

# 基于二重采样延时补偿的LC型并网逆变器鲁棒有源阻尼控制方法

曾江,杨耀权,肖扬,倪泽洹  
(华南理工大学电力学院,广东广州 510641)

**摘要:**LC型逆变器广泛应用于分布式电源与电网的接口。针对LC型并网逆变器有源阻尼的控制延时问题,提出基于二重采样延时补偿的LC型并网逆变器鲁棒有源阻尼控制方法。该方法通过在同一开关周期内采集载波波峰与波谷时刻的并网点电压,构造出超前信号以实现1.5个控制周期的延时补偿,使并网点电压单位前馈的等效正阻尼范围拓宽至Nyquist频率附近,提高了LC型并网逆变器适应电网阻抗变化的鲁棒性。实验结果表明,所提方法能改善数字控制延时对并网点电压前馈有源阻尼性能的影响,从而保证系统稳定运行。

**关键词:**并网逆变器;LCL谐振;有源阻尼;二重采样;延时补偿

## 0 引言

随着新型电力系统建设的稳步推进,源-网-荷高度电力电子化已然成为我国电力系统发展的重要趋势<sup>[1-4]</sup>。LC型逆变器凭借其更强的高次开关谐波衰减性能以及更小的总电感量被广泛应用于分布式电源与电网的接口装置<sup>[5-9]</sup>,其缺点是会与电网阻抗相互作用形成LCL谐振,从而影响系统的稳定性<sup>[10]</sup>。

基于状态变量的有源阻尼通过引入状态反馈,在LCL滤波器中模拟出一个虚拟电阻来阻尼LCL谐振峰,因其无损耗的优点而得到了广泛应用。目前主要包括电容电流反馈、电容电压前馈、并网点(Point of Common Coupling, PCC)电压前馈、桥侧电流反馈及网侧电流反馈<sup>[11-13]</sup>。然而,出于成本的考虑,逆变器制造商通常在逆变器内只配备桥侧电流传感器、电容电压传感器以及并网点电压传感器,以实现快速过电流保护、预同步、功率控制等基本功能<sup>[14-16]</sup>。此外,当逆变器采用基于同步采样的数字控制时,不可避免地会引入一拍计算延时和半拍零阶保持延时<sup>[12]</sup>,从而影响状态反馈有源阻尼的性能。针对这一问题,文献[17-18]提出动态调整状态变量采样时刻以降低有源阻尼控制延时的实时运算方法。然而,实时运算方法的采样规则复杂,对

运算性能要求高。文献[19]提出分级运算机制,通过将有源阻尼策略设置在最高运算优先级,从而有效降低计算延时,但对逆变器输出的最小占空比有限制。文献[20-25]通过在状态反馈通路上串入一阶和二阶相位超前器以补偿控制延时,但一阶相位超前器的补偿范围有限,二阶相位超前器又面临着至少2个及以上的复杂参数设计。文献[26-27]通过对参考电压进行模型预测实现计算延时补偿,但是其预测模型的系数矩阵复杂、计算量大,且过于依赖系统模型辨识的精确性。文献[28]利用扩张状态观测器跟踪系统,并通过向前欧拉法离散进行预测控制以补偿一拍计算延时,该方法的缺点是增益矩阵设计复杂,且需要在噪声与观测带宽中进行权衡<sup>[29]</sup>。

综上所述,本文针对状态反馈有源阻尼的数字控制延时问题,提出了PCC电压二重采样延时补偿的鲁棒有源阻尼方法。研究的创新之处在于,利用同一开关周期内载波波峰和波谷的并网点电压采样值得到1.5拍超前信号实现延时补偿,使得PCC电压前馈的等效正阻尼范围扩展至Nyquist频率附近,且具备无需参数设计、运算逻辑简洁的即插即用特性。实例分析表明,所提方法能保证LC型并网逆变器在不同电网阻抗工况下均能平稳运行。

## 1 LC型并网逆变器系统模型

LC型并网逆变器系统如图1所示。其中, $L_1$ ,  $C_{fil}$ ,  $L_{grid}$ 分别为桥侧滤波电感、滤波电容以及电网电感, $v_{dc}$ ,  $v_{inv}$ ,  $v_{pcc}$ ,  $v_{grid}$ 分别为直流母线电压、逆变器输

基金项目:智能电网重大专项(2030)资助项目(2025ZD0806703)

Project Supported by Smart Grid Major Project (2030) Funding Project (2025ZD0806703)

出电压、PCC 电压以及电网电压,  $i_1, i_{C_m}, i_2$  分别为桥侧电流、滤波电容电流以及网侧电流, a, b, c 分别代表电力系统中的 a, b, c 三相,  $\alpha, \beta$  分别为两相静止坐标系的  $\alpha$  轴、 $\beta$  轴,  $H_i^{\text{con}}$  为电流控制器的传递函数。图 1 中, 控制系统通过锁相环(Phase-Locked Loop, PLL)提取 PCC 电压的相位  $\theta$ , 三相桥侧电流进行派克变换后得到旋转坐标下的  $d, q$  轴分量  $i_d^d$  和  $i_q^q$ , 并通过电流控制器跟踪桥侧电流的  $d, q$  轴参考值  $i_d^{\text{ref}}$  和  $i_q^{\text{ref}}$ 。PCC 电压单位前馈用作实现预同步控制, 限制并网冲击电流。最后, 通过空间矢量调制(Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM)驱动开关管。

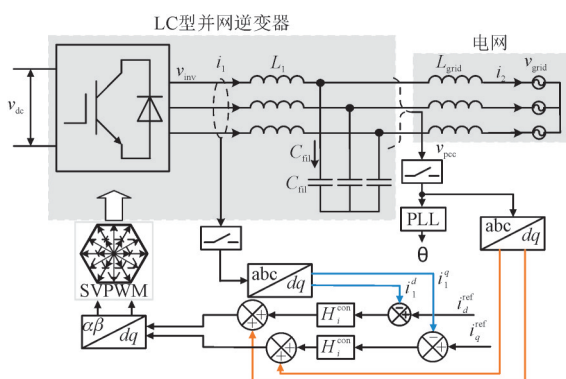


图1 LC型并网逆变器系统

Fig.1 LC-type grid-connected inverter system

本文选用比例-积分(Proportional-Integral, PI)控制器作为电流控制器, 对参考电流进行跟踪。在连续域中, PI控制器的  $H_i^{\text{con}}$  表达式为:

$$H_i^{\text{con}}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (1)$$

式中:  $K_p$  为比例控制系数;  $K_i$  为积分控制系数;  $s$  为连续域的复变量。

LC型并网逆变器的控制框图如图2所示。其中,  $i_{\text{ref}}$  为电流参考值,  $H_{\text{del}}(s)$  为数字控制延时环节的传递函数。

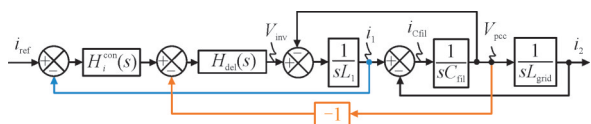


图2 LC型并网逆变器控制框图

Fig.2 Control block diagram of LC-type grid-connected inverter

当采用同步采样时,  $H_{\text{del}}(s)$  包含一拍计算延时和半拍零阶保持延时, 其表达式为:

$$H_{\text{del}}(s) = e^{-1.5sT_{\text{swi}}} \quad (2)$$

式中:  $T_{\text{swi}}$  为开关周期。

## 2 系统潜在阻尼作用及其稳定性分析

### 2.1 等效虚拟导纳模型的推导

LC型并网逆变器等效控制框图如图3所示。其中,  $Y_{\text{eq1}}(s)$  为电容电流反馈的等效虚拟并联导纳,  $Y_{\text{eq2}}(s)$  为PCC电压前馈的等效虚拟并联导纳。为推导其表达式, 对控制框图进行变换。具体步骤如下: 首先, 桥侧电流反馈拆分成网侧电流反馈和滤波电容电流反馈; 其次, 考虑到PI控制器中的积分环节对LCL谐振频段的影响极小, 因此可把电容电流反馈比较点从  $H_i^{\text{con}}(s)$  的输入移至  $H_i^{\text{con}}(s)$  的输出, 并忽略积分项的影响。

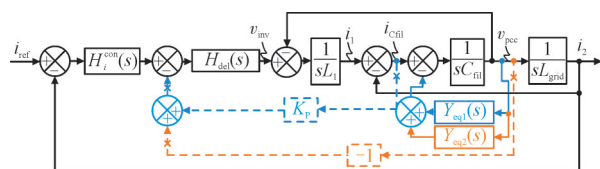


图3 LC型并网逆变器等效控制框图

Fig.3 Equivalent control block diagram of LC-type grid-connected inverter

由图3推导  $Y_{\text{eq1}}(s)$  和  $Y_{\text{eq2}}(s)$  的表达式分别为:

$$Y_{\text{eq1}}(s) = \frac{K_p C_{\text{fil}}}{L_1} e^{-1.5sT_{\text{swi}}} \quad (3)$$

$$Y_{\text{eq2}}(s) = -\frac{1}{sL_1} e^{-1.5sT_{\text{swi}}} \quad (4)$$

将  $s = j\omega$  代入式(3)和式(4)中, 可得:

$$Y_{\text{eq1}}(j\omega) = \frac{K_p C_{\text{fil}}}{L_1} e^{-1.5j\omega T_{\text{swi}}} = G_{\text{eq1}}(\omega) + jB_{\text{eq1}}(\omega) \quad (5)$$

$$Y_{\text{eq2}}(j\omega) = -\frac{1}{j\omega L_1} e^{-1.5j\omega T_{\text{swi}}} = G_{\text{eq2}}(\omega) + jB_{\text{eq2}}(\omega) \quad (6)$$

式中:  $\omega$  为角频率;  $G_{\text{eq1}}$  为电容电流反馈的等效虚拟并联电导;  $B_{\text{eq1}}$  为电容电流反馈的等效虚拟并联电纳;  $G_{\text{eq2}}$  为PCC电压前馈的等效虚拟并联电导;  $B_{\text{eq2}}$  为PCC电压前馈的等效虚拟并联电纳。

虚拟电导可在不影响滤波器低频增益和高频谐波衰减能力的情况下阻尼谐振峰, 电导越大时谐振峰阻尼效果越好<sup>[28]</sup>。本文以1台60kW的LC型并网逆变器为例对虚拟电导进行分析, 电路和控制参数如表1所示。虚拟电导的频率特性如图4所示。由图4可知, 受1.5拍控制延时的影响,  $G_{\text{eq1}}$  的正阻尼频段为  $(0, f_{\text{swi}}/6)$ ,  $G_{\text{eq2}}$  的正阻尼频段为  $(0, f_{\text{swi}}/3)$ 。二者叠加后的总并联虚拟电导  $G_{\text{eq}}$  的正阻尼频段将小于  $f_{\text{swi}}/3$ 。因此, 当系统实际谐振频率大于  $f_{\text{swi}}/3$  时, 将会产生一对开环不稳定极点, 使得

系统稳定条件难以满足。

表1 60 kW 并网逆变器参数

Table 1 Parameters of 60 kW grid-connected inverter

参数	数值
$v_{grid}/V$	380
$v_{dc}/V$	640
$L_f/\mu H$	341
$C_{fil}/\mu F$	20
$K_p$	1.65
$K_i$	794
电网频率 $f_{grid}/Hz$	50
开关频率 $f_{sw}/Hz$	19 200

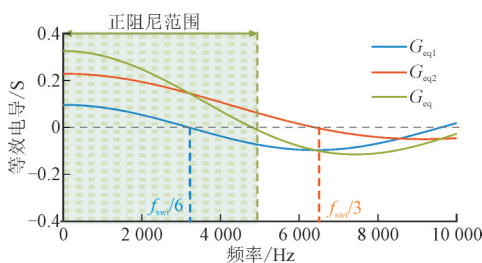


图4 虚拟电导的频率特性

Fig.4 Frequency characteristics of virtual conductance

## 2.2 稳定性分析

LC 型并网逆变器等效双环模型如图 5 所示。其中,  $H_{v_{inv} - i_2}(s)$  为  $v_{inv}$  到  $i_2$  的传递函数。

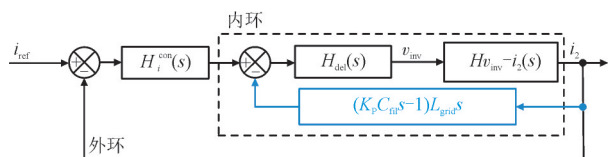


图5 LC型并网逆变器等效双环模型

Fig.5 Equivalent dual-loop model of LC-type grid-connected inverter

由图 5 推导  $H_{v_{inv} - i_2}(s)$ , 系统内环环路增益  $T_{in}(s)$  和外环环路增益  $T_{out}(s)$  的表达式如下:

$$H_{v_{inv} - i_2}(s) = \frac{i_2(s)}{v_{inv}(s)} = \frac{1}{L_1 L_{grid} C_{fil} s (s^2 + \omega_r^2)} \quad (7)$$

$$\omega_r = \sqrt{\frac{L_1 + L_{grid}}{L_1 L_{grid} C_{fil}}} = 2\pi f_r \quad (8)$$

$$T_{in}(s) = H_{del}(s) H_{v_{inv} - i_2}(s) (K_p s C_{fil} - 1) L_{grid} s \quad (9)$$

$$T_{out}(s) = \frac{H_i^{con}(s) H_{del}(s) H_{v_{inv} - i_2}(s)}{1 + T_{in}(s)} \quad (10)$$

式中:  $\omega_r$  为 LCL 谐振角频率;  $f_r$  为 LCL 谐振频率。

外环环路增益 Bode 图如图 6 所示。当  $L_{grid} = 180 \mu H$  和  $L_{grid} = 100 \mu H$  时, 系统呈现最小相位特性, 不存在开环右半平面极点。当相频曲线穿越  $-180^\circ$  时, 幅频曲线均小于 0 dB, 因此不存在闭环右

半平面极点。此时系统最小幅值稳定裕度和最小相位稳定裕度分别为 7.8 dB 和  $48^\circ$ 。当  $L_{grid} = 25 \mu H$  时, 系统呈现非最小相位特性, 存在一对开环右半平面极点, 须谨慎设计滤波器参数和控制参数, 确保相频曲线正穿越  $-180^\circ$  时幅频曲线大于 0 dB, 外环才能闭环稳定。

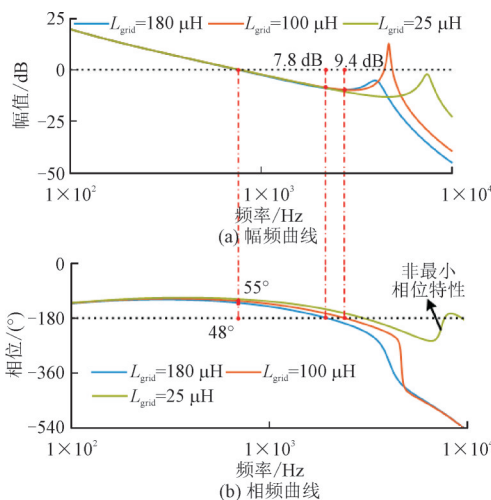


图6 外环环路增益 Bode 图

Fig.6 Bode diagram of outer-loop gain

## 3 基于二重采样的并网点电压前馈延时补偿方法

### 3.1 二重采样延时补偿方法

根据 2.1 节分析可知, 受控制延时影响, PCC 电压单位前馈的等效有源阻尼在  $f_r > f_{sw}/3$  的情况下呈现负阻尼特性, 是导致系统对电网阻抗鲁棒性差的原因。为此, 本文提出 PCC 电压二重采样延时补偿方法如图 7 所示。其中,  $t$  为系统运行时间,  $t_{AD1}$  为模数转换 1 (Analog-to-Digital 1, AD1) 的运算时间,  $t_{AD2}$  为模数转换 2 (Analog-to-Digital 2, AD2) 的运算时间,  $t_{con}$  为 PLL 和电流控制器的运算时间,  $t_{pcc}$  为 PCC 电压前馈的运算时间,  $t_{SVPWM}$  为 SVPWM 的运算时间。AD1 为三角载波波谷时刻对桥侧电流和 PCC 电压采样得到  $i_1$  和  $v_{pcc}$ , AD2 为三角载波波峰时刻对 PCC 电压采样得到 PCC 电压二重采样值  $v'_{pcc}$ 。由于逆变器的主功率开关管在开通和关断的瞬间过程中会产生较高的电压变化率, 因此, 在三角载波的波峰和波谷对 PCC 电压进行采样能有效避免开关噪声的干扰。  $v_{pcc}$  和  $i_1$  分别用于进行 PLL 和电流控制器的运算, 得到初始调制信号  $u_m$ 。  $v'_{pcc}$  和  $v_{pcc}$  用于对 PCC 电压前馈进行 1.5 拍延时补偿, 得到最终的调制信号  $u'_m$ 。最后, 利用  $u'_m$  进行 SVPWM 运算, 并在下一拍的三角载波波谷时刻进行寄存器装载。

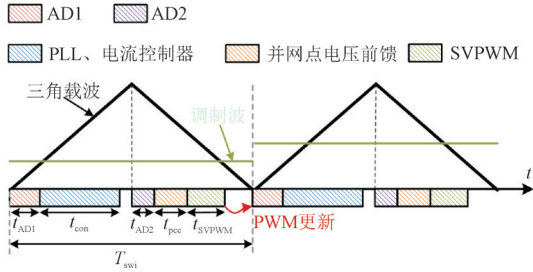


图7 PCC电压二重采样延时补偿方法  
Fig.7 Dual-sampling delay compensation method for PCC voltage

由图7可得经1.5拍延时补偿后的调制信号  $u'_m$  为:

$$u'_m = u_m + (v_{pcc} + 3 \times (v'_{pcc} - v_{pcc})) \quad (11)$$

对于单一的同步采样模式,需要满足如下运算时间约束:

$$(t_{AD1} + t_{con} + t_{pcc} + t_{SVPWM}) < T_{swi} \quad (12)$$

当采用本文所提二重采样模式时,还需要在式(12)的基础上满足以下约束:

$$(t_{pcc} + t_{SVPWM}) < \left( \frac{T_{swi}}{2} - t_{AD2} \right) \quad (13)$$

对比式(12)与式(13)可知,所提二重采样方法的PCC电压前馈和SVPWM的总容许运算时间比文献[18]所提的实时运算方法增加了  $5T_{swi}/12 - t_{AD2}$ 。

### 3.2 延时补偿后的等效虚拟导纳分析

由式(11)可知,延时补偿后的PCC电压前馈在s域满足如下关系:

$$v_{pcc}(s) + 3 \times (v'_{pcc}(s) - v_{pcc}(s)) \approx (1 + 1.5sT_{swi})v_{pcc}(s) \quad (14)$$

由式(6)和式(14)可知,延时补偿后PCC电压前馈的等效虚拟导纳  $Y_{ceq2}$  为:

$$Y_{ceq2}(j\omega) = \frac{-1 - 1.5j\omega T_{swi}}{j\omega L_1} e^{-1.5j\omega T_{swi}} = G_{ceq2}(\omega) + jB_{ceq2}(\omega) \quad (15)$$

式中:  $G_{ceq2}$  为延时补偿后PCC电压前馈的等效虚拟并联电导;  $B_{ceq2}$  为延时补偿后PCC电压前馈的等效虚拟并联电纳。

延时补偿后的等效虚拟电导频率特性如图8所示。其中,  $G_{ceq}$  为延时补偿后的总等效电导。

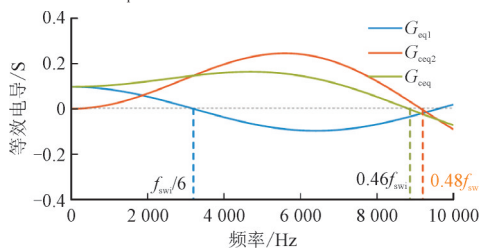


图8 延时补偿后等效虚拟电导的频率特性  
Fig.8 Frequency characteristics of equivalent virtual conductance after delay compensation

由图8可知,  $G_{ceq2}$  的正阻尼频段为  $(0, 0.48f_{sw})$ , 即使受  $G_{ceq1}$  在  $(f_{sw}/6, f_{sw}/2)$  频段负阻尼的影响,  $G_{ceq}$  的正阻尼频率也能达到  $0.46f_{sw}$ 。

### 3.3 延时补偿后的稳定性分析

由式(10)和(14)可知,延时补偿后的系统内环环路增益  $T_{in}^{com}(s)$  和外环环路增益  $T_{out}^{com}(s)$  分别为:

$$T_{in}^{com}(s) = H_{del}(s)H_{v_{in}-i_2}(s)(K_p s C_{fil} - 1.5sT_{swi} - 1)L_{grid}s \quad (16)$$

$$T_{out}^{com}(s) = \frac{H_i^{com}(s)H_{del}(s)H_{v_{in}-i_2}(s)}{1 + T_{in}^{com}(s)} \quad (17)$$

延时补偿后的外环环路增益Bode图如图9所示。由图9可知,延时补偿后外环始终呈现最小相位特性,且最小幅值稳定裕度和最小相位稳定裕度分别为2.3 dB和58°。因此,无论  $f_r$  是小于还是大于  $f_{sw}/3$ ,逆变器都能稳定运行,对电网阻抗的鲁棒性强。

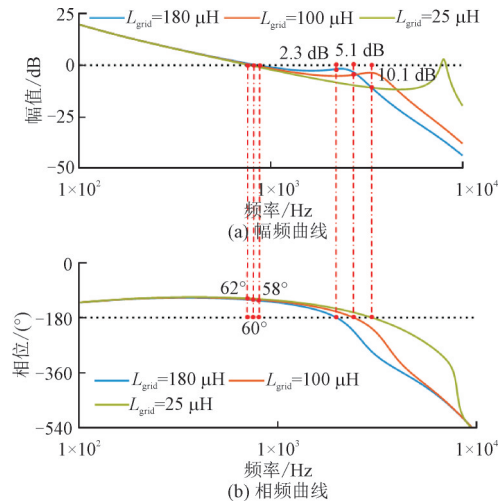


图9 延时补偿后的外环环路增益Bode图  
Fig.9 Bode diagram of outer-loop gain after delay compensation

## 4 实验验证

为了二重采样延时补偿策略的有效性,本文采用基于Typhoon HIL604的实验平台进行硬件在环测试,控制算法在TMS320F28377D上实现。所有电路参数和控制参数均与表1一致。以  $i_2$  为例,得到延时补偿前的稳态运行波形如图10所示。由图10可知,当  $L_{grid} = 180 \mu H$  和  $L_{grid} = 100 \mu H$  时,PCC电压和网侧电流均无振荡,波形平滑,系统稳定。当  $L_{grid} = 25 \mu H$  时,PCC电压和网侧电流均出现明显高频振荡,系统不稳定,分析结果与第2节一致。

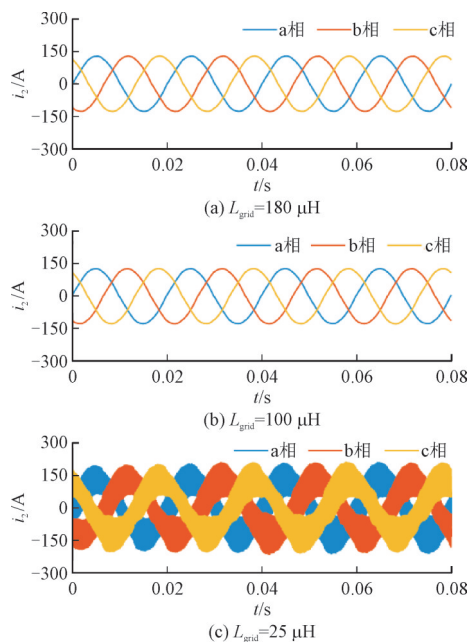


图10 延时补偿前的稳态运行波形

Fig.10 Steady-state operating waveforms before delay compensation

延时补偿后的稳态运行波形如图11所示。由图11可知,采用二重采样延时补偿后,3种 $L_{grid}$ 工况下PCC电压和网侧电流均无高频振荡,系统稳定。

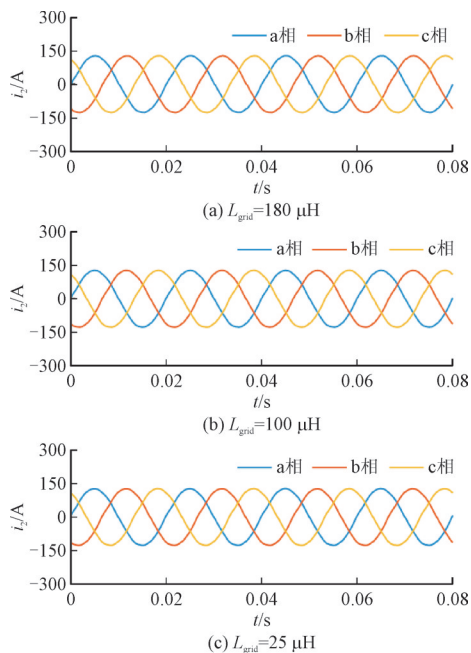


图11 延时补偿后的稳态运行波形

Fig.11 Steady-state operating waveforms after delay compensation

针对谐振峰抑制效果的定量分析,得到A相网侧电流频谱如图12所示。其中,(a)图和(b)图中延时补偿前后的频谱是重合的。由图12可知,当 $L_{grid} = 180 \mu\text{H}$ 和 $L_{grid} = 100 \mu\text{H}$ 时,无论延时补偿与否,网侧电流33次以上谐波均低于0.3%。当 $L_{grid} =$

25  $\mu\text{H}$  时,延时补偿前的网侧电流含有 52.06% 的 LCL 谐振含量,而延时补偿后的 LCL 谐振含量则能抑制在 0.3% 以内。分析表明,所提延时补偿策略能有效增强系统的有源阻尼性能,从而提升逆变器对电网阻抗的鲁棒性。

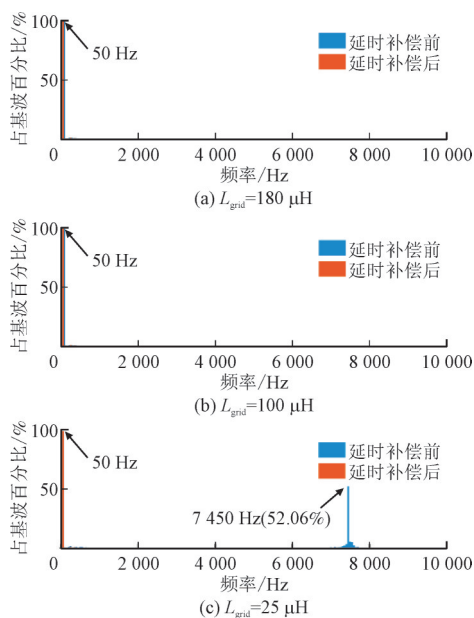


图12 A相网侧电流频谱

Fig.12 Grid-side current spectrum of phase A

延时补偿后的动态运行波形如图13所示。

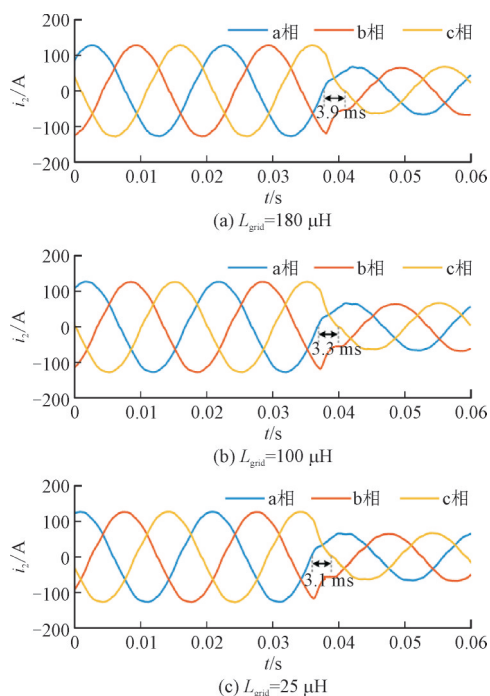


图13 延时补偿后的动态运行波形

Fig.13 Dynamic operating waveforms after delay compensation

由图13可知,3种 $L_{grid}$ 工况下满载切换至半载的动态过程均未见明显的高频振荡,且网侧电流在

突变后的 4 ms 内能恢复稳态,测得的最大超调量均不超过 10%。说明所提的二重采样延时补偿策略具有良好的动态性能。

## 5 结论

LC 型逆变器会与电网阻抗相互作用形成 LCL 谐振。本文针对 LC 型并网逆变器在数字控制延时影响下的 LCL 谐振抑制问题,提出基于 PCC 电压二重采样延时补偿的鲁棒有源阻尼控制方法,结论如下:

1) 利用同一开关周期内载波波峰和波谷的并网点电压采样值得到 1.5 拍超前信号实现延时补偿,可将 PCC 电压前馈的等效正阻尼范围拓展至  $0.48f_{swi}$ 。

2) 与现有的实时运算方法相比,二重采样延时补偿方法的采样时刻固定在载波波峰和波谷,具有更宽裕的时间裕度。同时,所提方法无需进行复杂的控制参数整定,计算逻辑简洁。

### 参考文献

- 董广凯,黄嵩,董佳林,等.定功率跟踪控制的光伏并网低电压穿越策略[J].高压电器,2023,59(3):93-98,107.  
DONG Guangkai, HUANG Song, DONG Jialin, et al. Low voltage ride-through strategy of grid-connected photovoltaic generation with constant power tracking control[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(3): 93-98, 107.
- 钟雅珊,杨韵,左剑,等.高比例新能源电网的运行经济性评估研究与应用[J].供用电,2024,41(3):78-87.  
ZHONG Yashan, YANG Yun, ZUO Jian, et al. Research and application on economic evaluation of high ratio new energy grid operation[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(3): 78-87.
- 蒋小亮,李元臣,郝元钊,等.计及新能源虚拟惯量的电力系统等效惯量评估[J].电力科学与技术学报,2023,38(4):169-176.  
JIANG Xiaoliang, LI Yuanchen, HAO Yuanzhao, et al. Evaluation of power system equivalent inertia considering new energy virtual inertia[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(4): 169-176.
- 江友华,刘弘毅,叶尚兴,等.考虑电压质量及灵活性的高比例新能源配电网储能-无功优化配置[J].电力建设,2023,44(9):68-79.  
JIANG Youhua, LIU Hongyi, YE Shangxing, et al. Energy-storage and reactive-power optimization of a high-proportional new energy distribution network considering voltage quality and flexibility[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(9): 68-79.
- 丁劲松,姚鸿德,李圣清.弱电网下 LCL 型并网逆变器输出阻抗复合重塑策略[J].电网与清洁能源,2024,40(3):32-40.  
DING Jingsong, YAO Hongde, LI Shengqing. A study on the complex remodeling strategy of output impedance of LCL-type grid-connected inverters under weak grids[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(3): 32-40.
- 李立生,于海东,刘洋,等.适应光伏高比例接入配电网的变流器控制策略[J].供用电,2024,41(3):17-23.  
LI Lisheng, YU Haidong, LIU Yang, et al. Control strategy of converters for high penetration of PVs into distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(3): 17-23.
- 张建新,常东旭,邱建,等.适应新型电力系统的安全稳定控制系统及装置设计方法[J].电网与清洁能源,2023,39(12):10-19.  
ZHANG Jianxin, CHANG Dongxu, QIU Jian, et al. A design method of stability control device and system adapted to new power systems[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(12): 10-19.
- 赵磊磊,牟伟,宋慧庆,等.适用于弱电网的三电平并网逆变器模型预测控制[J].浙江电力,2024,43(6):61-68.  
ZHAO Leilei, MOU Wei, SONG Huiqing, et al. Model predictive control of three-level grid-connected inverters for weak power grids[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(6): 61-68.
- 顾钰婷,颜文旭,倪宏宇,等.LCL型光伏并网逆变器频率自适应控制系统设计[J].电子设计工程,2024,32(11):60-64.  
GU Yuting, YAN Wenxu, NI Hongyu, et al. Design of frequency adaptive control system for LCL grid-connected photovoltaic inverter[J]. Electronic Design Engineering, 2024, 32(11): 60-64.
- MA W, GUAN Y, ZHANG B, et al. Active disturbance rejection control based single current feedback resonance damping strategy for LCL-type grid-connected inverter[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(1): 48-62.
- HUANG Y, XIE C, PENG C, et al. Rethink and design of capacitor-current-feedback active damping for grid-following inverters from a passivity enhancement perspective[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2024, 12(3): 2947-2959.
- CHEN W, ZHANG Y, TU Y, et al. Unified active damping strategy based on generalized virtual impedance in LCL-type grid-connected inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(8): 8129-8139.
- 杨磊,张浙波,杨敏,等.基于虚拟导纳的 LCL 型并联有源电力滤波器鲁棒电流控制[J].电力自动化设备,2024,44(8):168-175.  
YANG Lei, ZHANG Zhebo, YANG Min, et al. Robust current control of LCL-type shunt active power filter based on virtual admittance[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(8): 168-175.
- XU J, JIA P, ZHANG R, et al. Active damping for LC-filtered PMSM based on low-pass filter capacitor current feedback and extended state observer[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(2): 3292-3304.
- 贾本康.单相 LCL 并网逆变器无阻尼传感器控制策略研究[J].电子设计工程,2025,33(18):101-106.  
JIA Benkang. Research on control strategy of non-damped sensor for single-phase LCL grid-connected inverter[J]. Electronic Design Engineering, 2025, 33(18): 101-106.
- 杨明,杨杰,赵铁英,等.弱电网下抑制谐波谐振的 LCL 型并网逆变器鲁棒性 CCFAD 方法[J].电机与控制学报,2023,27(11):125-137.  
YANG Ming, YANG Jie, ZHAO Tiejing, et al. Robust CCFAD method for suppressing harmonic resonance of LCL grid-connected inverter in weak grid[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(11): 125-137.
- LIN Z, RUAN X, ZHANG H, et al. A generalized real-time computation method with dual-sampling mode to eliminate the computation delay in digitally controlled inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(5): 5186-5195.
- LI M, LIU J, XIAO M, et al. A real-time calculation PWM strategy that can eliminate one beat delay for PMSM driving[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2024, 39(2): 1230-1244.

- [19] XU D, YAO Y, HUANG Y. Robust single-side-current damping framework of high-speed PMSM with sine wave filter based on novel duty-cycle updating mechanism[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2025, 11(1): 3970–3979.
- [20] LI S, LIN H. A capacitor-current-feedback positive active damping control strategy for LCL-type grid-connected inverter to achieve high robustness[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(6): 6462–6474.
- [21] FANG T, SHEN S, ZHANG L, et al. Capacitor current feedback with phase-lead compensator to eliminate resonant frequency forbidden region for LCL-type grid-connected inverter in weak grid[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(5): 5581–5596.
- [22] 王渝红, 程杨帆, 廖建权, 等. 基于改进电容电流反馈的含非线性负载光伏并网系统振荡抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(16): 10–22.  
WANG Yuhong, CHENG Yangfan, LIAO Jianquan, et al. Oscillation suppression strategy of a PV grid-connected system with nonlinear loads based on improved capacitor current feedback[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(16): 10–22.
- [23] 赵铁英, 李俊然, 高宁, 等. 基于双二阶滤波器的LCL型并网逆变器延时补偿方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(8): 145–157.  
ZHAO Tieying, LI Junran, GAO Ning, et al. A delay compensation method based on a biquad filter for an LCL-type grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(8): 145–157.
- [24] 王林, 孙鹏菊, 薛统宇, 等. 一种提高LCL型并网逆变器电流控制性能的延时补偿方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(19): 6320–6329.  
WANG Lin, SUN Pengju, XUE Tongyu, et al. A delay compensation method to improve the current control performance of the LCL-type grid-connected inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(19): 6320–6329.
- [25] 金衍珍, 林丽, 戴哲仁, 等. 一种提高数字控制LCL型并网逆变器对电网阻抗鲁棒性的补偿策略[J]. 智慧电力, 2024, 52(4): 108–115.  
JIN Yanzhen, LIN Li, DAI Zheren, et al. A compensation strategy enhancing robustness of digital controlled LCL grid-connected inverter to grid impedance[J]. Smart Power, 2024, 52(4): 108–115.
- [26] 程勇, 宋世雄, 赵建文. 基于改进双矢量模型预测控制的逆变器功率均分控制策略[J]. 电力建设, 2024, 45(11): 137–147.  
CHENG Yong, SONG Shixiong, ZHAO Jianwen. Inverter power equalization control strategy based on improved dual-vector model predictive control[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(11): 137–147.
- [27] 张博宸, 周羽生, 周文晴, 等. 基于滑模观测器的三电平风力发电并网逆变器无差拍优化模型预测控制[J]. 电测与仪表, 2024, 61(4): 176–183.  
ZHANG Bochen, ZHOU Yusheng, ZHOU Wenqing, et al. Optimal model predictive control for three-level grid-connected wind power inverters without differential beat based on sliding mode observer[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(4): 176–183.
- [28] LI Y, GAO J, ZHANG Z, et al. Model-based and model-free predictive active damping for LCL-type active-front-end rectifiers[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(10): 11754–11765.
- [29] 方健, 李辉. 基于状态重构准谐振扩张状态观测器的LCL型并网逆变器电流控制策略研究[J]. 发电技术, 2024, 45(1): 170–179.  
FANG Jian, LI Hui. Research on current control strategy of the LCL-type grid-connected inverter based on state reconfiguration with quasi resonant-extended state observer[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(1): 170–179.

(责任编辑 李萌)

收稿日期: 2025-09-11; 修改日期: 2025-12-07

作者简介: 曾江(1972), 男, 江西萍乡人, 博士, 副教授, 主要研究方向为新能源并网技术、电能质量分析与控制。E-mail: zengxy@scut.edu.cn

杨耀权(2002), 男, 通信作者, 广东佛山人, 硕士研究生, 主要研究方向为光伏并网逆变器控制技术。E-mail: ep202421014317@mail.scut.edu.cn

## A Robust Active Damping Control Method for LC-type Grid-connected Inverters Based on Double-sampling Delay Compensation

ZENG Jiang, YANG Yaoquan, XIAO Yang, NI Zehuan

(School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** LC-type inverters are widely used as interfaces between distributed power sources and the grid. To address the control delay issue in active damping of LC-type grid-connected inverters, a robust active damping control method based on double-sampling delay compensation is proposed. By sampling the voltage at the point of common coupling (PCC) at both the peak and trough of the carrier wave within the same switching cycle, this method constructs an advanced signal to achieve a delay compensation of 1.5 control cycles. This extends the equivalent positive damping range of the PCC voltage unit feedforward to near the Nyquist frequency, thereby enhancing the robustness of the LC-type grid-connected inverter against variations in grid impedance. Experimental results show that the proposed method effectively mitigates the impact of digital control delay on the active damping performance of PCC voltage feedforward, ensuring stable system operation.

**Key words:** grid-connected inverter; LCL resonance; active damping; double-sampling; delay compensation