

CNIC-01359

SIP-0112

中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY REPORT

HL-1M 装置垂直场供电系统

THE VERTICAL FIELD POWER SUPPLY SYSTEM
FOR HL-1M TOKAMAK

(In Chinese)

中国核情报中心
原子能出版社

China Nuclear Information Centre
Atomic Energy Press

图书在版编目 (CIP) 数据

中国核科技报告 CNIC-01359, SIP-0112; HL-1M 装置垂直场供电系统/王尚柄等著. —北京: 原子能出版社, 1999. 6

ISBN 7-5022-1978-1

I. 中… I. 王… III. 核技术-研究报告-中国 IV. TL-2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 04823 号

原子能出版社出版发行

责任编辑: 武洁

社址: 北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码: 100037

中国核科技报告编辑部排版

核科学技术情报研究所印刷

开本 787×1092 1/16 · 印张 1/2 · 字数 12 千字

1999 年 5 月北京第一版 · 1999 年 5 月北京第一次印刷

定价: 5.00 元



王尚柄：中国核工业西南物理研究院高级工程师，
1967年毕业于四川大学物理系核物理专业。

WANG Shangbing; Senior Engineer of
Southwestern Institute of Physics of China.
Graduated from the Department of Physics
of Sichuan University in 1967, majoring in
nuclear physics.

CNIC-01359

SIP-0112

HL-1M 装置垂直场供电系统

王尚柄 徐永红 王明红 卜明南 杨仲春 刘玉琴

(核工业西南物理研究院, 成都, 610041)

摘 要

为 HL-1M 装置垂直场线圈直流馈电而研制这一大功率脉冲供电系统。该系统包括 3 组直流电压源, 通过调节输出电流的方式, 控制 HL-1M 装置垂直磁场波形变化, 用以平衡等离子体。介绍了该系统的用途、设计原理、它的主要组成部分、以及它在装置上的实验结果。

The Vertical Field Power Supply System for HL-1M Tokamak

(In Chinese)

WANG Shangbing XU Yongbong WANG Minghong
BU Mingnan YANG Zbongcbun LIU Yuqin
(Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041)

ABSTRACT

The vertical field power supply system has been developed for HL-1M Tokamak. It includes 3 d. c. voltage sources. One of them is connected to the output side of 80 MVA generator. Another one connected from the 6 kV system. Its current waveform is controlled with computer program set or plasma position feedback set. The experiment shows that it is possible to obtain 4 s plasma duration on HL-1M Tokamak.

前 言

HL-1M 装置是一个中型 Tokamak 装置。它具有环形真空室,大环半径为 102 cm,小环半径为 26 cm。由于装置的环状效应,大环内侧磁场比外侧强,等离子体受到向外扩张的电磁力,被驱使向外侧移动,直到撞击真空室器壁而破裂。用外加垂直磁场来抑制等离子体向外扩张,将等离子体平衡在中心位置,是装置实现稳定的长脉冲放电必要条件之一。

HL-1M 装置垂直场线圈由 4 组线圈组成,分布在环向场线圈外侧,位于四边形的四个角上,每组线圈 10 匝。

对 HL-1M 装置垂直场的供电和控制设计要求如表 1:

表 1 垂直场供电和控制设计要求

用 途	垂直场线圈供电
供电方式	脉冲
供电参数	直流电压: 200 V 直流电流: 6 kA 脉波数: 12
控制方式	(1) 计算机程序控制 (2) 等离子体位置反馈控制

1 原理分析

在 HL-1M 装置中,控制等离子体位移变化所需的垂直场强度,决定于等离子体电流的上升速度、等离子体小半径和电流电导率等多种因素。HL-1M 装置与其他 Tokamak 型装置在结构上的不相同之一,是不仅在变压器中心柱上具有上、下各 32 匝内欧姆线圈,还在环向场线圈外侧,具有上、下各 21 匝外欧姆线圈。后者在感应等离子体电流的同时,还提供部分垂直磁场。但是,这远不能满足平衡等离子体的要求,还必须外加可调节的垂直磁场。

实践证明,为了控制等离子体位移;HL-1M 垂直场线圈所提供的磁场必须随时间改变其强度来跟踪位移的变化。垂直场强与负载电流是成正比例变化。因此,要调整等离子体位置,可以通过调节负载电流随时间变化的波形来实现,垂直场供电简化原理如图 1 所示。

计算垂直场供电等效电路,负载电流为:

$$i = \frac{U}{R}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (1)$$

而对三相晶闸管整流桥,直流电压 U 可表示为:

$$U = 1.35E_d \cos \alpha \quad (2)$$

由 (1) 和 (2) 式可以得到:

$$i = \frac{1.35E_d}{R}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})\cos \alpha$$

其中: E_d —— 晶闸管整流柜交流侧线电压。

R —— HL-1M 垂直场线圈及引线电阻。

τ —— 直流回路时间常数。

α —— 晶闸管移相角。

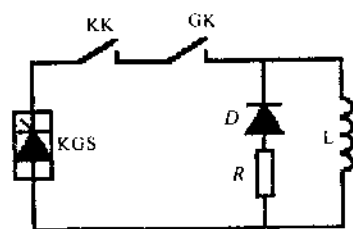


图1 垂直场供电原理图

KGS——晶闸管整流柜
L——HL-1M垂直场线圈
KK——直流快速开关
GK——隔离开关

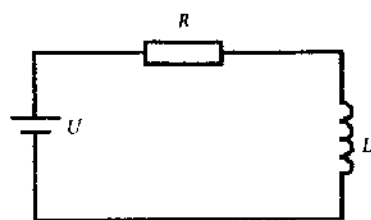


图2 垂直场供电等效电路

L——垂直场线圈及引线电感
R——垂直场线圈及引线电阻
U——晶闸管整流柜输出电压

以上计算公式，仅在单一直流电压源，而且交流馈电为市电的情况下是正确的。这里，垂直场供电系统包括3组直流电压源，由3组大功率变流设备组成。它的基本电压组由一个六相晶闸管并联桥组成，交流源为80 MVA脉冲发电机组，输出直流电压200 V，直流电流6 kA，峰值功率1.2 MW；它的两套辅助电压组分别由双反星形连接的晶闸管柜组成，交流源为6 kV电网，每套直流电压90 V，直流电流6 kA，峰值功率0.54 MW。

首先，80 MVA脉冲发电机组在输出特性上^[1]，与市电有以下差别：

(1) 80 MVA脉冲发电机的定子电流是非正弦的，其端电压波形发生严重畸变。

(2) 80 MVA脉冲发电机在脉冲供电过程中，由于机组释能，转速下降，频率不是恒定的，会不断发生变化，变化范围为49.5~44 Hz。

其次，垂直场的三组晶闸管交流设备，接线形式不同。在此，对这样一个复杂的多变量系统，我们不去推

导它的输出电压、电流精确表达式，但在各设备参数确定的情况下，仍可以得出以下关系式：

$$i = f(t, \alpha)$$

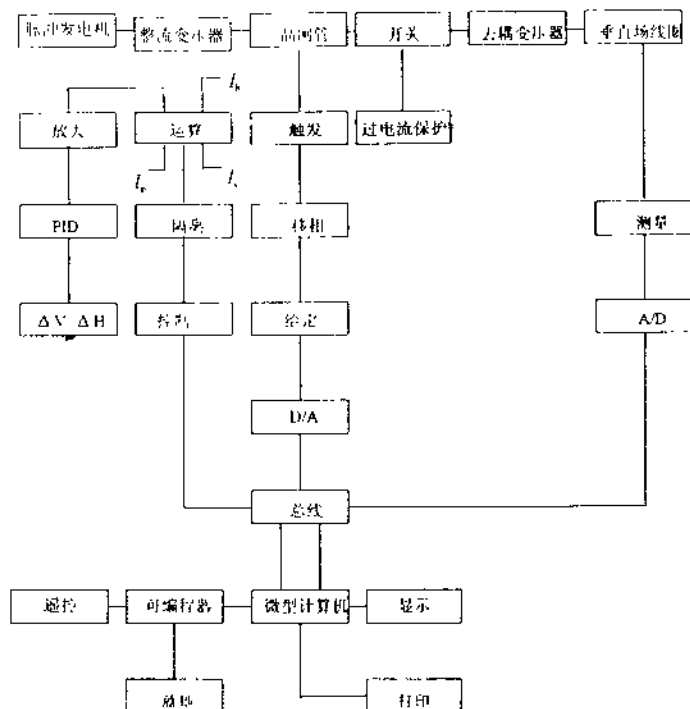


图3 HL-1M垂直场调节方框图

即可以认为, i 函数的两个变量, 是时间变量 t 和晶闸管移向角 α 。 α 是可以通过改变晶闸管给定电压来实现的。这就说明, 通过改变 t 和给定电压数值来调节输出电流波形是可能的。

2 研制内容

HL-1M 垂直场供电系统的研制内容包括: 供电主回路、继电控制系统、晶闸管移向触发系统、计算机控制系统。它的调节框图如图 3。

2.1 供电主回路

它的主回路接线如图 4, 包括 1 套基本电压组和 2 套辅助电压组:

(1) 基本电压组: 它由一套六相晶闸管并联桥组成, 交流源选择 80 MVA 脉冲发电机组。

主要设备选择如下:

表 2 80 MVA 脉冲发电机组

相电压:	1210 V	相电流:	11 kA
容量:	80 MVA	接线方式:	双 Y 错 30°
频率:	49.5~44 Hz	同步转速:	1500 转/分
一次脉冲释能:	100 MJ	机械储能:	300 MJ
拖动电机功率:	2500 kW		
纵轴超瞬变电抗:	$X''_d = 0.2842$ pu		
励磁方式:	同轴式		

表 3 整流变压器参数

额定容量:	1000 kVA
阻抗电压:	5.55%
电压变化:	6000 V/270 V

表 4 六相晶闸管并联桥参数

三相晶闸管整流柜	平衡电抗器
直流电压: 200 V	
直流电流: 6 kA	

(2) 辅助电压组: 一共两套, 每套由一组双反星形连接的晶闸管柜组成, 交流源为 6 kV 电网。

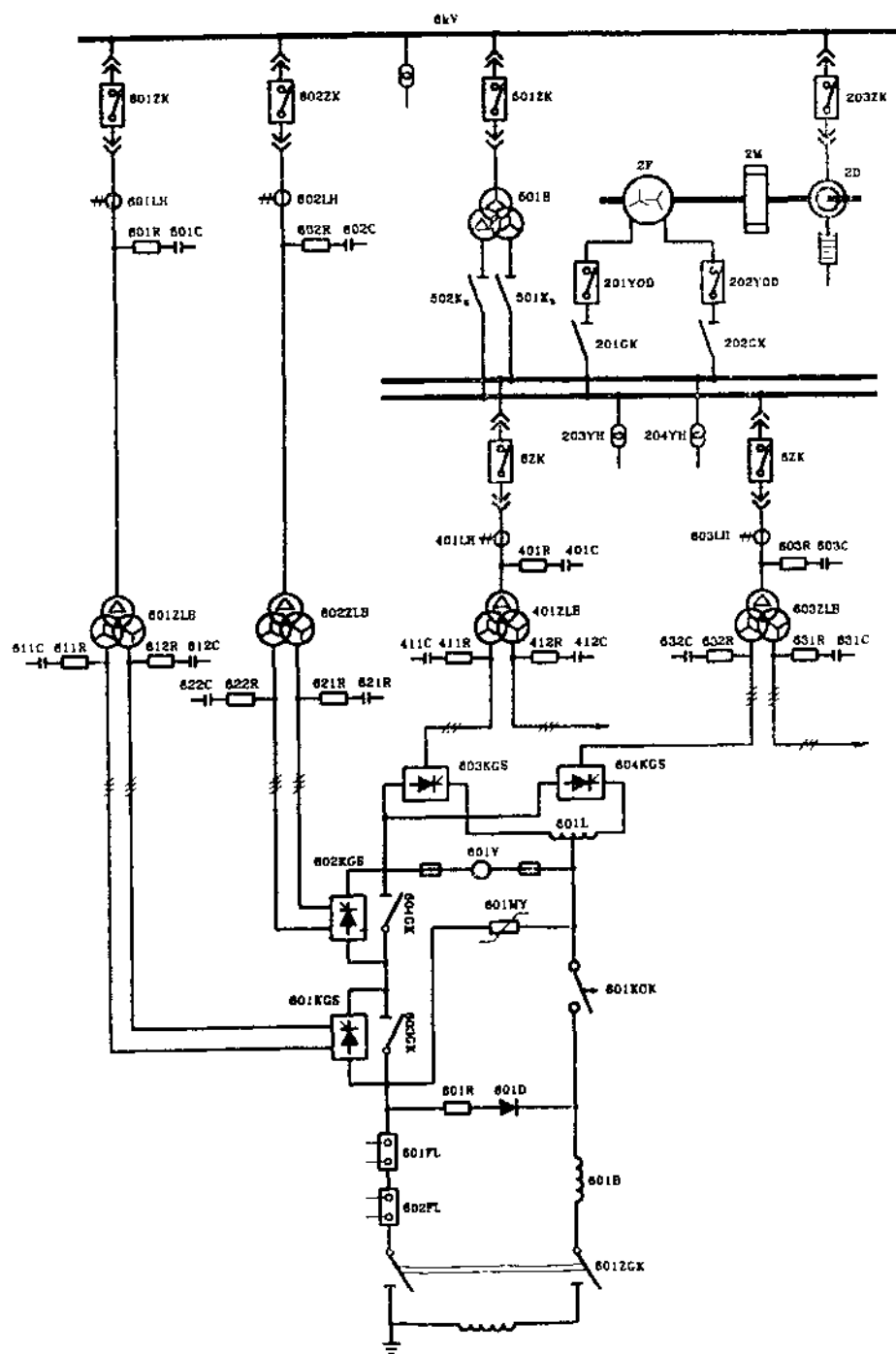
表 5 每套辅助电压组设备

整流变压器	双反星形晶闸管柜
额定容量:	1600 kVA
阻抗电压:	7.45%
电压变比:	6000 V/150 V
	直流电压: 90 V
	直流电流: 6 kA

(3) 直流侧主要设备: 包括直流快速开关、去藕变压器和隔离开关、平板分流器等。它具有以下特点:

a. 该电源由三组变流设备组成, 可以提供三组不同的直流电压, 按运行参数的高低逐步相串投入运行, 以提高输出电流的调节速度。

b. 该系统的基本电压组由六相晶闸管整流桥供电, 输出为 12 脉波, 可以减小输出电流纹波。



垂直场线图

图 4 HL-1M 垂直场供电主接线

c. 该系统的基本电压组的交流源选择 80 MVA 脉冲发电机组, 不直接从电网馈电, 在避免了电站扩容的同时, 还减小了对电网的功率冲击。

2.2 继电控制保护系统

它是该供电系统的监控、运行方式选择、故障保护、仪表监测、信号显示等功能部分。它不仅具有监控功能, 使供电安全、可靠, 还具有手控和遥控功能, 既可在专业控制室对电源进行调试, 又可在 HL-1M 装置运行时由中央控制室遥控操作。

所有继电控制及联锁电路均采用了可编程序控制, 减少继电器的使用数量, 降低了系统运行的故障率^[2]。

对该电源可能出现的各类故障, 采用不同的保护方式。在变压器入口装设真空断路器, 除具有保护功能外, 还具有运行方式切换功能。直流侧装设快速保护开关, 切断由于负载短路出现的故障电流。所有晶闸管交流柜均装设快速熔断器和阻容吸收装置, 以切断内部短路和吸收过电压。与真空断路器的保护相配合, 对过电流事故, 还采用晶闸管变流器脉冲封锁保护。

垂直场供电系统还按交流源、变流环节、负载环节用隔离开关分隔为三部分, 以方便设备维修与检查。

2.3 晶闸管同步及移向系统

(1) 同步信号装置: 对该系统的基本电压组, 由于交流源为 80 MVA 脉冲发电机组, 电压频率在 49.5~44 Hz 范围变化, 为了使 α 角不致失控而造成系统混乱, 使六相晶闸管并联桥能正常工作, 研制了特殊同步信号装置。对两套辅助电压组, 也研制了相应的同步信号装置。

(2) 移向触发装置: 每套直流电压组均具有各自的移相触发装置。它们分别由电源分配电路、接口电路、触发电路、脉冲分配电路和故障保护电路组成。电源分配电路输入 3 相 380 V, 输出 ± 24 V、 ± 15 V、 ± 9 V, 作为其它功能电路的工作电源。接口电路是把输入整定信号 ($-4 \sim 4$ V) 转换为触发电路所需要的电平, 触发电路采用锯齿波触发原理, 输出 3 相 6 个脉冲, 每个触发脉冲采用了双脉冲方式。脉冲分配电路是放大触发脉冲。故障保护电路的功能是对过电流等故障信号进行定值比较后报警、显示并封锁晶闸管。

2.4 微机控制系统

该系统包括 486 微型计算机、实时数控设备、位移反馈控制设备、信号隔离转换设备和防干扰设备。

它具有以下功能:

(1) 对 HL-1M 装置等离子体位移进行程序控制功能: 对三套晶闸管整流设备进行实时数字电压控制, 一次可各设置 8 个时序宽度和电压预值。

(2) 对 HL-1M 装置等离子体位移进行反馈控制功能。

(3) 对主要工程数据进行采集、显示和储存功能^[3]。

(4) 信号隔离、转换功能。

(5) 抗干扰功能。

3 实验结果

该供电系统研制完成后, 在 HL-1M 装置上进行了数千次放电实验, 完全达到了预期效

果。它的设备运行可靠,参数调节灵活,抗干扰性能好,事故率低。在 HL-1M 装置 1994 年 11 月的工程联调^[4]和 1995 年 5 月以来的物理实验中^[5],都对等离子体的位移进行了有效的控制,取得了良好的结果。它的实验波形如下:垂直场线圈电流波形如图 5,环电流为 320 kA 时测得的放电波形如图 6。

在 HL-1M 垂直场供电系统的研制中,任俱前研究员曾给予指导和帮助,在此深表感谢,也向所有为本系统的研制付出辛劳和给予帮助的同同志表示谢意。

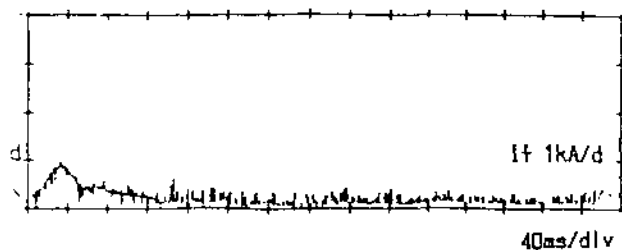


图 5 垂直场线圈电流波形

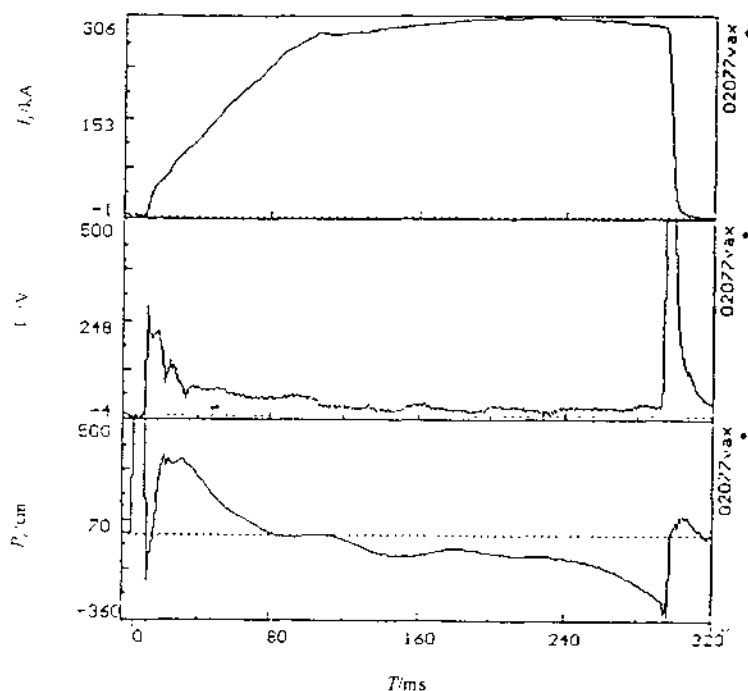


图 6 环电流为 320 kA 时测得的放电波形

I_p —— 等离子体电流
 V_L —— 环电压
 P_h —— 等离子体水平位置

参考文献

- 1 潘垣, 任俱前等. 环形磁体脉冲供电系统动态特性的分析与计算. 华中工学院学报. 1978, 3: 1~21
- 2 金广业, 李景学. 可编程序控制器原理与应用, 第一版. 北京 1991, 38~105
- 3 周明德. 微型计算机接口电路及应用, 第二版, 北京, 清华大学出版社. 1983, 193~301
- 4 谈满秋. 中国环流器新一号装置总体联调, 核聚变与等离子体. 1997, 17 (2): 1
- 5 秦运文等. HL-1M 装置欧姆等离子体实验的初步分析, 核聚变与等离子体物理. 1997, 17 (1): 20

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

This report is subject to copyright. All rights are reserved. Submission of a report for publication implies the transfer of the exclusive publication right from the author(s) to the publisher. No part of this publication, except abstract, may be reproduced, stored in data banks or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of the publisher, China Nuclear Information Centre, and/or Atomic Energy Press. Violations fall under the prosecution act of the Copyright Law of China. The China Nuclear Information Centre and Atomic Energy Press do not accept any responsibility for loss or damage arising from the use of information contained in any of its reports or in any communication about its test or investigations.

ISBN 7-5022-1978-1



9 787502 219789 >