

CNIC-00032

SIP-0011

中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

HL-1装置欧姆加热供电系统的研制



中国核情报中心

China Nuclear Information Centre

CNIC-00032

SIP-0011

HL-1装置欧姆加热供电系统的研制

迮明瑞 高云霞 谢江浮 王尚柄
程家顺 唐辉庭 唐觉春

(西南物理研究所, 四川)

中国核情报中心

北京·1986

摘 要

HL-1装置(即中国环流器一号)的欧姆加热供电系统,采用了一种新型的供电线路。它用电容放电建立强功率脉冲的前沿,通过机组和电感储能作用维持长脉冲平顶的供电,平顶持续时间长达2s以上。本文介绍了此电路的原理和技术特点,给出了主要设备参数,通过HL-1装置的调试和初步实验,对该供电线路的应用效果,进行了讨论和评价。

关键词 欧姆加热 电感储能 “开关-电容”换流 引燃管组同步自动续流

THE OHMIC HEATING POWER SUPPLY SYSTEM FOR HL-1 TOKAMAK

**Ze Mingrui Gao Yunxia Xie Jiangfu Wang Shangbing
Cheng Jiashun Tang Huiting Tang Juechun**

(Southwestern Institute of Physics, Sichuan)

ABSTPACT

A novel circuit is used in the ohmic heating power supply system for HL-1. The wavefront of the primary current with high power is set by the discharge of capacitor banks and can be adjusted between 2 to 12 ms, and the flat top is sustained for more than 2 seconds by a DC flywheel generator set and energy storage inductor. The principle and technical characteristics of the circuit are described and the main parameters of the system are given. The effect of the circuit is discussed, according to the result of the adjustment and the primary test of the system.

一、前 言

欧姆加热供电系统是“中国环流器一号”装置(HL-1)的主供电电源之一。它的任务是建立初始等离子体,并通过强功率长脉冲放电,对等离子体实施欧姆加热,使其获得高温。

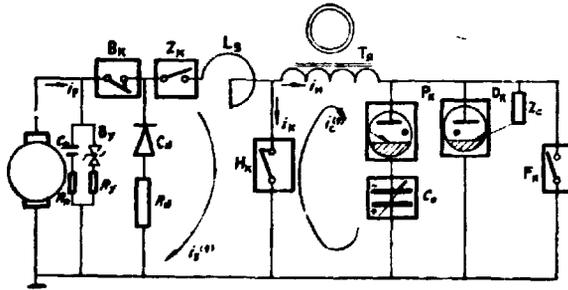
HL-1环流器是一个具有铁芯变压器的中型托卡马克装置。根据设计要求,当环向场强 $B_T = 5T$ 时,要求欧姆加热供电电源可提供一个幅值为400kA、平顶脉宽大于100ms的等离子体电流。为了研究等离子体特性,要求脉冲前沿稳定,且能在2—10ms内调节。

与国外同类装置相比,HL-1的欧姆加热绕组数少(仅32匝。),脉冲前沿上升快(2—10ms。),国外可把这种供电控制在15kV,5kA以下^[1]。幅值大,电压高,脉冲平顶持续时间长构成了HL-1装置欧姆加热供电系统研制的难点。

多年来,我们做了大量的先行实验工作^[2],研制成功了电感贮能的开关——电容换流线路^[3],引燃管组同步自动续流技术^[4]和高压大容量电容器变接线的保护技术^[5],解决了多种贮能装置脉冲放电电流的准确衔接,为新型供电线路研制成功,创造了条件。

二、简要原理和设备参数

欧姆加热供电系统所提供的脉冲功率需要数十万千瓦,为减少对电网冲击,过去多采用电容贮能放电方法。它虽技术成熟,波形重复性好,但贮能密度低,长脉冲放电不仅平顶特性不好且投资巨大。电感贮能虽兼有贮能密度高,平顶特性好的优点,但在当时换流技术不成熟,尚不能在感性负载上直接应用。我们经多年努力研制成功的新型供电线路(见图一),用容量不大的电容放电建立快而稳定的“波头”,用电感贮能和直流飞轮发电机组贮能维持

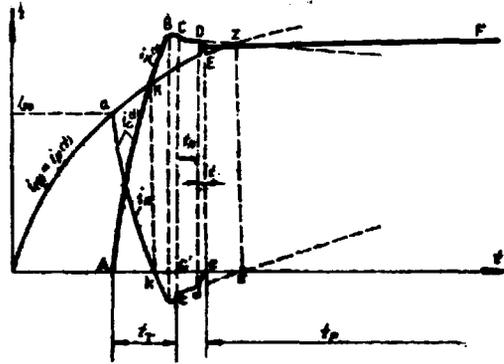


图一 欧姆加热供电系统原理图

其脉冲“平顶”,达到了扬长避短、良好的技术经济效果之目的。

图一和图二分别给出了供电原理和各支路电流间的关系。由图二不难看出,该供电系统提供的脉冲电流 $i_p(t)$ 是曲线ABCDEF轨迹。

主要设备参数:(图一)



图二 脉冲电流理论波形

- F —— 直流脉冲发电机组。非标。
 $1200^{\wedge}kW$ 、 $400V/30kA$ 、 $GD^2 370T=M^2$ 。
- L₁ —— 电感储能线圈。非标。
 $W_l = 4.5MJ$ 、 $30kA/80kV$ 、 $10mH/5m\Omega$ 。
- C₀ —— 波头电容器组。
 $W_c = 0.7MJ$ ($0.18mf/5kV$) $\times 288$ 变换。
- P_r —— 波头引燃管组。 ($P=P20kA/15kV \times 4$)
- D_r —— 自动续流引燃管组。 ($P=P20kA/15kV \times 4$) $\times 2$
- H_r —— 换流开关。P-P 20kA/30kV 非标。
- T₀ —— 气焊变压器。P-P 20kA/40kV 1.75V·s。
- Z_r —— 主令开关 10kV, 10MVA。
- F_r —— 分流旁路开关。同上。
- B_r —— 保护开关。
- Z₁ —— 自点燃系统。C₁、R₁和C₂、R₂、B₁、R₁分别为泄能保护及吸收过电压装置，它们的参数从略。

三、技术特点

解决电容电流 $i_c(t)$ 与机组、电感储能电流 $i_l(t)$ 平滑、准确地衔接，是新型供电线路的技术关键。本供电线路采用了如下技术：

（一）、开关电流人工过零技术

由图一、图二可知，开关电流 $i_k(t)$ 是电容电流 $i_c(t)$ 与储能电流 $i_l(t)$ 的差。开关电流零点附近换流开关 (H_r) 进行分断，这就保证了换流的可靠。

（二）、引燃管组同步自动续流技术

波头电流 $i_c(t)$ 一旦过峰值，续流引燃管组 (D_r) 即刻被自动点燃，电容器组 (C₀) 被短

接,因而大大降低了开关电流分断前夕过零的速率,保障了电流衔接点的准确、平滑。实践证明,由于衔接点附近负载电流变化平缓,由换流开关分闸时间分散性造成的电流误差、小于0.2%,这就保证了负载供电波形的质量。

引燃管组同步自动续流开关具有高压、低启动、大通量、长寿命、自动触发的特点,它的成本只是高功率硅堆装置的 $\frac{1}{50} \sim \frac{1}{100}$ 它与硅堆相比,具有更大的耐冲击和过载能力。

(三) 高压大容量电容器组变接线保护技术

为了改变脉冲前沿宽度,过去常将电容器分成容量不等的若干组,依不同的充、放电压和顺序接入。这样,设备和控制复杂,能量也不能充分利用。我们研制成功的变接线保护技术,可自行变更电容器的接线方式,获得多种放电脉冲前沿。充放电一次完成,脉冲前沿光滑,波形质量好。

(四) 一点接地、两次电容耦合技术

供电系统主回路一点接地、相关联的控制系统采用两次电容耦合技术。这样,可消灭事故状态下的入地电流,防止了地电位的浮动、升高和高压反击,能确保人身和重要设备的安全。多年来的实践和数千次的放电实验,证明这套办法是行之有效的。

四、控制与测量

控制与测量系统由大型数字化自控装置、继电控制保护和工程测量数据采集存贮系统等三大部分组成。

(一) 大型数字化自动控制装置

它采用了大规模集成技术。定时控制、定标控制、条件控制和逻辑综合等基本单元构成了环流供电系统的控制指挥中心。

多功能时控器采用了高稳定时钟脉冲技术,以 $10\mu\text{s}$ 石英计时脉冲为主体,可准确地进行程序控制。

高速、高精度电流定标控制器,其采样速度可达 $10\mu\text{s}/\text{点}$ 、控制范围 $25\text{A} \sim 10\text{kA}$,精度可达0.05%。

为了能在高压、强流、强磁场环境中工作,除采取了高电平、浮空全屏蔽措施外,还引用了脉冲选通和节点净化,光电隔离新技术。

(二) 多功能继电控制系统

它由机组控制,电容和电感储能控制、换流控制和大型非标设备监控系统等组成。它具有手控、遥控、单次和循环控制功能。既可在专业控制室操作,又可在中央控制室指挥。

(三) 工程测量、数据采集、存贮和显示

自行研制的高速高精脉冲大电流测量仪,采用高速的A/D和D/A数模转换技术。探头采用了特制的无感装置,采速为 $10\mu\text{s}/\text{点}$,测量精度可达 $0.06\% \pm 1$ 个字。仪器本身具备存贮、显示、打印功能。

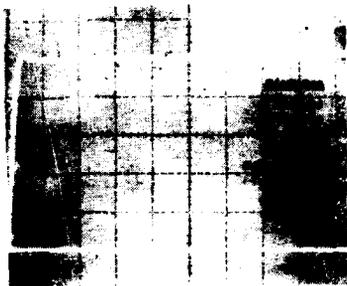
对于一般测量,我们采用了7633、7834、5441等存贮示波器。它的特点是波形直观,能够存贮,便于分析和比较。对于不同电位的多点信号综合,采用SC-16光线记录装置。

多种测量手段的综合应用,起到取长补短互为补充的作用。

五、调 试 结 果

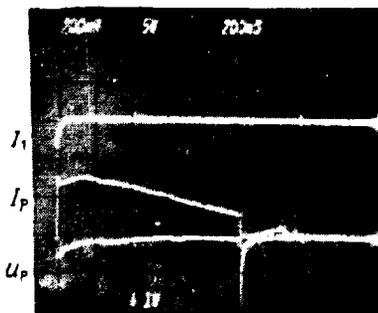
(一) 电源调试

为配合HL-1装置的启动,该供电系统于1984年8月在模拟负载线圈上进行了电源调试。调试是在装机容量1/6的规模上进行,获得了波头2.5、5、10ms,幅值6kA的供电脉冲波形。实验表明,“波头”与“平顶”的衔接平滑、准确,波形重复性好,选择不同的发电机电压,可获得不同程度的“平顶”上翘。图三照片是电源调试的部分结果。(脉冲前沿5ms)



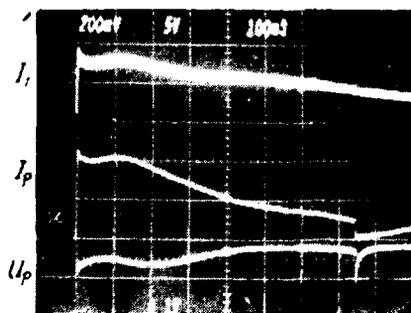
负载 L_H 2.97mH
 R_H 5m Ω
 电源 C_0 3.5mf
 U_{C_0} 6.42kV
 L_s 5mH
 U_F 250.9V
 比例 k_1 1.215kA/div
 k_2 10ms/div

图三 电源调试波形



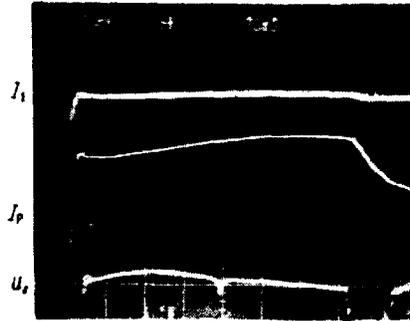
图四 环电流 $I_r = 75kA$

$C_0 = 3.42mf$ $U_{C_0} = 3.62kV$
 $P_H = 5 \times 10^{-1}Pa$ $U_F = 207V$ $N = 32coil$
 I_1 原边电流 2.5kA/(200ms·div)
 I_r 环电流 50kA/(200ms·div)
 U_p 环电压 1V/(200ms·div)



图五 环电流 $I_r = 105kA$

$C_0 = 3.42mf$ $U_{C_0} = 4.85kV$
 $P_H = 1 \times 10^{-1}Pa$ $U_F = 237V$ $N = 32coil$
 I_1 原边电流 2.5kA/(100ms·div)
 I_r 环电流 50kA/(100ms·div)
 U_p 环电压 1V/(100ms·div)



图六 环电流 $I_p = 135\text{kA}$

$C_s = 3.42\text{mf}$ $U_{C_0} = 4.81\text{kV}$ $P_H = 8 \times 10^{-2}\text{Pa}$ $U_F = 409\text{V}$ $N = 32\text{coil}$

I_1 : 原边电流 $5\text{kA}/(20\text{ms}\cdot\text{div})$ I_p : 环电流 $50\text{kA}/(20\text{ms}\cdot\text{div})$ U_e : 环电压 $1\text{V}/(20\text{ms}\cdot\text{div})$

(二) HL-1运行供电

HL-1装置于84年11月—85年8月进行了数千次的放电实验。图四—图六的示波器照片展示了该供电系统运行 (I_1 波形) 及其产生的部分实验结果。

上述实验结果表明:

1. 该供电系统提供的欧姆变压器原边电流 (I_1) 平滑、其“波头”段与“平顶”段的衔接准确。

2. 欧姆变压器原边电流 (I_1) 的“平顶脉宽”已超过 2s (设计值为 0.1s)、相应的等离子体电流 (I_p 环流) 存在时间长达 1s 。在约束较好的条件下, 该供电系统“平顶脉宽”的加大对延长等离子体寿命和改善其加热性能起了很大作用。

3. 上述实验是在变比 $k = 32:1$ 、氢气压强 $P = (5.3 \sim 13.3) \times 10^{-2}\text{Pa}$ 条件下得到的。根据实验数据分析表明, 在正常情况下, 当 $I_1 = 13.5\text{kA}$ 时, HL-1实验装置可获得 400kA 等离子体电流。随着装置物理实验参数的提高, 该供电系统一定会进一步发挥它的重要作用。

六、讨 论

1. 自七十年代以来, 国外先后建成了多个具有铁芯式脉冲变压器的中型托卡马克装置, 其欧姆加热供电系统绝大多数采用单一电容储能的方法。我们研制的电容放电建立脉冲前沿、用机组和电感储能供长平顶脉冲的方法是一个尝试。上千次的TOKAMAK放电证明, 这种尝试是成功的。

2. 七十年代后期建成的TFR-600装置, 采用了电容分级放电建波头, 可控硅变流器供脉冲平顶的先进技术⁶。与HL-1装置相比, 它的充放电及其控制设备复杂, 电容器能量无法充分利用, 而可控硅变流器对电网有巨大功率冲击, 脉冲前沿和平顶不够光滑。

我们研制成功的开关——电容换流技术, 引燃管组同步自动续流技术和高压电全桥组变

⁶ 见法国原子能委员会聚变部916号报告: EUR-CEA-FC 916* <LE TOKAMAK TFR600>

接线保护技术，在HL-1装置上亦得到了成功应用，以它们为基础而形成的新型供电线路，原理新颖，在技术上达到和超过了国际同类装置供电系统的研制水平。

感谢高级工程师何成逊、潘垣同志给予的指教和帮助。另外，工程师郭儒法、盛光昭、余宇波、佟绍云、王树锦、王道岑、助理工程师刘绍科、胡孝明、及杨火称等同志参加了系统研制，董振杰同志主持了工程安装，在此一并表示谢意。

参 考 文 献

- [1] 连明瑞，HL-1装置欧姆加热系统设计及计算，1979年，内部报告。
- [2] 451研究室贮能大组，欧姆加热电源的实验研究，1978年，内部报告。
- [3] 451研究室贮能大组，电感贮能的开关-电容换流线路的实验研究，受控核聚变，III，1977年。
- [4] 程家顺，连明瑞，大功率引燃管组开关技术实验研究，第一次核聚变工程会议资料汇编，四川乐山，第九册，1982年。
- [5] 郭儒法，余宇波等，多组变接线电容器组保护技术实验研究，同[4]。
- [6] 连明瑞，程家顺等，HL-1装置欧姆加热供电系统调试总结，1984年，内部报告。

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT



China Nuclear Information Centre