

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.03.009

并网变流器的多内模自适应重复控制方法研究

朱晋宇^{1,2}, 李宁宁², 唐西胜², 李岚¹, 彭鹏³, 李毓烜³

(1. 太原理工大学电气与动力工程学院, 太原 030024; 2. 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 3. 南方电网调峰调频发电有限公司储能科, 广州 510630)

摘要: 并网变流器在新能源发电、电能质量治理等领域的应用逐渐广泛,但其输出的并网电流谐波对电力系统有很大影响。重复控制是通过在参考波形中引入谐波成分,并在控制器中将其与误差信号进行比较从而抑制谐波的一种方法,因其对周期性扰动有良好的跟踪性能而在并网变流器中得到广泛应用。但当电网频率波动时,重复控制的谐振频率将会偏离实际电网的基波和谐波频率,大大降低了并网变流器的谐波抑制能力。对此文中提出一种与PI复合应用的多内模自适应重复控制策略来抑制并网变流器中的谐波干扰。首先给出所采用的典型并网变流器拓扑及其控制结构,建立其数学模型;其次针对传统重复控制器的缺点,引入校正因子以增强谐波下的控制增益,提升系统的频率适应性;最后对提出的控制策略进行参数设计,并通过仿真和实验验证了所提策略的有效性。

关键词: 重复控制; 并网变流器; 双闭环控制; 频率自适应; 谐波抑制

Research on Multiple Internal Mode Adaptive Repetitive Control Method for Grid-connected Converters

ZHU Jinyu^{1,2}, LI Ningning², TANG Xisheng², LI Lan¹, PENG Peng³, LI Yuxuan³

(1. College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. Southern Power Grid Peaking FM Power Generation Co., Ltd., Guangzhou 510630, China)

Abstract: The application of grid connected inverters in new energy generation, power quality control and other fields is gradually widespread, but its output harmonic of the grid connected current has a significant impact on power system. The repetitive control is a method to suppress harmonics by introducing harmonic components into the reference waveform and comparing them with error signals in the controller. It is widely used in grid connected converters due to its good tracking performance to periodic disturbances. However, in case of power grid frequency fluctuation, the resonant frequency of the repetitive control will deviate from the fundamental and harmonic frequencies of the actual power grid, which greatly reduces the harmonic suppression ability of the system. Therefore, in this paper a multi-internal model adaptive repetitive control strategy combined with PI is proposed to suppress harmonic interference in grid-connected converters. Firstly, the typical topology and control structure of the used grid connected converter are given and its mathematical model is set up. Then, in view of the shortcomings of the traditional repetitive controller, the correction factor are introduced to enhance the control gain under harmonics and improve the frequency adaptability of the system. Finally, parameters of the proposed control strategy are designed, and the effectiveness of the proposed strategy is verified through simulation and experiments.

Key words: repetitive control; grid-connected converter; double closed-loop control; frequency adaptive; harmonic suppression

收稿日期:2025-07-19; 修回日期:2025-09-23

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFE0123600);南方电网公司重点科技项目(STKJXM20200059)。

Project Supported by National Key Research and Development Plan Project(2019YFE0123600), Key Technology Project of China Southern Power Grid Corporation(STKJXM20200059).

0 引言

并网变流器被广泛应用于光伏、风电、储能、柔性直流等场景,是未来新型电力系统中的主要元件之一。而并网变流器输出电流容易受电网并网点电压质量的影响,故提高并网电流质量,即尽可能减小其总谐波畸变率的研究备受关注^[1-3]。目前常用的控制策略有比例积分(PI)控制、比例谐振(PR)控制和重复控制(RC)等^[4-6]。谐振控制器只能对特定频率的信号进行调节,随着抑制谐波次数的增加,系统控制算法实现难度加大,且在保证系统电流环稳定性的前提下,电流环的带宽会限制PR控制器能够抑制的谐波次数。由于变流器电压电流中的谐波成分为周期性的干扰,故采用重复控制来改善波形质量。重复控制是一种对周期性信号的积分,可有效抑制并网电流中周期性谐波的干扰,但其动态响应慢^[7-8]。可采用重复控制与PI相结合的方案^[9-11],提高系统的动态响应速度。例如文[12]提出的基于重复控制的并联双环控制策略中,系统的稳态精度与动态响应速度分别由重复控制器与PI控制器决定,两者结合可有效抑制谐波,提高系统稳定性。然而实际电网中因发电与用电负荷不平衡或故障等往往会引起频率的波动^[13],对于传统的重复控制器,若参考频率发生改变,单个参考周期内的采样数 N 可能会出现非整数的情况,此时需将 N 取整,这会导致系统的延迟长度不准确,使RC的谐振增益峰值偏移,降低控制器的谐波抑制能力^[14]。

为使RC具有频率适应性,文[15]根据电网频率来选取采样频率,以确保二者的比值为整数,但时刻波动的采样频率使得计算难度大为提高。文[16]通过合理选取内模系数 $Q(z)$ 与重复控制增益 k_r 以使RC在保证谐振增益较高的前提下谐振带宽也较高,提高重复控制对电网频率波动的适应能力,但在电网频率波动较大时效果不显著。文[17]利用基于Lagrange插值算法的有限脉冲响应滤波器来近似实现RC中分数阶延迟项。但是当电网频率波动时每次线性插值都要重新在线计算,增加了运算负担。文[18]采用全通滤波器来代替RC中的小数延时单元,但全通滤波器的系数需在线调整,且其阶数会影响RC的控制精度。文[19]采用高阶重复控制提高重复控制器在谐振频率及其邻域内的增益,但是并不能满足对任意分数延迟导致的增益衰减进行补偿。文[20]提出一种多内模RC策略,但其只是增加了谐波频率处的带宽并不能精确定位目标谐振频率。文[21]提出一种并行结构的分数阶重复控制

来提高谐振频率的控制增益,但引入大量权重系数,系统设计复杂。

在以上分析的基础上,文中提出一种选择性多内模自适应重复控制(multiple internal model adaptive repeat control, MIMARC)策略,以提高并网变流器在电网频率波动下的电流谐波抑制效果。针对MIMARC的收敛速度较慢的问题,文中采用了MIMARC并联PI的复合控制结构实现系统的快速动态响应。针对频率波动引起的重复控制器延时环节不为整数的特点,文中采用多内模并联结构,即在原有重复控制环节中并联接入考虑电网频率波动的辅助重复控制支路,且在各重复控制支路内模中引入校正因子以及低通滤波器,以灵活选择系统中比重大的谐波进行补偿并提高重复控制器的控制增益,提高重复控制器的频率适应性。对提出的控制策略进行了特性分析及参数设计,并通过仿真和实验对该策略的有效性进行了验证。

1 主电路拓扑与LCL滤波器数学模型

文中所采用的变流器拓扑及控制结构见图1。

主电路由母线电容、三电平四桥臂变流器、LCL滤波器组成。控制电路采用电网侧电流外环、变流器侧电流内环的双闭环控制策略。该方法既可以对功率开关有效保护,又具有较高的控制稳定性^[22]。其中,外环采用MIMARC+PI的复合控制方法,其控制速率主要由PI控制器参数决定,通过与内环的PI控制器参数匹配,以保证系统的动态性能和稳态性能。

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_1}{dt} + i_1 R_1 = u_{i_0} - u_c - i_c R_c \\ L_2 \frac{di_g}{dt} + i_g R_2 = u_c + i_c R_c - u_g \\ C \frac{du_c}{dt} = i_c = i_1 - i_g \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: $u_{i_0}(i=a, b, c, n)$ 为变流器各相输出电压; u_c 为滤波电容电压; i_1 为变流器的输出电流; u_g, i_g 分别为并网点电压和并网电流。由于三相电路的对称性,选取其中一相进行分析。考虑主电路中电感 L_1, L_2 的寄生电阻 R_1, R_2 ,电容 C 的寄生电阻 R_c ,根据基尔霍夫电压、电流定律,可得主电路状态方程式(1)。

由图2可推得并网电流 i_g 到变流器输出电压 u_{i_0} 的传递函数为

$$G_{LCL}(s) = \frac{i_g(s)}{u_{io}(s)} = \frac{1 + R_c Cs}{L_1 L_2 Cs^3 + [L_1 R_2 C + L_2 R_1 C + (L_1 + L_2) R_c C] s^2 + [(R_1 + R_2) R_c C + R_1 R_2 C + L_1 + L_2] s + R_1 + R_2} \quad (2)$$

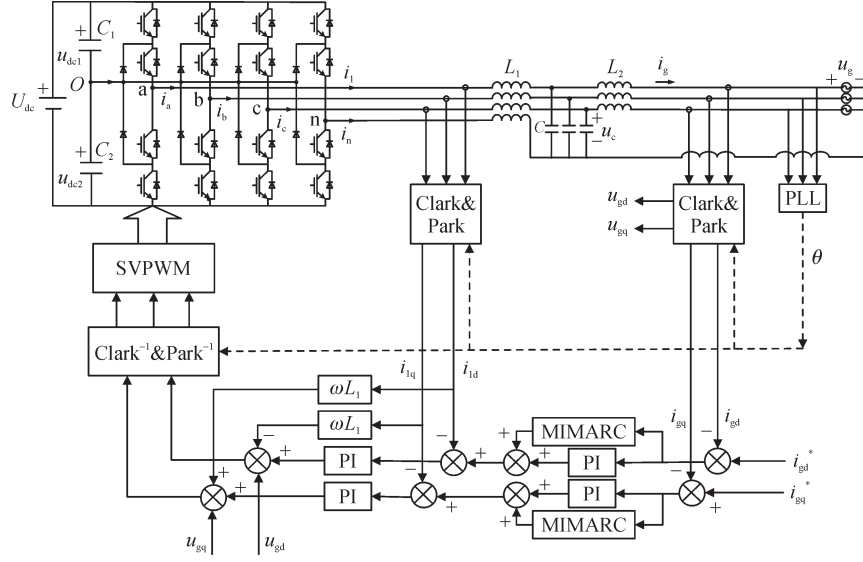


图1 三电平四桥臂变流器拓扑及控制结构

Fig. 1 Topology and control structure of three-level four-arm converter

忽略滤波电感和电容的寄生电阻,采用零阶保持器(ZOH)将其离散化得

$$P(z) = Z \left[\frac{1 - e^{-Ts}}{s} \frac{1}{L_1 L_2 C s^3 + (L_1 + L_2) s} \right] \quad (3)$$

由式(1)可得LCL型滤波器的模型框图见图2。

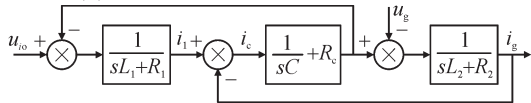


图2 LCL型滤波器的模型框图

Fig. 2 Model block diagram of LCL filter

2 控制系统设计

文中的双闭环控制结构中,外环MIMARC+PI复合控制器通过PI控制器提高系统的动态响应速度,通过MIMARC控制器提升频率适应性,可以在电网频率波动时使得控制器的谐振频率与电网实

际谐波频率相适应,从而提高控制器的谐振频率增益,达到谐波抑制效果。

为了方便控制器设计,采用dq旋转坐标系下的控制对象模型,d、q轴可分别独立控制。其控制结构见图3。实际应用中并网变流器的控制一般按最大功率因数进行,故文中无功电流的给定值为0。

2.1 多内模自适应重复控制MIMARC的提出

重复控制器是基于控制理论中的内模原理,其基本控制原理见图4。

图4中： $N = f_s / f_0$ 为一个周期内采样的次数； $P(z)$ 为被控对象； $Q(z)$ 是内模系数； k_r 是重复控制增益； $S(z) = z^k S'(z)$ 为补偿器，其中 z^k 是相位超前补偿器，用来弥补系统相位差， $S'(z)$ 为低通滤波器。

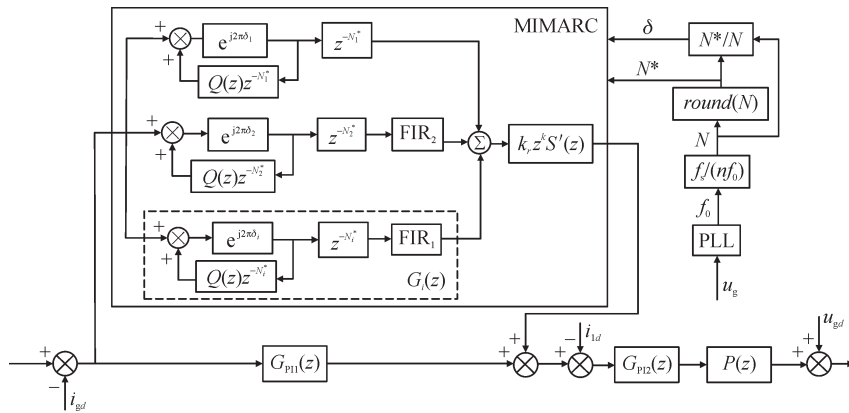


图3 并网变流器双闭环控制结构图

Fig. 3 Double closed-loop control structure of grid-connected converter

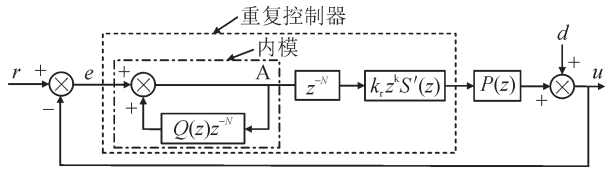


图4 重复控制器系统框图

Fig. 4 Repeat controller system block diagram

由图4可得到重复控制器的传递函数

$$G_{RC}(z) = \frac{k_r z^{-N+k} S'(z)}{1 - z^{-N} Q(z)} \quad (4)$$

式(4)中, N 只能取整数,当参考频率变化时,例如电网频率波动或者需要 f_s 取任意值时,会导致 N 出现非整数情况,此时 N 必须四舍五入为整数,导致谐振频率点偏移,降低所有谐波的控制增益,影响系统跟踪性能。

基于上述分析,提出一种多内模自适应重复控制(MIMARC)方案,使内模的谐振频率逼近电网基波和谐波频率的实际值,其控制结构见图5。

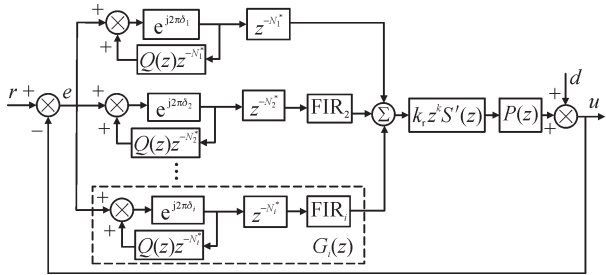


图5 MIMARC控制框图

Fig. 5 MIMARC control block diagram

图5中: $e^{j2m\delta_i}$ 为校正环节; $G_i(z)$ ($i=1, 2, \dots, n$)为 n 次谐波内部模型的传递函数; FIR _{i} 为对应支路的低通滤波器; $G_{FIR_i}(z)$ 为FIR _{i} 对应传递函数。

由图5可得

$$G_i(z) = \frac{e^{j2m\delta_i} z^{-N_i^*} G_{FIR_i}(z)}{1 - e^{j2m\delta_i} Q(z) z^{-N_i^*}} \quad (5)$$

式(5)中: $N_i^* = \text{round}(f_s/nf_0)$, n 为谐波次序, $\delta_i = N_i^*/N$ 为校正因子。可得式(5)的极点位于

$$j\omega = \delta_j \frac{2\pi f_s}{N^*} = \delta_j \omega_0^* \quad (6)$$

由式(5)、(6)可知,当电网频率 f_0 波动时, N^* 、 N 均跟随变化,故校正因子 δ 随频率 f_0 波动而在线调整,此时式(5)的极点也因校正环节的加入而从 $j\omega_0^*$ 变为 $j\omega$,即此时的谐振频率不再是将 N 四舍五入后的谐振频率,而是逼近电网的实际频率,因此MIMARC实现了系统对电网频率变化的适应。

MIMARC的传递函数为

$$G_{MIMARC}(Z) = k_r \sum_{i=1}^n G_i(z) S(z) \quad (7)$$

由于 $Q(z)$ 对重复控制的影响在传统模式和改进模式下是相同的,故下面分析不考虑 $Q(z)$ 。由于当 $f_0=50$ Hz时MIMARC与RC结构相同,两者幅频特性曲线一致。利用MATLAB画出6、12次谐波支路对应幅频特性图($f_s=10$ kHz)见图6,图6中蓝色曲线即为 $f_0=50$ Hz时MIMARC与RC对应幅频特性曲线。

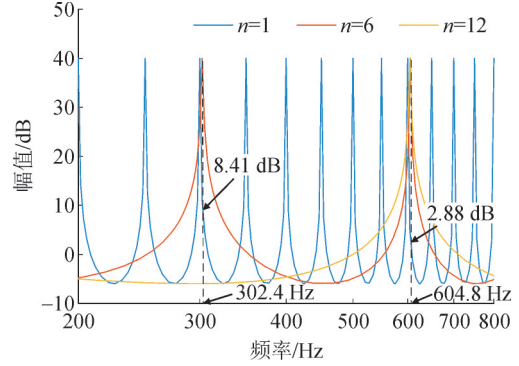


图6 $f_0=50$ Hz和 $f_0=50.4$ Hz($n=6, 12$)对应支路幅频特性图
Fig. 6 Branch amplitude-frequency characteristics with $f_0=50$ Hz and $f_0=50.4$ Hz respectively($n=6, 12$)

由图6可知,支路加入校正模块后,当电网频率由50 Hz波动到50.4 Hz时,RC与MIMARC对应谐振频率增益变化见表1。

表1 谐振频率增益变化表

Table 1 Resonant frequency gain change table

电网频率 f_0/Hz	n 次谐波	谐振频率增益/dB	
		RC	MIMARC
50.0	6	40.00	40.00
	12	40.00	40.00
50.4	6	8.41	40.00
	12	2.88	40.00

当电网频率波动时, MIMARC各支路的谐振频率峰值可分别精确定位在基频和 n 次谐波频率处。此时各谐波支路加入低通滤波器,滤掉 n 次谐波谐振频率后的波形,再将图中所有支路的输出求和,即可提高 n 次谐波的增益,进一步保证系统的跟踪性能。

由上述分析可知, MIMARC提供了一种相对简单的方法来解决RC频率自适应问题,无需进行复杂的在线插值计算。值得注意的是, MIMARC需要多个分支,会增加计算负担^[23-31]。为减轻计算负担和提高瞬态性能,可根据实际情况选择必要谐波次序的分支,以满足控制要求。

2.2 MIMARC的稳定机理分析

影响变流器控制稳定性的因素主要有内模系数 $Q(z)$ 、重复控制增益 k_r 以及补偿器 $S(z)$,故对这些因素逐一进行分析。

为了提高RC自身稳定性,通常 $Q(z)$ 被选为一个低通滤波器,以降低高频噪声的影响,或者取值为略小于1的常数^[23]。但 $Q(z)$ 并非越小越好,不同的 $Q(z)$ 对系统影响不同,不同 $Q(z)$ 下 $G(z)$ 的幅频特性($f_s=10\text{ kHz}, f_0=50\text{ Hz}$)见图7。

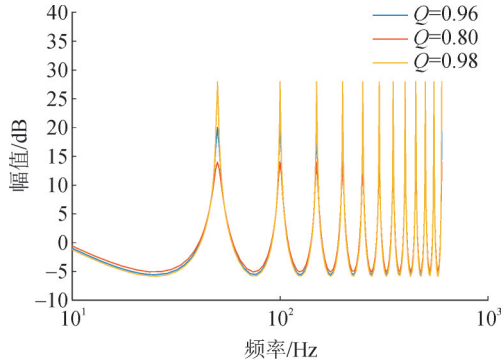


图7 $k_r=1$ 时重复控制器的幅频特性

Fig. 7 Amplitude-frequency characteristics of repeated controller with $k_r=1$

由图7可知,重复控制在基波和谐波频率处的控制增益较高。 $Q(z)$ 减小时,重复控制在谐振频率点的增益大幅下降,但是在谐振频率点处的带宽增大了,因此 $Q(z)$ 较小时,RC对电网频率的波动不敏感,系统的抗干扰性能较强,进而提高了系统的稳定性。但 $Q(z)$ 的减小引起谐振频率点增益下降,进而导致系统跟踪误差较大。由于低通滤波器形式的 $Q(z)$ 对逆变器的稳定性有影响,故 $Q(z)$ 常取略小于1的常数。

重复控制增益 k_r 变化时RC的幅频特性曲线见图8。由图8可看出,重复控制增益 k_r 取较大值时,RC在各个频率处的增益较大,可以降低系统稳态误差,但会增强系统敏感度,影响系统的抗扰性; k_r 取较小值时,会增强系统稳定性,但同时会增高系统稳态误差。文中将通过计算给出 k_r 的取值范围。

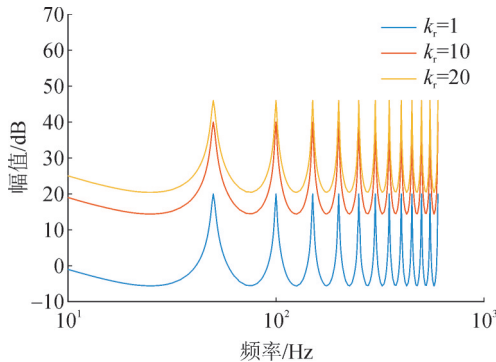


图8 $Q=0.9$ 时重复控制器的开环幅频特性

Fig. 8 Open loop amplitude-frequency characteristics of repeated controller with $Q=0.9$

补偿器 $S(z)$ 用于在每个周期内对误差进行补偿,使得系统能够更好地跟踪参考信号和抑制扰

动。其中超前环节 z^k 用来提高相位裕度,以增强系统的稳定性;低通滤波器 $S'(z)$ 是用来抑制高频噪声和干扰信号的影响,使得RC对于所需跟踪信号的响应更加平滑和稳定。因此需对补偿器 $S(z)$ 进行合理设计,否则会导致系统不稳定或者收敛慢。

基于以上分析,文中将通过计算给出使系统保持稳定的 k_r 与 $S(z)$ 的取值范围。由图3可得系统的闭环传递函数为

$$\frac{i_{gd}(z)}{i_{gd}^*(z)} = \frac{[G_{pl_1}(z) + G_{RC}(z)]G_{pl_2}(z)P(z)}{G_{pl_1}(z) + G_{RC}(z)G_{pl_2}(z)P(z)} \quad (8)$$

为说明方便,令

$$H(z) = \frac{G_{pl_2}(z)P(z)}{1 + G_{pl_1}(z)G_{pl_2}(z)P(z)} \quad (9)$$

由式(8)、(9)得系统的特征多项式

$$1 + [G_{pl_1}(z) + G_{RC}(z)]G_{pl_2}(z)P(z) = [1 + G_{pl_1}(z) + G_{pl_2}(z)P(z)][1 + G_{RC}(z)H(z)] \quad (10)$$

根据离散系统的稳定性判据可知,系统稳定的条件为:传递函数特征方程的根均在单位圆内。即系统在下列条件同时成立时可保持稳定:

- 1) 多项式 $1 + G_{pl_1}(z)G_{pl_2}(z)P(z) = 0$ 的根在单位圆内。
- 2) $|1 + G_{RC}(z)H(z)| \neq 0$ 。

显然,MIMARC与稳定条件1)无关。将式(7)代入条件2)得

$$k_r \sum_{i=0}^{n-1} G_i(z) \neq -\frac{1}{S(z)H(z)} \quad (11)$$

在理想情况下,为得到精确的重复控制相位补偿环节,取

$$S(z) = \frac{1}{H(z)} \quad (12)$$

但在实际应用中,对补偿器的精确度要求不高,设计补偿器 $S(z)$ 时只需满足

$$0 < S(z)H(z) \leq 1 \quad (13)$$

由式(13)得

$$-\frac{1}{S(z)H(z)} \leq -1 \quad (14)$$

由文[24]可知

$$\text{Re}[G_i(z)] \geq -\frac{1}{2} \quad (15)$$

此时,若控制增益 k_r 满足 $0 < k_r < 2$,则

$$\text{Re}\left[k_r \sum_{i=0}^{n-1} G_i(z)\right] > -1 \quad (16)$$

式(14)、(16)保证了式(11)成立,这意味着整个系统没有极点在单位圆外。

由上述分析可知,MIMARC闭环系统在满足以

下条件时是渐近稳定的:

1)无MIMARC控制器的闭环系统是稳定的,即 $1 + G_{PI_1}(z)G_{PI_2}(z)P(z) = 0$ 的所有根都在单位圆内。

2)补偿器 $S(z)$ 满足式(14)。

3)控制增益满足 $0 < k_r < 2$ 。而当设计参数不在上述区间之内时,系统将失稳。

2.3 MIMARC的参数设计

首先选择自适应重复控制器支路数量并设计各支路对应的低通滤波器。对于三相对称系统而言,三相并网变流器每相产生的谐波各项之间相互作用会出现谐波边带消除,最终呈现的主要是5、7、11、13、...、 $h(h=6k \pm 1, k$ 取整数)等阶次的谐波,而其余阶次的谐波含量极少^[25]。其中5、7次和11、13次谐波含量较高,又因为5、7次和11、13次谐波在 dq 旋转坐标系下分别等效为6次和12次谐波,故文中平行结构采用3个支路。FIR滤波器具有线性相频特性且稳定性好,所以文中选择该滤波器,其一般形式为

$$F(z) = \sum_{i=0}^{M-1} a_i z^{-i} \quad (17)$$

式(17)中, M 为滤波器的阶数。

设计截止频率分别为300、600 Hz的8阶FIR滤波器,由MATLAB/Filter Designer工具箱,可得:

$$G_{FIR_6}(z) = 0.1011 + 0.1084z^{-1} + 0.1139z^{-2} + 0.1173z^{-3} + 0.1084z^{-4} + 0.1173z^{-5} + 0.1139z^{-6} + 0.1084z^{-7} + 0.1011z^{-8} \quad (18)$$

$$G_{FIR_{12}}(z) = 0.0827 + 0.1027z^{-1} + 0.1188z^{-2} + 0.1293z^{-3} + 0.1329z^{-4} + 0.1293z^{-5} + 0.1188z^{-6} + 0.1027z^{-7} + 0.0827z^{-8} \quad (19)$$

其次设计 $S(z)$ 。其中超前环节 z^k 经实验确定取 z^9 时效果较好,滤波器 $S'(z)$ 设计为

$$S'(z) = 0.0632 + 0.0955z^{-1} + 0.1236z^{-2} + 0.1427z^{-3} + 0.1494z^{-4} + 0.1427z^{-5} + 0.1236z^{-6} + 0.0955z^{-7} + 0.0632z^{-8} \quad (20)$$

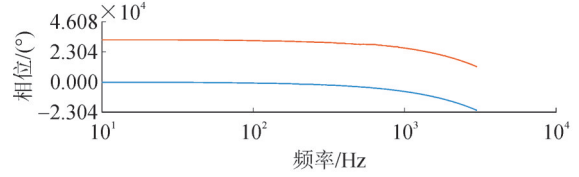
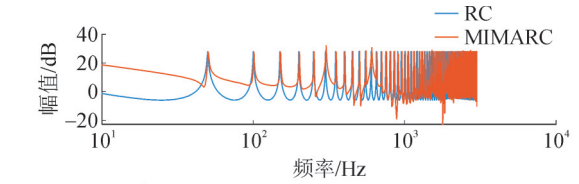
最后确定 $Q(z)$ 与 k_r 。根据稳定性分析的结果,文中 $Q(z)$ 取0.96, k_r 取0.2。

因此,电网频率为50.4 Hz时RC与MIMARC的频率特性见图9。由图9可知,电网频率波动时,MIMARC与RC相比,6、12次谐振频率处的控制增益分别从10 dB提高到32 dB、从4.9 dB提高到26.8 dB,减少了跟踪误差。

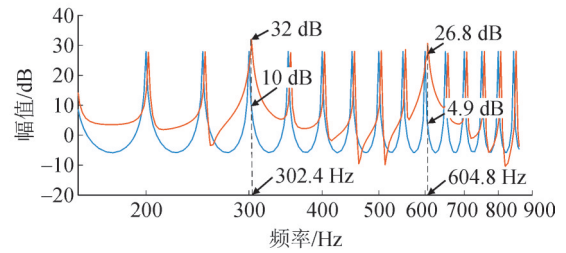
PI控制器传递函数为

$$G_{PI}(z) = k_p + \frac{k_i T}{z-1} \quad (21)$$

式(21)中: $T=1/f_s$; 外环 $k_p=5, k_i=0.8$; 内环 $k_p=0.06, k_i=0.002$ 。



(a) $f_0=50.4$ Hz时RC与MIMARC的频率特性



(b) 6、12次谐振频率处的局部放大图

图9 RC与MIMARC的频率特性

Fig. 9 Frequency characteristics of RC and MIMARC

3 仿真分析

为验证MIMARC方法的有效性,基于MATLAB/Simulink搭建三相LCL并网变流器仿真模型,其参数见表2。文中采用PI+RC与PI+MIMARC进行对比仿真,以电网频率为50、49.6、50.4 Hz为例。

表2 并网变流器仿真参数

Table 2 Simulation parameters of grid-connected converter

参数	数值
直流母线电压 U_{dc}/V	750
滤波电感 $L_1/\mu H$	168
滤波电感 $L_2/\mu H$	56
滤波电容 $C/\mu F$	14.1
电网电压 $u_s(50 \text{ Hz})/V$	380
额定功率 S/kVA	50
采样频率 f_s/kHz	10

校正因子 δ 随电网频率 f_0 波动而在线调整的变化曲线见图10。由图10可知,当电网频率变化时,各支路校正因子 δ_i 可立即跟踪频率变化而做出调整,使校正环节 $e^{j2\pi\delta_i}$ 发生作用。可以发现,当电网频率为50 Hz时, N 为整数,MIMARC不需要谐波支路,且 $\delta_1 = 1$,则校正环节 $e^{j2\pi\delta_1} = 1$,此时MIMARC的控制结构与RC的结构一致。

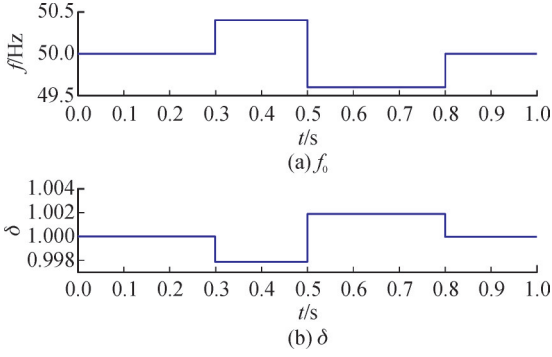


图 10 校正因子 δ 随电网频率 f_0 波动的变化曲线

Fig. 10 Change curve of correction factor δ as a function of grid frequency f_0 fluctuation

为证明 PI+MIMARC 的优越性, 在电网电压上

叠加了 5、7、11、13 次谐波, 后续仿真均在该条件下进行。叠加谐波后的电网电压及其 THD 波形见图 11。

电网频率为 50 Hz 时, 仿真结果见图 12、13。PI+RC 和 PI+MIMARC 并网电流 THD 分别为 1.00%、0.97%。对比得出, 电网频率为 50 Hz 时, PI+MIMARC 与 PI+RC 具有基本相同的稳态精度。

当电网频率为 49.6 Hz 时, 仿真结果见图 14、15。PI+RC 并网电流 THD 为 3.51%; 而 PI+MIMARC 并网电流 THD 为 1.80%。当电网频率为 50.4 Hz 时, 仿真结果见图 16、17, PI+RC 并网电流 THD 为 3.81%, 而 PI+MIMARC 并网电流 THD 为 2.10%。

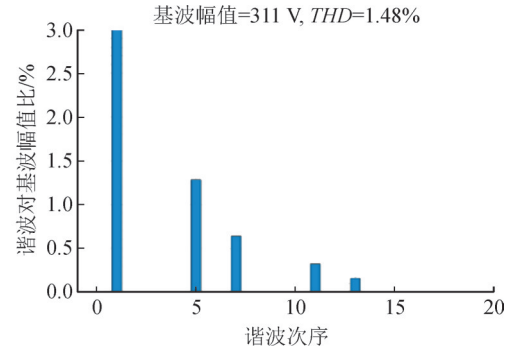
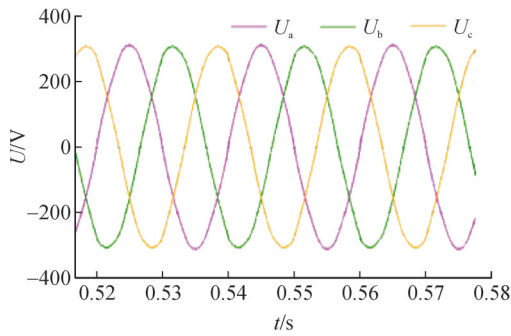


图 11 电网电压及谐波含量

Fig. 11 Grid voltage and harmonic content

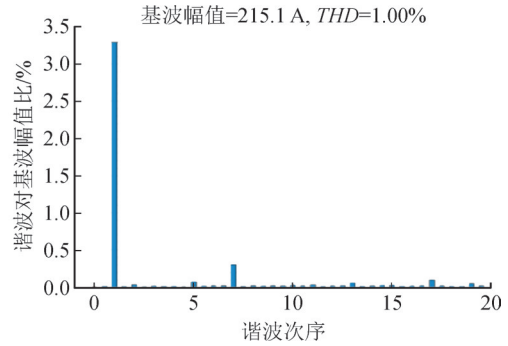
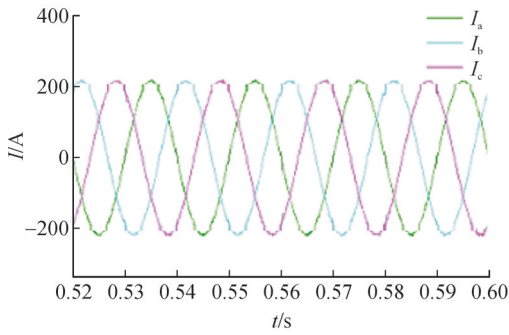


图 12 PI+RC 并网电流及谐波含量($f_0=50$ Hz)

Fig. 12 PI+RC grid-connected current and harmonic content($f_0=50$ Hz)

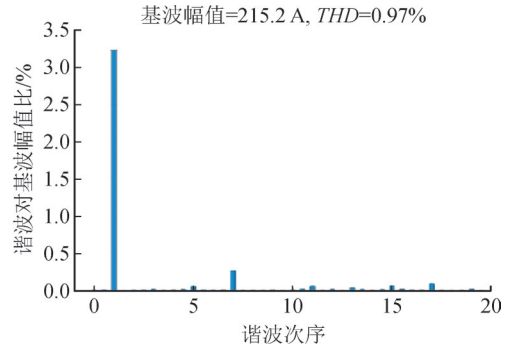
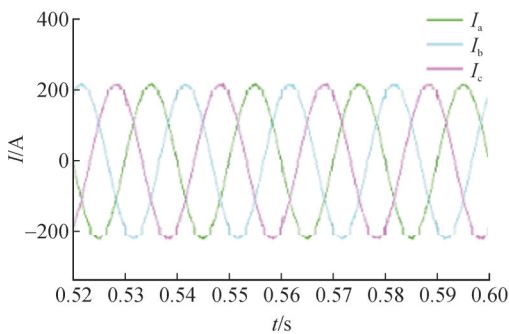


图 13 PI+MIMARC 并网电流及谐波含量($f_0=50$ Hz)

Fig. 13 PI+MIMARC grid-connected current and harmonic content($f_0=50$ Hz)

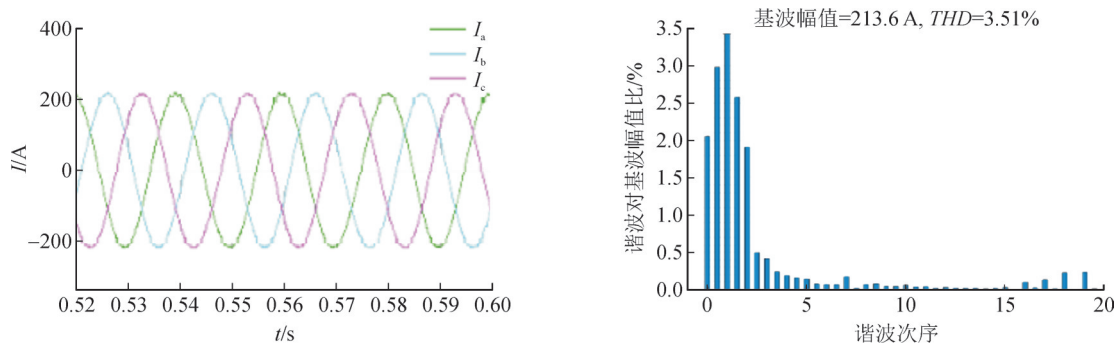


图 14 PI+RC 并网电流及谐波含量($f_0=49.6$ Hz)

Fig. 14 PI+RC grid-connected current and harmonic content($f_0=49.6$ Hz)

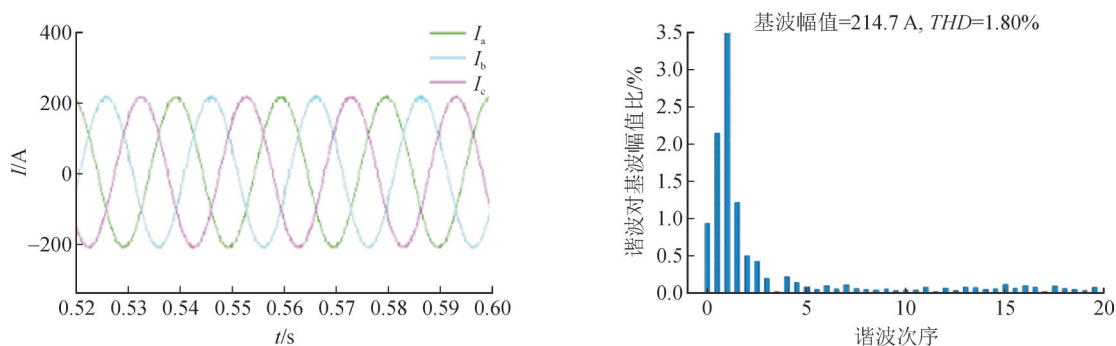


图 15 PI+MIMARC 并网电流及谐波含量($f_0=49.6$ Hz)

Fig. 15 PI+MIMARC grid-connected current and harmonic content($f_0=49.6$ Hz)

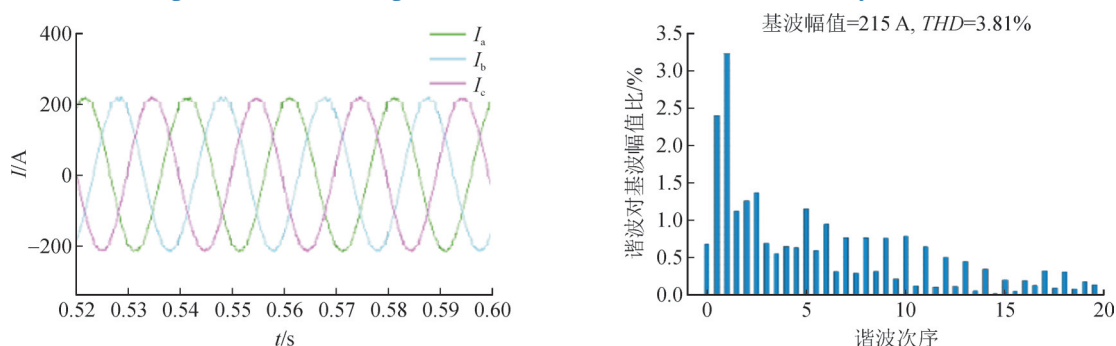


图 16 PI+RC 并网电流及谐波含量($f_0=50.4$ Hz)

Fig. 16 PI+RC grid-connected current and harmonic content($f_0=50.4$ Hz)

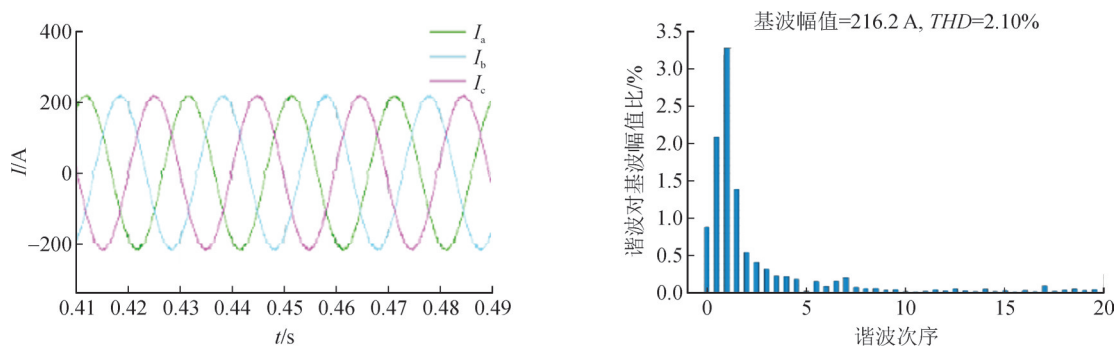


图 17 PI+MIMARC 并网电流及谐波含量($f_0=50.4$ Hz)

Fig. 17 PI+MIMARC grid-connected current and harmonic content($f_0=50.4$ Hz)

对比 PI+RC 和 PI+MIMARC 的仿真结果,可看出 PI+RC 在电网频率变化到 49.6 Hz 或 50.4 Hz 时控制效果变差,而 PI+MIMARC 比 PI+RC 的并网电流 THD 下降了 1.71%,证明了所提控制策略的有效性。

4 实验验证

为进一步验证可行性,文中搭建实验平台进行实验研究,实验平台见图 18。其中,Chroma 61860

电网模拟器用来模拟电网, 额定功率为 60 kVA; 电池模拟器用来提供直流母线电压; 储能变流器模块采用三相三电平四桥臂的全桥电路, 交流输出侧采用 LCL 滤波器, 额定功率为 50 kVA。其中实验参数同仿真系统参数一致, 如表 2 所示。

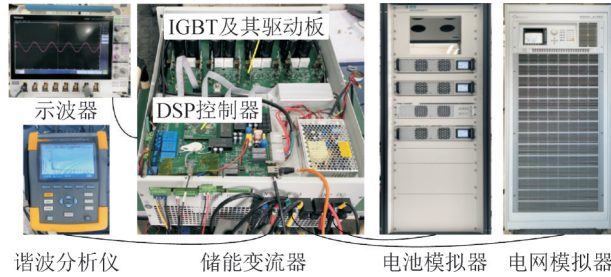
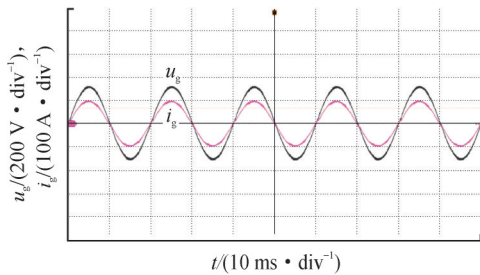


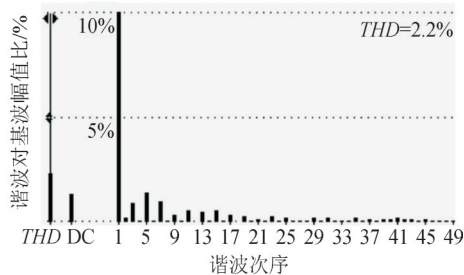
图 18 实验平台

Fig. 18 The experiment platform

实验中, 分别设置电网模拟器的输出频率为 50、49.6 Hz, 然后开机运行, 储能变流器并网放电运行在功率为 40 kW 工况下的实验结果见图 19、20。



(a) 并网电流 i_g 和电压 u_g



(b) 并网电流 i_g 的 THD

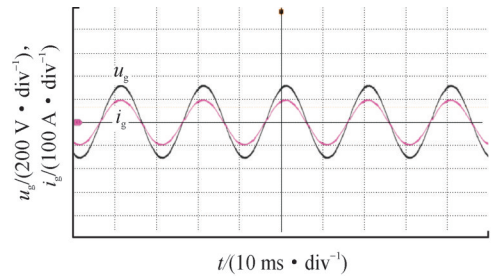
图 19 PI+MIMARC 并网电流及谐波含量实验结果 ($f_0=50$ Hz)

Fig. 19 PI+MIMARC grid-connected current and harmonic content experimental results ($f_0=50$ Hz)

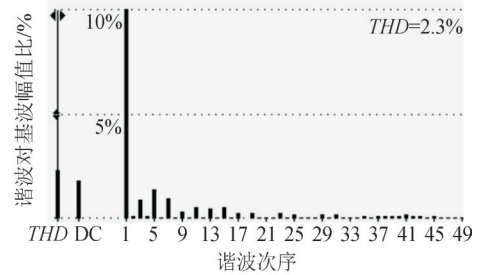
由图 19、20 可知, 电网频率为 50 Hz 时, 并网电流 THD 为 2.2%; 电网频率为 49.6 Hz 时, 并网电流 THD 为 2.3%。结果表明, 电网频率波动下, 采用 PI+MIMARC 控制器可保证并网电流达到良好的谐波控制水平, 进一步验证了本策略的有效性和仿真的准确性。

对比仿真和实验结果可看出, 实验结果的 THD 值比仿真结果略高, 这是因为仿真的结果是在一个特定模型下的计算结果, 在建模过程中会忽略一些因素(例如 LCL 的寄生电阻), 使得模型简化, 故而最

终结果与实验是有差别的。



(a) 并网电流 i_g 和电压 u_g



(b) 并网电流 i_g 的 THD

图 20 PI+MIMARC 并网电流及谐波含量实验结果 ($f_0=49.6$ Hz)

Fig. 20 PI+MIMARC grid-connected current and harmonic content experimental results ($f_0=49.6$ Hz)

5 结论

针对传统 PI+RC 在电网频率波动时控制效果不佳的问题, 文中提出了一种与 PI 复合应用的多内模自适应重复控制 MIMARC 策略, 以提高系统对频率的适应性, 改善变流器输出的电能质量。通过理论分析及实验验证, 可得出如下结论:

1) 设计了 MIMARC 与 PI 复合的双闭环控制策略, 抑制了电网谐波的干扰, 提高了系统的动态响应速度。

2) 分析了 MIMARC 的幅频特性, 可看出, 当变流器并网点频率变化使得采样数 N 出现非整数时, 通过在线调整校正因子可以使谐振频率的峰值接近实际电网频率, 从而提高了变流器的输出电流谐波抑制能力, 实现了对电网频率变化的适应性。

3) 推导了 MIMARC 稳定的条件, 并在该稳定条件下设计其参数, 基于三电平三相四桥臂并网变流器验证了该策略的有效性。当电网频率波动时, MIMARC 相比于 RC, 电流 THD 下降了 1.5% 以上。

参考文献:

[1] 许津铭, 谢少军, 张斌峰. 分布式发电系统中 LCL 滤波并网逆变器电流控制研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4153-4166.

- XU Jinming, XIE Shaojun, ZHANG Bin Feng. Overview of current control techniques for grid-connected inverters with LCL filters in distributed power generation systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4153-4166.
- [2] 何方, 张琦立, 魏书荣, 等. 考虑并网灵活性的大规模海上风电场集群接入系统规划研究[J]. 智慧电力, 2024, 52(9): 33-40.
HE Fang, ZHANG Qili, WEI Shurong, et al. Planning of large-scale offshore wind farm cluster access system considering grid-connected flexibility[J]. Smart Power, 2024, 52(9): 33-40.
- [3] 李洪伟, 徐学帅, 熊晓川, 等. 面向分频传输系统的Y-MMC自适应反步控制策略[J]. 智慧电力, 2024, 52(12): 35-42.
LI Hongwei, XU Xueshuai, XIONG Xiaochuan, et al. Adaptive backstepping control strategy for Y-type modular multilevel converter facing fractional frequency transmission systems[J]. Smart Power, 2024, 52(12): 35-42.
- [4] LI Yiyang, CHEN Qihong, GAO Chen. PI repeated control of three-phase grid-connected inverter[C]//2020 35th Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation(YAC). Zhanjiang: IEEE, 2020: 359-362.
- [5] 耿新, 马文恒, 武琼, 等. 新能源大规模并网环境下变电站孤岛技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(3): 161-171.
GENG Xin, MA Wenheng, WU Qiong, et al. Islanding prevention technology for substations in the context of large-scale grid connection of new energy[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(3): 161-171.
- [6] 张智, 徐永海, 张世聪, 等. 直流配电网电能质量指标研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(3): 172-187.
ZHANG Zhi, XU Yonghai, ZHANG Shicong, et al. Review of power quality indices of a DC distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(3): 172-187.
- [7] 杨兴武, 陈磊, 牛梦娇. LCL滤波并网逆变器多速率重复控制策略[J]. 高电压技术, 2018, 44(10): 3231-3240.
YANG Xingwu, CHEN Lei, NIU Mengjiao. Multirate repetitive control strategy for grid-connected inverter with LCL filter[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10): 3231-3240.
- [8] 谭翠兰, 陈启宏, 张立炎, 等. 三相四桥臂并网逆变器的无差拍重复控制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(18): 142-148.
TAN Cuilan, CHEN Qihong, ZHANG Liyan, et al. Deadbeat and repetitive control for grid-connected three-phase four-leg inverters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(18): 142-148.
- [9] YE Jie, LIU Linguo, XU Jinbang, et al. Frequency adaptive proportional-repetitive control for grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(9): 7965-7974.
- [10] 张兴, 汪杨俊, 余畅舟, 等. 采用PI+重复控制的并网逆变器控制耦合机理及其抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014(30): 5287-5295.
ZHANG Xing, WANG Yangjun, YU Changzhou, et al. Mechanism of the control coupling and suppression strategy using PI and repetitive control in grid-connected inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2014(30): 5287-5295.
- [11] 边庆超, 胡铭, 杨沛豪. 基于PI+自适应内模重复控制的并网逆变器系统研究[J]. 电源学报, 2021, 19(1): 97-106.
BIAN Qingchao, HU Ming, YANG Peihao. Research on grid-connected inverter system based on PI and repetitive control of adaptive internal mode[J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(1): 97-106.
- [12] 霍群海, 李苏宁. 微电网中微源逆变器带混合负载控制[J]. 电工技术学报, 2013(s2): 270-277.
HUO Qunhai, LI Ningning. Micro-source inverter with mixed load control in microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013(s2): 270-277.
- [13] GENG Yiwen, ZHU Lin, SONG Xuanfeng, et al. A modified droop control for grid-connected inverters with improved stability in the fluctuation of grid frequency and voltage magnitude[J]. IEEE Access, 2019(7): 75658-75669.
- [14] 范瑞祥, 刘斌, 周银星. 基于自适应重复控制的并网电流控制研究[J]. 电力电子技术, 2015, 49(12): 17-20.
FAN Ruixiang, LIU Bin, ZHOU Yinxing. Grid current control research based on self-adaptive repetitive control[J]. Power Electronics, 2015, 49(12): 17-20.
- [15] KURNIAWAN E, CAO Zhenwei, MAN Zhihong. Design of robust repetitive control with time-varying sampling periods[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(6): 2834-2841.
- [16] 竺明哲, 叶永强, 赵强松, 等. 抗电网频率波动的重复控制参数设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3857-3867.
ZHU Mingzhe, YE Yongqiang, ZHAO Qiangsong, et al. A design method of repetitive controller against variation of grid frequency[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3857-3867.
- [17] ZHAO Qiangsong, YE Yongqiang, XU Guofeng, et al. Improved repetitive control scheme for grid-connected inverter with frequency adaptation[J]. IET Power Electronics, 2016, 9(5): 883-890.
- [18] 陈磊, 季亮, 杨兴武, 等. LCL型并网逆变器新型频率自适应重复控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 57-64.
CHEN Lei, JI Liang, YANG Xingwu, et al. A new frequency adaptive repetitive control approach for grid-connected inverter with LCL filter[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 57-64.
- [19] JAMIL M, WARIS A, GILANI S O, et al. Design of robust higher-order repetitive controller using phase lead compensator[J]. IEEE Access, 2020(8): 30603-30614.
- [20] 姜一鸣, 姚俊涛, 刘飞, 等. 考虑电网频率偏差的并网逆变器多内模重复控制[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 144-149.
JIANG Yiming, YAO Juntao, LIU Fei, et al. A multi-internal-model repetitive control for grid-connected inverter considering grid-frequency deviation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 144-149.
- [21] LIU Tianqi, WANG Danwei. Parallel structure fractional repetitive control for PWM inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(8): 5045-5054.
- [22] 刘文军, 周龙, 陈剑, 等. LCL并网逆变器的电流双闭环控制[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 52-57.
LIU Wenjun, ZHOU Long, CHEN Jian, et al. Control method for

- grid-connected inverter with LCL filter by employing dual current closed-loops[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(17):52-57.
- [23] 霍群海, 李宁宁. 微源逆变器双环控制策略[J]. *电工技术学报*, 2013(s2):278-284.
HUO Qunhai, LI Ningning. Double loop control strategy for micro-source inverter[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013(s2):278-284.
- [24] LU Wenzhou, ZHOU Keliang, WANG Danwei. General parallel structure digital repetitive control[J]. *International Journal of Control*, 2012, 86(1):1-14.
- [25] 江悦, 曹旌, 梁刚, 等. 光伏并网逆变器谐波特性分析与谐波电流抑制[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2022, 34(9):64-72.
JIANG Yue, CAO Jing, LIANG Gang, et al. Analysis of harmonic characteristics and suppression of harmonic current for photovoltaic grid-connected inverter[J]. *Proceedings of the CSU-EPSCA*, 2022, 34(9):64-72.
- [26] 刘欣, 邓昊, 贾焦心, 等. 含构网型与跟网型逆变器的多变流器系统小干扰稳定性分析方法[J]. *电工技术学报*, 2025, 40(15):4722-4739.
LIU Xin, DENG Hao, JIA Jiaoxin, et al. Small-signal stability analysis method for multi-converter system with grid-forming and grid-following inverters[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2025, 40(15):4722-4739.
- [27] 吴婧婷, 张伟, 彭英杰, 等. 逆变器电压源化运行时的限流工作模式分析及控制策略设计[J]. *电网与清洁能源*, 2025, 41(4):18-26.
WU Jingting, ZHANG Wei, PENG Yingjie, et al. Analysis and control strategy design of current limiting operation mode for inverter voltage source operation[J]. *Power System and Clean Energy*, 2025, 41(4):18-26.
- [28] 李志军, 王雅欣. 基于双谐波注入识别电网阻抗的并网逆变器阻抗重塑策略[J]. *电力科学与技术学报*, 2025, 40(3):222-232.
LI Zhijun, WANG Yaxin, et al. Impedance reshaping strategy for
- grid connected inverter based on grid impedance identification via dual harmonic injection[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2025, 40(3):222-232.
- [29] 周步祥, 丁豪, 周毅, 等. 基于角频率偏差积分反馈的构网型逆变器暂态稳定提升策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(4):59-71.
ZHOU Buxiang, DING Hao, ZHOU Yi, et al. A transient stability enhancement strategy for grid-forming inverters based on integral feedback of angular frequency deviation[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(4):59-71.
- [30] 李国华, 谌智馨, 冯泉. 基于纹波峰值检测的逆变器多自由度能量信息一体化方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(13):71-81.
LI Guohua, CHEN Zhixin, FENG Quan. Multi-degree-of-freedom energy-information integration method for inverters based on ripple peak detection[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(13):71-81.
- [31] 赵铁英, 田培建, 李俊然, 等. 极弱电网下并网逆变器自适应改进前馈策略[J]. *电力科学与技术学报*, 2025, 40(4):269-281.
ZHAO Tiesheng, TIAN Peijian, LI Junran, et al. Feedforward strategy of adaptive improvement for grid-connected inverter with extremely weak grid[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2025, 40(4):269-281.

朱晋宇(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术(E-mail:250182358@qq.com)。

李宁宁(1984—), 男, 工学硕士, 高级工程师, 主要从事交直流电网技术、交直流逆变器的研究工作。

唐西胜(1975—), 男, 研究员, 博导, 主要从事电力系统稳定与控制、分布式电力与储能、交直流微电网等方面的研究工作(通信作者)(E-mail:tang@mail.iee.ac.cn)。

李岚(1962—), 女, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力电子技术、新能源发电控制技术等。