

# 多时间尺度下考虑电制氢细分能力和等效负荷分解的电网调峰研究

石坤<sup>1</sup>, 陈宋宋<sup>1</sup>, 陈雪洁<sup>2</sup>, 陈钊蕊<sup>2</sup>, 闫华光<sup>1</sup>, 吴英俊<sup>2</sup>

(1. 需求侧多能互补优化与供需互动技术北京市重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京 100192; 2. 河海大学 电气与动力工程学院, 江苏 南京 211100)

**摘要:** 新能源具有明显的波动性和反调峰特性, 大规模新能源并网对电力系统的调峰提出了重要挑战。氢能作为一种潜在的调峰资源, 具有很好的应用潜力。提出了一种基于电制氢的多时间尺度调峰调度模型, 旨在解决这一问题。首先, 建立电制氢调峰能力评价指标模型, 并计算不同类型的电制氢调峰能力评价指标。同时, 构建了一种基于坐标距离最小化和小波分解的等效负荷分解模型, 用于将不同的等效负荷分量与不同的电制氢系统进行匹配。随后, 以提高调峰的经济性和效果性为目标, 提出了针对不同负荷分量的多时间尺度调峰调度方案。最后, 通过对IEEE-30节点系统的仿真验证, 证明了所提模型的有效性。

**关键词:** 电制氢; 负荷分解; 调峰; 多时间尺度

**中图分类号:** TM734 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed25472

## Grid Peak-shaving Study Considering Electrolytic Hydrogen Production Segmentation Capacity and Equivalent Load Disaggregation in Multi-time Scale

SHI Kun<sup>1</sup>, CHEN Songsong<sup>1</sup>, CHEN Xuejie<sup>2</sup>, CHEN Zhaorui<sup>2</sup>, YAN Huaguang<sup>1</sup>, WU Yingjun<sup>2</sup>

(1. *Beijing Key Laboratory of Demand-side Multi-energy Complementary Optimization and Supply-demand Interaction Technology (China Electric Power Science Research Institute Co., Ltd.), Beijing 100192, China;*  
2. *College of Electrical and Power Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, Jiangsu, China*)

**Abstract:** New energy has obvious volatility and anti-peak-shaving characteristics, and the integration of large-scale new energy into the power grid poses challenges to the peak-shaving. Hydrogen energy has a good potential for application as a potential peak-shaving resource. A multi-time scale peak-shaving scheduling model based on electrolytic hydrogen production was proposed with the aim of solving this problem. Firstly, the evaluation index model of peak-shaving capacity of electrolytic hydrogen was introduced and different types of electrolytic hydrogen peaking capacity were calculated. Meanwhile, an equivalent load disaggregation model based on coordinate distance minimization and wavelet transform techniques was constructed for matching different equivalent load components with different electrolytic hydrogen production systems. Subsequently, a multi-time scale peak-shaving scheduling scheme for different load components was proposed with the objective of improving the economics and effectiveness of peak-shaving. Finally, the validity of the proposed model was confirmed through simulations on the IEEE-30 node system.

**Key words:** electrolytic hydrogen production; load disaggregation; peak-shaving; multi-time scale

大规模新能源并网在环境减负方面具有重要意义, 然而其不确定性和波动性带来了电网的反调峰和风电消纳问题, 这使相关挑战日益严峻<sup>[1-2]</sup>。因此, 需积极探索解决这一问题的方法<sup>[3-5]</sup>。

目前, 解决新能源消纳问题的常见方法包括深度调峰火电机组<sup>[6]</sup>、合理弃风策略以及储能系统参与调峰<sup>[7]</sup>。通常情况下, 当其它调峰资源有限时, 火电机组承担了主要调峰任务<sup>[8]</sup>。然而, 当新能源波动较大时, 火电机组无法有效解决新能

**基金项目:** 国家电网公司科技项目(5108-202218280A-2-382-XG)

**作者简介:** 石坤(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为智能用电、电力需求侧管理, Email: shikkun1984@163.com

源消纳问题。因此,采取合理的弃风策略以及引入储能系统成为缓解这一问题的途径。例如,文献[9-10]探讨了如何利用储能电站削峰填谷能力来改善火电机组的深度调峰策略。另一方面,文献[11]研究了如何通过电化学储能和抽水蓄能系统联合优化来减少风电的弃风量。然而,这些研究主要侧重于电化学储能和抽水蓄能系统的应用,对其它形式的储能系统的调峰研究较少。

基于电制氢的储能技术在解决风电消纳问题上具有巨大的潜力<sup>[12]</sup>。例如,文献[13-14]提出了一种基于新能源电能转化为氢能(power-to-hydrogen, P2H)和储氢技术机理的调度模型,以提高大容量和长周期充放电下电制氢储能系统的经济竞争力。尽管这些策略是基于前一天的预测数据,但随着风电预测精度的提高,这些方法在应对更短时间尺度的调峰需求上表现不佳。

因此,采用多时间尺度的调峰策略模型是解决这一问题的有效途径之一。以文献[15-16]为例,其建立了多时间尺度协调调度模型,通过滚动修正调度预案以应对风电的不确定性。然而,这些研究通常仅关注经济性目标,而忽视了在调峰幅度较大且持续时间较长的情况下,调峰效果的重要性。因此,仅从经济性出发制定的策略可能无法实现预期的调峰效果。此外,现有研究通常将新能源的整体调峰需求视为一个统一整体,而鲜有研究将总等效负荷细分为具有不同特点的等效负荷分量,并综合考虑多种调峰方法。

基于调峰能力和等效负荷分解制定调峰策略是解决针对性调峰问题的有效方法。在调峰能力方面,现有研究主要集中在储能电站领域。储能电站通常可分为功率型和能量型两大类,它们适用于不同调峰场景。功率型储能电站主要用于应对短期高功率输出和吸收需求,而能量型储能电站则主要用于长期能量储存和释放<sup>[17]</sup>。负荷分解领域在负荷预测领域的研究较为广泛。一些方法采用统计分解法将总负荷分解为基础和气象敏感负荷<sup>[18-19]</sup>。另外,小波分解<sup>[20]</sup>或变分模态分解<sup>[21]</sup>等方法将总负荷分解为低频和高频分量。尽管调峰能力和负荷分解领域已有许多研究,但在针对性调峰策略方面的研究较为有限。

针对上述问题,本文提出了一种多时间尺度调峰调度模型,该模型基于电制氢调峰能力的详细划分以及等效负荷的分解,旨在提高新能源的

消纳效率。首先,通过建立电制氢技术的动态响应能力、电能质量要求、负载范围和经济成本模型,提出了三类电制氢调峰能力评价指标,并计算电解槽和燃料电池的调峰潜力。同时,以坐标距离最小化为目标,将总等效负荷分解为基础负荷分量和其它负荷分量。在此基础上,运用二王小波分解法将其它负荷分量进一步分解为峰值和波动负荷分量,并将三类负荷分量与不同电制氢系统相匹配。随后,考虑策略的精准性和快速性,针对不同负荷分量,以调峰经济性和效果性为目标,制定日前-日内两阶段调峰策略。最后,通过算例仿真验证了该模型的有效性和经济性。

## 1 基于电制氢的含新能源电力系统调峰框架

传统调峰调度模型是提前一天基于对新能源和用电数据的预测,来制定第二天的调度计划。然而,这一方法存在以下两个问题:

1) 新能源和用电负荷都具有不确定性,因此提前一天进行的新能源和用电负荷数据预测通常不够准确。因此,仅仅通过制定日前调度计划难以满足实际需要的实时调峰需求。

2) 在某个季节内,每日的等效负荷包含许多相似的成分,它们的调峰计划往往相似度较高。区别通常出现在非相似负荷部分。因此,直接针对整体等效负荷制定的调峰计划通常缺乏必要的个性化,可能与实际情况产生偏差。

电制氢调峰需求由用电负荷、火电出力和新能源出力共同决定。定义用电负荷与火电和新能源出力的差值为等效负荷。当等效负荷大于零时,需要将已存储的氢能转化为电能(hydrogen-to-power, H2P);而当等效负荷小于零时,需要将多余的新能源转化为氢气储存。这可以减少新能源反调峰带来的等效负荷峰谷差的波动。

选择不同类型的电制氢系统用于调峰需根据电制氢的调峰能力和等效负荷的成分来决定。通过组合具有不同调峰能力的电解槽和燃料电池,可以形成不同调峰特点的电制氢系统。同时,由于等效负荷的成分差异很大,所以不同等效负荷成分需要使用不同的电制氢系统。

综上所述,本研究提出以下方法来解决上述两个问题。首先,基于电制氢的响应能力和电能质量、负载范围和经济成本等三个调峰能力评价指标,分析不同类型电制氢系统的调峰潜力。其

次,对一个季节内的日等效负荷进行分解,得到日基础负荷、日峰值负荷和日波动负荷成分,然后将它们与具有不同调峰特点的电制氢系统相匹配,以制定具有针对性的调峰计划。此外,根据不同类型的等效负荷成分,建立了多时间尺度的日前-日内调峰模型,以实现精确的实时调峰需求满足,并提高了调峰计划的制定速度。图1和图2分别展示了具体的方法框架和流程图。

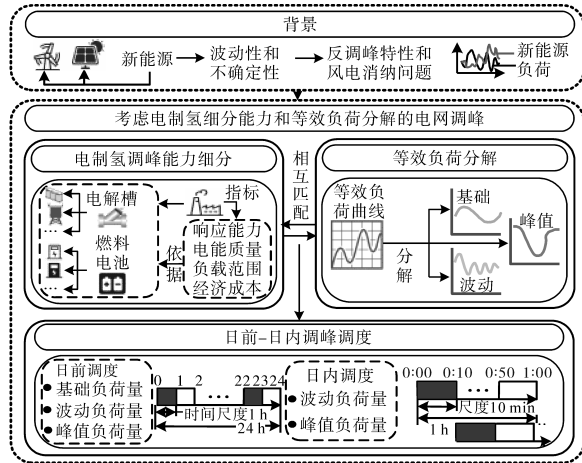


图1 基于电制氢的含新能源电力系统的调峰框架

Fig.1 Peak-shaving framework of new energy-containing power system based on electrolytic hydrogen production

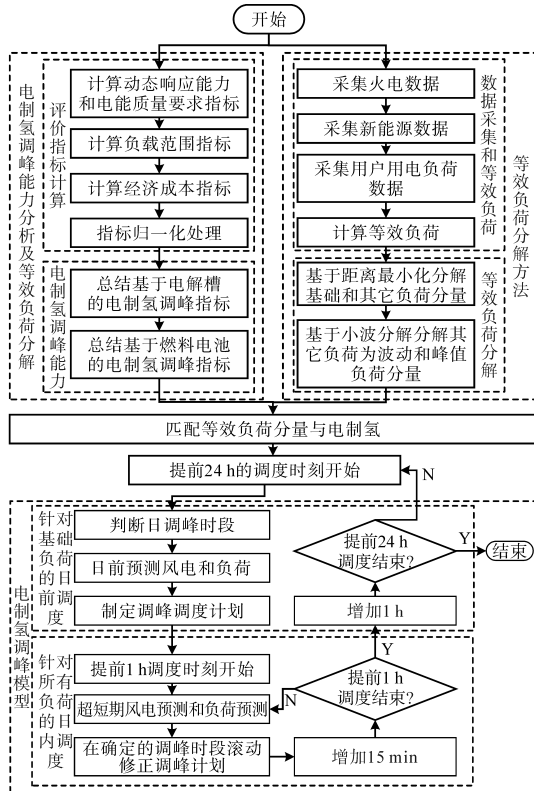


图2 基于电制氢的含新能源电力系统的调峰流程图

Fig.2 Peak-shaving flow-process diagram of new energy-containing power system based on electrolytic hydrogen production

## 2 电制氢调峰能力分析及其等效负荷分解

本节首先对电制氢调峰能力进行分析,其次将等效负荷分解为三种负荷分量,最后将等效负荷分量与电制氢相匹配。

### 2.1 电制氢调峰能力分析

#### 2.1.1 调峰能力评价指标模型

为了区分不同电制氢技术的调峰能力,本节建立三类电制氢技术调峰指标,分别是动态响应能力和电能质量要求指标、负载范围指标及经济成本指标。它们具体模型表示如下:

1) 动态响应能力和电能质量要求指标  $I_1$ 。动态响应能力一般包括设备启停能力和爬坡能力。其中设备启停能力模型如下式所示:

$$\iota = \frac{\alpha_{ec,max} + \beta_{ec,max}}{2} \quad (1)$$

$$\alpha_{ec,max} = \max_h \left( \sum_{t=1}^T \alpha_{ec,t,h} \right) \quad (2)$$

$$\beta_{ec,max} = \max_h \left( \sum_{t=1}^T \beta_{ec,t,h} \right)$$

$$\alpha_{ec,t,h} - \beta_{ec,t,h} = o_{ec,t,h} - o_{ec,t-1,h} \quad (3)$$

$$\alpha_{ec,t,h} \leq 1 - o_{ec,t,h} \quad (4)$$

$$\beta_{ec,t} \leq o_{ec,t} \quad (5)$$

$$o_{ec,0} = o_{ec,T} \quad (6)$$

式中:  $t$  为设备运行时刻,且  $0 \leq t \leq T$ ;  $T$  为设备运行总时段;  $\iota$  为设备启停能力;  $\alpha_{ec,max}, \beta_{ec,max}$  分别为设备日内开机、停机次数上限;  $o_{ec,t}, \alpha_{ec,t}, \beta_{ec,t}$  分别为设备的开关状态、开始启动和开始关停动作的指示,  $\alpha_{ec,t}$  和  $\beta_{ec,t}$  仅在模块开始启动动作或开始关停后的首个时间段取 1,  $o_{ec,t}$  的初始状态由日内最后一个时段的工作状态决定。

设备的爬坡能力体现在对工作功率的约束:

$$\Delta P_{ec,max} = \max_h \left[ \frac{(|P_{ec,t,h} - P_{ec,t-1,h}| - (1 - o_{ec,t,h})P_{fz,max})}{o_{ec,t,h}} \right] \quad (7)$$

式中:  $\Delta P_{ec,max}$  为开机时单位时段最大爬坡功率。

通过设置不同的权重,综合上述设备启停能力和爬坡能力,动态响应能力指标可以表示为

$$\sigma = \omega_1 \iota + \omega_2 \Delta P_{ec,max} \quad (8)$$

式中:  $\sigma$  为动态响应能力指标;  $\omega_1, \omega_2$  分别为设备启停和爬坡能力的权重。

设备的电能质量要求模型如下式所示:

$$\rho = \sqrt{\frac{1}{T_1 - 1} \sum_{t=1}^T (P_{\text{line},t} - P_{\text{line}}^{\text{av}})^2} \quad (9)$$

式中: $\rho$ 为电能质量要求; $P_{\text{line},t}$ 为电能输入或输出线功率; $P_{\text{line}}^{\text{av}}$ 为评估周期内输入或输出线平均功率。

通过式(8)和式(9)的权重组合,可以表示出第一类指标 $I_1$ 。

2) 负载范围指标 $I_2$ 。负载范围模型如下式所示:

$$\xi = P_{\text{fz,max}} - P_{\text{fz,min}} \quad (10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{\text{fz,min}} = \min_h \left[ \frac{(P_{\text{ec},t,h} - \sum_{\tau=0}^{\gamma_{\text{ec}}-1} \alpha_{\text{ec},t,h} P_{\text{fz,boot}})}{o_{\text{ec},t,h}} \right] \\ P_{\text{fz,max}} = \max_h \left[ \frac{(P_{\text{ec},t,h} - \sum_{\tau=0}^{\gamma_{\text{ec}}-1} \alpha_{\text{ec},t,h} P_{\text{fz,boot}})}{o_{\text{ec},t,h}} \right] \end{array} \right. \quad (11)$$

式中: $\xi$ 为负载能力指标; $P_{\text{ec},t}$ 为设备负载功率; $P_{\text{fz,boot}}$ 为设备需要负载; $P_{\text{fz,min}}$ , $P_{\text{fz,max}}$ 分别为设备最小和最大负载; $\gamma_{\text{ec}}$ 为设备启动时延,表示在开启后的第 $\gamma_{\text{ec}}$ 个时间段进入开机状态。

3) 经济成本指标 $I_3$ 。经济成本包括设备投资成本、平均维护成本和效率等效成本。计算公式如下:

$$C_{\text{ec}} = C_i + D_m c_m + C_h \quad (12)$$

$$C_h = (1 - \eta_{\text{ec},t}) P_{i,t} c_h \quad (13)$$

$$\eta_{\text{ec},t} = P_{a,t} / P_{i,t} \quad (14)$$

式中: $C_i$ 为设备投资成本; $c_m$ 为设备每日的平均维护成本; $D_m$ 为维修天数; $C_h$ 为制氢/发电效率等效成本; $\eta_{\text{ec},t}$ 为设备产氢/产电效率; $P_{i,t}$ 为工作产氢/产电功率; $c_h$ 为减少一单位制氢/产电所损失的成本; $P_{a,t}$ 为实际产出功率。

为使上述指标能够在同一量纲范围内,且统一指标方向为向下最优,对指标进行归一化处理:

$$I_{k,j} = \max \left[ \frac{\nu_{k,j} - \min(\nu_k)}{\max(\nu_k) - \min(\nu_k)} \right] - \frac{\nu_{k,j} - \min(\nu_k)}{\max(\nu_k) - \min(\nu_k)} \quad (15)$$

式中: $I_{k,j}$ 为处理后第 $j$ 个设备的第 $k$ 个指标; $\nu_k$ 为第 $j$ 个设备的第 $k$ 个指标; $\min(\nu_k)$ , $\max(\nu_k)$ 分别为所有设备的第 $k$ 个指标的最小值和最大值。

经归一化后的各指标中: $I_1$ 越小表明动态响应能力越强、电能质量要求越宽松; $I_2$ 越小表明负

载范围越宽; $I_3$ 越小表明经济成本越低。

### 2.1.2 不同类型电制氢调峰能力

基于2.1.1节,本节计算了基于电解槽和燃料电池的电制氢调峰指标。此外,还给出了电制氢的九种类型,为2.3节奠定基础。

1) 基于电解槽的电制氢调峰指标。常见的电解槽分为三种类型,分别为碱性电解槽(ALK)、质子交换膜电解槽(PEM)和固体氧化物电解槽(SOEC)。不同电解槽的调峰能力如表1所示。

表1 电解槽调峰能力

指标类型	第一类指标		第二类指标	第三类指标
	动态响应能力	电能质量要求	负载范围	经济成本/(元·MW <sup>-1</sup> )
ALK	0.53	0.20	0.68	0.32
PEM	0.11	0.83	0.35	0.34
SOEC	0.92	0.91	0.22	0.77

2) 基于燃料电池的电制氢调峰指标。常见的燃料电池分为三种类型,分别为磷酸燃料电池(PAFC)、熔融碳酸(MCFC)和固体氧化物燃料电池(SOFC)。不同燃料电池的调峰能力如表2所示。

表2 燃料电池调峰能力

指标类型	第一类指标		第二类指标	第三类指标
	动态响应能力	电能质量要求	负载范围	经济成本/(元·MW <sup>-1</sup> )
PAFC	0.05	0.79	0.34	0.37
MCFC	0.87	0.15	0.63	0.42
SOFC	0.43	0.87	0.16	0.12

经三种电解槽和燃料电池的两两组合,电制氢系统一共包含九种类型,如表3所示。

表3 电制氢系统类型

模式	组合	模式	组合	模式	组合
A <sub>1</sub>	ALK+PAFC	A <sub>4</sub>	PEM+PAFC	A <sub>7</sub>	SOEC+PAFC
A <sub>2</sub>	ALK+MCFC	A <sub>5</sub>	PEM+MCFC	A <sub>8</sub>	SOEC+MCFC
A <sub>3</sub>	ALK+SOFC	A <sub>6</sub>	PEM+SOFC	A <sub>9</sub>	SOEC+SOFC

### 2.2 等效负荷分解方法

考虑等效负荷的季节性,本节将其分解为基础、峰值和波动负荷分量。基础负荷分量是指距离一个季节内所有日等效负荷曲线最接近的曲线。它代表特定季节内等效负荷的特征,且在该

季节内保持稳定。然而,受到其它因素的影响,每日的等效负荷会有所偏离,这种偏离被归纳为峰值和波动负荷分量。峰值负荷分量具有较大幅度的波动,但波动变化较为缓慢,而波动负荷分量的波动幅度相对较小,但波动频率较高。因此,本节首先基于坐标距离最小化分解出基础<sup>[22]</sup>和其它负荷分量,其次运用小波分解法将其它负荷分量分解为峰值和波动负荷分量,如图3所示。

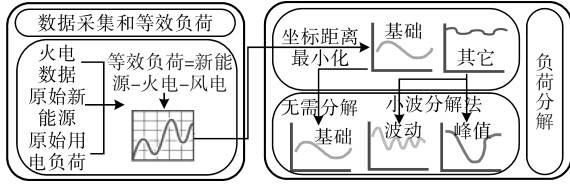


图3 等效负荷分解方法

Fig.3 The equivalent load disaggregation method

### 2.2.1 基于坐标距离最小化的基础负荷分量分解方法

本节介绍将总体等效负荷分解为基础负荷分量和其它负荷分量的方法。本文运用坐标距离最小化方法,提取出距离所有负荷曲线的相似度最高的基础负荷曲线。具体步骤如下:

1)收集历史等效负荷数据,并根据春、夏、秋、冬所在月份对数据进行分类。

2)在不同季节下提取基础负荷曲线,即求一条曲线使其与所有曲线对应时刻的距离最短的问题。假设已知在第*i*个季节中,该季节共有*N*+1天,则该用户在此季节中的负荷集合 $E_h^{i,d} \in (N+1) \times 24$ ,有:

$$E^i = \begin{bmatrix} e_0^{i,0} & e_1^{i,0} & e_2^{i,0} & \cdots & e_{23}^{i,0} \\ e_0^{i,1} & e_1^{i,1} & e_2^{i,1} & \cdots & e_{23}^{i,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_0^{i,N} & e_1^{i,N} & e_2^{i,N} & \cdots & e_{23}^{i,N} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中: $e_h^{i,d}$ 为第*i*个季节中第*d*天第*h*小时的等效负荷值。

设第*i*个季节日基础负荷分量为

$$X^i = [x_0^i \ x_1^i \ x_2^i \ \cdots \ x_{23}^i] \quad (17)$$

式中: $x_h^i$ 为第*i*个季节中第*h*小时的基础负荷分量值。

再以曲线间所有坐标距离最短为目标函数 $S^i$ ,有:

$$\min(S^i) = \sum_{d=0}^N \sum_{h=0}^{24} [(E^i[d][h] - X^i[h])^2]^{1/2} \quad (18)$$

同时, $X^i$ 各时刻的值不能超过对应时刻的上限和

$$\begin{cases} \min\{E^i[d][h]\} \leq X^i[h] \\ X^i[h] \leq \max\{E^i[d][h]\} \\ h = 0,1,2,\dots,23 \\ d = 0,1,2,\dots,N \end{cases} \quad (19)$$

最后结合式(18)和式(19),通过粒子群优化算法对目标函数进行求解,经迭代求解得到最优的 $X^i$ ,即为对应季节下的基础负荷分量曲线。

将提前一天预测的日等效负荷 $L^{i,d}$ 对应减去基础负荷分量 $X^i$ ,即可得到峰值和波动日负荷分量 $Z^{i,d}$ :

$$\begin{aligned} Z^{i,d} &= L^{i,d} - X^i \\ &= [L_0^{i,d} \ L_1^{i,d} \ \cdots \ L_{23}^{i,d}] - [x_0^i \ x_1^i \ \cdots \ x_{23}^i] \\ &= [z_0^{i,d} \ z_1^{i,d} \ \cdots \ z_{23}^{i,d}] \end{aligned} \quad (20)$$

式中: $z_h^{i,d}$ 为第*i*个季节中第*d*天第*h*小时的峰值和波动负荷分量。

### 2.2.2 基于小波分解法的峰值和波动负荷分量分解方法

本节介绍将其它负荷分量分解为峰值负荷分量和波动负荷分量的方法。本文选取小波分解解耦两种分量。

1)首先对连续信号分解。若 $\varphi(t) \in g^2(R)$ , $g(R)$ 为函数空间,代表该函数是平方可积的,而且经傅里叶变换后符合下式所表达的可容许条件即为小波基函数<sup>[23]</sup>:

$$C_\varphi = \iint_R |\varphi(\omega)|^2 / |\omega| d\omega < \infty \quad (21)$$

式中: $\varphi(t)$ 为母小波; $\varphi(\omega)$ 为 $\varphi(t)$ 的傅里叶变换。

通过改变伸缩因子*a*和平移因子*b*可以控制小波图像的“高矮”和“胖瘦”以及小波基函数的中心位置,连续处理伸缩因子*a*和平移因子*b*可以得到一组连续小波函数基:

$$\begin{cases} \varphi_{a,b} = \varphi[(t-b)/a] / (a)^{1/2} \\ a, b \in R \quad a > 0 \end{cases} \quad (22)$$

连续信号的连续小波变换就是利用某一小波将该信号展开,也即是待分析信号与小波基函数做内积,表达式如下:

$$\begin{aligned} WT_f(a,b) &= \langle f(t), \varphi_{a,b}(t) \rangle \varphi_{a,b} \\ &= [(1/a)^{1/2}] \int_R \varphi^* [(t-b)/a] dt \end{aligned} \quad (23)$$

式中: $\varphi^*$ 为函数 $\varphi$ 的共扼。

2)其次,因为实际中的采样信号都是离散信号,所以需要对离散小波变换进行研究。

首先离散化伸缩因子和平移因子,得到: $a = a_0^j, b = ka_0^j b_0, j, k$ 均为整数,然后再将离散化后的

两个因子代入到式中得到离散小波变换表达式:

$$\left\{ \begin{aligned} \varphi_{j,k}(t) &= (a_0)^{-j/2} \varphi[(t - ka_0^j b_0)/a_0^j] \\ &= (a_0)^{-j/2} \varphi[a_0^{-j}(t - kb_0)] \\ WT(a,b) &= \langle f(t), \varphi_{a,b}(t) \rangle \\ &= (1/|a|^j) \times \\ &\quad \int \{f(t) \times \varphi^*[(t - ka_0^j b_0)/a_0^j]\} dt \end{aligned} \right. \quad (24)$$

由以上可知,小波分解是指将需要分解的信号输入到低通滤波器和高通滤波器中,根据选取的分解层数不断对低频信号进行分解,最终实现多种频率分量的分离。

### 2.3 等效负荷分量与电制氢的匹配关系

结合2.1节和2.2节,可以得到等效负荷分量与电制氢系统的匹配关系。

1)由于SOEC和SOFC负载范围较宽,因此峰值负荷分量一般与SOEC和SOFC相匹配。

2)ALK和MCFC对输入电能质量的要求并不高,能够较好地适应输入电能的波动性,且经济成本较低。PAFC和PEM启停特性快、爬坡能力强,动态响应快。因此波动负荷分量一般与ALK,PEM,PAFC和MCFC相匹配。

3)一般情况下,基础负荷分量没有较多的波动性,且幅值变化范围较大,特征与峰值负荷分量更加相似。因此基础负荷分量一般与SOEC和SOFC相匹配。

## 3 针对不同时间尺度等效负荷的电制氢调峰模型

本节针对2.2节中三种负荷分量制定不同时间尺度的电制氢调峰模型。这些电制氢调峰模型符合2.3节中等效负荷分量与电制氢的匹配关系。

### 3.1 基础负荷分量的日前电制氢调峰模型

对于基础负荷分量,由于在一个季节内的固定性和不变性,因此只需进行日前调度,无需更新日内计划。日前调峰阶段每1h制定一次调峰计划。

计及调峰经济效果性,以电制氢的启停成本、弃风弃光成本和调峰指标最小化为目标函数:

$$\min C = \omega_c C_{\text{php}} + \omega_w \lambda_{\text{ph},t} C_w + \omega_1 \lambda_{\text{ph},t} (\omega_{\text{ph},1} I_{\text{ph},1} + \omega_{\text{ph},2} I_{\text{ph},2} + \omega_{\text{ph},3} I_{\text{ph},3}) + \omega_1 \lambda_{\text{hp},t} (\omega_{\text{hp},1} I_{\text{hp},1} + \omega_{\text{hp},2} I_{\text{hp},2} + \omega_{\text{hp},3} I_{\text{hp},3}) \quad (25)$$

$$C_w = \sum_{t=1}^T \kappa_{\text{qw}} P_{\text{qw},t} \quad (26)$$

式中: $\omega_c, \omega_w, \omega_1$ 分别为调度成本的权重系数、弃风弃光成本的权重系数和指标的权重系数; $C_{\text{php}}, C_w$ 分别为标准化处理的启停电制氢系统和弃风弃光成本; $\lambda_{\text{ph},t}, \lambda_{\text{hp},t}$ 分别为电解槽和燃料电池的应用状态,在P2H过程中, $\lambda_{\text{ph},t} = 1, \lambda_{\text{hp},t} = 0$ ,在H2P过程中则相反; $\omega_{\text{ph},1}, \omega_{\text{ph},2}, \omega_{\text{ph},3}$ 为P2H过程中三类指标权重; $\omega_{\text{hp},1}, \omega_{\text{hp},2}, \omega_{\text{hp},3}$ 为H2P过程中三类指标权重; $I_{\text{ph},1}, I_{\text{ph},2}, I_{\text{ph},3}$ 为P2H过程中标准化后三类指标; $I_{\text{hp},1}, I_{\text{hp},2}, I_{\text{hp},3}$ 为H2P过程中标准化后三类指标; $\kappa_{\text{qw}}$ 为弃风弃光惩罚系数; $P_{\text{qw},t}$ 为弃风弃光量。

约束条件包含功率平衡约束、新能源发电约束和电制氢约束,分别如下式所示:

$$\begin{aligned} \sum_{q=1}^{M_q} P_{q,t} &= \sum_{v=1}^{M_v} P_{f,t} + \sum_{k=1}^{M_k} P_{w,t} + \sum_{m=1}^{M_m} P_{m,t} \\ &= \sum_{v=1}^{M_v} P_{f,t} + \sum_{k=1}^{M_k} P_{w,t} + \\ &\quad \sum_{m=1}^{M_m} (P_{m,t}^f - P_{m,t}^c) + \\ &\quad \sum_{m=1}^{M_m} (P_{m,t}^f - P_{m,t}^c) \end{aligned} \quad (27)$$

$$0 \leq P_{w,t} \leq P_{w,\text{max}} \quad (28)$$

$$\left\{ \begin{aligned} P_{\text{ph}}(t) &< P_{\text{ph},\text{max}} \\ P_{\text{hp}}(t) &< P_{\text{hp},\text{max}} \\ S_{\text{h},\text{min}} &\leq S_{\text{h}}(t) \leq S_{\text{h},\text{max}} \\ 0 &\leq V(t) \leq V_{\text{max}} \end{aligned} \right. \quad (29)$$

式中: $P_{q,t}$ 为用电量; $P_{f,t}$ 为火电出力; $P_{w,t}$ 为新能源出力; $P_{m,t}^f, P_{m,t}^c$ 分别为电解槽消耗和燃料电池释放的功率; $M_v, M_w, M_m, M_q$ 分别为火力机组、新能源机组、电制氢和负荷数量; $P_{w,\text{max}}$ 为新能源最大出力; $P_{\text{ph},\text{max}}, P_{\text{hp},\text{max}}$ 分别为电解槽和燃料电池的最大输出功率; $S_{\text{h}}(t)$ 为储氢罐荷电状态; $S_{\text{h},\text{min}}, S_{\text{h},\text{max}}$ 分别为储氢罐最小和最大荷电状态; $V(t)$ 为设备容量; $V_{\text{max}}$ 为设备最大容量。

### 3.2 峰值和波动负荷分量的日前和日内电制氢调峰模型

对于波动负荷分量和峰值负荷分量,由于新能源和用电负荷的预测准确性难以做到零误差,单一时间尺度的调控模型难以满足大规模新能源并网的调峰需求。本文根据日前调峰调度,建立日前-日内两阶段滚动调峰调度。多时间尺度调峰调度过程如图4所示。日内调峰阶段每15min滚动一次,优化1h后的调峰方案。

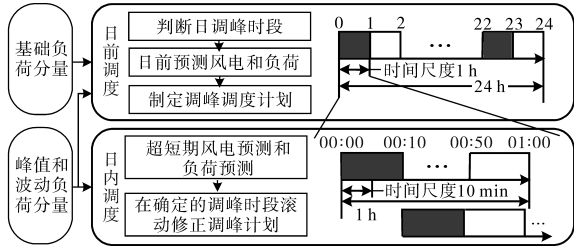


图4 多时间尺度调峰调度过程

Fig.4 Multi-time scale peak-shaving scheduling process

除去式(25)中的启停成本即为日内调峰模型的目标函数,如下式所示:

$$\begin{aligned} \min C = & \omega_c C_{php} + \omega_w \lambda_{phz} C_w + \omega_l \lambda_{phz} \cdot (\omega_{ph,1} I_{ph,1} + \\ & \omega_{ph,2} I_{ph,2} + \omega_{ph,3} I_{ph,3}) + \omega_l \lambda_{hpz} \cdot \\ & (\omega_{hp,1} I_{hp,1} + \omega_{hp,2} I_{hp,2} + \\ & \omega_{hp,3} I_{hp,3}) \end{aligned} \quad (30)$$

约束条件同日前调峰模型约束条件,如式(27)~式(29)。

## 4 算例

### 4.1 算例背景

本文选取改进的IEEE-30节点系统作为分析对象,新能源发电只考虑风电系统,如图5所示。

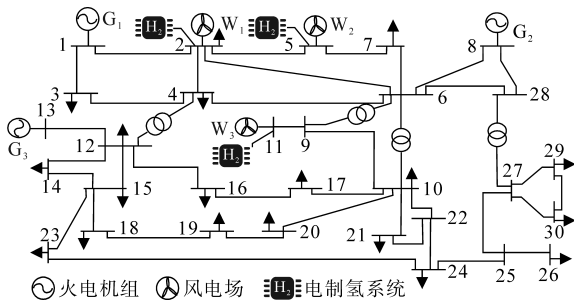


图5 改进的IEEE-30节点系统

Fig.5 Modified IEEE-30 node system

改进的IEEE-30节点系统的季节划分如表4所示。由于该地区春秋季节风力发电和用户用电特征类似,因此本文将春秋季节合并分析。同时假设这一地区包含一个火电机组、一个风电场和若干电制氢系统。火电机组每个季节发电量固定,其四季固定能够发电量如表5所示。风电场机组容量为4 MW,风电机组数量为150台。电制氢系统中电解槽的装机容量为10 MW,燃料电池的装机容量为10 MW,储氢罐容量为24 190.88 m<sup>3</sup>。此外,不同电制氢系统的调度成本相同,都为2元/MW。弃风惩罚费用2.43元/MW。

### 4.2 等效负荷分解场景

运用2.2.1节的方法得出不同季节的等效负荷分量曲线,如图6所示。春秋季节等效负荷曲

表4 季节划分结果

Tab.4 Seasonal classification results

季节	起始日期	终止日期
春	03月01日	05月31日
夏	06月01日	08月31日
秋	09月01日	11月31日
冬	12月01日	11月28日

表5 火电机组固定发电量

Tab.5 Fixed power generation from thermal units

季节	固定发电量/MW
春秋	[360,390]
夏季	[850,880]
冬季	[800,830]

线具有较大的波动性,分别有三个时段等效负荷小于零,需P2H,有两个时段等效负荷大于零,需H2P;夏季等效负荷呈现夜晚较高、白天较低的特性,因此夜晚需要H2P,白天需要P2H;冬季等效负荷呈现夜晚较低、白天较高的特性,因此夜晚需要P2H,白天需要H2P。

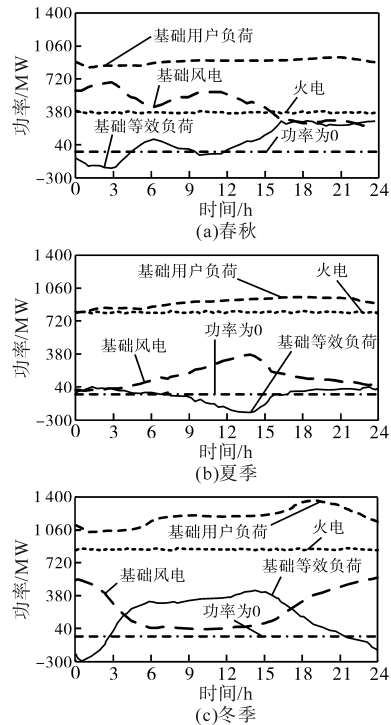


图6 不同季节的等效负荷分量曲线

Fig.6 Equivalent load component curves for different seasons

本文选取两重小波分解,在不同季节中分别选取特定的一天进行峰值和波动负荷分量的分解。分解后的峰值负荷分量和波动负荷分量如图7所示,峰值和波动分量相对于原负荷的波动量如图8所示。其中峰值负荷分量相对于原曲线波动较少,且幅值基本跟随原负荷曲线。而波动

负荷分量相对于原曲线波动较多。

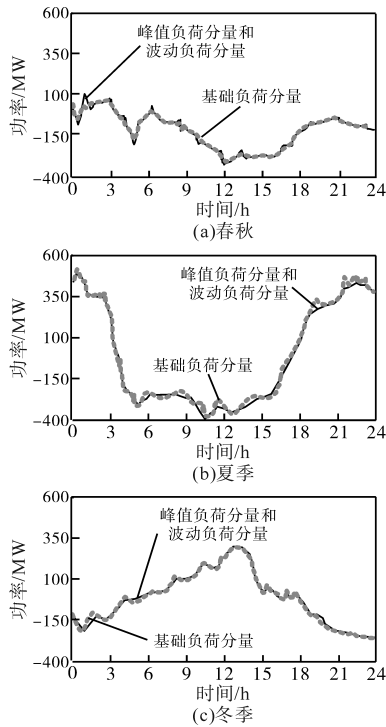


图7 基础负荷分量、峰值负荷分量和波动负荷分量  
Fig.7 Base load component, peak load component and fluctuation load component

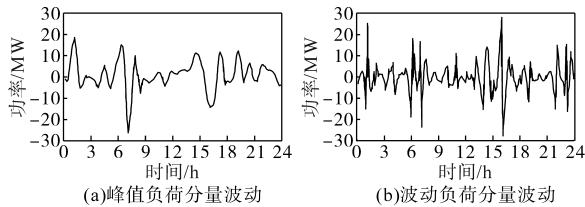


图8 峰值和波动分量相对于原负荷的波动量  
Fig.8 Amount of fluctuation of peak and fluctuation load components relative to the original load

### 4.3 模型有效性验证

为验证本文所提方案的有效性,本文选择三种算法进行对比分析。两种方案以春秋场景为基础,对比分析调峰经济性和调峰效果。

$S_1$ :不考虑负荷分解,直接以电制氢系统调度成本最优为目标日前调峰。

$S_2$ :考虑负荷分解,通过组合电制氢系统类型并匹配不同负荷分量日前调峰。

$S_3$ (本文):考虑负荷分解,通过组合电制氢系统类型并匹配不同负荷分量日前-日内调峰。

#### 4.3.1 基于负荷分解的调峰模型有效性验证

从经济性方面分析,两种场景下三种经济成本(电制氢系统调度成本、弃风成本和指标成本)如图9所示。其中储能电站调度成本相差不大, $S_2$ 下弃风成本略低于 $S_1$ ,这可能是因为本文所设

置的不同电制氢系统调度成本相同和不同风机的弃风成本相同。此外 $S_2$ 下指标成本明显低于 $S_1$ ,这是因为在 $S_2$ 中能够针对不同负荷特性调度电制氢系统,增加了调峰的准确度。

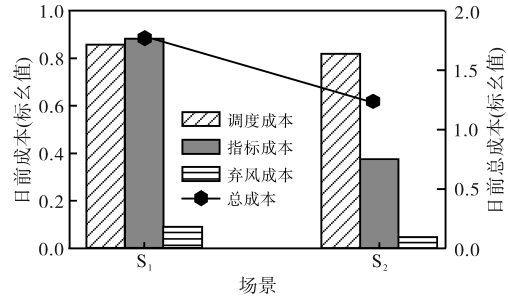


图9 两种场景经济性

Fig.9 Economy of two scenarios

两种场景下指标成本具体分析如表6所示。 $S_1$ 场景下指标成本是根据调度后的结果进行评估得到的,四种指标成本分配的权重相等。 $S_2$ 场景下的指标成本是在调度前根据三种负荷分量特点组合电制氢系统得到的。针对基础负荷分量,由于其特性综合了峰值分量和波动分量的特性,因此对 $I_3$ 指标分配权重较大(0.35);针对峰值负荷分量,由于其波动性较小、幅值变化较大,因此对 $I_2$ 指标分配权重较大(0.4);针对波动负荷分量,由于其波动性较大、幅值变化较小,因此对 $I_1$ 指标分配权重较大(0.3)。因此,在 $S_2$ 下的总指标成本总体低于在 $S_1$ 场景下的总指标成本。

表6 两种场景下指标成本

Tab.6 Indicator costs of two scenarios

组合		$I_1$		$I_2$	$I_3$	总指标成本(标么值)
		$\sigma$	$\rho$			
$S_1$	总负荷	0.87	0.69	0.98	0.85	0.85
	权重	0.25	0.25	0.25	0.25	1
	基础负荷	0.57	0.56	0.24	0.41	0.412 5
	权重	0.2	0.2	0.25	0.35	1
$S_2$	峰值负荷	0.73	0.74	0.14	0.33	0.380 5
	权重	0.15	0.15	0.4	0.2	1
	波动负荷	0.24	0.25	0.54	0.45	0.349 5
	权重	0.3	0.3	0.25	0.15	1

从调峰效果方面分析,两种场景下九种电制氢系统调度量如图10所示。在 $S_1$ 场景下总等效负荷的调度量是根据经济性指标最小化来选择的,其调峰效果并不是最优。而在 $S_2$ 场景下总等效负荷的调度量是根据不同负荷分量特征来选择的,其调度效果较好。基础负荷和峰值负荷一

般选择  $A_9$  和  $A_3$  模式的电制氢系统调峰,波动负荷一般选择  $A_1, A_2, A_4$  和  $A_5$  模式的电制氢系统。

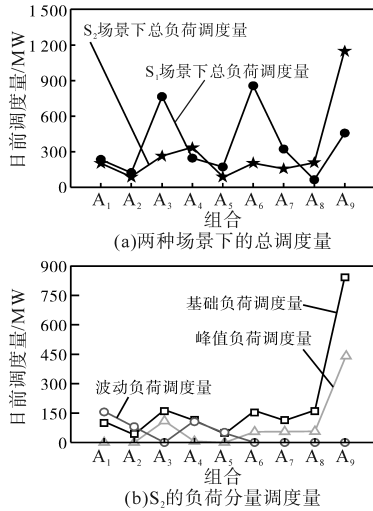


图10 两种场景下九种电制氢系统模式调度量  
Fig.10 Nine electrolytic hydrogen production systems' scheduling volumes of two scenarios

#### 4.3.2 基于多时间尺度的调峰模型有效性验证

本节验证考虑日前-日内多时间尺度调峰模型的有效性,如图11所示。图11a给出了两种时间尺度下经济成本,图11b给出了  $S_3$  的调峰效果,

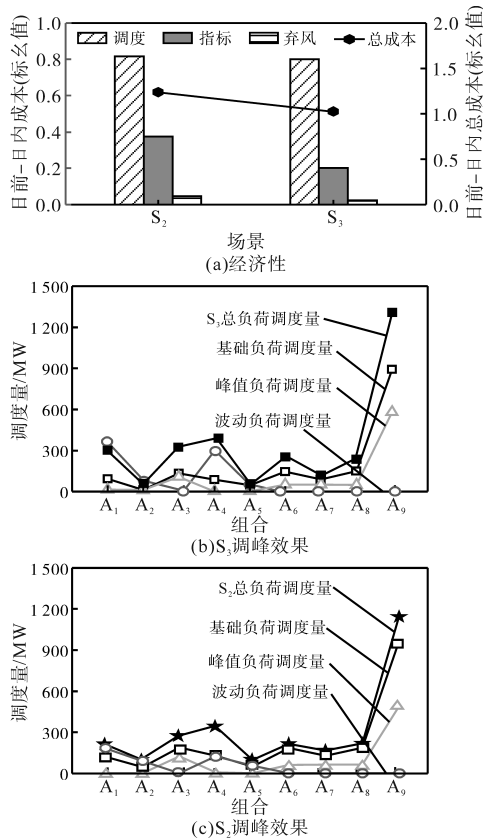


图11 两种时间尺度下经济成本和调峰效果  
Fig.11 Economic costs and peaking-shaving effectiveness on two time scales

图11c给出了  $S_2$  调峰效果。从图11a中看出,进行多时间尺度滚动调峰可以明显减少总成本,同时指标成本的下降意味着更好的调峰效果。从图11中看出,基础负荷分量相较于日前调度结果变化不大,因此无需进行日内调度。峰值和波动负荷分量相较于日前调度分配更加合理,使原本无法得到利用的电制氢系统得到利用。例如,峰值负荷对  $A_9$  模式的电制氢的调度量更多,波动负荷对  $A_1$  和  $A_4$  模式的电制氢的调度量更多,这显然是符合2.3节的匹配关系的。

#### 4.3.3 基于负荷分解和多时间尺度的调峰模型有效性验证

综合4.3.1节和4.3.2节,  $S_1, S_2$  和  $S_3$  三种算法的经济性和调峰效果如图12所示。从图12可以看出,本文所提的模型  $S_3$  在经济性和调峰效果方面都明显优于  $S_1$  和  $S_2$ , 验证了本文所提模型的有效性。图12a显示了  $S_3$  所有指标的经济成本最低,图12b显示了  $S_3$  的调度量更加符合2.3节的匹配关系。

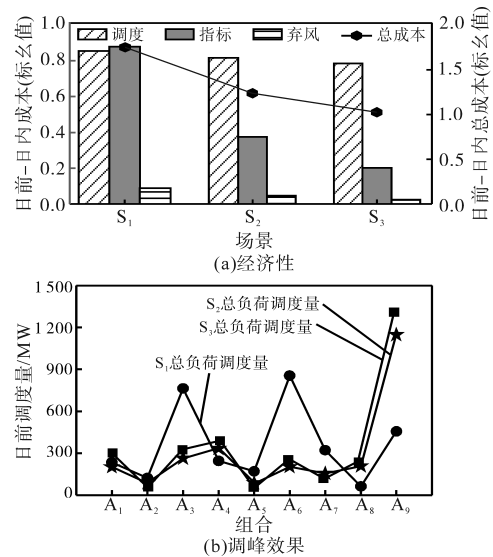


图12 三种算法的经济成本和调峰效果  
Fig.12 Economic costs and peaking-shaving effectiveness on three models

## 5 结论

将电制氢系统纳入电力系统配置中,可以有效解决大规模新能源并网带来的调峰问题。本研究构建了一个多时间尺度调峰策略,该策略基于电制氢调峰能力的细分和负荷分解。通过对IEEE-30节点系统的模拟验证,得出以下结论:

1) 本研究引入三类电制氢调峰能力评价指标,用于分析电解槽和燃料电池的调峰能力。这

些指标能较好地反映电制氢技术的不同特点。同时,采用坐标距离最小化和小波分解法,将等效负荷分解为三类分量,并与不同电制氢相匹配。模拟结果表明,基础负荷分量通常与“SOEC+SOFC”和“ALK+SOFC”模式的电制氢相匹配。

2)本研究考虑了负荷分解,并通过组合电制氢技术且匹配不同负荷分量来进行日前调峰,以降低经济成本并优化调峰效果。模拟结果显示,相较于不考虑负荷分解的电制氢系统调峰,综合经济性降低了0.52,其中调峰调度成本仅下降了0.05。这表明电制氢系统以更为合理的方式参与了调峰,且调峰效果更佳。

3)在负荷分解的基础上,本研究提出了多时间尺度的调峰方案,对不同负荷分量采用不同的时间尺度进行调度。这不仅提高了方案的准确性,还加快了调峰计划的制定速度。模拟结果显示,相较于单一的日前调峰,多时间尺度方案降低了0.19的综合经济性,其中调峰调度成本仅下降了0.02。此外,由于只对峰值负荷和波动负荷分量进行了日内滚动修正,制定速度也有所提升。

#### 参考文献

- [1] 方必武,肖亮,孙成,等.考虑调峰资源互济的区域电网优化调度方法[J].电气传动,2022,52(12):54-60.  
FANG Biwu, XIAO Liang, SUN Cheng, et al. An optimization dispatch method for regional power grid considering peaking resource mutual support[J]. Electric Drive, 2022, 52(12): 54-60.
- [2] 李聪,何勇琪,宋丽珠,等.多类型电源参与的调峰辅助服务市场模型[J].电气传动,2021,51(24):46-51.  
LI Cong, HE Yongqi, SONG Lizhu, et al. Peak shaving auxiliary service market model with multi-type power participation[J]. Electric Drive, 2021, 51(24): 46-51.
- [3] 朱凌志,陈宁,韩华玲.风电消纳关键问题及应对措施分析[J].电力系统自动化,2011,35(22):29-34.  
ZHU Lingzhi, CHEN Ning, HAN Hualing. Key problems and solutions of wind power accommodation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 29-34.
- [4] OLAWUMI T O, CHAN D W M. A scientometric review of global research on sustainability and sustainable development[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 183(May10): 231-250.
- [5] 鲁宗相,李海波,乔颖.高比例新能源并网的电力系统灵活性评价与平衡机理[J].中国电机工程学报,2017,37(1):9-20.  
LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Flexibility evaluation and supply/demand balance principle of power system with high-penetration renewable electricity[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 9-20.
- [6] MA H, YAN Z, LI M, et al. Benefit evaluation of the deep peak-regulation market in the northeast china grid[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(4): 533-544.
- [7] 刘新东,方科,陈焕远,等.利用合理弃风提高大规模风电消纳能力的理论研究[J].电力系统保护与控制,2012,40(6):35-39.  
LIU Xindong, FANG Ke, CHEN Huanyuan, et al. Research on rational wind power casting theory for large-scale wind power integration improvement[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(6): 35-39.
- [8] 林俐,邹兰青,周鹏,等.规模风电并网条件下火电机组深度调峰的多角度经济性分析[J].电力系统自动化,2017,41(7):21-27.  
LIN Li, ZOU Lanqing, ZHOU Peng, et al. Multi-angle economic analysis on deep peak regulation of thermal power units with large scale wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 21-27.
- [9] 盛四清,孙晓霞.利用风蓄联合削峰的电力系统经济调度[J].电网技术,2014,38(9):2484-2489.  
SHENG Siqing, SUN Xiaoxia. An economic dispatching strategy of peak load shifting by wind farm and pumped storage plant[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2484-2489.
- [10] 李军徽,张嘉辉,穆钢,等.储能辅助火电机组深度调峰的分层优化调度[J].电网技术,2019,43(11):3961-3970.  
LI Junhui, ZHANG Jiahui, MU Gang, et al. Hierarchical optimization scheduling of deep peak shaving for energy-storage auxiliary thermal power generating units[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3961-3970.
- [11] 安磊,王锦斌,齐霞,等.“风、光、火、蓄、储”多能源互补优化调度方法研究[J].新能源,2018,36(10):1492-1498.  
AN Lei, WANG Jinbin, QI Xia, et al. Optimal dispatching of multi-power sources containing wind photovoltaic /thermal/hydro-pumped and battery storage[J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36(10): 1492-1498.
- [12] 李娜,李志远,王楠,等.氢储能调峰站发展路径探索研究[J].中国能源,2021,43(1):55-59,67.  
LI Na, LI Zhiyuan, WANG Nan, et al. Exploratory study on the development path of hydrogen energy storage peaking stations[J]. Energy of China, 2021, 43(1): 55-59, 67.
- [13] 崔杨,闫石,仲悟之,等.含电转气的区域综合能源系统热电优化调度[J].电网技术,2020,44(11):4254-4264.  
CUI Yang, YAN Shi, ZHONG Wuzhi, et al. Optimal thermo-electric dispatching of regional integrated energy system with power-to-gas[J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4254-4264.
- [14] 林俐,郑馨姚,周龙文.基于燃氢燃气轮机的风光火储多能互补优化调度[J].电网技术,2022,46(8):3007-3022.  
LIN Li, ZHENG Xinyao, ZHOU Longwen. Hydrogen gas turbine wind-PV-thermal-storage multi-energy complementary optimal dispatching based on hydrogen gas turbine[J]. Power Sys-

- tem Technology, 2022, 46(8): 3007-3022.
- [15] 唐杰, 吕林, 叶勇, 等. 多时间尺度下主动配电网源-储-荷协调经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(20): 53-64.  
TANG Jie, LÜ Lin, YE Yong, et al. Source-storage-load coordinated economic dispatch of an active distribution network under multiple time scales[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20): 53-64.
- [16] 郝文波, 景菲, 颜庆宇, 等. 数据驱动下基于风电场景的多时间尺度调峰调度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(16): 115-126.  
HAO Wenbo, JING Fei, YAN Qingyu, et al. A multi-time scale peak shaving scheduling strategy based on wind powerscenario using a data-driven method[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(16): 115-126.
- [17] 李岱昕. 从CAISO和PJM区域电力市场,看储能的能量型和功率型应用状况[J]. 电器工业, 2018(7): 41.  
LI Daixin. From the CAISO and PJM regional electricity markets, a look at the state of energy-based and power-based applications of energy storage[J]. China Electrical Equipment Industry, 2018(7): 41.
- [18] 蔡冬阳, 赵申, 周玮, 等. 光伏影响下考虑气象负荷分解和LSSVM的负荷预测[J]. 计算技术与自动化, 2020, 39(4): 81-85.  
CAI Dongyang, ZHAO Shen, ZHOU Wei, et al. Load forecasting based on weather sensitive load decomposition and LSSVM under influence of photovoltaic[J]. Computing Technology and Automation, 2020, 39(4): 81-85.
- [19] 刘旭, 罗滇生, 姚建刚, 等. 基于负荷分解和实时气象因素的短期负荷预测[J]. 电网技术, 2009, 33(12): 94-100.  
LIU Xu, LUO Diansheng, YAO Jiangan, et al. Short-term load forecasting based on load decomposition and hourly weather factors[J]. Power System Technology, 2009, 33(12): 94-100.
- [20] 黄星知, 刘星, 张文娟, 等. 基于小波分解技术和随机森林算法的负荷概率预测[J]. 电力与能源, 2021, 42(3): 280-286.  
HUANG Xingzhi, LIU Xing, ZAHNG Wenjuan, et al. Probabilistic load forecasting based on wavelet decomposition technology and random forest algorithm[J]. Power and Energy, 2021, 42(3): 280-286.
- [21] 黄睿, 朱伶俐, 高峰, 等. 基于变分模态分解的卷积长短期记忆网络短期电力负荷预测方法[J]. 现代电力, 2024, 41(1): 97-105.  
HUANG Rui, ZHU Lingli, GAO Feng, et al. Short-term power load forecasting method based on variational modal decomposition for convolutional long-short-term memory network[J]. Modern Electric Power, 2024, 41(1): 97-105.
- [22] 王伟, 刘红旗, 杜单单, 等. 考虑负荷季节特性的电力用户用电行为画像[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2023, 28(3): 45-55.  
WAN Wei, LIU Hongqi, DU Dandan, et al. Portrait of power customers' electricity consumption behavior considering the seasonal characteristics of load[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2023, 28(3): 45-55.
- [23] 王苏蓬, 张新慧, 张军, 等. 基于WPD-LPF和灰色关联度的混合储能平抑风电波动控制策略[J]. 新能源, 2022, 40(9): 1241-1248.  
WANG Supeng, ZHANG Xinhui, ZHANG Jun, et al. Wind power fluctuation control strategy based on WPD-LPF and gray correlation[J]. Renewable Energy Resources, 2022, 40(9): 1241-1248.

收稿日期:2023-11-06

修改稿日期:2024-01-11