

基于时序卷积网络的低压柔性互联配电网短期最大供电能力评估

彭寒梅¹, 肖千皓¹, 谭貌^{1,2}, 苏永新^{1,2}, 李辉^{1,2}

(1. 湘潭大学自动化与电子信息学院, 湖南湘潭411105; 2. 湖南省多能协同控制技术工程研究中心(湘潭大学), 湖南湘潭411105)

摘要: 低压柔性互联将同一区域配电网的低压台区间形成互联互供, 可提高配电系统的最大供电能力(total supply capability, TSC), 且低压台区接入的分布式能源具有时序性和不确定性, 影响TSC值的变动。为此, 提出了一种基于时序卷积神经网络(temporal convolutional network, TCN)的低压柔性互联配电网短期TSC评估方法, 以兼具快速性和准确性。首先, 进行低压柔性互联配电网短期TSC分析, 建立基于数据驱动的短期TSC评估架构; 然后, 采用模型驱动的短期TSC评估方法, 得到短期TSC值以获得训练样本, 再离线训练TCN模型, 得到短期TSC值与具有一定时序性的影响因素间非线性映射的TCN模型, 实现由TCN在线评估系统短期TSC。最后, 低压柔性互联配电网算例系统测试验证了所提方法的有效性。

关键词: 低压柔性互联; 短期最大供电能力; 时序卷积网络; 模型驱动; 数据驱动

Evaluation of Short-Term Total Supply Capability for Low-Voltage Flexible Interconnected Distribution Network Based on Temporal Convolutional Network

PENG Hanmei¹, XIAO Qianhao¹, TAN Mao^{1,2}, SU Yongxin^{1,2}, LI Hui^{1,2}

(1. College of Automation and Electronic information, Xiangtan University, Xiangtan, Hunan 411105, China; 2. Hunan Engineering Research Center of Multi-Energy Cooperative Control Technology, Xiangtan University, Xiangtan, Hunan 411105, China)

Abstract: Low-voltage flexible interconnection forms interconnection and mutual power supply between low-voltage substation areas in the same regional distribution network, which can improve the total supply capacity (TSC) of the distribution system. Moreover, the distributed energy connected to the low-voltage substation area has temporal and uncertain characteristics, which affect the variation of TSC value. Therefore, a short-term TSC evaluation method for low-voltage flexible interconnected distribution networks based on temporal convolutional network (TCN) is proposed, which combines speed and accuracy. Firstly, short-term TSC analysis of low-voltage flexible interconnected distribution networks is conducted and establish a data-driven short-term TSC evaluation architecture is established. Then, a model-driven short-term TSC evaluation method is adopted to obtain short-term TSC values to obtain training samples. The TCN model is then trained offline to obtain a nonlinear mapping between short-term TSC values and influencing factors with certain temporal characteristics. This enables the online evaluation of short-term TSC by the TCN system. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified through system testing of low-voltage flexible interconnected distribution networks.

Key words: low-voltage flexible interconnection; short-term total supply capability; temporal convolutional network; model-driven; data-driven

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51777179); 湖南省自然科学基金项目(2023JJ50241)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China(51777179); the Natural Science Foundation of Hunan Province(2023JJ50241).

0 引言

“双碳”目标下越来越多的低碳元素接入配电网低压台区,包括分布式电源(distributed generation, DG)、电动汽车充电站、储能等。而大规模低碳元素的接入使得低压台区的运行复杂性及源荷不确定性增加^[1-4]面临诸多问题。在网架升级层面柔性互联技术能够有效解决上述问题。低压柔性互联配电网基于柔性互联技术通过低压电力电子柔性互联装置将同一区域配电网中的多个低压台区之间形成互联互供,已逐步得到了越来越多的研究与工程示范^[5-7]。

类似输电系统中的最大传输能力,配电网最大供电能力(total supply capability, TSC)是指一定区域内配电网满足 $N-1$ 准则条件下同时计及变电站主变与配电网络转供能力以及实际运行约束下的最大负荷供应能力^[8-9]。TSC是衡量配电网能力的重要指标。短期TSC评估考虑的时间尺度为小时、天、周。准确评估低压柔性互联配电网的短期TSC对系统优化调度与安全经济运行、低压柔性互联和DG的规划建设具有重要的指导意义。低压柔性互联配电网中含可进行功率互济的互联台区,低压台区接入DG、电动汽车(electric vehicle, EV)充电站和储能(energy storage system, ESS)等多元资源,使得TSC及其评估具有以下特点:1)系统拓扑结构不同于传统配电网,当某个低压台区配变故障退出运行后可将其可转供的负荷通过低压电力电子柔性互联装置快速转带至互联的其他台区配变,可提高系统的TSC, TSC评估需计及负荷的二次转供;2)DG、电动汽车充电站和储能功率具有时序性和较强的随机性与波动性, TSC值随时间波动变化,需进行短期TSC评估。由此,低压柔性互联配电网短期TSC评估的要素时变多样且评估的尺度短,评估的实时性和准确性受到挑战。

近年来,国内外已对低压柔性互联的规划、控制方式、优化调度等进行了研究^[10-12],然而对最大供电能力及其评估问题的研究较少^[13]。文献[13]研究了考虑低压台区柔性互联的配电网最大供电能力。但文献[13]未考虑低压台区接入DG、电动汽车充电站和储能等具有时序性和不确定性的低碳元素。目前,对计及 $N-1$ 安全准则的配电网TSC计算的研究大多针对的是确定性配电系统^[13-16],采用基

于TSC计算数学模型的模型驱动方法得到的TSC值为定值,然而,对含不确定性元素的配电系统TSC评估研究较少^[17-18]。文献[17]基于多场景技术采用重复潮流法进行含分布式能源主动配电系统短期供电能力评估。文献[18]建立基于机会约束规划的含风光发电配电网TSC评估模型,并将其转换为不含随机变量的确定性模型进行求解,得到一定置信水平的TSC值。但是,文献[17-18]均为模型驱动方法,且未考虑低压柔性互联拓扑结构。采用模型驱动进行计及不确定性因素的TSC评估会导致TSC模型复杂且变量多,求解效率低且难以建立复杂多样的不确定性模型,由此,模型驱动方法难以同时满足低压柔性互联配电网短期TSC评估对快速性和准确性的要求。

采用数据驱动的短期TSC评估方法和机器学习算法捕捉TSC值与影响TSC值的特征变量之间的非线性关系,可解决评估结果准确性不足与评估过程求解速度较慢的问题。目前,应用于电力系统领域的机器学习算法主要有支持向量机、传统神经网络、深度学习等方法,前两类方法并未对时序数据时间相关性进行分析,也不能对时序数据进行有效处理。时序卷积神经网络(temporal convolutional network, TCN)是2018年提出的一种深度学习算法,对数据的时间序列特征具有强大的处理和分析能力^[19]。近年来,TCN在电力系统中广泛应用于用户负荷预测和风电功率预测等领域^[20-21]。在低压柔性互联配电网中,短期TSC值与其影响因素之间的非线性映射关系呈现出一定的时序性,因此,采用TCN方法进行评估尤为适宜。

本文针对低压柔性互联配电网短期TSC的时序性和不确定性提出了基于TCN的评估方法,采用数学模型驱动结果训练TCN,由TCN在线评估短期TSC值以兼具快速性和准确性。首先进行低压柔性互联配电网短期TSC分析从而建立基于数据驱动的短期TSC评估架构;然后在离线建模环节中采用基于线性规划数学模型驱动短期TSC评估方法得到短期TSC值以提供训练样本;再采用TCN算法离线训练TCN回归模型参数,得到低压柔性互联配电网短期TSC值与不确定性因素之间复杂非线性映射的TCN模型,实现在线评估。最后在低压柔性互联配电网算例系统中进行验证。

1 数据驱动的短期 TSC 评估架构

1.1 低压柔性互联配电网短期 TSC 分析

直流母线分段分散式配置的低压柔性互联结构分为分段链式结构和分段环状结构。电压源型换流器 (voltage source converter, VSC) 作为能够灵活控制潮流并实现功率的双向流动的一种柔性互联装置, 常作为低压配电台区柔性互联设备。本文低压柔性互联配电网采用基于 VSC 的直流母线分段链式结构, 如图 1 所示。

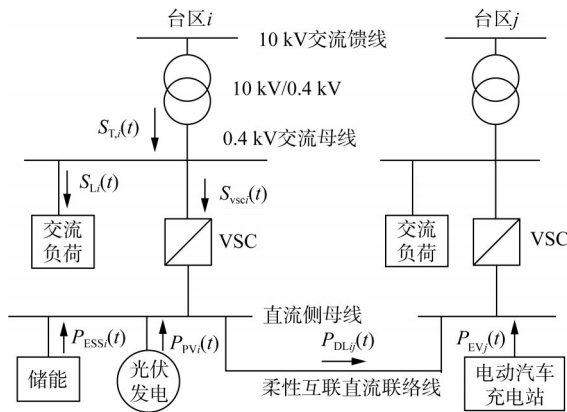


图 1 直流母线分段链式柔性互联系统

Fig. 1 DC bus segment chain flexible interconnection system

图 1 中, 10 kV/0.4 kV 配电变压器高压侧接入 10 kV 中压馈线上, 低压侧引出 0.4 kV 交流母线, 给台区内的交流负荷和 VSC 交流端口进行供电, VSC 直流侧端口引出台区内直流侧母线, 电动汽车充电站、储能以及光伏发电 DG 均接入直流侧母线; 互联台区通过台区间的柔性互联直流联络线连接各自台区的直流侧母线从而进行互联台区间的功率传输; 为确保电力系统的安全性, 台区禁止倒送电至 10 kV 中压馈线上。低压柔性互联配电网正常运行下, 基于 VSC 的功率连续调节功能进行互联台区间的功率互济, 能够实现台区负载均衡和提供台区电压支撑。

低压柔性互联配电网 $N-1$ 故障下, 具有 2 种故障转供模式: 1) 联络开关转供中压馈线上的失电负荷; 2) VSC 转供互联台区之间的负荷。同时, 低压台区接入的电动汽车充电站在故障期间可以输出功率。由此, 低压柔性互联丰富了负荷的故障转供方式, 可提升配电系统满足 $N-1$ 准则条件下的最大供电能力。

另一方面, 低压柔性互联配电网中低压台区接入的 DG、电动汽车充电站、储能等低碳元素, 具有一定的时序性和不确定性, 影响配电系统的 TSC, 使得其值具有时变性和波动性, 需进行短期 TSC 评估, 以为系统提供可靠的实时安全阈值。

1.2 短期 TSC 评估架构

TCN 是一种高效的深度学习算法, 对时序数据的时间相关性具有较强捕捉能力。针对含低压柔性互联配电网短期最大供电能力受系统内 DG、电动汽车充电站和储能等时序性和不确定性因素的影响, 而短期最大供电能力评估需要同时满足准确性和快速性这两个要求, 本文提出一种基于 TCN 的短期最大供电能力评估方法, 采用“模型驱动离线建模-在线评估”模式, 架构如图 2 所示。短期 TSC 评估考虑的时间尺度为小时。

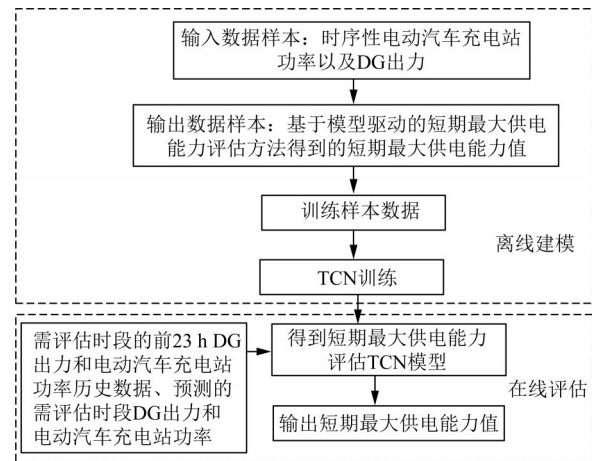


图 2 基于 TCN 的短期最大供电能力评估架构

Fig. 2 Short-term total supply capability evaluation architecture based on TCN

图 2 的离线建模环节中输入数据样本为 DG 出力和电动汽车充电站出力的历史数据, 输出数据样本为由模型驱动短期 TSC 评估方法计算得到的 TSC 值, 获得训练样本数据后再以数据驱动思想离线训练 TCN 参数, 得到含低压柔性互联配电网短期最大供电能力评估 TCN 模型。该环节需要大量训练样本以进行 TCN 模型离线训练, 从而保证在线评估短期 TSC 结果的准确性。在线评估环节中将需评估时段的前 23 h DG 出力和电动汽车充电站出力历史数据、预测的需评估时段 DG 出力和电动汽车充电站出力, 将其作为短期最大供电能力评估 TCN 模型的输入可在线得到系统的短期最大供电能力。

力值。

2 基于模型驱动的短期 TSC 评估

随着可再生能源接入低压台区规模的增大,风电、光伏的波动性加剧了系统运行的不确定性,同时电动汽车充电站和储能的接入及低压柔性互联的配置对配电网的短期最大供电能力评估提出了挑战。且为了保证配电网的供电安全以及负荷的稳定运行,需要对低压柔性互联配电网的短期最大供电能力进行准确快速评估。基于模型驱动的配电网最大供电能力计算是求解目标函数为可供最大负荷,约束条件包括 $N-1$ 安全约束及其运行约束的优化问题。城市电网供电路径不长,其网损较小,且电网和 DG 均具备调压能力,节点电压很少越限,因此不考虑电压约束^[22]。

2.1 目标函数

目标函数为配电网所能供负荷之和最大,为:

$$\max T_{TSC} = \sum_i^N S_{Li}(t) \quad (1)$$

式中: T_{TSC} 为配电网短期最大供电能力; $S_{Li}(t)$ 为 t 时刻配电网台区 i 所供负荷的视在功率; N 为低压台区数量。

2.2 约束条件

配电网最大供电能力计算需计及 $N-1$ 安全约束,是指当配电网中某个元件发生故障退出运行时通过馈线转供、柔性互联等方式同时满足系统运行约束,能够对非故障失电区域负荷进行供电下得到的系统最大所供负荷。本文针对低压柔性互联配电网,考虑的 $N-1$ 故障情况包括:主变故障、馈线出口故障、馈线线路故障以及柔性互联台区配变故障。

1) 任何 $N-1$ 故障下需满足的运行约束

为防止配变重载运行,台区运行时配变所供负荷视在功率与台区互联的 VSC 交流端口注入功率之和不得超过重载系数与配变额定容量之乘积。

$$0 \leq (S_{Li}(t) + S_{vsci}(t)) \leq \beta \cdot S_{T,i} \quad (2)$$

式中: $S_{vsci}(t)$ 为 t 时刻与台区互联的 VSC 交流端口注入功率之和,取正时表示 VSC 工作在整流状态,功率由配变流入 VSC 交流端口,取负时则表示 VSC 工作在逆变状态,功率由 VSC 交流端口流向配变方向; β 为变压器重载系数,取 0.8; $S_{T,i}$ 为配变额定容量。

直联联络线作为低压柔性互联台区之间进行功率互济的功率传输设备,台区间传输的功率需小于直联联络线的最大传输功率。

$$\alpha_i P_{vsci}(t) + P_{PVi}(t) + P_{ESSi}(t) + P_{EVi}(t) \leq \sum_{j \in \Omega_i} P_{DL,ij}(t) \quad (3)$$

式中: $P_{vsci}(t)$ 为 t 时刻与台区互联的 VSC 交流端口注入功率; α_i 为台区 i 的 VSC 转换系数, $P_{vsci}(t) > 0$ 时, α_i 为换流器的转换效率 η_{vsci} , 转换效率一般取 0.98, $P_{vsci}(t) < 0$ 时, α_i 为 $1/\eta_{vsci}$; $P_{PVi}(t)$ 为 t 时刻台区 i 的光伏出力; $P_{ESSi}(t)$ 为 t 时刻台区 i 储能的功率; $P_{EVi}(t)$ 为 t 时刻台区 i 的电动汽车充电站功率,为正时表示为电动汽车充电站的放电功率,为负时表示为充电功率; $P_{DL,ij}(t)$ 为互联台区 i 、 j 之间通过直联联络线进行互济的功率, $P_{DL,ij}(t) > 0$ 表示台区 i 向互联台区 j 输送功率,反之,表示互联台区 j 向台区 i 输送功率。

与配电网互联的 VSC 端口注入功率之和 $|S_{vsci}(t)|$ 需小于该 VSC 装置额定容量。

$$|S_{vsci}(t)| \leq C_{vsci} \quad (4)$$

式中 C_{vsci} 为台区 i 低压柔性互联装置 VSC 的额定容量。

储能接入配电网中,由于 DG 的波动性其可以起到“削峰填谷”的作用;当配变出现过载时或发生故障时,储能可以向电网提供功率支撑,对负荷进行供电。为了保护储能的工作寿命,在充放电过程中禁止储能过充或过放,限制充放电功率范围,同时对储能荷电状态(stage of charge, SOC)有上下限的约束,表示为:

$$\begin{cases} S(t+1) = S(t) + (\eta I_t^{\text{ch}} P_{ESSi}^{\text{ch}}(t) - \frac{I_t^{\text{dis}} P_{ESSi}^{\text{dis}}(t)}{\eta}) \cdot \frac{\Delta t}{C_{ESS}} \\ 0 \leq P_{ESSi}^{\text{ch}}(t) \leq P_{ESSmi}^{\text{ch}}(t), 0 \leq P_{ESSi}^{\text{dis}}(t) \leq P_{ESSmi}^{\text{dis}}(t) \\ P_{ESSi}(t) = P_{ESSi}^{\text{dis}}(t) - P_{ESSi}^{\text{ch}}(t) \\ S^{\min} \leq S(t) \leq S^{\max} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $S(t)$ 为 t 时刻储能 SOC; η 为储能充放电效率; I_t^{ch} 、 I_t^{dis} 为 0/1 变量,分别表示储能的充、放电状态,同一时刻下储能只有一种状态; Δt 为时间间隔; $P_{ESSi}^{\text{ch}}(t)$ 、 $P_{ESSi}^{\text{dis}}(t)$ 分别为 t 时刻储能的充、放电功率,其中下标 i 为储能编号; $P_{ESSmi}^{\text{ch}}(t)$ 、 $P_{ESSmi}^{\text{dis}}(t)$ 分别为 t 时刻储能充、放电功率的上限; $S^{\min}$ 、 $S^{\max}$ 分别为储能 SOC 的下限和上限; C_{ESS} 为储能容量。

为了保证储能 SOC 的日常循环, 还需满足:

$$S(1) = S(T) + (\eta^{\text{ch}} I_T^{\text{ch}} P_{\text{ESS}, T}^{\text{ch}} - \frac{I_T^{\text{dis}} P_{\text{ESS}, T}^{\text{dis}}}{\eta^{\text{dis}}}) \cdot \frac{\Delta t}{C_{\text{ESS}}} \quad (6)$$

式中: $S(T)$ 为一天最后时刻 T 的荷电状态, 需要与一天初始时刻的荷电状态 $S(1)$ 相连续; η^{ch} 为储能充电系数, 本文取 1; $P_{\text{ESS}, T}^{\text{ch}}$ 为储能处于充电状态时的充电功率; $P_{\text{ESS}, T}^{\text{dis}}$ 为储能处于放电状态时的放电功率; η^{dis} 为储能放电系数, 本文取 1。

2) 主变故障下需满足的安全约束

主变故障时, 主变所有台区的所供负荷视在功率、与全部互联台区的 VSC 交流端口注入功率之和、与转带过来的全部台区所供负荷视在功率之和, 减去接入的风光随机出力, 需不超过该主变的额定容量。

$$\sum_{i \in \Omega_m} (S_{\text{Li}}(t) + S_{\text{vsci}}(t) - S_{\text{DGi}}(t)) + \sum_{j \in \Omega_{\text{Trm}}} S_{\text{Lj}}(t) \leq C_m \quad (7)$$

式中: $S_{\text{DGi}}(t)$ 为 t 时刻台区 i 接入的风光随机出力; $S_{\text{Lj}}(t)$ 为 t 时刻台区配变 j 所供负荷的视在功率; $i \in \Omega_m$ 为故障后主变 m 上所带全部台区编号的集合; $j \in \Omega_{\text{Trm}}$ 为故障后通过互联转带负荷给主变 m 的全部台区的集合; C_m 为主变 m 的额定容量。

3) 馈线出口故障下需满足的安全约束

馈线出口故障时, 馈线所带的所有台区的所供用户负荷视在功率、与全部的互联台区的 VSC 交流端口注入功率之和、与转带过来的全部台区的所供负荷视在功率之和, 减去馈线上接入的风光随机出力, 需不超过该馈线的容量。

$$\sum_{i \in \Omega_l} (S_{\text{Li}}(t) + S_{\text{vsci}}(t) - S_{\text{DGi}}(t)) + \sum_{j \in \Omega_{\text{Trl}}} S_{\text{Lj}}(t) \leq C_l \quad (8)$$

式中: $i \in \Omega_l$ 为故障后馈线 l 上所带全部台区编号的集合; $j \in \Omega_{\text{Trl}}$ 为故障后通过馈线互联转带负荷给馈线 l 的全部台区的集合; C_l 为馈线 l 的额定容量。

4) 馈线线路故障下需满足的安全约束

当某一馈线线路故障时, 馈线所带全部台区的所供负荷视在功率、与全部的互联台区的 VSC 端口注入功率之和、与转带过来的故障线路下游的全部失电台区的所供负荷视在功率之和, 减去馈线上接入的风光随机出力, 需不超过该馈线的容量。

$$\sum_{i \in \Omega_l} (S_{\text{Li}}(t) + S_{\text{vsci}}(t) - S_{\text{DGi}}(t)) + \sum_{r \in \Omega_{\text{Trl}}} S_{\text{Lr}}(t) \leq C_l \quad (9)$$

式中 $r \in \Omega_{\text{Trl}}$ 为故障后通过馈线互联转带负荷给馈线 l 的故障线路 r 下游的全部失电台区的集合。

5) 柔性互联台区配变故障下需满足的安全约束

柔性互联台区的配变故障时, 通过互联台区进行转供需满足转带过来的台区负荷有功功率不大于台区内光伏、储能出力、电动汽车充电站出力以及 VSC 直流端口流出功率之和。

$$\alpha_i P_{\text{vsci}}(t) + P_{\text{PVi}}(t) + P_{\text{ESSi}}(t) + P_{\text{EVi}}(t) \geq P_{\text{Lj}}(t) \quad (10)$$

式中 $P_{\text{Lj}}(t)$ 为与台区 i 柔性互联的失电台区 j 负荷有功功率。

形成基于模型驱动的低压柔性互联配电网短期最大供电能力评估模型, 为:

$$\begin{cases} \max T_{\text{TSC}} = \sum_i^N S_{\text{Li}}(t) \\ \text{s.t. 式(2)—(10)} \end{cases} \quad (11)$$

式中 T_{TSC} 为配电网短期供电能力。

3 基于 TCN 的短期最大供电能力评估

TCN 是一种融合扩张因果卷积 (dilated causal convolution, DCC) 和残差连接 (residual connection, RC) 的神经网络模型。相较于传统的卷积神经网络, TCN 能够处理任意长度的时间序列, 并具备以下特点: 1) 在因果卷积中, 当前时刻的输出仅依赖于当前时刻及之前的输入数据, 从而避免了传统卷积神经网络中未来信息泄露的问题。扩张因果卷积相比因果卷积, 能够接收更广泛的输入数据, 同时捕捉更长的时序依赖关系, 在分析输入历史数据的波动规律方面展现出更强的预测能力。2) 残差神经网络通过残差块结构将当前层的输入直接加至下一层的输出, 有效解决了因网络层数增加而引发的梯度爆炸等难题。

低压柔性互联配电网系统的短期最大供电能力受到系统内风光发电 DG 出力、储能设备以及电动汽车充电站功率的多重影响。鉴于储能充放电功率在最大供电能力评估中扮演着中间变量的角色, 因此, 短期最大供电能力与风光发电 DG 出力及电动汽车充电站功率之间呈现出复杂的非线性关系。本文提出了一种基于数据驱动的短期最大供电能力评估方法, 采用 TCN 模型, 旨在深入探究系统短期最大供电能力与风光发电 DG 出力及电动汽车充电站功率等特征变量之间的复杂非线性关联, 并构建相应的短期最大供电能力评估 TCN 模型。

构建的短期最大供电能力评估 TCN 模型如图 3

所示。该模型以风光发电 DG 出力及电动汽车充电站功率为特征变量，构建特征变量矩阵 $\mathbf{X}$ ，输出短期最大供电能力 $\mathbf{Y}$ 。DCC 能够充分挖掘系统短期最大供电能力与时序性特征变量之间的映射关系，而 RC 结构则有效避免了在短期最大供电能力评估过程中出现的梯度消失和梯度爆炸现象。将特征变量矩阵 $\mathbf{X}$ 输入 TCN 层，通过全连接层综合上层信息，最终输出短期最大供电能力值。

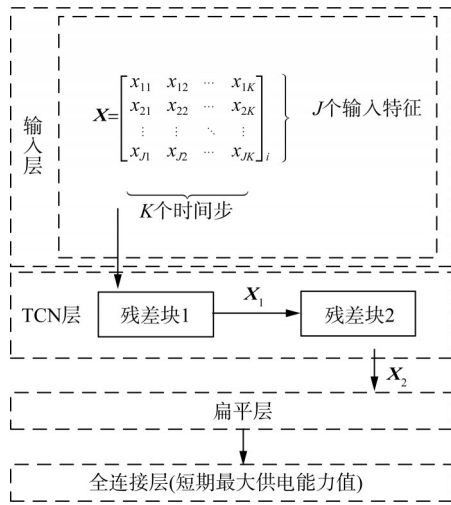


图3 TCN短期最大供电能力评估模型

Fig. 3 TCN short-term total power supply capacity evaluation model

离线训练短期最大供电能力评估 TCN 模型，训练样本集为 $\{(X_i, Y_i), i = 1, 2, \dots, m\}$ ， m 为样本数量， X_i 为第 i 个输入数据样本，即第 i 个特征变量矩阵 $\mathbf{X}_i$ ，包括风光发电 DG 出力及电动汽车充电站功率数据，其表示为式 (12)； Y_i 为对应的第 i 个输出数据样本，即为低压柔性互联配电网短期最大供电能力值。

$$\mathbf{X}_i = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1K} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{J1} & x_{J2} & \cdots & x_{JK} \end{bmatrix}_i \quad (12)$$

式中：列向量 $[x_{1k}, x_{2k}, \dots, x_{jk}, \dots, x_{Jk}]^T (j=1, 2, \dots, J; k=1, 2, \dots, K)$ 为 k 时刻下的输入数据样本； J 为系统中所有风光发电 DG 以及电动汽车充电站的数量； K 为时段数量。

基于训练好的短期最大供电能力评估 TCN 模型，实现由 TCN 在线评估系统短期最大供电能力，形成基于 TCN 的低压柔性互联配电网短期最大供

电能力评估，具体步骤如下。

步骤 1：输入低压柔性互联配电网系统参数，设定短期最大供电能力评估的时间尺度为小时。

步骤 2：以小时为时间间隔的时序性电动汽车充电站功率及 DG 出力数据作为输入数据样本，构建特征变量矩阵 $\mathbf{X}$ 。

步骤 3：对输入数据样本，采用提出的基于模型驱动的低压柔性互联配电网短期最大供电能力评估方法，得到系统短期最大供电能力值，作为输出数据样本 $\mathbf{Y}$ 。

步骤 4：建立短期最大供电能力评估 TCN 模型结构，将输入输出数据样本进行归一化处理，对 TCN 进行离线训练，得到训练好的短期最大供电能力评估 TCN 模型。

步骤 5：将需评估时段的前 23 h DG 出力和电动汽车充电站功率历史数据、预测的需评估时段 DG 出力和电动汽车充电站功率，作为训练好的短期最大供电能力评估 TCN 模型的输入，在线得到 TCN 模型输出的短期最大供电能力值。

4 算例分析

4.1 算例系统

在配置为 Intel Core i5-8265U CPU、16 GB 内存的个人计算机上，基于 PyCharm 平台，使用 Python 语言编制本文提出的基于 TCN 的低压柔性互联配电网短期最大供电能力评估程序。本文采用修改某实际配电网后的低压柔性互联配电网算例系统^[23]，拓扑结构如图 4 所示，其中，1) 含 2 个主变和 5 条中压馈线，中压电力节点 7、20、25、40 接入 DG，均为风力发电，中压线路 10-36、34-45、15-27 装有联络开关；2) 有 18 个低压台区装有 VSC，低压柔性互联为 5-16、18-20、21-38、22-24、25-26、29-31、33-44、39-40、42-43，低压台区 5、22、31、39、42 及 44 均接入光伏发电和储能，低压台区 5、18、22、31 接入电动汽车充电站，分别可容纳 12、8、10、11 辆电动汽车充电。

4.2 模型驱动下的短期 TSC 评估结果

1) 将电动汽车充电站视作分布式储能单元，在 $N-1$ 情况下可以支撑功率给电网，从而提升配电网的最大供电能力。基于蒙特卡洛的电动汽车充电站出力模型，设置电动汽车的电池容量为 60 kWh，功率上限为 30 kW，充放电效率为 0.9，模拟出 $N-1$

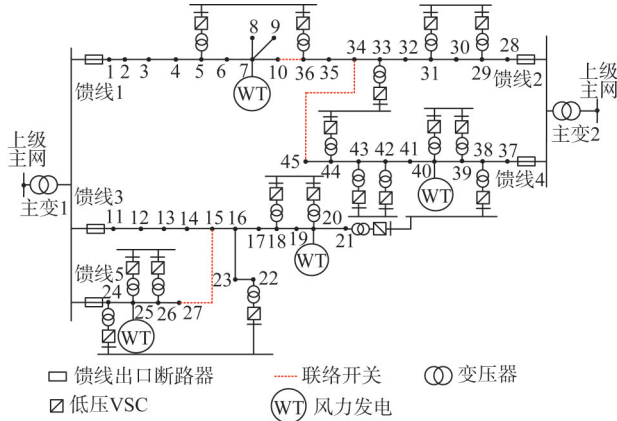


图 4 低压柔性互联配电网算例系统

Fig. 4 Example system of low voltage flexible interconnected distribution network

故障情况下的充电站剩余电量情况^[5],生成一天电动汽车充电站电量变化。台区 18 接入的电动汽车充电站电量变化如图 5 所示,全部电动汽车充电站向电网能提供的功率如图 6 所示。

2) 采用本文提出的基于模型驱动的低压柔性互联配电网短期最大供电能力评估方法,得到算例系统 24 h 短期最大供电能力如图 7 所示,储能 SOC 变化及其所提供的功率如图 8 所示。

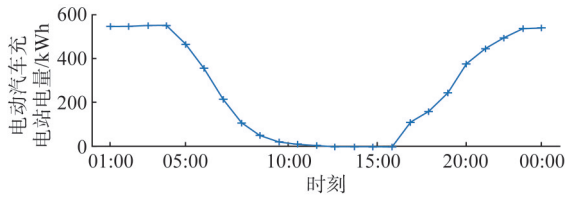


图 5 台区 18 接入的电动汽车充电站电量变化

Fig. 5 Electricities change of electric vehicle charging station in station area 18

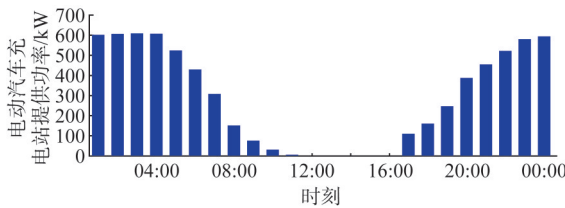


图 6 全部电动汽车充电站向电网能提供的功率

Fig. 6 Powers provided by all electric vehicle charging stations to the grid

由图 7 的 24 h 短期最大供电能力可知,时段 01:00—4:00,由于电动汽车充电站停放电动汽车数量较多,其向电网能提供的功率较大,且风力发

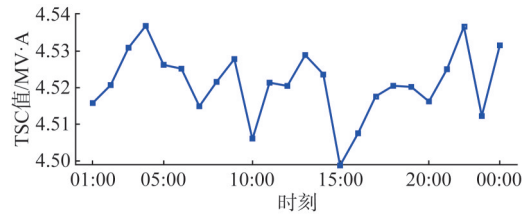
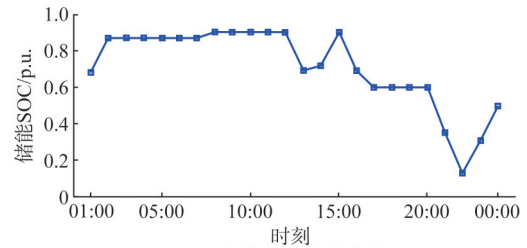
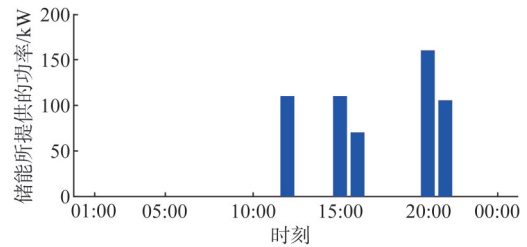


图 7 系统 24 h 短期最大供电能力

Fig. 7 Short-term total supply capacities of the system for 24 hours



(a) 储能 SOC 变化曲线



(b) 储能所提供的功率

图 8 储能 SOC 变化曲线以及所提供的功率

Fig. 8 SOC change curves of energy storage and powers provided by energy storage

电出力增加,使得系统的供电能力增大;06:00—07:00时段充电站内的电动汽车陆续驶离,其向电网能提供的功率下降,使得供电能力逐渐下降;10:00—12:00时段由于光伏发电受光照强度的影响,光伏出力逐渐增大,且储能的容量充足,储能放电为系统提供功率,使得供电能力增大。上述结果及分析表明,风光发电 DG 出力、电动汽车充电站功率以及储能功率共同影响低压柔性互联配电网的短期最大供电能力。

4.3 TCN 短期最大供电能力评估结果

基于 TCN 的低压柔性互联配电网短期最大供电能力评估方法,采用模型驱动结果训练 TCN,由 TCN 在线评估低压柔性互联配电网短期最大供电能力值。采用均方根误差和平均绝对误差作为评价指标,衡量短期最大供电能力评估 TCN 模型的评估效果。均方根和平均绝对误差的值越小,代表着模型的精度越高。

1) 取某实际地区 2022 年 1 月至 12 月共 8 760 h 的风光发电 DG 出力和电动汽车充电站功率数据, 每 1 h 的数据作为一组样本, 每组样本之间的数据时序性滚动更新 1 h, 作为输入数据样本。

2) 采用本文提出的模型驱动的低压柔性互联配电网短期 TSC 评估方法, 得到输入数据样本下, 2022 年 1 月至 12 月共 8 760 h 的短期最大供电能力值, 作为输出数据样本, 以 1 h 为一组输出数据的时间尺度单位。

3) 从输入输出数据样本中, 选取 2022 年每个季节的最后一日作为测试集, 其余作为 TCN 模型的训练集, 得到共 8 664 个训练样本集。离线建模环节, 训练样本集的构建: 采用 24 h 风光发电 DG 出力和电动汽车充电站功率数据, 构建输入数据样本矩阵 $\mathbf{X}$, 以对应时段由基于模型驱动的短期 TSC 评估方法得到的短期最大供电能力值作为输出数据样本矩阵 $\mathbf{Y}$; 再以 24 h 为一组输入数据的时间尺度单位、1 h 为时间间隔单位, 滚动更新输入数据样本。在此基础上, 对训练样本进行归一化处理, 对 TCN 进行离线训练, 得到训练好的短期最大供电能力评估 TCN 模型。

4) 由训练好的 TCN 模型, 评估测试集共 96 h 风光发电 DG 出力和电动汽车充电站功率数据下的最大供电能力。其中, 每小时的在线评估为: 将需评估时段的前 23 h DG 出力和电动汽车充电站功率历史数据、预测的需评估时段 DG 出力和电动汽车充电站功率, 作为短期最大供电能力评估 TCN 模型的输入, 可在线得到 TCN 模型输出的短期最大供电能力值。测试集下, TCN 模型在线评估方法与模型驱动方法得到的最大供电能力评估结果对比如图 9 所示。

由图 9 可知基于 TCN 的低压柔性互联配电网短期最大供电能力评估方法和模型驱动短期最大供电能力评估方法得到的 TSC 值相差较小, 平均绝对误差和均方根误差指标值分别为 7.485 6 和 7.131 1, 低压柔性互联配电网最大供电能力 TCN 模型表现较好。验证了本文所提方法在短期最大供电能力评估时具有较好的评估结果准确性。

4.4 对比实验

1) 设置 Case1: 算例系统; Case2: 将算例系统中的低压柔性互联去掉, 其余保持不变。得到采用 TCN 的系统最大供电能力对比如图 10 所示。由图

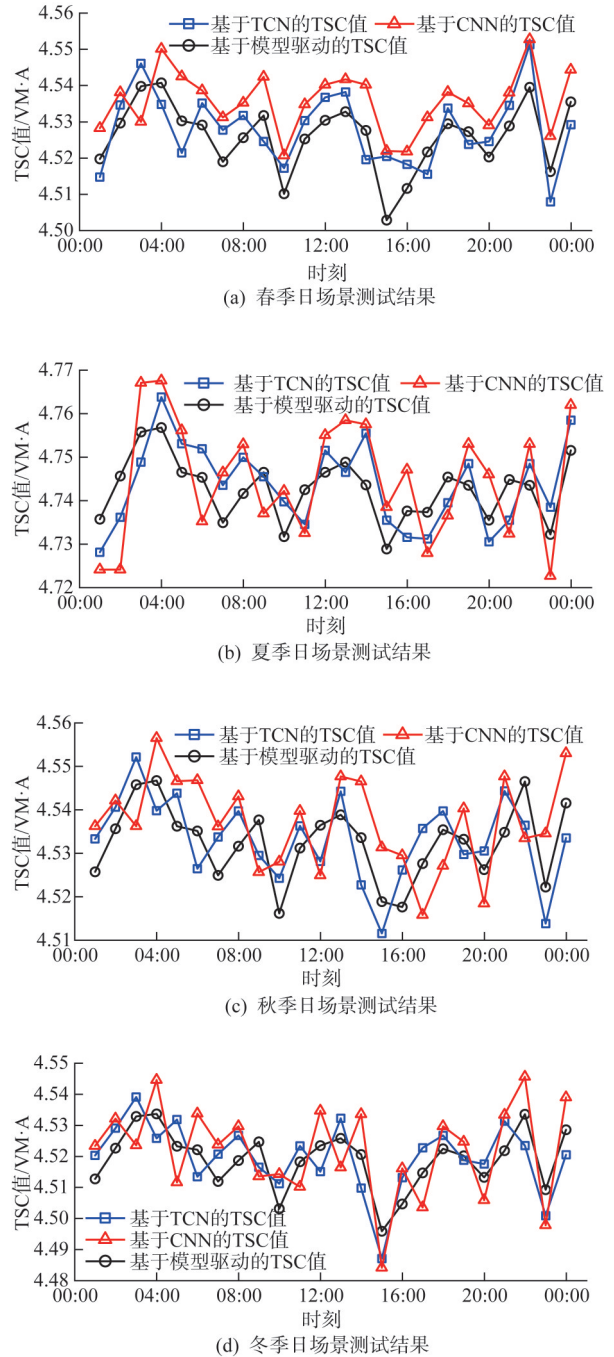


图 9 短期最大供电能力评估模型测试结果

Fig. 9 Test results of short-term total supply capacity evaluation model

10 可知, 相较于无低压柔性互联配电网系统, 低压柔性互联配电网的短期最大供电能力值有明显的提升。这是由于低压柔性互联能在 $N-1$ 故障情况下提供更多的负荷转供方式, 提高了系统最大供电能力。

2) 取低压柔性互联配电网算例系统及 4.3 节的

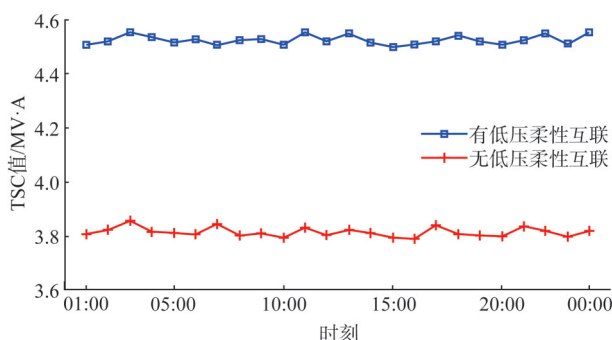


图 10 有/无低压柔性互联系统短期最大供电能力值对比

Fig. 10 Comparison of the short-term total supply capacity of systems with and without low-voltage flexibility interconnection

训练样本集和测试样本集,对比测试本文所提 TCN 方法与卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)方法的短期最大供电能力评估结果,评估结果对比见图 9,选取平均绝对误差和均方根误差作为评价指标,对比结果详见表 1。

由表 1 可知,本文 TCN 方法得到低压柔性互联配电网算例系统最大供电能力的平均绝对误差和均方根误差均比 CNN 方法小。这是由于与 CNN 方法相比 TCN 方法具有以下优点:扩张因果卷积根据历史输入序列进行计算,在保证时序性的同时扩张了感受野,处理数据的能力大幅提升。而 CNN 方法无法有效地提取数据的时序特征。本文提出的基于 TCN 的低压柔性互联配电网短期最大供电能力评估方法更优。

表 1 2 种方法的短期最大供电能力评估结果指标对比

Tab. 1 Comparison of short-term total supply capacity evaluation results of two methods

方法	均方根误差指标	平均绝对误差指标
CNN	11.253 7	10.531 9
本文 TCN 方法	7.485 6	7.131 1

5 结论

本文针对低压柔性互联配电网短期最大供电能力评估需兼具快速性和准确性,提出了一种基于 TCN 的短期最大供电能力评估方法,其核心是将模型驱动和数据驱动方法相结合。算例结果及分析如下。

1)提出的基于模型驱动的低压柔性互联配电网短期最大供电能力评估方法考虑了低压柔性互联的特性,计及了 $N-1$ 情况下的主变互联、馈线互联以

及柔性互联约束模型,适用于含柔性互联的有源配电网最大供电能力计算的建模。

2)根据提出的基于 TCN 的短期最大供电能力评估方法离线训练 TCN 模型,挖掘短期最大供电能力与特征变量之间的时序性依赖关系,再进行在线评估,可解决传统数学模型由于变量波动性强以及时序性带来的计算适应性差和速度限制问题,适用于短期最大传输能力及供电能力的评估。

3)采用模型驱动获得短期最大供电能力 TCN 模型的训练样本,解决了 TCN 模型训练样本中输出数据不易获得的问题,且可以提高评估的准确性。

参考文献

- [1] 沈培锋,王徐延,张昊亮,等.考虑规模化快充负荷的低压互联台区风险评估[J].中国电力,2021,54(5):56-64.
SHEN Peifeng, WANG Xuyan, ZHANG Haoliang, et al. Risk assessment of low-voltage interconnected distribution districts considering large-scale fast charging load [J]. Electric Power, 2021, 54(5): 56-64.
- [2] HUANG W, ZHENG W, HILL D J, et al. Distribution network reconfiguration for short-term voltage stability enhancement: an efficient deep learning approach [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 5385-5395.
- [3] 胡鹏飞,朱乃璇,江道灼,等.柔性互联智能配电网关键技术研究进展与展望[J].电力系统自动化,2021,45(8):2-12.
HU Pengfei, ZHU Naixuan, JIANG Daozhuo, et al. Research progress and prospects of key technologies of flexible interconnected smart distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 2-12.
- [4] 付宇,白浩,李跃,等.面向高比例光伏消纳的低压交直流混合配电网时空协调优化方法[J].南方电网技术,2023,17(1):84-93.
FU Yu, BAI Hao, LI Yue, et al. Spatial-temporal coordinated optimization method of low voltage hybrid AC/DC distribution network for accommodation of high-proportion PVs [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(1): 84-93.
- [5] 孙国强,徐广开,沈培锋,等.规模化电动汽车负荷的柔性台区协同经济调度[J].电网技术,2020,44(11):4395-4404.
SUN Guoqiang, XU Guangkai, SHEN Peifeng, et al. Coordinated economic dispatch of flexible district for large-scale electric vehicle load [J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4395-4404.
- [6] 曹昉,郑金钊,郑怡馨.基于 VSC 的优质光伏资源区配电台区柔性互联规划方法[J].南方电网技术,2023,17(1):14-25.
CAO Fang, ZHENG Jinzhao, ZHENG Yixin. VSC-based flexible interconnection planning method for distribution station areas of high-quality photovoltaic resource [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(1): 14-25.
- [7] 李昀宸,吕志鹏,刘文龙,等.柔性互联配电台区联合优化配置[J].高电压技术,2023,49(10):4223-4231.
LI Yunchen, LÜ Zhipeng, LIU Wenlong, et al. Coordinated

- optimize configuration of flexible interconnection of distribution station area [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49 (10): 4223 – 4231.
- [8] 肖峻, 龙梦皓, 程敏, 等. 计及变电站低压侧接线的配电网最大供电能力计算分析[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(2): 18 – 26, 43.
- XIAO Jun, LONG Menghao, CHENG Min, et al. Calculation and analysis of total supply capability of distribution network considering connection mode at low voltage side of substation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2): 18 – 26, 43.
- [9] CHEN K, WU W, ZHANG B, et al. A method to evaluate total supply capability of distribution systems considering network reconfiguration and daily load curves [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(3): 2096 – 2104.
- [10] 司金冬, 吴熙, 郭其胜, 等. 面向高比例新能源消纳的地区电网柔性互联规划与运行技术综述[J]. 电网技术, 2024, 48 (6): 2272 – 2286.
- SI Jindong, WU Xi, GUO Qisheng, et al. Review of flexible interconnection of regional grids interconnection planning and operation techniques for high percentage of renewable energy consumption [J]. Power System Technology, 2024, 48 (6): 2272 – 2286.
- [11] 彭寒梅, 尹棠, 肖千皓, 等. 高比例分布式电源配电网中低压柔性互联协调规划[J]. 中国电力, 2024, 57(8): 117 – 129.
- PENG Hanmei, YIN Tang, XIAO Qianhao, et al. Coordinated planning of medium-voltage and low-voltage flexible interconnection for distribution network with high proportion distributed generation [J]. Electric Power, 2024, 57(8): 117 – 129.
- [12] MUDALIYAR S, MISHRA S. Real-time coordinated control of low-voltage DC distribution network with soft opening point [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(6): 7123 – 7137.
- [13] 祖国强, 郝子源, 黄旭, 等. 考虑低压台区柔性互联的配电网最大供电能力[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(7): 84 – 93.
- ZU Guoqiang, HAO Ziyuan, HUANG Xu, et al. Total supply capability of distribution network considering flexible interconnection of low-voltage distribution station areas [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(7): 84 – 93.
- [14] 肖峻, 贺国伟. 考虑双向能量交换型负荷的配电网最大供电能力模型[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(5): 11 – 24.
- XIAO Jun, HE Guowei. Model of total supply capability for distribution network considering bidirectional energy exchange load [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(5): 11 – 24.
- [15] 朱嘉麒, 董树锋, 徐成司, 等. 考虑多次转供的配电网最大供电能力评估方法[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2275 – 2282.
- ZHU Jiaqi, DONG Shufeng, XU Chengsi, et al. Evaluation model of total supply capability of distribution network considering multiple transfers [J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2275 – 2282.
- [16] 党建, 闫运江, 贾嵘, 等. 基于图计算的配电网最大供电能力评估研究[J]. 电网技术, 2022, 46(3): 1039 – 1049.
- DANG Jian, YAN Yunjiang, JIA Rong, et al. Total supply capability evaluation of distribution network based on graph computation [J]. Power System Technology, 2022, 46 (3): 1039 – 1049.
- [17] 高亚静, 朱静, 程华新, 等. 计及不确定性因素基于多场景的主动配电系统短期供电能力评估[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6076 – 6085.
- GAO Yajing, ZHU Jing, CHENG Huaxin, et al. Evaluation on the short-term power supply capacity of active distribution system based on multiple scenarios considering uncertainties [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6076 – 6085.
- [18] 黄福泉, 孙伟卿, 李权, 等. 考虑馈线分段转供及风光出力的配电网最大供电能力评估[J]. 太阳能学报, 2021, 42(4): 168 – 174.
- HUANG Fuquan, SUN Weiqing, LI Quan, et al. Evaluation of maximum power supply capability for distribution network considering feeder section transfer and output of wind farm and photovoltaic generation [J]. Acta Energetica Sinica, 2021, 42(4): 168 – 174.
- [19] BAI S, KOLTER J Z, KOLTUN V. An empirical evaluation of generic convolutional and recurrent networks for sequence modeling [DB/OL]. (2018 – 3–4) [2018 – 4–19]. <https://arxiv.org/abs/1803.01271>.
- [20] 臧海祥, 陈玉伟, 程礼临, 等. 基于多尺度分量特征学习的用户级超短期负荷预测[J]. 电网技术, 2024, 48(6): 2584 – 2592.
- ZANG Haixiang, CHEN Yuwei, CHENG Lilin, et al. User level ultra-short-term load forecasting based on multi-scale component feature learning [J]. Power System Technology, 2024, 48(6): 2584 – 2592.
- [21] 徐钊, 谢开贵, 王宇, 等. 基于 TCN-Wpsformer 混合模型的超短期风电功率预测[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(8): 54 – 61.
- XU Tan, XIE Kaigui, WANG Yu, et al. Ultra-short-term wind power forecasting based on TCN-Wpsformer hybrid model [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(8): 54 – 61.
- [22] 祖国强, 肖峻, 穆云飞, 等. 计及分布式电源与需求响应的智能配电系统安全域[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(8): 100 – 107.
- ZU Guoqiang, XIAO Jun, MU Yunfei, et al. Security region for smart distribution system considering distributed generator and demand response [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(8): 100 – 107.
- [23] SEKHAVATMANESH H, CHERKAoui R. A multi-step reconfiguration model for active distribution network restoration integrating DG start-up sequences [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2879 – 2888.

收稿日期: 2024-03-07; 网络首发日期: 2024-09-19

作者简介:

彭寒梅(1979), 女, 通信作者, 副教授, 博士, 研究方向为智能配电网规划与优化调度, penghanmei8@163.com;

肖千皓(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为低压柔性互联配电网供电能力评估, 16670717760@163.com;

谭貌(1981), 男, 教授, 博士, 研究方向为综合能源系统及其优化, mr.tanmao@gmail.com。