

# 考虑功率匹配的风储联合一次调频控制策略

张小莲,武启川,郝思鹏,覃世球,胡淇,张金华

(南京工程学院 电力工程学院,江苏 南京 211167)

**摘要:**风储联合参与电网一次调频能够较好地利用风电和储能的优势进行调频控制,逐渐成为一种新的趋势。然而,风储在协调过程中存在储能利用不充分、风储功率不匹配的问题。针对上述问题提出一种改进风储联合一次调频控制策略。通过频率分离、设计六种工况切换规则、设置风电和储能自适应下垂系数,优化了储能电池的充放电功能,改善了电池的荷电状态,解决了工况切换过程中的功率不匹配问题,避免了由此导致的功率缺额过度补偿。最后通过仿真与风储实验平台对比了所提控制策略与现有控制策略的风能利用率和调频效果,验证了所提控制策略的有效性和优越性。

**关键词:**风储联合;一次调频;功率匹配;自适应下垂系数

**中图分类号:**TM72 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd25216

## Wind-storage Combined Primary Frequency Regulation Control Strategy Considering Power Matching

ZHANG Xiaolian, WU Qichuan, HAO Sipeng, Qin Shiqiu, HU Qi, ZHANG Jinhua

(School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, Jiangsu, China)

**Abstract:** The participation of wind power and energy storage in primary frequency regulation of power grid can make better use of the advantages of wind power and energy storage for frequency regulation, which has gradually become a new trend. However, there are some problems in the coordination of wind power system and energy storage, such as insufficient utilization of energy storage and mismatch of wind power and energy storage power. Aiming at the above problems, an improved wind-storage combined primary frequency control strategy was proposed. Through frequency separation, design of six operating conditions and the switching rules, optimization of wind power and energy storage adaptive droop coefficient, the charging and discharging function of energy storage battery was realized, the power mismatch problem in operating condition switching was improved, and the excessive compensation of power shortage caused by this was avoided. Finally, the wind energy utilization efficiency and frequency regulation effect of the proposed control strategy and the existing control strategy were compared through simulation and wind storage experimental platform, and the effectiveness and superiority of the proposed control strategy were verified.

**Key words:** wind-storage combined system; primary frequency regulation; power matching; adaptive droop coefficient

风电等新能源的大规模接入,会对电网的频率稳定性造成很大的影响<sup>[1-2]</sup>。同时储能系统响应速度快的优势越来越明显,大规模储能系统已成为解决电网频率稳定问题的必要手段之一,但也存在容量损耗、功率分配不合理等缺点。当前,新能源电力系统中,储能系统的充放电特性、风电-储能系统中风电与储能系统的协调控制以及储能系统的长效化等问题,已经成为新型电力系统发展的瓶颈<sup>[3-4]</sup>。

目前已有关于风电机组配置储能装置参与调频的相关研究,但是很多研究忽略了风机的风能利用率问题,储能与风机配合的同时往往追求调频效果,而导致风能利用率降低以及电池荷电状态恢复不足。例如文献[5-7]在网侧直流电压母线上加入超级电容,并结合虚拟惯量控制和下垂控制对电容充放电功率进行控制,使系统调频效果得到较好的改善,但是却忽略了风机的风能利用率以及储能电池荷电状态恢复问题,在控制

**基金项目:**国家自然科学基金(52107098)

**作者简介:**张小莲(1985—),女,博士,副教授,主要研究方向为风力发电技术、微电网控制技术,Email:zhangxl530@163.com

策略中没有设计储能充电控制策略。文献[8-9]利用风储联合调频策略,在转速恢复过程采用储能进行功率支撑,从而避免了频率的二次跌落,但是其风机和储能的配合存在不合理导致风能利用率不高。文献[10]为充分发挥 BESS 参与电网一次调频的优势,提出一种基于荷电状态与频率偏差的综合控制方法,旨在改善荷电状态的恢复,但是忽略了风机本身的功率输出,风能利用率较低。文献[11]为解决风电场并网带来的调频不稳定问题,提出一种利用储能补偿惯量的控制策略,有效地提高大规模风电场接入系统的频率稳定性,但是其没有考虑到协同配合导致的风能捕获效率降低的问题。文献[12]为解决频率稳定问题,运用限转矩控制使得DFIG参与系统调频,同时利用蓄电池装置,弥补功率缺额,但是没有考虑到电池的荷电状态恢复。文献[13]结合综合性控制以及超级电容器控制实现不同工况下的一次频率平滑控制策略,但是该控制策略中储能只进行放电,没有充电环节,导致电池的荷电状态恢复不足,储能利用率较低,而且该策略没有考虑风机和储能下垂系数不匹配带来的功率缺额过渡补偿问题以及工况切换不准确的问题。

针对上述研究所存在的问题,本文在源荷功率随机波动的场景下,提出了一种考虑风储功率匹配的风储联合系统参与电网一次调频的改进控制策略,通过优化风机与储能的下垂系数、完善储能的充放电功能,改善了风储联合调频中功率不匹配的问题,提升了系统的一次调频效果,同时提高了风机的风能利用率以及电池荷电状态恢复。最后通过仿真和风储实验平台验证了所提控制策略的有效性和优越性。

## 1 风储联合调频控制策略

### 1.1 风储系统结构

本文研究的风储系统主要由风电场、用于频率调节的储能装置、功率变流器以及负荷构成,如图1所示。系统采用双向DC/AC变流器控制储能装置充放电,将风电场发出的有功功率和蓄电池组内蓄电池的充电功率经双向DC/AC变流器控制并接入交流电网。

### 1.2 基于频率分离的风储调频控制策略

单机系统的频率动态响应模型<sup>[14]</sup>如图2所示。图中, $P_D$ 为负荷扰动; $P_w$ 为风电功率; $P_M$ 为传统同步发电机组的输出功率; $H$ 为电网的惯性时

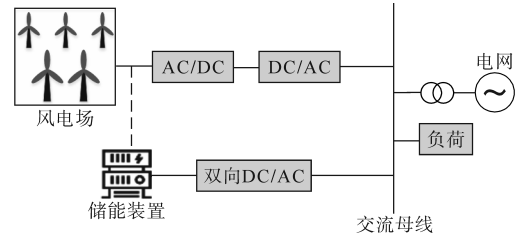


图1 风储系统结构图

Fig.1 Wind-storage system structure

间常数; $D$ 为电网的阻尼系数; $K_m$ 为机械功率增益系数; $F_H$ 为高压汽轮机组产生的部分功率; $T_R$ 为再热时间常数; $R$ 为同步发电机的下垂系数。

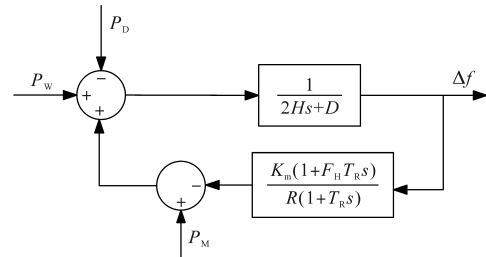


图2 单机系统的频率动态响应模型

Fig.2 Frequency dynamic response model of single machine system

为了更好地响应风电功率和负荷功率波动,将风电和负荷功率波动引起的频率偏差进行分离,并用于设置功率指令。具体如下:

若风电功率和同步发电机组的输出功率不发生变化,即 $P_w$ 和 $P_M$ 为0。由负荷功率波动引起的系统频率偏差的系统传递函数表达式<sup>[15]</sup>为

$$\Delta f_s = \frac{-P_D}{2Hs + D + G(s)} \quad (1)$$

其中  $G(s) = K_m(1 + F_H T_R s) / [R(1 + T_R s)]$

同理,由风电功率波动引起的系统频率偏差的系统传递函数<sup>[16]</sup>表达式为

$$\Delta f_{wind} = \frac{P_w}{2Hs + D + G(s)} \quad (2)$$

分离后的信号一方面用于判断源端和荷端功率的缺额情况,另一方面计算得到控制策略所需要的功率指令,分配给风机控制器或储能控制器,如图3所示。

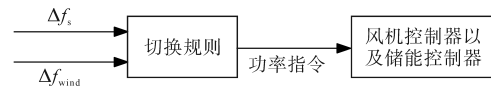


图3 频率分离信号的应用

Fig.3 Application of frequency separation signal

## 2 功率不匹配的难点分析

通过对现有的基于风储联合系统的频率平滑控制策略<sup>[13]</sup>的研究发现该策略具有未充分利

用储能功能以及存在功率不匹配的问题,难以充分发挥风储联合调频的优势。

现有风储联合调频控制策略根据负荷和风速波动情况设计了六种运行工况,并采用一定的判据实现不同工况的切换运行,细分如表1所示。其中风机采用下垂控制和虚拟惯性控制结合的综合惯性控制,储能采用含自适应下垂系数的下垂控制。本身负荷波动功率可由风电功率来弥补一部分,另外一部分则由储能功率或者风机下垂控制功率来参与,因此需要进行计算来求得参与调频的功率。

表1 工况细分  
Tab.1 Condition subdivision

工况	风速变化	负荷变化	功率缺额	切换规则	调频选择
工况一	增大	减小	系统需要减小功率	储能充电参与调频	储能
工况二	减小	减小	无法判断,需要进行比较	计算得到小于0的功率指令,风机降功率	风机
工况三	增大	增大	无法判断,需要进行比较	计算得到小于0的功率指令,风机降功率	风机
工况四	减小	减小	无法判断,需要进行比较	计算得到大于0的功率指令,储能放电	储能
工况五	增大	增大	无法判断,需要进行比较	计算得到小于0的功率指令,储能放电	储能
工况六	减小	增大	系统需要增大功率	储能放电参与调频	储能

当负荷与风速同时减小( $\Delta f_s > 0$ 且 $\Delta f_{wind} < 0$ )时,六种工况中的工况二和工况四的切换需要进行功率比较,通过计算得到的 $\Delta P$ 最终决定是风机还是储能来实现调频,控制框图如图4所示。当 $\Delta P < 0$ 时属于工况二,由风机进行调频,当 $\Delta P > 0$ 时属于工况四,由储能进行调频。 $K_{SCSS}$ 为频率平滑控制策略提出的储能自适应下垂系数。

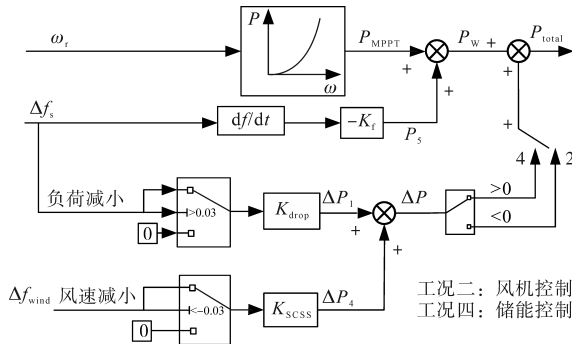


图4 现有控制中工况二和工况四的功率不匹配的控制框图  
Fig.4 Control block diagram of power mismatch between two and four operating conditions in the existing control

现有控制中下垂系数 $K_{drop}$ 与 $K_{SCSS}$ 不一致,带来功率指令计算不准确、与实际调频需求功率不匹配的问题,从而导致补充的功率缺额过多以及

工况切换不准确,即为功率不匹配问题。

由图4可知,风储系统需要提供的功率 $\Delta P$ 由下式计算:

$$\Delta P = K_{drop} \Delta f_s + K_{SCSS} \Delta f_{wind} \quad (3)$$

其中, $K_{drop}$ 与 $K_{SCSS}$ 均为负值。

当系数 $K_{drop}$ 与 $K_{SCSS}$ 不一致,计算得到的值在进行调频时会导致功率补充不准确。具体分析如下:

在风电功率变化量与负荷功率变化量相反且可以互相弥补的情况下,有以下关系:

$$|\Delta f_s| = |\Delta f_{wind}| \quad (4)$$

此时不需要额外的调频功率来补充。但是由于系数 $K_{drop}$ 与 $K_{SCSS}$ 不一致,式(3)会计算出非零的调频附加功率 $\Delta P$ ,导致风储系统输出错误的功率需求而出现过度调频。

例如,若 $K_{drop}$ 的绝对值更大,此时需要风机进行降功率输出,设风机所降功率为 $\Delta P_1$ ,当 $K_{SCSS}$ 的绝对值更大时,则需要储能放电补充功率缺额,设放电功率为 $\Delta P_2$ ,如下式所示:

$$\begin{cases} \Delta P_1 = K_{drop} \Delta f_s + K_{SCSS} \Delta f_{wind} & |K_{drop}| > |K_{SCSS}| \\ \Delta P_2 = K_{drop} \Delta f_s + K_{SCSS} \Delta f_{wind} & |K_{drop}| < |K_{SCSS}| \end{cases} \quad (5)$$

上述两种情况都属于弥补功率缺额过度的情况。

当设置 $K_{drop}$ 与 $K_{SCSS}$ 相等时,与系数不一致时的储能出力对比(工况四出力)如图5所示。

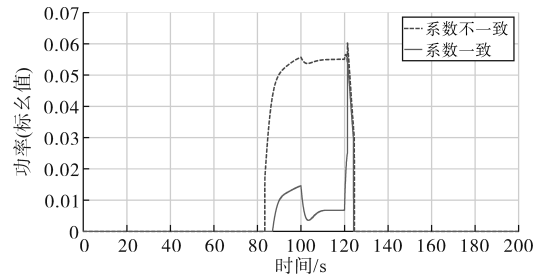


图5 系数一致与不一致时的储能出力

Fig.5 The energy storage output when coefficients are consistent and inconsistent

由图5可知,当使用的系数不一致时,出力明显增多,即计算得到的 $\Delta P$ 不准确,弥补的功率缺额过多,导致频率偏差增大,其频率偏差对比如图6所示。

除了上述功率不匹配的问题,现有控制策略还存在以下两点不足:

首先储能仅进行放电,没有充电环节,在频率平滑控制流程中,当所需功率大于0,即需要补充正功率时切换至储能控制来参与调频,其工况

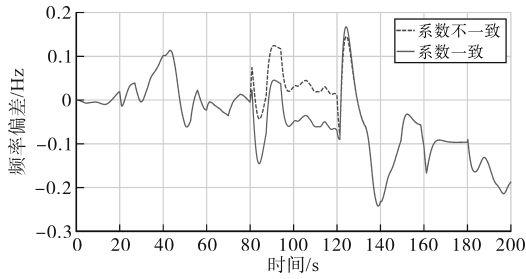


图6 系数一致与不一致时的频率偏差

Fig.6 The frequency deviation when coefficients are consistent and inconsistent

规则中切换至储能的工况如表2所示。

表2 原控制策略储能参与的工况

Tab.2 The original control strategy energy storage involved in the working condition

工况	风速变化	负荷变化	功率缺额	切换规则	调频选择
工况四	减小	减小	无法判断,需要进行比较	计算得到大于0的功率指令,储能放电	储能
工况五	增大	增大	无法判断,需要进行比较	计算得到大于0的功率指令,储能放电	储能
工况六	减小	增大	系统需要增加功率	储能放电参与调频	储能

由此可见,其没有充分利用储能的充放电特性,其次放电将很快达到电池的下限,对储能的初始容量需求较高,成本也随之增加。

此时储能的调频效果越来越差,此外,因为储能的自适应下垂系数很低导致式(5)计算得到的 $\Delta P$ 值总是小于0。所以应该切换到工况四的储能调频,却由于系数不匹配导致 $\Delta P$ 小于0而切换到了工况二的风机下垂控制,存在工况切换错误的问题,如图7所示。图7展示了不同系数对应的 $\Delta P$ 的差异,正负相反,导致工况判断错误。

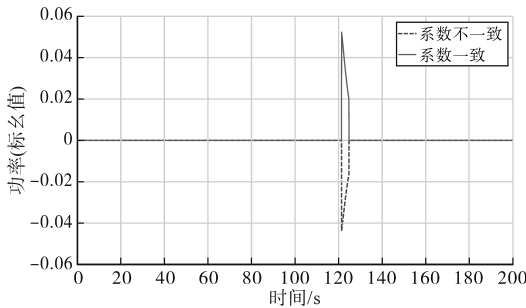


图7 系数不一致带来的工况切换错误

Fig.7 Operating condition switching error caused by inconsistent coefficient

### 3 考虑功率匹配的改进控制策略

#### 3.1 改进控制策略

改进风储联合调频控制策略原理框图如图8所示。包括风力发电机组最大功率点跟踪控制

框、风机综合惯性控制的功率指令控制框、储能下垂控制的功率指令控制框、负荷与风速的增减判断、功率指令的计算控制框以及工况切换规则控制框,工况切换的1,4,5以及6为储能下垂控制,工况切换的2和3为风机下垂控制,7为储能的输出功率,8为风机下垂控制的输出功率。 $\Delta f_s$ 为负荷变化引起的频率变化; $\Delta f_{wind}$ 为风速变化引起的频率变化; $K_p$ 为考虑到工况切换时功率匹配的风机自适应下垂控制系数; $K_{cn}$ 为考虑到工况切换时功率匹配的储能的自适应下垂控制系数; $P_{cn,1}$ 为工况一时储能参与调频需要的功率; $P_{cn,2}$ 为工况六时储能参与调频需要的功率; $P_{sel,1}$ 为工况二和工况四作差后得到的功率; $P_{sel,2}$ 为工况三和工况五作差后得到的功率; $P_{cn}$ 为储能下垂控制输出功率; $P_{drop}$ 为风机下垂控制功率; $P_w$ 为风电功率; $P_{total}$ 为风电功率和储能功率之和。

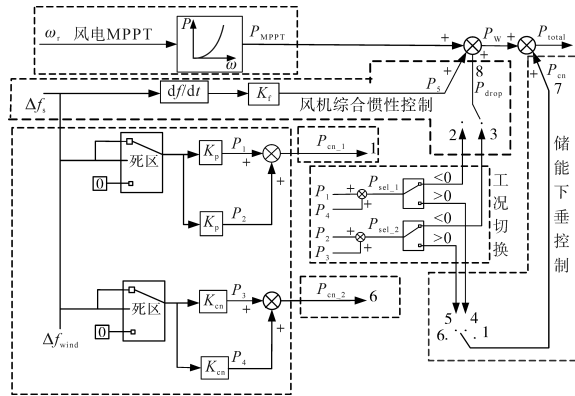


图8 改进风储联合调频控制策略原理框图

Fig.8 Principle block diagram of improved frequency modulation control strategy of air storage combination

根据《风电机组的试验方法》<sup>[17]</sup>设置调频死区为 $|\Delta f| \leq 0.03$  Hz。考虑到储能充放电会损耗其寿命,并且发挥发电机组控制的优势,采用风机与储能联合调频的控制策略,其控制流程图如图9所示。

考虑到负荷与风速同时随机波动的不确定性,本文从源端和荷端的变化情况出发,将其细分为六种不同的工况,以此来实现风机和储能协同参与调频,具体的工况代表的含义下面将一一阐述。

1)工况一。风速和负荷扰动同时检测,并且设置了调频死区,当系统负荷减小需要提供功率 $P_1$ 且风速增大需要提供功率 $P_2$ 时切换到工况一,此时由储能来进行充电的功率 $P_{cn,1}$ 为 $(P_1+P_2)$ ,另外发电机组提供所需惯性支撑时的功率 $P_5$ 。当

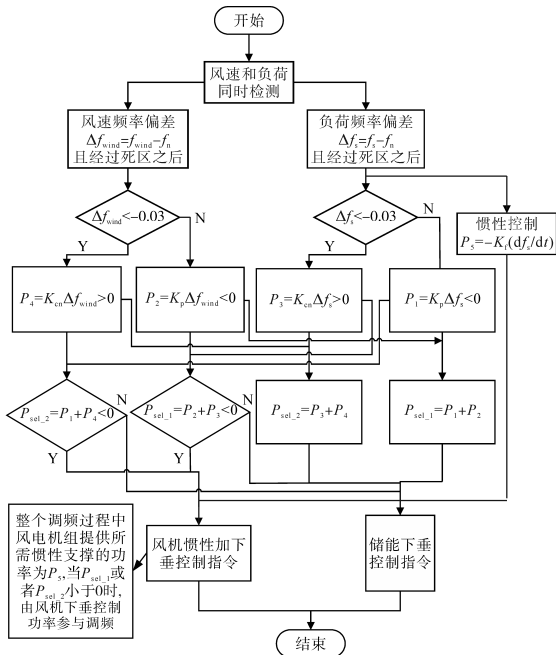


图9 控制流程图  
Fig.9 Control flow chart

负荷和风速同时减小或者增加时,可分为工况二和工况四以及工况三和工况五。

2) 工况二和工况四。在负荷减小需要提供功率  $P_1$ , 同时风速减小需要提供功率  $P_4$ , 此时需要对两者的功率进行比较, 即  $P_{sel2} = P_1 + P_4$ 。当  $P_{sel2}$  小于 0 时切换到工况二, 由风机采用下垂控制实现调频; 当  $P_{sel2}$  大于 0 时切换到工况四, 由储能采用下垂控制实现调频。另外, 发电机组提供所需惯性支撑时的功率  $P_5$ 。

3) 工况三和工况五。在负荷增大需要提供功率  $P_3$ , 风速增大需要提供功率  $P_2$  的情况同时发生时, 此时需要将两者的功率进行综合, 即  $P_{sel1} = P_2 + P_3$ 。当  $P_{sel1}$  小于 0 时切换到工况三, 由风机采用下垂控制实现调频; 当  $P_{sel1}$  大于 0 时切换到工况五, 由储能采用下垂控制实现调频。另外发电机组提供所需惯性支撑时的功率  $P_5$ 。

4) 工况六。当负荷增加需要提供功率  $P_3$  且风速减小需要提供功率  $P_4$  时切换到工况六。此时由储能装置通过网侧变流器向电网输入的功率  $P_{cn2} = P_3 + P_4$ , 另外, 发电机组提供所需惯性支撑时的功率  $P_5$ 。

综上所述, 对于负荷与风速同时随机波动的不确定性, 通过上述六种工况下进行控制, 总的控制框图如图 8 所示, 充分发挥了储能系统性能稳定、控制灵活、响应快速的优点, 充分利用风电机组的自身调频能力, 通过调节风机的出力实现

电网频率稳定, 减小因频率变化而导致的对电网的冲击。利用电池储能系统的快速响应特性, 将风电机组发出的能量转化为电能, 实现风机与储能配合参与电网调频。

### 3.2 储能充放电控制策略

频率平滑控制策略在风速增大且负荷减小, 即工况一对应的情况下, 选择风机降功率参与调频, 此种选择没有利用好储能的充电功能且风机需要降功率运行, 大大降低了风能捕获效率。

对储能只能进行放电而没有充电的问题改进方法为对其切换规则进行了优化, 工况一(负荷减小且风速增加)由原来的风机采用下垂控制参与调频修改为储能采用下垂控制参与调频, 也就是把此工况规则下的功率指令传递给储能, 让储能来实现调频。

最终可实现储能的充电功能, 并且储能调频效果要比原来风机调频效果好, 其次风机的风能利用率也有所提高。

### 3.3 功率不匹配的改进策略

针对工况二与工况四要进行功率比较时存在系数不一致导致补充的功率缺额过多, 以及工况切换不准确的问题, 本文为储能设置与风机匹配的自适应下垂系数  $K_{cn}$ , 即让风机的下垂控制系数与储能的下垂系数保持一致, 即  $K_{cn} = K_p$ 。这样在进行功率比较时, 避免出现因为系数不同而导致储能或者风机多出力造成过度弥补功率缺额以及切换不准确的情况, 改进后的功率指令如下式所示:

$$\Delta P = K_p \Delta f_s + K_{cn} \Delta f_{wind} \quad (6)$$

当采用系数一致的下垂系数时, 式(6)即可转换为

$$\begin{cases} \Delta P = K_{cn} (\Delta f_s + \Delta f_{wind}) \\ \Delta P = K_p (\Delta f_s + \Delta f_{wind}) \end{cases} \quad (7)$$

在计算过程中只有一个因素影响  $\Delta P$  的值, 此时风速和负荷同增同减的情况下, 可以准确计算得到功率缺额。

为了防止储能的 SOC 快速达到上、下限, 影响储能的调频效果, 本文对其原有的自适应下垂系数进行改进, 采用 Sigmoid 型函数(简称 S 型函数)曲线, 可以使得 SOC 维持在适中范围内, 以最优出力参与调频。

$K_{cn}$  可细分为一个放电系数  $K_{cn\_disch}$ , 一个充电系数  $K_{cn\_ch}$ , 如下式所示:

$$K_{cn\_disch} = \begin{cases} 0 & SOC \leq S_{low} \\ \frac{K_M}{1 + 120K_M e^{-\frac{a(S_{min} - SOC)}{S_{min} - S_{min}}}} & S_{min} < SOC < S_{low} \\ K_M & SOC \geq S_{max} \end{cases} \quad (8)$$

$$K_{cn\_ch} = \begin{cases} 0 & SOC \geq S_{max} \\ \frac{K_M}{1 + 120K_M e^{-\frac{a(SOC - S_{min})}{S_{min} - S_{min}}}} & S_{low} < SOC < S_{max} \\ K_M & SOC \leq S_{low} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $K_M$ 为下垂系数的最大值; $S_{max}$ , $S_{min}$ , $S_{low}$ 分别为储能荷电状态的最大值、最小值和合适的中值; $a$ 为设计系数的自适应因子,其大小可以改变系数的变化,本文 $a$ 取15。

当储能  $SOC$  偏高时,把储能放电系数设置为最大值,使电池  $SOC$  减缓达到上限的速度,同理,当储能  $SOC$  偏低时,把储能充电系数设置为最大值,使电池  $SOC$  能更快恢复,随着  $SOC$  增大充电系数随之减小<sup>[18]</sup>。将  $SOC$  划分为三个区域,设定下限  $S_{min}$  为0.1,适中值也是初始值  $S_{low}$  为0.5,上限  $S_{max}$  为0.9。

## 4 算例分析

### 4.1 仿真参数

为验证所提的风储联合系统参与电网一次调频的改进控制策略的可行性和有效性,本文使用含有风机和储能装置系统作为研究对象,在 Matlab/Simulink 中进行效果验证。总仿真时长设置为200 s,相关的参数如表3所示。

### 4.2 仿真分析

为验证本文所提改进策略的有效性和优越性,本文将对传统风储联合调频控制策略(风机采用综合惯性控制且储能采用定下垂系数控制)、文献[16]提出的频率平滑控制和本文所提策略进行对比研究。图10为三种不同控制方式下风电机组参与系统调频的系统频率变化情况,其相应的频率偏差平均值以及风能利用系数平均值如表4所示,储能输出功率情况如图11所示。

从图10可以看出,在风速和负荷同时随机波动的情况下,传统储能定下垂系数控制策略的频率偏差最大波动范围为-0.053~0.052 Hz;频率平滑控制策略下,其频率偏差最大的波动范围为-0.053~0.08 Hz;而采用本文所提出的改进控

表3 仿真参数

Tab.3 Simulation parameters

系统	参数	数值
电网	采样步长 $T/s$	0.04
	电网的惯性时间常数 $H$	26.89
	电网的阻尼系数 $D$	13.2
	机械功率增益系数 $K_m$	36.8
	高压汽轮机组产生的部分功率 $F_H$	0.3
	再热时间常数 $T_R$	2.975
	同步发电机的下垂系数 $R$	1
风机	初始风速 $v_0/(m \cdot s^{-1})$	7.5
	风轮半径 $r/m$	20
	风轮额定转速 $\omega/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	3.457
	最佳叶尖速比	5.8
	最大风能利用系数	0.460 3
储能	空气密度	1.225
	转动惯量 $(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	$5.492 \times 10^5$
	储能装置的容量 $E_{es}/(\text{kW} \cdot \text{h})$	12
	荷电状态下限值 $S_{min}$	0.1
	荷电状态上限值 $S_{max}$	0.9

表4 平均频率偏差和平均风能利用系数

Tab.4 Average frequency deviation and average wind energy utilization coefficient

控制策略	平均频率偏差/Hz	平均风能利用系数
传统风储联合调频	0.011	0.456 9
频率平滑控制策略	0.007 3	0.458 7
本文改进控制策略	0.002 5	0.458 8

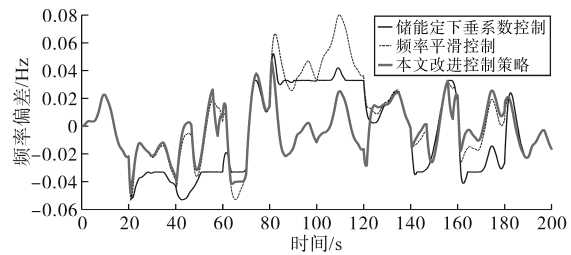


图10 频率偏差

Fig.10 The frequency deviation

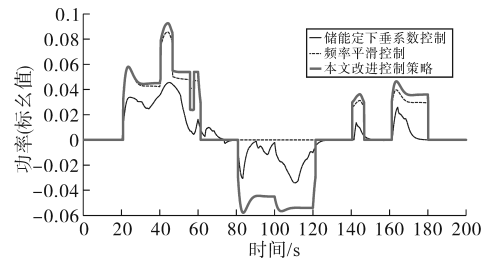


图11 储能输出功率

Fig.11 Energy storage output power

制策略下的频率偏差的最大波动范围为-0.048~0.047 Hz;从表4可以看出,本文所提改进控制策略的频率偏差平均值最小,仅有0.002 5 Hz,并且风能利用系数平均值最大,为0.458 8。因此,相较于其他两种控制策略,本文所提的改进控制策

略,频率调节能力最好,风能利用率最高。

80~120 s时段的频率偏差如图12所示。

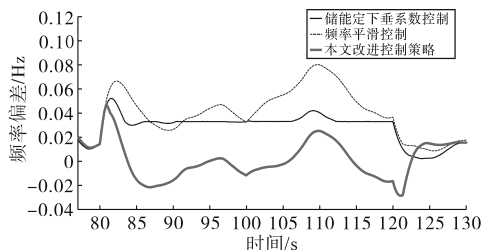
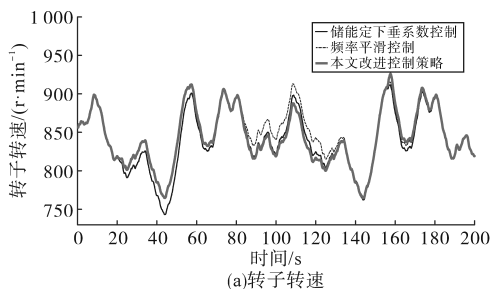


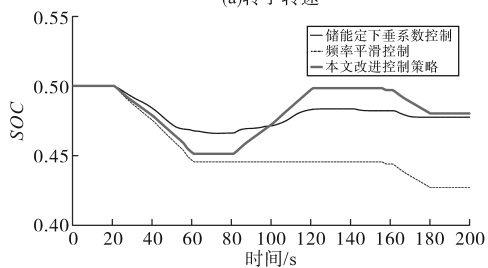
图12 80~120 s时段内的频率偏差

Fig.12 The frequency deviation in the period of 80~120 s

由图12看出,80~120 s这段时间内,本文所提控制策略的频率偏差最小,这个时间段内风速随机变化量在经过频率分离后在调频死区范围之内,而负荷减小,分离出的负荷频率变化量相较于不分离的情况,放大了调频信号,满足工况一的切换规则,切换为储能参与调频,如图11所示的储能输出功率,而频率平滑控制在这种情况下切换为变功率点跟踪控制,储能不参与调频,因此调频效果远不如本文所提策略,风电机组转子转速和储能SOC变化情况如图13所示。



(a)转子转速



(b)SOC变化情况

图13 转子转速以及SOC变化情况

Fig.13 Changes in rotor speed and SOC

从图13b可知,传统风储联合调频控制策略下的储能SOC的平均值为0.478,一次频率平滑调节方法的储能SOC的平均值为0.454,而本文所提改进控制策略下的储能SOC的平均值为0.4819,储能的荷电状态恢复更好,大大提高了储能的利用率,调频效果得到提高。

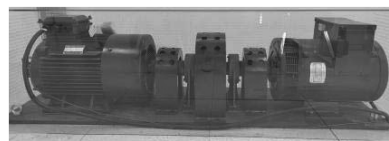
### 4.3 实验验证

本实验平台主要由以下几部分组成:风机模

拟器、磷酸铁锂电池、电池并网系统、PLC、上位机等,如图14所示。其中,风机模拟器由一台额定功率18.5 kW的异步电动机和一台额定功率为15 kW的永磁同步发电机组成,该电动机根据控制要求可以模拟风力机转子的旋转特性。异步电动机在风力机转动的同时,通过拖动发电机工作,使发电机工作于发电状态,风力机拖动发电机工作,通过变流器并网运行。采用DC/DC,DC/AC两级变换器将磷酸铁锂电池接入交流电网,其中磷酸锂电池组2用于模拟负荷波动。上述改进策略以Beckhoff PLC为核心,通过对风力机与锂电池运行进行控制,对风力机与锂电池进行实时监控,采用以上硬件与软件来验证改进策略的有效性和优越性。



(a)风机模拟器



(b)同步机模拟器



(c)风机拖动柜



(d)锂电池双向功率变流柜

图14 风储实验平台

Fig.14 Wind-storage experiment platform

分别采用本文改进控制策略和传统控制策略运行200 s,两种策略下的系统频率偏差如图15所示。

传统控制策略下的频率偏差范围为-0.247~0.234 Hz,而本文算例的频率范围为-0.138~0.161 Hz。此外,由于细化了各种工况,在风速增大且负荷减小或者风速减小且负荷增大的情况下,本文改进控制策略的储能充放电功率(大于0的部分表示放电功率,小于0的部分表示充电功率)都要大于传统控制策略的输出,如图16所示。

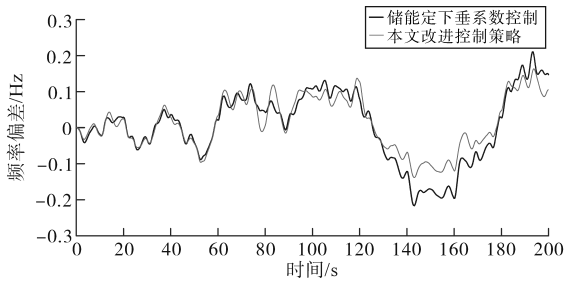


图15 实验下的频率偏差

Fig.15 Frequency deviation under experiment

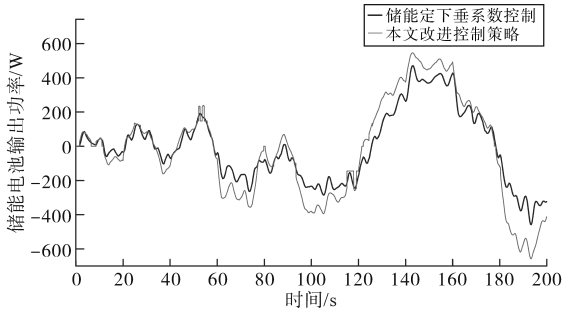
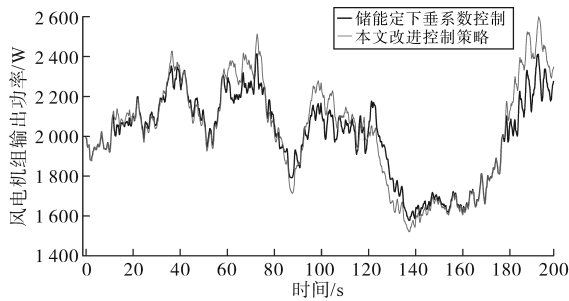


图16 储能系统输出功率

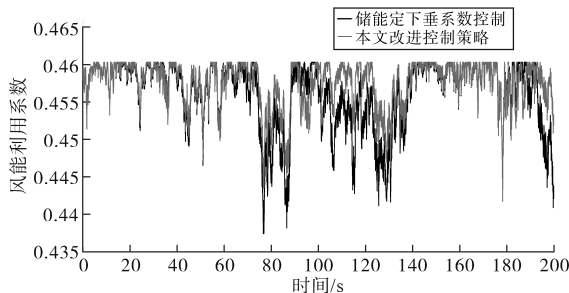
Fig.16 The energy storage system output power

由于本文改进控制策略对于工况的细化,减少了风机降功率运行时间,风电机组的输出功率大于传统控制策略下的输出功率,如图17a所示,因此本文控制策略的风能利用系数也大于传统控制策略,如图17b所示。

计算其平均值得到传统控制策略下的风能利用系数平均值为0.455 9,而本文改进控制策略为0.457 6,风能利用率得到了明显提高。



(a)风电机组输出功率



(b)风能利用系数

图17 风电机组输出功率和风能利用系数

Fig.17 The wind turbine output power and wind energy utilization coefficient

## 5 结论

本文针对风储联合系统参与电网的一次调频过程中存在功率不匹配、储能利用不充分的问题,提出一种改进控制策略,显著提高了风储联合参与电网一次调频的控制效果以及风电机组的风能利用率。通过仿真和实验验证了本文所提策略的有效性和优越性,主要结论如下:

1)本文所提出的改进的控制策略考虑到储能的充放电功能,相较于现有控制策略,提高了储能的利用率,且使得一次调频后系统的频率偏差更低,调频时间更短,达到了改善调频效果的目的,同时获得了更高的风能利用率。

2)针对工况切换时由于系数不一致导致的功率不匹配问题,对风机的下垂系数和储能的下垂系数进行匹配,获得更准确的功率指令,避免储能过度补充功率缺额,获得了更好的对频率恢复效果。

3)本文基于S型函数提出的自适应下垂系数对储能的荷电状态恢复更好,大大提高了储能的利用率,并且调频效果得到改善。

相较于传统风储联合调频控制,本文改进控制策略的频率偏差改善量可达31.19%,风能利用率提升可达0.37%。

### 参考文献

- [1] ZHANG Tian, GONG Yanfeng. Transmission technologies and operational characteristic analysis of hybrid UHV AC/DC power grids in China[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 199(1): 146-153.
- [2] 李程昊,蒋芒,姚德贵,等.高比例可再生能源电力系统的日前-日内两级无功功率滚动调度方法[J].南方电网技术, 2022, 16(6): 94-103.  
LI Chenghao, JIANG Mang, YAO Degui, et al. Day-ahead and intra-day two-stage reactive power rolling dispatch method for power systems with high renewable power penetration[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(6): 94-103.
- [3] 李欣然,黄际元,陈远扬,等.基于灵敏度分析的储能电池参与二次调频控制策略[J].电工技术学报, 2017, 32(12): 224-243.  
LI Xinran, HUANG Jiyuan, CHEN Yuanyang, et al. Battery energy storage control strategy in secondary frequency regulation considering its action moment and depth[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(12): 224-243.
- [4] 周霞,刘懿诗,戴剑丰,等.考虑风-储-直参与调频的电力系统频率特征定量分析[J].电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 30-44.

- ZHOU Xia, LIU Yishi, DAI Jianfeng, et al. Quantitative analysis of frequency characteristics of power systems considering wind-storage-direct frequency modulation[J]. Power Systems Protection and Control, 2023, 51(6):30-44.
- [5] 颜湘武,崔森,常文斐.考虑储能自适应调节的双馈感应发电机一次调频控制策略[J].电工技术学报,2021,36(5):1027-1039.
- YAN Xiangwu, CUI Sen, CHANG Wenfei. Primary frequency regulation control strategy of doubly-fed induction generator considering supercapacitor SOC feedback adaptive adjustment [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(5):1027-1039.
- [6] 颜湘武,崔森,宋子君,等.基于超级电容储能控制的双馈风电机组惯量与一次调频策略[J].电力系统自动化,2020,44(14):111-120.
- YAN Xiangwu, CUI Sen, SONG Zijun, et al. Inertia and primary frequency regulation strategy of doubly-fed wind turbine based on super-capacitor energy storage control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14):111-120.
- [7] 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 Xiangwu, SONG Zijun, 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.
- [8] 颜全椿,顾文,范立新,等.储能协助风电机组参与电网调频控制策略研究[J].现代电力,2022,39(5):537-546.
- YAN Quanchun, GU Wen, FAN Lixin, et al. Energy storage assists wind turbines to participate in grid frequency regulation control strategy research[J]. Modern Electric Power, 2022, 39(5):537-546.
- [9] MIAO Lu, WEN Jinyu, XIE Hailian, et al. Coordinated control strategy of wind turbine generator and energy storage equipment for frequency support[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(4):34-41.
- [10] 刘英培,田仕杰,梁海平,等.考虑SOC的电池储能系统一次调频策略研究[J].电力系统保护与控制,2022,50(13):107-118.
- LIU Yingpei, TIAN Shijie, LIANG Haiping, et al. Control strategy of a battery energy storage system considering SOC in primary frequency regulation of power grid[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13):107-118.
- [11] 刘巨,姚伟,文劲宇,等.一种基于储能技术的风电场虚拟惯量补偿策略[J].中国电机工程学报,2015,35(7):1596-1605.
- LIU Ju, YAO Wei, WEN Jinyu, et al. A wind farm virtual inertia compensation strategy based on energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7):1596-1605.
- [12] 赵晶晶,李敏,何欣芹,等.基于限转矩控制的风储联合调频控制策略[J].电工技术学报,2019,34(24):4982-4990.
- ZHAO Jingjing, LI Min, HE Xinqin, et al. Coordinated control strategy of wind power and energy storage in frequency regulation based on torque limit control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(24):4982-4990.
- [13] 崔森,颜湘武,王雅婷,等.考虑源-荷功率随机波动特性的双馈风力发电机一次频率平滑调节方法[J].中国电机工程学报,2021,41(S1):143-154.
- CUI Sen, YAN Xiangwu, WANG Yating, et al. A smooth adjustment method for primary frequency of doubly-fed wind generators considering random fluctuation characteristics of source-load power[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(S1):143-154.
- [14] 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 Tianxiang, ZHAI Baoyu, LI Xing, et al. Optimal control strategy for frequency response of combined wind storage system [J]. Power Grid Technology, 2022, 46(10):3980-3989.
- [15] 朱宁宁.风储联合调频控制策略研究[D].长沙:湖南大学,2019.
- ZHU Ningning. Research on frequency modulation control strategy of combined wind storage[D]. Changsha: Hunan University, 2019.
- [16] 包宇庆.需求响应参与电力系统调频机理及控制研究[D].南京:东南大学,2015.
- BAO Yuqing. Research on frequency modulation mechanism and control of power system based on demand response[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [17] 高雅.清洁发展的技术方案[J].国家电网,2016(11):57-59.
- GAO Ya. Technical scheme of clean development[J]. State Grid, 2016(11):57-59.
- [18] 王铭岐.电池储能系统参与系统一次调频控制策略研究[D].吉林:东北电力大学,2022.
- WANG Mingqi. Research on primary frequency modulation control strategy of battery energy storage system[D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2022.

收稿日期:2023-06-29

修改稿日期:2023-10-07