DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.4.111 **中图分类号**：TM46 **文献标志码**：A

一种新型交流侧调频输出的 AC-DC 双向变换器研究

刘晓东[1](中国电源学会高级会员)，张君扬[1]，李 宁[1]，
刘宿城[1](中国电源学会会员)，孙海涛[2]
(1.安徽工业大学电力电子与运动控制重点实验室，马鞍山 243032；2.国网抚顺供电公司，
抚顺 113008)

摘要：针对传统多级式 AC-DC 双向变换器功率密度较低、应用场景单一的问题，提出 1 种新型交流可调频输出 AC-DC 双向变换器。采用矩阵式变频电路代替全桥电路，结合整流与逆变 2 种工作模式控制方法，实现变换器无需直流环节的单级式交−交变频功能，使得变换器在满足车网互动 V2G(vehicle-to-grid)能源交互策略的基础上新增新能源电动车的能量灵活外放功能。控制层面，当变换器工作在逆变模式时，采用比例谐振控制以获得较低的总谐波失真及频率可调特性，进而覆盖更多交流侧用电器需求；当变换器工作在整流模式时，基于连续导通模式 CCM(continuous conduction mode)的平均电流控制可保证交流侧高功率因数值与直流侧稳压输出。最后，搭建 MATLAB/Simulink 仿真模型与硬件实验平台进行验证，结果证明了所提拓扑的正确性及有效性。

关键词：AC-DC 双向变换器；比例谐振控制；车网互动；频率可调

Research on Novel AC-DC Bidirectional Converter with Adjustable Frequency Output on AC Side

LIU Xiaodong[1], *Senior Member*, *CPSS*, ZHANG Junyang[1], LI Ning[1],
LIU Sucheng[1], *Member*, *CPSS*, SUN Haitao[2]
(1. Key Laboratory of Power Electronics and Motion Control, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China;
2. State Grid Fushun Power Supply Company, Fushun 113008, China)

Abstract: To address the problems of lower power density and fewer application scenarios of a traditional multi-stage AC-DC bidirectional converter, a novel AC-DC bidirectional converter with adjustable frequency output on AC side is proposed. A matrix frequency conversion circuit is used instead of a full-bridge circuit, and the two working mode control methods of rectification and inversion are combined to realize a single-stage AC-AC frequency conversion function of the converter without DC links, so that the converter can add a flexible energy outgoing function of new energy electric vehicles on the basis of satisfying the vehicle-to-grid energy interaction strategy. At the control level, when the converter works in an inversion mode, proportional resonance control will be used to obtain lower total harmonic distortion and adjustable frequency characteristics, so as to cover more AC-side electrical requirements. When the converter works in a rectification mode, the average current control based on CCM mode can ensure a high value of power factor on the AC side and a stable voltage output on the DC side. Finally, a MATLAB/Simulink simulation model and a hardware experimental platform were built to verify the scheme, and results proved the correctness and effectiveness of the proposed topology.

Keywords: AC-DC bidirectional converter; proportional resonance control; vehicle-to-grid (V2G); adjustable frequency

收稿日期：2023-03-17；**修回日期**：2023-05-11；**录用日期**：2023-08-07；**网络首发日期**：2024-01-09
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52277169)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 52277169

随着车网互动 V2G(vehicle-to-grid)的发展，

AC-DC 双向变换器作为其核心受到了学术界的关注[1-2]。使用最为广泛的 AC-DC 双向变换器拓扑由前级有源功率因数校正 PFC(power factor correction)电路和后级双有源桥电路组成，该拓扑控制简单，易于实现，但由于其两级系统串联，效率较低且两级拓扑之间的直流母线电压需要使用电容量较大的平滑电容进行稳压，使得变换器体积增大，生产成本陡增[3]。因此，为了提高 AC-DC 双向变换器的质量和功率密度，各种单级拓扑及其控制策略成为当前的研究热点。

隔离型 AC-DC 双向矩阵变换器是基于矩阵变换器衍生出的新型拓扑，具有能量双向流动、网侧电流单位功率因数小、体积小、重量轻、功率密度高等一系列优点[4]。因为其采用高频变压器作为输入和输出间的电气隔离，所以具备较强的抗干扰能力与较宽的升降压范围，得到广大科研工作者的关注和青睐[5-7]。

新能源电动汽车在日常使用期间，电池能源使用策略单一，仅考虑了电机驱动与小功率直流输出，而日常使用的电器多为 220 V 交流输入，极大地限制了用户的使用方向。针对此问题提出了一种新型可调频 AC-DC 双向变换器，在满足 V2G 的基础上，可使新能源电车的电池能源具备外放功能，通过变换器的逆变模式为用户提供有效值为 220 V 的交流电。同时，考虑到诸如韩国、巴西等国使用的工频不同于我国，为 60 Hz，在进行逆变时变换器也应具备可调频功能，以满足丰富的场景需求，实现电池储能系统的多功能利用。

1 电路拓扑

文献[8-9]采用的是非隔离全桥 Boost 型 AC-DC 双向变换器，其拓扑结构如图 1 所示，通过控制电路工作在不同的工作模式，实现电能在汽车电池和电网之间的双向传输。该拓扑的优点在于动态响应高、稳定性高、所用器件较少、电路较为简单，但是非隔离结构会导致电路可靠性较低、电压变化范围小等问题。

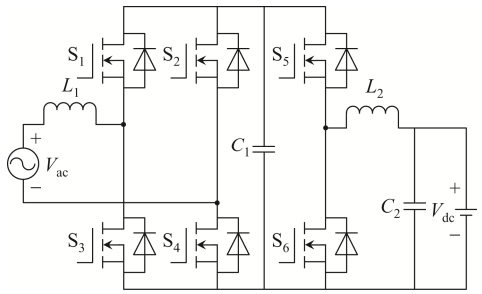


图 1 非隔离全桥 Boost 型 AC-DC 双向变换器

Fig. 1 Non-isolated full-bridge Boost AC-DC bidirectional converter

文献[10-11]所提拓扑是目前应用较为广泛的双级式隔离型 AC-DC 双向变换器，如图 2 所示。前级 PFC 电路实现了功率因数校正与直流电压的输出，再经后级 DC-DC 双有源桥变换器实现对输出侧电压电流的控制。由于该拓扑较易实现且控制相对简单，在工业领域被广泛应用，是目前市场上汽车充电机的主要拓扑之一，但其母线电压仅靠电容稳定，导致输入纹波较大时，变换器的开关管占空比易丢失。

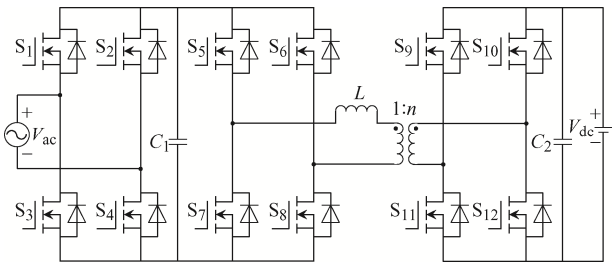


图 2 传统双级式隔离型 AC-DC 双向变换器

Fig. 2 Traditional two-stage isolated AC-DC bidirectional converter

一种新型可调频 AC-DC 双向变换器拓扑如图 3 所示，共由 5 个部分组成，分别为直流侧滤波电路、直流侧全桥电路、高频变压器、交流侧矩阵变频电路、交流侧滤波与储能电路。直流侧滤波电路在 2 种工作模式中主要起到滤波储能的作用；MOS 管 S_1~S_4 组成了直流侧全桥电路，为电能的逆变与整流提供了控制手段；高频变压器不仅可以增益电压幅值，提升变换器的电压变化范围，还能为电路提供可靠的电气隔离；交流侧矩阵变频电路由 4 组双向开关单元组成，每个开关单元均能做到电能的双向可控导通，为可调频低总谐波失真 THD (total harmonic distortion)逆变提供了硬件支撑；储能电感 L 与

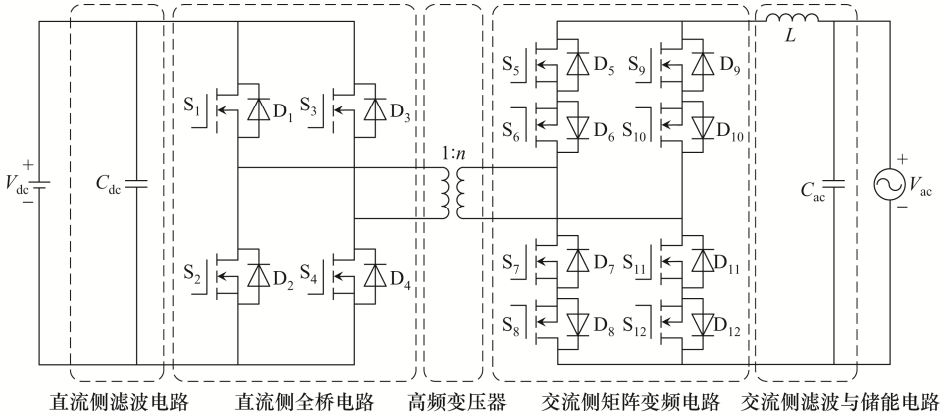


图 3　可调频 AC-DC 双向变换器拓扑

Fig. 3 Topology of AC-DC bidirectional converter with adjustable frequency

滤波电容 C_{ac} 共同组成了交流侧滤波与储能电路，在 2 种工作模式中起到了能量传递与滤波的功能。

2　逆变及整流模式下的控制方式

2.1　逆变模式控制设计

当变换器工作于逆变模式时，新能源电车内的电池能源转换为高质量的正弦交流电压并入电网，或为交流负载提供合适工频的单相电能，故可选择比例积分 PI(proportional integral)控制器作为电压环的误差放大器。PI 控制框图如图 4 所示，图中：$G_F(s)$为 LC 滤波器；$G_{PI}(s)$为 PI 电流控制器，其控制公式为

$$G_{PI}(s)=K_P+\frac{K_I}{s} \tag{1}$$

式中：K_P 为比例增益项；K_I 为积分项。

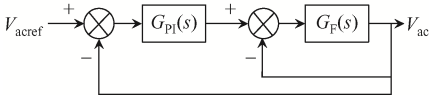


图 4　PI 控制框图

Fig. 4 Block diagram of PI control

由于 PI 控制对超过 50 Hz 的高频信号增益低、跟踪特性差且会把低频噪声放大，因此逆变控制通常采用高增益的比例谐振 PR(proportional resonant)控制策略来实现[12-14]。PR 控制框图如图 5 所示，图中 $G_{PR}(s)$为比例谐振传递函数，其控制公式为

$$G_{PR}(s)=K_P+\frac{2K_I s}{s^2+\omega_0^2} \tag{2}$$

式中，ω_0 为谐振频率。

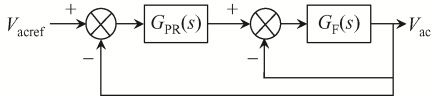


图 5　PR 控制框图

Fig. 5 Block diagram of PR control

虽然理想 PR 控制器在单一交流频率下可以产生无限的增益，但是在实际作用中，由于负荷变化、电网故障等因素，实际电网频率会发生波动。当电网频率偏离 PR 控制器设定的基频时，PR 控制器提供的增益会迅速下降。同时，由于理想的 PR 控制器增益较大，很难进行稳定控制，因此现在普遍使用非理想的 PR 来对电路进行控制[15-16]。非理想 PR 控制器的控制公式为

$$G_{nPR}(s)=K_P+\frac{2K_I\omega_c s}{s^2+2\omega_c s+\omega_0^2} \tag{3}$$

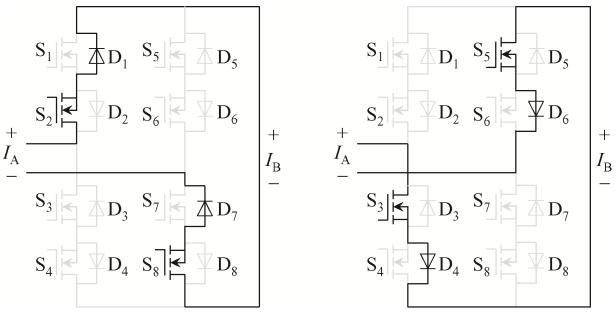
式中：$G_{nPR}(s)$为非理想比例谐振控制传递函数；ω_c 为截止频率。

2.2　逆变模式可调频性分析

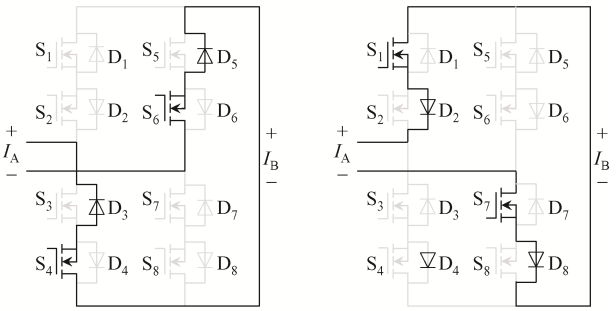
矩阵式变频器的单级可调频工作模态如图 6 所示，共 4 种工作模态，通过调节开关导通组合，可实现单级式交-交变频控制，交流侧输出频率及幅值由控制环路标准值设定，最终服务于多种工作场景。

2.3　逆变模式工作模态设计

通过控制直流侧全桥电路中的 S_1~S_4，将直流源的单电平电压调制成固定频率二电平，传入高频变压器直流侧，经高频变压器将幅值增益后的二电



(a)输入侧为正半周期时工作模态1　(b)输入侧为正半周期时工作模态2



(c)输入侧为负半周期时工作模态1　(d)输入侧为负半周期时工作模态2

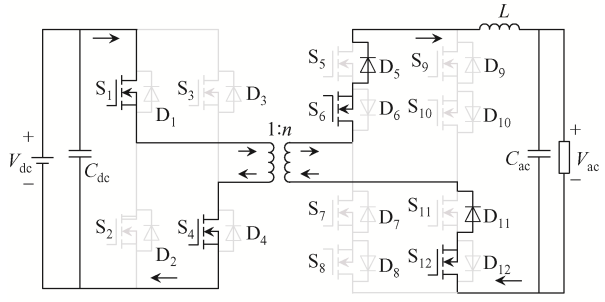
图 6　变换器调频工作模态

Fig. 6 Frequency modulation modes of converter

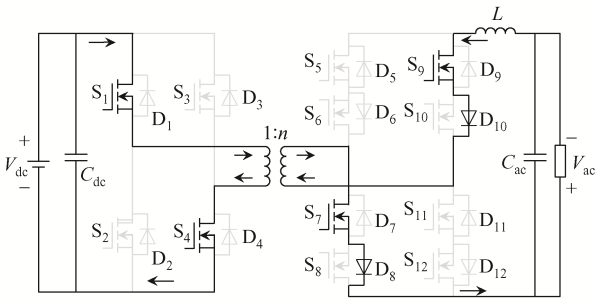
平电压传入交流侧矩阵变频电路，通过改变 PR 控制的输入参考频率与输出的占空比信号，控制矩阵变频电路中的 S_5~S_{12}，以生成合适频率的低 THD 交流电能。

定义变压器交流侧输出上正下负的电压为正向，上负下正的电压为负向；交流侧电感流经电流由左向右为储能状态，由右向左为释能状态。变换器具有 4 种工作模态，如图 7 所示。

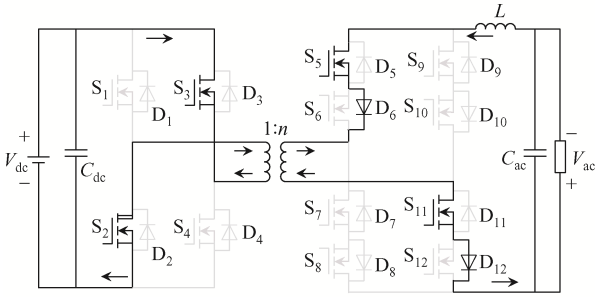
模态 1：直流侧全桥电路中 S_1、S_4 导通，为变压器传入正向电压，此时 PR 控制输出信号为高电平，交流侧电流通路为 S_6、D_5、S_{12}、D_{11}，电感呈储能状态。



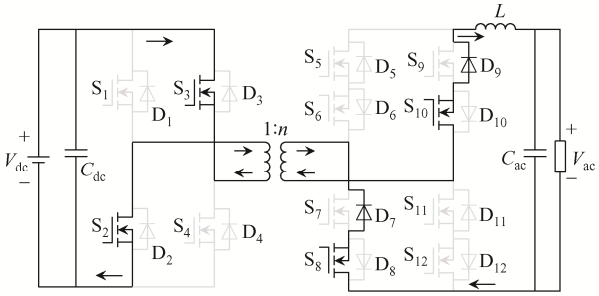
(a)模态1



(b)模态2



(c)模态3



(d)模态4

图 7　逆变模式工作模态

Fig. 7 Operating modes of inversion

模态 2：直流侧全桥电路中 S_1、S_4 导通，为变压器传入正向电压，此时 PR 控制输出信号为低电平，交流侧电流通路为 S_7、D_8、S_9、D_{10}，电感呈释能状态。

模态 3：直流侧全桥电路中 S_2、S_3 导通，为变压器传入负向电压，此时 PR 控制输出信号为低电平，交流侧电流通路为 S_{11}、D_{12}、S_5、D_6，电感呈释能状态。

模态 4：直流侧全桥电路中 S_2、S_3 导通，为变压器传入负向电压，此时 PR 控制输出信号为高电平，交流侧电流通路为 S_{10}、D_9、S_8、D_7，电感呈储能状态。

2.4　整流模式控制设计

当变换器作为电动汽车充电前级时，应满足的

功能为输出直流电压的纹波小于 5%，提高网侧功率因数，使其高于 0.95。

在平均电流控制策略中，含有电流环、电压环 2 个环路，针对这 2 个环路分别设计对应的补偿器。电流环保证交流侧电感电流自动跟随交流侧电压相位，满足预计的功率因数需求[17]；电压环将直流侧输出电压进行稳压处理，保证电路输出约 48 V 的电压。平均电流控制法系统框图如图 8 所示。图中：A_i 为电流环补偿器；A_v 为电压环补偿器；F_m 为 PWM 增益；k_z 为增益系数；G_{iv} 为电压环传递函数；G_{id} 为电流环主电路传函；R_s 为电流采样系数；k_{fb} 为输出电压采样系数。

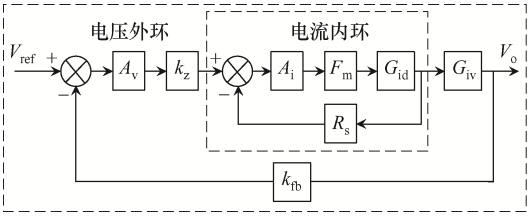


图 8　平均电流控制法系统框图

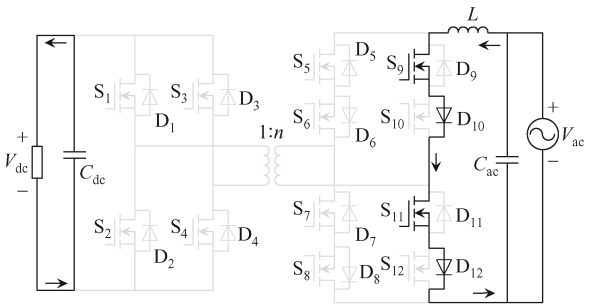
Fig. 8 Block diagram of system using average current control method

2.5 整流模式工作模态设计

当变换器工作在整流模式时，参考图腾柱 PFC 工作状态可表现为电感储能、释能 2 种模式[18]，以网侧电压正半周期为例，变换器电流的导通路径及工作模式如图 9 所示。

模态 5：双向开关桥中 S_9、S_{11} 导通，电流传递路径为 S_9、D_{10}、S_{11}、D_{12}，在此阶段网侧电能向电感充电，为下一模态的电感释能提供储备，直流侧则是电容为负载供能。

模态 6：在电感完成储能后，开关管 S_5、S_{11} 导通，交流侧电流传递路径为 S_5、D_6、S_{11}、D_{12}，变压器直流侧增益后的电流与 MOSFET 体二极管 D_1、D_4 形成回路为负载与电容供能。



(a) 模态5 电感储能模式

(b) 模态6 电感释能模式

图 9　整流模式工作模态

Fig. 9 Operating modes of rectification

3　仿真与实验验证

3.1 仿真验证

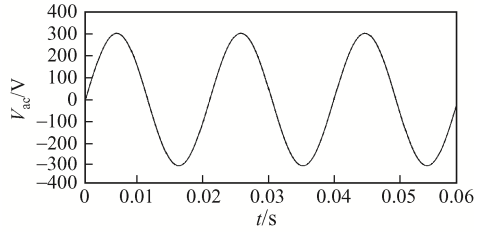
为验证所提控制策略的可行性，在 MATLAB/Simulink 仿真环境中搭建了 AC-DC 双向变换电路仿真模型，主要参数见表 1。值得注意的是，在进行新能源电车电能外放时，需考虑不同国家交流负载的工作频率不同，因此，为验证变换器在不同工频下的稳态性能，实验设置在 50 Hz 与 60 Hz 这 2 种频率下进行。

表 1　双向 AC-DC 变换器实验参数

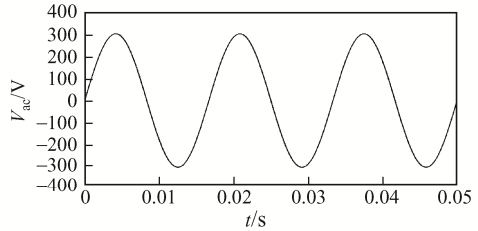
Tab. 1 Experimental parameters of bidirectional AC-DC converter

参数	数值
交流侧电压 V_{acrms}/V	220
直流侧电压 V_{dc}/V	48
交流侧电感 L/mH	5.5
交流侧电容 C_{ac}/μF	5
直流侧电容 C_{dc}/mF	15
开关频率 f_s/kHz	20

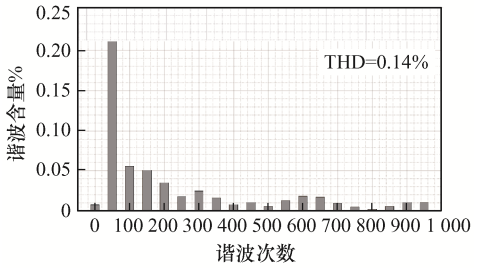
搭建好仿真模型后，对变换器工作在 50 Hz 与 60 Hz 的逆变模式进行仿真验证，采集交流侧负载的波形输入 MATLAB/Simulink 软件自带的快速傅里叶变换 FFT(fast Fourier transform)模块中进行电压畸变率分析，仿真结果如图 10 所示，可见，变换器运行在 50 Hz 与 60 Hz 时 THD 均低于 0.2%。



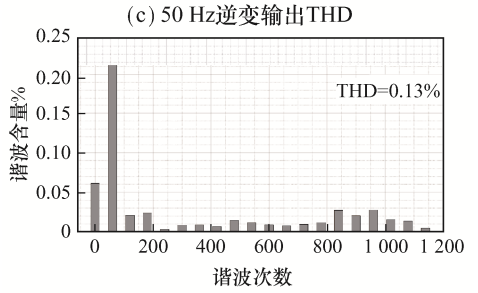
(a) 50 Hz逆变输出电压



(b) 60 Hz逆变输出电压



(c) 50 Hz逆变输出THD

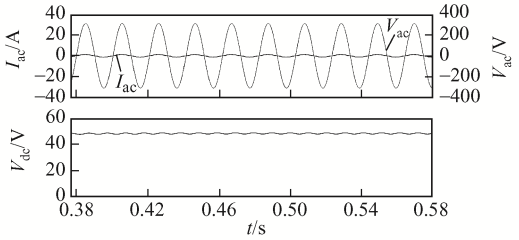


(d) 60 Hz逆变输出THD

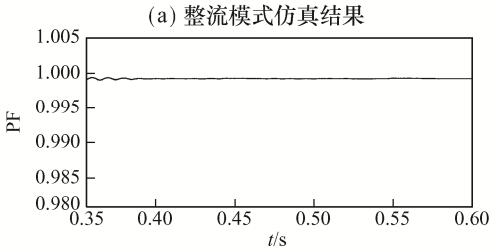
图 10 逆变模式仿真波形

Fig. 10 Simulation waveforms in inversion mode

对交流侧电感L的电流i_L与直流侧负载电压V_{dc}进行闭环控制，可以得到网侧输入V_{ac}、I_{ac}及直流侧输出电压V_{dc}，如图 11(a)所示。采集仿真模型中交流侧电压、电流数据并输入 PF 检测模块进行分析，当变换器工作在整流模式时，其 PF 值恒高于 0.99，有功功率占比较高，模块分析结果如图 11(b)所示。



(a) 整流模式仿真结果



(b) 交流侧PF值分析

图 11 整流模式仿真波形

Fig. 11 Simulation waveforms in rectification mode

3.2 实验验证

根据表 1 的参数搭建硬件实验平台，如图 12 所示，共有 5 部分组成：Chroma 可编程电源负责能源的提供，可根据实验需要在保证功率固定的前提下分别为逆变模式与整流模式提供 48 V 直流电压与任意工频的交流电压；AC-DC 双向变换器通过控制内部开关管的导通与关断对输出电能进行调制；DSPACE 数字控制器采集变换器中的模拟信

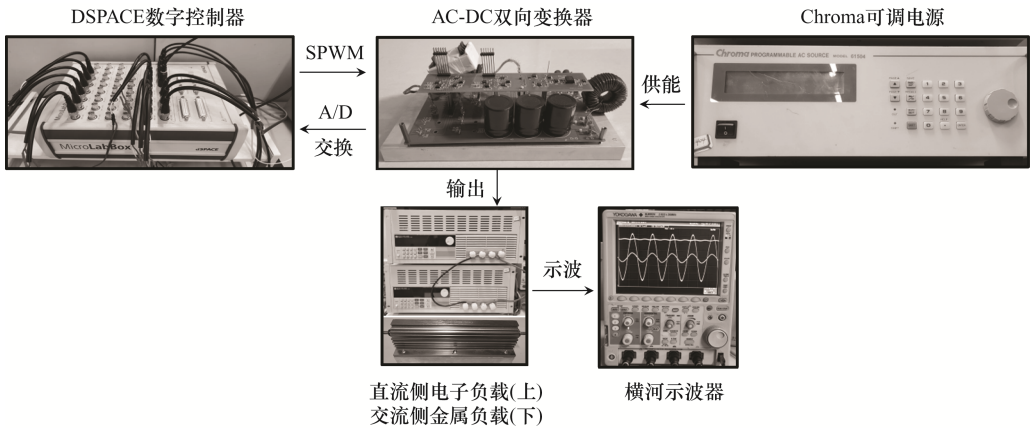


图 12 硬件实验平台

Fig. 12 Hardware experimental platform

号传入闭环控制系统进行补偿调整，输出占空比信号经由驱动芯片控制高频开关；负载侧根据不同实验模式分别选取电子负载与金属负载。

为验证 AC-DC 双向变换器在逆变模式下不同频率时的稳定性，对交流侧负载的输出电压幅值与谐波组成部分进行测量分析，实验结果如图 13 所示。图 13(a)和(b)分别为变换器工作在 50 Hz 和 60 Hz 工频逆变模式下的输出电压与电流波形。

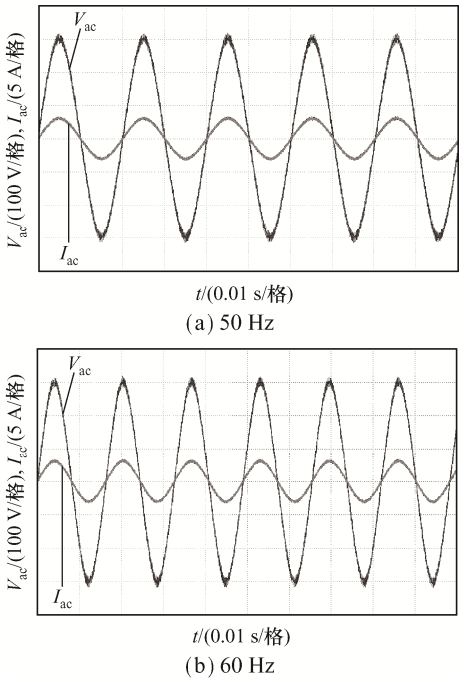


图 13　逆变模式输出波形

Fig. 13 Output waveforms in inversion mode

2 种频率下变换器输出的电压与电流波形均稳定，采集波形数据导入 MATLAB/Simulink 中的 FFT 分析模块，设置对应的基频与最大至基频 20 倍为检测范围，分析结果如图 14 所示。图 14(a)和(b)分别为变换器工作在 50 Hz 和 60 Hz 工频逆变模式下的 THD 分析，可见，最终的 THD 分析结果均小于 2.5%，证明该变换器拓扑设计合理，变换器在逆变模式工作稳态时电能质量较高。

通过设计工作在 50 Hz 工频下的负载功率跳变来测试变换器的动态调整能力，以保证变换器为交流器件供能时的电压稳定性，实验结果如图 15 所示。可见，变换器工作在 50 Hz 逆变模式时，从满载跳变至半载时，负载侧的输出电压与电流均可快速恢复至稳定，验证了所设计的闭环控制方案的正确性及变换器的可靠性。

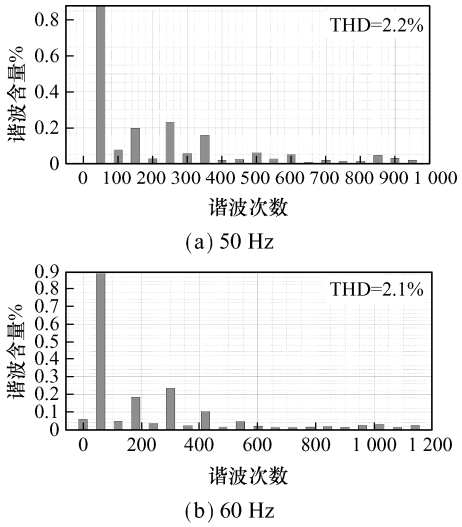


图 14　THD 分析

Fig. 14 Analysis of THD

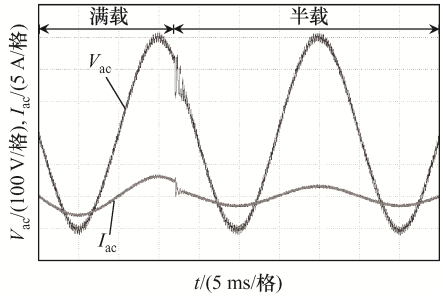


图 15　逆变模式负载功率跳变

Fig. 15 Changes in load power in inversion mode

变换器工作在整流模式时，需要在保证交流侧有源功率因数的前提下为直流侧负载提供符合国家规范的稳定直流电压，图 16 为变换器工作在整流模式时交流侧电压、电流相位及直流侧负载电压

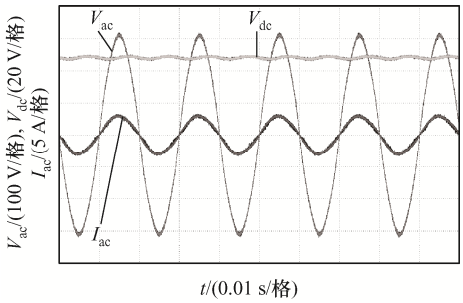


图 16　整流模式下交流侧电压、电流及直流侧电压波形

Fig. 16 Waveforms of AC-side voltage and current and DC-side voltage in rectification mode

波形。可见，当变换器工作在整流模式时，直流侧电压 V_{dc} 基本保持在 48 V，纹波小于 5%，交流侧 V_{ac} 与 I_{ac} 相位相同，PF 值高于 0.98，与理论分析一致，符合设计标准，验证了该工作模式下变换器运行的可靠性。

4 结论

本文采用的新型可调频 AC-DC 双向变换器由直流侧全桥拓扑、高频隔离变压器及交流侧矩阵变频电路组成，具有交流侧输出频率可调的特点。硬件上变频输出 AC-AC 环节采用矩阵变频电路，无需直流支撑环节的电解电容，提高了变换器工作寿命及功率密度；控制层面采用 PR 控制与平均电流控制法，可得到较低的 THD 与较高的 PF 值。通过仿真与实验验证可得到以下结论。

(1)变换器工作在逆变模式时：设置其交流侧输出频率分别为 50 Hz 与 60 Hz，THD 均低于 2.5%，电能质量较高；负载功率由满载切换至半载，输出波形恢复快，动态调整能力强。

(2)变换器工作在整流模式时：输出直流电压稳定，交流侧 PF 值较高，满足实验指标。

参考文献：

[1] Verma A K, Singh B, Shahani D T. Grid to vehicle and vehicle to grid energy transfer using single-phase bidirectional AC-DC converter and bidirectional DC-DC converter [C]// 2011 International Conference on Energy, Automation and Signal. Bhubaneswar, India, 2011: 1-5.

[2] 荆磊, 张俊峰, 邱茂航, 等. 基于 V2G 的双向 AC/DC 变换器控制技术及电流畸变问题的研究[J]. 电源学报, 2018, 16(2): 45-50.
Jing Lei, Zhang Junfeng, Qiu Maohang, et al. Research on control technology and current distortion of bidirectional AC/DC converter based on V2G [J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(2): 45-50. (in Chinese)

[3] Morrison R, Egan M G. A new power-factor-corrected single-transformer UPS design [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2000, 36(1): 171-179.

[4] Wheeler P W, Rodriguez J, Clare J C, et al. Matrix converters: A technology review [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49(2): 276-288.

[5] 鲁紫荆, 李珊瑚, 操孙鹏, 等. 一种大幅度减小间接矩阵变换器高频共模电压的调制策略[J]. 电工技术学报, 2023, 38(16): 4366-4375.
Lu Zijing, Li Shanhu, Cao Sunpeng, et al. A modulation strategy for simultaneously reducing high-frequency common-mode voltage of indirect matrix converter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(16): 4366-4375. (in Chinese)

[6] 吴胜华, 钟炎平, 赖向东, 等. 高频链矩阵式正弦波变换器控制策略的改进[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 228-233.
Wu Shenghua, Zhong Yanping, Lai Xiangdong, et al. Improvement of control strategy for matrix sinusoidal converter with high frequency link [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 228-233. (in Chinese)

[7] 文锋, 姜久春, 郭慧萍. 基于矩阵变换器的 AC/DC 变换器[J]. 电工技术学报, 2009, 24(3): 128-131.
Wen Feng, Jiang Jiuchun, Guo Huiping. AC/DC converter based on matrix converter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(3): 128-131. (in Chinese)

[8] Kisacikoglu M C, Kesler M, Tolbert L M. Single-phase on-board bidirectional PEV charger for V2G reactive power operation [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 767-775.

[9] Restrepo M, Morris J, Kazerani M, et al. Modeling and testing of a bidirectional smart charger for distribution system EV integration [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(1): 152-162.

[10] Everts J, Krismer F, Van den Keybus J, et al. Charge-based ZVS soft switching analysis of a single-stage dual active bridge AC-DC converter [C]// 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Denver, CO, USA, 2013: 4820-4829.

[11] Everts J, Krismer F, Van den Keybus J, et al. Optimal ZVS modulation of single-phase single-stage bidirectional DAB AC-DC converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(8): 3954-3970.

[12] Yusof N S, Ahmad A Z. Single-Phase grid-connected of

PV inverter using PR current controller [C]// 2017 IEEE Conference on Systems, Process and Control (ICSPC). Meleka, Malaysia, 2017: 117-121.

[13] Wang Helin, Cheng Qiming, Li Ming, et al. The study of single-phase PWM rectifier based on PR control strategy [C]// The 26th Chinese Control and Decision Conference (2014 CCDC). Changsha, China, 2014: 3818-3823.

[14] 摆世彬, 田志浩, 王峰, 等. 基于准 PR 调节器的模块化多电平变流器输电控制方法[J]. 电源学报, 2023, 21(1): 74-80.
Bai Shibin, Tian Zhihao, Wang Feng, et al. Transmission control method for modular multilevel converter based on quasi PR regulator [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(1): 74-80. (in Chinese)

[15] 陈旭, 张卓然, 于立, 等. 基于改进型准比例谐振控制的电励磁双凸极电机电流谐波抑制方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(14): 3836-3848.
Chen Xu, Zhang Zhuoran, Yu Li, et al. Current harmonic suppression method of doubly salient electro-magnetic machine based on improved quasi proportional resonant control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(14): 3836-3848. (in Chinese)

[16] Zuo Jianglin, Xie Xifeng, Luo Yuqiang. Suppression strategy of circulating current in MMC-HVDC based on quasi-PR controller [C]// 2020 IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC). Chongqing, China, 2020: 149-155.

[17] Lu Cheyu, Hsu Y W, Chen H C. Design of current sensorless control for totem-pole boost PFC converter [C]// 2019 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2019 - ECCE Asia). Busan, Korea, 2019: 986-991.

[18] 逄博. 双向开关图腾柱 PFC 变换器的研究与设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
Pang Bo. Research and design of bi-directional switch totem pole PFC converter [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)



刘晓东

作者简介：

刘晓东(1971—　)男，中国电源学会高级会员，通信作者，博士，教授。研究方向：电力电子功率变换技术及非线性控制。E-mail：lxdong168@sina.com。

张君扬(1997—　)，男，硕士研究生。研究方向：电力电子技术。E-mail：lihualing33@gmail.com。

李宁(1997—　)，男，硕士研究生。研究方向：电力电子技术。E-mail：zxc1256380092@gmail.com。

刘宿城(1981—　)，男，中国电源学会会员，博士，教授。研究方向：电力电子系统建模与控制，直流微电网。E-mail：liusucheng@ahut.edu.cn。

孙海涛(1979—　)，男，本科，工程师。研究方向：电力电子功率变换技术及非线性控制。E-mail：shtfool_beau@sina.com。

(责任编辑：耿越)