

基于潮流追踪的用户碳排放水平计算与评估方法

杨晓林^{1*}, 陈虹¹, 袁琪¹, 卢陈越¹, 马煜承², 王琦²

(1. 国网江苏省电力有限公司 常州供电分公司, 江苏 常州 213003;

2. 东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096)

Calculation and Evaluation Method of User Carbon Emission Level Based on Power Flow Tracking

YANG Xiaolin^{1*}, CHEN Hong¹, Yuan Qi¹, LU Chenyue¹, MA Yucheng², WANG Qi²

(1. Changzhou Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Changzhou 213003, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The characteristics of new power system user-side ubiquitous resources that are scattered in distribution, large in number, small in capacity and stochastic in nature create difficulties for user-side fine-grained carbon emission calculations. In order to accurately measure and assess the level of user carbon emissions in the power system, the sources of the power flows in each node of the power system is first analyzed through the power flow tracking method to determine the indirect carbon emission responsibility of each node. Then, the distribution of carbon flows in the power system is obtained by combining the carbon intensity of different sources according to the principle of proportional sharing. Finally, through the proposed load-side indicators of various electric power emissions, the cleanliness of different nodes is assessed so as to guide the users to use cleaner energies more often in order to reduce their own carbon emissions. And the real power system data are used for example validation to verify the rationality and usability of the proposed method.

Key words: power flow tracking; carbon emission data; carbon footprint tracking; carbon emission level assessment

摘 要: 新型电力系统用户侧泛在资源分布零散、数量多、容量小以及随机性大的特点,给用户侧精细化碳排放计算造成了困难。为了准确衡量与评估电力系统中用户碳排放水平,首先通过潮流追踪方法分析了电力系统各节点潮流的来源,确定了各节点的间接碳排放责任;然后依照比例共享原则结合不同来源的碳排放强度得到了电力系统碳流分布情况;最后通过提出的负荷侧各项电力

碳排放指标,评估了不同节点的清洁程度从而引导用户更多地使用清洁能源以降低自身碳排放。并采用实际电力系统数据进行算例验证,验证了所提方法的合理性与可用性。

关键词: 潮流追踪; 碳排放数据; 碳足迹追踪; 碳排放水平评估

0 引言

随着近年来电力系统向低碳化转型以及分布式电源、分布式储能技术的发展,部分用户从传统的单一能源消费者转变为同时兼具能源供给能力的产消者。这些用户侧泛在资源分布零散、数量多、容量小以及随机性大的特点^[1-2],加剧了电网公司在用户碳排放量溯源、计算与评估上的困境。因此本文提出了基于潮流追踪技术^[3]的用户碳排放水平计算与评估方法,对大电网的碳流分布进行有效追踪^[4-5]。同时,构建基于用户侧能源信息的碳排放指标体系,实现对用户碳排放水平的有效评估。

潮流追踪技术目前在大电网分析与控制领域中的研究较多,包括输电成本分摊方法^[6]、需求响应^[7]和网损分摊^[8]等。文献[9]提出结合潮流追踪法、功率灵敏度法与反向等量调整法对控制节点组进行相应控制进而快速消除线路过载避免连锁故障。文献[10]基于潮流追踪算法提出一种发电机功率非均匀分配方式以降低网络的临界同步耦合强度,改善电网同步性能与鲁棒性。文献[11]针对导致潮流方程无解的支路型故障,提出了一种基于潮流追踪方法的潮流解恢复控制策

基金项目: 国网江苏省电力有限公司科技项目(J2022104)
State Grid Jiangsu Electric Power Company (J2022104)

略。近年来,潮流追踪技术在碳电领域中的研究应用越来越被关注,文献[12]基于发、用电企业的电力生产和消费数据、电力潮流分布数据以及绿色电力交易数据,构建了一种企业用电碳排放因子计算模型,实现用电侧碳排放因子的实时更新。文献[13]建立了基于气、热系统叠加特性的动态潮流模型,对系统进行动态潮流追踪,形成了用户侧精细化碳指标。

在电力系统碳排放水平评估方面,各个研究尚未达成共识。文献[14]提出了随时间变化的电网碳排放因子测算方法,并分析了电网碳排放因子的日内和季节性变化。文献[15]提出利用灵敏度分析确定节点负荷变化对应的边际机组,进而量化用户的用电碳排放责任。文献[16-17]提出了初步的碳流理论架构,文献[18]基于该理论提出了电力碳排放区域分摊的基本原则。文献[19]将碳排放流理论拓展到综合能源系统,揭示了能源网络中碳排放流的基本特征与规律。

基于前人的研究,本文提出了一种基于潮流追踪技术的用户碳排放水平计算与评估方法。针对现有技术难以对电网碳足迹进行准确追踪等问题,创新性地提出了基于潮流追踪理论的电网碳追踪技术,构建碳流网络模型与理论框架。所提的创新碳排放指标体系,可助力相关部门、政府对于电力系统进行合理的碳排放的量化评估。

1 潮流追踪方法

电力网络源流之间可能存在一对多或多对一的供求关系,而某一源流对之间的电气供求路径是由一系列特定剖分子支路以链式的结构构成。记与原始有向图 G 对应顶点全集合 V 的邻接终点矩阵为 $\mathbf{R}^{(0)}$,作集合 V 的 $n-1$ 个子集 $V_i, i=1, 2, \dots, n-1$ 。各子集元素个数为 $n-i$,各子集满足关系 $V \supset V_1 \supset V_2 \supset \dots \supset V_{n-1}$,且集合 V 有相应的一个 $n-i$ 阶方阵 $\mathbf{R}^{(i)} = [\mathbf{r}_{jk}^{(i)}]$,由 $\mathbf{R}^{(i)} = \mathbf{R}^{(i-1)} \mathbf{R}^{(0)}$ 递推得到。递推过程遵守如下运算规则:若 $V_{i-1} - V_i = \{v_1\}$,即第 i 次从 V_{i-1} 中去掉一个顶点(节点 v_1)得到 V_i ,则:

$$\mathbf{r}_{jk}^{(i)} = \mathbf{r}_{jk}^{(i-1)} \vee \mathbf{r}_{j1}^{(i-1)} * \mathbf{r}_{1k}^{(i-1)}, v_j, v_k \in V_i \quad (1)$$

式中: $*$ 为顶点(节点)的相连运算,代表顶点序列满足结合律但不满足交换律; $\vee$ 为条件“或”,满足结合律、交换以及两种运算间的分配律。

通过三步进行潮流追踪^[20]:顺流和逆流追踪将网络损失双向分摊至负荷侧和电源侧从而将有损网络转化为无损网络;通过直流潮流方程对无损网络进行潮流分析求解;通过有功功率的逆流潮流追踪得到节点负荷、支路潮流分布以及发电机注入网络的功率分布。

首先通过双向网损分摊可以将支路损耗分摊至电源与负荷两侧如式(2)~(5)所示:

$$\Delta S_{Lk} = - \sum_{i=n+1}^{n+m} \frac{\beta S_{Gi}}{S_i} [\mathbf{A}_d^{-1}]_{ik} S_{Lk} \quad (2)$$

$$\Delta S_{Gk} = \sum_{i=n+1}^{n+m} \frac{(1-\beta) S_{Li}}{S_i} [\mathbf{A}_u^{-1}]_{ik} S_{Gk} \quad (3)$$

$$S'_{Lk} = S_{Lk} + \Delta S_{Lk} \quad (4)$$

$$S'_{Gk} = S_{Gk} - \Delta S_{Gk} \quad (5)$$

式中: ΔS_{Lk} 和 ΔS_{Gk} 分别为网损算至节点 k 负荷侧和发电侧的功率变化量; S_{Lk} 和 S_{Gk} 分别为节点 k 的负荷功率和发电机注入功率; β 为网络损耗分摊至负荷部分占比; $S_{Gi} (i \in [n+1, n+m])$ 为节点 n 与其下游节点构成的支路损耗等效成的虚拟发电机的输出功率; S_i 为节点 n 的各个下游节点的流过功率; $\mathbf{A}_d$ 为 $(n+m) \times (n+m)$ 阶的下游分布矩阵,组成元素为节点 n 流入功率占被流入节点总流入功率的比例的相反数; $S_{Li} (i \in [n+1, n+m])$ 为节点 k 与其下游节点构成的支路损耗等效成的虚拟负荷; S_i 为流过节点 i 的上游节点总功率; $\mathbf{A}_u$ 为 $(n+m) \times (n+m)$ 阶的上游分布矩阵,组成元素为上游节点流入节点 k 的功率占上游节点流过功率的比例的相反数; S'_{Lk} 和 S'_{Gk} 分别为网络的净负荷和净出力。

然后经过网络损失的双向分摊可以得到无损网,通过求解式(6)所示的直流潮流方程进行潮流计算。

$$\mathbf{P}'_k = \mathbf{P}'_{Gk} - \mathbf{P}'_{Lk} = \mathbf{B} \boldsymbol{\theta}'_k \quad (6)$$

式中: $\boldsymbol{\theta}'_k$ 为节点 k 的电压相角; $\mathbf{P}'_k$ 为节点注入功率; $\mathbf{P}'_{Gk}$ 和 $\mathbf{P}'_{Lk}$ 分别为节点 k 的电源有功净出力和有功净负荷; $\mathbf{B} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 是以支路电抗组成的节点导纳矩阵。

最后根据逆流追踪重新计算得到节点负荷、支路潮流中各发电机注入网络的功率占比。

2 基于潮流追踪的用户碳排放水平计算与评估方法

碳排放因子计算方法如图 1 所示。

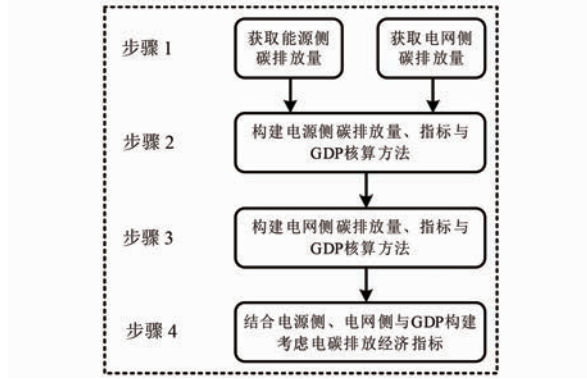


图1 结合电力与经济的电网碳排放指标计算流程

Fig.1 Calculation process of grid carbon emission indicators combining electricity and economy

碳排放因子计算如式(7)所示:

$$Em_{grid,i} + \sum_j (EF_{grid,j} \times E_{imp,j,i}) + \frac{\sum_j (EF_k \times E_{imp,k,i})}{E_{grid,i} + \sum_j E_{imp,j,i} + \sum_k E_{imp,k,i}} \quad (7)$$

式中: $EF_{grid,i}$ 为电网 i 的平均 CO_2 排放因子; $Em_{grid,i}$ 为区域电网 i 覆盖的地理范围内发电产生的 CO_2 直接排放量; $EF_{grid,j}$ 为向区域电网 i 净送出电量的区域电网 j 的平均 CO_2 排放因子; $E_{imp,j,i}$ 为区域电网 j 向区域电网 i 净送出的电量; EF_k 为向区域电网 i 净出口电量的 k 国发电平均 CO_2 排放因子; $E_{imp,k,i}$ 为 k 国向区域电网 i 净出口的电量; $E_{grid,i}$ 为区域电网 i 覆盖的地理范围内年度总发电量; i 为东北、华北、华东、华中、西北和南方区域电网之一; j 为向区域电网 i 净送出电量的其他区域电网; k 为向区域电网 i 净出口电量的其他国家。

由前述得到的节点负荷、支路潮流中各主网馈线输入的功率结合主网馈线碳排放强度 E_G , 即可计算得到配电网中的碳流分布情况, 如下式所示:

$$R_{Li} = \frac{P'_{Li}}{P'_i} \sum_{k=1}^n [A_u'^{-1}]_{ik} P'_{Gk} E_G \quad (8)$$

$$R_{ij} = \frac{P'_{ij}}{P'_i} \sum_{k=1}^n [A_u'^{-1}]_{ik} P'_{Gk} E_G \quad (9)$$

$$R_{Gk} = Re[S_{Gk}] E_G \quad (10)$$

$$\Delta R_{Gk} = Re[\Delta S_{Gk}] E_G \quad (11)$$

式中: R_{Li} 为负荷 i 的碳流率, 物理意义为负荷 i 每小时用电产生的等效到发电侧的碳排放量;

R_{ij} 为支路 $i-j$ 的碳流率, 物理意义为单位时间内随有功潮流通过的碳流量; R_{Gk} 为节点 k 注入配电网的碳流率; ΔR_{Gk} 为节点 k 承担的网损碳流率。

用户碳排放水平评价指标如表1所示, 用于评价实际电网中的用户用碳表现。其中: C_{load} 为用户负荷实时碳流率; P_{load} 为用户负荷实时有功功率; EC_{load} 为系统总体碳排放量; E_{load} 为系统总体用电量; EL_{Dloss} 为配网线损耗电量; EL_{DI} 为配网线路传输电量; ECL_{lpos} 为线路正向输电损耗; ECL_{lrev} 为线路反向输电损耗; E_{wind} 、 E_{light} 、 E_{water} 分别为风力、光伏、水力发电量; E_{total} 为系统总体发电量; P_{wind} 、 P_{light} 、 P_{water} 分别为风力、光伏、水力发电出力; P_{total} 为系统出力。 C_{load} 、 P_{load} 为实际量测量, 由实时监测获得; EC_{load} 、 E_{load} 、 EL_{Dloss} 、 EL_{DI} 、 ECL_{lpos} 、 ECL_{lrev} 、 E_{wind} 、 E_{light} 、 E_{water} 、 E_{total} 、 P_{wind} 、 P_{light} 、 P_{water} 、 P_{total} 为统计量, 由系统统计获得。

表1 用户碳排放水平评价指标

Tab.1 User carbon emission level evaluation index

指标类型	指标说明	计算方法
负荷指标	实时负荷碳排放因子	C_{load}/P_{load}
	系统负荷碳排放因子	EC_{load}/E_{load}
电网指标	配网线损率	EL_{Dloss}/EL_{DI}
	系统线路损耗碳排放	$ECL_{lpos} + ECL_{lrev}$
系统指标	清洁能源发电量占比	$(E_{wind} + E_{light} + E_{water})/E_{total}$
	清洁能源出力占比	$(P_{wind} + P_{light} + P_{water})/P_{total}$

3 算例分析

本文对东部省份某区域 220 kV 以上的电网节点进行拓扑构建、节点与线路碳排放量综合评估。其中 SCWB 与 QTB 两节点存在区外来电, 区外来电碳排放因子取 2020 年东部省网平均碳排放因子 700 g/kWh, 其他均为区域内部自发电厂供电, 其碳排放因子根据厂站碳排放监测与分析数据进行求解。本算法已部署在该区域碳排放中心, 对该区域的碳排放统计与减排实际工作进行指导。

分析可以得到电网碳排放综合态势评估结果, 如图2所示, 节点的颜色深浅与线路的粗细代表不同的节点负荷碳排放量和线路承载碳排放量的大小。

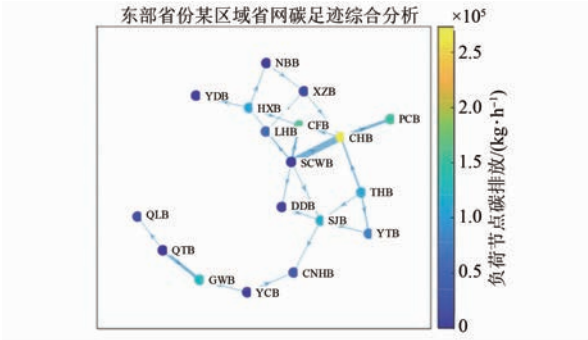


图 2 东部省份某区域省网碳足迹综合分析

Fig. 2 Comprehensive analysis of the carbon footprint of a regional provincial network in eastern province

东部省份某区域电网中碳排放量最高的负荷节点为 CHB,碳排放量为 272 983 kg/h;碳排放量最高的发电节点为 SCWB,碳排放量为 579 600 kg/h;承载碳排放最高的线路为 SCWB-CHB,碳排放量为 334 327 kg/h。

以 THB 为例,追踪其发电出力及等效碳排放向周边节点的传递过程,THB 的总碳排放量为 301 370 kg/h。结果如图 3 及表 2 所示。线路承载比例指源节点注入某一线路的碳排放占源节点总碳排放量的比例;负荷节点排放比例指某一节点负荷对应的碳排放中来自源节点的碳排放的占比。

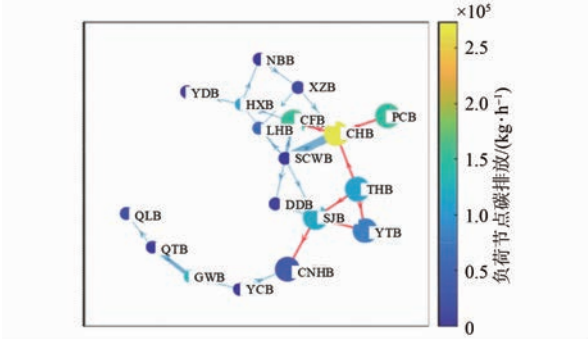


图 3 THB 源-荷追踪结果

Fig. 3 THB source-load tracking results

由表 2 可以看出,该发电节点的碳排放主要流向 THB 自身负荷与 YTB 负荷节点,占比分别为 36.20% 与 23.45%。

以线路 SCWB-CHB 为例,追踪其上承载的潮流及等效碳排放的来源节点与目标节点,结果如图 4 和表 3 所示。

由表 3 可以看出,该线路主要碳流来源是 SCWB 的区外来电;主要碳流目标为 CHB、PCB 以及 CFB 等地的负荷。

表 2 THB 源-荷追踪结果

Tab. 2 THB source-load tracking results

%

源节点	所经线路	线路承载比例	荷节点	负荷节点排放比例
THB	THB-SJB	15.32	CNHB	1.02
	CHB-CFB	0.44	SJB	12.52
	THB-CHB	26.82	THB	36.20
	SJB-YTB	1.78	CFB	0.44
	THB-YTB	21.66	CHB	17.13
	CHB-PCB	9.25	YTB	23.45
	SJB-CNHB	1.02	PCB	9.25

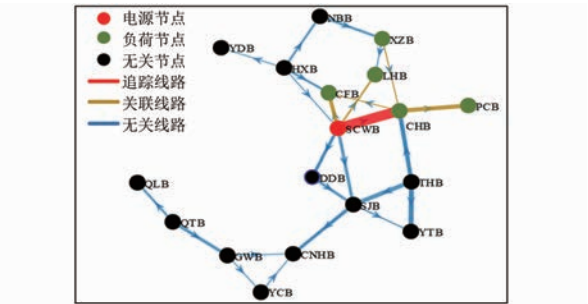


图 4 线路双向追踪结果

Fig. 4 Line bidirectional trace results

表 3 线路源-荷双向追踪结果

Tab. 3 Line source-load bidirectional tracking results

kg·h⁻¹

线路	源节点	源节点碳排放	荷节点	荷节点碳排放
SCWB-CHB	SCWB	330 458.52	CFB	5 482.26
	HXB	3 868.78	CHB	213 393.61
			PCB	115 451.42

以东部省份某区域一天内负荷平均功率与平均碳排放强度为例,可以计算负荷度电碳排放,如图 5 所示。

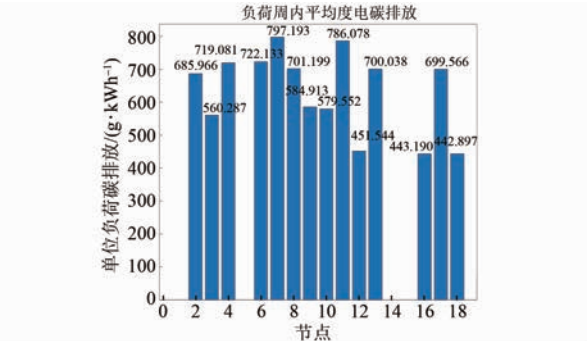


图 5 负荷节点清洁程度

Fig. 5 Load node cleanliness

将负荷按度电碳排放结果进行清洁程度评

估,分为以下几类:非常清洁(400~550 g/kWh):节点 12(YDB)、节点 18(HXB)、节点 16(XZB);一般清洁(550~710 g/kWh):节点 9(CFB)、节点 3(LHB)、节点 10(CHB)、节点 13(PCB)、节点 2(DDB)、节点 17(GWB)、节点 8(QLB);不清洁(>710 g/kWh):节点 4(CNHB)、节点 6(SJB)、节点 7(THB)、节点 11(YTB)。

以江水源能源站为例,计算典型大功率用户的用能碳排放追踪结果,从而得出用户的整体用能清洁程度如表 4 所示。

表 4 江水源能源站清洁程度

Tab. 4 Cleanliness of Jiangshuiyuan energy station

用户名称	上级变电站/ (220 kV)	日内度 电碳排	g·kWh ⁻¹
			清洁程度
江水源 7 号能源站	CNHB	712.67	不清洁
江水源 3 号能源站	CNHB	712.67	不清洁
江水源 6 号能源站	SJB	713.98	不清洁

4 结语

本文针对现有技术难以对电网碳足迹进行准确追踪等问题,创新性地提出了基于潮流追踪理论的电网碳追踪技术,提出了碳流网络的建模方法与理论框架,构建了电网节点、支路、网络碳流模型。提出了统一各维度与精度的电碳监测数据的方案,分行业、地区和时间对区域能源系统整体能碳数据进行监测。从源头引入,分析碳排放在一次能源-发电机组-输电网-配电网-用户负荷中的运行态势,在此基础上,结合行业企业数据,分析最终落点碳排放清洁消纳指标。从而计算区域内各类型企业的碳排放,定量测度系统碳排放总量和强度的总体水平。

参考文献

- [1] 张俊,高文忠,张应晨,等. 运行于区块链上的智能分布式电力能源系统:需求、概念、方法以及展望[J]. 自动化学报, 2017, 43(9): 1544-1554.
ZHANG J, GAO W Z, ZHANG Y C. Blockchain based intelligent distributed electrical energy systems: Needs, concepts, approaches and vision [J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(9): 1544-1554.
- [2] RAHIMI F, IPAKCHI A, FLETCHER F. The changing electrical landscape: End-to-end power system operation under the transactive energy

- paradigm [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2016, 14(3): 52-62.
- [3] 李卫东,孙辉,武亚光. 潮流追踪迭代算法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(11): 39-43.
LI W D, SUN H, WU Y G. Tide tracking iterative algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(11): 39-43.
- [4] 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 Y, JIANG C W, LI M W, et al. Carbon emission calculation on power consumer side based on complex power flow tracking [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 113-117.
- [5] 毕瀚文,范晓舟,肖海,等. 支撑电力系统全环节碳流追踪的节点导纳矩阵算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(20): 7881-7892.
BI H W, FAN X Z, XIAO H, et al. A node admittance matrix algorithm to support the carbon emission tracing model of whole power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(20): 7881-7892.
- [6] 曹昉,舒雅丽,李成仁,等. 混合 Copula 概率潮流追踪输电固定成本分摊法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(5): 111-119.
CAO F, SHU Y L, LI C R, et al. Hybrid Copula probabilistic power flow tracing method for allocation of fixed transmission cost [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(5): 111-119.
- [7] 刘开欣,杨卫红,王丹,等. 基于配网潮流追踪的可再生能源有功调度与节点集群需求响应策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(19): 5714-5726+5928.
LIU K X, YANG W H, WANG D, et al. Research on renewable energy scheduling and node aggregated demand response strategy based on distribution network power flow tracking [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5714-5726+5928.
- [8] 刘文颖,陈鑫鑫,王方雨,等. 基于图论和潮流追踪的网损分摊方法[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2020, 47(5): 1-9.
LIU W Y, CHEN X X, WANG F Y, et al. Network loss allocation based on graph theory and power flow tracking [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2020, 47(5): 1-9.

- [9] 赵开联, 唐岚, 杨婧, 等. 基于潮流追踪和功率灵敏度的线路过载紧急控制策略[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(11): 104-113.
ZHAO K L, TANG L, YANG J, et al. Overload emergency control strategy for line based on power flow tracing and power sensitivity [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(11): 104-113.
- [10] 邹艳丽, 高正, 梁明月, 等. 基于潮流追踪的电网同步性能优化及鲁棒性分析[J]. 计算物理, 2020, 37(5): 623-630.
ZOU Y L, GAO Z, LIANG M Y, et al. Optimization of synchronization performance and robustness analysis in power grids based on power tracing [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2020, 37(5): 623-630.
- [11] 李佳伦, 薛安成. 基于停运连续潮流和双向潮流追踪的潮流解恢复控制方法[J]. 智慧电力, 2020, 48(8): 70-75.
LI J L, XUE A C. Power flow solvability recovery control method based on outage-continuation power flow and bi-directional power flow tracing [J]. Smart Power, 2020, 48(8): 70-75.
- [12] 别佩, 林少华, 王宁, 等. 基于电力潮流追踪与绿色电力交易的企业用电侧碳排放因子核算[J]. 南方电网技术, 2023, 17(6): 34-43.
BIE P, LIN S H, WANG N, et al. Calculation of carbon emission factors on the corporate electricity consumption side based on power flow tracing and green power trading [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(6): 34-43.
- [13] 王梦雪, 赵浩然, 刘春阳, 等. 基于叠加原理的综合能源系统动态潮流追踪及碳熵分析[J/OL]. 电力系统自动化, 2023-03-28. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20230328.0903.002.html>.
WANG M X, ZHAO H R, LIU C Y, et al. Dynamic energy flow tracking and carbon entropy analysis of integrated energy system based on superposition principle [J/OL]. Automation of Electric Power Systems, 2023-03-28. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20230328.0903.002.html>.
- [14] KHAN I, JACK M W, STEPHENSON J. Analysis of greenhouse gas emissions in electricity systems using time-varying carbon intensity [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 184: 1091-1101.
- [15] 周全. 节能减排环境下电力系统碳排放责任分摊机制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
ZHOU Q. The study of carbon emission obligation allocation in power system [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- [16] 陈晓科, 周天睿, 李欣, 等. 电力系统的碳排放结构分解与低碳目标贡献分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(2): 18-25.
CHEN X K, ZHOU T R, LI X, et al. Structure identification of CO₂ emission for power system and analysis of its low-carbon contribution [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(2): 18-25.
- [17] 周天睿, 康重庆, 徐耀乾, 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 T R, KANG C Q, XU Y Q, et al. Preliminary theoretical investigation on power system carbon emission flow [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 38-43+85.
- [18] 李保卫, 胡泽春, 宋永华, 等. 电力碳排放区域分摊的原则与模型[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 12-18.
LI B W, HU Z C, SONG Y H, et al. Principle and model for regional allocation of carbon emission from electricity sector [J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 12-18.
- [19] CHENG Y, ZHANG N, WANG Y, et al. Modeling carbon emission flow in multiple energy systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 10(4): 3562-3574.
- [20] 朱星旭, 韩学山, 杨明, 等. 含分布式光伏与储能配电网时变最优潮流追踪的分布式算法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2644-2658.
ZHU X X, HAN X S, YANG M, et al. A distributed algorithm for time-varying optimal power flow tracking in distribution networks with photovoltaics and energy storage [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2644-2658.

收稿日期:2023-08-18

收到修改稿日期:2023-10-08

作者简介:

* 通信作者:杨晓林(1983-),男,学士,高级工程师,研究方向为电力数字化技术,网络安全管理,1005619496@qq.com。

Calculation and Evaluation Method of User Carbon Emission Level Based on Power Flow Tracking

YANG Xiaolin^{1*}, CHEN Hong¹, YUAN Qi¹, LU Chenyue¹, MA Yucheng², WANG Qi²

(1. Changzhou Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., 213003, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing, 210096, China)

Key words: power flow tracking; carbon emission data; carbon footprint tracking; carbon emission level assessment

The characteristics of new power system user-side ubiquitous resources that are scattered in distribution, large in number, small in capacity and stochastic in nature create difficulties for user-side fine-grained carbon emission calculations. Carbon flow analysis method is a carbon flow tracking method based on power distribution, the basic idea is to determine the power distribution in the power grid by using the downstream or countercurrent tracking algorithm on the basis of the power flow results, and then combine with the carbon emission intensity of the units to fairly distribute the carbon emissions from the power generation side to the loads of each node, the power of each branch and the network loss, so as to achieve accurate tracking and tracing of the specific flow of carbon emissions.

Network loss is an important factor affecting carbon emissions. The carbon flow calculation method based on DC power flow will produce a large calculation error when facing the actual lossy network. Power plants use the grid to supply electricity, and loads are used through the grid. If only one party bears the burden, this results in an unequal sharing of carbon emissions from network damage. In order to accurately measure and assess the level of user carbon emissions in the power system, a method for calculating and evaluating the level of user carbon emissions based on power flow tracking is proposed.

First, the sources of different currents in each node of the power system by means of power flow tracking method is analyzed, so as to determine the indirect carbon emission responsibility of each node.

Second, in accordance with the principle of proportional sharing, this paper combines the carbon intensity of different sources to obtain the distribution of carbon flows in the power system. After allocating the total network losses to the loads or power sources, the original network which will be transformed into a virtual lossless network, and the power generation and consumption of the lossless network will remain balanced. In the lossless network, the net load of nodes and the net output of power supply are known. In addition, the net active current value of each branch is not known. Considering that the virtual network has a tributary loss of 0, the active distribution of each branch can be determined by DC current equation.

Solve the tributary power flow equation to obtain the power of each branch. Then, according to the countercurrent tracking algorithm, active components of each generator in the node load and branch power are recalculated. At this point, the two-way sharing of network loss and the construction of the virtual network have been completed. On this basis, the carbon emission stream can be calculated and analyzed.

Finally, the proposed load-side indicators of various electric power emissions are used to assess the degree of cleanliness of different nodes, so as to guide the users to use more cleaner energy reduce their own carbon emissions.

In order to verify the validity of the proposed method, this paper uses the real power system data from a region in one eastern province as example to ensure the reasonableness and usability.