

文章编号: 1000-8152(2005)04-0583-05

## 基于自抗扰技术的光伏发电并网控制系统

张 森<sup>1,2</sup>, 吴 捷<sup>1</sup>

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640; 2. 广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510090)

**摘要:** 单相可再生能源并网发电系统是一非线性系统, 受电网和环境的影响, 系统存在较强的外部干扰和非线性不确定因素. 针对系统的工作特点, 采用自抗扰控制技术来实现对系统的有效控制. 系统利用自抗扰控制器(ADRC)的扩张状态观测器, 来对系统模型中的不确定因素和外扰进行动态观测, 使系统对扰动具有很好的适应能力. 并在系统的扩张状态观测器和非线性状态误差控制器中引入非线性幂指数函数, 使系统运算变得更加简单. 仿真结果表明所设计的控制器具有良好的动态性能和较强的鲁棒性, 即本文所设计的系统是可行的.

**关键词:** 自抗扰控制器; 跟踪-微分器; 扩张状态观测器; 可再生能源

**中图分类号:** TK615 **文献标识码:** A

## Control system of renewable energy connected grid based on the auto-disturbances rejection control technology

ZHANG Miao<sup>1,2</sup>, WU Jie<sup>1</sup>

(1. Electric Power College, South China University of technology, Guangzhou Guangdong 510640, China;

2. Automation College, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong 510090, China)

**Abstract:** Renewable energy generation system connected to the single-phase grid is nonlinear. Affected by grid and environment, the strong disturbance exists. To deal with this characteristics, the auto-disturbances rejection control(ADRC) is used to improve the system's performance. Based on ADRC extended state observer(ESO) to get the model uncertainty and external interference of the system, the system shows good adaptability to noise and model uncertainty. A nonlinear exponential function is applied to ESO and nonlinear state error feedback(NLSEF) controller, and it makes the system realize easier operation. Simulation tests show that the system has good robustness and dynamic performance and the system is feasible.

**Key words:** auto-disturbances rejection control; tracking differentiator; extended state observer; renewable energy

### 1 前言(Introduction)

随着科学技术的飞速发展, 人类社会对能源的需求也在不断增长, 开发和利用可再生绿色能源, 如风能、太阳能、生物能等已成为人们的迫切需要. 作为可再生绿色能源应用的重要组成部分其外围的控制装置——电力变换装置的研究与开发也是一个重要课题.

把可再生能源和民用电网并联如光伏建筑一体化 BIPV(Building Integrated Photovoltaics)<sup>[1]</sup> 是近年来利用太阳能发电的一种新概念, 它在建筑围护结构上铺设光伏阵列产生电力, 当可再生能源输出电能把不能满足负载要求时, 由电网来进行补充; 当可再生能源输出的功率超出负载需求时, 把电能输送到电网中.

为了最大限度减小因太阳能发电连接到电网对电网带来的不利影响, 系统除了要求输出功率因数

为“1”, 还需要输送到电网的电流谐波应尽可能的少, 即输出电流接近正弦.

本文通过对太阳能发电系统与单相民用供电系统相连接特点的分析, 采用自抗扰控制技术来实现对系统的控制, 并给出系统的试验结果.

### 2 系统控制原理(System control scheme)

#### 2.1 系统数学模型建立(System model)

系统结构如图 1 所示.

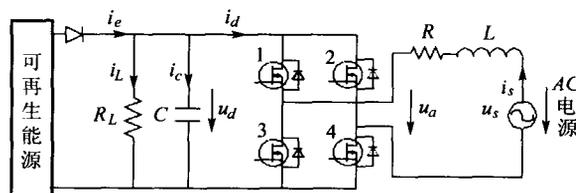


图 1 系统结构图

Fig. 1 System circuit

在图1所示系统中,电阻  $R$  代表逆变器损耗、电感器的电阻及线路损耗的等效电阻,  $L$  表示线路等效电感和扼流电感之和. 扼流电感用于减少逆变器输出的 PWM(脉冲宽度调制)信号高次谐波对电网的影响. 为了提高系统的功率因数,逆变器应保证系统输出电流为正弦,同时使电流与电网电压的频率和相位保持一致. 由于开关频率一般较高(为数 kHz 到数十 kHz),开关纹波影响较小,忽略高频开关纹波影响,可得系统数学模型

$$C \frac{du_c}{dt} = -\frac{1}{R_L}u_c + i_c - i_d, \quad (1)$$

$$L \frac{di_s}{dt} = u_s - Ri_s - u_a, \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{du_c}{dt} = -\frac{1}{R_L C}u_c - \frac{1}{C}i_d + \frac{1}{C}i_e, \\ \frac{di_s}{dt} = -\frac{R}{L}i_s + \frac{1}{L}u_s - \frac{1}{L}u_a, \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{u}_c \\ \dot{i}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_L C} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_c \\ i_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{C} \\ -\frac{1}{L} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{C} \\ \frac{1}{L} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_s \\ i_e \end{bmatrix}. \quad (4)$$

根据能量守恒定理,理想逆变器的输入和输出的瞬时功率相等,即

$$u_c i_d = -u_a i_s. \quad (5)$$

令系统直流端经逆变器输出的功率  $p_d = u_c i_d$ , 逆变器输出至交流端的功率  $p_a = -u_a i_s$ ; 取  $\alpha = \frac{u_a}{u_c}$ ,  $\beta = -\frac{i_d}{i_s}$ , 即得图1所示系统的等效电路,如图2所示.

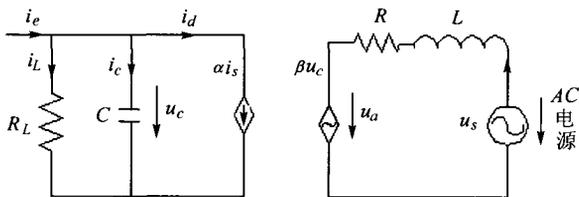


图2 系统等效电路图  
Fig. 2 System equivalent circuit

设电网电压为

$$\begin{aligned} u_s &= \sqrt{2}E\sin\omega t, \\ i_s &= \sqrt{2}I\sin(\omega t + \varphi), \end{aligned}$$

则电网输出的有功功率

$$p_s = u_s \cdot i_s =$$

$$\begin{aligned} &\sqrt{2}E\sin\omega t \cdot \sqrt{2}I\sin(\omega t + \varphi) = \\ &EI\cos\varphi - EI\cos(2\omega t + \varphi). \end{aligned} \quad (6)$$

为了保持系统的功率因数为1,即电流  $i_s$  与电压  $u_s$  相位相同或相位相反,即

$$\varphi = 0^\circ \text{ 表示逆变器从电网吸收能量,}$$

或

$$\varphi = \pm 180^\circ \text{ 表示逆变器向电网发送能量.}$$

由式(4)可知,  $p_s$  随时间变化在呈周期性改变,而为了最大限度发挥可再生能源的效率,可再生能源多采用最大功率输出控制,因而要使  $p_s$ 、负载与可再生能源输出功率始终相匹配,是不可能的.

取  $I_m(t) = I\cos\varphi$ , 其为电源输出电流有效值,  $I_m(t) > 0$  表示电网输出能量,  $I_m(t) < 0$  表示电网从逆变器吸收能量,式(6)可改写为

$$\begin{aligned} p_s &= EI_m(t) - EI_m(t)\cos(2\omega t + \varphi)/\cos\varphi = \\ &EI_m(t) - EI_m(t)\cos(2\omega t + \varphi)/\cos\varphi = \\ &EI_m(t) - EI_m(t)\cos 2\omega t. \end{aligned} \quad (7)$$

在这里,为了使逆变器在一个工频周期内的输出能量及系统的其他损耗与可再生能源输出能量相等,取  $I_m(t)$  为一个工频周期平均电流有效值.

### 2.2 系统电容 $C$ 参数选择(DC-link capacitor parameter selection)

根据能量守恒原理,系统交直流两侧的功率相等,即得

$$\begin{aligned} &u_c(I_e - u_c/R_L) + Cu_c \frac{du_c}{dt} = \\ &u_s \cdot i_s + Ri_s^2 + Li_s \frac{di_s}{dt} = \\ &(EI + RI^2) - (EI + RI^2)\cos 2\omega t + \omega LI^2 \sin 2\omega t. \end{aligned} \quad (8)$$

当系统稳定时,直流侧电压变化量  $u_c$  较小,取  $u_c = U_c + \Delta u_c$ , 代入式(8)得

$$\begin{aligned} &(U_c + \Delta u_c)[I_e - (U_c + \Delta u_c)/R_L] + \\ &C(U_c + \Delta u_c) \frac{d(U_c + \Delta u_c)}{dt} = \\ &(EI + RI^2) - (EI + RI^2)\cos 2\omega t + \omega LI^2 \sin 2\omega t. \end{aligned}$$

设系统稳定时直流端电压变化较小,即  $U_c \gg \Delta u_c$ , 上式可改写为

$$\begin{aligned} &U_c(I_e - U_c/R_L) + CU_c \frac{d\Delta u_c}{dt} = \\ &(EI + RI^2) - (EI + RI^2)\cos 2\omega t + \omega LI^2 \sin^2 \omega t. \end{aligned} \quad (9)$$

系统在稳定时,直流侧与交流侧消耗的有功分量相等,即

$$u_c(I_e - u_c/R_L) = EI + RI^2. \quad (10)$$

由于电阻  $R$  较小,通常  $E \gg RI$ , 则式(9)可改写为

$$\begin{aligned} \Delta u_c &= \\ \frac{1}{CU_c} \int_0^t (-EI \cos 2\omega t + \omega LI^2 \sin 2\omega t) dt &= \\ \frac{1}{CU_c} \int_0^t \sqrt{(EI)^2 + (\omega LI^2)^2} \sin(2\omega t + \theta) dt &= \\ \frac{\sqrt{(EI)^2 + (\omega LI^2)^2}}{2\omega CU_c} [\cos(2\omega t + \theta) - \cos\theta]. \end{aligned} \quad (11)$$

由式(11)可得直流部分纹波电压  $\Delta u_c$  波动的幅值

$$\Delta u_{cA} = \frac{\sqrt{(EI)^2 + (\omega LI^2)^2}}{2\omega CU_c}.$$

通常情况下,  $E \gg \omega LI$ , 则上式可改写为

$$\Delta u_{cA} = \frac{EI}{2\omega CU_c} \approx \frac{P_s}{2\omega CU_c}. \quad (12)$$

由式(10),(12)可知,直流部分纹波电压  $\Delta u_d$  波动的幅值取决于电容  $C$  的容量、所设定直流电压  $U_c$ 、可

再生能源输入的功率,通过适当的选取直流端的电容  $C$  和  $U_c$  可减小直流纹波电压.

### 2.3 控制方法(Control method)

自抗扰控制器(ADRC)是中国科学院系统科学研究所韩京清研究员经过多年努力发明的新一代非线性控制器,其基本思想和方法与传统控制器相比有很大突破,其特点是

1) 利用跟踪微分器(TD)安排过渡过程,对参考输入安排过渡过程并提取其微分信号;

2) 利用扩张状态观测器(ESO)对对象进行估计,不仅得到各个状态变量的估计,还能对对象的扰动进行观测和估计;

3) 利用非线性状态误差反馈律(NLSEF)来调节控制量,方式灵活.

根据系统的特点,系统采用双闭环控制,内环采用电流控制环,外环为电压控制环,在这里外环采用自抗扰控制控制,系统结构图如图3所示.

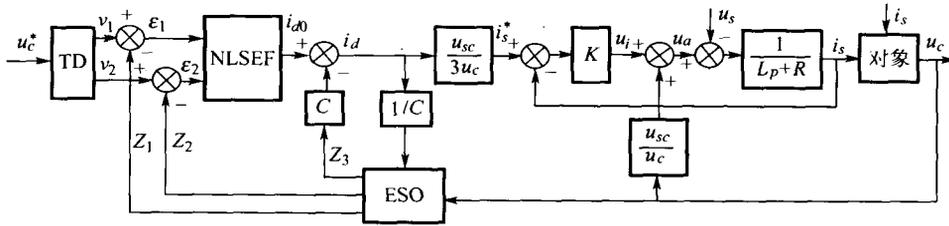


图3 控制系统的结构图

Fig. 3 System structure diagram

#### 2.3.1 被控对象(Controlled object)

由式(1)可得被控对象

$$\frac{du_c}{dt} = -\frac{1}{R_L C} u_c + \frac{i_e}{C} - \frac{i_d}{C}. \quad (13)$$

其中:电容  $u_c$  为系统的输出; $i_d$  为系统的控制量; $i_e$  为可再生能源输出电流,在这里为系统的一个扰动量.

#### 2.3.2 非线性跟踪微分器(Nonlinear tracking differentiation)

非线性跟踪微分器是根据参考输入  $v(t)$  和受控对象(13)安排的过渡过程,在这里非线性跟踪微分器提供系统输出的过渡过程变化规律.

$$\begin{cases} \dot{v}_1 = v_2, \\ \dot{v}_2 = -r \operatorname{sgn}(v_1 - v + \frac{v_2 |v_2|}{2r}). \end{cases} \quad (14)$$

式中  $r$  为反映 TD 变化规律的特征参数.

#### 2.3.3 扩张状态观测器(Extended state observer)

扩张状态观测器作为自抗扰控制器的核心环节,其作用是有效跟踪其观测的状态变量及其各阶

“广义微分信号”.由式(13)可知,该被控对象为一阶环节,系统中  $u_c$  和  $i_d$  为系统的可量测变量,由这两个变量作为输入,构造出如该系统的扩张状态观测器

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 g(e), \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_2 g(e) - \frac{1}{C} i_d, \\ \dot{z}_3 = -\beta_3 g(e). \end{cases} \quad (15)$$

其中  $e = z_1 - u_c$ . 在这里选择非线性函数

$$g(e) = e^{1/3}.$$

式中  $\beta_1, \beta_2$  和  $\beta_3$  为可调参数.

#### 2.3.4 非线性状态误差反馈律(Nonlinear state error feedback)

利用上面的扩张状态观测器的状态反馈与 TD 输出的系统状态误差反馈

$$\epsilon_1 = v_1 - z_1, \quad \epsilon_2 = v_2 - z_2,$$

构成系统的控制分量

$$i_{d0} = k_1 \cdot g_1(\epsilon_1) + k_2 \cdot g_2(\epsilon_2),$$

$$i_d = i_{d0} - C(z_2 + f_0(z_1, z_1)),$$

$$f_0(z_1, i_e) = k_f i_e / z_1.$$

式中  $k_1$  和  $k_2$  为误差非线性反馈率增益.

### 2.4 自抗扰控制器的参数调整 (ADRC parameters regulation)

第1步 根据实际受控对象的特点,选择一个合适的过渡过程曲线,根据该曲线来选择合适的参数  $r$ , 构造出微分跟随器(TD);

第2步 给控制对象施加阶跃控制量,给 ESO, NLSEF 设置初值,并使系统稳定;

第3步 在确保系统稳定的前提下,调整 ESO 的参数  $\beta_1, \beta_2$  和  $\beta_3$ , 使其尽可能快速而准确地估计参考输入及其微分状态和内外扰动的合成函数;

第4步 调整非线性组合的参数  $k_1$  和  $k_2$  使闭环系统的性能指标令人满意.

整个参数的选取是通过反复试选后确定.

### 3 仿真结果 (Simulation results)

为了验证本文自抗扰控制方法的可行性,本文分别采用了自抗扰控制与经典 PI 两种控制方法对图3所示的系统作相应的仿真研究,实验结果如图4~8所示.系统的参数如下:

$$R_L = 100 \Omega, R = 1 \Omega, L = 0.01 \text{ mH}, C = 10000 \mu\text{F},$$

$$u_c^* = 360 \text{ V}, E = 220 \text{ V}, r = 1.25, \beta_1 = 1000, \beta_2 = 1000, \beta_3 = 500, k_1 = 15, k_2 = 5.$$

根据系统的工作特点,系统在投入工作前交流电压通过逆变器续流二极管整流与直流部分得到平衡,直流电压约为交流的峰值电压 310 V,取  $u_c(0) = 310 \text{ V}$ .

由图4,5自抗扰控制系统与经典PID控制系统的动态响应曲线可知,很明显自抗扰控制系统动态响应  $u_c$  无超调,动态过程电流冲击大大降低,因此可以认为采用自抗扰控制器可获得较佳的动态性能;当扰动电流  $i_e$  突变时,由图4,5给出了自抗扰控制系统与经典PID控制系统的动态响应曲线;由图可知系统的直流电压  $u_c$  基本保持不变,与经典PID控制相比,自抗扰系统输出电流的有效  $I_{sm}$  很快趋于稳定;因此可以认为自抗扰控制系统的鲁棒性及自适应性均要优于经典PID控制系统.

由图6(a),(b)电压电流关系曲线可知,当太阳能电能大于负载消耗的能量  $u_s$  和  $i_s$  同相位电网电源处于供电方式;当太阳能电能小于负载消耗的能量  $u_s$  和  $i_s$  反相位电网电源处于吸收电能方式,系统在两种工作模式下都具有较好的性能.

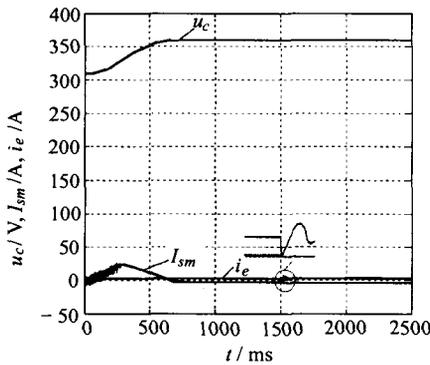


图4 ADRC控制仿真响应过程曲线  
Fig. 4 Simulation process of ADRC control

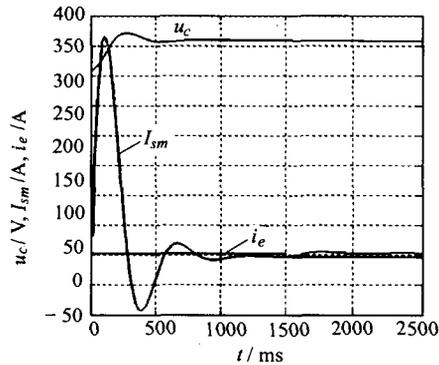
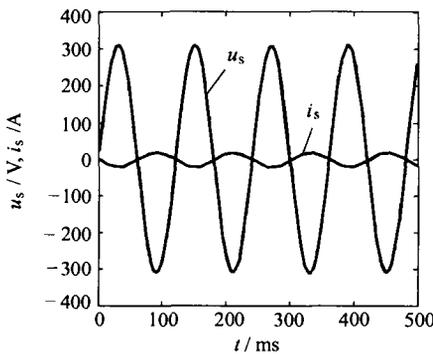
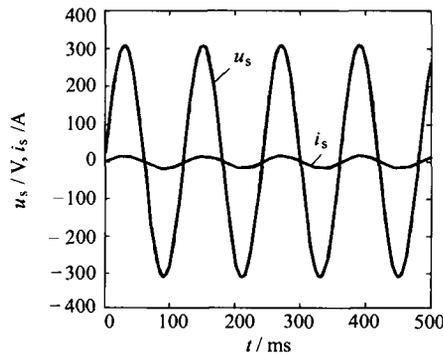


图5 PI控制系统仿真响应过程曲线  
Fig. 5 Simulation process of PI control



(a) 太阳能电能大于直流负载消耗



(b) 太阳能电能小于直流负载消耗

图6 电压电流关系曲线

Fig. 6 System output curves of voltage and current

由上述介绍的内容可知,由于电网吸收和发出的功率是按周期变化的,它也间接的带来了直流部分电压的波动.由图7可知,通过适当的选取电容 $C$ 的容量,是可将直流端电压波动的幅度限制在一定的范围.

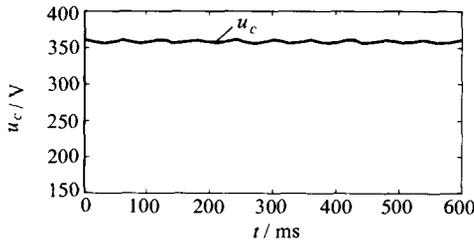


图7 系统稳定状态时直流端电压

Fig. 7 System DC-Link voltage curve in steady state

#### 4 结论(Conclusion)

自抗扰控制器可以用来解决不确定性对象的控制问题,这种控制器的最大特点是不依赖于被控系统的具体数学模型并对内外扰有较强的抗扰能力,使整个系统在工作区间内具有良好的鲁棒性与适应性.本文基于自抗扰控制方法,设计了一用于可再生能源与民用电网并联控制器,通过控制逆变器直流电压恒定来实现能量互换,并给出了控制量的具体选择方法,数值仿真实验取得了令人满意的效果.仿真结果表明与经典的PID的控制方法相比,ADRC的控制性能具有较好的适应性和鲁棒性,该种方案是可行的.

#### 参考文献(References):

[1] 杨洪兴,季杰. BIPV对建筑墙体得热影响的研究[J]. 太阳能学报,1999,20(3):270-273.

(YANG Hongxing, JI Jie. Study on the heat gain of a PV-wall [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 1999, 20(3): 270 - 273.)

[2] 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.)

[3] 张文革,韩京清. 跟踪微分器用于零极点配置[J]. 自动化学报, 2001, 27(5): 724 - 727.

(ZHANG Wenge, HAN Jingqing. The application of tracking differentiator in allocation of zero [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2001, 27(5): 724 - 727.)

[4] 吴捷,刘明建,薛峰. 控制理论在电力电子学中的应用概述(1): 非线性及智能化方法[J]. 控制理论与应用, 1999, 16(4): 470 - 473.

(WU Jie, LIU Mingjian, XUE Feng. An overview of control theories in power electronics—Model and linear method [J]. *Control Theory & Applications*, 1999, 16(4): 470 - 473.)

[5] 吴捷,刘明建,薛峰. 控制理论在电力电子学中的应用概述(2): 非线性及智能化方法[J]. 控制理论与应用, 1999, 16(5): 630 - 633.

(WU Jie, LIU Mingjian, XUE Feng. An overview of control theories in power electronics—Model and linear method [J]. *Control Theory & Applications*, 1999, 16(5): 630 - 633.)

[6] 钟庆,吴捷,徐政. 自抗扰控制器在并联型有源滤波器中的应用[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(16): 22 - 25.

(ZHONG Qing, WU Jie, XU Zheng. Application of the automatic disturbance controller in the shunt active power filter [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2002, 26(16): 22 - 25.)

#### 作者简介:

张森 (1968—),男,广东工业大学自动化学院副教授,主要研究方向为电力电子技术、可再生能源控制技术等, E-mail: bezhangm@gdut.edu.cn;

吴捷 (1937—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为自适应、自组织控制、电力系统自动化等.