

文章编号:1671-251X(2017)03-0081-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2017.03.019

董招辉,孙焱鹏,黄嘉琪,等.一种用于高压大电流脉冲放电的晶闸管间接强触发电路[J].工矿自动化,2017,43(3):81-85.

一种用于高压大电流脉冲放电的 晶闸管间接强触发电路

董招辉¹, 孙焱鹏², 黄嘉琪¹, 陈文光¹

(1.南华大学 电气工程学院,湖南 衡阳 421001; 2.杨村第一中学 物理组,天津 301700)

摘要:高压大电流放电技术普遍采用晶闸管串联作为电路放电的主开关,放电时如果晶闸管的导通过程较慢,则会导致芯片内部产生大量焦耳热,使晶闸管损坏;同时晶闸管在串联模式下,导通时间不一致也会导致导通较慢的晶闸管受到高电压而被击穿。针对该种复杂苛刻的工况,提出了一种可以用于高压大电流脉冲放电的晶闸管间接强触发电路,该电路利用间接光触发方式,在触发回路中,串联的晶闸管触发信号由同一个控制信号通过光纤进行控制,经过光电转换后产生强触发脉冲电流,使晶闸管同步快速可靠导通。实验结果表明,该电路可实现串联晶闸管可靠触发,晶闸管触发脉宽时间可调,放电电压为9 kV,放电电流高达32 kA,满足脉冲放电电源模块的应用要求。

关键词:岩石破碎;晶闸管串联;高压大电流脉冲源;强触发;间接光触发

中图分类号:TD608

文献标志码:A

网络出版时间:2017-02-28 17:14

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20170301.1515.019.html>

An indirect strong trigger circuit of thyristor for high voltage and large current pulse discharge

DONG Zhaohui¹, SUN Zhanpeng², HUANG Jiaqi¹, CHEN Wenguang¹

(1.School of Electrical Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China;

2.Physics Group, The First Middle School of Yangcun, Tianjin 301700, China)

Abstract:In application of high voltage and large current discharge, thyristor series is widely used as main switch of discharge circuit. If the thyristor conducts slowly, a large number of Joule heat will be produced in chip which leads the thyristor damaged. When thyristors are working in series mode, if the conduction time of thyristors are not consistent, the slower conduction thyristor will be subject to high voltage and breakdown, so the thyristor series must be triggered fast and synchronously. For the above problems, an indirect and strong trigger circuit of thyristor for high voltage and large current pulse discharge was proposed. The circuit uses indirect light trigger method, and in the trigger circuit, trigger signals of thyristor series are controlled by the same control signal through the optical fiber, strong trigger pulse current is produced after photoelectric conversion, so as to realize fast and reliable conduction and synchronization for thyristors. The experimental results show that the circuit can realize reliable trigger of thyristor series, trigger pulse width time is adjustable, and discharge voltage is 9 kV and discharge current is up to 32 kA, which meets application requirement of pulse discharge power supply module.

收稿日期:2016-08-17;修回日期:2016-11-22;责任编辑:张强。

基金项目:湖南省科技厅创新引导项目(2015GK3124)。

作者简介:董招辉(1980—),女,湖南衡阳人,讲师,硕士,现主要从事电路与系统方面的研究工作,E-mail:13988405@qq.com。通信作者:陈文光(1968—),男,湖南茶陵人,教授,博士,长期从事电力电子、特种电源技术等方面的研究工作,E-mail:chenwg@swip.ac.cn。

Key words: rock breakage; thyristor series; high voltage and large current pulse source; strong trigger; indirect light trigger

0 引言

在脉冲功率技术领域中,晶闸管电压等级和电流容量是目前大功率半导体器件中最高的,而且工作可靠,可用于重复频率工作状态,因此,晶闸管成为高压脉冲大电流放电领域的主要开关器件。脉冲功率系统中,晶闸管开关器件工作在高电压(十几千伏)、大电流(几万安培~100 kA)条件下,单个晶闸管已经不能满足使用要求,必须采用多个晶闸管串并联方式作为脉冲电源主开关^[1]。

晶闸管在较高电压、大电流放电条件下应用,如果晶闸管的导通过程较慢,则会导致芯片内部产生大量焦耳热,使晶闸管极易损坏,严重时可能会发生爆炸,对设备及人身安全产生严重威胁。同时,在串联模式下,导通时间不一致也会导致导通较慢的晶闸管受到高电压而被击穿,所以,必须确保串联工作模式下晶闸管安全快速同步导通。晶闸管导通过程受触发电路直接影响,要保证大功率晶闸管在脉冲放电条件下能够稳定可靠运行,必须展开触发电路对晶闸管导通特性影响的研究^[2-3]。

目前,晶闸管触发方式有电磁触发、直接光触发和间接光触发3种。

电磁触发方式成本低、技术比较成熟,但这种触发方式既要解决多路脉冲变压器输出的一致性问题,同时还要兼顾触发时电磁干扰的问题,尤其是在脉冲大电流条件下电磁干扰特性更为突出^[4]。参考文献^[5]中所提出的触发电路可产生脉宽为30 μs 、脉冲前沿小于3 μs 的脉冲波形。而在高压脉冲放电应用中,由于存在几十微秒的放电延迟,脉冲宽度一般需要大于150 μs ,才能保证晶闸管有足够的时间开通。

直接光触发方式只能应用于光控晶闸管,光控晶闸管成本较高,不适宜采用。

间接光触发方式在晶闸管串联使用时,触发信号都是通过光纤传输,各触发板之间通过光纤相互隔离,不会受到电磁干扰,可以保证触发波形的强度、陡度一致性,并且该触发方式可以应用于普通晶闸管,大大降低了应用成本,尤其适用于高电压大电流放电应用场合。在大电流脉冲源的应用中,高压绝缘和电磁兼容问题非常突出,采用间接光触发方式进行大电流脉冲源的触发放电,能够有效避免晶

闸管开关出现干扰误触发现象^[6-9]。参考文献^[8]设计了一种晶闸管间接光触发电路,使用场效应管设计高位门极驱动电路,低位使用光纤信号控制,每个驱动触发模块使用高位取电供电方式,输出的驱动波形是一个零输入的阶跃响应,尾部的驱动电压或者电流低于晶闸管的触发电压或电流,是一个潜在的风险。

针对以上问题,本文针对一种应用于岩石破碎的晶闸管串联工作模式,使用场效应管、高屏蔽性脉冲变压器设计了一种强触发电路,该电路使用了间接光触发方式,在驱动触发的整个过程中满足晶闸管的触发电流或电压的最小幅度要求。通过实验测试其导通快速性及一致性,满足大电流脉冲放电模块的应用要求。

1 大电流脉冲源主电路分析

高压大电流脉冲源模块电路如图1所示。大电流源模块主电路主要由脉冲电容器C、3个串联的大功率晶闸管组合开关SCR、高压硅堆D和脉冲成形电感器L组成,其中R表示整个线路中的阻抗。

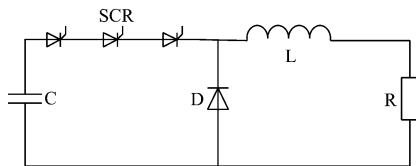


图1 高压大电流脉冲源模块电路

大电流脉冲源模块工作原理:脉冲电容器C充电完毕后等待放电,当触发晶闸管开关SCR导通时,放电回路接通,脉冲电容器C通过脉冲成形电感器L向负载R放电^[10]。由于电容工作电压为9 kV,单个晶闸管耐压不能满足要求,所以选取3个晶闸管串联使用,同时要保证三级晶闸管串联同时导通,保证触发信号的同步性。

针对脉冲源中晶闸管串联使用时出现的信号干扰及同步性问题^[11-14],设计了一种改进的间接光触发方式,其回路结构如图2所示。此方式既吸取了光触发方式抗干扰的优点,又解决了传统电触发方式中信号同步性的问题。在此触发回路中,串联的各晶闸管的触发信号都由同一个控制信号通过光纤进行控制。经过光电转换后,产生强触发脉冲电流,使晶闸管同步、快速、可靠导通。

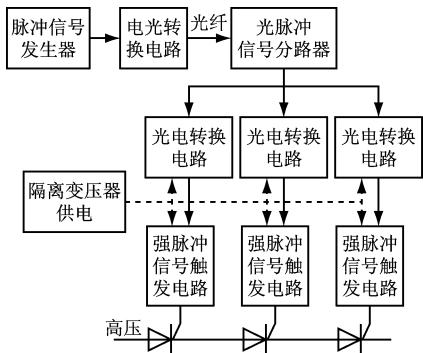


图 2 间接光触发电路结构

2 晶闸管强触发电路设计

在高压大电流放电应用中,由于晶闸管门极参数的分散性及其触发电压、电流随温度变化的特性,串联晶闸管可能会出现导通不一致现象,导致导通较慢的晶闸管承受电容高电压而被击穿。为使各合格元件在各种条件下均能可靠触发,触发电流、电压必须大于门极触发电流 I_{GT} 和触发电压 U_{GT} ,即脉冲信号触发功率必须保证在各种工作条件下都能使晶闸管可靠导通。根据参考文献[5],触发电路采用图 3 所示的强触发方式。强触发电流幅度 i_{bm} 为触发电流值 I_{GT} 的 5 倍左右,强触发电流幅度前沿陡度大于 $1\text{ A}/\mu\text{s}$ ($0\sim t_1$ 段);强触发宽度对应时间 t_2 应大于 $50\text{ }\mu\text{s}$,整个脉冲宽度不小于 $150\text{ }\mu\text{s}$ 。

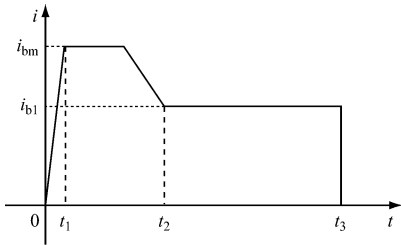


图 3 强脉冲触发信号波形

根据以上要求设计了晶闸管强触发电路,如图 4 所示。市电经过隔离降压变压器 T_1 降为 21 V 交流电,然后经全桥整流器 KBL608 整流后得到 $+27\text{ V}$ 的直流电储存在电容 C_1 和 C_2 上,此时光接收模块 HFBR2521 接收到光脉冲信号后,输出一个低电平脉冲信号,此时光耦 6N137 截止, $+5\text{ V}$ 电源通过串联电阻 R_2 和 R_3 后导通 Q_1 开关管 IRF540N。电解电容 C_2 通过回路 $C_2-Q_1-T_2-C_2$ 放电,在隔离脉冲变压器 T_2 原边产生一个脉宽可调、幅值约为 27 V 的低压脉冲,低压脉冲经过隔离变压器 T_2 在副边产生一个脉冲宽度可调的强触发电脉冲。电路中 R_2 是限流电阻,限制流向光耦 6N137 的电流; R_3 是场效应管栅极限流电阻,限制

开关管 Q_1 的触发电流,防止过大的电流烧坏开关管; D_1 为整流二极管,用于吸收触发脉冲中的反向电压,优化波形; D_2 为整流二极管,用于防止门极电流倒流。器件在较高的 di/dt 下,特别是在晶闸管的阻断电压很高的情况下,开通过程中门极-阴极间横向电阻所产生的电压可能会超过门极电压,甚至使门极电流倒流,烧坏晶闸管。脉冲变压器 T_3 使用外壳具有高屏蔽能力和抗干扰能力的脉冲变压器。

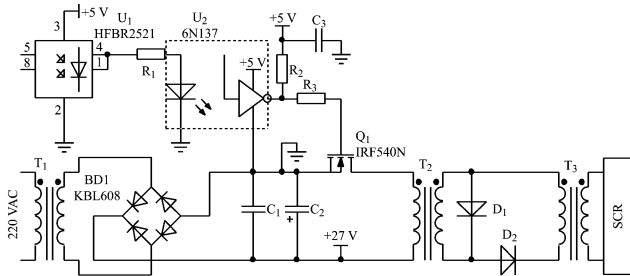
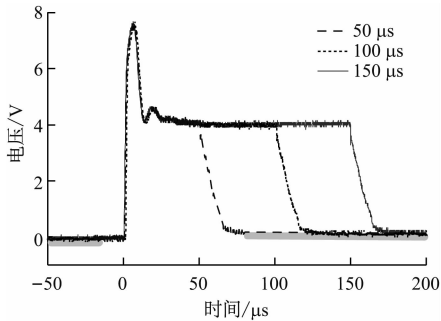


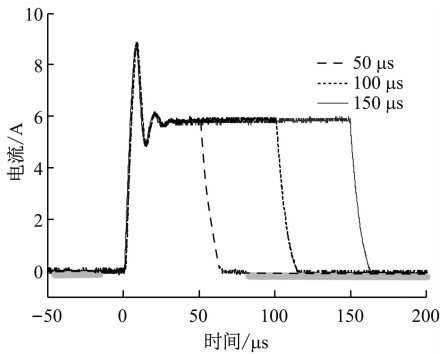
图 4 晶闸管强触发电路

3 实验研究

实验用的高压脉冲大电流电源采用 MKPC120-65 型的普通晶闸管,其断态电压高达 $6\text{ }500\text{ V}$,最大脉冲电流可达 120 kA 。晶闸管门极触发电压与电流波形如图 5 所示。



(a) 触发电压



(b) 触发电流

图 5 带载时不同脉宽下的晶闸管门极触发电压与电流波形

从图 5 可以看出,随着 MOS 开关管触发脉宽

的增大,触发电压和触发电流的脉宽也增大,能够实现不同类型的晶闸管对驱动板触发脉宽的要求,从而保证不同需求晶闸管的可靠导通。在不同的触发脉宽下,触发电压和触发电流的幅值很稳定,触发电压的幅值在 7.8 V 左右,触发电流的幅值大约是 9 A,电流的上升率在 5.7 A/ μ s 左右,实现了对大功率晶闸管的强触发。

触发电压和触发电流的波形出现了小幅振荡,主要是因为受晶闸管寄生电容和脉冲变压器分布电容的影响。电容工作电压为 600 V 时,串联晶闸管 SRC1—SRC3 同步触发电压波形如图 6 所示,导通及静态电压偏离误差低于 0.5%。从图 6 可看出,串联的 3 个晶闸管同步可靠触发,这就保障了在进行高压大电流实验时串联晶闸管同步导通,避免了因晶闸管导通不一致而损坏器件。

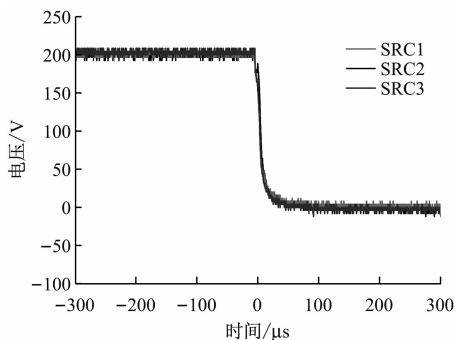


图6 晶闸管同步触发电压波形

工作电压为 9 kV 时,大电流脉冲源模块放电电流波形如图 7 所示,放电电流高达 32 kA,大电流脉冲源放电正常。

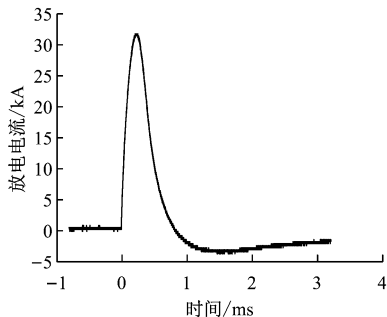


图7 工作电压为 9 kV 时,大电流脉冲源模块放电电流波形

该触发电路采用光纤传输触发信号,将充电系统的控制电路与空气开关的触发系统从物理上隔开。在进行高压大电流实验时,晶闸管不会因受到充电系统的电磁干扰影响而产生误触发现象,保证串联晶闸管开关的可靠快速同步触发^[15]。同时,操作人员与高压试验设备完全物理隔离,保证了人身安全。

4 结语

研究分析了用于岩石破碎的高压大电流脉冲应用模式下的晶闸管触发电路,通过设计的间接光强触发电路使得串联晶闸管能够同步快速触发导通。在整个触发阶段中,强触发电流幅度为一般触发电流值 I_{GT} 的 5 倍,强触发电流幅度前沿陡度达到 5.7 A/ μ s,强触发宽度大于 50 μ s,整个脉冲宽度不小于 150 μ s。触发电流或电压满足晶闸管触发的要求,晶闸管两端的电压及输出电流幅度平稳,波形无毛刺。

使用 600 V 电压对 3 个晶闸管组件的静态均压性能进行了测试,电压偏离误差低于 0.5%,电流上升时间约为 20 μ s,达到了同步、快速放电的要求。在实验平台上使用 9 kV 工作电压对电路进行了进一步测试,放电电流高达 32 kA,满足脉冲放电电源模块的应用要求。下一步将利用该电路产生电脉冲源进行岩石破碎有关力学响应实验研究。

参考文献:

- [1] 郑建毅,何闻. 脉冲功率技术的研究现状和发展趋势综述[J]. 机电工程, 2008,25(4):1-4.
- [2] ATTAR M A, HERFAMANESH M R, ZHAO H, et al. Experimental investigation of direct injection charge cooling in optical GDI engine using tracer-based PLIF technique[J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2014,59(9):96-108.
- [3] 岑正君,程汉湘,余韦彤,等. 晶闸管触发的可靠性及其在磁控电抗器中应用研究[J]. 电测与仪表, 2014, 51(20):53-57.
- [4] 江智军,赵江球,伍怡兴. 一种改进的晶闸管触发电路研究[J]. 通信电源技术, 2009,26(4):14-16.
- [5] 黄垂兵,潘启军,马名中,等. 一种大功率晶闸管触发电路设计[J]. 海军工程大学学报, 2014(2):15-19.
- [6] SPAHN E, BUDERER G, WENNING W. A compact pulse forming network based on semiconducting switches for electric gun applications [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1999,35(1): 378-382.
- [7] RENZ G, HOLZSCHUH F, ZEYFANG E. PFNs switched with stacked SCRs at 20 kV, 500 J, and 100 Hz REP-rate [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1997,7(1):390-395.
- [8] 薄鲁海. 晶闸管在脉冲功率电源中的应用研究 [D]. 武汉:华中科技大学, 2009.

[9] 鲁万新. 脉冲晶闸管的放电特性及热特性研究[D]. 武汉:华中科技大学,2011.

[10] 温家良,傅鹏,刘正之,等. 大功率直流晶闸管开关设计及其可靠性分析 [J]. 电力系统自动化,2006,30(5):55-58.

[11] 林渭勋. 现代电力电子技术 [M]. 北京:机械工业出版社,2006.

[12] 高强,胡安,何娜,等. 兆瓦级脉冲供电用间歇整流装置技术研究(一):新型晶闸管触发策略设计[J]. 中国电机工程学报,2013,33(30):58-64.

[13] 杨兰均,李晨辉,黄东,等. 串联晶闸管的同步触发技术研究[J]. 高电压技术,2016,42(10):3274-3279.

[14] 王磊,章程,高迎慧,等. 晶闸管串联开关及同步触发系统研制[J]. 强激光与粒子束,2015,27(11):221-226.

[15] 王胜林,李斌,吴鹏. 半导体器件失效分析研究[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版),2006,34(增刊2):36-37.