

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2014.03.011

一种新型的太阳能逆变器并网控制方案

张彬, 李圣清, 徐天俊, 杨峻

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 提出了一种新型的太阳能逆变器并网控制方案, 即迭代学习控制方法。分析了迭代学习控制的基本原理; 采用D型迭代学习控制来改善太阳能逆变器输出电流波形。仿真结果验证了该方法的有效性和可行性。

关键词: 太阳能并网逆变器; 迭代学习控制; 电流控制方法

中图分类号: TM464+.9

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2014)03-0052-04

A New Grid-Connected Control Scheme of Solar Inverter

Zhang Bin, Li Shengqing, Xu Tianjun, Yang Jun

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: A new grid-connected control scheme of solar inverter was proposed, that is iterative learning control method. Analyzes the basic principle of iterative learning control; Applies D-type iterative learning control to improve the solar inverter output current waveform. The simulation results verify the validity and feasibility of the scheme.

Keywords: solar grid-connected inverter; iterative learning control; current control method

0 引言

太阳能具有清洁、资源丰富等优点, 是理想的可再生能源。太阳能并网发电技术成为一种缓解能源危机的途径。逆变器并网控制方法在提高太阳能并网发电系统的运行效率、可靠性、电能质量等方面有重要作用。因此, 近年来国内外学者从不同方面研究逆变器并网控制方法。

文献[1]提出一种电压环、电容电流环和功率环的并网控制策略, 推导了系统的闭环传递函数, 分析了控制参数对系统闭环极点分布和稳定性的影响,

但是在控制参数设计过程中, 没有考虑引入调节通道对系统稳定性的影响。文献[2]提出了新的三角波-三角波调制方法, 将导抗变换器和并网逆变系统有机结合, 运用变换器的电压源-电流源变换特性, 使光伏电池阵列的电压变换为正弦包络线的高频电流, 经过高频DC-DC变换来传输功率, 再通过工频逆变器逆变后并到电网; 另外, 采用电网电压的过零信号来控制工频逆变器, 使其并网输出电流和电网电压同步, 降低并网电流谐波分量, 进一步提高光伏逆变并网系统功率因数, 实现正弦电流并网, 但是该控制策略适用范围较小, 仅适合分散式

收稿日期: 2014-02-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51077046), 湖南省自然科学基金资助项目(14JJ2116), 湖南省重点建设学科基金资助项目(201176)

作者简介: 张彬(1990-), 男, 安徽安庆人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电能质量控制与逆变系统,

E-mail: zhangb27@163.com

通信作者: 李圣清(1961-), 男, 湖南永兴人, 湖南工业大学教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事电力系统谐波的分析与治理, 电能质量调节与控制方面的研究, E-mail: lsq1961@sohu.com

的小型家用光伏并网发电系统。文献[3]提出基于谐波电压重复控制的逆变器新型并网策略,通过快速谐波检测算法来检测并网电感两端电压谐波,且加到指令信号中,采用重复控制主动发出相应的谐波电压来补偿谐波电流、缩小输出电抗的谐波电压差和改善并网输出电流波形质量,但是该方法很难降低并网电流总体谐波畸变率。

在太阳逆变器并网控制中,由于直流电压扰动,逆变器开关控制死区时间以及内部不对称等因素的影响,其输出电流波形会产生畸变。虽然传统的PI控制器设计简单、易于实现,但其参数在调节过程中保持初始值不变,因此,控制器很难满足抑制周期性扰动信号、实时跟踪给定值和减小稳态误差的需求。

综上所述,本文提出将迭代学习控制方法应用到太阳能逆变器并网控制中,通过迭代修正改善太阳能逆变器的输出波形,从而有效抑制太阳能逆变器并网输出电流的谐波扰动。该方法便于模块化设计,且系统稳定性好。

1 太阳能并网逆变器模型

单相太阳能并网逆变器的主电路如图1所示。该电路主要由光伏阵列、DC/DC变换器(常用Boost变换器)、DC/AC逆变器等组成^[4]。逆变桥由功率器件 $V_{T1} \sim V_{T4}$ 组成。本文采用单极性脉宽调制方式(SPWM)驱动DC/AC逆变桥,其输出经过滤波电感 L_2 连接到电网,再通过相应控制使并网电流 I_0 是与电网电压同频同相的正弦波。后级DC/AC逆变器实现直流侧稳压控制以及单位功率因数正弦波电流控制。

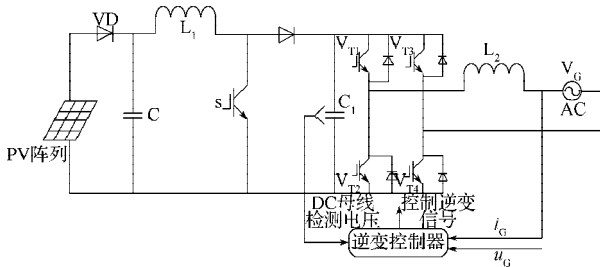


图1 太阳能并网逆变器主电路

Fig. 1 Main circuit of solar grid-connected inverter

2 迭代学习控制方法

2.1 迭代学习控制原理

针对具有重复运动特性的被控对象,迭代学习控制是一种很好的控制方法。该方法的控制原理为:对在一定时间内执行跟踪给定轨迹的控制器,通过前一次或前几次运行时测得的误差信息来修改其输

入值,使被控对象向着期望值调整,使该目标在下一次的运行中做得更好,不断重复反馈,直至在整个时间间隔内输出波形跟踪上参考输出波形^[5]。

令被控对象的动态过程为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{g}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t), \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{h}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t). \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x} \in R_n$, $\mathbf{u} \in R_r$, $\mathbf{y} \in R_m$ 分别为系统的状态、输入变量和输出变量; $\mathbf{g}(\cdot)$, $\mathbf{h}(\cdot)$ 为具有一定维数的向量函数,其结构及参数均未知。假如所需要的控制 $\mathbf{u}_d(t)$ 存在,则迭代学习控制的目的是:给定参考输出 $\mathbf{y}_d(t)$ 和每次运行的初始状态 $\mathbf{x}_k(0)$,在一定时间 $t \in [0, T]$ 内按照学习控制算法,通过多次重复操作使其控制输入值 $\mathbf{u}_k(t) \rightarrow \mathbf{u}_d(t)$,则并网系统输出 $\mathbf{y}_k(t) \rightarrow \mathbf{y}_d(t)$ 。迭代学习控制算法流程^[6]如图2所示。

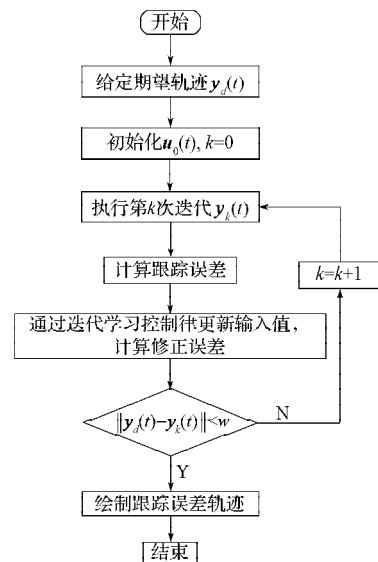


图2 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of algorithm

算法具体步骤如下:

- 1) 当 $k=0$ 时,给定期望轨迹为 $\mathbf{y}_d(t)$,初始输入值为 $\mathbf{u}_0(t)$ 。
- 2) 将输入值 $\mathbf{u}_k(t)$ 施加到被控对象,收集并储存为 $\mathbf{y}_k(t)$ 。
- 3) 计算输出误差 $\mathbf{e}_k(t) = \mathbf{y}_d(t) - \mathbf{y}_k(t)$,运用迭代学习控制律,计算下一次控制输入值,并存入存储器。
- 4) 检验停止条件。如果满足式(2),则迭代停止,得出跟踪误差轨迹。令 w 为设定的允许跟踪精度,停止条件为

$$\|\mathbf{y}_d(t) - \mathbf{y}_k(t)\| < w, t \in [0, T]; \quad (2)$$

如果不满足,则 $k=k+1$,跳至步骤2)。

2.2 迭代学习控制器

迭代学习控制方法分为开环学习和闭环学习2种^[7]。开环迭代学习流程如图3所示。

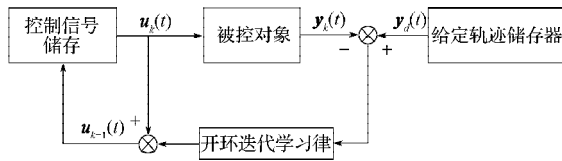


图3 开环迭代学习结构框图

Fig. 3 Structure diagram of open-loop iterative learning

开环迭代学习是将第 k 次的控制输入值加上第 k 次的输出误差校正项来作为第 $k+1$ 次的控制输入值, 即

$$u_{k+1}(t) = P(u_k(t), e_k(t)). \quad (3)$$

闭环迭代学习流程如图 4 所示。闭环迭代学习是将第 $k+1$ 次控制的误差作为学习的修正项, 即

$$u_{k+1}(t) = P(u_k(t), e_{k+1}(t)). \quad (4)$$

式 (3) ~ (4) 中, P 为线性或非线性算子。

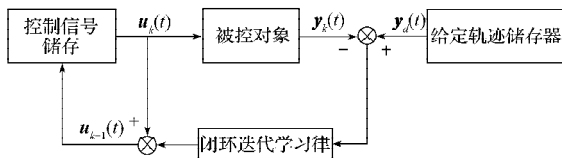


图4 闭环迭代学习结构框图

Fig. 4 Structure diagram of closed-loop iterative learning

1984 年, Arimoto 等人率先提出了线性时变连续系统的 D 型迭代学习控制律^[8],

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + K\dot{e}_k(t), \quad (5)$$

式中, K 是常数增益矩阵。从 D 型算法逐步演变出了 P 型、PI 型、PD 型的迭代学习控制律, 通常情况下均属于 PID 型迭代学习控制律的特殊形式。其表达式为

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + K\dot{e}_k(t) + P e_k(t) + Q \int_0^t e_k(\tau) d\tau, \quad (6)$$

式中: P, Q 是增益矩阵。若输出误差信号用 $e_k(t)$, 则为开环迭代学习控制; 若用 $e_{k+1}(t)$, 则为闭环迭代学习控制; 若同时采用 $e_k(t)$ 和 $e_{k+1}(t)$, 则为开闭环迭代学习控制。

本文采用基于反馈的指数变增益 D 型迭代学习控制律。设太阳能并网逆变控制系统的初始状态为 $x_0(0)$, 被控对象为输出电流 I , 其参考轨迹为 $I_{ref}(t)$, 第 k 次输出为 $I_k(t)$, 则 $e_k(t) = I_{ref}(t) - I_k(t)$ 。通过迭代学习控制律式 (7) 设计 $u_{k+1}(t)$, 从而使第 $k+1$ 次的运动误差 $e_{k+1}(t)$ 减小, 即

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + K_p (\dot{I}_k(t) - \dot{I}_{k+1}(t)) + K_d (I_{ref}(t) - \dot{I}_{k+1}(t)), \quad (7)$$

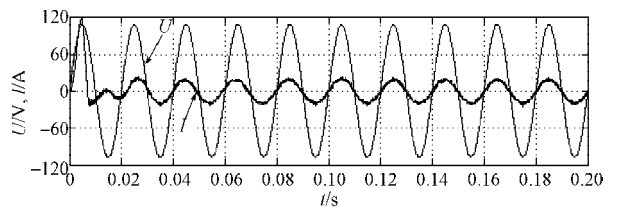
式中: K_p 和 K_d 是 D 型迭代学习控制律系数。

系统将要并网的电流给定参考值 I_{ref} 和实际并网电流 I_{out} 相比较得到差值 e , 经过处理产生相应的 SPWM 信号来控制功率管开关^[9], 使并网逆变器输出为与电网同频同相的正弦波电流。

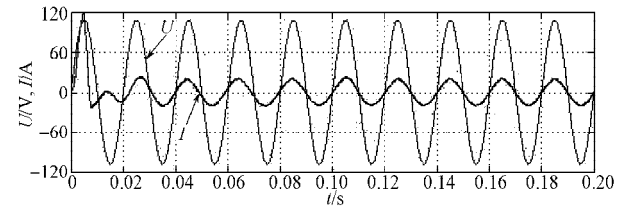
3 仿真分析

为验证迭代学习控制方法的有效性, 搭建了系统仿真模型。系统仿真参数如下: 直流侧母线电压为 400 V, 电网电压为 220 V/50 Hz, IGBT Bridge 为全桥逆变形式, 开关频率为 20 kHz。仿真时, 模拟网侧电压具有较大波动, 其谐波总畸变率 (total harmonic distortion, THD) 为 5.2%, 组件温度为 45 °C, 光照强度为 800 W/m²。本文分别对传统 PI 控制和迭代学习控制进行仿真分析。

两种控制算法的并网电压和电流波形如图 5 所示。由图 a 可看出, 采用传统 PI 控制时, 并网电压和电流幅值和相位存在静差, 太阳能输出电流出现比较严重的毛刺现象, 且波形出现畸变。由图 b 可看出, 采用迭代学习控制时, 太阳能输出电流能较好地与电网电压保持同频同相, 输出电流波形的质量有所改善, 达到太阳能并网的要求。由于功率因数较小, 并网电流幅值变大。



a) 传统 PI 控制

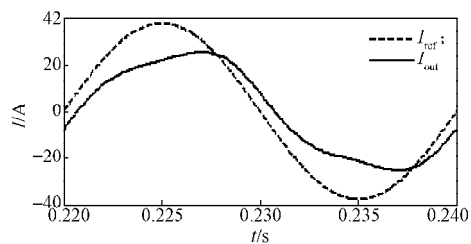


b) 迭代学习控制

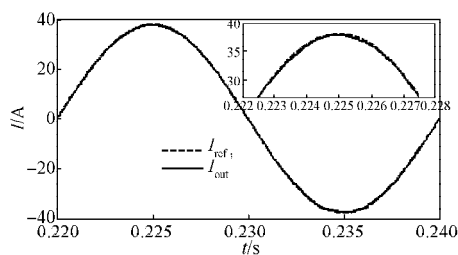
图5 并网电压和电流波形

Fig. 5 Grid-connected voltage and current waveform

图 6 是采用传统 PI 控制和迭代学习控制时太阳能输出参考电流 I_{ref} 和实际输出电流 I_{out} 的稳态仿真效果。由图可看出, 采用传统 PI 控制时的输出电流波形明显畸变; 而采用迭代学习控制时的实际输出并网电流与参考电流波形基本重合, 其高频谐波基本被滤除, 输出波形质量较好。



a) 传统 PI 控制



b) 迭代学习控制

图6 并网参考电流和输出电流稳态波形

Fig. 6 The steady-state waveforms of grid-connected reference current and output current

4 结语

在传统的PI基础上,本文采用迭代学习控制方法来改善太阳能逆变器的并网输出电流质量。仿真结果表明,该方法能无静差跟踪周期重复量,较好地改善了太阳能逆变器输出电流的波形质量,具有较高的工程实用价值。

参考文献:

- [1] 彭双剑, 罗安, 荣飞, 等. LCL滤波器的单相光伏并网控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(21): 17-24.
Peng Shuangjian, Luo An, Rong Fei, et al. Single-Phase Photovoltaic Grid-Connected Control Strategy with LCL Filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(21): 17-24.
- [2] 吴春华, 陈国呈, 丁海洋, 等. 一种新型光伏并网逆变器控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(33): 103-107.
Wu Chunhua, Chen Guocheng, Ding Haiyang, et al. A Novel Control Strategy for Photovoltaic Grid-Connected Inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(33): 103-107.
- [3] 吴浩伟, 段善旭, 徐正喜. 一种新颖的电压控制型逆变器并网控制方案[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(33):

19-24.

Wu Haowei, Duan Shanxu, Xu Zhengxi. A Novel Control Scheme of Grid-Connected Inverters Based on Voltage-Controlled Mode[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(33): 19-24.

- [4] 王峰, 樊轶, 龚春英. 一种单相两级式光伏并网逆变器控制策略[J]. 电力电子技术, 2013, 47(5): 53-55.
Wang Feng, Fan Yi, Gong Chunying. The Modeling and Control of Single-Phase Two-Stage PV Grid-Connected Systems[J]. Power Electronics, 2013, 47(5): 53-55.
- [5] 谢胜利, 田森平, 谢振东. 迭代学习控制的理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 3-12.
Xie Shengli, Tian Senping, Xie Zhendong. Iterative Learning Control Theory and Application[M]. Beijing: Science Press, 2005: 3-12.
- [6] 张西宁. 迭代学习控制算法的改进与应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2013.
Zhang Xi'ning. Improvement and Application of Iterative Learning Control Algorithm[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013.
- [7] 尚桦, 李海军, 闫清, 等. 迭代学习控制的分析与仿真[J]. 控制理论与应用, 2013, 32(8): 6-9.
Shang Hua, Li Haijun, Yan Qing, et al. Iterative Learning Control Analysis and Simulation[J]. Control Theory and Applications, 2013, 32(8): 6-9.
- [8] 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): 131-143.
Xu Jianxin, Hou Zhongsheng. On Learning Control: The State of the Art and Perspective[J]. Acta Automatica Sinica, 2005, 31(6): 131-143.
- [9] 张兴, 张崇巍. PWM整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 469-473.
Zhang Xing, Zhang Chongwei. PWM Rectifier and Its Control[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2012: 469-473.

(责任编辑: 邓彬)

