

基于自抗扰控制的光伏并网功率调节系统*

陈晓高^{1,2}, 付青¹, 余世杰¹

- (1. 中山大学太阳能系统研究所 // 光电材料与技术国家重点实验室, 广东 广州 510275;
2. 中山大学数学与计算科学学院, 广东 广州 510275)

摘要: 光伏并网功率调节(PVPC)系统是将光伏并网发电和有源电力滤波合为一体的综合系统, 它易受电网扰动和外部环境变化的影响, 存在诸多不确定性因素。将自抗扰技术应用到PVPC系统的控制中, 把系统模型中的不确定因素与外部扰动统一视为系统的未知干扰。通过扩张状态观测器对扰动进行动态观测, 然后利用非线性状态误差反馈控制律进行补偿, 使系统的控制律与系统内部的参数和未知扰动无关, 而仅与系统的给定输入和输出有关, 免去了对负载电流谐波和无功的检测, 使系统控制过程得以简化。仿真结果表明, 所设计的自抗扰控制器能取得预期的控制效果, 具有良好的动态性能和较强的鲁棒性。

关键词: 光伏并网; 自抗扰控制; 有源电力滤波器

中图分类号: TM615; TK514 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579(2009)02-0049-05

Photovoltaic Grid-connected Power Conditioning System Based on Active Disturbances Rejection Control

CHEN Xiaogao^{1,2}, FU Qing¹, YU Shijie¹

- (1. Institute for Solar Energy Systems // State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. School of Mathematics and Computational Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Photovoltaic grid-connected power conditioning system (PVPC) is an integrated system for photovoltaic grid-connected generation and active power filter. It's vulnerable to grid disturbances and the impact of changes in the external environment, so there are many uncertainties. The active disturbances rejection control technique is introduced into the control of PVPC system. The system model uncertainties and external interferences are regarded as the unknown disturbance to the system. The disturbance is observed dynamically by extended state observer, then can be compensated through the nonlinear state error feedback control law. The control law is only relative to the reference input and the output, not to the system internal parameters and the unknown disturbance. Thus, the system control is simplified without the detection of load harmonics and reactive power currents. The simulation results show that the designed active disturbances rejection controller can achieve desirable efficiency and be of good dynamic performance and robustness.

Key words: photovoltaic grid-connected; active disturbances rejection control; active power filter

随着全球范围内能源紧缺的日益突出, 可再生能源的利用引起了广泛的重视。太阳能光伏利用技

术在这种形势下进入了快速发展的阶段, 光伏并网发电成为人们利用太阳能的主要途径。同时随着电

* 收稿日期: 2008-07-07

基金项目: 广东省珠海科技计划资助项目(PC200710, PC20071013)

作者简介: 陈晓高(1981年生), 男, 博士研究生; 通讯作者: 付青; E-mail: fuqing@mail.sysu.edu.cn

力电子技术的飞速发展, 各种电力电子装置得到了广泛的应用, 然而也给电力系统带来了严重的谐波污染。有源电力滤波器 (APF) 是一种可以动态抑制谐波、补偿无功的电力电子装置, 是改善电网电能质量的一种有效手段。分析光伏并网发电装置与 APF 可知, 两者在结构和控制上有诸多相似之处, 于是光伏并网和 APF 的综合控制成为近年来国内外研究的新趋势^[1-3]。文献 [2] 中称这种系统为“光伏并网功率调节 (PVPC) 系统”。然而 PVPC 系统是一个典型的非线性系统, 受外部环境变化、电网波动、以及模型参数不确定性等问题的影响, 系统存在许多不确定性干扰。

基于扩张状态观测器的自抗扰控制是一种非线性鲁棒控制技术^[4], 它用配置非线性结构代替极点配置进行控制系统的设计, 依靠期望轨迹与实际轨迹的误差大小和方向来实施非线性反馈控制, 是一种基于过程误差来减小误差的方法, 它对非线性、复杂系统具有较好的控制品质, 并具有良好的抗干扰能力。本文通过对 PVPC 系统的分析, 采用自抗扰控制技术来实现系统的控制, 并对其进行了仿真研究。

1 PVPC 系统及建模

图 1 所示即为光伏并网功率调节系统, 光伏阵列直接或者经过升压电路连接到 APF 的直流侧, 通过对其实施最大功率跟踪 (MPPT)^[5], 实现光伏阵列以最大功率向电网注入电能, 并且在实现光伏并网发电的同时不会影响 APF 对谐波和无功的补偿性能, 反而增强了对直流侧能量的补充作用。PVPC 系统可以认为是一个可控的电压源和一个阻抗并联在电网与负载之间, 向电网注入来自光伏阵列的有功能量并对谐波和无功电流进行补偿, 如图 2 所示。

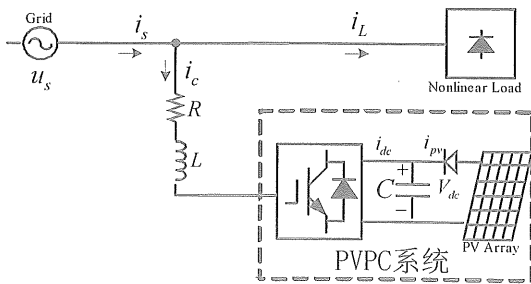


图 1 PVPC 系统结构示意图
Fig. 1 Frame of the PVPC system

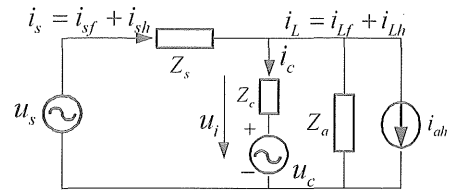


图 2 PVPC 系统的等效电路
Fig. 2 Equivalent circuit of PVPC system

i_{sf}, i_{sh} 分别为电源电流 i_s 的基波和谐波分量, i_{Lf}, i_{Lh} 分别为负载电流 i_L 的基本和谐波分量, i_c 为 PVPC 输出的补偿电流。由图 2 可得

$$L_c \frac{di_c}{dt} = u_i - R_c i_c - u_c \tag{1}$$

将 PWM 环节看成一个比例环节, 即 $u_c = u V_{dc}$, u 为 PWM 的调制量, 以此作为系统的控制量, V_{dc} 为直流侧电压。设 R_s, L_s 分别为电源线路上的等效电阻和电感, 可得

$$u_i = u_s - R_s i_s - L_s \frac{di_s}{dt} \tag{2}$$

由于 $i_c = i_s - i_L$, 同式 (2) 一起代入式 (1) 整理得

$$(L_c + L_s) \frac{di_s}{dt} = - (R_c + R_s) i_s - u V_{dc} + u_s + R_c i_L - L_c \frac{di_L}{dt} \tag{3}$$

忽略电源线路上的阻抗, 并令

$$\omega(t) = \frac{1}{L_c} (u_s + R_c i_L - L_c \frac{di_L}{dt}) \tag{4}$$

把此项当作未知干扰, 则系统可以写成:

$$\frac{di_s}{dt} = - \frac{R_c}{L_c} i_s - \frac{V_{dc}}{L_c} u + \omega(t) \tag{5}$$

2 PVPC 系统的自抗扰控制

自抗扰控制器 (ADRC) 由非线性跟踪微分器 (TD)、扩张状态观测器 (ESO)、非线性状态误差反馈控制律 (NLSEF) 等 3 个环节组成^[4]。它的功能有: TD 用来安排过渡过程并提取其微分信号; ESO 估计对象状态和不确定扰动作用; 过渡过程和状态估计之间误差的非线性组合和扰动估计量的补偿 NLSEF 用来生成控制信号。

根据 PVPC 系统的特点, 系统采用双环控制, 即一个直流侧电压外环和一个电流内环控制, 如图 3 所示。外环在 MPPT 控制的作用下通过一个 PI 控制器对直流侧电压进行控制, 获得指令电源电流; 内环的电流控制采用 ADRC 控制, 得到的控制量去驱动 PWM 电路实现 PVPC 系统的补偿控制。由

电网吸收或发出有功能量,从而导致了直流部分电压的波动。

图 7 为 PVPC 系统在三种不同状况下的仿真结果 (为了方便清楚显示,图中将电网电压缩小了 10 倍)。起始时,没有光照,光伏阵列没有能量发

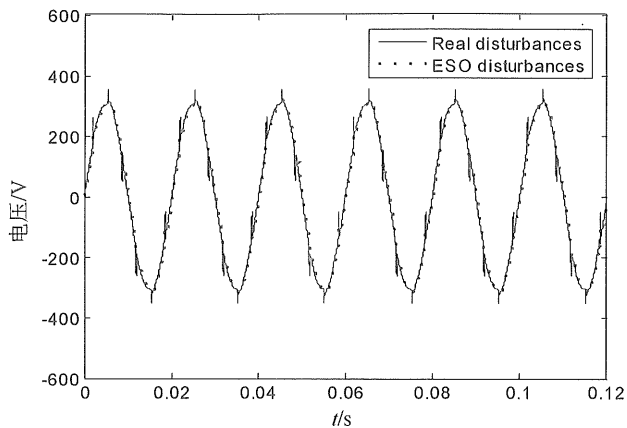


图 4 系统扰动量及 ESO 对其的观测曲线

Fig. 4 Curves of real disturb and ESO tracking disturb

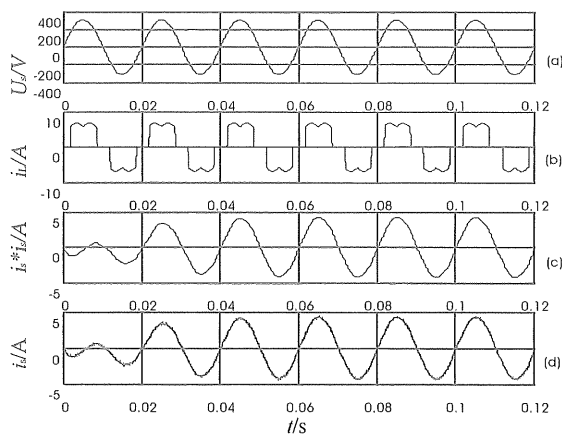


图 5 PVPC 系统工作时仿真波形 (a) 电网电压; (b) 负载电流; (c) 指令电网电流; (d) 电网电流

Fig. 5 Simulation waves of PVPC system (a) Voltage of the grid; (b) Current of the Load; (c) Reference current of the grid; (d) Current of the grid

出,即此时系统等效为并联型 APF。在 0.06 s 时,光照为 400 W/m^2 ,光伏发电启用,此时由图可以看出,电网电流有所减小,但仍与电网电压同相位,说明光伏阵列产生的电能小于负载消耗的能量,电网仍处于供电状态。在 0.12 s 时,突然使光照强度加大到 1000 W/m^2 ,此时电网电流与电网电压相位相反,说明此时光伏阵列产生的电能大于负载所消耗的能量,电网处于吸收电能状态。

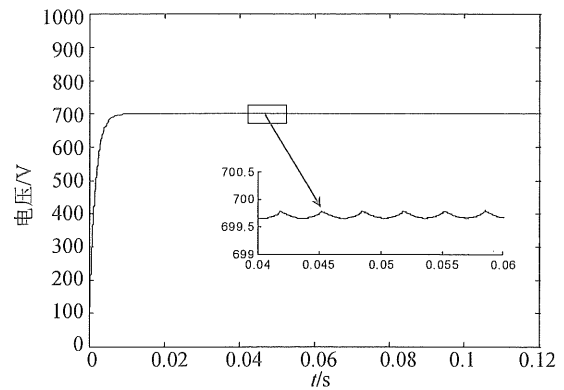


图 6 直流侧电压

Fig. 6 DC link voltage

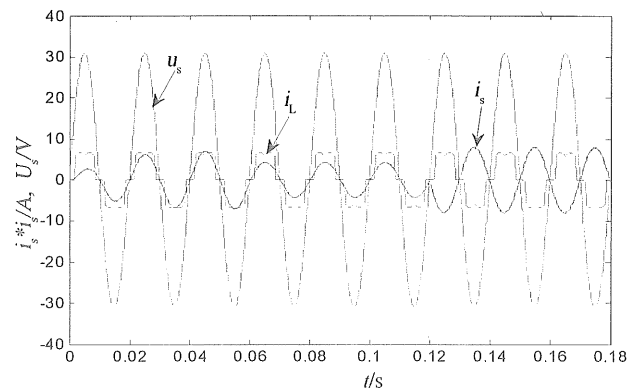


图 7 PVPC 系统在不同状况下工作时的仿真结果

Fig. 7 Simulation results of PVPC system under various conditions

4 结 论

自抗扰控制器可以用来解决不确定性对象的控制问题,其最大的特点就是对系统内外干扰具有很强的抑制能力,表现出良好的鲁棒性和适应性。本文把自抗扰控制引入到 PVPC 系统中,将负载电流和电源电压等因素作为系统的未知干扰并对其进行动态补偿,省去了对负载谐波和无功电流的检测过程,简化了整个系统的控制过程。同时,所设计的自抗扰控制器的参数选取与系统内部的参数无关,参数的选取可以在较大的范围内获得,所以控制系统结构相对简单且易于实现。

参考文献:

- [1] CAVALCANTI M C, AZEVEDO G M S, AMARAL B A, et al. A photovoltaic generation system with unified power quality conditioner function [J]. Industrial Electronics Society, 31st Annual Conference of IEEE, 2005: 750 - 755.
- [2] 汪海宁, 苏建徽, 丁明, 等. 光伏并网功率调节系统 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(2): 75 - 79.

- WANG Haining, SU Jianwei, DING Ming, et al. Photovoltaic grid connected power conditioner system [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(2): 75 - 79.
- [3] 张国荣, 张铁良, 丁明, 等. 光伏并网发电与有源电力滤波器的统一控制 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(8): 61 - 66.
- ZHANG Guorong, ZHANG Tieliang, DING Ming, et al. Combined control of active power filter and pv grid connected generation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(8): 61 - 66.
- [4] 韩京清. 从PID技术到“自抗扰控制”技术 [J]. 控制工程, 2002, 9(3): 13 - 18.
- HAN Jingqing. From PID technique to active disturbances rejection control technique [J]. Control Engineering of China, 2002, 9(3): 13 - 18.
- [5] 雷元超, 陈春根, 沈骏. 光伏电源最大功率点跟踪控制方法研究 [J]. 电工电能新技术, 2004, 23(3): 76 - 80.
- LEI Yuanchao, CHEN Chungeng, SHEN Jun, et al. Research on control method of maximum power point tracking for photovoltaic power system [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2004, 23(3): 76 - 80.
- [6] 韩京清. 自抗扰控制技术 [J]. 前沿科学, 2007(1): 24 - 31.
- HAN Jingqing. Auto disturbances rejection control technique [J]. Frontier Science, 2007(1): 24 - 31.
- [7] 张淼, 吴捷. 基于自抗扰技术的光伏发电并网控制系统 [J]. 控制理论与应用, 2005, 22(4): 583 - 587.
- ZHANG Miao, WU Jie. Control system of renewable energy connected grid based on the auto-disturbances rejection control technology [J]. Control Theory & Applications, 2005, 22(4): 583 - 587.
- [8] 茆美琴, 余世杰, 苏建徽. 带有MPPT功能的光伏阵列Matlab通用仿真模型 [J]. 系统仿真学报, 2005, 17(5): 1248 - 1251.
- MAO Meiqin, YU Shijie, SU Jianhui. Versatile matlab simulation model for photovoltaic array with MPPT function [J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(5): 1248 - 1251.
- [9] 赵为. 太阳能光伏并网发电系统的研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2003.
- [10] 汪进进. 光伏并网控制方法和系统的研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2002.
- [11] MEKHILEF S, AHMED M E, YOUNIS M A A. Performance of grid connected photovoltaic inverter with maximum power point tracker and power factor control [J]. IEEE, 2008(s): 1129 - 1134.
- [12] RAHIM N A, MEKHILEF S. Implementation of three-phase grid connected inverter for photovoltaic solar power generation system [J]. IEEE, 2002, 1(s): 570 - 573.

(上接第48页)

- LI Li, QU Liangsheng. Spectral correlation in mechanical signal feature extraction [J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(4): 334 - 338.
- [6] 蔡亦鸣. 煤矿机械设备的使用维修和故障诊断 [J]. 煤炭技术, 2008, 21(11): 17 - 19.
- CAI Yi ming. Use of maintenance and fault diagnosis of coal mine mechanical device [J]. Coal Technology, 2008, 21(11): 17 - 19.
- [7] ZHANG S, MATHEW J, MA L. Best basis-based intelligent machine fault diagnosis [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2005, 19(2): 357 - 370.
- [8] CHEN Changzheng, MO Changtao. A method for intelligent fault diagnosis of rotating machinery [J]. Digital Signal Processing, 2004, 14(3): 203 - 217.
- [9] BAI Mingsian, HUANG Jiamin, HONG Minghong. Fault diagnosis of rotating machinery using an intelligent order tracking system [J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 280(325): 699 - 718.
- [10] 周龙才, 李娟, 娄红. 基于小波分析的水泵机组振动故障诊断 [J]. 武汉大学学报: 工学版, 2008, 41(5): 23 - 25.
- ZHOU Longcai, LI Juan, LOU Hong. Vibration fault diagnosis of pump unit based on wavelet analysis [J]. Journal of Wuhan University, 2008, 41(5): 23 - 25.
- [11] 张正松. 旋转机械故障监测及故障诊断 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1991: 429 - 444.
- [12] 盛兆顺, 尹琦岭. 设备状态监测与故障诊断技术及应用 [M]. 北京: 工业装备与信息工业出版中心, 2003.