

DOI: 10.7667/PSPC170235

# 基于 LCL 滤波有源阻尼控制的 Z 源逆变器并网研究

杨峰峰, 杨旭红

(上海市电站自动化重点实验室, 上海电力学院自动化工程学院, 上海 200090)

**摘要:** 与传统的逆变器相比, Z 源逆变器由于其具有可以实现升降压功能、无需插入死区时间等优点而得到了广泛的应用。针对逆变器输出电压、电流高次谐波含量大的缺点, 提出采用 LCL 型滤波器进行滤波, 其滤波性能优异, 但带来的谐振峰易引起系统的不稳定。所以采用电容电流内环、电网电流外环的双电流环有源阻尼方案对谐振峰进行抑制。为避免多次调试参数, 提出一种控制参数设计方法, 即对传递函数进行极点配置, 从而得出最佳控制参数。在保证系统稳定性的前提下使系统具有一定的鲁棒性。最后, 通过仿真和实验结果验证了所提方案的有效性和可行性。

**关键词:** Z 源逆变器; LCL 滤波器; 有源阻尼; 双环控制; 简单升压控制

## Research on Z-source inverter grid-connected system based on LCL filter of active damping control

YANG Fengfeng, YANG Xuhong

(Shanghai Key Laboratory of Power Station Automation Technology, School of Automatic Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** Compared to traditional inverter, Z source inverter has been widely used because of its advantages such as the boost and buck capability, no need to insert the dead-time and so on. Aiming at the disadvantage of high harmonic contents of output voltage and current, the LCL filter is proposed to filter, its performance is excellent, but the resonance peak is easy to cause the system instability. So in this paper the active damping scheme with inner loop of capacitor current and outer loop of grid current is adopted to suppress the resonance peak. In order to avoid tuning parameters repeatedly, a control parameter design method is proposed, which is the pole assignment of the transfer function, so as to obtain the optimal control parameters. Under the premise of ensuring the stability of system, the system has better robustness. Finally, the effectiveness and feasibility of the proposed scheme are verified by simulation and experimental results.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61203224) and Natural Science Foundation of Shanghai (No. 13ZR1417800).

**Key words:** Z-source inverter; LCL filter; active damping; double-loop control; simple boost control

## 0 引言

随着能源危机的日益严峻, 开发利用新能源成为必然。光伏、风能发电作为清洁的新能源发电方式, 受到极大的关注。并网逆变器是新能源利用的重要组成部分<sup>[1]</sup>。传统逆变器同一桥臂上下功率开

关管不能同时导通, 否则会造成短路, 因此需在上下桥臂的开关信号之间加入死区时间, 但死区时间的加入会带来输出波形畸变。另一方面, 电压源型逆变器本身为降压型逆变器, 在输入电压较低或波动范围较大时, 需要在前级加入升压电路, 导致系统整体结构复杂、效率变低。Z 源逆变器通过引入特殊的阻抗网络, 能够克服电压源型逆变器的上述不足。Z 源逆变器利用同一桥臂上下功率开关的直通状态来实现对输入电压的升压功能, 因此 Z 源逆变器是升降压型逆变器<sup>[2-3]</sup>。同时, 由于直通状态成为逆变器的一种正常工作模式, 由电磁干扰等所造成的直通状态不会损坏逆变器, 并且可避免由死区

**基金项目:** 国家自然科学基金(61203224); 国家自然科学基金(13ZR1417800); 上海市科技创新行动技术高新技术领域重点项目(14511101200); 上海市电站自动化技术重点实验室开放课题(13DZ2273800); 上海市重点科技攻关计划(上海市科委地方院校能力建设项目)(14110500700)

时间引起的输出波形的畸变。

三相 Z 源逆变器一般都采用高频脉宽调制下的电流源控制, 会导致大量高次谐波电流注入电网之中, 对电网中 EMI 敏感设备以及电能质量产生很大影响。因此逆变器输出端通常采用 LCL 滤波器, 能够保证较好的入网电流质量。但所带来的谐振峰不可忽略, 并且会影响系统的稳定性。为抑制谐振峰, 可采用有源或无源阻尼方案<sup>[4]</sup>。无源阻尼方案一般是在滤波电容上串联电阻, 但会导致系统的损耗增加, 效率降低。有源阻尼方案则是以电容电流为内环, 采用双环控制来削减谐振峰, 提高系统稳定性。

本文将 Z 源逆变器与 LCL 滤波器相结合, 提升了逆变器的输出范围, 同时对并网电流高次谐波进行了有效滤除。采用电容电流作为内环的有源阻尼控制方案, 通过合理设计逆变器控制参数, 使得系统在稳定的前提下具有良好的动态和静态性能。最后通过仿真分析验证了该方法的有效性。

## 1 Z 源逆变器工作原理

传统 Z 源逆变器是在输入电源与三相逆变桥之间增加一个 X 型无源网络得到的。与传统的逆变器存在的 8 种开关矢量不同, Z 源逆变器多了一种直通零矢量状态, 即同一桥臂上下功率开关管同时导通的状态, 这在传统逆变器中是不允许的<sup>[5]</sup>。三相 Z 源逆变器主电路拓扑结构如图 1 所示。

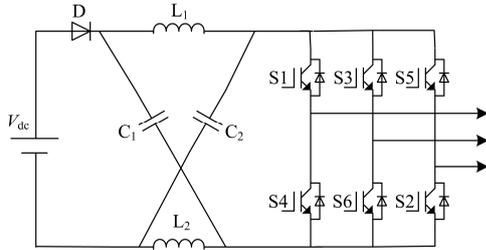


图 1 三相 Z 源逆变器主电路拓扑结构

Fig. 1 Main circuit topology of three-phase Z source inverter

为了分析方便, 假设 Z 源逆变器满足对称条件, 即

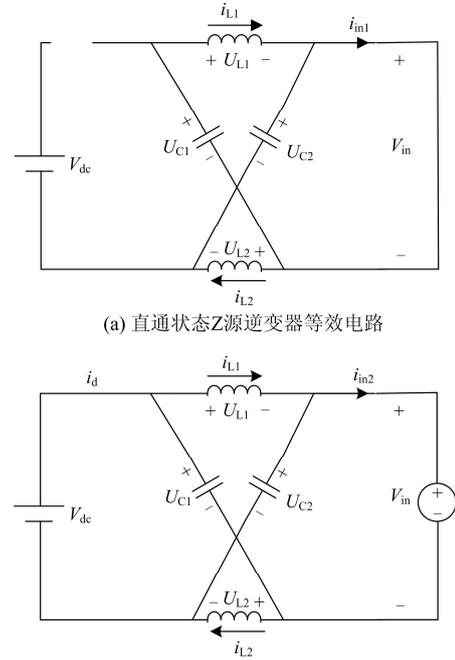
$$\begin{cases} L_1 = L_2 = L \\ C_1 = C_2 = C \end{cases} \quad (1)$$

由对称和等效电路可得

$$\begin{cases} U_{L1} = U_{L2} = U_L \\ U_{C1} = U_{C2} = U_C \end{cases} \quad (2)$$

根据同一桥臂上下两个功率开关管是否同时导通, Z 源网络可以分为直通状态和非直通状态。

图 2(a)是 Z 源逆变器直通状态时的等效电路图, 图 2(b)是 Z 源逆变器非直通状态时的等效电路图。



(b) 非直通状态 Z 源逆变器等效电路

图 2 Z 源逆变器等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of Z source inverter

假设在一个开关周期  $T$  内, Z 源逆变器处于直通状态的时间是  $T_0 = D_0 T$ , 其中  $D_0$  为直通占空比。由图 2(a)可知

$$\begin{cases} U_L = U_C \\ V_{in} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

设在一个开关周期  $T$  内, Z 源逆变器处于非直通状态的时间为  $T_1 = (1 - D)T$ , 由图 2(b)可知

$$\begin{cases} V_{dc} = U_L + U_C \\ V_{dc} = 2U_L + V_{in} \end{cases} \quad (4)$$

由于在一个周期  $T$  中, 稳态时电感两端平均电压为 0, 联立式(2)一式(4)可得

$$U_C = \frac{T_1}{T_1 - T_0} = \frac{1 - D_0}{1 - 2D_0} V_{dc} \quad (5)$$

直流链峰值电压为

$$\hat{v}_{in} = \frac{T}{T_1 - T_0} V_{dc} = \frac{1}{1 - 2D_0} V_{dc} = B V_{dc} \quad (6)$$

其中  $B = \frac{1}{1 - 2D_0} \geq 1$  为通过直通状态实现的升压因子<sup>[6]</sup>。

逆变器输出电压与直流链电压峰值之间的关系为

$$\hat{v}_{ac} = M \frac{\hat{v}_{in}}{2} \quad (7)$$

联立式(6)、式(7)可以得到

$$\hat{v}_{ac} = MB \frac{V_{dc}}{2} = G \frac{V_{dc}}{2} \quad (8)$$

$G$  为  $Z$  源逆变器的电压增益。因此, 通过选择合适的调制因子  $M$ , 调节直通占空比  $D_0$ , 间接调节升压因子  $B$ , 即可得到理想的逆变器输出电压。

## 2 LCL 型 $Z$ 源逆变器并网控制策略

基于 LCL 型滤波器有源阻尼控制的  $Z$  源逆变器并网控制结构如图 3 所示。

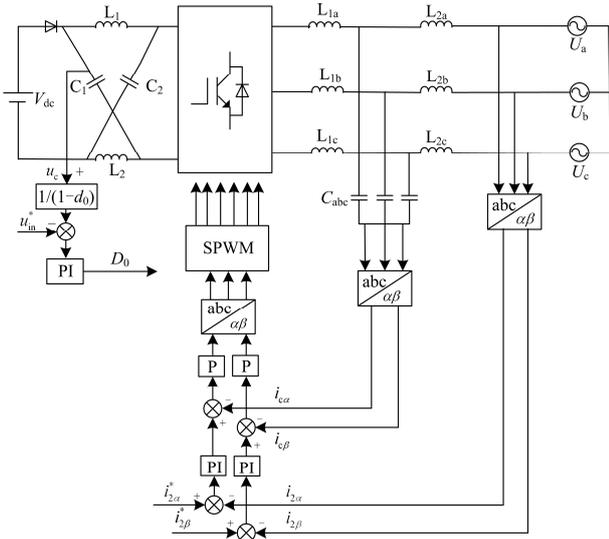


图 3  $Z$  源逆变器并网控制结构图

Fig. 3 Control structure of  $Z$  source inverter grid connected

为了维持电网电压的稳定, 直流侧可采取直接电压控制或间接电压控制。直接电压控制利用直流链电压(一系列的脉冲方波), 采样和控制较为复杂, 且实际效果并不理想。文献[7]和文献[8]中采用电容电压  $U_c$  来间接控制直流链电压, 进而维持电网电压稳定的方式。由式(5)、式(6)也可推导出电容电压  $U_c$  和直流链电压峰值  $\hat{v}_{in}$  之间存在一定关系。基于此, 本系统采用间接电压控制方式, 采集电容电压  $U_c$  乘以相应的比例系数后与参考值进行比较, 通过 PI 调节器得到直通占空比信号, 将此信号与调制信号叠加后得到功率开关管的驱动信号。

简单升压调制法是在传统 SPWM 调制的基础上, 用一个大于正弦正峰值的信号  $V_p$  和一个小于负峰值的信号  $V_n$  来控制直通占空比  $D_0$  [9-11]。原理如图 4 所示。在三角载波幅值大于  $V_p$  或小于  $V_n$  时, 逆变器三相桥臂同时导通(直通), 相当于直通零矢量被安插在传统零矢量中间。当三角波幅值在  $V_p$  和  $V_n$  之

间时, 逆变器进入传统的 SPWM 调制状态。

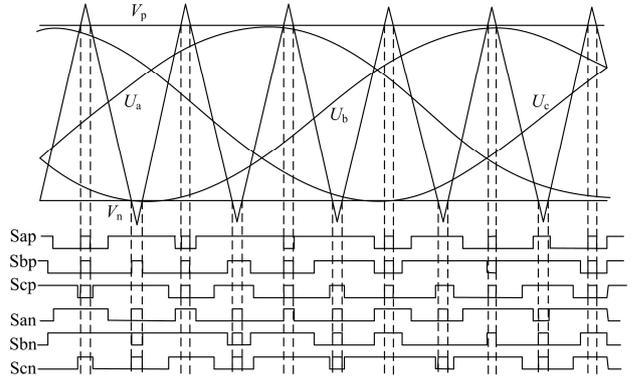


图 4 简单升压调制原理图

Fig. 4 Simple boost modulation schematic

对于交流侧电流环的控制一般采用直接电流控制, 即以并网电流为反馈量进行控制。但 LCL 型滤波器为三阶滤波电路, 会降低并网系统的阻尼, 产生谐振峰。为抑制谐振峰, 可采用有源或无源阻尼控制。文献[12]中指出采用网侧电流直接解耦控制, 但解耦过程过于复杂, 且电流谐波滤除效果一般, 不具备实际应用性。文献[13]中提出将有源阻尼和无源阻尼相结合的方法。该控制确实提高了系统的稳定性, 但也增加了系统的损耗和成本。并且采用的只是  $dq$  坐标系下的近似解耦, 故系统依旧存在误差。

本系统采用以电容电流为内环、电网电流为外环的双电流环有源阻尼控制。该方法可以有效地抑制谐振峰, 从而维持系统稳定, 降低系统设计的复杂性, 且能够有效减小系统损耗[14]。

## 3 双电流环参数设计

滤波器在  $\alpha\beta$  坐标系下, 两轴之间是没有耦合的, 可以独立进行控制。因此本文选取  $\alpha\beta$  坐标系进行控制。

$\alpha\beta$  坐标系下 LCL 滤波器系统的数学模型如图 5 所示。其中,  $u_{inv}$  表示逆变器侧输出电压,  $u_g$  表示电网电压,  $u_c$  表示电容电压。

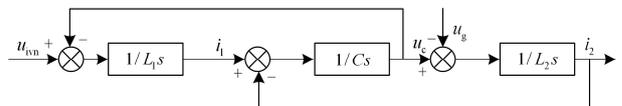


图 5 LCL 滤波器数学模型

Fig. 5 Mathematical model of LCL filter

由图 5 可以得到滤波器的传递函数为

$$G(s) = \frac{i_2(s)}{u_{inv}(s)} = \frac{1}{L_1 L_2 C s^3 + (L_1 + L_2) s} \quad (9)$$



有功指令电流为 15 A，无功指令电流为 0。双电流环控制参数为第 3 节中设计的参数，将表 1 中的参数和双环控制参数代入系统得到以下仿真结果。图 9 为 Z 源逆变器的电容电压图，电容电压不是固定值，而是随着时间变动的，原因是逆变过程始终存在着电容的充放电。

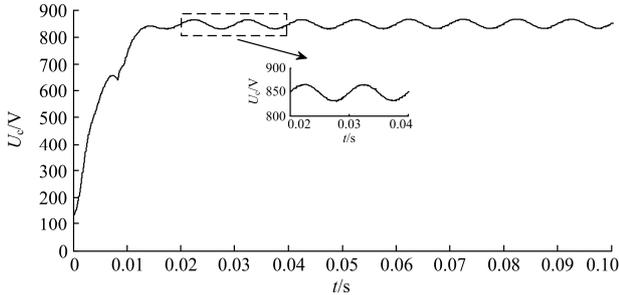


图 9 Z 源电容电压

Fig. 9 Capacitor voltage of Z-source inverter

Z 源逆变器的直流链电压如图 10 所示，对图 10 局部放大可知，直流链电压为一系列的方波信号。

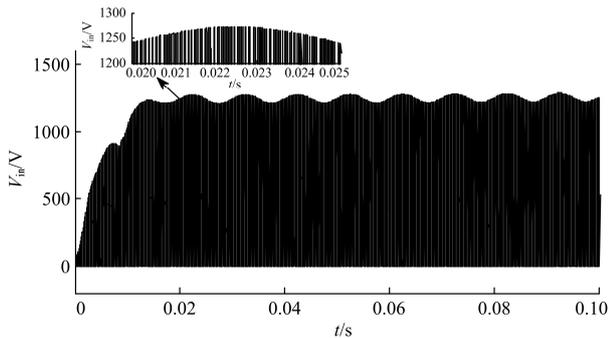


图 10 直流链电压

Fig. 10 DC link voltage

功率开关管的六路开关信号如图 11 所示。

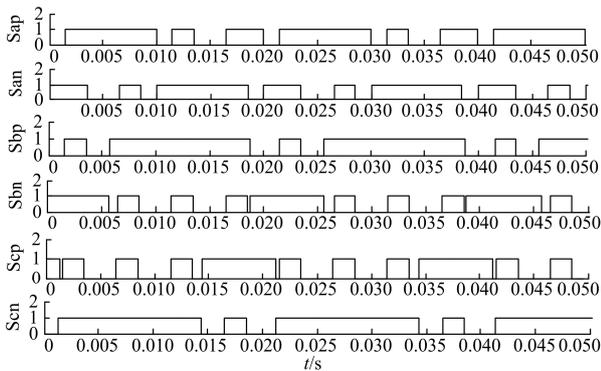


图 11  $D=0.3$  时功率管的开关信号

Fig. 11 Switching signal of power transistor when  $D=0.3$

由图 11 可以看出，通过改变传统的调制策略采

用简单升压调制方法，可以有效地将直通信号插入到传统零矢量当中，完成 Z 源逆变器升压的功能。当直通占空比  $D=0.3$  时，由式(5)、式(6)可得  $U_c = 875 \text{ V}$ 、 $\hat{v}_{in} = 1250 \text{ V}$ 。由图 9、图 10 可以看出，电容电压基本上可以稳定在 850 V 左右，而直流链电压可以跟随输入参考电压稳定在 1250 V，说明直流侧电压能够有效地跟随输入参考电压，进而维持电网电压稳定。

通过仿真选取三相并网电流中的 A 相进行观测，A 相并网电流如图 12 所示。由图可以看出，只有在波峰和波谷处存在少量的高次谐波，其余部分比较平滑，整体逼近正弦波。

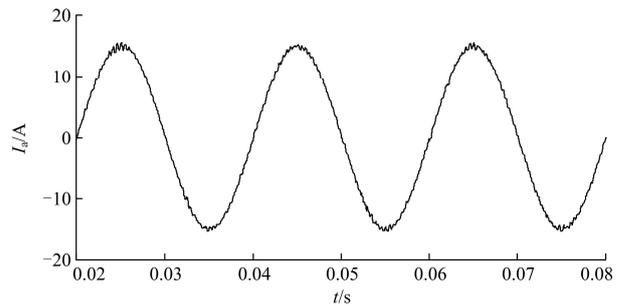


图 12 A 相并网电流

Fig. 12 A phase grid-connected current

并网电流的频谱分析如图 13 所示。

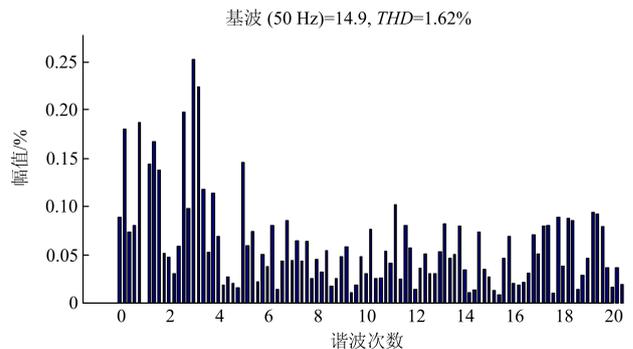


图 13 并网电流频谱分析

Fig. 13 Spectrum analysis of grid-connected current

通过对双电流环控制参数进行设计，并对控制性能进行分析，得出了最优的控制参数。由图 12 和图 13 可以得出，基于 LCL 滤波器的有源滤波控制在保证系统稳定的前提下可以将并网电流中的谐波快速滤除，而且滤波效果优越。并网电流 THD 达到了 1.62%，满足国家并网标准  $THD \leq 5\%$  的要求。

仿真时由于无功指令电流为 0，图 14 为 A 相电网电压并网电流图。由图可以看出，并网电压和并网电流保持同相位，系统基本上以单位功率因数运行。

本文对系统的鲁棒性进行了验证。有功指令电流在 0.05 s 时由 15 A 突变到 25 A。从图 15 中可以看出, 在新型控制下系统可以保持快速的动态响应特性, 能够在很短的周期内跟随指令电流且没有冲击电流。

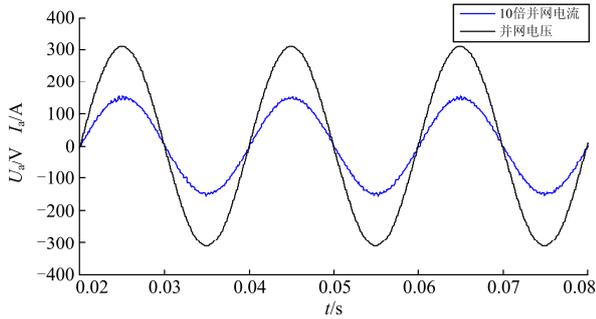


图 14 稳态时电网电压和并网电流

Fig. 14 Steady-state grid voltage and grid-connected current

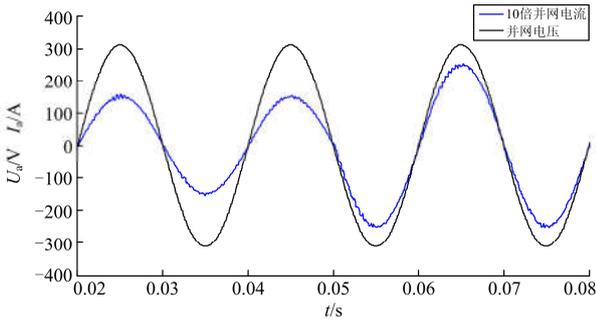


图 15 指令变化时电网电压和并网电流

Fig. 15 Grid voltage and grid-connected current when instruction changes

以上分析表明, 该控制方法一方面降低了并网电流的谐波畸变率, 且能够有效抑制谐振峰, 从而减少对电网的谐波污染, 维持电网的稳定运行。另一方面该控制系统具有快速的动态响应能力, 输出电流能够快速地跟随指令电流变化, 且没有超调。结果证明本文所提控制策略的有效性。

#### 4.2 实验

为了进一步验证所提控制方法的正确性和有效性, 搭建了 LCL 并网 Z 源逆变器实验平台, 且完成了并网运行实验研究。由于实际运行时 Z 源逆变器的电容电压以及直流母线电压会很高, 考虑到安全问题, 实验时的参数与仿真参数不同。

直流电源电压  $V_{dc} = 25\text{ V}$ , 并网有功指令电流为 0.3 A 时, 直流电源电压的稳态运行波形如图 16 所示, 电网侧 A 相电压、并网电流波形如图 17 所示。

由图 16 和图 17 可以看出, 在稳态过程中系统运行稳定, 从 A 相的电压和电流可以看出, 并网 Z 源逆变器实现了单位功率因数并网。

图 18 为并网暂态实验波形, 图 19 为系统实物图。从图 18 中可以看出, 当并网电流发生突变时, 系统能够快速有效地实现跟随, 从而证明了系统的动态性能。

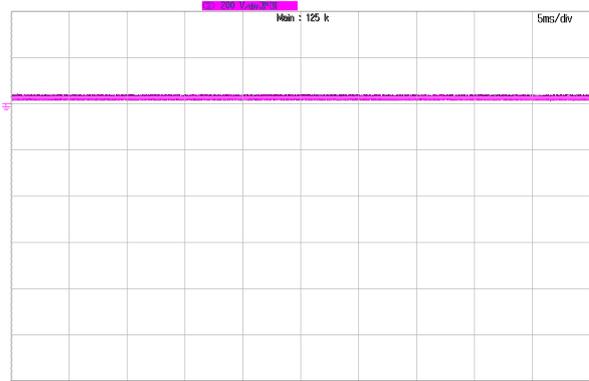


图 16 直流电源电压稳态运行波形

Fig. 16 Steady-state operation waveform of DC power supply voltage

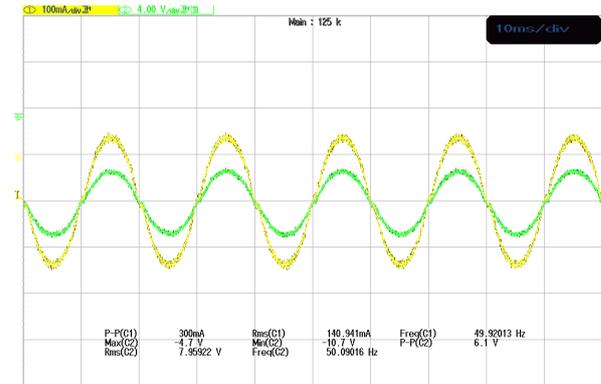


图 17 稳态运行时 A 相电压电流波形

Fig. 17 Voltage and current waveforms of A phase in steady state

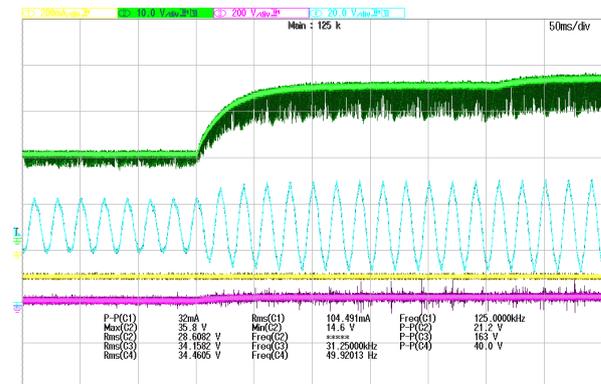


图 18 并网暂态实验波形

Fig. 18 Grid-connected experimental waveforms in transient mode

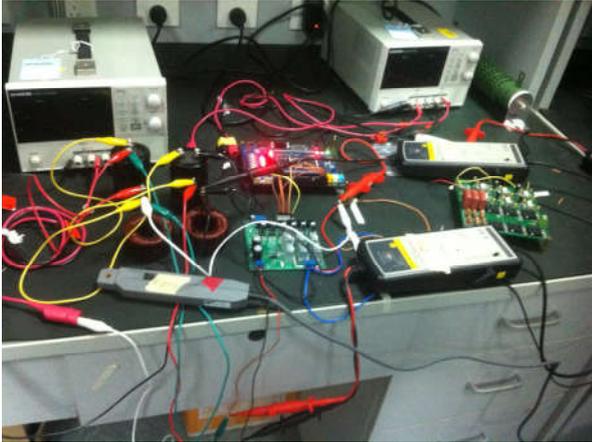


图 19 系统实物图

Fig. 19 System simulation object graph

## 5 结语

本文将 Z 源逆变器与 LCL 滤波器相结合,利用 LCL 滤波器的优点对系统高次谐波进行滤除。为了抑制谐振峰,采用电容电流内环、电网电流外环的双电流环有源阻尼控制方案。针对系统参数难以调节的特点,采用对传递函数进行极点配置的方法,从而得出了最佳的系统控制参数。通过将参数代入系统进行仿真,结果证明该参数可以使并网电流的谐波畸变率大大减小,提高了并网电流的质量。系统基本以单位功率因数运行,且动态性能优异。

## 参考文献

- [1] 杨水涛, 丁新平, 张帆, 等. Z-源逆变器在光伏发电系统中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(17): 112-118.  
YANG Shuitao, DING Xinping, ZHANG Fan, et al. Study on Z-source inverter for photovoltaic generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(17): 112-118.
- [2] 李红新, 周林, 郭珂, 等. Z 源逆变器最新进展及应用研究[J]. 电源技术, 2013, 37(3): 504-508.  
LI Hongxin, ZHOU Lin, GUO Ke, et al. Progress of Z-source inverter latest progress and its application development[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2013, 37(3): 504-508.
- [3] 彭方正, 房绪鹏, 顾斌, 等. Z 源变换器[J]. 电工技术学报, 2004, 19(2): 47-51.  
PENG Fangzheng, FANG Xupeng, GU Bin, et al. Z-source converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(2): 47-51.
- [4] 金亮亮, 周荔丹, 姚钢, 等. 适用于并网逆变器的新型 LCL 滤波器[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 1-8.  
JIN Liangliang, ZHOU Lidan, YAO Gang, et al. A novel LCL filter adopted in grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 1-8.
- [5] 汤雨, 谢少军, 张超华. 改进型 Z 源逆变器[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(30): 28-34.  
TANG Yu, XIE Shaojun, ZHANG Chaohua. Improved Z-source inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(30): 28-34.
- [6] 丁新平, 钱照明, 崔彬, 等. 基于模糊 PID 的 Z 源逆变器直流链升压电路控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(24): 31-38.  
DING Xinping, QIAN Zhaoming, CUI Bin, et al. Fuzzy PID controller for DC-link boost voltage in Z-source inverter[J]. Proceeding of the CSEE, 2008, 28(24): 31-38.
- [7] BABAEI E, ASL E S. A new topology for Z-source half-bridge inverter with low voltage stress on capacitors[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 140: 722-734.
- [8] 徐聪, 程启明, 李明, 等. Z 源逆变器及其多种改进拓扑结构的比较[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2926-2931.  
XU Cong, CHENG Qiming, LI Ming, et al. A comparative simulation study on Z-source inverter and its various improvement topologies[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2926-2931.
- [9] 薛必翠, 张承慧, 丁新平. Z-源逆变器 PWM 调制策略的分析比较[J]. 电工电能新技术, 2013, 32(3): 95-100.  
XUE Bicui, ZHANG Chenghui, DING Xinping. Analysis and comparison of PWM modulation strategies for Z-source inverter[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2013, 32(3): 95-100.
- [10] 顾华利, 张开如, 狄东照, 等. 基于模糊自适应滑模变结构的 PWM 整流器[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(8): 40-45.  
GU Huali, ZHANG Kairu, DI Dongzhao, et al. The PWM rectifier based on fuzzy adaptive sliding mode variable structure[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(8): 40-45.
- [11] 王晓刚, 张杰. 基于开关电感的增强型 Z 源三电平逆变器[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 65-72.  
WANG Xiaogang, ZHANG Jie. Enhanced Z-source three-level inverter based on switch-inductor[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 65-72.
- [12] 何祥龙, 赵莉华, 牛中伟, 等. 基于 LCL 滤波的三相并网 Z 源逆变器研究[J]. 电测与仪表, 2015, 52(6): 55-60.  
HE Xianglong, ZHAO Lihua, NIU Zhongwei, et al. Research on three-phase grid Z-source inverter based on LCL filter[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(6): 55-60.

- [13] 雷一, 赵争鸣, 鲁思兆. LCL 滤波的光伏并网逆变器有源阻尼与无源阻尼混合控制[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(11): 23-27.  
LEI Yi, ZHAO Zhengming, LU Sizhao. Hybrid control of active and passive damping for grid-connected PV inverter with LCL filter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(11): 23-27.
- [14] MASSING J R, STEFANELLO M, GRÜNDLING H A, et al. Adaptive current control for grid-connected converters with LCL filter[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2012, 59(12): 4681-4693.
- [15] 刘文军, 周龙, 陈剑. LCL 并网逆变器的电流双闭环控制[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 44(17): 52-57.  
LIU Wenjun, ZHOU Long, CHEN Jian. Control method for grid-connected inverter with LCL filter by employing dual current closed-loops[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 52-57.
- [16] 周乐明, 罗安, 陈燕东, 等. 单相 LCL 型并网逆变器功率控制及有源阻尼优化方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(6): 144-154.  
ZHOU Leming, LUO An, CHEN Yandong, et al. A single-phase grid-connected power control and active damping optimization strategy with LCL filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(6): 144-154.
- [17] 殷进军, 刘邦银, 段善旭. LCL 滤波并网逆变器双环控制参数设计与优化[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(9): 123-128.  
YIN Jinjun, LIU Bangyin, DUAN Shanxu. Parameters design and optimization of dual-loop controller for grid-connected inverters with LCL filters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(9): 123-128.
- [18] 屈克庆, 李文旗, 叶天凯, 等. 基于状态反馈的 LCL 型逆变器解耦控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(20): 130-138.  
QU Keqing, LI Wenqi, YE Tiankai, et al. State feedback based decoupling control strategy for grid-connected inverter with LCL filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(20): 130-138.
- [19] YIN J, DUAN S, LIU B. Stability analysis of grid-Connected inverter with LCL filter adopting a Digital single-loop controller with inherent damping characteristic[J]. IEEE Transaction on Industrial Informatics, 2013, 9(2): 1104-1112.
- [20] 谭菊华, 谢芳娟, 吴福英. 基于组合滤波器组的变压器局部放电信号识别[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(12): 82-85.  
TAN Juhua, XIE Fangjuan, WU Fuying. Transformer partial discharge signal recognition based on combined filter banks[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(12): 82-85.
- [21] 李钟慎. 高阶 Butterworth 低通滤波电路的快速设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2007(4): 27-29.  
LI Zhongshen. A quick design method provided for the high order Butterworth low pass electrical filter[J]. Industrial Instrumentation and Automation, 2007(4): 27-29.
- [22] 孟吉红, 徐军, 邓海波, 等. 三阶 Butterworth 型极点配置方法的改进[J]. 控制工程, 2007, 14(1): 70-72.  
MENG Jihong, XU Jun, DENG Haibo, et al. Improvement of the three-order butterworth pole allocation[J]. Control Engineering of China, 2007, 14(1): 70-72.
- [23] 马瑞钰. 低谐波 LCL 滤波器的光伏并网逆变器的研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2014.  
MA Ruiyu. Research on grid-connected photovoltaic inverter with the low harmonic LCL filter[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2014.

收稿日期: 2017-02-21; 修回日期: 2017-03-08

作者简介:

杨峰峰(1990—), 男, 硕士, 研究方向为 Z 源逆变器并网控制技术; E-mail: 1515811084@qq.com

杨旭红(1969—), 女, 通信作者, 教授, 硕士研究生导师, 研究方向为智能电网控制技术、新能源发电及储能技术、火电和核电机组的仿真建模及控制技术。E-mail: yangxuhong.sh@163.com

(编辑 魏小丽)