

微电网的开源机会

推动能源弹性创新和克服
市场障碍的五种方法

2023 年 6 月

Jessica Groopman
与 Jeff Lindstrom
Intentional Futures

前言作者：
Chris Xie 和 Yue Chen
Futurewei

合作伙伴：

 OLF ENERGY

 intentional futures

赞助商：

 FUTUREWEI
Technologies

开源微电网行业的挑战和机遇

OSS 具有**普及、规范和更好地整合**微电网的潜力，但开源微电网市场仍处于萌芽阶段。



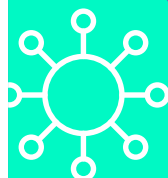
开源模型可通过减少进入时遇到的经济障碍并分享最佳实践、设计和工具来增加接入微电网的机会。



开源可加快微电网设计和上市，提高模块化水平和效率并实现更好的开放数据共享。



通过推动达成对标准的共识并促进公开透明的协作，**开源可以提高微电网的互操作性和标准化程度。**



开源商业模式的不同组成部分，例如软件、支持服务、培训、定制和模块化，可实现微电网创新和优化。

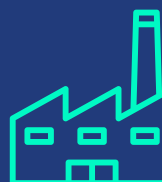
开源支持市场创新，通过开源商业模式、安全性、人才库和成本降低来大规模实现能源弹性。



需要进行充分协作和一致的政策制定来改革过时、分散的能源监管，朝着有利于集中式电网基础设施的方向发展。



必须应对来自行业现有企业的阻力，通过**开源项目和教育来解决安全问题。**



能源市场的现有企业在采用微电网方面面临经济难关和不确定性，**数据共享、教育和目标协调**将为其提供支持。



不同的利益相关者群体（从公用事业公司到政府再到社区）**需要建立一个中心枢纽来开展协作，参与并构建微电网环境。**

数据标准化、应用模块化、成本效益展示和市场协调将支持企业提高微电网互操作性。



通过专注于**教育、社区访问和技能培养**，可以减少技术采用方面的阻力和人才缺口。

目录

前言	4
导言	5
定义微电网和开源	6
微电网市场现状	7
微电网市场推动因素.....	7
微电网市场壁垒.....	14
微电网开发的开源环境	18
开源微电网现状.....	18
评估微电网的开源价值主张.....	21
价值主张 1: 开源可提高微电网采用的可达性.....	22
价值主张 2: 开源加速微电网设计	24
价值主张 3: 开源可以提高微电网的互操作性和标准化.....	26
价值主张 4: 开源支持微电网商业模式.....	29
开源微电网部署存在的挑战和差距	36
微电网生态系统的推荐发展路径	38
总结	41

前言

2022 年夏季，欧洲、美洲和亚洲遭受了史上罕见的热浪侵袭，这进一步印证了全球变暖的趋势。接下来的冬天，北加州同样迎来了前所未有的暴雨和大雪气候，这种极端天气在该地区十分罕见。这类极端气候状况使现有电力基础设施不堪重负，以至于不得不限制用电量，甚至还可能引发停电。根据 Gallup 2022 年的研究结果，基于目前对气候的预测，预计到 2030 年，高温天气将导致预估寿命大幅下降 17%。

然而，气候危机为我们提供了重新思考人类能源系统的契机。我们迫切需要转向更绿色、更具弹性和自我维持的能源系统。这不仅可以减轻气候变化的影响，还能够让基础设施有效应对极端天气条件引发的电力负荷波动。

本研究报告对微电网市场进行了全面剖析，揭示和反映了目前与目标的差距和面临的挑战。所幸，随着相关政府资金、政策支持和可持续能源解决方案（如开源微电网）激励措施的投入力度不断加大，该领域已迎来创新的成熟时机。

虽然开源微电网拥有巨大的潜在优势，但在带来机遇的同时也带来了一系列挑战。如果我们能探明一条清晰明确的战略性路径来解决这些挑战所带来的问题，我们将走上真正自由、安全和可持续的能源发展之路。当下时机已至，应把握眼前机遇，努力建设一个能抵御气候变化，以清洁、可靠能源为动力的未来。

感谢 Intentional Futures 的 Jessica Groopman 和 Jeff Lindstrom 为这份研究报告付出的不懈努力。我们还要向 Linux 基金会研究中心的 Hilary Carter 表示诚挚的谢意，她与我们有着共同的愿景，并自始至终发挥协同作用。此外，我们还要感谢为本报告做出贡献的许多领域专家和合作者。我们希望这份研究报告能为您追求能源自由提供有价值的信息。

Yue Chen, *Futurewei* 技术战略部主管

Chris Xie, *Futurewei* 开源战略部主管

导言

近年来，经济、环境和社会混乱加剧，能源弹性的需求进一步增加。微电网是一种小型本地能源系统，独立于传统公用电网连接和运行，正在成为强大的多功能解决方案。有几个因素将帮助扩展微电网；这份分析报告探讨了开源生态系统的作用。

根据 Guidehouse Insights 的数据，随着商业、工业、军事、机构和远程实现纷纷采用微电网，全球微电网市场正以 17.6% 的复合年增长率 (CAGR) 增长。¹大范围的脱碳、农村电气化和国家安全投资趋势，加上对数字、无线和云技术的依赖日益增长以及相关的网络安全威胁，正在拉动升级和新建微电网的需求。但是近年来，供应链中断、现有企业的阻力、互操作性挑战以及分散的标准和法规却阻碍了市场的加速发展。

虽然“开源微电网”市场如今才刚刚起步，但开源预示着通过克服这些障碍更快地加速微电网创新的巨大潜力。本研究分析了微电网市场挑战和推动因素的现状，同时列举了开源微电网的前景和其他行业的开放式创新。我们确定了开源生态系统促进微电网市场采用的五种方式：

1. **扩大微电网的接入范围**，在新兴市场普及能源获取以及为所有人提供微电网资源和教育
2. **通过实现模块化和效率以及开放数据共享**，加快微电网设计和上市。
3. 通过提高整个堆栈的生态系统协作、共识、透明度和兼容性，**提高互操作性**和标准采用率
4. 通过软件、支持和咨询服务、培训和认证、定制和集成、协作伙伴关系以及推进模块化，**实现微电网商业模式**
5. **支持市场创新**，通过开源商业模式、安全性和成本降低来大规模实现能源弹性。

该报告为要参与的关键利益相关者提供可行的见解和建议。近期，开源可以帮助发展中经济体促进能源获取。日后，开源将让整个微电网市场受益，涵盖广泛的利益相关者生态系统，从公用事业公司和金融机构到行业、政策制定者、开发商和社区。在气候变化莫测的时代，我们需要尽快扩展分布式可再生能源，利用开源工具和程序来帮助打造公平的竞争环境。

定义微电网和开源

微电网是明确定义的电气边界内一组互连的负载和分布式能源，相对于更大的电网，充当单个可控实体。微电网可以与电网连接和断开，使其能够以并网或孤岛模式运行。微电网是一种提高能源弹性的相邻技术设计，并且可以与虚拟电厂 (VPP) 或分布式能源管理系统 (DERMS) 等其他技术叠加使用。

开源指在开放许可条件下获得源代码的软件。该软件不仅可以免费使用，而且具有必要技能的用户可以检查源代码，修改并运行自己的代码，帮助修复错误，开发新功能等。有数千名志愿者为一些大型开源软件项目做贡献。开放定义在很大程度上基于早期的开源定义，该定义规定了软件可以被视为开源的条件。²

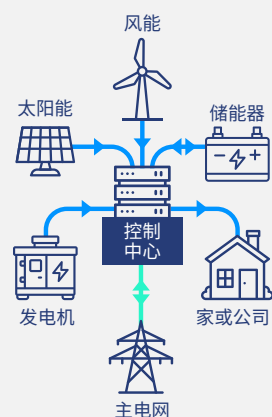


图 1
利用微电网

微电网是独立的能源系统，可以连接到更大的电网或充当“孤岛”。

存储器 可以存储多余电力的电池或电池系统；在使用间歇性分布式能源（例如太阳能）时至关重要。

负载 任何消耗微电网产生的电力的物体，例如房屋。

控制器 负责处理微电网分布式能源和较大电网的存储器的复杂组合。

图像来源：威斯康星州杂志上的研究报告

纳米电网

纳米电网是一种本地能源自给自足系统，通常具有“孤岛功能”，类似于具有三种不同特征的微电网：

1. 纳米电网规模较小，部署（通常）比微电网更快、更容易且具有更多模块化特征。
2. 纳米电网针对客户和单个建筑物进行更多本地化设置，也更倾向于直流电配置，并且可以为用户提供更多定制机会。
3. 与其他纳米电网、微电网和公用电网的兼容性和连接可以催生出聚合资源，从而有助于创建虚拟电厂 (VPP)。

分布式能源

分布式能源 (DER) 是小型模块化能源生成、存储和需求响应技术，可根据需要提供电容或能源或负载减少。分布式能源系统通常产生不到 10 兆瓦 (MW) 的电力，通常可以调整规模以满足特定需求并进行现场安装。分布式能源系统可以连接到当地电网，也可以在独立应用中孤立存在。分布式能源技术包括风力涡轮机、光伏发电 (PV)、燃料电池、微型涡轮机、往复式发动机、电池、飞轮、HVAC 系统、热水器和电动汽车。

分布式能源资源管理系统

一种基于软件的解决方案，用于跨客户、电网或市场应用实时监控、控制和调度并网及电表后的分布式能源。这些资产可能是公用事业公司、第三方或客户所有，并由公用事业公司直接或间接控制的资产。在配电层面有源功率优化需求的推动下，DERMS 可以解决特定公用事业配电馈线上的电压骤降和浪涌问题。

虚拟电厂

一种借助软件 and 智能电网，通过聚合和优化平台来远程自动调度和优化分布式能源的系统，通常将零售市场与批发市场关联起来。在市场信号和定价的推动下，VPP 可以处理系统范围内的频率变化。

微电网市场现状

微电网市场推动因素

微电网正在兴起。Guidehouse Insights 表示, 2022 年全球市场规模超过 116 亿美元, 预计到 2030 年将达到 500 亿美元以上, 复合年增长率为 17.6%。³尽管微电网已经存在了几十年, 但当今市场正在大量使用一系列可再生能源, 而不是传统的柴油供电网络。各个地区正在扩大微电网市场的产能和应用。⁴

但是开发大量能源并不是唯一的诱因; 在几个趋同趋势的共同推动下, 最近正在激起人们对能源开发的兴趣并加快其投资进度。

图 2

各地区的清洁能源微电网产能

全球市场: 2022-2031 年 (Guidehouse)

来源: GUIDEHOUSE INSIGHTS

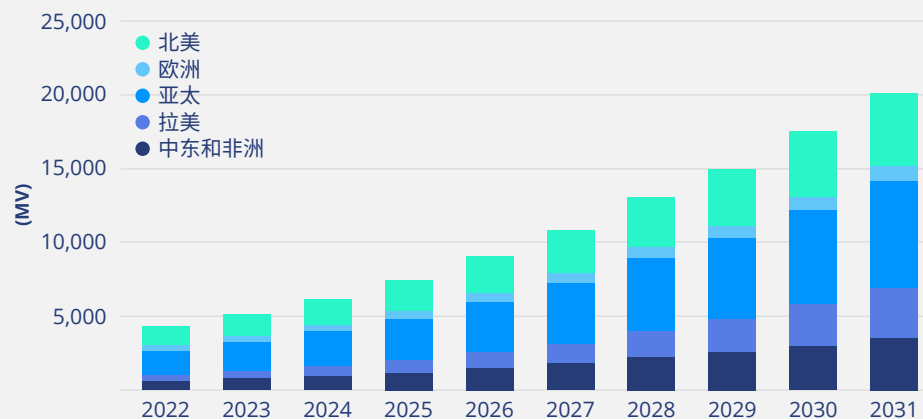


图 3

主要微电网市场



- 远程 44%
- 公用事业公司分配 14%
- 商业和工业 26%
- 社区 6%
- 直流电 0%
- 机构/校园 6%
- 军事 4%

按技术选择微电网产能



- 生物质 4%
- 柴油发电机组 12%
- 储能器 19%
- 燃料电池 4%
- 水力发电 3%
- 微型涡轮机 6%
- 天然气发电机组 9%
- 太阳能光伏 39%

来源:
GUIDEHOUSE
INSIGHTS

表 1
微电网市场
推动因素



2. 利益相关者的兴趣日益浓厚

随着投资者面临的脱碳压力越来越大，政府、军队、企业、城市、消费者等各方在提高能源弹性、主权和风险缓解方面的需求也日益增长。微电网是一种灵活且可扩展的解决方案。



1. 弹性、环境和社会需求

极端天气事件、老化的电网基础设施和停电风险将让人们们对微电网产生兴趣并推动其采用，以提高能源可靠性；私营和公共部门纷纷采用各种减缓气候变化和适应气候变化的投资以及“净零排放”策略，促使微电网市场大幅增长。



3. 新法规和政策激励措施

多样化的新气候立法的出台将给微电网和电动汽车及建筑等邻近领域带来利好。世界各地的工业化国家以及发展中国家的公共和私营部门都提供有利的政策。



4. 经济激励措施和新的商业模式

不断上涨的燃料成本和不断下降的可再生能源成本将共同推进微电网的采用。与此同时，技术进步使富有创新精神的供应商和大型公用事业公司能够将数字化与分布式能源关联起来，从而以新颖的方式实现能源基础设施和服务的商业化。

弹性、环境和社会需求：微电网是动荡时期的可靠能源。
我们获得可靠能源的途径并不平坦的原因有很多。面对老化的电网基础设施、不断增长的能源需求、日益增加的网络安全威胁、政治不确定因素以及日益频繁的极端天气事件（很可能与气候变化有关），微电网俨然成为传统高度集中电网的可行替代方案。仅去年一年，美国就遭遇了 22 起与极端天气和气候相关的灾难事件，每起事件损失都超过 10 亿美元，累计损失近 1,000 亿美元。⁵

“为了使电网在受到极端高温、洪水、火灾、大风和风暴等日益严重的威胁时仍能保持可靠性和弹性，我们需要具有本地控制措施的分布式系统，使社区能够充分享受分布式清洁能源投资带来的好处。依靠集中发电远距离输送电力的传统系统将不足以应对我们如今所遭遇的气候变化难题。”

- MARISSA HUMMON,
UTILIDATA 首席技术官

这些挑战不再孤立存在于某些地区。世界各地的人民(和政府)都希望提高能源主权和可靠性。在文化层面,人们对能源主权的渴望日益增长,包括强调本地化经济体和受移动网络启发的点对点基础设施。在制度层面,弹性问题是国家面临的首要安全威胁之一。事实上,美国、中国、印度和澳大利亚等多个国家的政府已将微电网纳入其气候和国家安全投资中。⁶

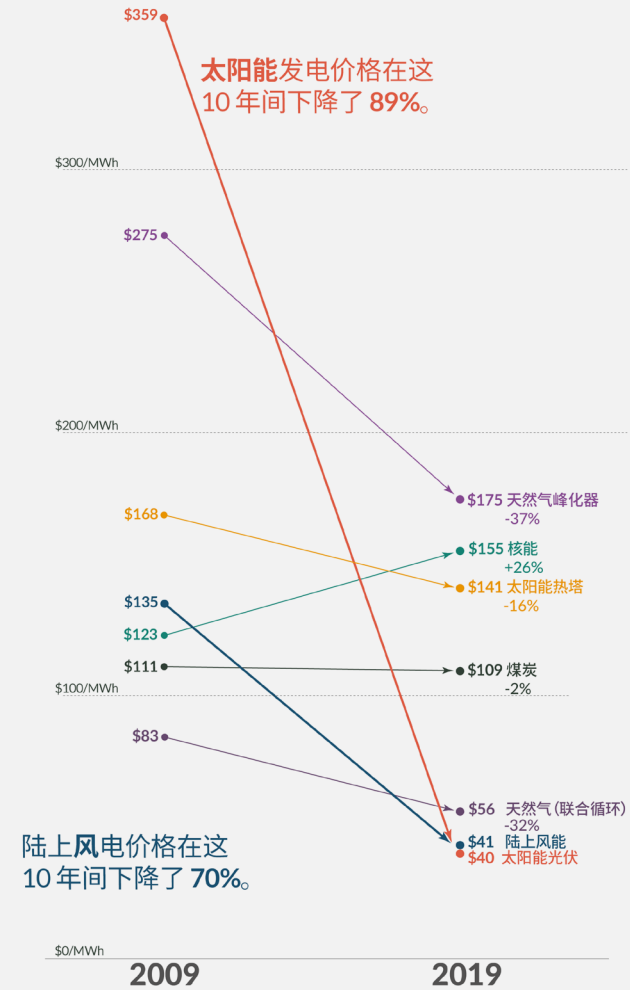
弹性方面的这种需求是一种更广泛的环境和社会投资趋势,可支持气候变化减缓和适应气候变化战略顺利实施。虽然目前仍有许多微电网依赖柴油(最不清洁的矿物燃料之一),但是如今微电网正在利用越来越多的可再生能源,例如太阳能、风能、氢能或生物发电机。向可再生能源过渡对于工业化经济体减少排放量和促进脱碳战略实施至关重要。

微电网为非洲、印度和东南亚等发展中地区提供了从矿物燃料转向可再生能源和农村电气化的通途。微电网也被视为重要的工具,通过让更多人用上可靠的能源和互联网基础设施来帮助减少贫困现象和弥合经济不平等情况。⁷肯尼亚 Sidonge 村安装微电网五年后,当地居民反映,女孩的入学率提高了 180%。⁸

图 4
新建电厂的电价

新建电厂的电价

电价以“平准化能源成本”(LCOE)表示。LCOE 涵盖电厂本身的建设成本以及电厂在其生命周期内的持续燃料成本和运营成本。



资料来源: OURWORLDINDATA.ORG

经济激励措施和新的商业模式：微电网可以降低成本并实现新的创收。能源成本的大幅提高使微电网市场直接受益，不仅提高了可再生能源在微电网能源中所占的比例，还提高了微电网部署的经济效益。2009 年，建造一座太阳能发电厂的成本比新建一座矿物燃料发电厂的成本高出 223%。⁹十年来，太阳能和风能的日益普及使可再生能源发电成本降低了约 90%，有效地扭转了上述局面，因为现在可再生能源比煤炭便宜。随着微电网安装数量的增多，可再生能源的成本将不断下降。近年来，随着燃料成本不断上涨、碳定价举措不断增多以及税收和监管激励措施不断增多，可再生能源变得更具竞争力。¹⁰

过去几十年的实验和技术进步也成为证明微电网有利可图的商业案例。这使得更大的公用事业公司纷纷参与进来：最近的一项研究发现，虽然只有 13% 的公用事业公司、制造商和网络运营商声称完全积极参与微电网事业，但已有约 28% 的公司“积极参与”，另外 39% 的公司则处于“探索微电网机遇的早期阶段”。¹¹鉴于大型电网运营商的投资回报 (ROI) 预期，新兴商业模式涉及面很广，对于更广泛地采用微电网至关重要。我们的研究发现以下商业模式趋势正在推动微电网实现商业化：

1. **数字控制技术的进步可实现能源即服务 (EAAS) 模型**，提供商采用其中的软件、遥感、分析等技术，能够通过远程监控和优化提供基于云的“即用即付”能源服务模式。目前美国也在机构、商业和工业微电网中应用 EaaS 模型。在这些模型中，公共/私人实体负责设计、建造、拥有、运营和维护微电网，而客户几乎不承担任何风险，也不需要预先投入任何资本。
2. **大型公用事业公司与当地社区合作**，基础设施和能源管理是其中两个相互独立的业务。社区将从当地（绿色）基础设施以及更高的效率和可靠性中受益，电网运营商则负责管理负载和基础设施，以确保灵活性和稳定性，同时增加可再生能源在配电网中的份额。
3. **追溯安装**，其中公司提供差异化的产品/服务，利用现有设备构建微电网，或通过整合新的可再生能源来更新现有的矿物燃料备用电力系统。
4. **系统集成和管理**，其中供应商或其他第三方帮助配置和实施完整或模块化微电网和/或收取服务和维护费用。
5. **产消者和点对点模型**，其中本地能源节点（住宅、车辆或商业）可以通过微电网产生更加可持续的电力，并将多余的能源出售给社区或公用事业公司的其他成员，从而降低所有人的成本。

尽管这些模型还处于萌芽阶段，但它们正在全力推动微电网的采用。与此同时，从标准定价机制到区块链代币化再到监管，这几个相邻趋势可能会进一步影响微电网的经济激励措施。

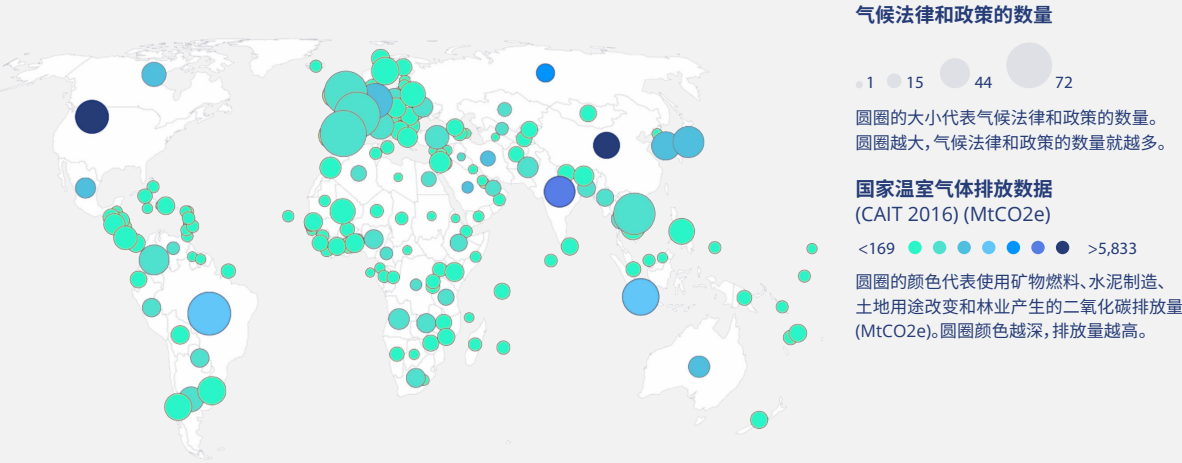
新的监管和政策激励措施：微电网和分布式能源出现在新兴立法中。在世界各地，越来越多的碳减排、电气化和能源弹性相关气候政策都对微电网有利。主要国家正在通过重要的法律先例。¹³

在美国，最近的《通胀削减法案》指定约 3,700 亿美元专门用于能源转型，包括生产和投资税收抵免，这有助于降低投资成本并激励分布式能源的使用。其他美国政策，例如联邦能源管理委员会第 2222 号法令，通过实现基于资产的需求响应（即现场能源参与电网运营），帮助聚合分布式能源与批发市场中的传统发电厂和其他电网资源进行同业竞争。州政府也出台了一系列促进微电网的政策：根据智能电力联盟 (Smart Electric Power Alliance) 和 EnerKnol 的数据，2015 年至 2020 年间，18 个不同州的立法者提出或颁布了 112 项法案。¹⁴

大型公用事业公司与当地社区之间的合作可建立新的商业模式。E.ON（欧洲最大的能源供应商之一）、亚琛工业大学和瑞典锡姆里镇展示了私营部门、地方政府和积极参与的公民之间的合作如何为所有人创造价值。该项目与利益相关者合作测试和实施当地微电网，通过连接当地太阳能电池板、风力涡轮机、电池储能、智能能源管理和互连用户，来显著减少电力消耗和碳排放量。该系统内置的点对点能源交换和自动化功能有助于平衡和优化电网。“产消者”因与邻居共享资源并回馈到电网而获得补偿。此次合作是欧盟 Interflex 项目的一部分，旨在“研究如何利用当地灵活的设施来减少配电网限制”。¹²

图 5
应对气候变化的全球法律

资料来自 CLIMATE-LAWS.ORG，并根据知识共享 CC BY-NC 许可协议提供。



“从车队电气化到扩大电动汽车、太阳能、风能和储能的税收抵免范围，《通胀削减法案》提到‘微电网’超过 10 次！”

- JANA GERBER, SCHNEIDER ELECTRIC 北美微电网总裁

**利益相关者的兴趣日益浓厚：
微电网正在创造更广泛的市场机会。**

从城市到公司，再从社区到消费者，这些消费群体对微电网的需求正在增加。电气化将扩大电力需求的范围。电动汽车、公共汽车、卡车、火车、滑板车、建筑、电动汽车充电站以及无数其他形式的基础设施不只是需要可靠的电力；它们还可以将能源回馈到更大的电网中。因此，世界各地的市政当局正在评估微电网，欲将其纳入智慧城市计划，共筑未来的关键基础设施。

“随着电网不断暴露其脆弱性，公司意识到停电成本高昂（以及现场或本地供电的好处）。例如，如果停电超过三个小时，许多杂货店就不得不扔掉所有东西。这段时间相当短。”

- CAMERON BROOKS, THINK MICROGRID 执行董事

除了城市之外，任何公司都可以从微电网带来的长期成本节约和能源安全好处中受益，特别是那些拥有大型办公室或园区或数据中心的公司，如果停电，这些公司可能损失巨大。微电网还可以帮助企业减少备用柴油发电机等设备对矿物燃料资源的依赖。从工业方面来看，大型制造厂通过采用新的建筑和配电技术来发挥微电网的作用，从而推动微电网市场实现发展。除了上述弹性优势之外，面临巨大脱碳压力的工业界也愈发意识到微电网在进一步提高效率和回报方面的潜力，无论是支持电动汽车充电的基础设施还是提供电网服务。农民、学校、零售商、医院、汽车和科技公司纷纷开始效仿。¹⁵

美国的能源部和两党基础设施法中制定了 105 亿美元的电网弹性和创新合作伙伴计划，旨在加快部署转型项目，帮助电力部门确保基础设施可靠运行。这笔资金可能有利于微电网的采用，一旦实施，可提高电网灵活性，助力电力系统抵御日益增加的极端天气和气候变化威胁。

微电网还呈现向更小型、更超本地化发展的趋势，这对小公司以及社区和家庭有利无弊。彭博社 NEF 研究报告称，2018 年之前微电网的平均规模为 7.7-7.9 MW，现在约为 1.7-1.9 MW。¹⁶这种转变与人们在更多能源自主权、环境问题和地方主权方面日益增长的政治和文化需求相结合，微电网可能在“产消者”模式中发挥重要作用，采用这种模式的家庭或小社区都使用和销售可再生能源和储能器。荷兰的一份报告发现，微电网技术可以通过各地的多个家庭之间分散的能源共享，使当地“技术经济”实现 90% 的自给自足。¹⁷

“微电网正在成为新兴市场能源获取和能源转型的平台。他们正在帮助数百个国家让电网摆脱矿物燃料的束缚，并获得高度可靠和享有主权的电力。”

- MANOJ SINHA, HUSK POWER 首席执行官

微电网市场壁垒

尽管推动微电网市场的因素有很多，但微电网也面临着阻碍其广泛采用的重大挑战。我们的研究揭示了阻碍微电网市场增长的以下障碍。

1. **现有企业继续抵制微电网的广泛部署。**传统权力结构往往会抵制变革，并且大规模实施变革速度缓慢。微电网市场面临着现有公用事业提供商以及一些行业和政府利益相关者制造的各种障碍。

一些基础设施较旧的“先进”经济体（例如美国）在突破文化障碍进行创新或摆脱根深蒂固的商业模式方面进展缓慢（或动力不足）。

“是缺乏意识，还是故弄玄虚维持现状？”一位行业资深人士提出。“当需要转型时，公用事业公司往往会反对。他们不想发展和适应市场；他们希望根据自己的需求来控制变革。大型公用事业公司控制微电网的能力将是影响微电网采用的一个重要因素。”

公用事业公司对新的电网模型或高级软件功能（尤其是使用开源方式构建的软件功能）无动于衷，通常缘于网络安全或风险增加。不过变革动力因地区而异。以支持脱碳而闻名的欧洲较少关注微电网，而更多地关注大规模可再生基础设施（例如风能）以及各国之间的交易（通过虚拟发电厂）。虽然一些大型公用事业公司已经采用微电网，特别是在澳大利亚，但很少有人投资进行与传统基础设施或 VPP 的整合，更不用说全面转型了。

一些人也指出了需求方的障碍，例如与供应商有关的密集采购规则，或者供应商必须在其地区或用例环境中运用的通用“买家标准”。对成熟品牌或实施的这类需求可能会给开源微电网部署带来更大的挑战。

在一些国家，由于石油和天然气行业的既得利益，政府在微电网的采用方面进展缓慢。与抵制可再生能源的煤炭行业类似，世界某些地区以柴油为基础的经济体和供应链参与者在向专注于可再生能源的微电网转型时几乎毫无经济收益。其他国家发生的政府腐败也会阻碍微电网的发展。例如，接受采访的微电网供应商提到某些国家政府官员拒签项目，除非许以个人利益。

2. **零碎的标准和互操作性低将影响微电网市场创新。**与许多其他技术市场一样，通用标准以及采用者轻松插入不同制造商的组件并在各组件之间交换信息的能力是高效部署和民主化访问的关键促成因素。微电网在几个方面都存在不统一问题：

- 组件硬件和系统架构（例如电池、数字继电器）以及组件技术（例如开关设备、太阳能逆变器）缺乏标准，从而阻碍“构建块”实现模块化和商业化
- “中间件”控制层（例如软件、API、电力流的技术监管）缺乏标准，无法帮助提取不同的配置并实现商业化，例如以新应用或市场的形式
- 缺乏供需控制标准机制（例如价格），无法轻松实现跨本地/分销/批发市场的交换

这些问题导致微电网与大型公用事业公司（及其专有控制制度）之间的互操作性低，从而减少能源弹性机会并影响新业务模式创新。

微电网部署涉及大量变量 — 位置、用例、时间、设备、电源等等 — 同时解释为什么配置（特别是软件）趋向于高度定制，并展示对提高标准化程度的潜在需求。

“互连性是关键。当数据、通信和设备的通用协议快速组合在一起时，将加速整个微电网行业的发展。以汽车行业为例：一辆汽车中有数百个零部件来自世界各地。这些零部件必须全部以客户看不见的方式无缝组装在一起才能像汽车一样行驶。”

- STEPHEN PHILLIPS, OPTIMAL POWER SOLUTION 首席执行官

“互联网之所以能发挥作用，是因为我们拥有一套人们必须遵守的核心技术标准。微电网目前尚不需要满足这一条件。如今，几乎所有微电网都采用定制设计和手工建造，更像是中世纪的工艺品而不是商品。从太阳能电池板到插头再到电池的电气技术在实现即插即用操作的模块化性能方面仍然表现不佳。”

- BRUCE NORDMAN, 劳伦斯伯克利国家实验室研究员

3. 现有政策和监管制度仍有待适应，这将阻碍微电网商业模式创新。虽然最近出台的一些政策（如上所述）大力支持微电网，但大多数现有能源政策仍缺乏有利于微电网发展的指导或激励措施。更全面的能源监管状况仍然非常有利于集中式电网基础设施的发展，但不足以推动微电网的部署。

挑战在于改变现有的监管制度，以激励公用事业公司更好地实现本地化能源弹性。例如，在美国，受监管的公用事业公司通过投资基础设施和向能源用户收费（而不是通过效率、公平或创新等市场机制）来盈利。因此，根据现有政策，当客户安装微电网时，公用事业公司通常不会盈利。事实上，在许多情况下还会减少营业收入。另一个相关挑战在于许可，包括在获得地方当局部署微电网许可方面产生的分歧和延误。

在某些地区，挑战不在于改变现有政策，而在于制定新政策，帮助公用事业公司实现可持续的业务模式。例如，监管机构必须考虑“产消合一”微电网运营商如何获得与传统电网运营商一样高的收入，来补偿基础设施维护成本。

“不仅仅要推敲现有法规的措辞，还要解决更多结构方面的问题。例如，维护配电系统的资金来自按能源消耗比例向能源用户收取的费用。在过去，这笔钱用于补偿电网的使用和维护，那么监管在确保新模型盈利和正常运行方面发挥什么作用呢？”

- FERDINANDA PONCI, 亚琛工业大学复杂电力系统自动化研究所教授

政策制定者普遍缺乏对微电网了解不深、立法变革步伐缓慢以及现有企业不愿做出与提案和路线图无关的承诺或合作，这些现状无不加剧这些挑战。¹⁸

“政府和公用事业公司都无法阻止微电网的发展。但是，他们肯定会减缓微电网进度、限制人们讨论相关内容并影响政策制定。”

- CAMERON BROOKS, THINK MICROGRID 执行董事

4. **利益相关者采用微电网时仍会遇到学习曲线障碍。**了解微电网部署涉及的广泛应用、技术、术语和专业知识是微电网市场发展成熟面临的重大障碍。政策制定者和市政领导可能会将一种类型的微电网（军事应用）与其他类型（例如社区）及其独特的价值主张混为一谈。为不同用例寻找高水平定制和零碎解决方案让电网运营商和供应商手忙脚乱，更不用说寻找具有设计和管理微电网所需技能和专业知识的人才了。客户和公民通常不知道微电网的好处或要求，也不知道微电网与太阳能电池板和现有电网有何不同。最后，我们都需要学习如何使用新技术并了解其前景和危险。

“人们仍然难以理解微电网；甚至这个术语对某些人来说太专业了。我们发现，将微电网称作本地可持续和可再生发电厂往往更能引起客户的关注。”

- VIPUL GORE, GRIDSCAPE SOLUTIONS 总裁兼首席执行官

5. **通货膨胀和供应链中断等宏观经济趋势也对微电网市场产生了冲击。**尽管这些挑战最近才出现，但不断上涨的价格、能源成本和复杂的供应链瓶颈对全球微电网建设提出了挑战。由于微电网基础设施涉及半导体、电池和太阳能电池板等关键部件，如果供应链发生延迟，则会导致设计周期更长、竞争压力更大，最终导致安装量减少。

读者可能会注意到，某些趋势分别代表微电网采用的推动因素和遇到的障碍。与许多新兴技术一样，不同地区以不同的方式推动市场发展。俄罗斯-乌克兰战争将进一步拉动欧洲摆脱对俄罗斯石油的依赖并更快实现可再生能源多元化发展的需求。然而，欧洲对大规模可再生能源计划的重视在很大程度上忽视了微电网的存在。欧洲人经常认为微电网等同于是远程应用，例如非洲或东南亚的远程应用。在澳大利亚和北美，微电网用例的多样性愈发丰富，利益相关者的兴趣也日益浓厚，而日本早期的微电网采用愈加转向 VPP。

中国和德国等一些国家正在资助发展中国家的电气化基础设施（和互联网），这会降低采用者的模型采用成本。与扩展大型集中式电网相比，微电网可以更加经济实惠地向农村地区供电，而负担得起、日益可再生、自给自足的能源和互联网接入可帮助低收入居民发展经济。尽管印度已有电网，但许多非政府组织仍在投资当地的能源接入，以减少频繁停电现象并扩大接入范围。

尽管美国电气化进程缓慢，但是政策推动力度正在增强。印度等国家在相关监管政策出台之前就已经拥有微电网多年，而包括尼日利亚在内的其他国家则更快地采纳了类似政策。正如他们所说，未来不可捉摸。

“在这个面临气候危机的时代，我们没有看到预期的增长情况。这是一个资本部署问题。在俄罗斯-乌克兰对战期间，我们看到大约 1,500 亿美元的补贴被用于支付天然气费用。想象一下，如果投资 1,500 亿美元建设微电网，我们将拥有数十年的能源供应！”

- MANOJ, HUSK POWER 首席执行官

微电网开发的开源环境

开源技术生态系统建立在开放、协作、透明和面向社区发展的原则之上，长期致力于实现可访问性、互操作性和创新。开源生态系统代表快速实现微电网创新的潜力无穷。微电网应用的广泛性及其分布式和本地化性质使微电网部署独具特色并且通常可以高度定制。这种复杂性以及多个系统相互通信的需求极大地拉动了人们对互操作性和标准制定的需求。

为了评估开源微电网的现状及其核心价值主张和存在的差距，我们采访了整个市场中的 17 位微电网领导，包括公用事业公司、规模不等的供应商、微电网设计师以及世界各地的研究和政策专家。我们还分析了微电网领域的开源活动，并调查了其他行业，以确定加速开源微电网采用的途径和建议。

“出于多种原因，我们需要加速微电网的采用，
但为了加速现有的所有供需趋势，开源可能是将微
电网提升到一个新水平所不可或缺的要素。”

- PETER ASMUS, 阿拉斯加能源与电力中心微电网战略与思想领导力研究组兼
职教师、高级顾问

开源微电网现状

尽管微电网市场在国际上呈不断增长的发展趋势，但“开源微电网”市场仍处于新生阶段。业内大多数人并不了解开源产品，而且目前开源技术在微电网供应商和采用者中的普及程度通常较低。我们确定了全球 20 多个开源微电网项目，以及微电网开发人员目前可以获取和使用的四个标准。下页的框架提供涵盖六个类别的开源微电网活动状况的示例视图：

开源微电网前景

标准				教育
OpenFMB Duke Energy、Siemens 等	Sunspec Modbus Sunspec	IEEE 2030.5 IEEE	Open ADR 伯克利实验室、Ford、NEEA、PGFA、Southern California Edison	Micro-Grid Academy 小城镇电气联盟 (Alliance for Rural Electrification)
建模和模拟工具				James E Rogers 能源获取项目 杜克大学
GridLAB-D 西北太平洋国家实验室	OpenDSS 电力科学研究院	Open Modelica Microgrid Gym 帕德博恩大学	tkRule-Based Optimized Service Restoration 亚琛工业大学 E.ON 能源研究中心	
VILLAS Framework 亚琛工业大学 E.ON 能源研究中心	Pymgrid: PYthon MicroGRID Total Energies	开放式微电网系统模拟器 GridApps-D	开放电力系统数据 Neon Energy	
软件与平台				基础
CoSiF IEEE	OpenPayGo EnAccess、Solaris	Hyphae LF Energy	开源微电网 (OSM) 德克萨斯大学	EnAccess
开放能源微电网控制器 国家可再生能源实验室	开放能源游乐场 RISE Interactive	电网交换结构 (GXF) LF Energy		Linux 基础
组件和硬件				
开放微电网 加州大学伯克利分校	自主电力交换系统 索尼计算机科学实验室	微电网一体化 爱达荷国家实验室		

*请注意，此前景规划提供开源微电网项目和支持实体的示例，并不是完整的列表。我们邀请社区帮助在 GITHUB 上共同创建此内容并参考 LF ENERGY 的[互动情况](#)。

- **开源微电网教育和培训:** 提供多种开源教育资源和培训计划，用于了解微电网技术和开发。
- **开源微电网标准:** 提供多种微电网开源标准，包括 OpenADR 和 OpenFMB 标准。这些标准可实现不同微电网系统和组件之间的互操作性，确保它们能够无缝通信和协同工作。
- **开源微电网建模和模拟工具:** 提供多种开源工具，用于建模和模拟微电网系统，例如 GridLAB-D 和 OpenDSS。这些工具使设计人员和开发人员能够评估微电网系统的性能并优化其设计和运行。
- **开源微电网软件 and 平台:** 提供多种开源平台，用于微电网开发和管理。这些平台提供集成各种微电网组件的框架，包括储能系统、可再生能源和负载管理系统。
- **开源微电网组件/硬件:** 提供一些开源组件，用于微电网系统，例如逆变器、控制器和传感器。这些组件可用于构建定制的微电网系统，以满足不同社区和环境的特定需求。

总之，开源微电网技术的前景多种多样且发展迅速。随着可靠的可持续能源解决方案的需求不断增长，我们预计该领域将不断创新和发展。



案例示例:

HYPHAE: 开源微电网控制器项目

Hyphae 项目由 Sony 和 LF Energy 合作开发，旨在开发大型能源提供商可以连接和了解的开源微电网。Hyphae 是一款自动控制器软件，可通过直流 (DC) 电网自动分配本地生产的可再生能源，以与交流 (AC) 电网互连。

Hyphae 旨在通过开发可转换为交流微电网的直流微电网解决方案来提高能源可用性、稳定性和独立性。行业专家 Antonello Monti 指出：

“直流微电网效率更高，为该行业指明了未来发展的方向。大多数微电网目前仍然采用交流电，但是，如果我们可以通过概念证明直流电可以转化为交流电，我们将实现更多的交流电采用和更广泛的互操作性，从而推动可扩展性。”

目前，Hyphae 正在为亚琛工业大学的巴士总站以及德国各地的其他一些企业和大学提供支持。未来，Hyphae 试图通过将 Hyphae 作为微服务集成到现有能源基础设施中来简化使用微电网的能源生产商与消费者之间的联系。

Hyphae 由 Hyphae 技术指导委员会参与管理，诚邀硬件提供商前来洽谈合作，以确保系统真正实现互操作性。

评估微电网的开源价值主张

开源在为微电网带来机遇和价值主张的同时，还解决了本报告前面所述的几个市场障碍。我们要求受访者确定微电网开源的主要好处以及需要克服的障碍和弥合的差距。我们还分析了微电网“技术堆栈”提供的机会。我们的分析发现，开源的价值主张可以支持跨多个层面的广泛行业协作、标准化和创新，如右侧表 2 中所示。

表 2
整个微电网堆栈的开源机会

	扩大 微电网采用的可达性	加速设计 共享和可组合性	提高互操作性和标准采用	市场创新 能源弹性规模效应
价值层面	能源获取/经济发展	效率	共识	上市时间
	以民主方式获取资源、教育	模块化	堆栈间的兼容性	成本降低和商业模式
		开放数据	透明 灵活性	安全改进措施 人才库
协作层面	利益相关者之间的协调和联盟： 教育 • 设计和框架共享 • 最佳实践共享 • 利益相关者联盟 政策设计 • 联合项目和开发			
	标准： 设定微电网系统中传输数据或连接节点的规则或程序，例如协议、技术标准、能量流机制			
	协议示例： 需求响应协议、数据通信、与公用事业公司的通信、定价管理			
微电网技术层面	数据建模与模拟： 跨微电网系统和有关微电网系统的数据流动，用于提供软件和机器学习程序培训，并对微电网系统进行建模和模拟			
	数据示例： 消费数据、负载数据、天气数据、定价数据、电源数据			
	软件 and 平台： 包含大约 20% 的微电网配置，例如能源管理系统、控制系统、API、算法			
	示例用例： 天气预报、能源预测、需求管理、系统平衡、负载控制、DER 聚合、仿真模型、优化建议			
	组件和硬件： 约 75% 的微电网配置包括硬件			
	小部件： 开关设备、控制器、继电器、逆变器、远程终端单元、智能电表、故障记录仪、其他物联网设备			
	电源： 太阳能电池板、电池、发电机、存储器			

价值主张 1: 开源可提高微电网采用的可达性

参与的经济障碍越少, 从中受益的人便越多。当今的开源软件与专有软件相比的一个显著特征是, 更加多样化的用户社区通常采用开源软件。产品越容易获得, 用户 (开发人员、设计师、产消者和工业用户等) 便愈发多样性, 他们的意见往往反映更广泛的需求和用例。

“操作系统可加速数字化的各个方面。无论规模大小, 均可借助其来突破障碍并通过民主化的方式进行新的构建、应用和商业化。”

- ANTONELLO MONTI, 亚琛工业大学教授兼研究所所长

新兴市场的能源和经济发展机会

新兴市场是开源微电网技术和构建块的主要受益者。在拉丁美洲和南美洲、东非和西非以及东南亚的部分地区, 世界上约 14% 的人口仍然无电可用¹⁹— 通过微电网可获得可靠的电力, 这种电力在发生极端天气事件期间更具弹性, 并且不受外国出口商的影响。

“许多社区根本没有能力支付 200 万美元的控制器。”

- VIVEK BHANDARI, POWERLEDGER 首席技术官

“通常, 系统没有多余资金来支持贫困社区。开源为我们提供社区平台, 并且投资显著减少。供应商的角色转向服务: 定制部署、云运营和维护。”

- MICHAEL GOLDBACH, NEW SUN ROAD 首席执行官

开源微电网还可以加快新兴市场的部署速度。我们采访的领导指出, 传统供应商和较发达的市场 (涉及清关、许可或其他执行部门) 往往行动非常缓慢, 而开源微电网构建块可以帮助较小的供应商和新兴市场更快地开展行动。此外, 微电网还是一款可扩展工具, 能够在帮助新兴市场从矿物燃料转型到清洁能源的同时推动经济发展。

“传统大型企业正在寻找机会参与价值数百万美元的微电网项目, 故而不会反对当地价值 10,000 美元的项目。通过开源, 每个人都可以了解该技术; 这不是一场竞争, 人人都可以参与进来。”

- VIVEK BHANDARI, POWERLEDGER 首席技术官

获得微电网的资源、相关培训和好处

以民主的方式获取通过开源共享的最佳实践、设计、工具和价值模型，可以帮助利益相关者加深对微电网的理解和掌握专业知识。作为全新的颠覆性技术系统，微电网同样面临着来自现有能源企业的阻力和质疑，并且通常大多数人对其了解不深。微电网知识曲线的受益人包括利益相关者、公用事业公司、产消者、开发商、政策制定者、业务采用者等。其中有许多人很难理解以下内容：

- 微电网的价值主张，例如成本效率、投资回报、安全性和弹性。
- 硬件组件、软件、网络之间的差异（例如，拥有太阳能电池板与连接到微电网）
- 多种不同类型微电网之间的差异（个性化定制解决方案、提供所需技能）
- 政策限制、新发展时机和变革机制



ENACCESS 使开源 DER 项目更容易实现

EnAccess 是一家总部位于荷兰的能源获取基金会，成立于 2017 年，其使命是通过直接支持能源系统建设者和能源用户等来支持、策划和促进全球能源获取。EnAccess 主要专注于可再生迷你电网能源管理解决方案，为硬件和软件“构建块”项目提供资金，为高风险、高回报的研究提供资助，并拥有一系列免费、可随时实施的开源硬件、软件和商业模式。他们致力于集成该领域尽可能多的开源项目，例如：

- [Micropowermanager](#)
- [Prospect.energy](#)
- [OpenPaygoMetrics](#)

EnAccess 已与 FirstElectric 等公司和 Access to Energy Institute 等非营利组织合作，共同构建各种可互操作的 DER 组件，包括智能电表和电池管理系统。在 EnAccess 这个活跃的生态系统中，DER 创新者、开发人员和用户通过有形、可访问的开源 DER 工具进行参与，这在大量专有组件和占主导地位的传统企业中显得特立独行。²⁰

价值主张 2: 开源加速微电网设计

我们采访的专家谈及，微电网开源最耳熟能详的好处是速度，通过了解、设计、实施微电网，最终所有人将得偿所愿。由于高度定制和低效协作，微电网部署面临延迟和成本不确定性。如果没有制定共享标准，开发人员必须浏览大量设备、协议、算法、能源和数据存储以及连接类型，才能确定适合每个客户应用的正确解决方案。

提高效率 and 成本效益

共享开源工具和最佳实践使开发人员能够通过相互构建来更快地推进微电网设计，而不是在每次实施时都从头开始重新设计。加速设计还可以为开发商和消费者带来成本和效率方面的连环效益。

“如果开源为开发人员提供一种更简单的方法来开发微电网，就会减少设计阶段花费的时间，同时提高更多项目的产能，从而为建设者的每个项目创造更多的收益。例如，如果为开发人员提供一份开源协议，通过转换器将其添加到代码中，从而提供从公用事业公司连接到微电网的标准，则将有助于避免项目的混合和匹配问题，否则会导致延误和高昂的成本。减少时间和简化实施也可以降低总体成本，最终用户也会从中受益。”

- HEILA TECHNOLOGIES 总裁 JORGE ELIZONDO

加速模块化设计

“构建块”有助于抽离各种/自定义配置的复杂性。为了帮助解决高度定制问题并减少部署时间和成本，全球数百家公司正在努力将微电网转变成模块化产品。这种方法涉及将商品化组件或捆绑产品关联起来。这种方法包括：

- 预先配置的关键硬件组件
- 通过软件（通常在云端）定制操作的能力
- 简化的部署程序，减少安装过程中的现场工程需求

据 Guidehouse 称，到 2029 年，模块化市场份额预计将增长至 22.9%，占部署的微电网项目中的大部分。²¹ 开源甚至可以进一步加速微电网模块化趋势，扩大模块化的范围和可达性，加快模块开发的设计时间，实现最佳实践共享和协作，并从目前主要基于硬件/组件的模块化扩展到未来基于软件或应用程序的模块化。

加速开源数据

共享系统数据以及有效和无效数据也可以加速微电网的设计和采用。

我们采访的专家指出了为以下领域提供更多开放数据的价值：

- 项目可行性和最佳实践开发
- 优化混合系统（在不同电源之间切换）
- 了解系统性能的经济和财务效益
- 支持规划者、开发商、银行和其他想要支持项目的人
- 拥有跨管辖区呈现和访问微电网数据的标准方法

向投资者提供微电网性能数据，可以帮助他们更快地了解微电网的效率提升、弹性增强和整体财务效益（相对于使用传统基础设施或不使用任何基础设施）。

“微电网的发展不仅仅是一个技术工程问题，更是一个金融工程问题。为投资界提供开源数据将是简化融资决策、协调和可操作性的佳选。”

- STEPHEN PHILLIPS, OPTIMAL POWER SOLUTIONS 首席执行官

评估微电网的政策制定者也可以从开放数据和资源共享中受益。

“只要监管到位，鉴于微电网的稳定性，资金就会源源不断地流入。这一切在印度和美国已得到印证。我们已经看到，一旦某个地区制定了一项政策，其他地区就会纷纷借鉴和效仿。”

- MANOJ SINHA, UTILIDATA 首席执行官



GRIDLAB-D 是一款用于建模和分析微电网的开源模拟工具。

它可以模拟不同能源的行为以及微电网内的潮流。在太平洋西北国家实验室和美国能源部电力办公室的资助下开发得到的 GridLAB-D 将潮流计算与配电自动化模型、新兴能源使用、设备需求和市场模型结合起来，用于预估智能电网技术的效益和影响。²²GridLAB-D 是多种开源微电网模拟工具之一，可帮助开发人员更快速地评估设计和实施决策。

LF ENERGY 支持多个开源能源项目，帮助开发人员加快设计和部署。

除了上面概述的 Hyphae 之外，它还支持 Grid eXchange Fabric，这是一个开源软件平台，可实现硬件监控并提供多种“开箱即用”功能，这些功能可提供高安全性、可扩展性和可用性，以及不受供应商控制的通用设计。²³

价值主张 3: 开源可以提高微电网的互操作性和标准化

微电网领域对通用系统架构的需求巨大。不统一的标准、不同制造商的设备之间缺乏互操作性, 以及无法集成或交换数据、API 或供需机制, 均会阻碍微电网的采用和创新。这不仅会给远程设备高效、可靠地协同工作带来额外的挑战, 还会为“即插即用”、增值功能、新业务模式以及公用事业公司的采用带来额外的障碍, 例如与微电网交换功能, 以更好地利用未充分利用的资产或提高跨应用的互操作性。

正如通用插头和插座允许制造商在电线上进行创新, 或者安全超文本传输协议的采用允许在互联网上进行安全通信(无论管辖范围如何)一样, 通用标准是网络采用和网络效应的关键推动者。

开源有助于提高对标准的共识, 从而在不同的微电网系统和组件之间实现互操作性, 确保它们能够无缝通信和协同工作。即使是 Schneider Electric 等大型公司也在尝试制定微电网的规模标准, 以降低定制工程成本。多方可以围绕开源协议进行测试、改进并达成一致的共同采用意见。通过 LF Energy 实现的两个这样的例子分别是碳数据规范和 EVrest, 这些是开源数据和软件, 专注于规范数据要求, 用于跟踪碳排放和摘录电动汽车领域的多个标准。²⁴



OPENFMB: 公用事业公司主导的开源标准, 用于在微电网中集成分布式能源

Duke Energy 将 25 家公用事业公司、供应商、研究实验室和政府机构组成一个联盟, 负责现场设备互操作性框架(称为开放现场消息总线(OpenFMB))的开发和商业化。

OpenFMB 是一个用于在微电网中集成分布式能源的参考架构和框架。它支持节点(仪表、继电器、逆变器、电容器组控制器等)管理分布式资源, 分布式资源通过通用语义进行通信并在本地联合数据用于控制和报告。它还可以对传统设备进行改造, 以获得新的功能和特性并延长使用寿命。

该标准于 2016 年获得北美能源标准委员会的批准, 该委员会是获得美国国家标准协会(ANSI)认可的领先能源行业标准制定组织。尽管需要获得会员资格才能参与其用户组, 但所有人都可以使用该标准。多个 OpenFMB 工作组可提供帮助, 支持并管理 OpenFMB 生态系统的开源技术工件(用例、数据模型、演示等), 各个公共存储库中提供这些工件, 以帮助提高对 OpenFMB 的认知、教育、实施、测试和认证。如今, Duke 和用户组中的几家组织正在测试微电网用例并在成员之间分享经验教训。²⁵

开源可以提高整个微电网堆栈的兼容性。尽管开源微电网项目刚刚起步，前景并不明朗，但涉足软件平台、组件和硬件、模拟器等的项目正在不断涌现。这预示着微电网技术和分布式能源网络的多个部分之间有可能达成更深一步的共识，实现共享采用、标准化和互操作性。开放接口和开源参考实现可在解决方案（无论是内部解决方案还是供应商构建的解决方案）之间实现互操作性，以便所有人都能够充分利用生态系统中的最佳选项。提高微电网的互操作性将帮助客户以模块化、简化和高效的方式调整其微电网。

技术成熟度是开源支持互操作性的决定因素之一，这只是一个时间问题。早在几十年前便已具备配置微电网的条件，例如太阳能光伏板或继电器。如果这些产品能够商业化，同时减少来自供应商的阻力，可能会促进此类技术的开源。

从电信领域转行到微电网行业的 Gridscape Solutions 首席执行官 Vipul Gore 分享了一个这方面的故事：

“电信网络行业的早期需要使用网卡，那时想要找到所有网卡的驱动程序是非常困难的。如今这些驱动程序都以开源形式提供。需要在互联网上提供成千上万台设备才能实现。随着能源网的发展，微电网的某些元件变得更加商品化，例如太阳能光伏系统、电池、变压器或开关装置，这些元件将变得更加通用，并且操作这些元件的控制软件在未来几年肯定更容易实现开源。”

另一方面，更多新兴的微电网技术，例如智能软件系统和能源优化分析，以及新兴的大数据和人工智能，通常被视为控制不同方案的差异化因素，因此开源在短期内可能会面临私有化方面的阻力。

代码透明有助于更好地实现软硬件兼容性。开源项目可对代码进行更严格的审查和验证，除了安全性和可靠性优势之外，开发人员还可以更轻松、更灵活地进行兼容设计，以便不同的硬件和软件之间可以相互通信。

“如果我们想要让微电网的软硬件实现开源，微电网必须与行业标准解决方案相配并兼容。”

- VIVEK BHANDARI, POWERLEDGER 首席技术官

如果某些软件实现开源后仍然与关键标准或硬件不兼容，则可能会进一步削弱功能或让本身已经很复杂的设计配置过程变得更加不统一或复杂。

“有一些 RTU 硬件支持开发人员向其中编写自定义程序。我们可以想象微电网的开源算法，可以向该硬件进行输入或输出。”

- VIVEK BHANDARI, POWERLEDGER 首席技术官

模块化有助于实现互操作性。如上所述，开源可以帮助微电网加速当前的模块化趋势。

“利用开源加速微电网设计的关键在于，当其他人想要基于可用的开源技术进行构建时，他们可以进一步增强功能。”

- VIVEK BHANDARI, POWERLEDGER 首席技术官

标准和互操作性是重要的推动因素，可以轻松有效地灵活定制、改造和构建解决方案性，以满足微电网项目的特定需求。

“开源可以帮助用户进一步提高互操作性。它真正的与众不同之处是帮助定义一个缺失的中间层，类似于 API。我们需要一个中间层，将其作为更加标准化的组件来执行操作，我可以从任何供应商处购买，但当我将购买到的组件链接到系统中时，它与其他组件并无区别。”

- ANTONELLO MONTI, 亚琛工业大学研究所所长

国际电工委员会 (IEC) 是一个发布国际电气技术标准的国际标准组织。IEC 还与国际标准化组织 (ISO) 和国际电信联盟 (ITU) 密切合作。此外，它还与包括 IEEE 在内的多家主要标准开发组织合作。我们采访的领导指出，微电网正在朝着引领行业标准的道路继续迈进。然而，微电网具有地域依赖性：北美的许多公司正在采用 IEEE 标准，而欧洲的开发人员倾向于使用 IEC。

价值主张 4: 开源支持
微电网商业模式

与其他开源技术商业模式一样，开源微电网商业模式可以专注于提供可访问的软件工具、平台和框架，用于设计、模拟、管理和优化微电网。这些商业模式旨在利用开源原则，鼓励协作、创新和更广泛地采用微电网进行分布式能源生成。

表 3
开源微电网商业模式的关键组成部分

开源软件和工具

这些企业通过开发和维护开源软件工具，来支持微电网的设计、模拟和管理。通过免费提供源代码，他们鼓励开发人员和研究人员开展协作、努力工作和调整工具，以满足用户特定的需求和要求。

支持和咨询服务

除了提供开源工具外，这些企业还经常提供支持和咨询服务，帮助客户设计、实施和优化微电网项目。这些服务不仅可以创收，还能促进能源领域采用开源解决方案。

培训和认证

开源微电网企业还可以提供培训和认证计划，以指导用户有效使用和实施其软件工具。这不仅有助于用户夯实基础，还可以为企业创收。

定制与集成

企业可以提供定制和集成服务，以使其开源工具满足特定的客户需求或将开源工具与其他软件平台和系统集成。这使得客户能够实现量身定制的解决方案，同时受益于开源软件的灵活性和成本优势。

合作伙伴关系

开源微电网企业可以与其他组织（例如研究机构、公用事业公司和技术提供商）建立合作伙伴关系，通过促进创新并开发新的解决方案，来应对微电网实施和运营中的独特挑战。

虽然如今微电网公司很少采用纯粹的开源商业模式，但仍有一些组织将开源元素融入其更广泛的产品中。这些公司通过开发开源工具或利用开源平台来增强微电网解决方案和服务。请注意，下面的示例并非纯粹的开源微电网公司，但它们在其产品中融入了开源原则。

我们采访的几位领导指出了**开源通过扩大微电网模块化应用范围来实现商业模式的潜力**。这可能包括硬件构建块和类似于算法或 API 的预配置软件功能，例如预测模块、电池优化算法、逆变器设计或资源受限设备的操作系统。一个模块市场可能会出现，激励构建者相互改进；开发应用程序，实现整个市场的互操作性。

鉴于开源软件可以轻松定制以满足微电网项目的特定需求，而不受专有软件的限制，构建块还可以实现商业模式灵活性。

**“采用开源工具包并不意味着不再需要第三方提
供商的支持 — 客户无法做到一切尽在掌握！”**

- FERDINANDA PONCI, LF ENERGY 成员兼
亚琛工业大学复杂电力系统自动化研究所研究员

OPENREMOTE

OpenRemote 是一个开源物联网平台，提供能源管理和微电网解决方案。该平台使用户能够管理微电网和分布式能源系统中的能源生成、存储和使用。OpenRemote 提供社区平台，并提供支持、定制和咨询服务。²⁶

OPENER (开源 ETHERNET/IP™ 堆栈)

OpENer 以开源方式实施 EtherNet/IP™ 协议，帮助微电网控制器和设备之间实现通信。虽然 OpENer 并不专注于微电网应用，但其开源解决方案可用于微电网通信系统。实施微电网的公司可以使用这个开源平台在项目中实现设备通信。²⁷

价值主张 5: 开源可以促进微电网市场创新

能源行业能否像其他行业近年来所做的那样，采用开源来加速创新？这项研究分析了其他行业中可应用于微电网市场的计划和先例。本节穿插介绍了可应用于开源微电网的能源行业外的其他行业示例。

近几十年来，曾经由专有技术主导的电信和 IT 行业已经开始采用开源技术，以更快地实现传统技术转型，并创建基础协议和软件层，进行移动、5G 网络、人工智能等大量创新应用。

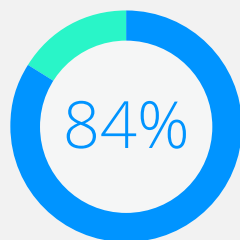
如今，开源已成为这些行业实施企业创新战略的重要组成部分。

尽管能源行业目前的创新速度相对较慢，并且比 IT 或电信行业更加抵制新兴技术，但是在微电网行业中应用开源程序设计的潜力巨大，可以通过改进以下方面来帮助克服常见障碍：

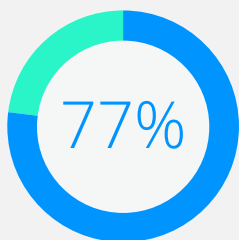
1. 创新速度/上市时间
2. 商业模式的可行性
3. 成本降低
4. 安全改进措施
5. 开发人员和人才库

图 6 企业开源的优势

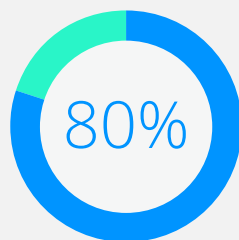
根据 Red Hat 2022 年高管调查数据³⁸，超过 75% 的电信和 IT 领导认为企业开源有利于实现创新，提高灵活性、采用和安全性



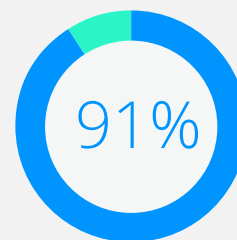
能够灵活定制解决方案，
满足我公司的需求



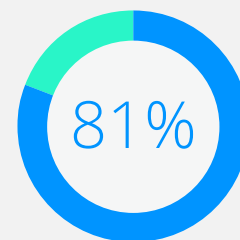
确保我的组织能够获得
最新的创新成果



对我的组织充分利用混合云
架构发挥了重要作用



简化采用混合云基
础设施的流程



构成我组织的安全策略
的关键部分

1. 创新速度和上市时间

大型电信和 IT 公司已采用开源技术和方法，以更快地向未来迈进。虽然与其他数十个市场的利益相关者合作似乎不如单独行动高效，但缺乏标准、互操作性或市场可行性的新产品和服务可能会带来投资失败和客户体验不佳的风险。开源组织和标准机构之间的合作也有助于加快上市。

开源可以实现微电网网络效应

正如技术领导们齐心协力创建移动开源操作系统一样，能源利益相关者也可以在网络和平台上进行协作，比单独行动更快地实现下一代能源应用和商业模式。

“我们需要弄清楚微电网的网络效应，这是重要的促进因素。开源可以帮助微电网利益相关者找到一种商业模式，当有更多人加入（也许通过定价方案）时，其他人加入会变得更价值。”

- KEN DULANE, 北卡罗来纳州立大学 FREEDM 系统中心工业与创新总监

随着电信和 IT 创新（从物联网到智慧城市、自动驾驶汽车到“工业 4.0”）通过电气化与能源融合在一起，分布式网络经济正在兴起一种新的基础设施。这进一步强调了开放式协作的必要性，因为互联互通会释放新的市场潜力。

开源给市场带来的重大突破

Android 操作系统现已被数十亿人使用。为了鼓励创新，Google 创建了开放手机联盟 (Open Handset Alliance)，这是一个由 84 家手机制造商、应用程序开发商、移动网络运营商和芯片制造商组成的联盟，共同开发 Android Open Source Project，即一个基于 Linux 内核的开源移动电话平台。该组织没有通过 Google 推出自己的移动设备，而是开放了一个完全集成的移动“软件堆栈”的源代码，其中包括操作系统、中间件、用户友好界面和应用程序。Samsung、Xiaomi、Amazon、LG 等公司仍在广泛使用免费的 Android，节省了数百万美元的开发成本。

2. 商业模式

开源技术的发展为微电网生态系统带来了多种商业模式。例如经典的免费增值模式，其中某些元件（例如数据库、软件代码或核心技术）可供任何人使用。供应商通过基于软件或服务级别协议的服务来实现盈利。这种模式的一大附加值是围绕开源创建的用户和开发人才生态系统。正如开源能让 IT 和电信供应商在软件控制方面保持竞争优势，微电网也蓄势待发。

服务提供商的定制实施、云运营、维护、安全等服务均不免费。值得一提的是，“构建块”模型可以由开源联盟（例如 LF Energy）开发，也可以由通过独特的增值服务持续实现盈利的公司促成。

开源商业模式

分布式数据库平台 **MongoDB** 是一种免费增值方式，为社区提供服务器并可免费下载其数据库和图集，但处理能力和存储空间有限。用户可以升级到付费服务，以访问“数据库即服务”托管产品或增值企业高级服务，这些产品或服务提供企业管理功能、高级安全功能、GUI、分析集成、身份验证和技术支持。

使用开源可将用户和开发人员带入更广泛的生态系统，这也是 **Google 对多种人工智能产品采取的做法**，这些产品包括 TensorFlow 机器学习平台、Material Design 框架和 Go 编程语言。上述三个产品均完全开源；任何人都可以在其他云服务平台（例如 Microsoft Azure）上运行它们。不过，这些产品位于 Google 生态系统中，可吸引大量用户、人才和客户进入该生态系统，使用 Google Cloud 的付费服务。

IBM 旗下 **Red Hat** 2021 年收入突破 170 亿美元，为企业和政府提供开源软件平台、中间件、应用程序和管理产品。该公司通过存储、支持、培训和咨询服务实现盈利。目前为混合云架构、云原生部署以及特定于大型公用事业公司的管理和自动化软件提供企业开源解决方案，其中包括微电网的整合。²⁸

ZEPHYR 实时操作系统 (RTOS) 由 Eonic Systems 公司开发，后来被 Wind River Systems 收购。2015 年，Wind River 将 RTOS 内核开源且免版税，但继续向客户提供该内核，并向他们收取云服务费用。²⁹ Zephyr 的“捆绑包”包括开发资源受限的嵌入式应用程序或基于微控制器的应用程序所需的所有组件，例如：

- 内核很小
- 灵活的配置和构建系统
- 一组协议栈
- 多个闪存文件系统的虚拟文件系统接口，用于非易失存储
- 管理和设备固件更新机制

3. 降低成本

开源软件通常可以免费使用，与专有解决方案相比，可以显著降低研发成本。转型到开源平台已帮助电信公司减少供应商控制和传统基础设施的竞争限制，使公司能够管理和协调为客户提供的差异化/更灵活的服务，同时减少支付给供应商的许可和维护费用。开源还可以作为内部团队的替代或补充，为公司和客户节省资金，同时推动市场发展。因此，开源已通过降低基础设施维护成本和投资风险，将成本模式从资本支出转变为运营支出。

开源可以帮助整个微电网生态系统实现成本节约。公用事业公司和运营商、供应商、集成商、教育工作者等可以降低研究、开发、模拟、概念验证测试等成本，如下面的 Linux Foundation Networking (LFN) 示例所示。

LFN 是一个行业联盟，旨在加速开源构建块开发、平台构建和协作，以推进网络基础设施的发展。该计划构成由服务提供商、云提供商、企业、供应商和系统集成商组成的 100 多个成员的“核心业务”。成员积极参与软件开发，围绕项目、互操作性、部署和安全展开协作，为基金会提供自有内部代码，并以开源形式发布。该计划负责管理不断增长的开源网络技术堆栈，涵盖九个项目。

其中一个项目叫 **OpenDaylight**，是一个模块化开放平台，用于定制和自动化任何大小和规模的网络。它与其他开源社区一起为 5G 核心技术的开发做出了重大贡献，包括软件定义网络和网络功能虚拟化的开发。

参与方式

- | | |
|-------------|-----------------|
| • 参加项目会议 | • 建立上游关系 |
| • 参加开发商活动 | • 提供上游代码 |
| • 加入经批准的项目 | • 启动或加入 OSN 用户组 |
| • 提出一个项目 | • 通过 EUAG 提供反馈 |
| • 编写文档 | • 筹备社区实验室 |
| • 提供用例 | • 回答提问 |
| • 分析需求 | • 进行演讲/培训 |
| • 定义测试/流程 | • 创建演示 |
| • 检查并提交代码补丁 | • 宣传 LFN 及其项目 |

从市场就绪的构建块到通过协作部署加快上市，领导们估计 LFN 基金会自 2018 年启动以来已在软件创新方面创造超过 90 亿美元价值。

4. 提高安全性

由于内部安全团队的规模有限、能力有限且存在偏见，因此开源内容已在整个 IT 行业中得到采用和信任。Red Hat 2022 年对电信 IT 领导进行的一项调查发现，87% 的人认为企业开源与专有软件一样安全甚至更加安全，其中 80% 的人表示“开源‘在组织的安全策略中发挥着关键作用’”。³⁰ 开源技术得到社区支持，意味着世界各地的开源开发人员都在审查代码，通过补丁预防风险，不仅可以显著提高安全弹性，还可以节省大量成本。

“矛盾的是开源往往比不开源更安全。” 亚琛工业大学复杂电力系统研究所所长 Antonello Monti 表示。Monti 负责监督 LF Energy 的两个项目，并指出开源行业团体通常拥有更健全的治理措施，且更安全可靠。能源行业存在一种普遍的误解，即认为开源解决方案不太安全，我们采访的几位领导指出需要解决这一问题，他们提到：

“我们必须解除人们对开源技术的怀疑。我们试图以这种心态向现有的大型企业解释，当今大多数云计算都基于 Linux 构建！在开源平台上运行的任务关键应用程序的示例有很多。”

- MICHAEL GOLDBACH, NEW SUN ROAD 首席执行官

虽然考虑安全问题可能有点顾此失彼，但正常运行时间更大程度上取决于应用程序，而不是开放与专有。例如，医院和军队等微电网应用在发生停机或破坏时不会存在灾难风险，而分布式电网或远程社区应用则需要满足 98% 的正常运行时间要求。

5. 开发者和人才

让更多人能够访问代码、算法、API 库、软件、开发套件或其他组件，为开发者生态系统奠定了基础，研究人员和构建者可以在其中探索、学习、使用、促成并经常帮助改进这些工具。IBM、Microsoft、Verizon 和 Ericsson 等公司吸引众多开发人员（无论老少）加入，因为这些公司知道如何推动企业创新，在自己构建的环境中开发应用程序，提高安全性，并为自己的长期人才库提供支持。减少进入障碍还会产生一些二阶效应，例如提高人员和应用环境的多样性、将工具使用范围扩大到新市场以及进一步弥合数字鸿沟。

开源可以帮助吸引开发人才进入微电网领域。 开源参与为能源公司提供机会，以更好地吸引开发人员和各方人才。在我们确定的开源微电网项目中，超过 50% 由大学和研究机构促成。微电网模拟器、软件、硬件和标准的开源项目不仅为设计微电网提供资源，还为参与微电网维护的贡献者社区提供资源。其他项目包括杜克大学的能源获取项目，这是一个专门的开源论坛，让学生与利益相关者围绕新的颠覆性工具和模型开发来突破障碍，改善全球能源获取。

开源微电网部署存在的挑战和差距

通过开源实现微电网接入民主化本身不太可能促成微电网的广泛部署。市场面临诸多挑战，需要专门的教育、计划、政策和融资来弥补差距。

	监管障碍 政策过时、分散或缺乏必要的政策；许多政策仍然有利于集中式电网基础设施	需求	• 政策制定者的参与 • 提高认识 • 协同政策设计 • 提高各管辖区的一致性
	需要协作 能源生态系统中的不同利益相关者群体：公用事业公司、微电网开发商、公共部门、政府、商业机构、社区等	需求	• 开源微电网参与和学习的集散地 • 开源微电网资源综合概况 • 微电网生态系统利益相关者的明确角色和活动
	行业现有企业的阻力 公用事业公司的变革步伐缓慢、矿物燃料的既得经济利益以及对安全问题的担忧	需求	• 通往开源程序的途径 • 解决安全问题 • 支持克服阻力（例如，公用事业公司互联互通要求）
	互操作性低 设备之间无法集成或交换数据、API 或供需机制，而且标准分散，阻碍其采用和创新	需求	• 标准不统一，难以达成共识 • 跨项目和管辖范围呈现/访问数据的标准方式 • 与相关市场（电动汽车、设施充电）协调 • 特定于应用的模块化 • 成本效益展示
	经济障碍 能源企业很难理解商业模式的影响；宏观经济不确定性会加剧避险情绪	需求	• 微电网经济数据共享 • 针对价值主张和投资回报率开展的教育 • 与脱碳目标保持一致
	数字障碍和人才缺口 利益相关者努力应对变革，无论是否与文化阻力、数字鸿沟、恐惧还是缺乏微电网工程技能相关	需求	• 关于微电网的各种教育 • 访问开源社区 • 了解工程、物理、生物领域的微电网技能开发知识

多样化的微电网应用和设计配置也对开源提出了挑战。从远程（离网）到社区，从固定和移动军事设施到机构园区，再到商业和工业应用，开源并不是解决大量技术和商业部署问题的良方。

微电网市场的常见现象凸显了这一挑战。Heila 是 Kohler 的模块化平台，采用开源技术进行微电网部署。Heila 创始人 Jorge Elizondo 表示，“如果您见过一个微电网……那说明您看到过，但并不能一概而论！”

“制定新标准存在风险。许多人都想制定一个标准一劳永逸，但这只会弄巧成拙，因为任何标准都需要有人配合！”

虽然每个人都认同有必要制定标准，但总有人质疑开源技术能否支持微电网达到标准的规模和速度要求。任何标准（无论是否通过开源制定）在最大程度上存在进一步加剧标准瓦解和不统一的风险。Elizondo 解释道：

“假设您有 100 个标准，然后您会说，‘让我们制定一个新标准来涵盖所有标准。’”好吧，现在您有了 101 个标准！”

其他人则分秒必争，认为通用系统架构是针对通信、设备或任何其他组件的标准化进行调整的先决条件。

“真正的问题是对通用架构或基础系统缺乏共识，人们希望顺其自然，迎接未来的到来，而我们则需要快速做出重大变革。开源可能对微电网帮助很大，但它并不能解决这些核心难题。”

- BRUCE NORDMAN, 劳伦斯伯克利国家实验室研究员

此外，由于电力、安全标准和公用事业公司互联互通的要求会带来一定的风险，开源的整个架构蓝图也面临阻力。³¹

微电网生态系统的推荐发展路径

通过开源实现微电网民主化是提高能源弹性和向可再生能源转型的核心。能源和运输行业实现电气化预计可以让地球的碳排放量减少75%。³²为了通过开源促进这一百年一遇的转型的实现，需要能源生态系统中的利益相关者之间进行前所未有的协作、坚守共同的承诺和秉持治理原则。

开源领导层必须端正心态，从“头”开始，不要为任何单一协议或组件过度编写索引，而是通过其项目策略帮助实现更宏大的“即插即用”或“以物换物”愿景。³³

您如何为开源微电网做出贡献？

通过开源实现微电网民主化需要确定微电网市场的主要利益相关者，并通过共同的挑战、工具、构建块和价值主张将他们团结起来，共同推动微电网市场发展。下面我们将介绍这些利益相关者所发挥的关键作用。

角色和建议的措施

微电网开发商

微电网开发商专注于设计和销售微电网，包括技术供应商、技术安装人员或建筑/施工团体。**相邻行业**（例如太阳能、存储、电池和电动汽车）的多家提供商也是微电网标准遵守、应用专业化、倡导和采用的重要合作者。微电网开发人员可以帮助：

- **参考并促成开源能源项目前景规划**中的微电网项目，涵盖微电网部署的每个阶段，从最佳实践分析和模拟到设计和部署。
- **促成开源数据共享**，让其他利益相关者对微电网性能、采用趋势和财务模型一目了然。
- **使用开源构建块进行模块化微电网设计**，以加速微电网部署并减少定制时间和成本。

公用事业公司和企业

大型能源供应商和电网运营商对电网技术设计和实施、资源分配、政策和开发商关系以及全球覆盖率的影响巨大。不同的公用事业公司模式——投资者所有、市政所有或农村电力合作社——在监管和优先事项方面也存在细微差别，可能会影响区域微电网的增长。此外，各种各样的微电网解决方案**商业、机构和工业采用者**在使用开源部署微电网方面也具有共同的经济利益。行业资源可以帮助：

- **协调能源弹性目标和资金**与开源战略（例如，为开源贡献付费的时间分配）以及相关的基础设施、人才和外展工作。

- **贡献代码、开源软件和微电网构建块**，开发开源微电网软件、功能和组件，以加快部署、实现互操作性和更广泛的行业创新。
- **加入开源能源联盟**，例如 LF Energy 计划和/或开放微电网联盟，以加速微电网技术创新、实现互操作性、促成标准协议和推进脱碳工作，并参与协作试点、商业模式开发和合资企业的活动。

开源社区和基金会

Linux 基金会和 GitHub 等**开源社区**在管理开源技术、提高可达性以及商业、政府和开发环境中实现开源合法化方面发挥至关重要的作用。正如他们在其他行业所做的那样，开源组织可以通过多种方式加速微电网创新：

- **建立致力于开源微电网发展的联盟**。LF Energy 与大型公用事业公司的关系有助于促进协作、达成共识，并朝着更加分布式的开放能源基础设施迈进。开源微电网联盟不仅限于大型公用事业公司和供应商的典型会员计划，涵盖客户、行业团体、政府、政策制定者、公民、产消者、合作社、城市、非营利组织、多边机构、投资者等。
- **通过相关开源项目支持和影响微电网标准的调整**，涵盖 LF Energy、网络、边缘、汽车（及同等项目）等关键项目。例如，就 5-10 个电网协调机制达成一致，正如一位受访者所建议的那样，“甚至尝试这五个或十个”³⁴，相比没有这类计划，可以更快地促进整个市场的标准化。

- **促进微电网学习内容的开源访问**。开源社区不仅仅进行代码提供。鉴于微电网应用环境的高度特异性和多样性，通过创建论坛、存储库和活动来推动知识共享：分析过去的项目、学习不同的技术、制定实施决策、模拟与真实操作、治理、融资模型、路线图、利益相关者协作、政策、客户采用、最佳实践共享、培训、会议、黑客马拉松和社区支持。

政府和公共部门

政府包括国家/联邦、地区/州、地方/市；军事和政府机构也是微电网的采用者。**监管者、政策制定者和机构**，包括能源部等执行机构，负责电网弹性和脱碳任务的监管设计、监督和补贴分配。此外，**公用事业委员会**通常负责公用事业费用审核和计划，对特定微电网项目的互联互通和批准影响巨大。这些公共部门利益相关者可以帮助：

- **参与开源计划**与其他利益相关者互动，确定资金和安全优先事项，提供监管观点或数字公共产品，汇总公共数据，并提高公共部门的计划通过率。
- 通过开源计划资源和活动**提高对微电网的认识和可及性**。
- **利用开源**，通过借鉴先例、推动标准统一以及评估治理需求，设计有利于微电网和分布式能源的政策更新。

“目前微电网建设方式不明确只会让人们曲解微电网的好处。这项挑战十分严峻。OSS 可以帮助每个人集中开展学习和协作，并简化流程。”

- FERDINANDA PONCI, LF ENERGY 成员兼亚琛工业大学复杂电力系统自动化研究所研究员

虽然麻省理工学院、³⁵太平洋天然气和电力公司、³⁶世界银行³⁷等机构已发布微电网最佳实践，开源生态系统既为行业合作提供了先例，又为技术构建者提供了广泛的影响力，两者都是商业采用的关键。

HUSK POWER SYSTEMS 发布新兴市场微电网部署路线图，以此刺激行业创新。

Husk Power Systems 主导了亚洲和非洲农村地区的微电网部署，开创了微电网实施和行业进步的先河。该公司近期为开发商发布了首份行业路线图，概述了新兴市场太阳能微电网行业的可扩展性、指标和商业可行性框架。该路线图收到了十多名利益相关者的意见，包括开发银行、私营部门贸易团体、学术界、智囊团和多边机构。该路线图将可持续性和规模化障碍转化为明确的行业绩效指标，并制定了通往成功的时间表。最终为围绕一组共同目标建立团结的生态系统奠定了基础，同时详细说明了到 2030 年该行业需要采取哪些行动才能实现规模化效应并实现融资，重点关注成本、需求、服务质量和部署率。

Husk 的创始人兼首席执行官 Manoj Sinha 根据以往半导体行业的从业经验获得了灵感，借此克服路线图中预示的障碍。

“大约 100 年前，政府通过补贴来帮助国家电网扩大规模，但微电网没有如此幸运。除非我们联合各方力量实现整合，否则微电网不会从根本上实现扩展。诚然，发布可能泄露自己秘密武器的路线图是一项冒险之举，可能会输得很惨，但是为了行业的发展，我们必须这样做。几年前，当我还在从事半导体工作时，Intel 便发布过一份半导体路线图。这些路线图不仅仅帮助其他公司，更会帮助整个行业做大做强。要让行业快速扩大规模，这种知识共享至关重要。”

总结

微电网是提高能源弹性和推进脱碳的重要工具。虽然有多种力量正在致力于提高微电网的采用率,但微电网市场仍面临一系列挑战,而开源生态系统已经做好应对这些挑战的准备。

- **简化微电网资源的获取** 减少所有利益相关者获取能源、专业知识和提高认识的障碍
- **加速微电网设计** 和缩短上市时间,通过开放数据共享、提高成本效率和模块化,帮助克服经济 and 政策障碍
- 通过提高整个堆栈的生态系统协作、共识、透明度和兼容性, **提高互操作性** 和标准采用率
- 通过软件、支持和咨询服务、培训和认证、定制和集成、协作伙伴关系以及推进模块化, **实现微电网商业模式**
- **大规模实现能源弹性市场创新**,支持能源部门采用 IT 和电信行业中经过验证的开源商业模式、安全优势和成本降低措施

短期内,开源可以通过提高可达性、实现模块化和降低实施成本来帮助发展中经济体促进能源获取。随着时间的推移,开源工具、方法和协作计划将使微电网利益相关者所在的整个微电网生态系统受益。

虽然开源微电网工具的采用和参与尚处于早期阶段,但我们通过分析开源微电网前景确定了 20 多个正在进行的项目以及当前可部署的四个标准。整个生态系统的利益相关者可以立即参与一些计划和活动,解决明显存在的差距和挑战,共建共享资源,以加速微电网的学习、开发和治理。

开源能源基础设施是一个快速发展的领域,有可能彻底改变我们的发电、配电和用电方式。开源微电网可以使每个人受益,从最大的公用事业公司和政府到偏远社区和各位居民以及地球本身。

需要探讨的其他研究问题

- 与云、ICT 等其他行业的开源解决方案相比,为什么能源领域没有明显领先的开源解决方案?
- 开发商如何才能最好地实现目前展示的开源微电网项目前景?
- 开发类似于用于 5G/6G 的 OpenRAN 或用于汽车的 OpenEV 的行业级开源能源创新解决方案需要具备什么条件?
- 可再生能源行业实现脱碳所需的潜在开源颠覆性解决方案是什么(例如微/纳米级别的能源存储;数据和能源互操作性)?
- 开发人员如何加速商业储能产品(例如 Tesla Powerwall)的开源产品开发?
- 开源生态系统如何应对司法管辖区内和跨司法管辖区的监管挑战?
- 其他行业现有的开源项目如何支持能源领域的开源采用?

方法学

这项研究由 Linux 基金会、Futurewei、Intentional Futures (iF) 和 Peter Asmus 于 2022 年 10 月至 2023 年 3 月期间共同开展。iF 针对开源微电网项目和活动进行了初步研究访谈、二次研究以及调查。iF 对整个市场的微电网领导进行了 17 次采访，其中包括公用事业公司、规模不等的供应商、微电网设计师以及世界各地的研究和政策专家。该分析还包括其他行业的评估结果，以确定加速开源微电网采用的途径和建议。此外，iF 还进行了广泛的二次研究，评估了微电网市场研究报告、投资趋势、供应商以及微电网出版物中的相关文章。

附件: 采访对象名单

ANTONELLO MONTI 亚琛工业大学教授兼研究所所长; LF Energy 技术咨询委员会主席

BRUCE NORDMAN 劳伦斯伯克利国家实验室研究员

CAMERON BROOKS Think Microgrid 执行董事

CHRIS VILLARREAL Plugged In Strategies 总裁

FERDINANDA PONCI 亚琛工业大学复杂电力系统自动化研究所教授

JANA GERBER Schneider Electric 北美微电网总裁

JORGE ELIZONDO Heila Technologies 总裁

MANOJ SINHA Husk Power 首席执行官

MARISSA HUMMON Utilidata 首席技术官; Grid Forward 董事会成员; LF Energy 治理董事会成员

MICHAEL GOLDBACH New Sun Road 首席执行官

MICHAEL CLARK, Encorp 首席执行官

SRDJAN LUKIC FREEDM Microgrid 副总监

STEFAN ZELANZY Access to Energy Institute 常务董事

STEPHEN PHILLIPS Optimal Power Solutions 首席执行官

VIPUL GORE Gridscape Solutions 总裁兼首席执行官

VIVEK BHANDARI Powerledger 首席技术官

关于作者

JESSICA GROOPMAN 是 Intentional Futures 的行业分析师兼数字战略和创新总监。她负责研究新兴技术对人类和社会的影响，专门研究人工智能、区块链、物联网、可再生能源等。她最近的研究涵盖可持续发展与气候技术、Web3、数字包容性和 DEI。Jessica 居住在旧金山湾区，与国际各大组织合作，支持多个垂直行业的战略咨询、数字化转型和研究。她经常作为主题演讲人和媒体撰稿人为初创企业提供咨询，曾担任国际物联网理事会和 IEEE 物联网小组的特约成员，并被 Onalytica 评为 100 名最具影响力的物联网思想领袖之一。此前，Groopman 曾在 Kaleido Insights、Tractica、Harbor Research、Altimeter Group 等公司主持研究实务，撰写了 40 多份报告并为多本书籍撰稿。

JEFFRY LINDSTROM 是 Intentional Futures 数字战略和创新团队的高级策略规划师，他就技术的应用、影响和可能性提供咨询。Jeffry 的营销和非营利管理背景与以人为本的设计和思维方法相结合，形成了一种具有同理心、以利益相关者为中心的研究和策略制定方法。Jeffry 曾就读于华盛顿大学、普拉特学院、IDEO 和帕森斯设计新学院，爱好包括室内设计、人物写真和网球。

致谢

作者想要在此感谢 Peter Asmus 担任项目和研究顾问时所发挥的关键作用，感谢 Anna Hermansen 为本报告提出宝贵意见并起到协调作用，同时感谢 Chris Xie 为开源微电网前景、商业模式影响和后续研究主题提供的重要指导、咨询和广泛意见。此外，还要感谢 FlexiDAO 的 Paul Breslow 和 EnAccess 的 Claudio Pedretti 提供的介绍和建议的研究途径。

谨以此报告缅怀 LF Energy 创始人 Shuli Goodman。

Endnotes

1 Clean Energy Microgrids Market Forecast 2022–2031. Guidehouse Insights. Accessed February 23, 2023. <https://guidehouseinsights.com/reports/Clean-Energy-Microgrids-Market-Forecast>

2 Glossary | TODO project. February 18, 2023. <https://todo-project.eu/deliverables/glossary>

3 Clean Energy Microgrids Market Forecast 202–231. Guidehouse Insights. Accessed February 23, 2023. <https://guidehouseinsights.com/reports/Clean-Energy-Microgrids-Market-Forecast>

4 DER Deployments for Microgrids. Guidhouse Insights. 3rd Quarter, 2020. Accessed February 23, 2023. <https://guidehouseinsights.com/reports/der-deployments-for-microgrids>

Peter Asmus, and Roberto Rodriguez Labastida. How Utilities can be Microgrids Leaders. Guidehouse Insights, Commissioned by PXiSE Energy Solutions. 3rd Quarter 2020. Accessed February 23, 2023. <http://www.pxise.com/wp-content/uploads/2020/09/Guidehouse-Insights-White-Paper-How-Utilities-Can-Be-Microgrid-Leaders.pdf>

Peter Asmus, and Jared Leader. Microgrid Trends Shine Spotlight on Role of Utilities and Policy Makers. SepaPower.org. September 3, 2020. Accessed February 23, 2023. <https://sepapower.org/knowledge/microgrid-trends-shine-spotlight-on-role-of-utilities-and-policy-makers/>

5 US power outages from severe weather have doubled in 20 years. The Guardian. April 6, 2022. <https://www.theguardian.com/us-news/2022/apr/06/us-power-outages-severe-weather-doubled-in-20-years>

6 Many large governments are investing in microgrids as part of their climate and national security policies, including the United States, China, Australia, Germany, and India.

Microgrids Play a Major Role in Federal Energy Strategy. Constellation. Accessed February 20, 2023. March 4, 2014. <https://blogs.constellation.com/energy-management/microgrids-to-play-a-major-role-in-federal-government-energy-strategy/>

India's Microgrid Market: Ready for Take-Off: Microgrids News. March 12, 2019. <https://microgridnews.com/indias-microgrid-market-ready-for-takeoff/>

\$50 million to ramp up microgrids in regional Australia. Australian Renewable Energy Agency. September 24, 2021. <https://arena.gov.au/news/50-million-to-ramp-up-microgrids-in-regional-australia/>

Past, today, and future development of micro-grids in China. Science Direct. Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 42, February 2015, Pages 145–163. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032114009630>

7 Why microgrids are key to solving energy poverty worldwide. Fortune. January 21, 2020. <https://fortune.com/2020/01/21/microgrids-energy-poverty-africa-asia/>

8 Why 'mini' matters to achieve power for all. The Beam. November 11, 2020. https://the-beam.com/sustainable/why-mini-matters-to-achieve-power-for-all-2/?mc_cid=1687a5db13&mc_eid=4b03df10df

9 Why did renewables become so cheap so fast? Our World in Data. December 1, 2020. <https://ourworldindata.org/cheap-renewables-growth>

10 Carbon Pricing Dashboard | Up-to-date overview of carbon pricing initiatives. January 27, 2023. <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/>

11 Making microgrids mainstream: challenges and opportunities. Modern Power Systems. February 4, 2023. <https://www.modernpowersystems.com/features/featuremaking-microgrids-mainstream-challenges-and-opportunities-6097156/>

12 Local energy system in Simris. Eurelectric. February 3, 2023. <https://www.eurelectric.org/stories/dso/local-energy-system-in-simris/>

13 Climate Change Laws of the World. Grantham Research Institute of Climate Change and the Environment. February 4, 2023. <https://climate-laws.org/>

14 Microgrid Trends Shine Spotlight on Role of Utilities and Policy Makers. Smart Electric Power Alliance. March 17, 2023. <https://sepapower.org/knowledge/microgrid-trends-shine-spotlight-on-role-of-utilities-and-policy-makers/>

15 From the Military to Retail Businesses: How Use of Microgrids is Growing. Microgrid Knowledge. October 16, 2019. <https://www.microgridknowledge.com/resources/reports/article/11429354/from-the-military-to-retail-businesses-how-use-of-microgrids-is-growing>

16 State of the Global Mini-Grids Market Report 2020. Mini Grids Partnership. January 28, 2023. <https://minigrids.org/market-report-2020/>

17 Smart Integrated Decentralized Energy (SIDE) Systems. Metabolic. February 3, 2023. <https://www.metabolic.nl/publication/new-strategies-for-smart-integrated-decentralised-energy-systems/>

- 18 All interviewees were asked about common barriers to microgrids market growth. Listed in the text above are categories of their answers related to policy/regulatory challenges developers and adopters face. Interviews conducted between October 2022 and March 2023.
- 19 SDG7 Access to Energy: Today 770 million people live without access to electricity. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/sdg7-data-and-projections/access-to-electricity> April 2022.
- 20 EnAccess. Accessed January 16, 2023. <https://enaccess.org/>
- 21 Plug-and-Play Modular Microgrids Gain Momentum. Microgrid Knowledge. December 30, 2019. <https://www.microgridknowledge.com/google-news-feed/article/11429211/plug-and-play-modular-microgrids-gain-market-momentum>
- 22 GridLAB-D. Wikipedia. Accessed March 20, 2023. <https://en.wikipedia.org/wiki/GridLAB-D>
- GridLAB-D. GitHub. Accessed March 16, 2023. <https://github.com/gridlab-d/gridlab-d>
- 23 Grid eXchange Fabric (GFX). Linux Foundation. Accessed March 22, 2023. <https://www.lfenergy.org/projects/gxf/>
- 24 Projects: Linux Foundation Energy. Accessed March 16, 2023. <https://www.lfenergy.org/projects/>
- 25 Duke Energy Coalition: Leading Advancements in Interoperability. Duke Energy. Accessed March 15, 2023. <https://www.duke-energy.com/our-company/about-us/smart-grid/coalition>
- 26 OpenRemote. Accessed April 1, 2023. <https://www.openremote.io/>
- 27 OpENER: Open source EtherNet IP Stack. Accessed April 1, 2023. <https://github.com/EIPStackGroup/OpENER>
- 28 Transforming utilities with open source technology. Red Hat. March 18, 2021. <https://www.redhat.com/en/resources/transforming-utilities-open-digital-leadership-in-energy-sector-whitepaper>
- 29 Zephyr (operating system). Wikipedia. February 2, 2023. [https://en.wikipedia.org/wiki/Zephyr_\(operating_system\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Zephyr_(operating_system))
- 30 The State of Enterprise Open Source: Telecommunications & IT. Red Hat. 2022. <https://www.redhat.com/en/resources/state-of-enterprise-open-source-telco-infographic>
- 31 Peter Asmus (Adjunct Faculty, Senior Advisor, Microgrid Strategy & Thought Leadership, Alaska Center for Energy and Power) Interview with the author, March 20, 2023.
- 32 International Emissions. Center for Climate and Energy Solutions. Accessed March 17, 2023. <https://www.c2es.org/content/international-emissions/>
- 33 Bruce Nordman (Researcher, Lawrence Berkeley National Labs), Jorge Elizondo (President of Heila Technologies), Jana Gerber (North America Microgrid President, Schneider Electric) Interviews with the author on November 1, 2023, November 16, 2023, and November 29, 2023, respectively.
- 34 Bruce Nordman (Researcher, Lawrence Berkeley National Labs) Interview with the author, November 1, 2022.
- 35 The Microgrid: Small Scale, Flexible Reliable Source of Energy. Massachusetts Institute of Technology. January 31, 2012. <https://energy.mit.edu/news/the-microgrid/>
- 36 Community Microgrids Technical Best Practices. Pacific Gas & Electric and Schatz Research Center. December 12, 2020. https://www.pge.com/pge_global/common/pdfs/residential/in-your-community/community-microgrid/pge-community-microgrid-technical-best-practices-guide.pdf
- 37 Mini Grids for Half a Billion People: Market Outlook and Handbook for Decision Makers. World Bank. June 25, 2019. <https://www.worldbank.org/en/topic/energy/publication/mini-grids-for-half-a-billion-people>
- World Bank Group. 2019. Investing in Mini Grids Now, Integrating with the Main Grid Later: A Menu of Good Policy and Regulatory Option. Live Wire; No. 2019/97. © World Bank, Washington, DC. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/732841558714625815/pdf/Investing-in-Mini-Grids-Now-Integrating-with-the-Main-Grid-Later-A-Menu-of-Good-Policy-and-Regulatory-Option.pdf> License: CC BY 3.0 IGO.
- 38 The State of Enterprise Open Source: Telecommunications. Red Hat. February 25, 2023. <https://www.redhat.com/en/resources/state-of-enterprise-open-source-telco-infographic>



成立于 2021 年的 Linux 基金会研究中心探索不断扩大的开源协作规模，深入了解新兴技术趋势、最佳实践和开源项目的全球影响。通过利用项目数据库和网络，并致力于定量和定性方法的最佳实践，Linux 基金会研究中心正在创建开源见解的首选库，以造福世界各地的组织。



版权所有 © 2023 [Linux 基金会](#)



本报告采用 [创作共用署名-禁止演绎 4.0 国际公共许可](#)。

关于该创作的引用如下: Jessica Groopman 和 Jeff Lindstrom, “微电网的开源机会: 推动能源弹性创新和克服市场障碍的五种方法”, Linux 基金会的 Yue Chen 和 Chris Xie 撰写的前言, 2023 年 6 月。



LF Energy 是一项史无前例的举措，也是 21 世纪一项行动计划，旨在通过开放框架、参考架构和互补项目的支持生态系统来解决气候变化问题。战略成员包括 Alliander、Google、Microsoft、RTE 和 Shell 以及来自能源行业、技术、学术界和政府的 50 多名普通会员及准会员。访问网站 <https://www.lfenergy.org> 获取更多信息。

if intentional futures

Intentional Futures 是一家总部位于西雅图的战略和设计咨询公司，面向全球客户提供服务。我们的客户是坚定的变革推动者，他们相信世界可以变得更加美好。我们的综合实践由五个专业领域组成：数字战略与创新、教育、社会影响、组织设计以及文化意识与融合。我们共同努力提高世人的同理心、独创性和有效协作能力，立志成为最具影响力的咨询公司。



Futurewei 与全球具有前瞻性思维的公司保持持续、深入的合作。我们追求研发的开放性，采用开放式创新模式，努力与技术社区分享想法和知识，创造新的商机。

- 我们的愿景是塑造未来，迈向万物互联的智能世界。
- 我们的使命是通过生态系统内的开源、标准化和协作开发创新，造福智能和数字社会。

过去 20 年来，我们的专家积极参与标准计划。通过这项工作，我们参与开发下一代无线技术和网络，并通过 ICT 系统的开放应用平台构建开放的生态系统。

www.futurewei.com