

弱电网中LLCL型并网逆变器的谐振分析与抑制策略研究

吴丽珍^{1,2}, 刘腾飞¹, 陈伟^{1,2}, 郝晓弘^{1,2}

(1. 兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 兰州 730050; 2. 甘肃省工业过程先进控制重点实验室, 兰州 730050)

摘要: 针对弱电网中多个LLCL型并网逆变器并联运行的谐振问题, 提出一种混合阻尼控制策略。在建立多LLCL型并网逆变器的数学模型基础上, 分析多机并联谐振的产生机理, 得出电网阻抗和LLCL滤波器参数变化是产生谐振的关键因素, 将影响系统并网运行的稳定性。为此, 在不改变LLCL型并网逆变器拓扑结构的前提下, 将所提控制策略应用到弱电网多机并联系统中。仿真与实验结果表明, 该控制策略能有效地抑制系统谐振, 降低并网电流和电压的谐波含量, 提高在弱电网条件下多机并联运行的稳定性。

关键词: 谐振; 阻尼; 逆变器; 弱电网; LLCL滤波器; 电网阻抗

中图分类号: TM46; TM761 **文献标志码:** A

0 引言

在实际应用中, 光伏、风力发电系统常通过并网逆变器接入配电网中, 大规模的接入将会对配电网的稳定性以及电能质量产生影响^[1-2]。考虑到配电网中较长的线路以及变压器的使用, 电网表现为弱电网特性, 即电网阻抗较大不能忽略^[3-4]。由于电网阻抗的存在, 使得公共耦合点 (point of common coupling, PCC) 的阻抗特性发生改变, 对系统的稳定性产生影响, 严重时将导致系统产生谐振现象^[5-6]。因此, 研究弱电网条件下抑制多机并联运行的谐振问题已成为当前热点。

目前, 通常采用L型、LC型和LCL型等滤波器作逆变器和电网之间的接口。在总电感量相同的情况下, LLCL型滤波器相比前者在高频谐波中具有更好的衰减能力^[7-8], 因此, 本文采用LLCL型滤波器作为接口滤波器, 并分析在弱电网条件下LLCL型逆变器多机并联运行的谐振问题。

针对电网阻抗对多机并联运行引起的谐振问题已有相关文献进行研究。文献[9]推导了单相逆变器并联系统的等效电路模型, 同时分析了电网阻抗对LCL滤波器谐振频率的影响, 但未考虑相互作用下的谐振抑制策略。为了抑制多机并联逆变器的谐振问题, 通常采用有源和无源阻尼控制^[10-13]。文献[14]提出一种附加有源阻尼控制器的谐振抑制策略, 以改善弱电网条件下的多机并联系统的电能质量, 但由于多机并联系统的谐振特性复杂, 导致有源阻尼控制器参数设计困难。

因此, 本文首先建立弱电网中多LLCL型并网逆变器数

学模型, 分析其谐振现象和产生原因。在此基础上, 通过结合逆变器本身的特点, 提出一种混合阻尼控制的多机并联的谐振抑制策略, 并通过仿真与实验验证该控制策略的有效性。

1 弱电网中LLCL型逆变器的谐振分析

1.1 弱电网中多LLCL型并网逆变器的数学模型

图1为弱电网中接入多并联逆变器的拓扑结构。图1中, U_{dc} 为直流侧电压; i_{dc} 为直流侧电流; U_g 为电网侧电压; i_g

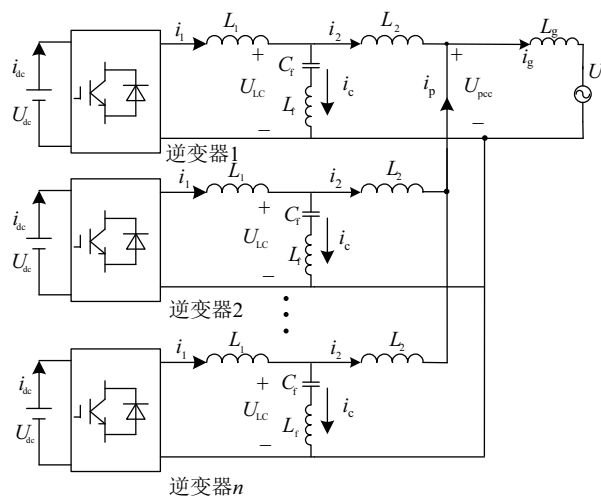


图1 弱电网下并联逆变器的拓扑结构

Fig. 1 Topology of parallel inverter in weak grid

收稿日期: 2018-09-30

基金项目: 国家自然科学基金(62063016; 51467009); 甘肃省科技计划(20JR10RA177); 甘肃省基础研究创新群体项目(18JR3RA133)

通信作者: 吴丽珍(1973—), 女, 博士、教授, 主要从事分布式发电与微电网的运行与控制方面的研究。wulizlut@163.com

为电网侧电流; L_1 为逆变器侧电感; L_2 为电网侧电感; L_f 为支路电感; C_f 为滤波电容, 忽略寄生电阻的影响; L_g 为电网阻抗; U_{Lc} 为滤波电容支路电压; i_1 为逆变器侧输出电流; i_2 为电网侧输出电流; i_c 为滤波电容支路电流; U_{pcc} 为公共耦合点的电压; i_i 为其他并联逆变器的并网电流。

图2为目前常采用的基于电容电流 $i_c(s)$ 和并网电流 $i_g(s)$ 反馈的双闭环控制。图2中, $G(s)$ 是PI控制器, 即 $G_i(s) = k_p + k_i/s$, G_{inv} 是并网逆变器的放大环节, 它相当于 $G_{inv} = k_{PWM}$, H_1 和 H_2 分别是反馈控制环节的反馈系数。其他控制环节可表示为: $G_{L1}(s) = 1/sL_1$, $G_{Lc}(s) = 1/sC_f + sL_f$, $G_{L2}(s) = 1/sL_2$, $G_{Lg}(s) = sL_g$ 。

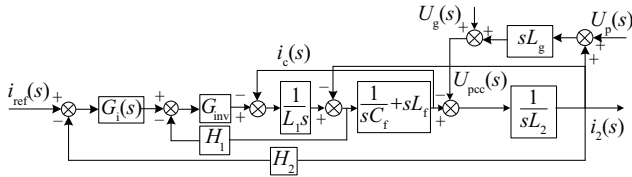


图2 弱电网中并联逆变器的并网控制框图

Fig. 2 Grid-connected diagram of parallel inverter

从图2中可得出, 多机并联系统受3个干扰量的影响, 即电网参考电流 i_{ref} , 电网电压 U_g 和其他并联逆变器的并网电流 i_p 。因此, 公共耦合点 U_{pcc} 处电压满足式(1):

$$U_{pcc}(s) = U_g(s) + sL_g[i_2(s) + i_p(s)] \quad (1)$$

根据图2可得, 3个干扰量到并网输出电流 i_2 的传递函数分别为: $G_{ref}(s)$, $G_g(s)$ 和 $G_p(s)$:

$$G_{ref}(s) = \frac{i_2(s)}{i_{ref}(s)} = \frac{A(s)}{1 + C(s)} \quad (2)$$

$$G_g(s) = \frac{i_2(s)}{U_g(s)} = \frac{B(s)}{1 + C(s)} \quad (3)$$

$$G_p(s) = \frac{i_2(s)}{i_p(s)} = \frac{G_{Lg}(s)B(s)}{1 + C(s)} \quad (4)$$

$$A(s) = G_i(s)G_{inv}(s)G_{L1}(s)G_{C_f}(s)G_{L2}(s) \quad (5)$$

$$B(s) = G_{L2}(s) + G_{L2}(s)G_{C_f}(s)G_{L1}(s) + G_{L2}(s)H_1G_{inv}(s)G_{L1}(s) \quad (6)$$

根据式(2)~式(4)可知, 系统的开环传递函数为 $C(s)$, 如式(7)所示。

$$C(s) = H_2G_i(s)G_{inv}(s)G_{L1}(s)G_{C_f}(s)G_{L2}(s) + H_1G_{inv}(s)G_{L1}(s) + G_{L2}(s)G_{C_f}(s)G_{L1}(s) + G_{L2}(s)G_{C_f}(s) + G_{L2}(s)G_{Lg}(s) + G_{L2}(s)G_{Lg}(s)G_{L1}(s)G_{C_f}(s) + G_{L2}(s)G_{Lg}(s)H_1G_{inv}(s)G_{L1}(s) \quad (7)$$

由式(7)可知, 每台逆变器的3个干扰量开环传递函数相同, 具有相同的零极点, 因此, 它们具有相同的谐振点。

图3是根据式(2)~式(4)和表3中的参数获得的3个干扰量的伯德图。由图3可知, 由于这3种干扰量的存在, 在逆变器输出电流中出现3个谐振点, 具有明显的峰值, 且这3个谐振点具有相同的谐振频率。

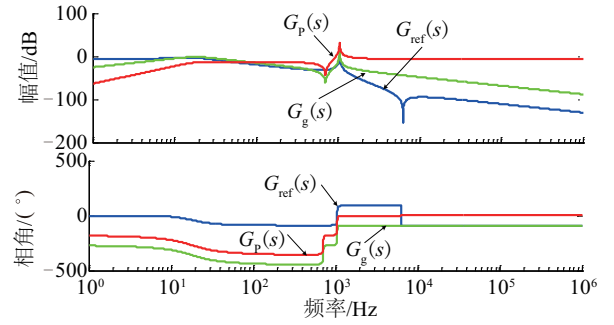


图3 并联逆变器系统中干扰量的伯德图

Fig. 3 Bode diagram of disturbance in parallel inverter system

1.2 谐振原因以及影响因素分析

由图3可知, 采用电容电流与并网电流反馈的双闭环控制策略使系统存在谐振点。对于多机并联系统, 系统谐振更加严重, 不适用于多机并网的情况, 因此, 需要对其控制策略进行改进。

由式(1)可知, 3个干扰量与弱电网中的电网阻抗 L_g 相互耦合, 使并联逆变器系统产生谐振。从式(7)中系统的开环传递函数也可得出, 电网阻抗 L_g 和LLCL滤波器参数会对多机并联系统的谐振分布产生影响。

图4为LC串联支路参数在不同取值时对LLCL滤波器谐振频率的影响, 其中4组参数取值如表1所示。

表1 LC串联支路的参数

Table 1 Parameters of LC series branch

参数	情况1	情况2	情况3	情况4
$L_f/\mu\text{H}$	64	32	16	8
$C_f/\mu\text{F}$	10	20	40	80

从图4中可看出, 随着LC串联支路参数的不同取值, 系统的谐振频率将向低频段移动, 但滤波器的输出特性将保持不变。

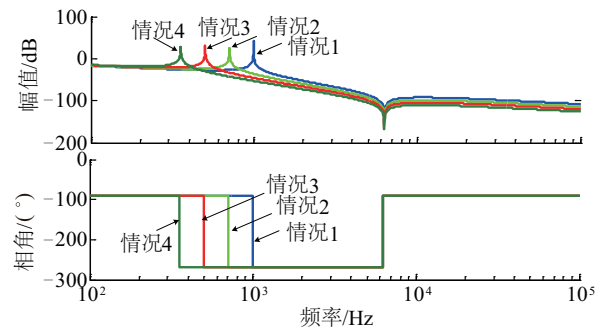


图4 LC串联支路的参数不同取值对谐振频率的影响

Fig. 4 Effect of different values of LC series branch on resonant frequency

图5为LLCL滤波器中电感 L_1 和电感 L_2 参数在不同取值时对谐振频率的影响, 其中4组参数的取值如表2所示。

表2 滤波电感 L_1 与 L_2 的参数

Table 2 Parameters of filter inductors L_1 and L_2

电感	情况1	情况2	情况3	情况4
L_1/mH	5.5	5	4	3.8
L_2/mH	1.5	2	3	3.2

从图5中可看出,随着电感 L_1 和电感 L_2 的取值不同,滤波器的谐振频率也将向低频段移动,LLCL滤波器的输出特性也保持不变。

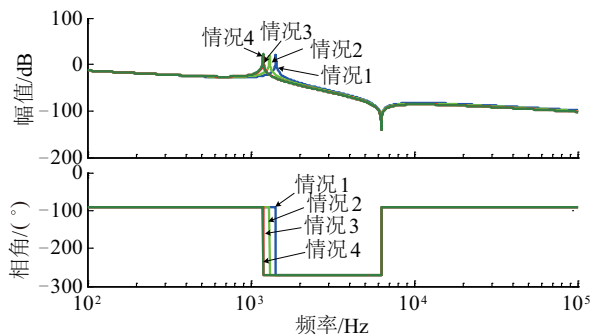


图5 滤波电感 L_1 与 L_2 的不同取值对谐振频率的影响

Fig. 5 Effect of different values of filter inductance

L_1 and L_2 on resonant frequency

当 N 台相同的并网逆变器并网连接时,网侧输出电流 i_2 的值将变为 Ni_2 。这一数值等效到电网阻抗 L_g 上,相当于 L_g 的值增加了 N 倍,可见并联逆变器的数量和电网阻抗 L_g 的值是可以等效相关的^[15]。

图6为随着并网逆变器数量的增加对系统谐振频率的影响,也等效验证了电网阻抗值的变化对谐振频率的影响。从图6中可得出,随着并网逆变器数量增加,系统的谐振频率将向低频段移动。

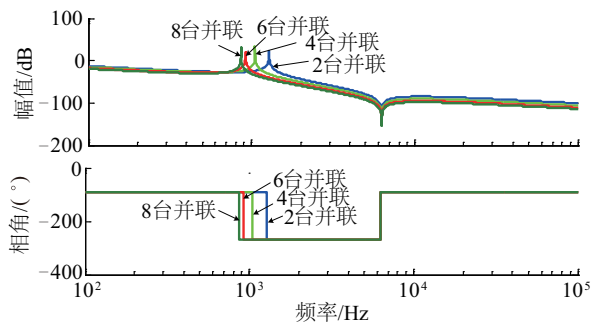


图6 并联逆变器数量对谐振频率的影响

Fig. 6 Effect of number of parallel inverters on

resonant frequency

2 混合阻尼控制策略

2.1 控制策略分析

在LC串联支路中串联或并联阻尼电阻可重构并网逆变

器的输出阻抗,有效抑制系统中的谐振尖峰。但无论是串联还是并联,它们都有各自的局限性。为此,本文提出一种混合阻尼控制策略,以改善系统稳定性,如图7所示。该控制策略在不改变逆变器拓扑结构的基础上,在LC串联支路上串联阻尼电阻 R_d ,以增强滤除高次谐波能力;阻尼电阻 R_p 并联在LC串联支路上,可增强抑制低次谐波的能力。串联阻尼电阻 R_d 后LC串联支路电流变为 i_{ch} ,并联阻尼电阻 R_p 后支路电压变为 U_{ch} 。

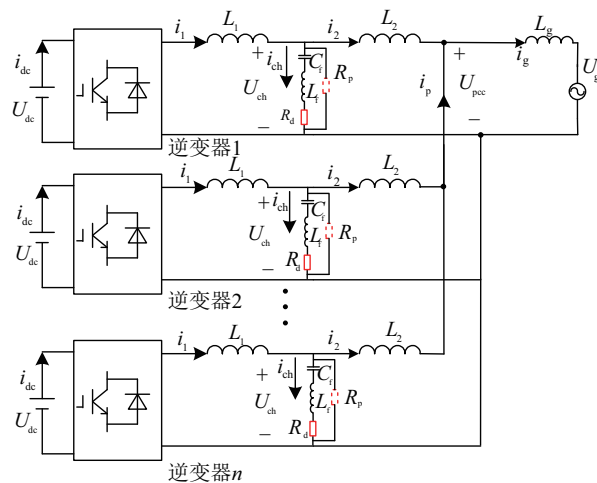


图7 混合阻尼控制策略的多并网逆变器拓扑结构

Fig. 7 Multiple grid-connected inverter topology of hybrid damping control strategy

图8为采用所提混合阻尼控制策略的并网逆变器控制框图。由于在LC串联支路上串联阻尼电阻 R_d , $G_{C_i}(s)$ 改变为 $G_{C_i}^*(s)=1/sC_i+sL_i+R_d$ 。在LC支路中并联虚拟阻尼电阻 R_p ,相当于增加反馈量 $G=1/R_p$,以实现与实际阻尼相同的效果。为进一步减少功率损耗,实现与实际阻尼电阻 R_p 相同的阻尼效果,采用并联虚拟电阻的控制策略来代替实际阻尼电阻 R_p 的作用。因此,本文所提出的混合阻尼控制策略可重塑多机并网逆变系统的输出阻抗,提高系统的谐振抑制能力。

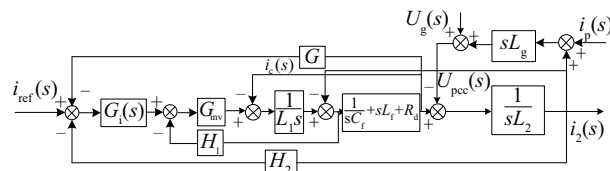


图8 混合阻尼控制策略控制框图

Fig. 8 Diagram of hybrid damping control strategy

2.2 谐振抑制效果分析

由图8可得,3个干扰量到并网电流 i_2 上的传递函数分别为 $G_{dref}(s)$ 、 $G_{dg}(s)$ 、 $G_{dip}(s)$:

$$G_{Dref}(s) = \frac{i_2(s)}{i_{ref}(s)} = \frac{A^*(s)}{1 + C^*(s)} \quad (8)$$

$$G_{Dg}(s) = \frac{i_2(s)}{U_g(s)} = \frac{B^*(s)}{1 + C^*(s)} \quad (9)$$

$$G_{Dp}(s) = \frac{i_2(s)}{i_p(s)} = \frac{G_{Lg}(s)B^*(s)}{1 + C^*(s)} \quad (10)$$

式中,

$$A^*(s) = G_i(s)G_{inv}(s)G_{L1}(s)G_{C1}^*(s)G_{L2}(s) \quad (11)$$

$$B^*(s) = G_{L2}(s) + G_{L2}(s)G_{C1}^*(s)G_{L1}(s) + G_{L2}(s)H_1G_{inv}(s)G_{L1}(s) \quad (12)$$

$$C^*(s) = H_2G_i(s)G_{inv}(s)G_{L1}(s)G_{C1}^*(s)G_{L2}(s) + H_1G_{inv}(s)G_{L1}(s) + G_{L2}(s)G_{C1}^*(s) + D(s) \quad (13)$$

$$D(s) = G_{L1}(s)G_{C1}^*(s) + G_{L2}(s)G_{Lg}(s) + GG_i(s)G_{inv}(s)G_{L1}(s)G_{C1}^*(s) + H_1G_{inv}(s)G_{L1}(s)G_{L2}(s)G_{Lg}(s) + G_{L2}(s)G_{Lg}(s)G_{L1}(s)G_{C1}^*(s) + G_{L2}(s)G_{Lg}(s)GG_i(s)G_{inv}(s)G_{L1}(s)G_{C1}^*(s) \quad (14)$$

图9为加入所提改进控制策略后的伯德图。从图9中可看出,在采用所提混合阻尼控制策略之后,系统的谐振尖峰得到抑制,3条曲线的幅频特性和相频特性得到改善。

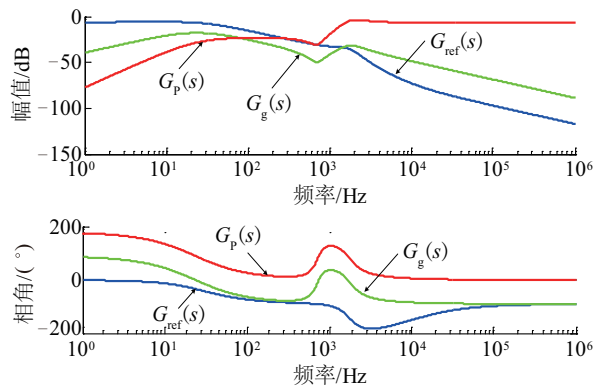


图9 采用所提控制策略后的干扰量伯德图

Fig. 9 Bode diagram of interference quantity under proposed control strategy

3 仿真与实验验证

3.1 仿真分析

为了验证所提控制策略的有效性,采用 Matlab/Simulink 仿真软件搭建 8 台容量均为 3 kW 的 LLCL 型并网逆变器并联组网仿真平台,仿真参数如表 3 所示。通过仿真分析并网电流 i_g 和 PCC 的电压 U_{pcc} 的总谐波畸变率 (total harmonic distortion rate, THD), 验证所提控制策略的谐振抑制效果。其中,电流的 THD 公式如式 (15) 所示:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (15)$$

式中, I_1 ——基波分量有效值; I_n ——第 n 次谐波分量有效值,电压的 THD 公式与电流类似。

表3 主电路和控制参数

Table 3 Power stage and control parameters

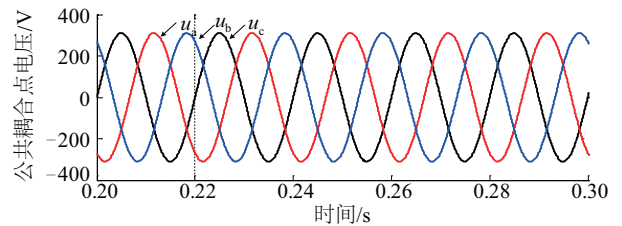
参数	数值	参数	数值
额定电压 E/V	311	网侧电感 L_2/mH	2
额定频率 f_0/Hz	50	阻尼电阻 R_d/Ω	6
直流母线电压 U_{dc}/V	500	虚拟电阻 R_v/Ω	2.3
逆变器侧电感 L_1/mH	5	电网电感 L_g/mH	2
支路滤波电容 $C/\mu F$	10	反馈系数 H_1	4
支路滤波电感 $L/\mu H$	64	反馈系数 H_2	2

3.1.1 控制策略加入前的仿真结果

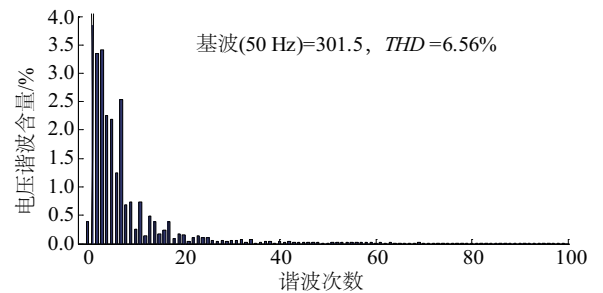
图 10 为未加入所提改进控制策略的公共耦合点电压 U_{pcc} 和并网电流 i_g 波形以及 2 者的 FFT 分析。由图 10 可知,这 2 个参数波形的总谐波畸变率较为严重,与伯德图分析的情况一致。2 者的 THD 分别为 6.56% 和 5.16%。其中,低频谐波含量相当明显,高频谐波含量相对较少,但不容忽视。由于 U_{pcc} 的 THD 超过 5%, 不满足并网的标准。

3.1.2 控制策略加入后的仿真结果

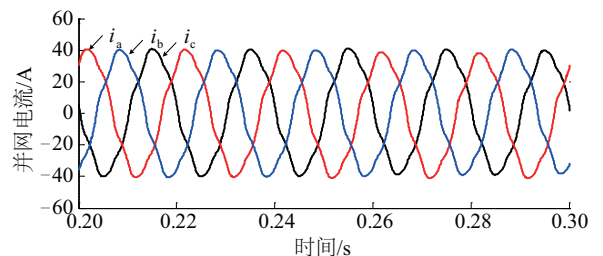
图 11 为所提改进控制策略的控制过程: 首先,将电网电压 U_g 送入锁相环和信号发生器获得参考电流 i_{ref} 。其次,将支路电压 U_{ch} 、电网侧电流 i_2 与参考电流 i_{ref} 相比较,将其差值送入 PI 控制器中。最后,PI 控制器输出信号与分支电流 i_{ch} 相



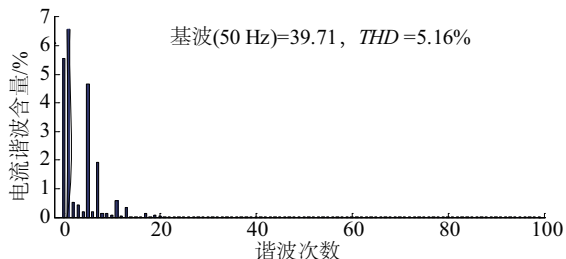
a. 公共耦合点电压 U_{pcc}



b. 公共耦合点电压 U_{pcc} 的 FFT 分析



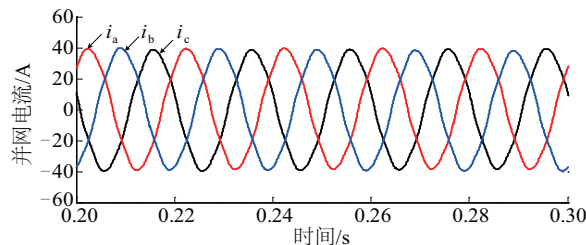
c. 并网电流 i_g 波形



d. 并网电流 i_g 波形的 FFT 分析

图 10 未加入抑制策略前 U_{pcc} 和 i_g 波形图以及 FFT 分析

Fig. 10 Simulated waveform and FFT analysis of U_{pcc} and i_g before adding proposed suppression strategy



c. 并网电流 i_g 的波形

比较后,送入到 SPWM 发生器中产生控制逆变器的信号。最终实现通过控制逆变器的输出阻抗来抑制系统谐振的发生。

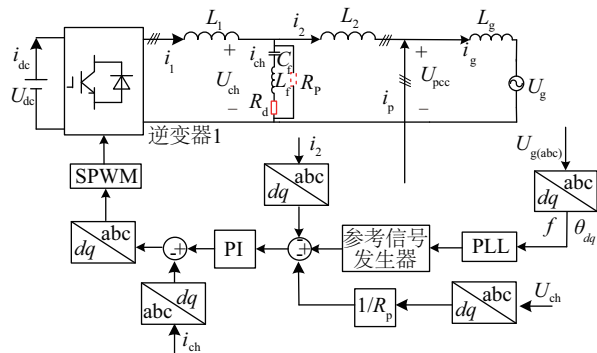
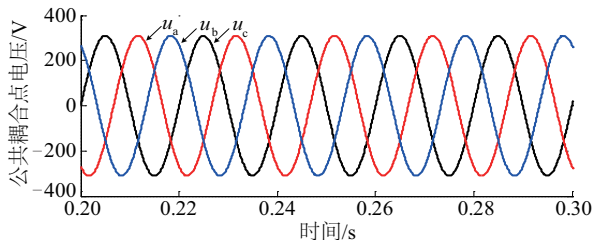


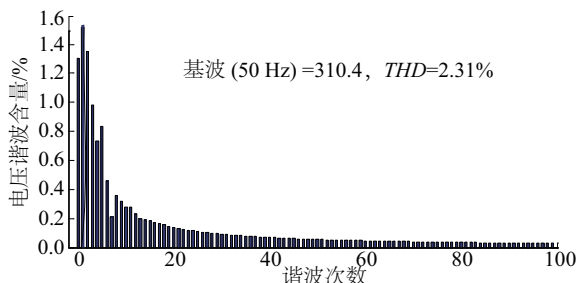
图 11 混合阻尼控制策略实现方式原理图

Fig. 11 Illustrative diagram of hybrid damping control strategy implementation

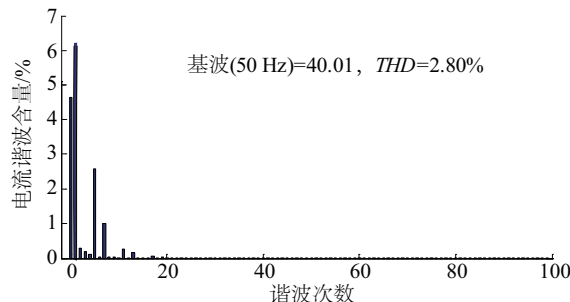
图 12 分别为加入所提改进控制策略后的 U_{pcc} 和 i_g 仿真波形以及 FFT 分析。由 FFT 分析可知,这 2 个参数的谐波畸变率分别为 2.31% 和 2.8%,与图 10 相比,THD 含量明显降低。其中,低频谐波含量的下降十分明显,高频谐波含量降低



a. 公共耦合点电压 U_{pcc} 的波形



b. 公共耦合点电压 U_{pcc} 的 FFT 分析



d. 并网电流 i_g 的 FFT 分析

图 12 加入抑制策略后 U_{pcc} 和 i_g 的波形图以及 FFT 分析

Fig. 12 Simulated waveform and FFT analysis of U_{pcc} and i_g after adding proposed suppression strategy

并保持合理水平,表明所提出改进控制策略能够有效提高对谐波的抑制能力。

3.2 实验验证

为了进一步验证上述所提改进控制策略的有效性,搭建了一套基于 dsPACE1007 控制器和 2 台 3 kW 并网逆变器并联组网的半实物仿真实验平台,如图 13 所示,其中 dsPACE 采样频率为 10 kHz。仿真参数与实验参数一致。



图 13 实验平台

Fig. 13 Experimental platform

图 14 为控制策略加入前后的 U_{pcc} 和 i_g 的实验波形。图 14a 为未加入所提改进控制策略前的公共耦合点电压 U_{pcc} 实验波形图。在未加入所提改进控制策略前,三相电压波形畸变严重,出现谐波放大现象,THD 为 12.68%,存在严重的耦合谐振现象,达不到并网电压标准。图 14b 为加入所提改进控制策略之后的公共耦合点电压 U_{pcc} 实验波形图。在加入所提改进控制策略后,三相电压波形明显改善,THD 为 2.87%,符合并网电压标准。图 14c 为未加入所提改进控制策略前的并网电流 i_g 实验波形图。可看出,在未加入所提改

进控制策略前,并网电流 i_g 的波形畸变严重,5次、7次谐波含量较高,THD为9.72%,达不到并网标准。图14d为加入所提控制策略后的并网电流 i_g 实验波形图。可看出, i_g 波形中的谐波含量的明显下降,THD为2.11%,表明所提出的控制策略能够显著提高谐波抑制能力。

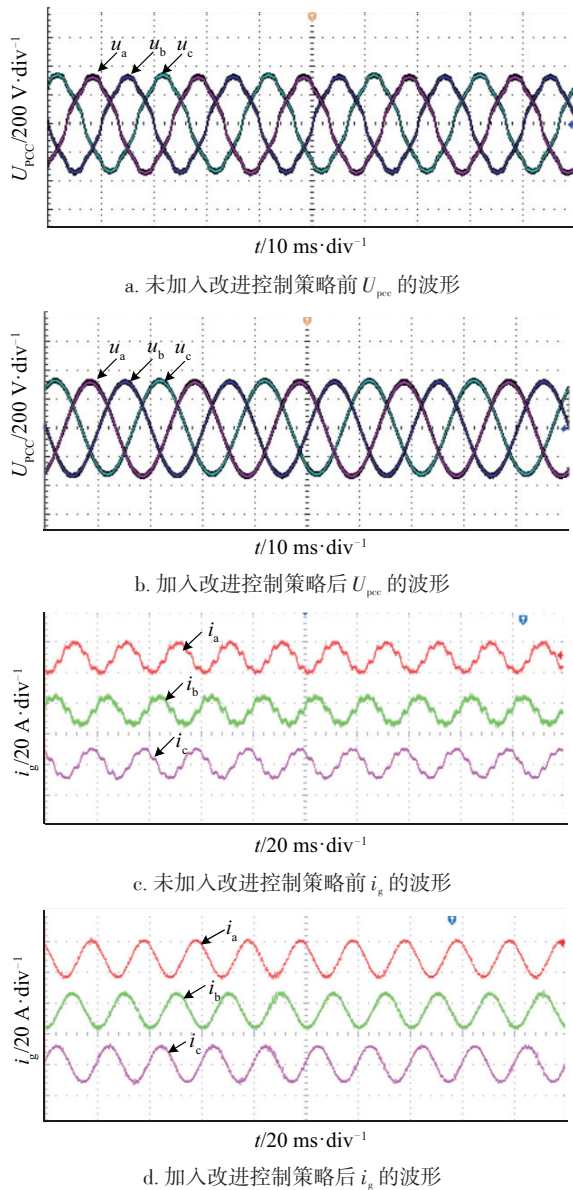


图14 U_{pcc} 和 i_g 的实验波形图

Fig. 14 Experimental waveforms of U_{pcc} and i_g

4 结论

基于逆变器本身的特点,本文研究了弱电网中多LLCL型并网逆变器的谐振抑制策略,得出如下结论:

1)弱电网中多LLCL型并网逆变器的谐振峰值主要由3个干扰量产生,即电网电流的参考电流、电网电压和其他并联逆变器的注入电流,且这3个干扰量引起的谐振频率处于同一谐振点。

2)LLCL滤波器的参数和电网阻抗的变化是导致系统产生谐振频率的关键因素。LC串联支路的参数取值不同,并联的逆变器数量,都会对系统的谐振频率产生影响。

3)本文提出了混合阻尼控制的谐振抑制策略,将所提改进控制策略应用到多并网逆变器系统中可抑制谐振尖峰,并使系统的THD降低到合理的水平,避免产生谐振,影响系统稳定性。

此外,本文仅研究弱电网中电网阻抗以及滤波器参数对系统谐振的影响,有必要进一步考虑电网背景谐波对系统谐振的影响。

[参考文献]

- [1] 徐飞, 汤雨, 谷伟. 弱电网条件下LCL型并网逆变器谐振前馈控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(18): 4970-4979.
XU F, TANG Y, GU W. Resonant feed forward control strategy for LCL-type grid-connected inverters in weak grid condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18): 4970-4979.
- [2] 陈燕东, 王伊, 周乐明, 等. 弱电网下LCL逆变器阻尼谐振抑制与功率快速调节方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(11): 2564-2574.
CHEN Y D, WANG Y, ZHOU L M, et al. Damping resonance suppression and fast power regulation method for LCL-type inverter under weak grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(11): 2564-2574.
- [3] 马兴, 徐瑞林, 陈民铀, 等. 弱电网下并网逆变器自适应H-∞控制方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13): 189-195.
MA X, XU R L, CHEN M Y, et al. Adaptive H-∞ control method for grid-connected inverters in weak grid[J]. Automation of electric power systems, 2018, 42(13): 189-195.
- [4] 年珩, 王涛, 程鹏. 适应实际电网阻抗特性的DFIG不平衡电压解耦补偿技术[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 49-57.
NIAN H, WANG T, CHENG P. An unbalanced voltage decoupling compensation technique for DFIG adaptive to grid impedance[J]. Automation of electric power systems, 2015, 39(23): 49-57.
- [5] 赵勇, 杨子龙, 曹笃峰, 等. 弱电网中光伏电站并网点谐波分析与抑制[J]. 太阳能学报, 2018, 39(1): 117-123.
ZHAO Y, YANG Z L, CAO D F, et al. Analysis and mitigation of PV PCC point harmonics in weak grid[J]. Acta energiae solaris sinica, 2018, 39(1): 117-123.
- [6] WANG X, BLAABJREG F, WU W. Modeling and analysis of harmonic stability in an AC power-electronics-

- based powersystem[J]. IEEE transactions on power electronics, 2014, 29(12): 6421-6432.
- [7] 郑昕昕, 肖岚, 王长宝, 等. 三相变流器LCL滤波器参数优化新方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12): 55-63.
ZHENG X X, XIAO L, WANG C B, et al. A new parameter optimization method of LCL filters in three-phase converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(12): 55-63.
- [8] WU W M, HE Y B, BLAABJREG F. An LLCL power filter for single- phase grid- tied inverter [J]. IEEE transactions on power electronics, 2012, 27(2): 782-789.
- [9] AGORRET J L, 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.
- [10] 王海松, 王晗, 张建文, 等. LCL型并网逆变器的分裂电容无源阻尼控制[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 895-902.
WANG H S, WANG H, ZHANG J W, et al. Split-capacitor passive damping control for LCL grid-connected inverter[J]. Power system technology, 2014, 38(4): 895-902.
- [11] 谢宇, 马灵甫, 任玉虎, 等. 基于虚拟电阻阻尼的三相并网逆变器控制设计[J]. 电源学报, 2015, 13(2): 33-37.
XIE Y, MA L F, REN Y H, et al. Design of three-phase inverter controller based on virtual resistors [J]. Journal of power supply, 2015, 13(2): 33-37.
- [12] 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 G F, XU D H. Resonance suppression for grid-connected multi-inverter based on active damping method [J]. Electric machines and control, 2017, 21(10): 62-68.
- [13] HE J W, LI Y W, BOSNJAK D, et al. Investigation and active damping of multiple resonances in a parallel-inverter-based microgrid [J]. IEEE transactions on power electronics, 2013, 28(1): 234-246.
- [14] WANG X F, BLAABJREG 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.
- [15] 王振浩, 李丹, 贺微, 等. LCL型逆变器接入弱电网下的谐振分析及抑制方法研究[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(6): 34-41.
WANG Z H, LI D, HE W, et al. Analysis of resonant characteristics and resonance suppression strategy of weak grid with LCL-type inverter [J]. Advanced technology of electrical engineering and energy, 2018, 37(6): 34-41.

RESEARCH ON RESONANCE ANALYSIS AND SUPPRESSION STRATEGY OF GRID-CONNECTED INVERTER WITH LLCL FILTER IN WEAK GRID

Wu Lizhen^{1,2}, Liu Tengfei¹, Chen Wei^{1,2}, Hao Xiaohong^{1,2}

(1. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Key Laboratory of Gansu Advanced Control for Industrial Processes, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: To solve the resonance problem of multiple parallel grid-connected inverters with LLCL filter in weak grid, a hybrid damping control strategy is proposed in this paper. Based on the mathematical model of multiple grid-connected inverters with LLCL filter, the mechanism of multi-inverter parallel resonance is analyzed. And the conclusion can be conducted that the key factors of resonance are the change of grid impedance and LLCL filter parameters, which will affect the stability of the system grid-connected operation. Therefore, on the premise of not changing the topology of LLCL-filter-based grid-connected inverter, the proposed control strategy is applied to the multi-inverter paralleled weak grid system. Simulation and experimental results show that the proposed control strategy can effectively suppress the system resonance, reduce the harmonic content of the grid-connected current and voltage, and improve the stability of multi-inverter parallel operation under weak grid conditions.

Keywords: resonance; damping; inverter; weak grid; LLCL filter; grid impedance