

① 31-35

第18卷 第2期

核聚变与等离子体物理

Vol. 18, No. 2

1998年 6月

Nuclear Fusion and Plasma Physics

June 1998

# 具有快速保护的超长脉冲微波负高压电源

徐伟华 吴君问 郑光华 黄乔林  
杨春生 周元卫 陈永浩

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

TL623

TL631.24

脉宽3—5s的HT-7低杂波负高压电源已经建成。针对电源设计的难点,交流侧采用脉冲发电机组-电网联合供电,超长脉冲的脉宽控制采用“直流侧瞬时合闸-交流侧延时分闸”,快速保护依靠撬棒完成。进一步设计了交流供电的软起动,解决了直流合闸时的过电压问题。两套电源均已在假负载上调到-35kV、40A的额定指标,接上速调管负载后,成功地进行了HT-7装置首轮低杂波电流驱动实验。

关键词 撬棒 软起动 低杂波电流驱动 HT-7装置

托卡马克 微波 负高压电源

## 1 引言

HT-7装置<sup>[1]</sup>首期建造的1MW低杂波电流驱动(LHCD)系统新近已经建成,系统脉宽达到3—5s,其微波源采用从俄罗斯进口的12只100kW级CW速调管。每只管子要求阴极电压-20kV~-35kV连续可调、纹波系数小于±1%、额定阴极电流6.5A,并对高压电源的快速保护性能提出了很严格的要求。

为了供电及控制方便,参考国外一些装置的做法<sup>[2-4]</sup>,初步确定将12只速调管并联后由一套负高压电源供电。考虑到满功率运行时12只速调管约需3MW电功率,若直接取自电网,则会对等离子体物理研究所的总容量为8MVA的电网冲击太大,有必要采用功率强大的脉冲发电机组作为高压源的供电电源,但须解决好输出电压-20kV~-35kV连续可调的问题。

本文简要介绍HT-7装置低杂波负高压电源的前级供电、滤波、快速保护和脉宽控制电路的设计。针对直流合闸过电压的问题,设计了交流供电的软起动,并给出了电源带假负载及带微波管时的调试结果。

## 2 前级供电及滤波

综合考虑容量与调压问题,采用了交流机组与电网联合供电的补偿法。由于交流机组为六相双Y接法,为保证其负载平衡,最终确定将12只速调管分成两组,分别由两套电源供电。

为了实现输出电压连续可调的目标,机组供电变压器设计成2.2kV/15kV±5kV副边三档可调,电网供电变压器设计成原边三相独立绕组经可控硅三相桥式整流后短接的结构,变比为0.4kV/10kV。由于可控硅桥放在电网变压器原边绕组星点,因而构成最简单的星点调压。交流高压经不控整流后串联叠加,得到脉动直流高压。再经LC低通滤波,使得输出电压纹波系数小于±1%。图1给出了前级直流电源原理图。

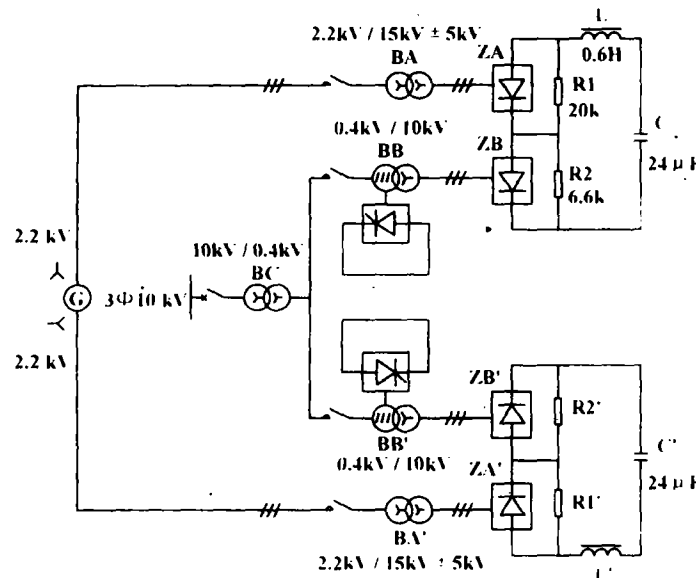


图 1 前级直流电源原理图

### 3 快速保护

微波管设计理论认为,速调管内部发生打火击穿时,若极间电弧能量  $W_A < 5J$ ,则对其性能影响甚微。我们的负高压电源以此为快速保护的设计依据,并以通过俄方设计的“捅短路棒”考验为检验标准。由于电弧电压在 20V 左右,若每只速调管串联  $20\Omega$  限流电阻,则短路电流的持续时间必须小于  $150\mu s$ 。

两套电源各自配备了由四只 BK7703 引燃管两并两串构造的撬棒,相应设计了均流电抗器及均压电阻。

在我们的电源中,紧急故障信号经光隔后直接触发撬棒,以保证硬件保护的绝对可靠。从光隔输入侧的下端得到取样信号送工控机,快速分断交流侧。鉴于机组内阻与滤波电感限制了短路电流的幅值及上升率,该保护配合经实践检验是安全可靠的。

### 4 脉宽控制

考虑到负高压电源控制的核心采用了工控机,脉宽控制问题方便地依靠直流开关与交流开关的动作配合来解决,亦即“真空继电器 K6 瞬时合闸-交流接触器 K2、K5 延时分闸”。

图 2 给出了其中一套电源的主回路原理图,另一套电源与此完全相同。

### 5 软起动

由于前级直流电源的串联阻尼电阻(考虑电抗器内阻及整流器、变压器等的等效阻抗)  $R_{\pi} \approx 5\Omega$ ,并联的六只速调管等效电阻  $R_{\#} > 850\Omega$ ,因而该主回路既不满足  $R_{\#} \geq 2\sqrt{L/C}$

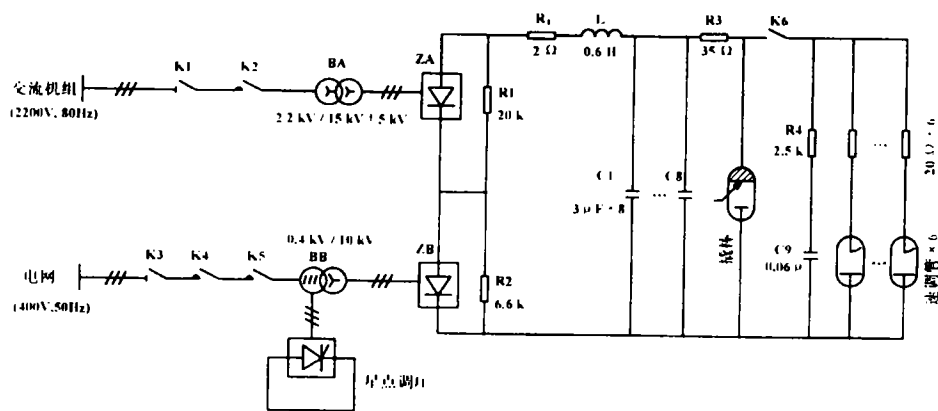


图 2 电源主回路原理图

也不满足  $R_{并} \leq \frac{1}{2} \sqrt{L/C}$ , 其回路的阶跃响应已满足衰减振荡的条件。

调试过程中, 针对机组供电与电网供电各自的特点, 分别采取不同的软起动措施, 有效地抑制了过电压。

首先, 在每次放电之前, 先将机组供电侧的接触器合闸, 利用机组输出电压缓变的特性避开冲击, 消除了空载振荡。直流开关 K6 合闸时, 由于突加负载, 等效为电流的阶跃输入, 又引起了衰减振荡 (见图 3), 振荡周期观测值 30ms 与理论估算值  $T = 2\pi \sqrt{LC} = 23.8\text{ms}$  非常接近。由于实验中要求机组输出电压建立后方可注入微波, 因而由机组供电引起的直流合闸过电压不可避免。

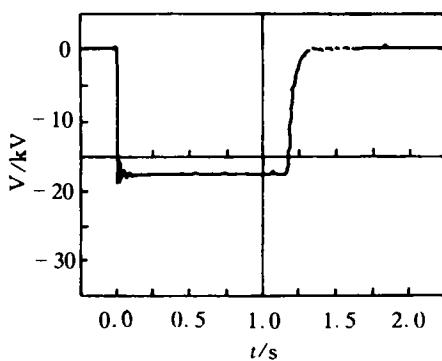


图 3 单独由机组供电时的输出电压波形

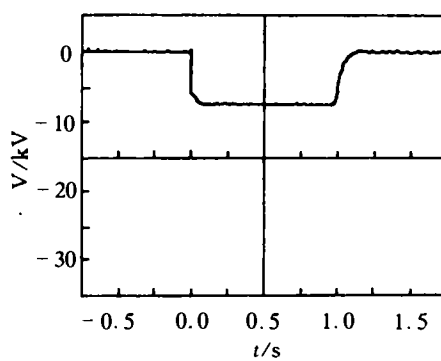


图 4 单独由电网供电时的输出电压波形

对于电网供电, 则事先封锁可控硅触发脉冲, 待直流开关合闸后, 方才解除封锁并将移相

电压经  $RC$  积分后再送给 KJZ-6 板,使得单独由电网供电时的输出电压波形缓慢上升且无超调(见图 4)。通过选择机组供电变压器的不同档位,并叠加尽可能多的电网供电成分,输出电压将呈现在缓变基线上叠加衰减振荡的波形。当输出电压达到额定值时,衰减振荡的峰值已低于稳定值,即无过电压存在(见图 5)。

## 6 调试和结果

1996 年 11 月初进行电源系统联调,两套电源均在陶瓷线性假负载<sup>[5]</sup>上调到了  $-35\text{kV}$ 、 $40\text{A}$  的额定指标,其输出电压波形如图 5 所示。

在将高压电缆连至速调管之前,遵照俄罗斯专家的建议,进行了“捅短路棒”试验。其做法是:取一绝缘杆,在其一端缠绕线径为  $0.5\text{mm}$  的铜丝(漆包线),铜丝的一头伸出、另一头与电源地线良好接触;实验时操作者手握绝缘杆的另一端,当直流开关 K6 合闸后,操作者设法使伸出的铜丝头与高压输出端接触,此时铜丝上流过短路电流,过流检测器及时将故障信号送出以便高压源执行快速保护。高压关闭得越快,伸出的铜丝头熔化得就越少。等效于耗散能量小于  $5\text{J}$ ,要求线径为  $0.5\text{mm}$  的铜丝头熔断长度小于  $3\text{mm}$ 。对两套电源均分别在输出  $-25\text{kV}$  及  $-35\text{kV}$  时进行了“捅短路棒”试验,结果熔断长度小于  $0.5\text{mm}$ ,证明电源快速保护性能完全达到了设计要求。

1996 年 11 月底,两套电源给 12 只速调管供电,成功地进行了 HT-7 装置首轮 LHCD 实验,观察到明显的电流驱动效应。这轮实验中,微波输出功率保持在  $400\text{kW}$ ,此时速调管上的阴极高压为  $-25\text{kV}$ ,其波形如图 6 所示。

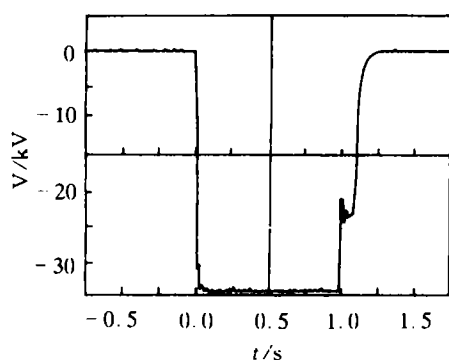


图 5 电源在假负载上的输出电压波形

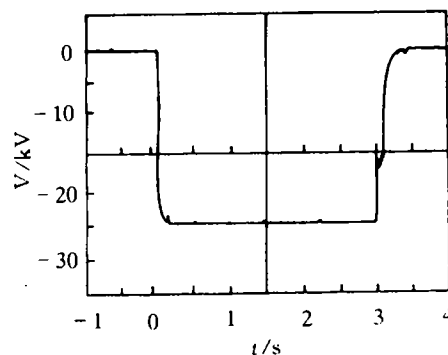


图 6 电源在速调管上的输出电压波形

1996 年底一轮以 LHCD 实验为主要内容的 HT-7 装置放电实验,充分证实低杂波负高压电源设计合理、运行可靠。这套电源的研制成功,为超长脉冲微波负高压电源的研制开辟了一条新途径。

感谢潘垣院士、匡光力研究员的大力帮助。

## 参考文献

- 1 杜世俊,王绍华,许武年等.具有超导环向场磁体的 HT-7 装置.核聚变与等离子体物理,1996,16(3):1.
- 2 Nagashima T, Uehara K, Kumura H, et al. JT-60 Radio-Frequency Heating System;Description and R&D Results. Fusion Engineering and Design,1987,5(1):101.
- 3 Magne R, Bibet P, Berger-by G, et al. The Tore Supra Lower Hybrid Transmitter. In;EURATOM-CEA ed. Fusion Technology. 1986. 14th SOFT Meeting. Avignon. 1986, Pergamon Press, 1986. Vol. 1,783.
- 4 Munich M, Haßenpflug F, Leuterer F, et al. The 2.45 GHz Lower Hybrid Current Drive System on the ASDEX Tokamak. In;Keen B E ed. Fusion Technology, 1990. 16th SOFT Meeting. London. 1990, Elsevier Science Publishers B. V., 1991. Vol. 1,1065.
- 5 阎晓林,徐伟华,袁方利.一种新型大功率长脉冲线性假负载的原理设计.高压电器,1996,32(2):20.

(编辑部 1997 年 6 月 26 日收稿)  
1998 年 2 月 2 日收到修改稿)

## ULTRA-LONG-PULSE MICROWAVE NEGATIVE HIGH VOLTAGE POWER SUPPLY WITH FAST PROTECTION

XU Weihua WU Junshuan ZHENG Guanghua HUANG Qiaolin  
YANG Chunsheng ZHOU Yuanwei CHEN Yonghao

(Institute of Plasma Physics, Academia Sinica, Hefei 230031)

### ABSTRACT

Two 1.4MW high voltage power supply (HVPS) modules with 3—5 s pulse duration have been developed for LHCD experiment in the HT-7 tokamak. The power source consists of a pulsed generator and the electric circuit. Duration of the ultra-long-pulse is controlled by switching-on dc relay immediately and switching-off ac contactor after a given time, and the fast protection is executed by a crowbar. Due to the soft starting of the power source, the problem of overvoltage induced by dc relay switching-on has been solved. Each power supply module outputs a rated power (—35kV, 40A) on the dummy load. With the klystrons connected as the load of the power supply modules, LHCD experiments have been conducted successfully in the HT-7 tokamak.

**Key words** Crowbar Soft-starting LHCD HT-7 tokamak