

# 多逆变器并网系统谐振特性分析

胡 伟,孙建军,马 谦,刘 飞,查晓明

(武汉大学 电气工程学院,湖北 武汉 430072)

**摘要:** 基于闭环传递函数法建立了  $LCL$  并网逆变器诺顿等效模型,利用所建立的模型分析了并联逆变器数量、组成和系统控制参数对系统谐振特性的影响。分析结果表明:和传统单逆变器系统相比,多逆变器并网系统存在多个谐振频率,谐振频率个数和系统中的逆变器种类相关,较低的谐振频率随着逆变器数量的增加而减小,随着并网阻抗的增大而减小;谐振频率随着电容电流内环参数的增大而减小,随着并网电流外环控制参数  $K_p$  的增大而增大,基本不受并网电流外环控制参数  $K_i$  的影响。仿真分析结果证明了理论分析的正确性。

**关键词:** 分布式发电;  $LCL$  滤波器; 并网; 逆变器; 谐振; 模型

中图分类号: TM 464

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.07.016

## 0 引言

基于可再生能源(如风能、太阳能等)的分布式发电技术是人类应对能源危机和环境污染的重要手段,近年来越来越受到重视<sup>[1-2]</sup>。并网逆变器因其灵活的运行模式和良好的可控性,成为可再生能源发电系统并网的主要接口之一<sup>[3-4]</sup>。由于可再生能源具有分布式接入特点,各逆变器间大多满足并联关系。

并网逆变器通常采用脉冲宽度调制 PWM(Pulse Width Modulation)方式,因此在输出波形中存在开关频率整数倍附近的高频谐波。为抑制高频开关产生的电压和电流纹波,通常在并网逆变器和电网之间加入  $LCL$  滤波器。与单电感  $L$  滤波器相比, $LCL$  滤波器对电流高频分量具有更强的抑制能力<sup>[5-6]</sup>,但  $LCL$  滤波器是一个三阶系统,具有一个阻尼系数很低的谐振尖峰。大量文献研究了无源阻尼或有源阻尼抑制谐振峰值的技术<sup>[7-12]</sup>,这些文献基于单  $LCL$  逆变器模型,针对  $LCL$  滤波器单个谐振峰进行抑制。而多  $LCL$  逆变器并网时,各逆变器通过公共连接点 PCC(Point of Common Coupling)交互作用<sup>[13-15]</sup>,系统谐振特性不同于单逆变器系统<sup>[16-17]</sup>。文献[16]将逆变器等效为一个理想的电压源,分析了并联  $LCL$  滤波器的谐振特性,分析中没有考虑逆变器对系统谐振的影响,多  $LCL$  滤波器的谐振特性并不等同于多逆变器并网系统的谐振特性。文献[17]基于离散传递函数建立了逆变器侧电流闭环控制的并网逆变器等效模型,考虑逆变器对系统谐振的影响,分析发现和单逆变器并网系统不同,多逆变器并网系统存在 2 个谐振峰。但分析过程中假设所有逆变器参数、控制策略及控制参数均相同,而实际系统中,由于

分布式电源的不同,并联逆变器参数、控制策略及控制参数往往不同,这些不同直接影响多逆变器并网系统谐振频率和谐振峰个数,且增加了多逆变器系统谐振特性分析难度。

为了深入研究多逆变器并网系统谐振机理,以采取有效的措施抑制系统谐振,本文基于闭环传递函数法建立了电容电流和网侧电流双闭环控制的  $LCL$  并网逆变器诺顿等效模型,利用所建立的模型分析多逆变器并网系统谐振特性及参数对系统谐振的影响。仿真验证了理论分析的正确性和准确性。

## 1 $LCL$ 并网逆变器诺顿等效模型

多个  $LCL$  并网逆变器构成的多逆变器系统通过 PCC 和弱电网并网运行,其结构如图 1 所示。图中,  $Z_{Li}$  和  $Z_{L2i}(i=1,2,\dots,n)$  分别为逆变器侧和网侧滤波电感抗;  $Z_{Ci}(i=1,2,\dots,n)$  为滤波器容抗;  $Z_g$  为交流弱电网的等效阻抗;  $u_g$  为并网电网电压;  $i_g$  为电网电流。

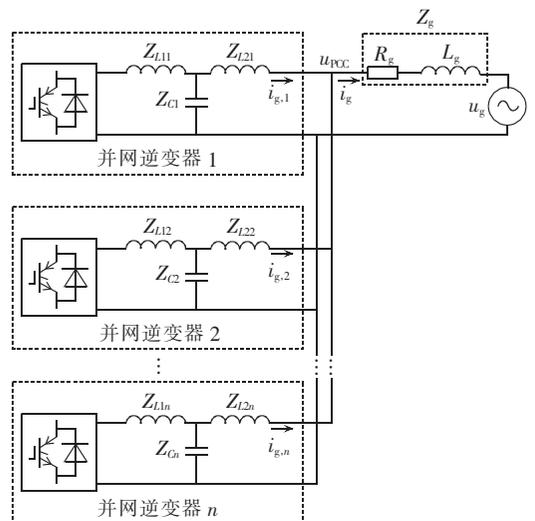


图 1 多  $LCL$  逆变器并网系统结构图  
Fig.1 Structure of grid-connection system with multiple  $LCL$  inverters

收稿日期:2013-11-20;修回日期:2014-05-12

基金项目:国家自然科学基金重大资助项目(51190102);国家自然科学基金资助项目(51277137,51177113)

Project supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China(51190102) and the National Natural Science Foundation of China(51277137,51177113)

图 1 中第  $i$  个  $LCL$  单相并网逆变器的结构如图 2 所示。其中,逆变器输入直流电压  $U_{dc}$  由分布式电源提供; $i_{g,i}$  为逆变器电网侧电流; $i_{c,i}$  为滤波器电容电流; $i_{li}$  为逆变器侧电流。

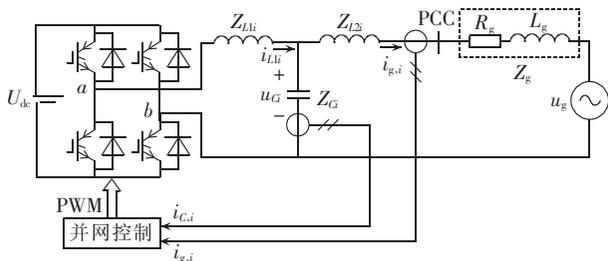


图 2  $LCL$  单相并网逆变器结构框图  
Fig.2 System structure of single-phase grid-connected inverter with  $LCL$  filter

当开关频率远远高于电网基波频率,并忽略直流母线电压波动及开关频率以上的高次谐波时,通过对功率器件开关状态在一个开关周期内进行平均运算所得模型<sup>[8-9]</sup>称为系统平均模型。图 2 中的逆变器采用并网电流和电容电流双闭环电流控制,其控制框图如图 3 所示。图中, $G_{i,i}(s)$  为电流外环控制传递函数; $G_{inv,i}(s)$  为逆变桥增益传递函数。根据梅森公式,图 3 可简化为图 4。

$$G_{x1} = \frac{G_{i,i} G_{inv,i} Z_{Ci}}{Z_{L1i} + Z_{Ci} + H_{1i} G_{inv,i}} \quad (1)$$

$$G_{x2} = \frac{Z_{L1i} + Z_{Ci} + H_{1i} G_{inv,i}}{Z_{L1i} Z_{L2i} + (Z_{L1i} + Z_{L2i}) Z_{Ci} + H_{1i} G_{inv,i} Z_{L2i}}$$

由图 4 可知,系统的输入输出满足以下关系:

$$i_{g,i} = \frac{T}{1+T} \frac{1}{H_{2i}} i_{ref,i} - \frac{G_{x2}}{1+T} u_{PCC} =$$

$$G_i I_{ref,i} - Y_i u_{PCC} = \frac{G_{i,i}}{G_{i,2}} i_{ref,i} - \frac{Y_{i,1}}{Y_{i,2}} u_{PCC} \quad (2)$$

$$T = G_{x1} G_{x2} H_{2i} = \frac{G_{i,i} G_{inv,i} Z_{Ci} H_{2i}}{Z_{L1i} Z_{L2i} + (Z_{L1i} + Z_{L2i}) Z_{Ci} + H_{1i} G_{inv,i} Z_{L2i}} \quad (3)$$

其中, $T$  为系统的环路增益; $G_i$  为受控电流源控制系数; $Y_i$  为并联导纳。

由式(2)可知, $LCL$  并网逆变器外特性可等效为如图 5 所示的诺顿等效电路。

将图 1 中的每个逆变器采用图 5 所示的等效诺顿模型替换,可得多  $LCL$  逆变器并网系统结构图如图 6 所示。

由图 6,根据基尔霍夫电流定律,可得公共并网

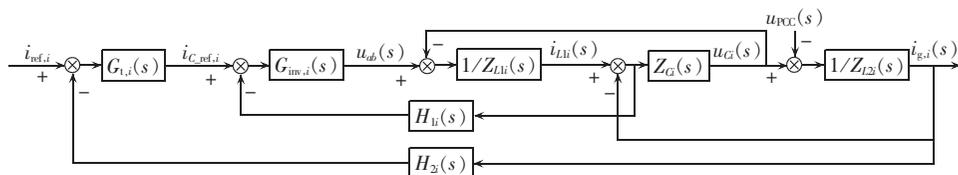


图 3 并网逆变器双闭环电流控制系统框图

Fig.3 Block diagram of dual-loop current control system for grid-connected inverter

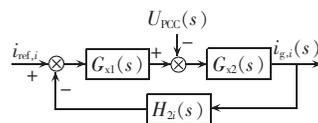


图 4 并网逆变器双闭环电流控制系统简化框图  
Fig.4 Simplified block diagram of dual-loop current control system for grid-connected inverter

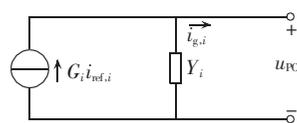


图 5  $LCL$  并网逆变器等效诺顿模型  
Fig.5 Equivalent Norton model of grid-connected inverter with  $LCL$  filter

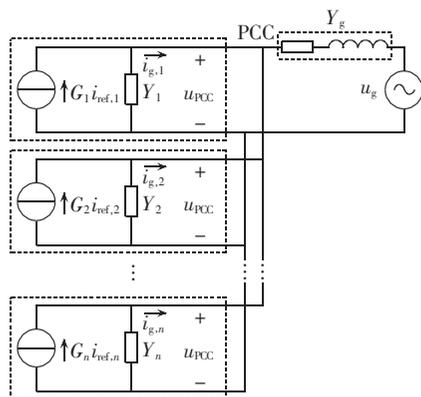


图 6 多  $LCL$  逆变器并网系统诺顿模型  
Fig.6 Norton model of grid-connection system with multiple  $LCL$  inverters

点的电压  $u_{PCC}$  满足式(4)。

$$u_{PCC} = \left( \sum_{i=1}^n G_i i_{ref,i} + u_g Y_g \right) / \left( \sum_{i=1}^n Y_i + Y_g \right) \quad (4)$$

将式(4)代入式(2)可得:

$$i_{g,i} = R_i i_{ref,i} + \sum_{t=2}^n P_{i,t} i_{ref,t} - S_i U_g \quad (5)$$

$$\left[ \begin{aligned} R_i &= \frac{Z_g \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{j,1} \prod_{k=1, k \neq j}^n Y_{k,2} + \prod_{k=1}^n Y_{k,2}}{Z_g \sum_{j=1}^n Y_{j,1} \prod_{k=1, k \neq j}^n Y_{k,2} + \prod_{k=1}^n Y_{k,2}} \frac{G_{i,1}}{G_{i,2}} \\ P_{i,t} &= \frac{-Z_g Y_{i,1} \prod_{j=1, j \neq i}^n Y_{j,2}}{Z_g \sum_{j=1}^n Y_{j,1} \prod_{k=1, k \neq j}^n Y_{k,2} + \prod_{k=1}^n Y_{k,2}} \frac{G_{i,1}}{G_{i,2}} \\ S_i &= \frac{Z_g Y_{i,1} \prod_{j=1, j \neq i}^n Y_{j,2}}{Z_g \sum_{j=1}^n Y_{j,1} \prod_{k=1, k \neq j}^n Y_{k,2} + \prod_{k=1}^n Y_{k,2}} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

微电网中各逆变器并网电流的矩阵表达式如下:

$$\begin{bmatrix} i_{g,1} \\ i_{g,2} \\ \vdots \\ i_{g,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & P_{1,2} & \cdots & P_{1,n} \\ P_{2,1} & R_2 & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ P_{n,1} & P_{n,2} & & R_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ref,1} \\ i_{ref,2} \\ \vdots \\ i_{ref,n} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_n \end{bmatrix} u_g \quad (7)$$

式(5)给出了逆变器并网电流模型,并网逆变器的电流由三部分组成:由自身桥臂产生;由其他并联桥臂产生,反映并联逆变器间的交互作用;由并联电网产生,反映多逆变器并网系统和并联电网的交互作用,交互作用使多逆变器并网系统谐振特性变得复杂。

## 2 多逆变器并网系统谐振特性分析

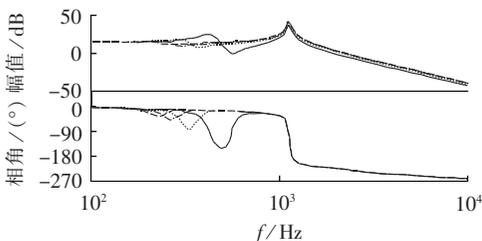
### 2.1 并联逆变器数量对系统谐振的影响

逆变器 A、B 和 C 的参数见表 1,其中,  $L_1$  和  $R_1$  分别为逆变器侧滤波电感及其电阻;  $L_2$  和  $R_2$  分别为网侧滤波电感及其电阻。3 个逆变器均采用双环控制,电容电流内环采用比例控制,并网电流外环采用 PI 控制。根据文献[18-19]的弱电网阻抗计算方法,并联弱电网的等效电感为 1.5 mH,等效电阻为 0.5  $\Omega$ ,电网电压为 220 V。由式(6)可知,并网电流 3 个组成部分的传递函数分母相同,即有相同极点和类似的谐振特性,因此本文分析  $R_i$  部分。图 7(a)、(b)和(c)分别给出了含不同数量逆变器的并网系统谐振特性。图 7(a)系统全部由逆变器 A 组成,图 7(b)系统由逆变器 A 和 B 按 1:1 的比例组成;图 7(c)系统由逆变器 A、B 和 C 按 1:1:1 的比例组成。

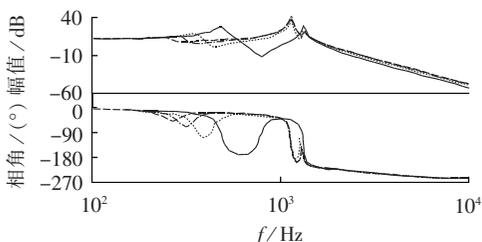
图 7 的仿真结果表明,多逆变器并网系统存在多

表 1 逆变器 A、B 和 C 的参数  
Tab.1 Parameters of inverter A,B and C

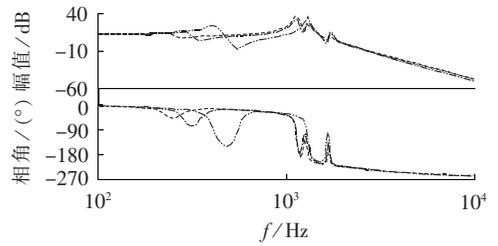
逆变器	$L_1/\text{mH}$	$R_1/\Omega$	$L_2/\text{mH}$	$R_2/\Omega$	$C/\mu\text{F}$	$K_p$	$K_i$	$H_{i1}$	$H_{i2}$	$U_{dc}/\text{V}$
A	4	0.25	0.5	0.05	40	1	200	0.2	0.2	500
B	1	0.10	0.2	0.05	20	1	200	0.3	0.3	500
C	3	0.20	0.6	0.06	30	1	200	0.4	0.2	500



(a) 系统由逆变器 A 组成



(b) 系统由逆变器 A 和 B 组成



(c) 系统由逆变器 A、B 和 C 组成  
—  $n=2$ , - - -  $n=3$ , .....  $n=4$   
- · - ·  $n=6$ , - - -  $n=8$ , .....  $n=9$

图 7 多逆变器并网系统谐振特性  
Fig.7 Resonance characteristics of multi-inverter grid-connection system

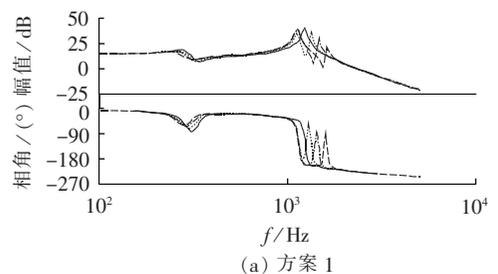
个正谐振峰,其个数和逆变器的种类有关,较低的谐振频率随逆变器个数增加而减小;系统中逆变器的组成比例固定时,并联逆变器的数量不影响系统的谐振峰个数。

### 2.2 逆变器组成比例对系统谐振的影响

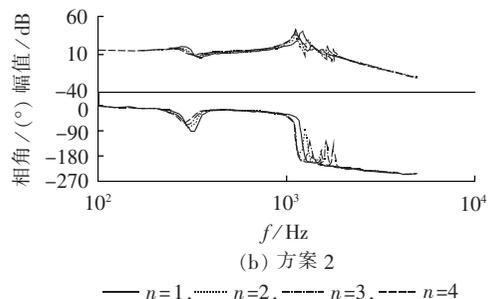
多逆变器并网系统由 6 台逆变器组成,系统有 2 种不同的组成方案。方案 1 为系统由逆变器 A 和 B 组成;方案 2 为系统由逆变器 A、B 和 C 组成。2 种方案下,逆变器组成比例如表 2 所示。图 8(a)和图 8(b)给出了 2 种组成方案下系统的谐振特性。

表 2 2 种方案下的逆变器组成  
Tab.2 Different inverter compositions of two schemes

逆变器数量	逆变器组成比例	
	方案 1	方案 2
1	1:5	1:4:1
2	2:4	2:3:1
3	3:3	3:2:1
4	4:2	4:1:1



(a) 方案 1



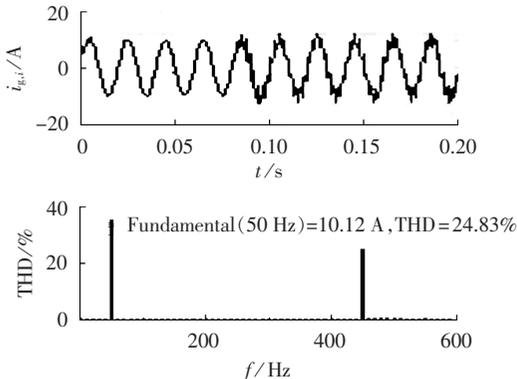
(b) 方案 2  
—  $n=1$ , .....  $n=2$ , - - -  $n=3$ , - - -  $n=4$

图 8 逆变器并网系统谐振特性  
Fig.8 Resonance characteristics of multi-inverter grid-connection system

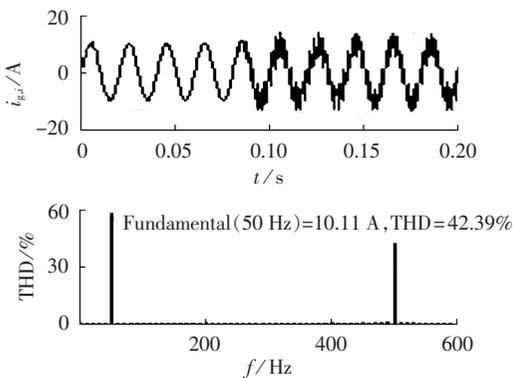
图 8 的仿真结果表明系统的谐振峰个数和系统的组成方案密切相关,相同数量的逆变器、不同的组成方案系统的谐振特性不同。

### 2.3 仿真验证

在 MATLAB 中建立 2 个逆变器并网系统仿真模型,逆变器参数同表 1。由图 7(a)和(b)可知,2 个逆变器 A 并联时系统谐振频率为 425 Hz,逆变器 A 和 B 并联时系统谐振频率为 490 Hz。考虑并网系统的基波频率为 50 Hz,因此当 2 个逆变器 A 并联时,在其中一个逆变器的给定值中注入 5% 的 450 Hz 谐波;而当单逆变器 A 和 B 并联时,在逆变器 A 给定值中注入 5% 的 500 Hz 谐波。图 9(a)和(b)给出了 2 种情况下逆变器 A 并网电流及其 THD 分析结果。图 10 给出了以上 2 种情况下,逆变器 A 中注入 5% 的不同频率谐波时,逆变器 A 并网电流 THD 分析结果。



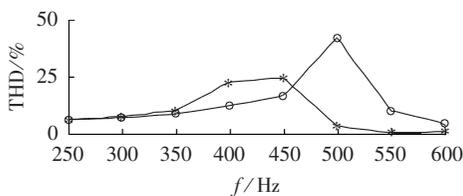
(a) 系统由逆变器 A 组成



(b) 系统由逆变器 A 和 B 组成

图 9 逆变器 A 并网电流及其 THD

Fig.9 Grid-connecting current and its THD of inverter A



—\*— 系统由逆变器 A 组成  
—○— 系统由逆变器 A 和 B 组成

图 10 逆变器 A 并网电流 THD

Fig.10 THD of grid-connecting current of inverter A

图 9 和 10 的仿真结果验证了诺顿模型的适用性,谐振分析结果的正确性和准确性。

## 3 参数对系统谐振的影响

多逆变器并网系统的谐振特性和系统控制参数及并网电网强度密切相关。基于分析结果,利用逆变器控制参数的协调优化设计有效抑制系统谐振。

### 3.1 控制参数对系统谐振的影响

以逆变器 A 和 B 组成的并网系统为例,图 11、12 分别给出了电容电流内环参数  $H_{li}$  和并网电流外环控制参数  $K_p$ 、 $K_i$  对系统谐振特性的影响。

从图 11 的仿真结果可以看出,随着电容电流内环控制参数的增大,系统谐振频率减小,但较低谐振频率的谐振峰值基本不变。从图 12 可以看出,随着并网电流外环控制参数  $K_p$  的增大,系统谐振频率和谐振峰值均增大;而并网电流外环控制参数  $K_i$  对系统的谐振频率没有影响,随着  $K_i$  的增大,系统较低

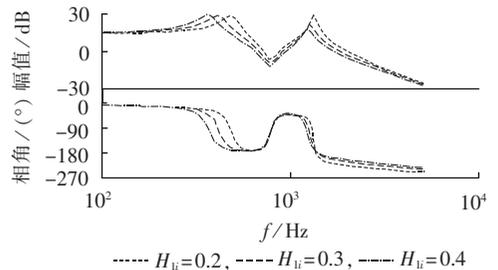
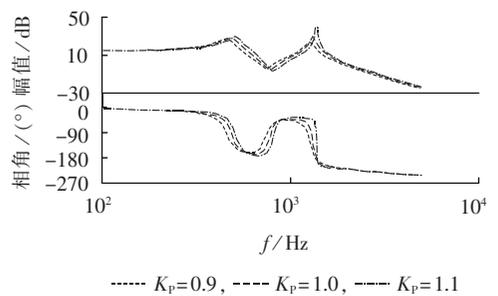
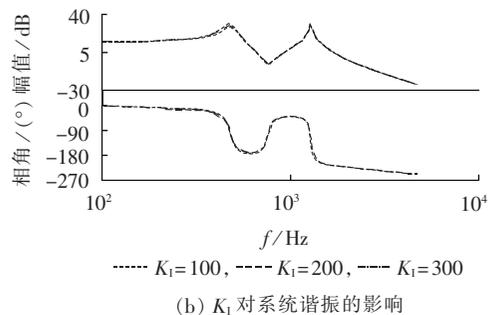


图 11 电容电流内环参数对系统谐振特性的影响

Fig.11 Influence of capacitive current inner-loop parameters on resonant characteristics of system



(a)  $K_p$  对系统谐振的影响



(b)  $K_i$  对系统谐振的影响

图 12 并网电流外环控制参数对系统谐振的影响

Fig.12 Influence of grid-connecting current outer-loop control parameters on resonant characteristics of system

谐振频率的谐振峰值有所减小。

### 3.2 并网阻抗对系统谐振的影响

图 13 给出逆变器 A 和 B 组成的并网系统谐振特性和并网阻抗的关系(本文验证时忽略电阻  $R_g$ )。

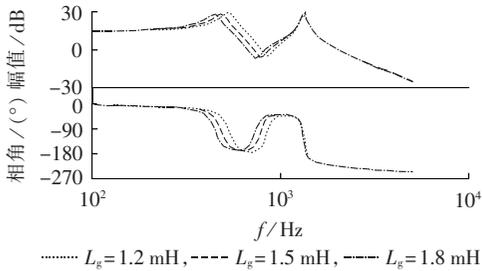


图 13 系统谐振特性和并网阻抗的关系

Fig.13 Relationship between system resonant characteristics and grid-connecting impedance

从图 13 可以看出,并网阻抗对系统较高的谐振频率没有影响,而随着并网阻抗的增大,系统较低的谐振频率会减小。

## 4 结论

本文基于闭环传递函数法建立了  $LCL$  并网逆变器诺顿等效模型,分析了多逆变器并网系统的谐振特性及控制参数对谐振的影响,得出如下结论。

a. 当系统中的逆变器完全相同时,系统仅存在 2 个谐振峰,较高谐振频率不变,而较低频率随着并联逆变器数量的增加而减小。

b. 当系统中的逆变器不同时,系统会产生多个谐振峰,谐振峰个数随着不同逆变器个数的增加而增加。

c. 系统的谐振频率和逆变器控制参数相关,其随着电容电流放大系数的增大而减小,随着并网电流外环控制参数  $K_p$  的增大而增大,基本不受并网电流外环控制参数  $K_i$  参数的影响。

d. 系统较低谐振频率随着并网阻抗的增大而减小。

### 参考文献:

[1] BLAABJERG F,TEODORESCU R,LISERRE M,et al. Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics,2006,53(5):1398-1409.

[2] PENG F Z,LI Y W,TOLBERT A M. Control and protection of power electronics interfaced distributed generation system in a customer-driven microgrid[C]//Power & Energy Society General Meeting. Calgary, Alberta, Canada;IEEE,2009:1-8.

[3] KROPOSKI B,PINK C,DEBLASIO R,et al. Benefits of power electronic interfaces for distributed energy systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2010,19(6):901-908.

[4] 马添翼,金新民,黄杏. 含多逆变器的微电网建模与稳定性分析[J]. 电力系统自动化,2013,37(6):12-17.

MA Tianyi,JIN Xinmin,HUANG Xing. Modeling and stability analysis of microgrid with multiple converters[J]. Automation of

Electric Power Systems,2013,37(6):12-17.

[5] LOH P C,HOLMES D G. Analysis of multiloop control strategies for  $LC/CL/LCL$ -filtered voltage-source and current-source inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2005,41(2):644-654.

[6] PAN D,RUAN X,WANG X,et al. Magnetic integration of an  $LCL$  filter for the single-phase grid-connected inverter[C]//Proceedings of IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Raleigh, North Carolina, USA;IEEE,2012:573-578.

[7] BIERHOFF M H,FUCHS W F. Active damping for three-phase PWM rectifiers with high-order line-side filters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2009,56(2):371-379.

[8] WU E L,PETER W. Digital current control of a voltage source converter with active damping of  $LCL$  resonance[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2006,21(5):1364-1373.

[9] DANNEHL J,FUCHS F,HANSEN S,et al. Investigation of active damping approaches for PI-based current control of grid-connected pulse width modulation converters with  $LCL$  filters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2010,46(4):1509-1517.

[10] MASSING J R,STEFANELLO M,GRÜNDLING H A,et al. Adaptive current control for grid-connected converters with  $LCL$  filter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2012,59(11):4681-4693.

[11] 雷一,赵争鸣,鲁思兆.  $LCL$  滤波器的光伏并网逆变器有源阻尼与无源阻尼混合控制[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):23-27.

LEI Yi,ZHAO Zhengming,LU Sizhao. Hybrid control of active and passive damping fo grid-connected PV inverter with  $LCL$  filter[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(11):23-27.

[12] 王要强,吴凤江,孙力. 并网逆变器用  $LCL$  滤波器新型有源阻尼控制[J]. 电力自动化设备,2011,31(5):75-79.

WANG Yaoqiang,WU Fengjiang,SUN Li. Active damping control strategy for  $LCL$  filter used in grid-connected inverter[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(5):75-79.

[13] ENSLIN J H R,HEKES P J M. Harmonic interaction between a large number of distributed power inverters and the distribute network[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2004,19(6):1586-1593.

[14] WANG F,DUARTE J L,HENDRIX M A M,et al. Modeling and analysis of grid harmonic distortion impact of aggregated DG inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2011,26(3):786-797.

[15] 许德志,汪飞,毛华龙,等. 多并网逆变器与电网的谐波交互建模与分析[J]. 中国电机工程学报,2013,33(12):64-71.

XU Dezhi,WANG Fei,MAO Hualong,et al. Modeling and analysis of harmonic interaction between multiple grid-connected inverters and the utility grid[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(12):64-71.

[16] HE Jinwei. Investigation and active damping of multiple resonances in a parallel-inverter-based microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2013,28(1):234-246.

[17] 陆晓楠,孙凯,黄立培. 微电网系统中并联  $LCL$  滤波器谐振特性[J]. 清华大学学报:自然科学版,2012,52(11):1571-1577.

LU Xiaonan,SUN Kai,HUANG Lipei. Resonance characteristics in a parallel  $LCL$  filter system for microgrid applications[J]. Journal of Tsinghua University:Science & Technology Edition,

2012,52(11):1571-1577.

- [18] FRANKEN B, ANDERSON G. Analysis of HVDC converters connected to weak systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(1): 235-242.
- [19] ZHANG Lidong. Interconnection of two very weak AC systems by VSC-HVDC links using power-synchronization control [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 344-355.

#### 作者简介:

胡 伟(1981-),女,安徽安庆人,博士研究生,主要研究方



胡 伟

向为微电网建模及动态等值、微电网电能质量  
(E-mail: dmqhw2004@163.com);

孙建军(1975-),男,江西九江人,副教授,博士,主要研究方向为微电网电能质量分析及治理、功率电力电子技术应用(E-mail: 278856036@qq.com);

查晓明(1967-),男,安徽安庆人,教授,博士,主要研究方向为微电网分析与控制、微电网建模及电能质量、大功率电力电子变换技术(E-mail: xmzha@whu.edu.cn)。

## Resonant characteristics of multi-inverter grid-connection system

HU Wei, SUN Jianjun, MA Qian, LIU Fei, ZHA Xiaoming

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** A Norton equivalent model of grid-connected inverter with *LCL* filter is established based on the close-loop transfer function method, based on which, the influences of the number and type of grid-connected inverters and the system control parameters on the resonant characteristics of system are analyzed. Results show that, the multi-inverter grid-connection system, compared to the traditional single-inverter system, has more resonant frequencies; its number is related to the inverter type and the lower resonant frequencies decrease along with the increase of the number and decrease along with the increase of grid-connecting impedance; the resonant frequency decreases along with the increase of capacitive current inner-loop parameters and increases along with the increase of grid-connecting current outer-loop control parameter  $K_p$ , and is immune to its control parameter  $K_i$ . Simulative results verify the validity of theoretical analysis.

**Key words:** distributed power generation; *LCL* filter; grid connection; electric inverters; resonant; models

(上接第 87 页 continued from page 87)

## Optimized inductive filter design based on multi-objective Pareto particle algorithm

LIU Wenyue<sup>1,2</sup>, LUO Longfu<sup>1</sup>, ZHANG Zhiwen<sup>1</sup>, LI Yong<sup>1</sup>, HUANG Zhao<sup>1</sup>, ZHANG Xiaofeng<sup>1</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. CSR Research Institute of Electricity Technology & Materials Engineering, Zhuzhou 412001, China)

**Abstract:** A filtering unit scheme of 12-pulse rectifier system to effectively balance the power quality and space limitation is selected according to the characteristics and requirements of inductive filtering, based on which, a multi-objective optimization math model is established and an improved particle swarm algorithm based on vector evaluation method is applied to optimize the filter parameters. The analytical, simulative and experimental results of an example show that, the filter with optimized parameters well meets the requirements of multi-objective design for filtering performance, reactive power compensation and cost saving, verifying the correctness and effectiveness of the selected scheme and optimization model.

**Key words:** high power rectifier; inductive filtering; passive filter; particle swarm optimization algorithm; optimization; electric filters