

强激光脉冲电源系统故障分析和对策

刘克富¹, 秦实宏¹, 李 劲¹, 潘 垠¹, 姚宗干¹,
郑万国², 郭良福², 周丕璋², 力一坤², 陈德怀²

(1. 华中科技大学 脉冲功率研究与发展中心, 湖北 武汉 430074; 2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 详细分析了强激光脉冲电源系统可能存在的故障问题, 通过电路模拟给出了故障电流波形。在此基础上提出了电源系统故障保护的方法和对策, 这对于电源系统的设计和安全运行具有十分重要的意义。

关键词: 强激光; 脉冲功率电源; 故障分析和保护

中图分类号: TN24

文献标识码: A

能源模块是惯性约束核聚变实验装置的关键技术之一, 大功率脉冲电源为氙灯负载提供满足要求的能量、功率和波形。安全可靠运行是脉冲电源系统重要性能指标之一。神光-Ⅲ 能源模块采用高储能密度电容器为储能单元, 运行在高电压、大电流脉冲状态, 由于各种原因, 导致故障发生是难以避免的, 美国 NIF 装置在试验过程中就曾发生过类似的故障, 如母线短路、闪光灯击穿等^[1]。由于电容器老化, 运行参数降低, 造成电容器短路爆炸也常有发生。故障引起的破坏力是很大的, 可能造成设备损坏, 甚至威胁人身安全。因此在电源设计过程中应当充分考虑到可能存在的故障情况, 提出相应的对策和保护措施, 使故障造成的损失减少到最小程度。本文正是基于这样的目的, 对神光-Ⅲ 能源模块可能发生的几种故障进行分析和模拟, 得到了计算波形, 在此基础上提出了相应的保护方案。

1 能源系统故障分析和模拟

如图 1 所示为能源系统简化电路图: 电容器 C_p 、电感 L_p 及开关 K_1 构成预电离支路; $C_1, C_2, \dots, C_{150}$ 为主放电电容器; $L_1, L_2, \dots, L_{130}$ 为限流电感; $L_{11}, L_{12}, \dots, L_{110}$ 为调波电感; $T_1, T_2, \dots, T_{10}$ 为传输电缆; $X_1, X_2, \dots, X_{10}$ 为 10 路为氙灯负载。以上回路参数, 可以根据氙灯负载能量、电流波形以及效率要求确定。能源系统工作原理是: 在所有电容器充电完毕后, 首先预电离引燃管触发导通, 预电离电容器对氙灯负载放电, 形成预电离脉冲; 延时一定时间后, 触发主引燃管导通, 由主电容器对氙灯放电, 形成主放电脉冲。

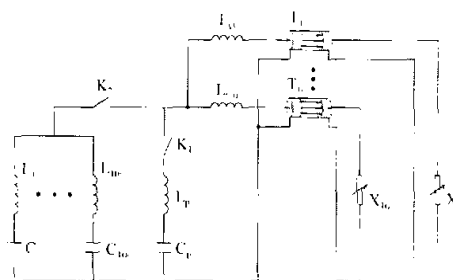


Fig. 1 Simplified schematic circuit of the power supply system

图 1 能源系统简化电路图

主电容器组由 100 台电容器并联而成, 出现故障的可能性较多, 而预电离支路电容器很少, 发生故障的可能性较小, 因此我们主要分析主电容器以及负载支路可能出现的故障。它包括单台电容器击穿、母线短路、氙灯短路和开路等故障。这些故障将对限流电感、调波电感、连接母排及电缆产生强大的冲击力作用, 以及瞬态过电压作用, 在电源系统设计过程中应当充分考虑到最严重故障状态, 设计相应的电流电压过载倍数, 留有一定裕度, 在控制和监测以及充电单元设计时也应考虑到故障状况, 保证系统安全可靠运行。

• 收稿日期: 2001-01-08; 修订日期: 2001-08-11

基金项目: 国家 863 惯性约束聚变领域资助课题 (863-416-7.3)

作者简介: 刘克富 (1963-), 男, 安徽桐城人, 副教授, 博士, 研究方向为脉冲功率技术和等离子体技术应用。

1.1 主电容器组短路故障

1.1.1 单台电容器击穿短路

能量模块是以金属介质自愈式电容器为储能元件,这种高压脉冲电容器储能密度较高,但如果冲击电流以及反向过电压超过允许值将大大减少使用寿命。对电容器而言,最常见故障是在充电或放电过程中发生单台电容器介质击穿导致短路。100 台电容器相并联运行,一旦某台电容器短路,所有其他正常电容器通过故障支路释放能量,如图 2 所示为电容器充电到最大电压 $U_0=23\text{kV}$,限流电感 $L=100\mu\text{H}$ 时,单台电容器击穿短路电流波形。可以看出单台击穿短路时,在该支路将产生高达 80kA 峰值电流(不考虑电容器内电阻,而计入限流电感电阻),冲击电流对限流电感产生巨大电动力冲击和热负荷冲击,可能导致限流电感烧毁甚至爆炸,因此必须尽快将故障支路断开。

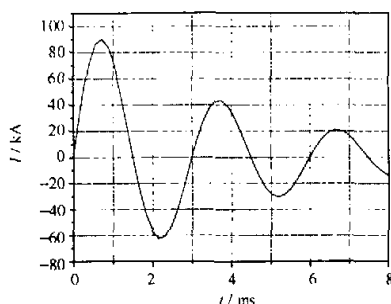


Fig. 2 Current waveform when a set of capacitor breakdown

图 2 单台电容器击穿短路电流波形

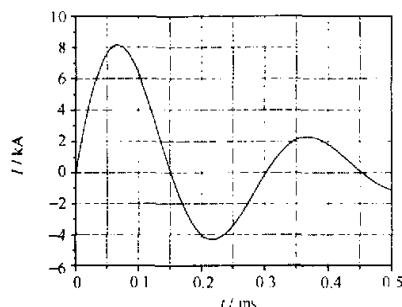


Fig. 3 Current waveform in a set of capacitor when the main bus short circuit to ground

图 3 主母线短路每台电容器电流波形

在单台电容器击穿短路情况下,应当保护其他正常电容器,将其冲击电流限制到允许值以下,防止事故扩大,限流电感和限流电阻能起到限流作用,但限流电感、限流电阻过大,影响电容器能量输出效率,同时会造成体积庞大。电感选择应当综合考虑多方面因素,优化设计。为了尽快切除故障电流,可以考虑采取快速熔断器保护,在故障第一峰值电流前较早时刻熔断,真正实现故障电流下快速保护。

1.1.2 主母线短路

对于主母线和分组母线而言,最严重故障情况是当电容器充电到额定电压而尚未对负载放电时,发生短路故障,短路电流波形如图 3 所示。这时每条电容器支路短路电流峰值是正常放电电流的 5.3 倍,对限流电感而言,其破坏性不大。但对主母线来说,它是所有短路故障中最为严重短路故障。在没有保护的情况下,100 台电容器通过母线对地短路放电,在母线上可能产生 800kA 巨大冲击电流,对母线造成巨大的电动力冲击破坏,可能导致整个能源模块主母线毁灭性破坏。为防止母线短路,应当采取封闭母线,加强绝缘等措施。

1.2 氙灯负载回路故障

1.2.1 氙灯负载短路

在电源对氙灯放电过程中,由于氙灯爆炸产生的等离子体电弧喷射,通过反射体可能出现氙灯负载短路的情况。短路发生在不同时刻,该负载支路产生过电流峰值不同,如图 4 为氙灯短路发生在不同时刻过电流波形。可以看出在主放电起始时刻氙灯短路,产生的过电流最大为 45kA ,是正常负载电流的 3 倍,因此调波电感的电流过载倍数应当按 3 倍考虑。

1.2.2 氙灯负载开路

氙灯负载开路将产生严重过电压,特别是当负载放电电流达到峰值时,氙灯爆炸开路的情况。如图 5 为 $t=300\mu\text{s}$ 时,氙灯爆炸产生的过电压波形。氙灯开路后,调波电感原先流过电流连续,通过传输电缆的分布电容产生振荡。其振荡周期由 $T=2\pi\sqrt{LC}$ 确定;其中, L 为调波电感, C 为传输电缆总分布电容。由于主电容器容量很大,可以看作恒压源。

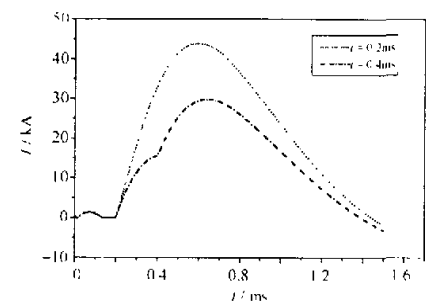


Fig. 4 Short circuit current waveform of a flash lamp at different time

图 4 氙灯负载不同时刻短路电流波形

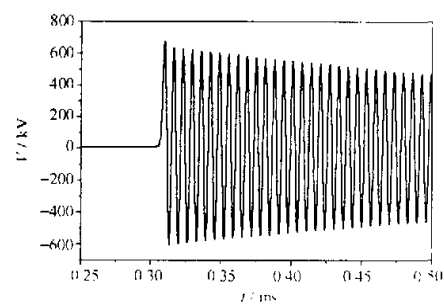


Fig. 5 Overvoltage waveform when a flash lamp breakdown

图 5 氙灯负载开路产生的过电压波形

2 电源系统主电路保护方案的提出

根据以上分析模拟,我们提出能源模块主电路故障保护设计方案,如图 6 所示。其中主电容器两级熔断器采取保护,负载回路采用氧化锌避雷器限制氙灯开路可能产生的过电压,预电离回路串联二极管,防止主放电对预电离放电电容器的反向充电,导致串联谐振。

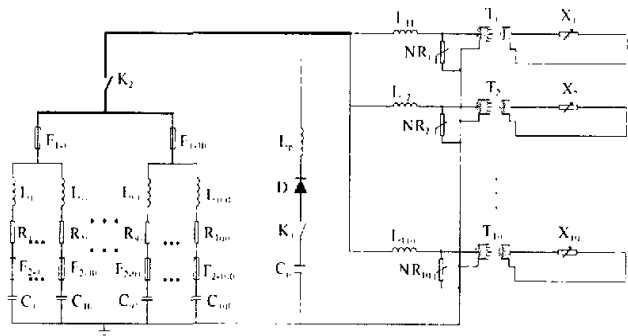


Fig. 6 Practical schematic circuit of the power supply with protection functions

图 6 具有故障保护功能的能源模块电路原理图

主放电电容器熔断器两级保护设计思想是,每台电容器串联电感及熔断器,电感起限流作用,熔断器起过电流保护作用。10 台电容器构成一组,共 10 组,每组又串联一只熔断器用于母线保护(称为母线保护熔断器)。两级保护熔断器设计原则如下:

- (1) 单台电容器击穿短路时,由该支路熔断器快速熔断,保护其他正常支路电容器,正常支路和母线保护熔断器都不动作;
- (2) 当某一分组母线短路时,该分组母线保护熔断器首先熔断,对其他正常 9 组电容器起保护作用,同时该分组母线所属 10 条支路电容器保护熔断器也熔断,对电容器起保护作用。
- (3) 当主母线短路时,10 组支路熔断器熔断,而每台电容器保护熔断器不动作。通过设计两级熔断器不同热负荷过载倍数可以实现上述技术要求。
- (4) 两级保护熔断器在正常工作时,应当承受正常电流和热负荷冲击,在相应的故障情况下,应当可靠动作,起到迅速保护作用。

如图 7 为我们设计的电容器支路保护熔断器保护动作电流波形,实验条件是,电容器充电电压 $U=25\text{kV}$,电容量 $C=25\mu\text{F}$,回路电感 $L=100\mu\text{H}$,电阻 $R=200\text{m}\Omega$,为便于比较分析,在相同参数条件下对回路安装有熔断器和没有安装熔断器两种情况进行了比较实验。曲线 1 是没有熔断器时回路预期电流,

曲线 2 是电容器对熔断器放电情况下电流波形。两者比较可以看出,熔断器按照设计要求在峰值 8.75kA 时熔断,在实验参数条件下,熔断器起始动作时间 $t = 60\mu\text{s}$,忽略熔断器电流过零以后振荡时间,熔断器熔断时间 $\Delta t = 26\mu\text{s}$,可以满足快速动作要求。熔断器设计以正常热负荷为基准,按照一定的过载倍数设计截面和长度,具体设计计算将另文介绍,这里不加详述。

氧化锌避雷器过电压保护设计在正常预电离和主放电工作时不应当动作,而在负载开路时应当可靠保护,其保护限值小于传输电缆绝缘耐压水平。

在预电离回路串联大功率二极管有利于预电离引燃管熄弧,可以避免预电离电容器和主电容器之间的串联振荡。同时可以使主放电起始时间提前,便于波形调节。

3 结 论

本文根据强激光能源模块安全运行要求,对大功率脉冲电源系统各种可能存在的故障进行了分析模拟,得到了过电流过电压波形;并在此基础上提出了故障保护设计方法和保护策略,这一保护设计已经通过能源模块单元放电初步试验验证。下一步工作将根据运行情况和要求,对故障保护技术做进一步优化。

致 谢 本文是在中物院八所有部门支持下完成的,本校陈开夫、王少荣、吴耀武、李启炎、徐至新、钟和清、朝洋云、林福昌、张丹丹及何孟兵等同志参与了本课题的研制工作,在此对他们表示衷心感谢!

参考文献:

- [1] Hammon J, Fulkerson E S, et al. Predicted pulsed-power/flash-lamp performance of the NIF main amplifier. 12th IEEE Pulsed Power Conf[C]. Monterey:California, USA, 1999.
- [2] Smith D L, Wilson J M, et al. FANTM, the first article NIF test module for the laser power conditioning system. 12th IEEE Pulsed Power Conf[C]. Monterey:California, USA, 1999.
- [3] 力一峰,周丕璋,薛锡刚,等.强激光能源系统预电离实验研究[J].强激光和粒子束,2000,12(2):178-180. (Li Y Z, Zhou P Z, Xue X G, et al. High power laser power conditioning system preionization experimental research. *High power laser and particle beams*, 2000, 12(2):178-180)

Fault analysis and strategy of high pulsed power supply for high power laser

LIU Ke-fu¹, QIN Shi-hong¹, LI Jing¹, PAN Yuan¹, YAO Zong-gan¹,

ZHENG Wan-guo², GUO Liang-fu², ZHOU Pei-zhang², LI Yi-zheng², CHEN De-huai²

(1. Pulsed Power R&D Center, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074 China;

2. Research Center of Laser Fusion, CAEP, P.O. Box 919-988, Mianyang 621900, China)

Abstract: According to the requirements of driving flash-lamp, a high pulsed power supply (PPS) based on capacitors as energy storage elements is designed. This paper analyzes in detail the faults of high pulsed power supply for high power laser. Such as capacitor internal short-circuit, main bus breakdown to ground, flashlamp sudden short or break. The fault current and voltage waveforms were given by circuit simulations. Based on the analysis and computation, the protection strategy with the fast fuse and ZnO was put forward, which can reduce the damage of PPS to the lower extent and prevent the personnel safe and collateral property from the all threats. The preliminary experiments demonstrated that the design of the PPS can satisfy the project requirements.

Key words: high power laser; high pulsed power supply; fault analysis and protection

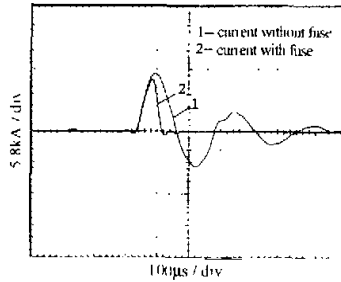


Fig. 7 Current waveform comparison with fuse and without fuse

图 7 熔断器保护动作电流波形