四通八达的电网结构帮助丹麦不仅成为一个风电丰富的出口国，而且在各邻国电力交易中成为一个灵活的交易者。

丹麦：大电网的魅力

文·陈思 范征

2015年，丹麦风电全年平均覆盖负荷的比例达到42%，继2014年覆盖比例39%以来又一次成为世界上风电使用比率最高的国家。其中，顺时风电覆盖负荷比例达到139%，较2014年最高值132%再度提高。自2006年以来，世界各国开始大力发展可再生能源。丹麦作为世界上风电使用率最大的国家，其成功的决策规划、技术方案和发展过程一直受到各界关注。10年后，在经历了世界经济剧烈波动，可再生能源产业逐渐成熟的今天，人们开始更加关注可再生能源在电力系统运营中的安全性和稳定性。如何积极有效的消纳可再生能源，克服其本身的间歇性和不稳定性成为了新的焦点。

能源互联网实现广域消纳

丹麦有7000公里的海岸线和丰富的风力资源，是连接北欧和欧洲大陆两大电力系统的枢纽。相较于其它可再生能源丰富的国家和地区，丹麦还拥有强壮的电网系统。这也为丹麦通过电网消纳可再生能源提供优势。发展风电需要强大的储能措施，和风电形成互补，比如北边挪威的水电可以通过蓄水放水实现对丹麦风电的补充。近年来，丹麦还在积极推进与邻国间国际包络线的建设项目，为能够更加灵活的消纳更多的可再生能源提供基础。为了达到灵活的控制目的，这些包络线大量采用直流传输设备，比如丹麦西部与挪威相连的四条海上直流传输线以及连接瑞典的两条直流传输线；丹麦东部与德国的直流传输线以及东西两网之间的直流传输。这样通过对直流传输线路的调节，实现灵活有效的调度。

此外，随着海上风场建设项目的推进，丹麦还将在未来5年内建设新的直流传输包络线并通过该风场与德国扩大联接；在北海与英国和荷兰各建设一条海上高压直流传输包络线。随着风电覆盖率的不断提高，国际传输线的容量在不断提高，利用广域网的资源实现本国可再生能源发电的目标。而这一切都需要各国在同一个游戏规则下才能顺利实现，即电力市场。

目前我国可再生能源丰富的地区，

丹麦作为世界上风电使用率最大的国家，其成功的决策规划、技术方案和发展过程一直受到各界关注。

一般是单一方向长距离的电能输出。这种单一的点对点传输线利用率较低，对电网稳定性也提出了很大挑战。相比之下，丹麦作为一个均耗电只有5千兆瓦时级别的小国，拥有如此多的国际包络线，为电网稳定性和消纳风电方面提供了基础。四通八达的电网结构帮助丹麦不仅成为一个风电丰富的出口国，而且在各邻国电力交易中成为一个灵活的交易者。在欧洲，电网建设需要考虑传输安全和社会效益。一个投资巨大的电网系统，只有结合本地和周边各类资源组成，才能实现利用率和经济效益的最大化。同时，安全传输才能得到有效保障。

在丹麦，由于陆地资源的限制，百兆瓦级别以上的大型风场均在海上建设。海上大型风场选址，不仅要考虑风能资源的优劣，也要考虑电网建设的情况。现在运营中和规划中的大型海上风场由于风能资源的分布，一般与大城市负荷中心相隔较远，但与主干电网的接入点一般会选在与国际包络线相近的电网较强壮的位置，以便在出口时减少线路损耗。

能源补贴逼退化石能源

相较传统能源，太阳能发电和风电的建设成本仍旧偏高。每个国家对可再生能源的补贴政策都不尽相同。自2008年以来，丹麦可再生能源法明确了一系列对于风能的补贴方案，从而降低其市场价格，使其被市场优先接纳。随着风电覆盖率的逐年提高，传统化石能源大型电机相继下线。一些传统电厂常年处于待机状态，仅为电网稳定提供必要的系统辅助服务。在多年风能补贴政策的推进和微调中，丹麦电网中的传统火电正在退出历史舞台。2015年9月2日，丹麦电网首次尝试在一个整运营日中，在不开启任何一个大型传统电机的情况下供给全国用电。此时全国用电主要来源于风电、太阳能、分布式热电联产和邻国传输。

在这一电网能源结构的转型中，传统电力公司早在能源补贴政策的初期就开始布局可再生能源发电的投资建设。这些电力公司也演变成现有的大型

海上风场的风场主。由于积攒了早期海上风场的选址、建设和运营经验，比如DONG电力公司近年来也开发投资了很多英国和德国的风电项目，在实现成功转型的同时也拓展了国际业务。

先进设备铸成消纳基础

对于远距离跨国传输，高压直流技术在可控性和辅助服务方面都有很大的优势。比如基于电压源换流器的直流传输线路可以高效的调节无功以控制电压。这类设备的利用对丹麦大型火电的下线提供了一个必要的补充。

另一方面，2009年开始，丹麦在百千伏以上的高压传输线的更新中大都采用地下电缆技术。与高架电缆相比，地下电缆有维护费用低、可靠性高、短时过载能力强，不受天气影响的特点。虽然，地下电缆的建设成本大概是相同容量高架电缆的4倍，但是考虑到后期的较低的维护成本，大大减少的传输安全隐患和事故率，以及未来的动态热定值技术的利用，都将大大减少系统运营成本，同时为未来消纳更多的风电做准备。

浮动电价维护电力平衡

在北欧，一系列电力市场规则的作用下，电力的生产和消费的平衡也体现在电力市场的价格中。过多的电量将会使得电价下跌，而反之电价升高。价格作为信号，可以用来调节生产和消纳，实现对电网电力生产和消耗的平衡。

自2009年11月欧洲电力交易协会（EPEX）出台负电价，标志着可再生能源的补贴政策、可再生能源的装机容量和电力市场价格形成了一个新的平衡。这也为电网中的储电单元建设提供了价值空间。目前在丹麦电力系统中新建了大约1300兆瓦容量的热电储存单元。这些负荷可以灵活调节，比如在低电价时段，以电加热水的方式短期储存能量。此外，作为发电方加装此类设备，可以在电价高时降低电转热的功率而对电网提供更大的电量。这种储电单元比蓄电池环保、造价低，同时联接了电力系统和区域供热系统，在帮助电网通过电价调节电力平衡的同时，也为运营方提供更多的可能性以提高其经济效益。E

（作者分别供职于丹麦电网公司、北京艾能万德智能技术有限公司）