DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.7.321 **中图分类号**：TM86 **文献标志码**：A

一种基于集成运放的有源型晶闸管过压触发电路

李 鑫(中国电源学会会员)，李龙权(中国电源学会学生会员)，姚鹏飞(中国电源学会学生会员)，陈英杰(中国电源学会学生会员)，陈 武(中国电源学会高级会员)
(东南大学电气工程学院，南京 210096)

摘要：转折二极管BOD(breakover diode)因其良好的伏安特性与温度特性，已成为晶闸管过电压保护的常用方案。目前，高压BOD主要由一些外国公司垄断，为解决卡脖子问题，提出1种无BOD的高速过压触发电路，该电路是由运算放大器、无输出变压器OTL(output transformer less)互补对称放大电路等构成的高速信号处理与放大电路，可实现快速过压检测和保护。最后，在实验室搭建了1 200 V晶闸管过压触发电路实验平台，并与BOD触发方案进行对比，充分验证了本方案的准确性、高速性、可靠性。

关键词：晶闸管；过压保护；集成运放；OTL互补对称放大电路

Active Thyristor Overvoltage Triggering Circuit Based on Integrated Operational Amplifier

LI Xin, *Member*, *CPSS*, LI Longquan, *Student Member*, *CPSS*, YAO Pengfei, *Student Member*, *CPSS*, CHEN Yingjie, *Student Member*, *CPSS*, CHEN Wu, *Senior Member*, *CPSS*
(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Breakover diode (BOD) has become a commonly used solution for thyristor overvoltage protection owing to its excellent volt-ampere and temperature characteristics. At present, high-voltage BOD is mainly monopolized by some foreign companies. To solve the bottleneck problem, a high-speed overvoltage triggering circuit without BOD is proposed, which uses a high-speed signal processing and amplification circuit consisting of components such as operational amplifiers and output transformer less (OTL) complementary symmetric amplification circuits to achieve fast overvoltage detection and protection. Finally, an experimental platform of 1 200 V thyristor overvoltage triggering circuit was built in the laboratory. Moreover, a comparison with the BOD triggering scheme fully verified the accuracy, speed and reliability of the proposed scheme.

Keywords: Thyristor; overvoltage protection; integrated operational amplifier; OTL complementary symmetrical amplification circuit

晶闸管自发明以来，因其耐高压且通流能力强的特性，在特高压直流输电工、大型发电机励程磁系统中取得广泛应用[1-2]。晶闸管电路在实际运行中，由于负载突变、短路故障或外部干扰等，会产生瞬时过电压，可能导致晶闸管的永久性损坏[3-4]，而更换晶闸管需要整体系统停机，工程量大、成本高昂，因此有必要对晶闸管设计过压触发电路，该电路需快速检测晶闸管端电压，并且一旦检测过压可自动触发晶闸管导通，从而有效保护晶闸管免受过电压损坏，确保系统的安全运行[5-6]。此外，晶

收稿日期：2024-12-30；**修回日期**：2025-02-28，2025-04-01；
录用日期：2025-04-17；**网络首发日期**：2025-05-19
基金项目：国家电网公司总部科技资助项目(5500-202240497A-3-0-ZZ)
This work is supported by State Grid Corporation of China Headquarters Technology Project under the grant 5500-202240497A-3-0-ZZ

闸管过压触发电路也常用于发电机转子过压保护中。在发电机运行过程中，转子绕组可能因负载突变或励磁系统故障而产生过电压[7-8]，为了避免转子过电压，通常在转子上并联晶闸管和氧化锌电阻，一旦转子端电压超过 50%~70%的转子绝缘电压，就需要触发晶闸管导通，此时氧化锌电阻承受高压而阻值迅速降低，从而迅速将转子电压降至额定范围[9]。

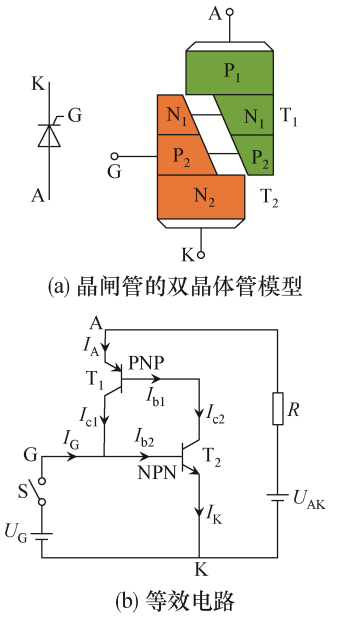
转折二极管 BOD(breakover diode)具有精准快速的转折特性和较好的温度特性，常被用于设计晶闸管过压触发电路[10]。文献[11]描述了 BOD 器件的物理结构及特性，论述了 BOD 在晶闸管过压触发应用中的典型电路设计及参数选取，最后通过晶闸管控制电抗器 TCR(thyristor controlled reactor)工程具体实例，给出实验结果；文献[12]以中国溪洛渡贵广一回、贵广二回等直流输电工程为背景，介绍了换流阀中每个晶闸管内部集成 BOD 电路的工作原理，并分析了单阀中允许最多 BOD 触发晶闸管级数的限定原则，以及单阀中超过允许 BOD 动作数的后果；文献[13]从分析 BOD 器件的原理入手，确立了 BOD 器件的导通条件，列举了 BOD 器件在高压直流 HVDC(high voltage direct current)输电和静止无功补偿器 SVC(static var compensator)阀中过电压应急保护触发及转子灭磁中的应用；文献[14]分析了晶闸管换流阀过电压导致阀短路时对直流输电的影响，然后对电子式过压触发电路 BTC (backup trigger circuit)和 BOD 这 2 种晶闸管的过电压保护方式进行理论计算和仿真分析，最后通过实验对 BTC 和 BOD 这 2 种保护方式的性能进行验证和对比；文献[15]分析了晶闸管换流阀运行实验中的暂态过电压和故障过电压问题，提出了阻容吸收和 BOD 触发晶闸管阀 2 种保护策略，通过实验验证了这些策略的有效性。

高压 BOD 作为过压保护电路的关键器件，被一些外国公司所垄断，国内目前尚无成熟的高压 BOD。近年来，国际贸易不确定性加剧，如果进口器件断供，已投运工程由于缺乏备品备件，将对电网安全运行带来严重隐患。因此，研究新型无 BOD 的晶闸管过压触发电路，实现晶闸管过压触发电路的国产化替代，具有重要的现实意义。

1 基于集成运放的有源型晶闸管过压触发电路原理与设计

1.1 晶闸管导通的基本要求

晶闸管的双晶体管模型与等效电路如图 1 所示，其包含 3 个电极，即阳极 A、阴极 K 和门极(也称控制极)G[16]。将晶闸管 N_1 层和 P_2 层各分为 2 个部分，则可将晶闸管看成是 PNP 型和 NPN 型 2 个晶体管的互连，如图 1(a)所示。其中一个晶体管的集电极同时又是另一个晶体管的基极，当在晶闸管阳极和阴极之间施加电压 U_{AK}，门极也加上足够的门极电压 U_G 时，等效电路如图 1(b)所示，则有电流 I_G 从门极流入 NPN 管 T_2 的基极。T_2 导通后，其放大后的集电极电流 I_{c2} 流出 PNP 管 T_1 的基极使 T_1 导通，T_1 导通放大后的集电极电流 I_{c1} 又作为基极电流流入 T_2 的基极。如此循环，产生强烈的正反馈过程，使 2 个晶体管饱和导通，这就是晶闸管的导通过程[11]。因此，设计晶闸管触发电路，需要在过压时，提供足够大的门极电流或者门极电压。



(a) 晶闸管的双晶体管模型

(b) 等效电路

图 1 晶闸管的双晶体管模型与等效电路

Fig. 1 Dual-transistor model and equivalent circuit of thyristor

1.2 基于集成运放的有源型晶闸管过压触发电路

本文所研究的晶闸管过压触发电路由稳压模块、滞回比较器、电流放大电路等组成，如图 2 所示，图中：R_3、R_4为滞回比较器输出端分压电阻；R_5为平衡电阻；R_9为限流电阻；R_{10}与 C_5共同组成缓冲电路。该电路的工作原理如下。

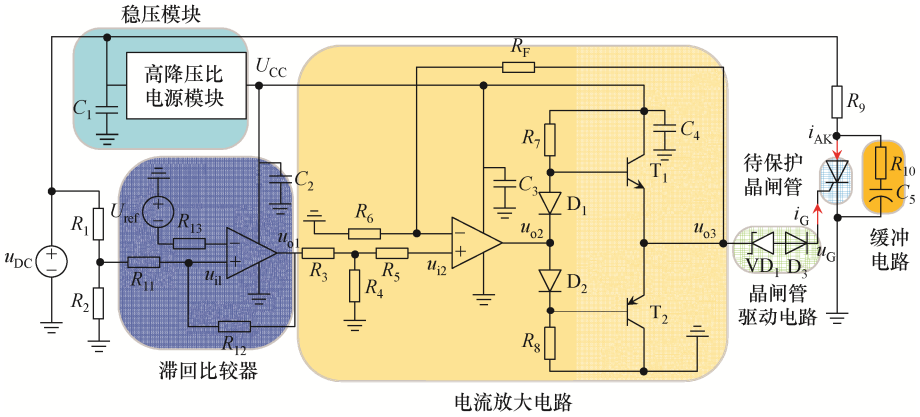


图 2　晶闸管过电压触发电路

Fig. 2 Thyristor overvoltage triggering circuit

第 1 步，采用滞回比较器作为晶闸管的电压检测电路。由于晶闸管的阳极—阴极电压可能会高于集成运放的耐压，本电路将晶闸管的阳极—阴极电压经分压后接入滞回比较器的同相输入端，反相输入端的基准电压为设定的晶闸管过压保护阈值电压。这样，当晶闸管阳极—阴极两端承受的正向电压小于滞回比较器的上门限电压时，滞回比较器输出反向饱和的电压信号；当晶闸管阳极—阴极两端承受的正向电压大于等于滞回比较器的下门限电压时，滞回比较器输出正向饱和的电压信号。同时，滞回比较器电路通过引入正反馈机制，设置了 2 个不同的阈值电压，这使得比较器在输入信号存在噪声或小幅波动时，不容易误触发，从而提高了电路的稳定性和抗干扰能力[17]。

第 2 步，滞回比较器的输出端经电阻分压，避免后续电路饱和，使同相比例放大器正常工作在运放的供电电压范围内，其中 u_{i2} 为同相比例放大器输入端电压，u_{o1} 为滞回比较器的输出电压，其数值在晶闸管过压触发电路触发动作时为集成运放的正向饱和电压，而在晶闸管过压触发电路不动作时，由于电路采用单电源供电，集成运放的反向供电端接地，u_{o1}≈0。

第 3 步，u_{i2} 接入由同相比例放大器和无输出变压器 OTL(output transformer-less)互补对称放大电路构成的电流放大电路。集成运放输出的电流信号无法达到晶闸管导通所需门极电流，因此需要在同相比例放大电路的集成运放后接入 1 个 OTL 互补对称放大电路来对电流进行放大。其中，同相比例放大器输出放大的电压信号，同相比例放大器的输出端与反馈端之间接入 OTL 互补对称放大电路，旨在将运放的输出电流放大至晶闸管门极开通所需的电流大小，其中同相比例放大器放大倍数公式为

$$\frac{u_{o3}}{u_{i2}}=1+\frac{R_F}{R_6} \tag{1}$$

式中：u_{o3} 为同相比例放大器反馈端电压；R_F 为反馈电阻；R_6 为输入电阻。

晶闸管承受正向过电压时，保护电路触发，三极管 T_1 工作于放大区；三极管 T_2 处于微导通状态，二极管 D_1 和 D_2 起到消除交越失真的作用，使在静态时三极管 T_1 和 T_2 均处于微导通状态，u_{o2}≈u_{o3}，其中 u_{o2} 为同相比例放大器的输出端电压。

第 4 步，电流放大电路的输出端经晶闸管驱动电路连接到晶闸管门极，晶闸管驱动电路由稳压管和二极管组成。当晶闸管承受正向过电压时，稳压管击穿，晶闸管门极触发而使得晶闸管导通，实现过压保护功能；在晶闸管两端承受正向电压大于设定的保护阈值电压时，u_{o1} 始终为正向饱和电压，

u_{o3} 也基本不变，可表示为

$$u_{o3} = u_Z + u_{D_3} + u_G \tag{2}$$

式中：u_Z 为稳压值；u_{D_3} 为二极管导通压降；u_G 为晶闸管门极电压，其值要在晶闸管数据手册规定的能够使晶闸管稳定导通的范围内。则根据式(2)可以确定稳压值 u_Z，进而选择稳压管的型号。

第 5 步，稳压模块负责给整个电路供电。在本电路中，集成运放与三极管均需要稳定的供电，并且滞回比较器的反相输入端也需要输入稳定的基准电压，可通过晶闸管阳极—阴极电压取电，经过稳压模块后得到低压供电电压，并进一步调理生成所需的基准电压。考虑到实际工况中晶闸管的阳极—阴极两端电压高(kV等级)且会宽范围变化，而芯片供电电压较低(几 V 到十几 V)，若直接采用宽输入高低压直流变换电路，则不仅价格较高，且体积较大，难以集成到 BOD 晶闸管过压触发电路板中，因此对于稳压模块的要求为高耐压、高降压比与小体积。

1.3 参数设计

1.3.1 器件参数选取

对于集成运放，由于晶闸管过压触发电路要求电路具有较高的精度和较为良好的温度稳定性，本设计中选择了 LM358 芯片，LM358 内部集成了 2 个独立的运算放大器，可以同时处理多个信号，提高了芯片的使用效率，并且在功耗方面，LM358 的静态电流为 500 μA/通道，适合需要长时间运行的应用；在温度稳定性方面，LM358 芯片以其良好的温度稳定性而受到广泛应用，即使在较宽的温度范围内，LM358 也能保持其电气特性，适合在多变环境温度下的应用；在供电方面，LM358 能够接受较宽的电源电压范围，增加了同相比例放大器设计的灵活性，且 LM358 支持单电源供电，其单电源供电的最高电压可以达到+32 V，符合本电路设计的要求。

对于电路中的二极管与三极管，电流放大电路中的 OTL 互补对称放大电路起到了电流放大的作用，OTL 互补对称放大电路要求 NPN 管 T_1 和 PNP 管 T_2 的特性相互对称，本电路中选择的 T_1 管型号为 2SC2073，T_2 管型号为 2SA940。而二极管 D_1、D_2 主要起到消除 OTL 互补对称放大电路中交越失真的作用，因此选择的二极管 D_1、D_2 的导通压降应与三极管 T_1、T_2 发射极正偏时 V_{BE} 近似相等，本电路中选择的 D_1、D_2 型号为 1N4007，二极管 D_3 也同样选择 1N4007。

对于电路中稳压管的选择，根据式(2)可以选定稳压管 VD_1 的稳压值 u_Z，晶闸管门极支路电流 i_G 应不超过稳压管 VD_1 被击穿时的最大工作电流，本电路中选择的稳压管 VD_1 型号为 1N4734。

1.3.2 稳压模块的优化设计

根据 1.2 节电路工作原理中所介绍的稳压模块需求，若直接采用宽输入高低压直流变换电路，则不仅价格较高，且体积较大，难以集成到过压触发板中。为此，本文的稳压模块设计采用选择 1 款高耐压、高降压比且体积较小芯片的思路。XD308H 芯片较适合作为本电路的稳压模块。XD308H 是 1 款超宽范围输入的降压型 DC-DC 转换器电源芯片，最大输出持续电流可以达到 500 mA，内部集成完善的保护功能(短路保护、过载保护、输出过压保护、输出欠压保护、过热保护等)；同时，XD308H 芯片采用 SOP8 封装，体积较小，便于集成到电路板中。本电路的稳压模块电路结构如图 3 所示，稳压电路从晶闸管阳极—阴极两端取电，经电阻分压后，电压从 kV 级降低至几百 V 级，再接入 XD308H 芯片的 DRAIN 管脚，进行进一步稳压，最后输出稳定的集成运放供电电压 U_{CC}，为集成运放、三极管与滞回比较器反相输入端供电。

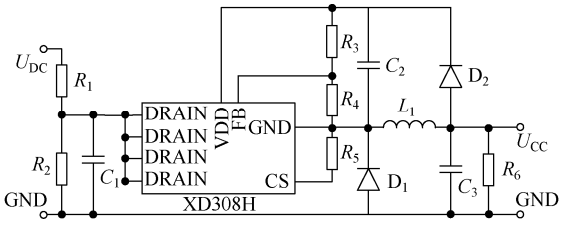


图 3 稳压模块电路拓扑

Fig. 3 Topology of voltage regulation module circuit

对于 XD308H 芯片，其输出电压的设置通过采样电感两端压降，分压后与内部基准比较形成闭环后输出恒定电压，即

$$U_{CC}=V_{FB}\left(1+\frac{R_1}{R_2}\right)-V_{D_1} \tag{3}$$

式中：V_{FB} 为反馈输入端电压，V_{FB}=2.0 V；R_1 和 R_2 为电阻，分别用于对 FB 引脚上拉和下拉；V_{D_1} 为二极管导通压降，其值一般设为 0.7 V 左右。

对于接入XD308H芯片DRAIN管脚分压电阻的设计，由于在本文所研究的电路中，稳压电路从晶闸管的阳极—阴极两端取电，而在实际工况中晶闸管的阳极—阴极两端电压常常为 kV 级。这一保护阈值远远大于XD308H芯片DRAIN管脚的耐压极限。因此，需要将晶闸管的阳极—阴极两端的电压经分压后接入电路，同时，由于电路板的体积有限而分压电阻所需承受的功率较大，分压电阻的设计也成为了本设计的一项关键内容。要保证在满载时电压 U_4 和空载时电压 U_5 均不会将芯片 XD308H 击穿，将 XD308H 芯片及其外围电路等效为电阻后可得如图 4 所示等效电路。图中：U_+为滞回比较器的上门限电压；R_{14} 与 R_{15} 为晶闸管的阳极—阴极两端与 XD308H 芯片之间的分压电阻；R_{16} 为 XD308H 芯片及其外围电路等效后的电阻；u_4 为芯片满载时分压电阻 R_{14} 与 R_{15} 间的电压；u_5 为芯片空载时分压电阻 R_{14} 与 R_{15} 间的电压。

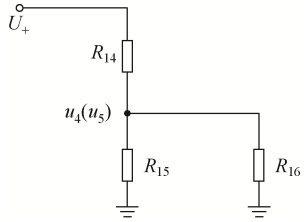


图 4　XD308H 芯片及其外围电路的等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of XD308H chip and its peripheral circuit

根据图 4 可以列出电路等式与约束条件，即

$$\begin{cases}\dfrac{u_4^2}{P}=R_{16}\\ u_4=\dfrac{R_{15}//R_{16}}{R_{14}+R_{15}//R_{16}}U_+\\ u_4<600\ \text{V}\\ U_{5m}=\dfrac{R_{15}}{R_{14}+R_{15}}U_+\\ U_{5m}<600\ \text{V}\end{cases} \tag{4}$$

式中：P 为稳压模块输入功率；U_{5m} 为空载电压 u_5 的最大值。

1.3.3　滞回比较器分压网络设计

本文所研究的晶闸管过压触发电路中，滞回比较器的同相输入端从晶闸管的阳极—阴极两端取电，而在实际工况中晶闸管的阳极—阴极两端电压常常为 kV 级。根据集成运放的数据手册，这一保护阈值远远大于滞回比较器的同相输入端的耐压极限。因此，需要将晶闸管的阳极—阴极两端的电压经分压后接入电路，同时，由于电路板的体积有限而分压电阻所需承受的功率较大，分压电阻的设计也成为了本研究的一项关键内容。

根据 1.2 节所述晶闸管过压触发电路工作原理，当晶闸管两端承受的正向电压小于滞回比较器的上门限电压时，滞回比较器输出反向饱和的电压信号；当晶闸管两端承受的正向电压大于等于滞回比较器的下门限电压时，滞回比较器输出正向饱和的电压信号。滞回比较器电路及其输出端正向饱和与反向饱和时的等效电路如图 5 所示。

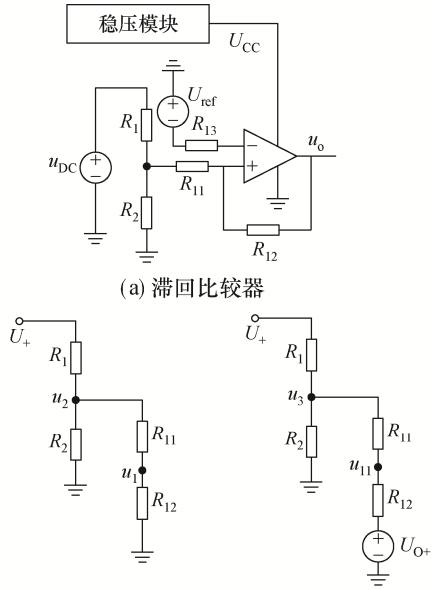


图 5　滞回比较器电路及其输出端正向饱和与反向饱和时的等效电路

Fig. 5 Hysteresis comparator circuit, and its equivalent circuits when output terminal is saturated in forward and reverse directions, respectively

由于集成运放的工作特性，输入端电压应小于芯片供电电压，可得到约束条件为

$$\begin{cases} u_1 < U_{CC} \\ u_{11} < U_{CC} \\ U_{ref} < U_{CC} \end{cases} \tag{5}$$

式中：u_1 为滞回比较器反向饱和临界状态时同相输入端电压；u_{11} 为滞回比较器正向饱和临界状态时同相输入端电压；U_{ref} 为滞回比较器反相输入端电压基准值。

同时，根据滞回比较器输出端正向饱和与反向饱和时的等效电路，可以得出

$$\begin{cases} \dfrac{u_1}{R_{12}} = \dfrac{u_2}{R_{11}+R_{12}} \\ u_2 = U_+ \dfrac{R_2 // (R_{11}+R_{12})}{R_1 + R_2 // (R_{11}+R_{12})} \\ \dfrac{U_{O+}-u_{11}}{R_{12}} = \dfrac{u_{11}-u_3}{R_{11}} \\ u_{11} = U_{O+} \dfrac{R_{11}+R_1 // R_2}{R_{11}+R_{12}+R_1 // R_2} + u_2 \dfrac{R_{12}U_+}{R_{11}+R_{12}} \end{cases} \tag{6}$$

式中：u_2 为滞回比较器反向饱和临界状态时分压电阻 R_1 与 R_2 间的电压；u_3 为为滞回比较器正向饱和临界状态时分压电阻 R_1 与 R_2 间的电压；R_1 与 R_2 为晶闸管的阳极—阴极两端与滞回比较器之间的分压电阻；R_{11} 为滞回比较器输入分压电阻；R_{12} 为滞回比较器反馈电阻；U_{O+}为滞回比较器正向饱和时的输出端电压。

1.4 设计实例

在 1.3 节中已经介绍了电路中各个器件的选型原则，本节将在具体的设计实例中根据 1.3 节的选型原则确定电路中具体的器件参数，并在第 2 节进行实验验证。

本实例中使用的晶闸管型号为 5STP26N6500，设置的过压保护阈值为 1 200 V，设置的滞回比较器上门限电压为 1 210 V。1.3 节中提到了稳压模块使用了 XD308H 芯片，本实例中选择让稳压模块输出+24 V 的电压来保证集成运放、三极管与滞回比较器反相输入端的供电。

对于滞回比较器的同相输入端分压电阻的选取，结合 1.3 节对滞回比较器工作回路的分析与本实例中晶闸管的 1 200 V 保护阈值的工况，给定滞回比较器上门限电压 U_+=1 210 V、滞回比较器正向饱和时的输出端电压 U_{O+}=22 V、U_{ref}=9.3 V，在满足分压电阻损耗比较低，同时满足输入电压范围的条件下，可取得 R_1、R_2、R_{11}、R_{12} 的 1 组最优解，取 R_1=632 kΩ、R_2=5 kΩ、R_{11}=5 kΩ、R_{12}=500 kΩ，其中 R_1 采用 3 个 150 kΩ-1W 和 2 个 91 kΩ-500 mW 的电阻串联以满足分压电阻的功率和体积要求。

对于 XD308H 芯片 DRAIN 管脚分压电阻的选取，根据本实例中晶闸管的 1 200 V 保护阈值的工况，XD308H 芯片在作为 24 V 稳压模块时，其输入电压范围为 45~600 V，根据数据手册，芯片在满载时效率为 85%。由仿真可得电路满载时，稳压模块供电电流为 0.11 A，供电电压为 24 V，取稳压模块效率为 85%，可得输入功率 P 约为 3 W；结合 1.3 节对稳压模块空载与满载工作回路的分析，在满足分压电阻损耗比较低，同时满足输入电压范围的条件下，可根据式(6)取得 R_{14}、R_{15} 的 1 组最优解，分别为 R_{14}=11 kΩ、R_{15}=10 kΩ，其中 R_{14} 采用 5 个 2.2 kΩ-5 W 的电阻串联、R_{15} 采用 5 个 2 kΩ-5 W 的电阻串联以满足分压电阻的功率和体积要求。

基于以上考虑，电路中选择的各个电阻电容的参数见表 1。

表 1 电路中电阻电容参数的选择

Tab. 1 Selection of resistance and capacitance parameters of circuit

参数	数值	参数	数值
R_1/kΩ	632	R_{12}/kΩ	500
R_2/kΩ	5	R_{13}/kΩ	5
R_3/kΩ	100	R_{14}/kΩ	11
R_4/kΩ	36	R_{15}/kΩ	10
R_5/kΩ	5	R_F/kΩ	10
R_6/kΩ	10	C_1/nF	100
R_7/kΩ	1.6	C_2/nF	100
R_8/kΩ	1.6	C_3/nF	100
R_9/Ω	100	C_4/nF	100
R_{10}/kΩ	10	C_5/μF	100
R_{11}/kΩ	5		

2　实验验证

2.1　实验原理

基于 1.4 节的参数设计，进行相关的实验验证。本实验基于“FLM-T2 灭磁过电压测试仪”平台完成，该测试仪是用于验证发电机转子中过电压保护与灭磁功能的专业设备，该测试仪可以准确模拟大型电机的转子过压工况。

测试时使用的晶闸管型号为 5STP26N6500，设置的过压保护阈值为 1 200 V。由于大型电机内部故障时，需要迅速切断励磁电流，直接切断励磁电流会在励磁绕组的两端产生高电压。晶闸管及其过压触发电路用于转子绕组过压保护(阈值约为转子最大绝缘电压的 50%~70%)，而氧化锌(ZnO)电阻主要用于灭磁(灭磁时电压约为转子最大绝缘电压的 30%~50%)，同时，过压保护电路中也复用了该 ZnO 电阻，充分利用 ZnO 电阻耐高压(30%~50%绝缘电压)和在低阻值时快速泄放能量的能力，分担晶闸管的负担，起到过电压保护和灭磁的目的。非线性电阻 ZnO 作为 1 种灭磁电阻，在正常工作条件下，当外加电压低于动作值时，表现为较大的电阻，回路中仅有较小的漏电流通过；一旦外加电压达到动作值，其电阻迅速下降，形成低阻通路，此时会有较大的电流通过。本实验中将非线性电阻 ZnO 与晶闸管串联，当晶闸管两端承受过电压时，过压触发电路动作，晶闸管门极被触发而导通，同时由于非线性电阻 ZnO 的限压作用，u_{DC} 被拉低。

设计如图 6 所示的实验进行验证，基于集成运放的有源型晶闸管过压触发电路板如图 7 所示，连接实物如图 8 所示。

2.2　实验结果

基于集成运放的有源型晶闸管过压触发电路测试结果如图 9 和图 10 所示，实验中测试了母线电压 u_{DC}、电流放大电路的同相输入端电压 u_{i2}、同相比例放大器输出端电压 u_{o2}、同相比例放大器反馈端电压 u_{o3}、晶闸管门极电压 u_G 和门极电流 i_G 在

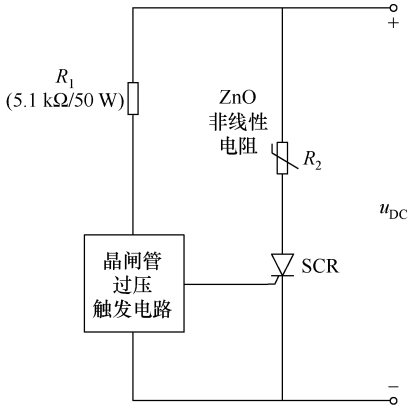


图 6　基于集成运放的有源型晶闸管过压触发实验电路原理

Fig. 6 Schematic of active thyristor overvoltage triggering experimental circuit based on integrated operational amplifier

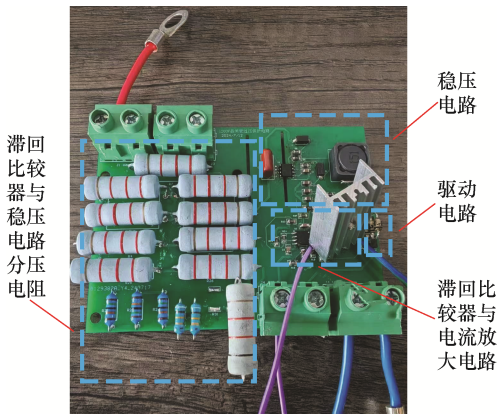
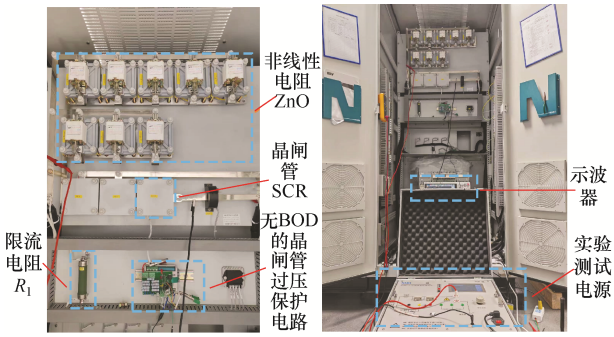


图 7　基于集成运放的有源型晶闸管过压触发电路板

Fig. 7 Active thyristor overvoltage triggering circuit board based on integrated operational amplifier



(a) 主电路连接实物　　(b) 实验平台实物

图 8　基于集成运放的有源型晶闸管过压触发电路连接实物

Fig. 8 Physical diagram of active thyristor overvoltage triggering circuit connection based on integrated operational amplifier

过压触发电路动作前后的波形变化。由实验波形可见，过压触发电路动作前 u_{i2}、u_{o2}、u_{o3}、u_G 均近乎 0 V，i_G≈0 A。过压触发电路动作瞬间 u_{DC}=1 222 V，晶闸管触发开通后在非线性电阻 ZnO 的作用下 u_{DC} 被迅速拉低至残压值 528.84 V，该残压值与设计值偏差约为 2.88%，符合行业标准 DL/T 294.3—2019；过压触发电路动作瞬间滞回比较器输出正向饱和电压，经分压后接入电流放大电路的同相输入端电压 u_{i2}=5.02 V；电流放大电路输出端电压 u_{o2}=10.36 V、反馈端电压 u_{o3}=10.20 V；过压触发电路动作瞬间晶闸管门极电压 u_G 峰值约为 3.13 V，门极电流 i_G 峰值约为 236.48 mA；在 u_{DC} 被拉低后晶闸管阳极—阴极两端电压小于设定的保护阈值，过压触发电路恢复到动作前的状态；过压保护时晶闸管导通延时约为 10 μs，即晶闸管出现过电压后 10 μs 左右开通，实现过压保护。整个过压保护过程符合参数设计预期，能够对过压工况实现准确快速地保护。

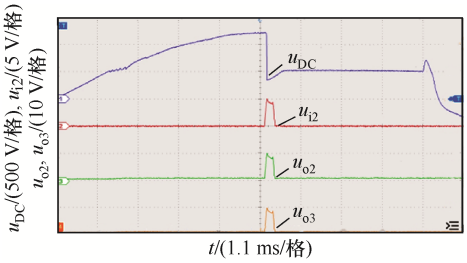


图 9 晶闸管过压保护前后 u_{DC}、u_{i2}、u_{o2}、u_{o3} 波形

Fig. 9 Waveforms of u_{DC}, u_{i2}, u_{o2} and u_{o3} before and after thyristor overvoltage protection

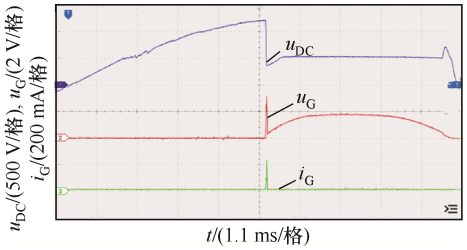


图 10 晶闸管过压保护前后 u_{DC}、u_G、i_G 波形

Fig. 10 Waveforms of u_{DC}, u_G and i_G before and after thyristor overvoltage protection

文献[18]给出了原含有 BOD 的晶闸管过压保护电路拓扑，该方案作为实验对照组，测试结果如图 11 所示，晶闸管导通瞬间门极电压峰值约为 3.13 V，门极电流峰值约为 61.07 mA，导通时间约为 18 μs，即晶闸管出现过电压后 18 μs 左右开通晶闸管得到保护。

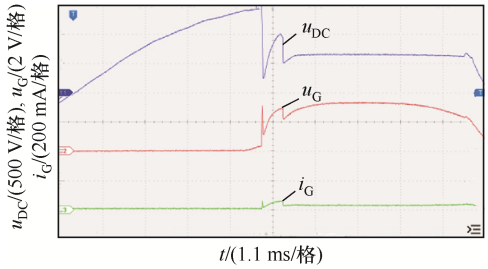


图 11 原含有 BOD 的晶闸管过压保护电路方案 u_{DC}、u_G、i_G 在晶闸管过压保护前后波形

Fig. 11 Waveforms of u_{DC}, u_G and i_G under thyristor overvoltage protection circuit scheme with BOD before and after thyristor overvoltage protection

2.3 实验分析

根据实验结果及理论分析可得：①本方案保护动作速度较原含有 BOD 的晶闸管过压保护电路方案提高了 44%，有效降低了过电压对晶闸管的冲击，提升了晶闸管过压触发电路的性能；②本方案保护动作时晶闸管门极电流大于原含有 BOD 的晶闸管过压保护电路保护动作时晶闸管门极电流，可保证晶闸管更加有效开通；③本方案中滞回比较器的作用，使得在输入信号存在噪声或小幅波动时，晶闸管不容易误触发。

3 结论

本文对基于集成运放的有源型晶闸管过压触发电路的工作原理进行了分析，并讨论了参数设计方案，最后，通过实验验证了晶闸管过电压触发电路的工作原理和保护效果，主要创新性工作如下。

(1)本文所提出的晶闸管过压触发电路不含 BOD，且所有电路元件实现了全国产化，与原含有 BOD 的晶闸管过压保护方案相比，保护动作更加迅速，利用高速比较器和运放电路的快速响应优点，实现了保护动作的准确可靠触发。

(2)滞回比较器的存在引入了正反馈机制，这

使得比较器在输入信号存在噪声或小幅波动时，不容易误触发，从而提高了电路的稳定性和抗干扰能力。

参考文献：

[1] 陈武. 寻迹电力电子[M]. 北京: 机械工业出版社, 2024.
Chen Wu. Tracking Power Electronics [M]. Beijing: China Machine Press, 2024. (in Chinese)

[2] 蒋张威, 廖彦铭, 傅孝韬, 等. 考虑水冷回路的晶闸管换流阀热阻模型建模[J]. 电源学报, 2024, 22(3): 38-45.
Jiang Zhangwei, Liao Yanming, Fu Xiaotao, et al. Modeling of thermal resistance of thyristor converter valve considering water-cooling circuit [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(3): 38-45. (in Chinese)

[3] 刘隆晨, 李龙蛟, 彭东, 等. 基于共轭梯度法的晶闸管电热耦合模型快速求解方法研究[J]. 电源学报, 2024, 22(3): 54-61.
Liu Longchen, Li Longjiao, Peng Dong, et al. Research on rapid solution method for thyristor electro-thermal coupling model based on conjugate gradient method [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(3): 54-61. (in Chinese)

[4] 贺之渊, 邓占锋, 查鲲鹏, 等. 晶闸管阀过电流试验装置过电压保护策略的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(13): 56-61.
He Zhiyuan, Deng Zhanfeng, Zha Kunpeng, et al. Study on overvoltage protection strategy of the thyristor valve overcurrent test equipment [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(13): 56-61. (in Chinese)

[5] Titushkin D, Surma A, Stavtsev K, et al. Thyristors with an integrated element optimized for protection against overvoltage impulses with a low rate of rise [C]// 2021 23rd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'21 ECCE Europe). Ghent, Belgium, 2021: 1-7.

[6] Do H D, Anuchin A, Shpak D, et al. Overvoltage protection for interior permanent magnet synchronous motor testbench [C]// 2018 25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives (IWED). Moscow, Russia, 2018: 1-4.

[7] 许国瑞, 胡沛东, 李志强, 等. 输电线不同类型短路对同步调相机转子损耗及温升的影响[J]. 电工技术学报, 2023, 38(2): 340-352.
Xu Guorui, Hu Peidong, Li Zhiqiang, et al. Influence of different types of short circuit in transmission line on the rotor loss and temperature rise of synchronous condenser [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(2): 340-352. (in Chinese)

[8] 杨江涛, 王镇宇, 冯垚径, 等. 高速永磁电机转子过盈方式对转子应力的影响[J]. 电工技术学报, 2023, 38(16): 4263-4273.
Yang Jiangtao, Wang Zhenyu, Feng Yaojing, et al. Influence of shrink fitting modes on rotor stress of high speed permanent magnet machine [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(16): 4263-4273. (in Chinese)

[9] 孟鹏飞, 郭敬科, 张恒志, 等. ZnO 压敏电阻微观结构参数与宏观电气性能的关联机制[J]. 电工技术学报, 2024, 39(5): 1454-1463.
Meng Pengfei, Guo Jingke, Zhang Hengzhi, et al. The correlation mechanism that micro-structure parameters of ZnO varistor to the macroscopic electrical characteristics [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(5): 1454-1463. (in Chinese)

[10] Veeramma S C B J. Packaged overvoltage protection circuit for triggering thyristors: US15876139 [P]. 2019- 05-28.

[11] 蓝元良, 汤广福, 张皎, 等. BOD 在晶闸管过电压保护中的应用研究[J]. 电工电能新技术, 2000, 19(3): 51-54.
Lan Yuanliang, Tang Guangfu, Zhang Jiao, et al. Study of BOD's application in thyristor protection against overvoltage [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2000, 19(3): 51-54. (in Chinese)

[12] 张建峰. 单阀中允许最多 BOD 触发晶闸管级数的简要分析[J]. 高压电器, 2013, 49(8): 112-114.
Zhang Jianfeng. Analysis on number limitation of BOD triggered thyristors in a thyristor valve [J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(8): 112-114. (in Chinese)

[13] 楼晓峰. BOD 器件在灭磁系统的应用[C]//全国大中型水电厂技术协作网技术交流会. 昆明, 中国, 2009: 168-174.
Lou Xiaofeng. Application of BOD devices in excitation

(下转第 348 页)

643-652.

[25] Blaabjerg F, Pedersen J K. Optimized design of a complete three-phase PWM-VS inverter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1997, 12(3): 567-577.

[26] Cree. C3M0030090K silicon carbide power MOSFET-C3MTM MOSFET technology N-channel enhancement mode [EB/OL]. (2021-01-20)[2023-01-17]. https://www.wolfspeed.com/downloads/dl/file/id/1185/C3M0030090K.pdf.

[27] EPC. EPC8009-enhancement mode power transistor [EB/OL]. (2021-01-20)[2023-01-20]. https://epc-co.com/epc/Portals/0/epc/documents/datasheets/EPC8009_datasheet.pdf.



陈益华

作者简介：

陈益华(2002—)，男，本科。研究方向：宽禁带半导体器件及其驱动技术。E-mail：U202012533@hust.edu.cn。

彭晗(1984—)，女，中国电源学会会员，通信作者，博士，教授。研究方向：基于宽禁带半导体的电力电子器件和装置以及基于能量收集的自供电传感技术。E-mail：pengh@hust.edu.cn。

辛晴(2000—)，女，硕士。研究方向：宽禁带半导体器件及其驱动技术。E-mail：qingxin@hust.edu.cn

(责任编辑：孙美菊)

(上接第 329 页)

system for demagnetization [C]// Proceedings of the 11th Technical Exchange Conference of Large and Medium-sized Hydropower Plants. Kunming, China, 2009: 168-174. (in Chinese)

[14] 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. (in Chinese)

[15] 查鲲鹏，汤广福，温家良，等. 晶闸管阀运行试验的过电压保护策略研究[J]. 电力电子技术，2006，40(3)：107-109.
Zha Kunpeng, Tang Guangfu, Wen Jialiang, et al. Study of overvoltage protection strategy of the thyristor valve operational test [J]. Power Electronics, 2006, 40(3): 107-109. (in Chinese)

[16] 阮新波. 电力电子技术[M]. 北京：机械工业出版社，2021.
Ruan Xinbo. Power Electronics [M]. Beijing: China Machine Press, 2021. (in Chinese)

[17] 秦曾煌. 电工学[M]. 7 版. 北京：高等教育出版社，2011.
Qin Zenghuang. Electrical Engineering [M]. 7th ed. Beijing: Higher Education Press, 2011. (in Chinese)

[18] 郭春平. 电力电子化直流电源系统中过电压保护的触发电路: CN214707155U[P]. 2021-11-12.
Guo Chunping. Trigger circuit for overvoltage protection in power electronic direct-current power supply system: CN214707155U [P]. 2021-11-12. (in Chinese)



李鑫

作者简介：

李鑫(1989—)，男，中国电源学会会员，通信作者，博士，副研究员。研究方向：高效率高功率密度变换器建模与控制，无线电能传输系统设计，新能源构网控制技术，变速抽蓄系统控制技术。E-mail：li-xin@seu.edu.cn。

李龙权(2000—)，男，中国电源学会学生会员，硕士研究生。研究方向：电力电子与电力传动。E-mail：15256137369@163.com。

姚鹏飞(1997—)，男，中国电源学会学生会员，硕士研究生，助理工程师。研究方向：电力电子与电力传动。E-mail：yao-pengfei@seu.edu.cn。

陈英杰(2001—)，男，中国电源学会学生会员，硕士研究生。研究方向：电力电子与电力传动。E-mail：1946494499@qq.com。

陈武(1981—)，男，中国电源学会高级会员，博士，教授。研究方向：电力电子功率变换，交直流配电网，新能源发电。E-mail：chenwu@seu.edu.cn。

(责任编辑：耿越)