

Analysis on Filtering Characteristics of 18-Pulse ATRU Based on Pulse Load

Lirong Sun¹, Liang Liu¹, Xinyue Fan¹, Xiaqing Pei², Yuanjun Zhou²

¹Shenyang Aircraft Design Institute, Shenyang Liaoning

²School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing

Email: peixiaqing@163.com

Received: Jan. 20th, 2015; accepted: Jan. 31st, 2015; published: Feb. 4th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The AC/DC converter of aircraft power supply system, converting 115 V/400 HZ AC to 270 V DC, drives a lot of power electronic devices. In order to reduce the grid current harmonic, multi-pulse rectifier technology is widely used and the auto-transformer rectifier unit (ATRU) technology is one of them. This essay discusses the filter design of 18-pulse ATRU, analyzes the filtering characteristics when ATRU drives pulse load and the choice of filter parameters when drives constant power load.

Keywords

ATRU, Pulse Load, Filtering, Constant Power Load

驱动脉冲负载的18脉波ATRU滤波特性分析

孙立荣¹, 刘 亮¹, 樊馨月¹, 裴夏青², 周元钧²

¹沈阳飞机设计研究所, 辽宁 沈阳

²北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京

Email: peixiaqing@163.com

收稿日期: 2015年1月20日; 录用日期: 2015年1月31日; 发布日期: 2015年2月4日

摘要

飞机供电系统中的AC/DC变换器，将115 V/400 Hz交流电转换为270 V直流电，提供给大量的电力电子设备。为了减小电网上的电流谐波，多脉冲整流技术得到广泛使用，自耦变压整流器(ATRU)是其中之一。论文讨论了18脉波ATRU的直流滤波器设计，重点分析了在驱动PWM控制的脉冲负载时的滤波特性，以及驱动恒功率负载时的滤波器参数的选择。

关键词

自耦变压整流器，脉冲负载，滤波，恒功率负载

1. 引言

在采用交流电源供电的现代飞机中，随着电力电子设备类型和数量的大量增加，导致供电系统对AC/DC变换器的需求大量增加，即需要将115 V/400 Hz交流电转换为270 V直流电，提供给不同的电力电子用电设备。大量的电力电子设备使得电网中的谐波问题日益严重，对电网的安全正常运行构成威胁，为了减小飞机电网上的电流谐波，多脉冲整流技术得到广泛使用，即采用变压器移相，增加整流器的输入电流的相数，抑制输入电流中的低次谐波，自耦变压整流器(ATRU)是被广泛应用的装置之一。

大部分电力电子设备采用PWM控制，使ATRU驱动的是脉冲负载，以及闭环控制而形成恒功率负载。本文针对一种航空18脉波ATRU，讨论了直流侧滤波器的设计，重点分析了驱动PWM负载时的滤波特性以及驱动恒功率负载时的滤波器参数的选择。

2. ATRU 的结构和原理

应用于航空变频交流电源的18脉波ATRU系统结构如图1所示。它由18脉波自耦变压器、三组三相桥整流器(R1、R2、R3)、两组三相电流平衡电抗器、LC滤波器组成[1][2]。

其中18脉波自耦变压器的电压矢量图如图2所示，变压器原边三角形连接，每相副边有两个变比为 k_1 和 k_2 的绕组，能够产生三组相位相差 20° 的三相交流电。

18脉波ATRU的电源输入电流在理论上最低次谐波为17次和19次，相对幅值分别为5.9%和5.3%，

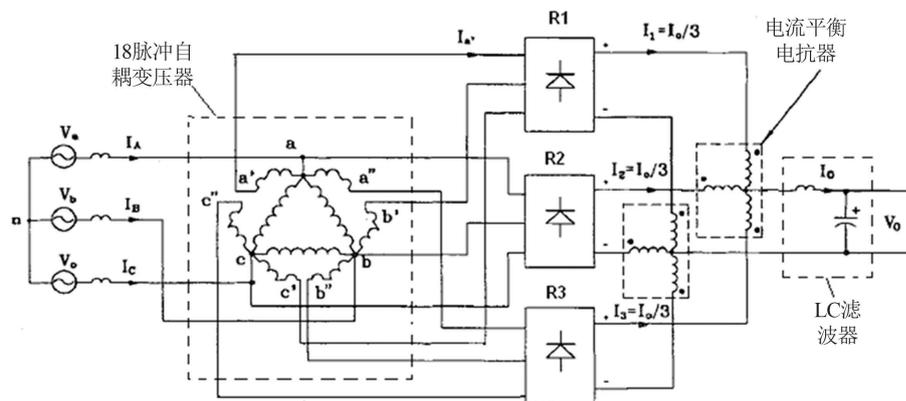


Figure 1. The basic structure of 18-pulse ATRU power supply system
图 1. 十八脉波 ATRU 的供电系统基本结构

THD 为 0.09843。对于 400 Hz 的航空交流电源，其中一相输入电流波形如图 3 所示。

图 1 中 LC 滤波器的目的是将直流侧 270 V 电压脉动降低到希望的水平。但另一方面，现代飞机电气设备大量地采用斩波控制，对于电源而言形成了高频脉冲负载，在直流电源供电的系统中，为了防止脉冲负载在电网上产生电磁干扰，往往需要增加电磁兼容(EMI)滤波器。当 ATRU 驱动的是由斩波器实现的脉冲负载时，作为直流电源滤波的 LC 滤波器，与直流系统的 EMI 滤波器的结构相同，可以同时完成脉冲负载的 EMI 滤波。

3. 直流滤波器的设计与特性

本论文研究的 ATRU 要求将 270 V 直流输出电压纹波波动抑制到 3 V 以下，据此设计了滤波器。首先分析得到电源频率为 400 Hz 时，18 脉波 ATRU 输出直流电压的脉动频率，即需要滤除的主要谐波的频率为 7.2 kHz，故取截止频率

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 700 \text{ Hz} \quad (1)$$

式中： L 为滤波电感； C 为滤波电容

并且使 7.2 kHz 谐波的衰减率为 -40 db。经计算最终取 $L = 945.3 \text{ uH}$ ， $C = 54.69 \text{ uF}$ 。

3.1. ATRU 平波特性分析

为了分析该滤波器的滤波性能，将 ATRU 滤波部分的电路简化为图 4，图中 E_s 为 ATRU 输出等效电

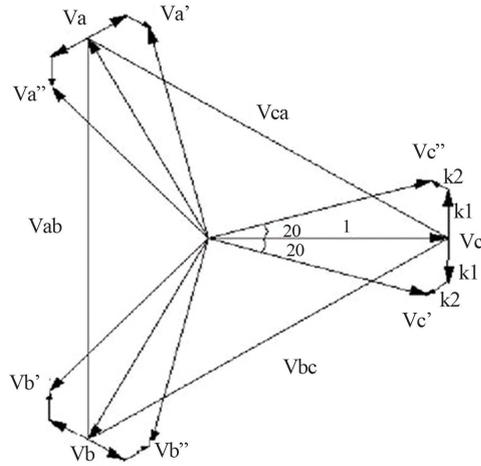


Figure 2. Voltage vector diagram of 18-pulse ATRU
图 2. 十八脉波 ATRU 电压矢量图

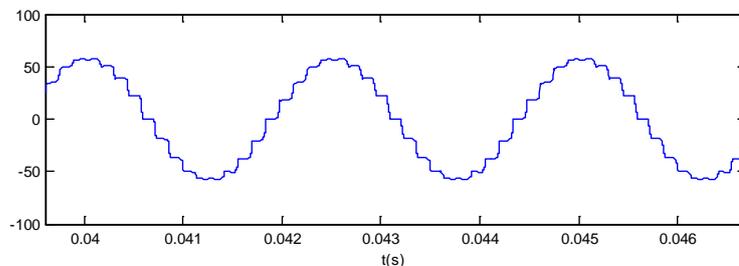


Figure 3. The grid current of 18-pulse ATRU
图 3. 十八脉波 ATRU 的电源输入电流

势， U_1 为输出平均电压， R_s 为电源等效电阻， E_2 为脉冲负载等效电势， R_L 为负载等效电阻， U_2 为负载电压。

根据图 4 的简化电路，可以得到电压平波滤波器的传递函数为

$$H_1(s) = \frac{U_2(s)}{E_s(s)} = \frac{1}{LCs^2 + R_sCs + 1} \quad (2)$$

由此得到谐振频率 $\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ ，阻尼系数 $\zeta = \frac{1}{2}R_sC\sqrt{LC}$ ，其频率特性如图 5 所示。

3.2. 驱动脉冲负载时的滤波特性分析

当上述 LC 滤波器作为 EMI 滤波器时，脉冲负载的 E_2 引起电源的电压脉动 ΔU_1 和电流脉动 ΔI_1 的传递函数为

$$\frac{\Delta U_1}{E_2} = \frac{R_s}{R_L LCs^2 + (R_s R_L C + L)s + (R_s + R_L)} \quad (3)$$

$$\frac{\Delta I_1}{E_2} = \frac{1}{R_L LCs^2 + (R_s R_L C + L)s + (R_s + R_L)} \quad (4)$$

由此得到：

$$\omega_n = \sqrt{\frac{R_L + R_s}{R_L LC}}, \quad \zeta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R_L LC}{R_L + R_s}} (R_s R_L C + L)$$

电压的频率特性如图 6 所示。

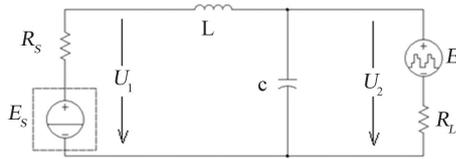


Figure 4. The simplified filter circuit
图 4. 滤波部分的简化电路

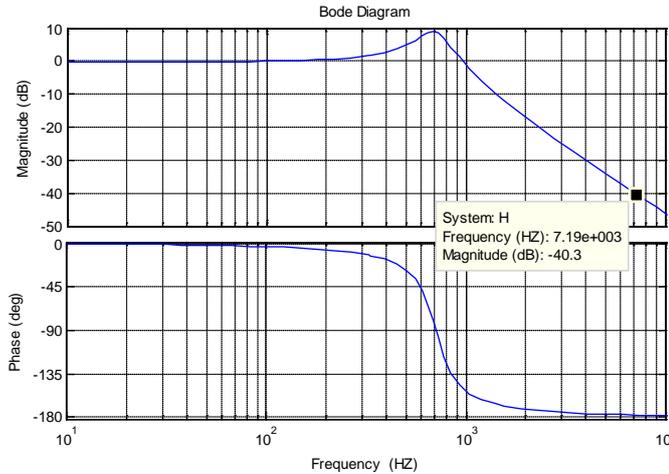


Figure 5. The frequency characteristic of LC filter
图 5. LC 滤波器的频率特性

将式(3)与式(2)比较可知,电源滤波器作为EMI滤波器时,因为一般 $R_s \ll R_L$, 谐振频率 ω_n 基本相等, 而当 $R_L > 1$ 时阻尼系数 ζ 也较大。因此对于斩波频率大于 $f_n = \omega_n/2\pi$ 的脉冲负载, 电源平波滤波器可以达到EMI滤波的目的。

3.3. 仿真结果分析

为验证上述结论, 对采用上述要求设计的滤波器的 ATRU 进行仿真, 如图 7 所示。其中图 7(a)为 10 kHz 的脉冲负载, 其中图 7b 为 1 kHz 的脉冲负载。

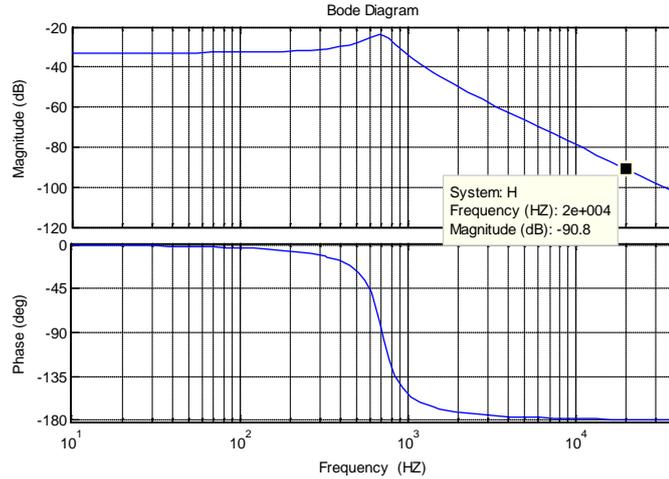
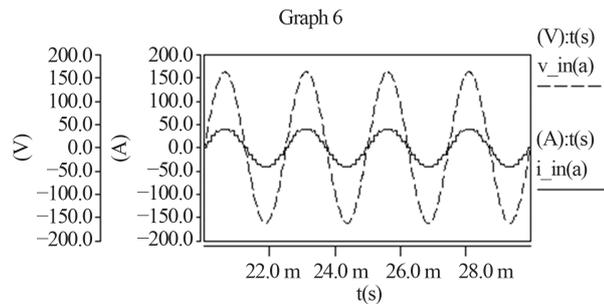
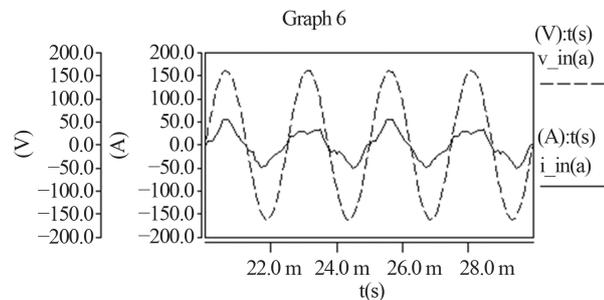


Figure 6. The bode diagram of EMI filter transfer function
图 6. EMI 滤波传递函数波特图



(a) 驱动 10 kHz 脉冲负载时 ATRU 的输入电流和输入电压



(b) 驱动 1 kHz 脉冲负载时 ATRU 的输入电流和输入电压

Figure 7. The influence of pulse load on grid current
图 7. 脉冲负载对 ATRU 输入电流的影响

由图 7 可见, 由于 ATRU 的 LC 滤波器是按照 7.2 kHz 设计的, 对于频率高于 7.2 kHz 的 10 kHz 脉冲负载, 滤波效果比较好, 而对于频率低于 7.2 kHz 的 1 kHz 脉冲负载, 滤波效果比较差。

对图 7 所示的电流波形进行傅里叶变换, 得到不同负载的谐波含量如表 1 所示, 其中将非脉冲负载, 即电阻负载也列于表中, 作为比较。

由表 1 中数据可见, 10 kHz 的脉冲负载, 含有的 17 次和 19 次谐波与纯电阻负载时比较增加很少。但是 1 kHz 的脉冲负载, 除 17 次和 19 次谐波与纯电阻负载近似外, 2 次、3 次和 4 次等低次谐波增加很多, THD 增加很多。

因此, 如果 ATRU 被要求驱动低于 7.2 kHz 的脉冲负载, 则需要依照脉冲负载的滤波要求来设计 LC 滤波器, 而不能依照电压平波的要求来设计。

4. 驱动恒功率负载的稳定性

所谓恒功率负载是指闭环控制装置对于电源所呈现的负载特性, 这里如果 ATRU 输出端接的是闭环控制的系统, 则 ATRU 驱动的是恒功率负载。

ATRU 驱动恒功率负载时的等效电路如图 8 所示, 图中 P_0 为恒功率负载的功率, 负载电流满足 $i_2 = \frac{P_0}{U_2}$ 。

恒功率负载在电压 U_2 变化 $\Delta U_2 > 0$ 时, 闭环控制系统为了使功率 P_0 不变, 电流的变化 $\Delta i_2 < 0$, 反之如果 $\Delta U_2 < 0$, 电流 $\Delta i_2 > 0$, 则动态电阻 $r_L = \frac{\Delta U_2}{\Delta i_2} < 0$, 用 $-R_L$ 表示。此时, 输入端的导纳模型为:

$$\frac{\Delta I_1}{E_s} = \frac{R_L C s - 1}{R_L L C s^2 + (R_s R_L C - L)s + (R_L - R_s)} \quad (5)$$

由式(5)可得到谐振频率和阻尼系数为

Table 1. The harmonic analysis of grid current when driving different loads
表 1. 驱动不同负载时电网电流谐波分析

谐波次数	10 kHz 脉冲负载	1 kHz 脉冲负载	电阻负载
2	--	14.74%	--
3	--	14.94%	--
4	--	9.04%	--
17	4.85%	4.07%	4.03%
19	4.05%	3.06%	3.31%
THD	6.566%	23.66%	5.375%

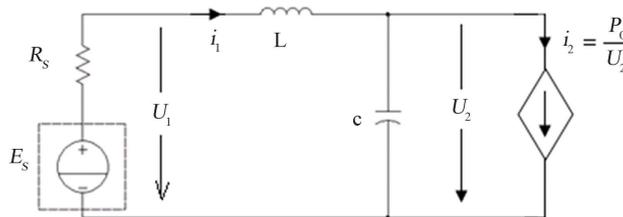


Figure 8. The equivalent circuit when drives constant power loads

图 8. 恒功率负载时的等效电路

$$\omega_n = \sqrt{\frac{R_L - R_s}{R_L LC}} \quad (6)$$

$$\zeta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R_L LC}{R_L - R_s}} (R_s R_L C - L) \quad (7)$$

为了保证系统稳定，由文献[3]可知需要满足下式：

$$\sqrt{\frac{L}{C}} < R_s < \frac{E_s^2}{4P_o} \quad (8)$$

式(8)表明，为了保证系统稳定，恒功率负载的功率需要受到限制。与此同时，滤波器的电感 L 和电容 C 的比例也受到限制，并且减小滤波电感 L 和增大滤波电容 C 都有利于系统稳定。

由文献[4]可知 ATRU 的等效电势内阻为

$$R_s = R_2 + \frac{3\omega_s L_s}{2\pi} \quad (9)$$

式中： ω_s 是交流电源角频率， L_s 为自耦变压器次级线圈漏感， $R_2 = r + r_{dc}$ ， r 为自耦变压器次级线圈电阻与整流桥中二极管压降等效电阻之和， r_{dc} 是直流母线电阻。

由此可见，交流电源频率，自耦变压器参数，整流桥中二极管等效电阻等等都会影响电源等效内阻 R_s 的大小，进而影响系统的稳定性。

5. 结论

论文研究了十八脉波自耦变压整流器(18-pulse ATRU)驱动脉冲负载时直流滤波器设计和滤波特性。结果表明，合理地设计作为电压平波作用的直流滤波器，可以兼顾脉冲负载的 EMI 滤波器的功能。当驱动的脉冲负载为闭环控制系统时，还需要进一步合理选择滤波器电感和电容的参数，就可以保证系统的稳定性。

参考文献 (References)

- [1] 白丽娜 (2008) 多脉冲整流系统设计. 硕士学位论文, 中国石油大学, 青岛.
- [2] Choi, S., Jouanne, A.R., Enjeti, P.N., et al. (1996) Polyphase transformer arrangements with reduced kVA capacities for harmonic current reduction in rectifier-type utility interface. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **11**, 680-690.
- [3] Belkhat, M., Cooley, R. and Witulski, A. (1995) Large signal stability criteria for distributed systems with constant power loads. *Proceedings of Power Electronics Specialists Conference*. IEEE, Atlanta, 1333-1338.
- [4] 王娜 (2014) 航空电源负载特性及电源稳定性的研究. 博士学位文, 北京航空航天大学, 北京.