



Federal Ministry  
for Economic Affairs  
and Climate Action



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

# 德国智能电网现状

中德能源与能效合作伙伴



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

**dena**  
German Energy Agency

## 版本说明

《德国智能电网现状》报告概述德国智能电网目前适用的框架条件，探索可能对更多国家具有启发性的成功理念和项目。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气候保护部（BMWK）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

弗里德里克·泊杰（Friederike Berger），德国能源署

安娜斯塔西亚·科姆莎科娃（Anastasiia Komshakova），德国能源署

### 图片来源：

BMWK/Cover  
Shutterstock/ 454323052 (p. 13)  
Shutterstock/ 1007325514 (p. 25)

### 项目主任：

尹玉霞  
德国国际合作机构

### 致谢：

莱亚-瓦莱斯卡·吉贝尔（Lea-Valeska Giebel），德国能源署  
西蒙·戈斯（Simon Goess）

### 报告管理和协调：

王昊  
德国国际合作机构

### 版面设计：

Edelman. ergo（受德国联邦经济和气候保护部的委托）

### 作者：

卡捷琳娜·西莫（Katerina Simou），德国能源署

© 2022 年 8 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。本报告仅代表作者的观点，而不代表项目合作伙伴的观点，如有任何信息遗漏或错误，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

版本说明 .....	2
引言.....	5
执行摘要 .....	6
<b>1 智能电网在德国的兴起 .....</b>	<b>7</b>
1.1 去中心化——智能电网的驱动力.....	7
1.2 通过发展智能电网应对挑战 .....	8
1.3 什么是智能电网? .....	9
1.4 信息通信技术的影响 .....	10
<b>2 德国智能电网的发展.....</b>	<b>12</b>
2.1 观念的转变——智能电网的参与方.....	12
2.2 智能电网运营 .....	14
2.3 配电网扩建与智能电网规划 .....	17
2.4 电动车接入电网 .....	18
2.5 数据的使用 .....	19
<b>3 德国智能电网的挑战与尝试 .....</b>	<b>20</b>
3.1 技术挑战 .....	20
3.2 监管挑战 .....	20
3.3 运营挑战 .....	21
3.4 相关研究和试点项目 .....	21
<b>4 德国的经验教训 - 智能电表的推广.....</b>	<b>24</b>
<b>5 结论 .....</b>	<b>26</b>
图片列表 .....	27
参考文献 .....	28



# 引言

近年来，随着大量分布式可再生能源接入电网，德国传统的电力系统在确保电力供给侧和需求侧平衡、电网稳定方面面临许多挑战。随着传统电厂运行时长的减少，和间歇性可再生能源发电比例的提高，德国电力系统的灵活性亟待提高，并通过调整电力需求来匹配发电量。这样的问题复杂而又棘手，而智能电网是潜在的解决方案。

智能电网的概念涵盖了未来电力系统构成中的多个要素，包括灵活性、可靠性、安全性和兼容性。此外，智能电网的核心是能源供应的去中心化以及能源系统的数字化转型，这也是推动德国能源转型的两个主要趋势。同时，智能电网使得数据及电力的双向流动成为可能。

最近十年间，德国智能电网发展取得了一定进展。新的数字化解决方案，以及通过试点项目获取的经验，是德国智能电网取得决定性突破以及发展的关键因素。

德国新一届政府承诺，要确保能源转型朝着数字化、民主化和可持续方向发展。实现能源转型这一远大目标，需要智能电网保驾护航。

智能电网可以为消费者参与能源转型、电网的高效运行以及可再生能源进一步并网和消纳创造新的机会。为此，智能电网已经成为德国能源领域的热门话题。智

能电网不仅为德国在严峻挑战下实现能源转型这一宏伟目标推波助澜，也成为解决全球气候问题的有效方案。

本报告旨在概述德国智能电网目前适用的框架条件，探索能够启发更多国家的成功理念和项目。报告在中德能源与能效合作伙伴的框架下，由德国国际合作机构（GIZ）委托德国能源署（dena）编制。

包括智能电网在内的高比例可再生能源电力系统灵活性一直是德国联邦经济和气候保护部、国家能源局指导的中德能源工作组框架下中德能源合作的重要议题之一。过去几年，GIZ 联合其他中德合作伙伴，围绕德国电力系统灵活性的发展经验和最佳实践及其对中国发展高比例可再生能源电力系统的参考意义，不断拓宽和深化该议题下的中德合作，开展交流研讨、联合编制政策研究报告。在中德能源与能效合作伙伴，陆续发布了《德国虚拟电厂的商业模式》、《山西电力系统灵活性与虚拟电厂》、《德国电力行业的供应安全：挑战与措施简述》等报告。在深化各项研究的同时，GIZ 未来还计划从实践层面出发，以区域为重点，进一步推动电力系统灵活性相关的中德合作示范，助力中国在双碳目标下向以可再生能源为主体的新型电力系统的快速、稳步转型。

编者

## 执行摘要

随着可再生能源的进一步发展，德国电力系统发生了根本性的转变，为此，电网需要相应的扩建、电力系统灵活性需要进一步提升，且电力系统要实现双向流动等。这样的趋势促成了电网运营的转变，主要体现在对分布式发电资源的协调以及对包括电动车、热泵、产消者和分布式电池等诸多新的灵活性电力资源的整合。在智能电网的框架内，电厂、电网、供给侧和消费者都要发挥其灵活性，且需要先进的信息与通信技术来确保网络管理的智能化。

本报告将智能电网定义为：通过信息与通信技术，对其组成部分进行动态控制，能实现数据和电力双向流动的，数字化、去中心化的能源系统。

研究表明，智能电网会形成额外的驱动力，并对不同的利益相关方产生影响。尤其是配电系统运营商（DSO），未来必须加强与输电系统运营商（TSO）之间以及消费者与能源生产商之间的协调，向符合智能电网发展的趋势转型，以面对越来越复杂的挑战。

智能电表和数字化基础设施可以支撑并改善需求侧管理，以应对电动车需求的快速增长。且为了实现能源转型的全面数字化，需要高度重视智能电表的应用。通过智能电表实现的数字化，可以提供负荷侧及发电侧数据的访问权，为系统运营商指导及监督电网运行提供支持。

电网扩建成本高昂，已经引发了德国公众的广泛讨论，而智能电网的发展可以减少电网扩建。智能电网可以智能化管理可控负荷，提升现有电力基础设施的效率，降低电网扩建的需求。为确保智能电网进一步发展，近期亟需解决的问题包括：电力系统新型分布式资源的接入与电网可用容量、电压与电流间的相位差问题和电动汽车对电网的挑战。通过提升智能电网的使用效力，促进电力系统中比重与日俱增的可再生能源与分布式负荷的发展，能有效减少电网扩建需求。

要通过智能电网统筹协调改进分布式能源发电与消纳的问题，须满足技术、监管及运营方面的众多先决条件。德国也并非尽善尽美，目前像电网运营数字化和电价信号的问题尚在解决中，电网费用改革需要进行评估，而人工智能在电网运营中的应用还待完善。

过去几年，在配电系统运营商及相关部委的积极推动下，智能电网试点项目发展迅猛。报告介绍了“智慧能源展示计划”项目以及 NETZlabor Sonderbuch 和 flexQgrid 项目，的相关成果。这些项目检验了新的理念，也为智能电网在更大范围内的应用奠定了基础。

通过全面审视德国智能电网的最新发展，报告提出了在国家层面推广智能电网的可行性，为推动智能电网相关研究，改善智能电网的技术、监管和运营提供了进一步的思路。

# 1 智能电网在德国的兴起

过去几年，可再生能源在德国的能源供应体系中稳步推进。在能源转型的同时要面对一系列新的挑战。可再生能源生产依赖天气，与此同时，与日俱增的分布式发电机组发挥着越来越重要的作用。大量新负荷接入电网，尤其是在低电压水平上接入电网。在此背景下，能源系统的各部分都需要智能化地连接与协调，发展智能电网成为一条必由之径。

## 1.1 去中心化——智能电网的驱动力

过去几十年间，在能源系统去中心化需求的驱动下，德国发起了能源供应的根本性变革，引进了以风能和太阳能光伏为主的大量可变可再生能源。能源转型启动后，成为德国公众讨论及政治辩论的热点。尽管目前已经进入能源转型末期，要确保转型成功，仍需采取多种措施，付出巨大的努力。

德国新一届政府提出了更具雄心的能源转型目标，其中最重要的两个趋势是：可再生能源发展和提高电力使用效率，降低一次能源消费。由于其他部门（工业、供热和交通）的大规模电气化，电力需求在短时间内的急剧增长的情况屡见不鲜。为了满足电力需求的增长、取代基于化石燃料的发电，必须大规模发展可再生能源。<sup>1</sup>未来几年，德国能源转型的目标包括：

- 到 2030 年可再生能源在电力需求中占比 80%
  - 到 2030 年海上风电达到 30 吉瓦（截至 2021 年的总装机容量为 8 吉瓦），陆上风电达到 115 吉瓦（截至 2021 年的总装机容量：56 吉瓦）
  - 到 2030 年光伏（PV）装机容量达到 215 吉瓦（截至 2021 年的光伏总装机容量为 59 吉瓦）

- 到 2030 年德国的电解槽装机容量达到 10 吉瓦
- 到 2050 年一次能源消费比 2008 年下降 50%

电力系统要始终维持供需平衡。随着可再生能源在发电结构中所占比重的不断提高，维持供需平衡遇到了新的挑战，且电力供需关系也发生了变化。以前，德国的供电系统是按需发电。不同的传统电厂不仅能有效地满足基础负荷，也能应对任何需求峰值，从而保障供需平衡，确保电网稳定。而可再生能源发电的高可变性和不确定性使电力系统的运行更为复杂，必须相应提高系统灵活性，并在一定程度上调整电力需求以适应发电量。

此外，电力系统已不再只是单向流动：私人家庭安装了屋顶光伏系统，有些公司甚至配备了热电联产机组或者燃料电池。<sup>2</sup>截至 2020 年，德国已经有超过 170 万套分布式发电装置，将风能、太阳能或者生物质能提供的绿色电力接入电网。如图 1 所示，90% 以上的分布式发电装置接入了配电网，这为网络运营商带来了新的挑战。<sup>3</sup>这些小规模分布式发电商积极参与市场，并加入需求侧响应。在德国，170 万千米的配电网将发电厂、家庭和企业紧密联系起来。<sup>4</sup>

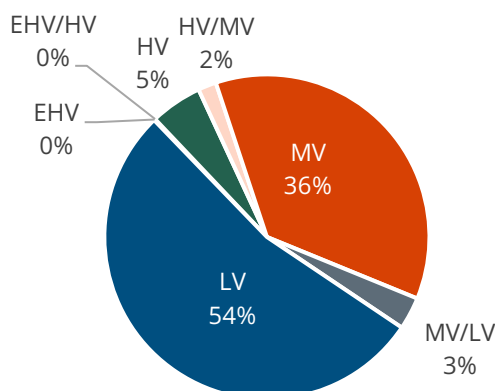
图 1：太阳能发电装机容量，按电压水平列示（2019）

<sup>1</sup> 德国联邦经济和气候保护部（Ziele der Energiewende）

<sup>2</sup> E.ON（2022）

<sup>3</sup> Maaßen（2019）

<sup>4</sup> 德国联邦经济和气候保护部（Das deutsche Strom-Verteilernetz）



\*缩写  
 - 低压 (LV);  
 - 中压 (MV);  
 - 高压 (HV);  
 - 特高压 (EHV)

来源：德国联邦网络局<sup>5</sup>

综上所述，配电网目前正在发生前所未有的能源转型。且电动车、部门耦合、储能等对配电网产生直接且巨大影响的消费侧，尚未被考虑在内。<sup>6</sup> 新型电力消费者（例如电动车、热泵、产消者、分布式电池系统）的崛起，需要更进一步的部门耦合，尤其是交通和供热与电力的耦合。以上这些都会对德国众多配电系统运营商（DSO）产生影响，也可能导致相应的电网扩建。

低电压水平的新负荷未来会越来越多，但配电系统运营商并不清楚消费者的行为将如何演变。未来，通过新的业务模型，消费者可以在有大量光伏发电或风电接入电网的超低电价时段用电。<sup>7</sup>且在低价时段，消费者可以在用电的同时进行充电，导致负荷的同步增长，对电力系统产生影响。德国的目标是采取安全、快速且高效的方式，整合电网中新的灵活的消费者。

德国正致力于打造气候中和的能源系统，而智能电网可以确保电力系统不会逆趋势发展，智能电网是解决供需两侧日益复杂情况的关键。

## 1.2 通过发展智能电网应对挑战

德国为什么必须推行智能电网？哪些因素促成了智能电网的出现？

德国智能电网发展的驱动力总结如下：

1. 电网中可再生能源比例的不不断提高
2. 新（灵活）负荷接入电网
3. 产消者提供灵活性获得的利益
4. 为确保供应安全和电网稳定性的灵活性需求
5. 将电网扩建需求降至最低

分布式机组数量不断增长，要把它们成功且高效地接入电网，同时又确保稳定的电力供应、减少电网的扩建，智能电网是必不可少的工具。电网扩建在德国引发了很多讨论：即通过使用智能解决方案，采取创新的商业及技术解决方案，精简系统运营，优化市场设计可以最大限度地避免电网扩建。

随着新的参与方和流程的出现，电网运营更为复杂。为了更进一步推动能源转型，迫切需要部署信息与通信技术（ICT）。

<sup>5</sup> 联邦网络局（配电网状况和扩建情况报告）

<sup>6</sup> Verband kommunaler Unternehmen e.V.（2022）

<sup>7</sup> 在德国，生产者和消费者的角色越来越朝着产消者和灵活消费者的方向转变。消费者能够在可再生能源发电期间用能，也有购买或者提供能量的选择权。

成熟的智能电网能提高电力系统中可再生能源的比重、供应安全与系统效率、以及较小规模参与方对能源转型的接纳和参与度以推动技术的发展。

### 1.3 什么是智能电网？

2013 年，德国政府“E-能源——基于信息通信技术的未来能源系统”资助倡议框架下的活动是德国智能电网的起源。此资助倡议第一次将智能电网的理念与数字化能源系统的理念联系在一起。<sup>8</sup>确定智能电网的定义不难，但要用几句话总结出智能电网的全部组成部分却并非易事。在智能电网理念发展的初期，德国联邦网络局（BNetzA）提出了最初的定义：

*“采用通信、计量、控制、监管和自动化技术以及信息技术组件升级传统电网后，传统电网就会变成智能电网。”<sup>9</sup>*

从这一定义中可以看出，信息通信技术是应对能源转型造成的电网巨大变化的关键。但此后，随着新情况的出现，德国更新了智能电网的定义：

*“当电网内存在信息交流，并可藉此对电力的生产、消费和储存进行动态控制，电网就变得智能。”<sup>10</sup>*

此外，智能电网是一种实现电力和数据双向流动的电网网络[……]具有自我治愈能力，能够让消费者成为主动参与者。<sup>11</sup>

从上述定义中可以得出：智能电网指的是存在一个数字化、去中心化的能源系统，此系统可实现数据和电力的双向流动，通过信息与通信技术的使用对不同的组成部分进行动态控制。本报告援引此定义作为分析依据。



<sup>8</sup> Schütz 和 Uslar (2022)

<sup>9</sup> 德国联邦网络局（“智能电网”和“智能市场”）

<sup>10</sup> 同上。

<sup>11</sup> i-SCOOP (2022)

## 1.4 信息通信技术的应用

去中心化的新情况给电网运营带来了新的挑战。电流的精确计量、控制和自动化是解决这些问题的关键。<sup>12</sup>目前，迫切需要在配电网中应用创新的信息通信技术，将配电网打造为智能电网。

数字化是分布式能源转型的重要组成部分。根据德国信息产业、电信和新媒体协会（BITKOM）的一项研究，通过加速数字化，到 2030 年，能源部门的二氧化碳当量（CO<sub>2</sub>e）排放可以减少 2300 万吨。<sup>13</sup>数字化的核心是收集及处理数据，并在数据处理和交换的基础上改进现有解决方案。以此，将生产者、消费者、储能设施、产消者和灵活消费者联系在一起，并通过自动化流程，对参与方进行实时控制和协调。

### 数字化及安全

通过数字化，可在城市和社区等层面实现对市场参与者的监测和控制。新的参与方和角色的出现使情况变得更加复杂，但高效且全面的数字化能够以稳健的方式持续改进能源系统的设计和控制。可用的智能及远程维护软件也越来越多，结合人工智能使用，电厂及设备维护的实时数据分析会变得更加简单、更加快速。<sup>14</sup>

在能源转型的过程中要重视数据在确保供应安全方面的重要性。奠定高质量的数据基础是把握数字化发展机会和可能性的先决条件。

同时，数字化安全属于基础设施问题，要由国家承担责任进行全面的监管，以避免由于数字化水平提高而招致的网络攻击。

### 网络攻击

德国通过“关键基础设施保护计划”（KRITIS），监管重要的关键基础设施。这些基础设施的故障或者损坏会导致持续的供应瓶颈，严重扰乱公共安全或者造成其他严重后果。<sup>15</sup>能源以及信息技术和电信部门存在关键基础设施，且它们遭遇的外部威胁也将越来越多。

为此，在关键基础设施立法中应特别强调信息安全的高优先级。<sup>16</sup>在能源部门“关键基础设施保护计划”（KRITIS）的背景下，有多项法律和规范与信息技术安全息息相关。尤其是网络与信息安全（NIS）指令，这是加强欧洲网络安全的重要法律文书。2015 年 7 月德国出台了《信息技术安全法》，努力加强信息技术安全。该法要求关键基础设施运营商根据技术发展最新水平加强信息技术安全，若发生重大信息技术安全事故，须向德国联邦信息安全局（BSI）报告。

### 智能合同

智能合同是自动化的高效控制流程，适用于大量分布式、可变的发电和用电设备共存的能源系统。智能合同是“转化为程序代码的合同”，大量反复发生、以标准化形式运行的过程尤其适合使用此种合同。

智能合同并非法律意义上的合同，而是可以自动执行合同条款的交易协议。随着可再生能源的发展，电网运营越来越复杂，智能合同及区块链技术的结合可以简化这些过程。智能合同可以提高分布式能源转型的速度和质量，降低交易成本，促成新的业务模型。原则上，在能源行业的整个价值链中都可以应用智能合同，例如来源保证书和证明、电动车辆的智能充电、灵活性交易或者本地的点对点能源交易。

早在 2019 年，德国政府就宣布创设智能合同登记簿。<sup>17</sup>智能合同登记簿的主要目标包括以下内容：

- 促成此主题方面的交流和网络化
- 打造使用案例的开放度和透明度
- 提供及讨论智能合同的描述
- 以代码形式提供智能合同
- 探索审计及认证选择
- 检查与现有软件解决方案的整合

### 人工智能

算法以及人工智能的使用具有巨大的潜力。在能源行业中，其最重要的用途是识别数据模式，协调及优化

<sup>12</sup> Flore and Gómez (2020)

<sup>13</sup> 信息产业、电信和新媒体协会（未注明日期）

<sup>14</sup> Franceschelli (2022)

<sup>15</sup> Next Kraftwerke GmbH (2022)

<sup>16</sup> 同上。

<sup>17</sup> 德国能源署也开发了智能合同登记簿的理念。通过以下链接可以获取更多信息：<https://future-energy-lab.de/projects/smart-contract-register/>

能源系统以适应并管理可再生能源和分布式比重不断提升的能源系统。

人工智能可以优化电网，将可再生能源高效地接入电网，为积极自主的配电系统提供支持，为需求侧灵活

性开辟新的收入流。人工智能也有可能加速高性能材料的探索，从而为下一代的清洁能源和储能技术提供支持。

人工智能在能源部门的应用依然非常有限，目前主要是部署在预见性资产维护的试点项目中。<sup>18</sup>要了解关于此主题的更多信息，请参考本报告子章节 3.1。



<sup>18</sup>世界经济论坛（2021）

## 2 德国智能电网的发展

智能电网的作用是提高电网运营的智能化和灵活性。智能电网发挥作用有几个前提条件，即其发展演变必须匹配新的市场角色、过程、挑战和创新理念。过去几年间，这些前提条件发生了重大变化，且未来会继续变化，以确保德国去中心化程度不断提高的能源转型取得成功。

### 2.1 观念的转变——智能电网的参与方

#### 配电系统运营商

德国的能源系统更加去中心化，因此配电系统运营商必须承担起新的角色和责任。由于可再生能源发电的可变性，在一天内，配电网内的负荷流动方向会发生多次变化。为了确保电网的安全运行，满足电流及电压的运行参数，配电系统运营商必须越来越多地应用无功功率及电网堵塞管理。

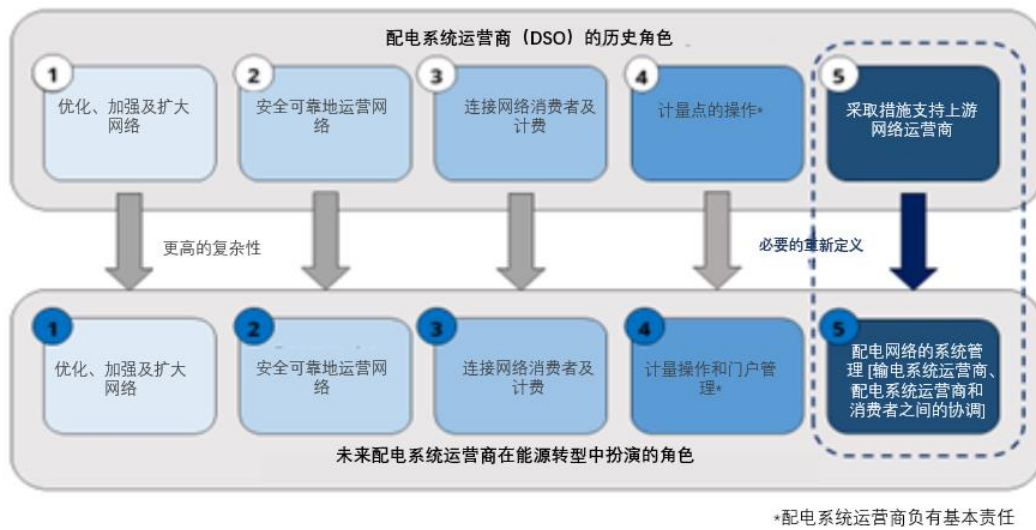
根据图 2，近些年，德国配电系统运营商必须承担的一项新责任是对配电网进行系统化管理。之前“采取措施支持上游网络运营商”的角色意味着只有大型发电厂才能直接接入输电网，而配电系统运营商须“自上而下”地将电力传输给消费者。<sup>19</sup>但是，随着传统电厂的逐步退役及小型分布式发电的崛起，这种历史角色的定义已经过时。

图 2 还展示了配电系统运营商的另一个重要角色，即“计量点运营商和网关管理者”。在智能电网内，各个参与方之间负荷及上网数据（即计量数据）的转移对精确预测至关重要，而精确预测的目的在于计费 and 系统平衡。智能电网的发展（同时参见第 4 章）是实现此目的的必要条件。配电系统运营商承担了计量点操作者以及智能电表门户管理员的角色，为大量市场及运营过程提供必要的计量数据。<sup>20</sup>当然，随着产消者数量的增长，会对计量点的操作提出新的需求，因此配电系统运营商的角色也会不断演变。这意味着在未来，配电系统运营商不仅仅是其电力网络的运营商，也是信息通信技术基础设施的运营商。实现了配电网的智能化，才能披露电网内较低电压电流的实际流动。对很多配电系统运营商来说，特定时间点的实际电网特征仍然是未知的。

<sup>19</sup> AHK Stockholm (2022)

<sup>20</sup> 同上。

图 2：配电系统运营商角色的演变



来源：德国联邦能源和水资源协会（BDEW）

### 输电和配电系统运营商之间的协调

随着配电系统运营商角色的转变，配电系统运营商和输电系统运营商（TSOs）之间的协调将变得更加重要。配电系统运营商不再只是分配输电系统运营商提供的电力，而是更侧重在调节，及与输电系统运营商配合管理电力流向和灵活性。

平衡是明确须由输电系统运营商承担的任务，但输电系统运营商和配电系统运营商都要负责避免其各自电网内的网络堵塞，保障整体的系统稳定性。为了让每一网络运营商都能确保其自身网络的稳定性，临近、上游或下游网络不得有任何未经协调的干预（梯级原则）。<sup>21</sup>每一配电系统运营商都有义务积极维护整体系统稳定性，不论其网络的规模或者布局如何。与输电系统运营商类似，配电系统运营商也将演变成“系统管理者”，利用其电网中的可用智能和灵活性资源，确保运行安全。

在高比例可再生能源接入的区域，越来越多的配电系统运营商正在履行这一职责。<sup>22</sup>

去中心化的趋势还会继续，因此，必须改变输电系统运营商与配电系统运营商之间的交互方式。欧洲输电系统运营商网络（ENTSO-E）制定了促进双方交互的理念，这些理念也已经成为德国讨论的主题。

为了促进输配网络运营之间更紧密的融合，各种组织结构已落实到位。欧洲层面出台的“欧洲输电系统运营商网络网络守则”，规定了输电系统运营商和配电系统运营商之间要交流的协议类型，并针对较低水平的网络及分布式能源设备，提出了可观察性和可控性的要求。智能电网中不同系统组件之间的信息交流，会产生大量的数据流动。该网络守则建立了系统运营必需数据的基本框架。输电系统运营商和配电系统运营商共同确定它们各自须得到的信息、信息的质量和所有权以及如何最终确保保密性和透明性。<sup>23</sup>此外，德国正在逐步落实欧盟指令 2017/1485 号“系统运营指导方针”。此指令针

<sup>21</sup> 德国联邦能源和水资源协会（Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.）（2016）

<sup>22</sup> Verband kommunaler Unternehmen e.V.（2018）

<sup>23</sup> 欧洲输电系统运营商网络（2015）

对输电系统运营商、配电系统运营商以及其他重大电网用户之间的信息和数据交流建立了一个协调的框架。

总的来说，配电系统运营商与上游输电系统运营商之间的关系不断变化，配电系统运营商要承担起更多责任，对系统稳定性做出更大的贡献。为了确保整体系统的稳定性，配电系统运营商要为输电系统运营商提供越来越多的支持，即执行堵塞管理以及电压和频率控制。

## 产消者

产消者是电网中新的参与者。欧盟有意加强产消者的地位，尤其是家庭产消者，这种新的参与方将在智能电网中发挥至关重要的作用。但个体产消者也极具依赖性，只有通过智能解决方案，它们才能成为系统的一部分。

当储能成为灵活、脱碳化智能电网的一个重要组成部分时，产消者就能为供应安全做出更大的贡献。家用储能设备或电动车也有助于电力不足时段的高用电需求。<sup>24</sup>

德国拥有欧洲最大的户用小型电池市场。根据德国储能系统协会（BVES）的数据，在 2022 年 4 月，德国户用电池系统的装机数量达到 50 万，装机容量超过 2.5 吉瓦，相当于两个核电厂的容量。<sup>25</sup>自 2020 年引进新的招投标细分市场以来，德国不断推动创新，鼓励安装配有电池储能设备的太阳能光伏项目，以帮助稳定电力系统。这些创新招投标已取得成效，获得补贴的个体光伏发电-储能结合体已经投入运营。<sup>26</sup>

此外，电池往往也可以配合屋顶光伏发电系统使用。家庭自身无法即时用掉的发电量可以进行短期储存，提高自给自足率，减少使用源自电网的电力。消费者储电的动力一方面是因为电价高，另一方面是因为电池及光伏系统的成本以及光伏发电接入公共电网的收入都在下降。因此，有了电池储电，就可以在没有光伏发电或者没有足够光伏发电的时段继续供电。但是，这需要有足够的单独、小型光伏系统的运营商参与上网，才能让系统平衡发生变化。

这种方式对电池的所有者具有经济吸引，但它对电力系统却没有任何助益。当前激励措施的主要目的是让自我消费量最大化，并不是鼓励向供电网提供服务。电

力的自我消纳不一定有利于电网运行，也可能对电力上网的可预测性产生负面影响。德国联邦网络局（BNetzA）指出，将自发电量全部上网会有助于优化对接入电网电量的预测。如果产消者自行消纳自身生产的电力，其行为就变得无法预测，这会增加对平衡能源的需求。

因此，从对系统最优的角度来看，还必须推动产消者生产的电力全部上网，并在智能电网的架构内，产消者对电价信号做出回应，聚合需求，实现利益的最大化。

## 聚合商

如前文所述，自给自足和需求聚合并行将成为消费者为提高电力系统灵活性做出贡献、参与市场的主要机制。但是，只有采用先进的技术通信、实现负荷计量的数字化，才可能实现聚合和市场参与。聚合商不仅与产消者有密切关联，也在供应侧发挥作用，它们将变得越来越重要。

聚合商往往指的是虚拟电厂（VPP），即整合了大量小型能源设备的分布式能源系统，例如太阳能和风能设备、热电联产以及燃料电池或者电泵和电动车等。虚拟电厂对各种不同的发耗电设备进行统一的能源监测。<sup>27</sup>

组建所谓的商业虚拟电厂（CVPP）是为了加入能源市场。本身配备了发电设备的家庭和企业可以通过商业虚拟电厂，主动参与电力交易。众多小型电力产销者接入商业虚拟电厂，可以动态抵消生产波动。近年来，这种商业模式在德国取得了长足的发展。

## 2.2 智能电网运营

德国引进了能源信息网络以及网络信号灯理念辅助电网运营。前者有利于电网和电厂运营商之间的数据交流。后者是采用智能技术监测并控制电网内所有电厂和状况的基础，信号的意义为：

- “绿灯相位”意味着基于预测值，预计不会出现任何瓶颈——不需采取限制措施，系统可以平稳运行。
- “黄灯相位”意味着，预测表明若不采取预防性措施，就会立即出现瓶颈。此情况下，要调整电网连

<sup>24</sup> 同上。

<sup>25</sup> Bundesverband Energiespeicher Systeme e. V. (2022)

<sup>26</sup> ZfK (2022)

<sup>27</sup> Cambridge (2018)

接点上的电力流动，但须避免电网运营商直接干预——直接干预则意味着交通灯变成“红色”。

- 在“红灯相位”下，系统会实时做出自动反应，进行干预，快速且安全消除出现的任何瓶颈。此种反应是基于实际计量。<sup>28</sup>

在黄色相位下，自由电网容量也可以通过基于区块链的二级市场，进行自动交易。<sup>29</sup>德国南部配电系统运营商 Netze BW 最近协调开展了一个名为 *flexQgri* 的项目，进一步发展了信号灯理念。<sup>30</sup>

为了满足日益增长的信息需求，德国对再调度规则进行监管改革。根据德国联邦网络局（BNetzA）的定义，再调度指的是干预发电厂的发电产量，以避免特定电力线路段发生过载。<sup>31</sup>“再调度 2.0”改革囊括了所有发电设备（低至 100 千瓦），将其全部纳入到再调度计划中。这些较小型的机组接入配电网之后，配电系统运营商就必须监督并控制其最终发电量。“再调度 2.0”生效前，再调度措施只适用于基于输电系统运营商要求落实这些措施的传统电厂（最低装机功率 10 兆瓦）。目前，可再生能源和热电联产发电厂（最低装机功率 100 千瓦）也参与再调度，配电系统运营商也在再调度中发挥作用。

### 智能电表

基于天气、能源市场及人类行为相关数据对电力需求所做的精确预测，在智能电网中对其网络运营商很有帮助。在得知用电需求，尤其是峰值需求后，网络运营商可以采取相应的行动，确保稳定的能源供应。

2015 年，德国颁布了《能源转型数字化法》（GDEW），提出智能电表的使用，并要求到 2017 年起开始强制使用智能电表，且到 2032 年，德国所有电表都必须是数字式电表。智能电表实时记录电量消费，并发送给负责的市场参与者。<sup>32</sup>

德国能源署最新的试点研究提出了可靠数据基础设施的三个组成部分，即数据收集的基础设施、数据传输的基础设施以及数据储存的基础设施。<sup>33</sup>每个组成部分都必须提供严格的数据保护，确保其单独使用或其他部分交互时的数据和信息技术安全。

德国将智能计量系统（iMSys）作为可靠的智能电网数据基础设施的核心组成部分给予大力发展。根据《能源转型数字化法》，智能计量系统中的“现代计量装置”（mMe）通过“智能电表网关”（SMGW）与通信网络连接。智能电表网关的作用是将电表以及灵活发用电设备接入智能电网。<sup>34</sup>

现代计量装置收集能源行业相关数据，而智能电表网关控制稳定的数据传输和数据储存。未来智能电表网关将用来控制发电设备与负荷。作为核心通信设备，智能电表网关能够让消费者和产消者自主选择、主动参与市场沟通。因此，参与者对可再生能源的消费或接入可能产生更大的影响，并能更好地控制此过程中产生的数据。

智能电表提供了越来越多的可用数据，为接入及消费预测提供了可靠的依据。未来，基于这些数据以及分布式发电机组的接入量预测，可以实现自动电网控制。

从数据驱动的角度来看，智能电表网关的发展考虑到能源转型的分散性，尽量将数据的处理在本地完成，只有在必要的情况下，才直接发送给相应的市场参与者。

除了智能电表网关以外，能源转型的数字化要求采用快速、安全且具有成本效益的传输路径。但是，由于存在安全风险，不论是有线通信网络还是商业移动网络，都不适合连接智能电表网关。采用 450 兆赫的通信频段可以解决这一问题，在这一频段下可以在防止停电的情况下实现基础设施的数字化，满足能源网络的智能计量应用需求<sup>36</sup>。为了确保控制及监测功能，在发生断电故障的情况下无线网络依然能保障正常通信，德国能源行业正在打造自给自足的无线网络<sup>37</sup>。2023 年，第一批网络将在德国启用，2025 年，覆盖整个德国。

除了智能电表网关及其所需的网络之外，未来的数据传输也将越来越多地使用低功率远程广域网（LoRaWAN）。事实证明，低功率远程广域网在城市职能项目以及具有成本效益的环境数据传感器技术中，可以发挥特别的作用。

<sup>28</sup> Netze BW GmbH（2022）

<sup>29</sup> Greenhouse Media GmbH（2021）

<sup>30</sup> AHK Stockholm（2022）

<sup>31</sup> 再调度（Bundesnetzagentur）

<sup>32</sup> 同上。

<sup>33</sup> 德国能源署（dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität）

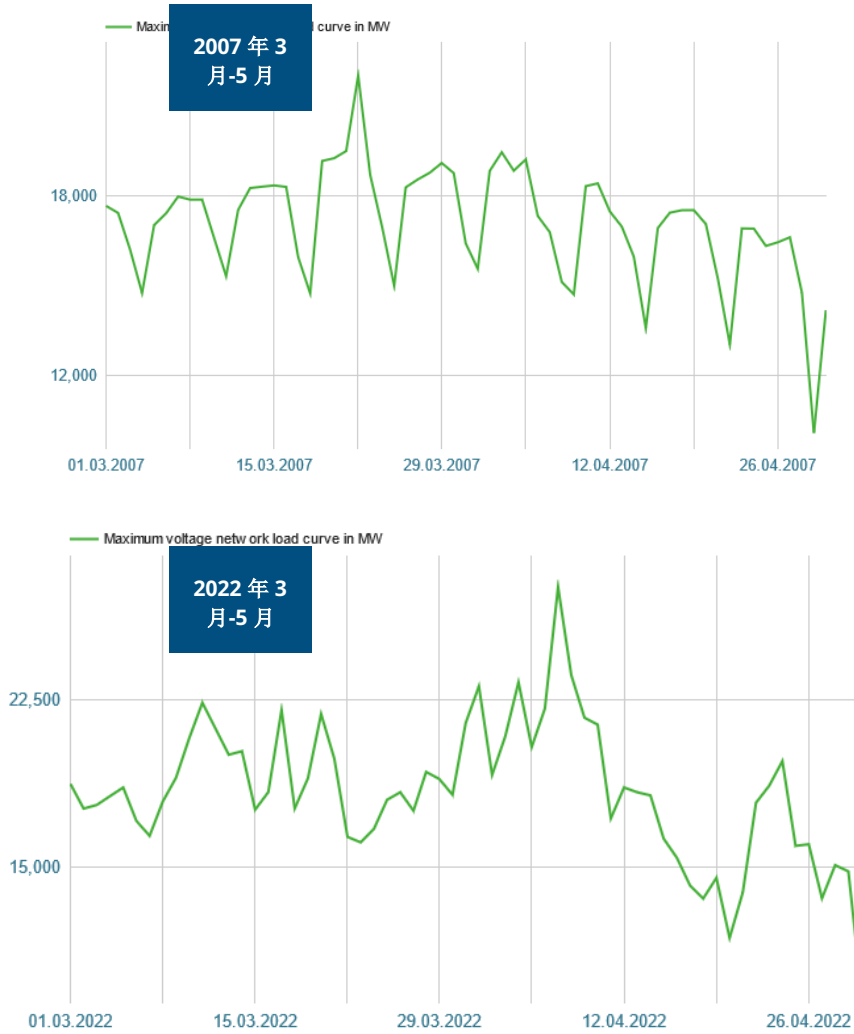
<sup>34</sup> 德国联邦经济和气候保护部（Was genau ist eigentlich ein Smart-Meter-Gateway?）

### 需求侧管理

电网内负荷流的大幅度波动是新趋势（图 3），且波动性负荷的增长趋势仍将延续，这需要大幅提高电网运营的灵活性。需求侧管理在德国已经得到了广泛应用，

但配电系统运营商需要采用更加精密的控制和计量技术，以应对分布式可再生能源和电动车的发展，热泵以及新的本地消费模式。为此，智能化的负荷管理须在稳定电网的过程中发挥更大的作用。

图 3：十五年内向不断增大的负荷波动性逐渐过渡



来源: TenneT Holding B.V. 2022<sup>35</sup>

<sup>35</sup> TenneT Holding B.V. (2022)

配电系统运营商可以使用负荷控制协议工具。签订负荷控制协议后，配电系统运营商有权管理小型电力消费者电气设备的电力消费，而消费者可以享受到电费折扣。负荷控制协议主要针对配有储能设备的热泵及蓄热式加热器等电热装置。负荷控制协议的目的是帮助配电系统运营商预防本地电网堵塞。当太多加热设备同时用电时，配电网会发生电网堵塞。签订了负荷控制协议后，配电系统运营商可行使其权利，要求某些设备在一定时期内停止用电，以此限制用电总负荷的峰值，从配电系统运营商的角度实现负荷转移。

另一个需求侧管理工具是提供使系统平衡的平衡控制能源。提供控制能源往往是发电侧的任务，但电力消费者也可以参与控制能源市场。如果满足了资格预审标准（目前的最低竞标规模为1兆瓦）<sup>36</sup>，就可以参与招投标，通过减少或增加其电网负荷，在不同级别（一级、二级和三级）市场上贡献或正或负的控制能源。

再有就是鼓励小型设施获取反映实际批发价格的动态价格。通过动态价格激励它们将高电价时段的消费转到低电价时段。但是，这可能最终让私人家庭等小型活动者不受保护地暴露在竞争市场的风险之下。

到目前为止，大型工业是需求侧管理的主要参与者，需求侧管理并未按预计的情况纳入足够多的小型设施，这主要由于激励的匮乏（见3.2章节）。人们普遍认为，能源密集度最高的产业部门有最大的需求侧管理潜力，预计可达3到5吉瓦。但多项研究指出，工业需求侧管理潜力低于居民家庭细分市场。多项研究认定，居民家庭细分市场的潜力可达到10吉瓦或以上。<sup>37</sup>而未来，德国工业需求侧管理潜力仍会增长，2018年的一项研究估算，到2050年德国工业的需求侧管理潜力为6.6吉瓦，且预计5吉瓦的潜力可以被使用。<sup>38</sup>

在需求侧管理的法规方面，德国修正了《能源经济法》（EnWG）第14a条，提出引进峰值负荷调节工具。该法的主旨是推进变革，让电网运营商能够更加灵活地控制电动车或热泵与电网连接，远程控制这些设备的启停，减少配电网扩建。但在多次研究、研讨和公共咨询之后，该法律草案于2021年1月17日被撤销。德国

联邦网络局（BNetzA）会依据新的发展趋势，修订国家层面的立法和相关标准，约束网络导向型管理协议让配电系统运营商对消费者进行控制。<sup>39</sup>

### 2.3 配电网扩建与智能电网规划

如前文所述，大多数可再生能源设备和智能电网系统都与配电网连接，以维持系统运行的稳定。为了确保电网的稳定运行，配电系统运营商正在有规律的扩大网络，不断加大对新电网技术的投资。

德国联邦网络局编制的2021年配电网状态报告预计，在未来五年，随着电动车、热泵和新型储能设施的兴起，大多数配电系统运营商都将面对负荷增长。<sup>40</sup>这种情况下，由于电网与可再生能源发展的不同步，电网堵塞，尤其是在中低压电网水平上的堵塞，将会成为配电系统运营商面临的挑战。在中电压水平，造成堵塞的原因主要是电网扩建问题，而在低电压水平，是由于现有基础设施有待优化和加强。<sup>41</sup>

因此，德国不仅要优化其输电系统运营商并扩建输电网络，也要配电系统运营商改善功能。整合分布式发电是其中一大挑战，为此，德国的配电网的进一步扩建不可避免。2012年德国能源署的“配电网”研究指出，在整个德国范围内，需要重建及扩建超过15万公里高、中、低电压网络。<sup>42</sup>

现有电网的可用配电容量是智能电网发展的重要参数及限制性因素。配电系统运营商的可用容量决定了在优化、加强或者扩建电网前，消费者或者发电商是否仍能接入或有多少消费者或者发电商可以接入电网。

电流和电压是电网优化的决定性参数。电流过高（容量瓶颈）会致使电缆温度过高，损坏设备。电网中过高或者过低的电压水平也可能导致故障，甚至会对消费者和发电商造成损坏。<sup>43</sup>

以上内容须在电网中电力双向流动的背景下考虑。双向流动意味着电流不再是只从超高电压水平，通过高、中电压水平，流动到低电压水平，而是也能够反向流动。这也是造成低电压和中电压水平上瓶颈及电压质量问题的主要原因之一。使用可调整的局域网变压器等新型变

<sup>36</sup> Regelleistung.net（未注明日期）

<sup>37</sup> Görner and Lindenberger（2015）

<sup>38</sup> 同上。

<sup>39</sup> Schaal（2022）

<sup>40</sup> 德国联邦网络局（Bericht zum Zustand und Ausbau der Verteilernetze）

<sup>41</sup> 同上。

<sup>42</sup> 德国能源署（德国能源署的配电网研究）

<sup>43</sup> 同上。

压器或者功率电子装置（STATCOMs）可以处理双向电力流动问题。通过智能控制机制（电压和无功功率控制）与设备，智能电网可以对相差和电流变化做出补偿。<sup>44</sup>但是，要实现预期目标，仍需进一步改进技术。

由于德国消费者要在电费中承担电网的费用，因此，电网扩建需要听取公众意见。而德国公众对扩建电网的支持度不高，严重影响了电网扩建进度。截至 2022 年 6 月，德国的电网扩建仍落后于计划。这主要是因为电网扩建的过程复杂，政治家、行业和民众之间存在着不同的利益，会针对电网扩建提出各种异议（例如噪音污染或者景观损害）。<sup>45</sup>此外，尽管电网扩建可能是整合新电网资产最简单、最直截的方式，但其成本高昂。德国联邦网络局预计，在 2035 年前，德国输电网的扩建需要花费大约 700 亿欧元，到 2040 年，还需再花费 500 亿欧元。在 2030 年前，必须再投入高达 450 亿欧元的资金，打造能源转型所需的配电网。<sup>46</sup>

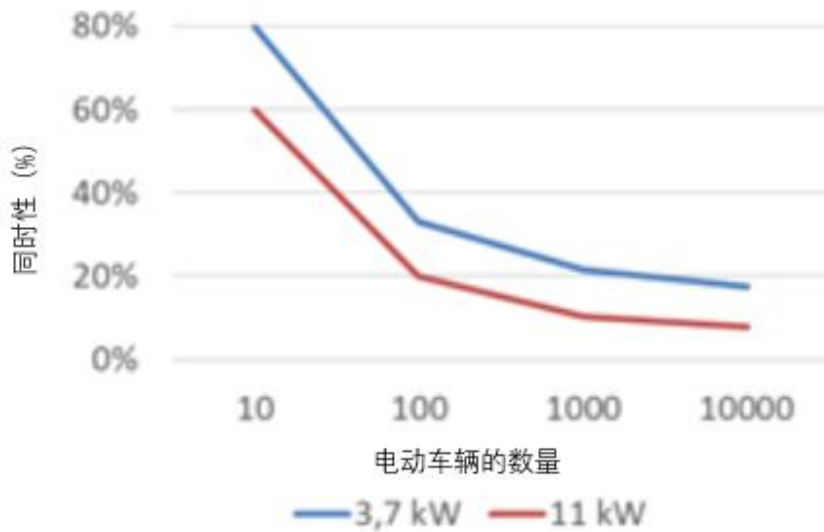
实现负荷与发电的本地及区域性平衡需要智能电网。通过智能电网智能化地引导接入电网的新的可控负荷（例如电动车或者储能系统），增加配电系统运营商的

灵活性，在一定程度上，可以避免为满足系统平衡所需的电网扩建。德国联邦网络局的智能电网报告指出，智能电网能更加充分地利用传统电力基础设施，抑制电网扩建需求，甚至能在维持同等容量使用水平的同时，改进电网的稳定性。<sup>47</sup>在电动车的范例中，充电管理是网络扩建的重要替代方案。但当充电管理实施到一定程度时，扩建电网仍然不可避免。因此，配电系统运营商应该优先通过智能电网的智能控制和灵活性手段改善现有电网，再考虑电网扩建。

## 2.4 电动车接入电网

随着电动车的兴起，未来的配电网规划也必须考虑同时系数。个体电池电动车（BEV）对网络的影响取决于充电功率、充电时间及持续时长。规模化的电池电动车对电网的影响取决于特定网络区域内同时充电的电池电动车数量，即称同时系数。在负荷峰值时段为电动车充电的影响最大。新建电网时，配电系统运营商要使用同时系数，为电动车的充电预留充分的容量。

图 4：德国低功率电动车辆充电的同时性



来源：Energynautics and RE-xpertise<sup>48</sup>

<sup>44</sup> Trattnig and Sovéc (2016)

<sup>45</sup> Schopen (2022)

<sup>46</sup> Krapp (2022)

<sup>47</sup> 德国联邦网络局（“智能电网”和“智能市场”）

<sup>48</sup> 德国能源署（电动车辆基础设施的规划及运营指南）

如图4所示，在较小规模的电网中，电池电动车的充电行为具有高度的相似性，即电动车主同时充电的可能性高。

有效降低同时充电可能性的方式包括：

- 更多的（公共）充电桩；
- 通过提高充电桩容量缩短充电时间；
- 在同一配电网内采取多样化的充电模式，如快充，慢充同时进行等。

截至 2021 年，德国约有 4700 万辆汽车，其中只有一小部分是电动车（BEVs）。未来，电动车的市场份额将会提高，德国新政府提出，2030 年前德国电动车总数达到 1500 万辆的目标。且有研究显示，德国 2050 年电动车保有量会达到 2200 万辆。

据估计，在 2030 年，如果德国的电动车同时充电，会形成 16 吉瓦的峰值负荷以及 59 太瓦时/年的用电量。在未来，如果为适应配电系统运营商稳定电网的需求，调整部分车辆的充电时间，电动车在需求侧方面的潜力将会远高于现有其他储能技术。管理电动车的充电负荷，规避电动车同时充电，可以避免配电网过载，具有重要的意义。

在做基础设施规划时，有充电装置或热泵的独栋房屋与没有充电装置和热泵的独栋房屋相比，接入负荷会有巨大差异。随着德国电动车强劲的增长势头，只有高效的电网控制机制才能为其提供可靠的规划依据，有效地抑制短期内电网扩建规模，并确保充电设施的及时连接。

充电管理是将电动车充电整合到配电网中最具成本效益的解决方案。在德国，与未加管理的充电相比，受到管理的充电可能在不损失终端消费者舒适度的前提下，降低峰值容量，减少 30% 到 50% 的投资。<sup>49</sup>此外，

随着电动车数量的迅速增加，推行充电管理刻不容缓。电动车的电池可以发挥储能的基本功能，甚至可以在智能电网中提供双向充电服务，起到稳定电网的作用。可以通过临时中断充电过程，或者在电网存在过剩电力的时候对车辆进行精准充电，来平衡过剩的供电量。德国充电管理的应用仍处于早期，但未来几年间将会加速发展。

## 2.5 数据的使用

德国联邦网络局（BNetzA）2021 年对配电系统运营商的研究表明，配电系统运营商远程控制设备的能力会随着时间的变化而加强。2017 年，受访的网络运营商中，有 86% 声称他们至少能够集中地部分控制中等电压水平以下的设备；在 2021 年的最新研究中，95% 的网络运营商可以做到这一点。<sup>50</sup>数字化实际上解锁了各种数据的访问权，让配电系统运营商和输电系统运营商都能够更加容易地完成网络监测任务。尤其是在较低网络水平上，智能电表的发展是成功监测和引导用电的必要条件。

数据分析是数字化的关键。德国一直讨论打造开放或闭合的数字信息系统，或者强制披露能源数据（开放数据）。关于数据的讨论受到巨大的利益驱使，一方面自由的使用能源数据，可以挖掘基于数据分析产生的新服务、新商业模式的经济潜力。另一方面，人们也意识到，数据收集的参与方也要能从其自身数据收集所创造的价值中获利。为此，要确定数据收集的价值，并保证数据的数量和质量。对于数据的完整性、真实性、可用性、保密性以及匿名性等性质，提出相应的要求，评估数据以及技术和应用。系统性的评估，有助于实现数据保护，维护数据安全和数据主权，为能源行业关键基础设施的数字化奠定基础。另外，缺少高质量的数据或数据数量不足也会影响数据分析。

<sup>49</sup> 德国能源署（电动车辆基础设施的规划及运营指南）

<sup>50</sup> 德国联邦网络局（Bericht zum Zustand und Ausbau der Verteilernetze）

## 3 德国智能电网的挑战与尝试

在能源转型阶段，几乎所有相关方，尤其是系统运营方，都在推进数字化转型，以便将人为干预降至最低。实现数字化的过程，就是向智能电网推进的过程。本章介绍了智能电网未来发展亟需解决的技术、监管和运营挑战相关的范例及研究，并分析了未来可能出现的情况。

### 3.1 技术挑战

人工智能（AI）、云技术和数字技术对实现从传统电网到智能电网的转变至关重要。尤其是人工智能的自我学习能力、适应能力和计算能力，具有巨大潜力来解决智能电网面临的挑战：包括提高安全性，加强需求侧管理的应用，实现更精准的预测以及提升电网的敏捷性和恢复力。<sup>51</sup>但是，要改进智能电网的运营，仍需其他技术的支撑。

德国联邦网络局（BNetzA）调研了多家配电系统运营商，以了解配电系统运营商是否在日常工作中使用人工智能，例如预见性维护、网络负荷预测、网络规划以及网络安全措施。<sup>52</sup>根据 2021 年的最新调查，大部分配电系统运营商表示，他们并没有使用或者计划使用人工智能，目前只有极少数配电系统运营商正在使用或者准备使用人工智能。<sup>53</sup>

在 59 家受访的配电系统运营商中，只有 4 家有相关的人工智能项目，例如基于卫星的架空线路监测、变电站的智能（自我学习）视频监控、通过无人机俯瞰检查高压线铁塔、通过人工神经网络预测负荷以及网络规划优化算法项目。<sup>54</sup>这表明，人工智能在配电网中的应用和推广相对缓慢。受访的配电系统运营商认为缺乏可机读的数据是最大的障碍之一。较为普遍的是，德国公众通常把人工智能和负面事物联系起来。且相比其他国家，这一顾虑在德国公众中尤为普遍。<sup>55</sup>

展现人工智能在能源转型中的成功应用是抵消这一顾虑的方法。上文提到，智能电网可使用越来越智能的算法，进行负荷预测。人工智能也能够支持带有储能的光伏系统的运行优化，通过有针对性的峰值负荷上限，提高供应的安全性。

目前暂不确定这些方法接入低压电网的应用程度。配电系统运营商应该进一步推广研究和试点项目，采用分布式、自动化的解决方案控制电网组件。

### 3.2 监管挑战

监管框架的改变是电力系统转型的基础。德国电网监管存在的一项实际挑战是，如何制定收取、管理电网费用并将其分配给电网运营商的统一规则。

目前，德国不同地区的电网成本存在巨大的差异。用户须支付的电网费用在很大程度上取决于其所属的用户类别、地理位置以及所在区域必要的电网扩建。私人终端用户支付的电网费用比例往往最大。<sup>56</sup>在集中发电时代，这样的电网费用分配方式被认为是合理的，但随着可再生能源的不断发展、分布式和数字化的推进，电网费用改革势在必行。因为分布式发电设备的大规模发展会导致巨大的电网连接以及电网扩建成本，特别是在农村地区。

<sup>51</sup> SAP（2022）

<sup>52</sup> 德国联邦网络局（关于配电网现状和扩建的报告 Bericht zum Zustand und Ausbau der Verteilernetze）

<sup>53</sup> 同上。

<sup>54</sup> 同上。

<sup>55</sup> E.ON SE（2019）

<sup>56</sup> Germanwatch e.V.（2022）

Germanwatch 最近的一篇文章<sup>57</sup>强调了电网费用改革必须包含的部分。其中包括：

- 配电网层面，全国统一的电网费用
- 分配给电力生产商的电网费用
- 双向成本转移
- 针对工业：改革非系统性电网费用
- 针对所有用户：峰谷电价

该论文的主要观点是：目前迫切需要重新评估成本的分摊与分配。虽然很难建立一个对于各方都公平的电网费用系统，但论文最终提出：为了让该系统的设计尽量可持续，先要组织不同的利益相关方（输电系统运营商、配电系统运营商、工业、消费者保护群体、非政府组织、研究机构、发电商和监管部门）公开对话，相互学习，共同探索解决可能出现的任何冲突目标的折中方案。理想情况下，在对话结束时，会达成各方满意的设计方案。<sup>58</sup>

同理，关于电价的辩论也具有价值。电价信号可以激励消费者在能源市场中发挥积极的作用，促使利益相关方动态调整其入网电量或者电力消费，以顺应电网的需求。如文中 2.1 部分所述，通过对电价信号的反应，家庭和行业消费者可以进行负荷转移，将自身的电力消费从一个时间段转移到另一个时间段，即从峰值时段转移到非峰值时段。智能电表应该让消费者能够接收价格信号并采取电网服务措施。考虑到能源转型仍在推进、可再生能源仍在发展，灵活性和对电价信号的反应能力至关重要。随时间变化的电网费用可能通过电价信号，刺激灵活的、利于电网的消费。电网费用基于电网负荷，以激励能源需求转移到高电量接入电网时段或者其他低消费量时段，从而带来巨大的灵活性潜力，并能够限制未来的电网扩建。<sup>59</sup>但是，这也可能会增加系统监管及运营的复杂性。因此，导致价格扭曲的市场参与者的战略行为也应该被考虑在内。<sup>60</sup>为了使消费者能够对价格作出反应，他们的负荷必须能够（借助智能电表和控制设备）自动作出反应，或者由聚合商控制。

此外，支持提高电力税和可再生能源附加税（EEG）征收的灵活性（向终端消费者电费征收的可再生能源附加税已自 2022 年 7 月起全面废除）也是调整电价的一种手段。如果终端消费者在电网服务时段购买电力，将会享受到税收优惠。这一举措更简单有效地发挥了电价

信号对消费者的激励作用。<sup>61</sup>最终的项目构想是建立一个完备的灵活性市场。

### 3.3 运营挑战

数字化目前面临的挑战是缺乏运营能力。数字化进程推进缓慢的限制性因素之一是缺少足够的人力资源来配合和实施创新过程。目前，德国的配电系统运营商和输电系统运营商迫切需要实现运营及工作流的数字化。一些运营商已经通过改进现有流程或尝试和实施新的方法来表明他们能够胜任这一任务。但同时，他们还需要面对其日常运营的重重挑战。

以目前的控制中心系统为例：某些运营商依旧采取成本高昂的手动方法同步数据。此外，这样做还会对同一供应商过分依赖，不仅妨碍落实当前的业务要求，还无法匹配未来的业务需求。将数字化与新理念的大规模测试相结合，才是未来电力系统转型可能采用的方式。

智能化系统运营是将目前的电网最终转变为“智能”电网的关键。改进数据收集与处理、执行资格预审，提高可再生能源预测的精确性、与其他市场活动方进行数据交流、开发相应的系统监测及堵塞管理工具都是需要优先处理的事项。为了改进上述流程，50 Hertz 等德国输电系统运营商已经开发出了内部专用解决方案。一些德国配电系统运营商也在继续落实试点项目（见章节 3.4）——即在社区内测试不同的智能电网理念。

能源转型的进一步发展要求电网运营商的思维模式和工作流程必须跟上发展的步伐，在德国，这甚至可能比以往任何时候都更加迫切。精简现有运营并使其能够应对未来考验的数字化解决方案已经开始。一定要持续推进数字化转型，在政策及科技层面大力支持德国电网运营商，提高其电网的智能性和可靠性。

### 3.4 相关研究和试点项目

#### “智慧能源展示计划”项目成果

2016 年到 2020 年，德国联邦经济和气候部资助了“智慧能源展示计划”项目（SINTEG “智慧能源展示计划——能源转型的数字议程”）框架下的五个示范区。该项目旨在以可再生能源为主的德国能源系统内，找出平衡环境、能源安全和经济效率的解决方案。这些项目

<sup>57</sup> 同上。

<sup>58</sup> 同上。

<sup>59</sup> 50Hertz Transmission GmbH（2021）

<sup>60</sup> Germanwatch effective Stromnetzgelte

<sup>61</sup> Ecologic Institut（2021）

汇聚了来自学界、行业和民间团体的 300 余位专家，聚焦利用创新的电网技术和运营战略，建立起连通供电侧和需求侧的智能网络，解决相关的技术、业务及法律挑战。

“智慧能源展示计划”发挥着监管试验台的作用，可以为未来项目的落实制定蓝图。通过践行“生活实验室”理念，打造测试新技术、新程序及新业务模式的环境，加速从实验室创新到实际测试阶段再到投放市场的整个流程。

在对所有案例展示的结果进行编辑和评估之后，相关方形成了五份全面且具有特定主题的报告：

- 部门耦合
- 灵活性机制
- 监管
- 数字化
- 参与

部门耦合可以大幅提高电网的灵活性，其运营方式基于电价信号，以协调相关设备的运行。数字市场平台可以通过交易聚合在一起的零散能源稳定电网，并将被聚合的零散能源在现货市场出售，或者作为备用电力，还能让其在同一电网级别或跨电网级别提供无功功率。

“智慧能源展示计划”项目还旨在全面提高消费者对德国能源转型的接受度，以易懂的方式宣传能源转型，为感兴趣的德国民众创造参与的机会。这种方式为公众提供了参与能源转型的机会，尤其是在风电及电网扩建方面。项目结束后，还有后续项目陆续开展，以进一步扩大项目成果。<sup>62</sup>

德国的能源社区发展得到强化。能源社区是小规模智能电网的测试案例，属于邻里解决方案，可以检测监管措施的效果。

在数字化和信息技术安全方面，研究指出分布式智能电力系统韧性更强，这是因为这种情况下，系统中多为小规模的发用电设备，这些设备可以相对独立的运行。

### NETZlabor Sonderbuch 试点项目

自 2011 年起，巴登-符腾堡州最大的配电网运营网 Netze BW 采用自动控制手段，对入网的高比例可变

可再生能源和可变负荷的网络区域进行管理，对配电网的智能规划和运行理念开展研究和测试。

他们的第一个试点项目名为 **NETZlabor Sonderbuch**。此项目是由配电网运营商 Netze BW 与斯图加特大学能量传输及高压技术研究所（IEH）合作打造，目标是实现将太阳能光伏发电整合到低压网络中的系统智能解决方案，以进一步改进分布式能源发电系统的电网整合，提高可再生能源的比例。<sup>63</sup> 该项目设在在只有 190 户居民的巴登-符腾堡州 Zwiefalten-Sonderbuch 镇，镇上已安装 60 套光伏系统。在峰值时段，小镇输入电网的电力是消费电力的六到七倍，超过了输电线的传输容量，达到了配电网的极限。此项目利用智能系统和现代测量控制技术，实现了连接更多光伏系统的可能性。从 2011 年 1 月到 2020 年 1 月的九年内，项目分为四个阶段推进<sup>64</sup>：

- 在第一阶段的工作是为变电站配备了现代测量技术，为家庭提供智能电表，可提供关于电网内电流及电压的数据。并基于测量数据，先确定导致系统达到负荷极限并阻碍进一步整合可再生能源的重大波动产生的原因。
- 第二阶段，项目设置了可控的本地网络变压器，以优化电力入网管理，为波动做出补偿，并安装了电池储能设备以降低电压峰值。
- 第三阶段，项目通过安装自动化网络控制系统“iNES”，自动登记本地网络的现状以及即将发生的强烈波动，提高现有网络的使用效率。在不用经过数据中心的前提下，系统可以使用数据识别出不理想的发展态势，并进行自动纠正。
- 第四阶段，以改进现有组件使用方式和扩大自动控制为目的的“智能电网示范项目”于 2017 年 6 月启动，Sonderbuch 镇的参与家庭以及对项目感兴趣的人，有机会在线观看关于系统发电状况和对下一天情况预测的“直播”。

在项目结束时，通过可控的本地电网变压器，入网电量提高了，确保不会突破电压限制，而光伏系统及高灵活性电池储能的组合控制也缓解了线路负荷。可行解决方案的基础是各相关组件通过移动通信和输电线路进行的可靠通信及数据交换。NETZlabor 项目的成果可以被其他项目借鉴。

### flexQgrid 试点项目

<sup>62</sup> <https://www.sinteg.de/en/>

<sup>63</sup> Baden-Württemberg e. V. (2020)

<sup>64</sup> Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2022)

**flexQgrid** 项目不仅连接了光伏系统，也连接了各种不同类型的系统（更多储能及消费者，例如热泵和电动车辆），实现了更加灵活的系统性能。<sup>65</sup>

黑森林小镇弗赖阿姆特一个由九个商业及科学合作伙伴组成的研究团队参与了项目，并研究了如何以最优

的方式将屋顶光伏系统发电整合到包含内置测试电池、热泵和电动车的电力系统。在三个具有不同发耗电结构的不同现场测试领域内，通过智能家庭装置和负荷测试了整个电网的信号灯系统。<sup>66</sup>以证明智能电网调控信号灯理念的切实应用，并为进一步发展奠定基础。



<sup>65</sup> Netze BW GmbH（2022）

<sup>66</sup> 同上。

## 4 德国的经验教训 - 智能电表的推广

如上文所述，智能电网要进一步发展，智能计量是重要的先决条件之一。智能电表的顺利推广需要法律和行政基础。本章着重介绍德国智能电表推广的成功经验与失败的教训。与其他欧盟国家相比，德国的智能电表推广相对落后，但未来几年，计量数字化仍是德国急迫面临的问题。

欧洲内部电力市场的共同规则——欧盟指令 2009/72/EC 是德国推广智能电表的依据。根据成本效益分析，欧盟指令要求在 2020 年之前，实现智能电表市场推广率达到 80% 的目标。预计在 2024 年之前，欧洲 77% 的家庭都将配备智能计量系统。德国智能电表推广计划规定到 2032 年，所有电表都须是智能电表，或至少配备了数字接口。

德国智能电表发展的主要经验教训为：

- 智能电表的安全要求需合理设置，
- 为智能电表的认证过程和推广设定明确的日期和成本框架。

2016 年颁布的《能源转型数字化法》（GDEW），为德国政府推广智能电表奠定了基础。《检测点操作法》（Messstellenbetriebsgesetz, MsbG）以推广智能电表为目的，设定了智能电表取代模拟电表的时限和方式，并对计量数据的收集、传输和使用提出了要求。它对消费者和电厂按能源消费量或者发电资产的规模进行分类，并针对不同类别设定了推广期限。<sup>67</sup> 按要求年消费量超过 6,000 千瓦时的消费者以及装机容量超过 7 千瓦的电厂必须配备智能电表。这一标准以下的消费者或电厂，不强制要求使用智能电表。《检测点操作法》还规定至少要有三个制造商的智能电表网关（SMGW）通过德国联邦信息安全局（Bundesamt für Sicherheit in der

Informationstechnik, BSI）的认证，以供用户和消费者选择。<sup>68 69</sup>

德国原定计划 2017 年开始推广智能电表，但因为智能电表的认证延迟到 2020 年 1 月启动推广。这是因为德国对智能电表（iMSys）的安全性提出了非常严苛的要求，且立法机构并没有就德国联邦信息安全局的认证过程设定目标日期或者成本框架。<sup>70</sup> 在此阶段通过认证并获得批准的智能电表与之前的电表相比只增加了数据传输功能。而智能电网平稳运行所需的提供动态电价合同、执行供需管理的能力以及有利于电网的运营的功能仍然受到限制，或未能实现。<sup>71</sup> 因此，德国第一代智能电表并没有为消费者提供任何重大附加价值。见图 6

在第一代智能电表使用前，德国市场上已有的计量系统就能够满足与之相当的安全及数据保护要求，符合国际或行业标准，但未能获得德国联邦信息安全局批准。因此，其不得再被安装使用。此后，各家公司提起了诉讼，高等行政法院为此于 2021 年 3 月发布了紧急命令，叫停了高消费量家庭和公司安装智能电表的义务。<sup>72</sup> 立法机构对法庭的裁决做出了快速回应，通过了《检测点操作法》修正案，尽管在框架上尚有一定的缺口，但智能电表的推广得以继续开展。

迄今为止，德国推广的智能电表主要是现代计量装置，而不是带智能电表网关的智能电表。根据德国联邦网络局的说法，在 2019 年 12 月，德国就已经实现了原定于 2020 年 7 月才能实现的智能电表发展目标，完成

<sup>67</sup> Bundesverband Neue Energiewirtschaft e.V. (2020)

<sup>68</sup> 同上。

<sup>69</sup> 智能计量系统包括一个“现代计量装置”（mMe）及其通过“智能电表网关”（SMGW）与通信网络的连接。智能电表网关在根本上将电表和灵活消费及发电设备与智能电网相连接。

现代计量装置收集与能源行业相关的数据，而智能电表网关控制稳定的数据传输和数据储存。

<sup>70</sup> Bundesverband Neue Energiewirtschaft e.V. (2020)

<sup>71</sup> 同上。

<sup>72</sup> GreenPocket (2021)

了 580 万台设备安装。但是，其中只有少数装置配备了能够充分发挥智能电表功能、匹配智能电网运行的智能电表网关。

能源部门的数字化是下一阶段能源转型的关键，而智能电表推广缓慢妨碍了这一进程。但在开发智能电表、促使消费者在分布式智能电网系统中发挥更积极作用方面，德国还存在巨大的潜力。

图 5：德国当前计量装置概况

	费拉里斯电表	现代电表	智能电表	通信元件——智能电表网关
电表类型	模拟式电表	不配备通信元件的数字电表	配备通信元件的数字电表	通信接口
电表功能	<ul style="list-style-type: none"> <li>当前电表读数</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>当前电表读数</li> <li>储存数值                             <ul style="list-style-type: none"> <li>日数值</li> <li>周数值</li> <li>月数值</li> <li>年数值</li> </ul> </li> </ul> <p>回溯两年</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>当前电表读数</li> <li>一刻钟数值                             <ul style="list-style-type: none"> <li>每一天</li> <li>周</li> <li>月</li> <li>年</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>电表和通信网络之间的接口</li> <li>可以连接一个或多个电表</li> <li>数据自动传输给计量点操作者</li> </ul>
负责安装、计量和技术操作的实体	本地电网运营商	符合资格的本地计量点操作者（通常是本地电网运营商）或者与消费者签约的计量点操作者		智能电表网关管理者（符合资格的本地计量点操作者或者市场竞争对手）

来源：BMWK (2021)

## 5 结论

为实现气候目标，德国的能源领域正在转型。在此过程中，作为分布式可再生能源发展的重要支撑，在监管、技术和研究的支持下，近年来智能电网在德国发展迅速。

智能电网可以实现能源系统的可持续性、提高成本效益并确保其可靠性，且智能电网在整合消费侧可再生能源资源和新的灵活性资源方面能发挥关键作用。

智能电表是智能电网核心的控制设备，可以有效应对电网尤其是配电网层面的挑战。通过必要的信息技术基础设施，使用智能电表，能有效地控制智能电网，统筹规划协调电网基础设施建设。

智能电网高效可靠的应用依赖于能源行业在技术、监管和运营框架方面的根本性转变。影响智能电网推广的挑战尚存，这些挑战主要包括：

- 人工智能在系统运营中的应用
- 系统运营商工作流程的全面改善和数字化
- 制定适当的电网收费制度，以激励灵活性
- 优化电网运营商的信息技术基础设施以处理经得起时间考验的（可变）电网收费制度
- 确立法定先决条件，充分发挥智能电网的功效，例如需求侧灵活性及分布式资源的电网整合
- 收集电网数据，为人工智能在智能电网运营中的功能性整合奠定基础

在能源领域向气候中和转变的过程中，区域和本地层面分布式优化是重要的解决方案。不断提高灵活性潜力、改进部门耦合并通过推广智能电表实现数字化，是打造智能电网的基石。

去中心化会给系统运营带来诸多的不确定性，所以在短期内，需要输电系统运营商和配电系统运营商携手重新进行系统规划，优化运营过程。但从长远来看，需要智能电网内所有利益相关方群策群力。仅凭电网运营商一己之力，无法实现变革。同时，需要打造共用的信息技术系统，为所有相关参与方提供数据库的访问权限。

为了推动智能电网的发展，德国开展了很多试点和研究。宣传最佳实践与试点，可以增强公众对智能电网的了解，并促进智能电网向好的发展。

总之，随着分布式可再生能源比重的进一步提高，以及应对能源、供热及交通运输部门转型面临的重重挑战，智能电网将会发挥更重要的作用，并将得到长足的发展。

# 图片列表

图 1: 太阳能装机容量, 按电压水平列示 (2019) .....	7
图 2: 配电系统运营商角色的演变 .....	13
图 3: 十五年内向不断增大的负荷波动性逐渐过渡 .....	16
图 4: 德国低功率电动车辆充电的同时性 .....	18
图 5: 德国当前计量装置的概况 .....	25

## 参考文献

- 1) Agnetha Flore 和 Jorge Marx Gómez, “两个智能电网迁移路径开发和比较的研究案例, Heliyon”, 第 6 卷, 2020 年第 9 期, ISSN 2405-8440, 网址: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844020317564>
- 2) Baden-Württemberg e. V., “智能电网: 以承诺方式将人们汇聚在一起的平台”, 2020 年, 网址: [https://smartgrids-bw.net/public/uploads/2020/07/Projektbrosch%C3%B4re\\_komplett\\_V2.pdf](https://smartgrids-bw.net/public/uploads/2020/07/Projektbrosch%C3%B4re_komplett_V2.pdf)
- 3) 德国联邦能源与水经济协会, “分布式能源世界中的主动分配系统运营商”, 2016 年 11 月 30 日
- 4) Bitkom, “气候保护”, 未注明日期, 网址: <https://www.bitkom.org/Klimaschutz>
- 5) 联邦网络局, “关于 2021 年配电网络现状和扩展情况的报告”, 2021 年, 网址: [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen\\_Institutionen/NetzentwicklungUndSmartGrid/ZustandAusbauVerteilernetze2021.pdf?&blob=publication\\_~:text=Mit%20dem%20Bericht%20zum%20Zusand,Zeitpunkt%20g%C3%BCtigen%20C2%A7%2014%20Abs](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/NetzentwicklungUndSmartGrid/ZustandAusbauVerteilernetze2021.pdf?&blob=publication_~:text=Mit%20dem%20Bericht%20zum%20Zusand,Zeitpunkt%20g%C3%BCtigen%20C2%A7%2014%20Abs)
- 6) 联邦网络局, “可再生能源法数据”, 2019 年, 网址: <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/ErneuerbareEnergien/ZahlenDatenInformationen/start.html>
- 7) 联邦网络局, “再调度”, 2021 年 11 月 18 日, 参见网址: <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Versorgungssicherheit/Netzengpassmanagement/Engpassmanagement/Redispatch/start.html>
- 8) 联邦网络局, “智能电网”和“智能市场”, 2011 年, 网址: [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2012/120102\\_EckpunkteSmartGrid.html](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2012/120102_EckpunkteSmartGrid.html)
- 9) 德国储能协会, “德国储能协会 2021/2022 行业数据: 储能系统日益流行! 50 万户家庭安装了储能系统”, 2022 年 4 月 6 日, 网址: <https://www.bves.de/bves-branchenzahlen-2021-2022-energiespeicher/>
- 10) 德国可再生能源协会, “推广智能电表: 德国的案例”, 2020 年 1 月 28 日, 参见 <https://www.bne-online.de/en/news/article/smart-meter-roll-out-the-german-case/>
- 11) 剑桥大学出版社 (出版商), “智能电网技术 - 云计算和数据管理方法”, 2018 年, 第 106 – 117 页, 网址: <https://www.cambridge.org/core/books/abs/smart-grid-technology/virtual-power-plant/A8125B8F40D38DDA64B73F23FA80A350>
- 12) Catiana Krapp, “德国正在对其电网进行彻底重组——三处最大的施工场地”, 《商报》, 2022 年 1 月 29 日, <https://www.handelsblatt.com/technik/forschung-innovation/insight-innovation-deutschland-baut-sein-stromnetz-radikal-um-das-sind-die-drei-groessten-baustellen/28007768.html>
- 13) David Frank 和 Kirsten Kleis 等人, “转型的有效电网收费”, 德国观察, 2022 年 3 月 10 日, 参见网址: <http://www.germanwatch.org/de/85071>
- 14) Denise Schopen, “德国的电网扩建: 缘起、计划和成本”, 2022 年 6 月 10 日, <https://energiemarie.de/energiertipps/wissenswert/stromnetz/ausbau>
- 15) 德国能源署 (出版商), “德国和中国的数据中心灵活性——现状和最佳实践”, 2022 年, [https://www.energypartnership.cn/fileadmin/user\\_upload/china/media\\_elements/publications/EnTrans/Data\\_centre\\_flexibility\\_in\\_Germany\\_and\\_China.pdf](https://www.energypartnership.cn/fileadmin/user_upload/china/media_elements/publications/EnTrans/Data_centre_flexibility_in_Germany_and_China.pdf)
- 16) 德国能源署 (出版商), “德国能源署配电网研究”, 2012 年, 网址: <https://www.dena.de/themen-projekte/projekte/energiesysteme/dena-verteilnetzstudie/>
- 17) 德国能源署 (出版商), “电动交通基础设施规划和运营手册”, 网址: <https://www.energypartnership-turkey.org/media-elements/>
- 18) 德国能源署 (出版商), “德国能源署牵头的研究: 气候中和的曙光”, 2021 年, 网址: <https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/abschlussbericht-dena-leitstudie-aufbruch-klimaneutralitaet/>
- 19) 意昂集团, “智能电网: 结构、定义和功能”, 网址: <https://www.eon.de/de/eonerleben/smart-grid-so-funktioniert-das-intelligente-stromnetz.html#uebersicht>
- 20) 生态研究所 (出版商), “德国智慧能源——能源转型数字化展示计划 (SINTEG) 关于调整法律框架的行动建议”, 2021 年 10 月 5 日, <https://www.ecologic.eu/de/18446>
- 21) 欧洲输电系统运营商联盟 (ENTSO-E), “迈向更智能的电网: 欧洲输电系统运营商联盟关于发挥输电系统运营商和配电系统运营商作用造福消费者的立场文件”, 2015 年 3 月 4 日, 网址: <https://www.entsoe.eu/2015/03/04/towards-smarter-grids-entso-e-position-paper-on-developing-tso-and-dso-roles-for-the-benefit-of-consumers/>
- 22) 欧盟委员会, “欧盟的智能电表部署”, 未注明日期, 网址: <https://ses.jrc.ec.europa.eu/smart-metering-deployment-european-union>
- 23) 联邦经济事务和气候行动部 (BMWK), “现代电网和电表”, 2021 年 1 月
- 24) 联邦经济事务和气候行动部 (BMWK), “德国的配电网络”, 未注明日期, 网址: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Infografiken/Energie/verteilernetz.html>
- 25) 联邦经济事务和气候行动部 (BMWK), “能源转型的目标”, 未注明日期, 网址: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Infografiken/Energie/ziele-der-energiewende.html>
- 26) 联邦经济事务和气候行动部 (BMWK), “智能电表网关究竟是什么?” 2020 年 2 月 26 日, 网址: <https://www.bmw-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2020/03/Meldung/direkt-erklaert.html>

- 27) Giuseppe Franceschelli, “预测性维护和电网”, Maps Spa Numero REA, 网址: <https://solutions.mapsgroup.it/predictive-maintenance-electrical-grids/>
- 28) 温室媒体公司, “弗赖阿姆特: 太阳能系统和储能为电动汽车和热泵提供动力”, 未注明日期, 网址: <https://www.energie-experten.org/projekte/freiamt-solaranlagen-und-speicher-versorgen-e-autos-und-waermepumpen>
- 29) GreenPocket, “停止在德国推出智能电表? ”, 2021年3月24日, 网址: <https://www.greenpocket.com/blog/stop-of-the-smart-meter-development-in-germany>
- 30) i-SCOOP, “智能电网: 电力网络和电网的演变”, 未注明日期, 网址: <https://www.i-scoop.eu/industry-4-0/smart-grids-electrical-grid/>
- 31) Johann Schütz 和 Mathias Uslar 等人, “数字化。SINTEG 资助计划的综合报告三”, 联邦经济和气候保护部委托开展的研究, 2022年, 网址: [https://www.sinteg.de/fileadmin/media/Ergebnisberichte/SF3\\_Digitalisierung/20220502-SINTEG-SyF3\\_bf.pdf](https://www.sinteg.de/fileadmin/media/Ergebnisberichte/SF3_Digitalisierung/20220502-SINTEG-SyF3_bf.pdf)
- 32) 意昂集团和联邦能源与水务局 (出版商) 合作出版 B, “人工智能是如何加速能源转型的”, 2019年5月, <https://www.eon.com/content/dam/eon/eon-com/Documents/en/new-energy/20191202-1022-in150-25039-yearbook-artinelli-170x240-online-5.pdf>
- 33) 意昂集团 (出版商), “从单个解决方案到未来能源系统”, Designetz, 2019年
- 34) Klaus Görner 和 Dietmar Lindenberger 等人, “虚拟研究所电改气和热——电-气-供热系统的灵活性选择”, p. 35f., 2015年2月26日, 网址: [https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docid/5845/file/5845\\_Virtuelles\\_Institut.pdf](https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docid/5845/file/5845_Virtuelles_Institut.pdf)
- 35) 巴登-符腾堡州环境、气候和能源管理部, “未来电网——应用负载均衡正当时”, “能源转型对话”项目, 未注明日期, 网址: <https://energiewende.baden-wuerttemberg.de/projekte/bildung-wissenschaft/stromnetz-der-zukunft-mitten-auf-der-alb>
- 36) Mirko Pracht 和 Ralf Heisig, “模块化控制中心系统”, “下一代”, 德国输电系统运营商 50Hertz 公司, 2021年3月24日, <https://f.hubspotusercontent30.net/hubfs/8156085/Mirko%20Pracht%20and%20Ralf%20Heisig%20-%2050Hertz.pdf>
- 37) Netze BW 公司, “flexQgrid 项目”, 2022年, 网址: <https://flexqgrid.de/>
- 38) Next Kraftwerke 公司, “什么是能源行业的关键基础设施 (CRITIS)? ”, 2022年, 网址: <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/kritis>
- 39) Nora Fischer 和 Verena Adamheit 博士等人, “德国的智能电网”, AHK Stockholm, 未注明日期, 网址: [https://www.handelskammer.se/sites/default/files/smart\\_grids\\_in\\_germany\\_-\\_web.pdf](https://www.handelskammer.se/sites/default/files/smart_grids_in_germany_-_web.pdf)
- 40) Regelleistung.net, “分钟备用”, 未注明日期, 网址: <https://www.regelleistung.net/ext/static/mr/>
- 41) SAP, “智能电网: 人工智能如何驱动当今的能源技术”, 2022年, 网址: <https://www.sap.com/insights/smart-grid-ai-in-energy-technologies.html>
- 42) Sebastian Schaal, “第 14 条 a 款: 德国联邦议院委员会呼吁联邦网络局实施高峰平滑”, electrive.net, 2022年6月6日, <https://www.electrive.net/2022/07/06/paragraf-14a-bundestagsausschuss-schiebt-spitzenglaettung-zu-bnetza/>
- 43) TenneT Holding BV, “年度峰值负载和负载曲线”, 2022年, 网址: <https://www.tennet.eu/electricity-market/transparency-pages/transparency-germany/network-figures/annual-peak-load-and-load-curve/>
- 44) Uwe Trattnig 和 Tina Sovec 等人, “智能电网与终端用户应用”, 能源创新专题讨论会, 应用科学大学, 2016, [https://www.tugraz.at/fileadmin/user\\_upload/Events/Eninnov2016/files/lf/Session\\_E6/LF\\_Trattnig.pdf](https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Events/Eninnov2016/files/lf/Session_E6/LF_Trattnig.pdf)
- 45) Verband kommunaler Unternehmen eV, “智能配电网级联中配电网运营商之间的新型合作”, 18年4月13日, <https://www.vku.de/vku-positionen/kommunale-energieversorgung/mehr-systemverantwortung-fuer-vnb/>
- 46) Verband kommunaler Unternehmen eV, “智能配电网级联中配电网运营商之间的新型合作”, 未注明日期, 网址: [https://www.vku.de/fileadmin/user\\_upload/Verbandsseite/Landingpages/VNB\\_Portal/171123\\_polPap\\_NQDZ\\_final.pdf](https://www.vku.de/fileadmin/user_upload/Verbandsseite/Landingpages/VNB_Portal/171123_polPap_NQDZ_final.pdf)
- 47) 世界经济论坛、彭博新能源财经和德国能源署, “利用人工智能加速能源转型”, 白皮书, 2021年9月, 网址: <https://www.weforum.org/whitepapers/harnessing-artificial-intelligence-to-accelerate-the-energy-transition>
- 48) ZfK, “创新召集项目: 首个项目全面运行”, 2022年2月9日, 网址: <https://www.zfk.de/energie/strom/innovationsausschreibung-erstes-projekt-vollstaendig-in-betrieb>

网站



微信

