

德国 100% 可再生能源电力系统稳定运行 路线图

发布时间：2023 年 11 月
由中德能源与能效合作伙伴梳理并总结

目录

1 背景.....	- 2 -
2 现状问题梳理：目标与挑战	- 2 -
1) 可再生能源与逆变器.....	- 3 -
2) 转移和分散化.....	- 3 -
3) 电网与供电恢复	- 4 -
4) 功率波动	- 5 -
5) 电力跨区传输.....	- 5 -
6) 优化和提高电网利用率	- 5 -
7) 部门耦合、数字化和灵活性	- 6 -
8) 网络物理弹性.....	- 6 -
3 组织管理任务	- 7 -
4 稳定性流程及措施	- 8 -
1) 频率	- 8 -
2) 电压.....	- 9 -
3) 谐振稳定性.....	- 9 -
4) 短路电流	- 10 -
5) 功角稳定	- 11 -
6) 电网运行	- 11 -
7) 黑启动	- 12 -
5 实施路径和里程碑	- 13 -

1 背景

为实现碳中和目标，德国电力系统将逐步实现 100%可再生能源供电。同时，传统的发电厂正在逐步退出历史舞台。即将退役的大型发电厂主要为输电网供电，而风电和光伏发电系统则主要接入配电网。在用电负荷方面，随着电动汽车的普及、热泵的广泛应用、工业流程的电气化以及电解槽制氢等，电气化趋势日益明显。此类用电需求的变化也主要集中在配电网层面。以上变化对未来电力系统的安全性和稳定性提出了新的挑战。

在此背景下，德国 100%可再生能源电力系统稳定运行路线图（以下简称“路线图”）应运而生。该路线图制定了确保电力系统在 100%使用可再生能源情境下安全稳定运行的行动方案，旨在解决这一系统变革带来的问题。

德国在 2021 年联合执政协议中首次提出了制定路线图，并启动了涉及所有利益相关方的广泛讨论与研究。该路线图由德国联邦经济和气候保护部（BMWK）牵头制定，参与方包括德国联邦网络局（BNetzA）、输电网运营商、系统制造商、行业协会、标准化协会和科学界学者等。路线图于 2023 年 11 月正式发布。

2 现状问题梳理：目标与挑战

路线图整体描绘了未来电力系统使用 100%可再生能源时面临的安全稳定方面的挑战。由于大量不确定性因素的存在，对这些分析的理解应该独立于发电厂投资组合构成的精确场景之外。虽然与市场供应安全和电网扩建相关的问题对未来电力供应也至关重要，但系统稳定性路线图侧重于技术稳定问题和电网的安全运行。因此，该路线图不对特定技术的发电或储能能力进行定量陈述。



1) 可再生能源与逆变器

a. 目标:

风电和太阳能发电将成为未来能源供应的重要支柱。它们需要借助逆变器技术并网。电力系统可在 100%使用可再生能源情境下实现安全稳定运行。逆变器技术可以在系统需要时提供足够的惯量、短路电流和短路功率，确保系统稳定运行。同时，逆变器通过动态电压调节功能，可以灵活地提供无功功率。此外，系统在电压质量方面应满足电压幅值、波形、频率和对称性方面的标准，确保高质量的电压水平。

b. 挑战:

- 随着传统发电厂的减少以及基于逆变器技术的发电厂的增加，《技术并网规则》需要进行相应调整。同时也需要为电网运行制定新的方案、流程和工具，还需特别关注系统在正常运行状态下的稳定性以及应对电网故障的能力。
- 逆变器不同于传统发电机，其行为更易受软件控制，具备更高的调节灵活性。但也需要对其制定明确的控制规则，并确保其实施得当，以使系统保持稳定。
- 由于传统发电厂提供的旋转惯量逐渐减少，负荷需求增加、峰谷差率拉大，系统稳定性面临更多挑战，尤其是在高负荷传输期间出现系统分裂等高故障风险的情况下。在这种情境下，系统需要利用所有可用资源来提供惯量，因此逆变器的作用显得尤为重要。发电设施和负荷的关键参数需要重新调整，以适应新的系统需求。
- 基于构网型逆变器的发电和消费设备的运行，依赖于并网点所在区域的稳定电压和足够大的短路比（SCR6）。为了确保这一短路比，必须始终确保具备足够的短路容量。需明确动态电压控制要求以及提供为维持电压稳定所需的动态无功功率。此外，还需要评估是否需要新的电网保护方案，或确保现有的电网保护方案不受影响。如果某一电网节点上活跃的构网型逆变器过多，过高的短路容量也可能带来风险。
- 针对短路容量需要全面考虑以下技术细节，确保电力系统在故障发生时能够可靠响应并自我保护：并网点的电网强度、保护装置的跳闸、谐波的衰减机制以及故障传播（放电电压模式）。随着逆变器技术的普及，这些局部问题将变得更加突出，需制定合适的评估标准。
- 提供辅助服务时，必须在保障系统安全和满足系统需求的前提下，找到一种经济高效的采购方案，包括容量、服务提供和调用方式。这可以通过强制性措施（如设定最低要求）、市场化手段或集成式电网组件（FINC），以及这些方案的合理组合来实现，甚至可以跨越不同的电压等级。针对设计方案和具有经济性的替代方案，需制定相应的激励机制，开发并网用户的额外潜力。需要注意的是，分布在各级电网的电力用户，可能会产生电网升级的后续成本，这些成本必须纳入经济分析中。
- 逆变器和分散控制系统可能导致功率振荡问题，需采取合理的控制方案或阻尼措施，以确保系统的稳定性。

2) 转移和分散化

a. 目标:

随着传统发电厂逐渐减少，输电网可提供的系统辅助服务（如频率和电压调节、无功功率补偿等）不再像过去那样充足，因此，系统稳定性越来越依赖于配电网中的发电和用电设施的特

性。为实现稳定运行，必须借助分布在配电网中的小型发电站、储能系统以及用户提供必要的辅助服务。

b. 挑战：

- 随着接入配电网的电力设施数量的不断增加，以及对配电网提供辅助服务的需求上升，电网运行管理的复杂性和对电网运营商之间协作的要求显著提高，尤其对自动化通信的需求尤为突出。
- 系统结构的分散化可能导致电网静态和动态特性可能发生变化。逆变器的高密度分布可能会造成相互影响。因此，必须通过合理的系统设计和电力用户布局来限制和抑制这些相互影响，并确保能够及时监测和处理这些潜在问题。

3) 电网与供电恢复

a. 目标：

电网和供电恢复过程将涉及大量接入配电网的分散式发电厂站、储能设施和用户。通过验证和测试各组件的特性、子系统的行为，以及在新的恢复框架下与所有利益相关方协同演练流程，确保各方在必要时具备有效应对能力，并将这些措施作为常规运营的一部分加以实施。在正常运行和恢复过程中，已建立起有效的流程协同机制。

在输电网层面，国家输电系统运营商（TSO）将建立国家级核心电网，以实现跨区域的电力传输，并在发生大规模停电后，可尽快将德国输电网重新接入欧洲互联电网。为了能够在一定区域内向用户恢复供电，即使在恶劣天气条件下，也要确保发电能力和能源供应量可以迅速地满足需求。一旦电网和系统要求不再占主导地位，各地区之间应明确优先供应和协作供应的原则。必须确保足够的发电能力和电力供应能力，并能够在恶劣天气条件下迅速提供所需的电力容量。电网和系统需求不再是主导因素时，关于供应优先级和区域间供应互剂的具体指导方针将得到明确规定。

b. 挑战

- 合理的采购方案必须确保每个 TSO 都拥有数量充足（含备用设施）且分布均匀的黑启动设施，用于电网恢复。这些黑启动设施需能储备足够的电力，确保在没有外部电源支持的情况下能自我启动，从而为电网恢复提供必要的初始电力支持。
- 由于可再生能源发电厂的电力供应存在不稳定性，必须制定明确的要求将其有效纳入供电恢复方案中。
- 必须确保某些发电和用电系统与电网运营商之间的通信和协调在停电情况下不受影响。
- 在电网和供电恢复中，TSO 和配电系统运营商（DSO）的角色和任务需适应日益分散的发电模式。TSO 负责协调所有配电网的快速供电恢复，并与下游 DSO 之间建立交互联系，以便 TSO 能够及时掌握配电网的现状和潜力。
- 通过构网型逆变器接入配电网的可再生能源系统必须为系统稳定性做出重要贡献。这些可再生能源系统应具备在出现故障时维持配电网孤岛电网稳定运行的能力，同时需要具备充足的频率和电压调节能力。此外，配电网中应建立聚合系统，以使大量分散式发电厂和储能设施能够参与有功功率管理（例如配电网中的电网控制器和区域发电厂）。

4) 功率波动

a. 目标

由跨区域电力传输、极端环境条件变化以及市场行为导致的功率波动，均已得到控制。未来，这些波动将主要由发电波动性和区域性差异引发，同时也受消费者行为变化的影响。

b. 挑战

- 由于光伏和风电装机容量的增加，在日出和日落时段以及风速骤变时会出现较大的功率波动。考虑到当前市场产品的时间尺度为每 15 分钟一次，这些变化可能会导致对调节备用容量的需求显著增加。
- 通过逆变器接入的电力用户，在市场出清时段开始和结束时的功率波动可能具有很高的同时性，这种功率的同步变化也可能与风力发电机的启动或关闭同步而加剧，需要事先采取措施避免或限制此类波动。对此，需要针对功率变化速率制定更加有效的规定。
- 为保持和稳定系统电压，较大的功率波动将增加对动态无功功率的需求，而提供动态无功功率的传统发电厂比例正在下降，这使得电力系统面临更大挑战。

5) 电力跨区传输

a. 目标

尽管区域间和跨区域的电力传输逐渐增多，但即使在发生严重的系统故障（如电网分裂）的情况下，系统的稳定性仍然必须得到保障。为应对各种可能的电力系统故障，需要基于典型案例进行分析，进而明确应对措施。

b. 挑战

- 为应对欧洲范围内更大的电力传输中断，惯量的需求将大幅增加。这种情况比常规故障更为复杂，因此必须评估在这种情况下的瞬时备用需求。同时，还需要研究如何通过合理的稳定机制来替代瞬时备用，以确保系统稳定。在这种情况下，应利用合理的措施组合，如快速调节备用、低频稳态调节（LFSM）和减载措施等。
- 保障系统稳定性的要求不仅仅涉及单一国家，而是覆盖整个欧洲互联电网。这需要确定统一的系统参数（例如惯量、有功功率控制速率、电压调节、保护和调节方案）以及跨国的协调合作体系，从而确保电网的整体稳定性。
- 随着频率对负荷和发电调节的影响越来越大，频率相关的调节（特别是过频和欠频时的调节）变得尤为重要。针对不同的频率情况，需要确保能够适时调节负荷和发电，以保持系统稳定。

6) 优化和提高电网利用率

a. 目标

由于市场驱动的跨区域电力传输、部门耦合及供电分散化，电网的传输需求日益增加且波动性增强。除了加快必要的电网扩建，还需进一步提高现有电网的利用效率，并确保电网运行的安全性。例如，可以通过负荷流量控制、电网保护性运行、基于天气的架空线路管理以及动态稳定性分析等手段实现。

b. 挑战

- 需要深入研究电网规划的长期目标，并评估预期瓶颈的问题是否应利用系统控制方案来解决。
- 由于负荷加重，电网对静态和动态无功功率的需求也显著上升。这使得无功功率调节变得愈发重要，静态和动态无功功率源必须始终保持可用状态。
- 对跨电网和跨区域的运行管理与协作的需求显著增加。
- 将在不同的电网层级逐步引入修正性运行管理，以完善现有的电网拥堵管理流程，从而有效缓解电网压力。

7) 部门耦合、数字化和灵活性

a. 目标

所有相关的发电设施、可调节负荷设备、储能装置以及各级电网运行设备均借助安全的信息通信技术设施进行互联，并能够根据电网的需求进行灵活调度。推动与其他能源部门的耦合，实现协同效应，同时积极开发数字化和灵活化的潜在优势。

b. 挑战

- 在配电网中，电网运行需要充分利用灵活性资源。为此，需实现对多样的灵活负荷进行调度管理，而这需要安全有效的信息通信技术设施来支撑。
- 通过灵活性资源支持电网运行，有助于优化配电网利用效率。为此，需创造有利的规划与监管环境，并协调解决与能源市场之间的利益冲突。
- 为实现灵活的预防性调度和实时调度（例如负荷削减、再调度等），电网运行管理的复杂性逐步增加。特别是在发生中断的情况下，各层级电网间的通信需求显著提升。
- 特别是在市场化交易的情况下，新的负荷（如电动汽车和电力多元化转换设施）可能在本地引起较高的负荷峰值。为有效利用此类负荷，需进一步明确提供辅助服务的技术规格。
- 电网并网点以及电解槽的设计必须确保与电网适配，保证其在正常和高峰期运行时期对系统不会造成过大负荷波动。

8) 网络物理弹性

a. 目标

确保系统在信息与通信技术基础设施、核心技术硬件和保护系统遭受破坏的情况下，依然具备运行能力。利用强大的控制和通信机制有效防范网络攻击及对 IT 系统的破坏。

b. 挑战

- 随着能源系统的数字化深入推进，信息与通信技术基础设施的稳定性变得愈发关键。为了应对网络攻击及大规模 IT 故障带来的影响，系统必须具备与电力用户通信中断情况下继续稳定运行的能力。这意味着整个能源系统应具备极强的应对能力，在任何意外情况下都能恢复系统稳定。
- 在通信中断等故障情况下，所有与系统相关的流程和工具必须具备备用方案，以维持受限但稳定的系统运行。为了确保这种受限操作模式下的最低供应要求，需确定相应的备用容量和辅助服务（SDL）的种类和规模。

3 组织管理任务

路线图的目标是为 100% 可再生能源电力系统制定一个明确的实施路径。该路线图旨在阐明实现目标所需的流程和现有流程中需要加速推进或调整的部分，以及如何将这些流程整体纳入能源转型的路线中。在该路线图中，“流程”一词涵盖所有旨在保障电网系统稳定性的措施。

- **责任划分：**除了明确需要启动或调整哪些流程外，确定每个流程的责任归属也是路线图的核心组成部分。首先，流程协调人需要确保相应流程的实施。根据不同流程的特点，可能需要其他利益相关方的参与或配合。明确这些额外的利益相关方的职责和角色也是该项目的重要任务之一。
- **时间安排：**由于实现能源系统碳中和的时间表十分紧迫，路线图的另一个关键关注点是协调各项行动的时间安排。因此，必须尽早启动各项进程，并合理规划时间，以确保每个进程都能在合适的时间节点顺利推进。
- **寻求共识：**电网稳定性的实现涉及多个利益相关方，情形复杂且需始终确保供电安全。因此，各方应密切合作，共同制定系统稳定性路线图。这一过程应从整体系统视角出发，结合深厚的专业知识，确保最终方案具有可操作性。同时，各利益相关方的共识至关重要，特别是在后期实施阶段，若各方对路线图目标达成一致，将促进高效的合作与协调。
- **谁在什么时候做什么？**路线图的核心问题可以总结为：在实现能源系统碳中和，谁应在什么时候采取哪些措施来确保系统稳定性？路线图的作用并不是直接实施这些流程，而是发挥协调功能，明确责任，并确保及时启动所有必要的进程。路线图发布后，德国联邦劳工部和德国国家电网将支持其实施。各利益相关方之间将继续保持对话和协调，必要时对已确定的流程进行调整。部分流程的实施已经启动。

路线图的工作共分为六个步骤，具体如下图所示。



4 稳定性流程及措施

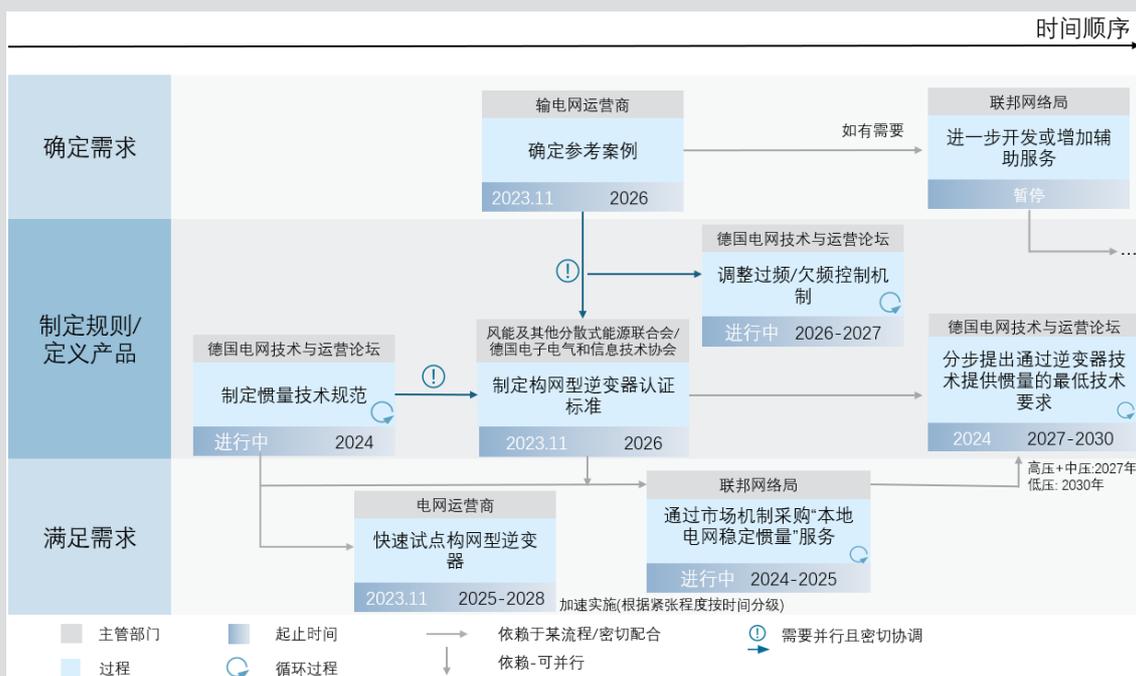
该路线图详细描述了为维持系统稳定所需的必要调整。这一过程需要所有利益相关者之间的紧密协作与高度配合。如果缺少额外人力资源的支持，路线图将难以按计划进度实施。由于实施该路线图的任务量较大，因此需要采取多线并行的推进策略。以此路线图为共同目标，相关方之间的交流与合作是其顺利实施的关键。因此，提前识别并解决可能出现的不确定性或潜在冲突至关重要。德国联邦经济事务与气候行动部（BMWK）将与联邦网络管理局（BNetzA）共同监督该路线图的执行，并在进程滞后时提供支持。

该路线图共确定了 41 个稳定性流程和 10 个连接性流程。稳定性流程涵盖以下七个主题，每个主题都包含其特定的稳定性措施。连接性流程则指跨越各主题的流程，涉及跨领域的调整、发展或决策，因此这些流程的责任将分配给多个机构来共同承担。所有流程的实施都需要在协调下进行，并将受到持续监测。

下文将介绍七个主题的稳定性流程。

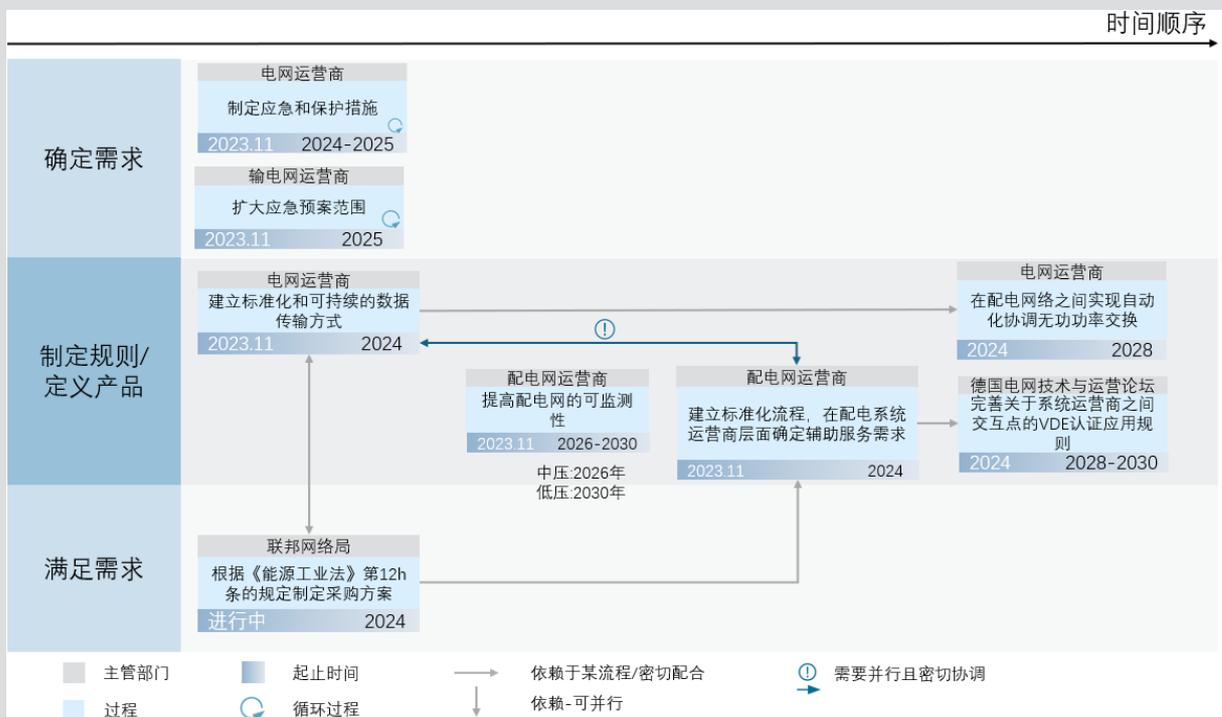
1) 频率

- a. 制定惯量技术规范
- b. 通过市场机制采购“本地电网稳定惯量”服务：制定采购方案，明确采购范围和适用的区域
- c. 适应电力系统在功率波动（过频或欠频）情况下的控制需求
- d. 确定参考案例，特别是电网系统解列的情形，并分析需求
- e. 分步提出通过逆变器技术提供惯量的最低技术要求
- f. 制定构网型逆变器认证标准
- g. 快速试点构网型逆变器，以积累经验和完善技术规则
- h. 进一步开发或增加辅助服务，如频率调节备用



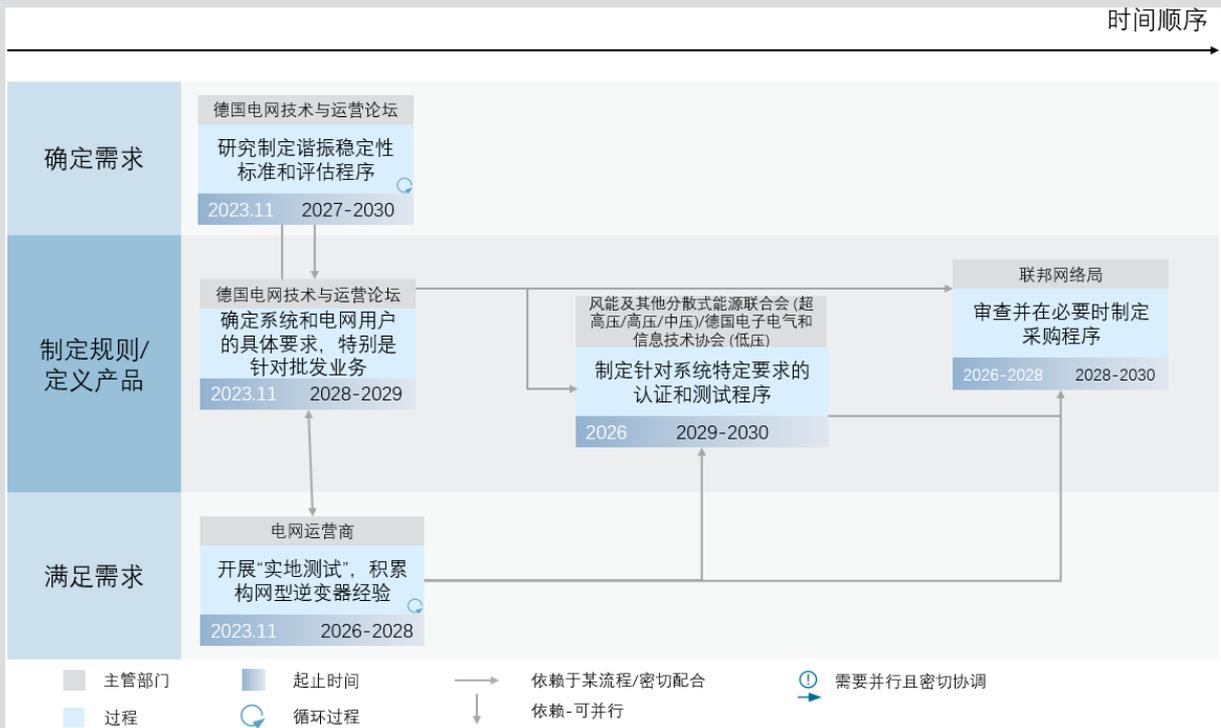
2) 电压

- 扩大应急预案范围，以应对“最坏情况”场景（如电网系统解列），包括对未来年份的风险评估和电网负荷情况分析
- 建立标准化流程，在配电系统运营商（DSO）层面确定辅助服务需求，作为电网扩建计划的一部分
- 在 TSO 与 DSO、DSO 与 DSO 之间建立标准化和可持续的数据传输方式
- 根据《能源经济法》第 12h 条引入采购方案，其中包括不同系统运营商之间的无功功率交换以及“转嫁费用”等内容
- 提高配电网的可监测性
- 系统运营商之间无功功率交换的自动化调用与协调
- 制定应急和保护措施（如系统保护计划和网络规范的实施），以避免电力系统发生电压崩溃情况
- 完善关于系统运营商之间交互点的 VDE 认证应用规则



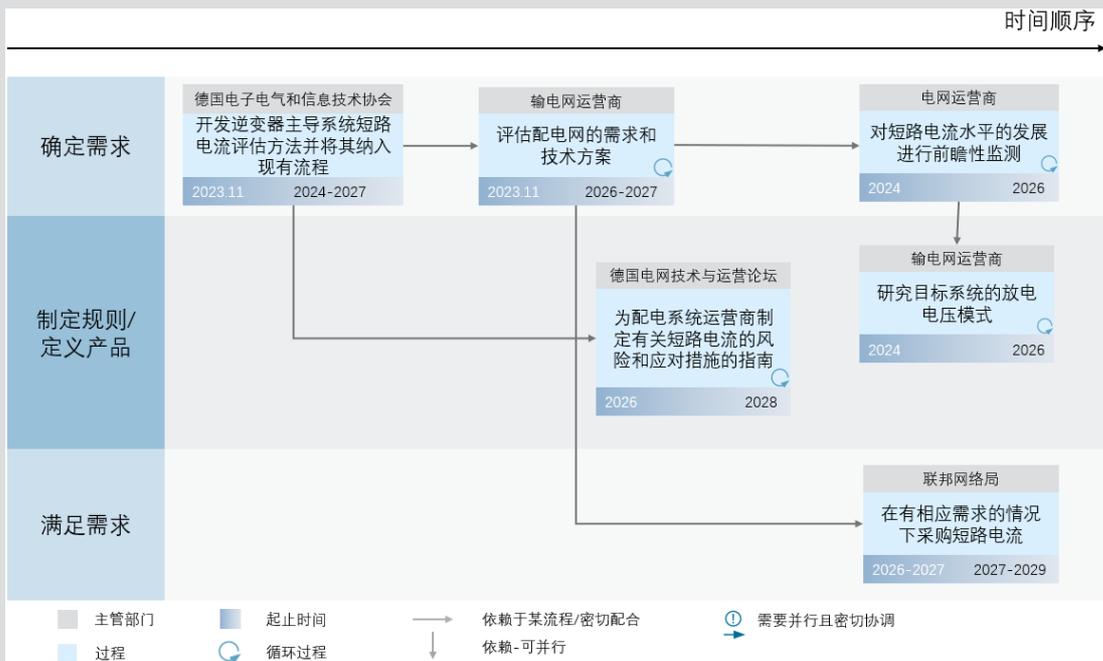
3) 谐振稳定性

- 研究制定谐振稳定性标准和评估程序
- 明确系统和电力用户的具体要求，特别是针对批发业务
- 制定针对系统特定要求的认证和测试程序
- 审查并在必要时制定采购程序
- 开展“实地测试”，在谐振稳定性方面积累构网型逆变器的经验



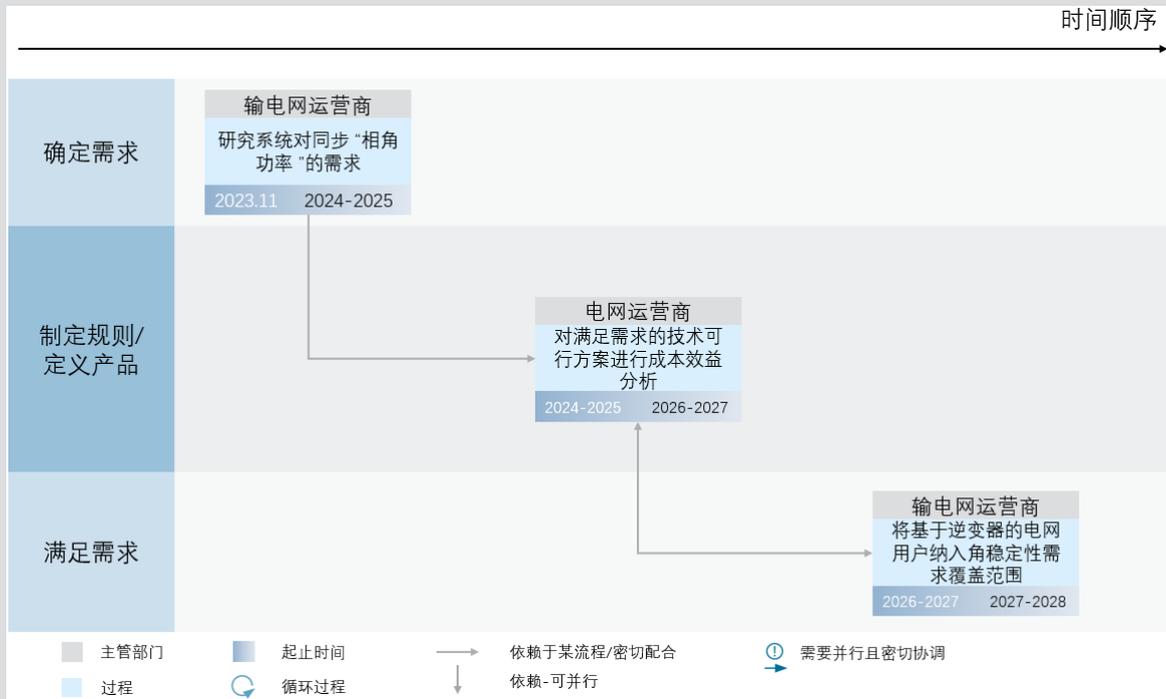
4) 短路电流

- 开发逆变器主导系统短路电流评估方法并将其纳入现有流程
- 在初步评估显示有相应需求的情况下, 制定短路电流的采购程序
- 评估配电网的需求和技术方案
- 为配电系统运营商制定有关短路电流的风险和应对措施的指南
- 对短路电流水平的发展进行前瞻性监测 (特别是在 TSO/DSO 互联点上)
- 研究目标系统的放电电压模式, 包括评估放电电压模式的变化特征



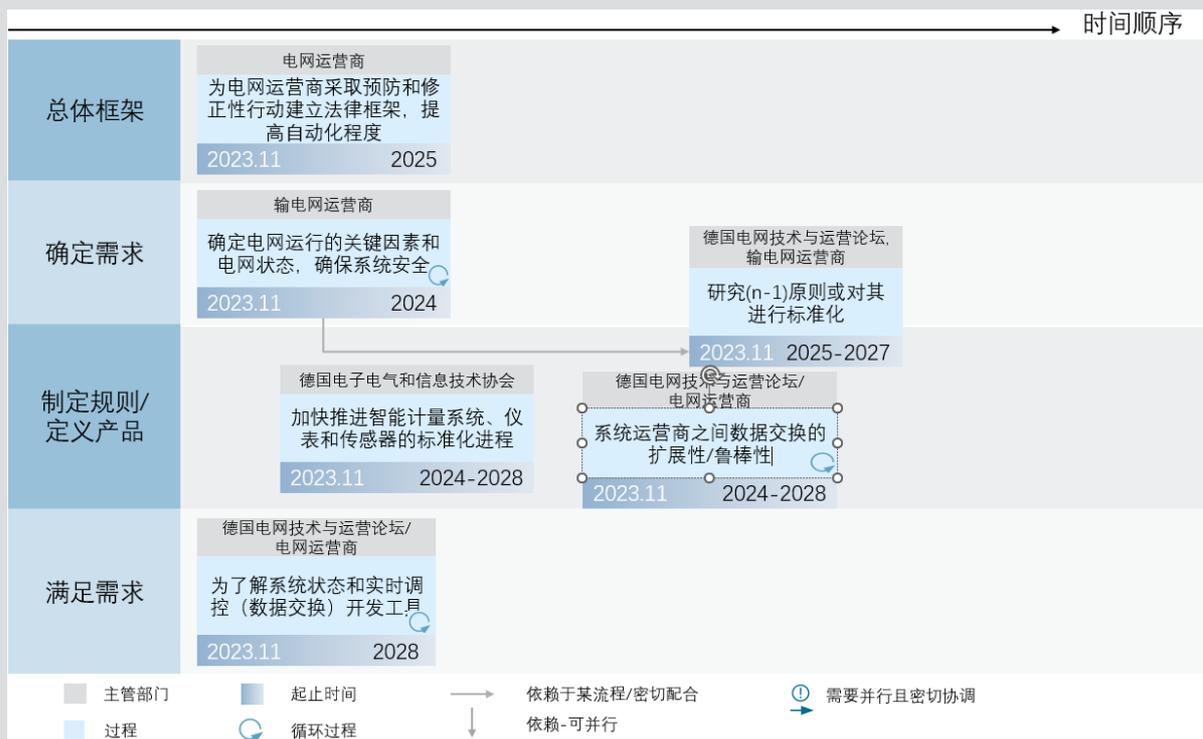
5) 功角稳定

- 研究系统对同步“相角功率”的需求
- 对满足需求的可行技术方案进行成本效益分析
- 将基于逆变器的电力用户纳入功角稳定性需求的覆盖范围



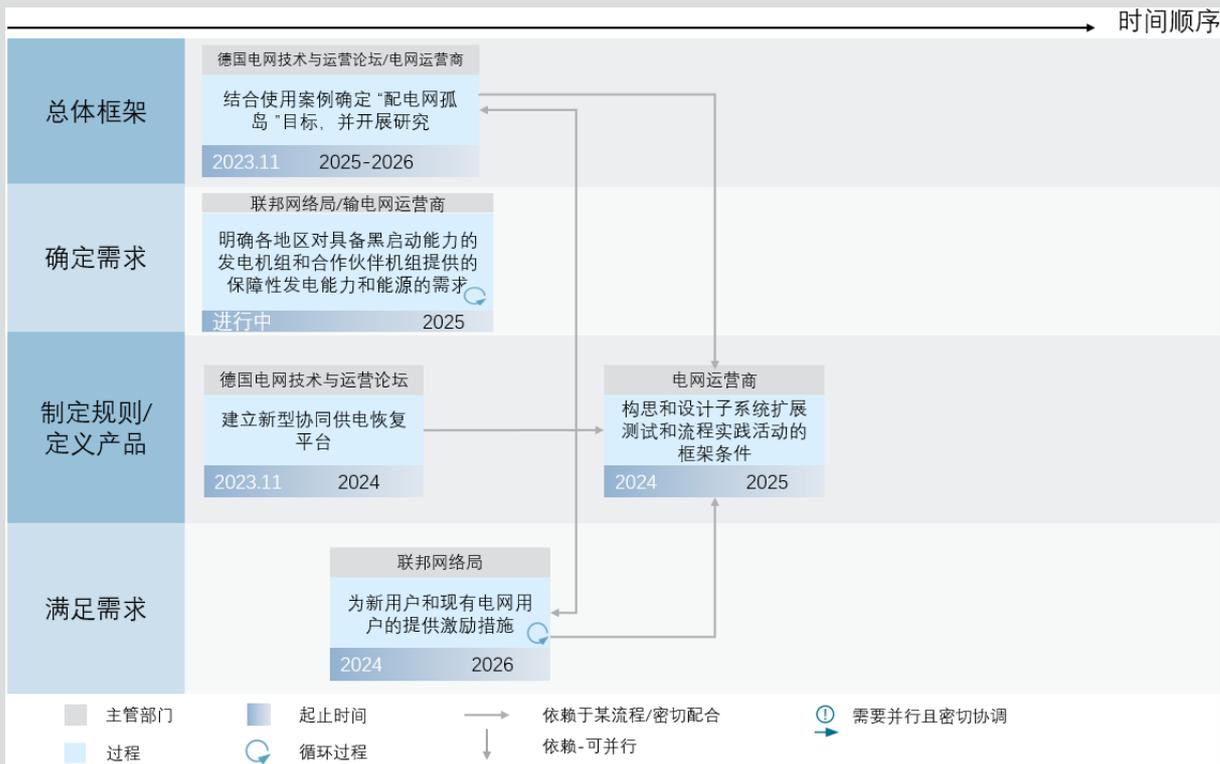
6) 电网运行

- 确定电网运行的关键因素和电网状态，确保系统安全
- 研究 n-1 原则并在必要时对其进行标准化
- 为了解系统状态和实时调控（数据交换）开发工具
- 系统运营商之间数据交换的扩展性/鲁棒性
- 加快推进智能计量系统、仪表和传感器的标准化进程
- 为电网运营商的预防和修正措施建立法律框架，提高系统自动化程度



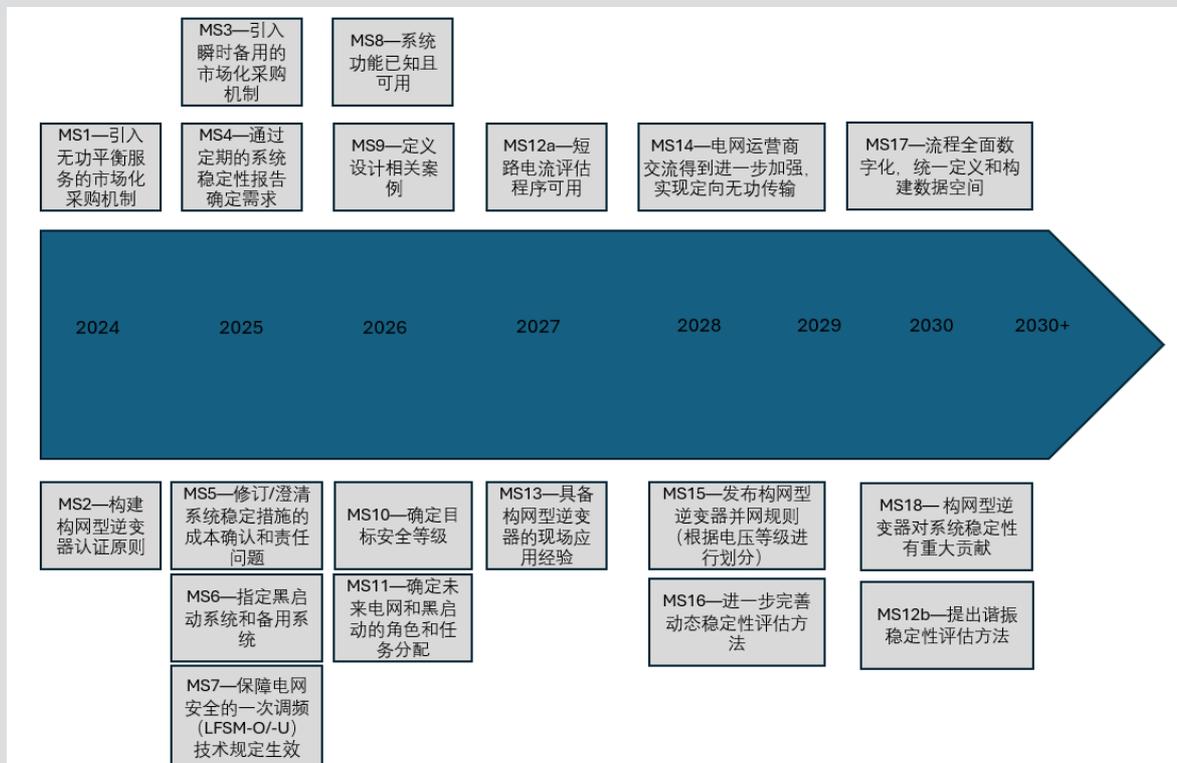
7) 黑启动

- a. 明确各地区对具备黑启动能力的发电机组和合作伙伴机组提供的保障性发电能力和能源的需求
- b. 建立新型协同供电恢复平台（如德国电网技术与运营论坛运营的“电网与供电恢复平台”）
- c. 构思和设计子系统扩展测试和流程实践活动的框架条件
- d. 结合实践案例确定“配电网孤岛”目标，并开展研究
- e. 为新用户和现有电力用户提供激励措施



5 实施路径和里程碑

该路线图确定了 18 个里程碑，如下图所示。



基于以上里程碑，实现德国 100%可再生能源电力系统稳定运行路线图可分为三步。

1) 第一步：确定安全等级和系统需求

在尚未明确具体情况时，必须确定电力系统目标安全等级，并在此基础上制定相应计划，同时考虑到可能需要应对的可预测和不可预测风险。全面防范所有潜在风险既不经济也不切实际，因此采取必要的措施是关键。通过确定的设计方案，可以量化并识别出系统辅助服务和其他稳定性措施的需求。在某些情况下，还需要进一步开发评估方法，以识别电力系统的其他需求（例如，基于逆变器的电力用户所需的短路电流贡献）。同时，必须建立全新的评估标准（如针对谐振稳定性的标准），这些标准应覆盖已知和未来潜在的辅助服务需求，以及其他确保系统稳定性的保障措施。

2) 第二步：满足系统需求和结构化采购

满足系统需求和结构化采购是第二条核心路径。为此，必须引入适当的采购程序，并补充并网技术规则和条例。在这一方面，电网资产和高压直流换流站都能起到重要作用。不仅需要进一步加强电网运营商与发电端和消费端之间的信息和数据交流，运营商之间的交流也至关重要。为了确保这些协调行动的顺利进行，还必须建立全面的数字化流程和标准化的数据共享平台。

3) 第三步：应用构网型逆变器

构网型逆变器是电力系统保持稳定运行的关键技术之一。目前仍缺少广泛的应用经验，需要通过试点测试来收集数据并确认其技术要求。此外，构网型逆变器应满足相应的并网规则（根据电压等级或功率等级进行区分），这些规则将有助于充分挖掘构网型逆变器的潜力（例如提供惯性），从而确保电力系统的稳定运行。

原文参考：System Stability Roadmap, BMWK, <https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Publikationen/Energie/system-stability-roadmap.html>

Initiated by:	Implementing organisation:
 Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action	 giz Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH