

# 德国新能源消纳的经验与启示

文 / 黄越辉 王跃峰

2017年4月30日,德国创下本国利用可再生能源新纪录——当天有85%的电力消费来自包括风电、太阳能发电、生物质能发电和水电等在内的可再生能源。记录显示,4月30日当地时间12时,太阳能发电、风电、生物质发电、水电、储能等可再生能源出力达到5573万千瓦,占当时用电负荷(5820万千瓦)的95.76%,相当于全德国用电基本上全部由可再生能源提供。

德国实现新能源的最大化消纳,主要取决于灵活的电力现货市场机制、强有力的电源调节能力、坚强的跨国输电网络和先进的新能源调度运行技术。

## 电力现货市场的电价机制

德国建立了新能源市场竞价和政府补贴相结合的市场化消纳机制。电力市场实际是边际成本的竞争,新能源由于其发电边际成本低,在市场竞争中具有绝对优势,新能源参与市场可以实现优先发电。由于风电、光伏发电功率一般只能天前预测,即当天预测次日的发电曲线,因此国外新能源发达国家通常采用日前、日内电力现货市场消纳新能源。新能源按照0电价参与竞价(不足部分由政府补贴),以保障优先上网。当新能源出力高时,电力市场的出清电价下降,甚至出现负电价,受电价影响,

水电、火电、燃油燃气发电等尽可能降低出力;当新能源出力低时,电力市场出清价大幅上涨,刺激各类灵活电源尽最大能力发出电力。

同样以德国2017年4月25~30日为例,风电、光伏发电大发时电价降低,电力市场日前风电、光伏发电低出力时电价升高,日前市场最高出清电价发生在4月26日8:00,电价为0.053欧元(0.41元人民币)/千瓦时,日前市场最低电价发生在4月30日14:00,电价为-0.075欧元(-0.57元人民币)/千瓦时。由于新能源出力的不确定性,日内实时电价甚至低至-0.111欧元(-0.85元人民币)/千瓦时,相当于发电场每发1千瓦时电,还需要向用户支付0.85元人民币。受日前、日内电力现货市场价格机制刺激,德国常规电源均有非常大的意愿进行灵活性改造,以便在电价低时尽量减小出力,电价高时尽快增加出力。

虽然在新能源迅猛发展的同时,德国电力市场出清电价稳中有降,但终端销售电价持续上涨。由于新能源发电的综合成本高,发展新能源势必带来整体发电成本的上涨,最终体现在终端销售电价中。德国销售电价中可再生能源分摊费持续上涨,以居民电价为例,可再生能源分摊费从2004年的0.0051欧元(0.039元人民币)/千瓦时上涨到2016年的0.06354欧元

(0.486 元人民币) / 千瓦时，占居民电价的比重达到 21.2%，同时居民电价上涨了 60%。

### 灵活的常规机组调节性能

德国灵活调节电源与新能源的比例并不是很高，但常规煤电调节能力极强。

以 2017 年 4 月 25 ~ 30 日为例，德国太阳能发电、风电出力大时，抽水蓄能、燃气发电、褐煤发电、硬煤发电甚至核电均参与调节。其中 4 月 30 日燃气发电最低压至本周最高出力的 18%，褐煤发电最低压至本周最高出力的 34%，核电最低压至本周最高出力的 63%，硬煤发电最低压至本周最高出力的 10%。

承担调峰主力的硬煤发电在 18 个小时从 1563 万千瓦降至 514 万千瓦，又在 1 天后降至 186 万千瓦。当 5 月 2 日风电出力减小后，硬煤发电在 6 个小时内由 350 万千瓦增加至 956 万千瓦。从 4 月 28 日硬煤出力 1563 万千瓦，到 4 月 30 日最小出力 176 万千瓦，再到 5 月 3 日出力重回 1361 万千瓦，总时间仅为 5 天半。

### 坚强的电网网架

新能源利用率高的国家，通常与相邻区域有充足的电网连接。与德国接壤的国家共 9 国，跨国间输电网主要由 380 千伏至 400 千伏线路组成；220 千伏至 285 千伏输电线路作为辅助。其中 380 千伏至 400 千伏线路总计 28 条，220 千伏至 285 千伏输电线路 31 条。

当德国风电、光伏出力大时，除了依靠本国常规电源进行调节，还加大了电力出口的力度。同样以 4 月 30 日为例，出口电力达 1336 万千瓦，相当于有 80% 的风电（当时出力 1675 万千瓦）或 45% 的太阳能发电（当时出力 2976 万千瓦）送往国外。而在 2015 年，德国全年进口电量 335.64 亿千瓦时，出口电量 853.48 亿千

瓦时，分别占总发电量的 5.2% 和 13.2%。同时，德国风电发电量只占全国总发电量的 12.3%。

### 先进的新能源发电预测及调度运行技术

电力系统消纳新能源的基础是新能源功率预测。在德国，基于天气预报的新能源功率预测属于商业领域。各大电网公司以及电力供求各方皆会购买来自专业机构的预测服务。

德国 50hertz 电力公司全网日前风电功率预测均方根误差可以达到 2% ~ 4%，太阳能可以达到 5% ~ 7%。大型新能源场站，如海上风电场，也要开展功率预测工作，根据预测发电能力参与市场竞争。

德国电网通过各输电网控制中心和上百个配电网控制中心实现对风电场的实时调度。风电场实时数据直接上传至配电网控制中心。根据德国《可再生能源法》的规定，所有容量大于 100 千瓦的可再生能源发电设备必须具备遥测和遥调的技术条件，才允许并入互联电网。当输电网运营商的输电线路存在阻塞，其首先给下属配电网调度指令下发限电指令，令其限制一定份额的电力。然后配电网或者直接限制连接在本网的可再生能源电力，或者再给其下属的中压电网调度中心指令，令其限制一定份额的电力。目前，虽然德国新能源出力已达到很高比例，但灵活的市场及调度运行机制使得电网运行安全依然可以得到保证。

发展风电、光伏发电等新能源是我国能源战略的重要组成部分，但发展新能源是一个必须由全社会参与的系统性工作，电源结构优化、电力系统灵活性提升、体制机制改革、技术进步等缺一不可。我国应充分学习国外新能源发达国家经验和教训，立足本国经济和电力发展实际情况，走出一条满足我国实际需求、促进我国新能源可持续发展的新路。🌱