飞机变频电力系统 PWM 整流器输出阻抗研究

郑先成，黄 沈，张晓斌

（西北工业大学 自动化学院，陕西 西安 710072）

摘 要： PWM 整流器是飞机变频电力系统中重要的功率变换设备，研究其输出阻抗特性与飞机变频电力系统直流环稳定性的关系具有重要意义。针对三相升压型 PWM 整流器，建立开环/闭环输出阻抗表达式，通过理论计算分析和仿真测试，研究了影响 PWM 整流器输出阻抗的参数，如供电电源频率、负载、输入电感、输出电容和控制带宽，由此得出改善整流器输出特性的方法。仿真结果表明，在控制带宽内，整流器输出阻抗主要决定于控制参数，在控制带宽外，输出阻抗主要决定于直流侧电容等无源器件，而供电电源频率和输入端电感对输出阻抗影响很小。根据阻抗特性的方法设计整流器的控制系统，有效优化整流器的性能和分析整流器带 DC/DC 变换器或电动机控制器等级联系统直流环的稳定性。

关 键 词： 多电飞机，变频电力系统，PWM 整流器，小信号阻抗，电力系统稳定性

中图分类号： TM712 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000-2758(2013)04-0647-05

多电飞机技术从飞机整体来优化飞机能源系统，可以有效降低飞机重量和成本，提高飞机的可维护性和可靠性。在多电飞机电气系统中，由于供电容量的急剧增加，变频供电体制具有广阔的发展空间[1]，而且大部分电力都需要经过功率变换后供负载使用，变换器通常呈现恒功率和非线性特性，将给电力系统的电能质量控制和稳定运行带来巨大挑战[2-4]。传统的分析动态稳定性方法基于系统传递函数矩阵特征值特性，Middlebrook 提出了基于级联系统的输入输出小信号阻抗的阻抗比方法进行稳定性分析[5]，Lee C 等对此方法进行了改善，在多个系统中已经验证其是一种有效的稳定性分析方法。

相对于不控整流，PWM 整流技术可以有效减少输入电流谐波，保证电力系统的供电品质；可以实现单位功率因数，甚至可以实现供电系统的无功功率优化[6]；而且具有能量双向流动能力，适应能量回馈应用的需求。所以 PWM 整流器将是多电飞机分布式电力系统重要的功率变换设备。本文根据多电飞机电力系统动态系统稳定性分析应用需求，建立了变频电力系统 PWM 整流器的数学模型以及开环/闭环输出阻抗表达式，通过理论计算分析和仿真测试，验证了不同工作状态和系统参数对 PWM 整流器的输出阻抗的影响，为优化 PWM 整流器设计以及进一步分析整流器带 DC/DC 变换器或电动机控制器等级联系统直流环的稳定性奠定了基础。

1 SPWM 整流器控制系统设计

三相电压型 PWM 整流器主电路结构框图如图 1 所示，采用输入串联电感、由全控器件 IGBT 构成的三相半桥电压型升压整流电路。输入为三相交流电压 115 V/360 Hz，输出直流电压为 400 V。

根据如图 1 所示的三相 PWM 整流器结构，可以得到在三相静止坐标下的状态方程。

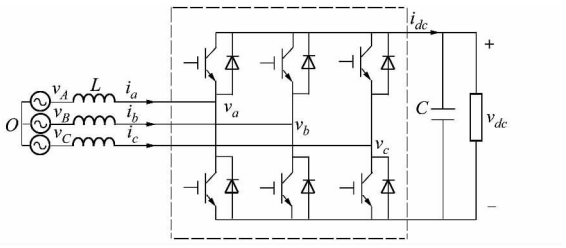


图 1 三相电压型 PWM 整流器的拓扑结构

收稿日期：2012-11-08 基金项目：航空科学基金(2012ZC53033)和西北工业大学基础研究基金资助

作者简介：郑先成(1977—)，西北工业大学副教授，主要从事航空航天器电力系统分析与控制及嵌入式实时系统设计研究。

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}i_{l-l}}{\mathrm{d}t}=\dfrac{1}{3L}v_{L-L}-\dfrac{1}{3L}v_{l-l}\\ \dfrac{\mathrm{d}v_{dc}}{\mathrm{d}t}=\dfrac{1}{C}i_{dc}-\dfrac{v_{dc}}{Rc}\end{cases}\tag{1}$$

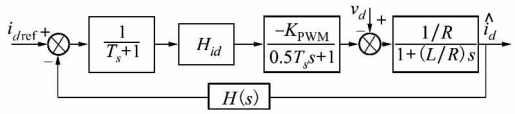
即 $v_{L-L}=\begin{bmatrix}v_{AB}\\v_{BC}\\v_{CA}\end{bmatrix}$,$v_{l-l}=\begin{bmatrix}v_{ab}\\v_{bc}\\v_{ca}\end{bmatrix}$, $i_{l-l}=\begin{bmatrix}i_{ab}\\i_{bc}\\i_{ca}\end{bmatrix}$

通过对(1)式整流器状态方程进行 dq 坐标变换,可得到 PWM 整流器在 dq 坐标系下的小信号模型为

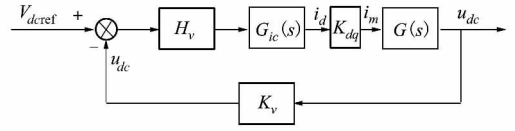
$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\begin{bmatrix}\hat{i}_d\\\hat{i}_q\end{bmatrix}=\dfrac{1}{3L}\begin{bmatrix}\hat{v}_d\\\hat{v}_q\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}0&-\omega\\\omega&0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\hat{i}_d\\\hat{i}_q\end{bmatrix}-\\ \qquad\dfrac{1}{3L}\begin{bmatrix}\hat{d}_d\\\hat{d}_q\end{bmatrix}V_{dc}-\dfrac{1}{3L}\begin{bmatrix}D_d\\D_q\end{bmatrix}\cdot\hat{v}_{dc}\\ \dfrac{\mathrm{d}\hat{v}_{dc}}{\mathrm{d}t}=\dfrac{1}{C}\begin{bmatrix}\hat{d}_d&\hat{d}_q\end{bmatrix}\begin{bmatrix}I_d\\I_q\end{bmatrix}+\dfrac{1}{C}\begin{bmatrix}D_d&D_q\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\hat{i}_d\\\hat{i}_q\end{bmatrix}-\dfrac{\hat{v}_{dc}}{RC}\end{cases}\tag{2}$$

根据(2)式的小信号模型,对三相 PWM 整流器采用双环控制结构,电压环用于调节直流输出电压;电流环用于调节输入功率因数,本文选取 q 轴的电流参考值为 0,以实现功率因数为 1 的控制。为了简化 dq 轴电流控制器的设计,系统采用前馈解耦控制策略。由于解耦后 d 轴和 q 轴的电流环控制特性相同,因此这里只以有功电流 i_d 的控制为例对控制器进行设计。

解耦后的整流器电流内环控制结构框图如图 2a)所示。其中,H_{id} 为电流内环的控制器的传递函数;$1/(T_s+1)$ 为采样信号产生的延迟;$1/(0.5T_s s+1)$ 为 PWM 控制的小惯性特性产生的传递函数;T_s 为整流器控制的开关周期。



a) 电流内环控制器结构



b) 电压外环控制器结构

图2 解耦后 d 轴控制框图

设定 $H(s)=1$,根据控制结构,忽略二阶小项整理后得到电流内环的开环传递函数为

$$G_{io}(s)=\frac{K_{\mathrm{PWM}}}{(1.5T_S s+1)(Ls+R_S)}$$

为了避免系统受到开关频率的干扰,且在开关频率处有较大的衰减,在保证电流环速度的情形下,对电流内环进行补偿设计。补偿后的电流内环的传递函数为

$$G_{ic}=\frac{K_{\mathrm{PWM}}(K_{ip}s+K_{ii})}{(1.5T_S s+1)(L_s s+R_s)s}$$

整流器电压外环的作用是稳定其输出电压,控制结构框图如图 2b)所示。其中,$G_{ic}(s)$ 表示整流器电流内环闭环传递函数,H_v 表示其电压外环补偿器的传递函数,K_{dq} 是由于 dq 变换引入的系数$\sqrt{\frac{2}{3}}$。

假定电压环的反馈系数 $K_v=1$。根据控制结构,忽略二阶小项整理后得到电压外环的开环传递函数为

$$G_{vo}(s)=\frac{17270K_oK_{dq}(1-T_Z s)}{(s+17270)(1+T_P s)}$$

由于电压环传递函数在右半平面的零点会使整流器初始性能变差。因此需要对电压外环进行补偿设计。补偿后的电压外环的传递函数为

$$G_{vo}(s)=\frac{17270K_oK_{dq}(1-T_Z s)(K_{vp}s+K_{vi})}{s(s+17270)(1+T_P s)}$$

补偿后电流内环的穿越频率为 2 000 Hz 处,相位裕度为 46.7°,可以较好地滤除开关磁纹波,大大提升了系统的抗干扰能力。同时,利用电流内环反馈控制可以显著提高控制系统的响应速度。由于电压外环右半平面零点在 1 396 Hz 处,为了保证系统稳定性,选取的穿越频率应该远离此零点。因此,系统电压环的穿越频率在 30 Hz 处,相位裕度为 88.8°,保证系统受到一定范围内的干扰后仍能够恢复到稳定的状态。另外,电压外环的穿越频率远小于电流内环的穿越频率,保证电流内环受电压外环的影响较小。

2 三相 PWM 整流器的阻抗分析

根据 PWM 整流器的主电路及其控制原理可以得出如图 3 所示的控制框图。

根据(2)式及整流器控制原理,可以写出三相桥式 PWM 整流器的开环状态方程(3)式及闭环特性方程(4)式[1]。

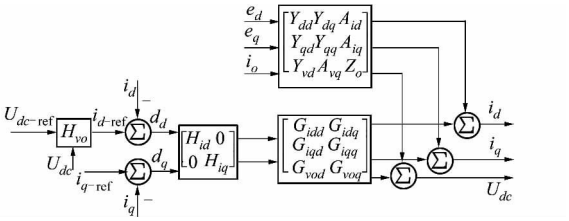


图 3　整流器控制框图

$$\begin{bmatrix}\hat{I}_d(s)\\ \hat{I}_q(s)\\ \hat{U}_{dc}(s)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}G_{idd} & G_{idq}\\ G_{iqd} & G_{iqq}\\ G_{vod} & G_{voq}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\hat{D}_d(s)\\ \hat{D}_q(s)\end{bmatrix}+$$

$$\begin{bmatrix}Y_{dd} & Y_{dq} & A_{id}\\ Y_{qd} & Y_{qq} & A_{iq}\\ A_{vd} & A_{vq} & Z_o\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\hat{E}_d(s)\\ \hat{E}_q(s)\\ \hat{I}_0(s)\end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\begin{bmatrix}Y_{ddcl} & Y_{dqcl} & A_{idcl}\\ Y_{qdcl} & Y_{qqcl} & A_{iqcl}\\ A_{vdcl} & A_{vqcl} & Z_{ocl}\end{bmatrix}$$

$$=\begin{bmatrix}1+G_{idd}H_{id} & G_{idq}H_{iq} & G_{idd}H_{vo}H_{id}\\ G_{iqd}H_{id} & 1+G_{iqq}H_{iq} & G_{iqd}H_{vo}H_{id}\\ G_{vod}H_{id} & G_{voq}H_{iq} & 1+G_{vod}H_{vo}H_{id}\end{bmatrix}^{-1}\cdot$$

$$\begin{bmatrix}Y_{dd} & Y_{dq} & A_{id}\\ Y_{qd} & Y_{qq} & A_{iq}\\ A_{vd} & A_{vq} & Z_o\end{bmatrix} \tag{4}$$

式中，Z_o 即为整流器的开环输出阻抗，Z_{ocl} 即为整流器的闭环输出阻抗。H_{vo} 为电压外环的传递函数控制器，H_{id} 和 H_{iq} 分别为电流内环 d 轴和 q 轴的传递函数控制器。

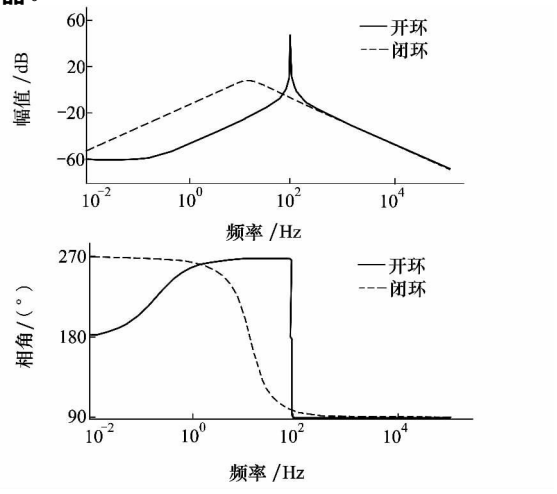


图 4　整流器开环闭环输出阻抗

整流器开环和闭环输出阻抗如图 4 所示。在带宽以内的频段，整流器闭环输出阻抗较开环输出阻抗大，输出阻抗为最大值时的频率为 8.4 Hz，这说明带宽以内的输出阻抗主要由控制系统决定; 在带宽以外的频段，闭环输出阻抗基本与开环输出阻抗一样，这是因为在控制带宽以外，输出阻抗由变换器主电路结构参数确定; 从整个频率段来看，闭环输出阻抗最大值比开环输出阻抗最大值小，由此可见，控制系统可以改善系统级联时的稳定性。

3　不同参数对整流器闭环输出阻抗的影响

当整流器接不同的恒功率负载时，对其输出阻抗要求不尽相同，因此，有必要分析影响整流器输出阻抗的因素及其改善方法。

3.1　供电电源频率对整流器输出阻抗的影响

鉴于多电飞机广泛采用变频供电系统，因此为了保证整个飞机变频系统稳定工作，在设计时必须充分考虑频率变化对整流器输出阻抗的影响。设置 PWM 整流器输入三相交流电频率分别 360 Hz、400 Hz 和 800 Hz，其输出阻抗如图 5 所示，由此可以看出，改变电源频率，输出阻抗基本不变。

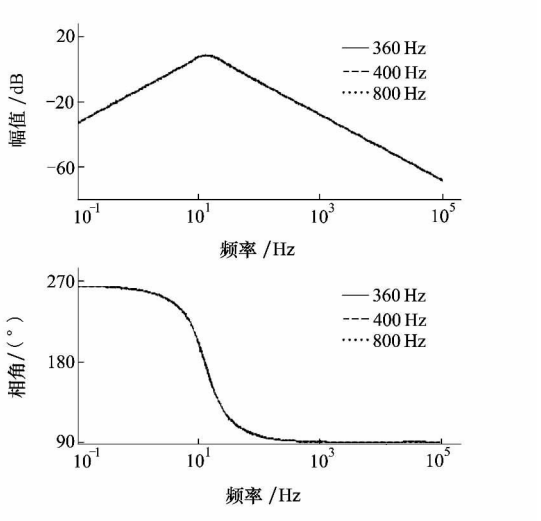


图 5　供电电源频率对整流器输出阻抗的影响

3.2　负载对整流器输出阻抗的影响

当改变负载(50%-100%-200%)时整流器的输出阻抗如图 6 所示。从图中可以看出，不同负载情况下整流器输出阻抗基本相同，只是输出阻抗最大

值随着负载电流的加大而减小。因此从图5和图6可知，阻抗特性实际上是变换器的一种固有特性，变换器的输入和输出变化对其影响并不明显。

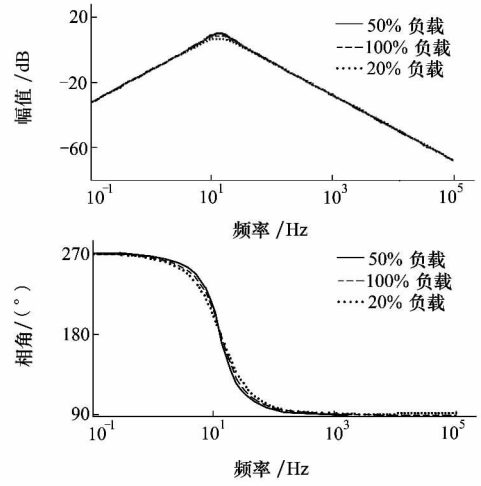


图6 负载对整流器输出阻抗的影响

3.3 输入电感对整流器输出阻抗的影响

PWM整流器的输入电感能够降低交流电流谐波含量，对控制器电流内环的静态、动态响应有着很大的影响。本文在设计电感时是根据电流的波形品质以及稳态条件下电流控制的快速性2个方面来考虑。当设置输入电感分别为150μ、300μ、600μ时，其输出阻抗如图7所示。由图7可以看出，改变输出电感，输出阻抗基本没有发生变化。因此，可以认为，整流器的输入电感对整流器的输出阻抗没有明显影响。

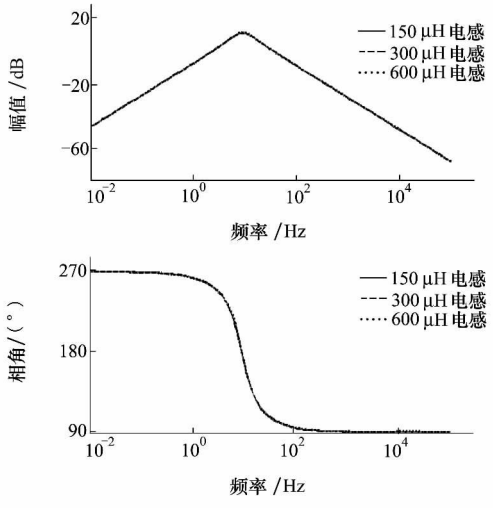


图7 输入电感对整流器输出阻抗的影响

3.4 输出电容对整流器输出阻抗的影响

取输出端电容分别为200μ、1 000μ和4 000μ时整流器的闭环输出阻抗如图8所示。由图8可知，电容在10 Hz～100 kHz对整流器的输出阻抗有着显著影响，且输出电容值越大整流器输出阻抗越小。因此增大系统的输出电容可以改善整流器输出阻抗特性。

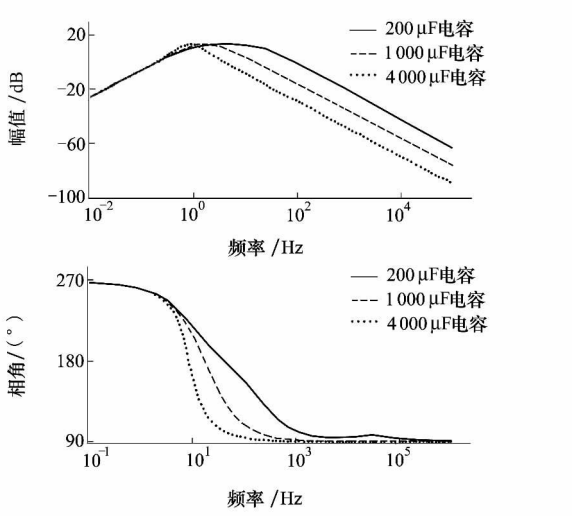


图8 输出电容对整流器输出阻抗的影响

3.5 控制带宽对整流器输出阻抗的影响

设置电压外环带宽分别为20 Hz、30 Hz和40 Hz，整流器输出阻抗如图9所示，由图9可知，控制带宽对整流器输出阻抗的影响主要体现为随着带宽增加，整流器输出阻抗降低，系统的动态性能提高，因此，合理的电压环控制参数有利于改善系统的稳定性。但是控制带宽的提高，则会引起整流器抗扰动能力降低。

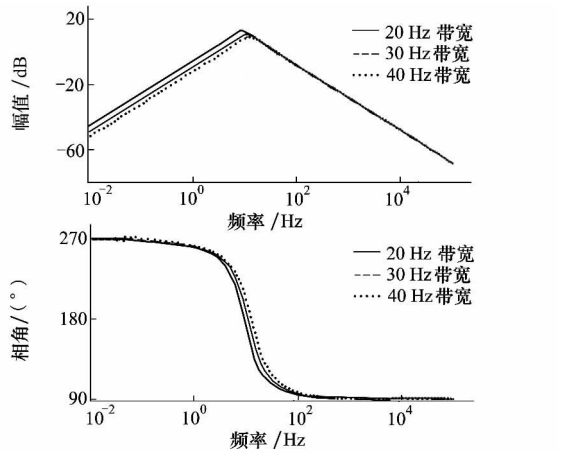


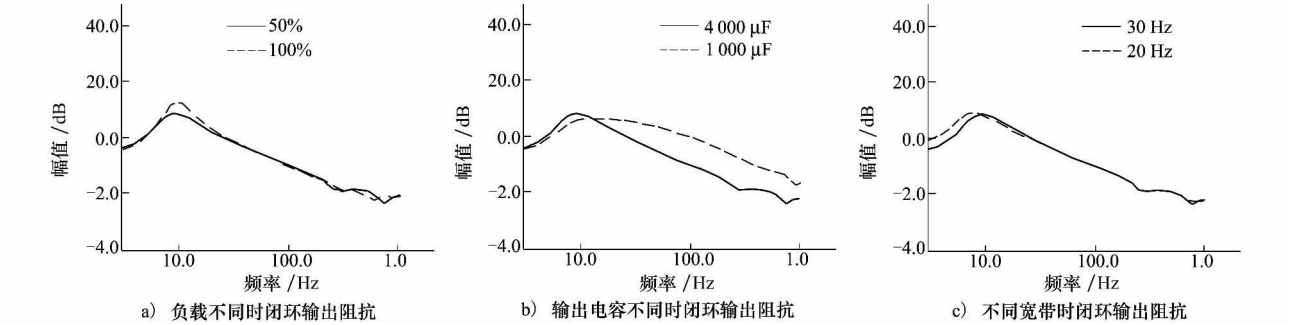
图9 控制带宽对整流器输出阻抗的影响

由以上分析可知,对于 PWM 整流器来说,影响其输出阻抗的主要因素是电压环控制参数和直流侧输出电容的大小。在控制带宽内,整流器输出阻抗主要决定于控制参数,在控制带宽外,输出阻抗主要决定于直流侧电容等无源器件,而供电电源频率和输入端电感对输出阻抗影响很小。

4　仿真验证

由于整流器输出为直流,因此可以采用网络分析仪来测量变换器的输出阻抗[8,9]。在 Saber 仿真平台中,TDSA 具有网络分析仪的功能,因此在Saber 仿真平台建立了上述三相 SPWM 整流器仿真模型,并对其进行阻抗测量。

输入三相交流电压: 115 V/360 Hz,输出直流电压: 400 V,交流侧电感: 300 μH, 直流侧电容: 4 000 μF,开关频率: 20 kHz,控制带宽: 30 Hz。由于低频测量误差较大,故选择从 5 Hz 进行仿真。在 Saber 中仿真得到整流器闭环输出阻抗频率响应曲线如图 10 所示。从图 10 可以看出,闭环输出阻抗的转折点在 7.6 Hz 处,幅值为 10.5 dB,理论计算出转折点在 8.4 Hz 处,幅值为 13.2 dB,转折频率在控制带宽范围内。且不同状态下的闭环输出阻抗仿真结果与理论分析一致。图 11 为加、卸负载时的 PWM 整流器输出电压波形,电压经过 0.16 s 调节后基本稳定在 400 V。



a) 负载不同时闭环输出阻抗　b) 输出电容不同时闭环输出阻抗　c) 不同宽带时闭环输出阻抗

图 10　不同状态下闭环输出阻抗频率响应特性

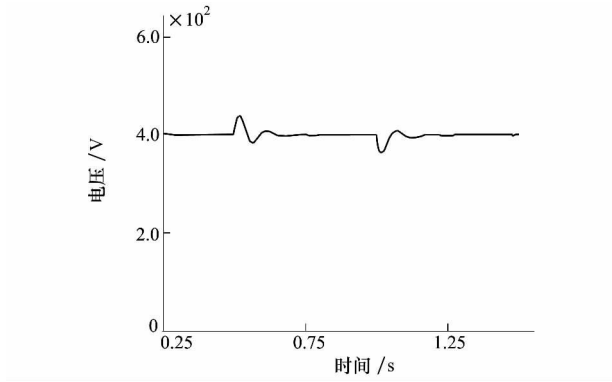


图 11　加、卸负载时 PWM 整流器输出电压波形

5　结　论

本文根据多电飞机变频供电体制应用需求,建立了 SPWM 整流器的数学模型和控制系统,分析了输入电源频率、负载、输入端电感、输出端电容、控制带宽对 PWM 整流器输出小信号阻抗的影响,并在 Saber 仿真平台下测试了整流器的输出阻抗。在控制带宽内,整流器输出阻抗主要决定于控制参数,在控制带宽外,输出阻抗主要决定于直流侧电容等无源器件,而供电电源频率和输入端电感对输出阻抗影响很小。本文的结论为优化 PWM 整流器设计以及进一步分析整流器带 DC/DC 变换器或电动机控制器等级联系统直流环的稳定性奠定了基础。

参考文献:

[1]　郑先成. 飞机变频电力系统电压稳定性分析[博士学位论文]. 西安: 西北工业大学, 2011
Zheng Xiancheng. Voltage Stability Analysis for Aircraft Variable Frequercy Power System. Ph. D. Thesis, Xi´an: Northwestern Polytechnical University, 2011 (in Chinese)

[2] Wei W, Haiping X, Xuhui W, Wenqing S. Dynamics and Control of Electronic Cascaded Systems. IEEE Power Electronics and Motion Control Conference, 2006, 1: 1-4

[3] Emadi A, Khaligh A, Rivetta C H, Williamson G A. Constant Power Loads and Negative Impedance Instability in Automotive Systems: Definition, Modeling, Stability, and Control of Power Electronic Converters and Motor Drives. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2006, 55: 1112-1125

[4] Khaligh A. Realization of Parasitics in Stability of DC-DC Converters Loaded by Constant Power Loads in Advanced Multiconverter Automotive Systems. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2008, 55(6): 2295-2305

[5] Middlebrook R D. Input Filter Considerations in Design and Application of Switching Regulators. IEEE IAS'76, 1976, 366-382

[6] Cheng K W E. Comparative Study of AC/DC Converters for More Electric Aircraft. IEEE Power Electronics And Variable Speed Drives, 1998, 299-304

[7] 吴 涛,阮新波. 分布式供电系统中源变换器输出阻抗的研究. 中国电机工程学报, 2008, 28(3): 66-72
Wu Tao, Ruan Xinbo. Output Impedance Analysis of Source Converters in the DC Distributed Power System. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(3): 66-72 (in Chinese)

[8] Feng Xiaogang. Impedance Specifications for Stable DC Distributed Power Systems. IEEE Trans on Power Electronics, 2002, 17(2): 157-162

Exploring Output Impedance of PWM Rectifier in an Aircraft's Variable Frequency Power System

Zheng Xiancheng, Huang Shen, Zhang Xiaobin

(Department of Automatic Control, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The PWM rectifier is an important power converter in an aircraft's variable frequency power system, and it is necessary to explore the relationship between the output impedance of the PWM rectifier and the stability of the DC loop of the variable frequency power system. This paper establishes the mathematical model of a three-phase boost PWM rectifier and the open/closed loop output impedance expressions. With theoretical calculation and simulation, we analyze the various factors that affect the output impedance of the PWM rectifier, such as the frequency of power supply source, load, input inductance, output capacitor and control bandwidth, thus obtaining a method for enhancing the output characteristics of the PWM rectifier. The simulation results and their analysis show preliminarily that: (1) within the control bandwidth, the output impedance of the PWM characteristic is determined mainly by control parameters; (2) outside of the control bandwidth, it is determined mainly by source-free devices such as output capacitor, whereas the frequency of power supply source and input inductance affect little on the output impedance. The exploration results are useful for optimizing the PWM rectifier design and analyzing the stability of the DC loop of the rectifier with a DC/DC converter or the controller of a motor.

Key words: more electrical aircraft, variable frequency power system, PWM rectifier, small signal impedance, power system stability