

DOI: 10.7667/PSPC161051

多并网逆变器系统谐振抑制策略

胡伟¹, 周友斌¹, 杜镇安¹, 张侃君¹, 王婷¹, 孙建军²

(1. 国网湖北省电力公司电力科学研究院电网技术中心, 湖北 武汉 430077;

2. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 多并网逆变器之间的交互影响会引发谐振, 威胁系统的安全稳定运行。为了解决谐振问题, 建立了多并网逆变器阻抗网络, 分析了谐振抑制机理, 基于导纳重构原理, 提出了一种基于虚拟导纳的全局谐振抑制策略。该策略利用公共连接点处谐波电压产生和共振频率相关的虚拟导纳, 动态调整网络阻抗, 抑制系统的谐振。以两个并网逆变器系统为例, 理论分析了谐振抑制效果, 仿真和实验验证了所提全局谐振抑制策略的可行性和有效性。

关键词: 阻抗网络; 谐振; 抑制策略; 并网逆变器; 导纳

Research on resonance suppression strategy of system with multiple grid-connected inverters

HU Wei¹, ZHOU Youbin¹, DU Zhenan¹, ZHANG Kanjun¹, WANG Ting¹, SUN Jianjun²

(1. Department of Grid Center, State Grid Hubei Electric Power Research Institute, Wuhan 430077, China;

2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The interactions between multiple grid-connected inverters can cause resonance and threaten the security and stability of the system. To address the problem of the resonance, the impedance network is built and the resonance suppression mechanism is analyzed, then a global resonance suppression strategy is proposed based on the principle of admittance reconstruction. The strategy is to dynamically reshape the impedance network using the virtual impedance generated by the public connection point harmonic voltage, such that the potential oscillations and resonance propagation in the parallel grid-connected converters can be mitigated. To validate the effectiveness of the active damper, simulations and experimental tests on a two converter-based setup are carried out. Simulation and experimental results are provided to verify the feasibility and validity of the proposed strategy.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277137).

Key words: impedance network; resonance; suppression strategy; grid-connected inverter; admittance

0 引言

逆变器具有灵活、高效的特点, 是新能源并网的主要接口^[1]。当多个逆变器连接到电网的同一个公共连接点时, 逆变器非理想的电源特性, 使得逆变器之间、逆变器与电网之间存在的谐波交互作用可能引发谐振^[2-4], 使系统出现过电压、过电流现象, 影响电网的电能质量, 甚至威胁系统的安全稳定运行。

多并网逆变器系统谐振抑制已成为当前研究特点之一。针对并网点谐波电压引起的系统谐振问题, 目前通常采用多 PR 调节器^[5-7]或者前馈电网电压的

方法^[8-9]。这些方法的本质是提高单个逆变器的阻抗模值来改变系统的阻抗特性, 以抑制系统的谐振。然而, 在弱电网中, 控制系统的截止频率随着电网阻抗的增大而降低, 当该截止频率低于 PR 调节器的谐振频率时会导致系统不稳定^[8]; 同样, 对并网点的电压前馈, 会引入电网阻抗电压的正反馈, 导致系统不稳定^[10]。针对该问题, 基于虚拟阻抗原理, 文献[11-12]通过电网电压谐波提取, 将谐振频率的谐波电压引入电流环控制, 以实现在逆变器输出端口处并联虚拟电阻, 提高系统在谐振频率处的阻尼, 抑制系统谐振。但该抑制策略需要在很宽的频带进行虚拟电阻控制, 不仅要求电流环具有较宽的带宽, 而且也牺牲了一定的逆变器容量。文献[13]提出了基于陷波器控制的光伏并网逆变器谐波抑制策略,

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51277137)

但文中没有详细论述陷波器设计方法。且文献[5-13]中所提出的控制策略都是通过提高单个逆变器输出阻抗,改善系统的阻抗特性,从而抑制系统谐振。但通过提高单个逆变器输出阻抗的控制方法,要求系统中的每一个并网逆变器都具有该控制功能,增加了逆变器的控制复杂度,降低了逆变器的有效容量。

本文将从改善电网等效阻抗的角度出发,提出了一种基于虚拟导纳的全局谐振抑制策略,该抑制策略通过控制并网点谐波电压,间接控制电网公共点等效谐波导纳,改变系统阻抗特性,抑制系统谐振。并以两个并网逆变器系统为例,仿真和实验验证了所提出控制策略的有效性。

1 谐振抑制机理分析

采用 PWM 调制的逆变器,其输出波形中含有大量开关频率整数倍附近的高频谐波,因此常在并网逆变器与电网之间加入滤波器进行滤波。与 L 滤波器相比,LCL 滤波器由于其具有体积小、滤波能力强等优点而得到广泛应用^[14]。同时多 LCL 型并网逆变器的谐振特性更加复杂^[15],因此,本文以 LCL 型并网逆变器为研究对象。

为了抑制 LCL 滤波器的谐振,多采用电容电流反馈的有源阻尼控制策略,即电网电流外环,电容电流内环的双环控制策略^[14, 16]。采用该控制策略的 LCL 型单相并网逆变器的结构如图 1 所示。

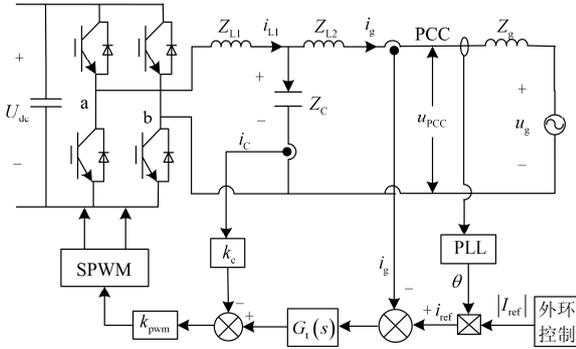


图 1 采用双电流闭环控制的 LCL 逆变器结构图
Fig. 1 System structure of single phase grid-connected inverter with LCL filter

图 1 中: Z_{L1} 和 Z_{L2} 分别为逆变器交流侧及电网侧的滤波电抗; Z_C 为滤波电容; Z_g 为电网等效内阻抗; u_g 为电网电压; i_g 为并网电流; i_C 为滤波器电容电流; U_{dc} 为逆变器直流侧电压。

图 2 为采用并网电流与电容电流双闭环控制的控制框图,其中 $G_i(s)$ 为并网电流环控制器传递函数, k_c 为电容电流反馈系数, k_{pwm} 为逆变桥增益。

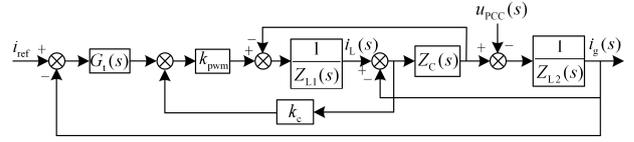


图 2 LCL 型逆变器双电流闭环控制框图

Fig. 2 Block diagram with dual-loop control scheme of grid-connected inverter

由图 2 可以得到 LCL 型并网逆变器输出电流表达式为

$$i_g = \frac{G_{x1}G_{x2}}{1+G_{x1}G_{x2}} \cdot i_{ref} - \frac{G_{x2}}{1+G_{x1}G_{x2}} \cdot u_{pcc} = G \cdot i_{ref} - Y \cdot u_{pcc} \quad (1)$$

式中:

$$G_{x1} = \frac{G_t k_{pwm} Z_C}{Z_{L1} + Z_C + k_c k_{pwm}} \quad (2)$$

$$G_{x2} = \frac{Z_{L1} + Z_C + k_c k_{pwm}}{Z_{L1}Z_{L2} + (Z_{L1} + Z_{L2})Z_C + k_c k_{pwm} Z_{L2}}$$

由式(1)可以得到单个 LCL 型并网逆变器的阻抗模型如图 3 所示,其中 G 为受控电流源的受控系数, Y 为并联导纳。

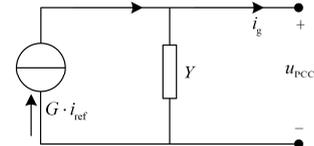


图 3 LCL 型并网逆变器阻抗模型

Fig. 3 Impedance model of the grid-connected inverter with LCL filter

当采用如图 3 所示的逆变器阻抗模型时,多 LCL 型并网逆变器等效模型如图 4 所示。

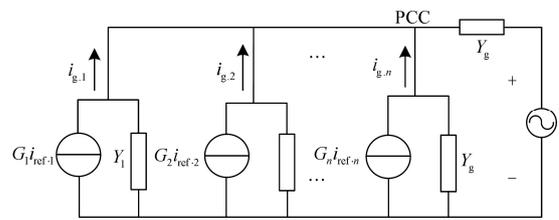


图 4 系统阻抗网络模型

Fig. 4 Impedance model of system

由图 4 可得

$$i_{g,i} = G_i \cdot i_{ref,i} - \sum_{k=1}^n (G_k \cdot i_{ref,k}) \cdot M_i - u_g \cdot N_i \quad (3)$$

$$M_i = \frac{Y_i}{\sum_{k=1}^n Y_k + Y_g}, \quad N_i = \frac{Y_g \cdot Y_i}{\sum_{k=1}^n Y_k + Y_g}$$

由式(3)可知, M_i 的极点即为系统的谐振点, 通过改变 Y_k 或者 Y_g 都可以改变系统的谐振特性, 现有的控制策略大多通过改变 Y_i 的方法改变系统的谐振特性, 本文通过改变等效 Y_g 改变系统的阻抗特性, 以改变系统谐振。

2 基于阻抗重构的谐振抑制策略及实现方案

假设在 PCC 处加入虚拟导纳 Y_f , 则系统阻抗网络如图 5 所示。

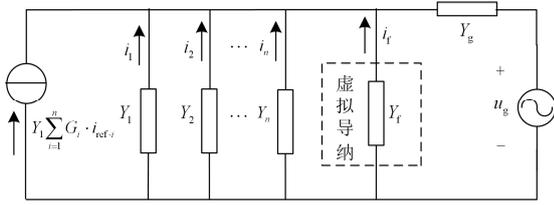


图 5 加入虚拟导纳后的系统阻抗网络

Fig. 5 Equivalent circuit of system with virtual admittance

由图 5 可得, 加入虚拟导纳之后第 i 台逆变器的输出电流表达式为

$$\begin{aligned} i_{g,i} &= G_i \cdot i_{\text{ref},i} - \sum_{k=1}^n (G_k \cdot i_{\text{ref},k}) \cdot \frac{Y_i}{L + Y_f} - u_g \cdot \frac{Y_g \cdot Y_i}{L + Y_f} \\ &= G_i \cdot i_{\text{ref},i} - \sum_{k=1}^n (G_k \cdot i_{\text{ref},k}) \cdot R_i - u_g \cdot S_i \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{式中: } L = \sum_{k=1}^n Y_k + Y_g; \quad R_i = \frac{Y_i}{L + Y_f}; \quad S_i = \frac{Y_g \cdot Y_i}{L + Y_f}。$$

对比分析式(3)与式(4)中的 M_i 与 R_i 以及 N_i 与 S_i 可知, 在谐振点附近 L 的幅值很小, 进而 M_i 与 N_i 的幅值很大, 使得系统中谐振频率附近的谐波被严重放大, 危害逆变器的并网电流以及电网的电能质量。要抑制系统的谐振并保证系统基波的控制不受影响, 要求虚拟导纳 Y_f 在谐振频率附近远大于 L 以减小 R_i 与 S_i 的幅值, 而在其他频率段则要求 Y_f 远小于 L , 从而不影响该频率段的控制。

由于带通滤波器具有在通带频率段增益很大, 而在其他频率段增益很小的特性, 符合全局谐振抑制所需的虚拟导纳要求。二阶带通滤波器传递函数为

$$H = A \frac{s(\omega_0/Q)}{s^2 + s(\omega_0/Q) + \omega_0^2} \quad (5)$$

式中: ω_0 为带通滤波器中心频率, 在该频率下带通滤波器的放大倍数最大; Q 为品质因素, 主要影响带通滤波器的宽度; A 为增益, 决定带通滤波器的幅值。

即令虚拟导纳为

$$Y_f = H = A \frac{s(\omega_0/Q)}{s^2 + s(\omega_0/Q) + \omega_0^2} \quad (6)$$

综合多逆变器系统的谐振特性和虚拟导纳特性可以确定虚拟导纳的参数设计原则。由谐振频率可以确定虚拟导纳的中心频率 ω_0 , 由所需抑制的频带宽度确定品质因素 Q , 由谐振抑制程度确定增益 A 。

为了实现式(6)的虚拟阻抗特性, 本文通过控制 PCC 的谐波电压来实现, 具体的控制策略如图 6 所示。

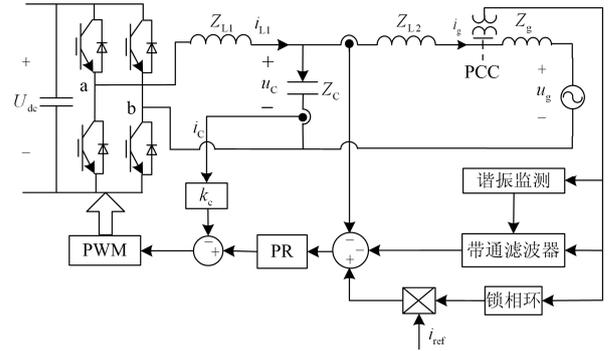


图 6 虚拟导纳控制框图

Fig. 6 Block diagram with virtual admittance control

图中谐振监测单元实现谐振频率在线检测, 从而确定带通滤波器的中心角频率和带宽。谐振检测已有一些研究成果^[17-18], 本文采用文献[18]中基于离散化快速离散傅里叶变换的谐振检测方法。图 6 中电流环 PR 控制器中的谐振控制仅需要对基波进行无差控制, 而不需要对谐波进行无差控制, 因为对谐波不要求实现无静差控制, 只要求控制能够实现所需求的谐波阻抗, 因此降低了电流环控制器的要求。

图 6 所提出的全局谐振抑制功能有以下两种实现方案。一种方案是在设计多并网逆变器时, 让其中一个并网逆变器在保证基本功能的同时, 承担谐振抑制功能。这台逆变器和普通逆变器的不同点在于容量的设计和控制部分: 容量方面除了实现基本功能外的容量, 还需要考虑谐振抑制所需求的容量; 而控制方面除了实现基本的并网逆变器的功能外, 还需要添加谐振抑制控制。另一种方案是系统中没有并网逆变器能够实现谐振抑制功能, 此时需要单独设计谐振抑制单元, 谐振抑制单元的拓扑结构和并联型 APF 的拓扑结构相同, 但其控制方法和静态谐波补偿的 APF 不同, 不是为了实现静态谐波补偿, 而是采用图 6 的谐振抑制控制策略, 实现全局谐振抑制功能的单元称为全局谐振抑制单元。含有全局谐振抑制单元的多逆变器并网系统结构图如图 7 所示。

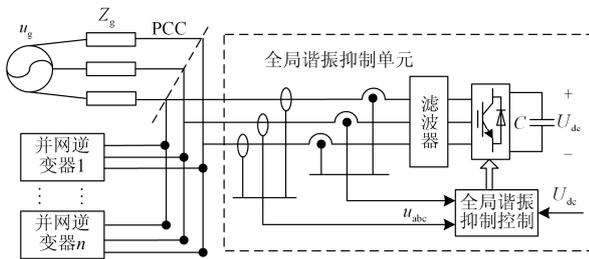


图 7 含全局谐振抑制单元的多逆变器并网系统

Fig. 7 Multi grid-connected inverters system with global resonance suppression unit

3 仿真与实验验证

3.1 仿真验证

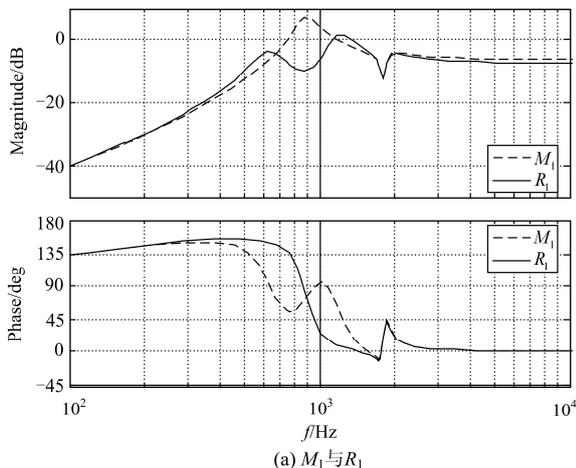
以逆变器 A 和逆变器 B 组成的两台并网逆变器系统为例，分析谐振抑制策略的效果。并网电网的电压为 220 V，电网的等效电感 L_g 为 1 mH。逆变器 A 和 B 的控制器参数如表 1 所示。

表 1 并网逆变器 A 和 B 参数

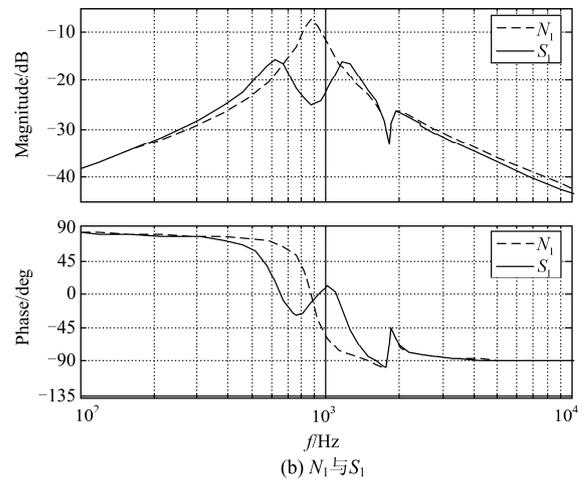
Table 1 Parameters of grid-connected inverters A and B

参数	逆变器	
	A	B
L_1/mH	2	3
$C/\mu\text{F}$	10	10
L_2/mH	0.5	0.8
L_g/mH	1	1
U_{dc}/V	500	500
k_p	0.1	0.1
k_r	100	150
k_c	0.15	0.08

应用文献[14]的方法分析可知，系统谐振频率为 850 Hz，根据参数设计原则确定虚拟导纳的参数为： $\omega_0=1700\pi$ ， $A=0.1$ ， $Q=3$ 。加入虚拟导纳前后反映系统谐振特性的 M_1 与 R_1 以及 N_1 和 S_1 的伯德图分别如图 8(a)和图 8(b)所示。图 8(a)中 M_1 为加入



(a) M_1 与 R_1



(b) N_1 与 S_1

图 8 加入虚拟导纳对系统谐振特性的影响

Fig. 8 Influence of virtual admittance on resonance characteristics

虚拟导纳前系统谐振特性； R_1 为加入虚拟导纳后系统谐振特性；图 8(b)中 N_1 为加入虚拟导纳前系统谐振特性； S_1 为加入虚拟导纳后系统谐振特性。

图 8 的仿真果表明：加入虚拟导纳对谐振频率段 700~1000 Hz 有很好的抑制效果，而对其他频率段影响很小，对基波控制没有影响。验证了谐振抑制策略的有效性。

3.2 实验验证

为验证谐振抑制策略的有效性，以逆变器 A 和 B 为例，搭建了两台并网逆变器实验平台如图 9 所示。

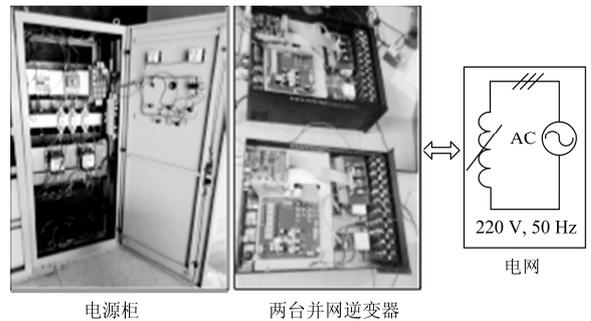


图 9 实验平台结构图

Fig. 9 Structure of experimental platform

实验中逆变器各参数同表 1 所示。两台逆变器的采样频率均为 25.8 kHz，开关频率均为 12.8 kHz，直流母线电压均为 500 V。电网的电压为 220 V。为了验证谐振抑制效果，在 A 逆变器参考电流中加入 3%的 13~21 次奇数次谐波，图 10 为加入谐振抑制策略前后逆变器 B 的并网电流波形，图 11 为加入谐振抑制策略前后，逆变器 B 并网电流 THD 分析结果。其中图 11(a)为加入抑制策略前，图 11(b)为加入谐

振抑制策略后。

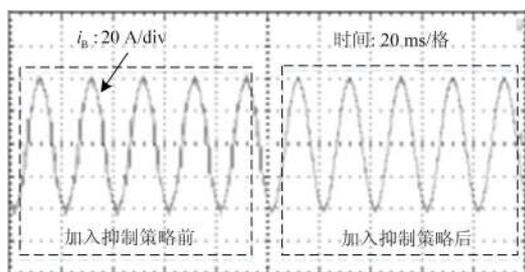
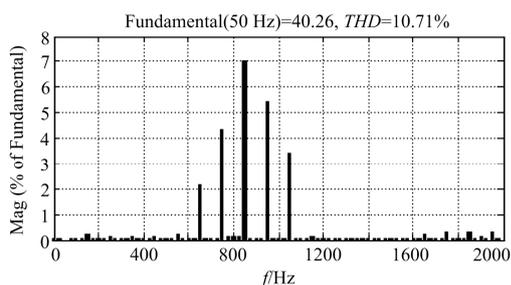
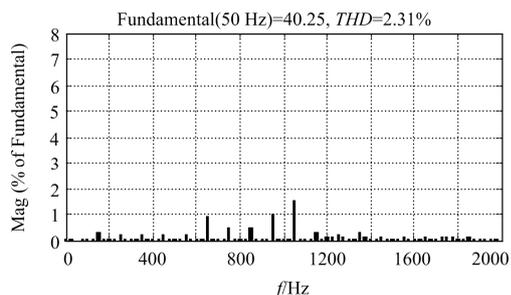


图 10 加入谐振抑制策略前后, 逆变器 B 的并网电流

Fig. 10 Experimental currents waveform of inverter B before and after applying the harmonic suppression strategy



(a) 加入谐振抑制策略前



(b) 加入谐振抑制策略后

图 11 加入谐振抑制策略前后, 逆变器 B 并网电流的 THD 分析

Fig. 11 THD of the grid-connected current of inverter B before and after applying the harmonic suppression strategy

比较图 10 中加入虚拟导纳前后电流波形以及图 11(a)和图 11(b)中加入虚拟导纳前后电流的 THD 分析结果可知, 加入谐振抑制策略后, 有效地抑制了谐振频率附近的谐波, 明显减小了电流的畸变率。验证了全局谐振抑制策略的有效性。

4 结论

1) 针对多并网逆变器谐振问题, 建立了多并网逆变器系统等效模型, 分析了多并网逆变器谐振抑制机理。

2) 基于导纳重构原理, 提出了基于虚拟导纳的

全局谐振抑制策略, 并给出了该策略的两种实现方法和控制参数设计方法。本文所提出的全局谐振抑制策略仅在谐振频率附近对电网阻抗进行重构, 不影响基波控制性能。

3) 本文所提出的全局谐振抑制策略仅需要一个逆变器或一个附加的类似有源滤波器拓扑结构装置承担谐振抑制功能, 其他并网逆变器不需要承担谐振抑制功能, 因此减弱了其他并网逆变器的控制设计复杂度, 具有一定的工程价值。

参考文献

- [1] 陈汝昌, 陈飞, 张帆, 等. 新能源电网中微电源并网控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 55-60. CHEN Ruchang, CHEN Fei, ZHANG Fang, et al. Control strategies for grid-connected microsource in new energy power systems[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 55-60.
- [2] 张兴, 余畅舟, 刘芳, 等. 光伏并网多逆变器并联建模及谐振分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 336-345. ZHANG Xing, YU Changzhou, LIU Fang, et al. Modeling and resonance analysis of multi-paralleled grid-tied inverters in PV systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 336-345.
- [3] 胡伟, 孙建军, 马谦. 多个并网逆变器间的交互影响分析[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2511-2518. HU Wei, SUN Jianjun, MA Qian. Analysis on interactive influences among multi grid-connected inverters[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2511-2518.
- [4] 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. ZHANG Zhanbin, ZHAI Hongxia, XU Huabo, et al. Study on output harmonic of multi-inverter grid-connected in photovoltaic plant[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 142-146.
- [5] JALILI K, BERNET S. Design of LCL filters of active-front-end two-level voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(5): 1674-1689.
- [6] LISERREE M, DELL AQUILA A, BLAABJERG F. Genetic algorithm-based design of the active damping for an LCL-filter three-phase active rectifier[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(1): 76-86.
- [7] ZMOOD D N, HOLMES D G. Stationary frame current regulation of PWM inverters with zero steady-state error[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(3): 814-822.
- [8] PARK S Y, CHEN C L, LAI J S, et al. Admittance

- compensation in current loop control for a grid-tie LCL fuel cell inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(4): 1716-1723.
- [9] 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 the weak grid condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(15): 2327-2335.
- [10] TUMER R, DUKE R, WALTON S. Stability and bandwidth implications of digitally controlled grid-connected parallel inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(11): 3685-3694.
- [11] WANG Xiongfei, BLAABJERG F, CHEN Z. Synthesis of variable harmonic impedance in inverter-interfaced distributed generation unit for harmonic damping throughout a distribution network[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(4): 1407-1417.
- [12] WANG Xiongfei, BLAABJERG F, LISERRE M, et al. An active damper for stabilizing power-electronics-based AC systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(7): 3318-3329.
- [13] 田鹏, 宣文华, 牛益国. 基于陷波控制的 LCL 型光伏并网逆变器谐波抑制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 82-88.
TIAN Peng, XUAN Wenhua, NIU Yiguo. Suppression of harmonic resonance for photovoltaic grid-connected inverter with LCL filter based on notch filter control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 82-88.
- [14] 刘飞, 段善旭, 查晓明. 基于LCL滤波器的并网逆变器双环控制设计[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(增刊1): 234-240.
LIU Fei, DUAN Shanxu, ZHA Xiaoming. Design of two loop controller in grid-connected inverter with LCL filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(S1): 234-240.
- [15] 胡伟, 孙建军, 马谦, 等. 多逆变器并网系统谐振特性分析[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(7): 93-98.
HU Wei, SUN Jianjun, MA Qian, et al. Resonant characteristics of multi-inverter grid-connection system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(7): 93-98.
- [16] 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[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 133-142.
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.
- [17] YUE X, FANG Z, WANG F, et al. A novel adaptive frequency injection method for power electronic system impedance measurement[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(12): 6700-6711.
- [18] ELISABETTA L, PERICLE Z, MARK S, et al. Real-time estimation of fundamental frequency and harmonics for active shunt power filtering aircraft electrical systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(8): 2875-2884.

收稿日期: 2016-07-12; 修回日期: 2016-10-09

作者简介:

胡伟(1981—), 女, 通信作者, 博士, 工程师, 研究方向为微电网建模、电能质量、直流输电控制保护。E-mail: huweitest@163.com

(编辑 葛艳娜)