

文章编号:1006-2467(2020)10-1065-09

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.046

LCL 型并网逆变器并联谐振机理分析及抑制方法

陶海军, 周犹松, 张国澎, 郑征

(河南理工大学 电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 针对两个并网逆变器并联系统,利用叠加定理分析了各逆变器对并网电流的影响,对并网电流进行分解,研究了由交互电流和公共电流产生谐振的机理,对比分析了相同和不同容量多个并网逆变器并联系统的谐振频率点特性.基于并联系统中交互电流产生的谐振频率点,设计了数字陷波器,引入到传统电容电流反馈有源阻尼控制中,实现了对基波信号的无静差控制,满足了此类系统的并网要求.搭建了相同和不同容量的逆变器并联系统模型,仿真结果验证了所提策略的正确性和有效性.

关键词: 多逆变器并联;不同容量;数字陷波器;谐振

中图分类号: TM 464

文献标志码: A

Parallel Resonance Mechanism Analysis and Suppression Method for LCL Type Grid-Connected Inverter

TAO Haijun, ZHOU Yousong, ZHANG Guopeng, ZHENG Zheng

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China)

Abstract: For the parallel system of two grid-connected inverters, the effect of each inverter on the grid-connected current is analyzed by using the superposition theorem, and the grid-connected current is decomposed. Besides, the mechanism of resonance generated by the interaction current and the common current is studied, and the resonance frequency point characteristics of parallel systems with multiple grid-connected inverters of the same and different capacities are compared and analyzed. Moreover, based on the resonant frequency point generated by the interactive current in the parallel system, a digital notch filter is designed and introduced into the traditional capacitive current feedback active damping control to realize the static-free control of the fundamental signal, which meets grid-connected requirements of such systems. Furthermore, the models of parallel systems of inverters with the same and different capacities are built. The simulation results verify the correctness and effectiveness of the proposed strategy.

Key words: parallel connection of multiple inverters; different capacity; digital notch filter; resonance

近年来,随着能源和环境问题的日益突出,可再生能源的并网发电技术得到了越来越多的关注.其

中,并网逆变器是风能、光伏发电等分布式发电系统的核心组成部分,因此受到了广泛的关注^[1-2]. 相较

收稿日期:2019-02-23

基金项目:河南省科技攻关项目(192102210228)

作者简介:陶海军(1980-),男,副教授,研究方向为微电网和开关电源技术.

通信作者:张国澎,男,博士,讲师,电话(Tel.):18623913296; E-mail: hpoyz@163.com.

于L型滤波器,LCL型滤波器对高频谐波抑制能力强,具有体积小、成本低等优势,目前被广泛应用于各类并网设备中^[3].在实际应用中,单个LCL型并网逆变器并网运行时能满足并网要求^[4-5].然而,多个LCL型并网逆变器同时并联运行时,系统会发生谐振和不稳定的现象.多个并网逆变器并联运行的谐振问题已经影响了新能源并网发电技术的大规模推广及应用^[6-7].因此,对于多个并网逆变器并网谐振原理及其谐振抑制策略的研究具有重要意义.

针对多个并网逆变器并联系统存在谐振的问题,国内外学者展开了多方面的研究.文献[8]提出针对1种多个并网逆变器系统的建模和控制方法,指出 n 个并网逆变器并联运行时,系统中单台并网逆变器的等效电网阻抗可等效为实际电网阻抗的 n 倍.文献[9-11]分析了电网阻抗对多个并网逆变器系统LCL谐振特性的影响,这些方法虽然分析了多并网逆变器并联系统的谐振机理,但并未考虑并网逆变器之间交互作用,未对其影响进行分析.为讨论并网逆变器之间以及并网逆变器与电网之间的交互作用,文献[12]提出了1种基于等效电网阻抗的直观分析方法,对系统的谐振频率特性和稳定性进行了分析.文献[13]讨论了在弱电网情况下的交互作用,提出了交互电流和公共电流的概念,并对系统稳定性分为交互稳定性和公共稳定性进行分析.在文献[12-13]的基础上,文献[14]揭示了由交互电流产生的谐振现象,并分析了逆变器之间交互谐振对系统谐振和动态特性产生的影响.但文献[12-14]中假设所有并网逆变器参数、控制策略及控制参数均相同,而在实际应用场合中,由于并网容量、输出电流以及LCL滤波器参数等不同,直接影响多逆变器并联系统谐振频率和谐振尖峰的个数,增加了对多逆变器并联系统谐振特性分析的难度^[15].因此,涉及不同容量逆变器并联系统的文献较少.

为深入研究多并网逆变器并联系统的谐振机理,本文以两台并网逆变器并网系统为例,利用叠加定理分析了各逆变器对并网电流的影响,对并网电流进行分解,对比分析了相同和不同容量并网逆变器并联系统的谐振频率点特性.基于多逆变器并联系统中由交互电流产生的谐振频率点,设计了数字陷波器,引入到传统电容电流反馈有源阻尼控制中,实现了此类系统对多谐振频率点的抑制,满足了系统的并网要求.最后,在MATLAB/Simulink仿真平台中搭建了相同和不同额定容量逆变器并联系统仿真模型,验证了所提策略对于弱电网下多并网逆变器并联运行的可行性.

1 两逆变器并联系统结构与控制模型

两台逆变器并联拓扑结构如图1所示,每组逆变单元分别通过LCL滤波器接入并网公共点(PCC),经电网阻抗与电网连接.图中: U_{dcn} 为逆变器 n 的直流侧电压($n=1,2$); Z_{1n} 、 Z_{Cn} 、 Z_{2n} 为逆变器 n 的逆变器侧电感感抗、滤波电容容抗及网侧电感感抗; U_{0n} 为逆变器 n 的逆变桥输出电压; Z_g 为电网电感感抗; U_g 为电网电压; i_{2n} 为逆变器 n 并网输出电流; i_g 为并网总电流.

$$\left. \begin{aligned} Z_{1n} &= sL_{1n} \\ Z_{2n} &= sL_{2n} \\ Z_{Cn} &= 1/(sC_n) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: s 为拉普拉斯变换因子; L_{1n} 为逆变器侧电感; L_{2n} 为网侧电感; C_n 为滤波电感.

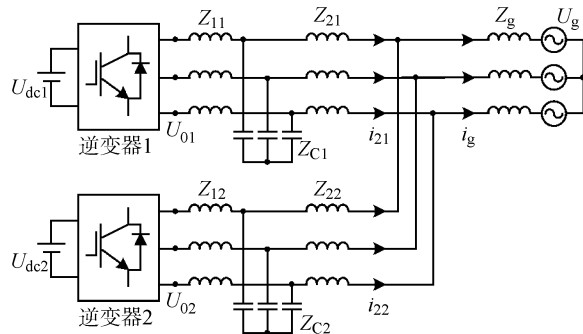


图1 两个并网逆变器并联运行系统模型

Fig. 1 Parallel operation system model of two grid-connected inverters

单个并网逆变器电流环控制结构如图2所示.图中: Z_1 、 Z_2 及 Z_C 为逆变器1的逆变器侧电感感抗、网侧电感感抗及滤波电容容抗; i_c 、 i_2 为逆变器1的滤波电容电流和并网输出电流; H_{11} 为逆变器1的电容电流反馈系数; H_{21} 为逆变器1的并网电流采样系数; u_M 为调制波; i_2^* 为 i_2 的指令值; I^* 为电压给定

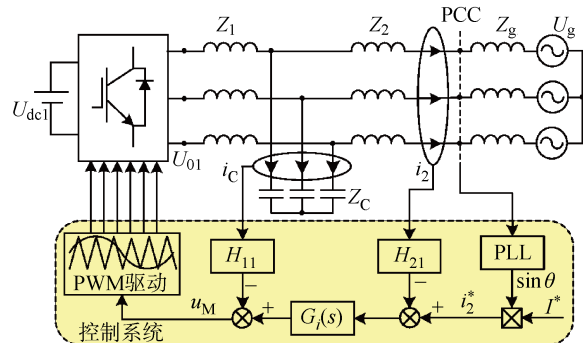


图2 单个并网逆变器控制结构图

Fig. 2 Control structure diagram of single grid-connected inverter

值。图中两个椭圆表示调制信号,与三角载波信号调制,生成 PWM 波。单个并网逆变器均采用独立的电容电流有源反馈方式进行并网。对并网逆变器而言,其首要目标是控制 i_2 ,使其与 U_g 同步,并使其幅值为 I^* 。通常 U_g 的相位由锁相环(PLL)获得, i_2^* 由外部电压环产生。 i_2 的采样信号与 i_2^* 进行比较,得到的误差信号送入电流调节器 $G_i(s)$ 中。通过反馈电容电流 i_c 实现 LCL 滤波器谐振尖峰的有源阻尼,从控制器 $G_i(s)$ 的输出 u_r 中减去 i_c 的反馈信号 u_{ic} ,可以得到调制波 u_M 。

根据图 2 可以推导出逆变器旋转坐标系下电流环 s 域控制模型,如图 3 所示。图中: K_{PWM} 为 u_M 到 u_{01} 的传递函数。

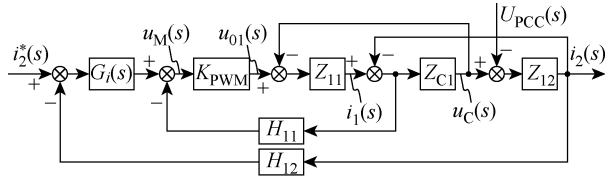


图 3 单个并网逆变器的电流环控制策略

Fig. 3 Current loop control strategy of single grid-connected inverter

2 两逆变器并联系统的建模与谐振分析

2.1 并联系统的阻抗模型

对系统而言, U_g 可视为扰动量,对 LCL 滤波器谐振尖峰的阻尼没有影响。为便于分析两逆变器之间的关系,可将 U_{0n} 等效为电压源^[12],则系统控制框图可简化为图 4(a)。两逆变器并联系统是多输入多输出的系统,其中, U_{0n} 为输入变量, i_{2n} 为输出控制变量。由于逆变器 1、2 采用相同的电路结构和控制方式,本文以逆变器 1 的并网电流 i_{21} 为例进行分析。由于 2 组逆变器是并联运行,所以每组逆变桥输出电压 U_{0n} 均会对 i_{21} 产生影响。采用叠加原理对 i_{21} 与 U_{0n} 的关系进行分析。如图 4(b)所示,系统可以分为两部分:一部分为逆变桥 1 自身输出电压 U_{01} 对并网电流 i_{21} 的作用;另一部分为逆变桥 2 输出电压 U_{02} 对并网电流 i_{21} 的影响。因此,对于 1 个多逆变器并联系统,逆变器与逆变器之间存在交互作用。

由图 4(b)、4(c)可得 U_{0n} 与 i_{21} 之间的传递函数为

$$G_{11} = \frac{i_{21}}{u_{01}} = \frac{Z_{C1}(N + 2Z_g P)}{2[MN + Z_g(MP + NQ)]} + \frac{Z_{C1}N}{2[MN + Z_g(MP + NQ)]} \quad (2)$$

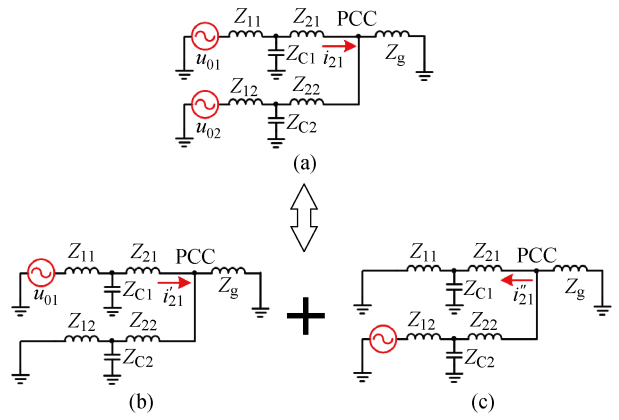


图 4 并联逆变器叠加原理的等效电路图

Fig. 4 Equivalent circuit diagram of parallel inverter superposition principle

$$G_{12} = \frac{i_{21}}{u_{02}} = -\frac{Z_{C2}(M + 2Z_g Q)}{2[MN + Z_g(MP + NQ)]} + \frac{Z_{C2}M}{2[MN + Z_g(MP + NQ)]} \quad (3)$$

式中:参数 $M = Z_{11}Z_{21} + Z_{11}Z_{C1} + Z_{21}Z_{C1}$; $N = Z_{12}Z_{L22} + Z_{12}Z_{C2} + Z_{22}Z_{C2}$; $P = Z_{12} + Z_{C2}$; $Q = Z_{11} + Z_{C1}$ 。 Z_{11} 、 Z_{21} 分别为逆变器 1 的逆变侧电感电抗和网侧电感电抗, Z_{12} 、 Z_{22} 分别为逆变器 2 的逆变侧电感电抗和网侧电感电抗。

同理,可得 U_{0n} 与 i_{22} 之间的传递函数为

$$G_{21} = \frac{i_{22}}{u_{01}} = -\frac{Z_{C1}(N + 2Z_g P)}{2[MN + Z_g(MP + NQ)]} + \frac{Z_{C1}N}{2[MN + Z_g(MP + NQ)]} \quad (4)$$

$$G_{22} = \frac{i_{22}}{u_{02}} = \frac{Z_{C2}(M + 2Z_g Q)}{2[MN + Z_g(MP + NQ)]} + \frac{Z_{C2}M}{2[MN + Z_g(MP + NQ)]} \quad (5)$$

由于两逆变器并联系统是多输入多输出系统,则 U_{0n} 与 i_{2n} 之间的关系为

$$\begin{bmatrix} i_{21} \\ i_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{01} \\ u_{02} \end{bmatrix} \quad (6)$$

由式(2)~(6)可得:

$$\left. \begin{aligned} i_{21} &= G_{11}u_{01} + G_{12}u_{02} = \frac{(N + 2Z_g P)Z_{C1}u_{01} - (M + 2Z_g Q)Z_{C2}u_{02}}{2[MN + Z_g(MP + NQ)]} + \frac{NZ_{C1}u_{01} + MZ_{C2}u_{02}}{2[MN + Z_g(MP + NQ)]} \\ i_{22} &= G_{21}u_{01} + G_{22}u_{02} = \frac{(M + 2Z_g Q)Z_{C2}u_{02} - (N + 2Z_g P)Z_{C1}u_{01}}{2[MN + Z_g(MP + NQ)]} + \frac{NZ_{C1}u_{01} + MZ_{C2}u_{02}}{2[MN + Z_g(MP + NQ)]} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

则 i_g 为

$$i_g = i_{21} + i_{22} = \frac{NZ_{C1}u_{01} + MZ_{C2}u_{02}}{MN + Z_g(MP + NQ)} \quad (8)$$

通过对比 i_{2n} 和 i_g 可知,逆变器 n 并网电流受到由逆变器 1、2 的共同作用,均由两部分组成.一部分电流存在于逆变器之间,且不流入电网中,每组逆变器的电流大小相等,但方向相反,称为交互电流,其表达式为

$$i_{ic} = \frac{(N + 2Z_gP)Z_{C1}u_{01} - (M + 2Z_gQ)Z_{C2}u_{02}}{2[MN + Z_g(MP + NQ)]} \quad (9)$$

另一部分电流则流入电网中,每组逆变器的电流大小相等,且方向相同,称为公共电流,其表达式为

$$i_{com} = \frac{NZ_{C1}u_{01} + MZ_{C2}u_{02}}{2[MN + Z_g(MP + NQ)]} \quad (10)$$

系统中交互电流与公共电流的关系如图 5 所示.

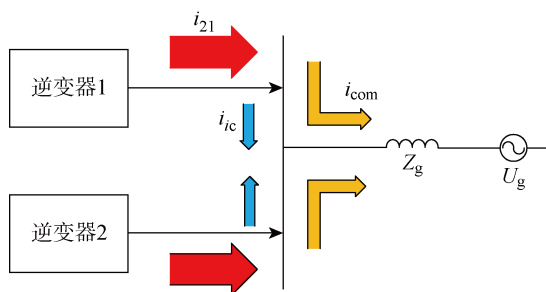


图 5 并联系统的交互电流和公共电流

Fig. 5 Interactive current and common current for paralleled system

2.2 并联系统的谐振分析

由式(9)可知 u_{0n} 与 i_{ic} 的传递函数为

$$G_{ic,1} = \frac{i_{ic}}{u_{01}} = \frac{(N + 2Z_gP)Z_{C1}}{2[MN + Z_g(MP + NQ)]} \quad (11)$$

$$G_{ic,2} = \frac{i_{ic}}{u_{02}} = -\frac{(M + 2Z_gQ)Z_{C2}}{2[MN + Z_g(MP + NQ)]} \quad (12)$$

由式(10)可知 u_{0n} 与 i_{com} 的传递函数为

$$G_{com,1} = \frac{i_{com}}{u_{01}} = \frac{NZ_{C1}}{2[MN + Z_g(MP + NQ)]} \quad (13)$$

$$G_{com,2} = \frac{i_{com}}{u_{02}} = \frac{MZ_{C2}}{2[MN + Z_g(MP + NQ)]} \quad (14)$$

由式(13)、(14)可求得两谐振频率分别为

$$\omega_{res,1} = \sqrt{\frac{A + \sqrt{B}}{2D}} \quad (15)$$

$$\omega_{res,2} = \sqrt{\frac{A - \sqrt{B}}{2D}} \quad (16)$$

式中:

$$\left. \begin{aligned} A &= C_1L_{11}[(L_{12} + L_{22})(L_{21} + L_g) + L_{21}L_g] + \\ &\quad C_2L_{12}[(L_{11} + L_{21})(L_{22} + L_g) + L_{22}L_g] \\ B &= C_1L_{11}[(L_{12} + L_{22})(L_{21} + L_g) + L_{21}L_g] - \\ &\quad C_2L_{12}[(L_{11} + L_{21})(L_{22} + L_g) + L_{22}L_g]^2 + \\ &\quad 4C_1C_2(L_{11}L_{21}L_g)^2 \\ D &= L_{11}L_{21}C_1C_2(L_{21}L_{22} + L_{21}L_g + L_{22}L_g) \end{aligned} \right\}$$

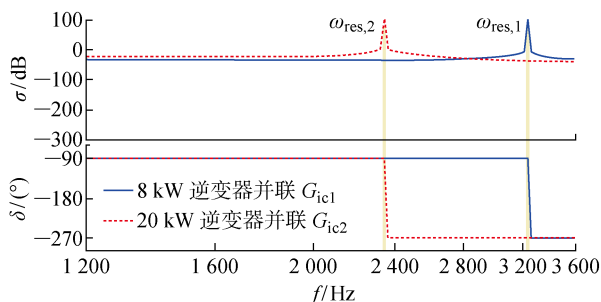
当采用相同容量逆变器并联运行时,谐振频率为

$$\left. \begin{aligned} \omega_{res,1} &= \sqrt{\frac{L_{11} + L_{21}}{L_{11}L_{21}C_1}} \\ \omega_{res,2} &= \sqrt{\frac{L_{11} + L_{21} + 2L_g}{L_{11}C_1(L_{21} + 2L_g)}} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

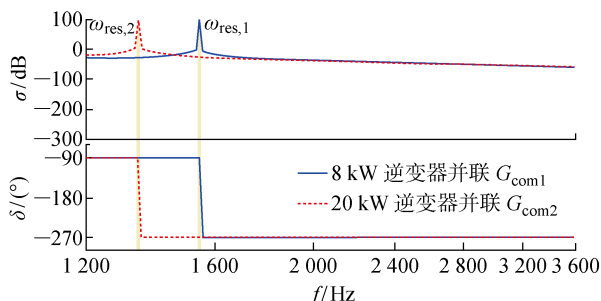
式中: L_g 为电网阻抗.

图 6 所示为采用相同额定容量逆变器并联系统传递函数 G_{ic} 、 G_{com} 的幅频特性图. 图中: f 为频率; δ 为相位; σ 为幅值. 由图 6 和式(17)可以看出,交互电流的谐振仅受 $\omega_{res,1}$ 的影响,该谐振点与 LCL 滤波器的参数有关,与 LCL 滤波器自身谐振频率相同. 而公共电流仅受到 $\omega_{res,2}$ 的影响,该谐振频率与 LCL 滤波器参数有关,也与 L_g 均有关. 而 n 台相同逆变器并网系统相当于每台逆变器的电网总阻抗等效增大 N 倍^[4],此时系统谐振频率 ω_r 与公共电流谐振频率 $\omega_{res,2}$ 相同,即

$$\omega_r = \omega_{res,2} = \sqrt{\frac{L_{11} + L_{21} + 2L_g}{C_1L_{11}(L_{21} + 2L_g)}} \quad (18)$$



(a) 交互电流传递函数 G_{ic} 波特图



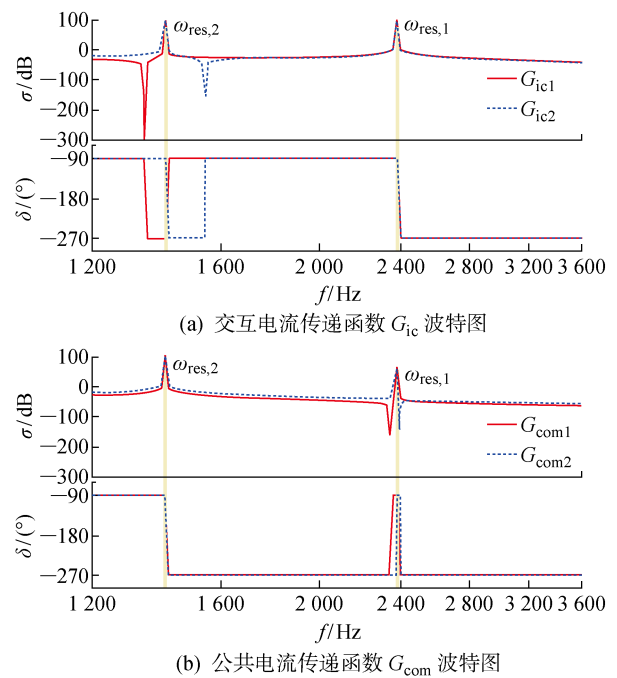
(b) 公共电流传递函数 G_{com} 波特图

图 6 相同额定容量并联逆变器的幅频特性

Fig. 6 Amplitude frequency characteristics of parallel inverters with the same rated capacity

图 7 所示为采用不同额定容量逆变器并联系统传递函数 G_{ic} 、 G_{com} 的幅频特性图。与相同额定容量逆变器并联系统不同的是,采用不同容量逆变器并联时,两谐振点同时作用于交互电流、公共电流,且 $\omega_{res,1}$ 和 $\omega_{res,2}$ 均发生了偏移,两谐振点的大小与每台逆变器的 LCL 滤波器参数及 Z_g 均相关。

单台逆变器并联系统时,逆变器只与电网阻抗



(a) 交互电流传递函数 G_{ic} 波特图

(b) 公共电流传递函数 G_{com} 波特图

图 7 不同额定容量并联逆变器的幅频特性

Fig. 7 Amplitude frequency characteristics of parallel inverters with different rated capacities

之间存在交互作用,采用有源阻尼控制能够有效抑制单个谐振尖峰;而多台逆变器并联系统中每组逆变器分别采用独立并网控制,每组逆变器有源阻尼能对 $\omega_{res,2}$ 起到抑制作用,但对于 $\omega_{res,1}$ 未起到阻尼抑制。因此,传统有源阻尼抑制并不适用于多逆变器并联运行系统。

3 并联系统谐振抑制策略

3.1 改进的系统控制框图

当单个并网逆变器并网时,采用传统电容电流反馈有源阻尼方式能够有效抑制由 LCL 滤波器和电网交互作用产生的单谐振尖峰;而当多个逆变器同时并联运行时,由于逆变器之间交互谐振的存在,系统会出现谐振或不稳定的现象。

针对两逆变器并联系统的多谐振问题,本文采用基于数字陷波器的电容电流有源阻尼方法。图 8 为改进的系统控制框图。在电容电流有源阻尼抑制的基础上,依据交互谐振点设计了相应的数字陷波器,引入电流环控制器,对系统中交互谐振进行抑制。当系统中公共谐振点发生轻微偏移时,电容电流反馈仍能实现对其阻尼抑制^[16-17];当陷波器的陷波频率与交互谐振频率相等时,数字陷波器会提供 1 个与交互频率相反的反谐振尖峰来抵消系统的正谐振尖峰,而在其余频段,数字陷波器阻尼的增益为 0,不会影响其余频段的幅频特性。通过数字陷波器和电容电流反馈有源阻尼的共同作用,实现了此类系统中交互谐振和公共谐振的共同抑制。

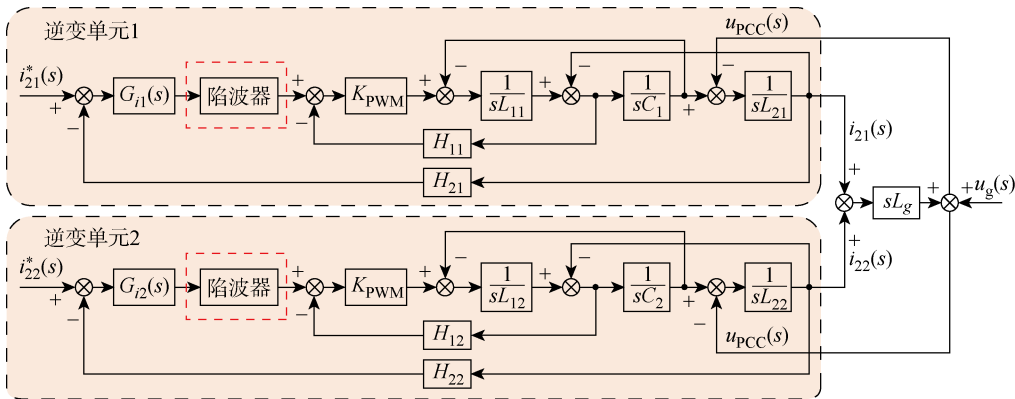


图 8 基于数字陷波器的电容电流反馈控制框图

Fig. 8 Capacitance current feedback control block diagram based on digital notch

3.2 数字陷波器的设计

本文选取的数字陷波器为典型的二阶陷波器,具有计算量小、频率选择性好的优点,其传递函数表达式为

$$G_x(s) = \frac{s^2 + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (19)$$

式中: ω_n 为陷波器的中心角频率,取值为 $\omega_{res,1}$; ζ 为阻尼系数,其取值的大小会影响到陷波器的抗扰动

能力. 为使系统能保持良好的稳定性和响应速度, ζ 取值为工程上的最佳阻尼比 0.707.

针对两逆变器并联系统,本文选取两组不同容量的逆变器进行并联为例进行说明,两组逆变器的参数如表 1 和 2 所示. 其中,三相全桥逆变器采用正弦脉宽调制 (SPWM) 控制, K_{PWM} 可近似表示为

$$K_{\text{PWM}} = u_{\text{M}}/2U_{\text{tri}}$$

(20)

式中: U_{tri} 为三角载波的幅值.

表 1 并网逆变器主要参数

Tab. 1 Main parameters of grid-connected inverters

参数	逆变器 1	逆变器 2
直流侧电压/V	700	700
逆变器侧电感/mH	2.6	1
滤波电容/uF	8	20
电网侧电感/mH	0.7	0.3
容量/kW	8	20
三角载波幅值/V	3	3
开关频率/kHz	12	12
采样频率/kHz	20	20
电容电流系数	0.67	0.252
并网电流系数	0.24	0.09

表 2 电网参数

Tab. 2 Parameters of power grid

参数	取值
电网电压/V	220
基波频率/Hz	50
电网电感/mH	1

当容量为 8 kW 的两组相同逆变器并联运行时,由式(13)可知,数字陷波器的谐振角频率为 $\omega_n =$

$\omega_{\text{res},1} = 15\,055\text{ rad/s}$. 采样时间 $T = 1 \times 10^{-4}\text{ s}$, 利用双线性变化法对其进行离散化,陷波器的传递函数为

$$G_1(z) = G_1(s) \Big|_{s=\frac{2(z-1)}{T(z+1)}} = \frac{18.27z^2 - 27.47z + 18.27}{26.78z^2 - 27.47z + 9.75}$$

(21)

式中: z 为变换因子. 同理,容量为 8 kW、20 kW 两组不同逆变器并联运行时,数字陷波器的谐振角频率为 $\omega_n = \omega_{\text{res},1} = 14\,955\text{ rad/s}$,陷波器的传递函数为

$$G_2(z) = G_2(s) \Big|_{s=\frac{2(z-1)}{T(z+1)}} = \frac{6.236z^2 - 3.528z + 6.236}{6.561z^2 - 3.528z + 5.911}$$

(22)

4 系统仿真

为了验证本文提出的基于数字陷波器的电容电流有源阻尼方法的正确性和有效性,用 MATLAB/Simulink 建立了系统仿真模型.

4.1 两相同容量并网逆变器并网运行

当采用容量为 8 KW 的两组逆变器 1 并联运行时,在时间 $t = 0.2\text{ s}$ 时由改进控制方式切换为传统控制方式,图 9 为 i_{21} 、 i_{22} 、 i_{g} 和并网电压 U_{PCC} 波形.

由图 9 可知: $t < 0.2\text{ s}$ 时两组并网逆变器均能实现稳定运行,此时两组逆变器输出电流的谐波总畸变率 (THD) 分别为 1.51%、1.48%,并网总电流的 THD 为 0.89%,且并网公共点 PCC 处电压稳定; $t = 0.2\text{ s}$ 时,控制方式由改进控制方式转换为传统控制方式,两组逆变器输出电流、并网总电流和并网公共点 PCC 处电压均发生谐振,系统不稳定. 因此,采用基于数字陷波器的电容电流反馈控制策略能够消除交互电流引起的谐振,并网电能质量得到了明显改善,有效降低了并网电流的总谐波畸

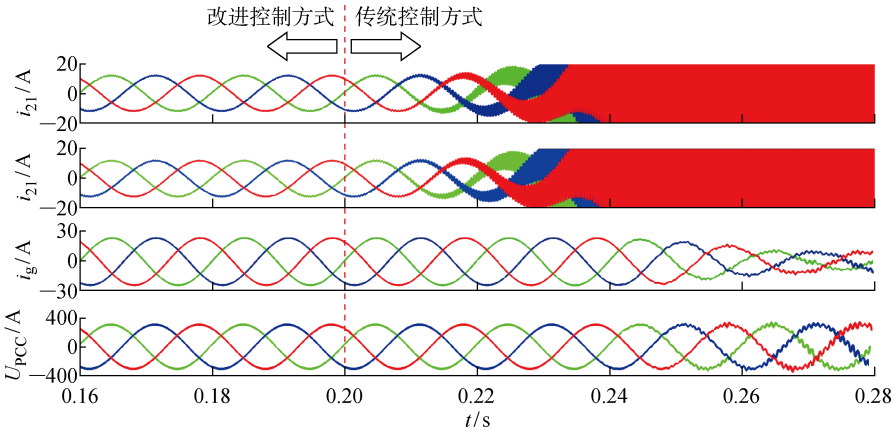


图 9 两组 8 kW 逆变器并联运行仿真结果

Fig. 9 Simulation results of parallel operation of two 8 kW inverters

变率.

图 10 为两组逆变器并联运行时,在 $t=0.2\text{ s}$ 时断开第 2 组逆变器时的运行状态对比图. 通过对比可知: $t<0.2\text{ s}$ 时,两组并网逆变器均能实现稳定运行,并网电流均满足并网要求,且并网公共点 PCC 处电压稳定;而 $t=0.2\text{ s}$ 时,当第 2 组逆变器离网时,第 1 组逆变器仅在切换时有轻微震荡,第 1 组逆变器仍能稳定运行,此时并网电流的 THD 为 0.99% . 因此,当系统由两台逆变器并网运行切换为单台逆变器并网运行时,并网电流在 1 个周期内能迅速达到稳定状态,具有快速动态响应能力.

4.2 两不同容量并网逆变器并网运行

当采用额定容量为 8 KW 的逆变器 1 和 20 kW 的逆变器 2 并联运行时,两逆变器的电流环控制方

式在 $t=0.2\text{ s}$ 时由改进方式切换为传统方式,图 11 为 i_{21} 、 i_{22} 、 i_g 和 U_{PCC} 波形.

由图 11 可知: $t<0.2\text{ s}$ 时,两组并网逆变器均能实现稳定运行,此时两组逆变器输出电流的 THD 分别为 1.66% 、 1.03% ,并网总电流的 THD 为 0.88% ,且并网公共点 PCC 处电压稳定;而 $t=0.2\text{ s}$ 时,控制方式由改进方式转换为传统方式时,两组并网逆变器输出电流、并网总电流和并网公共点 PCC 处电压均发生谐振,系统不稳定. 因此,采用基于数字陷波器的电容电流反馈控制策略对不同容量逆变器并联系统也能实现良好的谐振抑制效果.

逆变器 1 和逆变器 2 并联运行, $t=0.2\text{ s}$ 时切换为单逆变器并联运行,图 12 为各个逆变器输出电流、并网总电流和并网电压波形. 通过对比可知: $t<$

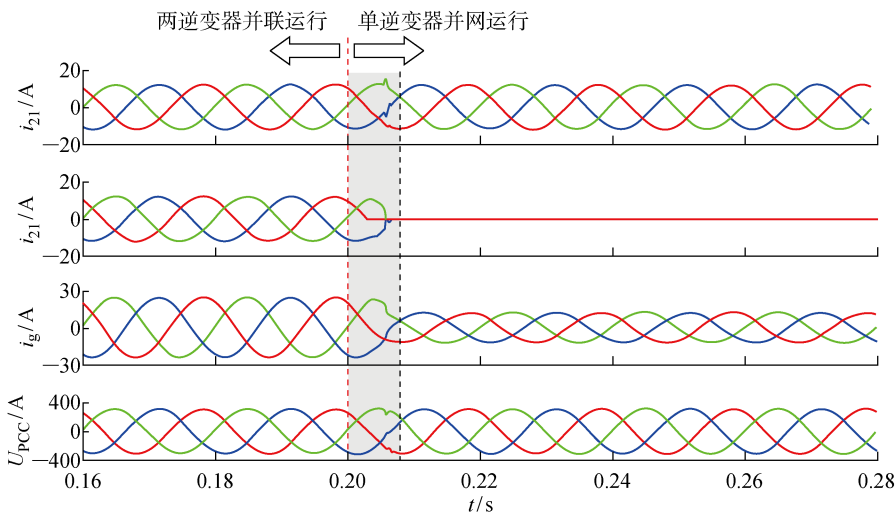


图 10 当逆变器 2 离网时仿真结果
Fig. 10 Simulation results when Inverter 2 is off grid

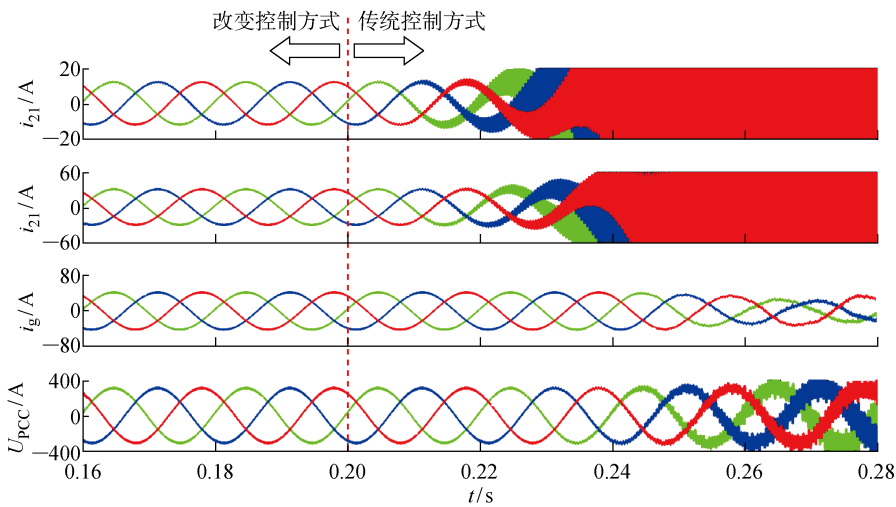


图 11 两组不同容量逆变器并联运行仿真结果
Fig. 11 Simulation results of parallel operation of two groups of inverters with different capacities

0.2 s 时,两组并网逆变器均能实现稳定运行,并网电流满足并网要求,且并网公共点 PCC 处电压稳定;而 $t=0.2$ s 时,当逆变器 2 离网时,逆变器 1 仅在切换时并网电流、并网电压发生轻微震荡,系统仍

保持稳定运行状态,此时并网电流的 THD 为 1.02%。因此,当系统由两台不同额定容量逆变器并网运行切换为单台逆变器并网运行时,并网电流在一个周期内能迅速达到稳定状态,具有快速动态响

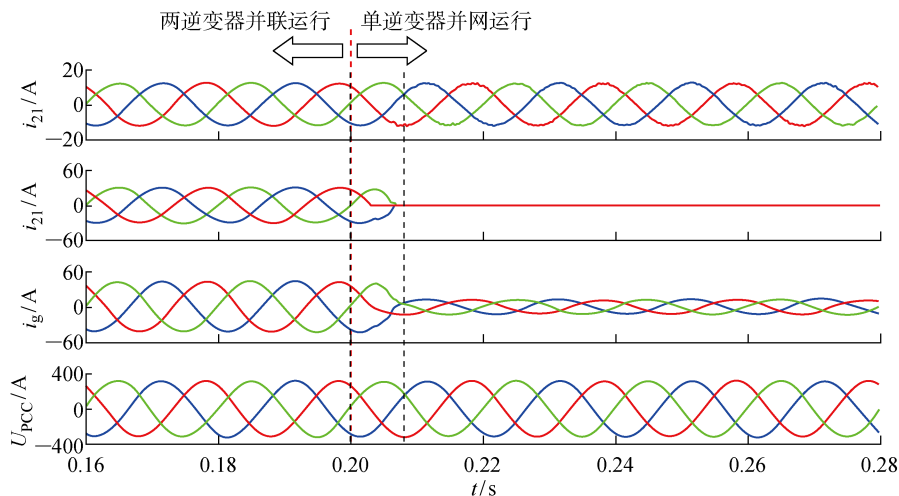


图 12 当逆变器 2 离网时仿真结果

Fig. 12 Simulation results when Inverter 2 is off grid

应能力。

5 结论

针对弱电网条件下多逆变器并联运行发生谐振的现象,对比研究了相同和不同容量逆变器并联系统的谐振频率特性。

(1) 多逆变器并联系统的稳定性除受到与单台逆变器并联系统谐振点接近的公共谐振影响外,还受到交互谐振的影响。

(2) 相同额定容量逆变器并联系统中,交互谐振仅受交互电流影响,公共谐振仅受公共电流影响,二者并未发生耦合;而不同额定容量逆变器并联系统中,交互谐振和公共谐振分别受交互电流及公共电流的共同影响,二者存在耦合作用。

(3) 基于多逆变器并联系统中的交互谐振,设计了数字陷波器,引入到传统电容电流反馈有源阻尼控制中,实现了多谐振点的抑制,满足了此类系统的并网要求。仿真结果验证了所提策略的正确性和有效性。

参考文献:

[1] 阳敏, 罗安, 肖华根, 等. 多逆变器并联系统环流分析及抑制方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(10): 6-11.

YANG Min, LUO An, XIAO Huagen, *et al.* Circulating current analysis and suppression method for

multi-inverter parallel system[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2017, 29(10): 6-11.

[2] 刘怀远, 徐殿国, 武健, 等. 并网换流器系统谐振的分析、检测与消除[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(4): 1061-1074.

LIU Huaiyuan, XU Dianguo, WU Jian, *et al.* Analysis, detection and mitigation of resonance in grid-connected converter systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(4): 1061-1074.

[3] 郭超, 杨洪耕. 考虑弱电网下逆变器稳定性的 LCL 滤波器参数优化方法[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 949-956.

GUO Chao, YANG Honggeng. Optimized LCL-filter design considering stability of grid-connected inverters in weak grid[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(3): 949-956.

[4] 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.

[5] 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.
- [6] 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.
LIU Yang, SHUAI Zhikang, LI Yang, *et al.* Harmonic resonance modal analysis of multi-inverter grid-connected systems [J]. **Proceedings of the CSEE**, 2017, 37(14): 4156-4164.
- [7] 姚骏, 谭义, 杜红彪, 等. 孤岛模式下逆变器并联系统的谐振特性分析及其抑制策略研究[J]. **电工技术学报**, 2016, 31(23): 199-210.
YAO Jun, TAN Yi, DU Hongbiao, *et al.* Analysis of resonant characteristics and resonance suppression strategy of inverter parallel system in islanding mode [J]. **Transactions of China Electrotechnical Society**, 2016, 31(23): 199-210.
- [8] AGORRETA J, BORREGA M, LOPEZ J, *et al.* Modeling and control of N-paralleled 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.
- [9] 严干贵, 常青云, 黄亚峰, 等. 弱电网接入下多光伏逆变器并联运行特性分析[J]. **电网技术**, 2014, 38(4): 933-940.
YAN Gangui, CHANG Qingyun, HUANG Yafeng, *et al.* Analysis on parallel operational characteristics of multi-photovoltaic inverters connected to weak-structured power system[J]. **Power System Technology**, 2014, 38(4): 933-940.
- [10] 何国锋, 徐德鸿. 基于有源阻尼的多逆变器并网谐振抑制[J]. **电机与控制学报**, 2017, 21(10): 62-68.
HE Guofeng, XU Dehong. Resonance suppression for grid-connected multi-inverter based on active damping method[J]. **Electric Machines and Control**, 2017, 21(10): 62-68.
- [11] 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.
- [12] LU M H, WANG X F, FREDE B, *et al.* An analysis method for harmonic resonance and stability of multi-paralleled LCL-filtered inverters [C] // **2015 IEEE 6th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)**. Aachen, Germany: IEEE, 2015: 1-6.
- [13] LU M H, WANG X F, POH C L, *et al.* Interaction and aggregated modeling of multiple paralleled inverters with LCL filter [C] // **2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)**. Montreal, QC, Canada: IEEE, 2015: 1954-1959.
- [14] LU M H, WANG X F, POH C L, *et al.* Resonance interaction of multiparallel grid-connected inverters with LCL filter [J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2017, 32(2): 894-899.
- [15] AKHAVAN A, MOHAMMADI H R, GUERRERO J M. Modeling and design of a multivariable control system for multi-paralleled grid-connected inverters with LCL filter[J]. **Electrical Power and Energy Systems**, 2018, 94(1): 354-362.
- [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型并网逆变器闭环参数设计[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] 许津铭, 季林, 葛小伟, 等. 计及逆变器侧电流反馈影响的LCL滤波器参数优化设计[J]. **中国电机工程学报**, 2016, 36(17): 4656-4665.
XU Jinming, JI Lin, GE Xiaowei, *et al.* LCL-filter optimization design with consideration of inverter-side current feedback control impacts[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2016, 36(17): 4656-4665.

(本文编辑: 陈晓燕)