

LCL型并网逆变器的网压滤波前馈控制策略

黄伟,张代润,杜仕海,何江涛

(四川大学 电气工程学院,四川 成都 610065)

摘要: LCL型并网逆变器的网压比例前馈策略因其实现方式简单、谐波抗扰能力良好而受到广泛应用,但是该策略在弱电网下的适应性较差,并网逆变器的前馈通道与电网阻抗产生交互影响,使得系统稳定性随着电网阻抗的增大而显著下降,恶化了入网电流质量。以改善网压比例前馈策略的适应性为目标,提出了一种基于多二阶滤波器的网压前馈控制策略,即在前馈通路上引入多个二阶滤波器,实现电网电压的选择性反馈。详细分析了该策略的输出阻抗特性以及谐波扰动的抑制情况,分析结果表明,该策略不仅可实现电网背景谐波的抑制,而且又不削弱系统在弱电网下的稳定性,从而提高了并网逆变器对弱电网的适应性。最后,仿真结果验证了该策略的有效性。

关键词: 网压比例前馈;并网逆变器;弱电网;适应性;抗扰性能;稳定性

中图分类号: TM464 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd20850

Grid Voltage Filtering Feedforward Control Strategy for LCL-type Grid-connected Inverters

HUANG Wei, ZHANG Dairun, DU Shihai, HE Jiangtao

(School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: Due to simple realization and good harmonic disturbance immunity, grid voltage proportional feedforward strategy of LCL-type grid-connected inverters has been widely applied, but this strategy has poor adaptability in the weak grid, the feedforward channel of grid-connected inverters interact with the grid impedance, which makes the stability of system decrease significantly with the increase of grid impedance, worsens quality of the injected grid current. Aiming at improving the adaptability of grid voltage proportional feedforward strategy, and putting forward a grid voltage feedforward control strategy based on multiple second-order filters, multiple second-order filters were introduced in the feedforward path to achieve selective feedback of grid voltage, then characteristics of output impedance and suppression of harmonic disturbance were analyzed in detail. The results of analysis show that this strategy can not only suppress the background harmonics, but also don't weaken the stability of system in weak grid, so as to improve the adaptability of grid-connected inverters in the weak grid. Finally, the results of simulation verifies the effectiveness of this strategy.

Key words: grid voltage proportional feedforward; grid-connected inverter; weak grid; adaptability; harmonic disturbance immunity; stability

LCL型并网逆变器是连接分布式发电系统与公共电网之间的核心设备,其入网电流质量问题受到国内外专家和学者的关注^[1-4]。目前,广泛使用的电网电压比例前馈策略虽然能显著增强LCL型并网逆变器的谐波抗扰能力^[5],保证了入网电流质量,但在拥有丰富背景谐波和电网阻抗宽范围变化的弱电网下,该策略的稳定性较差,易受来自电网阻抗变化的影响,进而大幅放大入网电流中的谐波分量^[6]。国家电网已明确规定,分布

式发电系统需满足在最小短路比10所对应的电网阻抗下稳定运行^[7],因此,提高网压比例前馈策略在弱电网下的适应性已成为近年来研究的热点,国内外学者对此已作出相关研究。

文献[8-9]提出了基于电网阻抗测量技术的自适应控制策略,在内环中引入了自适应相位补偿环节,用于消除稳定性下降的不利影响,但是该策略的补偿效果依赖于阻抗测量技术的精度,并且阻抗测量技术的应用会一定程度地恶化

作者简介: 黄伟(1993—),男,硕士,Email:2023890092@qq.com

入网电流质量,其实际应用价值有限。文献[10]提出一种基于加权系数的网压比例前馈策略,实现方式简单有效,但该方法是以牺牲一定的谐波抗扰能力来提升其稳定性的,系统适应性的提升空间有限。文献[11-12]采用构建虚拟阻抗的方法来实现稳定性的提升,但是其构建函数引入了微分项,将严重放大入网电流中高频谐波,且在实际工程中,微分环节也难以实现。

本文首先推导了LCL型并网逆变器的输出阻抗模型,明晰了网压比例前馈对弱电网的适应性;之后提出一种基于多二阶滤波器的网压前馈控制策略,详细分析了该策略的实现方式,滤波器参数设计,谐波抗扰能力以及应对电网阻抗范围变化的稳定性;同时与现有策略以及传统策略进行了对比。对比结果表明,该策略对弱电网同样拥有优越的适应性,可在恶劣的弱电网条件下输出质量良好的入网电流,无需复杂的电网阻抗测量技术,系统计算量更小,并且,引入的新环节也无微分项,无放大高频谐波的副作用。

1 弱电网下LCL型并网逆变器的输出阻抗模型

含网压比例前馈策略的单相LCL型并网逆变器的模型结构图如图1所示。

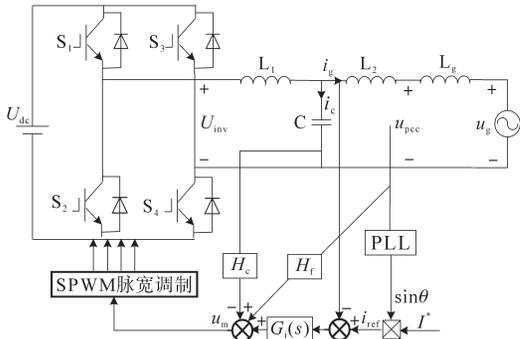


图1 含网压比例前馈的LCL型并网逆变器模型结构图

Fig.1 Model structure diagram of LCL-type grid-connected inverters with grid voltage proportional feedforward

图1中, U_{dc} 为直流侧电压源; S_1, S_2, S_3, S_4 为IGBT开关管; U_{inv} 为逆变器输出电压; L_1, C, L_2 分别为LCL滤波器的电感电容元件; i_c, i_g 分别为逆变器电容电流以及入网电流; u_{pcc} 为公共耦合点电压; L_g 为弱电网下呈感性的电网阻抗; u_g 为电网电压; I^* 为指令电流幅值; u_{pcc} 经过锁相环(phase locked loop, PLL)得出电网电压相位 θ , 与 I^* 结合后形成指令电流 i_{ref} ; $G_i(s)$ 为电流控制器; H_c 为电容电流采样系数,用于抑制LCL滤波器的谐振; H_f

为网压比例前馈系数; u_m 为控制环路得出的调制波, u_m 经过正弦脉宽调制后,将占空比信号传递至4个开关管,从而控制开关管的工作。

图2为LCL型并网逆变器的结构控制框图。

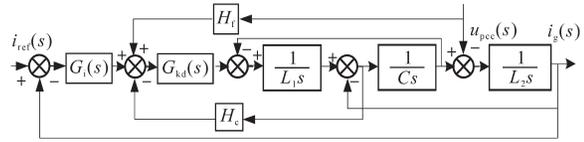


图2 LCL型并网逆变器的控制框图

Fig.2 Control block diagram of LCL-type grid-connected inverters

图2中, $G_{kd}(s)$ 为数字控制下零阶保持器,一拍计算延时,采样开关以及脉宽调制增益系数 K_{pwm} 共同构成的延时环节,其表达式如下式所示:

$$G_{kd}(s) \approx \frac{K_{pwm}}{T_s} e^{-sT} T_s e^{-0.5sT} = K_{pwm} e^{-1.5sT} \quad (1)$$

式中: T_s 为采样周期。

$G_{kd}(s)$ 结构如图3所示,其中, K_{pwm} 通常等效为下式^[13]:

$$K_{pwm} = U_{dc} / U_{tri} \quad (2)$$

式中: U_{tri} 为三角载波幅值。

另外,图2中网压比例前馈系数 H_f 的表达式如下式所示:

$$H_f = 1/K_{pwm} \quad (3)$$

电流控制器 $G_i(s)$ 采用准比例谐振控制器,实现对基波频率信号的良好跟踪, $G_i(s)$ 的传递函数如下式所示:

$$G_i(s) = k_p + k_r \cdot \frac{2\omega_i s}{s^2 + 2\omega_i + \omega_o^2} \quad (4)$$

式中: k_p 为控制器的比例系数; k_r 为控制器的基波增益系数; ω_i 为控制器带宽调整参数; ω_o 为基波信号的角频率。

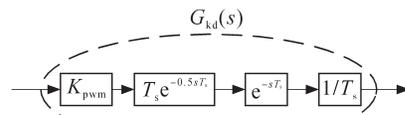


图3 延时环节 $G_{kd}(s)$ 的结构图

Fig.3 Structure diagram of delay link $G_{kd}(s)$

并网逆变器控制框图如图4所示。

对图2进行等效变换,将网压反馈点前移至 $G_i(s)$ 的输入端,则图2可进一步等效为图4a。其中, $G_{x1}(s)$ 与 $G_{x2}(s)$ 的表达式分别如下所示:

$$G_{x1}(s) = \frac{G_{kd}(s)G_i(s)}{s^2 L_1 C + s C H_c G_{kd}(s) + 1} \quad (5)$$

$$G_{x2}(s) = \frac{s^2 L_1 C + s C H_c G_{kd}(s) + 1}{s^3 L_1 L_2 C + s^2 L_2 C H_c G_{kd}(s) + (L_1 + L_2) s} \quad (6)$$

由图4a可得出系统的环路增益 $T(s)$ 为

$$T(s) = G_{x1}(s)G_{x2}(s) = G_i(s)G_{kd}(s) / [s^3 L_1 L_2 C + s^2 L_2 C H_c G_{kd}(s) + (L_1 + L_2) s] \quad (7)$$

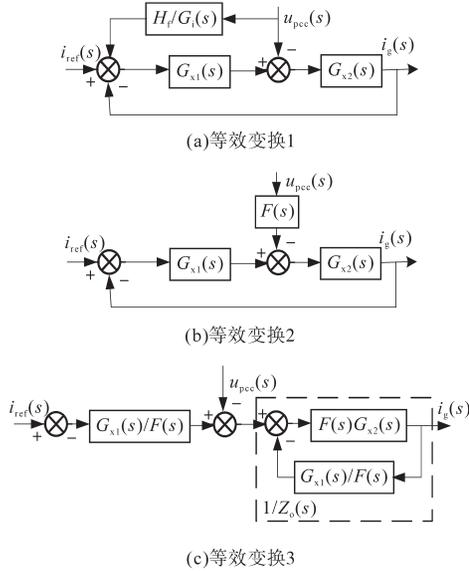


图4 并网逆变器控制框图的等效变换
Fig.4 Equivalent transformation of control block diagram of grid-connected inverters

将图4a的网压前馈点提前至 $G_{x1}(s)$ 输入端,并合并 $u_{pcc}(s)$ 的所有输入项,可进一步得到图4b。其中, $F(s)$ 为电网电压扰动函数,表达式如下式所示:

$$F(s) = 1 - H_f G_{x1}(s) / G_i(s) \quad (8)$$

式(8)反映了 u_{pcc} 点的扰动对并网逆变器的影响程度。

进一步将图4b中入网电流 $i_g(s)$ 的反馈端前移至 $G_{x2}(s)$ 的输入端,同时把 $F(s)$ 移动至 $G_{x2}(s)$ 的输入端,可得到图4c所示的等效框图。其中, $Z_o(s)$ 表示并网逆变器的输出阻抗,其表达式如下:

$$Z_o(s) = \frac{1 + G_{x1}(s)G_{x2}(s)}{G_{x2}(s)F(s)} \quad (9)$$

根据图4c,可建立LCL型并网逆变器的输出阻抗模型图,如图5所示。

图5中, $i_{eq}(s)$ 为并网逆变器的等效电流源,同时把弱电网等效为电压源 $u_g(s)$ 与电网阻抗 $Z_g(s)$ 串联的电路, $Z_g(s)$ 与 $i_{eq}(s)$ 的表达式如下式所示:

$$\begin{cases} i_{eq}(s) = \frac{G_{x1}(s)G_{x2}(s)}{1 + G_{x1}(s)G_{x2}(s)} \\ Z_g(s) = L_g s \end{cases} \quad (10)$$

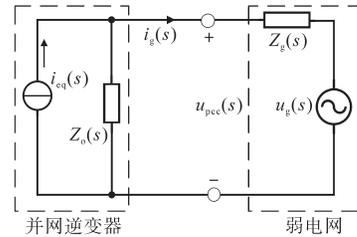


图5 并网逆变器的输出阻抗模型图

Fig.5 Output impedance model diagram of grid-connected inverters

根据叠加定理,可推导出图5的电路关系式如下:

$$i_g(s) = \frac{Z_o(s)}{Z_o(s) + Z_g(s)} i_{eq}(s) - \frac{1}{Z_o(s) + Z_g(s)} u_g(s) \quad (11)$$

由式(11)可知,并网逆变器若想抑制来自电网 $u_g(s)$ 的谐波干扰,必须提高分母上 $Z_o(s)+Z_g(s)$ 的模值,其中, $Z_g(s)$ 为一阶微分项,相位始终为 90° ,而且其阻抗值会随着频率的增大而增大,所以必然存在某一交截频率 f_i 处, $Z_o(2\pi f_i)$ 的模值等于 $Z_g(2\pi f_i)$ 的模值,若在该交截频率 f_i 处,两者的相位相反,即 $Z_g(2\pi f_i) + Z_o(2\pi f_i) = 0$,根据式(11),则电网背景谐波将被无穷放大。

综上所述,若要求并网逆变器系统拥有良好的谐波抗扰能力和稳定性,需要其输出阻抗 $Z_o(s)$ 在背景谐波频率处拥有高阻抗幅值,在阻抗交截频率 f_i 处拥有充足的相位裕度 PM ,一般工程要求 $PM > 40^\circ$, PM 的表达式如下:

$$PM = \arg [Z_g(f_i)] + \arg [Z_o(f_i)] \quad (12)$$

2 弱电网下网压比例前馈策略的适用性分析

2.1 系统谐波抗扰能力分析

图6为网压比例前馈策略下电网电压扰动函数 $F(s)$ 的波德图。由图6不难发现,比例前馈策略在小于 f_u 的频段里,皆可实现电网电压扰动的抑制,且频率越低,抑制效果越好,故网压比例前馈策略基本可以消除电网中低次谐波的干扰,但是受系统中固有的延时环节 $G_{kd}(s)$ 的影响,导致系统相位随频率的增加不断滞后,影响了网压比例前馈策略的谐波抑制效果,甚至在大于 f_u 的频段里,网压比例前馈还放大了电网中的高次谐波,但通常来说,实际电网当中高次谐波含量较少,所以放大效果可忽略不计。综上所述,网压

频特性的影响,令所有滤波器并联构成的传递函数为 $G_i(s)$,其波德图如图10所示,表达式如下:

$$G_i(s) = \frac{\omega_v s}{s^2 + \omega_v s + (3\omega_o)^2} + \frac{\omega_v s}{s^2 + \omega_v s + (5\omega_o)^2} + \frac{\omega_v s}{s^2 + \omega_v s + (7\omega_o)^2} + \frac{\omega_v s}{s^2 + \omega_v s + (9\omega_o)^2} \quad (14)$$

由图10不难发现,各特定次谐波信号的提取是互不影响,并联式的多二阶滤波器可以很好地提取各自的谐波信号,因此,我们可认为每个二阶滤波器之间是解耦的,所以在设计滤波器参数时,只需整定谐波信号的频率即可。

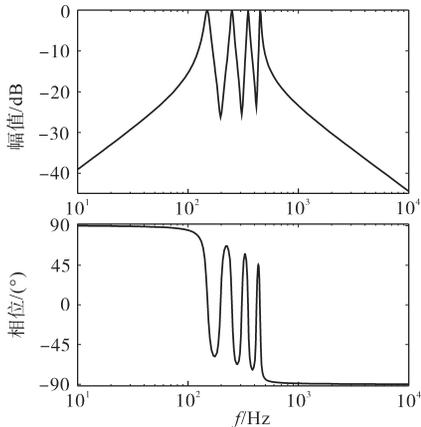


图10 并联式多二阶滤波器 $G_i(s)$ 的波德图

Fig.10 Bode diagram of parallel multiple second-order filter $G_i(s)$

3.3 改进后系统谐波抗扰能力分析

采用与第2节相同的分析方法,网压滤波前馈策略的电网电压扰动函数可列写为

$$F_{\text{SOCl}}(s) = 1 - \frac{G_i(s)H_f G_{x1}(s)}{G_i(s)} \quad (15)$$

图11为 $F_{\text{SOCl}}(s)$ 的波德图。

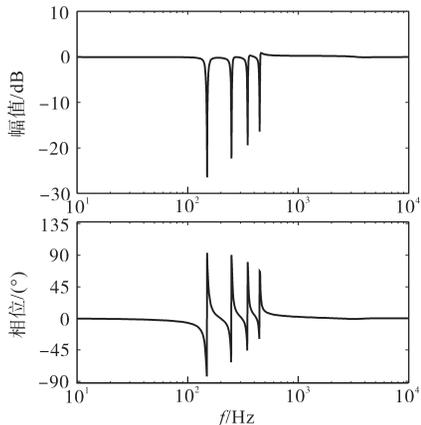


图11 电网电压扰动函数 $F_{\text{SOCl}}(s)$ 的波德图

Fig.11 Bode diagram of grid-voltage disturbance function $F_{\text{SOCl}}(s)$

从图11中可以发现, $F_{\text{SOCl}}(s)$ 在电网低次谐

波频率处有很低的幅值增益,说明在这些频率处, $F_{\text{SOCl}}(s)$ 引入的 u_{pec} 点等效干扰量基本趋近于0,表明并网逆变器可以很好地抑制这些低次谐波的干扰。但是同样的,由于延时环节 $G_{\text{kd}}(s)$ 的存在,导致该策略的谐波抑制效果随着频率的增加而削弱,但 u_{pec} 点的等效干扰量仍被抑制在-15dB以下,所以延时环节对该策略的谐波抑制效果影响可忽略不计。

3.4 改进后系统应对电网阻抗变化的稳定性分析

网压滤波前馈策略的输出阻抗 $Z_{o,\text{SOCl}}(s)$ 的表达式如下式所示:

$$Z_{o,\text{SOCl}}(s) = \frac{1 + G_{x1}(s)G_{x2}(s)}{G_{x2}(s)F_{\text{SOCl}}(s)} \quad (16)$$

图12为 $Z_{o,\text{SOCl}}(s)$ 的波德图。从图12中可看出,相比网压比例前馈策略,该策略的输出阻抗 $Z_{o,\text{SOCl}}(s)$ 在中频段的相位远大于 -90° ,在电网阻抗 L_g 宽范围变化时始终拥有令人满意的相位裕度 PM ,表明了该策略在弱电网下具有良好的阻抗稳定性,而且从图12还可看出,该策略大大提升了并网逆变器在低次谐波频率处的阻抗幅值。

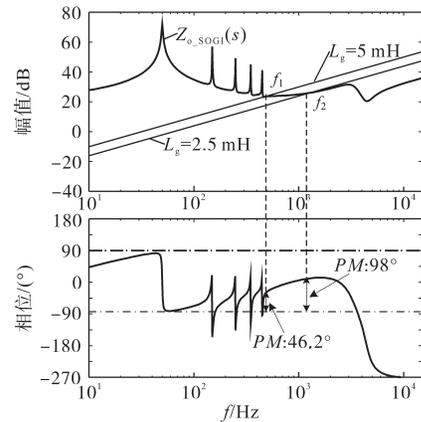


图12 输出阻抗 $Z_{o,\text{SOCl}}(s)$ 的波德图

Fig.12 Bode diagram of output impedance $Z_{o,\text{SOCl}}(s)$

综上所述,该策略既改善了并网逆变器应对电网阻抗宽范围变化的稳定性,又能提高对背谐波的抗扰能力,从而显著加强了并网逆变器对弱电网的适应性

4 仿真验证

为了验证本文提出的网压滤波前馈策略的有效性与正确性,通过仿真软件搭建了输出功率为4.5 kW的单相LCL型并网逆变器模型,并且对本文提出的策略与现有文章提出的自适应补偿

策略,以及网压比例前馈策略进行了详细对比,仿真参数如表1所示。同时,为了模拟拥有丰富背景谐波和电网阻抗宽范围变化的弱电网,在仿真模型的电网电压中,加入了各次谐波与电感,各次谐波的含量用电网电压幅值的百分比来描述,如表2所示,三个策略入网电流的总谐波失真(total harmonic distortion, THD)在25个公频周期内进行快速傅里叶变换分析。

表1 单相LCL型并网逆变器的仿真参数

Tab.1 Simulation parameters of single-phase LCL grid-connected inverter

参数	取值	参数	取值
输出侧电感 L_1 /mH	1.5	基波频率 f_1 /Hz	50
滤波电容 $C/\mu\text{F}$	3.5	直流侧电压 U_{dc}/V	400
网侧电感 L_2 /mH	0.7	电网电压有效值 u_g/V	220
采样频率 f_s/kHz	30	电容电流采样系数 H_c	0.04

表2 仿真模型中弱电网的各次背景谐波含量

Tab.2 Background harmonic content of weak grid in the simulation model

谐波次数	含量	谐波次数	含量
3	10%	11	2%
5	5%	13	2%
7	3%	15	1%
9	3%	17	1%

图13为 $L_g=0$ mH时三个策略的入网电流 i_g 和公共耦合点电压 u_{pcc} 的仿真波形。从图13a中可看出,网压比例前馈策略在强电网条件下有很好的谐波抗扰能力,各次谐波分量都能得到有效抑制,使得并网逆变器的入网电流质量较高;在图13b中,本文提出策略的入网电流的THD同样保持良好,验证了本文提出策略对电网低频背景谐波同样具有较好的抗扰能力;而在图13c中,自适应补偿策略需要间歇性注入一定的高频谐波电流用于检测电网阻抗,导致入网电流质量被恶化,但是谐波注入周期仅为2个周期,所以对系统的影响不大。

图14为 $L_g=2.5$ mH时三个策略的入网电流 i_g 和公共耦合点电压 u_{pcc} 的仿真波形。由图14可看出,网压比例前馈策略受到电网阻抗变化的影响,背景谐波被一定程度地放大,入网电流的THD增加,而本文提出策略对电网阻抗变化的敏感度较低,基本不受影响,另外,自适应补偿策略的实现效果同样较为理想,与本文提出策略的入网电流THD基本一致。

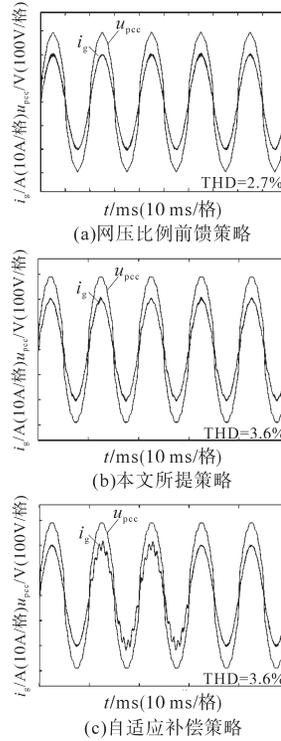


图13 $L_g=0$ mH时三个策略的仿真波形对比

Fig.13 Simulation waveforms comparison of three strategies when $L_g=0$ mH

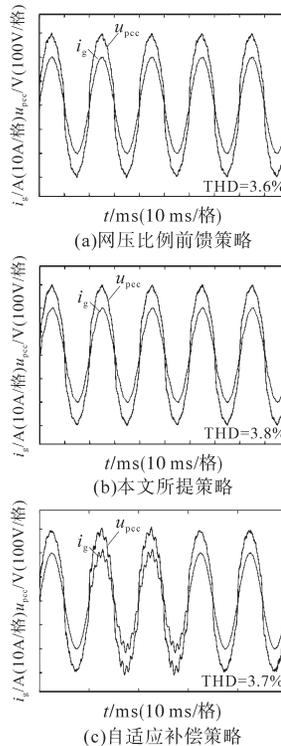


图14 $L_g=2.5$ mH时三个策略的仿真波形对比

Fig.14 Simulation waveforms comparison of three strategies when $L_g=2.5$ mH

图15为 $L_g=5$ mH时三个策略的入网电流 i_g 和公共耦合点电压 u_{pcc} 的仿真波形。不难发现,网压比例前馈策略中的背景谐波被大幅放大,入网

电流质量糟糕,无法满足分布式发电系统的并网标准,验证了第2节分析的正确性,而本文提出策略兼顾良好的谐波抗扰能力与稳定性,电网阻抗 L_g 在0~5 mH内变化内,并网逆变器均能输出质量良好的入网电流,相比于自适应补偿策略,本文提出策略的最终实现效果与其几乎相近,但是自适应补偿策略需要复杂的电网阻抗测量技术,严重加大了系统的计算量,而本文提出策略的计算复杂度远小于自适应补偿策略,实现方式简单有效,并且,新引入的二阶滤波器也不含微分项。

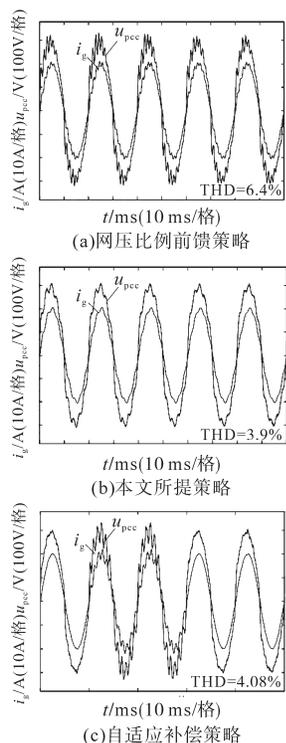


图15 $L_g=5$ mH时三个策略的仿真波形对比
Fig.15 Simulation waveforms comparison of three strategies when $L_g=5$ mH

5 结论

本文首先详细推导了并网逆变器在弱电网下的输出阻抗模型,输出阻抗能反映并网逆变器对谐波的抗扰能力和对电网阻抗变化的稳定性,当前广泛使用的网压比例前馈策略在弱电网下的适应性糟糕,不宜采用。为此,本文提出一种网压滤波前馈策略,该策略可使系统在弱电网下同时兼顾良好的谐波抗扰能力与稳定性,显著提

升了并网逆变器在弱电网下的适应性,并且与已有文献提出的自适应补偿策略相比,本文提出策略的实现效果与其接近,但是系统计算复杂度远小于自适应补偿策略,且不含微分项,无放大高频谐波的副作用。接下来将针对二阶滤波器的算法复杂度作进一步简化,并将该策略应用于三相并网逆变器。

参考文献

- [1] 周林,张密,居秀丽,等.电网阻抗对大型并网光伏系统稳定性影响分析[J].中国电机工程学报,2013,33(34):34-41,9.
- [2] Wang Jianguo, Yan Jiudun, Jiang Lin.Pseudo derivative feedback current control for three-phase grid-connected inverters with LCL filters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5): 3898-3912.
- [3] 张战彬,翟红霞,徐华博,等.光伏电站多逆变器并网系统输出谐波研究[J].电力系统保护与控制,2016,44(14):142-146.
- [4] 晋鑫,张琦,刘佳昊,等.具有低入网电流谐波的组合光伏发电系统研究[J].电气传动,2019,49(11):51-56.
- [5] 王学华,阮新波,刘尚伟.抑制电网背景谐波影响的并网逆变器控制策略[J].中国电机工程学报,2011,31(6):7-14.
- [6] 解宝,周林,郝高峰,等.考虑电网阻抗影响的光伏并网逆变器稳定性与谐振分析及设计[J].中国电机工程学报,2018,38(22):6662-6671.
- [7] 国家电网公司.Q/GDW 617—2011光伏电站接入电网技术规定[S].北京:中国电力出版社,2011.
- [8] 郑晨,周林,解宝,等.基于相位裕度补偿的大型光伏电站谐波谐振抑制策略[J].电工技术学报,2016,31(19):85-96.
- [9] 李建文,曹久辉,焦衡,等.弱电网下并网逆变器的相位裕度补偿方法[J].电力科学与工程,2018,34(11):8-13.
- [10] 李明,张兴,杨莹,等.弱电网下基于加权系数的电网电压前馈控制策略[J].电源学报,2017,15(6):10-18.
- [11] 杨东升,阮新波,吴恒.提高LCL型并网逆变器对弱电网适应能力的虚拟阻抗方法[J].中国电机工程学报,2014,34(15):2327-2335.
- [12] 同向前,刘乐,杨树德,等.基于虚拟电网电阻的并网逆变器稳定性增强控制[J].电气传动,2018,48(12):7-10,15.
- [13] 杨荫福,段善旭,朝泽云,电力电子装置及系统[M].北京:清华大学出版社,2006.

收稿日期:2019-09-09
修改稿日期:2019-10-06