

## 基于周期信号的迭代学习控制在逆变器中的应用

孟琦, 侯忠生<sup>†</sup>

(北京交通大学 电子信息工程学院 先进控制系统研究所, 北京 100044)

**摘要:** 提出一种基于周期信号的迭代学习控制方法, 并将其应用于电力逆变器, 分析了跟踪误差沿迭代方向的收敛条件, 给出了控制律的时域表达形式以及参数的确定方法. 由于该方法理论上可实现跟踪误差收敛到零, 因而使逆变器输出电压跟踪精度大幅提高. 通过MATLAB/Simulink仿真, 该方法的有效性得到验证; 此外, 与传统PID控制相比, 仿真结果显示该方法具有较好的负载适应能力以及优越的跟踪性能.

**关键词:** 迭代学习控制; 逆变器; 周期信号; 数据驱动控制

中图分类号: TP273 文献标识码: A

## A novel periodic-signal-based iterative learning control method and its application to inverter system

MENG Qi, HOU Zhong-sheng<sup>†</sup>

(Advanced Control System Laboratory, School of Electronic and Information Engineering,  
Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** A method of periodic-signal-based iterative learning control with application to inverter system is presented; the convergence condition for tracking error along the iteration axis is analyzed. The control law in time-domain and the parameter tuning method are developed. Since the tracking error can converge to zero when using this method, the accuracy of the inverter output voltage will be theoretically improved greatly. The effectiveness of this method is validated via the simulation implemented on MATLAB platform. In comparison with the PID control, simulation results show that the proposed method provides higher performance on load adaptability and output voltage tracking.

**Key words:** iterative learning control; inverter; periodic signal; data-driven control

### 1 引言(Introduction)

逆变器是一种把直流电能转换为交流电能的电力电子器件, 目前在电力系统中已经广泛应用<sup>[1-3]</sup>. 在直流输电、风力和光伏发电、电池储能等系统中, 逆变器都扮演着关键角色. 因此, 探讨高性能逆变器的控制问题有着十分重要的意义.

逆变器主要由晶体管等开关元件构成, 通过控制器产生合适宽度的脉冲驱动逆变桥开关管动作, 使直流输入变为一定幅值、一定频率的交流输出, 再辅以滤波电路降低波形的畸变, 使得输出电压总谐波含量(total harmonic distortion, THD)达到设计的性能指标. 目前逆变器系统主要的控制方法有以下几种:

PID控制<sup>[4-5]</sup>以结构简单、参数易于整定、使用方便成为当前最为广泛应用的控制方式. PID控制主要采用电压、电流瞬时值反馈控制方式. 然而, 其不足之

处在于: 1) 对于不同大小的负载一组参数难以全部适应, 需要更换参数予以应对; 2) 对于非线性负载无功功率较大时, 波形会出现畸变; 3) P型控制器跟踪正弦信号会存在静差, 加入积分项可有效克服静差, 但又不可避免的产生相位滞后, 因此PID控制很难在精度上再有所提高.

除PID方法外, 直接功率控制<sup>[6]</sup>、无差拍控制<sup>[7]</sup>等都是常见的逆变器控制方法. 其中直接功率控制的原理是将瞬时功率理论应用于逆变器控制, 通过求解有功、无功功率瞬时值, 确定脉冲序列的宽度. 该方法具有功率因数可调、更低的THD、算法效率高、系统结构简单等优点; 但是直接功率控制开关频率变化快, 硬件负担重, 滤波器设计难度较大. 无差拍控制则是根据系统的状态方程和输出反馈信号以及参考输出值, 计算下一开关周期的脉冲宽度. 这种方法具有很

收稿日期: 2015-04-01; 录用日期: 2015-10-09.

<sup>†</sup>通信作者. E-mail: zhshhou@bjtu.edu.cn; Tel.: +86 10-51688617.

本文责任编辑: 丛爽.

国家自然科学基金项目(61120106009, 61433002)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (61120106009, 61433002).

好的动态响应性能,能得到较高质量的输出波形;不足之处是系统性能很大程度上受到模型精度限制。

此外,还有状态反馈控制、滑模控制、智能控制等<sup>[8-10]</sup>。这些方法或是模型依赖性强;或是带不同大小、性质负载的适应能力不足;或是在理论上取得很好效果,但是应用难度较大。

迭代学习控制(iterative learning control)是一种无模型的数据驱动控制方法<sup>[11]</sup>,由Uchiyama于1978年首先提出,现今在工业流水线、机器人等领域已广泛应用<sup>[12-13]</sup>。该方法是针对一类在有限时间内重复运行的非线性动态系统,利用前一周期或几周期的误差和控制信息修正当前次的控制输入,逐渐逼近最优的控制量<sup>[14]</sup>。

本文提出一种基于周期信号的高精度逆变器迭代学习控制方法,并给出了控制律的时域表达形式以及参数的确定方法,利用跟踪误差沿迭代方向的传递函数分析了其收敛条件。该方法是一种基于数据驱动的无模型控制方法,仅通过对滤波器的设计,便可确定大部分的参数,模型依赖度较低。另外,其理论上可实现无静差跟踪,使得逆变器输出电压跟踪精度大幅提高。最后,通过MATLAB/Simulink仿真,验证了方法的有效性。

## 2 问题描述(Problem formulation)

逆变器系统<sup>[15]</sup>由直流电源、逆变桥、LC滤波电路构成如图1所示。其中: $E$ 为直流母线电压, $V$ 为逆变桥交流侧电压, $i_L$ 为滤波电感电流, $i_R$ 为负载上的电流, $v_C$ 为滤波电容电压。脉冲发生器根据控制信号产生适当宽度脉冲,驱动逆变桥动作,以得到期望的交流输出电压。

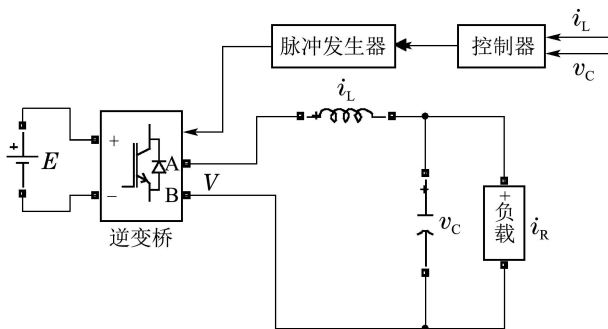


图1 逆变器系统结构  
Fig. 1 Structure of inverter system

由此可得逆变器系统模型为

$$\begin{cases} C \frac{du_C}{dt} = i_L - i_R, \\ L \frac{di_L}{dt} = V - v_C. \end{cases} \quad (1)$$

选择电容电压 $v_C$ 和电感电流 $i_L$ 为状态变量,逆变器交流侧电压和负载电流为输入,电容电压为系统输出。于是, $x = [v_C \ i_L]$ ,  $u = [V \ i_R]$ ,  $y = v_C$ 。逆变器

系统状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu, \\ y = Cx, \end{cases} \quad (2)$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L} & 0 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{1}{C} \\ \frac{1}{L} & 0 \end{pmatrix}, C = (1 \ 0).$$

由于建立逆变器系统模型很难将负载的特性完全考虑在内,负载变化引起的模型偏差无法根本去除。本文仅将模型作为研究对象,控制器设计、参数确定都不使用系统模型信息,仅通过在线输入输出数据进行控制。

## 3 迭代学习控制(Iterative learning control)

### 3.1 迭代学习控制的前提条件(Condition of iterative learning control)

我国电力系统交流电压普遍为50 Hz正弦波,若将其按周期分为若干独立过程,于是电压的控制过程可视为一个在有限时间区间上具有可重复性的动态系统<sup>[16]</sup>,每个周期的起始位置即为每次迭代的初始定位如图2所示。

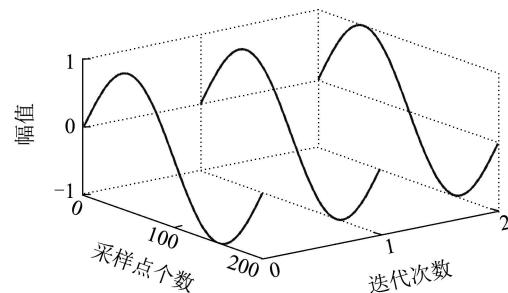


图2 周期信号迭代形式  
Fig. 2 Iterative form of periodic signal

迭代学习控制处理具有迭代重复性的扰动信号能够达到较好的效果,而逆变系统的扰动大都来自谐波干扰,当扰动信号频率 $f_d$ 是参考信号频率 $f$ 的整数倍时,可以保证扰动信号在迭代轴上是重复出现的<sup>[17]</sup>,即 $f_d = q \cdot f$  ( $q = 0, 1, 2, \dots, Q$ ,  $Q = N/2$ ,  $N = f_c/f$ ,  $f$ 为参考信号频率,  $f_c = 1/T$ 为采样频率,一般可把采样点数 $N$ 取为偶数),如图3所示。

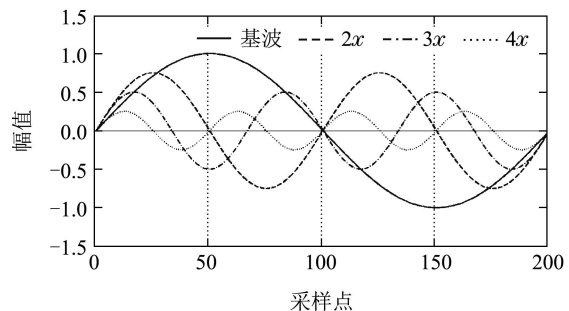


图3 基波和谐波  
Fig. 3 Fundamental wave and harmonics

### 3.2 周期信号迭代学习控制器 (Periodic signal ILC controller)

仅使用输出误差信号的学习律称为P型学习律, 离散时间P型迭代学习控制律<sup>[18]</sup>

$$u_j(k) = u_{j-1}(k) + \phi \cdot e_{j-1}(k+1), \quad (3)$$

其中 $j$ 为迭代周期. 利用信号周期性特征, 将其改写为离散时间周期形式:

$$u(k) = u(k-N) + \phi \cdot e(k-N+1), \quad (4)$$

其中 $u(k-N)$ 为 $u(k)$ 上一周期对应采样时刻的值. 引入周期延迟环节 $z^{-N}$ , 对于周期信号或含有扰动的周期信号且满足 $f_d = q \cdot f$ 时,  $z^{-N}$ 的模为1, 相位延迟为一周期, 即 $u(k-N) = u(k) \cdot z^{-N}$ , 将其代入式(4)并整理, 可得迭代学习控制器的传递函数形式

$$G_c(z) = \frac{U}{E} = \frac{1}{1-z^{-N}} \cdot \Phi(z)z^{-N+1}. \quad (5)$$

控制器结构如图4所示.

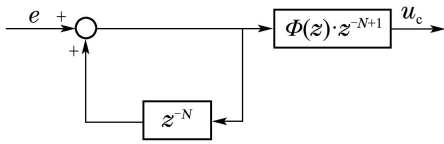


图4 迭代学习控制器结构

Fig. 4 ILC controller architecture

### 3.3 稳定性分析 (Stability analysis)

对式(3)进行 $z$ 变换:

$$U_j(z) = U_{j-1}(z) + z\Phi(z)E_{j-1}(z). \quad (6)$$

误差 $E_j = Y^*(z) - Y_j(z)$ ,  $P(z)$ 为被控对象, 将式(6)代入 $Y(z) = P(z)U(z)$ , 得

$$Y_j(z) = Y_{j-1}(z) + z\Phi(z)P(z)[Y^*(z) - Y_{j-1}(z)]. \quad (7)$$

整理可得

$$G'_{e(j)|e(j-1)} = \frac{E_j(z)}{E_{j-1}(z)} = [1 - z\Phi(z)P(z)]. \quad (8)$$

由此可得, 对于所有小于奈奎斯特频率的信号, 若满足

$$|1 - z\Phi(z)P(z)| < 1, \quad (9)$$

则可保证误差信号沿迭代方向单调递减<sup>[19]</sup>. 其中 $G'_{e(j)|e(j-1)}$ 表示误差 $e$ 在迭代轴上的传递函数. 当 $\Phi(z)P(z) = 1$ 时, 系统达到零增益、零相移的最优性能. 不难看出, 上述条件能否满足很大程度上受到被控对象 $P(z)$ 的影响. 一些文献中<sup>[20]</sup>提出, 通过设计使得 $\Phi(z) = P(z)^{-1}$ , 以获得零增益、零相移的性质, 但是这对模型的精度提出了很高的要求, 如果模型不精

确很可能导致系统失稳.

为了满足式(9)的误差收敛条件, 本文将 $\Phi(z)$ 设计为一个低通滤波器, 其形式如下:

$$\Phi(z) = \phi(0) + \phi(1)z^{-1} + \phi(2)z^{-2} + \dots + \phi(n)z^{-n}. \quad (10)$$

该滤波器尽可能使得信号在低频段零增益, 在高频段能够快速衰减. 为保证零相移, 再引入相位补偿因子 $z^\gamma$  ( $\gamma = \gamma_f + \gamma_p$ )<sup>[21]</sup>,  $\gamma_f = n/2$  ( $n$ 一般取偶数)用以补偿滤波器的相位延迟; 而被控对象 $P(z)$ 近似一个二阶系统, 也会产生少量相位延迟,  $\gamma_p$ 则用以补偿 $P(z)$ 所产生的相位延迟.  $\gamma_p$ 为实验数据<sup>[22]</sup>, 一般在3-8之间. 相位补偿后滤波器变为

$$z^\gamma \cdot \Phi(z) = \phi(-n/2 + \gamma_p)z^{-n/2 + \gamma_p} + \dots + \phi(-2)z^{-2} + \phi(-1)z^{-1} + \phi(0) + \phi(1)z + \phi(2)z^2 + \dots + \phi(n/2 + \gamma_p)z^{n/2 + \gamma_p}. \quad (11)$$

由此控制器可化为

$$G_c(z) = \frac{\Phi(z) \cdot z^{-N + \gamma}}{1 - z^{-N}}, \quad (12)$$

其离散时间表达式为

$$u(k) = u(k-N) + \sum_{i=-n/2 + \gamma_p}^{n/2 + \gamma_p} \phi(i)e(k-N+i). \quad (13)$$

闭环系统结构如图5所示.

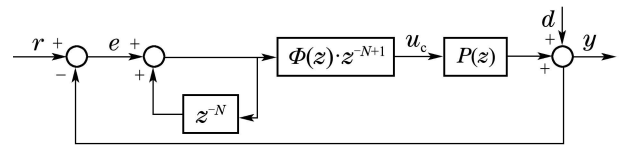


图5 闭环系统结构

Fig. 5 Closed-loop system structure

通过上述设计, 实现了信号在低频段零增益、零相移, 而在高频段可通过快速衰减加以抑制, 故式(9)的误差收敛条件得到保证. 此时, 滤波器变为一个非因果系统, 由于 $\gamma \ll N$ , 在迭代学习中, 上一周期的数据是已经获得的<sup>[23]</sup>, 因此非因果滤波器得以实现.

## 4 逆变器控制系统 (Control system inverter)

逆变器输出电压谐波扰动主要有: 直流分量、基波以及基带谐波、开关频率及其倍数次谐波、开关频率及其倍数次频率周围的边频带谐波, 这些谐波的峰值大多集中在基波整数倍频率附近.

因此, 可以利用谐波扰动的周期重复性特征, 通过迭代学习控制器设计方法, 逐周期的消除输出电压的偏差. 与传统控制方法相比, 迭代学习控制需要几个

基波周期的反复修正,所以瞬态响应性能在前几个周期会有一些的误差,但随着迭代次数的增加,该控制器理论上能够实现使跟踪误差收敛到零,这是其他传统方法无可比拟的。

逆变系统控制器采用电压电流双闭环结构,参考信号 $v_r$ 为50 Hz工频电压信号,电容电压 $v_c$ 和电感电流 $i_L$ 为测量数据.控制器外环采用迭代学习控制器,通过周期迭代消除谐波扰动的影响,使得系统输出电压能够精确跟踪参考信号;内环为P型电流控制器,由于电流比电压有更快的响应速度,系统的些许变化都会第一时间在电流上有所表现,所以内环的电流控制器能起到增强系统稳定性和提高动态响应性能的效果.逆变系统电压电流双闭环控制器结构如图6所示。

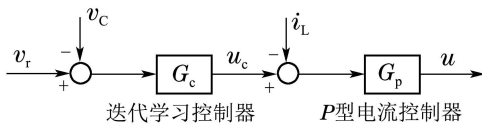


图6 逆变系统控制器结构

Fig. 6 Controller architecture of inverter

外环控制器采用反馈-前馈迭代学习控制<sup>[24-26]</sup>方法,反馈环节采用P型反馈控制律,主要用于镇定系统,降低非迭代重复扰动对系统的影响;前馈环节即式(13)中的迭代学习控制率,用于提高系统的跟踪精度.逆变系统外环电压控制器:

$$u_c(k) = K \cdot u(k - N) + \theta \cdot e(k) + \sum_{i=-n/2+\gamma_P}^{n/2+\gamma_P} \phi(i)e(k - N + i). \quad (14)$$

由于迭代控制器的积分作用,非重复性扰动在迭代轴方向不断累积,可能会导致跟踪误差先降后升,参数 $K$ 相当于对迭代学习控制器沿迭代方向滤波,可抑制非重复性扰动. $K$ 的取值是考虑跟踪精度与系统鲁棒性的权衡,可把 $K$ 取为一个接近于1的常数( $0 < K < 1$ ),也可取为迭代次数的函数. $\theta$ 为反馈环节增益.参数序列 $\phi(i)$ 根据式(9)的收敛性条件设计相应滤波器得到.由于FIR数字滤波器具有严格线性相位特性,因此它可以进行精确地相位补偿;而且其单位脉冲响应是有限长度,能够保证其稳定性,故将控制器中的 $\Phi(z)$ 设计为FIR数字低通滤波器.按照式(9)收敛性条件设计滤波器,使其在低频段具有零增益,相位补偿之后可实现零相移,同时再适当补偿被控对象的相位延迟.设计得到合适的滤波器也即确定了参数序列 $\phi(i)$ 。

## 5 仿真(Simulation)

仿真使用MATLAB/Simulink平台实现,把本文提出的控制器与传统的PID型控制进行对比,通过带不

同大小的有功和无功功率负载,体现控制器对各种负载的适应性。

仿真中,逆变器直流侧电压 $E = 400 \text{ V}$ ,滤波电感 $L = 2.5 \text{ mH}$ ,滤波电容 $C = 60 \mu\text{F}$ .参考电压 $v_r = 220 \cdot \sqrt{2} \sin(100\pi t) \text{ V}$ ,采样频率 $f_c = 10 \text{ kHz}$ .负载有功功率 $30 \text{ kW}$ ,无功功率 $5 \text{ kvar}$ 。

如图7所示,在迭代学习控制下,经过3-4个周期的调整,输出电压基本稳定.图8是ILC和PID控制输出电压跟踪误差的对比,通过对比不难看出PID控制的跟踪误差一直维持在一个较固定的幅值;而ILC经过几个周期调整后,稳定在一个很小的幅值波动.图9是在 $0.08 \sim 0.1 \text{ s}$ 时(第5个迭代周期)输出电压波形的对比,可见ILC达到稳态后,其跟踪误差的精度高于PID控制。

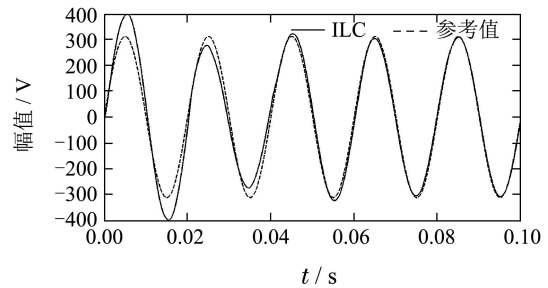


图7 迭代学习控制逆变器输出电压波形

Fig. 7 Waveform of inverter output voltage with ILC controller

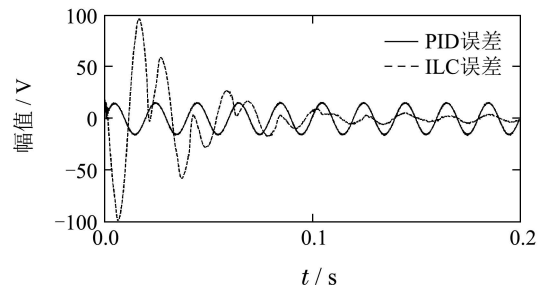


图8 ILC和PID控制跟踪误差对比

Fig. 8 Tracking error comparison with ILC and PID control

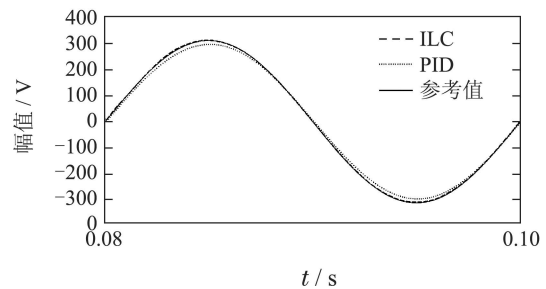


图9 逆变器输出电压第5周期波形

Fig. 9 The fifth period waveform of inverter output voltage

为测试控制算法对负载变化的适应能力,将负载有功功率提高到 $60 \text{ kW}$ ,其他所有参数保持不变.从

图10、图11中可以看出, 由于负载的变化, PID控制跟踪误差变大; 而ILC依然是经过几个周期调整后收敛的很好. 可见, ILC的学习能力使其具有很强的适应性, 负载的变化对其跟踪精度几乎没有影响.

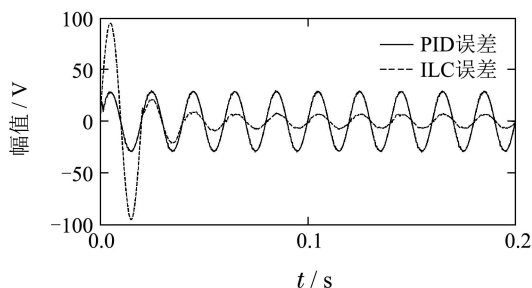


图 10 ILC和PID控制跟踪误差对比(60kW)

Fig. 10 Tracking error comparison with ILC and PID control (60 kW)

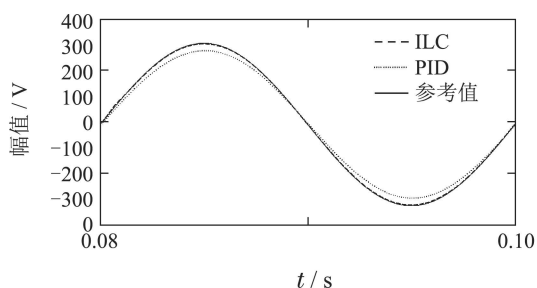


图 11 逆变器输出电压第5周期波形(60 kW)

Fig. 11 The fifth period waveform of inverter output voltage (60 kW)

图12为ILC的输出电压谐波含量. 在迭代学习控制下, 经过几个周期调整后, THD最终降低到0.5%以下.

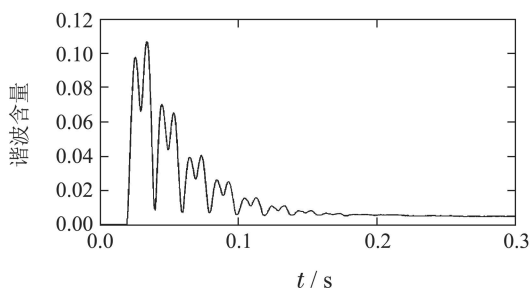


图 12 迭代学习控制的输出电压THD

Fig. 12 THD of ILC output voltage

## 6 结论与展望(Conclusion and prospect)

本文提出一种基于周期信号迭代的逆变器控制方法, 通过数学推导分析了其在迭代方向的收敛条件. 该控制器设计、参数整定无需被控对象的信息, 是一种无模型的数据驱动方法, 因此基于此控制方法的逆变器能够有很好的负载适应能力. 而且, 由于算法

本身理论上跟踪误差可收敛到零, 所以逆变器输出电压的精度比以往的传统方法有较大提高.

值得提出的是, 将迭代学习控制器与其他辅助控制器配合使用, 可以弥补其在前几个学习周期中误差较大的缺陷. 在这种方式下, 辅助控制器可在不同的运行阶段, 对控制量有不同程度的贡献, 而这种贡献程度究竟多少合适, 以及迭代学习控制器和辅助控制器之间如何实现平滑切换, 这是下一步需要深入探讨的问题.

## 参考文献(References):

- [1] ARJONA M A, RAMIREZ F A, HERNANDEZ C. Analysis of two current injection strategies of a grid connected single-phase PV-SVPWM inverter [C] // *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference*. Morelos: IEEE, 2010, 10: 690 – 695.
- [2] HAMZEH M, KARIMI Y, ASADI E, et al. Design and implementation of a single phase grid-connected PV inverter with a new active damping strategy [C] // *Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference*. Tehran: IEEE, 2014, 2: 72 – 77.
- [3] XIE Junhu, ZHAO Lihua. Digital control of Grid-connected inverter with LCL-filter using multi-rate sampling technique [J]. *Proceedings of the CSU-EPSCA*, 2011, 23(6): 81 – 86.  
(谢俊虎, 赵莉华. LCL滤波并网逆变器的多速率采样数字控制 [J]. *电力系统及其自动化学报*, 2011, 23(6): 81 – 86.)
- [4] XU Shungang, XU Jianping, CAO Taiqiang. Control of parallel operating inverter with voltage and current close-loops [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2009, 29(10): 103 – 106.  
(徐顺刚, 许建平, 曹太强. 电压电流双闭环反馈逆变器并联控制 [J]. *电力自动化设备*, 2009, 29(10): 103 – 106.)
- [5] CAI Fangkai, ZHANG Yuping. DC power supply with DSP-based dual closed-loop control [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2009, 29(10): 140 – 142.  
(蔡方凯, 张玉平. 基于DSP实现双闭环控制的直流电源 [J]. *电力自动化设备*, 2009, 29(10): 140 – 142.)
- [6] PORTILLO R, VAZQUEZ S, LEON J I, et al. Model based adaptive direct power control for three-level NPC converters [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013, 9(2): 1148 – 1157.
- [7] KAWAMURA A, HANEYOSHI T, HOFT R G. Deadbeat controlled PWM inverter with parameter estimation using only voltage sensor [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1988, 3(2): 118 – 125.
- [8] JUNG S L, YING-YU T. Discrete sliding-mode control of a PWM inverter for sinusoidal output waveform synthesis with optimal sliding curve [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1996, 11(4): 567 – 577.
- [9] JUNG S L, LIEN-HSUN H, HSING-CHUNG Y, et al. DSP-based digital control of a PWM inverter for sine wave tracking by optimal state feedback technique [C] // *Power Electronics Specialists Conference*. Taipei: IEEE, 1994, 6: 546 – 551.
- [10] HILLOOWALA R M, SHARAF A M. A rule-based fuzzy logic controller for a PWM inverter in a stand alone wind energy conversion scheme [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1996, 32(1): 57 – 65.
- [11] HOU Z S, WANG Z. From model-based control to data-driven control: Survey, classification and perspective [J]. *Information Sciences*, 2013, 235: 3 – 35.
- [12] JIN S T, HOU Z S, CHI R H, et al. Discrete-time adaptive iterative learning control for permanent magnet linear motor [C] // *Cybernetics and Intelligent Systems*. Qingdao: IEEE, 2011, 9: 69 – 74.

- [13] HOU Z S, XU J X, ZHONG H W. Freeway traffic control using iterative learning control-based ramp metering and speed signaling [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2007, 56(2): 466 – 477.
- [14] XU Jianxin, HOU Zhongsheng. On learning control: the state of the art and perspective [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2005, 31(6): 943 – 955.  
(许建新, 侯忠生. 学习控制的现状与展望 [J]. *自动化学报*, 2005, 31(6): 943 – 955.)
- [15] WU T F, NIEN H S, SHEN C L, et al. A single-phase inverter system for PV power injection and active power filtering with nonlinear inductor consideration [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2005, 41(4): 1075 – 1083.
- [16] DEYUAN M, YINGMIN J, JUNPING D, et al. Robust discrete-time iterative learning control for nonlinear systems with varying initial state shifts [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(11): 2626 – 2631.
- [17] ZHANG B, WANG D, ZHOU K, et al. Linear phase lead compensation repetitive control of a CVCF PWM inverter [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, 55(4): 1595 – 1602.
- [18] SUN Mingxuan, HUANG Baojian. *Iterative Learning Control* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999.  
(孙明轩, 黄宝健. 迭代学习控制 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.)
- [19] DENG H, ORUGANTI R, SRINIVASAN D. Analysis and design of iterative learning control strategies for UPS inverters [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, 54(3): 1739 – 1751.
- [20] DENG H, ORUGANTI R, SRINIVASAN D. A simple control method for high-performance UPS inverters through output-impedance reduction [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, 55(2): 888 – 898.
- [21] LONGMAN R. Iterative learning control and repetitive control for engineering practice [J]. *International Journal of Control*, 2000, 73(10): 930 – 954.
- [22] ZHANG B, WANG D, YE Y. Cutoff-frequency phase-in iterative learning control [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(3): 681 – 687.
- [23] CHI R, HOU Z, XU J. Adaptive ILC for a class of discrete-time systems with iteration-varying trajectory and random initial condition [J]. *Automatica*, 2008, 44(8): 2207 – 2213.
- [24] XU J X, WANG X W, HENG L T. Analysis of continuous iterative learning control systems using current cycle feedback [C]//*American Control Conference*. Seattle: IEEE, 1995, 6: 4221 – 4225.
- [25] AMANN N, OWENS D H, ROGERS E, et al. An  $H_\infty$  approach to linear iterative learning control design [J]. *International Journal of Adaptive Control & Signal Processing*, 1996, 10(6): 767 – 781.
- [26] GOH C J, YAN W Y. An  $H_\infty$  Synthesis of robust current error feedback learning control [J]. *Journal of Dynamic Systems Measurement & Control*, 1996, 118(2): 341 – 346.

### 作者简介:

孟琦 (1977–), 男, 博士研究生, 目前研究方向为迭代学习控制、数据驱动控制及其在电力、电子领域的应用, E-mail: mengqi@bjtu.edu.cn;

侯忠生 (1962–), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向包括无模型自适应控制、数据驱动控制、学习控制、智能交通系统、智能信息处理等, E-mail: zhshhou@bjtu.edu.cn.