

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2021.03.006

基于有源谐波电导法的光伏逆变器 集群谐振抑制策略

谷昕鹏^{1,3}, 吴强², 李圣清^{1,3}, 李小宝^{1,3}, 何元铭^{1,3}, 沈志超^{1,3}

(1. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412000;
3. 湖南省光伏智能电网控制工程研究中心, 湖南 株洲 412007)

摘要: 为抑制光伏逆变器集群并入电网引起的谐振, 提出一种基于有源谐波电导法的光伏逆变器集群谐振抑制策略。首先, 基于PI控制器下电容电流内环, 电网电流外环的双闭环控制, 分析双闭环控制下单台逆变器谐振抑制效果。其次, 在保持控制系统不变的情况下, 针对多台逆变器谐振问题, 在光伏并网系统中加入有源滤波电导, 不仅有效抑制逆变器低频谐波电流汇入网侧系统, 还提高逆变器抗扰动能力, 从而抑制逆变器集群引起的谐振问题。最后, 通过Matlab/Simulink软件仿真验证了光伏逆变器集群谐振能被有效抑制, 仿真结果表明谐波电导法对多逆变器谐振有抑制效果。

关键词: 光伏逆变器集群; 双闭环控制; 有源滤波电导; 低频谐波

中图分类号: TM464

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2021)03-0042-07

引文格式: 谷昕鹏, 吴强, 李圣清, 等. 基于有源谐波电导法的光伏逆变器集群谐振抑制策略[J]. 湖南工业大学学报, 2021, 35(3): 42-48.

Photovoltaic Inverter Cluster Resonance Suppression Strategy Based on the Active Harmonic Conductance Method

GU Xinpeng^{1,3}, WU Qiang², LI Shengqing^{1,3}, LI Xiaobao^{1,3}, HE Yuanming^{1,3}, SHEN Zhichao^{1,3}

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;
2. Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou Hunan 412000, China;
3. Hunan Photovoltaic Smart Grid Control Engineering Research Center, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of an suppression of the resonance brought about by the integration of photovoltaic inverter clusters into the grid, a photovoltaic inverter cluster resonance suppression strategy has thus been proposed based on the active harmonic conductance method. Firstly, based on the double closed-loop control of inner capacitor current loop and outer grid current loop under PI controller, an analysis has been made of the resonance suppression effect of single inverter under double closed-loop control. Secondly, with the control system unchanged, active filter conductance is added to the photovoltaic grid connected system for a solution of the resonance problem of multiple inverters, which can not only effectively suppress the low-frequency harmonic current of inverter into the grid side system, but also

收稿日期: 2020-04-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51977072); 国家重点研发计划基金资助项目(2018YFB0606005); 湖南省自然科学基金资助项目(2017JJ4024)

作者简介: 谷昕鹏(1995-), 男, 湖南长沙人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电力电子与电力传动,
E-mail: 972145944@qq.com

通信作者: 吴强(1965-), 男, 湖南株洲人, 株洲中车时代电气股份有限公司教授级高级工程师, 主要从事变流技术与地面自动过分相的研究开发, E-mail: 1900969058@qq.com

improve the anti disturbance ability of inverter, thus suppressing the resonance problem caused by the inverter cluster. Finally, the simulation results of MATLAB / Simulink show that the cluster resonance of PV inverter can be effectively suppressed, and that the harmonic conductance method can effectively suppress the multiple inverter resonance.

Keywords: PV inverter cluster; double closed loop control; active filter conductance; low frequency harmonic

1 研究背景

近年来,随着可再生能源发电技术的显著发展,光伏发电总量的比例越来越高,我国分布式光伏系统有着开发规模大、集群并网的特点。在并网运行模式下,光伏集群发电系统是由多个逆变器通过公共连接点(point of common coupling, PCC)接入电网^[1-3],以此提高其发电效率。但是,光伏集群系统大多采用LCL滤波器和网侧阻抗串联形成高阶电网系统,且系统存在固有谐振尖峰,称其为自身谐振;当逆变器集群接入电网后,多逆变器并联还会导致系统发生并联谐振^[4]。目前在光伏发电项目中,已有多起因多逆变器并联引起的谐振而导致大规模光伏并网系统瘫痪的案例。因此,对光伏逆变器集群的并联谐振抑制的研究有着深远的意义^[5]。

目前,关于光伏逆变器集群并网谐振的抑制手段,已有较多国内外学者对其进行了大量的研究。在逆变器谐振抑制策略方面,LCL逆变器谐振抑制方法有两种:无源阻尼^[6-7]和有源阻尼^[8-10];相对于无源阻尼,有源阻尼不仅控制相对灵活、简便,而且对系统损耗有较明显的降低。文献[11]运用了有源滤波器并联的控制方式,对谐波补偿的同时再对系统谐振进行抑制;文献[12]提出以有源电导法抑制逆变器的低次谐波电流,并对系统谐振进行抑制;但文献[11-12]只对单逆变器光伏系统进行验证,没有研究多逆变器下并网产生的谐振。文献[13]提出了在PCC点处加入RC阻尼器,对光伏多逆变器系统谐振尖峰进行抑制,但这种方法增加了经济运行成本,造成系统产生更大的损耗。综上所述,针对逆变器系统谐振问题,一般基于单台逆变器对其进行分析研究,而对于逆变器集群并网谐振问题,目前国内外学者对其抑制有效性的研究探索较少。

因此,为了进一步对光伏逆变器集群的谐振进行研究,本研究从多逆变器并网出发,通过分析系统的传递函数得知光伏逆变器集群系统的谐振原因和谐振特性,在双电流闭环控制下,提出一种有源滤波电导控制方法抑制系统的谐振,最后通过仿真实验验证谐振抑制的有效性。

2 光伏逆变器集群系统模型

光伏逆变器集群系统的拓扑结构如图1所示,采用LCL型滤波器的光伏集群逆变器系统结构,通过并联公共并网点汇入大电网系统中^[1-3]。

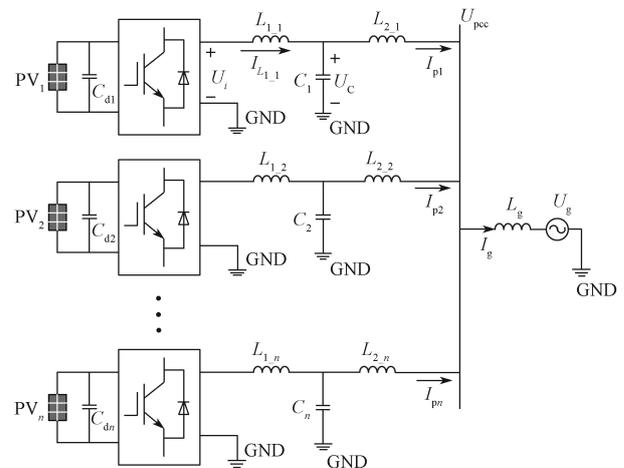


图1 光伏逆变器集群系统的拓扑结构

Fig. 1 Topological structure of photovoltaic inverter cluster system

图1所示光伏逆变器集群并网系统由光伏电源、逆变器、LCL滤波器、电网这4部分组成。 PV_1, PV_2, \dots, PV_n 为光伏电池阵列; $C_{d1}, C_{d2}, \dots, C_{dn}$ 为直流支撑电容; L_{1i}, L_{2i} 分别为逆变器交流侧电感和并网侧电感, $i=1, 2, \dots, n$; C_i 为滤波电容; L_g 为并网侧电感; U_g, I_g 为网侧电压和电流; U_i 为输出电压; $I_{L_{1i}}, I_{L_{2i}}$ 分别为流过电感 L_{1i} 和电感 L_{2i} 的电流; U_{pcc} 为系统中公共并网点总线电压; I_{p2} 为第2台逆变器并联后对第1台逆变器并网电流的影响。

3 光伏逆变器集群谐振机理及特性分析

3.1 LCL滤波器谐振频率分析

为简化逆变器结构,以单台光伏并网逆变器的LCL型滤波器为例进行研究分析,其等效电路图如图2所示,该图为LCL型滤波器和电网等效阻抗 L_g 所组成的等效回路。

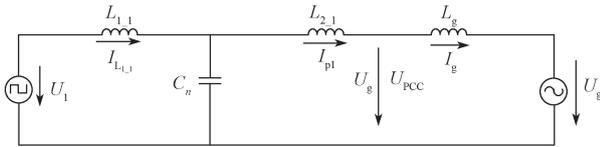


图2 单台光伏逆变器系统的等效电路图

Fig. 2 Single photovoltaic inverter system equivalent circuit

由图2可以得知，LCL型滤波器下光伏逆变器并网在复频域下的数学模型为

$$\begin{cases} U_1(s) = I_{L_{1-1}}(s)G_1(s) + G_C(s)I_C(s), \\ (G_2(s) + G_g(s))I_g(s) + U_g(s) = G_C(s)I_C(s), \\ I_{L_{1-1}}(s) = I_C(s) + I_g(s). \end{cases} \quad (1)$$

式中：

$$\begin{cases} G_1(s) = 1/L_{1-1}s, \\ G_C(s) = 1/C_n s, \\ G_2(s) = 1/L_{2-1}s, \\ G_g(s) = 1/L_g s. \end{cases} \quad (2)$$

根据式(1)(2)可得：

$$I_g(s) = \frac{U_1(s) - (s^2 L_{1-1} C_n + 1)U_g(s)}{s^3 L_{1-1}(L_{2-1} + L_g)C_n + s(L_{1-1} + L_{2-1} + L_g)}. \quad (3)$$

由函数表达式(3)可知，在给定LCL滤波器参数的条件下，系统并网电流 I_g 是由逆变器侧电压 U_1 和并网侧电压 U_g 来确定，因此单个逆变器并网系统输入为网侧电压、逆变器侧电压；输出为网侧电流系统。把网侧电压视作干扰量，可得出输入电压 $U_1(s)$ 到输出电流 $I_g(s)$ 的转移导纳 Y 为

$$Y = \frac{1}{s^3 L_{1-1}(L_{2-1} + L_g)C_n + s(L_{1-1} + L_{2-1} + L_g)}, \quad (4)$$

转移阻抗表达式为

$$Z = s^3 L_{1-1}(L_{2-1} + L_g)C_n + s(L_{1-1} + L_{2-1} + L_g). \quad (5)$$

当 $Z=0$ 时，在特定频率下逆变器系统会发生谐振，得出谐振频率为

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_{1-1} + L_{2-1} + L_g}{L_{1-1} C_n (L_{2-1} + L_g)}}. \quad (6)$$

3.2 光伏逆变器集群并网谐振特性分析

对图1所示逆变器集群拓扑结构进行特性分析，随着并联台数增多时，流过电网阻抗 L_g 的电流成倍增加。如果将其等效在单台逆变器下，折算到每台逆变器等效电路中相当于线路阻抗成倍增加。由此可知，并联逆变器台数的变化会直接影响电网等效阻抗，并对系统的谐振频率波动产生影响。LCL型光伏逆变器的等效控制框图如图3所示。

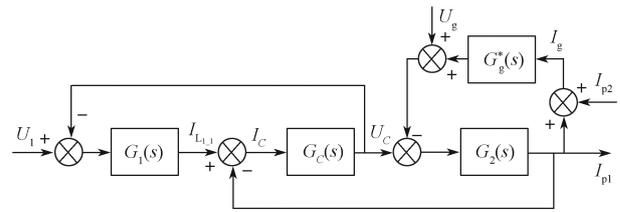


图3 LCL型逆变器的等效控制框图

Fig. 3 Equivalent block diagram of LCL inverter

分析图3可以得知，并网电流到逆变器输出电压的传递函数可表示为

$$G_{oi}(s) = \frac{G_1(s)G_2(s)G_C(s)}{G_k(s) + 1}, \quad (7)$$

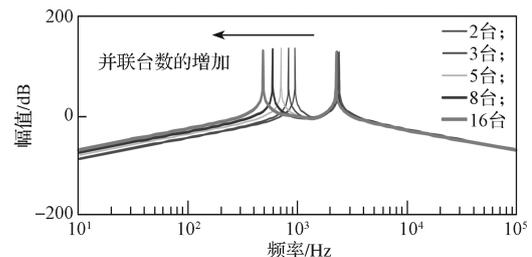
式中， $G_k(s)$ 的具体函数表达式如下：

$$\begin{aligned} G_k(s) = & G_1(s)G_C(s) + G_C(s)G_2(s) + G_1(s)G_C(s)G_2(s) + \\ & G_2(s)G_g^*(s) + G_1(s)G_2(s)G_g^*(s) + \\ & G_1(s)G_C(s)G_2(s)G_g^*(s). \end{aligned} \quad (8)$$

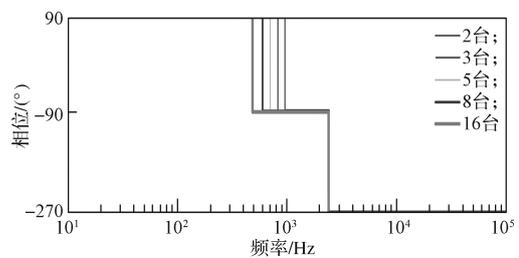
将式(2)代入式(7)，可得并联 n 台逆变器的谐振频率为

$$\begin{cases} f_{LCL} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_{1-1} + L_{2-1}}{L_{1-1} L_{2-1} C_n}}, \\ f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_{1-1} + L_{2-1} + nL_g}{L_{1-1} C_n (L_{2-1} + nL_g)}}. \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中： f_{LCL} 为逆变器自身产生的谐振频率； f_n 为并网逆变器集群产生的并联谐振频率。多台逆变器并网频率特性曲线如图4所示。



a) 幅值图



b) 相位图

图4 逆变器集群并网谐振频率的特性曲线

Fig. 4 Inverter cluster grid-connected resonant frequency characteristic curves

由图4可以看出, 当有电网阻抗作用时, 系统会出现两种类型的谐振: 一种为LCL逆变器内部谐振 f_{LCL} , 由图4b可以看出 f_{LCL} 谐振频率不会随着并联逆变器的台数和电网阻抗的增加而发生改变; 另一种谐振 f_n 是由光伏逆变器集群系统并联所引起的, 它与并联逆变器台数、电网阻抗密切相关, 由图4a可以看出, 逆变器并联台数增多时, 逆变器集群谐振频率向低频范围偏移, 其幅值也会随着减小。

通过式(9), 可以得到光伏逆变器集群并联台数与并网谐振频率的关系, 如图5所示。

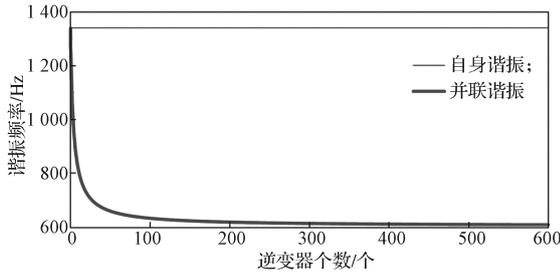


图5 逆变器集群并联台数与并网谐振频率的关系曲线
Fig. 5 Relationship curves between the inverter cluster parallel number and grid-connected resonant frequency

从图5可以看出, 逆变器集群自身谐振频率固定不变, 不会随着并联台数的增加而变化, 而并联谐振的频率会随着并联台数的增加而减小。

4 光伏逆变器集群谐振抑制策略

4.1 基于单台逆变器双闭环控制谐振抑制

本研究首先对单个光伏逆变器进行谐振分析, 采用电网电流外环、电容电流内环的双电流闭环控制策略^[14], 其控制框图如图6所示。

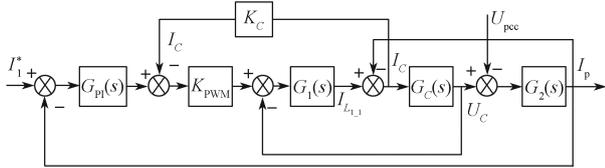


图6 双电流闭环控制框图

Fig. 6 Block diagram with dual-loop control

图6中, $G_{o2}(s)$ 为双电流闭环控制系统的开环传递函数, $K_{P_{PWM}}$ 为逆变桥传递增益系数, I_1^* 为系统输入量, I_p 为网侧的输出电流。 K_C 为电容电流反馈系数, $G_{PI}(s)$ 为PI控制器, $G_{P1}(s)=K_p+K_i/s$, K_p 为比例系数, K_i 为积分系数, 可得系统开环传递函数为

$$G_{o2}(s) = \frac{G_{PI}(s)K_{P_{PWM}}G_1(s)G_C(s)G_2(s)}{G_1(s)G_C(s)+G_C(s)G_2(s)+K_C K_{P_{PWM}}G_1(s)+1} \quad (10)$$

由式(10)可得系统的开环传递函数的波特图如图7所示。

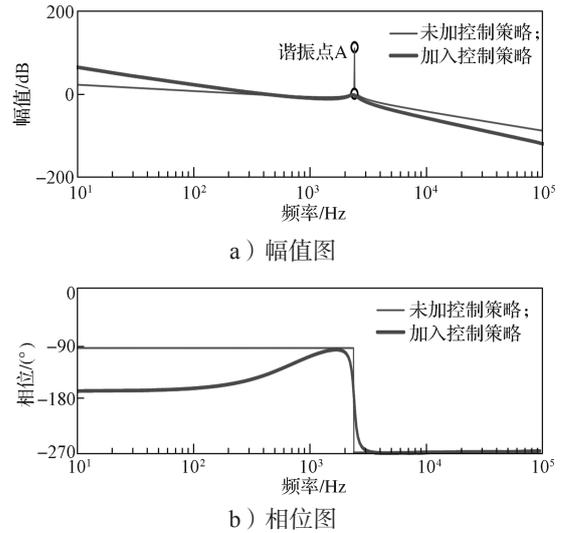


图7 双电流闭环控制的频率特征曲线

Fig. 7 Double current closed loop control frequency characteristic curves

由图7a可知, 加入双闭环控制结构后, 系统输出电流的谐振尖峰明显下降, 可见双电流闭环控制策略对单个逆变器谐振尖峰的抑制效果明显。

4.2 基于逆变器集群有源谐波电导法谐振抑制

引起逆变器集群并网产生谐振的因素很多, 包括逆变器自身的LCL滤波器、系统运行参数和并网侧等效阻抗参数等。对电网侧等效阻抗参数进行改变, 通常采用增加RC阻尼器和其他无源阻尼器, 此方法虽然对并网逆变器集群谐振有抑制效果, 但是会增加系统建造成本, 损耗也会增大^[15-17]。

本研究提出一种基于双电流闭环控制的有源谐波电导法, 在双闭环控制基础上, 且不改变逆变器拓扑结构也不增添传感器的情况下, 给谐波电流增加一条电导回路。加入电导回路后的系统结构模型如图8所示。

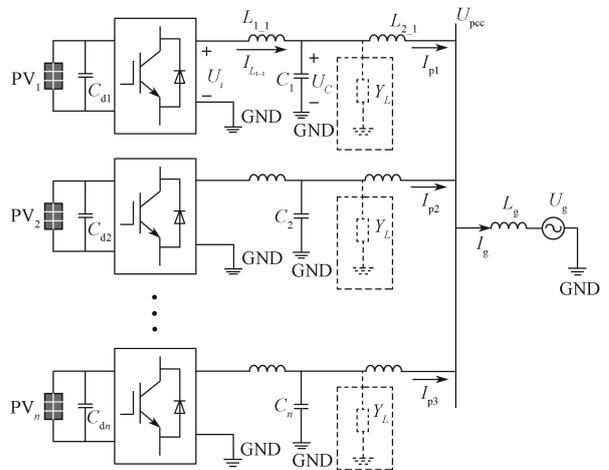


图8 谐波电导法模型拓扑结构

Fig. 8 Topological structure of the harmonic conductance model

图8中, Y_L 为并联的有源谐波电导, 当 $I_{L_{1-1}}$ 通过 LCL 滤波器, 高次谐波电流可通过 C_1 滤波, Y_L 能抑制低次谐波电流流入 L_{2-1} 和电网中去, 流入电网中的电流谐波含量大幅度减少, 因此, 有源滤波电导能有效避免谐振尖峰的出现。

双电流闭环控制的有源谐波电导法控制框图如图9所示。

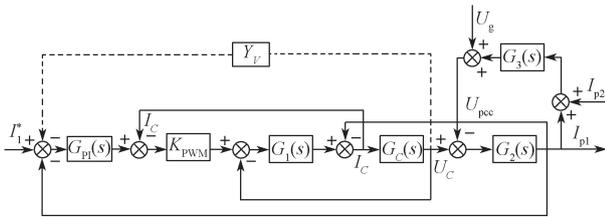


图9 电导法控制框图

Fig. 9 Control block diagram of the conductance method

由图9的控制框图可以推导出系统传递函数为

$$G_{o3}(s) = \frac{I_{p1}(s)}{I_1^*(s)} = \frac{-G_2(s)G_3(s)(1+K_{PWM}G_1(s))}{1+G_{V2}(s)} \quad (11)$$

式(11)中:

$$G_{V2}(s) = K_{PWM}G_1(s) + G_1(s)G_C(s) + G_2(s)G_C(s) + G_{P1}(s)K_{PWM}G_1(s)G_2(s)G_C(s) + G_{P1}(s)K_{PWM}G_1(s)G_C(s)Y_V(s) \quad (12)$$

式中: $Y_V(s) = 1/Y_V$ 。

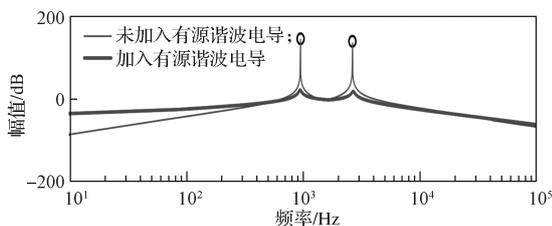
将式(2)代入式(12)可得:

$$G_{o2}(s) = \frac{A_1s^2 + A_2s}{A_3s^4 + A_4s^3 + A_5s^2 + A_6s + A_7} \quad (13)$$

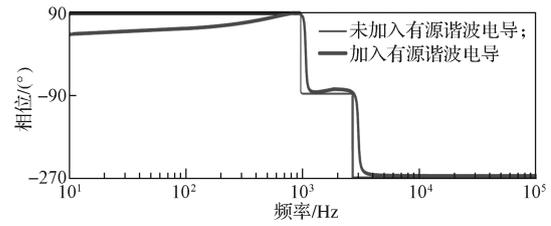
式(13)中:

$$\begin{aligned} A_1 &= -L_{1-1} \cdot C_1 \cdot Y_V; \\ A_2 &= -K_{PWM} \cdot C_1 \cdot Y_V; \\ A_3 &= L_{1-1} \cdot C_1 \cdot L_{2-1} \cdot L_g \cdot Y_V; \\ A_4 &= K_{PWM} \cdot C_1 \cdot L_{2-1} \cdot L_g \cdot Y_V; \\ A_5 &= (L_{1-1} + L_{2-1})L_g \cdot Y_V; \\ A_6 &= K_{PWM} \cdot K_P \cdot L_g (Y_V + L_{2-1}); \\ A_7 &= K_{PWM} \cdot K_I \cdot L_g (Y_V + L_{2-1}). \end{aligned}$$

由式(13)可得出有源谐波电导法控制传递函数波特图, 如图10所示。



a) 幅值图



b) 相位图

图10 电导法抑制电路频率特性曲线

Fig. 10 Frequency characteristic curves of suppression circuit by the conductance method

由图10a可知, 在双电流闭环控制结构的基础上, 未加入有源谐波电导, 逆变器谐振尖峰明显; 加入有源谐波电导, 逆变器自身谐振和并联谐振都得到了有效的抑制。

5 仿真分析

在 Matlab/Simulink 中搭建光伏集群逆变器并网系统的仿真模型, 模拟并联光伏逆变器接入电网系统, 验证加入双电流闭环控制谐波电导法并网谐振抑制效果。系统仿真参数如表1所示。

表1 光伏逆变器集群并网系统仿真参数

Table 1 PV inverter cluster grid-connected system simulation parameters

参数	符号及单位	取值
滤波器逆变器侧电感	L_{1-1}/mH	10
滤波器电容	$C/\mu\text{F}$	7
滤波器网侧电感	L_{2-1}/mH	2.5
电网等效阻抗	L_g/mH	1
电网电压	U_g/V	380
直流侧电压	U_{dc}/V	600
开关频率	f_{sw}/kHz	10
并网额定功率	P/kW	10

在光伏逆变器集群的三相电网系统中, 谐波电流会被分解到 dq 轴坐标系下, 与参考电流 I_{p2d}^* 、 I_{p2q}^* 进行计算分析得知, 会对控制系统造成影响。因此, 系统需要加入滤波器滤掉谐波电流中的交流分量, 输出直流信号, 使得 I_V 的 dq 轴直流分量能准确流入控制系统, 控制系统选取了截止频率很低的高阶滤波器。

本研究以两台光伏逆变器并网为研究分析对象, 并网系统的控制原理如图11所示。同时, 以第二台逆变器为例分析其性能, 在双电流闭环控制下, 对加入有源谐波电导前后三相并网系统电流进行分析, 波形变化图和 FFT 分析如图12和图13所示。

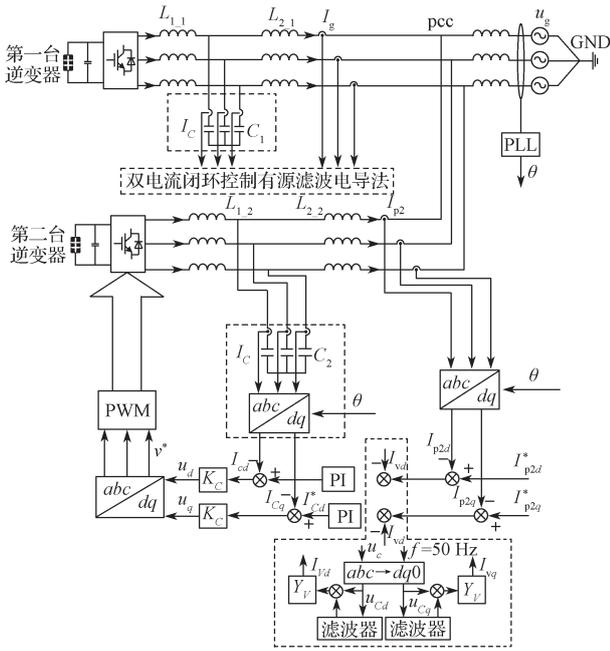
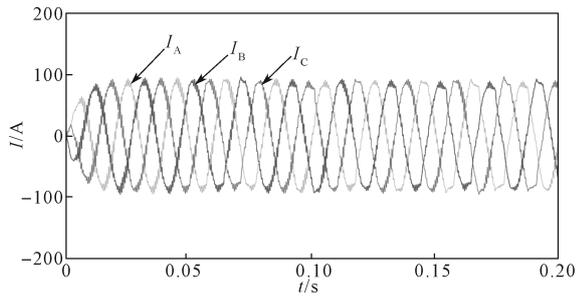
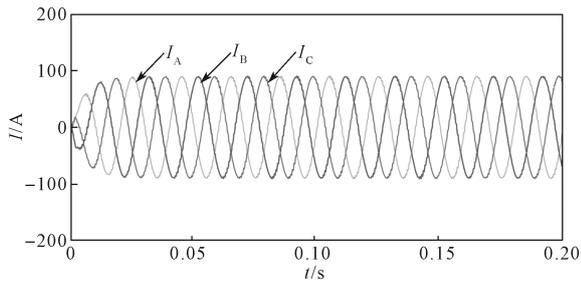


图 11 光伏集群逆变器并网系统控制原理图

Fig. 11 Control schematic diagram of photovoltaic cluster inverter grid-connected system



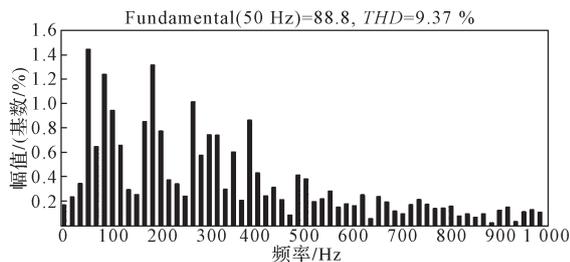
a) 加入有源滤波电导前



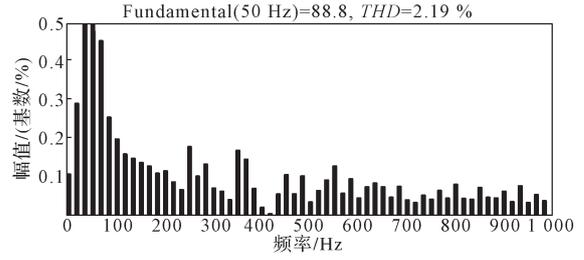
b) 加入有源滤波电导后

图 12 加入有源滤波电导前后的三相并网电流

Fig. 12 Three-phase grid-connected current with the active filter conductance



a) 加入有源滤波电导前



b) 加入有源滤波电导后

图 13 加入有源滤波电导前后的总谐波分析

Fig. 13 Total harmonic analysis with and without the addition of the active filter conductance

由图 12 可知，未加前能观察到网侧电流明显发生畸变现象，而且系统谐振现象比较严重；加入有源谐波电导后网侧电流波形明显改善。由图 13 可知，经过 FFT 分析，改进前总谐波含量 THD 为 9.37%，谐波含量比较高，改进后总谐波含量 THD 降至 2.19%。因此，由仿真结果表明，加入有源谐波电导后，对逆变器系统产生的谐振问题能有效抑制。

6 结语

针对光伏集群逆变器谐振问题，本研究提出了一种基于双电流闭环控制下，加入有源滤波电导的逆变器集群谐振抑制策略。研究表明，加入有源滤波电导对逆变器侧的低次谐波电流有抑制作用，可以有效地防止谐波电流汇入电网系统中，达到抑制光伏集群逆变器谐振的效果。仿真结果表明，本设计的控制策略验证了对光伏集群谐振抑制的有效性，能使逆变器的输出信号安全稳定并入电网系统，确保大电网系统供电的可靠性和安全性。

参考文献:

[1] 舒万韬, 洪芦诚, 刘宁波, 等. 多逆变器并网谐振特性分析 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(17): 5009-5019, 5298.
SHU Wantao, HONG Lucheng, LIU Ningbo, et al. An Analysis on Resonance Characteristics of Multi-Inverters Grid-Connected System[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 5009-5019, 5298.

[2] 解宝, 周林, 郝高锋, 等. 考虑电网阻抗影响的光伏并网逆变器稳定性与谐振分析及设计 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(22): 6662-6671.
XIE Bao, ZHOU Lin, HAO Gaofeng, et al. Stability and Resonance Analysis and Design of Photovoltaic Grid-Connected Inverters with Effect of Grid Impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(22): 6662-6671.

[3] 郑航, 张辉, 肖曦, 等. 微电网中并联逆变器

- 与电网的谐波交互分析[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2518-2524.
ZHENG Hang, ZHANG Hui, XIAO Xi, et al. Analysis of Harmonic Interaction Between Multi-Paralleled Inverters and Grid in Microgrid[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2518-2524.
- [4] WU W M, LIU Y, HE Y B, et al. Damping Methods for Resonances Caused by LCL-Filter-Based Current-Controlled Grid-Tied Power Inverters: An Overview[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(9): 7402-7413.
- [5] 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.
- [6] 许德志, 汪飞, 阮毅. LCL、LLCL 和 LLCCL 滤波器无源阻尼分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(18): 4725-4735.
XU Dezhi, WANG Fei, RUAN Yi. Passive Damping of LCL, LLCL and LLCCL Filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(18): 4725-4735.
- [7] BERES R N, WANG X F, BLAABJERG F, et al. Optimal Design of High-Order Passive-Damped Filters for Grid-Connected Applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(3): 2083-2098.
- [8] 张兴, 陈鹏, 余畅舟, 等. LCL 滤波并网逆变器逆变侧电流多次采样的单闭环控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 87-92, 107.
ZHANG Xing, CHEN Peng, YU Changzhou, et al. Single Closed-Loop Control Strategy Based on Multi-Sampled Inverter Side Currents for Grid-Connected Inverters with LCL Filters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 87-92, 107.
- [9] GUZMAN R, DE VICUNA L G, MORALES J, et al. Model-Based Active Damping Control for Three-Phase Voltage Source Inverters with LCL Filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(7): 5637-5650.
- [10] 陈新, 王赟程, 华森杰, 等. 采用混合阻尼自适应调整的并网逆变器控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3): 765-774.
CHEN Xin, WANG Yuncheng, HUA Miaojie, et al. Grid-Connected Inverters Control Schemes Based on Hybrid Damping Adaptive Control[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3): 765-774.
- [11] 吴隆辉, 卓放, 张鹏博, 等. 一种用于配电系统谐振抑制及谐波治理的新型 PAPF 控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(27): 70-77.
WU Longhui, ZHUO Fang, ZHANG Pengbo, et al. A Novel Control Method of PAPF for Resonance Damping and Harmonics Compensation in Power System[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(27): 70-77.
- [12] 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.
SUN Zhen'ao, YANG Zilong, WANG Yibo, et al. The Cause Analysis and Suppression Method of Resonances in Clustered Grid-Connected Photovoltaic Inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(2): 418-425.
- [13] 万庆祝, 张翊帆, 张学哲, 等. 光伏集群逆变器的谐振机理及抑制技术研究[J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3377-3384.
WAN Qingzhu, ZHANG Hongfan, ZHANG Xuezhe, et al. Research on Resonance Mechanism and Suppression Technology of Photovoltaic Cluster Inverter[J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3377-3384.
- [14] 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.
HU Wei, ZHOU Youbin, DU Zhen'an, et al. Research on Resonance Suppression Strategy of System with Multiple Grid-Connected Inverters[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 45-50.
- [15] LEITNER S, YAZDANIAN M, ZIAEINEJAD S, et al. Internal Model-Based Active Resonance Damping Current Control of a Grid-Connected Voltage-Sourced Converter with an LCL Filter[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6025-6036.
- [16] 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.
LI Lifeng, ZHENG Tianwen, GUO Yan, et al. Resonance Analysis and Suppression Strategy for Multi-Parallel Inverters Based on Phase Angle Compensation of Virtual Impedance[J]. Power System Technology, 2018, 42(12): 4069-4075.
- [17] 于航, 李鹏, 夏曼, 等. 基于有源阻尼器的并联逆变器集群集中式谐振抑制策略[J]. 电测与仪表, 2017, 54(11): 71-75.
YU Hang, LI Peng, XIA Man, et al. A Centre Resonance Mitigation Strategy for Clustered Grid-Connected Inverters Based on Active Damper[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(11): 71-75.

(责任编辑: 姜利民)