

基于 DSC 整流器和双闭环 PR 逆变器的 模块化中频静变电源^{*}

唐剑飞¹, 聂子玲², 许杰², 朱俊杰², 原景鑫²

(1. 中国舰船研究设计中心军事代表室, 湖北 武汉 430064;

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

摘 要: 与传统中频电源相比, 模块化中频静变电源具有选用灵活、可靠性高、冗余性好、便于系统维护等优点。中频静变电源整流器在控制母线电压稳定的同时还要实现单位功率因数控制。为此, 具体分析了双电流环控制策略, 给出了双电流环控制器中电压电流正负序分离原理和双 dq 锁相环的具体实现方法, 即延时信号抵消 (DSC) 和双闭环准比例谐振 (PR)。针对逆变器输出电压基波无差跟踪困难、谐波含量高等问题, 采用双闭环多重准 PR 控制策略, 实现中频电压的稳定输出。仿真和试验结果表明, 双电流环控制器能同时实现母线电压稳定和单位功率因数控制, 采用双闭环多重准 PR 控制策略的中频逆变器能够输出稳定的中频交流电压。

关键词: 中频电源; DSC 锁相环; 多重准 PR 控制器; 模块化

中图分类号: TM 46 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)10-0077-07

Modular Medium-Frequency Static Power Supply Based on DSC Rectifier and Double-Closed-Loop PR Inverter^{*}

TANG Jianfei¹, NIE Ziling², XU Jie², ZHU Junjie², YUAN Jingxin²

(1. Representatives Office in China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China;

2. National Key Laboratory of Science and Technology on Vessel Integrated Power System,
Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Compared with traditional medium-frequency power supply, modular medium-frequency static power supply had the advantages of flexible selection, high reliability, good redundancy and easy system maintenance. The rectifier of medium-frequency static power supply should achieve unit power factor control while controlling bus voltage stability. For this reason, the dual-current-loop control strategy was analyzed concretely. The principle of separating positive and negative sequences of voltage and current in dual-current-loop controller and the concrete realization method of double dq phase locked loop were introduced, i.e., delay signal cancellation (DSC) and quasi proportional resonance (PR). Aiming at the problems of high harmonic content and difficulty in tracking the fundamental wave of the output voltage of the inverter, a multiple quasi PR control strategy was adopted to achieve the stable output of the medium-frequency voltage. The simulation and experimental results showed that the dual-current loop controller could achieve bus voltage stability and unit power factor control simultaneously. The medium-frequency inverter with double closed-loop multiple quasi PR control strategy could output stable medium-frequency AC voltage.

Key words: medium-frequency power supply; DSC phase-locked loop; multiple quasi PR controller; modularization

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目 (51807199, 51977218)

作者简介: 唐剑飞 (1977—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为舰船电气工程。

聂子玲 (1975—), 男, 教授, 研究方向为电力电子与电力传动。

原景鑫 (1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。(通信作者)

0 引言

静止式中频电源具有电能变换效率高、噪声小、可靠性高等优点,能提供高质量的 400 Hz 中频交流电,在大型舰船雷达、航空航天、飞机服务系统等场合应用广泛^[1-3]。随着电力电子技术的发展,中频电源应用场合对供电系统灵活性、可靠性、维护性等要求越来越高。传统静止式中频电源供电系统虽然可提供大功率输出,但灵活性和维护性差。静止式中频电源的模块化、通用化、集成化设计可以提供更加灵活可靠的供电方式。根据系统的额定容量确定模块数量,使供电系统的体积和质量减小,提高整体效能,同时模块化中频电源的维护更加方便,因此静止式模块化中频电源已成为中频电源发展的必然趋势之一。

目前国内外对静止式中频电源进行了深入广泛的研究,静止式中频电源一般采用整流器和逆变器相结合的电路结构^[4-5]。为了使模块化中频电源在输入电压不对称时仍能保证母线电压稳定,同时实现单位输入功率因数控制,整流器一般采用高频整流。文献[6-9]提出一种正负序双电流环控制方案,结合混合同步坐标控制器进行控制,使整流器具有良好的动态性能,同时实现母线电压稳定和输入单位功率因数控制。目前对于中频电源逆变器的研究主要集中在控制策略上,以实现输出电压谐波畸变率低、电能质量高的目标。针对传统 PI 控制对正弦信号跟踪性差、控制带宽小等缺点,文献[10-11]提出双闭环多重比例谐振(PR)控制方法,有效抑制了负载扰动,提高了控制带宽。针对静止式中频电源的谐波特点,总结了输出电压谐波分布规律,有效减小了输出电压谐波畸变率。为了减小负载和电缆参数等不确定因素对输出电压的影响,文献[12]采用基于 PR 控制的串联动态电压恢复器来保证系统的输出质量。文献[13-14]提出基于 H_∞ 混合灵敏度方法的鲁棒控制器,实现了系统良好的动态性能和鲁棒性能,有效减少了电路电缆等不确定因素的影响。

本文提出了一种静止式模块化中频电源。首先,介绍了模块化中频电源的拓扑结构,主要包括高频整流和中频逆变器两大部分;其次,分别对高频整流和中频逆变器的实现方法和控制原理进行

分析,模块化整流器采用延时信号抵消(DSC)的方法实现正负序分离,模块化逆变器采用双闭环准 PR 控制器进行控制;最后,进行了仿真和试验,验证了静止式模块化中频电源的高频整流部分在实现母线电压稳定控制的同时,能有效减小电流谐波畸变率。中频电源逆变器能稳定输出 400 Hz 中频交流电。

1 静止式模块化中频电源拓扑结构

与传统静止式中频电源相比,模块化中频电源的数量具有配置灵活、方便维护、便于拆卸等优点。根据系统输出容量确定模块化单元的数量,减小了供电系统的体积和质量,提高了系统的功率密度。模块化中频电源有效提高了供电系统的可靠性。由于各个供电模块之间相互独立,当一个模块化单元出现故障时,不会影响其他模块正常工作,可直接替换故障模块,在短期内恢复中频供电系统的正常供电,具有良好的可维护性。另外,由于采用模块化设计,系统具有良好的冗余性,在一些重要的供电场合,采用冗余模块化设计能保证供电系统的可靠性。

图 1 所示为模块化中频电源系统结构框图。模块化中频电源系统输入为 380 V/50 Hz 三相交流电,输出为三相四线制的 115 V/400 Hz 中频交流电。从图 1 可以看到,每个中频模块单元完全相同,模块单元的电路相互独立,每一个单元均可独立完成 380 V/50 Hz 到 115 V/400 Hz 的电能变换功能。通过汇流端口输出三相四线制的中频交流电,各模块之间通过通信模块传输友机状态信息,便于系统的冗余设计和容量扩展,有效提高了供电系统的可靠性和灵活性。

图 2 所示为中频电源模块单元的电路结构

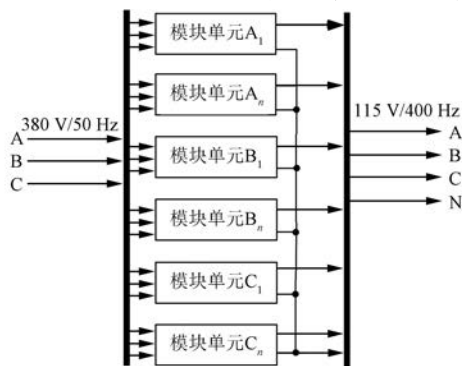


图 1 模块化中频电源系统结构图

图。与传统中频电源类似,中频电源模块单元采用三相全桥整流和单相 H 桥逆变器的电路结构,380 V/50 Hz 三相交流输入经过高频整流,得到稳定的直流母线电压,再经过单相 H 桥逆变器,输出 115 V/400 Hz 中频交流电压。

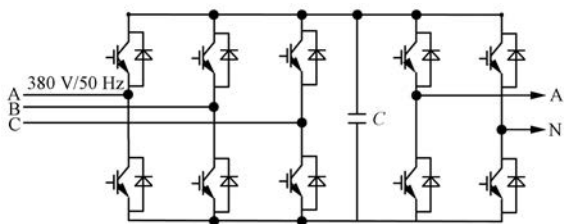


图 2 中频电源模块单元电路结构图

2 模块化中频电源工作原理

中频电源的模块单元主要由整流器和逆变器两部分组成。为了适应三相输入不平衡工况,同时实现单位功率因数控制及母线电压稳定,三相全桥高频整流采用双电流环控制方法,逆变器采用双闭环多重 PR 控制策略,使系统具有良好的动态性能,在实现正弦波无差跟踪的同时,有效减

少输出电压的低次谐波,较好地改善了输出波形的质量。

2.1 模块化 DSC 整流器

图3所示为正负序 dq 坐标示意图。在正序旋转坐标系中,电压电流正序分量为直流量,而负序分量表现为二倍频分量;在负序旋转坐标系中,负序分量为直流量,正序分量为二倍频分量,如果能消除旋转坐标系中的异序二倍频分量,就能减小直流母线电压波动,消除直流无功分量。因此,高频整流控制策略选用正负序双电流环控制,通过消除异序分量,实现直流母线电压的稳定。

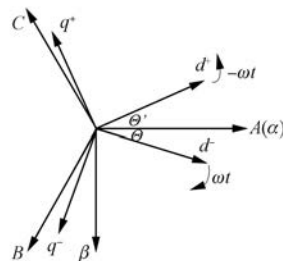


图 3 正负序 dq 坐标示意图

图 4 所示为双电流控制器控制框图^[6-10]。

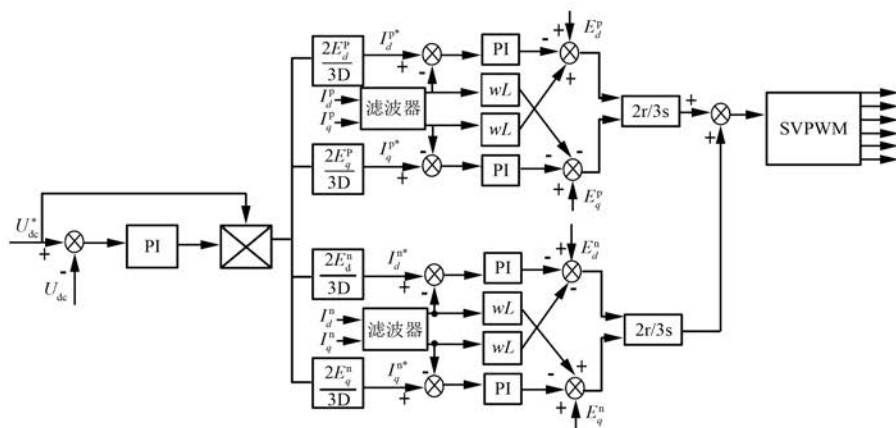


图 4 双电流控制器控制框图

图 4 中, E_d^p 表示电网电压 d 轴正序分量, E_d^n 表示 d 轴负序分量, E_q^p 表示电网电压 q 轴正序分量, E_q^n 表示 q 轴负序分量, U_{dc}^* 为直流电压给定, U_{dc} 为直流母线电压, ω 为正序电流角频率, L 为线路电感, $2r/3s$ 表示 dq 旋转坐标到 abc 静止坐标变换。 D 的表达式为

$$D = [(E_d^p)^2 + (E_a^p)^2] - [(E_d^n)^2 + (E_a^n)^2] \quad (1)$$

双电流环控制器采用直流母线电压外环、双

电流内环的控制结构,直流母线电压有功功率构成正负电流环的参考电流,通过双电流环的 PI 控制和解耦变换,消除直流母线电压中的直流无功分量和二倍频波动,实现母线电压的稳定和输入单位功率因数控制。双电流控制算法中需要对正负序分量进行提取,得到正负序调制电流后还需要进行 Park 变换。因此,要求采用高精度锁相环提供准确的相位信息。

2.1.1 正负序分量的分离

常见正负序分量提取方法有陷波器法和 $T/4$ 延时法。2 种方法均可实现正负序分量的提取,但是分别存在一些特点,文献[16]分析了陷波器法和 $T/4$ 延时法提取正负序分量的优缺点,如表 1 所示。结合双电流环控制器的特点,同时为避免正负序分离对整个系统稳定性的影响,应该采用 $T/4$ 延时法提取正负序分量。

表 1 陷波器法和 $T/4$ 延时法比较^[16]

提取方法	优点	缺点
陷波器法	原理简单,易于实现	不能误差分离,而且会降低系统的稳定性
$T/4$ 延时法	正负序无差分离,而且不会影响系统的稳定性	要求不对称量在延时时间段内的正负序分量组合保持不变

假设任意三相电压 A、B、C 的表达式为

$$\begin{cases} u_a = U_a \cos(\omega t + \varphi_a) \\ u_b = U_b \cos(\omega t + \varphi_b - 120^\circ) \\ u_c = U_c \cos(\omega t + \varphi_c + 120^\circ) \end{cases} \quad (2)$$

式中: U_a 、 U_b 、 U_c ——三相电压峰值;

ω ——三相电压角频率;

φ ——电压相角。

经过 Clarke 变换后在 $\alpha\beta$ 坐标系下的 u_α 和 u_β 可以由正序分量和负序分量表示:

$$\begin{cases} u_\alpha(t) = u_\alpha^p + u_\alpha^n = |U^p| \cos(\omega t + \varphi^p) + |U^n| \cos(-\omega t - \varphi^n) \\ u_\beta(t) = u_\beta^p + u_\beta^n = |U^p| \sin(\omega t + \varphi^p) + |U^n| \sin(-\omega t - \varphi^n) \end{cases} \quad (3)$$

式中: 上标 p——正序分量;

上标 n——负序分量。

将 u_α 、 u_β 分别延时 $T/4$, 得:

$$\begin{cases} u_\alpha\left(t - \frac{T}{4}\right) = |U^p| \cos\left(\omega t + \varphi^p - \frac{\pi}{2}\right) + |U^n| \cos\left(-\omega t - \varphi^n + \frac{\pi}{2}\right) \\ u_\beta\left(t - \frac{T}{4}\right) = |U^p| \sin\left(\omega t + \varphi^p - \frac{\pi}{2}\right) + |U^n| \sin\left(-\omega t - \varphi^n + \frac{\pi}{2}\right) \end{cases} \quad (4)$$

对式(4)进行整理,得:

$$\begin{cases} u_\alpha\left(t - \frac{T}{4}\right) = u_\beta^p - u_\beta^n = |U^p| \sin(\omega t + \varphi^p) - |U^n| \sin(-\omega t - \varphi^n) \\ u_\beta\left(t - \frac{T}{4}\right) = -u_\alpha^p + u_\alpha^n = -|U^p| \cos(\omega t + \varphi^p) + |U^n| \cos(-\omega t - \varphi^n) \end{cases} \quad (5)$$

结合式(3)和式(5),可得正负序分量分别为

$$\begin{cases} u_\alpha^p = \frac{1}{2} \left[u_\alpha(t) - u_\beta\left(t - \frac{\pi}{4}\right) \right] \\ u_\beta^p = \frac{1}{2} \left[u_\alpha\left(t - \frac{\pi}{4}\right) + u_\beta(t) \right] \\ u_\alpha^n = \frac{1}{2} \left[u_\alpha(t) + u_\alpha\left(t - \frac{\pi}{4}\right) \right] \\ u_\beta^n = \frac{1}{2} \left[-u_\alpha\left(t - \frac{\pi}{4}\right) + u_\beta(t) \right] \end{cases} \quad (6)$$

根据式(6),可得 $T/4$ 延时法的算法框图如图 5 所示。

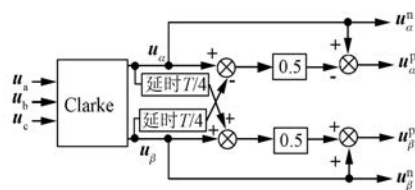


图 5 $T/4$ 延时法的算法框图

2.1.2 双 dq 变换锁相环

文献[15]分析对比了几种典型的锁相环动态性能特点,其中双 dq 变换锁相环具有良好的稳态性能和动态性能,算法简单,计算效率高,适用于双电流环控制器。图 6 所示为应用于双电流控制器中的锁相环原理图。三相电压经过 Park 变换,采用数学的方法消除异序分量,通过 PI 控制器实现锁相功能。

通过分析正负序分量的提取方法和双 dq 锁相环设计完成了双电流环控制器中的关键环节。根据图 4 设计的双电流环控制器能适应三相电压不均的工况,在稳定直流母线电压的同时,能实现单位功率因数控制,减小输入电流谐波。

2.2 模块化双闭环 PR 控制逆变器

逆变器是模块化中频电源的关键部分。中频电源模块单元逆变器输出 115 V/400 Hz 单相交流电,电路结构采用单相 H 桥逆变器。传统 PI

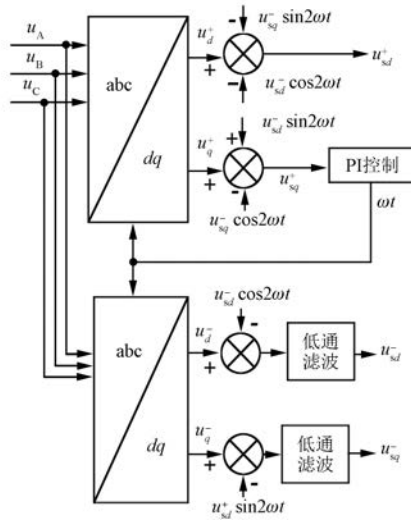


图6 双dq变换原理图

控制有不能实现中频电源基波频率的无静差输出、谐波抑制效果差等问题,而PR控制器是由同步旋转坐标中的PI控制器转换得到,可以直接控制交流量,实现稳态误差的消除,因此中频电源模块单元逆变器选用PR控制器。理想PR控制器传递函数为

$$G_{PR}(s) = K_p + K_i \frac{s}{s^2 + \omega_0^2} \quad (7)$$

其中: K_p 决定系统对阶跃信号的瞬态响应速度; K_i 决定系统对基波正弦信号的响应速度和补偿效果; ω_0 为基波角频率,控制器在 ω_0 附近很窄的频带内具有无限的增益。

实际系统中的基波频率存在波动,理想PR控制器在基波频率波动时,对基波频率的增益很小,导致输出电压的误差变大,响应速度减小,系统的性能下降。因此,实际使用的PR控制器一般采用准PR控制器,引入谐振截止角频率 ω_c ,准PR控制器传递函数为

$$G_{PR}(s) = K_p + K_i \frac{s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (8)$$

截止角频率 ω_c 越小,基波频率的增益越大,频带越窄,对基波频率的选择性越好。当系统的基波频率在截止角频率范围内波动时,准PR控制器可提供较大的增益,使系统的动态性能和稳定性得到改善。准PR控制器虽然在 ω_0 附近很窄的频带内具有良好的调节作用,但是低次谐波的补偿作用仅由 K_p 决定,补偿效果较差。为了实

现对低次谐波的有效补偿,采用多重PR控制器对准PR控制器进行改进。多重PR控制器的传递函数为

$$G_{PR}(s) = K_p + \sum_{n=1,2,3,\dots} \frac{K_{in}s}{s^2 + 2\omega_c s + (n\omega_0)^2} \quad (9)$$

当 $n=1,3,5,7$ 时,多重PR控制器在基波和3、5、7次谐波处的增益由 K_{in} 决定。 K_{in} 越大,在 n 次谐波处的跟踪效果越好,稳态误差越小,能实现基波的无差跟踪和低次谐波的有效抑制。对于更高频次的谐波,可采用LC滤波器进行滤除。

3 仿真及试验

为了验证双电流环控制器控制策略和多重闭环准PR控制器的有效性,对高频整流器和中频电源逆变器的控制效果进行仿真分析。

3.1 仿真验证

锁相环提供的相位信息是双电流控制器进行控制的基础,因此应验证锁相环相位的正确性。为了方便观察双dq变换锁相环输出的相位,将A相归一化后的电压与锁相环输出放在同一个坐标系下,仿真结果如图7所示。从图7可以看出,经过1个基波周期,双dq变换锁相环就能实现相位锁定,为双电流控制器提供稳定的相位信息。可见双dq变换锁相环具有较好的动态和稳态性能。

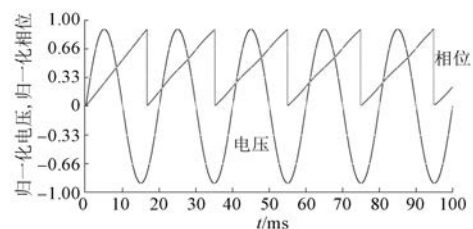


图7 双dq变换锁相环输出的相位

图8所示为电网输入电压和电流波形。从图8可以得出,经过0.13s,电网电流基本稳定,并且电压电流相位完全相同,实现了单位功率因数控制。双电流控制器中含有的双dq锁相环相位锁定需要1个基波周期才能提供稳定的相位信息,经过6个基波周期完成动态调节,经过双电流环控制器中的电压外环、电流内环结构中的5个PI控制器才能最终达到稳态无差。

图9所示为直流母线电压的调节过程。经过

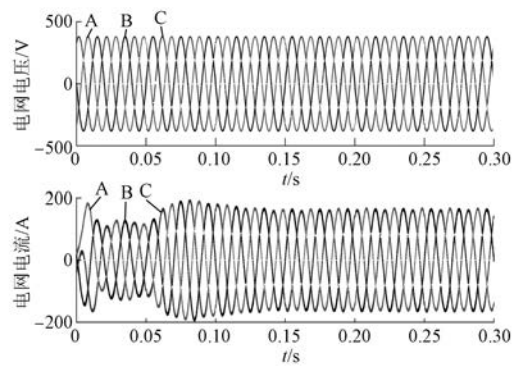


图 8 电网输入电压和电流波形

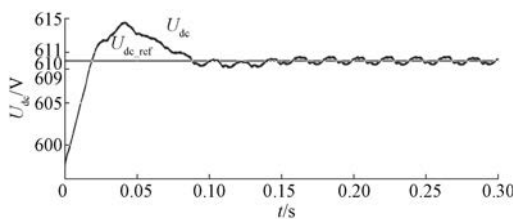


图 9 直流母线电压调节过程

0.1 s 的动态调节过程,直流母线电压达到稳定状态,稳态误差在 1.7 V 以内,动静态性能较好。

仿真结果表明:双 dq 变换锁相环能快速锁定相位,为双电流环控制器提供稳定准确的相位信息,实现母线电压稳定控制,并且能同时实现单位功率因数控制。

图 10 所示为采用多重双闭环准 PR 控制器的 3 台模块化单相逆变器输出电压波形。可以看出,采用多重双闭环准 PR 控制的逆变器能输出稳定的 115 V/400 Hz 中频交流电。

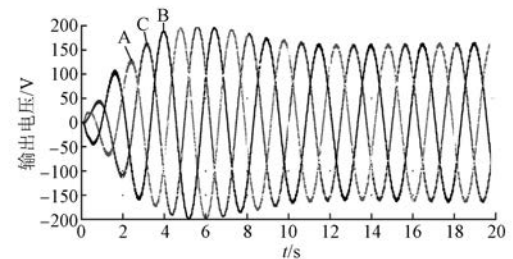


图 10 3 台模块化中频电源逆变器输出电压

仿真结果表明:双电流环控制器能同时实现母线电压稳定和单位功率因数控制,中频电源逆变器能输出稳定的 400 Hz 交流电压。

3.2 试验结果

为了进一步验证仿真结果的准确性,在

10 kW 模块化单元样机上进行试验。

图 11 所示为 DSP 控制器观察窗口测得的双 dq 锁相环输出相位。可以看到,锁相环的相位与计数器得到的波形相位完全相同,说明双 dq 锁相环可以实现相位的准确锁定,与仿真结果一致。

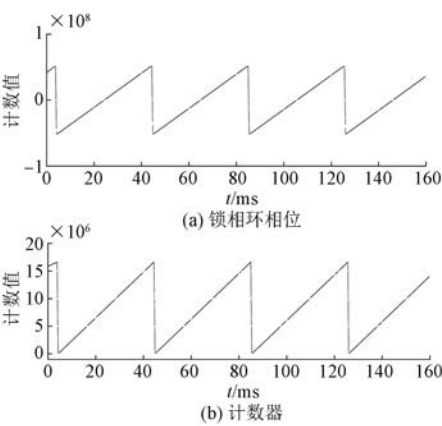


图 11 双 dq 变换锁相环输出相位

图 12 所示为采用双电流环控制器控制高频整流时的电流谐波含量,电流 THD 为 2.7%,最高次谐波为 2、3 次谐波,谐波含量分别为 1.26% 和 0.93%,说明双电流环控制器有较好的电流谐波抑制作用。

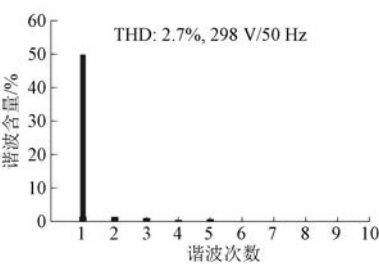


图 12 谐波分析仪测得的电流谐波含量

图 13 所示为采用多重双闭环 PR 控制器时的逆变器输出电压波形。试验结果表明中频逆变

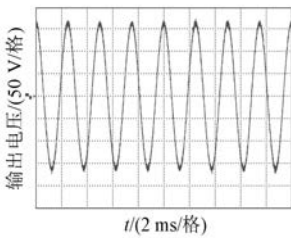


图 13 模块化中频电源逆变器输出电压

器可以输出稳定的 400 Hz 交流电。

4 结 语

本文通过对静止式模块化中频电源系统结构特点和模块化单元的分析,得出以下主要结论:

(1) 静止式模块化中频电源具有较高的灵活性、可靠性和冗余性,符合中频供电系统的发展趋势。模块单元采用插拔技术,根据供电系统的容量要求确定模块单元的数量,使用方便灵活。同时,模块化单元还具有良好的冗余特性、可维护性、扩展性,能满足供电系统的要求。

(2) 高频整流器采用正负序双电流环控制策略,对双电流环控制器的结构和实现方法进行了详细分析,介绍了正负序分量分离原理及双 dq 锁相环的实现方法。模块化逆变器采用双闭环多重 PR 控制器,较好地实现了基波的无差跟踪和低次谐波的抑制。采用双闭环多重 PR 控制器的中频电源逆变器能输出稳定的 400 Hz 交流电。

【参 考 文 献】

- [1] 朱俊杰,马伟明,聂子玲.基于下垂特性的开关信号及接收相位双同步组网控制[J].高电压技术,2016,42(1): 303.
- [2] 孙兴法,聂子玲,朱俊杰,等.交直流共用主电路及其控制方法在双输出航空静变电源中的应用[J].电机与控制应用,2017,44(12): 6.
- [3] 吴延好,聂子玲,朱俊杰.具有谐波补偿功能的中频 PWM 整流器研究[J].海军工程大学学报,2019,31(2): 67.
- [4] 赵娜.三相 400 Hz 逆变电源的研究[D].西安:西安电子科技大学,2017.
- [5] 张靖韵.中频电源的电能质量及滤波优化措施分析[C]//电网节能与电能质量技术论文集,2018: 106.
- [6] SONG H S, NAM K. Dual current control scheme for PWM converter under unbalanced input voltage conditions [J]. IEEE Transactions on Industrial

Electronics, 1999, 46(5): 953.

- [7] TAO W, GU Z, WANG L, et al. Research on control strategy of grid-connected inverter under unbalanced voltage conditions [C] // 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia), 2016.
- [8] SUH Y, LIPO T A. Control scheme in hybrid synchronous stationary frame for PWM AC/DC converter under generalized unbalanced operating conditions [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 42(3): 825.
- [9] 李坤奇,张斌,许伟奇,等.基于不平衡电网条件下的整流器预测直接功率控制[J].现代电子技术,2018,41(11): 82.
- [10] ZHU J, MA W, NIE Z, et al. Harmonic analysis and sectional suppression of 400 Hz solid-state power supply [C] // IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2013.
- [11] ZHU J, NIE Z, MA W, et al. Comparison between DB control and dual-loop PR control for collapsed H-bridge single-phase 400 Hz power supply [C] // 2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2012.
- [12] NIE Z, LI H, ZHU J, et al. Medium frequency power supply system based on dynamic voltage restorer [C] // 2016 IEEE International Conference on Aircraft Utility Systems (AUS), 2016.
- [13] 韩晨.400 Hz 航空电源的设计与研究[D].上海:上海工程技术大学,2016.
- [14] 冯德玉,张银锋,韩博,等.有源阻尼鲁棒控制方法在中频电源中的应用[J].空军预警学院学报,2017,31(6): 446.
- [15] 原景鑫,朱俊杰,聂子玲,等.双绕组感应发电机静止励磁调节器的锁相环研究[J].电机与控制应用,2018,45(12): 74.
- [16] 严广.电网不平衡情况下 PWM 整流器控制策略研究[D].徐州:中国矿业大学,2017.

收稿日期: 2019-06-28

【主要栏目】

- | | | |
|--------------|-----------|-------------|
| • 控制与应用技术 | • 研究与设计 | • 故障诊断与保护 |
| • 新能源发电与局域电网 | • 新能源汽车技术 | • 发电机组及其控制 |
| • 测试技术与测控系统 | • 材料与工艺 | • 电机生产及质量管理 |
| • 电力电子变流器技术 | • 智能制造 | • 节能应用 |