



中德能源与能效合作  
Energiepartnerschaft  
DEUTSCHLAND - CHINA

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# 德国虚拟电厂的商业模式

中德能源与能效合作伙伴项目



# 版本说明

本报告介绍了德国虚拟电厂的发展及其在灵活性方面的优势，包括分析与虚拟电厂相关的主要电力市场和监管框架，介绍德国虚拟电厂商业模式案例，总结德国促进虚拟电厂发展的有利因素，并建议了进一步推广虚拟电厂的措施。报告在中德能源与能效合作伙伴项目框架下发布。项目受德国联邦经济和能源部（BMWi）委托和资助，中国国家发展和改革委员会、国家能源局作为中方政府合作伙伴提供支持和指导。项目旨在围绕能效提升和发展可再生能源，通过深入交流可持续能源系统发展相关的政策、最佳实践和技术知识，推动高级别政府对话，企业与政府交流以及技术和政策法规层面交流，从而促进和推动两国能源转型，助力实现气候目标。

受德国联邦经济和能源部委托，德国国际合作机构（GIZ）负责实施中德能源与能效合作伙伴项目。

## 发行方

中德能源与能效合作伙伴  
受德国联邦经济和能源部（BMWi）委托  
北京市朝阳区亮马河南路 14 号  
塔园外交办公楼 1-15  
邮编：100600  
c/o  
德国国际合作机构（GIZ）  
Torsten Fritsche  
Köthener Str. 2  
柏林 10963

## 版面设计

edelman.ergo (on commission of BMWi)

## 图片

BMWi/封面  
Shutterstock/M. Somchai (第 5 页)  
Shutterstock/ConceptCafe (第 15 页)  
Shutterstock/Wild Squirrels (第 17 页)

## 研究负责人

尹玉霞、王昊  
德国国际合作机构（GIZ）

## 排版

邵明琪

## 作者

夏纯、费利克斯·格罗伊-克鲁尔、斯特凡·托  
马斯

德国伍珀塔尔研究所（Wuppertal Institute）

© 2021 年 11 月，北京

本报告全文受版权保护。截至本研究报告发布前，德国国际合作机构和相关作者对出版物中所涉及的数据和信息进行了仔细研究与核对，但不对其中所涉及内容及评论的正确性和完整性做任何形式的保证。本报告仅代表作者的观点，而不代表项目合作伙伴的观点，如有任何信息纰漏或错误，报告作者负全责。本出版物中涉及到的外部网站发行方将对其网站相关内容负责，德国国际合作机构不对其内容承担任何责任。本文件中的观点陈述代表委托方的意见。

# 目录

执行摘要 .....	4
虚拟电厂运行的关键要素.....	4
德国虚拟电厂发展的有利条件.....	4
德国虚拟电厂进一步发展的建议.....	5
1 引言 .....	6
2 支持德国虚拟电厂发展的电力系统、市场和政策框架 .....	7
2.1 德国电力系统要素概述.....	7
2.2 电力市场及规则 .....	8
2.3 《可中断负荷协议条例》 .....	9
2.4 电网阻塞管理 .....	9
2.5 《可再生能源法》 .....	10
2.6 聚合商相关法规 .....	10
2.7 居民提供灵活性的法律基础和先决条件.....	11
3 德国虚拟电厂的总体发展与案例研究 .....	12
3.1 独立聚合商模式的虚拟电厂.....	13
3.2 电力公司模式的虚拟电厂.....	13
3.3 新型市场参与者模式的虚拟电厂.....	14
4 结论 .....	16
4.1 虚拟电厂运行的关键要素.....	16
4.2 虚拟电厂发展的有利条件.....	16
4.3 德国虚拟电厂进一步发展的建议.....	17

# 执行摘要

德国提出 2045 年气候中和的目标，大力发展以风电、光伏为主的可再生能源是实现这一宏伟目标的重要支柱之一。由于风电和光伏发电间歇的特性，电力系统中高比例的风光发电将给电网运营商和电力市场供需平衡带来重大的挑战。与此同时，终端用能部门的碳减排会提高电气化程度，因此，电力总需求和用电峰值会大幅增长。电力系统的灵活性是帮助德国解决这一问题并实现气候中和的重要手段，而虚拟电厂（VPP）通过聚合并集中调度分布式能源成为提升电力系统灵活性的解决方案。参与虚拟电厂的分布式电源资源主要包括连接到配电网或终端用户附近的中小型资源，涵盖分布式发电机组、需求侧资源和储能。单独的中小型能源资源虽具有灵活性潜力，但由于规模过小、分布分散，或者发电波动过大，无法直接提供系统服务。虚拟电厂通过聚合商，把独立的分布式能源资源作为单一资源捆绑到发电资产组合中，通过中央信息技术系统监控、预测和优化来调度它们的发电、储能或释放灵活的电力需求，使分布式资源能与电力市场交易并向系统运营商提供灵活性。

本报告介绍了德国虚拟电厂的发展及其在灵活性方面的优势，分析了与虚拟电厂相关的主要电力市场和监管框架，介绍了德国虚拟电厂商业模式案例，总结了德国促进虚拟电厂发展的有利因素，并建议了进一步推广虚拟电厂的措施。

## 虚拟电厂运行的关键要素

- **技术要求：** 虚拟电厂的运行需要先进的信息与通信技术（ICT）软件平台聚合虚拟电厂里大量的能源资源。以及要智能电表、远程控制和自动化系统等对应的硬件设备。
- **分布式能源资源：** 建立包括需求、供应和储能在内的多样化分布式能源资源池，并在不同的市场上探索商机是增加虚拟电厂收入的重要策略。生物质/沼气发电厂和水电因高灵活性是德国虚拟电厂中的优质资源。电池电动汽车、热泵、家用储能设施、屋顶光伏等小规模分布式能源资源以及中压能源资源电解制氢厂是虚拟电厂资源池中的后起之秀。

## 德国虚拟电厂发展的有利条件

德国的电力市场和政策框架为虚拟电厂提供灵活性服务创造了如下有利条件：

- 德国政府要求可再生能源电厂，特别是 100kw 以上中型可再生能源电厂参与市场交易。由于中型电厂单独参与电力市场交易的边际成本较高，虚拟电厂可以为此提供服务。此外，发电、输电、配电、售电分开为虚拟电厂建立了积极的参与环境。
- 德国的日间电力市场允许接近实时的电力交易，订单到交割之间的时间缩短产生了对在短时间内可获得的快速可控灵活性资源的更多需求，而这类需求可以由虚拟电厂通过其资源组合提供。
- 根据平衡机制，输电系统运营商需要从平衡市场购买平衡能量，虚拟电厂可以通过其聚合的资源为平衡市场提供灵活性。此外，统一的平衡市场让包括虚拟电厂在内的平衡服务供应商，可以向所有输电系统运营商提供平衡服务，增加了虚拟电厂的商机。
- 德国能源相关法律从法律上规定了聚合商的市场角色、机会和义务。为虚拟电厂聚合能源资源提供了法律保障。
- 欧洲和德国的法规都确保虚拟电厂能够进入批发和平衡市场并进行交易。投标的最小单位或进入市场的资格条件对虚拟电厂的发展前景具有决定性作用。如果对进入市场的规模要求过高或资格预审要求过严，或将某类分布式能源资源排除在外，将限制虚拟电厂参与市场交易的可能性。在德国，输电系统运营商认可以分布式能源资源聚合的形式提供平衡服务；虚拟电厂有足够的自由确定其资源组合，包括分布式能源资源的数量和类型（由间歇性可再生能源发电机组提供的平衡服务，如光伏和风力发电，仍处于测试阶段）；最小投标单位为 1MW，并会进一步减小。

## 德国虚拟电厂进一步发展的建议

- 间歇性可再生能源（由于间歇性可再生能源特别是太阳能和风能的波动性和不可预测性，目前在资源聚合池中占比很少），和其它小规模能源资源（例如，电池电动汽车、热泵等）应进一步扩大在平衡市场中的参与。
- 针对小规模能源资源（如电池电动汽车、热泵等）为电网运营商提供灵活性，设计额外的市场机制。目前，配电系统运营商或输电系统运营商与小规模能源资源的所有者之间互不了解，建立小范围区域灵活性市场，使之成为小规模能源资源

和配电系统运营商网络运营商的独立交易平台，为虚拟电厂运营商提供新的发展机会，在这个市场中捆绑小规模资源进行投标，而不仅仅是要求配电系统运营商给提供灵活性的消费者降低资费（目前讨论的另一方案）。

- 免除家用储能提供灵活性的税费和过网费等双重经济负担。
- 在独立的聚合商、平衡责任方和电力用户之间制定标准化的程序，以解决补偿机制、测量和核证基准方法、数据交换和各自角色、责任、权利等问题。



# 1 引言

德国提出到 2045 年实现气候中和的目标。加速可再生能源发展是实现这一宏伟目标的关键。2020 年，可再生能源占德国发电量的 50.9% (248.82 TWh)，其中风能和光伏发电量占 37.2% (或 183.27 TWh)<sup>1</sup>。预计 2045 年可再生能源发电量将增至 899 TWh，其中风能和光伏将占主导地位<sup>2</sup>。由于风力发电和光伏发电具有间歇性的特点，电力系统中高比例的风电和光伏，会给电网运营商和电力市场平衡供需带来重大挑战。与此同时，所有终端用能部门的脱碳会引发电气化比例的提高，这将使得德国的电力总需求从 2018 年的 595 TWh 大幅增长至 2045 年的 1017 TWh<sup>3</sup>，并且造成

用电高峰增加。因此，提高电力系统的灵活性是德国实现气候中和的关键<sup>4</sup>。

本研究旨在通过对不同类型虚拟电厂的商业模式进行案例研究，分析虚拟电厂所需的关键市场政策框架，展示虚拟电厂在德国的发展及其对电力系统灵活性的贡献，总结有利于虚拟电厂在德国发展，特别是在提供灵活性方面的关键因素。

## 虚拟电厂 (VPP)

虚拟电厂 (VPP) 将分布式能源资源聚合在一起，并进行集中调度，通过为电网和电力市场提供灵活性服务，成为很有前景的提高灵活性解决方案。据法国电力公司估计，德国的能源聚合市场和灵活性市场规模为 75 GW，这一数字预计到 2030 年将翻一番<sup>5</sup>。分布式能源资源以中小型为主，可分为：1) 分布式发电机组，即可调度资源，如热电联产厂或沼气厂，以及间歇性可再生能源，如风能和光伏；2) 需求侧资源，即来自灵活能源用户的需求响应；以及 3) 储能，如电池、飞轮、电转 X，主要接入配电网或位于终端用户附近<sup>6</sup>。尽管分布式能源资源具有灵活性潜力，但通常由于其规模太小、分布分散，或者发电量波动大等原因，无法直接提供系统服务。虚拟电厂作为聚合商，可以将这些分布式能源资源捆绑成一个规模较大的组合。通过中央 IT 系统监测、预测、优化和调度发电、储电/放电或灵活消费，使这些资源能够参与电力市场并向系统运营商提供灵活性服务。

<sup>1</sup> Fraunhofer ISE (2021). Energy Charts. Öffentliche Netztromerzeugung in Deutschland in 2020. [https://energy-charts.info/charts/energy\\_pie/chart.htm?l=de&c=DE&interval=year&year=2020](https://energy-charts.info/charts/energy_pie/chart.htm?l=de&c=DE&interval=year&year=2020).

<sup>2</sup> Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2021). Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann Zusammenfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende.

<sup>3</sup> Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2021).

<sup>4</sup> AEE (Agentur für Erneuerbare Energien) (2016). Metaanalyse. Flexibilität durch Kopplung von Strom, Wärme & Verkehr; Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2020).

<sup>5</sup> <https://www.pv-magazine.com/2019/06/14/edf-to-acquire-energy2market/>

<sup>6</sup> SWECO (2015). Study on the effective integration of Distributed Energy Resources for providing flexibility to the electricity system. Report to the European Commission.

## 2 支持德国虚拟电厂发展的电力系统、市场和政策框架

在德国，与虚拟电厂运行最相关的框架条件涉及电力市场运行、可中断负荷管理、电网阻塞管理、可再生能源管理、聚合商法规、以及住宅分布式能源资源提供灵活性的法规。本节简要介绍这些框架条件，以及它们为虚拟电厂商业模式带来的机遇和挑战。

### 2.1 德国电力系统要素概述

#### 电力业务拆分

拆分传统的垂直一体化供电系统，将发电、输电、配电和售电分开，对虚拟电厂发展至关重要，这样的模式为新的市场参与者提供了公平的环境。德国的《能源经济法》（Energiewirtschaftsgesetz, EnWG）提出了电力系统拆分的要求，《能源经济法》第七条规定，所有客户超过 100,000 家的能源公司必须依法将其电网运营业务从竞争性的发电或供电业务中剥离。这意味着，输电系统运营商（TSO）<sup>7</sup>和规模较大的配电系统运营商（DSO）将独立于发电公司、交易商、供应商等其他电力市场参与者运行。规模较小的公司必须为发售电和输电业务分别设立完全独立的账户。这样的规定让德国的大部分电力得以在电力批发市场进行交易。

#### 平衡

电力系统的首要目标是确保总发电量和电力负荷之间随时保持平衡。在德国，每个发电厂和电力消费者会被分配到平衡区，由平衡责任方（BRP，通常是能源供应商或聚合商）确保平衡区内的总发电量加总外购电量与用电量相匹配。平衡责任方必须以 15 分钟为单位，为第二天做出准确的电网供需预测，并向负责的输电系统运营商提交相应的平衡计划。输电系统运营商负责保障区内

电力供应和负荷之间的平衡，并在每 15 分钟为每个平衡区进行一次清算。输电系统运营商监控每个平衡区的预测与实际情况之间的偏差，并利用平衡市场上的平衡服务解决预测偏差问题。若出现预测偏差，平衡责任方需承担平衡服务的费用，即负担平衡电量价格<sup>8</sup>。平衡责任方也可在日间电力市场购电或售电以减少偏差，降低平衡服务的成本<sup>9</sup>。

#### 调度

在德国，电厂根据成本和电力市场上的预期价格，以成本最优的方式确定其发电计划。根据电力市场竞价上网优先顺序规则，即按不同机组的发电边际成本优先排序，风电场和太阳能电厂等可再生能源发电的边际成本最低，所以总是可以在市场上先出售。电力交易完成后，各参与方向输电系统运营商提交发用电计划。交易结果决定了电力系统中供应侧和需求侧的资源配置。在电力交易结束后，输电系统运营商使用平衡市场来解决实时不平衡问题（见 2.2 节）。在电网发生阻塞的情况下，系统运营商可采取再调度，调整常规发电厂和可再生能源发电量（第 2.4 节）。

<sup>7</sup> 德国有四家输电系统运营商:TransnetBW GmbH, TenneT GmbH, Amprion GmbH, 50Hertz Transmission GmbH

<sup>8</sup> SMARD (n.d.) . Balancing energy.  
<https://www.smard.de/page/en/wiki-article/6076/6086>

<sup>9</sup> Ninomiya, Y., Schröder, J. and Thomas, S. (2019) . Digitalization and the Energy Transition: Virtual Power Plants and Blockchain. Study for the GJETC

## 2.2 电力市场及规则

根据从购买到实际交付之间的时间不同，德国电力市场交易所有期货（即长期交易）、日前现货和日间现货三种产品。长期交易发生在期货市场，根据对未来的预测和估计，长期交易可以发生在实际交割前几年。期货可用来对冲价格上涨的风险。大多数电力交易是短期交易，在欧洲电力交易所（EPEX）的现货市场进行。短期交易包括日前市场和日间市场，短期交易首先发生在日前市场，在日前市场中，对次日给定的某一小时电量报价在中午 12:00 前出价，日前市场比期货更能准确地预测发电和消费量。一旦出价被接受，发电商就计划启动电厂，并在前一天 14:30 前将发电计划提交给对应的输电系统运营商。日前预测的偏差将通过日间市场弥补，15 分钟产品和 1 小时产品可以交易到交割前 5 分钟（以前是可以交易到在交割前 45 分钟）。日间交易采用连续报价模式，由交易系统自动匹配买家和卖家进行交易。跨境日间交易（XBID）的概念于 2018 年推出，旨在欧洲范围内创建一个统一的泛欧洲跨区域日间市场。跨境日间交易解决方案以公共 IT 系统为基础，具有共享订单簿（SOB）、容量管理模块（CMM）和交割模块（SM）<sup>10</sup>。随着间歇性可再生能源的比例日益增加，日间市场越来越重要，它可以对平衡责任方不断变化的负荷和可再生能源发电量预测偏差做出及时响应<sup>11</sup>。

在德国，虚拟电厂活跃在日前市场和日间市场。此外，日间市场的交割期较短，对可在短时间内迅速作出反应的灵活性产品具有额外需求，虚拟电厂的灵活性资源池正好可以提供这项服务。

在日间市场交易结束后，输电系统运营商在平衡电力市场购买平衡服务，以解决系统实时供需失衡及其导致的频率偏差。2010 年德国建立了统一的电力平衡市场，由平衡服务提供商为输电系统运营商提供灵活性服务<sup>12</sup>。电力系统频率的稳定可以通过频率控制备用（FCR，也称为一次控制备用）以及自动和手动激活的频率恢复备用（aFRR，也称为二次控制备用），和手动控制，启动时间较长，补充二次控制备用的 mFRR，（也称为三次控制备用）来维持。这三类控制备用的激活时间从 30 秒到 15 分钟不等。一次备用的最低投标单位为 1 MW，且投标必须是对称的，即在正负两个方向上提供相同的容量<sup>13</sup>。一次控制备用产品的供应商只获得容量价格的收益（因为其有意愿在一定时间内保留平衡容量）。相反，二次控制备用和三次控制备用对正负备用分别询价，最低投标单位分别为 5MW。提供二次控制备用和三控制次备用的供应商通过容量价格和平衡能量价格获得收益（对实际使用的平衡能量进行计费，并将成本转嫁给导致启动备用的平衡责任方）。

表 1：三种控制备用产品的特点

	一次控制备用	二次控制备用	三次控制备用
激活时间	30 秒	5 分钟	15 分钟
最小投标单位	1MW (正备用或负备用)	5MW* (正备用或负备用)	5MW* (正备用或负备用)
收益	容量价格	容量价格+能量价格	容量价格+能量价格

\* 如果每个输电系统运营商控制区每个产品只提交一个投标，也可以将单位缩小到 1MW

<sup>10</sup> [https://www.amprion.net/Energy-Market/Congestion-Management/Multi-Regional-Coupling-\(MRC\)-and-Cross-Border-Intraday-\(XBID\)/Content-Page.html](https://www.amprion.net/Energy-Market/Congestion-Management/Multi-Regional-Coupling-(MRC)-and-Cross-Border-Intraday-(XBID)/Content-Page.html)

<sup>11</sup> Beucker, S. Et al. (2020). WindNODE-summary report: flexibility, markets and regulation

<sup>12</sup> 以前，不平衡是由四个输电系统运营商各自独立处理的。

<sup>13</sup> 正平衡服务是通过增加发电量或减少用电量提供的，而负平衡服务是通过减少发电量或增加用电量提供的。

由于德国的输电系统运营商接受聚合资源参与平衡市场的资格，虚拟电厂可用其资源池中聚合的各种分布式能源资源，参与平衡市场，提供备用服务，特别是二次备用和三次备用服务。

以前，若想提供平衡服务，平衡服务提供商必须同时参与容量拍卖，而以灵活性负荷进行聚合的虚拟电厂由于预测准确性的问题不能参与其中<sup>14</sup>。2020年11月以后，任何通过资格预审的平衡提供商，无论是否参与了容量拍卖，都可以提供平衡服务<sup>15</sup>。

### 2.3 《可中断负荷协议条例》

《可中断负荷协议条例》(AbLaV)于2013年生效，并于2016年修订，它允许输电系统运营商对可中断负荷的需求进行招标。该条例的引入旨在缓解平衡市场上可用的可中断负荷量不足的问题，激励各行业提供灵活性。根据《可中断负荷协议条例》，可中断负荷既可以参与电力平衡市场，也可以参与输电系统运营商的招标。《可中断负荷协议条例》修订前只涉及能源密集型行业，签订的协议不超过7份<sup>16</sup>。2016年修订后的《可中断负荷协议条例》试图放宽投标参与条件，增加供应商的数量和竞争。例如，投标门槛从50MW减少到5MW。此外，由之前的只能接入高压大型工业调整为允许接入6kV-60kV中压电网的分布式能源资源以及聚合的小负荷参与。

《可中断负荷协议条例》规定，输电系统运营商每周通过输电系统运营商的联合招标平台发布750MW的立即可中断负荷(SOL)和快速可中断负荷(SNL)招标<sup>17</sup>。提供可中断负荷的用户根据其所提供的容量和能量得到补偿。容量补偿基于竞争性拍卖的结果，每周最多500欧元/MW，能量补偿最多400欧元/MWh(《可中断负荷协议条例》第4条)。在提供可中断负荷服务期间，负荷中断信号由输电系统运营商直接或通过虚拟电厂发送给可提供中断负荷的用户。修订后的《可中断负荷协议条例》

为规模较小的电力用户，特别是服务部门的用户创造了机会，也为虚拟电厂服务其可中断负荷用户提供了商机。

### 2.4 电网阻塞管理

德国电力市场设计“电力市场2.0方案”的核心思想之一是电力市场与电网阻塞管理的分离。电力批发市场产生价格信号，但是并没有充分考虑电网的物理输送能力。因此，德国电网阻塞的管理在市场之外进行<sup>18</sup>。根据德国的《能源经济法》和《可再生能源法》，输电系统运营商可以采取如下措施，消除电网阻塞：

- 输电系统运营商根据平衡责任方提交的计划对下一日的用电负荷趋势做出分析，预测市场交易是否会导致阻塞及影响程度。根据《能源经济法》第13条第1段，在电网发生阻塞时，输电系统运营商可以要求进行再调度，即下调一地的发电商交易协定的并网电量，同时上调另一地的发电商并网电量<sup>19</sup>。因此，再调度是为了解决电力批发市场上，电力交易与电网基础设施所面临的物理输送之间的不一致<sup>20</sup>。2021年10月1日前，容量大于10MW的传统电厂有法定义务参与再调度，电厂也会因参与再调度获得相应的经济补偿，以抵消他们为此付出的成本。
- 如果传统电厂的再调度不能满足系统需求，输电系统运营商可以采取限制上网措施，减少可再生能源并网，进一步调整电力供应。

自2021年10月1日起，经修订的《电网加速扩建法》(NABEG)生效，该法案改革了对电网阻塞管理的措施，包括实施更新后的再调度方案——“再调度2.0”。修订后的《电网加速扩建法》要求，100kW以上规模的电厂和所有配电系统运营商也都有义务参与再调度。这意味着有更多的容量可以参与再调度<sup>21</sup>。修订后的《电网加速扩建法》改进之处体现在以下两方面。首先，它降低了参与再调度的最低门槛，即从10MW降低到100kW。由于门槛降低，也引入了“调度管理商”这一新的市场角色。可控电厂可将自己手中与再调度相关的职责交给调度管理商，由其负责可控资源的部署<sup>22</sup>。根据德国联

<sup>14</sup> Poplavskayaa, K. and Vries, L. (2019). Distributed energy resources and the organized balancing market: A symbiosis yet? Case of three European balancing markets. Energy Policy 126: 264–276

<sup>15</sup> BNetzA (2019). Einführung eines Regelenergiemarktes. [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2019/20191008\\_Regelenergiemarkt.html](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2019/20191008_Regelenergiemarkt.html)

<sup>16</sup> Wohlfarth K. and Klobasa, M. (2019). Setting course for demand response in the service sector. Energy Efficiency 12:327–341

<sup>17</sup> <https://www.regelleistung.net/ext/static/abla?lang=en> 即可中断加载(SOL)的激活时间必须少于1秒(通常为350ms)。快速可中断负荷(SNL)可以在15分钟内激活

<sup>18</sup> Hirth, L. et al. (2019). Cost- or market-based? Future redispatch procurement in Germany

<sup>19</sup> 根据电厂提供再调度的速度，输电系统运营商可以在提前七天到实时之间请求再调度。

<sup>20</sup> BMWi (2019). Electricity Market: A modern electricity market. <https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Dossier/electricity-market-of-the-future.html>

<sup>21</sup> BMWi (2020). Bericht des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie nach § 63 Absatz 2a EnWG

<sup>22</sup> BDEW (2021). Rollenmodell für die Marktkommunikation im deutschen Energiemarkt. Arbeitsgrundlagen Marktkommunikation, at p. 11.

邦网络管理局 AZ.BK6-20-059 文件，每个可控资源对应一个调度管理商。其次，它允许输电系统运营商和配电系统运营商在对传统电厂再调度之后，也可以对可再生能源和热电联产厂进行再调度。但是，修订后的《电网加速扩建法》并没有挖掘中小型负荷的灵活性潜力。

“再调度 2.0”包括两个补偿模型：a) 预测模型。电网运营商无需发电商的特定信息即可预测电厂运行。根据预测计算因并网电量减少而需要进行的补偿量；b) 计划价值模型，发电商或调度管理商需要传输发电计划数据，做为补偿量计算的基础。在这两种情况下，为了计算补偿量，风能和光伏发电商必须向电网运营商传输气象数据<sup>23</sup>。

可再生能源电厂可以参与再调度、“调度管理商”角色的引入以及“再调度 2.0”中的数据传输要求，为虚拟电厂运营商创造了新的商机。

## 2.5 《可再生能源法》

2012 年修订的《可再生能源法》(EEG) 引入了可再生能源电力“直接销售”的做法，作为固定上网电价 (FiT) 的可选替代方案。根据该法的规定，“直接销售”意味着，可再生能源发电机组可以在批发市场直接售电。可再生能源电厂可获得市场上的售价以及“市场溢价”，即所谓的“应用价值”<sup>24</sup>与每月日前市场平均价格之间的差价。2014 年的《可再生能源法》修正案规定，所有 100kW 以上的新增可再生能源机组都必须进行直接销售。此外，还增加了沼气发电享有容量灵活性补贴的条款，例如，新增的灵活性沼气发电容量每年可获得高达 65 欧元/kW 的灵活性补贴（2021《可再生能源法》第 50 a 条）。直接销售以及灵活性补贴鼓励了 100kW 以上的中型可再生能源发电机组接入到虚拟电厂，在批发市场上售电。因此，接入虚拟电厂的可再生能源发电商数量增加，极大地改善了德国虚拟电厂的状况，也使虚拟电厂能够发挥关键的作用。

<sup>23</sup> Nextkraftwerke (n.d.) Redispatch 2.0 <https://www.next-kraftwerke.de/virtuelles-kraftwerk/redispatch-2-0>

<sup>24</sup> 自 2017 年起，装机容量在 750kW 及以上的陆上新建太阳能和风能电厂以及装机容量在 150kW 及以上的生物质电厂都要参加拍卖。所以该“应用价值”与拍卖价挂钩

<sup>25</sup> Antoni, J., et al. (2020). Netzstabilität im Stromsystem aus institutionenökonomischer und rechtlicher Perspektive – Einführung in die Problemstellung und systematischer Überblick, at p. 31.

<sup>26</sup> Poplavskayaa, K. and Vries, L. (2020). Aggregators today and tomorrow: from intermediaries to local orchestrators? in Sioshansi, F. (eds) Behind and Beyond the Meter Digitalization, Aggregation, Optimization, Monetization. Academic Press, at p. 106.

## 2.6 聚合商相关法规

随着可再生能源在电力系统中的比例不断提高，欧洲和德国都制定了鼓励虚拟电厂发展的法规。虽然虚拟电厂的概念尚未得到法律界定，但它与“聚合商”的法律定义大同小异<sup>25</sup>。

在欧盟层面，“聚合商”一词于 2012 年首次在法律上定义为负荷管理服务提供商（2012/27/EU，第 2 条第 45 款）。2019 年《全欧人人享有清洁能源一揽子计划》对聚合商发展起了积极的推动作用<sup>26</sup>。涉及欧洲内部电力市场共同规则的欧盟法规（EU/2019/943）和指令（EU/2019/944）更准确地定义了聚合一词的概念<sup>27</sup>，并阐明了聚合商参与能源市场的不同机会。聚合商可以参与所有平衡市场，并提供相应的服务（2019/943，第 6 和 7 条）。指令第 17 条（2019/944）还要求成员国确保输电系统运营商和配电系统运营商在采购辅助服务时，对待需求响应的聚合商不得进行歧视。

德国目前的聚合商法规为虚拟电厂提供了充分的自由，虚拟电厂可以根据机组的数量和类型（可再生能源电厂<sup>28</sup>、灵活性负荷、储能等）确定其资源池中的分布式能源资源，从而提供各种平衡服务。在德国，聚合商有权将来自多个平衡区的资源捆绑在一个聚合池中<sup>29</sup>。这使得聚合商能够在降低交易成本的同时，大幅度地扩大聚合池的规模并且提高盈利水平。此外，聚合商还可以活跃在电力批发市场和平衡市场中。然而，非公用事业公司的独立虚拟电厂<sup>30</sup>，有义务将其聚合池内供用电情况及时通知平衡责任方，并获得平衡责任方的明确批准，这对于独立虚拟电厂发展是个障碍，因为：a) 因为聚合商在聚合平衡责任方管辖区内的分布式能源资源时会导致其平衡计划发生偏离，从而增加责任方调整不平衡的成本<sup>31</sup>；b) 平衡责任方（通常是电力公司）可能也发展虚拟电厂，是聚合商的潜在竞争对手。独立聚合商发展另一个障碍是独立聚合商、平衡责任方和消费者/生产者之间总体上缺乏标准化程序，比如补偿机制、测量

<sup>27</sup> 聚合是指“一个自然人或法人将多个客户负荷或发电量组合在一起，以便在任何电力市场上出售、购买或拍卖的功能”

<sup>28</sup> 可再生能源机组主要是生物质，因为间歇性可再生能源（如光伏和风能）参与平衡市场，尽管没有被禁止，但仍处于试验阶段（Poplavskaya 和 Vries, 2019）

<sup>29</sup> Poplavskaya and Vries (2019)

<sup>30</sup> EU 2019/944

<sup>31</sup> Poplavskayaa, K. and Vries, L. (2020)

和核证基准方法、数据交换等，这导致了交易成本较高<sup>32</sup>。

2016年，德国联邦网络局（BNetzA）提出了一个“聚合商模式”，并启动了一个利益攸关方进程，与相关市场主体共同对这个模式进行讨论。这一过程促使一项行业指导方针（BNetzA AZ.BK6-17-046）的出台，其中包括将“聚合商”定义为市场参与者的角色。此外，2021年7月，德国政府对聚合商的角色、市场机会和义务进行了法律界定<sup>33</sup>。

## 2.7 居民提供灵活性的法律基础和先决条件

### 储能

在德国，《能源经济法》将家庭（及其灵活性资源）归类为终端用户，因此，在从电网中购电和储电以及向电网供电时，家庭有义务支付不同的费用：从电网购电和储电时，居民需支付税费<sup>34</sup>；而向电网供电则需支付特许费、电网使用费和电力税。专门用于储电并向电网供电的储能设备可免税和电网使用费<sup>35</sup>。由于家用储能系

统通常用于优化用电，大多没有资格获得这一减免<sup>36</sup>。目前，家用储能能在储电和放电时都要付费的双重负担使得德国家庭即便在安装了智能电表的情况下，也无法让其家用储能设施或电池电动车通过提供灵活性合理获利。

### 智能电表

智能电表能够在消费者、生产者、产消者、供应商和智能电网之间进行数据传输，从而实现供电和网络的智能管理和自动化。因此，智能电表是挖掘家庭灵活性潜力的关键基础设施。在德国，输电系统运营商有义务为用电量在6000至10万kWh/年之间的终端用户安装智能电表（德国联邦经济与能源部，2020年）。由于德国有严格的数据保护法规，并且使用智能电表需要开发安全的数据传输技术，因此该政策从2020年初才启动，并计划在2032年完成目标。《可再生能源法》2021年修订版要求，容量超过7kW的光伏机组安装智能电表以计量其向电网的输电量，及超过25kW的光伏机组必须能够实现远程控制。这些新规定预计将加速智能电表在德国的推广。

<sup>32</sup> Wohlfarth and Klobasa (2019)

<sup>33</sup>2021年7月16日《在能源法中落实欧盟要求和管理纯氢网络的法案》。

<sup>34</sup> 以前也要缴纳可再生能源附加费，现在被取消了。

<sup>35</sup> 根据《能源经济法》和《电力税法》（StromStG）

<sup>36</sup> Schönfisch M., et al. (2020). Aggregation von Haushalten in (regionalen) virtuellen Kraftwerken

### 3 德国虚拟电厂的总体发展与案例研究

在德国，虚拟电厂已经完全商业化。由于《可再生能源法》引入了可再生能源发电直接销售的要求，德国虚拟电厂运营商的一项主要业务是在批发市场销售 100kW 以上中型可再生能源电厂生产的电量，在日前市场优化其售电，使这些电厂成为虚拟电厂资源。此外，虚拟电厂还有利于如生物质发电和水电这些灵活性较高的机组从日间市场和平衡市场中获利。除了可再生能源电厂外，燃气热电联产、电池储能、应急发电机和需求响应等都可以作为虚拟电厂资源<sup>37</sup>。

根据运营商不同，德国的虚拟电厂大致可分为三种类型：

- 独立虚拟电厂运营商，这类运营商不隶属于传统客户的电力供应商。他们也可以作为电力供应商（目前主要是装机在 100kW 以上的大客户）成为平衡责任方。
- 大型电力公司（跨国、地区和市级企业）将自己的发电资源以及可能的负荷用户和发电机组聚合到虚拟电厂当中。作为电力公司，它们也是平衡责任方；

- 新型市场参与者，特别是小规模分布式能源资源的制造商，它们主要将其用户的资源聚合到虚拟电厂当中。

表 2 列举了以上三类虚拟电厂的组成特征及业务类型。由于二级备用和三级备用服务的价格近年来有所下降，因此虚拟电厂中主要由热电联产（天然气和沼气/生物质）、非热电联产沼气/生物质以及储能等<sup>38</sup>可以轻松提供这些服务的设施承担二级备用和三级备用。

表 2：德国虚拟电厂案例

特征	Next Kraftwerke	e2m	Entelios	GETEC Energie	MVV Energie	BayWa.re	Sonnen
能源资源组合	发电侧、需求侧，储能	发电侧、需求侧，储能	需求侧	发电侧、需求侧	发电侧、需求侧	发电侧	储能
电厂规模	9016MW (2021 年)	3.260MW (2021 年)	>1GW (2018 年)	3000MW 以上	500MW (2015 年)	3.300MW (2019 年)	
资源管理与优化	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
平衡服务	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
直接销售	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
电力公司白标解决方案	✓	✓	✓				
需求响应（商业和工业）	✓	✓	✓	✓	✓		✓
需求响应（家庭）							✓
向消费者/产消者供电					✓	✓	✓

来源：根据德国能源经济研究中心 2019 数据<sup>39</sup>[1]，Poplavskaya 和 de Vries (2020) 编译



<sup>37</sup> Ninomiya et al. (2019)

<sup>38</sup> ibid

<sup>39</sup> FFE (Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH) (2019). Überblick über aktive Aggregatoren in Deutschland.

### 3.1 独立聚合商模式的虚拟电厂

Next Kraftwerke (NEXT) 成立于 2009 年, 是欧洲建立最早、规模最大的虚拟电厂之一, 总共聚合 11049 台机组, 联网容量为 9016MW<sup>40</sup>。其中包括沼气电厂、热电联产厂、水电、光伏、电池储能、电转气、电动汽车、参与需求侧响应的工业负荷。Next 公司的聚合服务由他们的控制系统完成, 使用基于大数据 (例如电厂运行情况、天气数据、市场价格信号、电网数据) 的智能算法, 使可再生能源发电机组和工业用户更加灵活, 对价格信号的响应更快。该系统既可以允许 NEXT 公司、单个资源、输电系统运营商和电力交易所之间进行通信; 又能为单独资源定制计划并自动调整。

**NEXT 与灵活性有关的主要活动包括:**

- **根据日间市场信号进行调整**

日间市场是保持整体电力系统平衡必不可少的工具。NEXT 公司根据电力市场波动调整其资源池中的可调度能源发电机组 (例如沼气厂) 和负荷的出力 and 需求, 为这些客户带来收入, 同时为系统平衡做出贡献。以接入 NEXT 公司的沼气电厂为例, NEXT Box 系统 (将电厂和远程控制中心连接起来的无线双向远程传输系统) 对其发电量按照 15 分钟的间隔进行调控, 根据电力批发市场的价格波动每天上下调整 20 次, 以优化发电收入<sup>41</sup>。

为鼓励工商业客户转移负荷, NEXT 公司按照日间市场电价的变化, 向工商业客户提供不同类型的电价 (电价构成取决于使用时间、用户调整生产计划的灵活性等) 信息。客户可以根据 NEXT 公司发出的价格信号自行决定执行计划, 也可以完全由 NEXT 公司进行远程自动调控<sup>42</sup>。

- **利用聚合的能源资源提供平衡服务**

NEXT 公司活跃在所有三个平衡市场。截至 2021 年中, NEXT 公司已累计拥有 2780MW 的虚拟电厂资源来提供平衡服务 (75MW 一级备用、983MW 二级备用、1762MW 三级备用)<sup>43</sup>。其客户通过参与平衡市场获得收入。NEXT 公司从收入中获得提成。

- **支持可中断负荷的销售**

NEXT 公司还通过提供代售服务和资格预审服务, 支持具有连续性负荷的工业和服务部门用户销售其可中断负荷。

- **帮助平衡责任方降低平衡区内发生偏差的风险, 并避免由此产生的相关费用。**

- 支持平衡责任方对平衡区进行管理, 如季度平衡区管理、能源数据管理、与输电系

统运营商之间的通信。NEXT 公司可以进行完全平衡管理或部分平衡管理。

- 支持平衡责任方进行能源资源管理, 通过优化发电量和用电量预测, 继而参与日间市场的电力交易, 最终解决预测和次日实际计划之间的偏差。
- 支持电厂运营商在“再调度 2.0”模式下提供灵活性

在“再调度 2.0”模式下, 各种数据需要传输给电网运营商, 用于预测和补偿计算。NEXT 公司作为电厂运营商的调度管理商, 与电厂运营商签订直接销售合同, 并将所需数据传送给系统运营商。

- **通过网络提供软件服务**

除了运行虚拟电厂, NEXT 公司还提供可定制虚拟电厂 (NEMOCS) 服务, 为能源公司建立自己的虚拟电厂提供软件解决方案。此外, NEXT 公司还提供电力系统平衡区管理软件 (NEXTRA)。

另外, 电动汽车 (EV) 的快速增长为虚拟电厂创造了新的机会。NEXT 公司最近加入了旨在使汉堡港电动自动导引车 (AGV) 能够利用其电池提供平衡服务的项目。NEXT 公司开发了电动自动导引车队平衡服务资格预审的概念, 使其充电系统可以交易控制备用电力。此外, 该项目还开发了预测算法, 使电动自动导引车在提供控平衡服务的同时确保完成物流作业<sup>44</sup>。

### 3.2 电力公司模式的虚拟电厂

德国有五家主要的能源电力公司, 号称“五大” (E. on SE、Uniper、EnBW AG、RWE AG、Vattenfall GmbH), 这五家公司多属于在发电方面占据主导地位的跨国公司, 旗下拥有多家区域性配电系统运营商和供电子公司。此外, 德国还有约 900 家中小型由市政所有的市级电力公司 (所谓的 Stadtwerke), 提供包括供能在内的当地基本公共服务。上文介绍的独立聚合商模式的虚拟电厂往往拥有信息和通信技术知识或能源管理技术, 但没有自己的分布式能源资源。相比之下, 电力公司模式的虚拟电厂拥有自己的发电资源。

<sup>40</sup> <https://www.next-kraftwerke.com/company>

<sup>41</sup> Lehbruck, L. et al. (2020). Aggregation of front- and behind-the-meter: the evolving VPP business model. in Sioshansi, F. (eds) Behind and Beyond the Meter Digitalization, Aggregation, Optimization, Monetization. Academic Press

<sup>42</sup> <https://www.next-kraftwerke.de/virtuelles-kraftwerk/stromverbraucher>

<sup>43</sup> NRW Invest (2021). Joint Venture Toshiba ESS - Next Kraftwerke

<sup>44</sup> Lehbruck, et al. (2020).

以热电联产厂提供灵活性为例。电力公司给热电联产厂安装蓄热罐，并且与大型电锅炉联合使用，当市场电价低迷或出现负电价时，启动电锅炉，实现热电解耦，不以热定电，进一步提高其灵活性。该技术方案使热电联产厂可以在日前市场上实现最大收益，优化其日间交易，并在平衡市场上提供服务。此外，作为平衡责任方，电力公司可以利用热电联产厂的灵活性优化平衡区。储热实现热电解耦，提高了电源侧的灵活性以满足用电客户需求，因此，电力公司无需在日间市场购电或售电，或为平衡电力付费<sup>45</sup>。

作为德国“五大”电力集团之一，E.ON 在德国和英国开发的虚拟电厂业务涉及出售 150 家电厂（600MW）的电力和灵活性<sup>46</sup>。E.ON 为其所拥有的包括发电机组（热电联产、燃气和蒸汽涡轮机、应急发电机、风力电厂）、能源用户（工业负荷、水泵、热电联产）和储能设施（如电池）资源等客户提供信息通信技术设备，以便远程管理电厂，优化电厂的收入，并在不对其核心业务产生负面影响的情况下参与平衡市场<sup>47</sup>。除发电侧资源外，德国的电力公司开始探索需求侧负荷通过虚拟电厂发挥其灵活性的潜力。E.ON 与德国最大的扁钢生产商蒂森克虏伯公司合作，将蒂森克虏伯公司一个用于绿氢生产的电解水工厂纳入其虚拟电厂，该厂可快速调节绿氢产能，以提供灵活性。该厂作为 E.ON 的虚拟电厂资源在平衡市场上提供一级备用（FCR）<sup>48</sup>。大型电解水工厂可以利用富余的可再生能源生产绿氢，绿氢能支持能源密集型产业生产过程的脱碳，并在未来提供季节性平衡服务<sup>49</sup>。这样，绿氢以为电力系统的稳定做出贡献。同时，绿氢生产厂也通过参与平衡市场获得了额外的收入，提高了绿氢厂的经济可行性。

德国伍珀塔尔市政电力公司（WSW）的虚拟电厂项目<sup>50</sup>侧重居民家庭的灵活性。WSW 为 500 户家庭安装了智能电表，记录每分钟的用电概况。WSW 鼓励参与项目的家庭在可再生能源发电较多的时段用电。根据日前市场、当地能源供应情况和电网稳定性这三个因素，系统会对家庭用电做出评估和用电建议，这些家庭每两小时会收到一次用电情况的提示，他们可以以此为依据做出响应<sup>51</sup>。参与项目的 5 个“最佳”即响应次数最多的消费者会获

得一年免费用电的奖励。WSW 还与当地大学合作，评估了此示范项目对技术和社会经济产生的影响。结果显示，三分之一项目参与者在一定程度上根据提示做出了需求响应，调整了 23% 的负荷，实现削峰填谷<sup>52</sup>。这表明，利用相对简单的技术手段和激励机制，可以改善局部电网平衡状况。

### 3.3 新型市场参与者模式的虚拟电厂

由于分布式能源资源在提供灵活性方面的潜力，家庭电池储能设施、热泵、电池电动汽车（BEV）等分布式能源供应商通过聚合其客户的分布式能源资源，推出虚拟电厂服务。

Sonnen 是德国家用电池供应商。Sonnen 为使用光伏系统和电池的业主建群，形成虚拟能源池，分享自发电力的情况。群成员间通过基于区块链的集中式软件平台和智能电表实现虚拟、智能连接，把多余的电力输入能源池，或从能源池中获取需要的电力。Sonnen 的业主群就属于新型市场参与者模式的虚拟电厂，用 Sonnen 电池提供平衡服务的成员，均可根据合同获得一定量的免费电量。2018 年，规模为 1MW 的 Sonnen 虚拟电厂通过德国最大输电系统运营商 TenneT 的资格预审，参与平衡市场交易。Sonnen 的目标是在不久的将来将其参与平衡市场的规模扩大到 100MW<sup>53</sup>。此外，在与 TenneT 合作中，在风能供应过剩时，Sonnen 通过储能服务，成功地实现德国范围内的再调度。

热泵也是一种灵活性资源，可以成为新型市场参与模式的虚拟电厂。因其高效率和碳减排潜力，热泵在德国 2045 年实现气候中和目标的大背景下，将会大幅增长。Prognos et al.（2021）分析估计，德国在 2030 年和 2045 年分别需要安装 600 万台和 1400 万台热泵<sup>54</sup>。由于热泵可以在不影响舒适度的情况下将单个家庭的需求峰值降低 50%，而具有显著的负荷转移潜力。德国领先的供暖和制冷解决方案提供商 Viessmann 和 TenneT 最近启动了 ViFlex 试点项目，测试通过利用热泵的潜在灵活

<sup>45</sup> Ninomiya et al.（2019）

<sup>46</sup> E.ON（2020）. E.ON and thyssenkrupp bring hydrogen production on the electricity market. <https://www.eon.com/en/about-us/media/press-release/2020/2020-06-30-e-on-and-thyssenkrupp-bring-hydrogen-production-on-the-electricity-market.html>.

<sup>47</sup> E.ON（2021）. Virtuelle Kraftwerke. <https://www.eon.de/de/gk/energieloesungen/energievermarktung/virtuelle-kraftwerke.html>.

<sup>48</sup> E.ON（2020）.

<sup>49</sup> Prognos et al. 2021

<sup>50</sup> WSW（2021）. VPP Forschungsprojekt “WSW: Wuppertal spart Watt”. <https://www.wsw-online.de/wuppertalspartwatt/>.

<sup>51</sup> Hobert, A., et al.（2021）. Analyse von Flexibilitätsoptionen in urbanen Quartieren. ew-Magazin 1/2021, pp. 18–21.

<sup>52</sup> Hobert, A., et al.（2021）.

<sup>53</sup> Enkhardt, S.（2018）. Sonnen to provide primary balancing power to German grid from networked home storage <https://www.pv-magazine.com/2018/12/05/sonnen-to-provide-primary-balancing-power-to-german-grid-from-networked-home-storage/>.

<sup>54</sup> Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut（2021）.

性，实现电网阻塞管理，形成由热泵及其储热罐和储电装置组成的虚拟电厂。Viessmann 通过他们的应用程序，

在将用户侧的热泵与 Tennet 的电网管理要求同步的同时，最大限度提高客户的舒适度和供热效率。



## 4 结论

在德国，虚拟电厂通过聚合分布式能源资源，根据电价波动调节其出力和需求，并在平衡市场为输电系统运营商提供平衡服务，为电力系统的灵活性提升做出了贡献。在“再调度 2.0”背景下，虚拟电厂运营商也会作为调度管理商支持可再生能源发电提供灵活性，解决电网阻塞的问题。随着德国可再生能源接入电网比例逐步提高，为了确保电网安全稳定，德国优化中低压电网供需的以小规模资源为主聚合而成的虚拟电厂试点也已经启动。

### 4.1 虚拟电厂运行的关键要素

#### 技术要求

虚拟电厂的运行需要先进的信息与通信技术（ICT）软件平台聚合虚拟电厂里大量的能源资源。该软件平台依靠先进的预测算法，制定优化的调度计划，可以实现包括采集数据（如电厂运行情况、气象数据、市场价格信号、电网情况），安全快速地在虚拟电厂、单个资源、输电系统运营商和电力市场间进行通信，自动调节分布式能源资源参与电力市场和为电网阻塞提供服务等功能。此外，还需要智能电表、远程控制和自动化系统等对应的硬件设备。

#### 分布式能源资源

虚拟电厂成功运行的关键要素之一是多样化的虚拟电厂能源资源。建立包括需求、供应和储能在内的多样化分布式能源资源池，并在不同的市场上探索商机是增加虚拟电厂收入的重要策略。在德国，生物质/沼气发电厂和水电因高灵活性成为虚拟电厂中的优质资源。像电池电动汽车、热泵、家用储能设施、屋顶光伏等小规模分布式能源资源成为虚拟电厂资源池中的后起之秀，将为电力系统提供更大的灵活性。然而，由于智能电表推动缓慢和监管障碍等因素，它们的潜力尚未挖掘出来。此外，可以提供短期和长期灵活性服务的绿氢电解厂也将成为中压能源资源。在认识到这些后起之秀的潜力后，德国的虚拟电厂和电网运营商开展了一系列试点。在试点中，这些分布式能源资源不仅参与电力市场交易，而且为解决电网阻塞和配电网级的平衡作出贡献。

参与虚拟电厂可以通过电价机制为需求侧节省成本或让分布式能源资源获得合理且明确的经济激励，为多样化的分布式资源参与虚拟电厂创造积极性，这是虚拟电厂

虚拟电厂还为德国可再生能源在电力市场的直接销售提供了服务，这也是德国虚拟电厂的主要业务。

通过提供灵活性服务，虚拟电厂可以促进可再生能源更大规模的发展并提高电气化水平。同时，虚拟电厂提供的灵活性可以减少德国电力系统基础设施领域的投资，减少新发电机组的建设，避免由于用电峰值增加导致的电网扩容。此外，虚拟电厂还为分布式能源资源业主增加了额外的收入。

成功运行的另一关键要素。此外，与虚拟电厂相关的信息与知识分享和意识提升也很重要。

### 4.2 虚拟电厂发展的有利条件

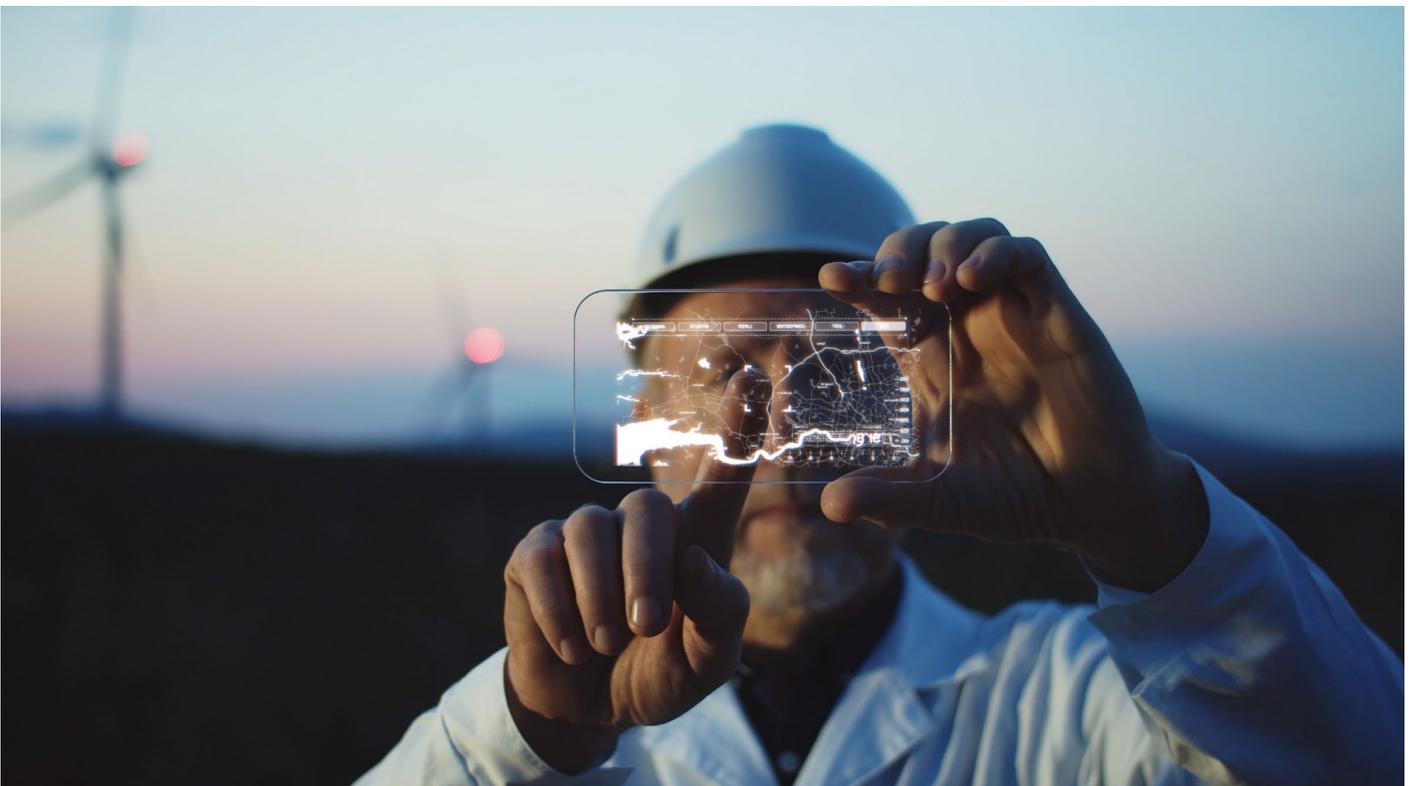
德国的电力市场和政策框架为虚拟电厂提供灵活性服务创造了如下有利条件：

- 德国政府要求可再生能源电厂，特别是中型可再生能源电厂参与市场交易。由于中型电厂单独参与电力市场交易的边际成本较高，虚拟电厂可以为此提供服务。此外，发电、输电、配电、售电分开为虚拟电厂建立了积极的参与环境。
- 德国的日间电力市场允许接近实时的电力交易，订单到交割之间的时间缩短产生了对在短时间内可获得的快速可控灵活性资源的更多需求，而这类需求可以由虚拟电厂通过其资源组合提供。
- 根据平衡机制，输电系统运营商需要从平衡市场购买平衡能量，虚拟电厂可以通过其聚合的资源为平衡市场提供灵活性。此外，统一的平衡市场让包括虚拟电厂在内的平衡服务供应商，可以向所有输电系统运营商提供平衡服务，增加了虚拟电厂的商机。
- 德国能源相关法律从法律上规定了聚合商的市场角色、机会和义务。为虚拟电厂聚合能源资源提供了法律保障。
- 欧洲和德国的法规都确保虚拟电厂能够进入批发和平衡市场并进行交易。投标的最小单位或进入市场的资格条件对虚拟电厂的发展前景具有决定性作用。如果对进入市场的规模要求过高或资格预审要求过

严，或将某类分布式能源资源排除在外，将限制虚拟电厂参与市场交易的可能性。在德国，输电系统运营商认可以分布式能源资源聚合的形式提供平衡服务；虚拟电厂有足够的自由确定其资源组合，包括分布式能源资源的数量和类型（由间歇性可再生能源发电机组提供的平衡服务，如光伏和风力发电，仍处于测试阶段）；最小投标单位为 1MW，并会进一步减小。

### 4.3 德国虚拟电厂进一步发展的建议

- 间歇性可再生能源（由于间歇性可再生能源特别是太阳能和风能的波动性和不可预测性，目前在资源聚合池中占比很少），和其它小规模能源资源（例如，电池电动汽车、热泵等）应进一步扩大在平衡市场中的参与。
- 针对小规模能源资源（如电池电动汽车、热泵等）为电网运营商提供灵活性，设计额外的市场机制。目前，配电系统运营商或输电系统运营商与小规模能源资源的所有者之间互不了解，建立小范围**区域灵活性市场**，使之成为小规模能源资源和配电系统运营商网络运营商的独立交易平台，为虚拟电厂运营商提供新的发展机会，在这个市场中捆绑小规模资源进行投标，而不仅仅是要求配电系统运营商给提供灵活性的消费者降低资费（目前讨论的另一方案）。
- 免除家用储能提供灵活性的**税费和过网费等双重经济负担**。
- 在独立的聚合商、平衡责任方和电力用户之间制定**标准化的程序**，以解决补偿机制、测量和核证基准方法、数据交换和各自角色、责任、权利等问题。



网站



微信

