

考虑飞轮和锂电储能协同频率支撑的电力系统优化调度方法

胡京¹, 高立乾¹, 崔世常¹, 艾小猛¹, 李昆¹, 励刚², 汤伟³, 方家琨¹, 曹元成¹, 文劲宇¹

(1. 华中科技大学 强电磁技术全国重点实验室, 湖北 武汉 430074;

2. 国网安徽省电力有限公司, 安徽 合肥 230022;

3. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 可再生能源大量接入给电力系统的频率安全带来挑战, 为了确保电力系统频率安全、稳定运行, 综合考虑锂电储能的高能量密度特性与飞轮储能的高循环特性, 同时结合两者的高功率密度和快速响应特点, 提出一种考虑飞轮和锂电储能协同频率支撑的电力系统优化调度方法。针对锂电储能深度循环加速寿命损耗的问题, 建立锂电储能运行优化模型, 并基于寿命衰减机理, 采用分段线性化技术, 构建与锂电储能调度运行相对应的寿命衰减线性模型; 针对飞轮储能在持续调频下能量维持能力有限的问题, 提出包含能量恢复机制的飞轮储能运行优化模型。基于虚拟同步机控制策略, 分析含飞轮和锂电储能的电力系统频率动态响应过程, 引入频率变化率、准稳态频率、频率最低点3个频率安全指标, 提出电力系统频率安全备用需求, 建立考虑频率安全备用的电力系统协同优化调度模型。基于改进的IEEE 14节点系统和IEEE 118节点系统, 从多个角度进行对比分析, 验证所提储能模型和协同优化调度方法的有效性。

关键词: 新能源电力系统; 优化调度; 飞轮储能; 锂电储能; 频率安全约束; 调频备用

中图分类号: TM73

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202601014

0 引言

随着风电等可再生能源在电网中的渗透率不断提高, 电力系统的频率稳定面临日益严峻的挑战^[1]。储能作为关键的灵活性资源, 具有快速响应与精准调节的技术优势, 能够为电网提供充足的调频备用容量, 从而有效提升系统的频率稳定性。

锂电储能系统凭借其快速响应能力、高功率密度、高能量密度等技术优势, 在支撑电网调频服务和促进新能源消纳方面发挥了重要作用。文献[2]在新能源电力系统的经济调度问题中添加一次调频备用约束, 建立了新能源电力系统的一次调频备用整定模型; 文献[3]提出了一种基于分层架构的风储协同参与一次调频的容量优化方法, 提高了储能型风电场的调频经济性; 文献[4]研究了锂电池参与一次调频的控制策略, 有效提升了储能一次调频效果。上述研究聚焦于锂电储能参与一次调频和经济调度, 但没有考虑锂电储能的寿命损耗。新能源出力具有波动性, 锂电储能可能要频繁切换充放电状态, 并可能出现过充或过放现象, 这会导致锂电池寿命衰减严重, 进一步限制其在长期调频任务中的可靠性和经济性^[5]。

飞轮储能作为一种基于动能存储的物理储能技

术, 具有高功率密度、长寿命、快速响应等特性^[6], 适用于参与电网频率调节和短时间功率补偿。相较于锂电储能系统, 飞轮储能在频繁充放电状态下效率稳定, 能有效解决锂电储能的容量衰减与材料离散性问题。文献[7]提出了混合飞轮储能阵列参与惯性响应和一次调频响应的控制策略; 文献[8]提出了一种火电机组-飞轮储能协调控制策略, 有效改善了调频性能并提升了经济性; 文献[9]设计了火储耦合调频的电气接线和飞轮并入方案, 显著提升了调频性能; 文献[10]基于交叉熵方法分析了飞轮储能荷电状态(state of charge, SOC)与动态特性的相关性, 提出了考虑持续运行的SOC管理策略; 文献[11]利用飞轮储能阵列双层自治控制技术, 实现了飞轮储能功率的优化管理; 文献[12]提出了考虑SOC的飞轮储能功率分配策略, 改善了电流环的响应效果。

上述研究均基于锂电储能和飞轮储能各自的优势来解决特定的问题, 但单一储能系统存在一定的局限性: 锂电储能在调频任务中频繁充放电会加速寿命衰减; 而飞轮储能则受限于低能量密度, 无法满足持续的电能平衡需求。因此, 研究多元储能的协同调度方法, 充分发挥各自的技术优势, 对于提升调频性能、优化储能利用率具有重要的意义。然而, 目前关于多元储能系统的协同调度研究仍较为有限。

由于锂电储能和飞轮储能的运行特性存在差异, 且应用场景的时间尺度不同, 其难以在统一的时间尺度下进行协同优化和功率分配。文献[13]针对储能系统的运行特性差异, 利用变周期调度策略, 实现了峰谷调节、快速功率波动支撑等不同时间尺度

收稿日期: 2025-05-09; 修回日期: 2025-10-09

在线出版日期: 2026-02-03

基金项目: 国家电网有限公司总部管理科技项目(5419-202320786A-3-8-KJ)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(5419-202320786A-3-8-KJ)

的协同控制,但未考虑锂电储能的寿命损耗;文献[14]合理分配飞轮储能和锂电池储能分别吸收高频波动功率、中频波动功率,但没有充分发挥锂电储能长时间尺度调度方面的电力电量平衡作用;文献[15]将自动发电控制指令分解为高频分量和低频分量,并根据储能系统的SOC对输出功率进行自适应调整,但未明确考虑系统的频率安全约束。

综上所述,本文在传统优化调度模型的基础上,提出一种考虑飞轮和锂电储能协同频率支撑的电力系统优化调度方法。首先,针对锂电储能深度循环加速寿命损耗和飞轮储能在持续调频下能量维持能力有限的问题,分别构建锂电储能和飞轮储能的运行优化模型,采用分段线性化技术近似处理锂电储能的循环寿命衰减模型,构建循环寿命损失不等式约束,以保障锂电储能的运行寿命,并提出飞轮储能的快速能量恢复机制,以确保后续调频中最大化利用其瞬态功率支撑能力;然后,基于虚拟同步机控制策略,结合含锂电和飞轮储能的电力系统频率动态响应过程,引入频率变化率(rate of change of frequency, RoCoF)、频率最低点、准稳态频率3个频率安全指标,提出电力系统频率安全备用需求,建立考虑频率安全备用的电力系统协同优化调度模型;最后,基于改进的IEEE 14节点系统和IEEE 118节点系统进行算例分析,验证所提模型的有效性。

1 多元储能的运行优化模型

飞轮储能具备毫秒级功率响应能力,适用于惯性响应、一次调频等快速调节服务^[16],但受限于容量,难以参与小时级的电力电量平衡。而锂电储能兼具高能量密度与快速响应能力,可同时胜任快速调节与小时级平衡任务。针对飞轮储能、锂电储能的不同特性,本章分别建立考虑寿命衰减的锂电储能运行优化模型和考虑能量恢复的飞轮储能运行优化模型。

1.1 锂电储能运行优化模型

锂电储能需要满足的运行约束条件如下。

1) 充放电功率约束。

$$\begin{cases} P_{es}^{\min} \leq P_{es,t} \leq P_{es}^{\max} & \forall t \\ P_{es,t} = \begin{cases} P_{cha,t} & t \in t_1 \\ P_{dis,t} & t \in t_2 \\ 0 & t \in t_3 \end{cases} \\ t_1 + t_2 + t_3 = t_{total} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_{es,t}$ 为 t 时刻锂电储能的充放电功率; P_{es}^{\max} 、 P_{es}^{\min} 分别为锂电储能充放电功率的最大值、最小值; $P_{cha,t}$ 、 $P_{dis,t}$ 分别为 t 时刻锂电储能的充、放电功率; t_1 、 t_2 、 t_3 分别为锂电储能处于充电状态、放电状态、静置状态的时刻集合; t_{total} 为锂电储能日工作周期的时刻集合。

2) SOC约束。

$$\begin{cases} S_{SOC,\min} \leq S_{SOC,t} \leq S_{SOC,\max} \\ S_{SOC,t} = S_{SOC,t-1} + \frac{\left(P_{cha,t} \eta_{cha} - \frac{P_{dis,t}}{\eta_{dis}} \right) \Delta t}{E} \\ S_{SOC,0} = S_{SOC,T} \end{cases} \quad (2)$$

式中: Δt 为时间间隔; $S_{SOC,t}$ 为 t 时刻锂电储能的SOC; $S_{SOC,\max}$ 、 $S_{SOC,\min}$ 分别为锂电储能SOC的上、下限; $S_{SOC,0}$ 、 $S_{SOC,T}$ 分别为锂电储能的初始、最终SOC; η_{cha} 、 η_{dis} 分别为锂电储能的充、放电效率; E 为锂电储能的容量; T 为锂电储能的日工作周期。

电化学储能频繁动作会对其寿命产生影响,且不同的充放电速率对储能装置寿命的损耗程度存在差异,相较于浅充浅放,深充深放对储能装置寿命的影响明显更大。锂电储能的寿命损失包含受日常退化影响的日历寿命损失和与放电深度(depth of discharge, DOD)相关的循环寿命损失^[17]。其中,日历寿命损失是锂电储能固有的老化过程,即使在不运行状态下也会持续发生。锂电储能的循环寿命与DOD之间的关系可以用基于储能循环次数与DOD曲线拟合得到的三参数模型进行量化描述^[18],如式(3)所示。

$$N_{life}(D_{DOD}) = \frac{c}{(D_{DOD} - d)^m} \quad (3)$$

式中: D_{DOD} 为锂电储能的DOD; $N_{life}(D_{DOD})$ 为锂电储能的循环寿命; c 、 d 、 m 为锂电储能的循环寿命系数。

结合锂电储能循环寿命的三参数模型,锂电储能的循环寿命损失可表示为^[18]:

$$l_t^{cyc} = |F(S_{SOC,t+1}) - F(S_{SOC,t})| \quad (4)$$

$$F(S_{SOC,t}) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{N_{life}(1)} - \frac{1}{N_{life}(1 - S_{SOC,t})} \right) \quad (5)$$

式中: l_t^{cyc} 为 t 时刻锂电储能的循环寿命损失; $F(S_{SOC,t+1})$ 、 $F(S_{SOC,t})$ 分别为 $t+1$ 、 t 时刻SOC下锂电储能的初始循环寿命; $N_{life}(1)$ 为100%的DOD下锂电储能的循环寿命。

锂电储能的循环寿命损失模型是一个非线性模型,本文采用分段线性化方法对 $F(S_{SOC,t})$ 进行线性化处理。分段线性化后的锂电储能循环寿命 $\bar{F}(S_{SOC,t})$ 如式(6)所示,循环寿命损失如式(7)所示。

$$\bar{F}(S_{SOC,t}) = \sum_{y=1}^Y N_{t,y}^{sck} F_y^{seg} \quad (6)$$

$$l_t^{cyc} = |\bar{F}(S_{SOC,t+1}) - \bar{F}(S_{SOC,t})| \quad (7)$$

$$S_{SOC,t} = \sum_{y=1}^Y N_{t,y}^{sck} S_{SOC,y}^{seg} \quad (8)$$

式中: Y 为锂电储能寿命损失近似模型的分段数; $N_{t,y}^{sck}$ 为第 y 个分段对 t 时刻的贡献; $S_{SOC,y}^{seg}$ 为第 y 个分段对应的SOC; F_y^{seg} 为第 y 个分段锂电储能的初始循环寿命。

对于每一个分段,可以分别根据式(9)和式(10)计算其斜率和截距。

$$k_y = \frac{F_{y+1}^{\text{seg}} - F_y^{\text{seg}}}{S_{\text{SOC}, y+1}^{\text{seg}} - S_{\text{SOC}, y}^{\text{seg}}} \quad (9)$$

$$b_y = F_y^{\text{seg}} - k_y S_{\text{SOC}, y}^{\text{seg}} \quad (10)$$

式中: k_y 为第 y 个分段的斜率,表示单位SOC变化引起的锂电储能初始循环寿命变化量; b_y 为第 y 个分段的截距,表示锂电储能初始循环寿命与SOC的线性关系中和SOC无关的初始循环寿命偏移。

1.2 飞轮储能运行优化模型

飞轮储能需要满足的运行约束条件为:

$$\begin{cases} P_{\text{fw}}^{\min} \leq P_{\text{fw}, t} \leq P_{\text{fw}}^{\max} \\ S_{\text{SOC}, \min}^{\text{fw}} \leq S_{\text{SOC}, t}^{\text{fw}} \leq S_{\text{SOC}, \max}^{\text{fw}} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $P_{\text{fw}, t}$ 为 t 时刻飞轮储能的功率; P_{fw}^{\max} 、 P_{fw}^{\min} 分别为飞轮储能功率的最大值、最小值; $S_{\text{SOC}, t}^{\text{fw}}$ 为 t 时刻飞轮储能的SOC; $S_{\text{SOC}, \max}^{\text{fw}}$ 、 $S_{\text{SOC}, \min}^{\text{fw}}$ 分别为飞轮储能SOC的最大值、最小值。

飞轮储能响应一次调频的动态过程可表示为^[19]:

$$T_{\text{fw}} \frac{d\Delta P_{\text{fw}, t}^{\text{PFR}}}{dt} + \Delta P_{\text{fw}, t}^{\text{PFR}} = K_{\text{fw}} \Delta f(t) \quad (12)$$

式中: T_{fw} 为飞轮储能的一次调频响应时间常数,其比火电机组的响应时间常数小2~3个数量级,因此将其近似为0^[20]; $\Delta P_{\text{fw}, t}^{\text{PFR}}$ 为 t 时刻飞轮储能的一次调频功率; K_{fw} 为飞轮储能的一次调频增益系数; $\Delta f(t)$ 为 t 时刻系统的频率偏差。

针对飞轮储能系统在调频过程中呈现的短周期充放电特性,为了确保在调频任务结束后飞轮储能恢复至初始能量水平,本文提出一种飞轮储能调频后的能量恢复机制:调频结束后,飞轮储能在规定时间内由火电机组和风电机组提供电能进行充电,使其恢复至调频前的能量水平,如式(13)~(15)所示。

$$U_{G_i, t} P_{G_i}^{\min} \leq P_{G_i, t} + \Delta P_{G_i, t}^{\text{pf}} + P_{G_i, t}^{\text{cf}} \leq U_{G_i, t} P_{G_i}^{\max} \quad (13)$$

$$0 \leq P_{j, t}^{\text{wf}} \leq \delta_{W_j, t}^{\text{cur}} P_{W_j, t}^{\max} \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{G_i, t}^{\text{cf}} + \sum_{j=1}^{N_W} P_{j, t}^{\text{wf}} t_{\text{wf}} \geq \Delta E_{\text{fw}} \quad (15)$$

式中: $U_{G_i, t}$ 为 t 时刻第 i 台火电机组的启停状态变量,若处于关机状态则取值为0,若处于开机状态则取值为1; $P_{G_i, t}$ 为 t 时刻第 i 台火电机组的出力; $P_{G_i}^{\min}$ 、 $P_{G_i}^{\max}$ 分别为第 i 台火电机组的最小、最大出力; $\Delta P_{G_i, t}^{\text{pf}}$ 为 t 时刻第 i 台火电机组的一次调频备用功率; $P_{G_i, t}^{\text{cf}}$ 为 t 时刻第 i 台火电机组对飞轮储能调频后能量恢复的备用功率; $P_{j, t}^{\text{wf}}$ 为 t 时刻第 j 座风电场对飞轮储能调频后能量恢复的备用功率; $P_{W_j, t}^{\max}$ 为 t 时刻第 j 座风电场的理论发电量; $\delta_{W_j, t}^{\text{cur}}$ 为 t 时刻第 j 座风电场的弃风率; N_G 、 N_W 分别为火电机组、风电场数量; t_{cf} 、 t_{wf} 分别为飞轮储能调频结束后火电机组、风电场对其进行充电的时长; ΔE_{fw} 为飞轮储能参与调频消耗的能量。

2 频率安全分析与约束构建

2.1 系统频率响应过程

当储能系统参与电网调频时,通常采用虚拟同步机控制技术来模拟同步发电机的外特性,这种控制方法使储能装置能够提供类似于同步发电机的惯量响应和一次调频功能,从而有效改善电力系统的频率^[21]。假设初始时刻含储能的电力系统受到有功功率扰动 ΔP_0 ,其暂态频率动态特性可基于摇摆方程进行建模^[22]。系统频率响应框图如图1所示。

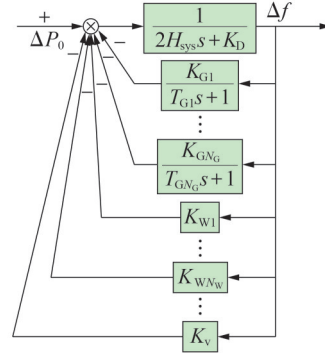


图1 含储能的电力系统频率响应框图

Fig.1 Block diagram of frequency response of power system with energy storage

根据系统的频率响应模型,列写时域下的频率动态响应方程,如式(16)所示。系统受到功率扰动后,有功功率缺额由火电机组的惯性响应、一次调频响应,风电场的虚拟惯性响应、虚拟一次调频响应,负荷阻尼特性响应,储能的虚拟惯性响应、虚拟阻尼响应和一次调频响应共同支撑。

$$\Delta P_0 = \sum_{i=1}^{N_G} \Delta P_{G_i}^{\text{PFR}} + \sum_{j=1}^{N_W} \Delta P_{W_j}^{\text{PFR}} + \sum_{i=1}^{N_G} \Delta P_{G_i}^{\text{IR}} + \sum_{j=1}^{N_W} \Delta P_{W_j}^{\text{IR}} + \Delta P_D +$$

$$\Delta P_v^{\text{PFR}} + \Delta P_v^{\text{IR}} = \sum_{i=1}^{N_G} \Delta P_{G_i}^{\text{PFR}} + \sum_{j=1}^{N_W} K_{W_j} \Delta f + K_v \Delta f +$$

$$2H_{\text{sys}} \frac{d\Delta f}{dt} + K_D \Delta f \quad (16)$$

$$H_{\text{sys}} = \sum_{i=1}^{N_G} U_{G_i, t} H_{G_i} + \sum_{j=1}^{N_W} H_{W_j} + H_{\text{es}} + H_{\text{fw}} \quad (17)$$

$$\begin{cases} \Delta P_v^{\text{IR}} = \Delta P_{\text{fw}}^{\text{IR}} + \Delta P_{\text{es}}^{\text{IR}} = 2(H_{\text{fw}} + H_{\text{es}}) \frac{d\Delta f}{dt} \\ \Delta P_v^{\text{PFR}} = \Delta P_{\text{fw}}^{\text{PFR}} + \Delta P_{\text{es}}^{\text{PFR}} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $\Delta P_{G_i}^{\text{IR}}$ 、 $\Delta P_{G_i}^{\text{PFR}}$ 分别为第 i 台火电机组的惯性响应、一次调频响应功率; $\Delta P_{W_j}^{\text{IR}}$ 、 $\Delta P_{W_j}^{\text{PFR}}$ 分别为第 j 座风电场的虚拟惯性响应、虚拟一次调频响应功率; ΔP_v^{IR} 、 ΔP_v^{PFR} 分别为飞轮储能与锂电储能的虚拟惯性响应功率之和、虚拟一次调频响应功率之和; ΔP_D 为负荷阻尼特性响应功率; K_{W_j} 为第 j 座风电场的虚拟一次调频功率增益系数; K_v 为储能的虚拟一次调频功率增益系数; K_D 为系统负荷阻尼系数; H_{sys} 为系统的总惯性时间常数; H_{G_i} 为第 i 台火电机组的惯性响

应时间常数; H_{Wj} 为第 j 座风电场的虚拟惯性响应时间常数; H_{es} 为锂电储能的虚拟惯性响应时间常数; H_{fw} 为飞轮储能的虚拟惯性响应时间常数; ΔP_{fw}^{IR} 、 ΔP_{es}^{IR} 分别为飞轮储能、锂电储能的虚拟惯性响应功率; ΔP_{fw}^{PFR} 、 ΔP_{es}^{PFR} 分别为飞轮储能、锂电储能的虚拟一次调频响应功率; Δf 为系统的频率偏差。

2.2 系统频率安全约束

为了确保系统受扰后的频率稳定性,本文引入最大 RoCoF、准稳态频率、频率最低点^[22]这3个关键频率安全指标。基于这些指标,分析并建立相应的频率安全约束条件。

系统最大 RoCoF 出现在 $t=0^+$ 时刻。此时系统的频率偏差 $\Delta f=0$, 火电机组的一次调频响应功率 ΔP_{Gi}^{PFR} 、风电场的一次调频响应功率 ΔP_{Wj}^{PFR} 、储能的虚拟一次调频响应功率 ΔP_v^{PFR} 、负荷阻尼特性响应功率 ΔP_D 均为 0, 仅靠火电机组、风电场和储能的惯性响应为系统提供功率支撑, 系统 RoCoF 达到最大值。最大 RoCoF 约束可表示为^[23-24]:

$$\left. \frac{d\Delta f}{dt} \right|_{t=0^+} = \frac{\Delta P_0}{2 \left(\sum_{i=1}^{N_G} U_{Gi,t} H_{Gi} + \sum_{j=1}^{N_W} H_{Wj} + H_v \right)} \leq f_{\max}^{\text{RoCoF}} \quad (19)$$

式中: f_{\max}^{RoCoF} 为系统的最大 RoCoF 允许值; H_v 为锂电储能虚拟惯性响应时间常数 H_{es} 与飞轮储能虚拟惯性响应时间常数 H_{fw} 之和。式(19)可以等效转换为线性约束, 如式(20)所示。

$$\Delta P_0 \leq 2 f_{\max}^{\text{RoCoF}} \left(\sum_{i=1}^{N_G} U_{Gi,t} H_{Gi} + \sum_{j=1}^{N_W} H_{Wj} + H_v \right) \quad (20)$$

当系统的一次调频响应进入准稳态($t=+\infty$)时, 系统频率偏差稳定为 Δf_{ss} , 此时系统的 RoCoF 可表示为:

$$\left. \frac{d\Delta f}{dt} \right|_{t=+\infty} = 0 \quad (21)$$

当系统进入准稳态时, 火电机组、风电场、储能的一次调频响应功率可表示为:

$$\begin{cases} \Delta P_{Gi}^{\text{PFR},ss} = K_{Gi} \Delta f_{ss} \\ \Delta P_{Wj}^{\text{PFR},ss} = K_{Wj} \Delta f_{ss} \\ \Delta P_v^{\text{PFR},ss} = K_v \Delta f_{ss} \end{cases} \quad (22)$$

式中: K_{Gi} 为第 i 台火电机组的一次调频功率增益系数; $\Delta P_{Gi}^{\text{PFR},ss}$ 为准稳态时第 i 台火电机组的一次调频响应功率; $\Delta P_{Wj}^{\text{PFR},ss}$ 为准稳态时第 j 座风电场的一次调频响应功率; $\Delta P_v^{\text{PFR},ss}$ 为准稳态时锂电储能与飞轮储能的一次调频响应功率之和。

将式(22)代入系统的扰动方程, 则系统准稳态下的频率安全约束为^[25]:

$$\Delta f_{ss} = \frac{\Delta P_0}{\sum_{i=1}^{N_G} U_{Gi,t} K_{Gi} + \sum_{j=1}^{N_W} K_{Wj} + K_v + K_D} \leq \Delta f_{\max}^{ss} \quad (23)$$

式中: Δf_{\max}^{ss} 为准稳态最大频率偏差允许值。式(23)可以等效转换为线性约束, 如式(24)所示。

$$\Delta P_0 \leq \Delta f_{\max}^{ss} \left(\sum_{i=1}^{N_G} U_{Gi,t} K_{Gi} + \sum_{j=1}^{N_W} K_{Wj} + K_v + K_D \right) \quad (24)$$

考虑一个额定频率为 f_0 的电力系统, 令系统的最大频率偏差允许值为 Δf_{\max} 。假设 t_m 时刻系统的频率恰好跌落至最低允许值($f_0 - \Delta f_{\max}$)^[26], 则在该时刻有:

$$\begin{cases} \Delta f(t_m) = \Delta f_{\max} \\ \left. \frac{d\Delta f}{dt} \right|_{t=t_m} = 0 \end{cases} \quad (25)$$

频率最低点安全约束可表示为:

$$\Delta P_0 \leq \sum_{i=1}^{N_G} \Delta P_{Gi,t_m}^{\text{PFR}} + \sum_{j=1}^{N_W} K_{Wj} \Delta f_{\max} + K_v \Delta f_{\max} + K_D \Delta f_{\max} \quad (26)$$

式中: $\Delta P_{Gi,t_m}^{\text{PFR}}$ 为 t_m 时刻第 i 台火电机组的一次调频响应功率, 其解析表达式未知, 无法直接纳入机组组合模型中。频率动态响应方程式(16)是关于频率偏差的高阶微分方程, 难以求解频率与运行参数的准确关系式。本文采用线性化频率偏差的方法近似获得 $\Delta P_{Gi,t_m}^{\text{PFR}}$ 的解析表达式, 用线性化频率偏差信号近似表示系统频率, 并作为调速系统的输入^[27], 当线性化频率偏差信号 Δf_{line} 达到最大频率偏差允许值 Δf_{\max} 时, $\Delta P_{Gi,t_m}^{\text{PFR}}$ 的表达式为^[22]:

$$\Delta P_{Gi,t_m}^{\text{PFR}} = \Delta P_{Gi,t_m}^{\text{PFR},\text{line}} = \frac{\Delta P_0 U_{Gi,t} K_{Gi}}{\pi H_{\text{sys}}} \times \left(-T_{Gi} + \frac{\pi \Delta f_{\max}}{\Delta P_0} H_{\text{sys}} + T_{Gi} e^{-\frac{\pi \Delta f_{\max}}{T_{Gi} \Delta P_0} H_{\text{sys}}} \right) \quad (27)$$

式中: T_{Gi} 为第 i 台火电机组调速器的响应时间常数; $\Delta P_{Gi,t_m}^{\text{PFR},\text{line}}$ 为线性化频率偏差方法得到的 t_m 时刻第 i 台火电机组的一次调频响应功率。

2.3 系统调频备用约束

基于上述3个系统频率安全指标, 结合含锂电和飞轮储能的电力系统频率动态响应过程, 建立电力系统频率安全备用约束, 在频率最低点安全约束和准稳态频率安全约束下的一次调频备用容量如式(28)~(37)所示。

$$\Delta P_{Gi,t}^{\text{nadir}} = \min \left\{ U_{Gi,t} \Delta P_{Gi,t}^{\text{PFR},t_m}, P_{Gi}^{\text{max}} - P_{Gi,t} \right\} \quad (28)$$

$$\Delta P_{Wj,t}^{\text{nadir}} = \min \left\{ K_{Wj} \Delta f_{\max}, \delta_{Wj,t}^{\text{cur}} P_{Wj,t}^{\text{max}} \right\} \quad (29)$$

$$\Delta P_{fw,t}^{\text{nadir}} = \min \left\{ K_{fw} \Delta f_{\max}, P_{fw}^{\text{max}} \right\} \quad (30)$$

$$\Delta P_{es,t}^{\text{nadir}} = \min \left\{ K_{es} \Delta f_{\max}, \left| P_{es,t}^{\text{max}} \right| - \left| P_{es,t} \right| \right\} \quad (31)$$

$$\Delta P_{Gi,t}^{\text{qss}} = \min \left\{ U_{Gi,t} K_{Gi} \Delta f_{\max}^{ss}, P_{Gi}^{\text{max}} - P_{Gi,t} \right\} \quad (32)$$

$$\Delta P_{Wj,t}^{\text{qss}} = \min \left\{ K_{Wj} \Delta f_{\max}^{ss}, \delta_{Wj,t}^{\text{cur}} P_{Wj,t}^{\text{max}} \right\} \quad (33)$$

$$\Delta P_{fw,t}^{\text{qss}} = \min \left\{ K_{fw} \Delta f_{\max}^{ss}, P_{fw}^{\text{max}} \right\} \quad (34)$$

$$\Delta P_{es,t}^{\text{qss}} = \min \left\{ K_{es} \Delta f_{\max}^{ss}, \left| P_{es,t}^{\text{max}} \right| - \left| P_{es,t} \right| \right\} \quad (35)$$

$$\Delta P_0 \leq \sum_{i=1}^{N_G} \Delta P_{Gi,t}^{\text{nadir}} + \sum_{j=1}^{N_W} \Delta P_{Wj,t}^{\text{nadir}} + \Delta P_{fw,t}^{\text{nadir}} + \Delta P_{es,t}^{\text{nadir}} + K_D \Delta f_{\max} \quad (36)$$

$$\Delta P_0 \leq \sum_{i=1}^{N_G} \Delta P_{Gi,t}^{qss} + \sum_{j=1}^{N_W} \Delta P_{Wj,t}^{qss} + \Delta P_{fw,t}^{qss} + \Delta P_{es,t}^{qss} + K_D \Delta f_{max}^{ss} \quad (37)$$

式中: $\Delta P_{Gi,t}^{PFR,t}$ 为 t 时刻频率最低点处第 i 台火电机组的一次调频功率; K_{es} 为锂电储能的一次调频增益系数; $\Delta P_{Gi,t}^{nadir}$ 、 $\Delta P_{Wj,t}^{nadir}$ 、 $\Delta P_{es,t}^{nadir}$ 、 $\Delta P_{fw,t}^{nadir}$ 分别为 t 时刻频率最低点处第 i 台火电机组、第 j 座风电场、锂电储能、飞轮储能的一次调频备用容量; $\Delta P_{Gi,t}^{qss}$ 、 $\Delta P_{Wj,t}^{qss}$ 、 $\Delta P_{es,t}^{qss}$ 、 $\Delta P_{fw,t}^{qss}$ 分别为准稳态频率下 t 时刻第 i 台火电机组、第 j 座风电场、锂电储能、飞轮储能的一次调频备用容量。由于频率最低点和准稳态频率处于同一响应阶段,基于动态响应特性,选取频率最低点和准稳态频率下一次调频备用容量中的最大值作为实际的一次调频备用容量。式(29)、(33)表示风电场提供的一次调频备用容量不能超过其弃风功率;式(30)、(34)表示飞轮储能提供的一次调频备用容量不能超过其最大功率;式(31)、(35)表示锂电储能提供的一次调频备用容量不能超过其当前的充放电功率。

3 频率安全备用下的优化调度方法

3.1 目标函数

本文所提频率安全备用下的优化调度方法以系统日总运行成本最小化为优化目标,日总运行成本包括火电机组煤耗成本、火电机组启停成本、弃风惩罚成本、锂电储能损耗成本和储能调频备用成本。目标函数可表示为:

$$\min \sum_{t=1}^T \left[\sum_{i=1}^{N_G} (C_{i,t}^p + C_{i,t}^{up} + C_{i,t}^{dn}) + C_{FR} + \sum_{j=1}^{N_W} c_{cur} \delta_{Wj,t}^{cur} P_{Wj,t}^{max} + k_{es} \left(P_{cha,t} \eta_{cha} - \frac{P_{dis,t}}{\eta_{dis}} \right) \right] \quad (38)$$

$$C_{FR} = \lambda_{fw} P_{fw}^{PFR} + \lambda_{es} P_{es}^{PFR} \quad (39)$$

式中: $C_{i,t}^p$ 、 $C_{i,t}^{up}$ 、 $C_{i,t}^{dn}$ 分别为 t 时刻第 i 台火电机组的煤耗成本、启动成本、停机成本; c_{cur} 为弃风惩罚系数; k_{es} 为锂电储能的损耗系数; C_{FR} 为储能调频备用成本; λ_{fw} 、 λ_{es} 分别为飞轮储能、锂电储能的调频备用成本系数; P_{fw}^{PFR} 为飞轮储能的一次调频备用容量; P_{es}^{PFR} 为锂电储能的一次调频备用容量。

储能调频备用成本主要包括初期投资成本、设备更新成本、运行维护成本、回收成本和设备残值^[28],为了衡量本文考虑的储能系统在受到不同扰动下预留调频容量的经济价值,利用储能全寿命周期成本对锂电储能和飞轮储能的调频备用成本系数进行折算^[29],如式(40)所示。

$$\begin{cases} \lambda_{fw} = \frac{C_{fw}}{(1 - P_{loss}/P_{fw}^{max}) \eta_{fw} P_{fw}^{max} \times 8760} \\ \lambda_{es} = \frac{C_{es}}{\eta_{es} P_{es}^{max} \times 8760} \end{cases} \quad (40)$$

式中:调频备用成本系数 λ_{fw} 、 λ_{es} 分别表示飞轮储能、锂电储能每小时维持 1 MW 调频容量处于随时可用

状态所需分摊的平均成本,其核心在于衡量系统为持续获得调频容量可用性所支付的经济价值; P_{loss} 为飞轮储能的热备待机损耗; η_{fw} 为飞轮储能的循环效率; C_{fw} 为飞轮储能的年化全周期寿命成本; C_{es} 为锂电储能的年化全周期寿命成本; η_{es} 为锂电储能的充放电循环效率。

本文考虑的飞轮储能热备待机损耗 P_{loss} 实质上是导致转子动能衰减的空载电磁损耗,该损耗主要来自转子涡流效应及电磁轴承的磁滞效应,可以用飞轮角速度和电磁损耗系数表示^[12],如式(41)所示。

$$P_{loss} = c_1 \omega^2 + c_2 \omega \quad (41)$$

式中: c_1 、 c_2 为飞轮储能的电磁损耗系数; ω 为飞轮角速度。

火电机组的煤耗成本 $C_{i,t}^p$ 通常为机组出力的二次函数,本文采用分段线性化计算方法,可将其表示为:

$$\begin{cases} C_{i,t}^p = C_i^{\min} U_{Gi,t} + \sum_{n=1}^{N_{pw}} \lambda_i^n P_{Gi,t}^n \\ P_{Gi,t} = P_{Gi}^{\min} U_{Gi,t} + \sum_{n=1}^{N_{pw}} P_{Gi,t}^n \end{cases} \quad (42)$$

式中: N_{pw} 为分段数量; $P_{Gi,t}^n$ 为 t 时刻第 i 台火电机组在第 n 个分段的出力; C_i^{\min} 为第 i 台火电机组最小出力时的燃料成本; λ_i^n 为第 i 台火电机组在第 n 个分段的费率。

3.2 约束条件

本文所提频率安全备用下的优化调度方法需要满足的约束条件包括附录 A 式(A1) — (A4)所示火电机组运行约束、弃风约束、功率平衡约束,式(1) — (5)所示锂电储能运行约束,式(11) — (15)所示飞轮储能运行约束,式(28) — (37)所示系统一次调频备用约束,以及式(43)所示储能寿命损耗约束。

$$\sum_{t=1}^T l_t^{cyc} + l^{cal} \leq \bar{l}^{loss} \quad (43)$$

式中: l^{cal} 为锂电储能的日历寿命损失; \bar{l}^{loss} 为锂电储能的每日最大累计寿命损失系数^[18],其是锂电储能的固有物理参数,可以确保锂电储能至少能在设定的时间跨度内运行。

本文所建模型为一个混合整数线性优化问题,可以直接利用商业求解器进行求解。

4 算例分析

4.1 算例条件

为了验证本文所提方法的有效性,基于改进的 IEEE 14 节点系统以及 IEEE 118 节点系统进行算例仿真分析。改进的 IEEE 14 节点系统和 IEEE 118 节点系统的拓扑结构分别如附录 A 图 A1 和图 A2 所示,在 IEEE 14 节点系统的节点 3、6 处分别增加 1 座容量为 200 MW 的风电场,并且在节点 3、6 处分

别配置 100 MW / 2 MW·h 的飞轮储能电站以及 100 MW / 400 MW·h 的锂电储能电站。IEEE 118 节点系统接入 10 座风电场(总装机容量为 2 000 MW, 每座风电场的容量为 200 MW), 同时配置 3 座锂电储能电站(单座容量配置为 100 MW / 400 MW·h, 总容量配置为 300 MW / 1 200 MW·h) 和 3 座飞轮储能电站(单座容量配置为 100 MW / 2 MW·h, 总容量配置为 300 MW / 6 MW·h)。

IEEE 14 节点系统中火电机组、风电场、储能的参数设置如附录 A 表 A1 所示; 系统负荷和风电出力曲线分别如附录 A 图 A3 和图 A4 所示; 负荷阻尼系数设置为 1; 设置频率安全指标 $f_{\max}^{\text{RoCoF}} = 0.5 \text{ Hz/s}$ 、 $\Delta f_{\max} = 0.5 \text{ Hz}$ 、 $\Delta f_{\max}^{\text{ss}} = 0.3 \text{ Hz}$ ^[22]。锂电储能和飞轮储能的主要参数设置如附录 A 表 A2 所示。需要说明的是, 表 A2 中的惯性时间常数、增益系数以及负荷阻尼系数未按照统一的功率基准值进行折算。基于

MATLAB 建立优化模型, 并调用 Gurobi 10.0 求解器进行求解。

4.2 IEEE 14 节点系统算例的分析结果

4.2.1 锂电和飞轮储能协同对比分析

为了比较锂电储能和飞轮储能系统在协同作用下的经济性以及储能调频备用情况, 设置以下 3 种储能调频备用模式: ① Case 1, 100 MW / 400 MW·h 锂电储能电站和 100 MW / 2 MW·h 飞轮储能电站协同提供调频备用, 即本文所提协同调度方法; ② Case 1a, 200 MW / 402 MW·h 锂电储能电站单独提供调频备用; ③ Case 1b, 200 MW / 4 MW·h 飞轮储能电站单独提供调频备用。

日前调度周期为 24 h (以 1 h 为间隔分为 24 个时段), 设置有功扰动 ΔP_0 为阶跃增加总负荷的 10%, 不同储能调频备用模式下的系统运行成本和调频备用结果如表 1 所示。

表 1 不同储能调频备用模式下的系统调度结果

Table 1 System scheduling results under different frequency regulation reserve modes of energy storage

调频备用模式	总运行成本 / 元	锂电储能损耗成本 / 元	锂电储能一次调频备用成本 / 元	飞轮储能一次调频备用成本 / 元	储能一次调频备用容量 / MW
Case 1	1539855	1482.19	5255.69	5685.25	889.00
Case 1a	1579318	2774.67	13655.29	—	832.64
Case 1b	1569668	—	—	8402.92	840.29

由表 1 可知: Case 1 的总运行成本最小, 相较于 Case 1a、Case 1b, 分别减少了 39 463、29 813 元, 分别降低了 2.5%、1.9%; 相较于 Case 1a, Case 1 下的锂电储能损耗成本减少了 1 292.48 元, 降低了 46.58%; 在 Case 1 中, 锂电储能和飞轮储能分别提供了 320.47、568.53 MW 的一次调频备用容量, 其中锂电储能提供的一次调频备用容量相较于 Case 1a 减小了 512.17 MW (降低了 61.5%)。

相较于 Case 1, Case 1a 下锂电储能提供的一次调频备用容量增大, 导致储能损耗成本提高, 同时受限于调频备用要求, 降低了其调度灵活性, 从而影响了总体经济性。而在 Case 1b 下, 飞轮储能虽然能够提供足够的一次调频备用容量, 但由于无法参与小时级经济调度, 导致火电机组的煤耗成本增加。由表 1 还可以看出, 锂电储能和飞轮储能协同调频能够减小锂电储能提供的调频备用容量, 提高锂电储能在经济调度中的参与度, 从而提升了系统的经济性。

不同储能调频备用模式下的储能一次调频备用容量如图 2 所示。由图可知: 相较于 Case 1a, Case 1 下锂电储能的调频备用容量几乎在全天时段都明显降低, 这可以减轻锂电储能的调频压力, 使其能够更多地参与到经济调度中; 储能在协同调度模式下提供的总调频备用容量大于单一锂电储能调度模式下的总调频备用容量, 这能够更加有效地保障系统的频率安全。

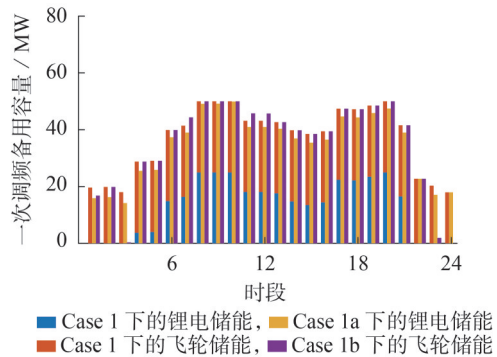


图 2 不同储能调频备用模式下的储能一次调频备用容量

Fig.2 Energy storage primary frequency regulation reserve capacity under different frequency regulation reserve modes of energy storage

3 种储能调频备用模式下火电机组的启停情况如附录 B 图 B1 所示。基于火电机组的启停情况, 选取时段 10 发生故障后的功率-频率动态特性进行仿真分析, 结果如附录 B 图 B2 所示。由图可知, 相较于 Case 1 和 Case 1b, Case 1a 下的频率安全指标有所提升, 但其一次调频功率的超量也更显著。这是因为 Case 1a 下的火电机组 5 在时段 10 处于开机状态, 而 Case 1 和 Case 1b 下火电机组 5 在时段 10 处于停机状态, 这导致 Case 1a 下的系统在时段 10 内预留了过多的调频备用容量。虽然 Case 1a 下的频率安全指标有所改善, 但由于 Case 1 和 Case 1a 下的频率

安全指标均远低于参考值,Case 1a下过多的调频备用功率可能造成资源浪费。

综合上述分析可知,锂电储能与飞轮储能协同优化调度策略能够充分发挥这2类储能的优势,在保证系统频率安全的前提下,降低系统的运行成本。

4.2.2 储能寿命与恢复特性对比分析

为了分析本文所考虑的锂电储能寿命损耗约束和飞轮储能能量恢复约束对系统调度决策的影响,设置以下4种方案进行对比分析:①方案1,考虑锂电储能的寿命损耗约束和飞轮储能的能量恢复约束(即本文所提方法);②方案2,不考虑锂电储能的寿命损耗约束,考虑飞轮储能的能量恢复约束;③方案3,考虑锂电储能的寿命损耗约束,不考虑飞轮储能的能量恢复约束;④方案4,不考虑锂电储能的寿命损耗约束以及飞轮储能的能量恢复约束。

表2 不同方案的系统调度结果

Table 2 System scheduling results of different schemes

方案	总运行成本/元	锂电储能损耗成本/元	锂电储能一次调频备用成本/元	飞轮储能一次调频备用成本/元	锂电储能一次调频备用容量/MW	飞轮储能一次调频备用容量/MW	锂电储能寿命/a
1	1539855	1482.19	5255.69	5685.25	320.47	568.53	10.00
2	1533785	1991.99	5253.22	5685.25	320.32	568.52	6.07
3	1610059	1982.56	8611.86	1200.00	525.11	120.00	10.00
4	1597320	2494.07	8821.23	1200.00	537.88	120.00	5.61

考虑飞轮储能的能量恢复约束后,系统性能得到进一步优化。相较于方案3,方案1的总运行成本减少了70204元(降低了4.3%),锂电储能损耗成本减少了500.37元(降低了25.2%),锂电储能的一次调频备用容量减少了204.64 MW(降低了39.0%);相较于方案4,方案2的总运行成本减少了63535元(降低了4.0%),锂电储能损耗成本减少了502.08元(降低了20.1%),锂电储能的一次调频备用容量减少了217.56 MW(降低了40.4%)。这是因为考虑飞轮储能的能量恢复约束后,飞轮储能在每个时段能够提供更多的备用支持,有效降低了系统对锂电储能和火电机组的备用需求。同时,锂电储能的功率受到限制,所以减少锂电储能损耗成本。此外,考虑飞轮储能的能量恢复约束还带来了额外的收益,相较于方案4,方案2中锂电储能的寿命延长了0.46 a(提升了8.2%)。

不同方案下的火电机组启停情况如附录B图B3所示。通过对比分析可发现,方案1和方案3之间存在显著的差异:方案1中的火电机组4在24个时段都处于停机状态,而方案3中的火电机组4持续运行。类似地,方案2和方案4之间也呈现显著的差异:方案2中的火电机组5全程停机,而方案4中的火电机组5持续运行。在不考虑飞轮储能的能量恢复约束的情况下,飞轮储能系统提供的一次调频备用容量受到限制,导致系统需要更多的火电机组保

有功扰动 ΔP_0 的设置与4.2.1节保持一致。不同方案的系统调度结果见表2。由表可知,考虑锂电储能的寿命损耗约束后,系统的运行特性发生变化。相较于方案2,方案1的总运行成本增加了6070元(提高了0.4%),但锂电储能损耗成本减少了509.8元(降低了25.6%),同时锂电储能的寿命延长了3.93 a(提升了64.7%);相较于方案4,方案3的总运行成本增加了12739元(提高了0.8%),但储能损耗成本减少了511.51元(降低了20.5%),同时锂电储能的寿命延长了4.39 a(提升了78.3%)。这是因为考虑锂电储能的寿命损耗后,系统通过降低DOD以延长锂电储能寿命,并优化其充放电功率,从而有效降低了锂电储能的损耗成本。但是,功率限制会导致锂电储能参与调度的电量减少,为了平抑负荷波动,火电机组需要增加出力,从而提高了系统的总运行成本。

持运行状态,以增强系统抵御频率波动的能力,但这会增加系统的总运行成本。

方案2和方案4的频率安全指标对比见图3。

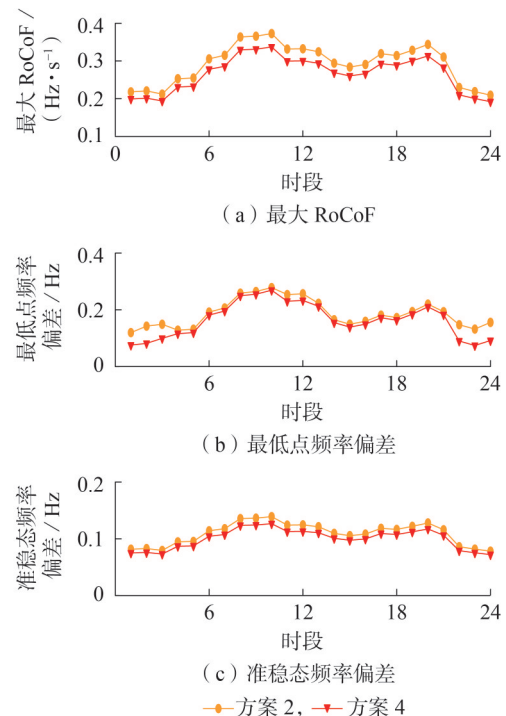


图3 方案2和方案4的频率安全指标对比

Fig.3 Comparison of frequency security indicators between Scheme 2 and Scheme 4

以时段10为例,方案4的最大RoCoF为0.337 Hz/s,略低于方案2的0.373 Hz/s。这一差距归因于方案4中的火电机组4在24个时段内相较于方案2都保持开机状态,从而为系统提供了惯量支撑,预留了一次调频功率。

方案1和方案2中锂电储能的SOC变化如图4所示,方案1的系统日前调度结果如附录B图B4所示。

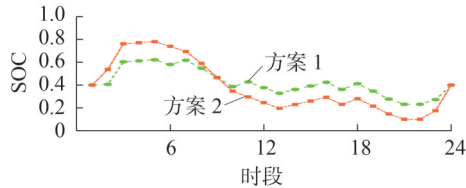


图4 方案1和方案2中锂电储能的SOC变化

Fig.4 Change of lithium-ion battery energy storage SOC in Scheme 1 and Scheme 2

由图4可知,相较于方案2,方案1中锂电储能的SOC呈现平稳变化趋势,波动范围稳定在0.2~0.6内,且相邻时段间的SOC波动显著减小。具体而言,方案2中时段10的锂电储能SOC相比时段9减小了0.12,而方案1中时段10的锂电储能SOC相比时段9仅减小了0.08,SOC变化幅度减小了33.3%。这表明考虑锂电储能的寿命损耗约束可以有效减少锂电储能深度充放电,从而减小锂电储能的循环寿命损失,延长锂电储能的使用寿命。结合图B4可以看出,方案1中锂电储能充放电功率的变化导致其在时段10—20内的SOC在小范围内上下变化,这是因为锂电储能承担了一次调频备用任务,其通过适度的充放电功率调节,既满足了系统频率稳定要求,又将SOC波动控制在合理的范围内。

综合上述分析可知,考虑锂电储能的寿命损耗约束和飞轮储能的能量恢复约束,能够通过优化锂电储能的充放电策略有效减少其深度循环损耗,有效延长锂电储能的运行寿命,且能够提高飞轮储能持续调频的能力,从而降低锂电储能的调频备用压力,进一步提升电力系统的运行经济性。

4.3 IEEE 118节点系统算例的分析结果

基于修改后的IEEE 118节点系统验证本文所提模型和方法的适用性。本文所提方法的优化调度结果如附录B表B1所示。IEEE 118节点系统的频率安全指标如附录B图B5所示。由图可知,在系统总负荷阶跃增加10%的情况下,采用本文所提方法优化调度后,IEEE 118节点系统的3个频率安全指标均在安全范围内,能够有效维持系统频率稳定性,确保系统频率安全。

进一步分析锂电储能的运行状态,10%负荷扰动下锂电储能和飞轮储能在各时段提供的一次调频备用容量如附录B图B6所示。由图可知,飞轮储能承担的一次调频备用容量高于锂电储能,这使得锂

电储能能够更多地参与经济调度。

5 结论

为了确保电力系统频率安全、稳定运行,针对锂电储能深度循环加速寿命损耗的问题和飞轮储能持续调频下能量维持能力受限的问题,本文提出一种考虑飞轮和锂电储能协同频率支撑的电力系统优化调度方法,并以改进的IEEE 14节点系统和IEEE 118节点系统为算例进行仿真验证,所得主要结论如下。

1)本文所提锂电储能和飞轮储能的协同调度策略,安排飞轮储能和锂电储能共同承担调频备用任务,并由锂电储能独立负责能量平衡。通过协调锂电储能和飞轮储能的出力与频率安全备用功率,在保证系统频率稳定的前提下,可以有效减少锂电储能的调频备用需求。相较于单一飞轮储能调度策略和单一锂电储能调度策略,所提协同调度策略下的系统总运行成本分别降低了1.9%和2.5%。

2)本文所提优化调度方法充分考虑了飞轮储能的能量恢复和锂电储能的寿命衰减,协同优化了锂电储能和飞轮储能的有功出力与备用调度分配,相较于传统不考虑飞轮储能能量恢复和锂电储能寿命衰减的调度方法,有效延长了锂电储能的运行寿命,增强了飞轮储能的持续调频能力。

本文所提锂电储能和飞轮储能的协同调度策略能在保障频率安全的同时,降低系统运行成本,延长储能寿命,但所建模型对储能实际运行条件、外部市场环境等因素的耦合刻画尚不够充分。在后续研究工作中,可进一步分析复杂运行条件下多类型储能的动态自适应策略,并探索其在电力市场多时间尺度交易中的协同出清机制与经济性评估。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 高志远,张晶,庄卫金,等. 关于新型电力系统部分特点的思考[J]. 电力自动化设备,2023,43(6):137-143,151.
GAO Zhiyuan,ZHANG Jing,ZHUANG Weijin, et al. Thoughts on some characteristics of new style power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023,43(6):137-143,151.
- [2] 杨牧青,王程,葛辰雨,等. 考虑多阻尼状态与限幅环节的新能源电力系统一次调频备用整定[J]. 中国电机工程学报,2024,44(1):147-159.
YANG Muqing,WANG Cheng,GE Chenyu, et al. Primary frequency regulation reserve procurement of renewable energy power system considering multiple damping states and governor limiters[J]. Proceedings of the CSEE,2024,44(1):147-159.
- [3] 冀肖彤,柳丹,江克证,等. 储能型风电场一次调频容量优化与风电功率协调分配[J]. 电力自动化设备,2023,43(7):58-65.
JI Xiaotong,LIU Dan,JIANG Kezheng, et al. Primary frequency regulation capacity optimization and wind power coordinated allocation of energy storage-based wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment,2023,43(7):58-65.
- [4] 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 Yufei,YANG Mingcheng,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.
- [5] 孙培锋,陆王琳,白鹏,等. 锂电池和超级电容混合储能辅助火电调频技术发展现状和趋势[J]. 动力工程学报,2024,44(3):418-429.
- SUN Peifeng,LU Wanglin,BAI Peng,et al. Development status and trends of lithium battery and supercapacitor hybrid energy storage assisted thermal power frequency regulation technology[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2024,44(3):418-429.
- [6] 张晓虎,张熊,王凯,等. 功率型储能技术与应用综述[J]. 电气工程学报,2024,19(3):385-398.
- ZHANG Xiaohu,ZHANG Xiong,WANG Kai,et al. Review of power-type energy storage technology and application[J]. Journal of Electrical Engineering,2024,19(3):385-398.
- [7] 董文琦,张东晖,曹一凡,等. 新型惯量飞轮与高速飞轮参与电网惯性响应与一次调频的控制策略[J]. 储能科学与技术,2025,14(3):1224-1233.
- DONG Wenqi,ZHANG Donghui,CAO Yifan,et al. The control strategies concerning the new type inertia flywheel and high-speed flywheel involved in the grid inertia response and primary frequency modulation[J]. Energy Storage Science and Technology,2025,14(3):1224-1233.
- [8] 罗耀东,田立军,王垚,等. 飞轮储能参与电网一次调频协调控制策略与容量优化配置[J]. 电力系统自动化,2022,46(9):71-82.
- LUO Yaodong,TIAN Lijun,WANG Yao,et al. Coordinated control strategy and optimal capacity configuration for flywheel energy storage participating in primary frequency regulation of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2022,46(9):71-82.
- [9] 梁志宏,刘吉臻,洪烽,等. 电力级大功率飞轮储能系统耦合火电机组调频技术研究及工程应用[J]. 中国电机工程学报,2024,44(21):8518-8531.
- LIANG Zhihong,LIU Jizhen,HONG Feng,et al. Research and engineering application of frequency modulation technology of power-level high-power flywheel energy storage system coupled with thermal power unit[J]. Proceedings of the CSEE,2024,44(21):8518-8531.
- [10] HONG F,WEI K C,JI W M,et al. A cross-entropy-based synergy method for capacity configuration and SOC management of flywheel energy storage in primary frequency regulation[J]. Energy,2025,316:134498.
- [11] 梁璐,洪烽,季卫鸣,等. 大规模飞轮储能阵列协同火电机组调频的能量管理系统[J]. 中国电机工程学报,2025,45(7):2658-2670.
- LIANG Lu,HONG Feng,JI Weiming,et al. Energy management system of large-scale flywheel energy storage array coordinated with thermal power unit in frequency regulation[J]. Proceedings of the CSEE,2025,45(7):2658-2670.
- [12] 许庆祥,滕伟,秦涛,等. 电网调频飞轮储能系统并网能量管理与控制策略[J]. 储能科学与技术,2025,14(5):2013-2022.
- XU Qingxiang,TENG Wei,QIN Run,et al. Energy management and control strategy for grid-connected frequency regulation flywheel energy storage systems[J]. Energy Storage Science and Technology,2025,14(5):2013-2022.
- [13] 吴永飞,包宇庆. 电能型-功率型混合储能日前-日内协同滚动调度策略[J]. 电力系统自动化,2024,48(1):77-87.
- WU Yongfei,BAO Yuqing. Coordinated day-ahead and intra-day rolling scheduling strategy for electricity-power hybrid energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems,2024,48(1):77-87.
- [14] 杨航宇,刘广忱,陈禹,等. 基于自适应变参数卡尔曼滤波算法的混合储能控制策略[J]. 太阳能学报,2025,46(2):32-40.
- YANG Hangyu,LIU Guangchen,CHEN Yu,et al. Hybrid energy storage control strategy based on adaptive parameter-varying Kalman filtering algorithm[J]. Acta Energetica Solaris Sinica,2025,46(2):32-40.
- [15] 严干贵,李永越,沙千理,等. 基于改进自适应完备集合经验模态分解的混合储能辅助火电机组调频的协同控制策略[J]. 电网技术,2026,50(1):210-220.
- YAN Gangui,LI Yongyue,SHA Qianli,et al. Co-control strategy for hybrid storage-assisted thermal power unit frequency regulation based on ICEEMDAN decomposition[J]. Power System Technology,2026,50(1):210-220.
- [16] 王文坚,陈飞雄,林世琦. 新型电力系统下调频容量需求计算与储-荷调频方法研究综述[J]. 智慧电力,2025,53(12):1-12.
- WANG Wenjian,CHEN Feixiong,LIN Shiqi. A review of frequency regulation capacity demand calculation and energy storage-load frequency regulation methods in new-type power systems[J]. Smart Power,2025,53(12):1-12.
- [17] 陈泽宇,陈艳波. 计及循环寿命和电能量-调频市场出清的储能自调度策略[J]. 电力系统自动化,2024,48(14):28-41.
- CHEN Zeyu,CHEN Yanbo. Self-scheduling strategy of energy storage considering cycle life and clearing of electric power energy-frequency regulation market[J]. Automation of Electric Power Systems,2024,48(14):28-41.
- [18] XUE X Z,AI X M,FANG J K,et al. Real-time schedule of microgrid for maximizing battery energy storage utilization[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2022,13(3):1356-1369.
- [19] 房方,刘渝斌,王冰玉,等. 基于NSGA-II的飞轮-火电联合二次调频最优负荷分配策略[J]. 电力系统自动化,2024,48(12):79-88.
- FANG Fang,LIU Yubin,WANG Bingyu,et al. Optimal load allocation strategy of flywheel-thermal power coordinated secondary frequency regulation based on non-dominated sorting genetic algorithm-II[J]. Automation of Electric Power Systems,2024,48(12):79-88.
- [20] ZHANG Z,ZHOU M,WU Z Y,et al. A frequency security constrained scheduling approach considering wind farm providing frequency support and reserve[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2022,13(2):1086-1100.
- [21] 石荣亮,兰才华,张群英,等. 储能VSG并联组网系统的有功振荡特性分析及其改进策略[J]. 电力自动化设备,2024,44(5):51-57.
- SHI Rongliang,LAN Caihua,ZHANG Qunying,et al. Analysis and improvement strategy of active power oscillation characteristics for energy storage VSG parallel networking system[J]. Electric Power Automation Equipment,2024,44(5):51-57.
- [22] LI K,AI X M,FANG J K,et al. Frequency security constrained robust unit commitment for sufficient deployment of diversified frequency support resources[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2024,60(1):1725-1737.
- [23] 洪晗笑,吴晨曦,倪索引. 考虑频率-惯量安全约束的新型电力系统优化调度[J]. 电力自动化设备,2024,44(8):176-184.
- HONG Hanxiao,WU Chenxi,NI Suoyin. Optimal scheduling of new-type power system considering frequency-inertia security constraints[J]. Electric Power Automation Equipment,2024,44(8):176-184.
- [24] 李晨,任洲洋,李文沅. 考虑燃料电池和电解槽虚拟惯量支撑的电力系统优化调度方法[J]. 电力自动化设备,2024,44(11):9-16.

- LI Chen, REN Zhouyang, LI Wenyuan. Optimal scheduling method of power system considering virtual inertia support of fuel cells and electrolyzers[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(11):9-16.
- [25] 谭洪, 陈嘉迅, 王秋杰, 等. 计及风电频率支撑能力和运行风险的鲁棒机组组合模型[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(4): 96-107.
- TAN Hong, CHEN Jiayun, WANG Qiuji, et al. A robust unit commitment model considering wind power frequency support capability and operational risk[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(4):96-107.
- [26] 杨德健, 楚晓玮, 李传亮, 等. 考虑动态频率稳定性及储能快速频率支撑的风功率承载极限解析计算[J]. 智慧电力, 2025, 53(11):73-80.
- YANG Dejian, CHU Xiaowei, LI Chuanliang, et al. Analytical calculation of wind power hosting capacity considering dynamic frequency stability and energy storage-based fast frequency support[J]. Smart Power, 2025, 53(11):73-80.
- [27] 黄怡涵, 王小海, 张红光, 等. 火电机组一次调频简化模型改进与电力系统频率安全约束解析计算[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(15):36-47.
- HUANG Yihan, WANG Xiaohai, ZHANG Hongguang, et al. Improvement of simplified primary frequency regulation model for thermal power units and analytical calculation of power system frequency security constraints[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(15):36-47.
- [28] 薛文浩, 吕泉, 齐楚, 等. 现货市场环境下独立储能参与一次调频市场运营策略[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(7):28-34.
- XUE Wenhao, LÜ Quan, QI Chu, et al. Operation strategy of independent energy storage participating in primary frequency regulation market under spot market environment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(7):28-34.
- [29] 傅旭, 李富春, 杨欣, 等. 基于全寿命周期成本的储能成本分析[J]. 分布式能源, 2020, 5(3):34-38.
- FU Xu, LI Fuchun, YANG Xin, et al. Cost analysis of energy storage based on life cycle cost[J]. Distributed Energy, 2020, 5(3):34-38.

作者简介:

胡京(2001—),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统优化调度(**E-mail**:hujing01@hust.edu.cn);

崔世常(1994—),男,博士,主要研究方向为需求侧的分布式优化调度、博弈与优化算法等(**E-mail**:shichang_cui@hust.edu.cn);

艾小猛(1986—),男,教授,博士研究生导师,主要研究方向为鲁棒优化理论在综合能源系统中的应用、可再生能源并网优化运行等(**E-mail**:xiaomengai@hust.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

Optimal scheduling method of power system considering coordinated frequency support of flywheel and lithium-ion battery energy storages

HU Jing¹, GAO Liqian¹, CUI Shichang¹, AI Xiaomeng¹, LI Kun¹, LI Gang², TANG Wei³,
FANG Jiakun¹, CAO Yuancheng¹, WEN Jinyu¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230022, China;
3. State Grid Anhui Electric Power Research Institute, Hefei 230601, China)

Abstract: The large-scale integration of renewable energy poses challenges to the frequency security of power system. To ensure the frequency security and stable operation of power system, considering the high energy density characteristic of lithium-ion battery energy storage and the high cycle characteristic of flywheel energy storage, and combining their high power density and rapid response features, an optimal scheduling method of power system considering coordinated frequency support of flywheel and lithium-ion battery energy storages is proposed. To address the issue of accelerated life loss due to deep cycling in lithium-ion battery energy storage, an operation optimization model of lithium-ion battery energy storage is established. Based on the life degradation mechanism, the piecewise linearization technique is adopted to construct a linear model of life degradation corresponding to the scheduling operation of lithium-ion battery energy storage. To address the issue of limited energy maintenance capability of flywheel energy storage under continuous frequency regulation, the operation optimization model of flywheel energy storage with an energy recovery mechanism is proposed. Based on the control strategy of virtual synchronous machine, the dynamic frequency response process of power system with flywheel and lithium-ion battery energy storages is analyzed, three frequency security indicators, namely the rate of change of frequency, the quasi-steady-state frequency and the frequency nadir, are introduced, the frequency security reserve demand of power system is proposed, and a coordinated optimal scheduling model of power system considering the frequency security reserve is established. Based on the modified IEEE 14-bus system and IEEE 118-bus system, the comparative analysis is conducted from multiple perspectives to verify the effectiveness of the proposed energy storage model and the coordinated optimal scheduling method.

Key words: renewable energy power system; optimal scheduling; flywheel energy storage; lithium-ion battery energy storage; frequency security constraint; frequency regulation reserve