

# 基于纹波电流前馈的并网逆变器模型预测控制方法

刘 澄<sup>1</sup>, 李 哲<sup>1</sup>, 王雪瑞<sup>2</sup>, 袁 瑞<sup>3</sup>

(1.国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京, 211106; 2.南京航空航天大学自动化学院, 江苏 南京, 211106; 3.国网经济技术研究院有限公司, 江苏 徐州, 221000)

**摘要:** 研究了一种基于纹波电流前馈的单相并网逆变器的电流控制方法。首先研究了适用于单相并网逆变器的传统有限集模型预测控制算法(FCS-MPC)。随后研究了输出电流的纹波特征, 接着通过改进传统的有限集模型预测控制算法, 在此基础上增加了前馈纹波电流环节, 以达到降低单相并网逆变器输出电流纹波的目的。最后通过仿真和实验, 证实了所提控制方法的有效性。

**关键词:** 单相并网逆变器; 电流纹波前馈; 有限集模型预测控制

## A model predictive control method for grid-connected inverters based on feedforward control of current ripple

LIU Cheng<sup>1</sup>, LI Zhe<sup>1</sup>, WANG Xuerui<sup>2</sup>, YUAN Rui<sup>3</sup>

(1.NARI Technology Development Co., Ltd., Nanjing, 211106, China;

2.College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 211106, China; 3.State Grid Economic and Technological Research Institute Co.,

Ltd., Xuzhou, 221000, China)

**Abstract:** A current control method for grid-connected inverters is studied. Firstly, the finite control set model predictive control (FCS-MPC) of the single-phase grid-connected inverter is investigated. Secondly, the characteristics of the output current ripple are studied and the output current ripple of the single-phase grid-connected inverter is reduced through improving the traditional finite set of model predictive control with a feedforward control of the current ripple. Finally, simulation and experimental results verify the performance of the proposed control method.

**Key words:** single-phase grid-connected inverter; current ripple feedforward control; Finite set model predictive control.

## 0 引言

单相并网逆变器具有成本低、体积小和安全可靠等特点, 在多能互补分布式发电和户用光伏发电等领域得到了广泛的应用。随着对高品质绿色能源的需求日益增加, 基于新能源的微电网对

电能质量要求越来越高, 因而要求并网逆变器必须满足高质量电能需求。而减少并网逆变器的输出电流纹波, 则是提高电能质量的研究重点之一。

并网逆变器的电流纹波是造成逆变器输出电流总谐波失真(THD)的直接原因。为抑制并网逆变器输出电流纹波, 文献[1]提出一种可变拓扑二极管箝位型并网逆变器, 减小损耗并提高逆变

国家电网公司2017年科技项目《电能替代典型场景优化互动及电网调控支撑技术研究及应用》

器输出电能质量,但这种方法需要修改常用的逆变器拓扑,应用成本较高。文献[2]针对在光伏并网系统中采用单纯PI控制的缺点,提出增加电网电压前馈控制来改善并网电流波形,但在电网电压质量较好时效果不佳。文献[3]在引入电网电压前馈控制的同时,采用准谐振控制器替代传统PI控制器,但参数设计较为复杂。为此,需要寻找一种适用性强、电流控制效果良好的逆变器控制方法。

有限集模型预测控制是一种被广泛采用的、能有效提高控制质量的方法。将该方法与传统电力电子控制算法相结合,能有效改善控制效果。如将有限集模型预测控制和最大功率跟踪算法相结合,能有效提高光伏逆变器的输出效率和电能质量<sup>[4]</sup>。

基于该思路,本文针对有限集模型预测控制原理,充分研究了单相并网逆变器输出电流纹波特点并建立其数学模型,构造了相应的代价函数,提出一种前馈电流纹波的控制方法,从而降低输出电流纹波,所提策略的有效性通过仿真和实验得到了验证。

## 1 基于前馈电流纹波的有限集模型预测控制方法

### 1.1 基于有限集模型预测控制的单相并网逆变器的控制策略

采用L型滤波器的单相并网逆变器拓扑结构如图1所示,其中直流侧输入电压记作 $V_{in}$ ,逆变器的输出电流记作 $i$ ,逆变器输出端滤波电感记作 $L$ ,总的等效阻抗记作 $r$ ,并联电网电压记作 $v_g$ , $u_a - u_b$ 记作 $u_o$ 。分别使用了四个MOSFET管( $S_1 \sim S_4$ )作为单相全桥的开关器件,同时1状态表示开关管开通,0状态表示开关管关断。用 $S$ 表示电路状态,当1、4管导通时,记为状态1;当2、3管导通时,记为状态-1;当处于1管导通、3管通过二极管自然续流时,记为状态0;当处于2管导通、4管通过二极管自然续流时,同样记为状态0。

由上文分析,图1所示电路共有1、0和-1三

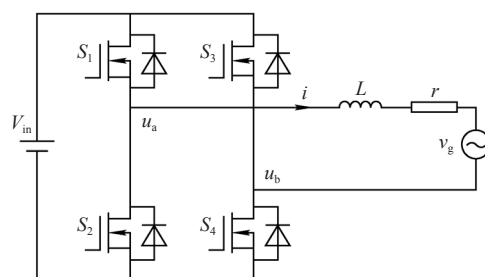


图1 单L型单相并网逆变器拓扑

Fig.1 Single-phase grid-connected inverter with an inductance filter

种状态,输出电压的表达式可以写为

$$u_o = (S_1 S_3 - S_2 S_4) V_{in} = S V_{in} \quad (1)$$

输出电流的预测模型可表达为

$$u_o(k) - v_g(k) = L \frac{di}{dt} + i(k)r \quad (2)$$

将上式离散化,可得离散化后的电流预测模型为

$$i^p(k+1) = (1 - \frac{T_s}{L}r)i(k) + \frac{T_s}{L}[S V_{in}(k) - v_g(k)] \quad (3)$$

式中, $i^p(k+1)$ 为 $t=k+1$ 时,单相逆变器并网电流的预测值; $V_{in}(k)$ 、 $v_g(k)$ 为 $t=k$ 时刻的直流侧电压和电网电压; $S$ 为电路状态,也是模型的控制量; $T_s$ 为离散系统一个时间周期。

通常情况下,用电流预测值和参考值差的平方作为预测控制的代价函数,即

$$g = [i^p(k+1) - i^*(k+1)]^2 \quad (4)$$

式中, $i^*(k+1)$ 为 $t=k+1$ 时,单相逆变器并网电流的参考值。

同样也可以用电流预测值和参考值差的绝对值作为代价函数,即

$$g = |i^p(k+1) - i^*(k+1)| \quad (5)$$

图2为基于有限集模型预测控制的单相并网逆变器的控制算法框图。控制策略中使用正弦跟踪的方法得到并网逆变器并网所需的网侧相位信息。首先采样电流和电压信息;随后逐一预测所有开关状态的下一时刻逆变器的并网电流;然后分别将每个预测电流值代入代价函数,确定使得代价函数值最小的开关状态;最后将此开关状态应用于下一时刻,如此循环往复。

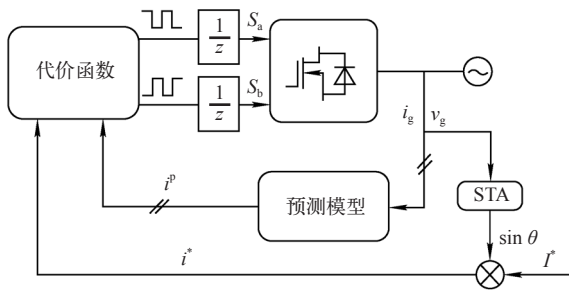


图2 基于有限集模型预测控制的单相并网逆变器的控制框图

Fig.2 Control block of single-phase grid-connected inverter based on the finite control set predictive control

### 1.2 基于有限集模型预测控制的单相并网逆变器输出电流纹波

由于控制算法中每个周期的开关状态不一定改变，所以开关管的开关频率是变化的，因此对于此控制下的电流纹波分析，应主要集中于系统开关状态切换时电流纹波的计算。

根据全桥结构的单相逆变器的数学模型，一旦开关状态发生改变，输出电压即出现阶跃，电感上流过电流的变化率同样发生变化，此时的电流值即为电流的极大或极小值。

基于有限集模型预测控制算法可以计算出四种不同的开关状态下，所对应的三种电流预测值。图3为采用该控制方法的输出电流示意图，上半部分为单相逆变器的并网电流，下半部分为单相逆变器的输出电压。定义在每一离散时刻电流的极大值或极小值，与单相逆变器并网电流基波的差值所形成的半连续曲线为电流纹波的包络线。在  $t=k$  时刻，实际的电流和电流参考量的差值为电流纹波，可以记为

$$i_{\text{ripple}}(k) = i(k) - i^*(k) \quad (6)$$

假设在  $t=t_k$  时刻，开关状态改变，则  $t_k+1$  时刻，原开关状态对应的预测电流  $i_1^{vp}$  代入代价函数后，得到的值大于开关状态  $v_0$  对应的预测电流值  $i_0^{vp}$  产生的代价函数值。当  $t_k$  时刻，取临界值，即  $i_{v1}$  对应的电流纹波和  $i_{v0}$  对应的电流纹波相等，即

$$i_{\text{ripple}}^{v1}(k) = i_{\text{ripple}}^{v0}(k) \quad (7)$$

当取临界值时，两个预测值产生的电流纹波

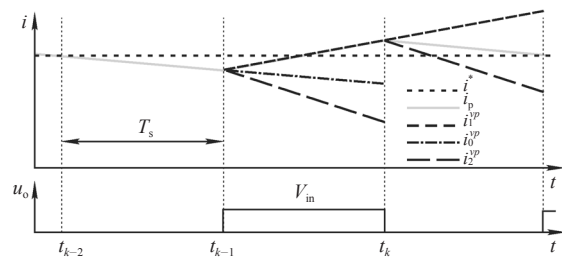


图3 基于有限集模型预测控制算法的单相并网逆变器输出电流示意图

Fig.3 The current diagram of single-phase grid-connected inverter based on the finite control set model predictive control

互为相反数，可得

$$\begin{aligned} (1 - \frac{T_s}{L}r)i(k) + \frac{T_s}{L}[V_{\text{in}}(k) - v_g(k)] - i^*(k) = \\ i^*(k) - (1 - \frac{T_s}{L}r)i(k) - \frac{T_s}{L}[0 - v_g(k)] \end{aligned} \quad (8)$$

将逆变器参考电流值  $i^*(k)$  用系统中定义的状态变量表示，同时忽略系统等效电阻对电压的影响，可得  $t=t_k$  时电流纹波为

$$i_{\text{ripple}}(k) = \frac{T_s}{2L}[V_{\text{in}}(k) - 2v_g(k)] \quad (9)$$

当电流值从下降状态切换为上升状态时，在这一时刻的电流值即为极小电流值。同样可以得到  $t=t_k$  时刻电流纹波为

$$i_{\text{ripple}}(k) = \frac{T_s}{2L}[-V_{\text{in}}(k) - 2v_g(k)] \quad (10)$$

对处于负半周的电流进行分析，同样可以得到相同的结果。因此可以得到形成电流纹波包络线的上半部分表达式为

$$i_{\text{ripple}}(k) = \frac{T_s}{2L}[V_{\text{in}}(k) - 2v_g(k)] \quad (11)$$

而电流纹波包络线的下半部分可表示为

$$i_{\text{ripple}}(k) = \frac{T_s}{2L}[-V_{\text{in}}(k) - 2v_g(k)] \quad (12)$$

最终，包络线的两边部分形成的差值为

$$i_{\text{ripple}}^h(k) = \frac{T_s}{L}V_{\text{in}}(k) \quad (13)$$

因此，当采用有限集模型预测控制算法时，

单相并网逆变器逆变电流的纹波宽度几乎是一恒定值。但电流纹波并不是与电流参考量对称的波形，其平均值可以记为

$$i_{\text{ripple}}^{\text{ave}}(k) = -2 \frac{T_s}{L} V_g(k) \quad (14)$$

### 1.3 基于电流纹波前馈的有限集模型预测控制

根据式(14)推导的电流纹波平均值，可以得到采用有限集模型预测控制算法后，单相并网逆变器并网电流纹波近似为一个在零值附近波动的锯齿波。若能实现对锯齿波的“削峰填谷”，消除该锯齿波的偏置量，就能有效减小输出电流纹波的有效值。

图4为前馈电流纹波的控制算法示意框图。该算法相比有限集模型预测控制，主要有两个变化：增加了对输出电流纹波的估算环节；增加了前馈输出电流纹波的环节。

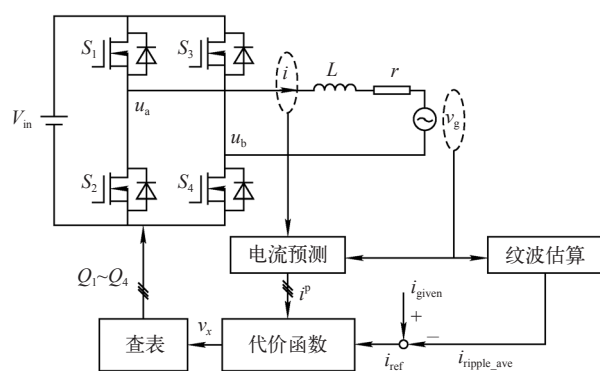


图4 前馈电流纹波控制算法

Fig.4 The feedforward control of the current ripple

新的控制算法可以归纳为以下三个步骤。

- 1) 在每个  $T_s$  周期，由采样信息和电路参数，估算出产生的电流纹波。
- 2) 将单相逆变器的给定电流参考值和纹波估算值做差值运算，然后将差值作为逆变电流参考值代入原有限集模型预测控制的代价函数中。
- 3) 根据预测控制相关原则，选出更新后的优化控制开关状态。

在前馈电流纹波后，更新后的电流参考量即可表示为

$$i^*(k) = i^*(k) + 2 \frac{T_s}{L} V_g(k) \quad (15)$$

新的电流纹波表达式为

$$i_{\text{ripple}}(k) = \frac{T_s}{2L} V_{\text{in}}(k) \quad (16)$$

可以看到，新的电流纹波没有交流偏置，而关于零轴对称，因此电流纹波得到了减小。

另外，类似思路可运用于三相逆变器电流纹波的抑制控制中。在考虑三相逆变器特殊性的前提下，建立三相逆变器全桥拓扑对应的有效开关状态表和输出电流模型，并遍历每一种开关状态对应的电流值，找到输出电流的极大值和极小值，绘制输出电流纹波包络线，并将相应的电流特征引入到有限集模型预测控制的代价函数中，结合电流纹波前馈方法，有效抑制输出电流纹波，能够灵活地提高控制性能与电能质量。

## 2 仿真与实验

### 2.1 仿真分析

本算法通过Matlab/Simulink仿真软件完成了相关仿真。其中，仿真中采用的具体电路拓扑结构和图1相同，采用的主要参数如表1所示。

首先仿真验证基于有限集模型预测控制时，单相并网逆变器的并网电流纹波是否与理论分析一致。图5为不同参考输出电流时对应的逆变电流和电流纹波仿真示意图。从图5中可以看出，当电感和采样周期都保持不变的情况下，输出电流的幅值大小分别为2 A和4 A，此时输出电流纹波保持不变，表明采用有限集模型预测控制算法时，单相并网逆变器输出的电流纹波为与输出电流大小无关的量。

表1 仿真和实验的主要参数

Table 1 Main parameters of simulation and experiment

| 系统参数                           | 数值  |
|--------------------------------|-----|
| 直流侧电压 $V_{\text{in}}/\text{V}$ | 150 |
| 电网电压 $v_g/\text{V}$            | 55  |
| 滤波电感 $L/\text{mH}$             | 4   |
| 采样周期 $T_s/\mu\text{s}$         | 25  |

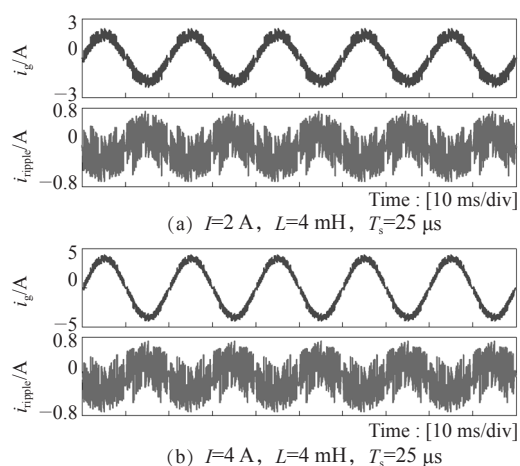


图5 不同输出电流时输出电流和纹波

Fig.5 The output current and ripple with different output currents

图6为采用不同滤波电感时对应的电流和纹波仿真示意图。从图6中可以看出,  $L$  分别取4 mH和8 mH时, 对应的电流纹波量与电路中滤波电感值成反比。

图7为采用不同采样周期 $T_s$ 时对应的电流和纹波仿真示意图。从图7中可以看出,  $T_s$ 分别取25  $\mu$ s和50  $\mu$ s时, 对应产生的电流纹波量与采样周期成正比。

图8为采用前馈电流纹波算法前后的仿真波形图。从图8中可以看出, 在采用了所提出的前馈电流纹波算法后, 产生的电流纹波的幅值和有效值

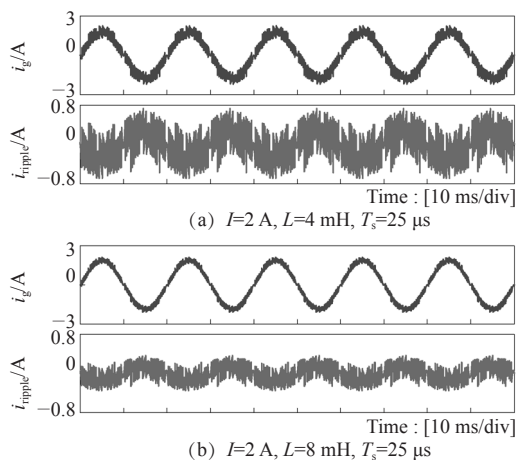


图6 不同滤波电感时输出电流和纹波

Fig.6 The output current and ripple with different filter inductance

都得到了减小, 电流的总谐波失真由21.04%降至18.06%。

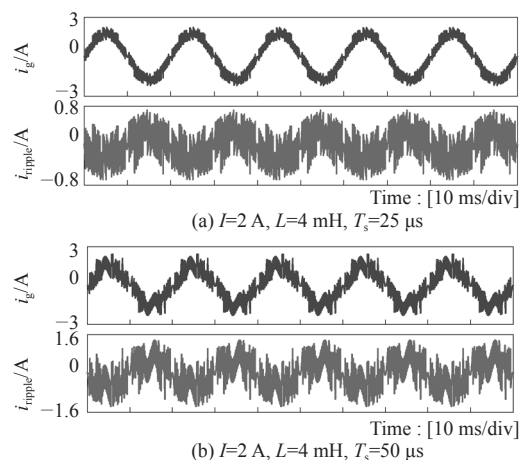


图7 不同采样周期时电流和纹波

Fig.7 The current and ripple with different sampling periods

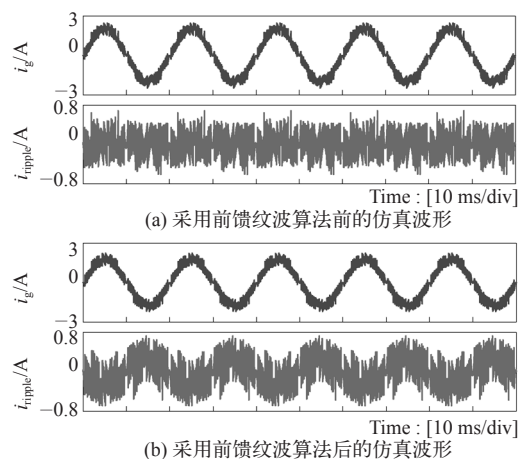


图8 采用前馈电流纹波算法前后仿真波形图

Fig.8 The waveforms before and after adopting the feedforward control of the current ripple

## 2.2 实验验证

实验验证所采用的相关参数与图1保持一致。在单相并网逆变器实验平台上分别进行采用前馈电流纹波算法前后的对比实验。

图9为采用前馈电流纹波前的实验波形图。从图9中可以看出, 并网电流有较大的电流纹波。

将实验电流数据存储, 并使用Matlab软件进行分析, 可得到电流纹波波形, 如图10所示。电流

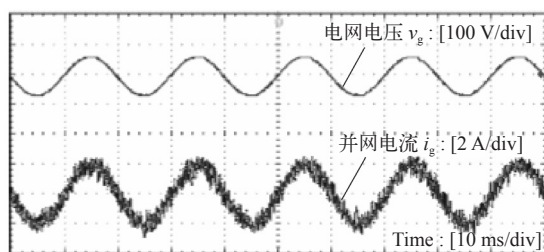


图9 采用前馈电流纹波前的实验波形图

Fig.9 The experimental waveform before the feedforward control of the current ripple is adopted  
纹波波形与前文分析一致，除了高频信号以外，其基波类似为一个在零值上下波动的锯齿波。

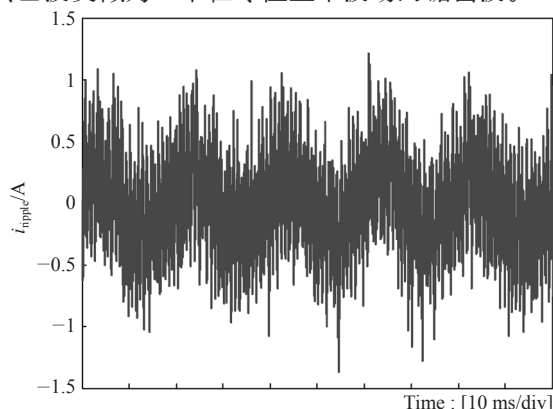


图10 采用前馈电流纹波算法前的电流纹波

Fig.10 The current ripple before the feedforward control of the current ripple is adopted

图11为采用前馈电流纹波算法后的电流波形图。采用前馈算法后，电流的基本信息（幅值、相位和频率等）保持不变。电流纹波减少。

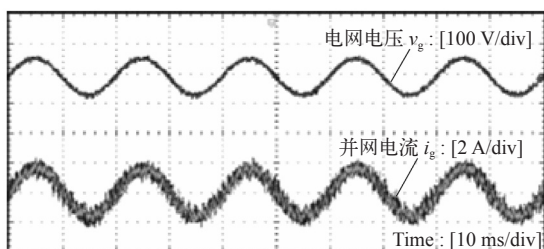


图11 采用前馈电流纹波后的实验波形图

Fig.11 The experimental waveform after the feedforward control of the current ripple is adopted

图12为采用前馈电流纹波算法后的电流波形图。可以看出，采用前馈电流纹波算法后，电流纹波波形相比未采用前馈电流纹波算法时，有一个明显的“削峰填谷”变化，与理论分析一致，

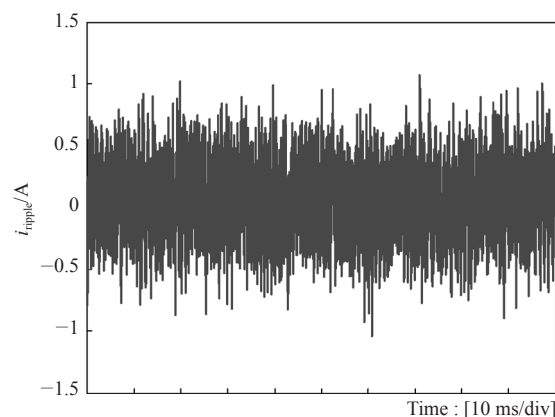


图12 采用前馈电流纹波算法后的电流纹波

Fig.12 The current ripple after the feedforward control of the current ripple is adopted

电流纹波的幅值和有效值得到了降低。

对采用前馈电流纹波算法前后的电流谐波含量进行了对比分析，如表2所示。在采用前馈电流纹波算法后，电流的总谐波失真和高次谐波含量都得到了有效抑制。

表2 采用前馈电流纹波算法前后的谐波含量对比

Table 2 Harmonic content before and after using feedforward current ripple algorithm

| 控制算法   | THD(%) | 高次谐波含量(5~20 kHz)(%) |
|--------|--------|---------------------|
| 未加前馈纹波 | 26.20  | 22.02               |
| 前馈纹波   | 23.08  | 19.35               |
| 指标提升比例 | 11.91  | 12.13               |

对采用前馈电流纹波算法的仿真和实验中得到的总谐波含量进行对比分析，如图13所示。当逆变器并网电流增加时，由于电流纹波与基波电流的比值减小，前馈电流纹波算法对总谐波含量的抑制作用相对变弱。同时由于实验中考考虑到死区时间影响、器件开关损耗、电压电流传感器误差和电网电压畸变等难以控制的非理想因素，从而使得实验中得到的电流总谐波含量要大于与之相对应的仿真结果。

### 3 结束语

针对单相并网逆变器的输出电流纹波问题，在传统有限集模型预测控制算法的基础上，提出

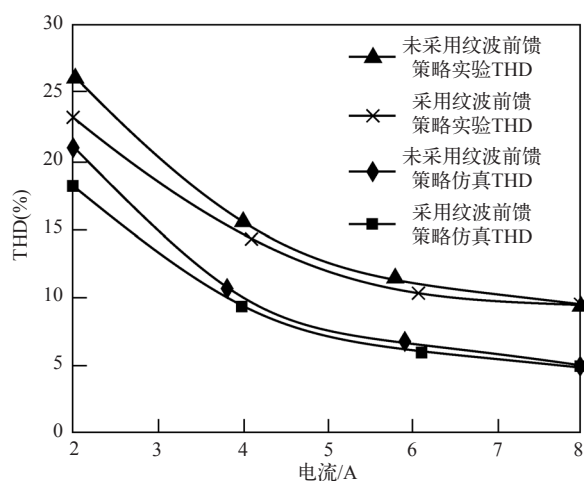


图13 仿真及实验中采用前馈电流纹波算法前后的电流总谐波含量  
Fig.13 The THD before and after using the feedforward control of the current ripple in simulation and experimental results

了基于前馈电流纹波的有限集模型预测控制算法,通过仿真和实验验证了该方法的优越性,得到以下结论。

1) 实验结果表明,相比普通有限集模型预测控制方法,采用前馈电流纹波算法能够使得输出电流THD在原有基础上降低11.91%,高次谐波含量(5~20 kHz)降低12.13%。

2) 该方法能够对单相并网逆变器的输出电流纹波进行“削峰填谷”,有效减小了电流纹波的极值和有效值,削弱了输出电流纹波的总谐波含量。

3) 基于单相逆变器的电流纹波建模方法、有限集模型预测方法中代价函数的建立思路,以及电流纹波前馈控制方法,可进一步推广至三相逆变器的电流纹波抑制研究工作中,能有效提高其电能输出质量。

#### 参考文献

[1] 李帛洋. 可变拓扑二极管箝位型并网逆变器研究

[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.

Research on diode-clamped grid-connected inverter with variable topology[D]. Harbin: Institute of Technology, 2017.

[2] 张彦, 赵义术, 余蜜, 等. 光伏并网逆变器电流控制技术研究[J]. 电力电子技术, 2009, 43(5): 29-31.

ZHANG Yan, ZHAO Yishu, YU Mi, et al. Research on current control of photovoltaic grid-connected inverter[J]. Power Electronics, 2009, 43(5): 29-31.

[3] 赵清林, 郭小强, 邬伟扬. 单相逆变器并网控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2007, 41(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, 41(16): 60-64.

[4] EXPOSTO B, RUI R, PINTO J G, et al. Predictive control of a current-source inverter for solar photovoltaic grid interface[C]. International Conference on Compatibility and Power Electronics, IEEE, 2015: 113-118.

#### 作者简介



刘澄

刘澄(1985-)男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统自动化。

(收稿日期: 2018-07-03) **EA**