

基于随机源—荷场景集的多区域电力系统可用输电能力评估

朱沿任¹, 石庆鑫¹, 苗谊凡¹, 霍成芳¹, 张丽娜², 田鑫²

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206;

2. 国网山东省电力公司经济技术研究院规划研究中心, 山东 济南 250021)

摘要:为了解决高比例新能源并网导致的运行点偏移,以及传统确定性可用输电能力(ATC)评估方法难以量化时序安全裕度等问题,提出了一种基于随机场景集的多时间断面ATC评估方法。首先,针对新能源出力与负荷需求的多维度不确定性,采用改进的条件 Wasserstein 生成对抗网络(CWGAN)法生成代表性随机源—荷场景集,构建系统初始运行点;其次,基于安全性指标构建系统的极限运行点,进而建立时序ATC评估模型;通过典型日源—荷场景集对多区域高比例新能源接入的电力系统ATC概率分布进行评估,并计及N-1故障对系统ATC的影响。最后,基于多区域IEEE 9节点系统与实际电网案例的对比分析,验证所提方法的正确性和有效性。

关键词:可用输电能力;源荷不确定性;生成对抗网络;高比例新能源;随机场景集;多区域

中图分类号:TM732

文献标志码:A

DOI:10.20204/j.sp.2025.07005

Available Transfer Capability Assessment for Multi-area Power Systems Based on Stochastic Source-Load Scenario Sets

ZHU Yanren¹, SHI Qingxin¹, MIAO Yifan¹, HUO Chengfang¹, ZHANG Lina², TIAN Xin²

(1.School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2.Planning Research Center, State Grid Shandong Electric Power Company Economic and Technological Research Institute, Jinan 250021, China)

Abstract: To address operational point deviations caused by high-penetration renewable energy integration and the limitations of traditional deterministic available transfer capability (ATC) assessment methods in quantifying time-sequential security margins, a multi-time-interval ATC assessment method based on stochastic scenario sets is proposed. First, considering the multi-dimensional uncertainties of renewable energy output and load demand, an improved conditional wasserstein generative adversarial network (CWGAN) method is employed to generate representative stochastic source-load scenario sets, constructing initial system operating points. Second, critical operating points are established based on security indices, forming a time-series ATC evaluation model. The probability distribution of ATC in multi-area power systems with high-penetration renewable energy is evaluated using typical daily source-load scenario sets, while accounting for the impact of N-1 contingencies on system ATC. Finally, comparative case studies on the multi-area IEEE 9-bus system and an actual power grid validate the correctness and effectiveness of the proposed method.

Key words: ATC; source-load uncertainty; generative adversarial network; high-penetration renewable energy; stochastic scenario sets; multi-area

0 引言

可用输电能力(Available Transfer Capability, ATC)指在电网安全运行约束下,系统可额外传输的

最大功率。ATC不仅是电网运行和市场化交易的关键技术指标^[1-2],也是电力系统规划的重要依据^[3]。因此,针对新型电力系统提出有效的ATC评估方法,对于优化电网资源配置、提升电力市场交易效率具有重要意义。

传统的ATC评估体系主要基于确定性建模^[4-5],即在系统运行条件已知的前提下计算ATC,计算速度较快,比较容易实现。但随着高比例可再生能源接入和多元负荷深度耦合,传统的确定性方法已难以满足新型电力系统对区域间ATC评估的

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52307094);国网山东省电力公司科技项目(52062522000Q)

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (52307094); State Grid Shandong Electric Power Company Science and Technology Project(52062522000Q)

准确性需求。

针对源-荷不确定性问题,学者提出了概率 ATC 评估方法。常见的概率 ATC 评估方法有基于蒙特卡罗仿真^[6]、鲁棒优化^[7]、区间优化^[8]和包含机会约束的优化等^[9-11]。基于蒙特卡罗仿真的方法能够综合考虑多种不确定性因素,但计算成本高、难以实现大规模场景分析;基于鲁棒优化或区间优化的方法虽然计算量较小,但只能给出大致范围,难以反映 ATC 的概率分布情况;基于包含机会约束的优化方法虽然能够通过概率约束平衡安全性与经济性,但计算复杂度高且缺乏场景生成的灵活性。

近年来,生成对抗网络(Generative Adversarial Network, GAN)^[12]、变分自编码器^[13]等方法在电力系统场景生成方面得到了较为广泛的应用。但这些方法不能灵活地利用条件变量控制生成场景的类型和特性,无法准确灵活地生成 ATC 评估所需的典型场景。

在新型电力系统中,新能源与负荷的时序不确定性导致 ATC 呈现出时间相关的概率分布。因此,当前 ATC 评估有 2 个关键难点:一是如何准确生成反映源荷不确定性的典型场景;二是如何建立适用于多类随机场景的 ATC 评估模型。为此,本文提出了基于典型新能源-负荷场景集的多时间断面 ATC 评估方法。首先,针对新能源出力与负荷需求的不确定性,本文利用条件 Wasserstein 生成对抗网络(Conditional Wasserstein Generative Adversarial Network, CWGAN)框架,耦合卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)与 Transformer 自注意力机制,生成并筛选出典型日场景集,构建电网基准运行状态集合;其次,基于系统安全性指标构建了电网的极限运行状态,建立了 ATC 评估模型;最后,基于不同典型场景集,确定 ATC 的概率分布,并分析了 $N-1$ 情况下对系统 ATC 的影响,为电力市场交易与系统规划提供重要依据。

1 计及随机场景的可用输电能力计算模型

电网 ATC 计算是在保证系统安全稳定的前提下,基于当前系统拓扑结构、机组组合状态、负荷功率等运行参数,结合功率增量分配策略,求解电网关键输电通道在当前运行点的最大功率传输裕度^[14]。

1.1 ATC 评估框架

ATC 定义为在满足既定运行约束的前提下,系

统最大输电能力扣除现有输电协议、容量效益裕度以及输电可靠性裕度之和后的剩余输电容量,用数学模型可以表示为^[2]:

$$P_{ATC} = P_{TTC} - P_{ETC} - P_{CBM} - P_{TRM} \quad (1)$$

式中: P_{ATC} 为系统可用输电能力; P_{TTC} 为最大输电能力; P_{ETC} 为现有输电协议; P_{CBM} 为容量效益裕度; P_{TRM} 为输电可靠性裕度。

P_{TTC} 在数值上与系统极限运行状态(极限运行点)下送端可调整发电机组有功出力相同; P_{ETC} 在数值上与系统在基准运行状态(初始运行点)下送端可调整发电机组有功出力相同。通常情况下, P_{CBM} 与 P_{TRM} 为区域调度中心给定的常数^[15-16]。

因此,为简化模型,本文忽略 P_{CBM} 与 P_{TRM} 对 ATC 的影响。将给定源-荷场景下的目标函数设置为^[8]:

$$\min \sum_{i \in T} \left[\alpha c_i P_{i,t}^G - \beta \sum_{i \in G} (P_{i,t}^{Gm} - P_{i,t}^G) \right] \quad (2)$$

式中: $P_{i,t}^{Gm}, P_{i,t}^G$ 分别为节点 i 在极限运行状态与初始运行状态下的火电机组出力; G 为送端含火电机组的节点集合; c_i 为节点 i 处火电机组的单位发电费用; α, β 分别为权重系数; T 为总时间段数量。

目标函数旨在最小化机组发电成本并最大化区域间 ATC。其中, $c_i P_{i,t}^G$ 是给定新能源输出与负荷需求情况下发电机组的日前经济调度费用; $\sum (P_{i,t}^{Gm} - P_{i,t}^G)$ 是 P_{TTC} 与 P_{ETC} 的差值。由于本文的目标函数与约束条件均针对特定的随机场景,因此所有功率、电压变量均省略用于表示随机场景的下角标 s 。

最终可以得到系统基于随机场景集的 ATC 概率分布如式(3)所示。

$$P_{ATC,s} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T P_{ATC,t,s} \quad (3)$$

式中: $P_{ATC,s}$ 为系统在场景 s 下的 ATC 概率分布值; $P_{ATC,t,s}$ 为场景 s 下系统在的 t 时刻的 ATC。

当随机源荷场景集数量充足时,其概率分布即可反映实际运行工况下系统初始运行点到极限运行点的距离。

1.2 电力系统运行约束

通过调整电力系统送端发电和受端负荷功率,增大区域间交换功率直至出现安全约束越限,此时对应的电网运行状态即为极限运行点。初始运行点至该点间送端火电机组的有功功率增量即 ATC。由于 ATC 评估对象通常为输电系统,为提高计算效率并有效处理系统的复杂性,本文采用直流潮流模

型。当仅考虑静态安全约束时,ATC 评估模型可以构建为 1 个线性模型,系统的运行约束如下。

1) 电网基准运行状态约束为:

$$P_{i,t} = P_{i,t}^G + P_{i,t}^W - P_{i,t}^D \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t}^G + \sum_{i=1}^N P_{i,t}^W = \sum_{i=1}^N P_{i,t}^D \quad (5)$$

$$a_{k,i} = \frac{X_{mi} - X_{ni}}{X_{mn}} \quad (6)$$

$$-F_{k,t} \leq \sum_{i=1}^N a_{k,i} \cdot P_{i,t} \leq F_{k,t} \quad (7)$$

$$P_{i,t}^{G\min} \leq P_{i,t}^G \leq P_{i,t}^{G\max} \quad (8)$$

$$\begin{cases} P_{i,t}^G - P_{i,t+1}^G \leq rP_{i,t}^{G\max} \\ -rP_{i,t}^{G\max} \leq P_{i,t}^G - P_{i,t+1}^G \end{cases} \quad (9)$$

式中: $P_{i,t}$ 为 t 时刻流入节点 i 的功率; $P_{i,t}^W$ 为节点 i 的风电场在 t 时刻的出力; $P_{i,t}^D$ 为节点 i 在 t 时刻的负荷; k 为线路 $m-n$ 的编号; N 为系统节点集合; X_{mi}, X_{ni}, X_{mn} 分别为节点电抗矩阵中 m 行 i 列, n 行 i 列和 m 行 n 列的元素; $a_{k,i}$ 为线路 k 对节点 i 的发电转移分布因子^[17]; $F_{k,t}$ 为线路 k 在时间 t 的热极限; $P_{i,t}^{G\max}, P_{i,t}^{G\min}$ 分别为机组 i 出力上下限; $P_{i,t+1}^G$ 为节点 i 的火电机组在 $t+1$ 时刻的出力; r 为爬坡率限值。

式(4)为节点功率平衡约束;式(5)为源荷功率平衡约束。线路的容量约束为非线性表达式,但由于本文使用的潮流模型为直流潮流模型,因此,用式(6)~式(7)近似表示线路的容量约束^[8]。式(8)代表发电机组出力约束。式(9)表示发电机组的爬坡约束。

2) 电网极限运行状态约束为:与基准运行状态类似,系统在极限运行点仍满足功率平衡约束、潮流约束、机组出力约束。因此,约束条件式(4),式(5),式(7)~式(9)重写为式(10)~式(14)。

$$P_{i,t}^m = P_{i,t}^{Gm} + P_{i,t}^{Wm} - P_{i,t}^{Dm} \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t}^{Gm} + \sum_{i=1}^N P_{i,t}^{Wm} = \sum_{i=1}^N P_{i,t}^{Dm} \quad (11)$$

$$-F_{k,t} \leq \sum_{i=1}^N a_{k,i} \cdot P_{i,t}^m \leq F_{k,t} \quad (12)$$

$$P_{i,t}^{G\min} \leq P_{i,t}^{Gm} \leq P_{i,t}^{G\max} \quad (13)$$

$$\begin{cases} P_{i,t}^{Gm} - P_{i,t+1}^{Gm} \leq rP_{i,t}^{G\max} \\ -rP_{i,t}^{G\max} \leq P_{i,t}^{Gm} - P_{i,t+1}^{Gm} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} P_{i,t}^G \leq P_{i,t}^{Gm}, i \in SR \\ P_{i,t}^G = P_{i,t}^{Gm}, i \in SK \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} P_{i,t}^D = P_{i,t}^{Dm}, i \in SR \\ P_{i,t}^D \leq P_{i,t}^{Dm}, i \in SK \end{cases} \quad (16)$$

式中: $P_{i,t}^m, P_{i,t}^{Gm}, P_{i,t}^{Dm}$ 分别为极限状态下的 $P_{i,t}, P_{i,t}^G, P_{i,t}^D$; SR 为送端区域节点集合; SK 为受端区域节点集合。式(15)~式(16)为基准运行状态与极限运行状态下

发电机、负荷的变化关系。

由于 ATC 通常评估区域间输电能力的增加潜力,因此,本文假设极限运行点的发电出力增量完全由送端的火力机组提供,受端的火力机组出力则不变化。另一方面,假设极限运行点的负荷增量完全由受端负荷引起,而送端各个节点的负荷保持不变。

根据中国电力企业联合会在 2015 年发布的《风力发电场设计规范》(GB 51096—2015)^[18],风力涡轮机组应满足功率因数在超前 0.95 到滞后 0.95 的范围作为风电并网的一个先决条件。在此标准下,风电场无需从电网吸收大量无功功率。所以,本文在模型中忽略无功功率问题,并将风电机组视为具有不确定性的常规机组。

1.3 随机源荷场景集

电网在满足系统经济性和安全性条件下形成的基准运行状态,称为初始运行点。初始运行点可视为多种参数组合形成的集合 S^0 。在省级及以上电力系统中,不同区域新能源场站出力与负荷需求存在较大的时序不确定性,系统的日内潮流分布存在较大波动,直接影响了系统的初始运行点。因此,为准确评估不确定场景下的 ATC,需依据新能源与负荷的大量历史数据,形成典型的随机源荷场景集,场景集 S^0, S^W, S^D 可以视作 P_i^W, P_i^D 形成的矩阵。如式(17)~式(19)所示。

$$S^0 = \{S^W, S^D\} \quad (17)$$

$$S^W = \{P_1^W, P_2^W, \dots, P_i^W\}, i \in W \quad (18)$$

$$S^D = \{P_1^D, P_2^D, \dots, P_i^D\}, i \in D \quad (19)$$

式中: P_i^W 为节点 i 处风电场出力; S^W 为系统中 P_i^W 的集合; P_i^D 为节点 i 处负荷需求; S^D 为系统中 P_i^D 的集合; 其中 $P_i^W = [P_1^W, P_2^W, \dots, P_T^W]$, $P_i^D = [P_1^D, P_2^D, \dots, P_T^D]$; W, D 分别为系统风电场、负荷节点集合。

2 基于改进 CWGAN 的源-荷场景集生成方法

在新能源与负荷出力不确定性建模方面,现有研究可以分为概率统计建模与数据驱动的深度学习方法。本文提出一种基于改进 CWGAN 的场景可控生成方法。

2.1 CWGAN 网络结构

CWGAN 通过生成器与判别器之间的零和博弈提升生成器生成样本的真实性^[19]。CWGAN 在生成器和判别器网络中均引入条件值 y , 学习指定条件概率分布^[20]。并使用 Wasserstein 距离计算损失函

数来解决梯度消失和模式崩溃的问题。

由于 Wasserstein 距离定义式的下确界难以直接求解,本文采用 Wasserstein 距离的 Kantorovich-Rubinstein 对偶形式^[21],并以梯度惩罚(Gradient Penalty, GP)替代权重裁剪。CWGAN-GP 的目标函数如式(20)所示:

$$\min_G \max_D V(G, D) = E_{x \sim p_x, y \sim p_y} [D(x|y)] - E_{z \sim p_z, y \sim p_y} [D(G(z|y)|y)] - \lambda E_{\hat{x} \sim p_x, y \sim p_y} \left[\left(\|\nabla_{\hat{x}|y} D(\hat{x}|y)\|_2 - 1 \right)^2 \right] \quad (20)$$

式中: λ 为GP系数,用来平衡初始目标和GP的影响; $D(\cdot)$ 、 $G(\cdot)$ 分别为判别器函数和生成器函数;真实数据 x 和生成器生成虚假样本 z 分别服从于概率分布 p_x 和 p_z ; $\hat{x}$ 为从概率分布 p_z 和 p_x 之间采样得到的一个数据点, $\hat{x}$ 可通过式(21)求解。

$$\hat{x} = \alpha D(x|y) + (1 - \alpha) G(z|y), (\alpha \in [0, 1]) \quad (21)$$

2.2 改进CWGAN网络结构

CNN 的局部泛化能力使得 CWGAN 模型能够捕捉新能源出力的局部特征,如风速和太阳辐射的局部变化。但受限于卷积核的局部感知特性,基于 CNN 的 CWGAN 模型易忽略某些短期且幅度较小的新能源出力波动^[22]。为了解决这一问题,本文提出了一种融合 CNN 局部泛化能力与 Transformer 全局自注意力机制的 CWGAN 模型。Transformer 的自注意力机制擅长处理长序列数据并捕捉新能源出力的长距离依赖关系^[23]。因此,通过结合 CNN 的局部泛化能力与 Transformer 的全局特性, CWGAN 能有效整合局部与全局信息,准确学习新能源出力的时空特征,进而为 ATC 评估提供更准确的分析预测概率模型。

在 CWGAN 的训练过程中,主要根据判别器对生成器生成数据的反馈,采用梯度下降法更新生成器和判别器。因此,本文仅在判别器网络中堆叠卷积模块和 Transformer 自注意力机制模块,从而实现时序场景中的多重特征进行判别,生成器则采用计算复杂度低的卷积模块。卷积模块能够快速处理早期的局部模式,为后续的 Transformer 模块提供有效的输入;而 Transformer 模块则能进一步建模全局依赖关系,提升模型的拟合和泛化能力。判别器采用这种组合方式,能够更好地应对复杂的场景数据,进而提高模型性能。生成器和判别器的架构如图 1 所示。

图 1 中,连接层用于将条件值转换为向量并与 z 或 x 纵向拼接;卷积块通过 3 部分处理数据:首先

使用卷积核捕捉局部特征,其次对卷积输出归一化以稳定训练,最后使用 LeakyReLU 激活函数增加非线性。k3n64p1 指该卷积层内核大小为 3×3 ,输出通道为 64 个,填充为 1;Transformer 块引入自注意力机制,计算数据不同位置的关联权重;前馈模块对自注意力输出做非线性变换,强化全局特征的表达力;线性变换层压缩高维特征到输出维度;全连接层将 Transformer 提取的全局特征压缩到一维,最终输出判断结果;判别器中每个 Transformer 块和前馈网络模块中都引入了残差连接,通过将模块的输入直接添加到模块的输出上,提高模型的稳定性。

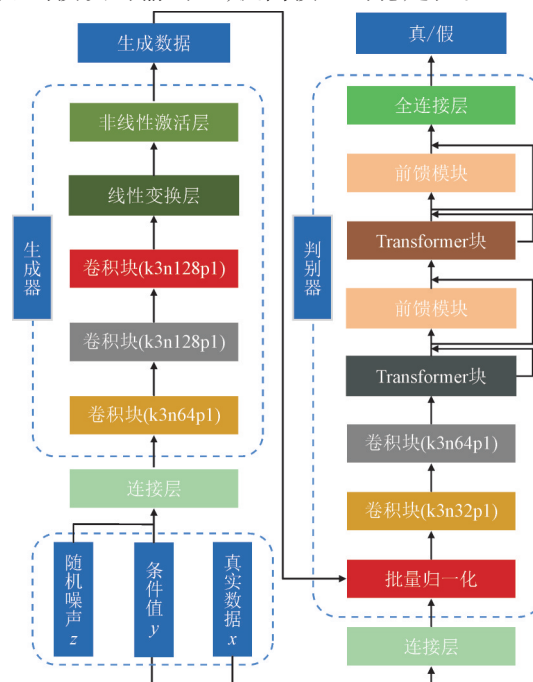


图1 生成器和判别器网络结构

Fig.1 Network architecture of generator and discriminator

2.3 可控场景集生成方法

针对 ATC 场景生成方法已经有很多,但总体来看仍有以下不足:(1)现有的场景生成方法往往难以精确捕捉源荷的不确定性,导致 ATC 评估结果与实际情况存在显著偏差;(2)许多场景生成方法效率不高,且缺乏灵活性,难以根据 ATC 评估的具体需求,快速生成所需的场景;(3)现有方法生成的场景往往不能充分体现多个区域的典型特征,而准确计算区域间的 ATC 需要生成各自具有代表性的场景;(4)部分场景生成方法能够生成大量场景,但缺乏有效的约简手段,ATC 评估需要少而精的典型场景。

因此,本文提出基于改进 CWGAN,融合层次聚类与 K-means 聚类的可控场景生成方法,生成 ATC 评估所需典型场景,具体步骤如下:

(1)分区域构建训练集:采用该区域内已有的新能源出力和负荷历史数据和对应的时间属性、出力需求特征建立训练集。

(2)设置可控条件值:以功率、气象以及时空特性作为条件值,经过独热编码处理后与数据纵向拼接后输入训练模型。

(3)训练模型:交替训练生成器和判别器直至模型收敛。

(4)可控场景生成:将第2步中的可控条件值输入到训练好的生成器中,生成大量符合该条件的场景。

(5)采用 K-means 聚类算法约简场景集:使用 K-means 对数据聚类后,选取每个类中距离聚类中心最近的点作为代表场景。

在电力系统中,ATC 的计算需要考虑多种可能的运行情况。通过本文提出的可控场景生成方法可以生成具有代表性的各类典型场景,更全面地评估系统 ATC 在不同运行状态下的表现。

2.4 场景条件值设定策略

一般来说,必须根据火电厂高输出和火电厂低输出的代表性基准运行状态场景情况来评估 ATC。因此,本文通过对风电出力、负荷需求的组合选择了4种具有代表性的典型日场景。其关键参数如表1所示。不同的场景表示不同的初始运行点。

表1 4类场景概述

Table 1 Overview of four types of scenarios

场景	风电出力	负荷需求	基准运行状态下的火电厂机组发电量
1	低	高	高
2	高	高	中
3	低	低	中
4	高	低	低

根据设定的4类场景分析表明,ATC 评估所需的条件值主要由风电出力和负荷需求的功率特性确定。同时,气象、时间和空间因素对源荷特性也有显著影响。因此,在设置条件值时,应优先选择与功率紧密相关的特性,以确保改进的 CWGAN 模型生成场景集能全面且灵活地反映实际电网的动态特征。

具体而言,风电出力直接由风速决定^[24],其输出功率 P_w 与风速 v 的关系如式(22)所示。

$$P_{w,t} = \begin{cases} 0, & v_t \leq v_{in}, v_t \geq v_{out} \\ P_{w,N} \frac{v_t - v_{in}}{v_r - v_{in}}, & v_{in} \leq v_t \leq v_r \\ P_{w,N}, & v_r \leq v_t \leq v_{out} \end{cases} \quad (22)$$

式中: $P_{w,N}$ 为风机的额定输出功率; v_{in} 为切入风速;

v_{out} 为切出风速; v_r 为额定风速; v_t 为实时风速。

此外,负荷需求具有较强的时序性,不同的季节、时间节点(如节假日)都会对负荷需求造成影响。因此,训练 CWGAN 的历史数据需要保证足够的时间跨度,并选取时间特性作为条件值,以全面反映实际电力系统负荷需求的变化。最后,在空间特性方面,为准确评估区域间 ATC,需要结合各个区域源荷典型特征,特别是送端以及受端的源荷特性。因此,本文通过不同分区设定不同条件值来体现空间特性。

综上所述,本文选取功率特性、风速、时间特性及区域位置作为条件值,并通过离散化与独热编码,使条件值可灵活组合,进而生成特定场景集,满足不同场景需求。

3 算例仿真

本节通过使用2个多区域电力系统来验证所提出的 ATC 评估方法的有效性,包括多区域 IEEE 9 节点系统以及实际的省域电网。ATC 计算任务在配备英特尔酷睿 i5 处理器(2.40 GHz)和 24 GB 内存的计算机完成,代码通过基于 Matlab 的 Gurobi Optimizer-11.0.2 实现。场景生成部分使用 PyTorch 深度学习框架,同时使用 NVIDIA GeForce GTX 1650 的图形处理器并行计算,图形处理器显存为 4.0 GB。

3.1 随机场景集生成

选取山东省鲁北、烟威、鲁南3个区域365 d 的风力发电厂和负荷的历史数据作为训练集,并选取功率特性、风速、时间特性及区域位置作为条件值。利用第2节介绍的改进 CWGAN 方法生成具有代表性的典型日风电出力和负荷场景集,设定学习率 η 为 0.000 1,批大小 b 为 200,序列长度 l 为 24。

CWGAN 使用 Wasserstein 距离判断 P_x 和 P_z 之间的差异,模型训练的 Wasserstein 距离如图2所示。由图2可知,Wasserstein 距离均随训练次数的增加而逐渐收敛。其中,改进的 CWGAN 方法与2.1节建立的 CWGAN-GP 模型相比,改进的 CWGAN 收敛速度更快,训练时间更短,且其收敛曲线波动幅度降低约40%,训练过程更加稳定。仿真结果表明,改进的 CWGAN 在生成复杂场景任务中具有更高的收敛精度,其生成结果与历史数据的概率分布一致性显著优于 CWGAN-GP 法,为高精度生成日内源-荷场景提供了可靠支撑。

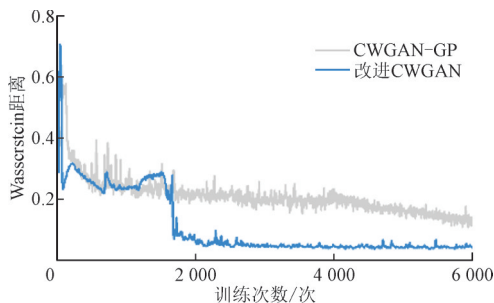


图2 不同方法下生成样本和历史样本间 Wasserstein 距离
Fig.2 Wasserstein distance between generated samples and historical samples under different methods

在模型训练阶段完成后,输入设定的条件值即可生成特定的源-荷场景。本文采用 K-means 聚类算法对场景进行约简,以更有效地捕捉特定条件下区域的关键特征。约简后的场景集能更精确地反映特定条件下的风电出力以及负荷的时空不确定性,从而在进行 ATC 评估时,提供更为精准且具有代表性的结果。

本文选取了 3 个区域中风电出力及负荷需求高或低的代表性场景,也即 6 类代表性条件值如图 3 所示。图 3(a)展示了用于 ATC 评估的部分风电出力场景,标记为 W1—W6,约简后的部分负荷曲线如图 3(b)所示,命名为 L1—L6。

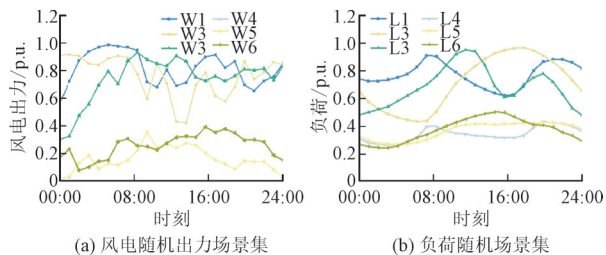


图3 源荷随机场景
Fig.3 Source-load random scenarios

3.2 ATC 评估结果

3.2.1 IEEE 9 节点系统 ATC 评估结果

测试系统如图 4 所示,系统由 2 个不同的 9 节点网络构成。图 4 中,3 个风电场标记 W1—W3;9 个火力发电厂标记为 G1—G9,其参数与文献[25]一致。在送端,火电厂的总额定功率大于其峰值负荷;而在受端,火电厂的总额定功率小于其峰值负荷。此外,送端风电渗透率为 19.80%,受端风电渗透率为 6.78%,该系统总风电渗透率为 34.09%。因此,无论风力如何波动,电力都会从送电区传输到受电区。风电出力和负荷曲线均由 CWGAN 法生成。

本节基于表 1 所示 4 种典型源荷场景对 IEEE 9 节点系统的 ATC 进行评估,多目标优化模型中的加权系数 α 和 β 分别设为 0.2 和 0.8^[8],评估结果如

表 2 所示。对比不同场景可知,ATC 最大均值为 1 410.08 MW,出现在场景 4 中。当负荷较低且风电出力较大时,火电机组增发裕度较高,系统拥有充足的可用输电能力。ATC 的最小均值为 765.07 MW,出现在场景 1 中。当负荷较高且风电出力较小时,需要大量的火电机组出力来满足负荷需求,造成机组及线路裕度下降,存在供电不足的风险。由此可见,负荷和风电出力的不确定性是影响 ATC 的关键因素。

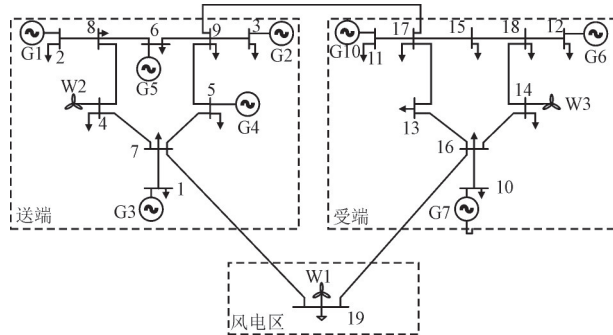


图4 多区域 IEEE 9 节点系统图
Fig.4 Multi-area 9-node system diagram

表2 ATC 概率分布
Table 2 ATC probabilistic distribution MW

项目	日均值	日标准差
1	765.07	243.39
2	1 313.17	331.88
3	1 362.34	53.75
4	1 410.08	44.62
平均	1 212.67	123.30

图 5 展示了 4 类场景典型日时序 ATC 评估结果。其中,场景 1 与场景 2 均为高负荷需求场景,负荷波动显著影响 ATC。由于二者总负荷变化曲线趋势相近,因此具有相似的波动特性,表现为总负荷较小时 ATC 较大,而总负荷较大时 ATC 较小。场景 3 和场景 4 的波动特征差异主要源于二者风电出力的不同。

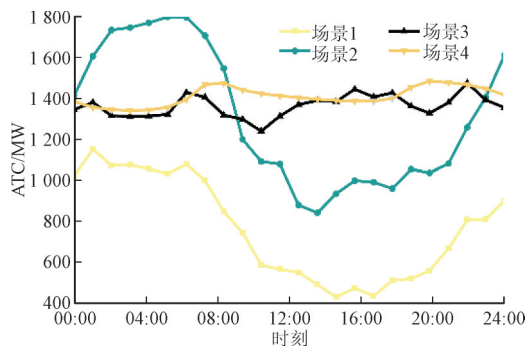


图5 IEEE9 节点系统典型日时序 ATC 评估结果
Fig.5 Time-series ATC assessment results for a typical day in IEEE 9-node system

另外,在 14:00—18:00 期间,总负荷较低,火

电机裕度较高,但除场景2外,其余场景的ATC均有不同程度的下降。如图6所示,在14:00—18:00,场景1、场景3风电出力降低(本文设定场景1、场景3风电出力趋势基本一致)。由于此时负荷较低,故场景1、场景3在该时段内ATC下降主要归因于风电出力的降低。而场景4在14:00—18:00风电出力较高,尽管火电机组增发裕度较高,但受线路容量约束的影响,极限状态下火电机组出力降低,由式(2)可知,该情况将导致ATC降低。若进一步提高新能源占比,系统在负荷较低时无法完全消纳新能源,将引发弃风现象以及ATC的降低。因此,依据ATC评估结果对系统扩展规划,并配备储能装置或根据负荷以及风电预测结果制定新能源售电计划,可以有效提升ATC和新能源消纳能力。

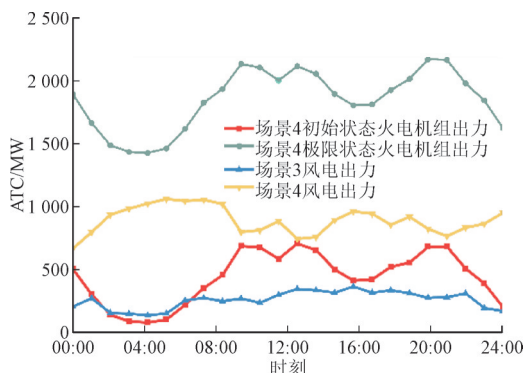


图6 特定场景下火电机组及风电出力

Fig.6 Thermal power unit and wind power output under a specific scenario

本文进一步分析了重载线路N-1故障下的ATC仿真结果。首先,依据ATC仿真得到初始运行点各输电线路功率 P_{tie} ;然后,切除最大 P_{tie} 的线路;最后,得出重载线路N-1工况下的ATC结果,如图

7所示。结果表明,重载线路切除后,4个场景的ATC均有所减少,但系统在各时段均可以保证稳定运行。

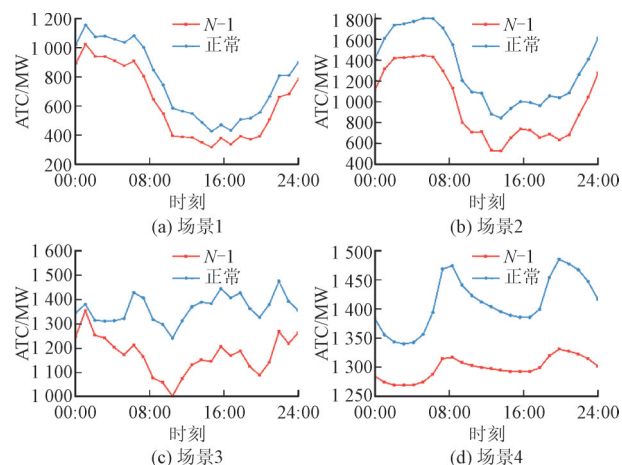


图7 重载线路N-1故障下ATC评估结果

Fig.7 ATC evaluation results for N-1 contingency under heavily loaded lines

通过不同重载线路N-1故障场景的评估,能够判断电网是否具备应对重载线路检修或故障的能力,快速定位系统脆弱点,为电网规划与扩展提供了重要依据。

3.2.2 省电网ATC评估结果

为进一步验证所提方法在复杂电力系统的有效性,本文将应用于图8所示包含高比例可再生能源的电力系统中。该系统由相互连接的送端、受端和风电区构成,3个区域通过4条输电通道实现连接。系统共有15台火电机组和9台风电机组,分别标记为G1至G15和W1至W9,风电总渗透率为37.64%。典型日风电出力和负荷曲线通过CWGAN方法生成。

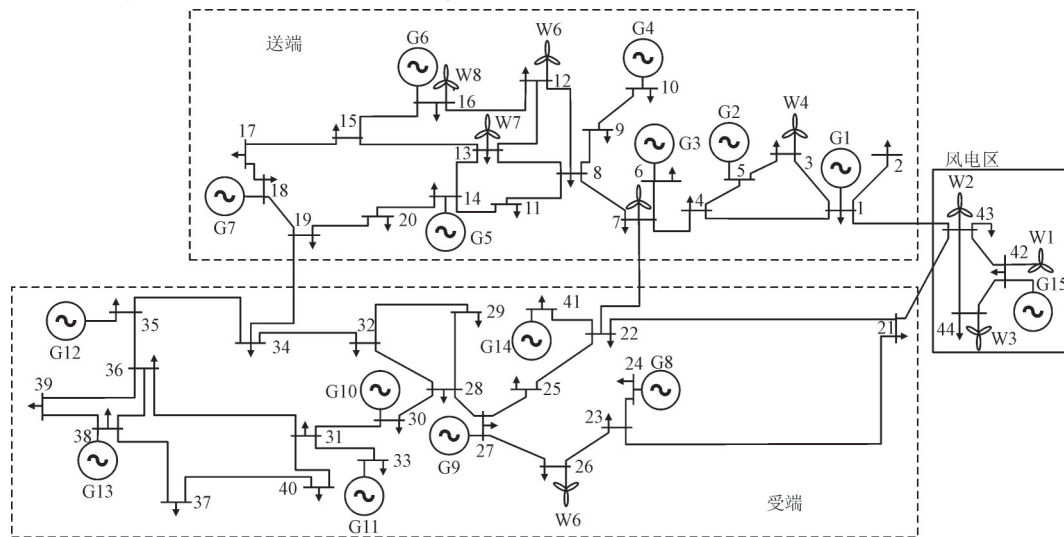


图8 省域电力系统图

Fig.8 Provincial power system diagram

省城电网典型日时序 ATC 评估结果如图 9 所示。与 3.2.1 节中的 IEEE 9 节点系统相同,省城电网 ATC 最大、最小日均值依然分别出现在场景 4 和场景 1 中。场景 1 至场景 3 的 ATC 波动趋势总体与负荷波动趋势呈负相关,与风电出力大小呈正相关。然而,在小负荷场景下,场景 4 的 ATC 随负荷增大而升高,由于在高比例新能源出力,低负荷需求时,新能源出力和受端火电机组基本可以满足负荷需求,即使负荷增加,送端火电机组出力也几乎不变。当区域间输电通道容量充足时,极限状态下送端机组出力会随负荷提升而增加,导致 ATC 波动趋势与负荷正相关。而在场景 1 至场景 3 中,随着负荷增大,送端火电机组必须增大出力以满足负荷需求,最终造成 ATC 的降低。

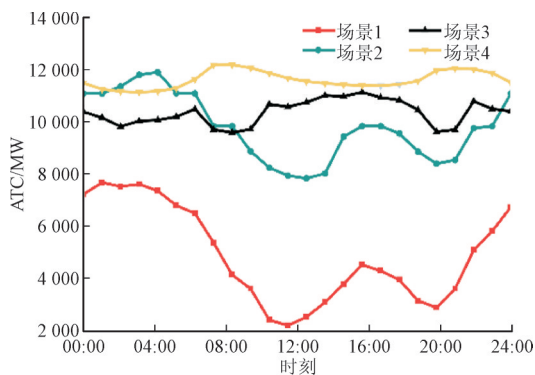


图9 省城电网典型日时序 ATC 评估结果

Fig.9 Time-series ATC evaluation results for a typical day in provincial power system

为全面评估系统 ATC 在不同 $N-1$ 故障场景下的变化,本文分析了系统在重载线路、机组以及母线发生故障时系统 ATC 的表现。由图 5、图 9 可知,ATC 最小的场景通常出现在高负荷需求、低风电出力的场景 1 中。因此,本文重点分析该场景下各类 $N-1$ 故障对 ATC 的影响,结果如图 10 所示。

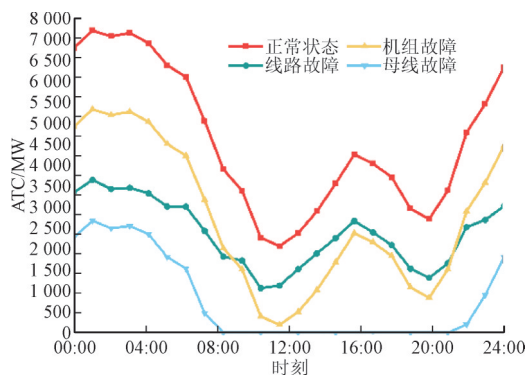


图10 场景1下 $N-1$ 故障 ATC 评估结果

Fig.10 ATC evaluation results for $N-1$ contingency under scenario 1

在母线发生故障后,系统 ATC 在 07:00—21:00 几乎降为 0。主要原因在于母线故障不仅会降低系统线路输电容量,还可能导致部分火电或风电机组的出力无法送出,致使系统 ATC 大幅下降。对此,系统需要在关键母线配置双母线接线,以保障供电连续可靠。不同于线路故障,机组故障对线路潮流分布的影响较小,因此机组故障状态下曲线可视为正常状态曲线的等值下降。在本次 $N-1$ 故障评估中,关键机组故障和重载线路故障均未出现 ATC 为 0 的情况,说明系统具备一定的韧性。但是在 12:00,机组故障使 ATC 降低至 197.07 MW,需要适当增加备用机组容量以进一步提高系统可靠性。

4 结语

在保证系统安全运行的前提下,准确、高效地计算高比例新能源并网的区域间 ATC,对于提高新能源消纳能力具有重要意义。本文提出了考虑新能源出力和负荷不确定性的 ATC 评估方法,该方法以最小化机组发电成本和最大化区域间 ATC 为目标。通过改进的 CWGAN 生成不同场景下的源荷场景集,实现对源荷不确定性的建模,并基于 4 种代表性的典型源荷场景对 ATC 进行评估,充分评估系统区域间联络线的输电裕度。此外,基于随机源荷场景的方法以及 $N-1$ 预想事故的考量,可以有效提升系统韧性,为电力系统扩展规划提供指导。

未来的研究将在 ATC 评估中考虑频率安全约束等暂态约束,以进一步提升计算的准确性。

参考文献

- [1] 王蓓蓓,李扬,黄霆,等.市场环境计及风险和商业化成分的可用输电能力粒子群优化计算[J].电力自动化设备,2008,28(10):8-13. WANG Beibei, LI Yang, HUANG Ting, et al. Available transfer capability calculation with particle swarm optimization considering risk and commercial components of power market[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(10): 8-13.
- [2] 陈厚合,何旭,姜涛,等.计及可中断负荷的电力系统可用输电能力计算[J].电力系统自动化,2017,41(15):81-87,106. CHEN Houhe, HE Xu, JIANG Tao, et al. Available transfer capability calculation of power systems considering interruptible load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(15): 81-87, 106.
- [3] ALSHAMRANI A M, ELMELIGY M A, SHARAF M A F, et al. Transmission expansion planning considering a high share of wind power to maximize available transfer capability[J]. IEEE Access, 2023, 11(1): 23136-23145.
- [4] OU Y, SINGH C. Assessment of available transfer capability and margins[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(2): 463-468.

- [5] 徐劭翔,苗世洪,周良松.跨区域互联电网的可用输电能力计算方法[J].电力系统自动化,2017,41(15):74-80,135.
XU Shaoxiang, MIAO Shihong, ZHOU Liangsong. Calculation method of available transfer capability for cross-regional interconnected power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(15): 74-80, 135.
- [6] 宋晓喆,李佳奇,孙福寿,等.计及风电相关性的区域间可用输电能力概率评估[J].电力建设,2021,42(7):118-126.
SONG Xiaozhe, LI Jiaqi, SUN Fushou, et al. Probability evaluation of available transfer capability considering wind power correlation [J]. Electric Power Construction, 2021, 42(7): 118-126.
- [7] MADADI S, MOHAMMADI-IVATLOO B, TOGIDI S. Probabilistic available transfer capability evaluation considering dynamic line rating based on a sequential game-theoretic approach[J]. IEEE Systems Journal, 2022, 16(1): 891-901.
- [8] KOU X, LI F. Interval optimization for available transfer capability evaluation considering wind power uncertainty[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(1): 250-259.
- [9] 杨燕,文福拴,李力,等.可用输电容量协调决策的多目标机会约束规划模型与方法[J].电力系统自动化,2011,35(13):37-43.
YANG Yan, WEN Fushuan, LI Li, et al. Coordinated model for available transfer capability decision-making employing multi-objective chance constrained programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(13): 37-43.
- [10] 陈金富,孙鑫,段献忠,等.基于机会约束规划的含风电场电力系统可用输电能力计算[J].中国电机工程学报,2019,39(23):6804-6814,7094.
CHEN Jinfu, SUN Xin, DUAN Xianzhong, et al. A chance-constrained approach for available transfer capability evaluation for power systems with wind Farm integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(23): 6804-6814, 7094.
- [11] 李雪,李佳奇,张儒峰,等.计及风电出力相关性和条件价值风险的电力系统概率可用输电能力评估[J].电工技术学报,2023,38(15):4162-4177.
LI Xue, LI Jiaqi, ZHANG Rufeng, et al. Probabilistic available transfer capability assessment in power system considering conditional value-at-risk and correlated wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(15): 4162-4177.
- [12] 孙锴,张大海,李亚平,等.考虑时空不确定性的风电出力场景生成方法[J].电力自动化设备,2024,44(7):101-107.
SUN Kai, ZHANG Dahai, LI Yaping, et al. Scenario generation method of wind power output considering spatiotemporal uncertainty [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(7): 101-107.
- [13] 王新迎,李烨,董晓翀,等.基于变分自编码器的主动配电网多源-荷场景生成方法[J].电网技术,2021,45(8):2962-2969.
WANG Xinying, LI Ye, DONG Xiaochong, et al. Multi-source-load scenario generation of active distribution network based on variational autoencoder[J]. Power System Technology, 2021, 45(8): 2962-2969.
- [14] 孙鑫,饶宇飞,肖浩,等.基于线性化最优潮流的电网可用输电能力计算[J].电力自动化设备,2020,40(10):194-199.
SUN Xin, RAO Yufei, XIAO Hao, et al. Available transfer capability calculation based on linearized optimal power flow[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10): 194-199.
- [15] 韩学山,李晓波.考虑元件长期载荷容许条件的最大可用输电能力的实用计算方法[J].电网技术,2004,(24):10-15.
HAN Xueshan, LI Xiaobo. Practical calculation method of maximal available transfer capability long-term load permissible condition of power transmission components[J]. Power System Technology, 2004, (24): 10-15.
- [16] YUAN H, LI F, WEI Y, et al. Novel linearized power flow and linearized OPF models for active distribution networks with application in distribution LMP[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(1): 438-448.
- [17] GB 51096-2015. 风力发电场设计规范[S]. 北京:中国标准出版社,2015:17.
GB 51096-2015. Code for design of wind farm[S]. Beijing, China: China Standard Press, 2015: 17.
- [18] GOODFELLOW I, POUGET-ABADIE J, MIRZA M, et al. Generative adversarial nets[C]//Proceedings of advances in neural information processing systems. Montréal, Canada: MIT Press, 2014: 2672-2680.
- [19] 董晓翀,孙英云,蒲天骄.基于条件生成对抗网络的可再生能源日前场景生成方法[J].中国电机工程学报,2020,40(17):5527-5536.
DONG Xiaochong, SUN Yingyun, PU Tianjiao. Day-ahead scenario generation of renewable energy based on conditional GAN[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5527-5536.
- [20] MA H, LIU D, WU F. Rectified wasserstein generative adversarial networks for perceptual image restoration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2023, 45(3): 3648-3663.
- [21] 张帅,刘文霞,万海洋,等.基于改进条件生成对抗网络的可控场景生成方法[J].电力自动化设备,2024,44(6):9-17.
ZHANG Shuai, LIU Wenxia, WAN Haiyang, et al. Controllable scenario generation approach based on improved conditional generative adversarial network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(6): 9-17.
- [22] VASWANI A. Attention is all you need[C]//31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS), long Beach, United States, 2017: 1-11.
- [23] 黄南天,王文婷,蔡国伟,等.计及复杂气象耦合特性的模块化去噪变分自编码器多源-荷联合场景生成[J].中国电机工程学报,2019,39(10):2924-2934.
HUANG Nantian, WANG Wenting, CAI Guowei, et al. The joint scenario generation of multi source-load by modular denoising variational autoencoder considering the complex coupling characteristics of meteorology[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(10): 2924-2934.
- [24] SHI Q, LI F, Olama M, et al. Network reconfiguration and distributed energy resource scheduling for improved distribution system resilience[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 124: 1-10.
- [25] ZHAO L, MENG X, YANG L, et al. Unified multi-objective optimization for regional power systems with unequal distribution of renewable energy generation and load[J]. Engineering Reports, 2023, 5(10): 1-15.

(责任编辑 杨海波)

收稿日期:2025-03-01; 修改日期:2025-06-10

作者简介:朱沿任(2000),男,江苏徐州人,硕士研究生,研究方向为电力系统配电网运行与规划。E-mail:825833018@qq.com

石庆鑫(1988),男,通信作者,北京人,博士,副教授,研究方向为韧性城市电网、电力系统频率调节与安全分析。E-mail:qshi@ncepu.edu.cn