

# 基于数字状态反馈的中频逆变电源等效输出阻抗优化技术研究

Research on the equivalent output impedance optimization technology of IF inverter power supply based on digital state feedback

张琦<sup>1,2</sup> 侯蕾<sup>1</sup> 戴伟<sup>2</sup> 刘菲菲<sup>2</sup> 龙泽坤<sup>2</sup>

Zhang Qi<sup>1,2</sup>, Hou Lei<sup>1</sup>, Dai Wei<sup>2</sup>, Liu Feifei<sup>2</sup>, Long Zekun<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学电气工程学院 陕西省西安 710048; 2. 新疆希望电子有限公司博士后科研工作站 新疆乌鲁木齐 830000)

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048) (2. Postdoctoral Research Station of Xinjiang Hope Electronics Co., LTD., Urumqi, Xinjiang 830000)

摘要: 受制于数字控制带宽的限制, 中频逆变电源在数字化控制过程中容易受到高频扰动的影响, 从而在面对非线性负载等扰动时存在严重的谐波畸变问题。针对此问题, 本文分别建立系统的频域和离散域数学模型, 分析了系统等效输出阻抗与扰动传递函数之间的关系和在传统的数字状态反馈控制条件下各状态反馈系数的定量取值依据, 并给出等效输出阻抗的制约因素。然后对电容电流状态反馈环路实施数字相位补偿, 并加入重复控制器, 设计了应用于中频逆变电源的复合控制器。最后, 通过仿真与实验验证了研究方法的可行性与有效性。

Abstract: Due to the limitation of digital control bandwidth, the medium frequency inverter power supply is easy to be affected by high frequency disturbance in the process of digital control, so there are serious harmonic distortion problems in the face of nonlinear load disturbance. To solve this problem, this paper establishes the frequency domain and discrete domain mathematical model, analyzes the relationship between the equivalent output impedance and the disturbance transmission function and the quantitative value basis of the feedback coefficient of each state under the traditional digital state feedback control condition, and gives the constraints of the equivalent output impedance. Then, digital phase compensation is implemented for the capacitance current state feedback loop, and repeated controller is added to design the composite controller applied to the IF inverter power supply. Finally, the feasibility and effectiveness of the research method are verified through simulation and experiment.

关键词: 中频逆变电源, 输出阻抗, 相位补偿, 重复控制

Key words: medium frequency inverter power supply, output impedance, phase compensation, repeated control

## 0 引言

中频逆变电源以体积小、重量轻的优势广泛应用于航空航天领域。然而, 由于数字控制带宽的限制, 逆变电源在高频抗扰性能方面无法达到传统模拟控制器的作用效果<sup>[1]</sup>。特别是数字控制器在离散化过程中引入了等效延迟环节<sup>[2]</sup>, 降低了系统的可控性, 使得数字化控制的逆变电源容易受到滤波器参数变化、控制器参数调整等影响, 甚至破坏系统的稳定运行特征。

传统逆变电源常采用“三环控制”方案<sup>[3]</sup>。由于开关器件的等效延迟, 系统的极点特征无法任意配置, 反馈环路参数存在互限因素, 并且存在显见的控制误差。而且由于数字控制延迟的引入, 这种矛盾在数字控制中更为突出。为解决该问题, 有学者提出提高电容电流的采样频率而有效提高系统极点的配置能力, 然而其本质是通过提升控制频率来实现, 对数字控制器性能有较高要求<sup>[4]</sup>。文献[5]提出了基于扰动观测器的负载电流前馈控制方法, 有效提升了系统动态性能, 参数适应性强。文献[6]提出了一种基于六倍频重复控制器与最优预见控制的复合控制策略, 简化状态变量、重复控制器和指令的反馈系数的求解, 保证系统稳定性。文献[7]提出了一种网侧电流控制策略, 增加闭环控制自由度, 降低有源补偿成本, 实现逆变器输出阻抗超宽频率范围无源性。这些方法目前被证明是有效的, 然而目前仍然缺乏对这些方法性能进行定量评价的指标性依据, 所以无法进行科学的量化对比。

由于中频逆变电源本质上为电压源系统, 其抗扰性通常可以由等效输出阻抗进行评价。因此, 获得控制器结构对系统等效输出阻抗的影响, 通过优化控制器而改善系统的等效输出阻抗, 从而提高了系统的抗扰能力和参数适应能力。本文首先建立中频逆变电源系统的频域数学模型, 分析系统等效输出阻抗与扰动传递函数的关系。然后在状态反馈控制条件下, 建立系统的离散域数学模型, 明确各状态反馈系数的定量取值依据, 并给出状态反馈控制时系统等效输出阻抗的制约因素。通过对电容电流状态反馈环路实施数字相位补偿, 设计了一种系统等效输出阻抗优化方法。另外, 将重复控制器的稳态波形控制优势与所研究方法的高频抗扰性能优势相结合, 设计应用于中频逆变电源的复合控制器。最后, 通过搭建的实验平台, 验证所研究方法的可行性与有效性。

### 1 中频逆变电源的阻抗模型分析

图1(a)为中频逆变电源的等效电路模型。其中, E为直流母线电压, r为考虑逆变器中各种阻尼因素的等效电阻,  $i_{load}$ 为负载电流, 将其作为扰动输入。图1(b)为逆变电源的频域结构图, 输出阻抗的定义为  $z_L = v_c / (-i_{load})$ , 结合图1(b)可得系统输出阻抗的频域表达式为(1)。

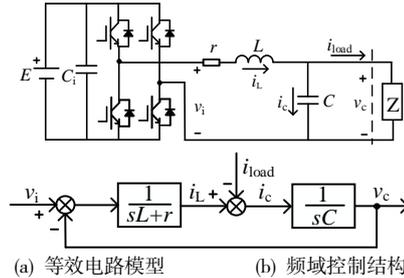


图1 逆变电源的电路模型和控制结构

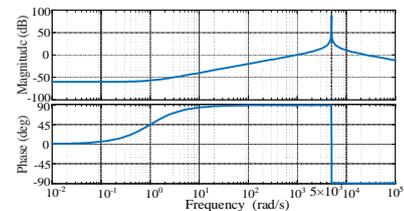


图2 输出阻抗频域分析

$$z_L = \frac{v_c}{-i_{load}} = \frac{sL + r}{LCs^2 + rCs + 1} \quad (1)$$

图2为逆变电源等效输出阻抗的伯德图, 对其进行幅频特性分析可知, 低频处的阻抗幅值较小, 系统的抗扰性较高。但随着频率的增加, 输出阻抗的值也随之增大, 并且在5kHz处出现阻抗尖峰, 这将严重影响系统的抗扰性, 所以需要引入反馈控制。

### 2 状态反馈控制下的阻抗模型分析

选择滤波电容的电压  $v_c$  和电流  $i_c$  作为状态变量, 且  $v_c$  作为输出量, 则系统的状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = Ax_1 + B_1v_i + B_2v_r \\ y = C_1x_1 \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $x_1=[v_c \quad i_c]^T$ ,  $v_r=[i_{load} \quad di_{load}/dt]^T$ , 系数矩阵 A、输入矩阵 B 和输出矩阵  $C_1$  分别为:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L} & -\frac{r}{L} \end{bmatrix}, B = [B_1 \quad B_2] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{L} & -\frac{r}{L} & -1 \end{bmatrix}, C_1 = [1 \quad 0]$$

本文采用全数字化控制方案, 需要将逆变电源连续域的数学模型按一定的采样时间 T 进行离散化, 离散域的状态方程变为:

$$\begin{cases} x_1(k+1) = G_1x_1(k) + H_{11}v_i(k) + H_{12}v_r(k) \\ y(k) = C_1x_1(k) \end{cases} \quad (3)$$

其参数分别为:

$$G_1 = L^{-1}[sI - A]^{-1} \quad (4)$$

$$H_1 = \int_0^T G_1 dt B \quad (5)$$

由于数字控制系统存在采样延时, 所以需要进行一拍的滞后处理, 此时系统的输入量变为  $v_{od}$ , 且  $v_i(k+1)=v_{od}(k)$ , 状态变量为  $x_2=[v_c \quad i_c \quad v_i]^T$ , 状态空间表达式为:

$$\begin{cases} x_2(k+1) = G_2x_2(k) + H_{21}v_{od}(k) + H_{22}v_r(k) \\ y(k) = C_2x_2(k) \end{cases} \quad (6)$$

其中:  $G_2 = \begin{bmatrix} G_1 & H_{11} \\ 0_{1 \times 2} & 0 \end{bmatrix}$ ,  $H_{21} = \begin{bmatrix} 0_{2 \times 1} \\ 1 \end{bmatrix}$ ,  $H_{22} = \begin{bmatrix} H_{12} & H_{13} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ ,  $C_2 = [1 \quad 0 \quad 0]$ 。

图 3 为加入状态反馈后的控制结构图。其中, 状态反馈矩阵  $K_f=[k_v \quad k_i \quad k_v]$ ,  $k_v$ 、 $k_i$ 、 $k_v$  分别为  $v_c$ 、 $i_c$ 、 $v_i$  的反馈系数。一方面, 状态反馈仅控制  $v_c$  和  $i_c$ , 而不希望改变  $v_i$ , 因此始终令  $k_v=0$ 。另一方面, 对中频逆变电源抗扰性的优化是在系统稳定的前提下而进行, 因此, 选取的状态反馈系数  $k_v$  和  $k_i$  必须保证系统的稳定性。

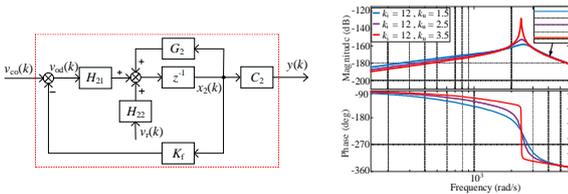


图 3 加入状态反馈后的状态空间结构图 图 4 反馈系数  $k_v$  对抗扰的影响

由于等效电阻  $r$  在实际电路中的阻值极小, 为简化计算令  $r=0$ 。令  $G_{2f}=G_2-H_{21}K_f$ , 则闭环系统特征多项式为:

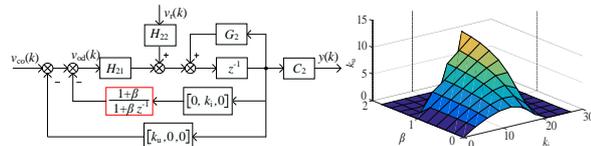


图 5 加入相位补偿的状态空间结构图 图 6 优化后反馈系数的取值范围

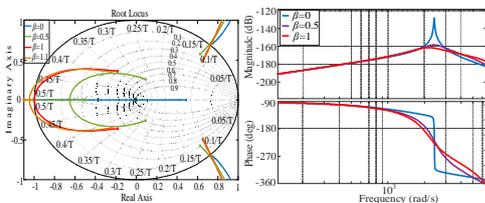


图 7  $\beta$  对系统根轨迹的影响 图 8  $\beta$  对抗扰特性的影响

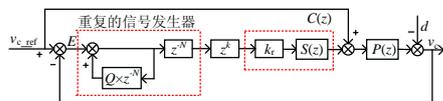


图 9 嵌入式重复控制系统

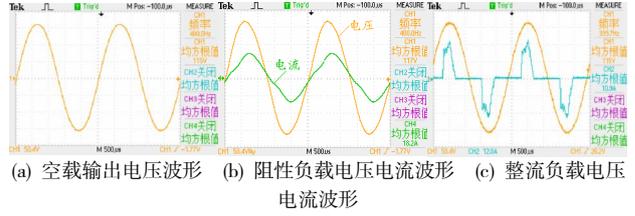


图 10 阻抗优化后逆变电源输出电压电流波形

$$\Delta(z) = [zI - G_{2f}]^{-1} \quad (7)$$

通过朱利判据得到系统稳定的充要条件为:

$$(k_{s1} - k_{s2})^2 + |2 \cos \omega T_s (k_{s1} - k_{s2}) - (1 + k_{s1} + k_{s2})| - 1 < 0 \quad (8)$$

其中,  $k_{s1}=k_v(1-\cos \omega T_s)>0$ ,  $k_{s2}=k_i \sin \omega T_s / \omega L$ 。由此得到  $k_v$  的取值范围为  $(0, 3.5)$ 。通常, 对于输入电压而言, 电压反馈系数越大, 控制器输入电压误差值越小。此时,  $k_v$  的取值范围过小, 控制系统对电压的跟踪效果较差。

其次, 根据图 3 列出控制系统在扰动作用下的状态方程为:

$$x_2(k+1) = G_{2f}x_2(k) + H_{22}v_r(k) \quad (9)$$

其中,  $v_r$  作为系统的扰动输入, 它包含了负载电流及其变化量。分别进行阻抗分析:

$$\frac{v_c}{-i_{load}} = G_{d1} = C_2 [zI - G_{2f}]^{-1} H_{22a} \quad (10)$$

$$\frac{v_c}{-di_{load}/dt} = G_{d2} = C_2 [zI - G_{2f}]^{-1} H_{22b} \quad (11)$$

其中,  $H_{22a}$  为参数矩阵  $H_{22}$  的第一列, 通过理论分析可知其值为 0, 所以  $G_{d1}=0$ ,  $H_{22b}$  为  $H_{22}$  的第二列, 所以系统的输出阻抗为  $sG_{d2}$ , 由此对输出阻抗进行频域分析。如图 4 所示, 电压反馈系数  $k_v$  越大, 输出阻抗整体的值越小, 系统整体的抗扰性越高。而当  $k_v$  值接近临界稳定值的时候, 输出阻抗的幅频曲线将出现阻抗尖峰, 这会在特定频率处影响系统的抗扰性。

### 3 系统高频段输出阻抗特征优化方法

本文在电流状态反馈回路加入相位补偿, 如图 5 所示, 控制系统离散域的传递函数为:

$$G_R(z) = \frac{1 + \beta}{1 + \beta z^{-1}} \quad (12)$$

其中,  $\beta$  为补偿系数。

图 6 为系统稳定运行时反馈系数的取值范围。此时,  $k_v$  的取值范围由 3.5 增加至 9.6, 并且  $k_v$  的值随着  $\beta$  的变化而变化。图 7 为系统前向通道的根轨迹图, 从中可知, 一旦  $\beta$  大于 1, 系统将出现一个单位圆外的零点, 这将增大系统的相位滞后, 所以  $\beta$  的取值范围为  $(0, 1)$ 。图 8 为阻抗优化后系统输出阻抗的频域分析图。由图可知, 通过调节相位补偿系数  $\beta$ , 可逐渐削弱阻抗尖峰。并且当  $\beta=1$  时, 控制系统阻抗尖峰基本完全消失, 由此证明了相位补偿可有效改善系统的抗扰性能。

其次, 逆变电源系统常采用重复控制器消除非线性负载等周期性扰动信号带来的影响。如图 9 所示, 在输入的正弦信号中叠加一个同频的周期补偿信号, 可达到对系统误差进行周期性补偿的效果。

### 4 实验分析与验证

实验平台通过外部数字控制平台 (RTU-box) 对系统进行控制, 并且也可以通过自身硬件电路中 TMS320F28335 控制器进行控制。而功率开关管 IGBT 采用宏微科技 MMG50H120X6TN, 死区时间为 1.5  $\mu$ s, 开关频率为 20kHz。

图 10 为采用阻抗优化技术后逆变电源输出电压和电流的实验波形。由图可知, 逆变电源在空载、阻性负载和整流负载情况下均可保持较好的电压波形质量, 输出电压的正弦度较高, 并且电压的跟踪效果较好, 准确达到给定值 115V。

### 5 结论

在考虑了数字控制延迟的基础上, 构建了中频逆变电源在状态反馈

控制方法下系统的等效输出阻抗模型。通过理论分析求出了输出阻抗表达式,由此分析了采用传统状态反馈控制时系统抗扰性不佳的问题。在电容电流内环引入了相位补偿环节,增加了内外环反馈系数的取值范围,消除了系统频域下的阻抗尖峰,并加入重复控制增加控制系统对电压的跟踪能力。该方法便于数字化实现,参数适应性强。文章通过理论分析与实验验证了这种方法的正确性与可行性,证实其对中频逆变电源在非线性负载情况下抗扰性改善的有效性。

参考文献:

- [1] Qi Zhang, Yu Tang, Lei Hou, et al. An Active High Frequency Damping Scheme for the Current Control of L Filter-Based Grid-Connected Inverter[J]. IEEE Access, 2019, 7: 171738-171751.
- [2] Zhiheng Lin, Xinbo Ruan, Hao Zhang, et al, A Generalized Real-Time Computation Method With Dual-Sampling Mode to Eliminate the Computation Delay in Digitally Controlled Inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(5): 5186-5195.
- [3] Chen Li, Shi-ming Ji, Da-peng Tang. Multiple-Loop Digital Control Method for a 400-Hz Inverter System Based on Phase Feedback[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 28(1): 408-417.
- [4] S. -S. Huang, Y. Konishi, Z. -Z. Yang and M. -J. Hsieh. Observer-Based Capacitor Current Sensorless Control Applied to a Single-Phase Inverter System With Seamless Transfer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(3): 2819-2828.
- [5] 曹文远, 韩民晓, 谢文强, 等. 基于扰动观测器的电压源型逆变器负载电流前馈控制及参数设计方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(4): 862-873.
- CAO Wenyuan, HAN Minxiao, XIE Wenqiang, et al. A Disturbance-Observer-Based Load Current Feedforward Control and Parameter Design Method for Voltage-Sourced Inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(4): 862-873. (in Chinese).
- [6] 兰梓冉, 郝瑞祥, 角宏林, 等. 基于重复控制和状态反馈的三相逆变器最优预见控制[J/OL]. 电工技术学报.
- LAN Ziran, HAO Ruixiang, JIAO Honglin, et al. Optimal Preview Control of Three-Phase Inverter Based on Repetitive Control and State-Feedback[J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society(in Chinese).
- [7] 边志维, 何远彬, 吴圆圆, 等. 一种提高 LCL 型并网逆变器无源性及抗扰性的网侧电流控制策略[J]. 中国电机工程学报.
- BIAN Zhiwei, HE Yuanbin, WU yuanyuan, et al. Design of the 400 Hz Inverter Based on Pole Configuration[J]. Proceedings of the CSEE(in Chinese).
- [8] Qi Zhang, Jiangjiang Li, Rongwu Zhu, Fujin Deng, Xiangdong Sun, Shaoliang An, Marco Liserre. Output Impedance Modelling and High Frequency Impedance Shaping Method for Distributed Bi-directional DC-DC Converters in DC Micro-grid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.35, No.7, 2020: 7001-7014.
- [9] Biying Ren, Xingdong Sun, Majing Yu, et al. Circulating Current Analysis and the Improved D -  $\Sigma$  Digital Control Strategy for Multiparalleled Three-Level T-Type Grid-Connected Inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(4): 2810-2821.
- [10] 周天翔, 陈恒林, 袁文琦, 等. 基于高通滤波测试的逆变器端口共模干扰建模[J/OL]. 中国电机工程学报.
- ZHOU Tianxiang, CHEN Henglin, YUAN Wenqi, et al. Terminal Common-mode Electromagnetic Interference Modeling of Inverter Based on High-pass Filter Measurement[J/OL]. Proceedings of the CSEE(in Chinese).