

# 光伏微逆变器中 Boost 变换器的混沌现象分析与控制研究

倪福银<sup>1,2</sup>, 李正明<sup>1</sup>, 潘天红<sup>1</sup>

(1. 江苏大学电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 江苏理工学院电气信息工程学院, 江苏 常州 213001)

**摘要:** 由于光伏并网微逆变器中 Boost 变换器存在着混沌现象, 易造成微电网系统的不稳定。故引入两级式微逆变器, 通过建立 Boost 变换器模型分析混沌现象产生机理, 参考电流参数是造成混沌的重要因素。提出一种基于参数共振微扰法的 Boost 变换器混沌动力学控制方法, 以参考电流作为微扰参数, 推导出最优控制计算公式。通过实例验证, 参数共振微扰法可以有效抑制 Boost 变换器的混沌现象。结果表明该控制算法对研究光伏微逆变器具有有效性和可行性。

**关键词:** Boost 变换器; 混沌控制; 参数共振微扰法; 光伏微逆变器; MPPT

## Analysis and control research of chaotic phenomena for Boost converter in photovoltaic micro-inverter

NI Fuyin<sup>1,2</sup>, LI Zhengming<sup>1</sup>, PAN Tianhong<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China)

**Abstract:** On account of the chaotic phenomena exists in Boost converter of photovoltaic micro-inverter, which is easy to make micro-grid unstable. The production mechanism of chaotic phenomena is analyzed by Boost converter modeling after two-stage micro-inverter is proposed, and reference current parameter is a key factor to effect chaos on the converter. A chaos dynamic control method for Boost converter which is based on the method of resonant parametric perturbation is put forward. The reference current is taken as perturbation parameter, and the expression of the optimal control is deduced. The method of resonant parametric perturbation is available to restrain chaotic phenomena on Boost converter by instance verification. Then the results demonstrate that the presented control strategy is effective and feasible to the study of photovoltaic micro-inverter.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477070).

**Key words:** Boost converter; control of chaos; method of resonant parametric perturbation; photovoltaic micro-inverter; maximum power point tracking (MPPT)

中图分类号: TM61 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)17-0149-06

## 0 引言

近年来, 光伏微型逆变器凭借具有对实际环境适应性强, 体积小、无热斑, 易于扩容等优点, 成为当前研究的热点。从技术角度来看与传统大功率集中式逆变器相比, 微逆变器输入电压低, 输出电压高, 功率小, 因此其拓扑结构成为关键性技术之一<sup>[1-2]</sup>, 应采用能够同时实现升、降变换功能的变换

器拓扑, 微型逆变器要求先将输入的低直流电压采用 Boost 变换器<sup>[3-4]</sup>升压后再转化为交流电并入电网, 由于 Boost 变换器采用开关器件, 具有很强的非线性特性, 经常会出现一些莫名其妙的“失稳”现象, 引起控制系统的不稳定和间歇振荡, 这种现象就是 Boost 变换器中存在的分岔与混沌现象<sup>[5-9]</sup>, 严重情况下会引起微电网的电能质量问题, 因此研究 Boost 变换器中的混沌现象与控制具有重要意义。

关于混沌控制算法当前已有不少学术成果<sup>[6-11]</sup>, 由于微逆变器需要在每块光伏电池板后安装, 考虑成本影响, 选用的控制器芯片不适宜使用一些算法复

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51477070); 江苏省前瞻性联合研究项目(BY2015028-01)

杂, 计算量大的控制混沌控制算法, 需要研究新的高可靠性、运算量小、低成本小功率拓扑结构及电压电流检测与控制技术, 故文章提出一种采用 DC/DC+DC/AC 双级拓扑结构的微逆变器<sup>[12-13]</sup>, 升压部分采用 PWM 型 Boost 变换器, 并采用前级 Boost 变换器进行最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)控制, 分析 Boost 变换器中的非线性现象机理, 选取采用基于电流参数共振微扰法<sup>[11]</sup>的 Boost 变换器混沌动力学控制方法来抑制混沌现象。

### 1 Boost 变换器的分岔与混沌现象分析

光伏微逆变器系统框图如图 1 所示, 包括光伏组件、Boost 变换器、DC/AC 逆变器和控制器等<sup>[14-15]</sup>, 为满足光伏发电电能质量符合负载设备用电需求, 要求微逆变器具有输入电压低, 输出电压高, 处理功率小等特点, 则对前级 Boost 变换器提出了更高要求, 必须深入分析其产生混沌现象机理, 有针对性地采取控制策略抑制混沌现象。

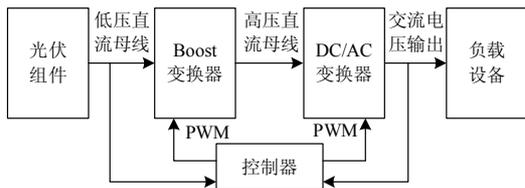


图 1 光伏微逆变器系统框图

Fig. 1 Block diagram of photovoltaic micro-inverter system

对于如图 1 所示的两级式光伏微逆变器, 采用前级 Boost 变换器 MPPT 控制方案<sup>[12]</sup>, 其中前级的 Boost 变换器实现 MPPT 控制, 后级的网侧逆变器实现直流母线的稳压控制, 通过调节 Boost 变换器的开关占空比来调节 Boost 变换器的输入电流, 进而调节光伏电池的输出电压。

建立如图 2 所示的 Boost 变换器模型, 模型中各元件的参数如下: 电感  $L = 1 \text{ mH}$ , 电容  $C = 1 \text{ nF}$ , 电阻  $R = 50 \Omega$ , 输入电压  $U_i = 5 \text{ V}$ , PWM 开关频率为  $25 \text{ kHz}$ , 二极管为续流二极管, 其内部电阻阻值为  $0.001 \Omega$ , 开关管选用 IGBT, 参考电流为  $I_{ref}$ , 其值由微逆变器 MPPT 控制确定<sup>[13]</sup>。

当参考电流  $I_{ref}$  值发生改变时, 可观察如图 3 所示的变换器输出电压波形图, 当变换器工作在周期一状态, 此时参考电流为  $4.1 \text{ A}$ , 电压波形如图 3(a) 所示, 电容电流输出波形在一个周期内变化一次, 此时系统是稳定的。为了更好地分析系统的动态过程, 取电感电流  $i_L$  和输出电压  $v_o$  作相位图, 如图 4(a) 所示, 得到系统的一条闭轨吸引子。

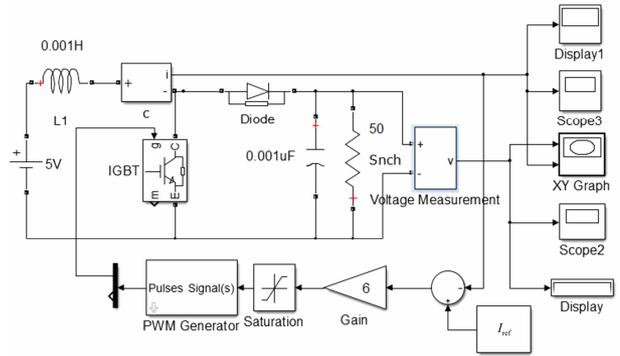
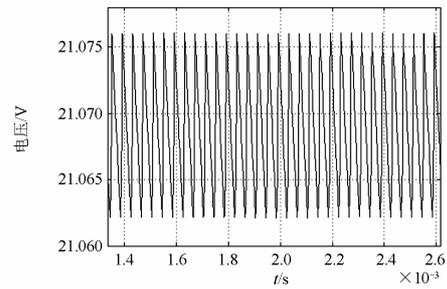
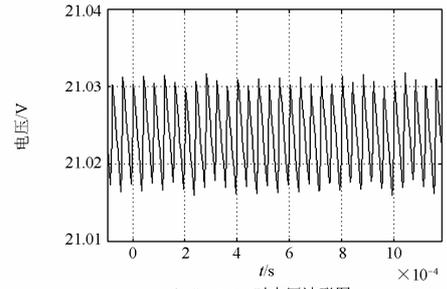


图 2 Boost 变换器模型

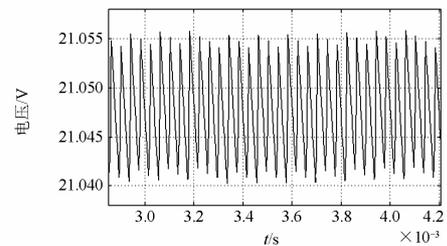
Fig. 2 Boost converter model



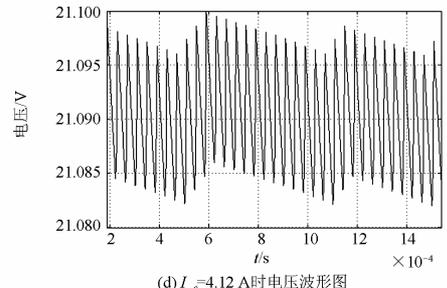
(a)  $I_{ref}=4.1 \text{ A}$ 时电压波形图



(b)  $I_{ref}=3.5 \text{ A}$ 时电压波形图



(c)  $I_{ref}=3.8 \text{ A}$ 时电压波形图



(d)  $I_{ref}=4.12 \text{ A}$ 时电压波形图

图 3 Boost 变换器电压波形图

Fig. 3 Boost converter voltage waveform

当  $I_{\text{ref}}=3.5\text{ A}$  时, 电流波形如图 3(b) 所示, 可以看出电流波形在一个周期内变化了两次。并且从图 4(b) 所示的相图也看出系统的吸引子依旧是一条闭轨, 表示系统依旧是周期运动, 但是闭轨时的周期变为原来的 2 倍。当参考电流取值从 4.1 A 到变化到 3.5 A 时, 变换器发生了倍周期分岔现象。同样, 当参考电流取值从 4.1 A 到变化到 3.8 A 时, 从图 3(c) 和图 4(c) 可以看到, 电路发生了三倍的倍周期分岔, 此时的吸引子为三周期吸引子。

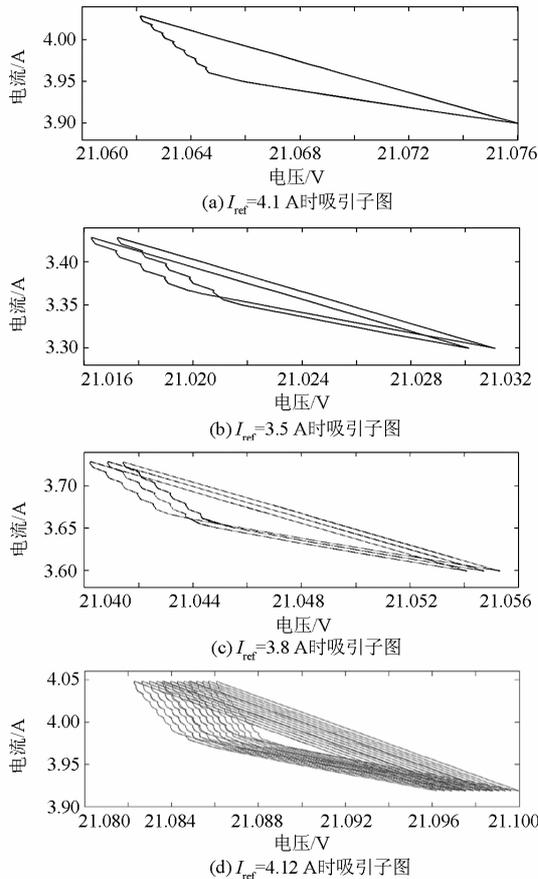


图 4 Boost 变换器吸引子  
Fig. 4 Boost converter attractor

当继续增加参考电流到大于 4.12A 时, 电路出现混沌现象, 如图 3(d)、图 4(d) 所示, Boost 变换器的电路波形不再是周期变化的, 而是在做类似不规则的运动。此时, 系统的吸引子变成比极限环具有更高分形维数的混沌吸引子, 而不再是极限环或周期吸引子的形式, 说明了 Boost 变换器通过倍周期分岔的通道达到混沌, 出现分岔与混沌现象。

## 2 基于参数共振微扰法的 BOOST 混沌控制研究

由于 Boost 变换器存在的混沌现象会严重影响微逆变器的性能, 因此需要采取控制策略消除混沌

影响。介于微逆变器主控芯片 DSP 产生的 PWM 波形属于非自治电路, 参数共振微扰法与其他相关控制方法相比, 具有计算量小, 实时性好等特点, 是一种简单的非反馈混沌控制方法, 适用于微逆变器抑制混沌现象。

常用两级式并网微逆变器 MPPT 控制分为基于后级网侧逆变器的 MPPT 控制和基于前级 Boost 变换器的 MPPT 控制, 若采用后级网侧 MPPT 控制方式, 后级网侧逆变器的 MPPT 控制主要是通过网侧逆变器输出电流幅值的调节来搜索最大功率点, 所对应的 Boost 变换器输入侧(光伏电池输出侧)电压变化值却随着光伏电池输出电流变化而变化, 导致实际电压步长是变化的, 会影响微扰共振法的有效控制, 故选择前级 Boost 变换器 MPPT 控制方案。

在前级 Boost 变换器进行 MPPT 控制的两级式微逆变器中, 采用恒定电压跟踪法进行 MPPT 控制, 保证光伏输出电压恒定, 根据以上 Boost 变换器混沌现象的机理分析, 参考电流参数  $I_{\text{ref}}$  是对变换器造成影响的重要因素, 故以参考电流作为微扰参数, 选取一个正弦波扰动量加在参考电流  $I_{\text{ref}}$  上, 通过调节 Boost 变换器的开关占空比来调节 Boost 变换器的输入电流, 进而调节光伏电池的输出电压, 则有

$$I_n = I_{\text{ref}} + A \sin(2\pi f t + \theta) \quad (1)$$

其摄动形式表达式为

$$\begin{cases} \frac{I_{\text{ref}} + A \sin[2\pi(D_0 + \delta D_0) + \theta] - (i_n + \delta i_n)}{(D_0 + \delta D_0)T} = \frac{E}{L} \\ \frac{I_{\text{ref}} + A \sin[2\pi(D_0 + \delta D_0) + \theta] - (i_{n+1} + \delta i_{n+1})}{[1 - (D + \delta D)]T} = \frac{v_0 - E}{L} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $E$  为 Boost 变换器输入电压值;  $L$  为电感值;  $D_0$  为占空比;  $i_n$  为电感电流;  $T$  为开关周期。把式 (2) 的形式变换成摄动小量, 则为

$$\begin{cases} 2\pi A \cos(2\pi D_0 + \theta) \delta D_0 - \delta i_n = \frac{ET\delta D_0}{L} \\ 2\pi A \cos(2\pi D_0 + \theta) \delta D_0 - \delta i_{n+1} = \frac{(E - v_0)T\delta D_0}{L} \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)改写为

$$\begin{cases} -m_c T \delta D_0 - \delta i_n = \frac{ET\delta D_0}{L} \\ -m_c T \delta D_0 - \delta i_{n+1} = \frac{(E - v_0)T\delta D_0}{L} \end{cases} \quad (4)$$

其中:

$$m_c = -2\pi Af \cos(2\pi D_0 + \theta) = -\left. \frac{di_{\text{ref}}}{dt} \right|_{t=t_0} \quad (5)$$

由式(5)可知电感电流的迭代关系式为

$$\begin{aligned} \delta i_{n+1} &= \delta i_n - \delta i_n \frac{1}{(1-D_0)\left(1+L\frac{m_c}{E}\right)} = \\ &\left(1 - \frac{1}{(1-D_0)\left(1+L\frac{m_c}{E}\right)}\right) \delta i_n = \\ &\left(1 - \frac{1}{(1-D_0)(1+M_c)}\right) \delta i_n \end{aligned} \quad (6)$$

当  $i_L = i_{\text{ref}}$  时,  $i_{\text{ref}}$  斜率的相反数。

其中:

$$M_c = L \frac{m_c}{E} = L \frac{-2\pi Af \cos(2\pi D_0 + \theta)}{E} \quad (7)$$

从式(6)可以得到共振扰动下变换器的特征值  $J$ , 如式(8)。

$$J = \frac{M_c}{1+M_c} - \frac{D_0}{(1-D_0)(1+M_c)} \quad (8)$$

由于特征值的稳定判据为  $J=-1$ , 故可以得出电路稳定占空比的判据为

$$D_0 = \frac{M_c + 0.5}{M_c + 1} \quad (9)$$

将式(8)代入式(9), 可以得出稳定电路的参考电流判据为

$$I_{\text{ref}} < I_{\text{ref.c}} = \frac{E}{L} \left[ \frac{R}{2\xi} \frac{M_c + 0.5}{M_c + 1} + 4(M_c + 1)^2 \right] \quad (10)$$

其中,  $\xi = L/T$ 。

对式(9)进行优化, 整理得

$$D_0 = \frac{M_c + 0.5}{M_c + 1} = 1 - \frac{0.5E}{m_c L + E} \quad (11)$$

从式(11)看出, 在输入电压  $E$  和电感  $L$  值确定的情况下, 得到的  $D_0$ 、 $m_c$  越大越好。当  $i_L = i_{\text{ref}}$  时, 有

$$\begin{aligned} m_c &= -\left. \frac{di_{\text{ref}}}{dt} \right|_{t=t_0} = -2\pi Af \cos(2\pi ft + \theta) = \\ &-2\pi Af \cos(2\pi D_0 + \theta) = \\ &-2\pi Af \cos(2k-1)\pi \end{aligned} \quad (12)$$

当  $m_c$  取最大值有

$$\theta = 2\pi \left( \frac{2k-1}{2} - D_0 \right) \quad (13)$$

其中,  $k = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ 。

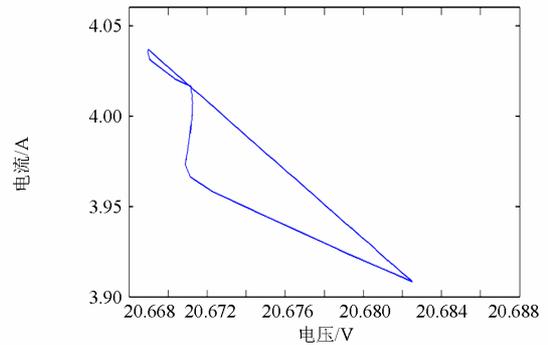
当  $\theta$  满足式(13)时, 此时的  $\theta$  为最优相位, 扰动参数  $I_{\text{ref}}$  对系统的控制最强, 此时有

$$M_c = L \frac{m_c}{E} = L \frac{2\pi Af}{E} \quad (14)$$

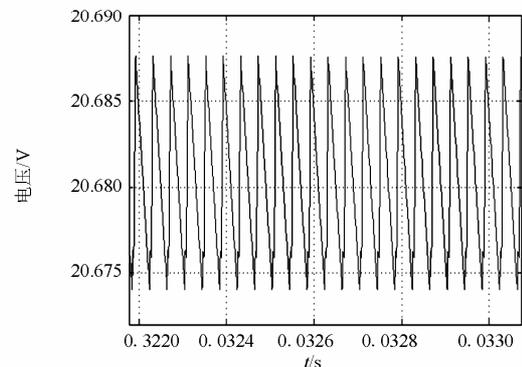
根据以上计算公式, 则可以求出参考电流  $I_{\text{ref}}$  的最优振幅和最优相位值, 通过微扰共振控制策略使得 Boost 变换器中出现的混沌现象系统重新回到稳定状态。

### 3 结果分析

在如图 2 所示的仿真图中, 加上正弦波扰动项后, 取参考电流  $I_{\text{ref}} = 4.12 \text{ A}$ , 式(13)中取  $k$  为 2, 计算出最优相位为  $\theta = 2\pi(1.5 - D_0)$ , MPPT 控制采用恒压法, 保证 Boost 变换器输入电压恒定, 以变换器的电感电流  $i_L$  和输出电压  $v_o$  作相图, 此时, 如图 5(a)为参数共振微扰法应用于 Boost 变换器后的相图, 图 5(b)为电感电流的时域图。当  $I_{\text{ref}} = 3.8 \text{ A}$  对应的 Boost 变换器相位图和电压波形图如图 5(c)、图 5(d)所示, 从混沌状态又重新回到了周期一状态, 即达到稳定的周期状态。结果表明, 采用基于参考电流参数的微扰共振法对抑制两级式光伏微逆变器的混沌现象是可行的。



(a)  $I_{\text{ref}} = 4.12 \text{ A}$  时吸引子图



(b)  $I_{\text{ref}} = 4.12 \text{ A}$  时电压波形图

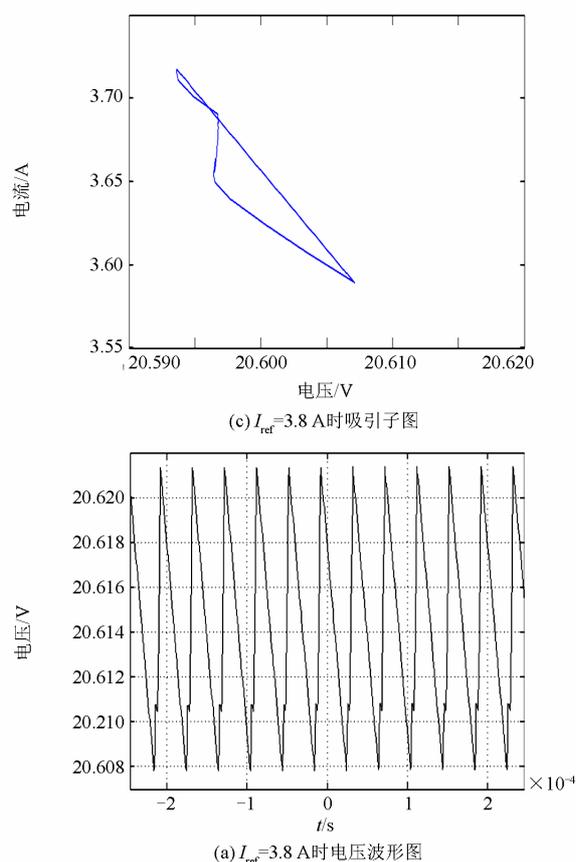


图5 参数共振微扰法应用于 Boost 变换器后的波形  
Fig. 5 Waveform with method of resonant parametric perturbation applied in Boost converter

#### 4 结论

对于光伏微逆变器 Boost 变换器存在的混沌现象, 分析了其产生现象, 根据产生机理选用比较适合参数共振微扰法, 在基于前级 Boost 变换器 MPPT 控制的两级式微逆变器中, MPPT 采用恒定电压跟踪法, 以参考电流作为微扰参数, 利用仿真电路实现微扰共振法对变换器混沌现象的控制, 结果表明该混沌控制方法在两级式微逆变器中可以有效的抑制 Boost 变换器混沌现象。

#### 参考文献

- [1] 张凤阁, 朱仕禄, 殷孝睢, 等. 交错反激式光伏并网微逆变器的控制器实现[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 142-153.  
ZHANG Fengge, ZHU Shilu, YIN Xiaoju, et al. Controller design of grid-connected micro-inverter based on interleaved flyback structure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 142-153.
- [2] 王玉斌. 单相并网逆变器前级交错并联 DC/DC 变换器

的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 66-71.  
WANG Yubin. Study of interleaved DC/DC converter used in the first-stage of single-phase grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 66-71.

- [3] 方宇, 马旭东. 一种新型耦合电感式双 Boost 光伏微逆变器拓扑分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(17): 32-37.  
FANG Yu, MA Xudong. A novel topology analysis of photovoltaic micro-inverters with coupled inductors and double boost[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(17): 32-37.
- [4] 汪洋, 罗全明, 支树播, 等. 一种交错并联高升压 BOOST 变换器[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(5): 133-139.  
WANG Yang, LUO Quanming, ZHI Shubo, et al. A new interleaved high step-up BOOST converter[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(5): 133-139.
- [5] 代璐, 龙崦平. PI 调节下光伏逆变器的分岔与混沌现象研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 89-94.  
DAI Lu, LONG Yanping. Study of bifurcation and chaos for photovoltaic inverter with PI controller[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 89-94.
- [6] PREMALATHA L, VANAJARANJAN P. Spectral analysis of DC-DC buck converter with chaotic dynamics[C] // INDICON, 2005 Annual IEEE: 605-608.
- [7] 朱宁, 吴为麟, 邵建昂. 电流模式 BOOST 变换器的参数微扰混沌控制[J]. 电路与系统学报, 2004, 9(2): 79-84.  
ZHU Ning, WU Weilin, SHAO Jianang. Chaotic control strategy for the current-mode BOOST converter with small parameter perturbation[J]. Journal of Circuits and Systems, 2004, 9(2): 79-84.
- [8] 陆益民, 毛宗源, 张波. 基于免疫算法的混沌多模型微扰控制[J]. 控制与决策, 2004, 21(1): 30-35.  
LU Yimin, MAO Zongyuan, ZHANG Bo. Multi-model solution for chaos control based on the immune algorithm[J]. Control Theory & Applications, 2004, 21(1): 30-35.
- [9] 董恩增, 陈增强, 袁著祉. 基于神经网络 PID 控制器的混沌控制与同步[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2007, 37(3): 646-650.  
DONG Enzeng, CHEN Zengqiang, YUAN Zhuzhi. Control and synchronization of chaos systems based on neural network PID controller[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2007,

- 37 (3): 646-650.
- [10] 卢伟国, 周维维, 罗全名, 等. BOOST 变换器延迟反馈混沌控制及其优化[J]. 物理学报, 2007, 56(11): 6275-6281.  
LU Weiguo, ZHOU Luwei, LUO Quanming, et al. Time-delayed feedback control of chaos in BOOST converter and its optimization[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(11): 6275-6281.
- [11] 周宇飞, 陈军宁, 谢智刚, 等. 参数共振微扰法在 Boost 变换器混沌控制中的实现及其优化[J]. 物理学报, 2004, 53(11): 3676-3684.  
ZHOU Yufei, CHEN Junning, XIE Zhigang, et al. Application of resonant parametric perturbation to the chaos control in Boost converter and its optimization[J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(11): 3676-3684.
- [12] AN Bin, GONG Maofa, SU Yanping, et al. Research and simulation of two level grid-connected photovoltaic inverter system[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2014, 5(2): 93-97.
- [13] 孟建辉, 石新春, 付超, 等. 新型高效率两级式单相光伏并网逆变系统的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(20): 87-92.  
MENG Jianhui, SHI Xinchun, FU Chao, et al. Research and application of novel high efficiency two-stage single-phase photovoltaic grid-connected inverter system [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(20): 87-92.
- [14] 付兵彬, 贾春蓉, 杨昌海, 等. 光伏并网发电系统仿真模型的参数辨识[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(5): 116-120.  
FU Bingbin, JIA Chunrong, YANG Changhai, et al. Parameter identification of distributed photovoltaic power generation system[J]. Proceedingsjk of the CSU-EPSSA, 2013, 25(5): 116-120.
- [15] 巢睿祺, 王杰. 太阳能光伏并网系统的控制与仿真[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(2): 81-87.  
CHAO Ruiqi, WANG Jie. Control and simulation of the grid-connected solar photovoltaic system[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(2): 81-87.
- 
- 收稿日期: 2014-11-20; 修回日期: 2015-01-05
- 作者简介:  
倪福银(1978-), 男, 讲师, 博士研究生, 研究方向为分布式发电与微电网、电能质量分析与控制等; E-mail: thimbed@163.com  
李正明(1958-), 男, 通信作者, 教授, 博导, 研究方向为电力系统自动化、智能电网、电能质量评估等;  
潘天红(1974-), 男, 博士, 教授, 研究方向为智能电网、电力系统分析运行与控制等。
- (编辑 张爱琴)