

分析报告

德国和欧洲电力系统充裕度评估及 对中国的经验和借鉴意义

中德能源转型研究项目



版本信息

《德国和欧洲电力系统充裕度评估及对中国的经验和借鉴意义》是德国国际合作机构（GIZ）联合德国能源署（DENA）在中德能源转型研究项目框架下共同发布的分析报告。该项目支持中国政府智库与德国研究机构交流，从而加强中德在能源转型方面的政策研究交流，并与中国受众分享德国的能源转型经验。该项目旨在通过国际合作和互利的政策研究和建模，推动以低碳为导向的能源政策，帮助中国建立更有效的低碳能源体系。项目由德国联邦经济和气候保护部(BMWK)在中德能源与能效合作伙伴框架下提供支持，中德能源与能效合作伙伴是中德两国政府能源政策对话的官方平台。国家能源局是项目框架下中德能源工作组的中方指导单位。中德能源转型研究项目由德国国际合作机构（GIZ）牵头，联合德国能源署(DENA)和 AGORA ENERGIEWENDE 共同实施。

发布方：

德国能源署

肖恩街 128 号

10115 柏林，德国

电话：+49 (0)30 66 777-0

传真：+49 (0)30 66 777-699

电子邮箱：INFO@DENA.DE

网址：WWW.DENA.DE

作者：

KAROLINA JANKOWSKA 博士，德国能源署

PETER-PHILIPP SCHEIRHORN，ENERGYNAUTICS 公司

THOMAS ACKERMANN 博士，ENERGYNAUTICS 公司

ANDERS HOVE，德国国际合作机构

发布时间：

2022 年 4 月

版权所有。对本出版物的所有使用均需得到德国能源署的同意。

请按以下方式引用本出版物：

德国能源署（DENA，2021）“德国和欧洲电力系统充裕度评估及对中国的经验和借鉴意义”

目录

1 引言：报告的目的、定义和研究问题	6
2 德国容量充裕度量化方法	7
2.1 流程、职责和定义的背景	7
2.2 相关定量方法	7
2.2.1 德国输电系统运营商对国家电力平衡的测算方法	8
2.2.2 欧洲输电系统运营商网络（ENTSO-E）采用的资源充裕度评估方法	9
2.2.3 2015–2021 年德国联邦经济与能源部的供电安全监测	11
2.2.4 德国联邦网络管理局（BNetzA）自 2021 年起的供电安全监测	18
2.2.5 确定德国容量备用的规模	21
3 电网和系统充裕度的定量方法：德国电网发展计划（NEP）中的方法	22
3.1 流程和责任的相关背景	22
3.2 电网发展计划中的容量充裕度	23
4 德国所使用方法的比较	24
5 德国电力系统评估的新兴发展	29
5.1 燃煤电厂和核电厂逐步淘汰引起的预期变化	29
5.2 是否有其他可能或者必要的变化？	31
6 结论及对中国的实际意义	33
采访合作伙伴及参加相关大会、利益相关者会议等	36
缩写	37
图列表	38
表列表	39
参考文献	40

编辑寄语

政策制定者和规划者早就认识到评估容量充裕度在维持电力系统可靠性方面所发挥的关键作用，而后者反过来对于保证经济平稳运行、并为全球持续开展低碳能源转型提供社会支持也起到至关重要的作用。风能和太阳能的规模化发展对电力系统规划提出了新的挑战。虽然，一些国家已经证明高比例波动性可再生能源系统与可靠的电力供应可以相互兼容，但它们确实带来了更多的不确定性，因此评估和规划过程也变得更为复杂。此外，规划者还不得不在电动汽车充电和需求侧灵活性等领域纳入新的实践。

2021 年，中国多个省份出现拉闸限电和电力短缺现象。虽然停电原因多种多样，但 2021 年 9 月和 10 月的停电主要与市场因素有关，即由高煤价与燃煤电厂发电的固定价格之间的不匹配造成。这导致了許多燃煤电厂实物燃料短缺并不得以低容量系数运行。虽然这一事件似乎主要与市场设计有关，而非由于系统充裕度规划原因所致，但任何电力短缺或断电现象都不可避免地提高了对供应侧提供更可靠容量的要求。中国政府也确实不仅仅通过提高电价、限制煤矿利润来应对短缺，而且制定了旨在提高燃煤电厂产能的新规定。旧的、效率较低的燃煤电厂退役后应进入储备状态，政府将要求煤电公司以至少与往年一样高的价格运营电厂。政府文件中对能源安全，尤其是供应安全，的重视程度与日俱增，这可能会导致新燃煤发电能力建设提速，以满足高峰负荷。

本报告的目的是解释和说明德国和欧洲如何调整其系统评估和规划流程，以确保传统燃煤电厂和核电厂容量的退役与可靠性和能源安全目标完美相容。毕竟，德国拥有世界上最为可靠的电力系统——最新的 2030 年系统充裕度研究表明，即便德国即将于本年代末逐步淘汰其最后剩余的核电站和大部分煤电产能，德国该年度电力不足概率

(LoLP) 也比该国当前标准安全 20 倍。¹然而，由于该分析是基于德国过去政策目标所做的假设，这些目标与此同时已发生诸多变化，因此未来更新的容量充裕度评估可能会得出略有不同的结果。德国也经历了被称为“黑暗低谷期”(dark doldrums)的时期——即在秋冬两季，风速下降，太阳能发电量也随之下落的时期。事实上，德国风能和太阳能的季节性低迷远比中国更为明显。中国的冬季阳光更加稳定，风能出力通常在较冷的月份达到峰值。鉴于欧洲和德国的可再生能源已在其电力生产中占据相当大的份额，将天气不确定性纳入容量充裕度评估已成为关键一环。上述工作应与对传统电厂、输电线路和化石燃料供应的短期中断、以及对气候事件或汽车电气化可能引发的长期需求增长的不确定性建模一起进行。

另外，对不确定性的现实水平的建模也非常重要，建模所采用的方法不应使规划结果偏向于安装成本更高的发电和储能，而是应该优先考虑在输电、跨境电力交易和需求侧灵活性方面相对具有更佳成本效益的投资。²正如我们在本报告中所展示的那样，尽管仍处于早期阶段，但欧洲的容量充裕度评估方法中已经开始更多的将这些因素纳入考量。最近对其他市场的几项研究表明，随着越来越多的储能容量的上线，适度数量的储能——主要是短期储能，如 4 小时储能容量——在确保充分利用每兆瓦风能或太阳能容量以满足峰值负荷方面将发挥巨大作用。³

最后，虽然本报告侧重于欧洲和德国系统充裕度评估的技术方面，但这里讨论的概念不仅与技术专家有关，也与政策制定者有关。电力系统的规划与评估不仅存在于技术报告领域，也存在于公共政策领域。对于政策制定者来说，此类评估方法可以用于设定高水平的可再生能源或碳目标时。当出现停电或电力短缺情况时，有关专家和政策制定者可

以利用这些分析结果，对诸如建立“更可靠的基荷能源”这样的简单化处理，或强制“所有可再生能源配备成本高昂的用户驻地储能设施”之类的一刀切做法予以直接回绝。正确的评估不仅有助于维护正常运转，而且有助于就可再生能源在能源转型中的作用和价值进行更富有成果的公开讨论。因此，规划者和政策制定者应努力使这一过程对更广泛的受众开放，并为其所理解，即便其对数据的要求和方法学会变得越来越复杂化。

本报告概述了德国当前和预期中未来电力系统的规划和评估实践，并分析了过去十年德国相关电力系统规划机构发表的各种出版物中所使用的方法。这些机构包括：德国输电系统运营商、联邦经济和气候行动部（2021 年底前为经济事务与能源部）和德国联邦网络管理局。此外，报告还介绍了欧洲输电系统运营商网络（ENTSO-E）在欧洲层面相关评估中所采用的方法。两者的结论和基础方法都被用于德国的评估和方法论的开发中。

正如报告所示，德国所开发和应用的方法具有一些共性，特别是在从确定性计算转向天气和其他事件的概率评估，以及扩大分析的地理范围方面。这些方法也似乎随着时间的推移而趋于一致。当前的争论表明，有必要将迄今为止主要由输电系统运营商（TSO）提供的电网和系统充裕度评估纳入整

体容量评估当中。这一发展也证实了我们的预想，即淘汰煤电将使德国纳入更多的容量和电网充裕度评估。

本报告是研究欧盟电力系统规划和评估实践的众多报告之一，这些实践对中国和其他国家向低碳能源系统转型具有一定意义。中欧能源合作平台（ECECP）于 2021 年 11 月发布的《ENTSO-e 中国电网规划建模展示报告》阐述了单条输电线路的规划方法，并在中国选出一些潜在的新输电线路应用该方法。⁴ 中欧能源合作平台的报告主要着眼于输电规划，而本报告侧重于更广泛的容量充裕度问题——但鉴于输电在确保互连互通区域内容量充裕度方面所起的作用，这两者显然是有关联的。两份报告在某些方面具有互补性，可以一并阅读。

我们希望这项研究能够帮助中国和其他地方的政策制定者了解德国和欧洲在系统充裕度规划方面的持续演变，以及它们是如何朝着对低碳能源转型做出积极贡献的方向发展的。我们相信，在中国建设以新能源为主体的电力系统的进程中，分享系统充裕度方面的经验和方法对各方都有启发，不仅有助于我们确保可靠的电力供应，也有助于政策制定者和公众预想如何才能建立一个清洁、可靠和具有成本效益的未来能源系统。

此致，

科琳娜·博林蒂纳努

德国能源署（dena）中德能源转型研究项目主任

侯安德

德国国际合作机构（GIZ）中德能源转型项目主任

1 引言：报告的目的、定义和研究问题

本报告旨在诠释当前和未来德国电力系统评估中所采用的量化方法。这种评估最重要的目的是在保证供电安全的同时，建立一个能满足经济和生态要求的电力系统。

供应安全包括两个方面：

- **发电容量充裕度；**
- **电网和系统充裕度。**⁵

关于容量充裕度，调查研究了电力市场在特定时期内是否以及如何才能达到供需平衡。这种平衡可以通过对一个国家或一组国家的电力市场进行建模来决定。⁶

为保持一致性，本报告使用“容量充裕度”一词，作为发电充裕度和资源充裕度的同义词，虽然引用报告的作者会使用其他术语表达相同的概念。

电网和系统充裕度涉及电网的稳定运行。电网规划和运营中的一项重要基本原则被称为 n-1 安全供电原则。该原则指出，如果单个发电机组或灵活性措施失灵，则电网技术参数（例如电流、电压或频率）必须保持在一定的容差范围内。⁷

本报告篇章架构如下：第 2 节讨论了容量充裕度的分析方法，并在第 2.2.2、2.2.4 和第 3 节中探讨了电网和系统充裕度问题。第 4 节通过一个长格式表比较了前几节中讨论的所有方法，指出了它们的异同、优势和劣势。第 5 节概述了因德国逐步淘汰煤电和核能，预计将发生的容量充裕度评估方法上的变化。鉴于正在进行的低碳能源转型，本节还讨论了对当前方法进行其他更改的可能性或必要性。

本报告回答了以下主要问题：

- 德国是如何定义供电安全、容量充裕度以及电网和系统充裕度的？
- 在德国，容量充裕度的估算和计算过程中涉及哪些主要参与者？他们承担哪些责任？
- 德国系统规划者如何估算发电容量、互连容量和系统灵活性（需求响应、储能、发电厂爬坡率）是否足以满足在 1 到 10 年间任何相关时段内该年所有小时的系统负荷？
- 德国规划者如何将电网灵活性、发电厂灵活化和需求侧灵活性等系统要素纳入容量评估中？
- 德国使用哪些量化指标，例如：等效带负荷能力(ELCC)？
- 在评估较长时期内的系统充裕度时，相较于传统火力（煤及核能）电源相比，系统规划者如何定量评估不同形式电源（如波动性可再生能源（RE）、波动性可再生能源和储能结合（混合）、独立储能、分布式储能等）？
- 如何确定德国的备用容量大小？如何对电厂进行补偿？参与的电厂类型以及未来十年将如何变化？
- 随着德国越来越多煤电和核电站退役，未来十年这些计算和估值将发生何种变化？
- 德国电力系统评估方法应作出哪些必要的改变？

2 德国容量充裕度量方法

2.1 流程、职责和定义的背景

德国的输电系统运营商、联邦经济和气候行动部及联邦网络局都采用了相似的容量充裕度定义。由 Consentec 和 r2b 能源咨询公司编写的 2015 年德国联邦经济和能源部报告将容量充裕度描述为“电力供应系统中电力平衡的一种长期安全性，特别是可以在任意时间点为电力市场的供需平衡提供足够可用的发电容量。”⁸2020 年发布的最新版输电系统运营商电力平衡报告建议，可通过计算因负荷减少的可靠可用容量与需求侧管理（DSM）潜力之间的差值来评估容量充裕水平。⁹

如第 2 节中所述，不同机构为容量充裕度建模及确定容量充裕度水平所采用的基础方法并不相同。目前德国围绕容量充裕度评估和建模的相关讨论主要集中在以下三个问题上：

- 模型是否、以及如何更好地整合/考虑概率分析的相关元素？
- 如何在模型中更好地整合/考虑灵活性措施，例如需求侧管理、跨境电力交换以及天然气和电力部门的连接等？
- 模型如何更好地整合电网和系统充裕度？

电力系统建模理论对以下内容进行了基本区分：

- **概率方法 (probabilistic approaches)**，即根据各种发电-负荷情况的相互作用和可能同时发生的情况，对容量充裕度作出基于概率的说明；以及
- **确定性方法 (deterministic approaches)**，明确定义的各种情况被认为是彼此独立的，不考虑它们发生的概率。¹⁰

概率方法的首要目的是更好地整合不确定性，例如波动性可再生能源发电以及发电厂或输电线路

的停运等。概率方法还旨在将灵活性更好地整合到容量充裕度模型当中去。

由于德国缺乏一个可囊括众多灵活性措施（如柔性负荷）的适当法律框架，因此德国目前基于概率的方法忽视了柔性负荷和部门耦合的影响和作用。

下一节中我们将详细介绍德国的输电系统运营商、联邦经济和气候行动部和联邦网络局当前采用的方法。

2.2 相关定量方法

德国输电系统运营商对国家电力平衡的测算方法从 2011 年到 2015 年，根据相关法律要求，德国的输电系统运营商需承担一项编撰有关德国供电安全联合报告的义务。目前，这些输电系统运营商仍在继续定期编写上述联合报告。输电系统运营商将他们运用的方法学称为“*国家电力平衡方法*”。

直至 2015 年，德国并未就供电安全报告中所用的方法学制定任何法律规则。输电系统运营商的分析是一种基于包含与发电机组可用性和负荷变化相关的概率元素的确定性方法。而这些又基于历史和预测数据。输电系统运营商在后来的报告中继续采用这种方法。该方法借鉴了欧洲输电系统运营商网络及其前身所应用和进一步完善的方法。¹¹然而，德国输电系统运营商仅侧重国内的发电机组和负荷，包括在技术上分配给德国电力系统的所有机组，并没有考虑欧洲内部市场的影响。此外，它们仅依据历史数据和预测来调查过去和未来特定时间点的具体供电情况，而非可能或可预想到的情况。

德国输电系统运营商 2020 年发布的最新报告对 2018 年的情况进行了回顾，并对 2019-2022 年情况进行了预测。输电系统运营商每年会选定一个参考日进行调查：

- 2018 年：2018 年 2 月 28 日晚上 7 点（参考情景基于历史数据）；
- 2019 年：12 月的第三个星期三晚上 7 点（参考情景基于历史数据）；
- 2020-2022 年：1 月的第三个星期三晚上 7:00（基于预测的未来情景）。¹²

该报告基于两种情景分析了 2020 年至 2022 年的发展情况：即逐步淘汰和不逐步淘汰煤电两种情景。根据 2020 年 1 月通过的《逐步淘汰煤炭法》草案，逐步淘汰情景考虑了 2022 年前关停相关（燃煤）电厂的情形。《逐步淘汰煤炭法》草案¹³ 预计，2038 年前将逐步淘汰煤电。法案于 2020 年 7 月成为法律。相应地，参考情景可以和未来可能的发展进行比较，其中包括了最坏情形——即：虽然逐步淘汰煤电的计划已经做好，但在输电系统运营商发布报告时尚未正式执行。

2.2.1 德国输电系统运营商对国家电力平衡的测算方法

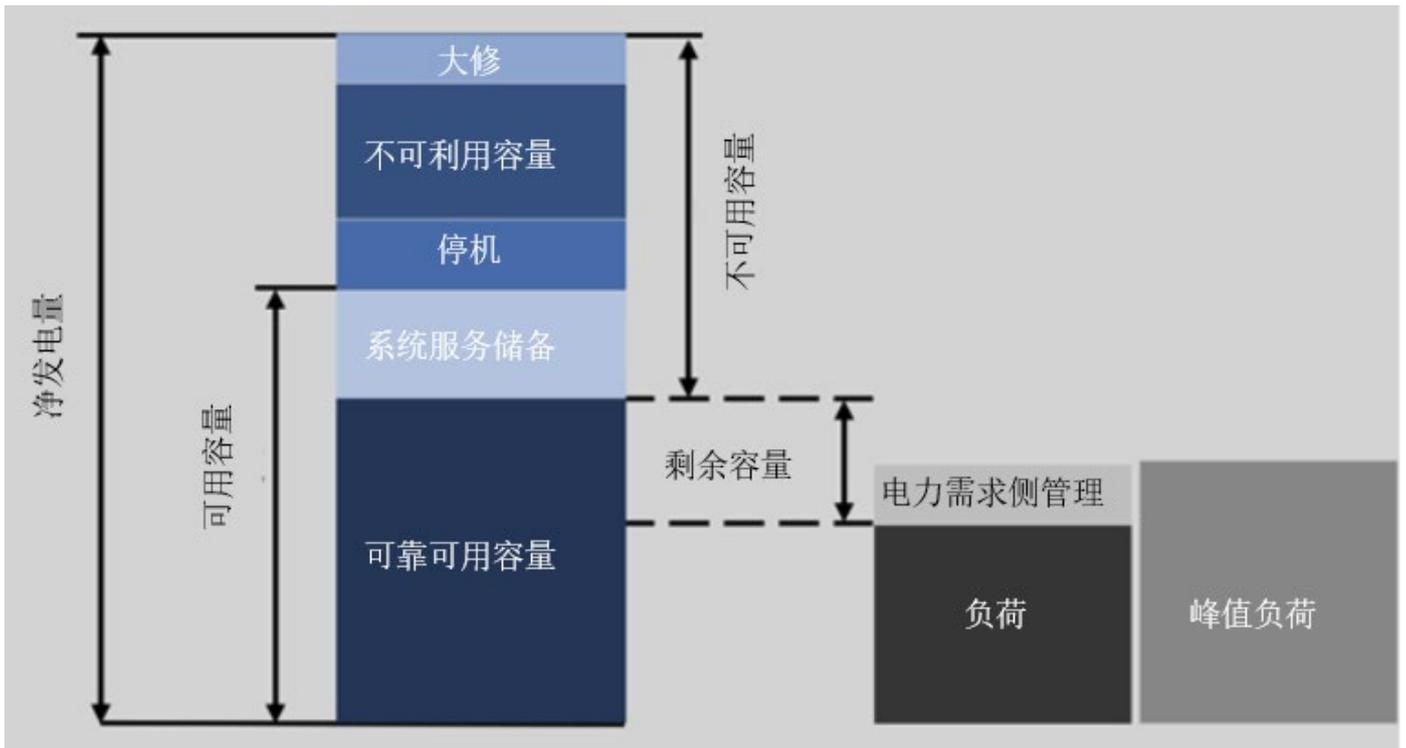
定量指标

图 1 展示了德国输电系统运营商使用的电力平衡估算方法。一般流程包含了几个步骤，这些步骤计算每年的主要模型指标并考虑不同的情景：

1. **可靠可用容量**，即从总装机容量（**净发电量**）中扣除各种不可用要素（**不可用容量**）。不可用容量是指未用于覆盖因**大修**、与燃料或天气有关的**停机（不可利用容量）**、其他**计划外停机**以及**辅助服务（系统服务储备）**而产生的负荷的容量。
2. 计算德国境内可能发生的**最高负荷（高峰负荷）**。
3. 计算**负荷减少的潜力（电力需求侧管理潜力）**。
4. 计算**剩余容量（或边际容量）**。即在**年度峰值负荷下，可靠可用容量和因电力需求侧管理潜力而减少的负荷间的差值**。

输电系统运营商的分析表明，系统容量充裕度取决于**剩余容量（或边际容量）**的大小。如果**边际容量**值为正，这意味着有足够的发电容量来满足负荷，并且在所考虑的情景中可以输出**剩余出力**。如果该值为负，则表明**负荷超过了可靠可用容量**，并且，在非灵活负荷的情况下，输电系统运营商考虑的情景中还存在一定的**进口依存度**。¹⁴

图 1 德国输电系统运营商的电力平衡估算方法



资料来源：Consentec, r2b 能源咨询公司（2015 年）¹⁵。

不同电源的定量值及其他假设

在计算可靠可用容量、峰值负荷和需求侧管理潜力时，分析研究了概率性参数。这些参数通过模拟峰值负荷、可再生能源发电和热电厂平均可用率的历史和预测数据以及抽水蓄能电厂的容量预测得到。但是，使用这种方法，输电系统运营商并未就单项技术分配任何具体的容量值，因为这一数值会随着所考虑的时间点不同而发生变化。

输电系统运营商在分析生物质和沼气发电厂的可用容量时只将在至少 99% 的情况下可用的容量纳入考量。关于传统电厂的可用性，输电系统运营商假设在达到年度峰值负荷时会发生计划外停机，供电安全水平（停电的累积概率）为 95%。¹⁶

2.2.2 欧洲输电系统运营商网络（ENTSO-E）采用的资源充裕度评估方法

2014 年 10 月，欧洲输电系统运营商网络（ENTSO-E）发布了更新的资源充裕度评估方法。¹⁷

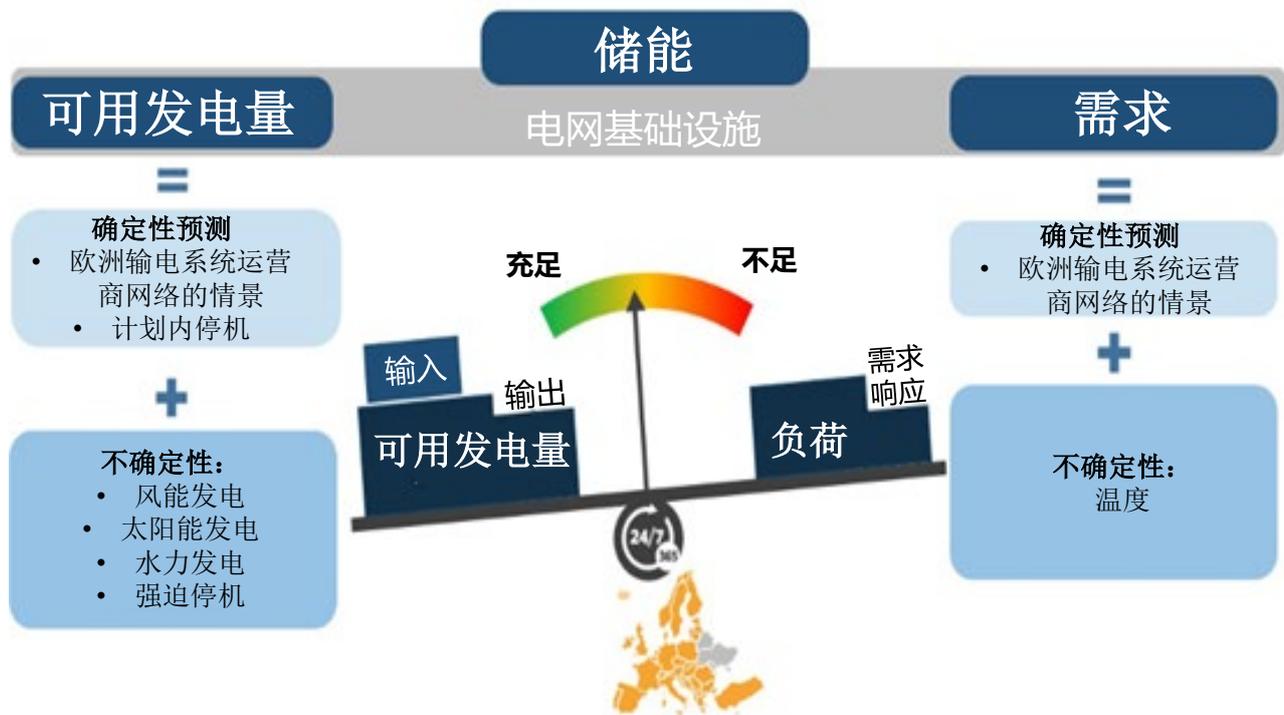
欧洲输电系统运营商网络决定逐步摒弃确定性方法，改用概率方法，以更好地对系统波动性和不确定性以及随机效应建模——主要是可再生能源发电、强迫停机和天气条件。欧洲输电系统运营商网络不推荐开展具体国家的评估，而是主张开展涵盖欧洲大部分地区的评估，以作为对本地或国家视角的补充。因此，调查应该涵盖若干输电容量有限的互连互通区域。这样可以对跨境电力的输入和输出进行更好、更系统的分析。

因此，欧洲输电系统运营商网络的新方法考虑了发电侧（可用发电）、需求侧和电网侧，包括通过互连线路进行的跨境电力交易。这与德国输电系统运营商采用的方法不同，后者忽略了跨境电力交易。图 2 以简化结构图的形式展示了 2020 年中期充裕度预测（Mid-term Adequacy Forecast,

MAF) 中所采用的欧洲输电系统运营商网络方法的要素。2020 年中期充裕度预测标志着开始落实

欧洲资源充裕度评估 (ERAA), 即泛欧洲区域内对电力系统资源充裕度进行的新颖监测评估¹⁸

图 2 2020 年中期充裕度预测中采用的欧洲输电系统运营商网络方法的要素



来源: 欧洲输电系统运营商网络 (ENTSO-E) (2020)¹⁹。

此种方法的主要部分是使用蒙特卡罗 (Monte Carlo, MC) 模拟, 按照时间顺序对整个互连互通线路系统进行每小时模拟。根据欧洲输电系统运营商网络 (ENTSO-E) 网站的内容, “蒙特卡罗方法的核心理念是使用随机的输入变量样本或输入值, 探索一种复杂的系统或过程在多种可能的未来电网状态下的行为。”²⁰在此模拟中, 将针对每一时间点 (小时), 使用一种优化程序尝试满足每一区域的预计负荷需求——根据优先次序使用本区域内以及其他区域的可用发电量, 并适当考虑互连线路的限制。²¹为此, 建模者会获取一系列描述系统的时间点, 它们被称为蒙特卡罗样本。在这些样本中, 随机输入变量 (可再生能源发电馈入、负荷、发电机组强制停机和互连线路) 在特定

的年份彼此组合, 以实现最优结果。通过基于不同气候条件的模拟确定可再生能源供电量。²²在 2020 年中期充裕度预测中, 目标年份包括 2025 年和 2030 年。²³

这种方法可评估随机效应, 例如恶劣的天气条件及其持续时间和对可再生能源产出的影响, 以及在这种极端天气持续期内不同的负荷情况。²⁴图 3 以图形展示了该程序。

图 3 特定目标年份的蒙特卡洛模拟原则



来源：欧洲输电系统运营商网络（ENTSO-E）（2020）²⁵。

定量指标

欧洲输电系统运营商网络（ENTSO-E）模型对各种天气条件和电厂可用性条件下的大量年度每小时模拟进行了分析，评估了与不同指标相关的结果。这些指标反映了容量充裕度的概率性特征。其中包括以下主要指标：

- **负荷期望损失（Loss of load expectancy, LoLE）**——代表每年可用发电量无法满足负荷的预期小时数。以每年的小时数为单位计量。²⁶
- **电力不足概率（Loss of load probability, LoLP）**——与负荷期望损失类似，但以百分比为单位计量或者没有任何单位。²⁷它代表的是特定期限内（周、月或年）负荷超过可用发电量的概率。电力不足概率（LoLP）也是负荷峰值期发生电量不足期望值（EENS）（见下文）的概率。例如，如果在特定年份内，有一周时间的发电量不足，则按周计算的电力不足概率等于 1/52。²⁸电力不足概率也可以每小时或每日为单位计算。²⁹
- **电量不足期望值（Expected energy not served, EENS）或者电量损失预期（Loss of**

energy expectation, LoEE）——指因发电量不足而无法匹配的年度负荷。以吉瓦时为单位计量。³⁰

不同电源的定量值及其他假设

欧洲输电系统运营商网络（ENTSO-E）的资源充裕度评估方法基于很多不同年份的天气条件，计算可再生能源发电量。此程序可以尽可能多的体现各种不同可设想的天气条件。例如，2020 年中期充裕度预测将 3 年的历史天气数据考虑在内，为可再生能源发电量和电力需求建模。³¹但是，此种方法并没有就单项技术分配具体的容量值，因为所考虑的时间点不同，容量值会因不同的天气条件或发电厂的停机或电网瓶颈而发生变化。

2.2.3 2015—2021 年德国联邦经济与能源部的供电安全监测

2015 和 2019 年，德国联邦经济与能源部委托了两份旨在开发容量充裕度方法的报告。³²这些分析成为德国联邦经济与能源部监测及报告供电安全的依据。2021 年 4 月，德国联邦经济与能源部基于之前所开发的方法，发布了最后一份容量充裕度报告。³³如前文所述，2021 年 1 月，德国联邦网络

管理局 (BNetzA) 接管了监督德国供电安全的责任。

上述两份报告都是在 2014 年引入的欧洲输电系统运营商网络方法基础上的扩展, 方法描述见前文章节。因此, 德国联邦经济与能源部 (BMWi) 和德国联邦网络管理局 (BNetzA) 摒弃了德国输电系统运营商所采用的电力平衡方法。德国联邦经济与能源部报告在方法层面上最重要的事项和发现将在下文章节中描述。

容量充裕度的跨国评估

所谓的**容量充裕度的跨国评估**就源自于这两项研究中的第一项 (Consentec, r2b, 2015)。³⁴它是基于概率性和跨境方法, 与欧洲输电系统运营商网络 (ENTSO-E) 的方法类似。它考虑了系统要素的随机特征以及跨境电力交易 (输入/输出) 的影响和输电限制。报告囊括德国及其地理和电力邻国。

图 4 Consentec 和 r2b 研究中的德国及其电力邻国 (2015 年)



来源: Consentec, r2b (2015 年)。³⁵

分析使用的数据与 2014 年欧洲输电系统运营商网络 (ENTSO-E)³⁶情景展望和充裕度预测中的最佳预测情景 (情景 B) 相同, 使用的数据涉及可再生能源装机容量的发展、峰值负荷、传统电厂以及进一步中央监管参数的确定方面。³⁷评估的主要目标和结果是确定使用所考虑地理范围内的可用容量全面满足负荷 (LBP) 的概率。

为了评估负荷平衡可能性 (LBP), 研究采用了基于计算机的随机和时间耦合模拟。此项模拟主要包括对各种发电及负荷情景的效应进行建模, 以测试传统发电或者其他电力来源 (例如需求侧管理、储能、输入或者其他容量) 能否以及如何满足剩余负荷。此项模拟基于单项输入变量值会随时间变化的假设, 例如因天气条件变化、电厂停机或者输电瓶颈等而引起的变化。模型的进一步优化包括抽水蓄能系统的跨时期 (时间耦合) 约束: 有限的水库、泵容量、自然流入量的时间分布及其可能对满足负荷做出的贡献。³⁸

评估确定了不同参数的数值以及负荷平衡可能性 (LBP), 不仅针对德国, 也针对其邻国。因此, 研究也可以确定电力输入在多大程度上是必要和可能的。³⁹研究为三个不同预测年份制定了情景和结果: 2015、2020 和 2025。

定量指标

图 5 以示意图的形式展示了 Consentec 和 r2b 在容量充裕度的跨国评估中所使用的方法。一般流程包含几个主要步骤, 在此过程中, 建模者会计算主要的模型指标:

1. 第 1 步包括提出假设 (发电和负荷情景) 和中央监管参数。
2. 基于第 1 步, 建模者设计了三种时间序列, 在每个预测年份 (2015、2020 和 2025 年) 内, 对每个国家的**剩余负荷**^[1]和**可再生能源发电馈入**进行每小时模拟。针对每个国家, 建模者使用

[1]剩余负荷: 每小时电力需求和再生能源发电之间的差距

源自 2010、2011 和 2012 基准年份的**历史负荷和天气数据**，以计算负荷和波动性可再生能源产出之间的区域性和基于时间的相关性。

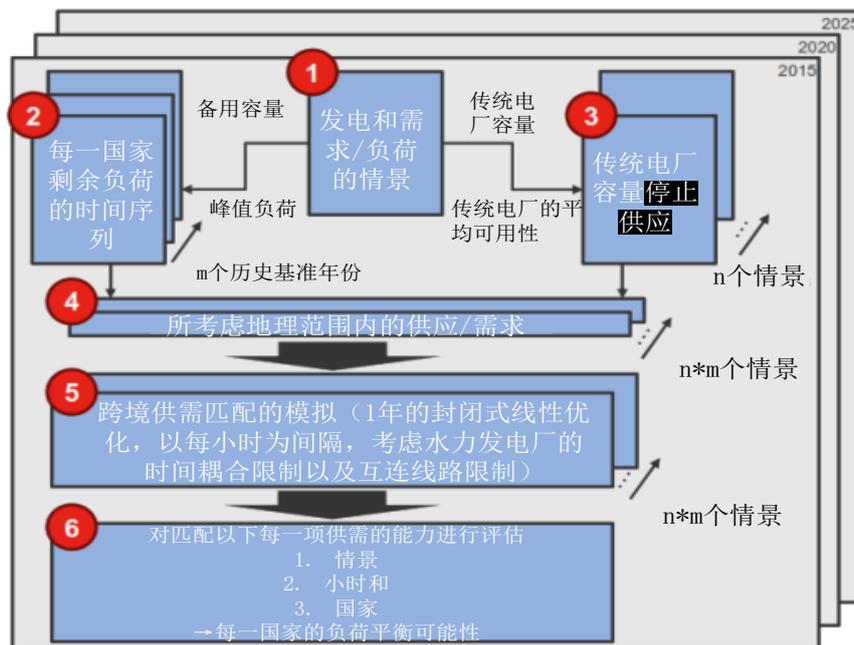
3. 在第 3 步，建模者基于与传统电厂可用性相关的假设，针对每一预测年份，设定了 333 个随机性停机情景。每一情景都包括每一电厂的每小时产量，考虑**典型的停机率**，以确定电厂的每小时可用性。
4. 在第 4 步，建模者将每一预测年份剩余负荷的三种时间序列（第 2 步）和每一预测年份的 333 个停机情景（第 3 步）整合成了每一预测年份的 999 个**供应情景**。之前的分析表明这一数量是足够的。
5. 在第 5 步，建模者使用供应情景作为输入数据，进行跨境供需匹配模拟。模拟针对所有 999 个

情景，研究了是否可在任何时间满足负荷需求，其中考虑了如互连线路限制等至关重要的技术监管条件。

6. 最后，建模者基于到目前为止的结果，计算了所研究的每一预测年份和国家的**负荷平衡可能性**（LBP）。⁴⁰

负荷平衡可能性（LBP）描述了，可用容量能够在特定时间点满足负荷的可能性。这种可能性被定义为负荷中不具备价格弹性的短期负荷部分。应该能够通过可用发电量、可用需求侧管理或者欧洲电力市场上可用的发电容量，满足负荷需求，无需采取任何进一步措施。

图 5 容量充裕度跨国评估方法概述



来源：Consentc, r2b 能源咨询（2015 年），第 14 页⁴¹。

分析结果表明考虑到跨境电力交易，尤其是区域内的组合效应，德国及其地理和电力邻国的负荷和发电量在任何时刻都非常有可能达到平衡。负荷平衡可能性（LBP）极高，到 2025 年几乎达到 100%。实际上，一个技术系统永远不可能完全达

到 100% 的可能性，因为总有可能出现超出模拟范围的极端情况或者没有想到过的情况。

任何情况下，研究都确认了跨国电力交易的益处以及对系统充裕度进行跨国监测的必要性，“不论未来容量的实际发展如何”。⁴²

不同电源的定量值及其他假设

正如欧洲输电系统运营商网络的方法（2014）一样，Consentec 和 r2b 没有就单项技术分配任何具体的容量值，因为这一数值会随着所考虑时间点的不同而产生变化。因此，基于很多不同气象年份的天气数据，计算出风能和太阳能的发电量。通过此程序可以尽可能多的映射出可设想的天气条件。分析考虑三个历史气象年份（2010、2011 和 2012 年），并建立了可再生能源供电量和用电负荷的模型。在传统电厂方面，分析考虑了发电机组的停机以及输电瓶颈。

在抽水蓄能方面，分析考虑了其跨时期限制，就水库规模、自然流入量及其随时间的分布做出了假设。自然流入量（每年每个国家的总流入量）取决于天气条件。为了确定流入量，分析采用了与负荷和可再生能源发电馈入时间序列相同的历史气象年度。每一个国家的抽水蓄能系统及其他储能电厂整合成一个抽水蓄能厂和一个储能电厂。⁴³ 在生物质方面，在确定剩余负荷时，分析中仅考虑了不灵活发电的部分，将生物质电厂与传统热电厂同等对待。⁴⁴

VS(供应安全)分析模型（2019 年）

2019 年，另一项在德国联邦经济与能源部（BMWi）委托下进行的分析发布了结果。该分析旨在评估德国的容量充裕度。此项研究由 r2b、Consentec、Fraunhofer ISI 和 TEP Energy 准备，采用了比此前 2015 年的研究更广泛的方法。⁴⁵ 它为供电安全的分析引入 VS 分析模型，此模型是基于 Consentec 和 r2b 在 2015 年研究中使用的概率性跨境方法，并在各个方面进行了进一步完善。尤其是，VS 分析模型采用不同的定量指标评估德国的供电安全水平。

所采用的方法解决了以下两个关键问题：

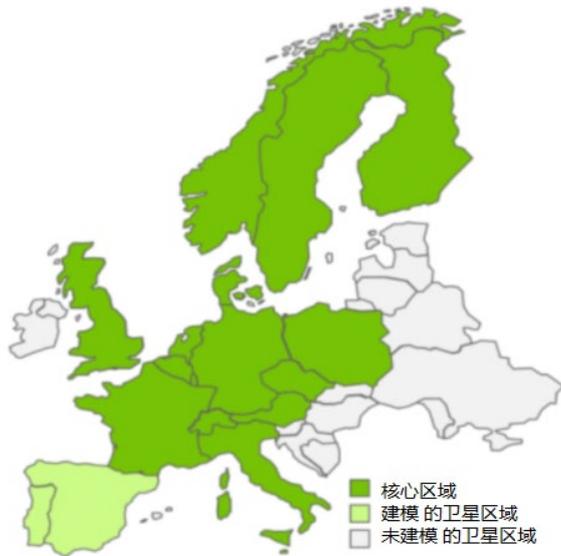
1. 欧洲电力系统在报告所述期限内将如何发展？
2. 欧洲供电系统是否有效地维持供电安全？

为了回答这些问题，研究需要创设电力系统的发展情景，然后基于已设定的可靠性标准（VS-标准）评估每一情景下的供电安全水平。

参考情景（气候变化方面没有任何额外政策情况下的最佳猜测情景）的开发是基于详细的研究以及与其他研究的比较，反映了现有的法律框架条件和政策目标。分析通过对替代情景进行敏感性审视了电力系统内的替代发展。⁴⁶

模型区分了核心区域以及已明确建模和未建模的卫星区域（见图 5）。研究将德国及其邻国、意大利、英国和斯堪的纳维亚国家定义为核心区域，将伊比利亚半岛定义为建模的卫星区域。建模者标注了核心区域国家之间以及核心地区和建模的卫星地区之间的电力输入与输出。卫星区域和核心区域之间的输入与输出以聚合方式计算。⁴⁷

图 6 VS 分析模型中的建模区域



说明:

Kernregion: 核心区域

Satellitenregion modeliert: 建模的卫星区域

Satellitenregion: 未建模的卫星区域

来源: r2b 能源咨询、Consentec、Fraunhofer ISI、TEP Energy (2019 年), 第 241 页⁴⁸。

如前文所述, 分析的主要目的是确定德国的供电安全水平。因此, 建模者主要应用了电力不足概率 (LoLP) 指标。确定指标的整个程序与 Consentec 和 r2b 在 2015 年研究中介绍的程序类似。主要区别 (除了所使用的指标以外) 包括:

- 五个目标年份而不是三个: 2020、2023、2025 和 2030。
- 五个历史负荷和气象年份而不是三个: 2009、2010、2011、2012 和 2013。
- 1750 个供电情景 (模拟年份) 而不是 999 个, 对应每年 1533 万个建模小时。

对于 1750 个模拟年份中的每一年以及整个地理区域, 建模者决定考虑范围内的每一竞价区的负荷能否始终被满足。建模考虑了可用的发电机组以及可用的灵活性潜力。与 2015 年的研究类似, 其中也考虑了所有相关的技术边界条件, 例如发电厂停机及可用跨境容量。⁴⁹

VS 分析模型的基本目的是证明与未来系统充分性相关的方程组和不等式是否有解。这一方程组与任何时间均可满足特定竞价区内负荷的要求相关。

这要求使用所有不同的供电来源, 例如传统电厂、不同的灵活性选项、储能容量及跨境输电容量。⁵⁰

如果以此种方式描述的方程组和不等式可以得出一个解, 则在特定年份内所考虑的全部地理区域内的全部负荷就可以被满足。如果方程组无解, 则至少有一个竞价区在一个小时的期限内无法实现负荷平衡。

为了确定电力不足概率, 并确定额外要求的负荷损失的频率、规模和地点, 建模者提出采用线性优化。⁵¹此种优化的目的是将所考虑的全部建模年份和区域内的负荷损失的持续时间降至最低。此外, 在此种优化中, 仅当竞价区无法凭借自身发电机组或者灵活性措施满足自身需求时, 才考虑跨境交易。根据笔者的看法, 这种类型的建模与电力市场经济模拟的建模不同, 因为除非是为满足负荷而必要的情况, 否则它不会因为更廉价的境外发电资源的可用性等经济指标而考虑加入跨境交易。因此, 这种模型能确定跨境交易对维持供电安全的贡献。⁵²重要的是, VS 分析模型中的跨境交易具有应急措施的功能, 其使用不会造成另一个竞价区的进一步负荷损失。⁵³

如报告中所述，线性优化的结果可用于确定每一竞价区和每一年的不同指标，以评估供电安全水平。下一章节将介绍这些指标。

定量指标

VS 分析模型中用于供电安全评估的主要指标与欧洲输电系统运营商网络 (ENTSO-E) 所采用的指标类似。这些指标包括 (这里的解释源自于 2b、Consentec、Fraunhofer ISI 和 TEP Energy (2019) 的出版物)：

- **电力不足概率 (LoLP)** —— 描述在所考虑的所有小时段内，可用发电量无法满足任何消费者负荷的可能性。以百分比为单位计量或者没有任何单位。⁵⁴
- **负荷期望损失 (LoLE)** —— 代表每年可用发电量无法满足负荷的预期小时数。以每年的小时数为单位计量。
- **电量不足期望值 (EENS) 或者电量损失预期 (LoEE)** —— 指因发电量不足而无法满足的年度负荷。以吉瓦时为单位计量。⁵⁵
- **系统平均停电持续时间指标 (System Average Interruption Duration Index, SAIDI)** —— 描述一个特定电网用户/负荷受到因电网相关原因造成的非自愿供电中断影响的可能性，现实中主要是因为配电网的故障所引起。为了确定系统平均停电持续时间指标 (SAIDI)，需要确定一年内所有供电中断的持续时间以及同一年内所有受到影响的电网用户/负荷的总负荷损失。接下来，必须计算损失负荷与一年内总负荷之间的关系。取决于分析所关注的参数，系统平均停电持续时间指标 (SAIDI) 可采用时间单位 (小时或分钟) /每

年计量，或者采用每年受影响负荷与总负荷的相对数值计量。⁵⁶

- **电力市场系统平均停电持续时间指标 (Power Market SAIDI)**：无法满足特定负荷的可能性。该指标考虑了通过负荷转移或削峰等措施，实现的电网用户/负荷的灵活性潜力及其自愿的负荷损失。为了确定特定竞价区内的电力市场系统平均停电持续时间指标，电量不足期望值 (EENS) 需要除以所有电网用户/负荷的年度用电量减去其自愿负荷损失潜力的年度积分。⁵⁷此指标以百分比或者以时间为单位 (例如小时/每年) 计量。
- **电力输入对确保供电安全的贡献 (Contribution of imports to ensure the security of supply)** —— 描述跨境电力交易对供电安全的影响。《能源行业法》(EnWG) 明确要求在供电安全监测中考虑跨境电力交易的影响。监测应该提供“电力输入在多大程度上有助于确保德国的供电安全”的信息 (《能源行业法案》第二章第 63 条)。但是，对于 VS 分析，只有在必须输入电力以避免负荷损失的时候它才具有相关性，只有在输入被纳入考虑范围时。因市场参与者的经济考量引发的实际或者预计的电力输入没有相关性，也就是说，在理想市场条件下，当具有技术可行性且相比国内发电或灵活性措施更具成本效益时，会发生跨境交易。相反，VS 分析模式区分了维持供电安全所必需的电力输入和纯粹出于经济原因进行的电力交易。⁵⁸

VS 分析模式中，评估德国电力系统适当体量的主要指标是电力不足概率 (LoLP)。⁵⁹ VS 分析确定 0.06% 的电力不足概率是维持德国供电安全的可靠性标准数值 2。此数值对应每年 5 个小时

² 每个实施容量机制的欧盟成员国都必须采用**可靠性标准 (Reliability standard)**。这是一个关于电力系统经济效率的欧洲标准。其目的是确保从长期角度，只有那些为消费者带来的成本不超过收益的容量才是容量机

制的一部分。可靠性标准的价值是在新容量的投资成本和电力用户愿意为不间断的电力供应付费之间的权衡。可靠性标准适用于一个竞价区。由于德国和卢森堡位于

的负荷期望损失或者每年大约 5 到 10 分钟的电力市场系统平均停电持续时间指标 (SAIDI)。⁶⁰ 然而, 可靠性标准在 2021 年 8 月被更新, 目前对应的负荷期望损失为每年 2.77 小时 (见 2.2.4 小节)。⁶¹ 这一数值是充裕度计算结果的参考值。如果计算出的负荷期望损失值低于可靠性标准, 就证明供应安全。对于德国来说, 在现有的监测供应安全的情况下, 一向可以保证供电安全。⁶²

在过去几年间, 德国的系统平均停电持续时间指标 (SAIDI) 水平在每年及每个电网用户 12 到 15 分钟之间。但这并非意味着德国的每一个电网用户每年都会经历大约 15 分钟的供电中断。在个体案例中, 供电中断可能持续更长时间, 而很多其他电网用户可能不会经历任何供电中断。因此, 系统平均停电持续时间指标 (SAIDI) 只是一个与所有电网用户相关的平均值。⁶³

不同电源的定量值及其他假设

与欧洲输电系统运营商网络的方法 (2014) 以及 Consentec 和 r2b 的方法 (2015) 类似, VS 分析模型没有就单项技术分配任何具体的容量值, 因为这一数值会随着所考虑的时间点不同而产生变化。其原因是不断变化的天气条件、电厂停机以及输电瓶颈。因此, 在模型中, 基于很多不同气象年份的天气数据及技术自身的扩张潜力, 计算了风能和太阳能的发电量。⁶⁴ 通过考虑河流流量的季节性变化, 确定径流水力发电的发电容量。对于地热发电厂、生物质能发电厂以及垃圾填埋场、污水和坑道气体, 基于发电馈入的历史数值和历史满负荷小时数确定每小时发电馈入概况。⁶⁵

此外, 在确定发电产量时, VS 分析模型考虑了更多因素, 例如不同的市场选择, 包括可再生能源的直接营销、生物能源的市场溢价模型、一次能源市场和热力市场。⁶⁶

电力批发市场的建模采用竞争性市场模型, 即在特定竞价区内以某一市场价格达成供求平衡。⁶⁷ 模型假设市场参与者基于理性预期采取行动。⁶⁸ 另一个假设是只有在无法通过同一竞价区或同一国家内发电机组或者灵活性措施满足需求时, 才会发生跨境电力交易。⁶⁹

基于 VS 分析模型 (2021 年) 评估容量充裕度的结果

基于 2019 年德国联邦经济与能源部报告中开发及描述的方法——此方法已在前文章节中介绍, 一项德国联邦经济与能源部委托的评估欧洲电力市场的容量充裕度的研究于 2021 年 4 月发布。⁷⁰ 此项研究开发了一系列不同的未来情景, 以确定欧洲电力市场所提供的电力是否能够始终满足需求直至 2030 年。⁷¹ 与德国相关的最重要发现是直至 2030 年, 电力供应能够满足所有研究情景下的需求, 包括基准情景以及两种预期会采取更有野心的气候行动的情景, 例如更高的碳价以及交通、供热和工业的更高电气化率。⁷²

专家将德国电力不足概率相关的**可靠性标准**设定为 99.94%。⁷³ 这一标准描述了为满足需求而提供任何额外发电容量的成本与消费者收益之间的平衡状态。99.94%的可靠性标准意味着在德国, 一年中有 99.94%的时间 (对应 0.06%的电力不足概率), 满足需求具有成本效益。⁷⁴ 不论在基准情景还是替代情景中, 电力不足概率均远低于 0.06%的成本效益水平。⁷⁵ 参考情景中的电力不足概率为 0%, 替代情景中为 0.003%。这一结果对应于参考情景中每年 0 小时的负荷期望损失或者替代情景中每年 0.25 小时的负荷期望损失。⁷⁶

研究比较了以下替代情景:

1. 假设单一能量市场在所有考虑国家中, 这意味着不会为可调度发电提供任何额外补贴;

一个联合竞价区, 他们共同确定了相同的可靠性标准, 该标准适用于两个国家。

2. 由于更具雄心的气候保护，二氧化碳价格和电力消费的适度增加，导致部门耦合的增强；
3. 由于更具雄心的气候保护，二氧化碳价格和电力消费的上涨，导致部门耦合的增强；⁷⁷

在情境 2 和情景 3 中，到 2030 年，预测总用电量将分别达到 615 太瓦时和 630 太瓦时。⁷⁸此数值高于之前的估算（567 太瓦时或者 591 太瓦时）。这一估算源自于之前设定的在 2030 年之前减少 55% 二氧化碳排放量的国家气候目标。2021 年 5 月，德国气候目标发生变化，提出在 2030 年之前进一步减少 65% 的二氧化碳排放。由于交通、供热和工业部门的预期电气化，此目标会在 2030 年之前，对电力需求预测产生直接影响。⁷⁹

咨询公司 Prognos 代表德国联邦经济与能源部编制了一份电力消费的分析。其最初的估算表明到 2030 年，电力消费会在 645 到 665 太瓦时之间；预测的平均值为 655 太瓦时，仅略高于德国联邦经济与能源部 2021 年容量充裕度报告中估算的最大值。可能导致德国电力消费进一步增加的另一个因素是“绿色协议”（Green Deal）在欧洲层面上的预期落实情况，这一政策仍然待定。⁸⁰

德国联邦经济与能源部 2021 年报告的最重要结果总结如下：

- 德国和欧洲电力系统有富余容量。
- 到 2030 年，德国将增建容量大约为 15 吉瓦的热电联产（CHP）厂。除此之外，燃气发电厂预期不会发生任何进一步的市场驱动型扩张。
- 到 2030 年，德国将提供高达约 2.5 吉瓦的附加灵活性选项（需求侧管理或者应急电力系统）。
- 欧盟内部电力市场在国家和竞价区之间提供了相当多的平衡机会。
- 电力输入是维持德国容量充裕度的必要条件：到 2030 年，在基础情境下，输入量高达 14 吉瓦；在情景 3 下，高达 24 吉瓦。2030 年，最大的必要电力输入依然远低于技术上可能的输入容量，即略低于 35 吉瓦。

- 电力输入对研究中涉及的所有欧洲国家也都是必要的，且输入量会随着时间的推移而增加。
- 欧洲输电系统运营商网络当前的研究表明到 2030 年，相比德国联邦经济与能源部 2021 年报告中的情景⁸¹，欧洲可调度资源可用性将更高，例如可调度电厂和灵活性选项：与德国联邦经济与能源部报告中的 17.5 吉瓦相比，欧洲输电系统运营商网络预计到 2030 年，德国将有 30 吉瓦的附加容量⁸²。
- 依然需要采取政治行动：应该通过更好的日前市场监管条件，改进同时发生电力短缺之时的跨境协调。⁸³

报告提醒值得注意的是：尽管其方法依然有效，但这里报告呈现的是基于 2020 年的政策目标，而这些目标已于 2021 年末更新。然而，截止 2022 年 3 月，即本报告发表之日，还没有发布对供电安全的新评估。

2.2.4 德国联邦网络管理局（BNetzA）自 2021 年起的供电安全监测

2021 年初，德国联邦经济与能源部（BMWi）将监测供电安全的责任移交给德国联邦网络管理局（BNetzA）。2021 年 10 月末，德国联邦网络管理局（BNetzA）向德国联邦经济与能源部提交了第一份供电安全报告。根据《能源行业法案》第 63 章，在报告发布之前，由德国联邦经济和气候保护部（BMWK）（之前是德国联邦经济与能源部）负责在联邦政府内部就报告拟定协议。目前为止，报告尚未发布。

根据《能源行业法案》第 63 章，联邦政府也应该基于德国联邦网络管理局（BNetzA）的报告，向议会（Bundestag）提交行动建议。行动建议本应在 2021 年 12 月 31 日第一次提交给议会，之后至少每四年提交一次。但是，应该注意到德国联邦网络管理局（BNetzA）的第一份供电安全监测报告只分析了一种情景：“最佳猜测”基准/参考情

景，该情景假定落实当前政府政策目标会带来最可能的发展。⁸⁴其中包括德国之前的目标，即在2030年之前，减少55%或65%（相比1990年）的温室气体，以及在2030年之后，减少燃煤发电。这对应2020年末设定情景之时德国政府的目标，但无法充分反映当前的联合执政协议，包括电力消费总量中的80%源自于可再生能源的预期目标。因此，基于德国联邦网络管理局（BNetzA）提供的供电安全监测报告，不足以提出行动建议。所以，根据德国联邦网络管理局的信息，为了适当反映联合执政协议的新目标，尽可能在2022年夏季之前修改供电安全监测报告才是权宜之计。这将会是量体裁衣的行动建议的基础。⁸⁵

尽管如此，为了完成对德国所使用的容量充裕度方法演变过程的综述，我们会介绍德国联邦网络管理局供电安全监测最重要的特征。我们的分析是基于对德国联邦网络管理局的采访以及在德国联邦网络管理局组织的利益相关方会议中收集的信息。

未来向德国联邦经济和气候保护部报告时，德国联邦网络管理局很可能使用同样或者类似的方法。但是，未来分析的结果可能与现有分析的结果略有不同，因为未来的分析将基于源自于新政治目标的其他假设，特别是气候和可再生能源目标。

为完成现有分析的报告和建模，德国联邦网络管理局选择了一个由三家外部机构构成的联合体：为报告工作提供支持的Consentec、能源经济和能源合理利用研究所（Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, IER）和能源经济研究中心（Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., FfE）。

基本上，德国联邦网络管理局进行的监测是依据德国联邦经济与能源部之前完成的工作以及之前委托的报告中所开发的方法。与前文章节中介绍的VS分析模型一样，德国联邦网络管理局电力市场

相关模型的第一步是预测未来的发电站组。这种预测聚焦于德国及其邻国的电力市场，尤其是德国-卢森堡竞价区。就未来发展做出相关假设时，使用可用的历史数据，例如发电、负荷、热需求、需求侧管理潜力、储能容量和跨境互连容量。此外，为了确定未来是否可预见供电短缺以及供电短缺的范围，模型使用具体的电力市场模型研究未来10年可能发生的变化。⁸⁶

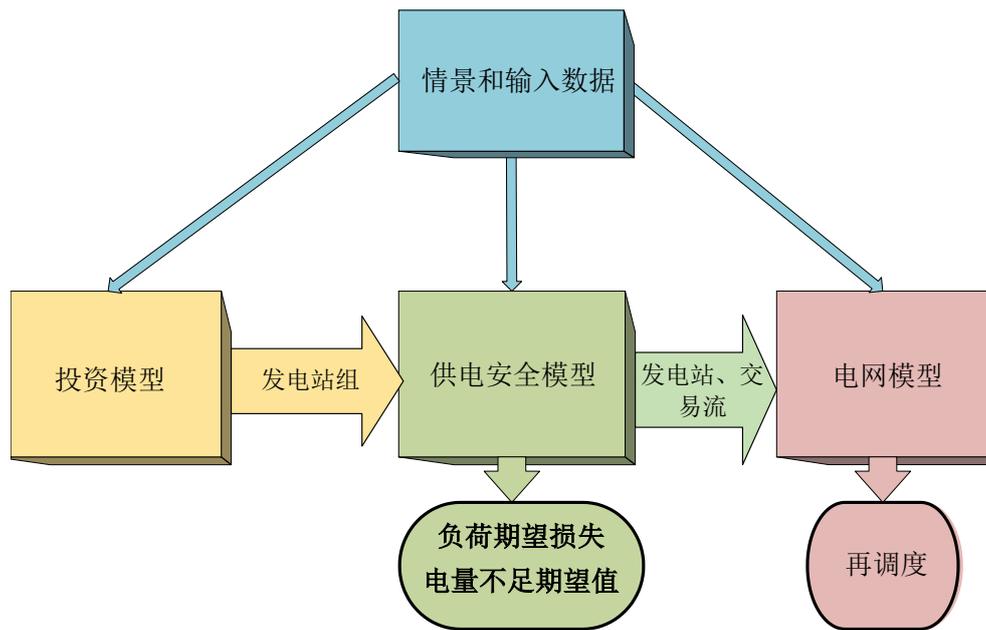
关于电网和系统充裕度，德国联邦网络管理局（BNetzA）通过市场模型分析调查了现有或计划的电网是否能够满足市场模型分析中所提供的电力流量。此外，还应该计算必要的再调度量。⁸⁷术语“再调度”指的是德国输电系统运营商的一种做法，即使用由市场结果导致的调度计划中的技术改变来避免输电电网阻塞。在计算市场关闭后可能发生的阻塞之后，输电系统运营商基于电厂在电网中的位置，向电厂发出减少或提升发电量的指令。为这些变化所支付的报酬基于行政法规，资金则来源于过网费。这些变化对市场交易没有任何影响，即有效的交付和报酬与最初的市场结果一致。

再调度反映了输电网的缓慢扩张，在过去几年间发挥了举足轻重的作用。今天的再调度报酬金额达到数亿欧元。任何发电资产都可能义务参与再调度，但德国监管机构建立电网备用（“Netzreserve”）以确保有足够的发电容量可用于再调度。因为显而易见的原因，这些电厂的位置至关重要——其中大部分位于德国南部临近工业负荷中心的地区。

模型由三个子模型组成：投资模型、供电安全模型和电网模型（参见下文图7）。投资模型为分析提供了总体框架。它假设利润最大化是市场参与者的主要前提。⁸⁸

下文图7介绍了德国联邦网络管理局在供电安全监测中使用的程序。

图 7 德国联邦网络管理局在供电安全监测中所使用程序的概况



来源：2021年3月16日，德国联邦网络管理局（BNetzA）组织的“供电安全监测”利益相关方会议期间，Franziska Adamek博士做出的幻灯片演示⁸⁹（作者翻译成英文）。

定量指标

德国联邦网络管理局使用与VS分析模型相同的定量指标，主要是负荷期望损失（LoLE）和电量不足期望值（EENS）（参见章节2.2.3）。根据德国联邦网络管理局的信息，为了基于这两个指标得出供电安全水平的结论，必须定义**可靠性标准**：

- 消费者为不间断供电支付费用的能力有多高？
- 无法满足负荷何时会对供电安全构成风险？⁹⁰

这种标准反过来取决于消费者为不间断电力消费支付费用的意愿。根据德国联邦网络管理局的说吧，该标准可以由议会、德国联邦经济与能源部/德国联邦经济和气候保护部或者德国联邦网络管理局设定。⁹¹ 2021年8月，德国联邦网络管理局与卢森堡能源和空间规划部共同确定了每年2,77小时的负荷期望损失值，作为德国-卢森堡投标区的新可靠性标准（另见2.2.3小节的脚注2），相当于0.04%的电力不足概率。

不同电源的定量值及其他假设

与欧洲输电系统运营商网络的方法（2014年）、Consentec和r2b的方法（2015年）以及VS分析模型（2019年）类似，德国联邦网络管理局（BNetzA）没有就单项技术分配任何具体的容量值。德国联邦网络管理局在给德国能源署的书面答复中解释了原因：

“首先，必须说明德国联邦网络管理局不规划任何发电容量，只观测、计算并评估了未来的发展，并就此编写了一份报告。通过这些计算，每种技术都可以在系统成本最低化的框架内，为满足用电需求做出贡献。这些计算对未来可再生能源的扩张以及可再生能源发电在总电力消费中的占比做出了假设。此外，淘汰煤炭和核能的有关政治决策也会发挥作用，其他传统发电厂和储能设施在市场驱动下的扩张和关闭也是如此。这意味着发电厂的进一步扩张或废除是模型计算的结果。可再生能源发电馈入通过历史发电馈入时间序列或天气数据反映。这些数据是基于装机容量的规模数据（包括预测误差）。可再生能源发电馈入被模拟为一个供应函数，

因此假设其不可改变。相反，传统电厂和储能设施可以自由参与电力市场；其电力供应仅受限于计划内及计划外的不可用性。这一点也在建模中反映。”⁹²

2.2.5 确定德国容量备用的规模

2016 年，《电力市场法》（Gesetz zur Weiterentwicklung des Strommarktes，或者 Strommarktgesetz）引入了容量备用（Kapazitätsreserve）。它是市场设计的一个附加组成部分，尽管容量备用是在电力市场之外结算。备用应该在批发或者调频市场上没有足够的供应、无法满足全部需求之时提供附加容量。德国输电系统运营商通过公开投标购买必要的容量。投标决定哪些设施将在未来交付期内建立备用。已计划退役的关停燃煤电厂、燃气电厂和储能设施（如果未在市场上销售电力）以及可再生能源（如果未在市场上销售电力）可以参与投标，并成为容量备用。只要输电系统运营商不需要激活这些设施，输电系统运营商处就会向这些设施支付年度报酬让它们保持待命状态。输电系统运营商通过电网费用将成本转嫁给终端用户。⁹³除了通过投标过程采购的容量备用以外，还有基于行政报酬，通过退役的燃煤电厂（“Sicherheitsreserve”，安全备用）构成的第二类备用。

2018 年，欧盟委员会认可德国的容量备用符合欧盟关于国家补助的规定。⁹⁴在 2019 到 2025 年期限内，备用容量的上限为 2 吉瓦，⁹⁵这一数值低于 2020 年德国总发电容量（略高于 226.8 吉瓦）的 1%。⁹⁶第一个交付期开始于 2020 年 10 月 1 日，将于 2022 年 9 月 30 日结束。

容量备用的规模取决于德国联邦经济与能源部所谓的“合理最坏情况情景”。对此情景的分析得出了一个结论：容量备用应该达到 2 吉瓦，以满足极端情况下电力市场上的需求或者将任何短缺降低到可接受的水平。⁹⁷2019 年 VS 分析的结果表明不论在参考情景下还是在具有雄心的情景下，采用容

量备用都会使德国电力不足概率进一步下降。但是，即便没有采用容量备用，电力不足概率也已经非常低了。⁹⁸此外，到目前为止，容量备用还从未被使用过。⁹⁹

在第一次也是目前为止唯一一次的招标中，中标的标仅有 1.056 吉瓦，剩余的标均不符合资格。¹⁰⁰目前的容量备用仅由燃气电厂构成。这也证实了德国电力供应依然充足。但是，如上文所述，德国联邦网络管理局的未来分析可能会得出略有不同的结果，因为未来分析基于的情景假设是源自更新的政策目标和措施。

3 电网和系统充裕度的定量方法：德国电网发展计划（NEP）中的方法

3.1 流程和责任的相关背景

德国通过每半年发布一次的“电网发展计划”（*Netzentwicklungsplan Strom*, 或 NEP）设定电网的发展规划。德国输电系统运营商协调计划的编制，之后在利益相关方流程中进行审核，最终由监管机构审批。《能源行业法案》第 12 章强制规定输电系统运营商和监管机构每两年执行一次此流程。

电网发展计划基于所谓的情景框架（单独的出版物）中介绍的三个主要发电发展情景，规定了中短期内（3 到 20 年）必要的电网增强和附加。这些情况包括一切照旧情景（情景 A）、切合实际的雄心情景（情景 B）和快速发展情景（情景 C）。

顾名思义，情景 B 通常被认为是最切合实际的主导情景。此情景的时间框架为 15 和 20 年，而其他情景的时间框架为 15 年（之前是 10 年）。

情景由输电系统运营商开发，必须经过监管机构审批之后，方可用于电网规划流程（NEP）。多年来，情景的范围略微改变。过去的迭代专注于转型速度和创新水平（图 8），而最新版本增加了新的参数——**部门耦合和电气化以及电网聚焦**（9）。电网聚焦指标描述的是发电和负荷侧为避免电网阻塞及电网增强需求所采取的措施，例如以电网为本的新发电容量的区域化、引入扶持措施，如电网储能和电解器。

图 8 2030 年电网发展计划的情景分类（2016 年），作者翻译

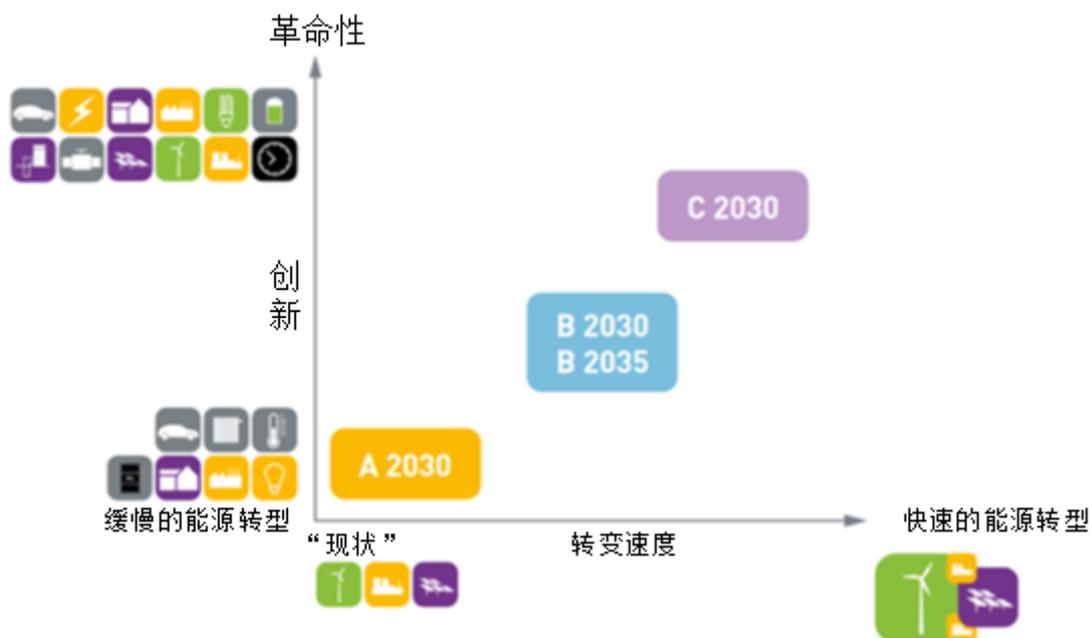
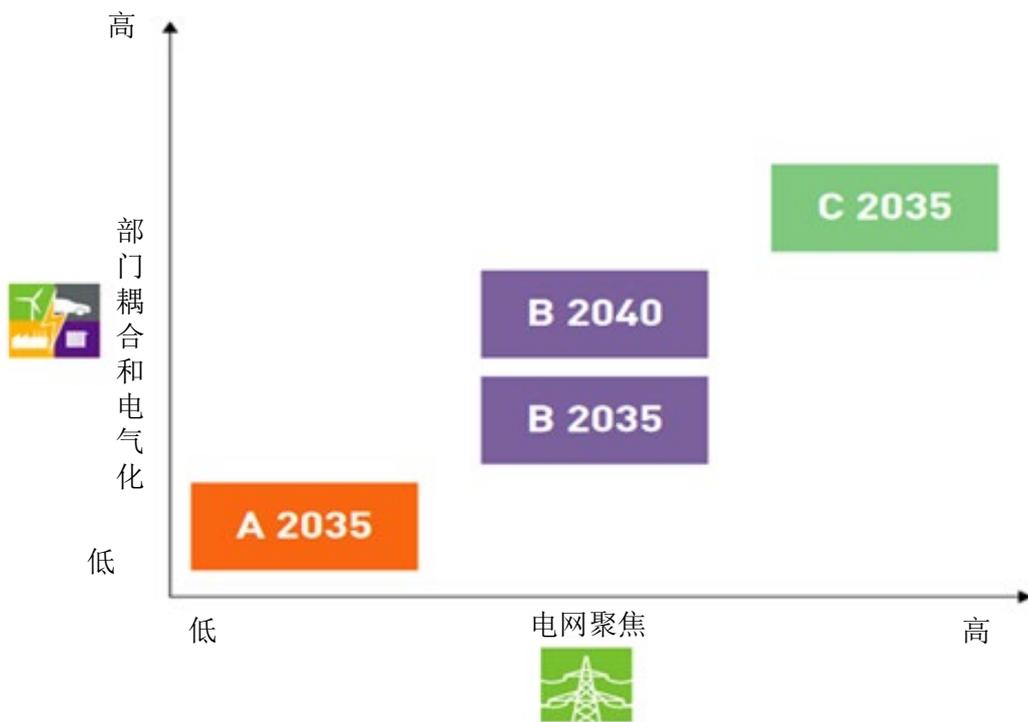


图 9 2035 年电网发展计划的情景分类（2020 年），作者翻译



来源：输电系统运营商（2020）。¹⁰²

3.2 电网发展计划中的容量充裕度

在电网发展计划中，并未明确地考虑容量充裕度本身。但是，电网发展计划与输电系统运营商和欧洲输电系统运营商网络准备的容量充裕度评估（参见章节 2.2.1 和 2.2.2）明确相关，以这些评估作为电网发展计划范围之外的外部研究。¹⁰³如 2035 年电网发展计划中所述，电网发展计划无意评估整体供电安全，而是基于预先设定的情景制定一份计划以确保电网不会对供电安全、可再生能源发展及气候政策目标造成障碍。

为制定电网发展计划而执行的市场和电网建模囊括了情景框架之外的其他闲置发电机，以确保系统供应始终充足并确保**传统发电容量的短缺不会成为电网发展的驱动力**。这与底层优化算法的硬性约束有关，即必须始终满足负荷。因此，发电容量不足的单一情况可能触发模型中的大规模电网投资，使用闲置发电机可以避免这一情况。闲置发电机基本上代表了“未提供的电量”，并未明确允许模型中出现该参数。2035 年电网发展计划的最新版本

中指出：在作为计划依据的任何最终模拟中，这些闲置发电机均未实际发电。在所有情景框架中，这可以被视为容量充裕度的指标。¹⁰⁴

4 德国所使用方法的比较

在此章节，我们以表格形式对所描述的每一种方法的最重要特征进行了汇总比较。

表 1 德国电力系统评估中方法的汇总比较

方法的特征/ 方法	输电系统运营商估算国家电力平衡的方法	欧洲输电系统运营商网络的充裕度评估方法	德国联邦经济与气候保护部容量充裕度的跨国评估（2015年）	德国联邦经济与气候保护部 VS 分析模型（2019–2021年）	德国联邦网络管理局（BNetzA）自2021年起的供电安全监测
作为模型依据的其他方法			欧洲输电系统运营商网络的充裕度评估方法	德国联邦经济与能源部容量充裕度的跨国评估（2015年）	德国联邦经济与能源部 VS 分析模型（2019–2021年）
目标/研究范围	确定过去和未来既定时间点的剩余容量	确定欧盟境内输电容量有限的多个互通互连区域内负荷平衡的可能性	确定所考虑的地理范围内负荷平衡的可能性	评估欧洲电力系统是否能够有效地维持供电安全	基于可靠性标准评估与电力市场（容量充裕度）和电网（电网和系统充裕度）相关的供电安全
方法	含峰值负荷、计划外停机和天气依赖性停机等随机要素的确定性方法	确定性及概率性组合方法（确定性预测+温度、可再生能源发电和强迫停机等不确定因素）	概率性跨境方法，考虑系统要素的随机特征以及跨境电力交易的影响和输电限制	概率性跨境方法，考虑系统要素的随机特征以及跨境电力交易的影响和输电	概率性跨境方法，考虑系统要素的随机特征以及跨境电力交易的影响和输电

方法的特征/ 方法	输电系统运营商估算国家电力平衡的方法	欧洲输电系统运营商网络的充裕度评估方法	德国联邦经济与气候保护部容量充裕度的跨国评估（2015年）	德国联邦经济与气候保护部 VS 分析模型（2019–2021年）	德国联邦网络管理局（BNetzA）自2021年起的供电安全监测
程序	将真实的参考情况与以既定时间点上临界参数为特征的理论情景进行比较	使用蒙特卡洛模拟特定目标年份下不同气候条件和随机强迫停机的优化程序	获得随机及时间耦合模拟年份的优化程序	获得随机及时间耦合模拟年份的优化程序	建模包括三个步骤：投资模型、供电安全模型和电网模型
调查的时间点	一年中一个确定的小时	每小时模拟	每小时模拟	每小时模拟	每小时模拟
数据集	负荷、发电和停机的可用预测和历史数据	负荷、发电和停机的可用历史数据	用于可再生能源及抽水蓄能系统发电的可用历史（2010、2011和2012年）天气数据、负荷数据以及传统电厂的典型停机率	用于可再生能源发电的可用历史（2009、2010、2011、2012和2013年）天气数据、负荷数据、可再生能源扩张潜力数据、河水流量季节性变化数据、地热电厂生物质能电厂、土地填埋场、污水和坑道气体的发电馈入值和满负荷运行小时数，以及传统电厂的典型停机率	发电、负荷、热需求、需求侧管理潜力、储能容量和跨境互联容量方面的可用历史数据；对于可再生能源，基于装机容量扩展历史发电馈入时间序列或天气数据

方法的特征/ 方法	输电系统运营商估算国家电力平衡的方法	欧洲输电系统运营商网络的充裕度评估方法	德国联邦经济与气候保护部容量充裕度的跨国评估 (2015 年)	德国联邦经济与气候保护部 VS 分析模型 (2019–2021 年)	德国联邦网络管理局 (BNetzA) 自 2021 年起的供电安全监测
处理不确定性	2 种情景：淘汰煤炭和不淘汰煤炭	蒙特卡洛采样	999 种不同模拟/情景	参考情景（没有任何附加气候保护措施的最佳猜测情景）和替代情景； 每一情景的 1,750 次不同模拟（年份情景）	“最佳猜测”基准/参考情景：落实最新能源政策目标导致的最可能发展
定量指标	<ul style="list-style-type: none"> - 可靠的可用容量 - 峰值负荷 - 需求侧管理 - 剩余容量 	<ul style="list-style-type: none"> - 负荷期望损失 - 电力不足概率 - 负荷平衡可能性 - 电量不足期望值/电量损失预期 	<ul style="list-style-type: none"> - 所考虑的每一预测年份和国家的负荷平衡可能性 	<ul style="list-style-type: none"> - 负荷期望损失 - 电力不足概率 - 电量不足期望值/电量损失预期 - 系统平均停电持续时间指标 - 电力市场系统平均停电持续时间指标 - 输入对确保供电安全的贡献 	<ul style="list-style-type: none"> - 负荷期望损失 - 电量不足期望值
不同电源的定量值	无具体容量值	无具体容量值	无具体容量值	无具体容量值	无具体容量值
其他假设	生物质和沼气发电厂在至少 99%的时间内可用		生物质：仅考虑不灵活的发电部分	市场参与者根据其理性预期行事	可靠性标准：每年 277 小时负荷期望损失，对

方法的特征/ 方法	输电系统运营商估算国家电力平衡的方法	欧洲输电系统运营商网络的充裕度评估方法	德国联邦经济与气候保护部容量充裕度的跨国评估（2015年）	德国联邦经济与气候保护部 VS 分析模型（2019–2021年）	德国联邦网络管理局（BNetzA）自2021年起的供电安全监测
	传统电厂：计划外停机在年度峰值时发生，停机的累积概率为95%			仅在无法通过一个竞价区或者国家内自有发电单位满足需求的情况下，才进行跨境电力交易	应0.04%的电力不足概率 市场参与者本着自身利润最大化的目的参与市场
地理焦点	德国电力系统和技术上分配给德国电力系统的所有单位	欧盟	德国及其地理和电力邻国	核心区域：德国及其邻国、意大利、英国和斯堪的纳维亚国家； 建模的卫星区域：伊比利亚半岛	德国及其邻国的电力市场——尤其是德国-卢森堡竞价区
欧洲内部市场的影响	未考虑	已考虑，通过考虑跨境电力交易（输入/输出）	已考虑，通过考虑跨境电力交易（输入/输出）	已考虑，通过考虑核心区域国家内部以及核心区域与建模卫星区域国家之间的跨境电力交易（输入/输出）	已考虑，通过考虑跨境电力交易（输入/输出）
时间范围	过去、本年以及未来几年	10年 两个目标年份	10年 三个目标年份	10年 四个目标年份	10年
近期分析的时间段	2018年的回顾	2020-2030	2015-2025	2020-2030	尚未发布

方法的特征/ 方法	输电系统运营商估算国家电力平衡的方法	欧洲输电系统运营商网络的充裕度评估方法	德国联邦经济与气候保护部容量充裕度的跨国评估 (2015 年)	德国联邦经济与气候保护部 VS 分析模型 (2019–2021 年)	德国联邦网络管理局 (BNetzA) 自 2021 年起的供电安全监测
	2019–2022 年的预测	目标年份：2025 和 2030	目标年份：2015、2020 和 2025	目标年份：2020、2023、2025、2030	
优点和缺点	缺点： <ul style="list-style-type: none"> - 仅考虑电力系统中最有可能的情况 - 不考虑跨境电力交易 - 不考虑电网充裕度 	优点： <ul style="list-style-type: none"> - 考虑跨境电力交易 - 考虑电网充裕度 缺点： 确定性方法的要素	优点： <ul style="list-style-type: none"> - 概率性方法 - 考虑跨境电力交易 缺点： 不考虑电网充裕度，只考虑跨境输电容量	优点： <ul style="list-style-type: none"> - 概率性方法 - 考虑跨境电力交易 缺点： 不考虑电网充裕度，只考虑跨境输电容量	优点： <ul style="list-style-type: none"> - 概率性方法 - 考虑跨境电力交易和电网充裕度

来源：自我表述。类似之处以绿色标记。

5 德国电力系统评估的新兴发展

5.1 燃煤电厂和核电厂逐步淘汰引起的预期变化

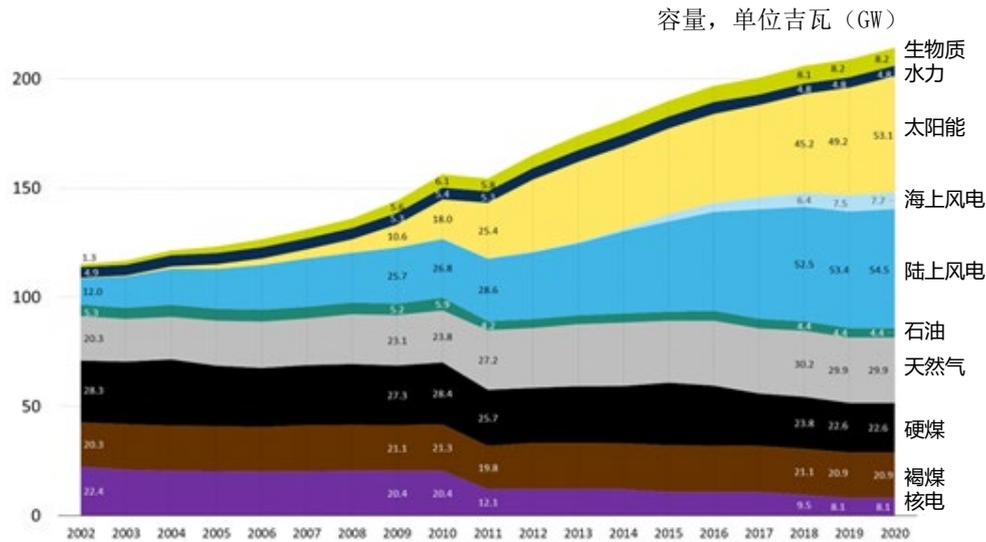
目前，德国正在逐步淘汰核电和煤电——2022 年末将核电容量从 2000 年的 22 吉瓦降为零；2038 年末将煤电容量从 2020 年的 44 吉瓦降为零。³

关于发电充裕度的公开讨论可以追溯到 1998 年，当时新当选的德国政府宣布其将践行选举时所做的承诺逐步淘汰核能发电。核电退出于 2000 年签署为法律，2010 年政府换届之后进行了修订，2011 年日本福岛事件发生之后再次修订，然后自 2011 年起一直延续至今，没有造成任何供电安全的下降。截至 2021 年末，仍有 8 吉瓦核电容量在线，计划到 2022 年末完全退役。对于德国可能成为净电力输入国依赖于邻国的核电和煤电容量的担心，到目前为止，并未化为现实。在某种程度上，这得益于可再生能源的快速发展，但也因为德国电力系统依然存在一定程度的产能过剩。

但是，容量充裕度已成为德国输电系统运营商和监管机构的一项顾虑。高昂的天然气价格加上低廉的国内煤炭价格加剧了这种顾虑。随着可再生能源占比的不断提高，到 2010 年代早期，德国很大一部分联合循环燃气发电机组（CCGT）机组的运行变得越来越不经济也加剧了这种顾虑。现代联合循环燃气发电机组机组高效又灵活——尽管通常不能同时有这两种优势，且在理论上，它会成为不断增加的波动性可再生能源发电的最佳伴侣，但很多燃气电厂却在市场上被取代，因为优先顺序倾向于采用价格低廉的煤电以及可优先调度的可再生能源发电，以满足基础负荷。近年来，随着欧盟碳排放权交易制度（ETS）下二氧化碳价格的增长造成煤电竞争力下降，这种趋势才出现了一定程度的逆转。但是，除了逐步淘汰核电之外，传统发电容量的大规模退役尚未发生，如以下德国发电容量图所示：

³ 到 2022 年初，煤炭退出期限已经前移到 2030 年，但是俄罗斯-乌克兰危机影响向德国的天然气供应，在此时间点上，其持续影响尚不明确。

图 10：2002-2020 年德国发电容量的发展



来源：Appun 2021¹⁰⁵。

自 2011 年起，只有大约 3 吉瓦的硬煤发电容量退役。褐煤发电容量甚至还增加了 1 吉瓦。监管机构通过打造燃气及燃煤电厂的冷备用机组的干预措施在一定程度上支持了此种发展。在得到监管机构的批准之后，德国输电系统运营商为某些发电容量支付报酬，使之作为冷备用机组维持可用性，可以提前一天调度或者在几天的交付周期内调度。冷备用机组有三种类型：¹⁰⁶

- 1. 电网备用 (Netzreserve)：**目前指的是燃气和燃煤电厂，尤其是在汇聚大部分核电容量、几乎没有风电的德国南部地区，可用于再调度以缓解电网堵塞（参见章节 2.4.4 中的解释）。
- 2. 容量备用 (Kapazitätsreserve)：**目前仅指的是市场上出现容量短缺时，可以在几个小时内激活的燃气电厂（目前容量为 2 吉瓦）（参见章节 2.2.5 中的解释）。
- 3. 安全备用 (Sicherheitsbereitschaft)：**可在几天内重新激活的已搁置燃煤电厂，（此方案计划将于 2023 年到期）（参见章节 2.2.5 中的解释）

所有这些备用电厂都不允许参与市场；相反，输电系统运营商向其支付成本，并通过网费收回成本。此外，输电系统运营商和德国联邦网络管理局

宣布德国南部的很多电厂（主要是联合循环燃气发电机组机组）都具有系统相关性，因此在可预见的未来这些电厂将不被不允许退役。这表明尽管到目前为止，德国的供电安全并未受到过任何威胁，但容量充裕度已经是德国电力系统的一项顾虑，且已经持续多年。容量和安全备用还从未被使用过，仅电网备用被使用过。¹⁰⁷

即将发生的煤炭淘汰必然会加剧对德国对容量充裕度方面的顾虑。2020 年通过的立法规定在 2038 年末之前退役所有的燃煤电厂。退煤目标在 2021 年末，新政府当选时被提前到了 2030 年。

至少十年来，电力部门的官员们一直在争论德国传统发电容量即将减少将会带来的总体影响。这一争论甚至还催动了关于泛欧洲地区容量充裕度的讨论。由于欧洲的多个国家都计划退役煤电容量，欧洲容量充裕度尤为相关。此外，不同国家的核能发电厂也已接近技术寿命周期的终点。

在互通互连、市场融合度不断提高的欧洲系统中，已经不能再从单一国家的层面上感知及处理发电充裕度问题。因此，欧洲输电系统运营商网络（ENTSO-E）和其前身电力传输协调联盟（Union for the Coordination of the Transmission of Electricity, UCTE）都在全欧

洲范围内评估了容量充裕度。欧洲输电系统运营商网络明确提到：欧洲煤电和核电容量的减少是推动中期充裕度预测（MAF）朝着欧洲资源充裕度评估（ERAA）方法发展的驱动力之一，并且欧洲资源充裕度评估方法应在目前以及未来的所有评估中使用。¹⁰⁸

欧洲资源充裕度评估方法相对中期充裕度预测有很大的改进，它将更多影响容量充裕度的参数参数纳入考量，例如欧洲基于潮流的市场耦合（Flow-based market coupling, FBMC）机制。⁴它还在更大程度上考虑了电池和电转 X 等技术。就这一点而言，欧洲资源充裕度评估（ERAA）对于未来德国和其他地方的能力充足性评估方法所需的变化具有示范作用。以德国而言，这些变化的主要驱动力并不是核电和煤电的逐步淘汰。需要考虑的其他因素包括：

- **发电位置和电网容量：**理论上，一个国家或者平衡区在供应侧可能是充裕的，但如果电网无法向负荷中心输送电力，就可能无法满足所有需求。由于建设可再生能源发电厂的最佳地点通常都远离负荷中心，而临近负荷中心的前基础负荷发电厂的退役增加了电网在容量充裕度评估中的重要性。
- **互连线路、电力交易和资源共享：**如果可以可靠地进行电力输入/交易，则通过本国资源无法满足自身负荷的国家或平衡区仍可能保持供应侧的充裕度。此外，伴随着互通互连及资源共享，可再生能源的容量贡献也会随之增长。要正确评估这些特征，就必须采用一种协调的泛欧洲方法，因为国家规划人员可能低估或者高估相关影响。例如，2018年，德国联邦能源和水资源协会（BDEW）发布了一份研究，表

明输电系统运营商和德国联邦网络管理局（BNetzA）高估了邻国的可用容量。¹⁰⁹

- **灵活性措施，**例如需求侧管理、储能和电转 X。

在煤炭淘汰方面，容量充裕度评估法以及容量不足时要采取的措施都具有相关性。向保持在线的系统相关电厂发放补贴，可能是防止联合循环燃气发电机组在短期内大规模退役的适当措施，但在煤炭淘汰的过程中，对于大量的煤电容量，这一措施可能并不适用。这一措施有悖于气候政策目标和退煤战略。多年来，德国一直在讨论引入容量市场，以激励新建更清洁、更灵活的联合循环燃气发电机组电厂；截至今日，容量市场仍不太可能被引入。德国输电系统运营商目前正在制定煤炭淘汰战略，有关这一问题的出版物预计会在2022年之后发布。这些关于容量充裕度的出版物以及进一步评估可能会更新对德国容量市场的讨论。新的联合执政协议预计将有一个研究此类问题的委员会（“平台气候中的电力系统”——“Plattform klimaneutrales Stromsystem”）。

5.2 是否有其他可能或者必要的变化？

德国系统始终满足负荷的能力与电网容量和电网阻塞挂钩。**充裕的可调度发电容量和/或输入容量显然是必要的，但并不足以维持供电安全。**在2013年刚开始讨论电网备用之时，这一点就已经明确了（于2016年实际引入）。与容量和安全备用不同，电网备用频繁地被用于缓解德国北部和南部之间的电网阻塞。尽管始终可提供足够的发电容量，但德国北部朝着风力发电过渡，位于德国南部负荷中心附近的传统电厂的退役，都增加了从北到南输电的量级和重要性。为解决此问题，德国政府

⁴ **基于潮流的市场耦合**是用于将竞价区之间的可用输送能力最大化。它不同于之前所采用的净输电容量（Net transfer capacity, NTC）法之处主要在于：基于负荷

潮流计算和电网状态不断调整输送容量。净输电容量也是基于负荷潮流，但它是由输电系统运营商每年或每半年一次相互议定的，留出了相当大的安全边际。

引入了电网发展计划，首次发布于 2013 年。电网扩张的推进速度远低于预期，主要是因为成本考量以及公众接受度的问题。麦肯锡公司在其 2019 年年度能源转型回顾中指出：如果电网扩张速度不大幅提高，第一份电网发展计划中提出的 2020 年目标在 2037 年之前都无法达成。¹¹⁰目前，对供电安全而言，电网充裕度的挑战性与容量充裕度相当——尽管后者仅在 2020 年决定淘汰煤炭之后才具有相关性。淘汰煤炭之后，可再生能源将取代煤炭对电力生产的大部分贡献，这将使得电网充裕度的重要性进一步提高。

就这一点而言，电网发展计划继续明确表示容量充裕度问题并不属于其范围之内，确实令人惊讶。我们认为，**德国的容量充裕度和电网充裕度彼此联系紧密，规划和评估方法应该反映出这一点。**此项工作很可能已经在幕后开展，因为负责电网发展计划的输电系统运营商也在准备自己的容量充裕度评估，德国联邦经济与能源部/德国联邦经济和气候保护部和德国联邦网络管理局反过来将这一评估包含在其自身的容量评估之中。输电系统运营商也可能在内部将过程和评估联系在一起。然而，这一过程将从更多的透明度中受益。煤炭淘汰会导致德国容量和电网充裕度评估的相互联系更为紧密。欧洲输电系统运营商网络（ENTSO-E）从中期充裕度预测过渡到欧洲资源充裕度评估法，表明此种相互联系已经在欧洲层面上发生了。毫无疑问，这会影 响德国应用的过程和方法。

6 结论及对中国的实际意义

过去十年间，德国和欧洲的容量充裕度研究发生了巨大的变化，以反映可再生能源规模的扩大以及天气需求猛增和电厂停机等概率性事件之间的相互影响。随着部门耦合、交通及其他部门的电气化以及互连线路容量的重要性提高，可能会发生更多的变化。



主要发现

在此研究中，针对德国输电系统运营商、相关部委和电网主管部门以及欧洲输电系统运营商网络（ENTSO-E）进行电网规划和容量充裕度研究的演变和最新实践，我们展示并提供了相关的技术细节。我们的主要结论是：

- 随着时间的推移，电网规划的重要性日益提高，执行该等规划的责任应由输电系统运营商承担。而容量充裕度评估的责任目前由德国联邦网络管理局（BNetzA）承担。因为电网规划和容量充裕度的责任在很多方面是孤立的，解决此缺陷会有助于提高规划和电力系统评估的整体效率和有效性。
- 同样的，建模以及容量充裕度评估工作的地理范围扩大了，目光也放得更为长远，而且这种趋势可能会变得更加明显，因为在很多地区逐步淘汰煤炭、退役核电厂之后，考虑泛欧洲地区容量充裕的需求也会随之增长。
- 容量充裕度模型从确定性方法转变为更加概率性的模型，将天气、电厂停机和传输中断以及需求猛增等多种情景的相互影响纳入考虑范围。这不仅反映了波动性可再生能源重要性的与日俱增，也反映了导致短期电力短缺的低概率事件的相互影响越来越大。
- 目前的模型没有明确指定每一电源的容量值（例如等效带负荷能力或者 ELCC）。相反，模型假设随着传统发电因为政策目标和碳价的原因逐步淘汰，每一种类型的发电都可发挥作用。
- 迄今为止，现有模型未充分考虑部门耦合和需求侧灵活性。目前，这些还是欧洲电力需求中的一个次要因素，但它们可能快速增长，尤其随着电动汽车使用量的增长加速以及车到电网技术变得具有商业可行性。
- 目前所有容量充裕度模型都表明：德国电力部门在未来几年间仍将供应充沛，部分是因为德国及其邻国的产能过剩，部分是因为传统电厂的灵活性以及与邻近区域之间存在高效的能量市场和互连线路。
- 今后数年间，德国的容量备用都不太可能派上用场，因为德国及其邻国有充足的容量——但德国新的气候政策目标以及俄乌危机之后可能改变这种情况。任何情况下，容量市场依然是包括在德国在内的欧洲的热门话题。

中国的电力系统规划模型

1997年，中国通过了《电力发展规划编制原则》。该原则明确电力发展规划编制的年限宜与国民经济和社会发展规划的年限相一致，分为短期规划（5年）、中期规划（10-15年）和长期规划（15年以上）。短期规划和长期规划每五年修订一次，中期规划每三年修订一次。¹¹¹

中国的电力系统规划分为全国（包括地区）电力规划和省级电力规划。2016年，中国国家能源局（NEA）发布了《电力规划管理办法》，阐明了两类电力规划的参与者和相关责任。¹¹²国家能源局是全国电力规划的责任部门，省级能源主管部门是省级电力规划的责任部门。国家能源局的电力规划由国家发展改革委（NDRC）审定，省级电力规划与全国电力规划衔接并达成一致。

负荷预测是电力规划的第一步。中国采用自下而上的方法，从省级到地区级再到国家级，聚焦于长期电力需求、峰值负荷、负荷分配和负荷结构。¹¹³负荷预测只包括三种情景：高、中和低增长。高增长情景主要反映强有力的经济增长以及夏季持续高温天气下的负荷。中增长情景代表经济的稳定运行以及夏季的缓慢升温。低增长情景考虑了经济增长放缓以及低于正常水平的夏季温度。¹¹⁴最后，只建议以一种负荷情景作为后续发电规划和电网规划的基础。

发电容量规划将确定每一电源的数量和地点。此过程将评估多种电源的建造规划，以确定所需的新容量和投资需求。¹¹⁵基于非化石能源占比的政策目标和省级可再生能源配额，发电规划首先要制定非化石电源的情景。¹¹⁶在每一情景中，根据地方电力平衡和本地可再生能源电力消费能力，规划提出每一地区化石能源电力容量和峰值容量的数值。最后，根据经济和技术分析，确定地区总装机容量和电力结构。¹¹⁷情景将使用每年、每月或典型的每周及每日负荷曲线，考虑不同的资源条件和政策以及地区特征。¹¹⁸

中国电力系统规划的现有问题

在中国，容量充裕度规划在总体上透明度较低，但电网规划者充分了解此报告中讨论的很多技术，尤其包括电力不足概率（LoLP）的关键指标。近年来，中国在开发国内电力市场方面取得了长足的进步，包括现货电力市场试点和辅助服务市场。

然而，中国的电力市场在与容量充裕度规划相关的几个重要方面与德国不同。首先，现货市场是较新的发展，可能尚未到达必要的规模和流动性，无法发挥欧洲现货市场在确保容量充裕度方面的类似作用。电价依然相对固定——尽管新近提高了燃煤发电的价格上限，但在某些高能耗行业可能并未设定上限，这影响了发电厂或者用户是否有足够的动机确保供电或灵活性，尤其是在峰值需求时段。因此，相对于市场力量，行政规划还是在发挥着主导作用。

在容量充裕度的讨论中，省间电力交易的障碍还发挥着显著作用，各省通常主要通过可调度的煤电或其他基础负荷资源，包括通过高压电线完成的专用电力输入，来确保满足峰值负荷。电力系统规划明确提出增加新的可再生能源电源，设定了非化石能源的（省级和全国性）目标，但在目前的省级规划中，可再生能源在满足峰值负荷方面的价值甚微或者没有价值。最新的分析表明更大规模的省间电力交易和备用共享会大幅降低成本，降低对化石燃料发电量的要求，从而支持以可再生能源作为国家实现碳达峰和碳中和目标的举措。¹¹⁹

尽管中国的电力市场和电力系统结构与德国和欧洲大相径庭，但欧洲的某些大趋势为中国的电力部门规划指出了未来可能的发展方向。首先，摒弃确定性规划模型，改用越来越复杂的概率性方式，即各种概率性供需情景彼此交互的方式，可能缓解与波动性可再生能源低峰值负荷容量值相关的某些顾虑，实现对新输电和发电投资的更高效规划。其次，欧洲从具体输电系统运营商或者具体国家的容量充裕度规划过渡到区域性容量充裕度规划的趋势，也会让人在考虑更大范围的地理区域时，能更多地

关注增加省间交易的需求，更多地考虑可再生能源和灵活性需求资源之间的互补。



结束语

最后，以清洁可再生能源为主体的电力系统的发展是一项进展中的工作，还没有任何地区已充分调整其评估或规划方法，以充分融合电动汽车灵活充电或者供热和工业电气化等新兴资源。欧洲和德国为确保容量充裕度已采取的措施本身也是一项进展中的工作。通过与中国以及其他正在推行长期转型、有意实现低碳能源系统的国家分享经验和教训，我们可以测试及改进现有的模型和方法，以确保我们在实现清洁、低碳的能源未来的过程中，仍能维持电力系统的可靠性。

采访合作伙伴及参加相关大会、利益相关者会议等

访谈或电子邮件通信

可再生能源电网计划，2021年2月9日接受采访。

50Hertz 输电公司，2021年2月17日书面答复。

Venios 公司董事，于2021年2月17日接受采访。

德国联邦网络管理局（BNetzA），2021年3月16日、2022年1月20日以及2022年3月17日的书面答复。

E.DIS Netz 公司，2021年3月17日接受采访。

会议

德国联邦网络管理局于2021年3月16日组织的名为“供应安全监控”的利益相关者会议。

BDEW – 德国联邦能源与水工业协会

BMWi – 德国联邦经济和能源部

BMWK – 德国联邦经济和气候保护部

BNetzA – 德国联邦网络管理局

CCGT – 联合循环燃气发电机组

CHP – 热电联产

DSM – 需求侧管理

EENS – 电量不足期望值

ENTSO-E – 欧洲输电系统运营商网络

EnWG – 能源行业法

ERAA – 欧洲资源充裕度评估

EU ETS – 欧盟排放交易体系

EU – 欧盟

FMBC – 基于流量的市场耦合

LBP – 负荷平衡可能性

LoEE – 电量损失预期

LoLE – 负荷期望损失

LoLP – 电力不足概率

MAF – 中期充裕度预测

MC samplings/simulation – 蒙特卡洛抽样/模拟

NEA – 国家能源局

NDRC – 国家发展和改革委员会

NEP – 德国电网发展计划

NTC – 净输电容量

RE – 可再生能源

TSO – 输电系统运营商

TWh – 太瓦时

UCTE – 电力传输协调联盟

VS – 供应安全 (*Versorgungssicherheit*)

VS-Standard – 供应安全标准

图列表

图 1	德国输电系统运营商的电力平衡估算方法	8
图 2	2020 年中期充裕度预测中采用的欧洲输电系统运营商网络方法的主要元素	9
图 3	特定目标年份的蒙特卡洛模拟原则	10
图 4	Consentec 和 r2b 研究中的德国及其电力邻国 (2015 年)	11
图 5	容量充裕度跨国评估方法概述	12
图 6	VS 分析模型中的建模区域	14
图 7	德国联邦网络管理局在供电安全监测中所使用程序的概况	17
图 8	2030 年电网发展计划的情景分类 (2016 年), 自行翻译	19
图 9	2035 年电网发展计划的情景分类 (2020 年), 自行翻译	20
图 10	2002-2020 年德国发电容量的发展	24

表 1 德国电力系统评估中方法的汇总比较 21

¹ 德国联邦经济和能源部 (BMWi) (2021), "联邦经济和能源部委托开展的 "监测欧洲电力市场资源充裕性"分类研究"。网址为 <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/G/gutachten-angemessenheit-der-ressourcen-begleitdokument.pdf>。

²张亚南等, "京津冀与德国电力系统灵活性的定量比较研究", 国家发改委能源研究所, 2020年12月, 网址为 https://www.energypartnership.cn/fileadmin/user_upload/china/media_elements/publications/Power_system_flexibility_in_Jingjinji_and_Germany.pdf。

³ "存储期货研究", 国家可再生能源实验室, 2022年, 网址为 <https://www.nrel.gov/analysis/storage-futures.html>。

⁴Peter Børre Eriksen 等人, "欧洲输电系统运营商网络中国电网规划建模展示报告", 中欧能源合作平台 (ECECP), 2021年11月, 网址为 <http://www.ececp.eu/wp-content/uploads/2021/12/ENTSO-E-showcase-report-EN-v1.2.pdf>。

⁵BMWi (2021), "联邦经济和能源部委托开展的 "监测欧洲电力市场资源充裕性"分类研究"。网址为 https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/G/gutachten-angemessenheit-der-ressourcen-begleitdokument.pdf?__blob=publicationFile&v=8, 第1页。

⁶比较。 BMWi (2021), "联邦经济和能源部委托开展的 "监测欧洲电力市场资源充裕性"分类研究"。网址为 https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/G/gutachten-angemessenheit-der-ressourcen-begleitdokument.pdf?__blob=publicationFile&v=8, 第1页。

⁷BMWi (2021), "联邦经济和能源部委托开展的 "监测欧洲电力市场资源充裕性"分类研究"。网址为 https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/G/gutachten-angemessenheit-der-ressourcen-begleitdokument.pdf?__blob=publicationFile&v=8, 第1页。

⁸Consentec, r2b 能源咨询 (2015年), "德国及其邻国的系统充裕性: 跨国监测和评估", 网址为 https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/V/versorgungssicherheit-in-deutschland-und-seinen-nachbarlaendern-en.pdf?__blob=publicationFile&v=3, 第4页。

⁹50Hertz、Amprion、Tennet、Transnet BW (2020), "德国输电系统运营商 2018-2020年电力平衡报告", 网址: https://www.amprion.net/Dokumente/Netzkenzahlen/Leistungsbilanz/Bericht-zur-Leistungsbilanz/Bericht_zur_Leistungs_20, 第6页。

¹⁰50Hertz、Amprion、Tennet、Transnet BW (2020), "德国输电系统运营商关于 2018-2020年绩效审查的报告", 网址为 https://www.amprion.net/Dokumente/Netzkenzahlen/Leistungsbilanz/Bericht-zur-Leistungsbilanz/Bericht_zur_Leistungs_20, 第4页。

¹¹参见例如 ENTSO-E (2012), "2012年度统计数据 and 充裕度回顾", 网址为 https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/Publications/Statistics/YSAR/140318_YSAR_2012_report.pdf。

¹²基于: 50Hertz、Amprion、Tennet、Transnet BW (2020), "德国输电系统运营商关于 2018-2020年绩效审查的报告", 网址为

https://www.amprion.net/Dokumente/Netzkennzahlen/Leistungsbilanz/Bericht-zur-Leistungsbilanz/Bericht_zur_Leistungsbilanz_2019, 第 7 页。

¹³基于：50Hertz、Amprion、Tennet、Transnet BW (2020), “德国输电系统运营商关于 2018-2020 年绩效审查的报告”，网址为

https://www.amprion.net/Dokumente/Netzkennzahlen/Leistungsbilanz/Bericht-zur-Leistungsbilanz/Bericht_zur_Leistungsbilanz_2019, 第 7 页。

¹⁴基于：50Hertz、Amprion、Tennet、Transnet BW (2020), “德国输电系统运营商关于 2018-2020 年绩效审查的报告”，网址为

https://www.amprion.net/Dokumente/Netzkennzahlen/Leistungsbilanz/Bericht-zur-Leistungsbilanz/Bericht_zur_Leistungsbilanz_2019 和 Consentec, r2b 能源咨询 (2015 年), “德国及其邻国的系统充裕性：跨国监测和评估”，网址为 https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/V/versorgungssicherheit-in-deutschland-und-seinen-nachbarlaendern-en.pdf?__blob=publicationFile&v=3, 第 7-8 页。

¹⁵Consentec, r2b 能源咨询 (2015 年), “德国及其邻国的系统充裕性：跨国监测和评估”，网址为

https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/V/versorgungssicherheit-in-deutschland-und-seinen-nachbarlaendern-en.pdf?__blob=publicationFile&v=3, 第 8 页。

¹⁶ 50Hertz、Amprion、Tennet、Transnet BW (2020), “德国输电系统运营商 2018-2020 年电力平衡报告”，网址为

https://www.amprion.net/Dokumente/Netzkennzahlen/Leistungsbilanz/Bericht-zur-Leistungsbilanz/Bericht_zur_Leistungsbilanz_2019, 第 12 页和 Consentec, r2b 能源咨询 (2015 年), “德国及其邻国的系统充裕性：跨国监测和评估”，网址为 https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/V/versorgungssicherheit-in-deutschland-und-seinen-nachbarlaendern-en.pdf?__blob=publicationFile&v=3, 第 7 页。

¹⁷ 欧洲输电系统运营商网络 (ENTSO-E) (2014), “欧洲输电系统运营商网络 (ENTSO-E) 充裕度评估的目标方法。协商后更新版本”，网址为 https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/sdc-documents/SOAF/141014_Target_Methodology_for_Adequacy_Assessment_after_Consultation.pdf。

¹⁸ 欧洲输电系统运营商网络 (ENTSO-E), “欧洲资源充裕度评估”，网址

<https://www.entsoe.eu/outlooks/eraa/>

¹⁹ 欧洲输电系统运营商网络 (ENTSO-E) (2020 年), “中期充裕度预测附录 2 方法”，网址为

https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/sdc-documents/MAF/2020/MAF_2020_Appendix_2_Methodology.pdf, 第 5 页。

²⁰ 欧洲输电系统运营商网络 (ENTSO-E) (2020), “2020 年中期充裕度预测”，网址为

<https://www.entsoe.eu/outlooks/midterm/>。

²¹ 欧洲输电系统运营商网络 (ENTSO-E) (2014), “欧洲输电系统运营商网络 (ENTSO-E) 充裕度评估的目标方法。协商后更新版本”，网址为 https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/sdc-documents/SOAF/141014_Target_Methodology_for_Adequacy_Assessment_after_Consultation.pdf,

第 10 页。

-
- ²² 欧洲输电系统运营商网络 (ENTSO-E) (2020), “中期充裕度预测-附件 2 方法”, 网址 https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/sdc-documents/MAF/2020/MAF_2020_Appendix_2_Methodology.pdf, 第 7 页。
- ²³ 欧洲输电系统运营商网络 (ENTSO-E) (2020), “中期充裕度预测-附件 2 方法”, 网址 https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/sdc-documents/MAF/2020/MAF_2020_Appendix_2_Methodology.pdf, 第 3 页。
- ²⁴ 欧洲输电系统运营商网络 (ENTSO-E) (2014), “欧洲输电系统运营商网络 (ENTSO-E) 充裕度评估的目标方法。协商后更新版本”, 网址为 https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/sdc-documents/SOAF/141014_Target_Methodology_for_Adequacy_Assessment_after_Consultation.pdf, 第 14 页。
- ²⁵ 欧洲输电系统运营商网络 (ENTSO-E) (2020), “中期充裕度预测-附件 2 方法”, 网址 https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/sdc-documents/MAF/2020/MAF_2020_Appendix_2_Methodology.pdf, 第 7 页。
- ²⁶ 欧洲输电系统运营商网络 (ENTSO-E) (2012), “2012-2030 年情景展望和充裕度预测”, 网址为 https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/pre2015/SDC/SOAF/120705_SOAF2012_final.pdf, 第 95 页。
- ²⁷ r2b 能源咨询、Consentec、弗劳恩霍夫太阳能系统研究所、TEP Energy (2019 年), “欧洲市场供应安全的定义和监控”, 网址为 https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/definition-und-monitoring-der-versorgungssicherheit-an-den-europaeischen-strommaerkten.pdf?__blob=publicationFile&v=18, 第 17-18 页。
- ²⁸ 欧盟委员会 (2016 年), “识别适当的发电量以及内部电力市场的系统充裕度标准”, 网址为 https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/Generation%20adequacy%20Final%20Report_for%20publication.pdf, 第 35 页。
- ²⁹ 欧盟委员会 (2016 年), “识别适当的发电量以及内部电力市场的系统充裕度标准”, 网址为 https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/Generation%20adequacy%20Final%20Report_for%20publication.pdf, 第 75 页。
- ³⁰ 欧洲输电系统运营商网络 (ENTSO-E) (2012), “2012-2030 年情景展望和充裕度预测”, 网址为 https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/pre2015/SDC/SOAF/120705_SOAF2012_final.pdf, 第 95 页。
- ³¹ “中期充裕度预测-附件 2 方法”, 网址 https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/sdc-documents/MAF/2020/MAF_2020_Appendix_2_Methodology.pdf, 第 3 页。
- ³² Consentec, r2b 能源咨询 (2015 年), “德国及其邻国的系统充裕性: 跨国监测和评估”, 网址为 https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/V/versorgungssicherheit-in-deutschland-und-seinen-nachbarlaendern-en.pdf?__blob=publicationFile&v=3 和 r2b 能源咨询、Consentec、弗劳恩霍夫太阳能系统研究所、TEP Energy (2019 年), “欧洲市场供应安全的定义和监控”, 网址为 https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/definition-und-monitoring-der-versorgungssicherheit-an-den-europaeischen-strommaerkten.pdf?__blob=publicationFile&v=18。

³³ r2b 能源咨询、Consentec、弗劳恩霍夫太阳能系统研究所、TEP Energy（2021 年），“监测欧洲市场的资源充裕性”，网址为

https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/angemessenheit-der-ressourcen-an-den-europaeischen-strommaerkten.pdf?__blob=publicationFile&v=18。

³⁴ Consentc, r2b 能源咨询（2015 年），“德国及其邻国的系统充裕性：跨国监测和评估”，网址为 https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/V/versorgungssicherheit-in-deutschland-und-seinen-nachbarlaendern-en.pdf?__blob=publicationFile&v=3。

³⁵ Consentc, r2b 能源咨询（2015 年），“德国及其邻国的系统充裕性：跨国监测和评估”，网址为 https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/V/versorgungssicherheit-in-deutschland-und-seinen-nachbarlaendern-en.pdf?__blob=publicationFile&v=3，第 16 页

³⁶ 欧洲输电系统运营商网络（ENSTO-E）（2014），“2014 年情景展望和充裕度预测”，网址为 https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/pre2015/SDC/SOAF/120705_SOAF2012_final.pdf。

³⁷ Consentc, r2b 能源咨询（2015 年），“德国及其邻国的系统充裕性：跨国监测和评估”，网址为 https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/V/versorgungssicherheit-in-deutschland-und-seinen-nachbarlaendern-en.pdf?__blob=publicationFile&v=3，第 14 页。

³⁸ Consentc, r2b 能源咨询（2015 年），“德国及其邻国的系统充裕性：跨国监测和评估”，网址为 https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/V/versorgungssicherheit-in-deutschland-und-seinen-nachbarlaendern-en.pdf?__blob=publicationFile&v=3，第 11、25 和 27 页。

³⁹ 欧洲委员会（2017 年），通知：“国家援助 SA.45852 (2017/N)——根据欧洲联盟运作条约第 108（2）条容量储备征求意见”，网址为 [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52017XC0519\(06\)&from=EN](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52017XC0519(06)&from=EN)，第 20 页。

⁴⁰ Consentc, r2b 能源咨询（2015 年），“德国及其邻国的系统充裕性：跨国监测和评估”，2021 年 9 月 14 日，网址为 https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/V/versorgungssicherheit-in-deutschland-und-seinen-nachbarlaendern-en.pdf?__blob=publicationFile&v=3，第 15 页。

⁴¹ Consentc, r2b 能源咨询（2015 年），“德国及其邻国的系统充裕性：跨国监测和评估”，网址为 https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/V/versorgungssicherheit-in-deutschland-und-seinen-nachbarlaendern-en.pdf?__blob=publicationFile&v=3，第 14 页。

⁴² Consentc, r2b 能源咨询（2015 年），“德国及其邻国的系统充裕性：跨国监测和评估”，网址为 https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/V/versorgungssicherheit-in-deutschland-und-seinen-nachbarlaendern-en.pdf?__blob=publicationFile&v=3，第三部分第 40 页。

⁴³ Consentc, r2b 能源咨询（2015 年），“德国及其邻国的系统充裕性：跨国监测和评估”，网址为 https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/V/versorgungssicherheit-in-deutschland-und-seinen-nachbarlaendern-en.pdf?__blob=publicationFile&v=3，第 25-26 页。

⁴⁴ Consentc, r2b 能源咨询（2015 年），“德国及其邻国的系统充裕性：跨国监测和评估”，网址为 https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/V/versorgungssicherheit-in-deutschland-und-seinen-nachbarlaendern-en.pdf?__blob=publicationFile&v=3，第 21-22 页。

⁴⁵ r2b 能源咨询、Consentec、弗劳恩霍夫太阳能系统研究所、TEP Energy（2019 年），“欧洲市场供应安全的定义和监控”，网址为

https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/definition-und-monitoring-der-versorgungssicherheit-an-den-europaeischen-strommaerkten.pdf?__blob=publicationFile&v=18

⁴⁶ r2b 能源咨询, Consentec, 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所, TEP Energy (2019 年), “欧洲市场供应安全的定义和监控”, 网址为

https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/definition-und-monitoring-der-versorgungssicherheit-an-den-europaeischen-strommaerkten.pdf?__blob=publicationFile&v=18, Zusammenfassung.

⁴⁷ r2b 能源咨询、Consentec、弗劳恩霍夫太阳能系统研究所、TEP Energy (2019 年), “欧洲市场供应安全的定义和监控”, 网址为

https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/definition-und-monitoring-der-versorgungssicherheit-an-den-europaeischen-strommaerkten.pdf?__blob=publicationFile&v=18, 第 240-241 页。

⁴⁸ r2b 能源咨询、Consentec、弗劳恩霍夫太阳能系统研究所、TEP Energy (2019 年), “欧洲市场供应安全的定义和监控”, 网址为

https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/definition-und-monitoring-der-versorgungssicherheit-an-den-europaeischen-strommaerkten.pdf?__blob=publicationFile&v=18, 第 241 页。

⁴⁹ r2b 能源咨询、Consentec、弗劳恩霍夫太阳能系统研究所、TEP Energy (2019 年), “欧洲市场供应安全的定义和监控”, 网址为

https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/definition-und-monitoring-der-versorgungssicherheit-an-den-europaeischen-strommaerkten.pdf?__blob=publicationFile&v=18, 第 80-82 页。

⁵⁰ r2b 能源咨询、Consentec、弗劳恩霍夫太阳能系统研究所、TEP Energy (2019 年), “欧洲市场供应安全的定义和监控”, 网址为

https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/definition-und-monitoring-der-versorgungssicherheit-an-den-europaeischen-strommaerkten.pdf?__blob=publicationFile&v=18, 第 82-83 页。

⁵¹ r2b 能源咨询、Consentec、弗劳恩霍夫太阳能系统研究所、TEP Energy (2019 年), “欧洲市场供应安全的定义和监控”, 网址为

https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/definition-und-monitoring-der-versorgungssicherheit-an-den-europaeischen-strommaerkten.pdf?__blob=publicationFile&v=18, 第 83 页。

⁵² r2b 能源咨询、Consentec、弗劳恩霍夫太阳能系统研究所、TEP Energy (2019 年), “欧洲市场供应安全的定义和监控”, 网址为

https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/definition-und-monitoring-der-versorgungssicherheit-an-den-europaeischen-strommaerkten.pdf?__blob=publicationFile&v=18, 第 84 页。

⁵³ r2b 能源咨询、Consentec、弗劳恩霍夫太阳能系统研究所、TEP Energy (2019 年), “欧洲市场供应安全的定义和监控”, 网址为

<https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/definition-und-monitoring-der->

[versorgungssicherheit-an-den-europaeischen-strommaerkten.pdf?__blob=publicationFile&v=18](#), 第 84-85 页。

⁵⁴ r2b 能源咨询、Consentec、弗劳恩霍夫太阳能系统研究所、TEP Energy (2019 年), “欧洲市场供应安全的定义和监控”, 网址为

https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/definition-und-monitoring-der-versorgungssicherheit-an-den-europaeischen-strommaerkten.pdf?__blob=publicationFile&v=18, 第 17-18 页和 50Hertz 的书面答复。

⁵⁵ 欧洲输电系统运营商网络 (ENTSO-E) (2012), “2012-2030 年情景展望和充裕度预测”, 网址为

<https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean->

[documents/pre2015/SDC/SOAF/120705_SOAF2012_final.pdf](https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/pre2015/SDC/SOAF/120705_SOAF2012_final.pdf), 第 95 页和 r2b 能源咨询、

Consentec、弗劳恩霍夫太阳能系统研究所、TEP Energy (2019 年), “欧洲市场供应安全的定义和监控”, 网址为 [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/definition-und-](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/definition-und-monitoring-der-versorgungssicherheit-an-den-europaeischen-strommaerkten.pdf?__blob=publicationFile&v=18)

[monitoring-der-versorgungssicherheit-an-den-europaeischen-strommaerkten.pdf?__blob=publicationFile&v=18](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/definition-und-monitoring-der-versorgungssicherheit-an-den-europaeischen-strommaerkten.pdf?__blob=publicationFile&v=18), 第 18 页。

⁵⁶ r2b 能源咨询、Consentec、弗劳恩霍夫太阳能系统研究所、TEP Energy (2019 年), “欧洲市场供应安全的定义和监控”, 网址为

https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/definition-und-monitoring-der-versorgungssicherheit-an-den-europaeischen-strommaerkten.pdf?__blob=publicationFile&v=18, 第 22-23 页。

⁵⁷ r2b 能源咨询、Consentec、弗劳恩霍夫太阳能系统研究所、TEP Energy (2019 年), “欧洲市场供应安全的定义和监控”, 网址为

https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/definition-und-monitoring-der-versorgungssicherheit-an-den-europaeischen-strommaerkten.pdf?__blob=publicationFile&v=18, 第 25 页。

⁵⁸ r2b 能源咨询、Consentec、弗劳恩霍夫太阳能系统研究所、TEP Energy (2019 年), “欧洲市场供应安全的定义和监控”, 网址为

https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/definition-und-monitoring-der-versorgungssicherheit-an-den-europaeischen-strommaerkten.pdf?__blob=publicationFile&v=18, 第 27 页。

⁵⁹ r2b 能源咨询、Consentec、弗劳恩霍夫太阳能系统研究所、TEP Energy (2019 年), “欧洲市场供应安全的定义和监控”, 网址为

https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/definition-und-monitoring-der-versorgungssicherheit-an-den-europaeischen-strommaerkten.pdf?__blob=publicationFile&v=18, 第 43 页。

⁶⁰ r2b 能源咨询、Consentec、弗劳恩霍夫太阳能系统研究所、TEP Energy (2019 年), “欧洲市场供应安全的定义和监控”, 网址为

https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/definition-und-monitoring-der-versorgungssicherheit-an-den-europaeischen-strommaerkten.pdf?__blob=publicationFile&v=18, 第 43 页和 50Hertz 的书面答复。

⁶¹ 德国联邦经济与能源部,“德国-卢森堡竞价区的电力供应可靠性标准,网址为 https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/XYZ/zuverlaessigkeitsstandard-fuer-die-stromversorgung-in-deutschland.pdf?__blob=publicationFile&v=10, 第 2 页。

⁶² 50Hertz 的书面答复

⁶³ r2b 能源咨询、Consentec、弗劳恩霍夫太阳能系统研究所、TEP Energy (2019 年),“欧洲市场供应安全的定义和监控”,网址为

https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/definition-und-monitoring-der-versorgungssicherheit-an-den-europaeischen-strommaerkten.pdf?__blob=publicationFile&v=18, 第 24 页。

⁶⁴ r2b 能源咨询、Consentec、弗劳恩霍夫太阳能系统研究所、TEP Energy (2019 年),“欧洲市场供应安全的定义和监控”,网址为

https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/definition-und-monitoring-der-versorgungssicherheit-an-den-europaeischen-strommaerkten.pdf?__blob=publicationFile&v=18, 第 249 页。

⁶⁵ r2b 能源咨询、Consentec、弗劳恩霍夫太阳能系统研究所、TEP Energy (2019 年),“欧洲市场供应安全的定义和监控”,网址为

https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/definition-und-monitoring-der-versorgungssicherheit-an-den-europaeischen-strommaerkten.pdf?__blob=publicationFile&v=18, 第 250 页。

⁶⁶ r2b 能源咨询、Consentec、弗劳恩霍夫太阳能系统研究所、TEP Energy (2019 年),“欧洲市场供应安全的定义和监控”,网址为

https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/definition-und-monitoring-der-versorgungssicherheit-an-den-europaeischen-strommaerkten.pdf?__blob=publicationFile&v=18, 第 249-252 页。

⁶⁷ r2b 能源咨询、Consentec、弗劳恩霍夫太阳能系统研究所、TEP Energy (2019 年),“欧洲市场供应安全的定义和监控”,网址为

https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/definition-und-monitoring-der-versorgungssicherheit-an-den-europaeischen-strommaerkten.pdf?__blob=publicationFile&v=18, 第 251 页。

⁶⁸ r2b 能源咨询、Consentec、弗劳恩霍夫太阳能系统研究所、TEP Energy (2019 年),“欧洲市场供应安全的定义和监控”,网址为

https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/definition-und-monitoring-der-versorgungssicherheit-an-den-europaeischen-strommaerkten.pdf?__blob=publicationFile&v=18, 第 83-84 页。

⁶⁹ r2b 能源咨询、Consentec、弗劳恩霍夫太阳能系统研究所、TEP Energy (2019 年),“欧洲市场供应安全的定义和监控”,网址为

https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/definition-und-monitoring-der-versorgungssicherheit-an-den-europaeischen-strommaerkten.pdf?__blob=publicationFile&v=18, 第 84 页。

⁷⁰ r2b 能源咨询、Consentec、弗劳恩霍夫太阳能系统研究所、TEP Energy（2021 年），“欧洲市场供应安全的定义和监控”，网址为

https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/angemessenheit-der-ressourcen-an-den-europaeischen-strommaerkten.pdf?__blob=publicationFile&v=18。

⁷¹ 德国联邦经济与能源部通讯，“直接能源转型”（2021），“新专家意见审视：欧洲的能源供应在 2030 年之前是否依然安全”，网址为 <https://www.bmwi-energiewende.de/EWD/Redaktion/EN/Newsletter/2021/07/Meldung/news2.html>。

⁷² 德国联邦经济与能源部通讯，“直接能源转型”（2021），“新专家意见审视：欧洲的能源供应在 2030 年之前是否依然安全”，网址为 <https://www.bmwi-energiewende.de/EWD/Redaktion/EN/Newsletter/2021/07/Meldung/news2.html>。

⁷³ 德国联邦经济与能源部（2021），“代表联邦经济和能源部所做‘监测欧洲市场的资源充裕性’研究的分类”，网址为 https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/G/gutachten-angemessenheit-der-ressourcen-begleitdokument.pdf?__blob=publicationFile&v=8，第 2 页。

⁷⁴ 德国联邦经济与能源部（2021），“代表联邦经济和能源部所做‘监测欧洲市场的资源充裕性’研究的分类”，网址为 https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/G/gutachten-angemessenheit-der-ressourcen-begleitdokument.pdf?__blob=publicationFile&v=8，第 2 页。

⁷⁵ 德国联邦经济与能源部（2021），“代表联邦经济和能源部所做‘监测欧洲市场的资源充裕性’研究的分类”，网址为 https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/G/gutachten-angemessenheit-der-ressourcen-begleitdokument.pdf?__blob=publicationFile&v=8，第 3 页。

⁷⁶ r2b 能源咨询、Consentec、弗劳恩霍夫太阳能系统研究所、TEP Energy（2021 年），“监测欧洲市场的资源充裕性”，网址为

https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/angemessenheit-der-ressourcen-an-den-europaeischen-strommaerkten.pdf?__blob=publicationFile&v=18，第 41-42 页。

⁷⁷ 德国联邦经济与能源部（2021），“代表联邦经济和能源部所做‘监测欧洲市场的资源充裕性’研究的分类”，网址为 https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/G/gutachten-angemessenheit-der-ressourcen-begleitdokument.pdf?__blob=publicationFile&v=8，第 3 页。

⁷⁸ 德国联邦经济与能源部（2021），“代表联邦经济和能源部所做‘监测欧洲市场的资源充裕性’研究的分类”，网址为 https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/G/gutachten-angemessenheit-der-ressourcen-begleitdokument.pdf?__blob=publicationFile&v=8，第 3 页。

⁷⁹ 德国联邦经济与能源部（2021），“代表联邦经济和能源部所做‘监测欧洲市场的资源充裕性’研究的分类”，网址为 https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/G/gutachten-angemessenheit-der-ressourcen-begleitdokument.pdf?__blob=publicationFile&v=8，第 3 页。

⁸⁰ 比较：德国联邦经济与能源部（2021），“代表联邦经济和能源部所做‘监测欧洲市场的资源充裕性’研究的分类”，网址为 https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/G/gutachten-angemessenheit-der-ressourcen-begleitdokument.pdf?__blob=publicationFile&v=8，第 3-4 页。

⁸¹ 欧洲输电系统运营商网络（ENTSO-E）（2020），“中期充裕度预测”，网址为 <https://www.entsoe.eu/outlooks/midterm/>。

-
- ⁸² 欧洲输电系统运营商网络 (ENTSO-E) (2020), “中期充裕度预测-附件 1 详细结果和输入数据”, 网址为 https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/sdc-documents/MAF/2020/MAF_2020_Appendix_1_Input_Data_Detailed_Results.pdf, 第 7 页。
- ⁸³ 德国联邦经济与能源部 (2021), “代表联邦经济和能源部所做‘监测欧洲市场的资源充裕性’研究的分类”, 网址为 https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/G/gutachten-angemessenheit-der-ressourcen-begleitdokument.pdf?__blob=publicationFile&v=8, 第 4-5 页。
- ⁸⁴ 2021 年 3 月 16 日, 德国联邦网络管理局 (BNetzA) 组织的“供电安全监测”利益相关方会议期间, 德国联邦网络管理局做出的幻灯片演示, 第 3 页。
- ⁸⁵ 德国联邦网络管理局 (BNetzA) 的书面答复。
- ⁸⁶ 德国联邦网络管理局 (BNetzA) 的书面答复。
- ⁸⁷ 德国联邦网络管理局 (BNetzA) 的书面答复和 2021 年 3 月 16 日, 德国联邦网络管理局 (BNetzA) 组织的“供电安全监测”利益相关方会议期间, 德国联邦网络管理局做出的幻灯片演示, 第 8 页。
- ⁸⁸ 2021 年 3 月 16 日, 德国联邦网络管理局 (BNetzA) 组织的“供电安全监测”利益相关方会议期间, 德国联邦网络管理局 Franziska Adamek 博士做出的幻灯片演示, “监督供应安全性介绍”, 第 9 页。
- ⁸⁹ 2021 年 3 月 16 日, 德国联邦网络管理局 (BNetzA) 组织的“供电安全监测”利益相关方会议期间, 德国联邦网络管理局做出的幻灯片演示, “监督供应安全性介绍”, 第 7 页。
- ⁹⁰ 德国联邦网络管理局 (BNetzA) 的书面答复。
- ⁹¹ 2021 年 3 月 16 日, 德国联邦网络管理局 (BNetzA) 组织的“供电安全监测”利益相关方会议期间, 德国联邦网络管理局做出的幻灯片演示, 第 6 页。
- ⁹² 德国联邦网络管理局 (BNetzA) 的书面答复。
- ⁹³ 德国联邦网络管理局, “容量储备”, 网址为 https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/KapRes/kapres-node.html 和 Next Kraftwerke, “什么是电网储备、容量储备和安全准备?”, 网址为 <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/netzreserve-kapazitaetsreserve-sicherheitsbereitschaft>。
- ⁹⁴ 欧盟委员会 (2018), “国家补助: 委员会批准确保比利时、法国、德国、希腊、意大利和波兰供电安全的六个电力容量机制”, 2018 年 2 月 7 日, 网址为 https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_18_682。
- ⁹⁵ r2b 能源咨询、Consentec、弗劳恩霍夫太阳能系统研究所、TEP Energy (2021 年), “监督欧洲市场资源充裕性”, 网址为 https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/angemessenheit-der-ressourcen-an-den-europaeischen-strommaerkten.pdf?__blob=publicationFile&v=18, 第 19 页。
- ⁹⁶ 弗劳恩霍夫太阳能系统研究所 (2021), “德国 2020 年净发电: 可再生能源第一次超过 50%”, 网址为 <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/news/2020/nettostromerzeugung-in-deutschland-2021-erneuerbare-energien-erstmal-ueber-50-prozent.html>。
- ⁹⁷ 德国联邦网络管理局 (BNetzA) 的书面答复, 第 4 页和欧洲委员会 (2018 年), “委员会于 2018 年 2 月 7 日关于援助 SA.45852 -2017/C (ex 2017/N) 计划 (德国建立容量储备) 的决定”, 网址为 https://ec.europa.eu/competition/state_aid/cases/269083/269083_1983029_170_2.pdf。

⁹⁸ r2b 能源咨询、Consentec、弗劳恩霍夫太阳能系统研究所、TEP Energy (2021 年), “监督欧洲市场资源充裕性”, 网址为

https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/angemessenheit-der-ressourcen-an-den-europaeischen-strommaerkten.pdf?__blob=publicationFile&v=18.

⁹⁹ Appunn, Kerstine (2021), “关停核电厂和燃煤电厂——德国能否仅依靠可再生能源维持供电安全?”, 网址为 <https://www.cleanenergywire.org/news/shutting-down-nuclear-and-coal-can-germany-maintain-supply-security-renewables-alone>.

¹⁰⁰ 路透社 (Reuters) (2020), “自 10 月起德国增加 1,056 兆瓦电力备用容量”, 网址为 <https://www.reuters.com/article/germany-electricity-networks/germany-adds-1056-mw-to-electricity-reserve-capacity-from-october-idUSL5N2AS740>.

¹⁰¹ 输电系统运营商 (2016), “2030 年电网发展规划情景框架。输电系统运营商草案”, 网址为 https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/paragraphs-files/160108_nep_szenariorahmen_2030.pdf, 第 17 页。

¹⁰² 输电系统运营商 (2020), “2035 年电网发展规划情景框架, 2021 年版本。输电系统运营商草案”, 网址为 https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/paragraphs-files/Szenariorahmenentwurf_NEP2035_2021_0_0.pdf, 第 18 页。

¹⁰³ 输电系统运营商 (2020), “2035 年电网发展规划情景框架, 2021 年版本。输电系统运营商草案”, 网址为 https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/paragraphs-files/Szenariorahmenentwurf_NEP2035_2021_0_0.pdf, 第 86 页。

¹⁰⁴ 输电系统运营商 (2021), “2035 年电网发展规划, 2021 年版本。输电系统运营商草案第二稿”, 网址为 https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/paragraphs-files/NEP_2035_V2021_2_Entwurf_Teil1.pdf, 第 101 页。

¹⁰⁵ Appunn, Kerstine (2021), “关停核电厂和燃煤电厂——德国能否仅依靠可再生能源维持供电安全?”, 网址为 <https://www.cleanenergywire.org/news/shutting-down-nuclear-and-coal-can-germany-maintain-supply-security-renewables-alone>.

¹⁰⁶ 德国联邦经济与能源部 (2020), “什么是电网储备、容量储备和安全备用?”, 网址为 <https://www.bmwi-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2020/09/Meldung/direkt-erklaert.html>.

¹⁰⁷ Appunn, Kerstine (2021), “关停核电厂和燃煤电厂——德国能否仅依靠可再生能源维持供电安全?”, 网址为 <https://www.cleanenergywire.org/news/shutting-down-nuclear-and-coal-can-germany-maintain-supply-security-renewables-alone>.

¹⁰⁸ 欧洲输电系统运营商网络 (ENTSO-E), “欧洲资源充裕度评估”, 网址为 <https://www.entsoe.eu/outlooks/eraa/>

¹⁰⁹ 德国联邦能源和水资源协会 (BDEW) (2018 年), “外国电厂容量在德国供应的可用性”, 网址为 https://www.bdew.de/media/documents/Awh_20180816_Verfuegbarkeit-auslaendischer-Kraftwerkskapazitaeten.pdf, 第 3 页

¹¹⁰ Solarify (2019 年), “麦肯锡: 煤炭逐步淘汰威胁供应安全”, 网址为 <https://www.solarify.eu/2019/09/05/238-mckinsey-kohleausstieg-gefaehrdet-versorgungssicherheit/>.

-
- ¹¹¹ “电力工业部关于颁发《电力发展规划编制原则》的通知,电计[1997]730号”,前电力工业部,1997年12月31日,网址为 <https://wenku.baidu.com/view/81af2boe941ea76e59fa0449.html>.
- ¹¹² “能源局关于印发《电力规划管理办法》的通知,国能电力[2016]139号”,国家能源局,2016年5月17日,网址为 http://www.gov.cn/gongbao/content/2016/content_5145577.htm.
- ¹¹³ 彭波、陈旭、董晓明,“协同新能源发展的电网规划关键技术研究”,南方电网技术,2014年。
- ¹¹⁴ “2017年电力供需分析报告”,国网能源研究院,2017年8月。第58页。
- ¹¹⁵ “电力工业部关于颁发《电力发展规划编制原则》的通知,电计[1997]730号”,前电力工业部,1997年12月31日,网址为 <https://wenku.baidu.com/view/81af2boe941ea76e59fa0449.html>.
- ¹¹⁶ “国家发改委 国家能源局关于印发能源发展“十三五”规划的通知,发改能源[2016]2744号”,国家发改委和国家能源局,2016年12月26日,网址为 http://www.sdpc.gov.cn/zcfb/zcfbghwb/201701/t20170117_835296.html;电力规划设计总院,第18页。
- ¹¹⁷ 韩小琪,“中国电力系统规划设计简介”,电力规划设计总院,2018年7月18日。关于电网规划程序的国际利益相关方研讨会,北京。第18页
- ¹¹⁸ “电力工业部关于颁发《电力发展规划编制原则》的通知,电计[1997]730号”,前电力工业部,1997年12月31日,网址为 <https://wenku.baidu.com/view/81af2boe941ea76e59fa0449.html>.
- ¹¹⁹ Jiang Lin 等人,“在可再生能源主导的中国电力系统情景下提高电网灵活性”,劳伦斯伯克利国家实验室,2021年8月,网址为 https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/final_national_plexos_081221_addappen_3.pdf.