

弱电网下LCL型逆变器的改进有源阻尼控制策略

曲晨明, 郭昆丽, 白阳, 李航, 朱婷华, 马鹏

(西安工程大学 电子信息学院, 陕西 西安 710600)

摘要:针对弱电网下考虑电网电压背景谐波影响,导致并网电流在加权平均电流控制(WACC)下出现反向谐振峰,使得系统无法实现零极点对消进而影响并网系统的稳定性,提出一种改进的加权平均电流(WAC)控制策略,通过准比例谐振控制器有效追踪并网电流,在电网电压前馈通道中引入选频环节抑制高次谐波,同时串联超前相位补偿器来消除延时环节导致反向谐振峰频率范围内的相位滞后,以此来提升系统的稳定性。理论分析以及Matlab/Simulink仿真结果表明,所提改进WAC控制策略能够提高LCL型逆变器在弱电网中的稳定性及适应性。

关键词:弱电网;LCL型逆变器;加权平均电流控制;并网逆变器;选频环节;超前补偿器

中图分类号:TM464 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed25805

Improved Active Damping Control Strategy for LCL Inverter in Weak Grid

QU Chenming, GUO Kunli, BAI Yang, LI Hang, ZHU Tinghua, MA Peng

(College of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710600, Shaanxi, China)

Abstract: Considering the influence of grid voltage background harmonics in weak current networks, reverse harmonic peaks appear in the grid-connected current under weighted average current control (WACC), making it impossible for the system to achieve zero pole cancellation and thus affecting the stability of the grid-connected system. An improved weighted average current (WAC) control strategy that effectively tracks the grid-connected current through a quasi-proportional resonant controller was proposed. Introduced a frequency selection link into the grid voltage feedforward channel to suppress high-order harmonics, and connected in series to eliminate phase lag within the reverse resonance peak frequency range caused by the delay link, thereby improving system stability. Theoretical analysis and Matlab/Simulink simulation results show that the improved WAC control strategy proposed can improve the stability and adaptability of LCL inverters in weak current networks.

Key words: weak grids; LCL inverter; weighted average current control (WACC); grid-connected inverter; frequency selection link; lead compensator

逆变器作为连接分布式发电系统与电网之间的关键一环,具有不可替代的作用^[1-2]。逆变器通常采用脉宽调制方式,开环频繁启停会导致逆变器输出侧含有大量开关谐波,因此需要对其进行滤波^[2]。LCL型滤波器由于其良好的低频增益和高频衰减能力被广泛应用于各种逆变器并网系统中,但因其为三阶欠阻尼系统,存在固有谐振,在弱电网下会导致并网电流谐波经电网阻抗后被放大,降低系统的稳定裕度,进而影响系统的稳定性^[3]。

针对LCL型逆变器存在的固有谐振问题,常

用的抑制方法可以归为两类:无源阻尼法^[4]和有源阻尼法^[5-15],其中有源阻尼法主要分为状态反馈法^[5-9]和降阶法^[10-14]。无源阻尼法需要串联或并联电阻以提升系统阻尼,这会导致系统功率损耗增加。有源阻尼法通过改进控制环节,经过反馈特定的状态变量实现与无源阻尼法相同的效果,可有效避免功率损耗。文献[5-9]通过反馈电容电流或电容电压从而达到抑制谐振尖峰的目的。降阶法本质上是对控制环节进行改进,其中加权平均电流控制法(weighted average current control, WACC)由于参数设计简单、良好的降阶特性等优

作者简介:曲晨明(2000—),男,硕士,Email:1075790455@qq.com

通讯作者:郭昆丽(1974—),女,硕士,副教授,Email:guokunli@xpu.edu.cn

点被众多学者应用于LCL型逆变器并网系统中^[2]。

在弱电网环境下加权平均电流控制法会受到电网阻抗影响,使其加权系数发生变化进而无法降阶^[11]。文献[13]提出一种通过检测电网阻抗从而矫正加权系数的措施,但会使系统变复杂,导致电流质量下降。文献[14]提出一种考虑电网电压前馈并重新设计加权平均系数的方法,然而该方法并未考虑延时环节对系统的影响。文献[15]提出了一种基于二阶广义积分器(second-order generalized integrator, SOGI)的LCL型并网逆变器延时补偿方法,虽然提高了系统的相位裕度(phase margin, PM),但是会降低逆变器输出模值。文献[16]证明延时环节会导致加权平均电流控制法出现反向谐振峰,影响系统稳定性,并提出将超前补偿环节引入电网电压前馈中以补偿反向谐振峰,但与电容串联的电阻会增加功率损耗。文献[17]将电容电流反馈引入加权平均电流环中,同时增加一个补偿环节实现零极点对消,但该方法会增加额外的传感器,成本较高,同时实现较为困难。文献[18]考虑数字延时环节在耦合点处引入高通滤波器,同时采用比例谐振控制器实现对并网电流的完全追踪,补偿了由加权平均电流控制产生的反向谐振峰问题,但对电网电压高次背景谐波抑制效果不佳。

基于上述分析,在综合考虑数字延时环节以及弱电网环境下加权平均电流控制方法无法兼顾其降阶和并网系统稳定性问题,本文提出将准比例谐振(quasi-proportional resonance, QPR)控制器与相位补偿器相结合的改进加权平均电流控制策略,通过QPR控制跟踪正弦波参考信号,同时增加选频环节用以抑制电网电压高次背景谐波,从而实现弱电网环境下WACC方法降阶特性并提升电能质量。在Matlab/Simulink中进行仿真验证了所提方法的可行性。

1 传统加权平均电流控制方法

图1为单相LCL型并网逆变器采用传统加权平均电流控制的结构图。

图1中, L_1, L_2, C 分别为构成LCL的电感与电容; V_{dc} 为直流母线电压; i_1 为逆变器侧电流; i_2 为网侧电流; i_c 为电容电流; R_d 为电阻; L_g 为电网侧等效阻抗; v_g 为网侧电压。控制环节中,PLL代表锁相环; β 和 $1-\beta$ 为加权系数; v_{pcc} 为公共耦合点电压; $G_i(s)$ 为电网电压前馈项; i_{ref} 为参考电流; i_{wac} 为

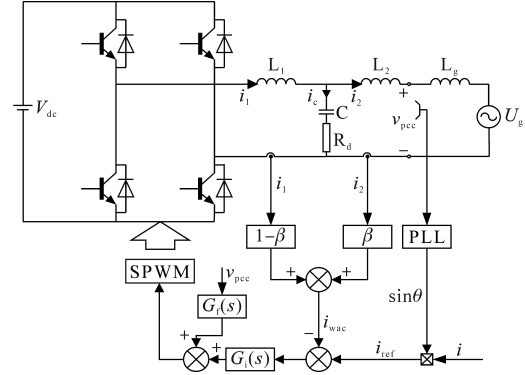


图1 加权平均电流控制的LCL型并网逆变器拓扑图

Fig.1 Topology diagram of LCL type grid connected inverter with weighted average current control

加权平均电流。

根据图1所示的拓扑图,可得如图2所示的系统控制框图。图中, $G_i(s)$ 表示比例积分控制器; $G_d(s)$ 表示延时环节; K_{pwm} 表示逆变桥等效环节, $K_{pwm}=V_{dc}/V_{tri}$, V_{tri} 表示三角载波幅值。

根据分布式发电并网的相关规定要求,单相并网逆变器需在系统短路比(short circuit ratio, SCR)大于等于10的工况下进行工作,即 $SCR \geq 10$ ^[19]。所以当 $SCR=10$ 时,此时对应的电网电抗 L_g 是本文考虑的最大电网电抗,数值为7.7 mH,所以本文在 $L_g \leq 7.7$ mH范围内进行具体分析。

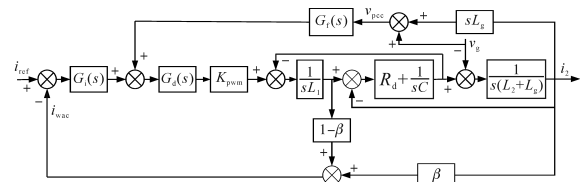


图2 传统加权平均控制的控制框图

Fig.2 Control block diagram of traditional weighted average control

由图2可以推导系统开环时电网电流参考值 i_{ref} 到加权平均电流反馈值 i_{wac} 的传递函数如下式:

$$G_{iref}^{i_{wac}}(s) = G_i(s) K_{pwm} G_d(s) [(1-\beta)(L_2 + L_g)Cs^2 + 1] / \{ (L_1 + L_2 + L_g)s [\frac{L_1}{L_1 + L_2 + L_g} (L_2 + L_g)Cs^2 - \frac{L_g G_i(s) K_{pwm} G_d(s)}{L_1 + L_2 + L_g} + 1] \} \quad (1)$$

其中

$$1 - \beta = L_1 / (L_1 + L_2)$$

根据表1所示的系统参数绘制如图3所示伯德图。

当忽略电网阻抗(即 $L_g=0$)时,若不考虑延时环节 $G_d(s)$,系统能够完全降阶,此时LCL型滤波器与L型滤波器的特性相同,其电感值为 L_1+L_2 。

表1 系统参数
Tab.1 System parameter

参数	数值	参数	数值
电网电压/V	220	谐振宽度 k_c	3.14
直流母线电压/V	360	电网基波角频率	314
开关频率/kHz	15	电流反馈系数	0.03
采样频率/kHz	30	网侧电感/mH	0.5
逆变器侧电感/mH	1.5	三角载波幅值/V	1
比例系数 k_p	0.35	选频系数 λ	1/1 000 π
谐振系数 k_d	20	选频系数 α	0.05

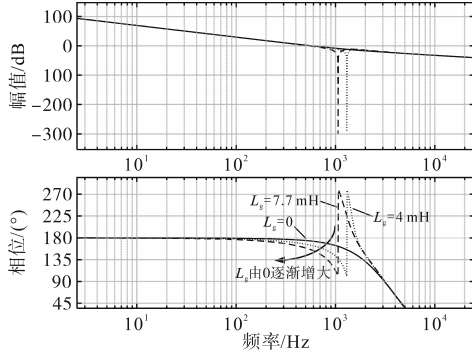


图3 弱电网下不同电网阻抗时传统WAC控制系统的伯德图

Fig.3 Bode diagram of traditional WAC control system under weak grid with different grid impedance

当不忽略电网阻抗(即 $L_g \neq 0$)时,系统出现反向谐振尖峰,系统的相位裕度随着电网阻抗逐渐增大而逐渐减小,导致系统失稳。由于延时环节 $G_d(s)$ 的存在,导致 $(1-\beta)(L_2+L_g)Cs^2+1$ 无法完成零极点抵消,从而导致反谐振峰出现,造成系统失稳。通过推导得到系统反谐振频率 f_{rx} 的表达式为

$$f_{rx} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1(L_2 + L_g)C}} \quad (2)$$

2 改进加权平均电流控制方法

2.1 引入选频环节的WAC控制策略

为了实现对并网电流的零稳态误差跟踪,文献[20-21]提出用准比例谐振控制器替换传统比例积分控制器的改进控制策略,取得了较好的控制效果,但其无法抑制高次谐波对系统造成的影响。综合考虑弱电网环境下电网电压前馈通道具有全通特性,其中的高次谐波会对系统稳定性造成危害^[21]。为了克服系统采用准比例谐振控制的缺点,同时提高并网电流质量,可在电网电压前馈环节设计选频环节 $G_c(s)$,使得前馈函数具有低通特性,具有抑制电网电压高次谐波的能力。引入选频环节后系统控制框图如图4所示,选频前馈函数如下式所示:

$$G_c(s) = \frac{1 + \alpha\lambda s}{1 + \lambda s} \quad (3)$$

其中, α 和 λ 均为选频系数, $\alpha < 1$,此时 $G_c(s)$ 的频率特性如图5所示。

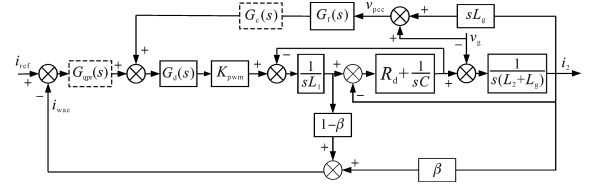


图4 引入选频环节后的控制框图

Fig.4 Control block diagram after introducing frequency selection link

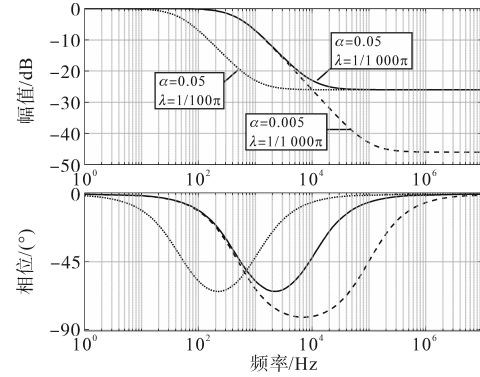


图5 选频环节的Bode图

Fig.5 Bode diagram of frequency selection link

由于选频环节在某些频率处可能会出现相位滞后的现象,所以在系统稳定的情况下, α 引起的相移尽量小。为了获得对电网电压背景谐波的高增益特性,需要满足 $1/(2\lambda\pi)$ 明显大于工频频率(50 Hz),综合考虑本文取 $\alpha=0.05$, $\lambda=1/1\,000\pi$ 。

图4中, $G_{qpr}(s)$ 为准比例谐振控制器,其表达式如下:

$$G_{qpr}(s) = k_p + \frac{2k_r k_c s}{s^2 + 2k_c s + \omega_0^2} \quad (4)$$

式中: k_p 为比例系数; k_r 为谐振系数; k_c 为谐振宽度; ω_0 为电网基波角频率。

由图4可得改进后WACC系统并网电流参考值 i_{ref} 到加权平均电流反馈值 i_{wac} 开环传递函数如下式所示:

$$G_{iref_i12_openloop}(s) = G_{qpr}(s) K_{pwm} G_d(s) [(1-\beta)s^2(L_2+L_g)C+1] / \{ s(L_1+L_2) \{ \frac{s^2 C(L_2+L_g)L_1}{L_1+L_2} + \frac{sL_g[1-K_{pwm}G_d(s)G_c(s)G_t(s)]}{L_1+L_2} + 1 \} \} \quad (5)$$

为了保持系统的降阶特性,当不考虑 $G_d(s)$ 时需满足:

$$\begin{cases} 1 - \beta = L_1 / (L_1 + L_2) \\ G_c(s)G_f(s) = 1/K_{pwm} \end{cases} \quad (6)$$

此时LCL滤波器的外特性表现与L型滤波器相同,其电感值为 L_1+L_2 ,系统能够实现完全降阶。

图6为系统开环传递函数伯德图,引入选频环节能够有效抑制系统谐振。当考虑延时环节时系统存在未抵消的谐振项,在谐振频率处产生反向谐振峰,引起系统相位穿越 -180° 。文献[22]指出当考虑延时环节时,系统稳定的必要条件是避免开环系统在谐振频率处相位穿越 -180° ,引入选频环节后系统在谐振频率处相位裕度具有显著提升,同时避免了系统在谐振频率穿越 -180° ,但仍存在反向谐振峰,其根本原因是式(5)中分母项中 $1-K_{pwm}G_d(s)G_c(s)G_f(s)$ 无法实现零极点对消,因此需要对系统的相位进行补偿,以达到零极点对消的目的。

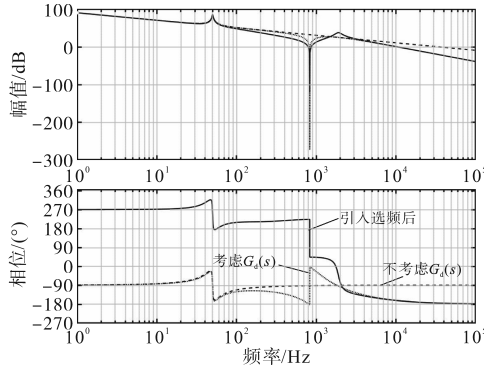


图6 并网电流参考值 i_{ref} 到加权平均电流反馈值 i_{wac} 开环传递函数伯德图

Fig.6 Bode diagram of i_{ref} to i_{wac} open-loop transfer function improved

2.2 改进WAC控制策略

为了兼顾系统鲁棒性以及并网电流质量问题,需要对弱电网下WAC控制方法进一步改进,实现开环系统零极点对消,本文选用超前补偿器解决由于延时环节造成WAC控制在弱电网下无法完成零极点对消的问题。补偿环节可以选择与逆变桥等效环节 K_{pwm} 串联,也可以选择设置在电网电压前馈环节中,但考虑在 K_{pwm} 串联补偿器会影响系统环路增益,而且会增加系统的复杂性^[1,23],因此本文在电网电压前馈处增加补偿环节用以抵消延时环节对系统造成的影响。超前补偿器表达式如下式所示:

$$G_{LC}(s) = \lambda_c \frac{s + m}{s + n} \quad (7)$$

式中: λ_c, m, n 均为补偿器参数。

加入超前补偿器后系统控制框图如图7所示。图中, $G_{c-f}(s) = G_c(s)G_f(s)$ 。

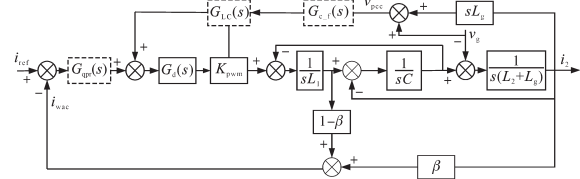


图7 引入超前补偿器后改进WAC系统控制框图

Fig.7 Improved control block diagram of WAC system after introducing lead compensator

根据前文分析可知,增加补偿器的作用是为了使得 $1-K_{pwm}G_d(s)G_{c-f}(s)G_{LC}(s)$ 在反向谐振频率处的幅值在零附近。为了保证系统稳定性,需要超前补偿器在反向谐振频率 f_r 处提供最大相位补偿角 φ_c ,用以完全抵消延时环节造成的相位滞后。相位补偿角 φ_m 与 $G_d(s)$ 的数学关系如下式所示:

$$\varphi_m = |\angle G_d(2\pi f_r)| \quad (8)$$

根据所需的最大相位补偿角 φ_c 和补偿器特性可分别推导补偿器参数 m, n 的数学关系:

$$\begin{cases} n \cdot m = 4\pi^2 f_r^2 \\ \frac{m}{n} = \frac{1 - \sin\varphi_m}{1 + \sin\varphi_m} \end{cases} \quad (9)$$

同时为了保证加入补偿器后开环系统相位在谐振频率处触碰 -180° 线,补偿器在反向谐振频率 f_r 处幅值必须为1,即

$$|G_{LC}(j2\pi f_r)| = 1 \quad (10)$$

将式(9)代入式(10)整理后得到参数 λ_c 的数学表达式为

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{4\pi^2 f_r^2 + n^2}{4\pi^2 f_r^2 + m^2}} \quad (11)$$

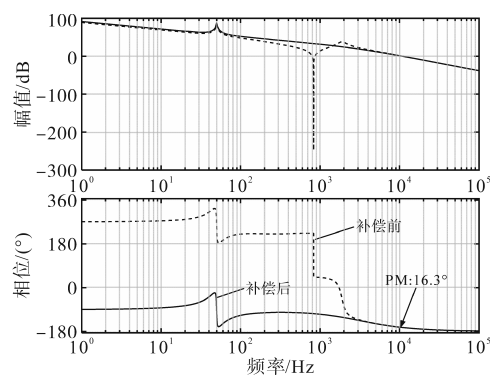
针对表1中LCL型逆变器并网系统,通过开环系统传递函数伯德图可以计算出补偿器参数,其中 $\lambda_c=3$,可以算出 $m=6\ 666, n=15\ 000$ 。采用补偿后系统 i_{ref} 到 i_{wac} 开环传递函数幅频特性如图8所示,开环传递函数如下式:

$$G_{iref_i2_openloop} = \frac{G_{iref_i2_closeloop}}{1 - G_{iref_i2_closeloop}} \quad (12)$$

其中

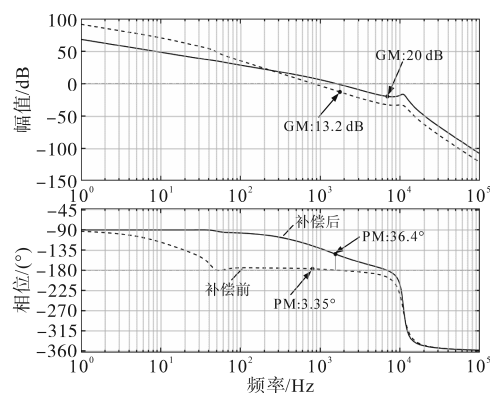
$$G_{iref_i2_closeloop} = \frac{G_i(s)G_d(s)K_{pwm}}{\Delta} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \Delta = & s(L_1 + L_2) \left[1 + \frac{s^2 L_1 C (L_2 + L_g)}{L_1 + L_2} \right] + \\ & sL_g [1 - G_d(s)G_c(s)G_f(s)G_{LC}(s)K_{pwm}] + \\ & G_i(s)G_d(s)K_{pwm} [s^2 C (L_2 + L_g)(1 - \beta) + 1] \end{aligned} \quad (14)$$

图8 引入补偿器前、后系统 i_{ref} 到 i_{wac} 传递函数伯德图Fig.8 Bode plot of system i_{ref} to i_{wac} transfer function before and after introducing compensator

由图8可知此时系统能够实现完全降阶,在谐振频率处相位曲线也不会穿越 -180° 线。

图9为 i_{ref} 到 i_2 的开环传递函数绘制电网阻抗 $L_g=7.7$ mH时系统的开环伯德图。其中,补偿后系统的相位裕度(PM)和幅值裕度(gain margin, GM)均有明显的提升,GM由13.2 dB提升到20 dB,PM由 3.35° 提升到 36.4° ,并网系统更加稳定。

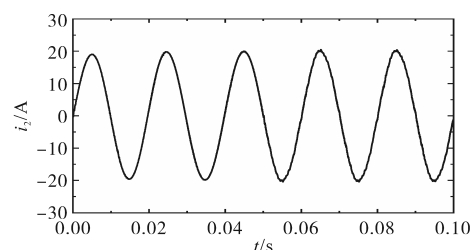
图9 电网阻抗 $L_g=7.7$ mH时系统 i_{ref} 到 i_2 开环传递函数伯德图Fig.9 Bode diagram of the system i_{ref} to i_2 open-loop transfer function when the grid impedance $L_g=7.7$ mH

3 仿真验证

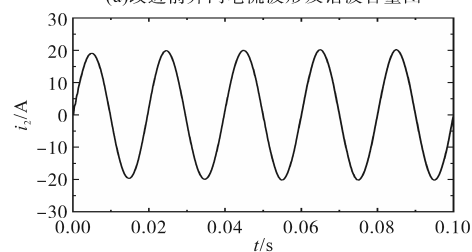
根据图1,在Matlab/Simulink中搭建仿真模型进行验证,具体参数如表1所示。设置电网阻抗 $L_g=7.7$ mH。改进前、后并网电流波形及谐波含量图如图10所示。

改进前系统虽然能满足并网标准限制的5%^[18],但系统存在明显的低频振荡,而改进后的控制方法,系统能有效抑制谐振,输出电流更加稳定,并网电流谐波总畸变率(total harmonic distortion, THD)从4.04%降低到3.47%。

为了验证本文所提的改进WAC控制策略在不同电网阻抗下的适应能力和电压背景谐波会



(a)改进前并网电流波形及谐波含量图



(b)改进后并网电流波形及谐波含量图

图10 改进前、后并网电流波形质量图

Fig.10 Grid-connected current waveform quality diagram before and after improvement

对逆变器并网电流造成的影响,在0.3 s时,向电网电压中注入10%的3次、5%的5次、3%的7次和2%的9次、11次、13次谐波。图11为所提控制策略并网电流和PCC处电压在电网阻抗 L_g 分别取0 mH、4 mH和7.7 mH时的仿真波形。

根据图11可知,本文所提改进控制策略的并网逆变器系统在弱电网下,并网电流无明显畸变。并网电流谐波畸变率分别为3.47%,3.56%和3.84%,均满足并网标准,由此验证了所提改进WAC控制策略的有效性。

此外,动态响应能力也是控制系统一项重要的性能指标,图12为电网阻抗 $L_g=7.7$ mH、系统在 $t=0.02$ s参考电流由满载额定电流跳变至半载的并网电流和PCC处仿真波形。由图可知本文所提改进WAC控制策略的系统具有很好的动态响应能力,而且动态跳变时间在0.01s内系统便可达到稳定。

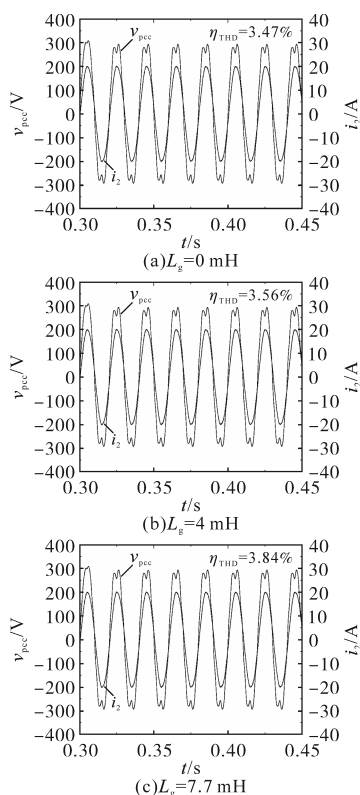


图 11 不同阻抗下公共耦合点电压 v_{pcc} 和并网电流 i_2 仿真波形
Fig.11 Simulation waveforms of common coupling point voltage v_{pcc} and grid-connected current i_2 under different impedances

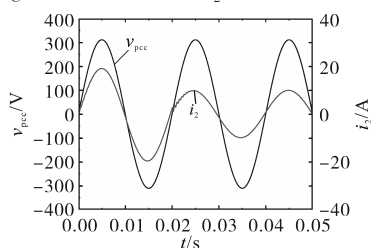


图 12 改进 WAC 控制策略公共耦合点电压 v_{pcc} 和并网电流 i_2 动态响应仿真波形
Fig.12 Improved WAC control strategy for v_{pcc} and i_2 dynamic response simulation waveforms

4 结论

针对在弱电网环境下传统 WAC 控制策略会失去其降阶特性的问题,本文以单相并网逆变器为例,证明弱电网下系统出现反向谐振峰从而导致并网逆变器失稳的根本原因是延时环节的存在,导致系统无法实现理想降阶,进而系统无法完成零极点对消。基于此,提出一种在电网电压前馈通道中引入选频环节用以抑制电网电压高次背景谐波,同时采用超前补偿器用以抵消由延时环节导致的反向谐振峰,提升相位裕度,提高了系统鲁棒性。仿真结果表明,该策略可对反向谐振峰补偿点进行完全补偿;在弱电网下,并网

逆变器仍可以稳定运行并产生符合标准的电流。

参考文献

- [1] 朱胤杰,苗虹,曾成碧,等. 弱电网下 LCL 型逆变器的改进并网电流控制策略[J]. 电源学报, 2024, 22(6): 81-90.
ZHU Yinjie, MIAO Hong, ZENG Chengbi, et al. Improved grid-connected current strategy for LCL-type inverter connected to weak grid[J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(6): 81-90.
- [2] 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.
YANG Dongsheng, RUAN Xinbo, WU Heng. A virtual impedance method to improve the performance of LCL-type grid-connected inverters under weak grid conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(15): 2327-2335.
- [3] 潘冬华,阮新波,王学华,等. 增强 LCL 型并网逆变器对电网阻抗鲁棒性的控制参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10): 2558-2566.
PAN Donghua, RUAN Xinbo, WANG Xuehua, et al. Controller design for LCL-type grid-connected inverter to achieve high robustness against grid-impedance variation[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10): 2558-2566.
- [4] 郑昕昕,肖岚,王长宝,等. 三相变流器 LCL 滤波器参数优化新方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12): 55-63, 186.
ZHENG Xinxin, XIAO Lan, WANG Changbao, et al. A new parameter optimization method of LCL filters in three-phase converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(12): 55-63, 186.
- [5] 王渝红,叶葳,宋瑞华,等. 基于阻抗分析法的三相 LCL 型并网逆变器附加有源阻尼设计[J]. 高电压技术, 2021, 47(8): 2645-2656.
WANG Yuhong, YE Wei, SONG Ruihua, et al. Design of additional active damping for three-phase LCL grid connected inverter based on impedance analysis method[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2645-2656.
- [6] PEÑA-ALZOLA R, LISERRE M, BLAABJERG F, et al. Systematic design of the lead-lag network method for active damping in LCL-filter based three phase converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(1): 43-52.
- [7] 李锐,邓磊,李小谦,等. 基于电容电压前馈的 LCL 逆变器并网控制[J]. 电气传动, 2017, 47(7): 37-42.
LI Rui, DENG Lei, LI Xiaoqian et al. Grid-tied control of LCL inverter based on capacitive voltage feed-forward[J]. Electric Drive, 2017, 47(7): 37-42.
- [8] 曹子恒,肖先勇,马俊鹏,等. 提高 LCL 型并网逆变器鲁棒性的改进型电容电流反馈有源阻尼策略[J]. 高电压技术, 2020, 46(11): 3781-3790.
CAO Ziheng, XIAO Xianyong, MA Junpeng, et al. Novel capacitor current feedback active damping strategy for enhancing robustness of LCL-type grid-connected inverters[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 3781-3790.

- [9] 鲍陈磊,阮新波,王学华,等. 基于PI调节器和电容电流反馈有源阻尼的LCL型并网逆变器闭环参数设计[J]. 中国电机工程学报,2012,32(25):133-142,19.
BAO Chenlei, RUAN Xinbo, WANG Xuehua, et al. Design of grid-connected inverters with LCL filter based on PI regulator and capacitor current feedback active damping[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 133-142, 19.
- [10] 庄超,叶永强,赵强松,等. 基于分裂电容法的LCL并网逆变器控制策略分析与改进[J]. 电工技术学报,2015,30(16):85-93.
ZHUANG Chao, YE Yongqiang, ZHAO Qiangsong, et al. Analysis and improvement of the control strategy of LCL grid-connected inverter based on split-capacitor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 85-93.
- [11] HAN Yang, LI Zipeng, YANG Ping, et al. Analysis and design of improved weighted average current control strategy for LCL-type grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(3): 941-952.
- [12] 王碧芳,李尚盛,瞿李锋,等. LCL并网逆变器改进加权电流控制方法及其鲁棒性分析[J]. 电测与仪表,2018,55(4):78-86.
WANG Bifang, LI Shangsheng, QU Lifeng, et al. Improvement and robustness analysis of the weighted average current control based on LCL grid-connected inverter[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(4): 78-86.
- [13] SHEN G Q, ZHU X C, ZHANG J, et al. A new feedback method for PR current control of LCL-filter-based grid-connected inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(6):2033-2041.
- [14] 孙建军,王毅,杨泽洲,等. 考虑电压前馈影响的LCL并网逆变器改进WACC加权系数计算方法[J]. 中国电机工程学报,2018,38(17):5158-5166,5313.
SUN Jianjun, WANG Yi, YANG Zezhou, et al. Improved WACC weighted coefficient method for LCL grid-connected inverter considering the influence of voltage feedforward[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 5158-5166, 5313.
- [15] 张竣淇,康朋,田昊,等. 基于二阶广义积分器的LCL型并网逆变器延时补偿方法[J]. 电气传动,2021,51(22):15-21.
ZHANG Junqi, KANG Peng, TIAN Hao, et al. A delay compensation method based on SOGI of LCL-type grid-connected inverter[J]. Electric Drive, 2021, 51(22): 15-21.
- [16] 朱坤龙,孙鹏菊,王林,等. 弱电网下LCL型并网逆变器的高鲁棒性加权平均电流控制策略[J]. 中国电机工程学报,2020,40(11):3592-3602.
ZHU Kunlong, SUN Pengju, WANG Lin, et al. High robustness weighted average current control for LCL-type grid-connected inverter in a weak grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3592-3602.
- [17] 汪颖,孙建风,肖先勇,等. 改进加权平均电流反馈的LCL型逆变器控制方法[J]. 高电压技术,2021,47(8):2678-2687.
WANG Ying, SUN Jianfeng, XIAO Xianyong, et al. Control method of LCL inverter based on improved weighted average current feedback[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2678-2687.
- [18] 杨明,杨杰,赵铁英,等. 基于数字控制延时的LCL型并网逆变器强鲁棒性加权平均电流控制策略[J]. 电机与控制学报,2023,27(2):143-152.
YANG Ming, YANG Jie, ZHAO Tieying, et al. Robust weighted average current control strategy for LCL grid-connected inverter considering digital control delay[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(2): 143-152.
- [19] CHEN Xin, ZHANG Yang, WANG Shanshan, et al. Impedance-phased dynamic control method for grid-connected inverters in a weak grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(1):274-283.
- [20] 郑红峰,杨亦红,郑颢,等. 准PR的复合控制技术在光伏并网逆变器中的应用[J]. 太阳能学报,2016,37(5):1190-1196.
ZHENG Hongfeng, YANG Yihong, ZHENG Hao, et al. Application of quasi PR composite control technology in photovoltaic grid connected inverters[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2016, 37(5): 1190-1196.
- [21] 李山,司文旭,陈艳,等. 基于准PR控制的隔离型准Z源单相光伏并网逆变器研究[J]. 太阳能学报,2018,39(11):3081-3089.
LI Shan, SI Wenxu, CHEN Yan, et al. Research on isolated quasi Z-source single-phase photovoltaic grid connected inverter based on quasi PR control[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2018, 39(11): 3081-3089.
- [22] 韩超,丁欣,梁理程,等. 单相LCL型并网逆变器的准比例谐振控制[J]. 广西大学学报(自然科学版),2021,46(4):973-981.
HAN Chao, DING Xin, LIANG Licheng, et al. Quasi-proportional resonance control of the single phase LCL grid-connected inverter[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2021, 46(4): 973-981.
- [23] 薛睿南,李国进,陈延明. 自适应陷波滤波器的并网逆变器相位超前补偿方法[J]. 哈尔滨工业大学学报,2023,55(7):124-132.
XUE Ruinan, LI Guojin, CHEN Yanming. Phase lead compensation method of grid-connected inverter with adaptive notch filter[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023, 55(7): 124-132.

收稿日期:2024-04-07

修改稿日期:2024-06-12