

基于碳流追踪的含光伏储能配电网减碳贡献分配方法

杨晓林¹, 承昊新¹, 陈虹¹, 杨凯¹, 马煜承², 王琦²

(1. 国网江苏省电力有限公司 常州供电分公司, 江苏 常州 213003; 2. 东南大学 电气工程学院, 南京 210096)

摘要:配电网中分布式光伏具有分布广、间歇性强的特点,其就地消纳的特性造成配电网减碳贡献分配不均。为公平衡量分布式光伏与储能装置在配电网中的减碳作用,首先通过双向网损分摊,将实际有损网络转化为无损虚拟网络,进而得到一个时间断面下的碳排放流分布。然后,计算长时间尺度下分布式光伏的计划功率与实际功率对应的碳流分布,从而得到分布式光伏的相对碳排放强度。最后,计算不同配电网储能容量场景下分布式光伏的相对碳排放强度,并以此为依据衡量储能装置的减碳作用,从而提出一种满足公平分配原则的含光伏储能的配电网减碳贡献分配方法,并在标准算例中进行验证。

关键词:碳流追踪;配电网;分布式光伏;网损分摊;隐含碳排放

Carbon reduction contribution allocation method of distribution network with photovoltaic and storage devices based on carbon flowing tracking

YANG Xiaolin¹, CHENG Haoxin¹, CHEN Hong¹, YANG Kai¹, MA Yucheng², WANG Qi²

(1. Changzhou Power Supply Company, Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Changzhou 213003, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Distributed photovoltaic device in distribution network has the feature of wide distribution and strong intermittency. Its local consumption characteristic causes unbalanced distribution of carbon reduction contributions in distribution network. In order to measure the carbon reduction effect of distributed photovoltaic and energy storage devices in distribution network fairly, real lossy network is transformed into lossless virtual network through two-direction network loss allocation, and then the carbon emission flow distribution under a time section is obtained. Then, the carbon flow distribution corresponding to the planned power and actual power of distributed PV in long-time scale is calculated respectively to obtain the relative carbon emission intensity of distributed PV. Finally, the relative carbon emission intensity of distributed photovoltaic under different distribution network energy storage capacity scenarios is calculated, which is the basis of carbon reduction effect measurement of energy storage devices, so as to propose a carbon reduction contribution distribution method in distribution network including photovoltaic and energy storage devices that meets the principle of fair distribution, and the standard calculation example is verified.

Key words: carbon flow tracing; distribution network; distributed photovoltaics; network loss allocation; embodied carbon emission

0 引言

为响应我国政府提出的2030年“碳达峰”、2060年“碳中和”目标,发展低碳电力系统势在必行。配电网是电力网络中最接近用户的部分^[1-2],探究配电网中碳排放的形成与影响机理,对于减少电力碳排放、实现低碳电力起到助推作用。近年来,分布式光伏与储能在配电网中得到大规模应用^[3-4],在减少配电网碳排放量的同时,也带来了减碳贡献公平分配的问题。

目前,电力系统碳排放计算的方法有宏观估计法^[5-7]与碳流分析法^[8-9]两种。宏观估计法从长时间尺度的宏观数据出发,对能源消耗总量进行统计,但其提供的结果具有一定的滞后性且无法精确描述系统内部的碳流机理^[10]。在宏观估计法的基础上,碳流分析理论的引入为电力系统碳排放的研究带来了新的思路和方法^[11-13]。文献[14]提出了基于潮流分布矩阵的电力系统碳排放流计算方法,并将节点负荷、支路以及网损的碳流率来源追溯至各发电机组。文献[15]通过计算线路等效传输功率和负荷节点等效负荷需求,将网损碳流率分摊至各节点,从而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。文献[16]考虑了多种分布式电源在实际配电网中的接入情况及其对应的碳流分布情况,

提出了精细化的碳流分布计算方法,使电力系统碳流计算与实际应用结合的更加紧密。文献[17]基于潮流追踪方法,构建了主动配电网中的碳流分析模型,使得对碳流分析方法的应用深入配电网。文献[18]使用数据驱动方法对碳排放流进行建模,并基于碳流分布情况进行最优功率调度。

在现有的碳流理论中,清洁能源如光伏发电由于不直接产生碳排放,因此其碳排放强度被设置为0。然而,考虑到光伏等新能源的随机性和不确定性,其并网需要外部电源或储能提供安全稳定支撑,因此其碳排放强度数值无法准确反映清洁能源减碳作用,同时现有碳流分析理论也忽视了储能装置的支撑作用。因此,需要对原有的分析方法进行改进,以准确分配减碳贡献和碳责任。

目前的研究较少关注分布式光伏与储能容量对配电网碳排放量的影响。本文在分析不同天气场景下的配电网碳流分布断面的基础上,结合宏观估计法思想,分别计算长时间尺度下分布式光伏的计划功率与实际功率对应的碳流分布,从而得到分布式光伏的相对碳排放强度,用以衡量分布式光伏对配电网的减碳贡献。而后考虑储能容量对分布式光伏的支撑作用,进而提出基于碳流追踪的含高比例光伏储能的配电网减碳贡献分配方法,并在标准算例中进行验证。经算例验证,该方法对于运营商碳责任公平分配有一定的参考作用。

1 分布式光伏相对碳排放强度计算方法

在现有的碳流分析理论中,清洁能源如光伏发电由于不直接产生碳排放,因此其碳排放强度被设置为0。这使得在现有碳流分析的算法中,整个系统的减碳贡献被全部归因于分布式光伏。事实上,系统为分布式光伏配置的备用储能以及系统负荷侧对光伏发电功率的消纳都是辅助分布式光伏减少系统碳排放的重要支撑。因此,为了准确评价分布式光伏的实际减碳效果,本文根据文献[16]的日内实际碳流计算方法,结合配电网特点,提出了一种基于碳流追踪的配电网分布式光伏发电装置相对碳排放强度的计算方法,其流程如图1所示。

首先计算不同天气条件下的分布式光伏发电功率,确定光伏发电的计划功率;而后通过潮流追踪和碳流率计算,得到不同实际发电功率断面下的碳流分布情况;之后结合一年内各天气情况的占比,得到实际的配电网年碳排放量;然后计算计划功率断面下的计划年碳排放量;最后得到分布式光伏的相对碳排放强度。

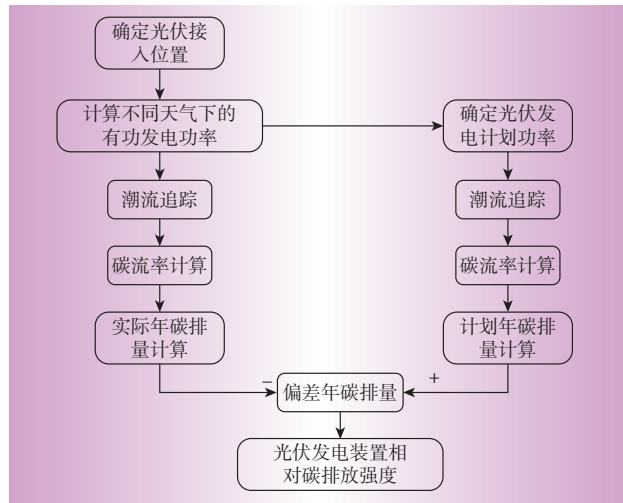


图1 光伏发电装置相对碳排放强度计算流程

Fig. 1 Flow of calculation of relative carbon emission intensity of photovoltaic power generation devices

1.1 分布式光伏计划发电功率

根据不同天气情况在一年中的天数占比,可以得到分布式光伏发电装置的计划发电功率,表示如下

$$P_{\text{plan}} = \sum_{i=1}^n p_i P_i \quad (1)$$

式中: n 为不同天气情况的个数; p_i 为各天气情况在1年内的天数占比; P_i 为各天气对应的光伏发电功率。

1.2 潮流追踪

对3个部分进行潮流追踪^[19]如下:通过顺流和逆流追踪,将网络损失双向分摊至负荷侧和电源侧,从而将有损网络转化为无损网络;通过直流潮流方程对无损网络进行潮流分析求解;通过有功功率的逆流潮流追踪,得到节点负荷、支路潮流分布以及发电机注入网络的功率分布。

顺流潮流追踪本质上是将支路损耗的负值等效为虚拟的电源出力,因此节点 n 分摊的网损如下所示

$$\Delta S_{Lk} = - \sum_{i=n+1}^{n+m} \frac{S_{Gi}}{S_i} [A_d^{-1}]_{ik} S_{Lk} \quad (2)$$

式中: S_{Gi} 为节点 n 与其下游节点构成的支路损耗等效成的虚拟发电机的输出功率; S_i 为节点 n 的各个下游节点的流过功率; A_d 为 $(n+m) \times (n+m)$ 阶的下游分布矩阵,组成元素为节点 n 流入功率占被流入节点总流入功率的比例的相反数。

逆流潮流追踪本质上是将支路损耗等效为虚拟负荷,由此可以得到节点 k 处电源承担的网损如下所示

$$\Delta S_{Gk} = \sum_{i=n+1}^{n+m} \frac{S_{Li}}{S_i} [A_u^{-1}]_{ik} S_{Gk} \quad (3)$$

式中: S_{Li} ($i \in [n+1, n+m]$) 为节点 k 与其下游节点构成的支路损耗等效成的虚拟负荷; S_i 为流过节点 i 的上游节点总功率; S_{Gk} 为节点 k 的输入功率; A_u 为 $(n+m) \times (n+m)$ 阶的上游分布矩阵,组成元素为上游节点流入节点 k 的

功率占上游节点流过功率的比例的相反数。

通过双向网损分摊可将支路损耗分摊至电源与负荷两侧,如下所示

$$\Delta S_{Lk} = - \sum_{i=n+1}^{n+m} \frac{\beta S_{Gi}}{S_i} [A_d^{-1}]_{ik} S_{Lk} \quad (4)$$

$$\Delta S_{Gk} = \sum_{i=n+1}^{n+m} \frac{(1-\beta)S_{Li}}{S_i} [A_u^{-1}]_{ik} S_{Gk} \quad (5)$$

$$S'_{Lk} = S_{Lk} + \Delta S_{Lk} \quad (6)$$

$$S'_{Gk} = S_{Gk} - \Delta S_{Gk} \quad (7)$$

式中: β 为网络损耗分摊至负荷部分占比; S'_{Lk} 、 S'_{Gk} 分别为网络的净负荷、净出力; S_{Gi} 为节点 n 与其下游节点构成的支路损耗等效成的虚拟发电机的输出功率; A_d 为节点 n 流入功率占被流入节点总流入功率的比例的相反数。

经过网络损失的双向分摊,可以得到无损网,通过下式进行潮流计算

$$P'_k = P'_{Gk} - P'_{Lk} = B\theta'_k \quad (8)$$

式中: θ'_k 为第 k 个节点的电压相角; P'_k 为第 k 个节点的节点注入功率; P'_{Gk} 和 P'_{Lk} 分别为节点 k 的电源有功净出力和有功净负荷; $B \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为以支路电抗组成的节点导纳矩阵。

通过求解式(8)可以得到各支路的功率,根据逆流追踪重新计算得到节点负荷、支路潮流中各发电机注入网络的功率占比。

1.3 碳流率计算

由1.2节可得节点负荷、支路潮流中各主网馈线输入的功率。结合主网馈线碳排放强度 E_G ,即可计算得到配电网中的碳流分布情况如下

$$R_{Li} = \frac{P'_{Li}}{P'_i} \sum_{k=1}^n [A_u^{-1}]_{ik} P'_{Gk} E_G \quad (9)$$

$$R_{ij} = \frac{P'_{ij}}{P'_i} \sum_{k=1}^n [A_u^{-1}]_{ik} P'_{Gk} E_G \quad (10)$$

$$R_{Gk} = \text{Re}[S_{Gk}] E_G \quad (11)$$

$$\Delta R_{Gk} = \text{Re}[\Delta S_{Gk}] E_G \quad (12)$$

式中: R_{Li} 为负荷 i 的碳流率,物理意义为负荷 i 每小时用电产生的等效到发电侧的碳排放量; R_{ij} 为支路 $i-j$ 的碳流率,物理意义为单位时间内随有功潮流通过的碳流量; R_{Gk} 为节点 k 注入配电网的碳流率; ΔR_{Gk} 为节点 k 承担的网损碳流率; Re 为复数的实部。

1.4 分布式光伏相对碳排放强度计算

通过式(9)至式(12)计算得到节点负荷碳流率、支路碳流率和发电机注入碳流率,由此可以得到不同天气情况下配电网1天的碳排放量,结合第1.1节所提1年内各天气情况占比,即可得到配电网分布式光伏相对碳排放强度如下所示

$$C_{\text{real}} = T \sum_{i=1}^n p_i C_i \quad (13)$$

$$E_{g-\text{rel}} = \frac{C_{\text{plan}} - C_{\text{real}}}{T \sum_{i=1}^n p_i P_i} \quad (14)$$

式中: T 为系统碳排放量的统计周期; n 为不同天气类型的数量; p_i 为各天气情况在1年内的天数占比; C_i 为各天气对应的碳排放量; P_i 为各天气对应的光伏发电功率; C_{real} 、 C_{plan} 分别为在光伏发电实际、计划功率在1个统计周期内配电网的整体碳排放量; $E_{g-\text{rel}}$ 为分布式光伏相对碳排放强度。

2 含高比例光伏的配电网储能减碳作用评估方法

配电网在不同气象条件下为分布式光伏提供的备用容量体现在:当光伏发电装置的实际发电功率与日平均发电量出现偏差时,配电网会通过调整主网馈线的出力来平衡整体出力的波动;当光伏发电功率小于计划发电功率时,主网馈线的输出功率增加,等效于部分备用容量投运,系统整体碳排放量增加;当光伏发电功率大于计划发电功率值时,系统按照计划发电功率运行,溢出功率转变为弃光损失。

当天气状况良好时,光伏发电功率大于计划功率,此时储能元件表现为负荷,相当于给储能元件充电,同时输出计划发电功率;当天气状况较差时,光伏发电功率小于计划功率,此时储能元件表现为电源,进行功率输出从而填补缺失的光伏发电功率,仍旧不足的发电功率差额部分依靠主网馈线增加输入功率填补。

由于分布式光伏发电装置配套的备用容量为发电功率的10%^[20],按照计划功率进行光伏发电时会产生一部分弃光损失。此时储能用户可以通过提供额外储能容量承接弃光损失,从而降低分布式光伏发电装置相对碳排放强度。通过第1节所提方法计算不同的额外储能容量对应配电网的总体碳排放量,从而衡量额外储能用户的减碳贡献。

在光伏发电计划功率下,配电网整体碳排放量如下所示

$$C_{\text{plan}} = N P_{m,\text{plan}} E_G t \quad (15)$$

式中: t 为每日分布式光伏工作时间, h; N 为碳排放统计周期的天数, d; E_G 为主网馈线碳排放强度, g/kWh; $P_{m,\text{plan}}$ 为计划功率下的主网馈线输入有功功率; C_{plan} 为在光伏发电计划功率下1个统计周期内配电网的整体碳排放量。

在光伏发电实际功率下,配电网的整体碳排放

量如下所示

$$C_i = \begin{cases} P_{m,plan} E_G t & P_i > P_{plan} \\ P_{m,i} E_G t & P_i < P_{plan} \end{cases} \quad (16)$$

$$C_{real} = \sum_{i=1}^N p_i C_i \quad (17)$$

式中: $P_{m,plan}$ 为计划功率下主网馈线输入配电网的有功功率; $P_{m,i}$ 为实际光伏发电功率下的主网馈线输入有功功率; C_i 为光伏发电功率为 P_i 时统计周期内配电网的整体碳排放量; p_i 为各个天气情况发生的概率; C_{real} 为在光伏发电功率为实际功率情况下的统计周期内配电网的整体碳排放量。

考虑到配电网在接入光伏装置时会配备一定容量的储能作为可靠性保障,由此式(16)、式(17)需要修正为式(18)、式(19),如下所示

$$C_i = \begin{cases} P_{m,plan} E_G t & P_i > P_{plan} \\ P_{m,i} E_G t - P_s E_G t_s & P_i < P_{plan} \end{cases} \quad (18)$$

$$C_{real} = \sum_{i=1}^N p_i C_i \quad (19)$$

式中: t_s 为储能元件放电时间; P_s 为配电网配置的储能充放电功率。在计算配电网整体碳排放量时,遵循的策略是保证光伏输入配电网的功率不低于计划功率,即光伏功率大于计划功率时,只使用溢出的部分对储能元件进行充电,不使用主网馈线对储能元件进行充电;光伏功率小于计划功率时,只使用储能元件放电进行光伏功率缺额的补充,不使用主网馈线对光伏功率缺额进行补充。

3 算例测试与分析

本文使用如图2所示的IEEE13节点配电网进行仿真与计算,其中650节点为主网馈线接入点,633节点与634节点之间连接有4 160V:480 V变压器,671节点与692节点连接有断路器K,选定634节点、652节点为分布式光伏发电装置接入点。

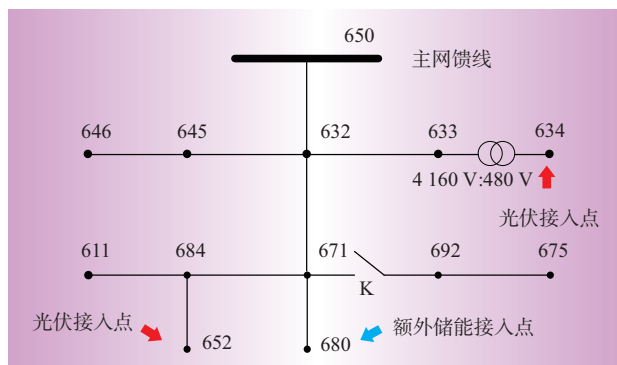


图2 光伏与储能装置接入点示意图

Fig. 2 Schematic of the access point of photovoltaic and energy storage devices

在设置仿真场景时,不论分布式光伏的接入系统方法如何,首先应当降低本节点的负荷,然后根据有功潮流分布对其余节点进行支持,因此当系统总接入光伏功率低于系统总负荷时,接入方法对结果的影响较小。设置不同的算例场景,场景1配电网只有光伏接入点634节点,通过场景1计算分布式光伏的相对碳排放强度;场景2在场景1的基础上增加652节点作为光伏接入点,从而进行光伏接入效果的对比试验;场景3在场景1的基础上,在680节点设置额外储能接入,研究额外储能容量的变化对分布式光伏相对碳排放强度的影响。

根据不同的天气情况,本文总结了4种典型天气场景对应的发电功率数据如表1所示,据此计算光伏发电装置的计划功率与分析碳排放量,其中天气比例数据为南京地区2022年度的各类型天气比例^[21]。

表1 典型天气类型下光伏发电输出功率

Table 1 Photovoltaic power generation output power of typical weather types

天气类型	晴天	少云天气	多云转晴	阴雨天
占比/%	8.5	8.2	62.8	20.5
对应温度/℃	30	25	20	10
对应光照强度/(W·m ⁻²)	1 000	900	400/800	200
光伏发电功率/kW	61.5	54.5	19.5/45.0	8.5

根据式(1)可以计算得到计划功率为31.692 kW,因此在634节点配置的备用容量为3.169 2 kW,充放电时间为2 h。在Simulink中搭建仿真模型进行潮流计算,主网馈线碳排放强度 E_g 为581 g/kWh,结合第1节所述方法完成光伏发电装置实际功率与计划功率的节点负荷碳流率、支路碳流分布的计算。

当配电网中不含分布式光伏时,年碳排放量为8 953.554 t;当分布式光伏按计划发电功率运行时,设置光伏装置每日工作时长为12 h,配电网年碳排放量为8 871.358 t;当分布式光伏按实际运行时,配电网年碳排放量为8 892.525 t。由式(14)可以得到分布式光伏发电装置的相对碳排放强度为209.121 g/kWh。

为了评估提供额外储能容量的用户在光伏发电装置减碳作用中的影响,本文选择在680节点设置不同容量的额外储能作为算例(如图2所示),使用第1节提出的碳流分析方法进行计算。

进行场景3的计算时,设置储能元件充放电策略为:当光伏发电功率大于计划功率时,需保证整体新能源发电功率不低于计划功率,即不能使用主网馈线向储能元件充电。主网馈线碳排放量随额外储能容量变化曲线如图3所示。

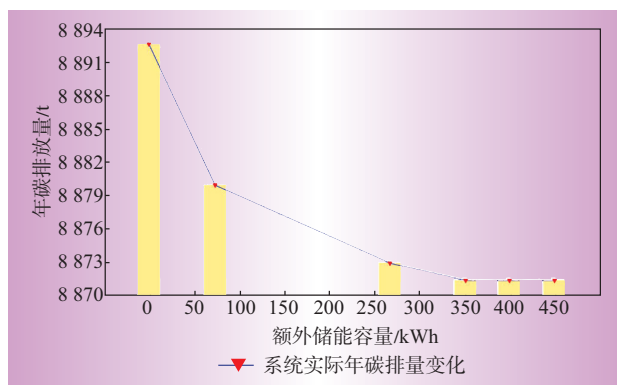


图3 配电网碳排放量随额外储能容量变化

Fig. 3 Carbon emissions of distribution network change with additional energy storage capacity

由图3可得,随着额外储能容量增大,主网馈线输入的碳排放量下降斜率越来越小,直至原本光伏发电的弃光功率全部被储能元件承接以填补光伏功率缺额。随着额外储能容量的增大,同时储能元件充电策略要求保证整体新能源发电功率不低于计划功率且不使用主网馈线向储能元件充电,因此配电网年碳排放量下降分为3个阶段。

第一阶段为额外储能元件容量逐渐增大至可在2 h内承接晴转多云天气下实际发电功率大于计划功率的部分,用以弥补实际功率低于计划功率天气下的光伏发电缺额;第二阶段为在第一阶段的基础上,额外储能元件容量逐渐增大至可在2 h内承接少云天气下实际发电功率大于计划功率的部分;第三阶段为在第二阶段的基础上额外储能元件容量逐渐增大至可在2 h内承接晴朗天气下实际发电功率大于计划功率的部分。在本文算例中,由于晴朗天气和少云天气所占比例之和小于阴雨天气,因此储能元件承接的晴朗天气和少云天气的弃光损失全部用于弥补阴雨天气的光伏发电功率缺额。表2为不同额外储能容量下的分布式光伏相对碳排放强度与配电网年碳排放量减少值。

表2 不同额外储能容量下分布式光伏的相对碳排放强度与配电网年碳排放量减少值

Table 2 Relative carbon emission intensity of distributed photovoltaics and annual carbon emission reduction of distribution network under different additional energy storage capacity

额外储能容量/kWh	分布式光伏的相对碳排放强度/($\text{g} \cdot \text{kWh}^{-1}$)	配电网年碳排放量减少值/t
0	209.121	61.034
73.510	71.552	73.644
267.358	12.309	80.624
351.358	0	82.196

由表2可知,当配电网额外储能容量增加,分布

式光伏的弃光损失减少,分布式光伏的相对碳排放强度降低,配电网年碳排放量减少值增加。当分布式光伏的弃光损失被全部承接,配电网整体年碳排放量和计划光伏功率场景下的年碳排放量一致。因此配电网的额外储能的减碳作用体现于可以承接原本的弃光损失,使得弃光率降低从而支撑分布式光伏减少配电网碳排放量。储能装置的储能容量和需求侧响应能力越高,分布式光伏装置的相对碳排放强度就越低。

4 结束语

本文结合宏观估计法与碳流分析法提出了一种评价分布式光伏相对碳排放强度的计算方法,同时依据该方法计算得到了不同天气场景下的分布式光伏相对碳排放强度,并在此基础上提出了含高比例光伏的配电网储能减碳作用评估方法。

所提方法后续可从两部分进一步深化:一是考虑精确的新能源功率预测方法,提高计划功率的设置合理性;二是进一步考虑配电网有功和无功潮流分布,分析潮流分布变化情况下碳流率改变是否会影响减碳责任分配,进而使得用户利益受到损失。D

参考文献:

- [1] 刘洪波,刘坤诚,盖雪扬,等.高比例新能源接入的主动配电网规划综述[J/OL].发电技术,1-13(2023-06-05)[2023-12-20].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/33.1405.TK.20230213.1059.002.html>.
LIU Hongbo, LIU Shencheng, GAI Xueyang. Review of active distribution network planning with high proportion renewable[J]. Power Generation Technology, 1-13 (2023-06-05)[2023-12-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/33.1405.TK.20230213.1059.002.html>.
- [2] 吴雪琼,夏栋.新型主动配电网智能规划与决策技术研究综述[J/OL].综合智慧能源,1-7(2023-08-06)[2023-12-20].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1461.TK.20230506.0945.002.html>.
WU Xueqiong, XIA Dong. Review on intelligent planning and decision-making technology for the new active distribution network[J/OL]. Integrated Intelligent Energy, 1-7 (2023-08-06)[2023-12-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1461.TK.20230506.0945.002.html>.
- [3] 潘旭东,黄豫,唐金锐,等.新能源发电发展的影响因素分析及前景展望[J].智慧电力,2019,47(11):41-47.
PAN Xudong, HUANG Yu, TANG Jinrui, et al. Influencing factors and prospects for development of renewable energy power generation[J]. Smart Power, 2019, 47 (11):41-47.
- [4] 许建峰,曹庆仁.中国分布式光伏并网发电现状及应

- 用研究[J]. 能源与节能, 2020, 177(6): 45-48.
- XU Jianfeng, CAO Qingren. Research on the status and application of distributed photovoltaic grid-connected power generation in China[J]. Energy and Energy Conservation, 2020, 177(6): 45-48.
- [5] 陈丽霞, 孙弢, 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.
- [6] RAN X, ZHANG J, LIU K. An interval-probabilistic CVaR (IP-CVaR) and modelling for unknown probability distribution of some random variables[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(3): 2 035-2 045.
- [7] GU Y, LI J, XING X, et al. Carbon emission flow calculation of power systems considering energy storage equipment[C]//2023 8th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), April 14-16, 2023, Tianjin, China.
- [8] 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.
- [9] 陈厚合, 茅文玲, 张儒峰, 等. 基于碳排放流理论的电力系统源-荷协调低碳优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 1-11.
- CHEN Houhe, MAO Wenling, ZHANG Rufeng, et al. Low-carbon optimal scheduling of a power system source-load considering coordination based on carbon emission flow theory[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 1-11.
- [10] KANG C, ZHOU T, CHEN Q, et al. Carbon emission flow from generation to demand: a network-based model[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5): 2 386-2 394.
- [11] 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 Yaoqian, et al. Preliminary theoretical investigation on power system carbon emission flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 38-43, 85.
- [12] 吴培肇. 考虑网损的电网碳流分析及其可视化研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- WU Peizhao. Analysis and visualization of grid carbon flow considering grid power loss[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [13] 杜效鹄, 王继琳, 张妍. 电力系统碳排放预测与分析[J]. 中国能源, 2022, 44(8): 12-19.
- DU Xiaohu, WANG Jilin, ZHANG Yan. Prediction and analysis of carbon emissions in the electric power industry[J]. Energy of China, 2022, 44(8): 12-19.
- [14] 汪超群, 陈懿, 迟长云, 等. 基于潮流分布矩阵的电力系统碳排放流计算方法[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(12): 4 835-4 842.
- WANG Chaoqun, CHEN Yi, CHI Changyun, et al. Calculation method of power system carbon emission flow based on power flow distribution matrix[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(12): 4 835-4 842.
- [15] 冯欣, 杨军. 考虑网络损耗的碳排放流理论改进与完善[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(5): 81-86.
- FENG Xin, YANG Jun. Improvement and enhancement of carbon emission flow theory considering power loss[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5): 81-86.
- [16] ZHANG W, GU Y, ZHANG Y, et al. A carbon emission flow analysis model and method of active distribution system based on power flow tracing[C]//2021 IEEE 5th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), October 22-24, 2021, Taiyuan, China: 1 197-1 202, doi:10.1109/EI252483.2021.9712910.
- [17] WANG Y, QIU J, TAO Y. Optimal power scheduling using data-driven carbon emission flow modelling for carbon intensity control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(4): 2 894-2 905, doi: 10.1109/TPWRS.2021.3126701.
- [18] 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): 1 683-1 693.
- 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): 1 683-1 693.
- [19] 刘文颖, 陈鑫鑫, 王方雨, 等. 基于图论和潮流追踪的网损分摊方法[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2020, 47(5): 1-9.
- LIU Wenyong, CHEN Xinxin, WANG Fangyu, et al. Network loss allocation based on graph theory and power flow tracking[J]. Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition), 2020, 47(5): 1-9.
- [20] 江苏省发展改革委员会. 省发展改革委关于我省2021年光伏发电项目市场化并网有关事项的通知[EB/OL]. (2021-09-28)[2023-12-20]. http://fzggw.jiangsu.gov.cn/art/2021/10/8/art_84097_10036933.html.
- Jiangsu Provincial Development and Reform Commission. Notice of the provincial development and reform commission on matters related to the marketization and grid connection of photovoltaic power generation projects in our province in 2021[EB/OL]. (2021-09-28)[2023-12-20]. http://fzggw.jiangsu.gov.cn/art/2021/10/8/art_84097_10036933.html.
- [21] 天气网. 南京地区2022年天气情况[EB/OL]. (2023-01-01)[2023-12-20]. <https://lishi.tianqi.com/nanjing.html>.
- Weather Network. Nanjing weather conditions in 2022[EB/OL]. (2023-01-01)[2023-12-20]. <https://lishi.tianqi.com/nanjing.html>.