

对光伏发电事业的深层次思考

■ 范继良

0 引言

石化能源是不可再生能源，总有耗尽的一天。因此，发展可再生能源是人类生存与发展道路上的一道不可回避的命题。科学家估计人类于本世纪三四十年代即会越过石化能源的使用高峰，水电、风电、光电等新能源将在人类的能源结构中扮演越来越重要的角色。在这样的背景下，全球许多国家都制定了新能源的发展目标，而光伏发电是这个目标下的分项任务。

在美国的大力宣传下，地球暖化的概念被广泛接受，科学家们认为，地球近几十年的加速暖化，是二氧化碳大量排放的结果。为了保持地球在物理上的平衡，人类必须改变能源生产及消费的方式，这为发展光伏发电等零排放新能源提供了进一步的理论依据。

在这样的背景下，德国在本世纪初开始推广光伏发电，并曾一度占据全球市场的一半，成为光伏产业的第一号推手。随后，欧洲其他国家及美国、日本等相继发力，共同推动了光伏发电市场的成长。过去几年，全球光伏市场的动能由西方向东方切换，中国和印度取代德国成为其主要推手；欧洲光伏市场出现持续的退坡现象；与此同时，中国成为全球光伏产业及应用的强者。

既然光伏发电那么美好，为什么欧洲会减速发展呢？光伏发电的经济意义是什么？晶硅光伏是通往未来平价发电的道路吗？为什么 Q-cell、

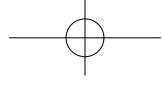
无锡尚德、江西赛维等龙头企业在“太阳升起时”不支倒下？英利、阿特斯、韩华等巨星又是否会步前者的后尘呢？这一切问题都发人深省，并最终回归到一个基本命题——光伏发电的本质是什么？

1 光伏发电的历史与当前面貌

光伏发电技术源自上世纪 50 年代。1955 年，美国的贝尔实验室研发出全球第一片单晶硅太阳能电池，其转换效率为 1%。60 多年后的今天，晶硅类太阳能电池的最高转换效率已超过 20%，而非晶硅薄膜相结合的 n 型单晶硅 HIT 太阳能电池的转换效率更是达到了 25%。

上世纪 70 年代，真空镀膜技术的成熟，推动了科学家研究第二代太阳能电池，这些技术分别以硅基薄膜、铜铟镓硒 (CIGS)、碲化镉 (CdTe)、砷化镓 (GaAs) 薄膜为基础。其中，CIGS 薄膜太阳能电池的实验室转换效率已达到 22.6%(ZSW, 2016-06-16)。除此之外，有机类及化学类太阳能电池也是科学家研究的方向。

面向未来，科学家正在开展第三代太阳能电池的理论研究，这些以热载流子、多带隙及多层堆栈结构为基础的技术仍是以真空镀膜技术为核心，其中，热载流子太阳能电池的理论极限效率可达到 86.8%。可以预期，光伏发电技术仍将不断更新换代，就像液晶电视取代阴极管电视一样，而技术的创新为后来者提供了切入竞争的机遇，



就像韩国三星取代日本同类企业成为全球显示器的王者一样。

光伏发电技术的产业化源自上世纪90年代，并在本世纪初呈现爆炸性增长。德国率先推行的上网电价法为全球树立了典范及可操作模式，开通了由公共财政消费或变相的公共财政消费拉动光伏应用市场发展的道路，并由此进一步推动了光伏产业的发展。

直到今天，光伏发电市场仍是一个由各种补贴构成的政策市场，各国政府在本质上扮演了最终消费者的角色。2017年，全球光伏市场规模达到102 GW，而在2012年时，全天光伏市场规模只有32 GW，2007年时则仅为2.932 GW。在累计装机容量方面，2017年全球累计装机容量约为405 GW，提供全球不到2%的电量。根据国家统计局的数据，截至2017年末，我国光伏装机容量为130 GW，占全球总装机容量的32%。2017年，我国总发电量为64951.4亿 kWh，其中，光伏发电占比约为1.7%。

根据国际能源协会(IEA)的预测，光伏发电到2050年将达到全球发电量的16%，累计光伏发电装机规模将达到4600 GW，即未来32年全球仍要生产超过6000 GW的光伏组件(以20年生命周期计算)，到2040年时市场的年供应量超过250 GW才可满足这一预计的安装量。然而，将会以何种技术生产这些组件，仍是单晶硅与多晶硅模块吗？

聚焦我国的光伏产业。2017年，不管是在应用端还是生产端，我国均占据了全球光伏的大半壁江山，拥有无可匹敌的完整光伏产业链，生产成本全球最低，晶体硅组件成本由2010年的约1.4美元/W下降到2017年末的约0.3美元/W，

周期逆变器则由约11美分/W下降到约3美分/W，竞争力世界第一，推动全球更进一步接近平价发电的目标，为全球新能源的发展作出了重大贡献。我国光伏产业的销售收入也由2011年的1519.47亿元上升到2017年的5483.27亿元。

表1 2017年我国光伏产量分布情况

类别 参数	硅料	硅片	电池片	组件	逆变器
产量	24.2 万 t	87.6 GW	68 GW	76 GW	60 GW
占全球 /%	56	83	68	71	55

数据来源：CPIA 资料整理

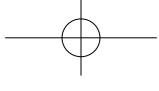
根据《可再生能源发展“十三五”规划》，到2020年，我国非石化能源占一次能源消费比重达15%，到2030年进一步扩大至20%。对于光伏产业，国家能源局发布的《太阳能发展“十三五”规划》中提出，2020年光伏电价同比2015年下降50%以上，在用户侧实现平价上网的目标。这意味着光伏上网电价将降至0.5元/kWh的水平。同其他国家一样，补贴的下降引发了抢装潮，令我国提早实现“十三五”规划的装机目标，强劲的需求也诱导企业进一步扩产。

电价的下降预示着系统投资成本要由2017年的约6元/W进一步降至5元/W的水平，这对于整个光伏产业链而言，无疑是一个重大的挑战。我国的晶体硅产业链可以达成这一使命吗？

2018年，我国GW级的光伏企业已达21家，其中，超过2 GW的企业12家，上市公司约60家，许多采用垂直整合发展模式，行业规模由2011年至今扩大了3倍以上，年均复合增长率约达29%。2017年，随着产品售价的下跌，企业利润普遍下滑。若以过去10年的10大光伏企

表2 2012~2017年我国光伏发电标杆上网电价

年份 参数	2012	2013	2014	2015	2016	2017
上网电价 / 元·kWh ⁻¹	1.00	1.00	0.90~1.00	0.90~1.00	0.80~0.98	0.65~0.85
当年安装量 / GW	4.5	10.9	10.6	15.3	34.5	53.0



业作样本可以发现，累计亏损远大于累计盈利，仅尚德、赛维的亏损及破产损失加上英利的累计亏损已达数百亿元。这或许说明了一个事实：各国的光伏消费只是填补了部分产业成本，并未在整体上转化为生产制造环节的利润。今年，业界估计将是继 2012、2013 年之后另一个艰苦的年头，行业的大洗牌一触即发。这或许是晶体硅产业链最后一次成年礼，却绝非光伏发电事业的最后一次洗牌。

2 光伏发电平价上网离我们有多远

世界各地的户用电价及发电侧上网电价有很大的差异，从几美分到几十美分不等。因此，在相同的系统价格下，各地区距离光伏发电平价上网的目标远近不一，光伏电力在各地区体现的经济意义也不大相同，并无统一模版。

光伏发电平价上网存在两个概念，一是在用户侧与低压配电网的连接，二是在发电侧与高压输电网进行连接。光伏业内人士经常宣讲这样一个概念：对于户用型发电设施，当其发电成本（加上折旧及营运等）等同消费电价，便已实现了用户侧的平价上网发电；对于集中式的发电设施而言，当其发电成本等同火力标杆上网电价时，便已实现了发电侧的平价上网发电。

这一逻辑在光伏装机容量及发电量相对于整个电力系统而言占比很小时是成立的，主要是由于光伏发电的瞬间波动性、日间波动性与四季波动性均不会对电力系统构成影响。

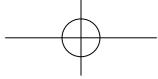
然而，随着光伏装机容量的上升，整套平价上网逻辑便要修改。从用户侧来看，假如相当大比例的用户安装了光伏发电系统并达到日间需求的动态平衡，那就意味着火力电厂及电网在这些时段出现闲置资源，火力电厂的发电量要下调，电网的传输量也相应下降。然而，光伏发电的巨大波动性使电力系统不能舍弃这些暂时或瞬间闲置的电力资源。换句话说，当我们考虑用户侧的平价上网时，必须考虑整个电力系统因光伏发电

而产生的额外日间闲置率所造成的边际经济成本。以这样的逻辑来看，当我们建立自己的户用发电装置时，电力系统实际上也为我们保存或建立了相应的备份系统，在经济意义上来看，社会支付了双重成本。

为了简化问题，我们假设地球上只有一户家庭，仅建了一家发电厂和一套输电系统，将电力输送到这个家庭。若该家庭安装了一套户用型光伏发电系统，正午时分，光伏系统的输出正好满足了这个家庭的能耗需求，此时发电厂和电网就可以停止工作。因此，光伏发电的引入令火电的产能利用率下降，造成成本的增加。这一项因光伏发电造成的火电及电网的度电边际成本的增加，应当叠加到光伏发电的成本上。

因此，在大规模引入户用光伏发电装置后，用户侧平价上网发电的概念应进行修改。计算方程是消费电价减去电力系统因光伏发电而产生的闲置成本。分摊到每一度电，每一度户用电力的成本构成在扣除税收因素后，大概是发电者占 4 成，传输者占 6 成。依据这样的逻辑，由于每一度户用发电排斥了一度电力系统供电，双方存在竞争关系，因此，这一度电的实际经济成本等于光伏发电成本加上电网供电设施闲置成本。依据此算法，用户侧平价上网发电很可能是一道伪命题。从宏观意义上讲，当前的光伏系统根本不存在这种平价上网的可能。

那么在发电侧又怎样去理解平价上网呢？为了简化讨论，暂不考虑与光伏发电存在竞争关系的火力电厂因光伏发电而闲置的问题，仅以电网利用率进行论述。电网就如道路，所不同的是，道路上的载体是汽车流，而在电网上传输的是电能流。若一条道路仅在日间使用，夜间关闭，必然令单位流量的使用成本上升，电网也一样。光伏发电主要是利用太阳光，且呈现由早到晚的发电量变化，为了满足最高日照时的电能传输要求，电网必须与光伏发电的装机容量进行匹配。



因此，电网为光伏发电预留的通道的使用率便因夜间不发电及日间发电量变化大而产生闲置。因此，理论上光伏发电度电传输成本要高于火电，以2016年国家统计局的数据进行对比，如表3所示。

表3 不同发电方式对比

参数 类别	装机容量 / 万 kW	发电量 / 亿 kWh
火电	105388	44370.7
水电	33211	11933.7
核电	3364	2132.9
光电	7742	662.0

由表3可以看出，即使剔除由于光伏发电基数低、增长高所造成的扭曲，火电每瓦装机容量每年的输出仍高于光伏发电4倍。然而，电网的建设不是与输出电量匹配，而是与峰值输出功率匹配，因此，每瓦装机量的发电量越低，相对应的传输成本便越高。光伏发电只是日间有效，并且具有只在中午时分达到发电峰值的特点，这使得光伏发电的传输成本在目前技术条件下高于火电。因此，从宏观体系来看，光伏发电的并网价格要远低于火电才具有综合成本效益。假如要享受相同的并网价格，光电发电系统便需要加装储能装置，让电能全天24 h输出与负载匹配，如此才可以提高单位电网容量的利用率。从这一角度来看，在发电侧平价上网的道路仍遥远。

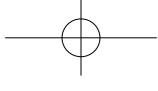
不管是光伏发电还是风电，必须引入储能装置，令电力输出保持稳定并与负载匹配，这才具有广泛的社会应用意义。在欧洲光伏发电先行国家集体退坡的情况下，我国更应在高歌猛进之时，对光伏经济作出更深层次的思考，捋清各种光伏发电的经济关系。

3 光伏经济中的非对称博弈

在现代商品经济中，博弈在宏观的法律框架下由生产者、流通者和消费者三方进行，任

何一方都不具备凌驾于博弈方的不对称的博弈优势。在这一种博弈中，市场的动态平衡由三方共同构建。企业为了获得更大的竞争优势，可透过执行垂直整合的策略统一供应侧的核心产出及流通要素，使博弈成为供应侧及需求侧的简单游戏。在这一种经济体系中，供与需常处于博弈的动态平衡，价格随竞争有序演变，行业随优胜劣汰的规则进化。在该行业，大型企业往往拥有更多的竞争优势，大者恒大。然而，从光伏产业的发展经验来看，大者往往“危大”。由Q-Cell到尚德，再由赛维到Solarworld，可以看出，先行者似乎更易深陷泥潭，为什么会这样呢？这是因为光伏经济的本质是一种非对称博弈，消费者并非真正的买家，真正的买家实际上是世界各国的政府，他们可以头脑一热便推出庞大的刺激政策，也可以把心一横便大幅下调补贴，打破光伏价值链的动态平衡；再不达目的，还可以征收光伏产品进口税或光伏发电暴利税，这一种行为全无规则可言，业界也无法反对，大企业转身难，适应更难。大家都还记得，德国曾大幅削减补贴，欧美也曾实施“双反”。今天的光伏产业实际上是由中国、印度、日本、美国几大光伏发电大国与全球光伏业者进行的一场非对称博弈，任何国家都不可能用公共财政资源去制造亿万富翁，许多做光伏的人，由富翁做到两袖清风，那些仍在向前冲的勇士有多少将成为烈士，大家心中有数。这一切都是由光伏经济的非对称博弈所致。

除了政策因素，光伏产业是一个动态产业，技术在不断革新，这体现在设备的性价比提高、制程的进化和产品转效的提升3方面。由于光伏产品都属于价格敏感型，品牌优势并不明显。后来者只要在政策突然改变后以更新的成本及技术结构切入竞争便会享有竞争优势。事实上，技术及装备的进步令单位产能的投资大幅下降，很多光伏先行者的负债远高于企业的重置成本，



令他们处于竞争的劣势。长江后浪推前浪，尚德与赛维不会是光伏产业的绝唱，数风流人物还看他朝。

4 谁是全球光伏发电博弈的赢家

从经济的角度看，光伏发电的根本目的是产生电力，减低排放只是光伏能源投资的长期副产品，在投入阶段增加的能源消费并无减排意义。在这一场跨世纪的博弈中，不同的阶段出现不同的赢家。

若回到 2012 年，我们看到的画面是西方国家的光伏消费打造了中国的光伏产业，毫无疑问中国是赢家。

然而，当我们站在 2018 年去看这个问题时，看法或许会不一样。我国光伏产业过去 10 年亏损的比赚取的多，这使我们不敢确定自己是否是赢家。反观泰国、印度、澳洲等国，他们用近乎零的产业投入，通过购买我国物美价廉的光伏产品去补充自己的能源缺口，打造自己的蓝色天空。而我国在稳居光伏产业世界第一的同时，也背上巨大的产业包袱。因此，在这一时期，或许纯光伏应用国是赢家，因为他们是以最低的经济投入成本换取了光伏发电使用。尽管我们有 130 GW 的装机容量，在产业制造端却耗费了数以千亿元的资本。这是否划算，要看这条道路是否可以通向真正意义上的平价发电应用，让我们摆脱政府消费带来的不对称博弈。

面向未来，我相信第一个达到平价发电及掌握相关技术的国家会是这一场光伏新能源博弈的赢家，而最终的赢家必然是全人类，当我们能使用又便宜、又清洁的新能源时是何其美哉！然而，使我们达成这一成就的光伏技术还会是晶体硅技术吗？

从产业链条的内部分工看，光伏发电商在本质上是全球光伏公共财政消费的代言人，利益永远受到保障。正如巴菲特曾说过的，光伏发电虽然不能让你发达，却可令你保持富有。投资者透

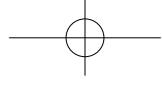
过保险工具化解发电风险，剩下的只是国家或电网的信用风险，几乎可以忽略不计，项目内部收益率远高于制造业。因此，任何一个时期拥有光伏发电设施的人都是赢家。而系统安装商和项目开发商以轻资产模式运作，转身便利、无包袱，也是赢家，相对而言，他们并不受补贴下调的影响。

对于光伏制造链，耗资数以千亿资本打造、不断迭代更新技术的光伏产业，若可通向平价上网的未来，我们便是赢家。这等同拥有了一个千秋万代取之不竭的大油田。

5 对未来的思考

今天，我国的光伏产业已是全球强者，但光伏产品的定价权却不是由我们掌握，如其他的产业一样，我国只享有减价权而无定价权，甚至连减价权都没有，动不动就被“双反”。产能的无序扩张导致另一场光伏寒冬的脚步已跨进家门。面向未来，我们需要思考：我们的机会在哪里？我们的威胁是什么？

若干年前，我国曾经是彩色电视机的生产大国，拥有完整的产业链，和今天光伏产业的情况大致相同。然而，一场平板显示器的革命让我国的制造业几乎错失了整个平板显示的黄金年代。直到今天，我们仍远远落后于韩国。尽管我国每年都出口近 20 亿个液晶显示设备，但显示屏仍主要依靠进口。假如有一天，世界出现一场光伏技术革命，我国的光伏产业将如何应对呢？在光伏产业的上一个浪潮，晶体硅光伏击败了薄膜光伏，我国的晶体硅业者也淘汰了世界大部分地区的竞争者。当我们站在胜利的山岗上顶冠同庆时，世界各国的研究单位正埋头苦干，研发新一代的光伏技术。德国巴登符腾堡太阳能和氢能源研究中心 (ZSW) 就于 2016 年 6 月 16 日宣布，其研制出了转换效率为 22.6% 的 CIGS 薄膜太阳能电池。对于制程全自动化的薄膜光伏技术，我国不管在装备端还是生产环节都不具备优势。这让我想到



有一天,我们或许会将打开平价并网发电大门的钥匙交给别人,就如第二代显示屏的发展史一样。历史总在一些我们认为是低概率的领域不断重演。

从技术发展的角度看,世界或许在不久的将来即会迎来第二代光伏技术的春天。除此以外,储能系统也必然成为光伏发电系统的未来标配。

从经济的角度看,光伏电力在当前依然相当昂贵,必须依靠补贴去维持光伏产业引擎的运转,这对国民经济而言是一种负担。全球光伏产业在这条道路上能走多远,难以估计。只有快速达至平价发电,摆脱补贴经济的非对称博弈,才可获得光伏产业的长治久安。

太阳能取之不竭,用之不尽。我坚信相信光伏发电将与科学家描述的一样,是人类未来的主流能源。全球光伏产业也将在一个又一个的浪潮中汰弱留强,茁壮成长,走向美好的未来!

6 结语

发展新能源及推动世界进入能源消费的新时代是一种大国责任,为人类的长远生存与发展奠定基础。在当前的成本及技术条件

下,光伏发电并未能达到真正意义上的平价发电。因此,过量地将资本投入在某一光伏技术领域并不一定符合长远地经济发展战略,也不符合公共财政资源的运用原则。我国全社会在光伏发电端及产业端投入的资源世界第一,累计规模估计超过1万亿元人民币。光伏发电在本质上是一项政府消费,而其在补贴发电的道路上还能走多远难以估计,一旦各国退出补贴政策,将对我国光伏业者造成致命打击。

光伏从业者应在冬天来临前加快新技术的研发,并为光伏发电引入储能系统,解决光伏发电的波动性问题,提升集中式光伏发电的电网利用率,使光伏发电成为火电真正的替代品。通过进一步降低成本,使光伏产业可实现真正意义上的平价发电,从与各国政府的非对称博弈中走出来,使光伏产业成为世界新能源博弈真正的赢家。到那时,我国西北部丰富的太阳能资源将成为我国未来能源安全的最大保障。**太阳能**

(本文内容仅代表作者个人观点,与《太阳能》杂志无关)

(接第51页)

4.3 小结

根据上文所述的技术改造结果来看,该技术方法遏制了PID现象的再出现,组件平均功率提升26.09%,发电量比提升3.46%,PID预防与恢复效果良好。这些数据说明本技术改造方案效果明显。

5 总结与讨论

通过上述组件功率提升和发电量增益的数据可知,该PID创新解决方法对光伏组件PID效应有明显作用,方案实施后,该技术方法有效地遏制了PID现象的再出现,问题组件功率平均提升26.09%,发电量比提升3.46%,在一定程度上

改善了电站发电量,保证了电站收益。另外,本解决方法易于操作,便于安装,(转第77页)且实施成本较小,很适合对运营中的光伏电站进行技术改造,提升光伏电站发电量和效率,保证投资者的收益。

参考文献

- [1] 闵坚. 光伏组件PID效应的机理研究与防护措施[J]. 神州, 2017, (26): 212 - 213.
- [2] 周晓蕾. 针对PID现象电池片防反射膜的工艺改进研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [3] IEC 61215-2005, Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval [S].
- [4] 史二颖, 姜坤, 姜存进. 光伏组件PID现象及PID修复装置作用研究[J]. 煤炭工程, 2017, 49(5): 114 - 116. **太阳能**