

可再生能源未来的创新前景： 波动性可再生能源并网解决方案



版权所有 © IRENA 2019

除非另有说明，本出版物中的材料可以自由使用、分享、复制、重印、打印及/或保存，并且所提供的相应知识源于 IRENA 且并由其持有版权。本出版物中属于第三方的材料，可能会有不同的使用条款和限制，在使用这些材料之前，应确保率先得到这些第三方许可。

引用：IRENA (2019), 可再生能源未来的创新前景：集成可变可再生能源的解决方案。决策者综述。国际可再生能源署，阿布扎比。

声明

本出版物及本文的材料据“原始状态”提供。IRENA 已经采取了所有合理的措施，以验证本出版物中材料的可靠性。但是，无论是 IRENA 还是其官方、代理、数据或其他第三方内容提供者中的任意一方，均不提供任何保证，也不会表示或暗示，同时他们对使用本出版物或材料后产生的任何后果，不承担任何责任。本文中包含的信息并不代表 IRENA 成员的观点。提及特定的公司或特定的项目或产品并不意味着 IRENA 认可或推荐这些公司或产品，并优先于未提及的类似性质的其他公司或产品。本文件中使用的名称和出现的材料并不意味着 IRENA 对任何地区、国家、领土、城市或地区或其当局的法律地位，或对其主管机构或边界的划分发表任何意见。

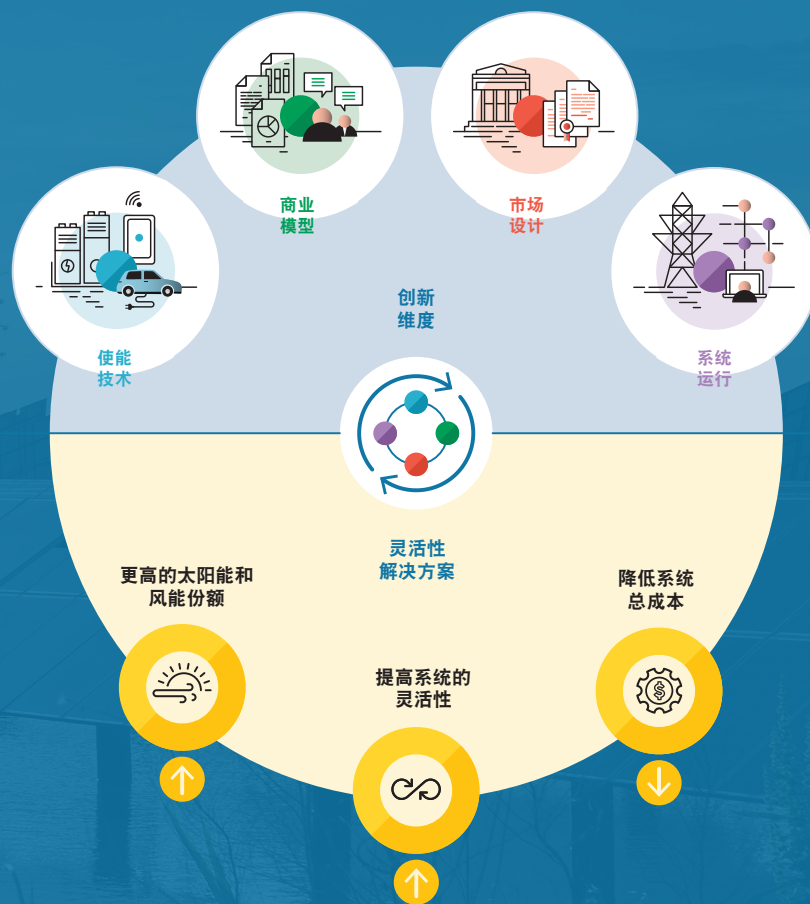
图片均源自 Shutterstock。



概要报告简介

IRENA 发布的“可再生能源创新前景情：波动性可再生能源并网解决方案”汇集了对新兴创新举措的许多重要认识，这些创新旨在帮助提高电力行业波动性可再生能源（VRE）的比重。实际上，波动性可再生能源的并网解决方案，是多领域多维度创新举措之间交互的产物。该报告分析了最重要的一些创新内容，并建立了它们之间的有机联系 - 最终形成了在不同情况下切实可行的 VRE 并网解决方案。

这份为决策部门提供参考的概要报告突出了原报告中的结论，重点将电力系统的灵活性作为可再生能源并网发电的主要保障。概要报告简要介绍了研究中提出的在关键技术、市场设计、商业模式及系统运营等方面的三十项创新内容，这些创新成果正在让电力行业朝着 VRE 为核心的方向转型。本报告还介绍了提出的 VRE 并网解决方案，并给出了成本效益分析。报告以为实现可再生能源发电的未来所提出的八步骤创新规划，总结了向决策部门提出的主要建议。



能源领域的转型需要 跨域整个领域的创新



创新是驱动着全球能源转型的发动机。此外，全球研发和引进更好、更高效的可再生能源技术的步伐正在加快。可再生能源正成为许多国家向安全、经济和环保的可持续能源供应过渡的首选。它们通过创造就业机会和创造当地价值来支持社会经济的持续发展，同时应对气候变化和当地的空气污染。

到目前为止，电力行业已经引领潮流，太阳能和风能技术的成本迅速降低，并在许多国家得到了广泛的应用。然而，尽管迄今为止取得了可喜的进展，能源转型仍需大幅加快步伐。与市场政策一样，推动技术创新的政策也应不断地重新审视

并更新，以跟上新的发展和突破（IRENA、IEA 和 REN21, 2018）。

随着占发电量比例的增加，VRE 并网也带来了具体的挑战 - 其本质是，维持供需平衡将成为一个更大的挑战。要发挥低成本 VRE，如太阳能和风能的最大价值，我们需要有灵活的集成的电力系统。

作为回应，世界各地的决策者和系统运营商正在采取一系列措施，以在不断变化的形势下保持既经济又可靠的供需平衡。创新的重点是促进解决方案的开发和部署，以增加高比例太阳能发电和风电所需的系统灵活性。

灵活性: 电力系统应当有能力应对太阳能和风能在不同时间范围内（从短期到长期）带来的波动性和不确定性的能力，避免这些波动性可再生能源（VRE）源的弃电现象，并可靠地满足所有客户的能源需求（IRENA, 2018a）。

波动性: 太阳能和风能资源的波动特性可能会导致发电量的快速变化。

不确定性: 无法准确预测太阳能和风能的未来产量。



近年来，世界各地富有远见卓识的政府和领军企业一直在创建、试验并部署多种创新解决方案，这些解决方案有可能在全世界彻底实现能源系统转型。解决方案的多样性，再加上地方能源系统之间的差异，可能会给决策者造成一个混乱的局面，他们可能难以判断并评估每个国家或情况下的最佳解决方案。

国际可再生能源署（IRENA）对各种可再生能源并网创新举措进行了广泛而详细的分析，并对创新和创新解决方案的许多实例进行了布局 and 分类。为此发表的这份报告，结合了各种线上资源，旨在为决策者就目前研发中，或是在某些情况下已经实际使用的，亦或是在全球不同情况下的各种创新给出清晰、易懂的指导。这些创新已经结合了全球范围内的各种系统。其结论框架应当能够对每个特定案例具有的潜在解决方案作出明智的判断。

本概要报告的内容如下：

- I 电力行业转型需要集成波动性可再生能源
- II 电气化、分布化及数字化趋势正改变着电力行业的格局
- III 为实现 VRE 并网的创新举措涉及到关键技术、市场设计、商业模式及系统运行
- IV 创新可以提高整个电力系统的灵活性
- V 定制化的解决方案是以创新为基础构建起来的。
- VI 评估实施灵活性解决方案的影响
- VII 创新可以降低系统成本并最大化收益
- VIII 电力行业转型的八步创新规划。

I. 电力行业转型需要 集成波动性可再生能源

世界正在经历一场转型，转向更加包容、安全、成本效益高、低碳及可持续发展能源的未来。其中关键的基石之一就是可再生能源。正如联合国可持续发展目标和关于气候变化的《巴黎协定》所反映的那样，这一转变是在前所未有的公众关注下推动的，并随后采取了政策行动解决世界各地的可持续发展和气候变化问题。

在环保和健康政策以及可再生电力成本（尤其是风能和太阳能光伏发电）快速下降的推动下，电力行业正在引领着能源的转型。在 2009 至 2018 年间，太阳能光伏发电的成本降低了约 75%，在同一时间内，陆上风电的成本也降低了约 25%（IRENA, 2018b）。

2017 年，在风能和太阳能光伏技术的部署大幅增长的情况下，可再生能源约占全球总发电量的四分之一（IRENA, 2017a）。截至 2017 年底，可再生能源装机容量达到 2337 吉瓦（GW），占总发电装机容量的 34%（IEA, 2018 年）。其中大部分是水力发电（54%），其次是风力发电（22%）和太阳能光伏发电（17%）。预计在未来几年，风能和太阳能光伏的份额将继续加速增长（IRENA, 2018c）。在一些国家，风能和太阳能光伏的比例已经远远高于全球平均水平。

例如，丹麦和爱尔兰，是全球风能集成的领跑者，风电比例分别占 44% 和 27%，因此，最大瞬时比例已分别超过需求的 150% 和 60%（RTE, 2018；EirGrid 和 SONI, 2018）。

然而，能源转型的增长需要进一步加速。根据 IRENA 的分析，在 2050 年之前，为了符合《巴黎协定》所制定的气候目标，电力行业的碳减排需要可再生能源占到总发电量的 85%。（图 S1）（IRENA, 2018c）。此外，电力在工业、运输和建筑等终端使用领域的总能源需求中的份额需要从 2015 年的 20% 左右增加到 2050 年的 50% 以上。

在符合《巴黎协定》的情况下，VRE 技术，特别是太阳能光伏和风力发电，在能源转型中发挥着核心作用。VRE 产能继续领先，将从今天的 900 吉瓦上升到 2050 年的 13 000 吉瓦，约占总发电量的 60%。这需要在 2017 年的水平上将年风电新增装机容量提高到三倍，将太阳能光伏年新增装机容量翻一番。

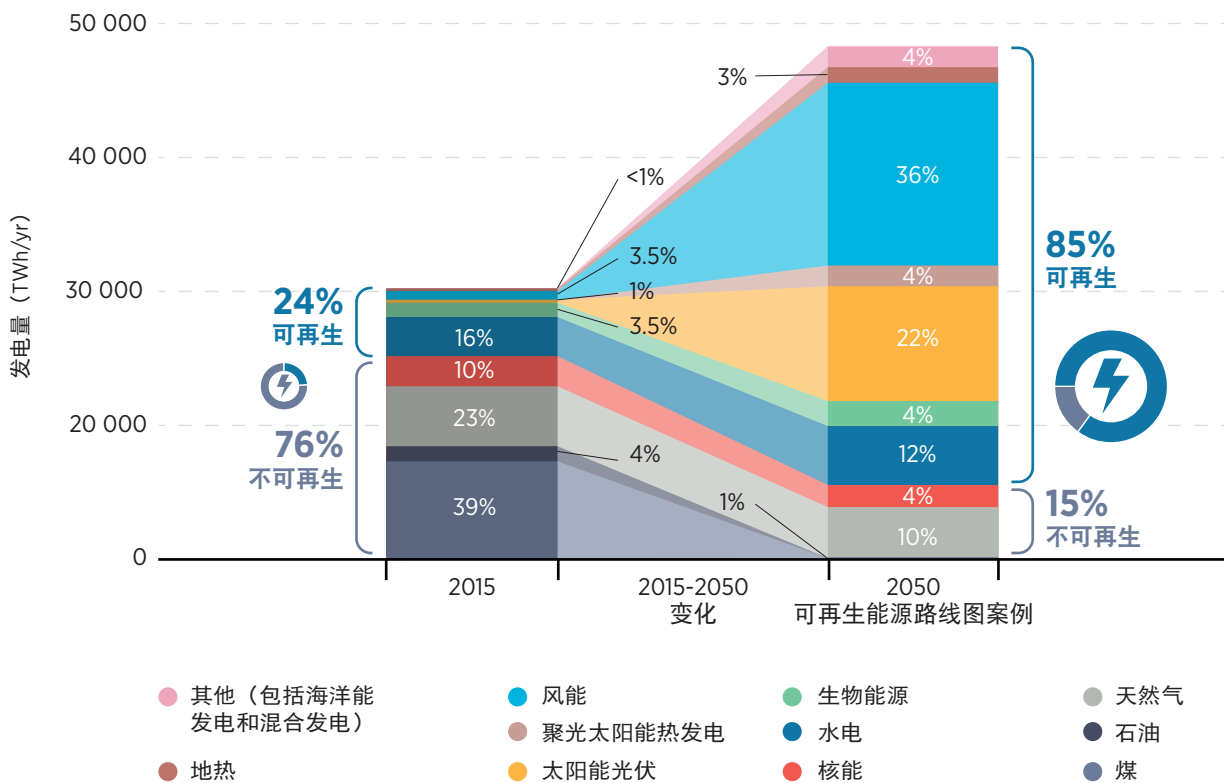
创新对于促进 VRE 并网和推动全球能源转型至关重要



因此，为实现**在电力系统中集成高比例 VRE 所开展的创新对于全球能源转型的成功至关重要**。³ 如此高比例的 VRE 并网具有重要意义：电力系统需要变得更加灵活；应控制系统成本；系统设计

必须考虑到持续创新的趋势（即数字化、电气化和分布化）带来的变化，无论是否伴随着 VRE 集成，这些创新趋势都很可能会发生。

图 S1 在符合《巴黎协定》的情况下按电能来源划分的细目列表



注：CSP = 聚光太阳能热发电 TWh = 太瓦小时；yr = 年。

来源：IRENA (2018c), 全球能源转型：到 2050 年的路线图, www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Apr/IRENA_Report_GET_2018.pdf

³ 完整报告中包含了新兴创新的详细信息，这些创新可以支持高比例的 VRE 并网，特别是通过增加电力系统的灵活性。这项工作是基于对全球和整个电力行业数百个创新项目和正在实施的方案的分析，涉及关键技术、市场设计、商业模式和系统运行。这些创新已被规划并按类别分成了 30 种创新类型。

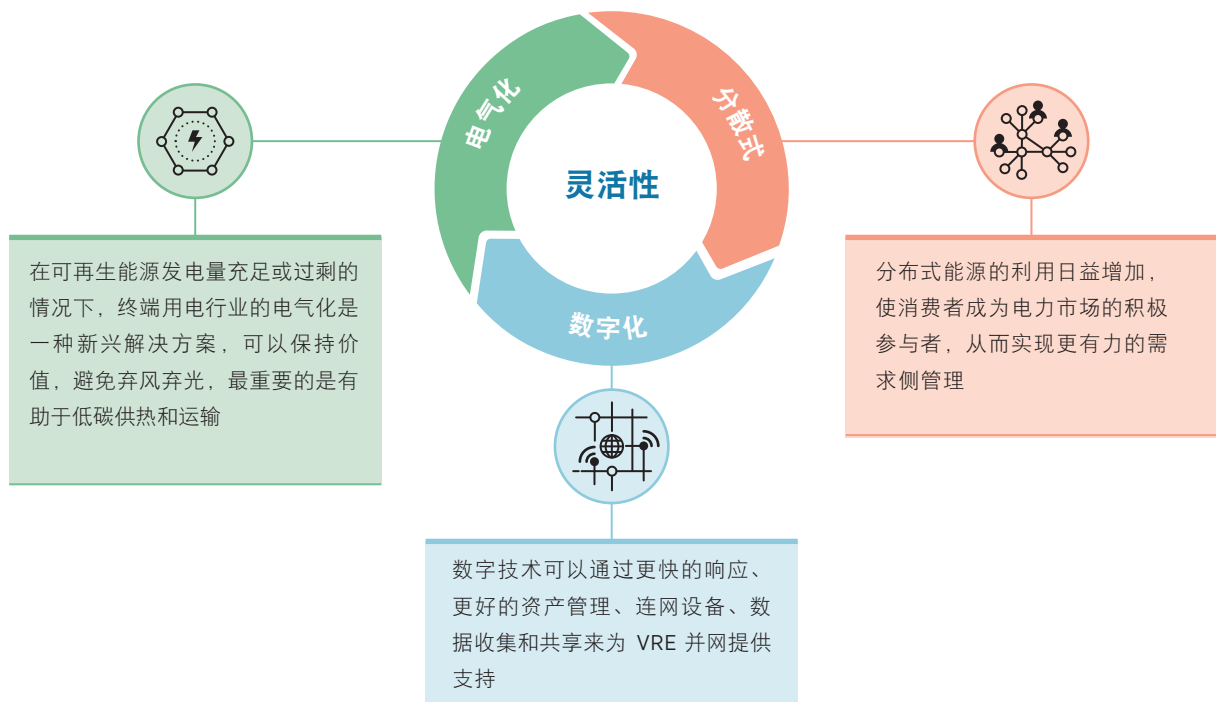
II. 电气化、分布化及数字化趋势 正改变着电力行业的格局

电 气化、分布化和数字化的结合正在加速电力行业的转型（图 S2）。这些领先的创新趋势正在改变着电力系统的格局，为高 VRE 比例释放系统灵活性，并改变着角色和责任，为电力行业的新兴企业打开了大门。

终端用户领域电气化

利用可再生能源实现电气化是实现最终用户领域（交通、建筑和工业）碳减排的基石。因此，新的电力负荷（例如：电动汽车、热泵、电锅炉）正在大规模地连接到电力系统中，且主要是在配电层面上。如果管理不好，这些新的负荷会对电力容量产生额外的需求，对电网造成压力，并需要额外的投资来加强电力基础设施。

图 S2 转变电力行业的三大趋势



方框1 电动汽车智能充电的灵活性

电动汽车不仅正在改变交通运输业，而且还通过提供新的灵活性来源正在重塑电力市场。到 2018 年 6 月，已有 400 万辆电动客车上路，全球约十亿辆电动汽车中有 40% 在中国，（BNEF，2018）。电动汽车的注册量于 2017 年创下新纪录，全球销量超过 100 万辆，约占汽车总销量的 1.3%。

许多国家和公司正在探索如何将这此车辆所需的充电基础设施与电力系统并网。例如，Nissan 和 Enel 合作实施了一种能源管理解决方案，该方案使用车辆到电网（V2G）充电装置，并允许作为电网用户的车主将其作为单独的能源中心运行，能够获取电力、存储以及把电力送回电网。Nuvve 公司提供了 V2G 软件解决方案，用于市场参与者之间的结算。在丹麦（Parker 项目）和英国启动了试点项目，以测试这一解决方案。2016 年，Nissan 电动汽车的车主通过 Enel 的双向充电器向电网输送电力而获得了收入，丹麦和英国的输电系统运营商（TSO）则受益于电网的一级监管服务（Nissan Newsroom Europe，2016）。

供热电气化也在增长。预计到 2017 年底，欧洲将安装 1000 多万台热泵（EPHA，2018）。热泵为需求侧管理应用创造了机会，如负荷转移和高峰调节。此外，工业应用已开始使用电力来生产氢气、热量和其他形式的能源，从而允许在发电高峰期消纳间歇性低成本可再生能源发电。

相反，如果能以一种智能的方式做好管理，这些新的负荷本身就可以通过需求侧管理策略成为灵活性的来源，这有助于将更多的可再生能源集成到电力系统中。许多这些新的负荷本身就非常灵活，例如（a）它们带有电池（例如电动汽车电池）或蓄装置（例如热泵或带热水箱的电锅炉），且（b）它们的用途可以及时切换，这有助于缓解需求趋势，以匹配发电的可用性和配电网的容量。**以智能的方式实现电气化对于实现这些效益至关重要**，这需要对电气设备的优化利用，并激励客户改变他们的使用方式，以符合电力系统的需求。

电力系统的分布化

实际上，连接在用户端的分布式能源（DER）的出现正在使电力系统愈加分散。它们包括屋顶太阳能光伏、微型风力涡轮机、表后（BtM）电池储能系统、热泵和插电式电动汽车。今天，源自风力涡轮机和太阳能光伏所产生的电力，很大程度上是集中式的。但是，分布式发电，特别是屋

方框2 通过 DER 和数字化实现更好的能源普及

分布式可再生能源与数字技术的结合也有助于解决能源普及问题。最近，诸如先用后付、点对点（P2P）能源交易和能源社区等模式在离网能源市场越来越受欢迎。例如，先装后付款模式改善了全球 8370 万人的能源使用方式（GOGLA，2017）。M-KOPA 是一家采用先用后付模式的公司，为肯尼亚和乌干达的家庭提供太阳能家庭系统，使用移动支付系统收取预付款。该公司为这些国家的 60 多万户家庭提供了电力接入，让这些家庭能够拥有灯光、给手机充电并使用家用电器，如电视机和冰箱（Quartz Africa，2018）。SOLshare 是一家在孟加拉新成立的企业，使用基于分布式能源技术的 P2P 太阳能交易平台（SOLshare，2017）。该电力交易平台利用太阳能家庭系统的过剩发电量，将其出售给附近的家庭，每年的能源使用费至少可降低 25%。预计到 2030 年，该公司将运营超过 20000 个微电网，并为孟加拉的一百万客户提供电力（UNFCCC，2018）。

顶太阳能光伏，目前只占了所有发电量的 1%，正在加速增长。分布式存储也获得了一定的发展势头。BtM 存储商业模式允许用户存储屋顶太阳能电池板产生的电能，并在需要时使用，或将其出售给电网。**基于 DER 的分布化可能是灵活性的重要来源，例如，可通过需求响应措施和需求聚合商的商业模式来实现。**

电力行业的数字化

对数字化监控和控制技术在发电和输电领域的应用，几十年来一直是一个重要的趋势，近年来在电力系统中的应用更加深入。智能仪表和传感器

的广泛使用、物联网（IoT）的应用以及大量人工智能数据的使用，为系统提供新的服务创造了机会。数字技术更以多种方式为电力部门的转型提供了支持，包括：更好地监控发电厂的运行状况；更加精细的操作且控制更接近实时；实施新的市场设计；同时出现新的商业模式。

数字化是能源转型的关键放大器，能够管理大量数据，并优化许多小型发电机组的系统。建立在区块链基础上，数字化系统增强了通信、控制以及未来的自动化智能合同管理，能够通过需求响应“聚合商”将各个分布式能源系统捆绑在一起。

方框 3 数字技术有助于家庭参与市场

据估计，全球已经安装了超过 7 亿台智能电表，仅在中国就有 4 亿台。此外，到 2025 年，预计全球将通过物联网连接 750 亿台电器，为消费者、制造商和电力供应商提供丰富的信息（Statista，2018）。

许多公司都在探索如何在能源应用中利用这些设备获益。例如，一家中国智能能源公司，Envision Energy 正与中期天气预报欧洲中心（ECMWF）、英国气象局（英国国家气象服务部门）和奥尔胡斯大学合作，投资研究先进的可再生能源预测（BTECH CET）。这项研究的重点是利用尖端科学数据、模型、算法和超级计算技术来提高对可再生能源发电的预测。先进的预测模型将提高能源资源评估的准确性，提高电网能力，接纳可再生能源发电量，从而降低风能和太阳能的平均成本。⁴

Elia 是一家比利时的输电系统运营商，运用 DER 容量提供电网平衡服务。通过一个共享的 IT 平台，所有连接到配电/输电网的用户和发电机每天都可以向 TSO 提供灵活的服务（Elia，2018）。此外，Elia 于 2018 年 4 月启动了一个区块链试点项目，探索如何利用这一技术作为支付系统，来解决由复杂和快速交易带来的业务问题。

2018 年，德国的电池解决方案公司 Sonnen 获得了 TSO Tennet 的官方认证，提供电网服务并参与该国的电力平衡市场。⁵ 电网服务通过聚合 3 万户家庭的上网存储系统来提供。3 万户家庭的网络化家庭存储系统聚合而成。将这些系统放在一起形成了目前世界上最大的虚拟电池之一，容量为 300 兆瓦时（MWh）。这些采用太阳能发电的家庭相互连接，能够取代传统燃煤发电厂提供的所有电网服务，并预计将以 800 兆瓦（MW）的装机容量取代一般的燃煤发电厂。

⁴ www.envision-energy.com/2017/12/11/envision-energy-announces-new-strategic-renewable-energy-forecasting-partnership/

⁵ www.montelnews.com/en/story/sonnen-balances-german-power-with-home-batteries--report/959924

除了提供一系列有用的能源服务外，分布式发电及其关键技术已成为极有价值的数据来源。有关消费模式、负荷曲线、电力系统部件性能和故障的详细和实时信息，可以使电网运营商更好地规划并运行系统。根据过去的行为模式，加强分布式能源对电力生产和消耗的预测也成为可能。这些开发成果可以用来更好地管理资产和运营，提高整体的系统灵活性。

由于分布化和电气化方面取得的成果，与数字化的关系也日渐加深。分布化产生了大量的新建小型发电机组，主要是屋顶太阳能光伏。对输电和热力的电气化，带来了大量的新增用电负荷，诸如电动汽车、热泵以及电锅炉。供电侧（基于分布化）和需求侧（基于电气化）的所有新设备均对电力系统产生了影响，使得监测、管理和控制对于能源转型的成功与否至关重要。



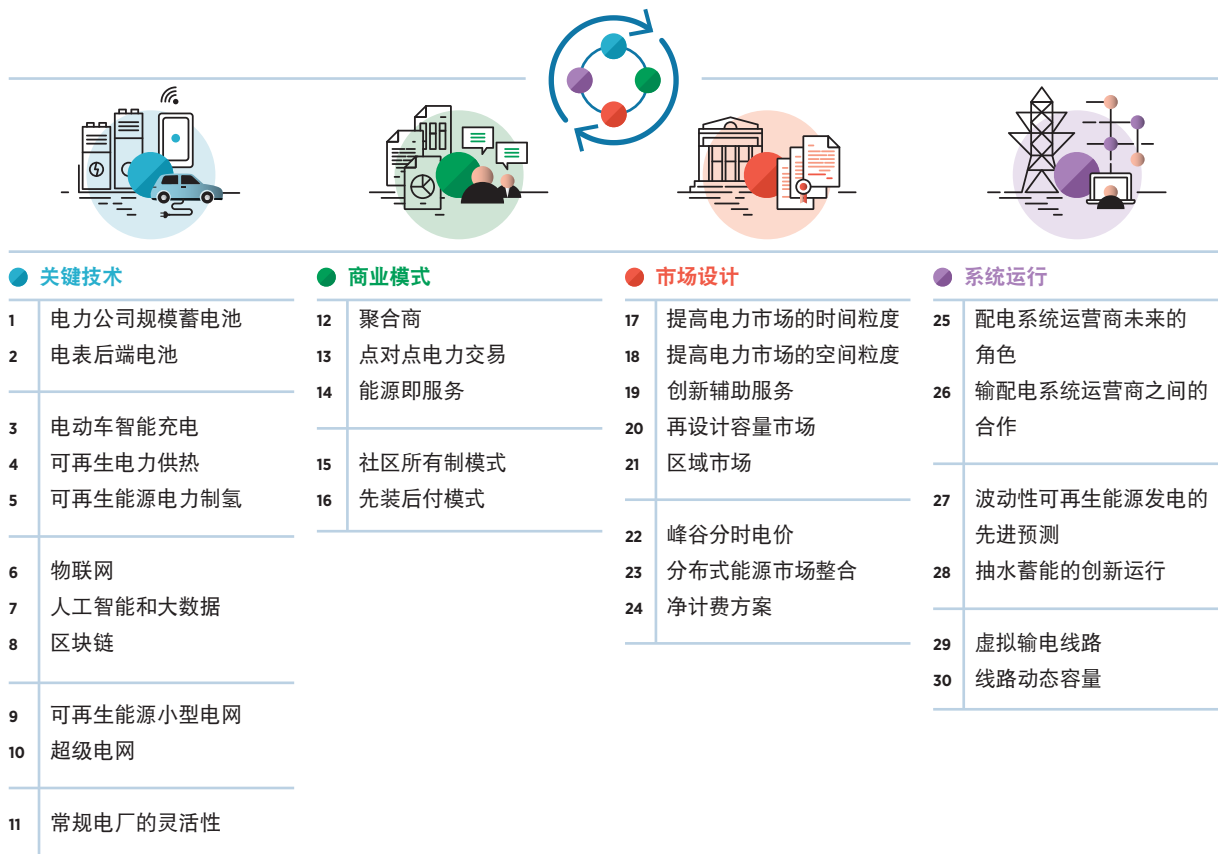
III.VRE 并网创新举措

覆盖关键技术、 市场设计、商业模式及 系统运行

在解决 VRE 并网发电问题时，我们并不缺乏创新。IRENA 对高比例 VRE 并网发电的创新举措进行了调研。通过调研分析找出了 30 种四大类电力行业转型创新举措：关键技术创新、商业模式创新、市场设计创新和系统运行方式创新，如图 S3 所示。

能源转型需要在使能技术、商业模式、市场设计和系统运行方面都有所创新。

图 S3 电力行业转型的创新举措



这些创新举措及其项目都在本研究涉及的创新内容简介中做了详细介绍。

- **关键技术。**使得电力系统获得更大灵活性的技术对实现可再生能源并网发电起到了关键作用。现有传统的发电技术，比如火电厂，已经正在逐步现代化，以变得更加灵活。电池储存、需求侧管理和数字化技术正在改变着电力行业，对可以解开系统灵活性枷锁的全新应用打开了大门。终端用户领域电气化作为可再生能源的新兴市场正在蓬勃发展，但如果能通过智能的方式，同样可以为灵活的需求提供额外的渠道。
- **商业模式。**创新的商业模式是将这些技术创造的新价值货币化的关键，有利于这些创新模式

的推广。在消费者端，随着 DER 的利用，出现了许多创新的商业模式，有些创新方案能够利用可再生能源为远离电网或人口稠密的一些地区提供电力。

- **市场设计。**根据不断变化的模式调整市场设计 - 向（高比例 VRE）低碳电力系统方向发展 - 这对于实现价值创造和充足的收入流至关重要，正如之前 IRENA 的分析（IRENA, 2017b）所述。批发市场和零售市场都需要创新，以充分释放电力系统的潜在灵活性。
- **系统运行。**有了新技术和完善的市场设计，还需要有系统运行方面的创新，以应对高比例 VRE 的并网发电，解决分布式发电并网带来的不确定性，并创新系统运行方式。

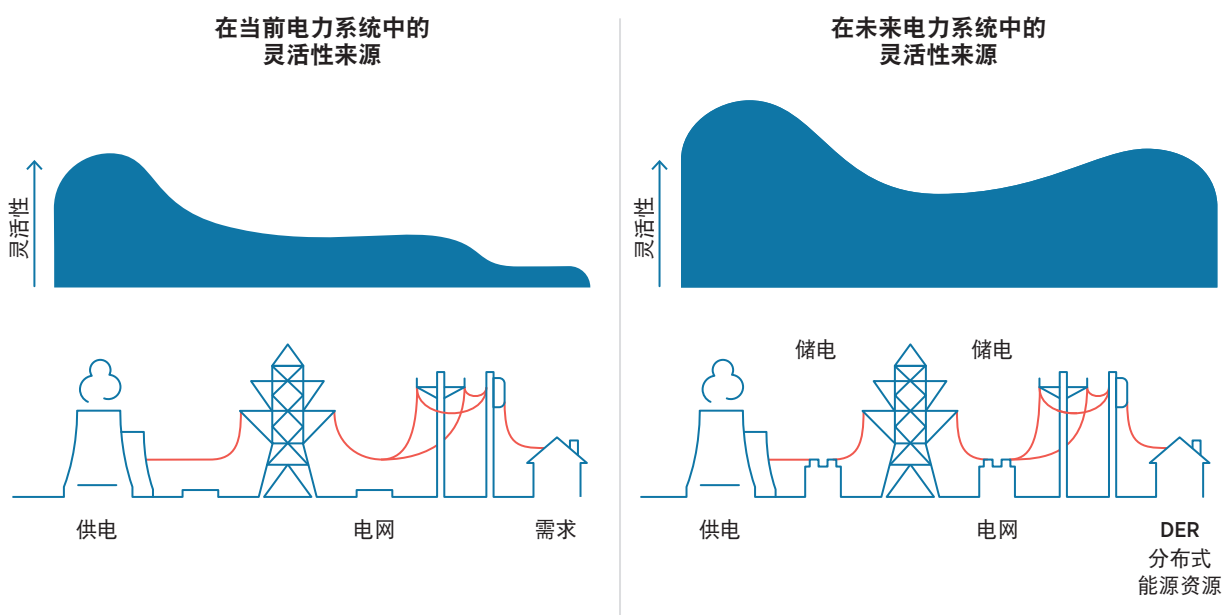


IV. 创新可以提高整个电力系统的灵活性

按常规，在传统的电力系统中，灵活性主要由供电侧提供，对可调度的发电量根据需求进行调整，如果可以，由抽水蓄能发电解决不灵活的基础负荷，减少为满足高峰用电需求对电厂建设的需要。近几十年来，在提高常规电厂的灵活性方面已取得了重要进展。但需求侧几乎无法提供任何灵活性，因为它基本上没有反馈。**新**

兴的创新不仅进一步提高了供电侧的灵活性，而且正在拓宽到提供电力系统所有部分（包括电网和需求侧）的灵活性。这些创新提供了更广泛的解决方案组合，可以进行组合和优化，以降低成本并最大限度地提高系统收益。下图 S4 表明了一个以发电为主要灵活性来源的系统过渡到一个整个系统都很灵活的系统。

图 S4 创新为电力行业提供了新的灵活性选项



提高整个电力系统的灵活性可能来自以下几方面。

- **供给侧灵活性：**需要更大的激励来提高供应侧的灵活性。通过降低最小运行负荷、缩短启动时间和提高爬坡率，可以使现有常规电厂的运行更加灵活。
- **电网灵活性：**可以通过提高网络容量和区域市场的互连来提高系统灵活性，这些市场允许电力在更大的平衡区域内、跨多个控制区域甚至在整个大陆内更便捷地进行输电。配电网容量和管理对于从配电层接入的能源中集成更多可再生能源也很重要。
- **需求侧灵活性：**在需求侧，由于 DER 的出现，再加上允许分布式能源参与市场的市场设计，有可能大大提高系统的灵活性。通过成为电网中的积极参与者，DER 对系统的状况作出响应，并对电网提供服务。
- **全系统的储电灵活性：**储能技术是灵活性的关键来源。它可以连接整个电力系统。电力公司规模电池以及电能到 X 的应用（如电制氢）可以通过储存多余的 VRE 发电来增加供应侧的灵活性，而在需求侧则可以通过终端用户领域的智能电气化来提高灵活性。储能技术也可以通过降低网络堵塞来增加电网的灵活性



V. 量身定制的解决方案是以创新为基础构建起来的

本 研究重点介绍了 11 种基于相关性和日益广泛使用的 VRE 并网发电解决方案，每种方案都结合了多种创新。这份清单虽然并不详尽，但旨在说明各国如何通过结合不同的创新来适应不同的环境，从而实现 VRE 的并网发电。图 S5 列出了报告中所讨论的灵活性解决方案。

创新是无法孤立地实现的。跨越各个维度的不同创新之间的协同作用可以为 VRE 集成提供解决方案。

案。为实现高比例 VRE 并网发电而设计的最优策略，并实现不同的创新举措，要根据各国的国情进行。不同的解决方案，为电力系统从发电厂到用户的不同环节提供了更大的灵活性。

图 S6 显示了 30 项创新内容与本研究中所阐述的 11 项灵活性解决方案之间的联系。不同的创新被用作建设基石，以创建 VRE 集成解决方案。

图 S5 释放电力系统灵活性的解决方案



注: RE = 可再生能源

方框 4 不同国家正在实施的灵活性解决方案示例

供给侧灵活性（德国）：自 2009 年以来，除了传统发电厂之外，可再生能源发电厂、电池存储系统和工业负荷也获准参与德国的平衡市场。2009 年至 2015 年期间，以吉瓦为单位的平衡市场规模下降了 20%，TSO 辅助服务采购成本下降了 70%。在同期内，系统稳定性提高，VRE 装机容量提高了 200%。这表明，允许替代能源参与辅助服务市场有助于提高系统稳定性，同时降低成本（Wang, 2017）。

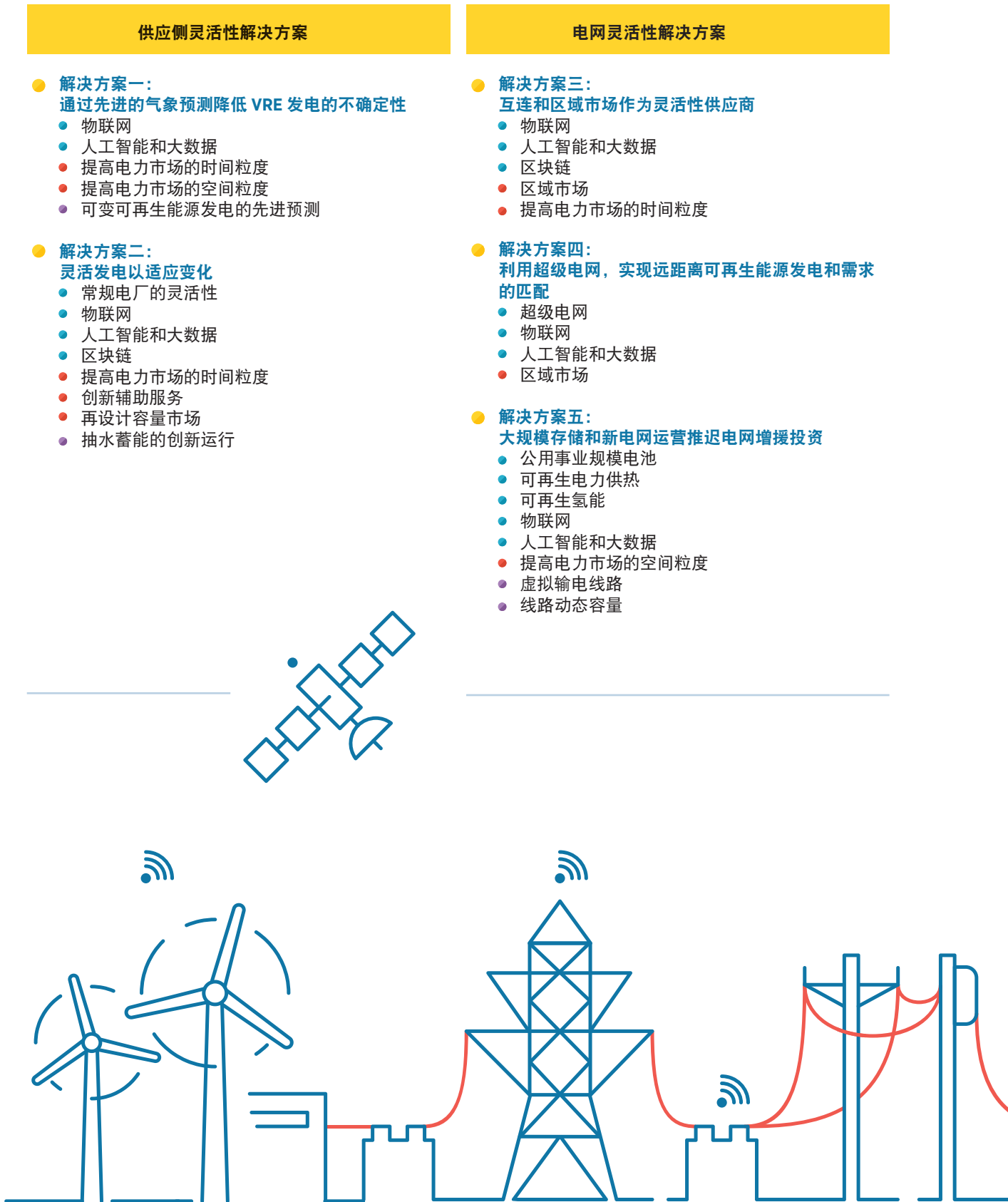
电网灵活性（丹麦）：大规模风力发电在很大程度上是由于电网的互联性强。丹麦主要向北欧其他国家出口过剩的风能，这些国家可以利用这些进口的风能来取代其水力发电，并节约其水库中的水资源。丹麦的国内电网稳定性强的，其与斯堪的纳维亚半岛其他国家和德国的互连容量几乎等于 6.5 吉瓦的峰值负荷（德国进口量 2.2 吉瓦，瑞典进口量 2 吉瓦，挪威进口量 1.6 吉瓦）。

需求侧灵活性（美国）：Con Edison 是纽约的一家电力公司，为参加其需求响应计划的客户提供退费折扣。客户允许电力公司每年对其温度自动调节器最多调整 10 次（Con Edison, 2016）。同样，美国公司 STEM 帮助商业和工业客户通过在需求高峰期使用电池中储存的能源削减其能源开销。该公司将电池存储与基于云的分析系统结合起来，以确定从电池存储中获取能量的最佳时间（Colthorpe, 2017）。STEM 利用基于人工智能的技术来实现（Pickrel, 2018）。

全系统的储电灵活性（澳大利亚）：美国公司特斯拉最近在位于南澳大利亚的规模为 315 MW 的 Hornsdale 风电场委托建造了一个容量为 100 MW/129 Mwh 的锂离子电池储存设施。该设施的旨在稳定风电场产生的电力，同时为南澳大利亚电网提供辅助服务（McConnell, 2017年）。另一个有关储存灵活性的例子是在荷兰开发的 HyStock 项目，该项目由一台 1 MW 的电解槽和一个 1 MW 的太阳能发电场组成，将提供产生氢气所需的部分电力。该项目位于一个盐洞附近，该盐洞可作为缓冲区，用于储存电解槽压缩后产生的氢气。然后，这些氢气可以被输入至储存罐中并运送给最终用户。此项目正在进一步研究该电解槽如何通过向电网提供辅助服务等方式让电力行业获益（EnergyStock, 2018）。



图 S6 通过整合关键技术、商业模式、市场设计和系统运营而创造出的灵活性解决方案。



需求侧灵活性解决方案

- **解决方案六：
为电网服务聚集分布式能源**
 - 电表后端电池
 - 电动车智能充电
 - 可再生电力供热
 - 物联网
 - 人工智能和大数据
 - 区块链
 - 聚合器
 - 分布式能源市场整合
 - 创新辅助服务
 - 输配电系统运营商之间的合作

- **解决方案七：
需求侧管理**
 - 电表后端电池
 - 电动车智能充电
 - 可再生电力供热
 - 物联网
 - 人工智能和大数据
 - 能源即服务
 - 峰谷分时电价
 - 净计费方案
 - 可变可再生能源发电的先进预测

- **解决方案八：
可再生能源小型电网向主电网提供服务**
 - 可再生能源小型电网
 - 电表后端电池
 - 电动车智能充电
 - 可再生电力供热
 - 物联网
 - 人工智能和大数据
 - 区块链
 - 点对点电力交易
 - 社区所有制模式
 - 分布式能源市场整合

- **解决方案九：
利用分布式能源优化配电系统运营**
 - 物联网
 - 电表后端电池
 - 电动车智能充电
 - 人工智能和大数据
 - 聚合商
 - 净计费方案
 - 配电系统运营商未来的角色
 - 虚拟输电线路

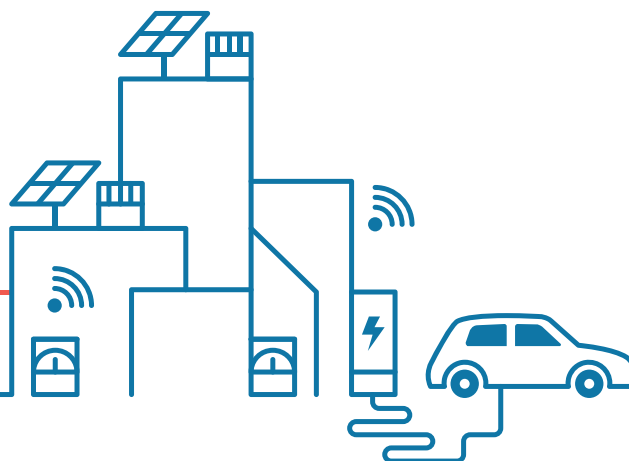
全系统的储存灵活性解决方案

- **解决方案十：
公用事业规模电池解决方案**
 - 公用事业规模电池
 - 物联网
 - 人工智能和大数据
 - 聚合器
 - 创新辅助服务
 - 提高电力市场的时间粒度
 - 提高电力市场的空间粒度
 - 再设计容量市场
 - 虚拟输电线路

- **解决方案十一：
电能利用解决方案**
 - 可再生氢能
 - 可再生电力供热
 - 人工智能和大数据
 - 创新辅助服务
 - 虚拟输电线路



- 关键技术
 - 商业模式
 - 市场设计
 - 系统运行
- 解决方案



VI. 评估灵活性解决方案的实施效果

决策者需要认识到，不同解决方案的实施带来了不同的挑战，例如需要对技术开发和基础设施建设进行投资、监管挑战、在多个利益相关方协调的复杂性以及主要参与者角色的潜在变化。

一般来说，对技术或基础设施投资需求最少的解决方案主要是基于系统运行和市场设计的创新。

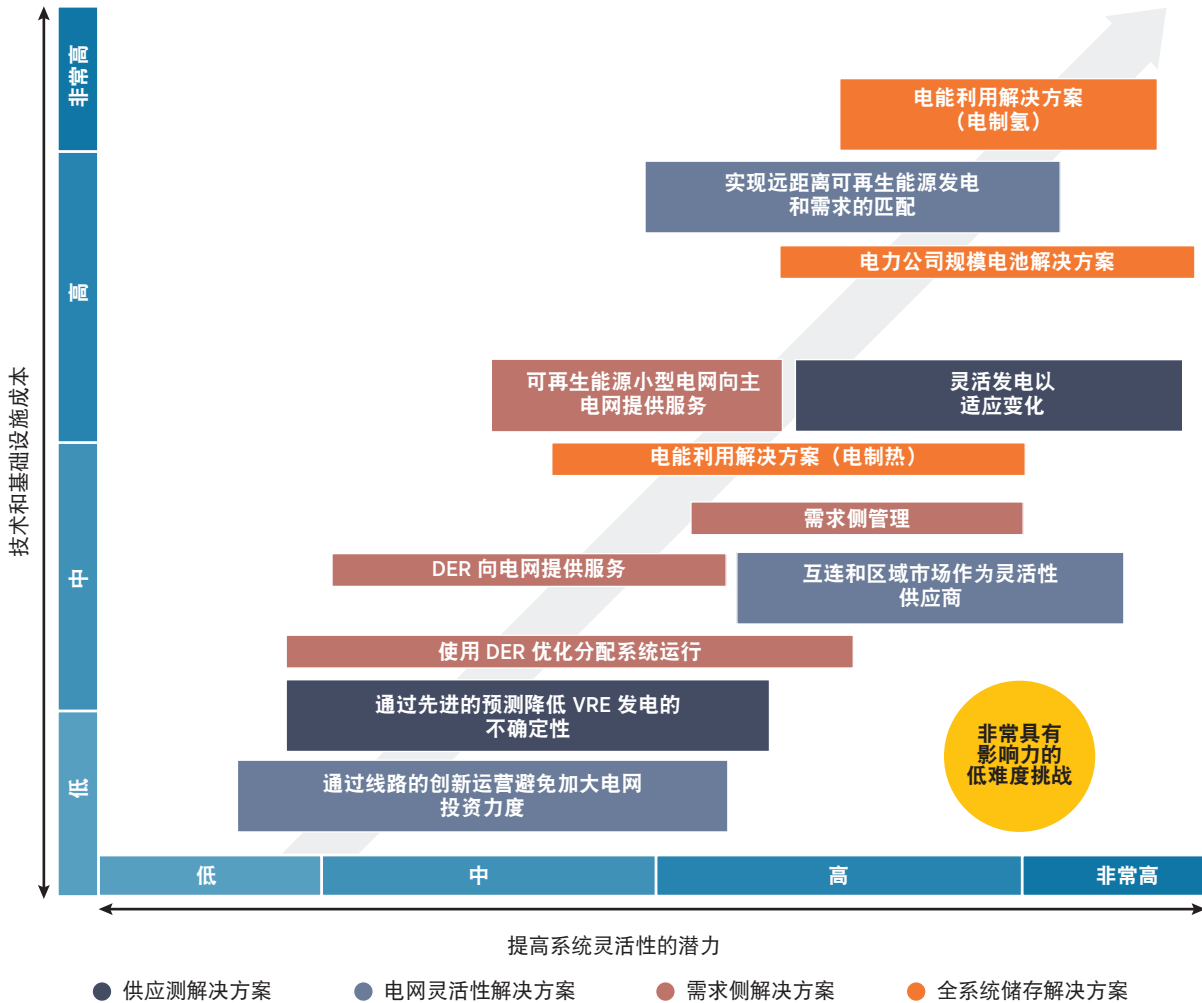
这些解决方案可以激励现有企业和新的企业在已有设备基础上有效地应对新的系统状况。下表 1 中说明了不同解决方案和创新可能带来的更高一级的挑战。

由于实现不同解决方案的复杂性不同，每个解决方案在实现高比例 VRE 方面的影响也不同。图 S7 从潜在灵活性和成本方面对解决方案进行了比较，而图 S8 则从非技术性挑战方面，例如需要改变政策或监管框架，在能源行业增加一些参与者，以及公众的接受程度等方面，对解决方案进行了对比。根本没有既影响大，又成本低且挑战少的所谓“新科技”，如图 S7 所示，解决方案所需的投资通常与它提供的潜在灵活性成正比。然而，非技术挑战的比例并不完全相同，如图 S8 所示。这是因为每一

表 1 实施创新的挑战

	所需投资	挑战
关键技术 	<ul style="list-style-type: none"> • 硬件投资需求大 	<ul style="list-style-type: none"> • 关键技术运营
商业模式 	<ul style="list-style-type: none"> • 硬件投资少，软件投入高（可能需要对人员和软件投资） 	<ul style="list-style-type: none"> • 很可能需要更改规定 • 需要实施新的数字化技术（比如传感器或预测性模块）
市场设计 	<ul style="list-style-type: none"> • 硬件投资少，软件投入高（例如，对能源交换和市场参与者的软件进行投资） 	<ul style="list-style-type: none"> • 规范框架有所变化 • 政治挑战 • 可能需要国际合作 • 需要多方之间进行协调 • 改变了在电力领域中行动者的地位 • 因为会分输赢，因此得到同意并进行部署可能会需要时间
系统运行 	<ul style="list-style-type: none"> • 硬件有限，软件极高（可能需要新软件、工具、控制系统） 	<ul style="list-style-type: none"> • 数据可用性 • 数据处理 • 可能需要更改规定

图 S7 解决方案灵活性潜力与技术成本相比



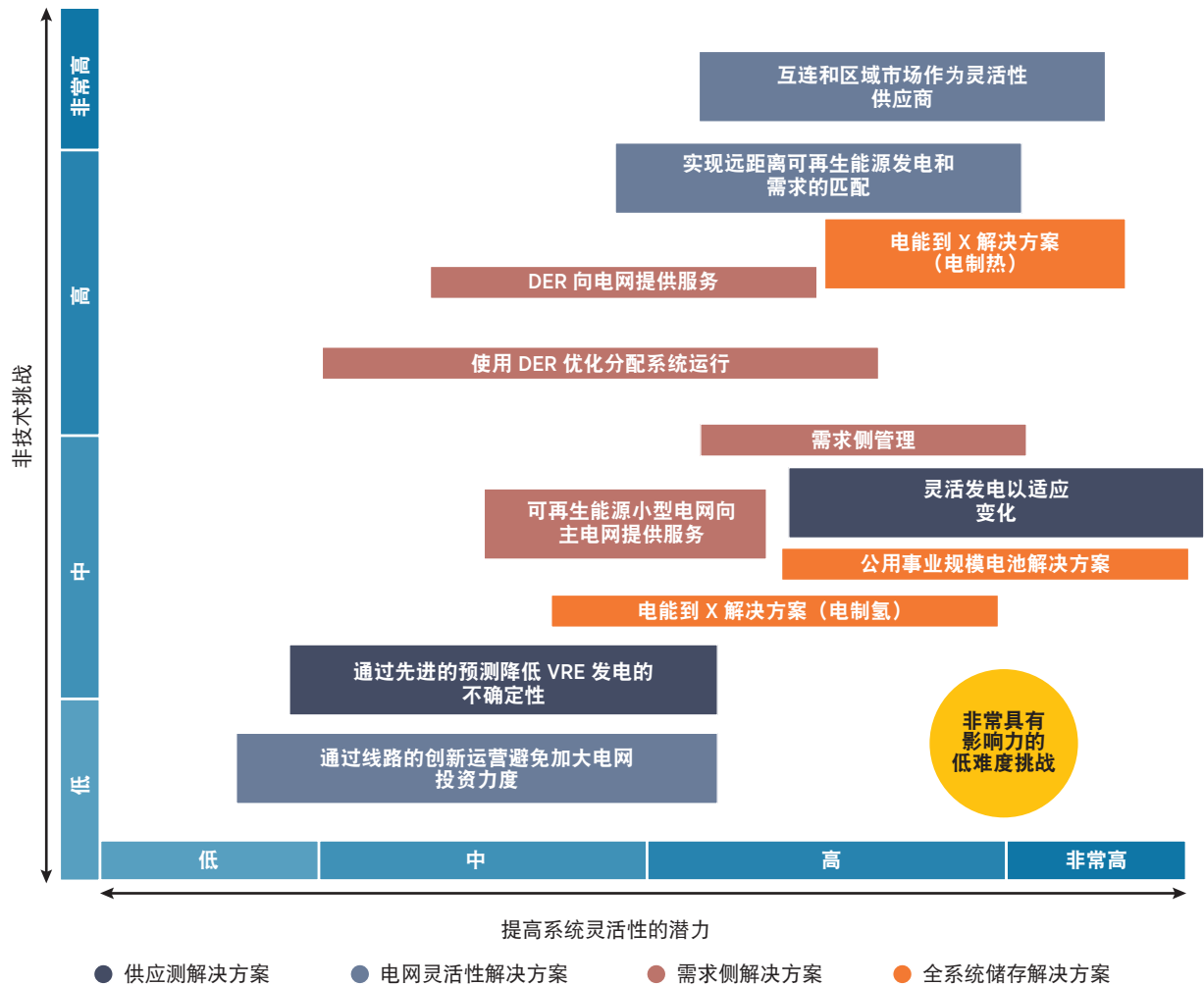
每个解决方案都有不同的挑战，并且很难以绝对的方式进行比较。每一个挑战都受到地缘政治和电力系统状况的具体影响。

图 S7 显示，应用了电制氢的大型电池、超级电网和电解槽是成本高昂的技术，但它们是具有高及非常高灵活性影响的解决方案。然而，许多其他的解决方案以更低的成本也可以提供显著的灵活性。每个系统都需要对所需的灵活性水平及其在状况下可以产生的协同作用进行自我评估。

然而，如果这些解决方案之间存在潜在的协同效应，其结果将使其在共同实施时降低投资要求。例如，在数字技术方面的投资，使数据交换系统能够向电网提供服务，也将有助于提供需求侧管理。对电制热解决方案（如住宅热泵）的投资将增加需求侧解决方案的影响，使需求侧管理更加高效，为电网提供服务，并使 DSO 能够更好地优化系统的运营。

在图 8 非技术挑战中考虑到的许多创新解决方案所面临的一个重要挑战是，所涉及的参与者的角色和责任不断变化。例如，需求侧的灵活性解决方案包括改变消费者的角色和改变消费模式。

图 S8 解决方案灵活性潜力与非技术挑战相比



注：非技术挑战包括所需的监管变化、参与者角色的变化以及其他挑战。

为了集成 DER 并使其释放需求侧的灵活性，需要改变 TSO 的角色，更重要的是，还需要改变 DSO 的角色。改变系统中参与者的角色是一个重大挑战，因为完成这一转变需要一定的激励和商业模式。在其他情况下，当涉及到外部合作、设定跨系统角色和责任并将区域利益置于国家利益之上时，政治体制和国际环境往往是一个特殊的挑战。这些可能是通过相互联系建立运作良好的区域市场互连或协议的最大障碍。

更通俗地说，上述图 S7 和 S8 表明，专注于需求侧和基于市场设计创新的**解决方案成本较低**，对 VRE 集成的影响则为中等至较高。这使得这些解决方案在许多国家成为一个极具吸引力的选择，因此是一个很好的开端。**对用到更多关键技术的解决方案，如电网、储电、以及电能利用的创新等，需要更大的投资，但对 VRE 并网发电也会产生更大的影响**。这使得它们更适合于高级阶段，在这些阶段，各国在其电力系统中实现了高比例的 VRE。然而，政策框架必须对监管和基础设施规划方面有所预见，这些方面对于在后期成功实施这些解决方案至关重要。

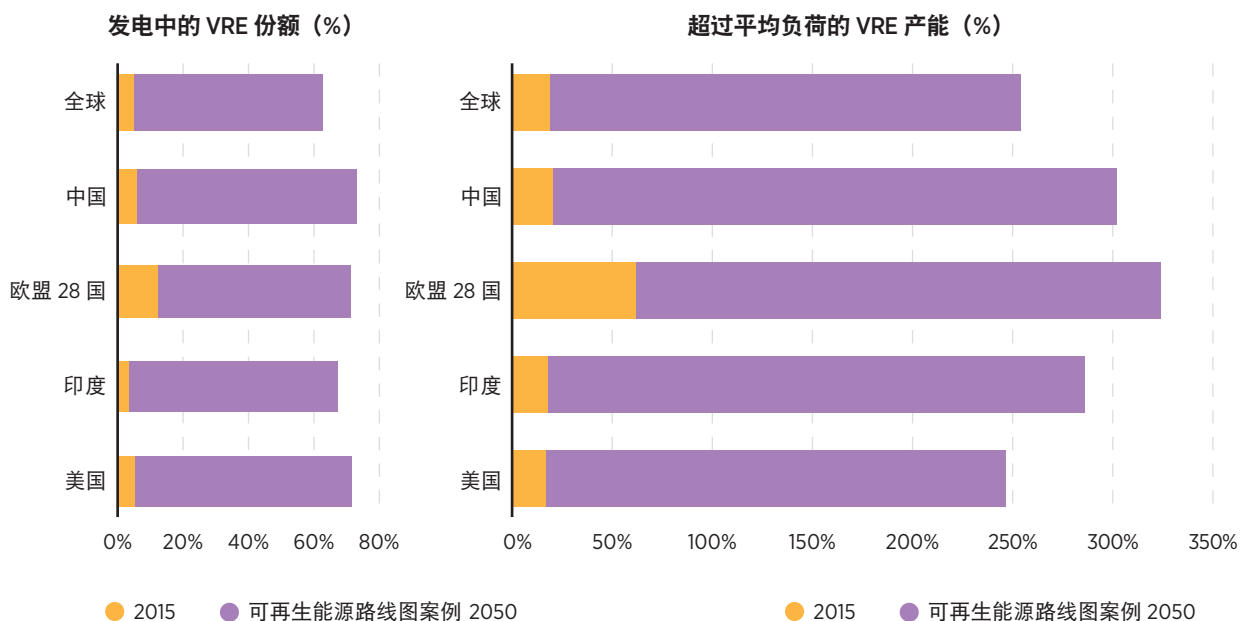
VII.降低系统成本并获得最大收益方面的创新

在符合《巴黎协定》的情况下，到 2050 年 VRE 在全球发电中的所占比例将达到 60 % 以上，有几个国家这一比例会更高。如图 S9 所示。电力系统的一个更重要的方面是，在许多国家，VRE 发电高峰期的供电量可能大大超过电力系统负荷。灵活的系统和智能方法有助于利用富

余的可再生能源电力，同时最大限度地减少对基础设施和电力系统运行的额外挑战。

为了实现具有成本效益的全球转型，从而形成低碳、可持续、可靠和包容性的能源系统这一目标，所采取的战略需要在最大限度地提高相关效益的同时，最大限度地降低与 VRE 集成相关的成本。

图 S9 在符合《巴黎协定》的情况下，2015 年和 2050 年特定国家总发电量中 VRE 的所占份额以及超过平均负荷的 VRE 产能



来源: IRENA 基于可再生能源路线图的数据。

由于缺乏波动性可再生能源并入电力系统的合理规划，可能会造成资源紧张，从而增加系统的成本。如图 S10 所示，能够预测系统需求并提出灵活解决方案的合理规划将提高低成本 VRE 发电的效益（IRENA，2017c）。

IRENA 分析得出的结论是为实现 VRE 并网所需的对加强电网基础设施、储电设备和建设灵活常规发电厂所需的投资强度，与新建可再生能源发电厂所需的总投资规模相当。按照《巴黎协定》的设想，在 2015-2050 年期间，只要实现一部分灵活性方案，预计这些总投资将达到 18 万亿美元（IRENA，2018c）。这就强调了创新的重要性，通过在电力系统中高比例 VRE 并网发电来提高效益的同时降低成本。

本报告表明，**电力系统的创新可以通过增加系统灵活性的解决方案，来降低 VRE 的集成成本**。此观点如图 S11 所示。与之对照的是一个目前 VRE 比例较低的系统，并且提高这一比例会有很多限制条件。实行灵活的解决方案有助于将成本曲线移到图表的右侧，这意味着，对于相同的投资水平，随着解决方案的落实可以实现更高的 VRE 份额。市场设计和系统运行解决方案的实施成本较低，并且是一个很好的开始机会。其他基于新商业模式和关键技术的解决方案需要更多的企业参与和更大的投入，但在电力系统中能够释放出更大的灵活性。

然而，如前所述，实现高水平的 VRE 并网发电需要在市场设计、系统运行、商业模式和使能技术方面都有所创新。

图 S10 最大化系统效益的创新

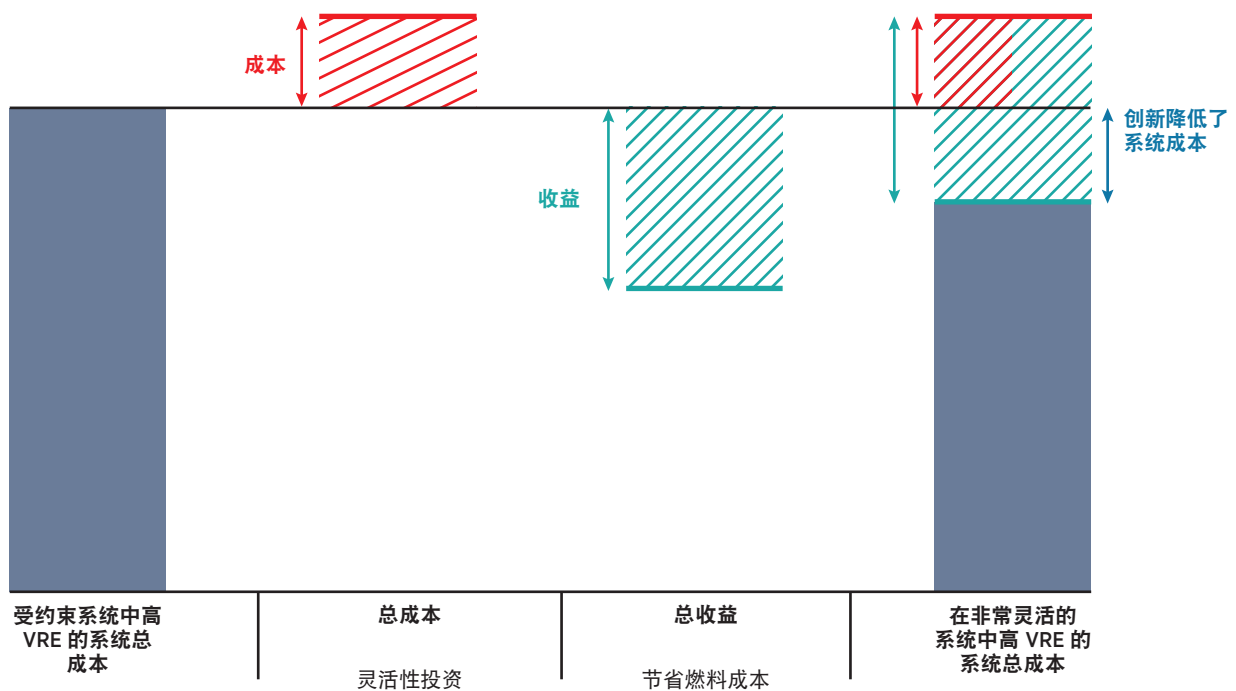
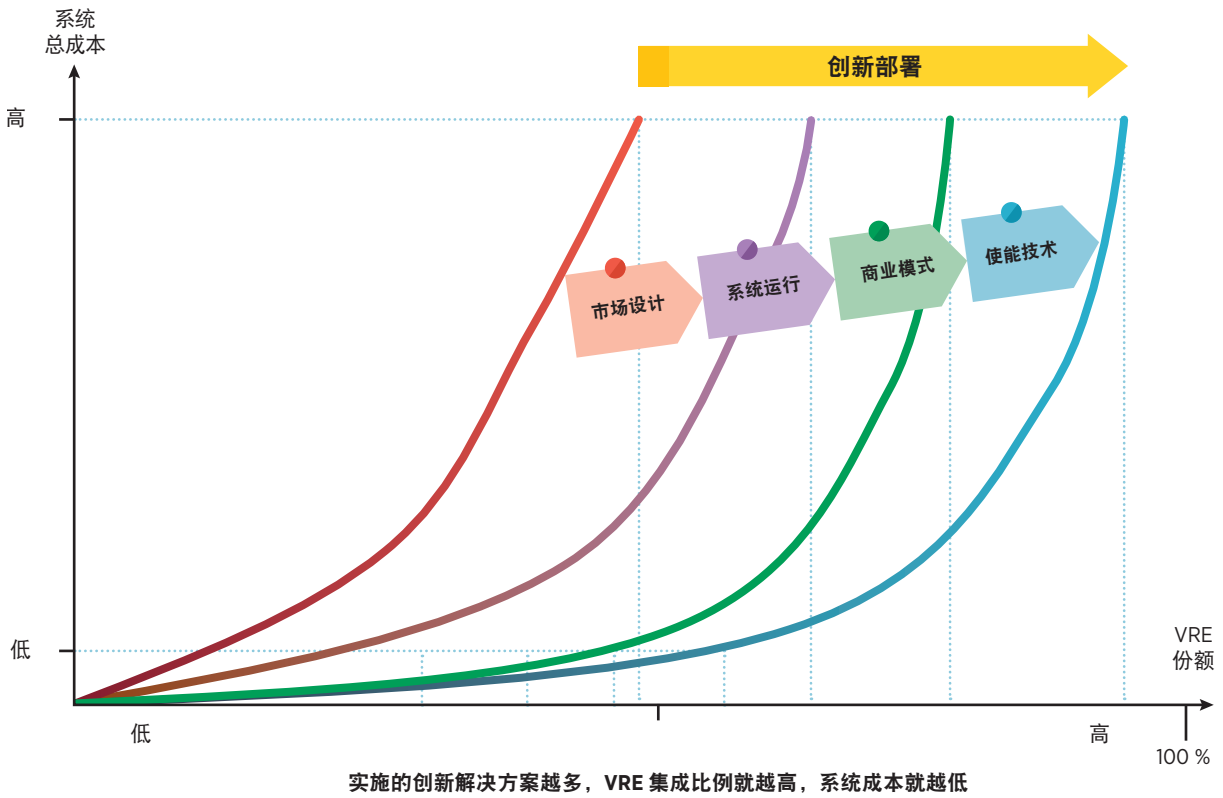


图 S11 以高比例 VR 降低系统总成本的创新理念



VIII. 电力行业转型的 八步创新规划

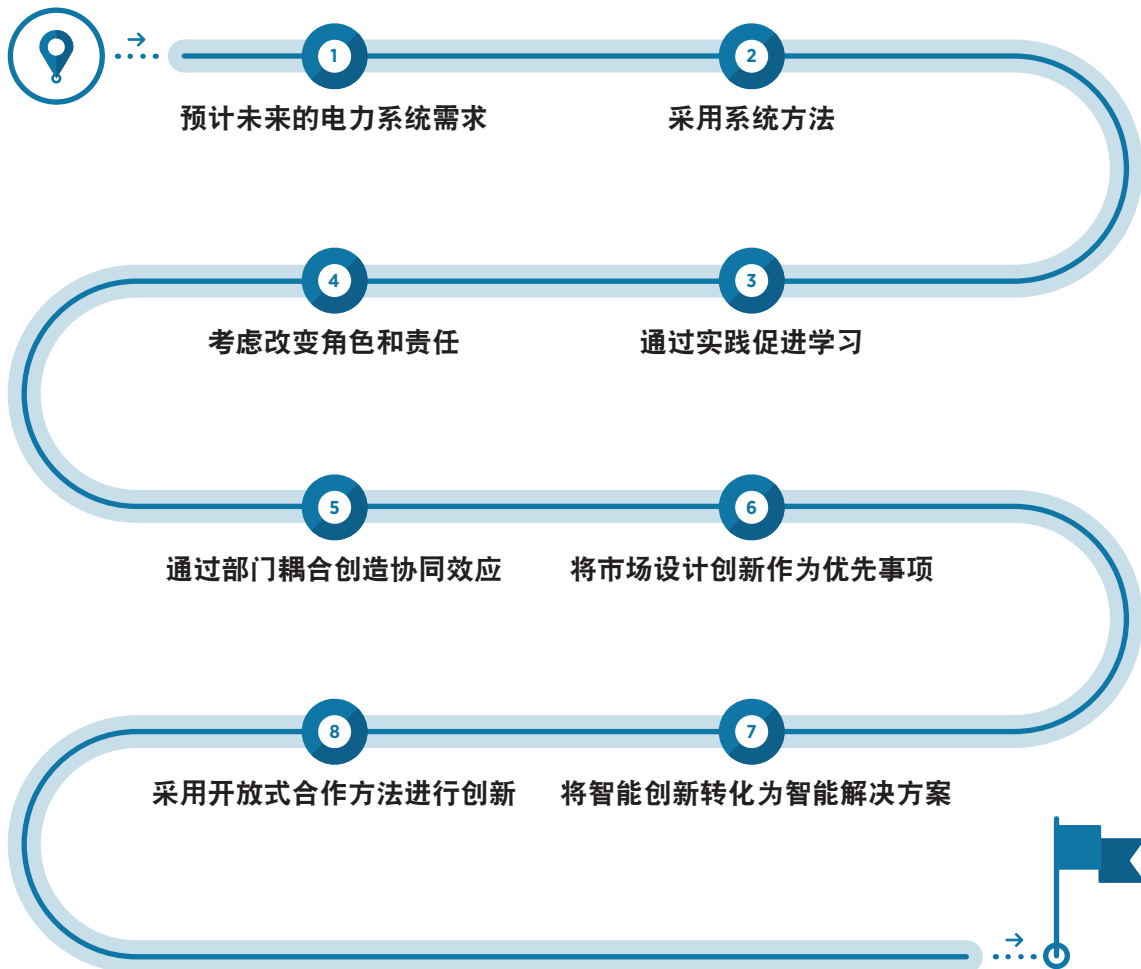
由于政策要求和创新速度加快，电力系统正在发生变化。风电和太阳能光伏等 VRE 技术的强大商业案例将其定位为转型的核心。在主要国家进行的创新试验表明，电力系统能够以可靠和经济的方式以非常高的 VRE 比例运行。然而，在 VRE 集成方面，引领者和大多数追随者之间存在着很大的差距。虽然私营部门将继续提出加快能源转型的新解决方案，但各国政府在根据国家社会经济目标促进和引导可再生能源发展方面起着至关重要的作用。为了弥补这一差距，希望可再生能源能够为其带来最大化经济效益的国家应采取以下建议措施（图 S12）。

1 制定具有远见卓识的政策框架，以满足未来电力系统的需求。 确保高性价比的大规模 VRE 并网发电，需要在当前需求（关注于可再生能源利用）与未来需求（关注于高比例 VRE 并网发电）之间找到平衡。在眼前利益和长久战略间进行权衡确实很难。为了实现高水平的可再生能源建设与并网发电，决策者们不应当只关注眼前利益。他们需要着眼于未来，当可再生能源部署已经成功实现，并围绕未来对市场和系统进行设计。

2 采用系统化的方式，将技术创新、市场设计创新、商业模式创新和系统运行方式创新结合在一起。 在系统的所有行业和系统的各个组成部分利用创新之间的协同效应，让各方都参与进来，这一点至关重要。本报告中所展示的创新解决方案说明，可以通过整合关键技术、市场设计、系统运营及商业模式中的创新，符合各国国情和需求而量身定制的解决方案。而实施这些创新可以发挥出整个电力领域的灵活性，从而降低集成 VRE 的成本，并支持能源转型。而在不同解决方案间也有实现协同效应的潜力，从而在一同实施时，减少投资。

3 通过试点示范总结经验。 我们根本无法预测在未来，电力系统中的典范会是哪种样子。创新不可避免的存在失败，但是能源系统不允许失败 - 灯不能灭，而且我们还必须了解在每一个国家环境中，那些解决方案时有效的，那些则毫无效果。这意味通过践行、通过实验、通过示范，是最重要的转移风险的方式。不同行动方承担风险的能力各不相同：初创企业（例如，新入企业）可以接受

图 S12 电力行业转型八步创新计划



更高的风险，有更大的失败余地。因此，开放创新的方式对于初创企业解决万难，并推出解决方案是一个非常重要的方式。其实在监管下有必要允许不同程度的试验；例如创建一个监管下的沙盒，允许行动者们进行试验并测试创新，而免受监管环境的限制。

4 要考虑到电力系统中角色和责任的改变。

随着分布式能源资源的逐渐渗透，以及新市场企业的兴起，比如生产消费者及主动消费者，将引领整个新时代。政府和企业们需要更加深入的收集消费者们和社群对需求

及期待的看法，以及他们接纳创新的意愿 - 并应当相应打造定制化解决方案。有些消费者们喜欢在能源系统中扮演主动的角色，但是收益必须清晰，同时需要实现自动化，以使反馈变得更加简便。此外，配电系统运营商必须调整他们目前的角色并对他们的商业模式进行转型，从仅仅是网络规划者转变为系统运营商。更好的与输电系统运营商进行合作必不可少，这样可以提高已接入的新建分布式能源的可视化程度，并向系统提供服务。

5 应当优先考虑市场设计方面的创新，它可以用相对低廉的成本促进灵活性的发展。 VRE 的市场设计解决方案已经证明它既有极强的影响力，又是个成本低廉的解决方案，这使得它们成为了众人首选的努力方向。一些能源市场和法规正在展现出应该如何调整市场，以反映出对电力系统中需要更高 VRE 份额的需求，以及如何应对数字化、分散化和电气化的趋势。市场正在注意到，其价值已经从提供发电量转向了提供灵活性，以配合性价比更高的 VRE。而连接这两者的纽带就是市场，能妥善平衡能源价格以及服务，并将为所有可以提供灵活性的行动者支付酬劳。妥善的能源转型规划将产生完整且性价比更高的市场设计。否则，基于短期利益和打补丁方式的解决方案将导致长期范围内的系统成本更高。逐步改善能源市场的定价是至关重要的，无论是否有可能采取短期补救措施。

6 在可再生能源供电、电动汽车、供热和制冷之间配合发展。 通过领域融合，可再生能源和终端使用部门的减排之间可以产生宝贵的协同效应。必须谨慎规划电气化战略，并明智地进行实施，与加速推广可再生能源的战略密切相关，同时还要考虑到更广泛的社会变革。

7 用数字化技术将智慧创新变为智慧解决方案。 数字化创新（人工智能、物联网、区块链等等）已经开始通过很多不同的方式，

显著的影响到了电力系统。而我们尚未完全理解对已建立的样板和行动者的影响以及风险。有了技术，但智能化的应用却很少。能源系统应该更多地利用数字创新所带来的“智能化”。值得注意的是，其他工业领域已经尽最大可能（接近）应用了数字化技术，其中获得的知识也可以转移到电力领域。在更广泛的环境中，还需要更多的数字化解决方案的试验和部署。

8 采取开放且协作式的方式进行创新。 创新需要多个部门的参与共同努力，无论是公共还是私营部门，也无论是发达国家还是发展中国家。应当更广泛的分享知识和经验。现在有足够的机会，可以从其它行业，以及不同的企业中学到更多东西。与其他非能源部门工业部门的互动，可能会带来产生协同效应的巨大机会。创新应当与可持续和包容的方法相结合。

报告显示，大量可以促进 VRE 集成的创新已经在全球范围内得到了实施或试验。此外，这些解决方案还可以根据任何国家的需要和情况进行专门定制。接受并支持采用创新解决方案的政策框架对于充分实现低成本可再生能源的效益是至关重要的。

成功的能源转型要求创新成为综合政策组合的一部分，其中包括与教育和培训、工业、劳动力和投资等相关的政策。能源系统规划者和决策者对可用选项了如指掌，就能够满怀信心地展望并为可再生能源的未来铺平道路。

首字母缩写词和缩写

AI	人工智能
BtM	电表后端
CSP	聚光式太阳能发电
DER	分布式能源
DSO	配电系统运营商
EV	电动汽车
IoT	物联网
IRENA	国际可再生能源机构
PHS	抽水蓄能
PV	光伏
P2P	点对点
RE	可再生能源
TSO	输电系统运营商
VRE	可变可再生能源
V2G	车辆到电网

计量单位

GW	吉瓦
MW	兆瓦
Mwh	兆瓦小时
TWh	太瓦小时
yr	年

参考资料

- COLTHORPE, A. (2017), “Stem connects 1MW aggregated virtual power plant in Hawaii”, *Energy Storage News*, www.energy-storage-news/news/stem-connects-1mw-aggregated-virtual-power-plant-in-hawaii.
- CON EDISON (2016), “A smarter way to control your comfort”, Con Edison, [www.coned.com/en/save-money/rebates-incentives-tax-credits/rebates-incentives-tax-credits-for-residential-customers/bring-your-thermostat-and-get-\\$85](http://www.coned.com/en/save-money/rebates-incentives-tax-credits/rebates-incentives-tax-credits-for-residential-customers/bring-your-thermostat-and-get-$85).
- EIRGRID AND SONI (2018), *Annual Renewable Energy Constraint and Curtailment Report 2017*, EirGrid and System Operator for Northern Ireland, Dublin and Belfast, www.eirgridgroup.com/site-files/library/EirGrid/Annual-Renewable-Constraint-and-Curtailment-Report-2017-Non-Technical-Summary-V1.pdf.
- ELIA(2018), “Deployment of a datahub shared by all system operators to support electrical flexibility”, www.elia.be/-/media/files/Elia/PressReleases/2018/20180308_SYN_Persbericht_Datahub_EN.pdf.
- ENERGYSTOCK (2018), “The hydrogen project HyStock”, EnergyStock, www.energystock.com/about-energystock/the-hydrogen-project-hystock.
- EPHA (2018), “Press Release: Ongoing growth: heat pump sector continues its positive contribution to Europe’s energy and climate targets”, European Heat Pump Association, <https://www.ehpa.org/about/news/article/press-release-ongoing-growth-heat-pump-sector-continues-its-positive-contribution-to-europes-ene/>
- GOGLA(2017), *Global Off-Grid Solar Market Report Semi-Annual Sales and Impact Data*, Global Off-grid Lighting Association, Utrecht, www.gogla.org/sites/default/files/resource_docs/gogla_sales-and-impact-reporth12017_def.pdf.
- IEA (国际能源署) (2018), *世界能源展望 2018*, OECD/IEA, Paris, p. 528.

IRENA (2018a), *用于能源转型的电力系统灵活性*。第1部分：决策者概述材料，国际可再生能源署，阿布扎比。

IRENA(2018b), *2017 可再生能源发电成本报告*，国际可再生能源署，阿布扎比，www.irena.org/publications/2018/Jan/Renewable-power-generation-costs-in-2017。

IRENA (2018c), *全球能源转型：到 2050 年的路线图*，国际可再生能源署，阿布扎比，www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Apr/IRENA_Report_GET_2018.pdf。

IRENA (2017a), *可再生能源统计 2017*，国际可再生能源署，阿布扎比。

IRENA (2017b), *可变可再生能源份额的适应性设计*，国际可再生能源署，阿布扎比。

IRENA (2017c), *规划可再生能源的未来：新兴经济体发展可变可再生能源的长期模式和工具*，国际可再生能源署，阿布扎比。

IRENA, IEA 和 REN21 (2018), *转型时期的可再生能源政策*，IRENA, OECD/IEA 和 REN21。

McCONNELL(2017), “SA’s battery is massive, but it can do much more than store energy”, ABC News, www.abc.net.au/news/2017-12-05/yes-sa-battery-is-a-massive-battery-but-it-can-do-more/9227288。

QUARTZ AFRICA (2018), “The global leader in pay-as-you-go solar power is downsizing to stay profitable”, <https://qz.com/africa/1229170/mkopa-solar-lays-off-kenya-uganda-staff-as-it-restructures/>。

NISSAN NEWSROOM EUROPE (2018), “Nissan and Enel launch groundbreaking vehicle-to-grid project in the UK”, <https://uk.nissannews.com/en-GB/releases/release-145248-nissan-and-enel-launch-groundbreaking-vehicle-to-grid-project-in-the-uk?query=nissan+at+paris+motor+show+2014>。

PICKEREL (2018), “Urban Energy Solutions and SunGreen Systems will use Stem’s AI solutions in solar+storage projects”, [www.solarpowerworldonline.com/2018/09/urban-](http://www.solarpowerworldonline.com/2018/09/urban-energy-solutions-and-sungreen-systems-will-use-stems-ai-solutions-in-solar-storage-projects/)

[energy-solutions-and-sungreen-systems-will-use-stems-ai-solutions-in-solar-storage-projects/](http://www.solarpowerworldonline.com/2018/09/urban-energy-solutions-and-sungreen-systems-will-use-stems-ai-solutions-in-solar-storage-projects/)。

RTE (2018), “Denmark on track to have 50% renewable energy by 2030”, www.rte.ie/news/newslens/2018/0111/932573-denmark-wind-farm/。

SOLSHARE (2017), “Step by step”, www.me-solshare.com/how-it-works/。

STATISTA (2018), “Internet of Things (IoT) connected devices installed base worldwide from 2015 to 2025 (in billions)”, www.statista.com/statistics/471264/iot-number-of-connected-devices-worldwide/。

UNFCCC (2018), *ME SOLshare: Peer-to-Peer Smart Village Grids in Bangladesh*, United Nations Framework Convention on Climate Change, <https://unfccc.int/climate-action/momentum-for-change/ict-solutions/solshare>。

WANG (2017), *Ancillary Services: An Introduction*, CNREC, <http://boostre.cnrec.org.cn/index.php/2017/09/14/ancillary-services-an-introduction/?lang=en>。



可再生能源未来的创新前景：

波动性可再生能源并网解决方案

© IRENA 2019

IRENA 总部

邮政信箱 236, 阿布扎比
阿拉伯联合酋长国

www.irena.org

