

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201549

基于多谐振电网电压前馈的并网逆变器相位补偿算法研究

王翰文, 曾成碧, 苗虹

(四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要: 在传统比例前馈并网逆变器中, 使用多谐振控制能够有效抑制电网背景谐波, 提高适应性。但是在弱电网情况下, 电网电感会使得系统的相位裕度大幅降低并出现多谐振环节的谐振峰与 0 dB 线相交的问题。因此提出了一种多谐振控制器与相位补偿器的组合控制策略。首先通过在电网电压前馈回路增加多谐振控制器以抑制电网背景谐波的干扰。其次, 为了解决加入多谐振控制器后系统相位裕度不足的局限性, 在逆变桥 PWM 传递函数处增加参数自适应的相位补偿器以提升系统相位裕度。仿真与实验结果证明了提出的控制策略能够有效地提升系统的相位裕度, 增强对高次谐波的抑制能力。

关键词: 多谐振控制; 相位补偿; 弱电网; 并网逆变器; 自适应控制

A phase compensation algorithm of a grid-connected inverter based on a feedforward multi-resonant grid voltage

WANG Hanwen, ZENG Chengbi, MIAO Hong

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

Abstract: In the traditional proportional feedforward grid-connected inverter, the use of multi-resonance control can effectively suppress the background harmonics of the grid and improve adaptability. However, in the case of a weak grid, the grid inductance will greatly reduce the phase margin of the system and cause multiple resonances. The problem is that the resonance peak of the link intersects the 0dB line. Therefore, a combined control strategy of a multi-resonance controller and a phase compensator is proposed. First, a multi-resonant controller is added to the grid voltage feedforward loop to suppress the interference of the grid background harmonics; secondly, in order to solve the problem of adding a multi-resonant controller caused by a limitation in or insufficient system phase margin, a parameter adaptive phase compensator is added to the inverter bridge PWM transfer function to improve that margin. Simulation and experimental results prove that the proposed control strategy can effectively improve the phase margin of the system and enhance the ability to suppress high-order harmonics.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFC1505502-03), the Project of Chengdu Science and Technology Bureau (No. 2019-YF05-02107-SN), and the Key Research and Development Program of Sichuan Province (No. 21ZDYF3753).

Key words: multiple resonance; phase compensation; weak power grid; grid-connected inverter; adaptive control

0 引言

化石能源的日益短缺以及近年来国际上对环境保护的关注, 如何开发可再生清洁能源成为当前能源发展的重点^[1-4]。其中, 并网逆变器作为清洁能源

发电系统与电网的连接枢纽, 承担着将清洁能源转换成工频交流电能的重要作用^[5-6]。对于采用电网电压比例前馈控制策略的 LCL 并网逆变器, 因其可有效抑制电网背景谐波所带来的影响而被广泛应用^[7-9]。但是在弱电网下, 感性的电网阻抗会通过电网电压比例前馈控制格外引入一个具有大量谐波的正反馈回路, 导致电流畸变, 系统稳定裕度降低^[10-12]。

文献[13]中采用基于电流误差信号补偿的控制策略, 提升系统的稳定性, 由于该方法是估算法,

基金项目: 国家重点研发项目资助(2018YFC1505502-03); 成都市科技局项目资助(2019-YF05-02107-SN); 四川省重点研发项目资助(21ZDYF3753)

会放大噪声。文献[14]提出了基于衰减因子的电网电压部分前馈控制策略,来抵消控制延时所带来的影响,该方法并未完全消除误差并且增加了系统的复杂性。文献[15]在电网电压前馈通道中引入带通滤波,从而削弱在电网电感增大时前馈通道和 PWM 延时对系统稳定性的影响,增强并网逆变器对弱电网的适应性,但是该方法所采用的带通滤波器的带宽大小对系统的鲁棒稳定性有着重要影响,因此参数选择存在限制。文献[16-18]中采用阻抗检测技术对相关参数进行在线调整,可以实现并网逆变器对弱电网阻抗的自适应控制,提高系统在电网电感增大时的稳定性与适应性。文献[19]基于阻抗重塑理论,设计了不受逆变器控制系统带宽限制多谐振控制器,可以有效地抑制电压谐波,但可调节范围较小。

综上所述,本文建立了加入多谐振控制器的 LCL 并网控制模型,并在电网电感变化时对系统的稳定性进行分析。随后,提出一种相位补偿器与谐振控制器组合的改进控制策略,通过在电网电压正反馈通路上添加多谐振环节以抑制电网背景谐波的影响,同时为了提高系统相位裕度,在逆变桥 PWM 传递函数处加入可自适应调整参数的相位补偿器,并给出了详细的设计步骤。最后,通过仿真平台验证了该策略在电网电感变化较大时维护系统稳定的有效性。

1 电路拓扑与控制系统结构

1.1 三相 LCL 型并网逆变器的建模

本文采用并网逆变器常用的 LCL 型三电平逆变器进行分析,其相应控制结构如图 1 所示。其中: U_{dc} 为直流母线电压; L_1 为逆变器侧电感; C 为滤波电容; L_2 为并网侧电感; 电网阻抗通常由电网电阻 R_g 和电网电感 L_g 组成,但阻性分量的存在利于并网系统的稳定,所以在分析最恶劣的工作情况时,仅考虑存在电网电感 L_g 。 I_{1i} 为逆变器输出电流, $i = a, b, c$ (下同); I_{2i} 为并网电流; I_{ci} 为电容电流; U_i 为逆变器输出电压; U_{ci} 为电容电压; U_{gi} 为并网电压。

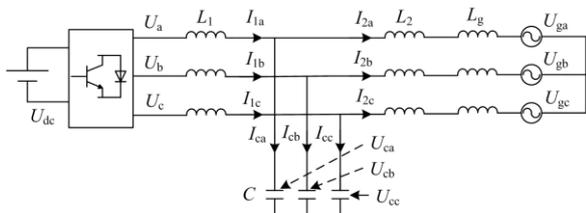


图 1 三相 LCL 并网逆变器拓扑

Fig. 1 Topology of three-phase LCL grid-connected inverter

在三相静止坐标系下,根据图 1 所示拓扑,三相 LCL 并网逆变器数学模型可表示为

$$\begin{cases} L_1 \frac{dI_{1i}}{dt} = U_i - U_{Ci} \\ (L_2 + L_g) \frac{dI_{2i}}{dt} = U_{Ci} - U_{gi} \\ C_f \frac{dU_{Ci}}{dt} = I_{1i} - I_{2i} \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可知,在 abc 三相坐标下,系统的阶数较高,需要对三个变量进行控制,且控制量为交流量,需要进行坐标变换,以减小控制难度。

1.2 带比例前馈的双电流反馈控制策略分析

想要实现对 LCL 并网逆变器的精准控制,需要进行 dq 变换或者是 $\alpha\beta$ 变换。但是在 dq 坐标系中,各个量之间存在大量耦合,控制较为复杂。在 $\alpha\beta$ 系中则不需要解耦,大大简化了控制结构,采用准 PR 控制后即可实现对给定电流的无静差跟踪^[20]。准 PR 控制器的传递函数为

$$G_R = K_p + \frac{2K_{r1}\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c + \omega_0^2} \quad (2)$$

式中: K_p 为比例系数; K_{r1} 为谐振增益系数; ω_c 为 QPR 控制器的截止带宽; $\omega_0 = 2\pi f_0$ 为控制器的基波角频率, f_0 为基波频率。为了保证当电网频率存在 ± 0.5 Hz 的波动时,并网电流在基波频率处的稳态误差 $< 1\%$, 要求基波增益幅值 > 75 dB, 则可取 $\omega_c = 3.14$ rad/s。

图 2 以一相为例,给出了引入并网电流和电容电流反馈时的控制框图。其中, $I_{ref}(s)$ 为给定电流参考值; K_{PWM} 为逆变桥增益,可表示为 U_{dc}/U_{tri} , U_{tri} 为三角载波幅值; 由于电网电压 U_g 含有丰富的背景谐波,为了抑制电网电压扰动对并网电流的影响,通常将 $v_{pcc}(s)$ 前馈,增益为 $G_f(s) = 1/K_{PWM}$; k 为电容电流反馈系数; $G_d(s)$ 为系统延迟,通常由采样开关、离散化计算延时及 PWM 调制延时共同构成,可统一表示为 $e^{-1.5T_s s}$ 。

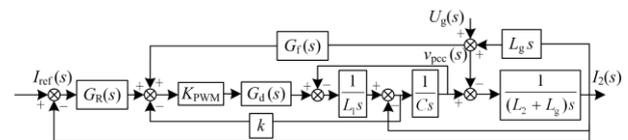


图 2 并网逆变器反馈控制框图

Fig. 2 Feedback control block diagram of grid-connected inverter

由图 2 可推出带比例前馈策略的系统开环传递函数为

$$G_{I_{ref}-I_2}(s) = G_R(s)K_{PWM}G_d(s)/(s^3L_1(L_2 + L_g)C + kK_{PWM}s^2(L_2 + L_g)C + s(L_1 + L_2 + L_g) - L_g s G_d(s)) \quad (3)$$

则 LCL 的开环谐振频率 f_{ref} 的表达式如式(4)所示。

$$f_{ref} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1(L_2 + L_g)C}} \quad (4)$$

2 改进控制策略分析

2.1 电网电压前馈多谐振控制器策略分析

为了降低控制过程中所引入的高次谐波对系统的影响, 可以在电网电压前馈回路中增加多谐振控制器, 使电压前馈通道只在电网主要低次谐波频率处保持反馈特性, 在其余非基波频率处的频段进行有效抑制^[13,21]。添加的 $G_v(s)$ 同样是一个由多个谐振控制器组成的谐振环节, 能够在主要背景谐波频率处保持幅值 0 dB 的特性, 并且在其余频段保持幅值衰减特性, 对电网中的高次谐波进行抑制^[22], 其相应表达式为式(5)。

$$G_v(s) = \sum_{m=1}^5 \frac{\omega_f s}{s^2 + 2\omega_f s + ((2m+1)\omega_0)^2} \quad (5)$$

式中: $2m+1$ 表示谐波频率次数, $m=1,2,\dots,5$; 取 10π 。加入该谐振控制环节后, 新的系统控制框图如图 3 所示。

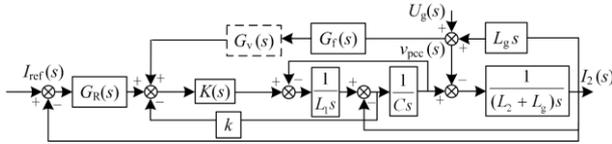


图 3 基于电压前馈多谐振的系统控制框图

Fig. 3 Control block diagram of the system based on voltage feed-forward multi-resonance

其中 $K(s) = K_{PWM}G_d(s)$, 依据新的控制框图得到改进后的系统开环传递函数为

$$G_{I_{ref}-I_2}(s) = G_R(s)K_{PWM}G_d(s)/(s^3L_1(L_2 + L_g)C + kK_{PWM}s^2(L_2 + L_g)C + s(L_1 + L_2 + L_g) - L_g s G_v(s)G_d(s)s) \quad (6)$$

分析图 3 与式(6), 可得到系统开环谐振频率表达式为

$$f_{ref-2} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2 + (1 - G_v(s))L_g}{L_1(L_2 + L_g)C}} \quad (7)$$

式(7)与式(4)相比, 式(7)在分子上多了一项系数

$(1 - G_v(s))L_g$ 。当多谐振控制器的幅值过大时会大幅降低谐振频率, 使得系统存在稳定性问题, 所以各个谐振控制器的系数不应过大。图 4 为相应系统的开环伯德图。

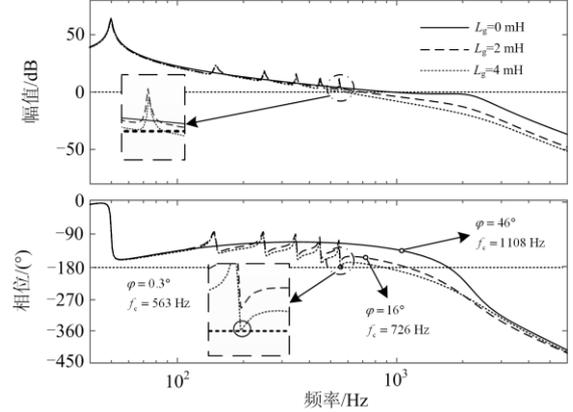


图 4 改进后的系统开环伯德图

Fig. 4 Open-loop Bode diagram of the improved system

从图 4 中可看出, 在电网电压前馈回路中加入多谐振控制器后, 可实现对电网电压高次谐波的有效抑制, 并且在基波频率处的增益保持不变。但是也可看出, 在电网电感增加到 4 mH 时已接近临界稳定点, 系统的相位裕度仅有 0.5°, 存在谐波谐振峰与 0 dB 线发生多次交截的风险。

2.2 提出的改进策略分析

因在电网阻抗较大时, 系统存在谐波谐振峰与 0 dB 线发生多次交截的问题, 所以需要增加系统的相位裕度以降低系统失稳的风险。现有多种方法可以有效地对系统相位裕度进行补偿, 其中超前补偿法不仅可以有效地对一定频段内的相位进行补偿, 而且还具有参数易于设计、实现简单的优点^[23]。本文选用一种超前补偿器来与多谐振控制器进行组合, 对系统特定频段的相位裕度进行补偿, 其表达式为^[24]

$$G_{ic} = K \frac{s+z}{s+p} \quad (8)$$

式中: K 为相位补偿器增益; p 为 G_{ic} 的极点; z 为 G_{ic} 的零点。

相位补偿与多谐振控制器有着多种组合。比如在前文所分析的多谐振准 PR 控制器基础上, 在增益环节的前面或在电网电压前馈回路上加入该相位补偿器。但是若相位补偿器与多谐振控制器串联, 可能会对其所在回路的相关增益产生影响, 并且增加了系统的复杂性。本文选择在电网电压前馈回路加入多谐振控制器, 在电流控制环节串联相位补偿器的组合控制法。改进后的控制框图如图 5 所示。

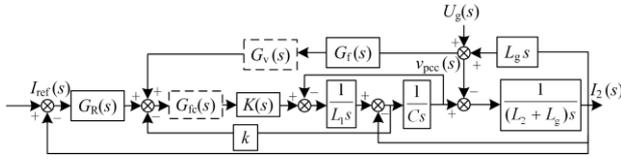


图5 基于组合控制的系统结构框图

Fig. 5 Block diagram of system structure based on composite control

由图5可得基于组合控制策略的系统开环传递函数如式(9)。

$$G_{I_{ref}-3}(s) = G_R(s)G_{fc}(s)K/(s^3L_1(L_2 + L_g)C + kK_{PWM}s^2(L_2 + L_g)C + s(L_1 + L_2 + L_g) - L_gG_v(s)G_d(s)) \quad (9)$$

此外,超前补偿器虽然可以有效提高系统相位裕度,但是在引入超前相位的同时会改变控制环路增益的幅值,因此需要对其相关参数进行合理设计。

3 基于组合控制策略的设计与分析

3.1 补偿参数设计

虽然本文所提出的相位补偿器可以改善系统的相位裕量,但它不可避免地会对系统环路的性能产生影响。因此,相位补偿器 K 、 z 、 p 参数的设计应该充分考虑系统的截止频率和稳定性裕度等条件。相位补偿器相应的伯德图如图6所示。

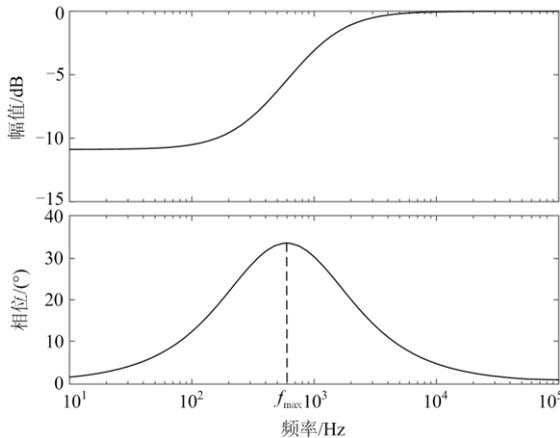


图6 相位补偿器伯德图

Fig. 6 Bode diagram of phase compensator

由相位补偿器的伯德图可知,其存在一个最大补偿点,其所处频率设为 f_{max} 。为了使得该最大补偿点处于谐波谐振峰区域,因此需要调整相关参数,从而避免与0 dB线发生交截,保证系统稳定性。

分析式(9)可知,补偿器所能提供的最大相位补偿角的表达式为

$$\varphi(\omega) = \arctan \frac{\omega(p-z)}{pz + \omega^2} \quad (10)$$

通过式(10)和系统所需的最大超前相位角 φ_{max} 则可推导出超前补偿器中 p 、 z 参数的表达式为

$$\begin{cases} \frac{p}{z} = \frac{1 + \sin \varphi_{max}}{1 - \sin \varphi_{max}} \\ p = 2\pi f_{rc} \sqrt{\frac{p}{z}} \end{cases} \quad (11)$$

为了降低设计难度,本文选取为系统截止频率为补偿器提供最大相位补偿角处的频率。但是系统的截止频率会随着电网电感的变化而变化,所以为保证系统的高稳定性与鲁棒性,本文采用自适应的方式实时调整 k 、 p 、 z 参数。下面将分步介绍自适应参数的设计过程。

步骤1:获取电网电感的估计值。为了降低估计阻抗与实际阻抗之间的误差,本文运用双次谐波注入法的阻抗检测技术测量电网电感值^[25]。

步骤2:计算系统的截止角频率。由于LCL的谐振频率较高,远大于截止频率,所以在没加相位补偿器时,在截止频率处可将式(10)近似为式(12)。

$$G_{I_{ref}}^*(s) \approx \frac{G_R(s)K_{PWM}}{s(L_1 + L_2 + L_g) - L_gG_v(s)G_d(s)} \quad (12)$$

又因为 $G_v(s)$ 在非谐振频率处的增益极小,所以在截止频率处同样可以忽略,即可得到式(13)。

$$G_{I_{ref}}^{**}(s) \approx \frac{G_R(s)K_{PWM}}{s(L_1 + L_2 + L_g)} \quad (13)$$

将 $s = j\omega_c$ 代入上式可得

$$\left| G_{I_{ref}}^{**}(s) \right| \approx \left| \frac{G_R(j\omega_c)K_{PWM}}{j\omega_c(L_1 + L_2 + L_g)} \right| = 1 \quad (14)$$

由式(14)可得 ω_c 的计算公式为

$$\omega_c = \sqrt{\sqrt{\frac{A}{X} + \left(\frac{B}{2X}\right)^2} + \left(\frac{B}{2X}\right)} \quad (15)$$

式中: $A = (2K_{r1}\omega_1K_{PWM})^2$; $B = (K_pK_{PWM})^2$, $X = (L_1 + L_2 + L_g)^2$ 。

步骤3:通过式(13)和第二步所得到的 ω_c 计算出相位补偿器的 p 、 z 值。

步骤4:计算相位补偿器的参数 K 值。该补偿器虽然能够增加系统的相位裕度但也会衰减电网电压前馈幅值,因此需要调整增益 K 的大小。令 $|G_{fc}(j\omega_c)| = 1$ 。可得到 K 的计算公式为

$$K = \frac{p}{z} \sqrt{\frac{z^2\omega_c^2 + \omega_c^2}{p^2\omega_c^2 + z^2p^2}} \quad (16)$$

步骤 5: 更新所获得的 k 、 p 、 z 参数。

3.2 系统稳定性分析

为了进一步分析所提出的组合控制策略在弱电网背景下的适应能力,图 7 给出了在表 1 的数据下, L_g 分别为 0、2 mH 和 4 mH 时逆变器开环传递函数的频率特性图。

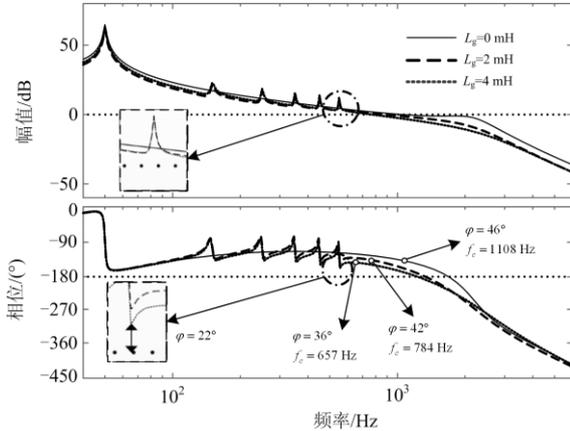


图 7 组合控制策略的系统开环伯德图

Fig. 7 Open-loop Bode diagram of the combined control strategy

从图 7 可以看出,采用所提的组合控制方法时,即使电网电感增大,在截止频率处的相位裕度仅仅只有小幅度降低,并网系统都能保持稳定。在电网阻抗最大时,系统的相位裕度都有 37°,各谐振峰也不存在与 0 dB 线相交的风险。由此可见,使用改进的组合控制法可以使得系统在弱电网下的适应性与稳定性大大增加。

3.3 估计值误差分析

因为获得的电网电感是估计值,存在一定的误差,因此需要分析估算误差对系统的影响。通常考虑估算值 $L_{g_est}=(0.8\sim 1.2)L_g$ 。画出此时的系统开环伯德图如图 8 所示。

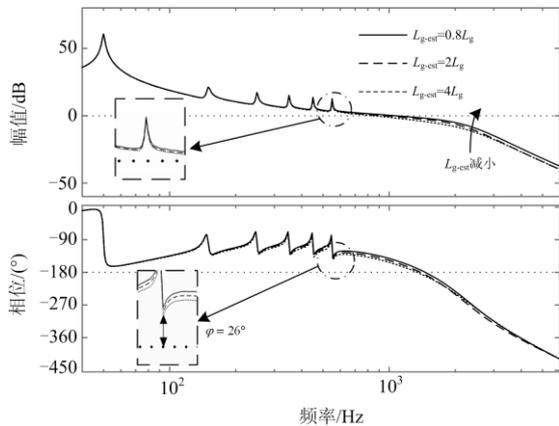


图 8 考虑估算误差的系统开环伯德图

Fig. 8 Open-loop Bode diagram considering the estimation error

由图 8 可知,系统即使存在 20%的误差也能保有较好的带宽和相位裕度,并且各谐振峰与 0 dB 线依旧保有安全的距离,因此可忽略测量误差对控制策略的影响。

4 仿真验证

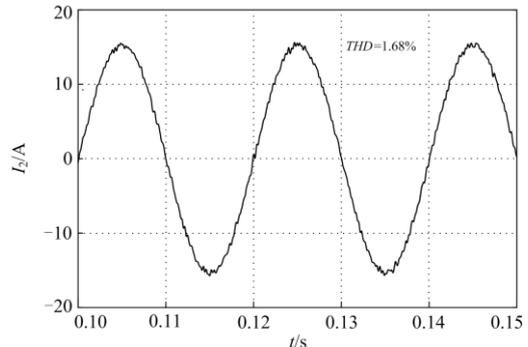
为验证本文研究的改进下垂控制策略的有效性,首先在 Matlab/Simulink 软件平台上搭建三相并网逆变器的仿真模型,仿真参数如表 1 所示。为模拟电网电压中所存在的高次谐波,在电网电源中注入了 5%的 3 次和 5 次谐波,3%的 7 次谐波和 1%的 9 至 11 次谐波^[26-27],以验证所提控制方法对 PCC 电压谐波引起的并网电流畸变的抑制能力。

表 1 实验参数

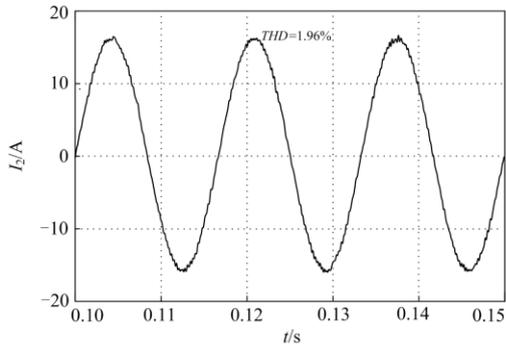
Table 1 Parameters of experiment

参数	数值	参数	数值
直流电压 U_{dc}/V	220	采样频率 f_s/kHz	30
电网电压 U_g/V	100	开关频率 f_w/kHz	15
滤波电感 L_1/mH	2	比例系数 K_p	0.5
滤波电容 $C/\mu F$	5	准谐振系数 K_r	100
滤波电感 L_2/mH	2	多谐振系数 K_{ri}	5
电网电压频率 f_0/Hz	50	电容电流反馈系数 k	0.2

以 A 相并网电流分析为例。图 9、图 10、图 11 分别为未加相位补偿和加入相位补偿后,在不同电网电感下的仿真图。图 10 与图 9 相比可看出,在未加电网阻抗时,两种控制方法的并网电流波形是一致的,但随着电网电感的增大,未加入相位补偿的并网电流出现高次谐波,谐波畸变率 THD 为 12.83%;而加入相位补偿后并网电流得到较大的改善,相应的谐波畸变率 THD 降低为 1.19%。当电网电感增大为 4 mH 时,电流波形畸变严重,谐波畸变率 THD 增大为 24.39%,系统不稳定;而加入相位补偿的波形依旧保持稳定,谐波畸变率 THD 仅为 0.91%。综上可得,改进后的控制策略提高了控制系统的相位裕度,即使电网电感增大也能保持控制系统稳定。



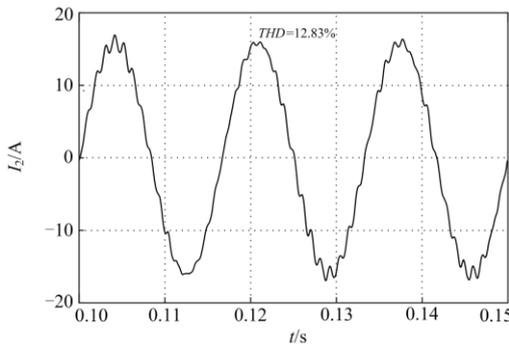
(a) 未加相位补偿的控制策略



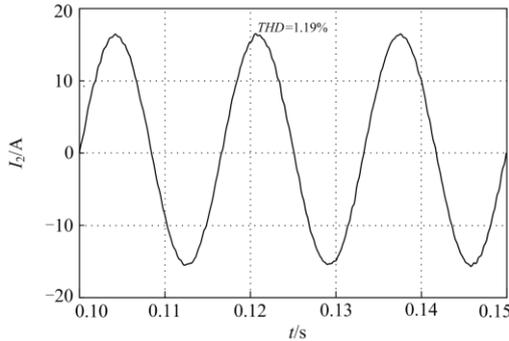
(b) 加入相位补偿的控制策略图

图 9 $L_g=0$ mH 时两种策略波形图

Fig. 9 Waveforms of two strategies when $L_g=0$ mH



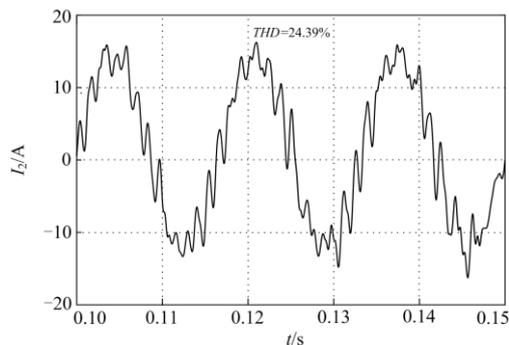
(a) 未加相位补偿的控制策略



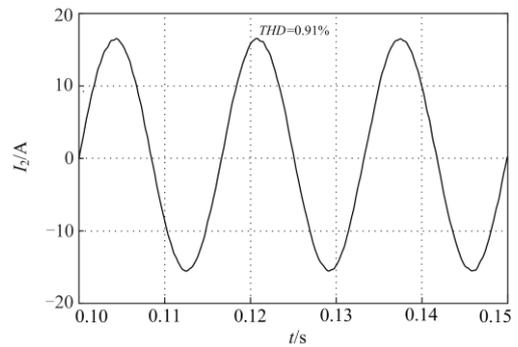
(b) 加入相位补偿的控制策略图

图 10 $L_g=2$ mH 时两种策略波形图

Fig. 10 Waveforms of two strategies when $L_g=2$ mH



(a) 未加相位补偿的控制策略



(b) 加入相位补偿的控制策略图

图 11 $L_g=4$ mH 时两种策略波形图

Fig. 11 Waveforms of two strategies when $L_g=4$ mH

为验证自适应控制的有效性,如图 12 所示,在 0.18 s 时将电网电感从 0 mH 增加到 4 mH,并在 0.26 s 时更新控制数据,可见电流波形能够在 一个周期内恢复稳定。

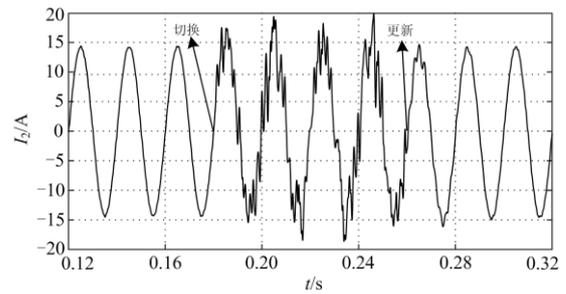


图 12 控制切换波形图

Fig. 12 Control switch waveform diagram

再分析在该控制策略下,电流跳变时三相并网逆变器的动态性能。图 13 为电流从幅值 15 A 跳变为 7.5 A 的波形图,可见电流波形能够在半周期内到达稳定状态,体现了改进后控制策略的快速性。

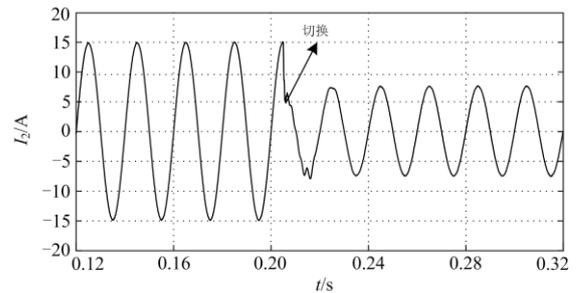


图 13 电流跳变波形图

Fig. 13 Current jump waveform

5 实验验证

为了验证本文所提控制策略的正确性和有效性,依据图 1 在实验室中搭建了相应的三相桥式并

网逆变器实验平台, 相应的硬件参数与控制参数已在表 2 中显示, 参数取值与仿真一致, 整体的实验样机如图 14 所示。

表 2 实验参数

Table 2 Parameters of experiment

参数	数值	参数	数值
直流电压 U_{dc}/V	220	采样频率 f_s/kHz	30
电网电压 U_g/V	100	开关频率 f_w/kHz	15
滤波电感 L_1/mH	2	比例系数 K_p	0.5
滤波电容 $C/\mu F$	5	准谐振系数 K_r	100
滤波电感 L_2/mH	2	多谐振系数 K_{ri}	5
电网电压频率 f_0/Hz	50	电容电流反馈系数 k	0.2



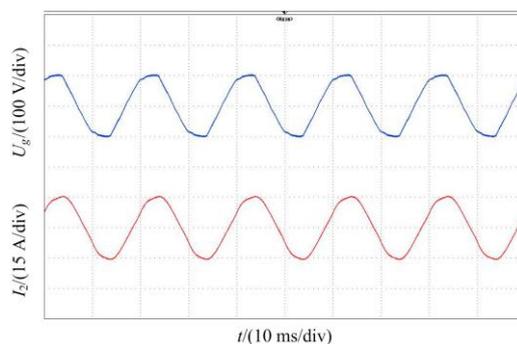
图 14 实验样机图片

Fig. 14 Photo of experimental prototype

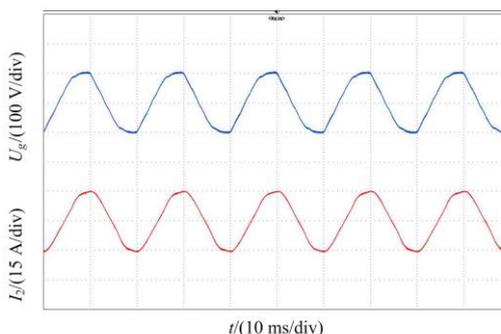
其中三相并网逆变器采用的是 Mayway 公司的三相桥式逆变器 MWINV-9R144, 采用的控制芯片为 TMS320C6657, 是一款高性能定点/浮点 DSP 处理器, 主频高达 1.25 GHz, 处理能力强。拥有多种工业接口资源, 包括两个 UART 接口、32 个 GPIO 引脚, 8 个 64 位定时器以及两个片上 PLL 等, 其中 32 个 GPIO 引脚可复用为 AD 采样、PWM 输出等特殊功能。

直流侧通过变压器与三相电源连接, 电网侧通过变压器直接与电网电压相连, 虽然变压器具有一定的漏感, 但是相对于电网阻抗来说值可以忽略不计, 因此不影响最终实验结果的验证。在实验中, 通过在电网侧串联具有一定感值的电感来模拟电网阻抗 L_g 。为保证并网安全性, 通过程序判断锁相是否成功, 从而发出并网信号导通继电器, 实现三相 LCL 逆变器并网。对应的实验波形图如图 15 和图 16 所示。

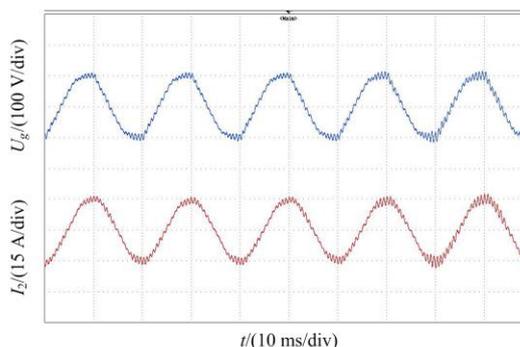
对比图 15 与图 16 可知, 实验波形与仿真波形基本一致。两种控制策略在无电网阻抗时, 系统都能保持稳定运行, 并且谐波较少。当 L_g 增大到 4 mH 时, 未加相位补偿的控制策略出现了大量的谐波, 与仿真和理论分析吻合, 而加入相位补偿后, 系统的相位裕度增加, 对谐波的抑制能力提升, 并网电流质量有了较大的改善, 如图 16(b)所示。



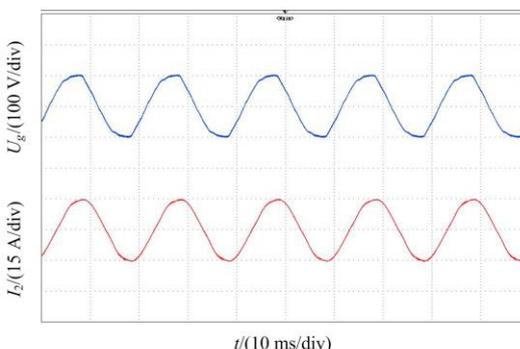
(a) 未加相位补偿的控制策略图



(b) 加入相位补偿的控制策略图

图 15 $L_g=0$ mH 时两种策略实验图Fig. 15 Experimental diagram of two strategies when $L_g=0$ mH

(a) 未加相位补偿的控制策略图



(b) 加入相位补偿的控制策略图

图 16 $L_g=4$ mH 时两种策略实验图Fig. 16 Experimental diagram of two strategies when $L_g=4$ mH

6 结论

1) 基于多谐振环节的电网前馈补偿控制策略在弱电网下会导致多谐振控制器谐波峰与 0 dB 线相交, 造成系统失稳。

2) 提出了一种相位补偿与多谐振控制器组合的改进控制策略, 在正反馈通道上添加多谐振环节的基础上, 在逆变桥传递函数 PWM 处增加参数自适应调整的相位补偿器以提相位裕度, 提高系统适应性。

3) 通过仿真与实验验证了本文所提控制策略对相位裕度的提升能力与弱电网的适应性。

参考文献

- [1] 郑征, 黄旭, 杨明, 等. 弱电网下逆变侧电流反馈的并网逆变器稳定性分析及优化[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 31-37.
ZHENG Zheng, HUANG Xu, YANG Ming, et al. Stability analysis and optimization of grid-connected inverter with current feedback on the inverter under weak current network[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 31-37.
- [2] 刘澄, 李哲, 吕捷, 等. 基于无功控制的光伏逆变器三相不平衡抑制方法[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(12): 107-114.
LIU Cheng, LI Zhe, LÜ Jie, et al. Three phase unbalance suppression method of photovoltaic inverter based on RPC control[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(12): 107-114.
- [3] 樊梦蝶, 曾成碧, 苗虹. 微网逆变器无功出力按容量分配的改进控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(23): 100-107.
FAN Mengdie, ZENG Chengbi, MIAO Hong. Improved control strategy of micro grid inverter reactive power output according to capacity distribution[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 100-107.
- [4] BLAABJERG F, TEODORESCU R, LISERRE M, et al. Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 1398-1409.
- [5] 陆海强, 吴秀英, 周武, 等. 考虑光伏无功分区计价的配电网无功优化[J]. 广东电力, 2020, 33(1): 61-68.
LU Haiqiang, WU Xiuying, ZHOU Wu, et al. Reactive power optimization of distribution network considering PV reactive power partition valuation[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(1): 61-68.
- [6] 黄堃, 刘澄, 吕潇, 等. 计及本地负荷的分布式光伏并网电压协同控制策略[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(11): 127-133.
HUANG Kun, LIU Cheng, LÜ Xiao, et al. Distributed photovoltaic grid-connected voltage coordination control strategy considering local load[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(11): 127-133.
- [7] ALZOLA R P, LISERRE M, BLAABJERG F, et al. Analysis of the passive damping losses in LCL-filter-based grid converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(6): 2642-2646.
- [8] DALY P A, MORRISON J. Understanding the potential benefits of distributed generation on power delivery systems[C] // Proceedings of IEEE Rural Electric Power Conference, April 29-May 1, 2001, Arkansas, USA: 1-13.
- [9] XU J, XIE S. LCL-resonance damping strategies for grid-connected inverters with LCL filters: a comprehensive review[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(2): 292-305.
- [10] FIRUZI M F, ROOSTA A, GITIZADEH M. Stability analysis and decentralized control of inverter-based AC microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(1): 65-86. DOI: 10.1186/s41601-019-0120-x.
- [11] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微网综合控制与分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 31(7): 98-103.
WANG Chengshan, XIAO Zhaoxia, WANG Shouxiang. Integrated control and analysis of micro grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 31(7): 98-103.
- [12] 许泽铭, 谢少军, 唐婷. 弱电网下 LCL 滤波并网逆变器自适应电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(24): 4031-4039.
XU Jinming, XIE Shaojun, TANG Ting. LCL filter grid-connected inverter adaptive current control under weak current network[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(24): 4031-4039.
- [13] 赵清林, 宋文璐, 袁精, 等. 弱电网中基于电流误差信号补偿的并网逆变器稳定性研究[J]. 太阳能学报, 2019, 40(10): 2833-2841.
ZHAO Qinglin, SONG Wenlu, YUAN Jing, et al. Research on the stability of grid-connected inverter based on current error signal compensation in weak power grid[J]. Acta Solar Energy, 2019, 40(10): 2833-2841.
- [14] 刘乐, 同向前, 杨树德, 等. 提高弱电网下逆变器稳定性的前馈控制策略[J]. 电力电子技术, 2019, 53(1): 65-68.
LIU Le, TONG Qian, YANG Shude, et al. Feedforward control strategy for improving inverter stability under weak current network[J]. Power Electronics Technology, 2019, 53(1): 65-68.

- [15] 杨树德, 同向前, 尹军, 等. 增强并网逆变器对电网阻抗鲁棒稳定性的改进前馈控制方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 222-230, 240.
YANG Shude, TONG Xiangqian, YIN Jun, et al. Improved feedforward control method to enhance impedance Robustness of grid-connected inverter for power grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 222-230, 240.
- [16] 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.
ZHENG Chen, ZHOU Lin, XIE Bao, et al. The harmonic resonance suppression strategy of large-scale photovoltaic plants based on phase margin compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(19): 85-96.
- [17] 刘桂花, 石桐, 马田源, 等. 弱电网下光伏并网逆变器自适应准 PRD 控制方法[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 112-117.
LIU Guihua, SHI Tong, MA Tianyuan, et al. Adaptive quasi-PRD control method for grid-connected photovoltaic inverter in weak current network[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 112-117.
- [18] 张孝军, 徐宇新, 王阳光, 等. 基于非特征频率突变量阻抗的多机集群孤岛检测方法[J]. 智慧电力, 2020, 48(9): 81-88.
ZHANG Xiaojun, XU Yuxin, WANG Yangguang, et al. Islanding detection method for multi-DGs based on non-characteristic frequency variation impedance[J]. Smart Power, 2020, 48(9): 81-88.
- [19] 苗德根, 侯世英, 王永胜, 等. 抑制恒压恒频逆变器输出电压谐波的改进前馈策略[J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3361-3368.
MIAO Degen, HOU Shiyong, WANG Yongsheng, et al. Improved feedforward strategy for suppressing output voltage harmonics of constant-voltage and constant frequency inverter[J]. Power System Technology, 2016, 42(10): 3361-3368.
- [20] 杨旭红, 郭凯, 杨峰峰, 等. 基于模糊 PCI 与 PR 控制的三相 LC 型并网逆变器控制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(5): 20-26.
YANG Xuhong, GUO Kai, YANG Fengfeng, et al. A control strategy of grid-connected inverter with three-phase LC filter based on fuzzy PCI and PR control[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(5): 20-26.
- [21] 罗运松, 胡晶, 林哲侃, 等. 基于准 PR 控制器的指定次谐波消除有源电力滤波器[J]. 广东电力, 2019, 32(7): 60-66.
LUO Yunsong, HU Jing, LIN Zhekan, et al. Selected sub-harmonic elimination active power filter based on Quasi-PR controller[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(7): 60-66.
- [22] 曹子恒, 肖先勇, 李媛, 等. 弱电网下 LCL 型并网逆变器的自适应改进前馈控制策略[J]. 高电压技术, 2020, 46(5): 1560-1570.
CAO Ziheng, XIAO Xianyong, LI Yuan, et al. Adaptive improved feedforward control strategy for LCL grid-connected inverter under weak current network[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1560-1570.
- [23] 杨龙月, 郭锐, 张乐, 等. 非理想电网下逆变器并网电流质量改善策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 10-18.
YANG Longyue, GUO Rui, ZHANG Le, et al. Improvement strategy for grid-connected current quality of an inverter under non-ideal grid conditions[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 10-18.
- [24] XU J, BIAN S, QIAN Q, et al. Robustness improvement of single-phase inverters under weak grid cases by adding grid current feedforward in delay-based phase-locked loop[J]. IEEE Access, 2020, 8: 124275-124287.
- [25] 刘翔宇. 弱电网下基于 LCL 并网逆变器的电流自适应控制方法研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
LIU Xiangyu. Research on current adaptive control method based on LCL-connected inverter in weak current network[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019.
- [26] YANG Fan, LIU Jun, LU Bingbing. Study of current control strategy of STATCOM based on LCL filter under distorted grid conditions[C] // 2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), August 10-13, 2016, Xi'an, China: 1-5.
- [27] XU J, XIE S, TANG T. Active damping-based control for grid-connected LCL-filtered inverter with injected grid current feedback only[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(9): 4746-4758.

收稿日期: 2020-12-14; 修回日期: 2021-04-18

作者简介:

王翰文(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为逆变器并网控制; E-mail: wanghanwen202012@163.com

曾成碧(1969—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为新能源及智能优化控制等光伏发电技术; Email: zengchengbi@scu.edu.cn

苗虹(1971—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为分布式发电和微电网。E-mail: 1604681549@qq.com

(编辑 周金梅)