

The Research of the Aircraft Power Unbalanced Load Based on APF

Zhe SUN¹, Qingyang LIANG¹, Hongyang LIANG², Xiqing GUO³

¹Aviation University of Air Force, Chang Chun, Ji Lin, China, 130022

²Shen Yang Military Command, Joint Logistics Department, Shen Yang, Liao Ning, China, 110005

³93017 Troop, Mu Danjiang, Hei Longjiang, China, 157023

Email: 197164579@qq.com

Abstract: Electrical equipment for aircraft and power is relatively more complex, more unbalanced and nonlinear loads, harmonic current and unbalanced component of more serious cases, this paper presents a shunt APF to achieve with the reactive power and unbalanced currents centralized compensation package. Because the power grid for independent small-capacity aircraft power system, power supply, the internal impedance bigger, so we choose to use the improved cross-vector algorithm for computing compensation current benchmark test, while use of hysteretic current control for the high frequency power supply system of the current Shun shi compensation and DC side voltage is regulated. The simulation and experimental results prove that the proposed compensation method can power imbalance compensation aircraft components and harmonic current, has a good compensation effect, and was confirmed to promote the use of the grid in the plane.

Keywords: APF; aircraft power; imbalance; load

基于 APF 的飞机电网三相不平衡负荷研究

孙哲¹, 梁青阳¹, 梁虹阳², 郭喜庆³

¹空军航空大学, 长春市, 吉林省, 中国, 130022

²沈阳军区联勤部司令部, 沈阳市, 辽宁省, 中国, 110005

³黑龙江省牡丹江市 93017 部队, 牡丹江市, 黑龙江省, 中国, 157023

Email: 197164579@qq.com

摘要:针对飞机电网用电设备相对较复杂, 不平衡和非线性负载较多, 谐波电流和不平衡分量较严重的情况, 本文提出了一种采用并联型 APF 来实现电网无功和不平衡电流的集中补偿方案。因为飞机电网为独立小容量电源系统, 电源内阻抗比较大, 所以我们选择用改进的交叉矢量算法进行补偿电流基准的检测计算, 同时采用滞环电流控制方法实现较高频率电源系统的电流瞬时补偿并对直流侧电压进行稳压调节。经过仿真和实验结果证明, 采用本文提出的补偿方法能够较好的补偿飞机电网的不平衡分量和谐波电流, 具有较好的补偿效果, 证实完全可以在飞机电网中推广使用。

关键词: APF; 飞机电网; 不平衡; 负载

1. 引言

三相电压不平衡度是衡量飞机电网电能质量的一个重要指标。随着电力电子装置的普及, 现代飞机上装备了大量的电子设备并配备了先进的航空电子系统及飞行控制系统。这些对飞机供电网产生了较大的影响, 最重要的是会使飞机电网的三相负荷不平衡严重化。从而导致飞机电网电压的不平衡, 这会对并网的电力电子装置产生较大的危害, 并且对整流负载来说不平衡的电

压会在交流侧产生大量的非特征次谐波, 如 2 次、4 次等^[1], 同时, 飞机电网三相电压不平衡也会增加整个飞机系统损耗, 降低系统效率, 使飞机的飞行安全受到严重威胁, 进而会对飞行员的人身安全埋下隐患。因此, 我们需要利用各种电力电子补偿装置来抑制飞机电网电压的不平衡。

2. 飞机电网 APF 结构

飞机电网中的电源采用三相四线制交流电源, 并且中线接飞机机体。飞机上的用电设备情况较复杂,

基金项目: 国家自然科学基金 (NO. 60972088) 资助课题。

所以不平衡和非线性负载也比较多，电流谐波和不平衡比较严重。现代APF（Active Power Filer，有源滤波器）的类型主要有并联型、串联型以及混合型等三种结构。

在飞机电网中由于对装置的体积、质量要求都非常严格，所以像传统的在飞机交流电源中加入三相四线变压器的做法是比较困难的。考虑飞机本身的交流电源容量不是很大，在飞机电网中采用并联型APF来补偿飞机负荷的三相不平衡状况。飞机电网APF主要由电流基准产生、电流控制和主功率电路三部分来组成^[2]。如图1所示。

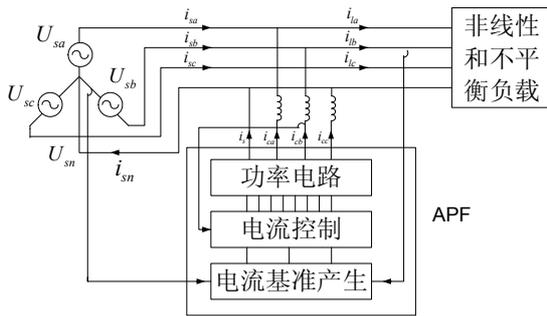


Figure 1. chart of aircraft APF
图 1. 飞机 APF 结构图

飞机电网APF的主电路结构是采用三相整流桥和直流侧电容组成外加主电路电抗器。结构如图2所示。Q1~Q6 是六个可控晶闸管，组成三相桥式电路，每相桥臂的输出通过滤波电感L 与三相电网连接。直流侧储能部分由电容C1, C2 组成。其中点与电网中线连在一起作为系统中性点。由于电容的容值比较大，我们可以认为在一个开关周期内两个电容上的电压保持不变，且两个电容实现均压^{[1] [3]}。

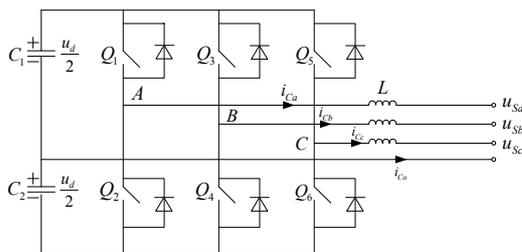


Figure 2. APF circuit structure of aircraft electricity grid
图 2. 飞机电网 APF 主电路结构

3. 交叉矢量算法

交叉矢量算法和同步旋转坐标法是常用的三相四

线APF的基准补偿电流的产生方法，飞机电网中APF补偿电流的基准产生方案决定着APF的补偿效果。传统的交叉矢量算法能在电源电压对称的情况下，可以保证APF产生的补偿电流不产生有功功率使补偿后电源电流为对称正弦，但是当电源电压不对称时，这种方法就不能完全抑制补偿后电源电流的不平衡情况^[4]。

飞机交流电网是独立的小容量电网，电源内阻抗比较大，并且负载会存在不平衡现象，所以当选择飞机APF电流基准产生方案时，需要充分考虑由不平衡电流引起的电源电压零序分量，并尽量使APF补偿后抑制电源电压的零序分量。可以在交叉矢量算法的基础上对负载电流中的零序电流进行补偿。为了使补偿后的电源电流不含零序分量，且补偿前后系统的有功功率保持不变，即APF本身无需储能元件，则补偿后的电源电流必须满足以下2个条件：补偿电流中无零序分量；补偿电流应与电源电压正交。在保证电源有功功率不变的前提下，采用改进的交叉矢量法可以计算得到飞机APF各相补偿电流的基准值^[5]。即：

$$i_{cm} = i_{lm} - \bar{g}(U_{sm} - U_{s0}/3) \quad (m = a, b, c)$$

式中： U_{s0} 为电网零序电压； $\bar{g} = p/(U_{sm} - U_{s0}/9)$ ，其中p为平均功率。由于APF 在工作时会有一定的功率损耗，通过直流侧电压调节可平衡这一部分能量并使直流侧电压保持恒定^[6]。

4. 滞环电流控制策略

根据传统的交叉矢量算法我们对其进行了改进，在此基础上我们提出用滞环电流控制策略来对飞机电网的三相不平衡情况进行改善。滞环电流控制策略是瞬时电流控制技术，在控制过程中能够实时跟踪电网电流的变化，且在电流跟踪中没有相位误差，较适合于对较高频率的中频电网进行电流控制。滞环电流控制通过迟滞比较器将APF电流指令信号与补偿电流反馈信号的误差限制在一个环宽以内，以保证系统的实时性^[7]。

Δip 引起的在指令电流中附加的基波有功分量就是APF 与电网交换有功能量，其中 Δip 引起的电网有功功率为 $\Delta P = \Delta ip(u_s - u_{s0}/9)$ 。

APF的有功功率与直流侧电容储能的关系为：

$$\int_0^{\Delta t} \Delta p dt = \frac{C}{2}(U_{DC0} + \Delta U_{DC}) - \frac{C}{2}U_{DC0}^2$$

上式中： C 为APF直流侧电容值； U_{DC0} 为直流侧平均电压； ΔU_{DC} 为偏差。

我们在工作点 U_{DC0} 附近进行线性化处理，得 $Gp(s) = U_{DC} / \Delta ip = ks / (Cs)$ ， ks 为常数。所以，直流电压环PI调节后的误差在直流侧电压稳态工作点附近近似于1个1阶积分环节^[8]。

设 K_p 和 K_i 分别为比例系数和积分系数， K_f 为反馈系数，PI环节的传递函数为 $K_p + 1/(K_i s)$ ，直流电压的传递函数：

$$\frac{U_{DC}(s)}{U_{DCr}(s)} = \frac{K_s(K_p K_i s + 1)}{CK_s S^2 + K_s K_f (K_p K_i s + 1)}$$

由上式可知，把直流电压误差信号叠加到电流基准控制中，直流环系统是稳定的，且稳态误差为0。

5. Matlab 模型搭建与仿真

为验证上述滞环电流控制策略的正确性和可行性，本文使用 Matlab 中电力仿真工具箱搭建了系统模型，并进行了仿真研究。如图3所示。

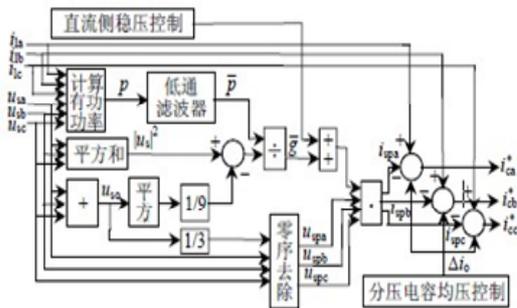


Figure 3. system model
图 3.系统模型

系统仿真参数：飞机电网供电系统电压为 115 V，频率 400 Hz，容量为 30 kVA，电源内阻抗为 $5 \mu H + 0.05 \Omega$ ，APF 直流侧电压稳定在 400 V 左右，电流滞环负载使用混合型负载，控制宽度 0.1 V，滤波电感 0.25 mH，电感值为 10uH 的三相滤波电感和整流桥接阻值为 10Ω 的纯阻性负载构成非线性负载，不对称负载为 C，负载 3 kW，功率因数 0.75。

在飞机电网三相不平衡负载条件下，采用本文的控制方法得到的仿真波形见图 4。图 4 中由上往下依次为电源电压、负载电流、补偿电流和电源电流。由此可以看出采用本文的 APF 可以抑制谐波电流、补偿不平衡电流，尤其在负载电流不平衡时，采用改进的交叉矢量算法，滞环电流法能完全补偿不平衡电流和无功电流，

且能够保证电源侧电压的平衡，具有很好的补偿效果。

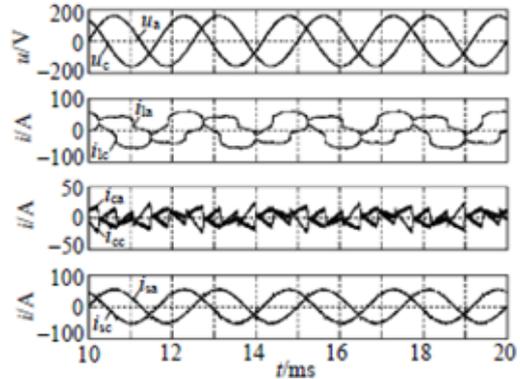


Figure 4. simulation waveform
图 4.仿真波形

6 结论

飞机电网供电质量的改善是一个非常复杂的设计问题，它不仅包括发电系统和配电系统的设计问题，还包括整个飞机供电系统的顶层设计问题。本文针对飞机电网不平衡问题提出一种滞环电流控制策略，也是在供电方面做出的改善。具体内容是：一是提出了在飞机电网系统中采用并联 APF，实现飞机交流电网的不平衡电流的补偿；二是结合飞机交流电源的特点，提出了适用于飞机电网的改进的交叉矢量法及控制策略；三是使用 Matlab 搭建系统模型并采用本文提出的飞机 APF 能实现 400Hz 飞机电源的谐波补偿完成仿真，验证了 APF 具有良好的稳态和动态性能；四是本文的 APF 补偿不平衡负载技术也可用于其他较低频率的三相四线独立电网系统。

致 谢

本课题在研究过程中得到梁青阳教授的悉心指导。他严肃的科学态度，严谨的治学精神，精益求精的工作作风，深深地感染和激励着我。在此谨向梁教授致以诚挚的谢意和崇高的敬意。

References (参考文献)

[1] He Yingjie, Zou Yunping, Huang Zhu. An Improved Algorithm for Harmonic Current Detection Based on Instantaneous Reactive Power Theory[J], *Power System Technology*, 2007, 31(6), P79-83. (Ch).
何英杰, 邹云屏, 黄柱, 等. 基于瞬时无功功率理论的改进谐波检测算法[J], *电网技术*, 2007, 31(6), P79-83.
[2] Wang Maohai, Sun Yuanzhang. Application of universal instantaneous power theory to unbalanced load compensation[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*,

- 2003, 23(11), P56-59.
王茂海, 孙元章. 通用瞬时功率理论在三相不平衡负荷补偿中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11), P56-59.
- [3] Akagi H. New trends in active filters for power conditioning [J]. *IEEE Transactions on Industry Application*, 1996, 32(6), P1312-1322.
- [4] Chen Hairong, Xu Zheng. Simulation study of active power filter detecting harmonic currents by space vector[J]. *Power System Technology*, 2005, 29(11), P60-64.
陈海荣, 徐政. 采用空间矢量检测谐波电流的有源电力滤波器仿真研究[J]. 电网技术, 2005, 29(11), P60-64.
- [5] Li Hui, Li Yibin, Zou Yunping. A Novel Adaptive Harmonic Detecting Algorithm Based on Variable Step-size LMS[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2005, 29(2), P69-73.
李辉, 李亦斌, 邹云屏, 等. 一种新的变步长自适应谐波检测算法研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(2), P69-73.
- [6] Aredes M, Hafner J, Heumann K. Three-phase four-wire shunt active filter control strategies[J]. *IEEE Trans on Power Electronics*, 1997, 12(2): 311-318.
- [7] Sun Chi, Wei Guanghui, Bi Zengjun. Detection for reactive and harmonics currents of unbalanced three-phase systems based of synchronous reference frame transformation[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2003, 23 (12), P43-48.
孙驰, 魏光辉, 毕增军. 基于同步坐标变换的三相不对称系统的无功与谐波电流的检测[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (12): 43-48.
- [8] Zeng Fanpeng, Wang Jianze, Fu Xiangyun. A Novel Digital Control Method for Shunt Active Power Filter Based on Line Current Detection[J]. *Power System Technology*, 2005, 29(24), P49-53.
曾繁鹏, 王建赓, 伏祥运, 等. 基于系统电流检测的并联有源电力滤波器数字控制方法[J]. 电网技术, 2005, 29(24): 49-53.