

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1026.2012.15.007

碳排放流在电力网络中分布的特性与机理分析

周天睿¹, 康重庆¹, 徐乾耀¹, 陈启鑫¹, 辛建波², 吴越²

(1. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 清华大学, 北京市 100084;

2. 江西省电力科学研究院, 江西省南昌市 330006)

摘要:碳排放流的分析与计算是基于电力网络拓扑结构而实现的。在此基础上,可以研究碳排放流在电力网络中的分布特性与机理,揭示和辨识电力系统中的高碳要素,以便进一步实现相应的优化决策。为此,文中定义了电力系统碳排放流的 2 种分布因子,可以清晰地表征碳排放流的分布特性。提出了 3 种关联矩阵的概念和定义,结合电力网络分析手段,分析了电力系统中发电机组的碳排放与流过支路、节点以及与电力负荷相对应的碳排放流的等量关联关系,揭示了碳排放流在电力系统中的产生、传输和消费的机理。提出了碳排放流关联矩阵的计算方法,用 IEEE 14 节点系统验证了该方法的正确性。

关键词:低碳电力技术;碳排放流;分布特性;碳流分布因子;碳排放流关联矩阵

0 引言

在低碳发展的大环境下,电力系统碳排放流理论框架的引入为低碳电力的研究带来了新的思路^[1-5]。在既有潮流分析和碳排放流理论体系^[1]的基础上,文献[2]讨论了潮流计算与碳排放流计算(简称碳流计算)的联系,提出了电力系统碳排放流的基本计算方法。

依照文献[2]中碳排放流的基本计算方法,可以实现对全系统中各条支路和节点碳流率与碳势的求解。通过该方法,可以得到系统中“高碳要素”(碳势高的节点和碳流率重的线路)的分布情况。为了清楚地描述碳排放流从发电侧流向用电侧的过程和机理,需要进一步研究碳排放流在电力系统中分布的特性与机理,使碳流理论成为从计算评估迈向优化决策的桥梁。

在电力网络中,因系统中流入所有支路与节点的潮流和碳排放流均来源于系统中的发电机组,机组类型的差异、接入系统位置的区别、出力的不同等都会影响系统的碳排放流分布(简称碳流分布)。在潮流分析中,基于网络拓扑实现分析计算是非常重要的,例如:文献[6]提出了“电力系统功率分布因子”的概念,实现了节点负荷功率与机组出力间的关联。在碳排放流分析(简称碳流分析)中,网络拓扑

同样处于关键性地位,一个直观的思路是通过网络拓扑将流过支路和节点的碳排放流与系统中发电机组注入的碳排放流对应起来,由此发现碳排放流形成的机理,识别碳排放流从发电机组流向负荷的通道。这个工作将有助于电力系统对自身高碳要素的辨识,以进行针对性的优化决策。基于此,本文将针对碳排放流在电力网络中的分布机理与特性展开研究。

1 碳流分布的特性与分布因子

发电机组对电力系统中流入目标节点和支路中碳排放流的影响,很大程度上取决于该机组注入系统的潮流从机组所在节点流向目标节点的路径与方式。为清晰地描述碳流分布特性及机组与碳流分布的关联情况,需定义 2 个与碳流分析相关的分布因子。

1.1 节点输出分布因子

节点输出分布因子用于表征某时刻从起始节点流向相邻目标节点的网络流(可以是有功潮流,也可以是碳排放流)与流入该起始节点的网络流(有功潮流或碳排放流)总量的比例关系。与已有的发电机有功功率分布因子^[6-8]不同,节点输出分布因子描述对象为系统中的节点。

定义节点 i 至节点 j 的节点有功输出分布因子 H_{ij}^P 为:

$$H_{ij}^P = \frac{P_{ij}}{P_{\Sigma i}} \quad (1)$$

式中: P_{ij} 为从节点 i 经支路 (i, j) 流至相邻节点 j 的

收稿日期: 2012-05-11。

国家自然科学基金资助项目(51107059);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20100002110007)。

有功潮流; $P_{\Sigma i}$ 为流入节点 i 的有功功率之和(即节点有功通量^[2])。

若两节点间无支路相连或者直接相连的支路上无正向有功潮流流入, 则 $H_{ij}^p = 0$, 特别地, 当 $i = j$ 时, $H_{ij}^p = 1$ 。

同理, 碳排放流的节点输出分布因子 H_{ij}^f 为:

$$H_{ij}^f = \frac{R_{ij}}{R_{\Sigma i}} \quad (2)$$

式中: R_{ij} 为从节点 i 经支路 (i, j) 流至相邻节点 j 的碳流率; $R_{\Sigma i}$ 为节点 i 的总流入碳流率。

若令 ρ_{ij} 为支路 (i, j) 的碳流密度, e_i 为节点 i 的碳势, 则根据碳排放流的性质, 有

$$\frac{H_{ij}^f}{H_{ij}^p} = \frac{\frac{R_{ij}}{R_{\Sigma i}}}{\frac{P_{ij}}{P_{\Sigma i}}} = \frac{R_{ij}}{P_{ij}} \frac{P_{\Sigma i}}{R_{\Sigma i}} = \frac{\rho_{ij}}{e_i} = 1 \quad (3)$$

由此可知, 对给定的起始节点和相邻节点, 碳排放流输出分布因子与潮流输出分布因子相等, 在电力系统碳流分析中可将两者统称为节点输出分布因子, 用符号 H_{ij} 表示。对 N 节点系统, 建立每个节点至系统其他节点的输出分布因子矩阵 $\mathbf{H}$, 即

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \cdots & H_{1N} \\ H_{21} & H_{22} & \cdots & H_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ H_{N1} & H_{N2} & \cdots & H_{NN} \end{bmatrix} \quad (4)$$

上述矩阵称为节点输出分布矩阵, 用此进一步描述系统在给定运行稳态下的潮流与碳排放流的分布信息。

1.2 路径输出分布因子

路径输出分布因子用于表征在某条路径下从起始节点流出的网络流(既可以是有功潮流, 也可以是碳排放流)对流入目标节点网络流总量的贡献率。

假设电网中从节点 i 到节点 j 存在一条潮流路径 l , 该路径中支路的集合为 $L(l)$, 那么从节点 i 到节点 j 的该条路径 l 的输出分布因子 $D_{ij}^{p(l)}$ 为:

$$D_{ij}^{p(l)} = \prod_{(r,s) \in L(l)} H_{rs}^p \quad (5)$$

如果从节点 i 到节点 j 存在多条潮流路径, 设所有从节点 i 到节点 j 的潮流路径的集合为 Γ , 则从节点 i 到节点 j 的路径输出分布因子 D_{ij}^p 为:

$$D_{ij}^p = \sum_{l \in \Gamma} \left(\prod_{(r,s) \in L(l)} H_{rs}^p \right) \quad (6)$$

类似地, 可定义碳排放流的路径输出分布因子为 D_{ij}^f 。因路径输出分布因子由节点输出分布因子计算得到, 且碳排放流和有功潮流的路径分布因子与节点分布因子的推导过程相同, 因此, 碳排放流和有功潮流的路径输出分布因子被证明相等, 即

$$D_{ij}^f = D_{ij}^p \quad (7)$$

可将 D_{ij}^f 和 D_{ij}^p 统称为路径输出分布因子, 以符

号 D_{ij} 表示。对节点数为 N 、其中 K 个节点存在发电机组注入的系统, 建立从每个存在发电机组的节点至系统其他节点的路径输出分布因子矩阵 $\mathbf{D}$:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & \cdots & D_{1N} \\ D_{21} & D_{22} & \cdots & D_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ D_{K1} & D_{K2} & \cdots & D_{KN} \end{bmatrix} \quad (8)$$

上述矩阵称为系统注入的路径输出分布矩阵, 用此表征发电机组注入系统的潮流和碳排放流从发电机组所在节点流至目标节点的路径信息。

2 碳排放流在电网中的分布机理

由于碳流分析注重碳排放流在系统中的生产、传输和消费, 因此针对电力系统碳排放流的基本分析将围绕上述 3 个方面展开, 通过建立 3 种关联矩阵来描述系统中碳排放流的分布机理。

2.1 机组-节点碳流关联分析

对于电网中的某个节点 i ($i=1, 2, \dots, N$), 任意时刻流入该节点的碳排放流由系统中的发电机组提供, 各机组对该节点的碳流率的贡献与发电机组碳流注入及接入系统位置有关, 可由路径分布因子表征。流入节点 i 的碳流率之和 $R_{\Sigma i}$ 为:

$$R_{\Sigma i} = \sum_{k=1}^K P_{Gk} e_{Gk} D_{ki} \quad (9)$$

式中: P_{Gk} 和 e_{Gk} 分别为第 k ($k=1, 2, \dots, K$) 台发电机组的有功出力 and 碳排放强度。

由式(9)可知, 系统中流入节点 i 的碳流率中来自于第 k 台发电机组的分量为:

$$R_{G,k-i} = P_{Gk} e_{Gk} D_{ki} \quad (10)$$

将其扩充为矩阵形式, 可得系统中所有发电机组的碳流注入对流入另一节点碳流率的贡献情况。为此, 定义机组-节点碳流关联矩阵 (unit-node carbon emission flow incidence matrix), 其为 $K \times N$ 阶矩阵, 用 $\mathbf{R}_{U-N} = (R_{G,k-j})_{K \times N}$ 表示。该矩阵第 k 行第 j 列元素为 $R_{G,k-i}$, 即

$$\mathbf{R}_{U-N} = \begin{bmatrix} R_{G,1-1} & R_{G,1-2} & \cdots & R_{G,1-N} \\ R_{G,2-1} & R_{G,2-2} & \cdots & R_{G,2-N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ R_{G,K-1} & R_{G,K-2} & \cdots & R_{G,K-N} \end{bmatrix} \quad (11)$$

将式(10)代入式(11), 同时利用节点碳势向量 $\mathbf{E}_N = [e_{N1}, e_{N2}, \dots, e_{NN}]^T$, 则式(11)可化为:

$$\mathbf{R}_{U-N} = \text{diag}(\mathbf{E}_N) \text{diag}(P_{G1}, P_{G2}, \dots, P_{GK}) \mathbf{D} \quad (12)$$

结合注入潮流分布矩阵 $\mathbf{P}_G$ 的定义, 式(12)可进一步整理为:

$$\mathbf{R}_{U-N} = \text{diag}(\mathbf{E}_G) \text{diag}(\mathbf{P}_G \boldsymbol{\zeta}_N^T) \mathbf{D} \quad (13)$$

式中: $\boldsymbol{\zeta}_N$ 为 N 维行向量, 其中所有元素为 1; $\mathbf{E}_G$ 为发电机组碳排放强度向量。

2.2 机组-支路碳流关联分析

由节点输出分布因子的定义,流过支路 (i,j) 的碳排放流中来自第 k 台发电机组的分量可表示为:

$$R_{G,k-(i,j)} = H_{ij}R_{G,k-i} \quad (14)$$

将其扩充为矩阵形式,可得系统中第 k 台发电机组的碳流注入系统中所有支路碳流率的贡献情况。为此,定义机组-支路碳流关联矩阵(unit-branch carbon emission flow incidence matrix),其为 $N \times N$ 阶矩阵,用 $\mathbf{R}_{U-B,k} = (R_{ij})_{N \times N}$ 表示,即

$$\mathbf{R}_{U-B,k} = \begin{bmatrix} R_{G,k-(1,1)} & R_{G,k-(1,2)} & \cdots & R_{G,k-(1,N)} \\ R_{G,k-(2,1)} & R_{G,k-(2,2)} & \cdots & R_{G,k-(2,N)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ R_{G,k-(N,1)} & R_{G,k-(N,2)} & \cdots & R_{G,k-(N,N)} \end{bmatrix} \quad (15)$$

由节点输出分布因子的性质,该矩阵第 i 行对角元素等于 $R_{G,k-i}$ 。将式(10)、式(14)代入式(15),可得

$$\mathbf{R}_{U-B,k} = R_{Gk} \text{diag}(D_{k1}, D_{k2}, \dots, D_{kN}) \mathbf{H} \quad (16)$$

式中: R_{Gk} 为第 k 台发电机组注入系统的碳排放流,其为 P_{Gk} 和 e_{Gk} 的乘积。

令 $\boldsymbol{\eta}_N^{(k)}$ 为 N 维单位行向量(其中第 k 个元素为1,其余元素为0),则式(16)可化简为:

$$\mathbf{R}_{U-B,k} = P_{Gk} e_{Gk} \text{diag}(\boldsymbol{\eta}_N^{(k)} \mathbf{D}) \mathbf{H} \quad (17)$$

需要注意,机组-节点碳流关联矩阵包含了系统中所有机组对系统节点碳流分布的贡献情况,而机组-支路碳流关联矩阵仅包含了第 k 台发电机组对系统支路的贡献情况。

2.3 机组-负荷碳流关联分析

根据比例共享原则,对于系统中某存在负荷的节点,系统中所有机组的碳流注入对负荷碳流率的贡献比例与对流入该节点碳流率总和的贡献比例相等^[1,9]。若第 $i(i=1,2,\dots,N)$ 个节点存在负荷 P_{Li} 且对应的碳流率为 R_{Li} ,则其中来自于第 k 台机组的分量应为:

$$R_{Gk-Li} = R_{G,k-i} \frac{R_{Li}}{R_{\Sigma i}} = R_{G,k-i} \frac{P_{Li}}{P_{\Sigma i}} \quad (18)$$

将其扩充为矩阵形式,可得系统中所有发电机组的碳流注入对其他节点负荷对应碳流率的贡献情况。为此,定义机组-负荷碳流关联矩阵(unit-load carbon emission flow incidence matrix),其为 $K \times N$ 阶矩阵,用 $\mathbf{R}_{U-L} = (R_{Gk-Li})_{K \times N}$ 表示,即

$$\mathbf{R}_{U-L} = \begin{bmatrix} R_{G1-L1} & R_{G1-L2} & \cdots & R_{G1-LN} \\ R_{G2-L1} & R_{G2-L2} & \cdots & R_{G2-LN} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ R_{GK-L1} & R_{GK-L2} & \cdots & R_{GK-LN} \end{bmatrix} \quad (19)$$

将式(18)代入式(19),同时利用节点有功通量矩阵 $\mathbf{P}_N$ 和负荷分布矩阵 $\mathbf{P}_L$ ^[2]的定义和性质,有

$$\mathbf{R}_{U-L} = \mathbf{R}_{U-N} \text{diag}(\boldsymbol{\zeta}_N \mathbf{P}_L) \mathbf{P}_N^{-1} \quad (20)$$

由于上述分析方法基于系统节点碳势和潮流分布存在并可求的前提下展开,因此 $\mathbf{P}_N^{-1}$ 的存在可以得到保证。

3 关联矩阵的计算方法

上文3种关联矩阵揭示了电力系统中碳排放流形成与分布的机理。显然,这些矩阵的准确快速计算将为碳流分析提供有力的保障。为此,本文研究了关联矩阵的计算方法。由于机组-负荷碳流关联矩阵可按式(20)由机组-节点碳流关联矩阵得出,故在此只介绍机组-节点碳流关联矩阵和机组-支路碳流关联矩阵的计算方法。

3.1 机组-节点碳流关联矩阵的计算方法

对碳流关联矩阵的计算,主要需解决矩阵 $\mathbf{H}$ 和矩阵 $\mathbf{D}$ 的计算和处理方法。根据支路潮流分布矩阵 $\mathbf{P}_B$ 和机组注入分布矩阵 $\mathbf{P}_G$ 的定义和性质,不难得到:

$$\mathbf{P}_N^{-1} \mathbf{P}_B = \begin{bmatrix} 0 & \frac{P_{12}}{P_{\Sigma 1}} & \cdots & \frac{P_{1N}}{P_{\Sigma 1}} \\ \frac{P_{21}}{P_{\Sigma 2}} & 0 & \cdots & \frac{P_{2N}}{P_{\Sigma 2}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{P_{N1}}{P_{\Sigma N}} & \frac{P_{N2}}{P_{\Sigma N}} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

因此,有

$$\mathbf{H} = \mathbf{I} + \mathbf{P}_N^{-1} \mathbf{P}_B \quad (22)$$

式中: $\mathbf{I}$ 为单位矩阵。

当系统经过校验可进行碳排放流的基本计算时, $\mathbf{P}_N$ 的可逆性可以得到保证,因此 $\mathbf{H}$ 的存在性可以得到保证。

根据矩阵 $\mathbf{D}$ 的定义,将式(9)扩充成矩阵形式,可得

$$\mathbf{P}_N \mathbf{E}_N = \mathbf{D}^T \text{diag}(\mathbf{P}_G \boldsymbol{\zeta}_N^T) \mathbf{E}_G \quad (23)$$

$$\mathbf{E}_N = \mathbf{P}_N^{-1} \mathbf{D}^T \text{diag}(\mathbf{P}_G \boldsymbol{\zeta}_N^T) \mathbf{E}_G \quad (24)$$

由系统节点碳势基本计算方法^[2]得到:

$$\mathbf{E}_N = (\mathbf{P}_N - \mathbf{P}_B^T)^{-1} \mathbf{P}_G^T \mathbf{E}_G \quad (25)$$

对比式(24)和式(25),可得

$$\mathbf{D}^T \text{diag}(\mathbf{P}_G \boldsymbol{\zeta}_N^T) = \mathbf{P}_N (\mathbf{P}_N - \mathbf{P}_B^T)^{-1} \mathbf{P}_G^T \quad (26)$$

当系统中所有机组出力均不为0时, $\text{diag}(\mathbf{P}_G \boldsymbol{\zeta}_N^T)$ 可逆,可由式(26)求得 $\mathbf{D}$,并进一步得到各种碳流关联矩阵。若系统中存在零出力机组时, $\text{diag}(\mathbf{P}_G \boldsymbol{\zeta}_N^T)$ 不可逆,此种情况下不能求出 $\mathbf{D}$ 。一种处理方法是该机组从系统中去除,消去 $\mathbf{P}_G$ 中的全零行,使 $\mathbf{D}$ 可求。然而此方法需要改变 $\mathbf{P}_G$ 矩阵的阶数。为避免因 $\text{diag}(\mathbf{P}_G \boldsymbol{\zeta}_N^T)$ 不可逆而带来的计

算不便,将式(23)两边取转置,注意到 $\text{diag}(\mathbf{P}_G \boldsymbol{\zeta}_N^T)$ 为对角阵,可得

$$\text{diag}(\mathbf{P}_G \boldsymbol{\zeta}_N^T) \mathbf{D} = [\mathbf{P}_N (\mathbf{P}_N - \mathbf{P}_B^T)^{-1} \mathbf{P}_G^T]^T \quad (27)$$

进一步,由式(13)和式(27)可得:

$$\mathbf{R}_{U-N} = \text{diag}(\mathbf{E}_G) [\mathbf{P}_N (\mathbf{P}_N - \mathbf{P}_B^T)^{-1} \mathbf{P}_G^T]^T \quad (28)$$

3.2 机组-支路碳流关联矩阵的计算方法

在 $\mathbf{R}_{U-B,k}$ 的计算中,同样会遇到矩阵 $\text{diag}(\mathbf{P}_G \boldsymbol{\zeta}_N^T)$ 求逆的问题。根据式(16)和式(17)可以发现,矩阵 $\mathbf{R}_{U-B,k}$ 使用的只有 $\mathbf{D}$ 矩阵的第 k 行元素,其物理意义为第 k 台发电机组对系统中各个节点的路径输出分布因子。实际上, $\text{diag}(\mathbf{P}_G \boldsymbol{\zeta}_N^T) \mathbf{D}$ 的实质是将矩阵 $\mathbf{D}$ 的第 k 行元素乘以第 k 台机组的实时出力,若第 k 台机组出力为 0,即 $P_{Gk}=0$,则该机组对系统中所有支路均无潮流和碳排放流的贡献,矩阵 $\mathbf{D}$ 的第 k 行元素均为 0,同时 $\mathbf{R}_{U-B,k}$ 为零矩阵。若第 k 台机组出力 P_{Gk} 不为 0,将 $\text{diag}(\mathbf{P}_G \boldsymbol{\zeta}_N^T) \mathbf{D}$ 的第 k 行取出除以 P_{Gk} ,即得到 $\mathbf{D}$ 矩阵的第 k 行元素。即

$$\boldsymbol{\eta}_N^{(k)} \mathbf{D} = P_{Gk}^{-1} \boldsymbol{\eta}_N^{(k)} \text{diag}(\mathbf{P}_G \boldsymbol{\zeta}_N^T) \mathbf{D} \quad (29)$$

结合式(17)、式(22)、式(27)和式(29)可得:

$$\mathbf{R}_{U-B,k} = \text{diag}((\mathbf{P}_N (\mathbf{P}_N - \mathbf{P}_B^T)^{-1} \mathbf{P}_G^T) \boldsymbol{\eta}_N^{(k)}) \cdot (\mathbf{I} + \mathbf{P}_N^{-1} \mathbf{P}_B) \mathbf{e}_{Gk} \quad (30)$$

4 实例分析

本文针对 IEEE 14 节点系统进行了实例分析。在不计网损的条件下,系统潮流分布可用直流潮流法计算。系统中各机组出力、各节点有功负荷以及稳态时的系统有功潮流分布如图 1 所示,图中有小数点的数据单位均为 MW。

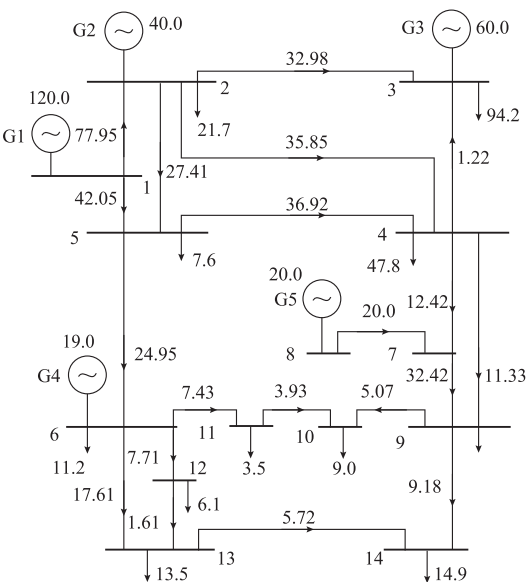


图 1 IEEE 14 节点系统稳态潮流分布
Fig. 1 Steady power flow of IEEE 14-bus system

由直流潮流计算结果可形成 $\mathbf{P}_B$, $\mathbf{P}_G$ 和 $\mathbf{P}_N$ 。设定 G1 为燃煤机组,其碳排放强度较高;G2 和 G4 为燃气机组,其碳排放强度较小;G3 和 G5 分别为分布式风电机组和水电机组,其碳排放强度为 0。给定所有发电机组碳排放强度向量如下:

$$\mathbf{E}_G = [875.0 \quad 525.0 \quad 0 \quad 520.0 \quad 0]^T \quad (31)$$

由式(28)得到系统的机组-节点碳流关联矩阵 $\mathbf{R}_{U-N}$,进而得到电力网络中流入各个节点的碳流率里来自系统中所有机组的分量明细,如表 1 所示(因 G3 和 G5 为零碳机组,对系统碳流分布贡献均为 0,无需在表格中单独列出)。

表 1 机组对节点流入碳流率的贡献
Table 1 Unit carbon emission flow rate contribution to each node

母线	机组对节点流入碳流率的贡献/(tCO ₂ · h ⁻¹)		
	G1	G2	G4
1	105.00	0	0
2	68.21	21.00	0
3	19.89	6.02	0
4	48.71	8.98	0
5	52.64	4.88	0
6	18.91	1.75	9.88
7	8.31	1.53	0
8	0	0	0
9	15.90	2.93	0
10	3.53	0.50	0.88
11	3.20	0.30	1.67
12	3.32	0.31	1.73
13	8.27	0.77	4.32
14	5.80	0.84	1.29

由表 1 可知,因机组 G2 并无潮流注入母线 1,因此其对流入母线 1 的碳排放流的贡献为 0。机组 G4 注入系统的潮流仅流入系统中少数几条母线,这在表 1 中也有明确体现。母线 8 仅有零碳机组注入潮流,因此所有机组对该母线均无碳排放流的贡献。

同时由式(30)可得到机组 G1, G2 和 G4 的机组-支路碳流关联矩阵 $\mathbf{R}_{U-B,1}$, $\mathbf{R}_{U-B,2}$ 和 $\mathbf{R}_{U-B,3}$,即对系统中各个支路的碳流率贡献,如表 2 所示。表 2 分析结果与碳流分布计算结果相符,也符合系统潮流分布的实际情况。可以看出,系统中大部分支路中的碳排放流均由碳排放强度较高的 G1 机组提供。

进一步,由式(20)可以得到系统中机组对负荷对应碳流率的贡献,如表 3 所示。从表 3 可以看出,对不含负荷的节点(母线 1、母线 7 和母线 8),系统中机组对该节点负荷对应的碳排放流均无贡献。系统中多数负荷对应的碳流率均来源于机组 G1,而母线 13 负荷对应的碳流率中来源于 G4 机组的部分占了较大比例。

表 2 机组对支路碳流率的贡献
Table 2 Unit carbon emission flow rate contribution to each branch

起始节点	终止节点	支路碳流率/ ($\text{tCO}_2 \cdot \text{h}^{-1}$)	机组对支路碳流率的贡献/($\text{tCO}_2 \cdot \text{h}^{-1}$)		
			G1	G2	G4
1	2	68.21	68.21	0	0
1	5	36.79	36.79	0	0
2	3	24.94	19.07	5.87	0
2	4	27.11	20.73	6.38	0
2	5	20.73	15.85	4.88	0
3	4	-0.97	-0.82	-0.15	0
4	5	-30.57	-27.98	-2.59	0
4	7	9.84	8.31	1.53	0
4	9	8.98	7.58	1.40	0
5	6	20.66	18.91	1.75	0
6	11	5.17	3.20	0.30	1.67
6	12	5.36	3.32	0.31	1.73
6	13	12.24	7.58	0.70	3.96
7	8	0	0	0	0
7	9	9.84	8.31	1.53	0
9	10	2.18	1.84	0.34	0
9	14	3.95	3.34	0.61	0
10	11	-2.73	-1.69	-0.16	-0.88
12	13	1.11	0.69	0.06	0.36
13	14	3.98	2.46	0.23	1.29

表 3 机组对负荷碳流率的贡献
Table 3 Unit carbon emission flow rate contribution to each load

母线	机组对负荷碳流率的贡献/($\text{tCO}_2 \cdot \text{h}^{-1}$)			总负荷碳流率/ ($\text{tCO}_2 \cdot \text{h}^{-1}$)
	G1	G2	G4	
1	0	0	0	0
2	12.55	3.86	0	16.41
3	19.89	6.02	0	25.91
4	32.00	5.90	0	37.90
5	5.76	0.53	0	6.29
6	4.82	0.45	2.52	7.78
7	0	0	0	0
8	0	0	0	0
9	10.72	1.98	0	12.70
10	3.53	0.50	0.88	4.91
11	1.50	0.14	0.79	2.43
12	2.62	0.24	1.37	4.24
13	5.81	0.54	3.03	9.38
14	5.80	0.84	1.29	7.93
总计	105.00	21.00	9.88	135.88

由此,上述碳流分布机理分析可以用于未来的低碳规划与决策。例如:当试图通过加装碳捕集装置来降低系统的碳排放强度时,对系统中不同支路、节点乃至负荷碳流率的下降效果可由上述分析过程进行定量评估,其有助于对系统中碳流率较大、碳势较高的区域进行合理优化和改善,同时,也为面向低碳的新技术、新机制与新标准的出台^[10-12]提供决策依据。此外,机组输出总碳流率与 3 台机组贡献加

总所得的负荷对应碳流率与文献[2]中计算结果一致,因此该方法满足碳流守恒条件。

5 结语

基于电力网络拓扑结构和碳排放流的计算方法,本文对碳排放流在电网中的分布特性与机理进行了剖析。结合高等电力网络分析方法,本文定义了节点输出分布因子和路径输出分布因子,以描述电网中碳流分布的特性。在此基础上,提出了 3 种关联矩阵,分别描述电力系统中流过每个节点、每条支路和与每处负荷相对应的碳排放流与系统中所有发电机组碳排放的等量关联关系,以揭示电网中碳排放流的产生、传输和消费的机理。进一步,本文建立了关联矩阵计算方法,并通过 IEEE 14 节点系统对方法的正确性进行了验证。由此,碳排放流在电网中的“来龙去脉”可得到清晰的展示,有助于对系统高碳要素的辨识,为进一步面向低碳的电力系统优化提供量化依据。希望本文的工作为电力系统碳流理论和低碳电力研究的进一步发展提供参考。

参 考 文 献

[1] 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.
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.

[2] 周天睿,康重庆,徐乾耀,等. 电力系统碳排放流的基本计算方法初探[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.

[3] 陈启鑫,康重庆,夏清,等. 电力行业低碳化的关键要素分析及其对电源规划的影响[J]. 电力系统自动化,2009,33(15):18-23.
CHEN Qixin, KANG Chongqing, XIA Qing, et al. Key low-carbon factors in the evolution of power decarbonisation and their impacts on generation expansion planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(15): 18-23.

[4] 张坤民,潘家华,崔大鹏. 低碳经济论[M]. 北京:中国环境科学出版社,2008.

[5] GRUBB M, JAMASB T, POLLITT M G. Delivering a low-carbon electricity system[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2008.

[6] 颜丽,鲍海. 基于电流分布的电网功率分布因子的计算[J]. 中国电机工程学报,2011,31(1):80-85.
YAN Li, BAO Hai. Algorithm of power distribution factor based on current distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 80-85.

[7] 张伯明,陈寿孙,严正. 高等电力网络分析[M]. 2 版. 北京:清华大学出版社,2008.

[8] 艾东平,鲍海,杨以涵.用于发电权交易安全校验的发电机有功功率线性分布因子算法[J]. 电力自动化设备,2010,30(12): 42-46.
AI Dongping, BAO Hai, YANG Yihan. Algorithm of generation linear distribution factors for security analysis of generation rights trade [J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(12): 42-46.

[9] BIALEK J. Tracing the flow of electricity[J]. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 1996, 143(4): 313-320.

[10] 王彩霞,乔颖,鲁宗相,等. 低碳经济下风火互济系统日前发电计划模式分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(22):111-117.
WANG Caixia, QIAO Ying, LU Zongxiang, et al. Day-ahead dispatch mode for wind-thermal power system in low-carbon economy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 111-117.

[11] 谭伟,何光宇,刘锋,等. 智能电网低碳指标体系初探[J]. 电力系统自动化,2010,34(17):1-5.
TAN Wei, HE Guangyu, LIU Feng, et al. A preliminary investigation on smart grid's low-carbon index system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 1-5.

[12] 宋永华,杨霞,孙静. 低碳高效安全可靠智能电网[J]. 中国能源,2009(10):23-27.
SONG Yonghua, YANG Xia, SUN Jing. Smart grid of low-carbon, high efficiency, security and reliability[J]. Energy of China, 2009(10): 23-27.

Analysis on Distribution Characteristics and Mechanisms of Carbon Emission Flow in Electric Power Network

ZHOU Tianrui¹, KANG Chongqing¹, XU Qianqiao¹, CHEN Qixin¹, XIN Jianbo², WU Yue²

(1. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330006, China)

Abstract: Topological structure of electric network is the foundation of carbon emission flow calculation and analysis. Based on that, distribution characteristics and mechanisms of carbon emission flow in electric network can be studied and the high carbon element in power systems can be revealed and identified, in order to achieve optimized decision-making. As such, two carbon emission flow distribution factors are defined to give clear representation of carbon emission flow distribution characteristics. With the proposed concept and definition of three incidence matrices, the corresponding relationship between the carbon emission from generation units and carbon emission flow in electric network can be analyzed. Thus the mechanism of the generation, transmission and consumption of carbon emission flow in electric network is revealed. The calculation methods of carbon emission incidence matrices are also given. Taking IEEE 14-bus system for case studies, the validity of this method is proven.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51107059) and Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (No. 20100002110007).

Key words: low carbon electricity technology; carbon emission flow; distribution characteristics; carbon emission flow distribution factors; carbon emission flow incidence matrix

抽蓄机组变频器实现国产化

2012年6月19日,“抽水蓄能机组启动变频器国产化研制”科技项目通过国家电网公司验收。该项目由国网新源控股有限公司和国网电力科学研究院共同完成,并在新源公司潘家口抽水蓄能电厂成功完成了示范应用。

启动变频器是抽水蓄能电站的核心控制设备,其技术与市场长期被国外少数企业所垄断。抽水蓄能机组启动变频器的成功研制,标志着中国已完全掌握启动变频器核心关键技术,打破了国外企业的长期技术垄断,突破了该技术领域国产化的技术瓶颈,提高了国内抽水蓄能机组自动化核心技术水平,极具推广应用价值。

【摘自国家电网报】