

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.06.029

# 基于改进物元可拓法的跨国联网工程综合效益评价

谭鑫<sup>1</sup>, 黄其昱<sup>1</sup>, 仝琳<sup>2</sup>, 王昊<sup>3</sup>

(1. 中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司, 江苏 南京 211102;

2. 河北省送变电有限公司, 河北 石家庄 050086;

3. 辽宁石油化工大学信息与控制工程学院, 辽宁 抚顺 113006)

**摘要:**落实“一带一路”倡议,推动跨境电网互联互通是“十三五”期间中国电力工业发展的重点任务之一。电网互联项目,尤其是跨国联网工程必然成为电网投资的重要方向。为了更全面地评价这类投资的综合效益,以提高投资决策的准确性,文中从经济、社会和环境3个方面构建了针对跨国联网工程的综合效益指标体系。为充分利用主客观信息,采用唯一参照物比较判断法和熵权法相结合的指标权重确定方法,应用灰关联改进物元可拓模型对跨国联网工程进行了综合效益评价。研究成果有助于提高电网公司跨国投资的决策水平,同时为有效保证国家间的平等互利合作奠定了基础。

**关键词:**跨国联网工程;综合效益评价;组合赋权;灰关联;物元可拓法

**中图分类号:** TM715

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2020)06-0199-08

## 0 引言

2013年,中国国家主席习近平提出共建“丝绸之路经济带”和“21世纪海上丝绸之路”的重大倡议(即一带一路战略),为沿线国家和地区实现优势互补、开放发展提供了国际合作的新平台<sup>[1]</sup>。2016年11月,国家发展改革委、国家能源局发布的《电力发展“十三五”规划》中指出,“十三五”期间中国电力工业发展的重点任务之一就是落实“一带一路”倡议,加强国际电力合作,根据需要推动跨境电网互联互通,鼓励电力企业参与境外电力项目建设<sup>[2-4]</sup>,跨国联网工程将进入新的发展阶段。对跨国联网工程的综合效益进行评价,寻找合适的投资策略成为亟需解决的问题之一。

目前,全球电网线路总长度约7 500万 km,其中跨国电网互联线路长度接近1万 km,针对跨国联网工程综合效益评价的研究仍处于初步阶段,但针对电网综合效益评价已有众多研究。文献[5]摆脱了目前评价结果与储能系统配置方案的局限性,提出一种考虑电网调峰能力限制的风储联合系统概率综合效益评价方法,为储能系统最佳配置方案提供参考。文献[6]结合配电网的特点,使用区间数理论改进的层次分析法和可拓评价方法对配电网项目的技术、经济、社会效益进行量化分析。文献

[7]从电网公司角度开展研究,引入群组判断和指数标度,并采用改进灰色系统白化权函数评估电网项目的经济、社会、环境效益。文献[8]结合了投资效益和投资效率,提出一种改进的电网投资项目效益评价指标体系,包括经济和环境效益评价指标。文献[9]研究了在新能源广域消纳和特高压交直流混联的电网新特征下的控制性能评价,针对新特征,评价指标有所侧重。

基于上述文献研究成果,文中通过总结相关电网项目的综合效益对“一带一路”背景下跨国联网工程的综合效益评价展开研究,根据工程特性从经济、社会、环境3个方面选取12个指标构成评价跨国联网工程效益的指标体系。为充分利用主客观信息,文中结合唯一参照物比较判断法和熵权法来确定指标权重。同时,为克服传统评价方法的不足,采用灰关联对物元可拓法进行改进,并使用改进后的方法进行综合效益评价,为工程投资决策提供方法支持。

## 1 跨国联网工程综合效益评价指标体系

### 1.1 评价指标体系

跨国联网工程作为国际性质的大型基础设施建设项目,往往与目标国家或地区的能源供应、国防民生等息息相关。一方面,影响跨国联网工程综合效益的因素繁多且复杂,包括政治、经济、文化、技术等<sup>[10]</sup>;另一方面,跨国联网工程兼具电力联网工程和跨国工程两者的特性,相较于普通工程其复杂性显著提高,涉及的相关效益的评价指标类型、

收稿日期:2020-06-21;修回日期:2020-07-29

基金项目:国家电网有限公司科技项目“跨国联网工程经济、社会、环境效益综合评价方法研究”(SGTYHT/16-JS-198)

指标数量更多<sup>[11]</sup>。基于以上分析,文中根据宏观和微观相结合、定性和定量相结合、宜少不宜多的指标筛选原则,坚持综合评价指标的科学性、合理性、实用性和可操作性,以国内外相关电力、经济、社会、环境等领域的技术标准、行业规范为依据<sup>[12]</sup>,从经济<sup>[13-14]</sup>、社会<sup>[15]</sup>、环境效益<sup>[16]</sup>3个方面设计跨国联网工程综合效益评价的指标体系,具体指标参数见表1。

表1 综合效益评价指标体系

Table 1 Comprehensive benefit evaluation index system

目标层	准则层	指标层
跨国联网工程 综合效益 G	经济效益 A	净现值 A <sub>1</sub>
		投资回收期 A <sub>2</sub>
		电力出口创汇率 A <sub>3</sub>
		跨境电价竞争力 A <sub>4</sub>
	社会效益 B	就业效果 B <sub>1</sub>
		投资贡献率 B <sub>2</sub>
		供电可靠率 B <sub>3</sub>
		国际间友好度 B <sub>4</sub>
	环境效益 C	综合能耗率 C <sub>1</sub>
		清洁能源占比 C <sub>2</sub>
		土地节约效益 C <sub>3</sub>
		项目减少 CO <sub>2</sub> 排放量 C <sub>4</sub>

## 1.2 评价指标解释

### 1.2.1 经济效益指标

(1) 净现值 A<sub>1</sub>。A<sub>1</sub>是项目寿命期内净现金流量现值的总和,其计算为:

$$A_1 = \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+i_s)^t} \quad (1)$$

式中: C<sub>t</sub> 为项目第 t 年的净现金流量; n 为计算周期; i<sub>s</sub> 为社会折现率。

(2) 投资回收期 A<sub>2</sub>。A<sub>2</sub>是从项目投建起,项目各年的净收入将全部投资收回所需的期限,其计算为:

$$\sum_{t=1}^{A_2} N_t = \sum_{t=0}^{A_2} (B_t - C_t) = K \quad (2)$$

式中: K 为总投资; B<sub>t</sub> 和 C<sub>t</sub> 分别为第 t 年收入和支出; N<sub>t</sub> 为第 t 年净收入。

(3) 电力出口创汇率 A<sub>3</sub>。A<sub>3</sub>是送端国家出口电力产品所产生的外汇增值,其计算为:

$$A_3 = L_p / K \times 100\% \quad (3)$$

式中: L<sub>p</sub> 为电力产品出口创汇额。

(4) 跨境电价竞争力 A<sub>4</sub>。A<sub>4</sub>衡量的是进口电力产品相较于受端国家同类型电力产品在价格上的优势,其计算为:

$$A_4 = p_r - p_s \quad (4)$$

式中: p<sub>s</sub> 为送端到网电价,是送端上网电价与输电电价之和; p<sub>r</sub> 为受端上网电价。且送端和受端上网电价是借鉴同类型电源的电力产品成本分解,基于边际理论和影子价格测算的结果,输电电价主要是根据国家现行财税制度所确定的内部收益率、资本金净利润率等进行测算。

### 1.2.2 社会效益指标

(1) 就业效果 B<sub>1</sub>。项目的建设运营涉及到设计、建设、维护等专业,为社会提供了一些就业机会。B<sub>1</sub>反映了建设跨国联网工程带来的就业效益,其计算为:

$$B_1 = N_e / K \quad (5)$$

式中: N<sub>e</sub> 为本项目新增就业人数。

(2) 投资贡献率 B<sub>2</sub>。对经济增长贡献的大小是考察项目优劣的重要判别标准之一,通过 B<sub>2</sub>可以确定工程对国民经济的影响,其计算为:

$$B_2 = K / G \times 100\% \quad (6)$$

式中: G 为当年受端国家的 GDP 增量。

(3) 供电可靠率 B<sub>3</sub>。电网互联后,各电力系统的备用容量可相互支援,进而提高 B<sub>3</sub>,减少停电损失。该指标的计算为:

$$B_3 = \left(1 - \frac{t}{T}\right) \times 100\% \quad (7)$$

式中: t 为用户平均停电小时数; T 为全年小时数。

(4) 国际间友好度 B<sub>4</sub>。B<sub>4</sub>是指电网互联国家之间的政治友好关系,该指标可采用问卷调查的方式获得受益民众对电网互联国家的好感度,以及未来去联网国家工作或旅游的计划次数等,最后计算该项目带来的友好关系改善数值。

### 1.2.3 环境效益指标

(1) 综合能耗率 C<sub>1</sub>。跨国联网工程可以提升当地的 C<sub>1</sub>。根据《综合能耗计算通则》的相关规定, C<sub>1</sub> 反映跨国联网工程建设实施产生的节能效果,其计算为:

$$C_1 = E / O \quad (8)$$

式中: E 为项目综合能耗价值; O 为项目净产出。

(2) 清洁能源占比 C<sub>2</sub>。推动“两个替代”的核心是不断提高清洁能源的开发效率和经济性。跨国联网工程有助于提高 C<sub>2</sub>,其计算为:

$$C_2 = g_c / g_t \times 100\% \quad (9)$$

式中: g<sub>c</sub> 为输电过程中清洁能源发电量; g<sub>t</sub> 为总输电电量。

(3) 土地节约效益 C<sub>3</sub>。建立跨国联网工程可以大量节约电力输送环节的占地,节约受端稀缺土地。C<sub>3</sub>的计算为:

$$C_3 = S_C p_1 - S_C p_2 - S_T p_1 \quad (10)$$

式中:  $S_C$ ,  $S_T$  分别为新增电厂和受端变电站/换流站的占地面积;  $p_1$ ,  $p_2$  分别为受端和送端国家的土地影子价格。

(4) 项目减少  $\text{CO}_2$  排放量  $C_4$ 。跨国联网工程的建立有助于可再生能源的开发利用,减少温室气体排放,实现《联合国气候变化框架公约》的温控目标。可测算项目预计输电量,计算  $C_4$ ,其计算为:

$$C_4 = \theta' - \theta \quad (11)$$

式中:  $\theta'$ ,  $\theta$  分别为项目建设后和现电力行业平均供电减少的  $\text{CO}_2$  排放总量。

## 2 跨国联网工程综合效益评价模型

由于评价对象的特殊性,需要一个能够确定项目综合效益水平的评价模型。文中在已构建的指标体系的基础上建立的评价模型主要包括两部分:第一部分为采用组合赋权法来进行指标权重确定;第二部分为使用灰关联改进的物元可拓法对跨国联网工程进行综合效益评价,其流程如图1所示。

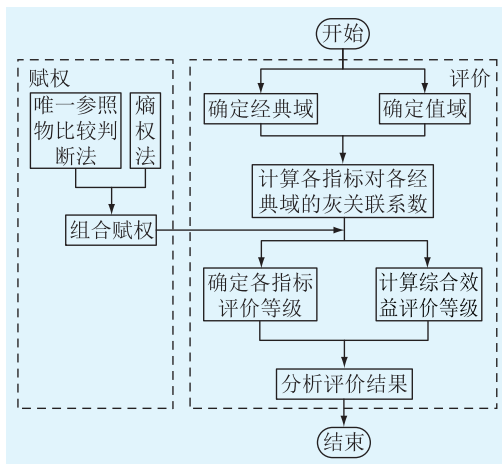


图1 综合效益评价流程

Fig.1 Flow chart of comprehensive benefit evaluation

### 2.1 基于组合赋权的指标权重确定

主观权重体现了指标的价值量,客观权重体现了指标的信息量,两者各具特点,综合评价应当体现两者的统一。

#### 2.1.1 唯一参照物比较判断法

唯一参照物比较判断法是一种在序关系法基础上更加面向实际应用,更能反映专家重视程度的赋权方法<sup>[17]</sup>。

设专家在指标集  $\{x_i\}$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) 中挑出其认为最不重要的一个且只有一个指标记为  $x_k$ ,专家根据有关信息对体系中其他指标  $x_j$  ( $j \neq k$ ) 与  $x_k$  的重要程度之比  $r_{jk}$  作出理性判断,若  $r_{jk}$  的赋值准确,

则各指标权重由下式确定:

$$\vartheta_i = \begin{cases} 1 / \left( 1 + \sum_{i \neq k} r_{ik} \right) & i = k \\ r_{ik} / \left( 1 + \sum_{i \neq k} r_{ik} \right) & i \neq k \end{cases} \quad (12)$$

#### 2.1.2 熵权法

熵权法是一种根据各项指标数值提供的信息量大小来确定权重的方法<sup>[18]</sup>,该方法能充分反映指标差异对评价结果的影响,赋权过程具有透明性、再现性。

首先,选取已进行过归一化处理的指标,利用式(13)计算第  $i$  项指标下第  $l$  个项目的特征比重;其次,利用式(14)计算熵值  $e_i$  和差异性系数  $g_i$ ;最后,通过式(15)计算权重。

$$H_{il} = x_{il} / \sum_{l=1}^n x_{il} \quad (13)$$

$$\begin{cases} e_i = -\frac{1}{\ln n} \sum_{l=1}^n H_{il} \ln H_{il} \\ g_i = 1 - e_i \end{cases} \quad (14)$$

$$\tau_i = g_i / \sum_{i=1}^m g_i \quad (15)$$

#### 2.1.3 组合赋权法

唯一参照物比较判断法反映评价者的主观判断,但易受评价者的经验影响。熵权法考虑指标数值差异对评价结果的影响,但忽略了评价者的直觉判断。文中在综合考虑主观和客观的基础上,对这2种方法所得权重进行合成,即综合权重  $w_i$ ,取  $\alpha = 0.5$ ,  $\beta = 0.5$ 。

$$w_i = \alpha \vartheta_i + \beta \tau_i \quad (16)$$

## 2.2 基于灰关联改进的物元可拓综合评价模型

由于跨国联网工程综合效益是一个复杂的系统,在评价过程中如何解决各指标之间的不相容问题是建立科学合理评价模型的关键,简单的评价方法由于没有考虑到系统内部的不相容因素,无法满足评价结果的客观性和全面性需求<sup>[19]</sup>。物元可拓法基于可拓理论,将多个目标的评价转化成为单个目标的评价,并利用数学模型量化指标数据,进而确定评价结果<sup>[20]</sup>。同时,物元可拓法应用物元概念变换不相容问题为相容问题,充分满足评价结果的客观性和全面性。

大部分学者利用该方法进行综合评价时,采用的是欧式“贴进度”来度量待评对象与标准对象的接近程度。然而,欧式“贴进度”并不全面,因为其相当于仅考虑了待评对象与标准对象向量终点之间的距离,这样可能导致多个待评对象的区分度不高<sup>[21]</sup>。文中结合灰关联,对物元可拓法中的欧式

“贴进度”进行改进,充分反映待评对象与标准对象变化的一致性程度。基于灰关联改进的物元可拓法的基本步骤如下:

(1) 确定经典域、节域和待评物元。令:

$$R_t = (N_t, c_i, v_{ti}) = \begin{bmatrix} N_t & c_1 & v_{t1} \\ & c_2 & v_{t2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_m & v_{tm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_t & c_1 & \langle a_{t1}, b_{t1} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{t2}, b_{t2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_m & \langle a_{tm}, b_{tm} \rangle \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$R_p = (p, c_i, v_{pi}) = \begin{bmatrix} p & c_1 & v_{p1} \\ & c_2 & v_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_m & v_{pm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p & c_1 & \langle a_{p1}, b_{p1} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{p2}, b_{p2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_m & \langle a_{pm}, b_{pm} \rangle \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$R_o = \begin{bmatrix} p_o & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_m & v_m \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中:  $N_t$  为所划分的第  $t$  个等级 ( $t=1,2,\dots,s$ );  $c_1, c_2, \dots, c_m$  为  $N_t$  的  $m$  个不同指标;  $p$  为待评对象等级的全体;  $p_o$  为待评物元;  $v_{t1}, v_{t2}, \dots, v_{tm}$  分别为  $N_t$  关于  $c_1, c_2, \dots, c_m$  所取值的范围,即经典域;  $v_{p1}, v_{p2}, \dots, v_{pm}$  分别为  $p$  关于  $c_1, c_2, \dots, c_m$  所取值的范围,即  $p$  的节域;  $v_1, v_2, \dots, v_m$  分别为  $p_o$  关于  $c_1, c_2, \dots, c_m$  计算所得的指标标准数据。

(2) 计算综合关联度。待评物元的指标  $i$  对评价等级  $t$  的灰色关联度的计算为:

$$\delta_{ti} = \frac{\min |v_i - u_{ti}| + \rho \max |v_i - u_{ti}|}{|v_i - u_{ti}| + \rho \max |v_i - u_{ti}|} \quad (20)$$

式中:  $u_{ti}$  为  $a_{ti}$  与  $b_{ti}$  的均值,即  $u_{ti} = (a_{ti} + b_{ti})/2$ ;  $\rho$  取 0.5。计算综合关联度  $K_i(p_o) = \sum_{i=1}^m w_i \delta_{ti}$ 。

(3) 等级的评定。若  $K_q(p_o) = \max\{K_i(p_o)\}$ , 则待评物元  $p_o$  属于  $q$  等级。

### 3 案例研究

文中在文献[22]介绍的跨国联网工程现有的相关案例背景的基础上,参考《中国电力年鉴》等,对未明确的、必要的数据进行完善和补充,利用文中建立的评价指标体系和评价模型进行综合效益评价,展开实证分析。

针对项目特点,在确定指标权重以及效益结果的过程中都需要组建专家小组。根据项目需要,文中的专家小组由 10 位电力技术、国际工程、技术经

济等领域的学者组成。

#### 3.1 指标权重确定结果

向 10 位专家学者提供文中选取的 12 个评价指标,专家根据工程综合效益的目标对各指标的重要程度采用唯一参照物比较判断法进行排序。同时,引入 15 个目标项目案例的相关数据,对各指标的数值差异进行计算,获得其熵权。最后,合成后的指标权重  $w_i$  如图 2 所示。

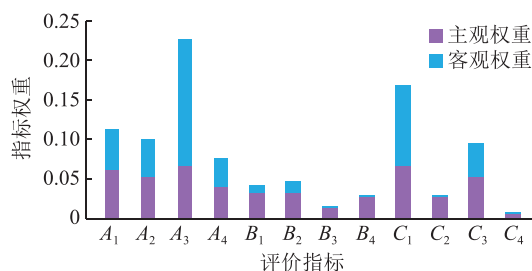


图2 各评价指标的权重

Fig.2 Weights for each evaluation index

可以看出,对跨国联网工程综合效益影响最大的指标是电力出口创汇率  $A_3$ ,权重为 0.236 5。其次分别是综合能耗率  $C_1$ ,净现值  $A_1$  和投资回收期  $A_2$ 。这 4 个指标的权重不论是“功能驱动”还是“差异驱动”,都较为重要,且其综合权重之和为 0.637 9,因此这 4 个指标的大小在评价跨国联网工程综合效益时最受投资者关注。具体分析如下:

(1) 净现值  $A_1$  和投资回收期  $A_2$  是从受端电网企业的角度,以财务估测数据来评价跨国联网工程投资在商业上的可行性,据此可进一步明了该跨国联网工程在财务上的可接受性。

(2) 针对跨国联网工程涉及多个国家或地区的特性,电力送端国家出口电力产品所产生的外汇增值情况,即电力出口创汇率  $A_3$ ,可以充分反映项目通过跨国所产生的经济效益。

(3) 全球能源互联网实质就是“智能电网+特高压电网+清洁能源”,能够推动实现“两个替代、一个提高、一个回归”,即能源开发实施清洁替代,能源消费实施电能替代,提高全人类电气化水平,使化石能源回归其基本属性。跨国联网工程清洁能源的利用从根本上解决了环境污染问题,提高了电力送端国家的综合能耗率  $C_1$ 。

#### 3.2 评价模型计算结果

##### 3.2.1 划分评价等级,确定指标归一化标准

将跨国联网工程的综合效益等级划分为 5 个不同的层次:极差、差、一般、好、极好。并结合《建设项目经济评价方法与参数(第三版)》等相关标准确定指标归一化标准,具体见表 2。

表2 综合效益评价指标的归一化标准  
Table 2 Normalization criteria of the comprehensive benefit evaluation index

综合效益评价指标等级					
指标	极差 [0,0.2)	差 [0.2,0.4)	一般 [0.4,0.6)	好 [0.6,0.8)	极好 [0.8,1)
$A_1$	$\geq 0$ ,项目可接受				
$A_2$	[0,5)	[5,10)	[10,15)	[15,20)	[20, $\infty$ )
$A_3/\%$	[0,20)	[20,30)	[30,40)	[40,50)	[50, $\infty$ )
$A_4$	[0,0.02)	[0.02,0.04)	[0.04,0.06)	[0.06,0.08)	[0.08, $\infty$ )
$B_1$	[0,500)	[500,600)	[600,700)	[700,800)	[800, $\infty$ )
$B_2/\%$	[0,0.000 2)	[0.000 2,0.000 4)	[0.000 4,0.000 6)	[0.000 6,0.000 8)	[0.000 8, $\infty$ )
$B_3$	受端国家电力企业规定:不低于99.90%				
$C_1$	[0.17,1)	[0.15,0.17)	[0.12,0.15)	[0.1,0.12)	[0,0.1)
$C_2/\%$	[0,60)	[60,70)	[70,80)	[80,90)	[90,100)
$C_3$	[0,10)	[10,20)	[20,30)	[30,40)	[40, $\infty$ )
$C_4$	[0,1 000)	[1 000,2 000)	[2 000,3 000)	[3 000,4 000)	[4 000, $\infty$ )

综合效益评价指标等级					
指标	极差 [0,0.6)	差 [0.6,0.7)	一般 [0.7,0.8)	好 [0.8,0.9)	极好 [0.9,1)
$B_4/\%$	[0,60)	[60,70)	[70,80)	[80,90)	[90,100)

3.2.2 案例项目数据测算及归一化

通过项目背景中指标数据测算,并依据上述归一化标准,将各指标数据反馈给专家,由专家打分获得归一化结果,如表3所示。

表3 项目综合效益评价指标数据及归一化  
Table 3 The evaluation index data and normalization of the comprehensive benefit

指标	指标数据	归一化
$A_1 \times 10^2/\text{万元}$	2 103.9	0.72
$A_2/a$	7.85	0.83
$A_3/\%$	38.6	0.74
$A_4/[\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	0.07	0.76
$B_1/(\text{人} \cdot \text{亿元}^{-1})$	712	0.62
$B_2/\%$	0.000 78	0.78
$B_3/\%$	99.927	0.69
$B_4/\%$	85	0.85
$C_1(\text{标煤})/(\text{t} \cdot \text{万元}^{-1})$	0.138 6	0.57
$C_2/\%$	78.36	0.58
$C_3 \times 10^2/\text{万元}$	24.04	0.44
$C_4/\text{万 t}$	1 543.16	0.72

3.2.3 确定经典域和待评物元

通过各指标的归一化标准和专家打分获得的归一化结果,实现对各等级经典域的划分和待评物元的指标数据梳理。

$$R_i = \begin{bmatrix} N & N_1 & N_2 & N_3 & N_4 & N_5 \\ A_1 & (0,0.2) & (0.2,0.4) & (0.4,0.6) & (0.6,0.8) & (0.8,1) \\ A_2 & (0,0.2) & (0.2,0.4) & (0.4,0.6) & (0.6,0.8) & (0.8,1) \\ A_3 & (0,0.2) & (0.2,0.4) & (0.4,0.6) & (0.6,0.8) & (0.8,1) \\ A_4 & (0,0.2) & (0.2,0.4) & (0.4,0.6) & (0.6,0.8) & (0.8,1) \\ B_1 & (0,0.2) & (0.2,0.4) & (0.4,0.6) & (0.6,0.8) & (0.8,1) \\ B_2 & (0,0.2) & (0.2,0.4) & (0.4,0.6) & (0.6,0.8) & (0.8,1) \\ B_3 & (0,0.2) & (0.2,0.4) & (0.4,0.6) & (0.6,0.8) & (0.8,1) \\ B_4 & (0,0.6) & (0.6,0.7) & (0.7,0.8) & (0.8,0.9) & (0.9,1) \\ C_1 & (0,0.2) & (0.2,0.4) & (0.4,0.6) & (0.6,0.8) & (0.8,1) \\ C_2 & (0,0.2) & (0.2,0.4) & (0.4,0.6) & (0.6,0.8) & (0.8,1) \\ C_3 & (0,0.2) & (0.2,0.4) & (0.4,0.6) & (0.6,0.8) & (0.8,1) \\ C_4 & (0,0.2) & (0.2,0.4) & (0.4,0.6) & (0.6,0.8) & (0.8,1) \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$R_0 = \begin{bmatrix} P_0 & A_1 & 0.72 \\ & A_2 & 0.83 \\ & A_3 & 0.74 \\ & A_4 & 0.76 \\ & B_1 & 0.62 \\ & B_2 & 0.78 \\ & B_3 & 0.69 \\ & B_4 & 0.85 \\ & C_1 & 0.57 \\ & C_2 & 0.58 \\ & C_3 & 0.44 \\ & C_4 & 0.72 \end{bmatrix} \quad (22)$$

3.2.4 计算各指标权重和灰色关联度

各指标权重的计算结果详见3.1节。同时根据式(16)计算待评物元指标对评价等级的灰关联度,结果如表4所示。

表4 待评物元各指标对评价等级的灰关联度  
Table 4 The grey correlation degree between the index and the evaluate grade

指标 $i$	极差	差	一般	好	极好
$A_1$	0.355	0.452	0.623	1.000	0.673
$A_2$	0.397	0.486	0.626	0.879	1.000
$A_3$	0.375	0.474	0.643	1.000	0.750
$A_4$	0.394	0.494	0.661	1.000	0.830
$B_1$	0.436	0.586	0.895	1.000	0.630
$B_2$	0.412	0.512	0.677	1.000	0.913
$B_3$	0.345	0.445	0.629	1.000	0.604
$B_4$	0.333	0.579	0.733	1.000	0.733
$C_1$	0.433	0.604	1.000	0.836	0.540
$C_2$	0.444	0.615	1.000	0.889	0.571
$C_3$	0.509	0.784	1.000	0.592	0.420
$C_4$	0.355	0.452	0.623	1.000	0.673

### 3.2.5 计算综合关联度及评价等级评定

通过计算得出该工程综合效益评价等级的综合关联度为:

$$\begin{cases} K_1(p_0) = \sum_{i=1}^{12} w_i \delta_{1i} = 0.4049 \\ K_2(p_0) = \sum_{i=1}^{12} w_i \delta_{2i} = 0.5424 \\ K_3(p_0) = \sum_{i=1}^{12} w_i \delta_{3i} = 0.7660 \\ K_4(p_0) = \sum_{i=1}^{12} w_i \delta_{4i} = 0.9135 \\ K_5(p_0) = \sum_{i=1}^{12} w_i \delta_{5i} = 0.6970 \end{cases} \quad (23)$$

因为  $K_4(p_0) = \max\{K_i(p_0)\}$ , 表明该工程综合效益对应的评价等级为“好”。经过分析, 该工程中电力出口创汇率  $A_3$ 、净现值  $A_1$  的指标等级为“好”, 投资回收期  $A_2$  的指标等级为“极好”, 综合能耗率  $C_1$  的指标等级接近于“好”, 这 4 个指标对其最终结果产生了较大影响, 证明了评价方法的合理性。同时, 该案例经典域和指标权重的确定为即将开展的跨国联网工程的建设和投资决策提供了参考。

### 3.3 项目投资方案风险分析

为了识别各影响因素不同幅度的波动对实现预期投资目标的影响程度和对额定输送容量 1 000~10 000 MW 的输电项目投资方案承受风险的能力做出判断, 文中选取影响较大且企业较关心的总投资额、送端上网电价、受端核定上网电价、年利用小时数 4 项因素展开风险分析, 同时选取净现值变化作为校验指标。假设选取的影响因素在案例项目的 -20%~20% 范围内波动, 且变化幅度为 5%, 其他因素均不变, 计算该工程的净现值变化如图 3—图 6 所示。

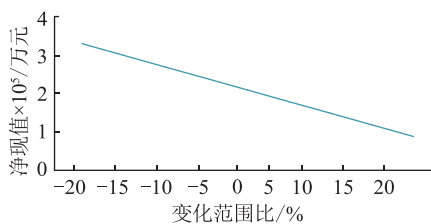


图3 总投资额风险分析

Fig.3 Risk analysis of total investment

由图可以看出, 总投资额、送端上网电价、受端核定上网电价、年利用小时数变化的临界值分别为 34.05%, 6.42%, -4.72%, -24.97%, 即当总投资额超过  $5.99445 \times 10^5$  万元, 送端上网电价超过 0.405 2 元/(kW·h), 受端核定上网电价低于 0.578 5

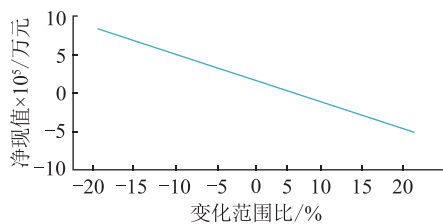


图4 送端上网电价风险分析

Fig.4 Risk analysis of power price at the sender end

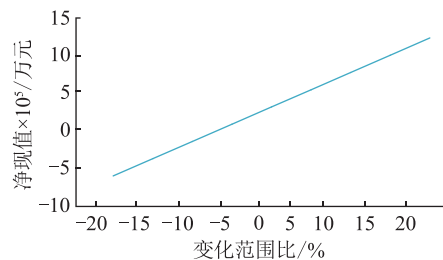


图5 受端核定上网电价风险分析

Fig.5 Risk analysis of power price at the receiver end

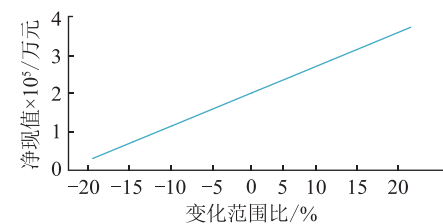


图6 年利用小时数风险分析

Fig.6 Risk analysis of annual utilization hours

元/(kW·h), 年利用小时数低于 3 415.26 h 时, 该项目的净现值开始为负, 因此投资者在项目可研时应控制影响因素在临界值范围内。

通过案例研究, 可以确定电网公司制定跨国投资决策时最为关注的指标分别为电力出口创汇率  $A_3$ 、综合能耗率  $C_1$ 、净现值  $A_1$  和投资回收期  $A_2$ 。同时, 评价项目能否达到预期建设目标, 为电力部门提供决策支撑。

## 4 结论

文中基于全球化视角, 对跨国联网工程综合效益评价进行了研究, 从经济、社会、环境 3 个方面选取 12 个指标构成指标体系, 并使用灰关联改进的物元可拓法对项目综合效益进行评价, 确定项目在可行性研究阶段的效益等级。根据实证案例的评价结果可以得出以下结论:

(1) 文中建立的评价指标体系和模型能有效地针对跨国联网工程进行综合效益评价, 使其结果更具科学性。

(2) 电力出口创汇率  $A_3$ 、综合能耗率  $C_1$ 、净现值  $A_1$  和投资回收期  $A_2$  这 4 个指标的大小在电网公司制定跨国投资决策时最为关注。

(3) 投资者在项目可研时应控制总投资额、送端上网电价、受端核定上网电价、年利用小时数 4 项影响因素在临界值范围内。

对跨国联网工程综合效益进行评价,有助于提高电网公司跨国投资决策水平,为即将开展的工程提供决策工具。同时为有效保证国家间的平等互利合作奠定基础,支撑和服务“一带一路”战略的落实。

#### 参考文献:

- [1] KAHO Y U. Energy cooperation in the belt and road initiative: EU experience of the trans-European networks for energy [J]. *Asia Europe Journal*, 2018, 16(3): 251-265.
- [2] 张晶,李彬,戴朝波. 全球能源互联网标准体系研究[J]. *电网技术*, 2017, 41(7): 2055-2063.  
ZHANG Jing, LI Bin, DAI Chaobo. Study on standard system for global energy interconnection [J]. *Power System Technology*, 2017, 41(7): 2055-2063.
- [3] 杨青润,丁涛,文亚,等. 计及碳排约束的跨国电力互联网新能源消纳分析[J]. *智慧电力*, 2019, 47(10): 1-6, 30.  
YANG Qingrun, DING Tao, WEN Ya, et al. Analysis on renewable energy integration in transnational power interconnection considering carbon emission constraints [J]. *Smart Power*, 2019, 47(10): 1-6, 30.
- [4] 金艳鸣,谭雪,焦冰琪,等. 基于可计算一般均衡模型的全球能源互联网经济社会效益分析[J]. *智慧电力*, 2018, 46(5): 1-7.  
JIN Yanming, TAN Xue, JIAO Bingqi, et al. Study on economic and social benefits of global energy internet based on computable general equilibrium model [J]. *Smart Power*, 2018, 46(5): 1-7.
- [5] 徐国栋,程浩忠,马则良,等. 考虑电网调峰能力限制的风储联合系统概率综合效益评价方法[J]. *电网技术*, 2015, 39(10): 2731-2738.  
XU Guodong, CHENG Haozhong, MA Zeliang, et al. A method to evaluate probabilistic comprehensive benefits of joint wind power and storage system considering constraints of peak load regulation capacity [J]. *Power System Technology*, 2015, 39(10): 2731-2738.
- [6] WU Q, PENG C. Comprehensive benefit evaluation of the power distribution network planning project based on improved IAHP and multi-level extension assessment method [J]. *Sustainability*, 2016, 8(8): 796.
- [7] 杜英,夏慧聪,牛东晓,等. 电网新能源消纳综合效益群组判断灰色评价[J]. *技术经济*, 2017, 36(8): 101-108.  
DU Ying, XIA Huicong, NIU Dongxiao, et al. Group judgement gray evaluation on comprehensive benefit of new energy consumption of power grid corp [J]. *Technology Economics*, 2017, 36(8): 101-108.
- [8] HE Y, LIU W, JIAO J, et al. Evaluation method of benefits and efficiency of grid investment in China: a case study [J]. *Engineering Economist*, 2018, 63(1): 66-86.
- [9] 常焯骅,刘娆,巴宇,等. 新能源高占比的特高压电网频率控制模式及性能评价[J]. *电网技术*, 2019, 43(2): 296-306.  
CHANG Yekui, LIU Rao, BA Yu, et al. Frequency control mode and performance assessment in UHV grid with high proportion of renewable energy resources [J]. *Power System Technology*, 2019, 43(2): 296-306.
- [10] LI C, LIU Y, LI S. Risk evaluation of Qinghai-Tibet power grid interconnection project for sustainability [J]. *Sustainability*, 2016, 8(1): 85.
- [11] ZHAO H, LI N. Risk Evaluation of a UHV power transmission construction project based on a cloud model and FCE method for sustainability [J]. *Sustainability*, 2015, 7(3): 2885-2914.
- [12] 曾博,白婧萌,郭万祝,等. 智能配电网需求响应效益综合评价[J]. *电网技术*, 2017, 41(5): 1603-1611.  
ZENG Bo, BAI Jingmeng, GUO Wanzhu, et al. Comprehensive evaluation for benefits of demand response in smart distribution networks [J]. *Power System Technology*, 2017, 41(5): 1603-1611.
- [13] 李艳梅,陈增. 基于联系度优化 TOPSIS 法的区域电能替代潜力评估研究[J]. *电网技术*, 2019, 43(2): 369-377.  
LI Yanmei, CHEN Zeng. Study on regional electric energy substitution potential evaluation based on the TOPSIS method improved by connection degree [J]. *Power System Technology*, 2019, 43(2): 369-377.
- [14] 游沛羽,王晓辉,张艳. 亚欧超远距离特高压输电经济性研究[J]. *电网技术*, 2015, 39(8): 2087-2093.  
YOU Peiyu, WANG Xiaohui, ZHANG Yan. Economic research on Asia-Europe long-distance UHV power transmission [J]. *Power System Technology*, 2015, 39(8): 2087-2093.
- [15] ESMAILI M R, KHODABAKHSHIAN A H, RAHMAT A, et al. A new coordinated design of sectionalizing scheme and load restoration process considering reliability of transmission system [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2018(102): 23-37.
- [16] ZHENG M, WANG X, MEINRENKEN C J, et al. Economic and environmental benefits of coordinating dispatch among distributed electricity storage [J]. *Applied Energy*, 2017(210): 542-855.
- [17] ABOUGERGI M S, SALTZMAN J R. More accurate method to evaluate the performance of scores in outcomes prediction [J]. *Journal of Clinical Gastroenterology*, 2019, 53(1): 76.
- [18] 朱天瞳,丁坚勇,郑旭. 基于改进 TOPSIS 法和德尔菲——熵权综合权重法的电网规划方案综合决策方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(12): 91-99.  
ZHU Tiantong, DING Jianyong, ZHENG Xu. A comprehensive decision-making method for power network planning schemes based on the combination of the improved TOPSIS method with Delphi-entropy weight method [J]. *Power System Protection*

and Control, 2018, 46(12):91-99.

[19] 夏俊荣,汪春,许晓慧,等. 中阿电网互联之未来新能源电力丝路[J]. 电网技术, 2016, 40(12):3662-3670.  
XIA Junrong, WANG Chun, XU Xiaohui, et al. Renewable energy generation linked by future china-arab interconnection [J]. Power System Technology, 2016, 40(12):3662-3670.

[20] 柳映潇,王衡. 基于物元可拓模型和 ARIMA 模型的生态城市建设评价研究[J]. 生态经济, 2018(7):154-161.  
LIU Yingxiao, WANG Heng. Evaluation of ecological city construction based on matter-element extension evaluation model and ARIMA model [J]. Ecological Economy, 2018(7):154-161.

[21] 梁瑛,季宪军. 基于灰色关联投影值的模糊物元评价法的改进[J]. 统计与决策, 2018(6):61-64.  
LIANG Ying, JI Xianjun. Improvement of fuzzy matter-element

evaluation method based on grey relational projection value [J]. Statistics and Decision, 2018(6):61-64.

[22] LI J, WU F, LI J, et al. Research on risk evaluation of transnational power networking projects based on the matter-element extension theory and granular computing [J]. Energies, 2017, 10(10):1523.

作者简介:



谭鑫

谭鑫(1992),男,硕士,经济师,从事技术经济、工程评价等相关工作(E-mail: tanxin-101215@jspdi.com.cn);

黄其昱(1979),男,学士,高级经济师,从事电力工程造价等相关工作;

全琳(1992),女,硕士,工程师,从事工程管理等相关工作。

## Comprehensive benefit evaluation of the transnational power grid interconnection project based on improved matter-element extension model

TAN Xin<sup>1</sup>, HUAGN Qiyu<sup>1</sup>, TONG Lin<sup>2</sup>, WANG Hao<sup>3</sup>

(1. China Energy Engineering Group Jiangsu Power Design Institute Co., Ltd., Nanjing 211102, China;

2. Hebei Electric Power Transmission & Transformation Co., Ltd., Shijiazhuang 050086, China;

3. School of Information and Control Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113006, China)

**Abstract:** Implementing "the Belt and Road Initiative" to promote the interconnection of cross border power grid is one of the key points of the development of China's power industry during the "13th Five-Year" period. The implementation of power grid interconnection projects, especially the transnational power grid interconnection projects, will inevitably become an important direction of investment in power grid. In order to evaluate the comprehensive benefits of such investments more fully and improve the accuracy of investment decisions, the comprehensive benefit evaluation index system of such projects is constructed from three aspects: economic, social and environmental benefits. In order to make full use of the subjective and objective information, the combination method of the only reference object comparison judgement and entropy weighting method is used to determine the index weight. At the same time, matter-element extension model improved by gray correlation is used to evaluate the comprehensive benefit of such projects. The research will help improving power grid corp's decision-making level on transnational investment and lay the foundation for effectively guaranteeing equality and mutually beneficial cooperation among countries.

**Keywords:** transnational power grid interconnection project; comprehensive benefit evaluation; combination weighting; gray correlation; matter-element extension model method

(编辑 方晶)