

# 三相光伏逆变器多机并联谐振抑制控制策略

刘建峰\*

(国网电力科学研究院,江苏南京 211106)

**摘要:**大型光伏电站必须采用三相并网方式以保障电网三相平衡,而采用传统 PI 加电压前馈控制方式,当接在并网变压器同一绕组达到一定数量后,逆变器并网电流会发生震荡,严重时甚至会因为超过安规 THD 而发生逆变器脱网,严重影响光伏电站的运行.通过研究逆变器多机并联系统电网侧输出电流的谐振特性,提出以虚拟电阻串电容替代实际硬件电路的控制策略,不仅有效抑制多机并联谐振问题且保证了逆变器的高效.最后,通过仿真与实验研究了最优虚拟阻值的选取,且验证了该控制策略的实际应用性.

**关键词:**多机并联;LCL 滤波器;电流谐振;虚拟电阻

**中图分类号:**TM464      **文献标志码:**A      **文章编号:**1672-9102(2018)04-0073-06

## Control Strategy of Parallel Resonance Suppression for Three-phase Photovoltaic Inverter

Liu Jianfeng

(State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** The three-phase grid-connected mode must be adopted in large PV power station to ensure the three-phase balance of the power network. By using the traditional PI method, when connected to the same winding of grid-connected transformer to a certain number, the grid-connected current of the inverter will vibrate. Seriously, the inverter will de-grid because it will be over the safety THD, which will seriously affect the operation of PV power station. By studying the resonant characteristics of the output current of the multi-inverter parallel system, a virtual resistor series capacitor method is proposed in this paper, which can suppress the resonance effectively. Finally, the optimal virtual resistance is studied, and the practical application of control strategy is proved.

**Keywords:** multi-paralleled inverters; LCL filter; current resonance; virtual resistance

近年来,随着新能源技术的广泛推进,分布式光伏发电技术得到大力发展.国家“光伏领跑者计划”重点支持光伏发电在矿山节能、废旧矿山基地绿色发展中的应用.2015年6月,《大同采煤沉陷区光伏发电基地规划及2015年实施方案》获得国家能源局批准,成为首个“光伏领跑者示范基地”.目前,分布式光伏发电系统接入电网普遍采用直流母线方式<sup>[1]</sup>,该方式下需要多个逆变器并联后再接入电网,但矿山供电系统复杂,电能质量较差,现有的光伏逆变器较难适应矿山要求.LCL滤波器因其兼具低频和高频效益,可减少电感的体积及滤波器成本<sup>[2,3]</sup>,被广泛应用于光伏并网逆变器.但LCL滤波器的引入会增加系统谐振问题,且当含LCL滤波器的逆变器多机并联后又会给系统引入新的问题.

多滤波器的逆变器并联系统,输出谐振特性发生变化,跟随逆变器并联数目的增加,谐振波峰的及其频率均有所降低,且低次谐波的比例增加<sup>[4,5]</sup>.文献[6]提出一种基于网测电压、电流双闭环重复控制策略;文献[7]在逆变器控制上采用交错并联方式,能有效降低系统谐波,但考虑电网侧阻抗时效果不理想;文献[8,9]讨论了多逆变器并联系统中,逆变器的相互作用将激发各种频率下的复杂谐振,并引入有源阻尼控制法,能有效抑制系统谐振,但其忽略了对引入阻尼法后谐振电流的抑制分析,且未对最优阻尼值进行研究.

本文针对逆变器多机并联系统,采用等效电流源模型对其进行分析建模.然后分析逆变器并联数量对系统输出电流的影响,之后,基于虚拟电阻串电容算法对系统谐振及输出电流进行分析,并对最优虚拟阻值进行研究.最后,仿真及实验显示该方法能有效抑制系统谐振,证明研究的有效性.

## 1 光伏并网单逆变器系统模型

基于LCL滤波并网逆变器的电路拓扑结构如图1所示<sup>[10]</sup>.图中 $L_1, R_1$ 为逆变器侧电感和等效电阻, $L_2, R_2$ 为电网侧电感和等效电阻, $C$ 为滤波电容.

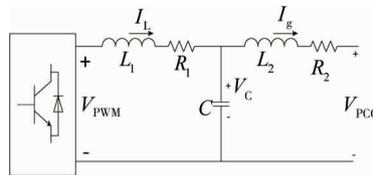


图1 LCL滤波并网逆变器拓扑结构

图1中: $V_{PCC}$ 为并网点电压; $V_{PWM}$ 为光伏逆变器输出电压; $V_C$ 为电容电压; $I_L$ 为逆变器电感电流; $I_g$ 为流入电网侧电流; $I^*$ 为给定电流值.采用传统PI控制方法时,以 $I_L$ 为电流环控制量,为了提高电流环控制带宽加入 $V_C$ 为前馈环节,控制框图见图2所示.

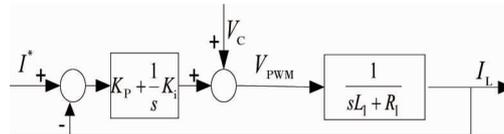


图2 逆变器侧电流环控制框图

图2中: $s$ 为复变量; $K_i, K_p$ 分别为控制器积分、比例系数.

根据图2可得逆变器输出电压指令为

$$V_{PWM}(s) = V_C(s) + (K_p(s) + \frac{1}{s}K_i(s))(I^*(s) - I_L(s)). \quad (1)$$

LCL滤波环节传递函数为

$$I_L(s) = H_1(s)V_{PWM}(s) + H_2(s)V_{PCC}(s); \quad (2)$$

$$I_g(s) = H_3(s)V_{PWM}(s) + H_4(s)V_{PCC}(s); \quad (3)$$

$$V_C(s) = H_5(s)V_{PWM}(s) + H_6(s)V_{PCC}(s). \quad (4)$$

式(2)~式(4)中各传递函数分别为

$$H_1(s) = (L_2Cs^2 + R_2Cs + 1)/[L_1L_2Cs^3 + (R_2L_1 + R_1L_2)Cs^2 + (L_1 + L_2 + CR_1R_2)s + R_1 + R_2];$$

$$H_2(s) = -1/[L_1L_2Cs^3 + (R_2L_1 + R_1L_2)Cs^2 + (L_1 + L_2 + CR_1R_2)s + R_1 + R_2];$$

$$H_3(s) = 1/[L_1L_2Cs^3 + (R_2L_1 + R_1L_2)Cs^2 + (L_1 + L_2 + CR_1R_2)s + R_1 + R_2];$$

$$H_4(s) = -(L_2Cs^2 + R_1Cs + 1)/[L_1L_2Cs^3 + (R_2L_1 + R_1L_2)Cs^2 + (L_1 + L_2 + CR_1R_2)s + R_1 + R_2];$$

$$H_5(s) = (L_2s + R_2)/[L_1L_2Cs^3 + (R_2L_1 + R_1L_2)Cs^2 + (L_1 + L_2 + CR_1R_2)s + R_1 + R_2];$$

$$H_6(s) = (L_1s + R_1)/[L_1L_2Cs^3 + (R_2L_1 + R_1L_2)Cs^2 + (L_1 + L_2 + CR_1R_2)s + R_1 + R_2].$$

联立式(1) ~ 式(4) 可得

$$I_g(s) = G_{IL}(s)I^*(s) - Y_{eq}(s)V_{PCC}(s). \quad (5)$$

式中:  $G_{IL}(s)$  和  $Y_{eq}(s)$  分别为给定电流至电网电流的传递函数和逆变器侧等效输出导纳的传递函数, 表达式为

$$G_{IL}(s) = \frac{G_{PI}(s)H_3(s)}{1 - H_5(s) + G_{PI}(s)H_1(s)}; \quad (6)$$

$$Y_{eq}(s) = \frac{G_{PI}(s)H_2(s)H_3(s) - H_3(s)H_6(s)}{1 - H_5(s) + G_{PI}(s)H_1(s)} - H_4(s). \quad (7)$$

式中:  $G_{PI}(s) = K_P(s) + \frac{1}{s}K_I(s)$ .

根据式(5)可将单个并网逆变器的等效模型简化为电流源模型, 如图3所示.

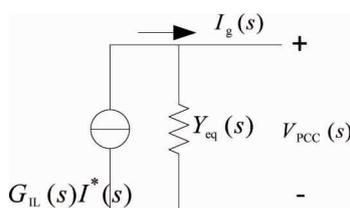


图3 并网逆变器等效电流源电路

## 2 光伏并网逆变器多机并联模型及分析

图3表示单个并网逆变器的等效电路, 将  $N$  个等效电路进行并联可得对并网逆变器并联配电网等效电路. 等效电路见图4所示.

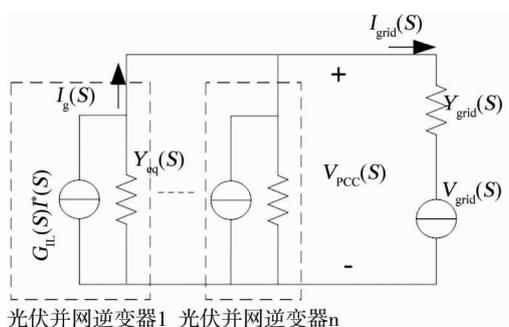


图4 光伏并网逆变器多机并联等效电路

如图4所示, 并网点电流  $I_{grid}(s)$  表示并网逆变器输出电流之和,  $Y_{grid}(s)$ ,  $V_{grid}(s)$  分别表示电网电压和线路等效导纳.

根据戴维南定理可得逆变器多机并联时并网电压  $V_{PCC}$  表达式, 设定逆变器参数一致.

$$V_{PCC} = \frac{NG_{IL}(s)I^*(s) + V_{grid}(s)Y_{grid}(s)}{NY_{eq}(s) + Y_{grid}(s)}. \quad (8)$$

联立式(5)和式(8), 可得  $N$  个并联后逆变器的输出电流为

$$I_g(s) = G_{IL}^N(s)I^*(s) - Y_{eq}^N(s)V_{grid}(s). \quad (9)$$

式中:  $G_{IL}^N$  和  $Y_{eq}^N$  分别为并联后给定电流至实际电流的传递函数和并联后等效导纳的传递函数, 表达式是

$$G_{IL}^N = G_{IL}(s) - \frac{NY_{eq}(s)G_{IL}(s)}{NY_{eq}(s) + Y_{grid}(s)}; \quad (10)$$

$$Y_{eq}^N = \frac{Y_{eq}(s)Y_{grid}(s)}{NY_{eq}(s) + Y_{grid}(s)}. \quad (11)$$

并网逆变器系统参数： $L_1, R_1$  为 3 mH, 0.01  $\Omega$ ； $L_2, R_2$  为 0.3 mH, 0.04  $\Omega$ ； $C$  为 40  $\mu$ F；电网侧等效电感  $L_{grid}$ ，电阻  $R_{grid}$  为 0.1 mH, 0.01  $\Omega$ ；电网侧电压  $V_{grid}$ ，频率  $f_{grid}$  为 220 V, 50 Hz；直流侧电压  $V_{dc}$  为 600 V； $K_p, K_i$  为 30, 0.3；逆变器开关频率  $f_g$  为 20 kHz. 详见表 1 所示. 图 5 为的伯德图.

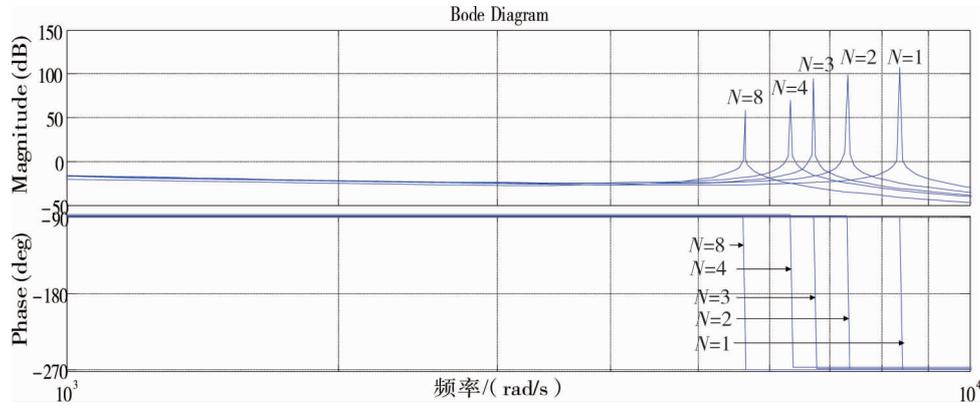


图 5 给定电流至实际电流系数 Bode 图

图 5 表示不同  $N$  时网侧电流对于给定电流传递函数的 Bode 图, 可知随着并联逆变器个数  $N$  的增加, 谐振波峰频率逐渐下降, 若谐振频率与网侧电流频率相近时, 会增大电流谐波; 同时, 随着  $N$  的增加谐振波峰峰值降低.

### 3 虚拟电阻串电容法研究

#### 3.1 串联虚拟电阻控制算法研究

通过上述两节的分析可得, LCL 滤波器含有固定谐振峰, 由文献[11]可得阻尼法能够很好的抑制谐振峰, 但是无源阻尼法增加系统损耗, 所以本文采取串联虚拟阻尼法, 即虚拟电阻串电容算法. 如图 6 所示.

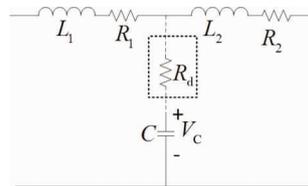


图 6 虚拟电阻串电容的电路

该方法是一种简单可行且可以实现的方法, 即将电容电流通过微分环境  $sCR_d$  负反馈至电流给定, 再经过 PI 控制而实现有源阻尼控制. 根据基尔霍夫电流定理可得  $I_c(s) = I_L(s) - I_g(s)$ , 虚拟电阻电压修正量:

$$V_{VD}(s) = sCR_d I_c(s). \tag{12}$$

式中:  $R_d$  为串联虚拟电阻.

虚拟电阻串电容法后, 逆变器的输出电压表达式为

$$V_{PWM}(s) = V_c(s) + G_{PI}(s) (I^*(s) - sCR_d I_c(s) - I_L(s)). \tag{13}$$

联立式(2)~式(4), 式(12), 式(13)可得, 虚拟阻尼法后  $N$  台并网逆变器并联时给定电流到并网点电流的传递函数为

$$G_{ILd}^N = G_{ILd}(s) - \frac{NY_{eqd}(s)G_{ILd}(s)}{NY_{eqd}(s) + Y_{grid}(s)}; \tag{14}$$

$$Y_{eqd}^N = \frac{Y_{eqd}(s)Y_{grid}(s)}{NY_{eqd}(s) + Y_{grid}(s)}. \tag{15}$$

式中  $G_{ILd}$  和  $Y_{eqd}$  分别表示串联虚拟电阻  $R_d$  后给定电流至实际电流的传递函数和并联后等效导纳的传递

函数.表达式为

$$G_{\text{lld}}(s) = \frac{G_{\text{PI}}(s)H_3(s)}{1 + H_5(s) + G_{\text{PI}}(s)(sCR_d + 1)H_1(s) + G_{\text{PI}}(s)sCR_dH_3(s)};$$

$$Y_{\text{eqd}}(s) = \frac{H_3(s)H_6(s) - G_{\text{PI}}(s)(sCR_d + 1)H_2(s)H_3(s) + G_{\text{PI}}(s)sCR_dH_4(s)H_3(s)}{1 + H_5(s) + G_{\text{PI}}(s)(sCR_d + 1)H_1(s) + G_{\text{PI}}(s)sCR_dH_3(s)} - H_4(s).$$

图7为串联阻尼后给定电流到网侧电流系数 Bode 图.

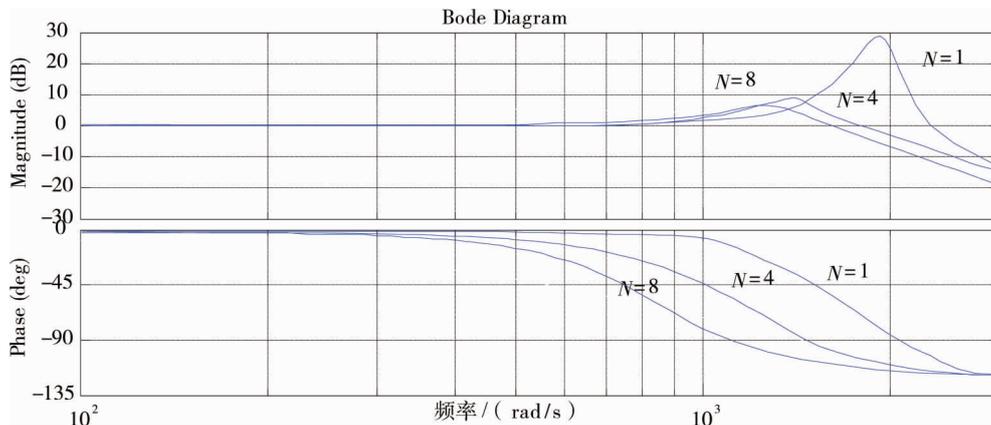


图7 阻尼后给定电流到网侧电流的系数 Bode 图

图7为  $R_d = 11 \Omega$ ,  $N$  台并网逆变器并联时给定电流到并网点电流传递函数的 Bode 图,由图可得,谐振波峰得到了良好的抑制.

### 3.2 串联虚拟阻值研究

令式(14)中  $N=8$ ,当  $G_{\text{lld}}^8 = 1$  时,虚拟阻值最优.由式(13)可得串联不同虚拟阻值,得到谐振电流情况不同.图8为8台并网逆变器并联运行时串联不同虚拟阻值时给定电流到网侧电流的系数 Bode 图.

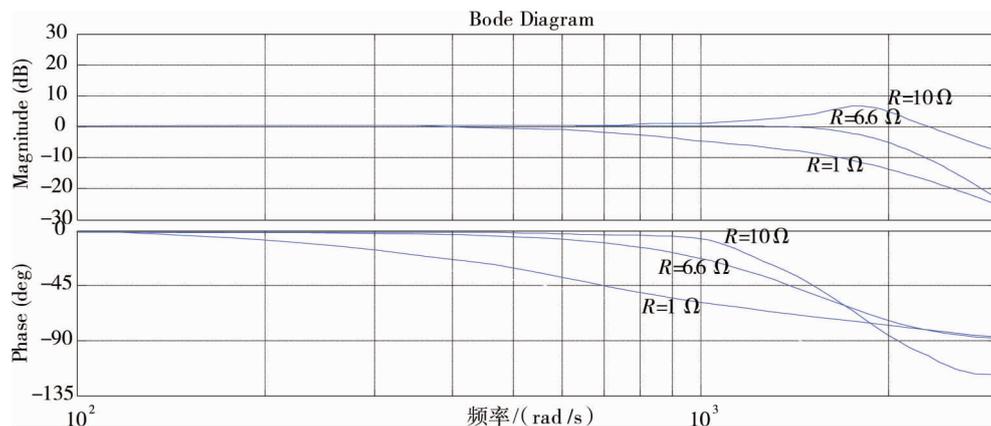


图8 不同阻尼值时给定电流到网侧电流的系数 Bode 图

由图8可知,  $R_d = 6.6 \Omega$  时,传函的 Bode 图与 0 dB 曲线最相似,所以串联该阻值时谐振电流抑制情况最好;  $R_d = 10 \Omega$  时,抑制效果不理想;  $R_d = 1 \Omega$  时,指令电流发生衰减.

## 4 实验验证

为了验证虚拟电阻串电容算法对并网谐振的抑制效果,采用2台10 kW 光伏并网逆变器进行算法验证及谐振分析,系统参数模拟矿山电力环境,见表1.逆变器并联采用独立控制方式,图9为采用虚拟电阻串电容算法前后的系统输出电流对比波形图,图中 IC 表示1#逆变器滤波电容上的电流, Ig1 为1#逆变器输出电流, Ig2 为2#逆变器输出电流,横坐标表示时间:200  $\mu\text{s}$ /格,纵坐标表示电流值:逆变器输出电流 50 A/格,电容电流 200 A/格.图9a为未采用虚拟阻值时系统电流输出波形,图9b为采用虚拟阻值后系统

电流输出波形.

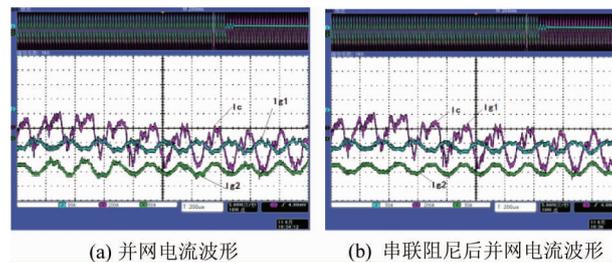


图9 系统输出电流波形

图10为采用虚拟阻值前后系统频谱分析图.图10a为未采用虚拟阻值时系统频谱分析,图10b为采用虚拟阻值后系统频谱分析,通过图10分析可得,采用虚拟电阻串电容算法后系统谐振得到明显抑制.图10b中仍然存在少量低次谐波,这是由于电网电压谐波导致的.

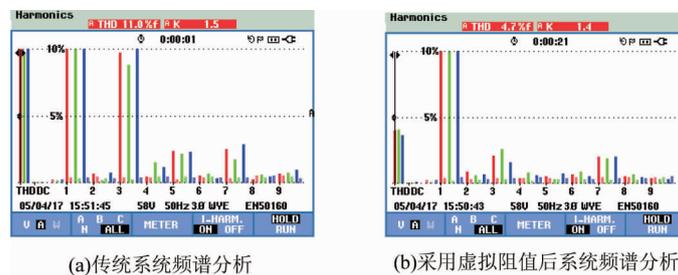


图10 系统频谱分析

## 五 总结

- 1) 随着并联数  $N$  的增大, 谐振波峰频率逐渐下降, 若谐振频率与网侧电流频率相近时, 会增大电流谐波.
- 2) 串联虚拟阻尼值为最优阻值时, 系统谐振电流抑制情况良好.

## 参考文献:

- [1] 王斯成. 加速发展光伏发电保障中国能源的可持续发展[J]. 中国工程科学, 2011, 13(9): 51-62.
- [2] 周林, 解宝, 郑晨, 等. 单相并网 LCL 型逆变器的改进设计方案[J]. 电工技术学报, 2017, 32(18): 211-219.
- [3] 刘飞, 查晓明, 段善旭. 三相并网逆变器 LCL 滤波器的参数设计与研究[J]. 电工技术学报, 2010, 25(3): 110-116.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 江法洋, 郑丽君, 宋建成, 等. LCL 型并网逆变器重复双闭环控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(10): 2944-2954.
- [7] 陈慧, 吴新科, 彭方正. 具有串并联自调整型倍流整流结构的交错并联移相全桥变流器[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(2): 434-441.
- [8] He J, Li Y, Bosnjak D, et al. Investigation and Active Damping of Multiple Resonances in a Parallel-Inverter-Based Microgrid[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2013, 28(1): 234-246.
- [9] Li Y W. Control and Resonance Damping of Voltage-Source and Current-Source Converters With LC Filters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(5): 1511-1521.
- [10] 陈新, 韦微, 胡雪峰, 等. 三相并网逆变器 LCL 滤波器的研究及新型有源阻尼控制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 71-79.
- [11] 苏建徽, 施永. 并网逆变系统滤波电路拓扑及其谐振抑制方法研究[J]. 太阳能学报, 2013, 34(9): 1619-1625.