

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2017.03.010

鲁棒与 PR 控制器对比分析及在中频电源中的应用

张银锋, 聂子玲, 赵治华, 李华玉, 李长乐

(舰船综合电力技术国防科技重点实验室(海军工程大学), 武汉 430033)

摘 要: 为提高中频电源的动态性能和鲁棒性能, 将鲁棒控制器应用到中频电源控制当中。在建立控制对象数学模型的基础上, 把负载和滤波器电感参数作为不确定因素, 基于 μ 分析与综合方法设计了一个鲁棒控制器。仿真和实验结果表明: 动态响应速度比采用双环准 PR 控制器的中频电源提高了一倍, 动态过程中电压的波动也降低了将近 40%, 且鲁棒性能更好。采用鲁棒控制器的中频电源不仅可以实现无静差跟踪和渐进稳定, 而且还具有良好的鲁棒性能以及抗负载扰动能力。

关键词: 中频电源; 鲁棒控制; 准 PR 控制; μ 分析与综合; D-K 迭代

中图分类号: TM46 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2017)03-0061-07

Comparative analysis between robust controller and PR controller and their applications in medium frequency power supply

ZHANG Yinfeng, NIE Ziling, ZHAO Zhihua, LI Huayu, LI Changle

(National Key Laboratory for Vessel Integrated Power System Technology (Naval University of Engineering), Wuhan 430033, China)

Abstract: In order to improve the dynamic and robust performance of the medium frequency power supply, the robust controller is applied to the medium frequency power supply control. Based on the mathematical model of the control object, at the same time, the load and the filter inductance parameters are taken as uncertain factors, a robust controller is designed based on the μ analysis and synthesis method. Simulation and experimental results show that the dynamic response speed is improved by one times than that of the intermediate medium power supply controlled with double loop quasi PR controller, and the fluctuation of voltage in the dynamic process is reduced by nearly 40%. The medium frequency power supply controlled with robust controller not only can achieve the tracking and asymptotic stability, but also has good robust performance and strong anti-interference to the load disturbance.

Keywords: medium frequency power supply; robust control; quasi PR control; μ analysis and synthesis; D-K iteration

中频电源可以分为旋转式和静止式, 早期用旋转发电机产生的中频供电电源称之为旋转式, 目前仍有部分场合在应用, 但这种方式存在体积重量大、工作噪音大、发电效率比较低、能耗比较大、维护成本高等缺点。随着电力电子技术和功率开关器件的发展, 静止式中频电源的发展已趋于成熟。但是, 中频电源在相同的采样频率下一个周期内采样点是工频电源的 $1/8$, 控制精度大大降低, 控制难度远大于工频 50 Hz 电源^[1], 因此中频电源优良精确的控制技术是该领域的重要研究方向之一。

传统的双闭环 PI 控制器结构简单^[2], 在直流电源及直流电机控制中得到了广泛的应用, 但由内模原理^[3]可知, 这种控制方法在以正弦波为参考信号的单相交流电源控制中存在静差^[4]。文献^[5]提出了一种复合控制策略, 但重复控制的滞后特性

使得闭环系统动态性能不高。文献^[6]提出了基于准 PR 控制器的电压电流双闭环瞬时值控制策略, 能够实现稳态性能, 但 PR 控制器带宽较窄、对频率过于敏感, 频率的偏移有可能导致系统不稳定, 且不能消除不确定性参数对闭环系统性能的影响。

自 1972 年多伦多大学 Davison 教授首次提出鲁棒控制这个概念以来, 鲁棒控制理论就得到了学者们的广泛关注和研究^[7-8]。鲁棒控制能对包含有界的不确定性系统进行调节校正, 主要利用反馈-前馈输出状态关系来产生相应的控制输入, 从而使系统输出沿预定“轨迹”变化。目前鲁棒控制理论已形成几个重要的分支, 并建立了各自完备的理论体系, 其中 μ 分析与综合方法在理论上不具有保守性, 是鲁棒控制中比较优秀的控制策略, 目前该方法在很多工程领域当中得到了应用^[9-10], 但是, μ 分析与综合方法在中频电源中的应用未见报道。

本文主要研究的内容是将中频电源输出滤波器参数以及负载作为不确定性因素, 使用结构奇异值理论来设计一个鲁棒控制器。首先分析单相中频电源的拓扑结构并建立了数学模型; 然后对准 PR 控

收稿日期: 2016-06-14

基金项目: 国家自然科学基金(51407189);

国家重点基础研究发展计划(2015CB251004)

作者简介: 张银锋(1983—), 男, 博士研究生;

聂子玲(1975—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 聂子玲, nieziling@163.com

制器和鲁棒控制器作了简要介绍;最后借助于 D-K 迭代算法求解出鲁棒控制器,与双环准 PR 控制器进行对比分析,并对两种控制方法分别进行了软件仿真和实验验证。

1 电路拓扑及建模分析

本文论述的单相中频电源中采用 H 桥逆变结构,其电路拓扑如图 1 所示,其中 T1、T2、T3、T4 为带有反并联二极管的功率器件 IGBT,滤波器采用 LC 型滤波器,其中 L 为输出滤波电感, r 为电感内阻, C 为输出滤波电容。 u_o 为中频电源输出电压, u_i 为直流母线电压, i_L 为滤波电感电流, i_o 为输出负载电流。

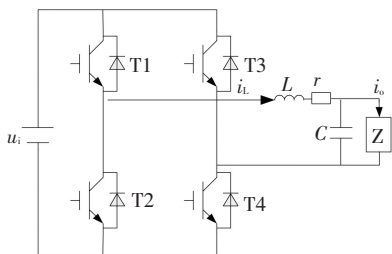


图 1 单相中频电源拓扑结构

Fig.1 Circuit topology of single-phase medium frequency power supply

H 逆变桥可近似等效为一个比例环节 k , 将滤波电感电流 $i_L(t)$, 滤波电容电压 $u_o(t)$ 作为状态变量,输入变量为逆变桥输出 ku_i , 输出变量为电容电压 $u_o(t)$, 可以得到状态空间表达式为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{i}_L(t) \\ \dot{u}_o(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & -\frac{r}{L} \\ 0 & \frac{1}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ u_o(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} ku_i + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{C} \end{bmatrix} i_o, \\ u_o(t) = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} i_L(t) \\ u_o(t) \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (1)$$

由状态空间模型可以得到单相中频电源的传递函数为

$$u_o(s) = \frac{kZ}{LCZs^2 + (rCZ + L)s + Z + r} u_i(s). \quad (2)$$

2 准 PR 控制器和 H_∞ 鲁棒控制器

2.1 准 PR 控制器

PR 控制器自提出以来就成为了交流电源系统研究的热点,该控制器可以提高基波增益,有效地减小系统的跟踪误差,从而克服 PI 控制器的缺陷。为了对电源输出频率有一定的适应性,一般采用准 PR 控制器,其表达式为

$$G_{PR}(s) = K_p + K_i \frac{s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2}. \quad (3)$$

式中 K_p 为比例系数, K_i 为谐振系数,对于 400 Hz 中频电源来说,其基波角频率 $\omega_0 = 800\pi$ 。

准 PR 控制器在基波频率处有很高的增益,具有消除稳态误差的作用,但 K_i 的增大也使得准 PR 控制器的频带范围加大,进而增加了谐振的影响范围,不利于闭环系统稳定。关于准 PR 控制器的论述已经在诸多文献中提及,参考文献[11-12]中的设计方法最终确定双环准 PR 控制器参数为

$$G_{PR}(s) = 3 + \frac{1000s}{s^2 + 20s + (800\pi)^2}. \quad (4)$$

2.2 标准 H_∞ 控制问题

标准鲁棒控制问题的控制结构框图如图 2 所示,图中 w 为外部输入的参考信号、干扰信号、以及传感器噪声信号等; z 为跟踪误差、调节误差以及执行机构输出,是被控对象的输出信号; u 为输入控制信号, y 为输出信号, K 为需要设计的鲁棒控制器, G 为广义被控对象模型。

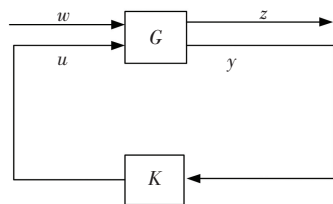


图 2 H_∞ 标准问题控制结构图

Fig.2 Standard problem of robust control

H_∞ 控制的标准问题可以描述为:设计一个控制器 $u = Ky$, 使得闭环系统内稳定,并且使扰动输入 w 到控制输出 z 的传递函数 T_{wz} 的 H_∞ 范数小于 1,即

$$\|T_{wz}\|_\infty < 1. \quad (5)$$

结构化奇异值 (μ) 分析和综合方法是分析多重扰动条件下 MIMO 系统鲁棒稳定性和鲁棒性能的有力工具,在 H_∞ 控制问题分析时具有较小的保守性,为此,本文采用 μ 分析和综合方法来分析和设计中频电源的控制器。

2.3 μ 分析方法

μ 分析方法是把被控系统中所有不确定性摄动“提取”到一个对角型分块矩阵中,其中每一个对角元素代表某一个来源的不确定性, $\Delta = \text{diag}\{\Delta_i\}$ (diag 表示对角矩阵, Δ_i 为系统的某一不确定量)。如果把鲁棒控制器也提取出来,就得到了如图 3 所示的不确定性系统一般结构框图。其中: P 为广义标称对象, Δ 为不确定性模块, K 为鲁棒控制器; w 为来自外界的扰动输入, z 为信号输出。 y_Δ 、 u_Δ 分别为不确定模块的输入和输出, v 、 u 分别为控制器的输入和输出^[13]。

3 鲁棒控制器的求取

目前还没有一个直接的方法可以综合 μ 最优控制问题,然而,试图求取能够最小化给定 μ 条件的控制器,这就是 μ 综合问题。

D-K 迭代是求解 μ 综合问题比较好的方法,该方法结合了 H_∞ 分析和 μ 分析,通常能够取得不错的控制效果,其出发点是根据尺度变换后的奇异值给出 μ 的上界,D-K 迭代流程图如图 7 所示。

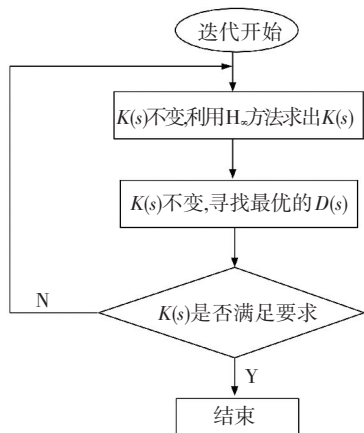


图 7 D-K 迭代流程图

Fig.7 Block diagram of D-K iteration

鲁棒控制工具箱提供了上述迭代过程的命令,dkit 和 dksyn 都可以求取基于 μ 分析的鲁棒控制器,本文采用 dksyn 命令,经过 7 次迭代,才使得结构奇异值满足式(9). 7 次迭代结构奇异值分别为 4.745, 3.523, 2.682, 1.430, 1.105, 1.034, 0.995,求得的控制为 6 阶最优控制器. 为了能够在 DSP 等数字处理芯片中实现该控制器,通过对控制器的降阶处理,最后得到的控制器为

$$K_\infty = \frac{a_1 s^4 + b_1 s^3 + c_1 s^2 + d_1 s + e_1}{s^4 + f_1 s^3 + g_1 s^2 + h_1 s + i_1}.$$

其中: $a_1 = 1.208, b_1 = 2\ 878, c_1 = 1.193 \times 10^9, d_1 = 2.643 \times 10^{12}, e_1 = 2.447 \times 10^{14}, f_1 = 216, g_1 = 9.932 \times 10^8, h_1 = 5.019 \times 10^{10}, i_1 = 6.167 \times 10^{15}$.

通过 Tustin 方法将控制器 K_∞ 离散化为

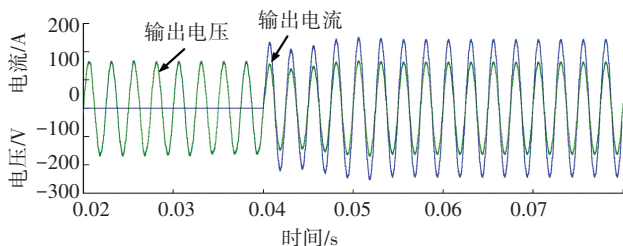
$$K_\infty(z) = \frac{1.208z^3 - 0.914\ 9z^2 - 1.188z + 0.899\ 8}{z^3 - 0.9413z^2 - 0.922z + 0.986\ 8}. \quad (14)$$

4 仿真与实验

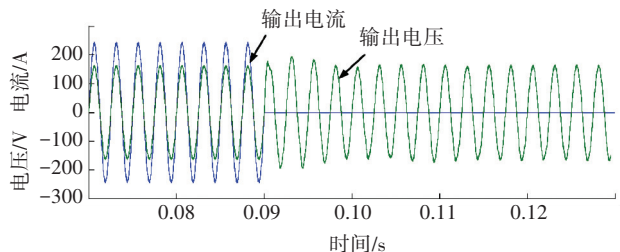
为了验证上述理论分析的正确性,利用 MATLAB 软件对全系统进行仿真分析,并在 20 kW 试验样机上进行了实验验证,其中电路参数为:输出滤波电容 $C = 166\ \mu\text{F}$,滤波电感 $L = 0.05\ \text{mH}$,阻性负载时 $R_o = 0.67\ \Omega$,阻感负载时 $R_o = 0.67\ \Omega, L_o = 0.4\ \text{mH}$.

4.1 双环准 PR 控制器仿真验证

图 8、9 分别为带阻性负载和带阻感负载时,采用双环准 PR 控制器的单相中频电源输出电压电流仿真波形。



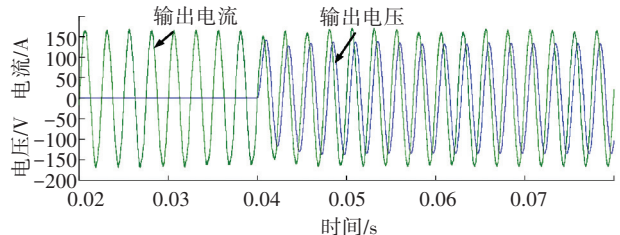
(a) 突加负载



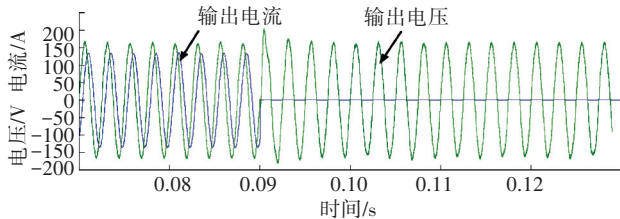
(b) 突卸负载

图 8 阻性负载时输出电压电流波形

Fig.8 Output voltage and current waveforms with resistive load



(a) 突加负载



(b) 突卸负载

图 9 阻感负载时输出电压电流波形

Fig.9 Output voltage and current waveforms with resistance-inductance load

4.2 单环鲁棒控制器仿真验证

图 10、11 分别为带阻性负载和带阻感负载时,采用鲁棒控制器的中频电源输出电压电流波形。

从上面的仿真结果可以看出,采用鲁棒控制器的中频电源系统,突加和突卸负载时输出电压波形几乎没有波动,比采用双环准 PR 控制器有更快的动态响应和抑制负载扰动能力。

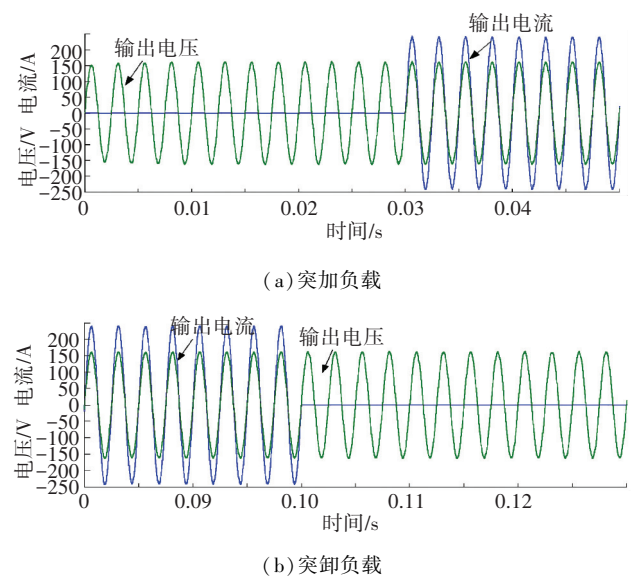


图 10 阻性负载时输出电压电流波形图

Fig.10 Output voltage and current waveforms with resistive load

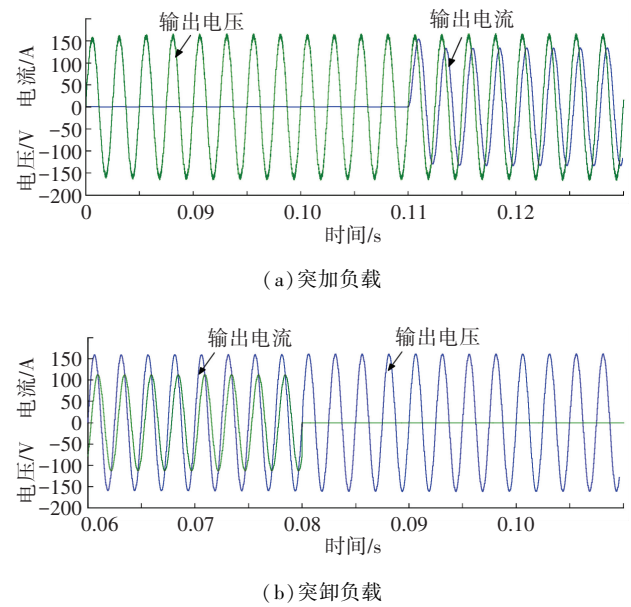


图 11 阻感性负载时输出电压电流波形

Fig.11 Output voltage and current waveforms with resistance-inductance load

4.3 双环准 PR 控制器实验验证

负载接 50%负载 (10 kW) 纯阻性负载时和负载中串入电感 0.4 mH, 实验结果分别如图 12、13 所示。负载接满载负载 (20 kW) 纯阻性负载时和负载中串入电感 0.4 mH, 实验结果分别如图 14、15 所示。

为了验证准 PR 控制器在频率偏移时的性能, 当给定参考波频率为 200 Hz 时, 输出电压产生了谐振, 输出波形如图 16 所示。

4.4 单环鲁棒控制器实验验证

与双环准 PR 控制器采用相同的实验条件, 50%负载和满载时实验结果分别如图 17 ~ 20 所示。

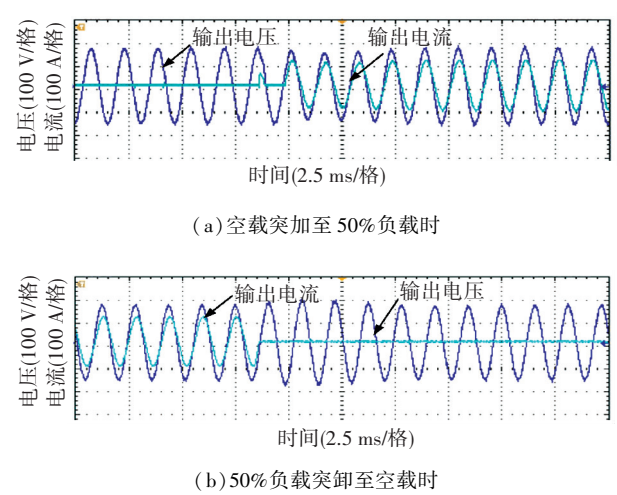


图 12 阻性负载时电压电流实验波形

Fig.12 Experimental waveforms with with resistive load

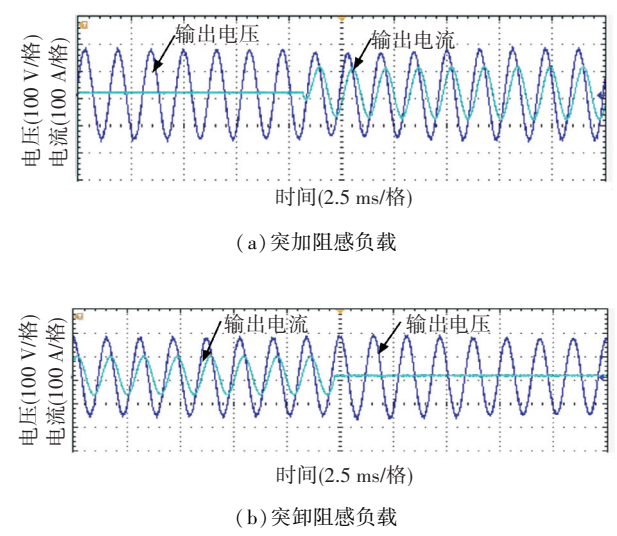


图 13 阻感负载时输出电压电流实验波形

Fig.13 Output voltage and current experimental waveforms with resistance-inductance load

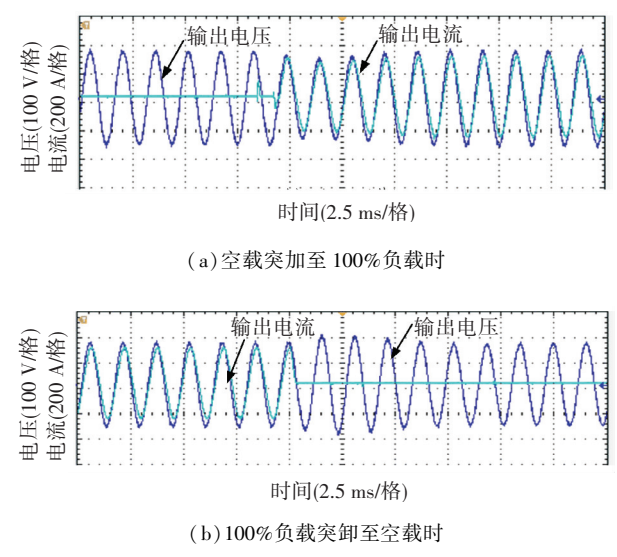
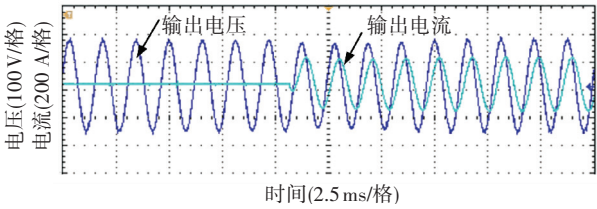
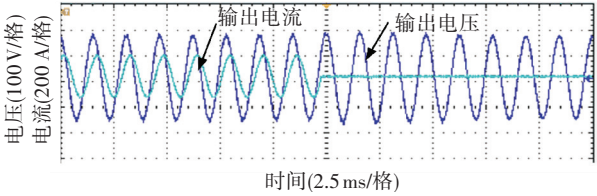


图 14 阻性负载时电压电流实验波形

Fig.14 Experimental waveforms with with resistive load



(a) 突加阻感负载



(b) 突卸阻感负载

图 15 阻感负载时输出电压电流波形图

Fig.15 Output voltage and current experimental waveforms with resistance-inductance load

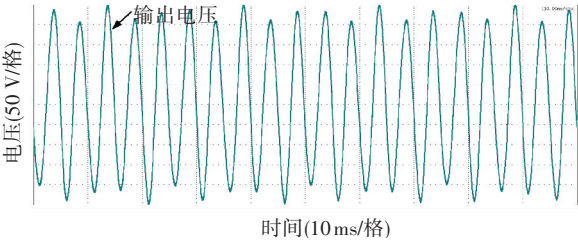
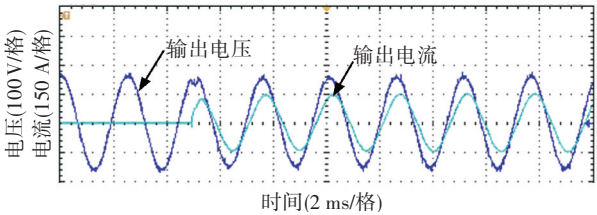
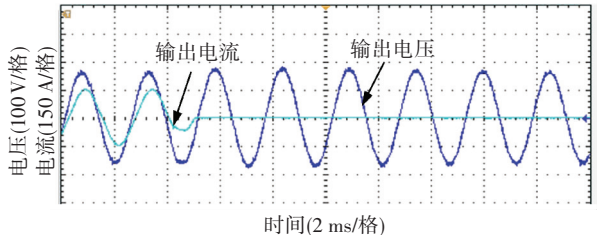


图 16 参考波频率为 200 Hz 时输出电压波形

Fig. 16 Output voltage experimental waveforms of 200 Hz reference signal



(a) 空载突加至 50% 负载时

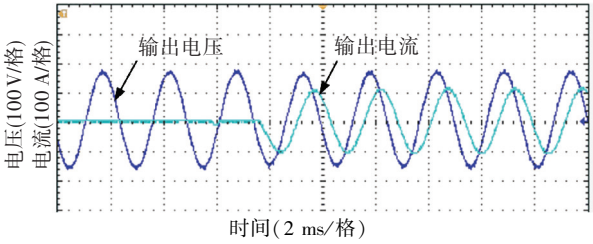


(b) 50% 负载突卸至空载时

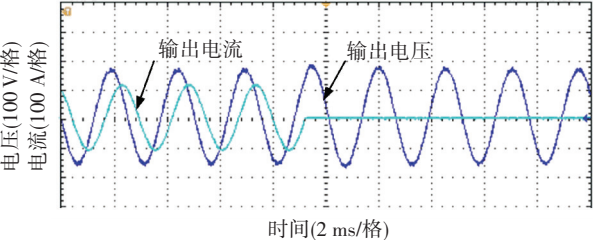
图 17 阻性负载时电压电流实验波形

Fig.17 Experimental waveforms with with resistive load

为了验证所设计的鲁棒控制器对频率的适应性, 改变参考波频率, 当参考波频率为 200 Hz 和 500 Hz 时, 输出电压波形如图 21 所示。



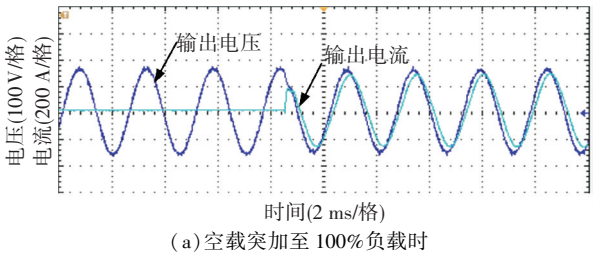
(a) 突加阻感负载



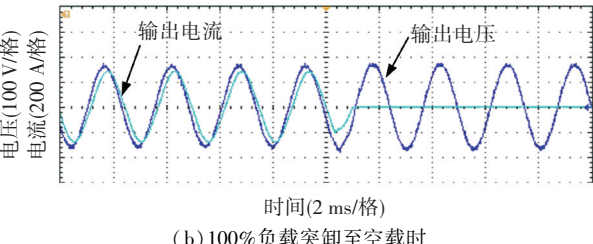
(b) 突卸阻感负载

图 18 阻感负载时输出电压电流波形

Fig.18 Output voltage and current experimental waveforms with resistance-inductance load



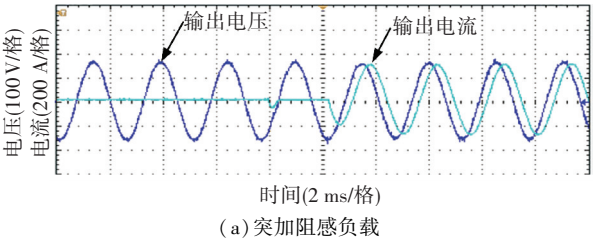
(a) 空载突加至 100% 负载时



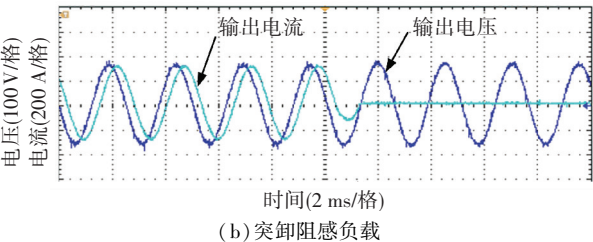
(b) 100% 负载突卸至空载时

图 19 阻性负载时电压电流实验波形

Fig.19 Experimental waveforms with with resistive load



(a) 突加阻感负载



(b) 突卸阻感负载

图 20 阻感负载时输出电压电流波形

Fig.20 Output voltage and current experimental waveforms with resistance-inductance load

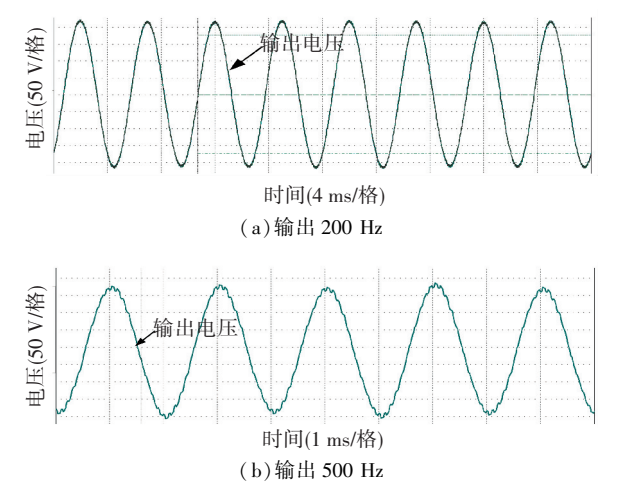


图 21 200、500 Hz 输出电压波形

Fig.21 Output voltage experimental waveforms of 200 Hz and 500 Hz reference signal

从上面结果可以得出采用双环准 PR 控制和单环鲁棒控制的中频电源动态性能,分别见表 1、2.

表 1 双环准 PR 控制时电源输出性能

Tab.1 Output performance with double loop quasi PR control

负载	U_{down}/V	U_{up}/V	THD	恢复时间/ms
10 kW 阻性	15	20	1.0	7.5
10 kVA 阻感	10	10	0.8	7.5
20 kW 阻性	35	30	1.2	10.0
20 kVA 阻感	20	20	0.9	10.0

表 2 单环鲁棒控制时电源输出性能

Tab.2 Output performance with single loop robust control

负载	U_{down}/V	U_{up}/V	THD	恢复时间/ms
10 kW 阻性	0	0	0.9	0
10 kVA 阻感	0	0	0.7	0
20 kW 阻性	10	10	1.0	2.5
20 kVA 阻感	8	8	0.8	2.5

表中 U_{down} 为突加负载电压跌落幅值, U_{up} 为突卸负载电压超调幅值. 从实验结果以及表 1、2 可以看出,两种控制方法输出稳态电压都比较好,均能消除稳态误差,稳态电压波动为 0.1 V,单环鲁棒控制器总谐波 THD 更小,电压波形质量比较高;在突加、突卸负载时,本文所设计的单环鲁棒控制器动态性能更好,突加负载电压跌落和突卸负载电压超调都非常小,表现出更加优良的动态性能. 另外,当参考波频率为 200、500 Hz 时,鲁棒控制器仍能无静差跟踪,采用双环准 PR 控制器时产生了谐振而不能正常工作,说明所设计的控制器鲁棒性也比较好.

5 结 论

1) 所设计的鲁棒控制器仅用一个电压控制环就能达到系统的性能要求,控制结构简单,且跟踪性能及抑制干扰能力较强.

2) 闭环系统静态性能较好,稳态电压在 114.9~

115.1 V 之间,且动态响应速度比双环准 PR 控制器更快,突加突卸 10 kW 负载动态恢复时间接近 0 ms,突加突卸 100% 负载 (20 kW) 动态恢复时间在 2.5 ms 以内.

3) 另外采用鲁棒控制器时输出电压频率可以达到 200~500 Hz,采用双环准 PR 控制时,参考波频率发生变化有可能产生谐振而不能正常工作,说明设计的鲁棒控制器表现出较强的鲁棒性能.

参考文献

[1] 张银锋,聂子玲,朱俊杰. 基于二自由度有功/频率控制的中频逆变器并联系统仿真研究[J]. 电器与能效管理技术, 2015, 13 (1): 42-49 .
ZHANG Yinfeng, NIE Ziling, ZHU Junjie. Research on parallel operation of medium frequency inverter based on two degree of freedom active power/frequency control[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2015, 13 (1): 42-49 .
[2] 陈斌,裴忠才,唐志勇. 液压四足机器人的自适应模糊 PID 控制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48 (9): 140-144.
CHEN Bin, PEI Zhongcai, TANG Zhiyong. Self-tuning fuzzy-PID control for hydraulic quadruped robot [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48 (9): 140-144.
[3] FRANCIS B A, WONHAM W M. The internal model principle in-control theory[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1976, 12 (5): 457-465.
[4] TIMBUS A, LISERRE M, TEODORESCU R. Evaluation of current controllers for distributed power generation systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24 (3): 654-664.
[5] 刁元均,邹滨. 基于复合控制的中频逆变电源研究流控制[J]. 电力自动化设备, 2007, 27 (7): 66-68.
DIAO Yuanjun, ZOU Bin. Hybrid control of medium frequency inverter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27 (7): 66-68.
[6] ZHU Junjie, NIE Ziling, MA Weiming, et al. Dual-loop PR control for collapsed H-bridge single-phase 400 Hz power supply [C] //Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Shanghai: IEEE, 2012: 687-693.
[7] 苏宏业. 鲁棒控制基础理论[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
[8] BABAZADEH M, KARIMI H. μ -synthesis control for an islanded microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 20 (1): 1-6.
[9] 鲍最, 冯勇, 孙黎霞. 非线性不确定系统的鲁棒滑模观测器设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36 (5): 613-616.
BAO Sheng, FENG Yong, SUN Lixia. Robust sliding mode observer design of nonlinear uncertain systems [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2004, 36 (5): 613-616.
[10] 贾庆贤, 张迎春, 李化义, 等. 卫星姿态控制系统鲁棒故障诊断方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43 (3): 19-22.
JIA Qingxian, ZHANG Yingchun, LI Huayi. NUIO/LMI based robust fault diagnosis for satellite attitude control system [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43 (3): 19-22.
[11] YAZDANI A, IRAVANI R. Voltage-sourced converters in power systems [M]. Hoboken: Wiley, 2010.
[12] BACHA S, MUNTEANU I, BRATCU A I. Power electronic converters modeling and control[M]. Berlin: Springer, 2014.
[13] SKOGESTAD S, POSTLETHWAITE I. Multivariable feedback control: analysis and design [M]. Hoboken: Wiley, 2005: 220-240.

(编辑 魏希柱)