

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250165

考虑线路参数修正的电力系统碳排放因子计算方法

郑熠辰¹, 郑迪¹, 赵璇孜², 郑嘉城¹, 李添荣¹, 李灵至¹

(1. 中国计量大学机电工程学院, 浙江 杭州 310018; 2. 福州天宇电气股份有限公司, 福建 福州 350109)

摘要: 电力系统碳排放计量是明确各环节排放责任、制定减排措施、实现碳中和战略目标的重要基础。碳流理论基于潮流追踪原理, 可实现电力系统碳排放因子的计算和碳排放责任的分摊。潮流计算结果是准确计算碳排放因子的基础, 但其受到网络模型准确性的影响。当线路参数发生变化时, 可能导致碳排放因子计算失准。为此, 提出了考虑线路参数修正的电力系统碳排放因子计算方法。首先, 分析了基于碳流理论的电力系统碳排放因子计算方法。然后, 利用量测数据和改进牛顿-拉夫逊法修正线路参数, 提出考虑线路参数修正的电力系统碳排放因子计算方法, 并进一步讨论了线路的参数变化对节点碳排放因子的影响规律。最后, 仿真结果验证了所提方法可有效提升碳排放因子计算的准确性。

关键词: 碳排放计量; 线路参数修正; 碳流理论; 改进牛顿-拉夫逊

A carbon emission factor calculation method for power systems considering line parameter correction

ZHENG Yichen¹, ZHENG Di¹, ZHAO Xuanzi², ZHENG Jiacheng¹, LI Tianrong¹, LI Lingzhi¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. Fuzhou Tianyu Electric Co., Ltd., Fuzhou 350109, China)

Abstract: Carbon emission measurement in power systems is an important foundation for clarifying emission responsibilities across different sectors, formulating emission reduction measures, and achieving carbon-neutrality goals. Carbon flow theory, based on the power flow tracking principle, enables the calculation of carbon emission factors and the allocation of carbon emission responsibility within power systems. Since accurate power flow results are fundamental to precise carbon emission factor calculation, their accuracy is affected by the fidelity of the network model. Variations in transmission line parameters may result in significant errors in carbon emission factor computation. To address this issue, a carbon emission factor calculation method considering line parameter correction is proposed. First, the carbon emission factor calculation method based on carbon flow theory is analyzed. Then, by using measurement data and an improved Newton-Raphson method to correct line parameters, a carbon emission factor calculation method that incorporates line parameter correction is developed. Furthermore, the influence of line parameter variations on nodal carbon emission factors is examined. Finally, simulation results verify that the proposed method can effectively improve the accuracy of carbon emission factor calculation.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Zhejiang Province (No. LQ22E070006).

Key words: carbon emission measurement; line parameter correction; carbon flow theory; improved Newton-Raphson

0 引言

工业革命后, 人类活动大量消耗化石能源, 导致二氧化碳排放量激增, 大气中温室气体浓度显著

增加, 加剧了全球气候变暖。电力作为现代社会最主要的能源之一, 广泛应用于各个领域。当前电力行业仍以煤、天然气等化石燃料为主要能量来源, 碳排放量巨大^[1-3]。因此, 减少电力相关的碳排放量已成为减排行动的战略高地。要有效推进减排, 首要任务是准确掌握电力系统的碳排放现状。

目前电力系统碳排放量计算主要分为核算法^[4-5]和碳流分析法^[6]。核算法是一种利用各发电厂统计

基金项目: 浙江省自然科学基金项目资助(LQ22E070006);
浙江省大学生科技创新活动计划项目资助(2024R409A030);
浙江省高等教育“十四五”教学改革项目资助(JGBA2024211)

数据得到碳排放量的方式，其数据获取方式比较容易，操作简便，但所得结果精度较低，只能分析发电侧的碳排放量大小，无法掌握碳排放的分布特性^[7]。而碳流分析法将碳排放视为随电功率潮流一起流动的虚拟流，原本只存在于发电机处的碳排放随着功率潮流的分配也分摊到系统中的各节点和支路上^[8]，相比于核算法能够更准确地把握系统中各个环节的碳排放情况，为电力系统减排策略提供更为精细的指导。

文献[9]首先提出将电力碳排放分析与系统潮流计算相结合，给出了碳排放流分析的基本概念与框架，并进一步提出了递推计算碳流的方法^[10]。基于此，文献[11]提出了计及网损的电力系统碳排放分析。针对网络损耗对应的碳排放分摊问题，文献[12]提出根据负载和发电机组的功率份额分配网络损耗的方式。文献[13]基于电网电流分布理论提出了一种将网损产生的碳排放量归算至电源侧的碳流计算方法。文献[14]提出一种考虑网损与新能源出力的碳排放流分析方法。此外，文献[15]提出了考虑无功潮流的电力系统碳排放计量方法。文献[16]则针对碳流方法需要海量跨区域电网数据带来的隐私和计算效率问题提出了主从式的计算框架。现有研究对基于碳流理论的电力系统碳排放计量大多基于对潮流的直接测量结果^[17-18]，但在实际应用中，可能存在不良量测数据或数据缺失的问题，这会导致碳排放无法进行计算或结果不可信。为此，仍需结合网络潮流计算和状态估计来对量测数据进行补充和修正^[19]。然而潮流计算准确性依赖准确的网络模型，实际运行中可能大量存在线路温度变化或老化引起参数变化的问题，当线路参数变化使网络模型不准确时也将使碳排放计算产生较大误差。

针对上述问题，本文提出一种考虑线路参数修正的电力系统碳排放因子计算方法，通过量测数据修正线路阻抗参数，从而实现更精确的碳排放因子计算。首先，分析了电力系统碳排放因子的计算方法。然后，利用量测数据和改进的牛顿-拉夫逊法对线路参数进行修正，进而提出了考虑线路参数变化和修正的节点碳排放计算方法。在此基础上，分析了线路参数变化对碳排放因子的影响规律。最后，通过算例验证了所提方法的有效性。

1 电力系统节点碳排放因子计算

对于具有 N 节点(不包括接地点)， S 个电源的电网，以有功电流为正的方向为参考方向，根据诺顿定理将所有电源等效为电流源，则网络中各节点的电流满足式(1)所示的关系。

$$A\mathbf{I}_b - \mathbf{I}_s = 0 \quad (1)$$

式中： A 为 $N \times B$ 的关联矩阵，其中 B 为无源支路数； \mathbf{I}_b 为 $B \times 1$ 维无源支路电流列向量； \mathbf{I}_s 为 $N \times 1$ 维的节点电源注入电流列向量。

关联矩阵 A 中元素-1 代表支路方向指向节点，若保留其中的-1 元素、其他元素均置 0，形成的矩阵 A_{nc} 可表征支路电流对节点的流入关系；反之只保留元素 1 的矩阵 A_{po} 可表征支路电流对节点的流出关系。由此，将式(1)拆分为节点流入、流出电流两部分，可得

$$\mathbf{I}_{np} = \mathbf{I}_s - A_{nc}\mathbf{I}_b \quad (2)$$

$$\mathbf{I}_{nz} = A_{po}\mathbf{I}_b \quad (3)$$

式中： \mathbf{I}_{np} 、 \mathbf{I}_{nz} 分别为节点流入、流出电流的列向量。

\mathbf{I}_b 中第 k 条支路电流 I_{bk} 亦可表示从节点 j 流向节点 i 的有功电流，其中 j 、 i 分别为第 k 条支路的首末端节点编号。对于任一支路电流其方向唯一，因此在由 $I_{b,ij}$ 构成的矩阵 \mathbf{I}_{bMat} 中互为对角的元素 $I_{b,ij}$ 和 $I_{b,ji}$ 仅有一非零。由此可写出矩阵 \mathbf{I}_{bMat} 与 \mathbf{I}_b 的关系为

$$\mathbf{I}_{bMat} = -A_{nc} \text{diag}(\mathbf{I}_b) A_{po}^T \quad (4)$$

式中： $\text{diag}(\cdot)$ 为对角化运算。

以图 1 所示的节点 i 为例，其流入电流可表示为

$$I_{np,i} = I_{si} + \sum_{j=1, j \neq i}^N I_{b,ij} \quad (5)$$

式中： $I_{np,i}$ 为列向量 \mathbf{I}_{np} 的第 i 个元素； I_{si} 为列向量 \mathbf{I}_s 的第 i 个元素，无电源接入时 $I_{si}=0$ 。

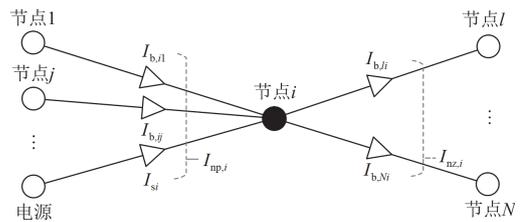


图 1 节点 i 的流入、流出电流

Fig. 1 Currents flowing into and out of node i

对式(5)等号两侧取共轭并乘以节点 i 的电压 U_{ni} ，可得注入节点 i 的复功率，进一步整理后可得

$$S_{si} = U_{ni} I_{si}^* = S_{np,i} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N S_{b,ij} = U_{ni} I_{np,i}^* - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N U_{ni} I_{b,ij}^* \quad (6)$$

式中： S_{si} 为节点 i 的电源注入复功率，若节点 i 无电源接入，则 $S_{si}=0$ ；上标“*”为共轭； $S_{np,i}$ 为节点 i 的总注入复功率； $S_{b,ij}$ 为节点 j 注入节点 i 的复功率。

根据节点功率的复比例共享原则, 节点 i 各流入支路对流出支路有功功率的贡献取决于该流入支路有功功率占节点总流入有功功率的比例, 无功功率也同理^[15]。考虑到碳排放仅与有功功率有关, 故可由式(6)写出节点 i 的有功功率平衡关系为

$$P_{si} = P_{np,i} - \sum_{j=1, j \neq i}^N P_{b,ij} = P_{np,i} + \sum_{j=1, j \neq i}^N \alpha_{ij} P_{np,j} \quad (7)$$

其中

$$\alpha_{ij} = -\frac{P_{b,ij}}{P_{np,j}} = -\frac{\operatorname{Re}(U_{ni} I_{b,ij}^*)}{\operatorname{Re}(U_{nj} I_{np,j}^*)}, i \neq j$$

式中: P_{si} 为节点 i 的电源注入有功功率, 若节点 i 无电源接入, 则 $P_{si} = 0$; $P_{np,i}$ 、 $P_{np,j}$ 分别为节点 i 、 j 的总注入有功功率; $P_{b,ij}$ 为从节点 j 注入节点 i 的有功功率。

可将式(7)改写为矩阵形式, 进一步求逆可得

$$\mathbf{P}_{np} = (\mathbf{E} + \mathbf{\Pi})^{-1} \mathbf{P}_s \quad (8)$$

式中: \mathbf{P}_{np} 为以 $P_{np,i}$ 为第 i 个元素的列向量; \mathbf{E} 为 $N \times N$ 单位矩阵; \mathbf{P}_s 为以 P_{si} 为第 i 个元素的列向量; $\mathbf{\Pi}$ 为对角元素为 0、第 i 行第 j 列元素为 α_{ij} 的矩阵, 计算如式(9)所示。

$$\mathbf{\Pi} = \frac{\operatorname{Re}[(\mathbf{U}_n \mathbf{1}^T) \circ \mathbf{I}_{bMat}^*]}{\operatorname{Re}[\mathbf{1}(\mathbf{U}_n^T \circ \mathbf{I}_{np}^*)]} \quad (9)$$

$$\frac{\operatorname{Re}\{(\mathbf{Y}_n^{-1} \mathbf{I}_s \mathbf{1}^T) \circ \{\mathbf{A}_{nc} \operatorname{diag}[\mathbf{Y}_b^* \mathbf{A}^T (\mathbf{Y}_n^{-1})^* \mathbf{I}_s^*] \mathbf{A}_{po}^T\}\}}{\operatorname{Re}\{\mathbf{1}\{(\mathbf{I}_s^T \mathbf{Y}_n^{-1}) \circ (\mathbf{I}_s^*)^T [\mathbf{E} - (\mathbf{Y}_n^{-1})^* \mathbf{A} \mathbf{Y}_b^* \mathbf{A}_{nc}^T]\}\}}$$

式中: \mathbf{U}_n 为 U_{ni} 构成的节点电压列向量; $\mathbf{1}$ 为 $N \times 1$ 维的单位列向量; \mathbf{Y}_n 为节点导纳矩阵; \mathbf{Y}_b 为支路导纳矩阵; “ \circ ”为矩阵哈达马积, 除法为矩阵元素相除。

式(8)表明, 各节点的总注入功率表示为各电源有功功率的组合。基于此有功功率溯源比例, 生产各电源有功功率所对应的化石能源消耗及碳排放量(可再生能源为 0)也应同比例地归算到各节点, 即碳流与有功潮流具有相同的传输路径和分解关系^[9]。因此, 各节点注入的总碳排放量构成的列向量 \mathbf{C}_n 可表示为

$$\mathbf{C}_n = \mathbf{P}_{np} \circ \mathbf{e}_n = (\mathbf{E} + \mathbf{\Pi})^{-1} (\mathbf{P}_s \circ \mathbf{e}_s) \quad (10)$$

式中: \mathbf{e}_n 为各节点的碳排放因子列向量; \mathbf{e}_s 为 $N \times 1$ 维节点电源碳排放强度列向量, 若第 i 个节点无电源接入, 则 \mathbf{e}_s 第 i 个元素 $e_{si} = 0$ 。

进一步可计算节点碳排放因子列向量 \mathbf{e}_n 为

$$\mathbf{e}_n = \frac{\mathbf{C}_n}{\mathbf{P}_{np}} = \frac{(\mathbf{E} + \mathbf{\Pi})^{-1} \{\operatorname{Re}\{[(\mathbf{A} \mathbf{Y}_b \mathbf{A}^T)^{-1} \mathbf{I}_s] \circ \mathbf{I}_s^*\} \circ \mathbf{e}_s\}}{(\mathbf{E} + \mathbf{\Pi})^{-1} \operatorname{Re}\{[(\mathbf{A} \mathbf{Y}_b \mathbf{A}^T)^{-1} \mathbf{I}_s] \circ \mathbf{I}_s^*\}} \quad (11)$$

由式(11)可知, 节点碳排放因子与电源出力、电源碳排放因子、网络拓扑结构、线路参数等因素有关。当线路参数发生变化时, 将引起节点碳排放因子的变化, 不考虑此变化将可能产生较大误差。

2 考虑线路参数变化的节点碳排放因子计算方法

2.1 基于改进牛顿-拉夫逊法的线路参数修正方法

牛顿-拉夫逊法是电力系统潮流计算的常用方法, 其以节点电压幅值和相位作为求解变量, 以节点功率平衡为约束, 通过泰勒级数展开非线性潮流方程, 利用雅可比矩阵计算潮流不平衡量, 并以此来修正求解变量, 从而实现迭代计算的目的^[20]。

传统牛顿-拉夫逊法通常不考虑线路参数和导纳矩阵的变化。为实现线路老化时线路参数的修正, 这里将线路参数作为求解变量一同计算, 形成改进的牛顿-拉夫逊法^[21]。

首先建立网络节点有功和无功潮流平衡方程, 如式(12)所示。

$$\begin{cases} \Delta P_i^k = P_{si}^k - U_{ni}^k \sum_{j=1}^n U_{nj}^k (g_{ij}^k \cos \theta_{ij}^k + b_{ij}^k \sin \theta_{ij}^k) \\ \Delta Q_i^k = Q_{si}^k - U_{ni}^k \sum_{j=1}^n U_{nj}^k (g_{ij}^k \sin \theta_{ij}^k - b_{ij}^k \cos \theta_{ij}^k) \end{cases} \quad (12)$$

式中: ΔP_i^k 、 ΔQ_i^k 分别为第 k 次迭代中节点 i 的有功、无功功率不平衡量; P_{si}^k 、 Q_{si}^k 分别为在第 k 次迭代中节点 i 的电源注入有功、无功功率; U_{ni}^k 、 U_{nj}^k 分别为第 k 次迭代中节点 i 、 j 的电压幅值; 当 $j = i$ 时, g_{ii}^k 、 b_{ii}^k 分别为第 k 次迭代中节点 i 的自电导和自电纳; 当 $j \neq i$ 时, g_{ij}^k 、 b_{ij}^k 和 θ_{ij}^k 分别为第 k 次迭代中节点 i 、 j 之间的互电导、互电纳和相位差。

将线路参数电导 g_{ij}^k 、电纳 b_{ij}^k 、电压幅值 U_{ni}^k 与 U_{nj}^k 和相角差 θ_{ij}^k 共同组成求解变量, 对式(12)计算偏导数, 构建改进牛拉法的迭代计算模型为

$$[\Delta g_{ij}^k \quad \Delta b_{ij}^k \quad \Delta \theta_{ij}^k \quad \Delta U_{ni}^k \quad \Delta U_{nj}^k]^T = \mathbf{J}^+ [\Delta P_i^k \quad \Delta Q_i^k]^T \quad (13)$$

式中: Δg_{ij}^k 、 Δb_{ij}^k 、 $\Delta \theta_{ij}^k$ 、 ΔU_{ni}^k 和 ΔU_{nj}^k 分别为相应变量在第 k 次迭代形成的增量; \mathbf{J} 为雅可比矩阵, 其各元素为有功或无功不平衡量对求解变量的偏导; 上标 “+” 为广义逆运算。 \mathbf{J} 具体表达式为

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} A & -B & C & E & G \\ B & -A & D & F & H \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中

$$\left\{ \begin{aligned} A &= \frac{\partial \Delta P_i^k}{\partial g_{ij}^k} = -U_{ni}^k U_{nj}^k \cos \theta_{ij}^k \\ B &= \frac{\partial \Delta Q_i^k}{\partial g_{ij}^k} = -U_{ni}^k U_{nj}^k \sin \theta_{ij}^k \\ C &= \frac{\partial \Delta P_i^k}{\partial \theta_{ij}^k} = U_{ni}^k U_{nj}^k g_{ij}^k \sin \theta_{ij}^k - U_{ni}^k U_{nj}^k b_{ij}^k \cos \theta_{ij}^k \\ D &= \frac{\partial \Delta Q_i^k}{\partial \theta_{ij}^k} = -U_{ni}^k U_{nj}^k g_{ij}^k \cos \theta_{ij}^k - U_{ni}^k U_{nj}^k b_{ij}^k \sin \theta_{ij}^k \\ E &= \frac{\partial \Delta P_i^k}{\partial U_{ni}^k} = -2U_{ni}^k b_{ii}^k - U_{nj}^k (g_{ij}^k \cos \theta_{ij}^k + b_{ij}^k \sin \theta_{ij}^k) \\ F &= \frac{\partial \Delta Q_i^k}{\partial U_{ni}^k} = 2U_{ni}^k b_{ii}^k - U_{nj}^k (g_{ij}^k \sin \theta_{ij}^k - b_{ij}^k \cos \theta_{ij}^k) \\ G &= \frac{\partial \Delta P_i^k}{\partial U_{nj}^k} = -U_{ni}^k (g_{ij}^k \cos \theta_{ij}^k + b_{ij}^k \sin \theta_{ij}^k) \\ H &= \frac{\partial \Delta Q_i^k}{\partial U_{nj}^k} = -U_{ni}^k (g_{ij}^k \sin \theta_{ij}^k - b_{ij}^k \cos \theta_{ij}^k) \end{aligned} \right.$$

利用式(13)计算得到的增量对求解变量进行修正。

$$\begin{bmatrix} g_{ij}^{k+1} \\ b_{ij}^{k+1} \\ \theta_{ij}^{k+1} \\ U_{ni}^{k+1} \\ U_{nj}^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{ij}^k \\ b_{ij}^k \\ \theta_{ij}^k \\ U_{ni}^k \\ U_{nj}^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta g_{ij}^k \\ \Delta b_{ij}^k \\ \Delta \theta_{ij}^k \\ \Delta U_{ni}^k \\ \Delta U_{nj}^k \end{bmatrix} \quad (15)$$

基于修正的求解变量根据式(12)重新求解节点功率不平衡量，同时按照式(14)更新雅可比矩阵后，再利用式(13)和式(15)修正求解变量，重复以上步骤直到节点功率不平衡量满足式(16)所示的收敛条件时，停止迭代计算。

$$\|\Delta \mathbf{P}^T \ \Delta \mathbf{Q}^T\|_2 < \varepsilon \quad (16)$$

式中： $\Delta \mathbf{P}$ 和 $\Delta \mathbf{Q}$ 分别为由各节点功率不平衡量 ΔP_i^k 和 ΔQ_i^k 构成的列向量； ε 为设定的迭代收敛阈值，根据计算精度要求设定；“ $\|\cdot\|_2$ ”为求二范数运算。

2.2 考虑线路参数修正的节点碳排放因子计算流程

基于以上推导，提出一种考虑线路参数修正的电力系统节点碳排放因子计算，其流程如图2所示。具体步骤如下所示：

- 1) 计算第 k 次迭代中节点有功功率和无功功率的不平衡量；
- 2) 计算第 k 次迭代中线路参数修正值以及节点电压幅值、相角修正值；
- 3) 迭代计算直到节点功率偏差满足精度要求或达到最大迭代次数，输出线路参数修正值；
- 4) 根据线路参数修正值计算节点碳排放因子。

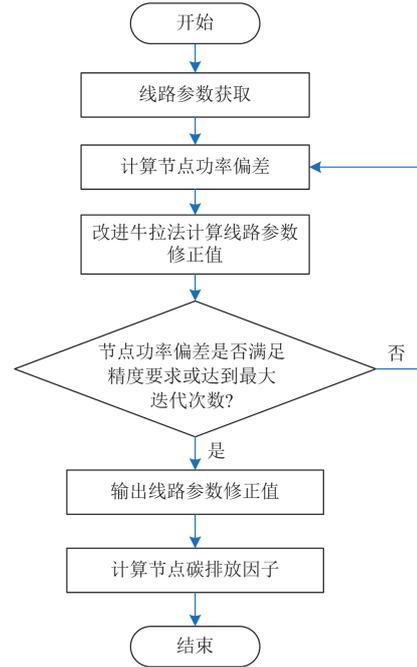


图2 考虑线路参数修正的节点碳排放因子计算流程图

Fig.2 Flowchart of nodal carbon emission factor calculation considering correction of line parameters

3 线路参数变化对节点碳排放因子影响分析

由式(11)可知，碳排放因子的计算结果与电源电流、线路参数、网络拓扑等因素有关。当线路参数变化导致支路导纳矩阵变化时，碳排放因子也将相应发生变化。为分析线路参数变化程度对电力系统碳排放因子的影响规律，定义线路参数变化因子 β_{bk} ，表示增量百分比，如式(17)所示。

$$\beta_{bk} = \frac{\Delta y_{bk}}{y_{bk0}} \quad (k=1,2,\dots,B) \quad (17)$$

式中： y_{bk0} 为线路导纳初始值； Δy_{bk} 为线路参数变化导致的导纳参数变化量，各线路参数变化因子 β_{bk} 构成列向量 $\Delta \Phi_b$ 。

根据灵敏度分析方法，利用节点碳排放因子向量对线路参数变化因子求导可得

$$\Delta \mathbf{e}_n = \mathbf{G} \Delta \Phi_b \quad (18)$$

式中： $\Delta \mathbf{e}_n$ 为线路参数变化引起的各节点碳排放因子增量组成的向量； \mathbf{G} 为灵敏度矩阵，其第 i 行第 k 列元素为

$$G_{ik} = \frac{\partial \Delta e_{ni}}{\partial \beta_{bk}} \quad (19)$$

根据最大增益定理，多输入多输出系统的最大增益为灵敏度矩阵 \mathbf{G} 的最大奇异值，最大增益方向为最大奇异值对应的右奇异向量方向^[22]。系统最大

增益可表示为

$$\max \frac{\|\Delta e_n\|_2}{\|\Delta \Phi_b\|_2} = \max_{\|\Delta \Phi_b\|_2=1} \|\mathbf{G}\|_2 = \max \sigma(\mathbf{G}) \quad (20)$$

式中：“ $\sigma(\cdot)$ ”为求奇异值运算。

式(20)表明最大奇异值可用于衡量线路参数变化对碳排放因子计算结果的影响程度。当网络各线路参数变化因子组成的向量 $\Delta \Phi_b$ 处于系统最大奇异值右奇异向量方向上时, 不考虑线路参数修正导致的碳排放因子计算结果误差最大, 误差大小取决于系统的最大奇异值。通过分析系统最大奇异值可以快速评估线路参数变化对节点碳排放因子的影响程度。

4 算例分析

为了验证所提方法的有效性, 在 MATLAB 仿真平台中构建了改进的 IEEE6 机 30 节点系统仿真模型^[23], 系统拓扑结构如图 3 所示。采用水电和风电分别等容量替换原系统中的节点 22、23 的火力发电机组, 对应电源碳排放强度均为 0。其他节点 1、2、13、27 接入的火电机组碳排放强度分别为 0.875、0.875、0.525、0.525 kg/kWh。

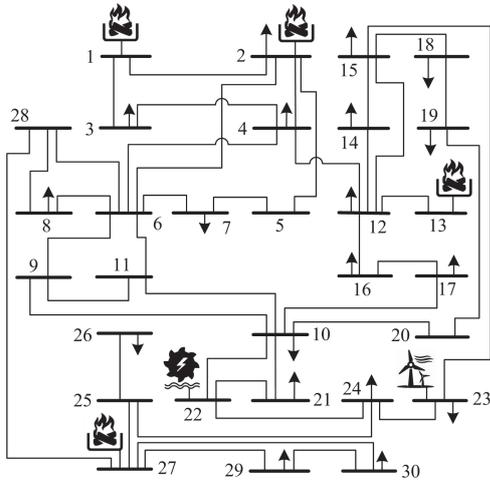


图 3 改进的 IEEE 6 机 30 节点图

Fig. 3 Diagram of modified IEEE 6-generator 30-bus system

4.1 不同工况下的效果验证

设除平衡节点外的所有电源出力和负荷保持不变, 设置 3 种工况分析所提方法的效果。

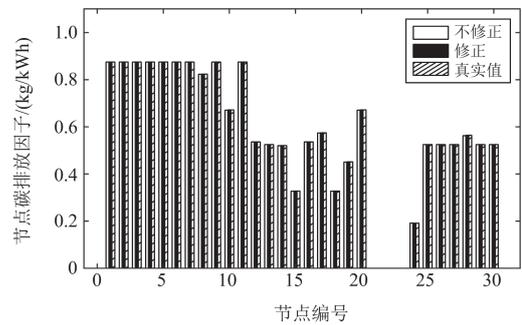
1) 工况 1: 全网线路参数均发生轻微变化, 所有线路参数变化因子设为-5%;

2) 工况 2: 全网线路参数变化不一, 各线路参数变化因子在-10%~5%范围内随机取值, $\|\Delta \Phi_b\|_2$ 与工况 1 保持一致;

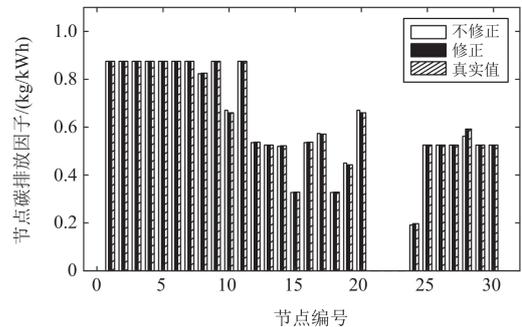
3) 工况 3: 全网线路参数均发生较大变化, 所

有线路参数变化因子设为-10%, $\|\Delta \Phi_b\|_2$ 是工况 1 的 2 倍。

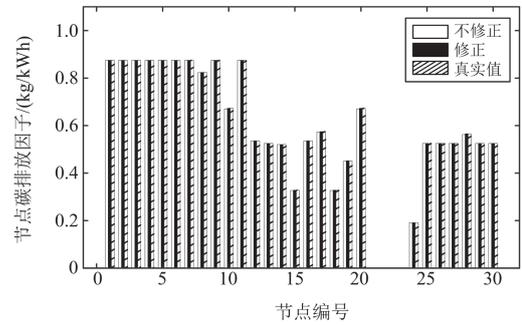
3 种工况下分别在考虑和不考虑线路参数修正下进行节点碳排放因子计算, 比较不同情况下的计算结果, 同时与系统仿真结果进行对比, 结果如图 4 所示, 3 种工况下修正前后计算误差对比如图 5 所示。不考虑线路参数修正时 3 种工况计算误差的二范数分别为 0.0028、0.0353、0.0060, 考虑修正后 3 种工况计算误差的二范数几乎为 0。通过修正前后各节点碳排放因子计算误差除以仿真值得到相对误差, 不考虑线路参数修正时工况 1、2 和 3 中各节点碳排放因子计算相对误差分别为-0.2980%~



(a) 工况1



(b) 工况2



(c) 工况3

图 4 3 种工况下不同节点碳排放因子计算结果对比
Fig. 4 Comparison of carbon emission factors of different nodes under three conditions

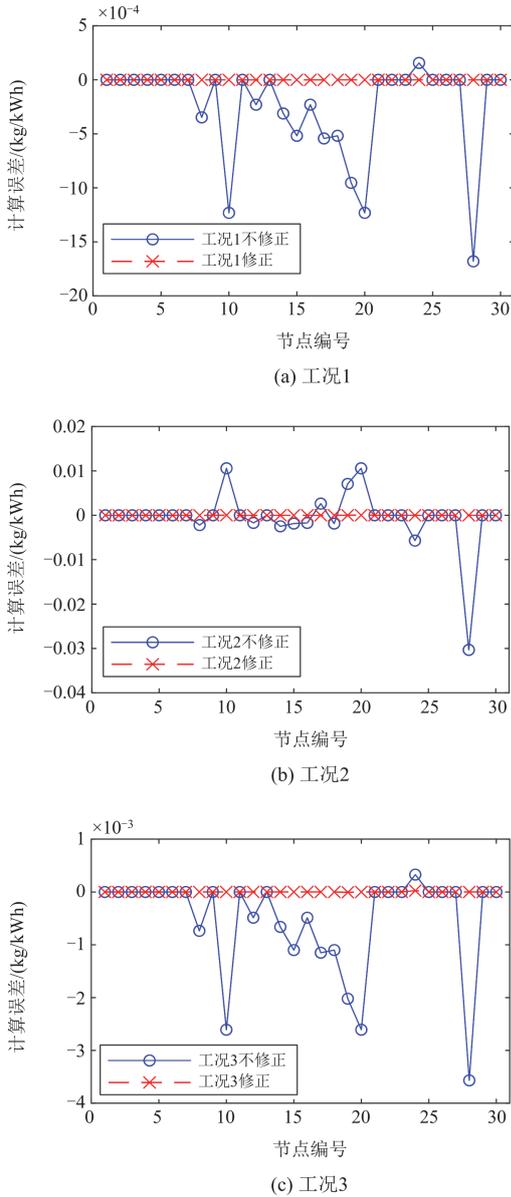


图5 3种工况下修正前后误差对比

Fig. 5 Comparison of errors before and after correction under three conditions

0.0817%、-5.1163%~1.6033%、-0.6304%~0.1720%，而考虑线路参数修正后，3种工况下各节点碳排放因子计算相对误差分别为0、-0.0013%~0.0039%、-0.0013%~0.0131%。3种工况下，相比于不考虑线路参数修正的节点碳排放因子相对误差，考虑线路参数修正后的相对误差均显著减小，验证了所提方法在不同工况下的有效性。

需要说明的是，节点22、23连接碳排放强度为0的电源，而节点21的注入功率均来自节点22，因此3个节点的碳排放因子均为0，以上相对误差的

计算中忽略了这3个节点。

4.2 线路参数变化程度的影响分析

比较4.1节中的3种工况来分析线路参数变化程度对节点碳排放因子的影响。首先计算算例网络灵敏度矩阵 G 的最大奇异值为0.3564，同时获得对应最大奇异值的右奇异向量 v_{max} 。

对比工况1和工况2，两者 $\|\Delta\Phi_b\|_2$ 相同，均为0.3202，但方向不同。 $\Delta\Phi_b$ 方向则可通过余弦相似度 F_{cs} 来量化，如式(21)所示。

$$F_{cs} = \frac{\Delta\Phi_b \circ v_{max}}{\|\Delta\Phi_b\|_2 \cdot \|v_{max}\|_2} \quad (21)$$

根据式(21)，工况1中 $\Delta\Phi_b$ 与 v_{max} 的余弦相似度 F_{cs} 为0.0046，而工况2则为0.3。而根据4.1节计算得到的结果，工况1和工况2中 $\|\Delta e_n\|_2$ 分别为0.0028、0.0353。即在相同二范数下，由于工况2中 $\Delta\Phi_b$ 更接近 v_{max} 的方向，因此产生的节点碳排放因子计算误差二范数更大。

其次，工况1和工况3中 $\Delta\Phi_b$ 与 v_{max} 之间的余弦相似度 F_{cs} 均为0.0046，工况3中 $\|\Delta\Phi_b\|_2$ 为0.6404，均大于工况1，产生的 $\|\Delta e_n\|_2$ 为0.0060，也大于工况1，表明 $\Delta\Phi_b$ 方向相同时， $\|\Delta\Phi_b\|_2$ 越大， $\|\Delta e_n\|_2$ 越大。

为进一步验证以上规律，分别设定 $\|\Delta\Phi_b\|_2$ 为0.3202、0.6404， $\Delta\Phi_b$ 与 v_{max} 的余弦相似度在0.05~0.55范围内变化，计算得到 $\|\Delta e_n\|_2$ 如图6所示。进一步证明，在相同的余弦相似度下， $\|\Delta\Phi_b\|_2$ 越大，节点碳排放因子增量向量 $\|\Delta e_n\|_2$ 也越大；在相同的 $\|\Delta\Phi_b\|_2$ 下，余弦相似度越大， $\|\Delta e_n\|_2$ 越大，即线路参数变化方向与 v_{max} 越接近，按照所提方法修正线路参数，节点碳排放因子误差减小得越多。需要说明的是，由于线路老化导致线路阻抗增大时，导纳减小， $\Delta\Phi_b$ 中各元素均为负，向量方向受限，与 v_{max}

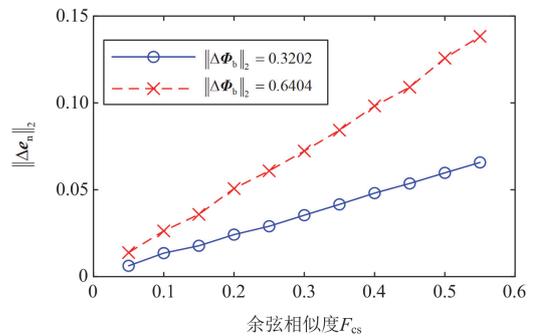


图6 $\|\Delta\Phi_b\|_2$ 与 $\|\Delta e_n\|_2$ 的关系

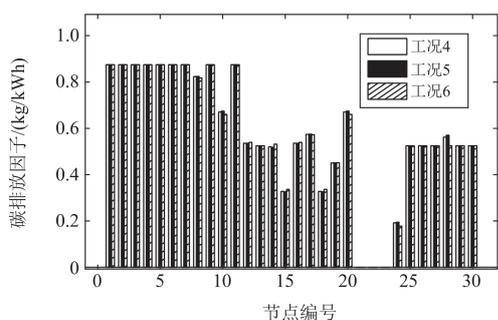
Fig. 6 Relationship between $\|\Delta\Phi_b\|_2$ and $\|\Delta e_n\|_2$

的余弦相似度 F_{cs} 无法等于 1(即完全同向)。

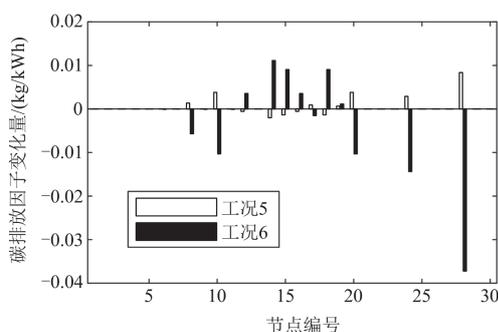
4.3 无功功率对节点碳排放因子的影响分析

在实际电力系统中,无功功率通过影响节点电压、支路电流及网络损耗,将间接改变有功潮流和节点碳排放因子分布情况。因此,本节分析无功功率对节点碳排放因子的影响。以图 3 所示系统的负荷情况为工况 4,分别对所有节点无功负荷增加、减少 20%,形成工况 5、6。3 种工况下,系统有功损耗分别为 2.8981、3.1563、2.3292 MW,无功损耗分别为 10.5830、11.4442、8.6893 Mvar。

3 种工况下节点碳排放因子分布情况如图 7(a)所示,工况 5、6 节点碳排放因子相对于工况 4 的变化幅度如图 7(b)所示。可以看出,无功功率的变化改变了节点碳排放因子的分布情况。工况 5 相比于工况 4 总有功网损增加,导致电源需要提供更多有功功率来弥补网损,导致各节点碳排放因子增大。而工况 6 的情况则相反,各节点碳排放因子减小。



(a) 不同无功负荷下节点碳排放因子分布



(b) 不同无功负荷下节点碳排放因子变化

图 7 不同无功负荷工况下节点碳排放因子分布及变化

Fig. 7 Distribution and changes of nodal carbon emission factors under different reactive power load conditions

5 结论

针对电网中线路参数变化导致碳排放计算不准确的问题,提出了一种考虑线路参数变化的电力系统碳排放因子计算方法。该方法通过改进牛顿-拉夫逊法对线路参数变化进行修正,从而提高了节

点碳排放因子计算的准确性。网络节点碳排放因子向量对线路参数变化因子向量的灵敏度矩阵的最大奇异值可用于表征所提方法改善误差的效果。改进 IEEE6 机 30 节点系统的算例结果表明,所提方法在不同线路参数变化程度的工况下均能较为准确地获得节点碳排放因子,线路参数变化因子向量与灵敏度矩阵最大奇异值对应的右奇异向量方向越相近,所提方法改善节点碳排放因子计算误差的效果越显著。

参考文献

- [1] 朱永胜, 张世博, 徐其迎, 等. 计及 LCA 碳排放的源荷双侧合作博弈调度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(2): 48-58.
ZHU Yongsheng, ZHANG Shibo, XU Qiyong, et al. Source load bilateral cooperative game scheduling considering LCA carbon emissions[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(2): 48-58.
- [2] 李家桐, 谢宁, 王承民, 等. 基于 CHP 机组碳排放分析的综合能源系统低碳调度优化方法[J]. 智慧电力, 2024, 52(6): 31-37, 83.
LI Jiatong, XIE Ning, WANG Chengmin, et al. Low-carbon dispatch optimization method for integrated energy system based on carbon emission analysis of CHP units[J]. Smart Power, 2024, 52(6): 31-37, 83.
- [3] 袁家海, 胡玥琳, 张健. 基于改进三阶段松弛测量-数据包络模型的火电上市公司碳排放效率评估研究[J]. 发电技术, 2024, 45(3): 458-467.
YUAN Jiahai, HU Yuelin, ZHANG Jian. The carbon emission efficiency of China's listed thermal power companies: an improved three-stage slack based measurement envelopment analysis model[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(3): 458-467.
- [4] 刘天蔚, 边晓燕, 吴珊, 等. 电力系统碳排放核算综述与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(4): 176-187.
LIU Tianwei, BIAN Xiaoyan, WU Shan, et al. Overview and prospect of carbon emission accounting in electric power system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(4): 176-187.
- [5] 张安安, 周奇, 李茜, 等. “双碳”目标下火电厂 CO₂ 计量技术研究现状与展望[J]. 发电技术, 2024, 45(1): 51-61.
ZHANG Anan, ZHOU Qi, LI Qian, et al. Research status and prospect of CO₂ accounting technology in thermal power plants under the goal of dual carbon[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(1): 51-61.
- [6] 汪超群, 陈懿, 迟长云, 等. 基于潮流分布矩阵的电力系统碳排放流计算方法[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(12): 4835-4842.
WANG Chaoqun, CHEN Yi, CHI Changyun, et al. Calculation method of carbon emission stream of power system based on power flow distribution matrix[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(12): 4835-4842.

- [7] 蔡新雷, 董锴, 崔艳林, 等. 考虑碳排放流与需求响应的电力系统两阶段优化调度[J]. 电力工程技术, 2024, 43(5): 81-90.
CAI Xinlei, DONG Kai, CUI Yanlin, et al. Two-stage optimal dispatch of power system considering carbon emission flow and demand response[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(5): 81-90.
- [8] 刘昱良, 李姚旺, 周春雷, 等. 电力系统碳排放计量与分析方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(6): 2220-2236.
LIU Yuliang, LI Yaowang, ZHOU Chunlei, et al. Overview of carbon measurement and analysis methods in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(6): 2220-2236.
- [9] 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, 35.
ZHOU Tianrui, KANG Chongqing, XU Qian Yao, et al. A preliminary study on the theory of carbon emission flow analysis in electric power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 38-43, 35.
- [10] 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. A preliminary study on the theory of carbon emission flow analysis in electric power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 44-49.
- [11] 陈达. 电力系统碳排放因素分解及网络流分析研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
CHEN Da. Study on factor decomposition and network flow analysis of carbon emission in power system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [12] KHOSRAVI M, MONSEF H, ALIABADI H M. Network loss management and allocating the transmission losses to loads and generation units according to their transactions[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(8): 1540-1551.
- [13] 李岩松, 刘启智, 张朕搏, 等. 基于电网功率分布的碳排放流计算方法[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 840-844.
LI Yansong, LIU Qizhi, ZHANG Zhenbo, et al. Algorithm of carbon emission flow based on power distribution algorithm of carbon emission flow based on power distribution[J]. Power System Technology, 2017, 43(3): 840-844.
- [14] 陈庆澳, 高强, 毛泽民, 等. 计及网损与新能源出力的电力系统碳排放流分析[J]. 天津理工大学学报, 2025, 41(3): 46-54.
CHEN Qing'ao, GAO Qiang, MAO Zemin, et al. Analysis of carbon emission flow in power system considering network loss and new energy output[J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2025, 41(3): 46-54.
- [15] 龚昱, 蒋传文, 李明炜, 等. 基于复功率潮流追踪的电力用户侧碳排放计量[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 113-117.
GONG Yu, JIANG Chuanwen, LI Mingwei, et al. Carbon emission calculation on power consumer side based on complex power flow tracing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 113-117.
- [16] WU Xinping, YANG Wei, ZHANG Ning, et al. A distributed computing algorithm for electricity carbon emission flow and carbon emission intensity[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2024, 9(2): 138-146.
- [17] 杨毅, 易文飞, 王晨清, 等. 基于碳流追踪的电力系统源网荷低碳经济调度[J]. 电力建设, 2023, 44(5): 108-119.
YANG Yi, YI Wenfei, WANG Chenqing, et al. Low-carbon and economic optimal scheduling of power system source-grid-load based on carbon flow tracing method[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(5): 108-119.
- [18] 于东民, 王晓鹏, 孙钦斐, 等. 基于VPP碳流计算的多目标多时间尺度优化调度[J]. 智慧电力, 2024, 52(1): 30-38.
YU Dongmin, WANG Xiaopeng, SUN Qinfei, et al. Multi-objective multi-timescale optimal scheduling based on VPP carbon flow calculation[J]. Smart Power, 2024, 52(1): 30-38.
- [19] 张静, 毕天姝, 刘灏. 电力系统状态估计精度综合评价与分析体系[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(20): 12-24.
ZHANG Jing, BI Tianshu, LIU Hao. A comprehensive evaluation and analysis system for accuracy of power system state estimation[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(20): 12-24.
- [20] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw Hill, 1994.
- [21] 戴雪婷, 李辉, 何柏娜, 等. 配电网拓扑分析与线路参数辨识研究[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(4): 46-56.
DAI Xueting, LI Hui, HE Baina, et al. Research on topology analysis and line parameter identification of distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(4): 46-56.
- [22] SKOGESTAD S, POSTLETHWAITE I. Multivariable feedback control: analysis and design[M]. New York: John Wiley & Sons, 2005.
- [23] FERRERO R W, SHAHIDEHPOUR S M, RAMESH V C. Transaction analysis in deregulated power systems using game theory[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(3): 1340-1347.

收稿日期: 2025-02-20; 修回日期: 2025-07-31

作者简介:

郑熠辰(2003—), 女, 研究方向为新能源电力系统计量及分析; E-mail: zyc.29@cjlu.edu.cn

郑迪(1991—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为新能源电力系统计量及分析; E-mail: di.zh@cjlu.edu.cn

赵璇孜(2003—), 女, 研究方向为新能源电力系统计量及分析. E-mail: zxz200301@163.com

(编辑 张颖)