

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190557

新型频率自适应复合重复控制及并网逆变器应用

李伟锋, 陆小辉, 陈赛男, 王双红, 马华国

(中原工学院电子信息学院, 河南 郑州 451191)

摘要: 电网频率波动时, 系统采样频率与电网频率的比值可能为分数。重复控制(RC)的谐振频率将偏离实际电网频率, 系统的谐波抑制能力将大大降低。针对该问题, 提出了基于有限脉冲响应(FIR)滤波器的频率自适应复合重复控制方案。该方法通过在线调整 FIR 滤波器的系数实现分数延迟, 使 RC 的谐振频率近似于电网频率, 从而实现系统对电网频率变化的适应。最后, 仿真和实验验证了所提控制策略的有效性。

关键词: 重复控制; 谐波抑制; 频率自适应; 有限脉冲响应(FIR)滤波器; 并网逆变器

Improved frequency adaptive compound RC scheme for grid-connected inverter

LI Weifeng, LU Xiaohui, CHEN Sainan, WANG Shuanghong, MA Huaguo

(School of Electronic and Information, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 451191, China)

Abstract: When the grid frequency varies, the ratio of system sampling frequency to grid frequency may be a fraction. The resonant frequencies of Repetitive Control (RC) will deviate from real grid frequencies, and the harmonic suppression capability of system will be significantly reduced. Therefore, a Frequency Adaptive PIRC (FA-PIRC) scheme based on FIR filter is proposed. The fractional delay is realized by adjusting the coefficients of FIR filter online, that the resonant frequency of RC is approximated to grid frequency, thus realizing the adaptation of system to grid frequency variation. Finally, simulation and experiments verify the effectiveness of the proposed control strategy.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61673404) and Key Science and Technology Project of Henan Province (No. 152102210155).

Key words: repetitive control; harmonic suppression; frequency adaptive; finite impulse response (FIR) filter; grid-connected inverter

0 引言

近年来, 随着新能源的开发和利用, 分布式发电和并网逆变器受到广泛的关注和研究^[1-3]。而并网逆变器输出电流易受到电网波动的干扰。因此, 一些谐波抑制技术被应用于并网逆变器入网电流的控制中, 如 PI、PR、RC 等^[4-6]。

RC 具有高稳态精度和良好的干扰抑制能力, 但 RC 的动态响应慢^[7-9]。因此, 在逆变器应用中, RC 通常与其他控制器结合, 以提高系统的动态响应速度^[10]。有学者提出比例积分与重复控制相结合的方案^[11-13], 然而分布式发电系统中电网频率会在一定范围内变化, 此复合控制方案受电网频率波动

影响大, 这将导致系统稳态性能变差。

因此, 针对频率自适应 RC, 文献[14-15]提出一种方案, 通过改变采样频率以确保采样频率与电网频率的比率为整数, 此方法将增加系统的计算复杂性。文献[16]提出一种虚拟采样 RC, 实际采样数据通过线性插值获得, 而且虚拟采样频率与电网频率的比值为整数^[17]。此方案的每个虚拟采样点将位于不同位置, 这会导致每次线性插值都要重新计算, 设计难度大。文献[18-20]提出基于拉格朗日插值算法的有限脉冲响应滤波器(FIR)用于近似实现 RC 中分数阶延迟项^[21]。但在插入式复合重复控制结构中还没有相关研究, 因此, 有必要研究在这种结构下的频率自适应。

本文提出了一种基于 FIR 滤波器的新型频率自适应复合重复控制(Frequency Adaptive PIRC, FA-PIRC)方案。当电网频率变化时, 可在线调整 FIR

滤波器的系数, 使 FA-PIRC 系统的频率接近实际电网频率, 从而改善系统的稳态性能^[17]。最终, 仿真和实验结果验证了所提频率自适应方案的有效性。

1 单相并网逆变器建模

单相并网逆变器的模型如图 1 所示, 其参数在表 1 中列出。 E_d 是电源电压, u_{inv} 是逆变器输出电压, L_1 和 L_2 是滤波电感, R_1 和 R_2 是其等效电阻, C 是滤波电容, L_g 是电网的等效电感, v_g 是电网电压, i_g 是电网电流, i_{ref} 是参考电流。

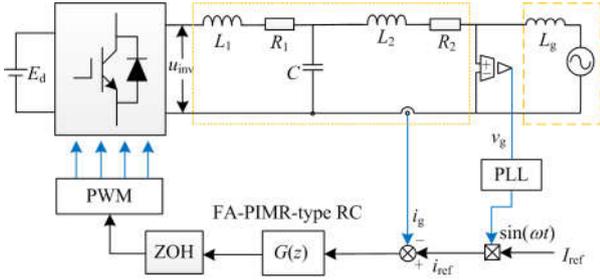


图 1 LCL 型并网逆变器模型

Fig. 1 Block diagram of grid-connected inverter with LCL filter

表 1 LCL 型并网逆变器参数

Table 1 Parameters of LCL type grid-connected inverter

参数	数值
逆变器侧电感 L_1	3 mH
L_1 等效电阻 R_1	0.48 Ω
电网侧电感 L_2	2.6 mH
L_2 等效电阻 R_2	0.32 Ω
滤波电容 C	10 μ F
直流母线电压 E_d	380 V
电网频率 f_g	50 Hz
采样频率 f_s	10 kHz
开关频率 f_{sw}	10 kHz
开关死区时间	3 μ s
参考电流 i_{ref}	10 A

如果忽略等效电阻, 则从输入电压 u_{inv} 到电网电流 i_g 的传递函数为

$$G_{LCL}(s) = \frac{i_2(s)}{u_{inv}(s)} = \frac{1}{L_1 L_2 C s^3 + (L_1 + L_2)s} \quad (1)$$

代入参数得

$$G_{LCL}(s) = \frac{1}{7.8 \cdot 10^{-11} s^3 + 0.0056s} \quad (2)$$

采用 ZOH 离散化得

$$P(z) = \frac{0.002061z^2 + 0.007949z + 0.002061}{z^3 - 2.324z^2 + 2.324z - 1} \quad (3)$$

2 分数延迟 FIR 滤波器的设计

重复控制内模中 N 是采样频率与电网频率的比值, 当 N 不是整数时^[17], 它可以分成整数 $\text{int}(N)$ 和分数 D , 如式(4)所示。

$$N = \text{int}(N) + D \quad (4)$$

拉格朗日线性插值可以实现分数延迟 z^{-D} 。分数阶延迟 FIR(FD-FIR)滤波器的传递函数为

$$z^{-D} \approx H(z) = \sum_{n=0}^M h(n)z^{-n} \quad (5)$$

基于拉格朗日多项式插值的 FIR 滤波器实现如图 2 所示。系数由 Thiran 公式确定。

$$h(n) = \prod_{K=0, K \neq n}^M \frac{D-k}{n-k}, n=0,1,2,\dots,M \quad (6)$$

式中: M 是 FIR 滤波器的阶数; D 趋近于 M 的一半时效果最好^[17]。当 $M=1, 2, 3$ 时, FIR 滤波器的系数在表 2 中列出。

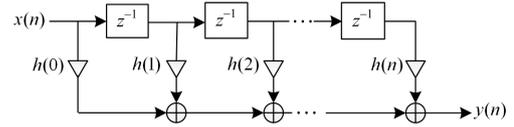


图 2 M 阶 FIR 滤波器的实现

Fig. 2 Direct form implementation of M -order FIR filter

当 $N=201.6$, $z^{-201.6}$ 可以表示为 $z^{-200} z^{-1.6}$, 由表 2 可得:

$$z^{-1.6} \approx -0.056 + 0.448z^{-1} + 0.672z^{-2} - 0.064z^{-3} \quad (7)$$

$z^{-201.6}$ 可以表示为

$$z^{-201.6} = z^{-200}(-0.056 + 0.448z^{-1} + 0.672z^{-2} - 0.064z^{-3}) \quad (8)$$

3 控制系统的设计

3.1 FA-PIRC 系统的设计

由内模型原理可知 RC 可以提高系统跟踪精度。但是, 重复控制存在周期延迟。因此, 输出对输入响应的变化至少延迟一个周期, 且动态性能不佳^[22]。所以, 在逆变器应用中, RC 通常与其他控制器组合以提高系统的动态响应速度^[12]。有学者提出 PI 和 RC 串联的复合控制策略。PI 具有较快的响应速度, RC 具有较高的控制精度, 因此逆变器的输出可以准确跟踪系统的输入信号。此方案使并网逆变器具有较快的响应速度和良好的控制精度^[10], 但此方案受电网频率波动影响比较大, 会使系统的稳态性能变差。

表 2 $M=1,2,3$ 时 FD-FIR 滤波器的系数Table 2 Coefficients of FD-FIR filter when order $M=1, 2, 3$

	$h(0)$	$h(1)$	$h(2)$	$h(3)$
$M=1$	$1-D$	D		
$M=2$	$(D-1)(D-2)/2$	$-D(D-2)$	$D(D-1)/2$	
$M=3$	$-(D-1)(D-2)(D-3)/6$	$D(D-2)(D-3)/2$	$-D(D-1)(D-3)/2$	$D(D-1)(D-2)/6$

因此,提出了基于 FIR 滤波器的 FA-PIRC 控制方案以提高并网逆变器的稳态跟踪性能。当电网频率变化时,在线调整 FIR 滤波器系数,使 RC 的谐

振频率逼近实际电网频率,从而实现系统对电网频率变化的适应^[20]。FA-PIRC 的框图如图 3 所示。

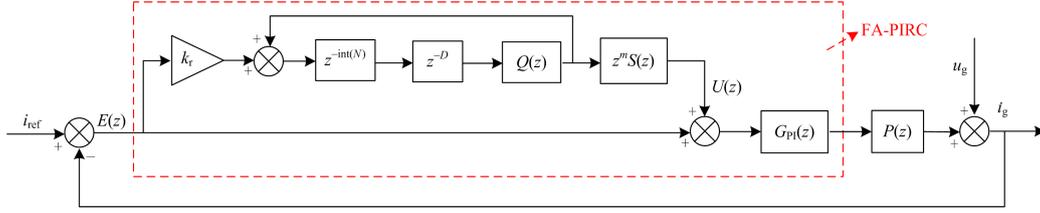


图 3 FA-PIRC 控制系统框图

Fig. 3 Block diagram of FA-PIRC system

图中, i_{ref} 是参考电流, $E(z)$ 是跟踪误差, RC 的增益 k_r 为 0.8, $z^{-int(N)}$ 为整数延迟, z^{-D} 为分数延迟, $Q(z)$ 为内模滤波器,以增加系统鲁棒性, $S(z)$ 是抑制高频谐波的四阶巴特沃斯低通滤波器, z^m 为相位超前补偿器,用来补偿低通滤波器引起的相位滞后^[23], $U(z)$ 是 RC 的输出, $G_{PI}(z)$ 为比例积分控制器。 $P(z)$ 是被控对象, u_g 是电网电压, i_g 是电网电流。

首先设计 $S(z)$, 本文将设计为截止频率为 1 kHz 的四阶巴特沃斯滤波器^[20], 其传递函数为

$$S(z) = \frac{0.004824z^4 + 0.0193z^3 + 0.02895z^2 + 0.004824}{z^4 - 2.37z^3 + 2.314z^2 + 0.1874} \quad (9)$$

其次确定 m , 经实验, m 取 9 时补偿效果较好。然后确定内模滤波器 $Q(z)$, 本文选取零相位低通滤波器作为 $Q(z)$, 其表达式为

$$Q(z) = 0.25z + 0.5 + 0.25z^{-1} \quad (10)$$

PI 控制器的传递函数为

$$G_{PI}(z) = k_p + \frac{k_i T}{z-1} \quad (11)$$

式中: $T=1/f_s$; 比例项 $k_p=12$; 积分项 $k_i=1000$ 。

3.2 FA-PIRC 系统的稳定性分析

由图 3 可知, FA-PIRC 系统的跟踪误差为

$$E(z) = \frac{1}{1 + [G_{rc}(z) + 1]P(z)G_{PI}(z)} [I_{ref}(z) - U_g(z)] \quad (12)$$

由式(12)可知, 系统的特征多项式为

$$1 + [G_{rc}(z) + 1]P(z)G_{PI}(z) = [1 + P(z)G_{PI}(z)] \left[1 + \frac{G_{rc}(z)P(z)G_{PI}(z)}{1 + P(z)G_{PI}(z)} \right] = [1 + P(z)G_{PI}(z)][1 + G_{rc}(z)P_0(z)] \quad (13)$$

式中, $P_0(z) = P(z)G_{PI}(z)/[1 + P(z)G_{PI}(z)]$ 。

因此, FA-PIRC 系统有两个稳定性条件:

- 1) 多项式的根 $1 + P(z)G_{PI}(z) = 0$ 在单位圈内;
- 2) $|1 + G_{rc}(z)P_0(z)| \neq 0$ 。

传统重复控制的传递函数(CRC)为

$$G_{rc}(z) = \frac{Q(z)z^{-N}}{1 - Q(z)z^{-N}} z^m k_r S(z) \quad (14)$$

根据式(4)、式(5)和式(14), FA-PIRC 的传递函数为

$$G_{FA-PIRC}(z) = \frac{Q(z)z^{-int(N)}z^{-D}}{1 - Q(z)z^{-int(N)}z^{-D}} z^m k_r S(z) \quad (15)$$

显然, FA-PIRC 与稳定的条件 1) 无关。将式(14)代入条件 2) 得

$$|1 - Q(z)z^{-N} + Q(z)z^{-N+m} k_r S(z) P_0(z)| \neq 0 \quad (16)$$

式(16)可表示为

$$|Q(z)z^{-N}(1 - z^m k_r S(z) P_0(z))| < 1 \quad (17)$$

将分数延迟应用于 PIRC, 式(17)变为

$$|Q(z)z^{-int(N)}z^{-D}(1 - z^m k_r S(z) P_0(z))| < 1 \quad (18)$$

式(18)可以表示为

$$|Q(z)(1 - z^m k_r S(z) P_0(z))| < |z^{-int(N)}z^{-D}|^{-1} \quad (19)$$

在 FIR 滤波器带宽内, $|z^{-int(N)}z^{-D}|^{-1} \rightarrow 1$ 。FA-PIRC 的稳定状态与 PIRC 系统相同。

当采样频率固定而电网频率变化时, RC 中的延迟环节 N 可能是一个分数。表 3 列出了当采样频率为 10 kHz, 电网频率在 49.5 Hz 和 50.5 Hz 之间变化时延迟环节 N 的变化^[24]。图 4 显示了 PIRC($N=200$)

和 FA-PIRC($N=198.4$ 和 $N=201.6$)在 7 次谐波频率处的频率特性。显然, 电网频率由 50 Hz 变为 49.6 Hz 或 50.4 Hz 时, PIRC 控制系统的增益从 38 dB 降至

10 dB, 这将增加系统的跟踪误差^[7]进而影响 PIRC 控制系统的稳定性。而 FA-PIRC 控制系统在谐振频率处仍然保持高增益, 不受电网频率波动的影响。

表 3 当电网频率发生变化时相应的 RC 延迟拍数 N

Table 3 Corresponding N when the grid frequency changes

f/Hz	49.5	49.6	49.7	49.8	49.9	50	50.1	50.2	50.3	50.4	50.5
N	202	201.6	201.2	200.8	200.4	200	199.6	199.2	198.8	198.4	198

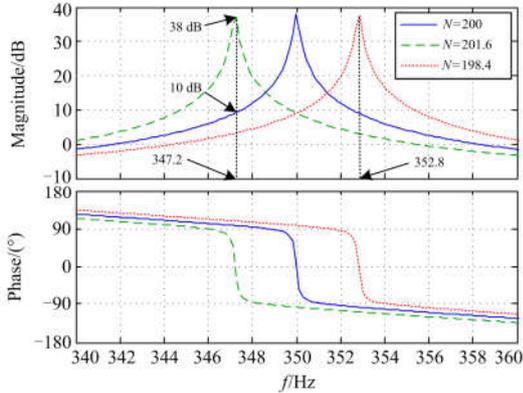


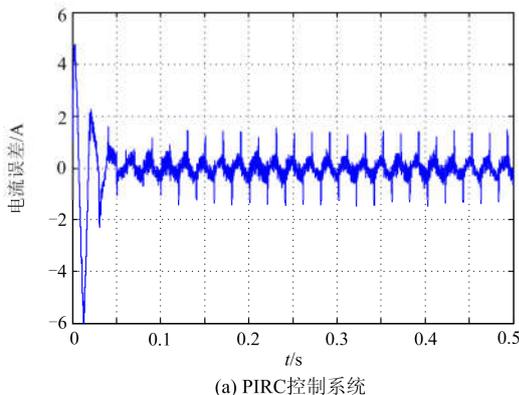
图 4 7 次谐波频率处 CRC 和分数阶 RC 的频率特性
Fig. 4 Frequency characteristics of CRC and FD RC at 7th harmonic frequencies

4 仿真验证

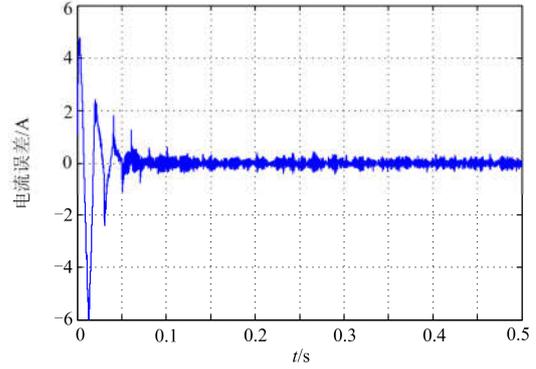
为了验证 FA-PIRC 方法的有效性和可行性, 基于 Matlab/Simulink 建立了单相 LCL 并网逆变器仿真模型, 其参数如表 1 所示。以电网频率 49.6 Hz 和 50.4 Hz 为例。

4.1 电网频率为 49.6 Hz

此时, $N = 201.6$, 电流误差收敛如图 5 所示。由图 5 可知, PIRC 控制系统输出电流的跟踪误差接近 2 A, 而 FA-PIRC 控制系统输出电流的跟踪误差小于 1 A。显然, FA-PIRC 控制系统的稳态性能更好。输出电流的频谱分析如图 6 所示。PIRC 控制系统输出电流的 THD 为 4.18%, 而 FA-PIRC 控制系统输出电流的 THD 为 1.55%, 低于 PIRC 控制系统。



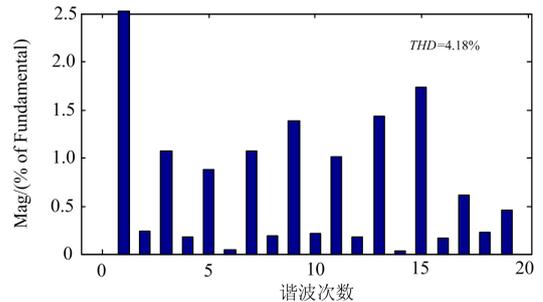
(a) PIRC控制系统



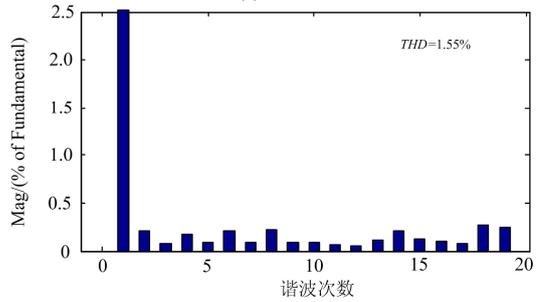
(b) FA-PIRC控制系统

图 5 输出电流误差收敛情况

Fig. 5 Error convergence of output current



(a) PIRC控制系统



(b) FA-PIRC控制系统

图 6 入网电流频谱分析

Fig. 6 Spectrum analysis of output current

4.2 电网频率为 50.4 Hz

此时, $N = 198.4$, 电流误差收敛如图 7 所示。显然, PIRC 控制系统的电流跟踪误差大于 FA-PIRC 控制系统, FA-PIRC 控制系统的稳态性能更好。输

出电流的频谱分析如图 8 所示。PIRC 控制系统输出电流的 THD 为 4.30%，FA-PIRC 控制系统输出电流的 THD 为 1.52%，低于 PIRC 控制系统。

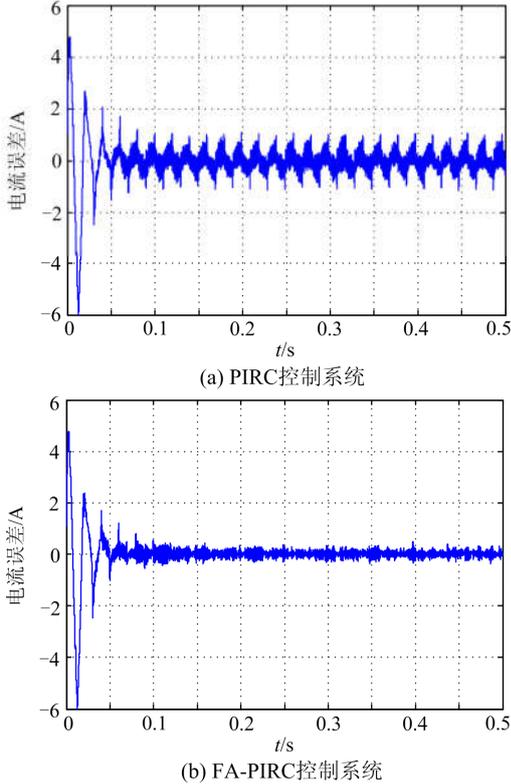


图 7 输出电流误差收敛

Fig. 7 Error convergence of output current

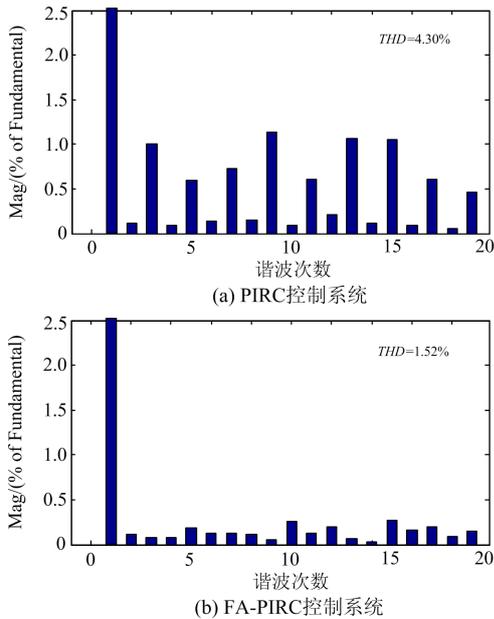


图 8 入网电流频谱分析

Fig. 8 Spectrum analysis of output current

5 实验验证分析

为了验证所提方案的有效性，搭建了基于 Quarc 控制系统的单相 LCL 型并网逆变器模型。实验参数如表 1 所示，以电网频率 49.6 Hz 和 50.4 Hz 为例，验证 PIRC 控制系统和 FA-PIRC 控制系统的特性。

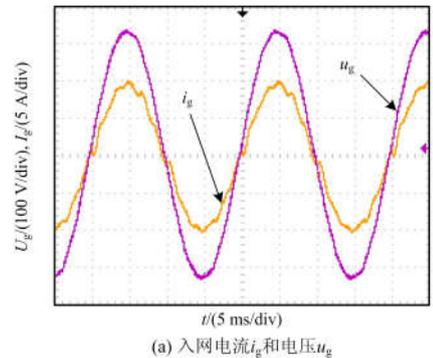
其工作原理：可编程直流电源提供 380 V 直流电压，经电容滤波，再由 IGBT 逆变桥输出交流电压，最后交流电压经 LCL 滤波并入电网。电压电流传感器采集电压电流信号经 Quarc 控制系统处理输出 PWM 波控制 IGBT 晶体管的打开与关断。以电网频率 49.6 Hz 和 50.4 Hz 为例，验证 PIRC 控制系统和 FA-PIRC 控制系统的特性。

5.1 电网频率为 49.6 Hz

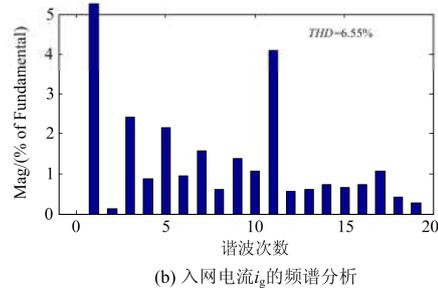
图 9、图 10 是电网频率为 49.6 Hz 时，PIRC 和 FA-PIRC 控制系统入网电流的稳态响应。由图可知，PIRC 控制系统的入网电流波形失真严重，其 THD 为 6.55%。而 FA-PIRC 控制系统入网电流 i_g 的 THD 为 2.00%，远小于 PIRC 控制系统输出电流的 THD 。

5.2 电网频率为 50.4 Hz

图 11、图 12 是电网频率为 50.4 Hz 时，PIRC 和 FA-PIRC 控制系统入网电流的稳态响应。由图可知，PIRC 控制系统入网电流波形失真严重，其 THD 为 6.76%。而 FA-PIRC 控制系统入网电流 i_g 的 THD 为 2.88%，显然小于 PIRC 控制系统输出电流的 THD 。结果表明 FA-PIRC 控制系统的谐波抑制能力更好。



(a) 入网电流 i_g 和电压 U_g



(b) 入网电流 i_g 的频谱分析

图 9 PIRC 控制系统的稳态响应

Fig. 9 Steady-state response of PIRC control system

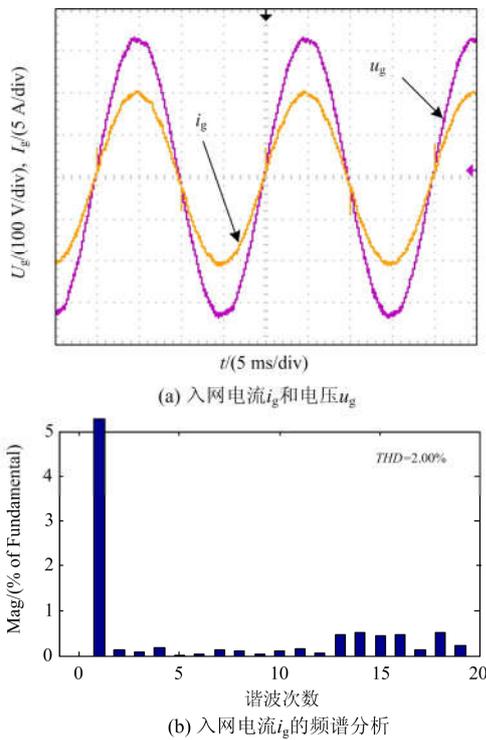


图 10 FA-PIRC 控制系统的稳态响应

Fig. 10 Steady-state response of FA-PIRC control system

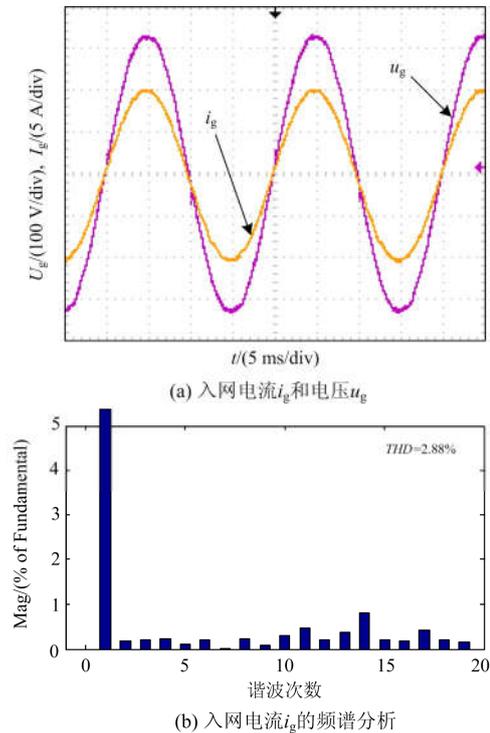


图 12 FA-PIRC 控制系统的稳态响应

Fig. 12 Steady-state response of FA-PIRC control system

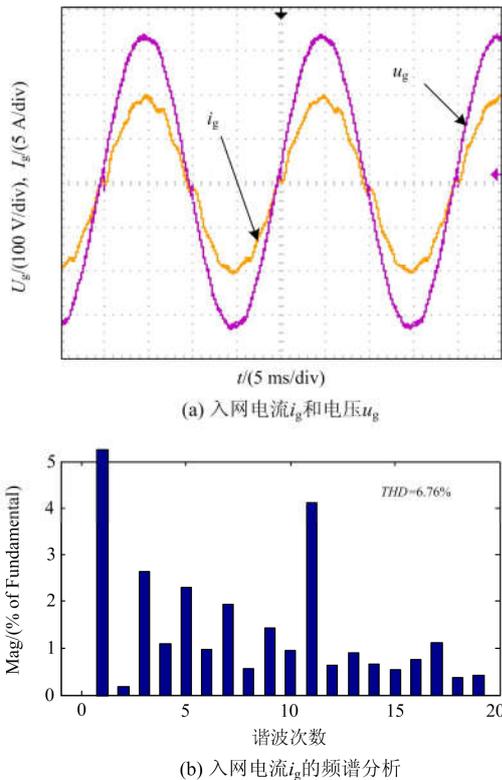


图 11 PIRC 控制系统的稳态响应

Fig. 11 Steady-state response of PIRC control system

6 结论

本文针对电网频率波动时, 逆变系统输出电流不稳定的问题, 提出了一种基于 FIR 滤波器的 FA-PIRC 控制方案以减少电网频率波动对系统的干扰。当频率变化时, 通过在线调整 FIR 滤波器的系数使谐振频率接近实际电网频率, 从而实现系统对电网频率变化的适应。仿真和实验验证了所提方案可以有效地抑制电网谐波并确保并网逆变器输出高质量的入网电流。

参考文献

- [1] 范士雄, 蒲天骄, 刘广一, 等. 主动配电网中分布式发电系统接入技术及其进展[J]. 电工技术学报, 2016, 31(增刊 2): 92-101.
- FAN Shixiong, PU Tianjiao, LIU Guangyi, et al. Technologies and its trends of grid integration of distributed generation in active distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(S2): 92-101.
- [2] MAGDY G, MOHAMED E A, SHABIB G, et al. Microgrid dynamic security considering high penetration of renewable energy[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 236-246. DOI: 10.1186/

- s41601-018-0093-1.
- [3] 许津铭, 谢少军, 张斌锋. 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.
- [4] 赵清林, 郭小强, 邬伟扬. 单相逆变器并网控制技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(16): 60-64.
ZHAO Qinglin, GUO Xiaoqiang, WU Weiyang. Research on control strategy for single-phase grid-connected inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(16): 60-64.
- [5] 滕国飞, 肖国春, 张志波, 等. 采用重复控制的 LCL 型并网逆变器单闭环电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(24): 13-21.
TENG Guofei, XIAO Guochun, ZHANG Zhibo, et al. A single-loop current control method for LCL-filtered grid-connected inverters based on the repetitive controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(24): 13-21.
- [6] 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.
- [7] 赵强松. 新型比例积分多谐振控制及其并网逆变器应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
ZHAO Qiangsong. Research on a novel proportional integral multi-resonant control scheme and its application in grid-connected inverter[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [8] 江法洋, 郑丽君, 宋建成, 等. LCL 型并网逆变器重复双闭环控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(10): 2944-2954.
JIANG Fayang, ZHENG Lijun, SONG Jiancheng, et al. Repetitive-based dual closed-loop control approach for grid-connected inverters with LCL filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10): 2944-2954.
- [9] 张东江, 仇志凌, 李玉玲, 等. 基于 LCL 滤波器的高稳态性能并联有源电力滤波器[J]. 电工技术学报, 2011, 26(6): 137-143.
ZHANG Dongjiang, QIU Zhiling, LI Yuling, et al. Shunt active power filter with high steady-state performance based on LCL filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(6): 137-143.
- [10] 竺明哲. 并网逆变器重复控制及其电网频率适应性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
ZHU Mingzhe. Research on repetitive control with adaptivity to grid frequency for grid-tied inverters[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [11] 徐红灿, 滕予非, 王晓茹. 基于重复和准比例谐振复合的直驱风机网侧变流器控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 95-102.
XU Hongcan, TENG Yufei, WANG Xiaoru. A control strategy combining repetitive control and quasi-PR control for PMSG grid side converter[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 95-102.
- [12] 李鑫, 孟亨, 杨楨, 等. 基于 BP 神经网络递推积分 PI-重复控制在微电网 APF 中的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 132-140.
LI Xin, MENG Heng, YANG Zhen, et al. Research on recursive integral PI-repetitive control based on BP neural network in micro-grid APF[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 132-140.
- [13] 蔡逢煌, 张婷婷, 林琼斌, 等. 双 Buck 逆变器嵌入式 PI+重复控制研究[J]. 电力电子技术, 2017, 51(5): 106-108.
CAI Fenghuang, ZHANG Tingting, LIN Qiongbina, et al. Research on embedded PI+repetitive control applied to dual Buck inverter[J]. Power Electronics, 2017, 51(5): 106-108.
- [14] 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.
- [15] ABUSARA M, SHARKH S, ZANCHETTA P. Adaptive repetitive control with feedforward scheme for grid-connected inverters[J]. IET Power Electronics, 2015, 8(8): 1403-1410.
- [16] YANG Yongheng, ZHOU Keliang, WANG Huai, et al. Frequency adaptive selective harmonic control for grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(7): 3912-3924.
- [17] 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, 2011, 26(6): 137-143.

- 2014, 29(6): 64-70.
- 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): 64-70.
- [18] ZOU Zhixiang, ZHOU Keliang, WANG Zheng, et al. Frequency adaptive fractional order repetitive control of shunt active power filters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(3): 1659-1668.
- [19] XIE Chuan, ZHAO Xin, SAVAGHEBI M, et al. Multirate fractional-order repetitive control of shunt active power filter suitable for microgrid applications[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(2): 809-819.
- [20] 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.
- [21] LAAKSO T I, VALIMAKI V, KARJALAINEN M, et al. Splitting the unit delay[J]. IEEE Signal Process, 1996, 13(1): 30-60.
- [22] 陈东. 并网逆变器系统中的重复控制技术及其应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- CHEN Dong. Research on repetitive control technique and application in grid connected inverter systems[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [23] 李正明, 高远, 潘天红. 基于复合控制的有源电力滤波器电流控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 55-61.
- LI Zhengming, GAO Yuan, PAN Tianhong. Compensation current control of APF based on compound control[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 55-61.
- [24] 王建宏, 张浩, 叶永强, 等. 分数延迟重复控制在并网逆变器中的应用[J]. 电力电子技术, 2015, 49(6): 66-68.
- WANG Jianhong, ZHANG Hao, YE Yongqiang, et al. Fractional delay repeat control and its application in grid-connected inverter[J]. Power Electronics, 2015, 49(6): 66-68.

收稿日期: 2019-05-17; 修回日期: 2019-07-23

作者简介:

李伟锋(1963—), 男, 教授, 研究方向为智能检测与智能控制; E-mail: 5470@zut.edu.cn

陆小辉(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为逆变器控制技术。E-mail: xiaohuilu008@126.com

(编辑 葛艳娜)