

球隙火花开关的高压触发装置设计^①

孙旭霞¹, 孙伟¹, 姚梦钰¹, 张世英²

¹(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 西安 710048)

²(武警工程大学 信息工程系, 西安 710086)

摘要: 研制了一种用于高压球隙开关的触发装置,该装置采用了全桥逆变与倍压整流为核心的电路方案。在阐述电路工作原理的基础上分析了输出电压与倍压电容之间的关系,作为参数选择的依据。并设计了以小铜球为触发开关的点火控制回路,保证球隙开关击穿的可靠性与快速性。同时以 Atmega16 型单片机作为控制核心编写软件程序,保证高压球隙开关工作在电压低抖动的可靠状态。通过 PSCAD 仿真软件进行了方案验证,并搭建实验样机。实验结果表明,该装置输出电压精度高、充电时间短、性能稳定。

关键词: 高压球隙开关; 全桥逆变电路; 倍压整流电路; PSCAD

Design of High-Voltage Trigger Device in Spark Gap Switches

SUN Xu-Xia¹, SUN Wei¹, YAO Meng-Yu¹, ZHANG Shi-Ying²

¹(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

²(School of Information Engineering, Engineering University of CAPF, Xi'an 710086, China)

Abstract: The triggering device of spark gap switches is developed in this paper. It adapts a circuit scheme of the full bridge inverter and voltage doubling rectifier as the core. The paper also analyzes the relationship between output voltage and doubling capacitance on the basis of the working principle of the circuit as the basis of parameter selection. And designing an ignited control circuit with copper ball trigger switch for guaranteeing the reliability and quickness of the ball gap switch breakdown. At the same time, using the Atmega16 microcomputer is control core for program to ensure high voltage ball gap switches working in a reliable state of voltage low shake. The device has Verified on the PSCAD simulation software and set up an experimental prototype. And the experimental results show that the device output voltage is in a high precision, short charging time and stable performance.

Key words: high-voltage gap switches; full bridge inverter circuit; voltage doubling rectifier circuit; PACAD

1 引言

球隙开关是一种高电压大电流的开关装置,广泛应用于高压放电实验中,其结构如图1所示。球隙开关由左侧的实心球和右侧的空心点火球组成。当给点火电极施加与对面球电极极性相反的点火脉冲时,点火电极和接地球之间首先引起沿绝缘管表面的沿面放电,从而引起与对面球电极之间电场分布的畸变,使球间隙击穿^[1]。

目前,常采用的球隙开关触发电路主要包括三种:高压脉冲变压器电路、充电电容放电电路以及高压包电路。文献[1]分别介绍了高压脉冲变压器和 IGBT 串

联的触发电路。前者通过高压脉冲变压器提供点火脉冲,引起点火电极和接地半球之间的击穿。但高压脉冲变压器存在分布参数计算复杂且脉冲产生瞬间会导致很强的电磁干的问题。后者采用 IGBT 作为高压电容器的放电开关,在开关管导通期间完成电容电压的瞬间泄放,使球隙开关击穿导通。该方案虽然可减小电磁干扰,但存在多路 IGBT 串联引起的均压问题。另外,通过高压包内线圈自激振荡升压,将高电压加载给球隙开关进行击穿触发。该触发方式设计简单,但高压包存在寿命短、电路功率低的问题。

① 基金项目:西安市科技计划项目(CXY1509(1))

收稿时间:2015-11-16;收到修改稿时间:2016-03-17 [doi: 10.15888/j.cnki.csa.005273]

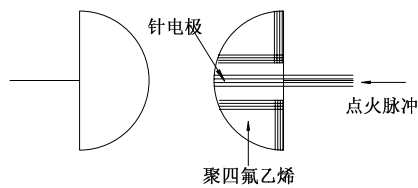


图 1 球隙开关结构图

结合上述方法的优缺点, 本文采用全桥逆变与对称式倍压整流电路给高压电容器充电, 再通过一对小铜球(微型球隙开关)替代 IGBT 接通电路, 最终触发球隙开关. 该方案避免了变压器高压脉冲产生瞬间对电路产生的电磁干扰. 用一对小铜球替代串联起来的 IGBT, 解决了 IGBT 的串联均压问题. 同时在高电压、高能量的要求下, IGBT 和高压脉冲变压器的制造成本都很高, 采用高压电容储能、小铜球的方案较为经济.

2 触发系统总体设计

本文研制的高压触发装置框图如图 2 所示. 主要由 PWM 逆变电路、倍压整流电路、触发回路、开关回路以及控制回路组成. 直流输入电压通过 PWM 逆变产生交流电, 后经双副边变压器升压隔离, 有效地避免了初次级地环路干扰. 变压器的一个副边通过倍压整流给高压电容器充电, 直接为微型球隙开关提供击穿需要的能量; 另一副边通过触发控制回路为微型球隙开关提供触发信号, 使主放电回路导通, 高压脉冲加在可控点火球的触发极和球壳上, 实现最终的击穿导通.

电路的控制系统选择 Atmel 公司的 Atmega16 型单片机作为主控芯片. 主要实现以下几个功能: A/D 转换、数字 PI 运算、PWM 脉冲以及保护和通信等.

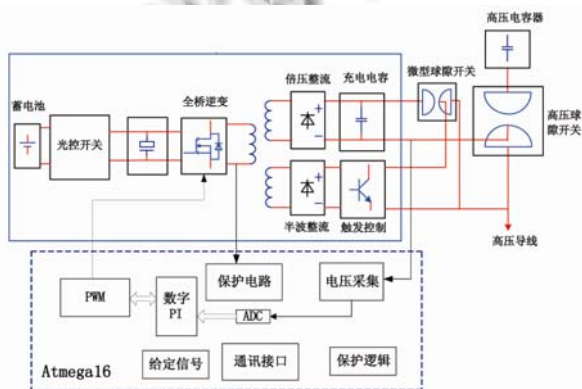


图 2 球隙开关触发电路原理框图

3 主电路设计

3.1 光控开关电路设计

图 3 示出了光控开关电路的结构.

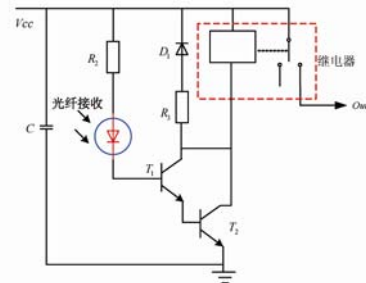


图 3 光控开关电路结构图

该电路通过光纤接收器 HFBR2412 接收远程控制室的控制信号, 并以此控制三极管 T_1 、 T_2 . 若 T_1 、 T_2 导通, 则继电器接收到控制信号, 触点吸合, 从而使主回路开始工作.

由于该电路通常工作在高电压的恶劣环境下, 极易受到强电场与强磁场的干扰, 所以控制信号需通过光纤传输至三极管 T_1 、 T_2 , 从而达到屏蔽干扰信号的目的. T_1 、 T_2 使用达林顿接法, 防止控制信号微弱时难以驱动继电器, 导致电路无法正常工作的情况.

3.2 升压电路设计

该装置的升压电路设计采用前级单相全桥逆变与后级倍压整流电路相结合的方式, 电路拓扑如图 4 所示.

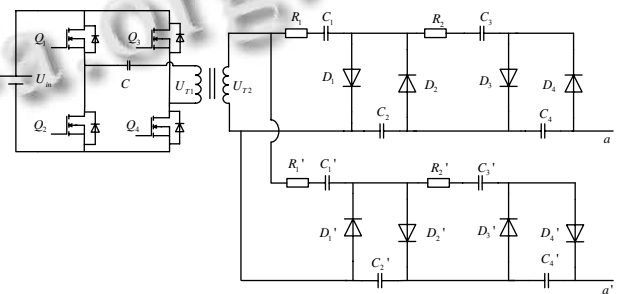


图 4 升压电路结构图

其中, 变压器副边采用了科克罗夫特沃尔顿(C-W, Cockcroft-Walton)对称式倍压整流电路, 其在 C-W 半波整流电路的基础上, 将 $n/2$ (n 为倍压电路的级数且为偶数) 级的 C-W 电路作为正向电压输出, 另 $n/2$ 级的 C-W 电路作为负向输出, 从而得到 n 级输出电压. 该电路有效地缩短了电路达到稳态的时间, 并降低了电

压纹波. 具体的工作过程为: t_0 时刻, Q_1 、 Q_4 导通, 变压器副边通过 D_1 、 R_1 向 C_1 充电, 此时由于 C_1 两端的电压不能突变, 故电压 U_{T2} 全部降落在 R_1 上. 随着 C_1 上的电压值逐渐升高, R_1 上的电压逐渐降为零; t_1 时刻, Q_2 、 Q_3 导通, D_1 承受 $2U_{T2}$ 的反相电压截止, 变压器副边通过 R_1 、 C_1 以及 D_2 向 C_2 充电. 当充电达到稳定状态时, C_2 上的电压为 $2U_{T2}$. 如此往复, 最终使得 $C_2 \sim C_4$ 上的电压均为 $2U_{T2}$, C_1 上的电压为 U_{T2} . 与此同时, 另 $n/2$ 级整流电路以相同的工作过程达到同样的输出电压, 但其电压为负向. 因此, 输出端 aa' 的电压 $U_{aa'}$ 为 $8U_{T2}$, 从而实现八倍压的输出. 由于两部分整流电路同时工作, 故其达到稳定状态的时间远远小于串联的 C-W 八倍压整流电路.

理论上, 无负载时, 该倍压电路的输出电压应为 $2nU_T$. 但若倍压电路接入负载, 则最终输出电压会因内部的压降而降低. 则电容器上输出的总压降为^[1]:

$$\Delta U = \frac{(8n^3 + 3n^2 + n)I_d}{12fC} \quad (1)$$

式中:

I_d —— 负载的平均电流;

n —— 串级倍压电路的级数;

f —— 电流的频率;

C —— 电容值;

电压脉动幅值为^[1]:

$$\delta U \approx \frac{n(n+2)I_d}{16fC} \quad (2)$$

根据式(1)、(2)可以看出, 电容器上输出的总压降和电压脉动幅值均与负载电流成正比, 与电容值和频率成反比, 且随倍压电路级数的增加而迅速增大. 实际中, 输入电压频率和倍压级数已经确定, 输出电流也有指标要求. 则要得到良好的输出品质, 主要通过调整参数 C 来进行. 表 1 为不同电容参数对输出电压的影响.

表 1 不同参数倍压电容对输出电压的仿真结果

倍压电容	输出电压	电压峰峰值	纹波系数
nF	kV	V	%
10	-4.917	5586	11.4
25	-6.889	420	6.1
50	-8.075	145	1.8
100	-10.392	35	0.34
200	-11.167	20	0.17

由表 1 可知, 随着倍压电路中电容容值的减小, 输出电压的压降越来越大, 纹波也越来越大, 最终导致输出电压不足以满足要求. 故本次设计利用对称式倍压整流电路达到稳态时间较短的优点, 选择增大电容 C 值来满足输出电压的要求.

如图 4 所示, 该倍压电路中每一级均加入了电阻 R_i . 该电阻一方面可以使倍压电路各级间充电平稳, 避免在电路开始工作到稳态建立的过程中产生的较大的冲击电流; 另一方面也可在输出短路放电时限制二极管上的放电电流, 保护二极管. 同时, 通过上述的分析可以发现, 倍压整流电路稳定工作时, $R_1 \sim R_4$ 承受的最大电压为 U_{T2} , $D_1 \sim D_8$ 承受的最大反向电压为 $2U_{T2}$. 因此, 实际中 $R_1 \sim R_4$ 均选用高压绿釉电阻, $D_1 \sim D_8$ 选用高压硅堆.

3.3 触发控制回路设计

触发控制回路为微型球隙开关提供触发信号, 使主放电回路导通, 高压脉冲加在可控点火球的触发极和球壳上, 实现最终的点火. 因触发控制回路与主升压电路相连, 且处于强电场与强磁场的恶劣工作环境中, 故触发控制电路极易受到干扰, 导致误动作; 同时, 因高压合成实验中对时间的严格要求, 点火装置的触发延时通常为 $400 \pm 50 \mu s$, 因此, 触发控制电路必须动作迅速、可靠且具有较强的抗电磁干扰能力.

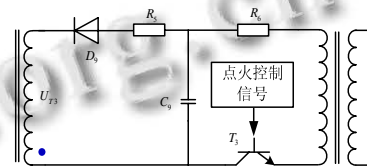


图 5 触发控制主回路

图 5 示出了触发控制回路的结构. 变压器副边产生幅值为 U_{T3} 的电压, 后经二极管整流为电容 C_1 充电. 若三极管 T_3 接收到控制室发出的点火控制信号, 则 C_1 通过电阻 R_2 放电, 并产生幅值为 U_{T3} 的脉冲电压. 该脉冲电压通过变压器加在微型球隙开关的触发电极上, 使其击穿, 并最终导致点火脉冲的发出.

由于控制室发出的点火信号不能直接驱动 T_3 导通, 因此需要对该信号进行处理. 如图 6 所示, 点火信号通过隔离变压器、脉宽门限电路、波形变换电路、数字光纤驱动电路、数字光纤发送器以及数字光纤接收器传输至三极管 T_3 控制其导通. 使用隔离变压器避

免了次级高压信号对点火控制信号的干扰；脉冲门限电路有效地限制了输入信号的宽度，滤除由强电场与强磁场的工作环境产生的高频干扰信号；波形变换电路将点火脉冲扩展至 100 μ s 左右，保证 T_3 的可靠导通。

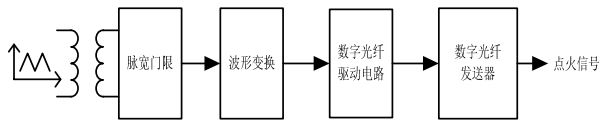


图 6 控制硬件框图

3.4 系统接地与静电屏蔽设计

由于球隙开关一般处于高电压大电流的工作环境中，所以在试验过程中不可避免的会产生地电位波动情况，从而在点火装置内部引起干扰电流，造成装置的误动作。因此，本装置采用了各个模块单点接地的方式，有效地避免了不同接地点之间的电势差，进而避免了电流环路的形成。同时，为了防止外界磁场与电场的干扰，实际设计中采用双屏蔽层的抗干扰方案以及使用远程光纤完成控制信号的传输。

4 控制系统设计

由 ATmega16 单片机为核心的控制板硬件结构框图如图 7 所示。主要包括：A/D 信号调理电路、PWM 脉冲驱动电路、光电隔离电路、通信电路以及保护逻辑电路等。

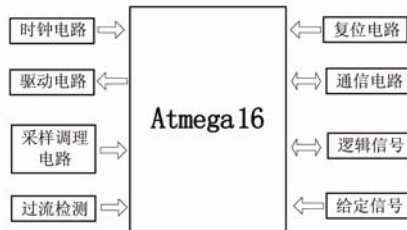


图 7 控制器硬件原理框图

如前文所述，高压球隙开关要求工作在输出电压可靠的低抖动状态，故本文采用以输出电压为控制变量的变速 PI 积分控制。根据输出电压与给定电压差值的大小，改变积分项的累积速度。若差值较大，则积分作用减弱；若差值较小，则积分作用加强。避免了常规 PI 控制中由于积分系数固定而导致的积分饱和现象，增强了系统的快速性。

本装置中，过流保护电路采用了电磁式电流互感

器检测变压器原边的峰值电流，若出现电流瞬间增大且超过参考值的现象，则迅速关断开关管，实现电路的快速保护。并且利用磁芯中存储的能量与电流互感器的开路阻抗在短时间内产生的伏秒积来实现磁芯复位，克服磁芯饱和。

5 仿真及实验结果分析

对触发系统的主放电回路在 PSCAD 软件上进行仿真，得到的结果如下：

图 8 示出了倍压整流电路中有无电阻 $R_1 \sim R_4$ 的电容充电电流。

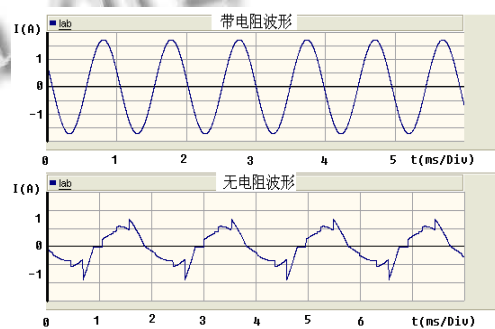


图 8 电容充电电流

从图 8 中可以明显的观察到，若接入电阻，则充电电流波形较为光滑，电路内局部产生的谐波被充分抑制。若无电阻接入，则充电电流波形毛刺较多，波形畸变严重，从而对最终的输出电压脉动幅值产生影响。

图 9 示出了倍压整流电路的输出电压波形。可以看出，电压的脉动幅值在 40V 左右，为输出电压的 0.33%，故不会影响最终的触发脉冲能量。

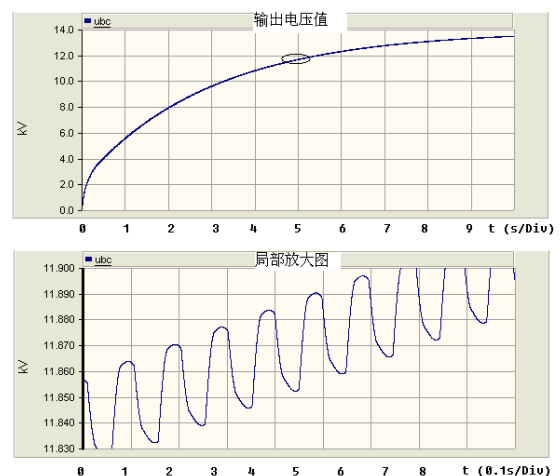


图 9 倍压整流电路输出电压波形

针对该设计搭建了一台实验样机,主要参数如表2所示.

表2 样机主要参数

供电电源	12V
开关频率	5KHz
输出模式	恒压输出
输出电压	12kV
充电时间	30s
输出电压误差	≤2%

表3 新点火装置电压统计表

测量序号	1	2	3	4	5	6
电池电压(V)	12.5	12.4	12.5	12.5	11	10.8
静电电压表读数(kV)	12.5	12.5	13	13	12.5	12.5

经过6次测量得到如表3中所示的输出电压,可以发现输出电压的幅值不小于额定值的.从而保证了球隙开关的可靠击穿.

6 结论

本文设计了一种基于AVR单片机控制的高压球隙开关触发装置.在满足高电压能量输出的同时,解决了球隙开关击穿过程中的可靠性与快速性问题.(1)采用全桥逆变+倍压整流的电路结构为高压电容器充电,确保球隙开关击穿所需要的能量;(2)利用光纤进行控制信号的传输,有效地解决了实际中的强电磁干扰问题;(3)变速PI积分的控制策略,满足了球隙开关需在输出电压可靠的低抖动状态,提高了动态响应速度.

参考文献

- 1 胡可峰,严伟,张学武.高压球隙开关的触发电路设计.微计算机信息,2010,26(3-2): 170-171.
- 2 岳振杰,蔡志远.基于单片机的高压点火装置的研制.中国科技博览,2011,37.
- 3 吴建进,魏学业,袁磊.一种推挽式直流升压电路的设计.电气自动化,2011,33(2):54-56.
- 4 石昊.基于Atmega16的新型智能直流高压电源设计.大众科技,2011,12:120-122.
- 5 李祥超,唐宏科,柴健.一种用于球隙火花开关的高压触发装置.实用新型专利,CN202076675,2011-12-14.
- 6 宋东东,马玉泉,田树耀.基于DSP的逆变电源数字控制电路的设计,2013,02-0029-04.
- 7 史廷东,杨剑威,宁飞.基于IR2156半桥逆变电路的设计与实现,2012,02-0108-04.
- 8 高飞,刘朴.光电点火装置在合成试验中的应用与研究.高压电器技术信息,2009,4.
- 9 陈翔,王从岭,杨平等.倍压整流电路参数分析与设计.科学技术与工程,2012,29-7732-04.
- 10 Kaya. Two-degree-of-freedom IMC structure and controller design for integrating processes based on gain and phase-margin specifications. IEEE Proc. Control Theory Appl, 2004, 151(4): 481-487.
- 11 Campos-Gaona D, Moreno-Goytia EL, Anaya-Lara O. Fault ride-through improvement of DFIG-WT by integrating a two-degree-of-freedom internal model control. IEEE Trans. Industrial Electronics, 2013,3(60): 1133-1145.