

基于碳排放流的配电网广义碳势感知方法

田书欣¹, 姜皓喆², 符杨^{1*}, 杨喜军³, 李振坤¹

(1. 教育部海上风电技术工程研究中心(上海电力大学), 上海市 杨浦区 200090; 2. 上海电力大学电气工程学院, 上海市 杨浦区 200090; 3. 上海交通大学电气工程系, 上海市 闵行区 200240)

Generalized Carbon Intensity Awareness Method for Distribution Networks Based on Carbon Emission Flow

TIAN Shuxin¹, JIANG Haozhe², FU Yang^{1*}, YANG Xijun³, LI Zhenkun¹

(1. Engineering Research Center of Offshore Wind Technology Ministry of Education (Shanghai University of Electric Power), Yangpu District, Shanghai 200090, China;

2. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Yangpu District, Shanghai 200090, China;

3. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Minhang District, Shanghai 200240, China)

ABSTRACT: The real-time assessment and prediction of the carbon intensity level of the distribution system is an important part of the low-carbon optimal operation of the energy flow-carbon flow on the distribution side. In order to quantify the carbon emission sources and carbon control margins of the distribution system, a generalized carbon intensity awareness method for the distribution network based on carbon emission flow is proposed. Firstly, on the basis of the carbon emission flow theory, the generalized carbon intensity of the distribution network considering the influence of active network loss is calculated by using the operating situation elements and carbon intensity elements of the distribution network, which reflects the spatial difference of carbon intensity of nodes in the radial distribution network. Secondly, in view of the limited sample size of carbon intensity data and the variability and complexity of source-load information, a multi-variate Padé approximation dendrite net (multi Padé-DDNet) prediction model is established to achieve high-precision generalized carbon intensity prediction results by strengthening the nonlinear mapping relationship between carbon intensity-related elements and model output. Thirdly, the nodal carbon intensity margin index, branch carbon intensity margin index, and network-level carbon emission margin index are established, progressing hierarchically from the key nodes to subdivisions and then to the distribution network. The high carbon intensity thresholds of different regions and different particle sizes in the distribution network are combined to perceive the system

security situation operational level and dynamic high carbon risk. Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed method are verified by taking an actual distribution network in China as an example.

KEY WORDS: generalized carbon intensity awareness; distribution network; carbon emission flow; multi Padé-DDNet; carbon intensity warning indicators

摘要: 配电系统碳势水平的实时评估和预测是实现配电侧能源流-碳流低碳优化运行的重要环节。针对配电系统的碳排放来源和控碳裕度的量化问题, 该文提出一种基于碳排放流的配电网广义碳势感知方法。首先, 在碳排放流理论上, 利用配电网运行态势要素以及碳势要素计算得到考虑有功网损影响的配电网广义碳势, 体现辐射状配电网节点碳势的空间差异性; 其次, 针对碳势数据的样本量有限和源荷信息的多变复杂特性, 提出多元 Padé逼近树突网络(multi-variate Padé approximation dendrite net, multi Padé-DDNet)预测模型, 通过强化碳势相关要素与模型输出的非线性映射关系, 实现高精度广义碳势预测; 然后, 从关键点-分区-配电网递进结合的角度着手建立配电网节点碳势裕度指标、支路碳势裕度指标和网络碳排放裕度预警指标, 并结合配电网不同区域、不同颗粒度的高碳势阈值, 感知系统安全态势运行水平和动态高碳风险; 最后, 采用我国某地区实际配电网为算例, 验证所提方法的可行性和有效性。

关键词: 广义碳势感知; 配电网; 碳排放流; 多元 Padé逼近树突网络; 碳势预警指标

0 引言

电力系统低碳绿色转型是促进新型电力系统建设、实现“双碳”目标的重要措施^[1]。据国际能

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2066214)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (U2066214).

源署(IEA)的《2023 年全球二氧化碳报告》中显示, 2023 年, 全球能源相关二氧化碳排放量为 374 亿 t, 创历史新高, 我国二氧化碳排放量增长 5.65 亿 t, 是全球二氧化碳排放增幅最大的国家^[2]。高碳排放一方面会导致气候变暖, 甚至可能会引起极端天气发生频次逐渐升高, 造成配电系统元件受损故障率增大, 影响配电网正常运行; 另一方面, 配电网在计及能源低碳约束条件下会影响系统最大供电能力和最大消纳能力等, 进而引发配电网供电安全问题。鉴于此, 构建低碳配电网是支撑电力系统控碳减碳的可靠途径^[3], 也是实现可再生能源消纳的关键手段^[4]。目前, 配电网结构已逐渐从传统配电网转变为源网荷储融合互动的模式, 但仍与上级电网存在较强的耦合关系, 故产生的碳排放无法准确统计, 难以量化呈现系统运行的清洁低碳效果^[5-6]。为了提高配电网发生负荷波动等扰动时的碳足迹捕捉能力, 亟须引入能够直观反映配电网碳排放水平的新型碳势感知方法来保障配电网安全高效、清洁低碳运行, 通过基于时段短时间尺度内的碳势感知可以从更小的时间分辨率下计算配电网中节点、支路以及网络的碳势水平, 精准追踪配电系统中碳势的动态演化规律。

配电网广义碳势感知是指在一定时间和空间下, 利用网络拓扑结构、设备参数, 碳势要素等信息对计及网络有功损耗的配电网实时运行情况进行分析、理解以及对未来碳势水平演化趋势进行预测预警的过程, 是态势感知理论在低碳运行领域的延伸和拓展。目前, 国内外学者对碳势感知已经展开初步探索, 大致可分为 3 类: 碳势指标计算^[7-8]、碳势变化趋势预测^[9]、碳势风险评估^[10]。碳势指标计算主要通过碳排放流理论(carbon emission flow theory, CEF)分析获取节点碳势指标与支路碳势指标, 并将碳势指标应用于电网低碳优化调度方法^[11]、优化购电计划或自身用能方案^[12], 进而量化分析降碳减排的效果。碳势变化趋势预测包含机组碳势因子预测和节点碳势因子预测。碳势因子表示发电或用电过程中单位能源产生的碳排放量。现有碳势因子预测方法是通过数据驱动与深度学习建立预测模型。文献[13]考虑煤电机组特征与特性建立贝叶斯优化的极致梯度提升模型, 对机组的发电与供热碳势相关因子进行预测, 有利于改造新建机组以减少碳排放强度。文献[14]提出基于 Dropout 反向传播神经网络碳势因子预测模型, 利用实时负荷预测

系统各节点碳排放因子, 有助于引导电力用户低碳消费。碳势风险评估是指能够准确辨识关键碳势节点或高碳脆弱节点, 评估其可能导致控碳降碳措施失效的风险。通过低碳评估指标和评估方法^[15], 结合复杂网络理论与节点碳势特征改进节点重要度指标^[16], 对重要负荷、高碳电源节点进行风险辨识, 为实现降碳减排提供建议。以上所使用的碳势理论均是针对无损网络或有损网络无损化处理后的网络^[17], 会出现辐射状配电网中全网碳势相等的现象, 无法体现配电网不同节点、不同支路的碳势差异化特征。因此, 本文引入广义碳势的概念, 结合碳排放流理论统筹分析网侧线路、变压器状态变化对碳势的间接影响以及源侧发电机组运行对碳势的直接影响, 进而提出适合配电网拓扑架构的广义碳势感知方法。本文所提方法是对现有配电网碳排放流评估方法的补充和完善。

综上所述, 本文提出一种基于碳排放流的配电网广义碳势(generalized carbon intensity, GCI)感知方法。首先, 立足于源侧发电信息、配电变压器六氟化硫分解等效排碳信息、本地分布式新能源消纳信息、线路潮流信息、线路与变压器网损信息、负荷信息、微型燃气轮机(micro turbines, MT)出力等源网荷碳势要素, 在碳排放流框架基础上, 综合考虑含碳电源、变压器六氟化硫设备直接产生的温室气体等效碳排放与线路、变压器等设备有功损耗、负荷用电间接造成的碳排放, 从节点与支路层面计算配电网的广义碳势, 为配电网碳势感知提供具有空间差异特征的广义碳势数据集, 并基于更小的空间分辨率锁定配电网高碳节点; 其次, 所获取的碳势数据规模往往有限, 难以发现碳势要素数据序列潜在规律和重要特征, 且易受到极值和源荷不确定性复杂多变特征影响, 导致碳势及其相关要素预测误差显著, 因而有必要引入多元 Padé 逼近策略, 建立 Padé 逼近树突网络(Padé approximation dendrite net, PadéDDNet)预测模型, 提高输入与输出的映射能力, 对配电网运行态势进行精准预测; 然后, 为量化配电网对安全运行态势和碳势运行风险, 从节点-支路-网络角度分别提出节点碳势裕度、支路碳势裕度和网络碳排放裕度指标, 跟踪配电网碳轨迹, 及时捕捉可能发生的安全高碳风险, 继而为配电网安全与高碳预警提供有效支撑; 最后, 以实际配电网系统为算例进行验证分析, 感知实际中网络可能发生的安全高碳风险。

1 基于碳排放流的配电网广义碳势计算模型

配电网中的碳源主要为微型燃气轮机设备、由上级电网电源侧设备输送至根节点的碳流和配电变压器六氟化硫设备等。依据配电网“闭环设计、闭环运行”的特点^[18]，若仍按照常规无损化处理的碳势理论计算辐射状架构配电网时，会使配电网各节点碳势相等，无法清晰感知配电网各节点碳势的空间差异性。本文基于碳排放流理论计算全网潮流情况，进而提出能体现空间差异性的配电网广义碳势指标。基于碳排放流理论，可在过渡支路碳流密度、过渡节点碳势、过渡负荷碳流率基础上，量化分析配电网广义碳势水平。

1.1 基于碳排放流的传递路径过渡碳排放量分析

传统碳排放流理论主要聚焦于电源直接碳排放因素，而忽略了网损等间接碳排放因素和配电变压器六氟化硫分解带来的等效增碳影响。鉴于此，本文引入碳排放流的概念，并且旨在充分考虑支路有功网损和配电变压器六氟化硫分解影响下表征电网碳足迹的传递路径，实现电力碳排放的责任分摊。在此背景下，本文结合过渡支路碳流密度、过渡节点碳势、过渡负荷碳流率等因素，量化分析配电网碳势水平。由碳排放流概念可知，可沿着碳足迹计算传递路径的过渡碳排放量，从而得到过渡支路碳流密度、过渡节点碳势、过渡负荷碳流率。

1) 过渡支路碳流密度。

过渡支路碳流密度(interim branch carbon flow intensity, IBCFI)是指在考虑网损情况下，单位时间内支路流过单位功率所产生的发电侧碳排放量，单位为 $\text{kgCO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ，用 ρ_{inter} 表示。

$$\rho_{\text{inter}} = R_{\text{inter}} / P_{\text{zs}} \quad (1)$$

式中： P_{zs} 为支路首端流过的有功功率； R_{inter} 为考虑网损情况下单位时间内潮流流过某支路首端产生的碳排放量， kgCO_2/h 。

2) 过渡节点碳势。

过渡节点碳势(interim nodal carbon intensity, INCI)是指考虑网损时配电网节点消耗单位电能等效到碳源产生的碳排放量，单位为 $\text{kgCO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ，用 e_{inter} 表示。

$$e_{i,\text{inter}} = \frac{\sum_{s \in I^+} R_{s,\text{inter}}}{\sum_{s \in I^+} P_s} = \frac{\sum_{s \in I^+} P_{s,\text{zs}} \rho_{s,\text{inter}}}{\sum_{s \in I^+} P_s} \quad (2)$$

式中： $e_{i,\text{inter}}$ 为节点 i 的过渡节点碳势； $R_{s,\text{inter}}$ 为支路

s 的过渡碳流率； I^+ 为有功潮流流入节点 i 的支路集合； $P_{s,\text{zs}}$ 为支路 s 首端的有功功率； $\rho_{s,\text{inter}}$ 为支路 s 的过渡支路碳流密度。对于上级电网相邻节点、分布式电源相连节点与微型燃气轮机相连节点， $e_{i,\text{inter}}$ 与上级电网碳排放强度、分布式电源碳排放强度和微型燃气轮机碳排放强度相等^[8]； P_s 为支路 s 的末端有功功率。

3) 配电网全网过渡节点碳势。

通过比例共享原则^[19-20]可以分析得到所有从节点流出的过渡支路碳流密度与该节点过渡碳势相等，说明过渡支路碳流密度仅与节点有关，与支路无关，见附图 A1。具体推导过程见附式(A1)–(A3)。某一节点过渡节点碳势推广至配电网全网过渡节点碳势，需要通过支路首端潮流分布矩阵、负荷分布矩阵推理得到^[21]。具体过程如下。

1) 支路首端潮流分布矩阵为 N 阶方阵，用 $\mathbf{P}_{\text{Bzs}} = (\mathbf{P}_{\text{Bij,zs}})_{N \times N}$ 表示。 $\mathbf{P}_{\text{Bzs}}$ 可以表示如下：

$$P_{\text{Bij,zs}} = \begin{cases} P_{ij,\text{zs}}, & i \text{ 与 } j \text{ 相连, 且 } i \text{ 流向 } j \\ 0, & i \text{ 与 } j \text{ 不相连, 或 } j \text{ 流向 } i \end{cases} \quad (3)$$

式中： i 与 j 为电力网络节点； $P_{ij,\text{zs}}$ 为支路 ij 的首端有功功率。对角元素为节点本身，无支路潮流。故当 $i=j$ 时， $P_{ij,\text{zs}}$ 为 0 ($i,j=1,2,\dots,N$)。

2) 将第 i 个节点的过渡节点碳势用 $e_{i,\text{inter}}$ 表示，则全网节点的过渡节点碳势的矩阵表示形式为 $\mathbf{E}_{\text{inter}} = [e_{1,\text{inter}}, e_{2,\text{inter}}, \dots, e_{N,\text{inter}}]$ 。考虑碳源中上级电网电源侧设备输送至根节点的碳流、微型燃气轮的碳排放与变压器运行中六氟化硫分解所产生的温室气体等效碳排放，过渡节点碳势计算公式为

$$e_{i,\text{inter}} = \frac{\sum_{s \in I^+} P_{s,\text{zs}} \rho_{s,\text{inter}} + P_{\text{Gi}} e_{\text{Gi}} + G_{\text{SF6}} E_{\text{SF6}} k_t}{\sum_{s \in I^+} P_s} \quad (4)$$

式中： P_{Gi} 为第 i 个节点所连碳源或分布式电源的有功出力； e_{Gi} 为第 i 个节点所连碳源或分布式电源的碳排放强度，其中，微型燃气轮机碳排放强度计算公式见附式(A4)； G_{SF6} 为六氟化硫全球增温潜势值，表示排放单位吨数的六氟化硫等温室气体相当于等效排放的二氧化碳吨数，取 23 900； E_{SF6} 为变压器中含有的六氟化硫质量，t； k_t 为六氟化硫泄漏值，按年逸散率取 0.5%。

3) 基于附录 A 的结论，将式(4)中 $\rho_{s,\text{inter}}$ 改为 $e_{i,\text{inter}}$ ，可以将全网过渡节点碳势用矩阵表示如下，具体过程见附式(A5)–(A9)。

$$\mathbf{E}_{\text{inter}} = (\mathbf{P}_N - \mathbf{P}_{\text{Bzs}}^T)^{-1} (\mathbf{P}_G^T \mathbf{E}_G + \mathbf{W}_T / t) \quad (5)$$

4) 过渡负荷碳流率(interim load carbon emission rate, ILCER)描述的是考虑网损情况下, 碳源单位时间内产生的碳排放量在节点上的分摊。第 i 个节点上所接负荷的过渡负荷碳流率可以用有功负荷功率和过渡节点碳势乘积表示。

$$R_{i,\text{Linter}} = P_{Li} e_{i,\text{inter}} \quad (6)$$

式中 P_{Li} 为第 i 个节点所接负荷有功功率。

负荷节点的过渡负荷碳流率可以表示为

$$\mathbf{R}_{L,\text{inter}} = \mathbf{P}_L \mathbf{E}_{\text{inter}} \quad (7)$$

式中 $\mathbf{P}_L$ 为负荷分布矩阵。

过渡负荷碳流率考虑了网络中有功损耗产生的碳排放, 因此, 各节点的过渡负荷碳流率之和可记为负荷碳流率与网损碳流率之和。

由于碳排放守恒, 源侧发电与变压器六氟化硫设备分解产生的直接碳流率应与过渡负荷碳流率相等, 即:

$$R_{\text{GT}} = \sum_{i=1}^N R_{i,\text{Linter}} = R_L + R_{\text{lineloss}} + R_{\text{Tloss}} \quad (8)$$

式中: R_{GT} 为直接碳流率; R_L 为负荷碳流率; R_{lineloss} 为线路损耗碳流率; R_{Tloss} 为变压器损耗碳流率。

1.2 节点层面的广义碳势

节点广义碳势(nodal generalized carbon intensity, NGCI)是广义碳势在节点层面的体现, 用于描述配电网中节点碳强度的物理量, 即节点上游线路及变压器产生单位有功网损时反映到该节点上等效于电网侧损耗的碳排放量。

配电网中的总过渡负荷碳流率可以表示为

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N R_{i,\text{Linter}} &= \sum_{i=1}^N P_{Li} (e_{i,\text{inter}} - e_{i,N} + e_{i,N}) = \\ &= \sum_{i=1}^N P_{Li} \Delta e_i + \sum_{i=1}^N R_{Li} \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $e_{i,N}$ 为节点 i 的节点碳势; Δe_i 为节点 i 的过渡节点碳势与节点碳势差值; R_{Li} 为第 i 个节点所接负荷的负荷碳流率。

由式(8)可以得到线路损耗碳流率和变压器损耗碳流率之和为

$$R_{\text{lineloss}} + R_{\text{Tloss}} = \sum_{i=1}^N P_{Li} \Delta e_i \quad (10)$$

式中 $P_{Li} \Delta e_i$ 可以看成节点 i 的所有上游线路及变压器的网损碳流率按比例在该节点的分摊, 具体

公式推导见附式(A10)—(A16)、附图 A2。据此, 节点 i 的节点广义碳势表示为

$$e_{i,g} = \frac{P_{Li} \Delta e_i}{P_{\text{lineloss},i} + P_{\text{Tloss},i}} \quad (11)$$

式中: $P_{\text{lineloss},i}$ 为节点 i 的所有上游线路产生的网损; $P_{\text{Tloss},i}$ 为节点 i 的上游变压器产生的损耗; $e_{i,g}$ 为节点 i 的节点广义碳势, $\text{kgCO}_2/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

1.3 支路层面的广义碳势

支路广义碳势(branch generalized carbon intensity, BGCI) 是广义碳势在支路层面的体现, 用于描述配电网中支路碳强度的物理量, 支路下游节点产生单位有功负荷时反映到该支路上等效于发电侧的碳排放量。由附式(A17)—(A20)及附图 A3、4 可知, 支路上的过渡碳流率与下游节点总过渡负荷碳流率有关。定义支路 l 的支路广义碳势大小为

$$\rho_{l,g} = \frac{P_{\text{Bl,zs}} \rho_{l,\text{inter}}}{P_{L,\text{down}}} \quad (12)$$

式中: $P_{\text{Bl,zs}}$ 为支路 l 的首端有功功率; $\rho_{l,\text{inter}}$ 为支路 l 的过渡支路碳流密度; $P_{L,\text{down}}$ 为支路 l 的下游节点总负荷功率; $\rho_{l,g}$ 为支路 l 的支路广义碳势, $\text{kgCO}_2/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

广义碳势指标关系如附图 A5 所示, 具体计算过程如下。

1) 为了表征考虑网损下的配电网碳足迹传递路径过程, 基于式(1)—(2), 依据潮流信息、碳排放信息提出过渡支路碳流密度与过渡节点碳势的概念。

2) 根据附录 A 的分析, 利用式(3)—(5)计算配电网全网过渡节点碳势。

3) 基于式(6)—(7)通过配电网全网过渡节点碳势进一步计算所有负荷节点的过渡负荷碳流率。

4) 基于式(11)—(12), 结合配电网过渡负荷碳流率、有功网损、负荷功率等计算节点层面与支路层面广义碳势。

2 基于多元 Padé 树突网络的广义碳势预测

配电网运行状态预测是碳势感知重要环节。碳势及其相关要素数据规模通常相对较小, 使基于传统神经网络或多项式回归序列的碳势预测模型易受到训练数据中的噪声和极值的影响, 出现过拟合问题, 因此, 本文提出融合多元 Padé 与树突网络

的广义碳势预测方法。

2.1 树突网络

Liu Gang 等提出一种白盒属性的树突网络算法(dendrite net, DDNet)^[22]。在传统神经网络预测中,多层感知机模型多采用 Sigmoid 以及 Relu 等非线性激活函数建立历史碳势要素量测数据、历史碳势要素输出数据等的关系,而 DDNet 采用 Hadamard 积建立碳势要素数据之间的关系,类似于在最优组合点处的 Taylor 多项式展开,相比于传统神经网络,学习非线性能力更强。

一层 DDNet 的输入与输出关系如下:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{W}\mathbf{X} \circ \mathbf{X} \quad (13)$$

式中: $\mathbf{Y}$ 为 DD 模块输出结果; $\mathbf{W}$ 为权重矩阵; $\mathbf{X}$ 为广义碳势要素量测数据; $\circ$ 表示 Hadamard 乘积,表示矩阵元素相乘。

如果 DDNet 有多层,则 DDNet 的输入与输出关系如下:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{W}^{l,l-1} \{ \dots \mathbf{W}^{L,L-1} [\dots \mathbf{W}^{2,1} (\mathbf{W}^{1,0} \mathbf{X} \circ \mathbf{X}) \circ \mathbf{X} \dots] \circ \mathbf{X} \dots \}, \quad L \in \mathbb{N}^+ \quad (14)$$

式中: $\mathbf{W}^{L,L-1}$ 为第 $L-1$ 层的输入广义碳势要素对第 $L-1$ 层输出广义碳势要素的权重矩阵; l 为 DDNet 的层数; $\mathbf{Y}$ 为 DD 模块输出结果; $\mathbf{X}$ 为广义碳势要素量测数据。

DDNet 通过拟合广义碳势要素历史数据对未来广义碳势要素变化趋势进行计算分析。3 阶 DDNet 展开见附式(A21)。

2.2 基于多元 Padé 逼近的树突网络

基于多元泰勒展开的 DDNet 实质是采用多项式逼近^[23]。传统的多项式逼近方式对于负荷数据、分布式光伏数据等碳势要素存在极值点的函数逼近精度较低,且碳势要素数据通常属于中小样本,较难发现不同时间尺度下数据之间的内在联系与规律,较容易受到极大值或极小值等偶然因素的影响。为提高拟合精度,本文考虑一种多元 Padé 逼近的方法对数据曲线进行近似拟合,进而提出基于 Padé 逼近改进树突网络(PadéDDNet)的预测模型,以提高模型对配电网广义碳势及其要素变化趋势的预测精度。

2.2.1 多元 Padé 逼近

本文预测模型中采用 Cuyt 定义的多元 Padé 逼近^[24]对树突网络进行改进。对于 n 个变量的 j 次多项式可以表示为

$$A_j x^j = \sum_{j_1+\dots+j_n=j} a_{j_1\dots j_n} x_1^{j_1} \dots x_n^{j_n} \quad (15)$$

式中: $a_{j_1\dots j_n} \in \mathbf{R} \cup 0$; $\mathbf{R}$ 为全体实数; $x_1 \dots x_n$ 为节点负荷或分布式电源出力及影响因素的历史数据。

存在:

$$\begin{cases} P(x) = A_{MN+M} x^{MN+M} + \dots + A_{MN} x^{MN} \\ Q(x) = B_{MN+N} x^{MN+N} + \dots + A_{MN} x^{MN} \end{cases} \quad (16)$$

满足:

$$(FQ - P)(x) = o(x^{MN+M+N+1}) \quad (17)$$

则称 P/Q 为 F 的 $[M/N]$ 型 Padé 逼近,其中, M 、 N 为阶数。将有功负荷、分布式电源出力及碳排放强度的时间序列用 Padé 形式进行逼近,提高含极值点曲线的拟合精度。

2.2.2 PadéDDNet 树突网络

PadéDDNet 预测模型的构建可以采用 Hadamard 积与矩阵乘积。以 $[M/N]$ 阶 Padé 逼近为例, P 可以表示为

$$\begin{aligned} P = & \mathbf{W}^P \{ [\mathbf{W}_{1,P}^{M,M-1} (\dots \mathbf{W}_{1,P}^{2,1} (\mathbf{W}_{1,P}^{1,0} \mathbf{X} \circ \mathbf{X}) \circ \mathbf{X} \dots) \circ \mathbf{X}] + \\ & [\mathbf{W}_{2,P}^{M+1,M} (\dots \mathbf{W}_{2,P}^{2,1} (\mathbf{W}_{2,P}^{1,0} \mathbf{X} \circ \mathbf{X}) \circ \mathbf{X} \dots) \circ \mathbf{X}] + \dots + \\ & [\mathbf{W}_{M+1,P}^{\alpha P, \beta P} (\dots \mathbf{W}_{M+1,P}^{1,0} (\mathbf{W}_{M+1,P}^{1,0} \mathbf{X} \circ \mathbf{X}) \circ \mathbf{X} \dots) \circ \mathbf{X}] \} \end{aligned} \quad (18)$$

Q 可以表示为

$$\begin{aligned} Q = & \mathbf{W}^Q \{ [\mathbf{W}_{1,Q}^{N,N-1} (\dots \mathbf{W}_{1,Q}^{2,1} (\mathbf{W}_{1,Q}^{1,0} \mathbf{X} \circ \mathbf{X}) \circ \mathbf{X} \dots) \circ \mathbf{X}] + \\ & [\mathbf{W}_{2,Q}^{N+1,N} (\dots \mathbf{W}_{2,Q}^{2,1} (\mathbf{W}_{2,Q}^{1,0} \mathbf{X} \circ \mathbf{X}) \circ \mathbf{X} \dots) \circ \mathbf{X}] + \dots + \\ & [\mathbf{W}_{N+1,Q}^{\alpha Q, \beta Q} (\dots \mathbf{W}_{N+1,Q}^{2,1} (\mathbf{W}_{N+1,Q}^{1,0} \mathbf{X} \circ \mathbf{X}) \circ \mathbf{X} \dots) \circ \mathbf{X}] \} \end{aligned} \quad (19)$$

式中: $\mathbf{W}_{1,P}^{1,0}$ 、 $\mathbf{W}_{1,Q}^{1,0}$ 等 $\mathbf{W}$ 矩阵为节点有功负荷或分布式电源出力与影响因素的连接权重矩阵,为可学习矩阵; $\alpha P = MN + M$; $\beta P = MN + M - 1$; $\alpha Q = MN + N$; $\beta Q = MN + N - 1$ 。

PadéDDNet 预测模型最终的输出结果为

$$\mathbf{Y} = \frac{P}{Q} \quad (20)$$

式中 $\mathbf{Y}$ 为广义碳势及其相关要素预测值。

参考式(16)–(20),通过调整 PadéDDNet 中 M 与 N 可以改变模型的模块数,进而改变式(20)中 P 、 Q 的幂数,以有理分式的形式对负荷曲线、分布式光伏出力曲线以及碳排放强度曲线等进行逼近,提高预测模型拟合精度。

2.2.3 模型预测结果的评估指标

采用以下指标对预测结果进行评估,相应指标如下所示。

平均绝对误差(mean absolute error, MAE) E_{MAE} 如下:

$$E_{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\mu_i - y_i| \quad (21)$$

式中: N 为预测点个数; μ_i 为第 i 个广义碳势要素预测值; y_i 为第 i 个广义碳势要素实际值。 E_{MAE} 值能够反映预测广义碳势要素数据与真实广义碳势要素数据的平均偏差程度。

均方根误差 (root mean square error, RMSE) E_{RMSE} 如下:

$$E_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\mu_i - y_i)^2} \quad (22)$$

E_{RMSE} 值能够反映预测广义碳势要素数据偏离真实数据的大小。

泰尔不等系数(Theil inequality coefficient, TIC) T_{IC} 如下:

$$T_{IC} = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\mu_i - y_i)^2}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i)^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\mu_i)^2}} \quad (23)$$

T_{IC} 值能够反映预测广义碳势数据与真实数据吻合程度。当 $T_{IC}=0$ 时, 表示广义碳势数据与真实数据完全吻合; T_{IC} 值越趋近于 1, 表示广义碳势数据与真实数据偏差越大。

克林-古普塔效率系数(Kling-Gupta efficiency coefficient, KGE) K_{GE} 如下:

$$\begin{cases} P_{CC} = \text{cov}(\mu, y) / [\sigma(\mu)\sigma(y)] \\ B_R = \bar{\mu} / \bar{y} \\ R_V = (\sigma\mu / \bar{\mu}) / (\sigma y / \bar{y}) \\ K_{GE} = 1 - \sqrt{(P_{CC} - 1)^2 + (B_R - 1)^2 + (R_V - 1)^2} \end{cases} \quad (24)$$

式中: K_{GE} 考虑了均值误差、变异性和动态性, 综合衡量预测广义碳势要素数据与真实数据的偏差; cov 为协方差; σ 为方差; $\bar{\mu}$ 为预测广义碳势要素数据平均值; $\bar{y}$ 为真实数据平均值; P_{CC} 为皮尔逊相关系数; B_R 为偏置比; R_V 为相对变化率。 K_{GE} 越接近于 1, 说明预测广义碳势要素数据与真实数据的偏差越小。

3 配电网广义碳势预警

配电网碳势预警是根据未来时段广义碳势来判断配电网能否安全低碳运行进行预知和警报, 有利于更好地了解配电网运行情况, 确定系统运行情况对网络可能造成的威胁程度。本文从节点-支路-网络角度设定高碳风险阈值, 并结合配电网安全运

行状态^[25-26], 利用节点碳势裕度指标、支路碳势裕度指标和网络碳排放裕度指标对广义碳势进行分析, 判断出现异常时对配电网造成的严重影响程度, 评估配电网潜在的高碳风险。

1) 节点碳势裕度指标。

针对节点是否处于高碳运行, 本文提出节点碳势裕度指标。该指标综合考虑了以节点电压是否越限为前提的碳势水平, 发掘配电网可能出现的高碳运行情况。节点碳势裕度指标可以表示为

$$\gamma_i = \begin{cases} e^{20|U_i-1|} + [1 + \text{sgn}(e_{i,g} - \frac{1}{NT} \sum_{j=1}^T \sum_{i=1}^N 0.05 P_{L,ij} e_{up})] / \pi \cdot \\ \quad [\arctan(e_{i,g} - \frac{1}{NT} \sum_{j=1}^T \sum_{i=1}^N 0.05 P_{L,ij} e_{up}) + \frac{\pi(e-1)}{2}], & U_{low} \leq U_i \leq U_{up} \\ e^{-20|U_i-1|}, & U_i < U_{low} \text{ 或 } U_i > U_{up} \end{cases} \quad (25)$$

式中: U_{up} 、 U_{low} 分别表示电压上限与电压下限; N 为配电网节点数目; T 为预测时长; $P_{L,ij}$ 为第 i 个节点第 j 时刻的负荷大小; e_{up} 为配电网低碳运行时节点碳势的上限值, 不同配电网取值应不同; P_{loss} 为配电网总有功网损。

当 γ_i 处于 $(0,1)$ 时, 节点 i 发生电压越限; 当 γ_i 处于 $[1,e]$ 时, 认为节点 i 处于节点电压不越限情况下低碳运行状态; 当 γ_i 处于 $(e,2e]$ 时, 认为节点 i 处于节点电压不越限情况下高碳运行状态。

2) 支路碳势裕度指标。

对于支路可能存在的潮流越限与高碳运行问题, 本文提出支路碳势裕度指标。该指标旨在支路潮流是否越限情况下发现可能存在的高碳运行隐患。支路碳势裕度指标可以表示为

$$\omega_l = \begin{cases} E_o = \frac{e^{1-P_{zs}/P_{up}} - e^{-(1-P_{zs}/P_{up})}}{e^{1-P_{zs}/P_{up}} + e^{-(1-P_{zs}/P_{up})}}, & P_{zs} > P_{up} \\ E_o + \frac{1}{2} [1 + \text{sgn}(\rho_{l,g} - \frac{P_{zs} \rho_{up}}{\sum_{k=1}^N P_{Lk}})] e^{\frac{\rho_{l,g}}{\rho_{l,g,up}}}, & P_{zs} \leq P_{up} \end{cases} \quad (26)$$

式中: P_{zs} 为支路首端有功功率; P_{up} 为支路潮流上限值; E_o 为支路首端功率大于支路潮流限值时的指标值; ρ_{up} 为配电网低碳运行时支路碳流密度的上限值。

当 ω_l 处于 $(-1,0)$ 时, 则支路 l 发生潮流越限; 当

ω_l 处于 $[0,1]$ 时, 认为支路 l 处于支路潮流不越限情况下低碳运行状态; 当 ω_l 处于 $(1,+\infty)$ 时, 认为支路 l 处于支路潮流不越限情况下高碳运行状态。

3) 网络碳排放裕度指标。

对于配电网可能存在的高碳问题, 本文提出网络碳排放裕度指标。该指标可以表示为

$$\zeta = (e^{W_G / [(1+\lambda)e_{up} \sum_{i=1}^N P_{Li} \Delta t]} - 1) / (e - 1) \quad (27)$$

式中: λ 为网损率; Δt 为时间尺度; W_G 为 Δt 内的直接碳排放量。

当 ζ 处于 $(0,1]$ 时, 认为配电网属于低碳运行电网; 当 ζ 处于 $(1,+\infty)$ 时, 认为配电网属于高碳运行电网。

4 配电网广义碳势感知方法步骤

本文所提的配电网广义碳势感知方法流程如附图 A6 所示。

由广义碳势感知方法流程图可知, 基于碳排放流的配电网广义碳势感知方法具体步骤如下。

1) 读取配电网拓扑结构、有功负荷、分布式电源出力以及碳源碳排放强度等广义碳势要素历史数据。

2) 运用 PadéDDNet 模型对配电网有功负荷、分布式电源出力及由上级电网源侧设备输送至根节点的碳排放强度进行预测, 获取配电网未来时段的源荷侧发电和用电情况。

3) 利用步骤 2) 预测结果, 通过牛顿-拉夫逊算法计算未来时段配电网潮流结果。

4) 在潮流运行结果已知基础上, 求解传递路径的过渡碳排放量, 再采用式(11)、(12)计算得到未来时段配电网广义碳势。

5) 根据式(25)~(27)提出的配电网广义碳势预警指标对配电网未来时段碳势运行情况进行评估, 实现对配电网碳势预警信息的输出, 为配电网启用如调整分布式发电资源接入方式、负荷削减等策略, 以响应高碳预警, 并提供信息指导。

5 算例分析

5.1 算例概括

本文以我国某地区实际配电系统为研究对象, 共有 16 个节点。配电网以节点 1 接入上级电网, 支路 5-14 为联络线, 正常运行时保持开环运行, 如图 1(a)所示; 在节点 10 接入 300 kW 微型燃气轮机

MT; 在节点 16 接入分布式光伏 PV, 作为改进的有源配电网, 如图 1(b)所示。变压器容量为 630 kV·A, 六氟化硫气体约为 2.25 t, 逸散率为 0.5%。上级电网碳排放强度由上级电网的机组运行情况获取。

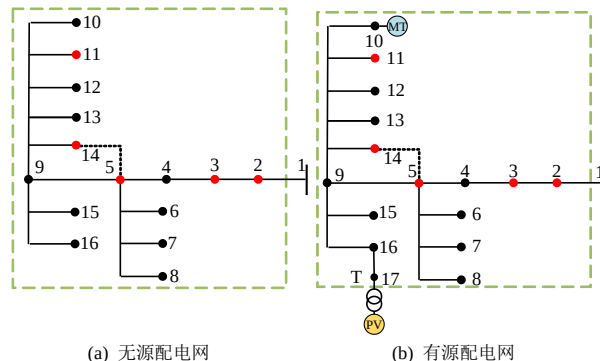


图 1 实际配电系统拓扑图

Fig. 1 Topology diagram of the actual distribution system

5.2 广义碳势计算

为了说明本文所提广义碳势的有效性, 并设定在已知上级电网碳排放强度情况下, 以图 1(a)与(b)为例, 将广义碳势与无损化传统碳势进行对比, 分析结果见附图 A7—A10。

5.3 基于多元 Padé 网络的配电网碳势预测及预警

通过对配电网节点的有功负荷、分布式电源出力及上级电网碳排放强度等广义碳势要素变化趋势预测可以获取该网络未来时刻的碳流运行情况。采用我国某地区 2019 年 1 月 1 日到 2019 年 3 月 31 日的实测光伏出力数据与气象数据; 选取我国某实际配电网负荷数据与上级电网传送到根节点的碳排放强度数据。所有数据采样间隔均为 15 min。取 80% 作为训练集, 20% 作为测试集。为了能够充分反应预测时段数据变化所包含的内在规律, 预测模型以过去 5 d 的历史数据及其相关影响因素多步预测未来 24 个时间步长的负荷功率、分布式光伏出力与碳排放强度运行趋势, 通过挖掘历史数据相关性实现广义碳势要素预测。分布式光伏数据集除光伏输出功率外, 还包括组件温度、环境温度、湿度、辐射等相关影响因素信息。预测模型中多元 Padé 逼近采用 [2/1] 型, 为验证本文所提预测方法的有效性, 算例部分设置反向传播 (backpropagation, BP) 神经网络、长短期记忆 (long short-term memory, LSTM) 神经网络以及改进的 DDNet 对相同的负荷数据集、光伏数据集与碳排放强度数据集进行预测。采用 MAE、RMSE、TIC 和 KGE 指标对不同

模型的预测结果进行评估,有功负荷、光伏出力、上级电网碳排放强度预测结果与评估结果见附图 A11—A13 与附表 A1—A3,鲁棒性测试结果见附表 A4—A6。由附图 A11—A13 可知,在实际配电网中,PadéDDNet 模型的预测精度在 E_{MAE} 、 E_{RMSE} 和 T_{IC} 指标上均优于 BP 神经网络、LSTM 神经网络以及 DDNet 树突网络;在 K_{GE} 指标上相较于对比模型更接近于 1,说明模型的性能更好,碳势预测结果具有更小的误差。由附表 A4—A6 可知,在添加噪声或有异常值的情况下,有功负荷、光伏出力以及碳排放强度的预测均对比模型的误差要小,说明所提模型可以有效减轻数据波动的影响,增强预测模型的鲁棒性。

5.4 配电网安全碳势预警结果

为了评估配电网潜在的安全高碳运行风险并验证所提广义碳势感知方法能够对配电网运行风险进行有效预警,基于 3 种场景对网络进行广义碳势风险评估。

场景 1: 不考虑负荷扰动、微型燃气轮机与分布式电源,对图 1(a)所示的无源配电网进行广义碳势预警分析。

场景 2: 不考虑微型燃气轮机、分布式电源,只考虑负荷扰动,对图 1(a)所示的无源配电网进行广义碳势预警分析。对网络施加服从正态分布的负荷扰动,均值为系统总负荷的 10%,标准差为 1,负荷波动如附图 A14 所示。

场景 3: 同时考虑微型燃气轮机、分布式电源、负荷扰动。微型燃气轮机出力、光伏出力为预测时段内的预测结果,如附图 A15、A16 所示。

5.4.1 碳排放量守恒验证

验证在 3 种场景下碳源产生的直接碳排放与间接碳排放守恒,如附表 A7 所示。由附表 A7 可知,在 1 h 内,碳源产生的直接碳排放量总和与间接碳排放量相等,也与过渡负荷碳流率相等。说明直接碳排放与间接碳排放保持守恒,所提过渡负荷碳流率能够直接等效为直接碳流率。

5.4.2 广义碳势预警

对图 1(b)所示的有源配电网进行广义碳势预警分析。

1) 节点碳势裕度指标。

根据广义碳势预测结果,结合式(25)求得未来 6 h 配电网各节点碳势裕度指标。式(25)中 e_{up} 的取值按照配电网所在区域规定,本文取 $0.7 \text{ kgCO}_2/$

(kW·h)。3 种场景下节点碳势裕度指标结果如图 2 所示。

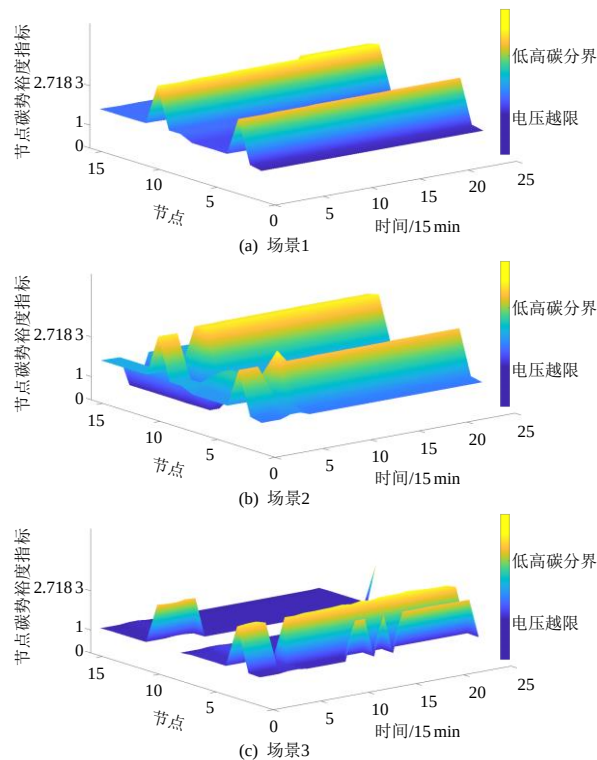


图 2 节点碳势裕度图

Fig. 2 Diagram of node carbon intensity margin

配电网节点碳势裕度指标结论分析如下。

①场景 1 中节点碳势裕度指标如图 2(a)所示。由于没有负荷波动,所有节点的指标值不存在小于 1 的数,说明所有节点均不存在电压越限问题。对于节点 4 与 11,在预测时间段内指标值处于 $(e, 2e]$,为高碳节点,此时应发出节点高碳运行预警信号。其余节点指标值均处于 $[1, e]$,属于低碳节点。即使当上级电网的碳排放强度在 $0.7 \text{ kgCO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 以上时,负荷较低的节点也属于低碳节点,所以,节点碳势高低不仅与上级电网碳排放强度有关,也与负荷用电量密切相关。

②场景 2 节点碳势裕度指标如图 2(b)所示。在第 4 时刻有负荷波动后,节点 9—16 的指标值均处于 $[0, 1]$,说明电压幅值小于 0.95,此时应发出电压越限预警信号。在第 5 时刻切除负荷波动后,指标恢复到 $(e, 2e]$,只发出高碳运行预警信号。

③场景 3 中节点碳势裕度指标如图 2(c)所示。节点 11 指标值在光伏出力较小时处于 $(e, 2e]$,此时为高碳节点。在光伏出力较强且 MT 发出低碳电能时位于 $[1, e]$,原因是节点 11 在白天由光伏机组产生的清洁电能供电,此时属于低碳节点。因此,低碳电能可以降低节点广义碳势,使节点变为低碳节点。

2) 支路碳势裕度指标。

利用式(26)可以求取支路碳势裕度指标。式(26)中 ρ_{up} 的取值按照配电网所在区域规定,本文取 $0.7\text{kgCO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。3种场景下支路碳势裕度指标结果如图3所示。

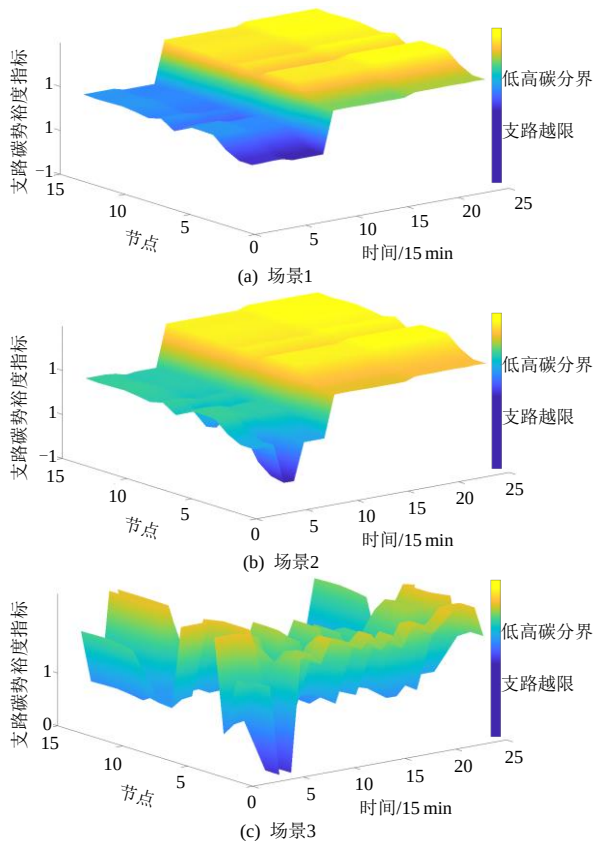


图3 支路碳势裕度图

Fig. 3 Diagram of branch carbon intensity margin

配电网支路碳势裕度指标结论分析如下。

①场景1的指标计算结果如图3(a)所示。当上级电网碳排放强度大于 $0.7\text{kgCO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 时,所有支路的指标值均在 $(1,+\infty)$,处于高碳运行状态。

②场景2的指标计算结果如图3(b)所示。在添加了负荷波动后,支路2-3、3-4、4-5的指标值处于 $[-1,0]$,出现支路有功潮流超限的情况。在负荷波动切除后,恢复到安全运行状态。

③场景3中当光伏出力较低时,部分支路会出现潮流超限;当光伏出力较大,同时MT发出低碳电能,支路9-10、9-11、9-12、9-13、9-14、9-15的指标值处于 $[0,1]$,不会出现高碳运行情况,原因是光伏机组释放“清洁”电能,降低了支路潮流含碳量,且光伏机组出力可以防止部分支路潮流超限。

3) 网络碳排放裕度指标。

利用式(27)获取配电网碳势裕度指标,令式(27)

中 $\lambda=3\%$ ^[27]。3种场景下网络碳排放裕度指标结果如图4所示。

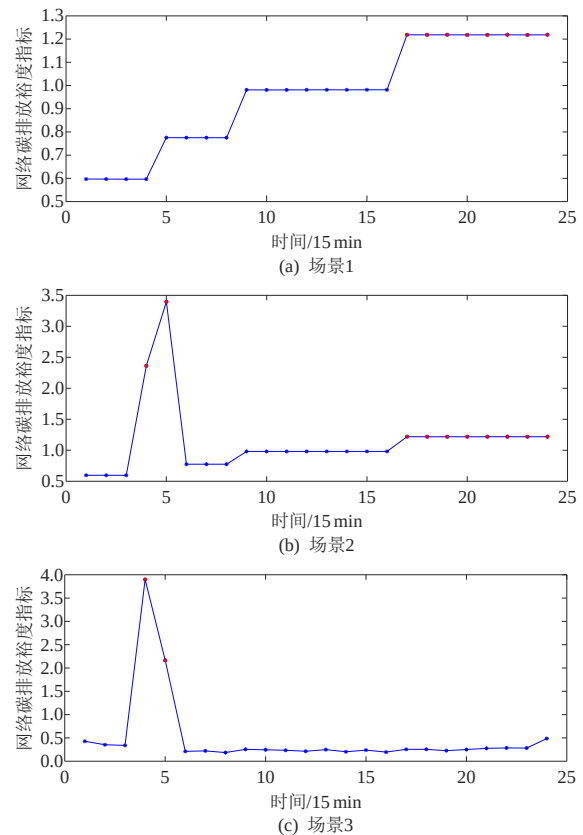


图4 网络碳排放裕度指标图

Fig. 4 Index diagram of network carbon emission margin

配电网网络碳排放裕度指标结论分析如下。

①场景1的指标计算结果如图4(a)所示。场景1下系统正常运行,当上级电网碳排放强度高于 $0.7\text{kgCO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 时,此时指标值处于 $(1,+\infty)$,说明配电网的碳排放量较高,此时属于高碳网络。

②场景2下发生负荷波动,如图4(b)所示,负荷增长后,碳排放量升高,指标值增长到 $(1,+\infty)$ 区间,配电网处于高碳运行状态,发出高碳预警。

③场景3中在负荷波动过程中当光伏机组出力较小时,配电网碳排放较高,指标值位于 $(1,+\infty)$;当MT与光伏机组共同出力较大时,可以减少配电网碳排放,此时指标值处于 $(0,1)$,属于低碳配电网。

5.5 高碳排放风险

过量的碳排放会导致气候出现极端天气,影响生物多样性。气候模型模拟结果表明,地表温度升高与二氧化碳排放增加有明显的正相关关系。以图1(a)所示配电网为例,设负荷功率在第12~16h处于高峰用电时期,一天内二氧化碳的排放量与广义碳势变化如图5所示。

由图5可知,广义碳势可以有效反映碳排放量

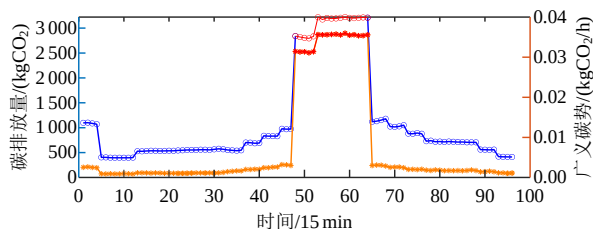


图5 二氧化碳的排放量与广义碳势变化图

Fig. 5 Diagram of changes in carbon dioxide emissions and generalized carbon intensity

变化。当负荷用电激增时,碳排放量大幅度增加,升高至原来的2~3倍。若配电网过度追求系统供电水平,可能会增加高碳排放机组出力,此时,配电网多处节点、支路或网络会出现“高碳”情况。因此,有必要对需求侧实施碳减排政策,围绕消费端,对衣食住行用等低碳行为进行优化,减少二氧化碳总体排放水平。

5.6 配电网降碳策略

当配电网达到高碳预警后,配电网需采用一定的措施降低配电网碳排放。本文采用碳捕集技术、提高分布式光伏接入功率、负荷削减及提高分布式光伏接入功率与负荷削减同时操作4种策略,实现配电网对高碳预警的响应,完善配电网高碳预警体系,如附图A17—A20所示。当出现高碳预警时,4种方案均可有效降低配电网中碳排放。

1) 方案1采用碳捕集技术降低上级电网碳排放强度与微型燃气轮机碳排放强度,从碳源降低配电网碳排放,故当负荷波动时配电网为低碳网络。

2) 方案2提高分布式光伏功率可以增加清洁电能输入,但此时由于节点4距离光伏较远,且其负荷功率很高,故接受高碳电能仍较多,当负荷波动时仍属于高碳电网。

3) 方案3通过部分负荷削减降低配电网间接碳排放,此时配电网仍有一个时刻属于高碳网络,原因是此时节点总负荷仍然较高,应继续控制负荷用电量。

4) 方案4削减负荷的同时增加光伏功率,从降低负荷碳排放与增加零碳电能两个角度大幅度降低网络碳排放,故当负荷波动时配电网属于低碳电网。

为探究4种方案在实现配电网降碳控碳的同时对配电网安全运行的影响,采用式(25)分析4种方案下的节点碳势裕度指标,如附图A21所示。4种方案情况下,节点碳势裕度指标均大于1,说明所提4种方案均可在保证配电网安全运行的情况下实

现配电网降碳控碳。

6 结论

本文通过广义碳势预测和预警,对配电网广义碳势水平进行感知,可以得到如下结论:

1) 基于碳排放流理论,考虑源网荷侧的潮流、损耗、发电与变电碳排放等碳势要素信息,建立配电网中满足空间差异性的广义碳势指标,辨识高碳节点,为配电网感知碳势运行趋势提供理论支撑。

2) 所提多元PadéDDNet模型能够发掘中小样本的碳势及其要素数据中的重要特征,也能够适应负荷或分布式电源出力等易受极值影响的函数,对网络运行趋势具有较好的预测效果。

3) 利用节点碳势裕度指标、支路碳势裕度指标和网络碳排放裕度指标对配电网潜在的安全隐患以及高碳势风险问题进行预警,有效反映配电网负荷或分布式光伏出力变化对配电网运行的影响。

本文所提方法能够捕捉无源配电网和有源配电网碳轨迹,感知碳势运行情况,可以为配电网安全低碳运行提供可靠参考。

参考文献

- [1] 韩富佳,王晓辉,乔骥,等.基于人工智能技术的新型电力系统负荷预测研究综述[J].中国电机工程学报,2023,43(22):8569-8591.
HAN Fujia, WANG Xiaohui, QIAO Ji, et al. Review on artificial intelligence based load forecasting research for the new-type power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(22): 8569-8591(in Chinese).
- [2] IEA. CO₂ emissions in 2023[R]. Paris: IEA, 2024.
- [3] 陈奔先,荆澜涛,叶鹏,等.新型配电网的低碳性评估与减碳措施研究[J].东北电力技术,2024,45(2):26-31,35.
CHEN Yixian, JING Lantao, YE Peng, et al. Research on low-carbon assessment and carbon reduction measures for new distribution network[J]. Northeast Electric Power Technology, 2024, 45(2): 26-31, 35(in Chinese).
- [4] 黄蔓云,卫志农,孙国强,等.数据挖掘在配电网态势感知中的应用:模型、算法和挑战[J].中国电机工程学报,2022,42(18):6588-6598.
HUANG Manyun, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Review of distribution system situation awareness based on data mining: modeling, algorithms and challenges[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6588-6598(in Chinese).

- [5] 田书欣, 李昆鹏, 魏书荣, 等. 基于同步相量测量装置的配电网安全态势感知方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 617-631.
TIAN Shuxin, LI Kunpeng, WEI Shurong, et al. Security situation awareness approach for distribution network based on synchronous phasor measurement unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 617-631(in Chinese).
- [6] 欧阳斌, 马瑞, 朱文广, 等. 计及碳减排分摊的配电网分布式储能集群配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(22): 8897-8907.
OUYANG Bin, MA Rui, ZHU Wenguang, et al. Distributed energy storage cluster configuration method of distribution network considering carbon emission reduction allocation[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(22): 8897-8907(in Chinese).
- [7] 周天睿, 康重庆. 基于碳排放流的配电系统低碳优化运行方法研究[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(3): 241-247.
ZHOU Tianrui, KANG Chongqing. Research on low-carbon oriented optimal operation of distribution networks based on carbon emission flow theory[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(3): 241-247(in Chinese).
- [8] 周天睿, 康重庆, 徐乾耀, 等. 电力系统碳排放流分析理论初探[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 38-43, 85.
ZHOU Tianrui, KANG Chongqing, XU Qian Yao, et al. Preliminary theoretical investigation on power system carbon emission flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 38-43, 85(in Chinese).
- [9] 李方一, 李楠, 周琰, 等. 基于多维数据与深度学习的区域发电碳排放因子预测研究[J]. 综合智慧能源, 2023, 45(8): 11-17.
LI Fangyi, LI Nan, ZHOU Yan, et al. Prediction on the regional carbon emission factor for power generation based on multi-dimensional data and deep learning[J]. Integrated Intelligent Energy, 2023, 45(8): 11-17(in Chinese).
- [10] 冯健冰, 任洲洋, 姜云鹏, 等. 电力系统定碳排运行域: 概念与方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(22): 8846-8859.
FENG Jianbing, REN Zhouyang, JIANG Yunpeng, et al. Committed carbon emissions operation regions of power system: concept and method[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(22): 8846-8859(in Chinese).
- [11] 梁思琪, 边晓燕, 刘天蔚, 等. 计及台区资源聚合功率的中低压配电系统低碳优化调度方法[J]. 电网技术, 2024, 48(8): 3217-3227.
LIANG Siqu, BIAN Xiaoyan, LIU Tianwei, et al. Low-carbon optimal dispatching method for the medium and low voltage distribution system considering the aggregated power of station resources[J]. Power System Technology, 2024, 48(8): 3217-3227(in Chinese).
- [12] 宋泽昊, 冯华, 陈晓刚, 等. 基于节点碳势的配电网分布式资源低碳调度策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(6): 2318-2328.
SONG Zehao, FENG Hua, CHEN Xiaogang, et al. Low-carbon scheduling strategy of distributed energy resources based on node carbon intensity for distribution networks[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2318-2328(in Chinese).
- [13] 赵敬皓, 王娜娜, 蒋嘉铭, 等. 基于 Bayesian Opt-XGBoost 的煤电机组碳排放因子预测[J]. 中国环境科学, 2024, 44(1): 417-426.
ZHAO Jinghao, WANG Nana, JIANG Jiaming, et al. Prediction of coal-fired power units carbon emission factor based on Bayesian Opt-XGBoost[J]. China Environmental Science, 2024, 44(1): 417-426(in Chinese).
- [14] 杨雨瑶, 潘峰, 钟立华, 等. 基于神经网络的电力系统节点碳排放因子预测方法[J]. 广东电力, 2023, 36(10): 2-9.
YANG Yuyao, PAN Feng, ZHONG Lihua, et al. Study on prediction method of node carbon emission factors in power system based on neural network[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(10): 2-9(in Chinese).
- [15] 徐菁, 李妍, 刘一鸣, 等. 基于相对靶心度的区域电网低碳发展潜力评估[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1281-1289.
XU Jing, LI Yan, LIU Yiming, et al. Assessment of low-carbon development potential of regional power grid based on relative off-targets distance[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1281-1289(in Chinese).
- [16] 王果, 李蓝锦, 闵永智, 等. 电力系统关键碳排放节点辨识[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(9): 114-120, 128.
WANG Guo, LI Lanjin, MIN Yongzhi, et al. Identification of key carbon emission nodes in power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(9): 114-120, 128(in Chinese).
- [17] 汪超群, 陈懿, 文福拴, 等. 电力系统碳排放流理论改进与完善[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1683-1691.
WANG Chaoqun, CHEN Yi, WEN Fushuan, et al. Improvement and perfection of carbon emission flow theory in power systems[J]. Power System Technology,

- 2022, 46(5): 1683-1691(in Chinese).
- [18] 林哲, 胡泽春, 宋永华. 考虑 $N-1$ 准则的配电网与分布式储能联合规划[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(13): 4390-4402.
- LIN Zhe, HU Zechun, SONG Yonghua. Joint planning of distribution network expansion and distributed energy storage systems under $N-1$ criterion[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13): 4390-4402(in Chinese).
- [19] 朱继忠, 周迦琳, 张迪. 清洁能源和电力系统碳足迹全生命周期核算综述[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(4): 1323-1342.
- ZHU Jizhong, ZHOU Jialin, ZHANG Di. Review of full life-cycle carbon footprints accounting of clean energy and power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(4): 1323-1342(in Chinese).
- [20] 吴杏平, 康重庆, 袁启恒. 我国碳排放影响因素及电力碳排放核算方法研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(S1): 1-18.
- WU Xingping, KANG Chongqing, YUAN Qiheng, et al. A review of the impact factors of carbon emissions and the accounting methods for electricity carbon emissions in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(S1): 1-18(in Chinese).
- [21] 周天睿, 康重庆, 徐乾耀, 等. 电力系统碳排放流的计算方法初探[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 44-49.
- ZHOU Tianrui, KANG Chongqing, XU Qian Yao, et al. Preliminary investigation on a method for carbon emission flow calculation of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 44-49(in Chinese).
- [22] LIU Gang, WANG Jing. Dendrite net: a white-box module for classification, regression, and system identification[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2022, 52(12): 13774-13787.
- [23] 马庆, 邓长虹, 龙志君. 基于白箱树突网络的电压灵敏度实时计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(19): 7503-7515.
- MA Qing, DENG Changhong, LONG Zhijun, et al. A real-time calculation method of voltage sensitivity based on white-box dendritic net[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(19): 7503-7515(in Chinese).
- [24] CUYT A A M. Multivariate Padé-approximants[J]. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 1983, 96(1): 283-293.
- [25] 刘权莹, 李俊娥, 倪明, 等. 电网信息物理系统态势感知: 现状与研究构想[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(19): 9-21, 51.
- LIU Quanying, LI Jun'e, NI Ming, et al. Situation awareness of grid cyber-physical system: current status and research ideas[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19): 9-21, 51(in Chinese).
- [26] 桑林卫, 许银亮, 孙宏斌, 等. 融合机器学习-优化的配电网低碳运行方法[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(8): 2855-2865.
- SANG Linwei, XU Yinliang, SUN Hongbin, et al. Carbon-aware distribution network operation approach via fusing learning and optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(8): 2855-2865(in Chinese).
- [27] 马喜平, 贾嵘, 梁琛, 等. 高比例新能源接入下电力系统降损研究综述[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4305-4315.
- MA Xiping, JIA Rong, LIANG Chen, et al. Review of researches on loss reduction in context of high penetration of renewable power generation[J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4305-4315(in Chinese).

附录

<http://nps.epri.sgcc.com.cn/djgxcb/CN/10.13334/j.0258-8013.pcsee.242069>



田书欣

收稿日期: 2024-08-28。

作者简介:

田书欣(1985), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统规划、智能配电网运行等, tsx396@163.com;

姜皓喆(1999), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为配电网态势感知, mikejhz@163.com;

*通信作者: 符杨(1968), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统分析、风力发电并网技术及海上风电优化设计等, mfudong@126.com。

(编辑 张文鑫, 胡琳琳)