

特高压电网社会效益分析及评价方法

田书欣¹,程浩忠¹,常 浩²,戚庆茹²,柳 璐¹,洪绍云¹

(1. 上海交通大学 电气工程系 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室,上海 200240;

2. 国网北京经济技术研究院,北京 100052)

摘要: 引入全寿命周期成本和影子价格理论,识别特高压电网成本和社会经济效益组成;并基于与效益相关的各元素影子价格估算公式,深入分析除售电收益外特高压电网所带来的巨大的社会效益。编制投入产出效益流量表,建立基于全寿命周期成本的特高压电网社会效益评价指标;结合灵敏度分析理论,形成适用于特高压电网的社会效益评价方法。以我国某特高压同步大电网 2020 年规划方案为算例,对比分析了在传统财务成本和考虑全寿命周期成本计算方式下的社会效益评价结果,验证了所提方法的有效性和可行性。

关键词: 特高压电网; 特高压输电; 全寿命周期成本; 社会效益; 影子价格; 投入产出分析; 成本效益分析; 评价

中图分类号: TM 723

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.02.024

0 引言

预计到 2020 年,我国将建成由 1000 kV 交流、±1100 kV 与 ±800 kV 直流构成的特高压电网。特高压电网具有建设规模大、投资高、社会影响大、不确定性因素多等特点。其构建增强了电网在大范围优化资源配置的能力,一方面促进大煤电、大水电、大核电、大型可再生能源基地的集约化开发,可以满足电网快速增长的电力需求;另一方面,随着特高压主网架建设,电网联网规模不断扩大,扩大了水电、风电、太阳能等清洁能源消纳能力,推动能源供应结构清洁化、优质化。因而特高压电网的效益不仅在于售电带来的经济效益,还在于带来了巨大的潜在社会效益,需要进行全面、准确的估量。文献[1-2]基于技术经济评价理论,从财务分析的角度对特高压交流试验示范工程的经济性进行了实证评估,但未从国民经济角度全面分析特高压电网所带来的各项社会效益。文献[3-4]虽然对特高压项目的社会效益进行了初步的探讨,并对特高压的综合效益组成进行归纳,但是没有针对特高压电网的高额投资成本展开深入的分析。因而本文基于全寿命周期成本 LCC (Life Cycle Cost) 对特高压电网的投资成本进行详细的费用分解,并提出从国民经济角度全面分析特高压电网所带来的各项社会效益的评价方法,是对现有经济性分析方法的有效补充和完善。

基于此,本文首先结合 LCC 方法,从时间维度、

元件维度和费用维度计算特高压电网的成本;然后基于边际理论引入反映资源真实经济价值的电力影子价格^[5],重点从节约装机效益、节约燃煤效益、降低网损效益、降低短路电流效益、可持续发展效益、优化社会资源配置效益等角度研究了特高压电网社会效益的组成要素及其估算方法,分析了除售电收益外特高压电网所带来的巨大的社会效益。最后,以某特高压同步大电网规划方案为算例,验证了上述研究工作的有效性。

1 特高压电网成本分析

针对特高压电网存在的高额投资成本问题,本文采用 LCC 分析的方法,对构建特高压电网的各项成本组成进行分析,旨在社会效益评价中充分考虑特高压电网高额投资成本对评价结果的影响。

基于特高压电网整体建立一个由时间维度、元件维度和费用维度组成的三维 LCC 模型。针对费用维度,又进一步分解为设备级费用、系统级费用和外部环境成本。同时研究了断供成本的计算,用电量不足期望值(EENS)将可靠性与成本相关联。在文献[6]所提出的费用分解方法基础上,分析了特高压电网中 LCC 模型应用的特性,其具体计算公式如下:

$$C_{LCC} = \sum_M \left(\sum_{i=1}^N C'_{dl,i} + C'_{sl} + C'_{exter} \right) \quad (1)$$

其中, C_{LCC} 为考虑 LCC 方式中特高压电网投资成本值; $C'_{dl,i}$ 为 LCC 设备级成本折算值; C'_{sl} 为 LCC 系统级成本折算值; C'_{exter} 为外部环境成本折算值; N 和 M 分别为元件数和时间阶段数。

2 影子价格计算理论

2.1 影子电价

电力影子价格是指能够保证电力资源的最优利

收稿日期:2014-05-12;修回日期:2014-11-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51337005);上海市优秀学术带头人计划(12XD1402900);国家电网公司科技项目(SGCC-MPLG018-2012)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51337005),Shanghai Excellent Academic Leader Plan(12XD1402900) and Science and Technology Project of State Grid of China Corporation(SGCC-MPLG018-2012)

用,反映电力真实价值的价格。本文在各电网的电源扩展优化及日常运行优化的基础上采用边际理论来测定与效益相关的各元素的电力影子价格,即为满足新增单位千瓦的用电需求,整个社会所花费的全部费用。

2.1.1 上网影子电价

通过对电力产品成本进行分解,基于边际理论测算真实反映煤电上网价值的上网影子电价^[7]。根据上网影子电价的相关理论可知:

$$\min T = \sum_i [(K_{Fi} - S_{mi})_a + S_{mi}i_s + C_i + v_i i_s] \quad (2)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum A_i \leq A_s \quad (3)$$

其中, $(K_{Fi} - S_{mi})_a + S_{mi}i_s$ 为某区域因发电量不足而新建发电厂 i 的固定资产投资的年回收值, $(K_{Fi} - S_{mi})_a = (K_{Fi} - S_{mi}) \cdot (A/P, i_s, n)$, 其中 $(A/P, i_s, n)$ 为资金回收系数, 表达了已知现值 P 和 n 个等年值 A 之间的等效关系, 即 $(A/P, i_s, n) = (1 + i_s)^n / [(1 + i_s)^n - 1]$; i_s 为社会折现率; A_i 为某区域新建发电厂 i 的年上网供电量; A_s 为全网最大年上网新增供电量约束; K_{Fi} 为折算至生产期初某区域发电厂 i 的新增装机机组的固定资产投资终值; S_{mi} 为某区域发电厂 i 的新增装机机组在生产期末可回收的固定资产余值; C_i 为某区域发电厂 i 的年运行费, 可以由固定资产投资 K_{Fi} 乘以年运行费率 u 估算求得, 即 $C_i = K_{Fi}u$; $v_i i_s$ 为发电厂 i 流动资金年占用费, 流动资金 v_i 是周转资金, 可以按 2 个月所需的运行费用进行估算; T 为年折算费用。

引入总发电量约束因子 λ_1 , 并假定 $\lambda_1 \geq 0$, 从而形成拉格朗日函数^[8]为:

$$L = \sum_i [(K_{Fi} - S_{mi})_a + S_{mi}i_s + C_i + v_i i_s] + \lambda_1 (A_s - \sum A_i) = \sum T_i + \lambda_1 (A_s - \sum A_i) \quad (4)$$

将拉格朗日函数对各发电厂的年上网供电量 A_i 求偏导, 有:

$$\frac{\partial L}{\partial A_i} = \frac{\partial \sum T_i}{\partial A_i} - \lambda_1 = 0 \quad (5)$$

$$\lambda_1 = \frac{\partial \sum T_i}{\partial A_i} \approx \frac{\Delta T}{\Delta A} = \frac{\Delta T}{\Delta E(1 - a\%)} \quad (6)$$

其中, ΔT 为特高压项目的年折算费用; ΔA 为年平均增加的上网供电量; ΔE 为年平均增加的发电量; $a\%$ 为厂用电率。

λ_1 即发电厂的上网影子电价 p_c , 它表示一个发电厂正常经营期间, 年平均增加的上网供电量所造成的地区发电厂年折算费用的变化。

2.1.2 受端影子电价

在 Pareto 有效配置模型和边际理论的基础上,

对受端影子电价进行分析。Pareto 有效配置即能满足任何重新配置都不能在不使任何其他人境况变坏的前提下, 使某(些)人的境况变得更好的经济资源和产出的配置^[9]。影子价格是采用 Pareto 有效配置时, 商品或服务的边际增量引起的社会效用或社会福利的增量。

目前, 我国受端电价主要是通过由政府对于局部垄断的电网企业销售电价实行适当的价格管制的方式来定价的, 其具体定价方法可参见图 1。在价格管制之前, 电网企业面对需求曲线 DM , 相应价格为 P_A 。若政府限价 P_B , 则厂商面对的需求曲线由 DM 变为 KBE , 边际收益曲线由 MR 变为 $KBFG$, 迫使厂商按边际成本曲线 MC 与需求曲线的交点 B 进行生产, 产量由 Q_A 提高到 Q_B 。可见, 只要管制价格 P_B 选择适当, 就可在 B 点实现 Pareto 有效配置, 此时的管制价格 P_B 即受端影子电价 p_s 。另外, 鉴于近几年我国受端电价的变化趋势以及各地区的峰谷电价, 应综合考虑受端影子电价 p_s 相对于平均受端电价 p 的上升程度 Δp ^[9], 即:

$$p_s = p + \Delta p \quad (7)$$

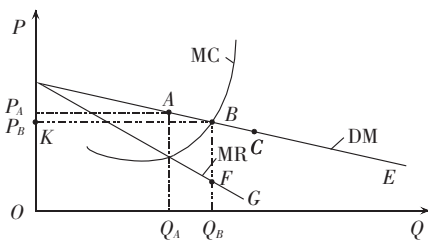


图 1 价格管制条件下 Pareto 有效配置受端影子电价
Fig.1 Receiving-end shadow price based on Pareto effective arrangement under price regulation

2.2 SO₂ 排放影子价格

煤电行业排放的 SO₂ 会对空气产生较大的污染。特高压输电可使我国燃煤电厂更多地建在环境承载力较强的西部地区。通过控制中东部地区新增煤电规模, 加快推进西部地区煤电基地集约化开发, 改造关停小机组并加装脱硫设施和污水处理设施, 中东部地区的 SO₂ 排放总量可逐步降低, 西部地区的 SO₂ 也不会增加, 从而可利用东西部地区经济差异, 减少电力行业的环保经济损失, 并将其折算为 SO₂ 排放影子价格^[10-11]。

假设某一地区的煤电基地 i 的年发电量为 A_{ei} , 其 SO₂ 年排放量为 W_i , 单位发电量 SO₂ 排放量为 r_i , 单位发电量排放 SO₂ 造成的环境经济损失为 p_i , 则可构造最小环境经济损失目标函数及约束条件:

$$\min p_{\text{coal}} = \sum p_i A_{ei} = \sum p_i \frac{W_i}{r_i} = \sum \frac{p_i}{r_i} W_i \quad (8)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum W_i \leq W_s \quad (9)$$

其中, p_i/r_i 为单位 SO_2 排放量造成的环境经济损失; W_s 为该地区所容许的 SO_2 排放总量。

对该地区煤电基地发电最小环境经济损失的目标函数和约束条件引入拉格朗日方程:

$$L_{\text{area}} = \sum \frac{p_i}{r_i} W_i + \lambda_2 (W_s - \sum W_i) \quad (10)$$

该方程的一阶条件为:

$$\frac{\partial L_{\text{area}}}{\partial W_i} = \frac{p_i}{r_i} - \lambda_2 = 0 \quad (11)$$

则可得:

$$\lambda_2 = p_i/r_i \quad (12)$$

其中,拉格朗日乘子 λ_2 就是单位 SO_2 排放影子价格,它代表的是该地区的 SO_2 排放总量在最优利用条件下对单位排放量的估价。

2.3 土地影子价格

土地影子价格应根据所占土地的地理位置、项目情况以及取得的不同方式,分别估算其影子价格,具体公式如下:

$$p_{\text{es}} = C_r + \frac{N_r}{i_s} + \sum_{t=1}^K N_r \frac{(1+R)^t - 1}{(1+i_s)^t} \quad (13)$$

其中, N_r 为不小于劣等土地的每亩净收益; R 为每亩土地净收益增长百分率; C_r 为征收每亩土地的实际成本; K 为项目的经济寿命; i_s 为社会折现率。在本文中,鉴于我国已经有较为完备的土地交易市场机制,因而可以结合式(13)按财务价格估算土地影子价格^[10]。

2.4 劳动力影子工资

劳动力影子工资是指建设项目使用劳动力资源而使社会付出的代价。特高压电网建设中的劳动力影子工资应按下式计算:

$$p_{\text{lb}} = w k_{\text{sl}} \quad (14)$$

其中, p_{lb} 为劳动力影子工资; w 为劳动力财务工资; k_{sl} 为影子工资换算系数。技术劳动力的工资报酬一般可由市场供求决定,即劳动力影子工资 p_{lb} 可按财务实际支付工资计算^[12]。

2.5 运输影子成本

发展特高压输电可以大量节约煤炭等资源输送环节,因而可以节省交通运输成本。具体的计算公式如式(15)所示。

$$C_t = C_{\text{in}} k_t \quad (15)$$

其中, C_t 为交通运输影子成本; C_{in} 为交通运输原始成本; k_t 为影子换算系数。

不同交通运输方式的影子换算系数选取为^[13-14]: 铁路 1.84, 公路 1.26, 沿海货运 1.73, 内河货运 2.00。

3 社会效益分析

本文从利益群体的角度考虑,立足于节约装机效益、节约燃煤效益、降低网损效益、降低短路电流

效益、可持续发展效益、优化社会资源配置效益 6 个方面分析特高压电网构建所带来的社会效益,并且基于影子价格理论,具体给出各个部分效益的估算方法。

3.1 节约装机效益

由于各区域电网负荷特性不同,最大负荷出现的时间不同,因此联网后电网间有明显的错峰,主要体现在月错峰和日错峰。扩大联网规模,可降低备用容量规模,获得节约装机效益^[15]。节约装机效益可按下式进行估算:

$$\text{EP}_N = S_N C_N \quad (16)$$

其中, EP_N 为节约装机效益; S_N 为减少装机容量; C_N 为新建机组单位成本。

3.2 节约燃煤效益

节约燃煤效益可分为 2 类:一类为将减少弃风量和弃水量折算为节约燃煤效益;另一类为我国煤炭资源丰富地区的大煤电基地集约化开发所带来的降低燃煤成本。与各负荷中心直接发电相比,在煤电基地发电的燃煤成本会大幅降低,因而可将其降低量折算为节约燃煤效益。具体计算如下:

节约弃风效益 EP_{WG} 为:

$$\text{EP}_{\text{WG}} = S_{\text{wi}} (p_c - p_{\text{is}}) \quad (17)$$

节约弃水效益 EP_{HG} 为:

$$\text{EP}_{\text{HG}} = S_{\text{hi}} (p_c - p_{\text{is}}) \quad (18)$$

其中, S_{wi} 为特高压减少的弃风发电量; S_{hi} 为特高压减少的弃水发电量; p_c 为煤电上网影子电价; p_{is} 为平均输电影子电价,可由受端影子电价与上网影子电价之差求得。

由大煤电基地集约化开发产生的降低燃煤成本 EP_J 为:

$$\text{EP}_J = T_J (p_{\text{EC}} - p_{\text{EN}}) \quad (19)$$

其中, T_J 为煤电基地送中东部所需标煤; p_{EC} 为中东部煤价; p_{EN} 为煤电基地煤价。

则节约燃煤效益可表示为:

$$\text{EP}_c = \text{EP}_{\text{WG}} + \text{EP}_{\text{HG}} + \text{EP}_J = (S_{\text{wi}} + S_{\text{hi}}) (p_c - p_{\text{is}}) + \text{EP}_J \quad (20)$$

3.3 节约网损效益

对特高压电网而言,降低网损主要是通过提高电网的运行电压水平来获得降低网损的效益。本文的节约网损效益具体计算公式如下:

$$\text{EP}_w = (H_1 - H_2) S p_s \quad (21)$$

其中, H_1 为常规电网输送每度电的平均损耗电量; H_2 为特高压电网输送每度电的平均损耗电量; S 为现特高压电网输电规模; p_s 为受端影子电价^[16]。

3.4 降低短路电流效益

由于 500 kV 高压电网存在因电力密度过大引起的短路电流过大、输电能力过低和安全性差等系统安全问题,则在 2020 年若不建设特高压网架,

电网中将有大量变电站需更换开关等变电设备且 500 kV 电网短路电流水平可达到 70 kA 以上。建成特高压网架后,可有效限制 500 kV 电网短路电流水平的增长,避免因短路电流超标大量更换电气设备,大幅减少电网改造费用。

经初步估算,需更换开关等电气设备占所在变电站投资的 10%~15%^[4],从而得出特高压电网降低高压电网短路电流所带来的效益 EP_T 。

3.5 可持续发展效益

3.5.1 土地效益

发展特高压输电可以大量节约能源输送环节的占地。根据我国地域分布特点,可以在西部建设大规模的煤电基地,节约东部比较稀缺的土地资源。东中部与西部的土地地价差值体现了节约东中部地区土地的社会效益,因此土地效益 EP_{es} 可以由下式进行估算:

$$EP_{es} = EP_{esc} - EP_{esw} = S_G p_{esc} - S_G p_{esw} - S_T p_{esc} \quad (22)$$

其中, S_G 为新增燃煤电厂占地面积; S_T 为受端特高压变电站/换流站占地面积; p_{esc} 为东中部土地影子价格; p_{esw} 为西部土地影子价格; EP_{esc} 为东中部土地价值; EP_{esw} 为西部土地价值。

3.5.2 环保效益

我国电力一次能源以煤炭为主,燃煤电厂是排放 SO_2 、 NO_x 、烟尘的重要部门。 SO_2 排放是造成酸雨问题严重的主要原因。 NO_x 、烟尘是城市 PM2.5 的重要来源之一。通过建设特高压网架,将西南水电和西北煤电大规模向东中部负荷中心输送,相应减少东中部煤电建设,有利于改善受电地区的环境,帮助解决城市 PM2.5 和霾等问题;同时,煤电基地也可以通过消化大量洗中煤,有效地治理煤炭产区的环境污染,从而得到环保效益 EP_e 。由于 SO_2 排放对大气环境危害最大,是导致环境损失的主要原因,因此本文环保效益是基于 SO_2 排放影子价格进行估算的,具体计算公式如下:

$$EP_e = (p_{ege} - p_{egw}) S_{we} M_s \quad (23)$$

其中, p_{ege} 为东中部地区单位电量 SO_2 排放影子价格; p_{egw} 为西部地区单位电量 SO_2 排放影子价格; S_{we} 为西部地区向东中部负荷地区的输电量; M_s 为单位电量所要产生的 SO_2 的排放量。

3.6 优化社会资源配置效益

3.6.1 就业效益

特高压输电对就业水平的影响途径和因素可分为直接影响和间接影响两大类。直接影响指特高压输电投资直接引起就业的增减^[17];间接影响表现为特高压输电投资对影响就业的因素发生作用,进而引起就业机会的增加。

就业效益的量化计算主要分为投资年份的特高压投资拉动的就业效益(按正比处理)、建成之后运营过程中带来特高压线路上就业岗位增加带来的就业效益、特高压项目建成后对 GDP 的贡献以及 GDP 按正比拉动带来的就业效益,这三部分效益之和即为总的效益,评估方式为拉动的就业人数与就业的劳动力影子工资的乘积^[18]。

$$EP_{em} = \begin{cases} I_t \frac{N_G}{I_G} p_{lb} & t \in Y_{inv} \\ \left(N_{ev} + \frac{N_{em}}{M_{GDP}} \sum_{i=1}^n \Delta S_i M_{ep} \right) p_{lb} & t \in Y_{ope} \end{cases} \quad (24)$$

其中, I_t 为特高压经济项目的总体投资金额; N_G 为中国年度总投资拉动的就业人数; I_G 为中国年度总投资; p_{lb} 为劳动力影子工资; N_{ev} 为特高压线路运营维护维修调度管理需要的工作人员数量; M_{GDP} 为中国的年度 GDP; N_{em} 为 M_{GDP} 对应的国内总的就业人数; ΔS_i 为特高压所带来第 i 年电量的增长量或减少缺电量; M_{ep} 为每度电带来的 GDP 量; Y_{inv} 为纯投资年份; Y_{ope} 为运行年份。

3.6.2 交通运输效益

从能源基地将电力通过特高压线路“北电南送,西电东送”工程的建立极大地减缓了将大量西北的煤炭等能源输送到东、南地区所带来的交通运输压力。本文主要考虑输电代替输煤所带来的缓解交通压力的效益,可由式(25)计算得到:

$$EP_{tr} = S_{we} r M_c C_t - S_{we} r p_{te} \quad (25)$$

其中, S_{we} 为西部地区向东中部负荷地区输送的发电量; r 为火电输电量占总电量的比例; M_c 为单位发电量煤炭的平均耗量; C_t 为每吨煤平均的运输影子成本; p_{te} 为单位输电量的输电成本。

3.6.3 其他社会资源配置效益

特高压电网建设对我国经济社会资源及相关多领域产业发展的影响是复杂且巨大的^[19]。除了上述的主要社会资源配置效益外,也产生了一些难以准确估量的积极拉动作用^[20],如促进技术升级创新、保障电力市场等。

4 社会效益评价方法

4.1 社会效益评价指标

本文建立的特高压电网的社会效益评价指标体系,是在现有国民经济评价指标的基础上,通过编制投入产出分析流量表和引入 LCC 理论对其进行了改进,具体指标如下所示。

a. 经济净现值(ENPV)。

$$ENPV = \sum_{t=1}^{n_c} (B - C)_t (1 + i_s)^{-t} \quad (26)$$

其中, B 为社会效益流量; C 为基于 LCC 的经济费用流量; $(B-C)_t$ 为第 t 期的投入产出净效益流量; i_s 为社会折现率; n_c 为项目计算期。

b. 经济内部收益率(EIRR)。

$$ENPV = \sum_{t=1}^{n_c} (B-C)_t (1+EIRR)^{-t} = 0 \tag{27}$$

c. 经济效益费用比(RBC)。

$$RBC = \frac{\sum_{t=1}^{n_c} B_t (1+i_s)^{-t}}{\sum_{t=1}^{n_c} C_t (1+i_s)^{-t}} \tag{28}$$

其中, B_t 为第 t 期的社会效益流量; C_t 为第 t 期的基于 LCC 的投入费用; i_s 为社会折现率。

4.2 评价指标灵敏度分析

通过分析不确定性因素(偏差或误差)发生增减变化时对社会效益评价指标的影响, 计算灵敏度系数, 找到较敏感的因素。通常只进行单因素灵敏度分析^[12]。其中灵敏度系数 S_{AF} 计算如下:

$$S_{AF} = \frac{\Delta A / A}{\Delta F / F} \tag{29}$$

其中, S_{AF} 评价指标 A 对于不确定因素 F 的灵敏度系数; $\Delta F / F$ 为不确定因素 F 的变化率; $\Delta A / A$ 为不确定因素 F 变化时, 评价指标 A 的相应变化率。 $S_{AF} > 0$, 表示评价指标与不确定因素同方向变化; $S_{AF} < 0$, 表示评价指标与不确定因素反方向变化。 $|S_{AF}|$ 较大表示灵敏度系数高。

5 特高压电网算例分析

以 2020 年某特高压同步大电网规划方案为算例, 设定 2011—2020 年特高压电网建设项目按照规划时序依次开工投产, 工程寿命周期为 25 a。应用本文所提的评价方法, 分析 2011—2045 年研究时限内此特高压电网规划方案的社会效益。

5.1 LCC 成本计算

5.1.1 基础数据

LCC 计算中涉及到的参数主要可以分为造价参数、外部环境成本参数、可靠性参数、运行维护及其他参数 4 类, 参数选取情况分别如下。

输变电工程造价参数主要可以分为各电压等级不同型号导线输电工程造价和各电压等级不同类型变电工程造价两部分; 外部环境成本参数包括特高压线路和电站的电磁辐射、噪声、废气排放等所带来的影响, 由于在本文中所采用的输变电工程造价参数已经考虑了环境补偿的综合造价, 因此单独的外部环境成本可视为 0; 鉴于特高压网架尚未建成, 可靠性历史数据缺乏, 本文选取已成功投运的特高压交流试验示范工程的强迫停运率统计数据, 将此特高压电网的 1000 kV 特高压电网线路综合故障跳闸率取为有用寿命期内的 0.104 次/(100 km·a); 运行维护及其他参数包括综合运行费率近似取年设备投资总额的 1.67%, 维护成本近似取年设备投资总额的 1%, 退役设备的处理费用近似取为设备价格的 1% 等。

5.1.2 计算结果

从投资成本、运行成本、维护成本、故障成本和废弃成本方面着手, 基于式(1)计算 LCC 的设备级成本、系统级成本和外部环境成本, 结果如表 1 所示。

经过折算, 某特高压同步大电网在 2011—2045 年整个全寿命周期内的成本合计为 16 963.4 亿元。其中设备级成本为 14 983.7 亿元, 占合计成本的 88.3%; 系统级成本为 1 979.3 亿元, 占合计成本的 11.7%。设备级成本仍然是 LCC 中最重要的部分, 但系统级成本也不可忽略。

5.2 影子价格计算

5.2.1 基础数据

根据《火电工程限额设计参考造价指标(2009

表 1 某特高压电网的 LCC 费用分解表
Table 1 Decomposition of LCC for a UHV power grid

项目	亿元									
	2011 年	2012 年	2013 年	...	2019 年	2020 年	2021 年	...	2044 年	2045 年
设备级	投资成本	926.2	926.2	926.2	...	928	928	0	...	0
	运行成本	10	19	29	...	87	97	97	...	97
	维护成本	9.26	18.52	27.29	...	83.43	92.71	92.71	...	92.71
	故障成本	7.59	7.44	7.34	...	6.92	6.88	6.88	...	6.88
	废弃成本	0	0	0	...	0	0	0	...	0
系统级	投资成本	0	0	0	...	0	0	0	...	0
	运行成本	6.48	12.97	19.45	...	58.40	64.90	64.90	...	64.90
	维护成本	0	0	0	...	0	0	0	...	0
	故障成本	0	0	0	...	0	0	0	...	0
	废弃成本	0	0	0	...	0	0	0	...	0
外部环境	投资成本	0	0	0	...	0	0	0	...	0
	运行成本	0	0	0	...	0	0	0	...	0
	维护成本	0	0	0	...	0	0	0	...	0
	故障成本	0	0	0	...	0	0	0	...	0
	废弃成本	0	0	0	...	0	0	0	...	0

年水平)》,新建 2×600 MW 超临界燃煤机组(含脱硫)参考单位造价为 3675 元/kW。基于国网《特高压电网经济性研究》中给出的某特高压同步大电网 2020 年规划方案,估算 2015—2020 年接入特高压电网的新增装机为 5.8×10^8 kW;接入某特高压电网的新增装机逐年投资,残值率为 4%,社会折现率为 8%,年运行费率为 1.4%^[13];估算接入某特高压电网新增装机的年平均发电量为 1.721×10^{12} kW·h,平均厂用电率为 6%。2020 年某特高压电网的平均受端综合电价估算为 0.454 9 元/(kW·h);受端影子电价相对于平均受端电价的上升程度 Δp 取 0.2 元/(kW·h)。2020 年通过某特高压电网外送火电装机容量减少 3.55×10^7 kW·h,相应产生 SO_2 8.5×10^4 t;电力行业 SO_2 排放的经济损失可减少 13 亿元/a。某特高压电网的东部受端负荷地区工业地价 980 元/m²;西部送端电源地区工业地价 577 元/m²。考虑煤炭运输过程中主要依赖于铁路,铁路电煤运价可取 100 元/t。

5.2.2 计算结果

基于式(2)—(15),结合以上数据,可求得各项影子价格如表 2 所示。

表 2 影子价格计算结果
Table 2 Calculated shadow prices

影子价格类型	估算值
p_e	0.3800 元/(kW·h)
p_s	0.6549 元/(kW·h)
p_{eqw}	1.101 万元/t
p_{eqp}	1.981 万元/t
p_{esc}	980 元/m ²
p_{esw}	577 元/m ²
p_{lb}	5 万元/(人·a)
C_t	184 元/t

5.3 社会效益组成估算

5.3.1 基础数据

基于电力需求预测,2020 年实现大规模某特高压交流同步联网后,理论上可节约的装机容量约为 3.2×10^4 MW,可减少弃风电量约 3×10^{10} kW·h,可减少弃水电量约 3.2×10^{10} kW·h。2020 年经某特高压同步大电网,煤电基地南送中部、送东部分别需要标煤 1.4×10^8 t、 1.1×10^8 t;煤电基地地区与中部、东部地区标煤价差按照最小值 365 和 376 元/t 标煤取值。2020 年建成某特高压电网架后,可按照交流功率线损率 1.86%、直流功率线损率 4% 考虑;同时将取区域内常规电网的年平均线损率的平均值来估算常规电网的交流线路线损率,经分析可按 1.94% 考虑;根据某特高压电网规划数据,经其输送的电量为 1.0335×10^{12} kW·h,其中经某特高压交流电网输送的电量为 4.946×10^{11} kW·h。估算某特高压同步大电网新增 500 kV 变电站投资为 1 084 亿元。2020 年东中部地区接受外来火电,可为东中部地区节省土地约 6×10^7 m²。2020 年经某特高压电网输送电量对应产生 SO_2 5.5×10^5 t。基于劳动力影子价格可估算 2020 年某特高压项目的就业效益为 2.3678 亿元/a。缓解交通运输效益中单位输电量成本为 0.047 3 元/(kW·h)。

5.3.2 编制投入产出效益流量表

依据基础数据,利用式(16)—(25)估算特高压电网的各类社会效益,编制某特高压电网的投入产出效益流量表,计算考虑 LCC 的社会效益评价指标,并与传统财务成本方式下的评价结果相比较,分别如表 3 和表 4 所示。表 3 为传统的以建设投资、运行费用和线损费用为费用流出的投入产出效益流量表。表 4 为以基于式(1)的 LCC 成本与流动资金之和为费用流出的投入产出效益流量表。表 3 和表 4

表 3 传统成本下的投入产出效益流量表

Table 3 Input-output benefit flow table by traditional financial cost method

项目	2011 年	2012 年	2013 年	...	2019 年	2020 年	2021 年	...	2044 年	2045 年
效益流入	364.8	506.3	647.7	...	1496.4	1637.9	1326.4	...	1310.3	1309.6
节约装机效益	117.6	117.6	117.6	...	117.6	117.6	0	...	0	0
节约燃煤效益	113	210.4	307.8	...	892.3	989.8	989.06	...	972.96	972.26
节约网损效益	1.9	1.98	2.05	...	2.51	2.59	2.59	...	2.59	2.59
降低短路电流效益	10.84	10.84	10.84	...	10.84	10.84	0	...	0	0
可持续发展效益	26	48.5	71.0	...	205.9	228.4	48.4	...	48.4	48.4
优化社会资源配置效益	95.5	116.9	138.4	...	267.2	288.7	286.3	...	286.3	286.3
回收流动资金	0	0	0	...	0	0	0	...	9.5	9.5
回收固定资产	0	0	0	...	0	0	0	...	38.1	38.1
费用流出	952.8	970.0	987.1	...	1091.7	1108.9	171.4	...	171.4	171.4
静态投资	926.2	926.2	926.2	...	928	928	0	...	0	0
流动资金	9.5	9.5	9.5	...	9.5	9.5	0	...	0	0
运行成本	17.1	34.2	51.4	...	154.2	171.4	171.4	...	171.4	171.4
净现金流量	-588	-463.7	-339.4	...	404.7	529	1155	...	1186.5	1185.8
累计净现金流量	-588	-1052	-1391	...	-823.9	-294.9	860.1	...	27660	28846
净现金流量折现	-588	-429.3	-290.9	...	218.6	264.6	535	...	93.6	86.6
累计净现金流量折现	-588	-1017	-1308	...	-1044	-778.9	-243.9	...	5322	5409

表 4 考虑 LCC 的投入产出效益流量表
Table 4 Input-output benefit flow table by LCC-based method

项目	2011 年	2012 年	2013 年	...	2019 年	2020 年	2021 年	...	2044 年	2045 年
效益流入	364.8	506.3	647.7	...	1496.4	1637.9	1326.4	...	1310.3	1309.6
节约装机效益	117.6	117.6	117.6	...	117.6	117.6	0	...	0	0
节约燃煤效益	113	210.4	307.8	...	892.3	989.8	989.1	...	973	972.3
节约网损效益	1.9	1.98	2.05	...	2.51	2.59	2.59	...	2.59	2.59
降低短路电流效益	10.84	10.84	10.84	...	10.84	10.84	0	...	0	0
可持续发展效益	26	48.5	71.0	...	205.9	228.4	48.4	...	48.4	48.4
优化社会资源配置效益	95.5	116.9	138.4	...	267.2	288.7	286.3	...	286.3	286.3
回收流动资金	0	0	0	...	0	0	0	...	9.5	9.5
回收固定资产	0	0	0	...	0	0	0	...	38.1	38.1
费用流出	969	993.6	1019.3	...	1173.3	1199	261.5	...	261.5	-53.63
LCC	959.5	984.1	1009.8	...	1163.8	1189.5	261.5	...	261.5	-53.63
流动资金	9.5	9.5	9.5	...	9.5	9.5	0	...	0	0
净现金流量	-604.2	-487.4	-371.6	...	323.1	438.8	1065	...	1058	1373
累计净现金流量	-604.2	-1092	-1463	...	-1262	823.2	241.7	...	24626	25999
净现金流量折现	-604.2	-451.3	-318.6	...	174.6	219.5	493.2	...	83.5	100.3
累计净现金流量折现	-604.2	-1056	-1374	...	-1344	-1124	-631	...	4464	4565

中的效益流入都包括节约装机效益、节约燃煤效益、节约网损效益、降低短路电流效益、可持续发展效益和优化社会资源配置效益。其中,设定在某特高压电网 2011—2045 年内,节约装机效益各年均相等,2020 年后为 0;节约弃水效益按照等额增长,2020 年后逐年递减;节约弃风效益、节约燃煤效益、节约网损效益、环保效益和缓解交通运输按照等额增长,2020 年后保持不变;降低短路电流效益、土地效益和就业效益按照等额增长,2020 年后为 0。在此条件下,计算各年的效益流入。

5.3.3 社会效益评价指标计算结果

结合投入产出效益流量表,基于式(26)—(28)计算社会效益评价指标,计算结果参见表 5。

表 5 社会效益评价指标计算结果(折算到 2011 年) Table 5 Calculated results of social benefit evaluation indices(converted to 2011)		
指标	传统方法	考虑 LCC 后
经济净现值/亿元	5012.6	4324.3
经济内部收益率/%	19	17
经济效益费用比	1.71	1.44

由表 5 可知,某特高压同步大电网规划方案传统方法下经济内部收益率为 19%,考虑 LCC 后为 17%,均大于基准折现率;传统方法下经济净现值为 5012.6 亿元,考虑 LCC 后为 4324.3 亿元,均大于 0;传统方法下经济效益费用比为 1.71,考虑 LCC 后为 1.44,均大于 1。对比传统方法下的评价指标和考虑 LCC 后改进的评价指标,表明无论是否考虑 LCC 影响,某特高压电网资源配置的综合经济效率均达到了可以被接受的水平。

5.4 评价指标灵敏度分析

本文选择成本与社会效益作为主要的不确定性

因素,对社会效益评价指标中的经济净现值、经济内部收益率和经济效益费用比进行灵敏度分析。

根据实际工程经验,通常的不确定因素变动范围在[-10%,10%]之间,本文取 2.5%为步长,给出了传统方案与考虑 LCC 方案单因素变动下的经济净现值曲线、经济内部收益率曲线和经济效益费用比曲线,分别如图 2—4 所示。

由式(29)分别计算传统方案和 LCC 方案下成本因素、社会效益因素变动时的灵敏度系数,如表 6 所示。

从整体上看,经济净现值、经济内部收益率和经

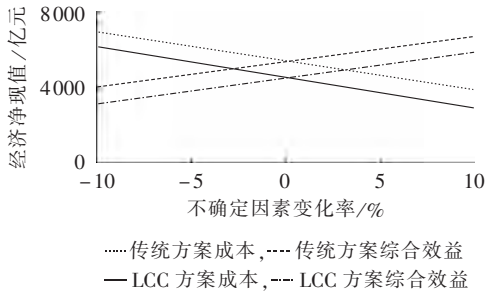


图 2 单因素变动下的经济净现值

Fig.2 Curve of ENPV vs. single factor variation rate for two methods

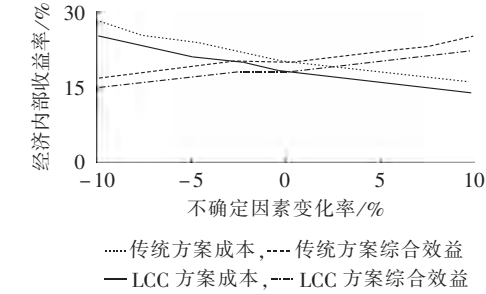


图 3 单因素变动下的经济内部收益率

Fig.3 Curve of EIRR vs. single factor variation rate for two methods

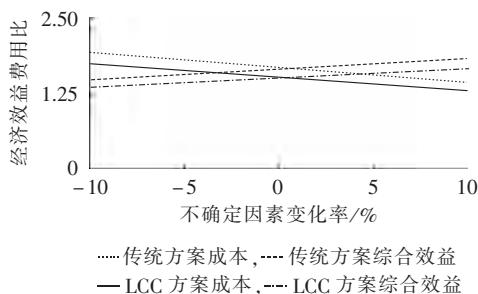


图 4 单因素变动下的经济效益费用比

Fig.4 Curve of RBC vs. single factor variation rate for two methods

表 6 灵敏度系数表

Table 6 Sensitivity coefficient

不确定因素	经济方案	ENPV 灵敏度系数	EIRR 灵敏度系数	RBC 灵敏度系数
成本因素	传统方案	-3.9	-2.7	-1.6
	LCC 方案	-4.3	-3.4	-1.7
社会效益因素	传统方案	2.1	2.4	0.9
	LCC 方案	2.3	2.9	1.1

济效益费用比都与社会效益成正比,与总投资成反比。传统投资方案的经济净现值、经济内部收益率和经济效益费用比都高于考虑 LCC 方案的相应值,但其灵敏度均低于考虑 LCC 方案的灵敏度。

6 结语

鉴于今后规划构建的特高压交直流混合大电网形态复杂、投资巨大、影响因素众多,传统的经济性评价方法已不能满足当前需求。因此,本文引入 LCC 技术对特高压电网的投资成本进行了费用分解,基于影子价格理论对特高压电网为社会带来的潜在效益进行明确的定义和分析;结合特高压电网高电压等级、高可靠性、多工程、多阶段的特点,形成了适用于特高压电网的社会效益评价方法,并以 2020 年某特高压同步大电网规划方案为算例实证分析了在传统方式和考虑 LCC 方式下该方法的有效性和可行性:一方面将 LCC 技术扩展到以大系统的观念考虑整个特高压电网的相关指标上;另一方面利用电力影子价格真实反映资源的经济价值,进而保证从电力资源的最优利用的角度评价特高压电网的社会效益。本文所提的方法为电网规划方案的比选提供经济性优劣的参考。

参考文献:

[1] 赵彪,史雪飞,孙珂,等. 特高压输电经济性实例分析[J]. 中国电机工程学报,2009,29(22):8-11.
ZHAO Biao,SHI Xuefei,SUN Ke,et al. Economic analysis of the instance for UHV AC transmission[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(22):8-11.
[2] 张运洲,韩丰,张卫东,等. 特高压交流输电的经济性[J]. 电力技

术经济,2007,19(1):1-7.

ZHANG Yunzhou,HAN Feng,ZHANG Weidong,et al. Economic advantages of ultra-high voltage AC power transmission [J]. Electric Power Technologic Economics,2007,19(1):1-7.

[3] 刘汕. 特高压试验研究基地社会经济效益评价方法研究[J]. 南方电网技术,2013,7(2):115-119.
LIU Shan. Study on social and economical benefits evaluation methods for ultra high voltage test base [J]. Southern Power System Technology,2013,7(2):115-119.
[4] 杜至刚,牛林,赵建国. 发展特高压交流输电,建设坚强的国家电网[J]. 电力自动化设备,2007,27(5):1-5.
DU Zhigang,NIU Lin,ZHAO Jianguo. Developing UHV AC transmission and constructing strong state power grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(5):1-5.
[5] 华科,谢开,郭志忠. 基于交流灵敏度的电能交易与输电权的统一拍卖[J]. 电力自动化设备,2007,27(10):47-50.
HUA Ke,XIE Kai,GUO Zhizhong. A joint auction of energy and transmission rights based on AC sensitivity[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(10):47-50.
[6] 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.
LIU Lu,WANG Hejie,CHENG Haozhong,et al. Economic evaluation of power systems based on life cycle cost [J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(15):45-50.
[7] 黄继明,薛年华,张维. 电力市场中输电定价问题的探讨[J]. 电网技术,2000,24(11):49-52.
HUANG Jiming,XUE Nianhua,ZHANG Wei. A preliminary study on electricity transmission pricing [J]. Power System Technology,2000,24(11):49-52.
[8] SHRESTHA G B,FONSEKA P A J. Congestion-driven transmission expansion in competitive power markets [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2004,19(3):1658-1665.
[9] 谭清美,周之豪. 从帕累托效率谈影子价格[J]. 河海大学学报:自然科学版,2000,28(3):60-64.
TAN Qingmei,ZHOU Zhihao. Discussion on shadow price on the basis of pareto efficiency[J]. Journal of Hohai University;Natural Sciences,2000,28(3):60-64.
[10] 林云华. 排污权影子价格模型的分析及启示[J]. 环境科学与管理,2009,34(2):16-19.
LIN Yunhua. The research on the implications and apocalyptoes of shadow price model of tradable permits [J]. Environmental Science and Management,2009,34(2):16-19.
[11] YAMASHITA D,NIIMURA T,YOKOYAMA R. Thermal unit scheduling for CO₂ reduction including significant wind power penetration [C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego,America;IEEE,2011:1-5.
[12] 高蕊. 电力建设项目国民经济评价理论与方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2009.
GAO Rui. The research on theory and method of the national economic evaluation for power project[D]. Beijing:North China Electric Power University,2009.
[13] 国家计划委员会,建设部. 建设项目经济评价方法与参数[M]. 3 版. 北京:中国计划出版社,2006:129-146.
[14] HUMAVINDU M N. Estimating Namibian shadow prices within

- a semi-input-output framework[J]. The Journal for Studies in Economics and Econometrics,2008,32(3):29-42.
- [15] 孙珂. 特高压半波长交流输电经济性分析[J]. 电网技术, 2011,35(9):51-54.
- SUN Ke. Economic analysis on UHV half-wavelength AC power transmission[J]. Power System Technology,2011,35(9): 51-54.
- [16] 王楠,张粒子,黄巍,等. 电力系统安全经济调度网损协调优化方法[J]. 电网技术,2010,34(10):105-108.
- WANG Nan,ZHANG Lizi,HUANG Wei,et al. Coordinative optimization of network loss in security-constrained economic dispatching[J]. Power System Technology,2010,34(10):105-108.
- [17] 黄浩. 基于 Panel Data 模型的投资就业敏感性探析[J]. 经济师,2010(4):67-69.
- HUANG Hao. Sensitivity analysis of investment on employment based on panel data model[J]. Economist,2010(4):67-69.
- [18] 王春枝. 中国产业结构调整就业效益分析[J]. 未来与发展, 2010(10):8-12.
- WANG Chunzhi. The analysis on employment-benefit from industrial structure adjustment of China [J]. Future and Development,2010(10):8-12.
- [19] 杨冬,刘玉田. 中国未来输电网架结构初探[J]. 电力自动化设备,2010,30(8):1-5.
- YANG Dong,LIU Yutian. Preliminary discussion on China transmission backbone in the future[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(8):1-5.
- [20] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京:中国经济出版社,2005:23-25.

作者简介:



田书欣

田书欣(1985—),男,安徽合肥人,博士研究生,主要研究方向为考虑风电的输电网规划(**E-mail**:tsx396@163.com);

程浩忠(1962—),男,浙江东阳人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统规划、电压稳定、电能质量等。

Analysis and evaluation of social benefit from UHV power grid

TIAN Shuxin¹,CHENG Haozhong¹,CHANG Hao²,QI Qingru²,LIU Lu¹,HONG Shaoyun¹

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion,Ministry of Education, Department of Electrical Engineering,Shanghai Jiao Tong University,Shanghai 200240,China;

2. State Power Economic Research Institute,Beijing 100052,China)

Abstract: The LCC(Life Cycle Cost) and the shadow price theory are applied to recognize the compositions of UHV(Ultra High Voltage) power grid cost and socioeconomic benefit. Beside the revenue of electricity sale, the social benefits from UHV power grid are analyzed based on various benefit-related shadow price theories. The input-output benefit flow tables are established and the LCC-based evaluation indices are built for the social benefits from UHV power grid. Combined with the sensitivity analysis theory,a method suitable for evaluating the social benefits from UHV power grid is put forward. As an example,the evaluated social benefits from a synchronous UHV power grid planed for 2020 are compared between the traditional financial cost method and the LCC-based method,verifying the effectiveness and feasibility of the proposed method.

Key words: UHV power grid; UHV power transmission; life cycle cost; social benefit; shadow price; input-output analysis; cost benefit analysis; evaluation