

用撬棒快速保护技术保护高功率微波管

黄懿贇

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘 要: 介绍了以高压引燃管为核心的撬棒快速保护技术, 它用来满足功率直流高压电源 (3~30 MW/35~100 kV) 场合下以 μs 级快速转移微波放大管负载故障电流的需要。通过对负载吸能极限的必要分析和对撬棒回路旁路故障能量的具体计算, 选择相应的引燃管串并联方式和抗干扰触发电路, 并按核聚变装置中功率速调管的保护要求给出撬棒快速保护技术线路。实验结果表明撬棒回路在 32 μs 内可完全转移高功率微波管的故障电流。

关键词: 引燃管; 撬棒; 高压电源; 速调管

中图分类号: TN122

文献标识码: A

文章编号: 1003-6520(2005)06-0066-03

Protection of the Power Klystron with Fast Protection Crowbar Technology

HUANG Yiyun

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy, Hefei 230031, China)

Abstract: Fast protection technology of crowbar base of ignitron is described in this article which apply in the high-voltage power supply on the microwave amplifier (3~30 MW/35~100 kV), the fault current can be transfer from the klystron to the ignitron which protect the tube from arcing in a few micro-seconds, according to circuit analysis for consumption of load energy and fault energy bypassed by crowbar circuit, ignitions are series-parallel connected with certain mode as well as anti-jamming trigger circuit is adopted, to satisfy the requirement of the protection technology for klystron in fusion system, technical project and virtual experiment of the crowbar protection are given below, and the experimental result is shown that the fault current can be transfer from the klystron to the crowbar entirely in 32 μs .

Key words: ignitron; crowbar; high-voltage power supply; klystron

0 引 言

HT-7 托卡马克核聚变领域^[1]中各类功率微波放大管如速调管 (2.45~3.7 GHz)、真空电子回旋管 (0.1~110 GHz) 迄今仍依赖进口, 价格昂贵, 能量取自相应等级的功率直流高压电源。微波产生或放大的过程中真空管内有时会产生过流甚至打火, 若不在短时间 (数十 μs) 内迅速切断高压直流电源, 则电弧会给管体造成不可恢复的损伤。故各类微波装置目前的关键问题是必须在负载故障态时快速切断高压电源, 其途径有三: ①选取 IGBT 等开关管^[2]来构成可快速自关断的高压直流电源, 但随着高压和功率等级升高而造价不菲, 且自身技术目前在国内仍处于发展阶段。②选用功率高压四级管来开关高压电源, 但目前可购四级管的板耗不高, 局限用于脉冲工作状态。③选用以引燃管为泄放元件的撬棒保护系统来旁路高压电源, 以迅速保护真空电子微波管, 这对现实中已建成的非快速自关断的高压直流电源既实用又经济。本文根据对负载吸能极限的必要分析和对撬棒回路旁路故障能量的具体计算, 估算出负载的实际吸能和对撬棒触发速度的要求, 选择一定的引燃管串并联方式并采取相应的均

流均压措施, 以保证撬棒系统自身的安全。

1 撬棒回路的参数设计和计算分析

HT-7 托卡马克中低杂波高压直流电源^[3,4]由前级整流、可控硅调压、电感电容无源滤波组成 (见图 1), 要求发生打火故障时消耗在负载即俄制 KU245 速调管内的短路能量 $\geq 5\text{ J}$ 。美制 7703 引燃管的容量为 25 kV/30 C, 单管导通时间为 3 μs , 串联 2 级对于 -35 kV 电压等级是必要和可靠的, 而并联数由速调管短路到其故障能量完全转移至撬棒

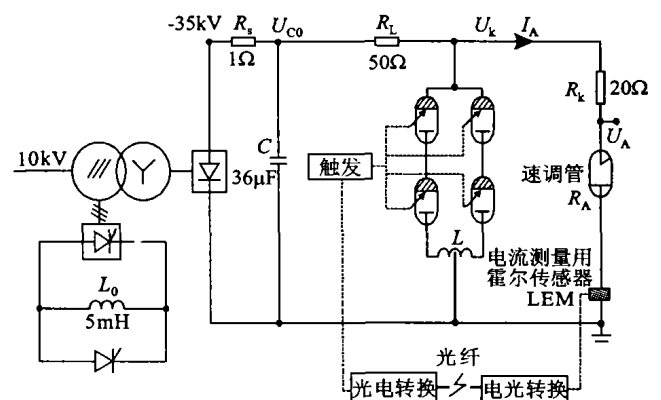


图 1 速调管高压电源及撬棒回路结构

Fig. 1 Configuration of high-voltage power supply and crowbar circuit for klystron

支路的过程中撬棒开关所需的电荷量决定。此过程中速调管耗能为速调管实际吸能 W_A (单位 J)。

1.1 引燃管吸能及均流均压相关计算

7703 引燃管最低导通电压 $U_x = 100$ V, 串联支路的均压问题可用均压电阻解决, 即使串联不同步, 一只管导通后电压也会加在其余串联支路的引燃管上而不影响导通。并联支路的均流问题可用均流电抗器 L 解决, 若不采取均流措施, 则一支路导通后管压迅速降为 0 而另一支路很可能来不及导通, 以致导通的引燃管因承受过大电荷而损伤 (见图 2)。

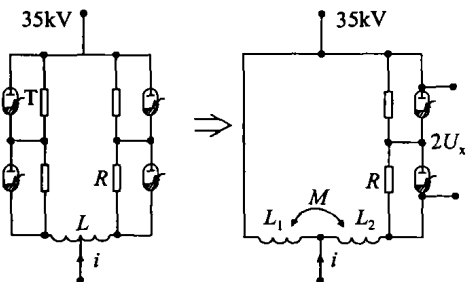


图 2 均压均流措施

Fig. 2 Balanced voltage and current in crowbar circuit

考虑极端情况, 设一支路已完全导通并完全短路, $M = 0.85L_1 = 0.85L_2$, 此时 $2U_x = L_1 di/dt + M di/dt = 1.85L_1 di/dt$, $2U_x$ 取 200 V, 由主回路计算和实验所得撬棒导通后的电流平均上升率 di/dt 为 15 MA/s, 则 $L_1 = L_2 = 7.5 \mu\text{H}$; $L = L_1 + L_2 + 2M = 3.7L_1 = 27.75 \mu\text{H}$, 可取 $30 \mu\text{H}$ 。

撬棒动作后引燃管承受的总电荷 Q_t 含 3 部分:

(1) 通过撬棒开关泄放的电容 C 上的电荷 Q_1

$$Q_1 = CU_{C0} = 1.26C.$$

(2) 交流分断前整流电源供给的电荷 Q_2

根据整流器的外特性状态方程^[5,6], 换相重叠角 $\gamma = \pi/3$, 故整流器工作在 2-3 状况 (可控硅 2 和 3 个阀轮流导通)。该外特性状态方程^[5,6] 为 $U_{d0} \cos\alpha = I_{ds}(R_c + R_L + R_s + R_k)$, 其中 U_{d0} 为整流器输出电压; R_s 为直流侧等效引线电阻; R_L 和 R_k 为限流电阻; $R_c \approx 50 \Omega$, 为换向压降换算的阻抗; $I_d = 40$ A, 为稳态电流。考虑极端情况即可控硅触发角 $\alpha = 0^\circ$, 解得稳态短路电流 $I_{ds} = 290$ A。设交流开关的最大分闸时间 $t_2 \approx 100$ ms, 整流变压器变比为 N , 电路固有时间常数 $\tau = LN^2 / (R_L + R_k) = 0.005$ s, 则短路电流 i_{Q2} 近似按指数规律上升:

$$i_{Q2} = I_d + I_{ds}(1 - e^{-t/\tau}),$$

$$Q_2 = \int_0^{t_2} i_{Q2} dt = (I_{ds} + I_d)t_2 - I_{ds}\tau(1 - e^{-t_2/\tau}) = 37 C.$$

(3) 交流分断后电感储能续流的电荷 Q_3

电感电流通过撬棒和整流器同时续流,

$$Q_3 = \int_0^{\infty} (I_d + I_{ds}(1 - e^{-0.1/\tau})) dt =$$

$$(I_d + I_{ds}(1 - e^{-t/\tau}))\tau = 2.3 C.$$

则 $Q_t = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 40.6 C$ 。可见两并两串的选择是恰当的。

1.2 速调管实际吸能及触发时间计算

撬棒保护过程中 W_A 含 2 部分:

(1) 速调管短路到撬棒动作的时间 $t_1 (< 333 \mu\text{s})$, 单位 μs 内速调管耗能 W_{A1} (由 C 造成, 单位 J):

$$W_{A1} = \frac{U_{C0}^2 R_A}{(R_L + R_k)^2} = \frac{U_A U_{C0} t_1}{R_L + R_k} = 15000 t_1,$$

其中 U_A, R_A 为速调管的电压、电阻。

(2) 撬棒动作后到撬棒支路电压趋于 0 时速调管耗能 W_{A2} (单位 J)。设电容电压 U_{C0} 在此期间基本保持一阶零初始过渡过程不变, 则速调管支路电压 U_k 将按指数规律衰减至 0:

$$U_k = \frac{U_{C0} R_k}{R_L + R_k} \exp\left(-\frac{R_L R_k t}{(R_L + R_k) L_k}\right),$$

速调管支路电流 $I_A = U_k / (R_A + R_k)$ 也按指数规律衰减至 0, 故

$$W_A = \int_0^{\infty} I_A^2 R_A dt = \int_0^{\infty} U_A I_A dt,$$

弧压 U_A 为一定范围内的常量, 此类速调管的 U_A 可取 30 V, 故只对 I_A 积分后可得:

$$W_{A2} = U_{C0} U_A L_k / R_L R_k = 0.05 \text{ J}.$$

则 $W_A = W_{A1} + W_{A2} = 15000 t_1 + 0.05 \text{ J} < 5 \text{ J}$ 。

模拟实验 (见图 3) 和使用经验表明, 撬棒的实际触发导通时间仅十几 μs 。图 3 中, 曲线 2 即撬棒触发电容放电电压约 500 V, 曲线 1 即撬棒阴阳极导通电压从 100 V 实验电压跌至 0, 滞后撬棒触发电路 $22 \mu\text{s}$ (这主要是触发引燃管的脉冲变压器和引燃管自身的导通时间之和), 再加上实际速调管短路给出故障信号到撬棒触发电容放电的时间差 ($\leq 10 \mu\text{s}$), 由此估得 $t_1 \leq 32 \mu\text{s}$, 则 $W_A = 15000 t_1 + 0.05 \text{ J} = 0.53 \text{ J} < 5 \text{ J}$, 符合速调管焦耳能量的限制要求。

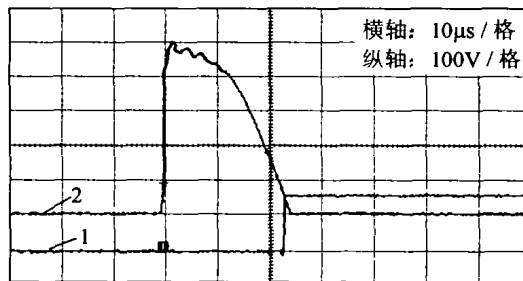


图 3 实际撬棒回路导通速度

Fig. 3 Time-respond of crowbar circuit in experiment

2 撬棒抗干扰触发电路

撬棒抗干扰触发电路见图 4, 先由 200 A 霍尔电流传感器判断出速调管的故障电流, 并经比较电

路后给出 15 V 故障电平信号,然后为了抗现场电磁干扰和高压回路中可能由地电位带来的浪涌电压,采用电光转换—80 m 多模光纤—光电转换来传输故障电平信号,并通过电路转换触发电容器对 800 V/4 kV 的脉冲变压器放电,最终触发引燃管。但引燃管可能会因其内壁凝结水银而自导通,故需对长期闲置的引燃管打耐压,以保证其可靠工作。

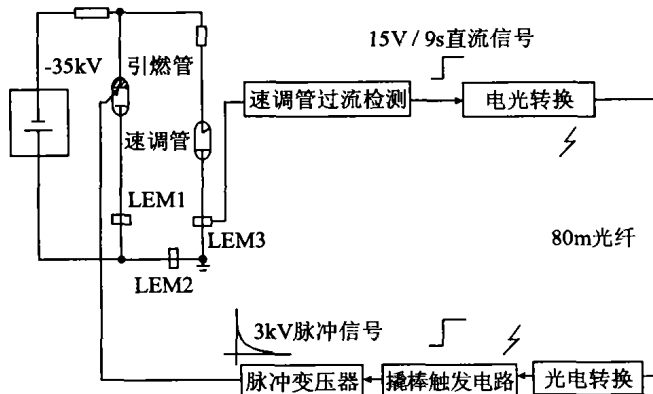


图 4 撬棒抗干扰触发回路

Fig. 4 Anti-jamming technology of trigger circuit for crowbar

3 结论

功率高压直流电源的一个难点是以 μs 级快速

切断或转移负载故障电流,相对其他电力电子方案,以引燃管为泄放元件来旁路负载的撬棒保护系统在现实中既经济可靠又安全可行,对于不同功率或高压等级的高压电源,可通过近似的电路计算来优化选择引燃管的串并联方式,并通过对负载吸能极限的必要分析和对撬棒回路旁路故障能量的具体计算来保证负载和撬棒系统自身的安全。

参 考 文 献

- [1] Kuang Guangli, Liu Yuexiu, Shan Jiafang, et al. A lower-hybrid current drive system on the superconductive Tokamak HT-7[J]. Fusion Technology, 1999, 36(2): 212-218.
- [2] 黄懿赞,刘保华,匡光力. 基于 PWM 变换器的长脉冲快速高压直流电源[J]. 电工技术杂志, 2000, (10): 37-39, 42.
- [3] 徐伟华,陈永浩. 具有快速保护的超长脉冲微波负高压电源[J]. 核聚变与等离子体物理, 1998, (2): 22-25.
- [4] 黄懿赞,刘保华,徐伟华,等. 星点调压脉冲高压电源的数学分析和模拟仿真[J]. 高电压技术, 2000, 26(6): 28-30, 50.
- [5] 黄俊. 电力电子变流技术[M]. 北京:机械工业出版社, 1993.
- [6] 布拉克 A. 电路理论基础和应用[M]. 北京:科学出版社, 1990.

(收稿日期 2004-09-06)

黄懿赞 1974 年生, 博士, 高工, 硕导, 从事微波系统电源及其控制的研究、设计和实验。电话:(0551)5593294; E-mail: yyhuang@ipp. ac. cn

(上接第 54 页)

参 考 文 献

- [1] Terada Mitsuo, Arasuna Ritsuo, Daifukuji Tomoihiro. Electric discharge-type ozone generator with point contact anode[P]. JP, 191907, 2003-01-08.
- [2] 岳朝松,陈万金,储金字,等. 电晕放电法臭氧发生器电极的研究[J]. 高电压技术, 2002, 28(6): 42-43.
- [3] 储金字,吴春笃,陈万金,等. 臭氧技术及应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2002.
- [4] 李铁锚,朱天宇. 无声放电臭氧发生器的特点分析[J]. 河海大学常州分校学报, 2003, 17(4): 76-80.
- [5] 张芝涛,白敏冬. 高浓度臭氧发生器放电特性实验研究[J]. 高电压技术, 2003, 29(5): 33-35.
- [6] 姚河清,朱天宇,卞新高,等. 电晕放电式臭氧发生器工作原理的探讨[J]. 高压电器, 2002, 38(6): 28-30.
- [7] 刘维良,吴坚强,陈云霞,等. 臭氧发生器用 AlN 陶瓷基板材料的改性研究[J]. 陶瓷学报, 2001, 22(3): 175-179.
- [8] Semin M A, Zelenchenkova E N. Insulating enamel for coating steel electrodes of ozone generators[P]. RU, 117622, 2003-08-10.
- [9] 赵纯,何正浩,李劲,等. 气体放电臭氧发生器的研究进展[J]. 高电压技术, 2002, 28(11): 44-46.
- [10] 王飞,朱天宇,姚河清,等. 臭氧发生管的设计及其稳定性研究[J]. 河海大学常州分校学报, 2002, 16(1): 1-5.
- [11] 朱天宇,周宏伟,卞新高,等. 有机高分子介电体臭氧发生管的特性研究[J]. 高电压技术, 2002, 28(12): 38-40.

- [12] Murata Takaki, Noguchi Motoki, Okita Yuji. Discharge-type ozone generators[P]. JP, 294407, 2001-10-23.
- [13] Natsuo Takahiro, Hayashi Nobuya, Satoh Saburoh, et al. Effect of dielectric materials on ozone generation efficiency in silent discharge type of ozonizer[J]. Rikogakubu shuho (SagaDaigaku), 2000, 29(2): 11-14.
- [14] 陈阳,杨学昌. 新型板式臭氧发生器的放电机理研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2000, 40(7): 16-19.
- [15] 岳朝松,张波,储金字. 沿面放电臭氧发生器电极的研究[J]. 安全与环境工程, 2002, 9(1): 30-33.
- [16] Shiue Lin-ren, Shiue Chia-chiann, Chung Hsing-chen et al. Electrolytic cell for ozone generation[P]. US, 146105, 2003-08-07.
- [17] Yamada Yasuhiro, Maruyama Eiji, Sasaki Noriyuki. Portable ozone generator[P]. JP, 230796, 2003-02-13.
- [18] Jodzis Slawomir. Synthesis of ozone in the silent discharge UV rays-catalyst system[J]. Przemysl Chemiczny (Pol), 2003, 82(6): 414-417.
- [19] Sauska Christian, Pirovic Arpad (USA). Ozone generator and germicidal device using an ultraviolet lamp[P]. EP, 1362828, 2003-11-19.
- [20] Renaud, Jean Luc. Ozone generator[P]. FR, 2835517, 2003-08-08.
- [21] 邓秋农,沈光辉,袁仁涛,等. 臭氧技术的现状与发展趋势[J]. 净水技术, 2001, 20(3): 7-10.

(收稿日期 2004-08-01)

蒋爱丽 1979 年生, 研究生, 从事物理化学等专业。

陈焯璞 1954 年生, 教授, 从事无机化学等。电话:(021)66132803; E-mail: cypsh@staff. shu. edu. cn