新能源技术

文章编号:1001-2060(2024)02-0154-08

考虑调频可靠性的风储系统多目标优化策略

葛丽超.张 怡

(华北理工大学 电气工程学院,河北 唐山 063210)

摘 要:针对风电强不确定性导致的电力系统频率不稳定问题,提出了考虑调频可靠性的风储系统多目标优化策略,以风电功率预测数据为基础,利用风储系统对电力系统提供频率支撑,保证电力系统频率稳定。该策略包含补 偿和调频两个步骤,首先提出基于储能系统的风电预测误差补偿策略,并将风电预测误差补偿至10%以内,同时为 风电场预留20%的调频容量。其次,考虑系统调频经济性,提出基于模型预测控制的风储系统参与电力系统频率 控制策略,采用风电备用和储能系统进行调频。最后,将上述策略作为约束条件,采用多目标哈里斯鹰算法求解满 足上述双目标的储能容量用以验证策略的有效性。仿真结果表明:本文所提调频策略能够在保障调频可靠性的基 础上,降低电网频率波动,满足风电系统和电网的高效、安全运行。

关键 词:风储系统;频率控制;储能;预测误差;多目标算法

中图分类号:TM614 文献标识码: A DOI: 10.16146/j. cnki. rndlgc. 2024.02.019

[引用本文格式] 葛丽超,张 怡.考虑调频可靠性的风储系统多目标优化策略[J]. 热能动力工程,2024,39(2):154-161. GE Lichao,ZHANG Yi. Multi-objective optimization strategy of wind storage system considering frequency modulation reliability[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2024,39(2):154-161.

Multi-objective Optimization Strategy of Wind Storage System Considering Frequency Modulation Reliability

GE Li-chao, ZHANG Yi

(College of Electrical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, China, Post Code: 063210)

Abstract: Aiming at the frequency instability of the power system caused by the strong uncertainty of wind power, a multi-objective optimization strategy for the wind storage system considering the reliability of frequency regulation was proposed. Based on wind power prediction data, the wind storage system was used to provide frequency support to the power system and ensure the frequency stability of the power system. The strategy consisted of two steps including compensation and frequency regulation. Firstly, a wind power prediction error compensation strategy based on the energy storage system was proposed, and the wind power prediction error was compensated to within 10%, while 20% of the frequency regulation capacity was reserved for the wind farm. Secondly, considering the economics of system frequency regulation, the wind storage system based on model prediction control was proposed to participate in the frequency control strategy of the power system, and the wind power standby and energy storage system were

Fund-supported Project: National Key Research and Development Program (International Cooperation Special Project) (2021YFE0190900); Science Plan Project of Tangshan (22130210H); National Natural Science Foundation of China (61803154); Na-

tional Natural Science Foundation of Hebei Province (F2019209553)

作者简介:葛丽超(1994 -),男,华北理工大学硕士研究生.

收稿日期:2023-04-18; 修订日期:2023-05-17

基金项目:国家重点研发计划项目(国际合作专项)(2021YFE0190900);唐山市科学计划项目(22130210H);国家自然科学基金(61803154); 河北省自然科学基金(F2019209553)

used for frequency regulation. Finally, the multi-objective Harris hawk optimizer (HHO) algorithm was used to solve for the energy storage capacity that satisfied the above dual objectives as a constraint to verify the effectiveness of the strategy. The simulation results show that the proposed frequency regulation strategy can reduce the frequency fluctuation of the grid on the basis of ensuring the reliability of frequency regulation, and meet the efficient and safe operation of the wind power system and the grid.

Key words: wind storage system, frequency regulation, energy storage, prediction error, multi-objective algorithm

引 言

风电是一种具有高度波动性和间歇性特点的可 再生能源。随着风电并网规模的增加,给电力系统 的调度与调频带来巨大挑战^[1-3]。我国风电多以风 电集群方式接入电网,因此风电自身积极参与系统 调频、改善系统频率响应能力是保证电力系统稳定 运行的有效手段^[4-5]。

目前,在风电场参与电力系统频率控制方面,文 献[6-8]分别提出了不同的风电场分布式有功功 率控制方案,用以保证风电场稳定参与调频。文献 [9]也提出了一种考虑惯性响应和一次调频与稳态 运行点的风电机组调频控制策略。在控制框架方 面,文献[10-11]为了改善风电调度并增加风电适 应能力,分别提出针对风 - 储联合系统的频率响应 控制策略。在考虑预测信息方面,文献[12-13]分 别提出了基于风电预测的风储控制策略,用于改善 风电预测周期内风速不确定性对调频能力的影响。 上述文献从不同方面考虑了风电场参与电力系统频 率控制的影响因素,但鲜有文献以风电预测为基础 预留备用调频容量,并利用储能系统补偿预测误差 保证调频可靠性。

储能系统在辅助风电场参与电力系统调频方面 有着显著作用^[14-15],文献[16-17]分别针对不同 目标提出了风电机组一次调频策略。模型预测控制 (Model Predictive Control, MPC)是一种将预测模型 与自身实际情况相结合的控制方法,已被证明在风 储系统参与电力系统频率控制方面有着较好的应用 效果^[18-19]。但上述研究多是将 MPC 应用到风电场 或者是风机频率控制中,对于将 MPC 应用到含储能 的风电系统中还需要更深一步的研究。

本文以电力系统频率控制为目标,提出考虑调

频稳定性的风储系统多目标补偿优化策略,以风电 功率预测数据为基础对电力系统提供频率支撑。考 虑系统调频可靠性,利用储能系统补偿风电预测误 差;考虑系统调频经济性,优先采用风电备用进行调 频,其次采用储能系统调频。以上述策略为约束条 件,采用多目标哈里斯鹰算法(Multi Objective Harris Hawks Optimizer, MOHHO) 求解满足上述双目标的 储能容量,继而分析所提策略的有效性。

1 风储集成发电系统结构

1.1 风储系统结构

风/储联合调频系统结构如图1所示,其中包含 风电场、储能系统、变压器、传输线路等组成。风电 场控制中心针对日前风电预测值,预留调频备用容 量,并针对预测误差,制定了储能补偿预测误差策 略,以保证风电场调频可靠性。风电场参与电网调 频时需要根据收到的调度参考值做出自身调整,利 用风电调频备用容量维持电网频率稳定,当调度指 令超过风电场最大出力时,在保证安全的前提下,储 能系统配合风电机组输出功率,同时功率变化也要 满足电网要求。





为了使风/储系统功率输出值尽可能地接近电 网调度指令,在采样时间点通过预测模型来预测未 来时间内的功率,并将预测到的结果作为新的调度 指令,通过功率调节单元的控制系统计算出电网功 率缺额,以此获得储能系统的充/放电功率,进而补 偿调度指令和风电场功率的差值。

1.2 考虑调频稳定性的风储系统多目标补偿优化 策略架构

以风电预测值为标准预留风电调频容量缺乏可 靠性,因此考虑调频稳定性的风储系统多目标补偿 优化策略必须对预测误差进行补偿。在电力系统出 现频率偏差时,才能有足够备用容量维持电力系统 频率稳定。综上所述,储能系统在辅助风电场参与 电力系统频率控制过程中,首先补偿风电功率预测 误差,保证实际风电备用容量在预测风电备用容量 的一定误差范围内,然后以此为基础辅助风电场参 与电力系统调频。为了同时满足上述双目标,必须 配置合理的储能容量。因此,本文构架可分为策略 部分和配置部分。而配置部分是长期的规划,因此 本文根据所提策略对储能容量进行配置的目的是验 证策略的有效性,一旦对储能进行定容,后期则参照 此容量运行。

2 基于风电功率预测的风/储系统调频策略

2.1 储能补偿风电功率预测误差策略

以风电预测功率为调频基准,当风电预测功率 大于20%的风电场装机容量时,风机始终工作在 80%模式,同时预留20%的调频容量,为并网调频 做准备。由于风电具有的不确定性,为了保证风储 系统调频可靠性,提出了储能补偿风电预测误差策 略,即必须保证风电实际调频容量达到以预测数据 为基准所预留的调频容量。

以补偿风电功率预测误差为目标,分析预测误 差是否偏离目标允许误差,制定储能补偿预测误差 策略。同时考虑储能荷电状态(State of Charge, SOC),构建储能补偿预测误差策略。对于利用储能 补偿风电预测误差,可得功率及 SOC 约束:

$$\frac{\mid P_{w}(t) - P_{s}(t) \mid}{P_{w}(t)} < \varepsilon$$
(1)

$$S_{\rm bl}(t) = S_{\rm bl}(t-1) + \frac{T \times \omega P_{\rm bl}(t)}{E_{\rm b}}$$
(2)

$$S_{\min} \leqslant S_{\rm b1}(t) \leqslant S_{\max} \tag{3}$$

式中: $P_w(t)$ —t 时刻风电场预测功率,kW; $P_s(t)$ —t 时刻风电场实际功率,kW; ε —风电场允许预测误 差,%; $S_{bl}(t)$ —t 时刻储能补偿预测误差时的 SOC 状态,%;T—补偿周期,min; $P_{bl}(t)$ —储能补偿预测 误差时的充/放电功率,kW; $P_{bl}(t)$ >0 为储能充电; E_b —储能的额定容量,kW·h; ω —储能充/放电效 率,%,其中,储能充电时 ω 为 η_c ,储能放电时 ω 为 $1/\eta_d$; η_c —充电效率; η_d —放电效率; S_{max} , S_{min} —储 能系统 SOC 的上、下限,%。

2.2 基于模型预测控制的风/储系统调频策略

以风电预测功率为基准,提取 20% 作为风电场 预留调频备用容量,剩余 80% 进行并网。当电网频 率过低时,由电网下达控制指令,风电场利用调频备 用和储能系统联合提高并网功率,提升电网频率。 当电网频率过高时,储能吸收风电或降低风电场输 出功率,补偿电网频率偏差,达到风/储系统联合调 频效果。对于系统调频可靠性,提出了储能补偿风 电预测误差策略,保证了实际调频容量满足预测调 频容量。对于利用风/储联合系统调节电网频率偏 差,提出基于模型预测控制的风/储系统联合调频 策略。

2.2.1 风/储联合调频模型

以风电场和储能系统联合对电网频率进行调节 为目的,可得风储联合调频模型如下:

$$\begin{cases} P_{\rm G}(k+1) = P_{\rm b2}(k) + P_{\rm y}(k) + \Delta P(k) \\ S_{\rm b2}(k+1) = S_{\rm b2}(k) + \frac{T \times \omega P_{\rm b2}(k)}{E_{\rm b}} \end{cases}$$
(4)

式中: $P_{G}(k)$ —系统联合输出,即输入电网的净功 率,kW; $P_{y}(k)$ — k 时刻储能补偿预测误差后的并 网风电功率,kW; $P_{b2}(k)$ — k 时刻储能调频充放电 功率,kW; $P_{b2}(k) > 0$ 为储能充电; $\Delta P(k)$ —k 时 刻风电场调频升/降功率,kW, $\Delta P(k) > 0$ 时为上升 功率, $\Delta P(k) < 0$ 时为下降功率; $S_{b2}(k) - k$ 时刻 储能调频时的 SOC 状态,%, $S_{b2}(k) = S_{b1}(k)$ 。

将式(4)转换成状态空间形式为:

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + B_1u(k) + B_2r(k) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases}$$
(5)
其中,状态量为:

$$x(k) = \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_G(k) \\ S_{b2}(k) \end{bmatrix}$$
(6)

控制输入: $u(k) = P_{h2}(k)$; 系统输出: $y(k) = P_{G}(k)$; 功率扰动: $r(k) = \Delta P(k)$ 。

系统模型中矩阵为:

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \boldsymbol{B}_{1} = \begin{bmatrix} 1 \\ T \\ \overline{E}_{b} \end{bmatrix}, \boldsymbol{B}_{2} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \boldsymbol{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$$

2.2.2 风/储联合调频 MPC 控制策略设计

MPC 在风/储系统参与电力系统频率控制方面 能够实现滚动预测、超前控制。

在已知当前一段时间的风功率时,根据约束条件求解未来一段时间的调频指令,将求解的第1个 值应用于风储调频系统,滚动至下一时刻,更新 SOC 状态变量值以及电网频率,重复上述过程。其滚动 优化原理如图2所示。



图 2 MPC 滚动优化原理

Fig. 2 MPC scrolling optimization principle

考虑储能最小出力,建立了 MPC 调频滚动优化 目标函数:

$$J = \min \sum_{i=0}^{M-1} P_{b2}^2(k+i) + \sum_{i=1}^M S_{b2}^2(k+i)$$
(7)

式中:M—MPC 滚动预测时间长度。

在利用模型预测控制进行滚动优化的过程中, 考虑储能的充放电约束、储能的 SOC 状态约束:

$$-P_{\rm b,max} \le P_{\rm b2}(k+i) \le P_{\rm b,max} \tag{8}$$

$$S_{\min} \leqslant S_{\rm h2}(k+i) \leqslant S_{\rm max} \tag{9}$$

式中: $P_{b,max}$ 一储能额定功率,kW。

将目标函数公式(7)和约束条件公式(8)~公 式(9)化为二次规划标准型得公式(10)~(12):

$$\min \frac{1}{2} z^{T} \begin{bmatrix} R & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q \end{bmatrix}^{z} = \frac{1}{2} z^{T} \operatorname{Hz} (10)$$

$$\begin{bmatrix} B_{1} & -I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A & B_{1} & -I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A & B_{1} & -I \end{bmatrix}$$

$$z = \begin{bmatrix} -Ax^{T}(k) - B_{2}r(k) \\ -B_{2}r(k+1) \\ \vdots \\ -B_{2}r(k+M-1) \end{bmatrix}$$
(11)
$$\begin{bmatrix} U & V & 0 & 0 & 0 \\ 0 & U & V & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots \end{bmatrix}^{z} \leq \begin{bmatrix} W \\ W \\ \vdots \\ \end{bmatrix}$$
(12)

式中: $Z = [u(k), x^{T}(k+1), u(k+1), \cdots, u(k+M)]^{T}$; *H* 是由储能控制序列和出力水 平的二次项权重 *R* 和 *Q* 组成的矩阵。*R* = 2, *Q* = $\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}$ 。

 $\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W \end{bmatrix}$

$$U = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; V = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

 $W = [P_{max}, P_{max}, -S_{min}, S_{max}]$ (13) 式中: P_{max} —储能最大功率输出; S_{min} —储能系统 SOC 下限; S_{max} —储能系统 SOC 上限。

3 基于双目标的储能容量配置模型

以储能补偿风电预测误差和辅助风电场参与电 力系统调频为目标,考虑储能配置成本、储能 SOC 状态及额定功率约束,建立多目标的储能容量配置 模型。

3.1 目标函数

储能容量配置模型主要考虑储能成本问题和双

目标实现效果问题。首先以储能日均运行成本最低 为目标函数:

$$J_{1} = \min \frac{(C_{\rm b,p}P_{\rm b,max} + C_{\rm b,e}E_{\rm b})}{365Y} + C_{\rm r,b}E_{\rm b} \quad (14)$$

式中: $C_{b,p}$ —储能单位功率成本,元/kW; $C_{b,e}$ —单位 容量成本,元/(kW・h); $C_{r,b}$ —储能维护成本, 元/(kW・h);Y—储能寿命,年。

考虑储能补偿风电预测误差效果、辅助风电场 调频效果,以最小化目标缺失量为目标函数:

$$J_2 = \min(\max(\eta_1) + \max(\eta_2))$$
(15)
其中:

$$\eta_1(t) = \begin{cases} 0, & \lambda_1(t) < \varepsilon \\ \lambda_1(t) - \varepsilon, & \lambda_1(t) > \varepsilon \end{cases}$$
(16)

$$\lambda_{1}(t) = \frac{|P_{w}(t) - P_{f}(t)|}{P_{w}(t)}$$
(17)

式中: $P_{f}(t) - t$ 时刻补偿预测误差后风电功率,kW; $\lambda_{1}(t) - t$ 时刻补偿预测误差后风电预测误差,%; $\eta_{1}(t) - t$ 时刻预测误差补偿效果,%; η_{1} --预测误 差补偿效果,其值越小越好; ε ---风电场允许预测 误差。

$$\eta_{2}(t) = |P_{G}(t) - P_{n}(t)|$$
 (18)
式中: $P_{n}(t) - t$ 时刻电网下发的调频调度指令,kW。
 η_{2} 一储能辅助风电场调频效果,其值越小越好,
kW。

3.2 约束条件

储能系统在任意 t 时刻必须满足充放电功率约 束为:

$$P_{\rm b}(t) = P_{\rm b1}(t) + P_{\rm b2}(t)$$
(19)

储能系统 t 时刻充放电功率约束为:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\rm b}(t)\eta_{\rm s,c} \leq P_{\rm b,max}, & P_{\rm b}(t) > 0\\ -P_{\rm b,max} \leq \frac{P_{\rm b}(t)}{\eta_{\rm s,d}} \leq 0, & P_{\rm b}(t) < 0 \end{cases}$$
(20)

式中: $P_{b}(t)$ —t时刻储能充放电功率,kW。 储能额定容量约束为:

$$E_{\rm b,s} = \sum_{t=1}^{T} \begin{cases} P_{\rm b}(t) \eta_{\rm b,c} \Delta t P_{\rm b}(t) > 0 \\ \frac{P_{\rm b}(t)}{\eta_{\rm b,d}} \Delta t P_{\rm b}(t) < 0 \end{cases} + E_{\rm b0} \quad (21)$$

$$E_{\rm b} \ge \max(\frac{E_{\rm b,s}}{S_{\rm max} - S_{\rm min}})$$
(22)

式中: $E_{\text{b,s}}$ 一调度周期内储能最大剩余容量, kW·h; E_{10} 一储能初始容量, kW·h; $\eta_{\text{b,c}}$ 一储能 B 的充电效 率;η_{b,d}—储能 B 的放电效率;*E*_{b,s}—调度周期内储 能 B 最大剩余容量。

储能系统在任意 t 时刻必须满足 SOC 约束为: $S_{\min} < S(t) < S_{\max}$ (23)

式中:S(t)—t 时刻储能总 SOC 值,%。

3.3 求解算法

多目标求解含多变量、非线性和多随机性等特征。多目标智能优化算法可以使3.1所示的多个目标在给定区域内同时尽可能最佳,得到一组均衡解。 多目标哈里斯鹰算法(MOHHO)是2020年提出的一种新型目标寻优算法,主要优化过程包括种群初始化、搜索阶段和围捕阶段。围捕阶段又分为盘旋围捕、强势突袭、俯冲突袭和渐进俯冲攻击4种策略,MOHHO已被证实具有优良的多目标寻优能力。

将控制策略以约束形式带入 MOHHO 算法中, 求解以式(14)和式(15)为目标函数,以式(19)~式 (23)为约束条件的储能容量。

4 仿真分析

为了验证所提方法对系统频率控制效果,选取 了某地电网频率变化数据,以某风电场实际数据为 例进行验证。考虑储能日均运行成本,求解针对双 目标的储能容量,分别验证储能补偿风电预测误差 策略的补偿效果和基于模型预测控制的风储系统调 频策略的调频效果。系统相关参数如表1所示。

表1 系统相关参数

Tab. 1 System dependent parameters

参 数	数值
风电场装机容量/MW	800
采样时间 T/min	15
风电预测误差限制 <i>ε</i> /%	10
电网允许频率偏差/Hz	±0.2
储能 SOC 状态上限/%	90
储能 SOC 状态下限/%	10

4.1 储能容量配置结果

将储能补偿预测误差策略和风储系统联合调频 策略以约束的形式带入 MOHHO 算法中,根据约束 式(21)~式(23),求解以式(14)和式(15)为目标 函数的储能最优容量。储能系统相关参数如表 2 所示。 0 D L / I

表 2 储能系统相关参数

	au. 2	Kelateu	parameters of	energy	storage system	
A	**			E	1 武学生 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	

奓 鉯	销酸畜电池
充放电效率/%	80
$C_{\mathrm{b,p}}/$ 元・(kW・h) ⁻¹	2 700
$C_{\rm b,e}$ /元 · (kW · h) ⁻¹	640
<i>T</i> /a	10

求得满足双目标的一组解集和其对应的目标值 如图 3 所示。



图 3 满足双目标的一组 Pareto 解集

Fig. 3 A group of Pareto solution set satisfying dual objectives

由图 3 可知,当储能日均运行成本 $J_1 = 54 035.6$ 元时,目标缺失量 $J_2 = 0$,达到了最小值,即双目标的完成效果最好,因此证明此时的容量为储能最优容量。储能优化配置结果如表 3 所示。



Tab. 3 Energy storage optimization configuration results

参数	铅酸蓄电池
额定功率/MW	187
额定容量/MW・h	85.5
日均运行成本 J ₁ /元	54 035.6
目标缺失量 J2	0

4.2 风储参与电力系统调频

4.2.1 储能补偿风电预测误差

风电场所预留的调频容量以日前风电预测功率 为基准,为了保障风储系统调频可靠性,降低风电不 确定性对调频效果的影响,提出了储能补偿风电预 测误差策略,将4.1节所配置的储能容量结果带入 补偿策略,可得储能补偿风电预测误差如图4所示。



图4 储能补偿风电预测误差

Fig. 4 Wind power prediction errors compensated by energy storage system

由图4可知,4.1节所配置的储能系统能够将 风电预测误差补偿至10%以内,满足本文设定需 求,保证风电场实际调频容量达到预留调频容量,为 风储系统参与电力系统调频提供保障。

4.2.2 风储系统参与电力系统调频效果

风电场以风电预测功率为基准预留 20% 调频 容量,储能系统辅助风电场完成调频,利用 Matlab (Matrix Laboratory)二次规划方法求解式(10)所示 的模型预测控制二次规划模型即可求得储能调频出力。风储调频效果及储能调频出力分别如图 5 和图 6 所示。



图 5 风储系统调频

Fig. 5 Frequency modulation of wind storage system

由图 5 和图 6 可知,对于发生突变的电网频率, 在制定合理的调频控制策略基础上,风储联合系统 可以实现频率控制,可根据调度指令将电网频率偏 差控制在±0.2 Hz 以内,实现了风储联合系统参与 电力系统调频,保障了电网频率稳定。



Fig. 6 Energy storage frequency modulation output

图 7 是储能针对两目标的 SOC 变化。由图 7 可知,储能补偿风电预测误差和辅助风电场参与电 力系统调频的 SOC 都保持在 0.1~0.9 之间,保证 了储能系统的安全运行。



4.2.3 对比分析

为验证本文所提策略的先进性,对比以下3种 情形:(1)储能系统不参与调频,只考虑风电场参与 调频;(2)采用一般方法进行风储联合调频;(3)采 用 MPC 方法进行风储联合调频。

对比结果如图 8 所示。由图 8 可知,对比于 (1)、(2)和(3)所示的 MPC 方法进行风储联合调频 效果最好,调频后电网频率偏差保持在±0.2 Hz 之 间,证明本文所提方法的有效性和先进性。



Fig. 8 Comparison of methods

5 结 论

(1)针对大规模风储系统参与电力系统频率控制问题,分析了风电预测误差对调频可靠性的影响。 提出了以风电日前预测功率为基准的调频策略,构建了含储能的补偿风电预测误差模型。利用储能将风电预测误差补偿至10%以内,同时为风电场参与调频预留20%的容量。减小了风电预测误差对风储调频可靠性的影响。

(2)根据风电预留调频容量,提出了基于模型 预测控制的风储系统调频策略,当风储参与调频时, 优先采用风电备用进行调频,其次采用储能调频,仿 真结果证明,储能可以辅助风电场将电网频率调整 至±0.2 Hz 以内。

(3)以上述两个控制策略为约束,采用多目标 哈里斯鹰算法对储能容量进行求解,仿真结果表 明,所求储能容量能在经济最优的情况下实现风电 预测误差的补偿和辅助风电场参与电力系统频率 控制。

参考文献:

- [1] SUN H S, LIU J, WEN J Y, et al. Participation of large-scale wind power generation in power system frequency regulation [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58:4557-4565.
- [2] 李军徽,冯喜超,严干贵,等. 高风电渗透率下的电力系统调频 研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(2):163-170.
 LI Jun-hui, FENG Xi-chao, YAN Gan-gui, et al. Survey on frequency regulation technology in high wind penetration power systems[J]. Power System Protection and Control, 2018,46(2): 163-170.

 [3] 叶 林,李 智,孙舶皓,等.基于随机预测控制理论和功率波 动相关性的风电集群优化调度[J].中国电机工程学报,2018, 38(11):3172-3183.

YE Lin, LI Zhi, SUN Bo-hao, et al. Optimal dispatch of system integrated wind farm clusters based on stochastic predictive control considering temporal correlation of wind power [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(11): 3172 - 3183.

- [4] 刘洪波,彭晓宇,张 崇,等.风电参与电力系统调频控制策略 综述[J].电力自动化设备,2021,41(11):81-92.
 LIU Hong-bo, PENG Xiao-yu, ZHANG Chong, et al. Overview of wind power paticipating in frequency regulation control strategy for power system [J]. Electric Power Automation Equipment,2021, 41(11):81-92.
- [5] GUO Y, GAO H, WU Q, et al. Distributed coordinated active and reactive power control of wind farms based on model predictive control [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 104:78 - 88.
- [6] 黄 伟,陈 炜,吴 军,等.基于功率平衡控制原理的双馈风 电机组辅助调频方法[J].电力自动化设备,2019,39(1):
 66-72.

HUANG Wei, CHEN Wei, WU Jun, et al. Auxiliary frequency modulation method of DFIG-based wind turbine based on principle of power balance control [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019,39(1):66-72.

- [7] 杨伟峰,文云峰,李 立,等.考虑疲劳载荷的风电场分散式频率响应策略[J].电力自动化设备,2022,42(4):55-62.
 YANG Wei-feng, WEN Yun-feng, LI Li, et al. Decentralized frequency response strategy for wind farm considering fatigue load
 [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42 (4): 55-62.
- [8] HANSEN A D, SØRENSEN P, LOV F, et al. Centralised power control of wind farm with doubly fed induction generators [J]. Renewable Energy, 2006, 31(7):935-951.
- [9] YE L, ZHANG C, TANG Y, et al. Hierarchical model predictive control strategy based on dynamic active power dispatch for wind power cluster integration [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6):4617-4629.
- [10] 杨伟峰,文云峰,张武其,等. 基于风 储联合的双层频率响 应控制策略[J]. 电力系统自动化,2022,46(12):184-193.
 YANG Wei-feng, WEN Yun-feng, ZHANG Wu-qi, et al. Bi-level frequency response control strategy based on wind power and energy storage [J]. Automation of Electric Power Systems,2022, 46(12):184-193.
- [11] 陈长青,李欣然,谭庄熙.考虑风电不确定性的风储调频能力 [J].高电压技术,2022,48(6):2128-2139.

CHEN Chang-qing, LI Xin-ran, TAN Zhuang-xi. Frequency modulation capability of wind storage considering wind power uncertainty [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48 (6): 2128 - 2139.

[12] 郭钰锋,潘梦琪.基于风功率三参数幂律模型预测日前调频 需求的调频辅助服务市场研究[J].中国电机工程学报, 2021,41(20):6941-6949.

GUO Yu-feng, PAN Meng-qi. Research on frequency modulation ancillary service market based on three parameter power law model of wind power to predict the day-ahead frequency modulation demand research [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41 (20): 6941-6949.

- [13] 董天翔,翟保豫,李 星,等.风储联合系统参与频率响应的 优化控制策略[J].电网技术,2022,46(10):3980-3989.
 DONG Tian-xiang, ZHAI Bao-yu, LI Xing, et al. Optimal control strategy for combined wind-storage system to participate in frequency response [J]. Power System Technology, 2022,46(10): 3980-3989.
- [14] YANG Y, BREMNER S, MENICTAS C, et al. Modelling and optimal energy management for battery energy storage systems in renewable energy systems: A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 167:112671.1 - 112671.27.
- [15] 贾天下,陈 磊,闵 勇,等.快速响应储能参与一次调频的 控制策略[J].清华大学学报(自然科学版),2021,61(5): 429-436.

JIA Tian-xia, CHEN Lei, MIN Yong, et al. Control strategy for primary frequency regulation with the participation of a quick response energy storage [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(5):429-436.

[16] 颜湘武,宋子君,崔 森,等.基于变功率点跟踪和超级电容器储能协调控制的双馈风电机组一次调频策略[J].电工技术学报,2020,35(3):530-541.

YAN Xiang-wu, SONG Zi-jun, CUI Sen, et al. Primary frequency regulation strategy of doubly-fed wind turbine based on variable power point tracking and supercapacitor energy storage [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35 (3): 530 – 541.

- [17] VALI M, PETROVIC V, BOERSMA S, et al. Adjoint-based model predictive control for optimal energy extraction in waked wind farms [J]. Control Engineering Practice, 2019, 84:48 – 62.
- [18] GONZALEZ H D P, DOMINGUEZ-GARCIA J L. Non-centralized hierarchical model predictive control strategy of floating offshore wind farms for fatigue load reduction [J]. Renewable Energy, 2022,187:248-256.
- [19] SAUNDERS D C, MARSHALL J S, HINES P D. The effect of timescales on wind farm power variability with nonlinear model predictive control [J]. Wind Energy, 2017, 20(11):1891 – 1908.

(姜雪梅 编辑)