

# 基于目标优选和模型预测控制的风储优化策略

严 潇<sup>1,2</sup>, 程 杉<sup>1,2</sup>, 左先旺<sup>1,2</sup>, 魏康林<sup>1,3</sup>

(1.三峡大学电气与新能源学院,湖北宜昌 443002;2.三峡大学智慧能源技术湖北省工程研究中心,湖北宜昌 443002;  
3.宜宾学院智能制造学院,四川宜宾 644000)

**摘要:**针对风储系统风电功率波动平抑效果不佳的问题,对风储系统的运行进行优化。在考虑风储系统运行的时序耦合特性和未来风电功率波动对储能系统的影响下,提出基于平抑目标优选方法和模型预测控制的优化策略。首先根据风电预测功率和储能固有约束求出期望的并网功率,再结合当前的储能荷电状态(SOC)等条件由模糊控制求出优选平抑目标,并引入局部预测准确度对其进行修正;然后利用模型预测控制一粒子群优化算法(MPC-PSO)策略滚动优化储能功率,使下一时段并网功率与优选目标功率之差最小且储能充放功率最小;最后基于算例的仿真和对比分析结果可见,所提优化策略既能提升风电波动的平抑效果,又能有效地降低储能运行成本。

**关键词:**风电波动平抑;平抑目标优选;模糊控制;模型预测控制

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2023.01.001 中图分类号:TM863 文章编号:1673-9140(2023)01-0001-10

## Optimally selected objective and model predictive control based optimal strategy of wind power with energy storage

YAN Xiao<sup>1,2</sup>, CHENG Shan<sup>1,2</sup>, ZUO Xianwang<sup>1,2</sup>, WEI Kanglin<sup>1,3</sup>

(1.College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2.Hubei Provincial Engineering Research Center of Intelligent Energy Technology, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;  
3.Faculty of Intelligence Manufacturing, Yibin University, Yibin 644000, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the wind storage system's power fluctuation suppression effect is unsatisfactory, the wind storage system's operation is optimized. Considering the time series coupling characteristics of wind storage system operation and the influence of future wind power fluctuation on the energy storage system (ESS), an optimization strategy based on stabilizing target optimization method and model predictive control (MPC) is proposed. Firstly, the expected grid-connected power is calculated according to the predicted wind power and the constraints of ESS, and the local prediction accuracy is introduced to correct it. Then, combined with the current state of charge (SOC) of ESS, the optimal stabilization target is obtained by fuzzy control; Lastly, the MPC with particle swarm optimization (MPC-PSO) strategy is used to optimize the ESS power, so as to minimize the difference between the grid-connected power of next time and the optimal target power and minimize the ESS power. The simulation results show that the strategy proposed in this paper has a better wind power fluctuation smoothing effect and can effectively reduce the operation cost of energy storage.

**Key words:** wind power fluctuation smoothing; optimal selection of target; fuzzy control; model predictive control

收稿日期:2021-09-06;修回日期:2022-04-13

基金项目:国家自然科学基金(51607105);四川省重点实验室开放基金(SCITLAB-1009)

通信作者:程 杉(1981—),男,博士,教授,主要从事智能配用电、综合能源系统、新能源微电网研究;E-mail:hpucquyzu@ctgu.edu.cn

风力发电是最成熟的新能源发电技术之一<sup>[1]</sup>,其出力的波动性和随机性对电力系统的安全稳定运行带来了挑战<sup>[2-3]</sup>,合理地配置储能系统并对其优化控制是有效的解决方案之一<sup>[4-6]</sup>。国内外学者已经对用于风电平抑的储能优化配置和运行控制问题开展了广泛的研究。

为取得有效的平抑效果并降低系统费用,文献[7]将风机惯性作为储能系统,提出基于模糊控制器的风电出力平抑方法,该方法具有较强的即时性,但未考虑风储系统的时序耦合特性;文献[8]根据特定时段内风电功率的平均值来制定风电波动的平抑目标,从而解决风储时序耦合影响,但这也导致风电实时特征的丢失;文献[9]建立混合储能的多目标优化配置模型,将最小化储能投资运维成本和最大化风电输出稳定性作为目标,并提出提高风电波动补偿满意率的混合储能功率分配方法;文献[10]则建立风储联合运行的多目标优化模型,但与文献[9]不同之处是该文将多目标优化函数转化为单目标优化函数后利用单目标优化算法求解;文献[11]提出基于即时控制策略的双电池组短期内平抑风电功率波动方法,该方法降低了因储能容量不足引起的瞬时大功率波动。为兼顾保护储能和提高平抑效果,文献[12]提出以储能出力最小和出力能力最大为复合目标的风电平抑模型预测控制方法。而文献[13]则根据储能荷电状态反馈的模糊控制器,提出多目标动态调节的风电平抑模型预测控制方法。文献[11-13]都对储能系统的控制策略进行了改进,但都未考虑风电平抑目标的时序耦合影响。

综上所述,基于最优化思想的优化控制技术已经在风电功率平抑中展现其可行性和有效性,但需要指出的是,目前研究中风电平抑目标函数普遍是固定不变的,尤其是含单一储能设备的平抑系统,需要根据储能荷电状态和风电功率波动动态调整平抑目标,进而控制储能出力以兼顾储能运行成本和整个平抑周期的风电出力平抑效果。因此,本文提出一种平抑目标优选的方法,使储能系统能根据平抑目标迅速调整出力以应对风电功率波动的快速变化,并将该方法与模型预测控制结合形成风储系统的运行优化策略。首先根据预测风电功率和

储能系统约束求得期望并网功率,在此基础上构造风电平抑的优选目标函数,并引入局部预测准确度对其进行修正以此减小预测误差的影响;然后采用模型预测控制一粒子群算法策略滚动优化储能功率,使下一时段风电并网功率与优选平抑目标差值最小且优化周期内的储能充放功率最小。最后仿真结果表明该策略能够提高风电平抑效果、降低储能运行成本。

## 1 风力发电储能系统

风电平抑系统以平抑总时段  $T_{ed}$  内风电并网功率波动之和最小为目标优化控制储能出力,而且规定时间内的最大并网功率变化满足约束:

$$\min \sum_{t=0}^{T_{ed}} |P_g(t+1) - P_g(t)| \quad (1)$$

$$\frac{\max |P_g(t) - P_g(t+\tau)|}{P_{rated}} \leq \gamma \quad (2)$$

式(1)、(2)中,  $P_g(t)$ 、 $P_g(t+1)$  分别为当前时段  $t$  和下一时段  $t+1$  的风电并网功率;  $P_g(t+\tau)$  为与时段  $t$  相距为时间  $\tau$  的风电并网功率,本文中  $|\tau| \leq 1$  或  $|\tau| \leq 10$ ;  $P_{rated}$  为风电机组额定功率;  $\gamma$  为风电并网功率波动率限制值,其中国网标准如表1所示。

表1 风电波动国网限值

Table 1 Limit of wind power fluctuation by state grid MW

风电场装机容量	10 min 最大变化量	1 min 最大变化量
<30	20	3
30~150	装机容量/3	装机容量/10
>150	50	15

风力发电储能系统拓扑结构如图1所示,  $P_g(t)$  与风电实际功率  $P_w(t)$  和储能功率  $P_{es}(t)$  ( $P_{es} > 0$  时放电,反之则充电)的关系式为

$$P_g(t) = P_{es}(t) + P_w(t) \quad (3)$$

能量管理系统根据  $t$  时段结束时的储能系统荷电状态  $S_{es}(t)$  与  $t+1$  时段风电并网功率目标和  $P_w(t+1)$ , 做出储能系统的能量管理决策,再将决策信号  $u$  发送到储能系统控制储能发出或吸收功率  $P_{es}(t+1)$ , 从而对  $t+1$  时段的风电波动进行平抑。

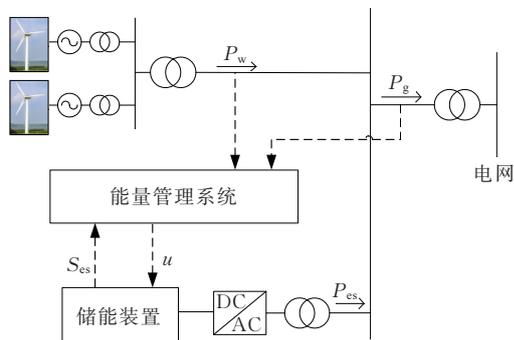


图 1 风力发电储能系统拓扑结构

Figure 1 Topological structure of wind power with ESS

当  $t$  时段结束时,储能装置的  $S_{es}(t)$  和剩余能量  $E(t)$  分别为

$$S_{es}(t) = S_{es}(t-1) - T_{es}P_{es}(t)/C_{es} \quad (4)$$

$$E(t) = S_{es}(t) \cdot C_{es} \quad (5)$$

且  $S_{es}$  和储能出力  $P_{es}$  必须满足约束:

$$0 \leq S_{es}(t) \leq 1 \quad (6)$$

$$-P_{es\_max}(t) \leq P_{es}(t) \leq P_{es\_max}(t) \quad (7)$$

式(4)~(7)中,  $P_{es\_max}$  为储能充、放电的最大功率;  $T_{es}$  为时段  $t$  和  $t-1$  的间隔时长;  $C_{es}$  为储能额定容量。

## 2 基于目标优选和模型预测控制的风储优化策略

### 2.1 平抑目标优选方法

只考虑平抑的实时效果,即根据  $P_g(t)$  优化控制储能对  $t+1$  时段的实际风电功率  $P_w(t+1)$  平抑,不利于提高储能的可持续平抑能力;只考虑储能荷电状态,即根据  $t+1$  时段期望的风电并网功率  $P_{fg}(t+1)$  平抑  $P_w(t+1)$ 。由于预测误差并不利于整体的平抑效果,因此需要选取合理的平抑目标对 2 种情况进行平衡。 $P_{fg}(t+1)$  是根据预测功率  $P_f$  在全局约束下求出的期望值,具有全局最优性,但受预测误差影响大;而实际并网功率  $P_g(t)$  仅反映当前实际平抑后的风电并网功率,具有局部最优性。引入优选系数  $k$ ,构建的风电功率平抑的优选目标为

$$P_m(t+1) = \min [P_{fg}(t+1), P_g(t)] + |P_{fg}(t+1) - P_g(t)| \cdot (k+0.5) \quad (8)$$

由式(8)可知,通过选取恰当的  $k$  可以兼顾

$P_{fg}(t+1)$  和  $P_g(t)$ , 本文根据模糊控制调整  $k$  使  $P_m(t+1)$  偏向  $P_{fg}(t+1)$  还是  $P_g(t)$ 。

平抑目标优选的准备阶段,需要预测风电出力<sup>[14-16]</sup>。与 BP 神经网络<sup>[17]</sup>、小波神经网络<sup>[18]</sup>相比,回归支持向量机<sup>[19]</sup>在短期风功率预测精度上具有明显的优越性<sup>[20]</sup>,故采用支持向量机回归预测得到未来  $T_{ed}$  内任一时段的风电功率  $P_f$ , 根据式(1)~(7),利用二次规划方法可以求得各时段的  $P_{fg}(t)$ 。优选系数  $k$  的求解包括以下步骤。

1) 计算局部预测准确度  $Z$ 。

$$Z = \delta h_1 + (1 - \delta) h_2 \quad (9)$$

$$h_1 = 1 - \sum_{i=t-5}^t \frac{|P_f(i) - P_w(i)|}{6P_w(i)} \quad (10)$$

$$h_2 = 1 - \frac{|P_f(t) - P_w(t)|}{P_w(t)} \quad (11)$$

式(9)~(11)中,  $h_1$ 、 $h_2$  分别为平均和当前预测准确度;  $\delta$  为权重系数,由仿真得到  $\delta=0.4$  时平抑效果最佳。

风电的强随机性导致  $P_f$  容易产生误差,而过大的  $P_f$  误差会使平抑目标偏离合理范围,在模糊控制环节引入一组局部预测准确度的模糊集对平抑目标进行修正,有助于削弱  $P_f$  误差过大的影响,以提高本文策略的鲁棒性。

2) 根据图 2 所示的模糊控制先确定  $k$ , 进而根据式(8)求出  $P_m$ 。

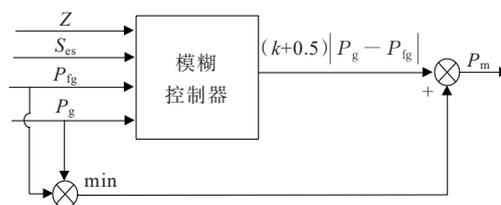


图 2 模糊控制结构

Figure 2 Fuzzy control structure

定义  $Z$  的模糊集为  $\{ZH, ZM, ZL\}$ , 分别表示高、中和低预测准确度。定义  $S_{es}$  的模糊集为  $\{FH, FM, FL, GH, GM, GL\}$ , 其中 FH、FM、FL 对应  $P_{fg} > P_g$  时, GH、GM、GL 则对应  $P_g > P_{fg}$ 。模糊控制输出参数  $k$  的模糊集为  $\{-1, -0.5, 0, 0.5, 1\}$ 。模糊规则如表 2 所示,隶属度函数如图 3 所示。

表2 模糊控制规则

Table 2 Fuzzy control rules

Z	不同 $S_{es}$ 下的优选系数 $k$					
	FH	FM	FL	GH	GM	GL
ZH	1.0	0.5	0.0	0.0	-0.5	-1.0
ZM	0.5	0.0	-0.5	-0.5	0.0	-0.5
ZL	0.0	0.5	-1.0	1.0	0.5	0.0

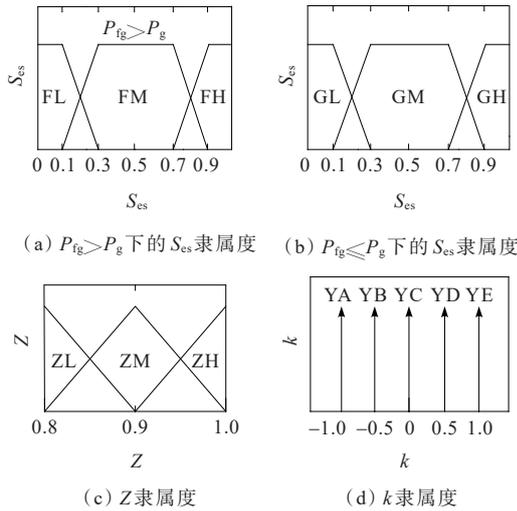


图3 模糊控制器的输入和输出量的隶属度函数

Figure 3 Membership functions of the inputs and outputs of the Fuzzy Controller

## 2.2 MPC-PSO 策略原理

MPC-PSO 是在已知预测干扰量的情况下进行时域滚动控制并用 PSO 求解出当前的控制量,具体步骤如下。

1) 根据当前状态量  $P_g(t)$ 、 $S_{es}(t)$  和已知未来  $N$  个时段的干扰量  $P_i$ , 考虑当前和未来的约束条件, 求解得到  $u = [P_{es}(t+1), P_{es}(t+2), \dots, P_{es}(t+N)]$ , 其中  $N$  为递增的时段。

2) 将  $u$  的第一元素即  $P_{es}(t+1)$  作为  $t+1$  时段的决策量传递给储能装置。

3) 由式(3)、(4)分别更新状态量  $P_g(t+1)$  和  $S_{es}(t+1)$ , 并重复步骤 1)、2)。

步骤 1) 中控制量即各时段  $P_{es}(t+N)$  的求解是以时段  $(t+1) \sim (t+N)$  内储能出力量最小和  $P_m(t+1)$  与  $P_g(t+1)$  之差最小为目标函数、式(2)和式(5)~(7)为约束, 利用 PSO 算法优化计算得出。其中, 目标函数为

$$J_1 = \min \sum_{i=t+1}^{t+N} P_{es}^2(i) \quad (12)$$

$$J_2 = \min |P_m(t+1) - P_g(t+1)| \quad (13)$$

优化计算时, 将多目标优化转化为单目标优化问题进行求解以降低计算复杂度。首先, 根据  $|P_m(t+1) - P_g(t+1)| \leq M$  将目标函数  $J_2$  转化为约束条件, 其中  $M$  为  $P_m(t+1)$  与  $P_g(t+1)$  的最大差值; 然后, 利用文献[21]中的 PSO 算法对目标函数  $J_1$  进行求解, 得到某个  $M$  值下的最优解并保存; 最后, 改变  $M$  的值得到不同的  $J_1$  值, 选择需要的  $J_1$  值和其对应的  $M$  值作为最终优化结果。  $M$  应该在一个不大的正数范围内取值, 否则  $P_m(t+1)$  将失去作为平抑目标的意义。本文经过若干次仿真, 发现将  $M$  的取值选择在 0~10 的范围内优化结果最好, 所以本文的  $M$  从 0.5 开始取值, 每次计算增加 0.5, 直到  $M=10$ 。

## 2.3 目标优选 MPC-PSO 风储优化策略原理

综上所述, 目标优选 MPC-PSO 风储优化策略首先根据  $P_i$  和储能固有约束求得  $P_{fg}(t+1)$ , 并由式(9)~(11)计算出局部预测准确度  $Z$  用于对  $P_{fg}(t+1)$  的修正以减小预测误差的影响; 其次, 结合  $S_{es}(t)$ 、 $P_g(t)$  和  $P_{fg}(t+1)$  等条件由式(8)和模糊控制求出  $P_m(t+1)$ ; 最后向 MPC-PSO 策略输入  $P_m(t+1)$ 、 $P_i$  与通过实时测量装置得到的  $P_w(t+1)$ , 滚动优化得到  $P_{es}(t+1)$ , 储能进行出力平抑得到  $P_g(t+1)$ 。本文策略流程如图 4 所示。

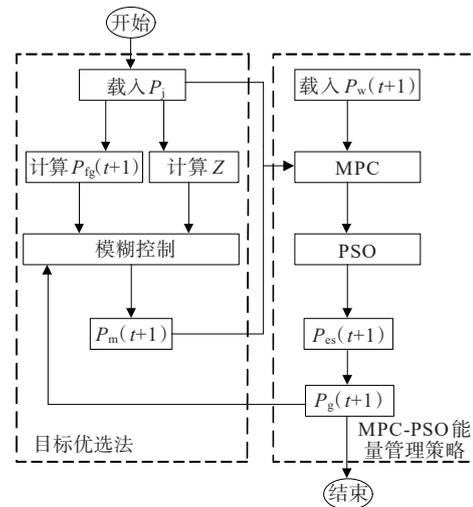


图4 目标优选 MPC-PSO 策略流程

Figure 4 Flowchart of optimally selected objective with MPC-PSO strategy

### 3 算例仿真及其对比分析

#### 3.1 仿真结果及其量化指标分析

以装机容量为 100 MW 的某风电场秋季风机出力数据为分析对象,风储系统的储能容量为 1.2 MW·h,储能充放电最大功率为 12 MW。利用本文策略优化后的风电功率平抑前、后对比曲线如图 5 所示。由图 5 可知,利用本文方法,风电并网功率波动得到了有效控制,尤其是在风电变化剧烈的采样点处更为明显。

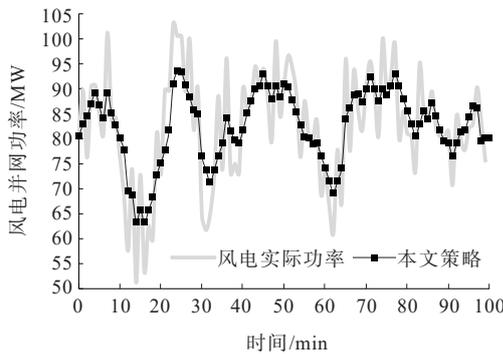


图 5 风电并网功率平抑前、后对比

Figure 5 Comparison of the original and the compensated wind power integration

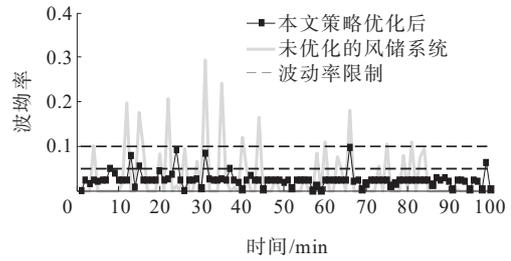
风电并网功率波动平抑前、后的量化分析指标结果如表 3 所示。结合表 1 可知,平抑前的 1 min 和 10 min 波动率大部分不满足国网标准;而平抑后,100% 和 94% 的采样点 1 min 波动率低于额定功率的 10% 和 5%,100% 的采样点 10 min 波动低于额定功率的 33%;本文策略平抑后的风电波动率 100% 符合国网标准规定。

表 3 平抑前、后的风电并网功率波动率

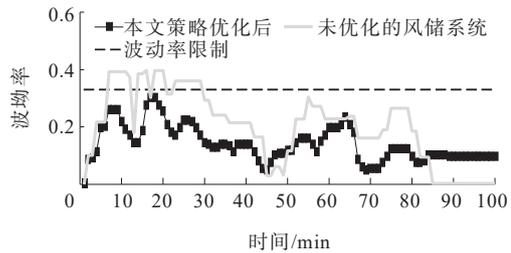
Table 3 Wind power integration volatility before and after smoothing %

波动率	采样点合格率	
	平抑后	平抑前
<5(1 min)	94	33
<10(1 min)	100	63
<33(10 min)	100	59

若不采取任何优化策略,储能的作用将可能受到限制,将这样的风储系统称为未优化的风储系统。将本文策略优化后与未优化的风储系统进行仿真结果对比,如图 6、表 4 所示。



(a) 1 min 波动率对比



(b) 10 min 波动率对比

图 6 优化前、后的风电并网波动率对比

Figure 6 Comparison of wind power integration volatility before and after optimization

表 4 优化前、后的储能功率对比

Table 4 Comparison of energy storage power before and after optimization

储能功率绝对值/MW	未优化的风储系统/%	本文策略优化后/%
<10	79	87
12(满载)	15	11

由图 6 可知,未优化的风储系统即使有储能装置进行补偿,但仍有相当一部分采样点的风电并网功率波动率超过了 0.1 的并网限制,而采用本文策略优化后的并网功率波动率 100% 符合国网标准规定。由表 4 可知,相比未优化的风储系统,优化后的储能满载运行时间的占比有所降低,且 10 MW 内的运行时间占比更高,故采用本文策略更有利于减少储能的充放电功率。引入局部预测准度的对比实验仿真如图 7 所示。由图 7 可知,在未引入局部预测准度时,风储系统的并网功率波动率在预测误差较大的采样点出现了 3 次越限,而引入局部预测准度后的波动率不但没有越限而且进一步降低。这说明引入局部预测准度可以有效修正平抑目标,削弱预测误差过大带来的危害,在一定程度上保证了结果的鲁棒性。

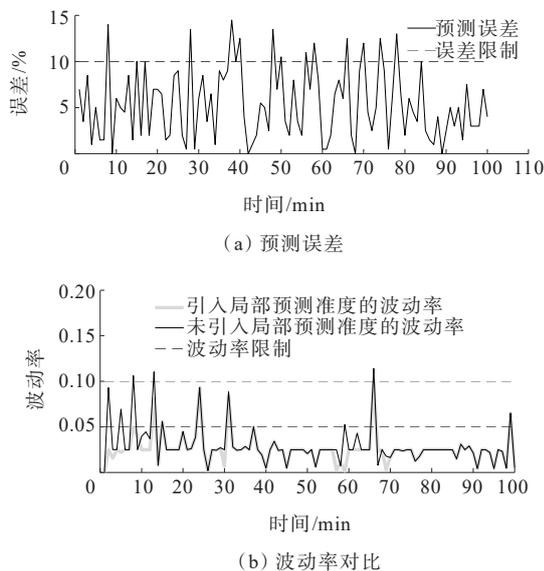


图7 引入局部预测准度的对比实验仿真

Figure 7 Simulation diagram of comparative experiment with local prediction accuracy

综上所述,优化策略对风储系统的运行和平抑风电功率波动的效果起着至关重要的作用,而采用本文策略优化后的风储系统不但能有效降低风电波动率,还能减少储能的充放电功率,从而降低运行成本。

### 3.2 不同优化策略的结果对比与分析

#### 3.2.1 与单一MPC策略的对比分析

与单一MPC策略进行风电并网功率对比,如图8所示。由图8可知,2种策略都能对风电实际功率进行有效平抑,但在储能功率的控制上有明显差别。例如在50~60 min区间,本文策略对储能进行动态控制,使其根据实际情况发出或者吸收功率,而MPC策略控制下的储能功率基本保持在发电状态;在80~100 min区间,本文策略选择较保守的平抑效果,而MPC策略却选择更平滑的平抑效果。

风电并网功率波动率对比如图9所示。由图9可知,在10~40、60~90 min等风电实际功率波动剧烈的区间,2种策略的风电并网功率波动率均出现了不同程度的上升,这是由于风电波动的随机性而无法避免,但相较于MPC策略的直接越限,本文策略剧烈区间的波动率上升幅度是较小的(在波动率限制以内)。根据表5可知,本文策略的风电并网功率波动率更低,且根据表1本文策略的风电并网功率为100%合格,而MPC策略只有97%,这表明本文策略的风电波动平抑效果更好。

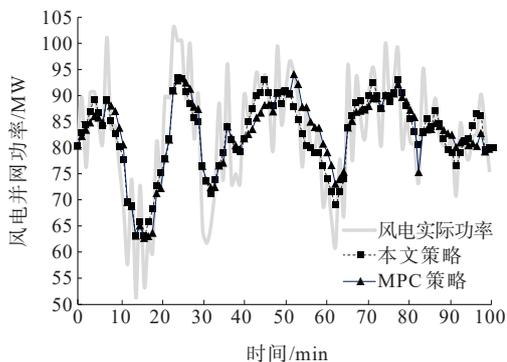


图8 本文策略与MPC策略间的风电并网功率对比  
Figure 8 Wind power integration comparison between the proposed strategy and the MPC strategy

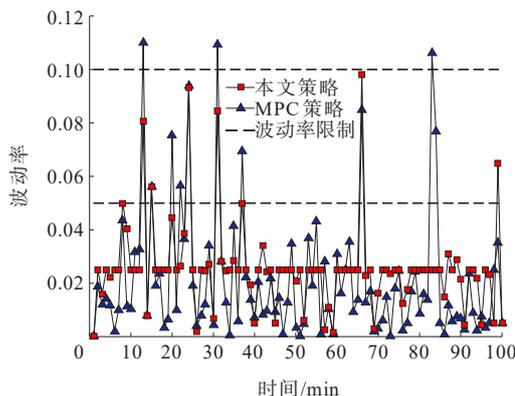


图9 本文策略与MPC策略的风电并网波动率对比  
Figure 9 Comparison of wind power integration volatility between the proposed strategy and the MPC strategy

表5 本文策略与MPC策略的风电并网波动率统计对比  
Table 5 Statistical results comparison of wind power integration volatility between the proposed strategy and the MPC strategy

1 min波动率	策略合格率	
	本文	MPC
<5	94	87
<10	100	97

本文策略和MPC策略下的储能功率控制效率结果如图10所示。由图10计算后发现,本文策略的储能满载功率的运行时间占比11%小于MPC策略的12%,10 MW内的运行时间占比86%,大于MPC策略的84%,这说明本文策略的储能充放电功率更低。

进一步列出了本文策略和MPC策略下的储能SOC对比结果,如图11所示。由图11可知,2种策略的储能荷电状态(state of charge, SOC)都出现过充满(储能SOC为1)或者放空(储能SOC为0)的现象,但本文策略只发生过2次充满,而MPC策略出

现了 6 次充满或者放空的情况。储能 SOC 的安全性可用 HSOC(health of SOC)描述,HSOC 指储能 SOC 处于安全区间(0.2~0.8)的采样点占整个优化周期的比例。经过计算,本文策略的储能 HSOC 达到了 80%,而 MPC 策略仅有 54%,这表明本文策略的储能 SOC 更为安全。

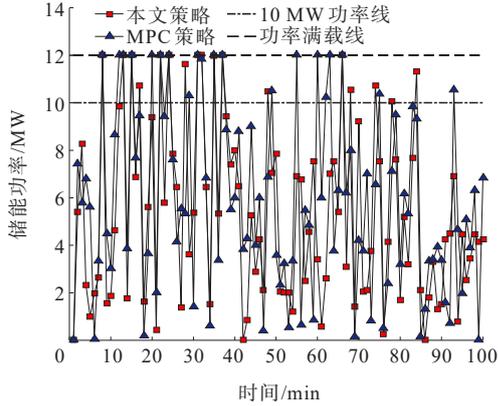


图 10 本文策略与 MPC 策略的储能功率对比

Figure 10 Comparison of energy storage power between the proposed strategy and the MPC strategy

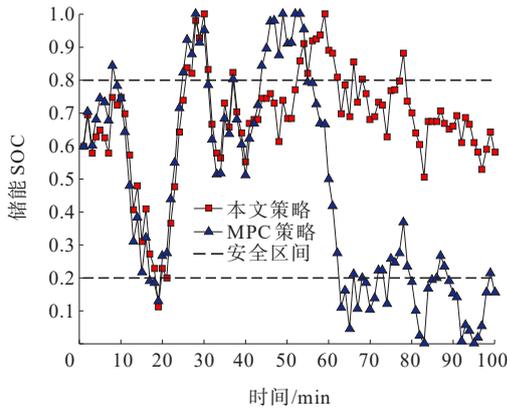


图 11 本文策略与 MPC 策略的储能 SOC 对比

Figure 11 Comparison of energy storage SOC between the proposed strategy and the MPC strategy

通过对图 8、9、11 的对比分析后发现,单一 MPC 策略只考虑局部而没有考虑全局的平抑目标,在满足剧烈区间的平抑需求时可能会牺牲储能的持续平抑能力;本文策略将储能功率的实时优化和风电功率波动的全局平抑效果进行综合考虑,在 MPC 策略基础上对平抑目标进行优选,尽量避免了储能 SOC 发生充满或者放空的情况,同时减少了储能出力。根据仿真结果无论是平抑效果还是储能的运行状态,本文策略均优于单一 MPC 策略。

### 3.2.2 与单一目标优选策略的对比分析

将本文所提出的策略与单一目标优选策略进行对比,以突出其技术优势。这 2 种策略中的风电并网功率对比结果如图 12 所示。由图 12 可知,目标优选策略同样能对风电实际功率进行有效平抑,但其风电并网功率曲线在 40~80 min 区间与本文策略差异明显,反映出 2 种策略的储能出力决策明显不同。

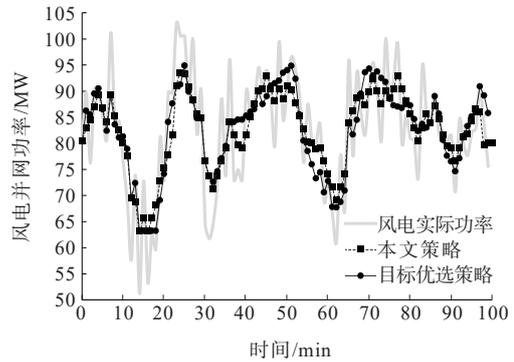


图 12 本文策略与目标优选策略间的风电并网功率对比

Figure 12 Wind power integration comparison between the proposed strategy and the objective optimization strategy

本文策略与目标优选策略之间的风电并网波动率对比结果如图 13 所示。由图 13 可知,目标优选策略虽然没有将剧烈区间(60~70 min)内的风电并网功率波动率控制在限制之内,但在其他区间的平抑效果尚能接受。本文策略在处理剧烈区间的风电实际功率时,波动率虽会上升,但都保持在限制之内。结合表 6 可以得出,本文策略的风电并网功率波动率更低,这表明本文策略的平抑效果更好。

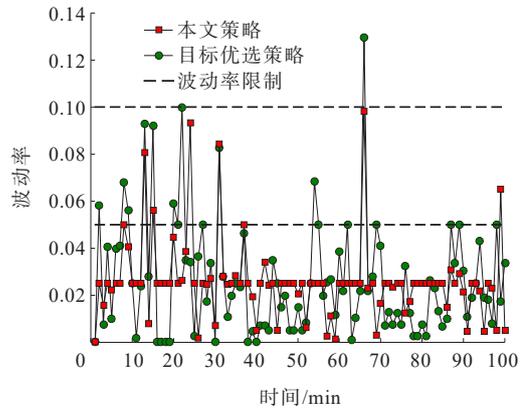


图 13 本文策略与目标优选策略的风电并网波动率对比

Figure 13 Comparison of wind power integration volatility between the proposed strategy and the objective optimization strategy

表6 本文策略与目标优选策略的风电并网波动率对比

Table 6 Statistical results comparison of wind power integration volatility between the proposed strategy and the objective optimization strategy %

1 min波动率	策略合格率	
	本文	目标优选
<5	94	90
<10	100	99

本文策略与目标优选策略之间的储能功率效果对比如图14所示。由图14计算后发现,本文策略的储能满载功率的运行时间占比11%小于目标优选策略的13%,10 MW内的运行时间占比86%大于目标优选策略的80%,这说明本文策略的储能充放电功率更低。

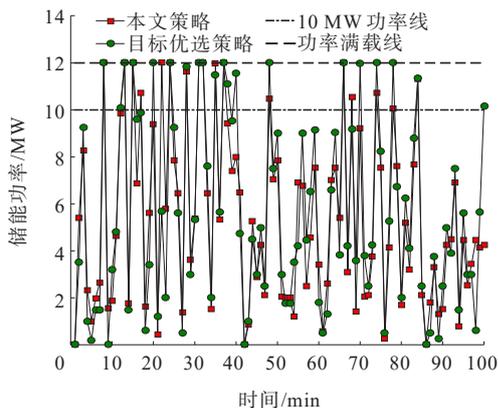


图14 本文策略与目标优选策略的储能功率效果对比

Figure 14 Comparison of energy storage power between the proposed strategy and the objective optimization strategy

此外,对本文策略和目标优选策略下的储能SOC结果进行了对比,如图15所示。由图15可知,2种策略的储能SOC大部分时间都处于安全区间内,并且两者曲线的增减趋势是相似而增减幅度不同,这说明两者在制定平抑目标时是相似的,但对储能出力大小的决策不同。计算得到的目标优选策略的HSOC为90%,比本文策略高10%。这说明本文策略在提升平抑效果和降低储能出力时,可能会牺牲少量的储能SOC安全性,但实质上本文策略80%的HSOC值并不低,依然能保证大部分时间储能的安全运行。

通过对图12、13、15的对比分析后发现,单一目标优选策略在平抑风电波动时具有储能SOC安全性高的优点,但在面临风电剧烈波动时仍存在风电

并网功率越限的风险,这是因为目标优选策略虽有考虑全局影响的优选目标,但缺乏储能功率的滚动优化策略。

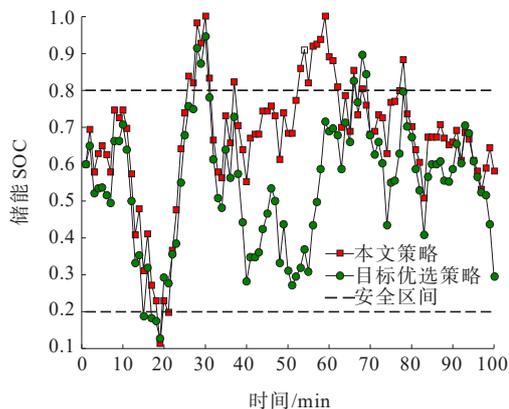


图15 本文策略与目标优选策略的储能SOC对比

Figure 15 Comparison of energy storage SOC between the proposed strategy and the objective optimization strategy

在计算用时方面,本文策略的平均单次平抑计算时长为0.12 s,单一MPC策略为0.21 s,单一目标优选策略为0.04 s。单一目标优选策略因为不涉及储能出力规划的计算,所以计算时间最短。而本文策略的计算用时比单一MPC策略降低了42.8%,这对于1 min的采样时间尺度来说具有一定的实时性,说明本文策略在实际应用中具备可行性。

综合以上仿真结果可知,本文所提出的平抑目标优选方法对传统的MPC策略具有明显改善作用,并且目标优选方法也需要借助良好的储能控制策略去指导储能出力。故本文策略将MPC和目标优选的优势融合,在满足储能安全运行的条件下,更能提高风电平抑效果以及减少储能的充放电功率。

### 3.2.3 不同策略的经济性对比分析

#### 1) 循环寿命对比。

由于超级电容具有较长的循环寿命,因此以蓄电池为对象进行循环寿命的对比。表7给出了3种优化策略的蓄电池充放电切换次数。

由表7可知,在相同时间内,本文策略的蓄电池充放电切换次数与MPC策略相等,比目标优选策略更低,这说明本文策略并没有因为提高平抑效果而牺牲蓄电池循环寿命。

#### 2) 运行成本对比。

不同策略的储能能量消耗对比如表7。设充放

电切换次数每 100 次便会进行维护,维护成本为 1 万元,储能能量消耗成本为 10 万元/(MW·h)。计算后得到不同策略的运行成本,如表 7 所示。由表 7 可知,本文策略的运行成本最低。

表 7 经济性对比

Table 7 Comparison of economy

策略	循环次数	能量消耗/(MW·h)	运行成本/万元
本文	46	8.77	88.16
单一 MPC	46	9.61	96.56
单一目标优选	49	9.32	93.69

综上所述,本文策略与单一 MPC 策略和单一目标优选策略相比,不但使风电并网功率波动更低,而且减少了储能的能量消耗,降低了运行成本。

## 4 结语

本文策略先对平抑目标进行优选,再通过 MPC-PSO 能量管理策略对储能出力进行滚动优化,实现了提高风电并网功率平抑效果和降低储能运行成本的目的。算例分析表明:

1) 当风储系统对风电功率波动进行平抑时,选择合理的平抑目标和控制策略对平抑效果有显著提升,利用目标优选 MPC-PSO 优化策略优化后的风储系统不仅有效降低了风电并网功率波动率,而且减小了储能的充放电功率;

2) 将目标优选 MPC-PSO 优化策略同其他 2 种优化策略进行比较,从性能和经济性两方面对比分析,结果表明目标优选 MPC-PSO 优化策略在保证储能运行安全性的情况下,能达到更好的平抑效果以及更低的储能运行成本。

### 参考文献:

[1] 程杉,冯毅焜,黄天力.含风电的电力系统区间调度问题求解[J].可再生能源,2019,37(2):199-204.  
CHENG Shan,FENG Yichen,HUANG Tianli.A solution to interval scheduling problem in power system containing wind power[J].Renewable Energy Resources,2019,37(2):199-204.

[2] 刘栋,魏霞,王维庆,等.基于 SSA-ELM 的短期风电功率预测[J].智慧电力,2021,49(6):53-59+123.

LIU Dong, WEI Xia, WANG Weiqing, et al. Short-term wind power prediction based on SSA-ELM[J].Smart Power, 2021,49(6):53-59+123.

[3] 刘明,曾成碧,苗虹.考虑风电不确定性的分布鲁棒机会约束机组组合模型[J].电力科学与技术学报,2021,36(2):51-57.  
LIU Ming, ZENG Chengbi, MIAO Hong. Distributionally robust chance-constrained unit commitment model considering uncertainty of wind power[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2021,36(2):51-57.

[4] 姚方,王佳伟,文福拴,等.计及碳税的含风电和储能的电力系统经济调度[J].电力科学与技术学报,2019,34(1):37-46.  
YAO Fang, WANG Jiawei, WEN Fushuan, et al. Economic dispatch for a power system containing wind power and energy storage with Carbon tax considered[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2019,34(1):37-46.

[5] 鲁鹏,田浩,武伟鸣,等.需求侧能量枢纽和储能协同提升风电消纳和平抑负荷峰谷模型[J].电力科学与技术学报,2021,36(1):42-51.  
LU Peng, TIAN Hao, WU Weiming, et al. Demand side energy hub and energy storage cooperate to smooth peak and valley and improve wind power consumption model[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2021,36(1):42-51.

[6] 任大伟,金晨,肖晋宇,等.计及灵活性基于时序的“十四五”储能需求分析[J].中国电力,2021,54(8):190-198.  
REN Dawei, JIN Chen, XIAO Jinyun, et al. Demand analysis of energy storage for the 14th five-year plan period based on time series considering power system flexibility[J].Electric Power,2021,54(8):190-198.

[7] HOWLADER A M, URASAKI N, PRATAP A, et al. A fuzzy control strategy for power smoothing and grid dynamic response enrichment of a grid connected wind energy conversion system[J].Wind Energy,2014,17(9):1347-1363.

[8] 刘春燕,晁勤,魏丽丽.基于实证数据和模糊控制的多时间尺度风储耦合实时滚动平抑波动[J].电力自动化设备,2015,35(2):35-41.  
LIU Chunyan, CHAO Qin, WEI Lili. Real-time rolling suppression of fluctuation based on multi-time-scale wind storage coupling based on empirical data and fuzzy control [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(2): 35-41.

[9] CHENG S, SUN W B, LIU W L. Multi-objective configuration optimization of a hybrid energy storage system[J].Applied Sciences,2017,7(2):163.

- [10] 蒋小平,彭朝阳,魏立彬,等.基于模糊控制的混合储能平抑风电功率波动[J].电力系统保护与控制,2016,44(17):126-132.  
JIANG Xiaoping,PENG Chaoyang,WEI Libin,et al.Hybrid energy storage based on Fuzzy control to smooth wind power fluctuation[J].Power System Protection and Control,2016,44(17):126-132.
- [11] 章竹耀,郭晓丽,张新松,等.储能电池平抑风功率波动策略[J].电力系统保护与控制,2017,45(3):62-68.  
ZHANG Zhuyao, GUO Xiaoli, ZHANG Xinsong, et al. Strategies for wind power fluctuation of energy storage batteries[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3):62-68.
- [12] 刘颖明,王晓东,彭朝阳.计及储能出力水平的平滑风电功率模型预测控制策略[J].电网技术,2020,44(5):1723-1731.  
LIU Yingming,WANG Xiaodong,PENG Chaoyang. Model predictive control strategy for smoothing wind power with energy storage output level[J].Power System Technology, 2020,44(5):1723-1731.
- [13] 侯力枫.风电功率波动平抑下储能出力与平滑能力的动态优化控制策略[J].热力发电,2020,49(8):134-142.  
HOU Lifeng. Dynamic optimization control strategy for energy storage output power and smoothing ability considering smoothing wind power fluctuation[J].Thermal Power Generation,2020,49(8):134-142.
- [14] 万筱钟,康耀元,呼斯乐,等.西北地区风电功率波动特性概率密度及波动统计[J].电网与清洁能源,2021,37(4):107-115.  
WAN Xiaozhong, KANG Yaoyuan, HU Sile, et al. Probability density and fluctuation statistical analysis of wind power fluctuation characteristics in Northwest China [J].Power System and Clean Energy,2021,37(4):107-115.
- [15] 焦东东,陈洁,方圆,等.基于变分模态分解下利用混合储能平抑风电出力波动的控制策略[J].电测与仪表,2021,58(5):14-19+30.  
JIAO Dongdong, CHEN Jie, FANG Yuan, et al. Control strategy of hybrid energy storage for suppressing fluctuation of wind power output based on variational mode decomposition[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2021,58(5):14-19+30.
- [16] 李浩博,邹海荣,朱建红.考虑风电计划跟踪的储能调度模糊控制系统研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(1):125-132.  
LI Haobo, ZOU Hairong, ZHU Jianhong. Research on a fuzzy control system of energy storage dispatch considering wind power plan tracking[J]. Power System Protection and Control,2021,49(1):125-132.
- [17] 朱显辉,于越,师楠,等.BP神经网络的分层优化研究及其在风电功率预测中的应用[J].高压电器,2022,58(2):158-163+170.  
ZHU Xianhui, YU Yue, SHI Nan, et al. Research on hierarchical optimization of BP neural network and its application in wind power prediction[J]. High Voltage Apparatus,2022,58(2):158-163+170.
- [18] 杨银国,李博,谭嫣,等.改进型小波神经网络在风光功率预测中的应用研究[J].信息技术,2020,44(2):98-102.  
YANG Yinguo, LI Bo, TAN Yan, et al. Application of improved wavelet neural network in landscape power prediction[J].Information Technology,2020,44(2):98-102.
- [19] 张明龙,张振宇,罗翔,等.基于多核支持向量机的混合扰动波形辨识算法研究[J].电力系统保护与控制,2022,50(15):43-49.  
ZHANG Minglong, ZHANG Zhenyu, LUO Xiang, et al. Complex disturbance waveform recognition based on a multi-kernel support vector machine[J]. Power System Protection and Control,2022,50(15):43-49.
- [20] 罗珂珂.基于回归支持向量机的风功率预测误差分析[J].技术与市场,2020,27(4):62-64.  
LUO Keke. Wind power prediction error analysis based on regression support vector machine[J]. Technology and Market,2020,27(4):62-64.
- [21] 程杉,许林峰,孙伟斌,等.基于电压稳定性的电动汽车充电站最优规划[J].电力科学与技术学报,2020,35(4):3-12.  
CHENG Shan, XU Linfeng, SUN Weibin, et al. Optimal planning of charging stations for electric vehicles based on voltage stability index[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2020,35(4):3-12.