•新型电力系统•

DOI:10.12454/j.jsuese.202500058

本刊网刊

基于电解铝负荷弹性的地区电网新能源消纳方法

赵清华[1],张　姝[1*],周勇军[1,2],黄　河[1],肖先勇[1]

(1.四川大学 电气工程学院,四川 成都 610065;2.国网西藏电力有限公司拉萨供电公司,西藏自治区 拉萨 850010)

摘　要:随着地区电网中新能源装机占比不断增加,挖掘负荷弹性以应对新能源波动所带来的弃风弃光问题,是地区电网面临的重要课题。本文聚焦调度周期内的负荷弹性,研究电解铝负荷参与地区电网新能源消纳方法。首先,在电解槽热平衡方程和功率变化规律的基础上,构建了电解铝负荷弹性模型;然后,结合电解铝负荷弹性潜力特征,分析了电解铝负荷弹性消纳新能源的耦合机理,揭示了电解铝负荷弹性平抑新能源波动的可行性;最后,以新能源消纳最大为目标,由机组出力约束、负荷调节约束、系统平衡约束组成多维约束条件,提出了基于电解铝负荷弹性的地区电网新能源消纳方法。基于MATLAB仿真平台,在改进的IEEE 30节点系统环境下运用GUROBI求解器进行求解。算例结果表明,相较于现有电解铝负荷功率模型,所构建的电解铝负荷弹性模型能挖掘更多的弹性潜力,同时,所提出的基于电解铝负荷弹性的地区电网新能源消纳方法不仅能有效提升地区电网新能源消纳能力,还能保障电解铝工业用户经济收益,从而为电解铝负荷弹性在新能源消纳领域的应用奠定了理论基础。

关键词:地区电网;电解铝负荷弹性;新能源消纳;时序特性;热平衡

中图分类号:TM73　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**2096-3246(2026)06-0183-10

地区电网新能源装机容量持续增多,调节资源供需矛盾逐渐显现,已成为电力系统新能源规划发展的主要障碍[1]。挖掘负荷弹性,提升地区电网新能源消纳能力,是地区电网面临的重大课题。电解铝等周期性工业负荷具有生产周期稳定、高载能性和局部可调性等特点,因此,挖掘电解铝等高载能负荷弹性潜力,充分消纳新能源,具有重要理论价值和工程意义[2]。

在电解铝负荷功率建模方面,Agalgaonkar等[3]通过分析电解铝负荷开环响应特性,建立了功率–电解铝负荷响应关系。Gong等[4]基于电解铝生产流程,论证了电解铝负荷在需求响应中的可调性。Both[5]、Wang[6]等研究了功率快速调节对电解铝生产的影响,论证了电解铝负荷参与电网调节的技术可行性。在此基础上,Li[7]等基于电解铝厂的运行特性,构建了电解铝负荷功率模型。Chen[8]等提出了一种新型电力电子拓扑,为电解铝结构改进提供了理论基础。范宇辉等[9]根据电解铝控制特性,构建了电解铝等效电路模型。王越等[10]结合电解铝生产工艺特点与负荷特性,构建了电解铝功率调节模型。上述文献根据电解铝负荷外特性,构建了电解铝负荷等效电路模型,但过于简化导致动态特性刻画不足。Lin[11]、Allard[12]等通过实际测量方法对电解槽顶部结构的热传递特性进行建模,揭示了顶部热量损失的关键影响因素,提高了散热损失的计算精度。廖思阳[13–14]、丁鑫[15]等通过热平衡分析,建立了考虑多物理场耦合的可调容量模型,逐步完善了电解铝负荷的精细化建模。然而,上述研究在建立电解铝负荷热平衡方程中忽略了散热功率的非线性特性,导致电解铝负荷可调潜力远低于实际。

在电解铝负荷参与电网新能源消纳领域,众多文献探索了面向新能源消纳的电解铝负荷协同调控方法[16–26]。Liao等[16]首创了高载能负荷平抑风电波动方法。Xu等[17]将电解类负荷纳入需求响应管理体系。Yu[18]和张斌[19]等通过源荷协同优化,实现新能源消纳率提升与电解铝效益改善。陈元峰等[20]通过工程实证表明合理运用电解铝负荷弹性可以有效降低弃风弃光率。蒋雪怡[21]、刘海南[22]等突破单一负荷调节局限,

收稿日期:2025 – 01 – 23　　**修回日期:**2025 – 05 – 13　　**网络出版日期:**2025 – 12 – 02

基金项目:国家自然科学基金项目(U2166209);四川省自然科学基金项目(2024NSFSC0864)

作者简介:赵清华(1999—),男,硕士生. 研究方向:地区电网弹性负荷建模. E-mail: 1499424988@qq.com

* **通信作者:**张　姝,副教授, E-mail: ZS20061621@163.com

分别开发多工业负荷协同跟踪算法和高载能负荷集群优化模型，进一步提升了系统消纳能力。马嘉晨等[23]构建的日前-日内多阶段调度体系与Yue等[24]设计的调峰机组联合优化模型，在保证生产连续性的同时能够有效降低调峰机组成本。针对特殊场景，Bao等[25]提出孤网协调调频策略，使电网频率偏差明显降低。刘昕明等[26]提出储能协同深度调峰方法，有效缓解了高比例新能源接入压力。然而，现有研究在调控策略构建中仍存在新能源波动与负荷弹性时序匹配机制缺失问题，导致电解类负荷弹性潜力无法实现最大化利用。

针对高载能电解铝等负荷调节潜力、负荷调节能力与新能源波动性之间的实时协调研究不足问题，本文提出了基于电解铝负荷弹性的地区电网新能源消纳方法。以实时消纳新能源为目标，挖掘电解铝等高载能工业负荷弹性，利用新能源波动性与负荷弹性在时序上的耦合关系，得到地区电网新能源消纳方法；结合热力学公式构建了电解铝负荷弹性模型，并依据新能源波动性与电解铝负荷弹性之间的时序特征，形成了基于电解铝负荷弹性的地区电网新能源消纳方法。

1 电解铝负荷弹性消纳新能源原理分析

1.1 电解铝负荷弹性及其建模

负荷弹性是指用电负荷调整其用电模式的能力，定义为可中断性、可伸缩性和可平移性等时序特性，用以表征负荷功率的可调节特性。电解铝负荷弹性，是指在生产过程中依据电解槽内部热惯性及工艺特性，在一定范围内灵活调节用电功率而不影响生产稳定性的能力，是本文建模的理论基础。根据电解槽内部热平衡关系，进行电解铝负荷弹性建模。电解铝负荷功率平衡模型如下：

$$P_{\mathrm{al}}^{t}=cm\frac{\mathrm{d}D_t}{\mathrm{d}t}+P_{\mathrm{m}}+(A_{\mathrm{sa}}h_{\mathrm{sa}}+A_{\mathrm{sh}}h_{\mathrm{sh}})(D_t-D_{\mathrm{air}}) \tag{1}$$

式中，P_{al}^{t}为电解铝负荷在t时刻的功率，c为电解槽内反应物比热容，m为反应物质量，D_t为电解槽在t时刻的温度，P_{m}为产品生产功率，A_{sa}为电解槽顶部散热面积，A_{sh}为电解槽侧壁散热面积，D_{air}为电解槽所处环境温度，h_{sa}为电解槽顶部散热系数，h_{sh}为电解槽侧壁散热系数。电解槽顶部散热系数表达式如下：

$$h_{\mathrm{sa}}=\frac{\sigma_0\varepsilon_{\mathrm{W}}}{D_t-D_{\mathrm{air}}}\left(\left(\frac{D_t+273.15}{100}\right)^4-\left(\frac{D_{\mathrm{air}}+273.15}{100}\right)^4\right)+\eta(D_t-D_{\mathrm{air}})^{0.25} \tag{2}$$

式中，σ_0为玻尔兹曼常数，ε_{W}为电解槽导热系数，η为对流散热系数。电解槽侧壁散热系数公式为：

$$h_{\mathrm{sh}}=\frac{1}{\frac{1}{h_{\mathrm{b}}}+\frac{\delta_{\mathrm{sl}}}{\lambda_{\mathrm{sl}}}+\frac{\delta_{\mathrm{SW}}}{\lambda_{\mathrm{SW}}}+\frac{1}{h_{\mathrm{air}}}} \tag{3}$$

式中，h_{b}为电解槽导热系数，δ_{sl}为槽壳厚度，λ_{sl}为槽壳导热率，δ_{SW}为碳块厚度，λ_{SW}为碳块导热率，h_{air}为环境导热率。

将散热系数代入式(1)后，得到整理后的电解铝负荷功率平衡模型如下：

$$\begin{aligned}P_{\mathrm{al}}^{t}=cm\frac{\mathrm{d}D_t}{\mathrm{d}t}+A_{\mathrm{sh}}h_{\mathrm{sh}}(D_t-D_{\mathrm{air}})+\\A_{\mathrm{sa}}\eta(D_t-D_{\mathrm{air}})^{1.25}+A_{\mathrm{sa}}\sigma_0\varepsilon_{\mathrm{W}}(D_t+273.15)^4-\\A_{\mathrm{sa}}\sigma_0\varepsilon_{\mathrm{W}}10^{-8}(D_{\mathrm{air}}+273.15)^4+P_{\mathrm{m}}\end{aligned} \tag{4}$$

电解铝负荷未参与调控前，存在稳态点$(P_{\mathrm{al}}^{0},D_0)$，其中，$P_{\mathrm{al}}^{0}$、$D_0$分别为调控开始前电解铝负荷初始功率、初始温度。当电解铝负荷处于稳态时，温度变化为0，稳态时刻的功率平衡表达式如下：

$$\begin{aligned}P_{\mathrm{al}}^{0}=A_{\mathrm{sh}}h_{\mathrm{sh}}(D_0-D_{\mathrm{air}})+A_{\mathrm{sa}}\eta(D_0-D_{\mathrm{air}})^{1.25}+\\A_{\mathrm{sa}}\sigma_0\varepsilon_{\mathrm{W}}(D_0+273.15)^4-\\A_{\mathrm{sa}}\sigma_0\varepsilon_{\mathrm{W}}10^{-8}(D_{\mathrm{air}}+273.15)^4+P_{\mathrm{m}}\end{aligned} \tag{5}$$

为直观分析功率-温度非线性关系，将$P_{\mathrm{al}}^{t}=P_{\mathrm{al}}^{0}+\Delta P_{\mathrm{al}}^{t}$($\Delta P_{\mathrm{al}}^{t}$为电解铝负荷弹性变化，表示电解铝负荷可调节潜力的量化特征)和$D_t=D_0+\Delta D_t$(ΔD_t为电解槽温度变化)代入式(4)，对式(4)在稳态点$(P_{\mathrm{al}}^{0},D_0)$进行泰勒展开，具体的泰勒展开的计算过程见附录A式(A1)～(A3)，结果如下：

$$\begin{aligned}P_{\mathrm{al}}^{0}+\Delta P_{\mathrm{al}}^{t}=cm\frac{\mathrm{d}\Delta D_t}{\mathrm{d}t}+A_{\mathrm{sh}}h_{\mathrm{sh}}\Delta D_t+A_{\mathrm{sh}}h_{\mathrm{sh}}(D_0-D_{\mathrm{air}})+A_{\mathrm{sa}}\eta(D_0-D_{\mathrm{air}})^{1.25}+\\1.25A_{\mathrm{sa}}\eta(D_0-D_{\mathrm{air}})^{0.25}\Delta D_t+A_{\mathrm{sa}}\sigma_0\varepsilon_{\mathrm{W}}(D_0+273.15)^4+\\4A_{\mathrm{sa}}\sigma_0\varepsilon_{\mathrm{W}}(D_0+273.15)^3\Delta D_t-A_{\mathrm{sa}}\sigma_0\varepsilon_{\mathrm{W}}10^{-8}(D_{\mathrm{air}}+273.15)^4+P_{\mathrm{m}}\end{aligned} \tag{6}$$

将式(5)代入式(6)进行整理，得到：

$$\begin{aligned}\Delta P_{\mathrm{al}}^{t}=cm\frac{\mathrm{d}\Delta D_t}{\mathrm{d}t}+1.25A_{\mathrm{sa}}\eta(D_0-D_{\mathrm{air}})^{0.25}\Delta D_t+\\A_{\mathrm{sh}}h_{\mathrm{sh}}\Delta D_t+4A_{\mathrm{sa}}\sigma_0\varepsilon_{\mathrm{W}}(D_0+273.15)^3\Delta D_t\end{aligned} \tag{7}$$

将式(7)展开整理得到电解铝负荷弹性模型如下：

$$\Delta P_{\mathrm{al}}^{t}=cm\frac{\mathrm{d}\Delta D_t}{\mathrm{d}t}+K\Delta D_t \tag{8}$$

式中，系数K表示为：

$$\begin{aligned}K=A_{\mathrm{sh}}h_{\mathrm{sh}}+1.25A_{\mathrm{sa}}\eta(D_0-D_{\mathrm{air}})^{0.25}+\\4A_{\mathrm{sa}}\sigma_0\varepsilon_{\mathrm{W}}(D_0+273.15)^3\end{aligned} \tag{9}$$

在初始状态$\Delta D_0=0$的情况下，对式(8)进行积分，结果如下：

$$\int\frac{1}{cm}\mathrm{d}t=\int\frac{1}{\Delta P_{\mathrm{al}}^{t}-K\Delta D_t}\mathrm{d}\Delta D_t \tag{10}$$

求解式(9)可以得到电解铝负荷弹性 $\Delta P_{\mathrm{al}}^{t}$ 表达式为：

$$\Delta P_{\mathrm{al}}^{t}=\frac{K\Delta D_{t}}{1-\mathrm{e}^{-K\cdot\Delta t/cm}} \tag{11}$$

1.2　电解铝负荷弹性消纳新能源时序特征分析

1.2.1　电解铝负荷弹性潜力特征分析

根据式(11)对电解铝负荷弹性时序潜力特征进行分析，负荷弹性时序潜力特征示意图如图1所示。

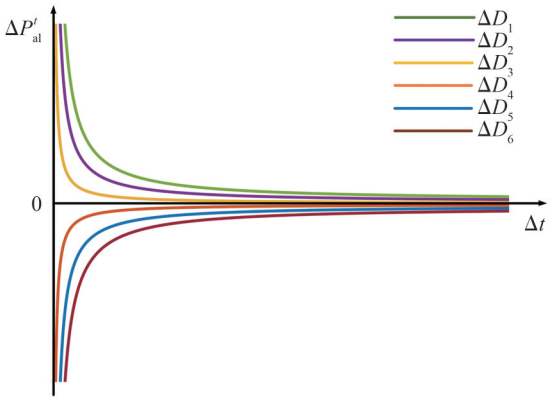


图1　电解铝负荷弹性时序潜力特征示意图

Fig. 1　Schematic diagram of temporal elastic potential characteristics of electrolytic aluminum load

图1中：$\Delta D_1\sim\Delta D_6$ 为不同温度，$\Delta D_1>\Delta D_2>\Delta D_3>0$，$\Delta D_6<\Delta D_5<\Delta D_4<0$；$\Delta t$ 为电解铝负荷调节的持续时间。当 $\Delta P_{\mathrm{al}}^{t}>0$ 时，代表电解铝负荷功率上调的潜力；当 $\Delta P_{\mathrm{al}}^{t}<0$ 时，代表电解铝负荷功率下调的潜力。

由图1可见：当电解铝负荷弹性 $\Delta P_{\mathrm{al}}^{t}>0$ 时，随着电解铝负荷弹性 $\Delta P_{\mathrm{al}}^{t}$ 逐渐减小直至趋近于0，调节持续时间将逐渐增大直至趋近于+∞；当电解铝负荷弹性 $\Delta P_{\mathrm{al}}^{t}<0$ 时，随着电解铝负荷弹性 $\Delta P_{\mathrm{al}}^{t}$ 逐渐增大，即 $\left|\Delta P_{\mathrm{al}}^{t}\right|$ 逐渐减小直至趋近于0，调节持续时间逐渐增大。因此，当电解铝负荷需要上升或下降至某一温度时，电解铝负荷上调或下调弹性越大，所需耗费的调节时间越短。

1.2.2　电解铝负荷弹性消纳新能源原理分析

结合电解铝负荷时序潜力特征与实际风光发电功率、电解铝负荷参数，获得电解铝负荷弹性时序消纳新能源特性如图2所示。图2中：蓝色、紫色、灰色填充部分面积分别表示当电解铝负荷上升10、15、20 ℃时所增加的耗电量；风光机组功率取正，数值增大代表功率增加；电解铝负荷功率取负，数值减小代表负荷增加。设置电解铝负荷功率最大值为220 MW，最小值为170 MW，在1 h内仅能进行一次功率调节。

由图2可知：当电解铝负荷在消纳新能源过程中温度上升10 ℃时，电解铝负荷能维持最大负荷功率工作7 h，共消纳177.81 MW·h新能源电量；当电解铝负荷在新能源消纳过程中温度上升15 ℃时，电解铝负荷能维持最大负荷功率工作12 h，共消纳268.39 MW·h新能源电量；当电解铝负荷在新能源消纳过程中温度上升20 ℃时，电解铝负荷能维持最大负荷功率工作17 h，共消纳357.87 MW·h新能源电量。由此可见，电解铝负荷参与新能源消纳能力与其温度调节能力呈现显著正相关关系，温度上升幅度可有效表征其新能源消纳潜力。风电出力具备反调峰特性，在夜间较高，而在白天较低，导致弃风现象在夜间多发；而光伏出力主要受日照条件影响，通常在白天中午时段光伏出力达到峰值，导致弃光现象常发生在中午时段。电解铝负荷功率具有快速调节特性，能够在短时间内进行调整，以适应电网的需求变化。但电解铝负荷功率的调节频率受到机组条件、工艺要求限制，调度周期内存在固定最大调节次数约束，且负荷功率存在最大、最小限制。

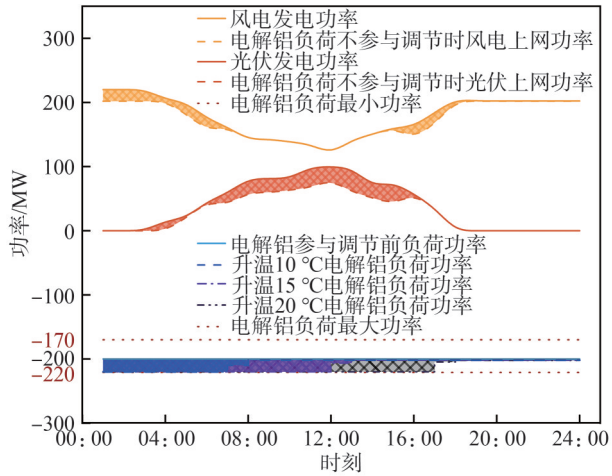


图2　电解铝负荷弹性时序消纳新能源特性示意图

Fig. 2　Schematic diagram of temporal new energy consumption characteristics of elastic electrolytic aluminum load

2　基于电解铝负荷弹性的地区电网新能源消纳方法

提出基于电解铝负荷弹性的地区电网新能源消纳方法，该方法将地区电网最大化新能源消纳的目标转化为经济性指标，并求解电解铝负荷时序调节模型。

2.1　目标函数

基于电解铝负荷弹性的地区电网新能源消纳方法以地区电网调节成本最小为目标函数，具体如下：

$$\min F=\min(F_{\mathrm{wind}}+F_{\mathrm{ray}}+F_{\mathrm{tp}}+F_{\mathrm{al}}) \tag{12}$$

式中，F 为地区电网运行总成本，F_{wind} 为地区电网弃风惩罚成本，F_{ray} 为地区电网弃光惩罚成本，F_{tp} 为地区电网火电机组运行成本，F_{al} 为电解铝负荷调节成本。

地区电网内风电机组的弃风、光伏机组的弃光惩罚成本的计算公式如下：

$$\begin{cases} F_{\text{wind}} = \sum_{t=1}^{T} \left| P_{\text{wind}}^{t} - P_{\text{f-wind}}^{t} \right| S_{\text{w}}, \\ F_{\text{ray}} = \sum_{t=1}^{T} \left| P_{\text{ray}}^{t} - P_{\text{f-ray}}^{t} \right| S_{\text{r}} \end{cases} \tag{13}$$

式中，T为总调度时长，P_{wind}^{t}为地区电网内风电机组在t时刻发电功率，$P_{\text{f-wind}}^{t}$为t时刻风电发电功率预测值，S_{w}为地区电网风电机组弃风惩罚成本系数，P_{ray}^{t}为地区电网内光伏机组在t时刻发电功率，$P_{\text{f-ray}}^{t}$为t时刻光伏发电功率预测值，S_{r}为地区电网光伏机组弃光惩罚成本系数。

火电机组运行成本计算公式如下：

$$F_{\text{tp}} = \sum_{t=1}^{T} (a_{\text{tp}} P_{\text{tp}}^{t2} + b_{\text{tp}} P_{\text{tp}}^{t} + c_{\text{tp}}) \tag{14}$$

式中，a_{tp}、b_{tp}、c_{tp}均为火电机组运行成本系数[27]，P_{tp}^{t}为火电机组在t时刻发电功率。

在将电解铝负荷纳入电网调节时，需要对电解铝用户给予一定的经济补偿，电解铝负荷调节成本如下：

$$F_{\text{al}} = \sum_{t=1}^{T} \left| \Delta P_{\text{al}}^{t} \right| S_{\text{al}} \tag{15}$$

式中，S_{al}为电解铝负荷调节补偿系数。

2.2 约束条件

1)地区电网功率平衡约束条件

在任意时刻地区电网保持功率平衡，通过火电、风电、光伏机组出力与电解铝负荷调节相配合，来满足其余常规负荷需求。地区电网功率平衡约束条件为：

$$P_{\text{load}}^{t} + \Delta P_{\text{al}}^{t} = P_{\text{wind}}^{t} + P_{\text{ray}}^{t} + P_{\text{tp}}^{t} \tag{16}$$

式中，P_{load}^{t}为系统在t时刻总负荷功率。

2)风电、光伏机组功率约束

风电、光伏机组在运行过程中存在功率约束，具体如下：

$$\begin{cases} 0 \le P_{\text{wind}}^{t} \le P_{\text{f-wind}}^{t}, \\ 0 \le P_{\text{ray}}^{t} \le P_{\text{f-ray}}^{t} \end{cases} \tag{17}$$

3)火电机组功率约束

地区电网中火电机组功率约束包括机组出力上下限约束、机组爬坡率约束。出力上下限约束如式(18)所示，机组爬坡约束如式(19)、(20)所示。

$$P_{\text{tp}}^{\min} \le P_{\text{tp}}^{t} \le P_{\text{tp}}^{\max} \tag{18}$$

$$\begin{cases} 0 \le R_{\text{tp1}}^{t} \le r_{\text{tp}}^{\text{up}} \Delta T, \\ P_{\text{tp}}^{t} + R_{\text{tp1}}^{t} \le P_{\text{tp}}^{\max} \delta_{t\text{p}}^{t} \end{cases} \tag{19}$$

$$\begin{cases} 0 \le R_{\text{tp2}}^{t} \le r_{\text{tp}}^{\text{down}} \Delta T, \\ P_{\text{tp}}^{t} - R_{\text{tp2}}^{t} \ge P_{\text{tp}}^{\min} \delta_{\text{tp}}^{t} \end{cases} \tag{20}$$

式(18)～(20)中，$P_{\text{tp}}^{\min}$、$P_{\text{tp}}^{\max}$分别为地区电网火电机组最小、最大出力值，$r_{\text{tp}}^{\text{down}}$、$r_{\text{g}}^{\text{up}}$分别为地区电网火电机组向下、向上爬坡率，$\Delta T$为调度时间间隔，$R_{\text{tp1}}^{t}$、$R_{\text{tp2}}^{t}$为地区电网火电机组在$t$时刻内提供的向上、向下的旋转备用容量，$\delta_{\text{tp}}^{t}$为0-1变量。

4)电解铝负荷弹性约束

电解铝负荷弹性约束包括功率约束、温度约束，具体如下：

$$\begin{cases} \Delta P_{\text{al}}^{t} = \dfrac{K \Delta D_{t}}{1 - \text{e}^{-K \cdot t/cm}}, \\ P_{\text{al}}^{\min} - P_{\text{al}}^{t} \le \Delta P_{\text{al}}^{t} \le P_{\text{al}}^{\max} - P_{\text{al}}^{t}, \\ D_{\min} - D_{t} \le \Delta D_{t} \le D_{\max} - D_{t} \end{cases} \tag{21}$$

式中：$P_{\text{al}}^{\max}$、$P_{\text{al}}^{\min}$分别为电解铝负荷功率上下限，功率上限$P_{\text{al}}^{\max}$取电解铝负荷额定功率的1.1倍，功率下限取电解铝负荷额定功率的0.85倍[28]；$D_{\min}$、$D_{\max}$分别为电解铝生产工艺中电解槽温度最小值、最大值，取$D_{\min}$=950 ℃、$D_{\max}$=970 ℃[29]。

频繁调节电解铝负荷会导致设备机械损耗，因此，在一个调度周期内，限制其最大调节次数为：

$$\sum_{t=1}^{T} Z_{t} \le N \tag{22}$$

式中：Z_{t}为电解铝负荷在t时刻调节状态，取1表示调节，取0表示未调节；N为电解铝负荷一个调度周期内的最大调节次数。

5)电压相角约束

为确保电网运行稳定性，节点电压相角需满足安全边界约束，具体如下：

$$\theta_{i\min} \le \theta_{i}^{t} \le \theta_{i\max} \tag{23}$$

式中，$\theta_{i\min}$、$\theta_{i\max}$分别为节点i电压相角的最小值、最大值，θ_{i}^{t}为节点i在t时刻电压相角[29]。

6)潮流约束

为避免过载风险，地区电网需满足潮流约束条件，潮流约束具体如下：

$$P_{i}^{t} = \sum_{j=1}^{N} (B_{ij}(\theta_{i} - \theta_{j})) \tag{24}$$

式中：P_{i}^{t}为节点i在t时刻注入功率；B_{ij}为节点i、j的互导纳，当i=j时，B_{ii}为自导纳；θ_{i}和θ_{j}分别为节点i、j的电压相角值[30]。

3 算例分析

3.1 场景介绍

考虑到电解铝负荷电压需求，采用改进的IEEE-30节点系统作为地区电网算例环境，地区电网详细拓扑结构如图3所示。该系统包括4台火电机组，分别于节点2、22、23、27处接入，参数详见附录A表A1。地区

电网于节点 1 处接入 1 台风电机组，其额定容量为 180 MW；于节点 13 处接入 1 台光伏机组，其额定容量为 320 MW；风光预测功率取自 IEEE Global Energy Forecasting Competition 数据集，风光功率曲线见附录 A 图 A1，弃风弃光惩罚价格为 600 元/(MW·h)[31]；同时，电解铝工业用户位于节点 18 处，额定用电功率为 200 MW，其功率范围、散热系数、环境温度等参数见附录 A 表 A2。

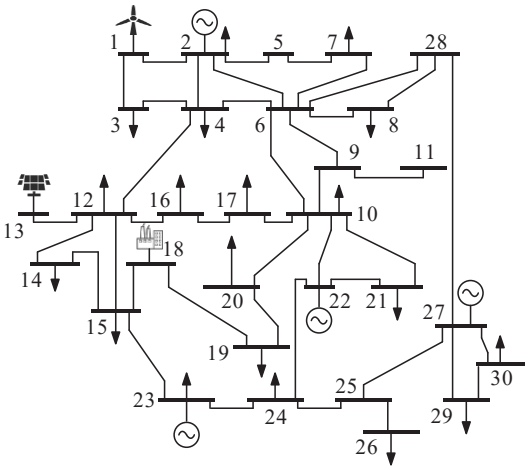


图 3　地区电网拓扑结构图

Fig. 3　Regional power grid topology diagram

3.2　电解铝负荷弹性消纳新能源效果分析

将电解铝负荷不参与地区电网新能源消纳的情况设为方案 1，将忽略了散热功率非线性特性的电解铝负荷参与消纳的情况设为方案 2[14]，将采用本文方法设为方案 3。3 种方案机组出力与电解铝负荷调节情况分别如图 4、5、6 所示。其中：电解铝负荷调节功率为负代表负荷用电功率上升；反之，代表用电功率下降。

由图 4 可以发现：采用方案 1 时，电解铝负荷不参与地区电网调节，由风电机组出力、光伏机组出力及火电机组出力满足电网负荷需求。地区电网仅依靠火电机组作为调节能源，新能源消纳能力严重不足；并在 09：00—11：00 时，存在负荷功率需求升高现象，此时通过上调火电机组功率满足平衡需求。

由图 5、6 可知：采用方案 2、3 时，除原有机组出力外，地区电网将电解铝负荷弹性纳入调节范围，以增强电网新能源消纳能力，减少电网弃风弃光惩罚成本。方案 2、3 下电解铝负荷调节功率变化趋势一致。二者都是在弃风弃光严重时段，增加负荷功率，以消纳新能源出力；在用电高峰时段，以削减负荷功率减轻火电机组调节压力，从而维持电网平衡。不同之处在于，由于所采用电解铝负荷弹性模型不同，方案 3 的电解铝负荷调节功率数值大于方案 2，且方案 3 的消纳新能源出力优于方案 2。

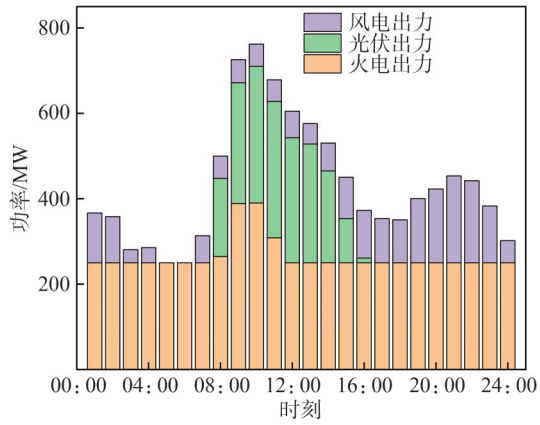


图 4　方案 1 各机组出力情况

Fig. 4　Output situation of each unit under Scheme 1

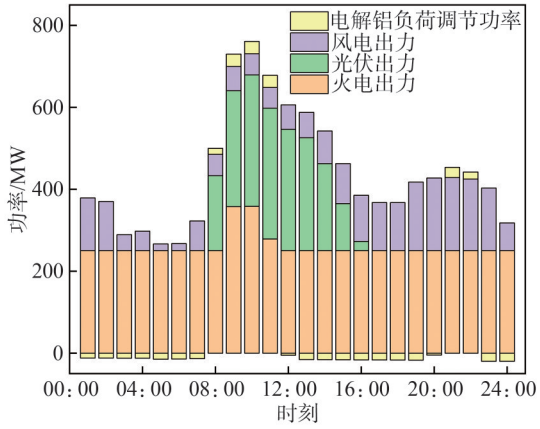


图 5　方案 2 各机组出力情况

Fig. 5　Output situation of each unit under Scheme 2

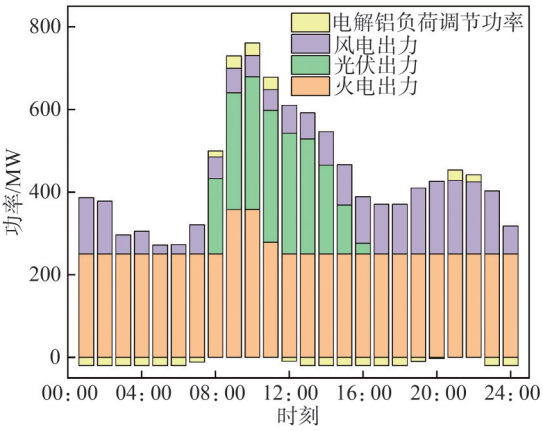


图 6　方案 3 各机组出力情况

Fig. 6　Output situation of each unit under Scheme 3

3 种方案下地区电网新能源消纳情况及运行成本情况如表 1 所示。由表 1 可知：在新能源消纳方面，与方案 1 相比，方案 3 的风电消纳量增加 10.77%，光伏消纳量增加 1.57%，总新能源消纳量增加 6.22%；与方案 2 相比，方案 3 的风电消纳量增加 2.16%，光伏消纳量增加 0.45%，总新能源消纳量增加 1.34%。

在经济成本方面，与方案 1 相比，方案 3 的风电成本下降 28.16%，光伏成本下降 7.21%，总成本下降

1.86%；与方案 2 相比，方案 3 的风电成本下降 7.86%，光伏成本下降 2.21%，总成本下降 0.06%。综上所述，本文方案充分利用电解铝负荷弹性，可以有效提升地区电网新能源消纳能力，提升新能源消纳率，降低弃风弃光成本。同时，相比于现有忽略了散热功率非线性特性的电解铝负荷弹性模型，本文所提出的电解铝负荷弹性模型能够挖掘更多的弹性潜力，更具优越性。

表 1 不同方案下地区电网新能源消纳情况及运行成本分析

Tab. 1 Analysis of new energy consumption and operation cost of regional power grid under different schemes

方案	风电消纳量/(MW·h)	光伏消纳量/(MW·h)	弃新能源量/(MW·h)	风电成本/万元	光伏成本/万元	火电机组成本/万元	电解铝调节成本/万元	总成本/万元
1	2 049.06	2 006.29	1 220.54	47.02	26.21	195.61	0	268.84
2	2 221.71	2 028.58	1 025.60	36.66	24.87	187.34	15.14	264.01
3	2 269.72	2 037.71	968.46	33.78	24.32	187.34	18.41	263.85

3.3 电解铝负荷收益分析

电解铝用户的净收益可近似表示为生产收益与电网调节补偿收益之和减去用电成本和原料成本，其计算式如下：

$$H_{\mathrm{i}}=H_{\mathrm{m}}+H_{\mathrm{al}}-F_{\mathrm{e}}-F_{\mathrm{p}} \tag{25}$$

式中，H_{i}为电解铝用户净收益，H_{m}为电解铝用户工艺生产收益，H_{al}为电解铝用户参与电网调节所获得的补偿收益，F_{e}为电解铝用户运行过程中用电成本，F_{p}为电解铝用户生产原料成本。

电解铝用户的生产收益、功率、补偿收益、用电成本、生产原料成本的计算式如下：

$$\begin{cases} H_{\mathrm{m}}=S_{\mathrm{m}}\sum\limits_{t=1}^{T}0.335\,6I_{\mathrm{ind\text{-}al}}^{t}\Delta t(\eta_{\mathrm{al}}^{\mathrm{N}}-1.5\%(D_t-D_{\mathrm{N}})), \\ P_{\mathrm{al}}^{t}=I_{\mathrm{d}}^{t\,2}R+I_{\mathrm{d}}^{t}E, \\ H_{\mathrm{al}}=\sum\limits_{t=1}^{T}\left|\Delta P_{\mathrm{al}}^{t}\right|S_{\mathrm{al}}, \\ F_{\mathrm{e}}=\sum\limits_{t=1}^{T}P_{\mathrm{al}}^{t}S_{\mathrm{e}}, \\ F_{\mathrm{p}}=S_{\mathrm{p}}\sum\limits_{t=1}^{T}M_{\mathrm{p}}^{t} \end{cases} \tag{26}$$

式中，S_{m}为电解铝单位产量生产利润，$I_{\mathrm{ind\text{-}al}}^{t}$为$t$时刻电解铝负荷直流侧电流，$\eta_{\mathrm{al}}^{\mathrm{N}}$为电解铝负荷的额定电流效率，$D_{\mathrm{N}}$为电解铝负荷生产的额定温度，$I_{\mathrm{d}}^{t}$为$t$时刻电解铝直流电流，$R$为直流侧等效电阻，$E$为直流侧反电动势，$S_{\mathrm{e}}$为电解铝负荷用电电价，$S_{\mathrm{p}}$为电解铝生产过程中耗材价格，$M_{\mathrm{p}}^{t}$为在$t$时刻消耗生产原料的质量。

当地区电网采用第 3.2 节中 3 种不同运行方案时，电解铝负荷功率变化如图 7 所示。结合式(26)与图 7 电解铝负荷功率变化数据，求解不同方案下电解铝直流侧电流变化情况如图 8 所示。3 种方案下电解铝负荷温度变化如图 9 所示。

结合图 7、9 分析可知：当地区电网采用方案 1 时，电解铝负荷仅存在轻微功率、温度波动。当采用方案 2、3 进行地区电网调节时，电解铝负荷功率、温度变化趋势一致。

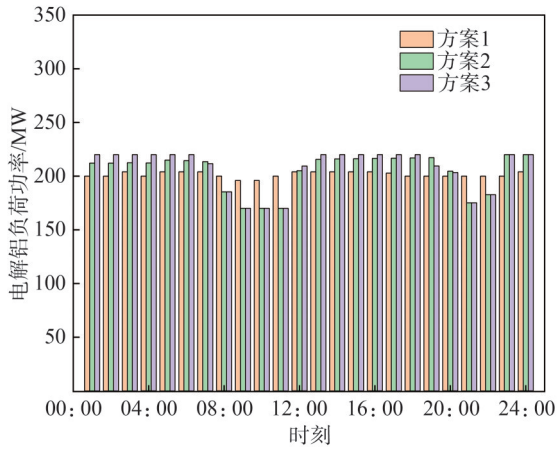


图 7 不同方案的电解铝负荷功率变化

Fig. 7 Power variations of electrolytic aluminum load under different schemes

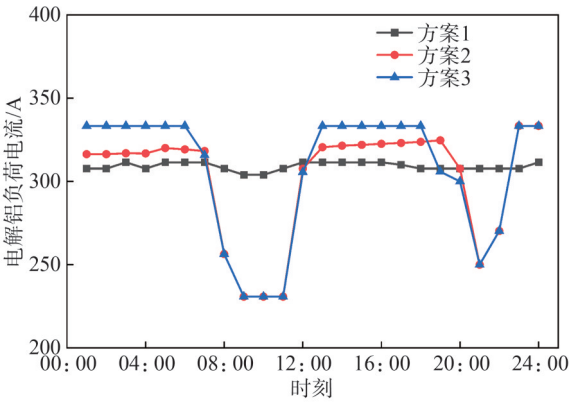


图 8 不同方案的电解铝直流电流变化

Fig. 8 DC current changes in aluminum electrolysis under different schemes

结合式(25)、(26)及图 7～9 的数据，3 种方案电解铝用户收益如表 2 所示。

由表 2 可知：与方案 1 相比，方案 3 的电解铝用户净收益提升了 3.55%；与方案 2 相比，方案 3 的电解铝用户净收益提升了 2.81%；因此，采用本文方法对于电解铝用户参与地区电网调节净收益最大，本文方法在参与地区电网调节的同时保证了自身的生产收益最佳。

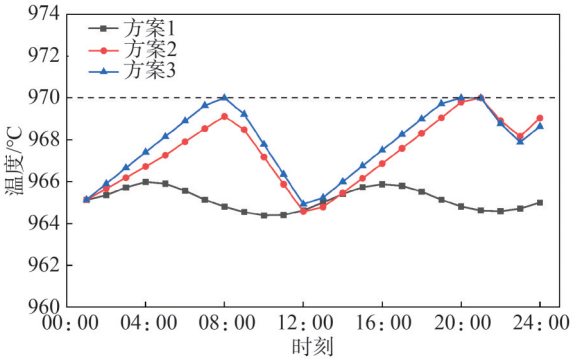


图9　不同方案的电解铝温度变化

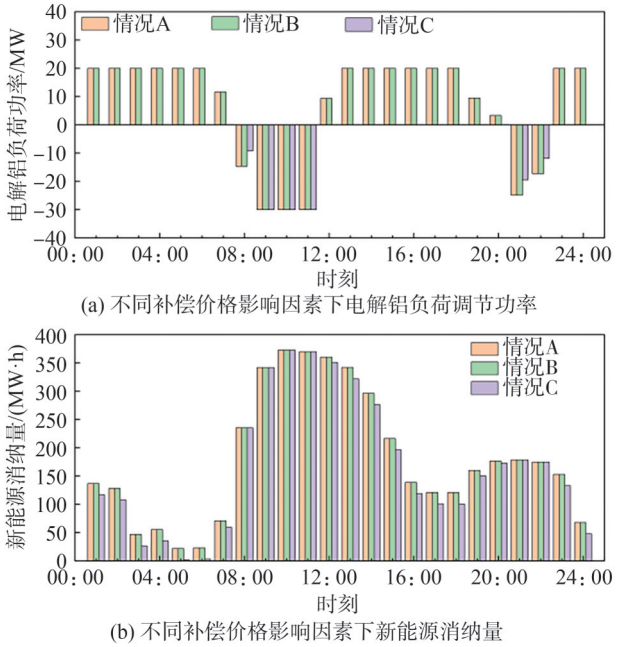
Fig. 9　Temperature changes in electrolytic aluminum under different schemes

表2　不同方案的电解铝用户收益情况

Tab. 2　Revenue situation of electrolytic aluminum users under different schemes

方案	生产收益/万元	补偿收益/万元	总成本/万元	净收益/万元
1	3 177.49	0	577.28	2 600.21
2	3 185.74	15.14	581.89	2 618.99
3	3 267.54	18.41	593.39	2 692.56

在电解铝用户参与地区电网调节过程中，给予调节补偿是鼓励电解铝用户参与响应的主要手段，下面分析不同补偿价格对于电解铝负荷调节功率及新能源消纳量影响。将电解铝负荷调节补偿价格为400、500、700元/(MW·h)的情况分别设为情况A、B、C，不同情况下电解铝功率调节与新能源消纳对比结果如图10所示。



(a) 不同补偿价格影响因素下电解铝负荷调节功率

(b) 不同补偿价格影响因素下新能源消纳量

图10　不同补偿价格的调节功率与新能源消纳对比

Fig. 10　Comparison of power regulation and new energy consumption at different regulation compensation prices

由图10可知：由于地区电网调节资源有限，当电解铝调节补偿价格低于弃风弃光惩罚价格时，充分发挥电解铝负荷弹性以消纳过剩新能源，成为降低地区电网运行成本的唯一可行方案。因此，尽管情况A的补偿价格低于情况B，但受限于电网调节资源不足，情况A、B下的电解铝负荷调节功率与新能源消纳量变化保持一致。情况C下，当电解铝调节补偿价格高于弃风弃光惩罚价格时，利用电解铝负荷弹性消纳过剩新能源的方法将无法降低电网运行成本。电解铝负荷仅在电网出现功率缺额时降低用电功率，以确保电网安全稳定运行。

4　结　论

本文将电解铝负荷弹性视为地区电网灵活性调节的重要资源，构建了电解铝负荷弹性模型，分析了电解铝负荷弹性消纳新能源的时序特征；在此基础上，提出了基于电解铝负荷弹性的地区电网新能源消纳方法。

算例分析表明：相比于电解铝负荷不参与的情况，本文所提消纳方法的新能源消纳量提升了6.22%，其电解铝用户净收益提升了3.55%；相比于原有的电解铝功率模型，本文方法的消纳量提升了1.34%，其电解铝用户收益提升了2.81%。本文所构建的电解铝负荷弹性模型比现有电解铝功率模型能挖掘更多的弹性潜力，同时，本文所提出的基于电解铝负荷弹性的地区电网新能源消纳方法，能有效提高地区电网新能源消纳量并保障工业用户收益。

目前，本文所提基于电解铝负荷弹性的地区电网新能源消纳方法仅考虑了电解铝负荷与火电机组协同的调节方案，未来可进一步研究电解铝负荷与储能系统及热(冷)、电、气等多能的协同互补，提升地区电网的新能源消纳能力。

附录见本刊网络版，扫描标题旁的二维码可阅读网络全文。

参考文献：

[1] Shu Yinbiao, Zhao Yong, Zhao Liang, et al. Study on low carbon energy transition path toward carbon peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1663−1672.[舒印彪,赵勇,赵良,等.“双碳”目标下我国能源电力低碳转型路径[J]. 中国电机工程学报,2023,43(5): 1663−1672.]

[2] Geng Jian, Zhou Jing, Lü Jianhu, et al. Analysis and discussion on transaction mechanism of load side adjustable resources in electricity market[J]. Power System Technology, 2022,46(7):2439−2448.[耿建,周竞,吕建虎,等. 负荷侧可调节资源市场交易机制分析与探讨[J]. 电网技术,2022,

46(7):2439−2448.]

[3] Agalgaonkar A P, Muttaqi K M, Perera S. Open loop response characterisation of an aluminium smelting plant for short time interval feeding[C]//Proceedings of the 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Calgary:IEEE,2009:1−7.

[4] Gong Feixiang, Ren Kaikai, Zhang Aiqun, et al. Review of electrolytic aluminum load participating in demand response to absorb new energy potential and methods[C]// Proceedings of the 2021 IEEE 2nd International Conference on Big Data, Artificial Intelligence and Internet of Things Engineering(ICBAIE). Nanchang: IEEE, 2021: 1015−1019.

[5] Both J. The modern era of aluminum electrolytic capacitors [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2015, 31(4):24−34.

[6] Wang Xi, Chen Baorui, Xie Haocong, et al. Participation of electrolytic aluminum loads in grid interaction control strategies considering process flow and regulation costs[J]. Frontiers in Energy Research, 2025, 12:1493558.

[7] Li Lingfang, Chen Yixuan, Zhu Xinchun, et al. Modeling method of electrolytic aluminum load characteristics based on controllable reactor boundary constraints[C]//Proceedings of the 2021 13th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation(ICMTMA). Beihai:IEEE,2021:90−93.

[8] Chen Huan, Sun Kai, Lu Languang, et al. A constant current control method with improved dynamic performance for CLLC converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(2):1509−1523.

[9] Fan Yuhui, Jiang Tingyu, Huang Qifeng, et al. Portrait-based assessment on demand response potential of industrial parks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(1):41−49.[范宇辉,姜婷玉,黄奇峰,等. 基于画像的工业园区需求响应潜力评估[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(1):41−49.]

[10] Wang Yue, Xie Haipeng, Zhu Hao. Source-load coordinated optimal planning method of electrolytic aluminum industrial park[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(7):132−140.[王越,谢海鹏,祝昊. 电解铝工业园区的源荷协同优化配置方法[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(7): 132−140.]

[11] Lin C J, Chen A Y T, Chiou C Y, et al. Dynamic load models in power systems using the measurement approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(1):309−315.

[12] Allard F, Désilets M, LeBreux M, et al. Improved heat transfer modeling of the top of aluminum electrolysis cells[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 132: 1262−1276.

[13] Liao Siyang, Zhang Mingqiang, Xu Jian, et al. Frequency stability control method for electrolytic aluminum participation in power grid considering the static voltage stability constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6727−6740.[廖思阳,张明强,徐箭,等. 考虑静态电压稳定约束的电解铝参与电网频率稳定控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18):6727−6740.]

[14] Liao Siyang, Bian Shiqi, Xu Jian, et al. Evaluation of grid-load interactive adjustable capacity of electrolytic aluminum load considering optimization of electrolytic cell energy flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(6): 2110−2121.[廖思阳,卞士琪,徐箭,等. 考虑电解槽能量流优化的电解铝负荷网荷互动可调容量评估[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(6):2110−2121.]

[15] Ding Xin, Xu Jian, Sun Yuanzhang, et al. Source-load coordinated control strategy for smoothing wind power fluctuation in grid-connected high energy consuming electrolytic aluminum industrial power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(11):47−55.[丁鑫,徐箭,孙元章,等. 联网型高耗能电解铝工业电网源荷协调平抑风电功率波动控制策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(11):47−55.]

[16] Liao Siyang, Xu Jian, Sun Yuanzhang, et al. Control of energy-intensive load for power smoothing in wind power plants[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6142−6154.

[17] Xu Jian, Chen Yuanfeng, Liao Siyang, et al. Demand side industrial load control for local utilization of wind power in isolated grids[J]. Applied Energy, 2019, 243:47−56.

[18] Yu Qingfang, Xu Jian, Liao Siyang, et al. Adaptive load control of electrolytic aluminum for power system frequency regulation based on the aluminum production operation state[J]. Energy Reports, 2022, 8:1259−1269.

[19] Zhang Bin, Si Dajun, Li Fan, et al. Research on peak shaving of wind power grid connection considering demand side response of electrolytic aluminum load[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2023, 42(7):31−38.[张斌,司大军,李凡,等. 计及电解铝负荷需求侧响应的风电并网调峰研究[J]. 电工电能新技术, 2023, 42(7):31−38.]

[20] Chen Yuanfeng, Xu Jian, Fan Chuanguang, et al. Frequency control strategy based on electrolytic aluminum load regulation for isolated grids with high wind power penetration [J]. Electric Power Construction, 2018, 39(3):92−100.[陈元峰,徐箭,范传光,等. 基于电解铝负荷调节的含高渗透率风电孤立电网频率控制策略[J]. 电力建设, 2018, 39(3): 92−100.]

[21] Jiang Xueyi, Xu Jian, Liao Siyang, et al. Coordinated con-

trol scheme of multi-type loads for wind power fluctuation in industrial parks considering the difference in response willingness of industrial users[J].Engineering Journal of Wuhan University,2022,55(9):876−885.[蒋雪怡,徐箭,廖思阳,等.考虑工业用户响应意愿差异性的工业园区多类型负荷协同平抑风电功率波动控制方法[J].武汉大学学报(工学版),2022,55(9):876−885.]

[22] Liu Hainan,Lin Hong.Optimal source-load dispatch strategy considering wind power fluctuation[J].Water Resources and Power,2021,39(9):210−214.[刘海南,蔺红.考虑风电波动性的源荷优化调度策略[J].水电能源科学,2021,39(9):210−214.]

[23] Ma Jiachen, Yuan Man, Yang Deyou, et al. Research on high-energy load dispatching strategy usedto improve wind power ability[J].Journal of Northeast Electric Power University,2024,44(2):79−87.[马嘉晨,袁满,杨德友,等.用于提升风电消纳能力的高载能负荷调度策略研究[J].东北电力大学学报,2024,44(2):79−87.]

[24] Yue Xiaoyu,Liao Siyang,Xu Jian,et al.Collaborative optimization of renewable energy power systems integrating electrolytic aluminum load regulation and thermal power deep peak shaving[J].Applied Energy,2024,373:123869.

[25] Bao Yi,Xu Jian,Liao Siyang,et al.Field verification of frequency control by energy-intensive loads for isolated power systems with high penetration of wind power[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2018,33(6):6098−6108.

[26] Liu Xinming,Wang Haiyun.Deep peak shaving method of electrolytic aluminum load cooperating with thermal power and energy storage system based on Wasserstein distance distribution robust[J].Thermal Power Generation,2024,53(8):152−162.[刘昕明,王海云.基于Wasserstein距离分布鲁棒的电解铝负荷协同火储深度调峰方法研究[J].热力发电,2024,53(8):152−162.]

[27] Xie Hua,Li Kai,Qie Jingbiao,et al.Cooperative optimal scheduling of source-grid-load-storage based on generative adversarial network modification[J].Proceedings of the CSEE,2025,45(5):1668−1680.[谢桦,李凯,郄靖彪,等.基于生成对抗网络修正的源网荷储协同优化调度[J].中国电机工程学报,2025,45(5):1668−1680.]

[28] Yue Xiaoyu,Liao Siyang,Fu Lijun,et al.Hierarchical optimization strategy of high-penetration wind power system considering electrolytic aluminum energy-intensive load regulation and deep peak shaving of thermal power[J]. Power System Technology,2024,48(8):3186−3196.[岳晓宇,廖思阳,付立军,等.计及电解铝高耗能负荷调控和火电深调的高比例风电系统分层优化策略[J].电网技术,2024,48(8):3186−3196.]

[29] 徐箭,廖思阳,孙元章.工业负荷建模控制及电网互动调节[M].北京:科学出版社,2022.

[30] Dan Yangqing,Wang Lei,Zheng Weimin,et al.Robust improvement strategy for power grid hosting capacity with integration of high proportion of renewable energy[J].Electric Power,2023,56(9):104−111.[但扬清,王蕾,郑伟民,等.高比例可再生能源接入背景下电网承载能力鲁棒提升策略[J].中国电力,2023,56(9):104−111.]

[31] Nie Lijun,Xing Haijun,Jiang Weijian,et al.Optimized configuration of distributed energy storage considering peak shaving requirements under aggregator mode[J].Acta Energiae Solaris Sinica,2024,45(7):153−162.[聂立君,邢海军,江伟建,等.聚合商模式下考虑调峰需求的分布式储能优化配置[J].太阳能学报,2024,45(7):153−162.]

Method for Accommodating New Energy in Regional Power Grids Based on the Load Elasticity of Electrolytic Aluminum

ZHAO Qinghua[1], *ZHANG Shu*[1*], *ZHOU Yongjun*[1,2], *HUANG He*[1], *XIAO Xianyong*[1]

(1.College of Electrical Engineering, Sichaun University, Chengdu 610065, China;
2.Lhasa Power Supply Company of State Grid Xizang Electric Power Company Limited, Lhasa 850010, China)

Abstract:

Objective With the continuous increase in the installed capacity of renewable energy units in regional power grids, the regulation capacity of traditional power sources is inadequate to meet the growing regulation demands of the power grid. Therefore, exploring the regulation potential on the load side to enhance renewable energy accommodation capacity becomes a critical issue in the ongoing development of regional power grids. The electrolytic aluminum load (EAL) is characterized by a long production cycle, substantial adjustment potential, and an extended regulation duration. Therefore, fully utilizing the flexibility of EAL holds substantial theoretical value and practical engineering importance for increasing the renewable energy accommodation rate in regional power grids and strengthening the regulation capacity of the system.

Methods A renewable energy accommodation method for regional grids based on EAL flexibility was proposed. First, an EAL flexibility model was constructed based on an investigation of the thermal equilibrium and power variation characteristics of the electrolytic cell. Second, an in-depth analysis of the fluctuation characteristics associated with the sequential accommodation of renewable energy through the flexibility potential of EAL revealed the underlying principle by which EAL flexibility suppressed renewable energy fluctuations. Then, a renewable energy ac-

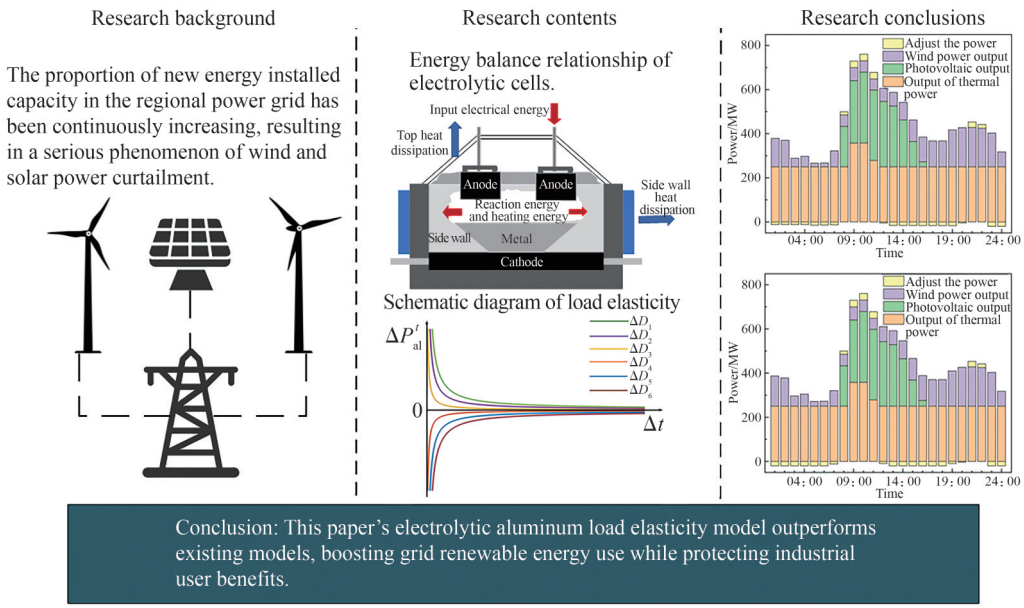
commodation method for regional power grids was established based on the temporal characteristics of EAL flexibility in accommodating renewable energy fluctuations, with the objective of maximizing renewable energy accommodation. Finally, case validation was performed using the MATLAB platform and the GUROBI solver, with the case conducted within an improved IEEE 30-bus system environment.

Results and Discussions A comparative analysis was performed under three conditions: EAL without participation in regional grid regulation, the existing EAL power model with participation in grid regulation, and the proposed EAL flexibility model with participation in grid regulation. The results demonstrated that the proposed EAL flexibility model accommodated greater renewable energy fluctuations when it participated in grid regulation and exhibited greater suitability for renewable energy accommodation in regional grids.

Conclusions Our results demonstrate that the EAL flexibility model developed in this study more accurately characterizes the dynamic coupling relationship between EAL flexibility and temperature variations in the electrolytic cell than existing EAL power models, revealing greater flexibility potential. In addition, the proposed regional grid renewable energy accommodation method, based on EAL flexibility, effectively improves the renewable energy accommodation rate and regulation capacity of the grid and safeguards the economic benefits of electrolytic aluminum users, establishing a theoretical foundation for applying EAL flexibility to renewable energy accommodation.

Key words: regional power grid; flexibility of electrolytic aluminum load; renewable energy accommodation; temporal characteristics; thermal equilibrium

Graphical abstract:



（编辑　赵　婧）

引用格式: Zhao Qinghua,Zhang Shu,Zhou Yongjun,et al.Method for accommodating new energy in regional power grids based on the load elasticity of electrolytic aluminum[J].Advanced Engineering Sciences,2026,58(6):183–192.[赵清华,张姝,周勇军,等.基于电解铝负荷弹性的地区电网新能源消纳方法[J].工程科学与技术,2026,58(6):183–192.]