



基于PSO参数优化NL-ADRC的储能控制策略

谢敏¹, 田桂珍^{1,2}, 刘广忱^{1,2}, 温素芳¹

(¹内蒙古工业大学电力学院, ²大规模储能技术教育部工程研究中心, 内蒙古 呼和浩特 010080)

摘要: 随着风电机组在电力系统中渗透水平的不断提升, 其波动性和间歇性特点导致电力系统调频负担不断增大, 本研究基于电池储能的风电场一次调频控制策略。首先, 针对传统惯量控制中虚拟惯量系数和下垂系数固定可能出现惯量支撑与系统需求不匹配的问题, 研究基于模糊控制的自适应综合调频控制策略, 通过实时调整虚拟下垂和惯性系数, 提升系统的响应特性。在此基础上, 为改善传统比例积分控制下系统的动态响应性能, 研究功率的非线性自抗扰(non-linear active disturbance rejection control, NL-ADRC)控制策略, 并通过粒子群优化算法对NL-ADRC的控制参数进行寻优, 实现NL-ADRC参数的最优配置, 从而减小频率波动。仿真与实验结果表明, 本工作所提策略能够减小系统频率波动使系统频率更快达到稳定状态。

关键词: 储能系统; 一次调频; 模糊控制; 自抗扰控制

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0955

中图分类号: TM 721

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 04-1312-13

Improved integrated control strategy of energy storage based on NL-ADRC with PSO parameter optimization

XIE Min¹, TIAN Guizhen^{1,2}, LIU Guangchen^{1,2}, WEN Sufang¹

(¹College of Electric Power, Inner Mongolia University of Technology, ²Engineering Research Center of Large Energy Storage Technology of Ministry of Education, Hohhot 010080, Inner Mongolia, China)

Abstract: With the continuous improvement of the penetration of wind turbines in the power system, its variable and intermittent characteristics lead to an increase in the frequency regulation burden of the power system. This paper studies the primary frequency regulation strategy of wind farms based on battery energy storage system. Firstly, aiming at the problem that the fixed virtual inertia and droop coefficients in the traditional control may lead to the mismatch between the inertia support and the system demand, the adaptive integrated frequency regulation strategy based on fuzzy control is studied. By adjusting the virtual droop and inertia coefficient in real time, the response characteristics of the system are improved. In order to improve the dynamic response performance of the system under traditional proportional integral control, the nonlinear active disturbance rejection control (non-linear active disturbance rejection control, NL-ADRC) is studied to control power. The control parameters of NL-ADRC are optimized by particle swarm optimization algorithm to realize the

收稿日期: 2025-10-23; 修改稿日期: 2026-01-19。

基金项目: 国家重点研发计划专项 (2024YFB2408400)。

第一作者: 谢敏 (1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电控制技术, E-mail: xinmeng136@126.com; 通信作者: 田桂珍, 教授, 博士, 研究方向为新能源发电控制技术、储能控制等, E-mail: tianguizhen@126.com。

引用本文: 谢敏, 田桂珍, 刘广忱, 等. 基于PSO参数优化NL-ADRC的储能控制策略[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(4): 1312-1324.

Citation: XIE Min, TIAN Guizhen, LIU Guangchen, et al. Improved integrated control strategy of energy storage based on NL-ADRC with PSO parameter optimization[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(4): 1312-1324.

optimal configuration of NL-ADRC parameters, so as to reduce the frequency fluctuation. The simulation and experimental results show that the proposed strategy can reduce the system frequency fluctuation and enable the system frequency to reach the steady state faster.

Keywords: battery energy storage systems; primary frequency regulation; fuzzy control; active disturbance rejection control

在全球化石能源枯竭与生态压力加剧的双重挑战下, 能源转型已成为国际社会的战略共识。风能作为一种清洁、无污染且蕴藏量丰富的可再生能源, 逐步发展为传统能源的重要替代项之一^[1]。与传统发电机组依靠旋转惯量进行自主调频调压不同, 清洁能源因采用电力电子设备, 其能量解耦特性导致在并网运行时缺乏维持电网电压和系统频率稳定的能力^[2]。

为应对风力发电所带来的诸多挑战, 储能技术的应用显得尤为关键。电池储能系统 (battery energy storage system, BESS) 不仅能够平滑风电的功率波动, 增强风电的消纳能力, 还能够参与到电网的频率调节和电压调节中, 以此来保障电网的稳定运行^[3]。

针对储能系统参与频率调节的控制需求, 常规策略通常为下垂控制与虚拟惯性控制^[4]。这些策略通过模拟同步发电机的特性, 能够在一定程度上优化系统的频率响应特性。下垂控制通过调节储能装置的功率输出量, 使其和电力系统的频率偏差呈现出比例关系, 以此达成频率调控目的; 而虚拟惯量控制则是仿照同步发电机的惯性响应特性来实现调频的, 提供瞬时功率支撑, 缓解系统频率波动^[5]。文献[6]依据系统在惯性响应阶段与频率恢复阶段的频率特性表现, 构建了双馈风机 (doubly fed induction generator, DFIG) 与储能协同参与调频的控制方案, 并构建了分阶段协同发力的出力模式。文献[7]给出了一种依托于电池储能装置的集成式自适应一次调频方案, 该方案能够自动调节储能系统的出力参数, 并使趋势系数随系统频率变化率自适应更新。文献[8]针对储能系统调频场景下的动态特性与寿命损耗问题, 提出了一套基于锂电池特性的建模与控制优化方法, 有效改善了调频控制效果。文献[9]提出了一种面向风电场-储能系统协同控制的自适应控制架构, 通过设计标称荷电状态 (state of charge, SOC) 恢复控制器与加速恢复控制器, 实现了风储系统的动态功率协同调度, 在改善系统

频率特性的同时加速标称充电恢复, 且不影响风电场的输出。文献[10]提出了一种基于多目标优化的多区域电力系统协同控制架构, 通过构建蓄电池储能系统的功率调控模型, 实现了频率-电压双变量的分布式协同控制, 能够快速及时地缓解电压和频率偏差。文献[11]旨在充分挖掘飞轮储能与锂电池储能各自调频方面的独特优势, 提出了一种依据自适应 SOC 电池-飞轮混合储能系统一次调频控制方法。文献[12]在设计多变量模糊逻辑控制器时, 综合考量了风速、频率变化率及频率偏移这3个关键参数。

考虑到相位滞后与抗扰能力受限等固有缺陷, 已有一些学者将自抗扰技术应用在储能控制中, 但较少有将自抗扰控制应用于储能调频控制当中。文献[13]提出一种混合储能增强型自抗扰协调控制策略, 有效抑制系统直流母线电压波动的控制信号。针对双向 DC-DC 变换器数学模型非线性、时变的特点, 文献[14]提出一种基于模糊神经网络的线性自抗扰控制方法。文献[15]提出一种参数动态协同自抗扰控制, 增强母线电压稳定性, 从而使得储能能够更好地发挥“削峰填谷”的调节作用。文献[16]构建了一种基于有限时间观测器的滑模自抗扰控制方法, 且将此方案应用于储能变流器的功率调控以及双向 DC-DC 变换器的直流母线电压调节环节, 以此提升系统的瞬态响应性能。采用 NL-ADRC 替代传统 PI 控制, 可以提升系统的控制精度, 增强系统的抗扰能力, 但是算法的复杂性也随之增加。鉴于此, 可采用寻优算法对 NL-ADRC 参数进行优化整定, 使其具有更好的控制性能。

本研究提出了一种基于参数自适应的储能优化控制策略。首先, 通过综合考虑虚拟惯性系数和下垂系数, 利用模糊控制算法动态调整控制参数; 其次, 为改善传统比例积分控制下系统的动态响应性能, 研究自抗扰控制策略并采用粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO) 优化自抗扰参数。最后, 在仿真平台上针对各类不同的控制策略

展开仿真测试, 以此验证本研究策略的有效性与可行性。

1 BESS辅助火电机组参与风电场一次调频频率等效模型

储能在调频过程中的响应性能取决于具体的控制策略^[17]。鉴于虚拟惯量控制与下垂控制之间存在不同特点, 本研究提出了一种适用于储能系统的综合惯性调控策略。在系统频率突变的初始阶段, 储能通过虚拟惯量控制快速响应, 有效抑制频率差的瞬时剧烈波动, 而在后续调频过程中, 通过下垂控制确保稳态平衡区间内的持续频率支撑, 消除了虚拟惯量控制中输出功率波动大以及下垂控制无法为频率瞬间变化提供有功功率的情况。其控制框图如图1所示。图中, f_N 为频率参考值, 为50 Hz; f_{ref} 为实际频率测量值; K_p 为虚拟惯性系数; K_E 为下垂系数; P_{Bref} 为综合控制下的储能输出功率。

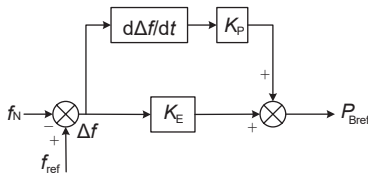


图1 储能综合控制框图

Fig. 1 Energy storage integrated control block diagram

综合控制环节储能输出的有功功率增量 P_{Bref} 由式(1)表示:

$$P_{Bref} = K_p \frac{d\Delta f}{dt} + K_E \Delta f \quad (1)$$

2 储能综合控制的参数分析

2.1 系统传递函数

为分析储能装置对电网频率动态特性的影响, 在忽略常规机组非线性动态特性的基础上, 建立了包含储能单元的一次调频动态过程线性化数学模型^[18]。此简化旨在降低模型复杂度, 便于应用线性系统理论进行稳定性分析和控制器参数设计, 并将分析重点集中于储能系统的动态特性及其对系统频率的影响上。

根据一次调频模型建立系统传递函数方程:

$$\Delta f(s) = \frac{\Delta P_B(s) + \Delta P_G(s) - \Delta P_L(s)}{2H(1-\rho)s + D} \quad (2)$$

$$\Delta P_B(s) = \Delta P_{BE}(s) + \Delta P_{BP}(s) \quad (3)$$

式中, $\Delta P_L(s)$ 为负荷扰动; $\Delta P_G(s)$ 为传统火电机组输出功率变化; $\Delta P_B(s)$ 为储能系统输出功率变化; $\Delta P_{BE}(s)$ 为下垂控制下储能系统输出功率变化; $\Delta P_{BP}(s)$ 为下垂控制下储能系统输出功率变化; H 为电网的惯性时间常数; D 为负荷阻尼系数; ρ 为新能源并网比例。

机组出力变化方程:

$$\Delta P_G(s) = -K_G(1-\rho)\Delta f(s)G_G(s) \quad (4)$$

$$G_G(s) = \frac{1}{(1+T_Gs)(1+T_Cs)} \quad (5)$$

式中, K_G 为传统机组调节系数; T_G 为调速器时间常数, 取0.2 s; T_C 为汽轮机时间常数, 取0.3 s。

储能出力:

$$\Delta P_B(s) = -(K_E + K_p s)\Delta f(s)G_B(s) \quad (6)$$

$$G_B(s) = \frac{1}{T_Bs + 1} \quad (7)$$

式中, T_B 为储能响应时间常数, 一般取为0.3 s。

综上所述, 频率的传递函数为

$$\Delta f = \frac{-P_L(s)}{K_G(1-\rho)G_G(s) + K_E G_B(s)} + \frac{-P_L(s)}{s[K_p G_B(s) + 2H(1-\rho)] + D} \quad (8)$$

频率的初始变化速率和稳态偏差为

$$\begin{cases} \frac{d\Delta f}{dt} = \lim_{s \rightarrow \infty} s^2 \Delta f(s) = -\frac{\Delta P_L}{K_p + 2H(1-\rho)} \\ \Delta f = \lim_{s \rightarrow 0} s \Delta f(s) = -\frac{\Delta P_L}{K_E + K_G(1-\rho) + D} \end{cases} \quad (9)$$

根据上述分析, 所建立的结构如图2所示。

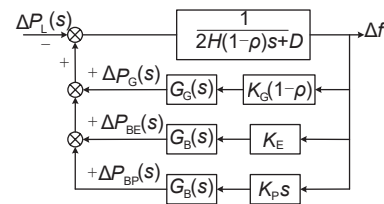


图2 储能一次调频对应的线性化模型

Fig. 2 The corresponding linearization model of primary frequency regulation of energy storage

随着新能源渗透率的持续提升, 系统等效机械惯量和电磁阻尼系数降低, 不仅削弱了电网应对扰动的鲁棒性, 而且使得稳态频率偏差幅值与初始频率变化率增大。故而为储能系统配置恰当的虚拟下

垂及虚拟惯量控制参数，有助于提升系统运行频率的稳定性。

2.2 参数对于系统稳定性的影响

在动态系统稳定性分析领域，确定控制参数后，可建立系统特征多项式方程。基于根轨迹理论，通过跟踪单一参数的连续变化，可观察到其动态特性变化规律。

选取电网参数 $H=3$ 、 $D=2$ ，设置风电占比 $\rho=1/3$ ，不断改变下垂系数 K_E 和虚拟惯性系数 K_p ，绘制反映系统稳定及动态性能的零极点分布图。当虚拟惯性系数 $K_p=0$ 、下垂系数 K_E 的取值范围由 0.01 变动至无穷大时，系统的根轨迹情况如图 3 所示。下垂系数决定了系统频率偏差与储能系统输出功率之间的关系。在一定范围内， K_E 取值越大，系统特征根距离虚轴越近，其响应速度越迟缓；而当 K_E 的取值过大时，则可能导致系统稳定性面临风险。

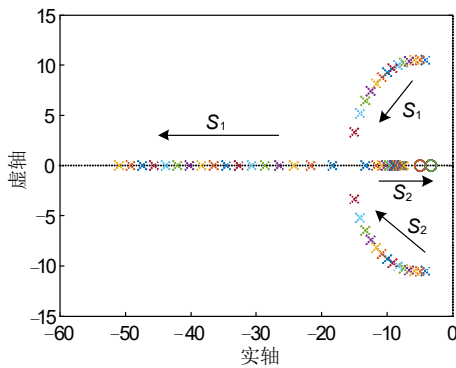


图 3 下垂系数改变时根轨迹
Fig. 3 Root locus under the droop coefficient changed

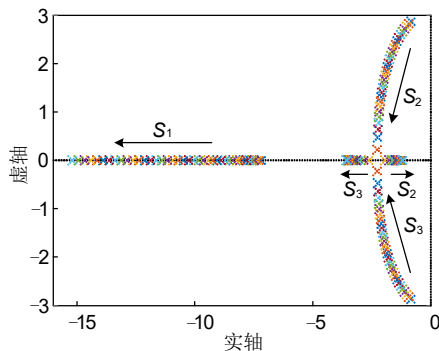


图 4 虚拟惯性系数改变时根轨迹
Fig. 4 Root locus under virtual inertia coefficient changed

当下垂系数 $K_E=0$ 、虚拟惯性系数 K_p 从 0.01 到无穷大变化时，系统根轨迹如图 4 所示。图中， S_2 、 S_3 为主导极点， S_1 为非主导极点。较大的虚拟惯性系数能够提供更强的瞬时功率支撑，但如果 K_p 取值过大，系统特征根会不断向虚轴靠拢，可能导致系统超调，使系统的响应速度变得缓慢，衰减变慢；较小的虚拟惯性系数则可能导致频率波动缓解效果不明显。

2.3 参数分析

根据式(8)频率的传递函数，可以绘制出不同情况下频率的响应曲线，分析储能系统在频率动态调节过程中下垂系数 K_E 和虚拟惯性系数 K_p 的作用。

(1) 下垂系数的影响

当储能下垂系数为 5、15、20、25 时，频率响应曲线如图 5 所示。从图中可以看出，在惯性响应阶段和一次调频阶段内，此控制模式可以促进电网频率的恢复，且虚拟下垂控制系数越大，最大频率偏差值和稳态频率偏差值越小，即调频效果越好。但下垂系数影响到最终储能输出功率大小，由于系统所配备的储能有容量限制，而且下垂系数过大可能会导致系统频率出现二次下降的情况，因此综合考虑，在本次研究中系统下垂系数取为 20。

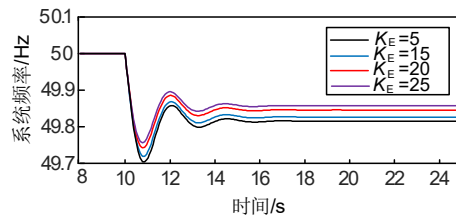


图 5 下垂系数改变时系统频率响应曲线
Fig. 5 The system frequency response curve when the droop coefficient changes

(2) 虚拟惯性系数的影响

当虚拟惯性系数为 10、15、20、30 时，系统频率响应曲线如图 6 所示。由图 6 可以看出，在系统频率变化初始时刻，为降低系统频率变化率可设置较大的虚拟惯性参数，能够增强系统阻尼性，使频率偏差量的暂态振荡幅度被有效抑制，以此减缓系统频率的下跌速度。当系统所受的扰动作用停止后，若将虚拟惯性系数设定为较小值，有助于系统频率更快地恢复到额定范围。因此综合考虑，在本次研究中系统虚拟惯性系数取为 20。

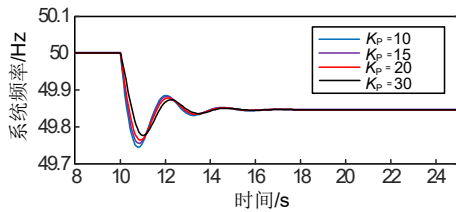


图6 虚拟惯性系数改变时系统频率响应曲线

Fig. 6 The system frequency response curve when the virtual inertia coefficient changes

3 参数自适应储能综合控制策略

在电力系统频率动态响应过程中，针对频率暂态下降与稳态恢复阶段的动态特性差异，储能需充分发挥虚拟下垂控制与虚拟惯性控制各自的优势，以实现频率的有效调节。然而，若直接切换控制模式，可能会导致储能电站输出功率出现突变，进而影响系统的稳定性。本研究设计基于隶属度函数动态寻优的模糊协调控制器，通过动态调整两种控制模式，实现两种控制模式的协同作用。

控制框如图7所示，图中 K_{E0} 代表储能下垂控制系数初值， α 为虚拟惯性控制调节因子， K_{E1} 为下垂控制调节因子。

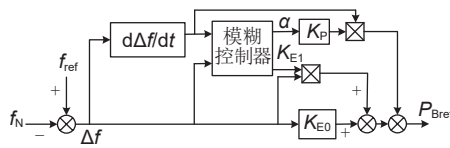


图7 虚拟惯性与下垂系数协同自适应综合控制框

Fig. 7 Coordinated adaptive integrated control block of virtual inertia and droop coefficient

模糊控制下，有功功率增量 P_{Bref} 由式(10)表示。

$$P_{Bref} = \alpha K_p \frac{d\Delta f}{dt} + (K_{E1} + K_{E0}) \Delta f \quad (10)$$

(1) 输入输出量的隶属度函数

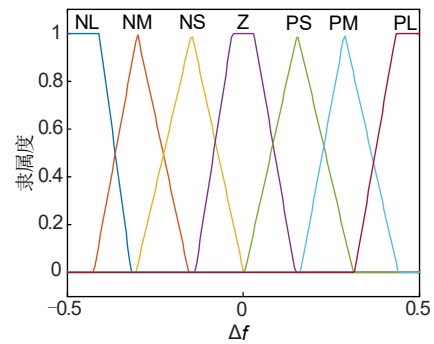
分别设置输入1频率偏差的论域为 $[-0.5, 0.5]$ ，输入2频率变化率的论域为 $[-15, 15]$ ，输出1虚拟惯性控制调节因子 α 的论域为 $[-0.5, 2.0]$ ，输出2下垂控制调节因子 K_{E1} 的论域为 $[0, 10]$ ，得到输入、输出变量的隶属度函数，如图8所示。

(2) 模糊规则

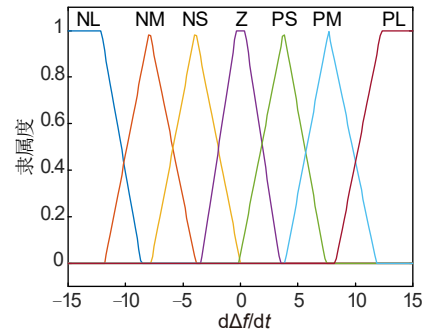
下垂控制调节因子 K_{E1} 以及虚拟惯性控制调节因子 α 的模糊规则，如表1和表2所示。

(3) 去模糊化

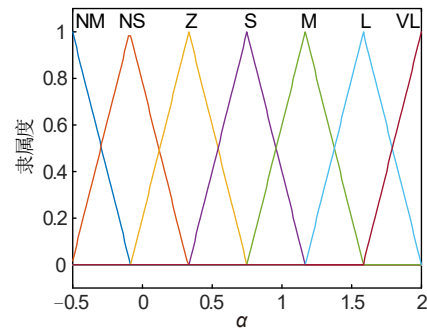
本研究选用重心坐标法作为去模糊化的手段，



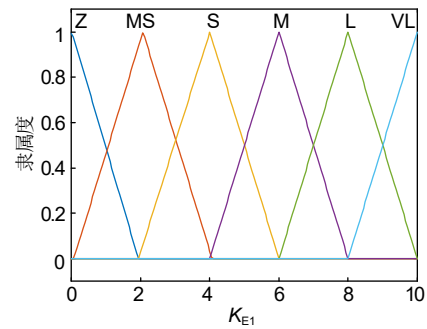
(a) 频率偏差的隶属度函数



(b) 频率偏差变化率的隶属度函数



(c) alpha的隶属度函数



(d) K_E1的隶属度函数

图8 输入输出隶属度函数

Fig. 8 Input and output membership function

以此获取一系列关于参数 α 以及 K_{E1} 的精确数值。

图9呈现了 α 和 K_{E1} 双变量协同作用下的三维关系。在系统频率偏差绝对值 $|\Delta f|$ 处于较小范围且频率变化率绝对值 $|d\Delta f/dt|$ 相对较大时，需把下垂系数

表 1 K_{E1} 模糊控制规则表

Table 1 Fuzzy control rules table of K_{E1}

K_{E1}	频率偏差/Hz							
	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL	
频率变化率 (Hz/s)	NL	VL	L	M	M	M	L	VL
	NM	VL	L	M	S	M	L	VL
	NS	VL	M	MS	Z	MS	N	VL
	Z	VL	S	Z	Z	Z	S	VL
	PS	VL	M	MS	Z	MS	M	VL
	PM	VL	L	M	S	M	L	VL
	PL	VL	L	M	M	M	L	VL

表 2 α 模糊控制规则表

Table 2 Fuzzy control rules table of α

α	频率偏差/Hz							
	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL	
频率变化率 (Hz/s)	NL	VL	VL	VL	VL	NM	NM	NM
	NM	VL	L	M	M	NS	NS	NM
	NS	M	M	M	S	Z	NS	NS
	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
	PS	NS	NS	Z	S	M	M	M
	PM	NS	NS	NS	M	M	L	L
	PL	NM	NM	NM	VL	VL	VL	VL

动态调整为较小数值，而将虚拟惯性系数设置为较大数值；与之相反，当频率偏差绝对值 $|\Delta f|$ 较大且频率变化率绝对值 $|d\Delta f/dt|$ 较小时，这表明系统处于频率跌落的后时段，此时需将模糊控制器内的下垂系数设定为较大数值，虚拟惯性系数则设定为较小数值。

4 基于 PSO 参数优化的功率 NL-ADRC 控制

为了进一步增强系统抗扰性，加快系统响应速

度，储能控制器可以采用自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)策略参与系统调频^[19]。

4.1 非线性自抗扰控制器(NL-ADRC)原理及参数整定规律

基于非线性控制理论构建的二阶自抗扰控制器(NL-ADRC)的拓扑架构如图 10 所示。

该控制体系包含 3 个核心功能模块，NL-ADRC 采用跟踪微分器(tracking differentiator, TD)来规划过渡响应，确保微分信号的稳定提取，有效抑制设定值跳变引发的瞬态超调；非线性状态误差反馈控制律(nonlinear state error feedback law, NLSEF)能够优化控制性能；非线性扩张状态观测器(nonlinear extended state observer, NLESO)可以实时监测系统的总扰动情况^[20]。在图 10 中， v 是系统设定的参考输入值； u 为 NL-ADRC 的输出信号； y 为系统的实际输出； b_0 为系统内部增益； z_1 、 z_2 、 z_3 分别对应 NLESO 系统输出状态变量 x_1 、 x_2 、 x_3 的估计值。

假设存在二阶对象

$$\ddot{y} = f[y, \dot{y}, \omega(t), t] + bu \tag{11}$$

式中， $\omega(t)$ 为系统外部扰动； $f[y, \dot{y}, \omega(t), t]$ 为考虑系统外部扰动和内部扰动的总扰动。

状态变量满足

$$\begin{cases} x_1 = y \\ x_2 = \dot{x}_1 \end{cases} \tag{12}$$

可得出状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f[x_1, x_2, \omega(t), t] + bu \\ y = x_1 \end{cases} \tag{13}$$

式中， u 为 NL-ADRC 的输出，本次设计中为

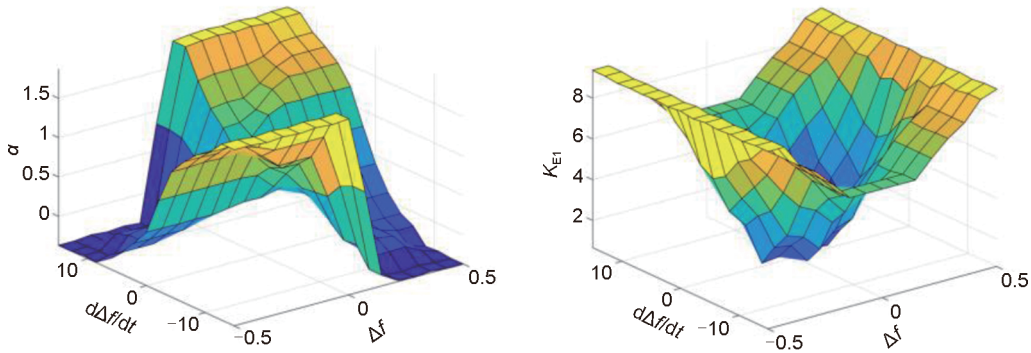


图 9 α 、 K_{E1} 与 $d\Delta f/dt$ 、 Δf 的三维关系图

Fig. 9 The three-dimensional diagram of the relationship between α , K_{E1} and $d\Delta f/dt$, Δf

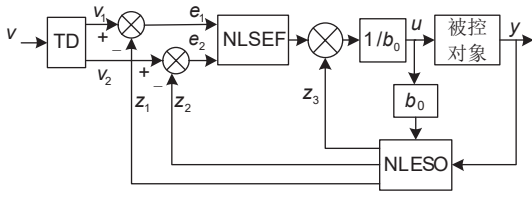


图10 二阶NL-ADRC结构

Fig. 10 Second-order NL-ADRC structure

储能变换器 d 轴电流 i_{dref} 。

NL-ADRC 的核心在于实时估计 $f[y, \dot{y}, \omega(t), t]$ ，并加以消除。

在本次设计中，选择的状态变量为

$$\begin{cases} x_1 = P_B \\ x_2 = \dot{P}_B \\ x_3 = f[y, \dot{y}, \omega(t), t] \end{cases} \quad (14)$$

式中， P_B 为储能功率。

(1) 跟踪微分器 TD

TD 的核心功能在于对系统输入信号实施提取与处理操作。其具体实现方式可通过如下数学表达式进行描述：

$$\begin{cases} v_1(k+1) = v_1(k) + hv_2(k) \\ v_2(k+1) = v_2(k) + hfhan[v_1(k) - v(k), v_2(k), \delta, h_0] \end{cases} \quad (15)$$

式中， v_1 为平滑后的过渡信号，即储能功率给定值经过 TD 环节作用后新产生的给定值 P_{Bref}^* ； v_2 为过渡信号的微分信号； h 为采样周期； $fhan$ 为最速的非线性函数； δ 为快速因子； h_0 为函数控制参量，为采样周期 h 的若干倍。

$fhan$ 函数的定义如下式：

$$fhan = \begin{cases} r \text{sign}(m), & |m| > d \\ r \frac{m}{d}, & |m| \leq d \end{cases} \quad (16)$$

式中， d 为滤波因子， $d=rh$ ，本次实验中选取 h 为 0.001； r 为速度因子，决定了微分器跟踪输入信号的快慢程度。

m 的表达式如式(17)所示：

$$m = \begin{cases} x_2 + \frac{(b_0 - d)}{2} \text{sign}(y), & |y| > d_0 \\ x_2 + \frac{y}{h}, & |y| \leq d_0 \end{cases} \quad (17)$$

增大加速因子有助于减小跟踪误差，但过高的收敛速率增益将削弱过渡过程对指令阶跃扰动的缓冲作用，导致动态规划功能失效。

(2) 非线性扩张状态观测器 NLESO

NLESO 能够将原本具有不确定性的系统转化为一种“积分器串联型”系统，极大地简化了控制过程，显著增强了控制系统的工程适用性^[21]。

结合式(13)和式(14)可得到基于输入输出信息的扩张状态观测器：

$$\begin{cases} \dot{e} = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 e \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_2 \text{fal}(e, m, \delta) + b_0 u \\ \dot{z}_3 = -\beta_3 \text{fal}(e, m, \delta) \end{cases} \quad (18)$$

式中， e 为系统总输出误差； β_1 、 β_2 、 β_3 为观测增益系数，需通过参数整定确定；通过实验，选取 b_0 为 1.2。

式(18)中连续幂次函数 fal 定义如下：

$$\text{fal}(e, m, \delta) = \begin{cases} \frac{e}{\delta^{m-1}}, & |e| \leq \delta \\ |e|^m \text{sign}(e), & |e| > \delta \end{cases} \quad (19)$$

在明确 fal 函数曲线特性之后，需对 NLESO 增益系数的参数进行优化配置。随着 β_1 值的增大，观测误差呈现减小趋势，同时收敛速度加快；随着 β_2 、 β_3 参数值的增加，系统振荡的趋势逐渐减弱。

(3) 非线性状态误差反馈控制律 NLSEF

NLSEF 利用 NLESO 反馈的状态信息以及 TD 的输出结果，构成了具有非线性组合特性的状态反馈误差^[22]。该状态反馈误差的数学表达式为

$$\begin{cases} e_1 = v_1 - z_1 \\ e_2 = v_1 - z_1 \\ u = k_1 \text{fal}(e_1, m_1, \delta) + k_2 \text{fal}(e_2, m_2, \delta) \end{cases} \quad (20)$$

在系统参数调整过程中，参数 m_1 的增大会导致系统上升时间相应缩短，进而使得系统响应速度加快；当参数 m_2 增大时，系统的上升时间会随之增加，导致系统响应速度变慢，但超调量会得到减小。当 k_1 的取值增大时，系统稳态时间会出现延长，而该参数对超调量及稳态误差的影响并不显著；当 k_2 的取值减小时，系统稳态时间相应缩短，响应速度得以提升，不过超调量会呈现显著增大的趋势。

4.2 粒子群算法优化自抗扰控制器参数

对于 NLESO 中参数 β_1 、 β_2 、 β_3 的整定，首先需要选取初始值，通过调整 ω_0 选取 β_1 、 β_2 、 β_3 的初始值。如果 β_3 取值过大，可能会导致总扰动估计值出现振荡的情况。本研究最终选取的参数 β_1 、 β_2 、 β_3 初始值公式如下：

$$\begin{cases} \beta_1 = 3\omega_0 \\ \beta_2 = 3\omega_0^2 \\ \beta_3 = \omega_0^3/5 \end{cases} \quad (21)$$

参数 k_1 、 k_2 可以依据控制器带宽 ω_c 的概念来设计，如式(22)：

$$\begin{cases} k_1 = \omega_c^2 \\ k_2 = 2\omega_c \end{cases} \quad (22)$$

针对二阶系统而言，NLESO 的带宽数值越大，系统的响应速度就越快，NL-ADRC 的稳定性与鲁棒性也会更强。然而，若带宽设置得过大，会使控制器的输出以及观测值的噪声过大，这会对工程实际应用产生不利影响。所以，在实际进行参数调节时，需要找到一个合适的折中点。

使用带宽法进行参数整定，需要整定的参数数量减少，但一般都是通过经验来选择，其调整较为复杂与困难，因此使用 PSO 来对选择的参数进行优化，实现 NL-ADRC 参数的最优配置。在仿真实验框架下，采用 PSO 算法对 NL-ADRC 的关键参数实施离线优化策略，PSO 算法寻优流程如图 11 所示。

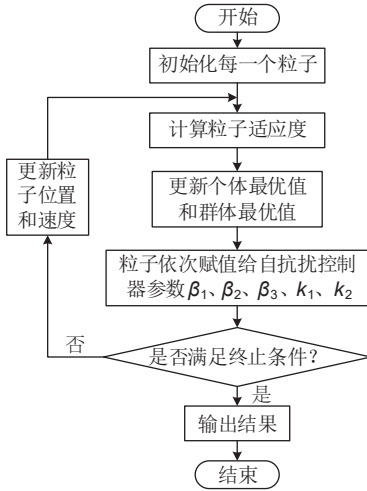


图 11 PSO 算法流程
Fig. 11 PSO algorithm flow

图 12 为 PSO 优化非线性 NL-ADRC 参数过程中的适应度变化曲线。该图表明，在粒子群算法持续迭代开展寻优的过程中，粒子的适应度数值逐步降低，并且最终趋于平稳状态。这一现象表明，在寻优过程中，系统所对应的目标函数值不断降低，即所获得的控制器参数组合逐渐趋近于最优解。

PSO 优化得到 NL-ADRC 参数 β_1 、 β_2 、 β_3 、 k_1 、 k_2 的变化曲线，如图 13 所示。

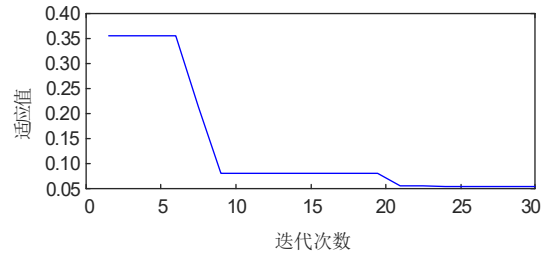


图 12 适应值变化曲线
Fig. 12 Adaptation value change curve

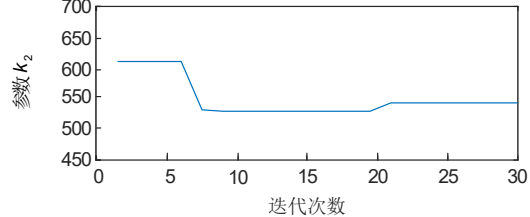
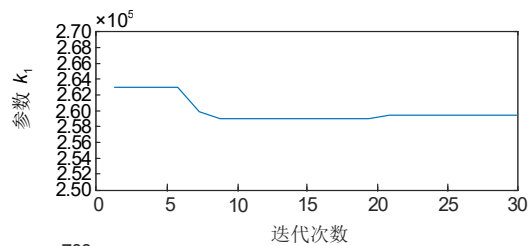
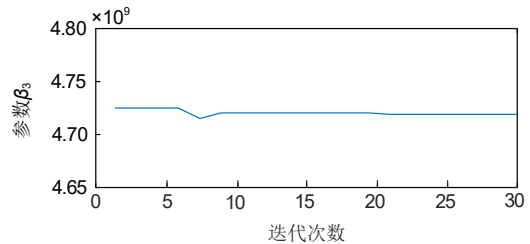
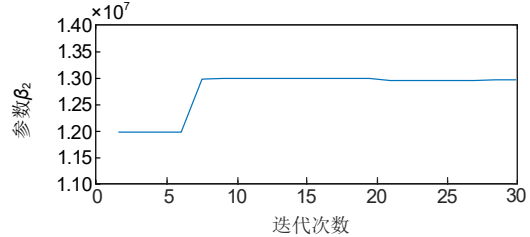
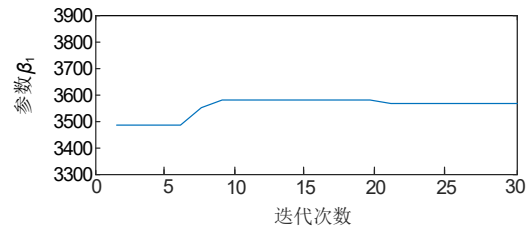


图 13 参数优化曲线
Fig. 13 Parameter optimization curve

4.3 储能参与风电场一次调频的总体控制框图

储能的自适应综合控制+基于 PSO 参数优化的 NL-ADRC 控制策略框如图 14 所示。自适应综合控

制采用模糊控制自动调节下垂系数和惯性系数，有功功率采用基于 PSO 参数优化的 NL-ADRC 控制策略，减小负载和风电功率扰动引起的频率波动。根据内蒙古自治区通辽市某工业园区实际情况，其风

电场容量为 50 MW，采用单机法由 20 台 2.5 MW 风机聚集而成，同步机组容量为 150 MW，额定负荷为 200 MW，储能的额定容量设置为风电场额定容量的 20%，即 10 MW/20 MWh，短路比为 3.2。

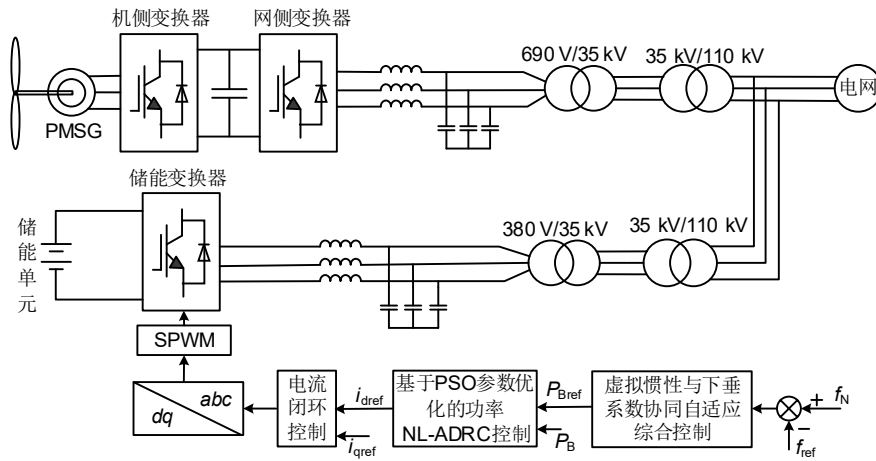


图 14 储能总体控制框

Fig. 14 Overall control block for energy storage

5 仿真分析

5.1 负荷突变

(1) 负荷突增

储能参与系统调频控制策略如表 3 所示。

表 3 储能控制策略

Table 3 Energy storage control strategy

方案	调频方式
方案一	储能综合控制
方案二	虚拟惯性与下垂系数的协同自适应综合控制
方案三	自适应综合控制+NL-ADRC 控制策略
方案四	自适应综合控制+基于 PSO 参数优化的 NL-ADRC 控制策略

在风速设定为 12 m/s 的条件下，于仿真时间 1 s 时刻向系统施加 10 MW 的负荷扰动，调频过程仿真结果如图 15 所示。由图 15 可知，储能采用综合控制调频时，频率最低值 f_{\min} 为 49.778 Hz，系统频率稳定值为 49.855 Hz，对比其他方案，频率的稳定性最差；在 4 种储能调频控制方法中，采用方案四的 f_{\min} 为 49.82 Hz，频率的偏差最小，调频控制效果优于其他方案，且系统响应速度最快，频率达到稳态的时间 t_s 为 0.063 s。

(2) 负荷突减

在风速为 12 m/s 的情况下，在 1 s 时系统中减少 10 MW 负荷扰动，仿真结果如图 16 所示。由图 16 可知，储能采用综合控制调频时，频率最高值 f_{\max} 为 50.221 Hz，系统频率稳定值为 50.13 Hz，对比其他

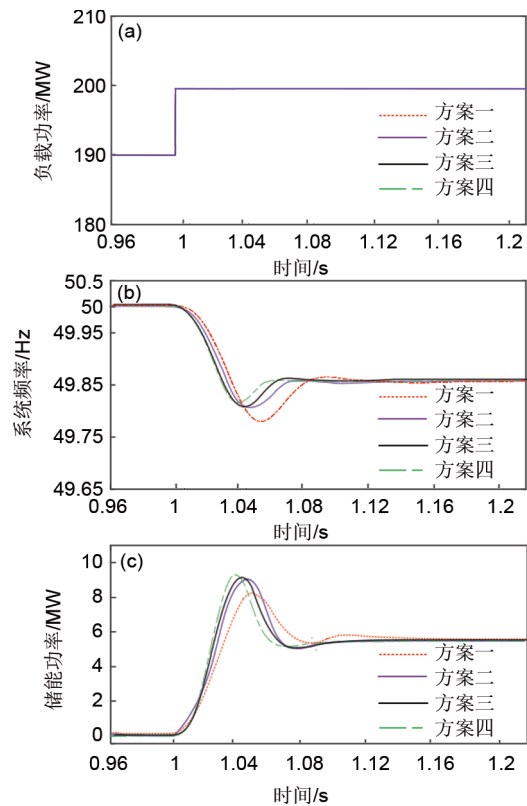


图 15 负荷突增仿真结果

Fig. 15 Simulation results of sudden load increase

方案，频率的稳定性最差且系统达到稳态的时间最长，频率达到稳态的时间 t_s 为 0.15 s；在 4 种储能调

频控制方法中，采用方案四的频率最高值 f_{max} 最小，为 50.172 Hz，调频控制效果优于其他方案，系统响应速度最快，频率达到稳态的时间 t_s 为 0.088 s。

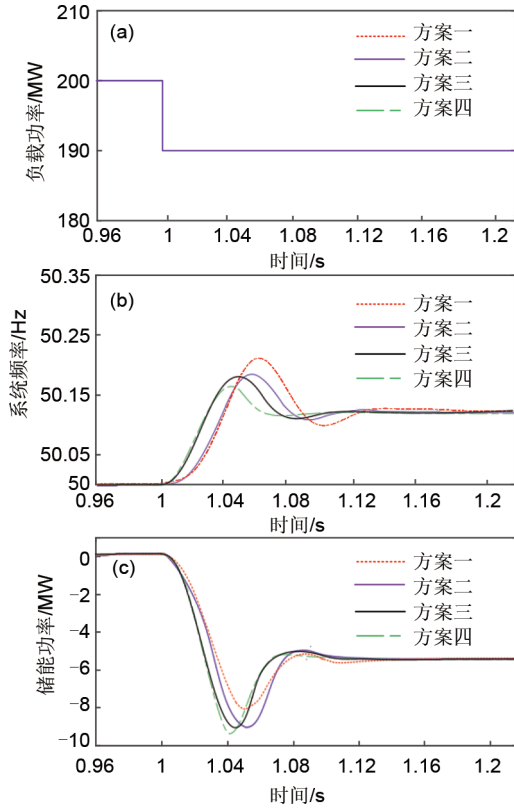


图 16 负荷突减仿真结果
Fig. 16 Simulation results of sudden load reduction

5.2 风速突变

(1) 风速突减

负荷一定的情况下，在 1 s 时系统风速由 12 m/s 变成 10.8 m/s，调频过程仿真结果如图 17 所示。由图 17 可知，储能采用综合控制调频时，频率最低值 f_{min} 为 49.767 Hz，系统频率稳定值为 49.85 Hz，对比其他方案，频率的稳定性最差且系统达到稳态的时间最长，频率达到稳态的时间 t_s 为 0.12 s；在 4 种储能调频控制方法中，采用方案四的频率最低值 f_{min} 为 49.81 Hz，调频控制效果优于其他方案，系统响应速度最快，频率达到稳态的时间 t_s 为 0.067 s。

(2) 风速突增

额定负荷的情况下，在 1 s 时系统风速由 10.8 m/s 变成 12 m/s，仿真结果如图 18 所示。由图 18 可知，储能采用综合控制调频时，频率最高值 f_{max} 为 50.265 Hz，系统频率稳定值为 50.145 Hz，

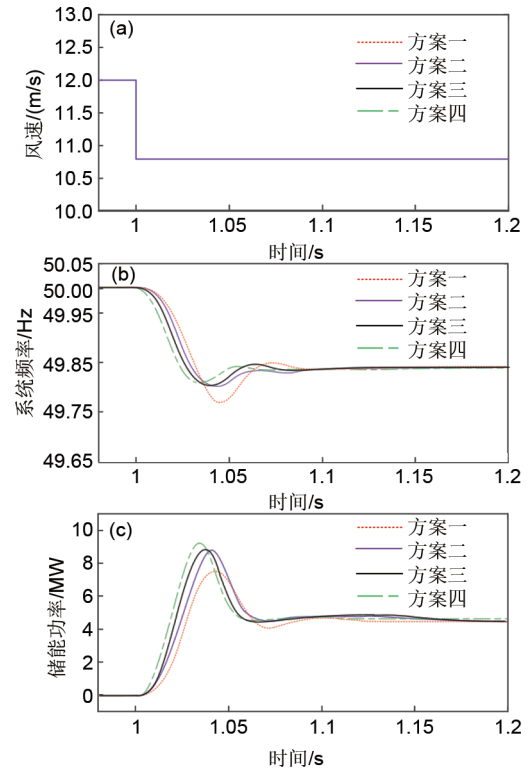


图 17 风速突减仿真结果
Fig. 17 Simulation results of wind speed reduction

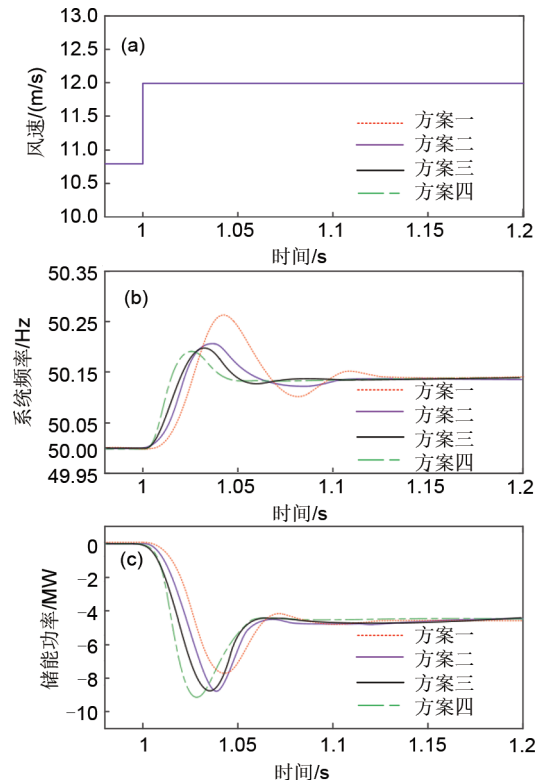


图 18 风速突增仿真结果
Fig. 18 Simulation results of wind speed increase

对比其他方案, 频率的稳定性最差且系统达到稳态的时间最长, 频率达到稳态的时间 t_s 为0.133 s; 在4种储能调频控制方法中, 采用方案四的频率最高值 f_{\max} 最小, 为50.195 Hz, 调频控制效果优于其他方案, 系统响应速度最快, 频率达到稳态的时间 t_s 为0.057s。

6 基于RTDS与RCP的硬件在环实验研究

为检验本研究所提控制方法的有效性, 搭建了一套半实物仿真测试平台, 该平台基于实时数字仿真设备(real time digital simulation system, RTDS)与快速控制原型开发系统(rapid control prototyping, RCP), 形成完整的硬件在环(HIL)实验环境。

6.1 RTDS与RCP硬件在环实验平台设计

本研究所设计的基于RTDS与RCP的硬件在环实验平台如图19。

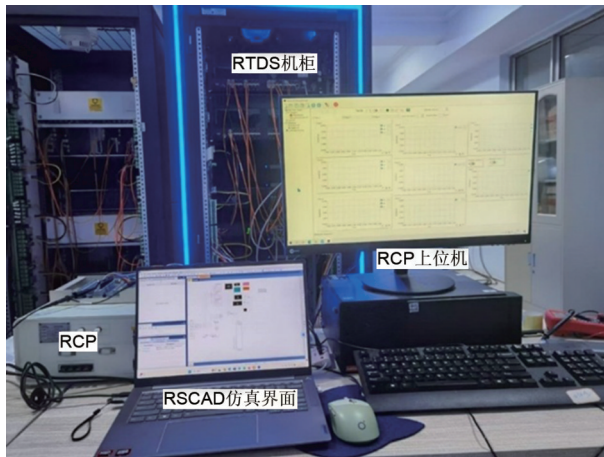
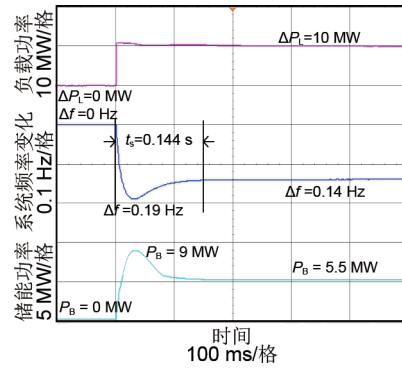


图19 基于RTDS与RCP的硬件在环实验平台

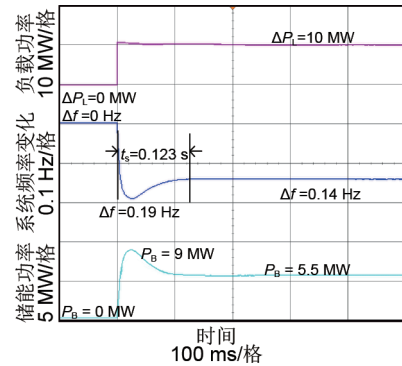
Fig. 19 Hardware-in-the-loop experimental platform based on RTDS and RCP

6.2 实验结果及分析

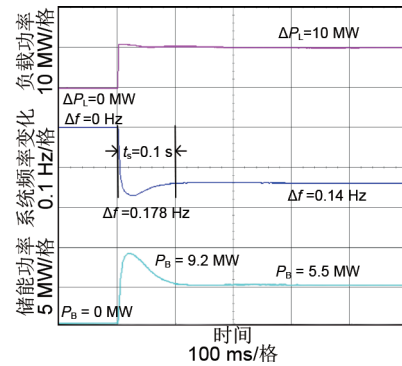
系统初始正常运行, 突增10 MW负荷和突减10 MW负荷的系统频率变化及储能输出的有功功率实验结果分别如图20和图21所示。由图20和图21可知, 在系统负荷突增的情况下, 采用本研究调频方法可将系统最低频率提高为49.822 Hz, 大于其他调频方法, 且系统频率达到稳定状态所需时间最短为0.1 s; 在系统负荷突减情况下采用本研究调频方式可将系统最高频率降低为50.17 Hz, 且系统频率达到稳定状态所需时间最短为0.14 s。实验结果表明, 所提出的控制策略在实际应用场景



(a) 虚拟惯性与下垂系数协同自适应综合控制



(b) 虚拟惯性与下垂系数协同自适应+NL-ADRC控制



(c) 协同自适应+PSO优化NL-ADRC参数控制

图20 负荷突增情况下实验波形

Fig. 20 The experimental waveform under the condition of sudden increase of load

中展现出了良好的性能。

负荷突增和突减情况下, 仿真实验与半实物实验对比结果见表4。由表4可见, 实验与仿真的结果基本一致, 验证了本研究控制方法的有效性。

7 结论

本研究针对大规模风电并网带来的一次调频能力不足问题, 以储能参与风电场一次调频为研究背景, 提出了一种储能自适应调频控制策略。针对传统PI控制存在的抗扰能力受限的固有缺陷, 储能控制

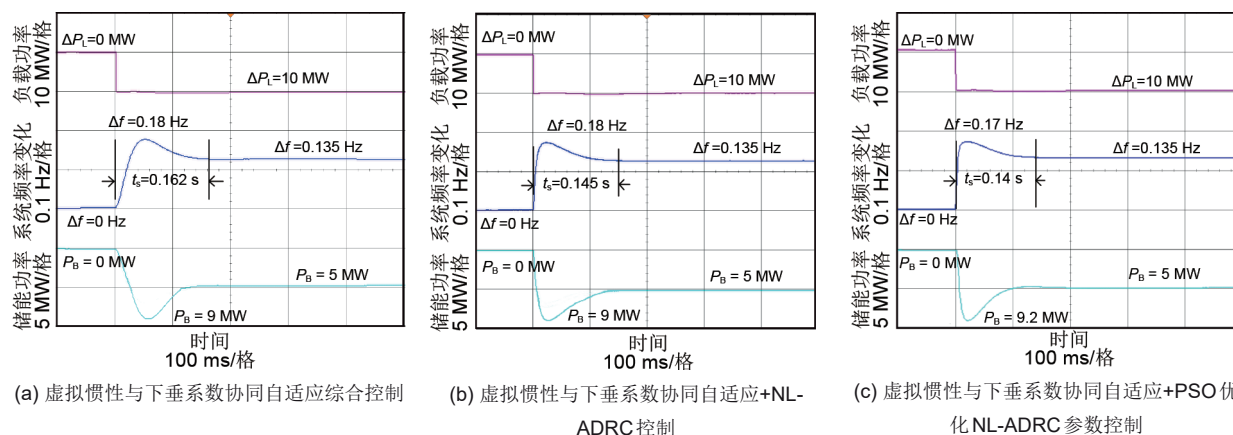


图 21 负荷突减情况下实验波形
Fig. 21 Experimental waveform under sudden load reduction

表 4 仿真与实验对比结果

Table 4 The comparison results of simulation and experiment

负荷变化	方案	仿真 Δf_{max} /Hz	实验 Δf_{max} /Hz	仿真 t_s /s	实验 t_s /s
负荷突增	虚拟惯性与下垂系数协同自适应综合控制	0.188	0.190	0.104	0.144
	虚拟惯性与下垂系数协同自适应+NL-ADRC 控制	0.189	0.190	0.076	0.123
	虚拟惯性与下垂系数协同自适应+PSO 优化 NL-ADRC 参数控制	0.180	0.178	0.063	0.100
负荷突减	虚拟惯性与下垂系数协同自适应综合控制	0.185	0.180	0.136	0.162
	虚拟惯性与下垂系数协同自适应+NL-ADRC 控制	0.182	0.178	0.104	0.145
	虚拟惯性与下垂系数协同自适应+PSO 优化 NL-ADRC 参数控制	0.172	0.170	0.088	0.140

器功率外环采用自抗扰控制，并采用粒子群算法优化自抗扰控制器参数，降低调参难度，实现 NL-ADRC 参数的最优配置。最后，在系统负荷突变以及风速突变工况下，通过开展仿真实验以及硬件在环测试，来验证所提出控制策略的有效性，得到以下结论。

(1) 制定多变量模糊控制规则，根据频率偏差变化率以及频率偏差动态调节虚拟惯性控制系数和下垂控制系数，充分发挥储能调频性能。所提控制策略可有效减小系统频率偏差，加快系统响应速度。

(2) 本研究所提出的自适应综合控制+基于 PSO 参数优化的 NL-ADRC 控制策略，可以在系统负荷突变或风速突变时，有效减小系统频率偏差，加快系统响应速度，缩短频率恢复时间，系统频率最大偏差值均小于 0.2 Hz，频率恢复时间不大于 0.1 s。

参考文献

[1] 王涛, 王廷涛, 刘芮, 等. 计及动态频率响应约束的高比例风电电力系统机组组合模型[J]. 高电压技术, 2021, 47(10): 3463-3474. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20210857.
WANG T, WANG T T, LIU R, et al. Unit commitment model of high proportion wind power system considering dynamic frequency response constraints[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10):

3463-3474. DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.20210857.
[2] CHEN C Q, TANG W H, XIA Y Q, et al. Hybrid-energy storage optimization based on successive variational mode decomposition and wind power frequency modulation power fluctuation[J]. Energies, 2024, 17(17): DOI:10.3390/en17174391.
[3] 胡泽春, 蔡福霖, 冯建洲. 兼顾新能源消纳与频率电压支撑的电池储能系统优化规划[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(7): 3-12. DOI: 10.16081/j.epae.202405026.
HU Z C, CAI F L, FENG J Z. Optimal planning of battery energy storage system considering renewable energy consumption and frequency and voltage support[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(7): 3-12. DOI:10.16081/j.epae.202405026
[4] LIU Y Q, CHEN M R, XIE B, et al. Integrated control strategy of BESS in primary frequency modulation considering SOC recovery [J]. IET Renewable Power Generation, 2024, 18(5): 875-886. DOI:10.1049/rpg2.12959.
[5] 张崇, 李博, 李笑宇, 等. 基于虚拟同步机控制参数自适应调节的储能系统调频方法[J]. 发电技术, 2024, 45(4): 772-780. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.23035.
ZHANG C, LI B, LI X Y, et al. A frequency regulation method of energy storage system based on adaptive adjustment of virtual synchronous generator control parameters[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(4): 772-780. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.23035.
[6] 姜惠兰, 蔡继朝, 肖瑞, 等. 一种提高系统频率响应特性的风储协调控制策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(7): 44-51.
JIANG H L, CAI J Z, XIAO R, et al. A wind-storage coordinated

- control strategy for improving system frequency response characteristics[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(7): 44-51.
- [7] 梁继业, 袁至, 王维庆, 等. 基于电池储能系统的综合自适应一次调频策略[J]. *电工技术学报*, 2025, 40(7): 2322-2334. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.240456.
LIANG J Y, YUAN Z, WANG W Q, et al. Comprehensive adaptive primary frequency control strategy based on battery energy storage system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2025, 40(7): 2322-2334. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.240456.
- [8] LI C P, LI J, LI J H, et al. Optimization strategy of secondary frequency modulation based on dynamic loss model of the energy storage unit[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 51: 104425. DOI:10.1016/j.est.2022.104425.
- [9] BOYLE J, LITTLER T, FOLEY A. Battery energy storage system state-of-charge management to ensure availability of frequency regulating services from wind farms[J]. *Renewable Energy*, 2020, 160: 1119-1135. DOI:10.1016/j.renene.2020.06.025.
- [10] MEJIA-RUIZ G E, PATERNINA M R A, SEGUNDO SEVILLA F R, et al. Fast hierarchical coordinated controller for distributed battery energy storage systems to mitigate voltage and frequency deviations[J]. *Applied Energy*, 2022, 323: 119622. DOI:10.1016/j.apenergy.2022.119622.
- [11] 王俊月, 杨骥, 宋政湘, 等. 基于自适应SOC的电池-飞轮混合储能一次调频控制策略[J]. *电力工程技术*, 2024, 43(5): 122-130.
WANG J Y, YANG K, SONG Z X, et al. Primary frequency regulation strategy for battery-flywheel hybrid energy storage based on adaptive state of charge[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2024, 43(5): 122-130.
- [12] 商侨晏, 李凤婷, 王森, 等. 基于多变量模糊逻辑控制的风储联合系统一次调频策略[J]. *电网技术*, 2023, 47(6): 2344-2352. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2022.1827.
SHANG Q Y, LI F T, WANG S, et al. Primary frequency modulation strategy for wind-storage combined system based on multivariable fuzzy logic control[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(6): 2344-2352. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2022.1827.
- [13] 陶珑, 马小勇, 王议锋, 等. 混合储能系统增强型自抗扰协调控制[J]. *太阳能学报*, 2024, 45(9): 668-677.
TAO L, MA X Y, WANG Y F, et al. Coordinated control of hybrid energy storage based on enhanced active disturbance rejection control[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2024, 45(9): 668-677.
- [14] 马幼捷, 杨清, 周雪松, 等. 基于模糊神经网络的储能侧双向DC-DC变换器自抗扰控制策略[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(10): 488-495. DOI:10.19912/j.0254-0096.tynxb.2023-1955.
MA Y J, YANG Q, ZHOU X S, et al. Active disturbance rejection control strategy of bidirectional DC-DC converter on energy storage side based on fuzzy neural network[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2023, 44(10): 488-495. DOI:10.19912/j.0254-0096.tynxb.2023-1955.
- [15] 马幼捷, 陈韵霏, 周雪松, 等. 融合DDPG算法的参数动态协同储能变换器自抗扰稳压控制[J]. *高电压技术*, 2025, 51(11): 5607-5619. DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.20241981.
MA Y J, CHEN Y F, ZHOU X S, et al. Parameter dynamic cooperative energy storage converter active disturbance rejection and voltage regulation control fused with DDPG algorithm[J]. *High Voltage Engineering*, 2025, 51(11): 5607-5619. DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.20241981.
- [16] 黄红杰, 皇金锋, 周杰. 基于有限时间观测器的两级式储能变流器改进滑模自抗扰控制[J]. *电工技术学报*, 2025, 40(1): 178-189. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.231469.
HUANG H J, HUANG J F, ZHOU J. Improved sliding mode active disturbance rejection control for two-stage power conversion system based on finite time observer[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2025, 40(1): 178-189. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.231469.
- [17] 李浩然, 王子滔. 基于电池储能SOC特性的配电网供电恢复有功控制方法[J]. *储能科学与技术*, 2025, 14(7): 2833-2843. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0108.
LI H R, WANG Z T. Active control method for power restoration in distribution networks considering the characteristics of distributed energy storage SOC[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2025, 14(7): 2833-2843. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0108.
- [18] 吴启帆, 宋新立, 张静冉, 等. 电池储能参与电网一次调频的自适应综合控制策略研究[J]. *电网技术*, 2020, 44(10): 3829-3836. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1214.
WU Q F, SONG X L, ZHANG J R, et al. Study on self-adaptation comprehensive strategy of battery energy storage in primary frequency regulation of power grid[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(10): 3829-3836. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1214.
- [19] 李建林, 卢冠铭, 游洪灏, 等. 基于改进LADRC的构网型储能调频控制策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(15): 142-154. DOI:10.19783/j.cnki.pspc.240093.
LI J L, LU G M, YOU H H, et al. Frequency regulation control strategy for grid-forming energy storage based on improved LADRC[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(15): 142-154. DOI:10.19783/j.cnki.pspc.240093.
- [20] 杨伯鹏, 崔森, 陈来军, 等. 基于改进自抗扰控制的分布式压缩空气储能系统调频控制策略[J]. *电气工程学报*, 2024, 19(4): 37-47. DOI:10.11985/2024.04.004.
YANG B P, CUI S, CHEN L J, et al. Frequency regulation control strategy in distributed compressed air energy storage based on improved active disturbance rejection control[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2024, 19(4): 37-47. DOI:10.11985/2024.04.004.
- [21] 孙斌, 王海霞, 苏涛, 等. 永磁同步电机调速系统非线性自抗扰控制器设计与参数整定[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(20): 6715-6725. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.200018.
SUN B, WANG H X, SU T, et al. Nonlinear active disturbance rejection controller design and tuning for permanent magnet synchronous motor speed control system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(20): 6715-6725. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.200018.
- [22] 蒋皓, 贾云飞, 陶灿辉. 基于NLADRC的水下飞行器姿态控制算法[J]. *中国测试*, 2024, 50(4): 119-124. DOI:10.11857/j.issn.1674-5124.2022030204.
JIANG H, JIA Y F, TAO C H. Attitude control algorithm of underwater vehicle based on NLADRC[J]. *China Measurement & Testing Technology*, 2024, 50(4): 119-124. DOI:10.11857/j.issn.1674-5124.2022030204.