

文章编号: 1004-4353(2023)02-0136-04

# 基于模糊控制的光伏储能系统的特性分析

刘 頔, 崔一然, 徐红梅  
( 延边大学 工学院, 吉林 延吉 133002 )

**摘要:** 为提高光伏储能系统的控制性能和抑制外部干扰的能力,提出了一种自抗扰控制策略,即在电流内环采用双向变换器线性自抗扰控制策略,在电压外环采用模糊自抗扰控制策略.利用 Matlab/Simulink 仿真平台对传统 PI、LADRC 控制器与基于模糊控制的 LADRC (fuzzy-LADRC) 控制器进行仿真对比表明, fuzzy-LADRC 控制器可有效抑制因多源干扰而引起的直流母线电压波动,并可提高光伏系统的跟踪性能和鲁棒性.

**关键词:** 光伏储能系统; 双向变换器; 自抗扰控制; 模糊控制; 鲁棒性

**中图分类号:** TM46

**文献标识码:** A

## Analysis of characteristics for photovoltaic energy storage system based on fuzzy control

LIU Di, CUI Yiran, XU Hongmei  
( College of Engineering, Yanbian University, Yanji 133002, China )

**Abstract:** In order to improve the control performance and mitigate external disturbances of photovoltaic energy storage systems, a self-disturbance rejection control strategy was proposed. Specifically, a bidirectional converter linear self-disturbance rejection control strategy was employed in the current inner loop, while a fuzzy self-disturbance rejection control strategy was utilized in the voltage outer loop. The use of Matlab/Simulink simulation platform was employed to compare the performance of the traditional PI and LADRC controllers with the fuzzy control-based LADRC (fuzzy-LADRC) controller. The simulation results demonstrate that fuzzy-LADRC controller can effectively overcome the problem of DC bus voltage fluctuation caused by multiple sources of interference, and improve the tracking performance and robustness of the photovoltaic system.

**Keywords:** photovoltaic energy storage system; bidirectional converter; automatic disturbance rejection control; fuzzy control; robustness

### 0 引言

随着光伏 (photovoltaic, PV) 发电技术的发展和不断成熟,利用光伏发电已成为我国能源转型的重要方式之一.但在目前的光伏储能系统中,如何控制好直流母线电压和保证光伏电源与负载

之间能量的有效传输仍是亟需解决的问题<sup>[1]</sup>. 为此,一些学者对此进行了研究.例如:2021 年, Cabrane 等<sup>[2]</sup>采用电池和超级电容器构建了一种具有混合储能功能的储能系统,该系统通过一个新设计的 PI 控制器来稳定直流母线电压和控制 Buck-Boost 变换器.仿真结果证明,该系统能有

收稿日期: 2023-05-10

基金项目: 吉林省教育厅科研项目(JJKH20210589KJ)

第一作者: 刘頔(1998—),女,硕士研究生,研究方向为非线性动力学.

通信作者: 徐红梅(1975—),女,博士,教授,研究方向为非线性动力学.

效保持直流母线电压的稳定. 2023年, J. Heidary 等<sup>[3]</sup>提出了一种自抗扰控制方法. 该方法利用能源管理系统来保持直流母线电压的稳定, 利用逆变器来控制微电网内部的电压、频率和功率; 实验结果表明, 该控制方法的性能显著优于传统的 PI 控制器. 但在自抗扰控制器的相关研究中, 由于涉及的可调参数较多, 整定复杂, 因此如何进一步提高参数的适应性和改善系统的鲁棒性仍需进一步研究. 为此, 本文提出了一种自抗扰控制策略(在电流内环采用双向变换器线性自抗扰控制策略, 在电压外环采用模糊自抗扰控制策略), 并分析了不同干扰因素(环境温度、光照、负载不确定等)对直流母线电压的影响.

## 1 光伏储能系统的结构

### 1.1 独立光伏储能系统的结构

光伏储能系统是一种将光伏发电和储能设备相结合的系统. 目前, 光伏发电系统主要可分为3类: 独立光伏系统、并网光伏系统以及混合光伏系统<sup>[4]</sup>. 在独立运行的光伏发电系统中, 为解决由天气因素而导致的发电量波动、发电效率低、能量不足等问题, 系统必须通过配备储能介质来储存和调节能量<sup>[5]</sup>. 在传统的独立光伏储能系统中, 储能介质与直流母线直接相连接; 但由于其在充放电时的电流难以得到有效的控制, 因此当负载突变时, 可能会导致储能介质的充放电的电流过大, 进而导致储能系统的损坏; 因此, 需要在系统直流母线和储能介质之间插入一个 DC/DC 变换器, 以控制储能介质能够平稳地充放电<sup>[6]</sup>.

常见的独立光伏储能系统的结构如图1所示. 系统由分布式电源、DC/DC 变换器、负载、储能装置(一般为蓄电池)组成. 分布式电源由光伏阵列组成. 光伏阵列通过 DC/DC 升压变换器与直流母线相连接, 其中 DC/DC 升压变换器用于控制储能装置的充放电, 以此来稳定直流母线电压和最大功率点追踪(maximum power point tracking, MPPT)<sup>[7]</sup>.

### 1.2 双向 DC/DC 变换器的工作原理

双向 DC/DC 变换器是在单向 Buck 或 Boost 变换器基础上构建的, 其电路的拓扑结构如图2

所示. 该变换器具有结构简单、转换效率高的优点<sup>[8]</sup>.

当双向 DC/DC 变换器处于降压模式时, 开关管  $S_1$  以 PWM 方式工作, 开关管  $S_2$  截止. 此时, 该变换器相当于一个单向 Buck 电路, 能量从直流母线端流向负载端, 即储能介质处于充电状态. 当双向 DC/DC 变换器处于升压模式时, 开关管  $S_1$  截止, 开关管  $S_2$  以 PWM 方式工作. 此时, 该变换器相当于一个单向 Boost 电路, 能量从负载端流向直流母线端, 即储能介质处于放电状态<sup>[9]</sup>. 当直流母线电压值处于给定的范围内时, 该变换器停止工作, 即储能介质处于待机模式.

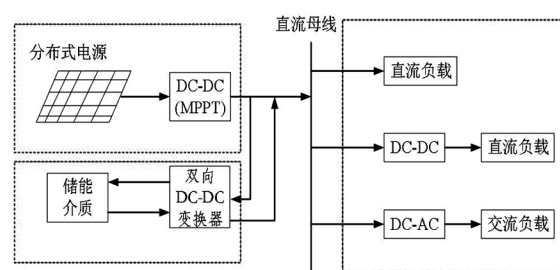


图1 独立光伏储能系统的结构示意图

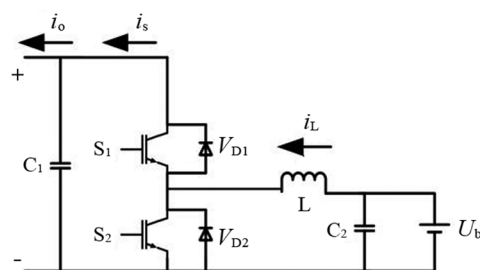


图2 双向 Buck-Boost 电路的拓扑结构

## 2 模糊自抗扰控制器的设计

### 2.1 自抗扰控制结构的设计

图3为基于自抗扰控制的双向 DC/DC 变换器的控制结构图. 其中, 电压外环采用模糊自抗扰控制器, 电流内环采用线性自抗扰控制器. 双向 DC/DC 变换器的工作模式由电流环的电流给定值 ( $I_{ref}$ ) 确定<sup>[10]</sup>. 当  $I_{ref} < 0$  时, 双向 DC/DC 变换器在 Buck 模式下工作. 此时直流母线电压的实际值大于给定值, 能量从直流母线端流向储能介质端. 当  $I_{ref} > 0$  时, 双向 DC/DC 变换器在 Boost 模式下工作. 此时直流母线电压的给定值大于实际值, 能量从储能介质端流向直流母线端<sup>[11]</sup>.

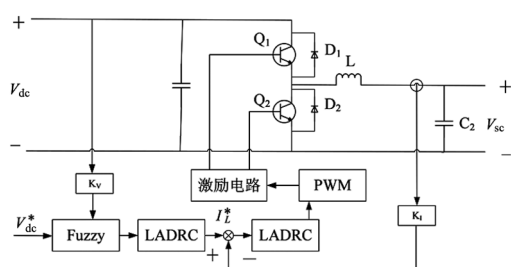


图 3 双向 DC/DC 变换器的控制结构

## 2.2 模糊自抗扰控制的结构设计

研究表明,将自抗扰控制算法与模糊控制算法相结合的模糊自抗扰控制策略不仅可以有效控制直流母线电压的稳定,而且还可以提高控制系统的自适应能力和鲁棒性<sup>[12]</sup>。模糊自抗扰控制器的控制结构如图 4 所示。

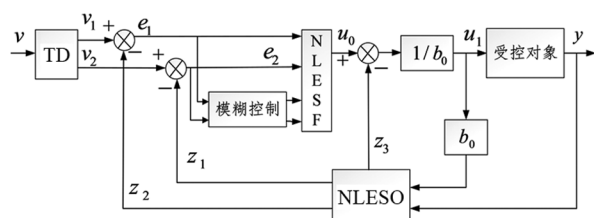


图 4 模糊自抗扰控制器的控制结构

研究显示,利用模糊自抗扰控制器在线调整控制量参数,不仅可以使系统能够适应复杂的外围环境,而且还可以获得更稳定的控制效果<sup>[13]</sup>。因此,本文在模糊自抗扰控制器中设置了 2 个控制量参数 ( $\beta_1$  和  $\beta_2$ ),并设定模糊控制器的输入量 ( $k_1$ ) 和输出量 ( $k_2$ ) 为观测器的增益误差。由此,基于模糊控制的线性自抗扰控制器 (fuzzy-LADRC) 的参数  $\beta_1$  和  $\beta_2$  可重新定义为:

$$\begin{cases} \beta_1' = \beta_1 + k_1\beta_1, \\ \beta_2' = \beta_2 + k_2\beta_2. \end{cases}$$

## 3 光伏储能系统的特性分析

为验证 fuzzy-LADRC 控制器对光伏储能系统的有效性,本文应用 Matlab/Simulink 平台建立了一个独立的光伏储能系统,同时在系统的电压外环中分别设计了 3 种控制方式:传统 PI 控制方式、LADRC 控制方式和 fuzzy-LADRC 控制方式。仿真参数见表 1。

### 3.1 3 种控制器的跟踪性能分析

为对比 3 种控制器的跟踪性能,在稳态情况

下对系统的启动过程进行了测试。系统的稳态参数:光照强度为  $1000 \text{ W/m}^2$ ,电池温度为  $25^\circ\text{C}$ 。

图 5 为稳态时 3 种控制器的跟踪性能。由图 5 可以看出:本文提出的 fuzzy-LADRC 控制器与传统 PI 控制器、LADRC 控制器相比,几乎没有超调现象,并且调节时间极快 ( $0.005 \text{ s}$ )。这表明, fuzzy-LADRC 控制器具有良好的跟踪性能。

表 1 仿真参数

| 参数                     | 数值  |
|------------------------|-----|
| 直流母线电压/V               | 700 |
| 直流母线侧电容/ $\mu\text{F}$ | 500 |
| 开关频率 $f/\text{kHz}$    | 500 |
| 储能侧电容/ $\mu\text{F}$   | 120 |
| 储能电感/mH                | 2   |
| 负载电阻 $R/\Omega$        | 70  |

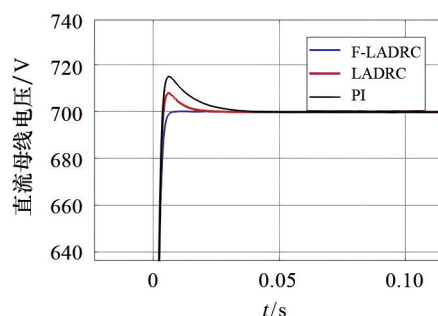


图 5 稳态时 3 种控制器的跟踪性能

### 3.2 不同光照强度对系统鲁棒性的影响

图 6 为光照突变时 3 种控制器的鲁棒性(在  $0.4 \text{ s}$  处加入光照突变,光照强度从  $600 \text{ W/m}^2$  突变至  $1000 \text{ W/m}^2$ )。由图 6 可以看出: fuzzy-LADRC 控制器的电压增量和调节时间显著低于传统 PI 控制器和 LADRC 控制器。当光照强度从  $1000 \text{ W/m}^2$  恢复到  $600 \text{ W/m}^2$  时, fuzzy-LADRC 控制器在电压过冲和暂态恢复时间上仍优于传统 PI 控制器和 LADRC 控制器。这表明,在光照强度发生突变时, fuzzy-LADRC 控制器能够有效抑制其给系统带来的波动。

### 3.3 不同电池温度对系统鲁棒性的影响

图 7 为电池温度变化时 3 种控制器的鲁棒性。由图 7 可以看出:在温度扰动的情況下 3 种控制方式虽都可以保证系统的正常运行,但 fuzzy-LADRC 控制器在电池温度突然下降时,其电压下冲和超调量明显小于传统 PI 控制器和 LADRC 控

制器。这表明,在不同电池温度下, fuzzy-LADRC 控制器能使直流母线电压快速恢复,比其他 2 种方式更能有效地保持储能系统的稳定性。

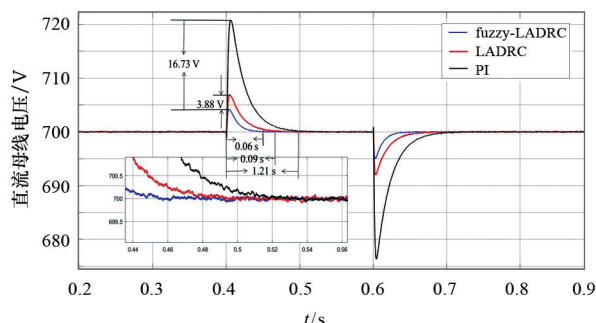


图6 光照突变时3种控制器的鲁棒性

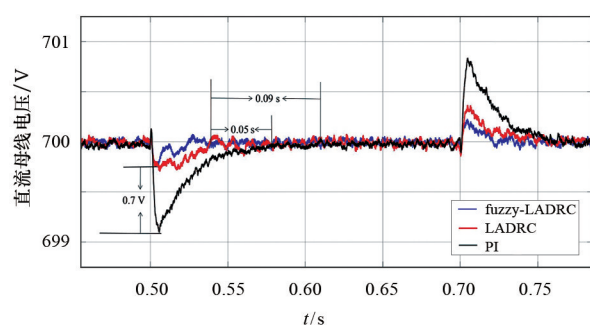


图7 电池温度变化时3种控制器的鲁棒性

### 3.4 不同负载变化对系统鲁棒性的影响

图8为负载变化时3种控制器的鲁棒性(在0.6 s时将电阻由50  $\Omega$ 跳变至70  $\Omega$ )。由图8可以看出:在负载发生跳变的情况下, fuzzy-LADRC 控制器的电压波形范围和调节时间明显优于 PI 控制器和 LADRC 控制器。这表明,在不同负载变化下, fuzzy-LADRC 控制器能够有效抑制负载扰动给系统带来的波动。

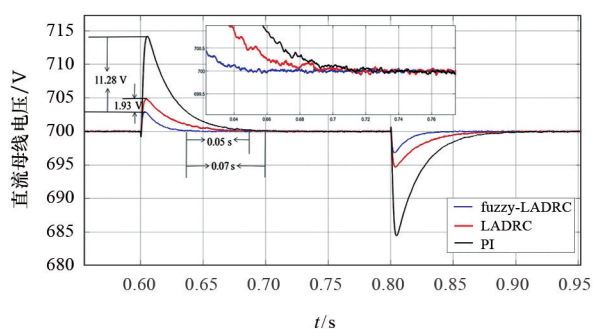


图8 负载变化时3种控制器的鲁棒性

## 4 结论

对本文提出的 fuzzy-LADRC 控制器进行研

究显示,该控制器对光伏储能系统的外部干扰具有良好的鲁棒性,且可提高系统的运行效率;因此,该控制器可为光伏储能系统的设计研究提供良好参考。在今后的研究中,我们将结合其他控制方法以进一步提高系统的控制效率和稳定性。

## 参考文献:

- [1] 邹才能,熊波,薛华庆,等. 新能源在碳中和中的地位与作用[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(2): 411-420.
- [2] CABRANE Z, KIM J, YOO K, et al. HESS-based photovoltaic/batteries/supercapacitors: Energy management strategy and DC bus voltage stabilization[J]. Solar Energy, 2021, 216: 551-563.
- [3] HEIDARY J, GHEISANEJAD M, KHOOBAN M H. Stability enhancement and energy management of AC-DC microgrid based on active disturbance rejection control[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 217: 109105.
- [4] 尹淦,郝继红. 我国太阳能光伏发电技术应用综述[J]. 电力技术, 2009(3): 1-4.
- [5] JAVADI M S, GOUGH M, LOTFI M, et al. Optimal self-scheduling of home energy management system in the presence of photovoltaic power generation and batteries[J]. Energy, 2020, 210: 118568.
- [6] 廖志凌,阮新波. 独立光伏发电系统能量管理控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(21): 46-52.
- [7] HAGHIGHIAN S K, TOHIDI S, FEYZI M R, et al. Design and analysis of a novel SEPIC-based multi-input DC/DC converter[J]. IET Power Electronics, 2017, 10(12): 1393-1402.
- [8] 黄炼,王朴,武建文,等. 分布式光-储发电系统的双向 DC-DC 非线性控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(S2): 10-18.
- [9] 张卫平. 开关变换器的建模与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006: 5-10.
- [10] 杨惠,骆姗,孙向东,等. 光伏储能双向 DC-DC 变换器的自抗扰控制方法研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(5): 1342-1350.
- [11] 周雪松,谢冰杰,马幼捷,等. 基于改进自抗扰的双向 DC-DC 变换器控制策略研究[J]. 电气传动, 2022, 52(15): 10-16.
- [12] 刘向杰,周孝信,柴天佑. 模糊控制研究的现状与新发展[J]. 信息与控制, 1999, 28(4): 283-292.
- [13] FOSSATI J P, GALARZA A, MARTIN-VILLATE A, et al. Optimal scheduling of a microgrid with a fuzzy logic controlled storage system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 68: 61-70.