

风电、太阳能电力与电网调节功率¹

作者：Lion Hirth、Inka Ziegenhagen

原刊于德国《能源经济当前问题分析》杂志

风能和太阳能发电存在预测误差，进而提高了对调节功率的需求。我们根据概率分析模型预测，太阳能或风能功率每增加 1 GW，调节功率就需提高 30 至 70 MW。回顾过去我们就会发现一个出人意料的情况：尽管过去五年风能和光伏发电的装机功率翻了一翻，但对调节功率的需求却降低了 20%。对此有两个原因：一是引入了电网联合调节方案，二是改进了供需平衡管理。

过去五年，德国的风能和太阳能装机功率翻了一倍，达到 65 GW。按照电网发展规划，到 2020 年将再次翻倍。由于可再生能源发电的不稳定性，会产生不可避免的预测误差，因此，可再生能源的进一步扩展会带来更大的调节电能需求。

本文初步地探讨了可再生能源对调节功率市场的影响，以及风能和光伏发电对系统稳定可以发挥的积极作用。

调节电能系统

为使电力系统保持 50 Hz 的稳定频率，耗电量和发电量必须随时匹配。为了即便在短时间内也可实现这个目标，系统采用了调节电能。如果耗电量小于发电量，那么就需要负的调节电能，在这种情况下将限制发电站的产能，或者提高用电负荷。在电力系统中出现功率不足的情况时，则会采用正的调节电能。

在德国，由四家输电网运营商（ÜNB）负责调节容量¹的使用（见图 1）。自 2009/10 年起，这四家运营商在电网联合调节方案（NRV）平台上合作运营，共同确定需保有的调节功率，通过一个中央在线平台发布功率数据，在德国范围内确定统一的补偿电价（reBAP）。此外，NRV 还可避免各个供电区之间出现相反调节的现象。

¹ 译者注：文中的调节功率为直译，即为通常所说的备用容量，因原文中对容量和功率区别使用，故在翻译时也没有统一译为备用容量。

使用调节容量产生的成本将通过补偿电价的形式由启用该容量的供需平衡责任方 (BKV) 承担。该责任方可以是发电厂、电力销售公司或大型工业企业。BKV 负责制定每一刻钟的负荷运行时间表，列明计划的供电量和需电量。BKV 需对运行时间表的遵守承担经济责任。

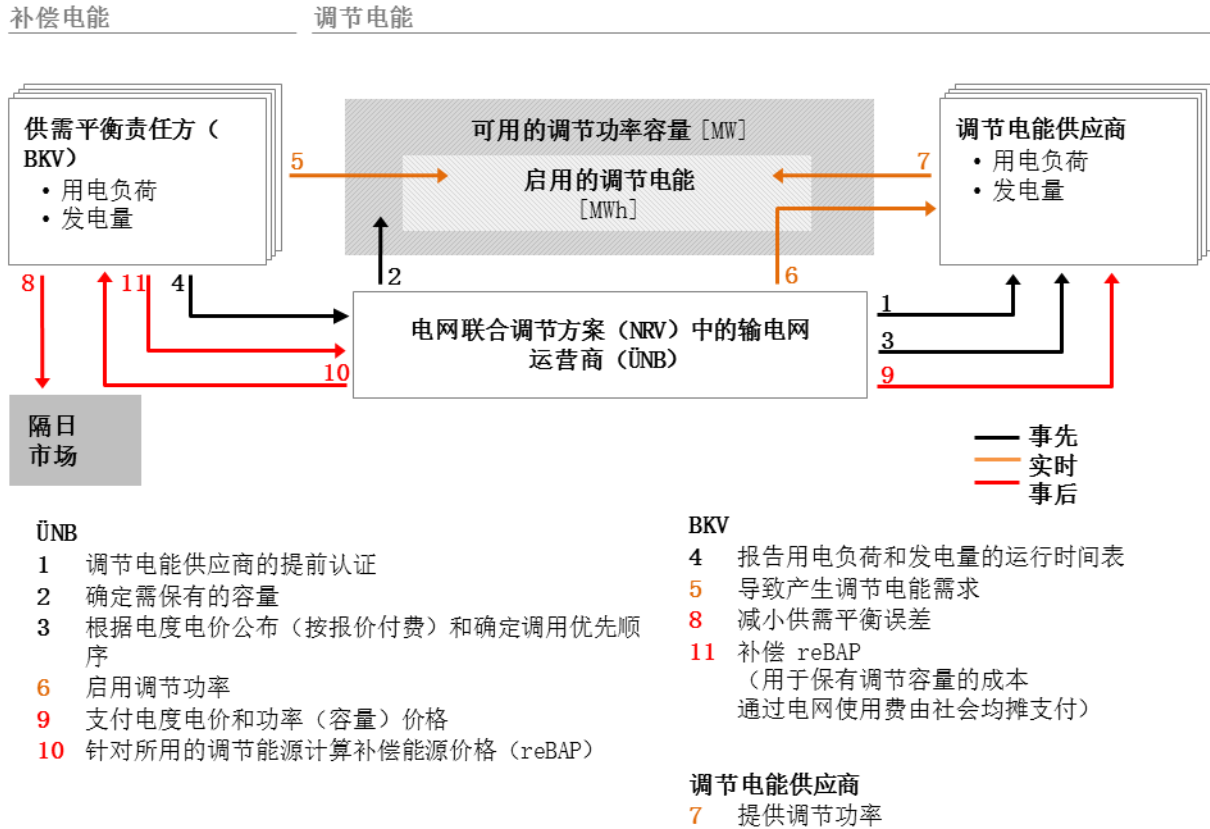


图 1：电能调节系统中的参与方及其相互影响

使用调节电能的原因

对调节电能的需求及需要保有的备用容量的大小主要取决于四个基本的影响因素 (参见图 2)：计划外的发电厂停机、用电负荷预测误差、风能和光伏发电短期预测误差和运行时间表突变ⁱⁱⁱ。在此需要注意，并非每一个“误差”都要弥补，需要弥补的只是所有误差正负叠加后的差额。

对于由风能和太阳能预测误差所引起的调节电能需求，除了装机功率之外，预测质量也发挥着决定性的作用。对此，预测的时间具有重要的影响：预测的时间越接近实际的达成时间，预测的准确度就越高。供电预测由供需平衡责任方 (BKV) 负责。责任方对日前电力交易进

行初步预测。如果在预测当天发生改变，那么责任方可以在日内交易中进行重新调整。在市场流动性足够的前提下，那么只有短期日内预测对调节电能需求起决定性作用。

此外，对调节电能的需求受到多个间接因素的影响：

- **安全水平**是指，在一年中有多少小时允许调节电能的实际需求高于保有容量。在德国，调节功率必须达到总小时数的 99.95%。
- **调节区越大**，预测误差相互间就可以得到更多的补偿，要维持的容量也就越小。
- **补偿电价**作为经济上的刺激因素决定了供需平衡责任方的行为，例如对风能、太阳能和用电负荷的预测质量以及供需平衡管理。这样，通过提高对导致系统失衡的供需平衡误差的惩罚，就会促使责任方为提高预测质量或积极进行日内交易而增加投资。

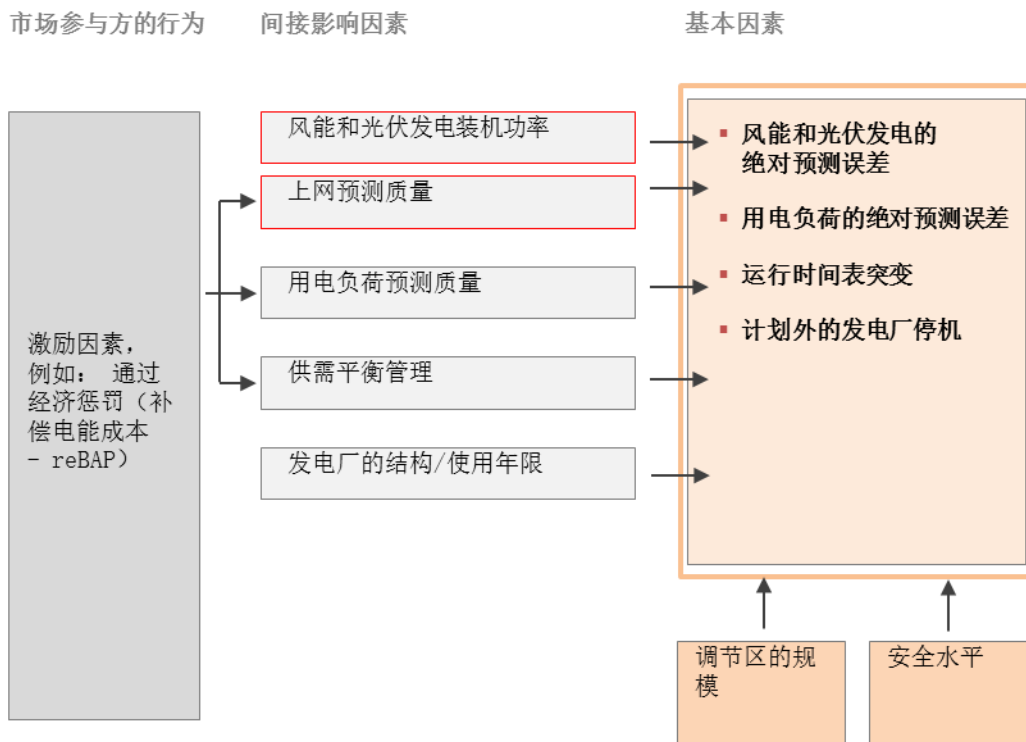


图 2：影响调节功率容量大小的因素

模型结果：对调节功率的需求在增加

为估测风能和太阳能发电功率增加对调节功率需求造成的影响，我们使用了基于格拉夫-哈皮里希方法的概率分析模型。首先根据经验，用输电网运营商（ÜNB）和电力交易市场（EEX）的数据估算出各个基本影响因素的概率密度，然后合并为一个共同的密度函数。根据安全水平，可以将需保有的容量解读为密度函数的分位数。为了将可再生能源对调节功率保有容量的影响加以量化，在第二步中提高风能和光伏发电的装机功率并改变预测质量，同时其他因素保持不变。

模型结果说明，风能和太阳能功率每增加 1 GW，就需要增加 30 至 70 MW 的调节功率。调节功率需求一方面取决于预测质量的发展，另一方面取决于风能和太阳能建设增加的情况。在增加 100 GW 可再生能源装机容量的情况下，提高 30% 的预测质量将降低 4 GW 的调节功率容量需求（图 3）。风能和太阳能发电的组合建设将使调节功率的需求逐渐减少。我们的结果与公开的文献资料一致^{iv}。

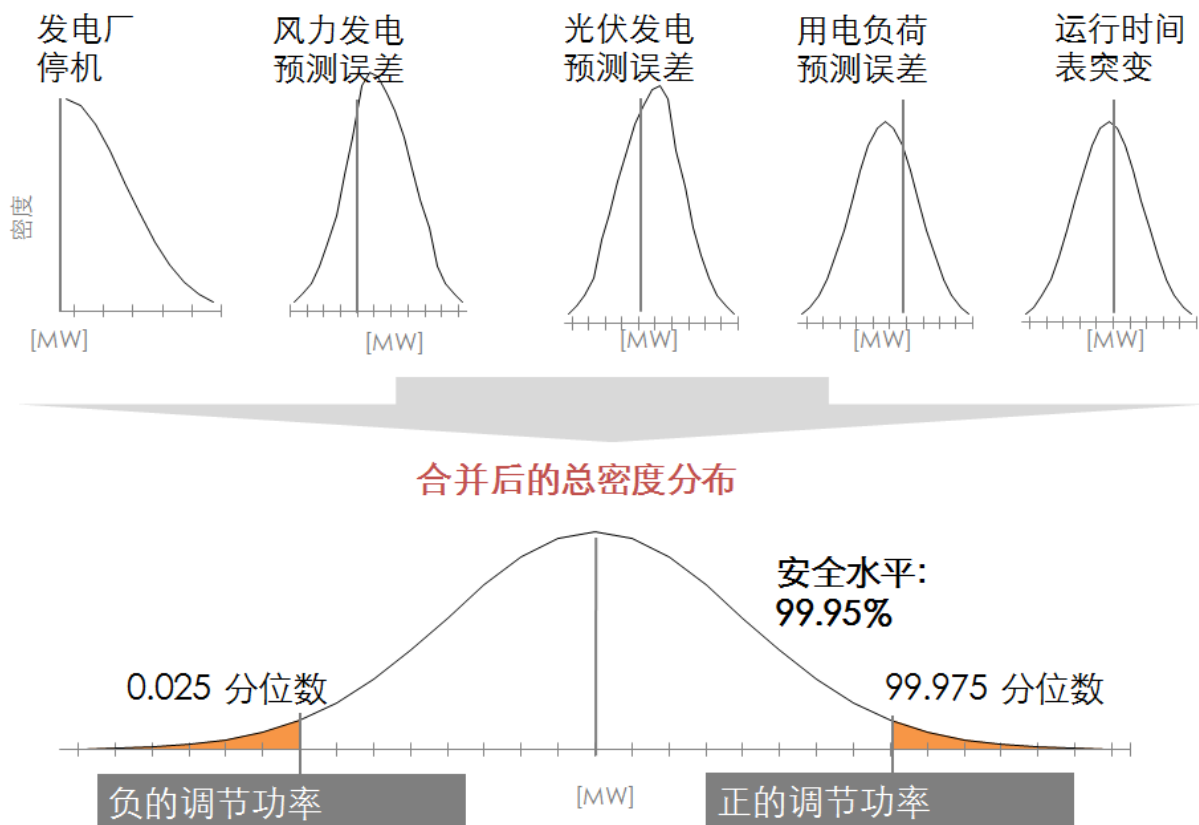


图 3：确定所需的调节功率

可再生能源比例提高，但调节功率容量降低？

回顾历史上所公布的调节功率容量的变化过程，可以发现一个出人意料的情况。尽管过去五年风能和光伏发电的装机功率增加了一倍多，但是 2012 年所公布的调节功率容量比 2008 年降低了约 20%（参见图 4），用于维持功率的成本甚至降低了一半ⁱ。

这是由一系列的影响因素造成的：引入电网联合调节方案、更准确地预测可再生能源发电量以及通过流动性更强的日内交易对供需平衡管理进行改进。可惜我们还不知道如何将因素的影响进行量化。当然，最近五年的市场发展并不能说明不稳定的可再生能源是降低调节功率需求的原因，但却明确地提醒我们，有大量的因素会对调节容量需求造成影响。而且，在过去五年中，风能和太阳能的蓬勃发展显然并不是决定性的影响因素。

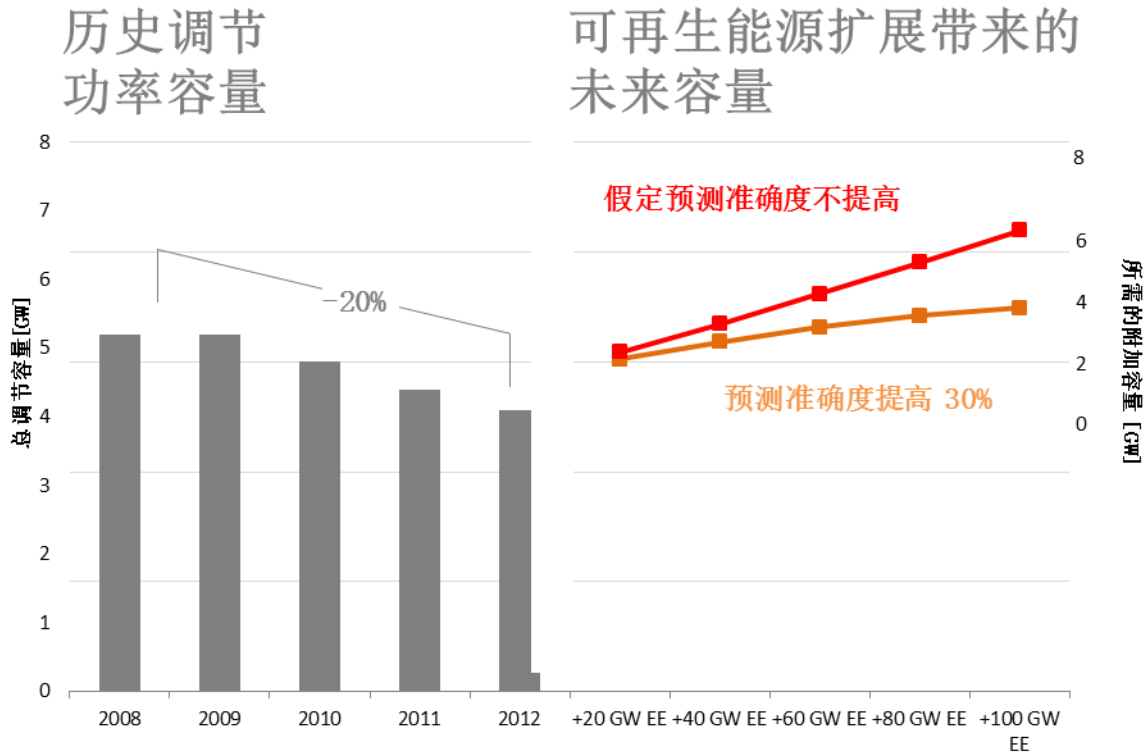


图 4：ÜNB 公布的调节功率的历史发展和我们根据模型对可再生能源发电建设的预测

风能和光伏发电作为调节功率的提供者

可再生能源并不只意味着调节功率容量的增加，其自身还可以提供调节功率。由于技术上的特性，风能和太阳能在发电过程中可以提供非常有益的负调节功率：与热电设备不同，即使是骤升骤降也不会产生多少额外的损耗。参与直接销售的设备并不受到二次销售禁令的约束，因此，目前对于一半以上的可再生发电功率，并无进入调节功率市场的法律限制。然而，目前可再生能源几乎并未进入这个市场。IWES 研究项目“通过风力发电设备来提供调节能源”目前正在致力于消除最后的管理障碍。

然而，备用容量市场的设计仍然对风能和太阳能发电设备进入市场构成较高的障碍：输电网运营商在每周的拍卖中至少以 8 小时的时间跨度来公布二次调节功率ⁱⁱ。在这个时间水平上，发电量的预测过于不准确，无法以所需的安全水平来提供调节功率。此外，尤其是对于光伏发电，需要以更短的时间跨度来进行拍卖。在我们看来，有诸多理由支持应采用与现货市场的日前拍卖类似的模式，提前一天按照每小时来拍卖调节功率，这一点上基本找不到反对理由。

减少可再生能源进入调节容量市场的准入壁垒！

最后用下面几句话总结电力调节容量市场的发展，也包括对政策方面如何继续优化容量市场的建言：

1. 由于存在不可避免的预测误差，不稳定的可再生能源（风能和太阳能）提高了对调节功率的需求，我们估计每 GW 增加 30-70 MW。
2. 但是也存在一系列其他的影响因素，同样会对调节功率需求造成影响：发电厂停机、用电负荷预测误差、运行小时突变和调节区的规模，以及补偿电价的间接影响。
3. 其中一些因素所造成的影响明显超过最近五年风能和太阳能的蓬勃发展所带来的影响：尽管可再生能源功率翻了一倍，但输电网运营商如今公布的调节功率比 2008 年降低了 20%。
4. 因德国调节功率市场的拍卖设计方式产生的可再生能源（和其他能源）进入调节容量市场的壁垒应被取消。准确到小时的调节功率日前拍卖模式必定会产生其他积极的社会效应，并减少调节容量市场的常规特权。

联系德国国际合作机构 - 可再生能源项目:

雷克鹏 Paul Recknagel

高级项目经理

T +86 10 8527 5180 ext. 15

F +86 10 8527 5185

M +86 150 1154 5801

E paul.recknagel@giz.de

备注：

ⁱ如想了解更多的成果和有关措施的详细信息，请参见 Hirth,L.; Ziegenhagen,I.: „Control power and variable renewables “(电力调节与多变的可再生能源), FEEM Working Paper 2013.046, 草案；以及 Ziegenhagen, I.: Impact of Increasing Wind and PV Penetration Rates on Control Power Capacity Requirements in Germany(风电和光伏电力的增加对德国电力调节容量的影响), 发表于 2013 年莱比锡大学的硕士论文。

ⁱⁱ欧洲大陆电力系统按启动速度及启动方式等参数不同将调节功率（备用容量）分为三类：一次功率（PRL, 30 秒内），二次功率（SRL, 5 分钟内）及分钟备用容量（MRL, 5 分钟内）。PRL 启用做功由欧洲大陆互联电网（UCTE）通过电网频率变化集中控制，SRL 和 MRL 则在考虑调节大小的基础上根据电网调节区的频率偏差和边界积分通过输电网运营商启用。参见：UCTE 在 2009 年的运行手册，网站链接：www.entsoe.eu/publications/system-operation-reports/operation-handbook

ⁱⁱⁱ所谓的运行计划突变在最近一段时间已成为欧洲输电网运营商越来越关注的焦点。主要产生原因是实际的供、需运行连续偏离于梯形的供需运行计划。首先运行计划突变出现在早、晚间剩余负荷（即电网负荷总需求与不稳定电力供应负荷如风电负荷的差值）突然变化较大的时刻。参见：Weißbach, T.; Welfonder, E.: High Frequency Deviations within the European Power System – Origins and Proposals for Improvement (欧洲电力系统内的高频偏差), 发表于 VGB PowerTech 6/2009。

^{iv} Ela, E.; Milligan, M.; Kirby, B.: Operating Reserves and Variable Generation(备用容量运行与多变的发电机组), 发表于 NREL Technical Report TP-5500-51978(2011);类似还可参见：Holttinen, H.; Meibom, P.; Orths, A.; Lange, B.; van Hulle, F.: Impacts of large amounts of wind power on design and operation of power systems (大容量风电对电力系统设计和运行的影响), 发表于：Wind Energy 14 (2) 2011。