

用于磁场测量的高精度 500 A/30 V 零压开关直流稳流电源

程 健, 王放安, 张 旌, 陈 斌, 陈素颖, 龙锋利

(中国科学院 高能物理研究所, 北京 100039)

摘要: 研制了一种带有无源辅助网络的全桥移相脉宽调制零压开关(FB-PS PWM ZVS)高精度磁铁稳流电源,并在电磁铁磁场测量中得到应用,其电流稳定度在8 h内优于 $\pm 1 \times 10^{-4}$ 。

关键词: 零压开关;无源辅助网络;高精度稳流电源

中图分类号: TL503.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6931(2004)05-0474-03

DC Power Supply (500 A/30 V) With Zero-voltage-switch and High Stability Current for the Magnetic Field Measurement

CHENG Jian, WANG Fang-an, ZHANG Jing, CHEN Bin, CHEN Su-ying, LONG Feng-li
(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: A DC power supply of full bridge phase shift pulse-width modulation zero-voltage-switch(FB-PS PWM ZVS) with passive auxiliary network was developed, which is used in magnetic field measurement. From the testing data, the current stability of this power supply is better than $\pm 1 \times 10^{-4}$ per 8 h.

Key words: zero-voltage-switch; passive auxiliary networks; DC power supply with high stability current

在加速器磁铁制造过程中,需对各种磁铁进行磁场的精确测量,这就要求励磁电源不但要有较高的精度,同时还要输出电流可在大范围内连续可调,并稳定工作。而且,许多高能物理加速器磁铁电源应用领域也经常会遇到要求加速器能量可在较大范围内变化并在各个能区稳定工作的情况。因此,就要求磁铁电源输出电流能够进行大范围的连续调节并稳定地工作。根据这种需求,在FB-PS PWM ZVS逆变器技术的基础上研制了输出功率为15 kW

(500 A/30 V)的高精度稳流电源。

1 工作原理

FB-PS PWM ZVS逆变器的工作原理参见文献[1]。图1为研制的电源主电路原理图。

由于要求电源输出电流可在大范围内调节,因此,这台电源的关键技术是如何能在较大范围内实现开关管的零压开关。对于普通的FB-PS PWM ZVS电路,其开关管实现零压开

收稿日期:2003-05-12;修回日期:2003-09-30

作者简介:程 健(1955—),男,北京人,高级工程师,电机制造专业

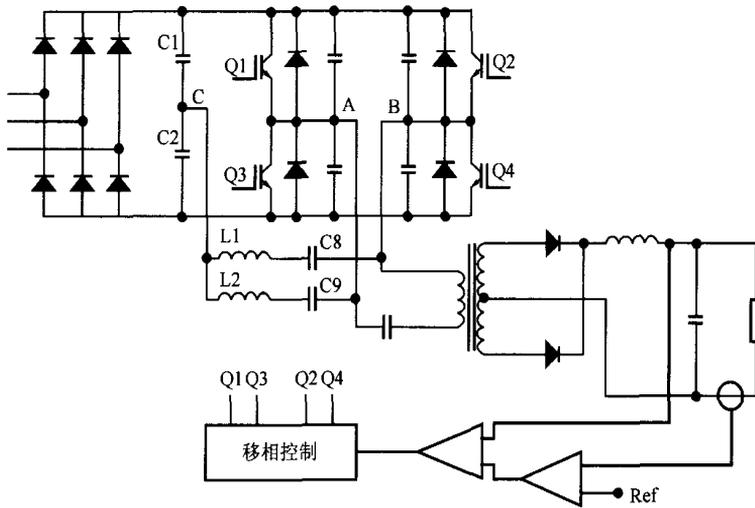


图 1 电源主电路原理图

Fig. 1 Basic circuit principle of the power supply

关的条件^[1]为:

$$\frac{1}{2} L I^2 > \frac{4}{3} C_{lag} V_{in}^2 + \frac{1}{2} C_{tr} V_{in}^2 \quad (1)$$

其中: C_{lag} 、 C_{tr} 分别为开关管的并联电容和结电容; V_{in} 为整流电压; I 为变压器初级电流; 对滞后桥臂而言, L 为高频变压器漏感, 通常情况下其值都较小; 对于超前桥臂, L 还应包括等效到变压器初级的输出续流电感的电感值。

在电源输出电流 I 很小时, 由于无法满足开关管进入零压开通的条件, 开关管工作在所谓“硬开关”状态。此时, 因开关管没有适当的缓冲电路而将产生较大的开关损耗, 同时还伴有较强的电磁干扰信号。如果采用在变压器初级绕组中串联饱和电感的方法, 虽增加了开关管的零压工作范围^[2], 但同时也增大了变压器副边占空比的丢失。

为了解决上述问题, 在逆变电路中加入两组无源辅助网络(图 1 中的 $L1$ 、 $C1$ 、 $C8$ 和 $L2$ 、 $C2$ 、 $C9$), 目的是在电源输出电流很小时, 通过辅助网络中储存的能量向变压器初级提供额外的逆变电流来满足式(1)的要求。这里, $C1$ 、 $C2$ 是两个容量很大的电解电容, 构成了两个电压值均为输入直流电压 (V_{in}) 一半的电压源, 即

$$V_{C1} = V_{C2} = \frac{1}{2} V_{in}.$$

这里以滞后臂为例 ($Q2$, $Q4$), 并规定从 C 点流出电流的方向为正方向。当 $Q4$ 导通时, 加在辅助电感 $L1$ 上的电压为

$\frac{1}{2} V_{in}$, 其电流线性增加; 当 $Q2$ 导通时, 加在辅助电感 $L1$ 上的电压为 $-\frac{1}{2} V_{in}$, 其电流线性减小。

实际上, $L1$ 、 $C8$ 和 $L2$ 、 $C9$ 分别构成了谐振回路, 但在选取 $L1$ 、 $C8$ 和 $L2$ 、 $C9$ 时要使其谐振频率远低于电源的开关频率, 使得流过辅助网络的电流近似于线性增加(减小)。这里, $C8$ 、 $C9$ 的主要作用是当 V_{C1} 、 V_{C2} 不相等时避免电感出现直流磁化而发生饱和现象。图 2 显示了

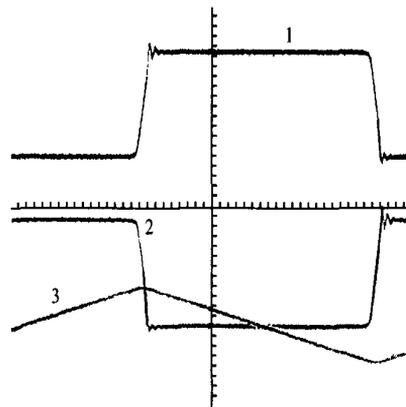


图 2 滞后臂辅助网络中的主要波形

Fig. 2 Oscillogram in passive auxiliary network for the lagging-leg

1—— $Q4$ 管压降; 2—— $Q2$ 管压降;
3——通过 $L1$ 、 $C8$ 支路的电流 I_e

在滞后臂辅助网络中的主要波形(负载电流为30 A)。所示波形(自上而下)分别为Q4管压降、Q2管压降和通过L1、C8支路的电流 I_e 。从图2可看出,辅助网络为辅助电感L1提供一个近似三角波的电流 I_e ,其电流峰值为:

$$I_{e(pk)} = \frac{V_{in}}{8L_1f_{sw}} \quad (2)$$

其中, f_{sw} 为电源开关频率。

实验表明:在未加入辅助网络时,电源输出电流降到250 A时,Q2、Q4的零压开关现象消失;加入辅助网络后,在整个电流调节范围内均可实现零压开关。这些辅助网络与主逆变回路是并联的,通过电感和电容的电流及电压的大小与电源负载无关。若设计适当,则既能保证开关管实现零压开关的范围,又可得到最小的 I_e 。

2 控制电路

功率开关管选用IGBT的IPM功率模块,方便了驱动电路和开关管保护电路的设计。电源闭环控制回路采用电压、电流双环控制结构,电流环与高精度电流传感器相配合,用以跟踪各种因素引起的电流漂移;电压环用于抑制电网的波动以及三相整流后产生的300 Hz纹波。控制芯片采用的是UC3875,频率为20 kHz。

3 主要技术指标

电源的主要技术指标如下。

- 1) 电流稳定度:8 h内电流稳定度优于 $\pm 1 \times 10^{-4}$ (在输出10%~100%范围内);
 - 2) 输出电流范围:0%~100%连续可调;
 - 3) 零压范围:小于额定输出电流5%;
 - 4) 在输出10%~100%范围内输出电压纹波:高频纹波分量(以40 kHz为主)峰峰值为200 mV,低频纹波分量(以50 Hz为主)峰峰值为20 mV;
 - 5) 电源效率:在额定输出的60%时,效率大于85%;
 - 6) 体积:700 mm × 540 mm × 1 000 mm (长 × 宽 × 高)。
- 目前,该电源已投入使用二年,工作稳定可靠,性能良好,并圆满地完成了美国SPEAR3加速器全部六级磁铁磁场测量工作。今后还将作为BEPC测磁电源继续使用。

参考文献:

- [1] Sabate JA, Vlatkovic V, Ridley RB, et al. Design Considerations for High-voltage High-power Full-bridge Zero-voltage-switched PWM Converter[A]. IEEE APEC Conference Proceedings [C]. USA: IEEE, 1990. 275~284.
- [2] Hua Guichao, Lee FC. An Improved Full-bridge Zero-voltage-switched PWM Converter Using a Saturable Inductor[J]. IEEE Trans Power Electron, 1993, 8(4): 530~534.