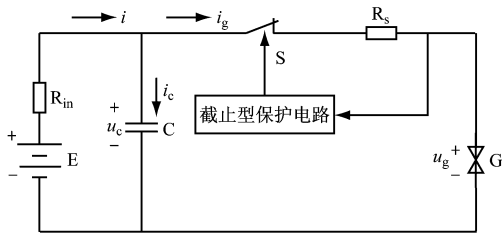


图 3 本安电源容性电路火花放电等效模型

Fig. 3 Spark discharge equivalent model of capacitive circuit of intrinsic safety power supply

E 为电源电势, C 为电源的等效电容, R_{in} 为电源内阻, R_s 为放电回路的等效总阻值(包括线路阻值、开关管在导通状态下的等效电阻、火花试验装置的内阻), S 为截止型保护电路控制的开关(管), i , i_c , i_g 分别为放电阶段电源电势放电电流、等效电容放电电流和总火花放电电流, G 为火花试验装置, u_c 为放电阶段电容电压, u_g 为放电阶段火花放电电压, 近似为建弧电压 u_h (维持火花放电的最小电压, 为定值, 其大小与火花放电电极材料有关(镍为 11 V ^[14])). 根据图 3, 列出基尔霍夫电压数学方程、基尔霍夫电流数学方程和电容元件特性方程:

$$u_c = i_g R_s + u_h \quad (1)$$

$$i = i_g + i_c \quad (2)$$

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} \quad (3)$$

$$E = i R_{in} + u_c \quad (4)$$

联立式(1)~式(4), 得

$$\frac{du_c}{dt} + u_c \frac{R_{in} + R_s}{CR_s R_{in}} - \frac{u_h R_{in} + ER_s}{CR_s R_{in}} = 0 \quad (5)$$

解一元线性微分方程得

$$u_c = \frac{u_h R_{in} + ER_s}{R_{in} + R_s} + C_1 \exp\left(-\frac{R_{in} + R_s}{CR_s R_{in}} t\right) \quad (6)$$

式中 t 为火花放电时间。

根据电路换路定则, 电容电压换路瞬间不能跃变, 即

$$u_c(0_+) = u_c(0_-) = E \quad (7)$$

一元线性微分方程的解中的系数 C_1 为

$$C_1 = \frac{(E - u_h) R_{in}}{R_{in} + R_s} \quad (8)$$

将式(8)代入式(6), 求解得到 u_c :

$$u_c = \frac{u_h R_{in} + ER_s}{R_{in} + R_s} + \frac{(E - u_h) R_{in}}{R_{in} + R_s} \exp\left(-\frac{R_{in} + R_s}{CR_s R_{in}} t\right) \quad (9)$$

将 u_c 代入式(1)得火花放电电流 i_g 为

$$i_g = \frac{E - u_h}{R_{in} + R_s} + \frac{(E - u_h) R_{in}}{(R_{in} + R_s) R_s} \exp\left(-\frac{R_{in} + R_s}{CR_s R_{in}} t\right) \quad (10)$$

根据以上推算得到火花放电能量 W_g 为

$$W_g = \int_0^{t_s} u_g i_g dt = \frac{u_h (E - u_h)}{(R_{in} + R_s)^2} \times \left[(R_{in} + R_s) t_s + CR_{in}^2 \left(1 - \exp\left(-\frac{R_{in} + R_s}{CR_{in} R_s} t_s\right) \right) \right] \quad (11)$$

式中 t_s 为截止关断时间。

3 本安电源过压、过流保护次序选择分析

电气火花能量的大小直接决定了其本质安全性。从式(11)可以看出, 在电源电势 E 及电阻 R_s 、 R_{in} 一定的情况下, 火花放电能量 W_g 主要与截止关断时间 t_s 及电容 C 有关系。式(11)较为复杂, 不能对其进行有效的分析判断, 所以, 借助 Matlab 仿真软件对其进行数学仿真, 能直观看出三者之间的关系。假定 $E = 12 \text{ V}$, $R_{in} = 0.44 \Omega$, $R_s = 0.1 \Omega$, 火花放电能量 W_g 与截止关断时间 t_s 、电容 C 的关系如图 4 所示。

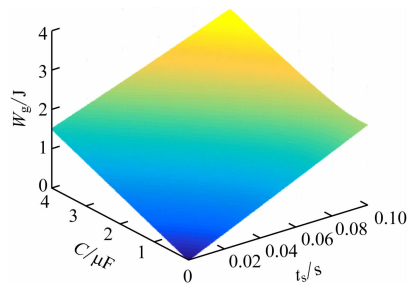


图 4 火花放电能量随截止关断时间和电容变化的三维关系

Fig. 4 Three dimensional relationship of spark discharge energy with cut-off time and capacitance

从图 4 可以看出, 火花放电能量 W_g 与截止关断时间 t_s 和电容 C 有很大的关系, 随着截止关断时间和电容的增大, 火花放电能量逐渐变大。

但是, 在本安电源过压、过流保护次序选择优化研究中, 保护次序的改变并不会改变电容 C 参数, 只会影响截止关断时间 t_s 的大小。为了进一步研究 W_g 与截止关断时间 t_s 的关系, 对火花放电能量 W_g 求截止时间 t_s 的导数:

$$\frac{\partial W_g}{\partial t_s} = \frac{u_h(E - u_h)}{R_s(R_{in} + R_s)} \left(R_s + R_{in} \exp \left(-\frac{R_{in} + R_s}{CR_{in}R_s} t_s \right) \right)$$

(12)

因为电源电势 E 大于建弧电压 u_h , $E - u_h > 0$, 所以, $\frac{\partial W_g}{\partial t_s} > 0$, W_g 是关于截止时间 t_s 的单调递增函数, 即火花放电能量 W_g 随着截止时间 t_s 的减小 (增加) 而减小 (增加)。所以, 要想提高本安电源的安全性能, 降低火花放电能量, 必须设法减小截止关断时间。基于这个原理对本安电源过压、过流保护次序进行比较研究。

本安电源过压、过流保护电路主要是防止输出超出负载承受极限的过电压和防止由于负载电阻变小或者短路导致电流值变大。引起过电压、过电流故障的主要原因分别来自输入侧、负载侧。为了提高本安电源的本质安全性能, 从物理距离来讲, 保护电路越靠近故障, 其动作反应就越快, 截止关断时间就越短。因此, 过压保护电路应该相对靠近输入侧, 过流保护电路应该相对靠近负载侧, 即本安电源应该设计过压-过流保护次序, 这样当输入侧发生过压故障或负载侧发生过流故障时, 保护电路反应更快, 截止关断时间更短, 更能达到保护效果。

4 验证分析

为了证明以上分析的正确性, 设计一种过流保护电路和一种过压保护电路作为试验电路, 模拟发生过压故障、过流故障和同时发生过压、过流故障 3 种情况下 2 种保护次序的保护电路截止关断时间的大小。

4.1 过流保护电路设计

过流保护电路采用文献[15]的快速截流保护电路, 如图 5 所示。该过流保护电路不含电感元件, 只有很小的电容, 具有截流速度快、可自动恢复、投入点可调节等特点, 输出额定电压约为 12 V, 过流保护值为 1.5 A。电路具体参数设计可参考文献[15]。

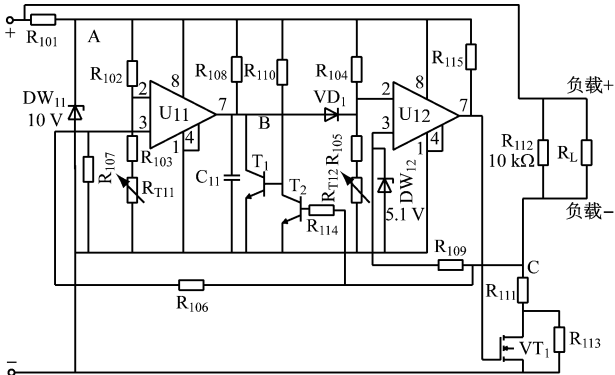


图 5 新型过流保护电路结构

Fig. 5 Structure of new over-current protection circuit

4.2 过压保护电路设计

设计的过压保护电路额定输入电压为 12 V, 过压保护动作值为 12.6 V, 如图 6 所示。当达到输入过电压时, 稳压管 D_1 被反向击穿且达到三极管 T_1 的发射极偏置电压, 三极管 T_1 的集电极和发射极两端导通, 导致 b 点的电位被拉低, T_2 关断, c 点的电位等于输入端的电压, MOSFET 栅极电位较高, VT_1 处于关断状态, 截止对外输出, 实现过压保护。

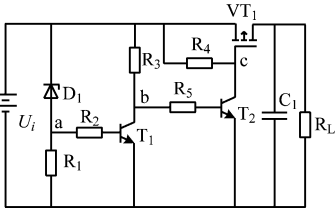


图 6 过压保护电路结构

Fig. 6 Structure of over-voltage protection circuit

4.3 2 种保护次序比较

对本安电源过压、过流保护次序的选择优化研究, 主要是比较这 2 种保护次序的保护电路截止关断时间的大小。为了方便研究, 对模型进行简化: 在模拟过程中, 用直流电源代替本安电源保护电路的前面部分, 同时用一重化的保护电路代替原来两重化的保护电路。设计的截流保护电路过流保护值为 1.5 A, 过压保护电路过压保护值为 12.6 V, 即当负载电流大于 1.5 A、输入电压超过 12.6 V 时, 保护电路就会动作。为了使效果更加明显, 在模拟故障的过程中, 设置的过压故障为 14 V, 过流故障为 2 A (此时负载约为 6 Ω)。发生过压故障、过流故障和同时发生过压、过流故障时的 2 种保护次序形式如图 7—图 9 所示, 同时发生过压、过流故障时, 本安

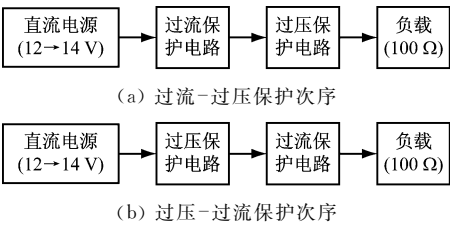


图 7 发生过压故障时的本安电源 2 种保护次序形式

Fig. 7 Two protection sequence forms of intrinsic safety power supply in case of over-voltage fault

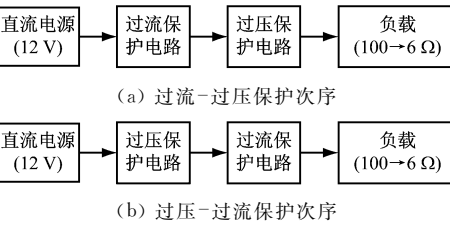


图 8 发生过流故障时的本安电源 2 种保护次序形式

Fig. 8 Two protection sequence forms of intrinsic safety power supply in case of over-current fault

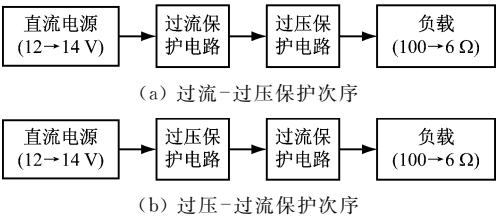


图 9 同时发生过压、过流故障时的本安电源 2 种保护次序形式

Fig. 9 Two protection sequence forms of intrinsic safety power supply in case of over-voltage fault and over-current fault

电源电压-电流保护次序 Multisim 仿真电路如图 10 所示。

为准确测量截止关断时间,用 Multisim 软件图示仪中光标 1 标记发生故障的时刻 T_1 ,光标 2 标记当发生故障以后输出电压在 0.2 V 的时刻 T_2 ,截止关断时间 $t_s = T_2 - T_1$ 。图 11—图 13 为仿真波形,其中图 13 为随机在不同时刻 ($T_1 = 154.6928, 117.6428, 77.1328\text{ ms}$)同时发生过压、过流故障时,本安电源过压-过流保护仿真波形。

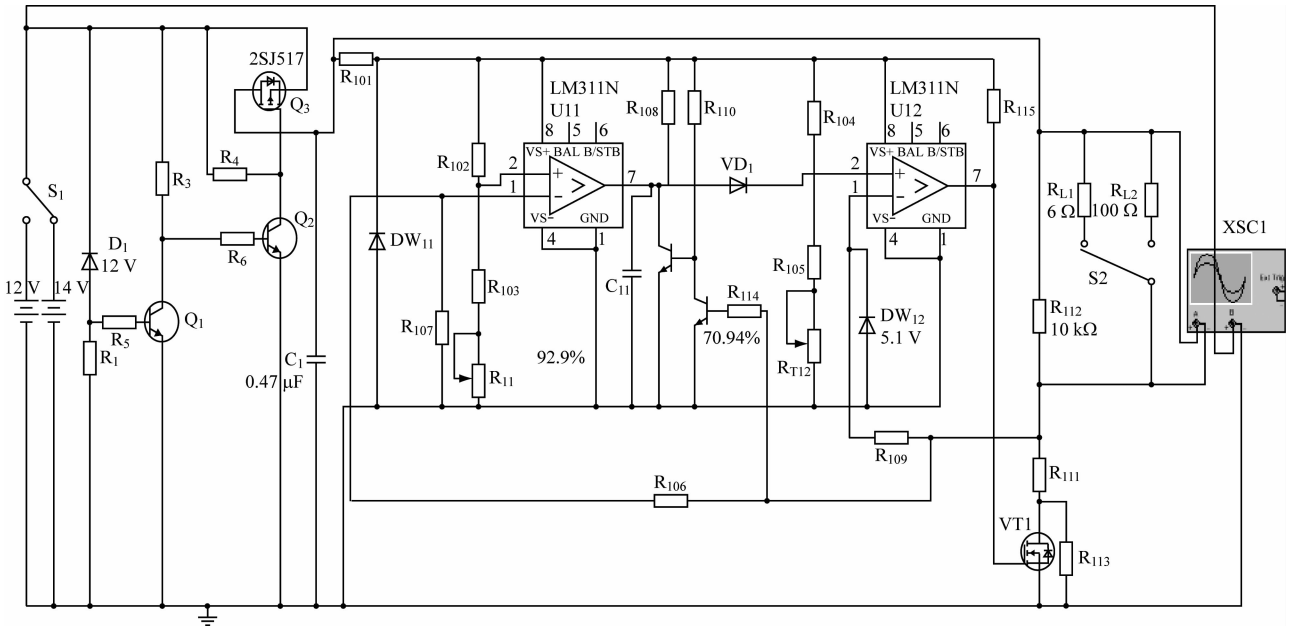
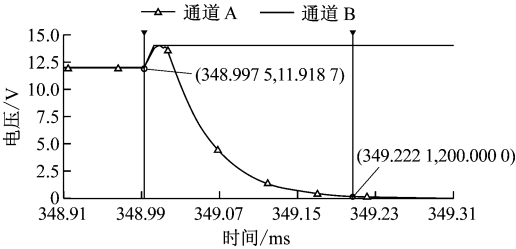
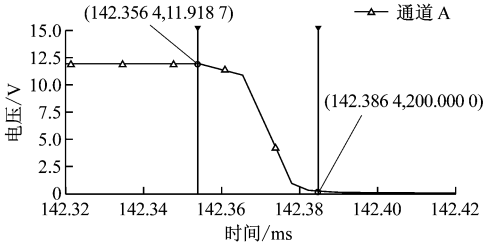


图 10 同时发生过压、过流故障时,本安电源电压-电流保护次序仿真电路

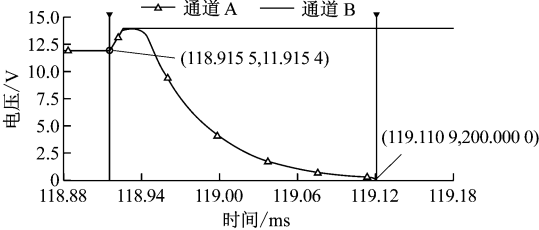
Fig. 10 Simulation circuit of protection sequence of voltage and current for intrinsic safety power supply in case of over-voltage and over-current fault



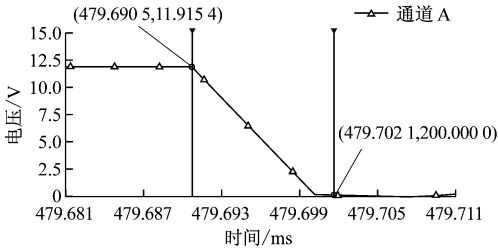
(a) 发生过压故障时的过流-过压保护次序波形



(a) 过流故障时的过流-过压保护次序波形



(b) 发生过压故障时的过压-过流保护次序波形



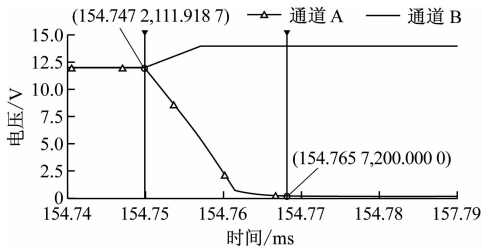
(b) 过流故障时的过压-过流保护波形

图 11 过压故障时的本安电源 2 种保护次序的仿真波形

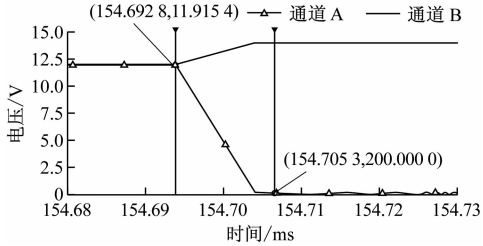
图 12 过流故障时的本安电源 2 种保护次序仿真波形

Fig. 11 Simulation waveform of two protection sequence of intrinsic safety power supply with over-voltage fault

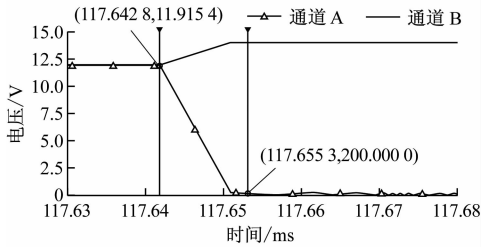
Fig. 12 Simulation waveform of two protection sequences of intrinsic safety power supply with over-current fault



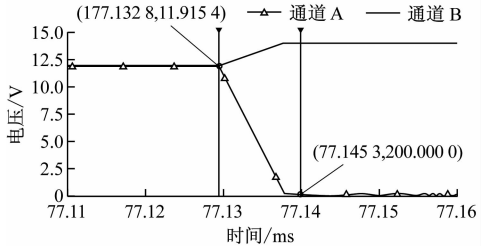
(a) 过压、过流故障时,过流-过压保护次序波形



(b) 过压、过流故障时, $T_1=154.692\text{ ms}$ 的过压-过流保护次序波形



(c) 过压、过流故障时, $T_1=117.642\text{ ms}$ 的过压-过流保护次序波形



(d) 过压、过流故障时, $T_1=77.132\text{ ms}$ 的过压-过流保护次序波形

图 13 过压、过流故障时的本安电源 2 种保护次序仿真波形
Fig. 13 Simulation waveform of two protection sequence of intrinsic safety power supply with over-voltage and over-current fault

模拟发生过压故障时,假定过流-过压、过压-过流保护次序的保护电路截止关断时间为 t_{s1} 、 t_{s2} ,由图 11 可得: $t_{s1} = T_2 - T_1 = 349.222\text{ ms} - 348.997\text{ ms} = 0.224\text{ ms}$; $t_{s2} = T_2 - T_1 = 119.110\text{ ms} - 118.915\text{ ms} = 0.195\text{ ms}$ 。

模拟发生过流故障时,假定过流-过压、过压-过流保护次序的保护电路截止关断时间为 t_{s3} 、 t_{s4} ,由图 12 可得: $t_{s3} = T_2 - T_1 = 142.386\text{ ms} - 142.356\text{ ms} = 0.03\text{ ms}$; $t_{s4} = T_2 - T_1 = 479.702\text{ ms} - 479.690\text{ ms} = 0.011\text{ ms}$ 。

模拟同时发生过压、过流故障时,假定过流-过压保护次序的保护电路截止关断时间为 t_{s5} ,由图 13(a)可以得: $t_{s5} = T_2 - T_1 = 154.765\text{ ms} - 154.747\text{ ms} = 0.018\text{ ms}$ 。

假定随机在 $T_1 = 154.692\text{ ms}$, 117.642 ms , 77.132 ms 时刻同时发生过压、过流故障,过压-过流保护次序的保护电路截止关断时间为 t_{s6a} 、 t_{s6b} 、 t_{s6c} ,由图 13(b)、(c)、(d) 可得: $t_{s6a} = T_2 - T_1 = 154.705\text{ ms} - 154.692\text{ ms} = 0.012\text{ ms}$; $t_{s6b} = T_2 - T_1 = 117.655\text{ ms} - 117.642\text{ ms} = 0.012\text{ ms}$; $t_{s6c} = T_2 - T_1 = 77.145\text{ ms} - 77.132\text{ ms} = 0.012\text{ ms}$ 。

很明显,随机在不同的时刻 $T_1 = 154.692\text{ ms}$, 117.642 ms , 77.132 ms ,模拟同时发生过压、过流故障时,过流-过压保护次序的保护电路截止关断时间都为 0.012 ms ,即仿真模拟中,故障发生的时刻对保护电路截止关断时间是没有影响的,排除在仿真中模拟故障发生的不同时刻对 2 种保护次序下截止关断时间大小的影响。

然后比较在发生不同故障的情况下,过流-过压保护和过压-过流保护这 2 种保护次序的保护电路截止关断时间的大小,如图 14 所示。

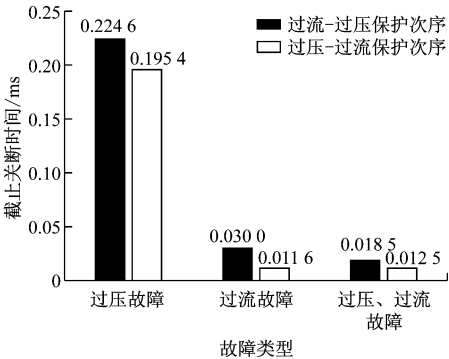


图 14 不同故障类型的 2 种保护次序保护电路的截止关断时间对比

Fig. 14 Cut-off time comparison of protection circuits of two sequences under different fault types

从图 14 可看出, $t_{s1} > t_{s2}$, $t_{s3} > t_{s4}$, $t_{s5} > t_{s6}$,即分别在过压故障、过流故障和同时发生过流、过压故障情况下,过压-过流保护次序的保护电路截止关断时间更短。

为了突出对比 2 种保护次序截止关断时间的相对大小,进一步比较分析:

$$\frac{t_{s1} - t_{s2}}{t_{s2}} \times 100\% = \frac{0.224\text{ ms} - 0.195\text{ ms}}{0.195\text{ ms}} \times 100\% = 14.9\% \quad (13)$$

$$\frac{t_{s3}-t_{s4}}{t_{s4}} \times 100 \% = \frac{0.03-0.0116}{0.0116} \times 100 \% = 158.6 \% \quad (14)$$

$$\frac{t_{s5}-t_{s6}}{t_{s6}} \times 100 \% = \frac{0.0185-0.0125}{0.0125} \times 100 \% = 48 \% \quad (15)$$

从式(13)一式(15)可以看出,分别在发生过压故障、过流故障、过流过压故障情况下,过流-过压保护次序的保护电路截止关断时间比过压-过流保护次序的保护电路截止关断时间长 14.9%,158.6%,48%,可以看出,2 种保护次序的保护电路截止关断时间相差较大,选择不同保护次序对发生故障时保护电路的截止关断时间有较大影响,即过压-过流保护次序的保护电路截止关断时间更短,其保护效果更好,本安电源的安全性能更高。

5 影响本安电源过压、过流保护次序选择的其它因素

除了把保护电路截止关断时间的长短作为本安电源过压、过流保护次序的选择依据外,过压保护电路类型的特点也影响着本安电源过流、过压保护次序的选择。

短路型过压保护电路的 2 种简单形式如图 15 所示。图 15(a)中稳压管直接和电源输出端相连,当电源输出达到稳压管雪崩电压与晶闸管的触发电压之和时,晶闸管被触发导通。该晶闸管可直接并在电源输出端,它的导通造成输出过电流,从而使过流保护电路动作,切断电源输出。这类保护电路还有其他的形式,如图 15(b)所示。短路型过压保护电路的典型特点是必须有过流保护电路相配合,过压保护电路中有晶闸管(或三极管)且与输出端并联,当过压时,晶闸管(或三极管)导通,造成输出端短路,使过流保护电路动作,切断电源,从而起到过压保护的作用。因此,当使用该种类型的过压保护电路时,本安电源保护必须设计成先过流保护,再过压保护,即过流保护靠近输入侧,过压保护靠近输出侧,这样过压保护电路才能正常发挥过压保护作用;否则发生过压故障时,过压保护电路会将电源短路。

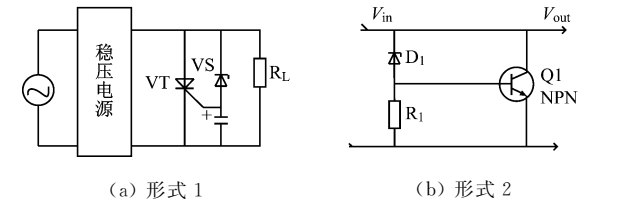


图 15 短路型过压保护电路

Fig. 15 Short circuit over-voltage protection circuit

6 结论

(1) 在本安电源的设计中,过压、过流保护次序的选择并不是随机任意的,而是有原则可循的:过压保护电路类型的特点影响着本安电源过压、过流保护次序选择;在设计中,首先要判断过压保护电路的类型,如果过压保护电路的类型是短路型,本安电源保护电路应设计成过流-过压的保护次序,否则应设计成过压-过流保护次序,这样当发生故障时保护电路截止关断时间更短,保护电路动作更快,本安电源的安全性能更高。

(2) 本安电源对安全设计的要求较高,如果不符合要求,将带来严重的人身安全隐患。通过对本安电源过压、过流保护次序选择优化研究,可提高其安全性能,对于减少煤矿井下电气火花引起的瓦斯爆炸事故、保护人民的生命财产安全具有重要价值。

参考文献(References):

[1] 张津嘉,许开立,王贝贝,等. 特别重大煤矿瓦斯爆炸事故致因分析及管理模式研究[J]. 中国安全科学学报,2016,26(2):73-78.
ZHANG Jinjia, XU Kaili, WANG Beibei, et al. Extraordinarily serious gas explosion accidents in coal mines: analysis of causes and research on management mode[J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(2): 73-78.

[2] 刘树林,刘健. 本质安全开关变换器[M]. 北京:科学出版社,2009.

[3] 刘树林,祁俐俐. Buck 变换器的等效简单电感电路及内部本安判据[J]. 西安科技大学学报,2016,36(3):434-439.
LIU Shulin, QI Lili. Equivalent simple inductive circuit and inner-intrinsic safety criterion of Buck converter[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2016, 36(3): 434-439.

[4] 刘树林,刘健. 本质安全 Boost 变换器的非爆炸内部本质安全判据[J]. 煤炭学报,2008,33(6):707-712.
LIU Shulin, LIU Jian. Non-explosive inner-intrinsic safety criterion of intrinsic safe Boost converter[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(6): 707-712.

[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]. Journal of Electrical

- Technology, 2015, 30(14): 253-260.
- [6] 于月森, 谢冬莹, 伍小杰. 本安防爆系统与本安电源结构特点及分类探讨[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(3): 78-82.
- YU Yuesen, XIE Dongying, WU Xiaojie. Discussion on features and classification of intrinsic safe flame proof system and intrinsic safe electric power structure[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(3): 78-82.
- [7] 周亚夫, 许辰雨. 矿用本安电源保护电路的优化设计[J]. 中国煤炭, 2015, 41(1): 70-72.
- ZHOU Yafu, XU Chenyu. Research on optimization design of the protection circuit of mine intrinsically safe power[J]. China Coal, 2015, 41(1): 70-72.
- [8] 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): 61-65.
- [9] 朱前伟. 矿用本质安全电源的基本要求和设计方法[J]. 工矿自动化, 2012, 38(2): 22-25.
- ZHU Qianwei. Basic requirements and design methods of mine-used intrinsic safety power supply[J]. Industry and Mine Automation, 2012, 38(2): 22-25.
- [10] 徐倩楠, 李良光, 朱忠鹏. 矿用本安电源的设计[J]. 煤矿机械, 2014, 35(2): 129-131.
- XU Qiannan, LI Liangguang, ZHU Zhongpeng. Design of mine intrinsically safe power supply[J]. Coal Mine Machinery, 2014, 35(2): 129-131.
- [11] 房绪鹏, 于志学, 马伯龙, 等. 本安电源双重化保护电路冗余方式对比研究[J]. 煤矿安全, 2017, 48(6): 119-122.
- FANG Xupeng, YU Zhixue, MA Bolong, et al. Redundancy modes comparison study on dual protection circuit of intrinsically safe power[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(6): 119-122.
- [12] 于志学, 房绪鹏, 赵扬. 一种“ia”级新型本质安全型电源设计[J]. 工矿自动化, 2017, 43(8): 83-86.
- YU Zhixue, FANG Xupeng, ZHAO Yang, et al. Design of novel intrinsically safe power supply with “ia” grade[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(8): 83-86.
- [13] 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 Junting, 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.
- [14] 于月森, 张望, 孟庆海, 等. 截止型保护方式下容性电路短路火花放电模型及分析[J]. 煤炭学报, 2013, 38(3): 517-521.
- YU Yuesen, ZHANG Wang, MENG Qinghai, et al. Modeling and analysis on spark discharge of capacitive circuit with cut-off type protection[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(3): 517-521.
- [15] 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.