



Federal Ministry  
for Economic Affairs  
and Climate Action



中德能源与能效合作

Energiepartnerschaft

DEUTSCHLAND - CHINA

中德能源转型研究项目

# 可再生能源对辅助服务及系统稳定性的贡献

德国经验回顾



**giz** Deutsche Gesellschaft  
für Internationale  
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

**dena**  
German Energy Agency

# 版本说明

《可再生能源对辅助服务及系统稳定性的贡献》是德国国际合作机构（GIZ）在中德能源转型研究项目框架下发布的报告。中德能源转型研究项目支持中德两国能源领域政府智库、研究机构之间的交流，加强中德能源转型的科研合作，分享德国能源转型的最佳实践经验。项目旨在通过加强能源转型智库之间的国际合作与互利政策研究和建模，推动以低碳为导向的能源政策，帮助中国构建更有效的低碳能源系统。该项目是中德能源与能效合作伙伴这一中德能源领域政府交流平台和机制的组成部分，受德国联邦经济和气候保护部（BMWK）委托，中国国家能源局（NEA）作为中方政府支持部门进行整体指导和协调。德国国际合作机构（GIZ）作为德方牵头实施机构，与德国能源署（dena）和 Agora 能源转型论坛联合负责项目实施。电力规划设计总院是该项目的中方牵头实施单位。

## 发行方：

中德能源转型研究项目  
项目为中德能源与能效合作伙伴的重要组成部分，  
受德国联邦经济和气候保护部（BMWK）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

## 项目负责人：

克里斯托弗·博特（Christoph Both），德国国际合作机构 (GIZ)

## 作者：

德国能源署（Dena）：  
卡捷琳娜·西莫（Katerina Simou）  
弗里德里克·泊杰（Friederike Berger）  
安娜斯塔西亚·科姆莎科娃（Anastasiia Komshakova）

挪威船级社（DNV）：  
马蒂亚斯·穆勒·米恩纳克（Matthias Müller Mienack）  
康斯坦丁诺斯·卡拉曼利斯（Konstantinos Karamanlis）

## 参编：

莱亚-瓦莱斯卡·吉贝尔（Lea-Valeska Giebel），  
德国能源署（Dena）

## 版面设计：

edelman.ergo (on commission of BMWK)

© 北京，2022 年 12 月

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.....	5
<b>1 辅助服务和系统稳定性：基本原则和定义 .....</b>	<b>6</b>
1.1 什么是辅助服务？ .....	6
1.2 稳定的重要性 .....	7
1.3 电网连接的协调性要求 .....	8
<b>2 回顾——德国的辅助服务 .....</b>	<b>10</b>
2.1 历史背景 .....	10
2.2 参与方概况和监管环境 .....	11
<b>3 采购选择和标准——监管决策.....</b>	<b>14</b>
3.1 监管背景 .....	14
3.2 辅助服务采购的不同阶段 .....	14
3.3 技术电网连接指导方针中的规范 .....	15
3.4 市场化采购.....	16
3.5 辅助服务的成本 .....	17
3.6 未来的采购——利益相关方的意见.....	17
3.7 未决问题——利益相关方的意见 .....	19
<b>4 展望未来——技术发展.....</b>	<b>21</b>
4.1 惯量.....	21
4.2 快速频率响应（FFR） .....	21
4.3 灵活性 .....	22
4.4 电压控制 .....	22
4.5 频率控制：50.2 赫兹问题——为什么必须对要求做出前瞻性的调整.....	22
4.6 未来的考量——利益相关方的意见.....	23
<b>5 结论.....</b>	<b>25</b>

## 编辑寄语

随着德国能源转型的推进，分布式以及通过逆变器接入的电厂在系统中所占比重与日俱增。为了确保系统运营的安全性，未来必须要通过可再生能源、储能以及灵活的电力用户提供辅助服务。不少可再生能源电厂已经具备了提供大量辅助服务的技术能力，或者可以配备相应的能力。这种发展，再加上数字化的推进以及创新技术的使用，将从根本上改变电力系统。

电网运营商负责确保电网运营的高效性、安全性和可靠性；2019年，平均电力中断时间为12.20分钟，<sup>1</sup>对德国电网运营商而言，尽管在电网运营中遇到的挑战越来越多，但“维持业务正常运行”依然是重中之重。事实上，未来的能源系统也会变得更加一体化——电、气、供暖和氢能网络之间均有接口——协调工作将变得更加复杂。

当然，电网运营商应该有能力防止电压、频率及电流过限等情况的出现，并有能力避免断电的发生。当出现电力中断或者干扰的情况后，需要有能力立即修复电网。一种叫“辅助服务”的手段可以让电网运营商满足以上所有要求。

提供辅助服务的事宜已经在德国被讨论多年。为了确保电网能够安全、可靠的运行，不论是输电网运营商还是配电网运营商，都必须根据电压水平提供各种辅助服务。以前，这种服务都是由大型热电厂所提供。而大型热电厂将逐步退出电力系统，或是降低运行频率。尽管它们仍然能够提供单项辅助服务，例如在停机状态下也能够提供黑启动能力，但未来，此项责任主要还是要由可再生能源（RE）电厂承担。随着大多数可再生能源电厂都已接入配电网，未来，配电网中越来越多的服务将由电厂提供。

如果再叠加考虑电动汽车及其他分布式容量（电池储能、热泵）的话，这一点会变得更为显著，配电网运营商也将承担起更大的系统责任。未来的辅助服务设计中将有巨大的回旋余地，必须加以合理利用。这也适用于尚未直接归入典型辅助服务范畴的领域。在此方面，最重要的范例可能就是惯量问题。

关于辅助服务进一步发展的讨论仍是一项重要议题，尤其是考虑到负荷流量大幅波动、德国境内电力输送距离不断加大以及传统发电厂运营时间减少的背景。这从根本上改变了对辅助服务的需求以及提供方式。

必须对数量庞大的分布式发电厂的运营进行统筹协调，才能满足系统要求。此外，跨电网运营也将变得愈发重要，因为越来越多的潜在辅助服务提供商将与配电网连接。因此，当下必须要为可再生能源电厂提供各种技术能力奠定基础，以确保未来系统运营的安全性和稳定性。

本报告可以为中德两国的业内人士未来开展双边交流提供基础。作为拥有世界上最大的可再生能源装机容量的国家，中国在未来的某个时刻需要积极利用辅助服务，才能顺利实现可再生能源的整合。另一方面，德国辅助服务的发展也并非尽善尽美；因此，深入了解中国的相应经验，后期也可能让德国获益匪浅。

谨启

科琳娜·博林蒂纳努

德国能源署，中德能源转型研究项目，项目主管

克里斯托弗·博特

德国国际合作机构，中德能源转型研究项目，高级顾问

## 执行摘要

对任何高比例可再生能源的系统而言，如何确保电网的安全性和稳定性都是一项始终存在的挑战。目前，很多此类服务本质上都是由传统电厂提供的，而这通常也是最具成本效益的方式。但在短期内，传统电厂的渗透率仍将持续下降，尤其是在德国。必须弥合这一缺口并对系统进行重新设计，才能确保未来有充足的辅助服务供应商，能够以一种有经济性的方式，满足对辅助服务的需求。

本报告概述了德国辅助服务发展的现状。其中总结了有助于电网可持续运营的辅助服务的关键定义，即：

- 运行管理
- 频率控制
- 电压控制
- 供电恢复

此外，报告还在更广泛的范围内总结了参与方的情况，概括了可再生能源电厂要提供必要的辅助服务，就必须满足的相关技术条例。目前，德国在国家层面上针对辅助服务所推行的监管框架，基本上是在整个欧洲层面上确立的。

报告还描述了单项辅助服务的不同采购选择和标准。通过何种方式（有约束力的并网指导方针、市场或电网运营商）才是最有效提供辅助

服务的方式只能根据参与方的结构和市场设计具体情况具体分析。

未来关于辅助服务发展的讨论要聚焦于哪些方面，也是一个关键问题。本文研究的重点是对频率控制、灵活性、惯量以及电压控制的当前讨论及长期构想。其中也讨论了在发展过程中发起临时监管调整的经验。核心要点是一定要正确估计及预判系统的变化，以使电厂能够及时配备适当的能力，适应相关流程。

为了让研究更加深入，本报告还纳入了与此领域相关参与方进行的访谈，受访者介绍了德国可再生能源增长及辅助服务发展的相关经验以及他们对这种经验的实际洞察。这些访谈也揭示了眼下必须进一步改进监管制度的需求。受访的参与方包括德国电网运营商、监管机构、发电厂运营商以及行业代表，也有来自欧洲其他国家的输电系统运营商和监管当局。访谈由顾问机构挪威船级社（DNV）完成。

总而言之，本报告旨在介绍德国辅助服务领域的过去、当前发展状况以及未来需要采取的行动。这一主题仍在不断发展演变，所以可以将本报告视作一张瞬时快照。本报告旨在向该领域的国家层面及国际层面的业内人士介绍德国辅助服务的演变过程以及与此相关的讨论要点。



# 1 辅助服务和系统稳定性：基本原则和定义

## 1.1 什么是辅助服务？

能源政策的最重要目标是确保可靠的能源供应。因此，电力系统必须能够随时满足电力用户的用电需求，同时确保电力系统的安全运行。

电网运营的参与者数量众多、关系复杂，因此系统可能出现偏差和错误，例如负荷或供应波动、设备故障以及发电中断。为了避免系统出

现这些错误和故障，需要不间断地提供将频率和电压维持在可接受数值范围内的服务，或者在发生偏差或故障后，将这些数值恢复到正常范围的服务。保证这种技术过程的服务被称为辅助服务。<sup>2</sup>

表 1：主要辅助服务产品

辅助服务：正常运行和正常运行波动			
频率控制	电压控制	系统恢复	运行管理
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 控制功率               <ul style="list-style-type: none"> <li>■ mFRR</li> <li>■ aFRR</li> <li>■ FCR</li> <li>■ 可中断负荷</li> <li>■ 快速频率备用*</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 直接电压控制</li> <li>■ 切换操作</li> <li>■ 变压器分接头</li> <li>■ 无功功率控制               <ul style="list-style-type: none"> <li>■ (准) 静止**</li> </ul> </li> <li>■ 静止同步补偿装置或者移相器</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 黑启动能力**               <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 能源备用</li> <li>■ 孤岛运行能力**</li> </ul> </li> <li>■ 转换到辅助负荷</li> <li>■ 协调</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 信息通信技术和数据交换</li> <li>■ 运行规划</li> <li>■ 网络安全管理</li> <li>■ 调整运行模式以适应无功功率控制               <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 系统自动化 (例如联锁跳闸)</li> </ul> </li> </ul>
辅助服务产品		* 作为新的辅助服务产品或者对一级控制备用的更改 ** 不受频率约束的辅助服务	

来源：德国能源署 (2020)

在欧洲的法律体系中，根据“关于内部电力市场的共同规则”的 2019/944 号指令条款 2 (48)，“辅助服务”这一术语指的是输电或配电系统运行所必需的一项服务，包括平衡及非频率辅助服务。尽管此指令中并未明确提到阻塞管理，但它依然是输电系统运营商 (TSOs) 在运行管理中频繁使用的一个重要工具。

辅助服务分为四大类：运行管理、频率控制、系统恢复和电压控制 (参见表 1)。为了提供四项辅助服务，电网运营商建立了大量流程，使用了多项辅助服务产品。这些产品不仅仅通过网络运营商的资源提供，

而且也来自网络用户。必须对确保单位设施及系统文件性的技术能力、始终维持运转的产品 (例如故障穿越能力) 以及仅在必要时要求启动的产品 (例如控制备用) 进行区分。

### 运行管理

作为运行管理的一部分，电网运营商须承担起组织安全、可靠的电网运行的任务——具体来说，就是由输电系统运营商提供持续的监测和控制，由配电系统运营商 (DSO) 提供网络管理。运行管理是提供其他辅助服务的基础，因此它对系统运营极为重要。最重要的运行管理活动包括：

- 设备的控制，不超过容许的限值
- 数据收集、聚合和交换
- 通过网络阻塞管理，避免网络内输电线路的物理过载
- 为必要的网络维护、转型或扩容提供支持的运行及停机规划<sup>3</sup>

## 频率控制

系统运营商平衡发电量和用电量，保障 50 赫兹的标准频率。频率控制是平衡供需的核心支柱。比如，如果发电量高于用电量，过剩的能量会造成系统加速。频率会因此提高，从而给接入电网的负荷及发电设备造成危险。同理，如果电力需求高于供应，即电力短缺时，则频率下降。按以下次序采取措施，可以确保符合 50 赫兹的额定频率：

- 平衡电力是由灵活发电厂、电力用户或储能系统所提供。他们在特定框架内调整其发电或用电量以满足要求，并出于此目的切换电网运营商的技术参数。反过来，平衡电力的提供者会收到网络运营商支付的经济补贴。平衡电力分三个时间阶段提供：一级平衡电力（与电网频率设定值的偏差达到特定值时，在 30 秒内自动全面启动）、二级平衡电力（在电网运营商调用之后的 5 分钟内全面启动）以及分钟备用电力（在网络运营商调用后的 15 分钟内完全启动）。
- 可切断的负荷可在 350 毫秒或者 15 分钟之内立即启动（例如可在炼钢厂的熔炼过程中执行）。这种切断是自愿的，须经过协商并提供补偿。与下一条项中提到的系统保护计划框架内的停机不同，这种切断可以得到赔偿。
- 如果控制容量不足，采用自动频率补救（或者区域断电）作为应急措施。与前一条项不同，这种停机是发生在系统保护计划的框架之内。<sup>4</sup>

## 系统恢复

如果频率升高到 51.5 赫兹以上或者下降到 47.5 赫兹以下，电厂将出于保护目的关停。在整个系统关停（停电）之后，系统恢复的目标首先是恢复网络，然后是在尽可能短的时间内恢复供电。为了恢复超高压网络，电厂可以在完全关停状态下重启。

电力恢复辅助服务是一项复杂的协作型任务，只能分阶段执行，因为电力系统中已经激活的部分必须始终维持在平衡状态。如果发生大规模断电，须由负责的输电系统运营商与相连的配电系统的运营商协调完成此项任务，也须与邻近的输电系统及电厂运营商进行磋商。首先在单个“孤岛”内重建电压，然后再实现这些子网络频率的彼此同步。

## 电压控制

电源电压是电网内能源供应商所提供的、用于传输电力的电压。在欧洲，几乎所有地方的交流电网的电压都是 230 伏特 50 赫兹频率。这个数值在世界其他地方可能有所不同，但设备必须与相应的电源电压相匹配。

电网运营商确保系统的运行电压维持在适当水平，不超过电压限值。尽管电压可以在特定的范围内变化，但网络内的电压必须维持在特定的电压范围内。否则，如果网络电压过高，就可能造成接入网络设备的损坏。

网络运营商有各种稳定电压的方案。

- 规划过程中的考量：在规划网络项目时，首先要考虑的是有功功率的输送。但其在选择合理的网络拓扑结构、进行网络的技术设计时，可能已经把电压稳定性考虑在内了。
- 负荷流控制设备：在系统运行时，切换运行可能改变网络拓扑结构或者切换变压器的匝比，从而影响电压。
- 电厂自身的控制：最后，可以通过具体影响所连接系统或者网络组件的无功功率行为，影响电压。<sup>5</sup>

## 1.2 稳定的重要性

为了保障电力系统的长期安全，在正常运行中，需要通过辅助服务来满足运行限值。然而，一旦现有安全备用耗尽且超过了技术限值，就会有其他机制介入。为了避免故障及破坏的蔓延，网络运营商会依赖稳定性措施。

稳定性措施是用于控制偶发事件。应该限制故障的影响，且应按照系统保护计划中的说明，在不进一步超限的情况下，让系统从故障运行状态恢复到正常运行。<sup>6</sup>

为了评估系统稳定性，一种常见的做法是将“稳定”分为三类：频率稳定性、电压稳定性和角度稳定性。

取决于具体情况的相关性，对辅助服务或者稳定性的需求可以决定具体的维度。在正常运行以及发生故障的情况下，惯量对维持频率至关重要。局部网络可运行性也是网络恢复及频率稳定的一个重要前提。因此，往往不宜明确地区分辅助服务和稳定性。

**表 2：主要的稳定性产品**

稳定性 干预的控制			
频率稳定性	电压稳定性	角度稳定性	共振和控制器稳定性
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 瞬时备用**</li> <li>■ 孤岛运行能力</li> <li>■ 可中断负荷的自动切断</li> <li>■ 系统保护计划</li> <li>■ 超频下的有限频率敏感模式/欠频下的有限频率敏感模式</li> <li>■ 削减发电量</li> <li>■ 削减负荷</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 动态电网支持**</li> <li>■ 脉冲激励</li> <li>■ 短路电流**</li> <li>■ 直接电压控制</li> <li>■ 无功功率控制               <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 动态/快速</li> </ul> </li> <li>■ 系统保护计划               <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 削减负荷</li> <li>■ 变压器分接头闭锁</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 瞬时备用</li> <li>■ 快速功率调整 (“快速调阀”)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 电网构建</li> <li>■ 谐波阻尼</li> <li>■ 隔绝能力</li> <li>■ PSS 和 POD 控制器***</li> </ul>
<b>稳定性产品</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>* 作为新的辅助服务产品或者对一级控制备用的更改</li> <li>** 不受频率约束的辅助服务</li> <li>*** 电力系统稳定器 (PSS) 和功率振荡阻尼 (POD)</li> </ul>			

来源：德国能源署 (2020)

### 1.3 电网连接的协调性要求

随着传统电厂比例的下降，可再生能源发电厂需要在断电及正常的运行过程中为维持电网稳定性做出贡献。网络连接规范 (NC) 要求接入系统的所有设备自接入之时起，且在其整个寿命周期内，都符合网络连接规范中设定的规范。网络规范是欧洲输电系统运营商网络 (ENTSO-E) 在欧洲能源监管合作署 (ACER) 的指导下，拟定的一系列规则，旨在促进欧洲电力市场的协调、整合和效率。每一条网络规范都是建成内部市场不可或缺的一部分。<sup>8</sup>

根据输电系统运营商之前的观点，辅助服务仅限于频率控制、电压控制、网络恢复和运行管理。稳定性被视为附加领域。

表 2 概述了出于个体稳定性目的要分配的具体产品。应该注意，在进行系统设计时，还必须将进一步的稳健性要求、网络中断以及系统和网络保护纳入考虑范围。<sup>7</sup>

2016 年 4 月，欧盟委员会发布了设定网络规范的新条例，对接入电网的发电设备提出了要求 (RfG)。此法令的连接条件适用于新建的发电厂。2018 年 5 月 17 日，欧洲对发电设备提出的要求正式生效。

发电设备要求的网络规范 (RfG) 协调发电设备接入电网所必须遵守的标准。这些 (欧洲范围内) 协调标准旨在刺激发电技术市场，提高竞争力。此条例涵盖了从频率稳定能力、无功功率的提供直到大型设施黑启动能力等在内的各个方面。<sup>9</sup>

发电设备要求条例：



- 为电网连接打造一个明确的法律框架。
- 促进整个欧盟范围内的电力交易。
- 保证系统安全性。
- 支持可再生能源的整合。
- 推动竞争，从而使电力用户受益。<sup>10</sup>

技术连接规则（TCR）是欧洲网络规范中定义的一部分，欧洲网络规范是德国为了进一步满足欧洲标准，委托电气、电子和信息技术协会（VDE FNN）制定的规范。技术连接规则意味着可再生能源在电网中的安全整合、电网的互操作性以及投资和规划安全。

技术连接规则：

- 概述了电力用户系统接入公用事业电网的基本要求。
- 为设备运行提供重要信息。
- 确定电网运营商、电厂运营商、规划者和电力用户的职责。

FNN目前正在修订所有四项技术连接规则（每一电压水平一条规则）。修订的焦点是贯彻欧洲网络规范。<sup>11</sup>

## 2 回顾——德国的辅助服务

### 2.1 历史背景

德国曾经是以化石燃料的为主导的系统，多为一体公司，主要是利用传统发电厂的同步发电机的固有特征（感应电压、惯量），维持电力系统的稳定性。2000年，德国颁布了第一部《可再生能源法（EEG）》，自此发起了能源转型。转型很快就影响到了各个层面上的系统运行。

之前，可再生能源一度只被认为是系统的附加品。只要它们不干扰系统的稳定性，就可以保持电网连接状态，可一旦出现疑问，就会被切断连接。随着越来越多传统发电厂的退役，这种方式遭到了越来越多的挑战。

此外，电力市场拆分及市场自由化都加速了新参与方的涌现，使得第一批电力市场出现。1990年代和2000年代，大部分欧洲国家都建立了电力市场。德国的电力市场自由化是始于1990年代的多项努力的成果<sup>12</sup>，随着《能源产业法》（EnWG）的修订而成形。<sup>13</sup>

如今的电力市场的一个关键特征是平衡市场。审视平衡市场的发展进程，有以下引人注目的里程碑事件：

- 作为可用辅助服务的一部分，平衡服务（也称为控制备用）包括平衡容量和平衡能源。在平衡容量市场上进行平衡容量交易的同时，最近，又引入了**平衡能源市场**作为一项辅助措施。<sup>14</sup>通过资格预审且未参与平衡容量市场的平衡服务提供商，只要能够在短时间内提供可用容量，即被准许参与平衡能源市场。<sup>15</sup>因此，输电系统运营商可以获得更接近实时的附加平衡投标。
- 直到最近，提供平衡能源的资格预审标准以及产品定义，都主要是为了适应传统发电厂而设计的。<sup>16</sup>考虑到可再生能源的崛起，在一定程度上重新选择了**产品规范**。这确保了可再生能源能够不受歧视地进入平衡市场。

- **控制区域内的合作**——德国有四个控制区域，为了避免激活的控制功率被抵消，德国改进了这些控制区域内的合作。

能源市场自由化过程中实现的另一大里程碑事件是通过《可中断负荷指令》（AbLaV），实现**可中断负荷的参与**，这是确保频率稳定性的一个途径。在收到输电系统运营商的相关要求后，这些负荷必须能够在短时间内减少或者切断自身的电力使用。

另一项措施是**缩短提前期**，即从产品开放交易到交付的时间跨度。2015年，德国日内市场的提前期从45分钟减少到30分钟，到2017年又进一步减少到5分钟。<sup>17</sup>提前期的缩短是精准解决日内电力交易不平衡性的重要一步。<sup>18</sup>

电网运营商可采用不同措施来维持电压的稳定。其中，无功功率控制和故障穿越（FRT）在近几年得到了更为广泛的应用。为了影响电压，电网运营商可以使用接入的电厂或电网组件的无功功率。传统电厂具有自动电压调节，因此反应更为迅速，能满足今天大部分的无功功率需求。如果在配电网内，越来越多地使用可再生能源取代正逐步淘汰的大型电厂的部分功能，也必须大幅提高这些电厂的反应速度。<sup>19</sup>这会改变在配电网内提供无功功率的要求，也会改变为输电网额外提供无功功率的要求。

目前，无功功率按不同“速度”进行区分，即较快及相对较慢的无功功率提供。在电压缓慢变化的情况下，使用（准）静止无功功率维持静态电压，而在动态电网支持的背景下，则向电网馈入较快的无功功率，以平衡电压的快速变化。正常运行状态下，可再生能源正常运行状态下电压变化会更快，因此未来对快速无功功率的需求也会更高。<sup>20</sup>

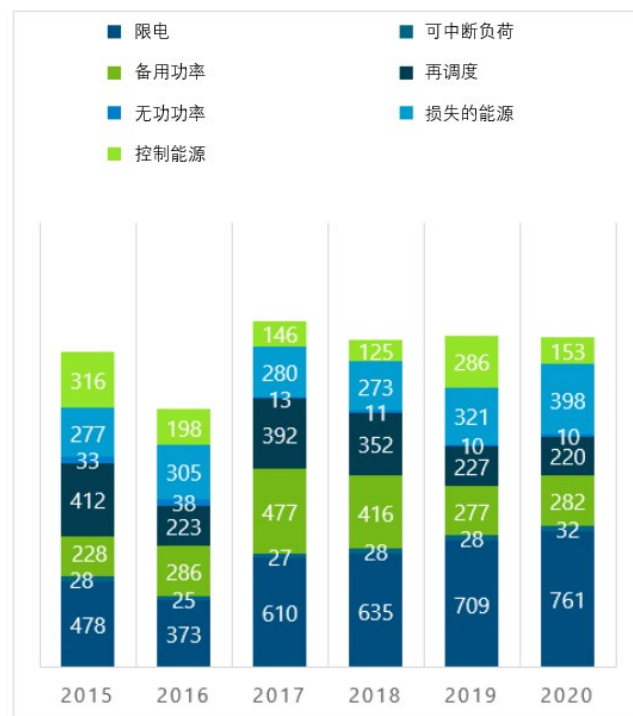
电网故障时对动态支持的要求以及为限制压降而提供的相关电压支持（亦称为故障穿越）不会受到这种快速无功功率的影响。原则上，通过转换器连接的系统能够处理快速的无功功率。但其前提是转换器可实现足够快速的控制。

为了管理阻塞，一年前引入了面向未来的监管改革：随着再调度 2.0 的引入再调度程序通过纳入低至 100 千瓦的所有发电机组，基本上是对可再生能源开放了。可再生能源和传统电厂也遵从同一优先次序。再调度 2.0 的首要目标是以非歧视性且具有成本效益的方式，消除定期和不定期的网络瓶颈。<sup>21</sup>这种措施最终优化了网络管理，降低了消除网络瓶颈的成本。以前，再调度是由输电系统运营商执行的，但自 2021 年 10 月起，配电系统运营商以及接入低、中、高压电网的电力用户和电厂也被纳入到再调度计划中。

这些立法变化预计会降低由再调度措施导致的高成本，因为分布式可再生能源电厂会更加接近阻塞点，从而能够相当高效地解决问题。<sup>22</sup>但仍然要以入网优先级为准：优先由传统电厂执行再调度措施，而可再生能源电厂只有在其成本比传统电厂低 10 倍的情况下，才会被考虑。<sup>23</sup>德国联邦网络局（BNetzA）的最新提案为可再生能源电厂设定的最低系数是 10，为热电联产（CHP）厂设定的最低系数是 5。

回顾德国输电系统运营商为辅助服务支付的成本，可以明显看出它们为维持电网平衡及稳定支付的费用在不断提高（参见图 1）。<sup>24</sup>根据德国联邦网络局（BNetzA）的监测报告，辅助服务的成本从 2014 年的 12.11 亿欧元增长到 2020 年 12.183 亿欧元，四年时间里，增长了大约 67%。这种趋势预计还将延续，目前正在立法修订，以期在未来抵消这种趋势。但是，未来需要推行的变革可能不止于此。

图 1：辅助服务的成本发展



来源：德国联邦网络局（2021）

## 2.2 参与方概况和监管环境

辅助服务领域的持续发展会影响到各个执行阶段所涉及的众多参与方。2019 年 6 月，欧洲通过了“关于内部电力市场的共同规则的指令”（第 2019/944/EU 号）的修正案。此修正案是所谓的“清洁能源一揽子计划”的一部分。

根据该指令，电网运营商主要将在市场上购买辅助服务，只要这种方式具有经济效益。具体来说，必须采购六项“非频率辅助服务”，包括电压调节、本地电网稳定性惯量、短路电流、动态无功电流支持、孤岛运行能力以及黑启动能力。为实现此目的，须在国家层面上，引进一种非歧视、市场化的辅助服务采购模式。

上述指令必须在 2020 年底之前在成员国的国家立法中体现。在德国，由德国联邦经济和气候保护部（BMWK）牵头，基于专家委员会（即 SDL-Zukunft）形成的专家意见，设定了基本原则。而关于具有经济效益的辅助服务意味着什么，则须由国家监管当局裁量。如果并未选择基于市场的方式，主管当局必须证明它们选择的替代方案是对所有利益相关方都更为高效的方式。

成员国必须考虑具体的立法措施，其中包括修订现有法律以及通过新的法规。在德国，需要修正《能源产业法》（EnWG）。一份重要的修正案就是对《能源产业法》第 12 条（h）款的修订，此修订旨在授予德国联邦网络局确定辅助服务采购模型的权限。该法于 2020 年 11 月 27 日生效。<sup>25</sup>

德国联邦网络局（BNetzA）设定采购非频率辅助服务的规范和要求。或者，德国联邦网络局可以要求网络运营商共同制定适当的规范和要求，让所有相关网络用户参与其中，并最终交由其审批。<sup>26</sup>如果基于市场的辅助服务采购不具有经济效益，德国联邦网络局可以作出豁免规定。豁免的情况须至少每三年复核一次。德国联邦网络局参与了德国联邦经济和气候保护部发起的专家评审过程，但其最终决定并不受限于此评审过程的结果。<sup>27</sup>

通常由输电系统运营商负责确保系统安全性，但它们也越来越依赖于低电网级别和电厂运营商来提供必要的辅助服务。<sup>28</sup>

运行管理负责各电网运营商，且必须考虑到各上游电网运营商的必要要求。输电系统运营商全面承担起维持系统稳定性的责任，也需要与其他欧洲输电系统运营商协调行动。

输电系统运营商通过维持发电与用电的平衡，来维持频率。在电压调节方面，由输电及配电网运营商负责维持其各自电网区域内的电网电压，将之维持在与电压质量相对应的容许范

围内。工作是在其自身电网级别上完成的，但须将上下游电网的要求都考虑在内。

发生大规模断电的情况下，输电系统运营商必须能够与配电系统运营商合作，在尽可能短的时间内恢复电力供应（系统恢复）。

网络运营商的活动得到“技术监管机构”电气、电子和信息技术协会网络技术/网络运营论坛（VDE FNN）的支持。VDE FNN 在技术设施连接和运行的具体技术指导方针中，设定了将政治框架条件考虑在内的系统要求。立法机构要求为能源厂的建设和运行提供技术安全担保（《能源产业法》第 49 条）。在此方面，立法机构的使命只是设定一个保护目标，技术规范须交由 VDE FNN 负责。立法机构认可这一套规则，推定满足 VDE FNN 的技术规则，即代表可以确保技术的安全性。<sup>29</sup>

设备制造商基于这些规范设计设备，由设备运营商决定是否提供辅助服务。只有所有参与方都获得可靠的框架条件以及充分的规划确定性，才可能确保系统的安全性。<sup>30</sup>

在 2007 年的输电规范中，设定了德国所有四个输电系统运营商区域内的电网接入条件。这一套规则最初是由 VDE FNN 在 1998 年拟定的，其主旨是回应电力市场的自由化以及《能源产业法》（EnWG）的相应修订。<sup>31</sup>涵盖整个欧洲市场的网络规范是由欧洲输电系统运营商网络（ENTSO-E）开发的。

图 1：参与方及其活动概况



可以看出欧洲层面上不断出台新的法规、指令、决议和标准，且之后必须在德国贯彻实施。但是，信息的流动并不是单向的。比如，在设定德国的技术规则时，VDE FNN 可以纳入更加具体的规定——前提是不得与欧洲法规相抵触；此外，它也可以通过相关的咨询，影响即将出台的欧洲法规。<sup>32</sup>



## 3 采购选择和标准——监管决策

因为供电系统和欧洲法律要求的变化，辅助服务产品的采购也必须进一步发展。可用的采购选择包括市场化采购、技术电网连接指导方针中有约束力的要求以及由电网运营商提供。要完成此项工作必须执行本章节开头部分论及的三个决策阶段。

### 3.1 监管背景

如前文所述，2019年6月，欧盟委员会通过了对“关于内部电力市场的共同规则的指令”（第2019/944/EU号）的修正。其中描述了未来如何组织提供所谓的“非频率辅助服务”（nf-AS）。

根据指令的规定，未来的辅助服务采购须采用透明、非歧视的市场方式，电网运营商通过电网运营设备自行提供这种服务的情况除外。<sup>33</sup>如果监管当局认定非频率辅助服务的市场化采购没有经济效益，则可被豁免遵守此项规定。此义务不适用于完全一体化的网络组件（FINC，要获取进一步的解释，参见以下子章节3.3）。

众多国家性法律法规受到此指令的影响，各成员国被要求采取各种措施贯彻此指令。因此，德国不得不修订《能源产业法》，并于2020年10月通过了一部监管辅助服务市场化采购的法律。<sup>34</sup>与欧洲指令类似，这项法规的目的是通过引进透明且非歧视性的市场程序，允许所有市场参与者（即发电商、储能设施或者电力用户）提供辅助服务。除了刺激竞争以外，亦可据此法规发挥额外的技术潜力，提供辅助服务，从而提升系统运行的整体安全性。<sup>35</sup>

德国联邦网络局设定了具体的采购系统。如果辅助服务产品的市场化采购不具有经济效益，德国联邦网络局可能批准相应的豁免情况。此法律于2020年11月27日生效。<sup>36</sup>

为了进一步支持市场化采购体系的引进，德国联邦经济和气候保护部（BMWK）启动了SDL-Zukunft项目（由顾问公司ef.Ruhr落实），在此项目中，经气部与德国联邦网络局密切合作，并让网络运营商、行业协会和研究人員等利益相关方参与其中探讨该推荐何种辅助服务市场化采购模式。<sup>37</sup>

德国联邦网络局采纳了SDL-Zukunft报告的建议之后，初步完成了对市场化采购模式的效率评估，但本报告对德国联邦网络局没有约束力，并不能以任何方式预先制止德国联邦网络局的决定。<sup>38</sup>目前，正式设定采购模式的过程再次交由德国联邦网络局负责。2020年，在SDL-Zukunft框架内执行的初步效率评估只是一个前奏。如前文所述，在定期评估的框架内，德国联邦网络局应至少每三年复审一次其豁免决定。

### 3.2 辅助服务采购的不同阶段

采购辅助服务产品时，必须通过三个决策阶段：

1. **技术能力的提供：**第一步就是必须从根本上设定设施的技术能力，确保设备有能力提供必要的辅助服务产品。可以在相应的网络规范及指导方针中规定这种技术能力，在适用的情况下，还应一并设定技术连接要求或者其他国家规定。
2. **容量的提供：**下一步，就是必须确保设施的可用性，确保网络运营商可以获得其使用权。
3. **服务的提供：**之后，流程的最后一步就是实际提供辅助服务产品。

除了由电网运营商直接提供辅助服务以外，原则上，也可以通过市场参与者满足系统要求。采购的组织方式有三种不同变体：

1. 义务性，没有报酬
2. 义务性，有报酬
3. 基于激励和报酬的自愿性

前两种**义务性模式**是通过技术连接要求，规定必须提供辅助服务产品。之后，取决于决策阶段以及不同的辅助服务产品，可以对报酬进行不同的调节。<sup>39</sup>

另一方面，自愿采购模式一般都是以市场为基础的。根据德国联邦经济和气候保护部的解释，市场化采购要求由辅助服务产品的提供商可以自由决定至少一个参数——价格或数量。因此，对于在调节模式下获得报酬的辅助服务产品，只要提供商一方可以自由地通过相应的数量发盘做出回应，即可被定义为以市场为基础。

总的来说，辅助服务产品的市场化采购有四种不同选择：

- 调节报酬
- 双边合同
- 招标

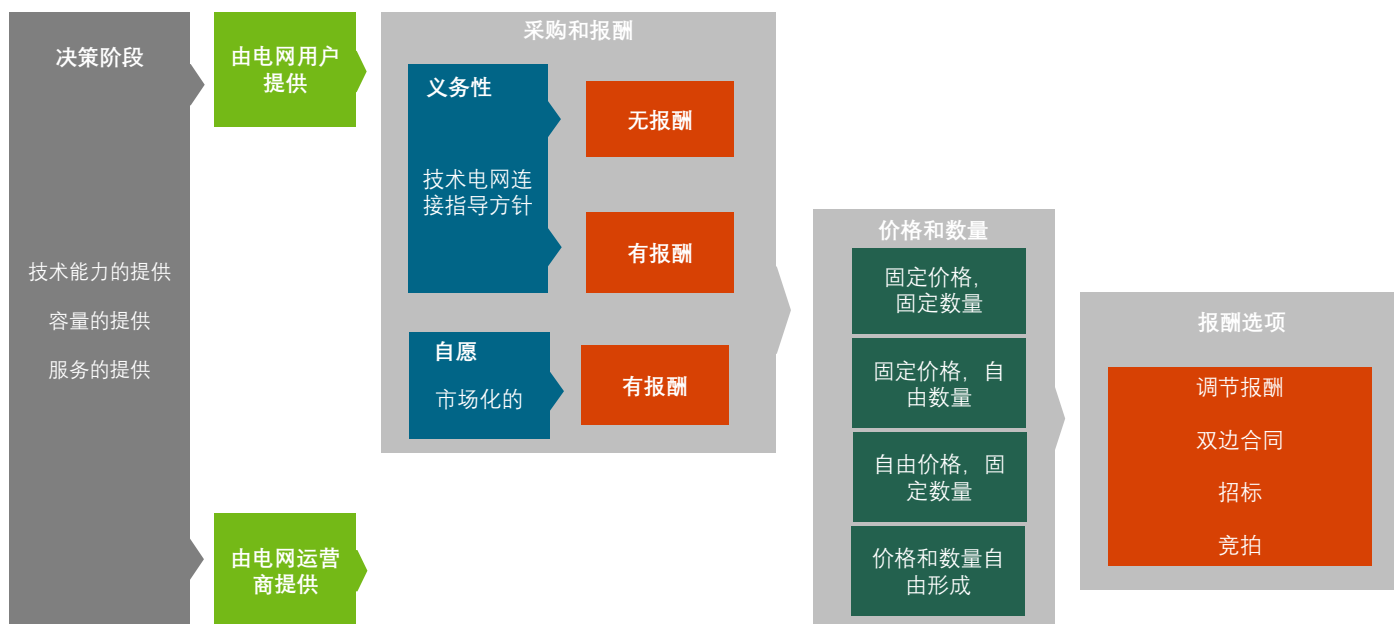
- 竞拍

最后，在面对不同辅助服务产品的采购时，必须要解答以下问题：

- 应由电网运营商还是电网用户提供辅助服务产品？
- 服务的提供应该是强制的还是自愿的？
- 辅助服务是否应该收到报酬？
- 如果是，采用何种报酬模式？

图 3 全面概述了这些问题。问题有时候会相当复杂，因为有众多的因素（例如交易成本、市场失灵、影响、系统需求等）必须要考虑在内。

图 3：辅助服务采购的级别



### 3.3 技术电网连接指导方针中的规范

目前，在辅助服务方面对电网用户提出的适用技术要求是由欧盟制定、在国家层面上落实的。典型的网络规范是“发电设备要求”、“需求连接规范”以及“系统运营指导方针”。<sup>40</sup>基于这些技术要求和监管限制，可以评估不同网络资产和设备适宜提供辅助服务的范围。

德国通过 VDE FNN 开发的相应的技术连接指导方针，贯彻落实了这些要求。<sup>41</sup>在设定通过发电设备提供辅助服务须满足的要求时，VDE FNN 的应用规则对一类和二类发电设备进行了

根本性的区分。总的来说，一类设备——即在同步发电机的帮助下提供电能的设备——只有满足更为严格的要求，才能提供辅助服务；所有其他设备被定义为二类能源发生设备，即通过逆变器耦合的可再生能源系统。<sup>42</sup>

储能系统在所有权方面受到额外的限制。这源自于第 2019/944 号指令的要求，此项指令正在植入到德国的国家法律中。根据此项指令的要求，原则上，网络运营商可以不拥有储能设施。

此要求不适用于“完全一体化的网络组件”（FINC）。根据指令中的定义，FINC 指的是输电或配电网中整合的、仅用于确保网络安全及可靠运行的网络组件。<sup>43</sup>FINC 既不可用于系统平衡（提供控制备用），也不可用于阻塞管理（再调度）。根据指令第 54 条第 2 段的规定，要确认某一储能设施为 FINC，须获得监管当局的批准。

### 3.4 市场化采购

深入研究市场化采购之后，此子章节解释了德国评估这种采购选择的效益时所采用的标准。评估市场化采购的增值价值是否超过市场交易成本有四种途径。在每一决策阶段（容量、技术能力、服务提供），分别评估所列之标准，且在必要的情况下，按照网络级别进行评估。现行标准的每一项都是达成效益所必须满足的标准。只要有一项标准未满足，市场采购就会被视为没有经济效益。

在此方面，一个重要标准是**市场规模与辅助服务市场采购导致的预期交易成本之间的相对关系**。根据市场规模以及具体的供应成本及技术参数，就可以掌握辅助服务产品经济成本的近似总量。另一方面，将交易成本转化为在市场上引入辅助服务产品所引发的额外成本的定性估计，在此过程中，要将引入成本、市场产能提升以及市场运营的持续成本都考虑在内。<sup>44</sup>在此标准中，**潜在提供商的数量**是另一个决定性因素。此因素是虑及潜在提供商数量不足所引发的风险。它也考虑了中短期内有多少新的提供商可以进入市场。如果没有足够的提供商，可能导致少数提供商掌握过大的市场权力。如果出于技术原因，必须在本地区分非频率辅助服务，那么潜在提供商的区域分布也可能关系重大。

在评估市场化采购的效率时，**激励措施**也具有重要意义。在此方面，也务必要考虑运营和投资效率。在**运营效率**方面，要执行定性分析，确定市场化采购能否激励相关方以技术中立的方式，做出最有利的选择。在**投资效率**方面，也要执行定性分析，确定投资人在选择各自的非频率辅助服务提供技术时，市场化采购是否足以激励其投资于最高效的技术。还要执行另一项定性评估，将市场化采购的优势与电网运

营商通过自有资源提供辅助服务的优势进行比较。

另一个要考虑的指标是市场化采购可能对**电力市场和价格造成的影响**。通过此标准，考虑影响以及与其他电力市场（例如平衡市场）的交互。有损于系统的战略投标行为（“操纵”）的可能性被归入此指标的范围。研究**分配效应**是另一个重要方面；通过提高电网费用、加大电力用户的负担，可能产生分配效应。此外，可能形成成为发电厂提供报酬的新模式。

**系统安全性和环境兼容性**是市场化采购评估标准的第四大支柱。首先，要调查市场化采购的基本特征是否与安全的运行相冲突。尤其是区域分布式非频率辅助服务，它会造成这方面的挑战。此外，还要着眼于更宏观的气候中和目标，审视对相关环境目标的影响，即二氧化碳排放和资源消费。

最终，流动性市场是辅助服务市场化采购的一个重要前提，往往伴随着巨大的成本和努力。最后，如果在特定的时间无法实现市场化采购，就必须由电网运营商直接满足现有的系统需求，例如采用“完全一体化的网络组件”（FINC）的形式、备用或者通过技术连接规则中对所有市场参与者都有约束力的电网连接条件。<sup>45</sup>如果认为可以实现市场化采购，则启动相应的采购程序。如果情况与事先评估不符，市场参与者无法高效地满足本地系统需求，则应由电网运营商满足剩余需求。

德国联邦网络局根据《能源产业法》段落 12h 的规定，于 2020 年 12 月就以下非频率辅助服务发布了一项豁免决定，也就意味着以下服务不在市场上采购：

- 快速无功电流注入
- 短路电流的提供
- 本地电网稳定性的惯量
- 孤岛运行能力

另一方面，在市场上采购的服务如下：

- 稳态电压控制
- 黑启动能力



“SDL-Zukunft”项目已代表德国联邦经济事务与气候保护部制定了一项黑启动能力采购系统的提案。

### 3.5 辅助服务的成本

在德国联邦网络局的监测报告中，会定期发布辅助服务的成本。2018 和 2019 年，成本相当稳定，分别为 19.332 亿欧元和 19.312 亿欧元。<sup>47</sup>但在 2020 年，转嫁至终端电力用户的辅助服务的净成本增长到 20.183 亿欧元左右。审视成本结构后发现，这一年主要的成本构成如下：<sup>48</sup>

- 网络备用电厂的提供和使用，合计金额约为 2.828 亿欧元（2019：2.781 亿欧元），
- 国内及跨境再调度，合计金额为 2.205 亿欧元（2019：2.272 亿欧元），
- 入网管理措施的预计赔偿要求，合计金额为 7.612 亿欧元（2019：7.095 亿欧元），
- 以及损失能量，合计金额约为 3.988 亿欧元（2019：3.212 亿欧元）。

使用辅助服务产品时，电网和设备运营商都要承担成本。例如，如果到目前为止，都是基于没有报酬的技术电网连接指导方针提供非频率辅助服务，那么网络运营商无需承担直接成本；但网络用户要承担的成本通常会升高。<sup>49</sup>到目前为止，这些成本都是由提供商自身承担，并以其他形式转嫁给电力用户——例如，通过在其投资决策中提出更严格的边际受益要求，或者在可再生能源竞拍的情况下，提高投标价格。<sup>50</sup>在市场化采购模式下，这种供应商侧的成本会被包含在网络费用中，因此也更加明显。但总体而言，辅助服务的成本是通过网络费用来承担。

### 3.6 未来的采购——利益相关方的意见

为了更好地理解可再生能源发电厂目前对辅助服务的态度，挪威船级社在本报告的框架内对八位电网运营商、设备和电池运营商以及业内利益相关方的代表进行了访谈。通过访谈，获取了关于此话题监管方面的有用信息，也大体了解了辅助服务及其采购的进一步发展演变。

在与一位风电厂运营商的访谈中，受访者认为相关主管当局和政策制定者仍需更多地关注风

力涡轮机在维持系统稳定性方面的潜力。包括巩固相关政策，在辅助服务领域，推动以可再生能源电厂大规模取代传统发电厂。为了发挥这种潜力，可以追求不同的理念。访谈中提到了一个合作项目，该项目评估了是否可以通过风电场的运行来提供短路承受能力。此外，毫无疑问的是加强灵活交流电输送系统（FACTS）的利用也有利于更高效的无功功率补偿；这也是受访者不断考量的因素之一。另一方面，目前尚未要求风力发电对谐波滤波服务做出贡献。最后，随着新型的风力涡轮机逐渐投入运行，快速频率响应未来很可能被纳入到辅助服务中。这些说法也得到了另一位设备运营商的印证，该运营商强调了当前的监管框架与可再生能源技术能力可能带来的市场潜力之间的差距。

当被问到设备运营商什么情况下会需要附加的辅助服务时，受访者再一次强调可以落实一揽子服务项目。需要加大在灵活交流电输送系统（静止同步补偿装置、电网构建式逆变器）整合方面的投资。尤其是针对黑启动，需要阐明要求框架以及适用此框架的情况。推广电池储能系统（BESS）是关键所在，因为它会鼓励混合解决方案的应用。提供服务的方式也必须阐述清楚（强制或者有报酬）。在提供短路承受能力服务方面，这种可能性尚不成熟，过滤的可能性也比较低。

总而言之，从设备运营商的回应来看，网络监管的范围与设备所有方扩大业务规划的渴求之间似乎存在着分歧。设备运营商有一种感受是：系统在设计时为了发挥出协同相应，施加了一定程度的限制性。因此，呼吁设备运营商扩大业务范围、开始提供辅助服务是一项相当复杂的工作。再加上可能成为绊脚石的官僚主义制约，局势变得有些含混不清，拖延了统筹利用分布式设备的进度。

最后，访谈中还提到了利益相关方在下一时期要考虑的一个额外参数。开发风电场（海上和陆上）需要考虑到风电场所接入电网的相应扩建。因此，如果批准分布式设备接入的连接系统必须扩建或者加强其电网扩建，同时又强制要求其无功功率提供补偿，那就意味着成本必然会增加。因此，考虑到这一问题，发电规划必须与网络规划齐头并进。

在讨论过去国家层面上采取的行动时，一位受访的电池和电厂运营商表示此类行动的落实效率还有进一步提高的空间。尤其是，认证程序不足以推广新的网络技术，尤其是混合解决方案。此外，市场激活方面仍存在着经济障碍。总而言之，受访者总结称：有了灵活性更高、决策更加直接的环境，才可能为整个过程提供更大的支持。

在与另一位输电系统运营商代表的访谈中，受访者指出辅助服务市场不应被视作单一市场，这与风电厂运营商的看法不谋而合。从这个意义上来说，输电系统运营商与配电系统运营商的需求和标准存在某些方面的差异。根据受访者的说法，需要加强配电系统运营商的相关的市场，可再生能源的整合在配电系统层面将越来越多。随着传统发电厂的关停，必须推行并推广新的解决方案，通过分布式可再生能源发电设备提供这种服务。特别是惯量，已经成为一个大问题。但是，在输电系统运营商层面上，此市场的发展速度较慢，因为受访者认为全面取代传统发电设备的转型过程可能发展迅速，但只要涉及到辅助服务，就需要采取更为谨慎的方式。

在配电系统运营商网络层面上，以下辅助服务通常是必不可少的：阻塞管理（限电/再调度）、所有接入的设备运营商提供无功功率以及通过电池储能系统（BESS）提供一级控制（频率控制储备）。根据网络规范，提供无功

功率被描述为一项具有约束力的辅助服务。电网规范并不要求再调度服务，但需要依法有偿提供。

根据受访的配电系统运营商的说法，关于通过分布式设备获取进一步辅助服务的讨论（例如惯量、再调度研究）一直没有间断。从它们的角度来看，眼下第一要务是要验证技术可行性以及这种发展的有利影响。但是，如果认定个体生产商具备为电网提供支持所必需的能力，那么双方可以订立双边有偿服务协议。

每一次访谈的最后都是请受访者就不同辅助服务的采购方式，发表其个人观点。不同的选择包括：

- 强制（无报酬）
- 双边协议（自愿、有报酬）
- 市场采购/排他（自愿、有报酬）

提供这些个人观点的依据是不同利益相关方提供此类服务的可用容量和承诺（参见表3）。通过对各领域不同利益相关方群体的访谈，可以发现他们对不同辅助服务的采购方式持有不同的观点。但是，大多数利益相关方群体都偏向于未来通过双边合同采购辅助服务。应将这种考量事项作为利益相关方对话的话题之一，因为关于附加辅助服务采购的讨论预计会持续很久，短期内不可能终止。访谈的详细记录见本报告[英文版](#)。





整合分布式解决方案依然是一个未解决的问题。另一个受访的输电系统运营商提到，因为要找出电网中需要巩固的薄弱之处，还要扩建电网本身以管理起伏不定的可再生能源电力流动，所以通过可再生能源提供辅助服务的市场受到了拖累，无法快速发展成熟。

剖析受访的业内利益相关方之后，可以发现现状颇为复杂：一方面，一些业内参与方强烈关注辅助服务的提供，但另一些业内参与方只关注其核心发电业务以及防止因供应短缺造成自身损失的所有必要措施。但是，两方受访者都清楚地发现了提供辅助服务所遇到的障碍，例如最近的市场裁撤以及对快速、即时可用的可中断负荷的监管。

## 4 展望未来——技术发展

### 4.1 惯量

随着同步电机的逐步淘汰，电网内的可用惯量正在减少。目前，瞬时备用来自于旋转质量的惯量，是由同步接入电网的能源厂提供的，主要是本身拥有这种能力的大型传统发电厂。<sup>51</sup>要在未来的电网中取代这种影响将是一项艰巨的任务。尽管在可预见的未来，故障仍在可控的范围内，但目前已经需要获得额外的惯量，才能安全地处理系统分拆。

最终，可使用逆变器模仿这种行为，但对于是否要在欧洲输电网中整合电网构建式逆变器，目前尚未得出评估结论。在大多数电网中，惯量依然是由化石燃料电厂和水电厂提供。除了对大型热电厂进行再调度这一明显途径之外，还存在一些可用于增加惯量的新的技术理念。

- **旋转移相器：**在供电系统内增加惯量的另一个可能方式是使用旋转或者同步移相器。现有的已退役电厂可以被相应地转换，或者可以建立新的移相器。旋转移相器本质上就是处于空闲模式的同步电机。旋转移相器在德国尚未普及。目前，旋转移相器的主要用途不是提供惯量，移相器的旋转质量相对较小，但只要通过简单的措施，就可以增加其旋转质量。
- **电网构建式逆变器：**电网构建式逆变器可以即刻对频率变化做出反应，从而通过调整有功功率馈入量来提供惯量。之所以使用逆变器提供惯量，其主要原因在于发电设备、负荷和储能设施的连接反正也需要用到逆变器。可以根据设备的主要目的，例如馈入有功功率，调配部分的投资成本。因此，使用逆变器可能是替代旋转质量的一个经济选择。但是，因为技术连接指导方针的原因，电网构建式逆变器目前并未在输电网层面上应用于互联电网中。只有在下一次修订了发电设备和电网连接指导方针的要求之后，才允许使用这种逆变器。此外，关键的技术和经济问题尚未完成有定论的调查，也就是说目前的技术和

经济潜力难以量化。<sup>52</sup>中期内，输电系统运营商预计在任何情况下，都会对可再生能源的电网构建式逆变器有巨大的需求。

将有越来越多的电网用户通过逆变器接入电网（例如风力涡轮机和太阳能光伏等分布式发电厂、电转 X 设备和储能系统等大型负荷）。这些设备可以调整自身的有功和无功功率馈入量，为电压和频率维持做出贡献。要升级通过逆变器连接的设备，以对于干扰做出即时反应（例如为惯量或短路电流做出贡献），就必须修改逆变器的理念。一方面，这可能意味着技术复杂性的提高，另一方面，这也会在其他运行管理领域造成挑战。

欧洲监管机构欧洲能源监管合作署（ACER）和欧洲能源监管委员会（CEER）有意在未来几年间，修订适用于发电厂及电力用户设备电网接入的监管法规——“发电设备要求”（NC RfG）和“需求连接”（NC DC）的网络规范。<sup>53</sup>今年五月提交了初稿。<sup>54</sup>但此初稿引发了激烈的讨论，若不经修改，很可能无法通过。同时，德国正在考虑惯量的市场化采购。

### 4.2 快速频率响应（FFR）

现如今，在技术上，电池储能系统的反应速度可能比针对一级控制功率需求提出的要求要快得多。有鉴于此，一些利益相关方（尤其是电池储能系统的制造商和运营商）提倡引入另一种超高速的控制备用，以发挥这种额外的技术潜力。例如，爱尔兰的“DS3 项目”框架下正在打造一种新的辅助服务产品。这是一个旨在实现爱尔兰 2020 年可再生能源目标的多年期项目。<sup>55</sup>其目标是提供经济激励，鼓励通过直接耦合的同步电机向系统提供惯量。<sup>56</sup>

但是，德国的输电系统运营商认为目前并没有这种需求，一方面是因为其互联系统规模巨大，而这种要求较低<sup>57</sup>，另一方面，是因为在“发电设备要求”的电网规范（NC RfG）中可以找到类似的应急要求。具体来说，针对超频下的有限频率敏感模式（LFSM-O）和欠频下的

有限频率敏感模式（LFSM-U）的条款 13（2）和 15（2）（c）规定：当系统处于超频或者欠频的紧急状态时，必须激活这两种模式。<sup>58</sup>因此，超频下的有限频率敏感模式可以快速减少系统内有功功率的产生量，欠频下的有限频率敏感模式可以快速增加欠频下的有限频率敏感模式。<sup>59</sup>

### 4.3 灵活性

在扩建电网、进行再调度之外，必须向电网运营商提供在市场上采购及调用灵活性的机会，即从分布式可再生能源电厂处采购。此规定也适用于产消者，即在消费自己生产的能源的同时，产消者也应该能够向第三方提供其灵活性。<sup>60</sup>德国联邦网络局将电力系统的灵活性定义为“旨在服务能源系统、对外部信号（价格信号或激活）做出回应的馈入量或者退出量的改变”。<sup>61</sup>

在监管框架方面，根据欧盟法律以及更有针对性的内部电力市场指令的规定，灵活性的市场化采购是一项从根本上来说具有约束力的原则——参考“为灵活性来源投资提供的市场化激励”以及电网收费的结构。<sup>62</sup>在德国法律中，此规定被转化为《能源产业法》第 14 条 c 款，促成了配电网中灵活性服务的市场化采购。<sup>63</sup>

在考虑贯彻落实此段落中的规定时，值得研究一下由德国联邦经济和气候保护部出资的智慧能源展示计划（SINTEG）的项目成果。除了其他灵活性平台的雏形之外，还打造了所谓的 ENKO 灵活性平台，通过此平台交易实际运行中的灵活性服务。<sup>64</sup>此平台是用于石勒苏益格-荷尔斯泰因（Schleswig-Holstein）联邦州。但是，为 ENKO 平台设定的过程、产品和市场角色可为联邦层面上的设计提供一个宝贵的模板。<sup>65</sup>

在此背景下，《能源产业法》第 14 条 a 款的未决设计也值得研究。对《能源产业法》第 14 条 a 款的一项修订旨在引进一个负荷削峰工具。此法案带来的变化是允许电网运营商在需要灵活性的情况下，远程切断电动汽车或热泵，最终减少较低级别上电网扩建的需求。经过多次研究、研讨会和公共咨询之后，该法律草案于 2021 年 1 月 17 日被撤销。根据此领域的最新监管发展，德国联邦网络局支持颁行

国家性法规。基于该等法规，配电系统运营商及其电力用户有义务就可控电力用户设备的网络导向型管理达成协议；为实现此目的，德国联邦网络局还须制定相应的标准，以基于该等标准达成前述协议。

### 4.4 电压控制

为了将电压维持在规定的限值之内，电网运营商主要使用无功功率。如子章节 3.4 所述，已决定遵循 SDL-Zukunft 项目的提案，采购无功功率。其中介绍了一种有选择自由的三支柱理念（基于技术连接指导方针中的规范提供无功功率、市场化采购或者通过电网运营商的自有资源提供）。

三支柱理念的一个重要因素是互联电网层面上电网运营商之间有组织、协调有序的无功功率交换。<sup>66</sup>此提案最终须经德国联邦网络局批准，目前正在制定采购系统的具体设计。以独立于有功功率的方式提供无功功率（所谓的静止同步补偿装置）的技术理念已经很成熟，但并没有得到广泛的应用。<sup>67</sup>

### 4.5 频率控制：50.2 赫兹问题——为什么必须对要求做出前瞻性的调整

在欧洲，基准频率是 50 赫兹（Hz）。轻微的波动相当常见，但频率应该维持在该水平上，否则一旦波动过大，就会出现严重问题。2005/2006 年，电气、电子和信息技术协会网络技术/网络运营论坛（VDE FNN）制定了一项指导方针（“低电压电网内的自发电设备”），要求在出现 50.2 赫兹超频的情况下，立即关闭并切断可再生能源设备。结果，大量较小发电设备（例如光伏发电设备）会被同时切断，从而导致供电量大幅降低，并最终造成断电。<sup>68</sup>

出台这种连接指导方针是基于一个假设，即可再生能源在发电构成中的占比不大。但是，随着光伏发电的动态扩张，如果所有可再生能源设备被同时切断，就会对电网的稳定性造成威胁。因此，迫切需要改变这一指导方针。

因此，环境部、经济部之后携手电网运营商和协会，共同制定了预防性措施。《系统稳定性法令》（SysStabV）于 2012 年 7 月 26 日生



效，其目的主要是监管超过 300,000 套现有光伏（PV）系统的改造。<sup>69</sup>根据该法令的规定，未来在发生 50.2 赫兹超频的情况下，改造后的光伏系统会分阶段从电网中断开，不会同时断开。

电网运营商负责落实此项改造。改造只能逐一的完成，且必须实际前往每一电厂。但是，这种大规模的改造被证实是一项非常复杂且艰巨的任务。因此，电网运营商请求德国联邦能源和水资源协会（BDEW）协助落实《系统稳定性法令》。

简而言之，在 2005/2006 年，制定连接指导方针的时候，电气、电子和信息技术协会网络技术/网络运营论坛（VDE FNN）并没有预见到光伏发电在接下来几年间的动态扩张。结果，不得不花费巨大成本，改造现有设备。未来，应通过有先见性的连接指导方针的调整，避免落入这种陷阱。

#### 4.6 未来的考量——利益相关方的意见

在能源转型的下一阶段，通过可再生能源提供辅助服务预计会引起更多的公众关注。访谈深刻地洞察了辅助服务未来发展的可能面貌。在被请求介绍未来可提供的服务时，受访的风电厂运营商提到人们已经在广泛讨论二级调节服务的提供。当前，尽管这种服务具有潜在的技术可行性，但受访者解释了与之类似的服务当下不可能实现的限制因素。首先，如果二级调节的要求考虑提高电力输出量基准点，设备运营商就无法确保增加的发电量，这是由风能的性质及其间歇性所决定的。这可能不仅需要改变天气预测，还需要设备运营商采取及时的响应行动。此外，从经济的角度来看，设备运营的利润率最低可能降到至调度发电量的-20%。因此，二级调节尚未被纳入风电厂运营商的电网规范要求。

关于未来可能提供的其他潜在服务，受访者介绍了一个有趣的方面，即利用风电场执行黑启动程序。已向相关输电系统运营商的专家提议了相应的方法，向他们介绍了一个整合了风力发电和电池储能系统（BESS）的现有设施。在此情况下，开发了一个由风力涡轮机和电池的混合设施为 110 千伏和 20 千伏输电线路供电的情景。可以通过电池容量满足大功率要求。

因此，根据研究，风机可以约 10 个小时的时间间隔内启动其连接到电网的变压器，考虑到 n-1 标准，混合设施可以确保 14 天以上的供电。

在与发电厂和电池储能系统运营商的访谈中，受访者提到接入的电池系统目前可以提供一级频率控制，并被归类为有报酬的服务。未来，通过资格认证的电池二级控制也可能被包含在内。在此访谈中，也特别强调了混合系统的利用，因为混合系统预计会成为未来可再生能源整合的驱动力。这种系统的落实离不开超大型逆变器，因其可以提供功率备用的潜力。在此点上，受访者也热衷于强调输电系统运营商和技术发展之间的差距，尤其是在电力电子学领域。技术解决方案已经存在，只要有相应的激励措施推动其市场化，这些解决方案很容易贯彻落实。监管框架要对此负责。但要指出一点，风力涡轮机和电池的混合系统引起了关于增量成本的担忧，因为电网要求的框架尚未有明确的界定。任何情况下，其核心驱动力都是加强电网运营的可预测性（瓶颈管理）。

从输电系统运营商的角度来看，提高了提供辅助服务的能力，分布式资产也会得到增强。其中，通过静止同步补偿装置扩展的电压支持、提供黑启动服务的电网构建式逆变器、虚拟惯量以及通过逆变器提高短路承受能力，形成了可能在持续演变过程中占据主导地位的可能情景。要探究所有这些可能性，才能对其运营利润和电网接口形成更深入的理解。在任何情况下，一个关键的信息就是能源行业正朝着更加自主、更加“自我服务”的方向转变。

当被问及未来可能用到的进一步辅助服务时，受访的配电系统运营商提到了扩展电压控制的要求，通过引入电网构建式逆变器功能，提供黑启动服务。除此之外，还可能找出多种可能性，例如提供短路功率或者支持谐波滤除。在这些情况下，对电网运营商来说，最重要的标准就是要对行为本身以及这些服务对系统稳定性和供应安全性的影响进行全面的验证和分析。

另一位设备运营商指出，在当前的背景下，考虑到能源市场以及生产商的需求变得越来越复杂，人们应该考虑沿用相同的工具和方法是不是明智之举。如受访的配电系统运营商所言，比如，电网构建式逆变器就是一项值得信赖的



技术，可以用来应对淘汰传统发电厂所引发的挑战。而与此同时，储能及电解装置等其他技术也在大规模地兴起。所有这些技术解决方案的协调及其潜在的优势可能在现有框架内成为现实。因此，受访者提出一个问题，为了避免不必要的负担和不可持续的解决方案，是否必须考虑调整利益相关方的优先次序。

受访的业内参与方指出，在短期内，很多业内利益相关方将投资打造自己的（备用）发电和电池储能系统，但这些系统主要是用于应急供电，而不是向输电系统运营商提供辅助服务。但是，如果还没有应用，两个利益相关方都期望未来通过其生产场地为电压稳定性做出贡献。

## 5 结论

考虑到电力消费量的不断提高，到 2050 年，峰值负荷及可再生能源发电容量都可能翻一番，届时德国电网会遇到多种挑战（但也存在机遇）。同时，因为传统发电技术逐步淘汰，通过其他方式维持稳定性的技术特征（即惯量）也越来越少。目前，正呼吁可再生能源发电厂承担起这种任务。这就要求不断进行再次评估，确定辅助服务需要如何改变及进一步演化，才能顺应系统的需求。

近年来，此话题在德国取得了积极广泛的发展，这在一定程度上，也是得益于欧洲层面的发展。为了找到最佳的发展途径，这些年来，与所有利益相关方进行了多次讨论。这些讨论的结果也记录在访谈结果中：大多数利益相关方已在此领域掌握了充分的经验，能够明确地描述出对未来的憧憬。这种持续的辩论预计在短期内不会结束；且未来仍须不断讨论和界定辅助服务的设计以及对可再生能源发电厂的要求，才能设计出相应的流程和技术。

目前，提供辅助服务的选择主要有三种：通过具有约束力的电网连接指导方针、市场或者电网运营商。这三种选择中哪种最高效，必须基于参与方的结构和设计，根据具体情况进行具体的评估。访谈凸显了不同利益相关方观点的差异，因此，强烈建议就辅助服务采购的演变展开开放、有建设性的对话。

但是，所有受访的利益相关方都对一件事抱有信心：在整个能源转型的过程中，电力质量一直维持着高水平，未来也将维持高水平。即便已观测到波动性的不断提高，但这不会影响供电安全级别的维持。在发生故障时，每一设备均可采取个体化行为，这也在一定程度上保证了供电安全，而在以前，情况却并非总是如此。

为了以最优的方式取代提供辅助服务的传统发电厂并确保电网的稳定性，理想的方式是将可再生能源发电厂与储能解决方案结合在一起。必须在近期内解决的一个问题是要为辅助服务提供商提供充分的激励；大多数受访者认为这是加速辅助服务提供商转型、摆脱化石燃料以及推动辅助服务市场进一步发展的关键。

电力系统的持续变化表明，目前比以往任何时候都更需要维持辅助服务的安全性、可靠性和经济可行性。最后，只有通过可再生能源电厂能力的高效利用以及现有法规的不断调整，才有可能实现这一点。

任何情况下，都一定要预测到变化，以便能够为可再生能源电厂提供充分的提前期，修改任何采购过程。积极主动地处理此领域可能出现的任何监管或技术问题是最佳的前进道路。目前在德国运营的电厂，到了已经实现气候中和和电力系统的未来，也必须能够安全的运行。

# 图表列表

表 1: 主要辅助服务产品 .....	6
表 2: 主要的稳定性产品.....	9
图 1: 辅助服务的成本发展.....	12
图 2: 参与方及其活动概况.....	13
图 3: 辅助服务采购的级别.....	15
图 4: 通过可再生能源设备提供的辅助服务类别的概述.....	17

---

## 参考文献

- <sup>1</sup> Kerstine Appunn, “每年 12 分钟: 德国有史以来最短的停电时间”, 2020 年 10 月 22 日, <https://www.cleanenergywire.org/news/12-minutes-year-germany-has-shortest-time-power-black-outs-ever>.
- <sup>2</sup> 德国能源署, “系统安全 2050 - 未来电力系统的系统服务和稳定性”, 2020 年 4 月, 参见 <https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/dena-studie-systemsicherheit-2050-systemdienstleistungen-und-aspekte-der-stabilitaet-im-zukuenftigen-stromsystem/>.
- <sup>3</sup> Markus Graebig 等人, “电力, 电网, 电流”, 日期不详, 参见 <https://www.stromnetzfluss.de/#download>.
- <sup>4</sup> 同上.
- <sup>5</sup> 同上.
- <sup>6</sup> 德国能源署, “定义和划定 - 供应安全性和可靠性的要素”, 2019.
- <sup>7</sup> 同上.
- <sup>8</sup> 欧洲议会和理事会, “第(EC) 714/2009 号关于跨境电力交换的网络准入条件以及废除第(EC)1228/2003 号条例的条例”, 2009 年 7 月 13 日, 参见: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex%3A32009R0714>.
- <sup>9</sup> VDE 电气, 电子和信息技术协会, “发电机组网络规范要求”, 2017 年 12 月 18 日, 参见 <https://www.vde.com/en/fnn/topics/european-network-codes/rfg>.
- <sup>10</sup> 能源监管机构合作署, “发电机组要求”, 2021 年, 参见 <https://documents.acer.europa.eu/en/Electricity/CONNECTION-CODES/REQUIREMENTS-FOR-GENERATORS>.
- <sup>11</sup> VDE 电气, 电子和信息技术协会, “技术连接规则解释”, 2018 年 4 月 12 日, 参见 <https://www.vde.com/de/fnn/arbeitsgebiete/tar/uebersicht>.
- <sup>12</sup> 德国能源署, “电力市场自由化”, 日期不详, 参见 <https://www.dena.de/en/topics-projects/energy-systems/electricity-market/>.
- <sup>13</sup> Markus Graebig 等人, “电力, 电网和 电流”, 日期不详, 参见 <https://www.stromnetzfluss.de/#download>.
- <sup>14</sup> Next Kraftwerke, “什么是常规劳动力市场?”, 2021 年, 参见 <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/regelarbeitsmarkt>.
- <sup>15</sup> 50 赫兹, “德国平衡能源市场启动”, 2020 年 11 月 6 日, 参见 <https://www.50hertz.com/en/News/FullarticleNewsof50Hertz/id/7178/go-live-of-german-balancing-energy-market>.
- <sup>16</sup> 联邦能源与水经济协会(BDEW), “分析和评估进一步发展电力控制能源市场的方案”, 2019 年 7 月 8 日, 参见 [https://www.bdew.de/media/documents/Stn\\_20190708\\_EOM-2-0-Weiterentwicklung-Regelenergiemarkt-Strom.pdf](https://www.bdew.de/media/documents/Stn_20190708_EOM-2-0-Weiterentwicklung-Regelenergiemarkt-Strom.pdf).
- <sup>17</sup> 德国能源署, “土耳其和德国电力市场灵活性”, 2021 年 11 月, 参见 <https://www.energypartnership-turkey.org/media-elements/>.
- <sup>18</sup> 同上.

- 
- <sup>19</sup> 德国能源署, “系统安全 2050”, 2020 年 3 月, 参见 [https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2020/dena\\_Systemsicherheit\\_2050\\_LANG\\_WEB.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2020/dena_Systemsicherheit_2050_LANG_WEB.pdf).
- <sup>20</sup> 同上.
- <sup>21</sup> 虚拟电厂-巴登符腾堡能源公司(EnBW), “重新调度 2.0 - 电厂运营商现在需要知道的事情”, 2021 年 5 月 11 日, 参见 <https://www.interconnector.de/energieblog/redispatch-2-0-was-anlagenbetreiber-jetzt-wissen-muessen/>.
- <sup>22</sup> 德国能源署, “土耳其和德国电力市场灵活性”, 2021 年 11 月, 参见 <https://www.energypartnership-turkey.org/media-elements/>.
- <sup>23</sup> 同上
- <sup>24</sup> 德国联邦网络局, “2021 年监测报告”, 2022 年 3 月 15 日, 参见 [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Monitoringberichte/Monitoringbericht\\_Energie2021.html](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Monitoringberichte/Monitoringbericht_Energie2021.html).
- <sup>25</sup> 德国能源署, “在德国和法国执行欧盟内部电力市场指令中非频率相关系统服务市场化采购的分析”, 2022 年 2 月, 参见 <https://www.d-f-plattform.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/analyse-marktliche-beschaffung-von-nicht-frequenzgebundenen-systemdienstleistungen-deutsch-franzoesisch/>.
- <sup>26</sup> 联邦能源与水经济协会, “未来系统服务采购”, 2020 年 9 月 10 日, 参见 <https://www.bdew.de/energie/kuenftige-beschaffung-von-systemdienstleistungen/>.
- <sup>27</sup> 德国能源署, “在德国和法国执行欧盟内部电力市场指令中非频率相关系统服务市场化采购的分析”, 2022 年 2 月, 参见 <https://www.d-f-plattform.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/analyse-marktliche-beschaffung-von-nicht-frequenzgebundenen-systemdienstleistungen-deutsch-franzoesisch/>.
- <sup>28</sup> 德国能源署, “系统安全性长期设计”, 2020 年 11 月, 参见 <https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/dena-stellungnahme-langfristige-ausgestaltung-der-systemsicherheit/>.
- <sup>29</sup> 德国电气工程师协会电网接入/电网运行委员会 (VDE FNN), “制定规则的好处”, 2016 年 9 月 28 日, 参见 <https://www.vde.com/de/fnn/arbeitsgebiete/regelsetzung/nutzen>.
- <sup>30</sup> 德国能源署, “系统安全性长期设计”, 2020 年 11 月, 参见 <https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/dena-stellungnahme-langfristige-ausgestaltung-der-systemsicherheit/>.
- <sup>31</sup> Next Kraftwerke, “什么是输电规范?”, 日期不详, 参见 <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/transmission-code>.
- <sup>32</sup> VDE FNN, “与欧洲法规的相互作用”, 2019 年 7 月 22 日, 参见 <https://www.vde.com/de/fnn/arbeitsgebiete/regelsetzung/zusammenwirken-europaeische-regelsetzung>.
- <sup>33</sup> 联邦能源与水经济协会, “未来系统服务的采购”, 2020 年 9 月 10 日, 参见 <https://www.bdew.de/energie/kuenftige-beschaffung-von-systemdienstleistungen/>.
- <sup>34</sup> 德国能源署, “在德国和法国执行欧盟内部电力市场指令中非频率相关系统服务市场化采购的分析”, 2022 年 2 月, 参见 <https://www.d-f-plattform.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/analyse-marktliche-beschaffung-von-nicht-frequenzgebundenen-systemdienstleistungen-deutsch-franzoesisch/>.
- <sup>35</sup> 联邦经济事务和气候行动部 (BMWK), “网络运行和系统安全”, 日期不详, at <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/NetzeUndNetzausbau/netzbetrieb-und-systemsicherheit.html>.



---

<sup>36</sup> 德国能源署, “在德国和法国执行欧盟内部电力市场指令中非频率相关系统服务市场化采购的分析”, 2022 年 2 月, 参见 <https://www.d-f-plattform.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/analyse-marktliche-beschaffung-von-nicht-frequenzgebundenen-systemdienstleistungen-deutsch-franzoesisch/>.

<sup>37</sup> 联邦经济事务和气候行动部 (BMWK), “网络运行和系统安全”, 日期不详, 参见 <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/NetzeUndNetzausbau/netzbetrieb-und-systemsicherheit.html>.

<sup>38</sup> Schlecht 等人 (系统服务的未来需求和采购(SDL-Zukunft)项目框架内的报告), “对非频率相关系统服务的市场化采购的效率审计 (NF-SDL)”, 2020 年 8 月 18 日, 参见 [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/ergebnispapier-effizienzpr%C3%BCfung-nf-sdl.pdf?\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/ergebnispapier-effizienzpr%C3%BCfung-nf-sdl.pdf?_blob=publicationFile&v=2).

<sup>39</sup> 德国能源署, “系统服务采购”, 日期不详, 参见 <https://www.dena.de/newsroom/veranstaltungen/2019/beschaffung-von-systemdienstleistungen/>.

<sup>40</sup> 欧洲输电系统运营商联盟(ENTSO-E), “什么是系统规范?”, 日期不详, 参见 [https://www.entsoe.eu/network\\_codes/](https://www.entsoe.eu/network_codes/).

<sup>41</sup> 同上.

<sup>42</sup> 电气系统和网络、数字化和能源经济研究所, “高电压和特高压网络中的网络资源和系统服务”, 2021 年 7 月 14 日, 参见 <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/netzbetriebsmittel-und-systemdienstleistungen-im-hoch-und-hoehchstspannungsnetz.html>.

<sup>43</sup> 同上.

<sup>44</sup> 德国能源署, “在德国和法国执行欧盟内部电力市场指令中非频率相关系统服务市场化采购的分析”, 2022 年 2 月, 参见 <https://www.d-f-plattform.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/analyse-marktliche-beschaffung-von-nicht-frequenzgebundenen-systemdienstleistungen-deutsch-franzoesisch/>.

<sup>45</sup> 同上.

<sup>46</sup> 德国电气工程师协会电网接入/电网运行委员会, “根据需求实施非频率相关系统服务”, 2021 年 8 月 13 日, 参见 <https://www.vde.com/de/fnn/aktuelles/nicht-frequenzgebundene-systemdienstleistungen-bedarfsgerecht-umsetzen>.

<sup>47</sup> Next Kraftwerke, “什么是系统服务”, 日期不详, 参见 <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/systemdienstleistungen#kosten-der-systemdienstleistungen>.

<sup>48</sup> 德国联邦网络局, “2021 年监测报告”, 2022 年 3 月 15 日, 参见 [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Monitoringberichte/Monitoringbericht\\_Energie2021.html](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Monitoringberichte/Monitoringbericht_Energie2021.html).

<sup>49</sup> Schlecht 等人 (系统服务的未来需求和采购(SDL-Zukunft)项目框架内的报告), “对非频率相关系统服务的市场化采购的效率审计 (NF-SDL)”, 2020 年 8 月 18 日, 参见 [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/ergebnispapier-effizienzpr%C3%BCfung-nf-sdl.pdf?\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/ergebnispapier-effizienzpr%C3%BCfung-nf-sdl.pdf?_blob=publicationFile&v=2).

<sup>50</sup> 同上.

<sup>51</sup> 德国电气工程师协会电网接入/电网运行委员会, “根据需求实施非频率相关系统服务”, 2021 年 8 月 13 日, 参见 <https://www.vde.com/de/fnn/aktuelles/nicht-frequenzgebundene-systemdienstleistungen-bedarfsgerecht-umsetzen>.

<sup>52</sup> 同上.

<sup>53</sup> 欧洲能源监管合作署 (ACER), “欧洲能源监管合作署 (ACER) 和欧洲能源监管委员会 (CEER) 就“电网连接网络规范”发起公共协商”, 2022 年 5 月 6 日, 参见 <https://www.acer.europa.eu/events-and-engagement/news/acer-and-ceer-launch-public-consultation-electricity-grid-connection>.

- 
- <sup>54</sup> 详细资料可在此查阅: [https://acer.europa.eu/Official\\_documents/Public\\_consultations/PC\\_2022\\_E\\_02/GCNCs%20Policy%20Paper-%20public%20consultation.pdf](https://acer.europa.eu/Official_documents/Public_consultations/PC_2022_E_02/GCNCs%20Policy%20Paper-%20public%20consultation.pdf).
- <sup>55</sup> 爱尔兰电网 (EirGrid) 集团, “DS3 项目”, 日期不详, 参见 <https://www.eirgridgroup.com/how-the-grid-works/ds3-programme/>
- <sup>56</sup> 德国能源署, “系统安全 2050 - 未来电力系统的系统服务和稳定性”, 2020 年 4 月, 参见 <https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/dena-studie-systemsicherheit-2050-systemdienstleistungen-und-aspekte-der-stabilitaet-im-zukuenftigen-stromsystem/>.
- <sup>57</sup> 这可以解释为, 欧洲电网中还有许多提供惯性的常规发电机, 所以在正常运行中不需要担心这个问题。
- <sup>58</sup> 欧洲输电系统运营商联盟 (ENTSO-E), “有限频率敏感模式”, 2018 年 1 月 31 日, 参见 [https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/Network%20codes%20documents/NC%20RfG/IGD\\_LFSM-O-U\\_final.pdf](https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/Network%20codes%20documents/NC%20RfG/IGD_LFSM-O-U_final.pdf).
- <sup>59</sup> 同上。
- <sup>60</sup> 联邦能源与水经济协会, “市场设计 2030+”, 2021 年 8 月, 参见 <https://www.bdew.de/service/stellungnahmen/bdew-positions-papier-marktdesign-2030-das-marktdesign-fuer-eine-klimaneutrale-energieversorgung/>.
- <sup>61</sup> 德国联邦网络局, “供电系统的灵活性, 改进灵活性发展的清单、障碍和方法”, 2017 年 4 月 3 日, 参见 [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen\\_Institutionen/NetzentwicklungUndSmartGrid/BNetzA\\_Flexibilitaetspapier.pdf;jsessionid=936740FED421F40E5682B9D8203CDDC9?\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/NetzentwicklungUndSmartGrid/BNetzA_Flexibilitaetspapier.pdf;jsessionid=936740FED421F40E5682B9D8203CDDC9?_blob=publicationFile&v=1).
- <sup>62</sup> 环保、能源与交通研究所 (IKEM), “提供低电压灵活性 - 现状、互动和展望”, 2019 年 12 月, 参见 [https://www.ikem.de/wp-content/uploads/2020/02/20200129\\_ENavi\\_14a\\_EnWG.pdf](https://www.ikem.de/wp-content/uploads/2020/02/20200129_ENavi_14a_EnWG.pdf).
- <sup>63</sup> 关于电网收费的更多信息, 可以在 “德国的智能电网: 目前情况” 报告中找到, 德国能源署撰写, 可在此查阅 <https://www.energypartnership.cn/media-elements/>.
- <sup>64</sup> 可再生能源集团 Arge Netz, 电网运营商 Schleswig-Holstein Netz, “‘交易平台’能源智能协调(Enko) 改进绿色电力并入电网的概念”, 2018 年 11 月, 参见 [https://www.enko.energy/wp-content/uploads/ENKO\\_White-Paper-Stand-Nov.-2018.pdf](https://www.enko.energy/wp-content/uploads/ENKO_White-Paper-Stand-Nov.-2018.pdf).
- <sup>65</sup> Deuchert 等人. “根据《能源工业法(EnWG)》 § 14c 设计基于市场的灵活性采购 - 能源转型数字化议程之智慧能源展示计划(SINTEG)灵活性平台‘能源智能协调’(ENKO)的经验”, 2021 年 6 月, 参见 [https://www.e-bridge.de/wp-content/uploads/2021/06/et\\_Ausgestaltung-der-marktgest%C3%BCtzen-Flexibilit%C3%A4tsbeschaffung\\_SINTEG\\_ENKO\\_Heft-6\\_2021.pdf](https://www.e-bridge.de/wp-content/uploads/2021/06/et_Ausgestaltung-der-marktgest%C3%BCtzen-Flexibilit%C3%A4tsbeschaffung_SINTEG_ENKO_Heft-6_2021.pdf).
- <sup>66</sup> 联邦经济和气候保护部 (BMWK), “网络运行和系统安全”, 日期不详, 参见 <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/NetzeUndNetzausbau/netzbetrieb-und-systemsicherheit.html>.
- <sup>67</sup> 同上。
- <sup>68</sup> 联邦能源与水经济协会, “关于 50.2 赫兹光伏系统改造的常见问题及其答案”, 2023 年 1 月 18 日, 参见 <https://www.bdew.de/energie/systemstabilitaetsverordnung/>.
- <sup>69</sup> 联邦能源与水经济协会, “50.2 赫兹问题: 基本信息”, 2012 年 7 月 27 日, 参见 <https://www.bdew.de/energie/systemstabilitaetsverordnung/502-hertz-problem/>.

Website



Wechat

