

PSI 数字化电源控制器在上海光源大功率电源上的应用及创新

陈焕光 李 瑞 郭春龙 沈天健 李德明

(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

摘要 本文介绍了国外使用 PSI 数字化控制器在大功率电源上的控制方式,进而阐明了上海光源(SSRF)大功率开关电源的控制方式,及 PSI 数字化控制器在 SSRF 大功率开关电源上的创新应用。

关键词 数字化电源控制器, 大功率开关电源, 上海光源

中图分类号 TP214⁺.5, TP271⁺.9, TN7

开关电源技术发展迅速,高频变换特别是软开关高频变换已成主流,电源的高频化、高功率密度化、微型化、智能化、绿色化等技术是发展的方向^[1]。大功率晶体管、晶闸管及绝缘栅双极晶体管(IGBT)是较理想的开关器件,数字化电源控制器是电源控制技术的最新发展,可方便地实现各种复杂的控制算法,为电源的智能化、远程通信控制提供良好的平台。根据电源技术的发展,上海光源的磁铁电源几乎全部采用数字化控制,并取得良好效果。

1 电源的需求分析

上海光源的设计需要大量的高精度稳流电源,电源功率范围从几瓦至 800 多千瓦,所有电源都由中控室控制。上海光源增强器大功率动态电源的设计是一个难点,性能稳定指标好于 50×10^{-6} ,分辨率达 15×10^{-6} ;对于动态电源,输出电流稳定范围要求 4%~100%,电源输出电流对给定的跟踪性好于 10^{-3} ,要求输出可编程 2 Hz 偏置准正弦的动态电流。电源设计要跟踪先进技术、高效率及智能化。因此我们决定使用数字化控制的开关电源技术。

2 PSI 数字化电源控制器简介

PSI 数字化电源控制器由数字信号处理(DSP)控制卡和转换(ADC)采样卡构成。DSP 控制卡支持上层 5 M 波特率的光纤通信,访问速度达 10000 次/s;本地 RS232 串口通信,设置电源控制参数;具有 16 路数字量输入和 8 路数字量输出;支持多种电源工作模式(1Q, 2Q, 4Q, 2×2Q);PWM 工作输出频率

可为 10、16、25、33、50 和 100 kHz;具有支持波形输出能力及外部光纤触发功能,具有 11 存储页面,每个页面能存储 16384 个数据点。

ADC 卡主要负责模拟信号的采集,有 8 路 50 ksp/s 的 16 bit 的 AD 转换器和 2 路 14 bit 的模数转换器。PSI 控制器在瑞士光源(SLS)^[2]和英国 Diamond 光源^[3]的电源上应用良好,电源的性能高,稳定度达 10×10^{-6} ,分辨率好于 10×10^{-6} ,控制电源调节循环时间达 20 μ s,因而电源带宽较高。

3 国外应用

SLS 的大功率弯转磁铁电源设计为 3 Hz,峰值功率达 1 MW,额定电流长期稳定性(8 h)为 4×10^{-5} ,短期稳定性为 $1 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-5}$,跟踪精度为 10^{-3} ,设计指标很高,故使用开关电源,并开发了一套 PSI 数字化电源控制器。其大功率电源控制结构如图 1。

瑞士光源大功率电源控制系统(图 2)用四套电源控制器控制单台大功率电源的工作与通信。控制器的程序根据控制结构需要而定制,用多套控制器对单台电源主从控制的多控制器模式。SLS 还提供单套控制器对单台电源控制的单控制器模式,用户其单控制器模式无须购买版权,但使用其多控制器模式须购买版权,因为用户必须修改控制器程序才能适应用户多控制器模式的特殊运用。

英国 Diamond 光源增强器的大功率电源设计结构与 SLS 光源类似,性能指标也很高,电源控制器也用 PSI 数字化电源控制器。

SLS 和 Diamond 光源的磁铁电源运行的性能非常好,得到专家的高度评价。

第一作者:陈焕光,男,1977 年出生,2000 年毕业于中南大学,现为在读博士,工程师,研究方向为应用电子技术, DSP 数字处理、FPGA、嵌入式系统开发

收稿日期:2008-04-22,修回日期:2008-06-11

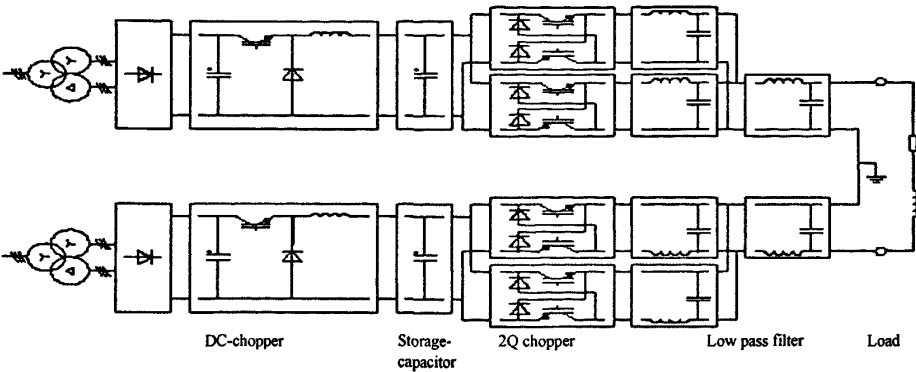


图 1 瑞士光源大功率电源控制结构^[4]
Fig.1 High-power supply control structure of Swiss Light Source

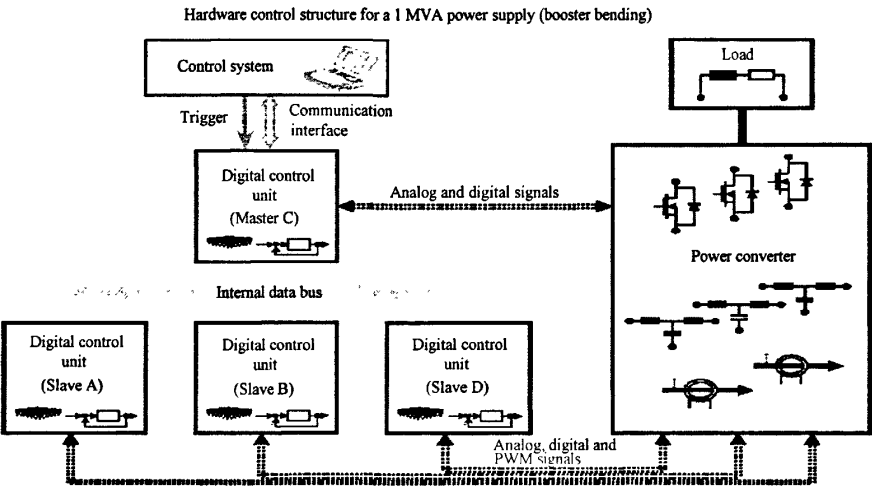


图 2 瑞士光源大功率电源控制系统^[4]
Fig.2 High-power supply control system of Swiss Light Source

4 SSRF 电源控制器的创新应用

上海光源的大功率电源结构(图 3)基本与瑞士光源相似，采用 IGBT 大功率开关器件，串并联结构；电源由 8 个模块单元组成，每 4 个模块单元先串联，再并联；并由一套 PSI 数字化电源控制器控制与通信。

若照搬 SLS 大功率电源控制系统，我们须购买 PSI 多控制器模式的控制器版权、修改控制器程序，会遇到系统复杂、经费高、工程进度难以控制等问题。由此，在拥有单控制器模式的控制器、掌握 PSI 控制器的各项功能后，我们确定了如下的电源控制系统创新性方案。

将 PSI 控制器作为外环控制回路，实现电源控制的数字化调节，完成中央控制智能化通信。PSI

控制器接收本地 PC 或中央控制的给定电流，并与外环电流反馈产生误差，进行脉冲输入(PI)调节运算，再输出脉宽调制 (PWM)信号；将 PSI 输出的 PWM 信号进行二阶 RC 低通滤波，滤波后的模拟信号作为内环模拟 PI 调节回路控制的给定，与内环反馈电流进行模拟 PI 调节控制，内环 PI 调节器控制输出的信号，送到 PWM 发生器(SG3525)产生移相输出的 PWM，最后将此 PWM 送到 IGBT 的驱动芯片，进而对 IGBT 进行开关控制。

设计配置控制器的给定滤波参数、反馈电流滤波参数，滤波频率要>2 kHz，减小相位延时，提高跟踪精度；设计 PI 调节比例积分参数，匹配电源系统的零极点，尽可能地提高系统带宽与电源的稳定性；采用二阶 RC 对输出 PWM 进行低通滤波，为使滤波输出信号得到最小纹波与最小相位延时，将

控制器设置成 100 kHz 的 PWM 工作频率，并设置 PWM 的工作模式为四路 PWM 移相输出，再将 PWM 进行逻辑或操作得到 400 kHz 的 PWM 信号，这样使得二阶 RC 低通滤波能得到最小的纹波与最

小的相位延时，来满足增强器动态电源 2 Hz 波形输出电流跟踪精度千分之一的要求。SSRF 大功率电源控制系统示意图如图 4。

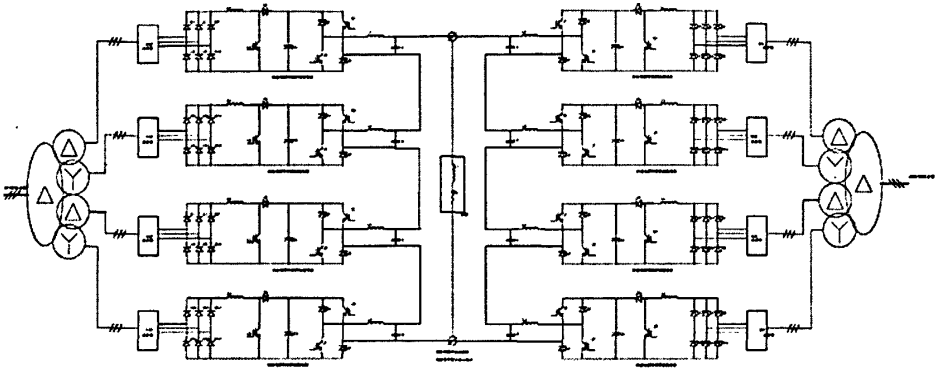


图 3 SSRF 大功率电源控制结构
Fig.3 High-power supply control structure of SSRF

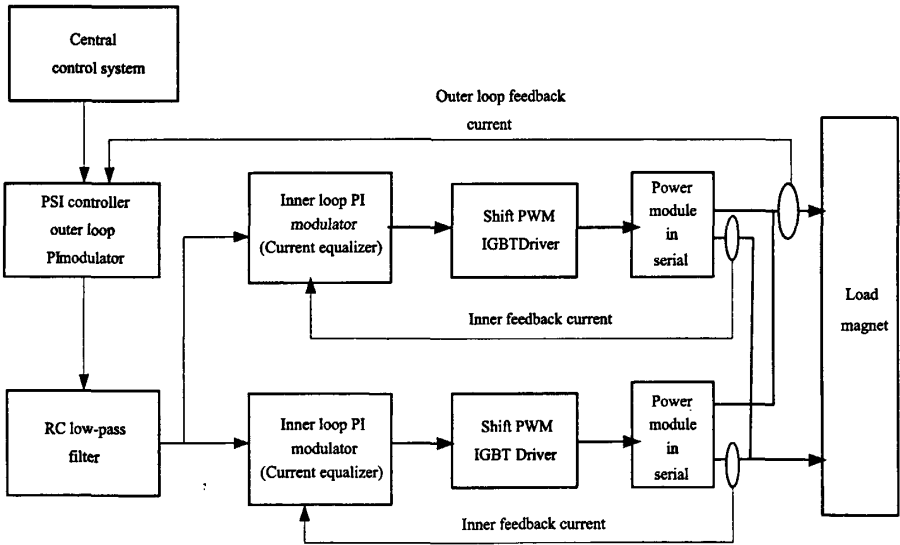


图 4 SSRF 大功率电源控制系统示意图
Fig.4 High-power supply control system of SSRF

5 实验结果

SSRF 通过仔细的仿真实验与调试，最终 SSRF 大功率电源成功达到设计指标并完成验收。验收结果二极管电源 B1 电流分辨率在满量程 4% 达到 25×10^{-5} ，70% 达到 10^{-5} (绝对分辨率) 如图 5。

电流输出稳定性达到 5×10^{-5} 。其稳定性计算公式如下：

$$\gamma = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2I_{av}}$$

通过数据采集卡采样输出电流，再对获取的数据进行快速傅立叶变换(FFT)分析，分析输出电流与否含 2 Hz 基波的高次谐波。若高次谐波成分太多，说明电源输出存在一定的失真，电源的跟踪误差就会增大，线性度变差。跟踪 2 Hz 给定升能波形的电流输出结果如图 7。图中 $X=2$ 为 2 Hz 信号增益为 1， $X=4$ 为 2 Hz 的谐波分量 4 Hz 信号幅值为小于千分之一。说明系统跟踪 2 Hz 给定信号好于千分之一。

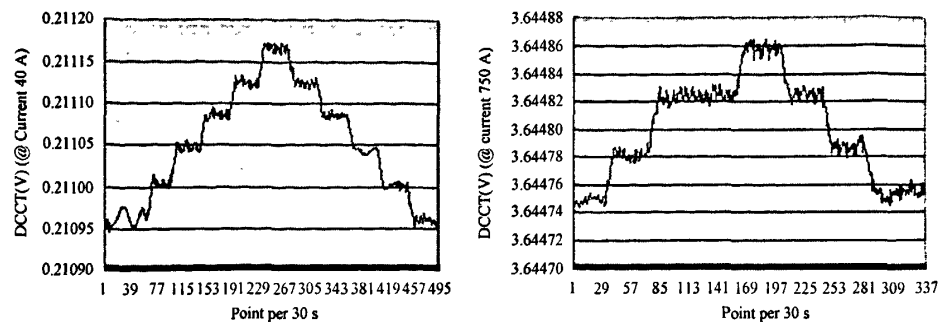


图 5 SSRF 二极磁铁电源 B1 电流分辨率验收结果
Fig.5 Current resolution of dipole magnet power supply B1 of SSRF

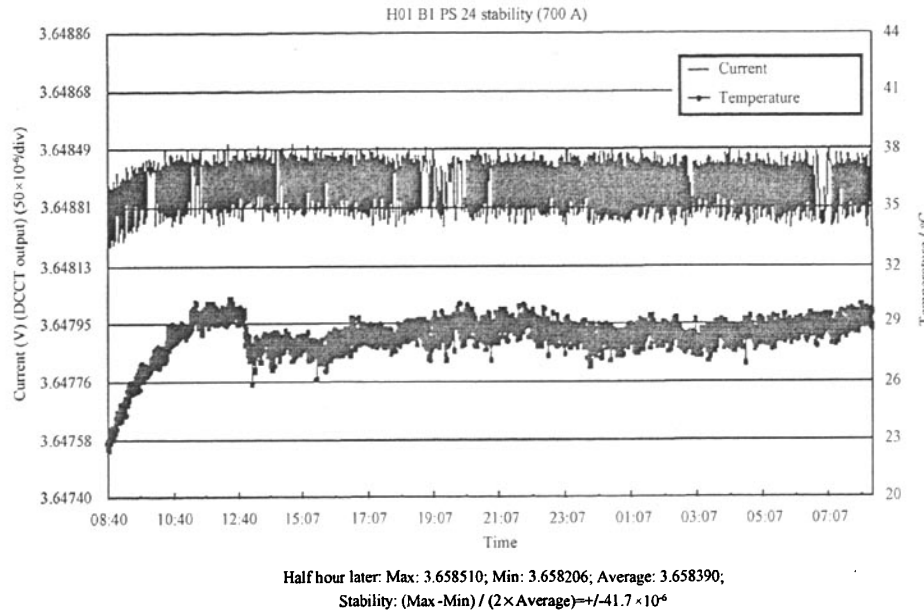


图 6 SSRF 二极铁电源 B1 电流输出稳定性验收结果
Fig.6 Current stability of dipole magnet power supply B1 of SSRF

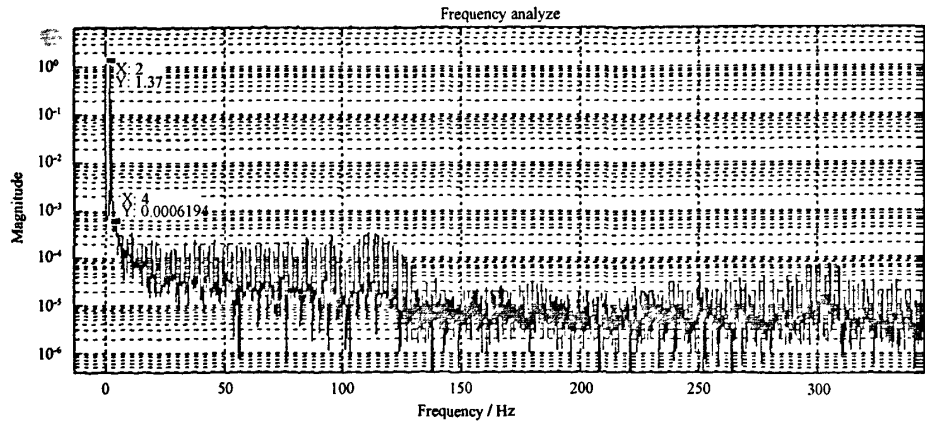


图 7 SSRF 二极铁电源 B1 电流输出跟踪性验收结果
Fig.7 Current control error of dipole magnet power supply B1 of SSRF

6 结束语

相比国外的 PSI 控制器使用, 我们的应用更简单, 只使用了一套 PSI 控制器及基本的软件配置, 使 PSI 数字化电源控制器在 SSRF 上得到了创新性的应用, 既节省了经费, 又按时地达到和超过各项性能指标, SSRF 增强器顺利成功将电子束升能到 3.5 GeV, 保证了储存环的 100 mA 调束的成功。

参考文献

- 1 中国电源学会. 全国电源技术年会论文集. 第 13 届, 1999 年 11 月 15 日-18 日
China Power Supply Society. A Volume of Papers of
- 2 Joho W, Gough C, Irminger G, *et al.* The SLS Booster Synchrotron, Proc. of the 6th European Particle Accelerator Conference, Stockholm, June 1998
- 3 Marks N, Griffiths S A, Theed J E. Configuration of the Dipole Magnet power supplies for the DIAMOND booster synchrotron, these proceedings
- 4 Irminger G, Horvat M, Jenni F, *et al.* (all PSI/AEI Switzerland), 21./22.10. 1998, A 3 Hz, 1 MW peak Bending Magnet Power Supply for the Swiss Light Source (SLS)

An innovational application of digital power supply controller on SSRF dynamic power supply

CHEN Huanguang LI Rui GUO Chunlong SHEN Tianjian LI Deming

(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract Control structure of dynamic power supply using PSI controller in SLS and Diamond is introduced. For designing dynamic power supply using PSI controller in the booster of SSRF, an innovative application of PSI digital power supply controller has been developed. In the commissioning of SSRF, the dynamic power supplies performed perfectly.

Key words Digital power supply controller, Dynamic power supply, PWM, SSRF
CLC TP214*.5, TP271*.9, TN7