

光纤通讯技术在晶闸管触发系统中的应用

黄连生¹, 傅鹏¹, 王林森¹, 王祥学²

(1.中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031; 2 中铝山东分公司动力厂, 山东 淄博 255052)

摘要:介绍了利用光纤通讯技术传输晶闸管触发脉冲实现普通晶闸管光纤触发的方法。光纤收发模块和光分路器配合使用传输晶闸管触发脉冲, 光纤传输信号不受外界电磁干扰, 提高了触发系统抗干扰能力。并采用耦合取能技术给高电压端的脉冲接收放大电路供电, 光纤优秀的高压隔离性能和耦合电源的使用使高、低电位电路隔离, 解决了高压大容量晶闸管整流器和晶闸管触发控制系统之间的高压隔离及脉冲抗干扰问题。

关键词:晶闸管; 光纤; 通讯 / 耦合电源; 光分路器

中图分类号: TN344; TN929.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-100X(2007)11-0044-03

Applications of Optical Fiber in the Thyristor Trigger System

HUANG Lian-sheng¹, FU Peng¹, WANG Lin-sen¹, WANG Xiang-xue²

(1. Institute of Plasma Physics of CAS, Hefei 230031, China; 2 Shandong Aluminum Corporation, Zibo 255052, China)

Abstract: This paper describes a method in which the optical fiber communication technology was used for transmitting the thyristor trigger pulse to make the ordinary thyristor triggered by optical fiber. The transmission of thyristor trigger pulses was realized by using optical fiber transmitters and receivers modules in combination with splitter. The transmission of signals by optical fiber was immune from interference by electromagnetic field in the environment, which enhanced the trigger system's antijamming ability. Novel self-supply technology was applied to supply power to the pulse-receiving-magnifying circuit in the high voltage end. The high voltage-isolation performance of optical fiber and the use of self supplied power completely separated the high and low potential circuits, which realized the isolation between high voltage, large capacity thyristor rectifier and thyristor trigger-control system.

Keywords: thyristor; optical fiber; communication / self supplied power; optical splitter

Foundation Project: Supported by National Mega-Project 'Ninth-Five-Years-Plan' of Science Research of Experimental Advanced Superconducting Tokamak [No.(1998)1303]

1 引言

随着超导应用技术的发展, 国际上发达国家一直在竭力研究和发展托卡马克磁约束受控核聚变试验装置, 力图从根本上解决能源短缺问题^[1]。超导托卡马克核聚变试验装置 (Experimental Advanced Superconducting Tokamak, 简称 EAST) 作为中国“九五”重大科学项目之一, 于 1998 年批准立项。托卡马克试验装置的高功率电源系统包括纵场电源、极向场电源、等离子体快控电源。极向场电源是其中规模最大的子系统, 它由 12 组独立可调的晶闸管变流器分别向 12 组相互耦合的极向场超导线圈供电, 实现等离子体的产生、加热和平衡的实时控制。

EAST 极向场电源晶闸管数量极多, 在运行过程中, 一千多个晶闸管同时工作, 由此产生了极强的电磁干扰。触发控制器处于强电磁干扰环境, 触发脉

冲在这种环境下受到强干扰, 脉冲品质变差, 容易导致晶闸管误触发或不触发。晶闸管整流器的电压高达数千伏, 处于高压状态, 而触发控制系统则是低压弱电系统, 为保障触发控制系统的安全, 必须采取高压隔离措施, 将高低电位单元隔离。目前采用变压器隔离或光耦隔离方式能解决数千伏电压的隔离问题, 但要隔离更高等级电压比较困难, 也无法解决触发系统长距离传输过程中抗干扰问题。为了有效解决低压电路高压隔离问题和脉冲传输受干扰问题, 采用了晶闸管光纤触发方案。

2 EAST 变流器

图 1 示出变流器主回路, 它采用三相桥式同相逆并联整流电路。其原理是采用两个相同的整流桥反并联连接, 从结构上按相位组合在一起, 构成自二次绕组直到整流臂的两组同相反极性, 引线尽可能靠近配置, 其通过的电流在任何瞬间都大小相等、方向相反, 使各自所产生的交变磁通在两逆并导体的外部相互抵消。从而减少各部分线路电抗, 并增加相间、臂间阻抗的对称性。

基金项目: “九五”大科学工程超导托卡马克核聚变试验装置((1998)1303)

定稿日期: 2007-07-10

作者简介: 黄连生(1983-), 男, 江西赣州人, 硕士研究生, 研究方向整流器控制、数字触发技术。

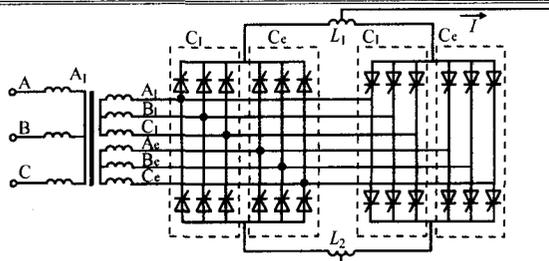
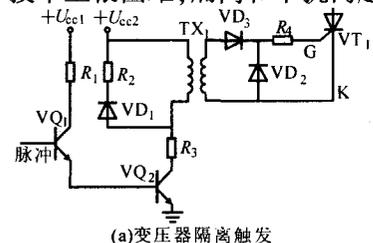


图1 电源主回路

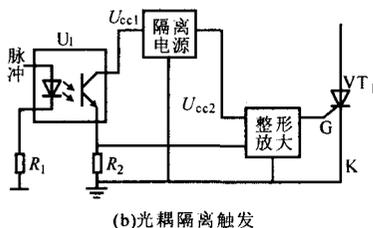
3 触发方案比较

目前,有图2所示几种晶闸管触发方案:

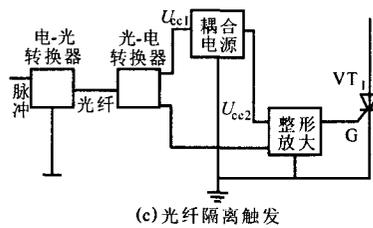
(1)直接电触发即变压器隔离触发方式,见图2a将低电位触发脉冲信号经脉冲变压器隔离后送到高电位晶闸管门极。这种方式触发脉冲采用全电缆传输,电磁干扰严重,而且制造高耐压的脉冲变压器技术上很困难,隔离和干扰问题难以解决。



(a)变压器隔离触发



(b)光耦隔离触发



(c)光纤隔离触发

图2 触发方式

将触发脉冲经过光耦合器传输至高电位脉冲放大电路,脉冲放大后触发晶闸管。该方式可隔离上千伏高压,但是当电压继续升高时则难以胜任。该方式仍采用全电路传输脉冲,脉冲传输受干扰问题未能解决;
②光纤隔离触发,采用光纤通讯技术,即触发脉冲经过电光转换器耦合到光纤,然后由光纤传输到高电位脉冲放大单元,再经光电转换器输出电信号,整形、放大后输出到晶闸管门极。该方式解决了高压隔离问题,同时因采用光纤传输脉冲,光在传输途中不受电磁干扰,极大地减少了脉冲受电磁干扰的机会。

4 晶闸管光纤触发方案

由于光控晶闸管成本很高,为解决控制电路高

压隔离问题和脉冲传输受干扰问题,同时兼顾成本问题,这里采用间接光触发方案的第二种——光纤隔离触发。

光纤通讯是以光波为载波,以光导纤维为传输媒介的一种通讯方式。光纤通讯具有一系列优点:传输频带宽,传输容量大,损耗低,不受电磁干扰,线径细,重量轻等优点^[2]。光纤制造材料具有高绝缘性,隔离电压等级几乎不受限制。

EAST极向场电源中一组整流器输出15kA电流、1kV电压,采用多晶闸管并联结构,而且是由两组整流桥反并联运行。每组整流器中,每个桥臂由3个晶闸管并联构成,反并联的是两个相同结构的整流桥,每6个晶闸管成一组接收同一路触发脉冲。Alpha板产生三相六路触发脉冲,因此需要将这6路脉冲中的每路脉冲分为3×2路。脉冲传输结构如图3所示。先将触发脉冲在电路中先一分为二,然后采用光分路器在光路中一分为三。这种方案具有线路简单、光纤发送器最少、成本低等优点。

光发送器选用低功耗的LED源光纤收发器^[3],光发送模块HFBR-1414和光接收模块HFBR-2412配合使用,其性能指标为:通讯速率最大值为5Mbd;工作温度-40~+85℃;发送器电流越大可传输距离越远,最大传输距离2km,采用62.5/125μm芯光纤。

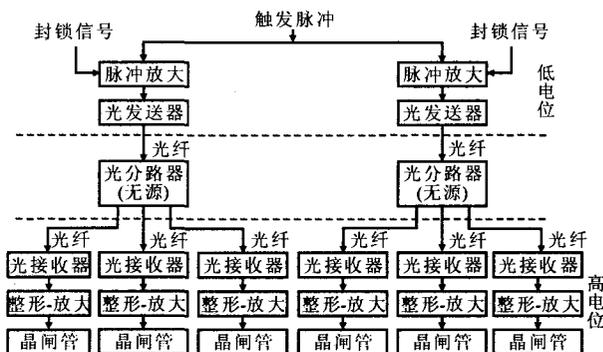


图3 脉冲传输结构

4.1 光分路器

光分路器是无源器件,采用的是熔融拉锥技术一次性成型。光分路器将光纤传输的一路光纤信号平均分成多路光纤信号。均分后的每路光纤信号与原光信号比较只是光强度略有衰减,所传输信号的其它特性保持不变,即在光路中实现传输信号按比例分配。光分路器不需要电源供电及其它外围辅助电路,只要不出现机械碰撞致使光分路器损坏,即可长时间无故障运行,可靠性极高。光收发器HFBR-1414是LED源,产生820nm波长信号,需要利用多模光纤传输,因此这里选用1×4多模光纤分路器^[4],

使用其中 3 个输出口,另一个输出口备用。分路器的工作波长为 850nm 和 1300nm, 典型附加损耗为 1.5dB,最大插入损耗为 8.4 dB,均匀性为 1.8 dB,工作温度为-20~+75℃。

4.2 光发送电路

光分路器损耗对光波长敏感,多模光纤分路器损耗极大,光分路器最大可接收能量为输入的 40%,即 1×4 分路器每路最大可接收能量为输入的 10%。光纤接口插入存在损耗,光信号在光纤传输中也存在损耗,实际每路接收率小于 10%。因此,在光发送端需要加大发送电流,才能保证 HFBR-2412 的可靠接收。图 4 示出光纤发送电路,采用三极管 2N1893 放大。经实验测试,在光纤长度为 14m 时,最小发送电流为 10mA,此时有:

$$R_3 = (U_{cc} - U_{sat} - U_{ce}) / I = (5 - 1.5 - 0.04) \text{V} / 0.01 \text{A} = 346 \Omega \quad (1)$$

式中 U_{cc} ——电源电压 U_{sat} ——HFBR-1414 饱和电压降

U_{ce} ——2N1893 导通电压降

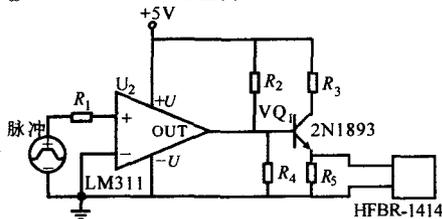


图 4 光发送电路

为保障 HFBR-2412 可靠接收信号,需要适当增大发送电流,实际取值 $R_3=200\Omega$,发送电流:

$$I = (U_{cc} - U_{sat} - U_{ce}) / R_3 = (5 - 1.5 - 0.04) \text{V} / 200 \Omega \approx 17.3 \text{mA} \quad (2)$$

4.3 光接收电路

光接收模块 HFBR-2412 输出为 TTL 电平格式,图 5a 示出其光接收和脉冲整形电路。

实验测得 HFBR-2412 输出逻辑低电平电压为 0.7V,输出脉冲上升时间约为 460ns,上升时间较长。在 HFBR-2412 接收电路后加一级整形电路,缩短脉冲上升时间,优化脉冲波形。HFBR-2412 输入输出为反逻辑关系,因此 LM311 反相端为脉冲输入端。为了最大限度地减少脉冲传输延时,在电路允许范围内参考电压应尽量取小,可缩短脉冲传输时延,缩短系统响应时间,整形电路参考电压取值:

$$U_{ref} = U_{cc} R_3 / (R_2 + R_3) = 5 \times 2 / (10 + 2) = 0.83 \text{V} \quad (3)$$

图 5b 示出光纤接收器 HFBR-2412 输出 u_o 波形和控制板输出脉冲 u_c 波形,图 5c 示出带晶闸管负载的实际工作波形。可看出触发脉冲波形传输质量高,波形完全满足整流器晶闸管触发要求。

5 耦合电源

采用电容耦合式电源,使高电位脉冲放大单元与

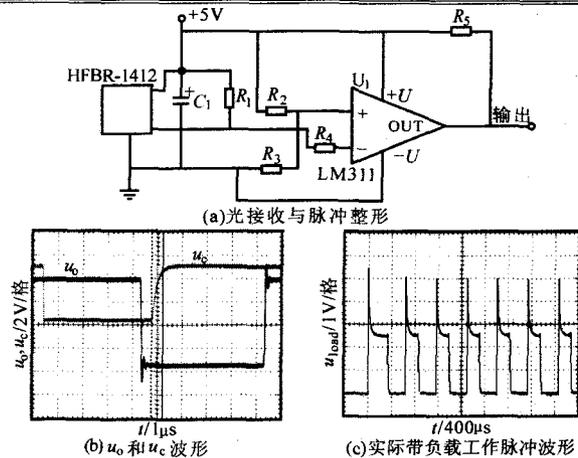


图 5 光接收和脉冲整形电路及其输出脉冲和实际带载工作波形

低电位控制单元没有电磁联系,只有光联系,实现了高压隔离。图 6 示出耦合电源原理。

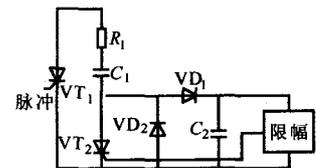


图 6 耦合电源原理

图中 R_1, C_1, C_2 ——阻容吸收电路的电阻、电容及储能电容
 VT_1, VT_2 ——整流晶闸管和耦合电源保护晶闸管

当晶闸管截止时,耦合取能电路通过阻容吸收电路获取能量,交流电源通过 C_1 向耦合单元充电, VD_1, VD_2 构成半波整流电路, VD_2 也是阻容吸收通道。当 C_2 上电压超过设定电压值时,限幅电路工作,限幅电路同时触发保护晶闸管 VT_2 使其导通,此时相当于耦合单元输入短路,防止耦合单元过压损坏。当 VT_1 导通时, VD_1 截止,由于 VT_1 导通压降很小约为 1~3V,而 C_2 电压高于 3V,此时耦合取能电路不工作,如此循环工作。由于三相全桥整流电路中每一个晶闸管仅有 1/3 周期处于导通状态,而且在一个工作周期内晶闸管一旦被触发导通就不再需要发出脉冲,耦合能量大小与 C_2 有以下关系:

$$W = W_c = 0.5 C_2 u^2(t) - 0.5 C_2 u^2(-\infty) \quad (4)$$

C_2 充电到设定电压 U_1 , 脉冲功率放大后 C_2 上的能量被消耗掉一部分,电压降为 U_2 , 因此 C_2 实际释放能量为:

$$W = W_c = 0.5 C_2 U_1^2 - 0.5 C_2 U_2^2 \quad (5)$$

耦合电源功率要满足脉冲放大功率的需求, C_2 的最小取值为:

$$C_2 = W / (0.5 U_1^2 - 0.5 U_2^2) \quad (6)$$

W 是脉冲放大电路消耗的最大能量,该值只能根据实际电路估算。储能电容实际取值为 $C_2=60\mu\text{F}$ 。

6 结论

光纤触发系统已经成功应用在 EAST 极向场电源系统中。光纤触发方式采用全光路传输触发脉冲,使触发脉冲在传输过程中不受电磁干(下转第 70 页)

图 3a 示出采用有源箝位方式和硬开关方式的占空比到输出电压的传递函数 G_{ud} 的比较。由图可见,有源箝位电路消除了硬开关电路在转折频率处的高 Q 值,但是 G_{ud} 会有一些掉落,同时右半平面零点的位置右移,使得系统的性能变得更加优异。

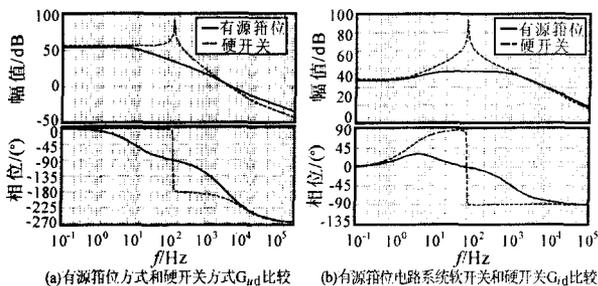


图 3 采用有源箝位方式和硬开关方式 G_{ud} 和 G_{ol} 的比较

图 3b 为采用有源箝位方式和硬开关方式 G_{ol} 的比较,可以看出,采用有源箝位以后系统的幅频衰减性能更好,输出受输入电压波动的影响更小。

6 实验结果分析

根据仿真参数设计了其实验电路,鉴于实验条件等因素,以 30V 输入 33% 负载来进行实验分析。

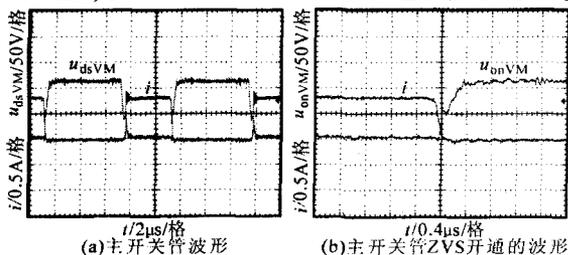


图 4 主开关管漏源电压和 ZVS 开通实验波形

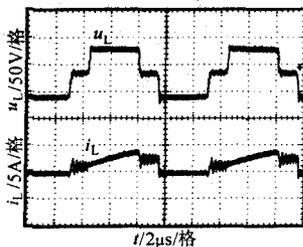


图 5 负载电压、电流实验波形

图 4 示出主开关管漏源电压 u_{dsVM} 及其 ZVS 开通时的 u_{onVM} 实验波形;图 5 示出负载电压 u_L 和电流 i_L 实验波形;图 6 示出辅助开关管漏源电压 u_{dsVMA} 及

其 ZVS 开通时的 u_{onVMA} 实验波形。

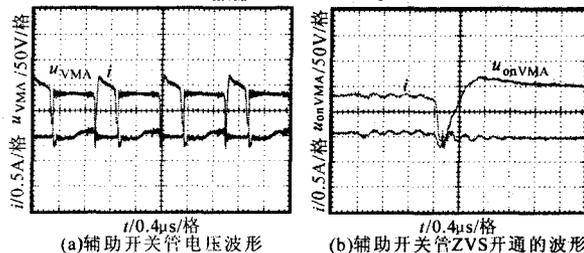


图 6 辅助开关管漏源电压和 ZVS 开通实验波形

实验证明,在电压高变换比的情况下,采用了有源箝位技术的电流馈电半桥变换器,其主、辅开关管所承受的电压均被有效箝位,主、辅开关管在轻载到满载的负载范围内均能实现 ZVS 开通,有效地提高了变换器的效率。

7 总结

根据轮毂电动汽车的特点设计了一个 DC/DC 型 Boost PWM 功率变换器,并作了小信号建模分析、仿真优化设计及实验。实验数据显示,基于有源箝位的电流馈电半桥模型应用在轮毂电动汽车功率变换器设计上是合理的,它不仅可以提高电压变换的升压比,也实现了软开关的动作。随着电力电子技术及电机控制系统的发展,各种节能方案将逐步地应用到电动汽车上。

参考文献

- [1] Antonio Affanni, Alerto Bellini, Giovanni Francschini, et al. Battery Chice and Management for New-Generation Electric Vehicles[J].IEEE Trans. on Industronics, 2005, 52 (5): 1343~1348.
- [2] Sang-Kyoo, Hyun-Ki Yoon, Gun-Woo Moon, et al. New Active Clamping Zero-Voltage Switching PWM Current-Fed Half-Bridge Converter [J].IEEE Trans. on Power Electronics, 2005, 20(6): 1271~1279.
- [3] Chen Min, Sun Jian. Reduced-Order Averaged Modeling of Active Clamp Converters[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2006, 21(2): 487~494.

(上接第 46 页)扰,以提高触发系统抗干扰能力;利用光纤材料的高绝缘特性和耦合取能方式供电,解决了触发控制电路隔离高压问题。与使用光控晶闸管相比,晶闸管光纤触发方式的特点是成本低;与传统变压器隔离触发方式相比,这种触发方式触发脉冲品质大幅提高。因此,普通晶闸管光纤触发方法具有成本低,性能好的综合优势,在高压电力电子设备中的应用将越来越广泛。

参考文献

- [1] De Lorenzi A, Bettini P, Peruzzo S, et al. Thyristor Making

Switch System for Plasma Startup Control in RFX[A].Fusion Engineering, 18th Symposium [C].25~29 Oct.1999: 421~424.

- [2] 高炜烈,张金菊.光纤通讯[M].北京:人民邮电出版社, 1999.
- [3] HP. Low Cost Miniature Fiber Optic Components with ST[®], SMA, SC and FC Ports Technical Data[Z].1997.
- [4] FOCL, C-NM Standard Multimode Couplers Data[Z].2005.
- [5] Jun Zhang, Renjie Ding, Haitao Song. A New Reliable Self Supplied Gate Drive Circuit for SCRS with Breakover Diodes for Protection[A].IEEE ISCAS'04. 2004[C].2004:972~975.