

文章编号:0253-9993(2013)03-0517-05

截止型保护方式下容性电路短路火花放电模型及分析

于月森¹,张 望¹,孟庆海²,伍小杰¹

(1. 中国矿业大学 信息与电气工程学院,江苏 徐州 221008;2. 北方工业大学 机电工程学院,北京 100144)

摘要:提出截止型输出短路保护方式下本质安全型开关变换器火花放电的容性等效电路模型。通过在IEC火花试验装置上进行试验,研究截止型保护方式下容性电路火花放电的规律,建立截止型保护方式下容性电路火花放电数学模型。分析与实验表明,建立的数学模型与实际基本相符;截止放电模式与自然放电模式在火花放电规律方面有显著的差异;截止放电模式下减小截止时间和减小电容值均能提高本质安全性能,但在不同取值范围效果不同。

关键词:容性电路;截止放电模式;火花放电;数学模型;本质安全

中图分类号:TD684 **文献标志码:**A

Modeling and analysis on spark discharge of capacitive circuit with cut-off type protection

YU Yue-sen¹,ZHANG Wang¹,MENG Qing-hai²,WU Xiao-jie¹

(1. School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 2. College of Mechanical Electrical and Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: It was proposed that the equivalent circuit model of intrinsically safe switching converter with cut-off type output short circuit protection was capacitive circuit with cut-off type protection. The discharge characteristic of the capacitive circuit with cut-off type protection was found out through a large number of spark discharge experiment in IEC spark test apparatus. The spark discharge mathematical model was established. Analysis and experimental results show that mathematical model is consistent with the reality. The spark discharge laws are significant differences between natural discharge mode and cut-off discharge mode. Under natural discharge mode, both shortening the discharge time and reducing the capacitance value could improve the performance of intrinsical safety, but there are different effects in different value range.

Key words: capacitive circuit; cut-off discharge mode; spark discharge; mathematical model; intrinsical safety

本质安全型开关电源是本质安全防爆电源发展的必然趋势,在含有爆炸性混合物的环境中具有广阔的应用前景^[1-4]。由于开关电源可以等效为容性电路,因此,要研究开关电源本质安全性能,首先要研究容性电路火花放电规律。电容为储能元件,两端电压不能突变,容性电路仅在触点闭合时发生火花放电,在触点断开时,不会发生火花放电^[5]。因此容性电路火花放电的理论研究以闭合火花放电为主要研究形式,一般不考虑断路情况。目前容性电路火花放电

数学模型主要有放电电压指数模型^[6]、动态伏安特性模型^[7-8]和建弧电压模型^[9]。由于上述模型以电容的自然放电为研究对象,没有考虑截止时间的影响,不能适用于实际中广泛采用的截止型输出短路保护的本质安全型开关变换器(简称截止型本安开关变换器)的分析设计。本文在建弧电压模型基础上引入截止时间变量建立了火花放电能量集中阶段的数学模型,研究了截止型保护方式下容性电路火花放电规律,分析截止放电模式与自然放电模式在火花放

收稿日期:2012-02-10 责任编辑:许书阁

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2012QNB30);国家高新技术研究发展计划(863)资助项目(2008AA062200);江苏省“青蓝工程”基金资助项目(苏教师[2010]27号)

作者简介:于月森(1978—),男,山东五莲人,讲师,博士研究生。Tel:0516-83885961, E-mail: yuyuesen@cumt.edu.cn

电规律上的差异,以及截止型保护方式下容性电路火花能量的影响因素,最后通过火花实验进行了验证。

1 截止型火花放电特性

截止型本安开关变换器火花放电等效模型如图 1 所示,其中 R 为放电回路的总电阻(包括线路上电阻和火花试验装置的内阻); G 为火花实验装置; S 为截流开关; u_c 为火花放电期间的电容电压; u_g 为火花放电期间的火花电压; i_g 为火花放电期间的火花电流。工作原理为当截止型输出短路保护电路检测到容性电路输出短路,关断截流开关 S 来切断电容对输出短路处的能量传输。

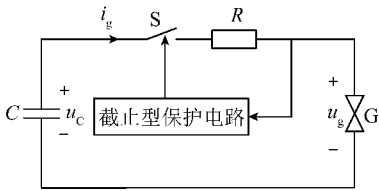


图 1 截止型本安开关变换器火花放电等效模型
Fig. 1 Equivalent circuit model of intrinsically safe switching converter with cut-off type protection

截止型保护方式下容性电路火花放电实验原理如图 2 所示,其中 E 为充电电源的电压; R_0 为充电电阻,选择充电电阻 R_0 远大于放电回路中电阻 R ,以避免充电电源 E 对放电过程的影响。

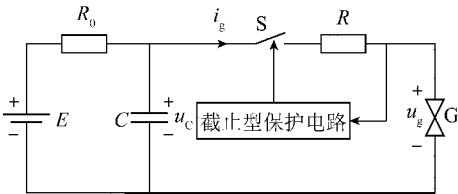


图 2 截止型保护方式下容性电路火花放电实验原理
Fig. 2 Schematic of capacitance circuit spark discharge test with cut-off type protection

通过对上千组实验波形的统计分析和研究发现,截止型保护方式下容性电路火花放电具有一定规律性,典型火花放电电压和电流波形如图 3,4 所示。

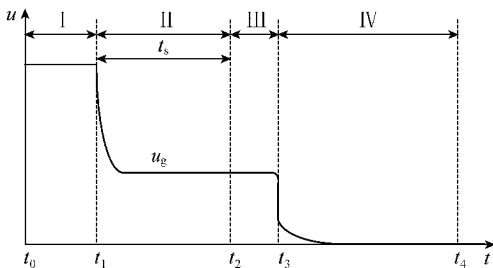


图 3 典型火花放电电压波形

Fig. 3 Typical spark voltage waveform

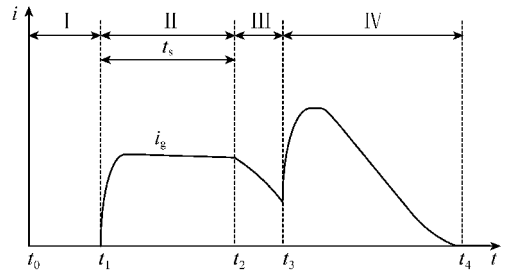


图 4 典型火花放电电流波形

Fig. 4 Typical spark current waveform

路火花放电过程可以分为 4 个阶段:

第 I 阶段,实验前的电路稳定状态。此阶段内火花实验装置处于断路状态,装置两端的火花电压为电源电压 E ,火花电流为零。

第 II 阶段,容性电路火花放电状态。此阶段火花电流瞬间上升至最大值,然后按近似指数规律开始下降;火花电压瞬间下降至建弧电压 U_h 值,其大小与电极材料有关(铜为 11 V)^[10]。

第 III 阶段,保护动作过程中容性电路火花放电状态。 t_s 为截止时间,在 t_2 时刻保护电路开始关断截流开关 S ,又因为截流开关不会瞬间关断,而是需要一定的时间才会彻底关断,所以在该阶段火花电流随着开关的逐渐关断而减小,其特性与截流开关实现器件的关断特性有关。

第 IV 阶段,容性电路火花熄灭状态。 t_3 时刻火花熄灭,电极彻底闭合,电压快速下降至零,但因为截流开关还未完全关断,电容继续释放存储能量,所以有电流存在,一直持续到 t_4 时刻,此时截流开关彻底关断。该阶段因为电压基本为零,所以虽然电流出现峰值,但是火花能量非常小,通常可以忽略。

由以上分析可见,第 I 阶段为火花放电前的状态,没有释放能量;第 II 阶段为火花放电状态,能量高度集中,对安全性能具有决定性影响;第 III 阶段为保护动作后火花放电状态,能量逐渐减小,对安全性能有一定影响,但影响不大;第 IV 阶段为火花熄灭状态,火花装置处于闭合状态,能量主要由电路中电阻吸收,对安全性能几乎没有影响。本文主要研究能量高度集中的第 II 阶段。

2 截止型火花放电数学模型

截止型保护方式下容性电路火花放电期间,第 II 阶段释放的能量是引燃可燃性危险混合物的主要能量。因此,在建立截止型保护方式下容性电路火花放电数学模型时,可以只考虑截止时间 t_s 之内的放电过程。截止时间主要受故障检测时间与开关管驱动及动作时间等因素影响,目前截止时间通常在 $5 \mu s$

从图 2 和 3 可以看出,截止型保护方式下容性电

左右,最小可以做到 $1 \mu\text{s}$ 。自然放电过程通常在几十毫秒^[9],特殊情况下最小也有几十微秒,相比之下,通常截止时间远小于自然放电时间。通过上百组实验研究发现,当截止时间在 $5 \mu\text{s}$ 左右时火花放电电压波形仍具有建弧电压特性。

在图1所示电路中,选择充电电阻 R_0 远大于放电回路中电阻 R ,可忽略充电电源 E 对放电回路的影响,放电回路电压方程和电流方程分别为

$$u_c = i_g R + u_g \quad (1)$$

$$i_g = -C \frac{du_c}{dt} \quad (2)$$

火花放电电压为

$$u_g = U_h \quad (3)$$

式中, U_h 为最小建弧电压值。

火花放电电流为

$$i_g = \frac{E - U_h}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (4)$$

可得火花放电能量为

$$W_g = \int_0^{t_s} u_g i_g dt = \int_0^{t_s} U_h \frac{E - U_h}{R} e^{-\frac{t}{RC}} dt = CU_h(E - U_h)(1 - e^{-\frac{t_s}{RC}}) \quad (5)$$

国家标准 GB 3836.4—2010 中,考虑 1.5 倍安全系数,氢气-空气混合物最小点燃能量为 $260 \mu\text{J}$,将火花能量 W_g 与最小点燃能量相比较,即可判断火花能量是否引燃可燃性危险混合物^[11-13]。

2.1 截止时间对于火花能量的影响

将式(5)对 t_s 求导,可得

$$\frac{\partial W_g}{\partial t_s} = \frac{U_h(E - U_h)}{R} e^{-\frac{t_s}{RC}} > 0 \quad (6)$$

由式(6)可知,火花能量 W_g 随着截止时间 t_s 的减小而单调减小。即减小截止时间可以单调减小火花能量。根据式(5)可知,火花能量 W_g 与截止时间 t_s 成指数规律变化,如图5所示。

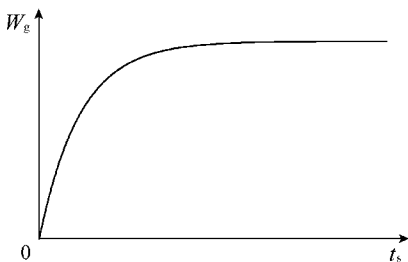


图5 截止时间与火花能量的关系曲线

Fig. 5 The relationship between cut-off time and spark energy

按照指数规律可知,当 $t_s < RC$ 时,减小截止时间 t_s 可以快速减小火花能量,并且截止时间越小,火花能量减小速度越快,最大斜率为 $U_h(E - U_h)/R$,该斜率受电容电压及电阻 R 影响,当 $RC < t_s < 3RC$ 时,减小截止时间 t_s 可以减小火花能量,但变化趋势较为缓

慢;当 $t_s > 3RC$ 时,减小截止时间 t_s 对于火花能量的减小基本没有影响。由此可知,虽然减小截止时间都可以降低火花能量,但是当截止时间处于不同的范围内,减小同样大小的截止时间对于降低火花能量的效果不同。

当截止时间大于自然放电时间(即自然放电模式)时,火花放电能量最大,最大值为

$$W_g = CU_h(E - U_h) \quad (7)$$

从式(7)可以看出,该最大值与电容量、供电电压以及建弧电压有关,由于建弧电压约为常数^[14-15],还可以看出火花能量大小与电容量成正比,与供电电压成正比。即当供电电压一定时,减小电容量可以成比例的减小火花能量。

在实际工程应用中,通过截止时间控制火花能量从而提高本安性能,是非常有效的措施。对于 24 V 的输出本安开关电源,假设 $470 \mu\text{F}$ 的电容可以满足输出电压纹波要求,故障时负载电阻被短接,放电回路电阻 $R = 0.05 \Omega$,可以计算出时间常数为 $23.5 \mu\text{s}$,而截止时间可以做到 $5 \mu\text{s}$ 以下,根据分析结果可知,截止时间数值正处于可以快速减小火花放电能量的区间,即对火花能量的影响显著。

2.2 电容量对于火花能量的影响

将式(5)对 C 求导,可得

$$\frac{\partial W_g}{\partial C} = U_h(E - U_h)(1 - e^{-\frac{t_s}{RC}} - \frac{t_s}{RC} e^{-\frac{t_s}{RC}}) \quad (8)$$

经数学推导可以证明

$$\frac{\partial W_g}{\partial C} > 0$$

由式(8)可知,火花能量 W_g 随着电容量 C 的减小而单调减小。即减小电容量 C 可以单调减小火花能量。根据式(5)可知,火花能量 W_g 与电容量 C 近似按照指数规律变化,如图6所示。

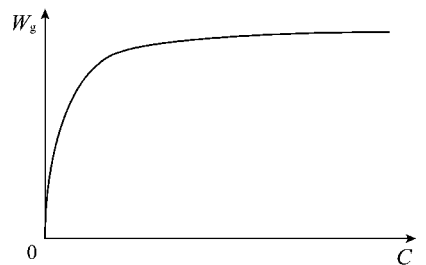


图6 电容量与火花能量的关系曲线

Fig. 6 The relationship between capacitance and spark energy

经计算分析,当 $C < t_s/R$,随着 C 的减小火花能量减小较快近似线性变化;当 $t_s/R < C < 5t_s/R$ 时,随着 C 的减小火花能量减小缓慢;当 $C > 5t_s/R$ 时,随着 C 的减小火花能量减小很慢,几乎不变。当 C 趋向无穷

大时

$$W_g \rightarrow U_h(E - U_h)t_s/R \quad (9)$$

由式(9)可知,当电容量趋于无穷大时,火花能量趋于稳定的最大值,该值除了与供电电压、建弧电压有关外,还与截止时间成正比,与回路电阻 R 成反比。

由式(7)可知,在自然放电模式下,火花能量最终达到稳态,稳态时火花放电能量与电容值的大小成正比,即随着电容量的趋向于无穷大,火花能量正比的趋向于无穷大;而在截止放电模式下,由式(9)可知,火花放电能量与电容值的大小成近似指数变化,随电容量趋向于无穷大,火花放电能量趋向于一个稳态值。因此,截止放电模式与自然放电模式在火花放电规律方面有显著的差异。

3 仿真及实验验证

为验证模型的正确性,按照图1搭建实验电路。电源电压 E 为24 V,电容 C 为47 μF ,电阻 R 为5.1 Ω ,为保证截止型输出短路保护电路的供电电流,电阻 R_0 取值较小。自然放电模式下火花电压和电流实验波形如图7所示。截止放电模式下 t_s 设置为10 μs 的火花电压和电流实验波形如图8所示,相对应的火花放电能量如图9所示。

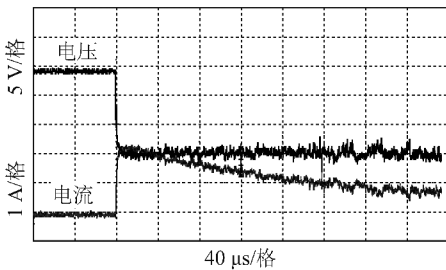


图7 自然放电模式火花放电电压和电流实验波形

Fig. 7 Experimental waveforms of spark discharge voltage and current under natural discharge mode

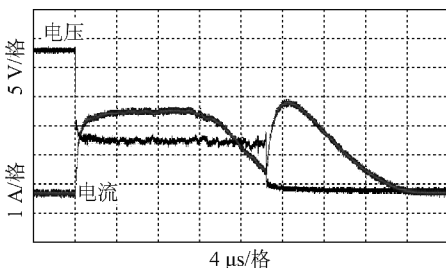


图8 截止模式火花放电电压和电流实验波形

Fig. 8 Experimental waveforms of spark discharge voltage and current under cut-off discharge mode

从图8和9可以看出,本文所建立的数学模型与实际基本相符,火花放电能量主要集中在第II阶段,

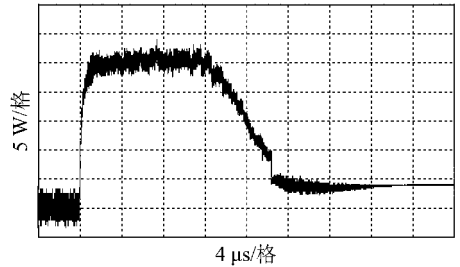


图9 截止模式火花放电功率实验波形

Fig. 9 Experimental waveform of spark discharge power under cut-off discharge mode

且远大于第III阶段的能量。

比较图7和8可以看出,截止放电模式与自然放电模式在火花放电规律方面有显著的差异;截止放电模式的火花放电能量明显小于自然放电模式。

图8中实际电流波形并不是瞬间上升至峰值,这是由于线路中存在寄生电感,延长了电流上升至峰值的时间,关于电感对容性电路的影响将专文论述。另外在不同的实测波形中建弧电压并非完全恒定,有时会略有变化,但不影响前文分析结论的正确性及适用性。

4 结 论

截止放电模式与自然放电模式在火花放电规律方面有显著的差异。在自然放电模式下,火花能量最终达到稳态,稳态时火花放电能量与电容值的大小成正比,即随着电容量的趋向于无穷大,火花能量正比的趋向于无穷大;截止放电模式下,火花放电能量与电容值的大小成近似指数变化,随电容量趋向于无穷大,火花放电能量趋向于一个稳态值。在截止放电模式下,减小截止时间和减小电容值均能提高本质安全性能,但在不同取值范围效果不同。通常截止时间远小于自然放电时间,所以截止放电模式下的火花放电能量明显减小。

论文研究结果为截止型本安开关变换器的分析及本质安全性能的非爆炸评价提供了理论及实践参考。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 刘晓强.本质安全型防爆直流开关电源及备用电源研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2001.
Liu Xiaoqiang. The research of intrinsically safe DC switching power

- supply and its reserve power supply [D]. Beijing: China University of Mining & Technology (Beijing), 2001.
- [3] 崔保春, 王 聪. 本质安全电源电路理论综述 [J]. 电源世界, 2006(12): 1-6.
Cui Baochun, Wang Cong. The theoretical survey of intrinsically safe supply circuits [J]. The World of Power Supply, 2006(12): 1-6.
- [4] 刘树林. 本质安全开关变换器基础理论及关键技术研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2007.
Liu Shulin. Basic theory & key technologies of intrinsically safe switching converters [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2007.
- [5] 章良海, 宋雅亭, 刘小周. 安全火花原理及应用 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.
- [6] 刘建华. 爆炸性气体环境下本质安全电路放电理论及非爆炸评价方法的研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008.
Liu Jianhua. A study on discharge theory and non-explosion evaluating method of the intrinsically safe circuits for explosive atmospheres [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2008.
- [7] 刘 辉. 隔爆兼本安直流稳压开关电源的研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2005.
Liu Hui. Research on flame-proof & intrinsically safe DC switching power supply [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2005.
- [8] 张军国. 容性本安电路短路放电瞬时火花引燃爆炸性气体的研究 [J]. 电气防爆, 2001(3): 25-28.
- [9] 左官芳. 本质安全电路非爆炸检测方法研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2007.
Zuo Guanfang. Study on non-explosion assessing intrinsic safety circuits method [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2007.
- [10] 张冠生. 电器学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [11] GB 3836.4—2010, 爆炸性气体环境用电气设备. 第四部分: 本质安全型“i” [S].
- [12] 孟庆海, 胡天禄. 应用放电电流线性衰减模型评价电感性本质安全电路 [J]. 煤炭学报, 1999, 24(4): 416-419.
Meng Qinghai, Hu Tianlu. Evaluation of inductive intrinsically safe circuit based on linear current attenuation model [J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(4): 416-419.
- [13] 刘树林, 刘 健, 寇 蕾. 开关变换器的本质安全特性分析与设计 [J]. 电工技术学报, 2006, 21(5): 36-41.
Liu Shulin, Liu Jian, Kou Lei. Intrinsically safe behavior of switching converters and its design [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(5): 36-41.
- [14] 孟庆海, 牟龙华. 本质安全电感电容复合电路电弧放电特性的研究 [J]. 煤炭学报, 2004, 29(4): 510-512.
Meng Qinghai, Mu Longhua. Arc discharge characteristics of intrinsically safe compound circuits [J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(4): 510-512.
- [15] 孟庆海, 牟龙华. 基于电流线性衰减模型分析低能电弧放电特性的研究 [J]. 煤炭学报, 2001, 26(6): 654-656.
Meng Qinghai, Mu Longhua. Analysis of low energy arc discharge characteristics based on linear current attenuation model [J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(6): 654-656.