

DOI: 10.7667/PSPC151432

基于陷波控制的 LCL 型光伏并网逆变器谐波谐振抑制研究

田鹏, 宣文华, 牛益国

(国网冀北电力有限公司秦皇岛供电公司, 河北 秦皇岛 066000)

摘要: 为研究光伏并网谐波谐振现象, 针对 LCL 型光伏并网系统, 建立了光伏并网逆变器数学模型, 采用频域分析方法研究多台逆变器并网时的谐波谐振问题。建立单台和多台逆变器并联的输出阻抗模型, 研究不同并联台数情况下逆变器谐波谐振特性和多并网逆变器相互间的耦合关系。在此基础上, 提出逆变器的陷波控制方法抑制光伏并网系统的谐波谐振。仿真结果表明, 该方法滤波效果好、能够抑制 LCL 型光伏并网系统的谐波谐振, 同时对电网背景谐波噪声也具有较好的抑制效果。

关键词: 光伏并网; 谐波谐振; 阻抗模型; 频域分析; 陷波控制

Suppression of harmonic resonance for photovoltaic grid-connected inverter with LCL filter based on notch filter control

TIAN Peng, XUAN Wenhua, NIU Yiguo

(Qinhuangdao Power Supply Company, State Grid Jibei Electric Power Company Limited, Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: In order to analyze the mechanism of harmonic resonance phenomenon in PV grid-connected system, a LCL type inverter model is established, which adopts frequency domain analysis to research harmonic resonance problems when multiple inverters are connected to the grid. Besides, the inverter output impedance model of a single and multiple inverters is established to study the harmonic resonance characteristics and the coupling relationship between each inverter in the condition of different parallel numbers of inverter. A method of notch control is proposed to suppress the harmonic resonance of the system. Simulated results show that this method is good-effected in filtering, and can suppress the harmonic resonance of PV grid-connected system in the type of LCL filter; at the same time, the background harmonic noise of the grid is also well suppressed.

Key words: PV grid-connected system; harmonic resonance; impedance model; frequency domain analysis; notch filter control

0 引言

光伏并网发电系统的三相逆变器通常使用 PWM 调制技术, 会向电网注入谐波。虽然 LCL 型滤波器对逆变器输出电流高次谐波分量具有较强的抑制能力, 但由于其阶数为 3 阶, 可能会产生谐波谐振问题^[1]。另一方面, 当多个光伏同时并网时, 不同并网逆变器会产生谐波交互影响^[2-3], 也会引起谐波谐振。这些问题给电网带来了严峻的挑战^[4-6], 影响对用户供电的安全性^[7-9]。因此, 研究合理的光伏并网系统谐波谐振抑制策略对提高光伏并网发电系统的可靠性, 减少对电网的影响是十分必要的。

针对光伏并网系统谐波谐振问题, 文献[10]对比分析了 L 型和 LCL 型逆变器对并网系统谐波畸变率的影响, 得到 LCL 型并网逆变器具有较低的谐波

畸变率。但 LCL 滤波器是一个三阶系统, 存在高频谐振问题, 会影响系统的稳定性, 对 LCL 滤波器的参数设计和系统的控制策略提出了更高的要求^[11-12]。文献[13]针对 LCL 型滤波器的参数设计问题进行了研究, 综合考虑电感、电容以及与谐振频率之间的关系, 使其具有最优的滤波效果。文献[14]建立了谐波谐振数学模型, 分析了谐波放大系数与输电线距离、谐波次数、谐波类型等参数的关系, 即系统的谐振特性。文献[15]建立了光伏并网的小信号等效模型, 分析光伏并网发电系统多逆变器并联的谐振特性。文献[16]根据三相并网逆变器的运行特点、LCL 滤波器及 PR 调节器的工作特性设计了光伏并网多谐振 PR 控制器。文献[17]分析重复控制模块的频率特性, 得到影响重复控制稳定性的因素, 并提出一种应用于 LCL 型逆变器的控制结构。若通过增

加逆变器的无源阻尼来抑制谐波谐振, 需要投入新设备, 且功耗大, 不适于大功率逆变器。文献[18]搭建了光伏并网系统的阻抗模型, 采用增加虚拟阻抗的方法, 可以有效抑制谐波谐振问题。

本文从频域角度分析 LCL 型光伏并网系统谐波谐振产生机理, 得到谐波谐振频率。研究多台逆变器之间的耦合作用对谐波谐振的影响, 提出逆变器陷波控制策略抑制谐波谐振, 并通过仿真验证了陷波控制策略的有效性。

1 典型光伏并网系统的结构模型

1.1 光伏并网系统的拓扑结构

光伏并网发电系统的拓扑结构如图 1 所示, 将太阳能光伏电池发出的电能由最大功率跟踪(MPPT)控制后, 经 DC/AC 逆变为交流, 并在电网的公共耦合点接入。图中, u_1 为逆变器输出的交流电压, u_2 为并网点电压。

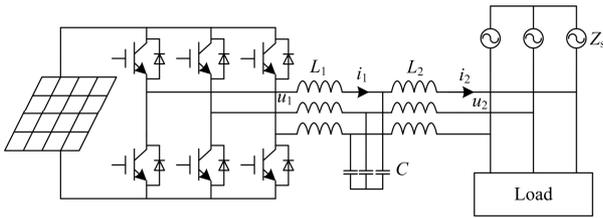


图 1 光伏并网的典型拓扑结构

Fig. 1 A typical topology of PV system

1.2 光伏并网系统 LCL 滤波器的频域特性

不考虑阻尼时, 由 LCL 型滤波器的等效电路可知并网侧电流 $I_2(s)$ 与逆变器输出电压 $U_1(s)$ 之间的传递函数为

$$\frac{I_2(s)}{U_1(s)} = \frac{1}{L_1 L_2 C s^3 + (L_1 + L_2)s} \quad (1)$$

根据传递函数, L 型滤波器和 LCL 型滤波器的幅频特性 bode 图如图 2 所示。

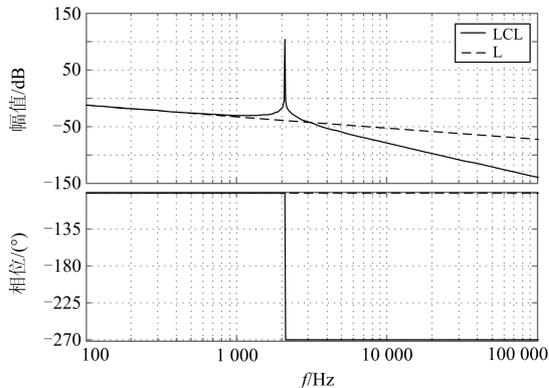


图 2 LCL 和 L 型滤波器特性分析

Fig. 2 Characteristic analysis of the LCL and L filter

在低频区域, L 型和 LCL 型滤波器的频率响应基本相同, 可认为是 LCL 型滤波器总电感值与 L 型滤波器电感值等效相等。但 LCL 型滤波器存在明显的谐振现象, 对并网系统的稳定性造成威胁。

2 光伏并网的谐波谐振分析

LCL 型光伏并网系统的等效电路如图 3 所示。

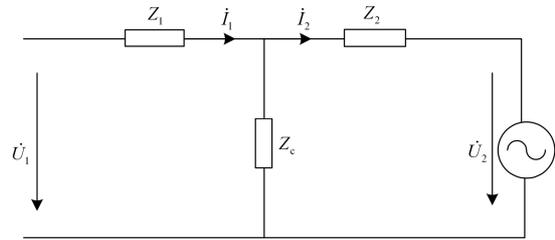


图 3 LCL 型光伏并网系统的等效结构

Fig. 3 Equivalent model of the grid-connected system

电流 $I_1(s)$ 、 $I_2(s)$ 关于 $U_1(s)$ 、 $U_2(s)$ 的传递函数可用叠加原理计算得到, 如式(2)所示。

$$I_1(s) = \frac{Z_2 + Z_c}{\Delta} U_1(s) - \frac{Z_c}{\Delta} U_2(s) \quad (2)$$

$$I_2(s) = \frac{Z_c}{\Delta} U_1(s) - \frac{Z_c + Z_1}{\Delta} U_2(s)$$

式中, $\Delta = Z_1 Z_2 + Z_1 Z_c + Z_2 Z_c$ 。

多台逆变器并网时, 根据叠加原理, 取其中一台为研究对象, 则并网逆变器的网侧输出电流 $I_2(s)$ 和逆变器输出电压 $U_1(s)$ 之间的传递函数为

$$\frac{I_2(s)}{U_1(s)} = \frac{1}{Z_c + Z_A // Z_B // Z_L // Z_s} \cdot \frac{Z_B}{Z_B + Z_A // Z_L // Z_s} \quad (3)$$

式中: $Z_A = \frac{1}{m-1} \frac{\Delta}{Z_1 + Z_c}$; $Z_B = \frac{\Delta}{Z_1}$; $Z_C = \frac{\Delta}{Z_c}$;

$m(m \geq 2)$ 为并联逆变器的台数; Z_L 为负荷阻抗; Z_s 为电源的阻抗。

逆变器不同并联合数的谐波谐振特性如图 4 所示。与图 2 相比, 逆变器谐波谐振幅频特性中谐振峰个数变为 2 个, 谐振频率在 1 k~2 kHz 之间。随着并联合数的增加, 两个谐振峰间的距离也增大, 当 $m=8$ 时, 还出现了更为复杂的情况, 即谐振峰的个数增加为 3 个。

多台逆变器并网运行时, 为分析它们之间的耦合关系, 根据式(2)以及逆变器控制原理, 建立单个逆变器的输出阻抗模型如图 5 所示, 其中 PI 为比例积分控制器。

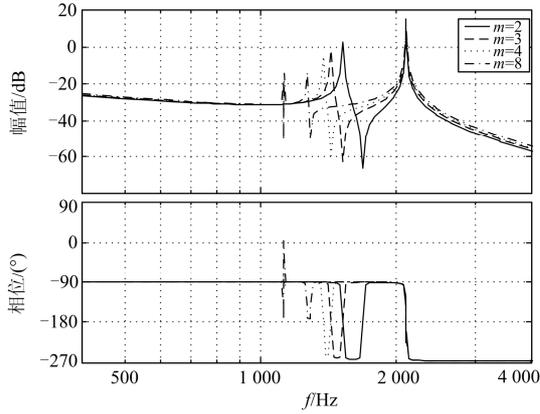


图 4 逆变器并联台数的影响

Fig. 4 Influence of the parallel number of inverters

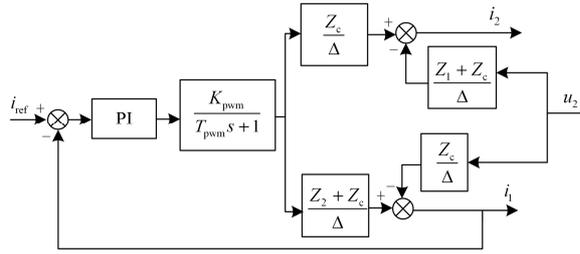


图 5 单个逆变器的输出阻抗模型

Fig. 5 Impedance model of a single inverter

图中, $K_{pwm}=400$, $T_{pwm}=3 \times 10^{-9}$ s。滤波器输出电流 $I_2(s)$ 和并网点电压 $U_2(s)$ 之间的关系为

$$I_2(s) = \frac{1}{\Pi} \{ G_{PI}(s)G_{pwm}(s)G_1(s)I_{ref}(s) - G_3(s)U_2(s) + [G_1(s)G_4(s) - G_2(s)G_3(s)]G_{PI}(s)G_{pwm}(s)U_2(s) \} \quad (4)$$

式中: $\Pi=1+G_{PI}(s)G_{pwm}(s)G_2(s)$; $G_1(s)=\frac{Z_c}{\Delta}$; $G_2(s)=\frac{Z_2+Z_c}{\Delta}$; $G_3(s)=\frac{Z_1+Z_c}{\Delta}$; $G_4(s)=\frac{Z_c}{\Delta}$; $G_{PI}(s)=K_p + \frac{K_i}{s}$; $G_{pwm}(s)=\frac{K_{pwm}}{T_{pwm}s+1}$ 。

根据式(4)建立关于 i_{ref} 和 U_2 的含多台并网逆变器的光伏系统诺顿等效电路, 如图 6 所示。

Y_i 为第 i 台并网逆变器的等效导纳, Y_L 为负荷的导纳, Y_s 为电网的导纳。假设并网逆变器的总台数为 m , 那么在 PCC 处的电压满足

$$U_2(s) = \frac{\sum_{i=1}^m K_i I_{refi}(s) + Y_s(s)U_s(s)}{\Gamma} \quad (5)$$

式中, $\Gamma = \sum_{i=1}^m Y_i + Y_L + Y_s$ 。由式(4)和式(5)可得第 i 台并网逆变器滤波器输出电流 $I_{2i}(s)$ 为

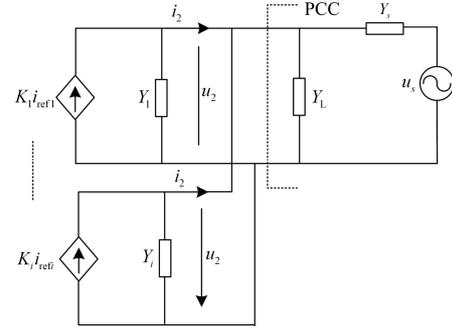


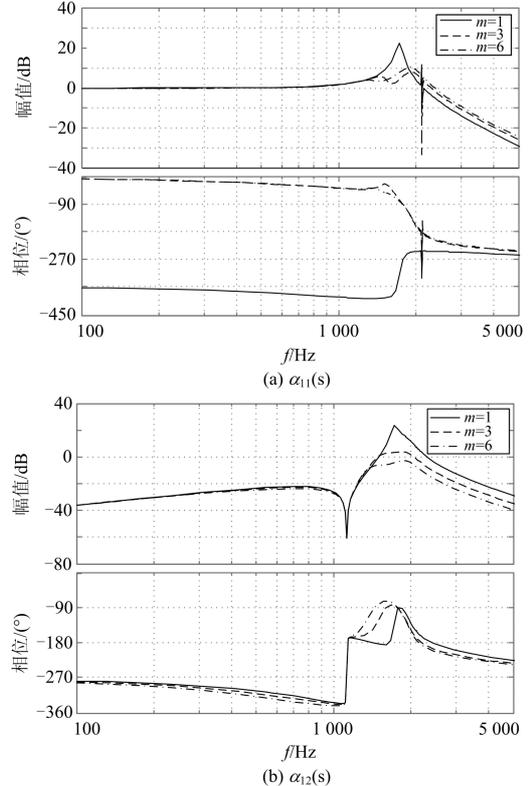
图 6 多逆变器并网光伏系统的诺顿等效电路

Fig. 6 Norton equivalent circuit of multi-inverter PV system

$$I_{2i}(s) = K_i I_{refi}(s) - Y_i U_2(s) = (K_i - Y_i \frac{K_i}{\Gamma}) I_{refi}(s) - Y_i \sum_{j=1, j \neq i}^m \frac{K_j I_{refj}(s)}{\Gamma} - Y_i \frac{Y_s}{\Gamma} U_s(s) = \alpha_{ii}(s) I_{refi}(s) - \sum_{j=1, j \neq i}^m \alpha_{ij}(s) I_{refj}(s) - \beta_i(s) U_s(s) \quad (6)$$

式中: $\alpha_{ii}(s) = K_i - Y_i K_i / \Gamma$, 为逆变器耦合对并网输出电流影响; $\alpha_{ij}(s) = Y_i K_j / \Gamma$, 为逆变器 i 和 j 之间参考电流的耦合度; $\beta_i(s) = Y_i Y_s / \Gamma$, 为逆变器 i 和电网之间的耦合度。

上述耦合系数的频域特性 Bode 图如图 7 所示, 表明各耦合系数随频率的变化关系。



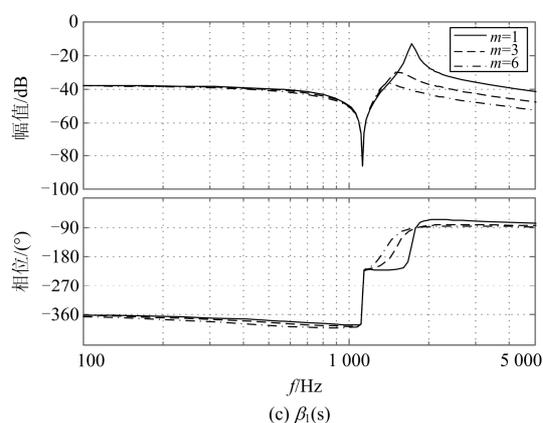


图 7 多并网逆变器间的影响
Fig. 7 Coupling of multi-inverter

3 基于陷波控制的谐波谐振抑制

光伏并网系统采用的是 PQ 控制策略, 这里提出抑制谐波谐振的逆变器控制策略——陷波控制。陷波控制指在形成 PWM 参考信号前, 引入 50 Hz 陷波传递函数, 分离工频成分和其它频率成分, 使 PWM 载波控制信号为工频正弦信号, 而不含其它频率成分。50 Hz 陷波器的传递函数为

$$G_b(s) = \frac{k(s^2 + \omega^2)}{s^2 + Bs + \omega^2} \quad (7)$$

这里 k 取 1, $\omega=2\pi f=314 \text{ rad/s}$, $B=2\pi f_b$ 。 f_b 取不同值时, 陷波传递函数 Bode 图如图 8 所示。

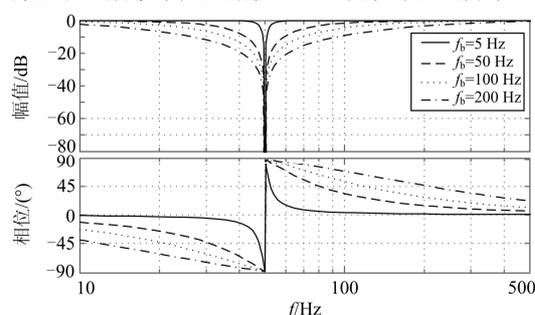


图 8 f_b 取不同值时的 Bode 图
Fig. 8 Bode diagram of different f_b

图 8 中基频成分的幅值极大地衰减, 其他频率成分幅值变化不大, 可见经过陷波控制能够很好地将工频成分和其它频率成分分离, 仅保留工频成分。随着 f_b 减小, 对工频附近成分的提取能力增强; 反之亦然。但 f_b 减小时, 50 Hz 陷波器的暂态响应速度会变慢。综合考虑系统响应速度和对工频成分的分离能力是 f_b 取值的关键。

运用陷波控制提取工频成分的控制策略方框图如图 9 所示。

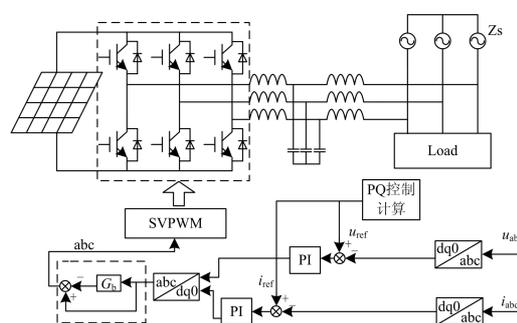


图 9 陷波控制策略
Fig. 9 Notch control strategy

由第 2 节的分析得到: 并网逆变器和电网之间的谐振是由于阻抗问题产生的。阻抗的改变会影响系统谐波谐振频率, 陷波控制目的在于滤除可能引起谐振的频率, 只保留工频成分, 实现系统稳定运行。

4 仿真验证

对上述逆变器控制方法进行仿真验证, 光伏并网系统参数如表 1 所示, 搭建 SIMULINK 仿真模型, 模型中包含两台并网逆变器, 且在同一并网点并入系统, 验证基于频域分析的谐波谐振抑制方法的有效性。光伏并网逆变器控制参数如表 2 所示。

表 1 光伏并网系统参数

| Table 1 Parameters of PV system | |
|---------------------------------|---------------------------------------|
| 电网电压 | 380 V |
| 电网阻抗 | $R_s=0.1 \Omega$, $L_s=2 \text{ mH}$ |
| 滤波电容 | $C=4 \mu\text{F}$ |
| 逆变器侧阻抗 | $R_1=0.1 \Omega$, $L_1=5 \text{ mH}$ |
| 电网侧阻抗 | $R_2=0.1 \Omega$, $L_2=2 \text{ mH}$ |

表 2 光伏并网逆变器控制参数

| Table 2 Control parameters of PV system | | | |
|---|---------------|-----------------|--------------|
| 逆变器 | P/kW | Q/kvar | PI 参数 |
| 逆变器 1 | 30 | 0 | $K_p=0.1984$ |
| | | | $K_i=3.3069$ |
| 逆变器 2 | 10 | 0 | $K_p=0.1984$ |
| | | | $K_i=3.3069$ |

两台光伏逆变器并网后电流出现明显的畸变, 对其进行傅里叶分析可得图 10。结合图 5 的分析可知谐振频率附近 1.6 k~1.9 kHz 频段内谐波含量较大, 光伏并网系统谐波谐振引起了谐波电流放大。

4.1 陷波控制效果

为保证系统的响应速度, 降低对谐波分量的衰减, 取 $f_b=100 \text{ Hz}$, 给系统加入陷波控制的工作过

程为：起始时刻光伏并网运行，0.05 s 投入负荷，0.1 s 切除负荷；0.15 s 对逆变器 1 投入陷波器控制，0.2 s 切除该控制。逆变器 1 和逆变器 2 输出有功与无功功率如图 11 所示。由图 11 可以看出陷波控制方法可以根据需要对系统进行动态控制，对电流进行傅里叶分析，结果如图 12 所示。采用陷波控制后，电流波形中引发谐振的频率成分被滤除，其余各次频率成分含量也很低，谐波畸变率为 0.39%，说明陷波控制方法的抑制效果明显。

4.2 陷波控制策略对高斯白噪声的抑制

从上述分析可以得出基于陷波控制原理的逆变器控制策略对谐波谐振问题具有更好的抑制效果。

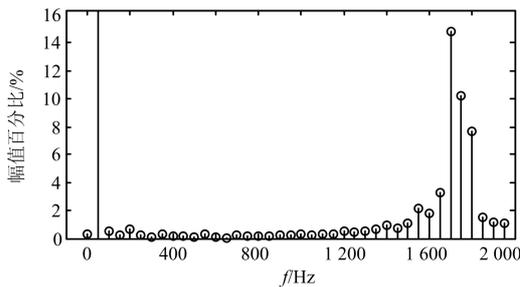
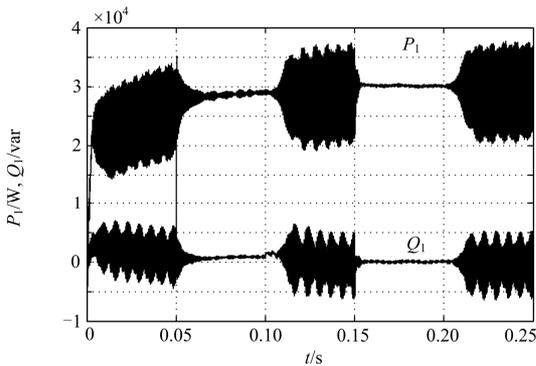
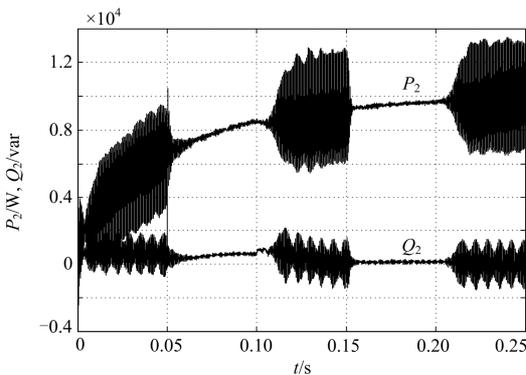


图 10 不加抑制措施的 PCC 电流各次谐波含量
Fig. 10 Simulated current and FFT without suppression measures at PCC



(a) 逆变器1输出的有功与无功功率



(b) 逆变器2输出的有功与无功功率

图 11 逆变器输出的有功与无功功率
Fig. 11 Waveform of active and reactive power

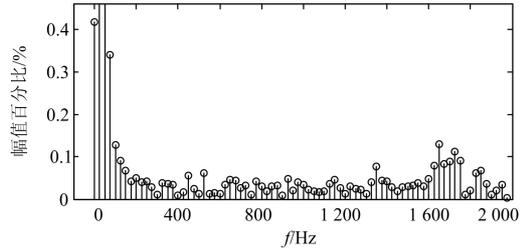
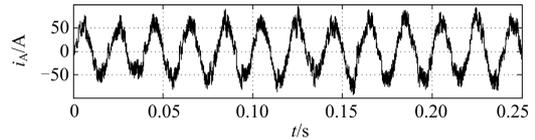
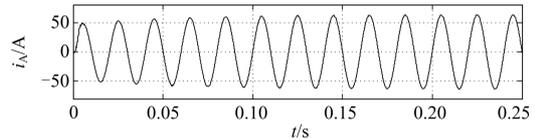


图 12 PCC 点电流各次谐波含量
Fig. 12 Simulated current and FFT at PCC

在此基础上，给电网的电流信号加入高斯白噪声，用于模拟电网背景谐波，验证该控制方法对电网中噪声的抑制能力。电流信号加入噪声后的波形如图 13(a)所示(以 A 相为例)，波形出现了明显的畸变。采用陷波控制方法后仿真波形如图 13(b)所示。对比发现该控制方法可实现抑制谐波谐振的目的，输出电流中仅保留 50 Hz 的工频成分，滤波效果较好。



(a) 高斯白噪声对电流波形的影响



(b) 对噪声的抑制

图 13 陷波控制对高斯白噪声的抑制作用
Fig. 13 Suppression to Gaussian white noise

4.3 陷波控制策略对功率波动的抑制

综上所述，光伏并网时，先投入电容支路的阻抗，以抑制并网瞬间引起的功率波动，接着切除电容支路的电阻，并投入陷波控制策略。如在 $t=0.02$ s 时光伏并入电网，同时投入电容支路的阻抗； $t=0.05$ s 时投入陷波控制，并将电容支路的阻抗切除。这样，PCC 处的功率如图 14 所示，并网系统的谐波谐振以及并网瞬间功率的波动得到了较好地抑制。

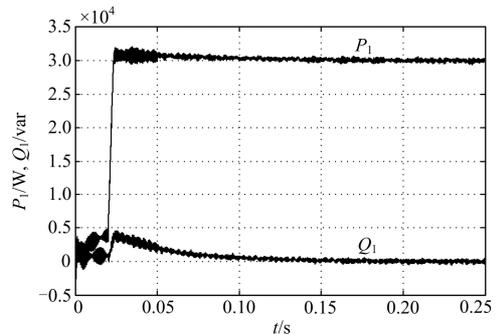


图 14 陷波控制实际应用

Fig. 14 Application of Notch control strategy

5 结论

本文针对 LCL 型光伏并网的谐波谐振问题, 利用 Bode 图分析多台逆变器对谐波谐振的影响和相互耦合关系, 提出基于频域分析的逆变器陷波控制策略来抑制谐波谐振。主要结论如下:

(1) 多个 LCL 型光伏逆变通过相同的 PCC 点并网时, 向系统注入谐波电流, 逆变器彼此间具有耦合关系, 且逆变器的台数变化时谐振频率和谐振峰的位置也随之发生相应的改变。

(2) 陷波控制方法适用于光伏并网逆变器的控制, 当系统中多台逆变器同时并联投入时, 能够较好的抑制谐波谐振。陷波控制方法也能改善并网系统的背景谐波问题, 具有良好的工作特性。

(3) 陷波控制策略也适用于含逆变器工作的其他场合, 可以动态控制, 操控性强。

参考文献

- [1] 刘书铭, 李陈莹, 李琼林, 等. 电力系统串联谐波谐振的特性分析与灵敏度计算[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 21-27.
LIU Shuming, LI Chenying, LI Qionglin, et al. Characteristics analysis of power system series harmonic resonance and sensitivity calculation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 21-27.
- [2] 许德志, 汪飞, 毛华龙, 等. 多并网逆变器与电网的谐波交互建模与分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12): 64-71.
XU Dezhi, WANG Fei, MAO Hualong, et al. Modeling and analysis of harmonic interaction between multiple grid-connected inverters and the utility grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(12): 64-71.
- [3] 韩莹, 陈维荣, 李奇, 等. 分布式电源并网逆变器谐波抑制方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(9): 1-6.
HAN Ying, CHEN Weirong, LI Qi, et al. Harmonic suppression methods for grid-connected inverter of distributed generation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(9): 1-6.
- [4] 陈晟. 电能质量与供电可靠性关系分析[J]. 高压电器, 2013, 49(12): 99-103.
CHEN Sheng. Analysis of relationship between power quality and power supply reliability[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(12): 99-103.
- [5] 潘爱强, 时珊珊, 董瑞安, 等. 微网电能质量特征及其监测分析[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 133-138.
PAN Aiqiang, SHI Shanshan, DONG Ruian, et al. Power quality characteristics and detection concerning in microgrid[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 133-138.
- [6] 易桂平, 胡仁杰. 分布式电源接入电网的电能质量问题研究综述[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(1): 38-46.
YI Guiping, HU Renjie. Survey on the power quality question resultant from connection of distributed power generation to the grid[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(1): 38-46.
- [7] 崔红芬, 汪春, 叶季蕾, 等. 多接入点分布式光伏发电系统与配电网交互影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 91-97.
CUI Hongfen, WANG Chun, YE Jilei, et al. Research of interaction of distributed PV system with multiple access points and distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 91-97.
- [8] 侯玉强, 李威. 大规模光伏接纳对电网安全稳定的影响及相关制约因素分析[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(4): 73-77, 84.
HOU Yuqiang, LI Wei. Influence of integration of large-scale photovoltaic on grid and key factors restricting its accepted capacity[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(4): 73-77, 84.
- [9] 黄冬冬, 吴在军, 窦晓波, 等. 光伏规模化并网的电能质量复合控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 107-112.
HUANG Dongdong, WU Zaijun, DOU Xiaobo, et al. A power quality composite control strategy based on large-scale grid-connected photovoltaic power generation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 107-112.
- [10] 徐少华, 任永峰, 刘峰. 新能源发电系统中 L 型及 LCL 型变流器对比分析[J]. 电气应用, 2013, 32(16): 54-59.
XU Shaohua, REN Yongfeng, LIU Feng. L and LCL converter analyzed in new energy generation systems[J]. Electric Technology, 2013, 32(16): 54-59.
- [11] TANG Yi, POH Chiang Loh, WANG Peng, et al. Generalized design of high performance shunt active power filter with output LCL filter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(3): 1443-1452.
- [12] 李泽斌, 罗安, 田园, 等. LCL 型光伏并网逆变器电流

- 内环控制方法[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2772-2778.
LI Zebin, LUO An, TIAN Yuan, et al. Inner current loop control method for photovoltaic grid-connected inverter with LCL filter[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2772-2778.
- [13] 黄亚峰, 李龙, 严干贵, 等. 大容量光伏逆变器LCL滤波器参数优化设计[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 104-109.
HUANG Yafeng, LI Long, YAN Gangui, et al. Parameter optimization design for LCL filter of large capacity PV inverter[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 104-109.
- [14] 谢宁, 罗安, 马伏军, 等. 大型光伏电站与电网谐波交互影响[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 9-16.
XIE Ning, LUO An, MA Fujun, et al. Harmonic interaction between large-scale photovoltaic power stations and grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 9-16.
- [15] 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.
- [16] 杭丽君, 李宾, 黄龙, 等. 一种可再生能源并网逆变器的多谐振 PR 电流控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(12): 51-58.
HANG Lijun, LI Bin, HUANG Long, et al. A multi-resonant PR current controller for grid-connected inverters in renewable energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(12): 51-58.
- [17] 滕国飞, 肖国春, 张志波, 等. 采用重复控制的LCL型并网逆变器单闭环电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(24): 13-21.
TENG Guofei, XIAO Guochun, ZHANG Zhibo, et al. A single-loop current control method for LCL-filtered grid-connected inverters based on the repetitive controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(24): 13-21.
- [18] 曾正, 赵荣祥, 吕志鹏, 等. 光伏并网逆变器的阻抗重塑与谐波谐振抑制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4547-4558.
ZENG Zheng, ZHAO Rongxiang, LÜ Zhipeng, et al. Impedance reshaping of grid-tied inverters to damp the series and parallel harmonic resonances of photovoltaic systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(27): 4547-4558.

收稿日期: 2015-08-14

作者简介:

田 鹏(1969-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为分布式光伏并网及其电能质量问题; E-mail: qhdtianpeng@aliyun.com

宣文华(1977-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为分布式光伏并网及其电能质量问题; E-mail: xuan.wenhua@nc.sgcc.com.cn

牛益国(1975-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为分布式光伏并网。E-mail: niu.yiguo@nc.sgcc.com.cn

(编辑 张爱琴)