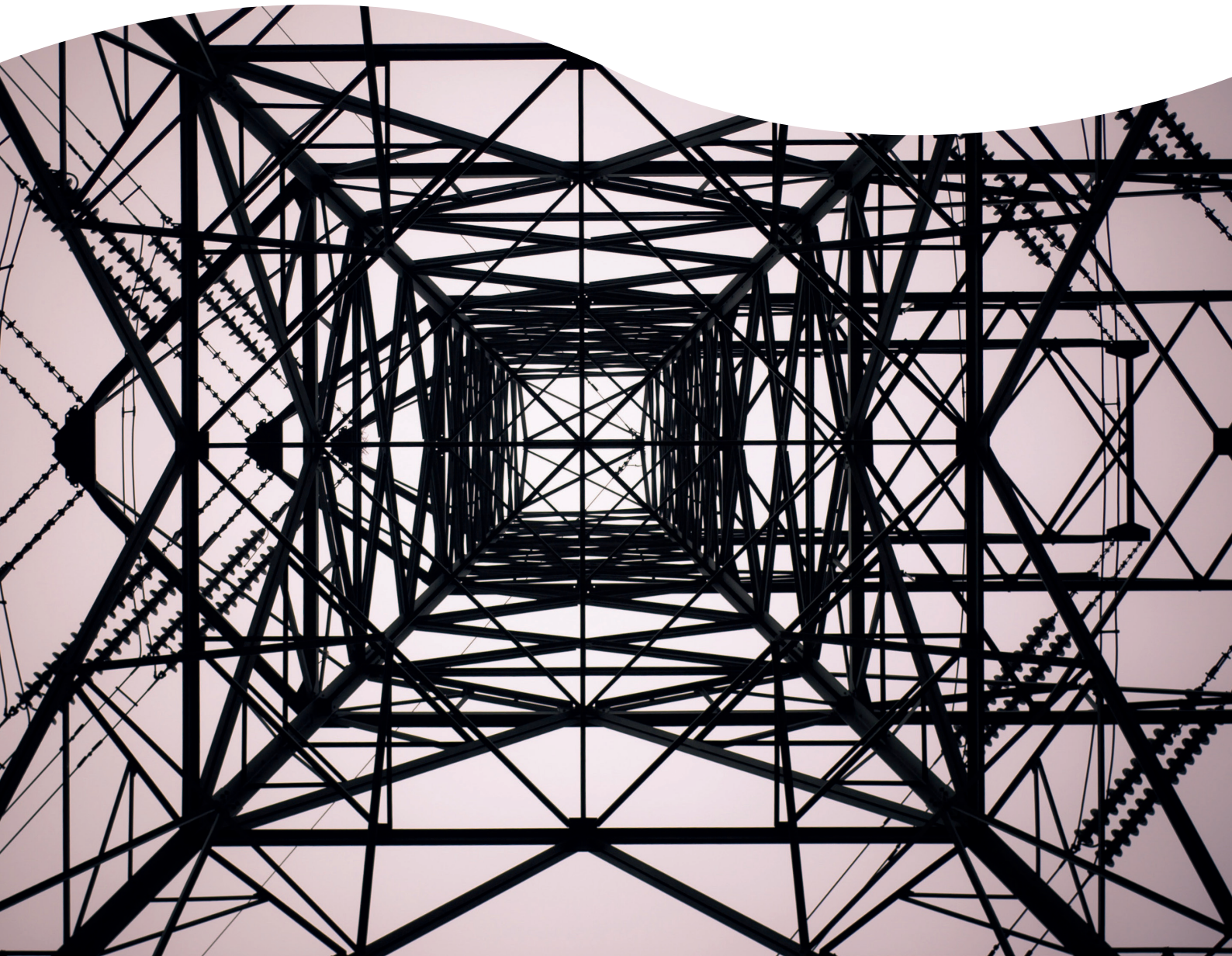


关于
电网

电网如何帮助消纳可变可再生能源



关于 电网

出版说明

关于电网

电网如何帮助消纳可变可再生能源

衷心感谢 GIZ（德国国际合作机构）提供资金支持与建议。



委托方：

Agora Energiewende
Anna-Louisa-Karsch-Straße 2 | 10178 Berlin
电话 +49. (0) 30. 700 14 35-000
传真 +49.(0) 30.700 14 35-129
www.agora-energiewende.de
info@agora-energiewende.de

作者：

Stephanie Ropenus, 以及
Philipp Godron
Markus Steigenberger

stephanie.ropenus@agora-energiewende.de

排版：pro-diction GmbH

封面图片：unsplash.com/ Shane Rounce

169/01-won-2019/ZH

出版：12/2019



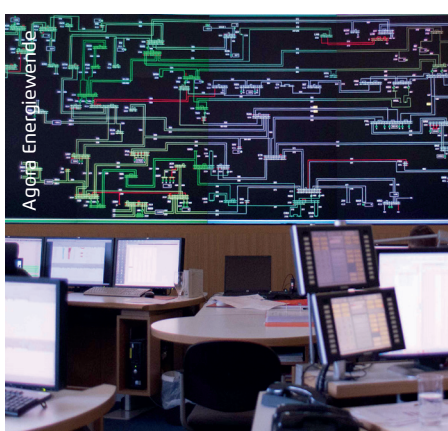
扫描二维码，
下载本出版物。

内容纲要

为何风力和太阳能发电给电网运营和规划带来新挑战

详见第 13 页

风电和太阳能光伏发电能力视天气而定。为了保证在实时变化的影响下仍可保持系统稳定，电力供应必须始终与电力需求相匹配。随着可变可再生能源 (vRES) 份额的不断增长以及更为陡峭的爬坡速率，电力系统的运营日益复杂。可再生能源通常接入配电网，且靠近电力用户，属于小型模块化发电装置。这与常规电力系统大相径庭，后者采用少量大型火电机组直接向输电网馈电。高 vRES 份额使得电力规划者和运营商越来越难以协调电力供给与电力需求的平衡。



如何优化利用现有电网基础设施来消纳可变可再生能源 (vRES)

详见第 17 页

发电侧的变化通常意味着需要进行电网扩容。好消息是，现有电网基础设施可经过改造消纳不断增长的 vRES 份额。现有输电线的温度监控功能有助于进一步提高线路容量利用率。使用移相变压器可以让电网运营商控制并优化潮流，从而缓解电网限制。通过电网补强，可对现有输电线进行升级，而无需架设新线路。由于没有通用型解决方案，因此在选择最优措施时需要考虑各电网区域和国家的实际情况。如果因为电网优化和补强措施不符合标准而必须架设新输电线，则采取“GORE 原则”——“电网优化先于补强，补强先于扩容”——降低成本和提高公众接受度。



电网规划如何尽早应对高 vRES 份额

详见第 20 页

有多种不同的电网规划方法。在常规方法中，根据新电力供给和需求进行电网扩容。但架设输电线所带来的长前置时间意味着电网扩容无法与新 vRES 电站（如风力发电机和太阳能电池板）保持同步，后者的安装通常较为迅速。协调电网规划与 vRES 部署的手段更适用于整体规划方法。



如何应对电网发展瓶颈

详见第 30 页

随着 vRES 份额增加，如果电网扩容延迟，电网阻塞和瓶颈现象可能随之出现。成熟的电网可以防止此类阻塞的出现。例如，在德国，可再生能源占全年电力需求的三分之一左右，且可再生能源弃电率只有约 2% 至 4%。然而，即便是拥有强大电网基础设施的国家或地区仍可能遇到电网阻塞的情况。当出现此情况时，其电网运营商需要基于各种手段采取具体措施，并遵循明确规定的规则。否则，当仍存在大量常规发电时，可能导致 vRES 限电。可再生能源限电应当作为最后手段，以确保电网绿色电力最大化。对 vRES 发电厂及其实时发电数据的远程控制访问可帮助电网运营商管理电力系统。



在常规发电机组日益减少的形势下如何采购辅助服务

详见第 33 页

传统上，常规火力发电机已提供了对保证系统可靠运行至关重要的辅助服务，例如频率和电压控制。但如今，常规发电已逐渐式微，因此新辅助服务来源就变得非常关键。如果确定了相关规定，例如并网要求，可再生能源发电厂可以提供一定的辅助服务。此外，提供辅助服务（不包含电力联产）所需的组件也可直接嵌入电网（如 STATCOM 设备）中。即使是已停用的核电厂发电机也可被改造成旋转式同步调相机，提供电压支持。在配电网中，电压波动——或由于太阳能光伏馈入引起的电压升高——可通过安装可调变压器抵消。



为何要尽早预估vRES 对电力系统的影响

详见第 34 页

当 vRES 在电力系统中的份额较小时，其常容易被忽略。但有必要尽早预估不断增加的 vRES 份额将带来的影响，因为为了提高可靠性而改造现有设备的成本高昂且过程繁琐。为了跟踪 vRES 对电力系统的影响以及确定是否有必要采取额外措施，创建用于记录所有可再生能源发电设备（包括其相关技术要求）的主注册存储设备是关键。



目录

内容纲要:	3
导言	9
1. 风能、太阳能和电网: 未来趋势与挑战	13
2. 作为灵活性选项的电网: 电网规划与扩容工具箱	17
2.1 GORE 原则 – 电网优化先于补强, 补强先于扩容	17
2.2 电网规划流程	20
2.3 提高新输电线的公众接受度	26
3. 系统运营: 用于消纳份额不断上升的可再生能源的工具箱	29
3.1 灵活性为关键要素时的系统运营	30
3.2 辅助服务的采购	33
参考文献	37

导言

可再生能源并网

近年来，太阳能光伏发电和风电成本已大幅下降。在智利和摩洛哥，太阳能光伏发电和风电中标电价低于 3 欧分/千瓦时。2017 年 11 月在德国进行的第三轮拍卖过程中，陆上风电价格已经降至 3.82 欧分/千瓦时。¹ 2016 年，全球许

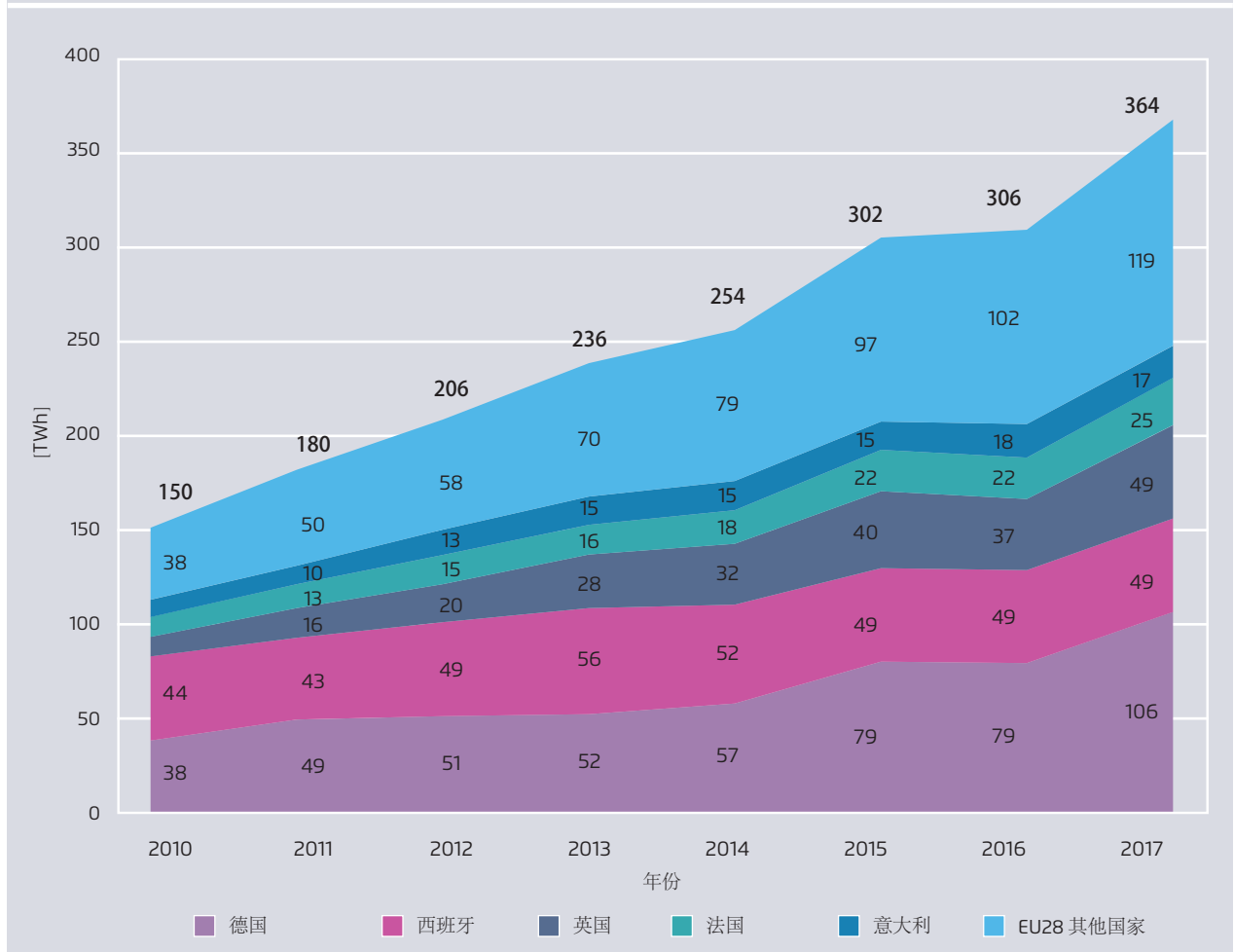
多地方的陆上风电和太阳能发电站投标价格为 5 欧分/千瓦时左右。² 由于成本不断下降，风力和太阳能光伏成为全球增速最快的发电资源，并有望在不久的将来占据电力结构中相当大的一部分份额。

¹ 2018 年，德国地面安装型太阳能光伏（6 月）拍卖价为 4.59 欧分/千瓦时，陆上风能（5 月）为 5.73 欧分/千瓦时。

² 请参见 BNetzA (2017a)、BNetzA (2017b)、ENEL Green Power (2016)、Bloomberg Markets (2016) 和 Reneweconomy (2016)。

EU-28 中的风力发电（包括前 5 大国家发电量）

图 1



资料来源：Agora Energiewende 和 Sandbag (2018)，第 16 页，基于 2010 年至 2015 年的 EUROSTAT 数据；我们的计算值用于 2016 年和 2017 年

风能和太阳能依赖于天气。随着可变可再生能源 (vRES) 份额的增加，有必要对电网运营实施一些根本性变革。因此，许多研究人员和决策者将目光投向了可变可再生能源在供电中已占据相当大份额的国家/地区，如丹麦 (vRES 份额超过 40%)、爱尔兰、西班牙和德国 (vRES 份额均为 20% 左右)。³

消纳高份额的 vRES 对系统运营商而言是一项挑战。而拥有高 vRES 份额的国家/地区却表现得相当不错，供电的可靠性一直处于非常高的水平。例如，诸如系统平均电力中断持续时间指数 (SAIDI) 和损失负荷概率 (LOLE) 等关键指标显示，尽管德国的 vRES 份额不断上升且基荷发电不断下降，但其电力系统在全球范围内处于最稳定之列 (图 2)。⁴ 此数据说明，高电网可靠性与消纳不断上升的可再生能源份额并非无法兼顾。⁵

在本文中，我们将概述一些关于电网消纳 vRES 的经验教训，这些经验教训源自可变电力份额较高的国家/地区，如德国和丹麦。我们将介绍在这些国家/地区的法规框架背景中的现行实践，以及为应对电网运营商一直面临的挑战所采取的变革措施。第 1 章描述，随着 vRES 发电水平的不断提高，电力系统的未来趋势以及电网面临的挑战。第 2 章关注新电力传输线和变电站的建设。第 3 章关注系统运营和辅助服务。

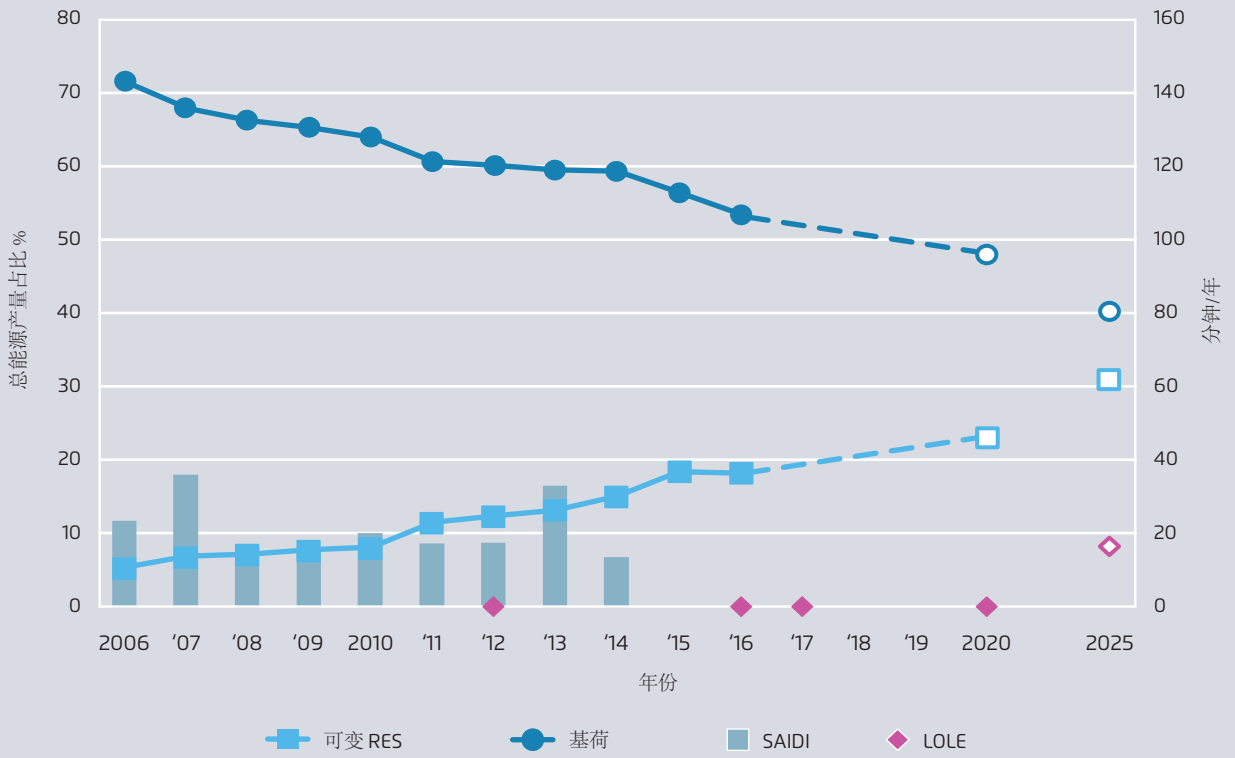
3 请参见 IEA (2017)。

4 请参见 Hogan 等人(2018)。

5 不存在衡量系统可靠性 (和电力品质) 的单一指标。尽管 SAIDI 指标仅反映电力中断，但我们认为其仍可作为整体电能质量的指示风向标。LOLE 表示控制区域内每年可能出现的电力供应不足时长，以分钟为单位。

德国：电源结构与电网可靠性

图 2



资料来源：Hogan 等人(2018)

1. 风能、太阳能和电网： 未来趋势与挑战

与道路基础设施一样，电力网络也可被分为长距离、大容量输电线/网（“高速公路”）和区域性局部配电网/网（“主干道和居住区街道”）。**输电网**的主要用途是将电力从发电量大的区域长距离输送至电力需求量大的城市和工业中心。还可以通过互联通道实现跨国界线的电力交易。**配电网**负责将电力输送至以低压接入电网的独立电力用户。传统上，常规火力发电厂通过褐煤、硬煤、燃气、核能和水力发电设备发电。这类大规模发电设备一般位于大负荷中心附近，并接入输电网。电力从输电网以“从高到低”的方式输送至配电网的低压级，然后最终输送至私人电力用户。相比之下，大部分 vRES 发电被馈送至配电网网络中。在大多数情况下，陆上风力发电机连接至中压或高压级。⁶ 许多太阳能光伏，尤其是屋顶太阳

能光伏系统，将所产电能馈送至在地理位置上非常靠近电力用户的低压电网。但是，也有几类 vRES 因发电量大而需要接入超高压输电网，例如海风电。某些大规模陆上风电场和地面安装型太阳能光伏也直接接入输电网。图 3 所示为丹麦从基于常规火力发电的集中式系统转向由分散式热电联产与风能组成的分布式系统的电力生产变革。

当越来越多的发电方式接入配电网时，**配电系统的职责**发生改变。其不再专用于从高到低将电力从大型发电厂输送至电力用户。相反，如果分布式发电所产生的电能未能在本地被完全消耗，其将“从低到高”被输送至更高电压等级，之后被调度至其他地区。这导致**双向潮流**——从输电网向配电网和反向路径——也标志着对从高到低输电的单向常规电力系统的重大变革。换言之，发电结构的变革可对电网规划和运营带来重大影响（图 4）。

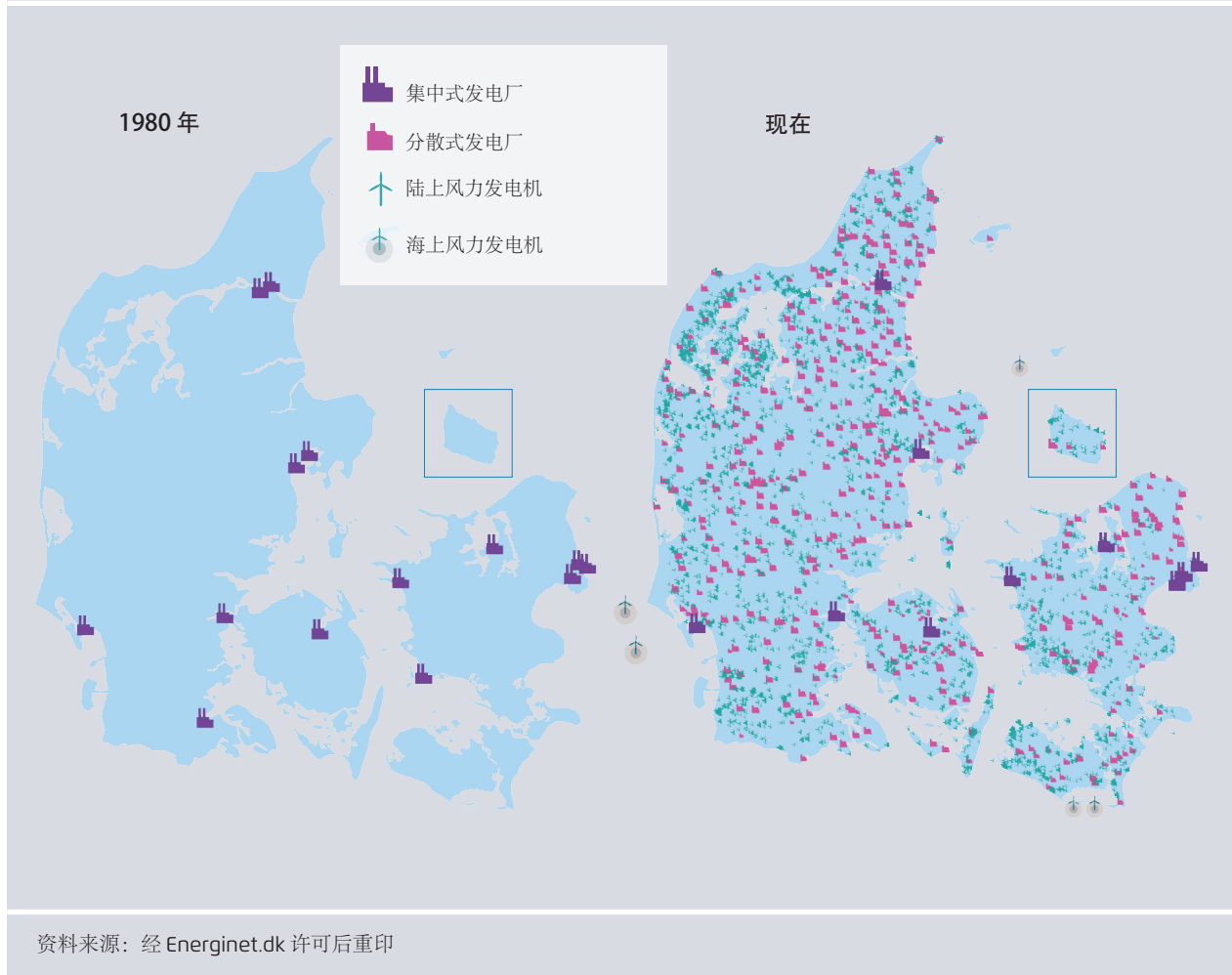
⁶ 在某些国家/地区，如德国，高压线路（110 kV）为配电系统的一部分；而在其他国家/地区，110-kV 等级属于输电系统。

重要见解：

- 随着 vRES 的增加，更多电力进入配电网。当 vRES 来自屋顶太阳能光伏和陆上风能时更是如此。
- 电网的未来取决于新发电和电力需求的空间分布。
- 可再生电源供电的可变性让系统运营更加复杂，需要更高的灵活性。
- 随着电源、整合商和需求侧应用的激增，未来能源系统必须加强供需协调。
- 鉴于传统辅助服务提供商的数量不断减少，需要更多辅助服务。

丹麦 1980 年与现在的发电情况：从集中式向分布式发电转变

图 3



让我们看看另外一个例子。过去几十年，每周和每季度电力需求曲线遵循同一可预测模式。这种情况现已不复存在。如今，**新的且难以预测的电力需求模式**为电网运营商和规划员带来了新的挑战。另一个对电力系统布局和运营带来巨大影响的因素是越来越多地使用热泵、电动汽车和新商业模式进行需求侧管理。

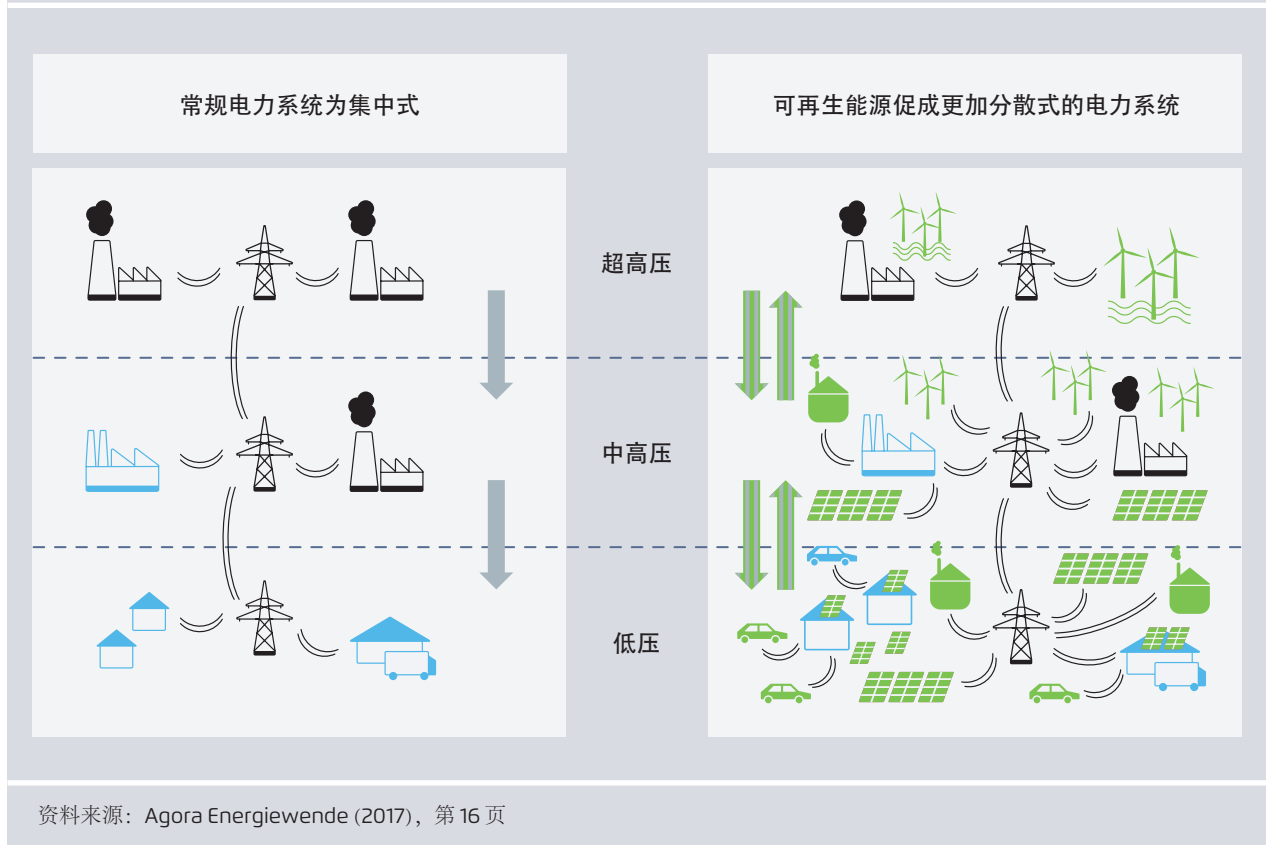
一言以蔽之，我们已经认识到四大能源系统趋势以及随之而来的挑战：

趋势 1：未来电网必须适应新发电和电力需求的空间分布。

在大多数情况下，风力发电厂和太阳能光伏发电厂位于风能和太阳光照条件良好的区域。如果新的 vRES 发电集中于本地电力需求较低的区域，将需要对电网进行扩容，以便将电力配送至其他地区。当新 vRES 设备位于网络状况较差且电网已发生阻塞的区域时更是如此。同时，需求侧的变化可能对系统的规划和运营造成显著影响。这些变化可能包括实施用于减少电力消耗和/或实现更灵活电力消耗的节能措施，如低功率电器、机械、照明和制冷系统。但也可

从传统单向系统向更加分散式的双向系统转变

图 4



能包括新型电力需求，如电动汽车、热泵、电锅炉以及（生产甲烷或氢的）燃料厂。发电和电力需求的空间分布是一项重要驱动因素，辅助确定输电线扩容需求以及未来电网的布局。实施电网扩容的前置时间可能相当长，甚至比风能或太阳能项目的建成期长若干年。

趋势 2：供需的急剧变化带来更陡峭的爬坡速率。

风速和太阳辐照强度的变化会引起发电的急剧波动。电能是一种实时商品，需要瞬时平衡供需。但在两种情况下可能出现失衡：当发电量超出电力需求时（比如由于高风速和/或强日照导致）⁷ 以及当几乎没有 vRES 发电时。尽管

预测能力越来越准确，但 vRES 发电水平仍可能发生骤变，迫使电网运营商不得不根据需求采取短期平衡措施。当需求侧变化加剧时，也会出现类似效应。例如，如果电动汽车和热泵在发电量过多时抽取部分电能，将有助于系统平衡。但是，如果同时被激活（例如许多电动汽车大规模充电与消除系统约束的“智能”充电），则也可能导致高爬坡速率，并带来新电力需求高峰。挑战在于应对电力供应与需求中高爬坡速率的同时维持系统平衡。

⁷ 请注意，这不仅取决于风力发电量，而且受整个系统灵活性的影响（例如常规发电厂的灵活性、弹性电力需求以及电能储

存），以应对发电量突增的情况。

趋势 3：供电侧电源数量和需求侧电动设备数量不断增长。

高可再生能源渗透率通常会导致供电侧电源数量增加。这是可再生能源发电主要来自小规模 and 模块化能源转化设备，这与仅使用一些大型火力发电机的系统恰恰相反。在需求侧，越来越多的电动设备进入市场，例如电动汽车和热泵等。在某些国家/地区，例如挪威，这一发展非常迅速。2018 年伊始，在挪威登记的电动汽车数量就达到 142,490 台。这与 2017 年年初相比增加了 42.5%。⁸ 此外，还可看到“电能产消者”（既生产也消耗电能）数量不断增长。通常，这些产消者将太阳能光伏电池板与电池储能相结合，因为此类技术的价格已大幅下降，所以极具吸引力。供电侧电源和需求侧用电设备的增长会实时影响电网。这种影响同时取决于生产和消耗电能的位置以及时间。挑战在于协调所有这些电源和电力需求应用，以及管理由此导致的电网复杂性。信息与通信技术 (ICT) 的数字化和扩散对于获取实时电网数据和实现电源与用电设备之间的通信日趋重要。

趋势 4：鉴于传统辅助服务提供商的数量不断减少，需要更多辅助服务资源。

电网运营商负责辅助服务运作。此类服务包括频率控制、旋转储备、电压支持、电网损耗补偿以及黑启动和孤岛运行能力。简而言之，辅助服务对于维持电网始终稳定、可靠运行是必要的。传统上，火力发电厂可在发电的同时提供配套辅助服务。挑战在于确保辅助服务可用性以保障系统可靠运行与找到获取辅助服务的新途径这二者之间取得平衡。

⁸ 请参见 SBB (2018)。

2. 作为灵活性选项的电网： 电网规划与扩容工具箱

输电网是一个重要的灵活性选项，用于实现系统跨区域平衡，以及让风能和太阳能光伏馈入波动趋于平缓。重大挑战之一就在于预估未来输电线的长度和位置——以及预测哪些技术创新将替代传统电网扩容。

2.1 GORE 原则 – 电网优化先于补强，补强先于扩容

GORE 原则是一种优先改进既有电网基础设施而非架设新输电线的电网规划方法。GORE 表示在 Expansion（扩容）和 Reinforcement（补强）前实施 Grid（电网）Optimisation（优化），其始终以优化现有输电线容量为先行措施（见下文）。其下一步是补强现有输电线，例如通

过使用可输送更大电流的特殊导线对线路进行升级。仅当上述所有选项都已用尽时，才考虑架设新输电线。此方法将成本降至最低，并减少了对居民和环境的负面影响。德国就是已推行 GORE 原则的国家之一。⁹

2.1.1 优化意味着始终安全地最大程度地利用现有电网。

为了确保电网安全运行，务必让输电线、变压器和其他电气设备保持在发热限值以内。通过输电线或变压器输送的电能越多，则导线工作温度越高。如果架空输电线的工作温度超出其发热限值，则其材料会膨胀，且线路弧垂会低

⁹ 在德国，该系统被称为“NOVA”（德语“Netz Optimierung vor Verstärkung vor Ausbau”的首字母缩写词）。

重要见解：

- 输电网是实现跨区域供需平衡的关键。
- 提高公众接受度并使成本最小化的电网规划方法之一采用 GORE 原则：电网优化先于补强，补强先于扩容。
- “易实现目标”包括系统化采用动态线路输送容量，以及将现有输电线更换为可承载更大电流的特殊线路。
- 用于协调电网规划与 vRES 规划的手段可提高电网扩容与 vRES 部署之间的协调性。
- 在敏感地区地下铺设部分输电线，并与当地利益相关方沟通，有助于提高公众接受度。
- 应尽早创建用于记录所有新发电厂，包括新 vRES 装机的主注册存储设备。

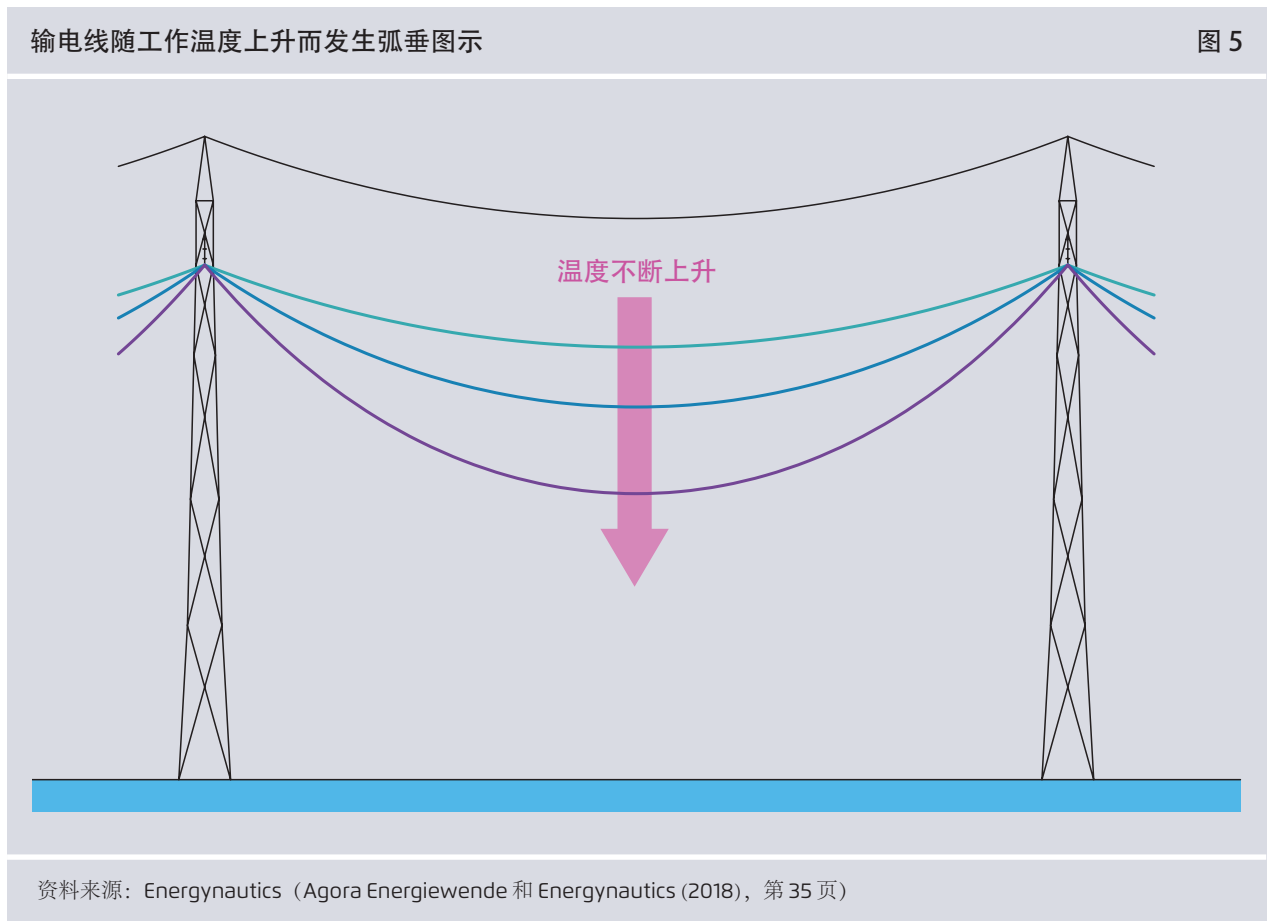
于可接受程度（图 5）。这将对输电塔造成过大机械应力，并让周围环境暴露于强烈电场和磁场中。¹⁰

输电导线的工作温度受各种因素影响，包括线路损耗、风速和风向、太阳辐照度以及导线材料性质。传统上，线路输送容量基于“最坏情况”假设静态确定，但这样通常会低估输电导线的实际承载能力。动态线路输送容量则根据输电导线的实际运行条件安全利用现有输电导线的输电量。与使用确定性或概率性方法计算的静态线路输送容量相反，动态线路输送容量会将实

际环境情况纳入考虑。由于动态线路输送容量还将冷却条件考虑在内，因此与静态输送容量相比，其允许输送更大的“动态”电流。从这一方面来看，风能和输电导线的环境温度可谓“完美搭档”：风力越大，输电导线的环境温度就越低，因而在大风馈入时段可输送的电能也就越多。动态确定线路输送容量要求持续测量架空输电导线的温度。这可通过安装传感器和红外热像仪等技术设备实现。之后，必须将所收集的数据传输给电网运营商。

移相变压器和其他潮流控制设备也可以辅助优化电网利用率。由于潮流控制属于电网运营的一部分，这些技术将在第 3.1.3 节中介绍。

¹⁰ 输电导线弧垂是指（输电塔）两个支撑点与两座输电塔之间输电导线的最低点之间的距离。如果输电导线弧垂，其与地面的距离将缩短。除了输电导线弧垂外，诸如线路张力等其他限制因素也会产生一定影响。



通过特殊变压器，即所谓的移相器，可将潮流从重载线路分流至低载线路。



2.1.2 通过升级现有输电线而非建设新线路补强电网

电网补强是指改造输电网和配电网中的现有输电线。补强措施之一是用高温低弧垂 (HTLS) 输电线代替“常规”架空输电线。与架空输电线中一般采用的钢芯铝绞线 (ACSR) 电缆不同，HTLS 导线尽管与常规 ACSR 电缆的直径相同，但却可以承受更高的工作温度。这意味着在相同输电线中，HTLS 导线允许通过更大电流。其他电网补强措施包括将电网升级至更高电压等级，以及向既有输电线添加二次回路。在理想状况下，通过 HTLS 进行电网补强后，相比常规架空输电线，输电量可提高 50% 至 100%。HTLS 所带来的实际输电量提升取决于所使用的材料。¹¹

2.1.3 尽管没有通用型解决方案，但必须基于电网异质性做出最优选择

电网优化和补强措施可显著提高输电量。鉴于未来发展的内在不确定性，系统运营商期望找到不会导致“投资搁置”的稳健电网发展措施。因此，如果可行，则电网优化和补强可被视为“无悔”措施。优化和补强措施不会导致不必要的电网扩容，反而可节省很多新线路架设成本。挑战在于找到电网优化、补强与扩容的最优结合。由于电网结构可能存在巨大差异，最优组合需要视具体情况而定。在架设新输电线之前，GORE 原则优先实现电网优化和补强中的“易实现目标”。

¹¹ Kenge 等人(2016) 概述了不同 HTLS 导线的比较。

信息框 – 德国法律规定的电网要求：优先接网、浅接网费和电网扩容

在德国，可再生能源发电机可获得直接优先电网接入，且仅承担在发电厂外从发电厂至接入点的成本（称为“浅接网费用”）。这极大促进了德国电力系统内可再生能源的持续增加。

重要见解：可再生能源的优先接网是关键；这包括高电压等级电网的补强和优化。

- **优先接网。** 也被称为“优先接入”，优先接网要求电网运营商以最短直线距离将新可再生能源装机接入适当电压等级电网系统（除非有更具有技术优势和经济效益的接入点）。值得注意的是，可再生能源发电商可选择不同的接网点，前提是其不会给电网运营商带来巨大额外成本。
- **针对可再生能源装机的强制电网优化、补强和扩容。** 将可再生能源装机接入电网的大部分电网运营商同时也是配电系统运营商。他们负责在需要时从低压至高压 (110 kV) 级优化、补强和扩建电网，从而把可再生能源输送至有需要的区域。
- **成本分配计划：浅接网费。** 电网运营商承担电网优化、补强和扩容成本。可再生能源发电商仅承担从发电厂到接网点的直连线路成本，以及该线路上安装的计量装置成本。从这个意义上讲，接网点可被视为成本分配的“分割线”（图 6）。最高至 110 kV 级的电网补强也涉及接入中压级的可再生能源发电厂。经验表明，提前预计可再生能源发电厂对接网电压等级以上电网部分的影响可提高电网规划的一致性。
- **优先调度。** 电网运营商有义务优先采购和运输可再生能源发电。可再生能源限电仅作为终极措施。（更多详情请参见第 3 章。）

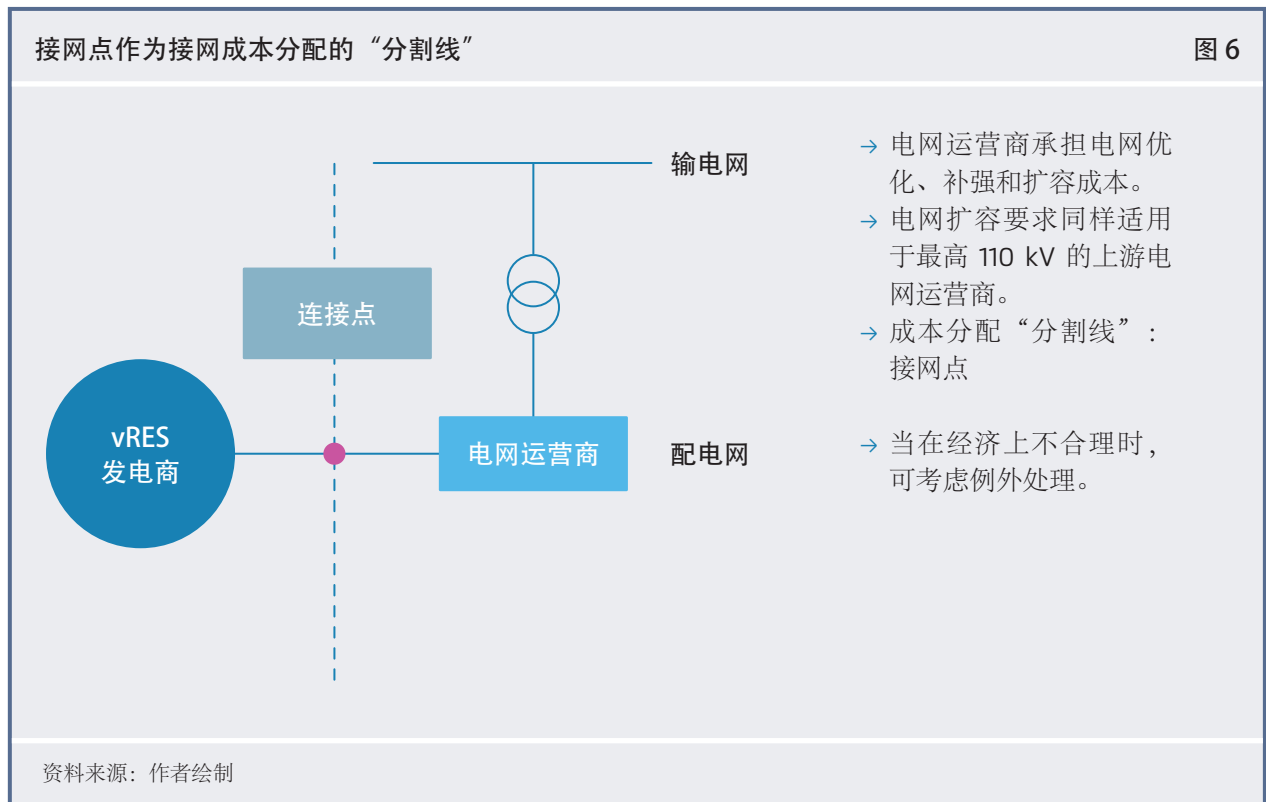
2.2 电网规划流程

电网规划应具有前瞻性。新输电线项目的实现通常需要一段较长的时间。因为这不仅涉及新输电线和输电塔的建设，而且涉及审批程序以及环境影响评估造成的长前置时间。电网规划者面临的主要问题是需要架设多长的新输电线以及架设地点。鉴于可再生能源份额增速越来越快，该问题的解决尤其重要。电网规划所面

临的其中一项挑战是在提前预测发展与保持一定灵活度之间取得平衡。本节将介绍不同电网规划方法和工具。

2.2.1 “依据发电量和需求量进行电网扩容”方法

常规电网规划方法包括两个连续步骤。首先，规划者设想相关情景，确定将在规定目标年限内（例如在 2030 年）实现的电力负荷和新发



电站位置所以及数量。这些设定可作为输入参数。然后，规划者根据情景的输入参数执行电网模拟。在多数情况下，规划者还将运行电力市场调度模型，以模拟常规发电和 vRES 的调度情况。电力市场调度模型的结果将被作为输入参数用于电网模拟。在电网模拟中发生的任何阻塞都意味着需要架设新输电线。

此方法的基本假设是依据发电量和需求量进行电网扩容。德国是采用此方法的国家之一。在德国，有四家输电系统运营商¹²采用了三阶式流程：

阶段 1 - 情景框架。在规划者可预估未来电网扩容需求之前，需要回答一些：到给定时间段（如 2030 年），将有多少发电量以及哪些发电类型？将部署在何处？电力需求有多高？用电中心将位于何处？还有哪些主要驱动因素影响电网布局？为回答这些问题，德国输电系统运营商每两年起草一份情景框架。其包括至少四种情景；三种涵盖未来 10 到 15 年，一种必须涵盖未来 15 到 20 年。该情景框架由德国监管机构联邦网络管理局 (Bundesnetzagentur) 批准。

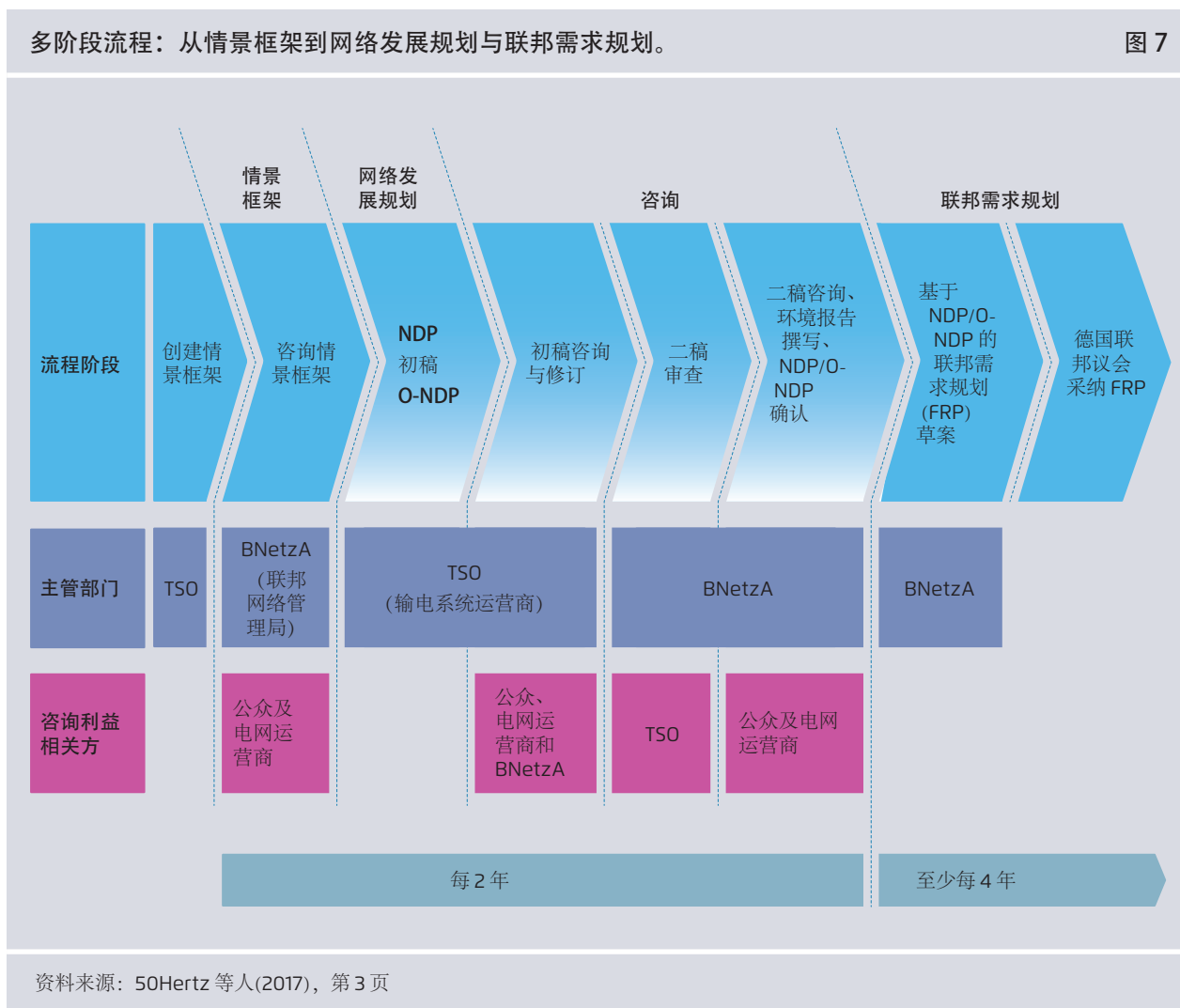
第 2 阶段 - 网络发展规划。通过使用来自情景框架的输入参数，规划者根据电力市场调度模型进行市场模拟。后续电网模拟可测定未来十年的电网优化、补强和扩容需求。然后，根据 GORE 原则（见上文）将预估输电线扩容纳入

¹² 德国输电网由四家输电网运营商运营：分别是 50Hertz Transmission GmbH、Amprion GmbH、TenneT TSO GmbH 和 TransnetBW GmbH。

网络发展规划中。网络发展规划包括所有必要的措施和实施时间表。在网络发展规划获得监管机构批准之前，其必须通过环境影响评估。

第 3 阶段 - 联邦需求规划。 联邦网络管理局每四年向联邦政府提交一次网络发展规划。网络发展规划是联邦需求规划的依据，后者包含高优先级电网扩容项目，并明确了项目起点和终点。一旦联邦需求规划被德国议会采纳，就具备了法律约束力（图 7）。

许多国家/地区的经验证明，网络扩容规划的实施具有一定困难。在这些国家/地区，由于当地居民反对高压线路或由于冗长的规划和审批程序而导致严重延期。电网扩容的延期可能使电网在高阻塞时段难以运行。因此，德国相当重视针对输电网严重阻塞地区的电网规划和可再生能源部署制定协调解决方案。这促成了许多创新解决方案的实施：



百分之三方案：电网规划中的削峰

最初，德国网络发展规划要求电网运营商消纳所有可再生能源发电量。通过调整电网布局来确保始终消纳 vRES 发电量，即使是在风能和太阳能光伏馈入量极大且用电负荷极低的时段亦如此。但此一刀切式的要求并不具有经济效益，因为其所涵盖的极端情况通常在一年内只会出现数个小时。百分之三方案背后的理念是在电网扩容与成本效率之间取得平衡。在此方法中，输电网运营商考虑的 vRES 削峰最高不超过年度发电量预测值的百分之三。这消除了架设新输电线以涵盖当年极有限高峰时段的需求，从而大幅减少了电网扩容成本。

新 vRES 的“电网友好型”布局

对于 vRES 份额非常高的地区，如果未能及时完成新输电线的建设，将给输电网带来巨大压力。由此导致的阻塞将需要越来越多的“再调度”（上调和下调常规发电厂以缓解电网瓶颈）和限电（降低可再生能源发电量）。近年来，德国北部已屡次出现此类情况，超过 70% 的电力都来源于风能。因此，政府决定限制输电网已过载地区（称为“电网扩容地区”）的新陆上风力发电机装机，直到有额外电网容量可用。

2.2.2 “可再生能源地区输电规划流程”方案

如上文所述，风力和太阳能发电厂的建设时间相对较短，而输电线架设时间则相对较长，这两者之间的矛盾给传统输电网规划带来挑战。相应地，“依据发电量和需求量进行电网扩

运输机械和设备要求一定的基础设施保证，如港口和公路。由于某些部件（如转子叶片和输电塔段）的尺寸限制，风电项目可能比太阳能光伏项目的要求更高。



容”方案可能无法及时满足 vRES 部署所带来的日益增加的电力输送需求。风力和太阳能发电厂位于多风和阳光充裕的区域，且有时远离高用电负荷中心。即使是大型 vRES 项目也可以在一到三年内落成。这与常规发电厂相比，可谓速度惊人。同时，它也比规划和架设新输电线要快，新输电线用于连接具有大量风能或太阳能的偏远地区和高用电负荷中心，其规划和架设通常需要五到十年，有时更久。在理想情况下，输电规划决策应早在做出可再生能源发电开发决策之前就拟好。然而，这在实践中几乎不可行，因为难以预测新 vRES 发电厂的部署位置。通常导致的结果就是新 vRES 部署与电网扩容之间存在时滞。

此问题的有效应对措施之一是可再生能源区域 (REZ) 输电规划流程，该措施在美国德州推出。¹³其目的是鼓励在所谓的最佳资源地区进行 vRES 投资，此类地区最适合可再生能源发电，同时确保输电基础设施及时完工。

在此方法中，输电规划会对国家或地区的太阳能和风能资源进行深度评估，以确定可再生能源区域，即 REZ。这些区域在地理位置上能发展经济性好的并网可再生能源。REZ 拥有优质可再生能源资源、合适的地形和土地使用规定，能吸引开发者的兴趣，从而支持具有成本效益的可再生能源发展。[基于此类 REZ 规定]，REZ 输电规划流程是一种规划、审批和建设将 REZ 与电力系统相连的输电基础设施的方法。”¹⁴

输电规划步骤如图 8 所示。

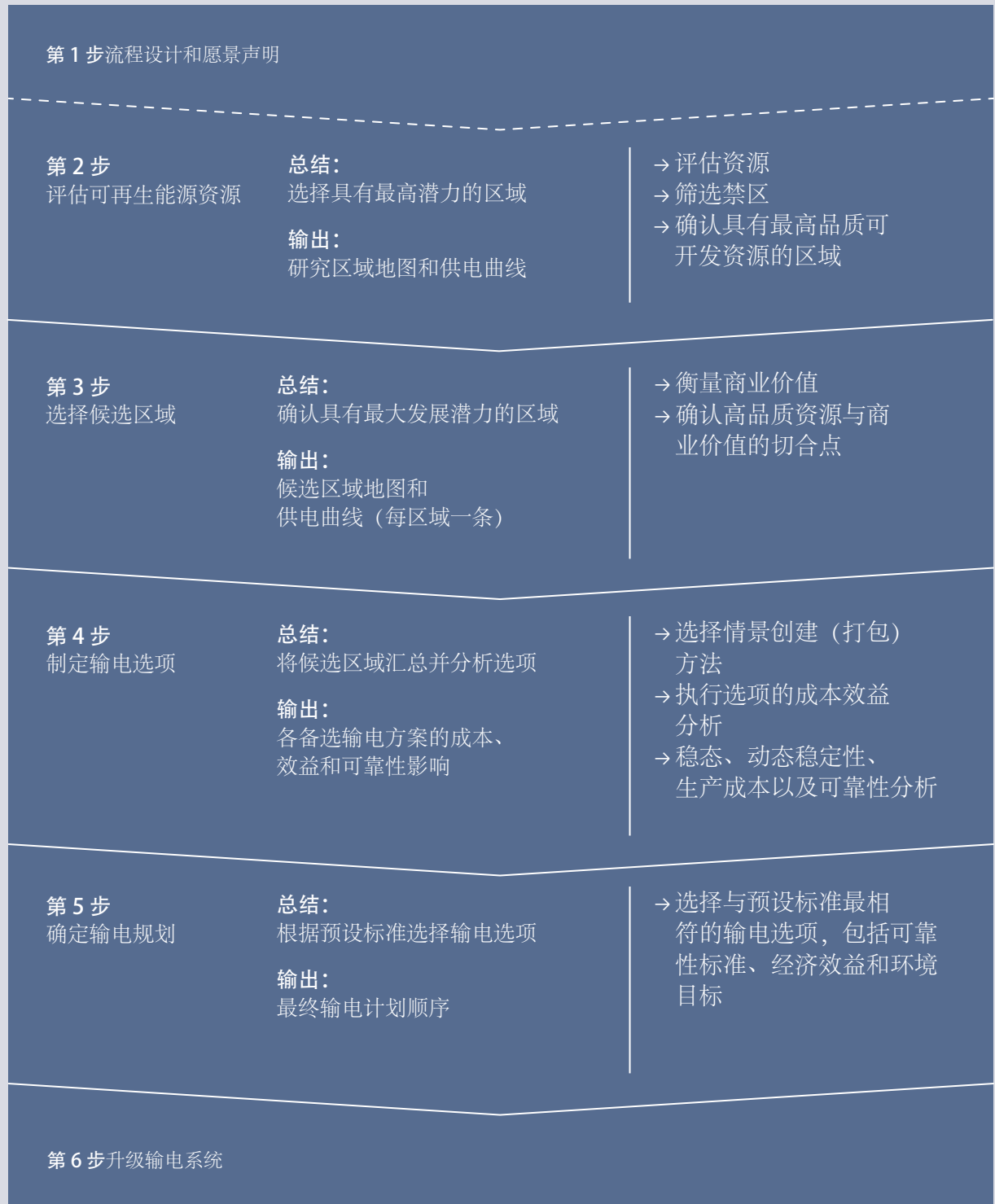
与传统输电规划一样，该流程由指定的部门、监管机构或输电公司组织和牵头。但是，与传统输电规划不同的是，其成功还取决于开发者、投资者、环保机构、公用事业单位和非政府组织的积极参与。一旦成功执行，其可帮助提供充分的输电资源，以便在最有利的位置加速风能和太阳能发展。

¹³ 如需了解更多，请参见 N. Lee 等人(2017)。

¹⁴ 请参见 N. Lee 等人(2017)，第 iii 页。

REZ 流程：总览

图 8



2.3 提高新输电线的公众接受度

让居住在新规划输电线附近的居民提前了解并保证项目透明度是赢得公众支持的关键。当地居民可能在以下几个方面受输电线影响：他们可能认为线路会有碍观瞻；他们的房产价值可能降低；或担心暴露于电场和磁场会对人体健康或当地动植物造成不利影响。务必慎重对待所有上述问题并妥善解决。

有许多方法可以提高公众接受度。在所选区域采用（部分）地下布线而非架空输电线就是可选方式之一。在丹麦，输电线通常以架空线路的方式架设，但在某些区段，特别是经过自然保护区或城区附近时，则采用地下布线。在德国，政策制定者已决定为贯通该国南北的新大型高压直流（HVDC）输电线采用地下布线设计。这种方法的优势显而易见：地下线路比传

统架空线路更隐蔽，释放的电场和磁场更少，且对鸟类和蝙蝠的负面影响也更少。但另一方面，地下电缆要比架空输电线贵得多——具体成本受多项因素影响，包括电缆长度、土壤结持度以及输电技术——因此通常专用于较为敏感的区域。

为了将输电线的影响降至最低，丹麦启动了一项对既有 400kV 架空输电线进行“美化”的方案。具体措施包括短距离内以部分地下布线代替架空线，或以降低对周围景观影响的方式建设输电塔，以及其他短距离路线调整。¹⁵丹麦 TSO（输电系统运营商）就该项目征集了民众和利益相关组织的意见，并获得了关于路线偏好以及地下布线区段的建议。

¹⁵ 请参见 Energinet.dk (2018)。



地下高压线路更易被公众接受。但是，建设周期比常规线路要长，且价格也更昂贵。

美观的高压电塔可更好地融入景观中，因而可作为地下高压线路的替换方案。



另一种增加公众对新输电线的接受度的方式是尽早让民众参与规划流程。例如，在德国，公共咨询和影响评估就具有发挥了重要作用。监管机构连同 TSO 提供信息，向民众和其他受影响利益相关者征集书面反馈，并举办了多场让公众可以表达其观点和顾虑的活动。论题包含了情景框架、网络发展规划以及规划者设定走廊地带内的路线识别。此外，还通过网站介绍规划的输电项目，并由受影响城区的民众咨询局提供当地项目的相关信息。

3.系统运营：用于消纳份额不断上升的可再生能源的工具箱

风能和太阳能的可变属性给电网运营商带来了新的挑战。电能为实时商品。为了让频率接近设定值（通常为 50 或 60 赫兹），需要保证供需的瞬时平衡。随着 vRES 在发电中的份额日益增加，要求运营商与规划者转变思维方式。像传统做法那样关注大型发电机组全天候运行的基荷容量无法为可再生能源供电系统提供足够的灵活性。需要更灵活的资源来抵消可再生能源发电时的波动。可用选项包括爬坡速率更快的可调度发电厂（如燃气涡轮发电机）、需求侧管理、电能储存技术以及——从长远角度看——电力、供热和运输领域的整合。Agora

Energiewende 出版物《关于灵活性》详细介绍了应对灵活性挑战的策略和技术。¹⁶

输电网可以通过平衡各地区之间的可变电力输出提供灵活性。系统供需的平衡是一项“全局性”任务，而电网阻塞则出现在局部层面。理论上，存在供电量能够满足特定区域乃至整个国家的电力需求、而电网容量不足以将电能从发电厂输送至负荷中心的情况。下文阐述了解决电网阻塞的措施。在后续章节中，将介绍保障电网可靠运行的另一项前提条件：获取频率和电压控制等辅助服务。传统上，常规发电机

¹⁶ 请参见 Agora Energiewende (2018)。

重要见解：

- 电网扩容延迟可能导致电网阻塞和瓶颈。
- 再调度常规电能、可再生能源限电以及其他此类措施对于确保电网稳定运行是必要的。此外，需要明确 vRES 限电条件。
- 实时 vRES 发电厂数据和远程输出控制可帮助电网运营商安全运营电网。
- 随着常规发电量的减少，来自 vRES 发电厂的辅助服务和新技术将变得越来越重要。
- 当太阳能光伏馈入较高时，会导致低压电网内电压升高。
- 诸如调节配电变压器等创新技术可帮助消纳更多的可再生能源发电，并缓解电压问题。
- 当已经开始规划阶段时，开发人员必须将不断增长的 vRES 份额所带来的系统影响考虑在内。否则，可能需要花费高额成本改造现有 vRES 装机。

可在发电过程中提供辅助服务。随着系统中常规火力发电的减少，需要通过新的方式来提供此类服务。

3.1 灵活性为关键要素时的系统运营

当输电量不足以将电能从发电厂输送至需求点时，会发生电网阻塞。如果太多电能涌入电网，例如风力发电高峰时段（德国北部经常出现），就会出现这种情况。但是，电网扩容的延迟、缺乏灵活性的热力发电或跨国界电力流也可造成这种阻塞。

阻塞所带来的问题是会削弱系统安全性。这是因为，系统内每条线路或每台变压器的最大可靠载容量都基于其发热限值。如果架空输电线的工作温度超过其限值，就会发生弧垂（见第2章）。如果流经输电线或变压器的有功功率和无功功率超出其相应限值过久，会造成永久性损坏。除了发热限值外，电网运营商还必须遵守电压和稳定性限值，以进一步保障系统安

全性。¹⁷如果单一输电线、发电机或变压器发生故障，内部冗余——被称为“N-1”标准——可确保电力系统仍继续稳定运行。

3.1.1 应对阻塞：再调度和限电

为了避免阻塞，电网运营商可采取各种不同的实时措施。包括电网相关措施（切换操作）、再调度（上调和下调电网瓶颈两侧的常规发电厂）、限电（降低可再生能源发电量）以及在某些情况下甩负荷。为这些措施的应用和优先顺序设定清晰明确的规则至关重要。否则，在常规发电厂保持运行时可能需要实施 vRES 限电，导致更多的二氧化碳排放。欧洲许多国家都已为可再生能源设立了优先调度政策。即仅在其他所有措施都已用尽时才进行 vRES 限电。可再生能源的优先调度对于消纳和推广 vRES

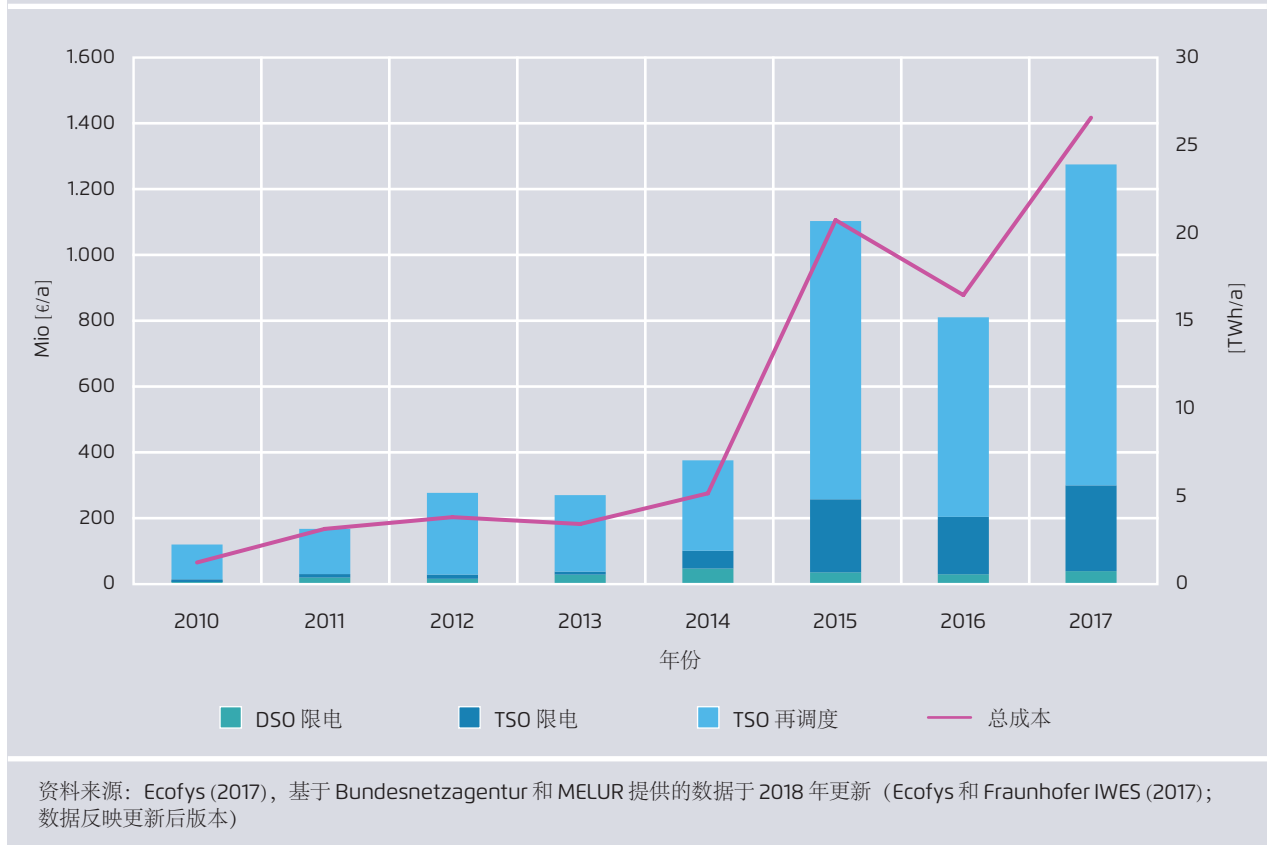
¹⁷ 此处所提到的限值旨在保证内容的完整性，更详细的讨论不在本报告范围内。目前，稳定性限值并非德国面临的主要问题，但在将来可能变得越发重要。随着实时稳定性限值变得更加复杂，且与输电电量的线性关系越来越不明显，届时势必要求对电网稳定性进行实时评估（在线动态稳定性评估，即在线 DSA）。

信息框 – 德国的再调度措施和限电

过去几年来，对再调度和限电的依赖性增加，这在德国政策讨论层面和媒体中都引发了越来越高的关注。目前这些措施的成本总计约十亿欧元。由于电力用户必须通过电网费用来承担这些成本，公众对此类措施的接受度可能降低。目前，可再生能源限电仍是一种主要的局部现象。大约三分之二的限电都发生在北部石勒苏益格-荷尔斯泰因州，大部分风力发电机都部署在此。目前，再调度和限电总量约占总发电量的 3%，与其他国家/地区相比，该数值相对较小。在给定年度内，实际再调度和限电总量受各种因素影响。例如，由于风力发电产量减少和新输电线“Thuringian Electricity Bridge”缓解了德国东部的电网约束，2016 年的再调度和限电量比 2015 年要低。2017 年，再调度和限电量再次走高，达到与 2015 年相似的水平。为了避免限电量进一步增加，政策制定者必须鼓励灵活性选项，如电转热和灵活性负荷。

德国的再调度和限电措施

图 9



发电尤为有益，特别是在可再生能源份额较低（但日益增加）的国家/地区。

德国电网运营商用于管理电网的四大主要工具如下（按重要性排列）：

- 系统相关措施，例如电网切换操作；
- 市场相关措施，例如根据发电商（或储能运营商）与电网运营商之间的合同或电网运营商的法定义务进行再调度（上调和下调容量超过 10 兆瓦的常规发电厂），从而补偿发电商的成本和经济损失；
- 按合同启用备用电厂，以补偿再调度能力的不足和为发电商提供成本补偿；以及

→ 基于可再生能源和热电联产的限电（逐渐减少或消除新能源发电厂或热电联产电厂产量），在此情况下，基于所谓的“艰难条款”为受影响的发电商提供 95% 的收入损失补偿。¹⁸

其他潜在终极措施包括馈电调整和根据电网运营商的请求切除电力用户（无经济补偿）。

¹⁸ 如果损失超过年收入的百分之一，则发电商将收到全额经济补偿，而非 95%。

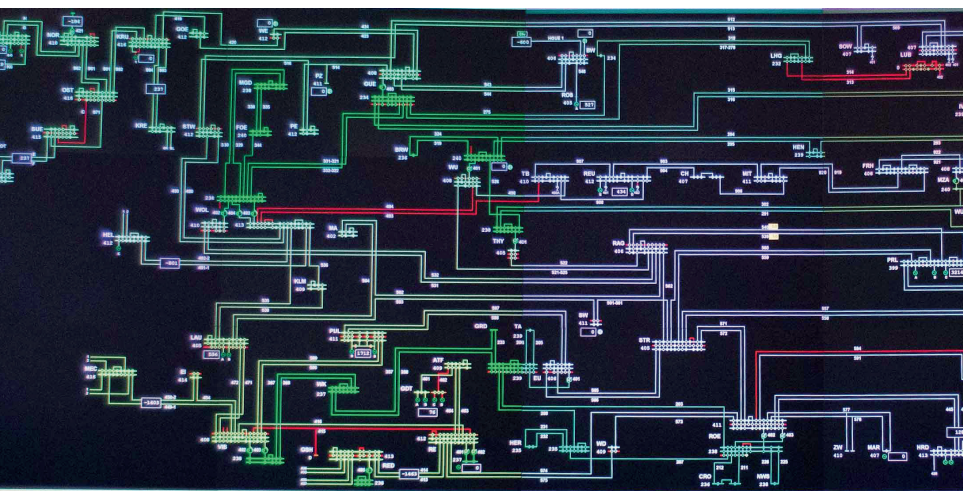
3.1.2 vRES 发电的远程监控

当电网运营商可以实时对 vRES 发电数据进行远程访问且具备远程控制能力来降低 vRES 发电量时，限电更有效。如果从一开始就安装可再生能源发电厂远程在线监控装置，让运营商能够通过“电话呼叫选项”（即致电 vRES 电厂操作员请求减出力）进行配电，则更容易消纳 vRES。随着可再生能源份额的增长，vRES 发电的监控对时间的要求变得更加严格。改造既有 vRES 发电厂可能相当繁琐，特别是在牵扯到大量小规模太阳能光伏发电和风力发电时。因此，建议在并网之前为具备特定发电量的 vRES 发电厂配备远程监控设备。概言之，随着电源和需求应用数量的增长，以及电网运营复杂性的增加，实时监控越来越重要。

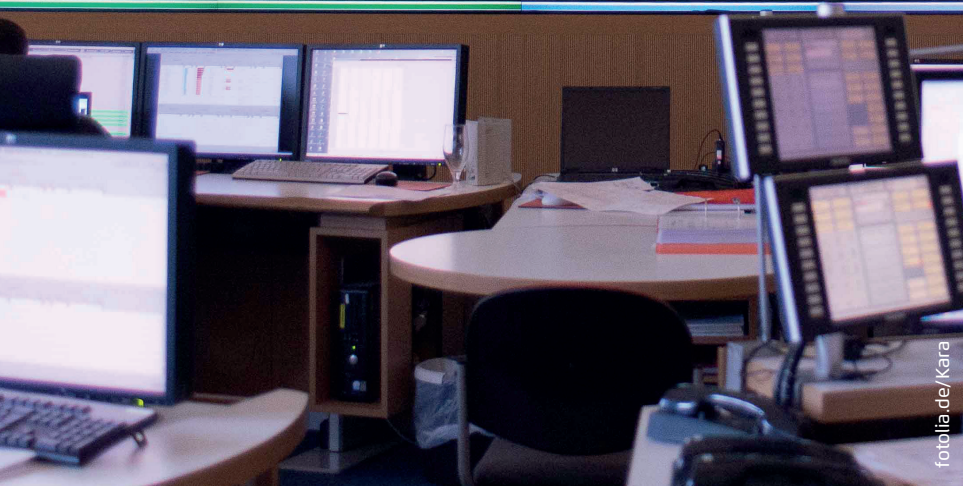
3.1.3 潮流控制：潮流优化和电网阻塞管理短期措施

移相变压器和其他潮流控制设备的操作允许电网运营商优化电力潮流和增加对既有输电量的利用率。移相变压器是一种特殊的变压器，可控制并引导交流电（AC）输电网中的实时潮流。例如，移相变压器可调节波兰和德国之间互联通道的跨国界电力流。¹⁹同样，移相变压器也可用于控制或改变一个国家/地区内输电网的潮流路线，从而缓解特定输电线的电网阻塞情况。可通过改变潮流通往其他输电线或网络区域的路线避免特定输电线过载，前提是有足够的输电容量可供使用。移相变压器可用作短期潮流控制设备，以释放重载电路上的电网约束。

19 50Hertz 和 PSE (2016)。



精确监控电力潮流和线路负荷是高可再生能源占比电网运行的前提条件。



信息框 – 德国用于缓解电网阻塞的移相变压器

在未来几年内，德国的输电系统运营商将电网阻塞严重的选定区域安装移相变压器，以降低可再生能源再调度和限电。在安装前，将先进行成本效益分析，确保移相变压器（或其他潮流控制设备）的运行比阻塞导致的再调度和限电具有更高的成本效益。2017年，德国采用移相变压器作为电网规划流程中的新短期措施，以缓解电网瓶颈。要强调的是，电网局部阻塞可以得到改善，且电网瓶颈可能只是暂时的。例如，电网瓶颈可能在架设新输电线后不复存在。如果某一电网部分中不再需要移相变压器，可将该变压器用于其他位置。使用移相变压器通常不会对环境造成明显影响，因为其一般安装在既有变电站内。如在相邻局域内采用多台移相变压器，则电网运营商必须考虑到潮流控制的相互依赖性。潮流控制是控制有功潮流、调节电压和稳定电网的重要手段。

3.2 辅助服务的采购

要让系统可靠运行，需要提供各种辅助服务。一般来说，辅助服务是指“输电或配电系统运营商需要的所有服务，以便维持输电或配电系统的完整性和稳定性，同时保证电力品质。”²⁰ 此类服务包括频率控制、电压支持、电网损耗补偿以及黑启动和孤岛运行能力。如上文所述，其中一些服务可被视为“全局”或“系统层面”（如频率控制），而其他服务则为“局部型”（例如电压支持）。为了提供辅助服务（例如频率控制、电压控制），电网运营商组织并从发电商、储能运营商和其他来源采购必要的系统服务（例如频率控制所需的备用和电压控制所需的无功功率）。传统上，辅助服务由常规旋转发电机提供。随着 vRES 在电力系统中的份额日益增多，需要提供辅助服务的新来源。如果没有新辅助服务来源，则需要始终保留一定份额的火力发电来提供电压或安全支持，这将限制 vRES 馈入。因此，可再生能源发电（连同其他备选项）必须有助于系统服务。

²⁰ 请参见 Eurelectric (2004)。

3.2.1 可再生能源发电机提供的辅助服务

提供辅助服务一直是常规发电厂必须满足的条件之一，以实现并网。此类最低技术要求在网络规范中根据相应电压等级予以确定。如果 vRES 发电份额增加仅是边际上的，可再生能源发电不会造成系统影响。随着德国装机速度的提高，风力发电机也提出了类似要求。《辅助服务条例》于 2009 年开始实施，同年也见证了约 25 吉瓦陆上风电新装机。该条例介绍了陆上风力发电机频率和电压支持要求，并确定了陆上风力发电机的技术规定，以对现有网络规范进行补充。这些要求对于从 2011 年 4 月及以后投入运营的新陆上风力发电机是强制性的。对于在此时间之前已投入运营的风力发电机，如果其运营商自愿遵守条例规定，可获得一笔奖励金。如今，可再生能源发电要求已成为现有不同电压等级网络规范框架的一部分。

3.2.2 提供辅助服务的新方式

随着 vRES 的增加，更多电力流入配电网。未在本地产生的电力被馈入上游高电压等级配电网或馈入输电网。自从德国开始逐步淘汰主要位于南部的核电厂，电压稳定性越来越难得到保证，因为没有足够的集中传统发电厂来提供

信息框 – 赢在起点：德国 50.2 赫兹问题。

要维持系统稳定性，需要保证 50 或 60 赫兹的频率（视乎国家/地区而定）。当发电量超过用电量时，频率升高至可接受水平以上（频率过高）；当发电量不足以满足用电需求时，频率降至可接受水平以下（频率过低）。两种情况都会危及系统稳定性。在德国，接网规定最初要求太阳能光伏发电厂（一般接入低压电网）在达到 50.2 赫兹的过频率时脱网。只要系统内的太阳能电力处于低水平，此要求就不会引起任何问题。但在 2009 至 2012 年间，德国每年光伏装机量达到 7 到 8 吉瓦。总容量从 2009 年的 11 吉瓦上升到 2012 年的 33 吉瓦。而与此同时，陆上风力发电机仍被配置在 49.5 赫兹的低频率下脱网。这导致了较危险的情况：如果在 50.2 赫兹时有大量太阳能光伏模块脱网时，一次调频可能无法补偿电网频率骤降。此外，发电损失可能造成频率过低，从而强制陆上风力发电机在 49.5 赫兹时脱网。此“多米诺效应”最终可能导致断电。为此，德国联邦经济事务和能源部 (BMWi) 要求 vRES 发电商对数十万台太阳能光伏模组和陆上风力发电机进行改造，并重新配置脱网电压等级，这一任务不仅耗时，而且在许多情况下都必须在现场进行。这给德国的政策制定者上了宝贵的一课：在规划阶段就评估接网规定对系统的影响要好过，接网后再改造。

无功功率。辅助服务可由发电机或电网组件提供，以确保系统稳定性。例如，静止无功补偿器 (SVC)、静止同步补偿器 (STATCOM) 和同步调相机可以提供电压支持辅助服务，而无需发电。例如，工程师可将停用的 Biblis 核电厂发电机 A 转化为旋转同步调相机。Biblis 发电机 A 的容量是 1.2 吉瓦，位于 Hesse 南部。这是首次将如此规模的发电机用于低或高电网电压无功功率调节。²¹在丹麦，输电系统运营商 Energinet.dk 就辅助服务供应定期举行招标。在某些招标活动中，安装新同步补偿器甚至比从现有发电厂获得辅助服务更加便宜。²²

3.2.3 配电网辅助服务的提供

配电网中电压升高可能是由小规模太阳能光伏发电厂接入较低电压等级导致。对于分散式

vRES 发电密度高但本地电力需求有限且配电距离长的区域，尤其要注意此问题。²³抵消低压网络中电压波动影响的其中一个解决方案是安装可调变压器。传统上，中低压电网中的电压变化必须保持在 $\pm 10\%$ 范围内。使用经调节的配电变压器可以在各电压等级实现对整个电压范围 $\pm 10\%$ 的控制。通过解耦这两个电压等级，可允许消纳更多的可再生能源发电。²⁴图 10 所示为德国 880 家配电系统运营商采用的不同措施类型。尽管其中一些措施属于常规电网扩容，但“智能”计量和控制技术将在未来变得越来越重要。截至 2017 年 4 月，德国有 57 家配电系统运营商采用了可调变压器，61 家配电系统运营商采用了调压器。²⁵

²¹ 请参见 Siemens (2017) 和 Amprion (2012)。

²² 如需更多信息，请参见 Ea Energy Analysis (2015)，第 51 ff 页。

²³ 请参见 Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg (2017)。

²⁴ 详见 E-Bridge、IAEW 和 OFFIS (2014)。

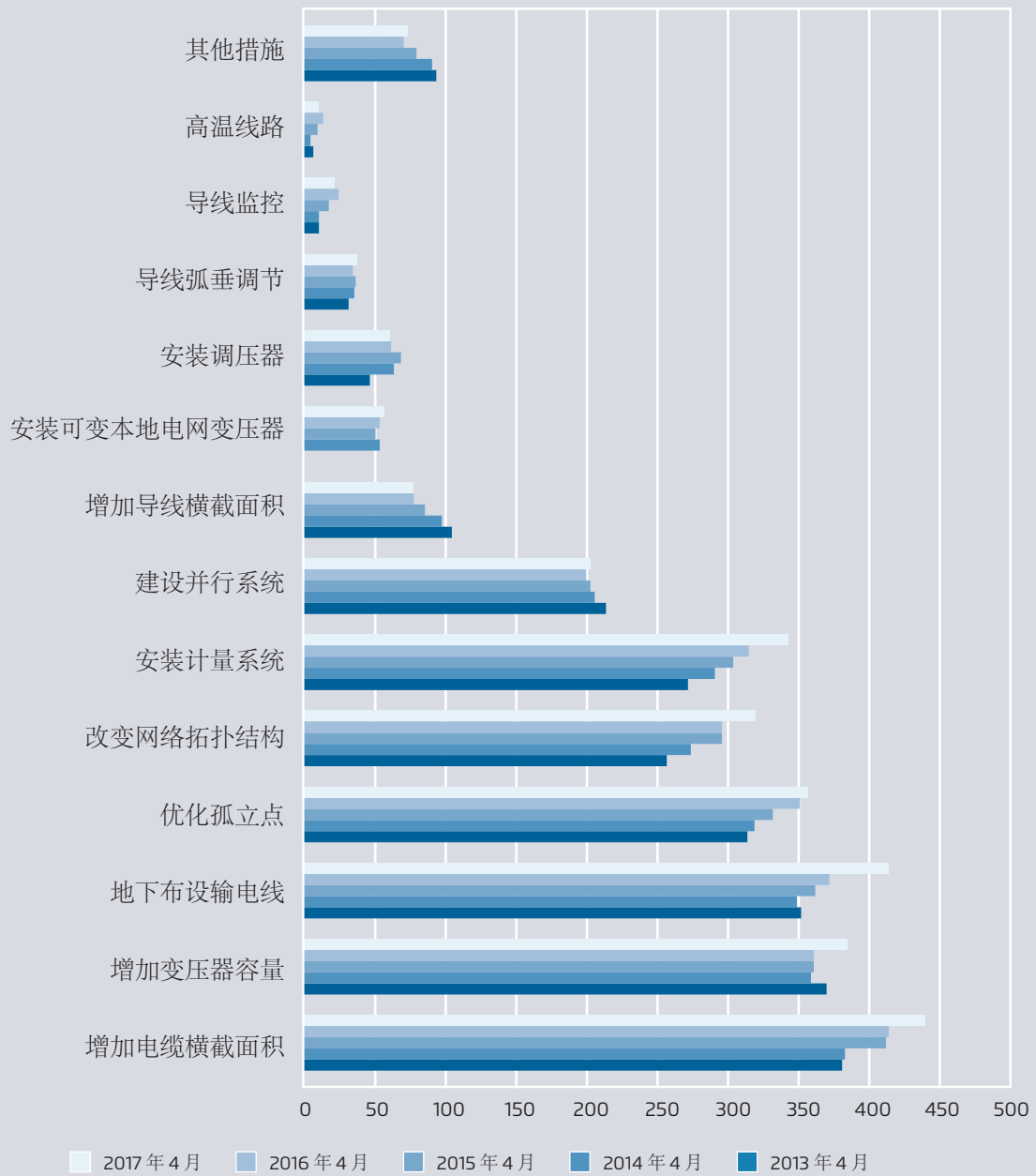
²⁵ 请参见 Bundesnetzagentur und Bundeskartellamt (2016)。

即使是已停用的发电厂发电机，仍可改造为旋转同步调相机，提供电压支持。



根据 EEG 第 12 章应用的电网优化和补强措施概览以及这些措施在电网运营商（配电系统运营商）中的使用频率

图 10



BNetzA 和 Bundeskartellamt (2017)

参考文献

50Hertz (50Hertz Transmission GmbH) (2017)

50Hertz Geschäftsbericht 2016: Eine erfolgreiche Energiewende – für eine nachhaltige Welt. 可在线获取: <http://www.50hertz.com/de/Medien/Publikationen> (于 2018 年 1 月 29 日访问)。

50Hertz et al. (50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH, TransnetBW GmbH) (2017)

Netzentwicklungsplan Strom 2030. Offshore Netzentwicklungsplan 2030. Version 2017, 1. Entwurf.

50Hertz and PSE (2016)

Milestone for Improved Power Flow Regulation between German and Polish Electricity Systems. Press release. 可在线获取: www.50hertz.com (于 2018 年 8 月 9 日访问)。

AEE (Agentur für Erneuerbare Energien) (2018)

Landesinfo Schleswig-Holstein (SH). 可在线获取: https://www.foederal-erneuerbar.de/landesinfo/bundesland/SH/kategorie/wind/auswahl/437-anteil_windenergie_a/ (于 2018 年 2 月 5 日访问)。

Agora Energiewende (2018)

A Word on Flexibility. 可在线获取: <https://www.agora-energiewende.de/en/publications/a-word-on-flexibility-1/> (于 2018 年 8 月 5 日访问)。

Agora Energiewende and Energynautics (2018)

Toolbox für die Stromnetze – Für die künftige Integration von Erneuerbaren Energien und für das Engpassmanagement. Study commissioned by Agora Energiewende.

Agora Energiewende and Sandbag (2018)

The European Power Sector in 2017. State of Affairs and Review of Current Developments.

Agora Energiewende (2017a): Energiewende 2030

The Big Picture: Megatrends, Ziele, Strategien und eine 10-Punkte-Agenda für die zweite Phase der Energiewende.

Amprion (2012)

Generator wird zum Motor. 24.02.2012. 可在线获取: <http://www.amprion.net/generator-wird-zum-motor> (于 2018 年 2 月 5 日访问)。

Ancillary Services Ordinance (2009)

Verordnung zu Systemdienstleistungen durch Windenergieanlagen (Systemdienstleistungsverordnung – SDLWindV). Urfassung. 可在线获取: https://www.clearingstelle-eeg.de/files/SDLWindV_juris_Urfassung_0.pdf (可 2018 年 2 月 5 日访问)。

Ancillary Services Ordinance (2009)

Verordnung zu Systemdienstleistungen durch Windenergieanlagen (Systemdienstleistungsverordnung – SDLWindV). Historische Lesefassung. 可在线获取: <http://www.energie-chronik.de/energierecht/SDLWindV.pdf> (于 2018 年 2 月 5 日访问)。

BDEW (German Association of Energy and Water Industries) (2015)

Smart Grids Ampelkonzept: Ausgestaltung der gelben Phase. Berlin, 10 March 2015.

Bloomberg Markets (2016)

Solar Sold in Chile at Lowest Ever, Half Price of Coal. Article by Vanessa Dezem. 可在线获取: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2016-08-19/solar-sells-in-chile-for-cheapest-ever-at-half-the-price-of-coal> (于 2018 年 2 月 5 日访问)。

BNetzA (Bundesnetzagentur – Federal Network Agency) (2018)

Leitungsvorhaben. 可在线获取: https://www.netzausbau.de/leitungsvorhaben/de.html?cms_map=2 (于 2018 年 8 月 13 日访问)。

BNetzA (Bundesnetzagentur – Federal Network Agency) (2017 a)

Beendete Ausschreibungen 2017. Solaranlagen. 可在线获取: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Ausschreibungen/Solaranlagen/BeendeteAusschreibungen/Ausschreibungen2017/Ausschreibungen2017_node.html (于 2018 年 2 月 4 日访问)。

BNetzA (Bundesnetzagentur – Federal Network Agency) (2017 b)

Beendete Ausschreibungen 2017. Windenergieanlagen an Land. 可在线获取: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Ausschreibungen/Wind_Onshore/BeendeteAusschreibungen/BeendeteAusschreibungen_node.html (于 2018 年 2 月 4 日访问)。

BNetzA (Bundesnetzagentur – Federal Network Agency) (2017 c)

Quality of supply. 可在线获取: https://www.bundesnetzagentur.de/EN/Areas/Energy/Companies/SecurityOfSupply/QualityOfSupply/QualityOfSupply_node.html (于 2018 年 1 月 29 日访问)。

BNetzA (Bundesnetzagentur – Federal Network Agency) (2017 d)

EEG in Zahlen 2016. 可在线获取: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/ZahlenDatenInformationen/zahlenunddaten-node.html (于 2018 年 1 月 29 日访问)。

BNetzA (Bundesnetzagentur – Federal Network Agency) (2017 e)

Netz- und Systemsicherheit. Daten für das Jahr 2015. 可在线获取: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Netz_Systemsicherheit/Netz_Systemsicherheit_node.html#doc266942bodyText4 (于 2018 年 2 月 5 日访问)。

BNetzA (Bundesnetzagentur – Federal Network Agency) (2011)

"Smart Grid" und "Smart Market". Eckpunktepapier der Bundesnetzagentur zu den Aspekten des sich verändernden Energieversorgungssystems.

BNetzA (Bundesnetzagentur – Federal Network Agency) and Bundeskartellamt (2017)

Monitoringbericht 2017. 13 December 2017.

BWE (Bundesverband WindEnergie e.V. – German Wind Energy Association) (2018)

Zahlen und Fakten. 可在线获取: <https://www.wind-energie.de/themen/zahlen-und-fakten/> (于 2018 年 7 月 6 日访问)。

Danish Energy Agency (DEA) (Energistyrelsen) (2018)

Udbygningen af solceller. Excel sheet, containing data through 2017.

Danmarks Vindmølleforening (2018)

Vindmøller i Danmark. Data through March 2018. 可在线获取: <http://dkvind.dk/html/nogleta/kapacitet.html> (于 2018 年 7 月 6 日访问)。

E-Bridge, IAEW und OFFIS (2014)

Verteilernetzstudie. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi). 12 September 2014.

Ea Energy Analysis (2015)

The Danish Experience with Integrating Variable Renewable Energy. Study commissioned by Agora Energiewende.

Ecofys and Fraunhofer IWES (2017)

Smart-Market-Design in deutschen Verteilnetzen. Study commissioned by Agora Energiewende.

EEG (Renewable Energy Act) 2017

Gesetz zur Einführung von Ausschreibungen für Strom aus erneuerbaren Energien und zu weiteren Änderungen des Rechts der erneuerbaren Energien. (Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) 2017).

ENEL Green Power (2016)

EGP experience with auctions. Presentation from 14 March 2016. 可在线获取：https://www.iea.org/media/workshops/2016/reppostcop21/22VenturiniRIAB_14marzo2016_ver7.pdf (于 2018 年 2 月 4 日访问)。

Energinet.dk (2018)

Politiske rammer for udbygning af elnettet. 可在线获取：<https://energinet.dk/Anlaeg-og-projekter/Netplanlaegning/PolitiskeRammer> (于 2018 年 8 月 14 日访问)。

**EnWG (German Energy Industry Act) 2016.
Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung.
Eurelectric (2004)**

Ancillary Services: Unbundling Electricity Products – an Emerging Market. Thermal Working Group. Ref: 2003-150-0007.

Eurelectric (2004)

Ancillary Services: Unbundling Electricity Products – an Emerging Market. Thermal Working Group. Ref: 2003-150-0007.

Fraunhofer ISE (2018)

Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. 2018 年 6 月 14 日版本。可在线获取更新：www.pv-fakten.de (于 2018 年 7 月 6 日访问)。

Hogan, M., Kadoch, C., Linvill, C., O'Reilly, M. (2018)

How Germany's Energiewende Renewables Integration Points the Way. Public Utilities Fortnightly. February 2018.

IEA (International Energy Agency) (2017)

Renewables 2017. 可在线获取：<https://www.iea.org/publications/renewables2017/> (于 2018 年 1 月 29 日访问)。

Kenge, A.V., Dusane, S.V., Sarkar, J. (2016)

Statistical Analysis & Comparison of HTLS Conductor with Conventional ACSR Conductor. International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT). IEEE (2016).

Lee, N., Flores-Espino, F., Hurlbut, D. (2017)

Renewable Energy Zone Transmission Process: A guidebook for practitioners. Golden, CO, USA, 2017.

Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg (2017)

Informationsportal Regelbare Ortsnetztransformatoren. 可在线获取：<http://ront.info/> (于 2018 年 2 月 5 日访问)。

Reneweconomy (2016)

New Low for Wind Energy Costs: Morocco Tender Averages \$US30/MWh. 可在线获取：<http://reneweconomy.com.au/new-low-for-wind-energy-costs-morocco-tender-averages-us30mwh-81108/> (于 2018 年 2 月 5 日访问)。

SBB (Statistisk sentralbyrå – Statistics Norway) (2018)

Over 140,000 elbiler i Norge. 22 March 2018. 可在线获取：<https://www.ssb.no/transport-og-reiseliv/artikler-og-publikasjoner/over-140-000-elbiler-i-norge> (于 2018 年 7 月 6 日访问)。

Siemens (2017)

Biblis: A generator stabilizes the grid as a synchronous condenser. 可在线获取：https://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/automation/automation-control-pg/sppa-e3000/Electrical_Solutions/BiblisA_RWE-Power-AG_electrical-solutions_generator_synchronous-condenser_sppa-e3000.pdf (于 2018 年 2 月 5 日访问)。

Spanish Wind Energy Association (AEE) (2018)

The figures of the Spanish wind power industry. 可在线获取：<https://www.aeolica.org/en/about-wind-energy/wind-energy-in-spain/> (于 2018 年 7 月 31 日访问)。

关于 Agora Energiewende

Agora Energiewende 致力于制定基于事实且政治可行的政策，助力德国、欧洲和世界其他地区向清洁能源的成功转型。作为智库和政策实验室，我们的目标是与政治、商业和学术界的利益相关者分享知识，同时进行富有成效的思想交流。我们基于科学的研究强调制定实用的政策方案，同时避免意识形态化的议程。作为一个主要通过慈善捐助资助的非营利性组织，我们不受局部的企业或政治利益掣肘，而是致力于为全球应对气候变化做出贡献。



扫描二维码，下载本出版物。

Agora Energiewende

Anna-Louisa-Karsch-Straße 2 | 10178 Berlin

电话 +49 (0)30 700 14 35-000

传真 +49 (0)30 700 14 35-129

www.agora-energiewende.de

info@agora-energiewende.de

