

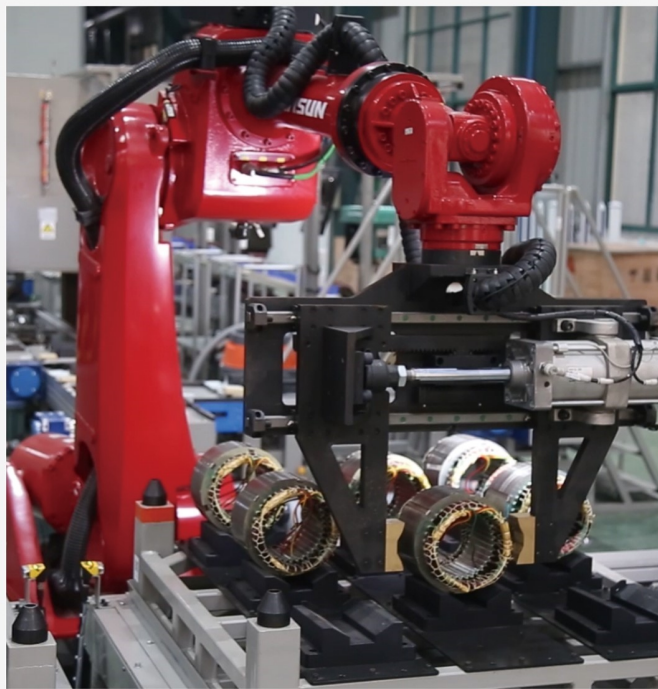
本文全文线上首发由
上海电器科学研究所
(集团) 有限公司
支持

赵春丽, 王英华, 梁安江, 王帅, 史振翔.
驱动棒电源整流器同步采样回路有源
带通滤波器设计.
电机与控制应用, 2022, 49(2): 60.



中国智能制造系统解决方案供应商联盟 (成员)
上海智能制造系统解决方案供应商 (首批)

电机·智能制造



咨询服务

规划设计

设计制造

信息化系统

项目实施



扫码联系
我们

联系人: 黄先锋 手机: 13501892388
上海电器科学研究所 (集团) 有限公司
上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司
上海市武宁路505号9号楼6层

驱动棒电源整流器同步采样回路 有源带通滤波器设计

赵春丽, 王英华, 梁安江, 王 帅, 史振翔

(上海发电设备成套设计研究院有限责任公司 核能技术中心, 上海 200240)

摘 要: 在某核电站棒控电源系统产品设备系统联调试验中, 整流器带纯电阻性负载, 当负载电流增加到额定电流的 20% 左右时, 整流器报“同步故障”并停止输出。出于实际工程项目的时效、成本等多方面考虑, 在不改变输入侧容量的基础上, 为整流器的同步采样回路设计一个以 50 Hz 为中心频率的四级二阶带通滤波器。经过理论推导、软件仿真、硬件设计及现场模拟试验, 较为有效地实现了在输入侧容量较小的情况下采样回路仍然正常工作的目的。

关键词: 二阶有源带通滤波器; 同步采样; 棒电源; 谐波含量

中图分类号: TM461 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)02-0060-07

doi: 10.12177/emca.2021.187

Design of Active Band Pass Filter for Synchronous Sampling Loop of Drive Rod Power Rectifier

ZHAO Chunli, WANG Yinghua, LIANG Anjiang, WANG Shuai, SHI Zhenxiang

(Nuclear Energy Technology Center, Shanghai Power Equipment Research Institute Co., Ltd.,
Shanghai 200240, China)

Abstract: During the equipment-system joint commissioning test of the rod control power supply system product of a nuclear power plant, failure occurred in the rectifier: for the rectifier operated with a pure resistive load, when the load current increased to about 20% of the rated current, the rectifier reported “synchronous fault” and stopped output. Considering the timeliness, cost and other aspects of the actual project, a four-stage second-order band pass filter with 50 Hz center frequency is designed for the synchronous sampling loop of the rectifier without changing the input side capacity. Through theoretical derivation, software simulation, hardware design and field simulation experiment, the purpose of normal operation of the sampling loop is effectively realized when the input side capacity is relatively small.

Key words: second-order active band pass filter; synchronous sampling; rod power supply; harmonic content

0 引 言

“碳达峰、碳中和”理念的提出, 使能源届对新能源发电技术更加高度重视; 与此同时, 核能发电技术也在逐渐完善。在某核电站棒控电源系统产品设备系统联调试验中, 整流器带纯电阻性负

载, 当负载电流增加到额定电流的 20% 左右时, 整流器报“同步故障”并停止输出。针对棒控电源系统整流器同步采样回路谐波干扰的问题, 需要利用傅里叶展开对电流谐波进行分析, 推导各次谐波含量计算表达式, 验证工程试验中谐波来源及组成^[1]。由于棒控电源系统的电源电压并不

收稿日期: 2021-09-13; 收到修改稿日期: 2022-01-15

作者简介: 赵春丽(1997—), 女, 硕士, 研究方向为核电棒电源系统。

是稳定的电网电压,文献[2]为避免增加滤波装置的负担,设计了一种能够检测特定次谐波的检测算法,其计算量小,并且在电网电压不平衡和含特定次谐波时都能有良好的检测效果。滤除谐波的方案有很多,例如文献[3]对发电机定子绕组采用星形和曲折星形连接方式的谐波磁势进行了全面分析,从理论上验证了曲折星形连接能有效降低电机损耗及磁路饱和的可能性,同时也提出了在曲折星形连接方式下减少 5、7 次谐波磁势和偶次谐波电流的建议。但该方案主要针对发电机侧,且本文依托的棒控电源系统对应的发电机已经采用了此改进方案,同步采样回路仍然有高次谐波干扰。文献[4]在减小直流侧输出电压谐波畸变率的同时还能够有效地降低交流侧电流的谐波畸变率,其中通过添加 Boost 电路来补偿整流桥输出电流,同时改变 Boost 电路占空比来调节负载电压的方法确实可以减少直流侧谐波畸变,但棒控电源系统需要稳定的直流电源,这种负载电压可调的方式并不适用。在多脉波整流器中,整流脉波数决定着系统的谐波抑制能力,可以通过增加移相变压器的输出相数和使用抽头变换器来增加整流脉波数^[5],但前者会增加移相变压器的复杂性,后者会导致脉波太小无法使负荷部分控制棒正常工作。因此本文根据有源带通滤波器和无源带通滤波器的优缺点比较及文献[3,6-7]对二阶压控电压源和二阶无限增益多路反馈两种有源带通滤波器的优缺点分析对比和设计仿真,决定对整流器的同步采样回路设计一个四级二阶带通滤波器(中心频率为 50 Hz),防止高次谐波影响采样回路正常工作。进行了理论推导、设计、仿真和电路板模拟试验,试验结果符合预期。

1 驱动棒电源系统整流器同步采样故障问题

1.1 驱动棒电源系统结构及工作原理

驱动棒电源系统主要用于压水堆核电站。由于核电站的安全性、稳定性要求较高,现有的控制棒电源系统一般采用双机并列的方法来保证其供电可靠性。本文主要针对整流器同步采样环节的滤波进行研究,因此以其中一列机组为基础展开。由图 1 可见,驱动棒电源机组的电动机由厂内三相 380 V 交流电源供电,通过电动机-飞轮-发电机组

输出交流电源,再经整流装置将交流转化为直流,为控制棒驱动机构提供稳定、可靠的直流电源。

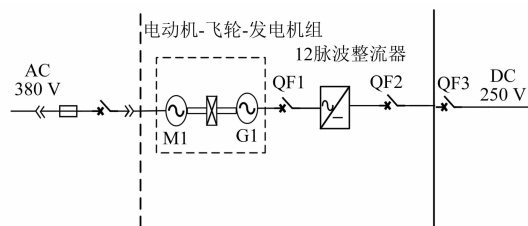


图 1 驱动棒电源系统结构图

1.2 同步采样故障问题及分析

1.2.1 同步采样故障问题

在棒控电源系统设计生产中对电动机、飞轮、发电机及整流器进行合理设计和选择,使其达到最佳配合效果,但实际联调试验可能会出现整流器同步故障的问题。当整流器带纯电阻性负载时,随着负载电流逐渐增大,整流器报同步故障并停止输出。系统中的两套整流器均出现同样的状况。

图 2 中第一个波形为同步采样电压波形 U_a ,第二、第三个为两个整流器输出电压波形 U_{a1} 、 U_{a2} ,第四个为直流输出电流波形 U_d 。可以看出同步采样的电压在不到 1 s 时出现毛刺严重的问题,谐波含量较高,整流得到的直流电压也含有很多的纹波。这将导致直流电流也有一定的波动。

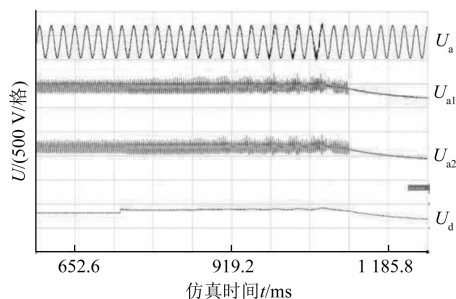


图 2 同步采样故障信号

1.2.2 问题分析及解决方案

整流器采样故障问题可采用以下方案逐一试验,分析具体的故障原因:

- (1) 在整流器进线输入端并联吸收板;
- (2) 在整流器进线输入端串入滤波器;
- (3) 在整流器进线输入端并接有源滤波器 (APF);
- (4) 发电机电容和下游整流器容量匹配不合

理,当输入网侧容量偏小,整流器负载会对输入波形产生较大谐波分量,造成同步回路测量出现故障,更换大容量发电机组;

(5) 对整流器的同步采样回路设计一个级联带通滤波器^[8](中心频率为 50 Hz),将整流器负载对输入波形产生的较大谐波分量进行滤除,防止高次谐波影响采样回路正常工作。

本文系统进行完前四个试验方案后,谐波滤除效果并不明显,其中:方案(3)有一定效果,但是负载电流增加到额定电流的 25% 时,APF 出现过压保护,紧接着整流器出现同步故障,停止输出;方案(4)将 130 kVA 机组替换为 300 kVA 的较大容量机组,试验效果良好。因此,可以确定整流器同步采样故障的原因是发电机容量和整流器容量不匹配。出于实际工程问题中工效和成本的考虑,方案(4)并不可取,故基于方案(5)进行设计和试验。

2 滤波器设计

2.1 设计步骤

2.1.1 滤波器选型

工程实际问题是整流装置及负载会给输入端引入大量谐波干扰,导致采样回路无法准确采集输入信号波形,造成整流器同步失败,因此本文将在同步采样的输入端串接一个带通滤波器。为了实现更优良的滤波效果和较小相移,并且保证实际操作过程较为简单,将采取高输入阻抗和低输出阻抗的二阶有源带通滤波器。根据带通滤波器的设计要求和侧重点,选定二阶无限增益多路反馈带通滤波器为模型,该模型所需要的网络元件少,成本低,并且利用负反馈电路,噪声较小。本文设定 50 Hz 为中心频率。首先通过理论分析和仿真模拟得到相应的波特图及滤波效果,再用 Altium Designer 绘制 PCB 板将滤波器设计成实物并进行现场模拟试验来验证。由于实际器件参数会有一定偏差,需要根据实际情况进行调整,从而得到最优性能。

2.1.2 设计要求

中心频率:50 Hz。

通频带:小于 30 Hz。

通带内起伏:不超过 3 dB。

通带外:在不大于 5 Hz 和不少于 95 Hz 处衰

减不小于 20 dB。

增益: $G=1$ 。

2.1.3 设计依据

二阶无限增益多路反馈带通滤波器电路如图 3 所示^[6]。

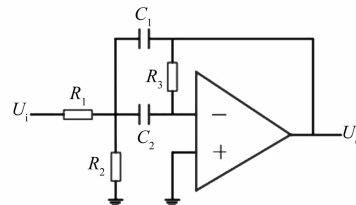


图3 带通滤波器电路

上述电路满足传递函数

$$H(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{GBs}{s^2 + Bs + \omega_0^2} \quad (1)$$

其中

$$G = -\frac{C_2}{C_1 + C_2} \cdot \frac{R_3}{R_1} \quad (2)$$

$$B = \frac{1}{R_3} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) \quad (3)$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{C_1 C_2 R_3} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (4)$$

式中: G 为增益; B 为带宽; ω_0 为角频率。

对照二阶带通滤波器标准传递函数

$$H(s) = \frac{b_0 s^2 + b_1 s + b_2}{a_0 s^2 + a_1 s + a_2} \quad (5)$$

对应参数有:

$$b_0 = 0, b_1 = GB, b_2 = 0 \quad (6)$$

$$a_0 = 1, a_1 = B, a_2 = \omega_0^2 \quad (7)$$

2.2 计算方法

本文根据实际工程情况,需要滤除被整流器引入的谐波,原信号增益不变,所以 G 取1。带通滤波器的带宽 B 表示的是对应-3 dB处上下两个截止频率的差值,带宽的大小主要影响滤波器的选择性能,此选择性能通常用品质因数 Q 表示。带通滤波器的品质因数和带宽的关系为^[7]

$$Q = \frac{\omega_0}{B(-3 \text{ dB})} \quad (8)$$

带宽越小则 Q 值越大,其频率分辨力越好,选择性能越好。而

$$Q = \frac{1}{2\varepsilon} \quad (9)$$

ε 表示阻尼率, 因此

$$B = \frac{\omega_0}{Q} = 2\omega_0\varepsilon \tag{10}$$

阻尼率越大, 则滤波器降至 -3 dB 的幅频曲线就越平缓, 对应带宽越大, 选择性越差。因此可以通过改变阻尼率来控制带宽, 增益和中心频率保持不变。

根据滤波器设计要求中带宽、增益和中心频率等参数, 首先选定一个阻尼率来确定带宽。

接下来将用具体的器件来实现。根据式(3)中带宽与电阻的关系可以得到对应的 R_3 , 再利用增益公式(2)得到电阻 R_1 , 再利用中心频率公式(4)得到电阻 R_2 。以上计算需要先选定一个电容值, 根据电容确定各个电阻的大小, 找到最方便可控的三个电阻值, 其计算过程如下。

(1) 先取 $C = 1 \mu\text{F}$, 通过改变阻尼率来观察滤波器仿真效果及对应电阻值变化。

图 4 中幅频特性曲线和相频特性曲线对应阻尼率 $\varepsilon = 1.5, 0.7, 0.3, 0.1$ 。由图 4 和表 1 可以看出, 随着阻尼率的减小, 带通滤波器的幅频特性曲线变陡峭, 带宽逐渐变小, 选择性更好, 对谐波滤波效果也更好。

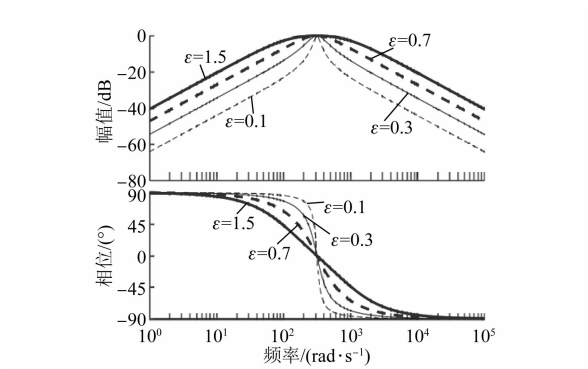


图 4 $C = 1 \mu\text{F}$, ε 变化对应的伯德图

表 1 $C = 1 \mu\text{F}$, ε 变化时滤波器相应带宽		
阻尼率 ε	-3 dB 带宽/Hz	-20 dB 带宽/Hz
1.5	69	97
0.7	48	93
0.3	26	84
0.1	10	59

(2) 综合考虑滤波器的选择性良好、尽可能使基波信号不失真, 以及实际工程中元器件简单

易得的原则来选择适当的阻尼率。

因为实际工程中基波信号并不是非常精确的 50 Hz, 可能存在一定误差, 所以带宽也不能太窄。由表 2 可见, 当 $\varepsilon = 1.5$ 时, 滤波器相应参数为负值, 选择 $\varepsilon = 0.3$ 较适合工程实际。

表 2 $C = 1 \mu\text{F}$, ε 变化时滤波器参数

阻尼率 ε	$R_1/\text{k}\Omega$	$R_2/\text{k}\Omega$	$R_3/\text{k}\Omega$
1.5	1.06	-1.36	2.12
0.7	2.25	7 450.00	4.50
0.3	5.31	1.16	10.61
0.1	15.91	324.81	31.83

(3) 在选定的阻尼率基础上更换电容值, 找到方便设计和调参的理论计算电阻值。

从表 3 可以看出, 无论电容 C 取什么值, 电阻 R_3 和 R_1 均为二倍关系, 刚好满足式(8)所示增益 $G = 1$ 时的等式关系, 随着电容值的增大, 三个电阻值都成反比例减小趋势。

表 3 $\varepsilon = 0.3$, C 变化时滤波器参数

$C/\mu\text{F}$	$R_1/\text{k}\Omega$	$R_2/\text{k}\Omega$	$R_3/\text{k}\Omega$
2.0	2.70	582.30	5.30
1.0	5.31	1.16	10.61
0.5	10.60	2.30	21.20
0.1	53.10	11.60	106.10

为了方便器件型号选择和试验过程中参数调整, 选择较大电阻对应的电容值 $C = 0.1 \mu\text{F}$ 。此时对应的各器件参数为 $\varepsilon = 0.3$, $C = 0.1 \mu\text{F}$, $R_1 = 53.1 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 11.6 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 106.1 \text{ k}\Omega$ 。

(4) 选择实际元件参数值。

由于实际电阻选型和理论计算有一定误差, 所以实际电阻值选择: $R_1 = 51 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 13 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 100 \text{ k}\Omega$ 。

3 仿 真

3.1 仿真电路设计

在已完成滤波器选型的基础上, 根据采样信号中各次谐波含量及快速傅里叶变换(FFT)分析确定滤波器串联级数。

根据图 5 实际问题中谐波含量, 决定采用带通滤波器多级串联的形式以提高谐波滤除的

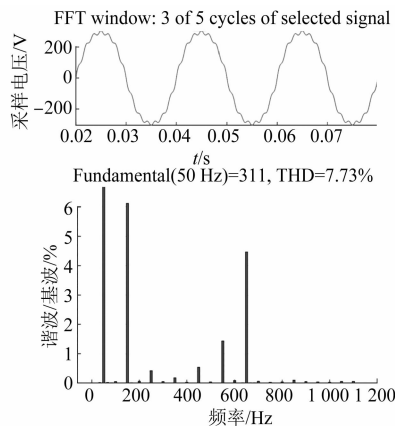


图5 同步采样信号 FFT 分析

能力。

通过仿真电路的 FFT 分析,串联四级时可达较好的谐波滤除效果,其仿真电路如图 6 所示。

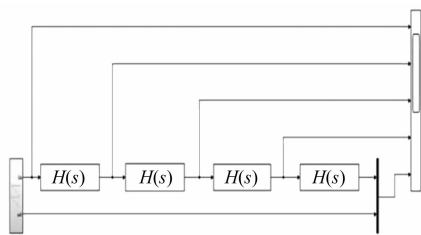


图6 滤波器四级串联电路

3.2 仿真结果

其仿真结果如图 7 所示,五路信号分别为原采样信号及经过一阶至四阶滤波电路之后的采样信号。

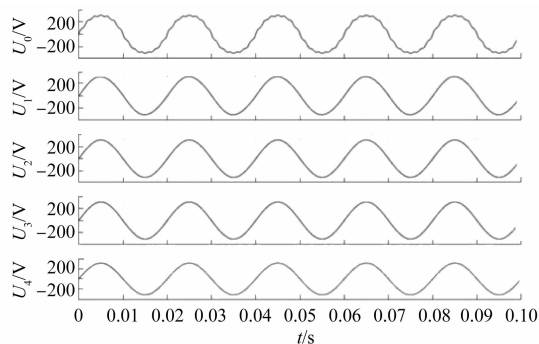


图7 采样信号经各级滤波器后的滤波效果

对仿真结果进行 FFT 分析如图 8 所示。

可见,经过四级串联,已经可以很好地滤除含量较高的奇次谐波,并且总谐波含量已经从最开始的 7.72% 降低为 0.09%,不会对基波造成影响,

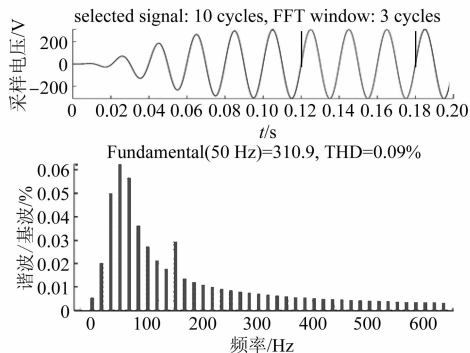


图8 四级串联带通滤波器滤波之后的采样信号 FFT 分析

同时基波幅值为 310.9 V,没有出现失真,仿真效果良好。

4 试验

4.1 试验问题及分析

首先引入正常的 50 Hz 正弦交流电源,验证是否可以保证增益为 1 且不会产生谐波干扰。经试验发现,其增益只有 $\frac{2}{3}$ 。分析其原因可能有三种:

(1) 实际滤波器电路前加入一个隔离电容,电容值取 0.1 μF ,目的是隔离直流信号,可能该电容会产生一定的电压损耗。

(2) 实际带通滤波器的电阻电容参数值导致中心频率相对 50 Hz 有所偏移,使得 50 Hz 信号通过时被削弱了。

(3) 根据增益公式可知,实际电阻 $\frac{R_3}{R_1} < 2$ 导致增益公式(8)无法满足增益为 1。

4.2 试验改进及结果

针对以上原因分别进行如下改进:

(1) 根据电容阻抗计算公式 $X_c = \frac{1}{2\pi fC}$,应增大电容容量,使其阻抗尽可能小,分压可忽略不计,通过试验尝试最终选择 $C_0 = 10 \mu\text{F}$ 。

(2) 根据式(10)可知中心频率和三个电阻均有关系,而为了保证带宽,则根据式(9) R_3 暂且保持不变,同时根据式(8),增益为 1,则 R_1 也不变,通过多次改变 R_2 值,从 $R_2 = 4.7 \text{ k}\Omega$ 至 $R_2 = 19.7 \text{ k}\Omega$,试验结果并没有明显变化,增益仍小于 1,暂时排除了中心频率偏移的问题。最终取其中

增益最接近 1 的电阻 $R_2 = 10\text{ k}\Omega$ 。

(3) 由于实际电阻选型和理论值存在一定偏差,尽可能减少参数变动,在步骤(2) $R_2 = 10\text{ k}\Omega$ 选定之后保持不变, $R_1 = 51\text{ k}\Omega$ 既影响中心频率又影响增益,也使其保持不变,增大 R_3 为 $110\text{ k}\Omega$ 使增益计算值略大于 1,最后试验结果刚好为 1。

再用倍频发生信号通过滤波器时,其输出结果在录波器上几乎为零,所以改进后滤波效果和基波信号保留效果都良好。

4.3 成功改进后的试验电路及试验结果

进行参数改进后的试验电路如图 9 所示, PCB 板设计图纸如图 10 所示。

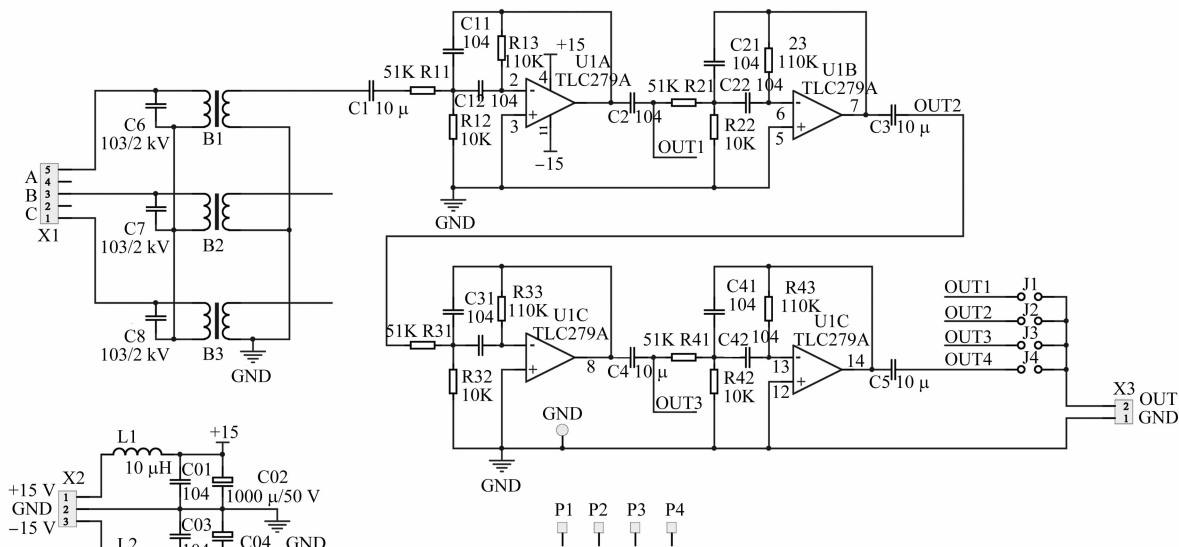


图 9 参数改进后的试验电路

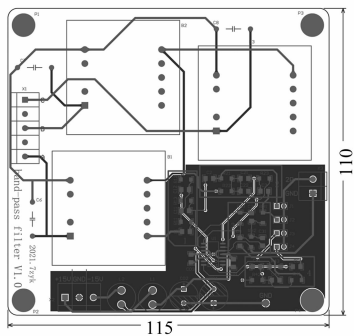


图 10 滤波器 PCB 设计图纸

在以上试验效果良好的前提下,将实际驱动棒电源系统整流回路的同步采样信号引出,进行模拟试验时,录波器显示其试验结果如图 11~图 13 所示。图 11~图 13 分别为空载、带 50% 额定负载及带 100% 额定负载时的整流器输入端交流信号滤波效果,图示为三相交流信号中的一相采样结果,带毛刺的为原信号,平滑曲线为滤波信号。可见滤波效果良好,虽然滤波后信号略超前

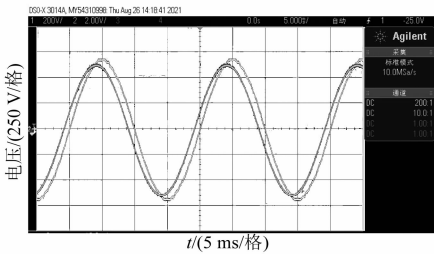


图 11 加入滤波器后空载运行滤波效果

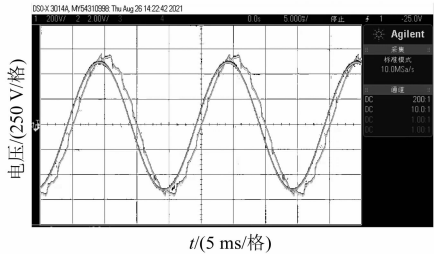


图 12 加入滤波器后带 50% 额定负载运行滤波效果

滤波前的实际信号,但对于此滤波模块而言,只需要保证滤波后相移在 20° 以内某一固定值即可,

因为系统中滤波模块后会有移相装置进行下一步处理。此处相移为 15° 固定值,完全满足设计要求,无需再增加工频软件锁相环。

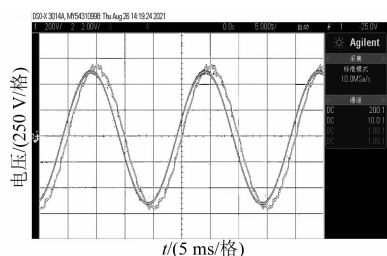


图 13 加入滤波器后带额定负载运行滤波效果

5 结 语

本文基于核电站驱动棒电源产品,针对在某核电站试验平台上进行设备系统联调试验过程中出现的由于发电机和整流器容量不匹配导致的整流器同步故障问题,采用四级串联的二阶无限增益多路反馈带通滤波器有效解决了基波不失真前提下高次谐波滤除的问题,为驱动棒电源产品谐波处理提供新的思路。同时可以看出理论计算结果、仿真效果和实际试验效果还是存在一定的差异。带通滤波器会影响系统的动态响应和稳定

性,且模拟电路存在分散性和温漂问题,这些问题都有待进一步研究。

【参考文献】

- [1] 周蕴花,王帅. 三代核电站棒电源整流电路谐波分析及测算方法研究[J]. 发电设备,2017,31(5): 340.
- [2] 黄海宏,魏阳超,王海欣,等. 特定次谐波滤除锁相在有源电力滤波器中的应用[J]. 电力自动化设备,2019,39(12): 36.
- [3] 韩勇,高永,刘文静,等. 控制棒驱动机构电源系统的谐波磁势分析[J]. 科技视界,2015(24): 110.
- [4] 王威. 12脉波整流器谐波抑制方法研究[D]. 厦门:厦门理工学院,2019.
- [5] 高蕾,孟凡刚,杨威,等. 多脉波整流器直流侧无源谐波抑制机理研究[J]. 电机与控制学报,2016,20(4): 69.
- [6] 陈文渊,沈斌坚. 二阶模拟带通滤波器的仿真和实现[J]. 声学及电子工程,2010(3): 47.
- [7] 于小龙. 基于 MAX291 的无限增益多路反馈带通滤波器[J]. 机械工程与自动化,2017(4): 142.
- [8] 熊俊俏,戴璐平,刘海英. 无限增益多路反馈带通滤波器的研究[J]. 电气电子教学学报,2013,35(3): 84.

(上接第 59 页)

- [8] 王惠东,胡建辉,赵猛. 航空电推进电机转子结构对比及模块化定子分析[J]. 微电机,2021,54(4): 1.
- [9] LEE T Y, SEO M K, KIM Y J, et al. Cogging torque of surface-mounted permanent magnet synchronous motor according to segmented-stator core effect[C]//

2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2016.

- [10] BAKER N J, SMITH D J B, KULAN M C, et al. Design and performance of a segmented stator permanent magnet alternator for aerospace[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2018,33(1): 40.

【期刊简介】

《电机与控制应用》(原《中小型电机》)创刊于 1959 年,是经国家新闻出版总署批准注册,由上海电器科学研究所(集团)有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。

期刊定位于电机、控制和应用三大板块,以中小型电机为基础,拓展新型的高效节能和微特电机技术,以新能源技术和智能控制技术引领和提升传统的电机制造技术为方向,以电机系统节能为目标开拓电机相关应用,全面报道国内外的最新技术、产品研发、检测、标准及相

关的行业信息。

本刊每月 10 日出版,国内外公开发刊,邮发代号 4-199。在半个多世纪的岁月中,本刊为我国中小型电机行业的技术进步与发展做出了巨大的贡献,在中国电机及其应用领域享有很高的声誉。

依托集团公司雄厚的技术实力和广泛的行业资源,《电机与控制应用》正朝着专业化品牌媒体的方向不断开拓创新,得到了业内人士的普遍认可,备受广大读者的推崇和信赖,多次被评为中文核心期刊、中国科技核心期刊、全国优秀科技期刊。