

引用格式:孙建华,王佳旭,杜晓勇,等.考虑频率安全约束的高比例风电电力系统储能优化配置策略[J].电力科学与技术学报,2024,39(5):151-162.

Citation:SUN Jianhua,WANG Jiayu,DU Xiaoyong, et al.Energy storage optimal configuration strategy of high proportion wind power system considering frequency security constraints[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2024,39(5):151-162.

考虑频率安全约束的高比例风电电力系统 储能优化配置策略

孙建华¹, 王佳旭², 杜晓勇¹, 田春笋³, 秦军伟¹,
郭长辉¹, 王廷涛², 苗世洪²

(1. 国网河南省电力公司, 河南 郑州 450000; 2. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074;
3. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052)

摘要:近年来,具有强不确定性、弱支撑能力的风电机组大规模并网,给电力系统的频率安全造成严重冲击。为提升高比例风电的电力系统稳定运行的能力,提出一种考虑频率安全约束的储能优化配置策略。首先,推导了高比例风电电力系统多主体频率响应表达式,建立全系统动态频率响应模型;其次,以电力系统年总成本值最小化为目标,建立上层储能容量优化配置模型,以系统日前调度成本最小化为目标,构建考虑频率安全约束的下层典型日优化调度模型,并采用改进粒子群算法对该双层模型进行求解;最后,基于改进 IEEE 39 节点系统进行算例分析。研究表明:该策略可以保证电力系统稳定而充裕的调频资源,在满足频率安全约束的同时,有效改善电力系统运行的经济性。

关键词:高比例风电;频率调整;储能电站;优化配置

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.05.016 中图分类号:TM732 文章编号:1673-9140(2024)05-0151-12

Optimization strategy for energy storage configuration in high proportion wind power system considering frequency safety constraints

SUN Jianhua¹, WANG Jiayu², DU Xiaoyong¹, TIAN Chunsun³, QIN Junwei¹,
GUO Changhui¹, WANG Tingtao², MIAO Shihong²

(1.State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450000, China; 2.School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2.Electric Power Research Institute, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: In recent years, the large-scale integration of wind turbines, characterized by strong uncertainty and weak support capability, has posed significant challenges to the frequency security of power systems. To enhance the stable operation capability of power systems with a high proportion of wind power, this paper proposes an optimal energy storage allocation strategy considering frequency security constraints. Firstly, the multi-agent frequency response expression for power systems with a high proportion of wind power is derived, and a dynamic frequency response model for the entire system is established. Secondly, aiming to minimize the annual total cost of the power system, an upper-level optimal energy storage capacity allocation model is formulated. With the objective of minimizing the day-ahead scheduling cost of the system, a lower-level typical daily optimal scheduling model considering frequency security constraints is constructed. An improved particle swarm optimization algorithm is adopted to solve this bi-level model. Finally, a case study is conducted based on a modified IEEE 39-bus system. The research results indicate that this

收稿日期:2024-01-03;修回日期:2024-03-19

基金项目:国网河南省电力公司科技项目(52170223000D)

通信作者:王佳旭(2000—),男,硕士研究生,主要从事电力系统优化规划与运行等方面的研究;E-mail:wjx2022@hust.edu.cn

strategy can ensure stable and adequate frequency regulation resources for the power system, effectively improving the economic performance of power system operation while satisfying frequency security constraints.

Key words: high proportion of wind power; frequency regulation; energy storage power station; optimized configuration

随着中国“双碳”战略目标的持续稳步推进,以风电为代表的新能源装机容量不断攀升,截至2023年6月底,中国风电装机容量达到3.9亿千瓦^[1]。然而,随着高比例风电的接入,电力系统的频率安全面临着严峻挑战:一方面,风电转动惯量低、调频性能差,难以提供足够的频率支撑能力;另一方面,高比例风电接入电网挤占了传统同步机的发电区间,降低了电网频率安全水平^[2]。为有效应对这些问题与挑战,在电网侧配置合适的储能电站,可提高电力系统的灵活性与消纳能力。此外,在制定电力调度计划时,考虑动态频率安全约束,有助于进一步提高电网频率安全水平,保障电力系统安全、优质、经济地运行^[3-4]。

目前,学者们对电网侧储能的容量优化配置问题开展了大量研究,为高比例风电电力系统的建设与改造提供了重要参考。文献[5]针对大规模风电接入的电力系统,提出了一种混合储能优化配置与运行方法,该方法大幅改善了风电出力特性与系统运行经济性,为电网侧建设储能提供了思路。文献[6]考虑风光资源的时空互补特性,分析了新能源资源、电站数量等多重因素对储能配置的影响,有效降低了储能投资成本。文献[7-8]针对新能源高占比的电力系统,在储能优化配置问题中考虑弃电率约束,有效提高了新能源消纳率。文献[9]面向新型电力系统提出了多应用场景下分布式储能的配置流程,阐明了典型优化算法的适用性,在算法层面为解决配置问题提供了理论支撑。但这些研究仅从考虑系统运行约束方面进行储能优化配置,未引入具体的频率安全约束,无法量化评价系统的频率安全能力,也无法解决风电高占比的电力系统存在的低惯量问题。因此,有必要进一步开展考虑频率稳定的储能优化配置研究。

在面向高比例风电电力系统的研究中,已有部分文献考虑频率安全需求。文献[10-12]考虑频率变化率及频率最大偏差约束,构建了系统频率动态响应数学模型,提出了风电高占比的电力系统的最小惯量评估方法,为系统优化调度提供了理论支撑。文献[13-14]在优化调度模型中考虑了新能源

机组的调频作用,提高了系统的主动响应能力。文献[15-16]考虑机组频率响应特性,提出一种鲁棒区间滚动优化调度模型,该模型定量地描述了风电预测误差与电力系统频率波动大小的关系。文献[17-18]提出了火电机组调速器等效降阶方法与最大频差双层求解方法,建立了考虑动态频率响应约束的机组组合模型,有效降低了模型求解难度。在此基础上,文献[19]考虑高比例风电电力系统中不同类型的功率扰动,建立了考虑频率安全约束的电力系统日前一日内联合调度模型,该模型能合理安排调度计划,有效提高频率安全水平。高比例风电电力系统具有转动惯量低、调频能力弱、不确定性强等特点。这些研究在优化调度、惯量评估等领域考虑动态频率响应约束,有助于提高电力系统的频率安全水平。然而,目前鲜有文献对电力系统频率稳定的储能优化配置问题开展研究。作为新型电力系统规划建设的关键一环,储能电站容量配置是否合理,直接决定了电网在运行阶段能否具备足够的频率响应能力与良好的运行经济成本。因此,有必要深入探究频率安全约束的储能容量优化配置策略,以提升高比例风电电力系统的频率安全性与运行经济性。

针对这些问题,本文提出了一种考虑频率安全约束的高比例风电电力系统储能优化配置策略。首先,建立高比例风电电力系统动态频率响应模型;其次,以系统年总成本最小化为目标,建立上层储能容量优化配置模型,以系统日前调度成本最小化为目标,构建考虑频率安全约束的下层典型日优化调度模型;最后,基于改进IEEE 39节点系统进行算例分析,验证所建模型在储能优化配置与频率安全方面的有效性。

1 高比例风电电力系统频率响应模型

本文以图1所示考虑高比例风电接入的电力系统开展容量优化配置研究。在图1中,风电场和储能电站通过变流器接入电网,并由控制器对其进行功率调控。优化配置过程将忽略线路阻抗引起的损耗。

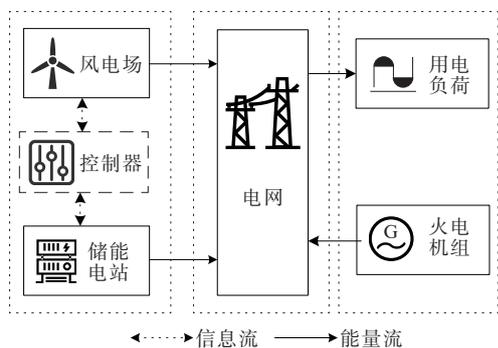


图 1 高比例风电电力系统架构

Figure 1 Architecture of power system with high proportion of wind power

1.1 系统动态频率响应模型

风电场与储能电站应具备快速控制自身有功功率,提供惯量响应和一次调频的功能^[20]。故本文主要考虑火电机组、风电场和储能电站的调频作用,建立了如图 2 所示的高比例风电电力系统动态频率响应模型。

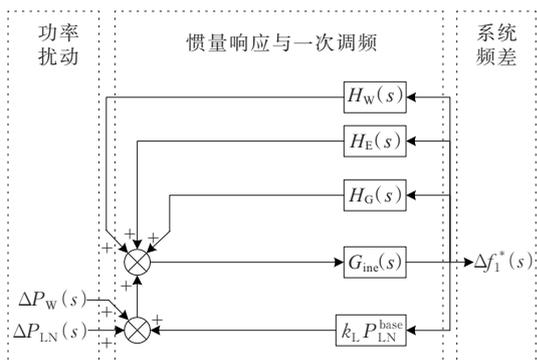


图 2 整体频率响应模型

Figure 2 Overall frequency response model

在图 2 中, s 为复频域自变量; $\Delta P_w(s)$ 、 $\Delta P_{LN}(s)$ 分别为风电扰动和额定频率下的负荷扰动; $H_w(s)$ 、 $H_E(s)$ 、 $H_G(s)$ 分别为风电场、储能电站和火电机组的传递函数; $G_{me}(s)$ 为系统惯性响应传递函数; k_L 为负荷频率调节系数; P_{LN}^{base} 为额定频率情况下的负荷值; $\Delta f_1^*(s)$ 为系统频率变化量的标么值。

1.1.1 火电机组的惯量响应传递函数

该函数表达式为

$$G_{ine}^{(s)} = \frac{1}{2(Hs + D)} \quad (1)$$

式中, H 为发电机惯性时间常数; D 为发电机阻尼系数。

1.1.2 火电机组调速系统响应传递模型

该模型为

$$\begin{cases} H_G(s) = -\frac{(K_G^P + K_G^I/s)\Delta f_1^*(s)}{1 + \mu_G(K_G^P + K_G^I/s)} \\ K_G^P = \frac{F_{HP}}{\mu_G(1 - F_{HP})} \\ K_G^I = \frac{1}{\mu_G T_R(1 - F_{HP})} \end{cases} \quad (2)$$

式中, K_G^P 、 K_G^I 分别为火电机组频率响应比例系数与积分系数; μ_G 为火电机组的调差系数; F_{HP} 为高压涡轮级功率占汽轮机总功率的比例系数; T_R 为再热器时间常数。

1.1.3 负荷动态频率响应函数 $\Delta P_L^*(t)$

该函数表达式为

$$\begin{cases} \Delta P_L^*(t) = \Delta P_{LN}^*(t) + k_L \Delta f^*(t) \\ k_L = \sum_{j=0}^{N_L} j a_j \end{cases} \quad (3)$$

式中, ΔP_L^* 为负荷实际波动量的标么值; ΔP_{LN}^* 为额定频率下负荷波动量的标么值; a_j 为系统内与频率的 j 次方 ($j=0, 1, 2, \dots, N_L$) 成正比的负荷所占的比重; N_L 为负荷所正比的频率最大幂值。

1.1.4 风电场动态频率响应传递函数

根据《风电场接入电力系统技术规定第 1 部分: 陆上风电》(GB-T 19963.1—2021) 的要求, 风力发电应具备快速控制自身有功功率与一次调频的功能, 能提供惯量响应, 且能将其惯量响应和一次调频配合使用, 以实现有功功率的连续平滑调节。风电动态频率响应传递函数 $H_W(s)$ 为

$$\begin{cases} H_W(s) = -(K_{W1} + sK_{W2}) \\ K_{W1} = K_{Wf}/f_N \\ K_{W2} = T_{WJ}/f_N \end{cases} \quad (4)$$

式中, K_{W1} 和 K_{W2} 分别为风电场一次调频系数和惯量响应系数; K_{Wf} 为风电场有功调频系数; T_{WJ} 为风电场等效惯性时间常数^[19]; f_N 为电网额定频率。

1.1.5 储能电站动态频率响应传递函数

根据《电化学储能电站并网运行与控制技术规范》(DL/T 2246.7—2021) 的要求, 电化学储能能实现有功功率的连续平滑调节, 惯量支撑, 阻尼控制和自主参与电力系统快速调频的能力。电化学储能电站动态频率响应传递函数 $H_E(s)$ 为

$$\begin{cases} H_E(s) = -(K_{E1} + sK_{E2}) \\ K_{E1} = K_{Ef}/f_N \\ K_{E2} = T_{EJ}/f_N \end{cases} \quad (5)$$

式中, K_{E1} 和 K_{E2} 分别为电化学储能一次调频系数和惯量响应系数; K_{Ef} 为电化学储能有功调频系数; T_{EJ}

为电化学储能等效惯性时间常数^[22]。

综上所述,高比例风电电力系统动态频率响应模型的传递函数 $\Delta f_i^*(s)$ 为

$$\Delta f_i^*(s) = \frac{G_{ine}(s)(\Delta P_W(s) + \Delta P_{LN}(s))}{\left(1 - G_{ine}(s)(H_W(s) + H_E(s) + H_G(s) + k_L P_{LN}^{base})\right)} \quad (6)$$

1.2 动态频率响应指标计算

电力系统动态频率响应指标主要包括最大频率变化率 $R_{OCOF, \max}$ 、稳态频差 Δf_{std} 与最大频差 Δf_{\max} 。它们可用来衡量电力系统抵御功率扰动的能力^[19]。系统受扰后动态频率响应曲线如图3所示。

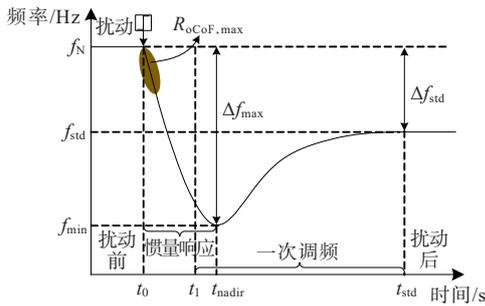


图3 电力系统受扰动后动态频率响应曲线

Figure 3 Dynamic frequency response curve of power system after disturbance

图3中, f_{std} 为系统频率稳定值; f_{min} 为系统受扰后频率最小值; t_0 、 t_1 、 t_{nadir} 、 t_{std} 分别为扰动发生时刻、调速器动作时刻、频率最小时刻与频率恢复时间。为求解动态频率响应指标,先要对 $H_G(s)$ 进行等效降阶处理,将系统调速器群体等效为一个相同形式的虚拟调速器,保持两者响应特性相同^[18]。由于风电场与储能电站传递函数具有相似性,可再对 $H_W(s)$ 与 $H_E(s)$ 进行合并简化处理。等效后得到的全系统整体频率响应模型如图4所示。

对应的传递函数 $\Delta f_2^*(s)$ 为

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta f_2^*(s) &= -\frac{P_{LW}}{k_G s} \cdot \frac{s + \lambda}{(s + \alpha)^2 + (\beta - \alpha)^2} \\ k_G &= 2 \sum_{i=1}^{N_G} u_i^G \cdot P_{N,i}^G \cdot H_i^G + K_{WE2} \\ \lambda &= \frac{\mu_{equ} K_{equ}^1}{1 + \mu_{equ} K_{equ}^P} \\ \alpha &= \frac{k_G \mu_{equ} K_{equ}^1 + K_{equ}^P}{2k_G (1 + \mu_{equ} K_{equ}^P)} + \frac{(k_L P_{LN}^{base} + K_{WE1})}{2k_G} \\ \beta &= \frac{(k_L P_{LN}^{base} + K_{WE1}) \mu_{equ} K_{equ}^1 + K_{equ}^1}{k_G (1 + \mu_{equ} K_{equ}^P)} \end{aligned} \right. \quad (7)$$

式中, k_G 为系统等效惯性系数; u_i^G 为火电机组的启停状态($u_i^G = 1$,机组开机; $u_i^G = 0$,机组停机); $P_{N,i}^G$

为火电机组 i 的额定功率; H_i^G 为火电机组的惯性时间常数; N_G 为火电机组总数; λ 、 α 、 β 均为系统动态频率响应模型传递函数的变换系数; P_{LW} 为风电与负荷的阶跃波动功率总和; μ_{equ} 、 K_{equ}^P 、 K_{equ}^1 分别为火电机组等效调差、比例、积分系数; K_{WE1} 、 K_{WE2} 分别为风储一次调频系数和惯量响应系数,其应满足关系式:

$$\left\{ \begin{aligned} H_{WE}(s) &= K_{WE1} + sK_{WE2} \\ K_{WE1} &= P_W K_{W1} + P_{EN} K_{E1} \\ K_{WE2} &= P_W K_{W2} + P_{EN} K_{E2} \end{aligned} \right. \quad (8)$$

式中, $H_{WE}(s)$ 为风联合传递函数; P_W 为风电有功功率; P_{EN} 为储电站额定功率。

对式(7)进行拉普拉斯反变换,可以得到最大频率变化率 $R_{OCOF, \max}$ 、稳态频差 Δf_{std} 与最大频差 Δf_{\max} 的解析式,详见文献[119],在此不再赘述。

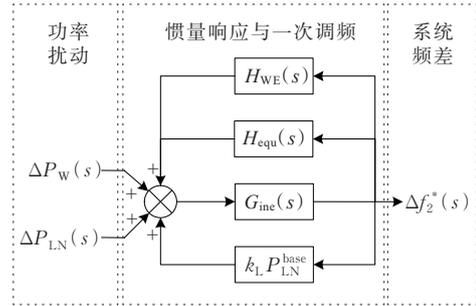


图4 等效频率响应模型

Figure 4 Equivalent frequency response model

2 储能电站优化配置模型

储能电站优化配置模型分为上、下两层,上层容量优化配置模型以系统总成本年最小为目标,产生配置结果传递给下层模型,下层典型日优化调度模型以系统日前调度成本最小为目标,求解系统在各典型日下的调度结果,并将相应的运行参数传递给上层。双层模型反复迭代得到最终的优化结果。

2.1 上层容量优化配置模型

上层模型用于实现储能电站的容量优化配置,决策变量包括储能电站的规划容量和额定功率。

2.1.1 上层目标函数

上层模型以储能等年值投资成本和系统年运行成本最小为目标函数。储能投资成本主要包括储能安装成本、更新成本和运维成本;考虑到季节风力资源和负荷需求情况的不同,本文分别求取各季节典型日的运行成本,之后经过加权计算得到年运行成本。具体目标函数表达式为

$$\min C = \frac{r(1+r)^{T_r}(C_{ins} + C_{rep})}{(1+r)^{T_r} - 1} + C_{om} + C_{op} \quad (9)$$

$$\begin{cases} C_{\text{ins}} = \sum_{i=1}^{N_E} (\xi_E E_i^{E,N} + \xi_P P_i^{E,N}) \\ C_{\text{rep}} = \sum_{k=1}^{\rho} \frac{C_{\text{ins}}}{(1+r)^k T^{\text{ESS}}} \\ C_{\text{om}} = \sum_{i=1}^{N_E} \zeta_{\text{fix}} P_i^{E,N} + 365 \zeta_{\text{var}} \sum_{t=1}^T |P_{i,t}^E| \end{cases} \quad (10)$$

式(9)、(10)中, C 、 C_{ins} 、 C_{rep} 、 C_{om} 和 C_{op} 分别为系统每年的总成本、安装成本、更新成本、年维护成本和年运行成本; r 为折现率; T_p 为工程寿命; N_E 为储能电站的数量; ξ_E 与 ξ_P 分别为储能设备的单位容量成本和单位功率成本; $E_i^{E,N}$ 、 $P_i^{E,N}$ 分别为储能电站 i 的配置容量和配置功率; ρ 为储能设备需要进行更新的次数; T^{ESS} 为储能设备寿命; ζ_{fix} 和 ζ_{var} 分别为储能设备的单位固定运维成本和单位可变运维成本; T 为调度时段数; $P_{i,t}^E$ 为 t 时段储能电站 i 的充、放电功率;

2.1.2 上层约束条件

由于实际场地和经济成本等情况限制, 储能系统的功率和容量约束为

$$\begin{cases} E_i^{E,\min} \leq E_i^{E,N} \leq E_i^{E,\max} \\ P_i^{E,\min} \leq P_i^{E,N} \leq P_i^{E,\max} \end{cases} \quad (11)$$

式中, $E_i^{E,\max}$ 、 $E_i^{E,\min}$ 分别为储能电站 i 配置容量的上、下限; $P_i^{E,\max}$ 、 $P_i^{E,\min}$ 分别为储能电站 i 功率的上、下限。

2.2 下层典型日优化调度模型

下层模型基于上层模型的配置结果, 以系统日前调度成本最低为目标函数, 求解系统在各典型日下的调度结果, 并将相应的运行参数传递给上层。下层模型的决策变量包括系统内火电机组、储能电站、风电场的启停状态和计划出力。

2.2.1 下层目标函数

下层模型的优化目标为系统日前运行成本最低, 即

$$\begin{cases} \min C_{\text{op,d}} = C_{G,r} + C_{G,\text{re}} + C_{G,\text{ss}} + C_{W,w} \\ C_{G,r} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} (a_i^G P_{i,t}^G \Delta t_{15} + b_i^G u_{i,t}^G) \\ C_{G,\text{re}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} (c_i^G R_{i,t}^{G,+} + d_i^G R_{i,t}^{G,-}) \Delta t_{15} \\ C_{G,\text{ss}} = \sum_{t=1}^{T-1} \sum_{i=1}^{N_G} \frac{e_i^G}{2} \left[(u_{i,t+1}^G - u_{i,t}^G) + |u_{i,t+1}^G - u_{i,t}^G| \right] + \\ \sum_{t=1}^{T-1} \sum_{i=1}^{N_G} \frac{f_i^G}{2} \left[(u_{i,t}^G - u_{i,t+1}^G) + |u_{i,t}^G - u_{i,t+1}^G| \right] \\ C_{W,w} = \sum_{t=1}^T c_{\text{penalty}} (P_{i,t}^{W,t} - P_{i,t}^W) \Delta t_{15} \end{cases} \quad (13)$$

式(12)、(13)中, $C_{\text{op,d}}$ 、 $C_{G,r}$ 、 $C_{G,\text{re}}$ 、 $C_{G,\text{ss}}$ 和 $C_{W,w}$ 分别为

日前运行成本、火电运行成本、火电备用成本、火电开关机成本和弃风成本; N_W 为风电场的数量; a_i^G 、 b_i^G 均为火电机组 i 的购电成本系数; $P_{i,t}^G$ 为火电机组 i 在 t 时段的有功出力; Δt_{15} 为日前调度阶段的单位调度时长, 本文设其值为0.25 h; c_i^G 、 d_i^G 分别为火电机组 i 的正、负单位备用成本; $R_{i,t}^{G,+}$ 、 $R_{i,t}^{G,-}$ 分别为火电机组 i 在 t 时段的正、负备用容量; e_i^G 、 f_i^G 均为火电机组 i 的单次开关机成本系数; $u_{i,t}^G$ 为火电机组 i 在 t 时段的启停状态; c_{penalty} 为弃风成本系数; $P_{i,t}^{W,t}$ 、 $P_{i,t}^W$ 分别为风电场 i 在 t 时段的预测与实际出力。

2.2.2 下层约束条件

1) 火电机组运行约束。

火电机组出力约束、备用约束、启停机约束、爬坡率约束可参考文献[23], 在此不再赘述。火电机组调频约束为

$$u_{i,t}^G (P_{\min,i}^G + P_{i,t}^{G,\text{mar}}) \leq P_{i,t}^G \leq u_{i,t}^G (P_{N,i}^G - P_{i,t}^{G,\text{mar}}) \quad (14)$$

式中, $P_{i,t}^{G,\text{mar}}$ 为 t 时段火电机组 i 参与一次调频的变化量限值; $P_{\min,i}^G$ 为火电机组 i 的最小技术出力。 $P_{i,t}^{G,\text{mar}}$ 具体计算式为

$$P_{i,t}^{G,\text{mar}} = \min \{ \epsilon_i^G P_{N,i}^G, P_{i,t}^{G,\text{pfm}} \} \quad (15)$$

$$P_{i,t}^{G,\text{pfm}} = - \frac{P_{N,i}^G}{\mu_i^G} \Delta f_{\infty,t}^{*\max} = \quad (16)$$

$$\frac{P_{N,i}^G}{\mu_i^G} \cdot \frac{P_{LW,t}^{\text{error}} \mu_{\text{equ},t}}{k_L P_{LN,t}^{\text{base}} \mu_{\text{equ},t} + 1}$$

式(15)、(16)中, ϵ_i^G 为火电机组 i 的一次调频限幅系数, 一般取6%~10%, 具体取值见参考标准[20]; $P_{i,t}^{G,\text{pfm}}$ 为 t 时段系统受到可能出现的极限功率扰动的情况下, 火电机组 i 一次调频稳态功率变化量; $P_{LW,t}^{\text{error}}$ 为 t 时段系统可能发生的极限功率扰动, 包括增量与减量两个方向, 假设这两方向上的其绝对值相等; $\Delta f_{\infty,t}^{*\max}$ 为 t 时段极限功率扰动下的系统稳态频差标么值; $P_{LN,t}^{\text{base}}$ 为 t 时段额定频率下的负荷预测值; $\mu_{\text{equ},t}$ 为 t 时段的系统等效调差系数; μ_i^G 为火电机组 i 的调差系数。

2) 储能电站运行约束。

储能电站运行状态约束、功率约束、备用约束、荷电状态约束可参考文献[24], 不再赘述。电化学储能调频约束为

$$-P_{i,t}^{E,N} + P_{i,t}^{E,\text{mar}} \leq P_{i,t}^E \leq P_{i,t}^{E,N} - P_{i,t}^{E,\text{mar}} \quad (17)$$

式中, $P_{i,t}^E$ 为 t 时段储能电站 i 的充、放电功率; $P_{i,t}^{E,\text{mar}}$ 为 t 时段储能电站 i 参与一次调频的变化量限值。

$$P_{i,t}^{E,\text{mar}} = \min \{ \epsilon_i^E P_{i,t}^{E,N}, P_{i,t}^{E,\text{pfm}} \} \quad (18)$$

式中, ϵ_i^E 为储能电站 i 的一次调频限幅系数; $P_{i,t}^{E,\text{pfm}}$ 为

t 时段系统受到极限功率扰动时,储能电站 i 参与一次调频稳态功率变化量,其计算方法与式(16)类似,在此不再赘述。

3) 系统运行约束。

系统运行约束包括系统功率平衡约束、系统备用约束、风电出力约束,其中,前2项约束具体表达式可参考文献[25],在此不再赘述。风电出力约束为

$$P_{i,t}^{W,\text{mar}} \leq P_{i,t}^W \leq P_{i,t}^{W,f} - P_{i,t}^{W,\text{mar}} \quad (19)$$

$$P_{i,t}^{W,\text{mar}} = \min \{ \epsilon_i^W P_{i,t}^W, P_{i,t}^{W,\text{pfm}} \} \quad (20)$$

式(19)、(20)中, $P_{i,t}^{W,\text{mar}}$ 为 t 时段风电场 i 参与一次调频的变化量限值; ϵ_i^W 为风电场 i 的一次调频限幅系数; $P_{i,t}^{W,\text{pfm}}$ 为 t 时段系统受到极限功率扰动时,风电场 i 一次调频稳态功率变化量,计算方法与式(16)类似,在此不再赘述。

4) 频率安全约束。

为量化描述系统受扰后的频率变化,本文选取稳态频差和最大频率变化率作为动态频率响应指标^[26-29]。

① 稳态频差约束。

$$|\Delta f_{\text{std},t}^*| + \Delta f_{\text{dz}}^* \leq \Delta f_{\text{std},\text{lim}}^* \quad (21)$$

$$\frac{|P_{LW,t}^{\text{error}}|}{\Delta f_{\text{std},\text{lim}}^* - \Delta f_{\text{dz}}^*} - (k_L P_{LN}^{\text{base}} + K_{WE1}) \leq \sum_{i=1}^{N_G} \frac{u_{i,t}^G P_{N,i}^G}{\mu_i^G} \quad (22)$$

式(21)、(22)中, $\Delta f_{\text{std},t}^*$ 为 t 时段系统受到极限功率扰动时,稳态频差的标么值; Δf_{dz}^* 为调频死区的标么值; $\Delta f_{\text{std},\text{lim}}^*$ 为系统稳态频差限值的标么值。

② 最大频率变化率约束。

$$|R_{\text{OCOF},\text{max},t}^*| \leq R_{\text{OCOF},\text{lim},t}^* \quad (23)$$

式中, $R_{\text{OCOF},\text{max},t}^*$ 为 t 时段系统受到极限功率扰动时,最大频率变化率的标么值; $R_{\text{OCOF},\text{lim},t}^*$ 为系统在 t 时段最大频率变化率限值的标么值。结合 $R_{\text{OCOF},\text{max}}$ 计算式,可将式(23)进一步改写为

$$\frac{|P_{LW,t}^{\text{error}}|}{R_{\text{OCOF},\text{lim},t}^*} \leq 2 \sum_{i=1}^{N_G} u_{i,t}^G P_{N,i}^G H_i^G + K_{WE2} \quad (24)$$

2.3 模型求解方法

粒子群优化算法是一类基于概率的全局优化算法,其具有突出性、并行性、稳健性、进化性和良好的记忆功能,已广泛应用于求解基于工业背景的优化问题。故本文采用粒子群算法进行求解。在上层模型生成电化学储能的容量配置结果后,下层模型将被转化为混合整数线性规划问题,采用Gurobi 9.5.1求解器对其进行求解^[26-27],求解流程如图5所示。

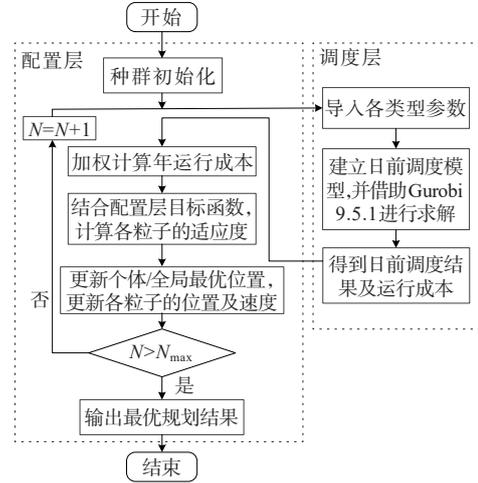


图5 容量优化配置的求解流程

Figure 5 Solving process of capacity optimization configuration

3 算例分析

3.1 算例参数及场景设置

本文以改进的IEEE 39节点系统为研究对象进行算例分析,系统结构如图6所示。在图6中,G1~G7为火电机组,W1~W3为风电场,E1~E4为储能电站。针对本文所提的高比例风电电力系统,设置的风电渗透率为50.27%。

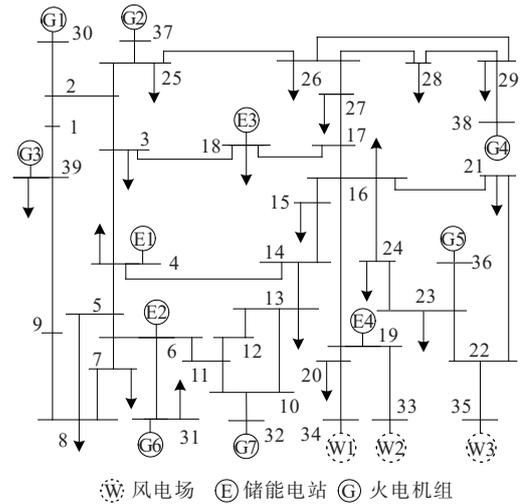


图6 改进IEEE 39节点系统

Figure 6 Structure diagram of improved IEEE 39-bus system

为保证储能电站优化配置结果的合理性,本文选取1年中4个典型日预测的风力资源和负荷需求情况分别进行调度分析,之后经过加权计算得到年运行成本,将其计入容量配置结果。火电机组、储能电站、风电场的具体参数分别见表1~3,系统其他参数见表4,各典型日的风电、负荷的预测曲线如图7~10所示。

为验证优化配置模型的有效性与优越性,设置如表 5 所示的 4 种运行场景。其中,场景 A 为本文研究场景;场景 B 不配置储能电站,依靠火电与风电

调;场景 C 配置储能电站,但仅依靠火电调频,风电场与储能电站不参与调频;场景 D 不考虑频率安全约束。

表 1 火电机组参数

Table 1 Parameters of thermal power units

机组编号	额定出力/ MW	最小技术 出力/MW	启停成本/ 美元	最小启停机 时间/h	爬坡率/ (MW·min ⁻¹)	购电成本系数①/ (美元·MW ⁻¹ ·h ⁻¹)	购电成本系数 ②/(S·h ⁻¹)
G1	550	165.0	1 700	5	10.5	32.29	127.62
G2	500	150.0	1 500	4	9.1	35.94	123.75
G3	400	100.0	1 500	4	8.8	38.03	121.96
G4	350	87.5	1 450	3	8.5	37.02	123.02
G5	250	50.0	1 400	3	7.9	37.04	123.09
G6	200	40.0	600	2	5.9	56.15	103.98
G7	150	30.0	700	1	4.2	55.68	103.99

机组编号	正备用成本系数/ (美元·MW ⁻¹ ·h ⁻¹)	负备用成本系数/ (美元·MW ⁻¹ ·h ⁻¹)	调差系数	调速器比例 增益	调速器积分 增益	惯性时间常数/ (H·s ⁻¹)	调频限幅 比例/%
G1	27.77	24.17	0.050	19	2.2	8.7	8
G2	24.79	20.32	0.044	16	2.2	8.4	8
G3	24.16	21.03	0.048	14	2.1	9.4	8
G4	23.04	20.65	0.046	18	2.3	10.5	8
G5	22.89	19.58	0.048	16	2.2	7.3	10
G6	22.56	19.88	0.042	11	2.5	8.6	10
G7	23.58	19.97	0.041	5	2.6	7.1	10

表 2 储能电站参数

Table 2 Parameters of energy storage station

单位额定功率/ MW	单位额定容量/ (MW·h)	能量上限/ %	能量下限/ %	初始时刻能量/ %	功率转换效率	单位容量成本/ (美元·MW ⁻¹ ·h ⁻¹)
1	2	95	10	50	0.98	104 000

单位功率成本/ (美元·MW ⁻¹)	单位固定运维成本/ (美元·MW ⁻¹ ·a ⁻¹)	单位可变运维成本 (美元·MW ⁻¹ ·h ⁻¹)	设备寿命/ a	虚拟惯量控制 增益系数	频率下垂控制 增益系数	调频限幅比例/ %
120 000	5500	1.5	10	10	50	10

表 3 风电场参数

Table 3 Parameters of wind farm

风电场装机 容量/MW	弃风惩罚成本系数/ (美元·MW ⁻¹ ·h ⁻¹)	虚拟惯量控制 增益系数	频率下垂控制 增益系数	增负荷调频 限幅比例/%	减负荷调频 限幅比例/%
500	83.2	8	30	6	10

表 4 系统其他参数

Table 4 Other parameters of system

折现率/ %	工程寿命/ a	稳态频差 限值/Hz	最大频差 限值/Hz	初始频率变化率 限值/(Hz·s ⁻¹)	调频死区/ Hz	负荷频率 调节系数
8	20	0.2	0.5	0.35	0.03	1

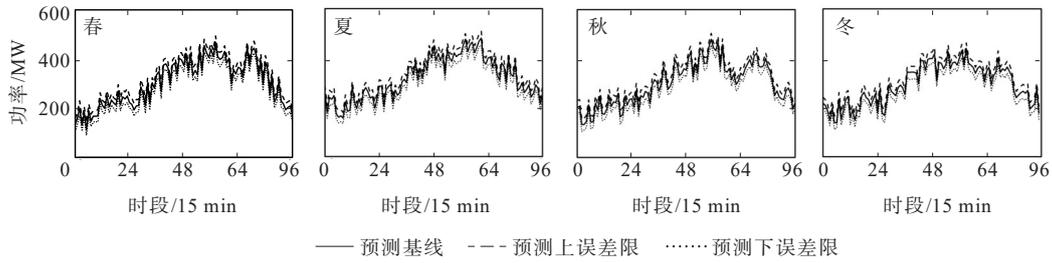


图7 风电场W1的短期预测曲线

Figure 7 Short term forecast curve of wind power and load of wind power station 1

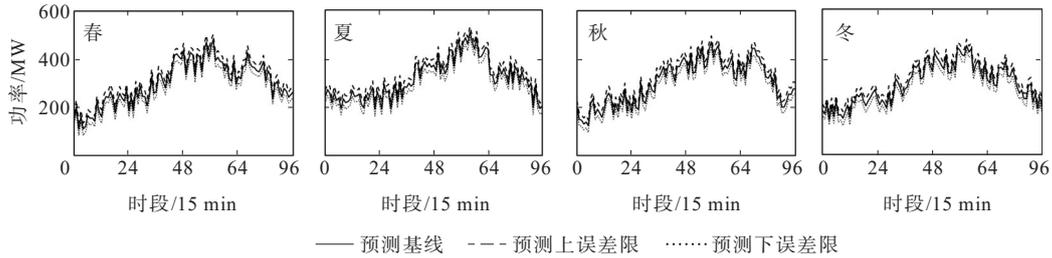


图8 风电场W2的短期预测曲线

Figure 8 Short term forecast curve of wind power and load of wind power station 2

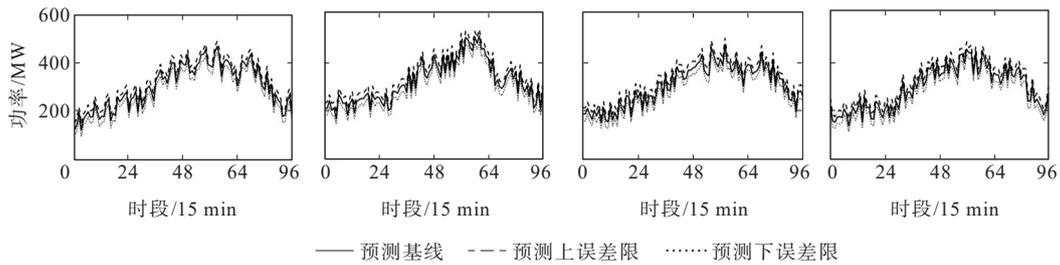


图9 风电场W3的短期预测曲线

Figure 9 Short term forecast curve of wind power and load of wind power station 3

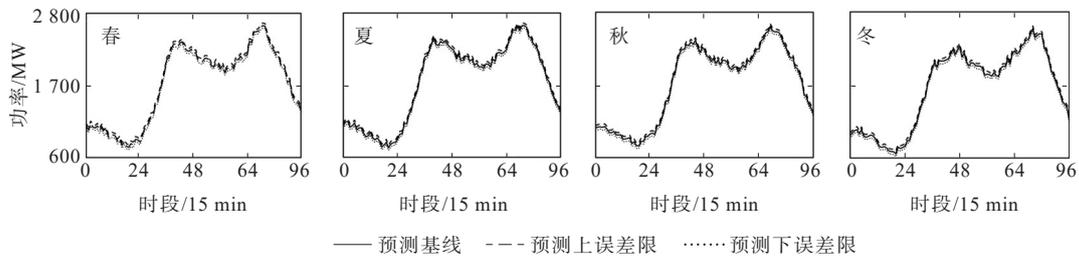


图10 负荷的短期预测曲线

Figure 10 Short term forecast curve of load

表5 算例场景设置

Table 5 Case scenario settings

场景	调频资源使用情况			是否配置 储能电站	是否考虑频 率安全约束
	火电机组	风电机组	储能电站		
A	是	是	是	是	是
B	是	是	否	否	是
C	是	否	否	是	是
D	是	是	是	是	否

3.2 优化配置及运行结果分析

经过求解得到各场景下储能电站的优化配置结果见表6。

由表6可知,场景A的配置功率最大,合计配置功率为171 MW,结合图10可知:场景A考虑动态频率响应约束,需要增加火电机组开机数量以保证充足的调频能力,而火电机组最小技术出力限制会导致系统无法全额消纳风电,存在着较大的能量转移需求,且场景A中储能电站参与调频,限制了其

出力,所以需要配置较多的储能设备。而场景 D 由于不需要考虑动态频率响应约束,火电机组开机数量较少,部分时段如 03:00—07:00 甚至仅有一台火电机组开机,系统主要依靠风电出力供给负荷,所以配置一定的储能设备就可以满足风电足量消纳,降低系统运行成本。

表 6 储能电站优化配置结果
Table 6 Optimal configuration results of energy storage power station

场景	额定功率/MW					额定容量/(MW·h)				
	ES-1	ES-2	ES-3	ES-4	合计	ES-1	ES-2	ES-3	ES-4	合计
A	47	44	52	28	171	94	88	156	56	342
B	—	—	—	—	0	—	—	—	—	0
C	28	24	30	14	96	56	48	90	28	192
D	38	35	45	22	140	76	70	135	44	280

系统经济成本对比如图 11 所示。从图 11 可以看出,场景 A 的总成本年值较场景 B 的降低了 1.15×10^7 美元。这是因为:虽然场景 B 不需要承担储能投资成本,但由于失去了储能电站的削峰填谷作用,场景 B 无法足量消纳风电,需要承担更高的弃风成本,而且场景 B 中火电机组需要承担大部分的调频任务,导致该场景下火电运行成本高于场景 A 的约 0.86×10^7 美元,其年运行成本高出场景 A 的约 5.65%,所以总成本最高。由此可见,储能的接入能提高电网的灵活性与经济性。

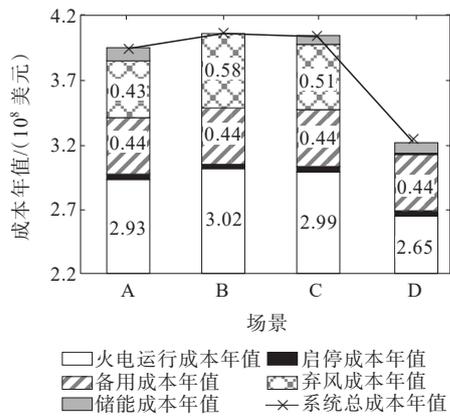


图 11 系统经济成本分析

Figure 11 Economic cost analysis of system

储能电站经济成本对比如图 12 所示。从图 12 可看出,场景 A 的总成本年值较场景 C 的降低了约 0.92×10^7 美元,年运行成本降低了约 1.36×10^7 美元。这是因为:场景 A 中风电场和储能电站也提供调频服务,减轻了火电机组的调频负担,进而降低系统的运行成本。而场景 C 仅依靠火电调频,在某些时

段需要采用大容量的机组组合方式,影响系统运行经济性。由此可见,风储参与调频可以缓解火电的调频压力,获得更优越的运行经济性。

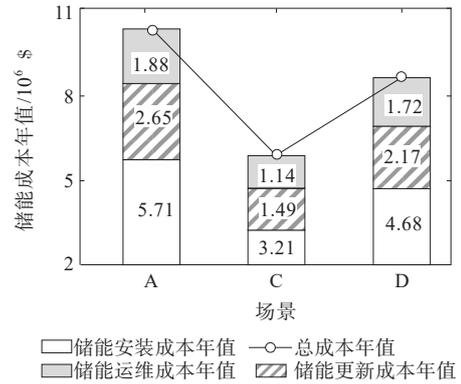


图 12 储能电站经济成本分析

Figure 12 Economic cost analysis of energy storage station

由图 11 可看出,场景 A 的总成本年值较场景 D 的增加了约 7.8×10^7 美元,这是因为场景 D 仅考虑经济性,制定调度计划时均安排经济性较好的火电机组(如 G1~G2)出力,而经济性较差的 G3 处于停机状态,降低了系统运行成本。

春季典型日下火电机组的运行出力情况如图 13 所示。从图 13 可看出,在制定运行计划时,火电机组 G1 与 G2 具备较好的经济性,在系统中承担了大部分负荷需求;而 G6 与 G7 的发电成本较高,因此大部分时段处于低出力或停机状态。结合图 7 可知,在 00:00—07:00 时段,负荷需求较低,此时各火电机组均保持低载运行;在 09:00—14:00 和 17:00—22:00 时段,系统净负荷较高,机组 G1、G2 保持满载出力。

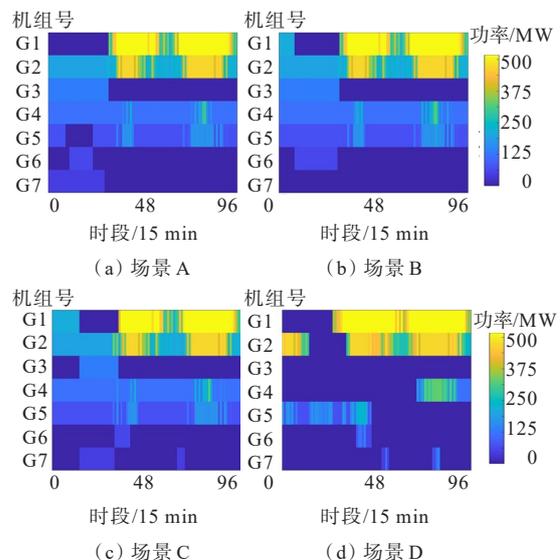


图 13 火电机组运行出力情况

Figure 13 Operating output of thermal power units

3.3 动态频率响应指标分析

各场景下系统的稳态频差与最大频差变化率的分布情况如图14、15所示,箭头指向为场景A~C的局部放大图。

从图14、15可看出,场景D在00:00—07:00和13:00—17:00时段,出现稳态频差和最大频率变化率严重越限的问题。这是由于在这些时段系统火电机组开机数量较少,系统惯量支撑能力严重不足,且主要由风电场和储能电站承担一次调频需求。场景A~C的稳态频差和最大频率变化率均满

足限值要求。结合系统源荷分布情况可以发现,系统在净负荷较高时具备更优良的频率响应指标。这是因为在这些条件下火电机组开机数量较多,系统整体惯量支撑与调频能力较强。

从图14可看出,场景A低于场景C的稳态频差分布。经计算发现,场景A稳态频差平均值较场景C的降低了4.18%,这是因为场景A具备多种调频资源,在系统发生扰动时,可以共同作用降低频差,而场景C仅依靠火电调频,在这方面不具备优势。

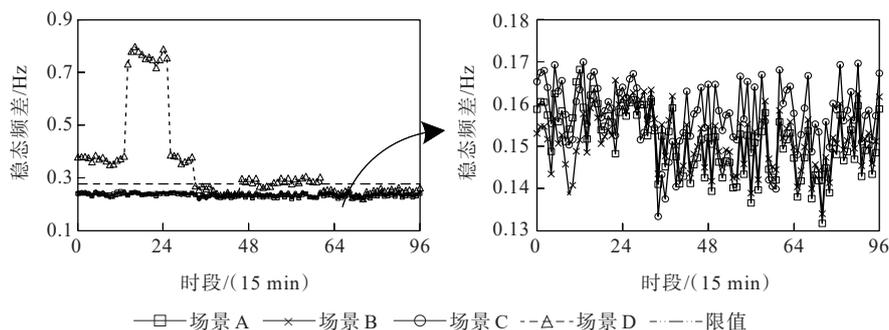


图14 系统稳态频差

Figure 14 Steady-state frequency difference of system

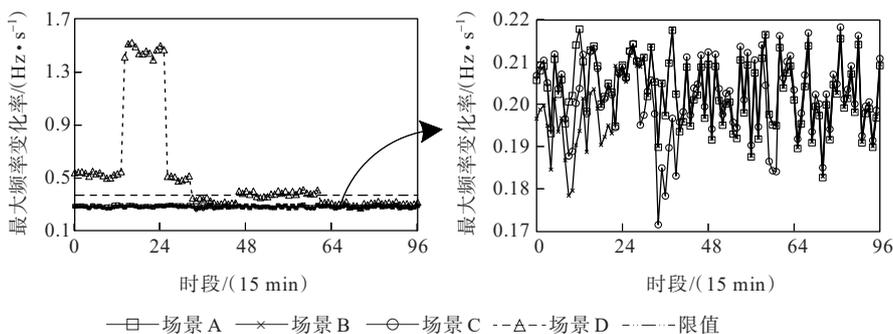


图15 系统最大频率变化率

Figure 15 Maximum frequency change rate of system

综上所述,在高比例风电电力系统中,传统的调度策略难以保证系统拥有稳定且充裕的调频资源,预留的系统惯量无法应对过快的频率变化冲击,而在考虑动态频率响应约束之后,机组组合与经济调度计划得到了优化,并与其他调频主体共同配合保障系统的频率安全。

4 结语

针对高比例风电接入引发的电力系统频率安全问题,本文提出了考虑频率安全约束的储能优化配置策略,由算例分析,得出以下结论:

1) 本文所提出的储能优化配置策略可获得合

适的配置结果,能在满足频率限值要求的基础上,制定合理的机组组合与经济调度计划,提升电力系统运行经济性;

2) 在高比例风电电力系统中,本文所提出的频率安全约束可以保证系统拥有稳定且充裕的惯量支撑及调频资源,各项频率指标均能够满足要求;

3) 火电机组启、停状态对系统调频能力具有较大影响,而风电与储能参与调频可以缓解火电机组的调频压力,所提出的储能优化配置策略可以综合利用电力系统多类型调频资源,能够获得更优越的运行经济性。

参考文献:

- [1] 国家能源局. 国家能源局发布1-6月份全国电力工业统计数据[EB/OL].(2023-07-19) [2023-11-10].http://www.nea.gov.cn/2023-07/19/c_131073327_2.htm
National Energy Administration. The National Energy Administration released statistics on the national power industry from January to June in 2023[EB/OL].(2023-07-19) [2023-11-10].http://www.nea.gov.cn/2023-07/19/c_131073327_2.htm
- [2] 李世春,田冰杰,李惠子,等. 基于频率安全约束与临界惯量计算的时段限制风电出力方法[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(15):60-71.
LI Shichun, TIAN Bingjie, LI Huizi, et al. Method for limiting wind power output in time periods based on frequency safety constraints and a critical inertia calculation[J]. Power System Protection and Control, 2022,50(15):60-71.
- [3] 蒋小亮,李元臣,郝元钊,等. 计及新能源虚拟惯量的电力系统等效惯量评估[J]. 电力科学与技术学报,2023,38(4):169-176.
JIANG Xiaoliang, LI Yuanchen, HAO Yuanzhao, et al. Evaluation of power system equivalent inertia considering new energy virtual inertia[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2023,38(4):169-176.
- [4] 李世春,苏凌杰,张志刚,等. 基于改进粒子群算法的风电场虚拟惯量优化分配方法[J]. 智慧电力,2023,51(8):8-14+22.
LI Shichun, SU Lingjie, ZHANG Zhigang, et al. Optimal allocation method of wind farm virtual inertia based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Smart Power,2023,51(8):8-14+22.
- [5] 齐晓光,姚福星,朱天瞳,等. 考虑大规模风电接入的电力系统混合储能容量优化配置[J]. 电力自动化设备,2021,41(10):11-19.
QI Xiaoguang, YAO Fuxing, ZHU Tiantong, et al. Capacity optimization configuration of hybrid energy storage in power system considering large-scale wind power integration[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(10):11-19.
- [6] 陈泽西,孙玉树,张妍,等. 考虑风光互补的储能优化配置研究[J]. 电工技术学报,2021,36(增刊1):145-153.
CHEN Zexi, SUN Yushu, ZHANG Yan, et al. Research on energy storage optimal allocation considering complementarity of wind power and PV[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(Sup 1): 145-153.
- [7] 代倩,吴俊玲,秦晓辉,等. 提升局部区域新能源外送能力的储能容量优化配置方法[J]. 电力系统自动化,2022,46(3):67-74.
DAI Qian, WU Junling, QIN Xiaohui, et al. Optimal configuration method of energy storage capacity for improving delivery ability of renewable energy in regional area[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022,46(3):67-74.
- [8] 谢毓广,李金中,王川,等. 考虑消纳水平的新能源配套储能和输电通道容量协调优化配置[J]. 电力自动化设备,2023,43(7):51-57+72.
XIE Yuguang, LI Jinzhong, WANG Chuan, et al. Coordinated optimal capacity configuration of energy storage equipped by new energy and transmission lines considering consumption level[J]. Electric Power Automation Equipment,2023,43(7):51-57+72.
- [9] 李建林,姜冶蓉,马速良,等. 新型电力系统下分布式储能应用场景与优化配置[J]. 高电压技术,2024,50(1):30-41.
LI Jianlin, JIANG Yerong, MA Suliang, et al. Application scenarios and optimal configuration of distributed energy storage under the new power system[J]. High Voltage Engineering,2024,50(1):30-41.
- [10] 王宝财,孙华东,李文锋,等. 考虑动态频率约束的电力系统最小惯量评估[J]. 中国电机工程学报,2022,42(1):114-127.
WANG Baocai, SUN Huadong, LI Wenfeng, et al. Minimum inertia estimation of power system considering dynamic frequency constraints[J]. Proceedings of the CSEE,2022,42(1):114-127.
- [11] 张伟骏,李智诚,陈大玮,等. 配网侧分布式储能系统的随机优化配置和选址方法[J]. 高压电器,2023,59(7):125-135.
ZHANG Weijun, LI Zhicheng, CHEN Dawei, et al. Stochastic optimal configuration and site selection method of grid-side distributed energy storage system[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 125-135.
- [12] 李东东,刘强,徐波,等. 考虑频率稳定约束的新能源电力系统临界惯量计算方法[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(22):24-33.
LI Dongdong, LIU Qiang, XU Bo, et al. New energy power system critical inertia estimation method considering frequency stability constraints[J]. Power System Protection and Control,2021,49(22):24-33.
- [13] ZHANG Q Y, XIE J, PAN X P, et al. A short-term optimal scheduling model for wind-solar-hydro-thermal complementary generation system considering dynamic frequency response[J]. IEEE Access, 2021, 9: 142768-142781.
- [14] 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.

- [15] 陈建华,张瑶,郭子明,等.考虑电力系统频率响应特性的鲁棒区间风电调度方法[J].中国电机工程学报,2016,36(22):6096-6102.
CHEN Jianhua,ZHANG Yao,GUO Ziming,et al.A robust interval wind power dispatch method considering system frequency response[J].Proceedings of the CSEE,2016,36(22):6096-6102.
- [16] 李正文,王祥旭,丁奇力,等.基于模型-数据融合驱动的频率响应分析方法[J].电网与清洁能源,2022,38(5):16-24.
LI Zhengwen,WANG Xiangxu,DING Qili,et al. Model-Data integration driven based frequency response analysis method[J].Power System and Clean Energy, 2022,38(5):16-24.
- [17] SHI Q X, LI F X, CUI H T. 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.
- [18] 王涛,王廷涛,刘芮,等.计及动态频率响应约束的高比例风电电力系统机组组合模型[J].高电压技术,2021,47(10):3463-3479.
WANG Tao,WANG Tingtao,LIU Rui,et al. Unit commitment model of high proportion wind power system considering dynamic frequency response constraints[J].High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3463-3479.
- [19] 王廷涛,苗世洪,姚福星,等.计及动态频率响应约束的高比例风电电力系统日前-日内联合调度策略[J].中国电机工程学报,2024,44(7):2590-2604.
WANG Tingtao,MIAO Shihong,YAO Fuxing,et al. Day-ahead and intra-day joint dispatch strategy of high proportion wind power system considering dynamic frequency response constraints[J].Proceedings of the CSEE,2024,44(7):2590-2604.
- [20] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.并网电源一次调频技术规定及试验导则:GB/T 40595—2021[S].北京:中国标准出版社,2021:4.
State Administration of Market Regulation,, National Standardization Administration.. Guide for technology and test on primary frequency control of grid-connected power resource: GB/T 40595—2021[S]. Beijing: Standards Press of China,2021:4.
- [21] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.风电场接入电力系统技术规定 第1部分:陆上风电:GB/T 19963.1—2021[S].北京:中国标准出版社,2021:8
State Administration of Market Regulation, National Standardization Administration.. Technical specification for connecting wind farm to power system: Part 1: On shore wind power: GB/T 19963.1—2021[S]. Beijing: Standards Press of China,2021:8.
- [22] 国家能源局.电化学储能电站并网运行与控制技术规范 第7部分:惯量支撑与阻尼控制:DL/T 2246.7—2021[S].北京:中国电力出版社,2021:7.
National Energy Administration. Technical specification for grid-connected operation and control of electrochemical energy storage station. Part 7: Inertia support and damping control: DL/T 2246.7—2021[S]. Beijing:China Electric Power Press,2021:7.
- [23] 王文剑.火电—风电—储能联合调频运行算法研究[D].北京:北京交通大学,2016.
WANG Wenjian. Research on joint frequency modulation operation algorithm of thermal power, wind power and energy storage[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [24] 周校聿,刘尧,鲍福增,等.百兆瓦级储能参与电网双重辅助服务调度的联合优化模型[J].电力系统自动化,2021,45(19):60-69.
ZHOU Xiaoyu, LIU Rao, BAO Fuzeng, et al. Joint optimization model for hundred-megawatt-level energy storage participating in dual ancillary services dispatch of power grid[J].Automation of Electric Power Systems, 2021,45(19):60-69.
- [25] 蔡杰,张松岩,杜治,等.含光热集热模块的先进绝热压缩空气储能系统容量配置策略[J].电力自动化设备,2020,40(7):165-176.
CAI Jie, ZHANG Songyan, DU Zhi, et al. Capacity allocation strategy of advanced adiabatic compressed air energy storage system with solar thermal collector module[J].Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7):165-176.
- [26] YANG L, XU Y L, ZHOU J G, et al. Distributionally robust frequency constrained scheduling for an integrated electricity-gas system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2022,13(4):2730-2743.
- [27] ZHANG Z Y,DU E S,TENG F,et al. Modeling frequency dynamics in unit commitment with a high share of renewable energy[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2020,35(6):4383-4395.
- [28] 王钰,郝毅,王磊,等.基于改进粒子群算法的多能微网多目标优化调度[J].电测与仪表,2023,60(11):29-36+59.
WANG Yu,HAO Yi,WANG Lei,et al. Multi-objective optimal dispatching for multi-energy microgrid based on improved particle swarm optimization algorithm[J].Electrical Measurement & Instrumentation,2023,60(11): 29-36+59.
- [29] Gurobi Optimization.Gurobi optimizer reference manual [EB/OL].[2023-11-10].<http://www.gurobi.com>.