

考虑多元调频资源及频率安全的高比例新能源电力系统储能规划研究

丁颖¹ 李奇² 王秀丽¹ 王泽森² 章力凯¹ 张海涛¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 国网冀北电力有限公司电力科学研究院, 100045, 北京)

摘要: 为应对高比例新能源电力系统中, 新能源接入引发的系统惯量下降与频率安全挑战, 提出一种考虑多元调频资源及频率安全的储能规划模型。首先, 建立了涵盖火电机组、新能源电场和电池储能的多机系统频率响应模型, 采用多机聚合方法将异构调频资源统一为等效单机模型, 并构建可用频率响应功率约束和功率裕度约束以保证充足的一次调频响应能力。其次, 基于频率安全裕度理论, 将频率最低点非线性约束转化为系统可承受的最大功率不平衡约束, 采用分段线性化方法嵌入混合整数线性规划模型。在此基础上, 以储能全生命周期成本与系统运行成本之和最小为目标, 将短期机组组合嵌入长期投资决策, 协同优化储能配置与系统运行。改进IEEE-39节点系统算例表明: 所提线性化约束平均误差为4.3%; 相较于不考虑频率约束模型, 系统频率安全域由78.31 MW提升至171.21 MW; 与储能不参与调频模型相比, 系统总成本降低了2.2%。该研究结果表明, 所提方法能够提升系统频率安全水平, 并获得兼顾安全性与经济性的储能规划方案。

关键词: 高比例新能源电力系统; 多机系统频率响应; 频率安全; 储能规划

中图分类号: TM715 **文献标志码:** AA

文章编号: 0253-987X(XXXX)XX-0001-20

Energy Storage Planning for High-Penetration Renewable Power Systems Considering Multiple Frequency Regulation Resources and Frequency Security

DING Ying¹, LI Qi², WANG Xiuli¹, WANG Zesen², ZHANG Likai¹, ZHANG Haitao¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Electric Power Research Institute, State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 100045, China)

Abstract: To address the challenges of declining system inertia and frequency security caused by renewable energy integration in high-penetration renewable power systems, this paper proposes an energy storage planning model considering multiple frequency regulation resources and frequency security. First, a multi-machine system frequency response model encompassing thermal units, renewable energy plants, and battery energy storage systems is established. A multi-machine

收稿日期: 2026-02-02。

aggregation method is adopted to unify heterogeneous frequency regulation resources into an equivalent single-machine model, and constraints on available frequency response power and power margin are formulated to ensure sufficient primary frequency response capability. Second, based on the concept of frequency security margin, the nonlinear frequency nadir constraint is transformed into a constraint on the maximum power imbalance that the system can withstand, which is then embedded into a mixed-integer linear programming model through piecewise linearization. On this basis, with the objective of minimizing the sum of the life-cycle cost of energy storage and the system operating cost, short-term unit commitment is incorporated into long-term investment decision-making to jointly optimize energy storage configuration and system operation. Case studies on a modified IEEE 39-bus system show that the proposed linearized constraint has an average error of 4.3%; compared with the model without frequency constraints, the system frequency security region is expanded from 78.31 MW to 171.21 MW; and compared with the model in which energy storage does not participate in frequency regulation, the total system cost is reduced by 2.2%. The results demonstrate that the proposed method can enhance system frequency security and obtain an energy storage planning scheme that balances security and economic performance.

Keywords: high-penetration renewable power system; multi-machine system frequency response; frequency security; energy storage planning

随着“双碳”目标的推进,电力行业正加速构建以新能源为主体的新型电力系统^[1]。风电、光伏的高比例并网在提升清洁能源供给水平的同时,也对系统安全稳定运行提出了更高要求^[2]。新能源经电力电子变换器并网,由于缺乏同步机固有的转动惯量与阻尼特性,而导致系统等效惯量下降、动态稳定性劣化^[3];风、光出力的间歇性与随机性使扰动下的功率不平衡更难被快速抑制,频率越限的风险加剧^[4]。在此背景下,电池储能凭借毫秒级功率响应速度,可在惯量支撑与一次调频等方面提供关键的动态频率支撑,其合理规划对保障高比例新能源电力系统的频率安全具有重要意义^[5]。然而,现有储能规划研究在两方面仍存在不足:一是储能多

被作为能量平衡资源处理,其快速调频特性未在规划阶段得到充分利用;二是频率安全约束难以准确嵌入规划优化模型,导致规划方案可能无法满足实际频率的安全要求。

近年来,高比例新能源场景下的储能规划研究主要包括:□通过选址定容、潮流约束与多场景不确定性建模实现源-储联合规划^[6];□规划与短期运行耦合,将投资决策与日前调度、网络约束及多主体协调机制联立求解以评估灵活资源的调度价值^[7];□面向系统可靠性提升,引入期望缺供电量/电力不足概率等指标,与扩展规划联合量化储能的供电保障贡献^[8-9];□面向市场与辅助服务机制,建立储能参与调频市场的模型,评估收益驱动下的运行策略^[10-11]。

上述研究主要将储能作为能量平衡与削峰填谷的资源进行处理,其快速功率调节能力所具备的频率支撑价值尚未在规划阶段得到充分体现。

频率约束问题同时也被纳入经济调度和机组组合的考虑范围。例如,文献[12]将非线性频率偏差约束引入交流最优潮流以保持频率稳定;文献[13]考虑可信的发电中断,充分利用一次频率备用以满足最小频率偏差要求。文献[14]提出了混合整数线性机组组合模型,同时优化发电量、惯性相关的快速频率响应和一次频率响应;文献[15]采用下垂控制来减少同步发电机的频率支持需求。文献[16-17]设计了频率备用市场以提供辅助服务并实现效益最大化。文献[18]通过考虑风电参与频率响应,提出了稳态和暂态协调机组组合模型。上述文献多从单一调频环节出发刻画频率服务需求,对常规机组、新能源与储能等多元调频资源的协同响应机理缺乏统一的建模框架,难以直接用于指导规划层面的容量配置与安全性评估。

针对多元调频资源统一建模问题,已有学者从频率响应聚合建模角度展开探索。文献[19]提出参数等效方法,将多机系统等效为单机频率响应模型,但仅针对同步机组。随着新能源和储能参与频率支撑需求的提升,相关研究进一步拓展了等效频率响应模型。文献[20]建立了含虚拟同步变速风机的二阶系统频率响应模型,将风电的虚拟惯量与下垂响应嵌入系统频率响应模型,但未考

虑储能;文献[21]采用一阶等效环节描述同步机和储能的调频特性,但建模中略去了机组类型与控制策略差异,且未考虑新能源;文献[22]将同步机与风电的惯量及下垂系数聚合进等效传递函数中,储能则通过应急支撑功率与预留容量修正系统等效不平衡功率,但储能的动态参数未与同步机、风电置于频率响应方程中进行参数等效,难以在统一聚合框架内表征其动态调频特性。

在将频率安全由运行层面的分析约束进一步拓展到储能规划问题方面,文献[23]提出了储能辅助火电机组一次调频控制策略,通过深度强化学习优化储能出力;文献[24]提出了运行约束下的电池储能系统规划模型以提供充足的一次频率备用,但由于忽略了频率最低点、频率变化率和准稳态频率偏差等关键指标,无法保证频率稳定性。文献[25]在储能规划中引入了频率最低点约束,但其采用线性爬坡速率替代一次调频反馈的动态特性,未能准确刻画调速器-汽轮机环节的频率响应过程。

基于以上分析,针对高比例新能源替代同步机组导致系统惯量显著下降与频率安全难以兼顾的问题,本文提出一种计及多元调频资源及频率安全的储能规划方法。相较于已有的等效单机频率响应模型,本文将火电机组、风电场和电池储能纳入统一的传递函数框架,建立保留各类调频资源动态特性的聚合多机系统频率响应模型。在此基础上,针对非线性频率约束难以精确嵌入规划模

型问题,将频率最低点非线性约束进一步转化为适用于储能规划模型的系统可承受最大功率不平衡约束,并采用分段线性化方法将其嵌入混合整数线性规划模型,实现长期储能经济配置与短期时变频率安全边界自适应协同优化。

1 聚合多机系统频率响应模型

1.1 常规机组的频率响应

在系统发生扰动导致频率下降时,常规火电机组参与频率支撑的过程主要由调速器和汽轮机动态决定,其中汽轮机往往对频率响应起主导作用。机组的频率动态过程可表示为

$$2H_g \frac{d\Delta f(t)}{dt} = \Delta P_{m,g}(t) - \Delta P_L(t) - D_g \Delta f(t) \quad (1)$$

式中:下标 g 为火电机组序号; H_g 为机组的惯性常数; t 为时间; $\Delta f(t)$ 为时域中频率偏差; $\Delta P_{m,g}$ 为调速器调节后的机械功率输出; ΔP_L 为系统的不平衡功率,表示负荷突增或发电缺额引起的等效扰动功率; D_g 为阻尼系数。

调速器本身的调节行为可近似为一阶惯性系统,其在频域的机械功率输出 $\Delta P_{m,g}(s)$ 的传递函数表达式为

$$\Delta P_{m,g}(s) = \frac{1}{R_g(1+T_g s)} \cdot (-\Delta f(s)) \quad (2)$$

式中: R_g 为调速器的调差系数; $\Delta f(s)$ 为频域中的频率偏差; s 为复频率; T_g 为调速器-汽轮机系统的响应时间常数。

1.2 新能源电场的频率响应

新能源电场经由电力电子变换器并网,不具备传统同步机组的物理惯量,通常采用虚拟同步机技术,以控制逻辑模拟同步发电机的惯性响应与下垂特性。在时域内,新能源电场基于虚拟同步控制策略的时域总响应功率 $\Delta P_w(t)$ 可表示为

$$\Delta P_w(t) = -2H_w \frac{d\Delta f(t)}{dt} - D_w \Delta f(t) \quad (3)$$

式中:下标 w 为新能源场站序号; H_w 、 D_w 分别为新能源电场的惯性常数、下垂系数。

同时,在频域中,还需考虑控制系统的响应延迟问题,其频域中的总响应功率 $\Delta P_w(s)$ 的表达式为

$$\frac{\Delta P_w(s)}{\Delta f(s)} = \frac{-2H_w s - D_w}{1 + T_w s} \quad (4)$$

式中: T_w 新能源电场的响应时间。

由于频率响应功率依赖于减载运行,一次调频响应的最大量受到新能源弃电的限制条件为

$$P_{w,t}^c \geq D_w P_{w,t}^f \lambda_w \Delta f_{\max} \quad (5)$$

式中: $P_{w,t}^c$ 、 $P_{w,t}^f$ 分别为 t 时刻新能源电场 w 的弃电功率、预测输出功率; $\Delta f_{\max}$ 为最大频率偏差; λ_w 为备用系数,用于调节一次调频响应的预设功率裕量。

1.3 电池储能系统的频率响应

锂离子电池储能系统在电网频率发生扰动后,能够迅速激活一次调频响应,并提供及时的功率支撑,本文选用锂离子电池作为电池储能系统的核心储

能单元。储能系统与电网之间的功率交换动态特性可以用以下一阶传递函数来表示:

$$\frac{\Delta P_e(s)}{\Delta f(s)} = \frac{K_e}{R_e(1+T_e s)} \quad (6)$$

式中:下标 e 为储能系统序号; $\Delta P_e(s)$ 为频域中储能系统的频率响应功率; K_e 、 R_e 、 T_e 分别为储能系统的增益系数、下垂系数和响应时间。

1.4 多机系统频率响应模型

为全面反映当前电力系统频率响应的多元化特征,本文建立了一个集成同步发电机、新能源电场以及储能系统的多机系统频率响应模型,如图1所示。

图中, F_g 、 T_{rg} 分别为火电机组的高压缸功率占比、再热时间常数; K_g 、 R_g 分别是火电机组机械功率增益系数、调速器调差常数; n_g 、 n_w 、 n_e 分别为火电机组、新能源并网变流器和储能并网

变流器的数量; ΔP_g 、 ΔP_w 和 ΔP_e 分别是火电机组、新能源和储能系统响应频率偏差 Δf 的一次调频响应功率; H_e 和 D_e 分别是等效系统惯性常数和负荷阻尼常数。

该模型将各类电源的频率响应模块并联,其总输出与系统功率不平衡量共同作用于系统的等效惯性与负荷阻尼环节,从而决定频率偏差。

1.5 聚合多机系统频率响应模型

为全面反映含多元化调频资源的电力系统频率动态,需建立统一的频率响应模型。为在保证动态特征准确性的前提下简化计算,本文在文献[19]提出的对同步发电机组进行参数等效思想的基础上,通过参数聚合与结构等效方法,将多元异构的频率响应单元整合为一个统一的等效响应实体。

将新能源电厂和储能系统的传递函数分别进行等效转换后得到表达式为

$$\frac{2H_w s + D_w}{1 + T_w s} = D_w \frac{1 + 2H_w T_w s / (T_w D_w)}{1 + T_w s} = \frac{1}{R_w} \frac{1 + F_w T_w s}{1 + T_w s} \quad (7)$$

$$\frac{K_e}{R_e(1 + sT_e)} = \frac{1}{R_e / K_e} \frac{1}{(1 + sT_e)} = \frac{1}{R_e'} \frac{1 + F_e T_e s}{1 + T_e s} \quad (8)$$

式中: R_w 、 R_e' 分别为新能源电场、储能系统的等效下垂系数; F_w 、 F_e 分别为新能源电场、储能系统的等效功率分数。

得到的等效参数表达式为

$$\left\{ \begin{array}{l} R_w = \frac{1}{D_w} \\ F_w = \frac{2H_w}{T_w D_w} \\ R_e' = \frac{R_e}{K_e} \\ F_e = 0 \end{array} \right. \quad (9)$$

在参数等效过程中,根据各类设备在总容量中的比例确定其等效功率分

数,进而结合各自的下垂控制参数,计算出加权平均的等效下垂系数和等效时间常数,以此作为聚合后设备在频率响

应中的参数代表。每台同步发电机和变流器的功率增益因子 $K_{m,i}$ 的表达式为

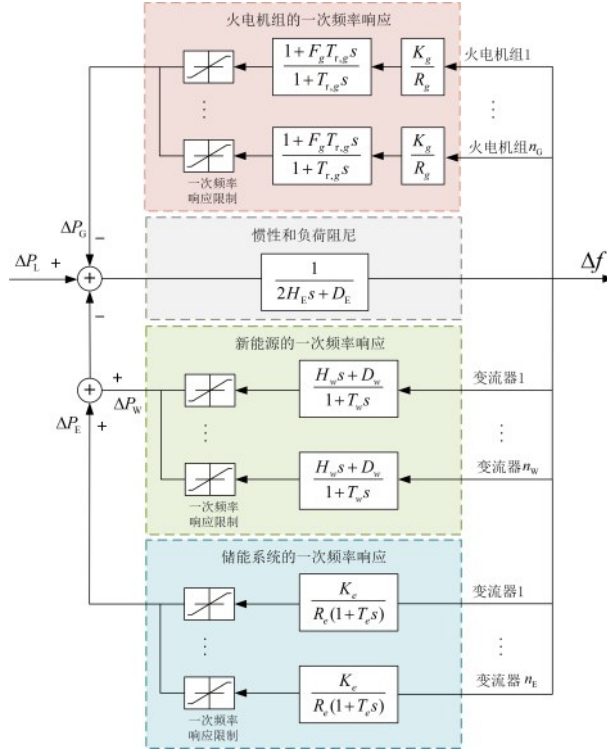


图1 多机系统频率响应模型

Fig. 1 Multi-Machine System Frequency Response Model

$$K_{m,i} = \frac{P_{i,\max}}{S_{B,\text{sys}}} \quad i \in \mathcal{G} \cup \mathcal{R} \cup \mathcal{X} \quad (10)$$

式中： $P_{i,\max}$ 为第 i 个设备的最大响应容量； $S_{B,\text{sys}}$ 为系统基准功率； $\mathcal{G}$ 、 $\mathcal{R}$ 、 $\mathcal{X}$ 分别为火电机组、新能源电场和储能系统的索引集合， $\cup$ 为并集符号。

综合频率下垂系数 κ_i 的定义表达式为

$$\kappa_i = \frac{K_{m,i}}{R_i} \quad (11)$$

式中： $i \in \mathcal{G}$ 时， R_i 为调差系数； $i \in \mathcal{R} \cup \mathcal{X}$ 时， R_i 为等效下垂系数。

占用比例 λ_i 及所有比例之和

$\sum_{i \in \mathcal{G} \cup \mathcal{R} \cup \mathcal{X}} \lambda_i$ 的定义式为

$$\begin{cases} \lambda_i = \frac{\kappa_i}{\sum_{i \in \mathcal{G} \cup \mathcal{R} \cup \mathcal{X}} \kappa_i} \\ \sum_{i \in \mathcal{G} \cup \mathcal{R} \cup \mathcal{X}} \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (12)$$

为了更精确地刻画系统整体惯性水平与调频能力,还需将同步发电机的惯

性常数、最大响应容量与其在频率响应中所处状态进行统一加权整合,从而推导出时变的等效系统惯量。

本文假设系统基准功率等于小时需求,因此阻尼系数在任何时间间隔内始终保持不变。基于此, t 时刻的等效系统惯性常数 $H_{E,t}$ 的计算表达式为

$$H_{E,t} = \frac{1}{\sum_{b \in \mathcal{B}} d_{b,t}} \sum_{g \in \mathcal{G}} H_g P_{g,\max} u_{g,t} \quad (13)$$

$$\frac{1}{R_{T,t}} = \frac{1}{\sum_{b \in \mathcal{B}} d_{b,t}} \left(\sum_{g \in \mathcal{G}} \frac{K_g}{R_g} P_{g,\max} u_{g,t} + \sum_{w \in \mathcal{R}} \frac{1}{R_w} p_{w,t}^f u_{w,t} + \sum_{e \in \mathcal{A}} \frac{1}{R_e'} R_e^{\max} u_{e,t} \right) \quad (14)$$

式中: $u_{w,t}$ 、 $u_{e,t}$ 分别为 t 时刻新能源电场 w 和储能系统 e 是否参与调频的状态; $R_e^{\max}$ 储能系统的最大响应容量。

在此基础上,分别构建 t 时刻等效高压缸功率占比 $F_{H,t}$ 和等效再热时间常数 $T_{R,t}$ 的表达式为

$$T_{R,t} = \frac{1}{\sum_{b \in \mathcal{B}} d_{b,t}} \left(\sum_{g \in \mathcal{G}} \frac{K_g P_{g,\max} T_{r,g}}{R_g} u_{g,t} + \sum_{w \in \mathcal{R}} \frac{p_{w,t}^f T_w}{R_w} u_{w,t} + \sum_{e \in \mathcal{A}} \frac{K_e R_e^{\max} T_e}{R_e'} u_{e,t} \right) \quad (16)$$

综上所述,得到聚合多机系统频率响应模型如图2所示。

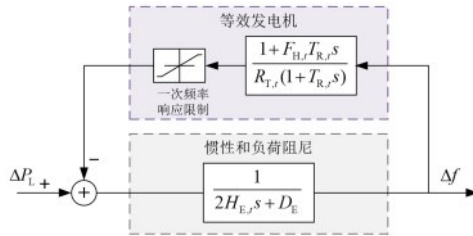


图2 聚合多机系统频率响应模型

Fig. 2 Aggregated Multi-Machine System Frequency Response Model

式中: $P_{g,\max}$ 为火电机组 g 的最大频率响应容量; $\mathcal{B}$ 为同电网母线的索引集合;下标 b 为电网母线索引号; $d_{b,t}$ 为 t 时刻母线 b 的负荷需求; $u_{g,t}$ 为 t 时刻火电机组 g 的是否参与调频的状态。

通过线性叠加的方式构造 t 时刻等效调差系数 $R_{T,t}$ 的倒数,即等效一次调频增益的表达式为

$$\frac{F_{H,t}}{R_{T,t}} = \frac{1}{\sum_{b \in \mathcal{B}} d_{b,t}} \left(\sum_{g \in \mathcal{G}} \frac{K_g P_{g,\max} F_g}{R_g} u_{g,t} + \sum_{w \in \mathcal{R}} \frac{p_{w,t}^f F_w}{R_w} u_{w,t} \right) \quad (15)$$

2 频率安全裕度约束内嵌建模

2.1 频率安全裕度约束

系统频率安全通常由频率变化率、最低点频率及准稳态频率3个指标衡量。其中,最低点频率是防止低频减载的关键约束,须满足

$$f_{\text{nadir}} \geq f_{\min} \quad (17)$$

式中: f_{nadir} 为系统实际发生频率振荡时的频率最低值; $f_{\min}$ 为系统所能容许频率下降的最低值。

为此,本文引入频率安全裕度的概

念^[26]，其定义为：系统在满足频率最低点约束的条件下，所能承受的最大功率扰动。

为求解系统满足频率最低点约束下所能承受的最大不平衡功率 $\Delta \bar{P}_L$ 表达式，需先基于聚合多机系统频率响应模型，推导得到等效多机系统的频率响应模型，其传递函数 $G(s)$ 表达式为

$$G(s) = \frac{\Delta f(s)}{\Delta P_L(s)} = \frac{R_T \omega_0^2 (1 + T_R s)}{(D_E R_T + 1)(s^2 + 2\zeta \omega_0 s + \omega_0^2)} \quad (18)$$

式中： ω_0 为无阻尼自然振荡角频率； ζ 为阻尼比。 ζ 的计算表达式为

$$\begin{cases} \omega_0^2 = \frac{D_E R_T + 1}{2R_T H_E T_R} \\ \zeta = \frac{R_T D_E T_R + 2R_T H_E + F_H T_R}{2(D_E R_T + 1)} \omega_0 \end{cases} \quad (19)$$

时域中 $\Delta f(t)$ 的解析表达式为

$$\Delta f(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ G(s) \frac{\Delta P_L}{s} \right\} = \frac{R_T \Delta P_L}{D_E R_T + 1} (1 + \alpha e^{-\zeta \omega_d t} \sin(\omega_d t + \varphi)) \quad (20)$$

式中： $\mathcal{L}^{-1}$ 表示拉普拉斯反变换； ω_d 为阻尼振荡角频率； α 为幅值系数； φ 为相位角。 ω_d 、 α 、 φ 的计算表达式为

$$\begin{cases} \alpha = \sqrt{\frac{1 - 2T_R \zeta \omega_0 + T_R^2 \omega_0^2}{1 - \zeta^2}} \\ \omega_d = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2} \\ \varphi = \arctan \left(\frac{\omega_d T_R}{1 - T_R \zeta \omega_0} \right) - \arctan \left(\frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{-\zeta} \right) \end{cases} \quad (21)$$

根据频率偏差的计算公式，对式(20)求导得到最大频率偏差 $\Delta f_{\max}$ 及其对应的频率最低点时间 t_{nadir} 表达式如式(22)所示，此时最大频率偏差的决策变量为 $(H_E, F_H, R_T, T_R, D_E)^T$ 。

$$\begin{cases} \Delta f_{\max} = \frac{R_T \Delta \bar{P}_L}{D_E R_T + 1} (1 + \sqrt{1 - \zeta^2} \alpha e^{-\zeta \omega_d t_{\text{nadir}}}) \\ t_{\text{nadir}} = \frac{1}{\omega_d} \arctan \left(\frac{\omega_d T_R}{\zeta \omega_0 T_R - 1} \right) \end{cases} \quad (22)$$

为降低后续线性化约束的变量维度，对决策变量中变化范围较窄的参数作如下的常数化处理。

(1) 由于频率偏差对再热时间常数的敏感性较低^[27]，取等效再热时间常数 T_R 为常数，合理性验证详见附录A。其中，附录A表A1给出了验证算例的设备频率参数及等效权重，并依据附录A式(A1)定义的相对误差指标，对比了多机系统频率响应模型与聚合等效模型在同一扰动下的频率曲线（如附录A图A1所示）；附录A表A2列出两模型关键频率指标的对比及误差；附录A表A3进一步给出再热时间常数取定值时所引入的额外误差，该结果表明该简化假设的误差处于工程可接受范围内。

(2) 系统运行人员通常将阻尼和下垂增益严格限定在较窄的范围内，因此将系统的等效阻尼系数视为常数^[18]。

基于以上处理，最大频率偏差的决策变量简化为 $(H_E, F_H, R_T)^T$ 。

由式(22)可知，在给定的决策变量下，最大频率偏差 $\Delta f_{\max}$ 与最大不平

衡功率 $\Delta \overline{P}_L$ 之间呈线性关系。因此, 可以将最大频率偏差表达式等价转换为最大不平衡功率的表达式

$$\begin{cases} \Delta \overline{P}_L = \Delta f_{\max} g(H_E, F_H, R_T) \\ g(H_E, F_H, R_T) = \frac{DR_T + 1}{R_T \left(1 + \sqrt{1 - \zeta^2} a e^{-\zeta \omega_d t_{\max}}\right)} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $g(H_E, F_H, R_T)$ 为频率安全裕度函数。

由此, 最低点频率约束即可等效转换为频率安全裕度约束, 即对系统实际功率不平衡功率 ΔP_L 的限制为

$$\Delta P_L \leq \Delta \overline{P}_L = \Delta f_{\max} \frac{DR_T + 1}{R_T \left(1 + \sqrt{1 - \zeta^2} a e^{-\zeta \omega_d t_{\max}}\right)} \quad (24)$$

2.2 频率变化率约束

此外, 频率变化率 R^{ROCOF} 作为衡量系统短期惯性支撑能力的重要指标, 在突发扰动初期具有重要意义。频率变化率主要与系统惯量和不平衡功率有关, 计算表达式为

$$R^{\text{ROCOF}} = \partial_t f(t_0^+) = \Delta P_L / (2H_E) \quad (25)$$

式中: ∂_t 为对时间 t 的求导算子; t_0^+ 为

扰动发生初始时刻。

进一步构建频率变化率约束, 频率变化率约束等价于系统惯性要求, 其形式为线性, 可直接嵌入规划模型, 表达式为

$$H_E \geq f \Delta P_L / (2R_{\max}^{\text{ROCOF}}) \quad (26)$$

2.3 线性化频率安全裕度

由于频率安全裕度函数 (式 (24)) 关于决策变量是非线性的, 无法直接嵌入混合整数线性规划模型。为实现线性化, 本文采用分段线性化方法, 构造一组保守的线性超平面来逼近该非线性约束, 以保证线性化后的约束不高于系统实际安全裕度。

根据聚合模型的等效频率参数公式, 通过设定所有机组参与、不参与调频的极端情况, 确定等效参数 $(H_{E,t}, 1/R_{T,t}, F_{H,t}/R_{T,t})$ 的取值范围。

将该参数范围划分为一系列子空间 $A_j (j=1, 2, \dots, N_A)$, 并在每个子空间内生成采样点 $(H_{E,k}, 1/R_{T,k}, F_{H,k}/R_{T,k})$ 。通过求解以下优化模型来寻找最接近函数 $g(H_E, F_H, R_T)$ 的超平面:

$$\begin{cases} \min_{E_k^{\text{Err}} \geq 0} \sum_{k \in A_j} E_k^{\text{Err}} \\ E_k^{\text{Err}} = g(H_{E,k}, F_{H,k}, R_{T,k}) - \left(\beta_j^C + \beta_j^H H_{E,k} + \beta_j^F \frac{F_{H,k}}{R_{T,k}} + \beta_j^R \frac{1}{R_{T,k}} \right) \end{cases} \quad (27)$$

式中: β_j^C 、 β_j^H 、 β_j^F 、 β_j^R 为超平面的系数; E_k^{Err} 为拟合误差; 下标 k 为采样点的序号。

基于以上分析, 可以将非线性频率

安全裕度约束转化为以下线性频率安全裕度约束

$$\Delta P_L \leq (f_0 - f_{\min}) \left(\beta_j^C + \beta_j^H H_{E,t} + \beta_j^F \frac{F_{H,t}}{R_{T,t}} + \beta_j^R \frac{1}{R_{T,t}} \right), \forall j \quad (28)$$

式中: f_0 为系统额定频率; $\forall j$ 表示该约束需对所有子空间对应的线性超平面同时成立。

由于分段线性约束 (28) 比原始约束 (24) 更严格, 因此拟合结果是系统频率安全的充分条件。

3 考虑频率安全约束的储能规划模型

3.1 储能规划模型目标函数

为协调储能规划与系统运行, 本文建立的储能规划模型以储能配置成本 C^{BESS} 与系统运行成本 C^{oper} 的和 C 最小为目标函数, 表达式为

$$\min C = C^{\text{BESS}} + C^{\text{oper}} \quad (29)$$

(1) 储能配置成本

储能配置成本采用全生命周期成本法计算, 并通过资本回收系数折算为等效日成本, 表达式为

$$C^{\text{BESS}} = \sum_{e \in \mathcal{X}} \frac{\beta^{\text{BESS}} C_{\text{inv}}^{\text{BESS}} + C_{\text{om}}^{\text{BESS}}}{365} x_e \quad (30)$$

式中: β^{BESS} 为资本回收系数; $C_{\text{inv}}^{\text{BESS}}$ 、 $C_{\text{om}}^{\text{BESS}}$ 分别为电池储能系统的初始投资成本、运行维护成本; x_e 为储能系统 e 是否参与投建的状态。本文假定所有储能均为候选投建, 其中已投建储能的投建成本设为 0。资本回收系数、初始投资成本和运行维护成本分别为如下式

所示。

$$\beta^{\text{BESS}} = \frac{r^{\text{BESS}} (1 + r^{\text{BESS}})^{y^{\text{BESS}}}}{(1 + r^{\text{BESS}})^{y^{\text{BESS}}} - 1} \quad (31)$$

$$C_{\text{inv}}^{\text{BESS}} = \sum_{e \in \mathcal{X}} (S_e^{\text{BESSN}} C_e^{\text{BESS}} + E_e^{\text{BESSN}} C_e^{\text{BESS}}) \quad (32)$$

$$C_{\text{om}}^{\text{BESS}} = \sum_{e \in \mathcal{X}} S_e^{\text{BESSN}} C_{\text{om}}^{\text{BESS}} \quad (33)$$

其中, r^{BESS} 为年贴现率, y^{BESS} 为运行年限, S_e^{BESSN} 为额定功率, E_e^{BESSN} 为额定容量, C_e^{BESS} 、 $C_{\text{om}}^{\text{BESS}}$ 分别为单位功率成本、单位容量成本。

(2) 系统运行成本

系统运行成本综合考虑了火电机组运行成本 C_q^G 、新能源弃用成本 C_q^{aban} 及负荷损失 C_q^{load} 成本, 并计及多场景的不确定性, 表达式为

$$C^{\text{oper}} = \sum_{\pi_q \in \mathcal{Q}} \pi_q (C_q^G + C_q^{\text{aban}} + C_q^{\text{load}}) \quad (34)$$

式中: 下标 q 为场景序号; π_q 为场景 q 的概率; $\mathcal{Q}$ 为场景概率集。各部分成本分别如下表达式。

$$C_q^G = \sum_{t \in \mathcal{T}} \left[\sum_{g \in \mathcal{G}} C_g^G p_{g,t,q} + \sum_{g \in \mathcal{G}} C_g^{\text{SU}} y_{g,t,q} \right] \quad (35)$$

$$C_q^{\text{aban}} = \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{w \in \mathcal{R}} C_w^R p_{w,t,q}^c \quad (36)$$

$$C_q^{\text{load}} = \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{b \in \mathcal{B}} (C_b^D p_{b,t,q}^{\text{DC}} + C_b^{\text{FD}} p_{b,t,q}^{\text{FD}+} + C_b^{\text{FD}} p_{b,t,q}^{\text{FD}-}) \quad (37)$$

其中, $\mathcal{T}$ 为时间间隔, C_g^G 为火电机组的燃料消耗成本, C_g^{SU} 为火电机组的启动成本, $p_{g,t,q}$ 为火电机组的有功出力, $y_{g,t,q}$ 为火电机组是否启动的状态, C_w^R 为新能源单位弃用成本, C_b^D 为负荷中断成本, C_b^{FD} 为负荷转移成本, $p_{b,t,q}^{\text{DC}}$ 为负荷功率, $p_{b,t,q}^{\text{FD}+}$ 、 $p_{b,t,q}^{\text{FD}-}$ 分别为负荷移入功

率、负荷移出功率。

3.2 约束条件

(1) 系统常规运行约束

系统常规运行约束包括节点功率平衡约束、直流潮流约束、机组组合约束以及新能源电场约束。上述约束均采用电力系统优化中的标准建模形式,具体表达式如附录 B 式 (B1) ~ (B10) 所示。

(2) 储能参与调频约束及运行约束

电池储能系统参与调频的约束分别如下式。电池储能系统总一次调频响应功率的计算表达式为

$$E_{e,t,q} = E_{e,t,q}^c + E_{e,t,q}^d \quad (38)$$

式中: $E_{e,t,q}$ 为总一次调频响应功率;

$$S_{e,t,q}^{\text{SOC}} = S_{e,t,q}^{\text{SOC}} - \underbrace{(E_{e,t,q}^d + r_{e,t,q}^d) \Delta t_p / \eta_e^d}_{1} + \underbrace{\eta_e^c (r_{e,t,q}^c - E_{e,t,q}^c) k_{e,t,q}^c \Delta t_p}_{2} - \underbrace{(E_{e,t,q}^c - r_{e,t,q}^c) k_{e,t,q}^d \Delta t_p / \eta_e^d}_{3} \quad (42)$$

式中: $S_{e,t,q}^{\text{SOC}}$ 、 $S_{e,t,q}^{\text{SOC}}$ 分别为电池储能系统频率响应前、后的储能能量; Δt_p 为一次调频响应持续时间; η_e^d 、 η_e^c 分别为放电、充电效率; $k_{e,t,q}^c$ 、 $k_{e,t,q}^d$ 分别为储能系统是否处于充电、放电调频的状态。此外,式(42)中,1~3 部分指由于频率调节引起的能量变化,部分1对应电池储能系统在正常运行时的放电情况,部分2对应电池储能系统在正常运行和频率调节期间均处于充电状态的情况,部分3对应电池储能系统在正常运行时充电,但在频率调节后转变为放电状态的情况。

$E_{e,t,q}^c$ 、 $E_{e,t,q}^d$ 分别为电池储能系统调频时处于充电、放电状态时提供的向上一次调频响应功率。

充放电状态互斥约束表达式为

$$v_{e,t,q}^d + v_{e,t,q}^c \leq 1 \quad (39)$$

式中: $v_{e,t,q}^d$ 、 $v_{e,t,q}^c$ 分别为储能系统是否处于放电、充电的状态。

规定放电状态和充电状态下,电池储能系统的频率响应功率的范围分别为

$$0 \leq E_{e,t,q}^d \leq (R_{e,t,q}^{\text{d,max}} - r_{e,t,q}^d) v_{e,t,q}^d \quad (40)$$

$$0 \leq E_{e,t,q}^c \leq (R_{e,t,q}^{\text{c,max}} + r_{e,t,q}^c) v_{e,t,q}^c \quad (41)$$

式中: $R_{e,t,q}^{\text{d,max}}$ 、 $R_{e,t,q}^{\text{c,max}}$ 分别为最大放电、充电功率; $r_{e,t,q}^d$ 、 $r_{e,t,q}^c$ 分别为实际放电、充电功率。

电池储能系统正常运行与参与调频后存储的能量之间关联表达式为

调频状态互斥约束表达式为

$$k_{e,t,q}^c + k_{e,t,q}^d \leq 1 \quad (43)$$

储能系统投建状态和调频状态关联约束表达式为

$$u_{e,t,q} \leq x_e \quad (44)$$

式中: $u_{e,t,q}$ 为储能系统是否参与调频的状态。

电池储能系统的运行约束分别如下式。储能系统能量动态平衡约束表达式为

$$S_{e,t,q}^{\text{SOC}} = S_{e,t-1,q}^{\text{SOC}} + (r_{e,t,q}^c \eta_e^c - r_{e,t,q}^d / \eta_e^d) \Delta T \quad (45)$$

式中: ΔT 为充放电时间。

储能系统能量的上、下限为

$$S_{\min,e}^{\text{SOC}} x_e \leq S_e^{\text{SOC}} \leq S_{\max,e}^{\text{SOC}} x_e \quad (46)$$

式中: $S_{\min,e}^{\text{SOC}}$ 和 $S_{\max,e}^{\text{SOC}}$ 分别为最小和最大储能能量;

电池储能系统的充电功率和放电功率进行限制的表达式为

$$\begin{cases} 0 \leq r_{e,t,q}^c \leq R_e^{c,\max} v_{e,t,q}^c \\ 0 \leq r_{e,t,q}^d \leq R_e^{d,\max} v_{e,t,q}^d \end{cases} \quad (47)$$

在典型日的初始和结束时刻, 电池储能系统剩余的能量需要保持一致, 表达式为

$$S_{e,T_0,q}^{\text{SOC}} = S_{e,T_N,q}^{\text{SOC}} \quad (48)$$

式中: $S_{e,T_0,q}^{\text{SOC}}$ 、 $S_{e,T_N,q}^{\text{SOC}}$ 分别为典型日初始、结束时刻电池储能系统的剩余能量。

电池储能系统只有投建才能处于充电状态或放电状态的表达式为

$$\begin{cases} v_{e,t,q}^c \leq x_e \\ v_{e,t,q}^d \leq x_e \end{cases} \quad (49)$$

(3) 频率安全约束

新能源电场、火电机组预设足够的功率裕量, 以保证一次调频响应, 表达式为

$$p_{w,t,q}^c \geq u_{w,t,q} p_{w,t,q}^f \Delta f_{ss,\max} / R_w \quad (50)$$

$$P_{g,\max} - p_{g,t,q} \geq u_{g,t,q} P_{g,\max} \Delta f_{ss,\max} K_g / R_g \quad (51)$$

$$E_{e,t,q} \geq u_{e,t,q} R_e^{\max} \Delta f_{ss,\max} / R'_e \quad (52)$$

式中: $\Delta f_{ss,\max}$ 为准稳态下的最大频率偏差; $u_{w,t,q}$ 、 $u_{g,t,q}$ 、 $u_{e,t,q}$ 分别为新能源、火电机组和储能是否参与调频的状态; $p_{w,t,q}^c$ 、 $p_{w,t,q}^f$ 分别为新能源电场的弃电功率、预测输出功率。

电池储能系统的功率裕量表达式包括频率变化率约束的式 (26)、等效频

率参数计算式 (13) - (15)、以及频率安全裕度约束的式 (28)。

4 算例分析

4.1 算例设置

本章算例在 Python3.9 环境中编程, 调用 Gurobi 12.0.1 求解器进行优化, 在改进的 IEEE-39 节点系统中进行算例分析, 包含 39 条母线、15 座发电厂 (10 座火电厂、3 座风电厂和 2 座光伏厂) 以及 46 条线路。其中, 改进的 IEEE-39 节点系统拓扑结构如附录 C 图 C1 所示; 各电厂基本信息及发电单元等效频率响应参数见附录 C C1, 火电机组基本参数见附录 C 表 C2, 候选储能参数见附录 C 表 C3。

为体现新能源出力的不确定性与随机性, 本文基于某地区全年 8 760 h 的风电与光伏历史逐时出力数据, 采用 K-means 聚类算法对 365 d 的风光联合出力曲线进行聚类分析, 从中选取 4 个典型日作为代表性场景。风电场和光伏场在 4 个典型日的预测功率如图 3 所示, 负荷需求曲线如图 4 所示。

4.2 线性化频率安全裕度约束验证

为验证所构建分段线性化频率安全裕度约束的逼近精度, 本文在参数可行域内选取采样点数为 6×10^4 , 分段线性化超平面与原始非线性曲面之间的平均数值误差为 4.3%。图 5 对比了非线性与分段线性化后的频率安全裕度约束。结

合图示结果表明,线性化约束平面在整体上有效逼近了原始非线性曲面,并始终位于其下方或与之重合。这验证了所采用的保守逼近策略的有效性,确保了线性化模型不会高估系统的实际安全裕度,从而为系统运行提供可靠的安全保障。

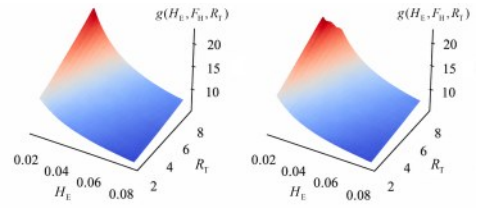


图 5 频率安全裕度约束

Fig. 5 Frequency security margin constraint

(a) 非线性频率 (b) 线性频率

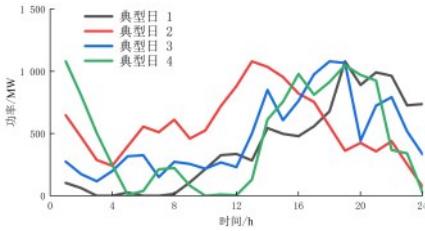
4.3 规划结果

本小节对比4种模型,验证频率安全约束的必要性及储能参与调频的作用。4种模型设置为:

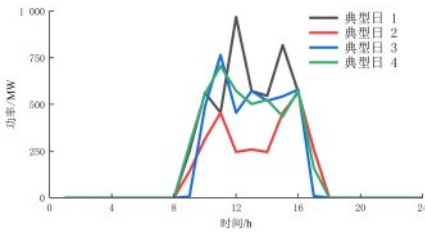
- (1) 模型1为考虑频率安全约束,储能参与调频;
- (2) 模型2为不考虑频率安全约束,储能不参与调频;
- (3) 模型3为考虑频率安全约束,储能不参与调频;
- (4) 模型4为考虑传统安全约束,储能提供扰动后的频率支撑。

其中,模型1和模型3采用的频率安全约束为本文3.2小节所提出的,模型4采用文献[25]提出的基于调速器线性爬坡速率的传统频率约束。

设置系统可承受最大不平衡功率为165 MW,即对各典型日的各时段施加165 MW负荷阶跃扰动,规划结果如表1所示,其中储能投建节点编号为附录图C1中的节点编号。模型1、模型3的频率安全域分别为171.21 MW和166.38 MW,均满足安全阈值;模型2仅为78.31 MW,远不及要求,验证了



(a) 风电场



(b) 光伏场

图 3 新能源在4个典型日的预测出力
Fig. 3 Predicted output of new energy on four typical days

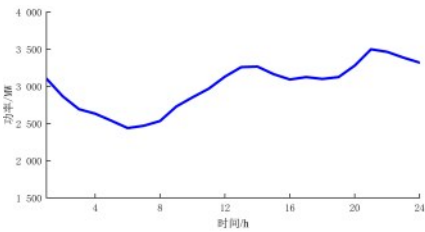


图 4 负荷需求曲线

Fig. 4 Load demand curve

频率安全约束对保证系统频率安全的作用。模型4频率安全域为158.39 MW, 同样未能达到安全阈值, 这表明在本文

定义的频率安全裕度评价指标下, 传统频率约束与系统真实频率安全需求之间仍存在偏差。

表1 4种模型规划结果

Table 1 Planning results of four models

模型	储能投建节点编号	储能配置成本/万元	运行成本/万元	总成本/万元	频率安全域/MW
1	5, 9, 12	17.28	110.73	128.01	171.21
2	13, 20, 23	13.44	79.87	93.31	78.31
3	18, 28, 29, 37	15.16	115.74	130.90	166.38
4	22, 28	7.68	296.08	303.76	158.39

频率安全域采用本文提出的频率安全裕度指标评价。

从经济性角度分析, 模型4的储能配置成本(7.68万元)虽低于模型1(17.28万元), 但运行成本高达296.08万元, 这说明在传统频率约束下, 系统更倾向于依赖常规机组维持频率安全, 未能发挥储能快速调频的经济优势。模型2与模型3对比, 引入频率约束后总成本由93.31万元升至130.90万元, 增量主要来源于运行成本上升, 其原因在于储能不参与调频时系统需更多常规机组出力支撑频率安全。模型1与模型3同样满足频率约束, 但允许储能参与调频后总成本由130.90万元降至128.01万元(降幅为2.2%), 这主要得益于运行成本下降。

由图6对比模型1与模型2在不同典型日的机组出力可知, 模型2以经济性为主导, 系统优先利用风电与光伏出力, 火电机组以平滑方式跟随净负荷, 储能主要执行移峰填谷的能量搬移; 引入频率安全约束后, 系统由经济性最优

转为安全约束下的经济最优, 火电机组出力调整更体现灵活调节属性, 储能在风光出力爬坡与回落等净负荷快速变化时段表现出更积极的充放电响应, 从而在保障频率安全的同时降低对常规机组深度调节的依赖。

4.4 频率安全约束的作用

为验证频率安全约束在模型中的作用及不同约束方法的差异性, 设定系统最大不平衡功率扰动为250 MW。图7为模型1、2、4在典型日下, 运行表现的对比分析。由图可知, 模型1的频率安全域在所有典型日中均稳定维持在安全阈值之上, 且波动幅度较小, 这表明系统通过协调储能与火电机组等多元调频资源, 获得了良好且稳定的动态频率响应能力。未考虑频率约束的模型2, 其频率安全域显著低于安全要求, 这表明了在规划中引入频率约束的必要性。采用传统频率约束的模型4, 波动明显

且在多个时段跌破安全阈值,这反映出传统频率约束在高比例新能源、多源调频场景下对系统时变频率安全边界刻画能力的有限性。相较于模型4,在不同典型日下呈现出一致的频率安全域波动特征,模型1能够表现出差异化的变化趋势,这说明本文所提模型能够更充分表征风、光出力波动和运行工况变化引起的系统时变频率安全边界特性。

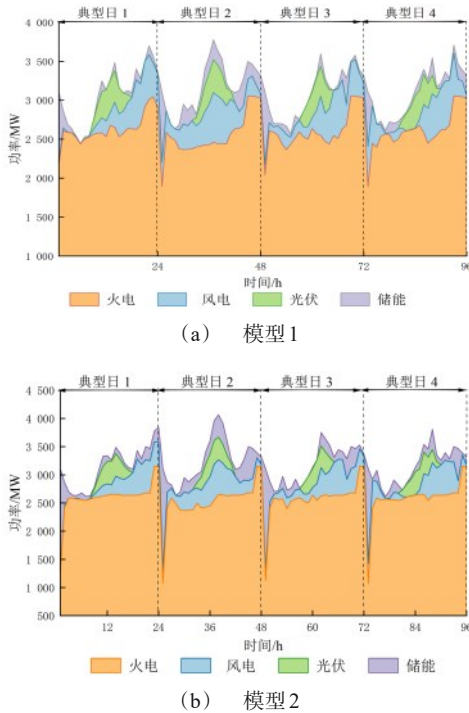


图6 模型1和模型2的机组出力

Fig. 6 Unit output of model 1 and model 2

图8进一步对比了模型1和模型2在遭受扰动后的频率动态。在典型日特定时段,模型2在扰动后,频率迅速跌至49.22 Hz,远超49.5 Hz的安全底线,

这反映出系统一次调频能力严重不足。而模型1则能将最低频率维持在49.54 Hz,始终处于安全区间内,并表现出更快的振荡衰减特性与恢复能力,系统在约20 s内便回升至准稳态水平。结果表明,频率约束有效提升了储能及同步机组的协同调频响应能力,使系统在扰动下能够快速抑制频率偏移。

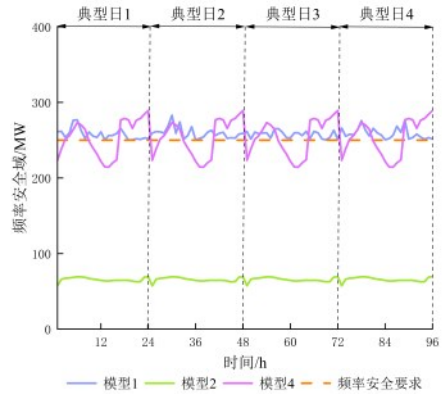


图7 3种模型的系统频率安全域对比
Fig. 7 Comparison of system frequency security margins among three models

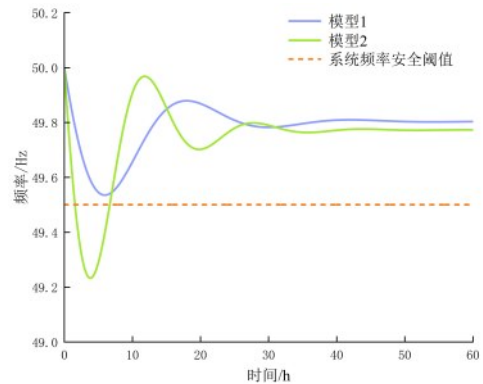


图8 2种模型的频率动态对比
Fig. 8 Comparison of frequency dynamics between two models

4.5 新能源渗透率对规划结果的影响

为探究新能源渗透率对规划方案的影响,设置了从10%至60%的不同新能源占比情景进行分析。如表2所示,随着新能源渗透率的提升,为保障系统

动态安全所需的储能配置容量与投资成本的显著增加。在低渗透率下,系统仅需少量储能即可满足频率安全需求;而当渗透率达到60%时,储能站点的数量与总投资成本均大幅攀升,以弥补常规同步机组退出所造成的系统惯量与调频能力缺口。

表2 不同新能源占比下的储能规划结果

Table 2 Energy storage planning results under different renewable energy penetration levels

新能源占比/%	储能投建节点编号	储能配置成本/万元
10	25	3.84
20	9, 20	9.60
30	5, 9, 12	17.28
40	5, 6, 9, 12, 26	26.88
50	2, 5, 6, 9, 12, 20, 21	36.48
60	1, 2, 5, 6, 8, 9, 10, 12, 20, 26	53.76

图9进一步揭示了不同渗透率下系统总成本与频率安全域的变化趋势。一方面,系统总成本随新能源占比的提高而下降,这主要得益于新能源发电近乎为0的边际运行成本,有效降低了系统的整体运营开销。另一方面,频率安全域呈现出明显的收缩趋势,反映出高比例新能源的接入削弱了系统的频率响应能力。尽管如此,在所提出的规划模型中,由于频率约束的强制作用,各场景下的频率安全域始终维持在165 MW的安全阈值之上。这表明,模型通过合理增加储能配置成本,减小了因新能源占比提高而引发的频率安全风险,在提升系统经济性的同时,确保了其动态安全性能。

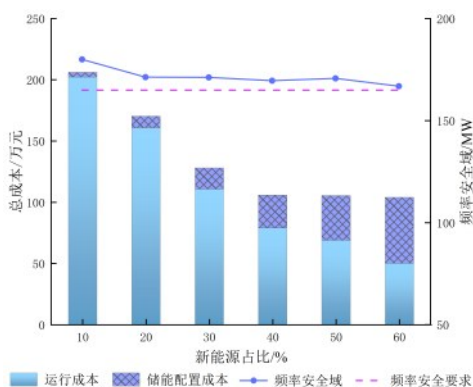


图9 不同新能源占比下的总成本和频率安全域

Fig. 9 Total cost and frequency security region under different renewable energy penetration levels

4.6 储能老化特性的影响

本小节分析电池老化特性对储能规

划的影响,假设容量衰减完整充放电循环次数呈线性关系。若 N_e^{Cyc} 为储能系统 e 在全生命周期内的最大完整充放电循环次数,则场景 q 下的老化成本 $C_{e,q}^{\text{Deg}}$ 可表示为

$$C_{e,q}^{\text{Deg}} = \sum_{t \in T} \frac{1}{N_e^{\text{Cyc}}} C_e^{\text{BESS}} (r_{e,t,q}^{\text{d}} + E_{e,t,q}^{\text{d}}) \Delta T \quad (53)$$

为防止储能提前老化,年老化成本

应小于年均投资成本:

$$\sum_{q \in Q} \pi_q C_{e,q}^{\text{Deg}} \leq \gamma^{\text{Degr}} \frac{\rho^{\text{BESS}} C_e^{\text{BESS}}}{365} x_e \quad (54)$$

式中: γ^{Degr} 为控制电池最大运行老化程度参数。

取循环次数 N_e^{Cyc} 为4 500,表3给出了不同 γ^{Degr} 下的储能规划结果。

表3 电池老化特性对储能规划的影响

Table 3 Impact of battery aging characteristics on energy storage planning

老化程度	储能投建节点编号	储能配置成本/万元	运行成本/万元	总成本/万元
不考虑老化	5, 9, 12	17.28	110.73	128.01
$\gamma^{\text{Degr}}=1.0$	5, 9, 12	17.28	110.73	128.01
$\gamma^{\text{Degr}}=0.8$	7, 10, 11, 25	21.12	112.05	133.17
$\gamma^{\text{Degr}}=0.6$	2, 7, 9, 14, 25	24.96	114.52	139.48

由表3可知,当 $\gamma^{\text{Degr}}=1$ 时,规划结果与不考虑衰减时一致,这表明在线性容量衰减假设下,未考虑老化时的储能使用方式不会缩短其使用寿命。而当储能使用进一步受限时,储能配置成本和运行成本分别增加。 γ^{Degr} 分别为0.8和0.6时,投资的储能系统台数由3分别增加至4和5,老化约束对单台储能循环深度的限制将通过增加储能的投资来补偿。

5 结论

面向高比例新能源电力系统中异构调频资源频率响应难以统一表征、非线性

性频率安全约束难以嵌入储能规划模型的问题,本文提出了一种计及多元调频资源与频率安全的储能规划方法。算例结果表明,所提方法能够较好地刻画多元调频资源共同作用下的系统频率动态特性;所采用的线性化处理平均误差仅为4.3%,在保证安全性的同时具有较好的精度。与传统频率约束模型相比,本文方法能够更准确地反映高比例新能源场景下系统时变频率的安全边界:在165 MW扰动下,本文方法的频率安全域达171.21 MW,而不计频率约束的模型仅为78.31 MW,传统约束模型也仅为158.39 MW。

进一步,改进IEEE-39节点系统算例验证储能参与调频不仅有助于提升频

率安全水平,而且能够改善系统经济性。在满足频率安全约束的条件下,允许储能参与调频后,系统总成本由130.90万元降至128.01万元,降幅为2.2%。敏感性分析表明,随着新能源占比由10%提升至60%,储能配置成本由3.84万元增至53.76万元;随储能老化程度加深,投建台数由3台增至5台、总成本升至139.48万元。这说明为维持既定频率的安全要求,频率安全约束与寿命因素均会对储能规划结果产生重要影响。综上所述,本文所提方法能够为高比例新能源电力系统中兼顾安全性与经济性的储能配置提供一种有效思路。

未来研究中,应采用更加高效求解算法,纳入更多典型日以更精准的描述新能源出力的不确定性;在储能老化建模方面,后续可引入考虑充放电倍率、放电深度和温度等多因素耦合的非线性退化模型,以进一步提升储能寿命评估与规划决策的精度。

参考文献

- [1] 辛保安,单葆国,李琰慧,等. “双碳”目标下“能源三要素”再思考[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3117-3126.
- XIN B, SHAN B, LI Q, et al. Rethinking the “Three Elements of Energy” under the “Dual Carbon” Goal [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2022, 42(9): 3117-3126.
- [2] 谢小荣,贺静波,毛航银,等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461-475.
- XIE X, HE J, MAO H, et al. New stability issues and classification discussion of “high-proportion renewable and high-power electronics” power systems [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2021, 41(2): 461-475.
- [3] 曹永吉,张恒旭,施啸寒,等. 规模化分布式能源参与大电网安全稳定控制的机制初探[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(18): 1-8.
- CAO Y, ZHANG H, SHI X, et al. Preliminary study on the mechanism of large-scale distributed energy participating in power grid security and stability control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(18): 1-8.
- [4] 马宁嘉,谢小荣,李浩志,等. 计及频率动态分布性的新能源机组惯量需求分析[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(9): 3500-3508.
- MA N, XIE X, LI H, et al. Inertia requirement analysis of renewable energy units considering dynamic frequency distribution [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2024, 44(9): 3500-3508.
- [5] ZHANG Y, ZHAO C, TANG W, 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.
- [6] SABOORI H, HEMMATI R, GHIASI S M S, et al. Energy storage planning in electric power distribution networks - A state-of-the-art review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 79: 1108-1121.

- [7] STERGIOTIS K, MAKRIS P, TSAOUSOGLOU G, et al. Co-Optimization of Distributed Renewable Energy and Storage Investment Decisions in a TSO-DSO Coordination Framework [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(5): 4515-4529.
- [8] SEHLOFF D, KWON J, MEHRTASH M, et al. Assessing the Reliability Benefits of Energy Storage as a Transmission Asset [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2025, 61(1): 994-1005.
- [9] XIONG P, SINGH C. Optimal Planning of Storage in Power Systems Integrated With Wind Power Generation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(1): 232-240.
- [10] 黄翰锟, 王秀丽, 张恒源, 等. 独立储能参与的电能量和全过程调频市场联合出清模型[J]. 西安交通大学学报, 2025, 59(1): 17-27.
- HUANG H, WANG X, ZHANG H, et al. Joint clearing model of energy and whole-process frequency regulation market with participation of independent energy storage [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2025, 59(1): 17-27.
- [11] XU T, SUN J, MENG H, et al. Frequency regulation market participation of distributed energy storage systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2025, 172: 111099.
- [12] NGUYEN N, ALMASABI S, BERA A, et al. Optimal Power Flow Incorporating Frequency Security Constraint[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(6): 6508-6516.
- [13] LEE Y Y, BALDICK R. A Frequency-Constrained Stochastic Economic Dispatch Model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2301-2312.
- [14] TENG F, TROVATO V, STRBAC G. Stochastic Scheduling With Inertia-Dependent Fast Frequency Response Requirements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1557-1566.
- [15] 张振宇, 张钢, 栗龙轩, 等. 参与一次调频的新能源发电并网系统振荡机理分析与参数优化配置[J]. 西安交通大学学报, 2025, 59(3): 124-134.
- ZHANG Z, ZHANG G, LI L, et al. Analysis of oscillation mechanism and parameter optimization configuration of grid-connected renewable energy system participating in primary frequency regulation [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2025, 59(3): 124-134.
- [16] ZHANG G, ELA E, WANG Q. Market Scheduling and Pricing for Primary and Secondary Frequency Reserve[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 2914-2924.
- [17] RABBANIFAR P, JADID S. Stochastic multi-objective security-constrained market-clearing considering static frequency of power system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 54: 465-480.
- [18] HAO L, JI J, XIE D, et al. Scenario-based Unit Commitment Optimization for Power System with Large-scale Wind Power Participating in Primary Frequency Regulation[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 8(6): 1259-1267.
- [19] SHI Q, LI F, CUI H. Analytical Method to Aggregate Multi-Machine SFR Model With Applications in Power System Dynamic Studies[J]. IEEE Transactions on

- Power Systems, 2018, 33(6): 6355-6367.
- [20] MALEKPOUR M, KIYOU MARSİ A, GHOLİPOUR M. Analytical system frequency response model with virtual synchronous wind turbines[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2021, 15(18): 2618-2631.
- [21] ZHANG J, XUE Y, TANG Y, et al. Equivalent system frequency response model with energy storage[J]. Electric Power Systems Research, 2025, 239: 111211.
- [22] LI J, QIAO Y, LU Z, et al. Integrated Frequency-constrained Scheduling Considering Coordination of Frequency Regulation Capabilities from Multi-source Converters[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2024, 12(1): 261-274.
- [23] 王建波, 孙冉, 刘忠凯, 等. 面向储能辅助火电机组一次调频的深度强化学习控制策略[J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(6): 186-192.
- WANG J, SUN R, LIU Z, et al. Deep reinforcement learning control strategy for energy storage-assisted thermal power unit primary frequency regulation [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(6): 186-192.
- [24] CARRIÓN M, DVORKIN Y, PANDŽIĆ H. Primary Frequency Response in Capacity Expansion With Energy Storage[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 1824-1835.
- [25] YAN S, ZHENG Y, HILL D J. Frequency Constrained Optimal Siting and Sizing of Energy Storage[J]. IEEE Access, 2019, 7: 91785-91798.
- [26] ZHANG Z, ZHANG N, KANG C. Modeling Frequency Dynamics in Unit Commitment with a High Share of Renewable Energy[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(6): 4383-4395.
- [27] AHMADI H, GHASEMI H. Security-Constrained Unit Commitment With Linearized System Frequency Limit Constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1536-1545.