电容型高功率脉冲电源控制电路设计

李贞晓，栗保明，杨春霞
（南京理工大学瞬态物理国家重点实验室，江苏 南京 210094）

摘 要：论述了电容型高功率脉冲电源中控制电路的基本功能。指出控制电路设计选用固态继电器主要原因是其具有优良的抗震动性能。采用经验法设计了控制电路，并通过试用改进了控制电路。设计的控制电路满足了电热化学炮与高功率脉冲电源实用化一体集成需要。

关键词：脉冲电源；控制电路；固态继电器；电路设计
中图分类号：TM571 **文献标识码**：B

Design of Control Circuits for Pulse Power Supply

Li Zhenxiao, Li Baoming, Yang Chunxia
(*National Key Laboratory of Transient Physics, NUST, Jiangsu Nanjing* 210094)

Abstract: The basic function of control circuits in pulsed power supply is illustrated. Because of good anti-vibration performance, the solid state relays are selected and used in the control circuits. To meet the practical requirements of electrothermal-chemical gun system, the control circuits are designed by experience means and improved after the trials.

Keywords: pulsed power supply; control circuit; solid state relays; circuit design

1 引 言

高功率脉冲电源(PPS)是为脉冲功率装置负载提供电磁能量的装置。由多个脉冲电容器组为储能单元并联组成的 PPS，具有储能简单，造价低、波形灵活可调，所需充电功率小，抗干扰能力强，方便运输等突出优点，在电热化学炮(ETCG)研究领域得到了广泛应用[1]。

实验研究用的 PPS 通常由充电子系统、脉冲成形子系统、汇流排及大功率传输线、控制与测试子系统、屏蔽与接地子系统等几部分组成[2]。为了避开 ETCG 发射时剧烈的机械震动和强烈的电磁干扰，实验研究时 PPS 的控制子系统的电路通常采用远方方式设计和使用。随着 ETCG 朝实用化方向发展，需要 ETCG 与 PPS 诸系统集成一体，从而要求控制电路必须具有优良的抗机械震动性能，并能在强电磁干扰环境中使用。

2 控制电路功能

PPS 工作时，由控制电路对系统各阶段状态进行监测，并根据监测情况发指令进行系统状态跳转。控制电路主要功能是实现 PPS 的充、放电电控制。

通常，充电子系统内部配有过电流、过电压和过热等故障保护或异常告警装置。但这些装置的保护范围一般仅限于充电子系统内部，PPS 放电时浪涌电压等外部因素仍可能造成充电设备损坏。因此，在储能单元和充电子系统间还需配置一些隔离和保护电路[3]。图 1 给出了用于 ETCG 研究的 PPS 所配置的充电隔离及保护电路。图 1 中，充电隔离开关(Kc)和地绝缘隔离开关(Kg)在充电结束后打开，用以防止 PPS 放电时由负载等因素产生的浪涌高电压通过充电子系统对地放电，可以避免因此所造成的充电设备绝缘损坏；充电输出终端并联了一小容量电容器(Cp)及其安全释能电路(开关 Kp、电阻

[收稿日期] 2008－09－06
[作者简介] 李贞晓(1975－)，男，山东临沭人，工程师。研究方向：电磁发射技术。

Rp)，目的在于防止空载误充电，以避免在此情况下充电电路末端电压急剧升高损坏充电设备。

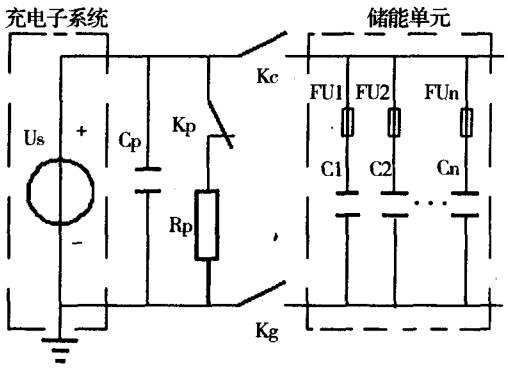

图 1　充电隔离保护电路

脉冲电容器储能后，由控制电路发送命令进行触发放电(ETCG 发射)。ETCG 发射精度和一致性与 PPS 储能量密切相关，电容器储能大小与其充电电压的量值平方成正比，因此控制电路必须能精确控制充电电压量值，这可以通过与被充电容器组并联“分压器－电压继电器组”来实现，见图 2。

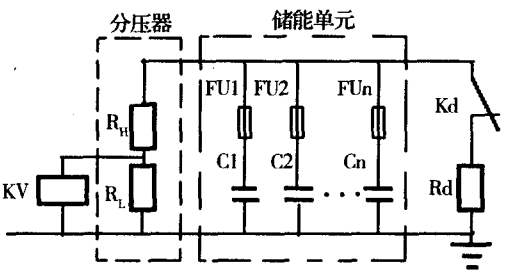

图 2　充电电压测控与安全释能电路

工作中有可能因安全因素或异常情况需要取消 ETCG 发射，这种情况下电容器可能已经储存了大量电能。此外，ETCG 发射后电容器一般仍存储着一些剩余电能。因此，如图 2 所示，PPS 安装了储能安全释放电路，Kd 是安全释能开关，其状态受控于控制电路，Rd 为安全释能电阻。

因此，控制电路应具备如下基本功能：

(1)高压继电开关状态控制。控制电路必须能使各高压继电开关通断状态正确对应于 PPS 的不同工作阶段，见表 1；

(2)充电启、停控制。充电设备将根据控制电路命令启动或停止充电；

(3)放电控制。在正常情况下，电容器组储能结束后，PPS 将根据控制电路命令启动触发放电(ETCG 发射)；

(4)急停控制。工作中，若系统某个部分(器件)发生异常或出现安全隐患，控制电路应具有使充电设备紧急停车功能，并能使电容器安全释能。

表 1　被控继电开关状态

工作阶段	继电开关状态			
	Kc	Kg	Kp	Kd
充电	1	1	0	0
放电	0	0	1	0
待机	0	0	1	1

注：“1”表示“通”“0”表示“断”

3　控制器件选用

ETCG 发射特点不仅是高电压、强电流，而且伴随着强烈的机械震动。因此，选用控制器件时必须兼顾器件的电磁兼容(EMC)性能和抗震动性能。实验研究用 PPS 的控制电路一般为远方模式，可以采用单片机等微控制器(MCU)或者电磁式继电器(EMR)进行电路设计。但系统一体集成时，ETCG 发射所引起的强震动、强电磁干扰将致使 MCU 不能正常工作甚至损坏，同样，由于具有金属线圈和机械触点，EMR 也难免发生误动作或损坏。

调查发现，固态继电器(SSR)可在强震动工况下使用。作为一种由固态电子元件组成的新型无触点开关器件，SSR 近年来在民用工控领域得到了广泛应用。它是依靠半导体器件和电子元件的电、光特性来完成隔离和继电切换功能的。由于没有电磁线圈，且不含运动零部件，因而它不怕剧烈的机械震动。根据文献[4]所进行的电磁抗干扰能力测试与给出的 EMC 抗干扰标准，SSR 也具有良好的 EMC 性能，在类似于 ETCG 工况的电磁环境中使用完全合适。因此，电路设计时控制器件选用了 SSR。

4　控制电路设计

图 3 是基于 PPS 控制功能要求，采用经验法[5,6]设计的控制电路。需要指出，为了让被控继电开关通断状态信息实时地反馈于控制环节，系统中使用的高压继电开关(Kc、Kg、Kd、Kp)均带有位置行程辅助开关。

图 3(a)中，KM1-4 为 SSR，SB1-4 为自锁按钮。系统上电后，通过按钮 SB1 启动 KM1 和 KM2，这样 Kd 将首先得电动作，随后 Kc、Kg、Kp 也相继动作，为下一步进行的充电工作做好了准备。图 3(b)中，Kc 和 Kg 启动采用了位置接点 Kd1，同样 Kp 启动也采用了位置接点 Kc1 和 Kg1，这样设计目的是使控制电路具有了逻辑动作与防误闭锁功能。此时

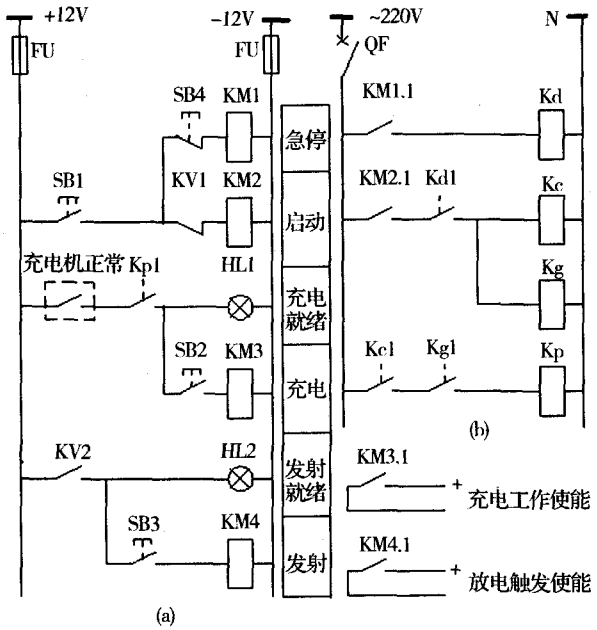

图 3 基本控制电路

只要充电设备自检正常(图 3(a)中"充电机正常"接点闭合),则灯 HL1 指示可以进行充电,通过按钮 SB2 启动 KM3 便可对脉冲电容器组进行充电。脉冲电容器电压达到预设值后,KV 动作,常闭接点 KV1 断开致使 KM2 失电,则 Kc、Kg、Kp 相继返回,同时 Kp 返回又使 KM3 失电,这样 Kc、Kg 断开,充电机停止工作,满足了系统放电前提。此时灯 HL1 熄灭、KV2 接通,灯 HL2 指示充电完毕,通过按钮 SB3 启动 KM4 则可进行 ETCG 发射。

若遇到异常需要工作急停,仅需通过按钮 SB4 使 KM1 失电即可。KM1 失电将使得 Kd 复位闭合,脉冲电容器中存储的能量便通过电阻 Rd 安全释放;同时,由于位置接点 Kd1 断开,Kc、Kg、Kp 相继复位,系统从而完全停止运行。在 ETCG 发射完毕后 SB4 还被用作状态复位按钮。

5 电路试用及改进

将图 3 电路组装于钢箱内,安装在电容 8 000 μF、脉冲成形电感 10 μH、工作电压 15 kV 的 PPS 上,通过模拟 ETCG 工况对电路进行了试用。

试用期间电路出现了 SSR 误动作问题。统计发现,出现 SSR 误动的工作次数约占总工作次数的 7%。分析表明,SSR 误动作的原因来自 PPS 充放电所产生的强电磁干扰,与机械震动无关。SSR 通常因 DC 输入侧或 AC 输出负载侧出现了较大电磁噪音(或浪涌)而误动作[7]。PPS 中,被控高压继电开关(Kc、Kg、Kd、Kp)采用的是大功率电磁铁开关,线圈通断电和强电磁干扰必然会生成电磁噪音或浪涌。此外,控制电源、控制线路也会因强电磁干扰而出现谐波与噪音。

如图 4 所示,针对 PPS 充放电所产生的强电磁干扰,在控制电路中为 SSR 增装了浪涌吸收等辅助保护电路。电阻 Ru 和吸收电路 Rs－Cs 用来防止负载所造成的 SSR 误动;Ru 用于吸收 SSR 断开时继电开关线圈的残存能量以及因电磁干扰产生的感应能量,能有效抑制因此所产生的电磁噪音与浪涌;Rs－Cs 是 SSR 负载侧浪涌吸收电路。电阻 Rv 作用是使 SSR 输入端在 SB 断开时具有相同电位,能防止输入侧噪音所引起的 SSR 误动。

控制电路改进后试用没有再次出现 SSR 误动作,这说明其可以满足 ETCG 与 PPS 一体化集成要求。

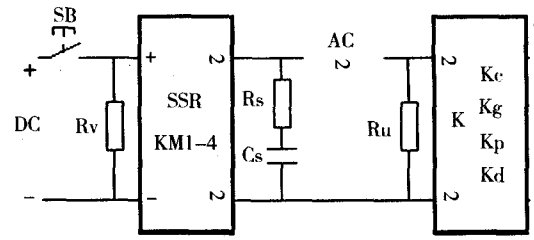

图 4 控制辅助电路

6 结束语

根据 PPS 控制电路功能要求和 ETCG 实用化方向发展要求,本文选用 SSR 进行了 PPS 控制电路设计,并通过模拟实验对基于 SSR 设计的控制电路进行了试用和改进。与其他控制器件相比,SSR 具有优良的抗震动性能和较强的电磁兼容能力,应用于强震动环境下的电控领域前景广阔。

参考文献

[1] Jin-Sung Kim, Young-Ho Choi. Analysis on High Surge Voltages Generated in Paralleled Capacitor Banks [J]. IEEE transaction on magnetics. 2003, 01 (39):422 －426.

[2] 杨小铭. 电容储能脉冲成形网络及其大功率器件特性研究[D]. 南京:南京理工大学,2002.

[3] Yun-sik Jin, Hong-sik Lee. Performance of 2. 4-MJ Pulsed Power System for Electrothermal-Chemical Gun Application [J], IEEE transaction on magnetic, 2003, 01(39):235－238

[4] 高志刚,林育超. 固态继电器的电磁兼容测试[J]. 电力电子,2007,02:42－48

[5] 王仁祥. 常用低压电器原理及其控制技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2001:189－195

[6] 佟为明,翟国富. 低压电器继电器及其控制系统[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2000:274－278

[7] 朱英明,周长刚. 固态继电器原理及应用中一些问题的讨论[J]. 四川:机床电器,2006. 01: 9－12