

基于变论域模糊逻辑的直流母线控制策略

杨旭东^{1,2}, 刘春江^{1,2}, 刘叶瑞^{1,2}, 刘孝敏^{1,2}

(1. 甘肃自然能源研究所, 甘肃 兰州 730046;

2. 甘肃省低碳建筑工程研究中心, 甘肃 兰州 730046)

摘要:针对分布式光伏出力不稳定造成的直流母线电压、功率波动的问题,以储能系统双向DC-DC变换器为研究对象,提出一种改进的变论域模糊控制策略,该方法通过光照强度及母线电压的变化修正论域的上、下限,提高PI控制的响应速度及动态稳定性。此外,为提高分布式光伏电站出力的利用率及延长储能系统的寿命,提出通过光照强度及储能系统的荷电状态(SOC)实现储能系统和市电系统的切换。最后通过 Matlab/Simulink 软件仿真,验证所提控制策略的有效性及其稳定性。

关键词:分布式光伏;双向DC-DC变换器;市电;变论域模糊控制;光照强度;直流母线

中图分类号:TM743 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed26696

DC Bus Control Strategy Based on Variable Domain Fuzzy Logic

YANG Xudong^{1,2}, LIU Chunjiang^{1,2}, LIU Yerui^{1,2}, LIU Xiaomin^{1,2}

(1. Gansu Natural Energy Research Institute, Lanzhou 730046, Gansu, China;

2. Gansu Province Low-carbon Building Engineering Research Center, Lanzhou 730046, Gansu, China)

Abstract: Aiming at the problem of DC bus voltage and power fluctuations caused by the instability of distributed photovoltaic output, an improved variable domain fuzzy control strategy was proposed for bidirectional DC-DC converters in energy storage systems. The method corrected the upper and lower limits of the domain through changes in light intensity and bus voltage, improving the response speed and dynamic stability of PI control. In addition, to improve the utilization rate of distributed photovoltaic power plant output and extend the life of energy storage systems, it was proposed to switch between energy storage systems and mains power systems through light intensity and state of charge (SOC) of the energy storage system. Finally, the effectiveness and stability of the proposed control strategy were verified through Matlab/Simulink software simulation.

Key words: distributed photovoltaics; bidirectional DC-DC converter; municipal power supply; variable domain fuzzy control; light intensity; DC bus

近年来,随着低碳“光储直柔”(photovoltaics, energy storage, direct current and flexibility, PEDF)快速发展,低压直流系统较传统交流系统的优势越发明显^[1-2]。PEDF包含分布式光伏、储能系统、市电系统及接入母线的不同类型负载,因此,直流母线的电压、功率状态是判别PEDF稳定的根本依据^[3]。储能系统通过双向DC-DC变换器,完成充、放电过程,从而平衡分布式光伏出力和负载功率,进而达到“削峰填谷”的作用,保证直流母线电压及功率的稳定^[4]。当光伏出力不足,且

储能系统自身电量不足或出现故障时,由市电系统完成以上补偿控制。因此,优化双向DC-DC变换器、市电整流-逆变控制器的控制方式,减少分布式光伏功率波动对母线电压稳定性的影响,提高直流系统的动态稳定性,是目前诸多学者的研究重点。

目前,DC-DC变换器常用的控制方式有PI控制、自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)、模型预测控制(model predictive control, MPC)、模糊理论结合PI控制等。PI控制一

基金项目:甘肃自然能源研究所青年科技创新计划项目(2023QN-01);甘肃自然能源研究所科技重大专项(2024ZD-01)

作者简介:杨旭东(1989—),男,硕士研究生,助理研究员,主要研究方向为太阳能自动化控制,Email: yangibm1@163.com

通讯作者:刘春江(1991—),男,本科,助理工程师,主要研究方向为太阳能及节能技术,Email: 840021271@qq.com

般采用双闭环控制,传统的双闭环控制以母线电压为外环控制,以变换器的电感电流为内环控制,应用经典控制理论,通过PI控制调节使微电网稳定运行,但双闭环控制的参数不可动态调整、动态响应较慢、对外界扰动抑制和自我恢复能力较差,不适合非线性时变的系统控制^[5]。ADRC的核心是扩张状态观测器(extended state observer, ESO), ESO对扰动的估计精度决定了ADRC的鲁棒性。ADRC的优势在于,其不需要被控对象的精确模型,利用ESO的观测值在前馈通道进行补偿,可以提升系统的快速性和控制精度。文献[6]应用滑模自抗扰控制原理,设计了储能系统直流母线电压稳定控制器,减少了可调参数数量并提高了系统的鲁棒性,但滑模控制固有的抖振现象会产生不利影响。MPC对变换器控制参数设计要求较低,可削弱延时对系统的影响。但是对扰动信号的抑制能力较弱,尤其是当扰动形式未知时,仅依靠MPC难以实现母线电压稳定^[7]。

模糊控制是一种基于操作人员经验而设计的智能控制算法,其特点在于不依赖被控对象精确数学模型,易于实现,尤其是在处理被控对象的时变性及非线性时,具有较强的适用性,模糊控制与传统PID相结合的模糊PID控制已经应用于很多专业方向^[8-10]。由于新能源出力的波动较大,使得母线电压、功率与参考值的误差及误差变化率较大,而传统模糊PID控制的论域固定不变,造成控制系统的精度明显下降^[11]。为了克服模糊控制的缺陷,文献[12]提出了变论域模糊控制,其中详细阐述了论域与误差、误差变化率大小呈正相关。该控制思路可有效降低模糊控制过度依赖专家经验的问题,并能有效改变论域的变化范围。变论域的核心问题是量化因子的构造,而构造量化因子需要选取传统函数并设置相关参数,由于量化因子并没有实际的物理意义,故参数设定时,也需要依赖专家经验,与此同时,传统函数的通用性较差。此外,随着人工智能算法的发展,神经网络^[13]、粒子群算法^[14]、遗传算法^[15]等逐渐被用于优化量化因子的参数,但在复杂控制系统中,此类方法的在线计算成本很高,易导致严重的时滞现象。

针对以上问题,本文提出基于变论域模糊逻辑的直流母线控制策略,为避免低幅值、高频分量的影响,不增加微分量参与控制,以母线电压

及辐照度变化量作为输入变量,设计一级、二级模糊控制器。其中一级模糊控制器用于论域修正,通过反馈误差的大小调整升缩因子,改变论域,提高控制精度。二级模糊控制器用于储能系统电压外环控制,保证辐照度大范围变化时,控制系统的稳定运行。此外,设定母线电压波动阈值,并结合储能荷电状态(state of charge, SOC)完成储能系统与市电的切换。最后,通过仿真实验验证本文控制策略的有效性。

1 系统结构

1.1 系统等效模型

系统等效模型如图1所示,光伏阵列通过Boost升压电路与直流母线连接,采用最大功率点追踪(maximum power point tracking, MPPT)控制^[16],最大程度利用太阳能,市电通过三相PWM整流-逆变电路^[17]与直流母线通过可控开关 S_1 连接,完成整流-逆变双向传输,储能系统通过Boost-Buck电路与直流母线电压通过可控开关 S_2 连接,实现充放电功率双向控制。

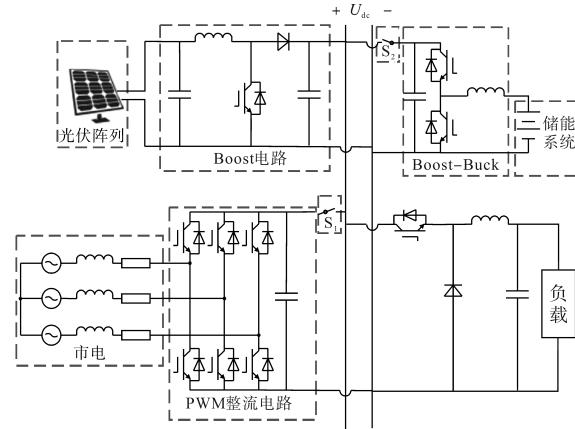


图1 系统结构图

Fig.1 System structure chart

1.2 系统工作原理

为保证母线电压稳定,通过母线电压的偏移量设定母线电压的上限阈值 U_{DC}^{max} 、下限阈值 U_{DC}^{min} 和母线电压参考值 U_{DC}^{ref} 之间的关系为

$$U_{DC}^{min} < U_{DC}^{ref} < U_{DC}^{max} \quad (1)$$

$$U_{DC}^{max} = (1+2\%)U_{DC}^{ref} \quad (2)$$

$$U_{DC}^{min} = (1-2\%)U_{DC}^{ref} \quad (3)$$

此外,为提高储能系统使用寿命,设定储能系统的SOC值小于等于30%时,停止放电切换至市电运行。

结合以上约束条件,将系统运行工况划分为

5种工作模式:

工况1:光伏出力充足+储能充电模式。当光伏出力充足时,光伏Boost电路采用MPPT控制驱动,储能系统切换至Buck电路,进入充电模式,吸收系统盈余功率。当储能系统满电后,光伏Boost电路切换至恒压模式运行。

工况2:光伏出力不足+储能放电模式。当光伏出力不足时,光伏Boost电路继续采用MPPT控制驱动,储能系统切换至Boost电路,进入放电模式,补偿系统缺失功率。

工况3:光伏无出力+储能放电模式。储能系统切换至Boost电路,由储能系统单独完成系统供电。

工况4:光伏出力不足+市电补充模式(储能 $SOC \leq 30\%$)。当光伏出力不足,储能系统 $SOC \leq 30\%$,储能系统退出运行,市电系统投入运行,由市电三相整流电路补偿系统缺失功率。

工况5:光伏无出力+市电供电模式(储能 $SOC \leq 30\%$)。由市电三相整流电路补偿系统缺失功率。

系统控制策略流程图如图2所示。

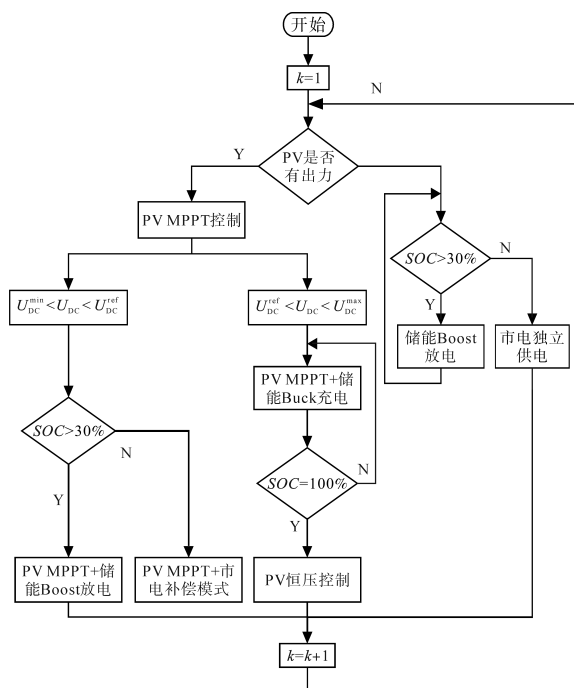


图2 控制策略流程图

Fig.2 Control strategy flow chart

2 储能系统变论域模糊控制策略

本文提出变论域模糊控制,一级模糊控制器用于实时调整量化因子,二级模糊控制器用于母

线电压外环控制,储能系统电感电流的内环控制采用经典PI控制。

以往的传统模糊控制通常将误差信号和误差信号的微分作为模糊推理的输入变量,PI中导数因素易引入高频测量噪声,并且滤波时间常数难以确定^[18]。针对以上问题,本文设计一种以母线电压变化量 e 和辐照度变化量 i 作为模糊推理输入变量的模糊控制器。其中Boost升压电路的输出电压与母线电压相同时的辐照度 i_{ref} 作为参考辐照度,将实时辐照度与 i_{ref} 差值定义为 i 。将母线实时电压 U_{dc} 与母线参考电压 U_{DC}^{ref} 差值定义为 e 。选取 e 和 i 作为输入变量,可有效避免辐照度变化引起母线电压波动的复杂函数推理过程。此外,该控制器为没有导数分量的PI结构,以确保闭环控制系统的稳定性。变论域模糊控制器结构示意图如图3所示。

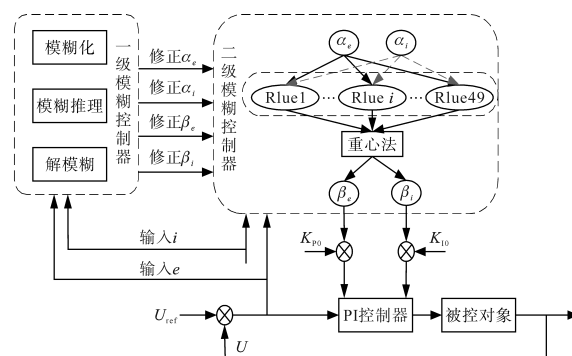


图3 变论域模糊控制器结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of variable domain fuzzy controller structure

2.1 模糊双闭环控制简介

模糊控制的整体控制思路可分为输入变量模糊化、模糊规则推理以及输出变量解模糊3个部分,其中输入变量模糊化是通过量化因子同比例归一化输入变量并根据隶属度函数将真实的确定量输入转换为模糊矢量,再根据模糊语句制定模糊规则,推理出输出变量的模糊矢量,如If M_1 is A_1 and M_2 is A_2 then N_1 is B_1 , N_2 is B_2 (M_1, M_2 为双变量输入, N_1, N_2 为双变量输出)。最后将输出变量的模糊矢量解模糊化,并通过量化因子同比例归一化实际控制量。需要特别说明的是,模糊控制输入、输出变量都需要建立隶属函数,且隶属函数的个数决定系统控制精度,因此,模糊控制的仿真时长将远超传统PI控制,但由于传统PI双闭环控制中,电压外环控制精度低于电流内环控制,综上所述,本文在设计模糊双闭环控制中,电压外环采用模糊控制,电流内环采用传统

PI控制,这样既可提高系统精度,也可缩短仿真时长。

2.2 变论域模糊控制

本文在设计模糊控制时,由于光伏出力导致母线电压波动的不确定性,当量化因子选取较小, e 与 i 在固定论域上符合的隶属度函数较少,造成动态过程中可用规则较少,控制精度下降。若增加模糊控制规则或隶属度函数,则又增加了设计复杂性,导致系统仿真时长增加。因此,在规则数量及隶属度函数不增加的情况下使论域压缩(如图4所示),等同于 e 和 i 局部可用规则数量增加,控制精度得到提高。

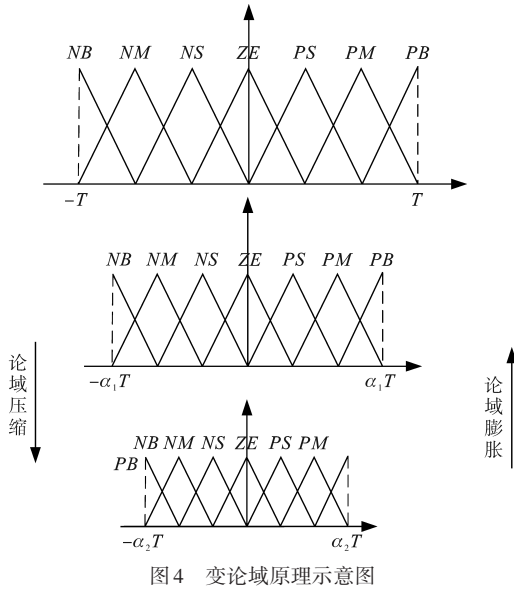


图4 变论域原理示意图

2.2.1 量化因子模糊控制(一级模糊控制器)

传统的变论域设计时,常选取经验函数构造动态变化的量化因子^[19],而经验函数的相关参数则需要多次试验确定,其没有明确的物理意义。此外,函数法的通用性较差,尤其是在处理不确定性的物理量方面,控制效果欠佳。因此,本文采用模糊逻辑推理机制设计动态量化因子,通过模糊语言刻画论域的动态调整机制。该方法仅需掌握论域变化大致规律,不需要构建精确的数学模型,从而有效规避了传统方法中的模型构建与参数优化难题。模糊控制下的量化因子动态调整策略具有良好的通用特性,能够有效应对具有不确定特征的变论域控制场景,特别适用于复杂系统的自适应调控需求。鉴于以上分析,本文输入变量 e, i 设置7个模糊子集:NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、ZE(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大),采用三角型隶属函数,如图5a所示。

输出量为电压误差伸缩因子 α_e 和辐照度误差伸缩因子 α_i ,将其划分为4个模糊集合:Z(零)、S(小)、M(中)、B(大),隶属函数如图5b所示。论域收缩除考虑精度外,应避免同时激活太多规则,影响计算效率,因此输出的伸缩因子 α_e 和 α_i 共用相同的模糊推理规则(如表1所示)。制定伸缩因子模糊推理规则的基本要求是:当双输入变化量较大时,扩展论域,加快收敛速度;当双输入变化量较少时,收缩论域,增加控制规则,提高控制精度和稳定性。最后,保证系统仿真效率,输出量化因子采用文献[12]中公式(22)。输入、输出的曲面关系如图6所示。

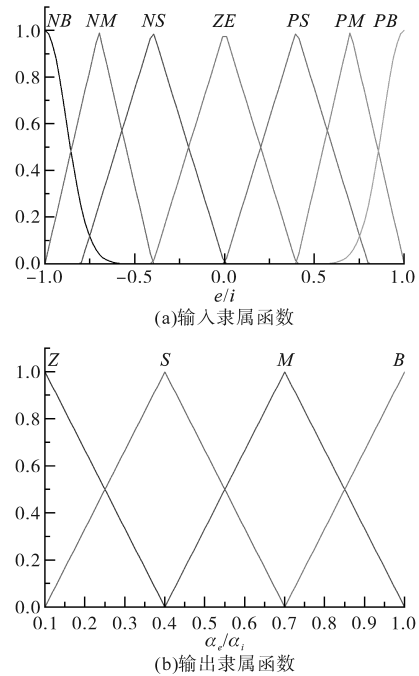


图5 一级模糊控制器输入、输出隶属函数

Fig.5 First level fuzzy controller input and output membership functions

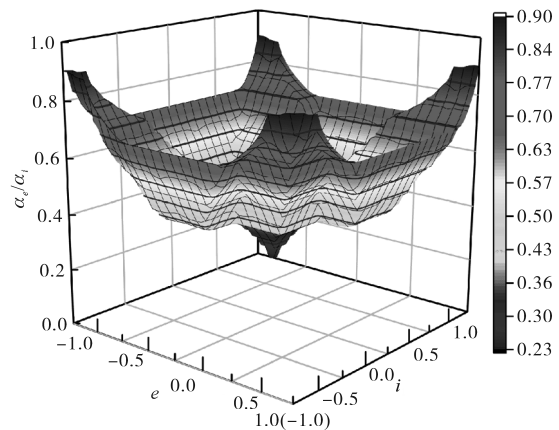


图6 一级模糊控制器输入 e, i 与输出 α_e 和 α_i 曲面图

Fig.6 First level fuzzy controller input e, i and output α_e and α_i surface diagrams

表1 一级模糊控制器输入量化因子 α_e 和 α_i 模糊推理规则

Tab.1 Fuzzy inference rules for input quantization factors α_e and α_i of the first level fuzzy controller

α_e, α_i	e						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
α_e	NB	B	B	M	M	M	B
	NM	B	M	S	S	M	B
	NS	M	M	S	S	S	M
α_i	ZE	M	S	S	Z	S	M
	PS	M	S	S	S	S	M
	PM	M	M	M	S	M	M
	PB	B	B	M	M	M	B

2.2.2 电压外环模糊控制(二级模糊控制器)

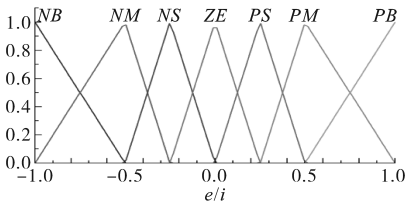
总结以往控制系统的设计经验,主要考虑PI控制器参数对动态和静态控制性能的影响,可以得到 e, i 与 $\Delta K_p, \Delta K_i$ 的关系大致如下:

1)当偏差 e, i 较大时,说明此时辐照度较强,且母线电压远大于参考值, ΔK_p 应取较大值,加大系统响应速度, ΔK_i 取0,避免积分控制影响比例控制出现系统过大超调。

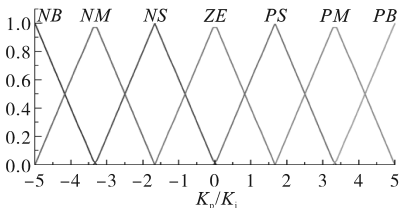
2)当偏差 e, i 中等时, ΔK_p 应取中等值,降低系统响应速度,减少超调, ΔK_i 的取值应中等,降低余差。

3)当偏差 e, i 较小时, ΔK_p 应取较小值, ΔK_i 应取较大值,使系统具有良好的稳态性能,消除余差。

综上所述,本文在电压外环模糊控制器设计时, e 与 i 和 ΔK_p 与 ΔK_i 的隶属函数都采用三角形,且基础模糊论域都是 $[-5, 5]$, $e, i, \Delta K_p$ 和 ΔK_i 的模糊子集为NB(负大),NM(负中),NS(负小),ZE(零),PS(正小),PM(正中),PB(正大),隶属函数如图7所示。模糊推理规则如表2所示,输入、输出的曲面关系如图8所示。



(a)输入隶属函数



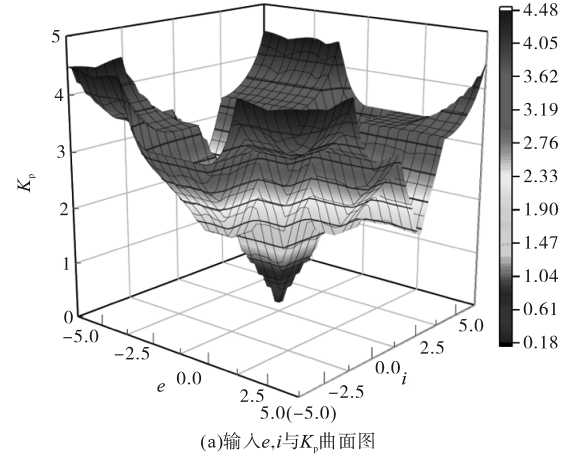
(b)输出隶属函数

图7 二级模糊控制器输入、输出隶属函数
Fig.7 Second level fuzzy controller input and output membership functions

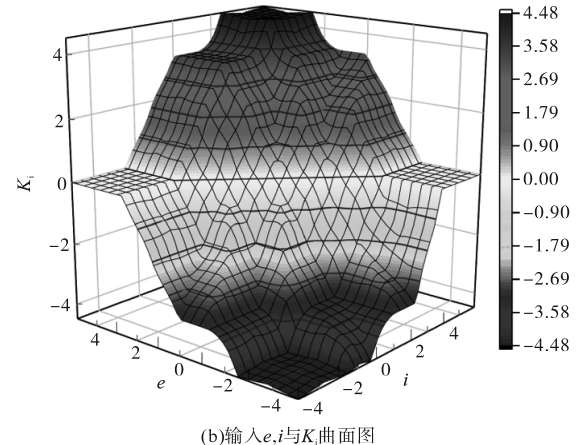
表2 二级模糊控制器 $\Delta K_p, \Delta K_i$ 模糊推理规则

Tab.2 Fuzzy inference rules for secondary fuzzy controller ΔK_p and ΔK_i

$\Delta K_p / \Delta K_i$	e						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
ΔK_p	NB	PB/NB	PB/NB	PM/NM	PM/NM	PM/NS	PB/ZE
	NM	PB/NB	PM/NB	PS/NM	PS/NS	PM/NS	PM/ZE
	NS	PM/NB	PM/NM	PS/NS	PS/NS	PS/ZE	PM/PS
ΔK_i	ZE	PM/NM	PS/NM	PS/NS	ZE/ZE	PS/PS	PS/PM
	PS	PS/NM	PS/NS	PS/ZE	PS/PS	PS/PS	PS/PM
	PM	PM/ZE	PM/ZE	PM/PS	PS/PS	PM/PM	PM/PB
	PB	PB/ZE	PB/ZE	PB/PS	PM/PM	PM/PM	PB/PB



(a)输入 e, i 与 K_p 曲面图



(b)输入 e, i 与 K_i 曲面图

图8 二级模糊控制器输入 e, i 与输出 K_p, K_i 曲面图
Fig.8 Second level fuzzy controller input e, i and output K_p and K_i surface diagrams

3 算例分析

为验证本文所提算法的有效性,在 Matlab/Simulink 仿真软件搭建光伏、储能、市电系统验证对直流母线的控制,如图9所示。储能系统DC-DC变换器采用本文所提的变论域模糊控制,一级模糊控制器用于量化因子的动态调整,二级模糊控制器用于储能系统电压外环控制。

系统初始条件设计:环境温度25℃,蓄电池

初始 $SOC=30.002\%$, 储能系统 $SOC=30\%$ 作为储能、市电切换条件。母线电压额定值 800 V 。

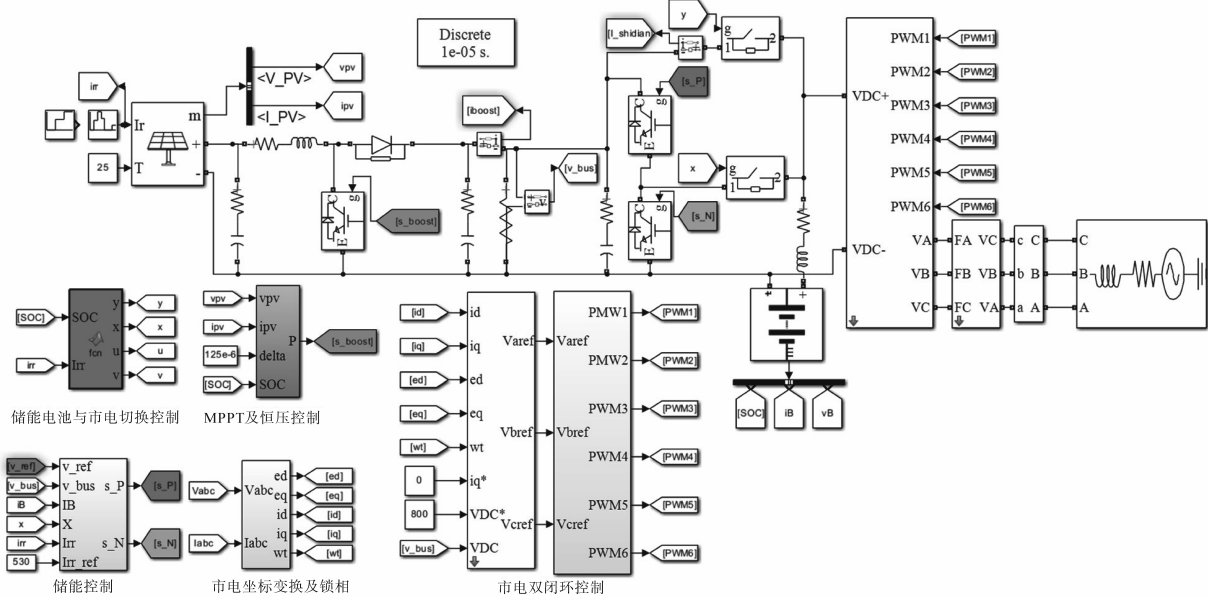


图9 系统仿真模型

Fig.9 System simulation model

3.1 算法比对

为验证本文所提算法的控制精度,与传统模糊控制进行比对,分别仿真 0 s 辐照度为 0 , 初次上电(工况3), 0.5 s 辐照度上升至 300 W/m^2 (工况2)以及 1 s 辐照度上升至 600 W/m^2 (工况1), 光伏输出功率如图10所示, 母线电压波动情况如图11所示。

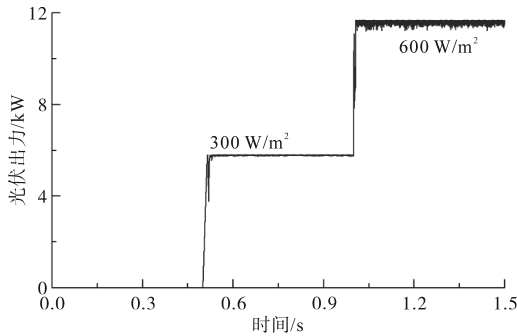


图10 光伏输出功率(算法比对)

Fig.10 PV output power (algorithm comparison)

由图11可得,初次上电,本文方法母线最大幅值为 800.54 V , 调节时间约为 0.075 s , 传统模糊控制最大幅值为 804.57 V , 调节时间 0.16 s , 本文方法明显好于传统模糊控制算法。其原因在于,初次上电误差 e 为最大值,传统模糊控制为保证 e 落入固定论域时,必须将量化因子适当放大,无形中减少了模糊控制规则,而本文所提方法可实时调整量化因子,量化因子随误差减小而减小,相当于动态增加了模糊控制规则,故控制精度明显好于传统模糊控制算法。此外,本文在光伏系

统出力不足+储能系统放电补偿模式及光伏系统出力充足+储能系统充电模式下控制精度和调节时间均好于传统模糊控制。

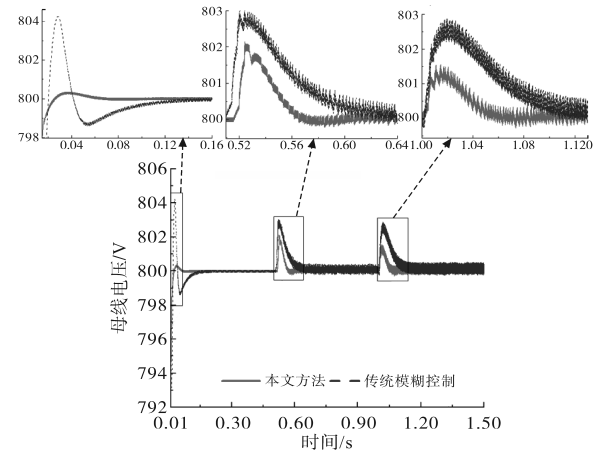


图11 母线电压波动(算法比对)

Fig.11 Bus voltage fluctuation (algorithm comparison)

3.2 5种工况仿真分析

为验证本文算法的完整性,分别仿真不同辐照度下系统工况切换的正确性以及母线电压、功率补偿的稳定性。辐照度波动光伏出力如图12所示,并将 3.5 s 仿真时间划分为7个时段($x_1 \sim x_7$ 时段)进行分析。

母线电压波动、系统功率波动、储能 SOC 变化分别如图13~图15所示。 x_1 时段($0\text{ s} \sim 0.5\text{ s}$)对应工况3, 储能放电功率为 10.7 kW , SOC 下降最快, 曲线斜率为 -2 ; x_2 时段($0.5\text{ s} \sim 1.0\text{ s}$)辐照度上升至 400 W/m^2 , 系统切换至工况2运行, 光伏出力

为 7.6 kW,储能系统补偿功率为 3.1 kW,此时 SOC 下降速率变慢,曲线斜率为 -0.56; x_3 时段(1.0 s—1.5 s)辐照度上升至 800 W/m²,系统切换至工况 1 运行,光伏出力上升至 15.5 kW,储能系统转为充电模式,功率为 4.7 kW, SOC 上升,曲线斜率为 0.84; x_4 时段(1.5 s—2.0 s)辐照度下降至 500 W/m²,系统重新切换至工况 2 运行,光伏出力下降至 9.7 kW,储能转为放电模式,放电功率为 1.1 kW, SOC 下降,曲线斜率为 -0.22; x_5 时段(2.0 s—2.52 s)辐照度下降为 0,系统切换至工况 3 运行,储能放电功率 10.7 kW, SOC 曲线斜率降至 -1.98; x_6 时段(2.52 s—3.0 s),由于储能系统 SOC≤30%,系统切换至工况 5,储能系统停运,由市电单独运行,市电功率为 10.7 kW; x_7 时段(3.0 s—3.5 s),系统切换至工况 4 运行,光伏出力为 3.8 kW,市电补偿功率为 3.8 kW。

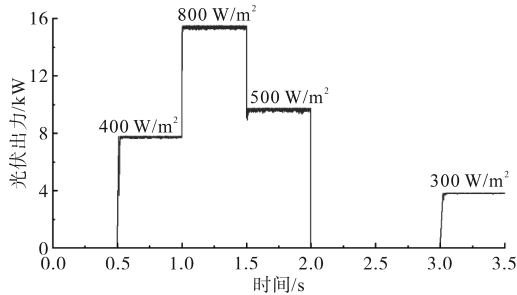


图 12 光伏输出功率(5种工况)

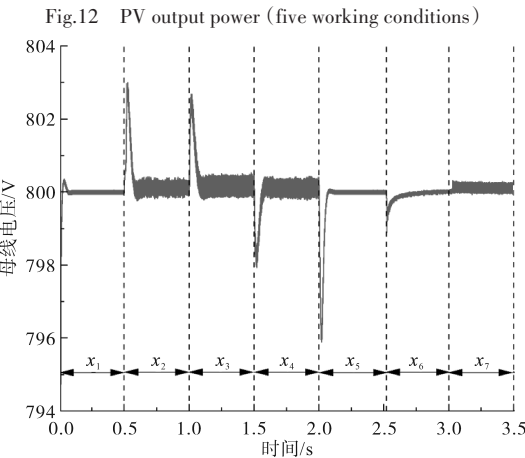


图 13 母线电压波动(5种工况)

不同工况切换时,母线电压超调值和调节时间如表 3 所示。

由以上分析及数据可得,本文所提储能系统双模糊控制,不仅动态响应较快且超调量较少,与此同时,储能系统充、放电功率稳定,满足正常工作的功率需求。此外,针对不同工况,储能系统与市电系统的切换平滑,可保证系统稳定运行。

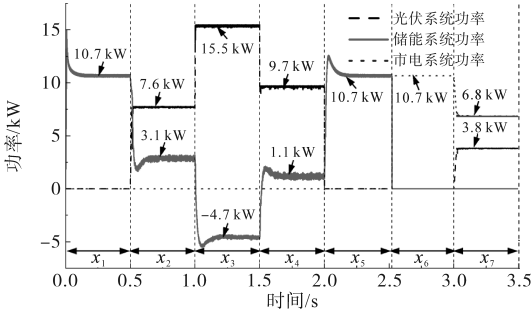


图 14 系统功率波动

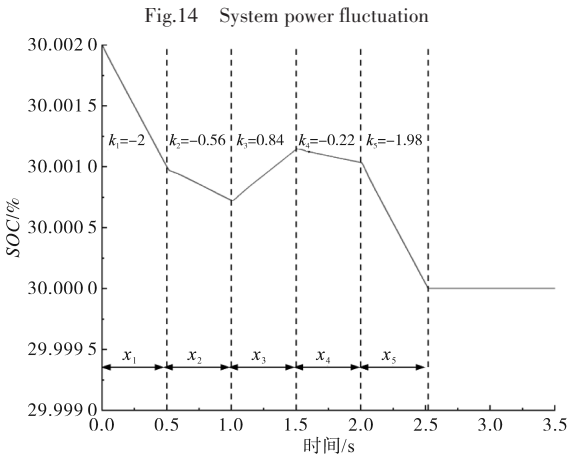


图 15 储能 SOC 随时间变化

Fig.15 Changes in energy storage SOC over time

表 3 辐照度变化母线电压输出特性

Tab.3 Output characteristics of irradiance variation bus voltage

辐照度变化	运行工况切换	超调值/V	调节时间/s
0.5 s: 0~400 W/m ²	工况 3—工况 2	802.98	0.13
1.0 s: 400~800 W/m ²	工况 2—工况 1	802.68	0.12
1.5 s: 800~500 W/m ²	工况 1—工况 2	797.93	0.13
2 s: 500~0 W/m ²	工况 2—工况 3	795.89	0.12
3 s: 0~300 W/m ²	工况 3—工况 5 (2.52 s) 工况 5—工况 4	798.91 800.32	0.16 0.11

3.3 系统高频噪声影响

为充分考虑系统实际运行时,外界环境及测量、控制设备(如传感器、PLC 等)可能带来的高频噪声污染,本仿真通过高斯白噪声对系统的影响,分析所提控制策略对噪声抑制的有效性。加入白噪声后,辐照度按图 10 波动,系统母线电压变化如图 16 所示。

在噪声影响下传统模糊控制对于母线电压的控制欠佳,母线电压出现较大振幅,母线电压

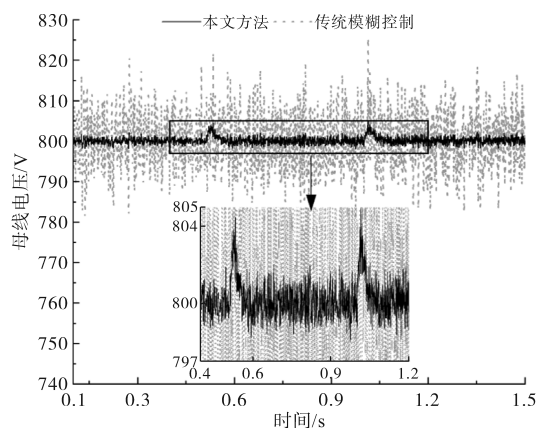


图16 加入噪声后母线电压变化

Fig.16 Changes in bus voltage after adding noise

超调严重。而本文方法在同等噪声影响下母线电压振幅较小,且辐照度如图10变化时,保持直流母线超调值小于5 V,保证系统正常运行。

3.4 变换器电路参数偏移影响

考虑到制造工艺、环境温度波动及元器件老化等问题,变换器电路中电感的实际值常偏离标称值。为模拟此类问题,根据图10辐照度变化,将参数摄动范围设定为 $\pm 10\%$ 。

电感参数对母线电压的影响如图17所示, $\pm 10\%$ 的电感偏移值下的母线电压动态响应总体相似。在0.5 s辐照度突变时,+10%电感偏差导致母线电压超调略高于额定值,而-10%偏差则略低。当1.0 s辐照度变化时,不同电感值仅引起纹波电压差异,系统调节时间相近,超调量稳定在3 V左右。综上,本文所提控制算法能有效抑制实际应用中电路元件的参数偏移问题。

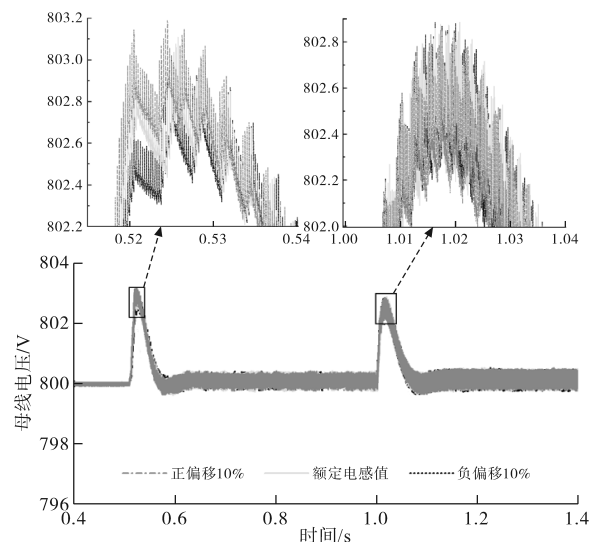


图17 电感参数对母线电压的影响

Fig.17 The influence of inductance parameters on bus voltage

4 结论

本文构建了基于辐照度与直流母线电压双输入变量的变论域模糊控制器。通过动态调整模糊控制论域范围,实现了储能系统在多种工况下的母线电压波动抑制与功率动态平衡控制。

相较于传统模糊控制器,本文所提出的变论域模糊控制器在系统初始上电阶段控制精度较高,有效降低系统启动阶段的电压冲击。

该控制架构通过实时协调储能变换器的功率分配与电网接口切换,在光照突变场景下,系统电压超调值小,调节时间短,控制策略鲁棒性强。该方法可为高渗透率新能源接入的直流微电网控制提供可靠参考。

参考文献

- [1] 汪超,贾潇雅,赵鹏,等. 建筑“光储直柔”系统中直流家用电器技术及标准进展研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45 (5): 369-379.
Wang Chao, Jia Xiaoya, Zhao Peng, et al. Research progress on technology and standard of DC household appliances in PEDF building[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2024, 45 (5): 369-379.
- [2] 赵宇明,郭佩乾,袁志昌,等. 建筑直流配电系统运行控制策略与示范应用[J]. 南方电网技术, 2023, 17(1): 63-72.
Zhao Yuming, Guo Peiqian, Yuan Zhichang, et al. Operation control strategy and demonstration application of DC building distribution and utilization system[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(1): 63-72.
- [3] 郭睿恒,黄文焘,余墨多,等. 独立直流微网电压动态轨迹神经网络优化控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(16): 6404-6416.
Guo Ruiheng, Huang Wentao, Yu Moduo, et al. Neural network optimal control strategy for voltage dynamic track of islanding DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44 (16): 6404-6415.
- [4] 代丽,王君瑞,谭露,等. 基于自适应下垂控制的光储直流微网控制策略研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(8): 154-163.
Dai Li, Wang Junrui, Tan Lu, et al. Research on control strategy of PV storage DC microgrid based on adaptive droop control [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2024, 45(8): 154-163.
- [5] Jia L, Sun X, Zheng Z, et al. Multimode smooth switching strategy for eliminating the operational dead zone in non-inverting Buck-Boost converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(3): 3106-3113.
- [6] 戴腾飞,茅靖峰,吴爱华,等. 分布式光储直流微电网滑模自抗扰鲁棒运行控制[J]. 可再生能源, 2022, 40(11): 1505-1514.

- Dai Tengfei, Mao Jingfeng, Wu Aihua, et al. Sliding mode active disturbance rejection robust operation control for distributed photovoltaic and energy storage DC microgrid[J]. Renewable Energy Resources, 2022, 40(11): 1505–1514.
- [7] Zeng Jianwu, Zhang Zhe, Qiao Wei. An interconnection and damping assignment passivity-based controller for a DC-DC boost converter with a constant power load[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(4): 2314–2322.
- [8] 刘永康, 李靖, 吕楠, 等. 基于模糊控制的燃料电池余热回收控制策略研究[J]. 电气工程学报, 2026, 21(3): 419–427.
- Liu Yongkang, Li Jing, Lü Nan, et al. Study on fuel cell waste heat recovery control strategy based on fuzzy control[J]. Journal of Electrical Engineering, 2026, 21(3): 419–427.
- [9] 吴文进, 郭海婷, 苏建徽, 等. 基于自适应模糊PID算法的锂电池组双层均衡控制[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(2): 111–117.
- Wu Wenjin, Guo Haiting, Su Jianhui, et al. Dual-layer equalization control of lithium batteries based on an adaptive fuzzy PID algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(2): 111–117.
- [10] 常天奇, 田亮, 冯海, 等. 基于模糊自整定串级PID的空冷型PEMFC温度控制系统的设计[J]. 太阳能学报, 2025, 46(2): 156–164.
- Chang Tianqi, Tian Liang, Feng Hai, et al. Design of air-cooled PEMFC temperature control system based on fuzzy self-tuning cascade PID[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2025, 46(2): 156–164.
- [11] Zhang H, Zhang R, He Q, et al. Variable universe fuzzy control of high-speed elevator horizontal vibration based on firefly algorithm and backpropagation fuzzy neural network[J]. IEEE Access, 2021, 9: 57020–57032.
- [12] Li H X, Miao Z H, Lee E S. Variable universe stable adaptive fuzzy control of a nonlinear system[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2002, 44(5/6): 799–815.
- [13] Pang H, Liu F, Liu X. Enhanced variable universe fuzzy control for vehicle semi-active suspension systems[J]. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 2016, 31(6): 2999–3006.
- [14] 孙国鑫, 余永恒, 吴林锋, 等. 基于变论域模糊控制的复合供暖系统温度控制研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(9): 435–441.
- Sun Guoxin, Yu Yongheng, Wu Linfeng, et al. Research on temperature control of composite heating system based on fuzzy control of variable domain domain[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(9): 435–441.
- [15] 张玉, 杨宏万, 王鹏. 自适应遗传模糊双闭环控制的微电网母线稳压[J]. 计算机仿真, 2023, 40(1): 107–111.
- Zhang Yu, Yang Hongwan, Wang Peng. Microgrid bus voltage stabilization based on adaptive genetic fuzzy double closed-loop control[J]. Computer Simulation, 2023, 40(1): 107–111.
- [16] 邢珊珊, 田素立, 王振华, 等. 光伏MPPT系统电压控制器的优化设计[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 114–118.
- Xing Shanshan, Tian Suli, Wang Zhenhua, et al. Optimized design of the voltage controller of PV MPPT system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 114–118.
- [17] 金申义. 三相电压型PWM整流器及其控制策略研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2019: 9–11.
- Jin Shenyi. Research on control strategy of three-phase voltage source PWM rectifier[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2019: 9–11.
- [18] 冯陈, 刘朝爽, 吴春旺, 等. 抽水蓄能机组新型变工况自适应模糊控制策略[J]. 电网技术, 2024, 48(7): 2815–2822.
- Feng Chen, Liu Chaoshuang, Wu Chunwang, et al. Innovative adaptive fuzzy control strategy for pumped storage units under variable operating conditions[J]. Power System Technology, 2024, 48(7): 2815–2822.
- [19] 张新荣, 康龙, 唐家朋, 等. 基于变论域模糊多参数自整定PID控制的智能挖掘机轨迹跟踪[J]. 中国公路学报, 2023, 36(2): 240–250.
- Zhang Xinrong, Kang Long, Tang Jiapeng, et al. Trajectory tracking of intelligent excavator using variable universe fuzzy multi-parameter self-tuning PID control[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(2): 240–250.

收稿日期: 2025-07-01

修改稿日期: 2025-09-16