

加速器磁铁电源低次纹波抑制实验研究

徐中雄 王放安 齐欣

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 文中对目前国内高能加速器主磁铁电源低次纹波抑制方法进行了理论和实验分析,指出了其主要缺点.在此基础上,介绍了笔者应用有源滤波器抑制电源纹波的实验研究效果,并且简要介绍了该有源滤波器的结构和设计要点.

关键词 电源 纹波 有源滤波器

1 引言

加速器磁铁电源输出的电压纹波施加于磁铁负载,引起叠加在磁铁工作电流上的电流纹波.在同步环型加速器中,主磁铁电流纹波形成的扰动磁场周期地作用于束流,使束流的能量和闭轨抖动,动力学孔径减小.因此,现代高性能加速器对主磁铁电流纹波提出了十分严格的指标.据目前世界上一些新建成和正在设计建造中的环型加速器统计,主磁铁电流纹波的技术指标为

$$\Delta I/I_r = (5\% - 10\%) \times \min\{S, R\}, \quad (1)$$

其中 ΔI 为电流纹波波形的峰-峰值, I_r 为磁铁额定工作电流. (1) 式右侧第二项是电流稳定性和调节分辨率的最小值,一般为 10^{-5} 量级.因此 $\Delta I/I_r$ 的指标在 $10^{-6} - 10^{-7}$ 范围内,例如磁铁工作电流为 1000A 时,其电流纹波的峰-峰值应小于 1mA. 该指标之严格由此可见一斑.

磁铁上的电压纹波各谐波成分 $\Delta V(\omega)$ 与电流纹波的谐波 $\Delta I(\omega)$ 有如下近似关系:

$$\Delta V(\omega) \approx \omega L(\omega) \times \Delta I(\omega), \quad (2)$$

其中 ωL 是磁铁负载回路感抗, ω 是谐波角频率. (2) 式说明, ω 值越低,引起的磁铁电流纹波成分就越高. 一般来讲,低次谐波成分以 50Hz, 100Hz 为主,其频率低于整流输出中的特征谐波频率. 磁铁电源多使用 LC 型无源滤波器(见图 1)滤除整流输出中 300Hz 或 600Hz 以上的特征电压谐波,但对低次谐波滤除能力很低. 严重的是,低次磁铁电流

纹波造成的扰动磁场很容易通过金属真空盒,影响粒子束流的运动. 作者曾用铝材质和不锈钢材质加速器真空盒模型(壁厚约 5mm),进行了磁场纹波衰减实验,实验结果列于表 1. 该表数据证明低次纹波是扰动磁场的主要成分,是需要我们研究解决的基本问题.

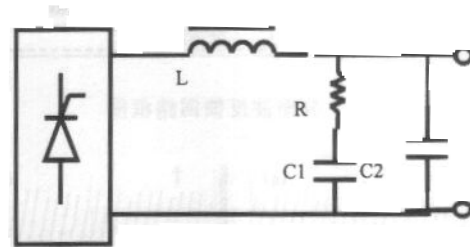


图 1 LC 型滤波器

表 1 真空盒对磁场纹波的衰减

纹波频率/Hz		50	100	300	600	1200	2400
衰减	铝盒	0.628	0.430	0.200	0.129	0.052	0.038
比率	不锈钢盒	0.909	0.850			0.818	0.772

目前正在启动的北京正负电子对撞机重大改进项目(BEPC II), 预制研究中的上海同步光源,都属于新一代强流加速器,它们的磁铁电流纹波技术指标远高于现有国内同类加速器的相应指标和设备经验. 因此,研究电源低次谐波的有效抑制方法和技术,是我们面临的一个重要技术研究课题.

2 目前低次纹波抑制技术的实验分析

根据工作原理,磁铁电源的纹波有源抑制方法

可分为串联补偿、并联补偿、分谐波反馈或前馈等 3 类,每类中又包含多种型式.在实际加速器磁铁电源技术中往往采用多种方法联合实现纹波抑制目标,主要电路结构类型有:可控硅整流和预调+串联周整晶体管,使用这种结构的又称为线性电源;整流器+串联斩波器,这种结构又称为 DC-DC 降压变换电路;可控硅整流和预调+串联型有源滤波器;可控硅整流和预调+并联型有源滤波器;电压谐波反馈控制;电压谐波前馈控制等.

目前在北京正负电子对撞机 (BEPC) 的主磁铁电源,是在 12 相可控硅整流电源上使用电压分谐波反馈技术对低次纹波抑制.同时, BEPC II 储存环, 中国科技大学同步光源二期工程, 兰州近代物理所重离子加速器, 这些国内重要加速器工程的一些主磁铁电源也都采用了这种结构, 因此研究和改进这种磁铁电源的低次纹波抑制能力是有一定普遍意义的工作.

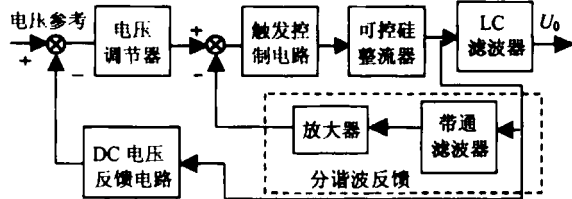


图 2 分谐波反馈回路框图

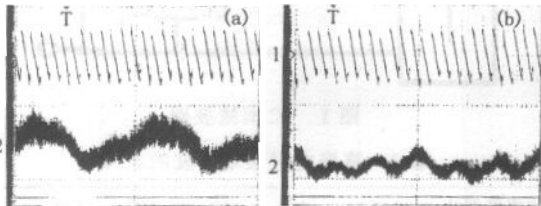


图 3 BEPC 主磁铁电源电压纹波
(a) 开环纹波; (b) 闭环后的纹波.

BEPC 储存环主二极和四级磁铁电源的分谐波反馈和电源调节回路如图 2 所示.从整流输出电压纹波检出的 50Hz, 100Hz 和 150Hz 分谐波信号反馈到可控硅触发控制电路, 从而降低了输出的纹波成分. 这种方法的优点是设备经济, 不必增加任何功率部件. 据我们对 14 台电源的测试结果, 电源输出电压纹波峰值约为直流输出电压的 2%, 以 50Hz 和 100Hz 成分为主, 图 3 为测试波形. 这一纹波水平不能满足将来 BEPC II 的电源指标. 为此, 我们对分谐波反馈回路的功能做了进一步实验分析. 表 2 列出了一台额定值为 400A/55V 的 BEPC 四极磁铁电源纹波衰减能力测试结果, 说明该纹波反馈环节对整

流输出电压的纹波衰减作用不明显. 为了寻找问题原因, 我们对该反馈环节的取样、带通滤波器和放大器分别做了电路理论和模拟分析及实验测试. 分析过程和实验数据限于篇幅, 不在此赘述, 这里仅把实验研究内容和分析结论简述如下:

表 2 RSQ3 磁铁电源纹波环的衰减测试

电源工作点		200.3A/18.2V	300A/27.4V
电压纹波	无纹波反馈	356mV	495mV
	有纹波反馈	265mV	435mV

1) 电源的反馈环路设计不合理, 限制了该环节的纹波抑制能力. 其原因是纹波反馈环与电压调节环在采样点与工作带宽上互相重叠, 且为了保证输出电压的稳定度, 电压环增益不能减小, 简单增大纹波反馈环增益将引起电源的振荡, 因此该环节开环增益很小. 图 3(b) 测试结果, 实际是电压反馈和纹波反馈的综合效果.

2) 为了将电压环和纹波反馈环分离, 我们将电压环采样点移至电感后, 实验结果表明将影响电源对电网快扰动的响应, 即影响电源稳定度. 这是由于 LC 滤波器是个大滞后环节, 不可能产生对电网快扰动的及时取样.

3) 由于上述两点原因, 我们认为目前使用的该类型电路难于进一步降低磁铁电源的电压纹波.

3 有源滤波器的实验研究

3.1 串联型有源电抗器的样机研制

为了研究降低可控硅型磁铁电源的纹波水平的有效途径, 为一台 500A/100V 可控硅型磁铁电源设计了串联型有源电抗器滤波器. 滤波器结构 (参见图 4) 主要包括取样、放大选频、移相、功率放大和变压器-电抗器 (以下简称电抗器) 等四部分. 滤波器工作过程简述如下: 这是一种电压串联型开环补偿过程, 补偿等效电路如图 5. 电源输出电压纹波 u_r , 经取样、选通放大和相位补偿后, 用于变压器-电抗器原边的功率驱动, 在副边绕组上产生补偿电压 u_c , 若电压 u_c 满足: $u_c = -u_r$, 从理论上讲, 加在负载上的低次谐波电压可接近于零. 一般情况下 u_r 为非正弦波, 可对其 50Hz, 100Hz 等主要谐波分别设计 2 个以上通道, 进行合成补偿; 本实验为了简单只用了一个宽带放大通路进行综合补偿. 有源滤波器的工作参数和一些部件的设计要点简述如下.

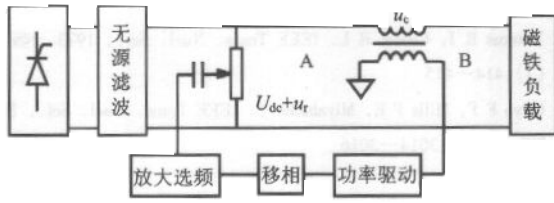


图 4 串联型有源电抗滤波器

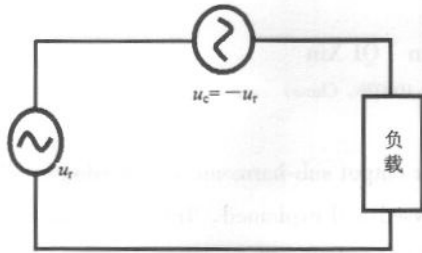


图 5 串联补偿等效电路

电抗器副边输出交流电压 u_c 峰值应约等于可控硅电源输出电压纹波峰值,本实验该值约为 2V. 考虑在电网扰动情况下应有足够的后备能力,取副边最大输出 $u_{c,max} = 4V$. 相对几百安培直流工作电流讲,电抗器副边上的交流电流成分可忽略不计,因此,电抗器的铁芯与副边绕组可根据直流工作电流设计. 本实验电抗器电感量设计为 $L_c = 0.3mH/500A/DC$,铁芯最大工作磁通 $B_m = 1.2T$,副边绕组匝数 $N_2 = 6$. 电抗器原边只通交流补偿电压和交流电流,尺寸很小. 原边电压 $u_{c1} = u_c \times N_1/N_2$, N_1 是原边绕组匝数,该值的设计选用主要考虑使功率放大元件工作电压在额定范围内,实验设计为 12. 这里强调的是功率驱动级输出电流 i_2 的设计,由于直流电抗器铁芯存在气隙,所以电抗器两绕组耦合系数小于 1,因此原边产生工作电压所需的磁化电流不能忽略,即

$$i_2 = \text{磁化电流 } i_c + \text{磁铁负载纹波电流 } i_m, \quad (3)$$

式中第二项可忽略不计. 磁化电流与纹波频率有关,近似于正弦波形时可按下式计算:

$$i_c = \frac{U_{c1} \times g \times 10^8}{5.6 \times N_1^2 \times S \times f}, \quad (4)$$

其中 i_c 和 U_{c1} 为原边电流、电压的有效值; g 是铁芯气隙(单位:cm); S 是铁芯有效截面积(单位:cm²); f 是纹波频率(单位:Hz).

取样环节的高保真性能很重要,取样信号失真会降低补偿效果,本实验采用的是自制的取样变压器. 取样波形的相移误差可通过移相环节补偿.

3.2 串联型有源电抗器样机实验

实验条件:试验电源采用 12 相可控硅整流器,输出额定值 500A/100V. 它的 LC 无源滤波器(见图 1)参数为: $L = 0.6mH$, $C_1 = 80mF$, $C_2 = 20mF$, $R = 0.1\Omega$;负载参数 $L_m = 56mH$, $R_m = 0.2\Omega$.

我们在电源不同的输出电流下,对有源滤波器接入前、后的磁铁电流纹波进行测试,表 3 和图 6 给出了部分纹波衰减测试结果,数据表明该滤波器的纹波衰减倍数约为 5 至 6 倍(约 15dB). 这台滤波器的衰减能力尚有进一步提高的余地,这是由于我们对非正弦纹波信号没有使用带通放大,仅采用了宽带放大器,而移相环节对信号中的各种频率的谐波的移相不同,因此产生波形畸变,致使电抗器的电压不可能完全补偿电源输出纹波电压,补偿效果不够理想. 即使如此,使用这种有源串联电压补偿滤波器,仍在可控硅电源上可获得 1×10^{-6} 水平的电流纹波指标,实验结果令人满意. 缺点是由于电抗器副边通过负载直流,电抗器体积和重量较大.

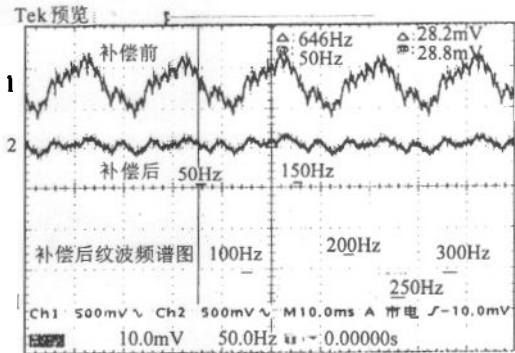


图 6 输出 450A 时电流纹波测试曲线
上: 衰减前; 下: 衰减后.

表 3 串联有源电抗器纹波衰减测试记录

电源直流输出		250A	450A
电流纹波 $\Delta I/I_k$	衰减前	5.5×10^{-6}	1.93×10^{-5}
	衰减后	1.15×10^{-6}	3.56×10^{-6}

4 结论

实验研究和分析表明:目前国内高能加速器为了抑制可控硅型主磁铁电源低次纹波,使用的分谐波反馈技术效果不理想,需设法改进. 本文提出的串联型有源滤波器,对于抑制电源低次纹波是一种有效的技术,可在可控硅磁铁电源上实际运用.

参考文献 (References)

- 1 ZHENG Ji. Power Semiconductor DC Power Supply of Current Source. Beijing: Mechanical Industry Publisher, 1985. 93—109(in Chinese)
(郑机. 电力半导体直流稳定电源. 北京:机械工业出版社, 1985. 93—109)
- 2 Yarema R J, Cassel R L. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1973, NS - 26 (3):414—415
- 3 Cilyo F F, Mills F E, Miyahama Y. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1981, NS - 28(3):3014—3016

Experimental Studies on Sub-Harmonic Suppression of Magnet Power Supply

XU Zhong-Xiong WANG Fang-An QI Xin

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

Abstract The characteristic and performance of ripple feedback loop for output sub-harmonic suppression in BEPC main magnet power supply were studied, the limits of the loop effect are analysed and explained. The experimental studies on active filters to attenuate the power supply output ripple are described, the structure and design of the filter are also introduced in this paper.

Key words power supply, ripple, active filter