

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.03.055

基于改进频谱分布算法的分布式光伏机组附加自抗扰控制

谭丹,王顺超,陶悦玥,陈聪,彭娟娟,赵心悦

(武汉电力职业技术学院 国网湖北省电力有限公司技术培训中心,湖北 武汉 430079)

摘要:针对分布式光伏机组自抗扰控制精度较低、效果较差的问题,提出基于改进频谱分布算法的分布式光伏机组附加自抗扰控制方法。建立光伏阵列模型和光伏机组的逆变器模型并实施傅里叶变换,引入窗函数和改进的频谱分布算法来优化频谱分析。基于信号变换结果计算信号功率谱密度,根据频谱的异常变化设定阈值。设计扩张状态观测器估计总扰动,设定光伏机组中总扰动界限范围。借助极点配置法选取合适的观测器增益系数矩阵从而完成控制律设计。获取自抗扰控制器的输出结果,进而实现分布式光伏内外扰动的有效抑制。实验结果表明:利用该方法开展自抗扰控制时,扰动估计误差较低,控制超调量较小,提升了控制效果。

关键词:改进频谱分布算法;分布式;光伏机组;附加自抗扰控制;增益系数矩阵

中图分类号:TP273 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2026)03-0280-07

Supplementary Active Disturbance Rejection Control for Distributed Photovoltaic Units Based on an Improved Spectral Distribution Algorithm

TAN Dan, WANG Shunchao, TAO Yueyue, CHEN Cong, PENG Juanjuan, ZHAO Xinyue

(State Grid Hubei Technology Training Center, Wuhan Electric Power Technical College, Wuhan 430079, China)

Abstract: To address the issues of low precision and poor effectiveness in the active disturbance rejection control of distributed photovoltaic (PV) units, a supplementary active disturbance rejection control method based on an improved spectral distribution algorithm is proposed. Models of the PV array and the PV unit inverter are established, and Fourier transform is applied. A window function and the improved spectral distribution algorithm are introduced to optimize spectral analysis. The power spectral density of the signal is calculated based on the signal transformation results, and thresholds are set according to abnormal changes in the spectrum. An extended state observer is designed to estimate the total disturbance, and the boundary range of the total disturbance in the PV unit is defined. An appropriate observer gain coefficient matrix is selected using the pole placement method to complete the control law design. The output of the active disturbance rejection controller is then obtained, effectively suppressing both internal and external disturbances in the distributed PV system. Experimental results show that when this method is applied for active disturbance rejection control, the disturbance estimation error is low, the control overshoot is small, and the control performance is significantly improved.

Keywords: improved spectral distribution algorithm; distributed; photovoltaic unit; supplementary active disturbance rejection control; gain coefficient matrix

0 引言

分布式光伏机组在实际运行中面临着复杂的工况和多样的扰动因素,如光照强度波动、环境温度变化、负载需求突变等。这些因素对光伏机组的稳定运行和高效发电提出了严峻挑战。传统的控制方法在面对分布式光伏并网系统的复杂性和不确定性时,往往难以达到理想的控制效果。而自抗扰控制技术作为一种新型实用数字控制技术,以其对系统非线性、不确定性和内外扰动的强大应对能力,为分布式光伏并网系统的控制提供

了新的思路^[1-2]。自抗扰控制技术通过扩张状态观测器实时估计系统的状态量和内外扰动,并通过非线性状态误差反馈律生成控制量,实现对系统的精确控制。针对分布式光伏机组整成系统控制,设计一个附加的自抗扰控制方法,以进一步稳定光伏机组的安全运行,成为当前光伏发电领域亟待解决的问题。

文献[3]所提方法针对光伏机组运行过程高频振荡带来的干扰问题,基于光伏系统的负载模型设计了一种自抗扰控制器。控制器设计时利用函数优化后分数阶微分跟踪器以及状态观测器抑

第一作者简介:谭丹(1990—),女,湖北咸宁人,高级工程师,硕士,研究方向为电力营销,dulu5060@163.com。

制干扰带来的影响,进一步保障光伏机组的运行安全。由于设计控制器的微分跟踪器在运行时,内部冗余参数较多,因此该方法在自抗扰控制时,控制效果较差。文献[4]所提方法针对光伏机组负载以及工作环境变化带来的扰动问题,设计了一种自抗扰控制器,使用D-分割法获取机组运行时控制器的参数范围,引入具备全局寻优的遗传算法,依据综合性能指标完成参数范围内的寻优,实现光伏机组的附加自抗扰控制。由于引入遗传算法开展参数寻优时的能耗较大,因此该方法在自抗扰控制时,控制性能较差。文献[5]所提方法使用加权平均控制原理设计一种用于附加干扰控制的自抗扰控制器,基于WACC控制原理将光伏系统3阶降维成1阶,将机组内部、外部扰动看作单一结构广义扰动形式,设计控制律对相关影响参数展开调节,从而抑制附加干扰对光伏机组带来的附加扰动影响。由于运行时算法的复杂程度较高,导致该方法的控制效果不理想。

文献[6]所提方法针对光伏机组运行过程确定内外扰动因素,联合模糊逻辑控制原理设计扰动的自抗扰控制器,在控制器中引入粒子群优化和扩展因子算法优化抗卷取分数阶比例积分微分器调节器,使用优化后的自抗扰控制器实现光伏机组扰动的自抗扰控制。由于引入粒子群算法优化微分器时增加了控制器负载值,因此该方法的控制性能较低。

为解决分布式光伏机组附加扰动自抗扰控制过程中控制精度较低、控制效果较差的问题,提出基于改进频谱分布算法的分布式光伏机组附加自抗扰控制方法,以期提高分布式光伏机组的自抗扰控制效果。

1 分布式光伏机组附加自抗扰控制设计

1.1 分布式光伏机组系统模型

分布式光伏系统受天气、光照强度、温度等多种因素影响,其输出功率存在波动性和不确定性。自抗扰控制作为一种先进的控制策略,能够有效地处理系统中的扰动和不确定性,提高系统的稳定性和性能。通过引入自抗扰控制,可以实时识别并补偿外部干扰,确保分布式光伏机组在复杂多变的环境下稳定运行。针对分布式光伏机组开展附加自抗扰控制时,需要对光伏机组开展建模分析,明确光伏机组发电系统的基本运行状况和特性^[7-8]。

光伏机组中,光伏阵列作为光伏机组的重要组成部分,主要是由太阳能电池组件以一定的排列方式(如方阵列、圆形阵列等)组合起来的构件。因此,建立光伏阵列模型时^[9-11],设定单个的光伏电池电力电荷量为 α ,玻尔兹曼常数为 k ,电池温度为 T ,由此获取光伏机组的单电池模型 I ,如式(1)所示

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{\alpha(V + IR_s)}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中:电池的光生电流为 I_{ph} ;反向饱和电流为 I_0 ;理想因子为 n ;电池的串联、并联电阻分别为 R_s 、 R_{sh} 。

基于光伏机组的单电池模型,设定光伏阵列是由 N_s 个光伏电池串联以及 N_p 个电池并联组合构成的,并光伏阵列的总输出电流以及电压分别为 I_{array} 、 V_{array} ,代入光伏机组的单电池模型,由此获取光伏阵列模型,过程如式(2)所示

$$I_{array} = N_p \left(I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{\alpha(V/N_s + I_{array} R_s / N_s N_p)}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{array} / N_s + I_{array} R_s / N_s N_p}{R_{sh}} \right) \quad (2)$$

光伏机组的光伏阵列在日常运行时,光照强度和温度是影响阵列运行的主要扰动因素^[12-13]。这些因素通过影响光伏电池的电流-电压关系和输出功率来影响整个光伏系统的性能。

光伏机组的逆变器工作时,通常有直通和非直通两种类别,因此可将阵列电感为 L ,电容为 C ,二者对应的电压以及电流分别为 U_L 、 U_C 、 I_L 、 I_C ,由此获取光伏机组的直通、非直通状态公式,结果如下式所示

$$\begin{cases} U_L = U_C \\ I_L = I_C \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} I_C = I_{pv} - I_L \\ U_L = U_{pv} - U_C \\ I_{dc} = 2I_L - I_{pv} \\ U_{dc} = 2U_C - U_{pv} \end{cases} \quad (4)$$

式中:光伏逆变器的直流侧非直通电流、电压分别为 I_{dc} 、 U_{dc} ;光伏阵列电压以及电流分别为 I_{pv} 、 U_{pv} 。

依据光伏机组的直通、非直通状态公式,将光伏逆变器的平均模型电感电流变化率以及对应的电容电压变化率为 i'_L 、 u'_C ;将光伏的电压瞬时值以及电流瞬时值为 u_{pv} 、 i_{pv} ,由此获取分布式光伏机组的逆变器数学模型,结果如下式所示

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} i_L' \\ u_C' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ u_C \end{bmatrix} (2d_c - 1) + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{pv} \\ i_{pv} \end{bmatrix} (1 - d_c) \\ \begin{bmatrix} u_{dc} \\ i_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 2 \\ 2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ u_C \end{bmatrix} (1 - d_c) + \begin{bmatrix} -1 & 2 \\ 2 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{pv} \\ i_{pv} \end{bmatrix} (1 - d_c) \end{cases} \quad (5)$$

式中:占空比函数表述成 d_c 形式;逆变器在非直通状态下的电压瞬时值以及电流瞬时分别为 u_{dc} 、 i_{dc} 。至此,获得光伏阵列模型和光伏机组的逆变器模型,完成分布式光伏机组系统模型的构建。通过模拟机组实际运行输出,获取系统电流、电压信号,为改进频谱分布算法分析提供基础数据。基于模型明确的电流、电压关联关系,可结合算法识别出的主导频率成分更加精准地分析频谱异常,确定扰动源和不稳定因素,为后续基于改进频谱分布算法的光伏运行附加自抗扰控制方法设计提供了坚实基础。

1.2 改进频谱分布算法下的光伏机组运行扰动源识别

运行光伏阵列模型与光伏机组逆变器模型,获取系统输出电流、电压信号,使用改进频谱分布算法确定光伏输出信号主要频率成分^[14-16],联合光伏阵列以及逆变器电流、电压关联关系,识别出其中的主要扰动来源^[17-18]。

获取分布式光伏机组的自身输出信号,使用改进的频谱分布算法,确定系统的主导频率成分。根据频谱特性,准确识别出系统中的扰动源和不稳定因素。具体流程如图1所示:

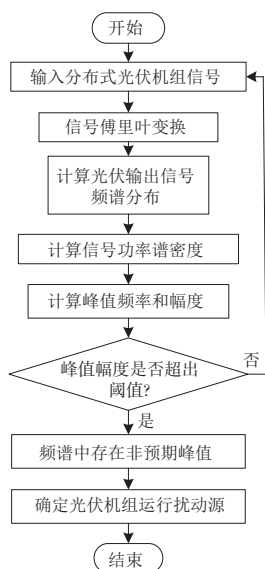


图1 改进频谱分布算法识别流程图

图1所示流程的具体步骤如下:

步骤1:获取分布式光伏机组的输出端电压、电流等信号信息 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{i3})$, $x_u = (x_{u1}, x_{u2}, \dots, x_{u3})$,建立光伏输出信号集合 $X_k = (x_i, x_u)$,对其实施傅里叶变换,过程如下式所示

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (6)$$

式中:输出信号的傅里叶变换后信号频谱为 $X(k)$ 形式;离散时间信号为 $x(n)$ 形式;信号长度为 N ;信号的频谱索引为 m 。

由于传统傅里叶变换方法在分析信号频谱时,精度不理想,因此需要引入窗函数 $w(n)$,改进频谱分布算法优化频谱分析,改进后光伏输出信号的频谱分布计算结果如下式所示

$$X^w(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot w(n) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}mn} \quad (7)$$

式中改进后的频谱分析算法的输出为 $X_w(k)$ 形式,即加窗后信号的离散傅里叶变换结果。

步骤2:完成光伏输出信号频谱计算后,基于信号变换结果,计算信号功率谱密度为 $S_{xx}(f)$,结果如下式所示

$$S_{xx}(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} |X_w(k)|^2 \quad (8)$$

步骤3:针对式(8)的计算结果,识别频谱中的峰值,确定主导频率成分,并由此完成峰值频率 f_{peak} 以及幅度 A_{peak} 计算,过程如下式所示

$$\begin{cases} f_{peak} = \arg \max_f |S_{xx}(f)| \\ A_{peak} = S_{xx}(f_{peak}) \end{cases} \quad (9)$$

步骤4:根据频谱的异常变化设定一个阈值为 θ ,若频谱中计算的 A_{peak} 超出该阈值,可认定频谱中存在非预期峰值(即为光伏机组运行扰动源)。

联合光伏机组阵列以及逆变器模型可知,光伏机组存在光照强度以及温度变化等外部扰动以及电流、电压瞬时变化带来的内部扰动。明确光伏机组运行扰动源能使自抗扰控制器设计更加具有针对性,可针对外部扰动设计补偿机制,动态调整参数以降低其对输出的影响;针对内部扰动精确监测分析,通过反馈环节抑制其传播放大。同时,确定扰动源有助于合理设置控制器性能指标,依据扰动强度、频率范围等确定响应速度、控制精度等,进而提升控制器整体性能与可靠性,更好地实现分布式光伏机组附加扰动自抗扰控制。

1.3 分布式光伏机组附加自抗扰控制器

确定分布式光伏机组内、外扰动来源,将稳定

输出电压、电流以及功率因数作为光伏系统附加自抗扰控制目标,充分考量控制冗余参数繁杂性并合理选取适宜的观测器增益系数矩阵,由此设计自抗扰控制器,通过控制器抑制扰动给分布式光伏阵列带来的影响^[19]。

基于分布式光伏机组扰动的附加自抗扰控制器结构如图2所示。

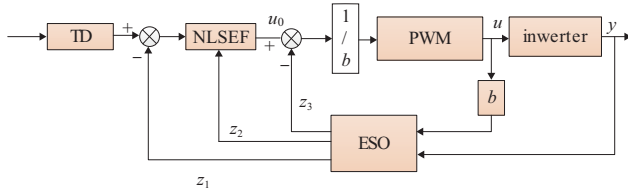


图2 自抗扰控制器结构

分析图2可知,自抗扰控制器主要由微分跟踪器(tracking differentiator, TD)、扩张状态观测器(extended state observer, ESO)以及非线性状态误差反馈率(nonlinear state error feedback, NLSEF)构成。分布式光伏的扰动变量参考值为 u ,光伏机组系统输出为 y ,控制增益为 b ,观测器的输出、输出微分以及系统总扰动信号分别为 z_1 、 z_2 、 z_3 形式。

分布式光伏机组的附加自抗扰控制具体过程如下:

步骤1:考虑光伏机组运行内、外扰动的不确定 n 阶被控过程,将自抗扰控制问题表述成下式所示

$$y^{(n)}(t) = g(y(t), \dots, y^{(2)}(t), \dots, y^{(n-1)}(t), z(t)) + bu(t) \quad (10)$$

式中:光伏机组系统的被控量、控制量以及扰动总和分别为 $y(t)$ 、 $u(t)$ 以及 $z(t)$ 形式;综合函数为 g 。

根据式(10),将系统增益估计设为 b_0 ,由此优化问题表述,结果如下式所示

$$y^{(n)}(t) = f(t) + b_0 u(t) \quad (11)$$

式中总扰动即为 $f(t) = z(t)$ 。

步骤2:设计扩张状态观测器对 $f(t)$ 实施估计。设定 f 可导,且 $\dot{f} = h$, $y^{(i-1)} = x_i$,由此获取控制变量的扩张状态观测值,过程如下式所示

$$\dot{z}(t) = \mathbf{A}z(t) + \mathbf{B}z(t) + \mathbf{Q}(y(t) - z_1(t)) \quad (12)$$

式中:变量 x_i 的观测值为 $z(t)$ 形式;状态系数矩阵为 $\mathbf{A}$,输入系数矩阵为 $\mathbf{B}$,增益系数矩阵为 $\mathbf{Q}$ 。

步骤3:设定光伏机组中总扰动界限范围,借

助极点配置法选取合适的观测器增益系数矩阵^[20-22],完成控制律设计,过程如下式所示

$$\begin{cases} u_0(t) = k_{p1}r(t) - \sum_{i=1}^n k_{p1} \dot{z}(t) \mathbf{Q} \\ u(t) = \frac{u_0(t) - \dot{z}_{n+1}(t)}{b_0} \end{cases} \quad (13)$$

式中增益系数为 k_{p1} 。

步骤4:根据联合设计控制律,完成自抗扰控制器的输出获取,实现分布式光伏内外扰动的有效抑制,过程如下式所示

$$y^{(n)}(t) = f + u_0(t) - \dot{z}_{n+1}(t) \quad (14)$$

2 实验

以某城市的光伏发电站作为实验对象,选取其中某分布式光伏机组作为测试目标,联合MATLAB软件以及Simulink软件,搭建一个分布式光伏机组系统模型,具体模型参数如下:

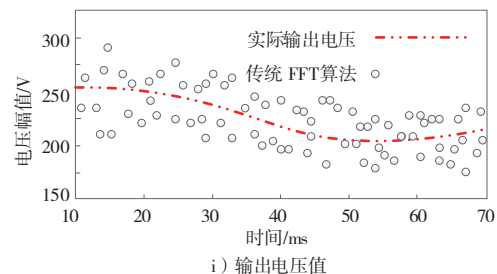
1)光伏组件:额定功率,10 kW;工作电压,250 V;工作电流,40 A;最大功率,50 W;短路电流,3 A;开路电压,22 V。

2)逆变器参数:额定功率,10 kW;输入电压范围,180~300 V;输出电压,220 V/380 V;输出频率,50 Hz/60 Hz。

3)频谱分析仪实验参数:分析频率范围,0 Hz至1 MHz;分辨率带宽,1 Hz;动态范围,不小于100 dB。

4)控制器参数:控制器带宽,2 500;观测器带宽,700;控制增益,12 000。

使用所提方法展开分布式光伏机组附加自抗扰控制时,光伏阵列电压、电流关系确定是外部扰动来源识别的基础。若改进前后频谱分布算法的频谱分析出的光伏阵列电压、电流输出结果与实际结果存在误差,会直接降低后续的自抗扰控制效果。为此,对传统FFT算法和改进后频谱分布算法输出的光伏阵列输出电流、电压值频谱分析结果进行对比测试,直观体现算法优化效果。对比结果如图3所示。



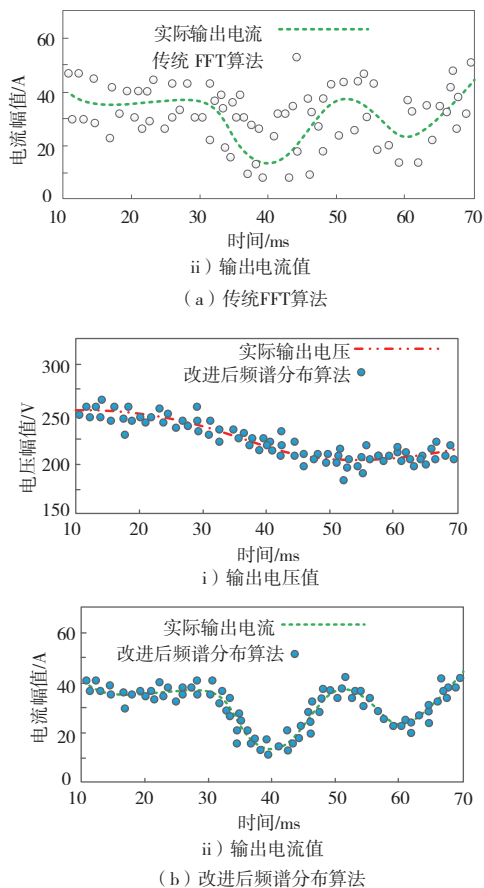


图3 光伏阵列输出频谱分析结果

由图3可知,使用改进后频谱分布算法开展分布式光伏机组输出信号的频谱计算时,能够有效检测出光伏阵列的输出电流、电压值,且检测结果与实际结果之间能够完全拟合。但传统的频谱分析拟合结果与实际结果偏差较大。由此可知,基于所提方法通过改进后频谱分布算法提升了频谱分析精度。

选取基于改进频谱分布算法的分布式光伏机组附加自抗扰控制方法(所提方法)、光伏跟踪电机的分数阶自抗扰控制方法、基于D-分割法的直流变换器遗传自抗扰控制器设计同时开展分布式光伏附加自抗扰控制,以此检测所提方法的实际有效性。

扰动实验场景设置如下:36 s时辐照度突变(快速移动云层遮挡导致辐照度在30 s内从 $1\,000\text{ W/m}^2$ 降至 200 W/m^2),同时,邻近工厂大电机启动造成电网电压瞬时跌落至360 V;72 s环境温度从 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 骤升至 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$,同时,电网背景总谐波畸变率从2%突增至8%。

本文利用自抗扰控制器进行上述扰动观测。其中增益系数是扰动观测的关键系数,需要利用

极点配置法确定观测器增益系数矩阵的优化参数。首先,设定闭环系统的期望极点为 $[-2.5 \pm 3.0, -1.8 \pm 2.2]$,以确保系统动态响应快速且无超调。极点位置对应阻尼比为0.7,自然频率为 4 rad/s ,平衡响应速度与稳定性。其次,设置增益系数组合为 $K1=[1.25, 0.8, -0.3]$ 、 $K2=[1.0, 1.0, -0.2]$ 、 $K3=[1.5, 0.5, -0.4]$,测试增益系数矩阵的3组权重参数,分析其对系统性能的影响(实验条件:光照强度 800 W/m^2 ,电网电压波动 $\pm 10\%$),最后获得参数优化敏感性分析表如表1所示。

表1 参数优化敏感性分析

增益系数组合	调节时间/s	超调量/%	稳态误差/%
$K1=[1.25, 0.8, -0.3]$	0.15	0.2	0.05
$K2=[1.0, 1.0, -0.2]$	0.22	1.5	0.12
$K3=[1.5, 0.5, -0.4]$	0.18	0.8	0.08

如表1所示,最优增益组合 $[1.25, 0.8, -0.3]$ 的调节时间最短、超调量最低,将其作为自抗扰控制器的优化参数。

使用所提方法、光伏分数阶自抗扰控制方法以及基于D-分割法的自抗扰控制方法开展实际总扰动估计,测试结果如图4所示。

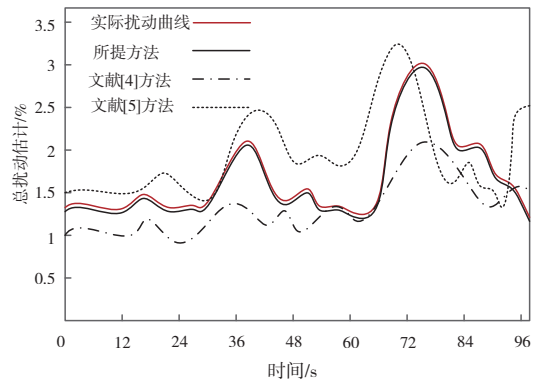


图4 不同方法的总扰动估计值

分析图4可知,开展分布式光伏机组附加自抗扰控制时,经由所提方法设计自抗扰控制器的扩张观测器检测出的光伏机组总扰动估计值与实际分布式光伏机组的扰动值之间基本一致,估计误差低于0.1%。而光伏分数阶自抗扰控制方法以及基于D-分割法的自抗扰控制方法由于并未在自抗扰控制前,使用改进频谱分布计算方法精准识别出光伏的内、外扰动来源,因此两种方法检测出的总扰动估计值与实际总扰动估计值之间存

在 0.5% 以上的误差,自抗扰控制精度较差。

使用所提方法、光伏分数阶自抗扰控制方法以及基于 D-分割法的自抗扰控制方法开展分布式光伏机组附加自抗扰控制时,对不同方法在自抗扰控制时的长期控制稳定性效果展开测试,测试结果如图 5 所示。

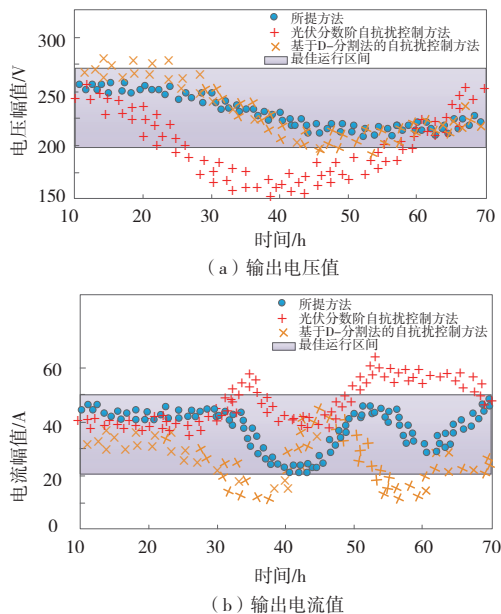


图 5 不同方法的实际扰动控制效果测试结果

分析图 5 可知,本文所提方法展现出的长期控制效果更为稳定,输出能够快速稳定在目标值附近,波动极小,超调量低于 1 A。而其他方法的超调量达到 10 A 和 40 V 以上,控制稳定性不理想。这是因为该方法引入改进的频谱分布算法,基于模型明确的电流、电压关联关系,能够有效识别出主导频率成分并精准分析了频谱异常,确定扰动源和不稳定因素。依据明确的扰动源设计自抗扰控制器,可针对外部扰动设计补偿机制,通过动态调整降低其对输出的影响,因此该方法在光伏机组自抗扰控制时,控制效果更好。

3 结语

随着分布式光伏机组发电技术的广泛应用,分布式光伏机组日常控制系统忽视的扰动来源不可控问题愈加严重,因此分布式光伏机组附加自抗扰控制就显得尤为重要。针对传统自抗扰控制方法中存在的问题,提出基于改进频谱分布算法的分布式光伏机组附加自抗扰控制方法。根据光伏系统阵列以及逆变器的电流、电压关系的确定,联合改进频谱分布计算,完成机组运行扰动来源的识别;由此设计自抗扰控制器,确定控制目标,

完成扰动因素的有效抑制。但是该方法忽略了一些细微但可能长期影响系统性能的因素,未来研究可以借助深度学习算法,优化控制器设计,从而实现更加智能、精准的自抗扰控制。

参考文献:

- [1] 李晨毓,姚志豪,祖家奎,等. 中型无人直升机内环控制器的设计与实现[J]. 机械制造与自动化, 2024, 53(3): 243-248.
- [2] 蔡斌军,姚振声,刘志雄,等. 基于模糊二阶线性自抗扰的光伏储能双向 DC-DC 控制策略研究[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2024, 34(4): 25-31.
- [3] 刘伟,胡磊,陈雪辉,等. 光伏跟踪电机的分数阶自抗扰控制方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2024, 36(2): 89-96.
- [4] 周雪松,王鑫,马幼捷,等. 基于 D-分割法的直流变换器遗传自抗扰控制器设计[J]. 太阳能学报, 2024, 45(9): 378-385.
- [5] 陈关旭,何国锋,董燕飞,等. 基于 WACC 的三相光伏并网逆变器 LADRC 控制器设计[J]. 可再生能源, 2024, 42(6): 789-795.
- [6] BOUDECHICHE G, AISSA O, SARRA M, et al. Solar shunt active power filter based on optimized direct power control strategy with disturbance rejection principle[J]. Electrical Engineering & Electromechanics, 2024(3): 72-80.
- [7] 张松,肖小兵,何金字,等. 基于 PEEC-MTL 混合方法的光伏系统建模及电磁瞬态计算分析[J]. 电力大数据, 2024, 27(11): 21-31.
- [8] 毛明轩,李鹏燕,许钊,等. 路面光伏并网系统建模与谐波分析[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(20): 8039-8048, 10010.
- [9] 赵康,秦玉林,吕国荃,等. 光伏阵列对屋顶传热影响的计算模型及分析[J]. 太阳能学报, 2025, 46(2): 333-341.
- [10] 陈伟,丁聪,裴婷婷,等. 基于矩阵扰动法和传感器优化配置的光伏阵列故障定位方法[J]. 太阳能学报, 2025, 46(1): 641-653.
- [11] 张健,赵咪,黄毅,等. 基于 CLD-COA-ELM 的光伏阵列故障诊断方法研究[J]. 太阳能学报, 2025, 46(1): 632-640.
- [12] 冯飞,李国利,赵恒,等. 基于 FBG 阵列的光伏电池板表面温度场测量与研究[J]. 自动化与仪表, 2023, 38(7): 87-90.
- [13] 徐天,徐兴浩. 基于月度温度的光伏阵列倾斜角优化方案[J]. 电子测试, 2019(21): 59-61, 110.
- [14] 杨振华,王丽,郑燕. 高等生物中基因组序列 8-mer 频谱分布模式及其在物种进化研究中的应用[J]. 基因组学与应用生物学, 2024, 43(2): 228-240.

- [15] 李世通,金小萍,孙杰,等. 基于高次时频谱特征的 LPI 雷达信号识别[J]. 北京航空航天大学学报, 2025,51(1):314-320.
- [16] 王红军,徐浩然,赵文元. 电磁频谱地图构建中的空间插值方法综述[J]. 电讯技术, 2025, 65(1): 141-151.
- [17] 黄艧,周游游. 基于改进频谱分布算法的发电机定子槽楔检测[J]. 电气自动化, 2022, 44(5): 92-94,101.
- [18] 范圆梦,刘顺兰. 基于随机共振和非中心 F 分布的频谱感知算法[J]. 电信科学,2023,39(1):42-50.
- [19] 杨桂婷. 低压配电网下光伏并网逆变器自抗扰控制策略研究[J].光源与照明,2023,(6):145-147.
- [20] 郝喆,于春战,张佳林,等. 基于 NDE-FLNN 与零极点配置法的六维加速度传感器动态性能补偿[J]. 电子测量与仪器学报,2024,38(10):109-117.
- [21] 李戈,毛崎波,王永,等. 基于极点配置法的电磁分流阻尼优化设计[J].噪声与振动控制,2022,42(6): 19-2365.
- [22] 翟小飞,周进,赖林. 周期性温度激励对 MGD 混合性能及小信号增益系数的影响[J].红外与激光工程,2019,48(6):315-321.

收稿日期:2025-03-04

(上接第 274 页)

- [2] 任子晖,李昂,吴新忠,等. 矿井通风网络风量智能调控研究[J]. 工矿自动化,2022,48(11):110-118.
- [3] WANG Z,SHAO L S,YANG C. Fuzzy prediction of the mine's ventilation structure's tunnel air volume[J]. Expert Systems with Applications,2023,231:120843.
- [4] 于保才,陈善文,白廷海. 基于改进鸽群算法的矿井风量智能调节方法[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2023,42(3):283-292.
- [5] 张佳鹏,郭春. 基于 CO-需风量理论的隧道施工通风控制优化模型研究[J]. 隧道建设(中英文),2023, 43(7):1153-1160.
- [6] 李团结,黄维明,潘伟华,等. 煤矿局部通风机风量智能控制系统研究及应用[J]. 煤炭科学技术,2023, 51(4):166-174.
- [8] 尚文天,邓立军,刘剑. 基于有上下界风量约束的矿井风量极值流算法研究[J]. 中国安全生产科学技术,2022,18(2):106-112.
- [9] 孙毅. 基于分布式 C/S 结构的皮革企业智能化管理系统设计与实现[J]. 中国皮革, 2022, 51(10): 16-20.
- [10] 郭爱军,吴松松. 基于分步式递阶反馈的井下四足机器人行走姿态控制[J]. 机械制造与自动化, 2025,54(1):245-250.

收稿日期:2025-02-10