

# LCL 滤波器无源阻尼和有源阻尼对多逆变器 并网谐振影响对比分析

郑嘉龙<sup>1</sup>, 杨 鸽<sup>1</sup>, 刘一均<sup>1</sup>, 刘 蓓<sup>2</sup>

(1. 四川水利职业技术学院, 四川 成都 611231; 2. 国网巴塘县供电公司, 四川 巴塘 627650)

**摘要:** 多并网逆变器系统谐振是由滤波器输出谐波与电网谐波共同作用的结果。LCL 滤波器谐振是滤波器输出谐波的主要因素之一, 因此提出 LCL 滤波器谐振阻尼方法对多并网逆变器系统谐振的影响进行分析。首先, 分析多并网逆变器系统谐波交互的机理; 其次, 建立无源阻尼和有源阻尼的多并网逆变器系统阻抗模型, 对比分析 2 种阻尼方法对低频谐振和超高次谐波的影响; 最后, 采用 3 台并网逆变器进行仿真实验验证所提理论的有效性。

**关键词:** 多并网逆变器; 谐振; LCL 滤波器; 无源阻尼; 有源阻尼

中图分类号: TM761 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2020)03-0068-05

DOI: 10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.03.014

## Comparative Analysis on Influence of Passive Damping and Active Damping of LCL Filter on Multi-inverter Grid-connected Resonance

Zheng Jialong<sup>1</sup>, Yang Ge<sup>1</sup>, Liu Yijun<sup>1</sup>, Liu Bei<sup>2</sup>

(1. Sichuan Water Conservancy Vocational College, Chengdu 611231, Sichuan, China; 2. State Grid Batang County Electric Power Supply Company, Batang 627650, Sichuan, China)

**Abstract:** The resonance of grid-connected multi-inverter system is the result of the joint action of filter output harmonic and grid harmonic. The resonance of LCL filter is one of the main factors of harmonic output of filter. Therefore, the influence of the resonance damping method of LCL filter on the resonance of grid-connected multi-inverter system is analyzed. Firstly, the mechanism of harmonic interaction in grid-connected multi-inverter system is analyzed. Secondly, the impedance model of grid-connected multi-inverter system with passive damping and active damping is established. Then, the influence of two damping methods on low frequency resonance and supraharmonic resonance is compared and analyzed. Finally, 3 grid-connected inverters are used for simulation experiment to verify the effectiveness of the above-mentioned theory.

**Key words:** grid-connected multi-inverter; resonance; LCL filter; passive damping; active damping

## 0 引言

由于需要长距离传输线,使得太阳能、风能等可再生能源分布式发电(distributed generation, DG)系统以及大型新能源电站的电网阻抗不可忽略<sup>[1]</sup>。同时,不同数量逆变器连接到同一个电网公共连接点(point of common coupling, PCC)促使任意单个逆变器在 PCC 对应的电网等效阻抗值发生变化<sup>[2]</sup>。再由于逆变器侧和网侧谐波的存在,导致多逆变器系统与电网在 PCC 处发生谐波交互威胁系统的稳

定运行<sup>[3]</sup>。以电力电子技术为基础的交流电源与电网的谐波交互已经引起广泛关注<sup>[4]</sup>,谐波交互导致的系统谐振更是其中的研究热点<sup>[5-6]</sup>。研究人员对多并网逆变器系统谐振出现的低频谐振<sup>[7]</sup>和超高次谐振<sup>[8]</sup>给出了一些分析模型开展研究。文献<sup>[7]</sup>提出了一种谐振分析方法用于多并网逆变器系统低频谐振与相关因素(并网逆变器数量、LCL 滤波器参数和电网阻抗)之间的关系分析以及在 PCC 点和各母线比例含有各频率谐振的比例计算。文献<sup>[8]</sup>分析了多并网逆变器系统超高频谐振的特性。但是,上述研究中均未提及 LCL 滤波器谐振阻尼策略与多并网逆变器系统谐振之间的关系。

基金项目:四川省水利厅科研项目(SL2017-06)

虚拟阻抗控制是多并网逆变器谐振抑制的主要方法<sup>[9-10]</sup>。文献[9]指出高电网阻抗是引起逆变器集群谐振的主要原因,并提出一种基于虚拟阻抗技术的有源谐波电导法。文献[10]提出一种基于虚拟导纳的全局谐振抑制策略,动态调整网络阻抗,抑制系统的谐波。但是有研究认为控制延时将导致虚拟阻抗控制策略失效,并提出了虚拟阻抗相角补偿法<sup>[11]</sup>和自适应滤波算法<sup>[12]</sup>抑制系统谐振。LCL滤波器谐振抑制策略与多并网逆变器系统谐振关系的研究主要集中在有源阻尼方法<sup>[13-14]</sup>和低频谐振分析方面。文献[13]结合图示法寻求有源阻尼参数对耦合谐振衰减的最优取值范围。文献[14]通过仿真实验结果对比发现有源阻尼可以抑制多并网逆变器系统谐振,并给出了虚拟阻尼电阻与系统谐振频率的关系。但是,没有说明虚拟阻尼电阻大小与系统谐振幅值的关系,即虚拟阻尼电阻与系统谐振抑制能力的关系。

文献[3]指出从阻抗角度对并网逆变器建模,是从源头分析谐波交互问题的最有效方法。下面建立LCL滤波无源阻尼和有源阻尼的并网逆变器阻抗模型,对比分析2种阻尼策略对多并网逆变器低频谐振和超高次谐波的影响,为多并网逆变器系统阻尼策略的设计提供参考。

## 1 多逆变器并网谐波交互

### 1.1 多逆变器并网模型

多逆变器并网诺顿模型如图1所示,其中 $L_1$ 、 $L_2$ 和 $C$ 组成单逆变器的LCL滤波器; $L_g$ 为电网侧等效电感; $U_{inv}$ 为逆变器输出电压; $Z_{o_n}$  ( $n=1,2,\dots,n$ )为单台并网逆变器等效阻抗; $Z_g$ 为电网等效阻抗; $i_{s_n}$  ( $n=1,2,\dots,n$ )为并网电流的指令值跟踪分量; $U_g$ 为电网电压。

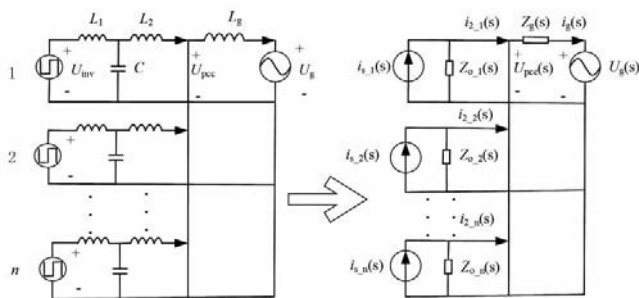


图1 多逆变器并网诺顿模型

公共连接点处的阻抗 $Z_{PCC}$ 可以认为是多并网逆

变器与电网等效阻抗并联,其表达式为

$$Z_{PCC} = \frac{nZ_g(s)Z_o(s)}{nZ_g(s) + Z_o(s)} \quad (1)$$

### 1.2 谐波交互

单个逆变器并网时,其输出阻抗 $|Z_o(s)|$ 与电网等效阻抗 $|Z_g(s)|$ 差不多大且两个阻抗的相位角之差等于 $180^\circ$ 左右时,系统进入准谐振状态<sup>[15]</sup>。对于多逆变器并网系统可将多逆变器输出阻抗并联等效为单个逆变器输出阻抗,与电网等效阻抗组成的多并网逆变器系统也同样存在上述系统准谐振状态。多并网逆变器系统中谐波成分的频率正好与系统阻抗网络发生准谐振频率相等时,将非常可能发生系统谐振导致系统阻抗值到达最小值。当此谐波成分频率低于2 kHz时称为低频谐振,频率范围在2~15 kHz为超高次谐波<sup>[16]</sup>。同时为了降低问题分析的难度,采用完全相同的单相逆变器并网。

滤波电感和阻尼电感的值都很小,因而对系统谐振频率的影响也非常小。图1所示的多并网逆变器并联的系统谐振频率 $f_{res}$ 的近似表达式为<sup>[8]</sup>

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2 + nL_g}{L_1L_2C + nL_1L_gC}} \quad (2)$$

定义多并网逆变器公共连接点等效阻抗与电网阻抗之比为 $K$ ,该值越大说明系统通过调节逆变器参数从而抑制谐波干扰能力越强,也说明阻尼策略对系统谐振抑制的适应能力越强。

$$K = \left| \frac{Z_{PCC}(s)}{Z_g(s)} \right| \quad (3)$$

## 2 阻尼策略阻抗模型分析

### 2.1 无源阻尼下多逆变器并网阻抗模型

为了简化计算,未考虑延时环节,也未考虑滤波器电感的等效电阻。单台无源阻尼并网逆变器及其控制框图如图2所示。其中 $L_1$ 、 $L_2$ 和 $C$ 构成LCL滤波器; $L_g$ 为电网的等效电感; $U_{inv}$ 为逆变器侧输出电压; $U_g$ 为电网电压; $R_d$ 为无源阻尼电阻; $K_{PWM} = U_{inv}/U_{tri}$ , $U_{tri}$ 为三角载波幅值; $G_i(s)$ 为PI调节器,传递函数为 $G_i(s) = K_p + K_i/s$ 。

从公共连接点观察单台无源阻尼并网逆变器等效阻抗 $Z_{o1}$ 的表达式如式(4)所示。

$$Z_{o1}(s) = \frac{A_{11}s^3 + A_{12}s^2 + A_{13}s + A_{14}}{s^2L_1C + sCR_d + 1} \quad (4)$$

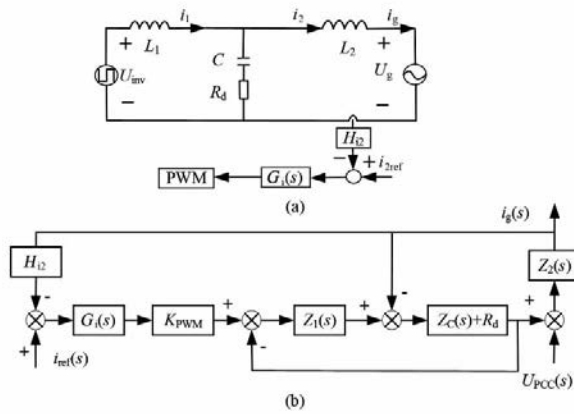


图2 单台无源阻尼并网逆变器及其控制框图

式中:  $A_{11} = L_1 L_2 C$ ;  $A_{12} = (L_1 + L_2) C R_d$ ;  $A_{13} = L_1 + L_2 + G_i(s) K_{PWM} C R_d$ ;  $A_{14} = G_i(s) K_{PWM}$ 。

将式(4)代入式(1)得无源阻尼多逆变器并网公共连接处等效阻抗  $Z_{PCC1}$  的表达式如式(5)所示。

$$Z_{PCC1} = \frac{nsL_g(A_{11}s^3 + A_{12}s^2 + A_{13}s + A_{14})}{B_{11}s^3 + B_{12}s^2 + B_{13}s + B_{14}} \quad (5)$$

式中:  $B_{11} = L_1 L_2 C + nL_g L_1 C$ ;  $B_{12} = (L_1 + L_2 + nL_g) C R_d$ ;  $B_{13} = L_1 + L_2 + G_i(s) K_{PWM} C R_d$ ;  $B_{14} = G_i(s) K_{PWM}$ 。

### 2.2 有源阻尼下多逆变器并网阻抗模型

相较于无源阻尼,有源阻尼去除了LCL滤波器滤波电容支路上的无源阻尼电容,增加了滤波电容支路电流的反馈系数  $H_{i1}$ 。单台有源阻尼并网逆变器及其控制框图如图3所示。

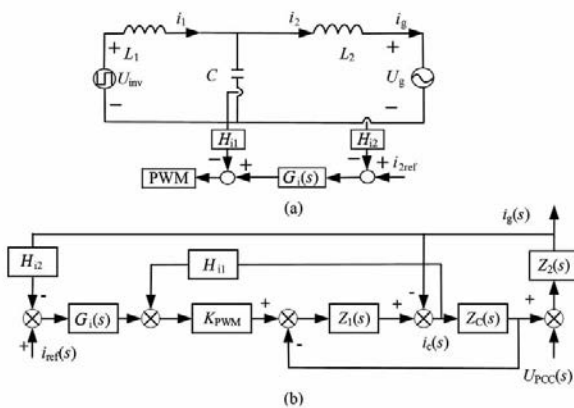


图3 单台有源阻尼并网逆变器及其控制框图

从公共连接点观察单台有源阻尼并网逆变器的等效阻抗  $Z_{o2}$  的表达式如式(6)所示。

$$Z_{o2}(s) = \frac{A_{21}s^3 + A_{22}s^2 + A_{23}s + A_{24}}{s^2 L_1 C + s C H_{i1} K_{PWM} + 1} \quad (6)$$

式中:  $A_{21} = L_1 L_2 C$ ;  $A_{22} = L_2 C H_{i1} K_{PWM}$ ;  $A_{23} = L_1 + L_2$ ;

$A_{24} = K_{PWM} G_i(s) H_{i2}$ 。将式(6)代入式(1)得有源阻尼多逆变器并网公共连接处等效阻抗  $Z_{PCC2}$  的表达式如式(7)所示。

$$Z_{PCC2}(s) = \frac{nsL_g(A_{21}s^3 + A_{22}s^2 + A_{23}s + A_{24})}{B_{21}s^3 + B_{22}s^2 + B_{23}s + B_{24}} \quad (7)$$

式中:  $B_{21} = L_1 C (L_2 + nL_g)$ ;  $B_{22} = C H_{i1} K_{PWM} (L_1 + L_2)$ ;  $B_{23} = L_1 + L_2 + L_g$ ;  $B_{24} = K_{PWM} G_i(s) H_{i2}$ 。

## 3 参数设计和敏感性分析

### 3.1 设计实例

采用3台( $n=3$ )单相LCL型逆变器并网进行仿真实验。设计实例用单相LCL型逆变器相关参数直接采用文献[17]所述数据,如表1所示。

表1 设计实例参数

参数	数值	参数	数值
$V_{dc}/V$	360	$L_1/mH$	0.6
$U_g/V$	220	$L_2/mH$	0.15
$P_o/kW$	6	$C/\mu F$	10
$f_o/Hz$	50	$K_p$	0.45
$f_{sw}/kHz$	10	$K_i$	2200
$H_{i2}$	0.15	$U_{tri}/V$	3.052
$n$	3		

### 3.2 参数设计和敏感性分析

根据并网逆变器系统的相位裕度、幅值裕度和基波频率处幅值增益等条件的约束,可得有源阻尼反馈系数  $H_{i1}$  的取值范围为  $0.1^{[17]}$ 。

文献[18]给出了结合电网等效电抗的LCL滤波器无源阻尼阻尼系数  $\zeta_{PD}$  和有源阻尼阻尼系数  $\zeta_{PA}$  的表达式如式(8)一式(9)所示。

$$\zeta_{PD} = \frac{R_d}{2} \sqrt{\frac{(L_1 + L_2 + L_g) C}{L_1 (L_2 + L_g)}} \quad (8)$$

$$\zeta_{PA} = \frac{H_{i1}}{2L_1} \sqrt{\frac{L_1 (L_2 + L_g) C}{L_1 + L_2 + L_g}} \quad (9)$$

设计无源阻尼参数时还需要考虑损耗优化问题,但这里主要讨论阻尼策略对多逆变器并网谐振的影响问题而不再涉及该问题。电网等效电感在  $0 \sim 2$  mH 之间变化时,谐振频率可能降低多达  $30\%^{[19]}$ ,当  $L_g = 0.2$  mH 时,系统谐振出现最大值<sup>[8]</sup>。分别取  $L_g$  的值为  $0$  mH、 $0.2$  mH 和  $2$  mH,在

$\zeta_{PD} = \zeta_{PA}$  的条件下, 计算每组参数对应的谐振频率, 相关参数如表 2 所示。并网逆变器集群设计时应该避免系统谐振频率进入逆变器 LCL 滤波器谐振频率的约束区间, 防止更多不稳定因素的出现。K 在 0 ~ 10 kHz 范围的幅频特性曲线如图 4 所示。图 4 中的 K1 和 K4 为理想电网的情况, 这里不作深入探讨。作为系统谐振频率发生在超高次频率的 K2 和 K5, 很明显有源阻尼的适应能力比无源阻尼的强。作为系统谐振频率发生在低频频率的 K3 和 K6, 有源阻尼的适应能力总体也比无源阻尼要强一些。

表 2 K 在 0 ~ 10 kHz 的相关参数

曲线组别	阻尼系数 $\zeta$	$L_g$ / mH	$R_d$ / $\Omega$	$H_{il}$	$f_{res}$ / kHz
K1	0.002 9	0.0	0.02		1.454
K2	0.003 9	0.2	0.04		2.758
K3	0.005 7	2.0	0.08		1.950
K4	0.002 9	0.0		0.1	1.454
K5	0.003 9	0.2		0.1	2.758
K6	0.005 7	2.0		0.1	1.950

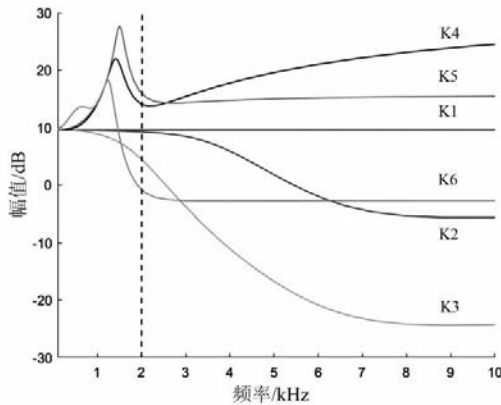


图 4 K 的幅频特性曲线

#### 4 仿真分析

采用 3 台同样参数的单相逆变器并网开展仿真实验。分别引入电网背景谐波含有率为 0.3% 的 1.950 kHz 和 2.758 kHz 考察无源阻尼策略和有源阻尼策略对多逆变器并网的低频谐振和超高次频率谐振的影响。得到并网电流  $i_g$  谐波频谱如图 5 和图 6 所示。从图 5 和图 6 可以看出无源阻尼策略对多逆变器并网低频谐振和超高次谐振几乎没有抑制作用, 有源阻尼对低频谐振的抑制效果比对超高次频率谐振的抑制效果要好一些。

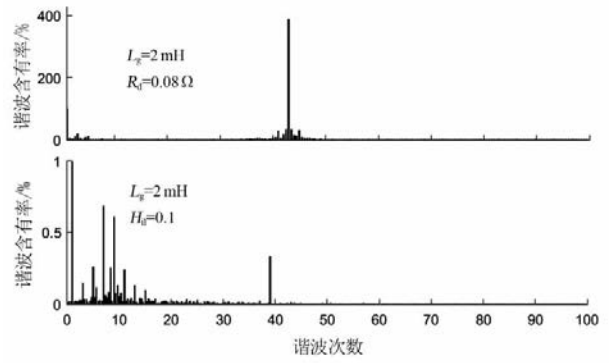


图 5 低频谐振下  $i_g$  频谱

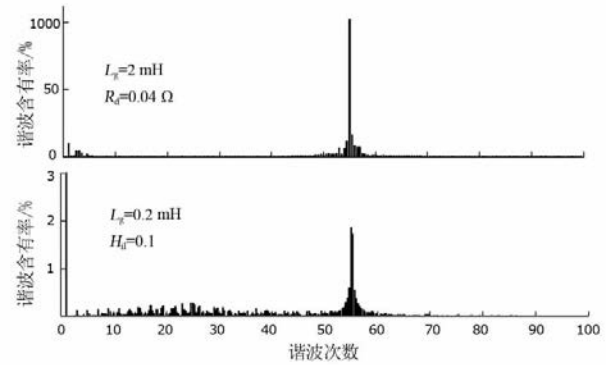


图 6 超高次频率谐振下  $i_g$  频谱

有源阻尼策略是在电容支路上虚拟并联电阻  $R_C$ , 然后通过控制框图的变形得到有源阻尼的反馈系数  $H_{il}$ 。因此, 可以通过  $H_{il}$  的表达式得出其等效的无源阻尼情况。  $H_{il}$  的表达式为

$$H_{il} = \frac{L_1}{K_{PWM} C R_C} \quad (10)$$

结合上述参数可知  $H_{il} = 0.1$  可以等效为  $R_C = 5 \Omega$ , 该电阻的阻值远远大于通过  $\zeta_{PD} = \zeta_{PA}$  条件计算出的电阻  $R_d$  值。提高  $R_d$  的数值为  $2 \Omega$  时, 无源阻尼策略对低频谐振的抑制能力明显提升, 对超高次频率谐振抑制能力也有所改善。  $R_d$  的数值为  $2 \Omega$  时, 3 台逆变器并网仿真实验结果如图 7 所示。

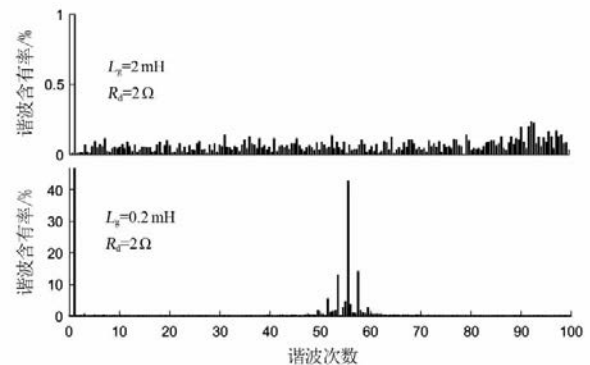


图 7  $R_d = 2 \Omega$  时仿真实验结果

## 5 结 语

前面首先分析了单相逆变器并网系统阻抗的数学模型,定义了并网逆变器阻尼策略对多逆变器并网谐振的适应力系数;然后提出了无源阻尼策略下的多逆变器并网阻抗模型和有源阻尼策略下的多逆变器并网阻抗模型;最后,在 Matlab/Simulink 平台上,搭建3台逆变器并网仿真模型,验证所提理论的正确性,并对无源阻尼策略和有源阻尼策略的不同表现展开分析,主要得到以下结论:

1) 在相同阻尼系数和其他相关参数条件下,有源阻尼策略对多逆变器并网谐振的适应性要好于无源阻尼策略。

2) 无源阻尼策略通过提高阻尼电阻的数值,可以提高对多逆变器并网谐振的抑制能力。该过程对于低频谐振的抑制效果要好于超高次频率谐振。

所提方法主要分析了无源阻尼和有源阻尼策略对低频谐振和超高次频率谐振的影响,没有开展混合阻尼策略对多逆变器并网谐振的影响,这项工作将在下一步的研究中展开。

### 参考文献

[1] Liserre M, Teodorescu R, Blaabjerg F. Stability of Photovoltaic and Wind Turbine Grid-connected Inverters for A Large Set of Grid Impedance Values [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(1): 263-272.

[2] Agorreta J L, Borrega M, Lopez J, et al. Modeling and Control of N-parallel Grid-connected Inverters with LCL Filter Coupled due to Grid Impedance in PV Plants [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3): 770-785.

[3] 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.

[4] Wang Xiongfei, Blaabjerg F, Wu Weiwei. Modeling and Analysis of Harmonic Stability in An AC Power-Electronics-Based Power System [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(12): 6421-6432.

[5] 刘洋,帅智康,李杨,等.多逆变器并网系统谐波谐振模态分析[J].中国电机工程学报,2017,37(14):4156-4164.

[6] Lu Minghui, Yang Yongheng, Johnson B, et al. An

Interaction - Admittance Model for Multi - Inverter Grid - Connected Systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(8): 7542-7557.

[7] Hong Lucheng, Shu Wantao, Wang Jianhua, et al. Harmonic Resonance Investigation of A Multi - inverter Grid - connected System Using Resonance Modal Analysis [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1): 63-72.

[8] 汪颖,罗代军,肖先勇,等.多逆变器并网下的超高次谐振特性分析[J].电力系统自动化,2020,44(1):192-199.

[9] 孙振奥,杨子龙,王一波,等.光伏并网逆变器集群的谐振原因及其抑制方法[J].中国电机工程学报,2015,35(2):418-425.

[10] 胡伟,周友斌,杜镇安,等.多并网逆变器系统谐振抑制策略[J].电力系统保护与控制,2017,45(14):45-50.

[11] 黎立丰,郑天文,郭岩,等.基于虚拟阻抗相角补偿的并联逆变器谐振抑制方法[J].电网技术,2018,42(12):4069-4075.

[12] 陈来军,黎立丰,郑天文,等.基于自适应滤波的并联逆变器谐振抑制策略[J].电网技术,2020(1):212-219.

[13] 匡慧敏,罗安,陈智勇,等.多逆变器并网耦合谐振机理及有源阻尼优化方法[J].电网技术,2016,40(4):1180-1189.

[14] 武健,赵家琦,王超,等.多逆变器并网系统谐振特性模态分析与有源阻尼稳定域计算[J].电机与控制学报,2018,22(2):98-107.

[15] 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.

[16] Bollen M, Olofsson M, Larsson A, et al. Standards for Supraharmonics (2 to 150 kHz) [J]. IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, 2014, 3(1): 114-119.

[17] 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.

[18] 雷一,赵争鸣,袁立强,等.LCL滤波的光伏并网逆变器阻尼影响因素分析[J].电力系统自动化,2012,36(21):36-40.

[19] 雷一,赵争鸣,鲁思兆.LCL滤波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.

### 作者简介:

郑嘉龙(1987), 硕士, 实验师, 主要研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用、实验技术。

(收稿日期: 2020-01-21)