

分散决策下的电力平衡机制分析与启示：以德国平衡结算单元为例

Shan, Lanqing; Song, Haotian; Tang, Qinghu; Guo, Hongye; Hou, Shengren; Kang, Chongqing

DOI

[10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1272](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1272)

Publication date

2025

Document Version

Final published version

Published in

Dianwang Jishu/Power System Technology

Citation (APA)

Shan, L., Song, H., Tang, Q., Guo, H., Hou, S., & Kang, C. (2025). 分散决策下的电力平衡机制分析与启示：以德国平衡结算单元为例. *Dianwang Jishu/Power System Technology*, 49(4), 1436-1446.
<https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1272>

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

**Green Open Access added to [TU Delft Institutional Repository](#)
as part of the Taverne amendment.**

More information about this copyright law amendment
can be found at <https://www.openaccess.nl>.

Otherwise as indicated in the copyright section:
the publisher is the copyright holder of this work and the
author uses the Dutch legislation to make this work public.

分散决策下的电力平衡机制分析与启示: 以德国平衡结算单元为例

单兰晴¹, 宋昊天¹, 唐庆虎¹, 郭鸿业¹, 侯胜任², 康重庆¹

(1. 新型电力系统运行与控制全国重点实验室(清华大学电机系), 北京市 海淀区 100084;
2. 代尔夫特理工大学电气数学和计算机部, 荷兰 代尔夫特 2628SK)

Analysis and Implications of Power Balancing Mechanism Under Decentralized Decision-making: An Example of Electricity Markets Based on Balancing Groups in Germany

SHAN Lanqing¹, SONG Haotian¹, TANG Qinghu¹, GUO Hongye¹, HOU Shengren², KANG Chongqing¹

(1. State Key Laboratory of Power System Operation and Control (Department of Electrical Engineering, Tsinghua University),
Haidian District, Beijing 100084, China; 2. Faculty of Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science,
Delft University of Technology, Delft 2628SK, Netherlands)

ABSTRACT: The penetration of renewable energy in power systems is continually increasing as the global energy system transitions to low-carbon, leading to greater uncertainty intensifying the clearing pressure in electricity markets and the dispatching pressure in power systems. These factors pose challenges to the selection of power-balancing mechanisms. This paper focuses on the typical decentralized decision-making balancing mechanism exemplified by the Balancing Group mechanism in Germany. It analyzes its advantages, such as enhanced autonomy of market participants, reduced aggregation of system uncertainty, and lowered dispatch pressure. The paper first introduces the mechanism's fundamental structure and operational methods, highlighting the role of balancing groups as a key component. Next, it analyzes the characteristics of the German Balancing Group mechanism rules and the supporting mechanisms in actual operations and explores the decentralized nature of this mechanism. Finally, it explores the issues and adaptability faced in introducing related market-oriented balancing mechanisms in China, offering recommendations on dispatch levels, market participation, market integration, and technical support.

KEY WORDS: electricity market; balancing group; electricity balancing; balancing market; balancing responsibility

摘要: 随全球能源系统向低碳化转型, 可再生能源在电力系统中渗透率不断提高, 其不确定性增大了电力市场的出清压力与电力系统的调度压力, 为电力的平衡带来挑战。文章聚焦以德国平衡结算单元机制为例的典型分散决策电力平衡机制, 分析了分散决策机制中市场主体自主性的增强、系统集聚不确定性的减弱与调度压力的降低等优势。首先, 介绍了上述机制的基本结构、运作方式与平衡结算单元作为关键组成的参与作用; 然后, 分析了德国电力平衡结算单元机制的规则特点、实际运行中的配套机制, 并剖析了该机制的分散平衡特性; 最后, 开展了相关市场化平衡机制引入我国面临的问题与适应性探索, 提出了调度层级、市场参与、市场衔接与技术支持方面的建议。

关键词: 电力市场; 平衡结算单元; 电力平衡; 平衡市场; 平衡责任

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1272

0 引言

随着全球能源系统低碳化进程的发展, 可再生能源在电网中的占比越来越高。国际能源署预测至2027年, 全球可再生能源机组将比之前5年增长约2400GW^[1], 相当于中国目前全部电力装机容量。欧盟将2030年可再生能源装机占比目标提升到45%^[2]。根据我国“十四五”发展目标, 可再生能源发电量增量在全社会用电量增量中的占比要超过50%^[3]。

但高比例可再生能源对电力系统电力平衡带来了重大挑战。由于可再生能源电源出力具有不确定性、随机性与反调峰特性^[4], 其与用电负荷曲线

基金项目: 国家电网有限公司总部管理科技项目“适应我国国情的电力平衡单元交易机制与关键技术研究”(5108-202218280A-2-287-XG)。

Project Supported by Science and Technology Project of SGCC "Research on the Trading Mechanism and Key Technology of Power Balancing Group Adapted to China's National Conditions" (5108-202218280A-2-287-XG).

匹配度较低,会对电力系统的平衡稳定产生冲击。传统集中决策的市场化电力平衡机制,通过时序渐进的市场实现电力平衡,但主要采用由独立系统运营商(independent system operator, ISO)或输电系统运营商(transmission system operator, TSO)进行统一出清与平衡调度的市场结构。这导致系统中各种可再生能源内生的不确定性集聚到市场出清环节,需要储备的平衡资源更多,对平衡资源的调度能力要求更高,增大了电力系统的平衡压力^[5]。

为此,世界各地的ISO进行了多项制度调整以应对由上述情况导致的高不确定性风险。澳大利亚市场运营(Australian Energy Market Operator, AEMO)将现货市场出清时间间隔由30min缩短为5min,以求在供求波动愈加剧烈的市场中释放更加准确的价格信号^[6]。美国加州市场(California Independent System Operator, CAISO)通过推广电化学储能,实现电能和时间上的大规模转移,并通过推出灵活性爬坡产品,来共同降低不确定性带来的影响^[7]。在学术界同样有一些尝试,例如文献[8]利用箱式鲁棒优化模型,提出一种市场出清优化求解算法,将可再生能源的风险程度纳入目标函数以最大程度减小不确定性对系统的影响。整体而言,以上举措意图在结果层面消除系统化不确定性的影响,但是并没有降低系统集中出清导致的集聚的不确定性。当可再生能源比例进一步增加时,优化空间将较为有限。

在可再生能源大量引入的未来资源形势下,电力系统供应充足但实时电力供应的预测精准度下降,分散决策平衡机制逐渐被电力市场建设者关注并考虑。德国在2005年能源经济法(EnWG 2005)中对TSO与配电系统运营商(Distribution System Operator, DSO)进行了拆分,并明确了一种责任分摊的组织形式——基于平衡结算单元(Balancing Group, BG, 本文中部分专业名词根据德文单词转译,中英文与德文单词对照见附录A)的市场化电力平衡机制^[9](后文简称“平衡结算单元机制”),便是一种现实电力市场中推行的经典分散决策平衡机制。此机制将维持计划和运行之间平衡的责任从TSO分摊到各个平衡结算单元,通过约束每个平衡结算单元维持实际净发电量(发电量减用电量)与在市场中承诺的净发电量尽可能一致,保障通过市场交易的电量平衡,从而减少TSO针对实际发用电与市场交易结果之间偏差的调度工作量,保障更高比例的可再生能源接入。如图1所示,在该机制的作用下,德国在可再生能源占比不断提高的同时实现

了系统平衡功率调用量的逐年减少^[10]。因此,在可再生能源比例不断提升的背景下,平衡结算单元机制正受到学界越来越多的关注。

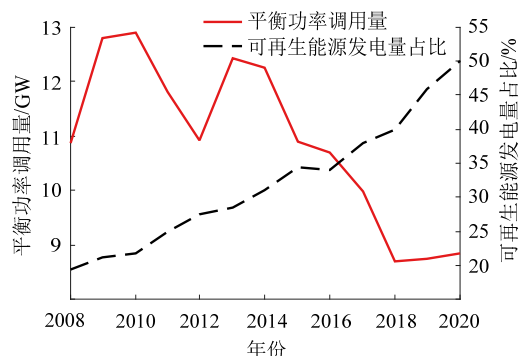


图1 德国电网平衡功率调用量及可再生能源占比
Fig. 1 Amount of balancing power called by the German Power Grid and the share of renewable energy

目前国内已有相当数量的文献对平衡结算单元及相关市场化电力平衡机制进行了介绍。其中文献[11]最先开始探讨德国的平衡结算单元机制,介绍了平衡结算单元的组成及其如何参与电力市场;书籍[12]重点介绍了德国平衡责任主体的组成,在电力平衡中如何发挥作用以及如何承担系统平衡成本,对德国的电能量市场与平衡市场、再调度也有涉及。为了读者更好地理解不同的平衡机制,文献[13]着重强调德国与英国电力市场平衡机制的对比分析。在前述文献的基础上,文献[14]主要叙述了平衡单元结算单元机制在德国的历史沿革、政策发展、机制内容,并举出了机制在德国的运行实例,为读者理解平衡机制的细节提供了重要参考。从其他角度,文献[15]对德国平衡结算单元的市场机制进行展开介绍,并初步展开平衡结算单元对于我国电力系统平衡机制构建的参考,梳理在中国电力市场现状该机制的借鉴意义。大量探讨德国电力平衡机制的论文集中于近3年内出现,与我国电力系统面临新能源渗透率不断提升,系统调节需求不断增加密不可分。当前的研究,主要聚焦于德国平衡单元体系的多方面介绍,对于挖掘平衡结算单元市场机制背后的分散决策平衡理念尚有缺失,亦缺乏对于平衡结算单元机制对于我国当前电力市场体系下的适用性与参考价值的探讨。

为此,本文将为读者从分散决策平衡视角解读德国平衡结算单元机制的运行方式,以及讨论平衡结算单元的设置本身在市场运行中所起作用。在此基础上,对平衡结算单元机制的规则特点与分散特性加以论述,分析分散决策平衡市场机制在现实市场的应用。最后就平衡结算单元市场化平衡理念对于中国的借鉴意义与适应性落地进行探索讨论。

1 德国平衡结算单元机制的结构与运作方式

1.1 德国平衡结算单元机制的结构

在德国的市场化电力平衡机制中,平衡结算单元是参与现货交易与不平衡结算的最小单位,其目的在于维持单元内实际的净发电量与在市场中承诺的净发电量一致,并通过日内市场交易不断更新其承诺的净发电量,平衡其日前和日内净发电量预测的偏差部分,以充分减轻 TSO 在现货尺度的不平衡调度压力,从而保障系统实时电力平衡。德国通过不平衡结算机制,对无法实现平衡的平衡结算单元赋予不平衡能量价格,通过市场手段引导平衡结算单元出于自身利益考虑更好地承担平衡责任。

德国电网运行水平相对较高、电源分布合理且充盈、位处欧洲中部具有欧盟大电网的充分备用支持等,均是德国最终采用平衡结算单元作为市场化平衡机制的重要原因。德国共有 4 个输电系统运营商 TSO,负责控制区内高压、超高压电网的建设与运维工作,需要根据市场参与者发电计划、市场出清结果与实时发用电情况,下达调度指令,维持区域内市场化电力平衡,保证电力系统安全稳定。每个 TSO 下属数百个 DSO,负责对应区域配电网建设运营,提供配电网连接服务。即 DSO 职责在于配电网的管理与向终端输电,具体包括接受 TSO 的委托对发电合约的交付进行监控与测量、协助

TSO 向单元下达再调度指令,承担平衡责任分散后分布式能源的并网责任,不直接参与平衡市场。

根据只包含发电商、只包含售电商或用户以及两者均包含 3 种情况,平衡结算单元可分为发电平衡结算单元、用电平衡结算单元和混合型平衡结算单元,上述 3 类平衡结算单元均需要真实接入电网,有物理意义上的输电端与用电端。每个平衡结算单元均设置一位平衡结算单元负责人(Balancing Group Manager, BGM)与对应 TSO 联系^[16],实现平衡结算单元内发用电平衡预测以及机组与用户的调度控制。

德国平衡结算单元机制的参与者结构如图 2 所示。其中的参与者分为 3 个层级,第一层是发电商、售电商等参与主体,第二层是由这些参与主体组成的平衡结算单元,第三层是由平衡结算单元构成的控制区域,由 TSO 进行管理,每个 TSO 下属平衡结算单元 2000~3000 个。平衡结算单元是参与主体与 TSO 之间的沟通单元。对内,其依据各参与主体发用电预测制定总体发用电计划,完成“自调度”;对外,平衡结算单元之间开展交易,保证发用电量与交易电量实现“自平衡”;向上,平衡结算单元接受 TSO 的调度指令、承担不平衡经济责任,保证系统平衡稳定。平衡结算单元内部的自平衡与自调度由 BGM 牵头负责,是德国市场化电力平衡机制的核心。

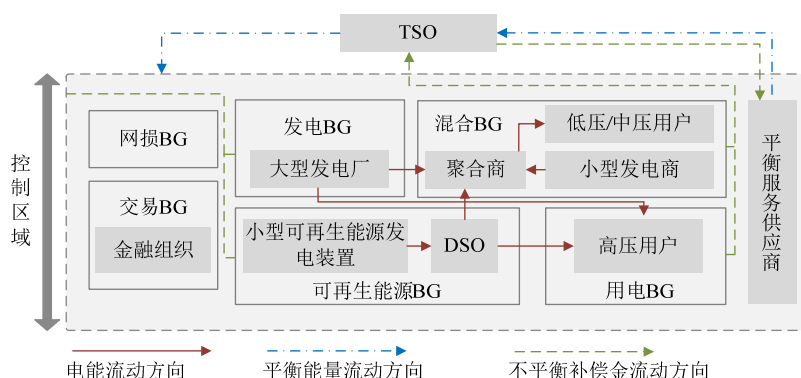


图 2 平衡结算单元机制参与者结构图

Fig. 2 Structural diagram of the participants in the electricity power balancing mechanism based on the balancing groups

1.2 德国平衡结算单元机制的运作方式

德国市场化电力平衡机制的主要环节时序见图 3,分为能量市场、平衡市场、再调度与不平衡结算,平衡结算单元贯穿始终。本节将简要介绍各环节运作方式并分析平衡结算单元这一特殊的分散决策平衡机制结构在其中的作用。

1.2.1 能量市场

能量市场分为中长期市场与现货市场,分别由欧洲能源交易所(European Energy Exchange AG,

EEX^[17])与欧洲电力现货交易所(EPEX SPOT^[18])负责。

中长期市场由各发电商与大用户的参与组成,主要签订物理合约,占德国电力交易总量的 75%。德国现货市场包括日前市场、日内市场,日内市场又分为日内拍卖市场与日内连续市场。日前市场与日内连续市场参与欧洲统一电力市场耦合出清,日内拍卖市场在德国国内开展,现货市场电力交易量占总电量的 25%。

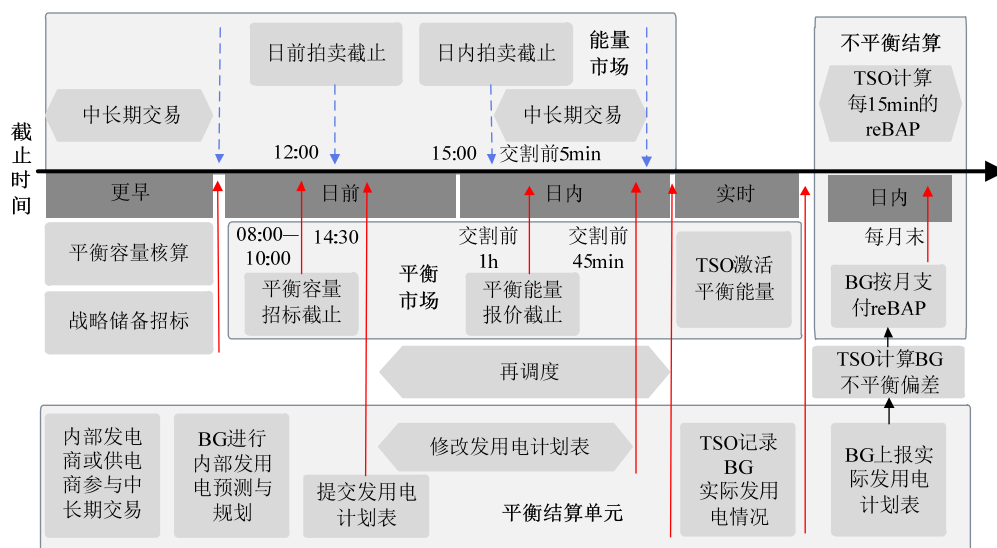


图3 德国电力平衡机制的主要环节时序图

Fig. 3 Structural diagram of the participants in the electricity power balancing mechanism based on the balancing groups

1.2.2 平衡市场

平衡市场涉及平衡容量的需求判定与采购以及平衡能量的激活，参与投标方为平衡服务提供商(balancing service provider, BSP)，由德国4个TSO共同运作。

德国将平衡容量按照响应时间为3种：频率抑制备用(frequency containment reserves, FCR，响应时间30s)、自动频率恢复备用(automatic frequency restoration reserve, aFRR，响应时间5min)、手动频率恢复备用(manual frequency restoration reserve, mFRR，响应时间15min)。其中FCR的需求通常每年计算一次，覆盖整个欧洲大陆同步电网的总需求，并按各TSO控制区的净发用电量比例进行分配，最终细分为每4h的需求容量^[19]。aFRR与mFRR的需求容量则通过动态计算获得，每4h更新一次^[20]。

在日前市场中，德国的4个TSO通过统一平台对平衡容量进行招标，投标方为国内BSP。FCR只需提供单一报价，但必须同时满足上调与下调要求，与欧洲多国耦合出清。aFRR与mFRR需分别为上调与下调报价，国内出清，部分容量也可通过跨国协作平台PICASSO(The Platform for the international Coordination of Automated Frequency Restoration and Stable System Operation)与MARI(Manually Activated Reserves Initiative)获取。此外，aFRR与mFRR提供者在平衡容量中标后还需进行平衡能量的投标。

实时运行阶段，如果平衡结算单元的实际发用电情况与承诺出现偏差，系统整体的发用电量将失衡。TSO每4s监测一次系统状态，一旦出现不平

衡，控制区内FCR将按容量比例关系立即启动。接下来aFRR将按平衡能量报价从高到低自动激活，以代替FCR。最后TSO会根据实际需要，手动激活mFRR代替aFRR。

平衡市场中采购平衡容量的成本将由TSO以输电费的方式，转移由用户承担。而平衡能量的激活成本将通过不平衡结算由产生不平衡的平衡结算单元承担。

1.2.3 再调度

为消除控制区内线路阻塞，TSO或DSO对部分发电厂进行干预，即送电区域发电机组降出力，受电区域增出力，所有100kW以上的发电机组均必须参与。

在平衡结算单元上交发用电计划表后，TSO会根据计划表与日前市场出清情况进行大型再调度安排，并发布阻塞预测。之后TSO会根据计划表修改情况，开展小型再调度安排，DSO也可自行开展再调度。再调度中，发电机组的补偿涵盖其增减出力的成本，如燃料价格与碳证价格等，但与能量市场出清价格无关。补偿成本通过输电费转移至用户侧分摊。如再调度仍不能消除线路阻塞问题，TSO会调用以非市场化方式购买的战略备用，严重情况下会限制可再生能源机组出力^[21]。

1.2.4 不平衡结算

不平衡结算参与方为产生不平衡的平衡结算单元，在每15min的实时交割结束后，TSO会按照激活平衡能量成本与系统不平衡总量计算区域统一不平衡能量价格(regional balancing energy price, reBAP)，并与平衡结算单元实际发用电情况与申报

计划之间的偏差相乘,得到平衡结算单元应当分摊的不平衡费用,并在每月底进行结算^[22]。过去5年中,德国不平衡结算费用占总平衡成本的24.89%。除不平衡结算费用外,平衡成本还包括网络安全成本(network security cost)与对手方成本(counterparty cost)。

不平衡能量价格 reBAP 由 4 个 TSO 控制区中激活的平衡能量的成本及收入之和除以系统不平衡总量得到,具体公式如下:

$$P_{d,q} = \frac{\sum C_{d,q} - \sum B_{d,q}}{\sum E_{d,q}} \quad (1)$$

式中: P 表示不平衡能量价格; d 表示对应日期; q 表示对应 15min 平衡周期, $q=1,2,\dots,96$; $\sum C_{d,q}$ 表示对应平衡周期内激活平衡能量的成本; $\sum B_{d,q}$ 表示收入。前者是 TSO 向 BSP 支付金额,当系统电力供不应求时, BSP 需向 TSO 提供正向能量, TSO 向 BSP 支付一定金额。后者是当系统电力供过于求时, BSP 向 TSO 提供负向能量,即提升能量消耗或降低出力,则 BSP 要向 TSO 返还该部分出力的对应能量金额。 $\sum E_{d,q}$ 表示 4 个 TSO 调用平衡能量的总和,由调用的正向能量减去负向能量得到。

然而,由平衡能量成本计算得出的不平衡能量价格有时可能低于日内市场的能量价格,违背设立不平衡能量价格的初衷。为防止套利行为,并在某些情况下加大对不平衡的惩罚力度,德国在实际计算 reBAP 时会对公式(1)进行相应修正:

1) 为确保 reBAP 与日内市场价格指数之间保持一定的最小价格差距,该差距被设定为日内市场价格指数的 25%与与 10 欧元/(MW·h)之间的较大值。日内市场价格指数反映相应平衡周期内日内连续市场的交易价格,这种修正可以确保造成不平衡的结算单元的利润低于通过日内市场消除不平衡的单元。

2) 当某一平衡周期内 4 个 TSO 需要调用的平衡能量总和超过上调或下调平衡容量总和的 80% 时, reBAP 将额外增加一定费用。

以上两种修正方法,均使得失衡的结算单元面临更大的利润损失,为其减少失衡提供了激励。

1.3 平衡结算单元的作用

平衡结算单元在上述除平衡市场外的各环节均为主要参与者,同时担负与 TSO 进行及时信息沟通,以保证整个市场化电力平衡机制顺利运行的责任^[23]。

中长期市场中,平衡结算单元内的发电商与售电商分别进行交易,交易结果在日前市场临近时共享给 BGM。BGM 会对单元内部发用电情况进行预测,并继续在日前市场上交易以实现发用电量与交易电量的平衡。在日前市场出清后, BGM 需要制定发用电计划表,并在日前提交给 TSO。之后如果发用电量变化, BGM 可以通过在日内市场的交易对产生的不平衡进行修正,并直至交割前 45min 均可向 TSO 提交发用电计划修改申请。此后直至日内市场截止,平衡结算单元仍可在日内市场进行交易,但无法再提交修改申请,此部分产生变化需要在交易日后在向 TSO 提交的实际计划表中进行反映。

在此过程中,平衡结算单元提交的发用电计划表与市场出清情况是 TSO 的调度基础。当电力市场出清后,由于物理网络约束或其他系统运行要求出现无法按计划输送电力的情况,会以此对平衡结算单元内部分发电机组进行再调度,平衡结算单元则必须接受调度,并将其在实际计划表中反映。日内市场结束后,如果平衡结算单元的发用电量与交易电量无法实现平衡,其叠加效果将表现为系统整体的不平衡。此时需要 TSO 激活平衡能量以实现系统整体平衡,同时 TSO 会依据对应成本与系统总不平衡量计算得到区域统一平衡能量价格。

在实际交割结束后,平衡结算单元需提交实际的计划表。TSO 将根据其实际计划表与实际发用电情况的偏差结合 reBAP 计算得到平衡结算单元的不平衡费用,并在每月底进行统一结算。

整个市场推进过程中,除平衡市场外,平衡结算单元均有参与,其发用电量计划是德国市场的平衡基础。而其实际发用电量与计划量之间的偏差、以及叠加后导致的系统不平衡,是平衡市场平衡能量调用的依据。

2 德国平衡结算单元机制的特点与其配套机制分析

在对平衡结算单元机制的运作方式有清晰了解后,本文希望更进一步总结德国平衡结算机制的规则特点,探究其能够在可再生能源大量并网下有良好表现的原因,并分析平衡结算单元机制在德国的实际运营情况,对平衡结算单元机制实际推行过程关注到的实际问题与需要哪些适应性调整加以分析,以及总结德国平衡结算单元机制作为分散决策机制的典型,其分散特性的体现之处。为借鉴平

衡结算单元机制的落地总结经验。

2.1 德国平衡结算单元机制的规则特点

德国平衡结算单元是市场机制而非商业模式或产品化服务,即平衡结算单元是参与现货市场的最小单位,所有想要参与现货市场的主体都必须加入到一个平衡结算单元中。结算单元是平衡责任的第一主体,为了躲避偏差惩罚,实际的平衡责任会下沉压实到参与平衡结算单元的每一市场成员身上。德国平衡结算单元机制有较深的去中心化程度,将平衡责任完全分散至市场主体成员身上,极大减轻调度压力。

德国的平衡结算单元无需直接提供平衡资源却能够起到平衡的偏差调节作用,更适用于可再生能源大量引入、挤压煤电空间带来的上下调资源减少的未来资源形势。德国平衡结算单元参与能量市场但不直接提供平衡资源,而是通过分散的平衡结算单元内实际发用与预测贴近来尽力达到分散平衡,而后保障系统总体平衡情况。该机制大大减少对于平衡资源、灵活性上下调资源的需求量,但对日内市场设计提出了较高要求。日前市场的截止时间要尽可能接近交割时间,同时其出清结果要能够精确反映市场供需情况,向平衡结算单元发出正确信号。

在不平衡结算中,德国所有实体平衡结算单元均需参与结算,承担相应偏差的经济责任。德国看重以偏差惩罚促使平衡结算单元维持自身平衡,使得所有市场主体均是承担平衡责任的第一责任人。而对于可能存在的较高不平衡能量价格为部分成员按照预测的系统不平衡方向相反的方向偏离出力曲线,在日内市场与不平衡结算中套利的可能问题,德国平衡结算单元机制的不平衡能量价格也有所考量。德国机制中将系统不平衡程度分为不同场景,各场景下的不平衡能量价格设置了与日内市场价格相关的价格帽与价格底,并对于极端失衡情况增加额外奖惩。德国的不平衡结算方式从偏差经济责任的承担者范围与偏差结算量化两方面角度承认市场参与主体的自主性并充分发挥其价值,更适用于未来的大规模分布式能源产销者并网的资源情形。

2.2 与德国平衡结算单元机制配套的机制调整

德国自2005年能源经济法改革以来,能源结构出现较大变化,见图4^[24]。风电光伏装机容量急速增长,光伏装机占比超过30%,其中屋顶光伏系统占比超80%,运营商统一管理难度较高。而平衡结算单元机制的分散决策管理,实现了对分

布式资源的整合利用,为运营商的统一管理减轻了负担。

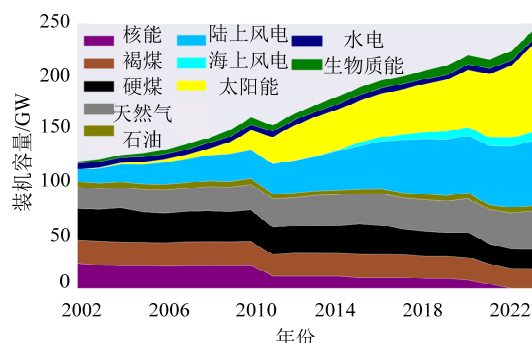


图4 德国不同类型电源装机容量占比变化图

Fig. 4 Change in the share of installed capacity of different types of power sources in Germany

随着德国传统火电厂逐步淘汰,分布式储能设备兴起,可供TSO集中调度的平衡资源供给量不断减少,分布式的平衡资源不断增加。而平衡结算单元的自调度自平衡可以使得分布式平衡资源的作用得到充分挖掘,以弥补传统火电平衡资源的不足。同时受自然资源影响,德国的风电场主要集中于风力资源较为丰富的北部地区,而都市区与高耗能企业多处于国家的南部与西部,发用电中心不匹配,南缺北丰现象较为明显。运营商需要保证其输电线路不产生阻塞,但是德国能量市场出清只考虑简化的物理约束问题,导致能量市场出清结果可能存在不可行的问题。因此德国推行了“再调度”机制,通过TSO与DSO对阻塞线路两端发电厂发电量的干预调整,消除线路阻塞问题。

德国也针对市场运营中的部分问题进行了相关机制的改进。

第一是跨区域平衡资源整合。在2010年前,德国4个TSO独立采购与激活平衡资源,仅对自己控制区内系统平衡负责,但可能出现相邻区域平衡资源激活方向相反,相互抵消的问题。因此2010年德国四大TSO联合成立国家电网控制合作组织(Grid Control Cooperation, GCC),联合进行净平衡资源抵消,从而提升整体的平衡资源利用率。在此之后, GCC不断寻求与其他国家TSO在平衡市场上的合作,最终形成了多国国家电网控制合作组织(International Grid Control Cooperation, IGCC)^[25]。

第二是可再生能源补偿。2000年,德国开始实行新能源“固定电价”上网,新能源行业井喷式发展,但带来了巨大的资金补贴压力。因此德国改为采用“市场电价+溢价补贴”模式,由DSO负责聚合区域内的小型可再生能源发电商,参与市场交

易,并在此基础上进行固定能量补贴。由此使得可再生能源发展与电力市场衔接,保证了相关行业的有序发展^[26]。

第三是能量市场交易方式的改进。由于新能源占比的不断提高,不确定性的提升导致平衡结算单元出现短时不平衡的可能性提高,因此日内市场需要尽可能的接近实时交割时间以保证相应不平衡量可以被消除。德国的日内市场截止时间不断延后,目前已经达到交割前 5min^[27]。

2.3 德国平衡结算单元机制的分散特性

德国电力平衡结算单元机制展现出的分散特性,可以从决策上的分散、责任上的分散与空间上的分散 3 个方面进行探讨。

1) 决策的分散。

决策权的分散化是德国平衡结算单元市场机制的核心特征之一。不同于集中决策机制中由 ISO 主导的各类电力生产计划、负荷预测、调度安排等,机制允许平衡结算单元内的市场主体在电力生产、交易与平衡的各环节拥有独立决策权,依据自身利益与市场条件做出相对应的自主生产安排。

这种决策权的分散化具有多种优势。其鼓励市场主体依据实时市场信号进行灵活调整,优化电力生产与消费,从而提高资源配置效率。发电商可基于价格信号决策发电机组的启停时间、消费者调整用电策略避免高峰电价等。决策权的分散提高了整个市场的多元化与竞争化,减少单一决策错误对系统整体的冲击,助力于市场整体运行效率的提升。

决策权的分散化也带来更高的协调需求与市场复杂度。市场主体之间的相互作用变得更加复杂,需要更加精细的市场规则与先进信息技术支持^[28]。德国电力市场引入数字化平台与实时数据交换系统,均确保主体能够基于最新的即时公开信息作出分散化决策;德国的整个市场体系规则制定与标准化操作程序,均起到规避市场失灵与系统性风险的作用。

2) 责任的分散。

德国平衡结算单元市场机制中,每个平衡结算单元承担自身的平衡责任,通过调节单元内部市场主体的发用电,维持单元内实际净发电量与运行前承诺值的一致,保障系统整体平衡。平衡结算单元是不平衡结算的最小单位,即偏差导致的不平衡结算费用承担最终压实到平衡结算单元内的市场主体中。平衡责任的分散化不仅是责任划分,更是一种经济激励机制。

不同于集中决策电力系统中电力平衡责任集中在 ISO 身上,系统的稳定性依赖于其调度预测以及控制能力。平衡结算单元市场机制将平衡责任分散至市场主体,形成多层次、多主体的责任网络。市场主体对于偏差成本的规避促进其对自身偏差平衡负责的主动性与自主意愿,起到分散系统责任风险的作用,避免因单一主体失误导致的系统性危机。决策的分散与责任的分散本质上是一组权责对等的概念:在德国的平衡结算单元分散决策机制中,ISO 的决策权力被平衡结算单元稀释,则平衡结算单元也要承担起相应的下放到自身的平衡责任。

3) 空间的分散。

平衡结算单元机制的空间分散性,体现在各区域市场的相对独立性与分布式能源的广泛接入上。德国电力市场覆盖全国,各地区电力需求与供应状况存在显著差异。平衡结算单元机制允许各 TSO 管辖范围内市场主体依据当地电力供应情况施行相对独立的平衡管理,减少跨区域电力传输压力,提高整个系统的运行效率。

空间分散性还与分布式能源的接入密切相关。随着家庭光伏、社区风电、分布式储能等分布式能源形式在德国的发展,分布式能源发电的比重总体呈升高趋势。每个分布式能源系统都可以构成一个事实上的独立平衡单元,通过分布在不同地区的平衡结算单元网络参与电力市场。空间分散使得分布式能源可以更加有效参与市场交易,并通过本地化的平衡机制减少对远距离电网传输的依赖。空间上的分散化也有助于提高系统的整体弹性与抗风险能力。在面对局部电力设备故障与自然灾害等突发事件时,分散化的平衡结算单元可以通过本地资源的调度与本地市场的调整迅速恢复区域电力平衡,减少对全系统的冲击^[29]。这种空间分散化的特性使得德国电网在复杂运行环境中能够保持高度稳定性与适应性。

3 中国引入平衡结算单元市场化平衡理念面临的问题与适应性探索

德国平衡结算单元机制的应用逻辑对于我国电源结构转型与系统调度架构转型的需求有一定契合度。当前我国新型电力系统的建设步伐不断推进,系统发电装机的结构主体电源将从传统能源转向兼具强不确定性、弱出力可控性的新能源。同时伴随的分布式新能源、储能等新型主体的大量涌现并网,在一定程度上挤压煤电等传统调节资源空

间,导致我国电力系统可用灵活资源匮乏^[30]。未来多品类经营性主体使得应用传统集中调度维系电力系统平衡的调度压力增大,而德国的平衡结算单元机制可以充分激活分布式主体的自调度与自平衡潜力,只需集中调度相对较少的平衡资源,便可实现系统的整体平衡。

随着可再生能源快速发展与大规模并网并逐渐成为电源主体,我国电力系统主要面对两方面难题:一是电力系统电源结构将转型为强不确定性与弱出力可控性的新能源发电装机主导,同时伴随分布式新能源、储能等新型主体大量并网涌现,导致电网运行更加复杂^[31];二是煤电等传统调节资源发展空间受到挤压,系统中可用的灵活性资源逐渐匮乏,同时为了适应可再生能源间歇性、随机性的特点,电力市场需要向更精细的时间维度和更精确的空间颗粒度发展,传统集中调度的处理频次与数据增多、调度压力增大^[5]。而德国平衡单元机制在其可再生能源发电量占比猛增的背景下,仍然表现平稳适应性良好。在这样高度的新能源渗透率下,其电力现货市场的自平衡性仍然很高,平衡功率的调用量绝对值从2014年开始几乎持续下降,只在2018年之后又少量回升,即平衡单元自身基本可以满足其在日前市场的发用电承诺,不需要通过额外的平衡功率调度来调整达到整个系统的平衡。这说明平衡结算单元市场化平衡理念化整为零、分而治之的特点值得借鉴,能够在一定程度上解决我国未来可能会面对的可再生能源并网与消纳问题。

当然,虽然德国的市场化平衡机制优势众多,但我国在借鉴过程中要注意其在德国能够顺利施行的先决条件优势,以及我国现有市场机制的适配性。首先,德国平衡结算单元能够实施的物理基础是德国电网冗余度高、同时市场衔接与设计灵活度高,因此物理执行中长期合约之后可以在平衡结算单元间频繁进行现货交易。其次,平衡结算单元机制在德国属于机制层面,即参与德国的现货市场需要以平衡结算单元作为最小单位,并没有其他现货市场的参与方式。而我国的电网阻塞较为常见,也存在比较成熟的现行电力市场机制。因此应在我国推进平衡结算单元这一分散决策的市场化平衡理念,而非直接在我国自上而下全面推行平衡结算单元的机制。对于平衡结算单元市场化平衡理念在我国的适配化应用,需要在调度、主体、衔接、技术等层面进行调整。具体适应性探索如下:

1) 调度层级层面。

在考虑我国引入分散决策平衡结算单元的市场化平衡理念时,首先需明确其应嵌入我国电力系统的哪一调度层级,并考虑其与我国现行全国统一电力市场的存在关系。基于我国现行的调度体系,平衡结算单元市场化理念在我国的引入适合嵌入到省调以下调度中,具体原因包括3个方面。从机构功能性的角度,德国的输电系统运营商 TSO 在平衡结算单元机制中承担的负责协调与管理价区内电力供应与需求、确保电力系统平衡与稳定运行的职能,这与我国省调在省级电力系统电力调度与运行组织协调中承担的电力调度、运行监控、市场交易支持与应急处理等职能可以对应,均负责一定区域范围内的电力系统安全稳定支持。而德国平衡结算单元作为 TSO 下属层级的电力市场最小准入单位,与我国省调以下的地县调等属于类似层级。从用电量匹配性迁移的角度,德国的全境全社会用电量与我国广东省处于同一量级,广东省在过去几年间全社会用电量排名持续居全国首位。德国由4个 TSO 负责调度,考虑到我国全国平均情况,即还存在区域大小与用电规模逊于广东省的省份若干。因此我国的省级调度负责范围大致与德国单个 TSO 近似,理解引入平衡结算单元的市场化理念应用范围时,可以考虑由省调层级进行同 TSO 层级的调度管理,将平衡结算单元的分散决策机制实际在省内地市级配网侧开展。从全国统一市场建设角度,现阶段跨省交易的省间市场还需要接受大区电网调度,即省级与跨省跨区市场不变,由省内市场引入平衡计算单元的分散决策平衡理念,鼓励分布式能源的引入与价值发挥,使得配网承担更多的平衡责任。

2) 市场参与层面。

平衡结算单元的市场化平衡理念推行,离不开配套经营性主体的参与,且需要市场参与者提升其自主意识。目前我国市场大多采用集中决策市场机制,应用统一出清的模式,即市场参与者只需要作为资源供给方考虑自己的发电能力与盈利预期,并听从调度机构的统一调令指挥即可。而引入平衡结算单元的分散决策市场化平衡理念后,平衡责任下放,发电个体与消费者的主体性增加,即理论上任何发电主体均可加入一个平衡结算单元并签订合同,单元的构成甚至无需考虑物理馈入点的设置。平衡结算单元的灵活性需要参与灵活单元的经营性主体同样具备高度的灵活市场意识,能够自主决策进入市场开展相应竞争与协作,可以通过收益与

价格刺激信号的反馈调整自己在市场中的动作进入系统总福利的正循环。现阶段,可以考虑优先以分布式能源、虚拟电厂、负荷聚合商、可控负荷、储能等分布式资源组成平衡结算单元,从调度机构处分摊一定的平衡责任,实现平衡结算单元的初步启动,并培养市场环境与市场意识。

3) 市场衔接层面。

为开展平衡结算单元市场化平衡理念在我国的适应性推广,需明确其与我国现有的现货市场之间的关系。平衡结算单元市场化平衡理念与我国现有市场机制之间的衔接可以从时间与空间两方面讨论。机制衔接的时间维度,主要落脚在省内市场全部或部分平衡结算单元化之后中长期合约的执行方式,即现货市场与中长期市场的衔接。平衡结算单元需要通过交易实现与上报预期的自平衡,这要求电力市场中的电力商品具有较高的流动性,因此在日前市场中应采用无约束出清方式,为日内连续交易市场提供明确的价格信号,便于不同节点平衡结算单元之间的交易。同时,平衡结算单元化市场平衡需要在日前预估实时发用电计划,因此配套的中长期合约要采用物理执行方式保证部分电量的确定^[32]。机制衔接的空间维度,主要落脚在平衡结算单元分散决策机制的引入与全国统一电力市场的协调。我国各省现货市场建设进度不一,对于平衡结算单元市场化理念的推广也存在是全国各省内市场同步引入平衡结算单元化的平衡责任下放,还是分阶段分试点区域推行的不同预期。而分阶段推行市场的平衡结算单元化时,已经推广平衡结算单元的省份与传统集中出清省份在市场机制时序上是否需要设计两套时序、采用平衡结算单元的分散决策平衡省份与采用传统集中决策平衡的省份在省间市场如何协调推进,是推动平衡结算单元的省份市场化平衡理念的推广落地需要重点考量的部分。

4) 关键技术层面。

为支撑平衡结算单元市场化理念的应用,现有电力市场关键技术需要进行针对性升级。平衡结算单元的预测与实际发用准确贴合的实现,需要不断依据其自身需求变化改变日内招投标量,以减少实时与计划之间的偏差。一方面,平衡结算单元需要对自身分布式资源的技术参数进行合理评估与日常预测,以期实现精准控制;另一方面,需要建立平衡结算单元与交易中心、电网运营商之间及时可靠信息通信系统相关的信息传递规范,保证数据的沟通顺畅。同时,平衡单元实现的全阶段,均需要

精准的实时监控与数据采集。德国电网署建立了完善的平衡结算单元电力市场规则(Marktregeln für die Durchführung der Bilanzkreisabrechnung Strom, MaBis),用以规范平衡结算单元机制各个环节的信息通信时间与格式,同时德国电力预测、结算管理等相关企业的迅速发展,也满足了平衡结算单元的运行需求。以此类推,平衡结算单元市场化理念在我国电力市场的应用,需要建立平衡结算单元与交易中心、电网运营商之间的信息通信规范,据此研发标准化信息通信系统并应用。可以考虑通过设置平衡结算单元管理系统实现结算单元完整业务流程的可描述、可观测、可调控。具体而言,平衡结算单元管理系统的建立要考虑纵向能够从上至下贯通省、地、县调度,横向能够跨越生产控制与信息大区,在确保数据安全的情况下形成交互。同时需要鼓励实时计量、超短期预测、实时调度等技术的研发与相关企业的发展,保证平衡结算单元内个体响应速度与能力,确保数据的准确交互、控制命令的正确解析与市场参与主体出力的精准跟随。即对于电力市场的预测、计量、调度、信息通信、数据监管采集等各环节技术均加以升级与准确性把控,保障平衡结算单元个体自调度、自平衡的顺利进行。

4 结论

本文从分散决策的视角,系统分析了德国平衡结算单元机制在可再生能源高渗透电力市场中的应用与运作,并讨论了该机制对电力系统平衡的影响。通过揭示这一机制的内在运作逻辑和对系统稳定性的贡献,本文为解决高比例可再生能源并网下的电力系统平衡问题提供了新的思路,并提出了平衡结算单元市场化平衡理念在中国电力市场中的适应性和应用路径。本文的主要贡献与观点有:

1) 引入分散决策平衡理念的分析框架。本文通过剖析德国平衡结算单元机制的结构与运作,在理论层面提出分散决策对电力市场平衡的积极作用。通过对平衡责任下放机制的解析,揭示在高比例可再生能源并网条件下,依靠市场主体的自我平衡与调节减少系统调度压力,从而提高市场的效率与稳定性。

2) 挖掘分散决策的平衡结算单元机制优势。分散决策的平衡结算单元机制不仅有助于减轻中央调度负担,还在提升系统弹性与应对不确定性方面有显著优势。通过对于平衡结算单元机制空间分

散、决策分散与责任分散的系统性分析,揭示该机制如何通过多层次的分散化处理,提升市场灵活性以更好应对大规模新能源引入。

3) 探索平衡结算单元市场化平衡理念对中国的适应性。本文对中国电力市场进行了针对性的适应性分析,指出尽管中德两国的电力市场在物理结构与市场机制上存在差异,分散决策的平衡理念依然具备一定的参考价值。本文提出了一系列适应中国市场的调整策略,如优化调度层级、完善配套技术与推进市场主体的自主性建设,为中国电力市场机制未来变化趋势提供思路。

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

参考文献

- [1] IEA. Renewables 2023 - analysis[EB/OL]. (2024-01-11)[2024-09-28]. <https://prod.iea.org/reports/renewables-2023>.
- [2] European Commission. The European green deal - striving to be the first climate-neutral continent[EB/OL]. (2021-07-14)[2024-09-28]. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_en.
- [3] 国家发展改革委, 国家能源局, 财政部, 等. “十四五”可再生能源发展规划[EB/OL]. (2022-06-01)[2024-09-28]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202206/P020220601501054858882.pdf>.
- [4] 张顺, 葛智平, 郭涛, 等. 大规模新能源接入后系统调峰能力与常规电源开机方式关系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 106-110.
ZHANG Shun, GE Zhiping, GUO Tao, et al. Research on relationship between the capacity of systematic peak regulation and conventional power startup mode after access to large-scale new energy[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 106-110(in Chinese).
- [5] 潘美琪, 贺兴, 艾芊, 等. 新型配电系统分布式资源调度研究现状与展望[J]. 电网技术, 2024, 48(3): 933-948.
PAN Meiqi, HE Xing, AI Qian, et al. Research status and prospect of distributed energy resource dispatching in new distribution system[J]. Power System Technology, 2024, 48(3): 933-948(in Chinese).
- [6] AEME. Five minute settlements[EB/OL]. (2017-10-17)[2024-09-28]. <https://www.aemc.gov.au/rule-changes/five-minute-settlement>.
- [7] Department of Market Monitoring. Special report on battery storage[EB/OL]. (2023-07-07)[2024-09-28]. <https://www.caiso.com/Documents/2022-Special-Report-on-Battery-Storage-Jul-7-2023.pdf>.
- [8] NIE Yongquan, HU Yaping, LI Wenchao, et al. Risk sharing method of robust optimization model considering the uncertainty of renewable energy output in electricity market[C]//2022 IEEE 6th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Chengdu: IEEE, 2022: 224-228.
- [9] EnWG. Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung (Energiewirtschaftsgesetz-EnWG)[EB/OL]. (2005-07-07)[2024-09-28]. https://www.gesetze-im-internet.de/enwg_2005/BJNR197010005.html.
- [10] SMARD. Market data visuals[EB/OL]. [2024-09-28]. <https://www.smard.de/page/en/marktdaten/78?marketDataAttributes=%7B%22resolution%22:%22year%22,%22from%22:1420066800000,%22to%22:1483225199999,%22moduleIds%22:%5B18000426,18000427,19000434,19000435,15004383,15004384,15004382%5D,%22selectedCategories%22:15,%22activeChart%22:false,%22style%22:%22color%22,%22region%22:%22DE%22,%22categoriesModuleOrder%22:%7B%7D%7D>.
- [11] 廖宇. 德国电力市场设计的得失与启示[J]. 中国电力企业管理, 2022(13): 54-58.
- [12] 谢开, 彭鹏, 荆朝霞, 等. 欧洲统一电力市场设计与实践[M]. 北京: 中国电力出版社, 2022: 55-102.
- [13] 刘秋华, 姜亚熙, 张正延, 等. 德国与英国电力市场平衡机制对比分析及启示[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(14): 8-15.
LIU Qiu-hua, JIANG Yaxi, ZHANG Zhengyan, et al. Comparative analysis on electricity market balancing mechanisms of Germany and UK and its enlightenment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(14): 8-15(in Chinese).
- [14] 陈宋宋, 董家伟, 王舒杨, 等. 德国电力平衡单元机制及其启示[J]. 电网技术, 2024, 48(10): 4157-4166.
CHEN Songsong, DONG Jiawei, WANG Shuyang, et al. German balance group mechanism and its inspiration[J]. Power System Technology, 2024, 48(10): 4157-4166(in Chinese).
- [15] 刘秋华, 张正延, 姜亚熙, 等. 平衡单元模式下德国电力电量平衡机制探讨及启示[J]. 电力需求侧管理, 2024, 26(4): 113-118.
LIU Qiu-hua, ZHANG Zhengyan, JIANG Yaxi, et al. Discussion on power balance mechanism of Germany and its implications under balancing group mode[J]. Power Demand Side Management, 2024, 26(4): 113-118(in Chinese).
- [16] Contract and Balancing Groups. Balancing groups and balancing group contract[EB/OL]. [2024-09-28]. <https://www.transnetbw.de/en/energy-market/balancing-group-management/contract-and-balancing-groups>.
- [17] EEX. European Energy Exchange AG (EEX)[EB/OL]. [2024-09-28]. <https://www.eex.com/en/>.
- [18] EPEX SPOT[EB/OL]. [2024-09-28]. <https://www.epexspot.com/en>.
- [19] Entsoe Electrifying Europe. Frequency containment reserves (FCR)[EB/OL]. [2024-09-28]. https://www.entsoe.eu/network_codes/eb/fcr/.
- [20] Regelleistung.net. Automatic frequency restoration reserve[EB/OL]. [2024-09-28]. https://www.regelleistung.net/en-us/General-Information/Types-of-control-reserve/automatic-Frequency-Restoration-Reserve_alt.
- [21] Bundesnetzagentur. Redispatch[EB/OL]. [2024-09-28]. <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Versorgungssicherheit/Netzengpassmanagement/Engpassmanagement/Redispatch/start.html>.
- [22] Netztransparenz.DE. Uniform imbalance price (reBAP)[EB/OL]. [2024-09-28]. <https://www.netztransparenz.de/en/Balancing-Capacity/Imbalance-price/Uniform-imbalance-price-reBAP>.
- [23] Bundesnetzagentur. Bilanzkreisabrechnung (Ma - BiS)[EB/OL]. [2024-09-28]. https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Beschlusskammern/BK06/BK6_Zug_Mess/833_mabis/mabis_node.html.
- [24] Energy-Charts. Installierte netto-leistung zur stromerzeugung in Deutschland in 2025[EB/OL]. [2024-09-28]. https://www.energy-charts.info/charts/installed_power/chart.htm.
- [25] Entsoe Electrifying Europe. Imbalance netting[EB/OL]. [2024-09-28]. https://www.entsoe.eu/network_codes/eb/imbalance-netting/.
- [26] Bundesministerium der Justiz, Bundesamt für Justiz. Gesetz für den ausbau erneuerbarer energien (erneuerbare-energien-gesetz-EEG 2023)[EB/OL]. (2024-07-21)[2024-09-28]. https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/BJNR106610014.html.
- [27] EPEX SPOT. Trading products[EB/OL]. [2024-09-28]. <https://www.epexspot.com/en/tradingproducts#intraday-trading>.

- [28] 李东东, 汪璐璐, 王维, 等. 考虑源荷互动的综合能源系统多目标双层规划[J]. 电网技术, 2024, 48(2): 527-539.
LI Dongdong, WANG Lulu, WANG Wei, et al. Multi-objective bi-level planning for integrated energy systems considering source-load interaction[J]. Power System Technology, 2024, 48(2): 527-539(in Chinese).
- [29] 刘方, 张浩, 杨秀, 等. 配电网多类型分布式资源辅助主网关键节点黑启动方案与实时调度策略[J]. 电网技术, 2023, 47(11): 4416-4429.
LIU Fang, ZHANG Hao, YANG Xiu, et al. Black start scheme and real-time scheduling strategy for key nodes of the main network assisted by multi-type distributed resources of the distribution network[J]. Power System Technology, 2023, 47(11): 4416-4429(in Chinese).
- [30] 吴林林, 陈璨, 胡俊杰, 等. 支撑新能源电力系统灵活性需求的用户侧资源应用与关键技术[J]. 电网技术, 2024, 48(4): 1435-1444.
WU Linlin, CHEN Can, HU Junjie, et al. User side resource application and key technologies for flexibility demand of renewable energy power system[J]. Power System Technology, 2024, 48(4): 1435-1444(in Chinese).
- [31] 康重庆, 杜尔顺, 郭鸿业, 等. 新型电力系统的六要素分析[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1741-1750.
KANG Chongqing, DU Ershun, GUO Hongye, et al. Primary exploration of six essential factors in new power system[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1741-1750(in Chinese).
- [32] 刘敦楠, 李竹, 董治新, 等. 基于标准能量块合约的电力中长期市场连续运营方案设计[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 129-141.
LIU Dunnan, LI Zhu, DONG Zhixin, et al. Design of continuous

operation scheme of electric power medium- and long-term market based on standard energy block contracts[J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 129-141(in Chinese).



单兰晴

在线出版日期: 2025-02-24。

收稿日期: 2024-07-08。

作者简介:

单兰晴(1995), 女, 博士, 博士后, 主要研究方向为电力市场、分布式能源、能源经济与政策,

E-mail: lanqingshan@mail.tsinghua.edu.cn;

宋昊天(2002), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力市场、系统运行与新能源并网, E-mail: song-ht20@mails.tsinghua.edu.cn;

唐庆虎(1998), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力市场、大数据分析, E-mail: tqh20@mails.tsinghua.edu.cn;

郭鸿业(1993), 男, 通信作者, 博士, 副研究员, 主要研究方向为电力市场、源网荷储市场化互动、需求侧灵活性, E-mail: hyguo@tsinghua.edu.cn;

侯胜任(1997), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力市场、短期电力市场交易与套利、能源经济与政策, E-mail: S.Hou@tudelft.nl;

康重庆(1969), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统规划、低碳电力技术、电力市场, E-mail: cqkang@tsinghua.edu.cn.

(责任编辑 王金芝)

附录 A

表 A1 专业名词中英文与德文单词对照表

Table A1 Comparison of Chinese, English and German words for Proper nouns

中文名	英文名	德文名
平衡结算单元	Balancing Group, BG	Bilanzkreis, BK
《可再生能源法案》	German Renewable Energy Sources Act	Erneuerbare Energien Gesetz, EEG
平衡结算单元负责人	Balancing Group Manager, BGM	Bilanzkreisverantwortlicher, BKV
区域统一平衡能量价格	Regional Balancing Energy Price	regelzonenübergreifenden einheitlichen Bilanzausgleichsenergiepreis, reBAP
控制区	Load-frequency Control Block, LFC block	Regelzonen, RZ
频率抑制备用	Frequency Containment Reserves, FCR	Primärreserve, PRL
自动频率恢复备用	automatic frequency restoration reserve, aFRR	Sekundärreserve, SRL
手动频率恢复备用	manual Frequency Restoration Reserve, mFRR	Minutenreserve, MRL
再调度	Redispatch	Redispatch
战略容量储备	Capacity Reserve	Kapazitätsreserve, KapRes
需求响应	Disposable Loads	AbLa
独立系统运营商	Independent System Operator, ISO	Unabhängiger Systembetreiber, USB
输电系统运营商	Transmission System Operator, TSO	Übertragungsnetzbetreiber, ÜNB
配电系统运行商	Distribution System Operator, DSO	Verteilnetzbetreiber, VNB
平衡单元	Balancing Mechanism Unit, BMU	Regelmechanismuseinheit, BMU
平衡结算单元	Market Rules for the Implementation of	Marktregeln für die Durchführung der Bilanzkreisabrechnung Strom,
电力市场规则	Balance Group Settlement in Electricity, MaBis	MaBis