

综合能源系统损耗碳排放责任的源荷双向分摊方法

张运舸¹,包哲静¹,尹建兵²,于森¹,王岗²,郁丹琦²,何思凡³

(1. 浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027;2. 国网浙江省电力有限公司杭州供电公司,浙江 杭州 310016;
3. 中曜达数能生态科技(浙江)有限公司,浙江 杭州 310015)

摘要:针对综合能源系统损耗碳排放责任在源荷主体间分摊不清的问题,提出一种基于焓的能源转换设备碳排放分摊模型,以及一种基于潮流追踪的综合能源系统网损碳排放责任分摊方法。提出计及焓损的能源转换设备碳排放分摊模型,将焓损对应的碳排放责任基于可调参数分摊给能源转换设备本身及其输出能流;对于具有多类型输出的能源转换设备,基于焓分摊法,将输出能流碳排放在不同类型输出能流间进行分摊,得到不同类型能流的碳排放强度;根据能源转换设备碳排放分摊模型以及电-热-气网潮流模型,基于潮流追踪法,获取网损源荷双向分摊的统一矩阵计算公式,将电-热-气网的网损基于可调参数分摊给源端和负荷端,进而求解得到源端和负荷端的网损碳排放责任。算例结果验证了所提模型和方法的有效性和合理性,综合能源系统损耗碳排放责任的精细合理分摊,有助于准确追踪与溯源碳排放流,提高各主体的碳排放责任意识,降低系统碳排放。

关键词:综合能源系统;碳排放流;碳排放责任;焓损;网损

中图分类号:TM73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202507020

0 引言

近年来,温室气体排放问题已成为世界各国面临的重大挑战。为落实碳达峰、碳中和的目标,我国将应对气候变化作为国家战略^[1]。2012—2023年,我国单位GDP能耗下降26.8%,单位GDP碳排放下降超35%,主要资源产出率提高60%以上,绿色低碳发展迈出坚实有力的步伐^[2]。

要实现低碳可持续发展,向低碳型经济转型,碳排放的分析统计工作尤为重要。文献[3]提出一种基于电网中潮流分布的碳排放追踪方法,将碳排放视为伴随电能流动的虚拟网络流。相较于传统的宏观统计法^[4]和全生命周期法^[5-6],碳排放流(carbon emission flow, CEF)理论对碳排放责任的界定更加清晰,可以实现碳排放具体流向的准确追踪与溯源。文献[7]提出考虑交流网损的电力系统CEF计算方法。文献[8]将CEF理论扩展至综合能源系统(integrated energy system, IES),并建立能源转换设备的碳排放分摊模型,对伴随不同能流的碳排放进行量化,利用效率法将总碳排放量在输出能流间平均分摊。文献[9]考虑扩展CEF的IES低碳经济调度,对

单输入单输出、单输入多输出能量耦合设备进行碳流建模。然而,文献[8-9]均未考虑能源转换过程损耗的碳排放分摊。文献[10]提出考虑能量枢纽碳流损失的矩阵模型,将能源转换过程损耗对应的碳排放分配给能量枢纽,但仅考虑损耗能量的数量,而未考虑不同能量类型间的质量差异。对于IES中能源转换设备损耗碳排放分配,现有研究未考虑不同类别能量的质量对碳排放责任分摊的影响,且未考虑设备输出能流对能源转换损耗碳排放责任的分摊。因此,应将能量所含焓值大小作为设备自身及其输出能流间碳排放责任分配的衡量标准,兼顾源荷责任主体以及能量的数量和质量,使得碳排放责任分摊更为合理。

IES中除了能源转换设备损耗碳排放责任的分配,网损的合理分配也是CEF计算和追踪的必要环节以及碳排放责任合理分摊的前提^[11]。文献[12]提出一种基于合作博弈Tau值法的三相配电网损耗分配方法,并通过简化Tau值法降低计算复杂度,使该网损分配方法适用于大型配电网。文献[8]将IES网损碳排放全部统一归算至网络侧或负荷端。文献[13]提出边际网损系数法与支路耗散功率转归分量法相结合的网损分摊方法,避免了边际网损系数法无法将平衡节点纳入网损分配范围的问题。文献[11]将区域IES网损等效至管线两端节点,明确网损碳排放责任的主体,但该方法使得热网连接节点也需要承担一定的碳排放责任。文献[14]引入可调网损分配系数,将顺流追踪与逆流追踪方法相结合,实现电力系统网损碳排放责任的双向分摊。然而,上述文献对IES中网损的研究较少,且均未考虑天

收稿日期:2024-09-11;修回日期:2025-04-10

在线出版日期:2025-07-18

基金项目:国家自然科学基金联合基金重点资助项目(U22B2098);国网浙江省电力有限公司科技项目(5211HZ240007)

Project supported by the Joint Fund of National Natural Science Foundation of China(U22B2098) and the Science and Technology Project of State Grid Zhejiang Electric Power Co.,Ltd.(5211HZ240007)

然气网中的压力损耗,这部分损耗在实际应用场景中不可忽视。因此,有必要对 IES 中网损碳排放责任分摊方法进行研究,为后续厘清各主体碳排放责任、降低 IES 碳排放提供依据。

为解决 IES 中能源转换设备损耗碳排放责任的分摊问题,需要考虑设备自身及其输出能流,且需要兼顾能量数量与质量,同时,IES 中网损碳排放责任需要在源荷两端进行合理分摊,本文提出一种 IES 损耗碳排放责任的源荷双向分摊方法。首先,基于电-热-气网潮流模型及 CEF 理论,建立 IES 能-碳流模型;其次,对能源转换过程中产生的烟损对应的碳排放责任进行分摊,得到能源转换设备承担的碳排放责任;再次,对于多输出能源转换设备,基于烟分摊法,对不同种类输出能流之间的碳排放进行分摊;最后,基于潮流追踪法,提出 IES 统一的网损碳排放责任源荷双向分摊方法,实现网损在源荷两端按预设比例进行分摊,以满足不同实际需求,进而实现对网损碳排放责任的合理分配。算例结果对所提模型和方法的有效性和合理性进行了验证。

1 电-热-气 IES 的能-碳流模型

1.1 能流耦合模型

电-热-气 IES 是由电力子系统、热力子系统和天然气子系统通过能源转换设备耦合而成的供能系统^[15-16]。其中,能源转换设备将某种形式的能源转换成其他形式的能源,主要包括燃气发电机组、热电联产(combined heat and power, CHP)机组、电锅炉(electric boiler, EB)、燃气锅炉等。本文研究的 IES 能量流示意图如附录 A 图 A1 所示。

本文使用 Distflow 模型建立辐射型电网交流潮流模型^[17],基于热网热力模型和水力模型建立热网供回水统一的等效潮流模型^[18-19],不考虑天然气传输慢惯性,采用基于 Weymouth 方程的气网稳态模型^[20],将压缩机消耗气流量视为气网损耗。IES 建模具体约束及网损表达式见附录 A 式(A1)~(A21)。

1.2 CEF 模型

以 IES 经济调度为优化目标,同时考虑 1.1 节中电、热、气网潮流约束和能源转换设备运行特性约束,求得多能潮流断面。基于该潮流断面,应用比例共享原则和能量合并原则计算 CEF^[8]。IES 中电、热、气网的 CEF 具体计算公式如附录 B 式(B1)~(B12)所示。至此,实现了 IES CEF 模型的建立。

2 能源转换设备的碳排放分摊模型

烟分析法是从能量的数量和质量 2 个角度,对设备中烟传递、转换与利用过程进行深入分析的工具。相较于传统的能量分析法,烟分析法不仅关注能量的数量,还重视能量的质量,因而能更全面反映

系统的实际运行状况^[21]。将烟分析法应用于能源转换设备的碳排放分摊中,不仅有助于识别和分析不同类型能源的碳排放特征,还能在 IES 中合理分摊各类能源的碳排放责任,从而支持系统低碳优化。

2.1 计及能源转换设备烟损的碳排放分摊模型

在 IES 中,能源转换设备在能源转换过程中不可避免会产生损耗,考虑损耗碳排放责任的分摊主体为设备自身及其输出能流,原因主要是:一方面,能源转换设备作为能源转换的重要耦合元件,承担部分损耗对应的碳排放责任是合理的,且有利于设备本身的技术升级与改造^[10];另一方面,能源转换过程本质上是由负荷端的用能需求所驱动的。其中设备自身分配到的碳排放责任应由 IES 的运营机构承担。考虑到能源转换设备将输入能量转换成其他形式的输出能量,在进行损耗碳排放责任分摊时,需要兼顾能量的数量和质量,因此本文提出基于能源转换设备烟损的碳排放分摊模型。

烟也称为有效能或可用能,指在某一状态下理论上可以转化为有用功的能量,它反映了能量在实际应用中的潜在可利用程度。电能、热水和天然气的烟值 Ξ_e 、 Ξ_h 、 Ξ_g 分别为:

$$\begin{cases} \Xi_e = \lambda_e E_e \\ \Xi_h = \lambda_h E_h \\ \Xi_g = \lambda_g E_g \end{cases} \quad (1)$$

式中: E_e 、 E_h 、 E_g 分别为电能、热水和天然气的能量值; λ_e 、 λ_h 、 λ_g 分别为电能、热水和天然气的能质系数^[22],计算公式分别如附录 C 式(C1)~(C3)所示。

在能源转换过程中,CHP 机组的烟损主要来自燃烧不可逆损失、热能转化为机械能进而转化为电能时的不可逆损失、高温排烟中的损失等。EB 的烟损主要来自电能转化为热能过程中的损失、热传递过程中的损失等。通过计算 CHP 机组和 EB 的输入、输出能流中烟的分布情况,得到能源转换过程中产生的烟损,即:

$$\Xi_{l, \text{CHP}} = \Xi_{g, \text{CHP}}^{\text{in}} - \Xi_{h, \text{CHP}}^{\text{out}} - \Xi_{e, \text{CHP}}^{\text{out}} \quad (2)$$

$$\Xi_{l, \text{EB}} = \Xi_{e, \text{EB}}^{\text{in}} - \Xi_{h, \text{EB}}^{\text{out}} \quad (3)$$

式中: $\Xi_{l, \text{CHP}}$ 、 $\Xi_{l, \text{EB}}$ 分别为 CHP 机组和 EB 在能源转换过程中产生的烟损; $\Xi_{g, \text{CHP}}^{\text{in}}$ 为 CHP 机组输入的天然气能量所含烟值; $\Xi_{e, \text{CHP}}^{\text{out}}$ 、 $\Xi_{h, \text{CHP}}^{\text{out}}$ 分别为 CHP 机组输出电、热能量所含烟值; $\Xi_{e, \text{EB}}^{\text{in}}$ 、 $\Xi_{h, \text{EB}}^{\text{out}}$ 分别为 EB 输入电能和输出热能所含烟值。

引入 $[0, 1]$ 内的可调参数 X ,将 CHP 机组和 EB 的烟损碳排放责任分摊给设备自身及其输出能流,将烟损碳排放责任的 X 部分分摊给设备自身,将剩余烟损碳排放责任的 $1-X$ 部分分配给设备输出能流。 X 的取值可以由负荷端以及能源转换设备的归属主体,如 IES 运营机构,共同协商确定。具体公式为:

$$\begin{cases} R_{\text{CHP}}^{\text{in}} = \rho_{\text{CHP}}^{\text{in}} G_{\text{CHP}}^{\text{in}} \\ R_{\text{L, CHP}} = X R_{\text{CHP}}^{\text{in}} \frac{\Xi_{\text{L, CHP}}}{\Xi_{\text{g, CHP}}^{\text{in}}} \\ R_{\text{CHP}}^{\text{out}} = R_{\text{CHP}}^{\text{in}} - R_{\text{L, CHP}} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} R_{\text{EB}}^{\text{in}} = \rho_{\text{EB}}^{\text{in}} P_{\text{EB}}^{\text{in}} \\ R_{\text{L, EB}} = X R_{\text{EB}}^{\text{in}} \frac{\Xi_{\text{L, EB}}}{\Xi_{\text{e, EB}}^{\text{in}}} \\ R_{\text{EB}}^{\text{out}} = R_{\text{EB}}^{\text{in}} - R_{\text{L, EB}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $R_{\text{CHP}}^{\text{in}}$ 、 $R_{\text{EB}}^{\text{in}}$ 分别为 CHP 机组和 EB 输入的总碳排放率; $\rho_{\text{CHP}}^{\text{in}}$ 为 CHP 机组输入端口的碳排放强度, 即单位能量天然气燃烧产生的碳排放量; $G_{\text{CHP}}^{\text{in}}$ 为 CHP 机组输入的天然气等效功率; $R_{\text{L, CHP}}$ 、 $R_{\text{L, EB}}$ 分别为 CHP 机组和 EB 自身分配到的烟损碳排放责任; $R_{\text{CHP}}^{\text{out}}$ 、 $R_{\text{EB}}^{\text{out}}$ 分别为 CHP 机组和 EB 输出能流在计及烟损碳排放责任之后分配到的碳排放量; $\rho_{\text{EB}}^{\text{in}}$ 为 EB 输入端口的碳强度; $P_{\text{EB}}^{\text{in}}$ 为 EB 输入的电功率。

可调参数 X 的取值不影响能源转换设备烟损对应的碳排放量, 但可以影响这部分碳排放责任在设备自身及其输出能流之间的分配。 X 取较大值可以使设备承担更多的烟损碳排放责任, 以激励其进行升级改造; 反之, 设备输出端承担更多的烟损碳排放责任, 以挖掘用户侧减排潜力。

2.2 能源转换设备不同类型输出能量间的碳排放分摊模型

同时输出多类型能流的能源转换设备, 例如 CHP 机组, 存在不同类型输出间的碳排放分摊问题。考虑到 CHP 机组中热能是电能的副产品, 传统的效率法将总碳排放量在输出热能和电能间进行平均分配^[8], 低估了输出电能的碳排放责任, 因此, 本文兼顾输出能流的质量和数量, 提出一种基于烟的分摊方法^[23], 即基于不同种类输出能量所含烟值的相对比例进行碳排放的分摊。

根据烟分摊法, 基于 CHP 机组输出电能和热能的烟值比例, 将输出能流对应的碳排放量在所产生的电能和热能之间进行分摊, 即:

$$\begin{cases} R_{\text{CHP, e}}^{\text{out}} = R_{\text{CHP}}^{\text{out}} \frac{\Xi_{\text{e, CHP}}^{\text{out}}}{\Xi_{\text{e, CHP}}^{\text{out}} + \Xi_{\text{h, CHP}}^{\text{out}}} \\ R_{\text{CHP, h}}^{\text{out}} = R_{\text{CHP}}^{\text{out}} \frac{\Xi_{\text{h, CHP}}^{\text{out}}}{\Xi_{\text{e, CHP}}^{\text{out}} + \Xi_{\text{h, CHP}}^{\text{out}}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $R_{\text{CHP, e}}^{\text{out}}$ 、 $R_{\text{CHP, h}}^{\text{out}}$ 分别为 CHP 机组输出端口电能和热能的碳流率, 即单位时间电能和热能输出对应的碳排放量。

基于 CEF 理论, 计算得到 CHP 机组输出端口的电能、热能碳排放强度 $\rho_{\text{CHP, e}}^{\text{out}}$ 和 $\rho_{\text{CHP, h}}^{\text{out}}$, 如式(7)所示。

$$\begin{cases} \rho_{\text{CHP, e}}^{\text{out}} = R_{\text{CHP, e}}^{\text{out}} / P_{\text{CHP}} \\ \rho_{\text{CHP, h}}^{\text{out}} = R_{\text{CHP, h}}^{\text{out}} / H_{\text{CHP}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: P_{CHP} 、 H_{CHP} 分别为 CHP 机组的电、热输出功率。

3 电-热-气 IES 统一的网损碳排放责任源荷双向分摊方法

传统潮流追踪法对电网某一运行状态下每台发电机出力或每个负荷用电在输电线路潮流中所占比例进行追踪, 从而为输电线路损耗的分配提供依据^[24]。将电网潮流追踪法推广至热网和天然气网, 实现网损在 IES 源荷两端按预设比例进行分配, 以满足实际情况中的不同需求, 进而实现网损所对应的碳排放责任在源荷两端的合理分配。

基于潮流追踪法, 引入 $[0, 1]$ 内的可调参数, 获取统一的电、热、气网网损分配矩阵计算公式, 将电-热-气网的网损分配给源端和负荷端。在基于潮流追踪法的电网网损碳排放责任分摊中只考虑有功功率和有功损耗, 这主要是由于发电机组无功功率的输出不涉及燃料的直接消耗, 因此源端无功功率对碳排放水平没有显著影响^[7]。线路的有功损耗计算中包含了线路无功功率对碳排放的间接影响。

假设网络中有 n 个节点和 m 条支路, 在支路中增设虚拟节点 k ($k \in [n+1, n+m]$), 并将支路损耗的负值等效为虚拟源出力。基于顺流追踪, 将电-热-气 IES 的网损分配给负荷端, 即:

$$P_{\text{Gk, } \Pi} = -\Delta p_{k-n, \Pi} \quad k \in [n+1, n+m] \quad (8)$$

$$[A_{\text{d, } \Pi}]_{ij} = \begin{cases} 1 & i=j \\ -P_{ij, \Pi} / P_{j, \Pi} & j \in D_{i, \Pi}, \Pi \in \{e, h, g\} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $P_{\text{Gk, } \Pi}$ 为虚拟源 k 的出力, $\Pi \in \{e, h, g\}$ 表示进行网损分配的网络, 包括电、热、气网; $\Delta p_{k-n, \Pi}$ 为支路 $k-n$ 的损耗; $[A_{\text{d, } \Pi}]_{ij}$ 为 $(n+m) \times (n+m)$ 阶下游分布矩阵 $A_{\text{d, } \Pi}$ 的元素; $P_{ij, \Pi}$ 为支路 $i-j$ 上的等效功率; $P_{j, \Pi}$ 为节点 j 流入的总功率; $D_{i, \Pi}$ 为节点 i 的下游节点集合。

负荷 γ 所承担的网损 $\Delta P_{\text{Ly, } \Pi}$ 可表示为每个虚拟源出力 $P_{\text{Gk, } \Pi}$ 对负荷 γ 的贡献分量之和的负值, 即:

$$\Delta P_{\text{Ly, } \Pi} = - \sum_{k=n+1}^{n+m} \frac{P_{\text{Gk, } \Pi}}{P_{k, \Pi}} [A_{\text{d, } \Pi}^{-1}]_{k\gamma} P_{\text{Ly, } \Pi} \quad \Pi \in \{e, h, g\} \quad (10)$$

式中: $P_{\text{Ly, } \Pi}$ 为负荷 γ 的值。

基于逆流追踪, 将支路损耗等效为虚拟负荷, 将电-热-气 IES 的网损分配给源端, 即:

$$P_{\text{Lk, } \Pi} = \Delta p_{k-n, \Pi} \quad k \in [n+1, n+m] \quad (11)$$

$$[A_{\text{u, } \Pi}]_{ij} = \begin{cases} 1 & i=j \\ -P_{ji, \Pi} / P_{j, \Pi} & j \in U_{i, \Pi}, \Pi \in \{e, h, g\} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $P_{\text{Lk, } \Pi}$ 为虚拟负荷 k 的值; $[A_{\text{u, } \Pi}]_{ij}$ 为 $(n+m) \times (n+m)$ 阶上游分布矩阵 $A_{\text{u, } \Pi}$ 的元素; $U_{i, \Pi}$ 为节点 i 的上游节点集合。

源端 ε 所承担的网损 $\Delta P_{\text{G\varepsilon, } \Pi}$ 可表示为源端 ε 对

每个虚拟负荷 $P_{Lk,\Pi}$ 的贡献分量之和,即:

$$\Delta P_{G\varepsilon,\Pi} = \sum_{k=n+1}^{n+m} \frac{P_{Lk,\Pi}}{P_{k,\Pi}} [A_{u,\Pi}^{-1}]_{k\varepsilon} P_{G\varepsilon,\Pi} \quad \Pi \in \{e, h, g\} \quad (13)$$

式中: $P_{G\varepsilon,\Pi}$ 为源端 ε 的出力。

引入 $[0, 1]$ 内的可调参数 Y , 将网损的 Y 部分分配给负荷端, 将剩余的网损 $1-Y$ 部分分配给源端。 Y 的取值可以由负荷端、源端的归属主体共同协商确定。负荷端和源端承担的网损分别为:

$$\begin{cases} \Delta P_{L\gamma,\Pi} = - \sum_{k=n+1}^{n+m} \frac{YP_{Gk,\Pi}}{P_{k,\Pi}} [A_{d,\Pi}^{-1}]_{ky} P_{L\gamma,\Pi} \\ \Delta P_{G\varepsilon,\Pi} = \sum_{k=n+1}^{n+m} \frac{(1-Y)P_{Lk,\Pi}}{P_{k,\Pi}} [A_{u,\Pi}^{-1}]_{k\varepsilon} P_{G\varepsilon,\Pi} \end{cases} \quad \Pi \in \{e, h, g\} \quad (14)$$

将网损分配给源端和负荷端后, 原始网络变为虚拟无损网络, 净负荷 $P'_{L\gamma,\Pi}$ 和净出力 $P'_{G\varepsilon,\Pi}$ 分别表示为:

$$\begin{cases} P'_{L\gamma,\Pi} = P_{L\gamma,\Pi} + \Delta P_{L\gamma,\Pi} \\ P'_{G\varepsilon,\Pi} = P_{G\varepsilon,\Pi} + \Delta P_{G\varepsilon,\Pi} \end{cases} \quad \Pi \in \{e, h, g\} \quad (15)$$

在虚拟无损网络净负荷和净出力已知的基础上, 将所有节点列功率平衡方程形成线性方程组, 求解得到各支路潮流净值。基于 CEF 理论, 得到有损和虚拟无损 IES 中各节点的碳排放强度。

网损分配前后源端和负荷端的碳排放变化量为网损碳排放责任分摊结果, 即:

$$\begin{cases} \Delta R_{L\gamma,\Pi} = \rho'_{L\gamma,\Pi} P'_{L\gamma,\Pi} - \rho_{L\gamma,\Pi} P_{L\gamma,\Pi} \\ \Delta R_{G\varepsilon,\Pi} = \rho_{G\varepsilon,\Pi} P'_{G\varepsilon,\Pi} - \rho_{G\varepsilon,\Pi} P_{G\varepsilon,\Pi} \end{cases} \quad \Pi \in \{e, h, g\} \quad (16)$$

式中: $\Delta R_{L\gamma,\Pi}$ 、 $\Delta R_{G\varepsilon,\Pi}$ 分别为负荷 γ 和源端 ε 的网损碳排放责任分摊结果; $\rho'_{L\gamma,\Pi}$ 、 $\rho_{L\gamma,\Pi}$ 分别为虚拟无损网络和有损网络下负荷 γ 的碳排放强度; $\rho_{G\varepsilon,\Pi}$ 为源端 ε 的碳排放强度。

可调参数 Y 取值较大时, 负荷端承担更多的网损碳排放责任; 反之, 源端承担更多的网损碳排放责任。参数 Y 的取值不影响网损对应的碳排放量, 只影响碳排放量在源和荷之间的分摊, 激发相关主体的碳减排责任意识。

4 计算流程

本文方法的计算流程具体如下。首先, 确定电-热-气 IES 的一个多能潮流断面, 即以 IES 运行总成本最小为优化目标的多能潮流。其次, 根据 CEF 理论和能源转换设备损耗的碳排放分摊模型, 求解 IES 的 CEF 结果, 由于没有考虑网损碳排放责任的分摊, 将该结果称为有损网络的 CEF, 以区别于后续考虑网损分摊的虚拟无损网络的 CEF。其中, 由于 CHP 机组与 EB 在 IES 中不同的耦合关系, CEF 计算顺序依次为气网、CHP 机组、电网、EB、热网。再次, 基于潮流追踪法对 IES 中的网损进行源荷双向分摊, 并

计算虚拟无损网络的能碳流, 其中计算顺序与 IES 有损网络的 CEF 计算顺序相同。最后, 根据上述计算结果求解得到 IES 损耗碳排放责任的双向分摊结果。本文方法的计算流程图如附录 D 图 D1 所示。

5 算例分析

5.1 IES 算例 1

使用 9 节点电力子系统、8 节点热力子系统和 8 节点天然气子系统 (E9-H8-G8 系统) 组成的 IES 分析和验证所提出的 IES 损耗碳排放责任源荷双向分摊方法。IES 拓扑图以及参数分别如附录 E 图 E1 及表 E1—E7 所示。

5.1.1 IES 有损网络 CEF 结果分析

根据第 4 章的计算流程, 基于 IES 多能潮流结果进行 CEF 计算以及能源转换设备损耗对应的碳排放分摊, 得到有损网络碳流率, 如图 E1 所示, 图中: PB、GB、HB 分别表示电网、天然气网、热网节点; GS 表示天然气气源。CHP 机组在天然气网中作为负荷, 而在热网和电网中作为电源, 计算得到其输入碳流率为 $2600.32 \text{ kgCO}_2/\text{h}$, 输出给电网和热网的碳流率分别为 $1608.45 \text{ kgCO}_2/\text{h}$ 和 $383.78 \text{ kgCO}_2/\text{h}$, 由于能源转换过程产生损耗, CHP 机组自身承担 $608.09 \text{ kgCO}_2/\text{h}$ 的碳排放责任。由上述结果可知, CHP 机组碳流率保持输入、输出平衡。同样, EB 碳流率也保持输入、输出平衡。

IES 有损网络的碳流率结果如表 1 所示。由表可知, 电、热、气网的总网损碳流率分别占其各自总输入碳流率的 2.88%、7.39%、2.34%。虽然相对占比不是很高, 但长年累月运行后网损碳排放累积的绝对量不容忽视。精确计算并合理分摊 IES 中网损对应的碳排放责任, 有助于明确各主体的碳排放责任, 为 IES 的节能降碳提供基础。

表 1 IES 有损网络的碳流率结果

Table 1 CEF rate results of IES with network loss

单位: kgCO_2/h

网络	总网损碳流率	总负荷碳流率	总输入碳流率
电网	84.80	2 857.81	2 942.61
热网	30.54	382.69	413.23
气网	212.27	8 870.32	9 082.59

5.1.2 IES 虚拟无损网络 CEF 结果分析

网损分摊前的有损网络 CEF 结果如图 1(a) 所示。根据第 4 章的计算流程, 对 IES 有损网络进行网损源荷双向分摊, 可得到虚拟无损网络的 CEF 结果, 如图 1(b) 所示, 图中, 红色、蓝色数字分别表示负荷端和源端承担的网损碳排放责任 (单位为 kgCO_2/h)。在图 1(b) 中, 当可调参数 $Y=0.5$ 时, 源端与负荷端各承担一半的网损碳排放责任。在电网中: 负荷节点 P_{B_1} 和 P_{B_4} 的网损碳排放责任为 0, 这是由于上述节

点的负荷由该节点发电设备供电,无须经由网络中的线路输电,因此这些节点负荷未分配到网损碳排放责任;节点PB₈处的风电机组会分配到部分网损,但由于其碳强度为0,根据式(16),这部分网损对应的碳排放责任为0。在热网中,管道流向固定,距离源端越远、流经管道长度越长的负荷,分摊到的网损碳排放责任越大,因此负荷节点HB₆、HB₇、HB₈的网损碳排放责任依次增大。在气网中,将压缩机消耗的天然气流量视为损耗,当只有1个气源时,负荷与气源之间相隔的压缩机数量越多,负荷分摊到的网损碳排放责任就越大,因此负荷GB₈比GB₆和GB₇承担的网损碳排放责任更大。

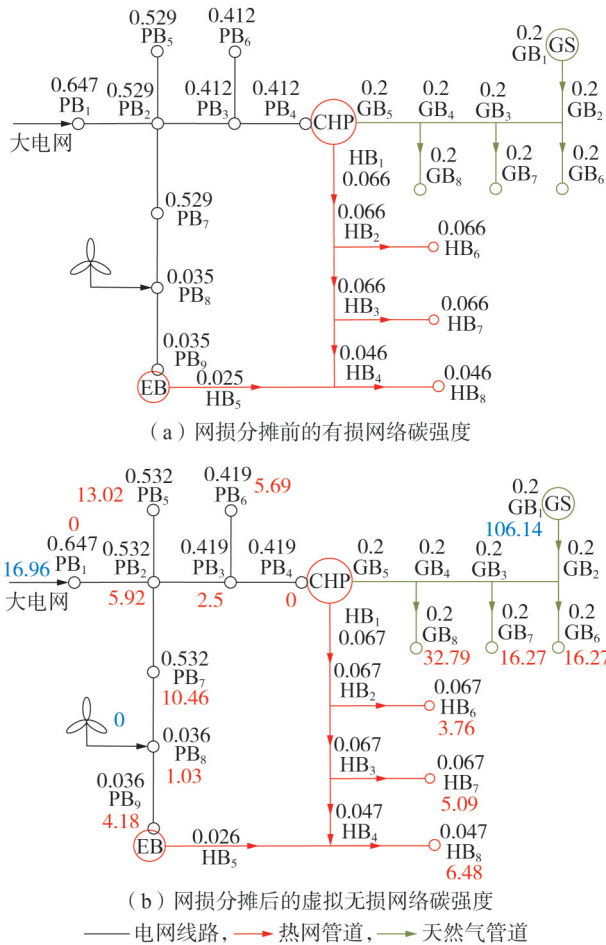


图1 IES网损分摊前、后的节点碳强度对比

Fig.1 Comparison of node carbon intensity between before and after allocation of IES network loss

比较图1(a)和图1(b)可知:对于整个IES输入而言,逆流追踪是将源端出力造成的网损按比例分配给该源端,这部分网损所含碳排放来自该源端,因此网损分摊不会改变源端碳强度,大电网、风电机组和天然气源的节点碳强度均不改变;在网损分摊后,能源转换设备输入的CEF会增加一部分输入网络分摊的网损碳排放责任,因此CHP机组和EB的输出节点碳强度均有所增加;在考虑能源转换过程的焓

损下,能源转换设备自身承担的碳排放责任也会有所增加。能源转换设备的损耗碳排放责任分摊结果如附录E表E8所示。

5.1.3 能源转换设备碳排放分摊模型分析

不同能源转换设备碳排放分摊模型的结果如图2所示,其中红色数字表示碳流率(单位为 kgCO_2/h)。在图2(a)中:利用效率法对CHP机组不同种类输出能量的碳排放进行分摊,电能与热能分摊到等量的碳排放;由于CHP机组的电效率低于热效率,因此其输出电能碳强度高于热能碳强度。在图2(b)中:利用焓分摊法进行分摊,电能的能质系数远大于介质为热水的热能能质系数,因此CHP机组输出电能分摊到的碳排放也大于热能分摊到的碳排放;相较于效率法,焓分摊法的电能碳强度提高了61.56%,热能碳强度下降了61.26%。从热力学视角来看,电能为高品质能源,在相同大小的能量下,电能的焓值远高于热能,这反映了电能更高的能源使用价值。CHP机组的电能生产通常伴随较大的能量损失和碳排放,相比较而言,热能作为CHP机组的发电副产品,其能源品质较低且向其他能源的转换效率受限。因此,为体现能源品质和使用价值的差异,将更多的碳排放责任分配给电能是合理的。

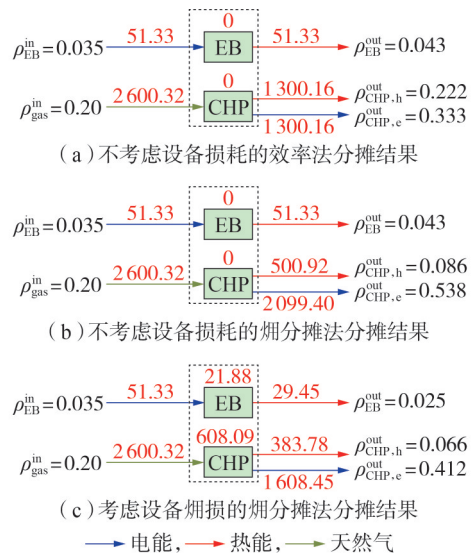


图2 能源转换设备的不同碳排放分摊模型对比

Fig.2 Comparison of different carbon emission allocation models for energy conversion equipment

在图2(b)中,不考虑设备焓损对应的碳排放时,能源转换设备不承担碳排放责任,只将输入的碳排放全部传递给输出能流。在图2(c)中:当可调参数 $X=0.5$ 时,能源转换过程中焓损对应的碳排放责任一半分配给设备自身,另一半分配给输出能流;由于EB是将高品质电能转换为低品质热能,该过程产生较大的焓损,因此EB自身分配到的碳排放责任较大,占其输入碳流的42.63%;CHP机组是将天然气

转换为热能和能质系数为1的电能,其焓效率高
于EB,因此CHP机组自身分配到的碳排放责任比EB
少,占其输入碳流的23.39%。对比图2(b)和图2(c)
可知,考虑设备焓损后,设备自身承担了部分焓损碳
排放责任,CHP机组输出电能和热能流的碳强度分
别下降了23.42%和23.26%,EB输出的碳强度下降
了41.86%。通过焓损追溯能源转换设备的能量损
失来源,将能源转换设备损耗对应的部分碳排放分
摊给设备自身,可以促进能源转换设备自身的技术
改造,从而达到降低碳排放的目的。另外,对于焓损
较大的设备,其自身会分摊到比例较高的焓损对应
的碳排放责任,有助于减少IES中高品质能源向低
品质能源的转换,降低不可逆损失。

5.2 IES算例2

为进一步验证所提IES损耗碳排放责任分摊方
法在大规模复杂系统中的有效性和适用性,基于改
进的IEEE 33节点系统,构建E33-H20-G19系统,系
统参数、拓扑图和碳排放分摊结果、多气源天然气网
节点碳流率分别如附录F表F1—F12、图F1和表F13
所示。

5.2.1 不同热电比对CHP机组碳排放分摊的影响

在热负荷不变的情况下^[25],热电比变化对抽汽
式机组CHP₃焓损碳排放分摊的影响如表2所示。
表中,场景1和场景2分别对应CHP₃热电比为1.33
和0.72的情况,焓效率(设备输出焓值与输入焓值之
比)分别为0.55和0.57。机组运行特性如附录F式
(F1)—(F3)所示。在场景1下,CHP₃机组的焓效率
更低,因此其产生的焓损占比更高,设备自身分摊到
的碳排放责任占比也更高,占总碳排放量的
22.36%,大于场景2的21.50%。由于场景1、2的热
负荷不变,场景2的输出电能随着热电比的降低而
增大,因此,相较于场景1,场景2的输出热能焓值占
比大幅降低,这导致场景2输出热能流分摊到的碳排
放减少。随着CHP机组热电比发生改变,其焓效率
也会发生改变,焓效率越高,设备承担的碳排放责任
占比越低,反之,设备承担的碳排放责任占比越高。

表2 不同热电比下CHP机组的碳排放分摊结果

Table 2 Carbon emission allocation results of CHP unit under different heat-electricity ratios

场景	焓效率	输入碳排放 / (kgCO ₂ ·h ⁻¹)	碳排放分摊结果 / (kgCO ₂ ·h ⁻¹)		
			设备自身	输出热能流	输出电能流
1	0.55	2316.58	517.93	336.11	1462.54
2	0.57	3785.20	813.94	329.62	2641.64

5.2.2 与传统网损碳排放分摊方法的对比

在传统网损碳排放分摊方法^[8]中引入0-1变量
Z,Z取值0和1分别表示将网损碳排放责任全部分
摊至网络侧和负荷端。在各节点碳强度 $\rho_{n,i}^N$ 计算中
加入网损分摊,即:

$$\rho_{n,i}^N = \frac{\sum_{i \in N} P_{G,i} \rho_{n,c} + \sum_{l \in \Omega_{n,i}^{in}} (P_{n,l} + Z P_{n,l}^{Loss}) \rho_{n,l}^B}{\sum_{i \in N} P_{G,i} + \sum_{l \in \Omega_{n,i}^{in}} P_{n,l}} \quad \Pi \in \{e, h, g\}$$

式中: N 为节点集合; $P_{G,i}$ 为节点*i*处的源端出力; $\rho_{n,c}$
为源端出力的碳排放强度; $\Omega_{n,i}^{in}$ 为流入节点*i*的支路
集合; $P_{n,l}$ 为支路*l*上的功率; $P_{n,l}^{Loss}$ 为支路*l*的损耗;
 $\rho_{n,l}^B$ 为支路*l*的碳排放强度。

对于热网,当要将网损碳排放责任全部分摊至
负荷端时,不能使用传统供回水网络模型,需使用供
回水统一的等效潮流模型。

当传统网损碳排放分摊方法取 $Z=0$ 时,将网损
碳排放责任全部分摊至网络侧,计算各条线路或管
道的损耗碳排放,将其求和后归算至网络侧或源端,
该方法适用于网络侧只有1个主体的情况。本文方
法取 $Z=0$ 时,可将网损碳排放责任具体分摊至每台
出力机组,当存在源端属于不同碳排放责任主体时,
例如IES中多个电源分别归属于IES运营机构与上
级电网,本文方法可以对2个或多个不同碳排放责
任主体所需承担的网损碳排放责任进行分摊,以适
用于不同的实际应用场景。网损碳排放全部分摊至
源端的结果对比如表3所示。在IES中,IES运营机
构承担内部CHP机组和风电机组的源端网损碳排
放责任,上级电网承担IES购电的源端网损碳排放
责任;在气网中,IES运营机构承担内部GS₁、GS₂气
源的源端网损碳排放责任,外部网络承担IES购气
的源端网损碳排放责任。

表3 网损碳排放全部分摊至源端的结果对比

Table 3 Results comparison when carbon emission from network loss is entirely allocated to source side

单位:kgCO₂/h

网络	本文方法分摊结果		传统方法网络侧 / 源端分摊结果
	IES运营机构	外部网络	
电网	495.72	830.56	1326.28
热网	92.42	—	92.42
气网	390.78	103.70	494.48

5.3 实际应用讨论

本文所提IES损耗碳排放责任的源荷双向分摊
方法可以功能模块的形式集成在IES的数据采集与
监控平台上,借助监控平台采集到的各项数据,得到
考虑损耗碳排放责任分摊后的负荷端、源端、能源转
换设备的节点碳流率和碳强度。若IES规模不大且
监控基础设施较为完备,则技术和经济挑战不大;反
之,则需要安装大量数据采集传感器,获取该功能模
块所需的信息。另外,具有多个主体的IES可能存
在信息壁垒等问题,需要多主体协同以实现多能数
据整合与损耗碳排放责任的源荷分摊。

6 结论

为了实现 IES 损耗碳排放责任的精细合理分摊,本文提出一种基于焓的能源转换设备碳排放分摊模型,以及基于潮流追踪的 IES 网损碳排放责任的源荷双向分摊方法。基于算例分析得出如下结论。

1)在计及焓损的能源转换设备碳排放分摊模型中,考虑设备所承担的碳排放责任有利于促进设备自身的技术改造。对于不同种类输出能量间的碳排放分摊,相较于效率法,焓分摊法的能质系数较大的输出能量会分配到更多的碳排放责任,提升了能源转换设备碳排放责任分摊的公平合理性。

2)IES 中网损对应的碳排放不容忽视,其碳排放责任应由源端与负荷端共同承担。网损碳排放责任的源荷双向分摊结果可以体现出不同源端出力对各条线路或管道损耗碳排放责任贡献的不同,以及源端与负荷位置分布的不同所带来的影响。所提模型和方法对各主体碳排放责任的分摊具有合理性和有效性,为后续降低 IES 碳排放奠定了基础。

后续笔者将结合 IES 实际案例,进一步考虑可再生能源不确定性、可再生能源参与电力市场和碳交易市场等问题,提升本文方法的实际应用价值。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 康重庆,杜尔顺,李姚旺,等. 新型电力系统的“碳视角”:科学问题与研究框架[J]. 电网技术,2022,46(3):821-833.
KANG Chongqing, DU Ershun, LI Yaowang, et al. Key scientific problems and research framework for carbon perspective research of new power systems[J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 821-833.
- [2] 寇江泽,刘温馨. 落实“双碳”行动建设美丽中国[N]. 人民日报,2024-04-28(02).
- [3] 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.
- [4] 陈丽霞,孙毅,周云,等. 电力系统发电侧和负荷侧共同碳责任分摊方法[J]. 电力系统自动化,2018,42(19):106-111.
CHEN Lixia, SUN Tao, ZHOU Yun, et al. Method of carbon obligation allocation between generation side and demand side in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(19): 106-111.
- [5] 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/OL]. 中国电机工程学报. [2025-03-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20240621.1615.005.html>.
- [6] LI L, YANG D C, LIU Z H, et al. Optimal scheduling of regional integrated energy system considering the integration of electric vehicles and the life cycle assessment method[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2024, 60(1): 986-995.
- [7] KANG C Q, ZHOU T R, CHEN Q X, et al. Carbon emission flow from generation to demand: a network-based model[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5): 2386-2394.
- [8] CHENG Y H, 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.
- [9] 张玉敏,孙鹏凯,吉兴全,等. 考虑扩展碳排放流的综合能源系统低碳经济调度[J]. 电网技术,2023,47(8):3174-3191.
ZHANG Yumin, SUN Pengkai, JI Xingquan, et al. Low-carbon economic dispatch of integrated energy system with augmented carbon emission flow[J]. Power System Technology, 2023, 47(8): 3174-3191.
- [10] LIN X Q, CAO Y T, WANG D, et al. A carbon hub matrix model considering carbon emission flow loss of energy hub[C]//2023 6th International Conference on Electrical Engineering and Green Energy. Grimstad, Norway: IEEE, 2023: 270-274.
- [11] 曹逸滔,王丹,贾宏杰,等. 计及站-网损耗分摊的区域综合能源系统碳排放流计算方法[J]. 电力系统自动化,2024,48(12):14-23.
CAO Yitao, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Calculation method for carbon emission flow in regional integrated energy system considering station-network loss allocation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(12): 14-23.
- [12] KUMAR H, KHATOD D K. Loss allocation in three-phase distribution network using τ -value[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(3): 4924-4934.
- [13] 刘家军,杨晓倩,陈乃兴,等. 含小水电群的配电网网损分摊研究[J]. 智慧电力,2020,48(7):93-99.
LIU Jiajun, YANG Xiaojian, CHEN Naixing, et al. Loss allocation of distribution network with small hydropower groups[J]. Smart Power, 2020, 48(7): 93-99.
- [14] 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):1683-1693.
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): 1683-1693.
- [15] 邵振国,林勇棋,陈飞雄,等. 考虑碳-绿证耦合机制的电-气-热综合能源系统分布式鲁棒低碳经济调度[J]. 电力自动化设备,2024,44(6):50-58,76.
SHAO Zhenguo, LIN Yongqi, CHEN Feixiong, et al. Distributionally robust low-carbon economic dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system considering carbon-green certificate coupling mechanism[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(6): 50-58, 76.
- [16] 李沉,陆帅,顾伟,等. 考虑热动态的综合能源系统碳排放流建模与分析[J]. 电力自动化设备,2024,44(7):205-213.
LI Yuan, LU Shuai, GU Wei, et al. Modelling and analysis of carbon emission flow for integrated energy system considering thermal dynamic[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(7): 205-213.
- [17] 刘睿捷,包哲静,林振智. 考虑双层奖惩型碳交易机制的源网荷分布协同低碳经济调度[J]. 电力系统自动化,2024,48(9):11-20.
LIU Ruijie, BAO Zhejing, LIN Zhenzhi. Distributed collaborative low-carbon economic dispatching of source, grid and load considering dual-layer carbon trading mechanism with reward and punishment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(9): 11-20.
- [18] 景巍巍,王强,程好,等. 电热综合能源系统稳态与区间潮流计算快速解耦新方法[J]. 中国电力,2024,57(7):203-213.
JING Weiwei, WANG Qiang, CHENG Hao, et al. New rapid decoupling methods for calculating steady-state and interval-power flow of integrated electricity-heat energy systems[J].

- Electric Power, 2024, 57(7): 203-213.
- [19] LI J X, WANG D, JIA H J, et al. Mechanism analysis and unified calculation model of exergy flow distribution in regional integrated energy system [J]. Applied Energy, 2022, 324: 119725.
- [20] 殷晨旭, 孙永辉, 谢东亮, 等. 博弈视角下电-气互联综合能源系统多目标协同优化[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(11): 173-183.
- YIN Chenxu, SUN Yonghui, XIE Dongliang, et al. Multi-objective cooperative optimization of electricity-gas interconnected integrated energy system from game perspective [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(11): 173-183.
- [21] 陈威成. 计及烟效率的区域综合能源系统综合评估方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
- CHEN Weicheng. Research on comprehensive evaluation method of regional integrated energy system considering exergy efficiency [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [22] YANG W J, HUANG Y P, ZHANG T R, et al. Mechanism and analytical methods for carbon emission-exergy flow distribution in heat-electricity integrated energy system [J]. Applied Energy, 2023, 352: 121980.
- [23] BUCHENAU N, HANNEN C, HOLZAPFEL P, et al. Allocation of carbon dioxide emissions to the by-products of combined heat and power plants: a methodological guidance [J]. Renewable and Sustainable Energy Transition, 2023, 4: 100069.
- [24] 张诗滔, 顾明宏, 李扬. 考虑网损分摊的潮流跟踪方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(4): 89-93.
- ZHANG Shitao, GU Minghong, LI Yang. Power flow tracing method considering loss allocation [J]. Proceedings of Electric Power System and Automation, 2005, 17(4): 89-93.
- [25] 陈大玮. 电-气综合能源系统建模与协同优化运行研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- CHEN Dawei. Modelling and coordinated optimization operation of non-isothermal integrated power and natural gas systems [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.

作者简介:

张运舸(2000—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为综合能源系统低碳优化调度(**E-mail**: 22310096@zju.edu.cn);

包哲静(1974—), 女, 副教授, 博士研究生导师, 博士, 通信作者, 主要研究方向为综合能源系统优化、人工智能在电力系统的应用(**E-mail**: zjbao@zju.edu.cn);

于 淼(1984—), 男, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要研究方向为微电网建模、控制与优化(**E-mail**: zjyumiao@zju.edu.cn)。

(编辑 王锦秀)

Bidirectional allocation method between source and load of carbon emission responsibility for loss in integrated energy system

ZHANG Yunge¹, BAO Zhejing¹, YIN Jianbing², YU Miao¹, WANG Gang², YU Danqi², HE Sifan³

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Hangzhou Power Supply Company of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310016, China;

3. Zhongyaoda Digital Energy Eco-technology(Zhejiang) Co., Ltd., Hangzhou 310015, China)

Abstract: Aiming at the unclear allocation problem of carbon emission responsibility for loss in integrated energy system among energy source and load, an exergy-based carbon emission allocation model for energy conversion equipment and a power flow tracking-based carbon emission responsibility allocation method for loss in integrated energy system are proposed. A carbon emission allocation model for energy conversion equipment is introduced considering the exergy loss, which allocates the carbon emission responsibility corresponded to the exergy loss to the energy conversion equipment and its output energy flow based on an adjustable parameter. Aiming at the energy conversion equipment with multiple output types, the output energy flow carbon emission is allocated among different types of output energy flow based on the exergy allocation method, which obtains the carbon emission intensity of different types of energy flow. According to the carbon emission allocation model of energy conversion equipment and the electricity-thermal-gas power flow model, a unified matrix calculation equation for bidirectional allocation of network loss between source and load is derived based on the power flow tracking method, the electricity-thermal-gas network loss is allocated to the source and load terminals based on the adjustable parameters, thereby the carbon emission responsibility for loss at the source and load terminals are obtained. The example results verify the effectiveness and rationality of the proposed model and method. The refined and rational allocation of carbon emission responsibility for loss in integrated energy system is helpful for accurately tracking and tracing the carbon emission, enhances the carbon emission responsibility awareness of each entity, and reduces the system carbon emission.

Key words: integrated energy system; carbon emission flow; carbon emission responsibility; exergy loss; network loss