

HIRFL-CSR 可控硅脉冲二极磁铁电源预研究^{*}

高大庆¹, 王有云², 周忠祖¹, 武 荣¹, 陈又新¹, 上官靖斌¹, 白 真¹

(1 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2 天水电气传动研究所, 甘肃 天水 741000)

摘 要: 简要介绍了兰州重离子加速器冷却储存环电源系统的概况, 指出了电源系统建设中的主要难点和设计制作大功率可控硅脉冲电源样机的必要性, 并且详细介绍了已经完成的可控硅脉冲电源样机的实施方案、电路原理、关键技术和测试结果等。

关键词: 可控硅; 脉冲; 电源; 测试; 样机

中图分类号: TL503.5 **文献标识码:** A

1 引言

兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)由主环、实验环和输运线等几部分组成。电源与磁铁共同组成磁场系统, 为 CSR 提供各种约束磁场。它的电源系统共有励磁电源 200 余台, 其中主环和实验环电源约 100 余台, 各输运线电源 100 多台。主环和实验环电源全部为脉冲工作模式, 输运线电源全部为直流工作模式。主环和实验环各有 16 块二极磁铁, 分别串联连接, 各由一台脉冲电源供电, 以减小磁场同步误差。其输出峰值电流达到 3 050 A、峰值电压达到 730 V。但磁铁的串联连接对电源要求非常严格, 该台电源产生的任何误差或波动将影响环上所有 16 块二极磁铁, 从而直接影响到加速器的性能。因此环二极磁铁电源的电流稳定度、电流纹波、跟踪精度、重复误差、可靠性等性能指标非常高, 是 CSR 所有电源中要求最高的, 技术方面难度也最大, 国内尚无厂家生产过类似电源。在这种情

况下, 大功率脉冲电源成为 CSR 电源系统建设的关键技术难题之一。我们决定和有关生产单位合作, 以主环和实验环二极磁铁电源为目标, 以环二极磁铁电源参数为指标设计制作小规模样机电源, 以摸索和解决脉冲电源有关的主要技术问题。样机电源具体参数指标列在表 1 中。该样机电源从设计思路、技术指标、电源结构等方面完全按照环二极磁铁电源来设计。图 1 为脉冲电源电流电压输出波形。

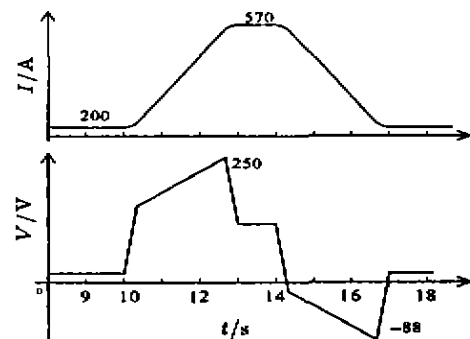


图 1 可控硅脉冲电源输出电流电压波形

表 1 样机电源主要设计指标

指标名称	参数	指标名称	参数
输出电流	200—570 A	电流上升下降率	± 190 A/s
输出电压	-88—246 V	跟踪精度	$< \pm 2 \times 10^{-4}$
电流稳定度	$5 \cdot 10^{-3}/8$ h(在 570 A)	电流纹波	$1 \cdot 10^{-3}$ (570 A < 1 kHz)
可靠性(MBTF)	$> 5 000$ h	再现误差	$< \pm 1 \cdot 10^{-3}$ (在 200 A)
峰值功率	140 kVA	周期重复误差	$< \pm 1 \cdot 10^{-3}$ (在 200 A)

收稿日期: 2001-04-24; 修改日期: 2001-09-03

* 基金项目: 国家大科学工程 HIRFL-CSR

作者简介: 高大庆(1969—), 男(汉族), 陕西佳县人, 高级工程师, 从事加速器电子技术的研究与应用。

2 电源样机工作原理

电源主回路整流采用改进型的串联12脉动晶闸管整流技术。主整流变压器为移相式整流变压器, 两台均为 Δ/Y 型, 一台为 $+15^\circ$, 另一台为 -15° ; 这样两组整流桥错相 30° 组成12脉动系统, 两组整流桥分别增加 VT_1, VT_2 和 VT_3, VT_4 四只辅助晶闸管, 组成了改进型的晶闸管整流系统, 以降低网测无功分量, 改善电源功率因数, 同时对减小输出端纹波也有作用。 $L_1C_1C_2R_1$ 组成第一级无源滤波器, $L_2C_3R_2$ 组成谐振滤波器, 构成第二级无源滤波器, 增加对600 Hz 纹波的衰减; 在其后面为一个并联型的直流有源滤波器, 彻底消去直流侧对称和不对称的纹波。同时采用低稳漂、高精度的零磁通电流传感器(DCCT)作为反馈元器件, 以确保闭环精度。电路原理图如图2所示。电源控制为双环结构, 内环为电压环, 电压环要求响应快, 放大倍数不高, 能够对电压扰动快速反应。外环为电流环, 放大倍数很大, 主要保证电源精度。

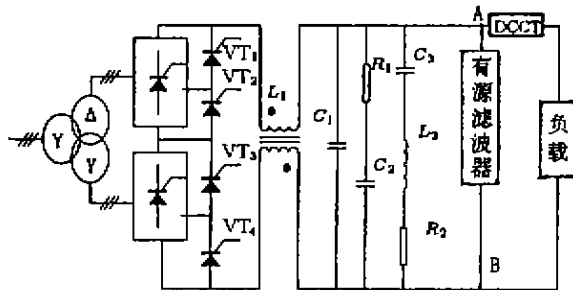


图2 可控硅脉冲电源原理图

3 关键技术

3.1 辅助晶闸管控制技术

在脉冲电流上升段, 主晶闸管投入工作, 对线电压进行整流, 辅助晶闸管截止。但在平台段或较低电压下运行时, 输出电压很小, 此时晶闸管导通角很小, 这时($\alpha > 2\pi/3$)触发辅助晶闸管, 直流侧电压波形为相电压的整流波形, 晶闸管导通角变大, 直流电压纹波明显减小, 功率因数提高。 $\pi/6 < \alpha < 2\pi/3$ 时, 直流侧电压波形为相电压和线电压的复合波型, 因此直流电压纹波也较小; $\alpha < \pi/6$ 时, 辅助晶闸管不工作, 整流系统与一般晶闸管整流系统相同。在逆变时, 通过设定 α 到 $5\pi/6$, 辅助触发角 δ

从 $0 - 2\pi/3$ 来改善直流电压纹波及提高功率因数。

3.2 无源滤波器

电路图见图2, $L_1C_1C_2R_1$ 构成一个低通滤波器。在脉冲工作模式下, 为追求电源好的跟踪特性, LC 滤波器中 LC 的值不能太大。这样 LC 滤波器对纹波的衰减不可能很大。实际设计中, LC 滤波器对特征谐波衰减 $30 - 50$ dB 左右即可。同时在 LC 滤波器后面又增加一个 $L_2R_2C_3$ 组成的并联谐振滤波器, 该滤波器谐振于 600 Hz (12脉动整流特征谐波), 对 600 Hz 谐波衰减增加约 30 dB。

3.3 有源滤波器

该电源采用了晶闸管12脉动整流器, 理论上直流侧只有 600 Hz 的纹波, 但由于三相电网的不平衡、晶闸管触发特性的不一致、整流变压器制作时三相输出不一致等诸多因素, 造成直流侧有低于特征谐波的分谐波和高次谐波存在。为了滤去这些谐波, 采用了一种基于 IGBT 的直流有源滤波器 (见图3)。该有源滤波器采用了并联型方案, 在有效

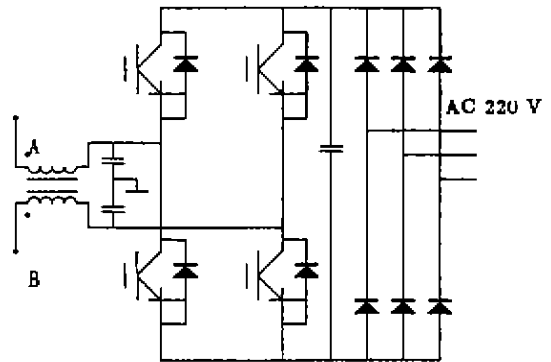


图3 有源滤波器原理图

消去直流侧各种纹波的同时, 不影响脉冲电源的快速性。这种有源滤波器通过检测电压纹波, 此纹波电压经放大后作为给定信号, 由 IGBT 逆变放大产生与主回路纹波电压大小相等、极性相反的电压信号, 抵消主回路中的电压纹波, 达到抑制纹波的目的。该有源滤波器采用 PWM 控制技术, IGBT 的工作频率最高达 20 kHz。表2为有源滤波器效果比较, 表中详细列出了在输出电流不同时, 有源滤波器投入和断开时的实测纹波电流值, 有源滤波器断开时只有无源滤波器起作用。可以看出, 有源滤波器对纹波衰减在 $5 - 10$ 倍之间, 效果非常明显。

表2 有源滤波器滤波效果比较

输出电流(A)	有源滤波	纹波电压	100 Hz	300 Hz	600 Hz	900 Hz
		峰-峰值(V)	纹波电流(mA)	纹波电流(mA)	纹波电流(mA)	纹波电流(mA)
630	断开	15.9	10.1	1.7	1	0.08
	投入	6.19	1.7	0.45	0.35	0.027
570	断开	15.3	12	1	1	0.1
	投入	5	1.1	0.32	0.39	0.048
400	断开	12.1	8.9	0.75	0.5	0.074
	投入	4.2	1	0.17	0.18	0.026
200	断开	8.9	5	0.84	0.45	0.052
	投入	3	0.73	0.2	0.13	0.015
100	断开	6.8	4.2	0.5	0.13	0.04
	投入	1.96	0.33	0.13	0.08	0.015
50	断开	5.1	3	0.39	0.28	0.034
	投入	1.68	0.33	0.09	0.08	0.011

4 测试结果

(1) 经过两个月的调试和测试, 该台电源达到表3所示的指标.

表3 样机电源测试结果

测试项目	输出电流	实测指标
直流输出长期稳定度	570 A	9.8×10^{-4}
直流输出电流纹波	200 A	3.5×10^{-5}
(570 A)	100 Hz	1.9×10^{-6}
	300 Hz	5.6×10^{-7}
	600 Hz	6.8×10^{-7}
	900 Hz	8.4×10^{-8}
再现误差		7×10^{-5}
周期重复误差		3.2×10^{-5}
可靠性	连续运行150小时无严重故障	

(2) 跟踪精度 由于受测试手段的限制, 动态跟

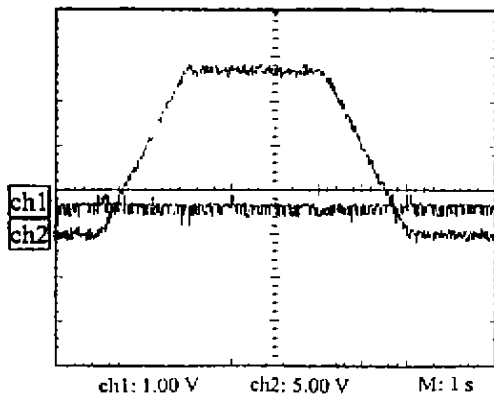


图1 跟踪误差实测波形

上升电流 200~570 A, 上升时间 2 s, 圆弧时间 0.3 s.

随精度无法度量, 我们只能根据实测的波形估计跟踪精度, 图4为上升时间2 s时的波形, 从波形分析看, 跟踪误差已非常小, 如果将上升时间延长为3 s, 跟踪误差会更小.

5 结论

通过一系列的理论和实际调试, 对晶闸管整流技术和 IGBT 组成有源滤波器技术进行了大胆的尝试, 现有测试结果表明, 该台样机电源的主要技术指标达到或超过了设计指标, 对可控硅脉冲电源的主要关键技术进行了摸索和尝试, 取得了一些极其宝贵的经验和数据, 实现了制造样机的目标, 为 CSR 可控硅脉冲电源的批量生产打下了坚实的

基础,同时填补了我国同类高精度可控硅脉冲电源 的空白.

参 考 文 献:

- [1] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 上海工业大学主编. 上海, 上海工业大学出版社. 1992, 48-49.
- [2] 戴忠达. 自动控制理论基础[M]. 清华大学主编. 北京, 清华大学出版社. 1991, 第1版, 177-228.
- [3] Pfeffer H, Yarema R J. A Bipolar High Precision Low Ripple Power Supply [J]. IEEE Transaction on Nuclear Science, 1983, NS-30(4): 2 870-2 882.
- [4] McCarthy J, Wolff D. Very High Precision Current Regulated Power Supplies for the Fermilab Antiproton Source [J]. IEEE Transaction on Nuclear Science, 1985, NS-32 (5): 3 778-3 780.

Design and Research of CSR Dipole Pulsed Thyristor Power Supply*

GAO Da-qing¹, WANG You-yun², ZHOU Zhong-zu¹, WU Rong, CHEN You-xin¹,
SHANGGUAN Jing-bin¹, BAI Zhen¹

(¹ Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

² Tianshui Electric Drive Research Institute, Tianshui 741000, China)

Abstract: The pulsed power supply is very important for HIRFL-CSR power supply system. All power supplies in CSRm and CSRe need pulsed operation mode. These power supplies must have high current stability, low current ripple and good dynamic characteristic. A small-scale thyristor rectifier prototype has been researched and designed to find and solve all technique problems of pulsed power supply. The parameters of prototype are the same or higher than dipole power supplies in CSRm and CSRe. The tested results are satisfied.

Key words: thyristor; pulsed; power supply; measurement; prototype