

电力系统碳排放流的递推算法

康重庆^{1,2}, 程耀华^{1,2}, 孙彦龙^{1,2}, 张 宁^{1,2}, 孟珩遐³, 闫华光³

(1. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市 100084;

2. 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;

3. 中国电力科学研究院, 北京市 100192)

摘要:碳排放流理论为电力系统中碳排放责任的分摊提供了新的视角。基于节点碳势计算中的邻接特性,文中提出了电力系统碳排放流的递推算法,论述了递推算法的基本原理及计算过程。然后,分析对比了递推算法和已有的直接算法的特点和适用性,并进一步将二者结合,提出了碳排放流的协同计算流程。最后,以简单电力系统为分析对象,具体说明了所提递推算法的递推过程。并以 IEEE 24 节点系统和挪威 2 383 节点系统为例,测试了递推算法在实际电力系统应用中的有效性。

关键词:碳排放流; 节点碳势; 递推算法; 协同计算; 多能源系统

0 引言

碳排放流是依附于电网中有功潮流存在的一种虚拟网络流,用于表征某一支路上所流过功率对应的碳排放^[1]。文献[1-3]建立了碳排放流的理论体系,提出了碳排放流的计算方法,并分析了碳排放流在电力网络中分布的特性与机理。碳排放流理论体系的建立可以在用户侧实现碳排放责任的计量,为低碳电力系统的分析提供了新的视角,得到了学者们的广泛关注。文献[4]基于碳排放流理论,提出了一种电力系统碳排放在发电、电网及用电各环节之间的分摊方法。文献[5]从二次能源终端消费的角度出发,基于碳排放流理论提出了中国分省化石能源消费碳排放量的计算方法,有利于厘清能源生产地与终端消费市场间的利益分配。文献[6]提出了一种考虑风电随机和不确定性功率注入对碳排放流影响的分析方法,计算了风电注入功率对碳排放流的影响因子。文献[7]在考虑网损的复功率潮流追踪模型基础上建立了碳排放流追踪模型,可以体现无功功率对碳排放流的影响。文献[8]则建立了一种最优碳排放流的计算方法。

现有电力系统碳排放流的计算方法是在求解全网有功潮流分布的基础上,形成支路潮流分布、机组注入分布、负荷分布及节点有功通量等一系列矩阵,根据所得矩阵经直接运算,一次性得到全系统碳排放流的分布^[2],在本文中将其称为“碳排放流的直接算法”(在下文中简称为“直接算法”)。该方法的实施需要生成碳排放流计算所需的一系列矩阵,并进行大规模的矩阵运算。

作为一种新的理论探索,本文在已有研究成果的基础上,结合碳排放流相关指标良好的运算性质,研究电力系统碳排放流的递推算法,通过算例验证了递推算法的准确性及在实际电力系统中的适用性。通过分析递推算法和直接算法的适用性,结合电力系统输配电网络的结构特点,提出了应用于实际电力系统的碳排放流协同计算流程,以期在实际系统中碳排放流计算体系提供新的技术选项。

1 碳排放流指标计算的邻接特性

在电力系统中,通过利用本地与邻居的信息交换,可实现系统较为快速的分析与控制。如文献[9]提出的分布式自律控制方法,通过交换本地和邻居的信息,可实现主动配电网无功的优化与电压的快速控制决策;文献[10-11]通过将本地分布式电源与邻居分布式电源的信息交互,实现了微电网的协同优化控制。同样的,电力系统碳排放流计算也可以利用这种“邻接特性”,下面具体阐述。

节点碳势和支路碳流密度是碳排放流理论中的

收稿日期: 2017-05-02; 修回日期: 2017-07-17。

上网日期: 2017-08-01。

国家自然科学基金重点国际合作研究项目(51620105007);
国家电网公司基础性前瞻性科技项目“电网低碳化分析与评价的基础理论与方法研究”。

两项核心指标,分别用于描述流过某一节点和某一支路有功功率对应的碳排放密度。在已知节点碳势或支路碳流密度的情况下,碳排放流的其他相关指标均可在有功潮流分布的基础上计算得到。

电力系统中某一节点的碳势的计算公式为:

$$e_b = \frac{\sum_{g \in \Omega_b^G} G_g e_g^G + \sum_{l \in \Omega_b^{L+}} P_l \rho_l}{\sum_{g \in \Omega_b^G} G_g + \sum_{l \in \Omega_b^{L+}} P_l} \quad (1)$$

式中: Ω_b^G 和 Ω_b^{L+} 分别为与节点 b 相连的发电机组集合和向节点 b 注入有功功率的支路集合; G_g 和 P_l 分别为发电机组 g 的有功出力和支路 l 的有功注入; e_g^G 为发电机组 g 的碳排放强度; ρ_l 为支路 l 的支路碳流密度。

文献[1]中已经证明:所有从节点流出潮流的支路碳流密度均等于该节点的碳势,即满足:

$$\begin{cases} \rho_l = e_n^l \\ n = \Gamma_l^N \end{cases} \quad (2)$$

式中: Γ_l^N 为支路 l 的注入节点; e_n^l 为该节点的碳势。

因此,结合式(1)和式(2)可得到:

$$e_b = \frac{\sum_{g \in \Omega_b^G} G_g e_g^G + \sum_{l \in \Omega_b^{L+}} P_l e_n^l}{\sum_{g \in \Omega_b^G} G_g + \sum_{l \in \Omega_b^{L+}} P_l} \quad (3)$$

从以上公式不难看出,电网中某一节点的碳势只与其注入节点的碳势及支路的有功功率相关,即碳排放流指标的计算具有邻接特性。利用此邻接特性,可实现碳排放流的递推计算,提升碳排放流计算的速度。

2 电力系统碳排放流的递推算法

2.1 递推算法的基本原理

由于电力系统碳排放流计算的邻接特性,在已知潮流分布结果的前提下,计算某一节点碳势时,只需要获取相邻节点的碳排放流结果即可,不需要知道网络中其他节点的碳排放流信息,如图1所示。根据潮流分布的结果,可以获得节点之间的连接关系。对于每一个节点,可以将与其相连的节点分为注入节点和流出节点两类,分别表示该节点的注入支路的首端节点和流出支路的末端节点,即该节点的“源”和“汇”。根据式(3)可知,只有某一节点的所有注入节点的碳势得到以后,才能求解该节点的碳势。而从全网看,发电机组是整个电网的注入,且发电机组的碳排放强度已知,因此发电机组的碳排放流信息可以作为递推计算的边界条件。

根据网络中的潮流分布,可以定义节点连接关

系矩阵 $\mathbf{A}$,其元素表达式为:

$$A_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{节点 } i \text{ 是节点 } j \text{ 的注入节点} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

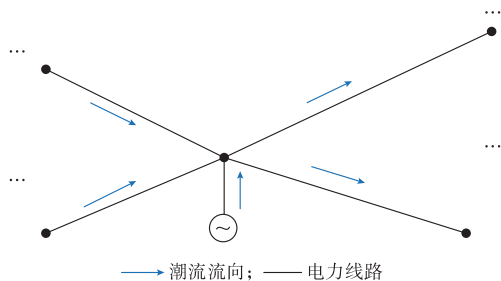


图1 碳排放流的邻接特性示意图
Fig.1 Schematic diagram of adjacency characteristics of carbon emission flow

根据节点连接关系矩阵 $\mathbf{A}$,可以得到节点 j 的注入节点集合,如下式所示:

$$\Omega^j = \{i | A_{ij} = 1\} \quad (5)$$

因此,可得到节点 j 的碳势表达式为:

$$e_j = \frac{\sum_{i \in \Omega_j} P_{i \rightarrow j} e_i + \sum_{g \in \Omega_j^G} G_g e_g^G}{\sum_{i \in \Omega_j} P_{i \rightarrow j} + \sum_{g \in \Omega_j^G} G_g} \quad (6)$$

式中: $P_{i \rightarrow j}$ 为节点 i 向节点 j 注入的有功功率; e_i 为节点 i 的碳势。

根据电力系统碳排放流的邻接特性,可以从与发电机相连的节点开始,采用递推的方式,依次求解网络中其他节点的碳势。每一次的递推过程中,若某一节点的所有注入节点碳势已知,则可求解得到该节点的碳势。因此,每次递推都可得到若干个节点的碳势。最终,通过有限次的递推,即可得到网络中全部节点的碳势。每次递推过程,只需要依次轮询碳势未知的节点,碳势已知的节点作为该次递推的边界条件。因此,可定义节点集合 Π_k ,表示第 k 次递推开始前碳势未知的节点所组成的集合。定义该集合的大小,即碳势未知节点的个数为 N_k 。每次递推过程中,只需要轮询集合 Π_k 中的节点。

此外,在电力网络中,可能出现某些节点没有潮流流过的情况,这些节点被称为悬空节点。由于悬空节点上没有潮流,这些节点对网络的碳流分布没有影响。因此,在递推算法中可以将这些节点从网络中剔除,只计算除悬空节点以外的其他节点的碳势。这与直接算法中需要剔除悬空节点以保证矩阵的可逆性是一致的[2]。

2.2 递推算法的计算流程

根据上文的原理,可得到电力系统碳排放流的递推算法的流程如图2所示。假设该电网中总共有 N 个节点,其中悬空节点个数为 M ,则递推算法的

具体过程如下。

步骤 1: 设置递推次数 k , 并设置 k 的初值为 $k=1$; 设置集合 Π_k 的初值为电网中除悬空节点外所有节点组成的集合, N_k 的初值为 $N_1=N-M$ 。

步骤 2: 按照集合 Π_k 中节点编号的大小, 依次轮询各节点, 设置节点次序 j 的初值为 $j=1$ 。

步骤 3: 轮询集合 Π_k 中第 j 个节点, 找到第 j 个节点的注入节点集合 Ω_j^k , 若集合 Ω_j^k 中所有节点碳势已知, 则根据式(6)计算节点 j 的碳势, 然后进入步骤 4; 若集合 Ω_j^k 中有节点碳势未知, 则跳过本节点, 进入步骤 4 (在第一次递推过程中, 有可能出现 $\Omega_j^k=\emptyset$ 的情形, 则说明只有发电机向该节点注入有功功率, 此时同样可以根据式(6)计算该节点的碳势, 该节点碳势等于向该节点注入有功功率的所有发电机组碳排放强度的加权平均值)。

步骤 4: 判断是否所有节点都已轮询完毕, 即 j 是否小于 N_k 。若是, 则令 $j=j+1$, 重复步骤 3, 继续轮询下一个节点; 否则进入步骤 5。

步骤 5: 令 $k=k+1$, 更新集合 Π_k 及其大小 N_k 。若 $N_k=0$, 则所有节点的碳势都已求出, 进入步骤 6; 否则, 进入步骤 2, 进行下一次递推。

步骤 6: 根据求得的所有节点碳势, 求解网络中的支路碳流率、负荷碳流率等其他变量, 计算结束。

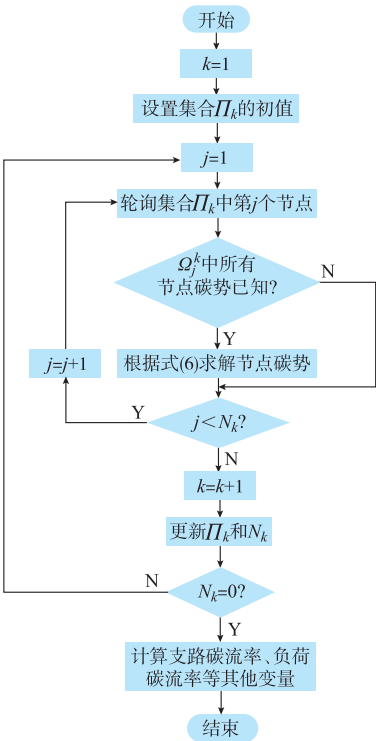


图 2 电力系统碳排放流的递推算法流程图
Fig.2 Flow chart of recursive calculation method of carbon emission flow in power systems

3 递推算法及直接算法的适用性分析

递推算法充分利用了电力系统碳排放流的邻接特性, 避免了大型电力系统中直接算法的大规模矩阵的生成及运算。但是, 由于该方法的每一次递推过程都需要获取注入节点的碳势, 且只有全部注入节点的碳势都已知, 才能得到该节点的碳势。因此, 要求所实施的电网具有小世界网络特性, 即网络中任意两个节点间通过数目较少的支路即可建立联系。如果不属于小世界网络特性, 则每次递推结束后可求解的节点数目较少, 则需要多次的递推才能求得全部节点的碳势。文献[12-13]论述了小世界网络的判定方法。文献[14]分析了美国西部电网和中国北方互联电网, 得出中、美两国的大区电网都属于小世界网络的结论。由于输电网的电压等级较高, 一般具有小世界网络特性, 覆盖范围广且输送功率大, 因此本文所提的递推算法适用于大部分的输电网。

而配电网往往具有辐射状网络结构, 两个节点间的支路数目较多, 由此会导致递推算法所需的递推次数较多, 每次递推过程中需要轮询的节点数目也相应增加。因此, 递推算法对配电网的适用性弱于输电网。但是配电网的覆盖范围一般较小, 节点数目较少, 因此适用于采用直接算法进行计算, 可以在避免递推算法多次递推的同时, 充分计及本地的负荷及分布式电源的用电及碳排放特性。

4 算例分析

本节将分别以简单系统和大规模实际输电系统为例, 说明递推算法的计算过程及计算结果。并将递推算法的结果与直接算法比较, 说明该算法的有效性。

4.1 简单系统中碳排放流的递推计算过程

发电机的碳排放强度及网络中的潮流分布给定以后, 经过若干次的递推可求解得到全网中的所有节点的碳势。

以图 3 所示的简单电力系统为分析对象, 说明本文所提出的递推算法的计算过程。由于电力系统碳排放流计算的关键是求解节点碳势, 因此此处只给出节点碳势的计算结果。图中蓝色箭头代表了有功功率的分布。发电机 G1 和 G2 的碳排放强度分别为 $0.8 \text{ kgCO}_2/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 和 $0.5 \text{ kgCO}_2/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

在某一时刻 t , 初始状况下除发电机外其他节点处的碳排放流指标均未知。系统中碳排放流的分布可通过如下过程计算得到。

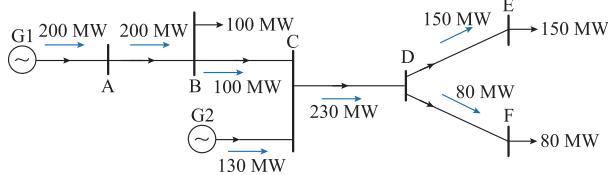


图 3 碳排放流计算示例系统
Fig.3 Example system for carbon emission flow calculation

1)从节点 A 开始依次轮询各节点,在此次递推中节点 A 的碳势可以由式(6)求出,等于发电机 G1 的碳排放强度,即 $e_A=0.8\text{ kgCO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$,其他节点的碳势未知。集合 $\Pi_k=\{B,C,D,E,F\}$,进行下一次递推。

2)依次轮询节点 B 至 F,由于节点 A 的碳势已知,因此可以得到节点 B 的碳势: $e_B=0.8\text{ kgCO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。由于在轮询节点 C 时,节点 B 的碳势仍然是未知的(集合 Π_k 在每次递推结束后才更新),因此节点 C 至 F 的碳势仍然未知。更新集合 Π_k ,进行下一次递推。

3)依次轮询节点 C 至 F,节点 C 的碳势可以根

据节点 B 和发电机组 G2 的碳排放流信息获得, $e_C=0.63\text{ kgCO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。节点 D 至 F 的碳势仍然未知。更新集合 Π_k ,进行下一次递推。

4)依次轮询节点 D 至 F,节点 D 的碳势可以根据节点 C 得到, $e_D=0.63\text{ kgCO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$,节点 E 和 F 的碳势未知。更新集合 Π_k ,进行下一次递推。

5)依次轮询节点 E 和 F,节点 E 和 F 的碳势可以根据节点 D 获得, $e_E=e_F=0.63\text{ kgCO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。全部节点的碳势都已求出,求解结束。

节点碳势求出以后,可以得到网络中的碳排放流分布情况,包括支路碳流密度、支路碳流率、负荷碳流率、碳流量等指标^[2]。

4.2 递推算法在大规模输电系统中的应用

本文所提出的电力系统碳排放流递推算法,同样适用于大规模电力系统。下面分别通过 IEEE 24 节点系统和挪威 2 383 节点系统进行说明。

首先,以 IEEE 24 节点系统^[15]为例,给出递推算法下节点碳势的计算结果。假设发电机组的碳排放强度和潮流分布已知,则节点碳势的递推计算过程如表 1 所示。

表 1 IEEE 24 节点系统中节点碳势的递推计算过程
Table 1 Recursive calculation process of carbon emission intensities in IEEE 24-bus system

节点	碳势/($\text{kgCO}_2\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$)									
	1 次递推	2 次递推	3 次递推	4 次递推	5 次递推	6 次递推	7 次递推	8 次递推	9 次递推	10 次递推
1	—	—	—	—	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53
2	—	—	—	—	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71
3	—	—	—	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
4	—	—	—	—	—	—	—	—	0.48	0.48
5	—	—	—	—	—	—	—	—	0.53	0.53
6	—	—	—	—	—	—	—	—	0.56	0.56
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.58
8	—	—	—	—	—	—	—	—	0.50	0.50
9	—	—	—	—	—	—	—	0.47	0.47	0.47
10	—	—	—	—	—	—	—	0.54	0.54	0.54
11	—	—	—	—	—	—	0.28	0.28	0.28	0.28
12	—	—	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
13	—	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71
14	—	—	—	—	—	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
15	—	—	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
16	—	—	—	—	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
17	—	—	—	0	0	0	0	0	0	0
18	—	—	0	0	0	0	0	0	0	0
19	—	—	—	—	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
20	—	—	—	—	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53
21	—	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84
24	—	—	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10

注:表中“—”代表了在该次递推中该节点的碳势未知。

从表 1 中可以看出,经过 10 次递推过程即可求得 IEEE 24 节点系统中所有节点的碳势,由此可以求得全网中碳排放流的分布。各节点的碳势一旦计算得到之后,即为该节点碳势的准确值,不存在多次迭代的过程,这一特性也可由图 3 中简单系统的计算过程看出。经过 10 次的递推以后,全网所有节点的碳势均可计算得到。

下面将所得结果与文献[2]中的直接算法进行比较。文献[2]的直接算法所得到的各节点碳势结果如表 2 所示。对比表 2 与表 1 最后一列,可知本文所提的递推算法与直接算法计算结果完全相同,这说明了本文所提算法的正确性。

表 2 直接算法下节点碳势的计算结果
Table 2 Carbon emission intensities under direct calculation method

节点	碳势/ (kgCO ₂ · (kW · h) ⁻¹)	节点	碳势/ (kgCO ₂ · (kW · h) ⁻¹)
1	0.53	13	0.71
2	0.71	14	0.11
3	0.10	15	0.10
4	0.48	16	0.11
5	0.53	17	0
6	0.56	18	0
7	0.58	19	0.11
8	0.50	20	0.53
9	0.47	21	0
10	0.54	22	0
11	0.28	23	0.84
12	0.80	24	0.10

进一步,在更大规模的输电系统中测试算法的有效性。本文采用 MATPOWER 软件包^[16]中的挪威电力系统进行测试,该系统一共包含 2 383 个节点。具体计算过程与表 1 类似,不同递推次数下碳势未知的节点数的变化如图 4 所示。

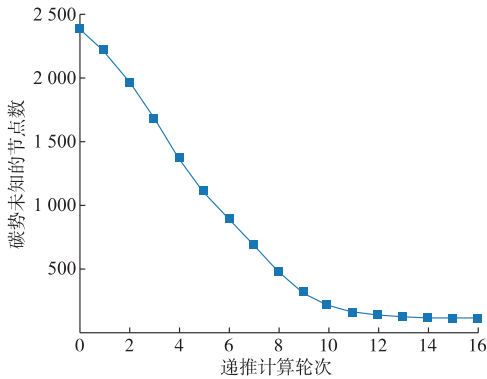


图 4 挪威 2 383 节点系统中节点碳势的递推计算过程
Fig.4 Recursive calculation process of carbon emission intensities in Nordic 2 383-bus system

从图 4 中可以看出,全网中大部分节点的碳势经过 15 次的递推计算过程均已求得,但剩余 108 个节点的碳势在后面的轮次中均无法求出。经检查,发现剩余的 108 个节点均为悬空节点。在进行递推计算时可以直接将这些悬空节点去掉。基于挪威 2 383 节点系统的算例分析可以充分表明本文所提递推算法在实际电力系统中的有效性。

5 扩展:递推算法与直接算法相结合的协同计算

结合递推算法及直接算法的适用性分析结果,可以对现有的电力系统碳排放流计算体系进行完善,进一步提出电力系统碳排放流的协同计算流程,如图 5 所示。

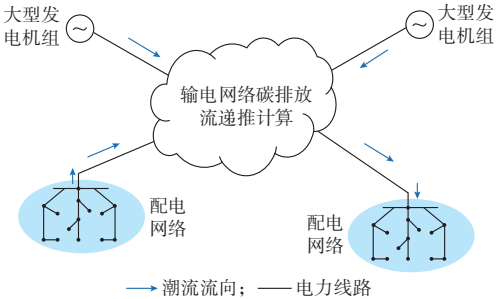


图 5 电力系统碳排放流的协同计算示意图
Fig.5 Schematic diagram of coordinated calculation of carbon emission flow in power systems

协同计算可考虑电网的结构特点,将递推算法与直接算法有机结合。首先,根据配电网与主网之间的功率交换方向及大小,判断配电网与主网之间的碳排放流计算次序。如果配电网向主网注入有功功率,则可将该配电网看成是主网的电源,反之则看成主网的负荷。对于向主网注入有功功率的配电网,首先根据配电网中的分布式电源和传统火电机组的边界信息,采用直接算法计算配电网中的碳排放流分布。然后,将根节点的碳势和注入功率作为主网的边界条件,利用递推算法进行主网的碳排放流计算。对于从主网输入有功功率的配电网,则根据主网的碳排放流计算结果,同样利用直接算法计算该配电网中的碳排放流分布。因此,在碳排放流的协同计算流程中,将各地的配电网视为单独的子系统,采用直接算法进行碳流计算。而主网则采用本文所提的递推算法。主网与配电网之间通过根节点进行结果的传递与协调,即可得到全局网络中碳排放流的分布。碳排放流协同计算流程充分利用了递推算法和直接算法的优点,根据输电网络和配电网的结构特点选择不同的算法,具有很好的实用性。

此外,多能源系统通过将电力、天然气、热力等相对独立运行系统进行耦合,其碳排放更为复杂,需要研究有效的碳排放分析方法。可考虑将本文所提出的电力系统碳排放流的递推算法拓展到多能源系统中,为多能源系统的碳排放分析提供技术参考。

6 结语

碳排放流理论为电力系统中碳排放责任的分摊提供了新的视角。现有的电力系统碳排放流直接算法需要一次性建立描述全网发电机组碳排放状况及功率潮流分布的向量和矩阵,需要进行大量的矩阵运算。

本文提出了一种电力系统碳排放流的递推算法,利用节点碳势计算中的邻接特性,依次轮询碳势未知的节点,经过若干次的递推过程即可计算得到全系统中所有节点的碳势,进而得到碳排放流的分布。将本文所提的递推算法应用于 IEEE 24 节点系统和挪威 2 383 节点系统,结果表明,通过有限次的递推过程即可得到全网中各节点的碳势,且计算结果与直接算法下一致。此外,本文对比分析了已有的直接算法和所提出的递推算法的优缺点及适用性,在此基础上提出了电力系统碳排放流的协同计算流程,可分别根据输电网和配电网的特点选取合适的计算方法,具有很好的适用性。本文所提算法丰富了电力系统碳排放流计算方法类型,可为碳排放流在实际系统中的应用提供技术支持。

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 Qianqiao, 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计算方法初探[J].电力系统自动化,2012,36(11):44-49.
ZHOU Tianrui, KANG Chongqing, XU Qianqiao, 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] 周天睿,康重庆,徐乾耀,等.碳排放流在电力网络中分布的特性与机理分析[J].电力系统自动化,2012,36(15):39-44.
ZHOU Tianrui, KANG Chongqing, XU Qianqiao, et al. Analysis on distribution characteristics and mechanisms of carbon emission flow in electric power network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 39-44.
- [4] 袁书林,马瑞.基于电力系统碳排放流理论的碳排放分摊模型研究[J].现代电力,2014,31(6):70-75.
YUAN Shulin, MA Rui. A research on the allocation model of carbon emission in power system based on carbon emission flow theory[J]. Modern Electric Power, 2014, 31(6): 70-75.
- [5] 汪锋,豆南南,喻冬梅.基于电力系统碳排放流的分省化石能源消费 CO₂ 排放量测算[J].电力系统自动化,2014,38(17):105-112.DOI:10.7500/AEPS201301246.
WANG Feng, DOU Nannan, YU Dongmei. Measurement of provincial CO₂ emission from fossil energy consumption based on carbon emission flow in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38 (17): 105-112. DOI: 10.7500/AEPS201301246.
- [6] 马瑞,袁书林,秦泽宇.考虑风电不确定性的电力系统碳排放流分析[J].电力系统自动化,2014,38(17):124-129.DOI:10.7500/AEPS20140510003.
MA Rui, YUAN Shulin, QIN Zeyu. Analysis on carbon emission flow of power system with uncertain wind power injection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 124-129. DOI: 10.7500/AEPS20140510003.
- [7] 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.DOI:10.7500/AEPS20130609011.
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. DOI: 10.7500/AEPS20130609011.
- [8] 张孝顺,郑理民,余涛.基于多步回溯 Q(λ)学习的电网多目标最优碳流算法[J].电力系统自动化,2014,38(17):118-123.DOI:10.7500/AEPS20140513010.
ZHANG Xiaoshun, ZHENG Limin, YU Tao. Multi-objective optimal carbon emission flow calculation of power grid based on multi-step Q(λ) learning algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 118-123. DOI: 10.7500/AEPS20140513010.
- [9] ZHENG Weiye, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. A fully distributed reactive power optimization and control method for active distribution networks[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2016, 7(2): 1021-1033.
- [10] 苏晨,吴在军,吕振宇,等.孤立微电网分布式二级功率优化控制[J].电网技术,2016,40(9):2689-2697.
SU Chen, WU Zaijun, LÜ Zhenyu, et al. Distributed secondary power optimization control for island microgrid[J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2689-2697.
- [11] 顾伟,薛帅,王勇,等.基于有限时间一致性的直流微电网分布式协同控制[J].电力系统自动化,2016,40(24):49-55.DOI:10.7500/AEPS20160216006.
GU Wei, XUE Shuai, WANG Yong, et al. Finite-time consensus based distributed cooperative control for DC microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(24): 49-55. DOI: 10.7500/AEPS20160216006.
- [12] WATTS DJ, STROGATZ S H. Collective dynamics of ‘small-

world' networks[J]. Nature, 1998, 393(6684): 440-442.

[13] 郑阳,刘文颖,温志伟,等.基于小世界网络的电网连锁故障实时搜索系统[J].电网技术,2010,34(7):58-63.

ZHENG Yang, LIU Wenying, WEN Zhiwei, et al. A real-time searching system for cascading failures of power grids based on small-world network [J]. Power System Technology, 2010, 34(7): 58-63.

[14] 孟仲伟,鲁宗相,宋靖雁.中美电网的小世界拓扑模型比较分析[J].电力系统自动化,2004,28(15):21-24.

MENG Zhongwei, LU Zongxiang, SONG Jingyan. Comparison analysis of the small-world topological model of Chinese and American power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(15): 21-24.

[15] SUBCOMMITTEE P M. IEEE reliability test system [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(6):

2047-2054.

[16] ZIMMERMAN R D, MURILLO-SÁNCHEZ C E, THOMAS R J. MATPOWER: steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2011, 26(1): 12-19.

康重庆(1969—),男,通信作者,教授,博士生导师, IEEE Fellow,主要研究方向:电力系统规划、负荷预测、低碳电力技术、电力经济。E-mail: cqkang@tsinghua.edu.cn

程耀华(1995—),男,博士研究生,主要研究方向:电力系统规划、低碳电力技术、多能源系统。E-mail: chengyh15@mails.tsinghua.edu.cn

(编辑 蔡静雯)

Recursive Calculation Method of Carbon Emission Flow in Power Systems

KANG Chongqing^{1,2}, CHENG Yaohua^{1,2}, SUN Yanlong^{1,2}, ZHANG Ning^{1,2}, MENG Junxia³, YAN Huaguang³

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The theory of carbon emission flow (CEF) provides a new perspective for the allocation of carbon emission responsibility in power systems. Based on the fact that the carbon emission intensity of a node only depends on the CEF related information of its adjacent nodes and branches, this paper proposes a recursive calculation method of CEF in power systems. The basic principle of the proposed recursive CEF calculation method is firstly elaborated and its calculation process is provided. Then, the characteristics and applicability of the recursive method and the existing direct method are analyzed. By combining the two methods, a coordinated calculation procedure is proposed. Finally, the solution process of the recursive method is illustrated based on a simple power system. The case studies of IEEE 24-bus system and the Nordic 2 383-bus system verify the effectiveness of the proposed recursive method in the actual power systems.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51620105007) and State Grid Corporation of China.

Key words: carbon emission flow; nodal carbon emission intensity; recursive calculation method; coordinated calculation; multiple energy systems



Journal of Modern Power
Systems and Clean Energy

 <http://www.mpce.info>
<http://www.springer.com/40565>

Sponsored by : State Grid Electric Power Research Institute, China



SCIE



For further information, please contact:
State Grid Electric Power Research Institute Press
No.19 Chengxin Avenue, Nanjing 211106, Jiangsu Province, China
Tel: 86-25-81093060 Fax: 86-25-81093040 E-mail: mpce@alljournals.cn