引用格式:田涛,黄明,常森伟,等.调峰-调频约束下核-储协调的新能源承载力提升调度方法[J].电力科学与技术学报,2025,40(4):171-181.
Citation: TIAN Tao, HUANG Ming, CHANG Senwei, et al. New energy carrying capacity enhancement scheduling based on nuclear storage coordination under peak shaving frequency regulation constraints[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2025,40(4):171-181.

调峰-调频约束下核-储协调的新能源承载力提升调度方法

田 涛[1],黄 明[2],常森伟[2],林长鹏[2],薛旻晖[2],刘 毅[3]
(1.国电投莱阳核能有限公司,山东 莱阳 265299;2.国核示范电站有限责任公司,山东 荣成 264312;
3.山东大学电气工程学院,山东 济南 250061)

摘 要:随着可再生能源比例的提高,电力系统的调峰和调频压力逐渐增加,现有调度方法不能充分兼顾系统安全性和新能源的消纳。提出一种基于核电与储能协同的调峰－调频约束下的新能源承载力提升调度方法。首先,分析核电机组与储能装置的时空互补特性,充分挖掘这二者在调峰、调频中的协同作用,建立核储协同的调度模型。其次,构建输配协同调度框架,通过解耦输电网和配电网的调度需求,制定合理的日前优化策略,提升电力系统中新能源的承载能力。再次,引入频率安全约束,分析频率安全约束对电力系统稳定性和新能源消纳能力的影响。最后,采用算例分析验证所提方法的有效性和实用性。研究结果表明,所提方法在降低系统总成本、提升新能源消纳水平和改善频率调节能力方面具有显著优势,可为核电机组深度参与电网调峰、调频提供理论支持。

关 键 词:核储协同;频率安全约束;新能源消纳;调峰;输配协同
DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2025.04.016 **中图分类号**:TM732 **文章编号**:1673-9140(2025)04-0171-11

Scheduling method for carrying capacity enhancement of new energy based on nuclear storage coordination under peak shaving - frequency regulation constraints

TIAN Tao[1], HUANG Ming[2], CHANG Senwei[2], LIN Changpeng[2], XUE Minhui[2], LIU Yi[3]
(1.State Power Investment Corporation Laiyang Nuclear Energy Co., Ltd., Laiyang 265299, China; 2.State Nuclear Power Demonstration Plant Co., Ltd., Rongcheng 264312, China; 3.School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: With the increasing proportion of renewable energy, the pressure on peak shaving and frequency regulation in power systems is gradually intensifying, and existing scheduling methods cannot consider both system security and new energy consumption. This paper proposes a scheduling method for carrying capacity enhancement of new energy based on the coordination between nuclear power and energy storage. Firstly, by analyzing the spatiotemporal complementary characteristics of nuclear power units and energy storage devices, the coordinated role of both in peak shaving and frequency regulation is fully explored to build a scheduling model for nuclear storage coordination. Then, a collaborative transmission and distribution scheduling framework is constructed to develop reasonable day-ahead optimization strategies by decoupling the scheduling requirements of transmission grids and distribution networks, and improve the carrying capacity of new energy in power systems. Additionally, frequency security constraints are introduced to analyze their influence on power system stability and renewable energy consumption. Finally, case analysis is conducted to validate the effectiveness and practicality of the proposed method. The results show the proposed method has significant advantages in reducing the total costs of systems, enhancing renewable energy consumption, and improving frequency regulation. As a result, theoretical support can be provided for nuclear power units to deeply participate in peak shaving and frequency regulation of power grids.

Key words: nuclear storage coordination; frequency security constraint; new energy consumption; peak shaving; collaborative transmission and distribution

收稿日期:2024-12-07;**修回日期**:2024-12-27
基金项目:国核示范电站有限责任公司科技项目(SPDP-MTD-G9AS2-20230002);国家自然科学基金(U2166208)
通信作者:黄 明(1976—),男,高级工程师,主要从事电力系统优化、核电厂生产管理等方面的研究;E-mail:2919755943@qq.com

近年来，气候问题日益严峻，污染治理刻不容缓，化石燃料投资也持续下降[1-3]，新型电力系统建设驱动着能源结构加速转型，大力发展可再生能源技术已成为能源领域的共识[4-7]。核能作为一种低碳能源，其全生命周期碳排放仅约为12 g/kW·h，且其具有装机容量大，运行稳定可靠、换料周期长等优点，具备较强的频率和电压支撑能力，可为经济社会发展提供充足的电力保障，为“双高”电力系统的安全稳定运行提供关键支撑。

核能的利用在促进能源转型和推动全球经济发展方面发挥重要作用。截至2023年底，累计32个国家、地区掌握并使用了核电技术，全球可运行核电机组达413台，总装机容量达37 151万千瓦。核能作为最清洁高效的能源之一，在应对全球气候变化、保障能源安全方面发挥着重要作用[8-9]。

目前，国内外学者围绕安全性指标，广泛开展了核电参与电力系统调频方面的研究。文献[10]提出了一种将核电机组与氢能综合体结合起来的方法，该方法让核电机组参与电力系统一次调频，通过电解水产生氢气和氧气，在罐中积累热水而积累能量，进而支撑调频指令的出力需求。文献[11]以中国福建省某核电站为研究对象，对核电装机比重、频率变化、调频死区等进行了研究，为核电机组参与电网一次调频提供了理论基础。文献[12]对核电机组参与电网一次调频的可行性进行了研究，建立了核电机组一次调频模型。其仿真结果表明，核电机组可以参与电网一次调频。文献[13]采用机理建模方法，建立了核电机组汽轮机参与一次调频的模型，构建了汽轮机功率-频率控制系统，其仿真结果显示所建模型可以实现对电网负荷的初步跟踪。

然而，随着中国国内沿海地区清洁能源项目的建设的扩展和负荷波动性的增强，电力系统的调峰和调频压力日益增加[14]，对核电的调度能力需求逐渐提高。现有的研究无法兼顾系统安全性与新能源充分消纳目标，特别是风电出力的随机性和反调峰特性[15-16]导致弃风现象频繁发生[17-20]。且在当前电力系统的运行中，核电机组往往被要求带基荷运行，这对系统中的其他电源的灵活运行提出了较高的要求[21-22]；甚至在系统调度中，部分核电机组被要求降功率运行甚至停运[23]，这严重限制了核电设备利用率。在核电等新能源渗透率高的地区，如何充分发挥包括核电在内的灵活性资源，实现多种需求协同调控[24]，成为当前亟待解决的难题。

在此背景下，本文开展调峰-调频约束下核-储协调的新能源承载力提升研究，聚焦多源协同调控难题，为核电机组深度参与电力系统的调峰、调频提供理论研究支持。本文深度剖析核电参与调峰、调频机理，促进在充分满足安全性目标下可再生能源充分消纳，提出了调峰-调频约束下核-储协调的新能源承载力提升调度模式，通过制定合理的日前优化策略，实现输电网配电网双侧核储协调下的调峰、调频联合优化，保障电力系统安全稳定运行，提高可再生能源承载能力。

1 核-储协同下调峰、调频能力分析

1.1 核电调频能力分析

核电机组功率自调节特性原理示意如图1所示。从图1中可以看出，新一代压水堆核电机组具有的自稳定性和自调节性，在反应堆调节系统不发挥作用的情况下，即使外界负荷在一定范围内波动，其也能很好地保证机组的有功出力跟随负荷变化。调速器通常由传感器、控制器和执行器组成。在正常功率运行期间，汽轮机的目标转速与实际转速的偏差被视为电网频率的偏差。当电网频率偏离时，传感器马上监测到这一变化，控制器立即计算出相应的调节策略，执行器则进行转速调节，以确保发电机与电网同步运行。调速器通过持续的反馈控制，适应电网频率的变化，维持电网的稳定。

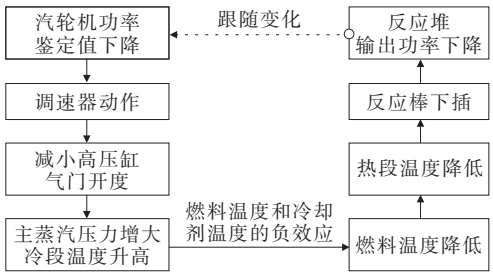

图1 核电机组功率自调节特性原理示意

Figure 1 Power self-regulating properties of nuclear power units

参与一次调频的核电机组的基本原理与火电机组的基本原理相似。在一次调频动作期间的机组功率的变化为

$$\Delta P=\frac{1}{K}\frac{\Delta f}{f_{\mathrm{N}}}P \tag{1}$$

式中，Δf为额定频率与实际频率的偏差；K是调节

系数；f_N 为额定频率；P 为额定功率；ΔP 为功率增量。

1.2　核电调峰能力分析

核电机组具备控制调峰深度、调节速率与低功率运行时长的能力，能根据系统负荷需求，调整出力。目前，核电机组已具备了成熟的调峰能力。核电调峰示意如图 2 所示。在图 2 中，$P_{i,n}^{N}$、$P_{i,x}^{N,\max}$ 分别为第 i 个核电机组在第 n 档调峰深度的核电功率、设定功率上限；l_i 分别为第 i 个核电机组在第 n 档调峰深度的低功率出力时长；$e_{i,j}$、$f_{i,n}$（i=1、2、3）分别为第 i 个核电机组在第 n 档调峰深度的功率上升与下降过度状态中的核电出力。

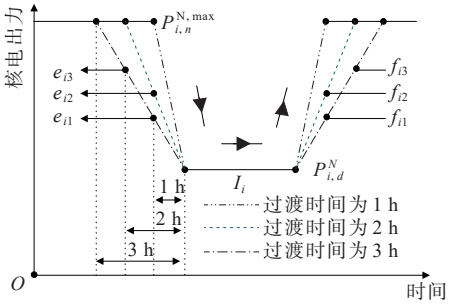

图 2　核电调峰示意

Figure 2　Peak shaving of nuclear power

为准确描述核电机组响应调峰需求的能力，划分核电机组调峰深度为 M 档，每档的对应调峰深度功率为

$$P_{i,n}^{N}=\left(P_{i,n}^{N,\max}-P_{i,n}^{N,\min}\right)n/M \tag{2}$$

式中，$P_{i,n}^{N}$ 为第 i 个核电机组在第 n 档调峰深度的功率；$P_{i,n}^{N,\min}$ 为第 i 个核电机组设定功率下限。

因此，核电机组在低功率阶段的第 n 档调峰深度出力 $P_{i,n}^{L}$ 为

$$P_{i,n}^{L}=P_{i,n}^{N,\max}-P_{i,n}^{S} \tag{3}$$

核电机组出力线性调整时间 T_C 通常为 1～3 h，在每个档位下设置 3 个过渡状态：

1）T_C=3，设定 0-1 状态变量 $d_{n,1}$ 和 $d_{n,3}$，$d_{n,1}$、$d_{n,3}$ 依次为下降功率过渡阶段和上升功率过渡阶段的状态；

2）T_C=2，设定 0-1 状态变量 $d_{n,2}$，其为低功率稳态运行阶段的状态；

3）T_C=1，不设过渡状态。

相应地，第 i 个核电机组在第 n 档调峰深度且为第 j 个状态的核电功率 $P_{i.n.j}^{N}$ 可表示为

$$P_{i.n.j}^{N}=P_{i,n}^{L}+P_{i,n}^{S}\left(1+j\right)/6 \tag{4}$$

式中，j 为状态标号，j=1，2，3。

则核电机组 i 在第 t 时段的功率 $P_i^{N,t}$ 可表示为

$$P_i^{N,t}=q_tP_{\max}^{N,t}+\sum_{n=1}^{M}l_{n,t}P_{i,n}^{L}+\sum_{n=1}^{M}\sum_{j=1}^{3}d_{n,j,t}P_{d,n,j}^{N} \tag{5}$$

式中，q_t 为 t 时段的满功率运行标志；$l_{n,t}$ 第 n 档调峰深度下 t 时段的低功率运行标志；$d_{n,j,t}$ 核电机组在第 n 档调峰深度、第 j 个状态、第 t 时段的升降功率运行标志；$P_{\max}^{N,t}$ 为核电机组在 t 时段的设定功率上限。

单个机组在某时段只能保持在一种状态下，即

$$q_t+\sum_{n=1}^{M}l_{n,t}+\sum_{n=1}^{M}\sum_{j=1}^{3}d_{n,j,t}=1 \tag{6}$$

核电机组在某状态下运行时，应维持此运行状态达最低运行时间，而不能在短时间迅速响应新的调节指令，即

$$\begin{cases} q_{n,t}^{N}\geqslant q_{n,t}-q_{n,t-1},\ t^{N}=t,t+1,\cdots,\\ \qquad \min\left(t+\underline{T}_{h}^{N}-1,24\right)\\ l^{N}\geqslant l_{m,t}-q_{m,t-1},\ t^{N}=t,t+1,\cdots,\\ \qquad \min\left(t+\underline{T}_{l}^{N}-1,24\right)\end{cases} \tag{7}$$

式中，$q_{n,t}^{N}$ 为核电机组第 n 档调峰深度下单位时间出力调节步长上限；$q_{n,t}$ 为核电机组第 n 档调峰下 t 时段的出力；l^{N} 为核电机组低功率出力时长上限；$\underline{T}_{h}^{N}$、$\underline{T}_{l}^{N}$ 分别为核电机组满功率和低功率最小持续运行时间。

T_P 为核电机组升降时间。在调整功率的过程中，这些运行标志还应满足时间尺度上的逻辑关系。

当 T_P=2 时，对应的状态约束为

$$\begin{cases} q_{t+1}\geqslant d_{n,2,t}+l_{n,t-1}-1\\ l_{n,t+1}\geqslant d_{n,2,t}+q_{t-1}-1\end{cases} \tag{8}$$

T_P=3 时，对应的状态约束为

$$\begin{cases} q_{t+1}\geqslant d_{n,3,t}+d_{n,1,t-1}-1\\ l_{n,t+1}\geqslant d_{n,1,t}+d_{n,3,t-1}-1\\ d_{n,1,t+1}\geqslant d_{n,3,t}+q_{t-1}-1\\ d_{n,3,t+1}\geqslant d_{n,1,t}+l_{n,t=1}-1\end{cases} \tag{9}$$

1.3　核-储协同调控机理

电力系统响应调峰需求主要依赖冷备用，响应调峰需求主要依靠热备用。核电与储能存在调峰、调频的互补特性，故应分析核储协同参与调峰、调频的调控方式。

受储能容量限制，当储能应用于调峰调频协同控制时，应考虑荷电状态（state of charging，SOC）的影响。当系统处于填谷区时，储能处于充电状

态，其SOC从0.10升至0.90[25-26]。为避免使SOC处于临界值，削弱调频能力，本文将SOC调峰工作区间设为0.15～0.85；并基于日前负荷预测结果划分协同工作区域。基于负荷预测的协同控制工作区域划分如图3所示。

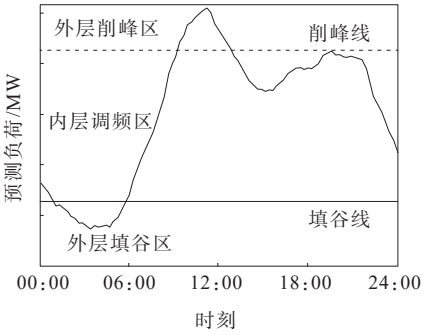

图3 基于负荷预测的协同控制工作区域划分

Figure 3 Work area division of collaborative control based on load prediction

在核电机组与储能阵列联合调频系统中，当电网的频率在超出死区的小范围内波动时，储能可以发挥自身快速响应的一次调频优势[27]，迅速抑制频率恶化，维护电网频率稳定。在此工况下，只须采用储能参与一次调频控制，核电机组不参与。当电网频率出现大范围波动时，利用储能和核电机组同时对大扰动段进行联合一次调频调节，即核电机组开始出力，储能阵列补差值，可使储能阵列和核电机组之间形成一次高效调频配合。该核储协同响应调频指令流程如图4所示。从图4中可以看出，核电和储能协调配合，保障电网频率可在小扰动下充分响应负荷需求变化。

$P_{\mathrm{PFR}}(t)$为在非调峰期由负荷扰动引起的储能调频输出功率。采样时间间隔为1 min，1 d时间内样本数为1 440。

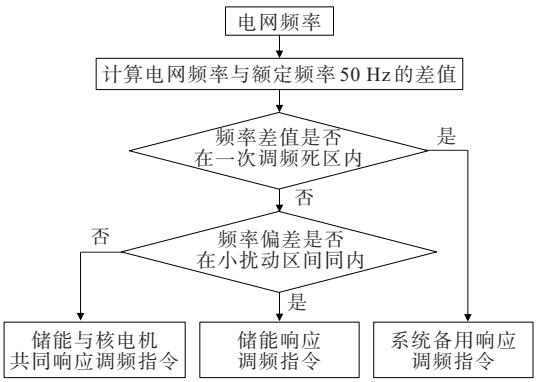

图4 核储协同响应调频指令流程

Figure 4 Frequency modulation instructions of nuclear storage coordination response

$$\Delta P_{\mathrm{PFR}_i}=K_i\Delta f \tag{10}$$

$$K_i=P_{\mathrm{N}}/f_{\mathrm{N}} \tag{11}$$

式中，$\Delta P_{\mathrm{PFR}_i}$为第$i$台核电机组的调频输出功率增量；$K_i$为第$i$台核电机组的单位功率调节系数；$P_{\mathrm{N}}$为储能额度功率。

2 调峰-调频约束下核-储协调的新能源承载力提升调度

2.1 输配协同调度框架

传统电网具有“源随荷动”的响应特性，随着分布式资源的接入，其源侧与荷侧的互动特性凸显，源荷互动成为调度研究的普遍趋势，为充分响应输配电侧源网荷储多类型资源的调度需要，考虑如图5所示的计及源网荷储多元主体的输配协同优化架构。在图5中，P_i^{dist}为第i个配电网从输电侧接收的功率；P_i^{trans}为输电网向第i个配电网输送的有功功率。输配电网通过联络线交换功率，充分挖掘两侧资源调控潜力，实现协同优化。

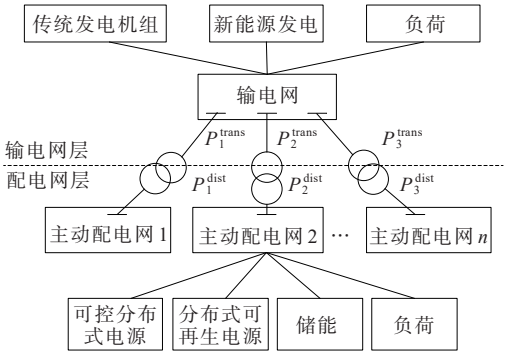

图5 计及源网荷储多元主体的输配协同优化架构

Figure 5 Collaborative transmission and distribution optimization framework considering multiple subjects of source networks and load storage

从图5中可以看出，输电网与配电网两侧的参与电网调度的主体存在差异。输电网和配电网的不同主体呈现出了多样化的调节特征，其在调度的时空尺度上保有相当的协同潜力，且差异化的主体也反映在输配电网的运行成本优化上，本文将对输电网与配电网两侧成本进行精细化分析。

为降低输配电网协同优化模型的求解难度，对边界联络线交换功率进行解耦，即

$$P_{k,t}^{\mathrm{trans}}-P_{k,t}^{\mathrm{dist}}=0 \tag{12}$$

式中，$P_{k,t}^{\mathrm{trans}}$为输电网在t时段向第k个配电网输送的有功功率；$P_{k,t}^{\mathrm{dist}}$为输电网在t时段在第k个配电网侧接受的有功功率。

2.2　基于拉丁超立方抽样的新能源出力场景构建

2.2.1　场景生成

本文运用拉丁超立方抽样建立风电出力的随机场景，拉丁超立方抽样流程如图 6 所示。在图 6 中，r_i 为第 i 个样本在[0，1]区间内按分层原则取得的均匀随机数列；Y_i 为 r_i 经分层映射得到的均匀变量；F 为逆累积分布函数；S_i 为第 i 个场景，i=1，2，…，N_1；N_1 为样本总数。

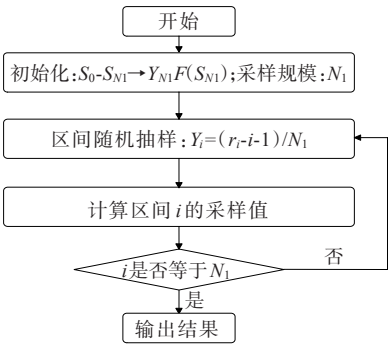

图 6　拉丁超立方抽样流程

Figure 6　Latin hypercube sampling

2.2.2　场景削减

通过拉丁超立方抽样得到的 N_1 个风电出力场景之间具有较高的相关性。因此，本文采用 Kantorovich 法对所生成的场景进行缩减[28]。具体步骤可分为 3 步。

1）计算某 2 个场景 S_i、S_j 的 Kantorovich 距离 $D_k(S_i, S_j)$。

2）计算出每个场景 s_i 与场景 s_r 的距离 $D_k(S_i, S_r)$ 及其与场景概率 P 的乘积 $PD_k(S_i, S_r)$，选择出与 S_r 距离最近的场景并将其删去，更新场景 S_r 的概率。

3）重复执行步骤 1）～2），直至将场景数削减至设定场景数量 n。

2.3　目标函数

电网运行成本 C 最优为目标，即

$$\min C = C_{\mathrm{TA}} + \sum_{k \in N_{\mathrm{n}}} C_{\mathrm{DA},k} \tag{13}$$

式中，C_{TA} 为输电网成本（包括机组成本、弃风惩罚、售电收益等）；N_{n} 为配电网数量；$C_{\mathrm{DA},k}$ 为第 k 个配电网的运行成本（包括发电成本、弃风成本、购电成本等）。

2.3.1　输电网成本

输电网层的优化目标是协调网侧资源、挖掘网侧多源调控潜力，提升输电网的经济性。输电网成本 C_{TA} 为

$$C_{\mathrm{TA}} = C_{\mathrm{TG}} + C_{\mathrm{GU}} + C_{\mathrm{w}} + C_{\mathrm{N}} - C_{\mathrm{sell}} \tag{14}$$

式中，C_{TG}、C_{GU}、C_{W}、C_{N}、C_{sell} 分别为输电网内来自于机组燃料消耗、机组调节、弃风惩罚、核电运行成本、售电收益（负成本）的成本。其中，核电运行成本 C_{N} 为

$$\begin{cases} C_{\mathrm{N}} = \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{M_{\mathrm{N}}}\left[a_i^{\mathrm{N}} P_i^{\mathrm{N},t} + b_i^{\mathrm{N}} + S_{\mathrm{N}}\left(P_{i,n}^{\mathrm{N,max}} - P_i^{\mathrm{N},t}\right)\right] \\ S_{\mathrm{N}} = C_{\mathrm{F}} + \sigma^{\mathrm{N}} C_{\mathrm{S}} \end{cases} \tag{15}$$

式中，a_i^{N}、b_i^{N} 分别为核电机组出力成本系数和常数项；S_{N} 为核电机组调峰成本系数；C_{F} 为附加燃料成本；C_{S} 为安全成本；σ^{N} 为核电机组安全价值参数；M_{N} 为核电机组集合；T 为日前调度时段数。

2.3.2　配电网成本

配电网层的优化目标是通过分布式灵活性资源调节，最大化消纳风电和平抑扰动，降低面向输电侧的电力需求，最大限度发挥配网内部的协同自治能力。以第 k 个配电网为例，其成本 $C_{\mathrm{DA},k}$ 可表示为

$$C_{\mathrm{DA},k} = C_{\mathrm{CDG},k} + C_{\mathrm{RDG},k} + C_{\mathrm{buy},k} + C_{\mathrm{ESS},k} \tag{16}$$

式中，$C_{\mathrm{CDG},k}$、$C_{\mathrm{RDG},k}$、$C_{\mathrm{buy},k}$、$C_{\mathrm{ESS},k}$ 分别为第 k 个配电网内来自于可控分布式能源发电、弃风、购电、储能调控的成本。

2.4　约束条件

2.4.1　输电网约束

1）功率平衡约束。

$$\sum_{i \in \Omega_d^{\mathrm{G}}} P_{i,t}^{\mathrm{G}} + \sum_{j \in \Omega_d^{\mathrm{W}}} P_{j,t}^{\mathrm{W}} - \sum_{k \in \Omega_d^{\mathrm{y}}} P_{k,t}^{\mathrm{trans}} = \sum_{d \in \Omega_{\mathrm{p}}} P_{d,t} \tag{17}$$

式中，$P_{i,t}^{\mathrm{G}}$ 为第 i 个火电机组在 t 时段的出力；$P_{j,t}^{\mathrm{W}}$ 为第 j 个风电机组在 t 时段的出力；$P_{d,t}$ 为节点 d 的 t 时段的负荷；Ω_d^{G} 为节点 d 上的火电机组集合；Ω_d^{W} 为节点 d 上的风电机组集合；Ω_d^{y} 为节点 d 的输电网负荷集合；Ω_{p} 为节点 d 上的配电网集合。

2）火电机组约束。

$$\begin{cases} \underline{P}_{i,t}^{\mathrm{G}} \leqslant P_{i,t}^{\mathrm{G}} \leqslant \bar{P}_{i,t}^{\mathrm{G}} \\ P_{i,t}^{\mathrm{G}} + \Delta P_{i,t}^{1,\mathrm{up}} + \Delta P_{i,t}^{2,\mathrm{up}} \leqslant \bar{P}_{i,t}^{\mathrm{G}} \\ P_{i,t}^{\mathrm{G}} - \Delta P_{i,t}^{1,\mathrm{dn}} - \Delta P_{i,t}^{2,\mathrm{dn}} \geqslant \underline{P}_{i,t}^{\mathrm{G}} \end{cases} \tag{18}$$

$$-P_{\mathrm{down},i}^{\mathrm{G}} \leqslant P_{i,t} - P_{i,t-1} \leqslant P_{\mathrm{up},i}^{\mathrm{G}} \tag{19}$$

式（18）、（19）中，$\bar{P}_{i,t}^{\mathrm{G}}$、$\underline{P}_{i,t}^{\mathrm{G}}$ 分别为火电机组 i 在第 t 时段的最大出力和最小出力；$\Delta P_{i,t}^{1,\mathrm{up}}$、$\Delta P_{i,t}^{1,\mathrm{dn}}$ 分别为火电机组 i 在 t 时段的一次调频向上和向下备用出力；$\Delta P_{i,t}^{2,\mathrm{up}}$、$\Delta P_{i,t}^{2,\mathrm{dn}}$ 分别为火电机组 i 在 t 时段的二次调频向上和向下备用出力；$P_{\mathrm{down},i}^{\mathrm{G}}$、$P_{\mathrm{up},i}^{\mathrm{G}}$ 分别为火电

机组 i 最大往下和往上爬坡速率。

3）核电机组约束。

本文引入连续变量 μ，设机组调峰深度为 $1-\mu$，根据图2，核电出力可写为

$$\begin{cases} P_i^{\mathrm{N},t}=h_{i,t}P_{i,t}^{\mathrm{N,max}}+\mu_{i,t}P_{i,t}^{\mathrm{N,max}}+\sum_{y=1}^{3}\left(e_{i,y,t}P_{i,y}^{\mathrm{N,e}}+f_{i,y,t}P_{i,y}^{\mathrm{N,f}}\right) \\ P_{i,y}^{\mathrm{N,e}}=\left(\frac{5-y}{6}\mu+\frac{y+1}{6}\right)P_{i,\max}^{\mathrm{N}} \\ P_{i,y}^{\mathrm{N,f}}=\left(\frac{5-y}{6}\mu+\frac{y+1}{6}\right)P_{i,\max}^{\mathrm{N}} \\ h_{i,t}+l_{i,t}+\sum_{y=1}^{3}\left(e_{i,y,t}+f_{i,y,t}\right)=1 \\ 0.3\leqslant\mu\leqslant1.0 \end{cases} \tag{20}$$

式中，y 为机组过渡状态标志变量；$P_{i,y}^{\mathrm{N,f}}$ 和 $P_{i,y}^{\mathrm{N,e}}$ 分别为核电机组 i 升功率过渡状态和降功率过度状态的出力；$h_{i,t}$、$\mu_{i,t}$、$l_{i,t}$ 分别为核电机组 i 在 t 时段的满功率稳态、调峰深度归一化系数、低功率稳态指示变量；$e_{i,y,t}$、$f_{i,y,t}$ 分别为核电机组 i 在 t 时段的降功率和升功率过渡的0-1状态变量。

式(5)～(9)与式(20)共同组成完整的核电机组约束条件。

4）频率安全约束。

系统的频率变化量 Δf 可以通过负荷扰动和等效惯量计算[29]，本文所用的频率安全约束包括动态频率约束和准稳态频率约束。

动态频率约束通过限制频率，保证系统保有一定的等效惯量以阻抑频率发生较大偏差，且由于机组调频系数的限制，每个核电机组、火电机组的出力变化均会受到频率偏差限制，即

$$-\Delta f^{\max}\leqslant\Delta f_t^{\mathrm{dn}}\leqslant0\leqslant\Delta f_t^{\mathrm{up}}\leqslant\Delta f^{\max} \tag{21}$$

$$0\leqslant\Delta P_{i,t}^{\mathrm{up}}\leqslant-R_g\Delta f_t^{\mathrm{dn}} \tag{22}$$

$$0\leqslant\Delta P_{i,t}^{\mathrm{dn}}\leqslant R_g\Delta f_t^{\mathrm{up}} \tag{23}$$

式(21)～(23)中，$\Delta f^{\max}$ 为最大允许频率偏差；Δf_t^{dn}、Δf_t^{up} 分别为时段 t 偏离额定频率的决策值的下限与上限；R_g 为机组 g 的调频系数；$\Delta P_{i,t}^{\mathrm{up}}$、$\Delta P_{i,t}^{\mathrm{dn}}$ 分别为机组 i 在 t 时段的系统功率波动的上限与下限。

准稳态频率安全约束可由摇摆方程得到。此时，设频率变化率为0，建立约束限制功率变化过程中的频率偏差，即

$$\left|\Delta f^{\mathrm{ss}}\right|=\frac{\Delta P_{\mathrm{L}}-\Delta P_{\mathrm{G}}-\Delta P_{\mathrm{W}}}{DP_{\mathrm{d}}}\leqslant\Delta f_{\max}^{\mathrm{ss}} \tag{24}$$

式中，Δf^{ss} 为准稳态允许的最大频率偏差；P_{d} 为负荷总量；ΔP_{L} 为负荷功率变化总量；ΔP_{G} 为火电机组功率变化；ΔP_{W} 为风电功率变化；D 为负荷阻尼系数；$\Delta f_{\max}^{\mathrm{ss}}$ 为准稳态允许的最大频率偏差的最大值。

5）支路潮流约束。

$$\left|\delta_{d,l}\left(\begin{array}{l}\sum_{i\in\Omega_d^{\mathrm{G}}}P_{i,t}^{\mathrm{G}}+\sum_{j\in\Omega_d^{\mathrm{W}}}P_{j,t}^{\mathrm{W}}+\\ \sum_{i\in M_{\mathrm{N}}}P_{i,t}^{\mathrm{N}}-\sum_{k\in\Omega_d^{T}}P_{k,t}^{\mathrm{trans}}-\sum_{d\in\Omega_{\mathrm{D}}}P_{d,t}\end{array}\right)\right|\leqslant K_l \tag{25}$$

式中，$\delta_{d,l}$ 为节点 d 到支路 l 功率转移分布因子，其可表征从节点 d 到线路 l 的功率映射关系；K_l 为线路 l 的功率承受上限；M_{N} 为核电机组集合；Ω_d^{T} 为输配联络线集合。

6）输配电网联络线交换功率传输约束。

$$\begin{cases} P_k^{\mathrm{T}\to\mathrm{D,min}}\leqslant P_{k,t}^{\mathrm{T}\to\mathrm{D}}\leqslant P_k^{\mathrm{T}\to\mathrm{D,max}} \\ P_k^{\mathrm{T}\to\mathrm{D,min}}\leqslant P_{k,t}^{\mathrm{T}\to\mathrm{D}}+\Delta P_{k,t}^{\mathrm{T}\to\mathrm{D,up}}\leqslant P_k^{\mathrm{T}\to\mathrm{D,max}} \\ P_k^{\mathrm{T}\to\mathrm{D,min}}\leqslant P_{k,t}^{\mathrm{T}\to\mathrm{D}}-\Delta P_{k,t}^{\mathrm{T}\to\mathrm{D,dn}}\leqslant P_k^{\mathrm{T}\to\mathrm{D,max}} \end{cases} \tag{26}$$

式中，$P_{k,t}^{\mathrm{T}\to\mathrm{D}}$ 为输电网T与配电网D间通过联络线 k 交换功率；$P_k^{\mathrm{T}\to\mathrm{D,min}}$、$P_k^{\mathrm{T}\to\mathrm{D,max}}$ 分别为输电网T与配电网D间通过联络线 k 传输功率上、下限；$\Delta P_{k,t}^{\mathrm{T}\to\mathrm{D,up}}$、$\Delta P_{k,t}^{\mathrm{T}\to\mathrm{D,dn}}$ 分别为输电网T与配电网D之间通过联络线 k 传输功率上、下爬坡量。

2.4.2 配电网约束

1）功率平衡约束。

$$\sum_{i\in\Omega_d^{\mathrm{N}}}P_{i,t}^{\mathrm{G}}+\sum_{w\in\Omega_d^{\mathrm{W}}}P_{w,t}-\sum_{k\in\Omega_d^{T}}P_{k,t}^{\mathrm{trans}}=\sum_{d\in\Omega_{\mathrm{p}}}P_{d,t} \tag{27}$$

式中，Ω_d^{N} 为节点 d 上的火电机组集合；Ω_d^{W} 为节点 d 上的风电机组集合。

2）火电机组约束。

同输电网的火电机组约束。

3）储能运行约束。

$$S_{k,m,t}^{\mathrm{ESS}}=(1-\sigma)S_{k,m,t-1}^{\mathrm{ESS}}+\left(\eta_k^{\mathrm{c}}P_{k,m,t}^{\mathrm{ESS}_{z^c}}-\frac{P_{k,m,t}^{\mathrm{ESS_d}}}{\eta_k^{\mathrm{d}}}\right)\Delta t/E_{k,m}^{\mathrm{ESS}} \tag{28}$$

$$0\leqslant S_{k,m,t}^{\mathrm{ESS}}\leqslant S_{k,m}^{\mathrm{ESS,max}} \tag{29}$$

式(28)、(29)中，σ 为损耗率；η_k^{c}、η_k^{d} 为均为工作效率参数；$E_{k,m}^{\mathrm{ESS}}$ 为在第 k 个配电网中第 m 个储能装置的容量；$S_{k,m,t}^{\mathrm{ESS}}$ 为 t 时刻段配电网 k 中的储能装置 m 的能量状态的归一化量。

4）配电网潮流约束。

$$\sum_{e\in u(f)}\left(P_{ef,t}-\frac{P_{ef,t}^2+Q_{ef,t}^2}{V_{e,t}^2}r_{ef}\right)+P_{f,t}=\sum_{j\in v(f)}P_{fj,t} \tag{30}$$

$$\sum_{e\in u(f)}\left(Q_{ef,t}-\frac{P_{ef,t}^2+Q_{ef,t}^2}{V_{e,t}^2}x_{ef}\right)+Q_{f,t}=\sum_{j\in v(f)}Q_{fj,t} \tag{31}$$

$$V_{f,t}^2 = V_{e,t}^2 + 2\left(r_{ef}P_{ef,t} + x_{ef}Q_{ef,t}\right) - \left(r_{ef}^2 + x_{ef}^2\right)\frac{P_{ef,t}^2 + Q_{ef,t}^2}{V_{e,t}^2} \tag{32}$$

式(30)～(32)中，$u(f)$为以节点f为初始节点的支路末端节点集合；r_{ef}、x_{ef}分别为节点e、f间的电阻、电抗；$P_{fj,t}$，$Q_{fj,t}$为t时段的节点f、j间有功、无功功率；$P_{f,t}$、$Q_{f,t}$分别为节点f的有功、无功功率；$V_{e,t}$、$V_{f,t}$分别为t时段的节点e，f间的电压；$P_{ef,t}$，$Q_{ef,t}$为t时段的节点e、f间的有功、无功功率；Δt为时间间隔，取为1 h。

5）输配电网联络线交换功率传输约束。

同输电网的输配电网联络线交换功率传输约束。

6）综合范数约束。

在文2.2中的拉丁超立方抽样所构建的风电出力场景中，当数据规模趋近于无穷大时，风电的参考分布会收敛到1-范数和∞-范数下的真实分布。因此，本文采用这2种范数来构建2种置信集（使用这2个范数约束来保证模型的收敛性）。定义2种置信集分别为Ω_l和Ω_∞，具体方法参考文献[24]，此处不再赘述，即

$$\Omega = \begin{Bmatrix} \| p_k - p_k^0 \|_1 \leqslant \theta_1 \\ \{ p_k \} \\ \| p_k - p_k^0 \|_\infty \leqslant \theta_\infty \end{Bmatrix} \tag{33}$$

式中，p_k为场景k的概率；p_k^0为由风电历史数据得到的第k个场景的初始概率；θ_1和θ_∞分别为1-范数$\|\cdot\|_1$与∞-范数$\|\cdot\|_\infty$的容差值，由给定的的置信度和历史数据量决定。

其他约束见文献[30-32]。

2.5　线性化处理

式(32)为绝对值约束，其形式不便于求解器求解。因此，本文引入0-1变量z_k^+和z_k^-，将其处理成线性约束[32]，即

$$z_k^+ + z_k^- \leqslant 1,\ \forall k \tag{34}$$

$$\begin{cases} 0 \leqslant p_k^+ \leqslant z_k^+\theta_1, & \forall k \\ 0 \leqslant p_k^- \leqslant z_k^-\theta_1, & \forall k \\ p_k = p_k^0 + p_k^+ - p_k^-, & \forall k \end{cases} \tag{35}$$

式(34)、(35)中，p_k^+和p_k^-分别为p_k相对p_k^0的正偏差和负偏差。

式(34)中的1-范数约束被转化为

$$\sum_{k=1}^{K} p_k^+ + p_k^- \leqslant \theta_1 \tag{36}$$

式中，K为场景总个数。

类似地，可对Ω_∞进行处理。引入0-1变量y_k^+和y_k^-，则有

$$y_k^+ + y_k^- \leqslant 1, \quad \forall k \tag{37}$$

$$\begin{cases} 0 \leqslant p_k^+ \leqslant y_k^+\theta_\infty, & \forall k \\ 0 \leqslant p_k^- \leqslant y_k^-\theta_\infty, & \forall k \\ p_k = p_k^0 + p_k^+ - p_k^-, & \forall k \end{cases} \tag{38}$$

式(34)中∞-范数约束被转化为

$$p_k^+ + p_k^- \leqslant \theta_\infty,\ \forall k \tag{39}$$

3　算例分析

3.1　算例参数设置

为验证本文所提方法的有效性，对所建立的调度方法进行算例分析，选取1个IEEE 118节点的输电网和3个IEEE 33节点的配电网作为测试系统。其中，输电网中火电机组的相关参数及线路参数来源于文献[33]，配电网的线路参数则参考文献[34]。这3个配电网分别连接于输电网节点49、64和89；集中式风电场则接入输电网节点38，其总装机容量为1 000 MW；网侧储能接在输电网节点71上，其总装机容量为400 MW；用户侧储能分别接在配电网节点15、27上，单台装机容量为4 MW；2台300 MW的核电机组接在输电网节点63、77上，每台机组的额定容量为300 MW，共配置2台机组。机组的最大出力为300 MW，最小出力为125 MW，机组在满功率工况下的最小持续运行时间为6 h，在低功率工况下的最小持续运行时间为5 h。机组的爬坡速率为225 MW/h，机组固定运行成本参数b为48 320元/h，功率相关的成本系数a为61.28元/(MW·h)，调峰燃料成本为18.23元，调峰过程中的安全成本为41.30元/(MW·h)；输配电网间的最大交换功率为1 000 kW；输配电网弃风惩罚成本为100元/(MW·h)；设Δf_{dead}为频率偏差死区值，取0.033 Hz。基于MATLAB的YALMIP进行建模，调用GUROBI求解器进行求解，计算机处理器为Intel i7-12700H，内存为32 G。

3.2　优化结果分析

基于拉丁超立方法生成并缩减得到风电出力场景，如图7所示。在图7中，经拉丁超立方抽样与场景缩减得到的典型出力场景1～5的初始概率依次为0.134、0.258、0.155、0.206、0.247。

本文设置了2个调度场景对调度结果进行对比。其中，调度场景1为常规核-火联合调度场景，

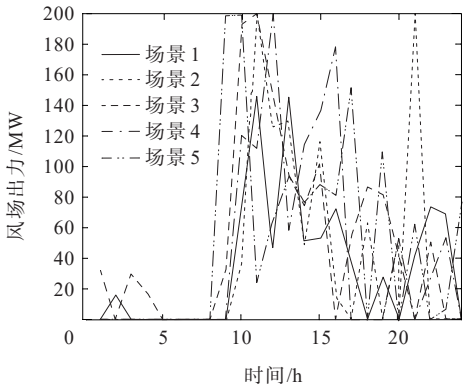

图7 风电出力场景

Figure 7 Wind power output scenario

调度场景2为运用本文模型的多源联合调度场景。火电机组启动情况如图8所示。弃风情况见表1。从图8中可以看出，在负荷高峰时，多源联合调度调度的火电机组启动数量低于常规调度方法的。由表1可知，本文所提方法显著降低了弃风弃光率和总成本，通过以核储为核心的多源协同调控降低了对火电机组调节的依赖。这是由于网侧储能装置的接入和配电网调度响应能力的充分挖掘，减轻了网侧机组调节压力，缓解了新能源接入电网导致的机组调节成本剧增问题，有力促进风电的消纳，有效提升新型电力系统的运行经济安全性。

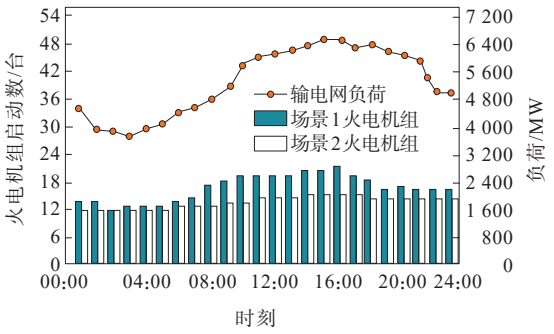

图8 火电机组启动情况

Figure 8 Starting situation of thermal power units

表1 弃风情况

Table 1 Wind abandonment situation

调度场景	弃风率/%	总成本/万元
1	1.52	506.31
2	0.31	499.54

核-火联合调峰下的核电出力如图9所示。这2个机组调峰深度分别为34.02%和39.55%，这2个机组低功率运行时间均为6 h。

多源联合调度下的核电出力如图10所示。从图10中可以看出，储能削峰填谷的作用使得系统的

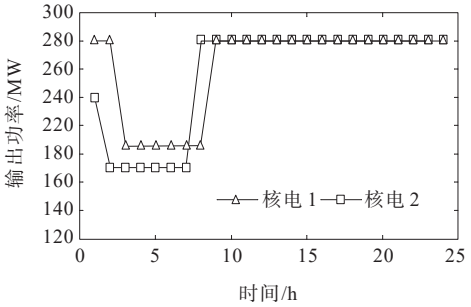

图9 核-火联合调峰下的核电出力

Figure 9 Nuclear power output under nuclear-thermal joint peak shaving

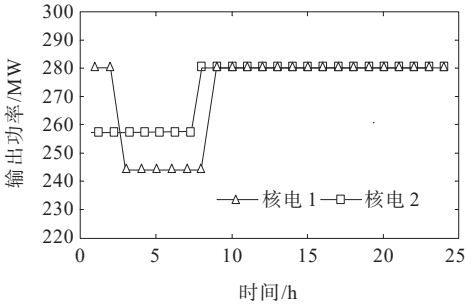

图10 多源联合调度下的核电出力

Figure 10 Nuclear power output under multi-source joint scheduling

爬坡速率提升，核电机组1的调峰深度优化为9.01%，核电机组2的调峰深度优化为13.12%。核储协同优化改善了核电机组的发电特性，多元联合调度提高了系统运行的安全性和经济性。

选取负荷峰值时段17:00—18:00，以此时刻各机组状态为例，在MATLAB的Simulink中对IEEE 118节点系统进行测试，与无频率安全约束的核储协调优化模型计算所得的机组组合方案下作对比，在t=60 s时增加10%负荷模拟扰动，频率变化如图11所示。从图11中可以看出，计及频率安全约束可以有效改善系统频率的波动，提高系统频率响应能力，保障核-储协同优化调度过程中的频率安全，充分挖掘了核电、储能的协调性。

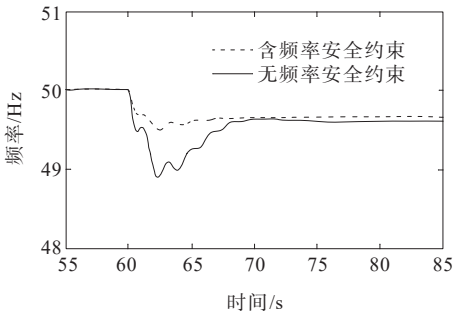

图11 频率变化

Figure 11 Frequency changes

4 结语

本文研究了调峰–调频约束下核–储协调的新能源承载力提升调度问题,系统分析了核电与储能协同参与调峰、调频的机理,基于输配协同调度框架,构建了综合范数约束下的新能源出力场景。通过详细的算例分析,验证了所提方法在提升系统频率调节能力和新能源消纳水平方面的有效性和实用性。

本文通过对输电网和配电网之间的调度需求进行解耦,制定合理的日前优化策略,提升了输电网对配电网的承载能力。结合核电自稳定性、自调节性特性与储能的快速响应能力,实现了核–储协同的调峰、调频控制,有效缓解了电网高峰负荷压力,降低了系统运行成本和弃风弃光率,提高了风电、光伏等可再生能源的利用效率。

此外,本文引入频率安全约束,深入探讨了核电和储能在频率调节中的协同作用。通过挖掘核电与储能的调节潜力,使系统在含高比例新能源发电的情况下,依然能够保持频率稳定性,并对新能源进行充分消纳。

本文提出的调峰–调频约束下核–储协调的新能源承载力提升调度方法,为核电机组深度参与电网调峰、调频提供了新的思路和理论支持,对实现高比例新能源接入下的电力系统安全稳定运行具有重要意义,为未来高比例新能源与海量分布式资源接入下的电网安全稳定运行提供了决策支撑。本文方法具备较强的市场适应性,随着电力市场的逐步放开,后续可以结合电力市场的价格信号,优化多品种市场耦合下的新型主体交易和调度策略,进一步提高核电与储能系统在市场化交易中的经济性和灵活性。

参考文献:

[1] 彭道刚,税纪钧,王丹豪,等.“双碳”背景下虚拟电厂研究综述[J].发电技术,2023,44(5):602-615.
PENG Daogang, SHUI Jijun, WANG Danhao, et al. Review of virtual power plant under the background of "dual carbon"[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(5):602-615.

[2] 张兴平,何澍,王泽嘉,等.不同新能源渗透率下燃煤机组行为策略分析[J].电力建设,2022,43(5):9-17.
ZHANG Xingping, HE Shu, WANG Zejia, et al. Behavior strategy of coal-fired units under different new energy penetration rate[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(5):9-17.

[3] 郭正雄,秦耀文,李欣悦,等."双碳" 一站式数字化服务平台建设与应用[J].供用电,2023,40(11):18-25.
GUO Zhengxiong, QIN Yaowen, LI Xinyue, et al. Construction and application of the "dual carbon" one-stop digital service platform[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(11):18-25.

[4] 张林."双碳" 背景下的中国核电发展前景研究[J].产业与科技论坛,2022,21(24):18-20.
ZHANG Lin. Research on the development prospect of nuclear power in China under the background of "double carbon" [J]. Industrial & Science Tribune, 2022, 21(24):18-20.

[5] 张家龙,宋彭,瞿体明.磁约束可控核聚变装置的磁体系统综述[J].发电技术,2024,45(6):995-1015.
ZHANG Jialong, SONG Peng, QU Timing. Overview of magnetic confinement controlled nuclear fusion reactors and superconducting magnet technologies[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(6):995-1015.

[6] 冀肖彤,杨东俊,方仍存,等."双碳" 目标下未来配电网构建思考与展望[J].电力建设,2024,45(2):37-48.
JI Xiaotong, YANG Dongjun, FANG Rengcun, et al. Research and prospect of future distribution network construction under dual carbon target[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(2):37-48.

[7] 冀肖彤,杨东俊,方仍存,等."双碳" 目标下未来配电网构建思考与展望[J].电力建设,2024,45(2):37-48.
JI Xiaotong, YANG Dongjun, FANG Rengcun, et al. Research and prospect of future distribution network construction under dual carbon target[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(2):37-48.

[8] 陶钧,石文翔,张江涛,等.秦山核电厂运行许可证延续技术路线研究与应用[J].核动力工程,2022,43(S1):7-10.
TAO Jun, SHI Wenxiang, ZHANG Jiangtao, et al. Research and application of technical route for operation license extension in Qinshan nuclear power plant[J]. Nuclear Power Engineering, 2022, 43(S1):7-10.

[9] 吴熙,陈康文,郭其胜,等.考虑核电灵活参与调峰的多源联合运行低碳经济调度[J].电力工程技术,2024,43(6):1-11.
WU Xi, CHEN Kangwen, GUO Qisheng, et al. A multi-source combined operation low carbon economy dispatch considering flexible participation of nuclear power in peaking[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(6):1-11.

[10] YURIN V E, EGOROV A N. Primary frequency regulation in the power system by nuclear power plants based on hydrogen-thermal storage[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(8):5010-5018.

[11] 方朝雄,李旭东,林章岁,等.核电机组对电力系统一次调频性能影响仿真分析[J].华北电力大学学报(自然科学版),2019,46(5):54-60.
FANG Chaoxiong, LI Xudong, LIN Zhangsui, et al. Simulation analysis on influence of nuclear power units on primary frequency regulation of power system[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition),2019,46(5):54-60.

[12] 唐贞鹏,陈世和,伍宇忠,等.压水堆核电机组一次调频动态仿真[J].电网技术,2013,37(11):3197-3201.
TANG Zhenpeng, CHEN Shihe, WU Yuzhong, et al. Dynamic simulations of primary frequency regulation for pressurized water reactor nuclear power generation units[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3197-3201.

[13] 程瑛,贺瑶,方彦军.基于机理法的核电机组汽轮机一次调频模型的研究[J].热力发电,2012,41(9):39-43.
CHENG Ying, HE Yao, FANG Yanjun. Rigorous method based primary frequency regulation model for steam turbine in nuclear power unit[J]. Thermal Power Generation,2012,41(9):39-43.

[14] 国家发展改革委 国家能源局关于印发«"十四五"现代能源体系规划»的通知[EB/OL].(2022-01-29)[2024-10-16]. https://www. gov. cn/zhengce/zhengceku/2022-03/23/content_5680759.htm.
Notice of the National Development and Reform Commission and the National Energy Administration on issuing the '14th Five-Year Plan for the modern energy system' [EB/OL].(2022-01-29)[2024-10-16].https://www.gov. cn/zhengce/zhengceku/2022-03/23/content_5680759.htm.

[15] 周刚.考虑核电参与的多类型电源联合调峰优化方法[J].电网技术,2019,43(3):928-935.
ZHOU Gang. An approach on coordinative peaking optimization for power system with nuclear power plant participation[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 928-935.

[16] 刘国伟,吴杰康,马楠,等.考虑"风-荷"不确定性的海上"风-储"协同调峰优化模型[J].电网与清洁能源,2024,40(7):1-10.
LIU Guowei, WU Jiekang, MA Nan, et al. A collaborative peak shaving optimization model for offshore"WindStorage" Considering the uncertainties of"wind-load"[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(7):1-10.

[17] 夏震.考虑风电不确定性及需求响应的动态SCUC多目标优化研究[D].南昌:南昌航空大学,2022.
XIA Zhen. Research on power system optimal schedulingconsidering wind power frequency modulation andfrequency constraints[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University,2022.

[18] 郑云平,亚夏尔·吐尔洪.基于VSG技术的风:光—储系统自适应调频控制策略研究[J].高压电器,2023,59(7):12-19.
ZHENG Yunping, YAXAR·Turgun. Research on adaptive frequency modulation control strategy of wind-PV-storage system based on VSG technology[J]. High Voltage Apparatus,2023,59(7):12-19.

[19] WANG C, LU Z X, QIAO Y. A consideration of the wind power benefits in day-ahead scheduling of wind-coal intensive power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems,28(1):236-245.

[20] 唐冬来,周强,宋卫平,等.基于网格聚类的峡谷风电短期功率预测方法[J].供用电,2023,40(1):80-87.
TANG Donglai, ZHOU Qiang, SONG Weiping, et al. Short term power prediction method of canyon wind power based on grid clustering[J]. Distribution & Utilization, 2023,40(1):80-87.

[21] ZHOU W, HU S B, SUN H, et al. Joint generation dispatching of power system with nuclear power units participating in peak load regulation[C]//2016 International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE). Chengdu, China. IEEE, 2016:324-327.

[22] GE F C, LIN Y, JU Y T, et al. Unit commitment considering the characteristics of nuclear and wind power [C]//2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON). Guangzhou, China. IEEE, 2018:4765-4771.

[23] 中国核能行业协会.2022年1-12月全国核电运行情况[EB/OL].(2023-02-03) [2024-10-16].http://www.heneng.org.cn/home/hd/infotwo/id/69513/sid/9/catId/162.html.
China Nuclear Energy Industry Association. National nuclear power operation status for January to December 2022[EB/OL]. (2023-02-03) [2024-10-16]. http://www.heneng. org. cn/home/hd/infotwo/id/69513/sid/9/catId/162.html.

[24] 李昊,李文安.核电与其他发电形式经济性对比研究[J].价值工程,2024,43(30):39-41.
LI Hao, LI Wenan. Comparative study of the economics of nuclear power and other forms of power generation[J]. Value Engineering,2024,43(30):39-41.

[25] 沈子伦,尹忠东,陈俊晔,等.基于SOC预测的火储联合调频控制策略[J].电力建设,2023,44(9):129-136.
SHEN Zilun, YIN Zhongdong, CHEN Junye, et al. Joint frequency modulation control method for energy storage thermal power units based on SOC prediction[J]. Electric Power Construction,2023,44(9):129-136.

[26] 崔红芬,杨波,蒋叶,等.基于模糊控制和SOC自恢复储能参与二次调频控制策略[J].电力系统保护与控制,

2019,47(22):89-97.
CUI Hongfen, YANG Bo, JIANG Ye, et al. Strategy based on fuzzy control and self adaptive modification of SOC involved in secondary frequency regulation with battery energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2019,47(22):89-97.

[27] 陈宏,贺悝,谭庄熙,等.考虑SOC均衡的储能电站一次调频协同控制方法[J].电力科学与技术学报,2023,38(6):105-114.
CHEN Hong, HE Li, TAN Zhuangxi, et al. Coordinated control method of primary frequency regulation for energy storage power station considering SOC balance [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023,38(6):105-114.

[28] 李小腾,薛成,张艳丽,等.考虑新能源不确定出力的有功无功协调降损控制策略研究[J].电网与清洁能源,2024,40(2):135-141+148.
LI Xiaoteng, XUE Cheng, ZHANG Yanli, et al. Research on active and reactive power coordination loss reduction control strategy considering the uncertain output of new energy[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(2): 135-141+148.

[29] 曹润杰.计及风电调频和频率约束的电力系统优化调度研究[D].宜昌:三峡大学,2020.
CAO Runjie. Research on optimal dispatching of power system considering wind power frequency modulation and frequency constraints[D]. Yichang: China Three Gorges University,2020.

[30] 税月,刘俊勇,高红均,等.考虑风电不确定性的电热综合系统分布鲁棒协调优化调度模型[J].中国电机工程学报,2018,38(24):7235-7247+7450.
SHUI Yue, LIU Junyong, GAO Hongjun, et al. A distributionally robust coordinated dispatch model for integrated electricity and heating systems considering uncertainty of wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2018,38(24):7235-7247+7450.

[31] 王静,徐箭,廖思阳,等.计及新能源出力不确定性的电气综合能源系统协同优化[J].电力系统自动化,2019,43(15):2-9.
WANG Jing, XU Jian, LIAO Siyang, et al. Coordinated optimization of integrated electricity-gas energy system considering uncertainty of renewable energy output[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(15):2-9.

[32] 刘春蕾,庞鹏飞,石纹赫,等.计及碳中和效益及清洁能源消纳的虚拟电厂双层协同优化调度[J].供用电,2021,38(9):19-27.
LIU Chunlei,PANG Pengfei,SHI Wenhe,et al.Taking into account carbon neutrality benefit and clean energy consumption of virtual power plant two-layer cooperative optimization dispatching[J]. Distribution & Utilization,2021,38(9):19-27.

[33] CHEN Z, GUO C X, DONG S F, et al. Distributed robust dynamic economic dispatch of integrated transmission and distribution systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2021,57(5):4500-4512.

[34] 谢康胜,李华强,王俊翔,等.考虑输配电网协同的源荷储资源统筹规划[J].电力建设,2021,42(9):41-52.
XIE Kangsheng, LI Huaqiang, WANG Junxiang, et al. Overall planning of source-load-storage resources considering coordination in transmission and distribution network[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(9): 41-52.