DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.7.75 **中图分类号**：TM461 **文献标志码**：A

单相 PWM 整流器模糊多重 PR 控制策略的研究

周 杰[1]，廖冬初[1,2]，蔡华锋[1,2]，刘浩东[1](中国电源学会会员)，孙得金[3]
(1.湖北工业大学电气与电子工程学院，武汉 430068；2.湖北工业大学太阳能高效利用湖北省协同创新中心，武汉 430068；3.武汉征原电气有限公司，武汉 430012)

摘要：为了降低单相 PWM 整流器输入电流谐波含量，并较好地抑制网侧电流中的特定低频谐波，在比例谐振 PR(proportion resonant)控制基础上研究了模糊多重 PR 控制，以解决多重 PR 控制中参数恒定不变、在控制过程中无法自适应参数变化和系统扰动等不确定因素影响的问题。最后在 MATLAB/Simulink 上进行仿真并通过实验平台验证了该方法的有效性。结果表明，所提控制策略有效减小了网侧电流总畸变率，并在一定程度上提高了系统的动态性和抗干扰性。

关键词：单相 PWM 整流器；模糊控制；多重 PR 控制；电流控制

Research on Fuzzy Multi-PR Control Strategy for Single-phase PWM Rectifier

ZHOU Jie[1], LIAO Dongchu[1,2], CAI Huafeng[1,2], LIU Haodong[1], *Member*, *CPSS*, SUN Dejin[3]
(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 2. Hubei Collaborative Innovation Center for High-efficiency Utilization of Solar Energy, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 3. Wuhan Zhengyuan Electric Co., Ltd., Wuhan 430012, China)

Abstract: To reduce the input current harmonic content of a single-phase PWM rectifier and improve the suppression effect on specific low-frequency harmonics in grid-side current, fuzzy multi-PR control based on PR control is studied, so as to solve the problem of influences due to uncertain factors such as constant parameters under multi-PR control, inability to adapt to variations in parameters in the process of control and system disturbance. Finally, the effectiveness of this method was verified by simulations on MATLAB/Simulink and experiments on an experimental platform. Results show that the proposed control strategy can effectively reduce the total distortion rate of grid-side current, and it can also improve the dynamic and anti-interference performance of the system to a certain extent.

Keywords: Single-phase PWM rectifier; fuzzy control; multi-PR control; current control

近年来，随着能源缺短和环境污染日渐严重，新能源的开发和改善已越来越重要，因此以节能环保、能量回馈为优点的电力电子设备得到了快速发展。据统计，由整流设备引起的谐波污染占整个谐波的 40%左右，是谐波的主要污染源，因此科研工作者对其展开了大量研究。在整流过程中由于传统控制方法存在一些缺陷，导致功率因数低、网侧电流非正弦化运行，大量的谐波电流注入电网中，造成电网的电压波形和电流波形畸变严重，同时会增加电路损耗、浪费电网容量、影响供电质量、严重危害供电设备和用电设备。并且在能量变换过程不能实现能量的回馈利用，这与当前国家倡导的节

收稿日期：2022-09-18；**修回日期**：2022-12-03，2022-12-28；
录用日期：2023-03-02；**网络首发日期**：2023-04-17
基金项目：高效利用及储能运行控制湖北省重点实验室基金项目(HBSKFZD2017008)
This work is supported by Hubei Provincial Key Laboratory for High-efficiency Utilization of Solar Energy and Operation Control of Stored Energy under the grant HBSKFZD2017008

能环保政策相违背[1-2]。现有技术解决电网污染主要有 2 种方法：第 1 种是设计使输入正弦波形谐波含量低、高功率因数的整流电路；第 2 种是在电力系统中添加补偿器，以补偿电网中的谐波和无功功率，如有源滤波、静止无功功率等。第 1 种措施是处理谐波源以防止谐波的出现，这是解决谐波问题最基本的措施；第 2 种措施是产生谐波之后再进行补偿，效果通常不理想[3-4]。

随着电力电子技术与计算机技术的发展，脉冲宽度调制 PWM(pulse width modulation)整流器已经广泛应用于各种工业领域。PWM 整流器在工作时能使整流系统在单位功率因数下运行，并且使电网侧电流按照正弦规律变化，同时也可以让能量双向流动，实现绿色电力变换，具有广泛的应用前景[5-6]。

国内外学者对单相PWM整流器控制策略做了大量研究，主要控制技术有电流滞环控制、模糊控制、多重 PR 控制和重复控制[7-8]。电流滞环控制具有结构简单、鲁棒性强等优点，但存在开关频率不固定、电流误差为滞环宽度 2 倍等缺点；模糊控制器实际上是 1 种非线性控制，和传统的控制器相比，不需要依赖于被控对象的精确数学模型，具有自适应自学习的能力，鲁棒性强，干扰和参数变化对控制效果的影响被大大减弱，文献[9]将模糊控制与滑模变结构相结合应用到 PWM 整流器的控制中，有效改善了系统的动态性能和输入电流波形；多重 PR 控制在谐振频率处的增益趋向于无穷大，可以对交流控制量实现无误差跟踪并且对特定的低次谐波有较好的抑制作用，但因其具有固定参数，对系统非线性变化有一定的局限性，文献[10]提出 1 种基于偏差解耦扰动观测器的多重 PR 控制方案，采用多重 PR 取代了传统 PI 作为电流内环控制器，依靠其在特定次频率高阻抗的特性，准确跟踪不规则谐波电流，提高了控制精度；重复控制较为复杂，需要系统较为精确的模型才能达到较好的控制效果。

针对以上问题，本文将模糊控制器与多重 PR 控制相结合作为电流内环控制器，当系统受到外界干扰、参数变化、模型不确定等因素时，多重 PR 控制器能够根据模糊控制器的输出值进行参数的及时调整，与传统的多重 PR 控制器相比，本文提出的控制策略有效解决了在控制过程中参数恒定不变的缺点，加快了系统的响应速度，同时提高了系统的稳态性。最后通过仿真分析和实验验证，证实了该新型复合控制策略的可行性与正确性。

1 单相 PWM 整流器拓扑结构

单相 PWM 整流器的拓扑结构如图 1 所示。图中：u_s、i_s 为网侧输入电压和网侧输入电流；u_{dc} 和 i_{dc} 为直流侧电压和电流；L_s 为交流侧滤波电感；R_s 为线路的等效电阻；u_{ab} 为整流器交流侧桥臂输入端电压；C 为直流侧稳压电容；R_L 为负载电阻；S_1~S_4 为全控型器件 IGBT。根据基尔霍夫电压电流定律可得

$$\begin{cases} u_s = R_s i_s + L_s \dfrac{\mathrm{d}i_s}{\mathrm{d}t} + u_{ab} \\ i_{dc} = C\dfrac{\mathrm{d}u_{dc}}{\mathrm{d}t} + \dfrac{u_{dc}}{R_L} \end{cases} \tag{1}$$

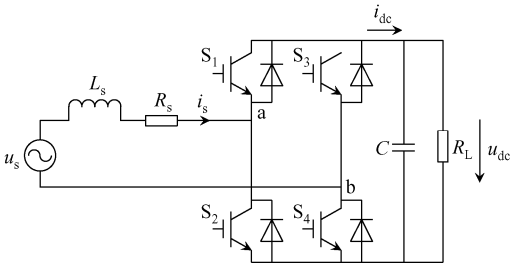


图 1 单相 PWM 整流器

Fig. 1 Single-phase PWM rectifier

2 多重 PR 控制器

PR 控制器是基于内模原理的控制器，通过使给定信号的极点在谐振频率处获得较大的增益，实现在该频率处对参考信号的无静差跟踪[11-12]。PR 控制传递函数为

$$G(s)=K_p+\frac{2K_r s}{s^2+\omega_0^2} \tag{2}$$

式中：K_p 为比例系数；K_r 为谐振增益系数；ω_0 为谐振频率。

但在实际应用中，理想 PR 控制器的增益在谐振频率附近急剧下降，不利于系统的稳定。为了提高 PR 控制器的稳定性和跟踪性，通常使用准 PR 控制器，其传递函数为

$$G_{PR}(s)=K_p+\frac{2K_r\omega_c S}{S^2+2\omega_c S+\omega_0^2} \tag{3}$$

式中，ω_c 为谐振宽带频率。由式(3)可知，影响准 PR 控制器性能的主要参数有 K_p、K_r 和 ω_c，其中 K_p 影响系统增益和稳态性能、K_r 能够减小稳态误差、ω_c 对谐振增益和带宽有一定的影响。取 $K_p=50$，$K_r=100$，$\omega_c=5$，$\omega_0=2\times\pi\times50$。准 PR 的伯德图如图 2 所示。可以看出，准 PR 控制器在谐振频率处有高增益，同时带宽明显增大，有较好的控制效果。

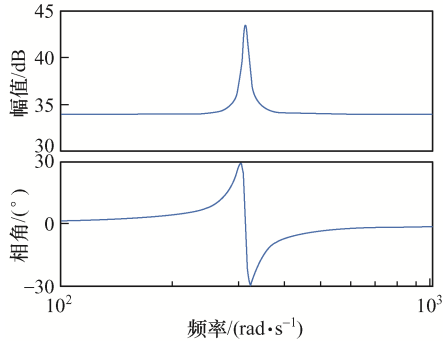


图 2　准 PR 控制器伯德图

Fig. 2 Bode diagram of quasi-PR controller

在单相 PWM 整流系统中，对于基波频率附近的谐波干扰准 PR 控制器具有比较强的抑制效果，但对基波频率之外的干扰抑制效果较小。单相 PWM 整流输入电流中含有较多工频附近的谐波，如 3、5、7 次谐波，谐波干扰问题比较严重，因此在准 PR 控制器的基础上，引入多重 PR 控制器，控制器传递函数为

$$G_{PR}(s)=K_p+\frac{2K_r\omega_c S}{S^2+2\omega_c S+\omega_0^2}+\frac{2K_{r3}\omega_{3c}S}{S^2+2\omega_{3c}S+\omega_{3h}^2}+\frac{2K_{r5}\omega_{5c}S}{S^2+2\omega_{5c}S+\omega_{5h}^2}+\frac{2K_{r7}\omega_{7c}S}{S^2+2\omega_{7c}S+\omega_{7h}^2} \tag{4}$$

式中：K_{r3}、K_{r5}、K_{r7} 分别为 3、5、7 次谐波对应的谐振系数；ω_{3c}、ω_{5c}、ω_{7c} 分别为 3、5、7 次谐波对应的频率带宽；ω_{3h}、ω_{5h}、ω_{7h} 分别为 3、5、7 次谐波对应的谐波控制频率。多重 PR 控制器的伯德图如图 3 所示。可以看出，多重 PR 控制器在 3、5、7 次谐波处具有很高的增益，在基波频率处也有很宽的频率带宽，对特定的低次谐波有较好的抑制作用。

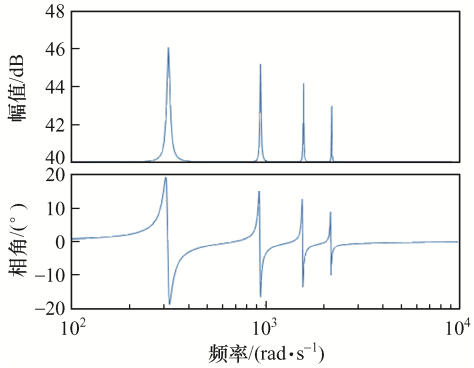


图 3　多重 PR 控制器伯德图

Fig. 3 Bode diagram of multi-PR controller

3　模糊多重 PR 控制

本文提出的模糊多重 PR 控制方法，主要是使参数 K_p、K_r 根据输入电流误差 e 和误差变化率 e_c 进行自适应调整，提高系统的稳定性和快速性。系统的 K_p、K_r 参数值是由模糊控制器输出的 ΔK_p、ΔK_r 进行实时更新的，即

$$\begin{cases}K_p=K_{p0}+\Delta K_p\\K_r=K_{r0}+\Delta K_r\end{cases} \tag{5}$$

式中，K_{p0}、K_{r0} 为多重 PR 控制参数的初始值，是根据单相 PWM 整流器的数学模型和传递函数确定的。电流内环模糊多重 PR 控制器结构如图 4 所示。

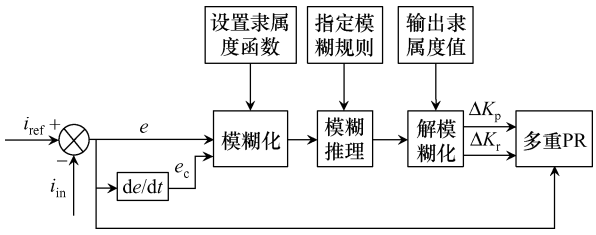


图 4　模糊多重 PR 控制原理

Fig. 4 Schematic of fuzzy multi-PR control

模糊控制器由模糊化、模糊推理和解模糊化 3 部分组成[13-16]。误差 e 和误差变化率 e_c 的模糊论域设定为[−12,12]，模糊集设定为{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB}，分别代表为负大、负中、负小、零、正小、正中、正大。本文采用 trimf 函数和 gaussmf 函数相结合的隶属度函数，在参考相关资料和多次仿真实验的基础上制定出模糊规则，见表 1 和表 2。

表 1 ΔK_p 的模糊控制规则

Tab. 1 Fuzzy control rule of ΔK_p

e_c	e						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	Z	Z
NM	PB	PB	PM	PS	PS	Z	NS
NS	PM	PM	PM	PS	Z	NS	NS
Z	PM	PM	PS	Z	NS	NM	NM
PS	PS	PS	Z	NS	NS	NM	NM
PM	PS	Z	NS	NM	NM	NM	NB
PB	Z	Z	NM	NM	NM	NB	NB

表 2 ΔK_r 的模糊控制规则

Tab. 2 Fuzzy control rule of ΔK_r

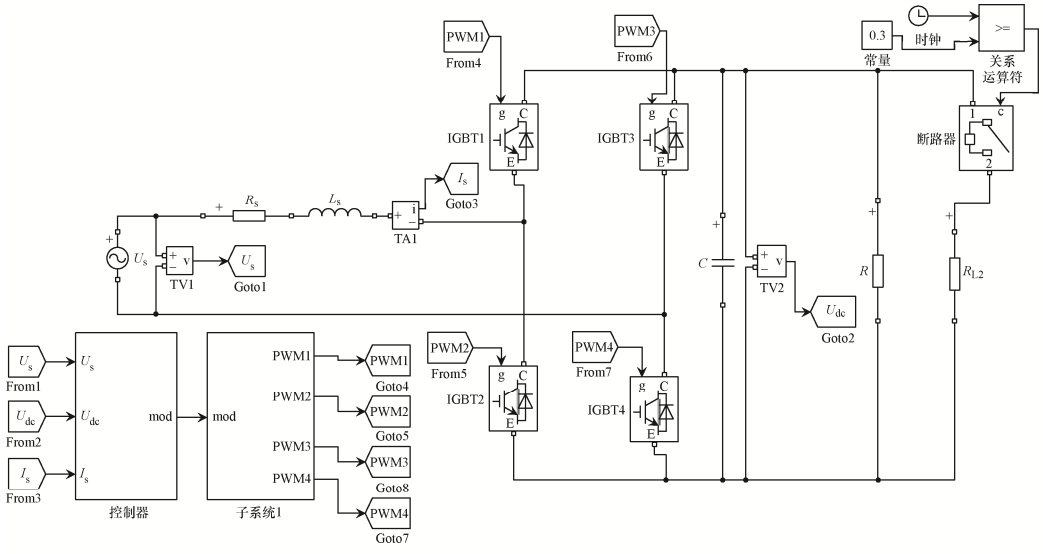
e_c	e						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	Z	Z
NM	NM	NM	NM	NS	NS	Z	Z
NS	NB	NM	NS	NS	Z	PS	PS
Z	NM	NM	NS	Z	PS	PM	PM
PS	NM	NS	Z	PS	PS	PM	PB
PM	Z	Z	PS	PS	PM	PB	PB
PB	Z	Z	PS	PM	PM	PB	PB

4 仿真与实验验证

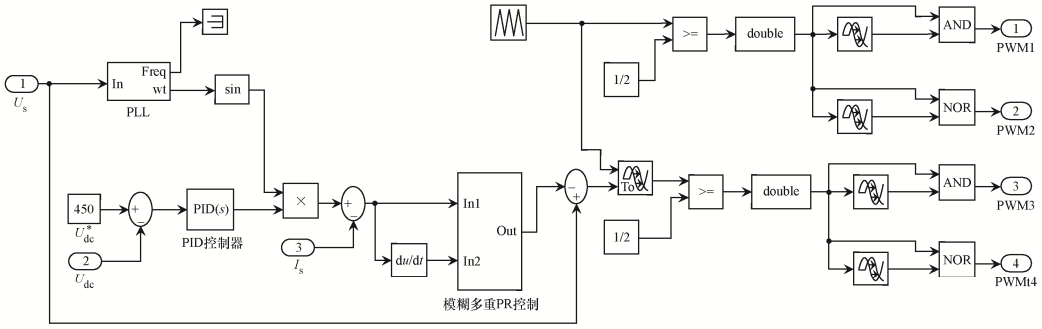
4.1 单相 PWM 整流器仿真验证

根据以上分析，本文在 MATLAB/Simulink 仿真平台上搭建了基于模糊多重 PR 控制的单相 PWM 整流器仿真电路，仿真模型如图 5 所示。系统参数设置为：输入电压有效值 220 V/50 Hz；交流侧电感 3 mH；直流侧电容 2 200 μF；直流侧电阻 35 Ω；直流侧电压 450 V；多重 PR 控制器初始参数为 K_p=200、K_r=100、ω_c=10、ω_0=100π、K_{r3}=200、ω_{3c}=2.5、ω_{3h}=300π、K_{r5}=80、ω_{5c}=4.5、ω_{5h}=500π、K_{r7}=40、ω_{7c}=8、ω_{7h}=700π。并且为了验证系统的动态特性，在 0.3 s 时负载并联 1 个 35 Ω 的电阻。

图 6 和图 7 分别为多重 PR 控制和模糊多重 PR 控制作用下的输入电流总谐波失真 THD(total harmonic distortion)、输出直流电压、输入电流与网侧电压和负载发生变化时的输出直流电压波形。从图 6 可知，电流环采用多重 PR 控制时，输入电流 THD 为 3.01%，输入电流在 0.2 s 左右才稳定下来，直流侧电压基本稳定在 450 V。从图 7 可知，在引入模糊多重 PR 控制方法后，输入电流 THD 下降为 0.43%，高频谐波也有明显下降，相较于多重 PR 控制时，输入电流能更快的稳定下来且与



(a) 单相PWM整流器主电路

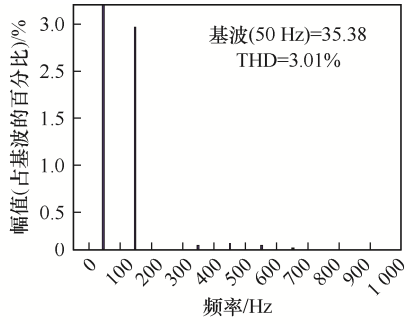


(b) 单相PWM整流器控制模型

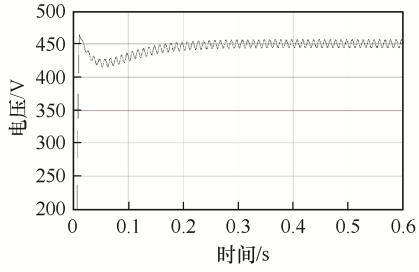
图 5　模糊多重 PR 控制的单相 PWM 整流器仿真模型

Fig. 5 Simulation model of single-phase PWM rectifier with fuzzy multi-PR control

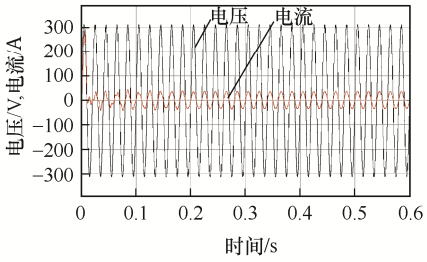
网侧电压相位保持基本一致，直流侧电压也更加快速的稳定在 450 V 左右。同时当负载在 0.3 s 发生突变时，采用多重 PR 控制策略时，直流侧电压需要经历约 250 ms 才能稳定下来，而采用模糊多重 PR 控制策略时，直流侧电压仅需要经历 150 ms 左右就可以稳定下来，比多重 PR 控制策略节约了 100 ms 左右。仿真结果表明，采用模糊多重 PR 控制方法，网侧电流 THD 更低，系统的响应速度更快。



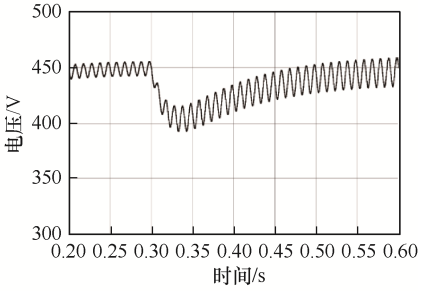
(a) 多重PR控制电流THD



(b) 多重PR控制输出直流电压



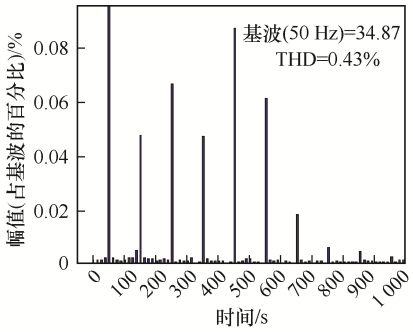
(c) 多重PR控制网侧电压电流



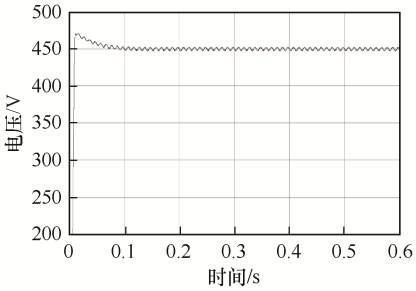
(d) 多重PR控制负载突变时输出电压

图 6　多重 PR 控制时，输入电流 THD、输出直流电压、网侧电压电流与负载突变时输出电压波形

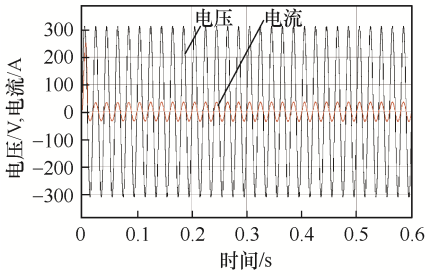
Fig. 6 Waveforms of input current THD, output DC voltage, grid-side voltage and current, and output voltage under load mutation with multi-PR control



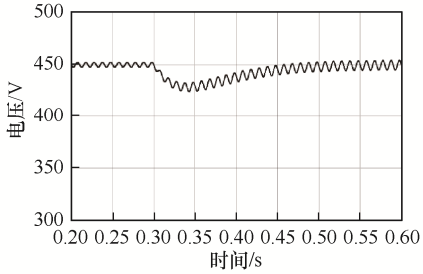
(a) 模糊多重PR控制电流THD



(b) 模糊多重PR控制输出直流电压



(c) 模糊多重PR控制网侧电压电流



(d) 模糊多重PR控制负载突变时输出电压

图 7 模糊多重 PR 控制时，输入电流 THD、输出直流电压、网侧电压电流与负载突变时输出电压波形

Fig. 7 Waveforms of input current THD, output DC voltage, grid-side voltage and current, and output voltage under load mutaion with fuzzy multi-PR control

4.2 实验验证

为验证本文单相PWM整流器控制方法的有效性，依据仿真参数搭建实验平台并做相关实验，实验样机如图 8 所示，控制芯片采用 TI 公司 TMS320-F2812。图 9 为系统正常运行时的网侧电流与电压波形，可以看出电流与电压波形同频同相，系统稳定运行；图 10 为系统稳定运行时的输出直流电压波形，可以看出电压波动幅度较小，符合要求；图 11 为负载突变时的网侧电流波形，可以看出网侧电流很快恢复到正常值，没有出现断续和毛刺现象，系统的动态性能良好，符合设计要求。

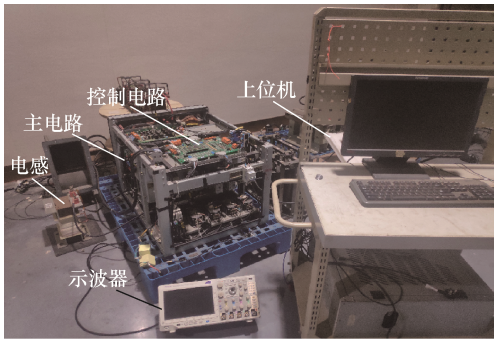
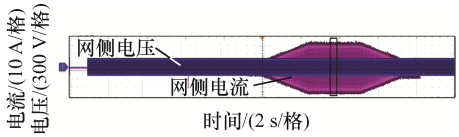
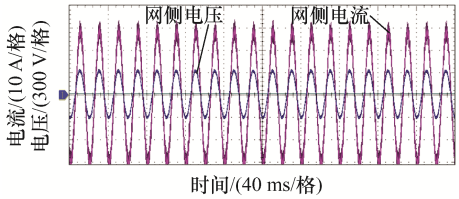


图 8 实验样机

Fig. 8 Experimental prototype



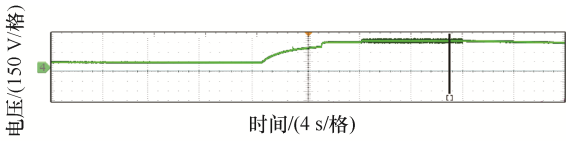
(a) 网侧电流与电压



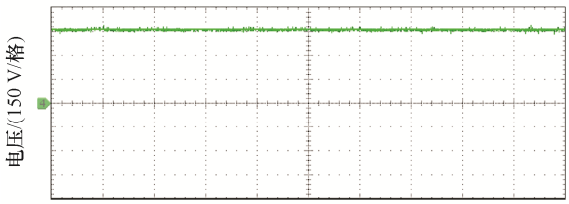
(b) 图(a)局部放大

图 9 网侧电流与电压波形

Fig. 9 Waveforms of grid-side current and voltage



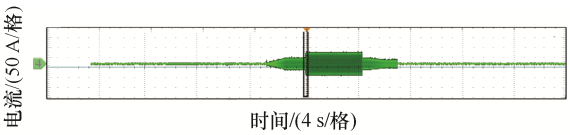
(a) 输出直流电压



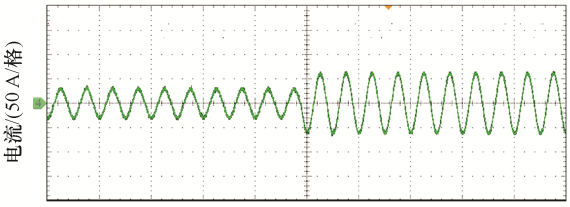
(b) 图(a)局部放大

图 10 输出直流电压波形

Fig. 10 Waveforms of output DC voltage



(a) 网侧电流



(b) 图(a)局部放大

图 11 负载突变时网侧电流波形

Fig. 11 Waveforms of grid-side current under load mutation

5 结语

本文通过对单相 PWM 整流器进行分析，采用

模糊控制与多重 PR 控制相结合的控制策略进行仿真与实验验证，并与传统控制方法相比较。结果表明，本文策略控制下的网侧电流具有更低的谐波畸变率，并且对于特定的低次谐波有很好的抑制效果，输入电流波形质量明显提高，系统的动态性能和稳态性能都有所提高。

参考文献：

[1] 杨青松，熊慧，石健将. 基于相位补偿的高频 Vienna 整流器解耦控制方法[J]. 电源学报, 2023, 21(4): 27-37.
Yang Qingsong, Xiong Hui, Shi Jianjiang. Decoupling control method for high-frequency Vienna rectifier based on phase compensation [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(4): 27-37. (in Chinese)

[2] 冯典森, 唐勇奇, 伍玉凯, 等. 基于双闭环控制的单相电压型 PWM 整流器仿真研究[J]. 新型工业化, 2016, 6(5): 8-14.
Feng Diansen, Tang Yongqi, Wu Yukai, et al. Simulation of single phase voltage PWM rectifier based on double closed-loop control [J]. The Journal of New Industrialization, 2016, 6(5): 8-14. (in Chinese)

[3] 郑征, 马方军, 韦延方. 单相 PWM 整流器分数阶建模与仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(4): 784-790.
Zheng Zheng, Ma Fangjun, Wei Yanfang. Fractional modeling and simulation analysis of single-phase PWM rectifier [J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(4): 784-790. (in Chinese)

[4] Mohammadi Moghadam H, Mohammadzadeh A, Hadjiaghaie Vafaie R, et al. A type-2 fuzzy control for active/reactive power control and energy storage management [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2022, 44(5): 1014-1028.

[5] 许福鹿, 韩梁, 石亮缘, 等. 基于不同控制策略的单相 PWM 整流系统研究[J]. 电力学报, 2018, 33(4): 346-352.
Xu Fulu, Han Liang, Shi Liangyuan, et al. Research on control strategy of single phase PWM rectifier based on different control strategy [J]. Journal of Electric Power, 2018, 33(4): 346-352. (in Chinese)

[6] 赵巧妮, 夏益辉. 单相 PWM 整流器比例谐振与阻尼控制研究[J]. 电气传动, 2018, 48(11): 30-33.
Zhao Qiaoni, Xia Yihui. Research on single-phase proportional resonant PWM rectifier based on input current damping control [J]. Electric Drive, 2018, 48(11): 30-33. (in Chinese)

[7] 朱荣伍, 伍小杰, 杨艳, 等. 采用比例谐振调节器的单相电压型 PWM 整流器[J]. 高电压技术, 2010, 36(8): 2095-2100.
Zhu Rongwu, Wu Xiaojie, Yang Yan, et al. Single-phase voltage-source PWM rectifier using proportion resonant controller [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(8): 2095-2100. (in Chinese)

[8] 李浩然, 杨旭红, 王亚楠. 基于模糊 PR 和 PI 控制的三相逆变器并网研究[J]. 电气传动, 2016, 46(1): 55-59.
Li Haoran, Yang Xuhong, Wang Yanan. Research on grid-connected three-phase inverter based on fuzzy PR control and PI control [J]. Electric Drive, 2016, 46(1): 55-59. (in Chinese)

[9] 黄辉先, 汤湘宁. 基于模糊滑模控制的三相 PWM 整流器仿真[J]. 电源技术, 2013, 37(5): 836-839.
Huang Huixian, Tang Xiangning. Simulation of PWM rectifier based on fuzzy reaching law of sliding mode variable structure control [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2013, 37(5): 836-839. (in Chinese)

[10] 王晓兰, 刘向辰, 杨沛豪, 等. 基于偏差解耦扰动观测器的多重 PR 控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(6): 21-27.
Wang Xiaolan, Liu Xiangchen, Yang Peihao, et al. Multiple proportional resonant control strategy based on deviation decouple disturbance observer [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(6): 21-27. (in Chinese)

[11] Li Yahui, Zhang Jing, Hao Zhenghang, et al. Improved PR control strategy for an LCL three-phase grid-connected inverter based on active damping [J]. Applied Sciences, 2021, 11(7): 3170.

[12] 姚鑫, 罗晓曙, 廖志贤, 等. 光伏并网逆变器模糊准 PR 控制仿真研究[J]. 电测与仪表, 2014, 51(19): 86-91.
Yao Xin, Luo Xiaoshu, Liao Zhixian, et al. The simulation research on fuzzy quasi PR control of PV grid connected inverter [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(19): 86-91. (in Chinese)

[13] 俞城生, 张艳. 单相 PWM 整流器电压外环模糊自适应控制[J]. 河北科技大学学报, 2020, 41(1): 23-30.
Yu Chengsheng, Zhang Yan. Fuzzy adaptive control strategy of voltage outer loop for single-phase PWM rectifier [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2020, 41(1): 23-30. (in Chinese)

[14] 武俊峰, 吴文杰, 张伟杰. 基于模糊 PR 控制的单相锁相环设计[J]. 通信电源技术, 2019, 36(11): 19-21.
Wu Junfeng, Wu Wenjie, Zhang Weijie. Design of single phase phase-locked loop based on fuzzy PR control [J]. Telecom Power Technology, 2019, 36(11): 19-21. (in Chinese)

[15] 陈荣, 郑立伟. 基于模糊自适应准 PR 控制的三相并网逆变系统锁相环研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(6): 200-203.
Chen Rong, Zheng Liwei. Three-phase grid-connected inverter system phase-locked loop study based on fuzzy adaptive quasi-PR control [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(6): 200-203. (in Chinese)

[16] 陈卉, 苏小玲, 杨文丽, 等. 低压双极性直流微网故障自恢复的模糊控制方法[J]. 电源学报, 2023, 21(3): 83-88.
Chen Hui, Su Xiaoling, Yang Wenli, et al. Fuzzy control method for low-voltage bipolar DC microgrid fault self-recovery [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(3): 83-88. (in Chinese)



周杰

作者简介：

周杰(1998—)，男，硕士研究生。研究方向：电力电子与电力传动。E-mail：1393515081@qq.com。

廖冬初(1963—)，男，博士，教授。研究方向：计算机控制，电力电子技术。E-mail：liaodc63@126.com。

蔡华锋(1978—)，男，通信作者，硕士，副教授。研究方向：计算机控制与电力电子节能技术。E-mail：37715457@qq.com。

刘浩东(1997—)，男，中国电源学会会员，硕士研究生。研究方向：电力电子与电力传动。E-mail：1178039402@qq.com。

孙得金(1977—)，男，本科，高级工程师。研究方向：电力电子与电气传动。E-mail：zytldq@zytldq.com。

(责任编辑：郭凯凯)



公益广告来源：天津文明网