

光伏三相并网系统的自抗扰控制

张 淼, 刘立强

(广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510090)

摘要: 光伏三相并网发电系统是一个典型非线性系统, 受电网和外部环境的影响, 系统存在许多不确定性干扰. 本文以三相光伏并网发电系统为对象, 利用自抗扰控制器的扩张状态观测器, 对系统模型中的不确定因素和外部干扰进行动态观测, 设计一自抗扰控制器, 使系统具有较好的适应能力, 并对系统进行了仿真研究. 结果表明所设计的控制器具有良好鲁棒性和较好的动、静态特性.

关键词: 自抗扰控制器; 光伏系统; 并网; 状态观测器

中图分类号: TK615 **文献标识码:** A

Disturbance rejection controller for photovoltaic three-phase grid-connected system

ZHANG Miao, LIU Li-qiang

(Automation College, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong 510090, China)

Abstract: Photovoltaic(PV) system connected to the three-phase grid is a typical nonlinear system. Affected by the grid and the environment, there are many uncertain disturbance sources. To deal with the characteristics of the system, the extended state observer(ESO) for auto-disturbances rejection control(ADRC) is applied to measure the model uncertainty and external interference of the system, and an disturbance rejection control(ADRC) is applied to improve the system's performances. Simulation results show that the system has good robustness and desirable control effect. Furthermore, it could improve the dynamics and static performances of the system.

Key words: disturbances rejection control; photovoltaic system; grid-connected; state observer

1 引言(Introduction)

随着传统的化石能源日益枯竭, 开发和利用可再生能源成为人类发展的必由之路. 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. 作为核心器件之一的并网逆变器也成为领域研究的一个重要课题.

目前常用的光伏并网逆变控制系统大多采用经典的PID控制方案, 在控制系统运行中, 受环境变化、电网波动、以及模型参数不确定性等问题的影响, 采用常规的控制方法就很难取得满意的效果.

基于扩张状态观测器(ESO)的自抗扰控制^[1,2]是一种非线性鲁棒控制技术, 它用配置非线性结构替代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^[3,4]. 针对光伏并网逆变控制系统的特点, 本文提出将自抗扰控制器应用到光伏三相并网发电控制系统中, 并进行了仿真研究.

2 自抗扰控制原理(Auto-disturbances control scheme)

自抗扰控制器包括跟踪微分器(TD)、扩张状态观测器(ESO)和扰动补偿、状态误差的非线性反馈规律(NLSEF)等. TD、ESO和NLSEF都是由非线性环节构成, 控制器的结构图如图1所示.

在图1所示的ADRC结构图中, TD和ESO分别用来处理参考输入和系统输出, NLSEF选择适当的状态误差的非线性组合获得系统的自抗扰控制律. 其中 n 阶TD给出参考输入 V_t 的各阶导数跟踪信

号 $V_1, \dots, V_n$ 提供一个快速无超调参考过渡过程曲线。

扩张状态观测器则对动态对象的各阶状态变量和系统的总扰动进行观测;非线性状态误差反馈控制律是利用TD输出的 $V_1, \dots, V_n$, 和ESO对应输出量 $Z_{2,1}, \dots, Z_{2,n}$ 之差来产生控制量 U_0 ;扰动量的观测值 $Z_{2,n+1}$ 被用来对系统的综合扰动进行补偿。

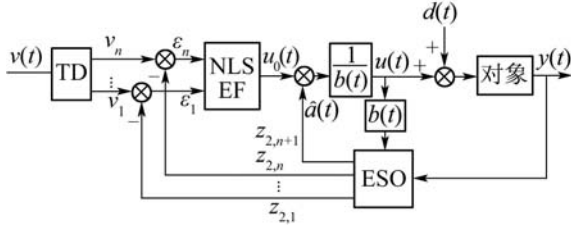


图1 自抗扰控制器结构框图

Fig. 1 Block diagram of ADRC

3 系统的实现(Realization of system)

3.1 系统数学模型(System model)

光伏发电与三相供电系统并网主回路原理图如图2所示。

图中: R 为逆变器损耗、电感器的电阻及线路损耗的等效电阻; L 为线路等效电感和扼流电感之和。可得系统三相静止坐标的数学模型和 $d-q$ 旋转数学模型如式(1)所示:

$$\begin{cases} L \frac{di_q}{dt} + \omega L i_d = -R i_q + u_q - e_q, \\ L \frac{di_d}{dt} - \omega L i_q = -R i_d + u_d - e_d, \\ C \frac{dU_{dc}}{dt} = i_{PV} - i_{dc}. \end{cases} \quad (1)$$

其中: 直流侧电压 U_{dc} 为系统的输出; i_{dc} 为系统的控制量; i_{PV} 为可再生能源输出电流。

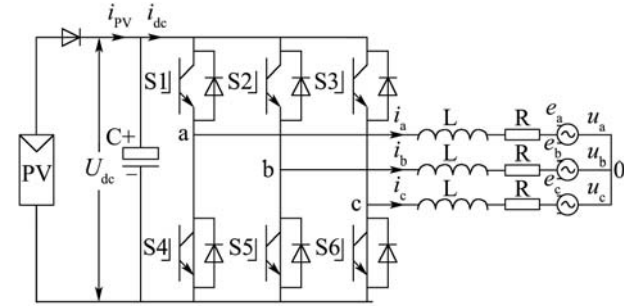


图2 系统结构图

Fig. 2 Frame of system

3.2 ADRC的设计(Design of ADRC)

根据系统的特点, 系统采用双闭环控制, 内环为电流控制环, 外环为电压控制环。其中外环采用自抗扰控制技术, 内环采用基于电流解耦的PI控制。系统结构图如图3所示。

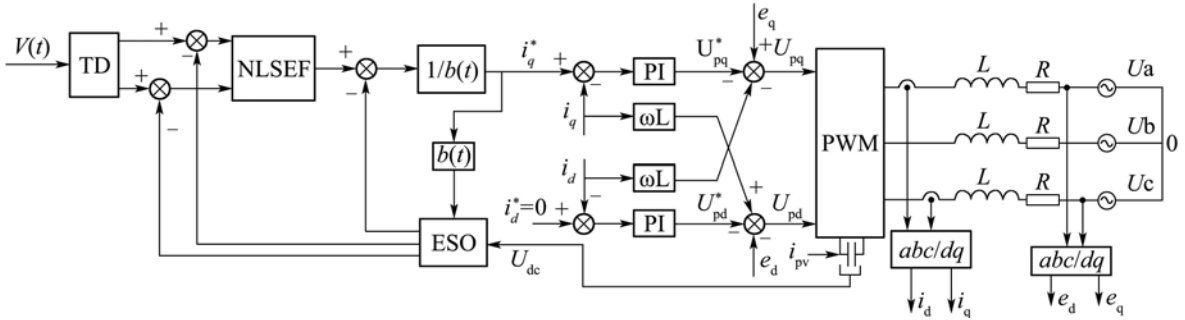


图3 控制系统的结构图

Fig. 3 The system structure diagram

3.2.1 微分跟踪器(TD)

系统中的非线性跟踪微分器是根据参考输入和被控对象所期望的过渡过程来设计, 即非线性跟踪微分器提供系统输出的过渡过程变化规律, 其数学模型:

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

式中 r 为反映TD变化规律的特征参数。

3.2.2 扩张状态观测器(ESO)

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”。由于被控环节为二阶环节, 系统中 U_{dc} 与 i_q 为系统的可量测变量, 由此变量作为输入, 构造出如该系统的扩张状态观测器:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 g(e), \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_2 g(e) - \frac{1}{c} i_q, \\ \dot{z}_3 = -\beta_3 g(e). \end{cases} \quad (3)$$

取非线性函数 $g(e) = e^{1/3}$, 式中 β_1, β_2 和 β_3 为可调

参数, 其中 $e = z_1 - u_{dc}$.

3.2.3 非线性状态误差反馈律(NLSEF)

实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反馈:

$$\varepsilon_1 = v_1 - z_1, \varepsilon_2 = v_2 - z_2.$$

构成系统的控制分量:

$$i_{q0} = k_1 g_1(\varepsilon_1) + k_2 g_2(\varepsilon_2), i_q = i_{q0} - cz_3.$$

式中: k_1 和 k_2 为误差非线性反馈率增益.

3.2.4 自抗扰控制器的参数调整(Regulating parameter of ADRC)

采用自抗扰控制器来实现控制, 主要需解决的问题是控制器参数的调整:

首先, 根据VSR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);

其次, 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 β_1, β_2 和 β_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.

系统参数的选取是利用MATLAB通过仿真来反复试选后确定的. 在这里经过多次选择与调试, β_1, β_2 和 β_3 的数值分别选为26, 13, 0.5, 另一组参数 k_1, k_2 则分别为80和1.5.

4 仿真结果(Simulation result)

为了验证所设计的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2所示系统作相应的仿真研究. 系统的参数为: $i_{PV} = 4 \text{ A}$, $L = 1 \text{ mH}$, $C = 2200 \mu\text{F}$, $U_c^* = 360 \text{ V}$. 实验结果如图4、图5所示.

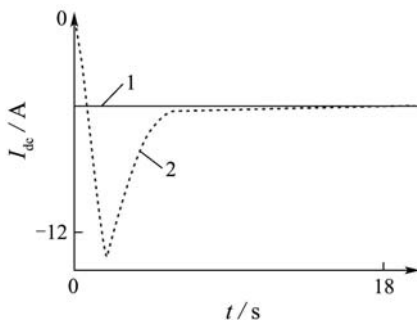


图4 自ESO观测干扰量

Fig. 4 ESO tracking the disturb

图4中, 曲线1、曲线2分别为系统的扰动量和ESO对扰动量的观测波形. 从图中可以看出, ESO对系统干扰的观测量在起始时刻有较大的误

差, 并逐步逼近系统的干扰量, 即所设计的系统ESO可较好的对系统的干扰进行观测.

图5中的曲线1、曲线2分别为自抗扰控制和PI控制的输出. 从图5的两种控制方法直流侧电压的对比, 可以明显得出两者的优劣. 在输出电压方面, 自抗扰控制在较短时间内达到给定值, 无超调; PI控制是经过震荡后到达给定值, 且超调量较大. 从图5的波形对比可以看出, 采用自抗扰控制器可获得较佳的动态性能及快速响应能力.

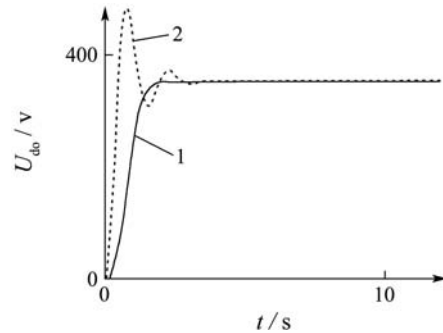


图5 直流侧电压的对比

Fig. 5 Comparison of DC link voltage

5 结论(conclusion)

自抗扰控制器可以解决不确定性对象的控制问题, 其特点是不依赖于被控系统的具体数学模型, 有较强的抗内外干扰能力. 本文基于自抗扰控制方法, 设计了一个三相光伏并网控制器, 通过控制逆变器直流电压恒定来把光伏电池发出的电能转换为交流电, 并给出了控制量的具体选择方法. 仿真结果表明与经典的PI控制方法相比, ADRC的控制性能具有较好的适应性和鲁棒性, 对电网的冲击较小, 显示出这种控制方法在光伏并网发电系统有着良好的应用前景.

参考文献(References):

- [1] 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.)
- [2] 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.)
- [3] 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.)
- [4] 徐春梅, 杨平. 火电厂主汽温控制系统的自抗扰控制仿真研究[J]. 华北电力大学学报, 2006, 33(3): 41 - 45.
(XU Chunmei, YANG Ping. Simulation study on auto-disturbance rejection controller of main steam temperature control system in power station[J]. *J of North China Electric Power University*, 2006, 33(3): 41 - 45.)