

计及防灾救灾功效的电力系统因灾运行碳排增加及责任分担

章坚民¹, 赵晓煦¹, 薛禹胜², 薛峰², 常康², 徐益珑¹

(1. 杭州电子科技大学自动化学院(人工智能学院), 浙江省杭州市 310018;

2. 国网电力科学研究院有限公司(南瑞集团有限公司), 江苏省南京市 211106)

摘要: 发电厂和电网因自然灾害受损或功能失效导致电力系统运行中产生额外增加的碳排放, 被定义为电力系统因灾运行碳排增加量(CEI-OD)。忽视频发自然灾害的CEI-OD累积效应将高估新型电力系统的减碳效果, 影响全球的减碳进程。因此, 如何计算CEI-OD并确定其责任分担, 成为一个重要课题。首先, 提出电力系统运行方式等效碳排因子(CEEF), 基于CEEF计算电力系统运行方式改变时的CEI-OD。其次, 以防灾设计灾害强度和相应的最大允许抢修时间两个指标构建防灾救灾措施功效模型。同时, 提出元件的防灾过失和抢修过失判据, 并据此提出将CEI-OD分解为过失追究和无过失分摊的理论和计算方法。然后, 针对无过失分摊部分的共同分摊, 提出了一种改进的Aumann-Shapely法, 较好地解决了高碳发电强制替代因灾受阻的低碳发电所导致的碳排放增量分摊不公问题。最后, 通过相关案例验证了所提方法的可行性。

关键词: 新型电力系统; 自然灾害; 碳排放; 等效碳排放因子(CEEF); 防灾救灾; 责任分担; 改进的Aumann-Shapely法

0 引言

构建新型低碳电力系统是中国实现“双碳”目标的必由之路^[1], 而频发的自然灾害已严重影响新型电力系统运行及其减碳能力^[2]。如何计算自然灾害导致的电力系统碳排增加量并进行责任分担, 成为一个重要和迫切的任务。文献[3]提出了自然灾害导致电力设备损害及功能失效而引起的电力系统碳排增加的计算方法。文献[4]进一步揭示了自然灾害影响一次能源过程和特征变化导致电力系统碳排增加的机理, 并提出了相应的计算方法。本文重点研究自然灾害导致电力系统运行产生额外碳排量, 及其过失追究和无过失分摊的计算方法。其中, 需要突破如下3个方面:

1) 电力系统因灾运行碳排增加的计算。大部分现有研究的电力系统碳排量^[5-7]是指运行中发电系统的直接碳排量, 本文定义为运行碳排量。目前, 少有根据电力系统运行方式推导其碳排量以及因灾运行碳排增加量的相关研究。

2) 防灾救灾措施的功效建模和过失判据。目

前, 电力系统在灾害监测预警、停电防御等方面多有建树^[8], 包括台风^[9]、暴雨^[9]、山火^[10]、雷击^[11]、冰灾^[12]等。防灾减灾是避免或减少因灾碳排增加的重要措施。因此, 电力系统相关元件的防灾减灾措施是否得当, 是否要承担相应的碳责任, 是首先要厘清和解决的问题。该方面针对性研究较少, 是本文要突破的研究内容。

3) 碳排增加量的分摊方法。已有针对碳排责任分摊的研究包括欧盟基于“共同但有区别的责任和各自能力”原则^[13]提出的减排目标分摊方法^[14]、消费者碳责任^[15]、贸易产生的碳排放责任在生产者和消费者间的分摊方法^[16]。

无自然灾害下的电力系统碳排分摊是指运行碳排放量在源、网、荷之间的分配^[17-18]。而自然灾害导致电力系统碳排增加的责任分担有所不同, 未见相关研究。电力系统以确保用户用电为主要运行目标, 在不计及因灾局部负荷的短时供电中断的情况下, 负荷将按原预期用电。因此, 源、网需要改变运行方式, 可能导致碳排增加。本文首先确定电力系统相关元件因防灾救灾过失而追究的相应碳责任, 对于剩余的碳排增加进行共同分摊。其中, 博弈方法是一个研究方向^[17, 19-21]。而高碳发电强制替代因灾受阻的低碳发电并承担由此导致的碳排放增量, 存在一定的不公平性, 据此结合相关原则对责任角

收稿日期: 2024-12-27; 修回日期: 2025-02-28。

上网日期: 2025-05-15。

南瑞集团有限公司科技项目: “信息-物理-社会元素的交互及协调技术”(GF-GFWD-210338)。

色进行明确的定义,并对相应的分摊方法进行改进。

1 因灾运行碳排增加的责任追究

1.1 运行等效碳排因子及相应计算

在负荷确定的情况下,电力系统运行方式由各发电厂出力和变电站断路器位置决定。假设 g 为电力系统运行方式序号, $t_{g,s}$ 和 $t_{g,e}$ 分别为运行方式 g 的起始时刻和结束时刻。在该运行方式下,电网开关状态保持不变,电力系统不同运行方式下的总碳排量为发电厂的碳排量之和,则运行方式 g 下电力系统总碳排量 F_g 为:

$$F_g = \sum_{m=1}^M C_{p,m} E_{g,m} = (t_{g,e} - t_{g,s}) \sum_{m=1}^M C_{p,m} P_{g,m} \quad (1)$$

式中: M 为发电厂总数; $C_{p,m}$ 为发电厂 m 的碳排因子; $E_{g,m}$ 和 $P_{g,m}$ 分别为发电厂 m 在运行方式 g 下的发电量和平均发电功率。

电力系统运行方式 g 对应的等效碳排因子(carbon emission equivalent factor, CEEF) C_g 定义为:

$$C_g = \frac{F_g}{E_{\text{sum}}} = \frac{\sum_{m=1}^M C_{p,m} E_{g,m}}{\sum_{m=1}^M E_{g,m}} = \frac{\sum_{m=1}^M C_{p,m} P_{g,m}}{\sum_{m=1}^M P_{g,m}} \quad (2)$$

式中: E_{sum} 为发电厂总发电量。

假设 $t_{g,s}$ 时刻起,自然灾害导致电力系统元件功能失效, $t_{g,e}$ 时刻该元件恢复,系统按照正常方式运行,用下标 0 表示,即 C_0 为其CEEF, F_0 为其总碳排量, $P_{0,m}$ 为其平均发电功率。设下标 r 表示实际灾害运行方式,则 C_r 为其CEEF, F_r 为对应的总碳排量, $P_{r,m}$ 为其平均发电功率。电力系统运行方式变化及其对应的碳排放变化如图1所示。

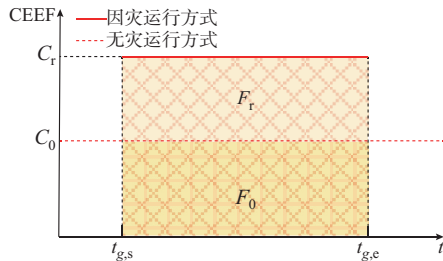


图1 电力系统因灾运行碳排变化量
Fig. 1 Carbon emission variation of power system operation due to natural disasters

当总发电量为 E_{sum} 时,电力系统相应的总碳排量表示如下:

$$F_0 = C_0 E_{\text{sum}} = \sum_{m=1}^M C_0 P_{0,m} (t_{g,e} - t_{g,s}) \quad (3)$$

$$F_r = C_r E_{\text{sum}} = \sum_{m=1}^M C_r P_{r,m} (t_{g,e} - t_{g,s}) \quad (4)$$

电力系统因灾运行碳排增加量定义为 ΔF_{PS} :

$$\Delta F_{\text{PS}} = F_r - F_0 \quad (5)$$

1.2 电力系统元件防灾救灾措施功效建模

本文重点在源、网两侧,相应的电力系统元件对应于电力设备,有相应的工程防灾减灾设计规程进行规范^[22]。

本文所提的防灾救灾与常规的防灾减灾内容一致。防灾的重点在于预防灾害导致运行方式的变化,救灾的重点在于灾害发生后如何尽早恢复正常运行。

电力部门的防灾救灾措施分析如下:

1) 变电设施的防灾减灾^[22]。应对不同灾害,采取合适的措施以防范相关设备或设施受灾。例如,应对雷击的防雷及接地系统和防止水淹的挡水排水系统。防灾措施设计需要进行技术经济评价,即针对特定的灾害强度设置防灾水平,遵循相关标准或规范建设相应的防灾工程。若实际灾害强度小于设计灾害强度,自然灾害仍然导致被保护的电力设备或设施受损、丧失功能,则认为防灾措施不当,需要承担相应的责任。

2) 线路部分的防灾减灾^[22]。主要包括支撑基础以及架空线等防止飓风、冰冻、暴雨等灾害导致倒杆或断线而采取的必要防范措施。

3) 救灾措施及抢修时间。救灾措施是指受损电力设备或设施尽快恢复功能的应急作业体系。尽管对于电力故障的抢修时间并没有标准或规范给出明确的强制规定,但是电力部门内部一般有一定的抢修时间标准,对外给出一定的供电服务承诺^[23],可以作为参考。如果抢修不及时,则认为救灾措施不当,需要承担相应的责任。

4) 各类发电厂站也有相应的规范,这里不再赘述。

总之,针对不同的灾害和受灾体,电力部门的防灾救灾措施十分繁多,目前尚无很好的建模,故本文提出了相应的抽象建模。

图2为元件 i 面临灾害 j 的防灾救灾措施功效模型。图中: R 为实际灾害强度; T_R 为实际恢复时间; $r(j)$ 为灾害 j 的实际强度; $t_R(j)$ 为 $r(j)$ 下元件 i 失效后的实际恢复时间。

元件 i 面临灾害 j 的实际工作点 $D_{\text{PR}}(i, j)$ 为三元组,表示如下:

$$D_{\text{PR}}(i, j) = \{i, r(j), t_R(j)\} \quad (6)$$

在不同灾害强度下,若元件 i 失效,其最大允许

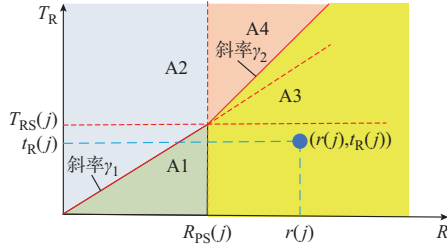


图2 第*i*个元件的防灾救灾措施功效模型
Fig. 2 Natural disaster prevention and recovery effect model of component *i*

抢修时间与灾害强度呈正相关,本文近似采用图2所示线性化的红色折线来表示防灾措施失效后的最大设计抢修时间 $t_{R,max}(i,j)$:

$$t_{R,max}(i,j) = \begin{cases} \gamma_1 r(j) & r(j) \leq R_{PS}(j) \\ \gamma_2 r(j) & r(j) > R_{PS}(j) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $R_{PS}(j)$ 为元件 *i* 防灾措施的设计灾害强度; γ_1 、 γ_2 为折线的斜率。

图2中折线的近似斜率的设计基本理由如下: 1) 发生的灾害强度越大,其抢修恢复的时间越长,反之,发生的灾害强度越小,其抢修恢复的时间越短; 2) 针对实际灾害强度小于设计灾害强度的自然灾害,也设计了相应规范和有序的救灾措施,而实际灾害强度超过设计灾害强度的自然灾害更难以应对,救灾措施应急性强、变化大,故抢修时间更长,即一般有 $\gamma_1 < \gamma_2$ 。

元件 *i* 面向实际灾害 *j* 的状态 $S_{PR}(i,j)$ 可以描述为:

$$S_{PR}(i,j) = \{i, j, S(i,j), r(j), t_R(j), R_{PS}(j), T_{RS}(j)\} \quad (8)$$

式中: $T_{RS}(j)$ 为灾害达到设计灾害强度时防灾措施失效后的最大允许抢修时间; $S(i,j)$ 为 $r(j)$ 下元件 *i* 的失效状态,如式(9)所示。

$$S(i,j) = \begin{cases} 1 & \text{元件受灾失效} \\ 0 & \text{元件受灾但未失效} \end{cases} \quad (9)$$

设置 $S_{Pr}(i,j)$ 为防灾措施责任,采用式(10)进行评估。

$$S_{Pr}(i,j) = \begin{cases} 0 & \text{防灾措施得当,无须承担相应责任} \\ 1 & \text{防灾措施不当,需要承担相应责任} \end{cases} \quad (10)$$

设置 $S_{Rp}(i,j)$ 为抢修恢复责任,采用式(11)进行评估。

$$S_{Rp}(i,j) = \begin{cases} 0 & \text{抢修及时,无须承担相应责任} \\ 1 & \text{抢修不及时,需要承担相应责任} \end{cases} \quad (11)$$

引入函数 $\text{Sgn}(x,y)$ 标识事件:

$$\text{Sgn}(x,y) = \begin{cases} 1 & x > y \\ 0 & x \leq y \end{cases} \quad (12)$$

面向实际防灾救灾,有以下2个重要指标:

1) 当实际灾害强度大于设计灾害强度时,有

$$\text{Sgn}(r(j), R_{PS}(j)) = \begin{cases} 1 & r(j) > R_{PS}(j) \\ 0 & r(j) \leq R_{PS}(j) \end{cases} \quad (13)$$

2) 当实际恢复时间大于设计恢复时间时,有

$$\text{Sgn}(t_R(j), t_{R,max}(i,j)) = \begin{cases} 1 & t_R(j) > t_{R,max}(i,j) \\ 0 & t_R(j) \leq t_{R,max}(i,j) \end{cases} \quad (14)$$

如图2所示,设计灾害强度 $R_{PS}(j)$ 与设计最大允许抢修时间曲线将 $R-T_R$ 平面分为A1至A4这4个区域。

若灾害强度 $r(j)$ 小于设计灾害强度 $R_{PS}(j)$,相关元件因防灾措施不当而失效,即图2中的A1、A2区域,则该元件需要承担相应的碳排增加: 1) 若恢复时间小于 $t_{R,max}(i,j)$,即恢复工作点在区域A1内,则元件仅承担防灾措施不当的责任; 2) 若恢复时间大于 $t_{R,max}(i,j)$,即恢复工作点在区域A2内,则元件不仅要承担防灾措施不当的责任,还要承担恢复时间超期的额外损失。

若实际灾害强度 $r(j)$ 大于设计灾害强度 $R_{PS}(j)$,元件 *i* 失效,即图2的A3、A4区域,则: 1) 若恢复时间小于 $t_{R,max}(i,j)$,则认为元件 *i* 不必承担相应的损失责任,即A3所在区域为免责区; 2) 若恢复时间大于 $t_{R,max}(i,j)$,即恢复工作点在区域A4内,则元件不承担防灾措施不当的责任,但要承担恢复时间超期的额外损失。

综上,有

$$\begin{cases} S_{Pr}(i,j) = S(i,j) (1 - \text{Sgn}(r(j), R_{PS}(j))) \\ S_{Rp}(i,j) = S(i,j) (1 - \text{Sgn}(t_R(j), t_{R,max}(i,j))) \end{cases} \quad (15)$$

1.3 碳排增加量的组成分析和过失追究

假设设计灾害运行方式序号为1,对应的总碳排放量为 F_1 , CEEF 为 C_1 ; 设灾害发生时间为 t_0 , 灾害导致该元件失效后最大允许抢修时间为 $t_{R,max}$, 对应的抢修结束时间为 t'_1 , 而该元件实际抢修完成时间为 t_1 ; 该元件若发生设计灾害下的最大抢修完成时间为 T_{RS} , 即灾害发生时间为 t_0 时, 应该在 t_2 时刻抢修完毕; 假设灾害导致电力系统采取的运行方式的 CEEF 为 C_r , 该运行方式结束时间为 t_3 。

图3给出了4个工作点的灾害导致的电力系统碳排增加组成。

$\Delta C_{DS}(P)$ 为设计灾害强度下的电力系统碳排增

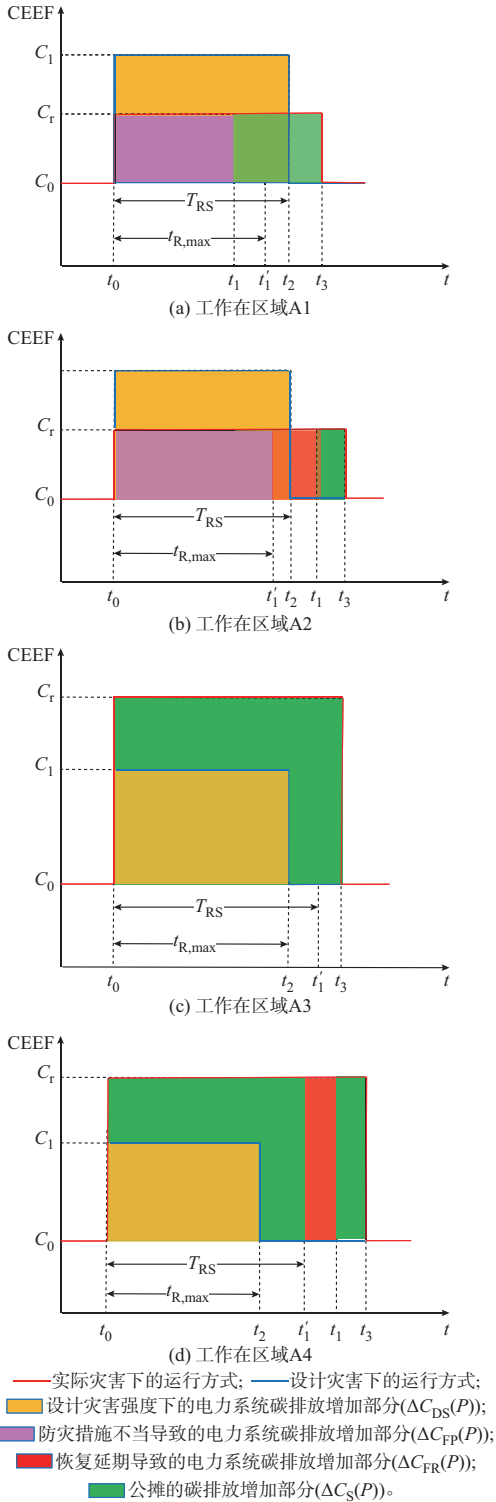


图3 灾害导致的电力系统碳排增加组成
Fig. 3 Composition of carbon emission increment in power system due to natural disasters

加部分,如下所示:

$$\Delta C_{DS}(P) = (t_2 - t_0) \left(\sum_{m=1}^M C_1 P_{p,m}^1 - \sum_{m=1}^M C_0 P_{p,m}^0 \right) \quad (16)$$

式中: $P_{p,m}^1$ 和 $P_{p,m}^0$ 分别为设计灾害和正常运行方式下电源 m 的平均功率。

图3中其余3个部分构成如下: 1) $\Delta C_{FP}(P)$ 为防灾措施不当导致的电力系统碳排增加部分, 由责任元件单独承担; 2) $\Delta C_{FR}(P)$ 为恢复延期导致的电力系统碳排增加部分, 由责任元件单独承担; 3) $\Delta C_S(P)$ 为公摊的碳排增加部分。

以下分别对4个工作点的构成进行计算:

1) 如图3(a)所示, 元件 i 在真实灾害未达到设计灾害强度时就产生了功能失效, 导致整个电力系统改变运行方式, 但是元件 i 在真实灾害对应的最大运行抢修时间内实现了功能恢复, 故其必须承担的相应碳排增加的责任为:

$$\begin{cases} \Delta C_{FP}(P) = (t_1 - t_0) \left(\sum_{m=1}^M C_r P_{p,m}^r - \sum_{m=1}^M C_0 P_{p,m}^0 \right) \\ \Delta C_{FR}(P) = 0 \end{cases} \quad (17)$$

式中: $P_{p,m}^r$ 为实际灾害运行方式下电源 m 的平均功率。

元件 i 功能恢复后, 电力系统并不一定可以立即恢复到原运行方式。若 t_3 大于 t_1 , 此时所形成的碳排增加的责任须由所有电力系统元件共同承担, 如下所示:

$$\Delta C_S(P) = (t_3 - t_1) \left(\sum_{m=1}^M C_r P_{p,m}^r - \sum_{m=1}^M C_0 P_{p,m}^0 \right) \quad (18)$$

2) 如图3(b)所示, 元件 i 在真实灾害未达到设计灾害强度时就产生了功能失效, 导致整个电力系统改变运行方式, 且元件 i 在真实灾害对应的最大运行抢修时间后才实现功能恢复, 故其必须承担相应的碳排增加的责任为:

$$\begin{cases} \Delta C_{FP}(P) = (t_1' - t_0) \left(\sum_{m=1}^M C_r P_{p,m}^r - \sum_{m=1}^M C_0 P_{p,m}^0 \right) \\ \Delta C_{FR}(P) = (t_1 - t_1') \left(\sum_{m=1}^M C_r P_{p,m}^r - \sum_{m=1}^M C_0 P_{p,m}^0 \right) \end{cases} \quad (19)$$

同样, 若 t_3 大于 t_1 , 须由所有电力系统元件共同承担的碳排增加 $\Delta C_S(P)$ 如式(18)所示。

3) 如图3(c)所示, 元件 i 遭遇真实灾害超过其设计灾害强度而功能失效, 同时, 抢修时间未超过真实灾害对应的最大运行抢修时间, 故元件 i 免责, 且所有因灾害造成的碳排增加均纳入公摊, 如下所示:

$$\begin{cases} \Delta C_{FP}(P) = \Delta C_{FR}(P) = 0 \\ \Delta C_S(P) = (t_3 - t_0) \left(\sum_{m=1}^M C_r P_{p,m}^r - \sum_{m=1}^M C_0 P_{p,m}^0 \right) \end{cases} \quad (20)$$

4)如图3(d)所示,元件*i*遭遇真实灾害超过其设计灾害强度而功能失效,但是其抢修时间超过了真实灾害对应的最大运行抢修时间,故元件*i*应免责,即

$$\begin{cases} \Delta C_{FP}(P) = 0 \\ \Delta C_{FR}(P) = (t_1 - t'_1) \left(\sum_{m=1}^M C_r P_{p,m}^r - \sum_{m=1}^M C_0 P_{p,m}^0 \right) \end{cases} \quad (21)$$

而灾害造成的剩余碳排增加均纳入公摊,即

$$\Delta C_S(P) = [(t'_1 - t_0) + (t_3 - t_1)] \left(\sum_{m=1}^M C_r P_{p,m}^r - \sum_{m=1}^M C_0 P_{p,m}^0 \right) \quad (22)$$

不同电力元件或设备的同一责任归属方视为一个责任主体。假设某一电力系统元件因其防灾抗灾措施不当而需要承担的碳排增加量为 ΔF_{PuPS} ,需要公摊的碳排增加量为 ΔF_{SrPS} ,则有:

$$\begin{cases} \Delta F_{PuPS} = \Delta C_{FP}(P) + \Delta C_{FR}(P) \\ \Delta F_{SrPS} = \Delta C_{DS}(P) + \Delta C_S(P) \\ \Delta F_{PS} = \Delta F_{PuPS} + \Delta F_{SrPS} \end{cases} \quad (23)$$

2 碳排增加公摊部分的责任分摊

本章将电力系统局部产生的碳排增加量 ΔF_{SrPS} 还原为系统整体的碳责任,并在各个责任主体中进行共同但有区别的分摊。

尽管电力系统碳排放由电源产生,但是电源因负荷的需求而生产电能,电网从中进行支撑,故共担碳责任是必要的。现有的责任共担方案主要有两类^[24]:1)系数法,即在生产者与消费者之间确定某一比例系数来划分;2)分类法,即按碳排放来源进行分摊。本文首先基于污染者负担原则和法学中相关定义提出有区别的责任角色划分,即确定责任主体;然后,结合系数法和分类法对不同主体的碳责任进行共同但有区别的分摊,即量化责任程度。

2.1 基于不同角色的碳责任分摊原则

1)电源侧是电力系统直接的碳排放源,对碳排放的产生有着不可推卸的责任,要承担其相应的严格碳责任。

2)电源因负荷的需求而生产电能,即电源和负荷基于一种“合伙”关系共同产生碳排放,负荷具有一定的连带碳责任。

3)电网侧重于电能的传输与配送,由电网公司统一营运,故只承担系统网损对应量的碳排放。

2.2 源网荷的整体分摊系数

由于线路网损的存在,电源侧产生的总碳排和负荷侧电能所对应的碳排并不相等,故需要先核算

二者的实际碳排放^[5];电网作为电力交易的受益者,网损对应的碳排放由电网侧来承担。假设灾害发生的起始时刻为 t_0 ,截止时刻为 t_T ,核算时段 T 内电力系统总发电量为 E ,核算碳排为 $F_{PS}(E)$;源、网、荷对应的碳排放分别为 $F_P(E)$ 、 $F_G(E)$ 、 $F_L(E)$,则有:

$$F_{PS}(E) = F_P(E) + F_L(E) + F_G(E) \quad (24)$$

结合系数法,将三侧的整体分摊系数定义为:

$$\delta_y = \frac{F_y(E)}{F_{PS}(E)} \quad y \in \{P, L, G\} \quad (25)$$

式中: δ_y 为源网荷三侧的整体分摊系数; $F_y(E)$ 为源网荷三侧与系统总发电量 E 对应的碳排放。

2.3 共同但有区别的分摊系数

电力系统有多个电源和负荷节点,结合系数法对碳责任进行初步划分后,还须结合分类法分别确定电源和负荷中不同主体的责任承担比例。其中,将电网侧仅视为一个责任主体。

2.3.1 自然灾害下受灾电源共同但有区别的特性

本文认为自然灾害发生后,低碳电源出力受阻是高碳电源替代发电并导致电力系统碳排放增加的直接原因。因此,低碳电源分摊到的碳责任应大于正常分摊时承担的责任。高碳电源替代低碳电源发电而导致自身碳排放增加,故其分摊到的碳责任应小于正常分摊时承担的责任。自然灾害发生后,低碳电源和高碳电源之间存在着承担责任多少的博弈。这种博弈也同样存在于由不同电源供电的负荷中。因此,基于共同责任原则的Aumann-Shapley(以下简称A-S)法不再适用于灾害导致的电力系统碳排放增加的责任分摊,需要重新进行设计。

2.3.2 基于共同但有区别特性的A-S法

基于合作博弈理论的A-S法是一种较为公平和有效的解决方案,已用于阻塞费用^[20]、网损^[21]的分摊,以及电力系统发电侧和负荷侧共同碳责任的分摊^[17]。

在A-S法基础上,本文结合“共同但有区别的责任”原则,将自然灾害对电力系统碳排放影响的责任分摊问题建模成一个基于合作博弈的碳资源分配问题,根据不同主体在系统碳排放产生过程中的“参与度”,将增加的碳排放分摊到不同责任主体。

假设电力系统有 M 个电源、 N 个负荷, P 为某一电力系统中电源和负荷节点的功率向量,并按照下标先电源后负荷的顺序统一进行排序,如下所示:

$$P = [p_{p,1}, p_{p,2}, \dots, p_{p,M}, p_{l,1}, p_{l,2}, \dots, p_{l,N}] = [p_1, p_2, \dots, p_z, \dots, p_{M+N}] \quad (26)$$

式中: $p_{p,m}$ 为电源节点 m (假设一个电源节点由一个发电厂构成)的功率($m=1, 2, \dots, M$); $p_{l,n}$ 为负荷节点 n 的功率($n=1, 2, \dots, N$); p_z 为统一排序后参与者 z (即电源和负荷节点)的实际功率。

假设 $F(P)$ 为与功率向量相关且具有一阶偏导数的碳成本函数,并满足 $F(0)=0$,则有:

$$F(P) = F(p_1, p_2, \dots, p_z, \dots, p_{M+N}) \quad (27)$$

基于 A-S 法,每个参与者 z 分摊的碳责任 $F_z^*(P)$ 记为:

$$F_z^*(P) = p_z \int_0^1 \frac{\partial F(\lambda P)}{\partial p_z} d\lambda = p_z F_z(P) \quad (28)$$

式中: $F_z(P)$ 为参与者 z 的边际碳责任; λ 为积分变量; $F(\lambda P)$ 为给定 λ 值时的碳成本函数。

碳核算中碳流计算与潮流信息更新的时间分辨率紧密相关^[25],电力系统碳排放计算并非是一个连续可微的函数,计算过程需要离散化处理^[18,26]。考虑到电力系统排放量问题的复杂性且难以将其分摊问题表达为规范的 A-S 形式,便采用简化 A-S 法^[26];文献[27]指出并证明了 A-S 法可以应用于像分段线性函数这样的不可微函数,故本文结合简化 A-S 法对不同的功率向量进行有限次分割,并最终将 $F(P)$ 视为由 K 个线性函数构成的碳成本函数,对其中每一个子区间的“长度”进行归一化的加权处理,基于简化 A-S 法的碳成本函数^[28]推理及计算详见附录 A,则式(28)中的边际碳责任近似为:

$$F_z(P) = \sum_{k=1}^K (\lambda_k - \lambda_{k-1}) \frac{\partial F(\lambda_k P)}{\partial p_z} \quad (29)$$

式中: λ_k 为第 k 个子区间积分变量,其中, $\lambda_0=0$ 、 $\lambda_K=1$; $\partial F(\lambda_k P)/\partial p_z$ 为给定值 λ_k 时参与者的边际碳责任。

在自然灾害导致的电力系统碳排放增加的责任分摊过程中,由于 $F_z(P)$ 是同质^[29]的(证明见附录 A 式(A13)),同时结合式(28)可见,参与者不能通过合并或分解其功率需求来改变其碳责任,从而无法改变自身的责任配额;A-S 法并不满足需求单调性(如果产品某些产出的水平增加,该产出也将获得更大的成本分担),而 Friedman-Moulin 方法则更好地满足这一点^[30],其基本形式^[19]如附录 A 式(A18)所示。

本文结合 Friedman-Moulin 的思想对 A-S 法做出如下改进:当灾害导致电力系统碳排放增加时,以 CEEF 为优先级来决定分配顺序,并认为系统不同时段的 CEEF 具有不同的边际效应,CEEF 越大,则需承担的责任也越大,将整体的 CEEF 信息聚合于不同个体的功率向量以体现“区别责任”,在功率权重的加成和约束下将碳责任视为基于特定路径的积分,其边际碳成本随功率的增加而增加,如下所示:

$$\begin{cases} C_{z,1} \leq C_{z,2} \leq \dots \leq C_{z,k} \leq \dots \leq C_{z,K} \\ p_z^* = p_{z,1} + p_{z,2} + \dots + p_{z,k} \end{cases} \quad (30)$$

式中: $C_{z,k}$ 为参与者 z 第 k 个子区间的 CEEF; $p_{z,k}$ 为参

与者 z 第 k 个子区间的功率; p_z^* 为基于改进 A-S 法计算时参与者 z 的功率。

$$F_z^*(P) = \sum_{k=1}^K \left[(\lambda_k^* - \lambda_{k-1}^*) p_z^* \frac{\partial F(\lambda_k^* P)}{\partial p_z^*} \right] = \sum_{k=1}^K \left[(\lambda_k^* - \lambda_{k-1}^*) \sum_{\tau=1}^k p_{z,\tau}^* \frac{\partial F(\lambda_k^* P)}{\partial p_z^*} \right] \quad (31)$$

式中: $F_z^*(P)$ 为基于改进 A-S 法的参与者 z 的碳责任; λ_k^* 为基于改进 A-S 法计算的变量; $p_{z,\tau}^*$ 为基于改进 A-S 法的参与者 z 个子区间的功率。

以基于改进 A-S 法计算的碳责任 $F_z^*(P)$ 作为责任分摊的关键指标(定义为改进的标么 A-S 法,与基于 A-S 法计算的对比见附录 A 图 A2),结合分类法将系统电源侧参与者 m 和负荷侧参与者 n 的共同但有区别的分摊系数 α_m 和 β_n 分别定义为:

$$\begin{cases} \alpha_m = \frac{F_m^*(P)}{\sum_{m=1}^M F_m^*(P)} \\ \beta_n = \frac{F_n^*(P)}{\sum_{n=1}^N F_n^*(P)} \end{cases} \quad (32)$$

2.4 公摊碳排放增加量的分摊计算

2.4.1 电源侧分摊

假设电源侧由 M 个电源节点构成,根据基于改进 A-S 法计算的碳责任对其进行进一步划分,第 m 个电源的碳责任 $F_{P,m}^*$ 定义为:

$$F_{P,m}^* = \delta_P \alpha_m \Delta F_{S_rPS} \quad (33)$$

式中: δ_P 为电源侧整体的分摊系数。

2.4.2 负荷侧分摊

假设负荷侧由 N 个负荷节点构成,根据基于改进 A-S 法计算的碳责任对其进行进一步划分,第 n 个负荷的碳责任 $F_{L,n}^*$ 定义为:

$$F_{L,n}^* = \delta_L \beta_n \Delta F_{S_rPS} \quad (34)$$

式中: δ_L 为负荷侧整体的分摊系数。

2.4.3 电网侧分摊

本文假设电网架构以及输配能力均已考虑了防止电源送出受阻等因素,故认为电网只须承担系统网损对应的碳排放,并定义电网侧的碳责任 F_G^* 为潜在碳责任:

$$F_G^* = \delta_G \Delta F_{S_rPS} \quad (35)$$

式中: δ_G 为电网侧整体的分摊系数。

3 案例验证及分析

3.1 案例说明

基于文献[3]中的新型电力系统案例,本文进行了 2 个改进电力系统网络的计算,其中,假设网损占总发电量的比例为 3.5%。

1)如图4(a)和(b)所示,案例1包括以光伏发电为主的G1、以水电为主的G2、以火电(燃煤)为主的G3,自然灾害分别作用于G1、G2的接入线路以及变电站S_A;灾害链对低碳电站送出功率的影响见文献[3],系统的功率和碳排放变化详见附录B图B1至图B5,案例1主要体现为线路级的碳排放增加^[3]。

2)案例2的系统接线图及各机组与负荷的有功注入如图4(c)所示,将网损等效到电源侧^[31]后对无损网络进行碳流计算^[6,31]。其中,G1(CF)为燃煤机组,G2(OG)和G4(NG)分别为燃油、燃气机组,G3(HY)和G5(PV)分别为水电、光伏机组。假设极端灾害直接作用于发电设备,受天气、地理环境以及低碳发电设备自身的影响,低碳电源全部退出运行,G3、G5暂时分别由备用的油电、气电发电设备代替,案例2主要体现为厂站级的碳排放增加^[3]。

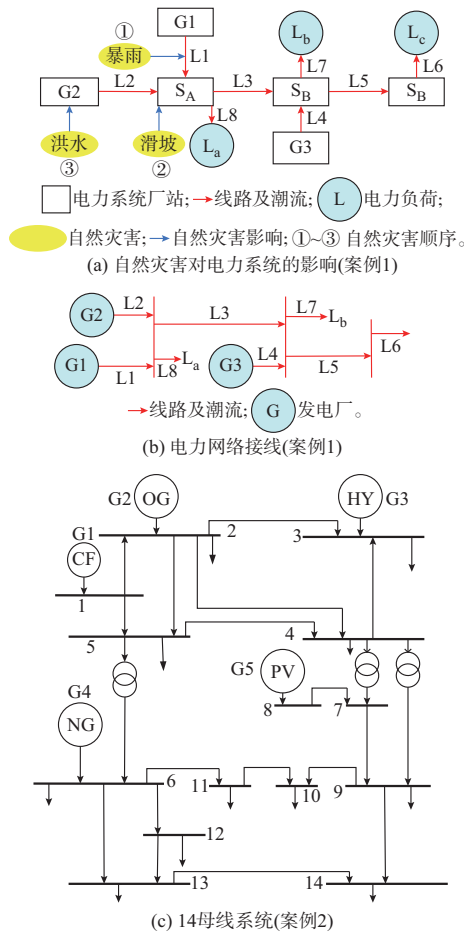


图4 3母线和14母线系统案例
Fig. 4 Cases of 3-bus and 14-bus systems

3.2 3母线系统

案例1中前6天不计防灾过失时,源网荷三侧的整体分摊系数分别为50.00%、1.75%、48.25%,需要额外承担的碳责任 ΔF_{SPPS1} 为3 677.840 tCO₂;以输电线路为例,结合第7天系统功率变化,对计及防灾

过失的碳责任分担进行讨论,如附录B图B1所示。若电网侧免除碳责任,则由电源和负荷两侧额外公摊的碳排放责任为93.980 tCO₂(整体分摊系数分别为51.813%、48.187%);源网荷三侧公摊的碳责任为296.977 tCO₂(分摊系数同前6天)。鉴于线路未及时抢修(防灾过失)导致系统碳排放增加,电网侧需额外承担的碳责任为195.478 tCO₂,详细分析见附录B。

以常规和改进A-S法计算的系统额外增加的碳责任分摊系数如表1所示,二者的碳责任见附录B表B2。

表1 案例1中不同分摊方法的碳责任分摊系数
Table 1 Carbon obligation allocation coefficients for various allocation methods in case 1

责任主体	碳责任分摊系数/%		责任承担相对变化率/%
	常规A-S法	改进A-S法	
G1(光伏)受灾	11.771	12.835	+9.039
G2(水电)受灾	16.517	18.613	+12.690
G3(燃煤)	71.711	68.552	-4.405
负荷L _a	15.688	15.937	+1.587
负荷L _b	42.472	39.352	-7.346
负荷L _c	41.838	44.712	+6.869

1)常规A-S法与改进A-S法相比,低碳电源G1、G2分摊的碳责任相对自身而言明显增加,而G2的变化程度较大是因为替代G2发电会产生更多的碳排放;高碳电源G3由于碳排放总量大,故分摊到的碳责任虽减少,但整体变化相对不大,这一点与A-S法类似,在计算边际碳责任的同时,自身的功率系数既是权重又是约束,而这也是对各自能力原则的体现,即虽然分配的优先级在于整体,但责任的变化是相对自身的。碳责任的变化体现在碳减排中,低碳电源出力占比增加,高碳电源出力占比减少。虽然出力的相对变化不大,但是低碳替代高碳而减少的碳排放十分可观,有利于“双碳”目标的实现。

2)负荷L_a(低碳用电)分摊的碳责任增加主要连带于G1、G2,但是增加程度小于低碳电源,这是因为灾害导致G1、G2减少的发电量主要供给负荷L_b、L_c;L_b的实际功率和碳排放与L_c相差不多,但是L_b和L_c的责任分摊变化相反,这是因为在系统CEEF较高的时段(电力多来自于G3),L_b功率大于L_c,导致自身碳排放被动增加(与G3类似)。同理,L_c对于低碳电力的使用占比较大(与低碳电力的关联更高),作为低碳电力的受益者,其责任承担占比会相对增加(连带于G1、G2)。

3)改进A-S法体现在电源侧,根据不同电源在碳排放增加过程中的关联度(参与度)来进行不同程度的责任划分;改进A-S法体现在负荷侧,根据不同

负荷在使用低碳电力过程中的参与度来进行有区别的责任划分。

结合式(33)一式(35),最终案例1中自然灾害导致电力系统碳排放增加的责任分摊结果见附录B表B3。

3.3 14母线系统

14母线系统的案例介绍以及相关计算分析详见附录C。其中,不同方法的分摊系数对比如表C1所示,灾害发生后由备用设备替代发电时系统中的不同节点碳排放强度主要变化对比如图C2所示。

1)案例2中G1、G2、G4未对系统碳排放的增加产生影响,故各自碳责任承担占比均减少,G3、G5直接导致了系统碳排放增加,碳责任承担占比增加。与案例1相比,案例2电源侧变化程度相对较大,原因在于低碳电源全部退出,由高碳电源替代低碳电源发电的占比较高,碳排放增加的程度相对较大。

2)负荷L2、L4、L5、L6、L11、L12的节点碳排放强度并未受低碳受灾电源的影响,未对系统碳排放的增加产生影响,故其碳责任承担占比同样约减少6%;L3受低碳电源影响较大,故责任承担占比增加11%左右;L14、L10的碳责任承担理论上会增加,但由于与高碳电源关联度更高,故碳责任承担减少3%左右。

从案例1、2来看,与低/高碳电源关联的负荷责任承担并非都增加或都减少,而是根据与低/高碳电源的关联度有区别地增加或减少其碳责任,这对于碳减排目标的确定也具有一定的参考意义。与常规A-S法相比,案例1、2采用改进A-S法的日均碳减排分别增加了407.336 tCO₂、156.843 tCO₂,减排比分别为0.895、0.880,减排目标不会因过于激进而难以实现或者导致发电成本增加和减负运行^[32]。

4 结语

本文首先提出了电力系统运行方式CEEF的概念及计算方法;其次,提出了电力系统因灾运行碳排放增加量的计算方法;然后,提出了面向自然灾害和电力系统元件的防灾措施功效模型;最后,提出了灾害强度下防灾措施不当所应承担碳排放增加量的计算方法,以及需要公摊的碳排放增加量的责任计算方法。

本文所提出的电力系统因灾运行碳排放增加计算,可以通过“电力系统运行方式对应CEEF”的计算值变化直接获得,与具体何类灾害或灾害链无关,故大大增加了本文所提问题和方法的适应范围。另外,本文所提出的电力系统元件的防灾措施功效模型具有抽象性和通用性,可以应对电力系统不同元件和不同灾种。

由于灾害不可抗力因素的影响,对于无过失的

电力系统碳排放增加,本文基于合作博弈的理论提出了一种改进A-S方法,较好地解决了因自然灾害导致高碳发电强制替代受灾受阻低碳发电所导致的碳排放增量分摊不公平矛盾,并以相关的案例验证了所提方法的公平性和可行性。

附录见本刊网络版,点击<http://www.aeps-info.com/aeps/article/abstract/20241227004>,或扫描英文摘要后二维码,可阅读全文。

参考文献

- [1] 舒印彪,张丽英,张运洲,等.我国电力碳达峰、碳中和路径研究[J].中国工程科学,2021,23(6):1-14.
SHU Yinbiao, ZHANG Liying, ZHANG Yunzhou, et al. Carbon peak and carbon neutrality path for China's power industry[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 1-14.
- [2] LI C, CHENG Y, XUE Y, et al. Trends and challenges of the interactions between microclimate and electric power systems[J]. The Innovation Energy, 2024, 1(4): 100046.
- [3] 章坚民,王雨宽,薛禹胜,等.自然灾害-电力系统-碳排放变化的贝叶斯网络建模与估计[J].电力系统自动化,2023,47(7):1-11.
ZHANG Jianmin, WANG Yukuan, XUE Yusheng, et al. Bayesian network modeling and estimation of natural disaster-power system-carbon emission change[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(7): 1-11.
- [4] 章坚民,徐益琰,薛禹胜,等.自然灾害下流域水库的产汇流过程对发电碳排放量的影响[J].电力系统自动化,2025,49(6):1-13.
ZHANG Jianmin, XU Yilong, XUE Yusheng, et al. Impact of runoff generation and concentration process in watershed reservoirs on carbon emissions of power generation under natural disasters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(6): 1-13.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 康重庆,程耀华,孙彦龙,等.电力系统碳排放流的递推算法[J].电力系统自动化,2017,41(18):10-16.
KANG Chongqing, CHENG Yaohua, SUN Yanlong, et al. Recursive calculation method of carbon emission flow in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(18): 10-16.
- [8] 薛禹胜,吴勇军,谢云云,等.停电防御框架向自然灾害预警的拓展[J].电力系统自动化,2013,37(16):18-26.
XUE Yusheng, WU Yongjun, XIE Yunyun, et al. Extension of blackout defense scheme to natural disasters early-warning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(16): 18-26.
- [9] 吴勇军,薛禹胜,谢云云,等.台风及暴雨对电网故障率的时空

- 影响[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(2): 20-29.
WU Yongjun, XUE Yusheng, XIE Yunyun, et al. Space-time impact of typhoon and rainstorm on power grid fault probability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(2): 20-29.
- [10] 吴勇军, 薛禹胜, 陆佳政, 等. 山火灾害对电网故障率的时空影响[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(3): 14-20.
WU Yongjun, XUE Yusheng, LU Jiazheng, et al. Space-time impact of forest fire on power grid fault probability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(3): 14-20.
- [11] 谢云云, 薛禹胜, 王昊昊, 等. 电网雷击故障概率的时空在线预警[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 44-51.
XIE Yunyun, XUE Yusheng, WANG Haohao, et al. Space-time early-warning of power grid fault probability by lightning [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 44-51.
- [12] 谢云云, 薛禹胜, 文福拴, 等. 冰灾对输电线故障率影响的时空评估[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(18): 32-41.
XIE Yunyun, XUE Yusheng, WEN Fushuan, et al. Space-time evaluation for impact of ice disaster on transmission line fault probability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(18): 32-41.
- [13] 邵莉莉. 碳中和背景下国际碳排放治理的“共同责任”构建——共同但有区别责任的困境及消解[J]. 政治与法律, 2022, 321(2): 30-43.
SHAO Lili. The establishment of “shared responsibilities” for international carbon emission for international carbon emission governance in the context of carbon neutrality—the predicaments in the doctrine of common but differentiated responsibilities and the solution [J]. Politics Science and Law, 2022, 321(2): 30-43.
- [14] 刘季熠, 张旖尘, 张东雨, 等. 欧盟减排《责任分担条例》修正案分析与启示[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(6): 756-763.
LIU Jiyi, ZHANG Yichen, ZHANG Dongyu, et al. Analysis and enlightenment of the latest European Effort Sharing Regulation [J]. Climate Change Research, 2022, 18(6): 756-763.
- [15] 李传轩. “双碳”目标下消费者碳责任及其立法表达[J]. 政治与法律, 2023, 332(1): 67-80.
LI Chuanxuan. Consumer carbon responsibility under the carbon peak and neutrality goals and its legislative expression [J]. Politics Science and Law, 2023, 332(1): 67-80.
- [16] JAKOB M, WARD H, STECKEL J C. Sharing responsibility for trade-related emissions based on economic benefits [J]. Global Environmental Change, 2021, 66: 102207.
- [17] 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.
- [18] 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 Quan. The study of carbon emission obligation allocation in power systems [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- [19] HOUGAARD J L. An introduction to allocation rules [M]. Heidelberg, Germany: Springer, 2009.
- [20] 杨洪明, 段献忠. 双边交易模式下基于Aumann-Shapley值的阻塞费用分摊方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 60-64.
YANG Hongming, DUAN Xianzhong. A study of the Aumann-Shapley value based allocation method for congestion cost in bilateral transaction environment [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(11): 60-64.
- [21] MOLINA Y P, PRADA R B, SAAVEDRA O R. Complex losses allocation to generators and loads based on circuit theory and Aumann-Shapley method [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(4): 1928-1936.
- [22] 国家能源局. 输变电工程防灾减灾设计规程: DL/T 5630—2021[S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.
National Energy Administration. Specification for design of disaster prevention and mitigation of power transmission and transformation projects: DL/T 5630—2021 [S]. Beijing: China Planning Press, 2021.
- [23] 国家电网有限公司. 供电服务“十项承诺”[EB/OL]. [2024-08-05]. <http://www.sx.sgcc.com.cn/articles/202206/a1154228.html>.
State Grid Corporation of China. Ten commitments on electricity service [EB/OL]. [2024-08-05]. <http://www.sx.sgcc.com.cn/articles/202206/a1154228.html>.
- [24] 杨军, 杨泽, 丛建辉, 等. 责任和收益匹配原则下中国省域碳排放责任共担方案优化[J]. 资源科学, 2022, 44(9): 1745-1758.
YANG Jun, YANG Ze, CONG Jianhui, et al. Optimization of China's provincial carbon emission responsibility sharing scheme based on the principle of responsibility and benefit matching [J]. Resources Science, 2022, 44(9): 1745-1758.
- [25] 张宁, 李姚旺, 黄俊辉, 等. 电力系统全环节碳计量方法与碳表系统[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(9): 2-12.
ZHANG Ning, LI Yaowang, HUANG Junhui, et al. Carbon measurement method and carbon meter system for whole chain of power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(9): 2-12.
- [26] 陈星莺, 郁清云, 谢俊, 等. 基于利用Aumann-Shapley值分摊网损和排放减少量的DLMP计算研究[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(4): 17-23.
CHEN Xingying, YU Qingyun, XIE Jun, et al. DLMP calculation based on power loss and emission reduction allocation using Aumann-Shapley method [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4): 17-23.
- [27] SAMET D, TAUMAN Y, ZANG I. An application of the Aumann-Shapley prices for cost allocation in transportation problems [J]. Mathematics of Operations Research, 1984, 9(1): 25-42.
- [28] HAIMANKO O. Cost sharing: the nondifferentiable case [J]. Journal of Mathematical Economics, 2001, 35(3): 445-462.
- [29] PIERRU A. Allocating the CO₂ emissions of an oil refinery with Aumann-Shapley prices [J]. Energy Economics, 2007, 29(3): 563-577.
- [30] HOUGAARD J L, TIND J. Cost allocation and convex data envelopment [J]. European Journal of Operational Research, 2009, 194(3): 939-947.
- [31] 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.
- [32] 梅天华, 边巧燕, 谢俊, 等. 考虑碳排放权的低碳电力调度及收

益分摊[J].电力系统自动化,2016,40(22):49-55.

MEI Tianhua, BIAN Qiaoyan, XIE Jun, et al. Low-carbon power dispatching and benefit allocation considering carbon emission allowance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 49-55.

章坚民(1962—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:态势感知及可视化、信息物理系统集成建模及信息安全防护、电网优化规划与运行等。E-mail:zhangjmhzc@hdu.edu.cn

cn

赵晓煦(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向:电力系统灾害与信息物理融合。E-mail:zxxhdu@163.com

薛禹胜(1941—),男,通信作者,中国工程院院士,博士生导师,主要研究方向:电力系统自动化。E-mail:xueyusheng@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 王梦岩)

Carbon Emission Increase of Power System Operation Under Nature Disaster and Its Obligation Allocation Considering Disaster Prevention and Recovery Effect

ZHANG Jianmin¹, ZHAO Xiaoxu¹, XUE Yusheng², XUE Feng², CHANG Kang², XU Yilong¹

(1. School of Automation (School of Artificial Intelligence), Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

2. State Grid Electric Power Research Institute (NARI Group Corporation), Nanjing 211106, China)

Abstract: The additional carbon emission generated during the operation of the power system due to damage or functional failure of power plants and power grids caused by natural disasters is defined as the carbon emission increase of power system operation due to natural disaster (CEI-OD). Neglecting the cumulative effects of CEI-OD from frequent natural disasters will overestimate the carbon reduction effectiveness of new power systems and affect global decarbonization process. Therefore, calculating CEI-OD and determining its obligation allocation has become an important issue. Firstly, the carbon emission equivalent factor (CEEF) for power system operation modes is proposed, and CEI-OD is calculated based on CEEF when the power system operation mode changes. Secondly, a disaster prevention and recovery measure effect model is constructed using two indicators: the intensity of designed disaster prevention and the corresponding maximum allowable repair time. Simultaneously, the criteria for component disaster prevention negligence and repair negligence are proposed, and based on these, a theory and calculation method for decomposing CEI-OD into accountability allocation and no-fault sharing are introduced. Then, for the collective sharing of the no-fault sharing, an improved Aumann-Shapley method is proposed, which effectively addresses the unfair allocation of carbon emission increase resulting from high-carbon power generation forcibly replacing disaster-affected low-carbon power generation. Finally, the feasibility of the proposed method is validated through relevant cases.

This work is supported by NARI Group Corporation (No. GF-GFWD-210338).

Key words: new power system; natural disaster; carbon emission; carbon emission equivalent factor (CEEF); disaster prevention and recovery; obligation allocation; improved Aumann-Shapely method

