DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)08-0060-06

基于模糊反馈的光伏发电系统功率波动自动化控制方法

周 涛, 徐小明, 魏兆成, 陈拾聪, 刘 君

(淮南市国家电投新能源有限公司,安徽 淮南 232000)

摘 要:光照强度、环境温度、阴影遮挡等不同影响因素,致使光伏发电系统输出功率具有一定的波动性,威胁电网的稳定运行。为此,提出基于模糊反馈的光伏发电系统功率波动自动化控制方法。构建模糊反馈控制器结构,明确输入与输出变量,并进行模糊化处理;依据系统动态特性制定模糊规则表,设计功率波动控制程序,实现功率波动的实时自动化调节。实验结果表明,所提方法在不同运行状态下均能准确获取控制器输出变量,与系统实际响应高度一致。在正常负荷、轻载负荷和重载负荷3种模式下,系统输出功率保持稳定,功率波动幅度明显降低,频率波动得到有效抑制,具备良好的动态响应能力和鲁棒性。同时,功率跟踪结果验证了该方法在不同负荷条件下的适应性,最大功率点输出与系统状态匹配良好。

关键词:发电功率;光伏发电系统;随机波动;模糊反馈;自动化控制;光伏电池

中图分类号: TN615;TP273;TM762 **文献标志码**: A **文章编号**: 1003-7241(2026)08-0060-06

Automatic control method for power fluctuation in photovoltaic power generation system based on fuzzy feedback

Zhou Tao, Xu Xiaoming, Wei Zhaocheng, Chen Shicong, Liu Jun

(Huainan State Power Investment New Energy Co., Ltd., Huainan 232000, Anhui, China)

Abstract: Due to influencing factors such as light intensity, ambient temperature, and shading, the output power of photovoltaic (PV) power generation systems exhibits certain fluctuations, which threaten the stable operation of the power grid. An automatic control method for power fluctuations in PV systems based on fuzzy feedback is proposed. The structure of the fuzzy feedback controller is constructed, the input and output variables are clearly defined and fuzzified. Based on the dynamic characteristics of the system, fuzzy rule tables are established, and a power fluctuation control program is designed to achieve real-time automatic regulation of power fluctuations. Experimental results show that the proposed method can accurately obtain the controller output variables under different operating conditions, which are highly consistent with the actual system response. Under the three modes of normal load, light load, and heavy load, the system output power remains stable, the amplitude of power fluctuations is significantly reduced, and frequency fluctuations are effectively suppressed, demonstrating good dynamic response capability and robustness. Meanwhile, the power tracking results verify the adaptability of the method under different load conditions, with the maximum power point output matching the system state well.

Keywords: power generation; photovoltaic power generation system; random fluctuations; fuzzy feedback; automation control; photovoltaic cells

全球能源结构转型,光伏发电作为一种清洁、可再生的能源形式,日益受到各国的重视和青睐。光伏发电系统具有无污染、无噪音、资源丰富等优势,因此在全球范围内得到了广泛应用。从本质角度出发,光伏发电系统功率波动主要受到光照强度、环境温度、阴影遮挡等多种因素的影响[1-3]。其中,光照强度的变化是最直接的影响因素,随着日出日落、季节更替以及天气状况的变化,光照强度呈现出较大的波动性。此外,环境温度的变化也会影响光伏电池板的工作效率,进而影响光伏发电系统的输出功率。阴影遮挡则是由建筑物、树木等障碍物引起的,会导致光伏电池板部分区域无法接收到光照,无法达到最佳光伏发电状态,从而导致光伏发电系统产生功率波动现象。在上述多种因素的共同作用下,光伏发电系统输出功率呈现出随机性、不确定性和快速变化的特点。若是将其直接并入大电网,势必会影响大电网运行的稳定性[4]。因此,研究光伏发电系统功率波动控制方法,对于提高电力系统稳定性、促进光伏发电规模化应用具有重要意义。

文献[5]以风电系统为研究对象,深入分析风电特性,确定储能系统的充电和放电区间段,结合储能系统的实时荷电状态,通过模糊控制技术修正ESS的充放电功率,从而达到风电功率波动控制的目的。此种方法以储能系统为核心对风电功率波动进行抑制与控制,但是储能系

收稿日期:2025-03-29;**录用日期**:2025-05-11

基金项目:国家自然科学基金项目(52277124)

作者简介:周 涛(1978—),男,工程师,研究方向为新能源安全技术及应用。

引用本文:周涛,徐小明,魏兆成,等.基于模糊反馈的光伏发电系统功率波动自动化控制方法[J].自动化技术与应用,2026,45(8):60-65.(Zhou Tao, Xu Xiaoming, Wei Zhaocheng, et al. Automatic control method for power fluctuation in photovoltaic power generation[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(8): 60-65.)

统容量有限,无法对大功率波动进行有效的抑制;文献[6]以并网型光伏发电站为研究对象,探究光伏并网传输形式,以滤波电感元件为基础,判定光伏发电行为所属类别,制定功率波动目标,通过功率波动节点预测结果计算控制矢量,从而实现功率波动的平滑控制。此种方法使用了滤波电感元件,其容易受到周围环境因素的影响,致使其测量数据精准度较差,从而影响最终的功率波动控制效果;文献[7]引入样条函数设计了光伏功率平滑控制方法,应用样条函数对功率波动率进行有效地调节,从而实现功率波动的精准控制。此种方法应用的样条函数运算难度较大,致使功率波动控制效率较低;文献[8]以分布式线性开关磁阻波发电系统为研究对象,提出了无通信下垂控制方法。设置适当的补偿器阈值,若总线电压波动超过该阈值,控制回路引入储能单元电压信息,并应用高下垂因子调节母线电压偏差和存储单元的能量不平衡,从而实现发电系统功率波动的有效控制。此种方法间接控制功率波动,只考虑输出电压对功率的影响,忽视了其他影响因素,致使最终的功率波动控制效率较差。为了解决上述方法存在的问题,提出基于模糊反馈的光伏发电系统功率波动自动化控制方法。

1 模糊反馈控制器结构设计

以上述光伏发电系统功率波动特性的分析内容为依据,设计模糊反馈控制器结构,为功率波动控制提供工具支撑[9-10]。

有效结合模糊逻辑与反馈控制原理设计模糊反馈控制器结构,具体如图 1 所示。

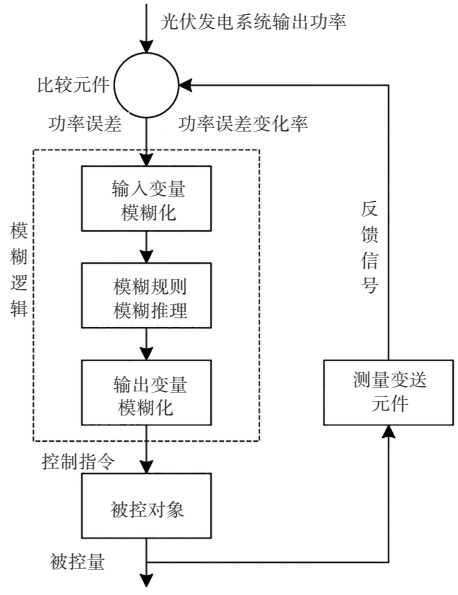


图 1 模糊反馈控制器结构

Fig. 1 The fuzzy feedback controller structure

如图 1 所示,设置当前时刻光伏发电系统功率为 P_t,光伏发电系统期望功率为 $\hat{P}$,通过比较元件计算功率误差与功率误差变化率[11],将其作为模糊反馈控制器的输入变量,计算公式为

$$\begin{cases} E_t = P_t - \hat{P} \\ \mathrm{EC}_t = \dfrac{(P_{t-1} - \hat{P}) - (P_t - \hat{P})}{\Delta T} \end{cases} \tag{1}$$

式中,E_t 表示光伏发电系统功率误差;EC_t 表示光伏发电系统功率误差变化率;P_{t-1} 表示前一时刻光伏发电系统功率;ΔT 表示光伏发电系统功率采样时间间隔。

根据输入变量——功率误差 E_t 与功率误差变化率 EC_t 的特性和控制需求,将其划分为不同的模糊集合[12]。其中,功率误差 E_t 模糊集合为:负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZE)、正小(PS)、正中(PM)与正大(PB);功率误差变化率 EC_t 模糊集合为:负变化(NV)、负变化小(NVS)、负变化中(NVM)、无变化(ZO)、正变化率中(PVM)、正变化率小(PVS)与正变化(PV)[13]。对于每个模糊集合,需要选择合适的隶属度函数来描述输入值属于该集合的程度。选择哪种隶属度函数取决于输入变量的特性和控制需求[14]。对于光伏发电系统功率误差 E_t 与功率误差变化率EC_t 来说,可以选择三角形隶属度函数,使得当输入值接近模糊集合的中心时,隶属度值迅速增加,而当输入值远离中心时,隶属度值迅速减少[15]。三角形隶属度函数如图 2 所示。

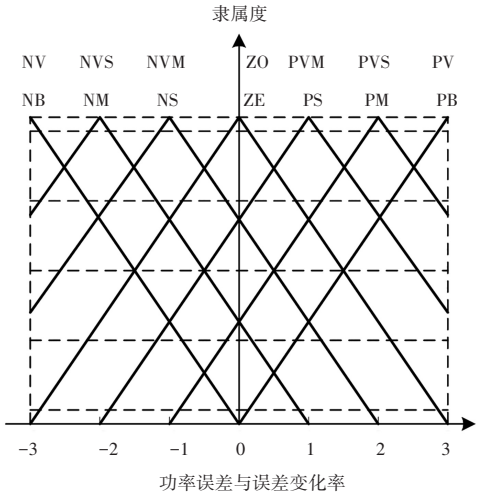


图 2 三角形隶属度函数

Fig. 2 The triangular membership function

模糊反馈控制器输出变量为功率波动控制指令,其主要是用于调整光伏发电系统工作状态的指令,模糊集合为:减小很多(DM)、减小一些(DS)、保持不变(ZR)、增加一些(IS)与增加很多(IM)[16]。输出变量模糊化采用梯形隶属度函数,其原理如图 3 所示。

如图 3 所示,当输出变量 $\zeta_t < A$ 时,模糊化结果为减小很多(DM);当输出变量 $A \leqslant \zeta_t < B$ 时,模糊化结果为减小一些(DS);当输出变量 $B \leqslant \zeta_t < C$ 时,模糊化结果为保持不变(ZR);当输出变量 $C \leqslant \zeta_t < D$ 时,模糊化结果为增加一些(IS);当输出变量 $\zeta_t \geqslant D$ 时,模糊化结果为增加很多(IM)。

根据上述输入变量与输出变量的模糊化结果,制定相应的模糊规则,为最终功率波动自动化控制的实现提供支

撑,具体如表1所示。

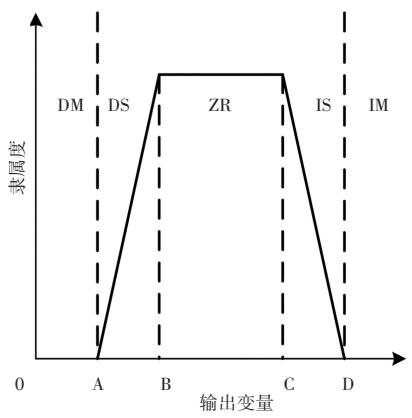


图3 梯形隶属度函数

Fig. 3 The trapezoidal membership function

表1 模糊规则

Tab. 1 Fuzzy rule

模糊规则	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NV	IM	IM	IM	IM	IS	ZR	ZR
NVS	IM	IM	IM	IS	IS	ZR	DS
NVM	IM	IM	IS	IS	ZR	DS	DS
ZO	IM	IS	IS	ZR	DS	DS	DM
PVM	IS	IS	ZR	DS	DS	DM	DM
PVS	IS	ZR	DS	DS	DM	DM	DM
PV	ZR	ZR	DM	DM	DM	DM	DM

上述过程完成了模糊反馈控制器结构的设计,并对输入变量与输出变量进行了确定与模糊化处理,制定了相应的模糊规则表,为最终研究目标的实现提供了一定的便利。

2 功率波动自动化控制实现

以上述设计的模糊反馈控制器为工具,制定功率波动自动化控制程序,执行制定程序即可实现功率波动的有效抑制与控制。

基于模糊反馈控制器的功率波动自动化控制程序如图4所示。

输出变量是一个模糊化结果,即隶属度值,利用最大隶属度法对其进行解模糊化操作,才能获得精准的控制指令[17],表达式为

$$\tilde{P}_t = \frac{\max\{\Gamma[\zeta_t]\}}{\Delta P^o \times E_t} \tag{2}$$

式中,$\tilde{P}_t$ 表示功率波动自动化控制指令;$\max\{\cdot\}$ 表示最大隶属度函数;$\Gamma[\cdot]$ 表示解模糊化函数;ΔP^o 表示控制指令归一化因子。

综上所述,执行图4所示程序即可实现光伏发电系统功率波动的自动化控制,为光伏发电系统后续应用提供助力。

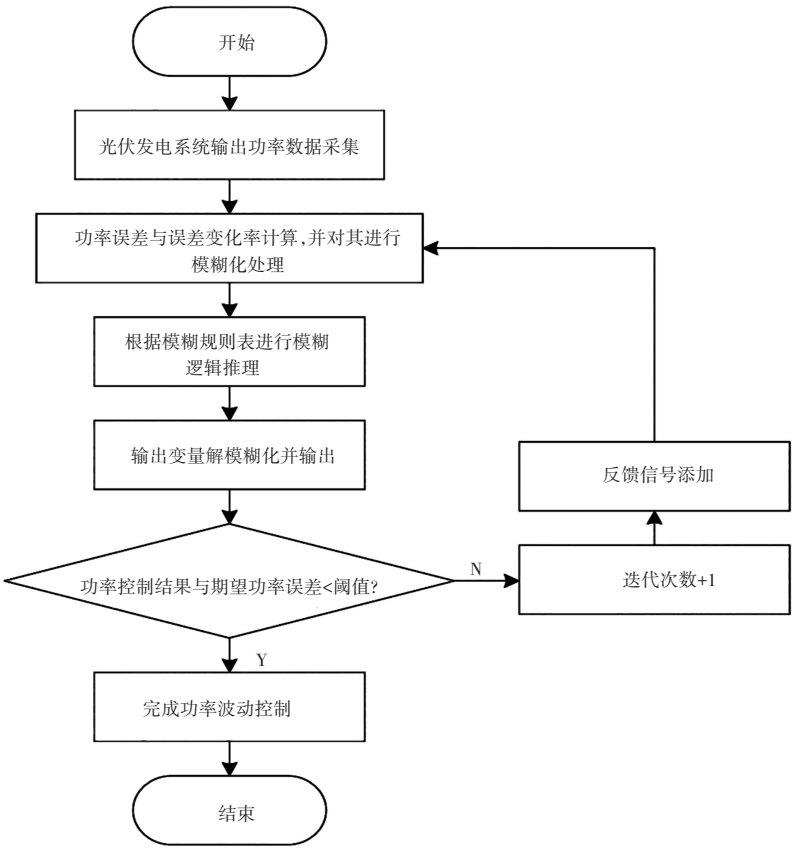


图4 功率波动自动化控制程序

Fig. 4 Program for automatic power fluctuation control

3 应用性能分析

选取文献[5]基于谷时段风电消纳的功率波动控制方法与文献[6]基于并网型光伏发电站储能的功率波动控制方法作为对比方法,联合提出基于模糊反馈的功率波动控制方法共同进行光伏发电系统功率波动控制实验,以此来验证提出方法的应用性能。

3.1 光伏发电系统环境搭建

为了简化实验过程,在实验室搭建简单的光伏发电系统环境,具体如图 5 所示。

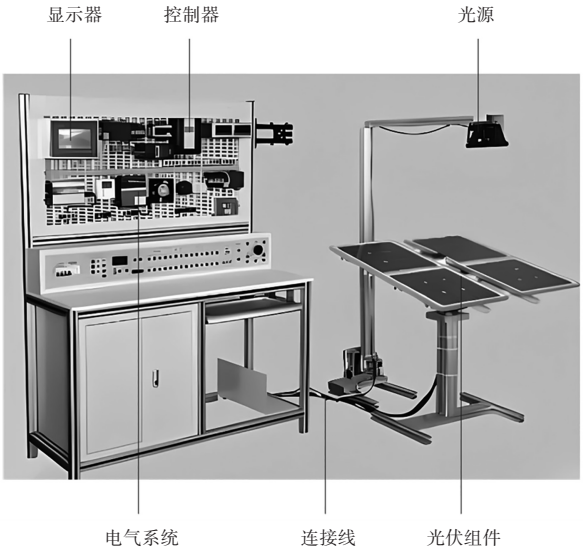


图 5 光伏发电系统环境

Fig. 5 The photovoltaic power generation system environment

如图 5 所示,光伏发电系统环境主要由光源、光伏组件、电气系统、显示器、控制器等构成。其中,光伏组件是光伏发电系统的核心部分,可以将太阳光能转换为直流电能。通常由多个光伏电池单元组成,封装在铝合金边框和玻璃背板内,具有防水、防尘、抗风压等特性。支架系统用于安装和固定光伏组件,确保其能够接收到足够的光照。支架系统需根据安装环境和需求选择,此研究采用的地面支架系统。连接线——电缆用于连接光伏组件、电气系统和其他设备,传输光伏发电系统产生的电能。其中实验现场图如图 6 所示。



图 6 实验现场

Fig. 6 Experimental site

上述过程完成了光伏发电系统环境的搭建与介绍,为后续实验提供了一定的便利。

3.2 控制器输出变量分析

在不同时间节点背景下,应用基于模糊反馈的功率波动控制方法、基于谷时段风电消纳的功率波动控制方法与基于并网型光伏发电站储能的功率波动控制方法获取光伏发电系统功率波动控制器输出结果,具体如表 2 所示。

表 2 控制器输出变量

Tab. 2 Controller output variable

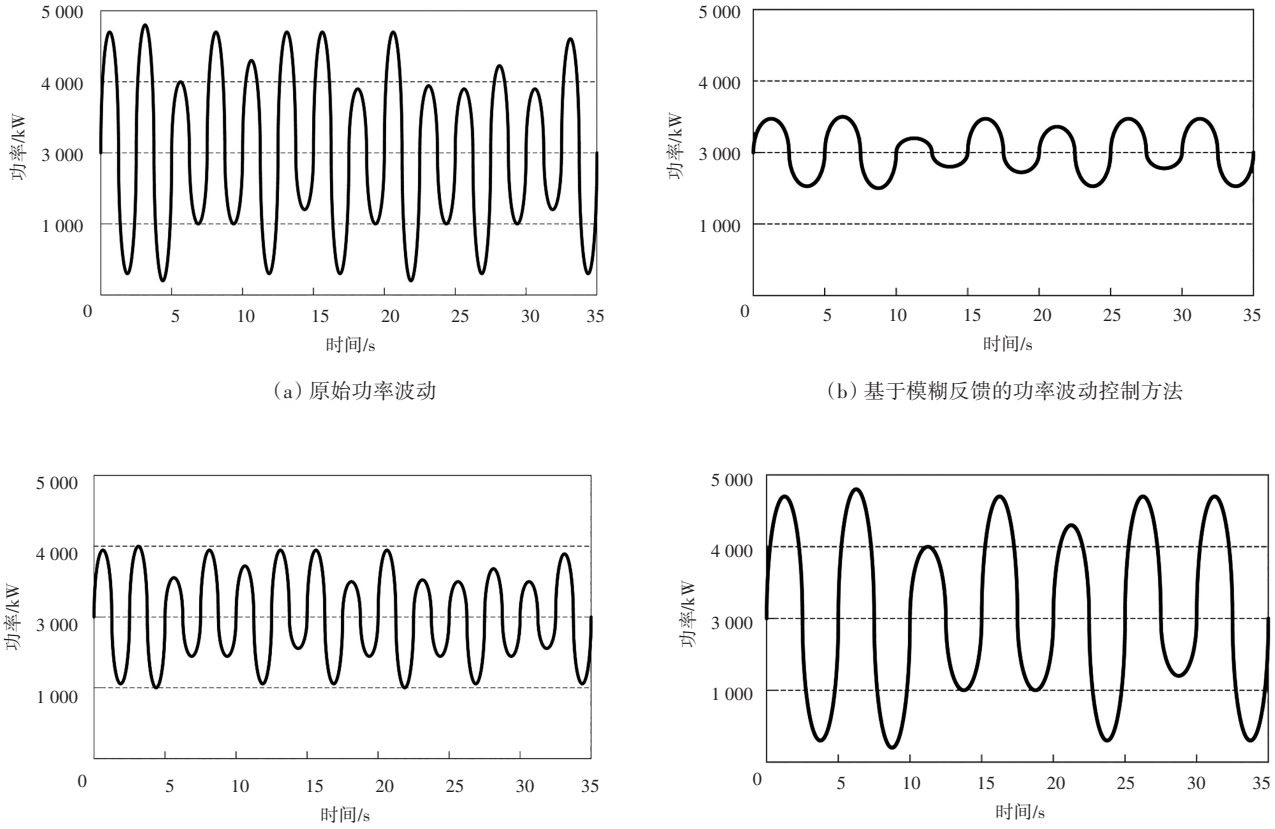
时间节点编号	应用方法	输出结果
1	实际结果	DS
	基于模糊反馈的功率波动控制方法	DS
	基于谷时段风电消纳的功率波动控制方法	DM
	基于并网型光伏发电站储能的功率波动控制方法	ZR
2	实际结果	IS
	基于模糊反馈的功率波动控制方法	IS
	基于谷时段风电消纳的功率波动控制方法	IM
	基于并网型光伏发电站储能的功率波动控制方法	DM
3	实际结果	DM
	基于模糊反馈的功率波动控制方法	DM
	基于谷时段风电消纳的功率波动控制方法	ZR
	基于并网型光伏发电站储能的功率波动控制方法	DS
	实际结果	ZR
4	基于模糊反馈的功率波动控制方法	ZR
	基于谷时段风电消纳的功率波动控制方法	DS
	基于并网型光伏发电站储能的功率波动控制方法	IS
5	实际结果	DS
	基于模糊反馈的功率波动控制方法	DS
	基于谷时段风电消纳的功率波动控制方法	DS
	基于并网型光伏发电站储能的功率波动控制方法	DM
6	实际结果	IM
	基于模糊反馈的功率波动控制方法	IM
	基于谷时段风电消纳的功率波动控制方法	ZR
	基于并网型光伏发电站储能的功率波动控制方法	IM

如表 2 所示,在不同时间节点背景下,应用基于模糊反馈的功率波动控制方法获得的控制器输出结果与实际结果相同,而应用基于谷时段风电消纳的功率波动控制方法与基于并网型光伏发电站储能的功率波动控制方法获得的控制器输出变量与实际结果存在着较大的偏差,表明基于模糊反馈的功率波动控制方法控制器输出变量更加精准。

3.3 功率波动抑制效果分析

通过实验获得功率波动抑制效果如图 7 所示。原始功率波动情况较为严重,应用基于模糊反馈的功率波动控

制方法获得的功率波动抑制效果显著,不但降低了功率波动幅度,并减小了功率波动频率;而应用基于谷时段风电消纳的功率波动控制方法获得的功率波动抑制效果只降低了功率波动幅度,应用基于并网型光伏发电站储能的功率波动控制方法获得的功率波动抑制效果只减小了功率波动频率,表明提出方法功率波动抑制效果更优。



(a) 原始功率波动

(b) 基于模糊反馈的功率波动控制方法

(c) 基于谷时段风电消纳的功率波动控制方法

(d) 基于并网型光伏发电站储能的功率波动控制方法

图 7 功率波动抑制效果

Fig. 7 Power fluctuation suppression effect

3.4 功率波动控制效果分析

为验证本文方法的应用可行性,采用本文方法分析光伏发电系统功率波动后的影响,获取光伏发电系统在正常负荷、轻载负荷运行以及重载负荷 3 种运行模式下,功率波动自动化控制变化结果,如表 3 所示。

表 3 光伏发电系统功率波动自动化控制变化结果

Tab. 3 Variation results of automatic control of power fluctuation in PV system

t/ min	功率波动/kW		
	正常负荷	轻载负荷	重载负荷
1	1.01	1.05	1.11
2	1.02	1.06	1.28
3	1.03	1.12	1.26
4	1.04	1.14	1.33
5	1.03	1.26	1.34
6	1.03	1.28	1.36
7	1.02	1.31	1.42
8	1.01	1.42	1.49
9	1.04	1.43	1.58
10	1.05	1.59	1.62

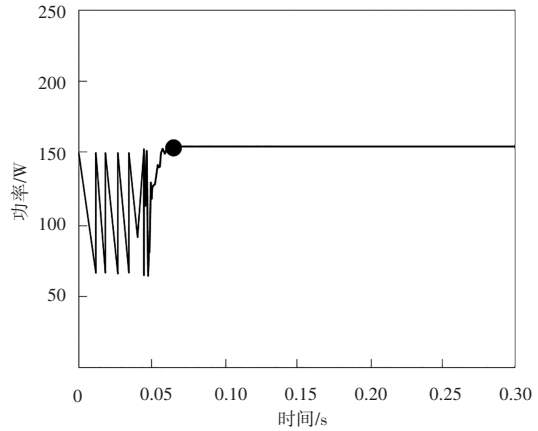
通过表 3 可知,在不同的运行时间点,光伏发电系统的功率输出正常负荷、轻载负荷和重载负荷都保持在一个相对稳定的范围内,随着运行时间的增加,不同负荷条件下的功率输出都呈现一定的上升趋势。重载负荷时的功率输出普遍高于轻载负荷和正常负荷,表明在高负荷下能够产生更多的电力。由此可知,光伏发电系统在不同负荷条件下均能保持稳定的功率输出,表明该系统具有较好的适应性和稳定性。在高负荷条件下能够产生更多的电力,有助于满足更大的电力需求,本文方法具有较好的功率波动控制效果。

3.5 功率跟踪结果

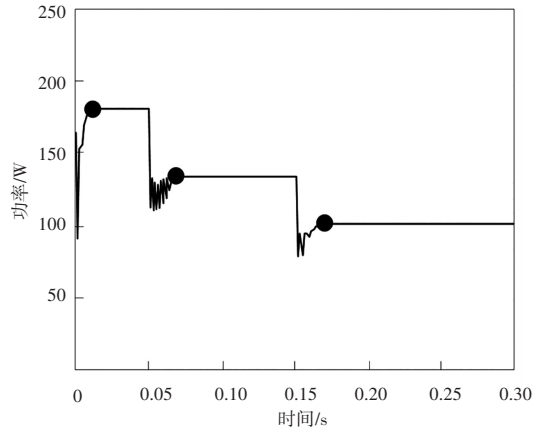
分别在光伏发电系统正常负荷、轻载负荷和重载负荷状态下,运用本文方法完成光伏发电系统功率波动跟踪,最终获得结果如图 8 所示。

根据图 8 的实验结果可知,光伏发电系统在正常负荷状态运行时间为 0.07 s 时,出现最大功率点,此时输出功率为 151 W;在轻载负荷状态状态下,光伏发电系统的功率发生了 3 次变化,依次为 180 W、139 W 和 100 W;在重载负荷状态状态下,运行时间为 0.08 s 时,出现最大功率点,此时输出功率为 205 W;相比之下,重载负荷状态的功率值最高,正常负荷状态的功率值适中,轻载负荷状态的

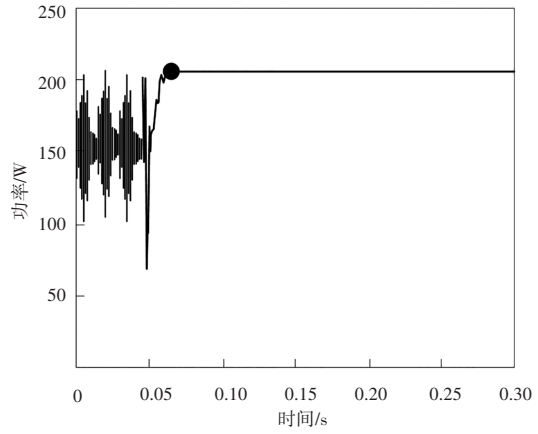
功率值较低;依据上述实验测试结果,可以看出本文方法是可行的。



(a) 正常负荷状态下功率波动跟踪结果



(b) 轻载负荷状态下功率波动跟踪结果



(c) 重载负荷状态下功率波动跟踪结果

图 8　3 种运行模式下功率波动跟踪结果

Fig. 8　Power fluctuation tracking results under three operating modes

4　结论

随着全球能源结构的转型和可再生能源的迅猛发展,光伏发电系统已成为推动绿色能源革命的重要力量。然而,光伏发电系统固有的功率波动问题一直是制约其稳定、高效运行的关键因素,故提出基于模糊反馈的光伏发电系统功率波动自动化控制方法。实验结果显示:提出方法有效提升了控制器输出变量精准度与功率波动抑制效果,具有较好的功率波动控制效果,为光伏发电系统功率波动控制提供更有效的方法支撑。

参考文献

[1]王茂春,陈春萌,杨凯璇,等. 电网电压不平衡跌落下两级式光伏并网系统直压控制策略[J]. 武汉大学学报(工学版),2022,55(3):283-291.

[2]仇新宇,陈霄,李悦,等. 基于特征提取的光伏发电系统故障检测方法[J]. 自动化技术与应用,2026,45(1):54-57,68.

[3]叶光伟,刘海哲,李长武. 光伏发电智能清洁机器人设计与实现[J]. 自动化技术与应用,2025,44(9):95-99.

[4]李铁成,闫鹏,胡雪凯,等. 光伏高占比系统中储能辅助调频控制策略研究[J]. 太阳能学报,2023,44(8):282-291.

[5]杨京渝,罗隆福,阳同光,等. 计及谷时段风电消纳的储能系统平抑风电功率波动控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(10):131-141.

[6]王鸣阳,刘昌嘉,刘仁和. 并网型光伏发电站储能功率波动平滑控制研究[J]. 电网与清洁能源,2022,38(1):115-120,134.

[7] Takahashi A, Kajitani T, Funabiki S. Parameter determination for reducing ESS capacity in PV power smoothing control using spline function[J]. Electrical engineering in Japan,2022,215(2):e23367.

[8]Jiang X S,Hong Y,Chen K,et al. A communication-free droop control scheme for distributed linear switched reluctance wave power generation system with adaptive voltage compensation[J]. International journal of electrical power and energy systems, 2022, 143(12): 108461. 1-108461. 14.

[9]高长伟,郑伟强,朱宁,等. 一种光伏发电系统的柔性功率输出控制策略[J]. 可再生能源,2022,40(12):1666-1673.

[10]叶青,蔡德胜,夏国庆,等. 光伏发电系统密集型大数据云存储系统设计[J]. 电子设计工程,2023,31(3):159-163.

[11]王彪,吕洋,陈中,等. 考虑信息时移的分布式光伏机理-数据混合驱动短期功率预测[J]. 电力系统自动化,2022,46(11):67-74.

[12]陈斌,王俊江,赵明胤,等. 基于改进鲸鱼优化算法的光伏发电系统MPPT 控制研究[J]. 电力系统及其自动化学报,2023,35(2):19-26.

[13]滕贤亮,谈超,昌力,等. 高比例新能源电力系统有功功率与频率控制研究综述及展望[J]. 电力系统自动化,2023,47(15):12-35.

[14]陆鹏,付华,卢万杰. 基于深度确定性策略梯度与模糊 PID 的直流微电网 VRB 储能系统就地层功率控制[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(18):94-105.

[15]高威,葛广言,杨赟,等. 基于前馈灰色预测和模糊控制的恒功率切削控制方法[J]. 机械设计与研究,2022,38(3):147-151.

[16]刘震宇. 基于孤岛模式的可再生能源电网分层能量平衡控制方法[J]. 自动化技术与应用,2023, 42(12):75-79,107.

[17]李奇,冯嘉,尹良震,等. 基于多阶滑模观测器的 PEMFC 发电系统输出净功率优化控制方法[J]. 电网技术,2022,46(3):1005-1015.