

文章编号:1001-2060(2023)06-0048-10

储能 - 火电联合一次调频的双层控制策略

于会群, 戚明鑫, 彭道刚, 孙浩益

(上海电力大学 自动化工程学院, 上海 200090)

摘要:针对储能系统参与一次调频造成储能电池寿命损耗的问题,提出一种储能 - 火电联合一次调频的双层控制策略,通过改进鲸鱼算法对单位调节功率和分配系数进行寻优,在减少储能寿命损耗的同时提高调频效果,最后搭建储能火电一次调频仿真模型。仿真结果表明:在连续负荷扰动工况下,本文提出策略的储能寿命损耗比固定下垂控制和变系数下垂控制分别减少 61.1% 和 32.8%,频率偏差均方根分别比固定下垂控制、变系数下垂控制和无储能减少 40%,100% 和 150%。

关键词:储能电池;一次调频;储能寿命;分配系数

中图分类号:TM732 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.mdlgc.2023.06.006

[引用本文格式] 于会群, 戚明鑫, 彭道刚, 等. 储能 - 火电联合一次调频的双层控制策略 [J]. 热能动力工程, 2023, 38(6):48-57.
YU Hui-qun, QI Ming-xin, PENG Dao-gang, et al. Double-layer control strategy of combined primary frequency regulation for battery energy storage system and thermal power unit [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(6):48-57.

Double-layer Control Strategy of Combined Primary Frequency Regulation for Battery Energy Storage System and Thermal Power Unit

YU Hui-qun, QI Ming-xin, PENG Dao-gang, SUN Hao-yi

(College of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai, China, Post Code:200090)

Abstract: Aiming at the problem of battery life loss caused by energy storage system participating in primary frequency regulation, a two-layer control strategy of combined primary frequency regulation for battery energy storage system and thermal power unit was proposed. By using the improved whale algorithm to optimize the unit regulating power and distribution coefficient, the energy storage life loss was reduced and the frequency regulation effect was improved. The simulation model of primary frequency regulation for thermal power energy storage was built eventually. The simulation results show that under the continuous load disturbance condition, the energy storage life loss of the proposed strategy is reduced by 61.1% and 32.8% respectively compared with the fixed droop control and variable coefficient droop control, and the root mean square of frequency deviation of this strategy is reduced by 40%, 100% and 150% respectively compared with the fixed droop control, variable coefficient droop control and no energy storage condition.

Key words: battery energy storage, primary frequency regulation, energy storage life, distribution coefficient

收稿日期:2022-10-17; 修订日期:2022-11-03

基金项目:上海市“科技创新行动计划”地方院校建设项目(20020500500)

Fund-supported Project: Shanghai University Science and Technology Innovation Action Plan Local University Capacity Building Project (20020500500)

作者简介:于会群(1978-),女,上海电力大学副教授。

引言

近年来,大量可再生能源并网引起电网频率波动,火电机组单独参与一次调频已不能满足调频需求^[1-2]。而储能电池因控制精度高、响应速度快被用来辅助火电机组进行一次调频。

目前,众多研究表明,储能辅助火电机组进行调频可以提高调频效果^[3-5]。文献[6]提出了两种模型用于一次调频,一种模型不限制充电状态,另一种模型考虑荷电状态(State of Charge,SOC)恢复,有效提升一次调频效果。文献[7]提出一种动态下垂系数和动态SOC基点的调频策略,通过改变SOC基点从而提高调频的效果。文献[8]提出一种考虑调频需求和SOC状态的调频策略,在满足调频需求的同时维持SOC在较好状态。部分学者对储能参与调频时的SOC进行了约束^[9-11],这对储能系统快速响应能力造成影响。文献[12]根据系统频率偏差进行模式切换,虽然在一定程度上提升了调频效果,但在模式切换时会对系统频率造成影响。针对文献[12]中提出的模式切换方法在切换不同模式时影响频率的问题,文献[13]通过设定比例系数来实现两种不同控制策略的无扰切换,而该方法仅根据频率偏差对比例系数进行调整,无法完全发挥这两种控制的优势。文献[14]设定储能系统的SOC在最优范围内,使储能系统参与调频的收益最大,但没有考虑储能电池参与调频时的寿命损耗。

针对储能参与一次调频时对寿命损耗的影响,兼顾一次调频频率偏差,将储能单位调节功率和分配系数相结合提出储能-火电联合一次调频的双层控制策略。上层是功率调整层,采用本文提出的改进鲸鱼算法对单位调节功率进行寻优,从而实现降低储能寿命损耗的目的。下层是系数分配层,以频率偏差最小为目标,采用改进鲸鱼算法对分配系数进行寻优调整,从而提高一次调频的效果。最后,基于现场数据,在典型工况条件下进行仿真验证,将本文策略与固定下垂控制、变系数下垂控制和无储能控制进行对比,证明本文提出的策略可以有效减少储能电池寿命损耗,并提高一次调频效果。

1 储能-火电联合一次调频模型

储能-火电联合调频系统如图1所示。图中 ΔP_B 为储能参与一次调频输出功率, ΔP_G 为火电机组参与一次调频输出功率。储能系统通过逆变器(PCS)与升压变压器进行连接再接入火电机组厂用母线。

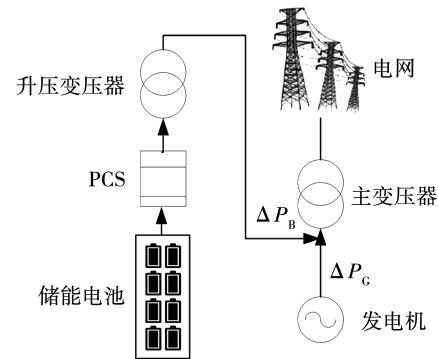


图1 储能-火电联合调频系统

Fig. 1 Combined frequency regulation system for energy storage system and thermal power unit

将火电机组和储能系统各部分进行等效,得到储能-火电联合一次调频模型如图2所示。图中 Δf 和 ΔP_L 分别为电网频率偏差和实时负荷扰动, H 为火电机组的下垂控制系数, T_M 和 s 分别为电网惯性时间常数和拉氏算子。功率调整层对单位调节功率进行动态调整,其参数如下: P_{ME} 为虚拟惯性控制单位调节功率, P_{KE} 为虚拟下垂控制单位调节功率, a 为单位调节功率的修正系数。系数分配层对分配系数进行动态调整,其参数如下: A_1 为虚拟下垂控制的分配系数, A_2 为虚拟惯性控制的分配系数, A_3 为虚拟负惯性控制的分配系数, ΔP_{E1} 为虚拟下垂有功功率增量, ΔP_{E2} 为虚拟惯性有功功率增量, ΔP_{E3} 为虚拟负惯性有功功率增量。火电机组的调速器和汽轮机参数如下: T_G 是火电机组调速器的时间常数, F_{HP} , F_{IP} 和 F_{LP} 分别为火电机组的汽轮机高、中和低压缸功率系数, T_{RH} , T_{CO} 和 T_{CH} 分别为火电机组的再热器时间常数、汽轮机中、低压缸蒸汽容积的时间常数和汽轮机高压蒸汽容积的时间常数。储能系统由储能电池和PCS这两个重要部分组成。 N 为电池储能

单体元件数量, V_{batt} 和 V_{ov} 分别为端电压和开路电压, R_1 为欧姆内阻, R_2, R_3, C_2 和 C_3 是并联支路的电阻与电容值, C_{rate} 为储能系统的额定容量, Q_{soc} 为初始电

池的 SOC 值^[15]。 T_{pes} 和 T_d 为 PCS 和延时环节的时间常数, U_{pes} 为转换系数。

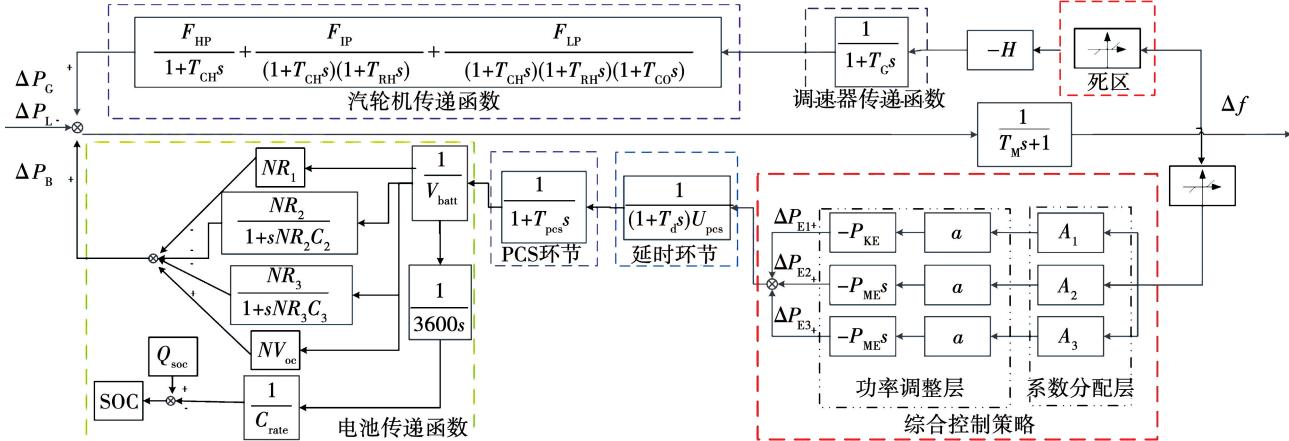


图 2 储能 - 火电联合一次调频模型

Fig. 2 Combined primary frequency regulation model for energy storage system and thermal power unit

2 一次调频双层控制策略

2.1 功率调整层

2.1.1 储能寿命模型

基于锂电池能量密度大、循环寿命长的特性,本研究采用锂电池作为储能装置辅助火电机组进行调频。锂电池的寿命主要由温度和放电深度所决定^[16-17],由于锂电池安装在恒定温度的集装箱中,因此不将温度作为影响储能电池寿命的主要因素。当温度一定时,储能电池放电深度越大,循环次数越小。储能电池参与一次调频时,根据不同负荷扰动进行不同的动作,从而导致放电深度发生变化。因此,放电深度是影响储能寿命的主要因素。储能电池的放电深度与电池的功率关系密切,因此构造储能单位调节功率与放电深度的关系式:

$$D = \left| \frac{P_{\text{ME}} \Delta f + P_{\text{KE}} d(\Delta f)/dt}{Q} \right| \quad (1)$$

式中: D —储能电池的放电深度,%; Q —储能电池容量,MW·h。

在一定时间内,虚拟惯性控制和虚拟下垂控制的单位调节功率越大,储能电池的放电深度越大。当电池放电深度越大时,储能电池寿命损耗越大,本文设定储能电池的寿命为 1。

储能电池寿命衰减关系式:

$$B(t) = \frac{|D|^{w_1}}{N_r e^{w_2(1-D)}} \quad (2)$$

式中: $B(t)$ —储能电池寿命损耗; e, w_1, w_2 —电池系数; N_r —电池额定循环次数。

2.1.2 单位调节功率修正

由于超短期预测在电网调度中已较为成熟,因此默认已获得超短期负荷预测曲线。超短期负荷预测会存在一定的误差,当超短期负荷预测与实际负荷扰动不一致时,求解的虚拟下垂控制单位调节功率和虚拟惯性控制单位调节功率会对调频结果造成影响,故需要对求解的单位调节功率进行修正。

单位调节功率的修正系数 a 为:

$$a = \frac{\Delta P_L}{\Delta P_L'} \quad (3)$$

式中: $\Delta P_L'$ —超短期预测所对应的负荷扰动,MW。

修正后虚拟下垂控制的单位调节功率:

$$P_{\text{KE1}} = P_{\text{KE}} \cdot a \quad (4)$$

修正后虚拟惯性控制的单位调节功率:

$$P_{\text{ME1}} = P_{\text{ME}} \cdot a \quad (5)$$

2.1.3 改进鲸鱼算法

鲸鱼算法^[18-19] (Whale Optimization Algorithm, WOA) 的主要流程包括搜索猎物、包围猎物和捕获

猎物。WOA 有较低的复杂度、较快的收敛速度和较强的搜索能力,但由于 WOA 的收敛系数 b 是线性变化,因此容易陷入局部最优。

鲸鱼算法的收敛系数 b 为:

$$b = 2 - 2t/t_{\max} \quad (6)$$

式中: t_{\max} —设置的最大迭代次数; t —当前迭代次数。

鲸鱼算法的系数向量 \mathbf{Y} 为:

$$\mathbf{Y} = br_1 - b \quad (7)$$

式中: r_1 —随机向量在 0~1 之间的随机数。

鲸鱼算法通过随机概率 p 对位置更新策略进行选择, p 为 0~1 的随机数; l 是包围猎物中的系数,为 [-1,1] 区间内的随机数。

改进的鲸鱼算法解决了基础鲸鱼算法容易陷入局部最优的问题,同时拥有较低的复杂度和较快的搜索能力。改进的鲸鱼算法流程如图 3 所示。

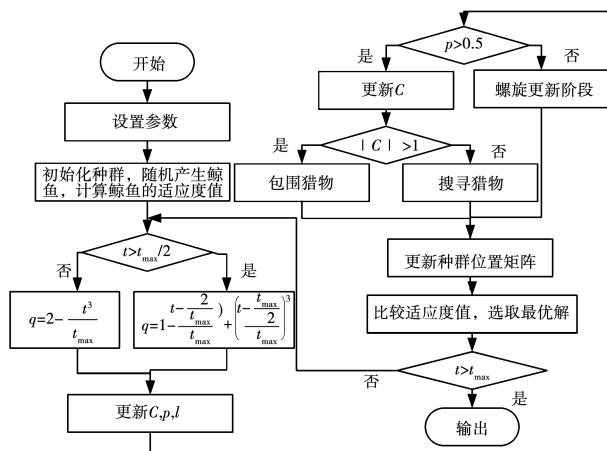


图 3 改进鲸鱼算法流程图

Fig. 3 Flow chart of improved whale algorithm

基础鲸鱼算法的收敛系数线性变化,会导致在搜索后期陷入局部最优的问题。因此改进的鲸鱼算法用非线性收敛系数来替换基础鲸鱼算法中的线性收敛系数,解决了由于线性收敛系数陷入局部最优的问题。非线性收敛系数为:

$$q = \begin{cases} 2 - \frac{t^3}{t_{\max}}, & t < t_{\max}/2 \\ 1 - \frac{t - 2/t_{\max}}{t_{\max}} + \left(\frac{t - t_{\max}/2}{t_{\max}}\right)^3, & t > t_{\max}/2 \end{cases} \quad (8)$$

2.1.4 单位调节功率求解流程

在单位调节层,首先建立储能寿命损耗模型,获取超短期负荷预测数据,设定鲸鱼算法参数和约束条件:

$$\begin{cases} t_{\max} = 400 \\ P_{ME} \Delta f + P_{KE} d(\Delta f)/dt > \Delta P_L' \\ D_{\min} < D < D_{\max} \\ |a| < 1000 \end{cases} \quad (9)$$

式中: D_{\min} —设置的最小放电深度; D_{\max} —设置的最大放电深度。

改进鲸鱼算法以储能电池寿命损耗 $B(t)$ 为适应度函数,对 P_{ME} 和 P_{KE} 进行寻优调整。再根据实时负荷扰动设定修正系数,最后对单位调节功率进行修正,得到 P_{ME1} 和 P_{KE1} 。

2.2 系数分配层

2.2.1 储能控制方案

系统的频率偏差为:

$$\Delta f = \frac{\Delta P_G + \Delta P_B - \Delta P_L}{T_M s + 1} \quad (10)$$

在频率偏差较小时,采用虚拟下垂控制可以避免储能的过动作和误动作造成的频率扰动。储能系统虚拟下垂控制^[20]的有功功率增量为:

$$\Delta P_{E1} = -P_{KE1} \Delta f \quad (11)$$

在频率偏差较大时,采用虚拟惯性控制可以快速减少频率偏差,阻碍频率的进一步波动。储能系统虚拟惯性控制^[20]的有功功率增量为:

$$\Delta P_{E2} = -P_{ME1} d(\Delta f)/dt \quad (12)$$

在频率恢复阶段,采用虚拟负惯性控制可以加快频率恢复。储能系统虚拟负惯性控制的有功功率增量为:

$$\Delta P_{E3} = P_{ME2} d(\Delta f)/dt \quad (13)$$

2.2.2 储能系统输出功率

储能参与一次调频的控制方法有虚拟下垂控制、虚拟惯性控制和虚拟负惯性控制,这 3 种控制方法都有各自的缺点。虚拟惯性控制和虚拟负惯性控制无法改善稳态偏差,虚拟下垂控制在单独控制的情况下无法改善频率变化速度和最大频率偏差。将三者相结合进行控制,可以弥补单一控制方法的不足,从而提高调频效果。在功率调整层确定单位调节功率后,系数分配层通过改进鲸鱼算法对分配系数进行寻优调整从而提高一次调频效果。

储能系统输出功率:

$$\Delta P_B = -A_1 \cdot \Delta P_{E1} - A_2 \cdot \Delta P_{E2} + A_3 \cdot \Delta P_{E3} \quad (14)$$

2.2.3 储能输出功率求解流程

在系数分配层,同样使用改进鲸鱼算法对分配

系数进行寻优调整。设定改进鲸鱼算法的最大迭代次数为 400,改进鲸鱼算法的种群数为 30。储能输出功率求解流程如图 4 所示。

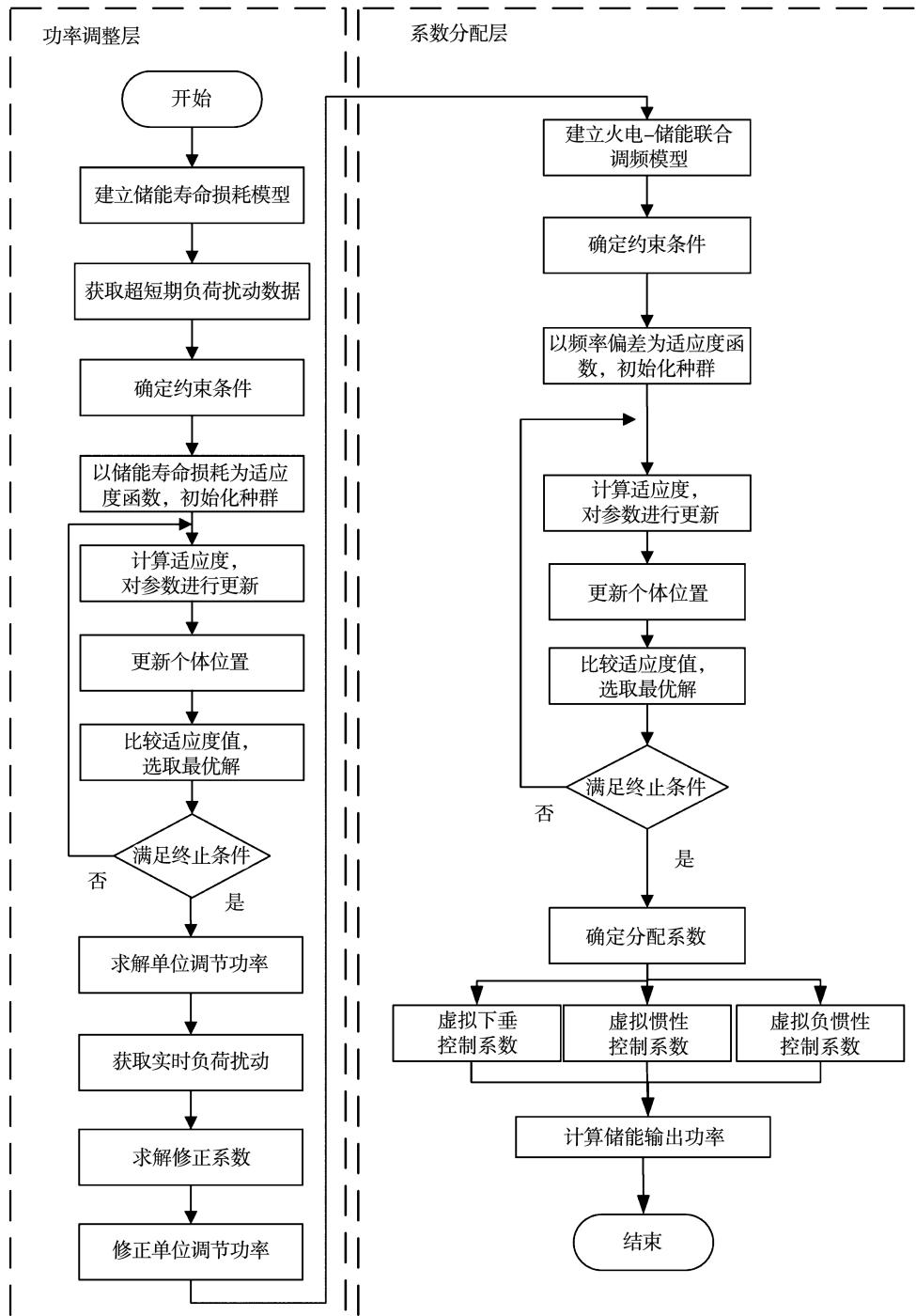


图 4 储能 – 火电联合调频流程图

Fig. 4 Flow chart of combined frequency regulation for energy storage system and thermal power unit

从功率调整层获取单位调节功率,建立火电 – 储能联合调频模型,改进鲸鱼算法以频率偏差 Δf 为

适应度函数,设定约束条件为:

$$\begin{cases} A_1 + A_2 + A_3 = 1 \\ A_2 + A_3 \neq 0 \\ |A_1| < 1 \\ |A_2| < 1 \\ |A_3| < 1 \\ t_{\max} = 400 \end{cases} \quad (15)$$

对分配系数 A_1, A_2 和 A_3 进行调整,通过将单位调节功率和分配系数相乘,确定最终的储能输出功率。

2.3 双层控制策略关联结构

储能-火电联合调频策略关联结构如图 5 所示。可以看出,在功率调整层,获取超短期负荷预测数据,建立储能寿命损耗模型。以储能寿命损耗最小为目标,采用改进鲸鱼算法对虚拟下垂控制和虚拟惯性控制的单位调节功率进行寻优调整,再根据实时负荷扰动对其进行修正并将其下发给系数分配层。系数分配层在获取单位调节功率后,以减少频率偏差为目的,采用改进鲸鱼算法对虚拟下垂控制、虚拟惯性控制和虚拟负惯性控制的分配系数进行寻优调整,通过将单位调节功率和分配系数相结合最终确定储能功率。

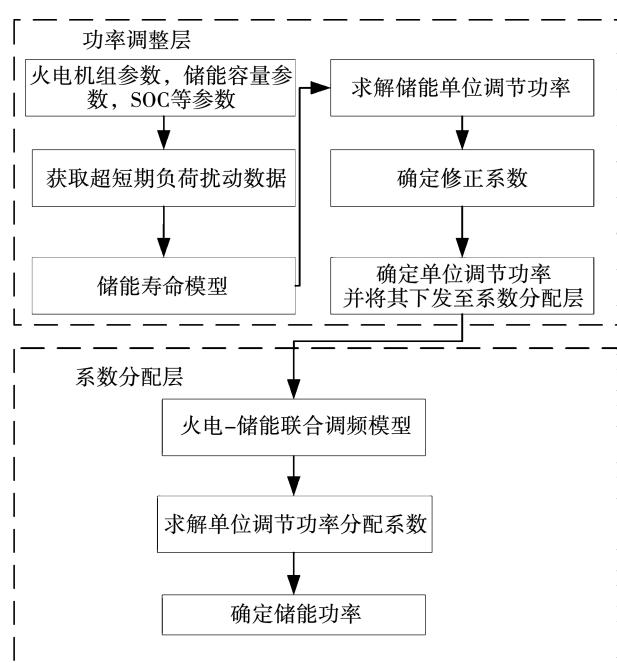


图 5 储能-火电联合调频策略关联结构图

Fig. 5 Associated structure diagram of combined frequency regulation policy for energy storage system and thermal power unit

3 仿真分析

3.1 仿真参数

在 Matlab/Simulink 中搭建了单区域电网一次调频模型,该机组额定容量为 1 000 MW,配置储能容量 10 MW·h。仿真参数如表 1 所示。为方便后期对比,定义储能-火电联合一次调频的双层控制策略为策略 1,文献[13]中提出设定固定虚拟下垂控制功率的固定虚拟下垂控制策略为策略 2,文献[8]中提出改变虚拟下垂控制功率的变系数虚拟下垂控制策略为策略 3,无储能控制策略为策略 4。为验证策略的有效性,选取阶跃扰动、120 s 连续负荷扰动和 900 s 连续负荷扰动,对策略 1,2,3,4 进行验证。

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

参数	数值
最小放电深度 D_{\min}	0.2
最大迭代次数 t_{\max}	400
调速器时间常数 T_G	0.02
PCS 时间常数 T_{PCS}	0.1
高压缸功率系数 F_{HP}	0.3
中压缸功率系数 F_{IP}	0.3
低压缸功率系数 F_{LP}	0.4
转换系数 U_{pcs}	0.5
最大放电深度 D_{\max}	0.8
改进鲸鱼算法种群数	30
再热器时间常数 T_{RH}	10
低压缸蒸汽时间常数 T_{CO}	0.5
高压缸蒸汽时间常数 T_{CH}	0.3
电网惯性时间常数 T_M	10
延时环节时间常数 T_d	0.1

3.2 阶跃负荷扰动工况

采用 4 种策略对标幺值为 0.05 p.u. 的阶跃负荷扰动进行验证。4 种不同策略所对应的频率偏差如图 6 所示。调频指标和电池指标如表 2 所示。由图 6 和表 2 可知,当受到 0.05 p.u. 的阶跃负荷扰动时,策略 1 到达稳态时间比策略 2,3,4 分别快 19.9%,21.8% 和 30.5%。策略 1 的稳态频率偏差比策略 2,3,4 分别少 4.2%,19.8% 和 21.8%。策略 1 的储能寿命损耗比策略 2 和 3 分别小 33.8% 和 61.5%。

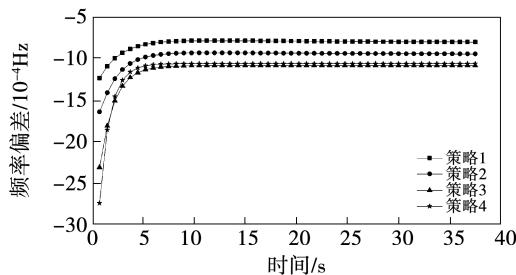


图 6 阶跃扰动下频率偏差曲线

Fig. 6 Frequency deviation curve under step disturbance

表 2 阶跃扰动下调频指标和电池指标

Tab. 2 Frequency regulation and battery indexes under step disturbance

策略	最大频率偏差/		稳态时间/	稳态频率偏差/	寿命损耗/
	10^{-3}	10^{-4}		10^{-9}	
1	1.792	19.11	-8.72	6.56	
2	1.892	22.93	-9.10	8.75	
3	2.676	23.28	-10.46	10.60	
4	4.075	24.95	-10.63	—	

图 7 为 0.05 p. u. 阶跃负荷扰动下 3 种策略的 SOC 曲线。由图 7 可知, 策略 1 和 3 的 SOC 变化不大, 策略 2 以较大功率输出使 SOC 变化率较大, 从而影响储能电池寿命。由上述分析可知, 策略 1 的一次调频效果优于其他 3 种策略。

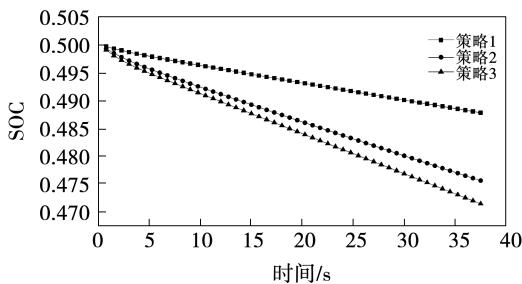


图 7 阶跃扰动下 SOC 变化曲线

Fig. 7 SOC change curve under step disturbance

3.3 连续负荷扰动工况

3.3.1 短期连续负荷扰动工况

为验证一次调频的有效性, 在仿真中加入 120 s 短期连续负荷扰动加以验证。负荷扰动曲线如图 8 所示。控制策略的频率偏差曲线和 SOC 曲线如图 9 和图 10 所示。4 种控制策略的调频指标如表 3 所示。电池指标如表 4 所示。

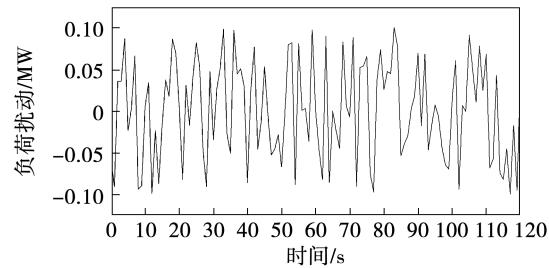


图 8 120 s 负荷扰动曲线

Fig. 8 Load disturbance curve in 120 s

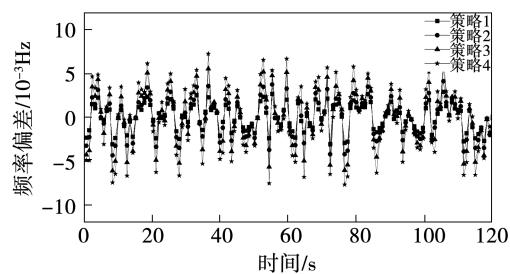


图 9 120 s 连续扰动下频率偏差曲线

Fig. 9 Frequency deviation curve in 120 s under continuous disturbance

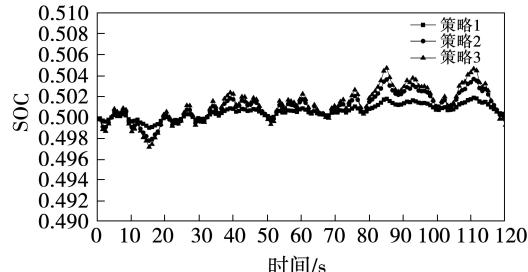


图 10 120 s 连续扰动下 SOC 变化曲线

Fig. 10 SOC change curve in 120 s under continuous disturbance

表 3 120 s 连续扰动下调频指标

Tab. 3 Frequency regulation index in 120 s under continuous disturbance

策略	最大频率偏差/ 10^{-3}	频率偏差均方根/ 10^{-3}
1	2.961	1.477
2	4.147	2.080
3	5.795	2.968
4	7.397	3.734

由图 9 和表 3 可知, 在 120 s 连续扰动工况下, 策略 1 的最大频率偏差比策略 2,3,4 分别小 40% ,

95% 和 149%, 频率偏差均方根分别小 40%, 100% 和 150%。策略 1 可以在频率波动较大时, 提高虚拟惯性控制的占比, 相比于单一的下垂控制, 能够快速解决频率震荡的问题。由图 10 可知, 策略 1 储能系统 SOC 的维持效果更好。在 120 s 连续负荷扰动情况下, SOC 均方根值为 0.500 41, 小于策略 2 和 3; 储能系统电池寿命损耗比策略 2 和 3 小 30% 和 16.7%。由上述数据可知, 策略 1 可以有效减少储能寿命损耗。

表 4 120 s 连续扰动下电池指标

Tab. 4 Battery index in 120 s under continuous disturbance

策略	SOC 最大偏差/ 10^{-5}	SOC 均方根	寿命损耗/ 10^{-6}
1	4.14	0.500 41	1.42
2	9.96	0.500 84	1.85
3	1.36	0.501 03	1.66

3.3.2 长时间连续负荷扰动工况

为验证长时间连续负荷扰动的有效性, 900 s 连续负荷扰动如图 11 所示。3 种策略的频率偏差曲线如图 12 所示。控制策略的 SOC 变化曲线如图 13 所示。控制策略的调频指标和电池指标分别如表 5 和表 6 所示。

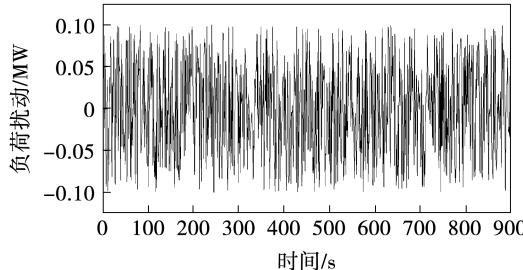


图 11 900 s 负荷扰动曲线

Fig. 11 Load disturbance curve in 900 s

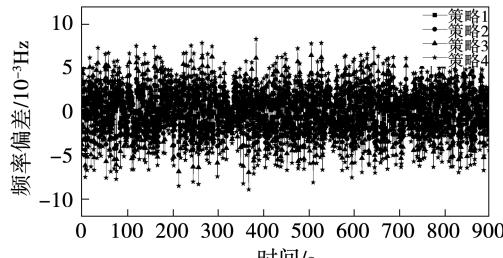


图 12 900 s 频率偏差曲线

Fig. 12 Frequency deviation curve in 900 s

结合图 12 和表 5 可知, 策略 1 的调频效果优于其他 3 种控制策略。在 900 s 连续负荷扰动情况下, 策略 1 的最大频率偏差比其他 3 种控制策略分别小 44%, 114% 和 179%, 且策略 1 的频率偏差均方差小于其他 3 种控制策略。由图 13 和表 6 可知, 在长时间连续扰动下, 策略 1 储能系统 SOC 的维持效果最好。策略 1 的 SOC 均方根为 0.500 7, SOC 的最大偏移为 5.4×10^{-3} , 小于其他 3 种控制策略; 策略 1 的电池损耗分别比策略 2 和 3 小 61.1% 和 32.8%。综上, 策略 1 可以有效减少储能参与一次调频时的寿命损耗并提高一次调频效果。

表 5 900s 连续扰动下调频指标

Tab. 5 Frequency regulation index in 900 s under continuous disturbance

策略	最大频率偏差/ 10^{-3}	频率偏差均方根/ 10^{-3}
1	3.401	1.38
2	4.976	1.96
3	7.350	2.83
4	9.510	3.57

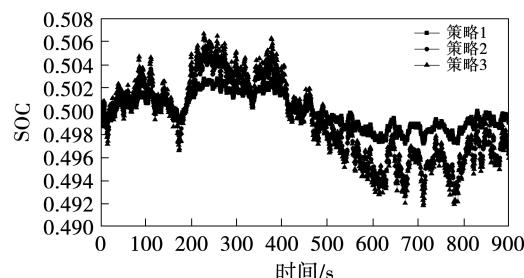


图 13 900 s 连续扰动下 SOC 变化曲线

Fig. 13 SOC change curve in 900 s under continuous disturbance

表 6 900s 连续扰动下电池指标

Tab. 6 Battery index in 900 s under continuous disturbance

策略	SOC 最大偏差/ 10^{-5}	SOC 均方根	电池寿命损耗/ 10^{-5}
1	5.4	0.500 7	1.52
2	13	0.500 8	2.45
3	16	0.501 2	2.02

4 结 论

将储能-火电联合一次调频的双层控制策略与

固定虚拟下垂控制功率的控制策略、改变虚拟下垂控制功率的控制策略和无储能控制策略对比,得出以下结论:

(1) 在长时间负荷扰动情况下,本文提出的储能-火电联合一次调频的双层控制策略比其他3种控制策略的频率偏差均方根分别减小40%,100%和150%。

(2) 在长时间负荷扰动情况下,本文提出的储能-火电联合一次调频的双层控制策略的电池寿命损耗分别比其他两种含有储能的控制策略分别减少61.1%和32.8%。

参考文献:

- [1] 李建林,马会萌,惠东.储能技术融合分布式可再生能源的现状及发展趋势[J].电工技术学报,2016,31(14):1-10.
LI Jian-lin, MA Hui-meng, HUI Dong. Present development condition and trends of energy storage technology in the integration of distributed renewable energy [J]. Transactions of China Electrotechnical Society ,2016,31(14):1-10.
- [2] 冯琦,周毅博,桂建忠,等.含大规模风电与储能元件的电力系统调频技术研究综述[J].电测与仪表,2017,54(8):39-46.
FENG Qi,ZHOU Yi-bo,GUI Jian-zhong, et al. Literature review on frequency regulation technologies of the power system with large scale wind power[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017,54(8):39 - 46.
- [3] 刘冰,张静,李岱昕,等.储能应用在发电侧调峰调频服务中的应用现状和前景分析[J].储能科学与技术,2016,5(6):909-914.
LIU Bing, ZHANG Jing, LI Dai-xin, et al. Energy storage for peak shaving and frequency regulation in the front of meter;progress and prospect[J]. Energy Storage Science and Technology,2016,5(6):909 - 914.
- [4] 张志,邵尹池,伦涛,等.电化学储能系统参与调峰调频政策综述与补偿机制探究[J].电力工程技术,2020,39(5):71-77,84.
ZHANG Zhi,SHAO Yin-chi,LUN Tao, et al. Review on the policies and compensation mechanism of BESS participation in the auxiliary service of frequency and peak modulation [J]. Electric Power Engineering Technology,2020,39(5):71 - 77,84.
- [5] 刘起兴,和识之,卢伟辉,等.电池储能辅助二次调频的模型预测控制方法[J].电测与仪表,2020,57(23):119-125.
LIU Qi-xing, HE Shi-zhi, LU Wei-hui, et al. Model predictive method for battery energy storage assisting secondary frequency regulation [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57 (23):119 - 125.
- [6] 孟雅,刘晓龙,崔习文,等.考虑扰动类型的电池储能系统一次调频控制策略[J].IEEE Access,2021,9:102004-102018.
- [7] 李军徽,高卓,应鸿,等.基于动态下垂系数与SOC基点的储能一次调频控制策略[J].电力系统保护与控制,2021,49(5):1-10.
LI Jun-hui, GAO Zhuo, YING Hong, et al. Primary frequency regulation control strategy of energy storage based on dynamic droop coefficient and SOC reference[J]. Power System Protection and Control,2021,49(5):1 - 10.
- [8] 孟高军,张峰,赵宇,等.电池储能参与电网一次调频的优化综合控制策略[J].电工电能新技术,2021,40(6):43-49.
MENG Gao-jun, ZHANG Feng, ZHAO Yu, et al. Optimized integrated control strategy of battery energy storage participating in primary frequency regulation of power grid[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2021,40(6):43 - 49.
- [9] 王育飞,杨铭诚,薛花,等.计及SOC的电池储能系统一次调频自适应综合控制策略[J].电力自动化设备,2021,41(10):192-198,219.
WANG Yu-fei, YANG Ming-cheng, XUE Hua, et al. Self-adaptive integrated control strategy of battery energy storage system considering SOC for primary frequency regulation [J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(10):192 - 198,219.
- [10] 傅质馨,张晶晶,崔晓丹,等.储能支撑光伏参与电网一次调频的优化控制策略研究[J].可再生能源,2021,39(11):1530-1540.
FU Zhi-xin, ZHANG Jing-jing, CUI Xiao-dan, et al. Research on optimal control strategy of photovoltaic system supported by energy storage participating in primary frequency regulation of power grid [J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39 (11): 1530 - 1540.
- [11] 马智慧,李欣然,谭庄熙,等.考虑储能调频死区的一次调频控制方法[J].电工技术学报,2019,34(10):2102-2115.
MA Zhi-hui, LI Xinran, TAN Zhuang-xi, et al. Integrated control of primary frequency regulation considering dead band of energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society ,2019 , 34 (10):2102 - 2115.
- [12] 邓霞,孙威,肖海伟.储能电池参与一次调频的综合控制方法[J].高电压技术,2018,44(4):1157-1165.
DENG Xia, SUN Wei, XIAO Hai-wei. Integrated control strategy of battery energy storage system in primary frequency regulation [J]. High Voltage Engineering,2018,44(4):1157 - 1165.
- [13] 李欣然,崔曦文,黄际元,等.电池储能电源参与电网一次调

- 频的自适应控制策略 [J]. 电工技术学报, 2019, 34 (18) : 3897 – 3908.
- LI Xin-ran, CUI Xi-wen, HUANG Ji-yuan, et al. The self-adaption control strategy of energy storage batteries participating in the primary frequency regulation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society , 2019, 34(18) :3897 – 3908.
- [14] ZHANG Ying-jun, ZHAO Chang-hong, LOW S, et al. Profit-maximizing planning and control of battery energy storage systems for primary frequency control [J]. IEEE Transactions on Smart Grid , 2018, 9(2) :712 – 723.
- [15] 于会群, 靳东辉, 彭道刚, 等. 考虑周期损耗的储能–火电联合调频策略 [J]. 电力系统及其自动化学报: 2022, 34 (9) : 102 – 109.
- YU Hui-qun, JIN Dong-hui, PENG Dao-gang, et al. Energy storage thermal power combined frequency regulation considering period loss [J]. Proceedings of the CSU-EPSA ,2022 ,34(9) :102 – 109.
- [16] 孟杰, 丁泉, 陈孝煜, 等. 基于寿命模型的混合储能参与二次调频的经济性研究 [J]. 现代电力, 2021, 38 (2) : 205 – 212.
- MENG Jie, DING Quan, CHEN Xiao-yu, et al. Economic feasibility in secondary frequency regulation considering hybrid energy storage cycle life model [J]. Modern Electric Power, 2021 , 38(2) :205 – 212.
- [17] 易林. 考虑可变寿命特征的电力系统用电池储能容量优化配置 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- YI Lin. Optimizing of the deployment of battery applied in power system considering its lifetime characteristics [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2015.
- [18] 吴铁洲, 张明月, 常春. 基于改进鲸鱼优化算法的锂离子电池充电方法 [J]. 电池, 2021, 51(5) :455 – 459.
- WU Tie-zhou, ZHANG Ming-yue, CHANG Chun. Li-ion battery charging method based on improved whale optimization algorithm [J]. Battery Bimonthly ,2021,51(5) :455 – 459.
- [19] 谭智钢, 程静, 王维庆. 基于改进鲸鱼优化算法的微网系统能量优化管理 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21 (32) :13714 – 13720.
- TAN Zhi-gang, CHENG Jing, WANG Wei-qing. Energy optimiza-tion management of microgrid based on improved whale optimiza-tion algorithm [J]. Science Technology and Engineering, 2021 , 21 (32) :13714 – 13720.
- [20] 邓睿. 电池储能技术在电力系统调频中的应用研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- DENG Rui. Research on frequency regulation for a power system with battery energy storage[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2017.

(刘颖 编辑)