

A Nonlinear Model Identification Method of Photovoltaic Grid-Connected Inverters Based on the NARX Model

Wei Zheng

Zhanjiang Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Zhanjiang Guangdong

Email: sinozhengwei@qq.com

Received: Sep. 28th, 2015; accepted: Oct. 10th, 2015; published: Oct. 16th, 2015

Copyright © 2015 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The system identification method of single-phase photovoltaic grid-connected inverter NARX model was proposed. For the black box feature of commercial photovoltaic grid-tied inverters, as well as the strongly nonlinear problem of the inverter which cannot be solved by existing linear modeling approach, in this method, the inverter was considered as a black box, wherein it was not necessary to know the topology and the parameters of the inverter internal circuits and power switching devices, as well as the type and logical relations of the control system. It only used the input-output external measurement data of the inverter, based on the NARX model nonlinear system identification techniques, to create an accurate mathematical model. The model can accurately imitate the behavior of the commercial inverter, and has simple structure and a small amount of computation. It takes a good balance between the complexity of the model and the model accuracy. It is suitable for power system with the grid-connected photovoltaic system scheduling, joint operation and coordinated control, and stochastic simulation research areas, in which the fast modeling and simple model structure are required.

Keywords

Photovoltaic, Inverter, System Identification, NARX, Black Box

基于NARX模型的光伏并网逆变器非线性模型辨识方法

郑 伟

文章引用: 郑伟. 基于 NARX 模型的光伏并网逆变器非线性模型辨识方法[J]. 智能电网, 2015, 5(5): 228-241.

<http://dx.doi.org/10.12677/sg.2015.55028>

广东电网有限责任公司湛江供电局, 广东 湛江
Email: sinozhengwei@qq.com

收稿日期: 2015年9月28日; 录用日期: 2015年10月10日; 发布日期: 2015年10月16日

摘要

论文提出了单相光伏并网逆变器NARX模型的系统辨识方法。针对商用光伏并网逆变器的“黑箱”特征, 以及现有的线性化建模方法无法解决逆变器的强非线性问题, 将单相光伏并网逆变器视为“黑箱”, 无需逆变器内部电路、功率开关器件等拓扑结构和参数及其控制系统的类型和逻辑关系, 仅仅利用逆变器输入-输出两侧的外部测量数据, 基于NARX模型非线性系统辨识技术, 可建立较为准确的数学模型, 实现对商用光伏并网逆变器准确描述其动态特性的可能。辨识所得单相光伏并网逆变器NARX模型结构简单, 运算量小, 在模型的复杂性和模型的精确性方面取了很好的平衡, 适用于电力系统对并网光伏发电系统的调度、联合运行与协调控制、随机模拟等需要快速建模与简单模型结构的研究领域。

关键词

光伏, 逆变器, 系统辨识, NARX, 黑箱

1. 引言

能源危机和气候变化是今天全球面临的主要挑战之一。作为人类应对这些挑战的努力, 太阳能光伏产业应运而生。光伏发电通过大量逆变器接入电力系统, 并网逆变器成为负责能量转换并提供必要控制的核心单元 [1]-[3]。目前由逆变器供应商提供的数学模型都是基于分析建模法, 主要包括状态空间平均法 [4]-[6]、离散迭代映射法 [7]-[10]、图形建模技术 [11]-[15]、计算机分析软件(例如 PSpice [16] [17])和数学工具(例如小波变换 [18])等。然而, 上述分析建模法所需要逆变器的结构、参数、微分方程、控制类型及开关拓扑等信息, 因各制造厂家的技术保密而无法全面了解, 使用方难以判断其准确性, 要通过逐个产品的验证测试来修正其模型, 这对于设备使用方来说具有极大的难度, 制约了分布式电源接入电力系统的建模、仿真、控制方法、电能质量等方面的研究与设计 [19], 因此迫切需要提出新的分布式电源逆变器建模方法来满足新能源并网系统的理论分析与建设需求。

光伏并网逆变器的产品研发分成两个部分: 拓扑结构和控制策略。现有对逆变器拓扑的研发, 都是沿着拓扑发现、模态分析、参数设计、仿真和实验研究的步骤, 这是一个典型电工学的研究方法。该方法的先天不足在于: 首先假定逆变器拓扑结构可用的基础上开展研究的, 而在进一步分析中完善拓扑, 整个研究过程中不断重复错误、修正、改进的步骤, 最终确定该逆变器有效性和特性; 控制策略的研发都无需考虑逆变器模型, 而是通过在实际中的不断调试来达到较好的控制效果 [20]。因此, 无论是拓扑结构还是控制策略的设计, 都经历了不断调试的过程, 这使得实际的光伏并网逆变器产品与原始的数学模型已经相去甚远, 加上生产厂家的技术保密, 设备使用方根本无法获得逆变器准确的数学模型, 光伏并网逆变器表现出的是完全的“黑箱”特性。

光伏并网逆变器是一种开关型功率变换器, 运行于开关状态; 由于反馈控制环节的引入, 功率开关器件的占空比随输入电压等发生变化, 使得的占空比和输出之间是非线性的函数关系; 构成光伏并网逆变器的元器件(包括开关器件、滤波元件、检测元件、控制器等)具有非线性, 且参数在系统实际运行中会漂移变化; 为了避免开关过程中桥臂直通现象的发生, 在开关器件的驱动信号中设置了死区, 死区效应

是一种光伏并网逆变器内部的非线性扰动 [21]; 在光伏并网逆变器中存在着准周期、倍周期分岔、边界碰撞分岔、切分岔、环面破裂分岔、非混沌奇怪吸引子、共存吸引子、间歇性分岔和阵发混沌等丰富的非线性现象 [6] [7]; 因此, 这决定了光伏并网逆变器是一种天然的强非线性系统。

现有逆变器数学模型研究均建立在线性电路的分析理论上, 基本思路是线性化的方法, 即对各个开关工作模态做时域上的平均处理, 同时忽略其非线性部分, 由此得出相应的数学模型。对于逆变器普遍存在的强非线性特征, 此类方法具有较大的局限性, 理论研究不能完全与实际相吻合, 无法很好地解决开关非线性的问题, 尤其不具有一般和广泛的适用性。

因此, 本文提出利用非线性系统辨识技术对单相光伏并网逆变器进行建模, 该方法基于非线性理论和离散时间系统, 选用了非线性系统辨识领域中简单而常用的 NARX (nonlinear auto regressive with exogenous input)模型, 将单相光伏并网逆变器视为“黑箱”, 根据在实验中采集的“黑箱”所表现出来的输入 - 输出信息, 辨识出与“黑箱”特性等价的单相光伏并网逆变器 NARX 模型。

2. NARX 模型

NARX 模型是线性 ARX (auto regressive with exogenous input [22]-[24])模型在非线性领域的扩展应用, 其通用的函数表达式如下:

$$y(t) = f[y(t-1), \dots, y(t-n_a), u(t-n_k), \dots, u(t-n_k-n_b+1)] \quad (1)$$

式中: $y(t)$ 为 NARX 模型的输出; $u(t)$ 为 NARX 模型的输入; $f(\cdot)$ 是取决于有限个先前输入 - 输出的非线性函数; n_a 为 NARX 模型输出的阶次; n_b 为 NARX 模型输入的阶次; n_k 为 NARX 模型输出的延时量。NARX 模型的结构如图 1 所示, 主要由回归分析器和非线性估计器组成。

2.1. 回归分析器

NARX 模型的回归分析器利用“黑箱” t 时刻及以前的输入信息 $u(t), u(t-1), u(t-2), \dots$ 和 t 时刻以前的输出信息 $y(t-1), y(t-2), \dots$ 进行计算分析, 然后将结果 $x(t)$ 输出给 NARX 模型的非线性估计器。

2.2. 非线性估计器

NARX 模型的非线性估计器包含了非线性函数模块和线性函数模块, 通过它们将 NARX 模型的回归分析器与 NARX 模型的输出建立起映射关系。NARX 模型非线性估计器的数学表达式如下:

$$y = F(x) = L^T(x-r) + d + g[Q(x-r)] \quad (2)$$

式中: y 为非线性估计器的输出, 即 NARX 模型的输出; x 为非线性估计器的输入; $L^T(x-r) + d$ 为线性函数模块的输出; d 为输出偏置; $g[Q(x-r)]$ 为非线性函数模块的输出; r 是回归矢量的平均值; Q 为非线性子空间。

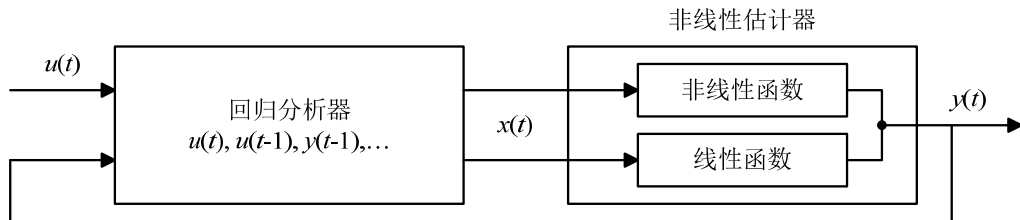


Figure 1. Structure of a NARX model
图 1. NARX 模型结构图

NARX 模型的非线性估计器可采用小波网络(wavelet networks)、树分割网络(tree-partition networks)、S 型网络(sigmoid networks)等 [25]。

① 小波网络

当 NARX 模型的非线性估计器采用小波网络函数时, 式(2)将被定义为如下的非线性函数:

$$y = F(x) = (x-r)PL + d + a_{s1}f\{b_{s1}[(x-r)Q - c_{s1}]\} + \cdots + a_{sn_s}f\{b_{sn_s}[(x-r)Q - c_{sn_s}]\} + a_{w1}g\{b_{w1}[(x-r)Q - c_{w1}]\} + \cdots + a_{wn_w}g\{b_{wn_w}[(x-r)Q - c_{wn_w}]\} \quad (3)$$

式中: P 为线性子空间; L 为线性系数; c_s 为尺度变换矩阵, c_w 为小波变换矩阵; a_s 为尺度系数; b_s 为尺度膨胀; a_w 为小波系数; b_w 为小波膨胀; 尺度函数 $f(\cdot)$ 和小波函数 $g(\cdot)$ 均为径向函数:

$$f(z) = e^{-0.5zz^T} \quad (4)$$

$$g(z) = [\dim(z) - zz^T] e^{-0.5zz^T} \quad (5)$$

式(3)亦可表示成如下形式:

$$y = F(x) = (x-r)PL + d + \sum_{i=1}^{n_s} a_{si}f\{b_{si}[(x-r)Q - c_{si}]\} + \sum_{j=1}^{n_w} a_{wj}g\{b_{wj}[(x-r)Q - c_{wj}]\} \quad (6)$$

其中: 函数 $F(x)$ 的前半部分 $(x-r)PL + d$ 为线性函数模块的输出; $F(x)$ 的后半部分为非线性函数模块的输出。

② 树分割网络

NARX 模型的非线性估计器亦可采用树分割网络。树分割网络采用的是二叉树非线性估计, 其定义的非线性函数 $y = F(x)$ 中, $F(x)$ 是分段线性函数, 其由 x 空间的二元分区 P 来定义, 在每个分割单元 P_k 中, $F(x)$ 为线性映射, 当 x 属于 P_k 时

$$y = F(x) = xL + d + (1, x)C_k \quad (7)$$

在 J 层的二叉树中, 每一个位于 $1 < j < J$ 层的节点都含有两个 $j+1$ 层的子代节点和一个 $j-1$ 层的父代节点。位于 1 层的根节点只有两个子代节点, J 层节点只含有一个父代节点。二叉树中的每一个节点都关联着一个分割单元。当节点 k 不是终止叶时, 分割单元 P_k 将被分割成两个子代节点的分割单元, 分割由半空间 $(1, u)B_k > 0$ 和 $(1, u)B_k \leq 0$ 来定义, 其中 B_k 用于改进分割子代节点时最小二乘算法的稳定性。

③ S 型网络

NARX 模型的非线性估计器采用 S 型网络时, 式(2)将被定义为如下的非线性函数:

$$y = F(x) = (x-r)PL + a_1f[(x-r)Qb_1 + c_1] + \cdots + a_nf[(x-r)Qb_n + c_n] + d \quad (8)$$

式(8)亦可表示成如下形式:

$$y = F(x) = (x-r)PL + \sum_{i=1}^n a_i f[(x-r)Qb_i + c_i] + d \quad (9)$$

式中: P 是线性子空间; Q 是非线性子空间; L 是线性系数; b 是膨胀矩阵; r 是回归分析器的平均值; d 为输出偏置; a 为输出系数; c 为变换矢量; S 型函数 $f(\cdot)$ 具有连续、平滑及饱和的非线性特性, 采用指数 S 状的曲线来描述 [26], 其数学表达式如下:

$$f(z) = \frac{1}{e^{-z} + 1} \quad (10)$$

3. 单相光伏并网逆变器 NARX 模型辨识

3.1. 逆变器辨识建模流程

单相光伏并网逆变器的非线性系统辨识建模流程如 图 2 所示，将单相光伏并网逆变器的输入 - 输出数据分成两组，分别用于系统辨识建模与模型验证；利用在 MATLAB 上编写的程序，对单相光伏并网逆变器的输入 - 输出数据进行基于 NARX 模型的非线性系统辨识建模，辨识出各种参数条件下的 NARX 模型；然后把验证数据输入至各个待定的 NARX 模型，将其输出波形与实测波形进行比较验证，得出精度最高的单相光伏并网逆变器 NARX 模型。

3.2. 输入 - 输出数据的采集

光伏阵列的输出特性具有强烈的非线性，它既非恒压源，亦非恒流源，也不可能为负载提供任意大的功率，是一种非线性直流电源。光伏阵列的输出电流在大部分工作电压范围内近似恒定，在接近开路电压时，电流下降率很大。光伏阵列的输出功率亦呈非线性过程变化 [27]。

因此，在单相光伏并网逆变器的非线性系统辨识过程中，需要采集并网逆变器的直流输入电压 U_{dc} 、直流输入电流 I_{dc} 、交流输出电压 u_{ac} 和交流输出电流 i_{ac} ，数据采集的同时完成数字采样，采样频率应满足采样定理，采样间隔不宜过长，否则并网逆变器的信息损失过大，直接影响辨识模型的精度。

3.3. 模型结构和参数辨识

单相光伏并网逆变器内部的控制系统采用闭环控制方式，由 图 1 可知，NARX 模型中的回归分析器不仅需要黑箱的输入信息，同时还要利用到黑箱的输出反馈信号，这一特性可以充分描述逆变器内部的闭环控制系统特性。因此，本文采用 NARX 模型对逆变器进行非线性系统辨识。

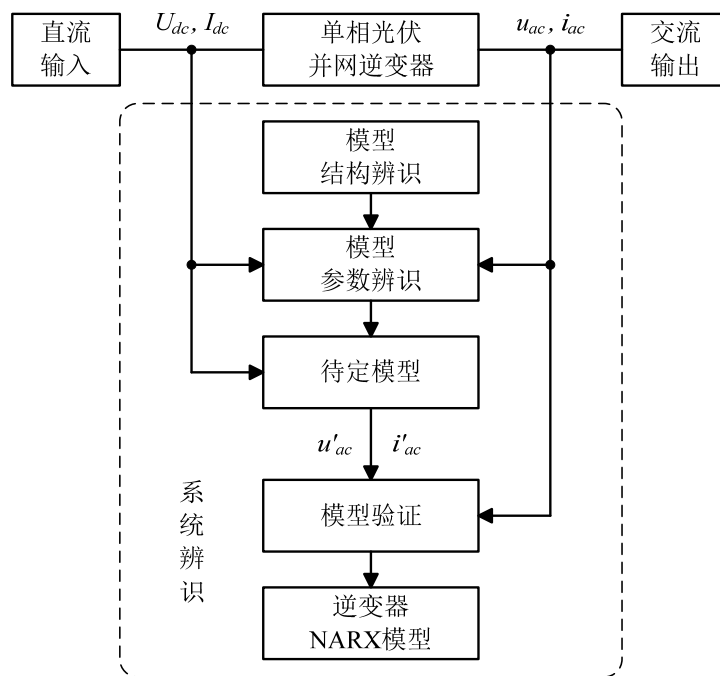


Figure 2. Identification modeling process of the single-phase photovoltaic grid-connected inverter

图 2. 单相光伏并网逆变器的辨识建模流程

由式(1)可得单相光伏并网逆变器 NARX 模型的表达式:

$$u_{ac}(t) = f[u_{ac}(t-1), \dots, u_{ac}(t-n_{a11}), i_{ac}(t-1), \dots, i_{ac}(t-n_{a12}), U_{dc}(t-n_{k11}), \dots, U_{dc}(t-n_{k11}-n_{b11}+1), I_{dc}(t-n_{k12}), \dots, I_{dc}(t-n_{k12}-n_{b12}+1)] \quad (11)$$

$$i_{ac}(t) = f[u_{ac}(t-1), \dots, u_{ac}(t-n_{a21}), i_{ac}(t-1), \dots, i_{ac}(t-n_{a22}), U_{dc}(t-n_{k21}), \dots, U_{dc}(t-n_{k21}-n_{b21}+1), I_{dc}(t-n_{k22}), \dots, I_{dc}(t-n_{k22}-n_{b22}+1)] \quad (12)$$

式中: $u_{ac}(t)$ 、 $i_{ac}(t)$ 为单相光伏并网逆变器 NARX 模型的输出; $U_{dc}(t)$ 、 $I_{dc}(t)$ 为单相光伏并网逆变器 NARX 模型的输入。单相光伏并网逆变器 NARX 模型输出的阶次 n_a , 单相光伏并网逆变器 NARX 模型输入的阶次 n_b , 单相光伏并网逆变器 NARX 模型输出的延时量 n_k 分别为:

$$n_a = \begin{bmatrix} n_{a11} & n_{a12} \\ n_{a21} & n_{a22} \end{bmatrix}, \quad n_b = \begin{bmatrix} n_{b11} & n_{b12} \\ n_{b21} & n_{b22} \end{bmatrix}, \quad n_k = \begin{bmatrix} n_{k11} & n_{k12} \\ n_{k21} & n_{k22} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式(11)和式(12)描述的单相光伏并网逆变器 NARX 模型, 可以用 q 次多项式来描述(逼近)其函数结构:

$$\begin{aligned} u_{ac}(t) = & \bar{u}_{ac} + \sum_{i=1}^{n_{a11}} a_i u_{ac}(t-i) + \sum_{i=1}^{n_{a11}} \sum_{j=i}^{n_{a11}} a_{ij} u_{ac}(t-i) u_{ac}(t-j) \\ & + \dots + \sum_{i=1}^{n_{a11}} \dots \sum_{v=p}^{n_{a11}} \sum_{q=v}^{n_{a11}} a_{i \dots q} u_{ac}(t-i) \dots u_{ac}(t-q) + \dots + \sum_{i=1}^{n_{b12}} b_i I_{dc}(t-n_{k12}-i+1) \\ & + \sum_{i=1}^{n_{b12}} \sum_{j=i}^{n_{b12}} b_{ij} I_{dc}(t-n_{k12}-i+1) I_{dc}(t-n_{k12}-j+1) \\ & + \dots + \sum_{i=1}^{n_{b12}} \dots \sum_{v=p}^{n_{b12}} \sum_{q=v}^{n_{b12}} b_{i \dots q} I_{dc}(t-n_{k12}-i+1) \dots I_{dc}(t-n_{k12}-q+1) \\ & + \sum_{i=1}^{n_{a11}} \sum_{j=1}^{n_{b11}} c_{ij} u_{ac}(t-i) U_{dc}(t-n_{k11}-j+1) \\ & + \dots + \sum_{i=1}^{n_{a11}} \dots \sum_{q=1}^{n_{b12}} c_{i \dots q} u_{ac}(t-i) \dots I_{dc}(t-n_{k12}-q+1) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} i_{ac}(t) = & \bar{i}_{ac} + \sum_{i=1}^{n_{a21}} a'_i u_{ac}(t-i) + \sum_{i=1}^{n_{a21}} \sum_{j=i}^{n_{a21}} a'_{ij} u_{ac}(t-i) u_{ac}(t-j) \\ & + \dots + \sum_{i=1}^{n_{a21}} \dots \sum_{v=p}^{n_{a21}} \sum_{q=v}^{n_{a21}} a'_{i \dots q} u_{ac}(t-i) \dots u_{ac}(t-q) + \dots + \sum_{i=1}^{n_{b22}} b'_i I_{dc}(t-n_{k22}-i+1) \\ & + \sum_{i=1}^{n_{b22}} \sum_{j=i}^{n_{b22}} b'_{ij} I_{dc}(t-n_{k22}-i+1) I_{dc}(t-n_{k22}-j+1) \\ & + \dots + \sum_{i=1}^{n_{b22}} \dots \sum_{v=p}^{n_{b22}} \sum_{q=v}^{n_{b22}} b'_{i \dots q} I_{dc}(t-n_{k22}-i+1) \dots I_{dc}(t-n_{k22}-q+1) \\ & + \sum_{i=1}^{n_{a21}} \sum_{j=1}^{n_{b21}} c'_{ij} u_{ac}(t-i) U_{dc}(t-n_{k21}-j+1) \\ & + \dots + \sum_{i=1}^{n_{a21}} \dots \sum_{q=1}^{n_{b22}} c'_{i \dots q} u_{ac}(t-i) \dots I_{dc}(t-n_{k22}-q+1) \end{aligned} \quad (15)$$

在上述单相光伏并网逆变器 NARX 模型结构的基础上, 综合考虑计算处理能力的限制, 将单相光伏并网逆变器 NARX 模型阶次和延时的范围限定在[1, 20]的区间内, 基于 ARX 模型, 逐次估计并计算预测误差 $J(n)$:

$$J(n) = \sum_{t=n+1}^{n+N} e^2(t) = \sum_{t=n+1}^{n+N} [y(t) - \hat{y}(t)]^2 \quad (16)$$

式中： $y(t)$ 是单相光伏并网逆变器的实测输出电压/电流； $\hat{y}(t)$ 是单相光伏并网逆变器 NARX 模型的输出电压/电流；阶次 $n = n_a + n_b$ ； N 为实验数据的个数。当 $J(n)$ 逐渐减小并趋于稳定时，得到一族 $[n_a, n_b, n_k]$ 值，将其作为单相光伏并网逆变器 NARX 模型回归分析器的阶次和延时量，选用小波网络非线性估计器，完成单相光伏并网逆变器 NARX 模型的非线性系统辨识建模。

3.4. 模型验证

利用 NARX 模型进行非线性系统辨识的过程中，NARX 模型的回归分析器可以选取不同的阶次和延时，NARX 模型的非线性估计器可以选取不同非线性函数进行估计，辨识计算将得出一族单相光伏并网逆变器 NARX 模型，即由式(11)和式(12)所描述的具有不同参数的单相光伏并网逆变器 NARX 模型。因此，需要对各个待定的单相光伏并网逆变器 NARX 模型进行比较验证，以获得最能反映实际单相光伏并网逆变器动态特性的 NARX 模型，验证方法如下：

计算单相光伏并网逆变器 NARX 模型输出与系统实测输出的最佳拟合度(Best Fit)，所得数值最大者的精度最高。

$$f_{\text{Best Fit}} = \left(1 - \frac{|y - \hat{y}|}{|y - \bar{y}|}\right) \times 100 \quad (17)$$

式中： y 是单相光伏并网逆变器的实测输出电压/电流； \hat{y} 是单相光伏并网逆变器 NARX 模型的输出电压/电流； \bar{y} 为实测输出 y 的平均值。

根据赤池(Akaike, 1972)原理，具有最小赤池最终预测误差(Akaike's Final Prediction Error, FPE)和最小赤池信息准则(Akaike's Information Criterion, AIC)的模型为最精确的单相光伏并网逆变器 NARX 模型。

$$f_{\text{FPE}} = V \left(\frac{1+d/N}{1-d/N} \right) \quad (18)$$

$$f_{\text{AIC}} = \log V + \frac{2d}{N} \quad (19)$$

式中： V 为损失函数； d 为被估参数的个数； N 为实验数据的个数。

当 $d \ll N$ 时，

$$f_{\text{FPE}} = V \left(1 + \frac{2d}{N} \right) \quad (20)$$

$$f_{\text{AIC}} = \log \left[V \left(1 + \frac{2d}{N} \right) \right] \quad (21)$$

损失函数 V 的定义如下：

$$V = \det \left\{ \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varepsilon(t, \theta_N) [\varepsilon(t, \theta_N)]^T \right\} \quad (22)$$

式中： θ_N 表示被估计的参数 [28]。

4. 实验

4.1. 光伏并网发电实验系统

为了验证上述基于 NARX 模型的非线性系统辨识方法的可行性，本文在 7.68 kW 光伏并网发电系统

中进行了相关实验测试，实验系统包含屋顶光伏电池板、单相逆变器、波形记录仪、计算机、220 V 配电网等，实验装置与系统结构如图 3 所示。

在 7.68 kW 光伏并网发电系统正常运行的情况下，波形记录仪的四个电压、电流通道同步记录单相光伏并网逆变器输入 - 输出侧的直流输入电压 U_{dc} 、直流输入电流 I_{dc} 、交流输出电压 u_{ac} 和交流输出电流 i_{ac} ，采样频率为 5000 Hz，波形记录仪可以连续记录 40 s 的单相光伏并网逆变器运行数据，并将数据传输至计算机进行非线性系统辨识。

4.2. 单相光伏并网逆变器 NARX 模型辨识结果

在实验数据的基础上，利用前述基于 NARX 模型的非线性系统辨识技术，其中 NARX 模型的非线性估计器采用小波网络，得出单相光伏并网逆变器 NARX 模型，然后计算和比较各不同阶次与延时的 NARX 模型的赤池最终预测误差(FPE)、赤池信息准则(AIC)和最佳拟合度(Best Fit)，部分结果见表 1。



(a) 屋顶光伏电池板



(b) 实验装置

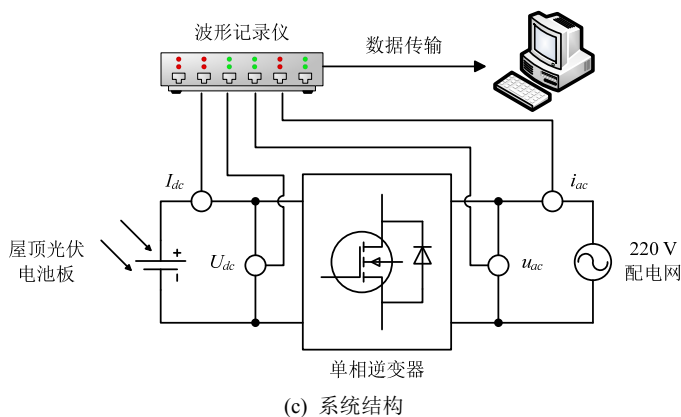


Figure 3. Experimental set-up and system architecture

图 3. 实验装置与系统结构

Table 1. Properties of the single-phase photovoltaic grid-connected inverter NARX models with different order and delay
表 1. 不同阶次与延时的单相光伏并网逆变器 NARX 模型特性

	n_a	n_b	n_k	f_{FPE}	f_{AIC}	$f_{Best Fit}/\%$
电压	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 6 & 1 \\ 4 & 5 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 4 & 1 \end{bmatrix}$	5.4146	1.7023	78.60
	$\begin{bmatrix} 12 & 12 \\ 12 & 12 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 11 & 16 \\ 11 & 16 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3 & 14 \\ 3 & 14 \end{bmatrix}$	9.4483	2.3979	71.64
	$\begin{bmatrix} 20 & 20 \\ 20 & 20 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 18 & 20 \\ 18 & 20 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3 & 19 \\ 3 & 19 \end{bmatrix}$	11.2286	2.7262	69.88
	$\begin{bmatrix} 9 & 9 \\ 9 & 9 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 8 & 5 \\ 8 & 5 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3 & 17 \\ 3 & 17 \end{bmatrix}$	8.3439	2.1865	64.20
	$\begin{bmatrix} 14 & 14 \\ 14 & 14 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 16 & 20 \\ 16 & 20 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3 & 19 \\ 3 & 19 \end{bmatrix}$	10.4350	2.5690	62.41
	$\begin{bmatrix} 5 & 5 \\ 5 & 5 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 5 & 1 \\ 5 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3 & 2 \\ 3 & 2 \end{bmatrix}$	7.5446	2.0414	48.59
	$\begin{bmatrix} 8 & 8 \\ 8 & 8 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 8 & 1 \\ 8 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3 & 2 \\ 3 & 2 \end{bmatrix}$	8.6475	2.2272	59.69
	电流	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 6 & 1 \\ 4 & 5 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 4 & 1 \end{bmatrix}$	5.4146	1.7023
$\begin{bmatrix} 12 & 12 \\ 12 & 12 \end{bmatrix}$		$\begin{bmatrix} 11 & 16 \\ 11 & 16 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3 & 14 \\ 3 & 14 \end{bmatrix}$	9.4483	2.3979	70.47
$\begin{bmatrix} 20 & 20 \\ 20 & 20 \end{bmatrix}$		$\begin{bmatrix} 18 & 20 \\ 18 & 20 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3 & 19 \\ 3 & 19 \end{bmatrix}$	11.2286	2.7262	24.78
$\begin{bmatrix} 9 & 9 \\ 9 & 9 \end{bmatrix}$		$\begin{bmatrix} 8 & 5 \\ 8 & 5 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3 & 17 \\ 3 & 17 \end{bmatrix}$	8.3439	2.1865	-77.07
$\begin{bmatrix} 14 & 14 \\ 14 & 14 \end{bmatrix}$		$\begin{bmatrix} 16 & 20 \\ 16 & 20 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3 & 19 \\ 3 & 19 \end{bmatrix}$	10.4350	2.5690	-63.91
$\begin{bmatrix} 5 & 5 \\ 5 & 5 \end{bmatrix}$		$\begin{bmatrix} 5 & 1 \\ 5 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3 & 2 \\ 3 & 2 \end{bmatrix}$	7.5446	2.0414	88.90
$\begin{bmatrix} 8 & 8 \\ 8 & 8 \end{bmatrix}$		$\begin{bmatrix} 8 & 1 \\ 8 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3 & 2 \\ 3 & 2 \end{bmatrix}$	8.6475	2.2272	90.05

由表 1 知, 在各不同阶次和延时的单相光伏并网逆变器 NARX 模型中, 赤池最终预测误差(FPE)和赤池信息准则(AIC)的最小值分别为 5.4146 和 1.7023, 其对应的单相光伏并网逆变器 NARX 模型的输出电压、电流最佳拟合度(Best Fit)也为所有模型中的最大值, 分别为 78.60%和 93.81%。由此得出辨识效果最佳的单相光伏并网逆变器 NARX 模型, 该模型的数学表达式如下:

$$u_{ac}(t) = f[u_{ac}(t-1), U_{dc}(t-1), \dots, U_{dc}(t-6), I_{dc}(t-2)] \quad (23)$$

$$i_{ac}(t) = f[i_{ac}(t-1), \dots, i_{ac}(t-3), U_{dc}(t-4), \dots, U_{dc}(t-7), I_{dc}(t-1), \dots, I_{dc}(t-5)] \quad (24)$$

其中, 单相光伏并网逆变器 NARX 模型的输出阶次 n_a , 输入阶次 n_b , 输出延时量 n_k 分别为:

$$n_a = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 3 \end{bmatrix}, \quad n_b = \begin{bmatrix} 6 & 1 \\ 4 & 5 \end{bmatrix}, \quad n_k = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 4 & 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

单相光伏并网逆变器 NARX 模型的输出电压 u_{ac} 采用含有 2 个小波元的小波网络非线性估计器, 输出电流 i_{ac} 采用了含有 4 个小波元的小波网络非线性估计器, 由式(23)和式(24)所描述的单相光伏并网逆变器 NARX 模型通过线性近似处理后得到的数学模型及参数如下:

$$\sum_{n=0}^3 A_n \begin{bmatrix} u_{ac}(t-nT) \\ i_{ac}(t-nT) \end{bmatrix} = \sum_{m=0}^7 B_m \begin{bmatrix} U_{dc}(t-mT) \\ I_{dc}(t-mT) \end{bmatrix} + e(t) \quad (26)$$

其中: $T=300$ s; $e(t)$ 为噪声; $A_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$; $A_1 = \begin{bmatrix} -0.7396 & 0 \\ 0 & -0.2903 \end{bmatrix}$; $A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -0.2393 \end{bmatrix}$; $A_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -0.1956 \end{bmatrix}$;
 $B_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$; $B_1 = \begin{bmatrix} 0.4194 & 0 \\ 0 & 1.2944 \end{bmatrix}$; $B_2 = \begin{bmatrix} -0.0449 & -1.5762 \\ 0 & -0.6604 \end{bmatrix}$; $B_3 = \begin{bmatrix} 0.1003 & 0 \\ 0 & -0.5903 \end{bmatrix}$;
 $B_4 = \begin{bmatrix} 0.1201 & 0 \\ 0.0007 & 0.4994 \end{bmatrix}$; $B_5 = \begin{bmatrix} -0.0831 & 0 \\ -0.0001 & -0.2850 \end{bmatrix}$; $B_6 = \begin{bmatrix} -0.2390 & 0 \\ -0.0005 & 0 \end{bmatrix}$; $B_7 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.0001 & 0 \end{bmatrix}$ 。

4.3. 逆变器 NARX 模型验证的结果与分析

实验系统中的单相光伏并网逆变器采取自动运行方式, 其控制系统的“黑箱”特点, 使得无法人为变更其工作状态。因此, 为了进一步探讨本文提出的非线性系统辨识建模方法及其所得单相光伏并网逆变器 NARX 模型的实用性, 本节将利用单相光伏并网逆变器在不同天气条件下(晴、晴转多云、多云、阴雨)的全天运行数据进行验证。

晴天条件下, 单相光伏并网逆变器及其 NARX 模型的输出电压、电流波形如图 4 所示, 其中模型与实测输出电压的最佳拟合度为 78.6022%, 模型与实测输出电流的最佳拟合度为 93.8082%。

晴转多云天气条件下, 单相光伏并网逆变器及其 NARX 模型的输出电压、电流波形如图 5 所示, 其中模型与实测输出电压的最佳拟合度为 79.3864%, 模型与实测输出电流的最佳拟合度为 92.3989%。

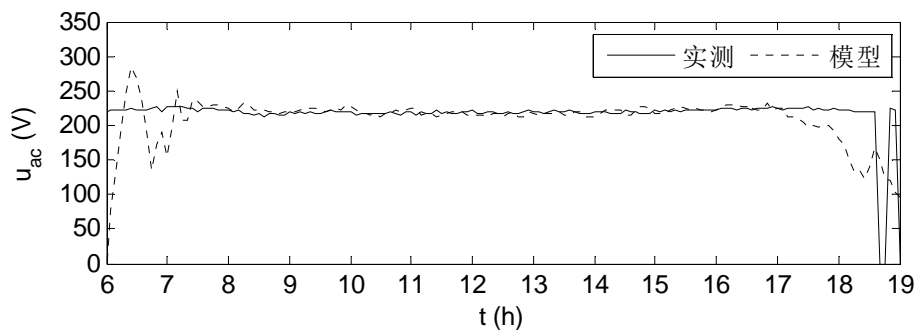
多云天气条件下, 单相光伏并网逆变器及其 NARX 模型的输出电压、电流波形如图 6 所示, 其中模型与实测输出电压的最佳拟合度为 81.5838%, 模型与实测输出电流的最佳拟合度为 84.3864%。

阴雨天气条件下, 单相光伏并网逆变器及其 NARX 模型的输出电压、电流波形如图 7 所示, 其中模型与实测输出电压的最佳拟合度为 80.0302%, 模型与实测输出电流的最佳拟合度为 77.4241%。

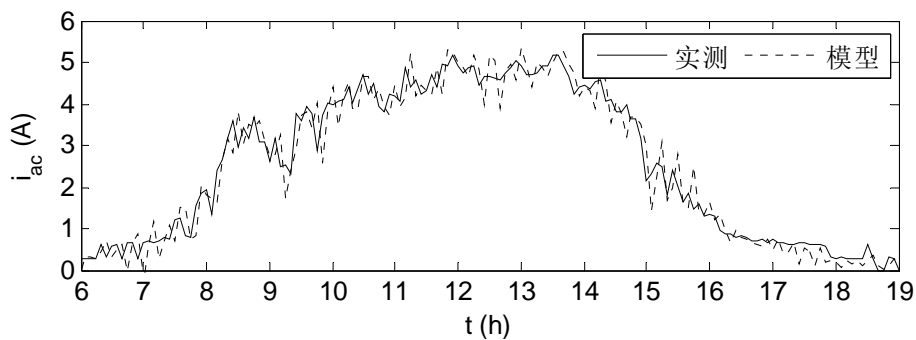
表 2 列举出了不同天气条件下单相光伏并网逆变器 NARX 模型输出电压、电流的最佳拟合度。

由图 4~7 和表 2 的计算结果可得如下结论:

① 单相光伏并网逆变器 NARX 模型输出电压拟合度在不同天气条件下的最佳拟合度差异较小, 其主要原因是单相光伏并网逆变器的输出电压受 220 V 配电网的约束, 波动幅度很小;



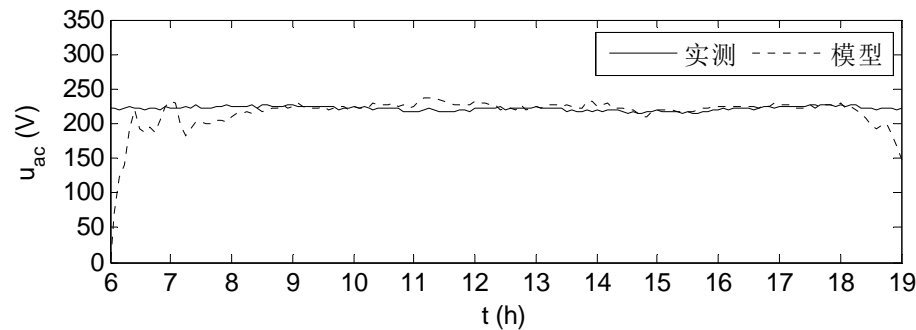
(a) 模型与实测输出电压



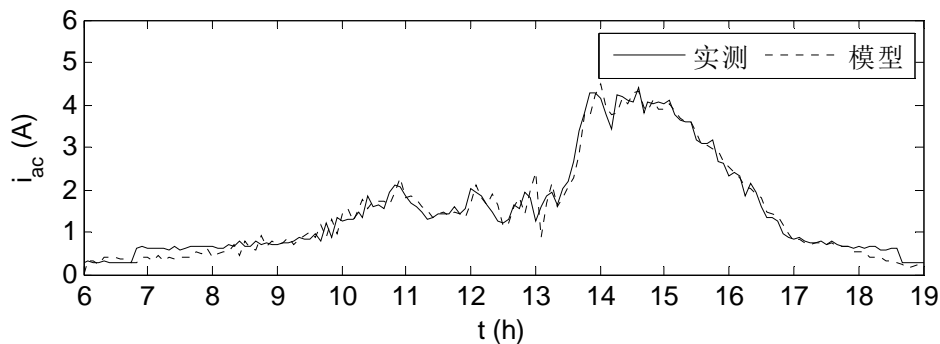
(b) 模型与实测输出电流

Figure 4. Model and measured output curves under sunny weather condition

图 4. 晴天条件下模型与实测输出曲线



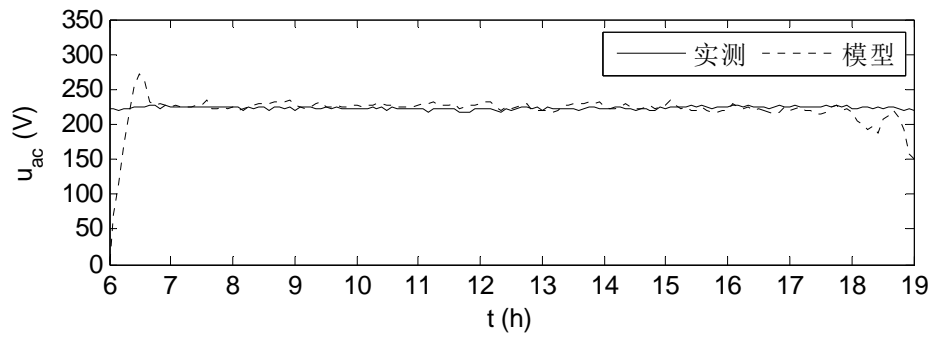
(a) 模型与实测输出电压



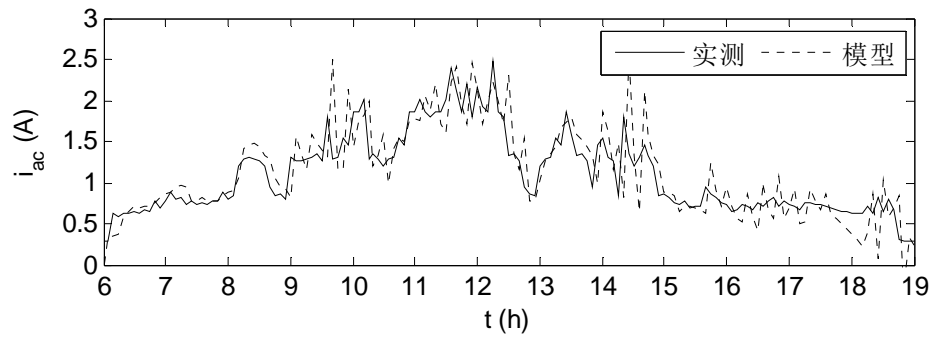
(b) 模型与实测输出电流

Figure 5. Model and measured output curves under partly cloudy weather condition

图 5. 晴转多云天气条件下模型与实测输出曲线



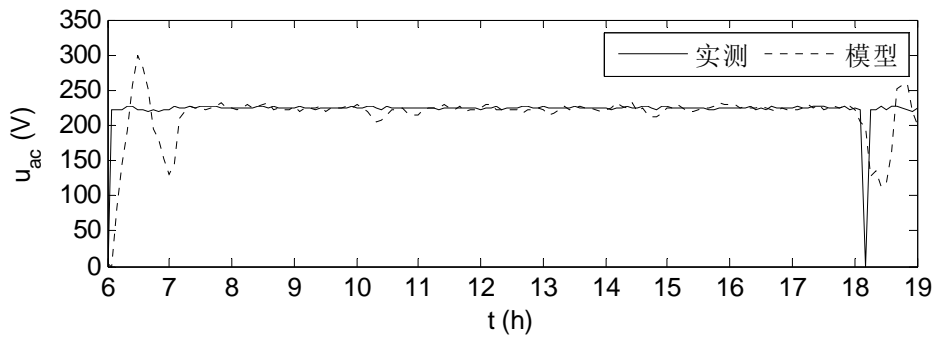
(a) 模型与实测输出电压



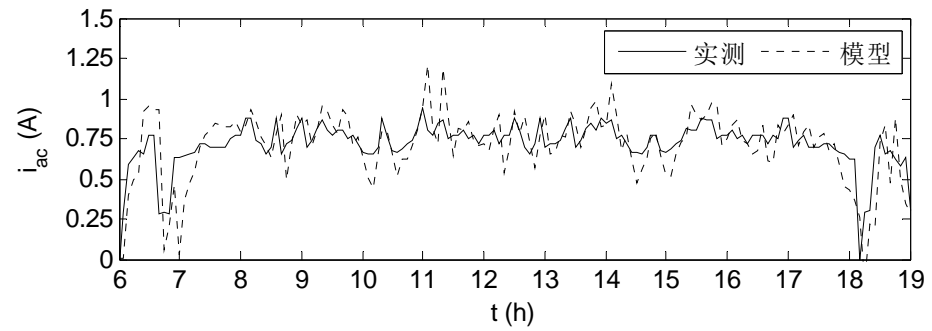
(b) 模型与实测输出电流

Figure 6. Model and measured output curves under cloudy weather condition

图 6. 多云天气条件下模型与实测输出曲线



(a) 模型与实测输出电压



(b) 模型与实测输出电流

Figure 7. Model and measured output curves under rainy weather condition

图 7. 阴雨天气条件下模型与实测输出曲线

Table 2. The best fits of the single-phase photovoltaic grid-connected inverter NARX model under different weather conditions**表 2.** 不同天气条件下单相光伏并网逆变器 NARX 模型的最佳拟合度

天气条件	输出电压($f_{Best Fit}/\%$)	输出电流($f_{Best Fit}/\%$)
晴	78.6022	93.8082
晴转多云	79.3864	92.3989
多云	81.5838	84.3864
阴雨	80.0302	77.4241

② 单相光伏并网逆变器 NARX 模型的结构简单, 其中输出电压 u_{ac} 只采用 2 个单元的小波网络非线性估计器, 输出电流 i_{ac} 只采用 4 个单元的小波网络非线性估计器, 使得模型在应用过程中的运算量较小;

③ 单相光伏并网逆变器 NARX 模型的最佳拟合度平均达到了 87.0044%, 这在模型的精确性和模型的复杂性方面取了很好的平衡, 适用于电力系统对并网光伏发电系统的调度、联合运行与协调控制、随机模拟等需要简单模型结构与快速运算的研究领域。

5. 结论

针对商用光伏并网逆变器的“黑箱”特点, 以及现有的线性化建模方法无法解决逆变器的强非线性问题, 本文将单相光伏并网逆变器视为“黑箱”, 研究了基于 NARX 模型的单相光伏并网逆变器非线性系统辨识建模方法。方法无需逆变器内部电路、功率开关器件等拓扑结构和参数及其控制系统的类型和逻辑关系, 仅仅利用逆变器输入-输出两侧的外部测量数据, 即可建立较为准确的数学模型。最后, 通过与光伏并网发电系统中的逆变器实测数据进行比较验证, 说明所得 NARX 模型可以较为准确地描述商用光伏并网逆变器的动态特性, 而且模型结构简单, 运算量较小, 为日趋复杂的新型电力系统调度、联合运行与协调控制、随机模拟等科学研究与工程应用创造了条件。

参考文献 (References)

- [1] 刘东冉, 陈树勇, 马敏, 王皓怀, 侯俊贤, 马世英 (2011) 光伏发电系统模型综述. *电网技术*, **8**, 47-52.
- [2] 黄汉奇, 毛承雄, 陆继明, 王丹 (2012) 光伏发电系统的小信号建模与分析述. *中国电机工程学报*, **22**, 7-14.
- [3] 艾欣, 韩晓男, 孙英云 (2013) 大型光伏电站并网特性及其低碳运行与控制技术述. *电网技术*, **1**, 15-23.
- [4] Middlebrook, R.D. and Cuk, S. (1976) A general unified approach to modeling-switching converter power stages. *Proceedings of the IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Cleveland, 8 June 1976, 73-68.
- [5] 魏克银, 刘德志, 欧阳斌, 翟小飞, 晏明 (2009) 三相四线制二极管整流桥的动态平均值模型. *电工技术学报*, **11**, 102-107.
- [6] 马西奎, 李明, 戴栋, 张浩, 邹建龙 (2006) 电力电子电路与系统中的复杂行为研究综述. *电工技术学报*, **12**, 1-11.
- [7] Banerjee, S. and Verghese, G.C. (2001) *Nonlinear phenomena in power electronics: Attractors, bifurcations, chaos, and nonlinear control*. Wiley-IEEE Press, New Jersey. <http://dx.doi.org/10.1109/9780470545393>
- [8] Tse, C.K. (2004) *Complex behavior of switching power converters*. CRC Press, Boca Raton.
- [9] Tse, C.K. and di Bernardo, M. (2002) Complex behavior in switching power converters. *Proceeding of the IEEE*, **90**, 768-781. <http://dx.doi.org/10.1109/JPROC.2002.1015006>
- [10] 谢玲玲, 龚仁喜, 李崎勇 (2013) 光伏发电最大功率点跟踪交错并联 Boost 变换器的动力学特性分析. *中国电机工程学报*, **6**, 38-45.
- [11] Mezghanni, D., Andoulsi, R., Mami, A. and Dauphin-Tanguy, G. (2007) Bond graph modelling of a photovoltaic system feeding an induction motor-pump. *Simulation Modelling Practice and Theory*, **15**, 1224-1238. <http://dx.doi.org/10.1016/j.simpat.2007.08.003>

- [12] Delgado, M. and Sira-Ramirez, H. (1998) A bond graph approach to the modeling and simulation of switch regulated DC-to-DC power supplies. *Simulation Practice and Theory*, **6**, 631-646. [http://dx.doi.org/10.1016/S0928-4869\(98\)00011-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0928-4869(98)00011-1)
- [13] Araújo, R.E., Leite, A.V. and Freitas, D.S. (2002) Modelling and simulation of power electronic systems using a bond graph formalism. *Proceedings of the 10th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED 2002)*, Lisbon, 9-12 July 2002, 1-9.
- [14] Smedley, K. and Cuk, S. (1994) Switching flow-graph nonlinear modeling technique. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **9**, 405-413. <http://dx.doi.org/10.1109/63.318899>
- [15] Veerachary, M., Senjyu, T. and Uezato, K. (2003) Signal flow graph modelling of interleaved buck converters. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, **31**, 249-264. <http://dx.doi.org/10.1002/cta.230>
- [16] Castaner, L. and Silvestre, S. (2002) Modelling photovoltaic systems using PSpice. John Wiley & Sons Ltd., Chichester. <http://dx.doi.org/10.1002/0470855541>
- [17] Birolek, D., Biolkova, V. and Kolka, Z. (2008) Averaged modeling of switched DC-DC converters based on Spice models of semiconductor switches. *Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on Circuits, Systems, Electronics, Control and Signal Processing (CSECS'08)*, Puerto de la Cruz, 15-17 December 2008, 162-167.
- [18] Onbilgin, G., Ozgonenel, O. and Turkmenoglu, V. (2007) Modeling of power electronics circuits using wavelet theory. *Sampling Theory in Signal and Image Processing*, **6**, 307-322.
- [19] 曾正, 赵荣祥, 杨欢 (2012) 含逆变器的微电网动态相量模型. *中国电机工程学报*, **10**, 65-71.
- [20] 张波 (2006) 电力电子学亟待解决的若干基础问题探讨. *电工技术学报*, **3**, 24-35.
- [21] 刘邦银 (2004) 电压源型逆变器的智能控制技术研究. 硕士论文, 华中科技大学, 武汉.
- [22] Billings, B.S. and Leontaritis, I.J. (1982) Parameter estimation techniques for nonlinear systems. *Proceedings of the 6th IFAC Symposium on Identification and System Parameter Estimation*, Washington DC, 7-11 June 1982, 505-510.
- [23] Radmaneshfar, E. and Karrari, M. (2007) A new method for structure detection of nonlinear ARX model: ANOVA_BSD. *Proceedings of the World Congress on Engineering 2007 (WCE 2007)*, London, 2-4 July 2007, 407-411.
- [24] Beyhan, S. and Alci, M. (2010) Fuzzy functions based ARX model and new fuzzy basis function models for nonlinear system identification. *Applied Soft Computing*, **10**, 439-444. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2009.08.015>
- [25] Ljung, L. (2002) *System identification: Theory for the user*. 2nd Edition, Prentice Hall PTR, London.
- [26] 郭科, 陈聆, 魏友华 (2007) 最优化方法及其应用. 高等教育出版社, 北京.
- [27] 陈艳 (2012) 光伏发电系统中 Z 源逆变器的控制技术研究. 博士论文, 重庆大学, 重庆.
- [28] Ljung, L. (2015) *System identification toolbox user's guide*. The MathWorks Inc., Natick.