

我国现阶段光伏发电成本分析

史珺

上海普罗新能源有限公司

[摘要] 本文根据史博士提出的光伏发电成本电价的数学分析模型,讨论了影响成本电价的因素,给出了光伏发电的投资效益分析方法,并对目前我国西北的光伏电站进行了实例分析。

一 影响光伏发电的成本电价的因素

光伏发电的成本可以用下式表示:

$$T_{\text{cost}} = C_p (1/\text{Per} + R_{\text{op}} + R_{\text{loan}} * R_{\text{intr}} - i_{\text{sub}}) / H_{\text{fp}} \quad (1)$$

式(1)即为光伏发电的成本电价的计算公式(史博士定律)。它表示出了光伏电站的成本电价 T_{cost} 与光伏电站的单位装机成本 C_p 、投资回收期 Per 、运营费用比率 R_{op} 、贷款状况(包括贷款占投资额的比例 R_{loan} 和贷款利息 R_{intr} 两个参数)、年等效满负荷发电小时数 H_{fp} 、该电站所享受到的其它补贴收入系数等六大因素的具体关系。

有了式(1)的光伏发电成本分析模型,可以对现阶段光伏发电成本做一个简要分析。本分析不考虑电站的其它补贴收入,即令式(1)中的 $i_{\text{sub}} = 0$ 。

1.1 单位装机成本对电价的影响

按照回收期 20 年,贷款比例为 70%,贷款利率 7%,运营费用 2% 计算。假设当地的年满负荷发电时间 $H_{\text{fp}} = 1500$ 小时,则不同的单位装机成本所对应的成本电价见表 1-1。

表 1-1 装机成本 C_p 对于成本电价的影响

| | | | | | |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 单位装机成本 (元/KW) | 10000 | 11000 | 12000 | 13000 | 14000 |
| 成本电价 (元/度) | 0.79 | 0.87 | 0.95 | 1.03 | 1.11 |

1.2 日照时间对于成本电价的影响

按照回收期 20 年,贷款比例为 70%,贷款利率 7%,运营费用 2% 计算。假设单位装机成本为 12000 元/KW,则不同的满负荷发电时间所对应的成本电价见表 1-2。

表 1-2 年满负荷发电时间对于成本电价的影响

| | | | | | |
|---------------|------|------|------|------|------|
| 年满负荷发电时间 (小时) | 900 | 1100 | 1300 | 1500 | 1700 |
| 成本电价 (元/度) | 1.59 | 1.30 | 1.10 | 0.95 | 0.84 |

可见，年满负荷发电时间对于成本电价的影响非常大。通常年满负荷发电时间与日照时间是直接相关的。但是，电站系统的设计方式、系统参数、系统追日与否，对年满负荷发电时间的影响都很大。下表给出几个地方的年日照时间与年满负荷发电时间的对照表。

表 1-3 影响年满负荷发电时间的因素

| 年日照时间（小时） （气象数据） 年发电时间（小时） | 1200 | 1600 | 2000 | 2400 | 2800 | 3200 |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| 全部固定支架安装 | 720 | 928 | 1120 | 1296 | 1456 | 1600 |
| 50%固定支架,50%追日 | 770 | 993 | 1198 | 1387 | 1558 | 1712 |
| 100%追日系统 | 828 | 1067 | 1288 | 1490 | 1674 | 1840 |
| 功率优化模块 | 894 | 1153 | 1391 | 1610 | 1808 | 1987 |

由上表可见，年日照时间对于年满负荷发电时间的影响是最大的，但在同样的年日照时间下，采用不同的系统安装方式，以及是否进行功率优化差异也是很大的。

例如，在年日照时间 2800 小时的地区（我国西北绝大多数是这类地区），固定支架的年满负荷发电时间为 1456 小时，但如果全部采用追日系统，并增添功率优化模块，则年满负荷发电时间可以达到 1808 小时。当然，年满负荷发电时间的增加需要投入的增大。但在组件不变的情况下，追加投入还是经济的。

对于追日支架等，除了考虑一次投入外，同时还要考虑当地的气候条件和安装条件，例如，屋顶通常不适宜安装追日系统。对于常有大风的地面电站，那么对于跟踪支架的维修费用可能影响较大。

1.3 贷款状况对于成本电价的影响

目前，对于大型地面光伏电站的建设，多多少少都要采用部分银行贷款。银行贷款占总投资的比例以及贷款利息对于光伏电站的成本电价影响十分巨大。

这里，假定装机成本为 12000 元/KW，按照投资回收期 20 年，年满负荷发电时间 1500 小时，运营费用 2% 的计算条件，对于不同的贷款条件所对应的成本电价进行计算，结果见表 1-4。

表 1-4 贷款条件对于成本电价的影响(电价单位：人民币元/度)

| 贷款比例 | 90% | 80% | 70% | 60% | 50% | 40% | 30% | 20% | 10% | 0% |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 贷款利息 | | | | | | | | | | |
| 10% | 1.28 | 1.20 | 1.12 | 1.04 | 0.96 | 0.88 | 0.80 | 0.72 | 0.64 | 0.56 |
| 9% | 1.21 | 1.14 | 1.06 | 0.99 | 0.92 | 0.85 | 0.78 | 0.70 | 0.63 | 0.56 |
| 8% | 1.14 | 1.07 | 1.01 | 0.94 | 0.88 | 0.82 | 0.75 | 0.69 | 0.62 | 0.56 |

| | | | | | | | | | | |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 7% | 1.06 | 1.01 | 0.95 | 0.90 | 0.84 | 0.78 | 0.73 | 0.67 | 0.62 | 0.56 |
| 6% | 0.99 | 0.94 | 0.90 | 0.85 | 0.80 | 0.75 | 0.70 | 0.66 | 0.61 | 0.56 |
| 5% | 0.92 | 0.88 | 0.84 | 0.80 | 0.76 | 0.72 | 0.68 | 0.64 | 0.60 | 0.56 |
| 4% | 0.85 | 0.82 | 0.78 | 0.75 | 0.72 | 0.69 | 0.66 | 0.62 | 0.59 | 0.56 |
| 3% | 0.78 | 0.75 | 0.73 | 0.70 | 0.68 | 0.66 | 0.63 | 0.61 | 0.58 | 0.56 |

从表 1-4 可见，在其余条件均给定的条件下，仅贷款条件的变化，光伏电价就可能从 0.56 元/度升高到 1.28 元/度。

对于光伏电站的建设来说，贷款利息当然是越低越好。贷款比例的升高也会导致成本电价的提升，但由于自有资本金占用少，所以，适当提高贷款比例也未必是坏事。这要通过计算内部收益率和根据能够得到的最低利率来确定最合适的贷款比例。本文对此不作深入讨论。

1.4 投资回收期对于成本电价的影响

假设单位装机成本为 12000 元/KW，运营费用按照 2% 计算。年等效满负荷发电时间按照 1500 小时计算。在两种贷款条件下，则不同的投资回收期所对应的成本电价见表 1-5。

表 1-5 年满负荷发电时间对于成本电价的影响（电价单位：人民币元/度）

| 投资回收期（年） | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
|---------------|------|------|------|------|------|
| 贷款条件 | | | | | |
| 全部自有资金 | 1.76 | 0.96 | 0.69 | 0.56 | 0.48 |
| 70%贷款比例,7%的年息 | 2.15 | 1.35 | 1.08 | 0.95 | 0.87 |

由表（1-5）可见，如果全部采用自有资金投入，投资回收期设定在 25 年，目前的光伏发电成本电价仅为 0.48 元/度。这个价格已经低于许多地方的火电上网电价。而如果设定投资回收期为 5 年的话，则成本电价高达 1.76 元。因此，投资回收期的设定对于光伏发电的成本电价的影响也是巨大的。

在我国，火力发电厂的投资回收期通常为 15~30 年，而核电的投资回收期更高达 50 年。因此，对于光伏发电的可行性分析计算时，按照 20 年或者 25 年的投资回收期计算是较为合理的。从表（2-5）可见，在 70% 贷款的条件下，如果电价定为 0.95 元，则 20 年可回收投资，如果电价定为 0.87 元/度，则 25 年可回收投资。

1.5 运营维护费对于光伏发电成本电价的影响

设定单位装机成本为 12000 元/KW，按照回收期 20 年，贷款比例为 70%，贷款利率 7%，年等效满负荷发电时间为 1500 小时，则不同的运营费用所对应的成本电价见表 1-6。

表 1-6 运营费用对于成本电价的影响

| | | | | | | | | | |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 不同运营费用 | 1% | 2% | 3% | 4% | 5% | 6% | 7% | 8% | 9% |
| 成本电价 | 0.87 | 0.95 | 1.03 | 1.11 | 1.19 | 1.27 | 1.35 | 1.43 | 1.51 |

由表(1-6)可见,运营费用对于光伏发电成本电价的影响也是较大的。同样一个电站,如果运营费用控制在1%,则成本电价可为0.87元/度;而如果成本控制在5%,则成本电价会飙升到1.51元/度。因此,对于电站的运营和维护的成本一定要精打细算。

二 现阶段的光伏发电成本及投资效益分析

2.1 现阶段光伏发电的装机成本

根据式(2-1),光伏发电的装机成本如下:

$$C_{ivs} = C_{pan} + C_{str} + C_{asb} + C_{cab} + C_{bas} + C_{trc} + C_{pom} + C_{inv} + C_{dis} + C_{trf} + C_{acc} + C_{con} + C_{mon} + C_{eng} + C_{man} + C_{land}$$

我们根据目前的光伏产业的成本,以一个10MW的光伏电站为例,分别计算,得出目前的光伏电站的装机成本,见表2-1。假定电站地点在青海某地戈壁滩,土地价格按照3000元/亩计算。

表2-1 2011年四季度在青海省一个10MW光伏电站的装机成本

| 序号 | 代号 | 名称 | 单位 | 数量 | 价格(万元) | 备注 |
|--------------------|------------|--------|----|-----|--------|---------------------|
| 1 | C_{pan} | 组件 | MW | 10 | 6600 | 6.6元/瓦 |
| 2 | C_{trc} | 追日系统 | | | 0 | 不含追日系统 |
| 3 | C_{pom} | 功率优化模块 | | | 0 | 提高组件发电量 |
| 4 | C_{inv} | 逆变器 | MW | 10 | 800 | 1MW 10台,效率98.6% |
| 5 | C_{mon} | 电站监控系统 | | | 120 | 视频和数据监控及远传 |
| 6 | C_{str} | 组件支架 | | | 400 | 全部固定支架 |
| 7 | C_{dis} | 高低压配电 | | | 300 | 电源/开关/配电/转接/计量/ |
| 8 | C_{trf} | 变压器 | | | 160 | 10000KVA(400V/10KV) |
| 9 | C_{cab} | 电缆 | | | 650 | 所有电缆 |
| 10 | C_{bas} | 支架基础 | | | 600 | 支架的地下及地面基础 |
| 11 | C_{con} | 电站土建工程 | | | 760 | 包括基础/道路/变电所/地面硬化/绿化 |
| 12 | C_{asb} | 组件安装费用 | | | 120 | 现场的组件上支架的安装 |
| 13 | C_{acc} | 外线接入 | KM | 1 | 120 | 假定输电站为1公里 |
| 14 | C_{eng} | 施工费用 | | | 300 | 含设备运费/安装/接线 |
| 15 | C_{man} | 管理费用 | | | 120 | 管理人员工资、报批、验收 |
| 16 | C_{land} | 土地费用 | 亩 | 500 | 150 | 3000元/亩,戈壁 |
| 合计:人民币壹亿壹仟柒佰陆拾万元整。 | | | | | 11160 | |

以上费用中，第 1~5 项（表中红字部分）的价格是由光伏产业的行情决定的，这部分金额为 8080 万元，占总投资 68.7%；第 6~9 项（表中绿色部分）是由钢材和铜材的市场价格决定的，金额为 1510 万元，占 12.8%；第 10~15 则是土建与安装施工费用，取决于当地的施工条件和业主和项目公司的管理水平，金额为 2020 万元，占总投资 17.2%；最后一项土地价格为 150 万元，占 1.3%。

2.2 光伏电站投资效益

2.2.1 上网电价为 1.15 元/度的投资收益

以上述电站为例。当地年日照时间为 3100 小时，经过试验测算，年等效满负荷发电时间为 1538 小时（固定支架，已扣除站内消耗）。电价经过国家发改委审批为 1.15 元/度。电站发电的运营维护采用三班两倒方式，共设立 15 人，年运营维护费用大约为 180 万元。

项目方资本金为 3176 万元；银行贷款 8000 万元，年利率为 7.5%，每年利息为 600 万元。此外，该项目每年减排约 20000 吨二氧化碳，可产生 125 万元的 CDM 指标收入。

利用式（2-5）电站的年税前利润：

$$I_{\text{int}} = P * H_{\text{fp}} * T_{\text{arif}} + I_{\text{sub}} - C_{\text{op}} - C_{\text{fn}}$$

$$= 10000 * 1538 * 1.15 + 1250000 - 1800000 - 6000000$$

$$= 10,439,600.00 \text{ 元}$$

如果电站按照 10 年加速折旧，则每年折旧费用约 1116 万元，前 10 年可不用交税，每年的税前利润可以用来归还银行贷款。假设每年除利息外，再归还 1000 万元贷款本金，八年还清，则利息将逐年递减 75 万元。

运营财务状况表见表 2-2。

表 2-2 青海某地 10MW 光伏电站运营财务状况表（上网电价：1.15 元/度）

| 年 | 电价收入 | CDM | 运营 | 财务 | 贷款本金 | 增值税 | 税前利润 | 所得税 | 现金流入 | 累计现金流入 |
|----|------|-----|-----|-----|------|---------|-------|---------|---------|---------|
| 1 | 1725 | 125 | 180 | 600 | 8000 | (18.02) | (106) | (26.50) | 96.50 | 96.50 |
| 2 | 1725 | 125 | 180 | 525 | 7000 | (5.27) | (31) | (7.75) | 152.75 | 249.25 |
| 3 | 1725 | 125 | 180 | 450 | 6000 | 7.48 | 44 | 11.00 | 209.00 | 458.25 |
| 4 | 1725 | 125 | 180 | 375 | 5000 | 20.23 | 119 | 29.75 | 265.25 | 723.50 |
| 5 | 1725 | 125 | 180 | 300 | 4000 | 32.98 | 194 | 48.50 | 321.50 | 1045.00 |
| 6 | 1725 | 125 | 180 | 225 | 3000 | 45.73 | 269 | 67.25 | 377.75 | 1422.75 |
| 7 | 1725 | 125 | 180 | 150 | 2000 | 58.48 | 344 | 86.00 | 434.00 | 1856.75 |
| 8 | 1725 | 125 | 180 | 75 | 1000 | 71.23 | 419 | 104.75 | 490.25 | 2347.00 |
| 9 | 1725 | 125 | 180 | 0 | 0.00 | 83.98 | 494 | 123.50 | 1546.50 | 3893.50 |
| 10 | 1725 | 125 | 180 | 0 | 0.00 | 83.98 | 494 | 123.50 | 1546.50 | 5440.00 |

由表（2-2）可见，该光伏电站用 9 年的时间即可收回全部投资（累计现金流超过资本金投入，贷款还清）。平时，在每年归还 1000 万元银行贷款后，还可有 100 万现金净流入，且每年递增大约 50 余万元。到第九年，银行本金还清，每年净现金流入为 1546 万元。

2.2.2 上网电价为 1 元/度的投资收益

2012 年后，国内大部分电价变为 1 元/度。这样，如果对同样一个上述电站，每年还款余额改为 800 万元，这样，财务状况见表 2-3。

表 2-3 青海某地 10MW 光伏电站运营财务状况表（上网电价：1 元/度）

| 年 | 电价收入 | CDM | 运营费用 | 财务费用 | 贷款本金 | 增值税 | 报表利润 | 所得税 | 现金流入 | 累计现金流入 |
|----|------|-----|------|------|------|-----|-------|-----|------|--------|
| 1 | 1500 | 125 | 180 | 600 | 8000 | 0 | (331) | 0 | (55) | (55) |
| 2 | 1500 | 125 | 180 | 533 | 7100 | 0 | (264) | 0 | 13 | (43) |
| 3 | 1500 | 125 | 180 | 465 | 6200 | 0 | (196) | 0 | 80 | 38 |
| 4 | 1500 | 125 | 180 | 398 | 5300 | 0 | (129) | 0 | 148 | 185 |
| 5 | 1500 | 125 | 180 | 330 | 4400 | 0 | (61) | 0 | 215 | 400 |
| 6 | 1500 | 125 | 180 | 263 | 3500 | 0 | 7 | 0 | 283 | 683 |
| 7 | 1500 | 125 | 180 | 195 | 2600 | 0 | 74 | 0 | 350 | 1033 |
| 8 | 1500 | 125 | 180 | 128 | 1700 | 0 | 142 | 0 | 418 | 1450 |
| 9 | 1500 | 125 | 180 | 60 | 800 | 0 | 209 | 0 | 585 | 2035 |
| 10 | 1500 | 125 | 180 | 0 | 0 | 152 | 269 | 0 | 1545 | 3580 |
| 11 | 1500 | 125 | 180 | 0 | 0 | 246 | 1445 | 291 | 1154 | 4734 |
| 12 | 1500 | 125 | 180 | 0 | 0 | 246 | 1445 | 361 | 1084 | 5818 |
| 13 | 1500 | 125 | 180 | 0 | 0 | 246 | 1445 | 361 | 1084 | 6901 |
| 14 | 1500 | 125 | 180 | 0 | 0 | 246 | 1445 | 361 | 1084 | 7985 |
| 15 | 1500 | 125 | 180 | 0 | 0 | 246 | 1445 | 361 | 1084 | 9069 |

由表 2-3 可见，如果上网电价为 1 元/度，则项目投资回收期为 10 年（累计现金流入超过资本金投入，贷款还清）。到第 10 年后，因为折旧完成，因此，增值税和所得税大幅增加，每年两税合计大约 600 万元，即便如此，每年项目公司依然有 1084 万元的现金净流入。

2.2.3 系统改进的电站投资收益

上述电站没有采用固定支架，没有追日并且没有进行功率优化，如果增加追日系统和固定支架，则投资需要增加 1600 万元，从而使电站总投资从 11160 万元增加到 12760 万元。考虑贷款 9000 万元，自有资本金为 3760 万元。但这样，电站的年满负荷发电时间可以增加至 1860 小时，但运营费用也相应增加到 200 万元/年。按照这个条件，再对该电站进行测算可知（表略），增加电站优化系统，虽然使总投资增加了 1600 万元，而且维护费用也增加了 20 万元/年，但由于增加了发电量，因此，投资回收期反而缩短到 9 年零一个月。收回投资后，每年的现金流增加了 280 万元。因此，投资效益是明显的。实践证明，任何能够低成本而有效地增加光伏组件发电量的技术，都对提高光伏电站的投资回报率有很大的帮助。

三、结语

目前, 国家发改委制定了 1 元/度的上网电价。由上述分析可见, 在现有的光伏发电系统的价格下, 在我国西北地区或其它年满负荷发电时间大于 1500 小时的地区建设光伏电站, 投资回收期为 10 年内。投资回报率超过了火力发电。