

中图分类号: TM461
学科分类号: 080804

论文编号: 1028703 09-0138

硕士学位论文



应用于飞机交流电源的有源 电力滤波器研究

研究生姓名 卢 盈

学科、专业 电力电子与电力传动

研究方向 功率电子变换技术

指导教师 邢岩 教授

南京航空航天大学

研究生院 自动化学院

二〇〇九年一月

中图分类号: TM461

学科分类号: 080804

论文编号: 1028703 09-0138

硕士学位论文

应用于飞机交流电源的有源电力 滤波器研究

研究生姓名	卢 盈
学科、专业	电力电子与电力传动
研 究 方 向	功率电子变换技术
指 导 教 师	邢 岩 教授

南京航空航天大学

研究生院 自动化学院

二〇〇九年一月

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics
The Graduate School
College of Automation Engineering

Research on active power filters for aircraft AC power system

A Thesis in
Electrical Engineering

by
Name Lu Ying

Advised by
Prof. Xing Yan

Submitted in Partial Fulfillment
of the Requirements
for the Degree of
Master of Engineering

January, 2009

承诺书

本人声明所呈交的硕士学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得南京航空航天大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。

本人授权南京航空航天大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

（保密的学位论文在解密后适用本承诺书）

作者签名：  _____
日 期： 09.3.24

摘 要

随着现代飞机战技性能要求的进一步提高, 机载电子设备越来越多, 谐波、无功和不平衡等分量对飞机交流电源系统的影响也越来越大, 严重影响了供电品质。有源电力滤波器能有效治理电网谐波和无功问题, 是改善电能质量的重要技术手段之一。飞机交流电源系统不同于民用电网, 其电源内阻抗较大, 非线性负载比重大, 电源受负载影响比较大; 飞机交流电网频率比较高, 为 400Hz。因此应用于飞机交流电网的有源电力滤波器有其特殊性。本文针对飞机交流电网的特点, 对应用于飞机交流电源系统的有源电力滤波器进行研究。

本文首先介绍了基于瞬时无功功率理论的谐波电流检测方法, 分析了电网电压畸变及不平衡对谐波电流检测精度的影响。然后建立了三相三线制并联型有源电力滤波器的高频和低频数学模型, 在此基础上分析了基于 $d-q$ 坐标系的电流控制方法, 在 Matlab/Simulink 环境下对系统进行建模仿真, 分析影响 APF 补偿性能的一些重要因素, 并提出相应的改善措施。在理论分析和仿真的基础上, 本文制作了一台用于 400Hz 电源的 APF 实验样机, 介绍了硬件电路和软件程序的设计方法, 在不同的条件下进行实验, 得到了 APF 补偿前后的实验结果, 论证了在飞机交流电源系统中应用 APF 的可行性和正确性。

关键词: 有源电力滤波器, 飞机交流电源, 并联型, 谐波, 三相三线

Abstract

With the increasing requirements of performance for the modern aircraft, more and more electronic equipments are applied. The AC power system in aircraft is affected seriously by harmonics, reactive and unbalanced component. The power quality degrades obviously. Active power filter(APF) can reduce harmonics and reactive component in the power system efficiently, so it's one of the most important technical means used to improve the power quality. There are some characteristics in the aircraft AC power system: large inner impedance, high power frequency, higher nonlinear load ratio, etc. So the APF which are applied for aircraft AC power system are unique. The APF which are applied for aircraft AC power system are researched in this paper based on characteristics of aircraft AC power system.

First of all, the harmonic current detecting methods based on instantaneous reactive power theory are introduced in detail. The precision of harmonic current detecting which is affected by distortion and unbalance of the grid voltage is analyzed. Then the low frequency models and high frequency models of the three-phase three-wire shunt active power filter is set up, based on the model the current control strategy based on d-q coordinate is analyzed. In order to analyze the factors which influence the compensation performance of the APF, the system model is simulated in Matlab software, and improvement measures are presented. Based on the academic analysis and simulation, the prototype of APF for 400Hz aircraft utility is built up, and the design methods of hardware circuit and software program are presented. The experimental results are received under the different condition. The feasibility and validity of the APF applied for aircraft AC power system are proved.

Keywords: active power filter, aircraft AC power system, harmonics, shunt, three-phase three-wire

注释表

1、缩略词及其全称

PPF	Passive Power Filter	无源滤波器
APF	Active Power Filter	有源滤波器
PWM	Pulse Width Modulation	脉冲宽度调制
DSP	Digital Signal Processor	数字信号处理器
THD	Total Harmonic Distortion	总谐波含量
PLL	Phase Locked Loop	锁相环
LPF	Low Pass Filter	低通滤波器
FIR	Finite Impulse Response	有限脉冲响应
IIR	Infinitive Impulse Response	无限脉冲响应

2、基本符号及说明

p	瞬时有功功率	i_{af}, i_{bf}, i_{cf}	电流瞬时值基波分量
q	瞬时无功功率	i_{ah}, i_{bh}, i_{ch}	电压瞬时值基波分量
e_a, e_b, e_c	ABC 三相电压瞬时值	$i_{apf}, i_{bpf}, i_{cpf}$	电流瞬时值基波有功分量
i_a, i_b, i_c	横向加速度极限值	ω	电压基波角频率
e_α, e_β	电压 α 、 β 轴分量	f	电压基波频率
i_α, i_β	电流 α 、 β 轴分量	I_n	n 次电流有效值
$\vec{e}, \vec{i}$	电压电流合成矢量	φ_n	n 次电流初始相角
i_p	有功电流	E_n	n 次电压有效值
i_q	无功电流	θ_n	n 次电压初始相角
i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}	ABC 三相补偿电流瞬时值	I_n^+	n 次电流正序分量有效值
u_{ra}, u_{rb}, u_{rc}	三相桥臂输入电压瞬时值	I_n^-	n 次电流负序分量有效值
L	APF 交流侧滤波电感	I_n^0	n 次电流零序分量有效值
i_{dc}	直流母线电流	φ_{+n}	n 次电流正序分量初始相角
$T_{abc/\alpha\beta}$	ABC 到 $\alpha\beta$ 坐标系变换矩阵	φ_{-n}	n 次电流负序分量初始相
$T_{\alpha\beta/dq}$	$\alpha\beta$ 到 d-q 坐标系变换矩阵	φ_{0n}	n 次电流零序分量初始相
S_a, S_b, S_c	三相桥臂开关函数	R	线路寄生电阻
i_d, i_q	电流 d 轴 q 轴分量	U_{dc}	直流母线电压

$\Delta u_{rd}, \Delta u_{rq}$	d 轴 q 轴电流调节器的输出	$T_{\alpha\beta/abc}$	$\alpha\beta$ 到 ABC 坐标系变换矩阵
h	滞环宽度	$T_{dq/\alpha\beta}$	d-q 到 $\alpha\beta$ 坐标系变换矩阵
U_{dc}^*	直流侧电压给定值	u_{NO}	负母线与电源中点电位差
f_s	开关频率	u_d, u_q	电压 d 轴 q 轴分量
P_o	负载功率	i_c^*	补偿电流指令信号
E_m	相电压有效值	i_c	补偿电流
$\Delta i_{\max}^*$	谐波指令电流最大变化量	Δi_d	电压调节器的输出
$ H_a(j\Omega) $	幅频函数	T_s	开关周期
Ω_{st}	阻带起始点频率	S_{APF}	补偿容量
K_p	比例系数	I_m	相电流有效值
G_{io}	电流环开环传递函数	Ω_c	截止频率
K_{PWM}	变换器放大倍数	C_N	N 阶契比雪夫多项式
G_{vo}	电压环开环传递函数	K_i	积分系数

目 录

第一章 绪论	1
1.1 飞机交流电网的谐波问题	1
1.2 传统飞机交流电网的谐波抑制技术	2
1.3 有源电力滤波器的研究概况	4
1.3.1 有源电力滤波器的工作原理	4
1.3.2 有源电力滤波器的研究现状	4
1.4 并联型有源电力滤波器的谐波检测技术	5
1.5 飞机交流电源系统中应用有源滤波器的难点	7
1.6 本文主要内容和意义	7
第二章 基于瞬时无功功率理论的谐波检测技术	9
2.1 三相电路瞬时无功功率理论	9
2.2 基于瞬时无功功率理论的谐波检测方法	10
2.2.1 $p-q$ 运算方式及其局限性	10
2.2.2 不受电网电压影响的 i_p-i_q 检测方法	13
2.3 本章小结	15
第三章 三相三线制并联型有源电力滤波器的控制	16
3.1 三相三线制并联型有源电力滤波器的数学模型	16
3.1.1 三相三线制并联型 APF 的低频数学模型	16
3.1.2 三相三线制并联型 APF 的高频数学模型	18
3.2 基于 $d-q$ 坐标系的解耦控制	19
3.3 补偿电流的控制技术	20
3.3.1 滞环电流控制	20
3.3.2 三角波交截脉宽调制	21
3.4 直流侧电压的控制	22
3.5 本章小结	22
第四章 系统仿真与分析	24
4.1 仿真建模	24
4.2 理想情况下的仿真分析	24
4.3 实际参数对补偿性能的影响	25

4.3.1 负载交流侧串接电感对补偿性能的影响	25
4.3.2 采样控制延时对补偿性能的影响	26
4.3.3 锁相误差对补偿性能的影响	28
4.3.4 死区对补偿性能的影响	28
4.4 改善补偿性能的措施	29
4.4.1 负载交流侧串接电感的选择	29
4.4.2 多分辨率控制方法	30
4.4.3 软件锁相的方法	31
4.5 本章小结	32
第五章 样机的设计与实现	33
5.1 设计指标和系统的总体结构	33
5.2 有源电力滤波器主电路关键参数的设计	34
5.2.1 补偿容量的设计	34
5.2.2 交流侧滤波电感的设计	35
5.2.3 直流侧电容的设计	37
5.3 控制电路的设计	38
5.3.1 采样调理电路的设计	38
5.3.2 驱动电路的设计	38
5.4 软件部分设计	38
5.4.1 程序的总体设计	38
5.4.2 谐波电流的计算	39
5.4.3 控制环路的设计	43
5.4.3.1 电流内环的设计	43
5.4.3.2 电压外环的设计	43
5.4.4 软件保护的设计	44
5.5 实验结果及分析	44
5.6 本章小结	48
第六章 总结与展望	49
6.1 全文工作总结	49
6.2 后续工作的展望	49
参考文献	51
致 谢	55

在学期间的研究成果及发表的学术论文 56

图表清单

图 1.1 12 脉冲整流电路原理图	3
图 1.2 并联型有源电力滤波器结构图	4
图 2.1 $\alpha-\beta$ 坐标系中的电压、电流矢量图	9
图 2.2 $p-q$ 运算方式原理框图	10
图 2.3 i_p-i_q 检测方法原理框图	13
图 3.1 三相三线制并联型 APF 主电路原理图	16
图 3.2 解耦控制原理框图	20
图 3.3 滞环电流控制示意图	21
图 3.4 滞环电流控制原理图	21
图 3.5 三角波交截脉宽调制技术控制原理图	21
图 3.6 直流侧电压控制的原理图	22
图 4.1 系统仿真总图	24
图 4.2 补偿前网侧电流波形	25
图 4.3 补偿前网侧电流频谱分析	25
图 4.4 补偿后网侧电流波形	25
图 4.5 补偿后网侧电流频谱分析	25
图 4.6 负载交流侧不接电感时仿真波形	26
图 4.7 负载交流侧接 100 μ H 电感仿真波形	26
图 4.8 负载交流侧接 200 μ H 电感仿真波形	26
图 4.9 负载交流侧接 300 μ H 电感仿真波形	26
图 4.10 延时一个开关周期(20 μ s)时负载电流、补偿后电网电流及补偿电流波形	27
图 4.11 延时两个开关周期(40 μ s)时负载电流、补偿后电网电流及补偿电流波形	27
图 4.12 锁相精确时负载电流、补偿后电网电流及补偿电流波形	28
图 4.13 锁相有一随机误差时负载电流、补偿后电网电流及补偿电流波形	28
图 4.14 负载功率 3kW 驱动无死区时负载电流、补偿后电网电流及补偿电流波形	29
图 4.15 负载功率 3kW 驱动有 1 μ s 死区时负载电流、补偿后电网电流及补偿电流波形	29
图 4.16 负载功率 20kW 驱动无死区时负载电流、补偿后电网电流及补偿电流波形	29
图 4.17 负载功率 20kW 驱动有 1 μ s 死区时负载电流、补偿后电网电流及补偿电流波形	29
图 4.18 多分辨率控制示意图	31

图 4.19 矢量相位差示意图	31
图 4.20 软件锁相原理框图	31
图 5.1 三相三线制并联型 APF 系统原理框图	33
图 5.2 整流性负载有源电力滤波器的电流波形	34
图 5.3 电流过零点处一个 PWM 开关周期中的电流跟踪波形	35
图 5.4 电流峰值处一个 PWM 开关周期中的电流跟踪波形	36
图 5.5 调理电路原理图	38
图 5.6 驱动电路原理图	38
图 5.7 主程序流程图	39
图 5.8 AD 中断程序流程图	39
图 5.9 巴特沃思低通滤波器的幅频特性曲线	41
图 5.10 契比雪夫 I 型低通滤波器的幅频特性曲线	41
图 5.11 电流环控制框图	43
图 5.12 电压环控制框图	44
图 5.13 软件保护程序流程图	44
图 5.14 负载功率为 6kW 补偿前的波形	45
图 5.15 负载功率为 6kW 补偿后的波形	45
图 5.16 负载功率为 12kW 补偿前的波形	45
图 5.17 负载功率为 12kW 补偿后的波形	45
图 5.18 负载功率为 16kW 补偿前的波形	46
图 5.19 负载功率为 16kW 补偿后的波形	46
图 5.20 负载功率为 21kW 补偿前的波形	47
图 5.21 负载功率为 21kW 补偿后的波形	47
图 5.22 不同负载功率时补偿前后网侧电流总畸变率折线图	47
图 5.23 突加负载从 3kW 到 20kW 时直流侧电压及网侧电流的动态波形	48
图 5.24 突卸负载从 20kW 到 3kW 时直流侧电压及网侧电流的动态波形	48
表 1.1 GJB181A-2003 对飞机电源系统部分供电特性的稳态要求	1
表 4.1 负载交流侧串接不同电感时负载直流侧电压的值	30
表 5.1 负载功率为 6kW, 补偿前后网侧电流的谐波含量	45
表 5.2 负载功率为 12kW, 补偿前后网侧电流的谐波含量	46
表 5.3 负载功率为 16kW, 补偿前后网侧电流的谐波含量	46

表 5.4 负载功率为 21kW ， 补偿前后网侧电流的谐波含量 47

第一章 绪论

1.1 飞机交流电网的谐波问题

随着现代飞机性能要求的进一步提高，机载电力电子设备越来越多，谐波、无功和不平衡分量对飞机交流电网的污染也越来越严重，严重影响了飞机电网的供电品质，增加了机载用电设备的谐波损耗，降低了用电设备的工作性能和使用寿命，同时也可能对通信系统产生干扰^[1-3]。近年来，我国在几种特种飞机电源研制过程中，均发生过由于负载非线性导致电源供电品质变差，从而引起电网电压严重畸变、设备谐波损耗增大发热加剧、设备性能退化，甚至电源系统不能正常工作等问题。为了保证飞机供电系统和用电设备的正常工作，GJB181A-2003 规定了飞机供电特性和对用电设备的要求^[4]。表 1.1 为 GJB181A-2003 对飞机电源系统部分供电特性的稳态要求。

表 1.1 GJB181A-2003 对飞机电源系统部分供电特性的稳态要求

正常稳态特性	范围
稳态电压	108.0V~118.0V
电压不平衡	3.0V，均方根 最大
电压调制幅度	2.5V，均方根 最大
电压相位度	116 度~124 度
畸变系数	0.05 最大
波峰系数	1.31~1.51
直流分量	0.10V~0.10V
稳态频率	393Hz~407Hz
频率调制幅度	4Hz
瞬态峰值电压	271.8V 最大

同时，为了限制用电设备对电气系统的影响，GJB181A-2003 对用电设备做如下规定：

- (1) 未经飞机设计部门的许可，交流用电设备总畸变电流的均方根值不应超过基波电流有效值的 10%；
- (2) 对于使用脉冲功率的用电设备，其电流变化率和脉冲幅值应尽量小，他的使用应与飞机设计部门协调；
- (3) 应尽量不使直流电流反馈到交流供电系统中；
- (4) 用电设备的电流波动不应使供电系统的电压调制、脉动和电压瞬变超出飞机供电特性

的要求。

事实上,即使电源系统和用电设备都采取了措施,满足各技术规范的要求,但是由于标准仅仅规定了电压或电流总谐波含量要求及个别单次谐波要求,而当所有电力电子设备在一起工作时,由于其特性的综合,仍可能会对供电系统品质产生较大的影响,甚至会超出飞机电源系统供电特性的稳态要求。因此解决谐波、无功和不平衡分量对飞机电网污染的问题,保证飞机交流电源系统的供电品质,维护飞机电源的可靠性和稳定性显得越来越重要。飞机交流电源系统的谐波处理也越来越受到各国的关注。

1.2 传统飞机交流电网的谐波抑制技术

解决谐波和无功问题的主要思路有两种:一是主动型,即对产生谐波的电力电子装置的拓扑结构和控制策略加以改造,使其理论上不产生谐波,且具备高功率因数。如采用多重化技术、PWM(Pulse Width Modulation, PWM)整流技术以及有源功率因数校正技术等^[5-7]。二是被动型,即在电网侧对已经产生的谐波和无功功率进行补偿。

目前在飞机上主要采用降低电源阻抗和线路阻抗,使用无源滤波器(Passive Power Filter, PPF)、多脉冲整流方案以及功率因数校正装置等措施来抑制飞机电网电流的谐波、无功和不平衡。

(1) 无源滤波技术

无源滤波技术^[8-9]是谐波补偿的传统方法,即在谐波源附近加装若干单调谐波及高通滤波支路以旁路谐波电流。无源滤波器一般是由电容器、电抗器(常用空心的)和电阻器适当组合而成,在进行谐波抑制的同时能兼顾无功补偿,改善功率因数。该方法具有结构简单、设备投资少、技术成熟、维护方便、运行费用较低等优点,因此无源滤波器在目前飞机电网的谐波抑制中起着很重要的作用。但由于结构和原理上的原因,无源滤波器也存在一些难以克服的缺点,如:由于流过无源滤波器的电流不仅仅是谐波电流,还有基波电流,因此滤波器的容量要求比较大,尤其是低次谐波滤波器;无源滤波器的体积重量比较大;补偿特性易受电网阻抗和运行状态的影响,LC 参数设计比较困难,易和系统发生并联谐振,使滤波器过载甚至烧毁。此外,它只能补偿固定频率的谐波,补偿效果也不甚理想。

(2) 多脉冲整流技术

在大功率和航空领域中,经常用多脉冲整流变压器实现功率因数校正^[10-11]。以 12 脉冲整流电路^[12-13]为例,其原理如图 1.1 所示。三相输入电压经过特定星-三角形连接的变压器连接两组二极管不控整流桥,两组不控整流桥直流侧输出通过平衡电抗器并联给后级的用电设备提供直流电源。其中变压器原边采用三角形连接,副边一组采用三角形连接,一组采用星形连接,由于两组副边绕组的结构不同,使得两组整流桥输入电压相位相差 30 度。

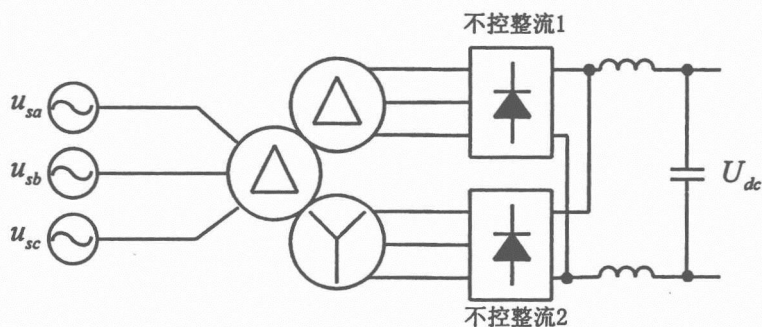


图 1.1 12 脉冲整流电路原理图

整流桥 1 交流侧电流傅立叶展开式为：

$$i_1 = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot I_d \cdot (\sin \omega t - \frac{1}{5} \sin 5\omega t - \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \frac{1}{11} \sin 11\omega t + \frac{1}{13} \sin 13\omega t - \frac{1}{17} \sin 17\omega t - \frac{1}{19} \sin 19\omega t + \dots) \quad (1-1)$$

整流桥 2 交流侧电压相位超前整流桥 1 交流侧电压相位 30 度，因此整流桥 2 交流侧电流傅立叶展开式为：

$$i_2 = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot I_d \cdot (\sin \omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \frac{1}{11} \sin 11\omega t + \frac{1}{13} \sin 13\omega t + \frac{1}{17} \sin 17\omega t + \frac{1}{19} \sin 19\omega t + \dots) \quad (1-2)$$

故合成的网侧电流为：

$$i = i_1 + i_2 = \frac{4\sqrt{3}}{\pi} \cdot I_d \cdot (\sin \omega t + \frac{1}{11} \sin 11\omega t + \frac{1}{13} \sin 13\omega t + \dots) \quad (1-3)$$

可见，两个整流桥产生的 5 次、7 次、17 次、19 次谐波相互抵消，注入电网的只有 $12k \pm 1$ (k 为正整数) 次谐波，即 11、13、23、25 等谐波，从而减小了谐波电流对电网电压的影响。多脉冲整流一般都采用变压器，因此可以实现输入和输出的电气隔离，但是变压器的体积重量较大，系统效率损失较大，可靠性低，与发电机的匹配差。

(3) 功率因数校正技术

随着电力电子技术的进一步发展，飞机上越来越多的电子设备电源采用 AC/DC 功率开关电路，因此可以在 AC/DC 变换器前级采用功率因数校正技术^[14-15]，通过对功率开关管的控制，使得输入电流跟踪输入电压的波形，从而实现功率因数接近于 1 并且使输入电流的总谐波含量 (Total Harmonic Distortion, THD) 比较小，达到抑制谐波和提高系统功率因数的目的。但是，对于单相系统，功率因数校正变换器在输入电压过零点附近，电感电流上升率很小，电感电流很难跟踪上基准电流，输入电流会发生畸变，而在输入电压基波频率较高 (400Hz) 的航空交流电源系统中，输入电流的相位超前输入电压更多，电流过零畸变更加明显，严重影响了系统的功