

文章编号: 0258-7025(2002)04-0317-04

神光 III 强激光能源模块高储能密度 电容器的快速保护

刘克富, 秦实宏, 李 劲, 姚宗干, 潘 垣

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北武汉 430074)

提要 分析了大功率激光脉冲电源高储能密度电容器快速保护的必要性, 提出了电感和特种熔断器快速保护技术路线, 介绍了快速保护熔断器设计方法。试验表明, 所研制的熔断器故障情况下可在四分之一周期时间内快速动作, 使电容器反向电压不超过 10%, 已成功应用于神光 III 能源模块高储能密度电容器的保护。

关键词 强激光电源, 电容器保护, 快速保护熔断器

中图分类号 TM 53 文献标识码 A

Fast Protection for Capacitor Bank with High Specific Energy Storage in SG-III High Power Laser Energy Module

LIU Ke-fu, QING Shi-hong, LI Jing, YAO Zong-gang, PAN Yuan

(Pulsed Power R & D Center, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract This paper analyzes the necessity of fast protection for capacitor bank with high specific storage used in SG-III high power laser. A technical scheme with inductor and tailor-made fuse was proposed. Especially the design of fast protective fuse was introduced. The experiments demonstrated that the fast protective fuse can take action within a quarter of first cycle of current and limit the voltage reversal under 10%. The design of the protection can meet the project requirements and can reduce the damage of PPS to the lower extent and prevent the personnel safe and collateral property from the all threats.

Key words power supply for high power laser, capacitor bank protection, fast protective fuse

1 熔断器快速保护的必要性

以电容器为储能单元的大功率脉冲电源系统是很多大科学工程实验装置的关键技术之一。不论磁约束核聚变还是激光惯性约束核聚变试验装置, 目前都采用数百台以上电容器并联提供初始能量。能源模块是整个实验装置的基础设备, 安全可靠运行是脉冲电源系统重要性能指标之一。整个电源系统工作在高电压、大电流脉冲状态, 由于电容器老化, 操作失误等各种原因, 导致电容器短路爆炸故障时有发生, 可能造成设备损坏, 甚至威胁人身安全。美国 NIF 装置在试验过程中就曾发生过母线短路故

障^[1]。神光 III 能源模块选用金属膜自愈式高储能密度电容器, 这种电容器承受冲击电流和反向过电压能力相对要弱, 采取快速有效的保护措施尤为必要。

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。计算表明^[2], 该支路将产生高达 80 kA 峰值电流(假定短路点电弧电阻为 5 mΩ), 冲击电流对流经回路的所有元件都产生巨大破坏作用, 必须尽快将故障支路从系统断开, 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。

对于主母线而言, 最严重的故障情况是当电容

收稿日期 2001-09-14; 收到修改稿日期 2001-11-21

基金项目 国家 863 惯性约束聚变领域资助课题(国家高技术 863-416 专题)

作者简介: 刘克富(1963—)男, 华中科技大学电气与电子工程学院副教授, 博士, 主要从事脉冲功率技术与等离子体应用研究。E-mail: kfliu@mail.hust.edu.cn

器充电到额定电压而尚未对负载放电时,发生短路故障。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,对电容器和限流电感而言,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的短路故障。在没有保护的情况下,100 台电容器通过母线对地短路放电,在母线上产生 800 kA 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。因而对电容器采取必要的保护措施,具有重要的现实意义。

熔断器保护技术虽然已研究多年,但针对高储能密度的电容器微秒量级快速保护熔断器研究还不多。现有熔断器不能满足技术要求,主要存在如下问题(1)电力系统保护熔断器通常熔断时间在毫秒量级,熄弧时间长,达不到微秒量级快速保护作用(2)一般实验室采用裸金属丝保护方式,不但熄弧时间长,而且熔断时电弧产生强大爆炸冲击波,可能引起事故扩大。故障电流上升率大,对电容器具有较大破坏作用(3)跌落式熔断器保护方式,动作灵敏度较差,不具备快速保护性能。

采用其他保护技术成本过高,比较而言,快速熔断器是一种简单廉价而有效的保护方法。为配合神光Ⅲ激光惯性约束聚变试验装置能源模块研制,针对电源模块多组电容器不同故障状态,我们研制成功安全可靠的熔断器快速保护技术。

2 电容器快速保护技术

2.1 电感及快速熔断器综合保护

电感线圈以及熔断器爆炸丝自身具有一定的电阻值,因此可以利用两者固有的电阻来限制过电流。

通过设计两者电阻之和满足一定的技术要求,在某台电容器或母线短路的情况下,起到限制电容器过电流的作用,而在正常运行时,不影响电源系统能量利用率。

电感的作用是限制短路电流的上升率,减少过电流对电容器的冲击,延长使用寿命。电感的选择应当根据熔断器的保护动作时间设计要求进行选择。电感值过大,熔断器保护动作时间越长,起不到快速保护作用,同时还会在电容器上引起反向过电压。因此应当综合考虑进行比较选择。

熔断器起快速限流作用,设计时应当考虑如下多方面因素(1)熔断器熔体所承受的热负荷(电流的平方对时间的积分)整定值选择既要保证熔断器动作的灵敏度,又要保证熔断器满足一定过载能力以及熔体正常工作时对温升的限制(2)在故障情况下,被保护电容器冲击电流和反向电压应小于规定值(本装置所用电容器要求冲击电流小于 10 kA,反向电压小于 2.5 kV)(3)熔断器本身应承受正常工作时电动力,熔断器外壳应承受故障时爆炸丝爆炸产生的冲击波。(4)熔断器故障动作时应提供信号指示,以便于识别和更换。

2.2 两级保护设计

整个电容器组故障保护由两级保护构成,100 台电容器分 10 组,每 10 台电容器构成一组,每组串联一只熔断器用于母线保护(称为母线保护或 1 级保护);每台电容器各自串联电感及熔断器,用于单台电容器击穿短路保护(称为单台电容器保护或 2 级保护)。如果母线采取特殊绝缘或加固措施,亦可采取单级保护方案。

具有故障保护功能的能源模块电路原理如图 1 所示。电源系统工作原理是,在所有电容器充电完

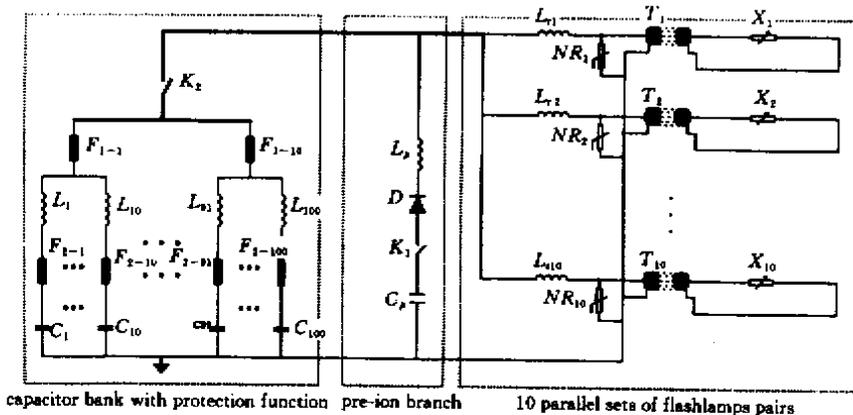


图 1 具有故障保护功能的能源模块电路原理图

Fig.1 A practical schematic circuit of the power supply with protection functions

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。

2.3 保护设计原则

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。

3 快速熔断器参数设计

快速熔断器处于两种工作状态,一种是正常通流工作状态,应当考核熔断器爆炸丝的温升以及电动力冲击。另一种工作状态即是在故障状态下,熔断器瞬时熔断,快速限流保护,关键技术是爆炸丝参数设计。

3.1 爆炸丝截面

根据 Tucker 研究结果^[3],爆炸丝熔断过程分为固体加热、融化、液态加热、气化、电弧共 5 个阶段,在气化阶段后期,爆炸丝电阻率发生突变形成爆炸电弧,向周围介质扩散,使周围介质发生相变,将电弧能量传递给介质,随后迅速熄灭。根据文献^[3]的试验和理论,对于一定型号的金属爆炸丝,在不同变化阶段“作用积分”为一定值(“作用积分”是电流密度对时间的积分)。在确定电流波形及动作时刻的条件下,根据爆炸丝气化时刻的“作用积分”值即可确定熔断器的截面,即

$$\int_0^t j^2 dt = \frac{\int_0^t i^2 dt}{S^2} = K \quad (1)$$

则熔断器截面可初步确定为

$$S = \sqrt{\frac{\int_0^t i^2 dt}{K}} \quad (2)$$

式中 i 为短路时刻熔断器保护动作的电流值,如果选定熔断器在电容器反向电压不超过 10% 最大充

电电压,则电流即为短路电流峰值, t 近似等于电流波形四分之一周期 $\pi \sqrt{LC}/2$, K 取正常工作时整个电流脉宽范围内熔断器承受的热负荷的 5 倍。

3.2 爆炸丝长度

在室温及正常电流情况下,爆炸丝电阻远小于回路特征阻抗 $\sqrt{L/C}$,当爆炸丝熔断时,其电阻值迅速突变上升,电阻率由原来较小的 ρ_0 上升到 ρ_{\max} ,为了使爆炸丝熔断时产生的过电压不超过电容器充电电压的 k 倍,通常 k 值取 3 ~ 5,其长度选择应当满足下面关系

$$R_{\max} \sim 2k \sqrt{L/C} = \rho_{\max} l/S \quad (3)$$

由(3)式可以看出,回路电感越大,爆炸丝长度越长越有利于熄弧。

3.3 爆炸丝正常温升校核

正常通流情况下,熔断器应当可靠工作,温升应当在允许范围内。正常运行时,爆炸丝电阻率随温度呈线性变化,即

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha(\theta - \theta_0)] \quad (4)$$

爆炸丝电阻温升计算由下式给出^[4]

$$\theta = \frac{\int_0^t \rho i^2 dt}{c\gamma A^2} + \theta_0 \quad (5)$$

(5)式计算可采用迭代法求出 θ 。其中, c 为爆炸丝材料比热(J/kg·K); γ 为爆炸丝材料比重(kg/m³); A 为爆炸丝截面(m²); ρ_0 为对应于室温 θ_0 的电阻率($\Omega \cdot m$); α 为温度上升系数(K⁻¹)。

正常电流产生的电动力对爆炸丝产生一定的作用,由于爆炸丝直径很细,如果不采取固定措施,可能导致爆炸丝变形,出现匝间短路损坏。特别是端部受力不平衡,更易破坏。电动力作用与熔断器结构有关,计算较复杂,我们采取实验方法对熔断器电动力的承受能力进行考核。

4 实验结果及波形分析

根据上述熔断器参数选取原则,设计了用于神光Ⅲ电源模块金属膜电容器快速保护熔断器。熔断器外壳采用聚乙烯塑料,填充石英砂,爆炸丝采用漆包线绕制而成。对电容器保护方案进行了仿真计算,优化电感、电阻和熔断器参数,同时对其电气性能进行了大量的试验研究,包括爆炸丝正常通流、过载和开断特性、电动力以及电气绝缘性能试验等。正常通流及过载能力试验电路参数为:电容器充电电压 $U_0 = 10$ kV, $C = 83.26$ μF , $L = 235.3$ μH , $R = 2.55$ Ω ,图 2 为熔断器 2 倍过载通流(峰值 2.98

kA 试验电流典型波形 熔断器正常工作通流为 1.5 kA 脉宽 550 μs。

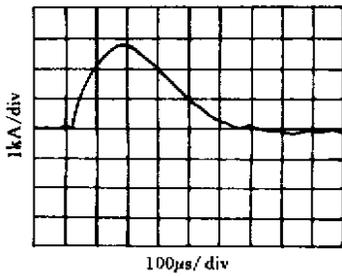


图 2 熔断器 2 倍过载通流的典型波形

Fig.2 Over load current waveform

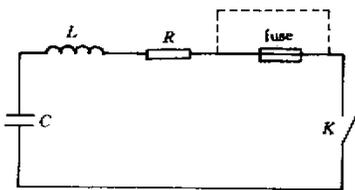


图 3 熔断器保护动作试验比较电路

Fig.3 Test circuit for fuse action

为了验证熔断器保护动作的可靠性,模拟神光Ⅲ能源模块母线短路状态,在“作用积分”相同条件下,对回路安装和未安装熔断器两种情况进行了比较实验。试验电路见图 3,电路参数如下,电容器充电电压 $U_0 = 25 \text{ kV}$,电容量 $C = 16.65 \mu\text{F}$,回路电感 $L = 100.5 \mu\text{H}$,电阻 $R = 520 \text{ m}\Omega$ 。图 4 为电容器支路保护熔断器保护动作电流波形,其中曲线 1 是没有熔断器时的预期电流,曲线 2 是安装熔断器后的保护动作电流波形。两者比较可以看出,熔断器按照设计要求在峰值 8.75 kA 时熔断,在上述实验参数条件下,熔断器起始动作时间 $t = 80 \mu\text{s}$,忽略熔断器电流过零以后振荡时间,熔断器熔爆时间 $\Delta t = 26 \mu\text{s}$,可以满足快速动作要求。图 5 为快速熔断器保护动作电压波形,可以看出,从起始点开始到爆炸,熔断器电阻经过一个逐渐上升过程,对应于熔断器熔爆过程前四个阶段,在 $t = 80 \mu\text{s}$ 时,熔断器电阻发生突变,随后 $26 \mu\text{s}$ 时间内电压过零,进入反向电压阶段,此电压即对应电容器反向电压,试验得到其反向电压为 1.5 kV,小于规定的 2.5 kV。

从试验样品可见,除端部以外整个爆炸丝长度构成电弧通道,不同于一般熔断器局部熔化形成分段电弧。这是因为在很大的电能注入爆炸丝瞬间,

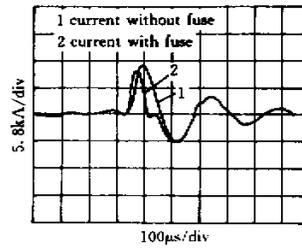


图 4 有无熔断器保护时的电流波形比较

Fig.4 Current waveform comparison with fuses and without fuses

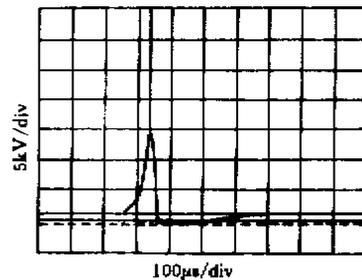


图 5 熔断器保护动作电压波形

Fig.5 Voltage waveform of a fuse action

会产生强烈的电弧爆炸过程,向周围石英砂扩散,使之发生相变,所以称熔断器熔体为爆炸丝(exploding wire)。这是快速熔断器与常规熔断器的根本区别。石英砂对熄弧时间有一定影响,试验结果表明,石英砂目数越大,灭弧效果越好,这是由于石英砂越细,发生相变的过程越快,越易于吸收能量。

大量试验结果表明,我们研制的熔断器可在 25 ~ 40 μs 时间内快速切断故障电流,反向电压在 2 kV 以内。同时具有动作指示功能,体积小而简单实用,较好地满足了神光Ⅲ能源模块电容器组保护要求。

致谢 本文是在中国工程物理研究院八所有关部门支持下完成的,在此向他们表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 David L. Smith, J. Michael Wilson, et al.. FANTM: The First Article NIF Test Module for the Laser Power Conditioning System [C]. 12th IEEE Pulsed Power Conf., Monterey, California, USA, 1999
- 2 Liu Ke-fu, Qin Shi-hong, Li Jing et al.. Fault analysis and strategy of high pulsed power supply for high power laser [J]. High Power Laser and Particle Beam(强激光与粒子束), 2001, 13(6):717 ~ 720(in Chinese)
- 3 T. J. Tucker. A Theoretical Model of the Resistance Behavior of Exploding Wire [R]. SC-RR-71-0739 Jan, 1972
- 4 Zhang Jie-rong, Qian Jia-li, Wang Bo-hang et al.. Principle and Application of HV Electric Apparatus [M]. Beijing: Qinghua University Publishing Company, 1989(in Chinese)