**DOI**：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.5.34 **中图分类号**：TM464 **文献标志码**：A

# 负载谐振软开关并网逆变器无源控制策略研究

张雅静[1](中国电源学会会员)，张焕晨[1]，王 勉[2]，李建国[1]，
马 爽[1]，王久和[1]
(1.北京信息科技大学自动化学院，北京 100192；2.中国长江三峡集团有限公司科学技术研究院，北京 100038)

**摘要**：负载谐振软开关可有效降低单相并网逆变器的开关损耗，是逆变器高频应用的研究热点。然而，基于线性模型的传统PI控制策略在大信号扰动时易失稳，系统输出波形较差。基于非线性理论的无源控制策略，可有效改善系统输出，提高系统稳定性。提出了基于E-L模型的负载谐振软开关逆变器无源控制策略，对单极性临界导通BCM(boundary conduction mode)调制模式下的单相全桥并网逆变器进行了详细建模，并基于阻尼注入方法设计了无源控制器。为验证所提控制策略的有效性，搭建了谐振软开关逆变器仿真模型，并在稳态和暂态工况下与传统PI控制策略进行了对比分析。

**关键词**：单相并网逆变器；无源控制；BCM调制；开关损耗

# Research on Passivity-based Control Strategy for Load Resonant Soft-switching Grid-connected Inverter

ZHANG Yajing[1], *Member*, *CPSS*, ZHANG Huanchen[1], WANG Mian[2], LI Jianguo[1], MA Shuang[1], WANG Jiuhe[1]
(1. School of Automation, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China; 2. Institute of Science and Technology, China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China)

**Abstract:** Load resonance soft-switching can effectively reduce the switching loss of single-phase grid-connected inverters, which is a research hotspot in high-frequency inverter applications. However, the traditional PI control strategy based on linear models is easy to be unstable under large signal disturbance, and the system output waveform is poor. Since the passivity-based control strategy based on the nonlinear theory can effectively improve the output and stability of the system, a passivity-based control strategy for a load resonant soft-switching inverter based on an Euler-Lagrange model is proposed. A single-phase full-bridge grid-connected inverter in unipolar BCM (boundary conduction mode) modulation mode is modeled in detail, and a passivity-based controller based on the damping injection method is designed. To verify the effectiveness of the proposed control strategy, a simulation model of the resonant soft-switching inverter is built, and this strategy is compared with the traditional PI control strategy under steady-state and transient conditions.

**Keywords:** Single-phase grid-connected inverter; passivity-based control; BCM modulation; switching loss

**收稿日期**：2022-08-01；**修回日期**：2022-09-11，2022-10-15；**录用日期**：2022-12-15；**网络首发日期**：2023-02-14
**基金项目**：国家自然科学基金资助项目(52107176，52237008)；北京市自然科学基金资助项目(3214061)；北京信息科技大学促进高校内涵发展科研水平提高资助项目(2121YJPY215)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grants 52107176 and 52237008; the Natural Science Foundation of Beijing under the grant 3214061; Promoting the Connotation Development of Colleges and Universities of Beijing Information Science and Technology University under the grant 2121YJPY215

近年来，新能源发电的相关技术发展迅速，逆变器作为新能源发电系统的重要组成部分，其技术

的革新成为推动新能源发电技术发展的重要途径。其中，高频化、小型化、数字化是逆变器技术的研究热点和重要方向[1-3]。逆变器开关频率的提高可以减小无源滤波器件的体积，降低相应的生产制造成本，提升逆变器功率密度并改善波形质量[3-4]。

负载谐振软开关为软开关技术的一种，在不添加额外辅助元器件[5]的前提下，通过开关管的结电容与负载侧电感形成谐振电路，在 1 个开关周期内实现电感电流的双向流动，为开关管的零电压导通创造条件，从而大大降低开关损耗。负载谐振软开关首先在 DC-DC 变换器中有成熟的应用，随后在功率因数校正 PFC(power factor correction)电路中有大量的应用[6-8]。在负载谐振软开关逆变器控制方面[9-10]，传统基于线性模型的比例积分 PI(proportional integral)控制大信号扰动时动态性能差，难以保持系统稳定。由于逆变器是非线性系统，将 PI 控制这种线性控制策略应用于非线性系统中具有局限性[11-12]，而无源控制作为非线性控制策略，具有无超调量、稳定性高、鲁棒性好的优势[13-18]。

本文提出了基于欧拉–拉格朗日 E-L(Euler-Lagrange)模型的无源控制方法以提升系统性能。首先，建立了负载谐振软开关并网逆变器的 E-L 模型，在理论分析的基础上，基于阻尼注入方法设计了无源控制器并分析了系统的无源性。为验证理论分析的可行性，本文搭建了基于 PSIM 的仿真模型，并与传统 PI 控制策略进行了对比分析。

## 1　负载谐振软开关逆变器拓扑及其工作原理

负载谐振软开关逆变器拓扑如图 1 所示，主要由全桥电路、谐振电感 $L_1$、滤波电路组成。图中：$u_d$ 为直流侧输入电压；$u_g$ 为电网电压；$C$ 为滤波电容；$L_2$ 为滤波电感；$S_1$~$S_4$ 为开关管。本文采用单极性临界电流模式，此模式中，开关管 $S_1$ 和 $S_2$ 组成高频桥臂，开关管 $S_3$ 和 $S_4$ 组成工频桥臂。

负载谐振软开关的工作原理以工频正半周期为例，过程①为谐振电感 $L_1$ 充电阶段，过程②为续流阶段，在桥臂中点制造高频谐振以实现开关管 $S_2$ 的零电压导通，然后，谐振电感电流 $i_{L_1}$ 每个开关周期下降到 0 甚至反向流动，在桥臂中点制造高频谐振过程③，从而实现开关管 $S_1$ 的零电压开通，负载谐振软开关可通过设置谐振电感电流 $i_{L_1}$ 的包络线实现。

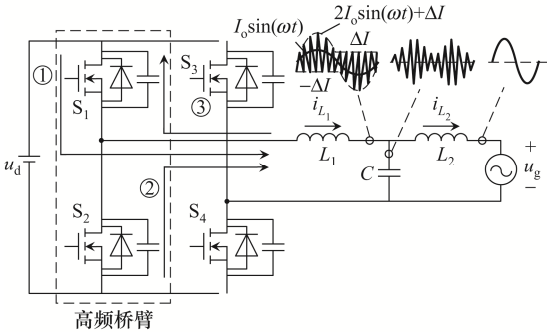



**图 1　负载谐振软开关单相并网逆变器拓扑**

**Fig. 1 Topology of load resonant soft-switching single-phase grid-connected inverter**

电感电流 $i_{L_1}$ 包络线上限 $(I_o\sin(\omega t)>0)$ 的公式为

$$\begin{cases} i_{up}=2I_o\sin(\omega t)+\Delta I \\ i_{down}=-\Delta I \end{cases} \tag{1}$$

电感电流 $i_{L_1}$ 包络线下限 $(I_o\sin(\omega t)<0)$ 的公式为

$$\begin{cases} i_{up}=\Delta I \\ i_{down}=2I_o\sin(\omega t)-\Delta I \end{cases} \tag{2}$$

式中：$i_{up}$ 和 $i_{down}$ 分别为电感电流 $i_{L_1}$ 包络线上限和下限；$I_o$ 为输出电流有效值；$\omega$ 为角频率；$t$ 为时间；$\Delta I$ 为控制高频管开通关断的包络线偏置电流。

## 2　基于无源控制的负载谐振软开关单相并网逆变器数学模型

### 2.1　无源控制器设计

选取电感电流 $i_{L_1}$ 和 $i_{L_2}$ 及电容电压 $u_C$ 作为状态变量，则单极性临界电流模式下的负载谐振软开关单相并网逆变器模型可表示为

$$\begin{cases} L_1\dfrac{\mathrm{d}i_{L_1}}{\mathrm{d}t}+u_C=Su_{\mathrm{d}} \\ L_2\dfrac{\mathrm{d}i_{L_2}}{\mathrm{d}t}-u_C=-u_{\mathrm{g}} \\ C\dfrac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t}-i_{L_1}+i_{L_2}=0 \end{cases} \tag{3}$$

式中，$S$ 为高频开关管控制率，在单极性临界电流模式中为控制高频管开通关断的谐振电感电流包络线峰值。

取状态变量 $\boldsymbol{x}=\begin{bmatrix} i_{L_1} & i_{L_2} & u_C \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$，可得到单相并网逆变器的 E-L 数学模型为

$$\boldsymbol{M}\dot{\boldsymbol{x}}+\boldsymbol{J}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{R}\boldsymbol{x}=\boldsymbol{u} \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{M}$ 为正定对角矩阵，$\boldsymbol{M}=\begin{bmatrix} L_1 & 0 & 0 \\ 0 & L_2 & 0 \\ 0 & 0 & C \end{bmatrix}$；$\boldsymbol{J}$ 为反对称矩阵，$\boldsymbol{J}=-\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$，反对称矩阵可反映系统内部的能量互联特性；$\boldsymbol{R}$ 为非负定矩阵，$\boldsymbol{R}$=0，反应系统能量的耗散特性；$\boldsymbol{u}$ 为系统的控制输入矩阵，$\boldsymbol{u}=\begin{bmatrix} Su_{\mathrm{d}} & -u_{\mathrm{g}} & 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$。

取期望 $\boldsymbol{x}^*=\begin{bmatrix} i_{L_1}^* & i_{L_2}^* & u_C^* \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$，状态矢量误差 $\boldsymbol{e}=\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}^*$，式(4)的 E-L 模型变为

$$\boldsymbol{M}\dot{\boldsymbol{e}}+\boldsymbol{R}\boldsymbol{e}=\boldsymbol{u}-(\boldsymbol{M}\dot{\boldsymbol{x}}^*+\boldsymbol{J}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{R}\boldsymbol{x}^*) \tag{5}$$

取误差能量存储函数 $\boldsymbol{H}_{\mathrm{e}}(\boldsymbol{x})$ 为

$$\boldsymbol{H}_{\mathrm{e}}(\boldsymbol{x})=\frac{1}{2}\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}\boldsymbol{e} \tag{6}$$

为了使误差能量存储函数快速收敛，选取注入阻尼 $\boldsymbol{R}_{\mathrm{a}}=\begin{bmatrix} r_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$，其中 $r_1>0$[19]。E-L 模型可转变为

$$\boldsymbol{M}\dot{\boldsymbol{e}}+\boldsymbol{R}\boldsymbol{e}=\boldsymbol{u}-(\boldsymbol{M}\dot{\boldsymbol{x}}^*+\boldsymbol{J}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{R}\boldsymbol{x}^*-\boldsymbol{R}_{\mathrm{a}}\boldsymbol{x}) \tag{7}$$

则误差能量存储函数对时间的导数可表示为

$$\dot{\boldsymbol{H}}_{\mathrm{e}}(\boldsymbol{x})=\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}\dot{\boldsymbol{e}}=-\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{R}+\boldsymbol{R}_{\mathrm{a}})\boldsymbol{e}<0 \tag{8}$$

从式(8)可以看出，误差能量存储函数的收敛速度取决于 $\boldsymbol{R}+\boldsymbol{R}_{\mathrm{a}}$，因此无源控制器快速收敛的条件为 $\boldsymbol{R}+\boldsymbol{R}_{\mathrm{a}}>0$。由此可得无源控制方程为

$$\boldsymbol{u}=\boldsymbol{M}\dot{\boldsymbol{x}}^*+\boldsymbol{J}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{R}\boldsymbol{x}^*-\boldsymbol{R}_{\mathrm{a}}\boldsymbol{x} \tag{9}$$

代入相应参数后可求得高频开关管控制率为

$$S=\frac{L_1\dfrac{\mathrm{d}i_{L_1}^*}{\mathrm{d}t}+u_C-r_1(i_{L_1}-i_{L_1}^*)}{u_{\mathrm{d}}} \tag{10}$$

其中，控制率 $S$ 是无源控制器计算出的谐振电感电流 $i_{L_1}$ 正弦包络线峰值的参考值。

### 2.2 系统无源性证明

负载谐振软开关单相并网逆变器模型方程可由式(3)推导得到，即

$$\begin{cases} L_1\dfrac{\mathrm{d}i_{L_1}}{\mathrm{d}t}=-u_C+Su_{\mathrm{d}} \\ L_2\dfrac{\mathrm{d}i_{L_2}}{\mathrm{d}t}=u_C-u_{\mathrm{g}} \\ C\dfrac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t}=i_{L_1}-i_{L_2} \end{cases} \tag{11}$$

将式(11)中的第一个公式乘 $i_{L_1}$，第二个公式乘 $i_{L_2}$，第三个公式乘 $u_C$ 后可得到系统的功率等效方程为

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(\underbrace{\frac{1}{2}L_1i_{L_1}^2+\frac{1}{2}L_2i_{L_2}^2}_{H_L(t)}+\underbrace{\frac{1}{2}Cu_C^2}_{H_C(t)})=Su_{\mathrm{d}}i_{L_1}-u_{\mathrm{g}}i_{L_2} \tag{12}$$

式中：$H_C(t)$为储存在电容中的电场能；$H_L(t)$为储存在电感中的电磁能。由此可推导出系统的能量函数为

$$\underbrace{H(t)}_{t\text{时刻能量}}=\underbrace{H(0)}_{\text{初始能量}}+\underbrace{S\int_0^t u_{\mathrm{d}}i_{L_1}\mathrm{d}\tau}_{\text{供给能量}}-\underbrace{\int_0^t u_{\mathrm{g}}i_{L_2}\mathrm{d}\tau}_{\text{耗散能量}} \tag{13}$$

式中：$H(t)=H_L(t)+H_C(t)$ 为电路的总能量；$\tau$ 为积分时间常数。因 $u_{\mathrm{g}}i_{L_2}>0$，使得耗散符合不等式

$$H(t)-H(0)<S\int_0^t u_{\mathrm{d}}i_{L_1}\mathrm{d}\tau \tag{14}$$

由此可证明该系统是严格无源的。

## 3 无源控制的负载谐振软开关单相并网逆变器仿真分析

本文搭建了 750 W 基于 PSIM 的仿真模型，对所提出的无源控制策略进行仿真验证，无源控制示意图如图 2 所示。图中：电感电流 $i_{L_1}$、期望电感电

流 $i_{L_1}^*$、电网电压 $u_g$ 经过无源控制器得到电感电流指令值 $i_{L_1,\mathrm{ref}}$，再经过单极性临界电流调制得到开关管控制信号。直流侧输入电压 $u_d$=380 V，电网电压峰值 $u_g$=311 V，电路仿真参数见表 1。因对比所用的 PI 控制结构与无源控制类似，本文不再赘述，仿真所用 PI 控制参数为 P=5.000，I=0.001。

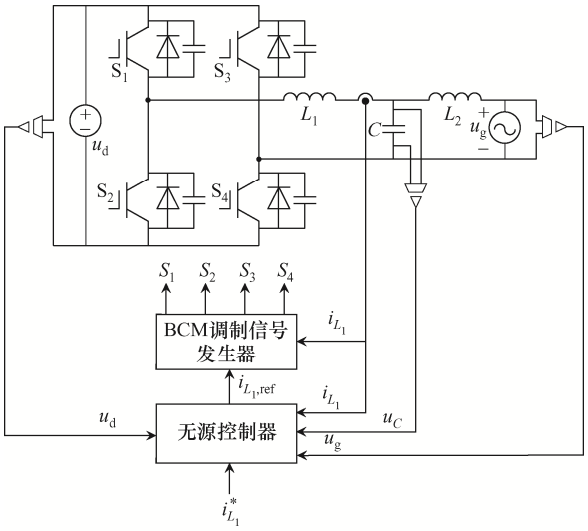



**图 2　无源控制示意**

**Fig. 2 Schematic of passivity-based control**

**表 1　电路仿真参数**

**Tab. 1 Simulation parameters of circuit**

| 仿真参数 | 数值 |
|---|---|
| 期望电感电流峰值 $i_{L_2}^*$/A | 4.8 |
| 电感 $L_1$/μH | 150 |
| 电感 $L_2$/mH | 3 |
| 电容 $C$/μF | 0.56 |
| 注入阻尼 $r_1$/Ω | 80 |
| 开关管结电容/pF | 258 |

### 3.1　无源控制的负载谐振软开关单相并网逆变器稳态仿真分析

本文分别从正常工作情况和存在采样误差 2 方面进行负载谐振软开关单相并网逆变器稳态特性仿真分析。正常工作情况下，负载谐振软开关单相并网逆变器采用无源控制策略下的输出波形如图 3 所示。可以看出，滤波前的输出电流 $i_{L_1}$ 在电感电流包络线内双向流动，满足单极性临界导通 BCM (boundary conduction mode)调制高频管零电压导通条件。无源控制下滤波后的输出电流总谐波失真 THD(total harmonic distortion)为 2.8%且与电网电压 $u_g$ 同相位，满足相应并网要求。相同条件下 PI 控制的输出电流波形如图 4 所示。在 0.05 s，PI 控制滤波后的输出电流在过零点时发生严重振荡畸变，而无源控制下的输出电流波形更加稳定，过零点时振荡畸变程度更低。PI 控制下滤波后的输出电流 THD=3.4%，而无源控制下滤波后的输出电流 THD=2.8%，无源控制相较于 PI 控制的输出电流并网效果更优。

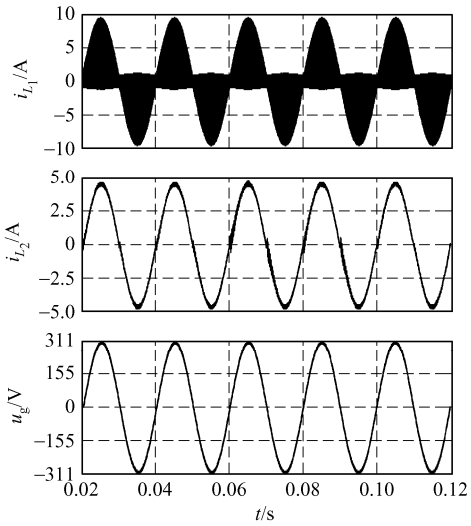



**图 3　正常工作情况下无源控制输出电流**

**Fig. 3 Output current under passivity-based control during normal operation**

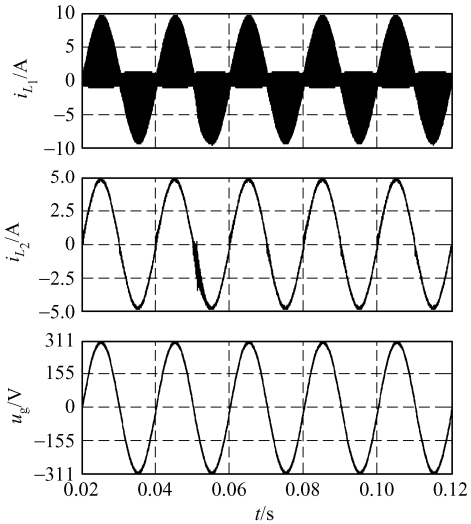



**图 4　正常工作情况下 PI 控制输出电流**

**Fig. 4 Output current under PI control during normal operation**

基于谐振电感参数，本文中高频管的最高开关频率约为 250 kHz，故选取 500 ns 作为谐振电感电流的采样延时时间。谐振电感电流存在采样延时情况下，无源控制输出电流波形如图 5 所示，PI 控制的输出电流波形如图 6 所示。可以看出，PI 控制的输出电流波形存在明显畸变，THD=4.3%，无源控制的输出电流波形畸变程度较小，THD=3.8%，因此，无源控制的负载谐振软开关单相并网逆变器存在谐振采样电流延时情况下性能更佳。

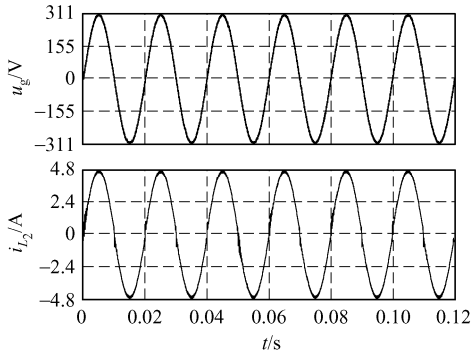



**图 5 谐振电流采样延时无源控制输出电流**

**Fig. 5 Output current under passivity-based control in the case of resonant current sampling delay**

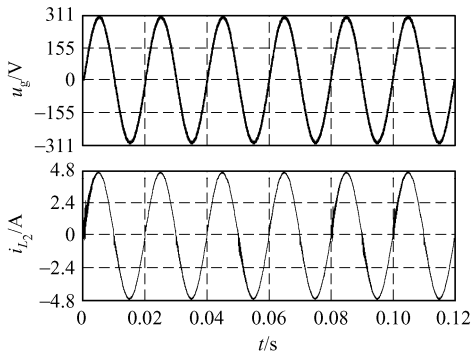



**图 6 谐振电流采样延时 PI 控制输出电流**

**Fig. 6 Output current under PI control in the case of resonant current sampling delay**

### 3.2 无源控制的负载谐振软开关单相并网逆变器暂态性能仿真

本文分别从电网电压骤降、并网电流突变、电网受到三次谐波及五次谐波干扰等方面进行暂态特性仿真分析。假设电网电压初始峰值为 311 V，在 0.04 s 时电网电压峰值下降 50%至 155 V，无源控制输出电流波形如图 7 所示，相同条件下 PI 控制的输出电流波形如图 8 所示。可以看出，0.04 s 后电网电压峰值下降 50%后 2 种控制方式输出电流峰值依旧保持不变，但 PI 控制的输出电流波形局部发生了明显畸变，而无源控制输出电流的波形畸变程度明显小于 PI 控制，无源控制策略性能更优。

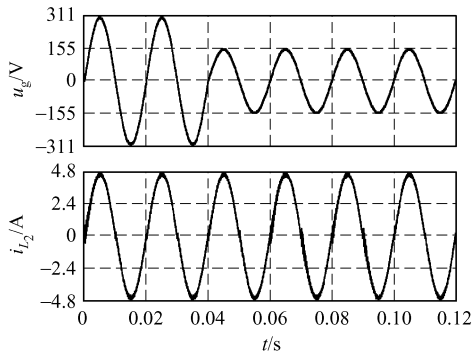



**图 7 电网电压骤降时无源控制输出电流**

**Fig. 7 Output current under passivity-based control in the case of grid voltage dips**

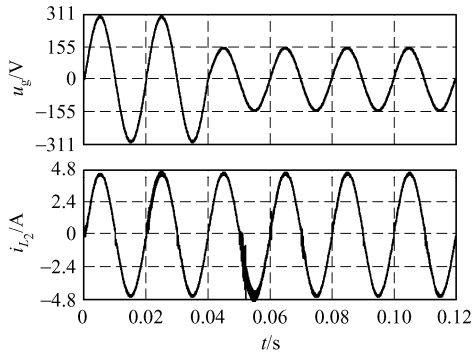



**图 8 电网电压骤降时 PI 控制输出电流**

**Fig. 8 Output current under PI control in the case of grid voltage dips**

假设在 0.042 5 s 并网电流峰值从 2.4 A 突变至 4.8 A，无源控制输出电流波形如图 9 所示，相同条

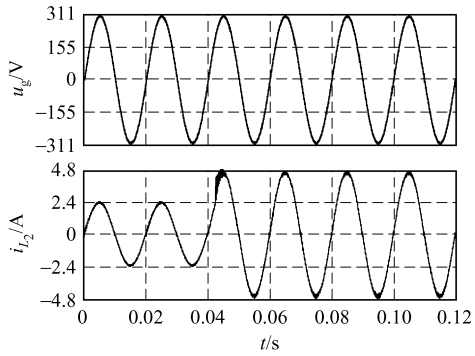



**图 9 并网电流突变时无源控制输出电流**

**Fig. 9 Output current under passivity-based control when grid-connected current suddenly changes**

件下 PI 控制的输出电流波形如图 10 所示。可以看出，并网电流峰值发生突变时，PI 控制的输出电流波形在过零点时畸变较为严重，而无源控制相较 PI 控制过零点处电流波形畸变更小，因此，无源控制对并网电流峰值发生突变时输出电流波形过零点时的畸变问题有着明显的改善效果。

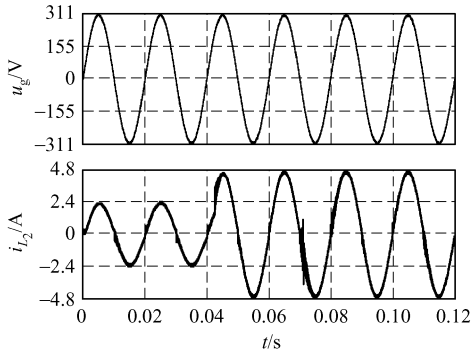



**图 10　并网电流突变时 PI 控制输出电流**

**Fig. 10 Output current under PI control when grid-connected current suddenly changes**

假设电网电压在 0.04 s 时受到三次谐波及五次谐波干扰发生畸变，无源控制输出电流波形如图 11 所示，相同条件下 PI 控制的输出电流波形如图 12 所示。可以看出，即使在 0.04 s 之后电网电压受到谐波干扰发生畸变，无源控制的输出电流依然保持良好的输出波形，而 PI 控制的输出波形在过零点附近发生了较明显的畸变，因此，无源控制下的负载谐振软开关单相并网逆变器抗谐波干扰能力更强。

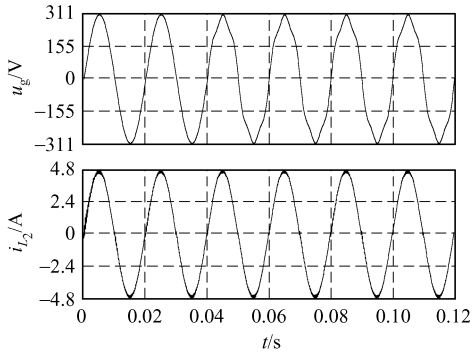



**图 11　电网电压受到谐波干扰时无源控制输出电流**

**Fig. 11 Output current under passivity-based control when grid voltage is disturbed by harmonics**

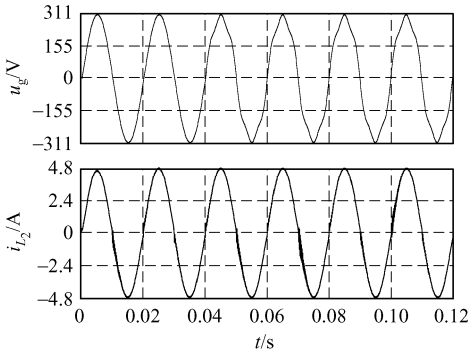



**图 12　电网电压受到谐波干扰时 PI 控制输出电流**

**Fig. 12 Output current under passivity-based control when grid voltage is disturbed by harmonics**

## 4　结语

本文基于无源控制理论中的 E-L 模型对负载谐振软开关并网逆变器进行理论建模并设计了无源控制器，然后证明了系统的无源性。此外，本文基于 PSIM 搭建了无源控制的负载谐振软开关并网逆变器，并从稳态和暂态 2 种情况与传统 PI 控制进行了对比分析。仿真结果验证了无源控制策略具有较好的稳态暂态特性，提升了系统性能。

**参考文献：**

[1] 易灵芝, 姜康宁, 胡炎申. 一种新型无源软开关三电平逆变器[J]. 电源学报, 2021, 19(2): 41-47.
Yi Lingzhi, Jiang Kangning, Hu Yanshen. Novel passive soft-switching three-level inverter [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(2): 41-47. (in Chinese)

[2] 李杰. 高频高效 GaN 逆变器研制[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
Li Jie. Development of high frequency and high efficiency GaN inverter [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. (in Chinese)

[3] 芦耀辉, 张德华. 具有良好负载适应性的软开关电流混合控制单相逆变器[J]. 电工技术, 2020(15): 37-40, 43.
Lu Yaohui, Zhang Dehua. Soft-switch current hybrid controlled single-phase inverter with good load adaptability [J]. Electric Engineering, 2020(15): 37-40, 43. (in

Chinese)

[4] 陈烨楠. 单相软开关光伏并网逆变器关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
Chen Yenan. The research on key issues of single-phase soft-switching grid-connected photovoltaic inverter [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese)

[5] 叶正煜. 带有源功率解耦的零电压开关单相逆变器研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
Ye Zhengyu. Research on single-phase ZVS inverter with active power decoupling [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese)

[6] Zhang Qian, Hu Haibing, Zhang Dehua, et al. A controlled-type ZVS technique without auxiliary components for the low power DC/AC inverter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(7): 3287-3296.

[7] Ryan R T, Hogan D N, Morrison R J, et al. Digital closed-loop control strategy to maintain the phase shift of a multi-channel BCM Boost converter for PFC applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(7): 7001-7012.

[8] Sun Jingjing, Li Jie, Costinett D J, et al. A GaN-based CRM totem-pole PFC converter with fast dynamic response and noise immunity for a multi-receiver WPT system [C]// 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Detroit, MI, USA, 2020: 2555-2562.

[9] Yao Kai, Wu Chengjian, Chen Jienan, et al. A scheme to improve power factor and dynamic response performance for CRM/DCM Buck-Buck/Boost PFC converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 36(2): 1828-1843.

[10] Fan Boran, Wang Qiong, Burgos R, et al. Adaptive hysteresis current based ZVS modulation and voltage gain compensation for high-frequency three-phase converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(1): 1143-1156.

[11] Amirahmadi A, Hu Haibing, Grishina A, et al. Hybrid ZVS BCM current controlled three-phase microinverter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(4): 2124-2134.

[12] 石桐. 基于无源理论的光伏逆变器控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
Shi Tong. Research on passivity-based control of photovoltaic inverter [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)

[13] 王久和. 先进非线性控制理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 78-101.
Wang Jiuhe. Advanced Nonlinear Control Theory and its Application [M]. Beijing: Science Press, 2012: 78-101. (in Chinese)

[14] Li Xin, Li Xiang. Passivity-based control for movable multi-load inductively coupled power transfer system based on PCHD model [J]. IEEE Access, 2020, 8: 100810-100823.

[15] 刘誉繁, 李建国, 张雅静, 等. 三端口直流换流装置及其无源控制仿真研究[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 106-112.
Liu Yufan, Li Jianguo, Zhang Yajing, et al. Simulation of three-port DC converter and its passivity-based control [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 106-112. (in Chinese)

[16] 徐海亮, 张伟杰, 林鸿彬. 一种提高并网逆变器无源性的阻抗重塑方法[J]. 电源学报. 2025, 23(3): 269-279.
Xu Hailiang, Zhang Weijie, Lin Hongbin. Impedance remodeling method for improving passivity of grid-connected inverters [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(3): 269-279. (in Chinese)

[17] 敖文杰, 陈家伟, 陈杰, 等. 燃料电池-锂电池混合供电系统的无源控制策略及参数设计方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(2): 580-594.
Ao Wenjie, Chen Jiawei, Chen Jie, et al. Passivity-based control strategy and parameter design method for fuel cell-lithium battery hybrid power supply system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(2): 580-594. (in Chinese)

[18] 刘林国, 罗嘉, 万文军. LCL 型并网逆变器基于无源性的重复控制策略[J/OL]. 电工技术学报, 1-12. (2025-07-30)[2025-07-30]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=Y2E-z2Sa5CP8fRD9-ePUVuoDKAEfHlhbEF_5A5S1PCxg5q8F8fFYEQM2u5Sx-wbVun0xwQ6oxQB3Mba0csQkz6f64HBOtIWx34DD1MxsxagI34VZgHCgjXdxDWUw9lksF4vPZZtn4P4k3CQDz0aGbkkMzmvbAwDGnPQAX9NzZ5niWMVOUALAWA==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.

Liu Linguo, Luo jia, Wan Wenjun. Passivity-based repetitive control strategy for LCL-type grid-connected inverters [J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025: 1-12. (2025-07-30)[2025-07-30]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=Y2E-z2Sa5CP8fRD9-ePUVuoDKAEfHlhbEF_5A5S1PCxg5q8F8fFYEQM2u5Sx-wbVun0xwQ6oxQB3Mba0csQkz6f64HBOtIWx34DD1Mxsxagl34VZgHCgjXdxDWUw9lksF4vPZZtn4P4k3CQDz0aGbkkMzmvbAwDGnPQAX9NzZ5niWMVOUALAWA==&uniplatform=NZKPT&language=CHS. (in Chinese)

[19] 杨继鑫, 王久和, 王勉, 等. 基于无源控制的双向并网变换器虚拟惯性控制策略[J]. 高电压技术, 2021, 47(4): 1295-1303.
Yang Jixin, Wang Jiuhe, Wang Mian, et al. Virtual inertia control strategy of bidirectional grid-connected converter based on passivity-based control [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4): 1295-1303. (in Chinese)



张雅静

**作者简介：**

张雅静(1984— )，女，中国电源学会会员，通信作者，博士，讲师。研究方向：宽禁带半导体及新能源发电。E-mail：zhangyajing@bistu.edu.cn。

张焕晨(1996— )，男，硕士研究生。研究方向：负载谐振软开关。E-mail：zhc15222726402@163.com。

王勉(1985— )，男，博士，工程师。研究方向：新能源发电，微电网控制。E-mail：wang_mian1@ctg.com.cn。

李建国(1975— )，男，博士，副教授。研究方向：电力电子与电力传动。E-mail：lijianguo@bjtu.edu.cn。

马爽(1988— )，女，博士，讲师。研究方向：控制科学与工程。E-mail：mashuang@bistu.edu.cn。

王久和(1959— )，男，博士，教授。研究方向：电力电子与电力传动。E-mail：wjhyhrwm@163.com。

(责任编辑：郭凯凯)