

固态切换开关触发控制单元的研究

付旭辉¹,方春恩¹,薛涛¹,黄雷超¹,陈军平²

(1.西华大学 电气与电子信息学院,四川 成都 610039;

2.成都旭光电子股份有限公司,四川 成都 610500)

摘要:为了保证固态切换开关在切换过程中晶闸管阀能准确无误地导通,设计了一种固态切换开关触发控制单元。首先,介绍了固态切换开关结构组成及工作原理和该触发控制单元结构组成及功能。其次,对该触发控制单元的核心模块逻辑回路的功能及工作时序做出了详细的阐述,介绍了触发控制单元重要模块电压检测回路的工作原理,提出了一种过电压保护电路,该过电压保护电路比传统的过电压保护电路更稳定和简单。最后,搭建了仿真模型和实验平台验证该触发控制单元的触发功能,仿真和实验结果都表明该触发控制单元的可靠性和正确性。

关键词:固态切换开关;触发控制单元;逻辑回路;过电压保护;电压检测

中图分类号: TN344 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd22360

Research on Trigger Control Unit of Solid State Transfer Switch

FU Xuhui¹, FANG Chun'en¹, XUE Tao¹, HUANG Leichao¹, CHEN Junping²

(1.School of Electrical Engineering and Electronic Information, Xihua University, Chengdu 610039, Sichuan, China; 2.Chengdu Xuguang Electronics Co., Ltd., Chengdu 610500, Sichuan, China)

Abstract: In order to ensure that the thyristor valve body can be accurately conducted during the solid state switch switching, a solid state switch trigger control unit was designed. Firstly, the structure and working principle of the solid state switch and the structure and function of the trigger control unit were introduced. Secondly, the function and working sequence of the core module logic loop of the trigger control unit were described in detail, the working principle of the important module voltage detection loop of the trigger control unit was introduced. A overvoltage protection circuit was proposed, which is more stable and simple than the traditional overvoltage protection circuit. Finally, the simulation model and experimental platform were built to verify the trigger function of the trigger control unit. The simulation and experimental results show the reliability and correctness of the trigger control unit.

Key words: solid state transfer switch (SSTS); trigger control unit (TCU); logic loop; overvoltage protection; voltage detection

随着中国经济和科技的不断发展与进步,大量非线性和冲击性负荷负载不断增加,电能质量问题日趋严重,电压暂降和短时断电成为最主要的问题^[1-3]。尤其医疗和IT行业等敏感负荷对电能质量要求极高,电压暂降或短时断电都可能造成巨大的经济损失,目前固态切换开关(solid state transfer switch, SSTS)^[4-5]是解决电压暂降和短时断电等电能质量问题最有效的手段之一。

SSTS切换时触发晶闸管阀体是一个核心问题。目前晶闸管触发主要以光电触发为主^[6-11]。文献[8]介绍了一种五脉冲晶闸管阀光电触发电子板,详细介绍了晶闸管光电触发电子板的结构和功能,但只是仿真验证其设计电路功能。文献[9]介绍了一种三脉冲晶闸管阀光电触发电子板,其逻辑回路采用传统逻辑模块实现,未考虑晶闸管在恢复阶段的过电压保护。文献[10]介绍两种不

基金项目:国家自然科学基金(51477142);四川省科技厅应用基础研究项目(2017JY0204);

先进输电技术国家重点实验室开放基金(GEIRI-SKL-2018-004)

作者简介:付旭辉(1996—),男,硕士研究生,Email:xuhuiFuww@163.com

同的晶闸管触发控制单元,分析了两种触发控制单元的功能及电路差异,但未给出具体实现过程。文献[11]提到了一种SSTS触发控制单元,该文献只是简单地介绍SSTS触发控制单元的组成结构,并未给出具体的电路及触发实现。

为此,本文设计了一种新的固态切换开关触发控制单元(trigger control unit,TCU),该触发控制单元能很好地触发固态切换开关晶闸管阀体。首先介绍触发控制单元结构组成,其次介绍触发控制单元中重要模块逻辑回路、过电压保护电路、电压检测回路的原理功能,最后通过仿真和实验验证触发控制单元的功能,仿真和实验都证明该触发控制单元的可靠性和正确性。

1 固态切换开关结构原理

1.1 固态切换开关结构

图1为固态切换开关结构原理图,其主要由主电源、后备电源、晶闸管阀和动静态均压电阻电容构成。图中,PS₁和PS₂为快速机械开关,TH₁和TH₂为反并联的晶闸管阀,R_{p1}和R_{p2}分别为TH₁和TH₂的晶闸管的静态均压电阻,C_{s1}及R_{s1}为TH₁的动态均压电容和电阻,C_{s2}及R_{s2}为TH₂的动态均压电容和电阻。

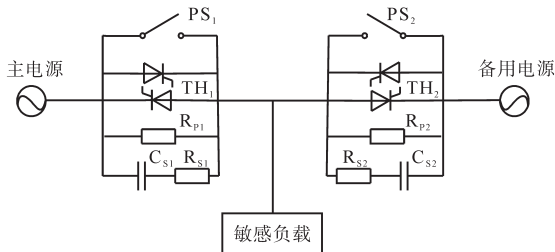


图1 固态切换开关原理图

Fig.1 Schematic diagram of solid transfer state switch

1.2 固态切换开关工作原理

当系统正常运行时,主电源通过机械开关PS₁向负载供电,此时PS₁处于闭合状态,PS₂处于断开状态,晶闸管阀TH₁和TH₂均处于关断状态。当检测到主电源故障时,PS₁断开同时触发晶闸管阀TH₁,PS₁断开产生的电弧电压因晶闸管阀的导通而熄灭,电流转移到晶闸管支路同时撤销触发命令,晶闸管阀因电流自然过零而关断。然后再触发晶闸管阀TH₂,TH₂导通后闭合机械开关PS₂,TH₂导通后两端电压压降很小,PS₂闭合也不会产生电弧。此时系统由备用电源供电。反之亦然,当主电源恢复正常后,又从备用电源切换至主电源。

2 固态切换开关触发控制单元

2.1 触发控制单元结构图及功能

图2为固态切换开关触发控制单元的结构原理图。其主要由电源监视模块、电压检测回路、du/dt检测回路、逻辑回路、脉冲放大回路、过电压保护电路、光接收器和光发射器组成。

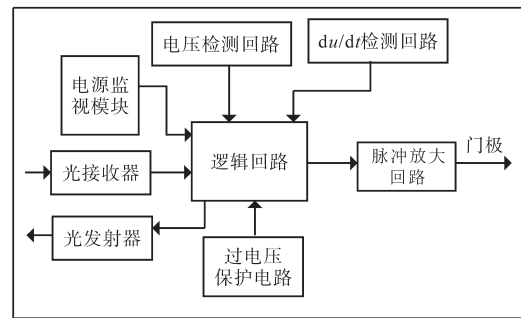


图2 触发控制单元结构原理图

Fig.2 Schematic diagram of trigger control unit structure

固态切换开关触发控制单元主要功能如下:

1)接收来自触发系统的脉冲编码信号,通过光接收器将光信号转变成电信号,最后通过逻辑回路和触发回路生成脉冲触发信号用以触发晶闸管。

2)当正常触发失败后,有后备触发保证晶闸管能再次触发而不会承受过电压烧毁。

3)在不同工作阶段能产生不同的回报信号,通过光发射器发送给控制系统,从而监控晶闸管阀体和触发控制单元是否正常。

2.2 逻辑回路

逻辑回路是触发控制单元的核心部分。逻辑回路采用复杂可编程器件(complex programmable logic device, CPLD)芯片和Verilog硬件描述语言代替传统的逻辑硬件模块,比传统的逻辑硬件模块具有更低的延时和更高的效率。整个触发过程在时序上可以分为四个不同的阶段。逻辑回路触发控制时序如图3所示。

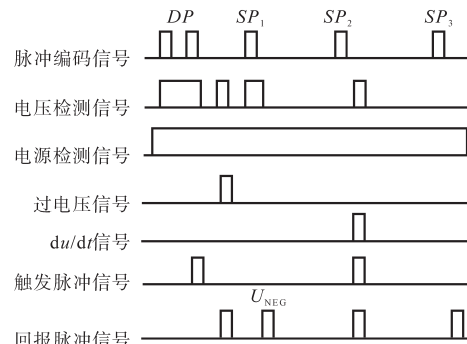


图3 逻辑回路触发控制时序图

Fig.3 Logic circuit trigger control sequence diagram

第一阶段:晶闸管阀触发阶段。当晶闸管电压检测回路检测到晶闸管两端正向电压超过设定的电压动作值,并且能够在50 μs内连续收到触发单元送来的两个单脉冲即双脉冲(double pulses, DP)信号^[12],则晶闸管触发控制单元将产生一个触发脉冲,该触发脉冲经过脉冲放大回路放大用于触发晶闸管导通。如果在晶闸管触发阶段,晶闸管触发控制单元的正常触发通道损坏,触发控制单元不能产生晶闸管触发脉冲时,只要晶闸管两端的正向电压大于过电压保护电路的动作值,则过电压保护电路将动作输出高电平,该高电平电压一方面直接作用于晶闸管门极触发晶闸管导通,防止晶闸管承受过电压损坏,另一方面送到逻辑回路,此时逻辑回路输出一个回报脉冲信号,该回报脉冲信号经过光发射器返回到控制系统,表明过电压保护动作。

第二阶段:晶闸管负电压检测阶段。在触发控制单元收到触发系统送来的第一个单脉冲 SP_1 时进入负向电压检测阶段。当晶闸管两端的电压小于负电压设定值,则触发控制单元将发出一个负电压建立回报脉冲信号 U_{NEG} ,该 U_{NEG} 信号通过光发射器送到控制系统。在控制系统收到回报信号 U_{NEG} 后,控制系统中的晶闸管监测系统(thyristor monitoring, TM)便开始累计信号 U_{NEG} 的个数,当TM计数到一个晶闸管阀内 U_{NEG} 的个数超过设定值时,触发系统发出第二个单脉冲 SP_2 并通过光接收器送到触发控制单元。该单脉冲信号 SP_2 用于结束晶闸管负压检测^[12-13]。

第三阶段:晶闸管 du/dt 检测阶段。在触发控制单元收到触发系统送来的第二个单脉冲 SP_2 信号时进入晶闸管 du/dt 检测阶段。当晶闸管两端的 du/dt 超过设定值时 du/dt 检测回路动作输出一个高电平脉冲送到逻辑回路,逻辑回路发出脉冲触发信号用于触发晶闸管重新导通,同时通过光发射器给控制系统返回一个 du/dt 脉冲回报信号。晶闸管监测系统累计每个阀中晶闸管 du/dt 动作的个数,若超过设定的 du/dt 动作个数,将由晶闸管监测系统启动触发系统产生一个双脉冲DP,经光接收器送到晶闸管触发控制单元后去触发阀中的所有晶闸管导通^[13]。若晶闸管 du/dt 动作的个数小于设定值,TM仅累计阀中 du/dt 的动作数目,触发控制单元不再重新触发整个晶闸管阀导通。

第四阶段:晶闸管状态检测阶段。在触发控

制单元收到触发系统送来第三个单脉冲 SP_3 信号时进入晶闸管状态检测阶段。该阶段将检测晶闸管是否损坏,在第二个单脉冲 SP_2 后,经过固定的延时,触发系统将产生第三个单脉冲 SP_3 ,该单脉冲 SP_3 经光接收器将其转换为电信号,并送到触发控制单元上的逻辑回路分析后,触发控制单元会发出一个回报脉冲信号,该回报脉冲信号经光发射器送回到控制系统。如果控制系统接收不到该回报脉冲信号,则认为是晶闸管发生了故障。

2.3 过电压保护电路

过电压保护电路可以在晶闸管正常触发通道损坏后作为后备触发电路,保证晶闸管在触发阶段能正常导通,以免晶闸管遭受过电压而损坏。传统晶闸管过电压保护采用击穿二极管(break over diode, BOD)进行保护^[14-17],高电压等级的保护需要多个BOD的串联使用,占用体积大,BOD随温度变化,动作值也会变化,影响保护动作值的稳定性。本文设计了一种过电压保护电路,该电路具有结构简单,保护动作值稳定的优点,如图4所示。

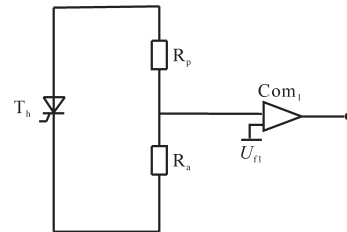


图4 过电压保护电路原理图

Fig.4 Schematic of overvoltage protection circuit

图4中 T_h 为晶闸管,Com₁为电压比较器,过电压保护动作阈值为

$$U_a = U_{ri} \frac{R_a + R_p}{R_a} \quad (1)$$

式中: R_p 为晶闸管静态均压电阻; R_a 为分压电阻; U_{ri} 为电压比较器的基准电压。

由图4可知,晶闸管两端的电压由静态均压电阻 R_p 和电阻 R_a 分压,改变 R_a 的值可以得到不同过电压保护动作值。当 R_a 上的电压高于比较器基准电压 U_{ri} ,比较器输出端将变为高电平。该高电平直接作用于晶闸管门极触发晶闸管导通,同时逻辑回路收到过电压保护的高电平信号,并将发出一个回报脉冲信号,表明过电压保护电路动作。

2.4 电压检测回路

电压检测回路的主要功能是检测晶闸管两

端的电压,当晶闸管两端电压变化,电压检测回路在不同阶段提供电平信号给逻辑回路,逻辑回路输出相应的回报脉冲信号和触发脉冲信号。其中, R_p 为晶闸管静态均压电阻,兼做电压检测回路的分压电阻。电压检测回路分为正向电压检测和负向电压检测两种工作情况。电压检测回路如图5所示。图5中, Q 为逻辑回路输出,正向检测时输出为 0 V ,负向电压检测时为 $+10\text{ V}$ 。

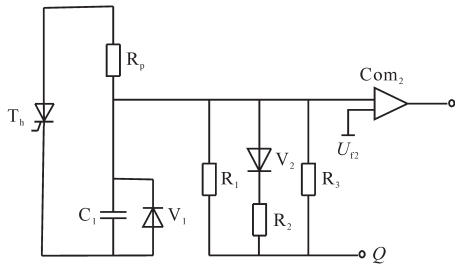


图5 电压检测回路原理图

Fig.5 Schematic diagram of voltage detection circuit

正向电压检测时,电阻 R_1, R_2, R_3 相当于并联,晶闸管两端电压由静态均压电阻 R_p 和 R_1, R_2, R_3 并联后的电阻串联分压。 C_1 电容很小,可忽略不计。 R_1, R_2, R_3 并联后等效电阻为

$$R_4 = \frac{1}{1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3} \quad (2)$$

正向电压检测动作值为

$$U_{a1} = U_{12} \frac{R_4 + R_p}{R_4} \quad (3)$$

式中: U_{12} 为电压比较器基准值。

负向电压检测时,二极管 V_2 承受反向电压而关断, R_2 与检测电路断开,负向电压动作值为

$$U_{a2} = 10 - \frac{U_{12}(R_p + R_1//R_3)}{R_1//R_3} \quad (4)$$

3 仿真分析

3.1 逻辑回路仿真

在 Quartus II 仿真软件中采用 Verilog 硬件描述语言仿真验证逻辑回路的正确性。仿真验证了正常触发、过电压保护动作触发和 du/dt 保护动作触发三种不同时序波形的情况。

仿真结果如图6~图8所示。图6~图8中 rst 为逻辑芯片的复位信号, clk 为时钟信号, $dudt$ 为晶闸管两端电压的变化率, $pulse$ 为脉冲编码信号, u 为电压检测回路的输出, Ubo 为过电压动作信号, $chufa$ 和 $huibao$ 分别为逻辑回路输出的触发脉冲信号和回报脉冲信号。

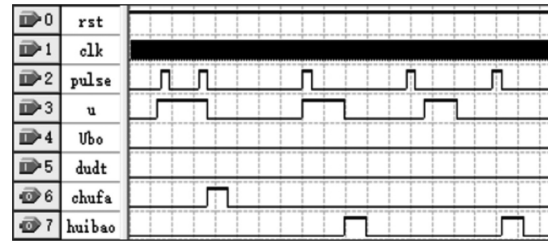


图6 正常触发波形

Fig.6 Waveforms of normal trigger

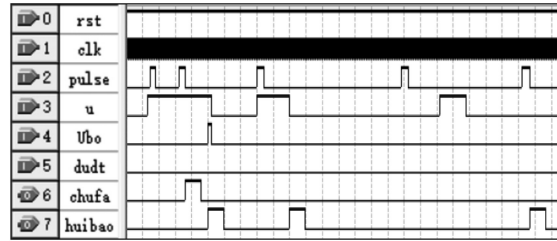


图7 过电压保护动作波形

Fig.7 Waveforms of overvoltage protection action



图8 du/dt 动作波形

Fig.8 Waveforms of du/dt action

由图6可知,逻辑回路接收到触发系统的双脉冲信号就会发出一个触发脉冲信号,该触发信号经脉冲放大电路放大,触发晶闸管导通。图7为正常触发通道损坏,晶闸管两端电压不断增加到达阈值,逻辑回路接收到过电压保护动作信号,发出一个回报脉冲信号。图8为晶闸管恢复阶段, $dudt$ 检测电路动作,晶闸管两端电压变化率超过动作值,逻辑回路发出一个触发脉冲信号用于重新导通晶闸管,并返回一个回报脉冲信号给触发系统。

3.2 过电压保护电路仿真

基于 Saber 仿真软件搭建了过电压保护电路仿真模型。仿真模型与过电压保护原理图一致,静态均压电阻 R_p 为 $100\text{ k}\Omega$,电压比较器基准电压值为 5 V , R_a 为 $112\ \Omega$,仿真结果如图9所示。

由图9可知,在 2.68 ms 左右时晶闸管两端电压超过 $4\ 500\text{ V}$,电压比较器输出高电平,晶闸管门极获得过电压保护电路动作的高电平信号,晶闸管导通,晶闸管两端的电压降为 0 V ,比较器输出变为低电平。

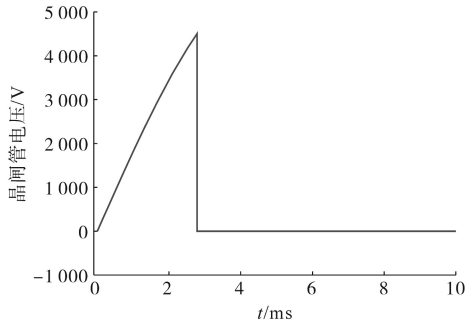


图9 过电压保护仿真波形

Fig.9 Simulation waveform of overvoltage protection

3.3 电压检测回路仿真

基于Saber仿真软件搭建了电压检测回路仿真模型。设置电源电压幅值300 V、频率50 Hz,静态均压电阻 R_p 为100 k Ω ,电阻 R_1 为5 000 Ω , R_2 为8 000 Ω , R_3 为100 k Ω ,电容 C_1 为120 pF,比较器基准电压 U_{12} 为5 V。脉冲电源在10 ms时为+10 V,模拟负压检测阶段,仿真结果如图10所示。

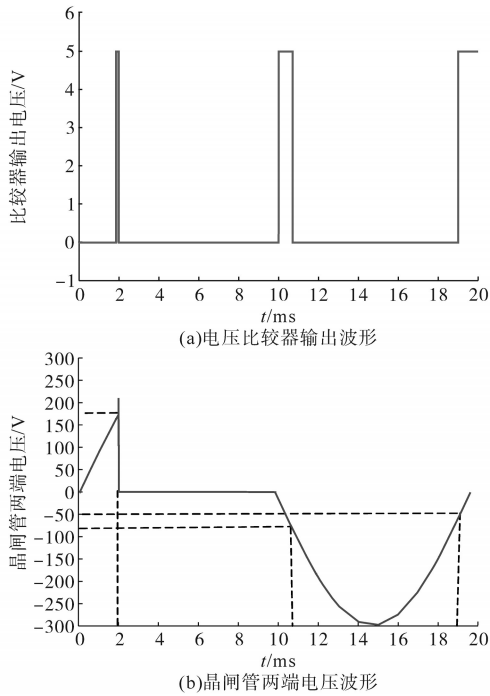


图10 电压检测仿真波形

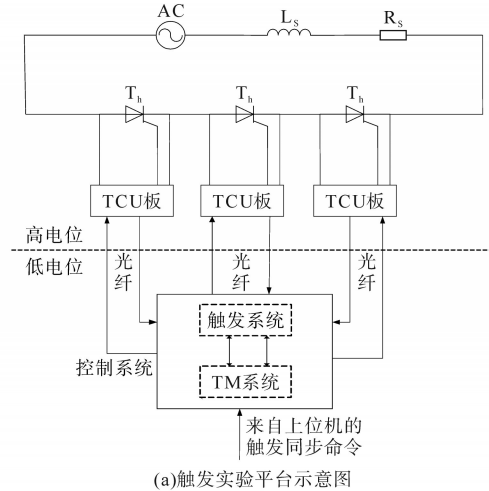
Fig.10 Simulation waveforms of voltage detection

由图10可知,约在1.98 ms时晶闸管两端电压达到170 V左右,电压比较器达到动作值,比较器输出高电平,此时晶闸管门极得到触发脉冲,晶闸管导通,其两端电压降为0 V,比较器输出变为低电平。在10 ms时,电压检测进入负向电压检测阶段,电压比较器输入电压突变为10 V,电压比较器输出高电平。当晶闸管两端电压降低到-80 V左右时,比较器输出由高电平变成低电平。在第三阶段时,当晶闸管两

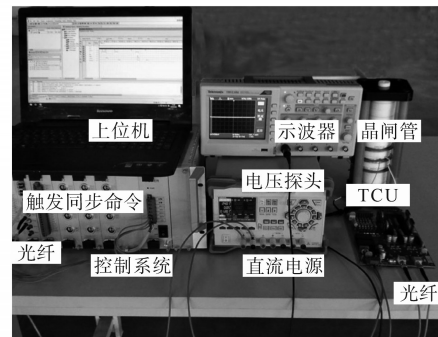
端电压上升到-50 V左右时,比较器又输出高电平。

4 实验验证

为验证所设计固态切换开关触发控制单元的正确性,搭建了触发实验平台,实验采用了中国中车型号为 $KP_x-1300-65$ 的晶闸管,其断态不重复峰值电压 U_{DSM} 为5 600 V,电压比较器型号为LM339,逻辑回路采用Alter公司型号为EPM1270F256I5的芯片,静态均压电阻为100 k Ω ,动态均压电阻和动态均压电容分别为30 Ω 和1 μ F,触发控制单元采用直流电源供电,其余各电路参数与仿真参数一致。触发实验平台如图11所示,限于实验条件,在低压条件完成了正常触发的实验。



(a)触发实验平台示意图



(b)触发实验实物图

图11 触发实验平台

Fig.11 Trigger experiment platform

图12~图14分别为控制系统发出的脉冲编码信号、逻辑回路输出的正常触发脉冲信号及回报脉冲信号。图12为第一阶段双脉冲波形,脉冲宽度为3 μ s,两个脉冲的间隔为30 μ s,满足双脉冲条件能准确触发晶闸管导通。逻辑回路收到双脉冲信号,输出一个脉宽为10 μ s,幅值为3.3 V

的触发信号,如图13所示,触发信号经脉冲放大回路放大,用于晶闸管的门极触发导通。在触发第二阶段和第四阶段都能收到正常的脉冲回报信号,回报信号脉冲宽度也为10 μs,如图14所示。

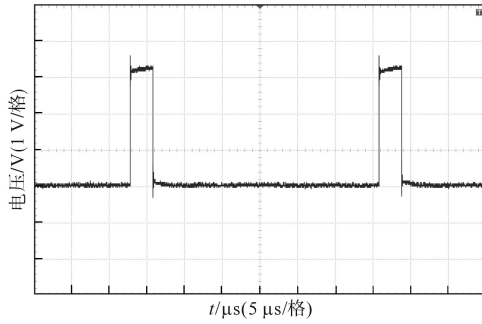


图12 脉冲编码波形

Fig.12 Waveform of pulse coding

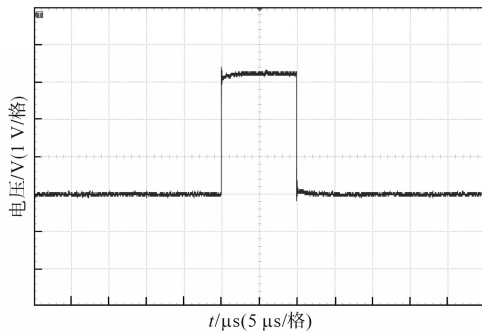


图13 触发信号波形

Fig.13 Waveform of trigger single

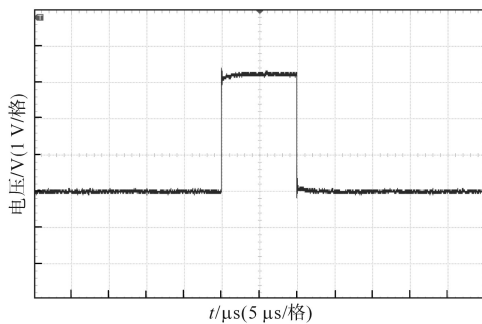


图14 回报信号波形

Fig.14 Waveform of return signal

图15为触发信号经脉冲放大回路放大的晶闸管门极触发脉冲波形,脉冲宽度50 μs左右,脉冲稳态幅值6.2 V,尖端峰值为7.63 V,以确保能准确触发晶闸管开通。图16为晶闸管两端电压波形,在晶闸管两端电压超过电压设定阈值170 V左右时,晶闸管同时收到触发脉冲信号,此时晶闸管导通,电压降至约为0 V左右。

图12~图16实验结果表明该触发控制单元功能的准确性和正确性。

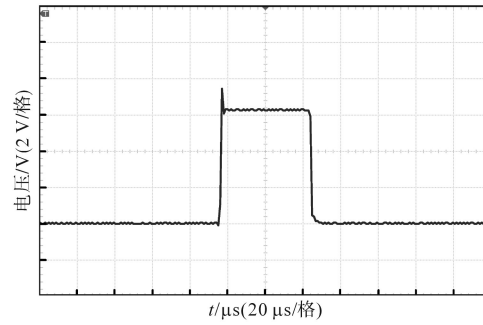


图15 晶闸管门极触发脉冲波形

Fig.15 Waveform of thyristor gate trigger pulse

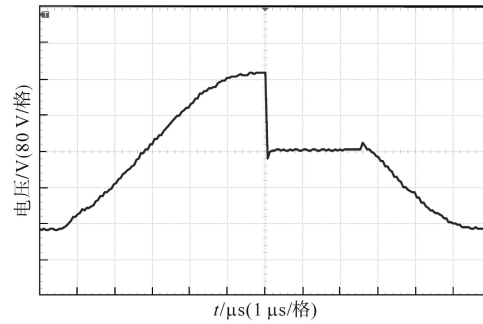


图16 晶闸管电压波形

Fig.16 Waveform of thyristor voltage

5 结论

设计了一种固态切换开关触发控制单元,分析了该触发控制单元的结构组成及工作原理,给出了其核心模块逻辑回路工作时序流程及工作原理,给出过电压保护电路、电压检测回路的工作原理及设计参数,并对该触发控制单元进行仿真和实验验证,仿真和实验结果表明其能很好地触发固态切换开关晶闸管阀体,并能很好地监视固态切换开关阀体中晶闸管和触发控制单元的状态。

参考文献

- [1] 刘颖英,冯丹丹,林才华,等.电能质量综合评估研究现状及发展趋势[J].电力系统保护与控制,2020,48(4):167-176.
Liu Yingying, Feng Dandan, Lin Caihua, et al. Current status and development trend of power quality comprehensive assessment[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 167-176.
- [2] 陈鹏伟,肖湘宁,陶顺.直流微网电能质量问题探讨[J].电力系统自动化,2016,40(10):148-158.
Chen Pengwei, Xiao Xiangning, Tao Shun. Discussion on power quality problems for DC microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(10): 148-158.
- [3] 汪颖,罗带军,肖先勇,等.IEEE ICHQP2018与电能质量

- 发展方向[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(4): 197-203.
- Wang Ying, Luo Daijun, Xiao Xianyong, *et al.* IEEE ICHQP 2018 and development directions of power quality[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4): 197-203.
- [4] 钱江, 王立冬, 郝登朴, 等. 中压固态切换开关装置的研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(9): 120-123, 128.
- Qian Jiang, Wang Lidong, Hao Dengpiao, *et al.* Research on medium-voltage solid state transfer switch[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(9): 120-123, 128.
- [5] Chen H, Dvian D. Design of a 10-kV·A soft-switching solid-state transformer (S4T)[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(7): 5724-5738.
- [6] 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.
- Yang Lanjun, Li Chenhui, Huang Dong, *et al.* Characteristics of the synchronous triggering of the serial thyristors[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3274-3279.
- [7] 周亮, 张蕴馨, 林志光, 等. 交流系统故障下高压直流输电晶闸管触发监测单元储能方式[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(9): 160-164.
- Zhou Liang, Zhang Yunxin, Lin Zhiguang, *et al.* Energy storage method of thyristor triggering and monitoring unit for HVDC transmission system with fault of AC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 160-164.
- [8] 黄舜, 李胜, 徐永海, 等. 静止无功补偿器光电触发与监测系统设计与仿真[J]. 现代电力, 2006, 23(1): 29-33.
- Huang Shun, Li Sheng, Xu Yonghai, *et al.* Designing and emulating a firing and monitoring system of static var compensator[J]. Modern Electric Power, 2006, 23(1): 29-33.
- [9] 刘飞, 卢志良, 刘燕, 等. 用于TCR的晶闸管光电触发与监测系统[J]. 高电压技术, 2007, 33(6): 123-128.
- Liu Fei, Lu Zhiliang, Liu Yan, *et al.* Thyristor photoelectric firing and monitoring system applied to TCR[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(6): 123-128.
- [10] 任小静, 王潇, 刘飞超, 等. 两种特高压直流输电用晶闸管控制单元工作原理分析对比[J]. 高压电器, 2015, 51(7): 74-77.
- Ren Xiaojing, Wang Xiao, Liu Feichao, *et al.* Comparative analysis on operating principles of the two thyristor control unit in UHVDC transmission[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7): 74-77.
- [11] 任西周, 黄杰, 李卫国. 投切电容器用高压固态复合开关的研制[J]. 电力电子技术, 2016, 50(9): 85-88.
- Ren Xizhou, Huang Jie, Li Weiguang. Development of high voltage solid-state hybrid switch for switched capacitor banks[J]. Power Electronics, 2016, 50(9): 85-88.
- [12] 任孟干. 高压阀光电触发与在线监测系统的应用研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2002.
- Ren Menggan. Study on the photoelectric firing and monitoring system for high voltage thyristor valves[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2002.
- [13] 袁青云. HVDC换流阀及其触发与在线监测系统[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- Yuan Qingyun. HVDC converter valve and its trigger and on-line monitoring system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- [14] 孙哲, 李彦斌, 张兆华, 等. 特高压换流站直流分压器二次侧过电压保护[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2601-2608.
- Sun Zhe, Li Yanbin, Zhang Zhaohua, *et al.* Study on surge protection of DC divider secondary side in UHV converter station[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2601-2608.
- [15] Liang H L, Xu Q, Zhu L, *et al.* Design of a gate diode triggered SCR for dual-direction high voltage ESD protection[J]. IEEE Electron Device Letters, 2019, 40(2): 163-166.
- [16] 程志明, 孙辉, 孟子玉, 等. 自取能自触发式晶闸管过压保护电路[J]. 电气传动, 2020, 50(1): 100-102.
- Cheng Zhiming, Sun Hui, Meng Ziyu, *et al.* Self-powered & self-trigger for SCR overvoltage protection circuit[J]. Electric Drive, 2020, 50(1): 100-102.
- [17] 王振, 任孟干, 国建宝, 等. 直流输电换流阀晶闸管过电压保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 182-187.
- Wang Zhen, Ren Menggan, Guo Jianbao, *et al.* Research on overvoltage protection of a thyristor on DC converter valves[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 182-187.

收稿日期:2020-08-28

修改稿日期:2020-09-27