

平衡单元模式下德国电力电量平衡机制探讨及启示

刘秋华¹,张正延²,姜亚熙²,吴玲¹,杨圣城²,刘鑫²

(1. 南京工程学院 经济与管理学院,南京 211167;2. 南京工程学院 电力工程学院,
南京 211167)

摘要:为实现“双碳”目标,国家正大力发展新能源。然而,间歇性波动性的新能源发电大幅增加了电力电量平衡的难度,亟需建设适应新能源极高渗透率的电力市场电力电量平衡机制。德国的能源结构与我国有着高度的相似性,分析德国的电力市场及其平衡机制对我国具有借鉴意义。首先在分析德国电力市场基础上,系统梳理了德国以平衡单元为核心的电力电量平衡机制;然后借鉴德国的经验并结合我国电力市场的现状,分别从减少平衡需求、下沉平衡责任、消纳新能源、下放部分调度权以及创新研究方向等5个方面对我国电力市场电力电量平衡机制创新提出启示。

关键词:电力市场;电量平衡;平衡单元;平衡需求;平衡责任

Discussion on power balance mechanism of Germany and its implications under balancing group mode

LIU Qiu-hua¹, ZHANG Zheng-yan², JIANG Ya-xi², WU Ling¹, YANG Sheng-cheng², LIU Xin²

(1. School of Economics and Management, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China; 2. School of Electrical Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: To achieve the dual “low-carbon” goals, China is developing new energy sources with great efforts. However, the substantial increase in power fluctuation and intermittency of these new energy sources has significantly added to the challenge of maintaining power balance. There is an urgent need to establish a power balance mechanism in the electricity market that can adapt to the extremely high penetration of new energy sources. Germany’s energy structure shares a high degree of similarity with China. Hence, analyzing Germany’s electricity market and balance mechanism provides valuable insights. Based on the analysis of the German electricity market, Germany’s power balance mechanism is systematically reviewed with the concept of “Balancing Group” at its core. Drawing on Germany’s experiences and considering the current state of China’s electricity market, suggestions are offered upon the development of China’s power balance mechanism, from the perspective of reducing balance demand, decentralizing balance responsibilities, accommodating new energy sources, devolving some dispatch rights, and innovation research direction.

Key words: electricity market; power balance; balancing group; balancing demand; balancing responsibility

0 引言

大力发展新能源是实现“双碳”目标的现实选择,随着间歇性波动性新能源发电占比逐年提高,电力电量平衡的难度越来越大,现有的电力市场机制已不能完全适应这种变化。2022年1月,国家发改委、国家能源局印发《关于加快建设全国统一电力市场体系的指导意见》,明确提出要“构建适应新型电力系统的市场机制,提升电力市场对高比例新能源的适应性,健全分布式发电市场化交易机制”。因此,构建适应高比例新能源的电力市场电

力电量平衡机制是我国能源转型的重要基础。

德国是世界上新能源发电量占比最高的国家之一,据德国官方网站资料^[1],2013年德国新能源发电量占比23.7%,而到2023年11月,新能源发电占量比达58.83%。德国成功的能源转型与其独特的电力市场设计、以平衡单元为核心的电力电量平衡机制密不可分。文献[2]在梳理德国电力市场改革历程中介绍了平衡单元的由来、责任和管理方式。文献[3]在分析德国电力市场的责任主体时介绍了平衡单元的职责,并表明平衡单元降低了平衡需求和平衡容量。文献[4]在梳理德国平衡机制时专门讨论了发生不平衡时所需承担的财务责任。文献[5]在德国现行电力市场和电力电量平衡机制基础上,分析了市场参与者的激励机制,表明平衡单元的套利行为

收稿日期:2024-01-06;修回日期:2024-03-25

基金项目:国家电网有限公司总部管理科技项目(5108-202218280A-2-287-XG)

会导致现货市场和平衡机制产生脱节,并提出一种新的替代市场设计方案。文献[6]讨论了可再生能源加入平衡单元成为平衡服务提供商的可能性,并建立了一种新的平衡单元双层混合整数线性规划模型,指出容量较小的光伏设备在其中更容易获利。

目前国际上未应用平衡单元的国家更关注对平衡单元的结构^[7]和应用平衡单元^[8]所需改变的市场规则的研究,缺少对于应用可能性的探讨;已有应用实践的国家更多研究现行电力市场模式下平衡单元具体的不平衡结算规则^[9]、平衡单元的优化协调^[10]以及新能源渗透率逐渐提高后平衡单元所需要的改变^[11]。国内关于电力电量平衡领域的研究主要集中在技术方面,缺少对于电力市场平衡机制的研究和探讨,而只有合适的机制才能充分激励各类资源参与系统平衡。

我国与德国在能源禀赋方面有高度的相似性:富煤、缺油、少气,且都以煤炭资源作为火力发电的核心,以推进光伏和风力发电作为新能源建设的重点。因此德国的能源转型过程和相关电力市场、电力电量平衡机制建设的经验对我国极具借鉴意义。针对以上内容,本文在介绍平衡单元结构的基础上,从中长期和现货交易、平衡市场、再调度以及不平衡结算5个方面厘清德国电力电量平衡机制,然后分析其机制优势,最后给出适应我国国情的电力电量平衡机制建设的启示。

1 德国电力电量平衡机制

1.1 电力市场概况

德国电力市场作为分散式电力市场的典型,电力交易是一个增量交易过程,各阶段市场在上一阶段市场交易结果的基础上进行申报。目前德国的电力市场按时序分为中长期市场、现货市场和平衡市场。中长期市场和现货市场成交的合约都需要物理执行,2022年德国中长期合约电量约占总电量的88%^[12],现货市场成交电量约占总电量的12%^[13]。平衡市场的容量招标按照边际电价出清,由输电系统运营商(transmission system operator, TSO)负责,TSO运营平衡市场并对平衡资源进行招标和调用。电力合约的交付由TSO和配电系统运营商(distribution system operator, DSO)监控并测量,发电商需按指定时间段交付合约电量。

德国的电力市场是在德国联邦网络局严格监管下的输配电网分离运营、发电侧寡头垄断、售电侧充分竞争的市场结构。4大TSO各负责一个控制区域,TSO保持区域电网稳定、协调控制,运营平衡市场以及

负责平衡能源的招标及激活。DSO负责运营中低压配电网并输电给最终消费者,DSO不参与平衡市场。TSO和DSO各自确保其网络电力供应的安全性和可靠性,负责对系统进行再调度、新能源弃电、减载等系统干预,因为部分小电源归DSO调度,如果要调整小电源出力的话,TSO需要通过DSO下达指令。德国联邦网络局作为电力监管机构负责监管TSO和DSO的行为。

1.2 以平衡单元为核心的平衡机制

1.2.1 平衡单元

理想情况下,如果供电商和客户的供电和消耗相同,则TSO只收取电网的运营维护费。然而,一旦发生偏差,无论是供电商提供过多过少或是客户消耗过多过少,负责平衡的TSO都要对其进行偏差奖惩。由于这部分的电量偏差必须得到补偿,1999年德国在电力行业第二份联合协议中引入了针对失衡的市场规则并首次提出了平衡单元(balancing group, BG)的概念^[14]。BG是德国电力市场改革中产生的一种创新性结构,各BG可以将自身的不平衡量最小化,以减少电网总体的不平衡量。

BG由电力市场的一个或多个市场主体组成,市场主体多为发电商、供电商、聚合商和大型工业用户,同时BG的成员必须在同一个TSO控制区域内。BG至少有一个送电端或用电端,由TSO或TSO委托的DSO对BG的送用电端电量进行测量。BG内成员的用电和发电偏差可以相互补偿,因此大型平衡单元内的偏差比小型平衡单元更容易达到平衡,德国BG的规模和数量已趋稳定,以BG为核心的电力电量平衡机制的核心沿用至今。如图1所示。

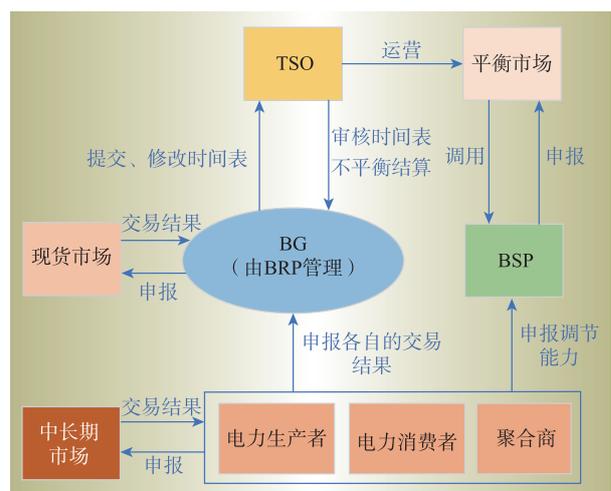


图1 德国平衡单元关系

Fig. 1 Balancing group relationship in Germany

组成平衡单元的成员必须向TSO指定一名平衡单元管理员(balancing relationship party, BRP), BRP必须以时间表的形式通知TSO其BG通过交易形成

的发电计划以及所需的输电容量,负责每 15 min BG 实际用电量与申报的时间表一致,同时承担不平衡电量的经济责任。BRP 为了自身的利益需要积极预测单元内的发电量,通过场内和场外进行电力交易,努力使所负责的 BG 完成时间表。

1.2.2 中长期与现货交易

德国电力市场主体在中长期市场上进行物理形式的中长期合约签订,发电商需在交货期内的每 15 min 交付与合约内容相同的电量。不同于我国主要由调度执行对中长期合约的分解,德国中长期成交的合约都需要按合约时间段执行物理交付。

现货市场用于在交付前的短时间内买卖实物数量的电力,参与的主体仅是 BRP^[15]。如图 2 所示,德国的现货市场分为日前拍卖、日内拍卖、日内连续交易和日后连续交易。

日前拍卖每天进行一次,在 D-1 日(电量实际交付前一日)12:00 结束,12:00 前 BRP 须将申报结果上传至交易平台,交易标的为每小时合约,允许跨境交易。D-1 日 13:00—15:00 期间,TSO 与交易所公布清结果。D-1 日 14:30 之前,BRP 必须向 TSO 提交 D 日的电表。电表包含 D 日内每 15 min 结算周

期的发电计划,BRP 也可以在此时间点之后每隔 15 min 更改时间表。

日内拍卖在 D-1 日 15:00 结束,交易标的为每 15 min 合约,交易所同样按边际出清原则形成 D 日各价区每 15 min 的市场出清价格。

随后日内连续交易开展,日内连续交易市场是实时交付前现货市场的最后一部分。参与日内连续交易的双方由交易所进行撮合匹配或直接进行双边交易,交易时间从 D-1 日 15:00 开始持续到实际交割前 1 h 的跨境通道关闭、实际交割前 30 min 的跨控制区通道关闭、实际交割前 5 min 的日内连续交易市场正式结束^[16]。

日后连续交易市场在 2021 年试点成功^[17],作为一种新兴市场,其存在的主要目的是给 BRP 提供日后交换偏差的平台,交易方式与日内连续交易相似,由交易所撮合,价格由 BRP 双方确定,交易标的是 D-1 日 1 h 和 15 min 电力产品。日后市场在交付日后开展,持续到下一日的 16:00 结束,随后 BRP 向 TSO 提交 D-1 日的最终时间表,TSO 根据收集到的最终时间表和实际调度信息,进行不平衡责任的分配和不平衡结算,在交付日 34 d 后将账单发送给 BRP。

1.2.3 平衡市场

平衡单元在电力市场的逐级交易,可以实现德国电力电量的基本平衡,但因新能源波动和负荷的不可控性,系统最终的平衡需要通过 TSO 实时调用和激活已招标的平衡资源来完成。临近交付的平衡时序图如图 3 所示。

平衡市场由四大 TSO 在网络平台上共同运作,平衡资源的种类依据欧洲输电系统

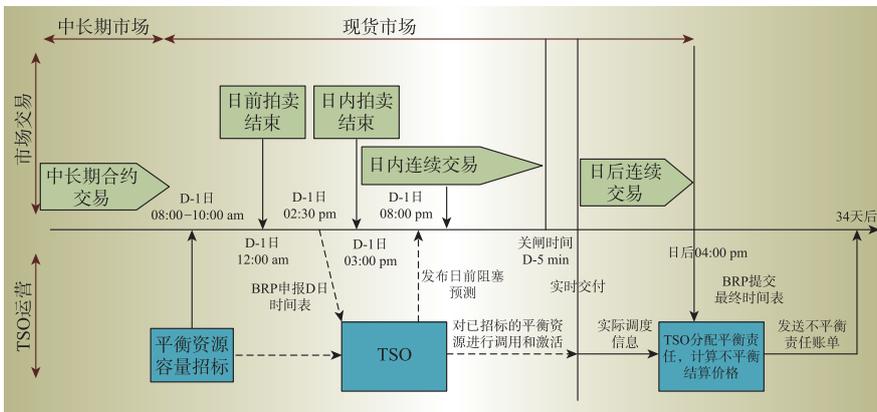


图2 德国电力市场时序
Fig. 2 Electricity market routine

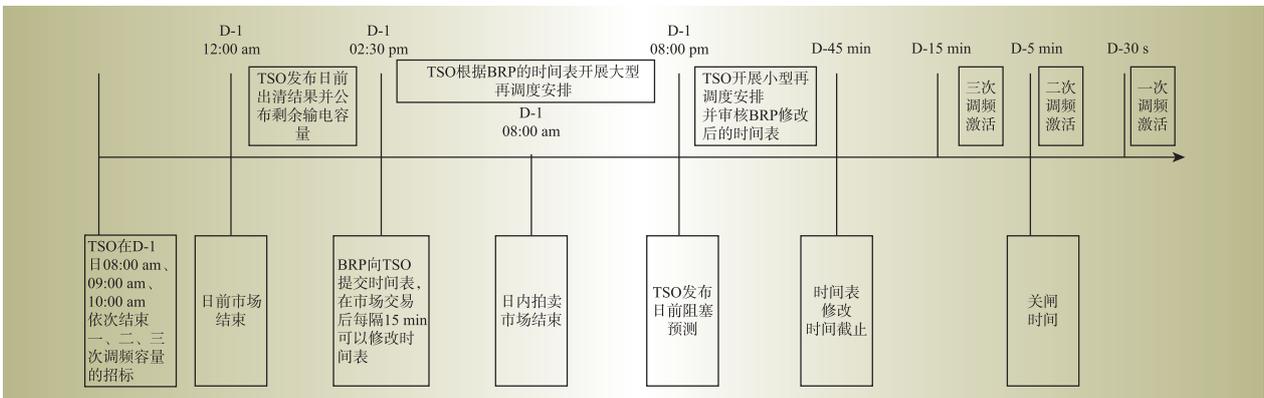


图3 德国电力市场平衡时序
Fig. 3 Balancing routine of electricity market in Germany

运营商联盟标准划分,由 TSO 认证的平衡服务提供商(balance service provider, BSP)提供灵活性服务,其中一次调频备用、二次调频备用和三次调频备用作为主要产品。TSO 根据收集到的 BRP 时间表,参考以往经验在平衡市场上向 BSP 购买一次、二次和三次调频备用容量。当预测和实际发生偏差时,TSO 调用并激活购买的调频备用,根据标准计算不平衡结算价格,并向 BG 收取费用。

1.2.4 再调度

为解决电网阻塞问题,德国会由 TSO 和 DSO 作为实施主体进行再调度安排。TSO 与 DSO 可以分别自行开展再调度,TSO 也可要求 DSO 参与协助再调度指令的实施。在再调度过程中 TSO 不能直接调度配网侧的电源资源,但是可以通过 DSO 对配网侧资源进行再调度,以确保系统稳定。在再调度实施时,通常对常规发电机进行再调度,如果不足以缓解阻塞,则 TSO 会使用市场外招标的电网备用容量,极端情况下 DSO 会采取新能源弃电等手段。

在 D-1 日 14:30, BRP 向 TSO 第一次交付 D 日时间表,TSO 根据 BRP 交付的时间表和日前市场出清结果开展大型的再调度安排。在 D-1 日 20:00, TSO 发布日前阻塞预测并重新评估之前再调度安排。之后 TSO 会对 BRP 每隔 15 min 修改的时间表进行审核,并不断开展小型再调度安排。

1.2.5 不平衡结算

电力交付后,TSO 收集实施调度信息以及交付日后 BRP 上交的最终时间表,计算每 15 min 不平衡结算价格、向 BRP 分配不平衡责任并出具账单。4 个 TSO 控制区下的不平衡结算价格统一,由四大 TSO 组成的德国电网控制合作公司(German grid control cooperation, GCC)进行计算。不平衡结算单价 I_p 的计算公式如下

$$I_p = \frac{\sum C_{\text{osts,GCC}} - \sum R_{\text{evenues,GCC}}}{n_{\text{et, balance, position,GCC}}} \quad (1)$$

式中: $C_{\text{osts,GCC}}$ 和 $R_{\text{evenues,GCC}}$ 分别为每 15 min 用于平衡的 GCC 的成本和收入,欧元; $n_{\text{et, balance, position,GCC}}$ 为 GCC 的净平衡状况,由每 15 min 正能量输入减去负能量作为输入得到, MWh。

2 德国平衡单元机制分析及对我国的启示

德国将 BG 作为电力电量平衡机制的核心,通过 BRP 在电力市场的运作将新能源消纳的责任合理地分摊到市场参与者,以市场手段有效消纳了逐年上升的新能源。同时,不平衡结算机制激励 BRP

减少自身 BG 的偏差,从而减少了系统整体的偏差,降低了电网运行所需的平衡资源储备。近年来,德国新能源占比逐年提高,但所需的平衡资源容量却逐年降低,德国招标的平衡资源从 2013 年接近 10 GW 下降到 2020 年不足 7 GW^[18]。

尽管我国与德国在经济社会发展水平、电网结构、电价制度上存在较大差异,但德国电力市场改革与平衡单元建设的成功经验,对我国仍有很好的借鉴作用,需要结合国情进行创新研究,以构建我国新的电力电量平衡机制。

2.1 分摊平衡责任,减少平衡需求

随着新能源入网比例的提升,新能源发电的波动性势必造成电力系统平衡需求的增加,这种平衡需求的产生是发展新能源的客观存在,而如何面对和处理平衡需求是我国电力市场改革面临的一个重要课题。

德国所有市场主体都需要加入一个平衡单元,都是降低平衡需求的参与者。平衡单元不仅具有自调度的特点,而且在日内市场可以与调度区域内的其他平衡单元进行电能的交换来纠正自身平衡单元的正负偏差。4 大控制区域的 TSO 只需要处理平衡单元日内市场能量交互后的总偏差,而这个总偏差由于平衡单元的介入大大减少,据统计,用于系统平衡偏差的一级储备容量从 2008 年到 2023 年下降了近乎一半^[19]。

目前我国正以“双碳”为目标,大力推动新能源发展。新能源并网量的不断提升对我国电力系统的稳定运行带来了巨大考验,同时也提高了平衡需求,调度机构需要激活使用更多平衡服务产品来消除不平衡,如果放任平衡需求持续无序增长,将会导致维护电网运营的必要储备成本增加,系统平衡成本和电价也将会不断上涨,不利于电网稳定运行的经济性,最终不利于人民福祉。

参考德国平衡单元成功的应用经验,我国有必要引导市场主体积极主动参与平衡过程以降低平衡需求。可以尝试试点设立类似平衡单元模式的自平衡机构,例如可将地市区域的 220 kV 分区作为一个平衡单元,以地区电网调度作为平衡责任的承担方,在初期以内部经济责任的方式进行不平衡结算,从而减少网省调的平衡压力。其次我国需要建立完善的现货市场交易体系并制定合理的平衡责任分担方式,由平衡责任的承担方参与现货市场交易以减少实际发用电可能造成的偏差,同时规定合理的不平衡结算方式奖励或惩罚平衡责任的承担方,提高平衡责任承担方参与市场交易的积极性。

2.2 下沉平衡责任,优化平衡管理

随着新能源尤其是接入配电网的分布式新能源的增加,我国电网的平衡责任加剧。为了确保电

力系统的稳定可靠运行,是继续由省级及以上调度机构统一承担平衡责任,还是借鉴德国平衡单元模式将平衡责任下沉更有利于电力平衡管理,成为我国电力市场改革面临的一个重要选择。

德国通过平衡单元模式实现了平衡责任下沉。在电力实时交付前,BRP为了减少BG的不平衡量,会通过参与现货市场交易来不断调整其向TSO提交的发用电计划时间表,以保证BG在每一结算期内的实际发用电按计划实施。进入电力实时运行阶段后,如果系统出现不平衡,TSO会调用提前在平衡市场上采购的平衡服务产品来维持系统稳定性。此外,为了解决网络阻塞问题,TSO与DSO协调进行再调度安排。通过这种分而治之的方式,TSO将实时平衡前的平衡责任下沉到众多BRP中,BRP在自身利益的驱动下主动调整发用电量以补偿平衡偏差。通过采用以平衡单元为主体的电力电量平衡机制,最终使电力系统总的不平衡量较小,并且随着电力实时交割时间的临近,电力供给和需求的匹配度逐渐提高。同时TSO将分散式新能源的整合责任下沉到DSO,作为新能源入网的直接端口,DSO逐渐承担起了分散式新能源的并网责任,DSO还可以通过切断可中断负荷和对新能源限电来解除网络阻塞问题,从而承担了一部分平衡责任。

我国目前的实时平衡责任仍然由省调及以上的调度机构负责,地调等更靠近分布式新能源和负荷侧的机构却较少承担平衡责任,缺乏类似平衡单元这样的中间责任主体进行平衡责任的下沉,难以调动市场成员主动参与市场平衡以减少偏差的积极性。因此我国可以适当分摊平衡责任给地调机构,或者进行电力市场改革,增加如同平衡单元管理员BRP的中间责任主体,由中间责任主体管理内部成员并承担平衡责任,通过经济责任优化电力平衡管理,确保中间责任主体发用电与计划相一致。同时将新能源限电和可中断负荷切除等平衡措施、电网阻塞管理和安全运营的部分责任交给地调或中间责任主体来运营。

2.3 适度下放调度权,促进源网荷储互动

新能源入网比例的增加使电网的调度压力加剧,同时,近年来大量分布式发电、储能设备入网使电网系统实时平衡愈发困难。是继续采用集中式调度,还是将调度权适度下放以利于源网荷储的灵活互动,也是我国电力市场改革的一个难题。

德国TSO通过平衡单元这种自调度的机制完成了大部分调度权下放。平衡单元管理人BRP需要对单元内部成员的发用电进行调度调整,在现货市场进行电量买卖以修正可能的发用电偏差,这就天然形成了平衡单元内的源网荷储互动,突破了发电端与用电端空间上的距离,提高了源网荷储之间

的互动性与关联性。同时德国也将部分调度权分配给DSO,根据《可中断负荷条例》规定^[20],允许DSO与德国的小型用户签订合同,由DSO远程管理一个或多个用户设备的电力消费,以换取电网收费的折扣。2021年德国约有83%的DSO使用这种需求侧管理工具,作为交换,DSO为参与者提供了平均57%的电网费用减免^[21]。可见,德国的调度模式是“多对多”,即先通过多个BRP对单元内的多个源网荷储进行调度管理,多个DSO也直接参与调度管理,最后再由TSO来处理剩余不平衡量。

目前我国源网荷储之间的关联性几乎全靠省级电网调度来维系,我国的电网调度可以认为是“一对多”的模式,即由各省调来主导源网荷储之间的互动,电网的需求往往与市场主体的利益不能完全匹配,导致用户缺乏积极性。我国电力实时平衡调度中,绝大部分地调不具备调度权限,然而贴近配网侧的源网荷储资源日渐丰富^[22],同时地调和配电网更接近负荷侧和分散式新能源,因此可以将调度此类贴近配电网侧的资源的权限交由地调负责,更好、更直接地兼顾用户诉求。将平衡单元这种自调度的机制应用到地调上,由地调合理规划区域内的分散式储能和发电资产,在省调完成对集中式新能源和大型发电商的发电计划后,地调在自身调度范围内,通过优化源网荷储之间的互动,对发用电和储能资产进行管理并通过地调之间的相互交易修正偏差量,把自身可能的偏差降到最小。

2.4 构建符合我国国情的电力电量平衡机制

我国与德国能源结构相似,且都在大力发展新能源,但电力市场结构差异较大,直接套用德国的平衡机制,明显会水土不服。因此,通过创新研究,构建符合我国国情的电力电量平衡机制是电力市场改革的主要目标之一。

德国与欧洲大部分国家采用的是分散式市场模式,分散式市场适合阻塞较少的区域,因此平衡单元这类活跃于现货市场的主体受到的阻塞管理和交易限制较少,市场主体的积极性可以得到充分发挥。

我国大部分省份是集中式市场模式,电力现货市场仍处于发展阶段,电力市场衔接不够完善,大部分电网阻塞频率较高,分布式的调节资源比较匮乏,因此不可能直接采用德国平衡单元模式的平衡机制。

为了构建符合我国国情的新型电力系统电力电量平衡机制,需要设计培育新的平衡责任主体,制定新的平衡机制运营所对应的市场架构和交易规则,研究平衡责任主体的地域限定要求、构成、运营模式和盈利模式,设计平衡主体内部成员的考核方式和奖惩方式等;同时需要研究不同层级市场之间的优化协同,研究基于新平衡责任主体的市场出清机制

和算法、阻塞管理,研究新平衡主体内部的优化协调算法,并设计实现新的市场技术支持系统等。

3 结束语

德国以平衡单元为核心的电力电量平衡机制有效发挥了作用,这一方面是机制设计合理所致,另一方面也是德国的经济社会发展、能源结构和电网网情使然。我国的能源禀赋、电网结构、市场机制、调度模式自成体系,与德国和欧洲相比有较大差异,但德国电力电量平衡机制的核心思想非常值得我国借鉴。在新能源快速发展、电力电量平衡需求急速增加、系统灵活性资源占比相对下降的趋势下,本文在对德国平衡单元模式深入分析的基础上,对构建适合我国国情的新型电力系统电力电量平衡机制给出了思考和建议,后续可以充分借鉴德国的成功经验,结合我国的国情、网情,在法律法规、市场体系、平衡机制等方面进行设计和完善,全面研究新平衡机制技术实现的理论、方法,并在阻塞情况相对较少的东部省市电网先行先试。D

参考文献:

- [1] Fraunhofer ISE. energy-chart [EB/OL]. [2024-03-08]. <https://energy-charts.info/charts/energy/chart.htm?l=de&c=DE&year=2021 & stacking=single & interval=year & chart Column Sorting=default>
- [2] AGORA E. The liberalisation of electricity markets in Germany [EB/OL]. (2019-12-20) [2024-03-08]. <https://www.agora-energiawende.org/publications/the-liberalisation-of-electricity-markets-in-germany>.
- [3] MÜSGENS F, OCKENFELS A, PEEK M. Economics and design of balancing power markets in Germany [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2014, 55: 392-401.
- [4] DUPUY M L. Electricity markets: balancing mechanisms and congestion management [J]. 2008.
- [5] JUST S, WEBER C. Strategic behavior in the German balancing energy mechanism: incentives, evidence, costs and solutions [J]. *Journal of Regulatory Economics*, 2015, 48: 218-243.
- [6] GRŽANIĆ M, T. Coordinated scheduling of renewable energy balancing group [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 125: 106-115.
- [7] Development Experience Clearinghouse. Introduction to the balancing market and balancing group model [EB/OL]. (2024-06-18) [2024-03-08]. https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PA00JZZK.
- [8] Development Experience Clearinghouse. Recommendations for creation of balancing groups and BRP [EB/OL]. (2014-07-17) [2024-03-08]. https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PA00JZW7.
- [9] 日本经济产业省. 关于平衡单元内不平衡费用的连带责任 [EB/OL]. (2021-12-14) [2024-03-08]. https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/pdf/042_03_02.
- [10] CHAKRABORTY S, OKABE T. Robust energy storage scheduling for imbalance reduction of strategically formed energy balancing groups [J]. *Energy*, 2016, 114: 405-417.
- [11] SPIEGEL T. Impact of renewable energy expansion to the balancing energy demand of differential balancing groups [J]. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 2018, 6(4): 784-799.
- [12] EEX. EEX Group Volume Report-2022 [EB/OL]. (2023-01-24) [2024-03-08]. https://www.eex.com/fileadmin/Global/News/Group/News/20230124_EEX_Group_Annual_Volume_Report.pdf, 2023-01-24.
- [13] EPEX. EPEX SPOT annual market review 2022 [EB/OL]. (2023-01-19) [2024-03-08]. https://www.eex-group.com/fileadmin/Global/News/Group/EpexSpot/2023-01-19_EPEX_SPOT_Annual_Press_Release-2022_final.
- [14] 德国联邦管理局. 《关于确定电力网络使用费标准的协议》[Z]. 柏林, 德国联邦管理局, 1999.
- [15] Tennet. Market-types. [EB/OL]. <https://www.tennet.eu/market-types>.
- [16] NARAJEWSKI M. Probabilistic forecasting of German electricity imbalance prices [J]. *Energies*, 2022, 15(14): 4976.
- [17] EPEX. EPEX SPOT and ECC successfully launch After Market products in Belgium and in the Netherlands [EB/OL]. (2021-01-29) [2024-03-08]. https://www.eex-group.com/fileadmin/user_upload/20210129_EPEX_ECC_After-Market_launch.
- [18] Team Consult. Electricity market [EB/OL]. [2024-03-08]. <https://www.teamconsult.net/en/electricity-market.php>
- [19] Neon Energy. Systemstützende BilanzkreisBewirtschaftung [EB/OL]. (2023-11-12) [2024-03-08]. <https://neon.energy/Neon-Systemst%C3%BCtzende-Bilanzkreis-Bewirtschaftung>.
- [20] 德国联邦管理局. 《可中断负荷条例》[Z]. 柏林, 德国联邦管理局, 2016.
- [21] German Federal Authority. Monitoringbericht 2021 der Bundesnetzagentur und des Bundeskartellamtes [EB/OL]. https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemittelungen/DE/2021/202111201_Monitoringbericht.html, 2021.12.1
- [22] 姚志华, 余波, 袁法培, 等. 考虑碳排放目标的配电网源网荷储优化调度探究 [J]. *电力需求侧管理*, 2023, 25(3): 80-86.
- YAO Zhihua, YU Bo, YUAN Fapei, et al. Optimal scheduling of distribution network side source network loadstorage considering dual-carbon targets in distribution market [J]. *Power Demand Side Management*, 2023, 25(3): 80-86.

作者简介:

刘秋华(1963),女,山东青岛人,博士,教授,主要研究方向为电力市场;

张正延(1997),男,通信作者,浙江宁波人,硕士研究生,主要研究方向为电力市场;

姜亚熙(1999),男,江苏宿迁人,硕士研究生,主要研究方向为电力市场。

(责任编辑 水 鹤)