

Analysis of Influence Factors of Aeronautic Variable-Frequency Power on ATRU*

NIU Junfeng*

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

Abstract: In order to study the influence of Aeronautic Variable-frequency power on the ATRU, an analytical method is proposed, which uses a frequency adjustable AC power source to connect the ATRU. By changing the load parameters, the phase shift waveform, DC bus voltage waveform, input power, power factor and efficiency of the ATRU are measured when the variable-frequency power supply is supplied. The simulation model is used to realize the verification of the analysis method, and the prototype of the ATRU is built based on the test platform. The experimental results show that the research provides technical support for the design of ATRU.

Key words: ATRU; variable-frequency power; FFT analysis; power factor

EEACC: 1270E; 1210

doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2019.04.011

航空自耦变压整流器受变频电源影响分析*

牛俊峰*

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

摘 要: 为了研究航空变频电源对自耦变压整流器的影响, 提出了一种分析方法: 输入采用频率可调的交流电源, 连接自耦变压整流器。通过变化负载参数, 在变频电源供电时, 测量自耦变压整流器的移相波形、直流母线电压波形、输入功率、功率因数 and 效率等重要参数。使用仿真模型初步实现了该分析方法的仿真验证, 并基于测试平台搭建自耦变压器样机。实验结果表明, 该研究为使用变频电源的自耦变压整流器的设计提供了技术支持。

关键词: 自耦变压整流器; 变频电源; FFT 分析; 功率因数

中图分类号: V242.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2019)04-0866-05

现代先进民用飞机多采用 115 V、360 Hz ~ 800 Hz 变频交流电源供电, 部分用电设备因为不能接受电源频率的变化, 需要采用 AC-DC 变换器改为直流电源供电, 或者采用 AC-DC-AC 变换器改为恒频交流电源供电。现代民用飞机电力驱动设备大量增加, 需要采用交直流变换器实现变频交流调速, 因此, 在变频交流电源供电的飞机上, 交直流变换器成为飞机电气系统中的重要设备, 自耦变压整流器是其重要的设备之一^[1]。

在 B787、A380 等先进大型客机上大量使用多脉冲整流器。如 B787 就使用了多脉冲变压整流器 (TRU) 及多脉冲自耦变压整流器 (ATRU)^[2]。其中多脉冲变压整流器 (TRU) 主要用于将交流母线电压整流为 28 V 低压直流输出, 供给直流燃油泵、飞

行显示器等负载^[3]。而多脉冲自耦变压整流器 (ATRU) 将交流母线电压整流为 270 V 高压直流输出, 给电动泵、空调包及启动发动机等负载供电^[4]。多脉冲自耦变压整流器具有体积小、重量轻等优点, 是多电飞机、全电飞机需要采用的重要机载设备。多脉冲自耦变压整流器在航空领域有着广阔的应用前景, 对多脉冲自耦变压整流器的研究具有很实用的价值及现实意义^[5]。

当 ATRU 应用于变频电源供电的系统时, 由于电路存在电感和电容, 不同的电源频率会使输入电流、输出电压、功率因数等特性产生差异^[6]。针对航空变频电源对自耦变压整流器的这些影响, 本文通过搭建自耦变压整流器样机, 进行变频电源对自耦变压整流器功率因数、损耗等影响分析试验, 研究

项目来源: 国家自然科学基金项目 (51377161)

收稿日期: 2018-07-19 修改日期: 2018-08-04

了 12 脉冲自耦变压整流器在变频电源供电时,输出电压的移相波形、输入电流波形 FFT 分析、功率因数、效率等实验数据。

1 自耦变压整流器试验模型

某大型客机变频电源采用 90 kVA、360 Hz~800 Hz、三相四线(115 V/200 V)宽变频发电系统。与其搭配的 12 脉冲自耦变压整流器采用自耦变压器 AT、两套三相全波整流器、平衡电抗器 BR 和 LC 滤波器组成^[7]。

自耦变压整流器试验模型如图 1 所示,三相 115 V/400 Hz 电源输入接变压器输入端 a、b、c,变压器 6 个输出端 a'、a''、b'、b''、c'、c'',接两个三相全桥整流模块。

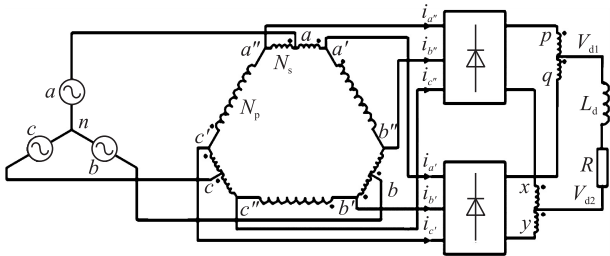


图 1 自耦变压整流器试验模型

2 自耦变压整流器模型仿真分析

为了验证本文分析方法的正确性,使用自耦变压整流器模型开展仿真分析。仿真模型主要参数如表 1 所示。

表 1 自耦变压整流器仿真参数表

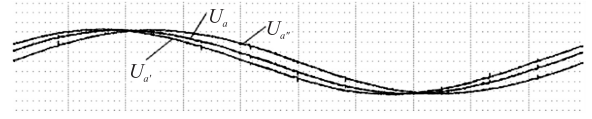
参数	设计值	其他参数
额定频率	400 Hz	—
功率容量	8 000 W	—
铁芯	SD32×32×100	—
初级匝数	200	规格 QZφ1.4,重量 2.3 kg,直流电阻 0.461 7 Ω,层数 4 层
次级匝数	31	规格 QZφ2.44,重量 2.8 kg,直流电阻 0.054 13 Ω,层数 3 层

仿真模型及其连接方式如下:输入采用频率可调的交流电源,连接 12 脉冲自耦变压整流器的 3 个输入端,6 个输出端接 2 个三相全桥整流模块,然后接 2 个平衡电抗器,输出接负载。示波器测试输入电压、电流和整流后母线波形^[8]。

2.1 移相波形

图 2 所示为移相波形,其中 U_a 、 $U_{a'}$ 、 $U_{a''}$ 波形, U_a 为输入波形, $U_{a'}$ 、 $U_{a''}$ 为输出波形,由输入三相电压 (U_a, U_b, U_c) 产生的两组三相电压 ($U_{a'}, U_{b'}, U_{c'}$)、

($U_{a''}, U_{b''}, U_{c''}$) 分别超前与滞后于输入三相电压 (U_a, U_b, U_c) 15° , 从而使得两组三相电压 ($U_{a'}, U_{b'}, U_{c'}$)、($U_{a''}, U_{b''}, U_{c''}$) 相位相差 30° , 经计算为 0.21 ms, 约为 1/12 周期。两组三相电压分别连接到两组整流桥, 整流桥输出通过平衡电抗器并联连接到负载。



横坐标 t:0.25 ms/div 纵坐标 V:50 V/div

图 2 移相波形

2.2 整流器输出电压分析

根据电压矢量图 $U_{a'} = \frac{U_a}{\cos 15^\circ}$, 式中 U_a 、 $U_{a'}$ 分别为输入三相电压有效值与超前三相电压的相电压有效值, 并定义有效值分别为 U_{in} 、 U_s , 则有: $U_{a'} = U_{a''} = \frac{U_a}{\cos 15^\circ} = \frac{U_{in}}{\cos 15^\circ} = U_s$, 短绕组与长绕组两端的电压有效值分别为 U_{Np} 、 U_{Ns} 。根据电压矢量图可得: $U_{Np} = \sqrt{2} U_{a'} = \frac{\sqrt{2} U_a}{\cos 15^\circ} = (2\sqrt{3} - 2) U_{in}$; $U_{Ns} = U_a \tan 15^\circ = (2 - \sqrt{3}) U_{in}$; $U_{Np} : U_{Ns} = (2\sqrt{3} - 2) : (2 - \sqrt{3})$ 。根据电磁感应定律, 同一磁路上的绕组产生的感应电动势之比等于绕组匝数之比。所以长绕组与短绕组的匝数之比为: $N_p : N_s = (2\sqrt{3} - 2) : (2 - \sqrt{3})$ 。

整流电压 u_{pn} 可表示为 $u_{pn} = \sqrt{2} U_s \cos(\omega t)$, 其中 U_s 为整流桥输入相电压有效值。 u_{pn} 用傅立叶级数展开可以得到:

$$u_{pn} = \sqrt{2} U_s \frac{3}{\pi} \sin \frac{\pi}{3} \left(1 - \sum_{n=3,6,9,\dots} \frac{2}{n^2 - 1} \cos \frac{n\pi}{3} \cos(n\omega t) \right)$$

u_{qn} 与 u_{pn} 相差 30° , 所以:

$$u_{qn} = \sqrt{2} U_s \frac{3}{\pi} \sin \frac{\pi}{3} \left[1 - \sum_{n=3,6,9,\dots} \frac{2}{n^2 - 1} \cos \frac{n\pi}{3} \cos[n(\omega t - 30^\circ)] \right]$$

平衡电抗器 L_{p1} 两端电压 u_{Lp1} 为 u_{pn} 与 u_{qn} 之差, 故:

$$u_{Lp1} = u_{pn} - u_{qn} = \sqrt{2} U_s \frac{12}{\pi} \sin \frac{\pi}{3} \sum_{n=3,6,9,\dots} \frac{1}{n^2 - 1} \cos \frac{n\pi}{3} \times \sin \frac{n\pi}{12} \sin[n(\omega t - 15^\circ)]$$

可见 u_{Lp1} 主要成分为三次谐波。

两组整流桥经平衡电抗器 L_{p1} 以后的输出电压为:

$$u_{d1} = u_{pn} - \frac{1}{2} u_{Lp1} = u_{pn} - \frac{1}{2} (u_{pn} - u_{qn}) =$$

$$\frac{1}{2}(u_{pn}+u_{qn})=\sqrt{2}U_s \frac{3}{\pi} \sin \frac{\pi}{3} \times \left[1 - \sum_{n=3,6,9}^{\infty} \frac{2}{n^2-1} \cos \frac{n\pi}{3} \cos \frac{n\pi}{12} \cos [n(\omega t-15^\circ)] \right] \quad (1)$$

同理输出电压 u_{d2} 为:

$$u_{d2}=-\sqrt{2}U_s \frac{3}{\pi} \sin \frac{\pi}{3} \times \left[1 - \sum_{n=3,6,9}^{\infty} \frac{2}{n^2-1} \cos \frac{n\pi}{3} \cos \frac{n\pi}{12} \cos [n(\omega t-75^\circ)] \right] \quad (2)$$

故,整个整流器的输出电压 u_d 为:

$$u_d=u_{d1}-u_{d2}=2\sqrt{2}U_s \frac{3}{\pi} \sin \frac{\pi}{3} \left[1 - \sum_{n=12,24,36,\dots}^{\infty} \frac{2}{n^2-1} \times \cos \frac{n\pi}{3} \cos \frac{n\pi}{6} \cos \frac{n\pi}{12} \cos [n(\omega t-45^\circ)] \right] = \frac{3\sqrt{2}U_l}{\pi} \times \left[1 - \frac{2}{11 \times 13} \cos(12\omega t) - \frac{2}{23 \times 25} \cos(24\omega t) - \dots \right] \quad (3)$$

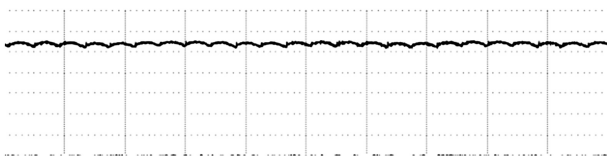
整流器直流输出电压平均值为:

$$U_d=U_{d1}-U_{d2}=2\sqrt{2}U_s \frac{3}{\pi} \sin \frac{\pi}{3}=2.34U_s$$

$$=2.42U_{in}=1.35U_l \quad (4)$$

式中: U_{d1} 、 U_{d2} 分别为上、下两个三相双半波不控整流电路的直流输出电压平均值, U_l 为整流桥输入线电压有效值。

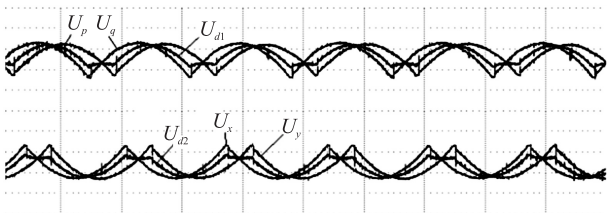
图 3 为整流器直流输出电压 U_d 波形,横坐标每个小格 0.5 ms,纵坐标每个小格 50 V,可以看出在 400 Hz 电源的一个周期 2.5 ms 内,即 5 个小格内有 12 个脉波,最大值为 278 V,最小值为 259.7 V,平均值为 270.2 V。



横坐标 $t:0.25 \text{ ms/div}$ 纵坐标 $V:50 \text{ V/div}$

图 3 整流直流电压输出波形

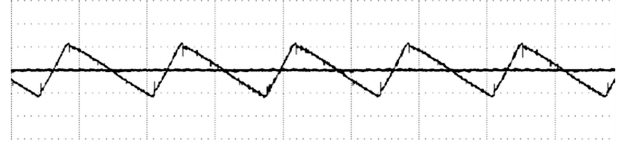
图 4 波形为各点相对于地的电压即 U_p 、 U_q 、 U_{d1} 、 U_x 、 U_y 、 U_{d2} , U_{d1} 为 U_p 和 U_q 的平均值, U_{d2} 为 U_x 和 U_y 的平均值。图 5 为电感两端的电压波形。



横坐标 $t:0.5 \text{ ms/div}$ 纵坐标 $V:50 \text{ V/div}$

图 4 U_p 、 U_q 、 U_{d1} 、 U_x 、 U_y 、 U_{d2} 电压波形

通过图 2 移相波形可以看出输出电压和输入电压有 30° 的移相,图 3 整流器直流母线电压在一个周期有 12 个纹波,图 4 各点相对于地的电位和图 5 电感两端的电压波形与理论分析波形相一致^[9]。



横坐标 $t:0.5 \text{ ms/div}$ 纵坐标 $V:50 \text{ V/div}$

图 5 电感两端的波形

2.3 整流器输入电流分析

对于节点 a 、 a' 、 a'' 、 b 、 b' 、 b'' 、 c 、 c' 、 c'' ,根据基尔霍夫电流定律,分别有:

$$\begin{cases} i_a = i_{a1} + i_{a2} & i_b = i_{b1} + i_{b2} & i_c = i_{c1} + i_{c2} \\ i_{a1} = i_c + i_{a''} & i_{b1} = i_A + i_{b''} & i_{c1} = i_B + i_{c''} \\ i_{a2} = i_{a'} - i_A & i_{b2} = i_{b'} - i_B & i_{c2} = i_{c'} - i_C \end{cases}$$

且: $i_A + i_B + i_C = 0$,代入后得:

$$\begin{cases} i_{a1} = i_{a''} + \frac{N_s}{N_s + N_p} (i_{b''} - i_{b'}) \\ i_{a2} = i_{a'} - \frac{N_s}{N_s + N_p} (i_{c''} - i_{c'}) \\ i_a = i_{a'} + i_{a''} + \frac{N_s}{N_s + N_p} (i_{b''} - i_{b'} + i_{c''} - i_{c'}) \end{cases} \quad (5)$$

每组整流桥独立工作,整流桥输入电流 $i_{a''}$ 、 $i_{b''}$ 、 $i_{c''}$ 相位分别相差 120° ,幅值为 $I_d/2$,整流桥输入电流 $i_{a'}$ 、 $i_{b'}$ 、 $i_{c'}$ 相位也相差 120° ,且分别滞后输入电流 $i_{a''}$ 、 $i_{b''}$ 、 $i_{c''}$ 30° 。整流器输入电流波形 i_a ,其电流有效值为:

$$I_{ams} = \sqrt{\frac{1}{6} \left\{ 2 \left[\left(1 + \frac{N_s}{N_s + N_p} \right) \frac{I_d}{2} \right]^2 + 2I_d^2 + \left[\left(1 + \frac{N_s}{N_s + N_p} \right) I_d \right]^2 \right\}}$$

$$= 0.8165I_d \quad (6)$$

将输入电流 i_a 正、负波形的中点作为时间零点对 i_a 进行傅立叶级数分解得:

$$i_a = \frac{2I_d}{\pi} \sum_{n=1,11,13,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} \left[\left(1 + \frac{N_s}{N_s + N_p} \right) \cos \frac{n\pi}{12} + \frac{N_s}{N_s + N_p} \cos \frac{3n\pi}{12} + \frac{2N_s}{N_s + N_p} \cos \frac{5n\pi}{12} \right] \sin(n\omega t) \quad (7)$$

整流器输入电流波形 i_a 经傅立叶级数分解,理论分析波形如图 6 所示。

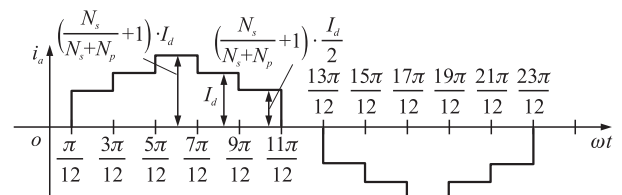
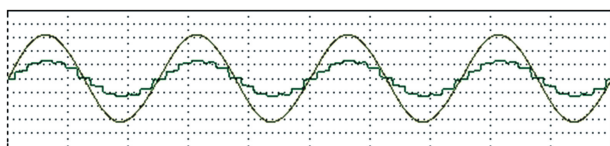


图 6 理论分析电流波形

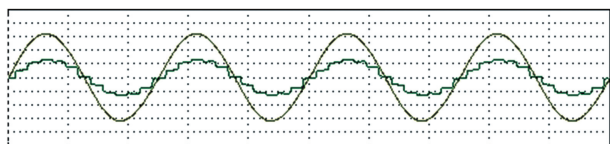
3 实验验证

为了验证负载变化对功率的影响,搭建自耦变压器样机,通过测试负载参数变化,输入总功率、有功功率、无功功率、功率因数和效率的变化情况。针对模型,实验设计更换负载、变化频率,测试各项电压和电流参数^[10]。实验共分 6 组负载,频率在 360 Hz、400 Hz、450 Hz 三档变化。测试波形电压 50 V/div,电流波形 2 V/div(电流波形 1 V 对应于实际电流 2.5 A)即 5 A/div,纯电阻负载 1~6 组,阻值由大到小变化。图 7~图 9 为不同频率下固定一组负载的测试波形。



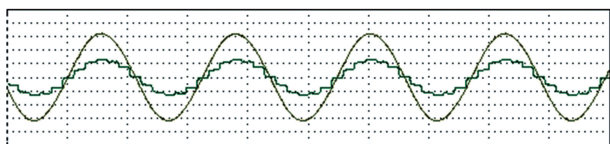
横坐标 t : 1 ms/div; 纵坐标电压 U : 50 V/div; 电流 I : 5 A/div

图 7 负载 50 Ω 电阻、频率 360 Hz、输入电压有效值 112.2 V、输入电流有效值 4.58 A



横坐标 t : 1 ms/div; 纵坐标电压 U : 50 V/div; 电流 I : 5 A/div

图 8 负载 50 Ω 电阻、频率 400 Hz、输入电压有效值 112.4 V、输入电流有效值 4.62 A



横坐标 t : 1 ms/div; 纵坐标电压 U : 50 V/div; 电流 I : 5 A/div

图 9 负载 50 Ω 电阻、频率 450 Hz、输入电压有效值 112.3 V、输入电流有效值 4.58 A

根据图 7~图 9 输入电压电流波形,可得:电压波形为变频电源输出,为标准正弦波。电流波形 i_a 与如图 6 理论分析电流波形一致。

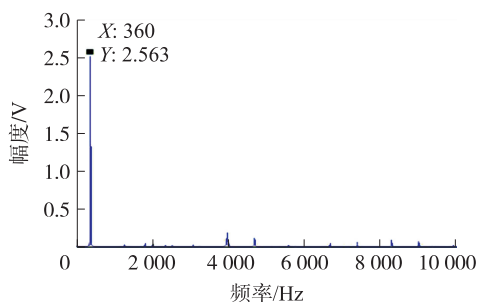
功率因数 $\lambda = v \cos \varphi_1$ 。 $v = I_1 / I$, v 为基波因数,即基波电流有效值和总电流有效值之比。 $\cos \varphi_1$ 称为位移因数或基波功率因数。对上述电流波形分析,位移因数为 1,则功率因数等于基波因数,即 $\lambda = v$ 。 I 为有效值,由示波器测得,则只要求取出 I_1 ,就能求出功率因数,经过 MATLAB 对电流波形进行离散 FFT 分解得到各个电流的基波有效值为表 2 所示。

图 10 为对负载 50 Ω 电阻情况的 FFT 分解,得到频率为 360 Hz 时,幅值最大为 2.563,有效值为 1.81, 11 次谐波幅值为 0.193,13 次谐波幅值为 0.084,23 次谐波幅值为 0.034,25 次谐波幅值为 0.073,11 次谐波

畸变率最大为 7.5%,总谐波畸变率为 14%。

表 2 基波有效值

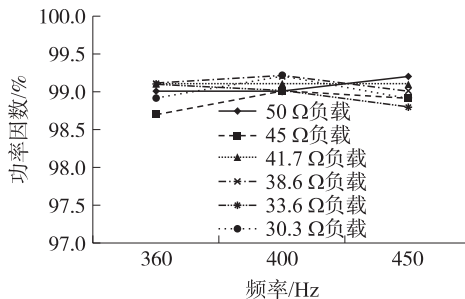
负载/ Ω	360 Hz 时电流/A	400 Hz 时电流/A	450 Hz 时电流/A
50	4.58	4.62	4.58
45	5.03	5.08	5.03
41.7	5.46	5.52	5.46
38.6	5.89	5.91	5.88
33.6	6.67	6.82	6.74
30.3	7.60	7.59	7.56



横坐标单位:Hz;纵坐标单位:V

图 10 负载 50 Ω 电阻情况的 FFT 分解

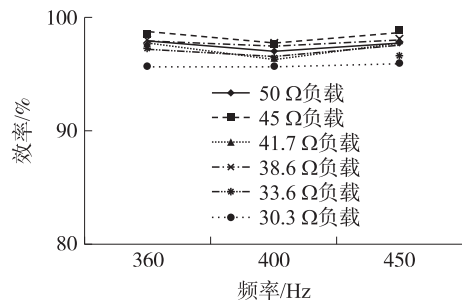
同理对各种负载和不同频率 FFT 分析得到如下结果,当频率不变,负载由有小变大,功率因数基本不变,功率因数为 99%左右,不随频率的变化而变化,不同频率不同负载的功率因数变化如图 11 所示。



横坐标单位:Hz;纵坐标单位:%

图 11 功率因数变化

电源频率从 360 Hz、400 Hz、450 Hz 变化,测量输入电压电流波形与理论一致,经过对电流波形进行分析,效率在 95%~98%之间变化,不同频率不同负载的变压器的效率变化如图 12 所示。



横坐标单位:Hz;纵坐标单位:%

图 12 变压器的效率变化

4 结 论

本文通过变频电源对自耦变压整流器功率因数、损耗等影响分析和试验,研究了 12 脉冲自耦变压整流器进行变频电源供电时,输出电压的移相波形、输入电流波形 FFT 分析、功率因数、效率等重要参数。试验结果表明,自耦变压整流器用于航空变频电源系统时,在变压器的设计中功率损耗受频率和温度的变化影响较小,当负载不变时功率因素不受频率的变化影响,当频率不变时输出功率会随着负载的增加而变大。

参 考 文 献:

- [1] Matheson E, Karimi K. Power Quality Specification Development for More Electric Airplane Architecture[J]. SAE 2002-01-3206;4-7.
 [2] ARINC. ARINC608A; Design Guidance for Avionics Test Equipment Part 1 System Description[S]. 1993;145-147.

- [3] IEEE. IEEE STD 993; IEEE Standard for Test Equipment Description Language[S]. 1997;42-45.
 [4] Sewan Choi, Prasad N Enjeti, Honghee Lee. A New Active Interphase Reactor for 12-Pulse Rectifiers Provides Clean Power Utility Interface[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1996, 32(6): 1304-1311.
 [5] 龚孝龙, 周元钧. 航空变频电源供电下自耦变压整流器(ATRU)的工作特性分析[J]. 电子电力, 2011(6): 23-26.
 [6] 尹梅莉. 飞机二次配电管理装置(SPDA)自动测试系统设计[J]. 测控技术, 2015(34): 96-98.
 [7] 刘瑾, 高朝晖. 航空自耦变压整流装置仿真模型的研究[J]. 计算机仿真, 2012(29): 73-76.
 [8] 高朝晖, 杨阳, 姚文利. 航空用 24 脉波自耦变压整流装置的研究[J]. 电源技术, 2015(5): 987-991.
 [9] 任志新. 多脉冲自耦变压整流器(ATRU)的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
 [10] Cheng K W E. Comparative Study of AC/DC Converters for More Electric Aircraft[C]//Proceedings of Seventh International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives. US: ICPE-VSD, 1998; 299-304.



牛俊峰(1978-),男,汉族,黑龙江牡丹江人,上海飞机设计研究院高级工程师,主要研究方向为民用飞机系统设计及测试,niujunfeng@comac.cc。