

零碳电力用户网购绿电消纳量测算方法及市场机制

谢敏^{1,2}, 李弋升^{1,2}, 黄莹^{1,2}, 刘明波^{1,2}, 王滔³, 赵文猛³

(1. 华南理工大学电力学院, 广州 510640; 2. 广东省绿色能源技术重点实验室(华南理工大学), 广州 510640; 3. 南方电网科学研究院, 广州 510663)

摘要: 据测算实现清洁能源电气化将减少73.2%的全球碳排放, 电力行业是CO₂减排的主战场, 因而对消费侧进行零碳电力消费引导对助力“双碳”目标的实现具有重要意义。绿电消纳量测算是零碳电力用户认证的关键技术需求, 然而现行电力市场缺乏相关测算方法。为此, 对市场环境下零碳电力用户绿电消纳量测算方法及市场机制开展了相关研究。首先, 基于改进的电力传输分配因子潮流追踪法构建了主配网多层级潮流追踪模型, 实现了零碳电力用户绿电实时消纳量多层级、高精度测算。在此基础上, 基于现行的电力市场规则提出了涵盖准入指标、绿电消纳量测算方法和结算机制三方面的零碳电力用户网购绿电消纳量测算方法及市场机制。最后, 通过南方某市实际电网算例验证了所提模型能为跨省跨区、邻近地区网购绿电用户提供有效的测算方法及市场机制, 还能引导零碳电力用户往分布式能源区域集中和向系统绿电占比较高的时段转移负荷, 促进新能源消纳。

关键词: 零碳电力用户; 现货市场; 绿电消纳量认证; 潮流追踪; 动态绿电比例信号

Calculation Method and Market Mechanism of Grid-Sourced Green Electricity Consumption for Zero-Carbon Electricity Consumers

XIE Min^{1,2}, LI Yisheng^{1,2}, HUANG Ying^{1,2}, LIU Mingbo^{1,2}, WANG Tao³, ZHAO Wenmeng³

(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Guangdong Key Laboratory of Clean Energy Technology, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 3. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China)

Abstract: According to calculations, achieving clean energy electrification will reduce global carbon emissions by 73.2%. The power industry plays a crucial role in CO₂ emissions reduction, making it essential to guide zero-carbon electricity consumption on the consumer side to support the achievement of the carbon peaking and carbon neutrality goals. Green electricity consumption calculation is a key technical requirement for zero-carbon electricity user certification, yet the current electricity market lacks relevant calculation methods. To address this issue, related research is conducted on the calculation method and market mechanism of green electricity consumption by zero carbon electricity users in the market environment. Firstly, based on an improved power transmission distribution factor power flow tracing method, a multi-level power flow tracing model is constructed, enabling real-time, multi-level, and high-precision calculation of green electricity consumption for zero-carbon electricity users. On this basis, a calculating method and market mechanism for grid-sourced green electricity consumption by zero-carbon electricity users are proposed, which covers access indicators, green electricity consumption calculation methods, and settlement mechanisms in line with existing electricity market rules. Finally, the proposed model is validated through a case study of a practical power grid in a southern city, demonstrating its effectiveness in providing efficient calculation methods and transaction mechanisms for cross-province, cross-regional, and neighboring grid-sourced green electricity users. Furthermore, the model guides zero-carbon electricity users to concentrate in distributed energy areas and shift loads to periods with higher system green power proportion, promoting the consumption of new energy.

Key words: zero-carbon electricity consumers; spot market; certification of green electricity consumption; power flow tracing; dynamic green electricity ratio signal

0 引言

“双碳”目标对现有的生产、消费和行为方式提出了更高的要求,电力等能源部门是全球约四分之一温室气体的排放来源^[1],是实现“双碳”目标的关键所在。在此背景下,电力用户的碳排放责任逐渐受到重视,部分电力用户在购买电能时会更加关注电力来源是否为绿色能源以践行其社会减排责任。而在电网消费侧,以建筑为代表的电力用户因供暖、制冷、照明和设备而产生的电力需求仍不断攀升^[2],亟需通过市场手段推动电网电力来源从化石燃料向零碳能源的转变。作为零碳用户典型代表之一的零碳建筑(zero carbon buildings, ZCB)是绿色建筑发展的重要途径且备受瞩目^[3]。目前加拿大^[4]、法国^[5]、巴西^[6]等国家已先后发布了各自的零碳建筑标准,英国则规定 2016 年后所有由政府出资的新建筑都必须是零碳排放。国内也在积极推进零碳建筑的发展。在国家层面,住房和城乡建设部发布了《“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划》^[7],明确了制定零碳建筑标准和建筑碳排放核算等工作方向;地方层面,天津市低碳发展研究中心制定了全国首个零碳建筑团体标准^[8],深圳市发布了近零碳排放区试点建设实施方案等。现阶段国内对零碳建筑认定和评价方面的研究也主要针对建筑的运营阶段^[9]。根据中国建筑节能协会 2022 年 12 月发布的《2022 中国城乡建设领域碳排放系列研究报告》^[10],2021 年全国建筑运行碳排放预估值为 22.4 亿吨,略高于 2020 年,同时建筑电力碳排放仍保持较快增长,年均增速约为 7%。可见,如何引导电力用户消费并认证绿色电力将成为助力建筑实现净零碳排的关键环节。

目前,零碳电力用户主要依赖于自身百分百的绿色电力认证来实现零碳认证,认证方法主要有两类:一类是自建的屋顶光伏等绿色电源,这类自产式绿色电力消纳量可由用户装设的电能计量表直接计量后认证;另一类则是用户从电网购买的绿色电量,即网购绿电,这部分电量通常无法直接从电网购电

量中进行区分和计量,需要开展绿色电力消纳量的认证。本文针对第二类情况开展研究,构建了市场环境下零碳电力用户网购消纳的绿色电量认证技术和机制。对于未能认证成绿色电的部分电量,用户还需要通过参与绿证市场、碳抵消市场等进行零碳认证,本文不展开讨论。

针对零碳电力用户的零碳认证方法需要对该用户的用电碳排放进行计量。国内既有的零碳用户评价体系存在用电碳排放量“算不清”的问题,用户电力碳排放按照区域全年平均碳排放因子核算,缺乏时效性,无法反映碳排放因子的时空差异性,无法向用户传递足够精细的电力碳排放信息以及实时绿色电力比例信号,不利于零碳电力用户的推行。目前已有的研究主要针对当前用户用电碳排放计量方法的不足展开。文献[11]开展了计及区域间电量交易的用电碳排放计量方法研究,但仍基于平均碳排放因子的思想,计量方法缺乏动态性和时效性。文献[12]提出了基于合作博弈的用电碳排放计量方法,具有较好的公平性、激励性和稳定性,但在含有大量电力用户的实际工程应用中计算复杂度大。文献[13]基于碳流追踪技术构建了绿色电力证书分配模型,以完成分配后各节点间等效碳排放强度差异最小为目标进行证书分配,引导电力用户进入绿色电力证书交易市场。该方法侧重于绿证的交易分配方法,而并未进一步考虑中长期市场与现货市场的联动问题。文献[14-15]均采用了基于潮流追踪法的碳流追踪技术,将交易电量和非交易电量拆分,通过计算交易时段内系统的自然潮流分布和实际潮流分布来测算用户碳排放因子。但对每次计算时需要通过网络进行无损化等效、自然潮流分布和实际潮流分布计算,碳排放因子的时间颗粒度越小则计算量越大,不利于电力市场现货出清环境下的具体计量。同时在实际电网运行时,电气距离较远的绿色电力交易可能会由于线路阻塞的存在而使得用户侧实际消纳的绿色电量远低于合约值,不利于零碳用户开展需求响应进一步实现减碳目标。

以上文献均从碳排放因子的角度对用户侧的电力

基金项目:广东省基础与应用基础研究基金面上项目(2022A1515240074, 2021A1515012245);广东省重点领域研发计划项目(2021B0101230004)。

Foundation item: Supported by the Guangdong Basic and Applied

Basic Research Foundation General Program (2022A1515240074, 2021A 1515012245); Guangdong Province Key Field Research and Development Program Project(2021B0101230004).

碳排进行计量,但在结合电力市场实际运行及结算机制等方面的研究还不够深入,需要在工程实用性上加以改进和完善。现行的绿电交易主要针对中长期市场,即中长期市场的绿电可追踪和认证;但在现货市场环节出清后的结果无法追踪和认证用户的实际绿电消纳量,中长期市场和现货市场关于绿电消纳的认证存在不一致性。因此,亟须制定实时绿电消纳量认定规则和完善相关市场机制以支撑零碳用户参与绿色电力消纳,通过市场手段推动“零碳”的发展。

综上所述,为进一步精细化计量电力用户的实时绿电消纳情况以实现用户的零碳电力技术认证,同时促进零碳电力用户开展需求响应进一步消纳清洁能源,本文基于实时动态绿电分布因子设计了一种零碳电力用户通过市场交易购买的绿电消纳量认证机制。首先,采用改进的电力传输分配因子潮流追踪法构建了用于测算零碳电力用户绿电实时消纳量的主配网多层次潮流追踪模型;以此为核心技术设计了零碳电力用户绿电消纳认证流程,并在现行的现货-中长期交易框架下设计相应的市场机制;最后,通过实际城市电网算例验证了所提方法的实用性和有效性。

1 零碳电力用户绿电消纳量认证机制研究边界及总体架构

目前零碳电力用户要实现清洁能源自给自足和完全零排放尚有难度,仍将需要与电网进行交互,产生相应的电力碳排放。因此,如何测算零碳电力用户在电力市场上因交易而产生的电力碳排放尤为重要。本文从绿电交易的角度出发,通过测算零碳电力用户从现货市场购买的实时绿电含量对其电力碳排放进行考核。为此,本文设计了零碳电力用户绿电消纳量认证机制总体架构,如图1所示。

同时,设定如下研究边界。

- 1) 绿电执行平价上网电价,其中中长期、现货绿电电价均包含电能量价格和环境溢价两部分。
- 2) 本文研究了基于“证随电走”的绿电交易模式,绿电的环境权益跟随绿电交易流转至用户侧。
- 3) 用户的实际绿电消纳量基于全电量出清的现货市场绿电潮流追踪结果进行核算。
- 4) 用户参与市场行为为理性行为,即依据自身实际绿电消纳能力在中长期市场合理购买绿电。

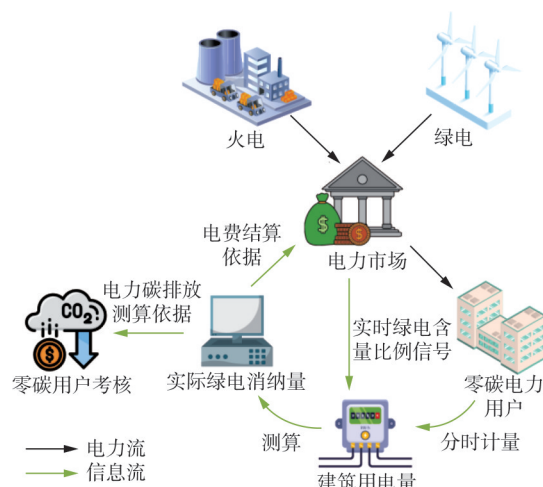


图1 零碳电力用户绿电消纳量认证机制总体框架

Fig. 1 Comprehensive framework of green electricity consumption certification mechanism for zero-carbon electricity consumers

在现货环境下,零碳电力用户的网购电量包含火电和未经认证的绿电,因此需要通过智能电表分时计量该用户的用电量,由交易中心或ISO依据运行日现货全电量出清结果以及绿电潮流追踪技术测算并发布该用户的实时绿电含量比例信号,零碳电力用户则根据该信号以及实际用电量计算并认证其实际绿电消纳量。而实际绿电消纳量一方面作为该用户在现货—中长期市场的电费计算依据参与统一结算,另一方面作为该用户建筑电力碳排放量的测算依据参与零碳指标考核。

从具体技术实现来看,图1所示的总体架构主要由绿电潮流追踪方法、零碳电力用户绿电消纳计算认证方法以及市场统一出清机制三项核心技术构成。下面将对这3项核心技术模块的实现原理展开阐述。

2 基于主配网多层次潮流追踪的绿电实时含量测算

现货市场实行绿电消纳认证的困难之一是如何区分网络潮流中的绿色电力。绿电上网后与传统火电无异,因而现货市场无法准确衡量用户的实际绿电消纳量。针对以上问题,一种实用的解决办法是采用潮流追踪技术(power flow tracing, PFT)对用户实际消纳绿电量进行分摊。PFT最初应用于输电费用的分摊^[16-17],并在一些国家的电力市场中得到实际应用^[18]。同时,随着可再生能源不断发展,

PFT在高比例可再生能源电力系统中的应用潜力也得到重视^[19-21]。总的来看,现有方法大多是从较长时间尺度上通过对简化电力网络做潮流追踪,主要存在以下问题:1)简化的电力网络和直流潮流更多应用于主网层面,并不适合配网层面的潮流追踪以及绿电分摊;2)长时间尺度上的绿电潮流追踪要求网络是在典型运行方式下进行的,不适应现货市场实时动态的特性。因此,已有应用的PFT方法将不足以支撑解决现货市场中零碳电力用户现货绿电实时动态的测算问题。

2.1 改进的PTDF-PFT算法

PFT依据其应用的技术原理可分为不同类型,其中应用较为广泛的是基于比例共享原理(proportional sharing principle, PSP)的潮流跟踪法^[22],其核心思想是认为不同来源的电流进入同一个节点后,输出支路的功率由各输入支路按功率比例提供,输入支路的功率也由各输出支路按功率比例分配。基于PSP的潮流跟踪法主要有3类:基于拓扑发电分布因子^[22](topological generation distribution factors-based, TGDF)、基于域的发电分布因子^[23](factors based on the generator domains, DGDF)和基于电力传输分配因子(power transfer distribution factors, PTDF)^[24]。过去20年间,学界对改进PFT模型给予了极大的关注,但算法核心思想基本都是源自以上3类方法^[25-29]。

TGDF-PFT和DGDF-PFT仅适用于无损网络,对有损网络进行潮流追踪前都需要等效为无损网络,且DGDF-PFT要通过生成域来创建系统的状态图,因而算法需要对每一条线路进行穷举搜索,即使当系统网络拓扑发生微小变化时也有可能导致域的生成发生巨大改变,不适用于大电网实时追踪,而PTDF-PFT则避免了这些问题。因此文献[25]采用改进PTDF-PFT算法开展相关研究,计算模型如下。

电力系统有功潮流满足基尔霍夫电流定律,则通过节点 n 的功率流守恒为:

$$P_n^{\text{in}} + \sum_m F_{m \rightarrow n}^{\text{in}} = P_n^{\text{out}} + \sum_m F_{n \rightarrow m}^{\text{out}} \quad (1)$$

式中: P_n^{in} 和 P_n^{out} 分别为节点 n 非线路的注入功率和流出功率; $\sum_m F_{m \rightarrow n}^{\text{in}}$ 和 $\sum_m F_{n \rightarrow m}^{\text{out}}$ 分别为节点 n 的线路注入功率和流出功率,且有:

$$P_n^{\text{in}} = \max\{(G_n - L_n), 0\} + I_n \quad (2)$$

$$P_n^{\text{out}} = \max\{-(G_n - L_n), 0\} + X_n \quad (3)$$

式中: I_n 、 X_n 分别为区域外的注入功率和流出功率; G_n 、 L_n 分别为节点 n 的发电功率和负荷功率。

对于大规模电力系统,注入功率 P_n^{in} 通常已经包含几个分量,因此引入分区内系数矩阵 q^{in} ,将节点 n 上的注入功率与一组分量 α 关联起来(如 $\{1, 2, 3, 4, \dots, n, I_{n1}, I_{n2}, \dots\}$,数字代表节点, I_{n1} 、 I_{n2} 代表不同的区外注入功率来源)。

$$q_{n,\alpha}^{\text{in}} = \begin{cases} \frac{\max[G_n - L_n, 0]}{P_n^{\text{in}}}, & \alpha = n \wedge P_n^{\text{in}} > 0 \\ \frac{I_n}{P_n^{\text{in}}}, & \alpha = I \wedge P_n^{\text{in}} > 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

考虑分区系数后,式(1)可改写为:

$$q_{n,\alpha}^{\text{in}} P_n^{\text{in}} + \sum_m q_{m,\alpha}^{(m \rightarrow n)} F_{m \rightarrow n}^{\text{in}} = q_{n,\alpha}^{\text{out}} P_n^{\text{out}} + \sum_m q_{n,\alpha}^{(n \rightarrow m)} F_{n \rightarrow m}^{\text{out}} \quad (5)$$

式中: $q_{n,\alpha}^{\text{in}}$ 、 $q_{n,\alpha}^{\text{out}}$ 分别为区域内、外在节点 n 处分量 α 贡献的功率比例; $q_{m,\alpha}^{(m \rightarrow n)}$ 、 $q_{n,\alpha}^{(n \rightarrow m)}$ 分别为从节点 n 、 m 处流向节点 m 、 n 的由分量 α 贡献的功率比例; $F_{m \rightarrow n}^{\text{in}}$ 、 $F_{n \rightarrow m}^{\text{out}}$ 分别为从节点 m 流入至节点 n 的功率、从节点 n 流出至节点 m 的功率。

考虑PSP原理并合并流出功率,则可以改写成如下矩阵形式。

$$q = (1 - D)^{-1} \text{diag}\left(\frac{P^{\text{in}}}{F}\right) q^{\text{in}} \quad (6)$$

式中: q 为各节点电力来源分布矩阵; D 为各节点线路注入功率比例分布矩阵; P^{in} 为非线路注入功率矩阵(包括本地发电机注入功率和区域外电网注入功率); F 为节点总注入功率矩阵; q^{in} 为分区内系数矩阵。

2.2 主配网多层次潮流追踪技术

基于改进PTDF-PFT算法设计了主配网多层次潮流追踪方法以实现零碳电力用户实际绿电消纳量的多层次、多精度测算。基于主配网多层次潮流追踪的绿电实时含量测算流程如图2所示。

具体流程如下。

1) 主网层面测算

(1)获取运行日内现货实时市场96时段的出清结果(包括各节点的发电量及负荷情况,以及系统

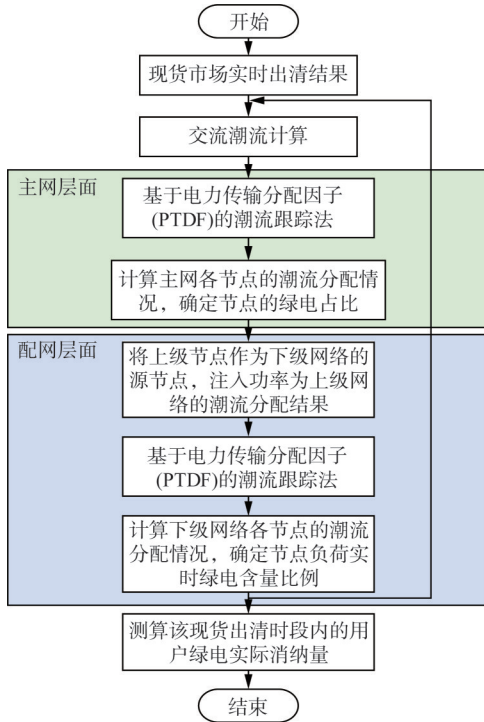


图2 基于主配网多层级追踪的绿电实时含量测算流程图

Fig. 2 Flowchart for real-time calculation of green electricity content based on multi-level power flow tracing in main and distribution networks

潮流自然分布下各节点的线路注入和流出功率), 开展潮流计算。

(2)根据采集到的潮流信息计算各时段各节点的绿电实时分布因子: 首先, 根据节点电源的来源组成和式(2)、(4)创建分区系数矩阵 q^m ; 根据节点的线路注入功率创建各节点线路注入功率比例分布矩阵 D ; 根据节点的总注入功率(包括线路注入、区外电源注入及节点发电机注入功率)创建节点总注入功率矩阵 F ; 根据节点的非线路注入功率(包括区外电源注入及节点发电机注入功率)创建节点非线路注入功率矩阵 P^m 。

(3)计算各节点电力来源分布矩阵 q , 其中元素即为发电节点 j 提供的电量在节点 i 消耗电量中的占比。

(4)计算零碳电力用户主网节点现货绿电实时含量。具体计算公式如下。

$$P_i^t = L_i^t \times \sum_{j \in G} q_{i,j}^t \quad (7)$$

式中: P_i^t 为运行日时段 t 零碳电力用户 i 的现货绿电实时消纳量; L_i^t 为运行日时段 t 零碳电力用户 i 的分时段计量电量; $q_{i,j}^t$ 为运行日时段 t 绿电机组 j 向零

碳电力用户 i 提供的实时绿电占比; G 为绿电机组集合。

2) 配网层面测算

(1)以主网层面的节点为上级节点, 对于连接在上级节点的配电网, 上级节点作为该配电网的边界节点, 以该节点的注入功率作为配网层面的电源功率(其绿电实时含量已由前述主网层面步骤(4)测算出来)加入到配网的潮流跟踪计算中;

(2)根据实时运行各时段配网各节点负荷、边界节点的注入功率以及分布式电源的出力情况, 计算配电网的潮流分布情况;

(3)重复前述主网层面测算步骤(2)~(4), 测算配网各节点实时绿电分布因子以及零碳电力用户所在节点的现货绿电实时含量。

3 零碳电力用户参与绿电消纳的市场机制

以广东为例, 现阶段绿电交易主要针对中长期市场, 现货交易的出清结果无法为用户实际消纳的绿电提供区分和认证。以下从现货市场和中长期市场两个环节进行考虑, 设计的零碳电力用户参与绿电消纳认证整体流程及市场机制如图3所示, 主要包括以下3个技术模块: 1) 基于主配网多层级追踪的绿电实时含量测算技术(见第2节); 2) 主配网多层级潮流追踪动态准入容量划定方法(见第3.1节); 3) 零碳电力用户参与现货-中长期市场统一结算流程(见第3.3节)。

3.1 主配网多层级潮流追踪服务的动态准入容量指标

考虑到实际工程应用以及市场管理的实用性, 一方面, 小负荷容量用户数量较多且较为分散, 对小负荷容量用户进行主配网多层级潮流追踪较为困难, 在现阶段不利于零碳电力用户绿电追踪认证业务的开展以及市场侧的用户管理; 另一方面, 目前难以获取10 kV以下层面的网络拓扑并进行自动化的潮流追踪, 对于容量较小的零碳电力用户来说, 难以获取其所在的低压配网的网络拓扑及潮流数据, 无法对其开展更进一步的绿电消纳量测算。因此需要划定零碳电力用户参与主配网多层级绿电潮流追踪的准入容量, 促进小负荷容量的零碳电力用户(散户)参与零碳负荷集成, 方便市场机构的管理与测算。

对于小于该准入值的零碳电力用户, 电网侧不提

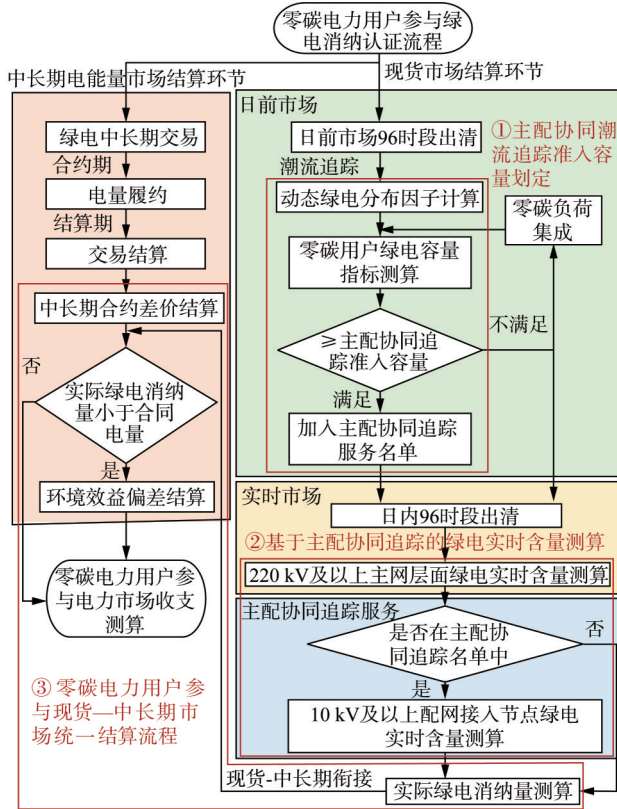


图3 零碳电力用户参与绿电消纳认证流程及市场机制

Fig. 3 Diagram of zero-carbon electricity consumers participation in green electricity consumption certification process and market mechanisms

供更精细化的主配网多层级绿电消纳实时含量测算服务，此类零碳电力用户按其所在的 220 kV 主网节点的实时绿电分布因子进行消纳量测算；而对大于准入值的零碳用户，电网侧可以提供更精细化的主配网多层级潮流追踪服务，在配网层面上 (10~110 kV) 对此类用户进行进一步的绿电消纳量测算。对不满足准入要求的零碳用户，可以通过其所在的 220 kV 主网节点的零碳负荷集成商聚合，统一参与主配网多层级潮流追踪计算。

主配网多层级潮流追踪动态准入容量划定具体流程如下。

1) 获取现货市场日前电能量出清结果。根据 SCUC 模型确定日前 96 时段机组组合情况，并进行交流潮流校核。设零碳电力用户所在节点为 $\{n_1, n_2, \dots, n_s\}$ ，分别获取日前市场出清系统总负荷最大时段与系统总负荷最小时段两个时段的动态绿电分布因子 $\{l_1, l_2, \dots, l_s\}$ 和 $\{s_1, s_2, \dots, s_s\}$ ，计算两个时段的绿电分布因子的平均值 $\{a_1, a_2, \dots, a_s\}$ 。则运

行当日该地区主网节点 n_s 上的零碳电力用户参与绿电消纳实时含量测算的容量计算公式为：

$$Q_s = a_s \times L_{s, \max} \quad (8)$$

式中： Q_s 为运行日主网节点 n_s 上的零碳电力用户参与绿电消纳实时含量测算的容量； a_s 为运行日主网节点 n_s 的平均绿电分布因子； $L_{s, \max}$ 为主网节点 n_s 的零碳电力用户报装容量。

2) 计算该地区在实际运行日内零碳电力用户参与主配网多层级绿电潮流追踪的动态准入容量。

$$Q^{\text{req}} = \frac{1}{K_s} \sum_{S' \subseteq \{n_1, n_2, \dots, n_s\}} Q_s \quad (9)$$

式中： Q^{req} 为运行日内零碳电力用户参与主配网多层级绿电消纳实时含量测算的准入容量，在数学上等于该地区所有零碳电力用户参与绿电消纳实时含量测算的容量的标准差截尾平均值，其中截尾的标准差数量 $n=1$ ； S' 为标准差截尾去除极值后剩余的零碳电力用户节点集； K_s 为标准差截尾去除极值后的零碳电力用户节点数量。

3.2 现货环境下的零碳电力用户绿电消纳量认证

现货环境下，以全电量出清的现货市场绿电潮流追踪结果作为运行日内零碳电力用户实时绿电含量比例。对满足 3.1 节动态准入容量指标的零碳电力用户，对其所在 10 kV 及以上配网节点进行主配网多层级潮流追踪，获取其运行日内各时段实时绿电含量比例，作为该用户当日实际绿电消纳量的测算依据；对不满足 3.1 节动态准入容量指标的零碳电力用户，则只计算其所在 220 kV 主网节点运行日内各时段绿电含量比例，作为该用户当日实际绿电消纳量的测算依据。则用户建筑某运行日内各时段的实际绿电消纳量=运行日内各时段绿电含量比例×各时段实际用电量，具体计算公式参考式(7)。

3.3 考虑环境效益偏差的零碳电力用户参与市场统一结算方法

依据广东现行的绿电交易设置的绿电中长期合同电价=“电能量价格+环境溢价”模式，本文将零碳用户的中长期结算分为电能量结算和环境效益偏差结算两部分，中长期市场采用差价合约的交易模式，现货市场结算采用统一出清价格，通过构建统一结算框架以实现零碳建筑用户参与现货市场与中长期市场的衔接。整体结算流程框架如图 4 所示。

由于零碳电力用户的特殊性，需要采用潮流追踪技术对其在现货市场交易中的实际绿电消纳量进

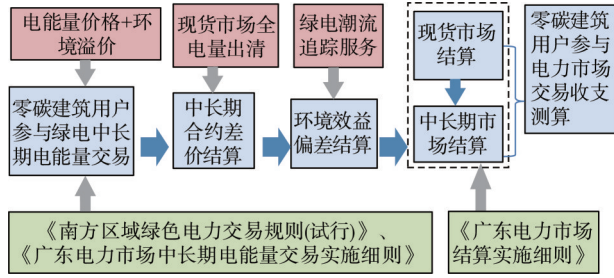


图4 零碳电力用户参与现货—中长期市场统一结算整体框架

Fig. 4 Comprehensive framework for zero-carbon electricity consumers engagement in spot and long-term market unified settlement

行测算。而测算得到的实际绿电消纳量也会对零碳电力用户的绿电中长期交易结果产生影响。由于绿电潮流追踪的结果除了与发用双方实际用电情况相关,也与系统网络拓扑有关,因此进行绿电偏差结算时也需要对零碳电力用户给予一定补偿。

若零碳电力用户参与了绿电中长期交易,则需要对其进行环境效益偏差考核,并根据考核结果进行结算,给予相应的惩罚及补偿:若合同期内零碳电力用户实际消纳的绿电量小于合约电量($Q_c < Q_e$, 其中 Q_c 、 Q_e 分别为用户实际消纳绿电量和合约电量),则偏差部分电量 $\Delta Q (\Delta Q = Q_e - Q_c)$ 不能被认证为该零碳用户消纳的绿电量,同时向该零碳用户补偿一部分由于网络拓扑导致的绿电交易损失。偏差部分电量交易补偿费用计算如下。

$$R^{\text{com}} = (1 - \lambda) \times P^{\text{pe}} \times \Delta Q, \quad \Delta Q > 0 \quad (10)$$

式中: R^{com} 为偏差部分电量交易补偿费用; P^{pe} 为绿电环境溢价; ΔQ 为绿电消纳偏差电量; λ 为偏差惩罚系数, $\lambda \in [0, 1]$, 具体数值由电力市场管理机构设置,偏差惩罚系数越大,则零碳电力用户因实际绿电消纳偏差导致的亏损越大。针对不同绿电电气距离的零碳电力用户参与绿电中长期交易,电力市场管理机构可以为交易双方配置不同的偏差惩罚系数,以抵消一部分由系统网络拓扑导致的绿电分摊比例的影响:1)绿电电气距离较近时说明该零碳电力用户具有较大的绿电消纳潜力,可以配置较大的 λ (趋向1),促使其在发电商绿电多发时段尽可能消纳绿电;2)绿电电气距离较远时零碳电力用户的实际绿电占比较低,说明该零碳电力用户在电网实际运行中可能会由于实际网络的阻塞约束并不能从物理意义上消纳绿电中长期合约签订的绿电

量,此时该合约更偏向于常规的电量合约,则可以配置较小的 λ (趋向0),避免用户较大的交易损失。

综上,零碳电力用户的总电费支出结算项主要包括:现货市场电能量费用结算、中长期合约差价电费结算和环境效益偏差结算。计算公式如下。

$$C^{\text{exp}} = C^{\text{spot}} + C^{\text{MLT}} - R^{\text{com}} \quad (11)$$

式中: C^{exp} 为零碳电力用户参与市场的总电费支出; C^{spot} 为其在现货市场上的电费支出; C^{MLT} 为其中长期市场上的电费支出; R^{com} 为考虑零碳电力用户参与绿电中长期交易时因进行绿电追踪而产生绿电消纳量偏差的补偿费用。

4 实例分析

4.1 实例设置

为验证本文方法的有效性和实用性,以某省电网典型运行方式下的潮流数据及某城市实际电网为计算实例,应用本文所提的零碳电力用户绿电消纳认证机制进行测算。本算例的实际电网数据经110 kV等值处理后,共1 559个节点,线路数量为1 668条,负荷节点数量为690个,供电节点数量为39个。具体供电节点、负荷节点出力参数设置参考表1—2,其中区外注入的绿电功率等效为区域电网边界节点的负值负荷(由于负荷节点数量较多,表2只列举了零碳用户所在的负荷节点数据)。在该运行方式下区外注入绿电总功率为4 709.75 MW,在XS站等9个主网站点均有零碳电力用户接入,且每个节点上均有1个零碳电力用户并网。在电源方面,该市内无大规模绿电机组,绿电来源基本为西部清洁能源以及海上风电。因此该市的零碳电力用户参与清洁能源消纳主要通过跨省跨区消纳的方式进行。同时配网中有分布式光伏并网发电,市内的零碳电力用户也可以通过购买邻近地区分布式光伏发电的方式来消纳绿电,具体架构如图5所示。

4.2 算例1:主网节点绿电含量追踪结果分析

本算例从主网层面对零碳电力用户所在节点参与跨省跨区绿电消纳情况进行了追踪分析。以该电网的KP站、ZJ站、XD站以及BA站的500 kV母线为西部清洁能源和海上风电的注入节点,分别注入了999 MW、296.75 MW、1 600 MW和1 814 MW的绿电功率,其中ZJ站总注入功率为1 187 MW,绿电功率占比25%,其余节点注入绿电功率

表 1 供电节点出力参数设置

Tab. 1 Setting of power supply node output parameters

节点	功率/MW	节点	功率/MW	节点	功率/MW
1	152.30	13	109.00	25	151.50
2	350.50	14	102.00	26	0
3	98.69	15	60.00	27	905.70
4	59.89	16	60.00	28	940.50
5	54.08	17	95.95	29	932.40
6	98.29	18	97.24	30	936.60
7	144.50	19	59.10	1 554	351.20
8	59.69	20	59.10	1 555	248.30
9	230.80	21	136.30	1 556	260.40
10	265.40	22	68.26	1 557	274.80
11	239.80	23	150.10	1 558	348.00
12	358.20	24	71.32	1 559	3657.3

表 2 负荷节点出力参数设置(部分)

Tab. 2 Setting of load node output parameters (partial)

节点	功率/MW
XS 站	35.780
LT 站	21.420
GM 站	22.080
JW 站	27.200
PD 站	41.560
LH 站	34.550
PS 站	27.020
YT 站	19.850
CSA 站	4.117

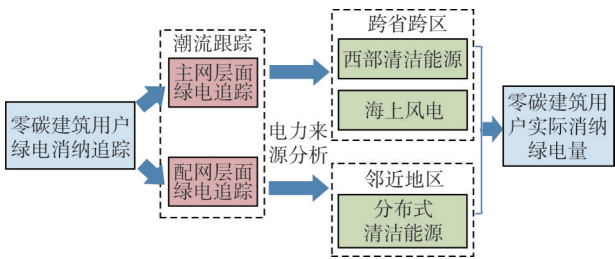


图 5 零碳电力用户绿电消纳追踪实现框架

Fig. 5 Framework for tracing green electricity consumptions by zero-carbon electricity consumers

占比为 100 %。

对该算例进行主网层面的绿电潮流追踪，图 6 为追踪结果的可视化展示，其中，箭头的粗细代表绿电功率的大小，箭头的方向表示绿电的来源及其具体流向。

图 6 直观地展示了各零碳电力用户节点消纳的绿电功率大小以及其来源组成。可见，距离绿电发

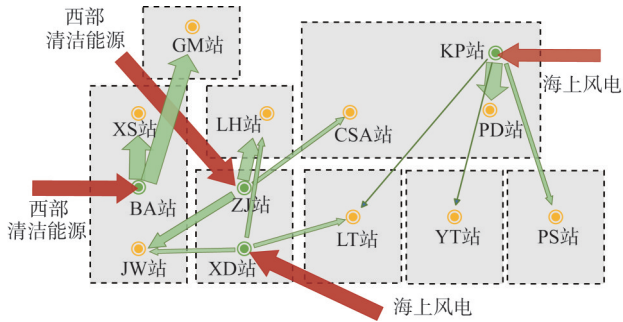


图 6 某市零碳电力用户主网层面绿电消纳追踪结果

Fig. 6 Results of green electricity consumptions tracing for zero-carbon electricity consumers at the main grid level in a certain city

电节点越远则零碳电力用户分摊到的绿电越少，这也是采用潮流追踪法的一个必然现象，这在本文算例 3 中也有所体现。同时，这一现象也是本文 3.3 节提出统一结算流程补偿机制的根本原因之一，即通过灵活设置偏差惩罚系数 λ 来改变绿电发电节点位置对零碳电力用户参与绿电交易的影响大小。换言之，如果采用潮流追踪法进行绿电消纳量认证，则可以推动零碳电力用户往靠近绿电发电节点的区域发展，从而促进绿电的就地消纳。

表 3—4 展示了各零碳电力用户节点的绿电占比及各零碳电力用户的实际绿电消纳情况。

表 3 各节点绿电含量比例

Tab. 3 Proportions of green power contents at various nodes

节点	注入节点的绿电占比			
	KP 站	ZJ 站	XD 站	BA 站
XS 站	0	0	0	0.709 4
LT 站	0.039 3	0	0	0
GM 站	0	0	0	1
JW 站	0	0.133 3	0.1734	0
PD 站	0.601 0	0	0	0
LH 站	0	0.175 8	0.228 8	0
PS 站	0.181 6	0	0	0
YT 站	0.039 3	0	0	0
CSA 站	0	0.175 8	0.228 8	0

算例结果展示了所采用的潮流跟踪方法在大型电网中的适用性，对节点负荷实际消纳的绿电提供了一种计算方法，对后续确定零碳电力用户的实时绿电消纳量具有实际意义。

4.3 算例 2:主配网多层级潮流追踪准入容量计算

以算例 1 为基础，考虑现货日前市场 96 时段的出清结果，依据 3.1 节所提方法进行主配网层级潮

表 4 各节点实际消纳绿电功率				
Tab. 4 Actual green power consumption powers at various nodes MW				
节点	注入节点的绿电功率			
	KP 站	ZJ 站	XD 站	BA 站
XS 站	0	0	0	25.380 6
LT 站	0.842 0	0	0	0
GM 站	0	0	0	22.08
JW 站	0	3.625 1	4.716 6	0
PD 站	24.979 0	0	0	0
LH 站	0	6.075 2	7.904 3	0
PS 站	4.907 6	0	0	0
YT 站	0.780 3	0	0	0
CSA 站	0	0.723 9	0.941 9	0

流追踪动态准入容量计算。模拟日前市场 96 时段出清, 负荷节点 96 时段负荷量依据该市夏季大方式运行的总负荷量等比例折算, 具体比例设置参考图 7 曲线; KP 站、ZJ 站、XD 站以及 BA 站等 4 个区外绿电注入节点的 96 时段绿电受电功率按不同比例折算, 此处不再一一列出。计算最大、最小系统负荷时段的绿电潮流追踪。追踪结果如表 5、表 6 所示。计算大、小负荷时段各零碳节点的平均绿电分布因子, 结果如表 7 第 3 列数据所示。假设参与主配网多层级潮流追踪的零碳电力用户报装容量如表 7 第 2 列数据所示。

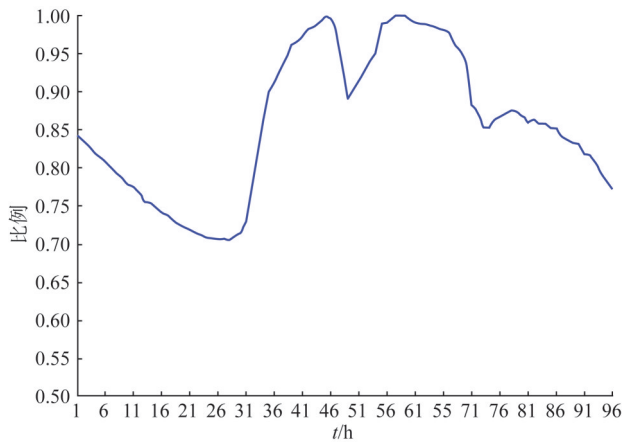


图 7 某市夏季大方式运行 96 时段总负荷比例变化情况
Fig. 7 Variation in the proportion of total loads over 96-hour periods during summer in a specific city

考虑以下两种场景开展潮流追踪准入零碳用户准入容量的计算和对比分析。

Case1: 本文所提的采用零碳用户绿电容量指

表 5 大负荷时段各零碳电力用户节点实时绿电含量比例					
Tab. 5 Real-time proportions of green electricity contents at various zero-carbon electricity consumer nodes during high-load periods					
节点	注入节点的绿电占比				总绿电占比
	KP 站	ZJ 站	XD 站	BA 站	
XS 站	0	0	0	0.681 5	0.681 5
LT 站	0.094 0	0	0	0	0.094 0
GM 站	0	0	0	1	1.000 0
JW 站	0	0.469 8	0.159 8	0	0.629 6
PD 站	0.478 7	0	0	0	0.478 7
LH 站	0	0.472 3	0.160 7	0	0.633 0
PS 站	0.297 5	0	0	0	0.297 5
YT 站	0.094 0	0	0	0	0.094 0
CSA 站	0	0.472 3	0.160 7	0	0.633 0

表 6 小负荷时段各零碳电力用户节点实时绿电含量比例					
Tab. 6 Real-time proportions of green electricity contents at various zero-carbon electricity consumer node during low-load periods					
节点	注入节点的绿电占比				总绿电占比
	KP 站	ZJ 站	XD 站	BA 站	
XS 站	0	0	0	0.945 4	0.945 4
LT 站	0.245 8	0	0	0	0.245 8
GM 站	0	0	0	1	1.000 0
JW 站	0	0.628 2	0.262 3	0	0.890 4
PD 站	0.586 6	0	0	0	0.586 6
LH 站	0	0.705 5	0.294 5	0	1.000 0
PS 站	0.562 0	0	0	0	0.562 0
YT 站	0.245 8	0	0	0	0.245 8
CSA 站	0	0.705 5	0.294 5	0	1.000 0

表 7 主配网多层级潮流追踪动态准入容量指标计算			
Tab. 7 Dynamic calculation of access capacity indexes for multi-level power flow tracing in main and distribution networks			
节点	报装容量/MW	平均绿电分布因子	绿电容量指标/MW
XS 站	0.10	0.813 5	0.081 3
LT 站	0.50	0.169 9	0.085 0
GM 站	0.75	1.000 0	0.750 0
JW 站	1.00	0.760 0	0.760 0
PD 站	1.50	0.532 7	0.799 0
LH 站	1.80	0.816 5	1.469 7
PS 站	2.00	0.429 8	0.859 5
YT 站	2.50	0.169 9	0.424 8
CSA 站	4.00	0.816 5	3.266 0

标的标准差截尾平均值计算准入容量(第 3.1 节)。准入容量结果为 0.653 7 MW, 则满足该准入容量门槛的零碳用户有 6 个, 分别为 GM 站、JW 站、PD 站、LH 站、PS 站和 CSA 站上的零碳用户。

Case2: 取所有零碳用户绿电容量指标的算术平均值作为准入容量。准入容量结果为 0.943 9 MW, 则满足要求的只有 LH 站和 CSA 站上的 2 个零碳用户。

上述算例结果表明, 本文所提的基于标准差截尾平均值的准入容量划定方法能避免极大、极小容量用户对系统零碳用户群绿电容量指标均值计算的影响, 能更好反映出零碳用户群的绿电容量指标的整体水平, 保证准入容量划定的合理性。

4.4 算例 3: 针对准入用户的主配网多层级追踪结果及对比分析

由算例 2-Case1 得到了主配网多层级追踪服务的用户名单, 本算例对名单中的用户(以 CSA 站的零碳电力用户为例)开展更精细化的绿电消纳量认证。配网层面的潮流跟踪以 CSA 站为上下级电网的边界节点, 并以其 10kV 的 33 节点配电网系统为例进行算例分析, 具体节点负荷参数设置参考表 8。其中, 33 节点配电网算例中节点 1 为上下级电网的边界节点, 节点注入功率为 4.117 MW; 节点 11 为配电网中的分布式能源所在节点, 提供绿电功率 0.5 MW; 节点 9 为 CSA 站的零碳电力用户 10 kV 网络接入节点, 用户负荷为 0.3 MW。

结合主网潮流跟踪结果, 对配网的潮流结果开展主配网多层级潮流跟踪测算。网络拓扑结构及各节点实际绿电消纳量计算结果如图 8—10 所示。图 8 节点饼图的大小表示节点用户的负荷大小, 饼图的蓝色部分为该节点消纳的绿电占比。图 8 直观地展示了分布式绿电对零碳电力用户实际绿电含量测算的影响, 越靠近绿电发电节点的用户可以获得更高的绿电份额, 因此同样也可以得到与算例 1 类似的结论: 即可以推动零碳电力用户往靠近绿电发电节点的区域发展, 或者促使零碳电力用户在所在区域装设更多分布式可再生能源。表 9—10 分别展示了配网层面各负荷节点的功率来源占比以及该时刻下实际消纳绿电的情况。通过表 9 和表 3 进一步对比可以发现, 在只进行主网层面的潮流追踪时, CSA 站节点上所有的零碳电力用户实际绿电消纳量均按 220 kV 主网层面的绿电比例信号值(0.404 6)

表 8 33 节点配网系统节点负荷参数

Tab. 8 Load parameters of a 33-Node distribution network

节点	节点类型	P/MW	Q/MW	节点	节点类型	P/MW	Q/MW
1	3	0	0	18	1	0.09	0.04
2	1	0.1	0.06	19	1	0.09	0.04
3	1	0.12	0.04	20	1	0.09	0.04
4	1	0.13	0.08	21	1	0.09	0.04
5	1	0.129 5	0.03	22	1	0.09	0.04
6	1	0.12	0.02	23	1	0.09	0.05
7	1	0.2	0.1	24	1	0.42	0.2
8	1	0.25	0.1	25	1	0.42	0.2
9	1	0.3	0.02	26	1	0.06	0.025
10	1	0.06	0.02	27	1	0.06	0.025
11	2	0.045	0.03	28	1	0.06	0.02
12	1	0.06	0.035	29	1	0.12	0.07
13	1	0.06	0.035	30	1	0.2	0.6
14	1	0.12	0.08	31	1	0.15	0.07
15	1	0.06	0.01	32	1	0.21	0.1
16	1	0.06	0.02	33	1	0.06	0.04
17	1	0.06	0.02				

进行测算; 当 CSA 站的零碳电力用户满足主配网多层级追踪准入容量门槛时, 则其实际绿电消纳量按其所接入的 10 kV 及以上等级配网层面的绿电比例信号值(0.525 0)进行测算, 绿电含量比例上升, 而上升的原因是主配网多层级追踪考虑了分布式绿电的影响, 从而使得零碳电力用户的绿电含量测算更为精确。

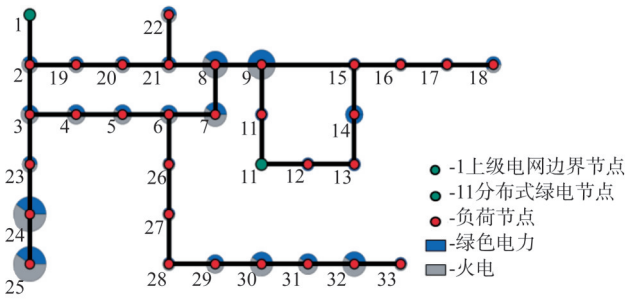


图 8 某市配电网系统算例结果图

Fig. 8 Case study results of a distribution network system in a certain city

上述算例结果表明, 依照所提出的主配网多层级绿电潮流追踪方法可以对零碳电力用户进行更为精细化的绿电实时消纳量测算, 能为零碳电力用户参与绿电消纳及自身零碳技术认证提供多层级、多精度的绿电实际消纳量测算依据。

表 9 各节点绿电含量比例

Tab. 9 Proportions of green electricity contents at various nodes

节点	绿电占比	节点	绿电占比
1	0.404 614 75	18	0.600 667 85
2	0.404 614 75	19	0.404 614 75
3	0.404 614 75	20	0.404 614 75
4	0.404 614 75	21	0.404 614 75
5	0.404 614 75	22	0.404 614 75
6	0.404 614 75	23	0.404 614 75
7	0.404 614 75	24	0.404 614 75
8	0.404 614 75	25	0.404 614 75
9	0.524 987 01	26	0.404 614 75
10	1.000 000 00	27	0.404 614 75
11	1.000 000 00	28	0.404 614 75
12	1.000 000 00	29	0.404 614 75
13	1.000 000 00	30	0.404 614 75
14	1.000 000 00	31	0.404 614 75
15	0.600 667 85	32	0.404 614 75
16	0.600 667 85	33	0.404 614 75
17	0.600 667 85		

表 10 各节点实际消纳绿电功率

Tab. 10 Actual green electricity consumption powers at various nodes

节点	实际消纳绿电/MW	节点	实际消纳绿电/MW
1	0	18	0.054 060 107
2	0.040 461 475	19	0.036 415 328
3	0.048 553 771	20	0.036 415 328
4	0.052 599 918	21	0.036 415 328
5	0.052 397 611	22	0.036 415 328
6	0.048 553 771	23	0.036 415 328
7	0.080 922 951	24	0.169 938 197
8	0.101 153 689	25	0.169 938 197
9	0.157 496 104	26	0.024 276 885
10	0.060 000 000	27	0.024 276 885
11	0.045 000 000	28	0.024 276 885
12	0.060 000 000	29	0.048 553 771
13	0.060 000 000	30	0.080 922 951
14	0.120 000 000	31	0.060 692 213
15	0.036 040 071	32	0.084 969 099
16	0.036 040 071	33	0.024 276 885
17	0.036 040 071		

4.5 算例 4: 零碳电力用户实际绿电消纳认证结果

以 CSA 站上的零碳电力用户为例进一步说明具体的结算及绿电消纳量认证结果。

表 11 零碳电力用户参与电力市场交易情况

Tab. 11 Participation of zero-carbon electricity consumers in electricity market transactions

对比项	电厂发电量/ MWh	用户负荷量/ MWh	成交价 /(元·kWh ⁻¹)
绿电中长期合约	500	500	0.552
现货出清结果	500	500	0.4
实际消纳绿电量	500	400	

如表 11 所示, 假设零碳电力用户分别在绿电中长期电能量市场和现货电能量市场中进行交易: 用户与绿电发电商签订了某段时间内 500 MWh 的绿色电力中长期合约, 成交价为 0.552 元/kWh(含绿电环境溢价 0.018 元/kWh); 根据现货市场的交易结果, 用户在合约期内实际负荷量为 500 MWh, 现货电价为 0.4 元/kWh。在进行零碳电力用户现货绿电实时含量测算后, 计算得到该用户实际消纳绿电量为 400 MWh。则在该时段内结算费用计算如下。

1)先结算现货市场;

零碳电力用户在现货市场支付的金额=50×0.4=20 万元。

2)再结算中长期与现货市场差价;

零碳电力用户向电厂支付差价金额=50×(0.552-0.4)=7.6 万元。

3)接着结算环境效益偏差(假设惩罚系数为 0.5, 地区绿电环境溢价为 0.018 元/kWh);

零碳电力用户因实际消纳绿电不足而获得的中长期交易补偿=(1-0.5)×0.018×(50-40)=0.09 万元。

4)计算总支出及总收入。

零碳电力用户总支出=20+7.6-0.09=27.51 万元, 认证的绿电量为 400 MWh, 实际认证绿电消纳量相比原绿电中长期合约减少 100 MWh。

同时, 通过上述算例也可以看出, 惩罚系数越大则相同的绿电偏差量情况下用户的补偿金额越小, 因此会促使零碳电力用户优先与距离自身节点较近的绿电商进行交易, 避免因系统实际网络拓扑结构及网络阻塞造成的绿电交易亏损。

4.6 算例 5: 实时绿电追踪应用效果分析

仍以 CSA 站上的零碳电力用户为例, 进一步研究本文所提零碳电力用户实时绿电追踪方法的应用效果。

图9—10分别展示了日前出清结果下系统的总绿电功率占比和CSA站的节点绿电实时含量比例。现假设零碳用户在保持总负荷量不变的情况下调整自身负荷曲线，将自身的灵活负荷尽可能转移至系统绿电比例较高的时段，如图11所示，以提高其认证的实际绿电消纳量。

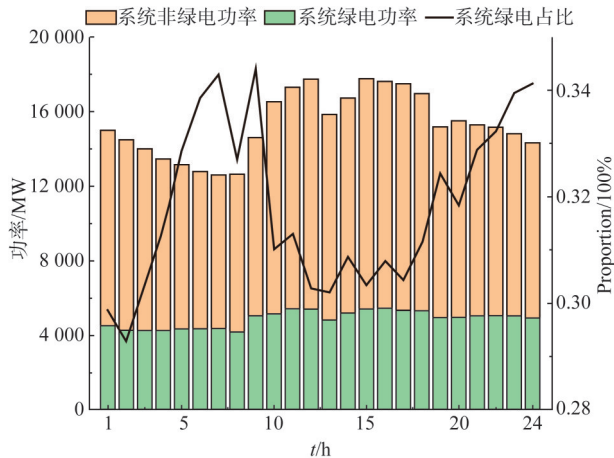


图9 系统绿电功率占比

Fig. 9 Proportion of green powers in the system

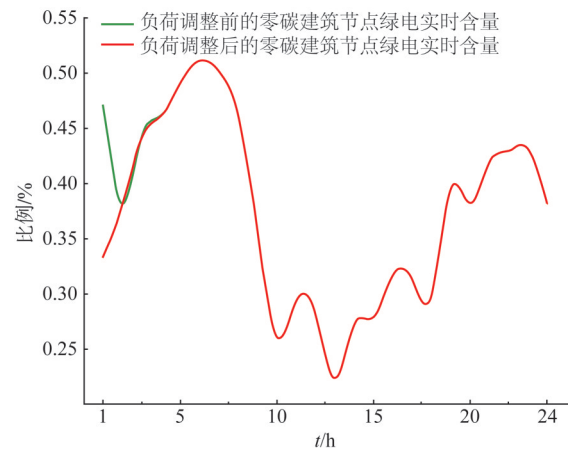


图10 CSA站节点绿电实时含量对比

Fig. 10 Real-time comparison of green power content in CSA

采用本文所提的零碳电力用户实时绿电消纳追踪方法进行算例分析，算例结果如图12和表12所示。

算例结果表明，负荷调整后的零碳电力用户所在节点的绿电实时含量基本不变，但经由追踪得到的用户实时绿电消纳量曲线相比调整前更贴近系统绿电实时含量的变化情况，同时，用户追踪得到的当日实际总绿电消纳量相比调节前得到显著提高，且系统发电总成本降低。

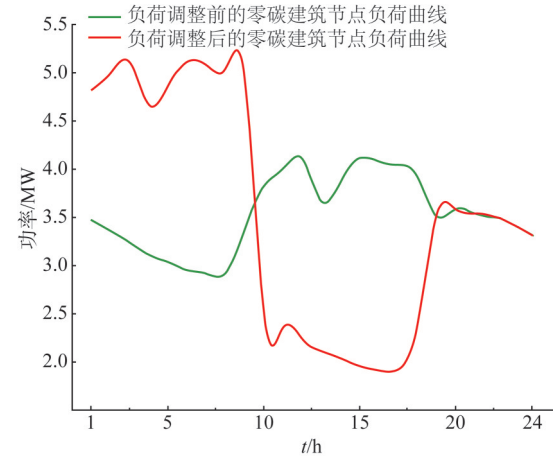


图11 CSA站零碳电力用户负荷调整前后负荷曲线对比图

Fig. 11 Comparison of load curves before and after load adjustment for zero-carbon electricity consumers in CSA

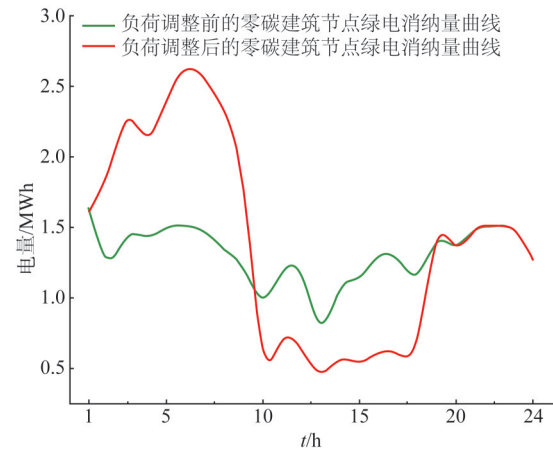


图12 CSA站零碳电力用户负荷调整前后绿电实时消纳量对比图

Fig. 12 Comparison of green electricity consumption before and after load adjustment for zero-carbon electricity consumers in CSA

表12 算例结果对比

Tab. 12 Comparison of case study results

对比项	系统发电总成本/元	零碳建筑节能节点绿电消纳量/MWh	零碳电力用户总消纳电量的绿电占比/%
零碳电力用户负荷调整前	364 007 261.03	31.37	36.947
零碳电力用户负荷调整后	364002685.03	33.51	39.459

上述结果进一步表明，本文所提的实时绿电追踪方法有助于促进零碳电力用户向系统绿电占比较高的时段转移负荷，提高其零碳电力认证的收益。同时也有助于促进新能源的实时消纳，降低系统发

电成本。

5 结论

随着“双碳”目标的不断推进,清洁能源电气化对需求侧提出了更高的要求^[30-31]。本文考虑到零碳电力用户的发展趋势及现有评价体系的不足,针对零碳电力用户对绿电消纳认证的技术需求,提出了基于PTDF-PFT的零碳电力用户实时绿电消纳追踪方法,在此基础上设计了基于主配网多层级潮流追踪的零碳电力用户绿电实时含量测算方法,并依据现行的广东电力市场规则进一步设计了零碳电力用户参与绿电消纳认证的完整流程及相应市场机制,最后在某实际城市电力系统中进行验证。通过算例分析主要结论如下。

1) 基于PTDF-PFT的零碳电力用户实时绿电消纳追踪方法可以对现货环境下实际电网的零碳电力用户实时绿电比例及来源进行有效的定量分析测算,为用户绿电实时含量测算提供技术支撑。

2) 基于主配网多层级潮流追踪的绿电实时含量测算方法能为不同电压等级、不同负荷容量的零碳电力用户提供多层级、高精度的绿电测算依据,充分考虑了实际应用中的可行性和实用性。

3) 基于国内现行的电力市场绿电中长期交易定价模式,通过引入偏差惩罚系数将零碳用户的中长期结算分为电能量结算和环境效益偏差结算两部分,实现了零碳电力用户参与现货市场与中长期市场绿电消纳认证的衔接,对零碳电力用户进行统一结算,同时能有效引导发用双方就近交易,促使零碳电力用户往分布式能源区域集中,并引导用户往系统绿电占比较高的时段转移负荷,促进新能源消纳。

综上,本文所提方法及机制有效地克服了现有的绿电追踪方法测算粗糙、时效性弱、与市场衔接性差等局限性,为将来零碳电力用户参与市场交易提供了技术支撑,为政府推进零碳电力用户以及零碳建筑建设的决策提供参考。

参考文献

- [1] International Energy Agency. Net zero by 2050 [EB/OL]. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.
- [2] United Nations Environment Programme. UN report: Carbon emissions from buildings and construction hit record highs [EB/OL]. <https://news.un.org/zh/story/2022/11/1112252>.

- [3] 虞菲,冯威,冷嘉伟.美国零碳建筑政策与发展[J].暖通空调,2022,52(4):72-82.
YU Fei, FENG Wei, LENG Jiawei. Zero carbon building policy development in United States[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2022, 52(4): 72-82.
- [4] Canada Green Building Council. Zero carbon building standards [EB/OL]. <https://www.cagbc.org/our-work/certification/zero-carbon-building-standard/>.
- [5] France Green Building Council. Bâtiments à énergie positive et réduction carbone [EB/OL]. <https://www.batiment-energiecarbone.fr>.
- [6] Brasil Green Building Council. Zero energy building standards [EB/OL]. <https://www.gbcbrasil.org.br/certificacoes/>.
- [7] 住房和城乡建设部.住房和城乡建设部关于印发“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划的通知[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/12/content_5678698.htm.
- [8] 天津市人民政府.我市首个低碳团体标准发布[EB/OL]. https://www.tj.gov.cn/zmhd/hyqgx/202109/t20210909_5587322.html.
- [9] 天津市环境科学学会.零碳建筑认定和评价指南:T/TJSES 002-2021[S].天津:天津市环境科学学会,2021:9.
- [10] 2022中国城乡建设领域碳排放系列研究报告[R].中国建筑节能协会建筑能耗与碳排放数据专业委员会,2022:9-14.
- [11] LING Ji, SAI Liang, SHEN Qu, et al. Greenhouse gas emission factors of purchased electricity from interconnected grids [J]. Applied energy, 2016(184):751-758.
- [12] 周全,冯冬涵,徐长宝,等.负荷侧碳排放责任直接分摊方法的比较研究[J].电力系统自动化,2015(17):153-159.
ZHOU Quan, FENG Donghan, XU Changbao, et al. Methods for allocation carbon obligation in demand side: a comparative study [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015 (17): 153-159.
- [13] 龚昱.基于碳流追踪的绿色电力市场用户侧研究[D].上海:上海交通大学,2015.
- [14] 李姚旺,刘昱良,杨晓斌,等.计及电量交易信息的用电碳计量方法[J].中国电机工程学报,2024,44(2):439-451.
LI Yaowang, LIU Yuliang, YANG Xiaobin, et al. Electricity carbon metering method considering electricity transaction information [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(2): 439-451.
- [15] 别佩,林少华,王宁,等.基于电力潮流追踪与绿色电力交易的企业用电侧碳排放因子核算[J].南方电网技术,2023,17(6):34-43.
BIE Pei, LIN Shaohua, WANG Ning, et al. Calculation of Carbon emission factors on the corporate electricity consumption side based on power flow tracing and green power trading [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(6): 34-43.
- [16] BARCIA P, PESTANA R. Tracing the flows of electricity [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2010, 32(4), 329-332.
- [17] LIMA D A, PADILHA F A, CONTRERAS J. An overview on network cost allocation methods [J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79(5), 750-758.
- [18] MIELCZARSKI W. HANDBOOK: energy systems & markets [M]. Warsaw: Association of Polish Electrical Engineers, 2018.
- [19] SCHÄFER M, HEMPEL S, HÖRSCH J, et al. Power flow tracing in complex networks [J]. New Horizons in Fundamental Physics, 2017(26): 357-373.
- [20] 王骥鑫,卢保通,王蓓蓓,等.配额制背景下基于区块链的可

- 再生能源电力追踪方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(23): 11 – 19.
- WANG Qixin, LU Baotong, WANG Beibei, et al. Blockchain-based renewable energy power tracking method in background of renewable portfolio standard [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(23): 11 – 19.
- [21] 陈荃, 吴科成, 曲毅, 等. 地市级可再生能源消纳责任权重目标分解方法[J]. 南方电网技术, 2021, 15(11): 85 – 93.
- CHEN Quan, WU Kecheng, QU Yi, et al. Decomposition method of renewable energy consumption responsibility weight target at prefectural level [J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(11): 85 – 93.
- [22] BIALEK J. Tracing the flow of electricity [J]. IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1996, 143(4): 313 – 320.
- [23] KIRSCHEN D, ALLAN R, STRBAC G. Contributions of individual generators to loads and flows [J]. IEEE Transactions on power systems, 1997, 12(1): 52 – 60.
- [24] GRAINGER J J, STEVENSON W D. Power systems analysis [M]. New York: McGraw-Hill Series in Electrical and Computer Engineering, 1994.
- [25] HÖRSCH J, SCHÄFER M, BECKER S, et al. Flow tracing as a tool set for the analysis of networked large-scale renewable electricity systems [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018(96): 390 – 397.
- [26] 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 Wenying, 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.
- [27] BACZYŃSKA, ALEKSANDRA. A new approach to constraints removal using power flow tracing method [C]// 2019 16th International Conference on the European Energy Market, May 20 – 23, 2019, Vienna, Austria. New York: IEEE, 1 – 5.
- [28] BACZYŃSKA A, NIEWIADOMSKI W. Power flow tracing for active congestion management in modern power systems [J]. Energies, 2020, 13(18): 1 – 12.
- [29] SCHÄFER M, HEMPEL S, HÖRSCH J, et al. Power flow tracing in complex networks [J]. New Horizons in Fundamental Physics, 2017(26): 357 – 373.
- [30] 周原冰, 张士宁, 侯方心, 等. 电力行业碳达峰及促进全社会碳减排影响分析[J]. 中国电力, 2024, 57(9): 1 – 9.
- ZHOU Yuanbing, ZHANG Shining, HOU Fangxin, et al. Analysis of carbon peaking in power sector and its impact on promoting whole-society carbon emissions reduction [J]. Electric Power, 2024, 57(9): 1 – 9.
- [31] 李璐, 张泽端, 毕贵红, 等. “双碳”目标下基于系统动力学的发电行业碳减排政策研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(12): 69 – 81.
- LI Lu, ZHANG Zeduan, BI Guihong, et al. Carbon emission reduction policy in the power generation sector based on system dynamics with “Dual Carbon” targets [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(12): 69 – 81.

收稿日期: 2023-08-24; 网络首发日期: 2024-04-24

作者简介:

谢敏(1978), 女, 副教授, 博士, 研究方向为电力系统优化规划与运行控制, minxie@scut.edu.cn;

李弋升(1998), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化运行控制与电力市场, 907353249@qq.com;

黄莹(1999), 女, 硕士研究生, 研究方向为虚拟电厂和电力市场与碳市场决策优化, 1419928558@qq.com。

广 告

中国南方电网电网仿真重点实验室 封二
南网知识星球 封三

直流输电技术全国重点实验室 A1
北京四方继保自动化股份有限公司 A2