

一种闸流管双脉冲触发装置的设计与研究

郝志阳¹, 李红刚¹, 刘廷军^{2,3*}, 李 斌¹, 孙世春¹, 姜 勇¹, 郑群川¹

(1. 北京航天广通科技有限公司, 北京 100039;

2. 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621999;

3. 先进激光与高功率微波全国重点实验室, 四川 绵阳 621999)

摘要: 针对高压大电流、低抖动高可靠工况下闸流管双脉冲触发需求, 该文研制并设计一款专用预触发-主触发双脉冲触发装置, 解决传统单脉冲触发导通不稳定、延迟抖动大、器件易损等问题。该装置采用高压脉冲与预电离混合触发架构, 以谐振充电升压、高速 MOS 开关、脉冲变压器倍压与低漏感工艺实现双路脉冲协同输出, 先由预触发建立稳定等离子体区, 再由主触发实现快速低抖动导通, 并配置负偏压及过压保护电路以提升运行可靠性。经 63 kV/5000 A、3 Hz 工况测试, 闸流管导通电流抖动 < 10 ns, 连续 72 小时运行稳定, 电流波动 $\leq \pm 2\%$, 触发稳定性和器件寿命显著优于传统方案。装置不改动原有结构, 可实现高稳定、低抖动、长寿命触发, 为高压大电流脉冲系统中闸流管可靠应用提供技术支撑。

关键词: 闸流管; 双脉冲触发装置; 预触发; 主触发; 等离子体区; 低抖动导通

中图分类号: TM919

文章编号: 1000-0682(2026)04-0056-08

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2026.04.010

Characteristic analysis of a thyristor trigger device

HAO Zhiyang¹, LI Honggang¹, LIU Tingjun^{2,3*}, LI Bin¹, SUN Shichun¹, JIANG Yong¹, ZHENG Qunchuan¹

(1. Beijing Aerospace Guangtong Technology Co., Ltd., Beijing 100039, China;

2. Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Sichuan Mianyang 621999, China;

3. National Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Laser and High Power Microwave, Sichuan Mianyang 621999, China)

Abstract: In response to the dual-pulse triggering requirements of thyristors under high-voltage, high-current, low-jitter and high-reliability working conditions, this paper develops and designs a dedicated pre-trigger-main trigger dual-pulse triggering device to solve the problems of unstable conduction, large delay jitter and easy damage of components in traditional single-pulse triggering. This device adopts a hybrid triggering architecture of high-voltage pulse and pre-ionization. It achieves dual-channel pulse coordinated output through resonant charging boost, high-speed MOS switch, pulse transformer voltage doubling and low leakage inductance process. First, a stable plasma zone is established by pre-triggering, and then rapid and low-jitter conduction is achieved by the main trigger. Negative bias and overvoltage protection circuits are also configured to enhance operational reliability. After testing under 63 kV/5000A and 3 Hz working conditions, the current jitter of the thyristor during conduction is less than 10ns. It operates stably for 72 consecutive hours, with current fluctuations $\leq \pm 2\%$. The trigger stability and component lifespan are significantly better than those of the traditional scheme. The device does not modify the original structure and can achieve high stability, low jitter and long-life triggering, providing technical support for the reliable application of thyristors in high-voltage and high-current pulse systems.

Keywords: thyatron; dual-pulse trigger device; pre-trigger; main trigger; plasma zone; low jitter conduction

收稿日期: 2025-05-11

第一作者: 郝志阳(1993—), 男, 汉族, 河北张家口人, 工程师, 研究方向为脉冲功率技术、电力电子电源设计。E-mail: 839735151@qq.com

通信作者: 刘廷军(1981—), 男, 汉, 甘肃镇原人, 工程师, 研究方向为高功率微波源研究及复杂电磁环境构建。E-mail: liutj66@126.com

0 引言

闸流管作为高压大电流快脉冲系统中的核心开关器件,其实现低抖动、无分散、长寿命导通的核心前提是采用预触发-主触发双脉冲协同触发的工作方式,闸流管以氢气为开关介质,需先通过预触发脉冲在栅极形成稳定等离子体区,再通过主触发脉冲触发主间隙快速导通,若两个阶段的脉冲参数、时序配合需与闸流管的工作特性精准匹配,否则将直接导致其触发导通不稳定、延迟抖动大、器件易损等问题。

目前工程中应用的闸流管触发方案多为传统单脉冲触发方案,该类方案无法匹配大功率闸流管的双脉冲触发工作要求,成为制约闸流管性能发挥的核心问题。其中,传统单脉冲高压触发方案仅输出单路高压脉冲,无独立预触发脉冲,无法在栅极形成稳定等离子体区,需施加高幅值脉冲才能强制触发闸流管导通,需施加高幅度脉冲才能强制触发闸流管导通,不仅导致闸流管不导通、触发抖动 $> 40 \text{ ns}$,还因单脉冲能量集中造成栅极电极严重烧蚀,降低闸流管寿命^[1-3]。

针对大功率闸流管双脉冲触发的工作要求,以及传统单脉冲触发方案的适配性缺陷,国内外学者开展了相关改进研究,但现有研究多聚焦于脉冲源性能提升,未针对闸流管双脉冲触发需求进行定制化设计:文献[4]提出基于谐振电路的高压脉冲源设计方法,提升了脉冲上升速率,但未设计独立的预触发、主触发双通道,无法实现双脉冲协同;文献[5]研制了快前沿固态触发器,仅实现单路纳秒级脉冲输出,未匹配闸流管的双脉冲时序要求;文献[6]提出高精度同步系统设计方法,虽降低了时序抖动,但未构建双脉冲输出架构,仍无法满足闸流管的核心触发要求。

该文针对闸流管本身的双脉冲触发工作要求,研制一款专用的双脉冲触发装置,精准匹配闸流管预电离-主导通的双阶段导电机理,构建预触发(G1)、主触发(G2)双独立通道,实现两路脉冲的参数定制与时序精准协同;同时优化脉冲变压器设计与电路拓扑,采用国产化器件设计,经实验验证及与传统单脉冲方案对比测试,该装置可完美匹配闸流管的双脉冲触发需求,显著提升其触发性能与使用寿命,为闸流管在脉冲功率源、高能物理、航天测控等领域的高压大电流快脉冲系统中的可靠应用提供专用配套技术支撑^[7-14]。

1 理论原理

1.1 闸流管双脉冲触发的工作机理

大功率闸流管的导通机理决定了其必须依赖预触发-主触发双脉冲的协同作用,才能实现稳定、低抖动导通,其完整导通过程分为预电离和主间隙导通两个核心阶段,两个阶段分别对应预触发脉冲、主触发脉冲的作用区间,二者缺一不可且参数、时序需精准匹配。

(1)预电离阶段:该阶段是闸流管导通的基础,需由独立的预触发脉冲提供大电流、缓前沿的电信号,激励栅极开槽处产生等离子体,使带电粒子沿栅缝均匀渗透至阳极区域,形成连续、稳定的等离子体通道。预触发脉冲的电流幅值、脉宽需与闸流管的栅极结构、氢气介质特性匹配,若缺少预触发脉冲或参数不匹配,栅极无稳定等离子体区,主触发脉冲将无法实现快速、无分散导通。

(2)主触发阶段:该阶段是闸流管实现全通道导通的关键,需由独立的主触发脉冲提供高幅度、快上升沿的电信号,在预电离等离子体区的基础上,通过阳极高压电场将等离子体瞬间放大,形成导通通道,完成脉冲形成网络(PFN)的能量释放。主触发脉冲的上升速率、电压幅值需与闸流管的主间隙结构、耐压等级匹配,且需与预触发脉冲保持精准的时序搭接,防止等离子体消散导致的导通失效。

传统单脉冲触发方案如图1所示,因缺少独立的预触发、主触发双通道,无法匹配上述双阶段导电机理,是导致其触发性能差、闸流管寿命短的根本原因;而该装置为闸流管定制设计双脉冲输出架构,使预触发、主触发脉冲分别精准作用于其两个导通阶段,从根本上匹配闸流管的固有工作要求。

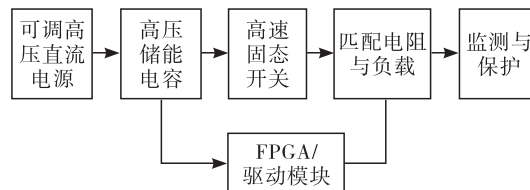


图1 传统触发方案框图

1.2 双脉冲触发装置的协同工作原理

该装置为闸流管专用定制,精准匹配其双脉冲触发要求,设计栅1(G1)预触发通道与栅2(G2)主触发通道两个独立功率通道,分别输出满足闸流管预电离、主间隙导通阶段要求的脉冲信号,通过高精度时序控制实现两路脉冲的协同配合,核心工作逻辑完全匹配闸流管的固有工作机理。

(1) G1 预触发通道:输出电流型脉冲,精准匹配闸流管预电离阶段的需求,具备缓前沿、低抖动特性,平顶宽度 $2 \sim 3 \mu\text{s}$,输出电流幅值 $\geq 40 \text{ A}$,核心作用是为闸流管栅极提供稳定的预电离激励,形成均匀的等离子体区,为后续主导通奠定基础,有效解决传统方案无预电离激励的问题;

(2) G2 主触发通道:输出电压型脉冲,精准匹配闸流管主间隙导通阶段的需求,电压调节范围 $1 \text{ kV} \sim 2 \text{ kV}$,脉宽 $1 \mu\text{s}$,上升速率 $\geq 5 \text{ kV}/\mu\text{s}$,核心作用是触发闸流管主间隙快速导通,实现能量的快速释放,满足百纳秒级前沿的工况要求;

(3) 双脉冲时序协同:两路脉冲的搭接时间 $\geq 0.25 \mu\text{s}$,G1 预触发脉冲超前 G2 主触发脉冲 $2 \mu\text{s}$ 输出,如图 2 所示,确保闸流管栅极的等离子体区形成后,主触发脉冲及时作用,避免等离子体消散,完全匹配闸流管的双阶段导通时序要求;同时在 G2 通道叠加 $-150 \text{ V}/150 \text{ mA}$ 负偏压,抑制杂散电子导致的误导通现象,提升闸流管的运行稳定性。

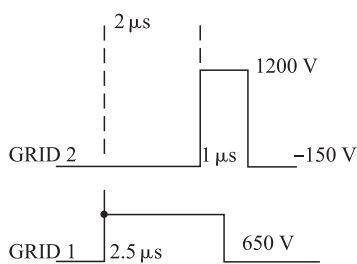


图 2 导通时序图

闸流管阴极由灯丝电源模块与氢发生器电源模块提供加热能量,阴极热丝预热后发射电子并积蓄于阴极与栅极之间;G1 预触发脉冲作用后,栅极形成稳定等离子体区;随后 G2 主触发脉冲施加正向高压,电子在强电场作用下与气体分子发生碰撞电离,形成“雪崩式”等离子区,并快速扩散至阳极栅极区域,最终完成闸流管的全通道导通。整个触发过程中,该装置的双脉冲输出与闸流管的双阶段导电机理精准匹配,实现了“按需触发”,相较于传统单脉冲方案的“强制触发”,可大幅提升了闸流管的触发性能与使用寿命。

2 触发装置系统设计

2.1 核心设计指标

该装置为 CX1671A 闸流管专用双脉冲触发装置,核心设计指标完全围绕闸流管的双脉冲触发工作要求制定,同时针对传统非双脉冲方案的适配性缺陷,确保输出的双脉冲在参数、时序上均与闸流管

精准匹配,具体核心指标如下:

(1) 输入参数:单相 $220 \text{ VAC} \pm 10\% @ 50 \text{ Hz}$;外部触发信号支持 $5 \sim 30 \text{ V}$ 电信号 ($1 \sim 100 \mu\text{s}$, BNC 接口) 或 HFBR-2404 光信号;最大工作频率 200 Hz ,适配闸流管的高频工作需求;

(2) G1 预触发通道(匹配闸流管预电离阶段):输出脉冲电压 $600 \text{ V} \sim 2000 \text{ V}$,脉宽 $2 \mu\text{s} \sim 3 \mu\text{s}$,最大驱动电流 45 A ,输出阻抗 $6 \Omega \sim 7 \Omega$;

(3) G2 主触发通道(匹配闸流管主间隙导通阶段):输出脉冲电压 $1000 \text{ V} \sim 2000 \text{ V}$,脉宽 $1 \mu\text{s}$,上升速率 $5 \sim 10 \text{ kV}/\mu\text{s}$,最大输出电流 10 A ,输出阻抗 $75 \Omega \sim 85 \Omega$ (含内部阻抗 47Ω),负偏压 -150 V ;

(4) 双脉冲时序指标(匹配闸流管双阶段导通时序):G1 超前 G2 输出时间 $2 \mu\text{s} \pm 0.1 \mu\text{s}$,两路脉冲搭接时间 $\geq 0.25 \mu\text{s}$,时序调节精度 $\pm 0.1 \mu\text{s}$;

(5) 触发性能指标:匹配闸流管后,导通抖动 $< 10 \text{ ns}$;

(6) 其他指标:输出接口为 2 个 SHV BNC 接口,分别对应 G1、G2 通道;具备完善的过压、过流保护与连锁控制功能;连续无故障运行时间 $\geq 72 \text{ h}$,有效提升闸流管系统的整体可靠性。

2.2 系统总体架构

该装置采用全协同双通道系统设计,整体分为光电接收模块、高精度延时控制模块、双通道功率放大模块和状态监测、保护模块与辅助电源模块五部分,相较于传统非双脉冲方案的单一功率输出架构,该架构的核心设计是增加了独立的 G1、G2 双功率通道,实现信号隔离、延时调控、脉冲生成、输出驱动与安全保护一体化。系统设计图如图 3 所示。

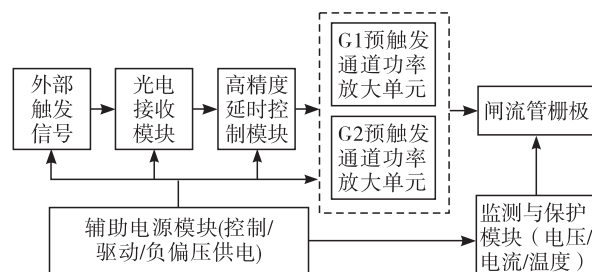


图 3 系统设计图

(1) 光电接收模块:采用 HFBR-2404 塑料光纤接口,将外部输入的光触发信号转换为系统可识别的 TTL 电信号,实现弱电与强电的隔离,避免强电干扰影响双脉冲的时序精度,确保闸流管触发的稳定性;

(2) 高精度延时控制模块:该装置的核心模块之一,通过高精度时序控制电路,精准调节 G1 预触

发与 G2 主触发两路脉冲的输出间隔、搭接时间,调节精度 $\pm 0.1 \mu\text{s}$, 确保两路脉冲的时序完全匹配闸流管的双阶段导通要求, 是实现双脉冲协同的关键;

(3) 双通道功率放大模块: 该装置的核心模块, 包含 G1 预触发与 G2 主触发两条独立的功率输出通道, 两路通道采用差异化拓扑设计, 分别生成满足闸流管预电离、主导通阶段要求的脉冲信号, 通道间互不干扰, 参数独立调控, 完全匹配闸流管对双脉冲的差异化参数要求;

(4) 监测与保护模块: 实时采集 G1、G2 两路脉冲的电压、电流、上升速率及系统温度参数, 同时监测双脉冲的时序配合状态, 当检测到参数幅度过门限或时序错乱时, 立即联动中央控制器切断系统高压输出, 保障装置与闸流管的运行安全, 解决传统方案无实时监测、故障后无保护的问题。

(5) 辅助电源模块: 为控制电路、驱动电路、负偏压电路提供多路隔离稳压电源, 保证全系统低噪声稳定供电。

2.3 关键电路设计

2.3.1 双通道功率输出拓扑

该装置针对 G1 预触发、G2 主触发通道的差异化脉冲需求, 以及闸流管的双阶段导通要求, 采用差异化的双通道功率输出拓扑设计, 两路通道均基于

谐振充电-升压结构, 相较于单脉冲方案的简单电容放电拓扑, 大幅提升了脉冲可控性与输出稳定性, 且两路通道独立设计, 完全匹配闸流管对预触发、主触发脉冲的要求, 核心设计如下:

(1) G2 主触发通道: 匹配闸流管主间隙导通阶段对快上升沿、高幅度脉冲的需求, 300 V 直流电源经隔离开关电感 L_2 向储能电容 C_{13} 充电; 当高速 MOS 管 TR2 导通后, C_{13} 与脉冲变压器 T2 初级形成谐振放电, 通过 1:5 的匝比设计将次级电压抬升至 1.5 kV 左右, 满足高幅度要求; 次级串联 47 Ω 限流电阻 R_3 , 兼顾电流限制与阻抗匹配; C_2 与负电源串联, 为输出端预置 -150 V 负偏压, 抑制杂散电子导致的闸流管误导通, 解决传统方案易误导通的问题; 在初级电感两端并联 R_9 、 D_{11} 吸收关断反峰电压, 各级节点配置 TVS 管实现多重过压钳位, 避免器件被高压击穿, 拓扑结构如图 4 所示。

(2) G1 预触发通道: 匹配闸流管预电离阶段对大电流、缓前沿脉冲的需求, 拓扑结构与 G2 通道类似, 省去负偏压相关电路; 脉冲变压器匝比设为 1:2.5, 输出内阻设计为 5 Ω , 平衡峰值输出电流与脉冲波形保真度, 满足大电流预电离要求; 选用铁硅电感 L_1 作为储能电感, 确保直流偏置下感量稳定、不易磁饱和, 保证脉冲的缓前沿特性, 拓扑结构如图 5 所示。

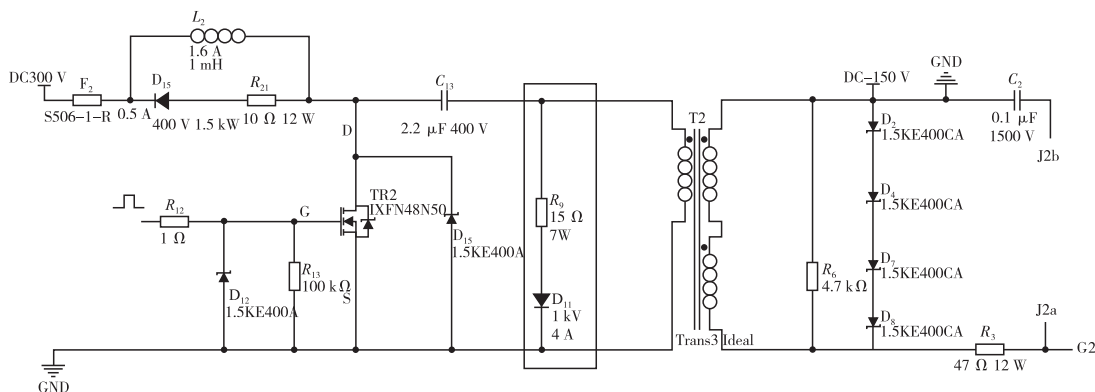


图 4 触发装置 G2 通道拓扑

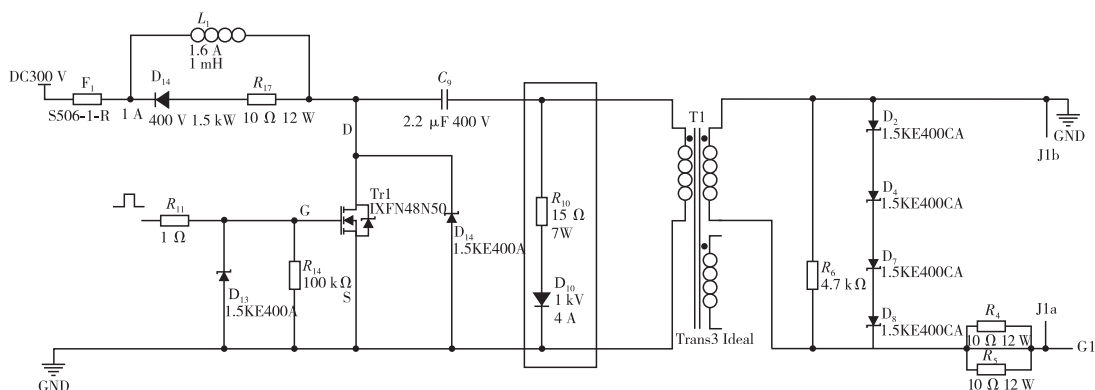


图 5 触发装置 G1 通道拓扑

2.3.2 脉冲变压器设计

脉冲变压器是双脉冲触发装置的核心部件,其性能直接决定输出脉冲的参数精度,该装置针对 G1、G2 通道的差异化需求,以及闸流管的双脉冲触发要求,对脉冲变压器进行定制化设计,相较于传统单脉冲方案的普通变压器,在磁芯选型、绕线工艺、绝缘设计上均做了大幅改进,确保两路脉冲的参数完全匹配闸流管的要求,具体如下:

(1) 磁芯选型:采用高饱和磁通密度、低高频损耗的 PC40 铁氧体磁芯,外形选用 ETD59 型号,兼顾功率容量与设备体积需求,适配闸流管高频工作的场景,解决传统方案磁芯饱和导致的脉冲失真问题,确保双脉冲的参数稳定性;

(2) 绕线工艺:采用多层多股交错绕线工艺,最大限度降低变压器漏感,漏感 < 100 nH,较传统方案降低 70% 以上,提升脉冲传输效率;针对 G2 主触发通道的快上升沿要求,初级绕制 5 匝,确保脉冲上升时间 ≤ 100 ns;针对 G1 预触发通道的大电流、缓前沿要求,初级绕制 16 匝,提升励磁阻抗,减少脉冲平顶阶段的压降,确保预电离激励的稳定性;

(3) 绝缘设计:采用环氧树脂真空浇注工艺,提升变压器初级与次级之间的耐压能力,耐压等级 > 10 kV,满足高压工况下的绝缘要求,防止匝间击穿,确保双脉冲通道的独立运行与参数稳定。

3 仿真分析

为验证双脉冲触发装置电路拓扑设计的合理性,以及输出双脉冲在参数、时序上与闸流管触发要求的匹配性,基于 Simulink 仿真平台搭建双通道全协同仿真模型,分别对 G1 预触发、G2 主触发通道的脉冲输出特性及双脉冲协同时序进行仿真验证,并与传统非双脉冲触发方案的仿真模型进行对比分析。

3.1 仿真模型建立

以双脉冲触发装置实际硬件电路为原型,搭建包含 300 V 直流电源、储能单元、脉冲变压器、高速 MOS 管开关、负载及保护电路的 G1、G2 双通道全链路仿真模型,如图 6 所示,重点构建高精度延时控制子模型,实现双脉冲的时序精准调控,仿真求解器选用 ode23tb,最大仿真步长 $1e-8$ s,保证仿真结果的精度与时效性。

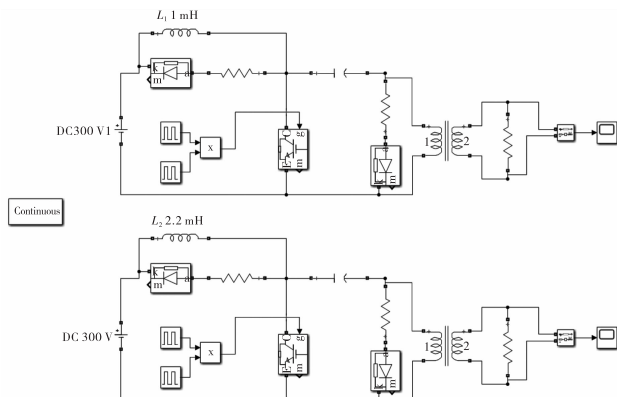


图6 仿真模型

3.2 仿真结果

仿真测试核心验证双脉冲参数与闸流管要求的匹配性、双脉冲时序的协同性,仿真结果如下:

G1 预触发通道:输出脉冲电压 650 V、脉宽 2.5 μ s,最大电流 45 A,脉冲平顶度好,无明显压降,完全匹配闸流管预电离阶段的脉冲要求,仿真波形如图 7 所示。

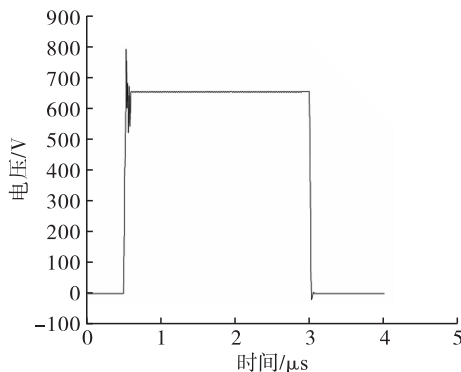


图7 栅1输出电压

G2 主触发通道:输出脉冲电压 1200 V、脉宽 1 μ s,上升速率 8 kV/ μ s, -150 V 负偏压输出稳定,无漂移,完全匹配闸流管主间隙导通阶段的脉冲要求,仿真波形如图 8 所示。

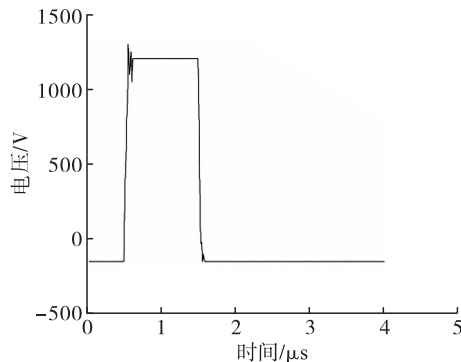


图8 栅2输出电压

双脉冲时序协同:G1 预触发脉冲超前 G2 主触

发脉冲 $2\ \mu\text{s}$ 输出,两路脉冲搭接时间 $0.5\ \mu\text{s}$,时序无错乱、无重叠失真,完全匹配闸流管双阶段导通的时序要求,协同时序仿真波形如图 9 所示。

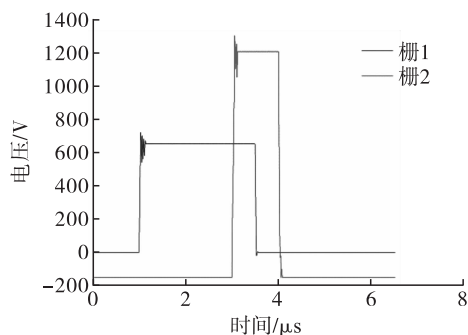


图 9 栅 1、栅 2 时序关系

仿真结果表明,该装置的电路拓扑设计合理,输出的双脉冲在参数、时序上均与闸流管的双脉冲触发要求精准匹配,为后续硬件制作与调试提供了可靠的理论支撑。

4 实验验证及结果分析

为验证双脉冲触发装置对闸流管双脉冲触发要求的匹配性,以及实际工作性能,搭建 $60\ \text{kV}/5100\ \text{A}$ 高压大电流实验平台,以实际闸流管为测试对象,开展双脉冲参数匹配性、触发动抖、长期稳定性等关键性能测试,并传统单脉冲触发方案在相同工况、同一闸流管下进行对比测试,验证该装置的适配性与性能优势。

4.1 实验平台搭建

实验平台由 $60\ \text{kV}$ 高压发生器、 $5100\ \text{A}$ 负载模拟单元、 $3\ \text{Hz}$ 重复频率控制模块、高精度数据采集系统、待测闸流管组成;数据采集系统选用 $1\ \text{GHz}$ 采样频率的数字示波器、高精度万用表与霍尔电流传感器,电压测量精度 $\pm 0.1\ \text{V}$,电流测量精度 $\pm 0.5\ \text{A}$,重点采集双脉冲的参数、时序及闸流管的导通特性;对比测试采用同一台闸流管、同一套高压负载系统,仅更换触发装置,保证对比测试的公平性与有效性;实验过程中严格执行高压安全操作规范,设置多重安全防护措施。

4.2 关键性能测试结果

4.2.1 脉冲参数测试

对 G1 预触发、G2 主触发通道的输出脉冲参数进行实测,结果与仿真高度吻合,且所有参数均与闸流管的双脉冲触发要求精准匹配,核心测试结果如下:

(1) G1 预触发通道:实测输出脉冲电压 $650\ \text{V}$,脉宽 $2.5\ \mu\text{s}$,最大驱动电流 $45\ \text{A}$,脉冲平顶度优异,

无明显压降,满足闸流管预电离阶段的大电流、缓前沿要求,实测波形如图 10 所示。



图 10 触发装置 G1 波形

(2) G2 主触发通道:实测输出脉冲电压 $1200\ \text{V}$,脉宽 $1\ \mu\text{s}$,上升速率 $8\ \text{kV}/\mu\text{s}$, $-150\ \text{V}$ 负偏压输出稳定,无杂散干扰,满足闸流管主间隙导通阶段的高幅度、快上升沿要求,实测波形如图 11 所示。

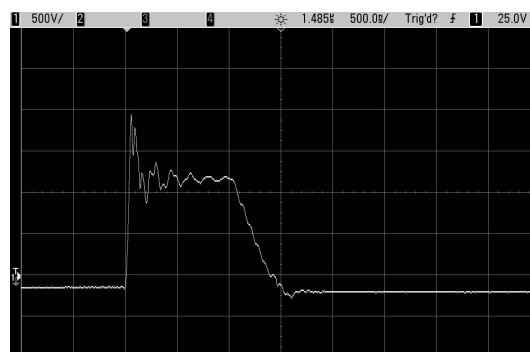


图 11 触发装置 G2 波形

实测栅 1、栅 2 波形有不同程度的震荡现象,经过研判,震荡幅值没有超过闸流管栅极的耐压,且震荡衰减肯快,不会影响触发器触发功能,反而说明触发前沿足够快,不需要特别处理,因此实测波形满足使用要求。

4.2.2 双脉冲时序协同测试

对 G1、G2 双脉冲的时序配合进行实测,结果显示:G1 预触发脉冲超前 G2 主触发脉冲 $2.0\ \mu\text{s}$ 输出,搭接时间 $0.5\ \mu\text{s}$,完全匹配闸流管双阶段导通的时序要求,无时序错乱、重叠失真等问题,确保闸流管栅极的等离子体区形成后,主触发脉冲及时作用,实现稳定导通。

4.2.3 触发动抖、平顶度及稳定性测试

在 $63\ \text{kV}/5000\ \text{A}$ 、 $3\ \text{Hz}$ 重复频率的额定工况下,以实际闸流管为对象,开展触发动抖测试、不同电压平顶度测试及 $72\ \text{h}$ 长期稳定性测试,测试结果如下:

(1)触发动抖:连续测试 1000 次触发过程,因双脉冲与闸流管精准匹配,闸流管导通电流波形上升沿抖动 $6.9\ \text{ns}$,小于 $10\ \text{ns}$ 的设计指标,实现了低

抖动触发,电流波形抖动测试结果如图 12 所示。

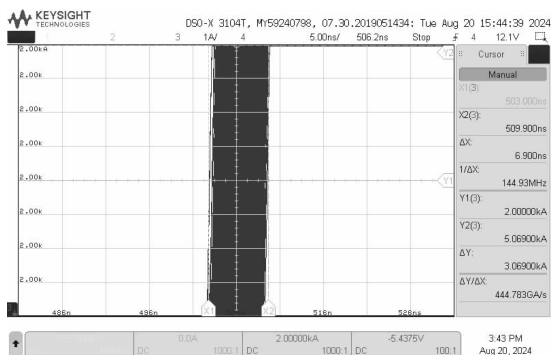


图 12 电流波形抖动

(2) 平顶度检测:分别设置电压为 20 kV、40 kV、63 kV,观察及测试对应电流波形的平顶度,平顶度检查表如表 1 所示。

(3) 长期稳定性:装置连续 72 小时无故障运行,期间实时监测悬浮电压、输出电流、电流平顶度等参数,悬浮电压保持 63 kV,输出电流大于 5000 A,电流平顶度波动 $\leq \pm 2\%$,无过压、过流或器件损坏现象,闸流管运行状态稳定,无不导通现象,72 小时连续运行稳定性测试结果如表 2 所示。

表 1 平顶度检查表

序号	充电电压设置值	平顶度要求	检测仪器	检验结果	结论
1	20 kV	$(I_{\text{MAX}} - I_{\text{MIN}})/2 \leq \pm 1\%$	示波器	$I = 1541.625 \text{ A}$ $I_{\text{MAX}} = 1557 \text{ A}$ $I_{\text{MIN}} = 1526.25 \text{ A}$ 平顶度 = $\pm 1\%$	通过
2	40 kV	$(I_{\text{MAX}} - I_{\text{MIN}})/2 \leq \pm 1\%$	示波器	$I = 3188.625 \text{ A}$ $I_{\text{MAX}} = 3201 \text{ A}$ $I_{\text{MIN}} = 3139.5 \text{ A}$ 平顶度 = $\pm 0.96\%$	通过
3	63 kV	$(I_{\text{MAX}} - I_{\text{MIN}})/2 \leq \pm 1\%$	示波器	$I = 5085.5 \text{ A}$ $I_{\text{MAX}} = 5136.25 \text{ A}$ $I_{\text{MIN}} = 5034.75 \text{ A}$ 平顶度 = $\pm 1\%$	通过

表 2 72 小时连续运行稳定性测试结果

运行时间	匹配负载结温变化	导通电压	输出电流	电流平顶度	结论
2024.9.27 15:05 (22 h)	26.1 ℃	63 kV	5040 A	$\leq \pm 1\%$	通过
2024.9.28 15:02 (46 h)	26 ℃	63 kV	5045 A	$\leq \pm 1\%$	通过
2024.9.29 15:04 (70 h)	25.9 ℃	63 kV	5043 A	$\leq \pm 1\%$	通过

4.2.4 与单脉冲方案的对比测试结果

在相同 63 kV/5000 A、3 Hz 重复频率工况下,将该装置与传统单脉冲触发方案在同一台闸流管上进行对比测试,核心测试指标包括导通抖动、脉冲上升速率、连续无故障运行时间、闸流管工作状态,对比测试结果如表 3 所示,核心差异源于该装置匹配闸流管双脉冲触发要求,而传统方案为非双脉冲架构,无法适配。

(1) 触发延迟与导通抖动:该装置因双脉冲与闸流管精准匹配,导通抖动 6.9 ns,较传统单脉冲方案降低 84.2%,传统方案因无法形成稳定等离子体区,放电分散性大,触发抖动大幅偏高;

(2) 脉冲上升速率:该装置 G2 主触发通道脉冲上升速率 8.0 kV/ μs ,完全匹配闸流管主导通的快

上升沿要求,较传统单脉冲方案提升 3.4 倍;而传统方案因漏感大、拓扑简单,脉冲上升速率难以提升,无法满足百纳秒级前沿要求;

(3) 连续无故障运行时间:该装置连续运行 72 小时无故障,闸流管状态稳定;而传统单脉冲方案因单脉冲能量集中,运行 4 小时即出现不导通、脉冲失真等问题。

表 3 该装置与传统单触发方案对比测试结果

测试指标	该装置	传统单脉冲方案
导通抖动/ns	6.9	43.7
脉冲上升速率/(kV/ μs)	8.0	1.8
连续无故障运行时间/h	72	4
闸流管工作状态	工作状态稳定	出现不导通、抖动大等问题

对比测试结果表明,该装置作为闸流管专用双脉冲触发装置,完美匹配其双脉冲触发的固有工作要求,在核心性能指标、运行稳定性、闸流管寿命提升等方面均显著优于传统单脉冲触发方案,解决了传统方案因适配性缺陷导致的一系列问题,具备工程应用的可行性与优越性。

5 结论

该文针对传统单脉冲触发方案无法适配大功率闸流管的核心问题,研制了一款专用的双脉冲触发装置,通过双通道架构与高精度时序控制,实现了预触发、主触发双脉冲的参数精准调控与时序协同,完美匹配闸流管预电离-主导通的双阶段导电机理,并通过与传统单脉冲方案的对比测试验证了装置的适配性与性能优势,核心研究结论如下:

(1)传统单脉冲高压触发方案,因无法匹配大功率闸流管的双脉冲触发核心要求,导致闸流管放电分散、触发动抖 $>40\text{ ns}$ 、寿命短等问题,无法充分发挥闸流管的固有性能;

(2)该装置为闸流管定制设计,构建了 G1 预触发、G2 主触发双独立功率通道,输出的双脉冲参数分别精准匹配闸流管预电离、主间隙导通阶段的要求,且通过高精度延时控制实现两路脉冲 $2\text{ }\mu\text{s}$ 超前、 $\geq 0.25\text{ }\mu\text{s}$ 搭接的时序协同,完全匹配闸流管的双脉冲触发时序要求,从根本上解决了传统方案的适配性缺陷;

(3)该装置采用高速 MOS 管与定制化脉冲变压器设计,G1 预触发通道最大驱动电流 45 A ,G2 主触发通道脉冲上升速率达 $8\text{ kV}/\mu\text{s}$,匹配闸流管后实现触发导通抖抖 $<10\text{ ns}$,较传统单脉冲方案降低 80% 以上,同时设置 -150 V 负偏压与多重保护机制,72 小时连续运行参数波动 $\leq \pm 2\%$,闸流管无烧蚀、无误导通;

(4)测试结果表明,该装置在导通抖动、脉冲上升速率、连续无故障运行时间等核心指标上均显著优于传统单脉冲方案,且能大幅提升闸流管的使用寿命,在不改变闸流管原有结构的前提下,为闸流管在 $60\text{ kV}/5100\text{ A}$ 、 3 Hz 重复频率的高压大电流快脉冲系统的可靠应用提供了专用配套技术支撑。

参考文献:

- [1] 江伟华,德地明,须贝太一,等.小型脉冲功率发生器的电路方法与实践[J].强激光与粒子束,2024,36(5):5-12.
- [2] 翟心哲,陈锦晖,王冠文,等.一种基于 LC 谐振放电的感应叠加固态脉冲电源[J].强激光与粒子束,2024,36(11):163-169.
- [3] 谢惠藩,彭光强,姚传涛,等.昆柳龙特高压混合多端直流阀控触发异常分析及优化措施[J].南方电网技术,2024,18(03):104-110+128.
- [4] 饶俊峰,汤鹏,王永刚,等.基于谐振电路与脉冲变压器的高压脉冲源设计[J].强激光与粒子束,2022,34(4):143-149.
- [5] 叶明天,张迎鹏,龙天骏,等.基于脉冲变压器的快前沿固态触发器[J].强激光与粒子束,2024,36(02):26-31.
- [6] 赵森,蔡永胜,杨阳,等.应用于 X 射线分幅相机的高精度低抖动精密同步系统设计[J].光子学报,2025,54(05):54-66.
- [7] 刘悦,周洁敏,洪峰,等.基于脉冲变压器的高压脉冲电源设计[J].电力电子技术,2025,59(07):94-99.
- [8] 江进波,王佳栋,程廷强,等.基于场路耦合方法的 100 kV 脉冲变压器设计与磁饱和特性[J].高电压技术,2022,48(12):4893-4903.
- [9] 李海涛.基于超导储能脉冲变压器的脉冲电源模式研究与系统设计[D].成都:西南交通大学,2012.
- [10] 刘玉录,李文正,陈杨,等.面向绕组监测的磁隔离直线变压器脉冲源研制[J].电力电子技术,2024,58(06):28-31+49.
- [11] 桂斌,章飞.基于特征建模的静电除尘脉冲电源控制方法研究[J].传感器与微系统,2020,39(12):74-77.
- [12] 李捷,罗红娥,顾金良,等.脉冲功率源控制及在线电流检测技术研究[J].国外电子测量技术,2021,40(5):73-77.
- [13] 刘祥洋,徐海,李浩宇,等.基于 FPGA 实现的等效型 SVPWM 算法的研究[J/OL].电力电子技术,1-7[2026-01-09].
- [14] 林倩,杨姝玥,黄翔东.基于 Simulink 的 SPWM 逆变电路谐波分析[J].现代电子技术,2023,46(12):22-26.