

提高光伏并网逆变器在弱电网下稳定性的阻抗 相角补偿控制^{*}

高选杰, 苗虹, 曾成碧, 熊正勇
(四川大学 电气信息学院, 成都 610065)

摘要:针对 LCL 型并网逆变器自身存在的谐振现象, 提出一种电容电压惯性反馈控制策略, 来抑制其谐振尖峰。在弱电网状况下, 由于电网阻抗和并网逆变器输出阻抗的相互作用, 使得并网逆变器的稳定性急剧恶化。于是提出输出阻抗相角补偿加滤波器的方法, 提高逆变器输出阻抗相角使其满足稳定裕度, 从而提高并网逆变器在弱电网下的稳定性。在 MATLAB/Simulink 仿真平台上搭建并网逆变器系统仿真模型, 对所提方法进行仿真验证。仿真结果表明, 所提方法不仅能提高并网逆变器的稳定性, 而且能改善并网电流的质量, 降低谐波总畸变率。

关键词:并网逆变器; 弱电网; 惯性反馈; 相角补偿; 相角裕度; 谐波总畸变率

DOI:10.19753/j.issn1001-1390.2019.022.001

中图分类号: TM615

文献标识码: B

文章编号: 1001-1390(2019)22-0001-06

Impedance phase angle compensation control for improving stability of photovoltaic grid-connected inverter in weak grid

Gao Xuanjie, Miao Hong, Zeng Chengbi, Xiong Zhengyong

(School of Electrical Engineering and Information Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Aiming at the resonance phenomenon of grid-connected inverter with LCL, an inertial feedback control strategy based on capacitor voltage is proposed to suppress the resonance peak. However, in the case of weak grid, the stability of grid-connected inverter deteriorates sharply due to the interaction between the grid impedance and the output impedance of grid-connected inverter. Therefore, a phase angle compensation method with filter is proposed to improve the output impedance phase angle of the inverter to meet the stability margin, thus improving the stability of grid-connected inverter in weak grid. The simulation model of grid-connected inverter system is built on MATLAB/Simulink platform and the proposed method is verified by simulation. The simulation results show that the proposed method cannot improve the stability of grid-connected inverter, but also improve the quality of grid-connected current and reduce the total harmonic distortion rate (THD).

Keywords: grid-connected inverter, weak grid, inertial feedback, phase angle compensation, phase margin, total harmonic distortion rate

0 引言

由于并网逆变器自身容易出现谐振问题, 如果滤波器控制策略及参数设计不合适, 会导致系统不稳定。在过去几年中, 已有大部分学者建立了多种能够控制 LCL 谐振的阻尼控制方法。现有的有源阻尼方法包括滤波器有源阻尼^[1]、电容电流反馈有源阻尼^[2-4]、电容

电压反馈有源阻尼^[5]以及电网电流反馈有源阻尼^[6-7]。以往的研究表明, 在不考虑电网阻抗的情况下, 采用有源阻尼方法能够很好地解决并网逆变器的谐振问题。但是随着分布式发电系统的接入, 弱电网阻抗将不可忽略, 导致并网逆变器在弱电网状况下, 可能出现电能质量变差, 谐波共振甚至不稳定等问题^[8]。因此, 在弱电网下, 并网逆变器的稳定性成为研究重点之一。

基于阻抗的稳定性判据是评价弱电网状况下并网

^{*} 基金项目: 四川省科技厅资助项目 (2018GZ0394)

逆变器系统稳定性的一种有效方法^[9-10]。文献[11-12]采用阻抗分析法来分析逆变器系统和电网系统之间的动态相互作用,并采用阻抗比来表示并网逆变器系统的稳定裕度。在文献[13]中利用阻抗稳定判据,提出了一种求解并网逆变器系统增益调度自适应控制的方法。文献[14]分析了电网阻抗对并网逆变器控制系统的影响,并给出一种改进的电网电压前馈控制策略用于提高弱电网下并网逆变器的稳定性。为了减小对电流回路性能的影响并保证足够的阻抗相角裕度,文献[15]采用了重塑阻抗的方法。虽然以上控制方法都能获得较好的综合性能,但是设计的复杂性也明显增加,同时没有指出相角裕度与并网电流谐波抑制之间的关系。

因此,针对上述问题,以单相 LCL 型并网逆变器为研究对象,采用电容电压惯性反馈有源阻尼方法来抑制谐振尖峰,加入相角补偿控制提高电网阻抗与逆变器输出阻抗频率相交点处的相角裕度,使系统达到稳定裕度的要求。但是当相角裕度小于 60° 时,谐波会增加,为了减小谐波,文章在相角补偿控制的基础上加入一个滤波器,增加并网逆变器稳定性的同时减小谐波,改善并网电流的质量。最后用仿真验证所提控制策略的正确性。

1 并网逆变器模型

图 1 是单相光伏并网系统结构示意图^[16]。该系统主要由 LCL 滤波器、光伏阵列、前级升压电路、后级并网逆变器四部分组成。图中 i_c 为电容电流, i_1 为逆变器侧电感电流, i_2 为网侧电感电流, U_{pv} 和 I_{pv} 分别为光伏阵列输出的电压和电流, U_{dc} 为逆变电路直流储能电容电压, U_g 为电网电压, L_g 为电网电感。光伏阵列将太阳能通过前级升压电路最大功率点跟踪控制转换为直流电能,后级并网逆变器主要实现前后级母线电压的稳定控制与并网电流跟踪控制。

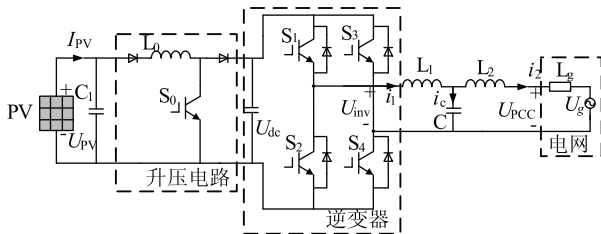


图 1 单相光伏发电系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of single phase photovoltaic system

根据基尔霍夫定律,可得:

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_1}{dt} = U_{inv} - U_c \\ C \frac{dU_c}{dt} = i_1 - i_2 \\ L_2 \frac{di_2}{dt} = U_c - U_g \end{cases} \quad (1)$$

根据式(1)可得 LCL 逆变器的控制框图,如图 2 所示。

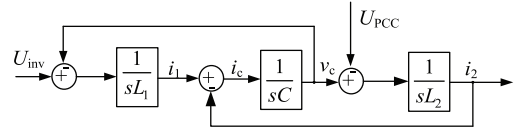


图 2 LCL 逆变器模型框图

Fig. 2 Control block diagram of LCL inverter

根据图 2,逆变器侧输出电压 U_{inv} 到并网电流 i_2 的传递函数表达式可表示为:

$$G_{LCL}(s) = \frac{i_2(s)}{U_{inv}(s)} = \frac{1}{s^2 L_1 L_2 C + s(L_1 + L_2)} \quad (2)$$

由式(2)和图 3 可得,系统的传递函数在右半平面会存在极点,使系统出现不稳定的现象。

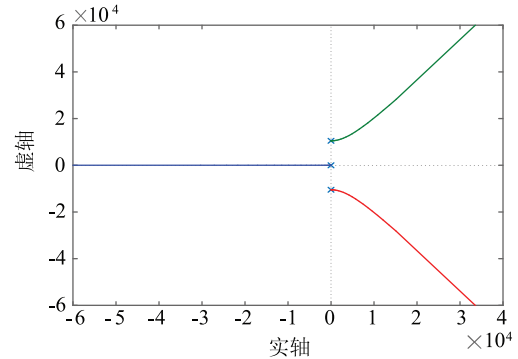


图 3 $G_{LCL}(s)$ 的根轨迹

Fig. 3 Root locus of $G_{LCL}(s)$

2 电容电压惯性反馈控制

2.1 电容电压惯性反馈

由于并网逆变器 LCL 滤波器自身容易出现谐振,文中采用电容电压惯性反馈控制来抑制其谐振。其电路控制框图如图 4 所示。

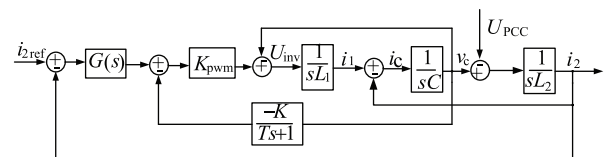


图 4 电容电压惯性反馈控制框图

Fig. 4 Block diagram of capacitor voltage inertial feedback control

将图4化简,如图5所示。

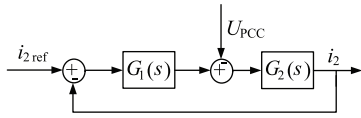


图5 电容电压惯性反馈等效结构框图

Fig. 5 Equivalent structure block diagram of capacitor voltage inertial feedback

其中:

$$G_1(s) = \frac{G(s)K_{pwm}(Ts + 1)}{s^2 CL_1(Ts + 1) - KK_{pwm} + Ts + 1} \quad (3)$$

$$G_2(s) = \frac{s^2 CL_1(Ts + 1) - KK_{pwm} + Ts + 1}{H(s)} \quad (4)$$

$$H(s) = s^4 TCL_1 L_2 + s^3 CL_1 L_2 + T(L_1 + L_2)s^2 + (L_1 + L_2 - L_2 KK_{pwm})s \quad (5)$$

$$G(s) = k_p + \frac{k_i}{s} \quad (6)$$

由图5可得系统的开环传递函数为:

$$G_{open}(s) = \frac{G(s)K_{pwm}(Ts + 1)}{H(s)} \quad (7)$$

2.2 控制参数设计

根据劳斯稳定判据,可得系统稳定的条件为:

$$L_1 + L_2 - L_2 KK_{pwm} > 0 \quad (8)$$

即: $0 < KK_{pwm} < 1 + \frac{L_1}{L_2}$, 表明 KK_{pwm} 可以等于1, 即

$K_{pwm} = 1/K$ 。由于“ s^4 ”项的系数比其他项的系数要小得多,在分析中可以忽略。根据式(7)可得系统的阻尼比为:

$$\xi = \frac{(L_1 + L_2)T}{2L_1 \sqrt{L_2 C}} \quad (9)$$

为了使系统的动态性能和阻尼效果更佳,一般会选取 $0.6 < \xi < 0.8$ 。但因实际参数 L_1 、 L_2 、 C 与设计值可能存在偏差,所以通常采用折衷值 $\xi = 0.707^{[17]}$ 。LCL滤波器的参数分别为 $L_1 = 0.6$ mH, $L_2 = 0.36$ mH, $C = 7\mu$ F。因此根据式(9)可得 $T = 4e^{-5}$ 。

根据式(2)和式(7)可得并网逆变器开环传递函数的波特图,如图6所示。

从图6中可以看出,原始系统的开环传递函数在30 000 Hz附近存在谐振尖峰,而采用文中提出的电容电压惯性反馈方法后明显抑制了谐振尖峰,因此保证了并网系统的稳定性。

2.3 逆变器输出阻抗分析

可将并网逆变器等效为理想电流源 I_s 及其输出阻

抗 Z_{inv} 并联的电路;同时,可将电网等效为理想电压源与电网阻抗串联的电路,如图7所示^[12]。

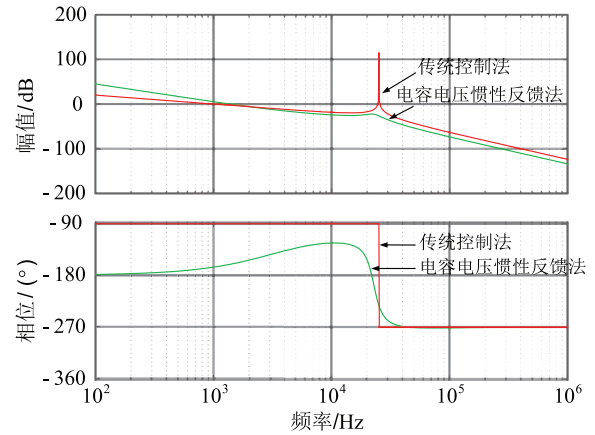


图6 LCL逆变器开环传递函数波特图

Fig. 6 Bode plot of open loop transfer function of LCL inverter

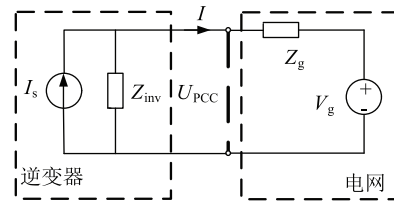


图7 并网逆变器的等效电路

Fig. 7 Equivalent circuit of grid-connected system

由图7可以推导出:

$$I(s) = \left[I_s(s) - \frac{U_g(s)}{Z_{inv}(s)} \right] \cdot \frac{Z_{inv}(s)}{Z_{inv}(s) + Z_g(s)} = \left[I_s(s) \frac{Z_g(s)}{Z_{inv}(s)} \right] \cdot \frac{1}{1 + Z_g(s)/Z_{inv}(s)} \quad (10)$$

为保证在变化的电网阻抗状况下并网系统的稳定,需满足以下情况:(1)在 Z_g 等于零的情况下,并网逆变器稳定;(2)在 Z_g 不等于零的情况下,阻抗比 Z_g/Z_{inv} 满足阻抗稳定性判据。

为了获得阻抗稳定性,它要求 Z_g 和 Z_{inv} 不相交或在 Z_g 和 Z_{inv} 相交频率点处的相角裕度满足 $PM = 180^\circ - (\angle Z_g(j\omega) - \angle Z_{inv}(j\omega)) > 0^\circ$ 。因电网阻抗为纯感性,相位为 90° ,所以相角稳定裕度要求可以简化为: $PM = 90^\circ + \arctan Z_{inv}(j\omega) > 0^\circ$, 即 $PMZ_{inv} > -90^\circ$ 。为进一步研究电网阻抗与逆变器输出阻抗之间的关系,根据图5可得:

$$i_2(s) = \frac{G_1(s)G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)} i_{2ref}(s) - \frac{G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)} U_{pcc}(s) \quad (11)$$

根据式(11)可得输出阻抗表达式为:

$$Z_{out}(s) = \frac{1 + G_1(s)G_2(s)}{G_2(s)} = \frac{H(s) + G(s)K_{pwm}(Ts + 1)}{s^2 CL_1(Ts + 1) - K_{pwm}K + Ts + 1} \quad (12)$$

根据式(12)可得电网阻抗与逆变器输出阻抗波特图,如图8所示。

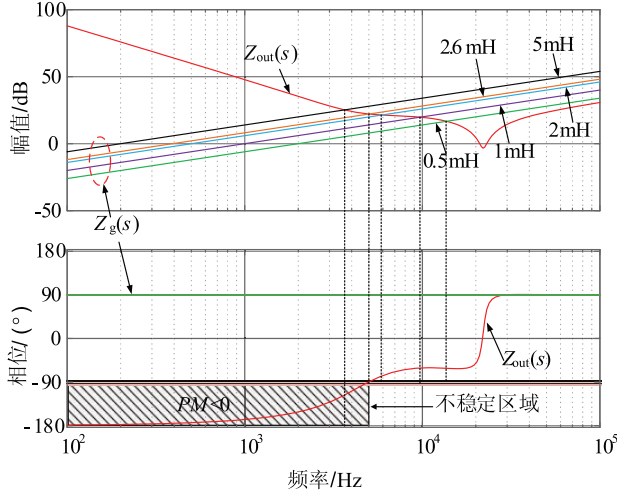


图8 $Z_{out}(s)$ 和 $Z_g(s)$ 的波特图

Fig. 8 Bode diagram of $Z_{out}(s)$ and $Z_g(s)$

由图8可知,随着电网阻抗的增加,并网逆变器系统的稳定性变得越弱,当电网阻抗 $L_g > 2.6$ mH 时,电网阻抗与逆变器的输出阻抗频率相交点处的逆变器输出阻抗相角裕度小于稳定裕度: -90° ,即不满足 $PM > 0^\circ$,此时并网逆变器发生谐波振荡,处于不稳定状态。

以上分析出现并网逆变器不稳定的现象是由于阻抗频率相交点处的并网逆变器的输出阻抗的相角裕度小于 -90° ,即不满足 $PM > 0^\circ$ 。因此可以通过提高并网逆变器输出阻抗相角的方法来使系统满足稳定裕度的要求。文中使用一个相角补偿控制式(13)来提高并网逆变器输出阻抗的相角,使系统满足稳定裕度要求,从而提高系统的稳定性。当 $PM < 60^\circ$ 时,谐波会增加^[18],因此在式(13)的基础上加入一个使相位曲线增大的滤波器(14),使并网逆变器系统输出阻抗相角增大的同时达到减小谐波的目的。

$$G_{s1}(s) = \frac{1 + \frac{s}{\omega_a}}{1 + k_a + \frac{s}{\omega_a}} \quad (13)$$

$$G_{s2}(s) = \frac{1 + \frac{s}{\omega_a}}{1 + k_a + \frac{s}{\omega_a}} \cdot \frac{nT_p s + 1}{T_p s + 1} \cdot \frac{1}{a} \quad (14)$$

式中 T_p 是时间常数; k_a 为补偿比例系数; a 与 n 为常数; ω_a 为补偿相角系数且 $\omega_a = 50 \pi \text{ rad/s}$ 。将式(13)、式(14)代入式(12),可得:

$$Z_{out1}(s) = \frac{H(s) + G_{s1}G(s)K_{pwm}(Ts + 1)}{s^2 CL_1(Ts + 1) - K_{pwm}K + Ts + 1} \quad (15)$$

$$Z_{out2}(s) = \frac{H(s) + G_{s2}G(s)K_{pwm}(Ts + 1)}{s^2 CL_1(Ts + 1) - K_{pwm}K + Ts + 1} \quad (16)$$

当电网阻抗 $L_g = 5$ mH 时,根据式(12)和式(15)以及式(16)可得图9。

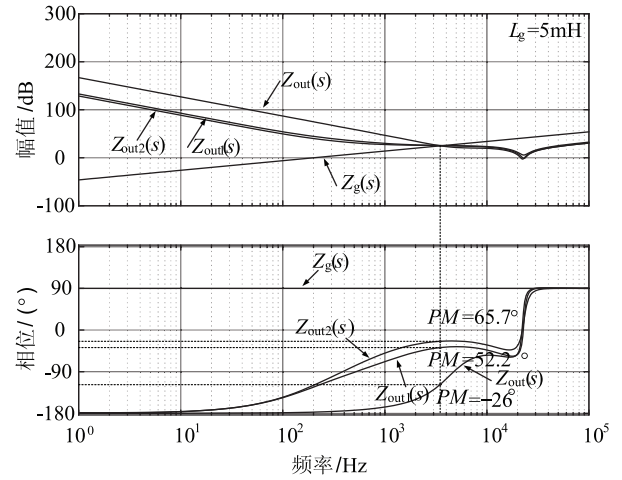


图9 $Z_{out}(s)$ 、 $Z_{out1}(s)$ 、 $Z_{out2}(s)$ 和 $Z_g(s)$ 的波特图

Fig. 9 Bode diagram of $Z_{out}(s)$ 、 $Z_{out1}(s)$ 、 $Z_{out2}(s)$ and $Z_g(s)$

由图9可看出,当 $L_g = 5$ mH 时,在没加相角补偿控制时逆变器输出阻抗 Z_{out} 的相角裕度 $PM = -26^\circ$ 不满足 $PM > 0^\circ$,系统不稳定。而加入相角补偿控制后,并网逆变器输出阻抗的相角裕度 $PM = 52.2^\circ$ 以及同时加入滤波器后 $PM = 65.7^\circ$,都能满足稳定裕度的要求。由此可见,加入阻抗相角补偿控制后使系统从不稳定状态变为稳定状态,提高了系统的稳定性,增加了系统的鲁棒性。

3 仿真实验结果与分析

为验证理论分析的正确性以及电容电压惯性反馈控制在弱电网系统下的稳定性,在 MATLAB/Simulink 仿真环境下进行了仿真。仿真参数见表1。

当 $L_g = 0$ mH 时,采用电容电压惯性反馈在 0.3 s 时,并网电流 i_2 从 40 A 突变为 20 A,仿真波形如图10所示。从图10中可以看出并网逆变器的并网电流在突变后,能够稳定运行且动态响应速度快。

图11为未加入相角补偿控制时并网电流 i_2 的波形,在 0.3 s 时电网阻抗从 1 mH 变为 5 mH,从图11中

可以看出,当电网阻抗 $L_g = 1 \text{ mH}$ 时,系统是稳定的。当电网阻抗 L_g 变为 5 mH 时,系统从稳定状态变为不稳定状态,是由于电网阻抗与逆变器输出阻抗频率相交点处的相角裕度不满足稳定裕度要求。

表 1 仿真参数
Table. 1 Simulation parameters

参数	数值	参数	数值
L_1	0.6 mH	k_p	0.014
L_2	0.36 mH	k_a	50
C	7 μF	ω_a	50π
T	$4e^{-5}$	n	100
T_p	63.662	a	200
k_i	50	k	0.05

图 12 为加入相角补偿控制后并网电流 i_2 的波形,从图中可看出电网阻抗从 1 mH 变为 5 mH 时,系统一直处于稳定状态,并网电流谐波畸变率从 2.31% 变为 3.5% 。

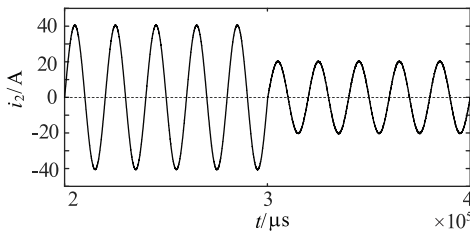


图 10 入网电流 i_2 波形

Fig. 10 Waveform of the grid current i_2

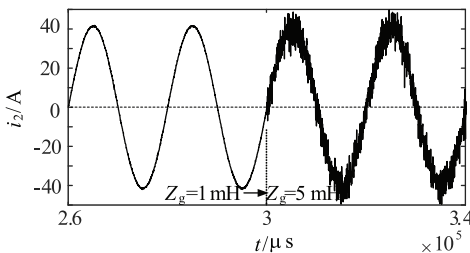


图 11 未加相角补偿控制

Fig. 11 Non-phase angle compensation control

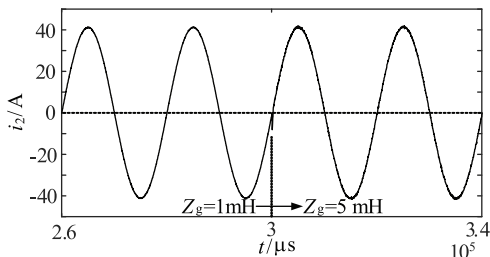


图 12 加入相角补偿控制

Fig. 12 Adding phase angle compensation control

加入相角补偿控制以及滤波器后,并网电流 i_2 的波形如图 13 所示。从图 13 中可以看出,同样当电网阻抗从 1 mH 变为 5 mH 时,系统一直处于稳定状态,此时并网电流谐波畸变率从 1.85% 变为 2.65% ,如图 14 所示。由此可见,加入相角补偿控制后,系统的稳定性得到提高,同时加入滤波器可以减小谐波使得并网电流的质量得到改善。仿真结果与理论分析一致。

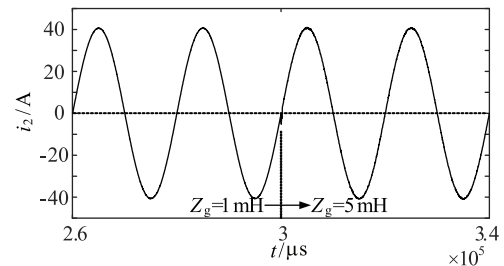
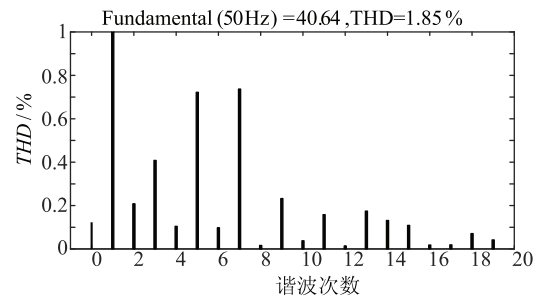
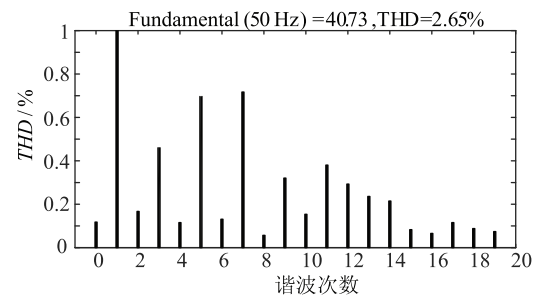


图 13 加入相角补偿控制以及滤波器

Fig. 13 Adding phase angle compensation control and filter



(a) $L_g=1 \text{ mH}$ 时谐波次数



(b) $L_g=5 \text{ mH}$ 时谐波次数

图 14 加入相角补偿控制以及滤波器后 i_2 谐波次数分析

Fig. 14 Analysis of harmonic number of grid current i_2 when adding phase compensation control and filter

4 结束语

阻抗建模是评估并网逆变器系统稳定性和抑制电网电流谐波的有效工具。基于数学推导,得出改善弱电网状况下并网逆变器系统稳定性以及抑制电网电流谐波的设计准则。研究结果表明,保证系统的稳定即

相角裕度大于零是不够的,同时还要保证并网电流的质量,使逆变器输出阻抗的相角裕度限制在 60° 以上。为保证并网逆变器系统在弱电网下的稳定及并网电流的质量,提出了一种阻抗相角补偿加滤波器的控制方法。在 MATLAB/Simulink 仿真平台上验证了该控制方法。仿真结果表明,该控制方法不仅能够保证并网逆变器在变化的电网阻抗下稳定运行,而且能够有效地减小并网电流的畸变率,提高并网电流的质量。

参考文献

- [1] W. Yao, Y. Yang, X. Zhang, et al. Digital notch filter based active damping for LCL filters[J]. in Proc. IEEE APEC, 2015, pp. 2399-2406.
- [2] Pan D, Ruan X, Bao C, et al. Capacitor-current-feedback active damping with reduced computation delay for improving robustness of LCL-type grid-connected inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(7): 3414-3427.
- [3] J. Xu, S. Xie, J. Kan, and B. Zhang. Research on stability of grid connected LCL filtered inverter with capacitor current feedback active damping control[J]. in Proc. ICPE-ECCE Asia, 2015, pp. 682-687.
- [4] Yang D, Ruan X, Wu H. A Real-time computation method with dual sampling mode to improve the current control performance of the LCL type grid-connected inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(7): 4563-4572.
- [5] He C, Zhao J, Zhang S, et al. Adaptive current control strategy based on system sensitivity for grid-connected LCL-filter inverter in weak grid [C]//Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT-Asia), 2016 IEEE. IEEE, 2016: 418-423.
- [6] Xu J, Xie S, Tang T. Active damping-based control for grid-connected LCL-filtered inverter with injected grid current feedback only[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(9): 4746-4758.
- [7] 赵曦, 杨洪耕. 基于二自由度内模控制的 LCL 并网逆变器控制策略[J/OL]. 现代电力, 2018, (6): 86-91.
Zhao Xi, Yang Honggeng. LCL grid connected inverter control strategy based on two-degree-of-freedom internal model control[J/OL]. Modern Electric Power, 2018, (6): 86-91.
- [8] Liserre M, Teodorescu R, Blaabjerg F. Stability of photovoltaic and wind turbine grid-connected inverters for a large set of grid impedance values[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(1): 263-272.
- [9] Yang D, Ruan X, Wu H. Using virtual impedance network to improve the control performances of LCL-type grid-connected inverter under the weak grid condition [C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2014 Twenty-Ninth Annual IEEE. IEEE, 2014: 3048-3054.
- [10] Chen X, Zhang Y, Wang S, et al. Impedance-phased dynamic control method for grid-connected inverters in a weak grid[J]. IEEE Trans. Power Electron, 2017, 32(1): 274-283.
- [11] Gao J, Zhao J, Qu K, et al. Reconstruction of impedance-based stability criterion in weak grid [C]//2018 3rd International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG). IEEE, 2018: 1-4.
- [12] Sankar R S R, Kumar S V J, Rao G M. Impedance based stability analysis of single-phase PV inverter connected to weak grid with voltage feed forward control [C]//2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI). IEEE, 2017: 2187-2194.
- [13] Cespedes M, Sun J. Adaptive control of grid-connected inverters based on online grid impedance measurements[J]. IEEE Transactions on sustainable energy, 2014, 5(2): 516-523.
- [14] Xu J, Xie S, Tang T. Evaluations of current control in weak grid case for grid-connected LCL-filtered inverter [J]. IET Power Electronics, 2013, 6(2): 227-234.
- [15] Xue M, Zhang Y, Kang Y, et al. Full feedforward of grid voltage for discrete state feedback controlled grid-connected inverter with LCL filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(10): 4234-4247.
- [16] 王逸超, 罗安, 金国彬, 等. 单相 LCL 型并网逆变器新型谐波阻尼策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(33): 5803-5810.
Wang Yichao, Luo An, Jin Guobin, et al. New harmonic damping strategy for single grid connected inverter with LCL filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(33): 5803-5810.
- [17] 徐志英, 许爱国, 谢少军. 采用 LCL 滤波器的并网逆变器双闭环入网电流控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(27): 36-41.
Xu Zhiying, Xu Aiguo, Xie Shaojun. Dual loop grid current control technique for grid connected inverter using an LCL filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(27): 36-41.
- [18] Xu J, Zhang B, Qian Q, et al. Robust control and design based on impedance-based stability criterion for improving stability and harmonics rejection of inverters in weak grid [C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2017, IEEE. IEEE, 2017: 3619-3624.

作者简介:



高选杰(1992—),男,硕士研究生,研究方向为光伏并网逆变器。Email:gaoxuanjieemail@163.com

苗虹(1971—),女,通信作者,副教授,硕士生导师,研究方向为分布式发电和微电网等。Email:1604681549@qq.com

曾成碧(1969—),女,教授,硕士生导师,研究方向为新能源及智能优化控制。

熊正勇(1993—),男,硕士研究生,研究方向为配电网优化及规划。Email:326947763@qq.com

收稿日期:2018-08-19;修回日期:2018-09-11
(焦阳 编发)