DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)07-0162-05

输电网潮流约束和概率分析的新能源消纳能力自动评估

张 艳, 孟宪珍, 李香平, 左 雅

(国网新疆电力有限公司,乌鲁木齐 830063)

摘 要:传统新能源消纳能力评估方法缺乏输电网潮流约束和概率分析,导致评估结果偏差大,影响电网调度和新能源接入决策。因此,提出引入输电网潮流约束和概率分析的新能源消纳能力自动评估方法。首先,分析电力系统接入新能源的运行模式,明确消纳机理和消纳空间,定义由输电网负荷与常规机组最小出力差值构成的新能源消纳空间。其次,以输电网运行周期内新能源出力最大化为优化目标,引入潮流约束条件和关键时间断面潮流自动选取思想,构建电网时序生产模拟模型并实现自动模拟。然后,基于潮流约束模拟结果,应用 Copula 连接函数构建新能源出力的联合概率分布函数,同时结合离散消纳场景及其权重系数,获取新能源消纳空间的概率分布。最后,根据潮流约束模拟结果,获取新能源出力和消纳空间的概率分布,并计算期望值,得出全时段消纳能力的自动评估结果。实验结果表明,本方法所得评估结果相对误差在 3%以下,能够准确评估输电网新能源的消纳能力。

关键词:输电网; 潮流约束; 时序生产模拟; 新能源消纳;评估; 概率分析

中图分类号: TP18;TN721 **文献标志码**: A **文章编号**: 1003-7241(2026)07-0162-05

Automatic evaluation of new energy consumption capacity considering power flow constraints and probability analysis in transmission networks

Zhang Yan, Meng Xianzhen, Li Xiangping, Zuo Ya

(State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830063, China)

Abstract: The traditional evaluation method for the consumption capacity of new energy lacks power flow constraints and probability analysis of the transmission network, resulting in large deviations in the evaluation results, which affects power grid scheduling and new energy access decisions. Therefore, a new energy consumption capacity automatic evaluation method is proposed by introducing power flow constraints and probability analysis of the transmission network. Firstly, it analyzes the operation mode of integrating new energy into the power system, clarify the consumption mechanism and consumption space, and defines the new energy consumption space composed of the minimum output difference between the transmission grid load and conventional units. Secondly, with the optimization objective of maximizing the output of new energy during the operation cycle of the transmission network, the concept of power flow constraints and automatic selection of critical time section power flow is introduced to construct a power grid time-series production simulation model and achieve automatic simulation. Then, based on the simulation results of power flow constraints, the Copula connection function is applied to construct a joint probability distribution function for new energy output, and combined with discrete consumption scenarios and their weight coefficients, the probability distribution of new energy consumption space is obtained. Finally, based on the simulation results of current constraints, the probability distribution of new energy output and consumption space is obtained, and the expected value is calculated to obtain the automatic evaluation result of the consumption capacity throughout the entire period. The experimental results show that the relative error of the evaluation results obtained by this method is below 3%, which can accurately evaluate the consumption capacity of new energy in the transmission network.

Keywords: transmission network; flow constraints; time series production simulation; new energy consumption; evaluation; probabilistic analysis

随着全球能源结构的转型,新能源在电力系统中的比重日益增加[1],但新能源的接入与消纳问题一直是制约其大规模应用的关键因素。特别是近年来,随着风电、光伏等新能源的大规模并网[2],输电网能源消耗结构更加复杂,需要准确观察新能源日常消纳能力,基于此调整电网中新能源发展规划策略[3]。为了应对大规模、多变的新能源接入场景,各种结合自动化评估技术的新能源消纳能力自动评估方法涌现出来。

国内陈宗源等[4]采用动态四元组的形式,整理所有电网运行数据,并观察数据时空关联特征。给定一个固定尺寸的滑动时间窗口,在其中运用时空同步图卷积网络提取原始数据的高维特征。将特征信息与新能源消纳图谱中

收稿日期:2024-10-29;**录用日期**:2025-03-28

基金项目:新疆国网新疆电力科技项目(5230JY200010)

作者简介:张 艳(1975—),女,高级工程师,研究方向为电力系统分析及投资管理。

引用本文:张艳, 孟宪珍, 李香平, 等. 输电网潮流约束和概率分析的新能源消纳能力自动评估[J]. 自动化技术与应用, 2026,45(7):162-166. (Zhang Yan, Meng Xianzhen, Li Xiangping, et al. Automatic evaluation of new energy consumption capacity considering power flow constraints and probability analysis in transmission networks[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026,45(7):162-166.)

的机理知识进行匹配,获取消纳能力自动评估结果。但该方法采用时空同步图卷积网络提取特征时未考虑传统的潮流约束条件和概率分析,会导致生成的高维特征与实际电网潮流特性偏离,进而导致数据信息存在一定程度的失真。孟高军等[5]针对输电网运行场景建立对应的模拟模型,并向其中添加网络安全稳定约束条件。计算多个指标的离散概率分布函数,体现新能源分布随机性特点,根据离散概率运算结果推算出新能源消纳容量。但该方法忽略潮流约束条件来进行离散概率分布函数计算,会使得结果与实际电网的运行情况脱节,导致模型的准确性受到影响。国外 Kumar 等[6]从输电网的需求侧入手,应用负荷成形思想采集大量电网运行数据,并将其作为新能源消纳能力评估的依据。考虑部分新能源消纳影响因素,结合层次分析法和量子粒子群优化算法,构建一种自动评估模型,将历史数据导入其中即可得到新能源消纳能力评估值。但该方法在应用负荷成形思想采集大量电网运行数据作为评估依据时,缺乏对输电网潮流约束的分析和概率分析,使得模型无法充分反映电网的实际运行情况,导致评估结果与实际情况偏离。Saidi 等[7]考虑输电网组成架构,建立时序生产模拟模型,并应用遗传算法和高效全局优化算法进行双层优化求解,得到最终评估结果。但该方法在优化求解过程中未考虑潮流约束,导致得出的消纳能力评估结果无法真实反映电网对新能源的实际接纳能力。

为了解决上述方法未能考虑到潮流约束条件,导致输电网中的电力流动无法得到准确控制,易出现过载或电压失控情况,提出一种考虑输电网潮流约束的新能源消纳能力自动评估方法。通过引入输电网的潮流约束条件和关键时间断面潮流自动选取思想,以自动模拟输电网的时序生产过程。通过这种方式,获取新能源理论出力和消纳空间的概率分布函数,进一步推理得到新能源消纳概率分布的期望值。基于这些计算和分析结果,可以得出全时段的新能源消纳能力自动评估结果,从而为电网的新能源发展规划提供更为准确和可靠的依据。

1 新能源消纳能力自动评估方法

1.1 新能源消纳机理与空间分析

当大规模新能源接入电力系统后,由于风电、光伏等资源具有随机波动性,常规机组需要不断跟踪输电网负荷变化[8],用以平抑新能源出力波动。这种情况下,输电网电力负荷与常规机组最小出力之间存在一块运行区域,理论上该区域就可以称之为新能源最大消纳空间,具体如图 1 所示。

对于任意输电网运行时刻来说,新能源消纳空间 $\alpha(t)$ 可以表示为式(1)。

$$\alpha(t)=P(t)-\sum_{j=1}^{J}\beta_j(t)\times\tilde{P}_j(t)=P(t)-\sum_{j=1}^{J}\beta_j(t)\times\lambda_j\hat{P}_j(t) \tag{1}$$

式中,t 表示时刻,$P(t)$ 表示输电网负荷随操作时刻变化的函数,J 表示常规机组数量,j 表示机组编号,$\beta_j(t)$ 表示描述编号为 j 的机组在 t 时刻运行状态的二进制变量,$\tilde{P}_j(t)$、$\hat{P}_j(t)$ 分别表示机组技术出力的下限和上限,λ_j 表示编号为 j 的机组最小技术出力系数。

在已知目标时刻输电网新能源理论功率的情况下,该时刻对应的新能源消纳功率可以表示为

$$\chi(t)=\min\{b(t),\alpha(t)\} \tag{2}$$

式中,$\chi(t)$ 表示新能源消纳功率,$b(t)$ 表示新能源理论功率。新能源消纳空间设定了新能源发电量的最大接纳上限,新能源理论功率是预测可产生的发电量,而新能源消纳功率则是实际接纳的发电量,新能源理论功率与新能源消纳功率之间更小的值对应了新能源发电量的最大接纳上限。

除此之外,在接入大规模新能源的输电网正常运行时,新能源最大消纳空间内限电功率计算过程可以表示为式(2)。

$$\delta(t)=\max\{0,b(t)-\alpha(t)\} \tag{3}$$

式中,$\delta(t)$ 表示新能源限电功率,是指在时刻 t,由于新能源消纳空间的限制,无法被系统消纳的新能源功率,取新能源理论功率与新能源消纳空间差值、0 之间的最大值。以此保证电力系统的安全稳定运行、合理利用系统资源,并避免负功率情况的出现。

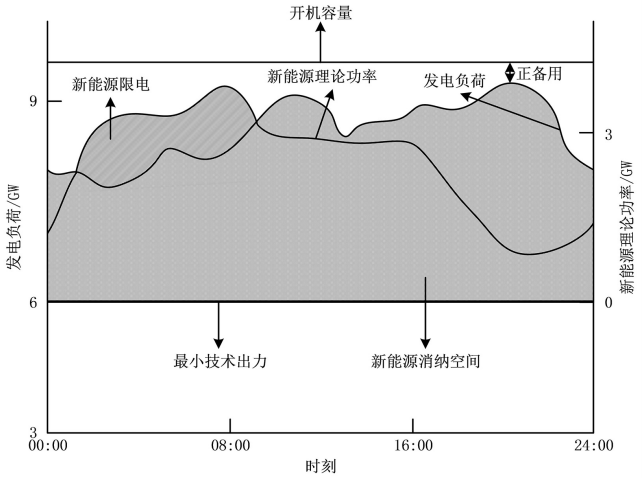


图 1 新能源消纳空间

Fig. 1 New energy consumption space

1.2 输电网时序生产模拟与优化

了解电力系统新能源消纳机理后,想要完成消纳能力的具体评估,以输电网运行周期内最大化新能源出力为目标,构建电网时序生产模拟模型,如式(4)所示。

$$F=\max\sum_{t=1}^{T}(V(t)+\mu(t)) \tag{4}$$

式中,F 表示时序生产模拟输出值,max 表示最大值取值函数,T 表示时序生产模拟总时间,V、μ 分别表示风电可消纳总功率、光伏可消纳总功率。

为了确保上述时序生产模拟模型符合输电网实际运行特点,考虑输电网潮流约束,针对公式(4)所示的模型,

给出节点功率平衡约束、支路容量约束和节点电压幅值约束,如式(5)~(7)所示。

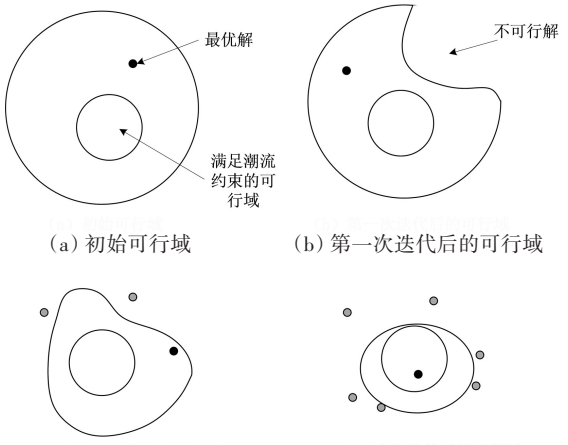
$$\begin{cases} Q(u,t)=\sum_{w=1}^{N}(G_{uw}U(u,t)U(w,t)\cos(\theta_{uw}(t))+ \\ \qquad B_{uw}U(u,t)U(w,t)\sin(\theta_{uw}(t))) \\ Q'(u,t)=-\sum_{w=1}^{N}(B_{uw}U(u,t)U(w,t)\cos(\theta_{uw}(t))- \\ \qquad G_{uw}U(u,t)U(w,t)\sin(\theta_{uw}(t))) \end{cases} \tag{5}$$

$$Q_{\min}(u,w)\leqslant Q(u,w,t)\leqslant Q_{\max}(u,w) \tag{6}$$

$$U_{\min}(u)\leqslant U(u,t)\leqslant U_{\max}(u) \tag{7}$$

式中,u、w 表示输电网中两个节点,二者相连形成一段支路,Q、Q' 分别表示有功、无功注入功率,N 表示电网内节点总数量,G 表示导纳矩阵实部,B 表示导纳矩阵虚部,U 表示电压幅值,θ 表示输电网支路两侧相角差,$Q_{\min}$、$Q_{\max}$ 表示支路内允许流过有功功率的下限值和上限值,$U_{\min}$、$U_{\max}$ 表示节点电压幅值最大值和最小值。

将上述输电网潮流约束条件代入电网时序生产模拟模型中,可以得到更加真实的时序模拟结果[9]。由于考虑输电网潮流约束的时序生产模拟模型需要进行复杂计算,为了简化模型求解过程,引入一种迭代寻优算法,自动选取关键时间断面潮流,其核心思想如图 2 所示。



(a) 初始可行域 (b) 第一次迭代后的可行域

(c) 第二次迭代后的可行域 (d) 多次迭代后的可行域

图 2 时序生产模拟寻优

Fig. 2 Time series production simulation optimization

如图 2 所示,经过数次迭代处理后所形成的最优解[10],更好地满足了所有时间断面的潮流约束,在该条件下得到的输电网时序生产自动模拟结果是最贴合真实情况的,可以辅助后续新能源消纳能力评估分析。

1.3 潮流约束模拟消纳能力评估

从新能源消纳机理可以看出,新能源消纳能力会受到能源理论出力、系统消纳空间的影响[11]。因此,根据潮流约束模拟结果,获取新能源出力与消纳空间的概率分布。计算期望值,得出全时段消纳能力的自动评估结果。详细过程描述如下。

以包含风电和光伏两种新能源发电形式的输电网为例,应用连接函数 Copula(概率论)函数[12],构建新能源出力概率分布函数,如式(8)所示。

$$f_1(z)=\frac{c}{d}\left(\frac{z}{d}\right)^{c-1}\exp\left[-\left(\frac{z}{d}\right)^{c}\right] \tag{8}$$

式中,f_1 表示理论出力概率分布函数,z 表示风速或光照强度,c 表示分布形状参数,d 表示分布尺度参数。

在已知电力系统新能源消纳空间的情况下,可以得到消纳空间对应的概率分布函数如式(9)所示。

$$f_2(A)=\sum_{j=1}^{J}A_j\times\zeta \tag{9}$$

式中,f_2 表示消纳空间概率分布函数,A 表示消纳场景,A_j 表示编号为 j 的机组消纳场景,ζ 表示最大负荷。

最后,结合式(8)和式(9)展开卷积计算,可以给出新能源弃电功率概率分布函数。

$$f_3(z)=\begin{cases}\int_{-\infty}^{+\infty}f_1(z)\otimes f_2(A), & z>0\\ 0, & z\leqslant 0\end{cases} \tag{10}$$

式中,f_3 表示弃电功率概率分布函数,$\otimes$ 表示卷积算子。

通过上述计算,得出多项离散概率分布函数求解结果后,在概率场景之下模拟电力系统新能源消纳过程,展开新能源消纳能力评估分析,可以确定新能源消纳概率分布的期望值。

$$\boldsymbol{\Phi}(2,X)=f_1(z)\times f_2(A) \tag{11}$$

式中,$\boldsymbol{\Phi}$ 表示消纳功率概率分布值,X 表示新能源消纳功率。

以此为基础,可以求出全时段的新能源消纳能力估计值。

$$E_1=T\sum_{r=1}^{M}\boldsymbol{\Phi}_1(1,r_{\Phi_1})\times\boldsymbol{\Phi}_1(2,r_{\Phi_1}) \tag{12}$$

$$E_2=T\sum_{k=1}^{K}\boldsymbol{\Phi}_2(1,k_{\Phi_2})\times\boldsymbol{\Phi}_2(2,k_{\Phi_2}) \tag{13}$$

式中,E_1、E_2 分别表示风电消纳能力评估值和光伏消纳能力评估值,M 表示风电机组数量,r 表示风电机组编号,K 表示光伏机组数量,k 表示光伏机组编号,$\boldsymbol{\Phi}_1$、$\boldsymbol{\Phi}_2$ 分别表示风电、光伏消纳功率概率分布。

通过上述推算,得出新能源消纳能力自动评估结果。

2 实验结果分析

2.1 实验场景

为观察此方法的实践应用效果,在实验准备阶段,参照“三北”地区某接入 78 个新能源场站的输电网,在实验室内搭建相应的电网拓扑结构,如图 3 所示。

如图 3 所示,所有新能源场站会根据地区划分情况,与 4 个 500 kV 变电站连接,实现电力能源的汇集。该能源结构中的新能源装置主要包括风电装机、光伏装机两类,二者的容量分别为 750 MW、3 500 MW。实验场景如图 4 所示。

在图 4 所示的实验场景下,分别运用本研究提出的引入输电网潮流约束和概率分析的新能源消纳能力自动评

估方法,基于时空卷积动态知识图谱的新能源消纳评估方法和基于网络安全稳定约束的新能源消纳能力评估方法进行新能源消纳能力自动评估,观察不同方法评估显示结果,基于此来判断引入输电网潮流约束和概率分析的新能源消纳能力自动评估方法是否有必要进行大范围传播。

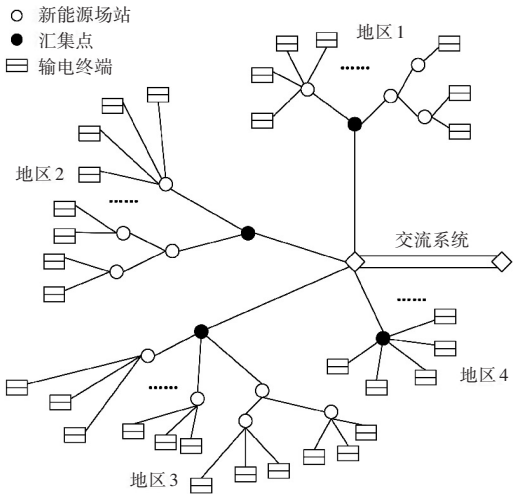


图 3　输电网新能源分布结构

Fig. 3　The distribution structure of new energy in the transmission network

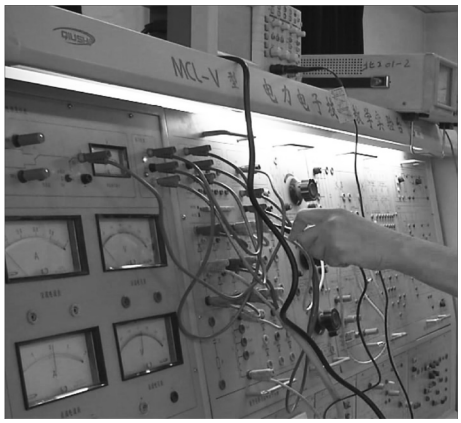


图 4　实验场景

Fig. 4　Experimental scene

2.2　实验设计

2.2.1　输电网时序生产模拟实验

在新能源消纳能力自动评估之前,先收集目标输电网架构的年度负荷出力情况,绘制出力序列,如图 5 所示。

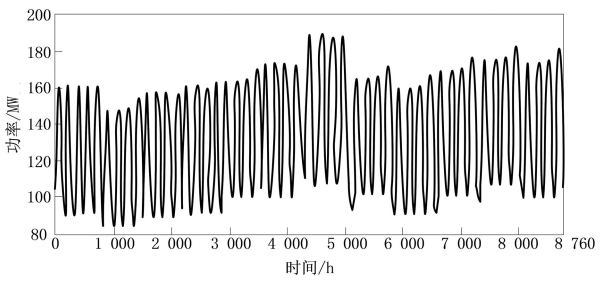


图 5　年度负荷出力序列

Fig. 5　Annual load output sequence

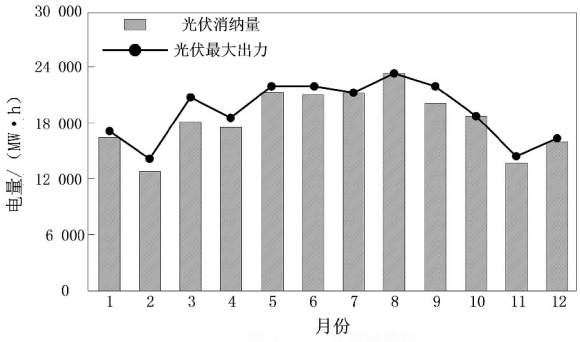
基于这些初步数据,将进行考虑输电网潮流约束的时序生产自动模拟,形成生产模拟参数(如表 1 所示),包括风电和光伏发电量、限电量及限电率等关键参数。

表 1　生产模拟详细参数

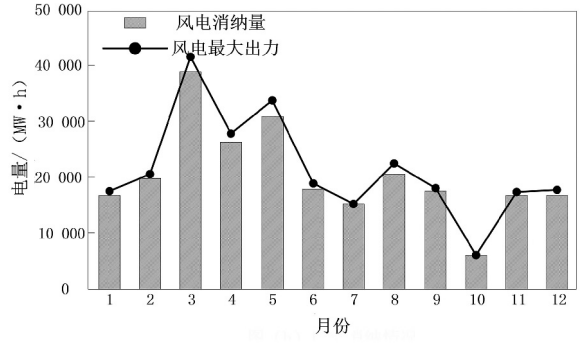
Tab. 1　Detailed parameters of production simulation

序号	项目	参数值
1	风电发电量/(TW · h)	13.88
2	光伏发电量/(TW · h)	1.78
3	风电限电量/(TW · h)	0.94
4	光伏限电量/(TW · h)	0.35
5	风电限电率/%	6.11
6	光伏限电率/%	13.19
7	风电限电时间/h	928
8	光伏限电时间/h	510
9	风电限电时间占比/%	10.46
10	光伏限电时间占比/%	5.82
11	新能源限电率/%	6.95
12	新能源发电量占比/%	16.52
13	新能源限电时间/h	1 014
14	新能源限电时间占比/%	11.63

在年度时序生产模拟环境中,模拟不同时段内新能源光伏消纳量与光伏最大出力的变化情况。记录并分析模拟结果,完成新能源消纳能力的自动评估,所得评估结果如图 6 所示。



(a) 光伏消纳情况



(b) 风电消纳情况

图 6　新能源消纳能力自动评估结果

Fig. 6　Results of automatic assessment of new energy consumption capacity

通过本实验,得到目标输电网架构在潮流约束条件下

的新能源消纳能力评估结果。根据图 6 可知,该输电网新能源年度光伏总消纳量为 238 427 MW · h,风电总消纳量为 269 313 MW · h。这表明引入输电网潮流约束和概率分析的新能源消纳能力自动评估方法能够有效地完成目标时段新能源消纳能力的自动评估[13],并满足预期设计要求。

2.2.2 不同评估方法性能对比实验

在完成对引入输电网潮流约束和概率分析的新能源消纳能力自动评估方法的性能测试后,使用了与之前实验相同的输电网架构和输入参数,分别应用了基于时空卷积动态知识图谱的新能源消纳评估方法和基于网络安全稳定约束的新能源消纳能力评估方法两种方法来评估能源消纳能力。根据式(14),计算了不同方法评估结果的相对误差,最终绘制得到图 7。

$$\eta = \frac{| y' - y |}{y} \times 100\% \tag{14}$$

式中,η 表示相对误差,y'、y 表示新能源消纳评估值和真实值。

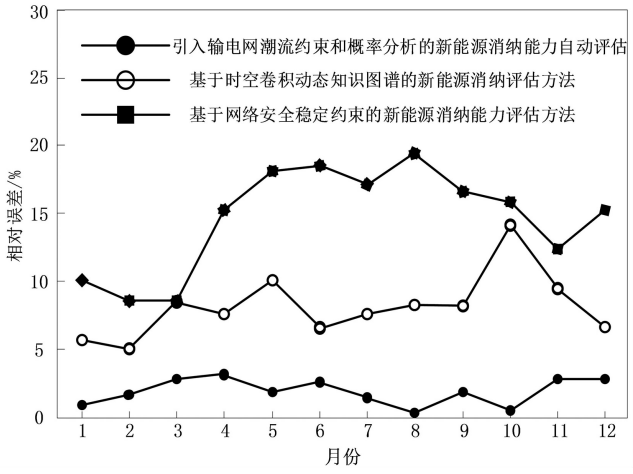


图 7 不同方法评估结果相对误差对比

Fig. 7 Comparative analysis of relative errors in evaluation results using different methods

根据图 7 可知,本研究采用考虑输电网潮流约束的新方法所得评估结果的相对误差低于 3%,而另外两种方法评估结果的相对误差均值分别为 9.8%、14.1%,明显偏高。这一实验结果充分验证了研究方法的优越性和有效性。具体原因在于方法通过设定目标时间段内新能源出力最大化为目标,结合输电网时序生产目标函数。通过引入输电网潮流约束条件和关键时间断面潮流自动选取思想,成功地考虑了输电网的潮流约束,从而为实现新能源消纳能力的有效评估提供了有力支持。这一优势使得该方法在评估结果上表现出更低的相对误差,提高了评估的准确性和可靠性[14]。

3 结论

随着新能源的大规模接入和全球能源结构的深刻转型,新能源消纳能力的准确评估显得愈发关键。针对当前新能源消纳评估中忽略输电网潮流约束的问题,本研究提出一种创新的新能源消纳能力自动评估方法[15-16]。该方法考虑输电网的潮流约束,通过模拟输电网的时序生产过程,获得了新能源理论出力和消纳空间的概率分布,并据此推导出了新能源消纳概率分布的期望值。这一评估方法不仅提高了评估的准确性,而且为电力系统的调度和规划提供了科学的决策支持。

参考文献

[1]郑伟民, 但扬清, 王晨轩, 等. 计及风-光-水-火多能协同的电网可再生能源消纳能力评估[J]. 中国电力, 2023, 56(12):248-254.
[2]丁坤, 陈博洋, 秦建茹, 等. 大规模新能源集群接入弱电网的消纳能力评估方法[J]. 电力建设, 2023, 44 (11):86-94.
[3]刘红丽, 张立伟, 李佳, 等. 大规模新能源并网的新能源消纳能力和消纳空间方法研究及应用[J]. 太原理工大学学报, 2024, 55(1):120-126.
[4]陈宗源, 余涛, 丁茂生, 等. 基于时空卷积动态知识图谱的新能源消纳评估方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(15):46-54.
[5]孟高军, 张峰, 徐晓轶, 等. 基于网络安全稳定约束的新能源消纳能力评估方法[J]. 太阳能学报, 2023, 44 (11):505-512.
[6]Kumar R S, Raghav L P, Raju D K, et al. Optimal day ahead energy consumption management in grid-connected microgrids[J]. International Journal of Energy Research, 2022, 46(2):1864-1881.
[7]Saidi M, Li Z, Elghali S B, et al. Realization of the optimal sizing of local hybrid photovoltaic and wind energy systems with load scheduling capacity[J]. International Journal of Energy Research, 2022, 46(15):21523-21537.
[8]刘俊, 高也, 齐宇蓉, 等. 基于马尔科夫链的可再生能源电力超额消纳量预测研究[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(4):164-168.
[9]张元鹜, 邓长虹, 曹鹏, 等. 一种分时段多目标火电机组实时调度策略及可再生能源消纳能力评估[J]. 武汉大学学报(工学版), 2023, 56(1):63-70.
[10]唐伟佳, 李强, 贾勇勇, 等. 基于风电-负荷匹配度的风电消纳能力自动评估方法[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(4):22-25,37.
[11]文云峰, 杨游航, 邢鹏翔, 等. 多维因素制约下新能源消纳能力评估方法研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(1):127-147.
[12]黎立丰, 刘春晓, 朱浩骏, 等. 考虑网络安全约束的可再生能源消纳能力评估方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(4):162-168.
[13]贾孟硕, 曹仟妮, 许偲轩, 等. 考虑机组调频容量约束的输电网概率潮流解析算法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(22):8592-8602.
[14]陈艳波, 强涂奔, 田昊欣, 等. 考虑集中式与分布式新能源不确定性的输配协同负荷恢复方法[J]. 电工技术学报, 2026, 41(7):2281-2299.
[15]李咸善, 陶雨露, 张磊. 考虑内部有偿交易的综合能源系统优化调度策略[J]. 电测与仪表, 2026, 63(1):92-104.
[16]陈铎, 张莹, 于海波, 等. 新能源消纳背景下配电网电能交互功率优化[J]. 计算机仿真, 2026, 43(2):74-78.