

超级电容器在晶闸管触发装置中的充放电研究

江凤娟 罗红娥 顾金良 夏言

(南京理工大学瞬态物理国家重点实验室 南京 210094)

摘要: 供电电源是脉冲功率系统晶闸管触发装置的关键组成部分。基于大功率晶闸管的触发要求,对触发电路进行了方案设计。系统采用了超级电容器作为供电电源来满足触发电路的供电电压要求。在此进行多次晶闸管触发实验,反复试验多组不同容量的超级电容器的充放电特性,选择容量合适的超级电容器作为晶闸管触发电路的触发电源。实验结果表明,晶闸管触发装置能够可靠触发,设计满足实验要求;选择5组超级电容器供电,满足触发时间要求。

关键词: 供电电源;超级电容器;触发电路;晶闸管

中图分类号: TP211 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Study on charge and discharge of supercapacitor in thyristor trigger

Jiang Fengjuan Luo Hong'e Gu Jinliang Xia Yan

(National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Power supply is a key component of thyristor triggering devices for pulsed power systems. Based on the triggering requirements of high power thyristor, the trigger circuit is designed. The system use super capacitor as a power supply to meet the trigger circuit power supply voltage requirements. To carry out multiple thyristor trigger test, in order to obtain the super capacitor charge and discharge characteristics, repeatedly test multiple sets of different capacity, and select the appropriate capacity of the trigger power. The experimental results show that the trigger device can be reliably triggered to meet the design requirements; select five groups of super capacitor power supply to meet the trigger time requirements.

Keywords: power supply; super capacitor; trigger circuit; thyristor

0 引言

超级电容器作为一种新型的高功率密度储能器件,使得其成为近年来研究的热点。它具有低电压大容量的特点:单体超级电容器的电压一般在2.5~3 V,具有几千甚至上万法拉的容量^[1],为了满足外部负载对电压等级的要求,通常需要将超级电容器串联使用^[2-3]。与传统电容器相比,它具有功率密度高、充电时间短、使用寿命长、温度特性好、节约能源和绿色环保等特点。超级电容器在电子通讯、工业制造、交通运输、军事科研、新能源等领域均有较好的应用前景^[4]。在军用方面,新一代激光武器、微波武器、电磁炮等新概念武器的脉冲功率源系统要求其具有较大的储能,并在毫秒数量级内大功率释放电能。超级电容器的充电、放电速度较快,成为了这些脉冲功率源系统的首选储能元件^[5-6]。

晶闸管作为脉冲功率系统的主开关,其触发装置的工

作可靠性显得尤为重要。为了保证晶闸管可靠有效触发,需要根据晶闸管触发条件设计外触发电路。触发电路提供电源是成功触发晶闸管的基本条件之一,本文利用光纤触发方式设计触发装置并使用超级电容器作为触发装置的供电电源,为了验证设计可行性,对超级电容器进行多次充放电实验。

1 触发电路的设计

大功率晶闸管是脉冲功率源主回路的开关元件,控制脉冲电容对负载的放电。晶闸管能否可靠有效的触发是脉冲功率源系统能否正常工作的关键。目前常用的触发方式主要有3种:电磁触发、光耦合触发以及光纤触发^[7-8]。光纤触发较于前两种触发方式具有光纤传输通信容量大、传输距离长、信号衰减小、抗电磁干扰性强、传输质量好、可靠性高、体积小、质量轻^[9]等优点。因此,本脉冲功率源系统选用光纤触发方式触发晶闸管。

在高压大电流晶闸管串联电路中,为保证串联晶闸管的可靠一致性导通,采用强触发的方式导通^[10]。为保证晶闸管导通,通常要求触发脉冲的上升沿陡度 $di/dt > 1 \text{ A}/\mu\text{s}$,上升时间 $T_r \leq 1 \mu\text{s}$;触发脉冲的电压幅值为 $4 \sim 10 \text{ V}$;触发脉冲宽度达到 $50 \sim 70 \mu\text{s}$ 。

1.1 触发装置设计

根据上述要求分析,设计了触发装置总体结构框图如图1所示。

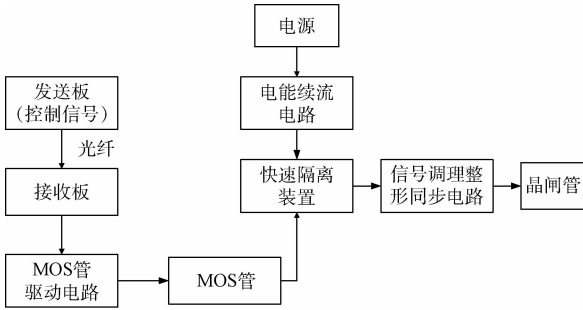


图1 触发装置总体结构

控制器向上位机发出触发指令,经光纤传输后由接收板接收,再通过光电隔离电路的光纤传输,由强触发电路接收触发信号并产生符合以上要求触发脉冲,触发晶闸管。

2 触发装置的供电电源设计

触发装置的供电电源作为触发装置的关键组成部分,在触发系统中占有至关重要的作用。脉冲功率源的触发装置供电有多种方式,目前主要采用锂电池供电、超级电容器供电等^[11]。

2.1 锂电池供电

锂电池供电的发展时间最长,技术的相对成熟。锂电池具有自放电率很低、电压稳定、功率承受能力强、高储能密度、高额定电压、安全性高、重量轻、绿色环保等优点,使其成为目前大功率脉冲功率源触发装置的常用方式。但锂电池充电时间长,成为该方法的主要缺点,实验时需要多个备用电源替换。锂电池充电时间主要与电池容量和充电电流有关:

$$t = M \frac{C}{I} \quad (1)$$

式中: t 表示充电时间(h), C 表示电池的额定容量(mAh), I 表示充电电流(mA), M 表示充电系数,此处 M 取值1.1,一般选用充电电流为 $0.5 \sim 0.8 \text{ A}$ 。根据晶闸管触发装置的供电要求,选用单节电压为 4.2 V 的锂电池,采用8个串联组成供电电源,工作电压为 33.6 V ,电池容量 $C = 2000 \text{ mAh}$,充电电流 $I = 0.7 \text{ A}$,根据计算得:

$$t = M \frac{C}{I} = 1.1 \times \frac{2000}{700} = 3.1 \text{ h} \quad (2)$$

由计算看出,锂电池完全充电时间达到 3.1 h ,即使没有深度放电的情况下充电时间也达 1 h 。更换电池操作繁

琐,费时费力;并且军用产品的使用环境较为恶劣,对温度要求高,锂电池的温度适用范围为 $-20 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$,一般情况下,温度低于 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 后锂电池性能就会下降,放电能力也就会相应降低,在低温的环境下脉冲系统无法正常工作。

2.2 超级电容器供电

与锂电池相比,超级电容器的充电速度有明显的优点,锂电池的充电时间一般为数小时,而超级电容器由于等效串联电阻较小,能提供较大的充电电流,一般充电时间为几分钟甚至几十秒。超级电容器循环寿命长,一般充放电次数可达几十万次。并且超级电容器的高低温特性很好,可在 $-40 \sim 75 \text{ }^\circ\text{C}$ 工作,满足军用产品的温度要求^[12]。

本文采用VINA 2.7 V系列电容单体,该超级电容器单体电容为 $2.7 \text{ V}/10 \text{ F}$,最大电流 $I_{\text{Max}} = 10.7 \text{ A}$,直流内阻 $ESR_{(\text{DC})} = 26 \text{ m}\Omega$,漏电流 $I_0 = 0.03 \text{ mA}$,工作的温度范围为 $-40 \sim +65 \text{ }^\circ\text{C}$ 。根据触发电路的要求,超级电容器的正常工作电压为 24 V ,最低安全工作电压为 10 V 。为了替代 24 V 锂电池,采用14个 $2.7 \text{ V}/10 \text{ F}$ 的单体电容串联成一组超级电容器。故超级电容器的等效电压、等效内阻和等效电容分别为 $U_1 = 37.8 \text{ V}$, $R_1 = 364 \text{ m}\Omega$, $C_1 = 0.71 \text{ F}$ 。

超级电容器的充电时间可以通过检测电压值的方式近似确定。充电过程中,超级电容器内阻会消耗部分能量,因此一般选择内阻较小的超级电容器。充电电流 I 与充电时间 t 的关系式为:

$$Q = It = SC\Delta u = C(U - U_0 - IR_{\text{ESR}}) \quad (3)$$

则充电时间为:

$$t = SC \frac{\Delta u}{I} = SC \left(\frac{U - U_0 - IR_{\text{ESR}}}{I} \right) \quad (4)$$

式中: C 为电容储能, U_0 为初始电压, U 为终止电压, R_{ESR} 为等效串联电阻, S 为充电时间的修正系数。

根据选型,一组超级电容器容量 $C = 0.71 \text{ F}$,充电终止电压 $U = 24 \text{ V}$,初始电压 $U_0 = 10 \text{ V}$ 。假设充电电流 $I = 0.5 \text{ A}$,修正系数 $S = 1.6$,则充电时间: $t = SC \frac{\Delta u}{I} = 1.6 \times \frac{0.71 \times (24 - 10 - 0.026 \times 14 \times 0.5)}{0.5} = 32 \text{ s}$ 超级电容器

两端电压 $u(t)$ 和放电电流 $I(t)$ 的关系为:

$$It = C\Delta u - ICR \quad (5)$$

则超级电容放电时间为:

$$t = C \frac{\Delta u}{I} - CR \quad (6)$$

如果以 0.02 A 的负载电流维持系统正常工作,根据选择的超级电容器,其内阻 $R = 0.364 \Omega$,初始电压 $U_0 = 24 \text{ V}$,终止电压 $U_{\text{末}} = 10 \text{ V}$, $\Delta u = U_0 - U_{\text{末}}$ 则一组超级电容的放电时间:

$$t = C \left(\frac{\Delta u}{I} - R \right) = 0.71 \times \left(\frac{14}{0.02} - 0.346 \right) =$$

$496 \text{ s} = 8.2 \text{ min}$

3 超级电容器的充电装置设计

超级电容器充电装置如图 2 所示,220 V 交流电通过开关电源转换为 24 V 直流电,为超级电容器提供电源,24 V 直流继电器控制充电电路是否对超级电容器进行快速充电。本系统充电电路采用恒流恒压方式对超级电容器充电,弥补了恒流充电时充电初期电流过大和恒压充电后期大电流会导致电池温升过高,容易损坏电容器的缺点。在电压较小时,设定充电电流和最大充电电压,以恒流方式充电。当电压逐渐上升至设定的充电电压时,以恒压方式充电。此时充电电流逐渐降低,当充电电流降至很小的值时,充电结束^[13-15]。

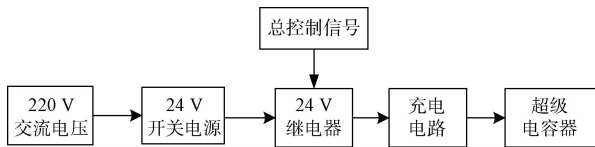


图 2 超级电容器充电装置原理

3.1 超级电容器充电

根据式(4)可以分别计算 1~5 组超级电容器的充电时间。1 组超级电容器的容量 $C = 0.71 \text{ F}$, 充电电流 $I = 0.45 \text{ A}$, 初始电压 $U_0 = 10 \text{ V}$, 充电终止 $U_{\text{末}} = 24 \text{ V}$, 忽略内阻影响则充电时间为:

$$t = SC \frac{\Delta u}{I} = 1.6 \times \frac{0.71 \times (24 - 10)}{0.45} = 35 \text{ s}$$

同理计算可得,2~5 组超级电容器的充电时间分别为 $t = 71, 106, 141, 171 \text{ s}$ 。利用 Visio 画出超级电容器理论充电曲线,如图 3 所示。

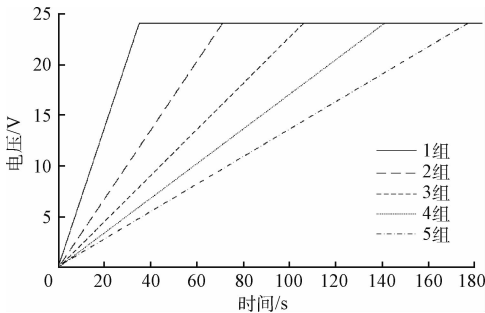


图 3 超级电容器充电理论曲线

为了测试不同容量电容器对触发电路的影响,本系统采用五组超级电容器作为触发电路的供电电源。分别对 1~5 组 2.7 V/10 F 超级电容器单体组成的电容组进行充电时间进行对比。记录每组超级电容器充电时间,将实验数据用 MATLAB 拟合其充电曲线,得到充电时间曲线,如图 4 所示。

由充电曲线可以看出,随着电容器组数的增加,曲线斜率逐渐减小,斜率表示充电速率,即超级电容器的容量

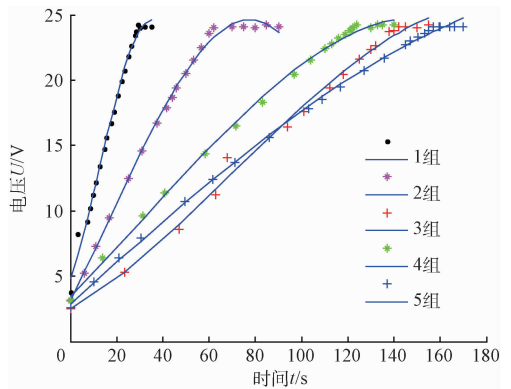


图 4 超级电容器充电时间曲线图

越大,斜率越小,充电时间越长。5 组超级电容器的充电时间最长不超过 3 min。实验数据曲线与理论计算结果基本相符,超级电容器的充电时间与锂电池相比有明显的优势。

3.2 超级电容器放电实验

根据式(6)可以分别计算 1~5 组超级电容器的充电时间。放电时通过万用表测得放电电流为 0.07 A , 初始电压 $U_0 = 24 \text{ V}$, 终止电压 $U_{\text{末}} = 10 \text{ V}$, 则放电时间:

$$t = C \left(\frac{\Delta u}{I} - R \right) = 0.71 \times \left(\frac{24 - 10}{0.07} - 0.364 \right) = 142 \text{ s} = 2.4 \text{ min}$$

同理可以计算出 2 组、3 组、4 组、5 组超级电容器的放电时间分别为 4.8、7.2、9.6、12 min。

将触发装置搭建完成后,由控制器发出触发指令,超级电容器充电结束后开始对晶闸管强触发电路供电,超级电容开始放电。实验测得触发电路发出的触发脉冲,如图 5 所示。

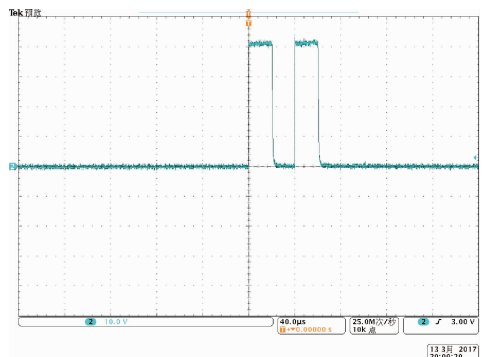


图 5 晶闸管触发脉冲

由图 5 可看出,触发脉冲的上升时间小于 500 ns ; 触发信号的脉冲宽度为 $20 \mu\text{s}$, 触发电压的幅值为 40 V , 基本满足触发脉冲的要求。通过实验发现,当超级电容器电压降到 7 V 以下时,触发电路的电源供压不足,晶闸管将无法正常工作。

在进行晶闸管触发实验的过程中记录每组超级电容器放电时间,将得到的实验数据用 MATLAB 拟合其放电曲线,如图 6 所示。

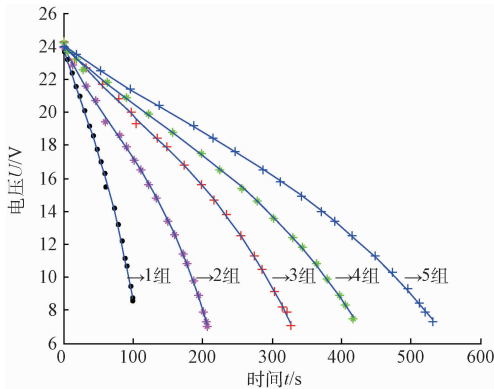


图 6 超级电容器放电曲线

由图 6 可以看出,随着电容器组数的增加,曲线斜率逐渐减小,斜率表示放电速率,即超级电容器的容量越大,斜率越小,放电时间越长。每组电容器放电曲线的斜率随放电时间的增加而变大,即放电速度变大。在触发电路输入端串联一个电流表,发现在实验过程中随着超级电容器放电的进行,放电电流有增长趋势,负载功耗变大,放电速度加快。

4 结 论

超级电容器组充电速度快,相比于锂电池有明显的优势。本文采用超级电容器代替锂电池作为脉冲功率源晶闸管触发装置的供电电源,并进行实验调试。实验结果表明随着容量的增加,充电速率和放电速率均会下降。在放电过程中,负载功耗会逐渐变大,放电电流变大,加快了放电速度。在本实验中考虑到触发对供电时间的要求,建议采用 5 组超级电容器作为实际触发电路的供电电源,触发结果表明五组超级电容器作为触发供电电源工作稳定可靠,可以成功触发晶闸管。

参考文献

[1] 张博,杨新华,鲁志军,等. 超级电容器充放电特性测试装置的研制. 自动化技术与应用, 2016, 35(3): 92-93.

- [2] SATOU D, HOSHI N, HARUNA J. Characteristics of cell voltage equalization circuit using LC series circuit in charging and discharging states [C]. Industrial Electronics Society, IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE, 2013: 514-519.
- [3] IWASAWA K, INOUE T, KOIZUMI H. A novel voltage equalizer using series/parallel switching capacitors [C]. IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET), 2010: 1-6.
- [4] 田虬,孙宜. 一种超级电容器充放电测试方法的研究. 现代电子技术, 2014, 16(67): 160-162.
- [5] 王恩峰. 超级电容器储能系统的充放电研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2015: 1-6.
- [6] 张超,董健年,张军. 脉冲功率源用高耦合度储能电感研究[J]. 电子测量技术, 2016, 39(10): 21-25.
- [7] 郭帆,何小平,王海洋,等. 晶闸管触发开通特性[J]. 强激光与粒子束, 2012, 10(24): 2483-2485.
- [8] 徐建霖,王晨,甄洪斌,等. 串联晶闸管光纤隔离触发系统设计与试验[J]. 船电技术, 2016, 12(36): 10-12.
- [9] 宁志毫,罗隆福,张杰,等. 一种用于中高压静止无功补偿的晶闸管光纤触发改进电路及其设计[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(6): 31-32.
- [10] 郭帆,王海洋,何小平,等. 晶闸管强触发电路设计[J]. 核电子学与探测技术, 2012(6): 698-700.
- [11] 刘大同,周建宝,郭力萌. 锂离子电池健康评估和寿命预测综述[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(1): 1-11.
- [12] 刘树林,马一博,刘健. 基于超级电容器储能的配电自动化终端直流电源设计及应用[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 176-178.
- [13] 吴莹. 脉冲功率源晶闸管触发装置设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2016: 1-10.
- [14] 温镇,胡仁杰,蒋玮. 独立光伏系统中超级电容器充电电路设计[J]. 电工电气, 2011(1): 9-12.
- [15] 敖振浪,刘艳中,敖进华. 自动气象站多功能电源的设计[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(2): 18-22.

作者简介

江凤娟, 硕士研究生, 主要研究方向为仪器与测试技术。

E-mail: 1165511036@qq.com