

DOI: 10.7667/PSPC170348

# LCL型并网逆变器新型频率自适应重复控制方法

陈磊<sup>1</sup>, 季亮<sup>1</sup>, 杨兴武<sup>1</sup>, 欧阳武<sup>2</sup>, 牛梦娇<sup>1</sup>

(1. 上海绿色能源并网工程技术研究中心(上海电力学院), 上海 200090;

2. 国网南昌供电公司, 江西 南昌 330000)

**摘要:** 提出一种应用于LCL型并网逆变器的新型频率自适应重复控制(FARC)方法。该方法采用全通滤波器来替代重复控制器中频率比值小数部分构成的延时单元。当电网频率变化时, 通过在线调整全通滤波器的系数, 使重复控制器内模的谐振频率逼近电网基波及谐波频率的实际值, 从而实现在电网频率变化情况下对电压谐波的有效抑制, 进而控制逆变器输出高质量的并网电流。详细给出FARC的设计过程及系统的稳定性分析。仿真和实验结果验证了所提控制方法的有效性和可行性。

**关键词:** 并网逆变器; 频率变化; 重复控制; 全通滤波器; 电流质量

## A new frequency adaptive repetitive control approach for grid-connected inverter with LCL filter

CHEN Lei<sup>1</sup>, JI Liang<sup>1</sup>, YANG Xingwu<sup>1</sup>, OUYANG Wu<sup>2</sup>, NIU Mengjiao<sup>1</sup>

(1. Shanghai Engineering Research Center of Green Energy Grid-connected Technology (Shanghai University of Electric Power), Shanghai 200090, China; 2. State Grid Nanchang Power Supply Company, Nanchang 330000, China)

**Abstract:** This paper proposes a new Frequency Adaptive Repetitive Control (FARC) approach for grid-connected inverter with LCL filter, which utilizes all-pass filter to approximate the delay unit of the frequency ratio's fractional parts of the repetitive controller. When the frequency varies, it makes the resonant frequencies of the internal model of repetitive controller be close to the practical grid fundamental and harmonic frequencies by tuning the coefficients of all-pass filter on-line. The proposed approach can achieve the effective suppression of harmonic in grid and ensure that the inverter output high quality grid-connected current when frequency varies. The design processes of FARC and system stability analysis are given in detail. Simulation and experimental results verify the effectiveness and feasibility of the proposed control approach.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51207086).

**Key words:** grid-connected inverter; frequency vary; repetitive control; all-pass filter; current quality

## 0 引言

随着化石能源的消耗和环境问题的日益严峻, 具有可持续发展意义的分布式发电受到越来越多的关注<sup>[1]</sup>。其中, 光伏发电由于其巨大的潜能成为近年来研究的热点<sup>[2-7]</sup>。

由于分布式发电系统不能调节公共耦合点(PCC)处的电压, 因此并网逆变器通常采用电流控制方式<sup>[8]</sup>。同时为有效、经济地减小逆变器产生的

开关谐波, LCL滤波器逐渐取代了L滤波器<sup>[9]</sup>, 但LCL滤波器固有的谐振尖峰容易导致系统的不稳定。无源阻尼方法可以对LCL滤波器的谐振峰进行抑制, 但也导致系统的损耗增加。有源阻尼方法, 如电容电流反馈<sup>[10]</sup>、电容电压反馈<sup>[10]</sup>或状态反馈<sup>[11]</sup>均需要额外的电流或电压传感器。近年来, 并网电流反馈有源阻尼(GCFAD)<sup>[12-13]</sup>方法由于仅需要检测并网电流, 系统具有硬件成本低, 可靠性高的优点, 在工程上得到了广泛应用。

目前分布式发电系统采用的控制方法主要有预测控制、比例积分控制<sup>[14]</sup>、准比例谐振控制<sup>[8]</sup>、多准谐振控制<sup>[15]</sup>和重复控制<sup>[16-19]</sup>。由于分布式电网中含有大量电力电子装置以及非线性、不平衡负载,

基金项目: 国家自然科学基金项目(51207086); 上海市青年科技英才扬帆计划(16YF1404800); 上海绿色能源并网工程技术研究中心资助项目(13DZ2251900)

因此 PCC 处含有各种低次谐波。传统控制方法对电压谐波的抑制能力偏弱,因而在 PCC 电压畸变较大的地区,通常采用多准谐振控制或重复控制的策略。多准谐振控制器在电网基波和设定的谐波频率处具有较大的增益和带宽,因而对特定谐波具有良好抑制功能,且对电网频率的变化具有一定的适应性,但该方法增加了控制系统设计难度;基于内模原理的重复控制充分利用干扰信号的周期性,可有效抑制 PCC 电压中周期性谐波的干扰,且设计简便<sup>[18]</sup>。

然而,传统重复控制(CRC)在电网频率变化时,控制系统的性能会有所下降。原因是 CRC 将带有小数部分的  $N$  取为接近它的整数,这会导致重复控制器内模的谐振频率偏离电网基波和谐波频率的实际值,从而降低对 PCC 电压谐波的抑制效果,进而影响并网电流的质量。

为提高重复控制对电网频率变化的适应性,已有相关文献提出了各种频率自适应重复控制方法。如文献[20]根据电网频率的变化相应改变开关频率和采样频率,保持频率比值  $N$  为整数。文献[21]采用一阶有限脉冲响应(FIR)滤波器来逼近频率比值小数部分构成的延时单元  $z^{-F}$  ( $0 \leq F \leq 1$ ),并替代  $Q(z)$  提供低通功能。文献[22]采用基于拉格朗日插值算法的 FIR 滤波器替代频率比值构成的小数延时单元,该方法易于在线调整 FIR 滤波器的系数且实施方便,因而在工程中应用广泛。文献[23]提出一种考虑电网频率偏差的多内模重复控制方法,通过增加谐波频率处的带宽来减小频率变化对控制系统性能的影响。

本文提出一种应用于 LCL 型并网逆变器的新型频率自适应重复控制(FARC)方法。该方法采用全通滤波器来替代重复控制器中频率比值小数部分构成的延时单元,其核心思想同文献[20, 22]一致,仍是使内模的谐振频率逼近电网基波和谐波频率的实际值,为减小系统硬件成本, LCL 滤波器采用 GCFAD<sup>[13]</sup>方法抑制谐振峰。本文的思路如下:首先介绍逆变器的拓扑及控制结构;其次给出 GCFAD 的设计方法;随后详细给出 FARC 的设计过程及系统的稳定性分析;最后本文在电网频率变化的工况下,对所提 FARC 方法进行了仿真和实验验证,仿真和实验结果表明,采用所提 FARC 方法,并网电流的质量较采用 CRC 方法有较大提高。

### 1 逆变器拓扑及控制结构

三相并网逆变器的拓扑及控制结构如图1所示。图中:  $V_{dc}$  为直流输入电压;  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $C$  分别为滤波器的电感和电容;  $R_1$  和  $R_2$  为滤波器电感支路的寄生

电阻;  $V_1$  和  $i_1$  分别为逆变器的输出电压和输出电流;  $i_c$  为滤波电容电流;  $i_2$  为并网电流; PCC 为分布式电网公共耦合点;  $U_g$  和  $Z_g$  分别为电网电压和电网阻抗。控制系统使用锁相环获得与 PCC 电压同步的并网电流指令  $i_{2\alpha\beta}^*$ 。

逆变器采用 FARC+P 的复合控制方法和正弦脉宽调制(SPWM)方法, LCL 滤波器采用 GCFAD<sup>[13]</sup>方法。

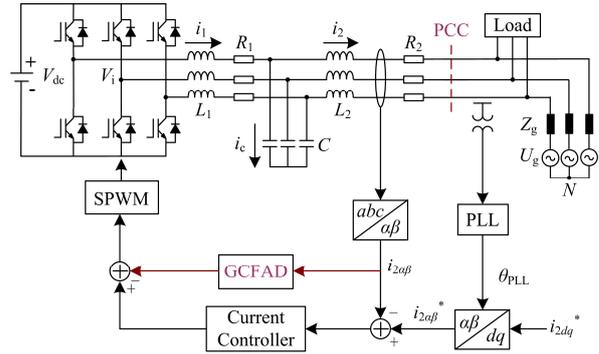


图 1 并网逆变器拓扑及控制结构

Fig. 1 Topology and control structure of grid-connected inverter

### 2 并网电流反馈有源阻尼(GCFAD)设计

以  $\alpha$  轴电流控制为例,并网电流反馈有源阻尼 P 控制结构如图 2 所示。

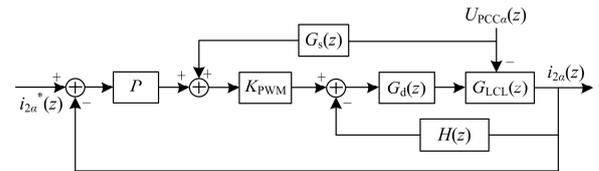


图 2 并网电流反馈有源阻尼 P 控制结构

Fig. 2 Structure of grid-connected current feedback active damping controlled by P

图 2 中:  $H(z)$  为 GCFAD 传递函数;  $K_{Pwm}$  为逆变桥增益环节,通常取直流输入电压的一半;  $G_d(z)$  为一拍控制延时;  $G_s(z)$  为 PCC 电压前馈环节,设计成  $1/K_{Pwm}$ 。

忽略电网阻抗  $Z_g$  并考虑 LCL 电感支路的寄生电阻,可得 LCL 滤波器的连续时间传递函数为

$$G_{LCL}(s) = \frac{1}{(L_1s + R_1)(L_2s + R_2)Cs + (L_1 + L_2)s + R_1 + R_2} \quad (1)$$

GCFAD 传递函数的连续时间表达式<sup>[13]</sup>为

$$H(s) = \frac{-K_c s}{s + \omega_h} \quad (2)$$

LCL 参数为:  $L_1=4$  mH,  $L_2=1$  mH,  $C=10$   $\mu$ F,  $R_1=0.1$   $\Omega$ ,  $R_2=0.02$   $\Omega$ 。按文献[13]中的方法,式(2)

中的参数  $K_c$  和  $\omega_h$  分别取 37.2 和 11 779.2 rad/s。

P 控制下系统的开环传递函数可表示为

$$G_o(z) = \frac{K_p K_{PWM} G_d(z) G_{LCL}(z)}{1 + G_d(z) G_{LCL}(z) H(z)} \quad (3)$$

采样周期  $T$  为 100  $\mu$ s, 分别对  $G_{LCL}(s)$ ,  $H(s)$  采用零阶保持器离散法和双线性变换离散法。绘制以  $K_p$  为开环增益的根轨迹如图 3 所示, 可知闭环系统稳定时  $K_p$  的整定范围是 0~0.18。

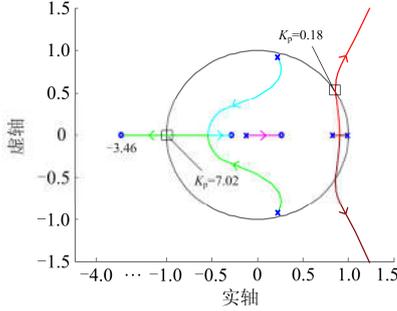


图 3 开环系统根轨迹

Fig. 3 Locus of open loop system

综合考虑系统的稳定性和快速性, P 控制器参数  $K_p$  取 0.05, 此时系统闭环传递函数表达式为

$$P(z) = \frac{0.0244z^3 + 0.085z^2 + 0.00071z - 0.00631}{z^5 - 2.13z^4 + 2.29z^3 - 1.65z^2 + 0.51z + 0.086} \quad (4)$$

### 3 频率自适应重复控制(FARC)

#### 3.1 FARC 设计

以  $\alpha$  轴电流控制为例, 重复控制闭环系统结构如图 4 所示。图中:  $P(z)$  为重复控制的等效控制对象, 也即第 2 节中并网电流反馈 P 控制时的闭环传递函数;  $Q(z)$  为低通滤波器, 用于提高系统的稳定性;  $S(z)$  为低通滤波环节<sup>[16]</sup>或低通滤波与陷波滤波的组合环节<sup>[17,19]</sup>, 目的是抑制 LCL 滤波器的谐振峰以及增加  $P(z)$  在高频段的幅值衰减速度, 以增强系统的稳定性和抗干扰能力;  $z^m$  为相位超前环节, 用来补偿  $P(z)$  和  $S(z)$  带来的相位滞后。

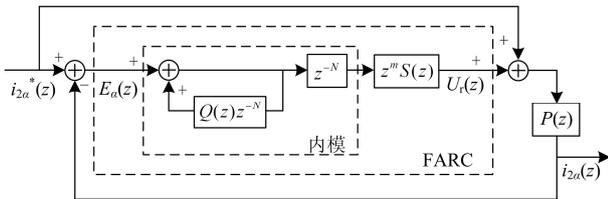


图 4 重复控制闭环系统结构图

Fig. 4 Structure diagram of close loop system of repetitive control

首先设计  $S(z)$ 。经过 GCFAD, LCL 的谐振峰已消除, 为此  $S(z)$  设计成低通滤波环节即可, 本文设计了截止频率为 1 kHz 的四阶巴特沃斯滤波器, 由 Matlab/Fdatool 工具箱, 可得  $S(z)$  的表达式为

$$S(z) = \frac{0.004952[z^4 + 4z^3 + 6z^2 + 4z + 1]}{z^4 - 2.37z^3 + 2.315z^2 - 1.055z + 0.1874} \quad (5)$$

其次确定超前环节的阶次  $m$ , 经过调试,  $m$  取 10 可使  $z^m$  对  $P(z)$  和  $S(z)$  带来的相位滞后进行较好的补偿。

接着确定低通滤波器  $Q(z)$ , 本文取零相移陷波滤波器作为  $Q(z)$ , 其表达式为

$$Q(z) = 0.25z^{-1} + 0.5 + 0.25z \quad (6)$$

在分布式发电系统中, 若逆变器工作在额定电网频率, 则重复控制内模环节中的  $N$  取 200(采样频率为 10 kHz); 若电网频率发生变化, 则频率比值  $N$  带有小数部分。传统重复控制(CRC)将小数部分进行四舍五入, 保持  $N$  为整数。该法虽实现简便, 但也导致控制系统稳态精度下降。本文提出一种新型频率自适应(FARC)重复控制方法, 下面详细说明。

将延时单元  $z^{-N}$  改写成  $z^{-N_i-H-F}$ , 其中  $H$  代表全滤波器的阶数,  $N_i+H$  代表  $N$  的整数部分,  $F$  代表小数部分( $0 \leq F \leq 1$ )。

$H$  阶全通滤波器  $AP(z)$  的传递函数表达式<sup>[20]</sup>为

$$AP(z) = \frac{z^{-H} D(z^{-1})}{D(z)} = \frac{b_h + b_{h-1}z^{-1} + \dots + b_1z^{-(h-1)} + z^{-h}}{1 + b_1z^{-1} + \dots + b_{h-1}z^{-(h-1)} + b_hz^{-h}} \quad (7)$$

全通滤波器的设计方法较多, 但仅有 Thiran 设计法易于在线调整<sup>[24]</sup>。本文采用该方法, 此时系数  $b_h$  的计算公式为

$$b_h = (-1)^h \frac{H!}{h!(H-h)!} \prod_{n=0}^{H-h} \frac{F+n}{F+n+h}, \quad h=1, 2, \dots, H \quad (8)$$

阶数  $H$  越高, 小数延时单元  $z^{-F-H}$  的近似精度也越高, 通常阶数取 3 即可满足近似精度的要求。因此本文  $H$  取 3, 此时系数  $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$  的计算公式简化为

$$b_1 = \frac{-3F}{F+4}, b_2 = \frac{3F(F+1)}{(F+4)(F+5)}, b_3 = \frac{-F(F+1)(F+2)}{(F+4)(F+5)(F+6)} \quad (9)$$

例如, 当电网频率变为 49.6 Hz 和 50.4 Hz 时, 比值  $N$  分别变为 201.6 和 198.4。若采用 CRC 方法,  $z^{-N}$  应分别取为  $z^{-202}$  和  $z^{-198}$ ; 若采用 FARC 方法,  $z^{-201.6}$  和  $z^{-198.4}$  应分别表示为  $z^{-198} AP_1(z)$ ,  $z^{-195} AP_2(z)$ 。

由图 4 可得重复控制内模的传递函数表达式为

$$G_{rep} = \frac{z^{-N}}{1 - Q(z)z^{-N}} \quad (10)$$

电网频率分别为 49.6 Hz 和 50.4 Hz 两种情况下,

采用 CRC 和 FARC 两种方法时内模的幅频特性对比如图 5 所示。可见 CRC 内模的谐振频率偏离了电网实际基波频率和谐波频率。以 7 次谐波为例，CRC 内模的谐振频率分别为 346.4 Hz 和 353.6 Hz，而 FARC 内模的谐振频率逼近期望的谐振频率，即 347.2 Hz 和 352.8 Hz。由图 5 分析可知电网频率变化时，采用 FARC 方法，电压谐波抑制效果更好。

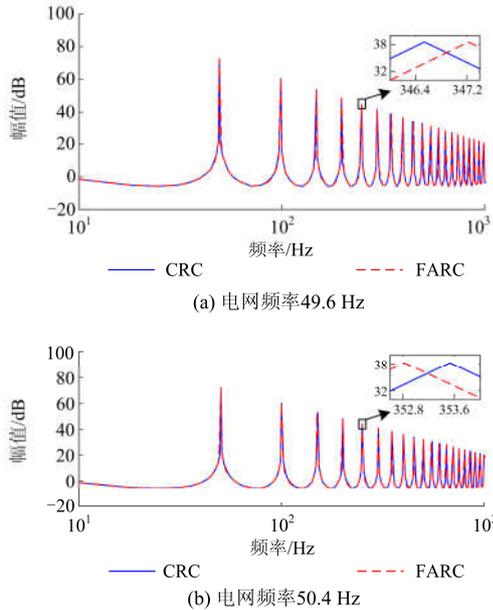


图 5 CRC 与 FARC 内模幅频特性对比

Fig. 5 Comparison of amplitude frequency characteristic of internal model of CRC and FARC

本文所提 FARC 方法的实现过程如图 6 所示。通过检测电网的实际基波频率，计算出频率比值  $N$  的小数部分  $F$ ，再根据式(9)在线调整全通滤波器的系数  $b_h$ ，时刻保持重复控制内模的谐振频率逼近电网实际谐波频率。

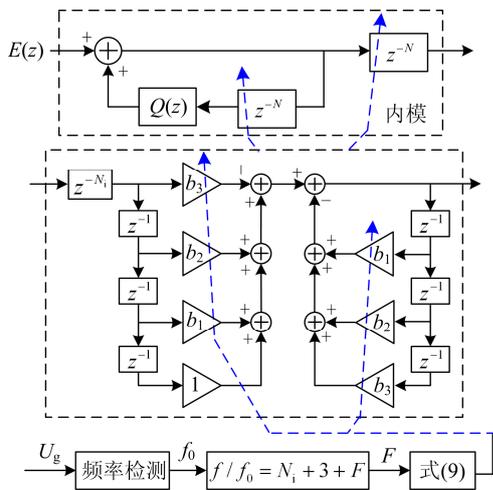


图 6 FARC 实现过程示意图

Fig. 6 Schematic diagram of realization process of FARC

### 3.2 系统稳定性分析

由图 4 可得系统的闭环传递函数表达式为

$$\frac{i_{2\alpha}(z)}{i_{2\alpha}^*(z)} = \frac{P(z)[z^N - Q(z)] + z^m S(z)P(z)}{z^N - Q(z) + z^m S(z)P(z)} \quad (11)$$

采用 FARC 内模后，闭环传递函数变为

$$\frac{i_{2\alpha}(z)}{i_{2\alpha}^*(z)} = \frac{P(z)[z^{N_i} - Q(z)AP(z)] + z^m AP(z)S(z)P(z)}{z^{N_i} - Q(z)AP(z) + z^m AP(z)S(z)P(z)} \quad (12)$$

闭环系统能够稳定的充分条件是系统特征方程根分布在单位圆内，即

$$|z^N| \text{ (或 } |z^{N_i}|) < 1 \Leftrightarrow |G(e^{j\omega T})| < 1 \quad (13)$$

式(13)中:

$$G(e^{j\omega T}) = Q(e^{j\omega T}) - e^{j\omega m T} S(e^{j\omega T}) P(e^{j\omega T}) \quad (14)$$

$$\text{或} = [Q(e^{j\omega T}) - e^{j\omega m T} S(e^{j\omega T}) P(e^{j\omega T})] AP(e^{j\omega T})$$

$\omega \in [0, \pi/T]$ ，也即角频率  $\omega$  从 0 增大到奈奎斯特频率过程中， $G(e^{j\omega T})$  的轨迹不超过单位圆，就可认为闭环系统的极点分布在单位圆内。在电网频率为 49.6 Hz 和 50.4 Hz 两种情况下，采用 CRC 和 FARC 方法时  $G(e^{j\omega T})$  的轨迹如图 7 所示。由图 7 可知，采用 FARC 方法，闭环系统仍可稳定。

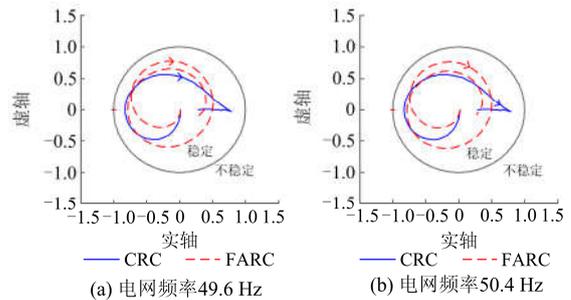


图 7  $G(e^{j\omega T})$  轨迹图

Fig. 7 Trajectory of  $G(e^{j\omega T})$

### 4 仿真实验与分析

为验证所提 FARC 方法的有效性和可行性，在 Matlab/Simulink 仿真环境下搭建了三相 LCL 型并网逆变器仿真模型，仿真参数如下：电网线电压有效值  $u_g=110$  V，电网频率  $f=49.6$  Hz 或 50.4 Hz，直流侧电压  $V_{dc}=250$  V，LCL 滤波器的参数在第 2 节中已经给出，开关频率为 10 kHz，采样频率为 10 kHz。

仿真中不考虑电网阻抗，此时 PCC 电压即为电网电压。由前面的分析可知，由于含有非线性本地负载，PCC 电压会含有低次谐波。因此仿真中向电网注入 5、7、11、13、17、19 次谐波，其含量分别为 2.85%、2.52%、2.36%、2.05%、1.89%、1.57%。图 8、图 9 分别给出了电网频率为 49.6 Hz、50.4 Hz，采用 CRC 和 FARC 方法时，PCC 电压和 A 相并网

电流的稳态仿真波形。由图 8、图 9 可知, 电网频率变化时, 采用 FARC 方法, 并网电流对指令信号的跟踪误差较小, 电流质量较高。

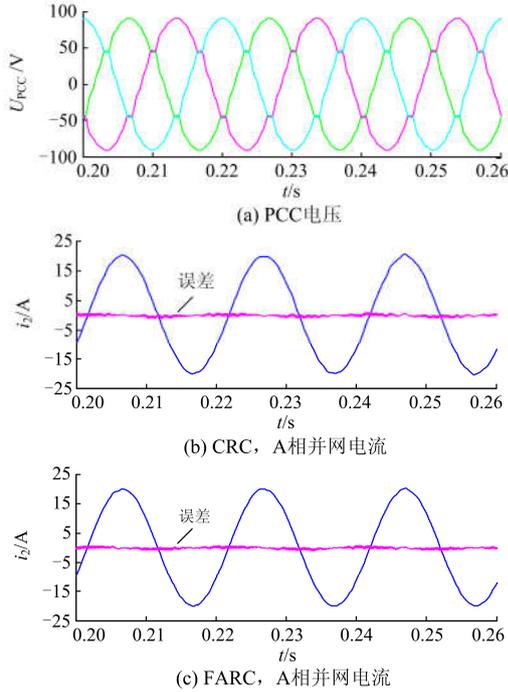


图 8 49.6 Hz, PCC 电压和 A 相并网电流仿真波形

Fig. 8 Simulation waveforms of PCC voltage and grid-connected current in A phase when frequency is 49.6 Hz

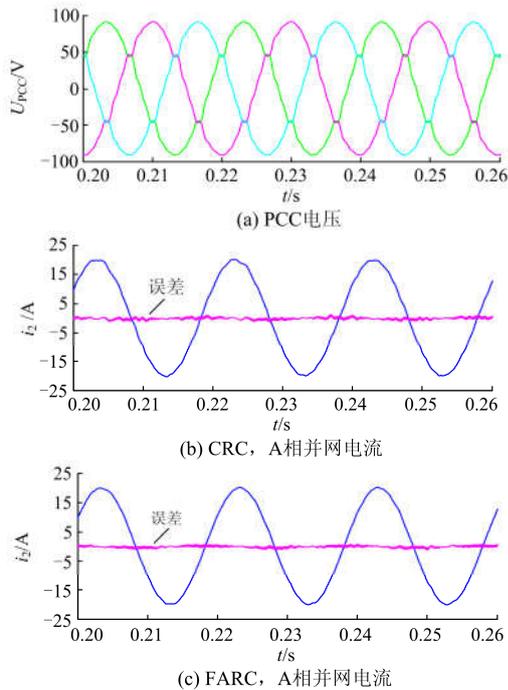


图 9 50.4 Hz, PCC 电压和 A 相并网电流仿真波形

Fig. 9 Simulation waveforms of PCC voltage and grid-connected current in A phase when frequency is 50.4 Hz

图 10、图 11 给出了电网频率为 49.6 Hz、50.4 Hz 两种情况下采用 CRC 和 FARC 方法时, A 相 PCC 电压和并网电流的频谱。由图 10、图 11 可知, 电网频率变化时, 采用 FARC 方法, PCC 电压中各次谐波的抑制效果更好, 这和前面的理论分析相一致。

最后, 考虑到本文所提 FARC 方法的思想与文献[22]类似, 两者均是对小数延时单元进行近似, 因而有必要对这两种自适应控制方法的结果进行对比。图 12、图 13 分别给出了采用文献[22]所提方法,

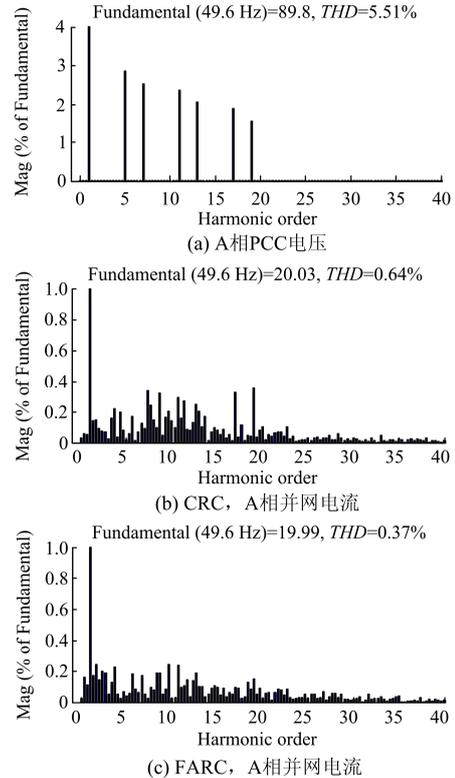
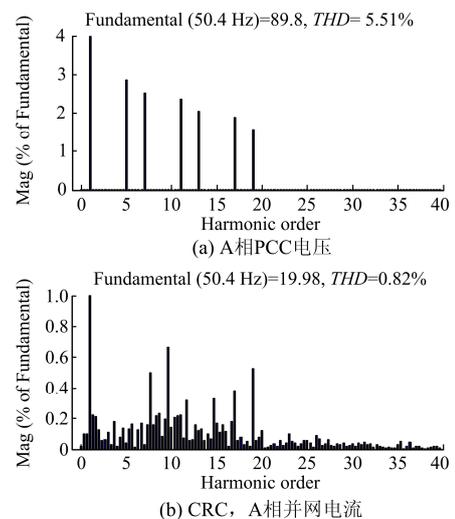


图 10 49.6 Hz, A 相 PCC 电压和并网电流频谱

Fig. 10 Spectrum of PCC voltage and grid-connected current in A phase when frequency is 49.6 Hz



(b) CRC, A 相并网电流

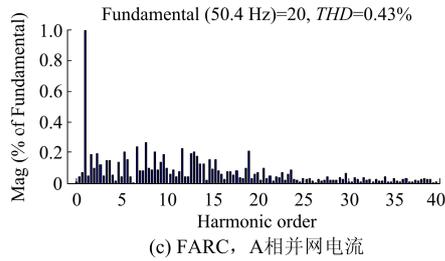


图 11 50.4 Hz, A 相 PCC 电压和并网电流频谱

Fig. 11 Spectrum of PCC voltage and grid-connected current in A phase when frequency is 50.4 Hz

电网频率为 49.6 Hz、50.4 Hz 时, A 相并网电流的稳态仿真波形和频谱。由图 12、图 13 可知文献[22]所提方法和本文所提 FARC 方法的控制效果接近。

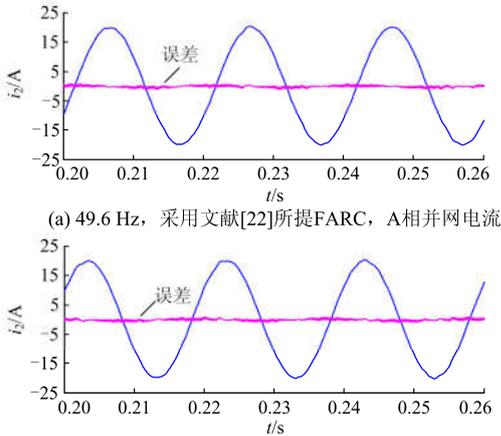
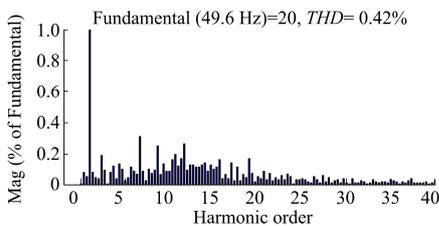
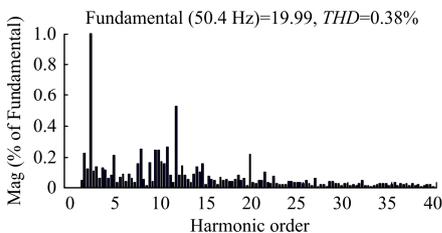


图 12 文献[22]所提 FARC, A 相并网电流仿真波形

Fig. 12 Simulation waveforms of grid-connected current in A phase with FARC mentioned in [22]



(a) 49.6 Hz, 采用文献[22]所提FARC, A相并网电流频谱



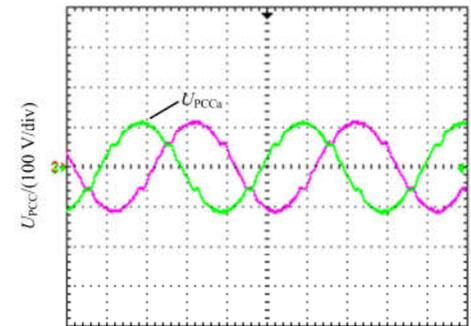
(b) 50.4 Hz, 采用文献[22]所提FARC, A相并网电流频谱

图 13 文献[22]所提 FARC, A 相并网电流仿真频谱  
Fig. 13 Spectrum of grid-connected current in A phase with FARC mentioned in [22]

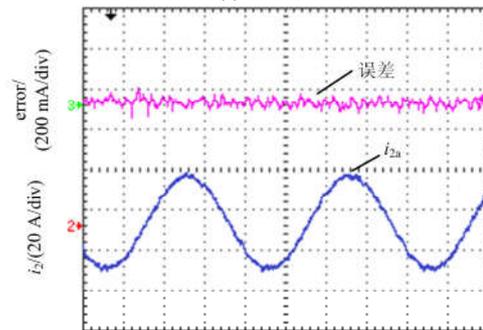
### 5 实验验证与分析

为了验证所提FARC方法和仿真结果的正确性, 本文在基于 TMS320F28335 浮点型 DSP 的三相 LCL 型并网逆变器实验平台上对 CRC 和 FARC 的控制性能进行了实验研究。实验系统的参数和仿真参数一致, 利用可编程电源向电网电压中注入 5、7、11、13、17、19 次谐波, 其含量与仿真时的谐波含量一致。

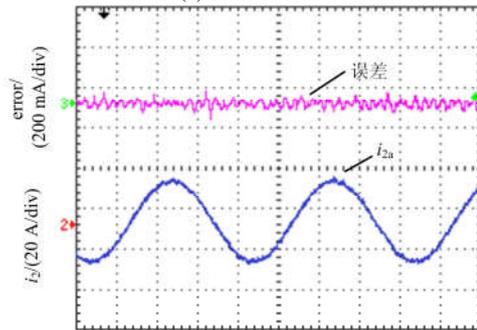
图 14 给出了电网频率为 49.6 Hz, 采用 CRC 和 FARC方法时, PCC 电压和 A 相并网电流的稳态实验波形。由实验结果可知电网频率变化时, 采用 FARC 方法, 并网电流对指令信号的跟踪误差较小, 电流质量较高。可见实验结果和仿真结果一致。



(a) PCC 电压



(b) CRC, A 相并网电流



(c) FARC, A 相并网电流

图 14 49.6 Hz, PCC 电压和 A 相并网电流实验波形  
Fig. 14 Experimental waveforms of PCC voltage and grid-connected current in A phase when frequency is 49.6 Hz

## 6 结论

1) 传统重复控制(CRC)工作于非额定电网频率时, 由于谐振频率偏离了电网基波和谐波频率的实际值, 会造成电压谐波抑制效果下降。

2) 本文所提的新型频率自适应重复控制(FARC)方法利用全通滤波器替代重复控制器中频率比值小数部分构成的延时单元, 使得谐振频率逼近电网基波和谐波频率的实际值, 从而实现了在电网频率变化情况下对电压谐波的有效抑制, 确保逆变器输出高质量的并网电流。

## 参考文献

- [1] 崔红芬, 汪春, 叶季蕾, 等. 多接入点分布式光伏发电系统与配电网交互影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 91-97.  
CUI Hongfen, WANG Chun, YE Jilei, et al. Research of interaction of distributed PV system with multiple access points and distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 91-97.
- [2] 闫凯, 张保会, 瞿继平, 等. 光伏发电系统暂态建模与等值[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 1-8.  
YAN Kai, ZHANG Baohui, QU Jiping, et al. Photovoltaic power system transient modeling and equivalents[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 1-8.
- [3] VISHAL D, KRISHAN K P, PARDEEP S, et al. Optimization of photovoltaic power system: a comparative study[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2: 11pp.  
DOI 10.1186/s41601-017-0036-2
- [4] 李伟峰. 一种低谐波畸变的平滑光伏并网调制策略研究[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(12): 113-117.  
LI Weifeng. Research on smooth modulation strategy with low harmonic distortion for active power filter of PV grid-connection[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(12): 113-117.
- [5] 白冰, 管魁威, 徐小丽, 等. 110 kV 室内变电站站用光伏发电系统[J]. 陕西电力, 2015, 43(11): 25-27.  
BAI Bing, GUAN Kuiwei, XU Xiaoli, et al. Probe into photovoltaic system for 110 kV indoor substation[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(11): 25-27.
- [6] 苏菲, 梁昊, 王养浩. 大规模光伏并网发电系统拓扑结构的对比研究[J]. 陕西电力, 2015, 43(3): 16-20.  
SU Fei, LIANG Hao, WANG Yanghao. Comparative analysis on large-scale grid-connected PV system topology[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(3): 16-20.
- [7] 陈海飞, 苗淼, 常康. 大型并网光伏电站无功电压控制综述[J]. 陕西电力, 2016, 44(10): 20-26.  
CHEN Haifei, MIAO Miao, CHANG Kang. Review on reactive voltage control for large-scale grid-connected PV power station[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(10): 20-26.
- [8] 杨勇, 赵春江. 分布式发电系统中并网逆变器比例谐振控制[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(11): 51-55.  
YANG Yong, ZHAO Chunjiang. Proportional resonance controller of grid-connected inverter for distributed generation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(11): 51-55.
- [9] 李泽斌, 罗安, 田园, 等. LCL 型光伏并网逆变器电流内环控制方法[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2772-2778.  
LI Zebin, LUO An, TIAN Yuan, et al. Inner current loop method for photovoltaic grid-connected inverter with LCL filter[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2772-2778.
- [10] 肖华锋, 许津铭, 谢少军. LCL 型进网滤波器的有源阻尼技术分析与比较[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 55-59.  
XIAO Huafeng, XU Jinming, XIE Shaojun. Analysis and comparison of active damping technologies for LCL filter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 55-59.
- [11] 许津铭, 谢少军, 唐婷. 基于极点配置的 LCL 滤波并网逆变器电流控制策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(3): 95-100.  
XU Jinming, XIE Shaojun, TANG Ting. Current control strategy based on pole placement for grid-connected inverters with LCL filters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(3): 95-100.
- [12] 陈东, 张军明, 钱照明. 带 LCL 滤波器的并网逆变器单电流反馈控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(9): 10-16.  
CHEN Dong, ZHANG Junming, QIAN Zhaoming. Single current feedback control strategy for grid-connected inverters with LCL filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(9): 10-16.
- [13] XU J, XIE S, TANG T. Active damping-based control for grid-connected LCL-filtered inverter with injected grid current feedback only[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(9): 4746-4758.
- [14] GUO Wenming, MU Longhua. Control principles of micro-source inverters used in microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 7pp.

- DOI 10.1186/s41601-016-0019-85
- [15] 王逸超, 罗安, 金国斌, 等. 单相LCL型并网逆变器新型谐波阻尼策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(33): 5803-5810.  
WANG Yichao, LUO An, JIN Guobin, et al. New harmonic damping strategy for single grid-connected inverter with LCL filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(33): 5803-5810.
- [16] 刘飞, 查晓明, 周彦, 等. 基于极点配置与重复控制相结合的三相光伏发电系统的并网策略[J]. 电工技术学报, 2008, 23(12): 130-136.  
LIU Fei, ZHA Xiaoming, ZHOU Yan, et al. Research on grid-connected strategy combining pole-assignment and repetitive control in three-phase photovoltaic system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(12): 130-136.
- [17] 王斯然, 吕征宇. LCL型并网逆变器中重复控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(27): 69-75.  
WANG Siran, LÜ Zhengyu. Research on repetitive control method applied to grid-connected inverter with LCL filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(27): 69-75.
- [18] 张学广, 马彦, 李瑞, 等. 两相静止坐标系下并网逆变器的重复控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(9): 85-91.  
ZHANG Xueguang, MA Yan, LI Rui, et al. Repetitive control strategy for grid-connected converters in stationary frame[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(9): 85-91.
- [19] 齐飞, 李建文, 张舒怡, 等. 基于LCL滤波器的光伏并网复合控制策略[J]. 电机与控制应用, 2016, 43(1): 48-53.  
QI Fei, LI Jianwen, ZHANG Shuyi, et al. Multiple control strategy of grid-connected photovoltaic based on LCL filter[J]. Electric Machines & Control Application, 2016, 43(1): 48-53.
- [20] MOHAMMAD A, SULEIMAN S, PERICLE Z. Adaptive repetitive control with feedforward scheme for grid-connected inverters[J]. IET Power Electron, 2015, 8(8): 1403-1410.
- [21] 陈东, 张军明, 钱照明. 一种具有频率变化适应性的并网逆变器改进型重复控制方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 63-69.  
CHEN Dong, ZHANG Junming, QIAN Zhaoming. An improved repetitive control scheme for grid-connected inverter with frequency-varying adaptability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(6): 63-69.
- [22] ZHAO Q, YE Y, XU G, et al. Improved repetitive control scheme for grid-connected inverter with frequency adaptation[J]. IET Power Electron, 2016, 9(5): 883-890.
- [23] 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.
- [24] TI L. Splitting the unit delay[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1996, 13(4): 30-60.

收稿日期: 2017-03-12; 修回日期: 2017-06-20

作者简介:

陈磊(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电与有源滤波技术, 并网变流器及其数字控制;

季亮(1985—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为新能源发电技术, 电力系统保护与控制; E-mail: jihome2002@sina.cn

杨兴武(1981—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新能源发电技术、FACTS技术。

(编辑 周金梅)