

新微电网技术如何在分布式能源中实现良好协作

著：薇洛妮克·布廷 (Veronique Boutin)
瓦尼亚·伊格纳托娃 (Vanya Ignatova)
雅克·菲利普 (Jacques Philippe)
鲁道夫·埃利奥 (Rodolphe Heliot)
雅恩·赫里欧 (Yann Herriot)
安迪·豪恩 (Andy Haun)
冯·瓦格纳 (Van Wagner)

执行摘要

微电网是互相连接的本地能源系统，可能成为新能源转型的基石。在电气领域中，微电网在边界中进行定义，并结合负载、分布式能源（包括存储）以及特定的控制功能。

其实现需要新的技术，以使分布式能源围绕一个共同目标进行协作、分析战略以优化互连系统的运作和管理，或缓解双向电力系统的设计局限。

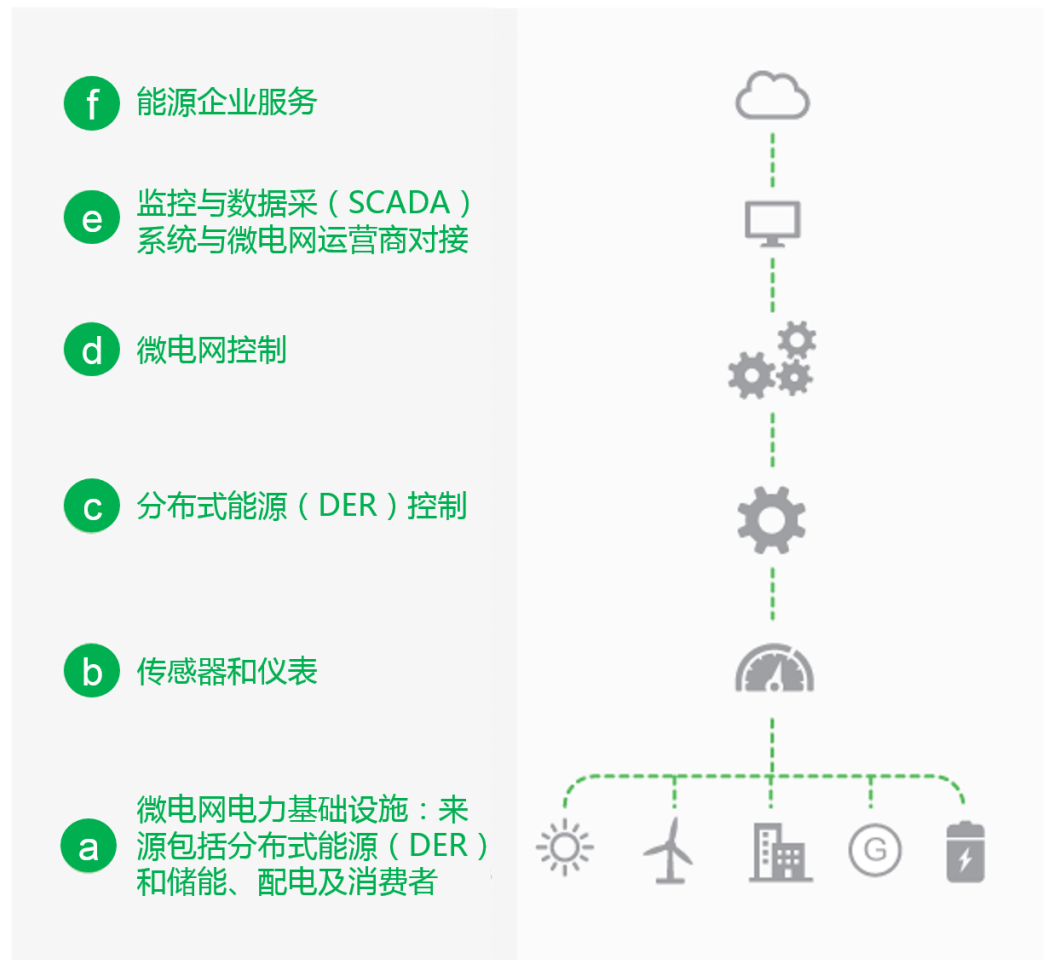
当前和未来的技术

微电网来自互相协作的子系统网络，而非独立的功能组件。实际上，其通常组成部分为：

- a) 一个能源网络基础设施，包括发电设备（通常是多个分布式能源）、一个能源分配网络、以及临界水平和配置各不相同的能源使用者/消费者。
- b) 传感器、仪表和网络保护
- c) 分布式能源（DER）水平的控件
- d) 微电网管理水平的控件，从而优化整个系统
- e) 监控与数据采集（SCADA）系统，从而与微电网运营商对接
- f) 云决策服务，例如费用管理、需量电费优化、需求响应、自消费、停电管理、二氧化碳（CO₂）减排等等。

图 1

微电网功能架构，从电网到云



微电网的实现旨在顺应全球性的能源期望，例如复原力、经济性、安全性和 CO₂ 减排。这些期望的优先级取决于微电网类别，以及不同组件的相关技术特性。但无论何种情况下，都必须通过系统控制和保护创新方面的技术进步，来满足具体的性能目标，以实现分布式能源围绕共同目标进行协作的目的。

确保安全和可靠的运行

保护策略的特定约束

在微电网中，本地分布式发电以及脱离主电网孤岛运行的能力为保护系统的设计带来新的挑战。

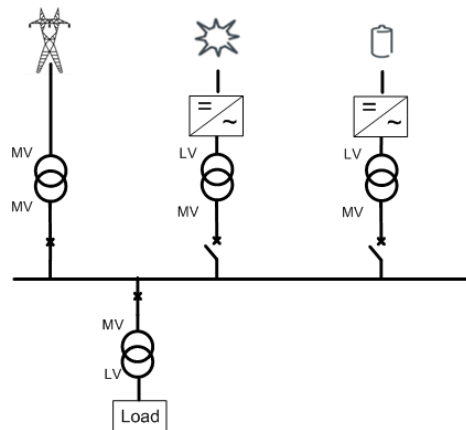
微电网根据分布式发电的实时生产力、微电网配置（并网运行或孤岛运行），以及实时功率需求（负荷配置）分为不同的操作模式，如图 2A、2B 和 2C 所示。

图 2A、2B、2C

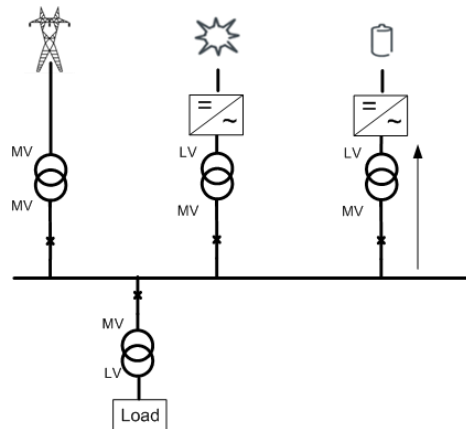
微电网运行模式示例



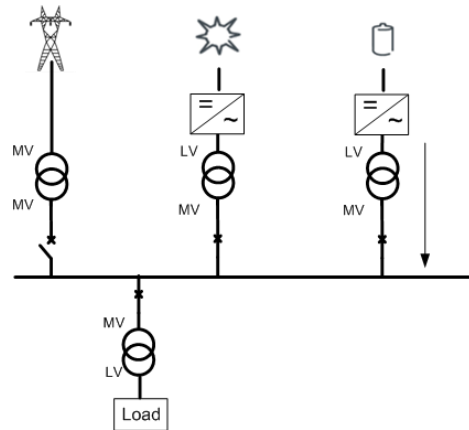
A. 仅由电网供电



B. 由电网和本地能源并行供应，储能充电



C. 由本地能源和储能供应（孤岛模式）



随着微电网运行条件的改变，网络拓扑结构也发生变化。因此，短路电流容量的大小和方向都可能不同。保护系统必须经过精心设计，以便在各个运行模式所有可能出现的故障情况中确保人员和设备的安全，同时避免因错误的保护识别而导致宕机。

特别应当注意的是，微电网往往都是多源系统，同时拥有旋转和电力电子式电源。保护系统设计的复杂性来源于这些电源可以并行供应，也可以单独运行。

第一个挑战是应对低短路电流容量。许多分布式能源，例如太阳能光伏（PV）板或风力涡轮机都通过逆变器耦合。这些逆变器的短路电流大小限值通常不得大幅高于额定电流，以保护逆变器本身。因此，短路电流容量低于类似的旋转电机，由此可能对仅包含逆变器能源的孤岛模式带来问题。依赖于更高的可用短路电流的传统过电流保护理论可能会失效，需要建立其他保护策略。

保护系统设计面临的另一挑战是对双向能量流的响应。随着能源资源被分配后，电力一般会同时自上而下（从发电厂到用户端）和自下而上（分布式能源和储能也许会向微电网的主电源或主电网供电）传输。

因此，针对具体项目的电气工程研究必不可少，以详细说明要使用的保护和计量装置。

电能质量相关细节

微电网能够实时平衡发电量和需求。这需要快速而准确地测量有功功率和无功功率、频率、电流和电压电平，以实现适当的电能质量控制和自动化操作。

在微电网应用中，电能质量的测量更加重要。应对下列特定电能质量问题进行监测，、分析，并使其保持在正常运行范围内。

- 谐波：谐波的产生和相互作用要比谐波的主要来源通常是电子负载和设备的传统网络更需重视。在微电网中，逆变器式分布式能源会产生额外的谐波污染，如果没有得到恰当监测和恰当处理，谐波水平可能大幅提升。
- 频率变化：通常来说，微电网频率在连接到主电网时很稳定，频率很少变化，特别是在电网强大且密集的国家。然而，当微电网孤岛运行时，由于系统中的刚性发电电源减少，频率变化可能变得更为关键，需要密切监测。
- 瞬变：配置和运行模式发生变化时，可能会发生瞬变。应对瞬变进行捕获和分析，以发掘任何可能的根本原因。
- 电压骤降和骤升是传统网络和微电网意外停机的主要原因。骤降和骤升应通过充分的监测功能得到监测、记录和本地化，例如扰动方向检测功能。

图 3

电能质量的测量是保证微电网控制、可靠性和标准合规性的关键。



控制 分布式能源

能源可靠性大多数时候都取决于能源、储能和电网之间的联系，而非分布式能源（DER）。分布式能源需要通过可靠的方法进行协作，从而保持稳定的频率和电压。这是孤岛式微电网的本质，并成为互连微电网支持主电网稳定性时的要求。

电力控制的稳定性

稳定的电力系统必须能够稳健应对由短路、电机起动、负荷变化，或任何配电网故障或停电引起的不可控瞬变。对于电力系统，这意味着需要非常快的响应速度。因此，维持微电网稳定性的第一步，是理解分布式能源互相之间的自然互动方式，并观察由快速内部控制导致的反射行为。

由同步发电机构成的传统的发电厂自然形成电网。这是一套行之有效的发电系统，归功于物理性能和控制逻辑的配合，即使电网电压发生瞬变，也可以提供稳定的频率和电压。事实上，同步电机的转动惯量和磁力设计使它们能够自然地形成电网，并在发生电网瞬变的时候，与其他并联电压源适当地分享工作量（即保持同步）。这是通过速度和电压控制回路实现的，此回路可通过下垂功能自动调节发电机的功率。

大多数分布式电源使用逆变器来接入电网（太阳能光伏、风力、电池、燃料电池等）。这些逆变器现今最常见的内部控制名为“并网”，意味着依赖于其他发电机来产生电网电压和稳定频率。该方案旨在为主电网提供有功功率和无功功率，或用于可再生能源渗透率低的微电网中。但是，如果我们想以大多数逆变器发电机为基础搭建电力系统，那么这种并网模式就不行了，首先是因为它们根本不能依靠自己产生电网电压。

和同步电机不同，如果想要将那些逆变器，作为可以与其他电网构成单位并行的组网分布式能源使用时，我们将面临新的挑战。将逆变式可再生发电与传统发电机相结合时，这将变得特别困难。除了可再生能源自带的间歇性以外，逆变器不具有转速和电网频率之间的天然惯性连接。逆变器控制回路不但耐受过电流能力差，而且要比旋转电机快很多。这种快速响应时间通常会使它们在旋转电机调节之前做出反应，由此可能导致电流饱和、无法同步，并最终断开连接等问题。这就是为什么强大的逆变发电机控制回路的设计是确保微电网稳定性面临的主要挑战之一。

最近推出的逆变器能够提供真正的分布式能源组网功能，能够在以独立模式运行，与其他能源来源（包括传统发电机）并联运行的情况下维持电力系统稳定。

利用逆变发电机（IBG）的创新概念可以帮助克服此前提到的稳定性挑战。这些逆变式发电机通常包括：

- 一种可再生分布式能源（例如太阳能光伏板、风力或水轮机）
- 一台电子逆变器，内置先进的电压和频率控制回路
- 一种名为电力存储的能量来源，用于使瞬时可再生发电与实际负荷需求脱钩，从而平稳可再生能源的易变性

将此类 IBG 与传统的发电机相结合，将帮助解决大多数微电网暂态稳定性相关的问题。

例如，虚拟同步发电机（VSG）概念就使用了综合模式，模拟真机的物理行为，从其自然构成电网的属性中受益。与电力存储关联使 VSG 能够提供“类似旋转”的储备，以确保微电网的稳定性。

此类 VSG 可以通过现有的电气架构和现有的控制策略实现。

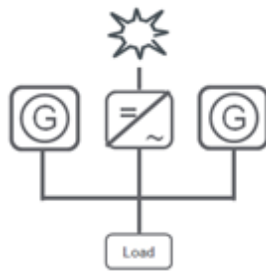
为保证电力的长期稳定和可用性，IBG 还需要通过特殊的电力管理算法进行控制。这些“次要”调节负责平衡 DER 之间的电力（例如传统发电厂常用的电力共享模块）。此外，这些调节能够在关闭一些燃料发电机的同时保持充足的电力储存水平。

这项新能力使可再生能源的广泛采用和高度一体化成为可能，下可至基本的“太阳能+光伏—柴油机”混合发电结构提供较低的燃油消耗，上可至存储耦合式可再生 DER 的零排放微电网。

图 4

传统转换器与逆变式发电机

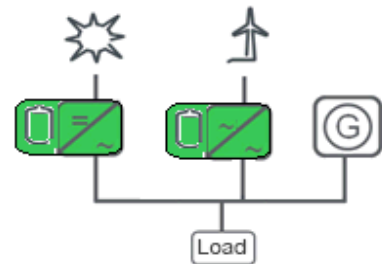
传统转换器限制可再生能源并入



网络稳定性问题：

- 电力间歇性
- 无惯性
- 不可形成电压

逆变式发电机打破可再生能源并入的限制



- 组网能力
- 与其他来源并行工作
- 获得惯性和旋转储备

优化能源流

优化的能源控制

微电网控制器负责整个系统的运行。这个协调层管理本地发电和存储功能、负载管理和电网服务，以达到能源成本、二氧化碳排放和可靠性相关的预期目标。

以下例子说明了能源优化及其在实践中的意义：

由太阳能光伏、热电联产（CHP）和储能器组成的微电网为一幢较高的校园建筑供电。天气预报称下午的太阳辐射很强，天然气供应商设定下午 2 点以后提高电费，而且今天是星期五，人们通常会在下午 6 点前下班。微电网控制器可以决定最大功率开动热电联产发电机，在为电池充电的同时，也为校园建筑供热，直到下午 2 点。然后关闭 CHP，在余下的下午时间段运行电池和太阳能光伏，拥有足够能源来提供预期平均负载，然后逐渐降低温度至可接受的最低值，直到下午 6:30。

系统优化涉及云分析与先进的微电网控制器之间的协作。数据采集和情境智能用于提供自动预测和资产调度，以在其定义限制下实现运营目标。微电网的运行环境会根据事件发生改变，例如恶劣天气、设备无响应、意外孤岛、系统重构，或大幅负载变化。这就是为什么微电网分析和控制系统需要具备动态和自治能力，以重新配置系统设置和算法，从而提供高效的配置。

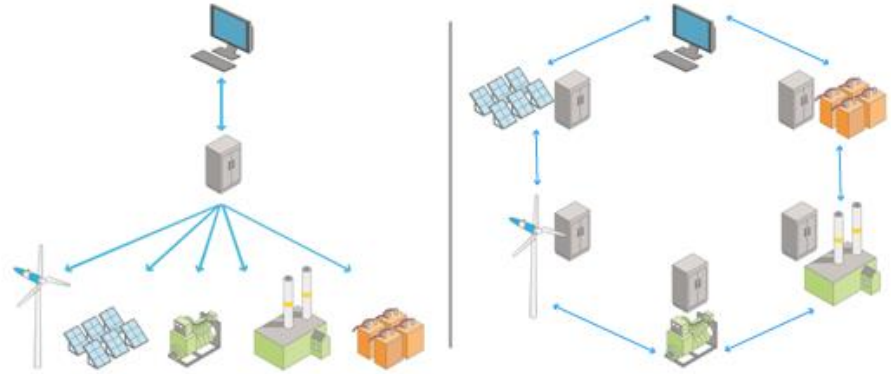
通过几种技术解决方案可以实现微电网控制器的高效运行：

- 最直接的解决方案是使用中央控制器来收集操作信息，直接与 SCADA 或云服务进行交互，以运行优化算法，将选定的策略部署到不同的互连资产上。该方案目前通常通过微电网控制器完成，其优点在于能够管理逻辑输入/输出，以及与普通的现场网络进行对接（例如 Modbus）。但这通常需要为单个项目开发专门设计的工程解决方案。
- 第二种解决方案是实现分布式微电网控制器。这意味着每个组件都参与系统优化，并直接与其同类进行协作。有趣的是，这已成为分布式智能发电机组控制制造商的典型解决方案，其中每个机组都会依据电网情况自主与其他组件互动。分布式控制的实施可能更具挑战性，但同时也带来了一些优点：
 - 提供自然冗余和即插即用行为，从而提高可靠性和可扩展性
 - 借助边界优化智能提高本地运行性能
 - 推动整合数据格式和用于系统优化的交换协议。

- 或者也可以综合上述两种解决方案。例如，在多设施微电网的情况下，将单设施微电网控制器（集中式操作）与多设施微电网系统协调的分布式方法相结合，会获得很好的效果。

图 5

集中式与分布式微电网控制器架构



结论

过去十年内的重大技术进步促成了微电网的面世。太阳能发电和可部署储能等分布式能源领域的实质性进展，以及可操作的物联网环境提供了全新的协作和优化能力。

然而，这些系统在运行过程中也出现了具体的新问题：

1. 确保分布式能源围绕共享目标进行协作需要多个控制层。
2. 优化微电网运行和管理的计算策略取决于整个网络中的数据 and 监控系统。
3. 双向电流相关的技术限制，需要改进可再生能源逆变器的性能和/或保护系统的设计。

所有这些技术挑战目前正在通过创新，以及实地验证的经验加以解决。

 关于作者

薇洛妮克·布廷 (Véronique Boutin) 是一名来自巴黎高等电力学院的工程师。她的博士论文主题为一个热力学太阳能发电厂的实验项目。在施耐德电气公司，她曾设计出在各种工业环境中运行的多个自动化系统。后来，她专注于创新，并参与了多个大型合作项目，例如关注建筑物能源效率的 HOMES，以及关注工业、建筑和基础设施协作自动化的 Arrowhead 等。她是分析、应用和计划团队的一员，负责概念论证的演示工作。

瓦尼亚·伊格纳托娃 (Vanya Ignatova) 是施耐德电气的一名可再生能源一体化建筑师。她拥有格勒诺布尔国立理工学院的电气工程硕士学位和电能质量博士学位。她于 2006 年加入施耐德电气，带来了在电气工程、能源管理、电能质量和可再生能源一体化方面的专门知识。她在这些领域著有多篇文章和白皮书。

雅克·菲利普 (Jacques Philippe) 是施耐德电气电力系统能力领域的主管。他也负责领导施耐德电气在欧洲、中东及非洲地区执行中心的一支电力系统专家团队。他拥有法国格勒诺布尔国立理工学院 (INPG) 的电气工程和信号/图像处理技术硕士学位。过去 12 年中，他参与了多个细分市场中各类客户项目的投标和执行，主要涉及电气工程领域。借助由整个施耐德电气公司及本地的代表和专家组成的核心团队，他领导并定义了公司在电力系统领域的路线图。

鲁道夫·埃利奥 (Rodolphe Héliot) 在 2004 年获得了法国国立高等电气机械学院 (Supélec) 的工程师学位，并在 2007 年获得了格勒诺布尔理工学院的电气工程博士学位。2008 年到 2009 年期间，他在伯克利的加利福尼亚大学攻读电气工程与计算机科学系的博士后研究生。2009 年到 2012 年，他在 CEA-LETI 担任科学家。他于 2013 年加入施耐德电气，成为解决方案分析团队的一名数据科学家。他的专长包括信号处理、数据分析、体系结构、系统建模和控制。他曾为各种会议撰写论文，多篇登上业界期刊，并拥有多项专利。他于 2009 年获得格勒诺布尔理工学院的最佳博士论文奖，以及 ICMC 卢特菲·扎德最佳论文奖。自 2015 年以来，他一直担任施耐德电气爱迪生集团的专家。

雅恩·赫里欧 (Yann Herriot) 负责领导施耐德电气企业研究中心的一个微电网创新项目。他拥有国立高等电气、电子、计算机、水力与电信学院 (ENSEEIH) 的电气工程和自动化硕士学位。他一直专注于增长电力转换领域的专业知识，并且现已扩展至微电网和分布式能源等领域。

安迪·豪恩 (Andy Haun) 是北美微电网系统的首席技术官。他负责推动技术路线图制定，以打造可以简化和实现高效电网边界解决方案部署的产品系列。安迪从 1985 年起加入施耐德电气，在这 30 多年的任职期间，他曾在 Square D Company 领导了多项重要产品的开发和技术创新，并担任研发部门的领导。他拥有爱荷华大学的电气工程学士学位，以及杜克大学的工商管理硕士学位。

冯·瓦格纳 (Van Wagner) 是密歇根州特洛伊施耐德电气工程服务中心的一名电力系统工程，负责电力系统的设计、分析、故障排除、电能质量研究和全国培训。他分别拥有密歇根大学的电机工程学硕士和密歇根州立大学的电子工程学士学位。他是“IEEE 1346-1998，评估电力系统和电子处理设备兼容性的推荐做法”标准的前任主席，也是新行业标准“IEEE 1100 绿皮书，电气设备布线和接地的推荐做法”的标准主席。他是密歇根州的注册专业工程师。