

文章编号:1005-2992(2018)06-0021-08

全寿命周期下考虑环境效益的集中式光伏发电成本-效益分析

杨 茂¹, 王少帅², 李大勇³, 苏 欣⁴, 孙 涌⁵, 贾云彭⁶

(1. 东北电力大学 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术(吉林省重点实验室), 吉林 吉林 132012; 2. 国网吉林省电力有限公司吉林供电公司配电运检室, 吉林 吉林 132001; 3. 国网吉林省电力有限公司通化供电公司, 吉林 通化 130022; 4. 东北电力大学 理学院, 吉林 吉林 132012; 5. 国网淄博供电公司, 山东 淄博 255000; 6. 国网吉林供电公司客户服务中心计量室, 吉林 吉林 132012)

摘 要: 集中式光伏发电拥有选址灵活、出力稳定、运行方式灵活、建设周期短、环境适应能力强等优点, 但投资大、投资回收期长、成本及效益计算困难, 导致很多投资者望而却步. 建立了集中式光伏发电在全寿命周期下的度电成本和效益模型, 引入碳排放权交易将光伏发电的环境效益量化为经济效益, 有效降低了度电成本, 优化了经济评估指标, 并对影响集中式光伏发电效益的不同因素进行了敏感性分析, 更加全面客观地对集中式光伏发电的经济效益进行评估分析, 为更多的光伏发电投资决策和光伏电站并网定价提供有力参考.

关 键 词: 集中式光伏发电; 全寿命周期; 环境效益; 成本-效益分析

中图分类号: TK511

文献标识码: A

化石燃料的日益枯竭、环境污染的日益严重, 加重人类对能源安全的担忧和环境恶化的焦虑, 使得充分利用可再生能源已经成为全球共识^[1~2]. 太阳能毋庸置疑是当今世界最大的可开发能源. 40 分钟照射在地球上的太阳能足以供全球人类消耗一年^[3]. 太阳能是人类取之不尽, 用之不竭的可再生能源, 由于分布广泛、无污染、安全可靠、广泛持久及经济潜力大等优点, 具有重要的战略地位, 已逐渐成为新世纪能源的宠儿^[4]. 以太阳能、风能为代表的大规模可再生能源并网发电已经成为新型电力系统不可阻挡的发展趋势, 许多国家已经做出大规模开发利用太阳能发电、风力发电的决策和规划, 一个以新能源发电为标志的电力系统新时代正在到来.

根据新能源“十三五”发展规划, 预计到 2020 年, 太阳能发电装机将占到电源总装机的 6% ~ 7% 左右. 届时新能源装机占电源总装机的比例将达到 20%, 发电量占全部发电量的比重达到 9% 以上. 所以, 无论分布式光伏发电还是集中式光伏发电, 在今后很长时间内都有很大的发展空间^[5].

集中式光伏发电一般是以大型地面电站的形式建设, 发出的电力目前是全部提供给电网公司, 即全额上网. 集中式光伏电站建设规模大、投资规模大、见效快、外部条件单纯、运行稳定可靠, 但项目投资大、投资回收期长、成本及效益计算困难, 导致很多投资者对集中式光伏投资望而却步.

文献[6]分析了电站单位初始投资、年满负荷发电时间、年运营维护成本、贷款条件对大型地面光伏电站发电成本的影响, 简单对其成本效益进行了分析, 对光伏电站的全寿命周期成本刻画不够详尽. 文献[7]从时间、空间、费用三个维度建立了一个针对电力系统整体的三维全寿命周期成本模型, 改进

收稿日期: 2018-06-05

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 计划)(2013CB228201)

第一作者: 杨 茂(1982-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 电力系统分析与风力发电技术

电子邮箱: yangmao820@163.com(杨茂); wangshaoshuai0909@qq.com(王少帅); ldy1109@qq.com(李大勇); suxin0930@qq.com(苏欣); sy9302426@163.com(孙涌); yphh8090@qq.com(贾云彭)

了传统经济性指标. 文献[8]建立了分布式光伏的全生命周期成本-效益模型, 然后分析了用户和能源投资商这两种投资主体下的三种经营模式(业主运营、委外运营和合作运营)所产生的不同效益情况. 文献[9-11]是国外研究人员利用全生命周期成本对不同地区光伏系统进行的经济性分析. 现有文献分析分布式光伏发电成本-效益的较多, 但对集中式光伏分析却寥寥无几.

然而, 任何技术能否形成大规模的商业化应用, 均取决于项目投资后的收益状况^[12]. 为了更加全面客观地建立集中式光伏发电的成本-效益模型, 为光伏投资决策和电站定价提供有力参考, 本文将对集中式光伏发电的全生命周期成本进行了详细分类刻画, 建立集中式光伏的度电成本模型, 并引入碳排放权交易将环境效益量化为经济效益, 对影响集中式光伏效益的不同影响因素进行敏感性分析, 更加客观地分析集中式光伏发电的经济效益.

1 集中式光伏全生命周期成本-效益模型

1.1 全生命周期成本及度电成本模型

集中式光伏全生命周期成本 (Life Cycle Cost, LCC) 构成, 如图 1 所示. 由投资成本 (Cost of Investment, CI)、运行成本 (Cost of Operation, CO)、维护成本 (Cost of Maintenance, CM)、故障成本 (Cost of Fault, CF) 和废弃成本 (Cost of Disposal, CD) 组成.

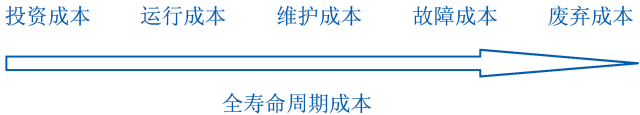


图 1 全生命周期成本构成

(1) 投资成本

集中式光伏电站的投资成本细分, 如图 2 所示.

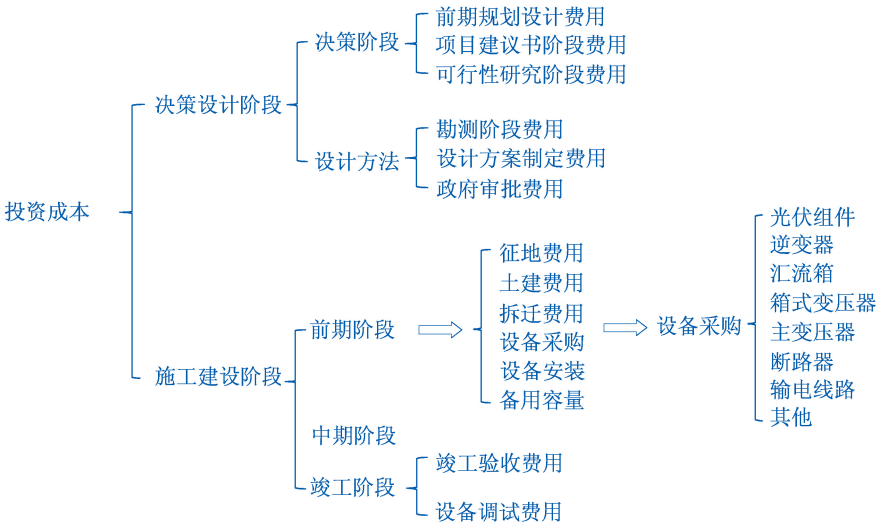


图 2 集中式光伏电站投资成本细分

一般情况下, 建设阶段占整个寿命周期的比例非常小, 我们可以假设建设阶段在项目开始的点就已完成, 因此在此阶段不涉及到折现率的问题^[13]. 本文中 $X(t)$ 表示项目 X 在第 t 年的费用, $X(0)$ 表示项目 X 折算后的现值.

集中式光伏的投资成本 CI 的现值可表示为

$$CI(0) = CI = \sum_{i=1}^m CI_i, \quad (1)$$

式中: m 为投资成本所含项目总数; CI_i 表示投资成本里第 i 个项目的费用.

(2) 运行成本

运行阶段是全寿命周期中从项目建成到项目报废的整个阶段. 在这个阶段,运营维护方案的不同会对整个全寿命周期的成本产生很大的影响,所以我们应该坚持全寿命周期成本最小的原则,将运行成本进行细分,制定科学合理的运营维护方案. 运行成本细分,如图 3(a) 所示.

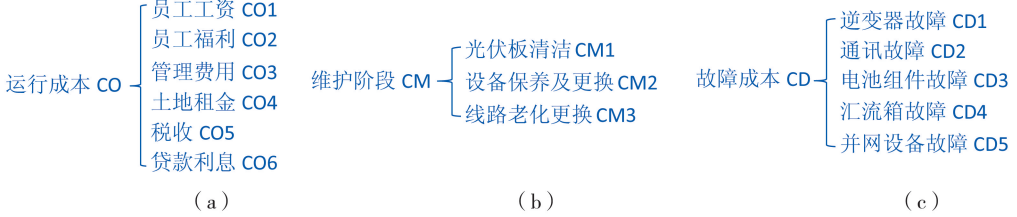


图3 集中式光伏电站运行、维护及各故障成本细分

贷款利息取决于项目总成本 CI 、贷款比例 R 、还款方式、年利率 η 及还款年限 a . 还款年限一般比项目的全寿命周期(n) 短. 还款年限内每年贷款利息计入运行成本,第 a 年还给银行所贷全部资金,不再计入运行成本. 第 t 年的贷款利息为

$$CO6(t) = CI \times R \times \eta, \quad (2)$$

则图 3(a) 贷款利息 $CO6$ 总计现值为

$$CO6(0) = \sum_{t=1}^a \frac{CO6(t)}{(1+r)^t}, \quad (3)$$

式中: r 为折现率.

前 a 年的年运行成本(包含贷款利息,且 $t \leq a$) 为

$$CO(t) = \sum_{m=1}^6 COm(t), \quad (4)$$

式中: COm 为运行成本细分项的费用.

a 年 ~ n 年的年运行成本(贷款已还, $a < t \leq n$) 为

$$CO(t) = \sum_{m=1}^5 COm(t), \quad (5)$$

所以运行成本的现值为

$$CO(0) = \sum_{t=1}^n \frac{CO(t)}{(1+r)^t}, \quad (6)$$

式中: n 为全寿命周期年限(下同).

(3) 维护成本

集中式光伏发电运营过程中,不需要原材料,机械磨损也可以忽略,因此维护费用比较低,也完全可以预见,主要包括光伏组件的维护保养费用、设备的保养更换及线路老化更换. 维护成本的细分,如图 3(b) 所示.

第 t 年的维护成本为

$$CM(t) = CM_1(t) + CM_2(t) + CM_3(t), \quad (7)$$

所以,维护成本现值为

$$CM(0) = \sum_{t=1}^n \frac{CM(t)}{(1+r)^t}. \quad (8)$$

(4) 故障成本

故障成本细分,如图 3(c) 所示.

第 t 年的故障成本为

$$CF(t) = \sum_{m=1}^5 CFm(t) , \quad (9)$$

所以故障成本现值为

$$CF(0) = \sum_{t=1}^n \frac{CF(t)}{(1+r)^t} . \quad (10)$$

(5) 废弃成本

固定资产残值 R 与处置废弃设备所产生的费用 Cd 抵消后的值认为是废弃成本,即

$$CD = Cd - R , \quad (11)$$

$$CD(0) = \frac{CD}{(1+r)^n} . \quad (12)$$

(6) 全寿命周期成本

LCC 全寿命周期成本现值为

$$TC(0) = CI(0) + CO(0) + CM(0) + CF(0) + CD(0) . \quad (13)$$

(7) 集中式光伏电站度电成本

集中式光伏发电全寿命周期总发电量为 TQ , 除去厂用电(厂用电率为 μ), 得到度电成本

$$C_e = \frac{TC(0)}{TQ(1-\mu)} . \quad (14)$$

1.2 全寿命周期效益模型

(1) 经济效益

集中式光伏发电的年发电量是分析经济效益的重要指标, 主要取决于光伏电站的装机容量. 在全寿命周期内, 由于地球和太阳的固有规律, 太阳对某一电站所在地区的年辐射量的变化很小, 所以在模型的研究过程中, 为了简化模型方便研究, 假设每年的太阳能年辐射量相等, 那么光伏电站年发电量也是不变的. 集中式光伏发电的年发电量计算方法为

$$Q(t) = \frac{H_i}{H} \times T \times C \times \lambda , \quad (15)$$

式中: Q 为年发电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; H_i 为该地区第 i 年的太阳能年辐射量, $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$; H 为标准太阳能辐射强度, kW/m^2 ; T 为光伏发电的装机容量, kW ; C 为倾斜光伏组件辐射量系数, 一般情况取值为 1.05 ~ 1.15; λ 为发电系统综合影响系数, 一般情况取值为 72% ~ 78%.

考虑到“光伏发电优先上网”的政策倾向, 光伏发电除去厂用电所有电量均上网交易. 每年的经济效益的计算公式为

$$S^c(t) = (Q - q) \times P + (Q - q) \times \varphi , \quad (16)$$

式中: Q 为年发电量; q 为厂用电; P 为上网电价; φ 为政府补贴额度.

因此, 全寿命周期的经济效益现值为

$$S^c(0) = \sum_{i=1}^N \frac{(Q - q) \times P + (Q - q) \times \varphi}{(1+r)^i} . \quad (17)$$

(2) 环境效益

太阳能作为一种清洁能源, 其节能减排效益、环境效益和社会效益都十分显著. 光伏发电的节能效

益主要体现在运行时减少常规能源的消耗. 其环境效益主要表现为在发电过程中不排放有害气体, 如不排放烟尘、 SO_2 、氮氧化物以及其它有害的物质, 而且剩余的碳排放权可以进行交易, 认为是一种环境收益, 所以第 t 年的环境效益为

$$S^e(t) = Q \times \beta \times \overline{P_t^c}, \quad (18)$$

式中: β 为单位光伏发电减排的 CO_2 , kg/kWh ; $\overline{P_t^c}$ 为第 t 年的碳排放交易平均价格. 因为碳排放权交易的价格每天都在进行变化, 因此取平均值比较符合实际情况.

因此, 全寿命周期的环境效益现值为

$$S^e(0) = \sum_{t=1}^N \frac{Q \times \beta \times \overline{P_t^c}}{(1+r)^t}. \quad (19)$$

集中式光伏电站考虑环境收益的度电成本为

$$C_e = \frac{TC(0) - S^e(0)}{TQ}. \quad (20)$$

(3) 总发电收益

总发电效益 = 经济效益 + 环境效益, 总发电收益现值为

$$S(0) = S^c(0) + S^e(0). \quad (21)$$

(4) 全寿命周期净收益现值

$$NS(0) = S(0) - TC(0). \quad (22)$$

2 经济效益评估模型

2.1 评估指标

(1) 净现值

净现值 NPV 是投资项目所付出的现金流出量现值与投资所产生的现金流入量现值的代数和. NPV 投资评价法的原理简单而又重要, 因为只有当投资项目的产出大于或至少等于其投入时, 该投资才是可行的. 具体公式为

$$NPV = \sum_{i=1}^n \frac{B^i - C^i}{(1+r_0)^i}, \quad (23)$$

式中: NPV 为集中式光伏在全寿命周期的净现值(元); B^i 为第 i 年现金流入量(元/a); C^i 为第 i 年现金流出量(元/a); r 为基准折现率(%).

(2) 内部收益率

内部收益率(IRR) 是公认的除净现值以外的另一个最重要的经济评价指标. 按定义, 内部收益率就是净现值为零时的折现率^[14]. 由此可得内部收益率的方程为:

$$\sum_{i=1}^n \frac{B^i - C^i}{(1+IRR)^i} = 0, \quad (24)$$

式中: IRR 为项目的内部收益率(%); $(B^i - C^i)$ 为项目第 i 年的净现金流量(元/a).

(3) 投资回收期

动态投资回收期是把投资项目各年的净现金流量按基准收益率折成现值之后,再来推算投资回收期^[15],公式为

$$T = t' - 1 + \frac{\left| \sum_{i=1}^{t'-1} \frac{B^i - C^i}{(1 + r_0)^i} \right|}{\frac{B^{t'} - C^{t'}}{(1 + r_0)^{t'}}}, \tag{25}$$

式中: T 为动态投资回收期(a); t' 为净现值大于0的年份.

2.2 敏感性分析

集中式光伏自身的不确定因素主要包括年发电量、上网电价、贷款利率、政府补贴额度、碳排放权交易价格、折现率、运维率、厂用电率、单位光伏排放的 CO_2 等. 本文将就这些可变因素对全寿命周期收益的净现值进行敏感性分析,敏感程度的公式为

$$S_{AF} = \frac{\Delta A/A}{\Delta F/F}, \tag{26}$$

式中: S_{AF} 为敏感程度; $\Delta F/F$ 表示不确定因素 F 的变化率(%); $\Delta A/A$ 表示当不确定因素 F 发生 ΔF 变化时,评价指标 A 的相应变化率(%). S_{AF} 绝对值越大,表明评价指标 A 对不确定因素 F 越敏感;反之,则不敏感.

3 算例分析

3.1 案例简介

以江苏省射阳县光伏项目为例,该项目的工程静态总投资 1.84 亿元,利息约为 4 750 000 元,工程动态总投资为 1.887 5 亿元,单位千瓦静态投资为 9.2 元/W,每千瓦动态投资为 9.43 元/W. 射阳县光伏项目基本投资情况见,如表 1 所示.

表 1 射阳光伏项目基本投资情况

序号	项目名称	金额(万元)
1	组件	9 000
2	固定支架	1 000
3	逆变器	1 200
4	电气设备	1 400
5	土建工程	2 200
6	安装工程	1 200
7	其他费用	800
8	基本预备费用	1 040
9	接入系统(内)	160
10	接入系统(外)	400
	工程静态总投资	18 400
	投资指标(元/W)	9.2

表 2 经济评价原始数据表

序号	项目名称	原始数据
1	发电容量(MW)	20
2	设备平均年发电小时数(h)	1 032
3	建设期(月)	4
4	项目运营期	25
5	人民币贷款年利率(%)	6.55
6	贷款还款期(年)	15
7	运维率(%)	0.6
8	折旧年限(年)	15
9	运营期保险费(%)	0.4
10	电站定员(人)	10
11	人工工资(元/年)	100 000
12	福利(%)	60
13	其他费用(元/KW·年)	30

建设期利息:建设期按 4 个月,根据工程实际情况测算资金需求,按一次取得贷款,按年计息的方式计算利息. 经测算,项目建设期利息约为 475 万元. 建设资金来源:电站总投资的 20% 使用资本金,其余从银行贷款. 建设贷款利率:按一年以内流动资金贷款利率为 6.0% 计算,五年期以上长期贷款利率为 6.55% 计算. 工资及福利:维护管理人员 10 人,工资按 10 万元/人年计算,员工福利费用按其工资的 60%

计算;维修费用:约为固定资产的 0.6%;土地租金:60 万元/年计算,租金每五年(首年支付)支付一次,每次上涨 10%。其他费用:其他费用按每千瓦 30 元计算。固定资产折旧,按 5% 计算取残值,折旧年限取 15 年。厂用电率为 1%。债务费用:自有资金为 20%,其余从银行贷款,贷款利率按 6.55% 计算。偿还贷款年限按整年计。射阳县光伏项目经济评价原始数据,如表 2 所示。

3.2 经济性评价指标分析

通过模型计算,结果如表 3 所示。光伏发电的环境效益不可忽略,考虑环境效益将会影响集中式光伏发电的经济评价指标,环境效益对评价指标的影响,如表 4 所示。

表 3 射阳光伏项目模型计算结果

全寿命周期阶段	数值(万元)	全寿命周期阶段	数值(万元)
投资成本	18 400	年发电量	$2.750\times10^7\text{kWh}$
运行成本	12 969.80	全寿命周期总发电量(除去 1% 厂用电)	$6.875\times10^8\text{kWh}$
维护成本	559.81	年经济效益	3 492.51
故障成本	839.71	全寿命周期经济收益现值	31 701.63
废弃成本	-4 600.00	年环境效益	109.41
全寿命周期成本	28 169.32	全寿命周期环境效益现值	993.10

表 4 环境效益对评价指标的影响

	度电成本(元)	净现值(万元)	投资回收期(年)	内部收益率(%)
不考虑环境效益	0.410	3532.31	10.51	8.2
考虑环境效益	0.395	4525.40	10.19	8.8
提高/减少百分比	3.6% ↓	28.1% ↑	3.0% ↓	7.0% ↑

从计算结果可以得到,对集中式光伏电站全寿命周期成本的详细刻画得到的度电成本和三个经济性评价指标的计算更加全面完善,考虑环境效益将有助于降低度电成本,提高净现值和内部收益率,缩短投资回收期,其中对净现值和内部收益率的改善较为明显,分别为 28.1% 和 7%。

3.3 敏感性分析

不同影响因素对净收益的影响程度也不一样,通过敏感性的分析,如图 4 所示。净收益对年发电量反应最为敏感,但是年发电量在一定的技术和经济条件下存在不可超越性。净收益对政府补贴、上网标杆电价的敏感程度体现了政府支持和电价机制对集中式光伏建设和发展的必要性和促进作用。敏感性从大到小为年发电量>政府补贴额度>上网电价>折现率>贷款利率>碳排放权交易价格>运维率>单位光伏排放的 CO₂>厂用电率。

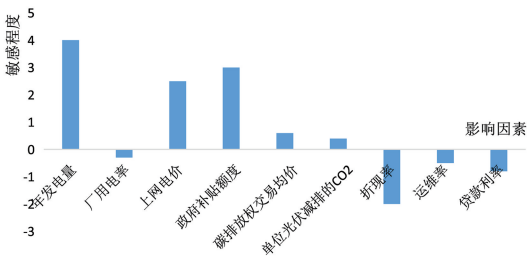


图 4 不同影响因素对净收益的敏感性对比

4 结 论

本文对集中式光伏发电的全寿命周期成本进行了详细地分类刻画,建立了集中式光伏发电在全寿命周期下的成本和效益模型,通过算例分析得到了以下结论:

- (1)引入碳排放权交易将光伏发电的环境效益量化为经济效益,算例中光伏电站的度电成本降低了 3.6%,净现值提高了 28.1%,投资回收期缩短了 3.0%,内部收益率提高了 7.0%,体现出了环境效益对集中式光伏发电不可忽略的影响。
- (2)对影响集中式光伏发电净收益的不同影响因素进行了敏感性分析,得到年发电量、政府补贴额度和上网电价对净收益的影响最为敏感,为集中式光伏电站控制成本提高收益提供了方向。
- (3)本文通过对集中式光伏发电成本和效益的客观全面地评估,为更多的光伏发电投资决策和光

光伏电站并网定价提供有力参考.

参 考 文 献

- [1] 杨茂,季本明.基于局域一阶加权法的风电功率超短期预测研究[J].东北电力大学学报,2015,35(5):6-10.
- [2] 丁明,王伟胜,王秀丽,等.大规模光伏发电对电力系统影响综述[J].中国电机工程学报,2014,34(1):1-14.
- [3] 舒海静.济南地区风力发电和太阳能发电资源潜力分析[D].济南:山东大学,2005.
- [4] 孙亮,袁文强,吴长鹏.两级式光伏并网系统建模及关键环节的设计[J].东北电力大学学报,2016,36(2):26-32.
- [5] 贾常艳.集中式光伏投资热情持续分布式光伏有望得到更多应用——访中国可再生能源学会常务理事、光伏专业委员会委员吴达成[J].电器工业,2016(3):43-45.
- [6] 胡芳.大型地面光伏电站发电成本分析[J].能源与节能,2013(10):46-47,107.
- [7] 柳璐,王和杰,程浩忠,等.基于全寿命周期成本的电力系统经济性评估方法[J].电力系统自动化,2012,36(15):45-50.
- [8] 薛金花,叶季蕾,陶琼,等.面向不同投资主体的分布式光伏运营策略研究[J].电网技术,2017,41(1):93-98.
- [9] J. F. Armendariz-Lopez, A. Luna-Leon, M. E. Gonzalez-Trevizo, et al. Life cycle cost of photovoltaic technologies in commercial buildings in Baja California, Mexico[J]. Renewable Energy, 2016, 87(1):564-571.
- [10] Aiyin Jiang, Yimin Zhu. Impact of incentives and system efficiency on the life cycle cost of photovoltaic systems[J]. International Journal of Construction Education & Research, 2012, 8(3):204-222.
- [11] M. Ozturk, B. B. Cirak, N. Ozek. Life cycle cost analysis of domestic photovoltaicsystem[J]. Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 2012, 18(1):1-11.
- [12] 孔令丞,钱伟.光伏发电并网电价及补贴政策效果[J].南大商学评论,2015,4(1):62-77.
- [13] 皮薇.全寿命周期的分布式光伏发电的成本—效益研究[D].北京:华北电力大学,2015.
- [14] 戴小木,陈继勇.净现值法和内部收益率法的比较分析[J].边疆经济与文化,2006(6):33-35.
- [15] 郭晓军.电力技术经济评价指标与方法[J].低碳世界,2014,3(5):76-78.

Cost-benefit Analysis of Centralized Photovoltaic Power Generation Considering Environmental Benefit under the Life Cycle

Yang Mao¹, Wang Shaoshuai², Li Dayong³, Su Xin⁴, Sun Yong⁵, Jia Yunpeng⁶

(1. Modern Power System Simulation Control & Renewable Energy Technology (Jilin Province key) Laboratory, Northeast Electric Power University, Jilin Jilin 132012; 2. Jilin Power Supply Company Distribution Inspection Room, State Grid Jilin Electric Power Co. Ltd., Jilin Jilin 132001; 3. Tonghua Power Supply Company, State Grid Jilin Electric Power Co. Ltd., Tonghua Jilin 130022; 4. Science College, Northeast Electric Power University, Jilin Jilin 132012; 5. State Grid Zibo Power Supply Company, Zibo Shandong 255000; 6. State Grid Jilin Power Supply Company Customer Service Center Metrology Room, Jilin Jilin 132012)

Abstract: Centralized photovoltaic (PV) power generation has the advantages of flexible location, output stability, flexible operation mode, short construction period and strong ability to adapt to the environment. However, large investment, long investment recovery period, and cost and efficiency difficult to calculate, make many investors discouraged. This paper establishes the cost and benefit model of centralized PV power generation under the life cycle, and introduces the carbon emission right transaction to quantify the environmental benefits of PV power generation into economic benefits, which effectively reduces the cost of electricity, optimize the economic evaluation index, and paper analyzes the different factors that affect the benefits of centralized PV power generation, and analyzes the economic benefits of centralized PV power more comprehensively and objectively. It provides a strong reference for more PV investment decision and PV grid pricing.

Key words: Centralized PV power generation; Life cycle; Environmental benefits; Cost-benefit analysis