

德国莱茵TÜV 全球新能源并网与构网技术白皮书

版 权 声 明

本报告版权为德国莱茵 TÜV 所有，由德国莱茵 TÜV 负责发送和提供相关咨询服务。

德国莱茵 TÜV 对白皮书拥有唯一著作权。报告有偿提供给限定客户，应限于客户内部使用，仅供客户在分析研究过程中参考。如客户引用报告内容进行对外使用，所产生的误解和诉讼由客户自行负责，本单位不承担责任。如将来用作商业或其他用途，未经本公司同意，不得以任何异于本报告原样之装订或包装形式将本报告出借、转售、出租、或在网上发布。凡使用本报告者均受本条款及本报告一切有关版权之条款约束。

如未获得德国莱茵 TÜV 书面允许，不得用任何方式抄袭或翻印本报告任何部分之文字及图片，在任何媒体上（包括互联网）公开引用本报告的数据和观点，否则引起的一切法律后果由该使用者自行承担，同时其行为亦涉嫌侵犯了德国莱茵 TÜV 的著作权，德国莱茵 TÜV 有权依法追究其法律责任。

报告的所有图片、表格及文字内容的版权归德国莱茵 TÜV 所有。其中，部分图表在标注有数据来源的情况下，版权归属原数据所有公司。

凡有侵权行为的个人、法人或其他组织，必须立即停止侵权并对其因侵权造成的一切后果承担全部责任和相应赔偿。否则我们将依据中华人民共和国《著作权法》等相关法律、法规追究其经济 and 法律责任。

德国莱茵 TÜV 大中华区市场部



李卫春

TÜV莱茵大中华区

太阳能与商业产品服务 高级副总裁

全球电力电子产品服务 高级副总裁

前言

能源转型正在以前所未有的速度重塑全球电力系统。风电、光伏、储能等新能源装机规模持续攀升，叠加AI算力中心、新型负荷的爆发式增长，电源结构正在发生根本性变革：传统同步火电逐步退出，以电力变流器为核心的新能源装备，正在成为电网的主体力量。

长久以来，绝大多数新能源设备以跟网型模式运行，依赖同步电网提供稳定的电压与频率参考。但随着新能源占比不断提高，弱电网、高渗透电网、孤岛运行场景大量出现，仅依靠跟网技术，已经难以满足电网安全稳定运行的现实诉求。在此背景下，构网型技术从概念走向工程落地，成为行业关注的焦点。

与此同时，全球化业务拓展给产业带来新的挑战。世界各国电网架构强弱不一，并网准则、构网测试要求、仿真验证标准碎片化。设备厂商、系统集成商、电站业主在产品研发、项目开发、海外出海过程中，常常面临技术边界模糊、仿真建模口径不统一、测试验证缺少参考依据等现实难题。产业亟需一份立足全球视角，兼顾宏观格局、设备技术、工程实践的参考文献。

基于TÜV莱茵数十年在全球新能源并网、电力电子装备测试认证领域的技术积累，结合大量国内外项目实践经验，我们编撰了这本《全球新能源并网与构网技术白皮书》。本书从全球新能源发展态势与各国电网特征切入，系统梳理传统并网技术体系，重点解析构网装备核心技术特性、关键指标与测试要求，厘清EMT、RMS仿真建模的技术差异，结合真实工程案例剖析项目落地痛点，同时输出可落地的技术解决方案。书中亦整理全球电网机构名录与专业术语，力求兼顾宏观战略价值与一线工程师的工具属性。

我们清醒地认识到：新型电力系统不是构网技术对跟网技术的简单替代，未来将是跟网-构网设备共存互补的格局。构网技术不是营销噱头，而是高比例新能源电力系统下保障电网韧性的客观刚需。技术迭代永无止境，并网与构网相关标准、工程实践仍处在持续演进的过程中。

编写本白皮书，旨在抛砖引玉。希望能够为设备研发人员、电站运营商、出海从业者、投资机构提供体系化的技术参考，促进行业统一技术认知，规避项目风险，助力中国光储产业高质量创新，稳健走向全球市场。期待与行业各界同仁携手，共筑安全、韧性、可持续的全球能源新生态。

目录

第一章 全球新能源发展现状与趋势	5	第三章 电网技术市场调研	41	第七章 典型案例分析	135
◆ 1.1 风电	6	第四章 并网技术要求	49	第八章 TÜV莱茵解决方案	140
◆ 1.2 光伏	8	◆ 4.1 并网技术发展趋势	50	第九章 TÜV莱茵成功案例	143
◆ 1.3 储能	10	◆ 4.2 并网技术路线	54	附录一 全球电网公司	151
◆ 1.4 氢能	15	◆ 4.3 并网技术应用	61	附录二 术语表	158
◆ 1.5 电动汽车及充换电	17	◆ 4.4 低压电网并网技术要求	62		
◆ 1.6 AI数据中心	20	◆ 4.5 中高压电网并网技术要求	76		
◆ 1.7 全球电力需求现状及预测	22	第五章 构网技术要求	90		
第二章 全球电网结构	26	◆ 5.1 构网技术标准及核心要求	91		
◆ 2.1 电网概念	27	◆ 5.2 构网设备测试要求	102		
◆ 2.2 电网演进	28	第六章 电网接入仿真技术要求	122		
◆ 2.3 电网结构	35	◆ 6.1 仿真模型与验证：EMT VS RMS	123		
◆ 2.4 电力系统	36	◆ 6.2 变流器RMS仿真模型	124		
◆ 2.5 电网应用	37	◆ 6.3 变流器EMT仿真模型	130		
◆ 2.6 全球主要国家电网特征	38	◆ 6.4 常见的并网仿真平台	134		
◆ 2.7 新能源快速发展对全球电网的挑战	39				

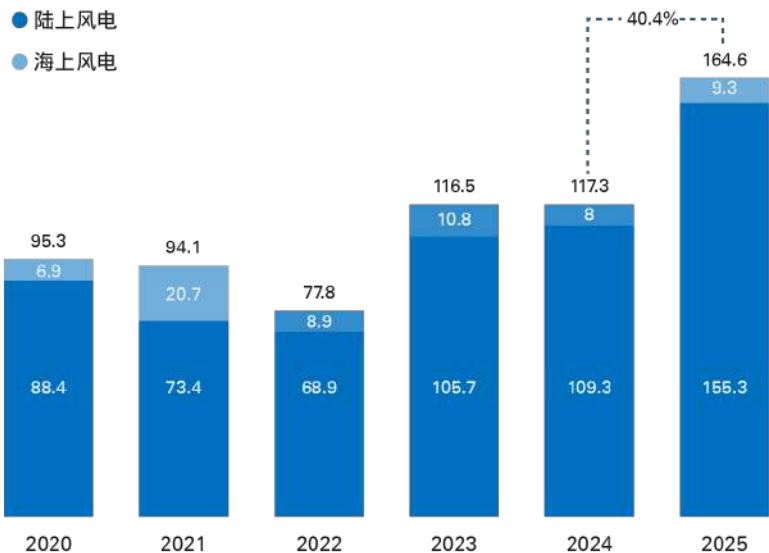
第一章 全球新能源发展现状与趋势



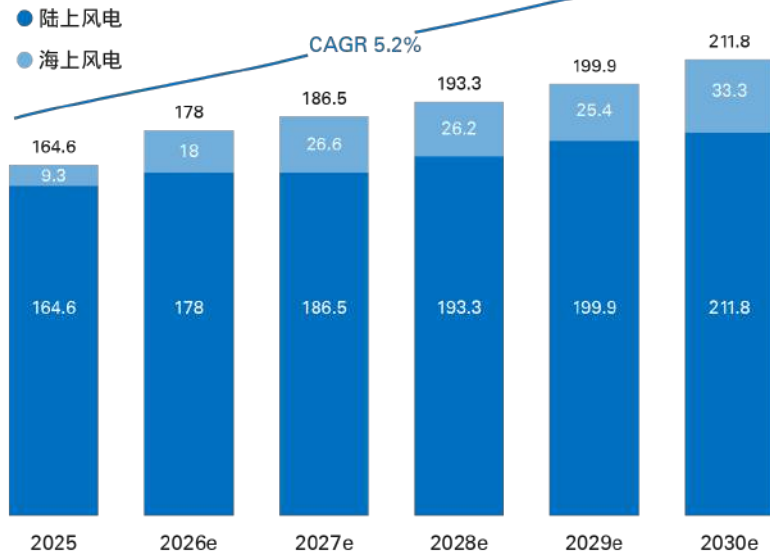
1.1.1 2025年全球风电市场概况

- 2025年，全球风力发电新增了165GW的并网容量，同比增长达到40%，全球风电累计装机容量达到1299GW，同比增长14%。
- 根据全球风能协会（GWEC）发布的《GWEC全球风能展望》显示，在2026年至2030年间，全球新增风电装机容量预计达到969GW，复合增长率为5.2%，2030年累计装机容量预计为2268GW，陆上风电仍占据主导地位，而海上风电在经历了一段调整期后，即将加速发展。

2020—2025年新增装机（GW）



2026-2030年预计新增装机(GW)

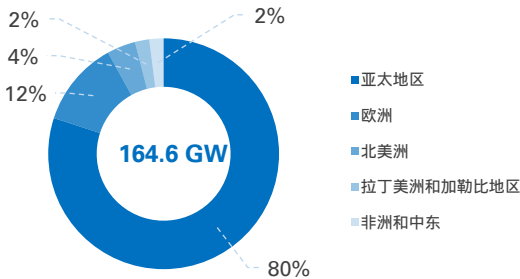


1.1.2 2025年全球主要风能市场表现

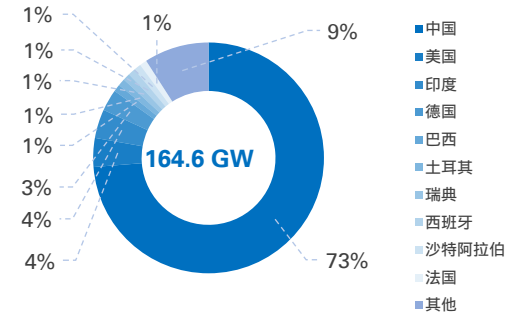
2025年全球新增装机的前五名依次为：中国、美国、德国、印度和巴西。这五个国家合计占2025年全球新增装机的86%，较上年提高5个百分点。这五个国家同时也是全球风电累计装机的前五名，合计占全球总装机容量的75%，较上年提高2个百分点。

2025年，亚太地区持续保持全球第一风电市场的领先地位，占据了全球80%的市场份额，其中，中国和印度合计新增超过126GW的风电装机。欧洲是全球第二大风电市场，新增风电装机容量19.1GW，同比增长16%，其中欧盟27国贡献了15.1GW。北美地区是全球第三大风电市场，其中美国的新增装机同比增长71%。拉丁美洲是第四大市场，但其市场份额同比下降了24%，其中智利的新增装机首次突破1GW，但巴西的新增装机下降近三分之一。中东和非洲地区新增装机容量同比增长32%。

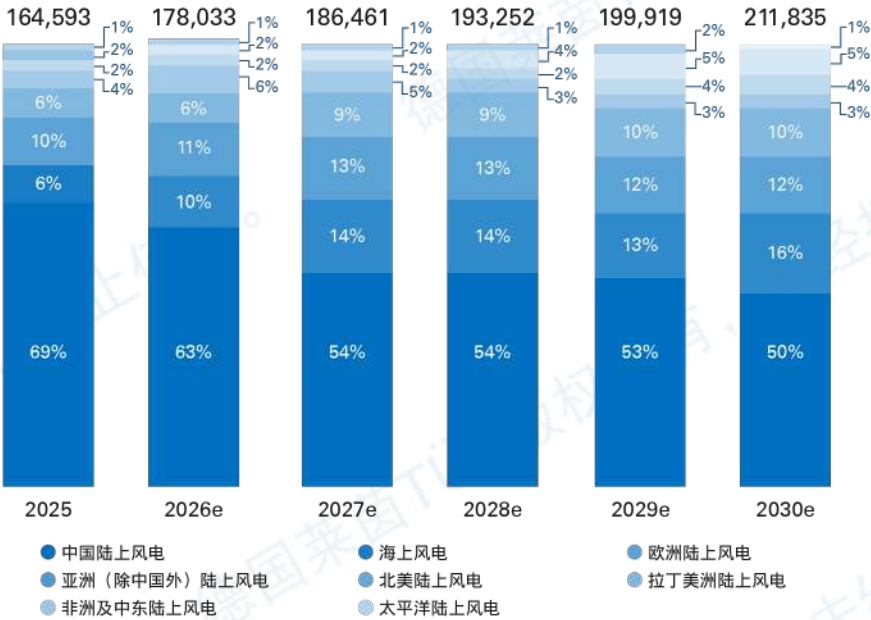
2025年全球新增装机地区占比（%）



2025年全球新增装机国家占比（%）



新增陆上和海上装机容量，分地区（MW,%）



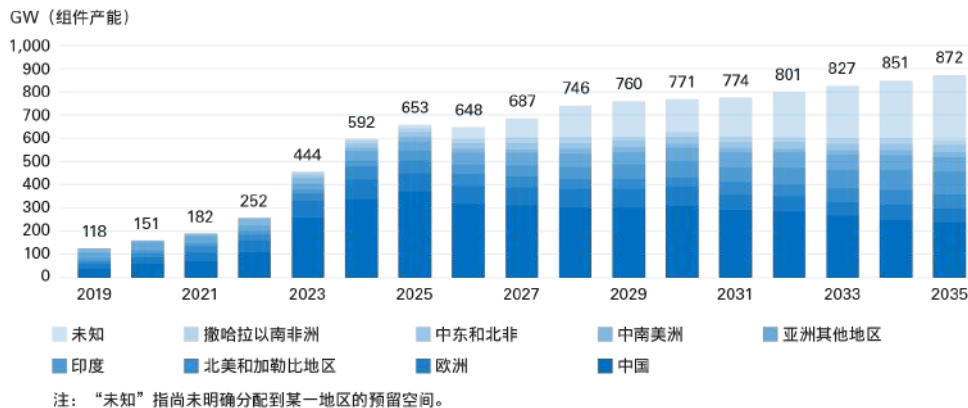
1.2 光伏

1.2.1 全球光伏装机概况

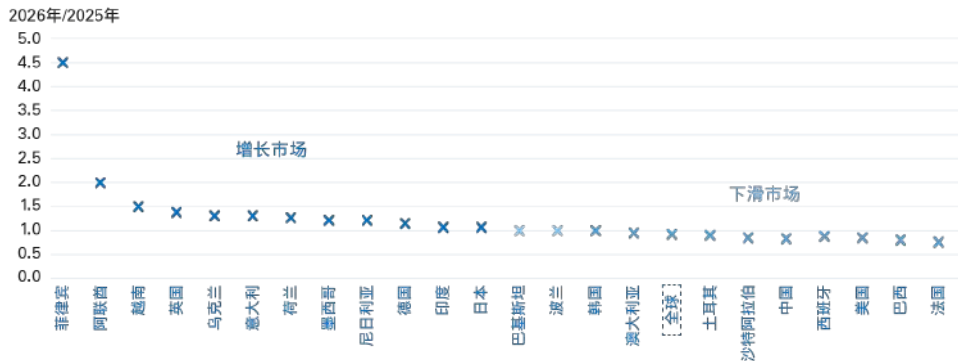
- ◆ 2025年全球光伏装机约为653GW，受到政策和市场饱和的影响，其中中国光伏装机出现较大回调。国际市场上，传统装机大国美国、法国、巴西等出现回调。
- ◆ 2026年全球光伏新增装机首次下行，全球预期装机648GW（DC），其中中国预期装机264GW（AC）/321GW（DC）。政策转向及市场饱和效应减缓投资活跃度是装机下降的主要原因，新兴市场光伏增长尚不足以弥补成熟市场降幅。预期全球装机最早在2027年恢复增长，但增幅放缓。
- ◆ 光伏配储项目快速发展，预期2026年三分之一地面电站项目会配置储能。但当前储能部署速度不足以支持更多光伏进入电网，现有储能装机容量仍难以满足将大量光伏余电转移至不同时段的需求。
- ◆ 市场新发展推动企业光伏购电协议增长及更多项目开发收购及合作。
- ◆ 关税政策继续重塑全球光伏供应链。
- ◆ 大宗商品价格波动带来的材料成本上涨及政策变化将推升全球组件价格，但需求放缓及项目收益不确定性可能抑制成本传导力度。

来源：BloombergNEF

全球光伏新增装机容量历史及预期



2026年新增光伏装机相较2025年的增长，部分市场



1.2.2 2025年全球主要光伏市场表现

中国

- 2025年继续保持全球第一，新增装机再次增长但增速放缓。官方确认新增至少349.8GW，实际可能高达415GW，在全球市场中占据绝对主导地位。

印度

- 跃居全球第三（新增55.9GW）。增长动力来自于公用事业规模项目在政策截止日期前的抢装，以及分布式光伏在政策支持下的加速发展。

德国

- 年度排名下滑至第四位，但累计装机仍居全球第五，显示出其长期的市场承诺。

沙特阿拉伯

- 凭借多个超大型项目的投运，首次进入年度新增装机前十名。

法国

- 排名上升至第八位，市场持续扩张。

巴基斯坦

- 尽管数据存在不确定性，但凭借连续两年的高装机量，成功进入年度前十。

巴西、西班牙、意大利、澳大利亚

- 这些成熟市场均保持在年度或累计排名的前列（前十或紧邻前十），显示出过去十年持续且稳定的部署能力。

欧盟

- 保持全球第二的位置，年新增装机量稳定在约65.7GW，市场表现平稳。

美国

- 跌至全球第四（新增43.2GW），这是自2019年以来首次跌出前三。下滑原因包括组件成本上升、供应链瓶颈、利率上升以及政府更迭带来的经济不确定性，这些因素同时打击了集中式和分布式市场。

2025年全球年度新增和累计装机容量前十名国家

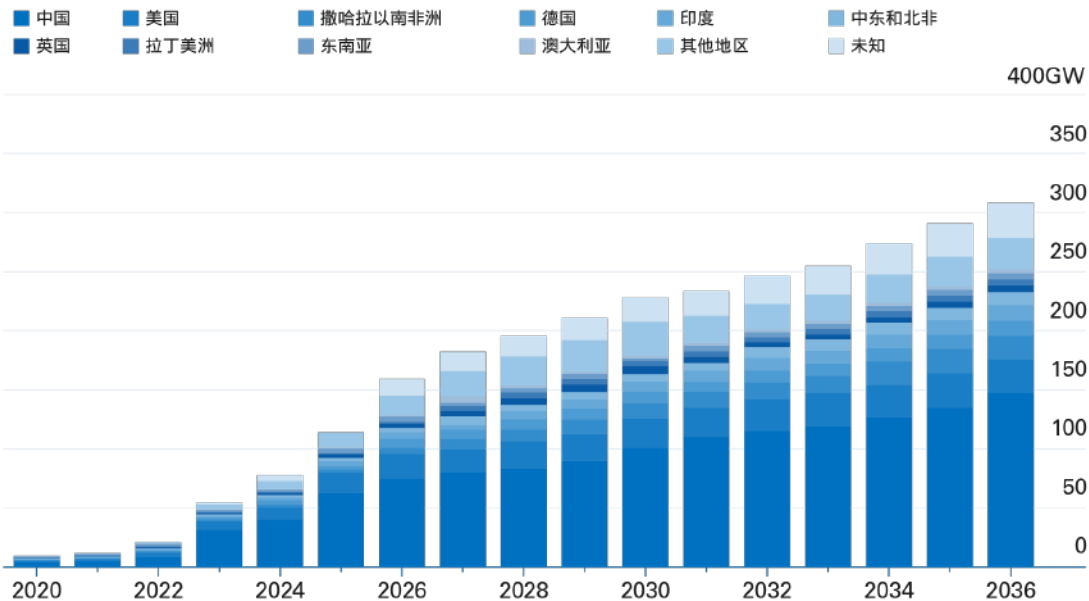
年度装机容量					累计装机容量				
1		中国	415,0	GW*	1		中国	1463,5	GW*
(2)		欧盟	65,7	GW	(2)		欧盟	406,0	GW
2		印度	55,9	GW	2		美国	268,2	GW
3		美国	43,2	GW	3		印度	180,5	GW
4		德国	16,9	GW	4		德国	117,3	GW
5		巴基斯坦	15,8	GW*	5		日本	102,7	GW
6		巴西	13,8	GW	6		巴西	66,0	GW
7		西班牙	11,3	GW	7		西班牙	59,0	GW
8		法国	7,4	GW	8		巴基斯坦	52,2	GW*
9		沙特阿拉伯	6,8	GW	9		澳大利亚	44,3	GW
10		意大利	6,5	GW	10		意大利	43,5	GW

数据来源：IEA PVPS

1.3.1 2025年全球储能市场新增装机规模及未来装机预测

- ◆ 根据彭博新能源财经数据，全球新型储能新增装机容量在2025年再创历史新高，达到112GW/307GWh，同比增长48%，其中，中国以54%的装机占比位居首位，美国紧随其后，占16%。尽管近期政策调整在一定程度上拖累了这两大市场新增风电和光伏项目的节奏，但其储能扩容势头目前依然强劲。
- ◆ 展望未来十年，全球储能安装量将持续攀升。彭博新能源财经预计，随着成本的下降、可再生能源渗透率的提高、强制配储政策的出台、各类招标项目的推进，以及数据中心和电动汽车充电等新兴应用场景的崛起，到2036年，全球年度储能新增装机容量有望突破300GW。

全球储能新增装机规模（GW）



注：图表显示的是新增总量，不包括抽水蓄能电站。“未知”指尚未明确分配到某一地区的预留空间。

来源：BloombergNEF

1.3.2 2025年全球主要储能市场表现

主要国家

美国

- ◆ 2025年，美国市场展现出显著的韧性。尽管联邦政策生变，其装机量仍实现了53%的同比增长。和解法案的通过引入了针对联邦税收抵免项目的供应链限制，起初引发了市场疑虑。
- ◆ 然而，该法案通过后，美国大型储能项目的预测装机量反而不降反升。这主要得益于本土电芯制造设施的宣布落地，以及大型电力负荷项目的承诺。为符合旧政策框架，开发商加速推进了超过13GW的“安全港”项目建设。
- ◆ 美国市场的关键增长驱动力包括：存在容量瓶颈、亟需储能提供关键可靠性服务的市场；州一级的激励政策与强制要求；以及该国首批电池扩容（augmentation）项目。2025年，约有12%的现有系统进行了容量扩充，这一新兴市场细分领域预计在未来几年将显著扩张。

日本

- ◆ 2025年2月最新发布的《第七次能源战略计划》中设立2040年可再生能源占比目标将达45%。储能政策以“GX促进战略”为核心，将储能列为优先新兴产业，计划通过20万亿日元债券支持绿色转型。长期脱碳电源拍卖（LTDA）机制提供20年固定收入保障，2025年修订后首次纳入长时储能类别，并将最低放电时长要求提高至6小时，政策明显向长时储能倾斜。

中国

- ◆ 2025年，中国以占全球新增装机量超50%的份额，确立了其在全球储能的绝对领先地位。这一高度的市场集中度，折射出中国宏大的可再生能源目标、“新能源+储能”的强制配建政策，以及强大的本土制造产能。
- ◆ 然而，进入2026至2027年，中国市场将面临严峻挑战。强制配储要求的取消以及成熟收益机制的缺位，带来了巨大的不确定性。尽管如此，预测显示，2025年至2034年间，中国仍将贡献全球约50%的新增储能容量，持续保持其全球领跑者的地位。

德国

- ◆ 2025年巩固了其作为欧洲分布式储能领导者的地位。强有力的政策框架、高昂的零售电价，以及上网电价补贴方案可能取消的预期，进一步增强了“存量分布式光伏+储能”的商业可行性。同时，德国也已成长为欧洲最活跃的大型储能市场之一，剧烈的电价波动、日益提高的可再生能源渗透率以及市场流动性的增加，共同推高了大型储能的需求。

澳大利亚

- ◆ 表现持续超出预期，增长率达55%。这主要得益于“容量投资计划”的扩容以及州级采购拍卖的成功。目前，该国在建装机容量超过6.5GW，预计到2034年，其国家电力市场（NEM）将容纳超过30GW的大型储能项目。

其他地区

中东

- ◆ 中东凭借阿联酋、沙特等国的宏观能源转型战略驱动，叠加黎巴嫩、伊拉克等因电网薄弱及电力供需缺口催生的刚性需求，迅速崛起为储能核心增量市场。2025年中企新增海外订单超40GWh，同比增长超80%，占全球总量12%，稳居第四大增长市场。然而，2026年初地区局势动荡导致项目交付延缓、物流受阻、回款承压，将倒逼企业强化风险管控与履约能力。

东盟

- ◆ 东盟储能市场正迈入高速增长期：2025年市场规模已达35.5亿美元，储能装机量达12GWh，同比增长50%；预计2026至2030年累计新增规模将接近100GWh。这一增长背后，既有明确的能源转型目标牵引，也有强制配储政策的刚性驱动，如泰国2025年起立法要求新建光伏电站配套储能比例不低于15%，越南亦要求新建风光项目必须配置15%的储能。

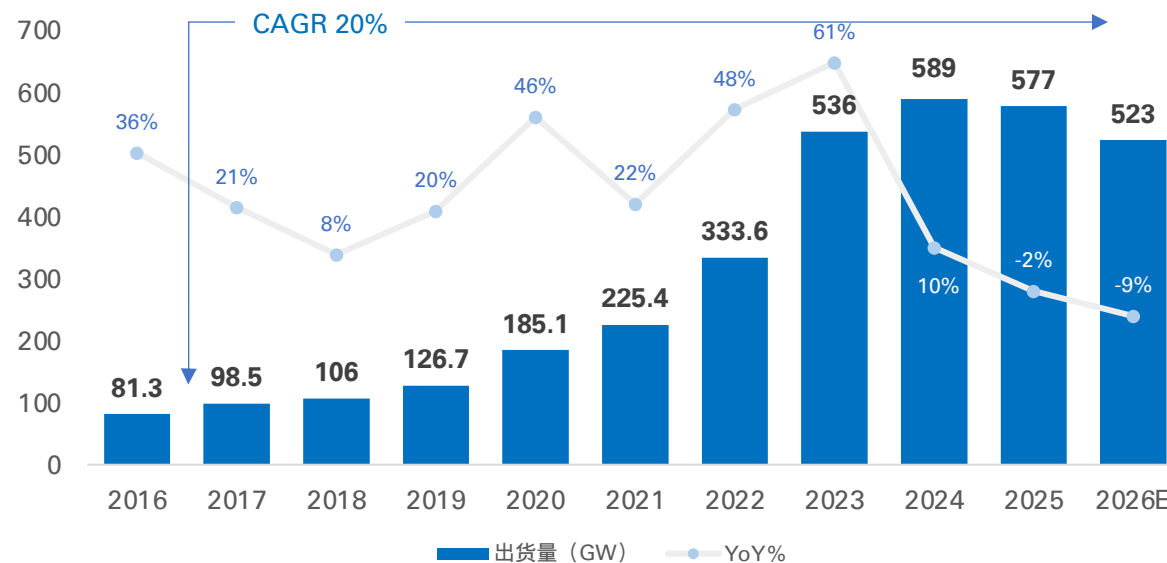
拉美

- ◆ 南美各国正通过立法、拍卖和激励措施，为储能市场的快速发展铺平道路。根据拉丁美洲能源组织（OLADE）的预测，为支持可再生能源整合，到2030年该地区需新增约24GW的储能容量，到2035年总需求将达到46GW。其中，智利和巴西将作为拉丁美洲新型储能行业的领跑者。

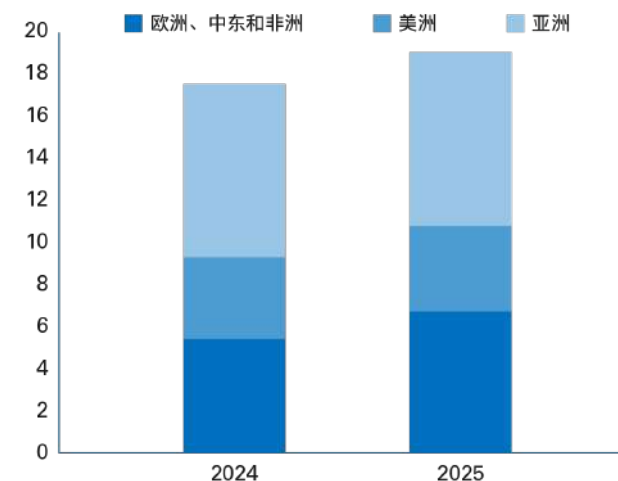
1.3.3 2025年全球逆变器出货量总计达到577GW，市场规模达到千亿人民币。

- ◆ 2025年全球逆变器市场规模将降至577GW，同比下降 2%；2026年还将进一步下滑9%至523GW。
- ◆ 此轮回落发生在2024年创纪录出货量之后，反映出主要光伏市场在政策、需求和投资层面的不确定性。
- ◆ 中国光伏逆变器市场预计将在2025年下降5%至304GW，这是自2019年以来的首次年度下滑。尽管如此，中国仍将保持全球主导地位。根据预测，到2034年，中国的累计逆变器需求将超过2.9TW。
- ◆ 在欧洲，逆变器出货量预计将从今年的88GW降至83GW，并因公用事业级项目捕获电价下降及库存压力，在2032年前进一步跌破75GW/年。
- ◆ 在美国，随着《通胀削减法案(IRA)》税收抵免逐步退出，逆变器市场预计明年将下滑22%。
- ◆ 东南亚是少数逆势增长的地区之一。今年该区域逆变器市场预计增至89GW，主要受本土制造投资以及屋顶光伏新兴市场支撑。

全球逆变器出货量 (GW)



全球光伏逆变器市场规模 (十亿美金)

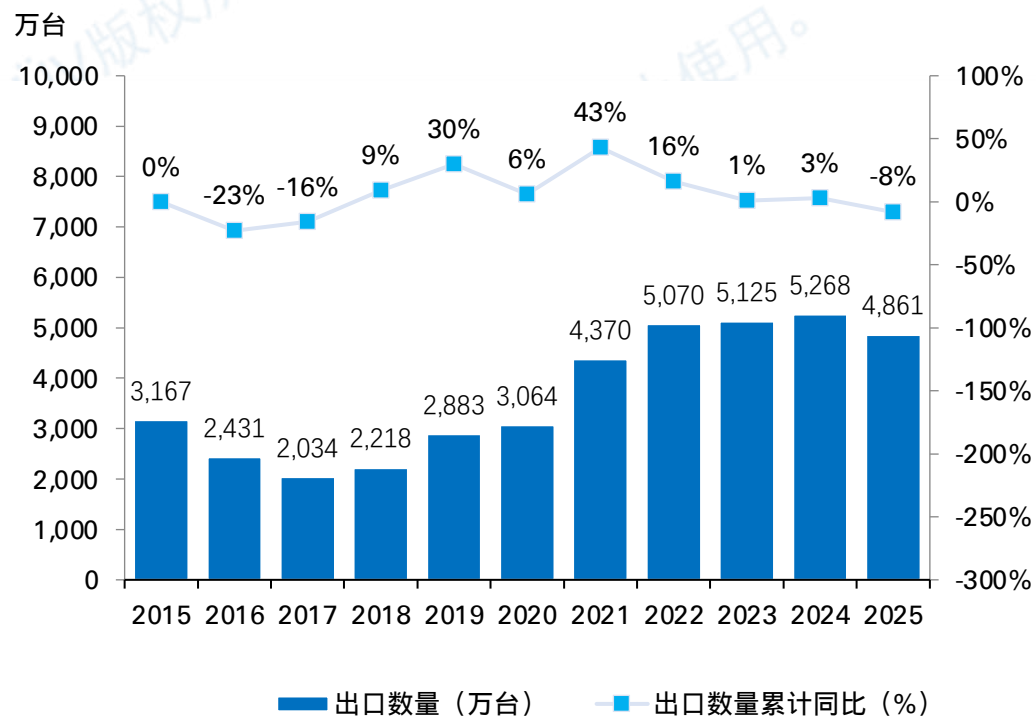


数据来源: S&P Global Commodity Insights.
©2025 S&P Global.

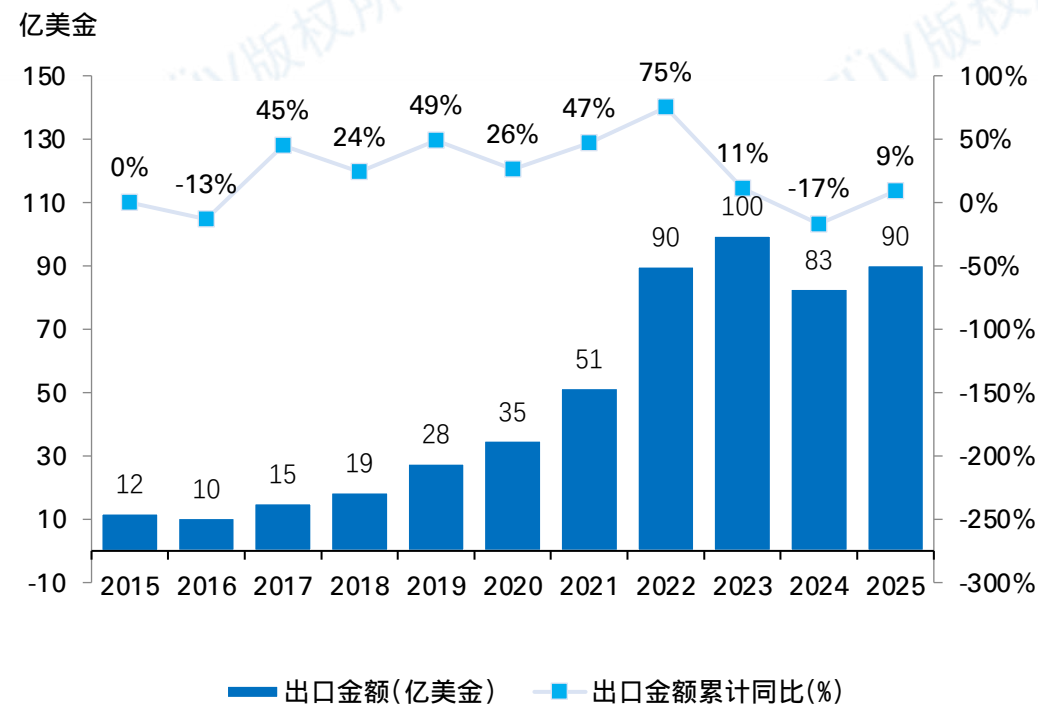
1.3.4 中国逆变器出口概况

2025年中国逆变器出口呈“量减额增”，出口额约90.2亿美元，同比增长9%；出口量约4861万台，同比下降8%；出口均价约1328元/台，同比增长约19%。这一背离表明产品结构正向更高价值的工商业储能和大型储能场景升级。

2015-2025年逆变器出口数量



2015-2025年逆变器出口金额



1.3.5 2025年逆变器主要出口国家及区域

欧洲及亚洲为中国逆变器出口核心区域，出口金额分别245.81/223.64 亿元，两大市场合计占比超70%，非洲、大洋洲则成为高弹性增长极。

◆ **欧洲：渠道去库确认，增长动能切换**

出口额达245.81亿元，同比+5.96%，出口数量928.91万台，同比-8.69%，均价2646.2元/台，同比+16%。经过2024年的去库存，欧洲逆变器库存水位在2025年回归正常，户储市场已从高速渗透期进入饱和期，德国等传统户储大户的需求放缓，地面电站、工商业等新需求则成为支撑出口额的关键引擎，增长动能已从“户储主导”转向“构网储能”，而匈牙利等新兴市场受益于欧盟援助的资金杠杆，正成为抵消西欧户储增速放缓的重要增量极。

◆ **亚洲：规模扩张，产品升级**

出口亚洲223.64亿元，同比+11.43%，出口1879.47万台，同比-3.77%，单价1189.92元/台，同比+15.8%。亚洲各国光储市场存在明显分化：印度、巴基斯坦市场凸显结构升级特征，大功率及储能混合型产品占比提升；伊拉克等新兴市场处于规模扩张期，以基础户用机型普及为主；沙特、阿联酋则体现政策驱动属性，依托“2030愿景”等顶层设计推动光储建设。

◆ **非洲：大型项目如期兑现**

2025年，中国逆变器出口非洲52.47亿元，同比+43%，出口1168.39万台，同比-11.1%，单价449.09元/台，同比+60.9%。分布式光储迭代升级依旧，大型项目依托国际融资通道以及中国产业链的扶持而持续推进。

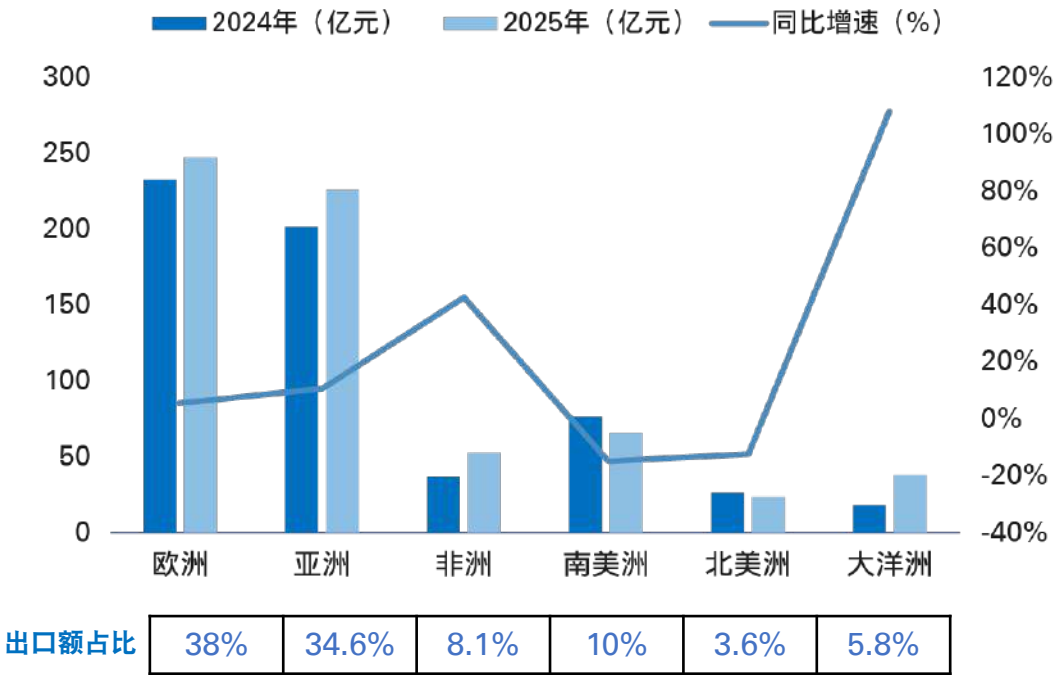
◆ **南美洲：单一大市场表现乏力**

2025年，南美洲进口中国逆变器64.46亿元，同比-14.18%，进口量411.6万台，同比-11.58%，单价1566元/台，同比-2.9%，规模收缩主要系前期过度备货后渠道存在较大去化压力，且多数国家仍处技术路线与产业政策的摸索期，需求释放节奏不一。

◆ **澳洲：补贴引爆储能需求**

2025年中国对澳洲出口逆变器35.27亿元，同比+106.21%，出口79.20万台，同比+1.59%，均价4453.28元/台，同比+102.99%。2025年澳大利亚逆变器进口呈现“量平价升”的典型产业升级特征，除了积极推进大型光储项目带动相应产品需求之外，户储政策“家庭电池计划”前期并未对产品容量进行严格区分，终端用户为享受更高的补贴额度明显倾向于大规格，而在25年末，澳洲联邦政府宣布对“家庭电池计划”进行战略性调整，将政策补贴总预算追加至72亿澳元的同时引入“容量分级补贴”机制，旨在抑制超大容量电池的过度补贴，引导市场回归理性配置。新规将于2026年5月1日生效，预计大功率产品需求回落，但新政策的整体补贴力度与持续性仍优于预期，澳洲户储市场有望持续活跃。

中国逆变器各大洲出口额

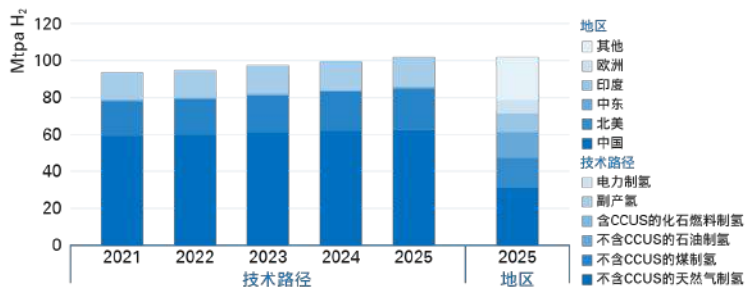


1.4 氢能

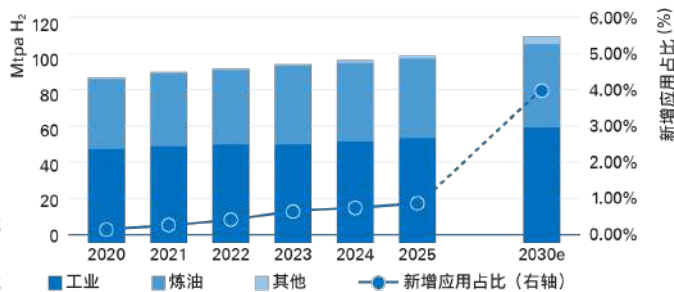
1.4.1 2025年全球氢能市场概况

- 根据IEA的统计，截至2025年底，全球氢气生产量近1亿吨，同比增长3%左右，炼油和化工占主导，但其中低排放制氢占比不到1%（包含电解水制氢）。中国占全球氢气需求量的30%，其次是北美（16%）和中东（15%）。
- 无论是当前的消费结构，还是未来的装机规划，氢能在电力系统中的用电属性（制氢）都显著强于供电属性（发电）。2024年，全球已投入生产的电解水制氢装机容量累计达2GW，产能每年38GW，氢能汽车的发展也会持续放大上游的氢气需求；全球氢或氨燃料发电装机总容量约0.5-0.7GW。用电比供电高出一个数量级。
- 预计2030年，如果已宣布项目全部实现，全球电解槽装机容量有望达到439GW；而氢或氨燃料发电装机规模有望达到7.5GW。2060年，全球低排放制氢将增长100倍。以上均说明氢能在未来将处于用电端。
- 如果实现“电-氢-电”闭环，一方面可以解决可再生能源的消纳问题，实现绿电跨地域、跨季节存储与利用，另一方面也可以提供稳定清洁低碳的电力供给，有望成为电力系统从化石依赖向零碳自主转型的关键解决方案。但近十年，氢能的用电与供电之间的缺口还会比较大。

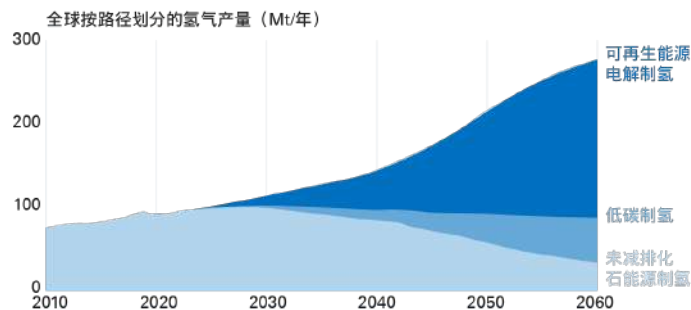
2021-2025年氢气产量，分技术与地区



氢气分产业用途，2021-2030e



2060年全球低排放制氢将增长100倍



1.4 氢能

1.4.2 2025年全球主要氢能市场表现

德国

电解槽建设不及预期，专注技术研发与工业脱碳，正在建设氢能核心管道网络。德国氢气需求较2020年有所下降，低排放氢气在传统领域逐步渗透，但总量仍低。德国氢能战略目标2030年5Mtpa绿氢生产，但项目管道仅约0.5Mtpa具备强可行性。沿用欧盟 Delegated Acts、ISO定义的绿氢认证体系。

北美

电解槽路线因政策环境变化而降温。氢需求占全球16%，增速极低，握有全球约40%的绿氢产能承诺，但实际产量仍很小。IRA 45V等政策可提供低碳制氢的税收抵免，但政策反复摇摆、窗口期紧迫，导致2024年仅1个电解槽项目达成FID。绿氢生产标准（CHPS）已发布，但政策执行延迟和资金削减风险又将制约投资。

印度

氢气需求增长迅速，标准和政策陆续落地。2025年印度氢气需求约10Mt，增长超4%，绿氢气产量极小。AM Green Kakinada项目（1.3GW电解槽）于2024年达成FID，为世界最大之一。已发布多个绿氢标准和目标：National Green Hydrogen Mission目标2030年5Mtpa绿氢生产、SIGHT计划提供电解槽供应侧补贴、Green Hydrogen Standard标准体系用于定义可再生氢。此外，印度还是近五年内获得开发性金融机构氢能资金最多的国家。

日本

主导氢/氨共燃发电技术，进口依赖度高。2025年氢气需求约2Mt，占全球2%，绿氢消费量极小，但有全球领先的氢/氨发电技术并计划2030年装机达7500MW。日本以氢社会促进法（Hydrogen Society Promotion Act）为核心政策框架，其提供15年CfD合同，弥合低排放氢成本差距，覆盖供应侧、基础设施、需求侧。日本自有的绿氢评价标准，正与ISO接轨。进口依赖度高，正通过JERA、IHI等企业锁定海外氢/氨供应合同。

中国

氢能整体体量最大，电解制氢需求侧有较大缺口。2025年氢气需求31Mt，占全球30%。电解制氢需求大约4.4GW，而电解制氢供给超35GW。中国电解槽部署占全球产能60%，且成本优势显著，但仍面临出口效率偏低、标准适配和运维保障等障碍。通过地方示范、国企带动、政策补贴推动绿氢的应用。

澳大利亚

体量偏小，拥有地区优势。澳大利亚氢气需求体量较小，低排放氢气产量极小，但处于早期阶段的项目管道庞大，主要集中在昆士兰、西澳拥有丰富可再生能源、低成本、靠近亚洲市场的地区优势。推出Hydrogen HeadStart计划提供生产补贴。无独立国家氢认证体系，主要沿用欧盟 Delegated Acts、ISO定义的绿氢认证体系。出口导向型项目面临日本、韩国等买家需求的不确定性挑战。

其他地区

中东

氢气需求增长迅速，拥有地区优势，出口依赖度高。2025年氢气需求约14Mt，占全球14%，增长约3%，低排放氢气产量极小，电解槽FID约2.6GW，几乎全部来自沙特的NEOM项目（2.2GW，2027年目标运营）。低成本天然气、土地特许、税收优惠等优势可吸引外资，但出口依赖严重，且缺乏统一认证体系，目前沿用几大进口地区的标准。沙特、阿曼、阿联酋等国发布氢能战略，目标成为全球氢能出口枢纽。沙特Jubail和阿联酋Al Reyadah等CCUS基础设施也支持绿氢发展。

东南亚

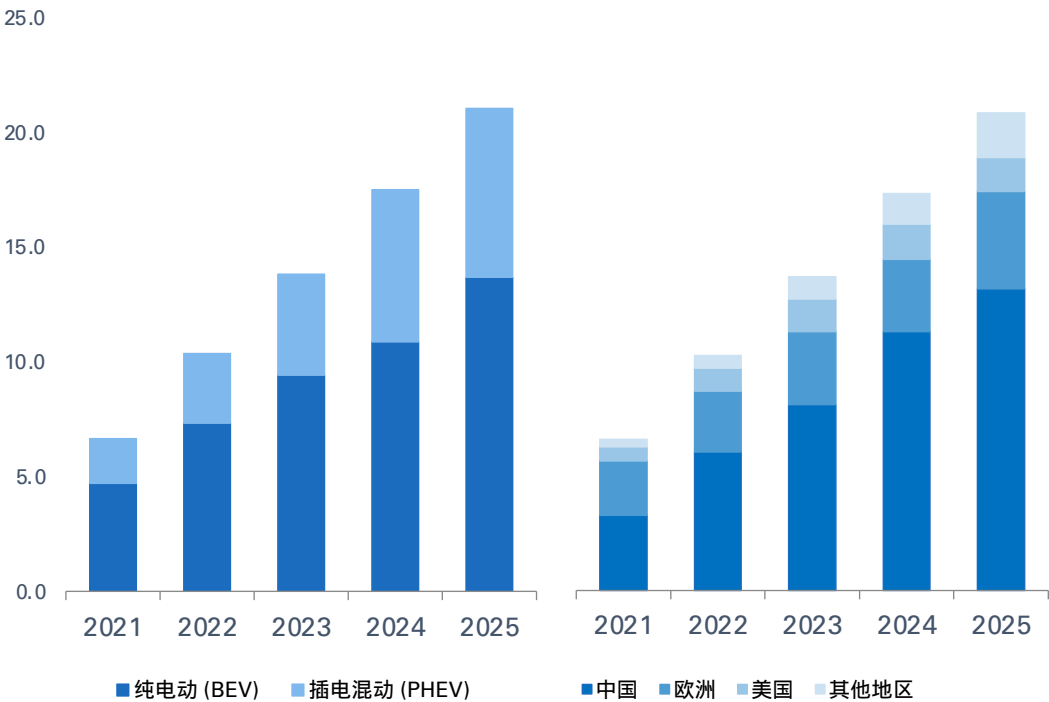
绿氢产业初步发展，各国政策框架尚处早期。东南亚氢气需求占全球约10%，印尼占比最多，其次是马来西亚、越南、新加坡，低排放氢气产量几乎为零。预计2030年低排放氢项目管道可达480ktpa，但仅6%达成FID，60%处于极早期。越南正在建设240MW电解槽项目、印尼发布国家氢氨路线图。

1.5 电动汽车及充换电

1.5.1 全球电动汽车发展现状及趋势

- ◆ 2025年全球电动汽车销量达到2100万辆，同比增长超20%，全球汽车销量累计7500万辆。这意味着每售出四辆汽车中就有一辆是电动汽车。中国占全球销量60%，欧洲和北美分别占约15%，欧洲市场增长最为强劲。中国是最大的出口国（35%），也是销量最多的国家（60%）。
- ◆ 增长动力包括：电力可作为石油的战略性能源替代、各国政府补贴与环保政策的推动、购置成本和充电成本都比较低。
- ◆ 根据IEA预测，到2035年，全球电动汽车保有量预计将比2025年增长超过六倍，达到5.1亿辆，电力需求超过1500TWh。全球汽车销量中电动汽车占比将达到约50%，中国国内的比例超过90%。

主要市场电车销量，2021-2025年



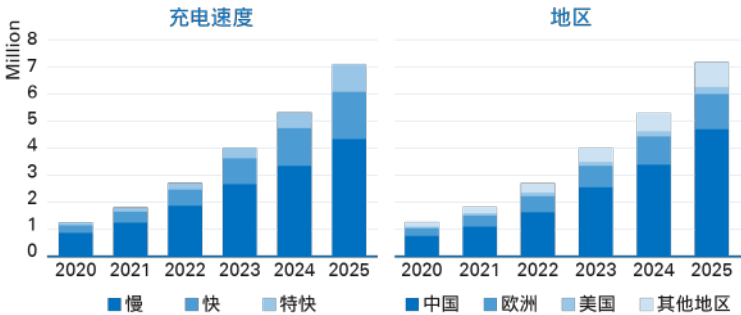
1.5 电动汽车及充换电

1.5.2 全球充换电市场概况

公共充电桩增长势头强劲

- 2025年全球公共充电桩总数突破700万个，新增近160万个，同比增长29%，其中快充和超充新增70万个，同比增长35%。2024-2025年全球充电桩的平均充电速度提高了15%，接近50kW，每辆LDV 4.5kW。超快充电的部署正在加速，根据IEA的预测，到2035年，全球慢充电桩将达到1400万个，快充和超快充总数超1000万个。
- 目前，电车与公共充电桩之比约为11: 1，其中，中国充电桩数量超65%。按现有政策情景，预计2026-2035年全球公共充电基础设施累计投资将超2600亿美元。
- 车网互动（Vehicle-to-Grid，简称V2G）可用性提高，但商业化程度十分有限。目前共有22款车型具备V2G功能，占所有电动汽车型号总数不到1.5%，市场主要在欧洲。

2020-2025年全球公共充电桩保有量，分地区和充电速度

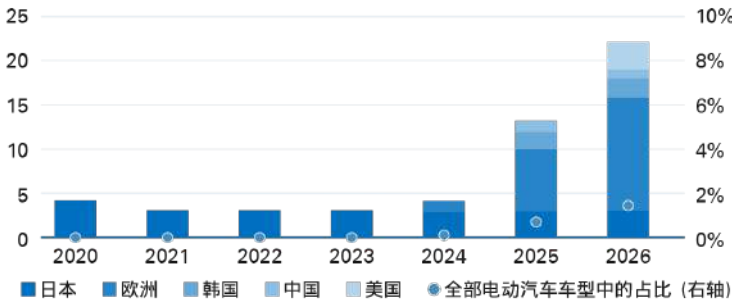


注：功率不高于22千瓦的充电桩归类为慢充；功率高于22千瓦且不超过150千瓦的充电桩归类为快充；功率高于150千瓦的充电桩归类为超快充。

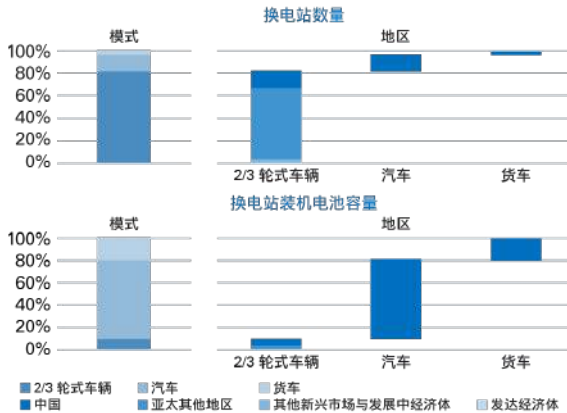
中国主导高容量换电市场

- 换电把“车辆补能”和“电池充电”分开，电池可在站内慢充，降低电网压力，并可支持削峰填谷等电网服务。
- 2025年换电站数量中，两轮/三轮车占绝大多数，说明换电目前最成熟、最普及的场景仍是电动两轮车、三轮车等轻型交通工具。虽然汽车和卡车换电站数量占比不高，但由于单车电池容量大，尤其是汽车约100kWh、卡车约210kWh，因此它们贡献了大部分换电站内安装电池容量。
- 中国是汽车和卡车换电的绝对核心市场，在中重型、高容量换电模式上领先明显。

具备V2G功能的电车型号数，2020-2026年



按类别和地区划分的换电站及相关电池容量预计占比，2025年



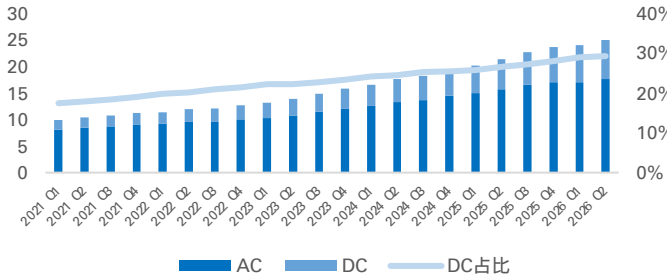
注：本分析中的平均电池容量采用销量加权平均值：两轮/三轮车为5千瓦，汽车为100千瓦，卡车为210千瓦。

1.5.3 2025年全球电动汽车充换电主要市场表现

美国

- 截至2025年末，美国公共充电桩达到23.6万个，同比增长22%，其中直流快充增长34%，占比增长到28%。
- 美国电车与充换电市场存在明显结构性缺口，2025年Q1电车与充电桩比例为30:1，充换电市场正向着高功率、高密度的配置快速发展以满足庞大的需求。然而，2025年初，国家级电动车基础设施计划（NEVI）资金暂停发放，2026年初又提出国产化率100%的充电设备才能获得NEVI资助资格，这导致市场存在波动和拨付延迟。目前，美国多个州和私营企业正绕过联邦项目，通过自筹或合作方式加速站点部署，行业中政策依赖与市场主导投资路径并存。

美国公共直流桩保有量及直流桩占比（万台、%）

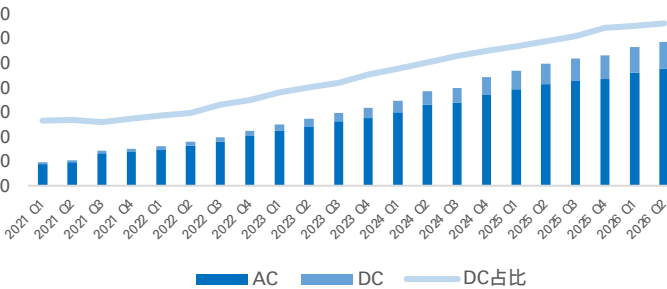


数据来源：EAFO官网

欧洲

- 在强制性政策的带动下，欧洲充电桩市场稳健增长。截至2025年末欧盟27国公共充电桩已突破100万个，同比增长20%，其中直流快充增长30%，占比迅速提高。截至2026年6月，荷兰以23万个保有量领跑欧洲，德国（21万个）与法国（20万个）紧随其后。预计到2035年欧洲公共充电桩将增至430万个以上（其中超快充近50万个）。
- 《替代燃料基础设施法规》强制要求到2025年，跨欧运输核心路网每60公里至少配置150kW以上快充站，且单站总功率须达400kW，并预计2027年底提升至600kW。德国、法国也分别提出2030年建成100万、40万个公共充电点的目标。此外，与之配套的资金政策也加速了充电桩建设落地，包括：替代燃料基础设施基金（AFIF），总规模10亿欧元；EXPAND-E等跨国项目为23个成员国提供超7000万欧元支持等。

欧盟27国公共直流充电桩保有量及直流桩占比（万台、%）

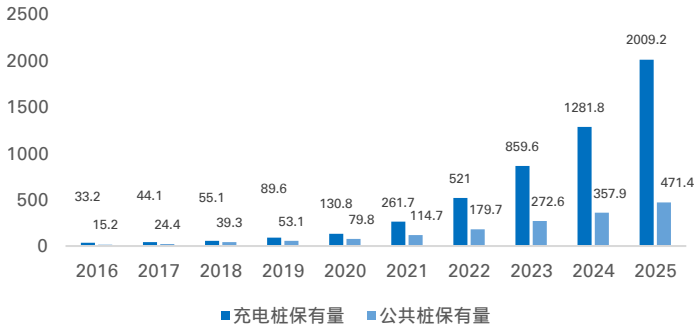


数据来源：AFDC官网

中国

- 截至2025年2月，中国充电联盟内成员单位总计上报充电桩2009万个，同比增长49.7%；公共类充电桩471.4万个，同比增长31.9%，其中直流充电桩数量只略小于交流充电桩数量，与欧美的结构有较大差异。
- 2022年国家发改委颁布《关于进一步提升电动汽车充电基础设施服务保障能力的实施意见》，提出国家、省、市三级监管平台体系，并对公共充电桩建设给予财政支持，鼓励大功率充电、车网互动（V2G）示范补贴。近两年内中国陆续发布强制性标准与监管准则，如3C强制认证、充电记录数据监管、消防与设计标准等。

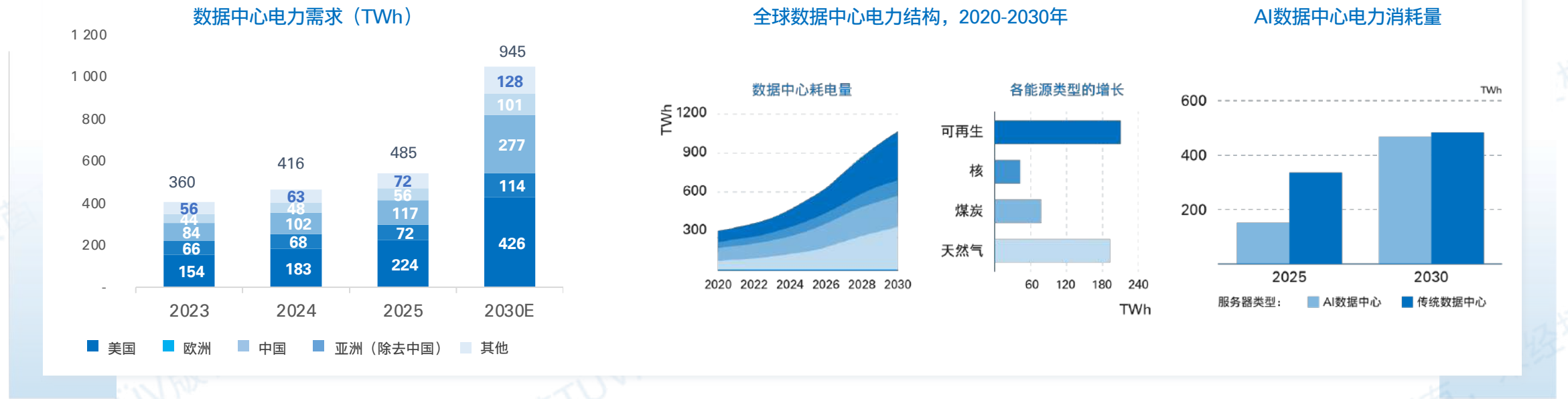
中国充电桩保有量及公共桩保有量（万个）



数据来源：中国充电联盟

1.6.1 AI数据中心电力消耗与能源结构演变

- 算力需求的增长、计算性能的进步、服务器的升级共同推动了数据中心的电力需求增长。2025年全球数据中心耗电量达到485TWh，增长了15%，占全球电力需求的1.5%。其中美国224TWh，占46%；中国117TWh，占24%；欧洲72TWh，占15%；中国以外的亚洲56TWh，占12%。预计到2030年电力需求将翻倍，达到约1000TWh，占全球电力需求的3%、电力需求增长量的10%。全球企业自建小型数据中心增速放缓，托管商和超大型数据中心占比快速提升。
- 数据中心的能源结构正向着低碳高效发展。多家企业陆续发布了零碳排放计划，可再生能源供电量预计在2030年达到总供给电量的三分之一以上。数据中心的PUE也逐年下降，整体平均PUE将从2025年的1.38下降到2030年的1.29，超大规模数据中心从2025年的1.13下降到2030年的1.1。
- 2025年，按照IEA的加速服务器的口径计算，全球AI数据中心的用电量为150TWh，占总数据中心的31%。预计2030年的耗电量将达到465TWh。



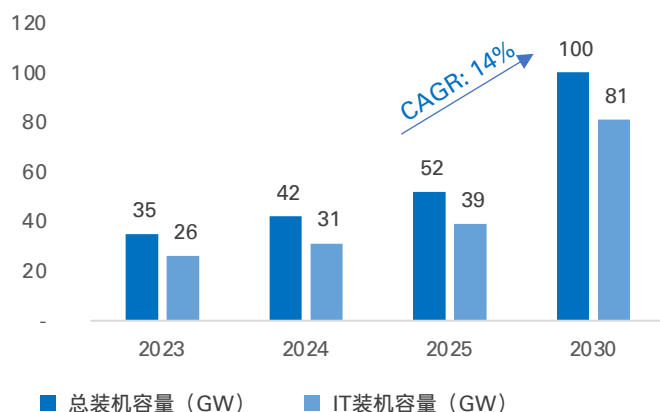
1.6.2 2025年全球数据中心主要市场表现

截至2026年5月全球数据中心已超过11,700个。美国5,427个位居榜首，其次是德国（529个）、英国（523个）、中国（449个）和加拿大（337个）。

美国

- 美国拥有全球四大超大型数据中心运营商（Microsoft, Google, Amazon, Meta），2025年的电力需求达到224TWh，占美国电力总需求的5.2%；总装机容量达到52GW，预计2030年将达到100GW，CAGR14%。
- 截至2026年3月，美国已运行和在建数据中心数量前三位：弗吉尼亚（运行320，在建136）、德克萨斯（运行212，在建140）、佐治亚（运行62，在建56）。
- 联邦通过《芯片与科学法案》等政策配套的先进制造业投资税收抵免（AMIC）、清洁能源税收抵免、研发税收抵免等推动AI的应用。州政策主要通过销售税/使用税豁免、财产税减免、优惠电价等政策来吸引投资、创造就业，如弗吉尼亚州针对数据中心的销售税豁免。2026年7月，纽约州宣布暂停审批部分大型数据中心项目，这说明未来美国数据中心的布局将迁移至土地充足、电力供应稳定、社区成本更低的地区。

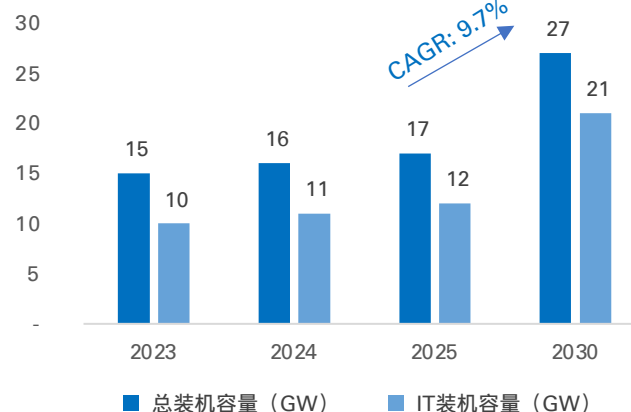
美国数据中心和IT设备装机容量（GW）



欧洲

- 2025年欧洲数据中心电力需求达到72TWh，约占欧洲电力总需求的2.7%；总装机容量达到17GW，预计2030年将达到27GW，CAGR9.7%。
- 主要市场为法兰克福、伦敦、阿姆斯特丹、巴黎、都柏林、米兰（FLAP-D），占据了45%的装机容量。
- 2023年底欧盟发布IPCEI-CIS项目，旨在建设下一代云计算基础设施和服务；2025年4月，欧盟发布《AI大陆行动计划》，计划在5-7年内使欧盟数据中心容量至少增长两倍，打通内部数据流通壁垒，并加速AI应用的落地。

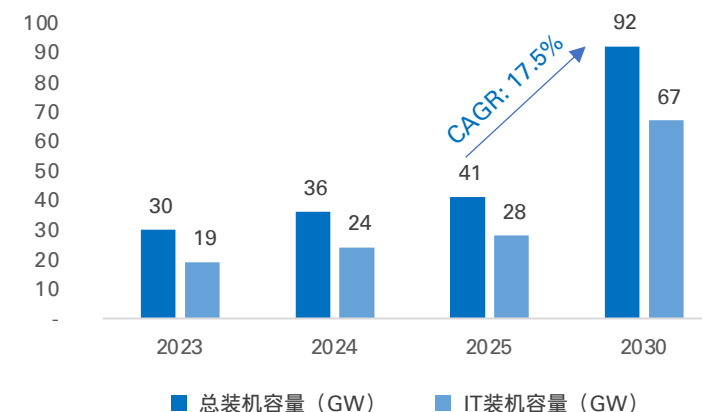
欧洲数据中心和IT设备装机容量（GW）



亚太

- 2025年亚太数据中心电力需求达到173TWh（中国117TWh），总装机容量达到41GW（中国28GW），预计2030年将达到92GW（中国67GW），CAGR 14%（中国19%）。
- 亚太地区拥有庞大的互联网用户和物联网市场，随着企业的云端迁移和AI的发展，其有望成为全球下一个数据中心枢纽。
- 中国：2026年“十五五”提出，将重点关注算力资源的规模化、集约化、绿色化、普惠化，并将西部开发项目和全国一体化算力网络重要节点纳入减税范围。
- 马来西亚：通过MyDIGITAL数字经济战略、DESAC 数字基建激励计划实施税收减免，同时新建项目向 AI 算力、低碳节能方向倾斜。
- 泰国：数据托管服务企业可获得8年所得税减免与关税豁免。
- 印度尼西亚：数据处理、托管等数字经济业务可获得5-20年免税期。

亚太数据中心和IT设备装机容量（GW）

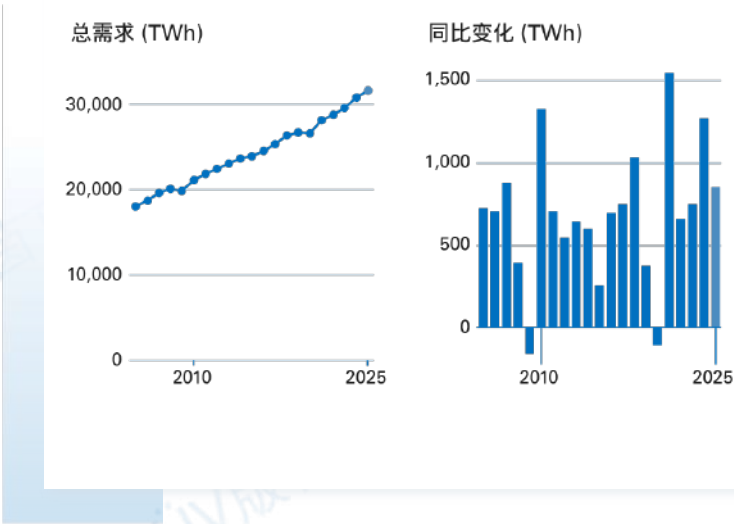


1.7 全球电力需求现状及预测

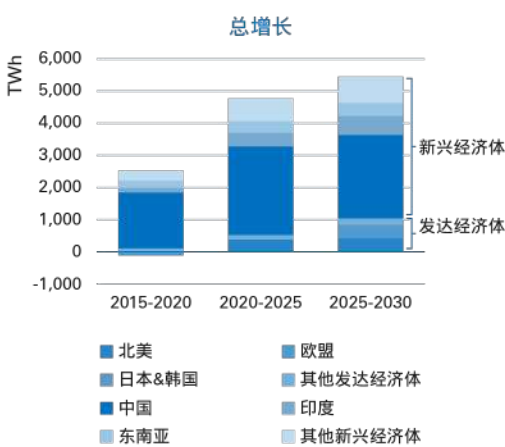
1.7.1 电力需求加速增长

- 根据Ember的统计，2025年全球电力需求增长了2.8%，达到31,779 TWh的历史新高。预计在2026年至2030年，全球将加速向电力经济转型，年均电力需求将比过去十年的年均增量高出50%，电力消费的增长速度将至少达到整体能源需求增速的2.5倍。
- 根据IMF与IEA的历年宏观数据，过去几十年的电力需求增速与经济扩张密切相关，但预计到2030年，全球范围内的电力需求增速将超过GDP增速，二者的关系将发生结构性转变。

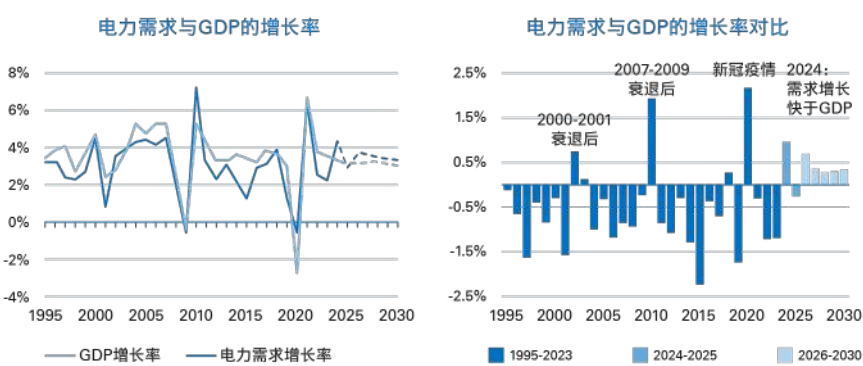
全球电力需求历史趋势



分地区电力需求增长，2015-2030年



全球电力需求与GDP趋势，1995-2030年



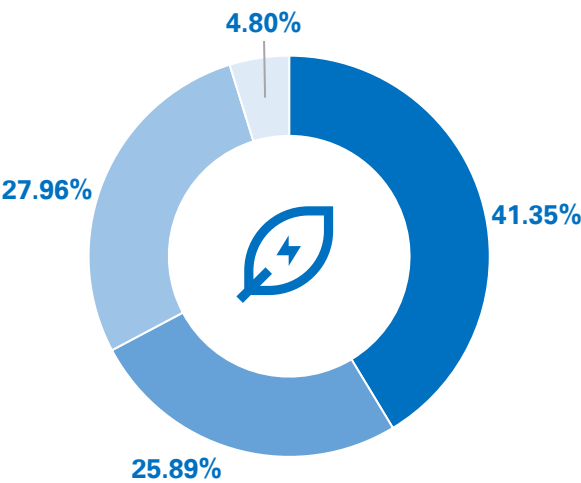
1.7.2 全球新能源发电量概况

新能源发展迅猛，并网压力与日俱增

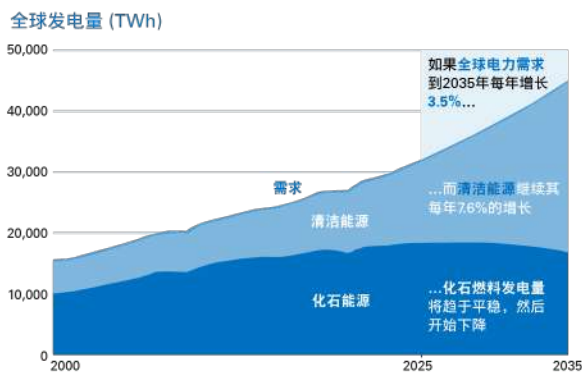
- 2025年，全球发电总量为31745TWh，其中可再生能源发电量为10,730TWh，占33.8%，首次超越了煤炭发电，且可再生能源发电的增长量则完全覆盖了新增电力需求量。过去十年，全球可再生能源发电量的平均年增长率约为6%。
- 光伏发电在新能源中增长最快，满足了全球电力需求增长的75%，光伏与风电合计满足了全球99%的新增需求。预计到2030年，可再生能源发电量将以每年约7.6%的速度增长，成为全球电力供给的第一大来源。

2025年可再生能源发电量占比

■ 水力 ■ 光伏 ■ 风力 ■ 其他（生物质、地热等）



在当前增长速度下，清洁电力持续跟上电力需求增长，从而推动化石燃料发电进入平台期



2025年全球电力结构变化

	2024 发电量 (TWh) 发电占比 (%)	2025 发电量 (TWh) 发电占比 (%)	变化 发电量 (TWh) 百分比变化 (%)	五年趋势 年均增速 2020-2024 (%)
电力需求	30,930TWh	31,779TWh	849TWh 2.8% ▲	2.9%
清洁电力总计	12,655TWh 40.9%	13,542TWh 42.6%	887TWh 7.0% ▲	5.4%
可再生能源总计	9,878TWh 31.9%	10,730TWh 33.8%	852TWh 8.6% ▲	7.1%
太阳能	2,143TWh 6.9%	2,778TWh 8.7%	636TWh 29.7% ▲	25.1%
风能	2,510TWh 8.1%	2,715TWh 8.5%	205TWh 8.2% ▲	12.0%
水电	4,434TWh 14.3%	4,437TWh 14.0%	3TWh 0.1% ▲	1.0%
其他可再生能源*	792TWh 2.6%	800TWh 2.5%	9TWh 1.1% ▲	4.1%
核能	2,777TWh 9.0%	2,812TWh 8.9%	35TWh 1.3% ▲	0.2%
化石燃料总计	18,276TWh 59.1%	18,238TWh 57.4%	-38TWh -0.2% ▼	1.4%
煤炭	10,539TWh 34.1%	10,476TWh 33.0%	-63TWh -0.6% ▼	1.4%
天然气	6,883TWh 22.2%	6,919TWh 21.8%	36TWh 0.5% ▲	1.5%
其他化石燃料**	854TWh 2.8%	842TWh 2.6%	-12TWh -1.4% ▼	0%

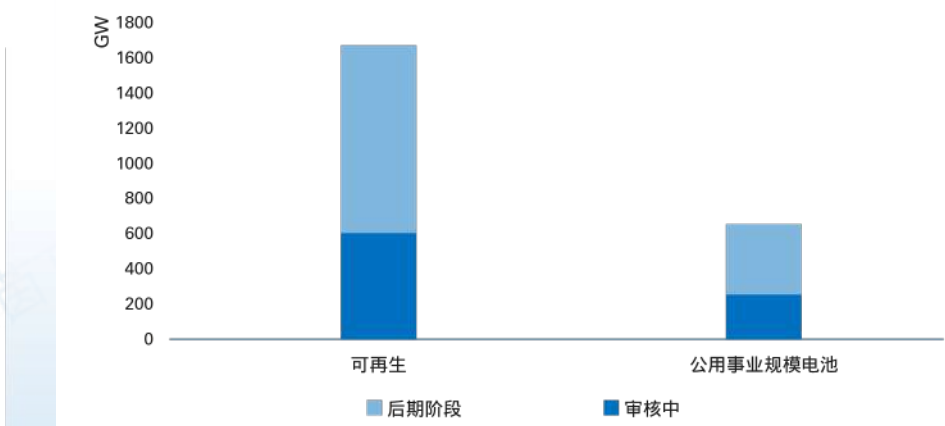
数据来源：EMBER

1.7.3 全球并网容量

加快电网建设已成为当务之急

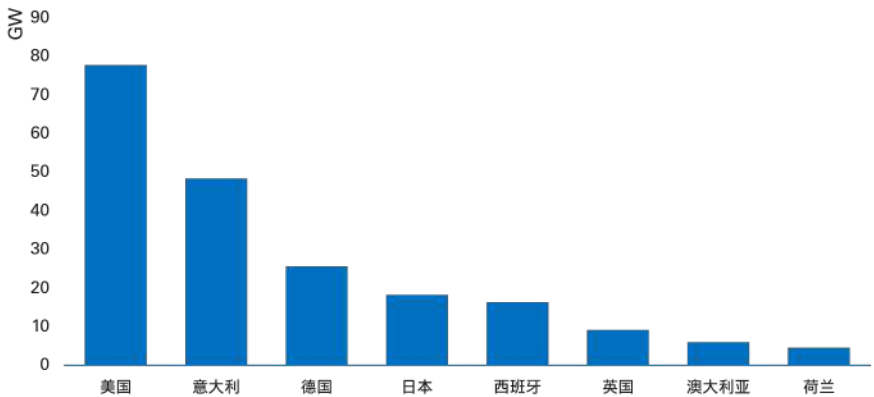
- ◆ 目前，全球范围由于电网投资远落后于开发项目，接入队列创下历史新高，限电现象日益加剧。
- ◆ 建设周期对比：电网基础设施建成：5到15年，且关键组件价格持续上升。
- ◆ 供需侧建成：太阳能光伏和风能：1到5年、数据中心：1到3年；电动汽车充电基础设施：1到2年。
- ◆ 截至2025年，全球至少有1700GW的可再生能源项目已进入并网申请和项目审核，另有超过600GW的电池储能项目正在排队等待并网，约五分之一的数据中心建设项目存在延误的风险。要满足2030年前的电力需求，每年电网投资需从目前的4000亿美元增加约50%，同时还需扩大电网供应链规模，并更有效地应对劳动力挑战。

全球处于较先进阶段、正在等待并网排队的可再生能源和公用事业级电池容量
(按项目阶段划分)，2025年



注：“后期阶段”指已进入电网并网流程后期、极有可能完成的项目。

处于并网排队后期阶段的公用事业级电池储能项目容量，2025年



投资建设

- 加快对电网基础设施的整体投资，提高并网容量上限。
- 容量预留：供电商使用的发电机的最大容量将大于电网的可用容量，利用输电低谷期的高电价期间，生产更多高收益的电能，进而覆盖多于容量的建设成本。

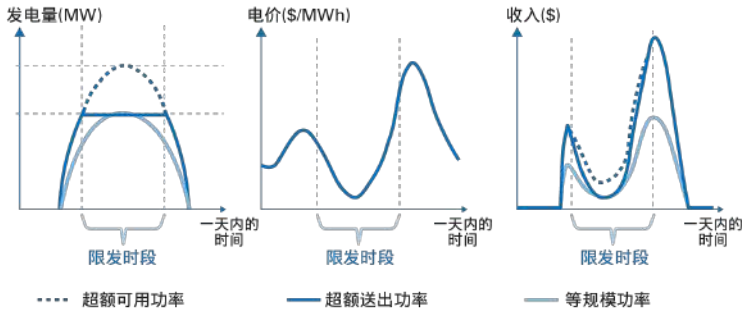
科技创新

- 动态线路额定值（DLR）、动态变压器额定值（DTR）、先进功率流控制（APFC）、拓扑优化（TO）以及储能作为输电资产（SATA），更换导线和提高额定电压等，提高容量与输电效率。

合规改进

- 非固定接入：与固定接入不同，在电网拥堵时允许临时削减其功率，从而释放潜在容量。
- 电网容量拍卖：通过拍卖与竞标的市场化手段分配稀缺的并网容量，使资源优先分配给高价值、高可行性项目，避免浪费。
- 排队管理：根据项目成熟度、实施可能性以及对系统需求的预期贡献来确定项目优先级，而非依据申请提交的时间顺序，例如美国的PJM并网改革、欧盟C/2025/8473文件等。
- 加快并简化审批流程：自动化审批、限制公司响应时间、为近期可落地的项目发放快速通道名额等。

以光伏电站为例，对容量预留的概念性解释



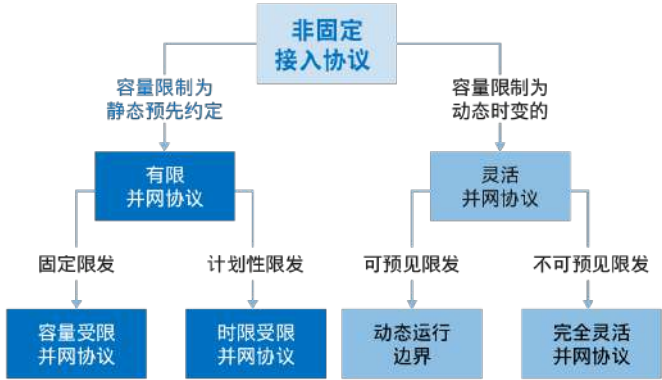
数据来源：IEA

并网技术升级及其特点概述

技术	容量提升幅度	全球潜在覆盖率	成本	可靠容量	实施周期
动态线路额定容量	20-30%	5-15%	\$	•	1-2 年
动态变压器额定容量	5-15%	5-15%	\$	•	1-2 年
拓扑优化	5-15%	10-20%	\$	••	1-2 年
先进潮流控制	10-20%	10-20%	\$\$	••	2-3 年
储能作为输电资产	30-40%	1-5%	\$\$	••	2-3 年
更换导线	50-100%	1-5%	\$\$\$	•••	3-4 年
电压等级提升	100-200%	1-5%	\$\$\$\$	•••	4-7 年
新建高压线路	-	-	\$\$\$\$	•••	7+ 年以上

数据来源：IEA

不同的并网接入类型



图片来源：Monterde, M.R., Alvarez, E.F. & Valarezo, O.

Non-Firm Grid Connections: A Review of Access Types, Mechanisms, and Regulatory Frameworks. Curr Sustainable Renewable Energy Rep 12, 23 (2025).

第二章 全球电网结构



电网（Power Grid）是由输电、变电、配电设备与线路组成的电力网络，负责把电能从发电厂跨越地域、安全高效地送达终端用户；它与发电侧、用电侧共同构成完整的电力系统。

■ 电的旅程：从发电厂到千家万户



■ 为什么远距离输电要先升压？

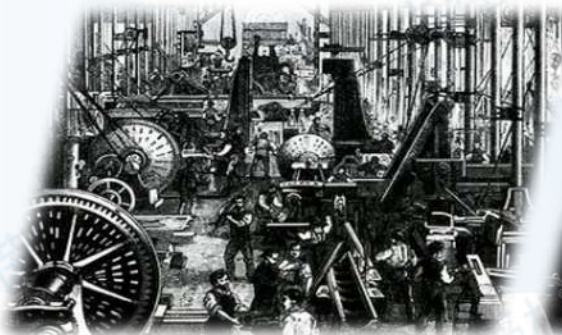
输送功率一定时 $P = UI$ ，电压越高、电流越小；而线路损耗， $P_{\text{损}} = I^2 R$ 与电流的平方成正比。升压使电能可远距离传输且损耗大减，交流电易于变压的优势由此得以充分发挥。

■ 电网运行的第一法则：实时平衡

电能难以大规模储存，发电量必须跟随用电负荷的每一刻变化；调度中心全天候调节，维持频率与电压稳定。电网因此成为人类建造的最复杂的实时系统之一。

2.2 电网演进

从蒸汽到电流：电网的诞生



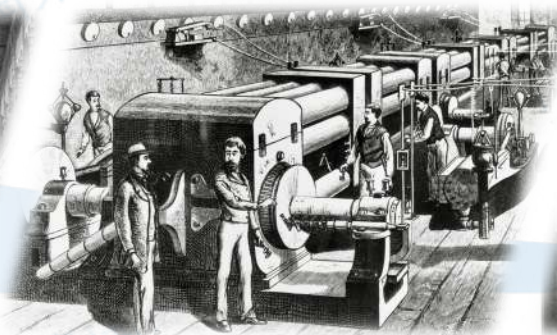
第一次工业革命

蒸汽机将热能转换为机械能，使动力可以在工厂内集中配置，并支撑规模化连续生产。能量由皮带、齿轮和传动轴在厂区内传递，机械动力在生产现场完成集中使用与分配。



第二次工业革命

进入19世纪，随着电磁感应现象的发现以及发电机、电动机和电灯等技术的发展，电力开始取代部分蒸汽动力，推动社会进入以电气化和规模化生产为特征的第二次工业革命。



集中式直流供电

1882年，全球首座中心发电厂投入运营。爱迪生在纽约珍珠街建立了世界第一座中央发电厂，发电、配电线路和终端用电由此连成局域供电系统，集中式直流供电系统建立。



现代多相交流电网

1895年，特斯拉推广的多相交流电系统在尼亚加拉水电站成功并网并实现远距离高压输电，最终确立了交流电在现代工业电网中的核心地位。

电网历史演进 · 时间轴



*NC-RfG1.0 (EU) 2016/631: network code on requirements for generators 发电机并网要求网络规范

2.2 电网演进

莱茵并网认证大事记



电网互联的形成：从单向供电到能源互联

- 119世纪末—20世纪末
- 221世纪初—2010年代
- 32021年提出·建设至今
- 4未来方向 · 演进展望

传统电网

集中式电源 · 单向供电

- 火电水电集中式电源为主
- "发输配用"单向潮流
- 机电保护、人工调度
- "源随负荷"单向平衡

标志 交流输电确立，区域电网互联

智能电网

信息化 · 自动化 · 互动化

- 特高压网架与配电自动化
- 智能电表全面普及
- 信息化互动化运行
- 新能源规模化并网起步

标志 2009年"坚强智能电网"启动

新型电力系统

新能源为主体 · 源网荷储

- 风光高比例接入
- 新能源与电力电子设备占比高
- 储能、虚拟电厂协同
- 数字智能灵活调度
- 电网具备高度韧性

标志 新能源成装机电量主体

能源互联网

多能互补 · 广泛互联

- 电热冷气多能协同
- 电网与信息交通网融合
- 人工智能与数字孪生
- 产消者参与电力交易

标志 面向碳中和的高级形态

演进主线 单向供电 → 分布式供电 → 源网荷储协同 → 多能互联共享：走向广泛互联的能源互联网

电网能力的提升：从传统电网到智能电网

传统电网

传统电网的本质是“集中式能源输送与指令调度中枢”，其运行逻辑建立在“电源稳定、负荷可预测”的基础上。在这一体系中，火电、水电等大型集中式电源是核心，电网扮演“能源搬运工”的角色——通过高压输电网络将电力从电厂输送至用户，调度模式以“自上而下的指令下达”为主：调度中心根据负荷预测制定发电计划，指令电厂调整出力，用户则始终处于“被动接受电力”的末端，缺乏参与调度的渠道与动力。

智能电网技术优势

- 与现有电网相比，智能电网体现出电力流、信息流和业务流高度融合的显著特点，其先进性和优势主要表现在：
- 具有坚强的电网基础体系和技术支撑体系，能够抵御各类外部干扰和攻击，能够适应大规模清洁能源和可再生能源的接入，电网的坚强性得到巩固和提升。
 - 信息技术、传感器技术、自动控制技术与电网基础设施有机融合，可及时发现、预见可能发生的故障。故障发生时，电网可以快速隔离故障，实现自我恢复，从而避免大面积停电的发生。
 - 柔性交/直流输电、网厂协调、电力储能、配电网自动化等技术的广泛应用，使电网运行控制更加灵活、经济；并能适应大量分布式电源、微电网及电动汽车充放电设施的接入。
 - 通信、信息和现代管理技术的综合运用，将大大提高电力设备使用效率，降低电能损耗，使电网运行更加经济和高效。
 - 实现实时和非实时信息的高度集成、共享与利用，为单位运行管理展示全面、完整和精细的电网运营状态图，同时能够提供相应的辅助决策支持、控制实施方案和应对预案。
 - 建立起双向互动的服务模式，用户可以实时了解电价状况和停电计划信息，合理安排电器使用；电力公司可以获取用户的详细用电信息，为其提供更多的增值服务。

智能电网

智能电网是将先进的传感量测技术、信息通信技术、分析决策技术和自动控制技术与能源电力技术以及电网基础设施高度集成而形成的新型现代化电网。

传统电网与智能电网对比

特点	传统电网	智能电网
可靠性	被动响应，故障影响范围大	对电网运行状态的实时监控和评估，大大提高了电网抵御自然灾害和网络攻击的能力
兼容性	集中式发电，单向潮流为主，不利于分布式电源接入	兼容大量小型发电设备和储能设备的接入
高效性	电网运行效率受人工、制度等多方面因素的影响	利用数字信息技术，可以动态优化电力资源配置，提高电网运行效率
交互性	终端用户只是单一的消费者，用户与电力公司的信息互动很少	用户可以实时了解电价以及用电信息从而合理安排用电，并且从单一的消费者转变成电力交易的参与者

电网能源系统的重构：新型电力系统

什么是新型电力系统

以新能源为主体，以“双高”（高比例可再生能源、高比例电力电子设备）为显著特征，源、网、荷、储多要素协同互动，由数字智能技术支撑的现代电力系统。

解决了什么挑战

挑战一 惯量下降
同步机占比降低，频率稳定承压

挑战二 波动与间歇
出力随机波动，平衡与韧性承压

挑战三 消纳与输送
新能源基地远离负荷中心

应用了哪些新技术

构网型（GFM）技术
变流器模拟同步机特性，主动提供惯量支撑

储能与虚拟电厂
抽蓄与新型储能双向调节，聚合需求侧响应

特高压与智能调度
大容量跨区输电，数字孪生与AI辅助调控

大型光伏基地：新能源成为装机主体



储能电站：构网型技术提供主动支撑



电网边界的拓展：走向能源互联网

能源互联网

能源互联网是一种将电力系统、热力系统、燃气系统等多种能源系统有机融合，并与信息通信技术深度耦合，实现多种能源相互转换、优化配置、高效利用的综合能源系统网络。它就像是一个能源的“互联网”，把不同类型的能源（如电、热、气等）以及能源的生产、传输、存储和消费等环节紧密地连接在一起。

关键技术

先进的电力电子技术： 电力电子设备如逆变器、整流器等能够实现电能的转换和控制。在能源互联网中，这些设备需要具备更高的效率、更大的功率密度和更好的兼容性。例如，光伏逆变器可以将太阳能电池板产生的直流电转换为交流电，并且能够实现最大功率点跟踪（MPPT），提高太阳能发电系统的发电效率。

智能电网技术： 包括高级量测体系（AMI）、分布式电源接入技术、电网自愈技术等。高级量测体系能够实现对用户用电信息的实时采集和监控，为电力公司和用户提供详细的用电数据，方便进行电费结算和需求侧管理；分布式电源接入技术使得大量的分布式能源（如屋顶太阳能、小型风电等）能够安全、稳定地接入电网；电网自愈技术可以在电网发生故障时，快速检测、隔离故障，并自动恢复供电，提高电网的可靠性。

信息通信技术（ICT）： 能源互联网需要强大的信息通信技术来实现能源系统各个环节之间的信息交互和协同控制。通过物联网（IoT）技术，各种能源设备（如电表、气表、储能设备等）可以接入网络，将自身的状态信息发送给控制中心。大数据技术可以对海量的能源生产、传输、消费数据进行分析，挖掘潜在的能源优化利用模式。云计算技术则可以提供强大的计算能力，用于能源系统的建模、仿真和优化控制。



2.3 电网结构



特高压

定义与范围	交流1000kV及以上，直流±800kV及以上。
应用场景	国家级骨干网架，用于解决能源基地与负荷中心间数千公里的电力传输，具备大容量、远距离、低损耗的优势。



超高压

定义与范围	交流330kV-750kV，直流±400kV-±660kV。
应用场景	构成跨国或跨区域电网的主干网架，连接大型发电厂与区域变电站，承担省际及国家级电力输送。



高压

定义与范围	35kV-220kV（常见35kV、66kV、110kV、220kV）。
应用场景	地区性电力输送与分配，连接输电网与配电网，或直接向大型工业企业供电。



中压

定义与范围	1kV-35kV（常见10kV、20kV）。
应用场景	城市及农村配电网的骨干网络，负责将电力分配至各个街区、社区或小型工业区。



低压

定义与范围	<1kV（常见220V/380V、110V）。
应用场景	直接面向终端用户，为家庭、商业及小型办公场所供电。

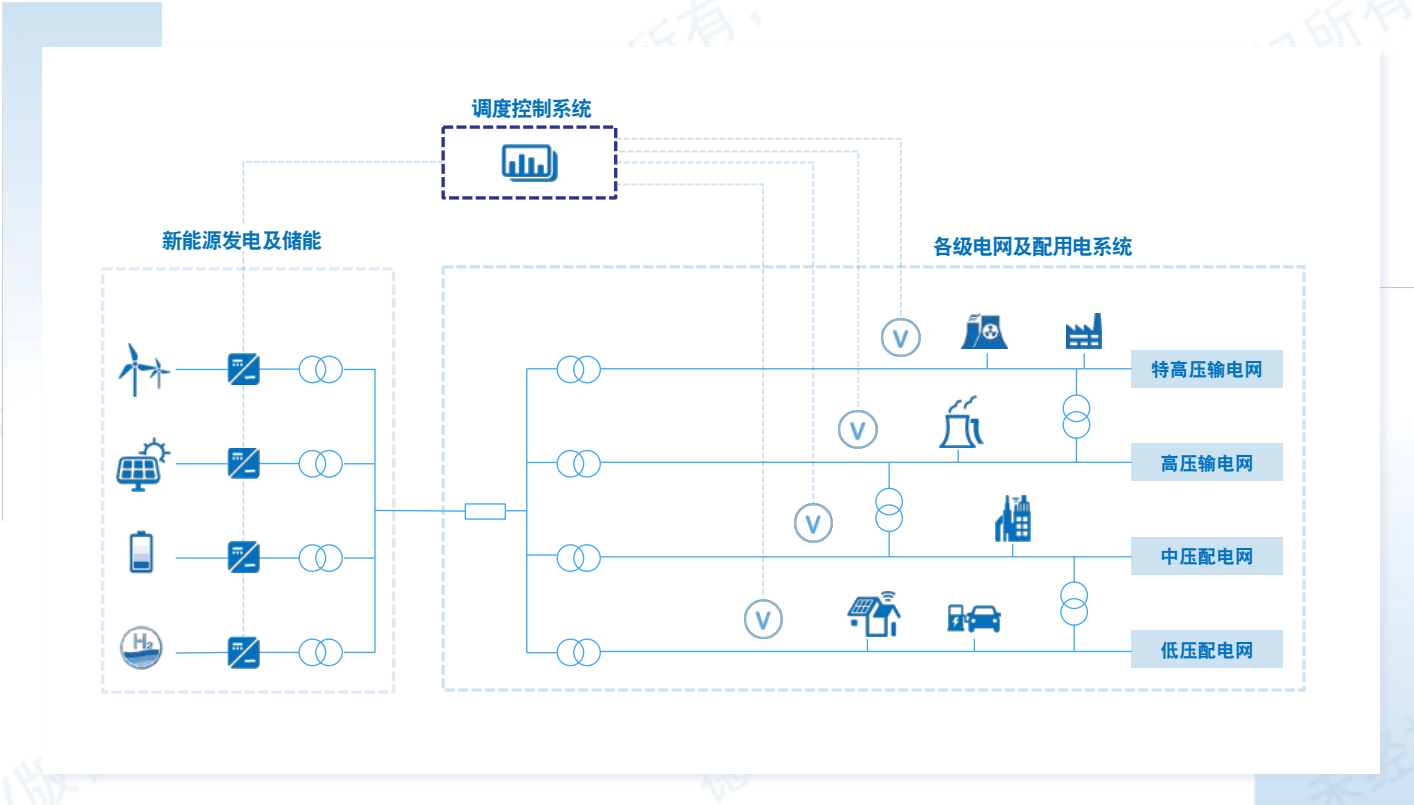


2.4 电力系统

电力系统是由发电、输电、变电、配电、用电及调度控制等环节组成的完整系统。不同环节之间通过电力设备、通信系统和控制系统相互连接，共同完成电能的生产、传输、分配和使用。

一般而言，电网可分为以下几个核心部分：

组成部分	主要功能
发电系统	将一次能源转化为电能，包括火电、水电、风电、光伏、核电等
输电系统	通过高压或超高压线路进行远距离、大容量电能传输
变电系统	实现电压等级转换，连接输电网与配电网
配电系统	将电能分配至工业、商业和居民用户
用电系统	电力消费终端，包括负荷、电动汽车、储能和用户侧能源设备
调度控制系统	对电网运行状态进行监测、分析、控制和优化



按功能层级

输电网 · 主干网架

220kV及以上，大容量远距离输送 | 应用：西电东送、
新能源基地外送、跨省区联网

配电网 · 末端网络

110kV及以下，供电“最后一公里” | 应用：城市与居民供电、
园区供电、分布式电源接入

按用户类型

工业电网 · 面向生产

负荷大且集中、连续供电要求高 | 应用：大工业直供、
工业园区配网、企业自备电厂并网

民用电网 · 面向生活

负荷分散、峰谷差明显、低压入户 | 应用：居民区、商业综
合体、学校医院等公共设施

按规模形态

大电网 · 集中互联

广域互联、统一调度、规模效应 | 应用：国家与省级骨
干网架、跨区域电力互济保供

微电网 · 分布自治

分布自治、可并网可孤岛运行 | 应用：园区、海岛、学校医
院、数据中心、应急保电

按交直流形式

直流电网 · 专线直达

无同步约束、损耗低，专线直达 | 应用：特高压直流外
送、海上风电送出、背靠背互联

交流电网 · 灵活组网

变压方便、易于组网，是主体形态 | 应用：城乡配电网、区
域交流联网、绝大多数场景

2.6 全球主要国家电网特征

北美风电带、中国送端、日本东西断面、南澳，都是弱网侧的典型。欧洲中部和中国东中部负荷中心，是相对强的一侧。同一国家里强弱同时存在，所以并网方案必须落到具体并网点的短路比和惯量。

			电压等级				频率	电网特点
			低压	中压	高压	特高压		
	北美	>>	120V	1-100kV	100-230kV	>345kV	60 Hz	东部主网较强，风电汇集区偏弱
	欧洲	>>	230/400V	1-36kV	36-150kV	>150kV	50 Hz	中部互济强，半岛和末端较弱
	德国	>>	230/400V	10-30kV	110kV	220-380kV	50 Hz	南北通道易过载，北部接入点偏弱。
	中国	>>	220/380V	1-20kV	35-750kV	330-1000kV	50 Hz	东中部受端较强，西部北部送端较弱。
	日本	>>	100/200V	6.6kV	22-500kV	1000kV	东部 50 / 西部 60 Hz	点状很强，网间互济偏弱。
	澳洲	>>	230/400V	1-33kV	66-220kV	275-500kV	50 Hz	分布式全球领先，骨干网强度偏弱。

备注：并网技术方案应该根据“强弱”电网的特性，考虑面对未来综合能力的要求，如：资源保供、跨区互济、电力设施水平、新能源消纳、负荷增长适配等因素。

电源侧 例：午间光伏大发与晚间高峰错配

- ① 新能源随机波动：
风电光伏出力“靠天吃饭”，电力电量实时平衡难度加大
- ② 惯量持续下降：
同步发电机占比降低，系统频率稳定承压

电网侧 例：直流闭锁等大功率冲击传导更快

- ③ 电力电子化加深：
换流设备大量接入，宽频振荡等新型稳定问题显现
- ④ 网架结构承压：
部分区域网架相对薄弱，老旧设备更新改造压力大

负荷侧 例：夏季空调与夜间充电负荷叠加

- ⑤ 新型负荷激增：
电动汽车、数据中心等用电需求快速增长
- ⑥ 峰谷差加大：
空调、充电负荷叠加，用电高峰期供电压力上升

技术
层面

政策
层面

外部环境 例：寒潮高温下的电力保供攻坚战

- ⑦ 极端天气频发：
高温、寒潮、台风等极端事件考验供电韧性
- ⑧ 网络安全风险：
数字化程度提升，电网面临的网络攻击面扩大

补贴退坡（去补贴） 例：风电光伏全面进入平价上网时代

新能源从补贴驱动转向平价与市场驱动，收益模式重构，投资回报不确定性上升

各国财政空间收紧 例：多国削减能源补贴与公共开支

财政压力加大，电网改造难以依赖公共投入，引入社会资本机制尚不完善

新型电力系统改造成本高 例：电网投资规模大、回收周期长达数十年

输配电网升级、储能、数字化需要巨额长期投资，“谁来买单”的成本疏导机制未理顺

新型系统标准缺失 例：新型主体并网检测与认证依据不足

储能、虚拟电厂、构网型技术等新型主体缺乏统一并网与技术标准，规模化推广受阻

缺乏统一的电网指令 例：跨国电网互联的技术规则各不相同

各国、各地区并网规则（Grid Code）碎片化，跨国跨区互联与设备认证协调成本高

电力市场机制不完善 例：调节资源的收益难以覆盖其成本

现货市场、辅助服务与容量机制仍在建设中，灵活性资源缺乏合理价格信号

维度	传统能源	新能源	带来的挑战
 能源来源	化石能源、集中式资源 	 风、光、储、氢等清洁资源	 资源分布与负荷中心不匹配
 发电特性	稳定、可控 	波动、间隙 	 电力平衡和稳定压力增加
 并网方式	同步发电机接入 	 逆变器接入 	 惯量下降，故障支撑能力变弱
 电网结构	单向供电 		 配电网电压、潮流、保护复杂化
 调度方式	集中调度大型电厂 	源网荷储协同 	 预测、通信和控制难度增加
 环境影响	碳排放和污染较高 	 低碳清洁	 设备回收和生命周期管理
 市场机制	以电量和燃料成本为主 	 低边际成本、高波动	 需要容量、辅助服务和灵活性市场

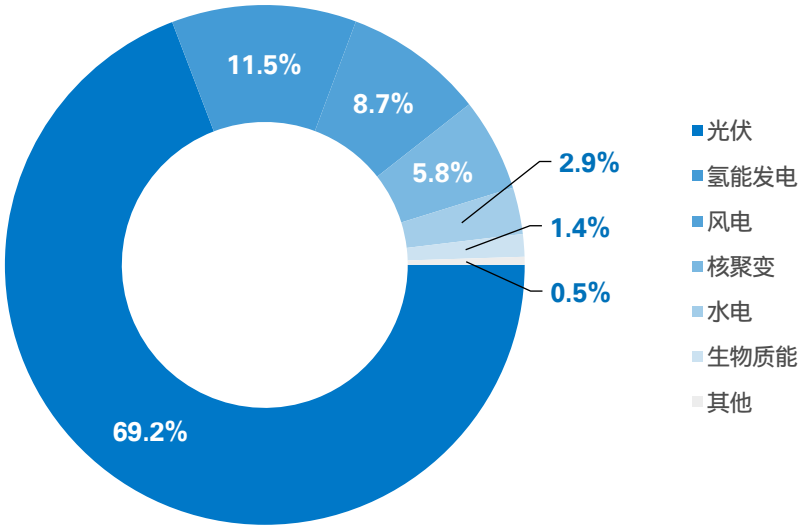
第三章 电网技术市场调研



3.1 能源供应端增长预期与核心因素

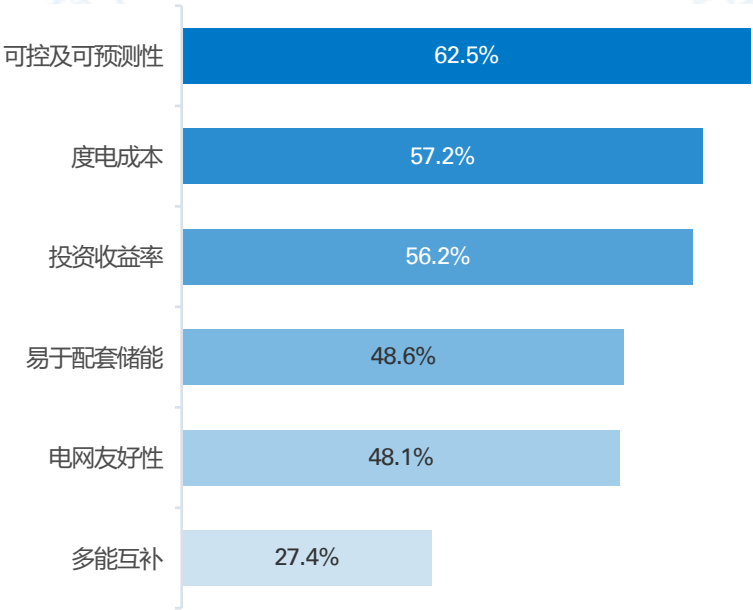
未来1—3年，发电占比增长最快的新能源类型（单选题）

光伏以69.2%的压倒性比例被选为增长最快的新能源类型，这一共识建立在光伏度电成本过去十年大幅下降的行业现实之上。国际可再生能源署数据显示，2025年全球光伏累计装机约2392 GW，单年新增511GW，约占全年可再生能源新增装机的四分之三。氢能以11.5%位列第二，反映出行业对其在长时储能和工业脱碳领域长期潜力的关注，但其经济性拐点尚未到来。风电和水电受限于地理资源禀赋和开发周期，增长预期相对保守。



能源供应端最重要的核心因素（多选题）

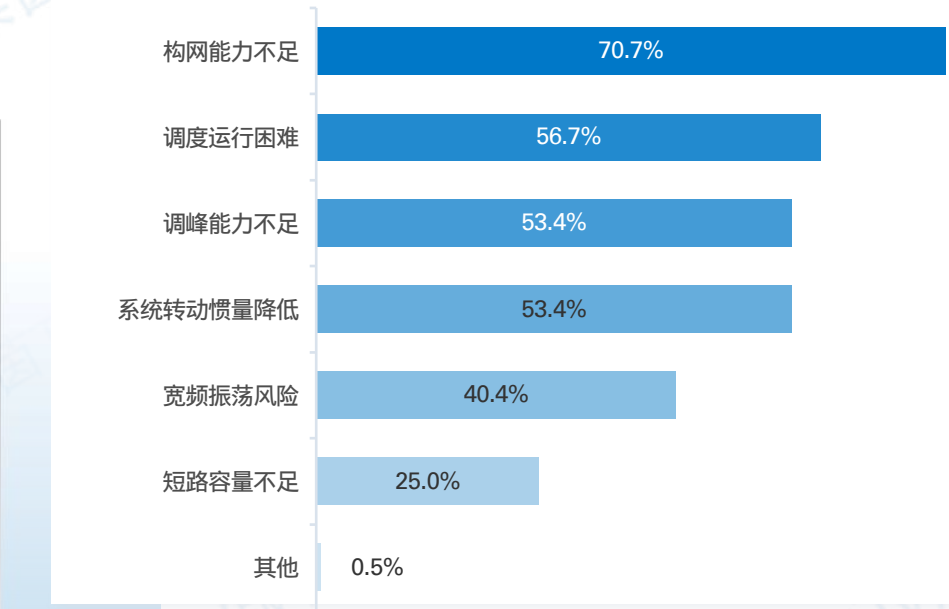
可控及可预测性、度电成本、投资收益率三大因素均有超过55%的受访者选择，三者在统计上几乎并驾齐驱，说明行业对供应端的核心关注已经从单纯的"便宜"升级为"便宜且可控"。电网友好性得到了48.1%受访者的选择，表明新能源发电企业在项目开发阶段就已经将电网适应性纳入核心考量。易于配套储能同样是近半数受访者的共同选择，这与光伏配储成为标准配置的行业趋势高度吻合。



3.2 电网运行技术挑战与负荷冲击

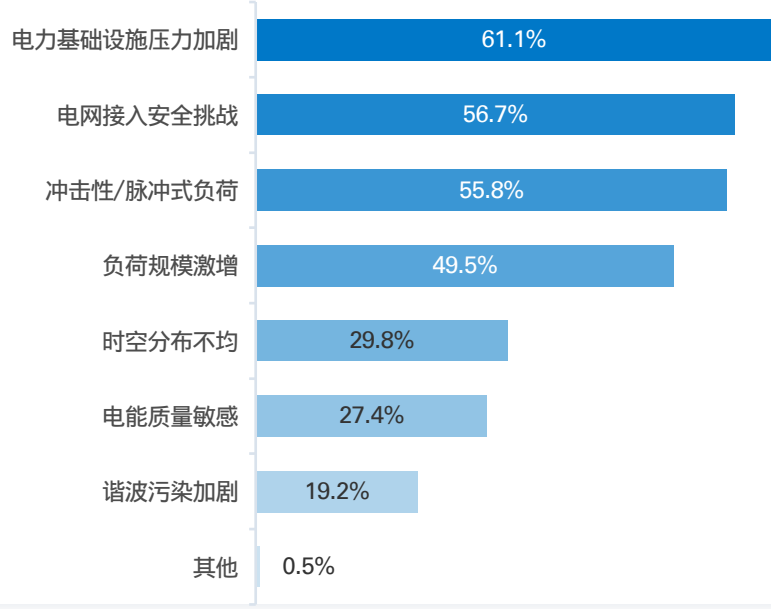
电网面临的技术挑战（多选题）

构网能力不足以70.7%的高票位居技术挑战首位，显著高于宽频振荡风险的40.4%和短路容量不足的25.0%。这一差距传递了明确信号：在新能源渗透率持续走高的背景下，电网挑战正在从传统物理瓶颈转向系统稳定性的深层问题。当前构网型逆变器仍处于工程示范和早期商业化阶段，相关IEC、IEEE标准与测试方法仍在推进中，标准缺失是商业化落地的重要制约因素。调度运行困难、调峰能力不足和系统转动惯量降低也均有过半受访者选择，四者共同构成新能源消纳的技术困境。



新型负荷对电网的主要冲击（多选题）

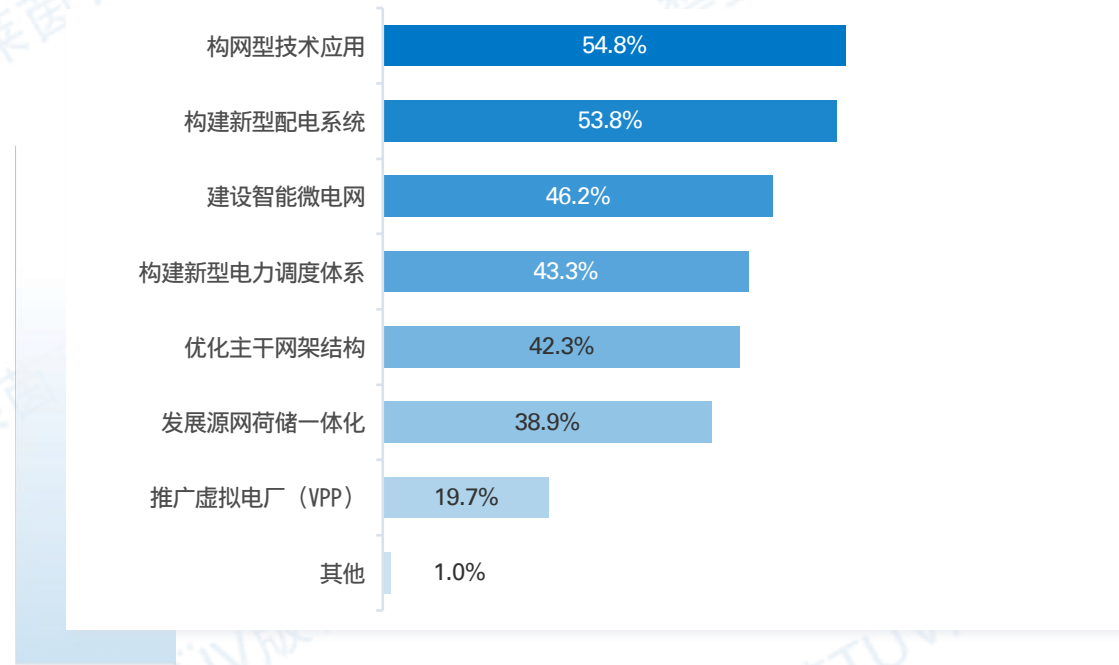
电力基础设施压力加剧、电网接入安全挑战、冲击性/脉冲式负荷三项核心关切均有超过55%的受访者选择，集中反映了AI数据中心（AIDC）和新能源汽车带来的不仅是负荷规模增长，更是负荷特性的根本改变。以AIDC为例，单个超大规模数据中心的电力需求可达数百兆瓦，且负荷波动可能对局部电网形成显著冲击。受访者对时空分布不均和电能质量敏感的关注度相对较低，说明行业焦点仍集中在基础设施承载能力和接入安全这两个前置性问题上。



3.3 电网建设解决方案与市场化举措

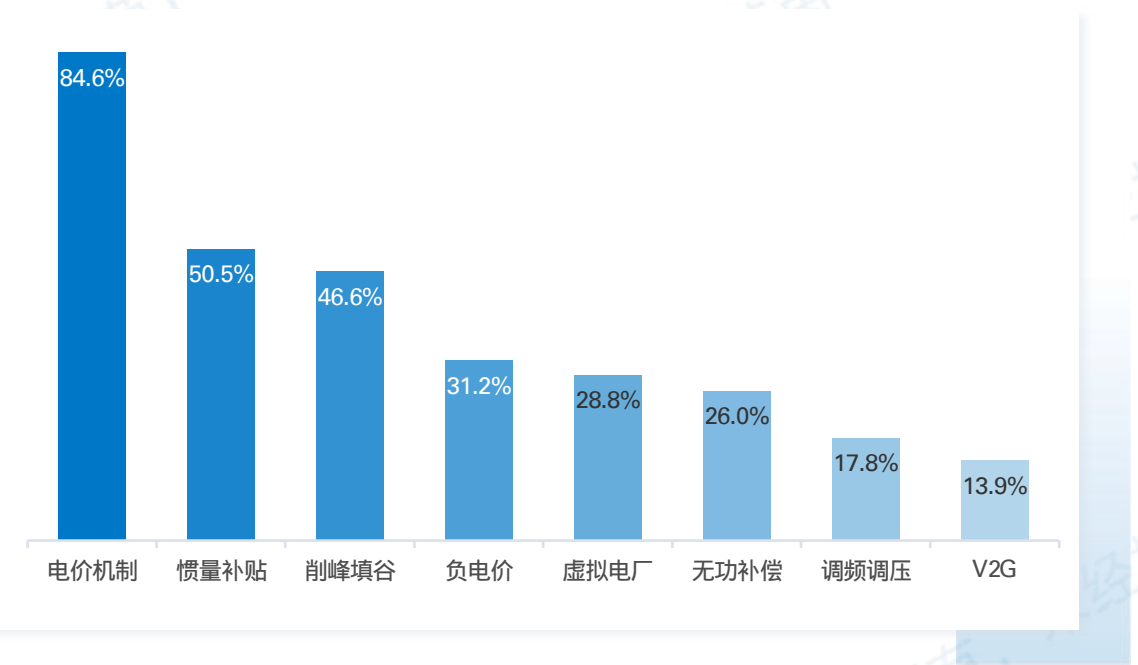
电网建设的核心解决方案（多选题）

构网型技术应用和构建新型配电系统分别获得54.8%和53.8%受访者选择，同属第一梯队，行业对技术路径的选择方向较为清晰。建设智能微电网和构建新型电力调度体系紧随其后，四项方案的选择比例均超过40%，说明受访者普遍认为解决方案不是单一的，而是需要技术、架构、调度、市场多管齐下。推广虚拟电厂（VPP）仅获19.7%，位列最末，反映出行业对VPP在当前阶段的商业化速度和实际调度效果仍持观望态度。



鼓励用户侧参与电网调节的市场化举措（多选题）

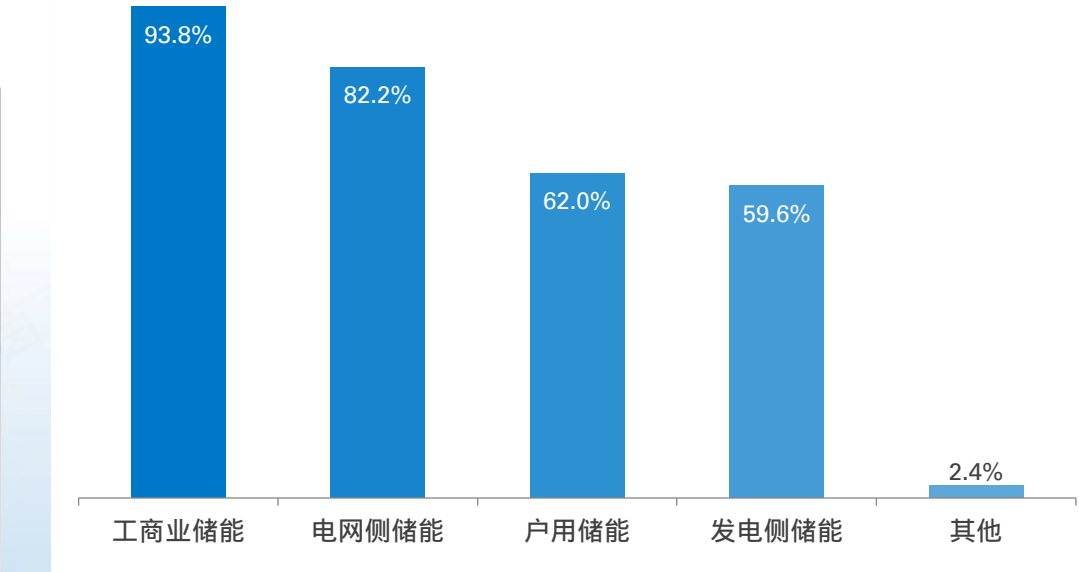
电价机制以84.6%的压倒性优势占据首位，是本次调研所有题目中第二高的单一选项共识度。这个数字说明行业几乎一致认为价格信号是调动用户侧资源最有效的手段。惯量补贴和削峰填谷也分别获得50.5%和46.6%受访者选择，表明除基础电价机制外，针对特定辅助服务的补偿机制同样受到重视。负电价和V2G的选择比例相对较低，前者可能受限于不同市场电力现货与实时价格机制的成熟度，后者则反映出车网互动技术短期内尚不具备大规模商业化条件。



3.4 储能应用与区域市场

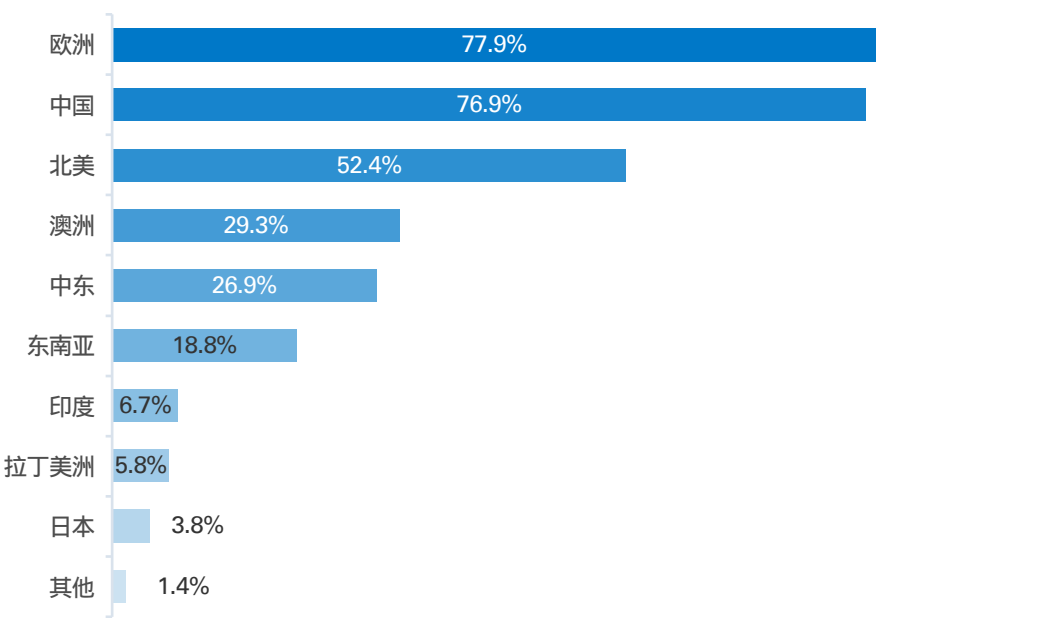
增长最快的储能应用场景（多选题）

工商业储能以93.8%的绝对优势成为本次调研中共识度最高的单一选项。据国信证券相关研究，2025年中国工商业储能新增装机约10.5GWh，同比增长40%；欧洲工商业储能达到3.6GWh，同比增长62%。工商业储能的经济性已在多数峰谷价差较大的地区得到验证——以浙江为例，典型两充两放模式下部分项目内部收益率可超过20%，投资回收期约四到六年。电网侧储能和户用储能分别获得82.2%和62.0%受访者选择，发电侧储能59.6%的选择比例则在一定程度上反映其增长更多受政策驱动而非纯市场驱动。



并网技术发展最快的市场（多选题）

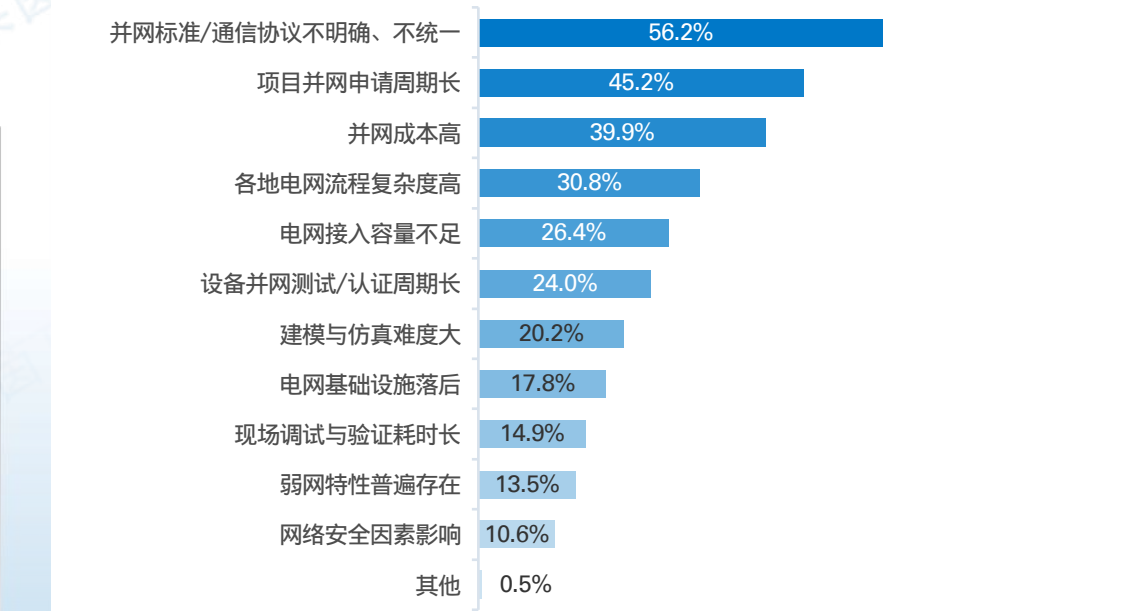
欧洲和中国分别获得77.9%和76.9%受访者选择，几乎完全持平，成为行业公认的两大并网技术发展引擎。欧洲略高于中国的结果可能与其更复杂的跨国电网互联需求以及更激进的能源转型政策有关。据欧盟委员会公开信息，欧盟2026年签署的储能三方协议提出2026—2028年安装约45GW储能，同时成员国承诺规模约30—35GW。北美以52.4%位居第三，澳洲以29.3%位列第四。印度和拉丁美洲分别仅获6.7%和5.8%，表明新兴市场在并网技术领域的存在感仍然较低。



3.5 并网流程痛点与标准趋势

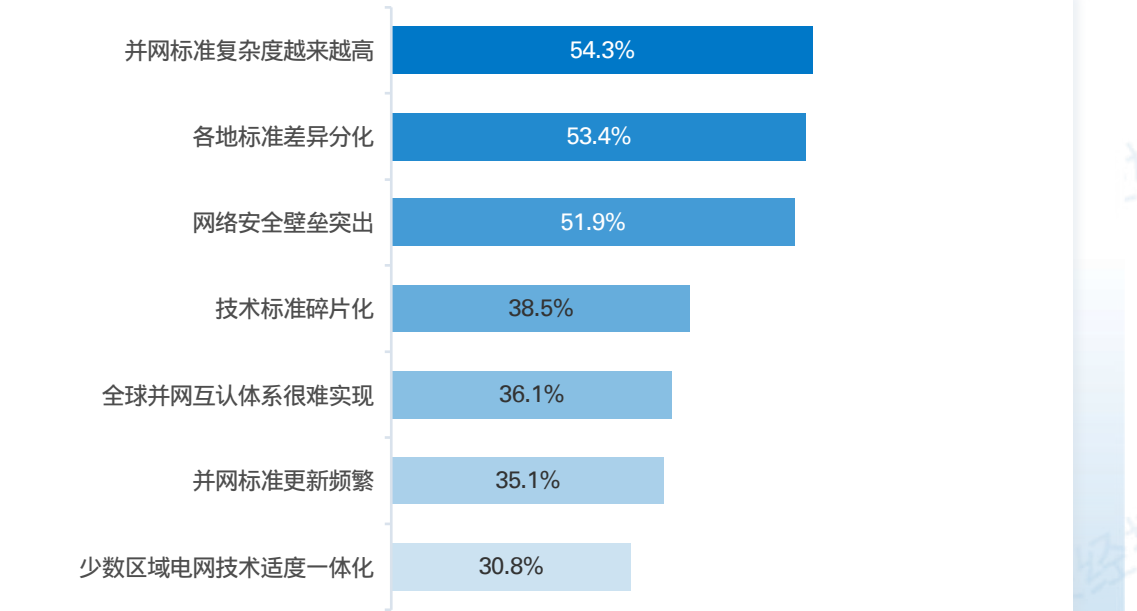
并网申请的难点和痛点（多选题）

并网标准/通信协议不明确、不统一得到56.2%受访者选择，成为最大痛点。这不仅是技术问题，更是制度协调问题。不同地区、不同电压等级的并网要求差异显著，导致设备厂商需要为同一产品做多次认证，开发商在项目前期也难以准确评估并网成本和时间。项目申请周期长和并网成本高分别有45.2%和39.9%的受访者选择，三者共同指向并网环节的制度性摩擦成本。



未来全球并网标准的发展趋势（多选题）

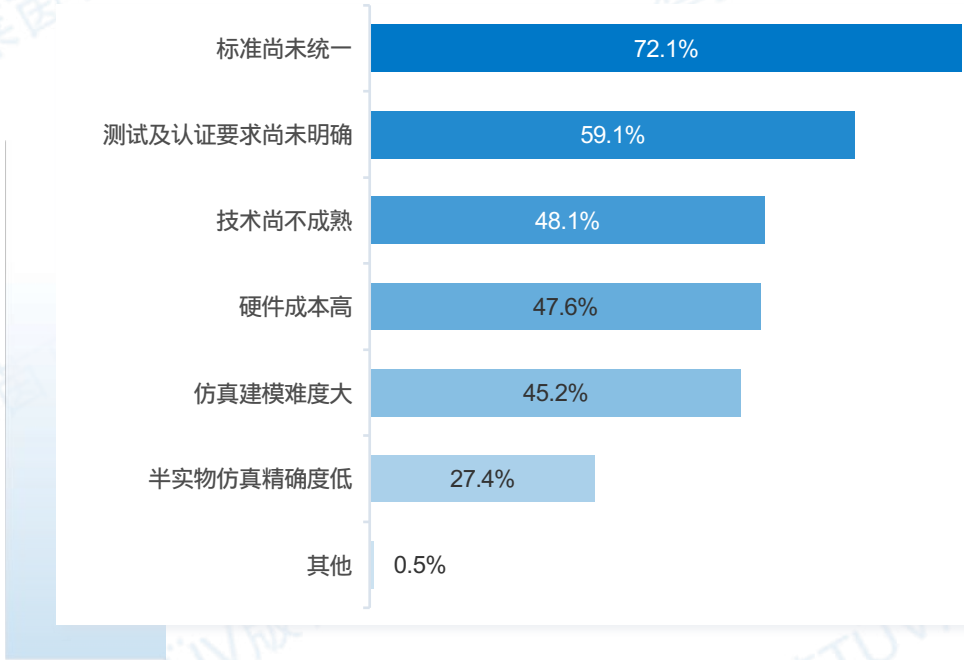
并网标准复杂度越来越高、各地标准差异分化、网络安全壁垒突出三者的选中率均在约52%至54%之间，形成紧密的第一梯队。这个“三高”格局描绘了一个清晰前景：全球并网标准不会走向统一简化，而是趋向更加复杂、更加分化、网络安全约束更强。全球并网互认体系很难实现以36.1%的选中率位居中游，进一步印证了行业对标准互认前景的悲观预期。少数区域电网技术适度一体化仅获30.8%，但对部分受访者而言，这可能是更务实的一条中间路径。



3.6 构网技术的现状与驱动力

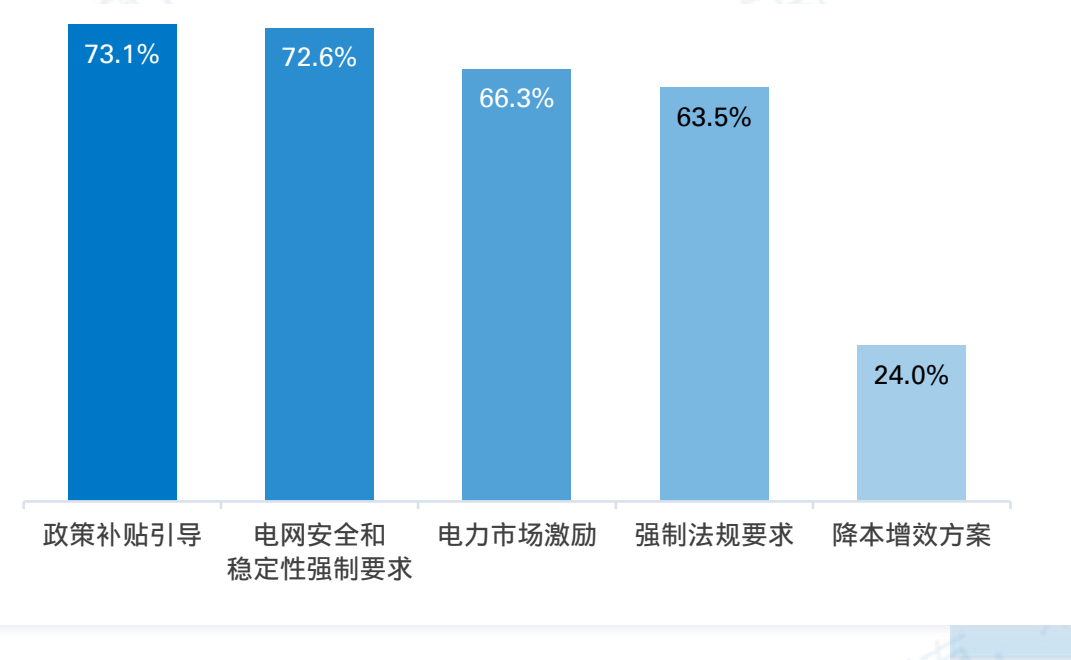
如何看待当前构网技术的发展现状（多选题）

标准尚未统一以72.1%的显著优势位居首位，测试及认证要求尚未明确以59.1%位居第二。这与构网技术所处的发展阶段高度吻合——技术已经从实验室走向工程示范，但距离大规模商业化还隔着标准化的鸿沟。技术尚不成熟和硬件成本高各获得接近半数的选中率，说明受访者对构网技术的判断是务实的：方向对了，但成熟度和成本仍需时间。德国弗劳恩霍夫太阳能研究所2025年对七家制造商的构网逆变器测试表明，在明确定义的测试条件下各设备表现相似，但在其他工况下存在显著差异，这从侧面印证了标准化工作的紧迫性。



推动构网技术发展的主要驱动力（多选题）

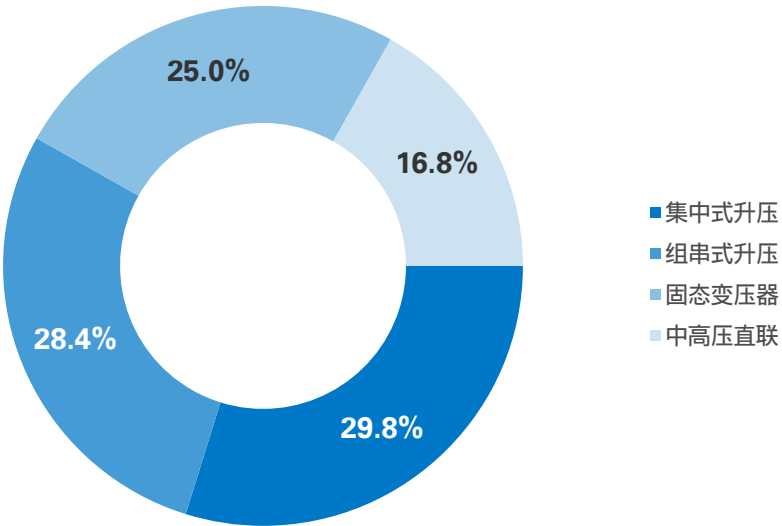
政策补贴引导和电网安全与稳定性强制要求以73.1%和72.6%的几乎相同选中率位居前列，分别代表政策推力和安全约束。电力市场激励以66.3%紧随其后，强制法规要求以63.5%位列第四。四项选择比例均超过60%，表明构网技术的发展不是单一力量驱动的，而是政策、监管和市场信号共同作用的结果。降本增效方案仅获24.0%，反映出行业认为构网技术当前的首要问题不是成本优化，而是方向和标准的明确。



3.7 技术路线与第三方认证

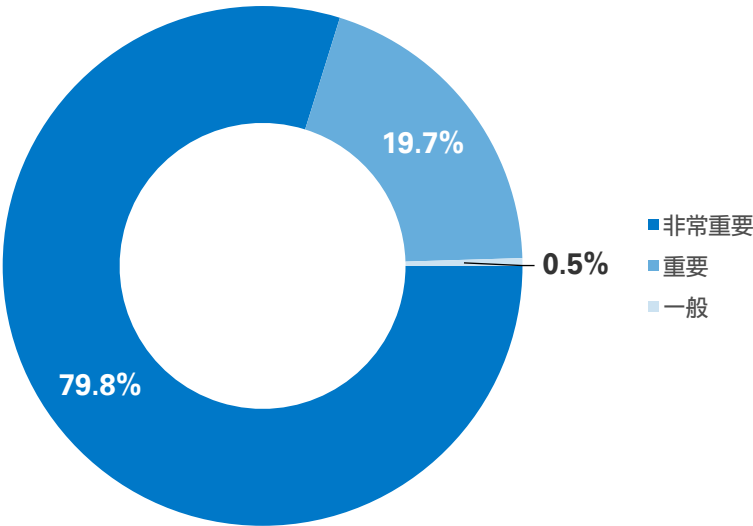
未来1—3年，最主流的并网接入形式（单选题）

集中式升压、组串式升压、固态变压器三种方案各有25%至30%的受访者选择，差距不超过五个百分点，是本次调研中观点最分散的一道题。这个三足鼎立的格局说明并网接入的技术路线远未收敛。集中式和组串式升压是当前的主流方案，各有适用场景和拥趸；固态变压器虽然技术前景被看好，但受限于成本和大功率器件的成熟度，距离大规模应用尚有时日。中高压直联以16.8%位居最末，但其中在高压场景下的效率优势仍值得关注。



权威第三方检测认证机构的作用（单选题）

非常重要以79.8%的绝对多数占据主导地位，加上19.7%认为重要，合计99.5%的受访者认可第三方检测认证机构的价值。这个近乎一致的共识传递了一个清晰的信息：在并网技术快速发展、标准尚未统一的行业过渡期，权威独立的第三方机构被认为是维护技术底线、促进良性竞争、建立市场信任不可或缺的角色。



第四章 并网技术要求



4.1.1 构网型控制技术

构网型并网技术主流控制方法

构网型（Grid-Forming, GFM）控制是解决高比例新能源并网后低惯量电网稳定性问题的核心技术，其核心目标是使逆变器具备自主构建电压与频率、主动支撑电网的能力，它的关键指标为：惯性时间常数 1–20s 在线可调；短路比 1.1–20 稳定运行；短路无功电流支撑速度 <20ms。目前主流分为下垂控制、虚拟同步发电机（VSG/VSM）、功率同步控制（PSC）、电压型构网控制（VOC）及匹配控制五大控制方法：

- 下垂控制作为最基础的构网型策略，通过 $P-f$ 和 $Q-V$ 下垂控制，分别模拟同步机的一次调频和励磁系统的无功调压特性，实现逆变器无通信并联与功率分配，结构简单但无惯性、无阻尼，适合小容量微网与强电网场景；
- 虚拟同步发电机（VSG）在下垂控制基础上嵌入同步机转子运动方程，模拟转动惯量与阻尼特性，具备同步机外特性与惯性支撑，可抑制频率突变与振荡，适配高比例新能源并网及弱电网场景；
- 功率同步控制（PSC）直接由有功功率驱动相角动态，无需锁相环（PLL）与电压外环，通过功率同步实现构网，在弱电网下同步稳定、抗扰动强，适合长距离输电场景；
- 电压型构网控制（VOC）以 $V-f$ 直接建压为核心，搭配虚拟阻抗实现多机功率均分，电压源特性强但缺乏惯量阻尼，需配合惯量补偿提升稳定性，适合离网孤岛与微网主电源场景；
- 匹配控制类比直流电容与同步机惯量，实现动态自适应下垂系数与惯量、下垂一体化控制，无需惯量参数整定，参数鲁棒性高，适合大规模场站协同。

跟网型（GFL）并网技术		构网型（GFM）并网技术	
核心原理	以 电流源 为核心特性，通过 锁相环 （PLL）实时跟踪电网电压幅值、频率与相位，获取同步参考信号。 控制目标为输出与电网同频同相的电流，依据电网调度指令或本地控制策略调节有功功率（ P ）、无功功率（ Q ），本质是“被动响应电网指令、跟随电网状态运行”。	以 电压源 为核心特性，无需依赖锁相环跟踪电网信号，通过虚拟同步机（VSG）、下垂控制（Droop Control）等核心算法，模拟同步发电机转动惯量、阻尼特性与调频调压机理。 自主设定输出电压幅值、频率与相位，并网时主动支撑电网参数稳定，离网时独立构建局部电网，本质是“主动构建并支撑电网运行”。	
技术特性	- 电网依赖性强：必须依赖外部稳定电网提供参考信号，无独立建网能力，孤岛场景无法运行； - 控制模式简单：电流闭环控制成熟可靠，算法复杂度低、响应速度快、成本低廉； - 支撑能力薄弱：仅能提供有限有功无功调节，无虚拟惯量与阻尼，依赖电网惯性； - 故障适应性差：电网电压跌落、频率畸变时，锁相环易失锁，故障状态下多以限流、脱网保护为主，难以主动支撑电网； - 控制模式简单：电流闭环控制成熟可靠，算法复杂度低； - 硬件成本较低：通常采用常规逆变器配置，工程实现成熟。	- 自主支撑能力：不依赖外部电网参考，可独立建立稳定电压频率，具备黑启动能力； - 虚拟惯量阻尼：模拟同步机惯量响应，可提供虚拟惯量与阻尼，毫秒级快速调节频率波动； - 主动调压调频：通过无功-电压（$Q-V$）、有功-频率（$P-f$）下垂特性，主动动态支撑电网电压频率； - 强故障穿越：具备较强电压支撑与故障穿越能力，可在深度电压跌落下保持稳定运行并快速提供无功支撑； - 多场景适配：适配弱电网、微电网、深远海风电、高比例新能源基地等全场景需求； - 控制策略更复杂：通常需结合VSG、下垂控制、限流保护等多种控制策略； - 硬件成本较高：系统配置和控制实现更复杂，通常较跟网型高约15%–20%。	
典型应用场景	强电网区域集中式风电场、光伏电站，电网结构稳固、短路比（SCR） ≥ 3 的常规并网项目，对电网支撑无特殊要求的分布式新能源场景。	弱电网（SCR < 3）区域、新能源高渗透率基地、微电网 / 孤岛供电、深远海风电、电网侧共享储能、黑启动电源等对电网支撑能力要求高的场景。	

4.1.2 中高压直挂与级联 H 桥拓扑

技术原理

传统低压方案

电池簇 → 集中式PCS（0.4kV）→ 升压变压器 → 6–35kV电网

级联高压直挂方案

电池簇 → 级联H桥功率单元串联叠加 → 直接输出6–35kV → 电网

省却升压变压器，PCS输出即电网；电抗器滤波替代LCL，避免谐振风险；单套系统功率达低压方案10倍以上，百兆瓦级电站仅需数套系统。

核心优势

- ◆ **效率跃升**：无变压器损耗，系统效率提升6–10个百分点
- ◆ **响应极速**：10ms内极速响应，单机独立接受电网调控
- ◆ **构网天然适配**：无变压器高低压侧性能差异，自同步电压源控制更稳定
- ◆ **占地节省**：省去升压站，占地面积减少30%以上
- ◆ **安全可控**：簇级分割管控杜绝并联环流，冗余模块旁路保障稳定运行

关键指标

指标	数值
系统循环效率	92%+（低压方案85–88%）
单机容量	20-100MW / 200MWh

4.1.3 交直流一体化储能技术

架构演进

传统架构

电池簇（DC）→ 集中式PCS（DC/AC）→ 交流母线

直流侧长距离布线，存在环流、短路风险；PCS 为独立设备，体积大、损耗高

交流电池架构

电池模组 + 全控功率器件深度融合 → 直接输出交流

直流线缆不出柜，消除直流侧短路隐患；电池本体即完成交直流变换，无需独立 PCS

核心优势

- ◆ **安全升级**：直流不出柜，消除直流侧短路这一储能最大风险点
- ◆ **安装革命**：出厂前完成预装预调，现场仅需简单并网，工期大幅缩短
- ◆ **效率提升**：减少一级功率变换，系统效率提升2–3个百分点
- ◆ **空间节省**：无独立PCS柜，功率密度提升30%以上
- ◆ **运维简化**：交直流一体设计，减少现场接线与调试工作量

应用场景

- ◆ **大型储能电站**：GW级项目采用交直流一体设计，减少现场施工量与调试周期；
- ◆ **工商业储能**：液冷一体机实现毫秒级并离网无缝切换，适配光储充一体化场景
- ◆ **户用储能**：电池与逆变器一体化设计，即插即用，降低安装门槛

4.1.4 固态变压器与电力路由技术

技术原理与指标

传统工频变压器：铁芯 + 铜绕组，50Hz 电磁感应，体积重量大，仅单向变压

固态变压器（SST）：SiC/GaN功率器件 + 高频隔离（kHz级），电力电子变换，体积小60-90%，双向可控

核心突破：10kV中压交流直接转换为 750V/800V 直流，省去多级交直流变换；模块化预装设计，建设周期从半年压缩至几天；响应速度比传统机械开关快1000倍以上。

指标	数值
转换效率	97.5–98.5%
体积/重量	较传统方案降低60–90%
功率密度	提升5–10倍

典型应用与案例

光储充一体化

珠海首套SST光储充示范站：10kV交流直转750V直流，系统损耗降低5–8%，实现车桩网储智能协同

配电网柔性互联

苏州 500kV级SST试点：支撑电网柔性互联、微电网运行及光储充一体化系统调度，融合数字孪生技术

数据中心供电

- 中压能源路由器：10kV直转 400-800V DC，峰值效率 98.3%，部署周期 <90天
- SST：10kV/750V双向变换，光储充全直流接入，效率提升3–5个百分点，建设周期从半年压缩至几天

4.1.5 柔性直流组网技术

柔性直流 vs 常规直流

维度	常规直流 LCC	柔性直流 VSC
换流元件	半控晶闸管	全控IGBT
电压频率控制	依赖交流电网	自主调控

核心优势：无换相失败风险，可接入弱电网甚至无源网络；有功无功独立控制，黑启动能力强；适合大规模新能源基地与远海风电送出。

演进方向

从“点对点”向“多端直流汇集组网”演进；远海风电柔直成为主流路径；特高压柔直占比从2023 年0%提升至2024年开工项目的75%

AI功率预测与虚拟电厂

- ◆ **AI功率预测：**构建“气象预报 + 功率预测”多周期算法大模型，复杂场景与转折性天气下预测精度高；
- ◆ **场群协同控制：**多时间尺度调节使新能源消纳率提升。

虚拟电厂（VPP）聚合

- ◆ 聚合光伏、储能、充电桩、楼宇空调等分布式资源，参与调频与辅助服务市场
- ◆ 无锡虚拟电厂接入资源12,121个、总规模400MW、可调负荷40MW，成为江苏规模最大地级市国有虚拟电厂
- ◆ 湖南、宁夏、湖北等地虚拟电厂以独立市场主体身份参与调峰辅助服务交易

SiC宽禁带器件：效率革命

特性	SiC	IGBT
开关频率	100kHz+	20kHz
开关损耗	降低70–80%	基准
系统效率	99%+	96–98%
无源器件体积	缩小60%	基准

2025年被视为SiC全面替代IGBT元年；光伏逆变器效率提升至**99%+**，储能变流器因高频特性成为主流。400kW+组串逆变器采用SiC器件，GW级电站全生命周期可多发9,000万度电；SiC渗透率2025年预计超**30%**

4.2 并网技术路线

4.2.1 传统电力的并网

传统主力机组都是同步发电机（转子带励磁，和电网同步旋转），并网后机组和电网强制同步旋转：电网拉着机组转，机组也支撑电网。

火电并网（汽轮机 + 同步发电机）

- ◆ 锅炉烧煤产蒸汽推动汽轮机，带动发电机转子旋转；
- ◆ 调速器控制转速，精确调到50Hz；励磁调节电压；
- ◆ 电压、频率、相位三者和电网完全一致，合上并网开关；

水电并网

原理和火电完全一致，只是动力换成水轮机，同样是同步发电机，同样有惯量、调压调频能力，调节速度比火电更快。

传统同步机天然优势

- ◆ 自主调压、调频
励磁系统自动支撑电压；汽轮机调速器自动增减出力稳住频率，电网缺电自动多发，过载自动减发。
- ◆ 自带短路支撑（短路容量大）
故障瞬间能输出巨大短路电流，让保护装置快速跳闸切除故障；
- ◆ 有旋转惯量
汽轮机、发电机巨大转子存机械能。电网突然丢负荷 / 跳闸时，转子惯性缓冲频率暴跌，不会瞬间崩网；
- ◆ 黑启动能力
全电网停电后，机组可自己启动，逐步恢复整片电网。



4.2.2 新能源电力的并网

光伏、新型风电等新能源机组没有同步发电机，全部通过电力电子转换送入电网。并网后机组不与电网强制同步旋转：变流器靠控制算法实时追踪电网，电网动它就跟着动（跟网型控制）。

光伏并网（光伏组件 + 逆变器）

- ◆ 光伏板发出直流电，经逆变器变换为交流电；
- ◆ 锁相环（PLL）实时跟踪电网的电压、频率、相位；
- ◆ 与电网完全一致后合上并网开关，以“电流源”方式注入功率；

风电并网

原理和光伏完全一致，只是动力换成风机：双馈机组经部分功率变流器、直驱机组经全功率变流器并网，发电机转速与电网频率解耦。

变流器并网天然短板

- ◆ 不能自主调压、调频
跟网型变流器是“跟随者”，电压频率全靠锁相环从电网“读”出，电网弱、扰动大时容易失锁脱网；
- ◆ 短路支撑能力弱（短路容量小）
受电力电子器件过流能力限制，故障时输出电流有限；
- ◆ 没有旋转惯量
变流器无转子，电网丢负荷 / 跳闸时频率缺少惯性缓冲，跌落更快、更易连锁脱网；
- ◆ 无黑启动能力
跟网型变流器必须先“看到”电网电压才能工作，全网停电后无法自行启动。

发展方向：构网型（Grid-Forming）变流器

让变流器从“跟随者”变“支撑者”：通过虚拟同步机（VSG）等控制主动建立电压频率、模拟惯量与调压调频，使新能源具备类似同步机的“压舱石”特性。



4.2.3 传统发电机/新能源发电机能力比对

相位跳变功率/能量:

发电机类型	正向（相位角负跳变）		负向（相位角正跳变）	
	能力 · 边界条件 · 限制因素	所需措施	能力 · 边界条件 · 限制因素	所需措施
PV 光伏	低 ◆ 受半导体热应力限制 ◆ 受 DC-link 储能容量限制 ◆ 取决于事件前负载水平 ◆ 性能取决于控制（阻尼等）	软件/控制（含保护）的根本性重构；需增加储能容量提供相位跳变能量	低 ◆ 取决于事件前负载水平 ◆ 性能取决于控制（阻尼等）	软件/控制（含保护）的根本性重构；可能需增加储能容量
Wind Turbine 风电	低 ◆ 受半导体热应力限制 ◆ 取决于事件前负载水平 ◆ 受机械载荷限制 ◆ 受DC-link储能容量限制 ◆ 性能取决于控制（阻尼等）	软件/控制（含保护）的根本性重构；需增加储能容量；加强机械部件	低 ◆ 取决于事件前负载（与转速） ◆ 受机械载荷限制 ◆ 受斩波器容量限制 ◆ 性能取决于控制（阻尼等）	软件/控制的根本性重构；增加储能容量和/或加强机械部件；
BESS 电池储能	中 ◆ 受半导体热应力限制（输出有功的运行点） ◆ 取决于事件前负载水平 ◆ 性能取决于控制（阻尼等）	软件/控制（含保护）的根本性重构	中 ◆ 受半导体热应力限制（吸收有功的运行点） ◆ 取决于事件前负载水平 ◆ 性能取决于控制（阻尼等）	软件/控制（含保护）的根本性重构
传统同步类 传统同步调相机 / SPGM	高 ◆ 具有很高的极滑限值（总功角裕度） ◆ 性能：设计上自带阻尼	无	高 ◆ 受阻抗与极滑限值限制 ◆ 性能：设计上自带阻尼	无

4.2.3 传统发电机/新能源发电机能力比对

惯量功率：

发电机类型	正向		负向	
	能力 · 边界条件 · 限制因素	所需措施	能力 · 边界条件 · 限制因素	所需措施
PV 光伏	无 · 除非运行在减载模式	软件/控制（含保护）的根本性重构； 需为惯量能量增加储能容量（视电网 规范要求，通常差数个数量级）	中 · 限制取决于运行点	软件/控制（含保护）的根本性 重构；硬件上可能需增加储能 容量以保稳定
风电	低 · 受半导体热应力、以及转子可稳定提取能量（性能） 的限制 · 取决于事件前负载与转速 · 可用储能（DC-link）很小 · 受机械载荷限制；有失速风险 · 若要求从相位跳变功率无缝过渡到惯量，则无此能力	软件/控制（含保护）的根本性重构； 不加储能则需更强的传动链；视电网 规范要求增加储能容量	中 · 取决于事件前负载与转速 · 受半导体热应力限制 · 可用储能（DC-link）很小 · 受机械载荷限制 · 受斩波器容量限制（如配置）	软件/控制（含保护）的根本性 重构；不加储能则需更强的传 动链；附加斩波器容量（如适 用）可替代储能，以限制对机 组寿命的影响
BESS 电池储能	中 · 受半导体热应力限制 · 受电池功率限值（过载能力）限制	软件/控制（含保护）的根本性重构	中 · 受半导体热应力限制 · 受电池功率限值（过载能力）限制	软件/控制（含保护）的根本性 重构
传统同步类 传统同步调相机 / SPGM	高 · 频率下降时自动释放转子动能，提供短时有功支撑； 可用能量受转动惯量、初始运行点及允许转速 / 频率 偏差限制。 · 短时功率受定子 / 转子热容量、励磁系统、轴系机械 应力及保护定值限制；同步调相机持续支撑需飞轮或 储能。	无	高 · 频率上升时自动吸收电能并转化为转子动能，降低机 组净输出；可用能量受转动惯量、初始运行点及允许 最高转速 / 频率偏差限制。 · 短时吸收功率受定子 / 转子热容量、励磁系统、轴系 机械应力及保护定值限制持续负向支撑需原动机减载、 飞轮或储能配合。	无

4.2.3 传统发电机/新能源发电机能力比对

FSM / LFSM频率稳定性:

发电机类型	能力 · 边界条件 · 限制因素	满足稳定性要求的措施
PV光伏	高 可通过适当控制提供 风险：与其他动态要求及孤岛检测存在相互影响	重新设计控制结构（取决于软硬件实现）
风电	中 可通过适当控制提供，但受动态改变有功能力的限制（转子与传动链的机械时间常数）	重新设计控制结构（取决于软硬件实现）
BESS电池储能	高 可通过适当控制提供 风险：与其他动态要求及孤岛检测存在相互影响	重新设计控制结构（取决于软硬件实现）
传统同步类 SPGM	中 可通过适当控制提供，但受动态改变有功能力的限制（原动机的机械时间常数）	重新设计控制与执行机构结构（取决于软硬件实现）

4.2.3 传统发电机/新能源发电机能力比对

幅值跳变功率

发电机类型	能力 · 边界条件 · 限制因素	所需措施
电力电子类 PV / 风电 / BESS	中 - 范围：受半导体热应力限制；取决于事件前负载；风电受机械载荷限制 - 性能：由控制策略定义，需全新设计；可能影响寿命设计	若最大电流要求提高，需加大逆变器额定容量；可能需要更大的DC-link
传统同步类 传统同步调相机 / SPGM	高	无

过载能力边界

发电机类型	能力 · 边界条件 · 限制因素	所需措施
电力电子类 PV / 风电 / BESS	低 设计上通常无过载能力	所有技术：所有主部件超配（半导体、DC-link、交流滤波部件） 风电型：机械部件超配 / 加强
传统同步类 传统同步调相机 / SPGM	高	无

今天安装的机组将影响系统20年以上，因此面向未来的并网规则对系统演进必不可少。并网装置从"被动合规"走向"主动支撑"，最终成为系统稳定的提供者。

阶段	核心含义	能力要求
电网友好型 Grid-Compatible	自2011年起，所有并网装置的强制要求，不产生负面干扰	- 全频率运行范围；全电压运行范围 - 基本无功控制（如单位功率因数运行） - LFSM-O（过频有限频率敏感模式） - 符合当地电能质量要求（如谐波 / 不平衡电流）
电网支撑型 Grid-Supporting	产生正面干扰，降低电网扩建的需求	- 故障穿越（Fault Ride-Through） - 电压控制——稳态、动态及P=0工况 - FSM与LFSM-U；提供阻尼 - 快速故障电流注入
系统稳定型 System-Stabilizing	主动贡献系统稳定，例如主动改善系统频率行为	- 建立系统电压；贡献故障支撑水平；贡献系统总惯量 - 支撑系统存续 - 控制上防止不利的控制系统交互 - 作为“源”吸收系统电压中的谐波与间谐波 - 作为“源”抑制系统电压的不平衡

电网中的惯量水平

技术类型	Category 1 系统支撑型	Category 2 扩展电网支撑型	Category 3 构网型	Category 4 扩展构网型
SPGM（同步发电机）	—（不适用）	$H < H_{min}$	$H = H_{min}$	$H > H_{min}$
PPM / BESS（电力电子电源）	$H = 0$	$0 < H < H_{min}$	$H = H_{min}$	$H > H_{min}$

4.3 并网技术应用

随着新能源、电动汽车和储能技术的发展，储能系统的作用已经不再只是简单的“存电”和“放电”，而是逐渐成为电力系统中的灵活调节资源。围绕储能和电动汽车，已经形成了多种商业模式，例如 V2G、虚拟电厂、削峰填谷、电网调频、需求响应、光储充一体化、新能源消纳等。这些模式可以帮助用户降低用电成本，也可以帮助电网提高稳定性和新能源利用率。

V2G 车辆向电网反向供电

- V2G是Vehicle-to-Grid的简称，意思是电动汽车不仅可以从电网充电，也可以在需要时把电池中的电能反向输送给电网。传统电动汽车只是用电负荷，而在V2G模式下，电动汽车可以变成一个分布式储能资源。
- 例如，车辆在白天停放时，可以在电网负荷较高或电价较高的时段向电网放电；夜间电价较低时再进行充电。车主可以通过电价差或电网补偿获得收益，电网也可以获得更多灵活调节能力。



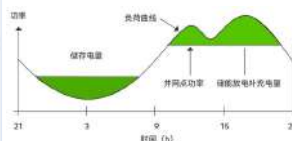
虚拟电厂 聚合分散资源参与市场

- 虚拟电厂并不是实体电厂，而是通过数字化平台，把分散的光伏、储能、电动汽车、充电桩、空调负荷等资源统一管理和调度。单个用户的储能容量较小，难以直接参与电力市场，但大量资源聚合后，就可以形成较大的可调节能力。
- 虚拟电厂可以根据电价、电网需求和用户负荷情况，统一安排充放电或负荷调整，参与需求响应、辅助服务和电力交易。对用户来说，可以获得额外收益；对电网来说，可以提高调度灵活性。



削峰填谷 利用峰谷电价差降低成本

- 削峰填谷是目前储能最常见的商业模式之一。其基本逻辑是：在低谷电价时段充电，在高峰电价时段放电，从而减少高价电的使用。
- 对于工商业用户来说，白天或晚高峰电价通常较高，企业可以使用储能系统供电，降低从电网购电的成本；夜间低谷电价时，再给储能系统充电。该模式适合工厂、园区、商场、数据中心、充电站等用电量较大的场景。



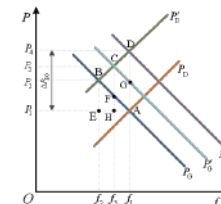
新能源消纳 减少弃风弃光

- 风电和光伏发电受天气影响较大，出力不稳定。有时新能源发电量较大，但当地负荷无法完全消耗，就可能出现弃风、弃光。储能可以在新能源发电较多时充电，在负荷较高或新能源出力较低时放电，从而提高新能源利用率。
- 该模式适合新能源电站、源网荷储项目和工业园区绿电消纳场景，有助于提升清洁能源比例，推动低碳能源转型。



电网调频 快速响应电网波动

- 电网调频是指储能系统通过快速充放电，帮助电网维持频率稳定。由于风电、光伏发电具有波动性，电网需要更多能够快速响应的资源。储能系统响应速度快，适合参与调频服务。
- 当电网频率下降时，储能可以快速放电，补充电力；当电网频率升高时，储能可以快速充电，吸收多余电能。相比传统机组，储能调频速度更快、控制更精准，因此具有较好的应用前景。



需求响应 根据电网需求调整用电

- 需求响应是指用户根据电网或电力市场的信号，主动调整用电行为。例如在用电高峰期，工厂、商业楼宇或充电站可以减少部分负荷，或者使用储能放电，降低对电网的压力。
- 用户参与需求响应后，可以获得补贴、电费优惠或市场收益。储能系统在需求响应中作用明显，因为它可以在不明显影响用户正常生产和生活的情况下，快速减少电网取电功率。



光储充一体化 光伏、储能和充电桩结合

- 光储充一体化是将分布式光伏、储能系统和新能源汽车充电桩结合起来。白天光伏发电可以直接给车辆充电，多余电量存入储能；夜间或高峰时段，储能再给充电桩或用户负荷供电。
- 这种模式适合充电站、工业园区、商业综合体、高速服务区等场景。它可以提高光伏自发自用比例，降低充电站对电网容量的依赖，也能减少高峰时段的用电成本。



备用电源和微电网 提升供电可靠性

- 储能系统还可以作为备用电源，在电网停电、限电或电压异常时，为重要负荷提供持续供电。例如医院、数据中心、通信基站、工厂关键设备等，都需要较高的供电可靠性。
- 在园区、海岛、矿区等场景中，储能还可以与光伏、柴油发电机和负荷管理系统组成微电网，提高能源自给能力，减少对外部电网的依赖。



4.4 低压电网并网技术要求

4.4.1 电能质量

4.4.1.1 电流谐波

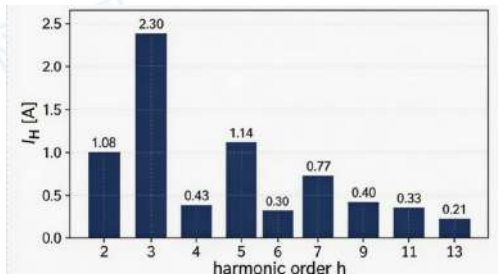
标准要求

定义

逆变器电力电子设备的开关动作与非线性特性，向电网注入基波整数倍和非整数倍频率的正弦电流分量；谐波电流流经电网阻抗引起电压畸变，以各整数次谐波含有率与总谐波畸变率（THD）衡量。

标准要求

- EN 50549-1 第4.8章：谐波按IEC 61000-3-2（每相 $\leq 16\text{A}$ ）或IEC 61000-3-12（16–75 A）分级考核；
- 测量方法按IEC 61000-4-7；总谐波畸变率 $\text{THD} \leq 5\%$ 。



关键参数表

项目	标准要求
适用标准	每相（ $\leq 16\text{A}$ ） I_n ：IEC 61000-3-2；每相（16–75 A） I_n ：IEC 61000-3-12
设备分级	A 类（一般设备）
THD限值	$\leq 5\%$ ；

测试方法

试验目的

验证不同功率工况下的谐波、间谐波及 2–9 kHz 高频电流谐波满足限值要求。

试验回路 / 条件

电网模拟器 — 被测机组 — 符合 IEC 61000-4-7 的功率分析仪（200 ms 测量窗）。

试验程序

- 被测设备（EUT）在10%–100% P_n 多个功率点分别稳定运行；
- 每个工况记录2–40次谐波、间谐波组与2–9 kHz高频分量；
- 以额定电流归一化，与适用分级限值表逐项比对。

试验工况与判定准则

试验工况 / 测点	测量内容	判定准则
2-40次谐波	各次谐波电流分量、 THD_i	$\leq$ IEC 61000-3-2 / -12 分级限值
间谐波	间谐波电流分量	满足 EN 61000-4-7+A1考核要求
2–9 kHz高频谐波	高频电流分量（分组）	满足 EN 61000-4-7+A1考核要求

4.4.1 电能质量

4.4.1.2 电压闪变

标准要求

定义

发电单元输出功率的快速波动引起公共连接点（PCC）电压有效值周期性变化，导致照明亮度波动并产生主观不适感。以短时闪变值 P_{st} （10 min统计）与长时闪变值 P_{lt} （2 h统计）及相对电压变化 $d(t)$ 在考核范围内。

标准要求

每相（≤16 A）需 I_n 满足 IEC 61000-3-3标准；每相（16–75 A）需 I_n 满足IEC 61000-3-11标准。限值： $\leq P_{st}$ 1.0、 $P_{lt} \leq 0.65$ ；相对稳态电压变化 $d_c \leq 3.3\%$ ，最大相对电压变化 $d_{max} \leq 4\%$ ，超过 $d(t)$ 3.3%的持续时间 $T_{max} \leq 500ms$ 。

关键参数表

项目	标准要求
适用标准	每相 ≤16 A：IEC 61000-3-3；16–75 A：IEC 61000-3-11
闪变限值	$P_{st} \leq 1.0$ （10min）； $P_{lt} \leq 0.65$ （2h）
电压变化限值	$d_c \leq 3.3\%$ ； $d_{max} \leq 4\%$ ； $T_{max} \leq 500ms$

测试方法

试验目的

验证机组出力波动与投切操作引起的电压波动和闪变满足 IEC 61000-3-3 / -11 限值。

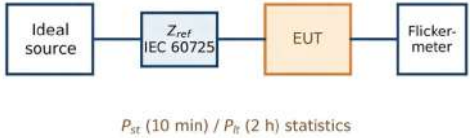
试验回路 / 条件

理想电压源 — IEC 60725 参考阻抗 — 被测机组；符合 IEC 61000-4-15 的闪变仪接于参考测量点。

试验程序

- 出力波动工况：在10%–100% P_n 多个功率点连续记录 P_{st} （10min）序列，累计2h计算 P_{lt} ；
- 投切 / 启停工况：记录相对电压变化 $d(t)$ 、 d_c 、 d_{max} 与 T_{max} 。

闪变测量回路：参考阻抗+ IEC 61000-4-15闪变仪



试验工况与判定准则

试验工况 / 测点	测量内容	判定准则
输出波动	P_{st} / P_{lt}	$P_{st} \leq 1.0$ ； $P_{lt} \leq 0.65$
并网 / 投切	d_c 、 d_{max} 、 T_{max}	$d_c \leq 3.3\%$ ； $d_{max} \leq 4\%$ ； $T_{max} \leq 500 ms$

4.4.1 电能质量

4.4.1.3 直流分量

标准要求

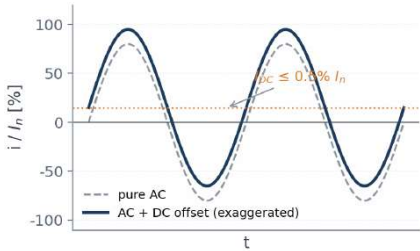
定义

逆变器输出交流电流中的偏置。

标准要求 · EN 50549-1

- 注入电网的直流分量不应超过逆变器额定交流输出电流的0.5%或者20mA，两者取较大值；
- 验证步骤按 EN 50549-10:2022 直流注入（DC injection）试验。

输出电流直流偏置示意；限值 $I_{DC} \leq 0.5\% I_n$



关键参数表

项目	标准要求
限值	$I_{DC} \leq \max(20\text{mA}, 0.5\% I_n)$
考核位置	并网逆变器交流输出端，覆盖全功率运行范围

测试方法

试验目的

验证机组在全功率范围内注入电网的直流分量不超过0.5% I_n 或20mA，取较大值。

试验回路 / 条件

电网模拟器 — 被测机组 — 功率分析仪。

试验程序

- 在不同的功率点分别稳定运行；
- 每个工况连续记录输出电流，提取直流分量并归一化至 I_n ；
- 取各工况最大值与0.5% I_n 或20mA限值比对。

试验工况与判定准则

试验工况 / 测点	测量内容	判定准则
10%–100% P_n 各点	输出电流直流分量	$\leq \max(20\text{mA}, 0.5\% I_n)$

4.4.2 有功调度

标准要求

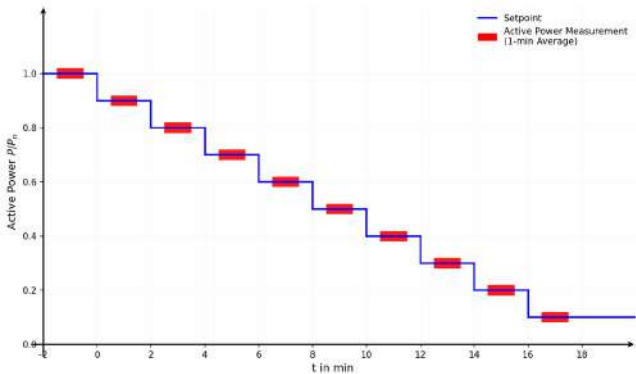
定义

发电厂按DSO下发的有功设定值（远程通信或本地整定），将输出有功限制或调整至给定水平并稳定保持，用于配电网拥堵管理、反向潮流控制与出力计划执行。

标准要求 · EN 50549-1

- 具备有功设定值控制能力，设定范围覆盖0–100% P_n ，现场可设定；
- 设定值阶跃后应在规定时间内达到新值并保持稳态精度，调节过程平稳无振荡；
- 远程接口形式与信息模型由DSO规定。

给定有功控制示意：设定值阶跃与实际出力跟随



关键参数表

项目	标准要求
设定范围	0–100% P_n 连续可调，现场可设定并防未经授权修改
指令来源	DSO远程指令 / 本地设定；通信接口与协议由DSO规定

测试方法

试验目的

验证机组执行有功设定值的准确性、响应速度与调节平稳性。

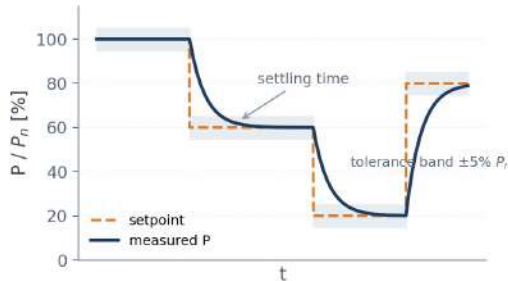
试验程序

- 依次下发有功设定值阶跃；
- 记录实际出力进入设定值 $\pm 5\%$ 容差带 P_n 的时间与稳态偏差；
- ESS 在放电与充电两个方向分别重复上述序列。

试验回路 / 条件

电网模拟器 — 被测机组 — 功率分析仪；
由测试上位机经本地 / 远程接口下发设定值序列。

设定值阶跃序列、容差带与实测跟随曲线



试验工况与判定准则

试验工况 / 测点	测量内容	判定准则
设定值阶跃	响应时间、稳态偏差	稳态偏差 $\leq \pm 5\%$, P_n 无持续振荡
上调 / 下调双向	两个方向的响应对称性	均满足响应时间要求

4.4.3 调频控制

4.4.3.1 LFSM-O（过频减出力）

标准要求

定义

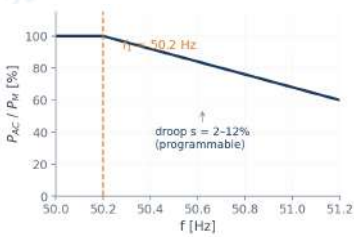
系统频率超过门槛值后，发电单元按下垂特性自动降低有功输出，抑制频率进一步上升，是分布式电源参与系统频率稳定的基本功能。

标准要求 · EN 50549-1

- 门槛频率 f_1 ：50.2–52Hz可设定，默认50.2Hz；下垂系数 s ：2–12%可设，默认5%；
- 功率基准 P_M 取到达 f_1 时刻的实际有功；调节精度±10%（>50.2 Hz 时） $P_n f$ ；
- PV：超过 f_1 后按下垂减出力；ESS：放电方向同PV，充电方向不得减小充电功率，条件允许时应按下垂增大充电功率（达最大充电功率或安全限制时除外）。

LFSM-O有功—频率特性

$$(P_{AC} = P_M \cdot [1 + (f_1 - f)/(s \cdot f_n)])$$



关键参数表

项目	标准要求
门槛频率 f_1	50.2–52Hz 可设（默认 50.2 Hz）
下垂系数 s	2–12% 可设；功率基准 P_M = 到达 f_1 时的实际有功或者做大功率 P_{max}
精度与响应	调节精度 ±10% P_n ($f > 50.2\text{Hz}$)；响应 / 稳定时间默认 ≤10 s / ≤30 s

测试方法

试验目的

验证过频减出力特性的门槛频率、下垂系数与响应时间与设定一致。

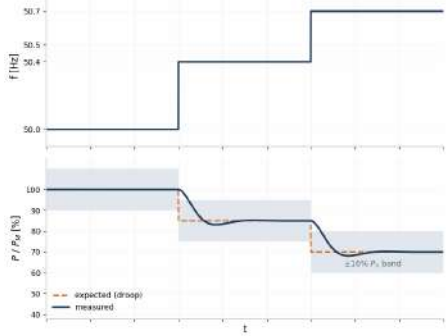
试验回路 / 条件

可变频电网模拟器 — 被测机组 — 功率分析仪；机组在稳定在初始功率下运行。

频率阶跃下的有功响应与
±10% P_n 容差带

试验程序

- 频率自50Hz阶跃至 $f_1+0.2\text{Hz}$ 保持，再阶跃至更高频点（如 50.8Hz）；
- 记录 $P(t)$ ，按两稳态点反推实测下垂 s ，并读取响应 / 稳定时间；
- 改变 f_1 与 s 设定值重复试验，验证参数可编程性。



试验工况与判定准则

试验工况 / 测点	测量内容	判定准则
过频阶跃响应	实测下垂 s 与设定偏差	功率偏差在±10% P_n 容差带内
动态过程	响应时间 / 稳定时间	默认≤10秒 / ≤30秒
参数可编程性	f_1 、 s 修改后特性复测	与设定一致

4.4.3 调频控制

4.4.3.2 LFSM-U（欠频增出力）

标准要求

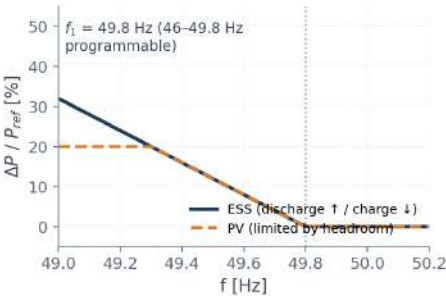
定义

系统频率低于门槛值时增加有功输出（或减小充电功率），支撑频率恢复。对PV仅在具备上调裕度时适用，对ESS为充放电双向的完整能力要求。

标准要求 · EN 50549-1

- 门槛频率 f_1 ：46–49.8Hz可设，默认49.8Hz；下垂系数 s ：2–12%可设（默认5%）；
- PV：仅当当前出力低于可用出力时增出力，且不超过可用功率；
- ESS：放电可增加至最大放电功率；充电可减少充电功率直至停止或转为放电。

LFSM-U特性：PV（受裕度限制）与ESS（双向完整响应）



关键参数表

项目	标准要求
门槛频率 f_1	46–49.8Hz可设（默认49.8Hz）
下垂系数 s	2–12%可设（默认5%）；功率基准为最大有功功率
PV / ESS差异	PV受可用出力限制；ESS放电上限 = 最大放电功率，充电可减至0或转为放电

测试方法

试验目的

验证欠频增出力特性，覆盖ESS放电 / 充电工况。

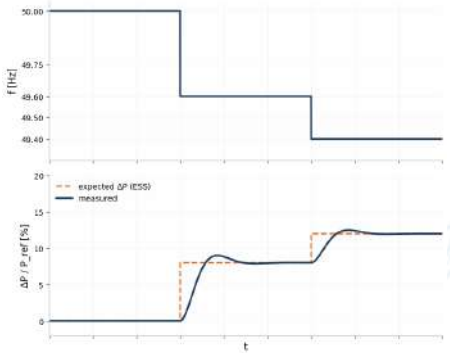
试验程序

- ESS 放电工况：频率阶跃至欠频，记录增出力响应；
- ESS 充电工况：验证充电功率按下垂减小直至停止或转为放电；
- PV：限功率工况验证增出力，满发工况验证不超过可用功率。

试验回路 / 条件

变频电网模拟器 — 被测机组 — 功率分析仪；ESS需具备可调充电工况，PV需限功率预留裕度。

欠频阶跃下的 ΔP 响应（ESS 放电工况示例）



试验工况与判定准则

试验工况 / 测点	测量内容	判定准则
ESS放电	欠频增出力响应曲线	功率偏差在 $\pm 10\%$ P_n 容差带内
ESS充电	充电功率减小 / 停止	功率偏差在 $\pm 10\%$ P_n 容差带内
PV限功率 / 满发	增出力能力与上限	功率偏差在 $\pm 10\%$ P_n 容差带内不超过可用出力

4.4.4 调压控制

4.4.4.1 $Q(U)$ 无功-电压特性

标准要求

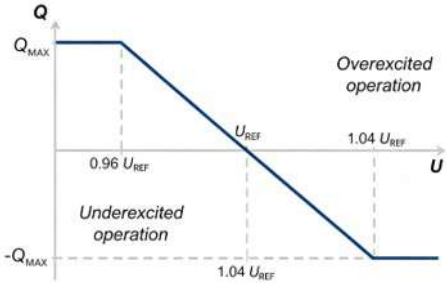
定义

无功—电压特性控制：按并网点电压幅值沿预设特性曲线自动调节无功输出——电压偏高时吸收无功，电压偏低时发出无功，参与局部电压调节。

标准要求 · EN 50549-1

- 无功控制模式： Q 设定值 / $Q(U)$ / $\cos\varphi$ 设定值 / $\cos\varphi(P)$ ，互斥启用，由DSO指定；
- $Q(U)$ 特性可由4个电压整定点与无功上下限构成三段折线（含死区），各点可配置；
- 动态按一阶滤波，时间常数3–60s可配置；低有功时可能受最小 $\cos\varphi$ 限制。

测试用无功功率-电压特性曲线



关键参数表

项目	标准要求
特性结构	4电压点与 Q 上下限的三段折线（含死区），全部可设
动态特性	一阶响应，时间常数3–60s可设；动态容差 $\pm 5\% P_n$
边界条件	锁入 / 锁出功率0–20% P_n （带回差）；最小 $\cos\varphi$ 0–0.95可设

测试方法

试验目的

验证 $Q(U)$ 特性的设定点、时间常数、锁入 / 锁出与静态精度。

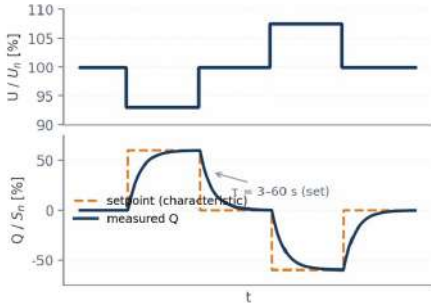
试验程序

- 电压按序列阶跃跨越各设置点；
- 每个台阶保持足够时间，记录 $Q(t)$ 并拟合实测特性与时间常数；
- 有功穿越锁入 / 锁出阈值，验证功能启停与回差。

试验回路 / 条件

电网模拟器 — 被测机组 — 功率分析仪；
机组在中等有功出力下运行。

电压阶跃序列下的 Q 响应（一阶特性， τ 可设定）



试验工况与判定准则

试验工况 / 测点	测量内容	判定准则
特性折线	各测点 Q 与设定偏差	$\leq \pm 5\% P_n$ （允许 $\leq 3s$ 延时）
动态响应	实测时间常数 τ	与设定值一致（3–60s范围）
锁入 / 锁出	功能启停功率点与回差	符合设定

4.4.4 调压控制

4.4.4.2 $P(U)$ 电压-有功特性

标准要求

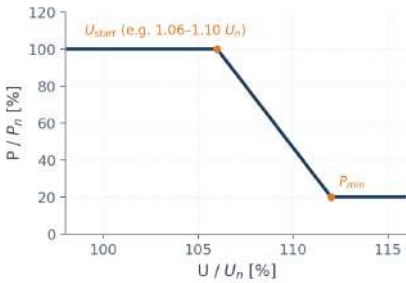
定义

并网电压超过触发值后，随电压升高自动降低有功输出，缓解局部过电压，避免过压保护动作导致脱网。

标准要求 · EN 50549-1

- 功能为推荐实施，是否启用与设定值由DSO规定；
- 触发电压、终止电压与最小有功均可配置；
- 与 $Q(U)$ 协调配合：优先无功调节，无功能力用尽后再削减有功；
- 削减过程应平稳，避免功率振荡与电压反复波动。

$P(U)$ 特性示意
(起调电压与最小有功可配置)



关键参数表

项目	标准要求
功能性质	启用与否及整定由DSO规定
触发电压	可配置（典型整定区间1.06–1.10） U_n
协调原则	先无功调节（ $Q(U)$ ），有功削减作为过压防护的最后手段

测试方法

试验目的

验证过压工况下有功按设定曲线削减，且与 $Q(U)$ 协调配合。

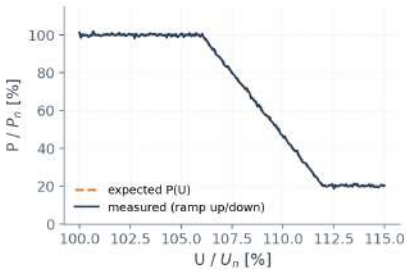
试验回路 / 条件

电网模拟器 — 被测机组 — 功率分析仪；机组在高出力工况下运行。

试验程序

- 电压自额定值缓慢斜坡升至触发点以上直至上限电压，再降回；
- 记录 $P-U$ 轨迹，与设定曲线逐点对比；
- $Q(U)$ 同时启用，验证先无功后有功的协调顺序。

电压斜坡下的 $P-U$ 实测轨迹与整定特性



试验工况与判定准则

试验工况 / 测点	测量内容	判定准则
电压斜坡升 / 降	$P-U$ 轨迹与特性偏差	符合设定特性，无回差异常
调节过程	功率变化平稳性	无振荡与反复波动
与 $Q(U)$ 协调	无功 / 有功动作顺序	先无功调节、后有功削减

标准要求

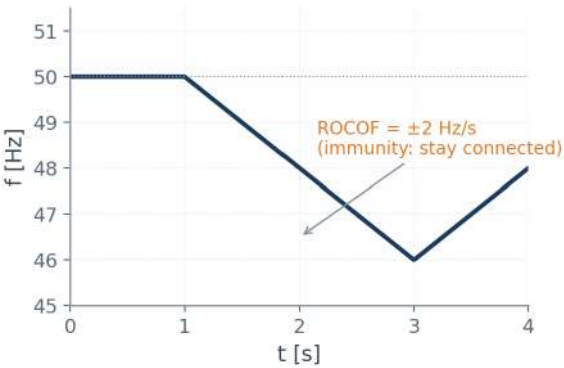
定义

电网频率快速变化时，发电单元保持并网运行、不误跳闸的能力，防止扰动后分布式电源连锁脱网、扩大事故。

标准要求 · EN 50549-1

- 非同步（变流器型）发电装置能够承受±2 Hz/s的频率变化速率；
- 电厂内所有可能导致脱网的元件（含保护继电器）须具备同等抗扰水平，保护设定不得先于抗扰能力动作。

ROCOF抗扰示意：±2 Hz/s频率斜坡下保持并网



关键参数表

项目	标准要求
非同步发电机	ROCOF 抗扰 ≥ ±2 Hz/s

测试方法

试验目的

验证机组在频率快速变化与相位跳变工况下不脱网。

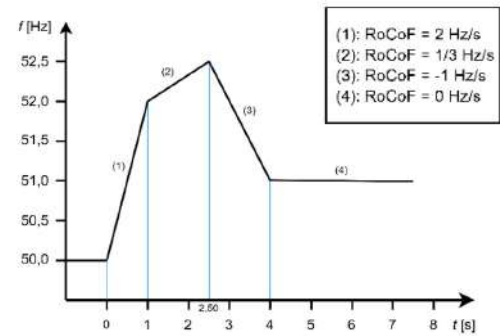
试验回路 / 条件

电网模拟器（可编程频率斜坡 / 相位跳变）— 被测机组 — 录波仪。

试验程序

- 额定工况下施加 +2 Hz/s 与 -2 Hz/s 频率斜坡；
- 监视机组运行状态，确认无脱网、无异常降额。

±2 Hz/s 频率斜坡抗扰试验（保持并网）



试验工况与判定准则

试验工况 / 测点	测量内容	判定准则
±2 Hz/s 斜坡	机组运行状态	不脱网、不异常降额
保护配合	包络内保护动作情况	无误动

标准要求

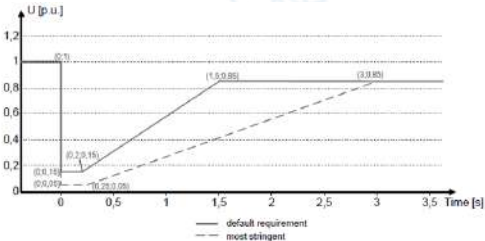
定义

电网故障引起电压跌落或升高时，发电单元在规定电压—时间包络内保持并网运行，支撑电网恢复，而非立即脱网。

标准要求 · EN 50549-1

- 连续运行电压范围 $0.85\text{--}1.10U_n$ ；
- UVRT: $0.05U_n$ 至少200ms、 $0.85U_n$ 至少3000ms；
- OVRT: $1.15U_n$ 至少60000ms、 $\geq 1.25U_n$ 至少100ms不脱网；
- 进入零电流模式后需80ms内电流降至 $10\%I_n$ 以内；
- 时间包络以外允许脱网。

非同步发电技术的低电压穿越能力
(EN 50549-1)



关键参数表

项目	标准要求
连续运行	$0.85\text{--}1.10U_n$
UVRT & OVRT穿越	$\geq 0.05U_n$ 至少200 ms、 $\geq 0.85U_n$ 至少3000ms； $\geq 1.15U_n$ 至少60000 ms、 $\geq 1.25U_n$ 至少100ms不脱网
零电流模式	80ms内电流降至 $\leq 10\% I_n$ (UVRT阈值20%–100% U_n 可配置，默认0.5 U_n ，OVRT阈值100%–120% U_n 可配置，默认1.2 U_n)

测试方法

试验目的

验证被测EUT在电压跌落 / 升高工况下按包络保持并网，且退出穿越可正常恢复的能力。

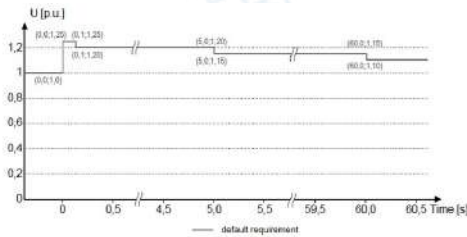
试验回路 / 条件

电网模拟器 / 电压跌落发生器（可编程对称与不对称跌落）— 被测逆变器— 高速录波。

试验程序

- 记录 $U/I/P/Q$ 波形，验证不脱网与故障清除后的恢复；
- 启用零电流模式时，80ms内电流降至 $\leq 10\%I_n$ （阈值 20%–100% U_n 可配置）

过电压穿越能力 (EN 50549-1)



试验工况与判定准则

试验工况 / 测点	测量内容	判定准则
$\geq 0.05U_n$ 至少200ms、 $\geq 0.85U_n$ 至少3000ms； $1.15U_n$ 至少60000ms、 $1.25U_n$ 至少100ms	逆变器连续运行	不脱网
恢复	退出穿越的恢复要求	1s内恢复到穿越前功率的90%及以上
故障期间电流	零电流模式	符合进入零电流模式在80ms内电流降至 $10\%I_n$ 以内

4.4.7 并网保护装置

4.4.7.1 孤岛保护

标准要求

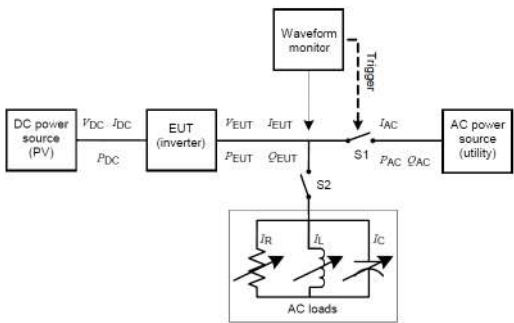
定义

电网失电后，分布式电源继续向局部线路与负荷供电，形成独立带电的“孤岛”，威胁检修人员安全、损坏设备并妨碍重合闸。检测方法分被动式（电压 / 频率越限、相位跳变监测）与主动式（注入微小扰动并观测系统响应）。

标准要求

- 验证按IEC 62116：在100% / 50–66% / 25–33%三种功率水平及负载不平衡条件下测试，断网后运行延续时间（run-on time） $\leq 2\text{s}$ 。

IEC 62116孤岛检测试验电路



关键参数表

项目	标准要求
检测方式	被动（电压 / 频率 / 相位跳变） / 主动（频率偏移、功率扰动等）
试验工况	三种功率水平 + 负载不平衡矩阵
脱网时限	$\leq 2\text{s}$

测试方法

试验目的

验证电网断开后机组在规定时间内停止输出。

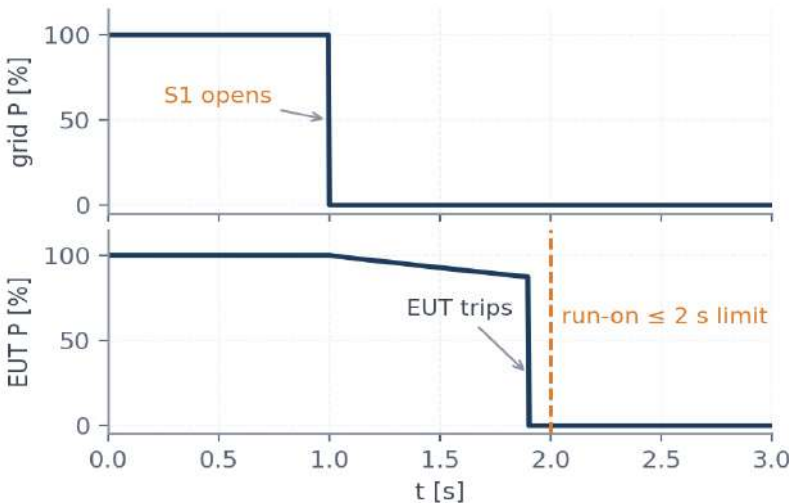
试验程序（以 $Q_f=1$ 为例）

- 调节RLC负载使流过S1的有功 / 无功 ≈ 0 ；
- 在100% / 50–66% / 25–33%功率点及负载不平衡工况下断开S1；
- 记录断网至逆变器停止输出的间隔时间。

试验回路 / 条件

电网模拟器 — 开关 S1 — 被测机组 — RLC 负载。

孤岛试验时序：S1断开 → 机组跳闸（ $\leq 2\text{s}$ ）



4.4.7.2 过欠压 / 过欠频保护

标准要求

定义
接口保护（interface protection）持续监测并网点电压与频率，电压或频率越限超过延时后断开并网接口，是设备安全的最后防线。

标准要求 · EN 50549-1

- 欠压、过压保护各设两级，跳脱阈值与跳脱时间独立可设置；欠频、过频保护阈值可设置。连续运行频率范围49–51Hz，47.5–49Hz与51–51.5Hz区间限时运行；频率脱网典型设置为47.5Hz / 51.5Hz，具体由DSO在国家实施中规定。

关键参数表

保护项目	跳脱阈值设置范围	跳脱时间设置范围	典型脱网设置
欠压保护1级	0.2–1.0 U_n	0.1–100s	按DSO规定
欠压保护2级	0.2–1.0 U_n	0.1–5s	按DSO规定
过压保护1级	1.0–1.2 U_n	0.1–100s	按DSO规定
过压保护2级	1.0–1.3 U_n	0.1–5s	按DSO规定
欠频保护	47.0–50.0Hz	按DSO规定	47. 5Hz
过频保护	50.0–52.0Hz	按DSO规定	51.5Hz

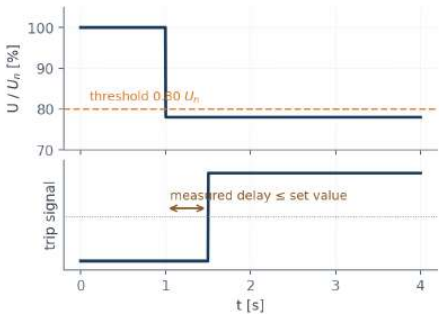
测试方法

试验目的
验证各级保护的跳脱阈值、跳脱时间。

试验回路 / 条件
电网模拟源（电压 / 频率可编程） — 被测逆变器 — 时间记录装置。

- 试验程序**
- 以斜率变化电压/频率，测量实际跳脱值；
 - 分别施加电压 / 频率阶跃越过各级跳脱值，记录动作时间。

越限阶跃下的动作延时测量



试验工况与判定准则

试验工况 / 测点	测量内容	判定准则
跳脱时间测试	动作时间	≤ 设置跳脱时间
跳脱值测试	实际跳脱值	与设定跳脱值误差≤ ±1%额定电压或±1%额定频率

4.4.8 低压并网法规与标准

4.4.8.1 各国（地区）标准要求

国家/地区	标准	说明
国际	IEC 61727	光伏系统并网接口要求，涉及电压、频率、功率因数、谐波、直流注入、防孤岛等测试。适用于光伏/光储并网逆变器。
国际	IEC 62116	并网逆变器防孤岛测试方法，验证电网断电时逆变器能否及时检测孤岛并停止送电。适用于单相/多相并网光伏逆变器，含支持离网/备电功能的产品。
美国	IEEE 1547	IEEE 1547-2018规定分布式能源并网与互操作技术要求，IEEE 1547.1-2020为对应能力验证测试。适用于分布式能源（DER）设备。
美国（加州）	Rule 21	涉及并网审批流程、智能逆变器强制技术规范、计量/安全要求。适用于加州光伏、储能PCS。
澳大利亚/新西兰	AS/NZS 4777.2	涉及低压场景下逆变器的预期性能和行为要求。适用于低压并网逆变器。
日本	JET 认证、JEAC 9701	涉及基于相关标准的并网认证测试，覆盖低压配电线（≤600V）、高压配电线、网络配电线等场景。适用于并网逆变器。
印度	BIS/IS 标准、IEC 等效标准、CEA 并网技术要求	印度光伏逆变器并网认证要求。
巴西	INMETRO PORTARIA N° 140/N° 515、ABNT NBR 16149/16150	INMETRO法令针对 ≤75kW 光储产品；ABNT NBR 16149规定并网接口性能，NBR 16150为对应测试要求。适用于光储产品。

国家/地区	标准	说明
欧盟	EU RfG (EU 2016/631)	并网框架性强制法规，涉及故障穿越、有功/无功调节、高低频耐受、保护逻辑等要求。适用于光伏、风电、储能 PCS、分布式电源等并网发电机组。
欧洲	EN 50549-1	EU RfG A、B类机组的技术细则与试验方法，涉及电压/频率保护、防孤岛、有功/无功控制、故障穿越、电能质量。适用于接入低压配电网的发电设备（配EN 50549-10测试要求）。
德国	VDE-AR-N 4105	涉及动态电网支撑、无功能力、频率响应、并网保护等测试。适用于单机 ≤135kVA 的光伏逆变器、户用/工商业储能PCS（配DIN VDE V 0124-100测试要求）。
英国	G98	单相额定电流≤16A的微型发电设备；
英国	G99	单相额定电流>16A的发电设备，包含对于Type A, B, C, D的要求；
英国	G100	英国电网功率限发 / 限入标准，核心是客户侧限值管控CLS/ELS（进出口功率限制系统）；
意大利	CEI 0-21	逐步向EN 50549 靠拢
法国	EN 50549-1、本地 Enedis 要求、UTE/XP C15 系列文件	
西班牙	NTS、UNE、RD 相关法规	
比利时	C10/11	
奥地利	TOR Stromerzeugungsanlagen	

4.4.8 低压并网法规与标准

4.4.8.2 低压并网认证与市场准入

低压并网认证

低压并网认证，是指光伏逆变器、储能逆变器、光储一体机、微型逆变器、PCS 等产品，在接入低压配电网前，需要通过相应标准的型式试验、文件审查和认证/列名流程，以证明设备在并网运行时能够安全、稳定、可控、可保护、可调节，不会影响电网安全、电能质量和人员安全。低压并网认证通常不是一步完成，而是分为以下阶段。



需要注意：测试报告不等于证书，证书也不等于最终电网公司准入。很多国家还需要额外做产品列名或 DSO 审核。

低压电网列名

低压电网列名，也可以称为低压并网产品列名、并网设备白名单、电网公司认可清单、Approved Product List、Type Test Register、Homologation List。它指的是：光伏逆变器、储能逆变器、光储一体机、微型逆变器、PCS 等产品，在通过相应并网认证后，还需要被录入某个国家、行业协会、电网公司或监管机构认可的产品清单，才能更顺利地用于当地低压并网项目。低压并网认证是证明产品“符合标准”；低压电网列名是证明产品“被当地市场/电网系统接受并可查询”。

低压电网列名的意义

- 方便电网公司审批
低压项目往往由当地 DSO、DNO、DNSP 或 utility 审核。列名后，电网公司可以直接在清单中核对型号，减少反复索要证书和报告的时间。
- 方便安装商选型
安装商通常不会逐页审核并网测试报告，而是直接选择已经在当地清单中的产品。未列名产品即使技术上合格，也可能因为审批复杂而不被优先采用。
- 方便补贴和备案
一些市场的补贴、可再生能源证书、安装备案会绑定列名清单。例如澳大利亚 Clean Energy Council 维护光伏组件、逆变器和电池等批准产品清单，用于确认产品符合澳大利亚及国际标准，并服务于太阳能和电池储能系统的设计安装。
- 便于市场监管
列名平台可以追踪标准版本、证书有效期、型号变更、进口商信息和产品状态。如果标准更新，平台可以要求厂家补充资料，否则产品可能被移除。澳洲 CEC 已明确 AS/NZS 4777.2:2020 Amd 2:2024 于 2025年8月23日生效，厂家需提交符合更新区域设置的证据，才能继续保留在批准清单中。
- 降低项目并网风险
列名相当于项目早期的“合规筛选”。如果项目使用未列名设备，可能出现：并网申请被退回，安装商不愿采用，补贴无法申请，项目延期及售后问题等风险。

4.5.1 电能质量

4.5.1.1 电流谐波

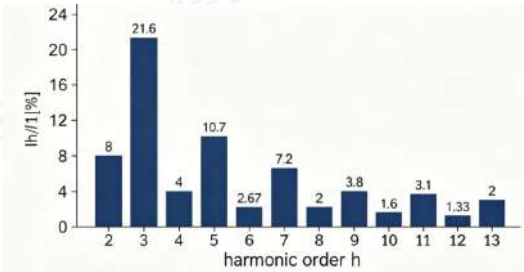
标准要求

定义

与低压相同，中高压并网关注变流器注入的谐波电流及其在系统阻抗上引起的电压畸变；不同点在于中压评估系统端谐波，约束更严格。

标准要求

- EN 50549-2；
- 设备端按 IEC 61000-3-12或并网协议约定值；
- 测量按 IEC 61000-4-7；EN 50549-10。



关键参数表

项目	标准要求
评估体系	系统端：IEC 61000-3-6；设备端：IEC 61000-3-12
测量与验证	IEC 61000-4-7；EN 50549-10 谐波 / 间谐波 / 2–9 kHz 高频谐波

测试方法

试验目的

验证中压并网机组谐波 / 间谐波 / 高频谐波电流，并按 IEC 61000-3-6 分配额度核算。

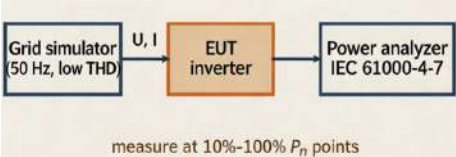
试验回路 / 条件

电网模拟器 — 被测机组 — 符合 IEC 61000-4-7 的功率分析仪；

试验程序

- 在10%–100%P_n多个功率点稳定运行并记录谐波频谱；
- 测量2–40次谐波、间谐波组与2–9 kHz高频分量；
- 设备端按IEC 61000-3-12 / 协议值判定，系统端按61000-3-6分配额度核算。

谐波 / 高频发射测量回路
(EN 50549-10型式试验)



试验工况与判定准则

试验工况 / 测点	测量内容	判定准则
10%–100%P _n 多个功率点	谐波电流含有率THD _i	61000-3-12 / 协议限值
间谐波 / 2–9 kHz	对应分量	EN 50549-10

4.5.1 电能质量

4.5.1.2 电压闪变

标准要求

定义

与低压一致（ P_{st} / P_{lt} 与相对电压变化 $d(t)$ ），但中压系统短路容量大、单台设备影响相对较小，因此供电部门按 IEC 61000-3-7 将闪变水平分配至各接入用户。

标准要求

- 系统端协调按 IEC 61000-3-7（中 / 高压系统闪变协调）；设备端测量与评估使用电流法。
- 工程要点：中压接入时闪变限值与接入点短路容量（ S_k ）直接相关： S_k 越大、允许排放越高。

关键参数表

项目	标准要求
评价指标	P_{st} / P_{lt} ，按规划水平在系统内逐级分配
协调标准	IEC 61000-3-7
设备评估	电流法

测试方法

试验目的

验证机组闪变在分配额度内，评估与接入点短路容量 S_k 的匹配性。

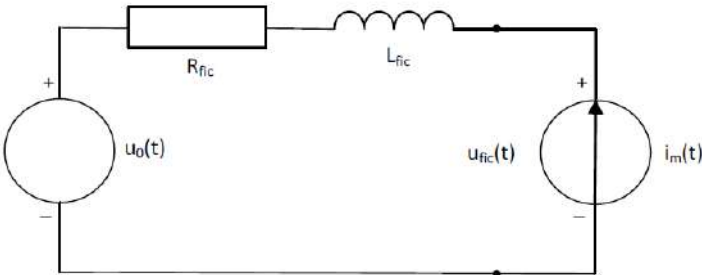
试验回路 / 条件

使用电流法结合虚拟阻抗测量闪变；

$$u_{fic}(t) = u_0(t) + R_{fic} \cdot i_m(t) + L_{fic} \cdot \frac{di_m(t)}{dt}$$

试验程序

- 记录源侧电压波形和电流波形
- 按照上述公式计算得到逆变器侧电压波形
- 按照 IEC 61000-4-15 计算逆变器侧电压 P_{st} / P_{lt}
- 按 S_k 折算至分配额度比对



4.5.1 电能质量

4.5.1.3 直流分量

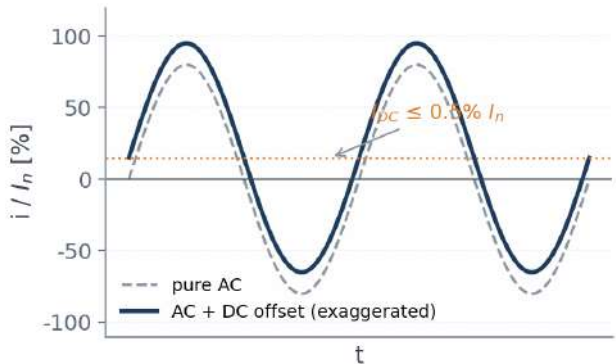
标准要求

定义

与低压一致：变流器输出电流中的直流偏置会引起并网变压器直流偏磁、铁心饱和与保护误动；中压升压变容量更大，偏磁导致的励磁畸变与发热问题更为突出。

标准要求 · EN 50549-2

- 直流分量限值与低压一致：不超过额定交流输出电流的0.5%或者20mA，取较大值；
- 验证按 EN 50549-10:2022 直流注入试验。



关键参数表

项目	标准要求
限值	$I_{DC} \leq \max(20\text{mA}, 0.5\%I_n)$
考核位置	变流器交流输出端，覆盖全功率运行范围

测试方法

试验目的

验证中压并网机组直流注入 $\leq 0.5\%$ 或 $20 \text{ mA} I_n$ 。

试验回路 / 条件

电网模拟器 — 被测逆变器 — 功率分析仪；

试验程序

- 多点功率（10%–100%） P_n 稳定运行并记录输出电流；
- 提取各工况直流分量并归一化；
- 取绝对值的最大值与限值比对。

试验工况与判定准则

试验工况 / 测点	测量内容	判定准则
10%–100% P_n 各点	输出电流直流分量	$\leq \max(20\text{mA}, 0.5\%I_n)$

4.5.2 有功调度

标准要求

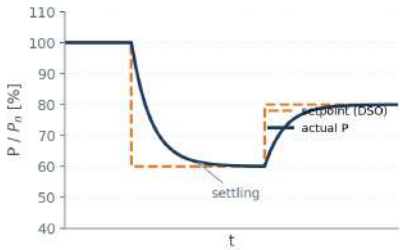
定义

与低压一致，按 DSO / TSO 下发的有功设定值调整电厂出力；中压电厂通常纳入调度自动化系统，要求支持远程设定、变化率限制与状态回报。

标准要求 · EN 50549-2

- 有功设定值控制：0~100% P_n 可调；ESS 覆盖充电—放电全范围（-100%~+100%）；
- 有功变化率（ramp rate）限制可配置，单位 % P_n /min，由DSO/TSO规定；
- 具备远程通信接口与本地逻辑接口，支持调度指令接收、执行与确认。

给定有功控制示意：设定值阶跃、变化率限制与跟随



关键参数表

项目	标准要求
设定范围	0~100% P_n ；ESS 双向（-100%~+100%）
变化率限制	% P_n /min 可配置，由 DSO / TSO 整定
指令接口	远程通信 + 本地逻辑接口；执行状态回报

测试方法

试验目的

验证设定值执行精度、响应速度及有功变化率限制，含 ESS 双向。

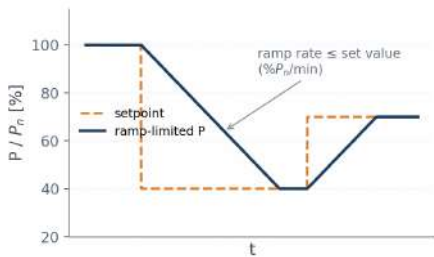
试验回路 / 条件

电网模拟器 — 被测逆变器 — 功率分析仪；经远程调度接口下发设定值。

试验程序

- 下发出力阶跃序列，记录跟随精度与响应时间；
- 下发大阶跃，验证实测爬坡斜率符合设定的变化率；
- ESS 在充电 / 放电方向分别验证，并做远程接口联调。

大阶跃下的变化率限制响应（斜坡跟随）



试验工况与判定准则

试验工况 / 测点	测量内容	判定准则
设定值阶跃	响应时间与稳态偏差	满足协议要求
变化率限制	实测爬坡斜率	设定值（% P_n /min）
ESS 双向	充 / 放电方向响应	均满足要求

4.5.3 调频控制

4.5.3.1 LFSM-O

定义

LFSM-O 为电网频率高于额定频率时的过频有功功率限制功能；当电网频率超过设定阈值，逆变器按照标准规定的频率-有功特性曲线降低输出有功功率，避免电网频率进一步抬升；中压机组需支持参数可配置、状态上报，储能设备需兼顾充电、放电双向工况。

标准要求 · EN 50549-2

- 触发频率阈值、频率-有功下垂斜率可配置，由 DSO/TSO 规定；ESS 需覆盖充-放电全范围（-100% ~ +100%）；
- 频率超出阈值后，有功按照 LFSM-O 特性曲线逐步降功率，禁止有功功率突变；
- 具备远程通信接口与本地逻辑接口，支持参数配置、功能投退、运行状态与故障回报。

关键参数表

项目	标准要求
频率工作范围	LFSM-O 触发阈值可配置，由 DSO/TSO 整定；ESS 双向（-100% ~ +100%）
下垂斜率	$\Delta P/\Delta f$ 可配置，单位 % P_n /Hz，由 DSO/TSO 整定
指令接口	远程通信 + 本地逻辑接口；功能投退、状态回报



测试方法（LFSM-O）

试验目的

验证过频减出力特性的门槛频率、下垂系数与响应时间与设定一致。

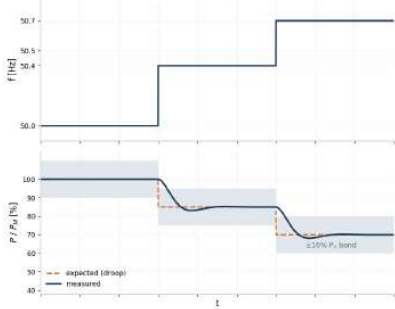
试验回路 / 条件

可变频电网模拟器 — 被测机组 — 功率分析仪；机组在稳定在初始功率下运行。

试验程序

- 频率自 50 Hz 阶跃至 $f_1 + 0.2$ Hz 保持，再阶跃至更高频点（如 50.8 Hz）；
- 记录 $P(t)$ ，按两稳态点反推实测下垂 s ，并读取响应 / 稳定时间；
- 改变 f_1 与 s 设定值重复试验，验证参数可编程性。

频率阶跃下的有功响应与 $\pm 10\%$ P_n 容差带



试验工况与判定准则

试验工况 / 测点	测量内容	判定准则
过频阶跃响应	实测下垂 s 与设定偏差	功率偏差在 $\pm 10\%$ P_n 容差带内
动态过程	响应时间 / 稳定时间	默认 ≤ 10 秒 / ≤ 30 秒
参数可编程性	f_1 、 s 修改后特性复测	与设定一致

4.5.3 调频控制

4.5.3.2 LFSM-U（欠频增出力）

标准要求

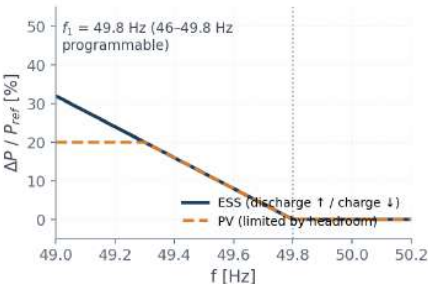
定义

频率低于门槛时增加有功输出（或减小充电功率）支撑频率恢复。中压场景下 ESS 的 LFSM-U 是重要的快速频率支撑资源。

标准要求 · EN 50549-2

- 门槛频率 f_1 ：46–49.8 Hz 可设定（默认 49.8 Hz）；下垂 s ：2–12% 可设；
- PV：仅在出力低于可用出力时增出力，上限为可用功率（需预留备用或按 TSO 约定）；
- ESS：放电可增至最大放电功率，充电可减至 0 或转为放电。

LFSM-U 特性：PV（受裕度限制）
与 ESS（双向完整响应）



关键参数表

项目	标准要求
门槛频率 f_1	46–49.8 Hz 可设（默认 49.8 Hz）
下垂系数 s	2–12% 可设（默认 5%）
PV / ESS 差异	PV 受可用出力 / 备用约定限制；ESS 双向完整响应

测试方法

试验目的

验证欠频增出力特性，覆盖 ESS 放电 / 充电工况。

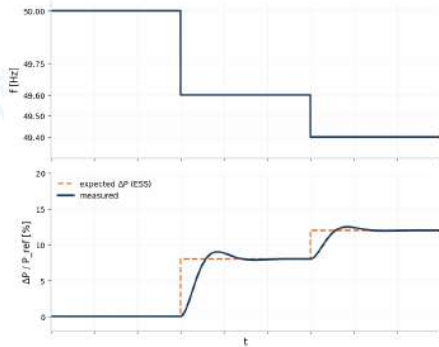
试验程序

- ESS 放电工况：频率阶跃至欠频，记录增出力响应；
- ESS 充电工况：验证充电功率按下垂减小直至停止或转为放电；
- PV：限功率工况验证增出力，满发工况验证不超过可用功率。

试验回路 / 条件

变频电网模拟器 — 被测机组 — 功率分析仪；ESS 需具备可调充电工况，PV 需限功率预留裕度。

欠频阶跃下的 ΔP 响应（ESS 放电工况示例）



试验工况与判定准则

试验工况 / 测点	测量内容	判定准则
ESS 放电	欠频增出力响应曲线	功率偏差在 $\pm 10\% P_n$ 容差带内
ESS 充电	充电功率减小 / 停止	功率偏差在 $\pm 10\% P_n$ 容差带内符合 50549-2 充电侧要求
PV 限功率 / 满发	增出力能力与上限	不超过可用出力

4.5.3 调频控制

4.5.3.3 FSM 频率敏感模式

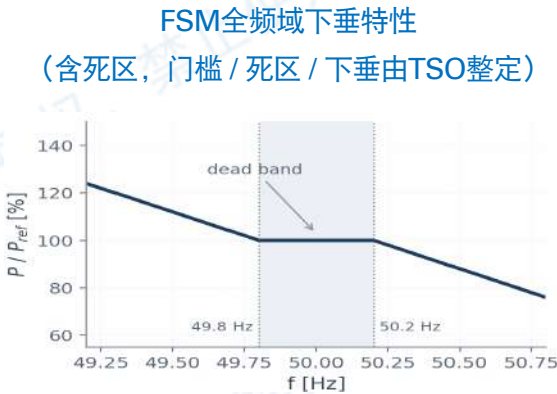
标准要求

定义

在门槛之外的全频率范围按下垂特性连续调节有功，并可设置死区。与LFSM仅在越限段动作不同，FSM是高压并网大容量机组（NC RfG Type C/D、VDE-AR-N 4120）的核心调频功能，调节范围与响应速度要求更高。

标准要求 · VDE-AR-N 4120 / RfG

- ◆ 门槛与死区由TSO规定：典型49.8 / 50.2 Hz，死区 0–±500 mHz 可设；下垂s：2–12%可设；
- ◆ PV：上调受可用出力限制，需按TSO约定预留备用；ESS：充放电双向对称调节，是FSM的理想资源。



关键参数表

项目	标准要求
门槛 / 死区	典型49.8 / 50.2Hz；死区0–±500mHz可设（TSO规定）
下垂系数s	2–12%可设
PV / ESS差异	PV 受可用出力限制、按约定预留备用；ESS充放电双向对称调节

测试方法

试验目的

验证全频域下垂特性、死区与双向响应速度。

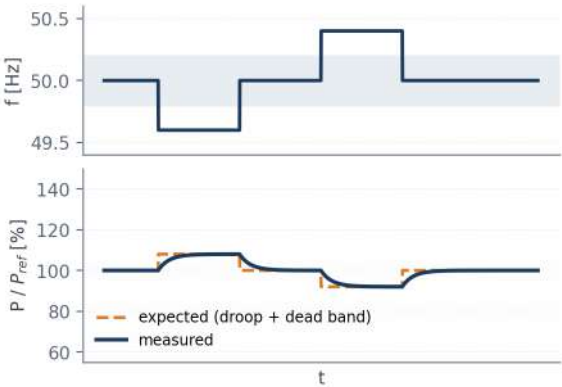
试验回路 / 条件

可变频电网模拟器 — 被测机组 — 高速录波；
按TSO整定门槛 / 死区 / 下垂。

试验程序

- ◆ 在死区内施加频率波动，验证功率不变；
- ◆ 向49.5 Hz与50.5 Hz方向分别阶跃 / 扫描，记录双向响应；
- ◆ ESS验证充放电对称调节；PV验证上调受约定备用限制。

全频域频率扫描下的双向有功响应



试验工况与判定准则

试验工况 / 测点	测量内容	判定准则
死区内	功率保持情况	无响应（死区有效）
死区外双向	实测下垂与响应时间	与TSO设定一致
ESS 对称性	充 / 放电响应一致性	双向对称

4.5.4 调压控制

标准要求

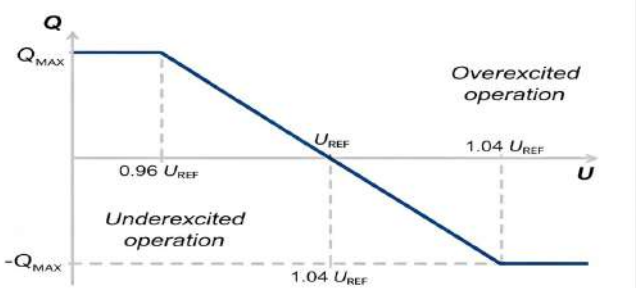
定义

中压电厂的电压支撑以无功调节为主： $Q(U)$ 按电压幅值自动调节无功， $P(U)$ 在过压时削减有功作为后备；控制结构与低压同构，但无功能力考核更严格。

标准要求 · EN 50549-2

- 无功能力按标准能力曲线考核：连续运行电压范围内提供规定无功，电压降低时能力可按斜线下降；
- 控制模式： Q 设定值 / $Q(U)$ / $\cos\varphi$ 设定值 / $\cos\varphi(P)$ ，互斥启用； $Q(U)$ 可为4点三段折线，时间常数3–60s；
- 中压电厂通常还须接受DSO远程无功 / 电压设定值调度； $P(U)$ 推荐实施，参数可配置。

测试用无功功率-电压特性曲线



关键参数表

项目	标准要求
无功能力	按50549-2能力曲线：连续电压范围内供规定无功，低压段允许斜线下降
控制模式	Q setpoint / $Q(U)$ / $\cos\varphi$ setpoint / $\cos\varphi(P)$ ，互斥；时间常数3–60s

测试方法

试验目的

验证 $Q(U)$ 特性、无功能力曲线边界及 $P(U)$ 过压削减功能。

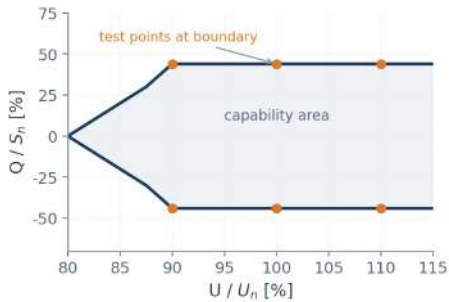
试验回路 / 条件

电网模拟器 — 被测机组 — 功率分析仪；
机组具备无功输出调节能力。

试验程序

- 电压序列阶跃验证 $Q(U)$ 特性与时间常数；
- 在 0.9 / 1.0 / 1.1 U_n 等电压点施加无功指令至边界，验证能力曲线（含低压段斜线下降）；
- 升压验证 $P(U)$ 削减特性及与 $Q(U)$ 的协调。

无功能力曲线与边界测点（ U - Q 平面）



试验工况与判定准则

试验工况 / 测点	测量内容	判定准则
$Q(U)$ 特性	各测点 Q 偏差与响应时间	$\leq \pm 5\%P_n$ ， τ 符合设定
能力曲线边界	各电压点最大无功	达到能力曲线要求
$P(U)$	过压削减轨迹	符合设定曲线

标准要求

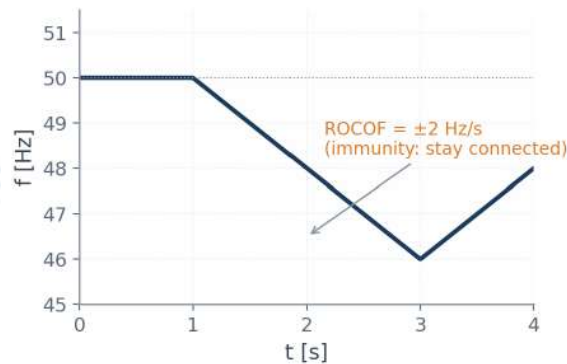
定义

与低压一致：频率快速变化时保持并网、不误跳闸的能力。中压电厂普遍配置 ROCOF / 矢量偏移（vector shift）类保护继电器，其设定与抗扰要求的协调是中压并网的典型问题。

标准要求 · EN 50549-2

- 非同步发电机 $\geq \pm 2 \text{ Hz/s}$;
- 接口保护（含 ROCOF / vector shift 继电器）设定须让位于抗扰与 FVRT 包络，禁止在 $\pm 2 \text{ Hz/s}$ 内动作。

ROCOF 抗扰示意： $\pm 2 \text{ Hz/s}$ 频率斜坡下保持并网



关键参数表

项目	标准要求
非同步发电机	ROCOF抗扰 $\geq \pm 2 \text{ Hz/s}$

测试方法

试验目的

验证中压机组频率斜坡 / 相位跳变抗扰及与接口保护的协调。

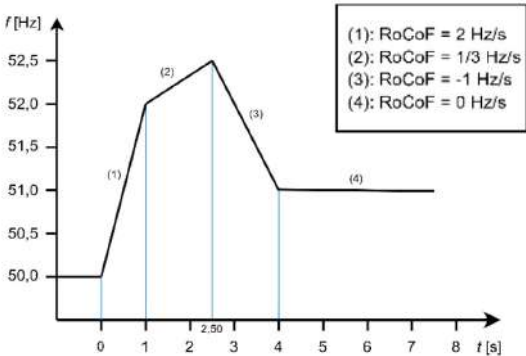
试验程序

- 施加 $\pm 2 \text{ Hz/s}$ 频率斜坡，监视运行状态；
- 全程监视 ROCOF / vector shift 继电器，验证包络内不动作。

试验回路 / 条件

电网模拟器（频率斜坡 / 相位跳变可编程）— 被测机组 — 录波仪；接口保护投入。

$\pm 2 \text{ Hz/s}$ 频率斜坡抗扰试验（保持并网）



试验工况与判定准则

试验工况 / 测点	测量内容	判定准则
频率斜坡	机组运行状态	不脱网
保护配合	继电器动作情况	包络内不误动

4.5.6 FVRT

4.5.6.1 电压穿越

标准要求

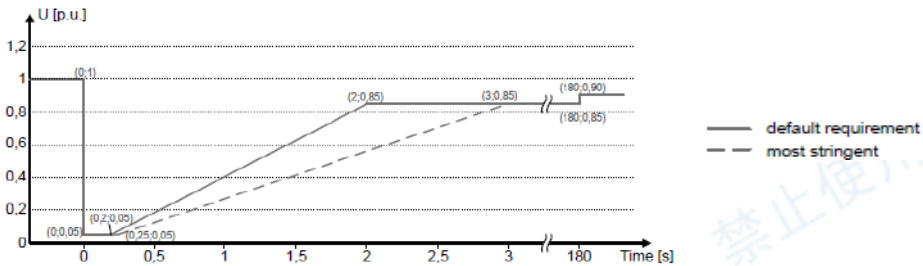
定义

中压FVRT与NC RfG Type B协调：电网故障导致电压跌落 / 升高时，电厂须在规定的电压—时间包络内保持并网并支撑电压恢复，包络以下才允许脱网。

标准要求 · EN 50549-2 (4.5)

- 故障起始耐受 $0\ U_n$ 持续250 ms；OVRT耐受 $1.25U_n$ 持续100ms；之后按包络线性恢复，恢复段参数（电压 / 时间坐标、斜率）由 DSO / TSO 在规定范围内给定；
- 恢复至 $\geq 0.85\ U_n$ 后连续运行。

非同步发电技术的低电压穿越能力



关键参数表

项目	标准要求
故障起始	$0.9U_n$ 以下开始注入无功电流； $0\ U_n$ 耐受250ms；（与 RfG Type B 协调）
恢复段	按包络线性恢复至 $\geq 0.85\ U_n$ 连续运行（参数由 SO / DSO 规定）
OVRT	$1.1U_n$ 以上开始注入无功电流；耐受 $1.25U_n$ 持续100ms

测试方法

试验目的

验证机组按 TSO / DSO 给定的穿越包络保持并网并支撑恢复。

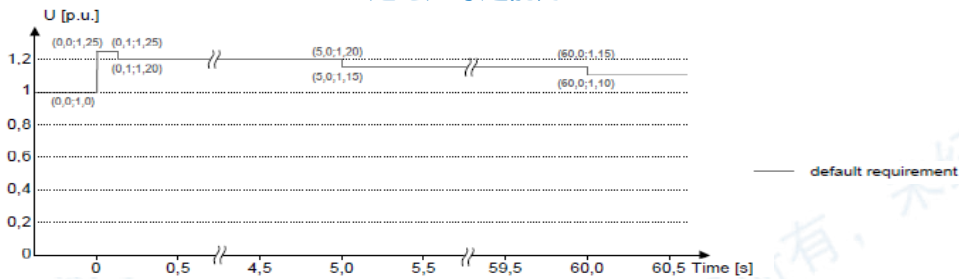
试验回路 / 条件

电压跌落发生器（按包络参数编程，含不对称故障）— 被测机组 — 高速录波。

试验程序

- 施加 $0\ U_n$ ·250 ms 深跌、恢复段中间点及 OVRT 点（对称 + 不对称）；
- 记录 $U / I / P / Q$ 波形，验证不脱网、故障期间无功注入与清除后恢复；
- 包络边界点复核：包络内不得脱网。

过电压穿越能力



试验工况与判定准则

试验工况 / 测点	测量内容	判定准则
$0\ U_n$ ·250 ms	机组连续性	不脱网
恢复段 / OVRT 点	连续性与恢复行为	符合包络要求
故障期间电流	无功注入行为	符合 4.7.4.2（见下页）

4.5.6 FVRT

4.5.6.2 无功电流注入与零电流模式

标准要求

定义

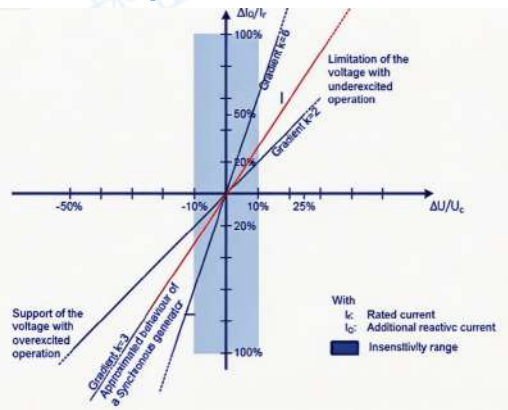
故障期间电压支撑：电压越出死区后，变流器按电压偏差成比例注入附加无功电流（ $\Delta I_q = k \cdot \Delta U$ ），抬升故障期间电压；深故障时可按模式切换为有功优先或零电流运行。

标准要求·EN 50549-2 (4.7.4.2)

- 梯度： k 0–6 可设定（默认2），注入上限可达100%额定电流；死区（典型 $\pm 10\%$ ） U_n 可配置；
- 三种运行模式：无功优先（故障时优先满足无功注入）、有功优先、零电流模式（电压低于阈值时电流降至 $\leq 10\%$ ，阈值 20%–100% 可配置，默认值为0.5）； $I_n U_n U_n$
- ESS 充电工况同样适用上述要求。

附加无功电流—电压偏差特性

$$(\Delta I_q = k \cdot \Delta U, k \text{ 默认 } 2)$$



关键参数表

项目	标准要求
梯度 k / 死区	$k = 0-6$ 可设（默认 2）；死区 $\pm 10\% U_n$ 可配置
注入上限	附加无功电流可达 100% I_n ；电流总量受变流器容量约束
运行模式	无功优先 / 有功优先 / 零电流模式（ $\leq 10\% I_n$ ，阈值可配置）

测试方法

试验目的

验证故障期间 $\Delta I_q = k \cdot \Delta U$ 注入特性及各运行模式切换。

试验回路 / 条件

电网模拟器（对称 / 不对称电压偏差）— 被测机组 — 高速录波（毫秒级）。

试验程序

- 施加 $0.2U_n / 0.5U_n / 0.75U_n / 1.15U_n / 1.20U_n / 1.25U_n$ 电压阶跃（三相对称及两相不对称测试）；
- 测量 ΔI_q 初始响应时间与稳态值，反推梯度 k 与设定比对；
- 分别启用无功优先 / 有功优先（如有）/ 零电流模式，验证切换行为与零电流模式下 80ms 内 $I \leq 10\% I_n$ 。

试验工况与判定准则

试验工况 / 测点	测量内容	判定准则
ΔU 阶跃	ΔI_q 稳态与梯度 k	与设定一致（ k 0–6）
响应速度	无功电流响应时间，稳定时间	响应时间 $\leq 30\text{ms}$ ，稳定时间 $\leq 60\text{ms}$ 。
模式切换	三种模式行为	零电流模式 80ms 内 $I \leq 10\% I_n$

4.5.7 并网保护装置：过欠压 / 过欠频保护

标准要求

定义

中压接口保护通常由专用保护装置实现，电压跳脱值以实际量值（kV）给出；功能与低压一致：超过跳脱值后在设定跳脱时间断开并网开关。

标准要求 · EN 50549-2 (4.9.2 / 4.9.3)

欠压、过压保护各设两级，跳脱值与跳脱时间独立可设置；欠频、过频保护阈值可设置。连续运行频率范围 49–51 Hz，边界区间限时运行。

关键参数表

保护项目	跳脱值设置范围	跳脱时间设置范围	典型脱网设置
欠压保护 1 级	0.2–1.0 U_n	0.1–100 s	按 DSO / 协议
欠压保护 2 级	0.2–1.0 U_n	0.1–5 s	按 DSO / 协议
过压保护 1 级	1.0–1.2 U_n	0.1–100 s	按 DSO / 协议
过压保护 2 级	1.0–1.3 U_n	0.1–5 s	按 DSO / 协议
欠频保护	47.0–50.0 Hz	按 DSO / 协议	47.5 Hz
过频保护	50.0–52.0 Hz	按 DSO / 协议	51.5 Hz

测试方法

试验目的

验证各级保护的跳脱阈值、跳脱时间。

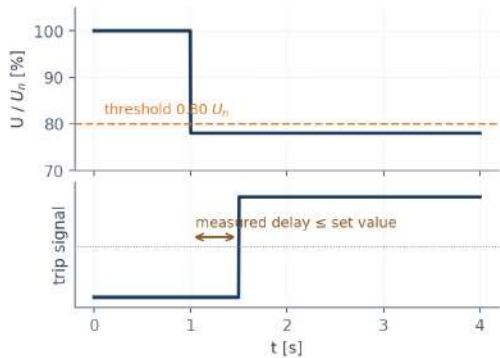
试验回路 / 条件

电网模拟源 — 被测机组 — 时间记录装置。

试验程序

- 按要求跳脱值施加电压 / 频率阶跃，记录动作时间；
- 缓变回扫测跳脱值。

越限阶跃下的动作延时测量



试验工况与判定准则

试验工况 / 测点	测量内容	判定准则
跳脱时间测试	动作时间	≤ 设置跳脱时间
跳脱值测试	实际跳脱值	与设定跳脱值误差 ≤ ±1%额定电压

4.5.8.1 各国（地区）标准要求

中高压并网标准，是指光伏电站、储能电站、风电场、工商业大型光储系统、集中式 PCS、升压站等接入中压或高压电网时，需要满足的技术规范、测试要求、建模要求、保护要求和电网公司接入要求。

相比低压并网，中高压并网更强调：电网支撑能力、故障穿越能力、动态无功能力、调度通信、保护配合、电能质量、模型仿真和项目级并网验证。

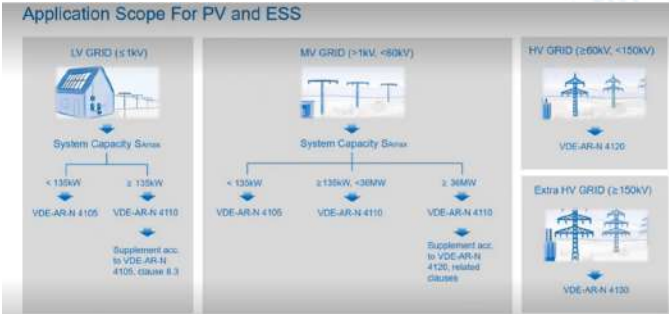
低压并网更多关注单台设备是否安全接入；中高压并网则关注整个电站或储能系统接入后，对配电网、输电网甚至区域电力系统稳定性的影响。

国家/地区	标准	说明
欧洲	EU RfG (EU 2016/631) + EN 50549-2	EU RfG Type A/B/C/D涵盖低压至中高压要求；EN 50549-2规定并接入公共中压配电网的发电设备保护功能和运行能力要求，用于Type B及以下设备与DSO签订接入协议、证明符合EU RfG。适用于接入中压配电网的发电设备（配 EN 50549-10测试要求）。
德国	VDE-AR-N 4110	中压1-60kV
德国	VDE-AR-N 4120	高压60-150kV
德国	VDE-AR-N 4130	特高压≥150kV
德国	TR3	中、高及特高压电网中发电机组、电站、储能设施及其组件的电气特性。
德国	TR4	发电机组、发电厂、储能设施及其组件的电气特性仿真模型的建模与验证要求。
德国	TR8	发电机组、发电厂、储能设施及其电网组件的电气特性认证。
意大利	CEI 0-16、Terna 系列标准	接入中压电网的设备需满足CEI 0-16；接入高压 ≥110kV、36kVTerna 电站及最大装机容量超6MW的发电设备参照 Terna 系列标准。适用于中高压并网发电设备。
欧洲其它市场	基于 EU RfG + EN 50549 的各国并网技术规范	欧洲多数国家依托EU RfG与EN 50549框架编制本国并网规范，按Type A/B/C/D分类界定低压、中高压要求。适用于接入配电网/输电网的发电设备。
美国	IEEE 1547、IEEE 2800-2022	接入配电网参照IEEE 1547系列；IEEE 2800-2022针对接入输电及相关系统的逆变型资源IBR的互联和互操作要求。适用于接入配电网的DER 及接入输电系统的逆变型资源。
澳大利亚/新西兰	GPS (Generator Performance Standards)	澳大利亚能源市场运营商AEMO制定的并网性能强制手册，需进行全项性能验收。适用于中高压接入的发电设备。

中国并网体系分三层架构：产品单机国标 + 电站场站国标 + 电网企业细则（国网 / 南网），光伏、储能分开设标，储能 PCS 为双向四象限变流器，调频、无功要求严于光伏。

装机容量	推荐接入电压	标准及要求
400kW~6MW	10kV 中压配网	GB/T29319、GB/T36547、Q/GDW12051
6MW~50MW	35kV/66kV 中高压	GB/T19964、GB/T36547、国网并网细则
50MW~200MW	110kV 高压输电	GB/T19964、Q/GDW 场站导则
> 200MW	220kV 及以上超高压	GB/T19964 + 电网专项并网审查

德国并网标准体系



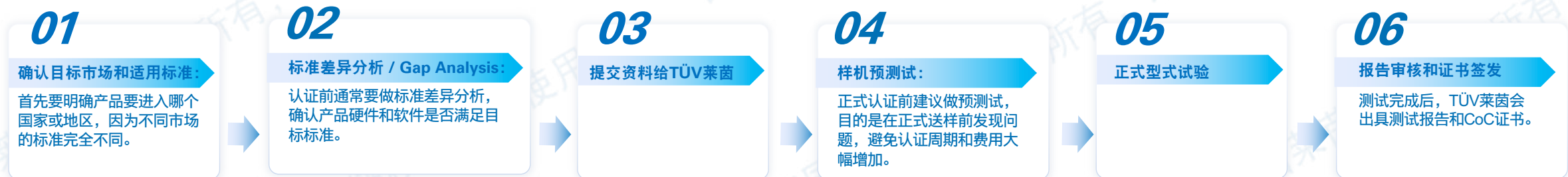
4.5.8 中高压并网法规与标准

4.5.8.2 中高低压并网认证与市场准入

中高压并网认证

中高压并网认证，是指光伏逆变器、储能逆变器、光储一体机、微型逆变器、PCS 等产品，在接入中高压配电网前，需要通过相应标准的型式试验、文件审查和认证/列名流程，以证明设备在并网运行时能够安全、稳定、可控、可保护、可调节，不会影响电网安全、电能质量和人员安全。

中高压并网认证通常不是一步完成，而是分为以下阶段。



需要注意：测试报告不等于证书，证书也不等于最终电网公司准入。很多国家还需要额外做产品列名或 DSO 审核。

中高压电网列名

中高压电网列名，也叫中高压并网设备入网注册、发电设备型式注册、电网准入登记，英文为 Grid-code Registration、Type-test Registration、System Homologation，针对中高压直挂 PCS、集中式变流单元、构网型发电单元等涉网设备；设备完成中高压并网型式试验后，厂商提交仿真模型，经电网运营商预资格审核录入电网准入门录，才可用于中高压并网项目。中高压并网认证证明设备符合并网标准，输出试验报告与证书，仿真模型由厂商配套提供；该列名属于电网侧预审，除证书外重点评审模型、控制逻辑与系统交互，通过后获取注册编号。不同于低压可公开查询的产品白名单，绝大多数国家中高压无通用公开设备清单，部分国家支持设备型式注册，但仍需做项目级评审，以项目预资格登记为主。

中高压电网列名的意义

- 便于电网运营商开展涉网审批
中高压电站由电网 TSO/DSO 开展涉网评审，列名 / 型式注册完成后，电网可复用已评审通过的设备证书、仿真模型与控制逻辑，减少新项目中设备层面的重复核验，缩短电站并网预审周期，但每个项目仍需开展场站级系统仿真评估。
- 降低 EPC、设计院选型风险
中高压项目 EPC、设计院一般不重新开展全套型式试验与模型校验，优先选用已完成电网注册的设备；即便产品证书齐全，未完成注册的设备，会增加项目评审工作量，容易不被优先选用。
- 满足电站备案、并网前置条件
不少国家电网导则将中高压发电单元设备预注册作为电站并网许可、项目备案的前置条件；部分区域电网会将注册编号纳入电站报批材料，无注册信息将无法推进并网流程，也有部分国家仅做项目级评审，无设备注册环节。
- 电网侧系统安全管控
注册环节同步归档设备仿真模型、保护定值、控制策略、版本变更信息，电网可基于统一模型开展系统仿真、故障分析；设备软硬件重大变更时，厂商需要更新提交资料，否则原有注册将暂停效力，需重新复核，以此保障电网整体运行安全。
- 规避项目并网失败风险
未完成注册的设备，即便单机型式试验合格，仍存在仿真不通过、涉网参数不满足电网导则的风险，容易造成并网审批驳回、项目工期延误，甚至需要现场改造设备，带来额外成本。

第五章 构网技术要求



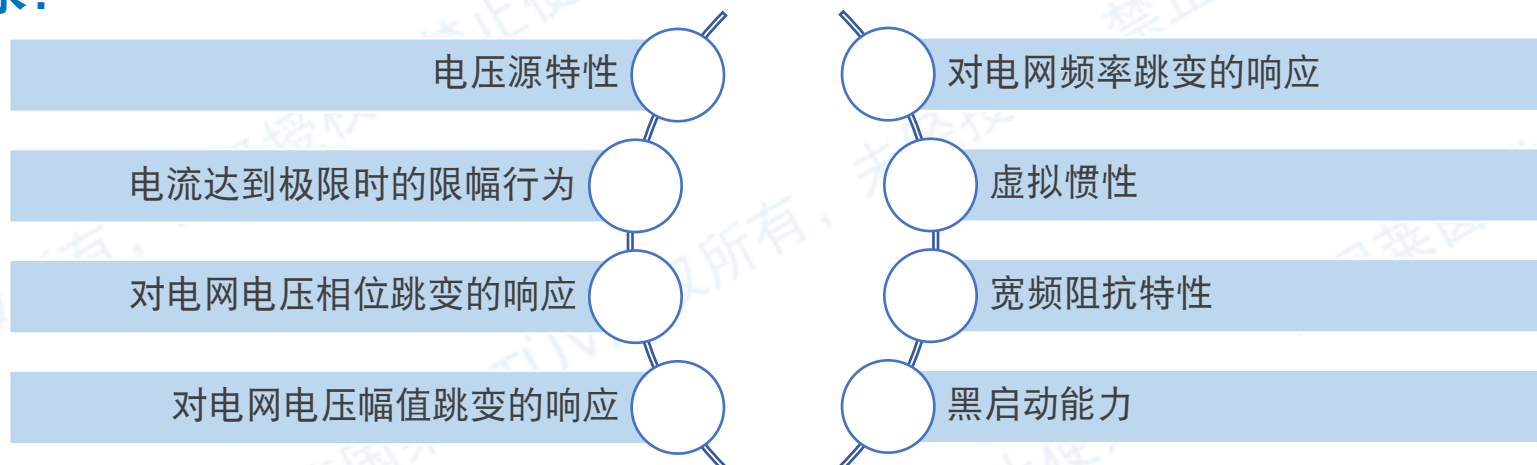
5.1 构网技术标准及核心要求

☆ 技术标准：

2023年12月，欧盟能源监管合作署（ACER）向欧盟委员会提交了修订并网规范（NC RFG）的建议，即NC RfG 2.0草案，首次将构网要求纳入发电厂模组（PPM，主要包含电力电子等非同步发电装置）的技术规范。

为配合NC RFG 2.0的实施，ENTSO-E发布技术指南文件《Grid Forming Capability of Power Park Modules》（发电厂模组的构网能力技术报告）。这是ENTSO-E联合多家行业组织于2025年10月3日发布的技术报告，旨在为即将出台的欧盟并网规范（NC RFG 2.0）中关于构网型变流器的技术要求提供详细指南。这是欧洲首次系统性地提出构网型变流器的可量化、可测试并网技术要求，为全球（包括中国、澳大利亚、美国）的构网标准制定提供了重要参考。

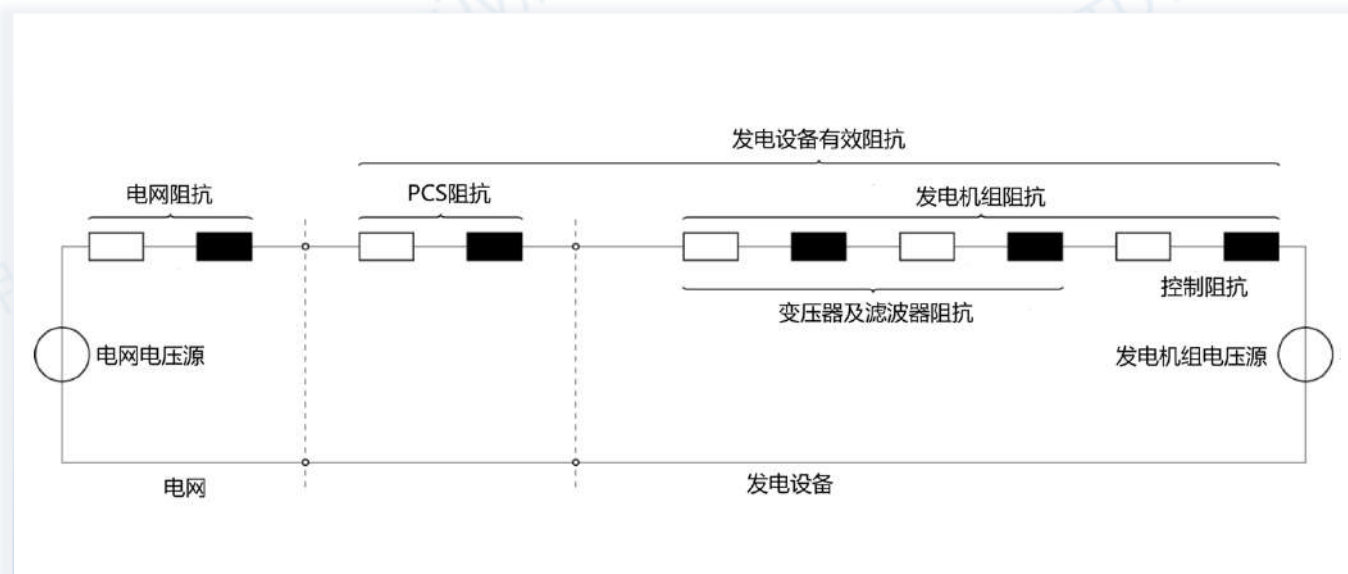
☆ 核心技术要求：



技术要求:

在正常和扰动工况下（电压幅值、频率、相位变化），构网型设备应表现为理想电压源（戴维南源）串联内阻的电压源特性：

- 理想电压源上电时输出电压具备启动时间常数 T_A 。
- 内阻（有效阻抗）包含实际阻抗（如变压器或滤波器）及虚拟阻抗（如设备控制）。
- 电网电压的幅值（相位）变化应引发电压源输出的无功（有功）电流发生变化。



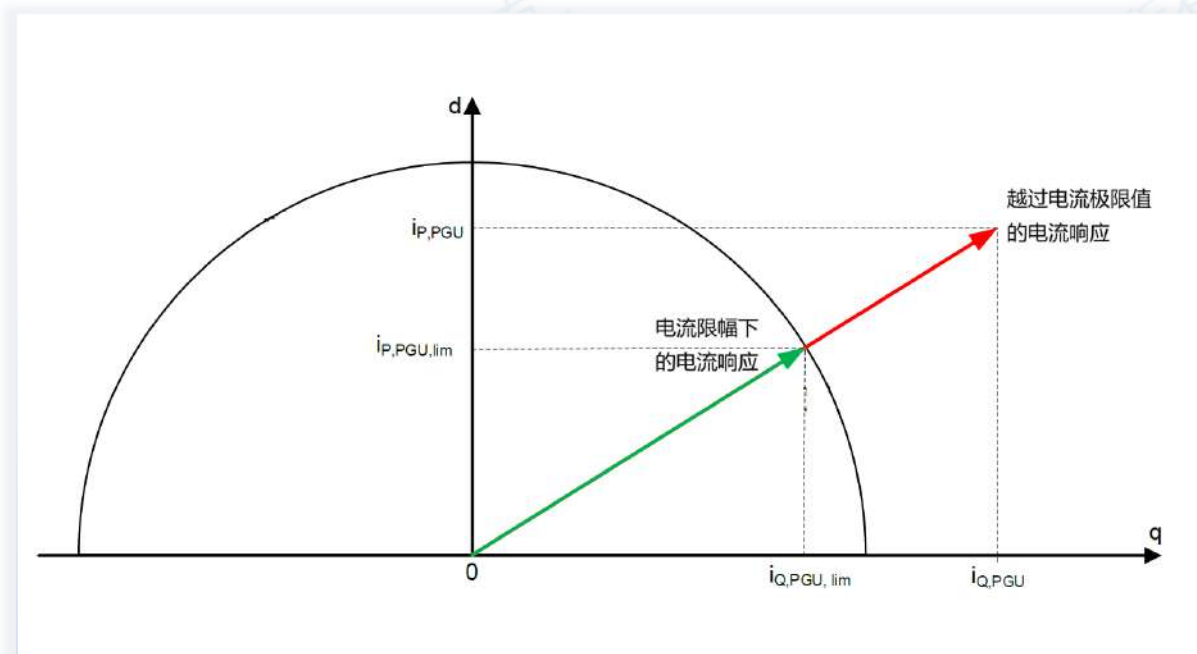
5.1.2 电流达到极限时的限幅行为

响应要求：

当需求的电流响应超过设备（PGU）的电流极限时，应等比缩放电流矢量（电流限幅）并保持矢量角不变，以保护设备硬件。此过程中，有功和无功并无优先级。

电流限幅（clipping）最多可保持40ms。为了避免长时间连续电流限幅，设备的电流极限可设定为额定电流的95%。

注：如果设备可以在电流超过极限的状态下运行，则设备可以提供超过电流极限值的电流响应。



5.1.3 对电网电压相位跳变的响应

⚠️ 响应要求：

当构网型设备（PGU）的端口电压发生电压相位角跳变时，设备应表现电压源特性，PGU内部电压的幅值，相位和频率在电网电压跳变瞬间保持不变。PGU的电流响应由其有效阻抗与电网电压差决定，本页中公式用于量化PGU的电流响应能力

（ $\Delta i_{P,PGU,Peak}$ ）。

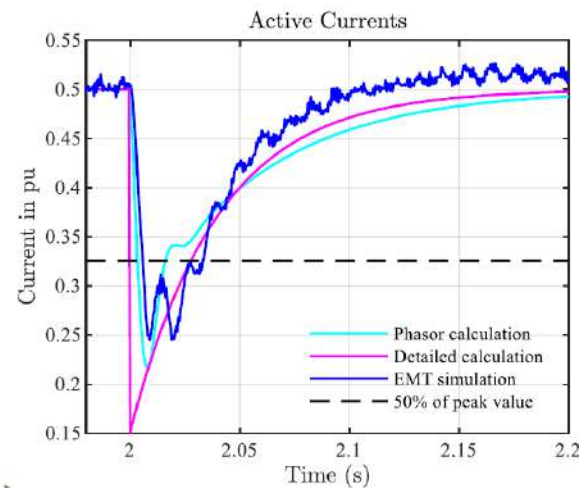
⚡ 电流变化计算：

$$\Delta i_{P,PGU,Peak} \approx -\frac{1}{x_{Eff}} (\sin(\delta + \gamma) - \sin(\delta))$$

其中 γ 为相位跳变角， δ 为跳变前的相角差， x_{Eff} 为PGU有效阻抗。

Ⓢ 性能指标（依据ENTSO-E构网技术指南）：

- ◆ 在10ms内，瞬时有功电流变化应至少达到理论峰值（按本页公式计算）的50%。
- ◆ 若无储能或储能有限，允许仅响应负功率变化。



图中展示不同计算（模拟）方法下PGU有功电流面对电网电压相位突变（+5°）时的响应。

5.1.4 对电网电压幅值跳变的响应 (1)

响应要求:

当构网型设备（PGU）的端口电压发生电压幅值跳变时，设备应表现电压源特性，PGU内部电压的幅值，相位和频率在电网电压跳变瞬间保持不变。PGU的电流响应由其有效阻抗与电网电压差决定，本页中公式用于量化PGU的电流响应能力（ $\Delta i_{Q,PGU}$ ）。

电流变化计算:

$$\Delta i_{Q,PGU} \approx \frac{1}{x_{Eff}} (U_{PGU} - U_{Inv} \times \cos(\delta))$$

其中 U_{PGU} 和 U_{Inv} 为PGU端口和内部电压， δ 为前述两电压的相角差， x_{Eff} 为PGU有效阻抗。

- 当PGU端口电压幅值变化不小于 $\pm 5\%$ 且不触发电流限幅时，无功电流响应近似为：

$$\frac{\Delta U_{PGU}}{x_{Eff}}$$

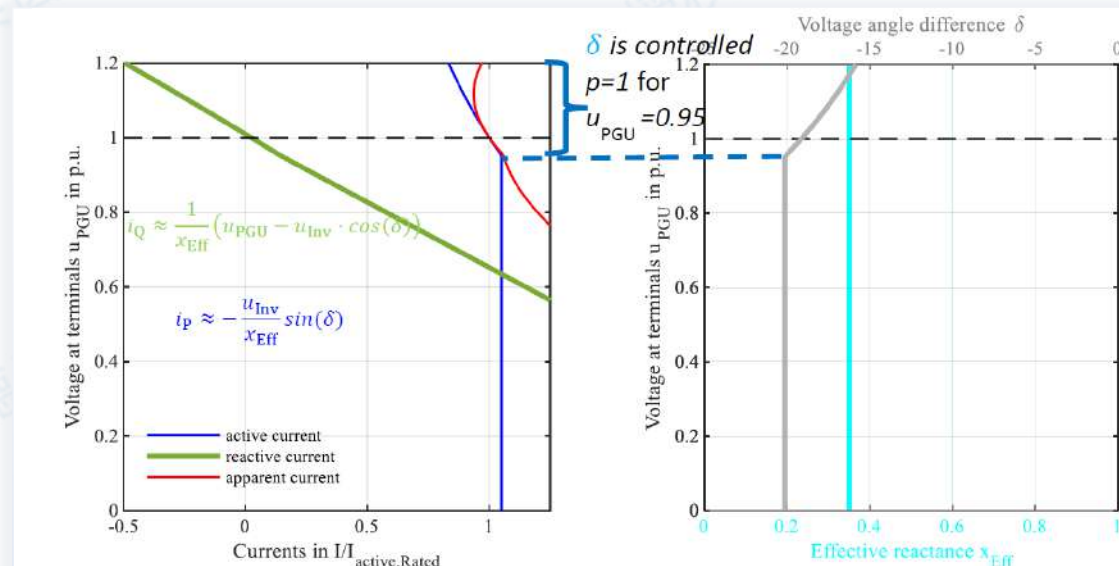
例如电压下降 5% 时，无功电流增加 0.15 p.u.（假设 $x_{Eff} = 0.33$ p.u.）。在没有达到电流极限值的情况下，无功电流 i_Q 随电压幅值的变化而变化。有功电流 i_P 不随电压幅值变化。在低电压时，视在电流 i_S 会变得非常高。

- 当电压变化小于 $\pm 5\%$ 时，有功电流 i_P 的微小变化是由有功功率控制环引起的，该控制环根据电网电压调整有功电流，以维持恒定的有功功率输出。

5.1.4 对电网电压幅值跳变的响应 (2)

⑧ 性能指标（依据ENTSO-E构网技术指南）：

- 在10ms内，视在电流 i_S 应达到预期值的90%。
- 电压变化不小于 $\pm 5\%$ 时，正/负序无功电流的响应阻尼比应 ≥ 0.3 ，且在80ms内进入 $\pm 15\%$ 误差带，130ms内进入 $\pm 5\%$ 误差带。
- 当需求响应超过电流极限值时，应等比缩放电流矢量（电流限幅）并保持矢量角不变，以保护设备硬件。此过程中，有功和无功并无优先级。（详见5.1.2，电流达到极限值时的限幅行为）。



图中展示在PGU的电压相角差（右图灰色线）和有效阻抗（右图蓝色线）不变的情况下，PGU输出的有功电流（左图蓝色线）保持不变，无功电流（左图绿色线）随PGU端口电压幅值的变化而变化。

5.1.5 对电网频率跳变的响应

响应要求：

构网型设备应能响应电网频率或相位跳变，提供阻尼功率，抑制频率或者功率的振荡。设备对有功功率的振荡抑制效果用阻尼比（按本页公式计算）进行量化。

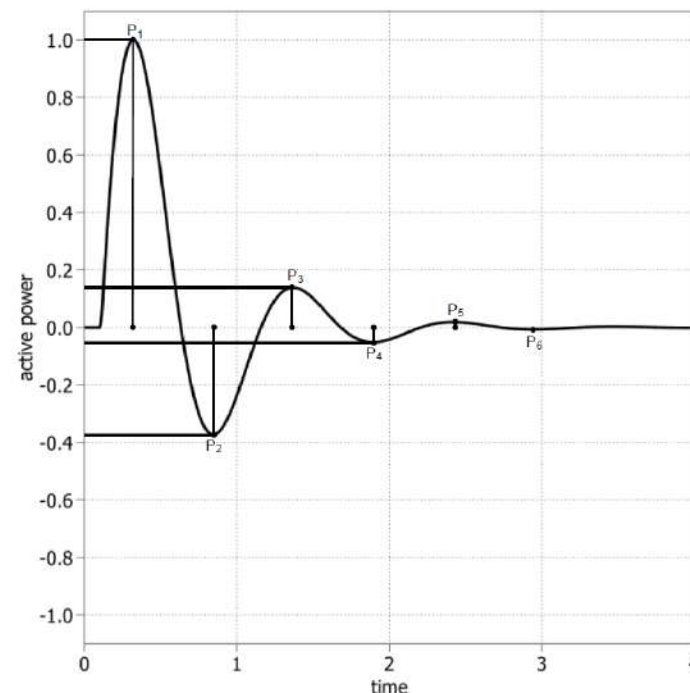
有功功率阻尼比计算：

$$\xi = \frac{\ln\left(\frac{P_n}{P_{n+2}}\right)}{\sqrt{(2\pi)^2 + \ln^2\left(\frac{P_n}{P_{n+2}}\right)}}$$

其中 P_n 和 P_{n+2} 的定义详见右图。

性能指标（依据ENTSO-E构网技术指南）：

在0.1Hz至10Hz的频率范围内，设备对有功功率振荡的阻尼比建议至少达到5%。



图中展示 P_n 和 P_{n+2} 为有功功率振荡过程中两个相连的最大值（或最小值）。

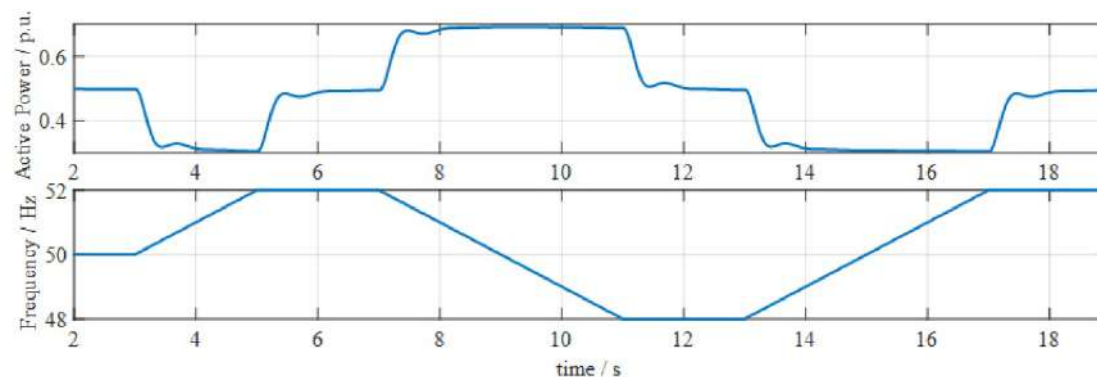
5.1.6 虚拟惯量 (1)

概念定义:

虚拟惯量是通过控制算法模拟同步发电机的转子惯量特性，使构网设备在电网频率发生变化时，能够自动、快速地调节有功功率输出，以抑制频率变化率（RoCoF）并减缓频率偏差的扩展。

响应要求:

构网型设备提供虚拟惯量的具体要求可由相关TSO与RSO指定。设备应能够响应频率变化，即在RoCoF变化时快速调整有功功率。对于Type B发电厂，储能设备需要在电网低频工况下提供虚拟惯量（储能设备放电）。对于Type C和Type D大型发电厂，在电网高/低频工况下均需要提供虚拟惯量，这要求额外的瞬时功率储备。



图中展示当电网频率（下图）上升时（RoCoF>0），设备发出的有用功（上图）降低以遏制电网频率的上升。当电网频率下降时（RoCoF<0），设备发出的有用功增加以供应额外的负载。

⚡ 功率变化计算:

构网型设备在提供虚拟惯量时所改变的有功功率 (ΔP) 可以由本页公式计算:

$$\Delta P = T_A \times \frac{\frac{\Delta f}{f_{\text{rated}}}}{\Delta t} \times P_{\text{rated}}$$

其中 f_{rated} 和 P_{rated} 是额定电网频率和额定设备有功功率。 T_A 是设备的启动时间常数。

Ⓢ 性能指标 (依据德国VDE FNN构网技术指南):

构网型设备的启动时间常数 (见本页公式中 T_A) 由相关TSO和RSO协调制定。当设备提供虚拟惯量时, 需求的功率变化响应需在800ms ($T_A \leq 10\text{s}$) 或在1300ms ($T_A > 10\text{s}$) 内完成。功率变化精度需保持在 $\pm 5\%$ 以内。

德国惯性功率采购要求基础产品和优质产品在全年30%和90%的时间内对于 $\pm 2\text{Hz/s}$ 的频率变化率不得出现功率限制。

当设备结束提供虚拟惯量后, 允许储能设备从电网中充电 (放电), 输出 (充入) 的能量不得超过之前改变的能量的1.5倍。

概念定义：

宽频阻抗特性是指一个元件或系统在一个较宽的频率范围内，其阻抗保持相对稳定或按特定规律变化的能力。

性能指标（依据德国VDE FNN构网技术指南及ENTSO-E构网技术指南）

PGU的频率敏感阻抗应在100Hz至2.5kHz的范围内拥有正实部。此要求适用于所有类型的发电设备（Types A-D）。对于大型发电机组（Type C和Type D），此要求同样适用于并网点（PoC）。ENTSO-E构网技术指南额外说明宽频阻抗特性所要求的最大频率可在1kHz至2.5kHz之间变化，最终由TSO指定。

PGU的宽频阻抗特性旨在确保PGU不会放大与电网交互过程中的各种共振（如控制）并最终引发系统谐波问题。

概念定义：

黑启动能力是指发电机组或储能系统在电网全停，无外部电源支援的情况下，依靠自身能量启动并带动其他设备恢复供电的能力。

性能指标

构网PGU在断开电网、无外部电能供应的情况下，能在规定时间内自行启动。待启动电网处于空载状态时，PGU应能在并网点提供接近额定频率的电压，并覆盖充电负荷与网损。电压应在10% – 105%额定电压范围内无级可调。从10%升至约90% – 100%的升压时间 不超过10分钟。电压 > 90%后，应自动投入发电机电压控制（电压控制器模式），以应对后续负载接入。负载连接（≤ 10%额定有功）引起的频率变化不得超过1Hz。

在全球绝大多数的构网技术指南中，黑启动并非是构网PGU的强制要求。TSO可根据具体情况向系统中的发电机组要求黑启动能力。

5.2 构网设备测试要求（依据德国VDE FNN构网技术指南）

德国VDE FNN构网技术指南涵盖的构网设备测试旨在准确地，科学地测试构网设备在不同工况下的运行表现及对电网的支持能力。这些测试可总结为以下十项测试：

测试1	模拟孤岛运行测试
测试2	相位跳变功率验证
测试3	有效阻抗验证
测试4	谐波频率范围内的阻抗和谐波源验证
测试5	有效阻抗的扰动响应特性和线性度验证
测试6	高低压穿越
测试7	达到和退出电流限值时的行为
测试8	返回电压带 $u_{rated} \pm 10\%u_{rated}$ 时的行为
测试9	功率-频率震荡阻尼验证
测试10	起动时间常数 T_A 、惯量功率和能量验证

注：本章节所有测试的测试方法和测试判据均依据德国VDE FNN构网技术指南。

5.2.1 虚拟孤岛运行测试 (1)



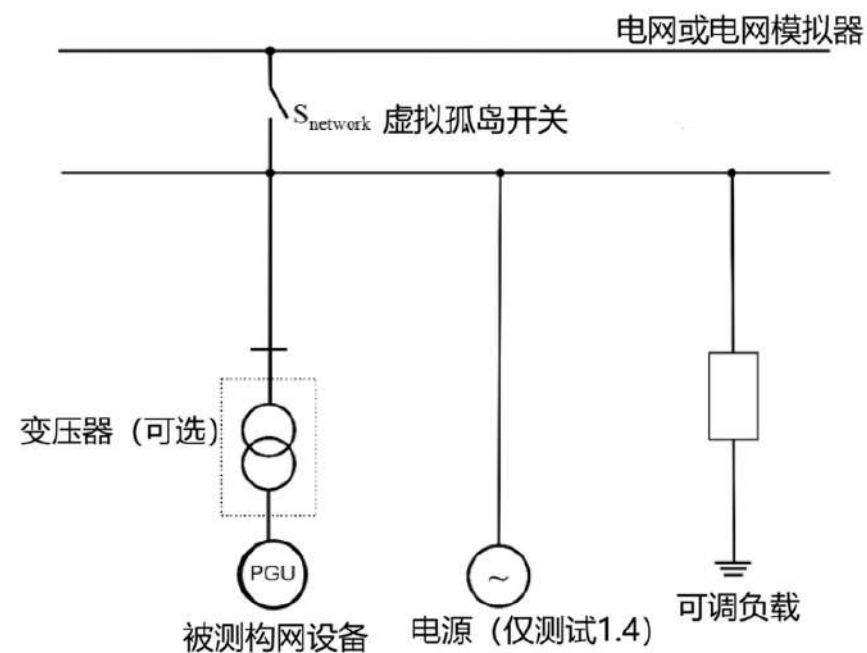
测试目的:

虚拟孤岛运行测试用于验证构网型设备 (PGU) 的电压源特性, 以及其是否在非受限范围内满足过频和欠频的响应要求, 即 PCNB 要求。作为测试的一部分, 还将验证启动时间常数 T_A 的有效性。



测试方法:

虚拟孤岛运行测试环境如右图所示: PGU 与电网或电网模拟器同步运行, 短路容量比 $SCR \geq 3$, 并为可调负载供电。可调负载可以是可切换负载或变流器负载, 应能够将负载状态从最小有功功率调节至最大有功功率。PGU 的内部保护和 PCNB 均应处于激活状态。





测试方法：

从并网运行的稳态工作点出发，通过断开断路器 S_{network} 形成虚拟孤岛，使PGU为预设可调负载供电。可调负载的功率可设置为PGU最大输出功率（ $P_{E,\text{max}}$ ）的45%至65%（输出功率反向时为-45%至-65%）。

测试包含沿着惯量功率方向的4个测试（测试1.1至1.4）及1个与惯量功率方向相反的测试（测试2.1）。所有测试均需在2个不同的启动时间常数 $T_{A,\text{min}}$ 和 $T_{A,\text{max}}$ 下进行。

测试记录应至少在断路器断开前10s开始，虚拟孤岛状态至少持续50s，直至达到新的稳定工作点。可调负载应尽可能表现无源特性，且不得影响被测PGU的控制。



测试判据：

测试评估时，若在虚拟孤岛状态下频率和有功功率达到稳态，且PGU内部保护未触发完全脱网（在虚拟孤岛中脱网），则认为验证成功。同时，测试数据反映出的启动时间常数 T_A 应在设定值的50%容差范围内。

对于PCNB，测试系统应保持稳定的孤岛运行，且测得频率超过52.5Hz的累计时间不超过0.1s，超过51.5Hz的累计时间不超过10s。

同时，PGU在频率及有功功率的稳定过程中应提供满足要求的阻尼。基于变流器的设备，例如光伏和电池储能系统，阻尼比应不低于0.2，风力发电站等装置的阻尼比应不低于0.06。

5.2.2 相位跳变功率验证（1）



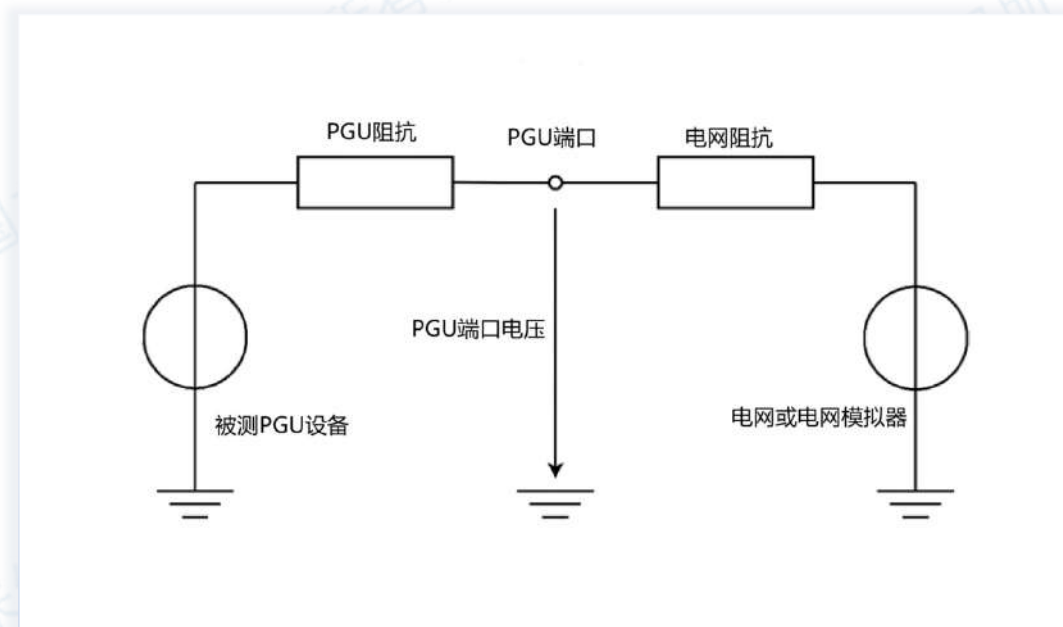
测试目的：

相位跳变功率测试用于确定构网型设备（PGU）对电压相角跳变时的动态有功功率响应，同时验证电压源特性相对于外部有功功率限制指令具有更高优先级。



测试方法：

相位跳变功率测试（及本章节余下所有构网设备测试）均需在 与电网或与电网模拟器同步运行的条件下进行，测试环境如右图所示。也可以在电网连接点（并网点）运行PGU，前提是可以 通过激活PGU上的相应信号以完成测试。





测试方法:

基于并网运行的稳态工作点（有功功率为 $50\% \pm 5\% P_{E,max}$ 的 $\pm$ ，无功功率为 $P_{E,max}$ 的 $\pm 5\%$ 范围内），通过以下两种方法中的一种，施加电压相位跳变并记录由此产生的功率变化：

1. 对PGU内部电压相角施加相位阶跃 $\Delta\theta_{setpoint}$ 。
2. 通过电网模拟器或FRT试验装置，对PGU端口电压相角施加相位阶跃 $\Delta\theta_{setpoint}$ 。

以上两种方法中，施加的相位跃迁应使PGU沿惯量功率方向产生至少 $45\% P_{E,max}$ 的功率变化，并施加反方向的相位跃迁（即 $-\Delta\theta_{setpoint} \pm 10\%$ ）重复测试。



测试判据:

测试评估时，确定并计算PGU内部电压相角（方法1）或PGU端口电压相角（方法2）在测试前后产生的角度变化 $\Delta\delta_1$ ，并按本页公式计算所需的最大有功电流响应（ $\Delta i_{P1,PGU,max}$ ）：

$$\Delta i_{P1,PGU,max} = -\frac{1}{Z_{w,max}} \sin(\Delta\delta_1)$$

其中 $Z_{w,max}$ 是设备的最大有效阻抗。

若最大有功电流变化（ $\Delta i_{P1,PGU}$ ）达到所需最大有功电流响应的50%（对于拥有储能设备需达到70%），则测试通过。

 测试目的：

有效阻抗测试用于确定PGU端口处的电压幅值发生变化时的有效阻抗，并验证其是否符合VDE FNN指南规定的最大值 $z_{w,max}$ 。

 测试方法：

有效阻抗测试同样基于PGU并网运行的稳态工作点，这些稳态工作点的要求可见下表。

序号	输出有用功	输出无用功	SCR
1	$> 55\%P_{E,max}$	$10\% \left(\pm 5\% \right) P_{E,max}$	SCR≥3
2	$> 55\%P_{E,max}$	$10\% \left(\pm 5\% \right) P_{E,max}$	
3	$15\% \sim 45\%P_{E,max}$	$-10\% \sim 10\%P_{E,max}$	

在3号测试工况下，电压变化 $\Delta u_{setpoint}$ 应沿负方向。



测试方法:

基于并网运行的稳态工作点，通过以下两种方法中的一种，施加电压幅值跳变并记录由此产生的电压和电流变化：

1. 在PGU端口处依次施加 ± 0.03 至 0.05 p.u.的电压幅值阶跃（ $\Delta u_{\text{setpoint}}$ ）。顺序为：正阶跃 $\rightarrow 0 \rightarrow$ 负阶跃 $\rightarrow 0$ ，系统需在各稳态之间达到稳态。
2. 通过电网模拟器或FRT试验装置，对PGU端口电压幅值施加两次幅值不同的变化，例如： $\Delta u_{\text{I}} = 0.03$ 至 0.05 p.u.和 $\Delta u_{\text{II}} = 0.07$ 至 0.1 p.u.。两次幅值变化应与起始稳态工作点，及彼此之间，相差至少2%。



测试判据:

测试评估时，根据电压变化前后稳态正序电压和视在电流计算有效阻抗：

方法1:

$$Z_{w,1} = \frac{u_{1,n} - u_{1,v} \pm \Delta u_{\text{setpoint}}}{i_{S1,n} - i_{S1,v}}$$

其中n和v代表电压变化后和变化前的变量。

方法2:

$$Z_{w,1} = \frac{u_{1,n} - u_{1,v}}{i_{S1,n} - i_{S1,v}}$$

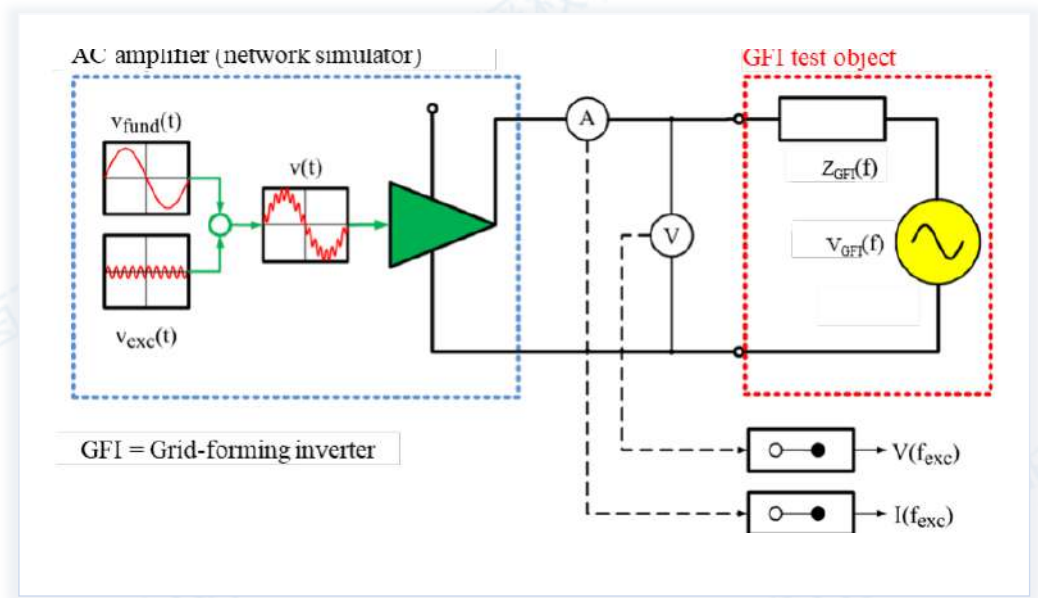
其中n和v代表电压变化后和变化前的变量。

如果通过测试得到的有效阻抗大小 $|Z_{w,1}|$ 符合VDE FNN指南规定的阻抗最大值 $Z_{w,\text{max}}$ ，则测试通过。

5.2.4 谐波频率范围内的阻抗和谐波源验证（1）

测试目的:

谐波频率范围内的阻抗和谐波源验证是为了验证构网PGU在100Hz至2.5kHz谐波频率范围内的无源性，此测试应基于设备制造商关于相关阻抗的声明进行验证。



测试方法:

德国VDE FNN构网指南提供了一种测试方法，即差分阻抗谱法。该方法允许采用以下四种试验配置：

1. 基于电网模拟器，在所需频率范围内调节电压的相角和幅值。
2. 采用并联或串联的附加谐波源，可选择通过FRT试验装置的纵向阻抗引入附加阻抗。
3. 采用C-HIL配置进行仿真测试，其中真实控制器在实时仿真器上运行，实时仿真器复现功率硬件。
4. 在软件环境中，利用真实控制器代码进行离线仿真测量。

这项测试需要在正序和负序下进行测试，每个频率点至少进行两次相互独立的测量。

5.2.4 谐波频率范围内的阻抗和谐波源验证 (2)



测试判据:

评估此测试时，应按照EN 61000-4-7，对每个窗口中记录的电压和电流进行傅里叶转换，然后计算对称分量。根据每个频率点上两次独立测量的数据a和b，分别计算正序和负序阻抗：

$$z_1(f) = \frac{u_{a1}(f) - u_{b1}(f)}{i_{a1}(f) - i_{b1}(f)}$$

$$z_2(f) = \frac{u_{a2}(f) - u_{b2}(f)}{i_{a2}(f) - i_{b2}(f)}$$

$$u_1(f) = \frac{u_{a1}(f) \times i_{b1}(f) - u_{b1}(f) \times i_{a1}(f)}{i_{b1}(f) - i_{a1}(f)}$$

$$u_2(f) = \frac{u_{a2}(f) \times i_{b2}(f) - u_{b2}(f) \times i_{a2}(f)}{i_{b2}(f) - i_{a2}(f)}$$

若阻抗在100Hz至2.5kHz整个频率范围内均具有正实部，则测试通过。

5.2.5 有效阻抗的扰动响应特性和线性度验证 (1)



测试目的:

有效阻抗的扰动响应特性和线性度验证用于确定在PGU的额定范围内, 响应电网电压幅值突变(如 $\pm 10\% u_{\text{rated}}$)时的无功电流上升时间, 稳定时间和阻尼, 以及在没有电流限制和小信号状态下的有效阻抗线性度。



测试方法:

此测试采用有效阻抗验证中的方法2(详见5.2.3), 即连续施加两个幅值不同的电压阶跃。此外, 还应该通过重复测试, 确定该PGU与至少一个其他PGU并联运行时的表现。如果该PGU通过自有变压器或自有变压器绕组并网, 则无需开展这项额外测试。



测试判据:

对测试结果进行测评时, 需要将三相瞬时电压和三相瞬时电流进行克拉克转换, 以得到电压在 $\alpha - \beta$ 坐标系中的分量。为了提高测量数据的质量, 计算 $\alpha - \beta$ 坐标系中电压($u_{\alpha\beta}$)和电流($i_{\alpha\beta}$)在5ms滑动窗口内的均值, 即 $u_{\alpha\beta, 5\text{ms}}$ 和 $i_{\alpha\beta, 5\text{ms}}$ 。

当 $u_{\alpha\beta, 5\text{ms}}$ 超过最终电压变化的10%时, 定义为时间原点($t = 0$)。

电流的上升时间指 $i_{\alpha\beta, 5\text{ms}}$ 从时间原点到最终稳定电流的时间90%。

正序无功电流 $i_{Q,1}$ 的稳定过程按照 $+20\% \sim -10\% i_{\text{rated}}$ ($\Delta i_{Q, \text{End}} > 0$)或 $-20\% \sim +10\% i_{\text{rated}}$ ($\Delta i_{Q, \text{End}} < 0$)的容差带进行评估。

5.2.5 有效阻抗的扰动响应特性和线性度验证（2）

测试判据：

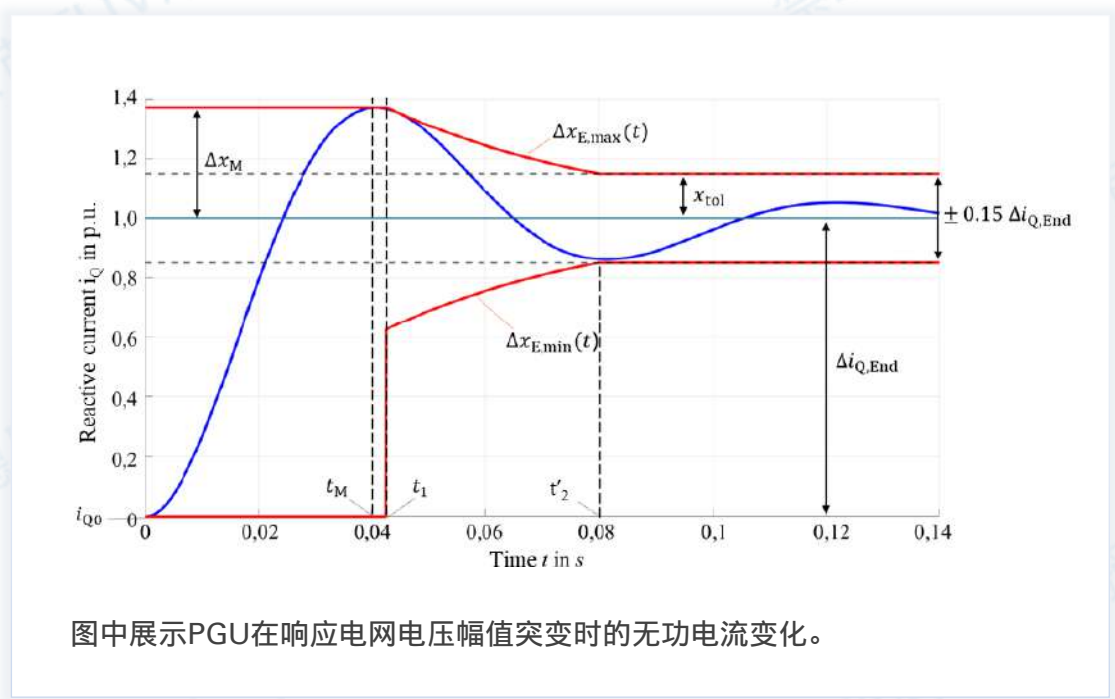
PGU在响应电网电压变化时的无功电流阻尼由右图所示的红色包络曲线进行评估。该曲线由以下参数定义：

$\Delta x_M = 0.037 \text{ p.u.}$, $\Delta i_{Q,End}$, $t_M = 40.65\text{ms}$, $t_1 = 42.6\text{ms}$ 和 $t'_2 = 80\text{ms}$

有效阻抗的线性度可通过测试过程中两次电压阶跃后的电压和无功电流变化计算：

$$L_z = \frac{\Delta u_I \times \Delta i_{Q,II}}{\Delta u_{II} \times \Delta i_{Q,I}}$$

- 通过此测试需满足：
- 1. 5ms滑动平均电流的上升时间不大于15ms。
 - 2. PGU的无功电流在电压变化后80ms至150ms内保持在稳定容差带内。
 - 3. PGU的无功电流响应位于右图所示的包络线内。
 - 4. PGU有效阻抗的线性度需满足 L_z 在0.85至1.15之间。



5.2.6 高低压穿越（1）



测试目的：

高/低压穿越（O/UVRT）测试用于验证构网PGU在对称和不对称电压跌落期间保持电压源控制行为的能力。

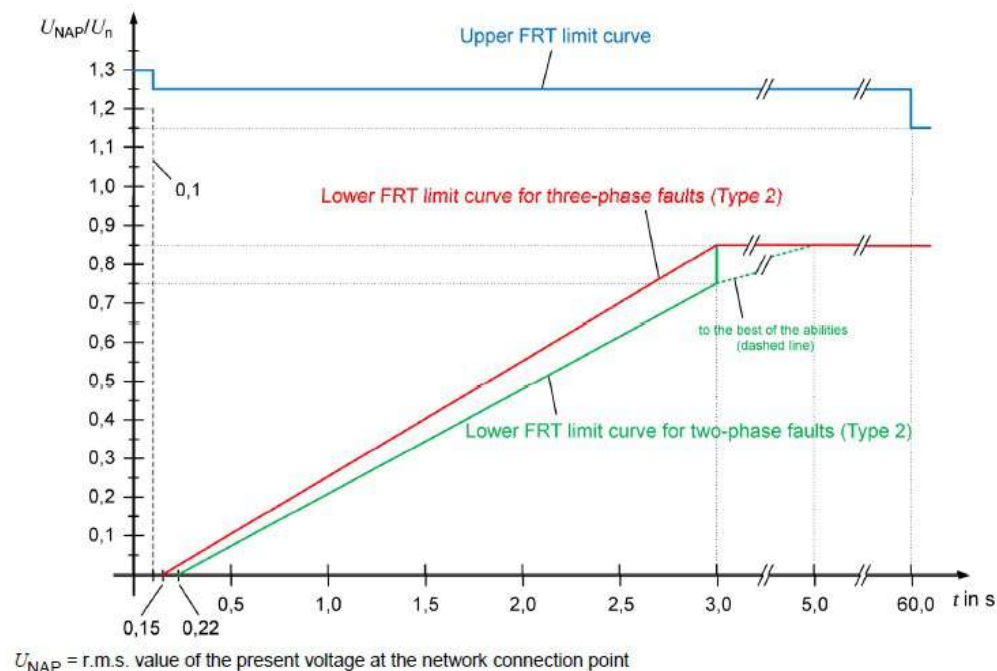


测试方法：

高/低压穿越测试中，电源电压会降低，剩余电压范围分别是：

- 0.7~0.8 p. u.
- 0.45~0.6 p. u.
- 0.2~0.3 p. u.
- < 0.05 p. u.

电压跌落的持续时间应至少达到右图中电压-时间曲线所规定的时长。





测试方法:

高/低压穿越测试需在满载 ($> 0.98P_n$) 和部分负载 ($0.1\sim 0.5 P_n$) 条件下进行。测试从 $\cos\Phi \approx 1$ 的工况开始,并在制造商规定的最大欠励和最大过励无功功率下进行附加测试。

拥有储能功能的设备应分别在供能和耗能模式下测试,过电压测试应在最低直流电压下进行。

过电压期间的特性通过对称电压阶跃进行验证,电压阶跃幅值至少为0.1 p.u.,并升至高于1.1 p.u.。对于不对称电压升高,最大线电压应不低于1.1 p.u.,持续时间至少为5s。



测试判据:

若满足以下条件,则测试通过:

1. PGU在所有电压跌落和升高期间保持并网。
2. 5ms滑动平均视在电流的上升时间(定义见5.2.5)不大于15ms。
3. 正序和负序无功电流, $i_{Q,1}$ 和 $i_{Q,2}$,在电压变化后的80ms内稳定在 $+20\%\sim -10\%i_{rated}$ ($\Delta i_{Q,End} > 0$) 或 $-20\%\sim +10\%i_{rated}$ ($\Delta i_{Q,End} < 0$) 的容差带内。
4. 在电压变化后的80ms内,正序和负序电压, u_1 和 u_2 , 的阻尼至少为0.3。

或者:

正序和负序无功电流, $i_{Q,1}$ 和 $i_{Q,2}$,在电压变化后的80ms内保持在 $\Delta i_{Q,End}$ 的 $\pm 15\%$ 范围内,并在130ms至300ms期间保持在 $\Delta i_{Q,End}$ 的 $\pm 5\%$ 范围内。

5.2.7 达到和退出电流限值时的行为



测试目的:

该测试的目的是对电流限幅及恢复至无限制运行的过程进行评估。



测试方法:

该测试基于高/低压穿越测试（详见5.2.6）中所记录的电流值。对每次对称电压跌落，应确定每相电流的总谐波畸变率（THD），分析频率最高至2.5 kHz，分辨率为25 kHz。测试也可以评估PGU内部用于指示是否采用电流限幅的信号。



测试判据:

若满足以下条件，则测试通过：

1. 电流谐波在电压突变100ms后不再明显，或从信号判断电流限幅在电压突变后已结束40ms。
2. PGU在剩余电压最低至0.2p. u.的电压跌落期间保持稳定；在整个电压跌落期间，平均视在电流不低于额定电流的95%；如果未达到电流极限值，则不低于预期视在电流（由故障前工作点测得的有效阻抗推导得到）的95%；当电压跌落幅度是初始状态的25%和50%时，电压跌落期间的有功电流不低于额定电流的5%。
3. 当正序电压重新进入 $u_{\text{rated}} \pm 10\%u_{\text{rated}}$ 电压带后150ms，无功电流需保持在其最终稳定值 $\pm 10\%$ 范围内。

5.2.8 返回电压带 $u_{\text{rated}} \pm 10\% u_{\text{rated}}$ 时的行为



测试目的:

该测试的目的是对电网故障后的恢复特性进行评估。



测试判据:

对测试结果进行测评时，若有功电流 $i_{p,1}$ 在1s内恢复至故障前的有功电流，则测试通过，由于技术限制导致的偏差应予以说明。

此外，正序电压的暂时过电压不得超过最终稳态值的5%，对于2027年12月31日之后投运的设备，暂时过电压不得超过最终稳态值的2.5%。



测试方法:

该测试同样基于高/低压穿越测试（详见5.2.6）中所记录的数据。故障前的测量数据采用10s平均值。有功电流 $i_{p,1}$ 的上升时间是指从电压恢复开始，到 $i_{p,1}$ 首次进入故障前有功电流 $\pm 10\%$ 容差带的时间间隔。暂时过电压则定义为电压恢复后正序电压 u_1 相对于其最终稳态值 $u_{1,\text{End}}$ 的最大值。

5.2.9 功率-频率振荡阻尼验证 (1)



测试目的:

该测试用于确定PGU在同步运行过程中功率-频率振荡的阻尼, 频率范围是0.05Hz至10Hz。



测试方法:

进行测试时, PGU应在SCR大于3, 有功功率输出为 $P_{E,max}$ 的50%至75%, $\cos\Phi = 1$ 的条件下运行。如果有多个启动时间常数 T_A 设定值, 则应在 $T_{A,min}$ 和 $T_{A,max}$ 下进行测试。对于拥有储能功能的PGU, 应测试两个功率方向, 并包含PCNB停用和激活两种状态(共4项测试)。

测试可以采用以下两种方法进行:

1. 施加0.25Hz至0.5Hz的频率阶跃。该阶跃可通过电网模拟器施加, 或直接叠加在PGU内部的电压频率上, 此时也会作用于PCNB。
2. 施加相位阶跃。相位阶跃可通过电网模拟器施加, 可连接至PGU内部相角, 也可在并网同步运行时通过附近负载阶跃或电网阻抗突变实现, 例如切换FRT试验装置的纵向阻抗。相位阶跃的幅值应使PGU沿惯量功率方向产生15%至30% $P_{E,max}$ 的有功功率变化, 或沿惯量功率的反方向产生2%至4% $P_{E,max}$ 的有功功率变化。在所有情况下, 施加的相位阶跃均不得使PGU进入电流限幅状态。

5.2.9 功率-频率振荡阻尼验证（2）



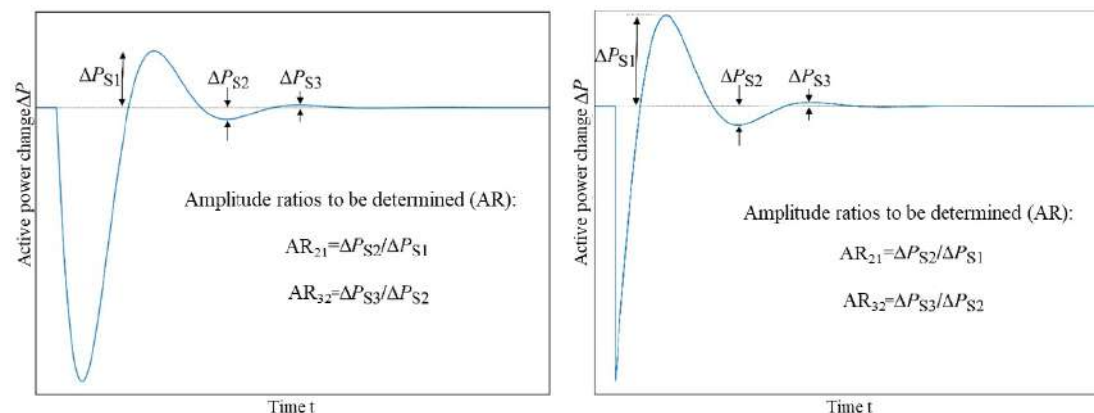
测试判据：

此测试项进行评估时，首先确定正序有功功率 P_1 在测试中首个最大值或最小值，之后最多取4个极值，并计算相邻极值的幅值比：

$$AR_{21} = \frac{\Delta P_{S2}}{\Delta P_{S1}}$$

$$AR_{32} = \frac{\Delta P_{S3}}{\Delta P_{S2}}$$

如右图所示，如果能够识别出3个极值，且 AR_{21} 和 AR_{32} 均小于0.2，则满足阻尼要求，测试通过。如果可识别的极值少于3个，也视为测试通过。



图中展示PGU有功功率在施加频率阶跃（左图）和相位阶跃（右图）时的振荡响应。

5.2.10 启动时间常数 T_A ，惯量功率和能量验证（1）



测试目的：

该测试用于验证构网PGU中设定的启动时间常数 T_A ，以及由此产生的惯量功率和惯量能量提供的能力，包括惯量功率相对于外部有功功率限制指令的优先级。

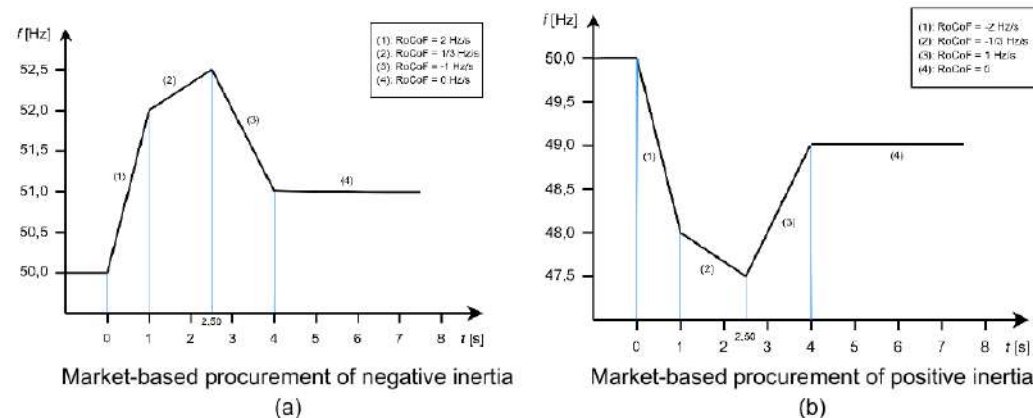


测试方法：

在测试中，PGU需承受如右图所示的频率变化：

1. 曲线（a）具有正频率偏差，三个测试阶段的频率变化率（RoCoF）分别为 $+2\text{ Hz/s}$ ， $+1/3\text{ Hz/s}$ 和 -1 Hz/s 。
2. 曲线（b）具有负频率偏差，三个测试阶段的频率变化率（RoCoF）分别为 -2 Hz/s ， $-1/3\text{ Hz/s}$ 和 $+1\text{ Hz/s}$ 。

频率曲线可以由电网模拟器施加，也可将其直接作为频率变化叠加在PGU内部频率上。测试工况应包含PCNB停用和启用的情况。在 T_A 测试中，应通过最高优先级接口施加有功功率限制设定值，使惯量功率超过限制值。验证 T_A 的整定范围时，需要在 $T_{A,\min}$ 和 $T_{A,\max}$ 下进行测试。



5.2.10 启动时间常数 T_A ，惯量功率和能量验证（2）



测试判据：

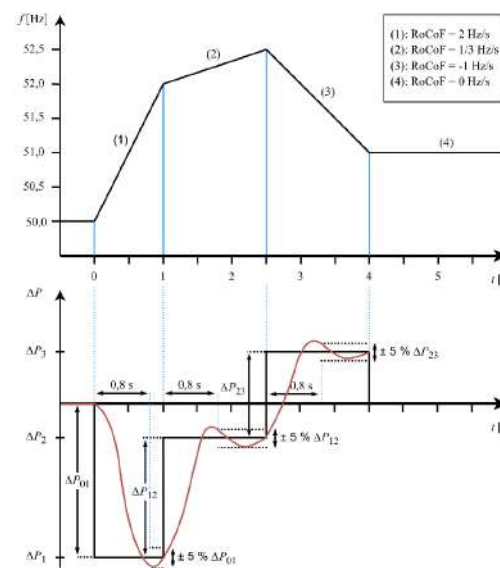
评估该测试时，测试各阶段的预期惯量功率按本页公式进行计算：

$$\Delta P = -T_A \times \frac{\Delta f}{f_{\text{rated}}} \times P_{\text{rated}}$$

其中 f_{rated} 和 P_{rated} 是额定电网频率和额定设备有功功率。 T_A 是设备的启动时间常数。

测得的有功功率变化将与预期的功率变化 ΔP_{01} ， ΔP_{12} ， ΔP_{23} 进行比较。同时，测试应通过在定义的时间窗口内对有功功率相对于其初始值的变差进行积分，以评估交换的惯量能量，即 ΔE_{pos} 和 ΔE_{neg} 。

当 $T_A < 10\text{s}$ 时，PGU的有功功率应在各测试阶段开始后800ms内进入容差带。当 $T_A > 10\text{s}$ 时，功率应在第一阶段开始后1s内进入 $\pm 15\%$ 容差带，在第二和第三阶段开始后1.3s内进入 $\pm 5\%$ 容差带，相关判据如下图所示：



测试判据：

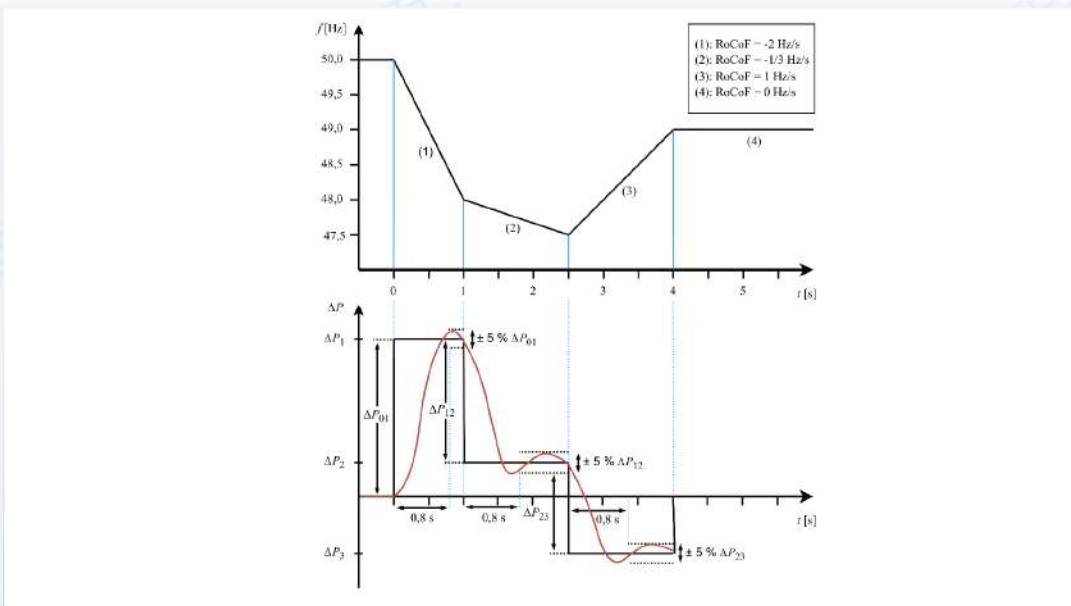
若满足以下条件，则测试通过：

1. PGU保持并网。
2. 测得有功功率在规定时间内保持在所需的容差带内。
3. 当 $T_A > 10\text{s}$ 时，测试阶段1中的功率应达到预期惯量功率的95%。
4. 根据测量值确定的启动时间常数 T_A 与设定值的偏差不超过5%。
5. 惯量功率不受有功功率限制设定值的限制，即满足优先级要求。
6. 满足能量要求：

测试阶段1中， $\Delta E_{\text{pos}} \leq 1.5 \times \Delta E_{\text{neg}}$

测试阶段2中， $\Delta E_{\text{neg}} \leq 1.5 \times \Delta E_{\text{pos}}$

同时，还应满足反方向响应测试阶段的能量要求。



第六章 电网接入仿真技术要求



6.1 仿真模型与验证：EMT VS RMS

RMS用于大范围、多场景的系统级分析；EMT保留逐相时量与快速控制环节，用于高风险工况的详细核查。

RMS模型

- 基于正序/负序相量与基波近似，刻画秒级慢动态，用于大扰动稳定性的大范围筛查。

EMT模型

- 采用瞬时值与微秒级步长，完整反映快速电磁暂态；可含逆变器全部部件——功率器件、直流母线、滤波器、锁相环/构网控制、电流环、控制与保护逻辑。

适用研究

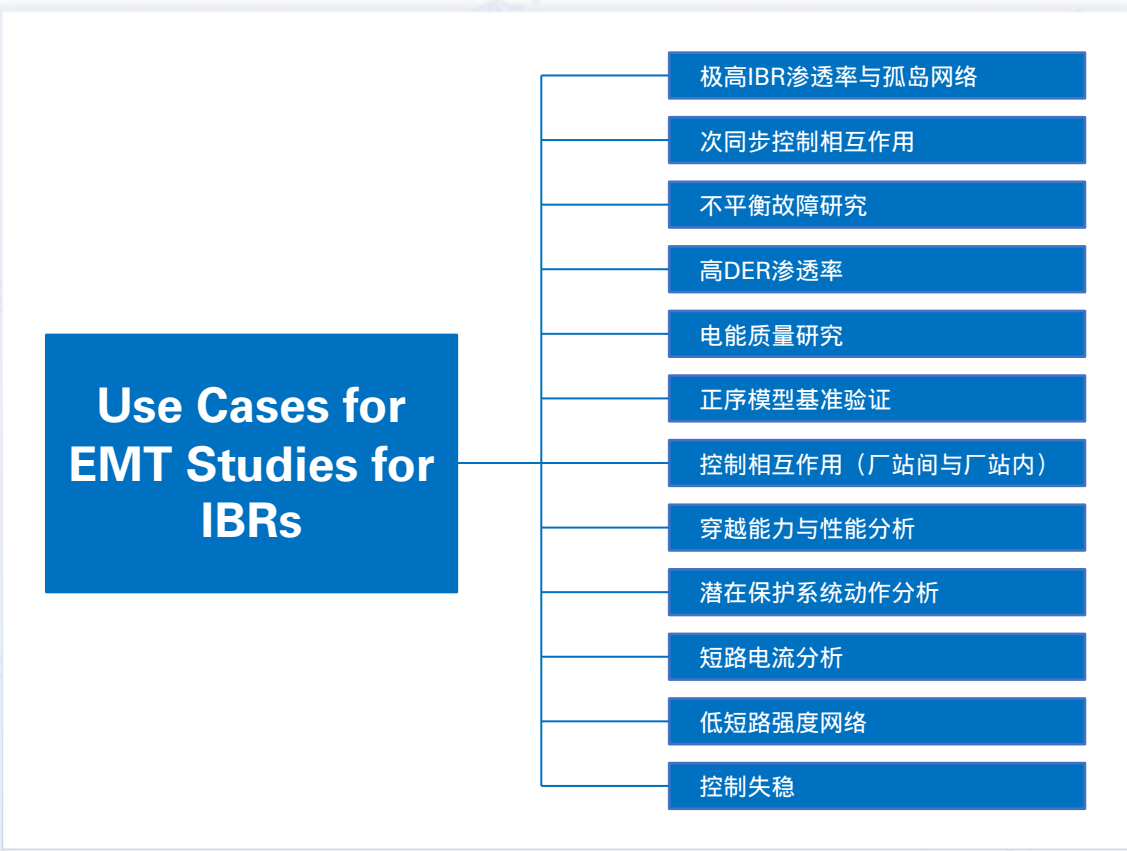
- 开关暂态与过电压、过电流/短路暂态、保护性能评估（限流对保护动作的影响）、电能质量与谐波、次/超同步振荡、弱网低SCR、黑启动与孤岛、不平衡故障。

开关模型 vs 平均模型

- 开关模型逐IGBT通断、精度高（谐波/损耗/控制内部动态），步长约1μs；平均模型用受控源等效开关、速度快（系统级宽频振荡），步长约10μs。

模型能覆盖哪些现象，取决于算力经济性与建模详细程度；正序RMS无法保留的动态（不平衡、限流、控制切换、宽频振荡）须由EMT补足。

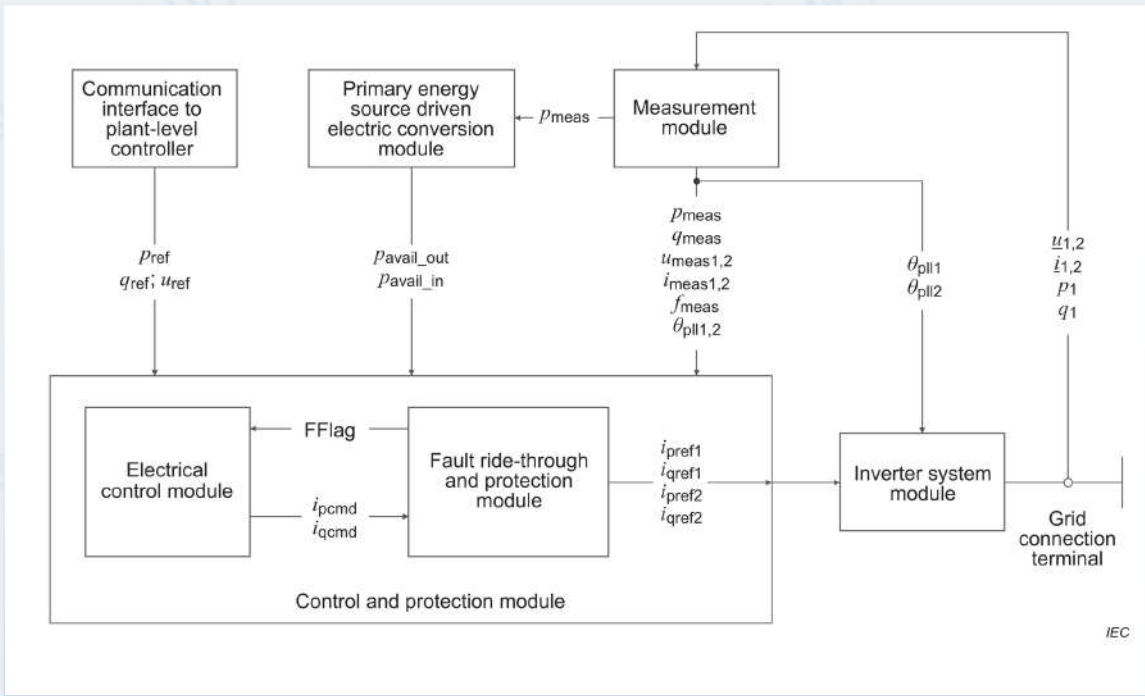
EMT模型的典型适用研究场景（NERC）



变流器（逆变器）RMS仿真模型是一种基于正序/负序相量的机电暂态仿真模型，可用于表示变流器发电设备（光伏、储能、风机等）在短期动态过程中的有功/无功响应、故障穿越行为及辅助服务控制特性，适用于大扰动稳定性分析。变流器（逆变器）RMS仿真模型常呈现模块化结构。

6.2.1 模型的模块化结构

变流器RMS仿真模型的一般性结构（IEC TS 63406）



一般将逆变器RMS模型划分为4个核心模块，每个模块可单独配置参数，以适配不同类型和控制策略的逆变器：

逆变器系统	提供电流源接口或电压源接口两种形式，模拟逆变器输出特性
测量模块	测量模块的核心任务是从电网电压和电流中提取后续控制（有功/无功控制、故障穿越等）所需的量。
有功控制模块	有功控制模块的核心任务是根据功率参考值、频率偏差和一次能源可用功率，生成有功电流指令 i_{pcmd} ，并配合无功控制模块完成总电流限幅。
无功控制模块	无功控制模块的核心任务是根据电网电压、无功功率参考或功率因数要求，生成无功电流指令 i_{qcmd} ，并与有功控制模块协调完成总电流限幅。
FRT模块	FRT模块的核心任务是在电网电压异常（过高或过低）或频率异常时，根据并网导则要求，重新计算有功/无功电流指令，确保逆变器在规定时间内不脱网，并为电网提供必要的电压支撑。

6.2.2.2 有功控制模块

有功控制模块的作用

有功控制模块的核心任务是根据功率参考值、频率偏差和一次能源可用功率，生成有功电流指令 $i_{p,cmd}$ ，并配合无功控制模块完成总电流限幅。

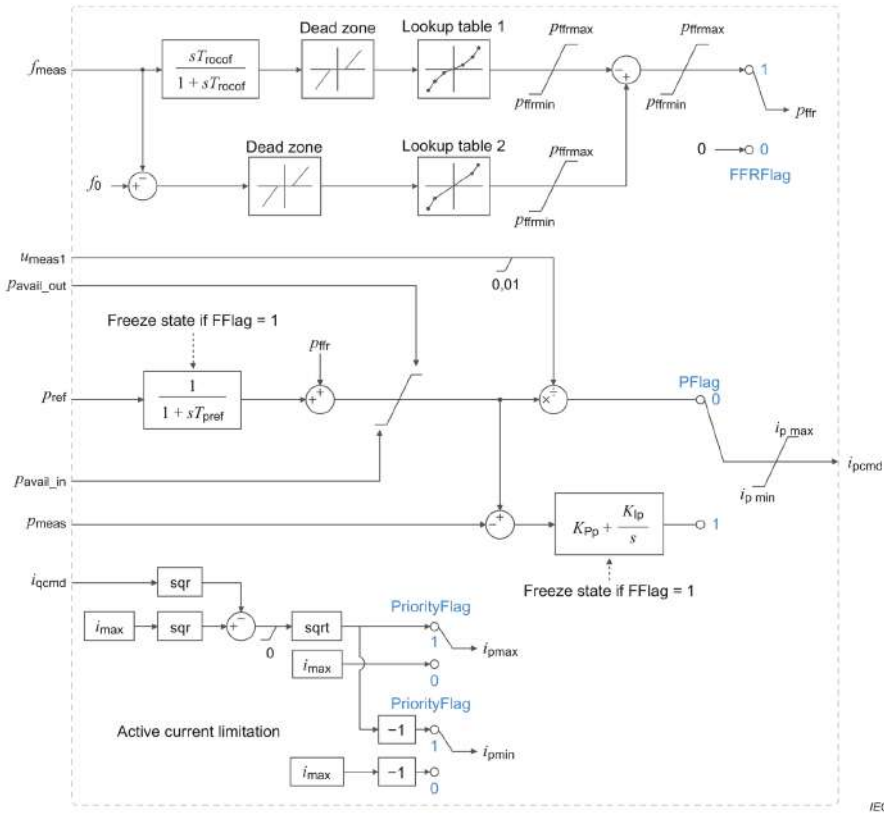
该模块同时实现：

- ◆ 常规有功功率跟踪
- ◆ 快速频率响应（FFR）：包含虚拟惯量响应 + 一次频率支撑

有功控制模块内部功能结构

功能	输入	输出
有功功率滤波	p_{meas}	p_{filt}
功率闭环PI控制	$p_{ref} - p_{filt}$	$i_{p,PI}$
快速频率响应（FFR）	f_{meas}	$i_{p,FFR}$
总功率指令限幅	$p_{avail_out}, p_{avail_in}$	p_{cmd}
有功电流计算	p_{cmd}, u_{meas}	$i_{p,cmd0}$
电流限幅（与无功协调）	$i_{p,cmd0}, i_{q,cmd}$	$i_{p,cmd}$

仿真模型有功控制模块的结构（IEC TS 63406）



6.2.2.3 无功控制模块

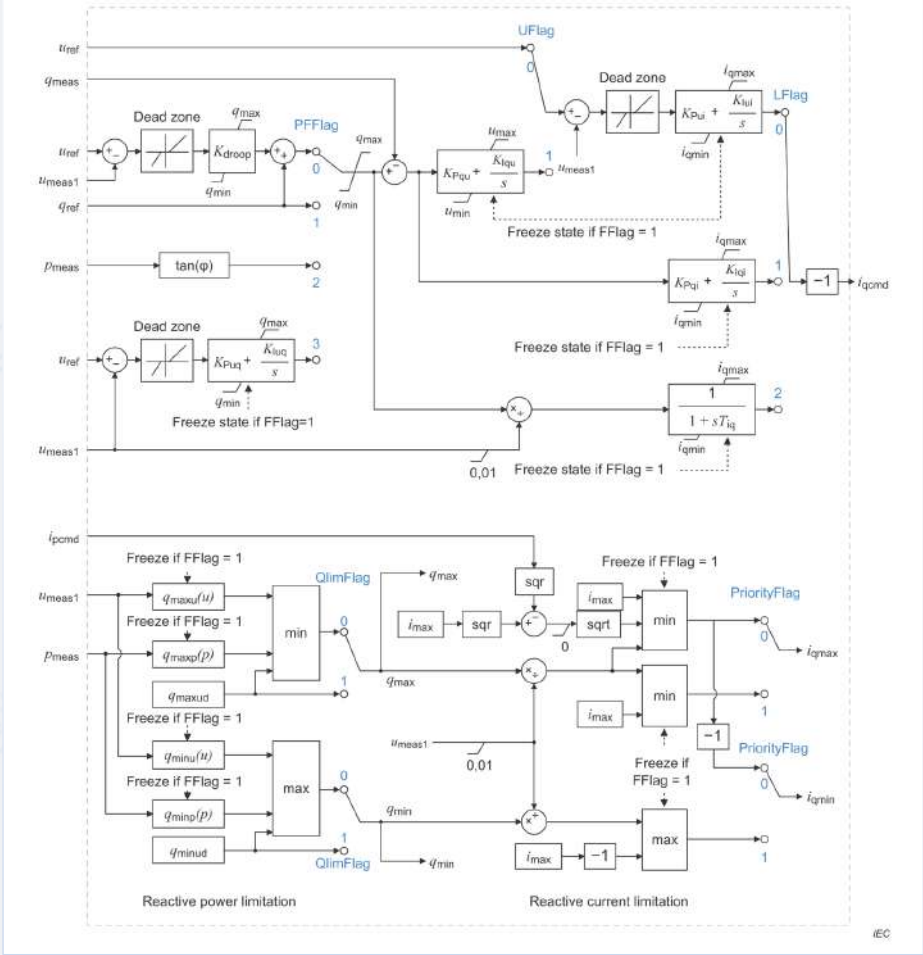
无功控制模块的作用

无功控制模块的核心任务是根据电网电压、无功功率参考或功率因数要求，生成无功电流指令， i_{qcmd} 并与有功控制模块协调完成总电流限幅。

无功控制模块内部功能结构

功能	输入	输出	说明
功率因数参考计算	p_{meas} , PFFlag	$q_{ref,pf}$	根据PF或 $\tan\phi$ 计算Q参考
无功参考选择	$q_{ref,plant}$, $q_{ref,pf}$, UFlag	$q_{ref,outer}$	多源参考切换
外环控制器（无功/电压）	$q_{ref} - q_{meas}$ 或 $u_{ref} - u_{meas}$	$i_{q,outer}$	PI控制
内环控制器（无功/电压/电流）	外环输出 $\pm$ 前馈	$i_{q,cmd0}$	可选PI或直接传递
无期限幅（QlimFlag）	u_{meas} , p_{meas}	q_{min} , q_{max}	查表或常数
电流限幅（与有功协调）	$i_{q,cmd0}$, $i_{p,cmd}$	$i_{q,cmd}$	优先级可配置

仿真模型无功控制模块的结构（IEC TS 63406）



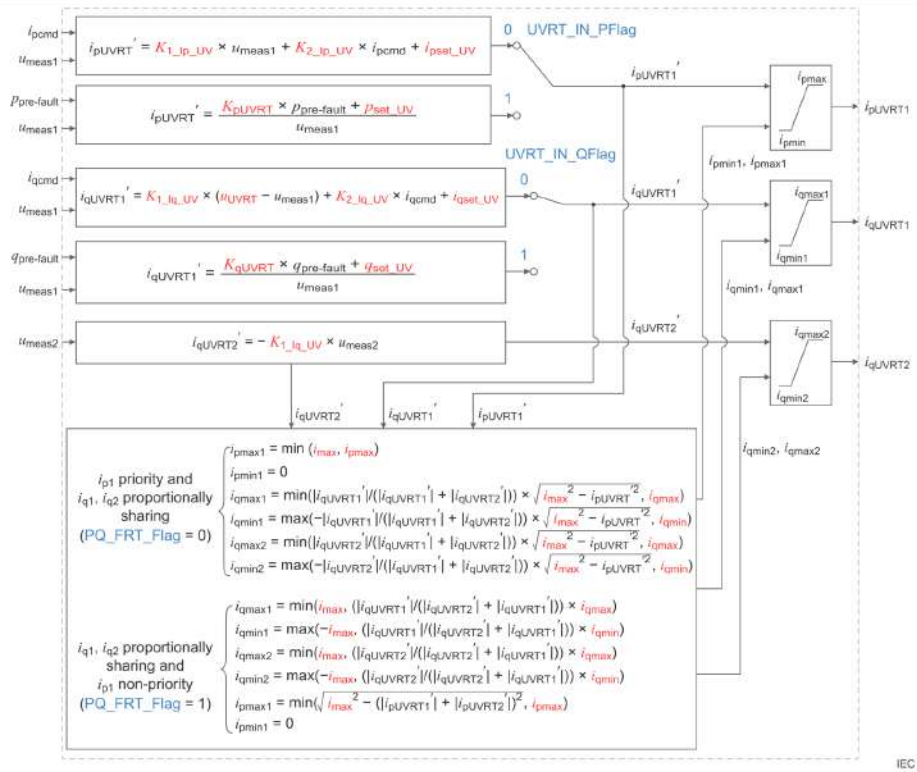
FRT模块的作用

FRT模块的核心任务是在电网电压异常（过高或过低）或频率异常时，根据并网导则要求，重新计算有功/无功电流指令，确保逆变器在规定时间内不脱网，并为电网提供必要的电压支撑。

FRT模块内部功能结构

功能	输入	输出	说明
故障穿越控制	u_{meas} 、 $i_{p,pre-fault}$ 、 $i_{q,pre-fault}$	$i_{p,ref}$ 、 $i_{q,ref}$	根据电压偏离程度，重新计算电流参考值
电压/频率保护	u_{meas} 、 f_{meas}	跳闸信号	当电压或频率超出允许范围时，决定是否脱网

仿真模型FRT模块的结构（IEC TS 63406）



6.2.3 无功电流参考值

无功电流参考值计算方式：

$$i_{q,ref} = \min \left(i_{q,max}, \max \left(i_{q,min}, K_{UVRT} \cdot (u_{UVRT} - u_{meas}) + i_{q,pre-fault} \right) \right)$$

- ◆ K_{UVRT} ：无功电流支撑系数（由 $K1_{Ip_UV}$ 或 $K2_{Ip_UV}$ 等参数决定）
- ◆ u_{UVRT} ：低电压穿越阈值
- ◆ $i_{q,pre-fault}$ ：故障前无功电流（用于平滑过渡）

6.2.5 电流限幅期间电流比例分配方案

FRT期间，变流器根据设定的电流优先级、对有功电流和无功电流参考值进行限幅，使输出电流保持在允许范围内。

电流限幅策略	电流比例分配
有功电流优先	优先满足有功电流需求，剩余无功电流按正、负序无功电流需求的比例分配
无功电流优先	优先满足正、负序无功电流需求，有功电流使用剩余可用额度

6.2.4 有功电流参考值

有功电流的计算有两种方式（通过 $UVRT_IN_PFlag$ 选择）：

方式	$UVRT_IN_PFlag$	计算公式	说明
恒电流法	0	$i_{p,ref} = i_{pset_UV}$	直接设置为固定值
恒功率法	1	$i_{p,ref} = P_{set_UV} / u_{meas}$	功率固定，电流反比于电压

- ◆ 电流限幅策略下的正、负序无功电流分配方案：

$$i_{q1,ref} = \frac{u_{1,meas}}{u_{1,meas} + u_{2,meas}} \cdot i_{q,ref}$$

$$i_{q2,ref} = \frac{u_{2,meas}}{u_{1,meas} + u_{2,meas}} \cdot i_{q,ref}$$

- ◆ $u_{1,meas}, u_{2,meas}$ ：正、负序电压的测量幅值
- ◆ $i_{q,ref}$ ：分配前无功电流参考值
- ◆ $i_{q1,ref}, i_{q2,ref}$ ：分配后的正、负序无功电流参考值

6.3 变流器EMT仿真模型

EMT (Electromagnetic Transient, 电磁暂态) 模型是与 RMS (均方根/机电暂态) 模型相对的一类仿真模型。RMS 模型基于相量和基波近似, 只能刻画秒级到数十秒级的慢动态; 而 EMT 模型采用瞬时值和微秒级时间步长求解, 能够完整反映快速电磁暂态过程。

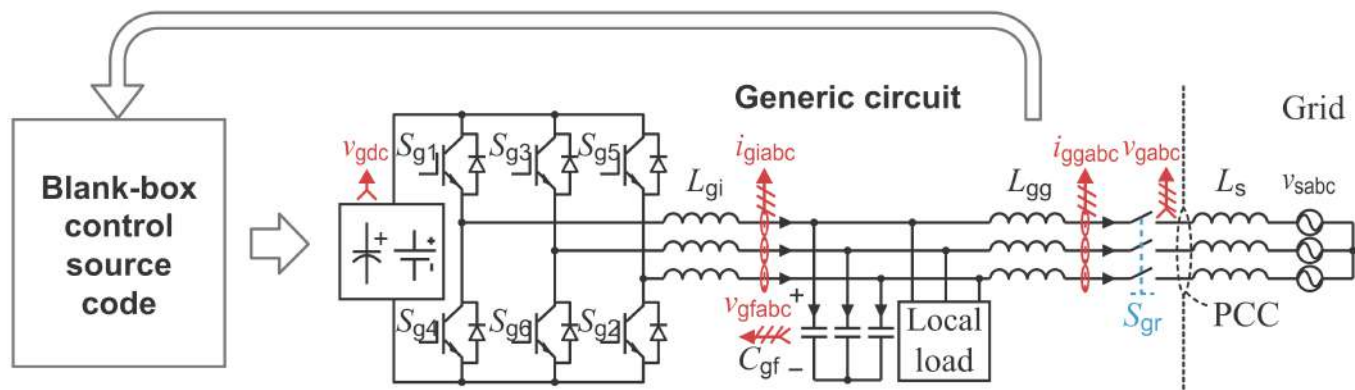
6.3.1 模型的特点与适用范围

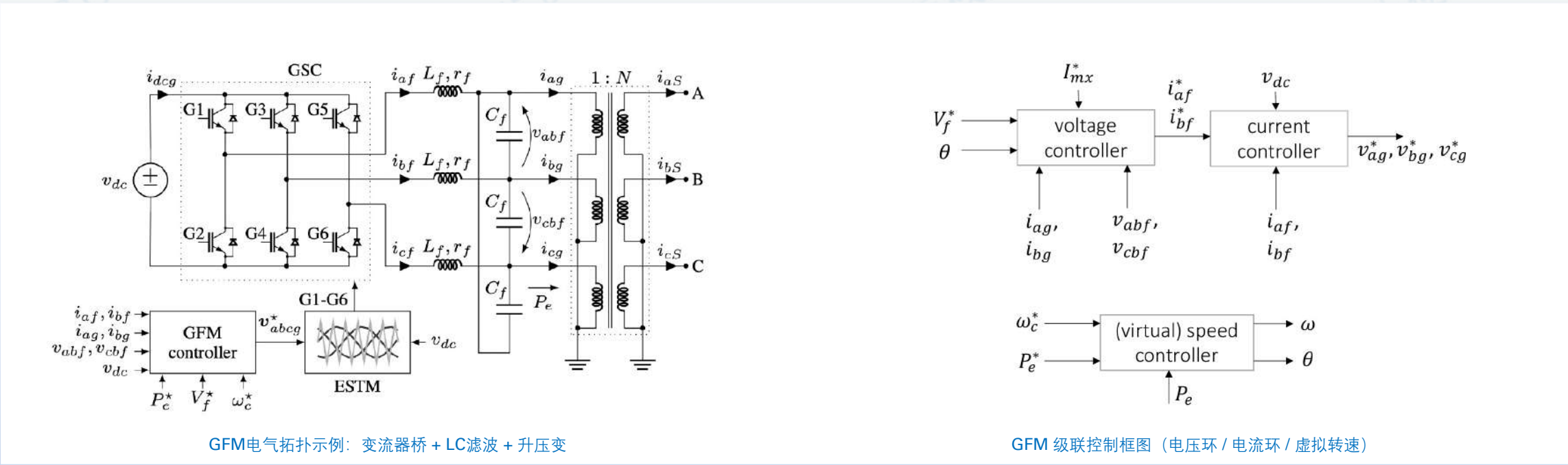
由于 EMT 模型可以包含逆变器的所有必要部件 (功率器件、直流母线、滤波器、锁相环、电流环、控制与保护逻辑等), 其能力上几乎可用于所有类型的研究, 包括:

- ◆ 开关暂态与过电压 (如并网投切、雷击、操作过电压);
- ◆ 过电流与短路暂态的短期分析;
- ◆ 继电保护性能评估 (故障穿越期间逆变器受限电流对保护动作的影响);
- ◆ 电能质量与谐波分析;

需要强调的是, 模型能覆盖哪些现象, 取决于两个前提: 一是计算能力与经济性 (EMT 仿真步长小、计算量大); 二是模型的详细程度, 例如采用完整开关模型 (full switching model, 逐开关模拟 IGBT 通断) 还是平均值模型 (average value model, 用受控源等效开关过程)。平均值模型速度更快, 适合系统级宽频振荡研究; 开关模型精度更高, 适合谐波、损耗、控制内部动态等细节研究。

EMT白盒通用模型拓扑 (IEC)

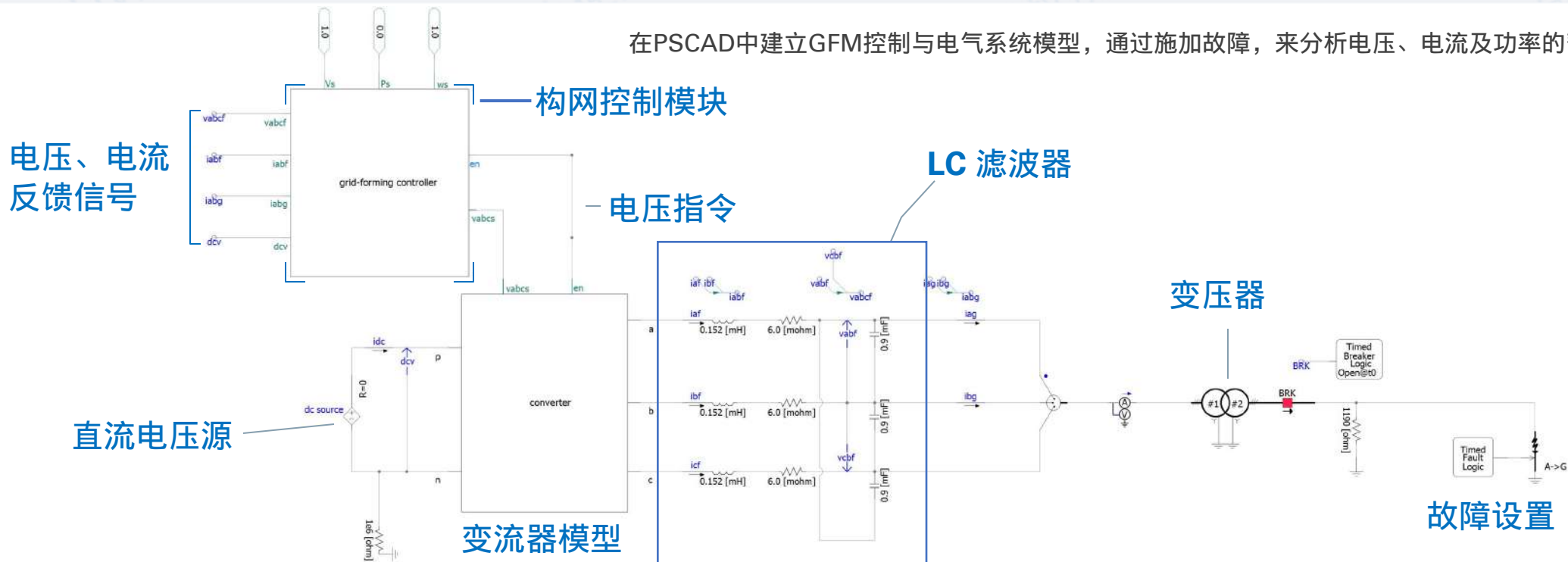




电气层	DC 源 → 变流器桥 → LC 滤波 → 升压变 → 电网。
控制层（级联）	虚拟转速下垂（P-f / 惯量）→ 电压控制（幅值 / Q-V）→ 电流控制 → 调制； θ 由转速积分得到，取代 PLL。
限流机制	两轴圆形限幅抗饱和 PI， $ i^* \leq I_{max}$ ，并受 v_{dc} 上限约束——即受控限流。
建模保真度	平均模型 10 μs （快） / 开关模型 1 μs （含 PWM 纹波）。
控制环节对应的构网能力	虚拟转速下垂 → 频率支撑与惯量响应；电压控制 → 电压源特性与电压支撑；电流圆形限幅 → 电流响应与限流恢复；内部电压相量保持 → 相位跳变响应。

6.3.2 构网型变流器EMT建模和仿真（2）

在PSCAD中建立GFM控制与电气系统模型，通过施加故障，来分析电压、电流及功率的暂态响应



EMT仿真的目的

在计算机中复现现场设备在大、小扰动下的真实性能，据此判定并网性能。

EMT仿真模型组成

GFM控制模块、变流器模块、直流侧电气模型、LC滤波器、变压器、负载

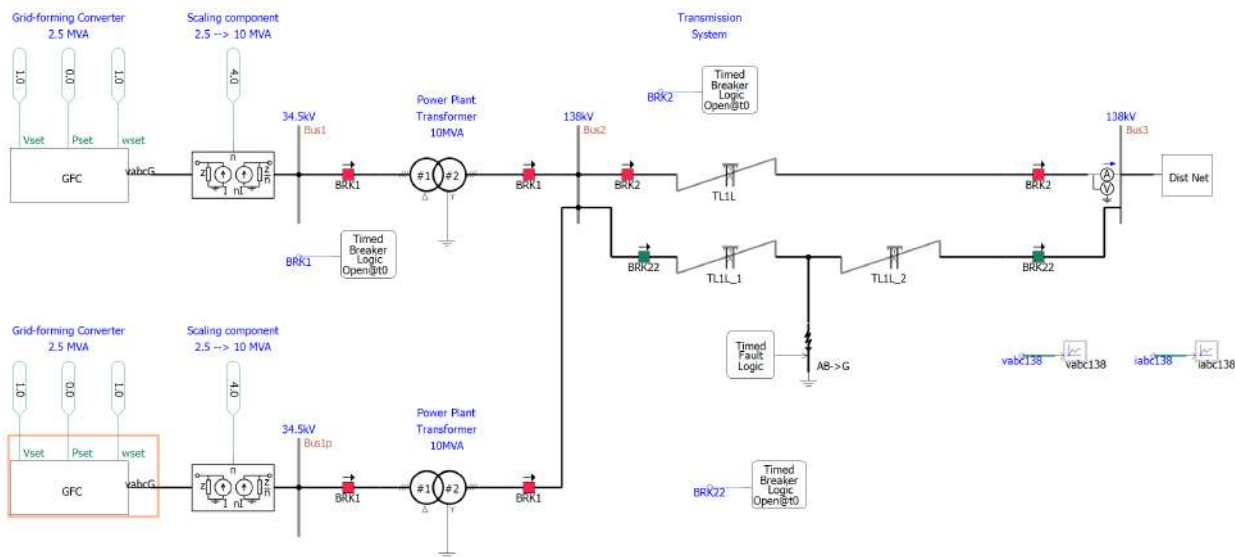
EMT仿真故障设置

在电网侧设置短路故障，或施加电压、频率及相角扰动

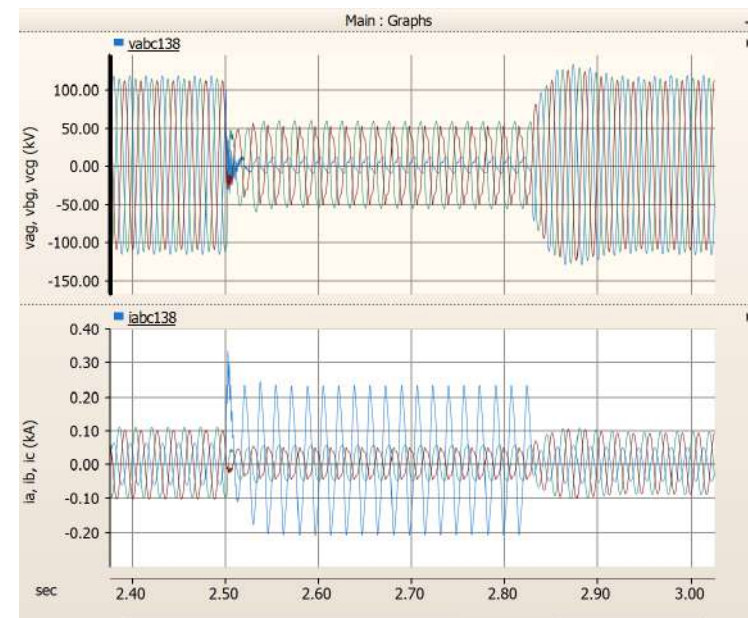
EMT仿真的响应分析

记录指定的测量点的电压、电流，及有功/无功，分析故障器件的限流响应和故障清除后的恢复过程

6.3.3 EMT仿真案例：构网下的故障穿越（双相接地AB→G）



PSCAD系统拓扑与双相接地故障（AB→G，双向接地不平衡）



EMT可验证（故障前 / 中 / 后）：

- ◆ 故障期间：三相电压跌落与相间不平衡是否越限？
- ◆ 设备响应：限流、控制切换与保护是否按设计动作？
- ◆ 故障后：电压/电流能否平稳恢复？有无持续振荡或过电压？

PSCAD仿真结果显示：故障期间（约2.50–2.83s），并网点三相电压跌落并呈明显相间不平衡；三相电流随之受控增大、故障相峰值升高但未失控。故障切除后，电压与电流均平稳恢复至故障前水平，无持续振荡或过电压。表明GFM变流器成功穿越了该不对称故障。

6.4 常见的并网仿真平台



常见的并网仿真平台有：

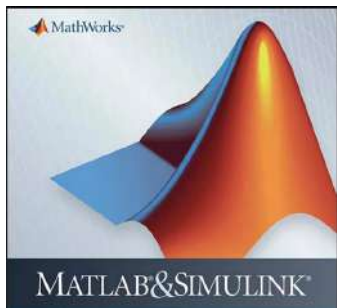
DigSilent/PowerFactory

DigSilent/PowerFactory是一款德国DigSilent公司开发的专业电力系统分析与仿真软件。PowerFactory是领先的电力系统分析软件，涵盖从标准功能到高度复杂和先进的电网分析应用的全部功能。其被全球公用事业公司和咨询机构广泛应用于电网规划，设计和运行维护。



PSCAD

PSCAD是一款电磁暂态仿真软件，其仿真核心EMTDC采用时域分析求解电力系统微分方程，PSCAD为其提供图形化操作界面。该软件应用于交流电力系统研究，雷电过电压分析，高压直流工程仿真等领域。



Matlab/Simulink

Simulink是MathWorks公司推出的Matlab中的一种可视化仿真工具，其常被用于动态系统和嵌入式系统的多领域仿真和基于模型的设计。Simulink提供了一个交互式的图形化环境及可定制模块库，可以对各种时变系统进行设计，模拟，执行和测试。



PLECS

PLECS是瑞士Plexim GmbH公司开发的系统级电力电子仿真软件。PLECS专注于电力电子和传动系统的电路与控制联合仿真，支持电气，磁，热，机械等多物理域建模。该软件可用于工业开发与学术研究，辅助电气系统的设计与分析。

第七章 典型案例分析



7.1 西班牙脱网事件

当地时间2025年4月28日12:33左右，西班牙、葡萄牙所在的伊比利亚半岛电网发生了全网大停电事故，波及超过5000万人，交通、通信、医疗等关键领域受到严重影响。伊比利亚半岛电网是欧洲可再生能源转型的先行示范区，风电光伏合计占比约50%。本次大停电事件是欧洲能源转型以来发生的规模最大停电事故，为电网的发展和运行带来重要警示。

事故发生前半个小时内，半岛电网开始先后经历两次功率振荡，调度员采取的抑制措施连续推高系统电压。事故发生的一分钟内，2200MW 新能源机组脱网，系统无功过剩，系统进入电压不断上升、频率不断下降的正反馈过程。随后短时间内损失了大量电源，半岛电网功率缺额越来越大，法国输入功率超过联络线静态稳定极限，西班牙-法国联络线因失去同步而解列，半岛电网继续电压上升、频率下降的正反馈过程，数秒后系统崩溃，电压从最高460 kV 以上跌至1 kV。事故发生后，西班牙协调法国和摩洛哥通过互联线路输入电力，同时利用水电和燃气电厂进行黑启动操作，逐步恢复供电。4月29日07:00，99.95%的负荷得到恢复，整个停电过程超过18 h。

■ 本起事故的原因有以下三点：

1. 强迫振荡应对不当，抬高系统电压。
2. 新能源机组不当跳闸，动态调压资源短缺。电压抬高后，大量新能源电站在电压尚未超过阈值的情况下跳闸，同时本应吸收过剩无功的调压机组未能按P.O.7.4 规程运作。
3. 设备配置滞后。电网基础设施和保护配置未能跟上新能源大规模接入的发展步伐，无功补偿装置容量不足，继电保护定值整定未及时更新。

■ 根据本起事故，电网可采取以下改进措施：

1. 全面加强电压控制能力。一方面提升可调压机组的动态响应与应急并网能力，另一方面强化新能源接入与退出过程的电压管理。
2. 强化中小型新能源发电端脱网合规管控。全面核查中小型发电单元保护定值合规性，提升电网调度员对其的可观测性。
3. 建立跨国振荡协同治理机制。欧洲大陆同步电网存在固有弱阻尼区间振荡模式，单一TSO难以独立应对。应构建跨国共享动态模型，实现振荡早期识别与源头定位。

已有公开数据的电压 (kV)

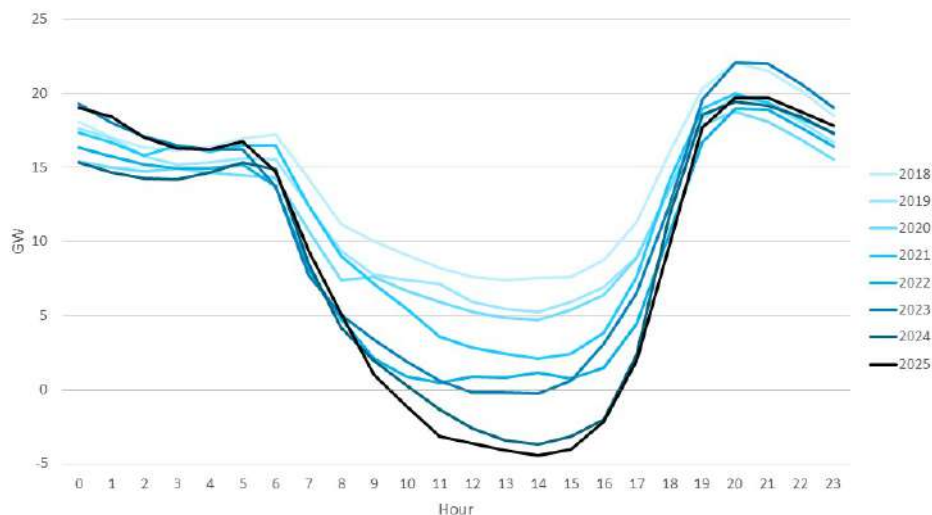


7.2 美国加州鸭子曲线挑战

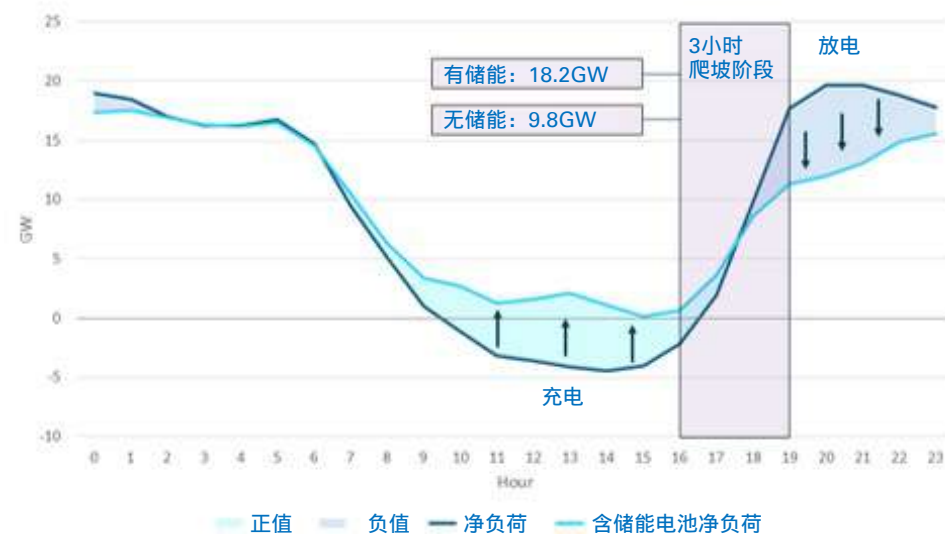
“鸭子曲线”源自美国加州电力系统模型，是描述一天内电力净负荷的变化图表（净负荷=实际负荷-可再生能源发电出力），曲线因形似一只鸭子而得名。光伏发电集中于午间，但此时是用电量较少，电网的净负荷较低形成低谷；而早上和傍晚光伏发电减少，而用电量较高，电网的净负荷较高形成高峰。随着光伏发电量占比的不断提高，这种资源错配现象越来越严重。近年来，鸭子曲线正进一步演变为“峡谷曲线”，曲线在中午接近甚至小于0，这意味着午间电网无法再接纳新增光伏发电，导致大量的弃光。

目前主流的解决方案是部署储能系统，它可以存储白天产生的部分太阳能，并在太阳落山后供电网使用，达到压平曲线、缓解弃电的效果，进而让新能源项目获得更好的并网窗口与发电价格。CAISO是美国最大的电池储能市场，截至2025年底，已装机BESS容量为15.7 GW。

CAISO最小净负荷



CAISO日内负荷曲线（2025年5月17日）



7.3 俄乌冲突以来欧洲新能源发展彰显强大韧性



俄乌冲突自2022年2月全面升级，已持续了四年多，这对欧洲的传统能源供应，尤其是天然气，造成了极大的冲击。战前欧盟45%的天然气进口来自俄罗斯；战争爆发后俄对欧管道气削减八成以上，北溪管道中断，欧洲电价一度较2021年上涨近15倍。



能源危机直接促进了欧洲新能源扩张，推动其既有的绿色发展布局加速兑现。2022年5月欧盟推出REPowerEU计划，将2030年可再生能源目标由40%提高至45%，光伏装机目标2030年600GW，并立法将新能源项目列为重要公共利益以压缩审批时间。从此，光伏、风电装机增速显著增加，2022年欧洲光伏新增40GW，同比增长35%创新高，2023年风光发电量首次超过天然气，2025年光伏年新增64.2GW。



到2023年，欧洲已较为平稳地度过了能源危机，展现出能源替代的较强韧性，但并网问题又造成了装机增速的回落。据统计，欧洲40%的配电网已有40年以上的历史。为此，欧盟2023年发布了电网行动计划，提出加快电网扩建、现代化和数字化，系统破解新能源快速增长背景下的并网瓶颈。2025年底又发布了欧洲电网方案，进一步优化并网流程和投资结构。

7.4 欧盟《发电机并网要求网络规范》

《发电机并网要求网络规范》（Network Code on Requirements for Generators 2.0简称NC RfG 2.0），是对欧盟现行并网法规 Regulation (EU) 2016/631 的修订。

2022年9月

欧委会委托 ACER（欧盟能源监管合作署）启动修订；

2023年12月19日

ACER 正式向欧委会提交修订建议案，颁布时间已多次推迟，预计本年年底颁布。新版本将风光储纳入并网要求中，并按容量分级，还新增了设备和电站的构网技术要求。

核心内容包括：

01

明确了风光储混合/直流耦合电站的容量聚合认定规则。新增强迫振荡限值、提高频率变化率耐受能力要求。

02

提高设备构网要求。新装1 MW以上的光储、V2G电动车和新能源电站必须像同步发电机一样提供电压支撑、惯量响应和频率调节。

03

强制性要求只适用于新并网项目和对现有电站的重大改造，存量电站不追溯。

ENTSO-E

将在法规正式颁布后6个月内发布实施指导文件，目前，构网型和强迫振荡两份技术报告已先期完成。

第八章 TÜV莱茵解决方案



8.1 一站式并网解决方案

01

实物测试

依据各国并网标准对发电产品展开单机测试，包括但不限于：

- 风能/光伏/储能变流器
- 构网型变流器
- 电站控制器
- 充电桩
- 无功补偿装置SVG

测试项目涵盖：

- 电能质量
- 调压控制
- 调频控制
- 有功调度
- FVRT 故障穿越
- ROCOF 频率抗扰
- 并网保护
- 虚拟惯性
- 孤岛与黑启动
- 宽频阻抗



02

半实物仿真测试

对于必须在完整电网环境下开展的并网测试，如变流器黑启动带载能力验证、多机并网工况下的电压源控制特性、电网故障下的构网响应等，TÜV莱茵依托实时数字仿真系统，构建高保真虚拟电网模型，将真实变流控制器接入仿真回路，**开展硬件在环（HIL）测试**。既保留了控制器软硬件的真实动态特性，又可灵活复现复杂工况与故障场景，突破实物测试环境的物理限制，确保并网测试能力覆盖全工况，为设备级并网认证提供完整、可信的验证依据。



03

建模仿真

基于PowerFactory与PSCAD软件，针对接入中高压电网的发电产品开展**机电与电磁暂态特性建模**，以出色的建模能力保障产品快速通过模型审核，显著提升认证效率。

并网仿真中，单机与电站级仿真是电力公司高度重视的关键环节。TÜV莱茵一站式建模服务可提供整站建模，加速产品并网，并以专业及时的售后与技术支持为服务全程保驾护航。



04

设备级证书

基于实验室测试与模型验证结果，为发电产品单机签发**并网认证证书**。

该证书权威且获国际广泛认可，为产品出海及海外当地并网保驾护航，避免无效认证，降低因无法并网造成的损失。依托TÜV莱茵一站式服务，客户在国内即可完成审核与发证，认证效率大幅提升。

发证资质：CNAS、DAkkS、JAS 等



05

电力公司列名

发电产品进入当地市场，需提前在电力公司完成注册列名，这往往成为众多厂商难以逾越的门槛，排队等待动辄数月。

TÜV莱茵秉承一站式服务理念，在**认证过程中同步启动列名申请**，省去冗长的排队等待；同时依托与电力公司的长期技术合作，有效**规避因报告或证书差错导致的列名延迟**，助力产品快速落地当地市场。



06

电站级证书

基于电站各部件的单机证书、测试报告及模型仿真结果，对电站的器件选型、并网电能质量、电网故障响应等性能进行综合评判，最终签发**电站并网认证证书**。

直接为**欧洲当地电站开展验收并发证**，打通并网认证的“最后一公里”，为客户提供完整的服务闭环。



MW级

最大
实验室容量

6家

全球
并网实验室

全球

并网
资质

100+

名

全球
并网专家

20年

并网
认证经验



TÜVRheinland®
Precisely Right.

8.2 全球化服务体系与网络

我们的十大测试中心分别位于德国科隆、德国亚琛、意大利米兰、中国上海、中国深圳、中国台湾、美国普莱森顿、美国波士顿、日本横滨和印度班加罗尔，具备完善的认证能力，拥有最先进的设备和资深工程师团队。作为储能行业公认的第三方测试认证领军品牌，可以快速响应当地制造商、零售商和投资者的需求，竭力帮助您克服挑战。多元化的技术能力和服务组合使我们成为您值得信赖的合作伙伴。我们为您建言献策，致力于提供最全面的支持，助您在全球各地市场取得成功。

300+ 专家

10+ 年从业经验

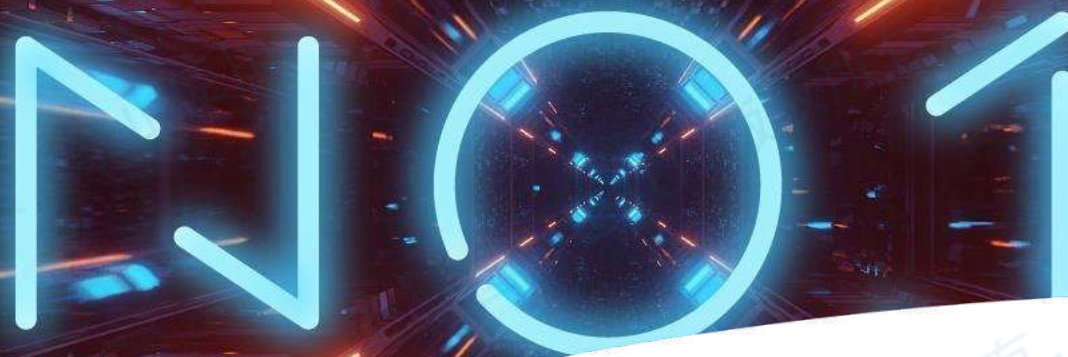
500 个地点

No.1 的储能产品测试与认证机构



第九章 TÜV莱茵成功案例





固德威：全球首张 VDE-AR-N 4105:2018 认证证书

TÜV莱茵始终紧跟标准更新，为国内逆变器和储能制造商带来最新、最快速的信息



项目摘要

更高质量	通过认证的ET系列逆变器以更高效率和更低的客户用电成本，丰富了固德威的储能解决方案，为市场带来更高质量的产品。
全球首证	TÜV莱茵与国际标准更新同频，助力固德威快速有效地将新标准技术要求导入产品开发。在标准正式发布后，就能迅速完成技术更新与标准升级工作。

产品与认证

签发日期：2018.11.14





TMEIC: 在台湾光伏产业中抢占先机

凭借在台湾的本地技术专家团队以及与当地相关机构的战略合作，TÜV莱茵可为逆变器制造商提供一站式准入服务

项目摘要

市场影响	助力东芝三菱电机产业系统公司（TMEIC）抢占台湾光伏产业即将迎来大幅增长的先机，实现 1500Vdc 集中式光伏逆变器在台湾市场的突破性进展。
高效优势	TÜV莱茵出具的 IEC/EN 电气安全测试报告补充了台湾标准中的差异化测试项目，相关机构可直接采纳而无需进行完整项目评估，极大缩短 VPC 认证的申请周期并降低成本。



产品与认证

发布日期：2021.4.1





阳光电源：SC210HX 逆变器获首张 VDE 4110/4120/4130 证书

通过 VDE 认证，您的产品被证明安全、符合标准且具有卓越性能，从而提升其市场竞争力

项目摘要

引领行业	TÜV莱茵向阳光电源的 SC210HX 系列储能逆变器颁发 VDE 4110、4120和4130 证书，这是工商业储能逆变器在该版块的首个认证。
树立标准	该认证体现出TÜV莱茵和阳光电源之间的成功合作，体现了双方在储能产品合规性和高质量发展方面的共同成果。

产品与认证

发布日期：2025.3.27





SMA：STP125-70 光伏逆变器获 VDE 4110/4120 证书

深耕德国并网规范，TÜV莱茵以专业测试与认证服务护航光伏逆变器登陆欧洲核心市场

项目摘要

双证加冕	VDE-AR-N 4110与VDE-AR-N 4120分别覆盖德国中压与高压电网并网要求，STP125-70一举通过双重认证，打通从工商业电站到大型地面电站的全场景并网通道。
德系品质	认证全面考核电网故障穿越、电能质量、有功/无功调节及电网保护功能，STP125-70以优异的电网友好性通过验证，彰显SMA在并网技术领域的深厚积淀。



产品与证书

发布日期：2025.12





ABB：PCS100储能变流器获澳洲证书

TÜV莱茵以全球化测试网络助力储能产品布局澳洲清洁能源蓝海

项目摘要

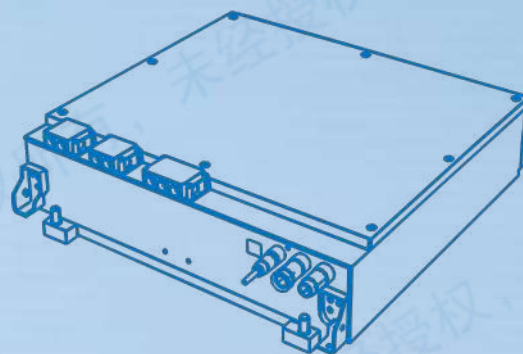
开拓澳洲市场	澳大利亚是全球增速最快的储能市场之一，ABB PCS100储能变流器成功获颁澳洲并网认证，正式拿到这一战略市场的准入资格。
全维度考验	认证依据AS/NZS 4777.2等澳洲并网标准，对产品电网保护、电能质量、功率调节及安规性能进行系统验证，PCS100各项指标表现优异，充分满足澳洲电网的严苛要求。



产品与证书

发布日期：2025.03





阳光电源：首张德国 VDE FNN 构网型式证明函

随着新能源高比例接入电网，维持电网稳定性的需求日益迫切，构网型技术成为新型电力系统建设的关键支撑。

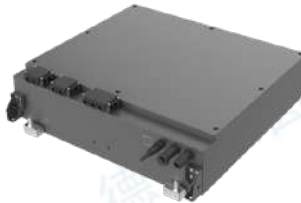
项目摘要

技术引领	阳光电源SC系列储能变流器具备出色的有功/无功调节与电网故障动态支撑能力。更重要的是，产品集成了符合德国 VDE FNN 2.0/2.1 指南的构网型技术，全面满足严苛的电网接入需求。
权威首证	TÜV莱茵为阳光电源颁发了行业首张德国 VDE FNN 构网型式证明函。产品成功通过VDE多项中高压并网标准验证，彰显其在构网型储能领域的全球领先地位，筑牢电网安全基底。

产品与认证

SC210HX系列储能变流器

签发日期：2026.6





特斯拉：Megapack 2 获颁欧盟并网法规 NC RfG 证书

从测试评估到并网合规，TÜV 莱茵以一站式认证服务助力储能产品畅行欧洲市场



项目摘要

准入通行证	NC RfG证书是发电设备接入欧盟电网的法定门槛，Megapack 2成功获证，意味着产品已获得进入欧洲储能市场的关键资质。
硬实力验证	认证覆盖频率响应、高低压穿越、有功无功控制等核心并网性能，Megapack 2在严苛测试条件下表现稳定，满足欧盟委员会条例 (EU) 2016/631 的全部技术要求。
全球化提速	依托NC RfG在欧盟成员国的普遍适用性，获证成果可在多国电网体系中复用，帮助客户显著缩短项目并网周期、降低重复认证成本。

产品与证书

发布日期：2026.08



TESLA

附录一 全球电网公司



国家/地区Country/Region	列名相关配电公司 Electricity network company	网址 Website
德国 Germany	1. Westnetz GmbH: 西部电网有限公司 2. Bayernwerk Netz GmbH: 巴伐利亚电网有限公司 3. E.DIS Netz / E.DIS AG: E.DIS 电网公司 4. Avacon Netz GmbH: Avacon 电网有限公司 5. Netze BW GmbH: 巴登-符腾堡电网有限公司 6. Stromnetz Berlin GmbH: 柏林电网有限公司 7. EWE NETZ GmbH: EWE 电网有限公司 8. Mitteldeutsche Netzgesellschaft Strom mbH (MITNETZ STROM): 中德电力网络有限公司 9. Stuttgart Netze GmbH: 斯图加特电网有限公司 10. SWM Infrastruktur GmbH & Co. KG: 慕尼黑市政基础设施公司	1. https://www.westnetz.de/ 2. https://www.bayernwerk-netz.de/ 3. https://www.stromnetz-berlin/ 4. https://www.e-dis.de/ 5. https://www.avacon-netz.de/ 6. https://www.netze-bw.de/ 7. https://www.ewe-netz.de/ 8. https://www.mitnetz-strom.de/ 9. https://www.stuttgart-netze.de/ 10. https://www.swm-infrastruktur.de/
	1. e-distribuzione S.p.A.: 意大利国家电力配电公司 2. Unareti S.p.A.: Unareti 配电公司 3. Duereti S.r.l.: Duereti 配电公司 4. areti S.p.A.: Areti 配电公司 5. IRETI S.p.A.: IRETI 配电公司 6. INRETE Distribuzione Energia S.p.A.: INRETE 能源配电公司 7. SET Distribuzione S.p.A.: SET 配电公司 8. Deval S.p.A.: Deval 配电公司 9. AcegasApsAmga S.p.A.: AcegasApsAmga 配电公司 10. Edyna S.r.l.: Edyna 配电公司 11. V-Reti S.p.A.: V-Reti 配电公司	1. https://www.e-distribuzione.it/ 2. https://www.unareti.it/ 3. https://www.duereti.it/ 4. https://www.aretit.it/ 5. https://www.ireti.it/ 6. https://www.inretedistribuzione.it/ 7. https://www.setdistribuzione.it/ 8. https://www.devalspa.it/ 9. https://www.acegasapsamga.it/ 10. https://www.edyna.net/ 11. https://www.v-reti.it/ **TSO: https://www.terna.it/
奥地利 Austria	1. Wiener Netze GmbH: 维也纳电网有限公司 2. Netz Niederösterreich GmbH: 下奥地利电网有限公司 3. Netz Oberösterreich GmbH: 上奥地利电网有限公司 4. Energienetze Steiermark GmbH: 施蒂里亚能源电网有限公司 5. KNG-Kärnten Netz GmbH: 克恩顿电网有限公司 6. Salzburg Netz GmbH: 萨尔茨堡电网有限公司 7. TINETZ-Tiroler Netze GmbH: 蒂罗尔电网有限公司 8. Vorarlberger Energienetze GmbH (vorarlberg netz): 福拉尔贝格能源电网有限公司 9. Netz Burgenland GmbH: 布尔根兰电网有限公司 10. Austrian Power Grid AG (APG): 奥地利电网股份公司 (输电系统运营商, TSO)	1. https://www.wienernetze.at/ 2. https://www.netz-noe.at/ 3. https://www.netzooe.at/ 4. https://www.e-netze.at/ 5. https://www.kaerntennetz.at/ 6. https://www.salzburgnetz.at/ 7. https://www.tinetz.at/ 8. https://www.vorarlbergnetz.at/ 9. https://www.netzburgenland.at/ 10. https://www.apg.at/
	1. UK Power Networks (UKPN): 英国电力网络公司 2. National Grid Electricity Distribution (NGED): 国家电网配电公司 3. Northern Powergrid (NPG): 北方电力电网公司 4. SP Energy Networks (SPEN): 苏格兰电力能源网络公司 5. Scottish and Southern Electricity Networks Distribution (SSEN Distribution): 苏格兰及南方电力网络配电公司 6. SP Electricity North West (SP ENW): 苏格兰电力西北配电公司 7. NIE Networks: 北爱尔兰电力网络公司	1. https://www.ukpowernetworks.co.uk/ 2. https://www.nationalgrid.co.uk/electricity-distribution 3. https://www.northernpowergrid.com/ 4. https://www.spenergynetworks.co.uk/ 5. https://www.ssen.co.uk/ 6. https://www.enwl.co.uk/ 7. https://www.nienetworks.co.uk/

国家/地区Country/Region	列名相关配电公司 Electricity network company	网址 Website
捷克 Czech Republic	1. ČEZ Distribuce, a. s.: ČEZ 配电公司 2. EG.D, s.r.o.: EG.D 配电公司 3. PREdistribuce, a. s.: PRE 配电公司	1. https://www.cezdistribuce.cz/ 2. https://www.egd.cz/ 3. https://www.predistribuce.cz/
西班牙 Spain	1. i-DE Redes Eléctricas Inteligentes, S.A.U.: i-DE 智能电网公司 2. e-distribución Redes Digitales, S.L.U.: e-distribución 数字配电公司 3. UFD Distribución Electricidad, S.A.: UFD 电力配电公司 4. E-REDES Distribución: E-REDES 配电公司 5. Viesgo Distribución Eléctrica, S.L.U.: Viesgo 电力配电公司 6. BEGASA – Barras Eléctricas Galaico-Asturias, S.A.: BEGASA 加利西亚-阿斯图里亚斯电力公司	1. https://www.i-de.es/ 2. https://www.edistribucion.com/ 3. https://www.ufd.es/ 4. https://www.eredesdistribucion.es/ 5. https://www.viesgodistribucion.com/ 6. https://www.begasa.es/
法国 France	1. Enedis: 法国电力配电网公司 2. Strasbourg Électricité Réseaux (SER): 斯特拉斯堡电力网络公司 3. réséda: 梅斯配电网络公司 4. GÉRÉDIS Deux-Sèvres: 德塞夫勒配电网络公司 5. SRD: 维埃纳配电网络公司 6. GreenAlp: 格勒诺布尔阿尔卑斯配电网络公司 7. EDF Systèmes Énergétiques Insulaires (EDF SEI): 法国电力岛屿能源系统公司 8. RTE: 法国输电网公司 (TSO)	1. https://www.enedis.fr/ 2. https://www.strasbourg-electricite-reseaux.fr/ 3. https://www.reseda.fr/ 4. https://www.geredis.fr/ 5. https://www.srd-energies.fr/ 6. https://greenalp.fr/ 7. https://portail-raccordement.edf.fr/ 8. https://www.rte-france.com/
斯洛文尼亚 Slovenia	1. Elektro Ljubljana, d.d.: 卢布尔雅那电力公司 2. Elektro Maribor, d.d.: 马里博尔电力公司 3. Elektro Celje, d.d.: 采列电力公司 4. Elektro Gorenjska, d.d.: 上卡尼奥拉电力公司 5. Elektro Primorska, d.d.: 滨海地区电力公司 6. ELES, d.o.o.: 斯洛文尼亚输电系统运营商	1. https://www.elektro-ljubljana.si/ 2. https://www.elektro-maribor.si/ 3. https://www.elektro-celje.si/ 4. https://www.elektro-gorenjska.si/ 5. https://www.elektro-primorska.si/ 6. https://www.eles.si/
罗马尼亚 Romania	1. CNTEE Transelectrica S.A.: 罗马尼亚国家输电公司 2. Rețele Electrice România S.A.: 罗马尼亚电力网络公司 3. Distribuție Energie Electrică România S.A. (DEER): 罗马尼亚电力配电公司 4. Delgaz Grid S.A.: Delgaz 电网公司 5. Distribuție Energie Oltenia S.A. (DEO): 奥尔特尼亚能源配电公司	1. https://www.transelectrica.ro/ 2. https://www.reteleelectrice.ro/ 3. https://www.distributie-energie.ro/ 4. https://delgaz.ro/ 5. https://www.distributieoltenia.ro/
葡萄牙 Portugal	1. REN – Redes Energéticas Nacionais: 葡萄牙国家能源网络公司 (输电系统运营商, TSO) 2. E-REDES – Distribuição de Eletricidade: E-REDES 电力配电公司 (DSO)	1. https://www.ren.pt/en-GB 2. https://www.e-redes.pt/pt-pt

国家/地区Country/Region	列名相关配电公司 Electricity network company	网址 Website
波兰 Poland	(as PTPIREE members) 1. ENEA Operator Sp. z o.o.: ENEA 配电运营公司 2. ENERGA-OPERATOR S.A.: ENERGA 配电运营公司 3. PGE Dystrybucja S.A.: PGE 电力配电公司 4. Stoen Operator Sp. z o.o.: Stoen 配电运营公司 5. TAURON Dystrybucja S.A.: TAURON 电力配电公司 6. PGE Energetyka Kolejowa S.A.: PGE 铁路能源公司	https://ptpiree.pl/kodeksy-sieci/warunki-i-procedury/ 1.https://www.operator.enea.pl/ 2.https://energa-operator.pl/ 3.https://pgedystrybucja.pl/ 4.https://www.stoen.pl/ 5.https://www.tauron-dystrybucja.pl/ 6.https://pgeenergetykakolejowa.pl/
	(as Synergrid members) 1. Elia: 比利时国家输电网公司 2. Fluvius: 布鲁维乌斯配电网络公司 3. Fluxys Belgium: 比利时天然气输送网络公司 4. RESA: RESA 配电网络公司 5. SIBELGA: 布鲁塞尔能源配电网络公司 6. AIEG: AIEG 电力配电公司 7. REW: 瓦隆地区电力配电公司 8. AIESH: AIESH 电力配电公司 9. ORES: ORES 能源配电网络公司	https://www.synergrid.be/fr/synergrid/nos-membres 1.https://www.elia.be/ 2.https://www.fluvius.be/nl 3.https://www.fluxys.com/ 4.https://www.resa.be/ 5.https://www.sibelga.be/fr?_country=BE 6.https://www.aieg.be/ 7.https://www.rew.be/ 8.https://www.aiesh.be/ 9.https://www.ores.be/
丹麦 Denmark	1. Energinet: 丹麦国家能源网络公司 (输电系统运营商, TSO) 2. Ørsted Salg & Service A/S: Ørsted 销售与服务公司 3. Norlys Energy Trading A/S: Norlys 能源交易公司 4. EWII Energi A/S: EWII 能源公司 5. Danske Commodities A/S: 丹麦大宗能源交易公司	1.https://energinet.dk/ 2.https://orsted.com/ 3.https://norlysenenergytrading.com/ 4.https://ewii.dk/ 5.https://danskecommodities.com/
芬兰 Finland	1. Fingrid: 芬兰国家电网公司 (输电系统运营商, TSO) 2. Caruna: 卡鲁纳配电公司 3. Elenia: 埃莱尼亚配电公司 4. Helen Electricity Network: 赫尔辛基电力网络公司	1.https://www.fingrid.fi 2.https://www.caruna.fi 3.https://www.elenia.fi 4.https://www.helen.fi

国家/地区Country/Region	列名相关配电公司 Electricity network company	网址 Website
爱尔兰 Ireland	1. ESB Networks DAC: 爱尔兰电力配电网络公司 2. Northern Ireland Electricity Networks Limited (NIE Networks): 北爱尔兰电力网络公司 3. EirGrid plc: 爱尔兰国家输电系统运营商	1.https://www.esbnetworks.ie/connection-s/generator-connections 2.https://www.nienetworks.co.uk/connections/generator-connections 3.https://www.eirgrid.ie/
荷兰 Netherlands	低压: DSO 1. Liander: Liander 配电网络公司 2. Stedin: Stedin 配电网络公司 3. Enexis: Enexis 配电网络公司 中高压: 4. TenneT: 荷兰国家输电系统运营商 (TSO)	1.https://liander.nl/ 2.https://stedin.net/ 3.https://enexis.nl/ 4.https://www.tennet.eu/
瑞士 Switzerland	1. ewz (Elektrizitätswerk der Stadt Zürich): 苏黎世市电力公司 2. SIG (Services Industriels de Genève): 日内瓦工业服务公司 3. EWB (Elektrizitätswerk Bern): 伯尔尼电力公司 4. CKW (Centralschweizerische Kraftwerke): 瑞士中部电力公司 5. BKW Energie AG: BKW 能源公司 6. Axpo Grid AG: Axpo 电网公司 7. EKZ (Elektrizitätswerke des Kantons Zürich): 苏黎世州电力公司	1.https://www.ewz.ch/en 2.https://www.sig-ge.ch 3.https://www.ewb.ch 4.https://www.ckw.ch 5.https://www.bkw.ch 6.https://www.axpo.com/ch/en/business-grid-services/distribution-grids.html 7.https://www.ekz.ch
瑞典 Sweden	1. Ellevio AB: Ellevio 电力配电公司 2. Vattenfall Eldistribution AB: Vattenfall 电力配电公司 3. E.ON Energidistribution AB: E.ON 能源配电公司 4. Göteborg Energi AB: 哥德堡能源公司	1.https://www.ellevio.se/ 2.https://www.vattenfall Eldistribution.se/ 3.https://www.eon.se/ 4.https://www.goteborgenergi.se/
挪威 Norway	能源监管机构: RME / NVE DSO: 1. Elvia: Elvia 电力配电公司 2. BKK: BKK 电网公司 3. Glitre Nett: Glitre 电网公司 4. Lede: Lede 电网公司 5. Tensio: Tensio 电网公司 6. Lnett: Lnett 电网公司 7. Linja: Linja 电网公司 8. Linea: Linea 电网公司 9. Arva: Arva 电网公司 10. Fagne: Fagne 电网公司	1.https://www.elvia.no/ 2.https://www.bkk.no/ 3.https://www.glitrenett.no/ 4.https://lede.no/kunde/ 5.https://www.tensio.no/ 6.https://www.l-nett.no/ 7.https://www.linja.no/ 8.https://www.linea.no/ 9.https://arva.no/hjem 10.https://fagne.no/

国家/地区Country/Region	列名相关配电公司 Electricity network company	网址 Website
匈牙利 Hungary	1. E.ON Dél-dunántúli Áramhálózati Zrt.; E.ON 南多瑙河地区电网公司 2. E.ON Észak-dunántúli Áramhálózati Zrt.; E.ON 北多瑙河地区电网公司 3. ELMŰ Hálózati Kft.; ELMŰ 电网公司 4. MVM Démasz Áramhálózati Kft.; MVM Démasz 电网公司 5. MVM Émász Áramhálózati Kft.; MVM Émász 电网公司 6. OPUS TITÁSZ Zrt.; OPUS TITÁSZ 电网公司	1. https://www.eon.hu/hu/rolunk/vallalatcsoport/halozati-engedelyes-cegek/eon-deldunantuli-aramhalozati-zrt.html 2. https://www.eon.hu/hu/rolunk/vallalatcsoport/halozati-engedelyes-cegek/eon-eszakdunantuli-aramhalozati-zrt.html 3. https://halozat.elmu.hu/ 4. https://www.mvmhalozat.hu/ 5. https://mvmemaszhalozat.hu/ 6. https://www.opustitasz.hu/
斯洛伐克 The Slovak Republic	1. Západoslovenská distribučná, a.s. (ZSDis) : 西斯洛伐克配电公司 2. Stredoslovenská distribučná, a.s. (SSD) : 中斯洛伐克配电公司 3. Východoslovenská distribučná, a.s. (VSDS) : 东斯洛伐克配电公司	1. www.zsdis.sk 2. www.ssd.sk 3. www.vsd.sk
印度 India	1. BRPL (BSES Rajdhani Power Ltd) : BSES 拉杰达尼电力公司 2. BYPL (BSES Yamuna Power Ltd) : BSES 亚穆纳电力公司 3. TPDDL (Tata Power Delhi Distribution Ltd) : 塔塔电力德里配电公司 4. MSEDCL (Maharashtra State Electricity Distribution Co. Ltd) : 马哈拉施特拉邦电力配电公司 5. BESCOM (Bangalore Electricity Supply Company) : 班加罗尔电力供应公司 6. DGVCL (Dakshin Gujarat Vij Company Ltd) : 南古吉拉特电力公司 7. TNEB (Tamil Nadu Electricity Board) : 泰米尔纳德邦电力委员会 8. TSNPDCL (Northern Power Distribution Company of Telangana) : 特伦甘纳邦北部电力配电公司 9. TSSPDCL (Southern Power Distribution Company of Telangana) : 特伦甘纳邦南部电力配电公司 10. APEPDCL (Eastern Power Distribution Company of Andhra Pradesh) : 安得拉邦东部电力配电公司 11. APSPDCL (Southern Power Distribution Company of Andhra Pradesh) : 安得拉邦南部电力配电公司	1. https://www.bsesdelhi.com/ 2. https://www.bsesdelhi.com/ 3. https://www.tatapower-ddl.com/ 4. https://www.mahadiscom.in/ 5. https://bescom.co.in/ 6. https://www.dgvcl.in/ 7. https://www.tnebnet.org/ 8. https://www.tsnpdcl.in/ 9. https://www.tssouthernpower.com/ 10. https://www.aepdcl.gov.in/ 11. https://www.apsdcl.gov.in/
泰国 Thailand	1. MEA (Metropolitan Electricity Authority, 首都电力局) 2. PEA (Provincial Electricity Authority, 地方电力局) 3. EGAT (Electricity Generating Authority of Thailand, 泰国国家电力局)	1. www.pea.co.th 2. www.metaco.co.th 和 www.mea.or.th/en/home 3. www.egat.co.th

国家/地区Country/Region	列名相关配电公司 Electricity network company	网址 Website
菲律宾 Philippine	1. NGCP (National Grid Corporation of the Philippines) : 菲律宾国家电网公司 2. MERALCO (Manila Electric Company) : 马尼拉电力公司 3. VECO (Visayan Electric Company) : 维萨亚斯电力公司 4. DLPC (Davao Light and Power Company) : 达沃电力公司 5. APG / Aboitiz Power Group: 阿博伊蒂斯电力集团 6. BENECO (Benguet Electric Cooperative) : 本格特电力合作社 7. DECORP (Dagupan Electric Corporation) : 达古潘电力公司 8. CEDC (Clark Electric Distribution Corporation) : 克拉克电力配电公司 9. AKELCO (Aklan Electric Cooperative) : 阿克兰电力合作社 10. BOHECO I (Bohol Electric Cooperative I) : 保和第一电力合作社 11. ANECO (Agusan del Norte Electric Cooperative) : 北阿古桑电力合作社 12. ASELCO (Agusan del Sur Electric Cooperative) : 南阿古桑电力合作社 13. COTELCO (Cotabato Electric Cooperative) : 哥打巴托电力合作社	1. https://www.ngcp.ph/ 2. https://www.meralco.com.ph/ 3. https://visayanelectric.com/ 4. https://www.davaolight.com/ 5. https://aboitizpower.com/ 6. https://www.beneco.com.ph/ 7. https://www.dagupanelectric.com/ 8. https://www.clarkelectric.ph/ 9. https://www.akelco.com.ph/ 10. https://boheco1.com/ 11. https://www.aneco.ph/ 12. https://www.aselco.ph/ 13. https://cotelco.com.ph/
越南 Vietnam	1. EVNNPC (Northern Power Corporation) : 越南北方电力公司 2. EVNHANOI (Hanoi Power Corporation) : 河内电力公司 3. EVNCP (Central Power Corporation) : 越南中部电力公司 4. EVNSPC (Southern Power Corporation) : 越南南方电力公司 5. EVNHCMC (Ho Chi Minh City Power Corporation) : 胡志明市电力公司	1. https://www.evnnpc.gov.vn/ 2. https://evnhanoi.vn/ 3. https://www.evnpc.gov.vn/ 4. https://www.evnspc.gov.vn/ 5. https://evnhcmc.vn/
马来西亚 Malaysia	1. TNB (Tenaga Nasional Berhad) : 马来西亚国家能源公司 2. SESB (Sabah Electricity Sdn. Bhd.) : 沙巴电力公司 3. SEB (Sarawak Energy Berhad) : 砂拉越能源公司	1. https://www.tnb.com.my/ 2. https://www.sesb.com.my/ 3. https://www.sarawakenergy.com/
阿联酋 United Arab Republic	1. DEWA (Dubai Electricity and Water Authority) : 迪拜水电局 2. ADDC (Abu Dhabi Distribution Company) : 阿布扎比配电公司 3. EtihadWE (Etihad Water and Electricity) : 阿联酋联邦水电公司	1. https://www.dewa.gov.ae/ 2. https://www.addc.ae/ 3. https://etihadwe.ae/
沙特阿拉伯 Saudi Arabia	1. Saudi Electricity Company 沙特电力公司	1. www.se.com.sa
约旦 Jordan	1. JEPCO (Jordan Electric Power Company) : 约旦电力公司 2. IDECO (Irbid District Electricity Company) : 伊尔比德地区电力公司 3. EDCO (Electricity Distribution Company) : 约旦电力配电公司 4. NEPCO (National Electric Power Company) : 约旦国家电力公司 (输电系统运营商, TSO)	1. https://www.jepco.com.jo 2. https://www.ideco.com.jo 3. https://www.edco.jo 4. https://www.nepco.com.jo

国家/地区Country/Region	列名相关配电公司 Electricity network company	网址 Website
印度尼西亚 Indonesia	1. PT PLN (Persero)：印度尼西亚国家电力公司 2. PT PLN Batam：巴淡岛电力公司	1. https://web.pln.co.id/ 2. https://www.plnbatam.com/
中国 China	1. State Grid Corporation of China (SGCC)：国家电网有限公司 2. China Southern Power Grid (CSG)：中国南方电网有限责任公司 3. Inner Mongolia Power Group Co., Ltd. (IMEPG)：内蒙古电力（集团）有限责任公司	1. https://www.sgcc.com.cn/ 2. https://www.csg.cn/ 3. https://www.impg.com.cn/
日本 Japan	1. Hokkaido Electric Power Company：北海道电力公司 2. Tohoku Electric Power Company：东北电力公司 3. Tokyo Electric Power Company (TEPCO)：东京电力公司 4. Hokuriku Electric Power Company：北陆电力公司 5. Chubu Electric Power Company：中部电力公司 6. Kansai Electric Power Company (KEPCO)：关西电力公司 7. Chugoku Electric Power Company：中国电力公司 8. Shikoku Electric Power Company：四国电力公司 9. Kyushu Electric Power Company：九州电力公司 10. Okinawa Electric Power Company：沖縄电力公司	1. https://www.hepco.co.jp/ 2. https://www.tohoku-epco.co.jp/ 3. https://www.tepco.co.jp/index-j.html 4. https://www.rikuden.co.jp/ 5. https://www.chuden.co.jp/ 6. https://www.kepcoc.co.jp/ 7. https://www.energia.co.jp/ 8. https://www.yonden.co.jp/ 9. https://www.kyuden.co.jp/ 10. https://www.okiden.co.jp/
巴西 Brazil	1. Enel SP (Enel Distribuição São Paulo)：Enel 圣保罗配电公司 2. CPFL Paulista：CPFL 保利斯塔电力公司 3. CPFL Piratininga：CPFL 皮拉蒂宁加电力公司 4. EDP São Paulo：EDP 圣保罗电力公司 5. Neoenergia Elektro：Neoenergia Elektro 电力公司 6. CEMIG-D (CEMIG Distribuição)：CEMIG 配电公司 7. COPEL Distribuição：COPEL 配电公司 8. Neoenergia Coelba：Neoenergia Coelba 电力公司 9. Neoenergia Pernambuco：Neoenergia 伯南布哥电力公司 10. Enel Rio (Enel Distribuição Rio)：Enel 里约热内卢配电公司 11. Light：Light 电力公司	1. https://www.enel.com.br/pt-saopaulo 2. https://www.cpfl.com.br/ 3. https://www.edp.com.br/ 4. https://www.neoenergia.com/ 5. https://www.cemig.com.br/ 6. https://www.copel.com/ 7. https://www.light.com.br/ 8. https://www.enel.com.br/pt-ri 9. https://www.neoenergia.com/ 10. https://www.cpfl.com.br/ 11. https://www.neoenergia.com/

国家/地区Country/Region	列名相关配电公司 Electricity network company	网址 Website
智利 Chile	监管机构：SEC DSO 1. SEC (Superintendencia de Electricidad y Combustibles)：智利电力与燃料监管局 2. Enel Distribución Chile：Enel 智利配电公司 3. CGE Distribución：CGE 配电公司 4. Chilquinta Distribución：Chilquinta 配电公司 5. Saesa (Grupo Saesa)：Saesa 电力公司 6. Frontel (Grupo Saesa)：Frontel 电力公司 7. Luz Osorno (Grupo Saesa)：奥索尔诺电力公司 8. Edelsén (Grupo Saesa)：艾森电力公司 9. Empresa Eléctrica Puente Alto (EEPA)：普恩特阿尔托电力公司	1. https://www.enel.cl/ 2. https://sucursavirtual.cge.cl/ 3. https://www.chilquinta.cl/ 4. https://web.gruposaesac.cl/web/saesac 5. gruposaesac.cl/frontel 6. gruposaesac.cl / luzosorno.cl 7. gruposaesac.cl / edelaysen.cl 8. https://eepea.cl/
阿根廷 Argentina	ENRE (国家电力监管局) DSO 1. EDENOR (Empresa Distribuidora y Comercializadora Norte S.A.)：北部电力配电公司 2. EDESUR (Empresa Distribuidora de Electricidad Sur S.A.)：南部电力配电公司 3. EDELAP (Empresa Distribuidora La Plata S.A.)：拉普拉塔电力配电公司	1. www.edenor.com.ar 2. www.edesur.com.ar 3. www.edelap.com.ar/
玻利维亚 Bolivia	监管机构：AETN (Autoridad de Fiscalización de Electricidad y Tecnología Nuclear)：玻利维亚电力与核技术监管局 1. DELAPAZ (Distribuidora de Electricidad La Paz S.A.)：拉巴斯电力配电公司 2. ELFEC (Empresa de Luz y Fuerza Eléctrica Cochabamba S.A.)：科恰班巴电力公司 3. CRE R.L. (Cooperativa Rural de Electrificación)：农村电气合作社	https://aetn.gob.bo/generacion-distribuida/ 1. https://www.delapaz.bo/2.https://www.elfec.bo/3.https://www.cre.com.bo/
哥伦比亚 Colombia	1. Enel Emgesa：Enel Emgesa 电力公司 2. EDEQ (Empresa de Energía del Quindío)：金迪奥能源公司 3. CENS (Centrales Eléctricas del Norte de Santander)：北桑坦德电力公司 4. ESSA (Electrificadora de Santander)：桑坦德电力公司 5. DSI：DSI 电力公司	1. www.enel.com.co 2. www.edeq.com.co 3. www.cens.com.co 4. www.essa.com.co 5. www.dsi.com.co
厄瓜多尔 Ecuador	1. CNEL EP (Corporación Nacional de Electricidad)：厄瓜多尔国家电力公司 2. Empresa Eléctrica Quito (EEQ)：基多电力公司 3. Empresa Eléctrica Ambato Regional Centro Norte (EEASA)：安巴托中北部区域电力公司 4. Empresa Eléctrica Azuques (EEA)：阿索克斯电力公司 5. Empresa Eléctrica Regional Centro Sur (CENTROSUR)：中南部区域电力公司 6. Empresa Eléctrica Provincial Cotopaxi (ELEPCO S.A.)：科托帕希省电力公司 7. Empresa Eléctrica Provincial Galápagos (ELEC GALAPAGOS)：加拉帕戈斯省电力公司 8. Empresa Eléctrica Regional Norte (EMELNORTE)：北部区域电力公司 9. Empresa Eléctrica Riobamba (EERSA)：里奥班巴电力公司 10. Empresa Eléctrica Regional del Sur (EERSSA)：南部区域电力公司	1. https://www.cnelep.gob.ec/ 2. https://www.eeq.com.ec/ 3. https://www.eeasac.com.ec/ 4. https://www.eea.gob.ec/ 5. https://www.centrosur.gob.ec/ 6. https://elepcosac.com.ec/ 7. https://www.elecgalapagos.com.ec/ 8. https://www.emelnorte.com/ 9. https://www.eersac.com.ec/site/ 10. https://www.eerssac.com.ec/

国家/地区Country/Region	列名相关配电公司 Electricity network company	网址 Website
秘鲁 Peru	OEFA 目前公布的名单中共有 21 家电力特许经营企业： 1. Pluz Energia Perú S.A.A.; Pluz 秘鲁能源公司 2. Luz del Sur S.A.A.; 南方电力公司 3. Electronoroeste S.A.; 西北电力公司 4. Electronorte S.A.; 北方电力公司 5. Hidrandina S.A.; Hidrandina 电力公司 6. Electrocentro S.A.; 中部电力公司 7. Electro Oriente S.A.; 东方电力公司 8. Electro Ucayali S.A.; 乌卡亚利电力公司 9. Electro Sur Este S.A.A.; 东南电力公司 10. Electro Puno S.A.A.; 普诺电力公司 11. Electro sur S.A.; 南部电力公司 12. Sociedad Eléctrica del Sur Oeste S.A. (SEAL); 西南电力公司 13. Electro Dunas S.A.A.; Dunas 电力公司 14. ADINELSA; 国家农村电力基础设施管理公司 15. Consorcio Eléctrico de Villacuri S.A.C.; Villacuri 电力联合公司 16. Electricidad Pangoa S.A. (EGEPSA); Pangoa 电力公司 17. Electro Tocache S.A.; Tocache 电力公司 18. ESEMPAT S.A.C.; ESEMPAT 电力公司 19. EMSEM S.A.; EMSEM 电力公司 20. EMSEU S.A.C.; EMSEU 电力公司 21. SERSA (Servicios Eléctricos Rioja S.A.); Rioja 电力服务公司后7家为地方小型配电公司	1.https://www.pluz.pe/ 2.https://www.luzdelsur.pe/ 3.https://www.distriluz.com.pe/enosa/ 4.https://www.distriluz.com.pe/ensa/ 5.https://www.distriluz.com.pe/hidrandina/ 6.https://www.distriluz.com.pe/electrocentro/ 7.https://www.elor.com.pe/ 8.https://www.gob.pe/electroucayali/ https://www.electroucayali.com.pe/ 9.https://www.else.com.pe/ 10.https://www.electropuno.com.pe/ 11.https://www.electrosur.com.pe/ 12.https://www.seal.com.pe/ 13.https://www.electrodunas.com/ 14.https://www.adinelsa.com.pe/adinelsaweb/ 15.https://www.cvcenergia.com.pe/ 16.https://www.egepsa.com.pe/ 17.https://www.electrotocache.pe/ 18.https://www.esempat.com/ 19.https://www.emsema.com/ 20.https://www.gob.pe/emseu 21.https://www.sersa.pe/
美国 USA	1. PG&E (Pacific Gas and Electric Company); 太平洋燃气电力公司 2. Southern California Edison; 南加州爱迪生电力公司 3. San Diego Gas & Electric; 圣迭戈燃气电力公司 4. Con Edison (Consolidated Edison); 联合爱迪生电力公司 5. National Grid USA; 美国国家电网公司 6. Eversource Energy; Eversource 能源公司 7. PSE&G (Public Service Electric and Gas Company); 公共服务电力燃气公司 8. PECO Energy; PECO 能源公司 9. Dominion Energy; 道明能源公司 10. Duke Energy; 杜克能源公司 11. Florida Power & Light; 佛罗里达电力照明公司 12. Georgia Power; 佐治亚电力公司 13. ComEd (Commonwealth Edison); 联邦爱迪生电力公司 14. Xcel Energy; Xcel 能源公司 15. Oncor Electric Delivery; Oncor 电力输配公司 16. CenterPoint Energy; CenterPoint 能源公司 17. Arizona Public Service; 亚利桑那公共服务电力公司 18. Salt River Project; 盐河项目电力公司 19. NV Energy; 内华达能源公司 20. Hawaiian Electric; 夏威夷电力公司	1. https://www.pge.com/ 2. https://www.sce.com/ 3. https://www.sdge.com/ 4. https://www.coned.com/ 5. https://www.nationalgridus.com/ 6. https://www.eversource.com/ 7. https://ni.pseg.com/ 8. https://www.peco.com/ 9. https://www.dominionenergy.com/ 10. https://www.duke-energy.com/ 11. https://www.fpl.com/ 12. https://www.georgiapower.com/ 13. https://www.comed.com/ 14. https://my.xcelenergy.com/ 15. https://www.oncor.com/ 16. https://www.centerpointenergy.com/ 17. https://www.aps.com/ 18. https://www.srpnet.com/ 19. https://www.nvenergy.com/ 20. https://www.hawaiianelectric.com/

国家/地区Country/Region	列名相关配电公司 Electricity network company	网址 Website
墨西哥 Mexico	1. CFE Distribución (Comisión Federal de Electricidad); 墨西哥联邦电力委员会配电公司 2. CENACE (Centro Nacional de Control de Energía); 墨西哥国家能源控制中心 3. CFE Transmisión; 墨西哥联邦电力委员会输电公司	1. https://www.cfe.gob.mx 2. https://www.cenace.gob.mx/ 3. https://transmision.cfe.mx/
南非 South Africa	1. Eskom Holdings SOC Ltd; 南非国家电力公司 2. City Power Johannesburg; 约翰内斯堡城市电力公司 3. City of CapeTown Electricity Services; 开普敦市电力服务公司 4. eThekweni Municipality Electricity; 德班都会区电力公司 5. City ofTshwane Electricity; 茨瓦内市电力公司 6. Nelson Mandela Bay Municipality Electricity; 纳尔逊-曼德拉湾市电力公司 7. Buffalo City Metropolitan Municipality Electricity; 布法罗城市大都会电力公司 8. City of Ekurhuleni Metropolitan Municipality Electricity; 埃库鲁莱尼大都会市电力公司 9. Mangaung Metropolitan Municipality Electricity; 曼加翁大都会市电力公司 10. Msunduzi Municipality Electricity; 姆松杜济市电力公司 11. Green Energy Africa; 非洲绿色能源公司 12. Scatec; Scatec 可再生能源公司 13. NERSA (National Energy Regulator of South Africa); 南非国家能源监管局	1. https://www.eskom.co.za/ (https://www.eskom.co.za/distribution/small-scale-embedded-generators/) 2. https://www.citypower.co.za/ 3. https://www.capetown.gov.za 4. https://www.durban.gov.za 5. https://www.tshwane.gov.za 6. https://www.nelsonmandelabay.gov.za 7. https://www.buffalocity.gov.za 8. https://www.ekurhuleni.gov.za 9. https://www.mangaung.co.za 10. https://www.msunduzi.gov.za 11. https://green-energy-africa.com/ 12. https://www.scatec.com/ 13. https://www.nersa.org.za (https://www.nersa.org.za/contact/)
埃及 Egypt	1. North Cairo Electricity Distribution Company (NCEDC); 北开罗配电公司 2. South Cairo Electricity Distribution Company (SCEDC); 南开罗配电公司 3. North Delta Electricity Distribution Company (NDEDC); 北三角洲配电公司 4. South Delta Electricity Distribution Company (SDEDC); 南三角洲配电公司 5. Middle Egypt Electricity Distribution Company (MEEDC); 中埃及配电公司 6. Canal Electricity Distribution Company (CEDC); 运河配电公司 7. Alexandria Electricity Distribution Company (AEDC); 亚历山大配电公司	1. www.ncedc.gov.eg 2.www.ncedc.gov.eg 3.www.nddec.gov.eg 4.www.sddec.gov.eg 5.www.medc.gov.eg 6.www.cced.gov.eg 7.www.aedc.gov.eg

国家/地区Country/Region	列名相关配电公司 Electricity network company	网址 Website
澳大利亚 Australia	1. Ausgrid: 澳大利亚电网公司	1. https://www.ausgrid.com.au/
	2. Endeavour Energy: 奋进能源公司	2. https://www.endeavourenergy.com.au/
	3. Essential Energy: Essential Energy 配电公司	3. https://www.essentialenergy.com.au/
	4. CitiPower: CitiPower 电力公司	4. https://www.citipower.com.au/
	5. Powercor: Powercor 电力公司	5. https://www.powercor.com.au/
	6. United Energy: 联合能源公司	6. https://www.unitedenergy.com.au/
	7. Jemena Electricity Networks: Jemena 电力网络公司	7. https://www.jemena.com.au/electricity/
	8. AusNet Services: AusNet 电网服务公司	8. https://www.ausnetservices.com.au/
	9. Energex: Energex 电力公司	9. https://www.energex.com.au/
	10. Ergon Energy Network: Ergon 能源网络公司	10. https://www.ergon.com.au/
	11. SA Power Networks: 南澳大利亚电力网络公司	11. https://www.sapowernetworks.com.au/
	12. TasNetworks: 塔斯马尼亚电力网络公司	12. https://www.tasnetworks.com.au/
	13. Evoenergy: Evoenergy 电力网络公司	13. https://www.evoenergy.com.au/
	14. Western Power: 西澳大利亚电力公司	14. https://www.westernpower.com.au/
	15. Horizon Power: Horizon 电力公司	15. https://www.horizonpower.com.au/en/
	16. Power and Water Corporation: 电力与水务公司	16. https://www.powerwater.com.au/

国家/地区Country/Region	列名相关配电公司 Electricity network company	网址 Website
新西兰 New zealand	1. Alpine Energy: 阿尔派能源公司	1. https://www.alpineenergy.co.nz/
	2. Aurora Energy: 奥罗拉能源公司	2. https://www.auroraenergy.co.nz/
	3. Buller Electricity: 布勒电力公司	3. https://bullerelectricity.co.nz/
	4. Centralines: Centralines 电力网络公司	4. https://www.centralines.co.nz/
	5. Counties Energy: Counties 能源公司	5. https://countiesenergy.co.nz/
	6. EA Networks: EA 电力网络公司	6. https://www.eanetworks.co.nz/
	7. Electra: Electra 电力网络公司	7. https://www.electra.co.nz/
	8. Firstlight Network: Firstlight 电力网络公司	8. https://www.firstlightnetwork.co.nz/
	9. Horizon Networks: Horizon 电力网络公司	9. https://www.horizonnetworks.nz/
	10. MainPower: MainPower 电力公司	10. https://www.mainpower.co.nz/
	11. Marlborough Lines: 马尔堡电力线路公司	11. https://www.marlboroughlines.co.nz/
	12. Network Tasman: 塔斯曼电力网络公司	12. https://www.networktasman.co.nz/
	13. Network Waitaki: 怀塔基电力网络公司	13. https://www.networkwaitaki.co.nz/
	14. Northpower: 北方电力公司	14. https://northpower.com/
	15. Orion: Orion 电力网络公司	15. https://www.oriongroup.co.nz/
	16. Powerco: Powerco 电力公司	16. https://www.powerco.co.nz/
	17. PowerNet: PowerNet 电力网络公司	17. https://powernet.co.nz/
	18. Scanpower: Scanpower 电力公司	18. https://scanpower.co.nz/
	19. The Lines Company: 线路电力公司	19. https://www.thelinescompany.co.nz/
	20. Top Energy: Top Energy 能源公司	20. https://www.topenergy.co.nz/
	21. Unison Networks: Unison 电力网络公司	21. https://www.unison.co.nz/
	22. Vector: Vector 电力网络公司	22. https://www.vector.co.nz/
	23. Waipā Networks: 怀帕电力网络公司	23. https://www.waipanetworks.co.nz/
	24. WEL Networks: WEL 电力网络公司	24. https://www.wel.co.nz/
	25. Wellington Electricity: 惠灵顿电力公司	25. https://www.welElectricity.co.nz/
	26. Westpower: 西部电力公司	26. https://westpower.co.nz/

附录二 术语表



缩写 (Abbreviation)	英文全称 (Full Term)	中文释义 (Chinese Definition)
ACER	European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulators	欧盟能源监管合作署
AEMO	Australian Energy Market Operator	澳洲能源市场运营商
DER	Distributed Energy Resources	分布式能源
DLR	Dynamic Line Rating	动态线路额定值
DNO	Distribution Network Operator	配电网络运营商
DSO	Distribution System Operator	配电系统运营商
DSP	Digital Signal Processing	数字信号处理
DTR	Dynamic Transformer Rating	动态变压器额定值
EMT	Electromagnetic Transient	电磁暂态
ENA	Energy Networks Association	英国能源网络协会
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity	欧洲输电系统运营商联盟
ERCOT	Electric Reliability Council of Texas	美国德州电力可靠性委员会
ESS	Energy Storage System	储能系统
EUT	Equipment Under Test	受试设备/被测设备
FFR	Fast Frequency Response	快速频率响应
FRT	Fault Ride Through	故障穿越
FSM	Frequency Sensitive Mode	频率敏感模式
FVRT	Fault Voltage Ride Through	故障电压穿越
GFL	Grid-Following	跟网型控制
GFM	Grid-Forming	构网型控制
ICT	Information and Communication Technology	信息通信技术
IEA	International Energy Agency	国际能源署
IEC	International Electrotechnical Commission	国际电工委员会
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers	电气电子工程师学会
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistor	绝缘栅双极型晶体管
IMF	International Monetary Fund	国际货币基金组织

缩写 (Abbreviation)	英文全称 (Full Term)	中文释义 (Chinese Definition)
JET	Japan Electrical Safety & Environment Technology Laboratories	日本电气安全环境研究所
LFSM-O	Limited Frequency Sensitive Mode-Overfrequency	有限频率敏感模式——过频
LFSM-U	Limited Frequency Sensitive Mode-Underfrequency	有限频率敏感模式——欠频
NC RfG	Network Code on Requirements for Grid Connection applicable to Generators	欧盟发电机组并网要求网络规范
OVRT	Over-voltage Ride Through	高电压穿越
PCC	Point of Common Coupling	公共连接点
PCE	Power Conversion Equipment	电力转换设备
PCS	Power Conversion System	电力转换系统
PF	Power Factor	功率因数
PPM	Power Park Module	发电厂模组/电力电子电源
PSC	Power Synchronization Control	功率同步控制
PSCAD	Power System Computer Aided Design	电力系统计算机辅助设计软件
p.u.	Per Unit	标么值
PWM	Pulse Width Modulation	脉冲宽度调制
ROCOF	Rate of Change of Frequency	频率变化率
SCR	Short Circuit Ratio	短路比
SG	Synchronous Generator	同步发电机
SPGM	Synchronous Power-Generating Module	同步发电模块
SST/PET	Solid State Transformer/Power Electronic Transformer	固态变压器/电力路由器
THD	Total Harmonic Distortion	总谐波畸变率
V2G	Vehicle-to-Grid	车网互动
VDE FNN	Network Technology & Network Operation Forum at VDE	德国电气、电子与信息技术协会网络技术与网络运营论坛
VOC	Virtual Oscillator Control/Voltage-controlled Grid-forming Control	虚拟振荡器控制/电压型构网控制
VPP	Virtual Power Plant	虚拟电厂
VSC	Voltage Source Converter	电压源换流器
VSG/VSM	Virtual Synchronous Generator/Machine	虚拟同步发电机

术语	释义
输电	输电指电能的传输，将相距较远的发电厂和负荷中心联系起来，使电能的生产和利用超越地域的限制。
变电	变电是指利用一定的设备将电压由低等级变为高等级（升压）或由高等级变为低等级（降压）的过程。
配电	配电是在电力系统中直接与用户相连并向用户分配电能的环节。
电力系统	电力系统是由发电厂、送变电线路、供配电所和用电等环节组成的电能生产与消费系统。它的功能是将自然界的一次能源通过发电装置转化为电能，再经输电、变电和配电将电能供应到各客户。
电网	是由输电、变电、配电设备与线路组成的电力网络，负责把电能从发电厂跨越地域、安全高效地送达终端用户；
逆变器	逆变器是把直流电能转变成定频定压或调频调压交流电的转换器，它由逆变桥、控制逻辑和滤波电路组成。
AI数据中心	AI数据中心即人工智能数据中心，是专为人工智能计算任务设计的高性能算力基础设施。其核心在于支撑大规模AI模型的训练与推理，具有高算力、高能耗、高密度的显著特征。
动态线路额定值	动态线路额定值是一种电力系统技术，通过平衡焦耳热、太阳辐射等发热因素与对流、辐射等散热因素，实时计算输电线路线缆的实际载流能力。
动态变压器额定值	动态变压器额定值是指根据实时环境条件（如环境温度、风速、日照）和变压器运行状态（如顶层油温、绕组热点温度），动态评估并确定的变压器最大安全负载能力。
先进功率流控制	先进功率流控制是一种基于现代电力电子技术的电网增强型技术，它能够在毫秒级内直接、动态地调整输电线路的阻抗、电压或相角，从而控制电力流量在网架中的重新分配。
智能电网	智能电网是将先进的传感量测技术、信息通信技术、分析决策技术和自动控制技术与能源电力技术以及电网基础设施高度集成而形成的新型现代化电网。
新型电力系统	以新能源为主体，以“双高”（高比例可再生能源、高比例电力电子设备）为显著特征，源、网、荷、储多要素协同互动，由数字智能技术支撑的现代电力系统。
能源互联网	能源互联网是一种将电力系统、热力系统、燃气系统等多种能源系统有机融合，并与信息通信技术深度耦合，实现多种能源相互转换、优化配置、高效利用的综合能源系统网络。它就像是一个能源的“互联网”，把不同类型的能源（如电、热、气等）以及能源的生产、传输、存储和消费等环节紧密地连接在一起。
特高压	交流1000kV及以上，直流±800kV及以上。
中压	1kV-35kV（常见10kV、20kV）
超高压	交流330kV-750kV，直流±400kV-±660kV。
低压	<1kV（常见220V/380V、110V）
高压	35kV-220kV（常见35kV、66kV、110kV、220kV）
工业电网	工业电网是专为工厂、矿山和工业园区等大规模生产场所提供高负荷，高可靠性电力传输与分配的专业电力系统。
民用电网	民用电网是专门为居民日常生活和公共建筑提供低压电能的电力输配系统。
大电网	大电网是指跨越广阔地域，将千万个发电厂和用电负荷紧密连接起来的超大型电力输配网络。
微电网	微电网是指由分布式电源、储能装置、能量转换装置、相关负荷以及监控、保护装置汇集而成的小型发电配电系统。

术语	释义
交流电网	交流电网是以交流电形式进行电能生产、传输和分配的电力系统。
直流电网	直流电网是以直流电形式进行电能生产、传输和分配的电力系统。
构网型控制	电力电子设备自主构建并维持内电势幅值和频率，以电压源特性运行的控制技术。
跟网型控制	电力电子设备跟随电网电压和频率，以电流源特性运行的控制技术。
电流源	电流源是一个能向外部提供恒定电流的电子元件或模型。
电压源	电压源是一种在其两端总能保持恒定电压的电路元件或电源模型。
锁相环	锁相环是一种利用闭环负反馈控制原理，使电路输出信号的频率和相位与外部参考信号保持同步的电子系统。
虚拟同步机	虚拟同步机是新能源由“被动调节”转为“主动支撑”的新一代新能源发电技术，是使新能源发电具备惯量支撑、一次调频和主动调压等主动支撑电网能力的有效路径。
下垂控制	下垂控制是一种在电力系统和微电网中，让多个发电机或逆变器在无需通信的情况下，通过本地测量独立按比例分担负载功率的去中心化控制策略。
SCR	短路容量与额定功率的比值。
中高压直挂	中高压直挂是指电力电子设备（如储能变流器或光伏系统）不经并网升压变压器，直接接入3kV及以上中高压电网的先进系统架构。
级联	级联是指多个对象、系统或事件按顺序连接或依附发生，使前一个环节的输出直接影响或触发后一个环节的机制。
固态变压器	固态变压器又称电力电子变压器，是一种将电力电子变换技术和基于电磁感应原理的高频电能变换技术相结合，实现将一种电力特征的电能转变为另一种电力特征的静止电气设备。
柔性直流	柔性直流是基于电压源换流器的新一代高压直流输电技术，具备高度的可控性与灵活的运行方式。
虚拟电厂	虚拟电厂是一种通过先进的信息通信技术和软件系统，将分散在各处的分布式电源、储能系统、可控负载以及电动汽车等资源聚合起来，进行协同优化控制的智慧化电力调度系统。
电流谐波	逆变器电力电子设备的开关动作与非线性特性，向电网注入基波整数倍和非整数倍频率的正弦电流分量。
电压闪变	发电单元输出功率的快速波动引起公共连接点（PCC）电压有效值周期性变化，导致照明亮度波动并产生主观不适感。
直流分量	直流分量是指信号在时间上的平均值，它是一个与时间无关的常数，对应频域中频率为0Hz的成分。
DSO	配电系统运营商，是负责管理、维护和运营中低压配电网，以确保电力安全、稳定、高效输送给最终用户的专业机构。
TSO	输电系统运营商，是使用固定基础设施在国家或地区层面上负责输送电力的能源输送公司。
通信接口	通信接口是不同设备或系统之间进行数据传输和信息交换的物理连接与规范。它定义了数据的传输方式、速率、距离和电气标准。
电网模拟器	电网模拟器是一种能够精确复现真实公共电网特性与工况的可编程电力电子测试设备或软件仿真系统。

术语	释义
故障电压穿越	电网故障引起电压跌落或升高时，发电单元在规定电压一时间包络内保持并网运行，支撑电网恢复，而非立即脱网。
孤岛	电网失电后，分布式电源继续向局部线路与负荷供电，形成独立带电的“孤岛”，威胁检修人员安全、损坏设备并妨碍重合闸。
虚拟惯性	通过控制算法模拟同步发电机的转子惯量特性，使变流器在电网频率发生变化时，能够自动、快速地调节有功功率输出，以抑制频率变化率（RoCoF）并减缓频率偏差的扩展。
黑启动	构网型变流器在断开电网、无外部电能供应的情况下，能在规定时间内自行启动。
有效阻抗	在构网型装置的戴维南等效模型中，有效阻抗指的是内部受控电压源与规定外部端口之间的总等效阻抗。它既包含变压器、滤波器等物理阻抗，也包含控制作用形成的等效阻抗。
启动时间常数	描述构网型变流器惯量特性的参数，与同步发电机惯性时间常数相对应。 $T_A = \frac{\left(\frac{\Delta P}{P_R}\right)}{\left(\frac{\Delta f}{f_N}\right) \frac{df}{dt}}$
并网容量	并网容量是指发电设施（如光伏电站等）已经建成并正式接入国家或地区电网，能够向电网输送电力的最大额定功率或实际容量。
装机容量	装机容量是指一个发电厂或一个区域电网具有的发电机组总容量。
消纳	消纳指将风电、光伏等新能源产生的电能接入电网并被用户消耗，避免电能浪费。
绿电	绿电是指生产过程中二氧化碳排放量为零或趋近于零的可再生能源发电。
车网互动	车网互动是指新能源汽车通过充电桩与电网进行电能和信息双向流动的技术体系。
拓扑优化	拓扑优化在电力系统中是通过改变电网中开关、断路器或变压器分接头的状态，调整输电线路的投切与连接方式，从而改善电网运行性能的技术。
分布式电源	分布式电源是指不直接与集中输电系统相连，分布在用户端，接入35kV及以下电压等级电网，以就地消纳为主的电源。
集中式电源	集中式电源是指将电源设备统一安装在一个指定区域，通过公共母线或电网向多个负载或设备集中分配电能的电源。
宽频振荡	宽频振荡是指电源、电网与电力设备之间在非工频频段（涵盖亚同步、超同步、高频等多个频段）以一个或多个固有频率复杂交互而引起的电压、电流剧烈波动现象。
短路容量	短路容量是指电力系统在发生短路时，短路点视在功率的大小，用来衡量电网的供电强弱和承受短路故障的能力。
集中式升压	集中式升压是指在大型光伏或储能电站中，将大量的电池簇或光伏组串在直流侧并联汇集起来，接入一台大功率的集中式逆变器或变流器，转换成交流电后，再通过共用的升压变压器将电压提升至中高压并入电网的技术方案。
组串式升压	组串式升压是一种将组串式电力电子变换器与升压变压器高度集成在一起的新能源电力转换技术。
电能质量	电能质量是指电力系统中电压、电流和频率等电气参数符合国家标准和设备正常运行要求的程度。

德国莱茵TÜV大中华区

TÜV Rheinland Greater China

联系人：梁英

电话：+86 21 6081 4532

gc-marketing-intelligence@tuv.com

www.tuv.com

LEGAL DISCLAIMER

This document remains the property of TÜV Rheinland. It is supplied in confidence solely for information purposes for the recipient. Neither this document nor any information or data contained therein may be used for any other purposes, or duplicated or disclosed in whole or in part, to any third party, without the prior written authorization by TÜV Rheinland. This document is not complete without a verbal explanation (presentation) of the content.

TÜV Rheinland AG