

考虑网络损耗的碳排放流理论改进与完善

冯 欣^{1,2}, 杨 军¹

(1. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072;

2. 国网苏州供电公司, 江苏 苏州 215004)

摘要: 考虑实际电力系统中的网络损耗, 通过计算线路等效传输功率和负荷节点等效负荷需求, 将网络损耗分摊到各负荷, 将有损网络转换成无损网络, 实现碳排放流理论的补充和完善, 使其能够应用于实际有损电力系统。IEEE 30 节点系统仿真结果验证了所提的考虑网络损耗的碳排放流理论的有效性和实用性, 其能够清晰追踪电力系统中碳排放流的具体流向, 可以对负荷的碳流进行来源分析, 也为碳交易市场下负荷侧应缴纳的碳配额计算提供了参考依据。

关键词: 碳排放流理论; 有损网络; 等效负荷需求; 碳配额

中图分类号: TM 744

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.05.013

0 引言

随着世界工业经济的发展、人口的剧增、人类生产生活方式的愈加无节制, 世界气候面临越来越严重的问题, 二氧化碳排放量越来越大, 地球臭氧层正遭受前所未有的危机, 人类的生存环境和健康安全已经受到严重危害。为了应对当今气候变化与能源危机, 减轻温室效应对全球的影响, 低碳发展是社会可持续发展的必经之路^[1-6]。低碳之路, 电力先行。电力系统作为碳排放的主要来源之一, 必将在低碳电力领域做出重大贡献。文献[7-8]从国家层面进行碳排放估算, 认为发展低碳电力必须对电力系统碳排放有深刻的认识, 分析其碳排放结构, 了解构成电力碳排放的不同原因^[9-13], 分析其影响电力系统相关排放的机理。

在当前电力系统低碳减排的发展趋势下^[14], 电力系统碳排放流理论的引入为电力系统低碳发展的研究带来了新的思路和方法^[15-17]。文献[15]提出了将碳排放视为依附于潮流而存在的虚拟网络流的思想, 将碳排放与电力潮流分析相结合, 建立了电力系统碳排放流的理念和理论框架。文献[16]将潮流计算与电力系统碳排放流计算相结合, 进一步提出了碳排放流计算的基本方法。文献[17]分析了碳排放流从发电侧流向用电侧的具体过程, 研究了碳排放流在电网中的分布特性和机理。碳排放流理论的提出为电力系统碳排放量的计算与分析提供了新的思路 and 手段, 具有良好发展前景。

但是, 文献[15-17]中提出的碳排放流理论只能应用在忽略网损的情况下, 无法应用于实际有损电

力系统, 需要进一步完善。本文考虑实际电力系统中的网络损耗, 通过计算负荷节点等效负荷需求和线路等效传输功率, 将网损分摊到各负荷, 从而将有损网络转换成无损网络, 对碳排放流理论进行了补充和完善, 使其能够适用于实际电力系统。所提方法能够追踪电力系统中碳排放流的具体流向, 回溯负荷侧碳流来源, 为碳交易市场下负荷侧用户应当缴纳的碳配额计算^[18-19]提供参考依据, 有利于促进用户参与节能减排行动, 推动低碳电力的发展。

1 未考虑网损的碳排放流理论基础

碳排放流基本理论^[15-17]介绍了碳排放流在电力系统中的分布机理与特性, 提出了用机组-节点碳流关联矩阵 $\mathbf{R}_{U-N}$ 、机组-支路碳流关联矩阵 $\mathbf{R}_{U-B}$ 和机组-负荷碳流关联矩阵 $\mathbf{R}_{U-L}$ 3 个关联矩阵来描述电力系统中的碳排放流分布。其中, 机组-节点碳流关联矩阵表示系统中所有发电机组的碳排放流注入对流入系统中任一节点碳流率的贡献情况, 节点碳流率的物理意义为发电侧为维持节点有功功率每单位时间产生的碳排放量, $\mathbf{R}_{U-N}$ 可由下式计算:

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

其中, $\mathbf{E}_G$ 为发电机组碳排放强度向量; $\mathbf{P}_N$ 为节点有功功率矩阵; $\mathbf{P}_B$ 为支路潮流分布矩阵; $\mathbf{P}_G$ 为机组注入分布矩阵。

机组-支路碳流关联矩阵 $\mathbf{R}_{U-B,k}$ 表示系统中第 k 台发电机组的碳排放流注入对系统中所有支路碳流率的贡献情况, 支路碳流率的物理意义为单位时间内系统为维持有功潮流而在发电厂产生的碳排放量, $\mathbf{R}_{U-B,k}$ 可由下式计算:

$$\mathbf{R}_{U-B,k} = \text{diag} \{ [\mathbf{P}_N (\mathbf{P}_N - \mathbf{P}_B^T)^{-1} \mathbf{P}_G^T] \boldsymbol{\eta}_N^{(k)} \} \cdot (\mathbf{I} + \mathbf{P}_N^{-1} \mathbf{P}_B) \mathbf{e}_{Gk} \quad (2)$$

其中, $\boldsymbol{\eta}_N^{(k)}$ 为 N 维行向量, 其第 k 个元素为 1, 其余元素为 0; $\mathbf{e}_{Gk}$ 为第 k 台发电机的碳排放强度。

收稿日期: 2015-02-10; 修回日期: 2016-01-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51277135)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277135)

机组-负荷碳流关联矩阵 $\mathbf{R}_{U-L}$ 表示系统中的各负荷节点碳流率来自于系统中各机组的分量,负荷节点碳流率的物理意义为发电侧为供应节点负荷每单位时间产生的碳排放量, $\mathbf{R}_{U-L}$ 可由下式计算:

$$\mathbf{R}_{U-L} = \mathbf{R}_{U-N} \text{diag}(\boldsymbol{\zeta}_N \mathbf{P}_L) \mathbf{P}_N^{-1} \quad (3)$$

其中, $\boldsymbol{\zeta}_N$ 为 N 维行向量, 其所有元素都为 1; $\mathbf{P}_L$ 为负荷分布矩阵。

上述关联矩阵的计算前提是无损网络, 但实际电力系统网络是有损的, 因此该方法并不适用于实际电力系统。为使碳排放流理论适用于实际电力系统, 本文对其进行了改进, 将实际有损网络转换成无损网络^[20], 并对上述 3 个关联矩阵进行了重新计算。

2 无损网络转换

当系统为有损网络时, 则需要考虑到网损, 可通过某种转换将有损网络等效为无损网络。随着碳交易市场的发展, 文献[18]提出消费者购买电力产品时除了应当支付相应的现金, 还需要提交与这些能源商品、服务的碳排放相当的碳配额。电力系统碳排放的本质来源是负荷侧的消费需要, 需求导致生产, 所以电力负荷才是碳排放的真正源头^[15]。因此, 电力系统网络损耗的产生也是由消费者需求产生的。基于此, 在碳交易市场背景下, 本文将网损等效到负荷侧, 把由网损引起的碳排放分摊给负荷侧消费者, 为碳交易市场中负荷侧用户缴纳的碳配额计算提供相应的参考依据, 促使负荷侧用户参与节能行动, 推动低碳电力的发展。

令 $P_i^{(g)}$ 为等效无损网络下节点 i 的有功潮流, $P_{i-j}^{(g)}$ 为等效无损网络下支路 $i-j$ 流过的有功功率, 则 $|P_{i-j}^{(g)}| = |P_{j-i}^{(g)}|$, 根据文献[20]有:

$$P_i^{(g)} = \sum_{j \in \alpha_i^{(u)}} |P_{i-j}^{(g)}| + P_{Gi} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

其中, $\alpha_i^{(u)}$ 为有功潮流直接流入节点 i 的节点集合; P_{Gi} 为接入节点 i 的发电机组出力。由于 $|P_{i-j}^{(g)}| = |P_{j-i}^{(g)}|$, 那么 $|P_{i-j}^{(g)}|$ 可以表示为 $|P_{i-j}^{(g)}| = c_{ji}^{(g)} |P_j^{(g)}|$, 其中 $c_{ji}^{(g)} = |P_{j-i}^{(g)}| / |P_j^{(g)}|$ 。文献[20]中提出, 由于线路有功损耗相对较小, 则可假设 $|P_{j-i}^{(g)}| / |P_j^{(g)}| \cong |P_{j-i}| / |P_j|$, 其中, P_{j-i} 为实际有损网络中支路 $j-i$ 从节点 j 流向节点 i 的有功潮流, P_j 为实际有损网络中节点 j 流过的有功潮流, 则式(4)可以写成:

$$P_i^{(g)} - \sum_{j \in \alpha_i^{(u)}} \frac{|P_{j-i}|}{P_j} P_j^{(g)} = P_{Gi} \quad (5)$$

亦可写成:

$$\mathbf{A}_u \mathbf{P}^g = \mathbf{P}_G \quad (6)$$

其中, $\mathbf{P}^g$ 表示等效为无损网络后电网各节点的有功潮流向量; $\mathbf{A}_u$ 为 $n \times n$ 阶矩阵, 可表示为式(7)。

$$[\mathbf{A}_u]_{ij} = \begin{cases} 1 & i=j \\ -c_{ji} = -|P_{j-i}|/P_j & j \in \alpha_i^{(u)} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

由于 $\mathbf{A}_u$ 和 $\mathbf{P}_G$ 已知, 则可计算出 $\mathbf{P}^g$ 。由 $\mathbf{P}^g$ 可计算出等效为无损网络后网络中支路有功潮流和各节点的有功负荷。线路 $i-l$ 的等效有功潮流为:

$$|P_{i-l}^{(g)}| = \frac{|P_{i-l}^{(g)}|}{P_i^{(g)}} P_i^{(g)} \cong \frac{|P_{i-l}|}{P_i} \sum_{k=1}^n [\mathbf{A}_u^{-1}]_{ik} P_{Gk} \quad l \in \alpha_i^{(d)} \quad (8)$$

其中, $\alpha_i^{(d)}$ 为从节点 i 直接流入有功潮流的节点集合。同样, 可求出节点 i 的等效有功负荷为:

$$P_{Li}^{(g)} = \frac{P_{Li}^{(g)}}{P_i^{(g)}} P_i^{(g)} \cong \frac{P_{Li}}{P_i} P_i^{(g)} = \frac{P_{Li}}{P_i} \sum_{k=1}^n [\mathbf{A}_u^{-1}]_{ik} P_{Gk} \quad (9)$$

其中, $P_{Li}^{(g)}$ 包含了节点 i 的实际负荷以及该负荷分摊的网损。

因此, 联立式(7)~(9), 可将有损网络等效为无损网络, 使得网损被分摊到各负荷处, 再将其应用于碳排放流理论的计算。

3 仿真分析与校验

3.1 网损转移计算

为了更清楚地展示有损网络转换成无损网络的过程, 及网损如何被分摊到各负荷处, 现通过 2 机 4 节点系统和 IEEE 30 节点标准测试系统来进行说明。

3.1.1 2 机 4 节点系统

图 1 所示为一个 4 节点交流系统^[20] (图中功率流的单位为 MW), 节点 1 和节点 2 处分别装有发电机组, 发电机有功出力分别为 $P_{G1}=400$ MW 和 $P_{G2}=114$ MW; 节点 3 和节点 4 为负荷节点, 负荷分别为 $P_{L3}=300$ MW 和 $P_{L4}=200$ MW。计算可知, 该网络系统总网损为 $(225-218) + (83-82) + (173-171) + (60-59) + (115-112) = 14$ (MW)。

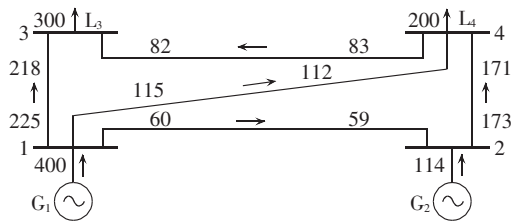


图 1 4 节点系统稳态潮流分布

Fig.1 Steady power-flow of 4-bus system

则根据式(7)可以求出矩阵 $\mathbf{A}_u$ 为:

$$\mathbf{A}_u = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{60}{400} & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{225}{400} & 0 & 1 & -\frac{83}{283} \\ -\frac{115}{400} & -\frac{173}{173} & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

将 $\mathbf{A}_u$ 代入式(6)中有:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{60}{400} & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{225}{400} & 0 & 1 & -\frac{83}{283} \\ -\frac{115}{400} & -\frac{173}{173} & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1^g \\ P_2^g \\ P_3^g \\ P_4^g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 400 \\ 114 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

求解上式可得到:

$$\mathbf{P}^*=[400 \quad 174 \quad 309.76 \quad 289]^T$$

当 $\mathbf{P}^*$ 被求解出来后,则可以根据式(9)求出网络等效情况下负荷节点 3 和负荷节点 4 处的等效负荷分别为:

$$P_{l_3}^{(g)}=\frac{P_{l_3}^{(g)}P_3^{(g)}}{P_3^{(g)}}\cong\frac{P_{l_3}}{P_3}P_3^{(g)}=\frac{300}{300}\times309.76=309.76(\text{MW})$$
$$P_{l_4}^{(g)}=\frac{P_{l_4}^{(g)}P_4^{(g)}}{P_4^{(g)}}\cong\frac{P_{l_4}}{P_4}P_4^{(g)}=\frac{200}{283}\times289=204.24(\text{MW})$$

网络未进行等效时,负荷节点 3 和负荷节点 4 处的实际负荷分别为 $P_{l_3}=300\text{ MW}$ 和 $P_{l_4}=200\text{ MW}$;网络等效后负荷节点 3 和负荷节点 4 所分摊网损分别为 $309.76-300=9.76(\text{MW})$ 和 $204.24-200=4.24(\text{MW})$,2 个负荷节点所分摊网损之和为 $9.76+4.24=14(\text{MW})$,等于系统的总网损。这表明经过文中的潮流追踪算法计算后网络中的网损被分摊到了各负荷处。

同时,根据式(9)可以追踪到各负荷来自于各台发电机组的功率如表 1 所示。

由表 1 可发现,网络等效成无损网络后,发电机发出的有功功率全部都由负荷消纳。负荷节点 3 来自于发电机 G_1 和 G_2 的功率分别为 276.32 MW 和 33.44 MW ,其分摊的网损为 9.76 MW 。负荷节点 4 来

表 1 4 节点系统电力分布

Table 1 Power distribution of 4-bus system

负荷节点	等效 负荷/MW	来自各机组的功率/MW		分摊 网损/MW
		G_1	G_2	
3	309.76	276.32	33.44	9.76
4	204.24	123.68	80.56	4.24
总和	514	400	114	14

自于发电机 G_1 和 G_2 的功率分别为 123.68 MW 和 80.56 MW ,其分摊的网损为 4.24 MW 。所有负荷分摊的总网损为 14 MW ,等于系统的总网损。

3.1.2 IEEE 30 节点标准测试系统

本文进一步利用 IEEE 30 节点标准测试系统来说明网损是如何转移到负荷侧的。IEEE 30 节点标准测试系统中各机组有功出力、各用户负荷及系统稳态有功潮流分布如图 2 所示,图中功率流单位为 MW。

可根据图 2 中各线路首末两端的功率差求得系统的总网损为 2.36 MW 。同理根据式(4)—(9),可求得系统各节点的等效负荷。系统各节点的实际负荷和等效负荷如表 2 所示,表 2 中同时列出了各个节点分摊的网损,且所有负荷节点分摊的网损之和为 2.36 MW ,等于系统的总网损。这表明网络等效后系统中的网损都被分摊到了各负荷处。同时追踪网络等效后各负荷来自于各台机组的功率,可发现发电机发出的有功功率全部都由负荷消纳。

3.2 等效网络下碳流理论的计算

为了展示考虑网络损耗的碳排放流理论在实际电力系统中的应用,本文采用如图 2 所示 IEEE 30 节点标准测试系统进行示例分析。

在实际有损网络和忽略网损 2 种情况下,本文

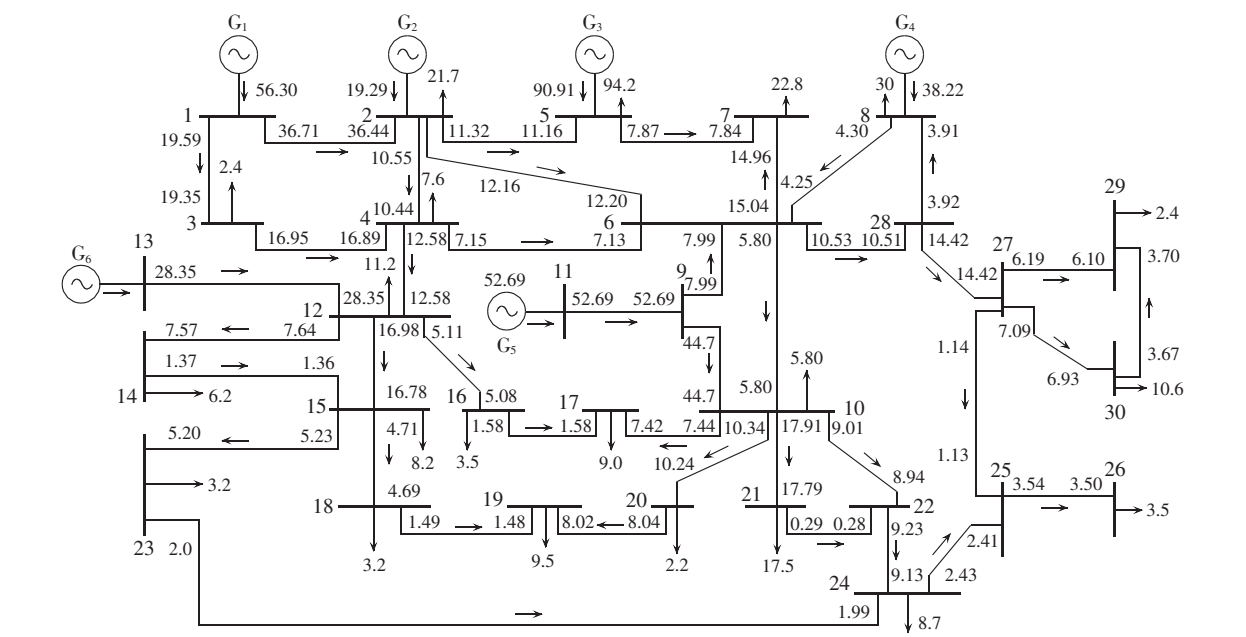


图 2 IEEE 30 节点标准测试系统稳态潮流分布

Fig.2 Steady power-flow of IEEE 30-bus standard test system

表 2 各节点处负荷及所分摊的网损
Table 2 Load and allocated power-loss
of each node

				MW			
节点	实际 负荷	等效 负荷	分摊 网损	节点	实际 负荷	等效 负荷	分摊 网损
1	0	0	0	16	3.5	3.540	0.040
2	21.7	21.806	0.106	17	9.0	9.053	0.053
3	2.4	2.429	0.029	18	3.2	3.272	0.072
4	7.6	7.720	0.120	19	9.5	9.648	0.148
5	94.2	94.402	0.202	20	2.2	2.225	0.025
6	0	0	0	21	17.5	17.651	0.151
7	22.8	23.114	0.314	22	0	0	0
8	30.0	30.000	0	23	3.2	3.274	0.074
9	0	0	0	24	8.7	8.878	0.178
10	5.8	5.808	0.008	25	0	0	0
11	0	0	0	26	3.5	3.623	0.123
12	11.2	11.254	0.054	27	0	0	0
13	0	0	0	28	0	0	0
14	6.2	6.288	0.088	29	2.4	2.462	0.062
15	8.2	8.338	0.138	30	10.6	10.975	0.375
总和			1.059	总和			1.301

应用碳排放理论分别计算碳排放流各相关矩阵。设定机组 G_1 、 G_2 和 G_6 为燃煤机组,其碳排放强度为 $0.875\text{ kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ (即生产每 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 电量排放 CO_2 0.875 kg);机组 G_3 和机组 G_5 为燃气机组,其碳排放强度为 $0.525\text{ kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ^[16];机组 G_4 为水轮机,其碳排放强度为 0。

可分别计算在无损网络和有损网络中各个节点处碳流率的注入量来自于系统中各个发电机的分量。各节点处的总碳流率如图 3 所示,可发现除了在节点 5、9、11、13 处外,其余节点的总碳流率在考虑网损情况下都要比忽略网损情况下大。这是因为在有损情况下,网络中线路损耗要消耗一部分碳排放流,但是由于节点 5、11 和 13 分别和发电机组 G_3 、 G_5 、 G_6 在同一条母线上,有损和无损情况下各发电机组向相应节点处的注入碳流率一定;节点 9 和节点 11 之间的线路电阻为零,相当于节点 9 和节点 11 处于同一母线,因此并没有线路损耗,所以在有损和无损 2 种情况下,节点 5、9、11、13 的总注入碳流率相等。另外,由于节点 8 处安装的是水轮机组,因此其注入的总碳流率为零。

计算无损网络和有损网络 2 种情况下各台发电

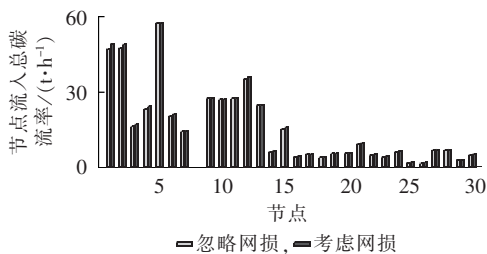


图 3 各节点流入总碳流率

Fig.3 Gross carbon emission flow rate of each node

机组对各条支路的碳流率贡献可发现,有损情况下大多数支路的总碳流率比无损情况下大,这是因为有损情况下考虑了线路损耗。只有小部分支路是相等或者较小,这部分支路的支路碳流率如图 4 所示。从图 4 中可发现,支路 11-9 和 13-12 处有损和无损情况下支路碳流率相等,这是因为这 2 条支路之间的电阻为零,支路损耗为零,节点 11 和节点 9、节点 13 和节点 12 相当于在同一条母线上,因此其支路碳流率相等。在支路 2-5、支路 5-7、支路 9-6、支路 10-17、支路 27-25 处,有损网络下的支路碳流率要比无损情况下小,是由于其他支路的碳流率增大导致这 5 条支路的碳流率减小。将该结果与潮流结果对比发现,与潮流结果相符。根据潮流结果发现,在有损情况下,上述 5 条支路流过的潮流也比无损情况下小,原因主要是其他支路增加的潮流补偿了这部分支路减少的潮流。

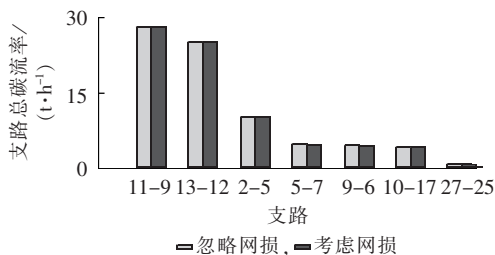


图 4 部分支路流过的总碳流率

Fig.4 Gross carbon emission flow rate of some branches

计算无损网络和有损网络 2 种情况下各发电机组对各支路的碳流率贡献可发现,2 种情况下各机组对支路 8-6 和支路 8-28 注入的碳流率均为零。这是因为支路 8-6 和支路 8-28 连接的是水轮机 G_4 ,支路功率完全由 G_4 供应,而 G_4 并没有碳排放,所以其碳流率都为零,因此这 2 条支路中的线损所引起的碳流率也为零。

因此,当线路连接的是水轮机或风机等没有碳排放的机组时,该线路的功率由相应机组提供,则该支路流过的碳流率为零,支路线损所引起的碳流率也为零。

计算有损和无损网络 2 种情况下的负荷节点碳流率,相应各节点处的负荷总碳流率如图 5 所示。

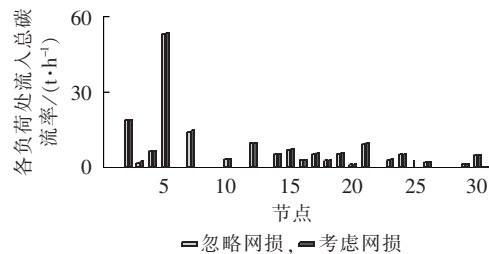


图 5 各负荷处总碳流率

Fig.5 Gross carbon emission flow rate of each load

从图 5 中可发现,在有损情况下,各节点负荷的总碳流率比无损情况下大。这是因为在有损网络中,线路损耗转移到了负荷侧,使得各负荷节点等效的负荷需求比实际大,其所需的碳流率也相应地增大,线路损耗成功地分摊到各负荷处。计算考虑网损和忽略网损 2 种情况下的各节点负荷处总碳流率的相对偏差率,可发现节点 26 处相对偏差率最大,为 6.83%。

本文对 IEEE 30 节点系统进行仿真,考虑到实际大电网中复杂网络结构和长线路实际情况,则考虑网损比忽略网损时的负荷节点碳流率大。可见,实际电网中网络损耗引起的碳排放不能被忽略,因此本文所提改进方法实用价值较好,能为碳交易市场下负荷侧应当缴纳的碳配额计算提供参考依据。各机组注入电网的总碳流率如图 6 所示。由图 6 可见,有损和无损 2 种情况下除了平衡机组 G_1 注入电网的碳流率不同之外,其余机组发出的碳流率均相等,符合潮流计算结果,说明有损网络和无损网络都不影响除了平衡节点外的发电机组出力。

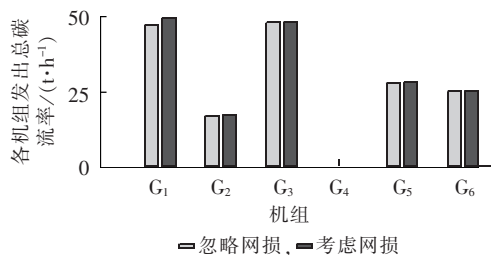


图 6 各机组注入电网的碳流率

Fig.6 Rate of carbon emission flow injected into power grid by each unit

4 结论

本文考虑到实际电力系统中的网络损耗,通过计算线路等效传输功率和负荷节点等效负荷需求,将网损分摊到各负荷,从而将有损网络转换成无损网络,对碳排放流理论进行了完善,使其能够适用于实际有损电力系统。IEEE 30 节点系统仿真结果表明,忽略网损时的碳流相关计算结果相比于实际有损电网存在一定偏差,而本文提出的考虑网络损耗的碳排放流理论能够清晰描述电力系统中碳排放流的流向和分布,可以回溯负荷侧的碳流来源,为在碳交易市场背景下负荷侧用户应当缴纳的碳配额计算提供参考依据,有利于促使用户参与节能减排行动,推动低碳电力的发展。

参考文献:

[1] 康重庆,陈启鑫,夏清. 低碳电力技术的研究展望[J]. 电网技术, 2009,33(2):1-7.
KANG Chongqing, CHEN Qixin, XIA Qing. Prospects of low carbon electricity[J]. Power System Technology, 2009,33(2):1-7.

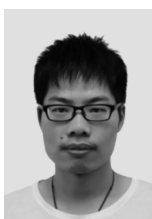
[2] 曾鸣,薛松,魏阳,等. 低碳智慧岛能源体系设计及经济可靠性评价模型[J]. 电力自动化设备, 2012,32(12):58-63.
ZENG Ming, XUE Song, WEI Yang, et al. Energy system for low-carbon-smart islands and economy-reliability assessment model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012,32(12):58-63.
[3] 辛建波,范瑞祥,郑蜀江,等. 智能配电网园区低碳效益仿真与评价系统及其在江西的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014,42(7):86-90.
XIN Jianbo, FAN Ruixiang, ZHENG Shujiang, et al. Low-carbon benefit simulation and evaluation system for smart distribution grid and its application in Jiangxi Province[J]. Power System Protection and Control, 2014,42(7):86-90.
[4] 朱泽磊,周京阳,韩忠旭,等. 基于多阶段不同政策机制的低碳电力调度模型[J]. 电网技术, 2013,37(2):287-294.
ZHU Zelei, ZHOU Jingyang, HAN Zhongxu, et al. A low-carbon power dispatch model based on policy mechanisms corresponding to different stages[J]. Power System Technology, 2013,37(2):287-294.
[5] 文旭,王俊梅,郭琳,等. 计及污染气体排放风险的多目标随机动态环境经济调度模型[J]. 电力自动化设备, 2015,35(5):131-138.
WEN Xu, WANG Junmei, GUO Lin, et al. Multi-objective stochastic and dynamic model of environmental and economic dispatch considering gas pollution emission risk[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015,35(5):131-138.
[6] 龙军,郑斌,郭小璇,等. 一种求解环境经济发电调度的交互式多目标优化方法[J]. 电力自动化设备, 2013,33(5):83-88.
LONG Jun, ZHENG Bin, GUO Xiaoxuan, et al. Interactive multi-objective optimization of environmental and economic power generation scheduling[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013,33(5):83-88.
[7] 张斌. 2020 年我国能源电力消费及碳排放强度情景分析[J]. 中国能源, 2009(3):28-31.
ZHANG Bin. Scenario analyses of China's energy and power use and carbon emission in 2020[J]. Energy of China, 2009(3):28-31.
[8] CHUNG W, TOHNO S, SHIM S Y. An estimation of energy and GHG emission intensity caused by energy consumption in Korea; an energy IO approach[J]. Applied Energy, 2009,86(10):1902-1914.
[9] IPCC. Intergovernmental panel for climate change; the fourth assessment report [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
[10] GRUBB M, JAMASB T, POLLITT M G. Delivering a low carbon electricity system[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2008.
[11] JAMASB T, NUTTALL W J, POLLITT M G. Future electricity technologies and systems[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2008.
[12] 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.
[13] 魏一鸣,刘兰翠,范英,等. 中国能源报告(2008):碳排放研究[M]. 北京:科学出版社, 2008.
[14] 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 Xiaoke, ZHOU Tianrui, LI Xin, et al. Structure identification of CO₂ emission for power system and analysis of its low-carbon contribution[J]. Automation of Electric Power

- System, 2012, 36(2): 18-25.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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 Qian Yao, 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.
- [18] 范进. 基于个人碳交易行为模型的电力消费选择研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.
- FAN Jin. The electricity consumption choice based on the

model of personal carbon trading behavior[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012.

- [19] 宋旭东, 莫娟, 向铁元. 电力行业碳排放权的初始分配机制[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1): 44-49.
- SONG Xudong, MO Juan, XIANG Tiejuan. Initial allocation mechanism of carbon emission permit in electric power industry[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 44-49.
- [20] BIALEK J. Tracing the flow of electricity[J]. Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings, 1996, 143(4): 313-320.

作者简介:



冯 欣

冯 欣(1990—), 男, 湖北黄冈人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制(E-mail: xfeng@whu.edu.cn);

杨 军(1977—), 男, 湖北武汉人, 副教授, 博士, 通信作者, 主要研究方向为电力系统运行与继电保护(E-mail: JYang@whu.edu.cn)。

Improvement and enhancement of carbon emission flow theory considering power loss

FENG Xin^{1,2}, YANG Jun¹

(1. College of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. State Grid Suzhou Power Supply Company, Suzhou 215004, China)

Abstract: With the consideration of power loss in practical power system, the equivalent transmission power of each branch and the equivalent demand of each load node are calculated to allocate the power loss to load nodes, which converts a lossy network into a lossless network to supplement and enhance the carbon emission flow theory for its application to practical power system. Simulative results of IEEE 30-bus system show that, being effective and practical, the improved carbon emission flow theory can clearly trace the specific carbon emission flow in power system and analyze the carbon emission source of load nodes, which provides the basis for the calculation of carbon quotas at the load demand side in the carbon trading market.

Key words: carbon emission flow theory; lossy network; equivalent load demands; carbon quotas

(上接第80页 continued from page 80)

Power system economic dispatch model with source-network synergy and moment-based semi-definite programming

SUN Donglei, HAN Xueshan, ZHANG Bo

(Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

Abstract: The treatment of the relation between power source and network is the core of power system operation and dispatch. As the contradiction between power source and network becomes increasingly sophisticated, an economic dispatch model with the synergy between electric power source and network is proposed based on the original conditions of economic dispatch, which takes the status of network equipment as a decision-making variable and expresses the operational constraints of network equipment in a complementary form. The nonconvex polynomial optimization problem is projected into the moment space, which is then converted into a standard semi-definite programming model by the moment-based semi-definite programming convex relaxation method and solved by the semi-definite programming optimization solver SDPA. Case analysis verifies the effectiveness of the proposed method.

Key words: electric power systems; economic dispatch; synergy between source and network; moment-based semi-definite programming; complementarity; models