第37卷 第11期 太 阳 能 学 报 Vol. 37, No. 11
2016年11月 ACTA ENERGIAE SOLARIS SINICA Nov., 2016

文章编号:0254-0096(2016)11-2929-08

潮流能发电装置输电特性综合评估研究

叶 青, 朱永强, 王冠杰

(新能源电力系统国家重点实验室, 华北电力大学, 北京 102206)

摘 要: 以潮流能装置输电特性为例,总结潮流能装置输电特性的各项指标,并基于合格率对指标进行标准化预处理;在深入研究集对分析理论的基础上,提出基于广义集对分析潮流能发电装置输电特性的综合评估模型;之后采用改进离差最大化法为评估模型中各指标赋权,该方法包括三步:首先利用熵值法得到指标属性权重,之后运用拉格朗日函数求解指标可变权重,最后将可变权重归一化处理得到该综合评估模型的指标权重向量。最后通过算例验证该评估模型的有效性。

关键词: 潮流能发电装置; 广义集对分析; 熵值法; 改进最大离差法

中图分类号: P743.1 **文献标识码**: A

0 引 言

目前,我国尚未建成为波浪能、潮流能发电装置提供试验、测试与评估的试验场,海洋能发电系统的研究成果主要集中在波浪能、潮流能发电装置的设计和控制等方面,对大规模海洋能发电装置的并网研究甚少[1,2]。潮流能发电装置通过电力电子元件与电网互联以保证输出的电能满足电网稳频稳压的要求。由于潮流能随时间不断变化,潮流流速的变动引起潮流能发电装置输出功率的波动间歇变化,装置输出电流随之变化而引起电网电压波动,同时,大量电力电子器件的使用必然会产生电压、电流谐波[3,4]。因此,为促进潮流能发电技术和大规模潮流能并网的发展进程,有必要对潮流能发电装置输电特性进行分析。

目前常用的评估方法主要有:模糊数学法、概率统计法、人工神经网络法、遗传投影寻踪法、层次分析法、集对分析法及以上方法的组合评估法。基于模糊数学的综合评估在构建指标隶属度函数时,受主观因素的影响较大,限制了评估结果的客观性[5~7]。基于人工神经网络、遗传投影寻踪等人工智能算法的评估方法有时可能需要大量的学习样本,且模型的物理意义不够明确,精度不高,应用范围有限。文献[8,9]由于算法自身的特点,缺少评估对象等级赋权的过程,即各指标的重要程度只能通过所限定的等级界限体现,无法合理解释输出权值的意义。利用概率统计方法进行分析时,各指标期望、方差基准值的选取会影响评估结果的准确性[10]。层次分析法[11]是被广泛应用的主观赋权法,但其判断矩阵的一致性检验过程使得该方法的计算量较大,当指标数量较多时,多采用其改进方法简化运算[12]。集对分析是一种用来处理模糊、信息不完全所导致的不确定性问题的系统分析方法,具有概念清晰、计算方法简单及评价直观等优点[13]。文献[14]针对评估指标的不确定性,引入集对分析法,建立各指标联系度表达式,提出基于模糊集对分析法电能质量综合评估模型,验证了集对分析法综合评估的有效性。

在集对分析评价过程中,确定的联系度忽略了处于同一级别内指标大小的影响,即当两样本同属于某一评判级别时,不能进一步区分其评估对象的好坏程度。为了解决以上问题,本文提出基于广义集对分析潮流能发电装置输电特性综合评估方法,通过联系度从同、异、反三方面充分利用样本数据,提高方法的分辨率。标准的离差最大化赋权法只考虑因指标值差异性引起的可变权重,忽略了评价指标本身的属性权重,易造成评价结果偏离真实结果。因此,本文综合考虑指标属性权重和可变权

收稿日期: 2014-11-15

通信作者: 朱永强(1975—), 男, 博士、副教授, 主要从事新能源发电与并网技术方面的研究。zyq@ncepu.edu.cn

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

重，对离差最大化赋权进行改进，基于改进熵值法得到评价指标的属性权重，运用拉格朗日函数求解指标的可变权重，并进行归一化处理得到该综合评估模型的指标权重向量。最后，通过算例验证该评估模型的有效性。

1 潮流能发电装置输电特性指标分析

图1为潮流能发电系统示意图，从图中可看出通过电力电子元件的作用，发电装置与电网互联，以使输出电能满足电网要求。与此同时，由于潮流能随时间不断变化引起发电装置输出功率的波动，从而引起电网电压波动，此外，大量电力电子器件的使用也会产生电压、电流谐波。

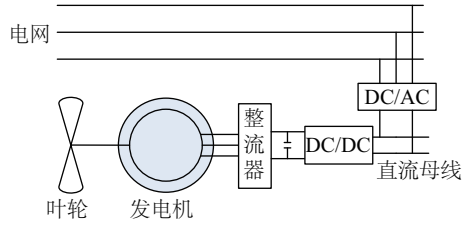

图1 潮流能发电系统示意图

Fig. 1 Schematicdiagram of tidal current energy generation system

1.1 输电特性指标

为改善潮流能并网出现上述问题，避免其对电网稳定性、可靠性和电能质量造成影响，需在潮流能发电装置并网前，准确监测、评估装置输电特性，对其进行改进和合理控制以达到并网要求。因此，如图2所示，测点2~4处的可变负载可分别为空载、大电阻负载以及大阻感负载，则将测点1~4处所检测的电能质量指标作为潮流能装置输电特性评估的初始数据。

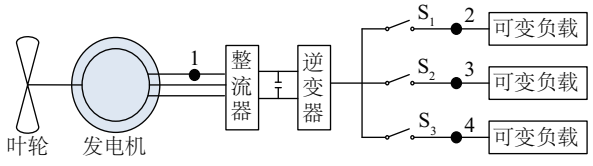

图2 潮流能发电装置输电特性指标测点图

Fig. 2 Diagram of tidal current energy generation system monitoring sites

1.2 基于合格率的指标预处理

电压总谐波畸变率 THD_{UCP95} 和三相电压不平衡度 ε_{UCP95} 的归一化指标是将指标CP95（95%概率大值）的实测值与其对应的标准限值相比，即：

$$I_U' = \frac{I_{UCP95}}{I_{UB}} \tag{1}$$

电压波动与闪变以长时间闪变值 P_{lt} 作为评估指标，其归一化指标是将长时间闪变CP95的实测值，与其对应的标准限值相比，则电压长时间闪变指标 P_{lt}' 为：

$$P_{lt}' = \frac{P_{ltCP95}}{P_{ltUB}} \tag{2}$$

电压偏差δU、频率偏差 df 的指标特性与上述指标刚好相反，故采用指标不合格率对其进行归一化处理，以电压偏差为例，其中，$I_{\Delta U}$ 代表电压偏差不合格率指标。

$$\text{电压不合格率} = \frac{\text{电压超限时间}}{\text{总运行时间}} = 1 - \text{电压合格率（\%）} \tag{3}$$

$$I_{\Delta U} = \frac{\text{实际电压不合格率}}{\text{最大允许电压不合格率}} \tag{4}$$

2 广义集对分析评估模型

2.1 广义集对分析理论

集对分析（SPA）是将确定与不确定视为一个系统，从事物之间的联系与转化的同一度、差异度和对立度三方面刻画事物。假设给定集合 X 与 Y，组成集对 $H=(X,Y)$，在某问题 W 背景下，集对 H 有N个特性：集合 X 与 Y 所共同的特性数为S；集合 X 与 Y 相对立的特性数为 P；集合 X 与 Y 在剩余特性 $F=N-S-P$ 上既不共有，也不对立，则用联系度 u 表示集对的辩证关系如下：

$$u = a + bi + cj \tag{5}$$

式中，a ——集合 X 与 Y 对于问题 W 的同一度，a = S/N；b ——集合 X 与 Y 对于问题 W 的差异度，b = F/N；c ——集合 X 与 Y 对于问题 W 的对立度，c = P/N；i、j——差异度系数和对立系数，且有 $i\in[-1,1]$，$j=-1$，$a+b+c=1$。差异度系数 i 表征确定性与不确定性之间的相互转化关系，当 $i\to 0$ 说明事物的不确定性增强；当 $i\to -1$ 或 $i\to 1$ 时，则事物的确定性增强；i 的取值为-1或1均是确定的。

广义集对分析引入信息熵理论，由于联系度值 $\mu(x_h)\in[-1,1]$，为使 $\mu(x_h)$ 满足信息熵的使用条件，令 $\mu'(x_h)=\frac{1+\mu(x_h)}{2}$，则 $\mu'(x_h)\in[0,1]$，因此根据联系度向

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

量，可定义：评价系统联系向量 $\boldsymbol{\mu}(x_h)$ 的广义联系熵为：

$$G[\boldsymbol{\mu}(x_h)]=-\frac{1}{c\ln 2}\sum_{h=1}^{c}\left\{\left[\frac{1+\boldsymbol{\mu}(x_h)}{2}\right]\ln\left[\frac{1+\boldsymbol{\mu}(x_h)}{2}\right]+\left[\frac{1-\boldsymbol{\mu}(x_h)}{2}\right]\ln\left[\frac{1-\boldsymbol{\mu}(x_h)}{2}\right]\right\} \tag{6}$$

2.2　广义集对分析评估

已知共有 n 个评价样本，每个样本均有 m 个评价指标，则评价样本的指标值矩阵 $\boldsymbol{X}$。其中，x_{nm} 表示样本 n 指标 m 的实测值。

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix}x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m}\\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m}\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm}\end{bmatrix} \tag{7}$$

将每个指标的标准划分为 c 个等级，即评判集 $V=\{v_1,v_2,\cdots,v_c\}$，由指标集和评判集可构成评价指标分类标准，用 $s_{mi}\sim s_{m(i+1)}$ 来表示某指标 m 第 i 级标准 v_i 的限值范围。

集对分析法潮流能发电装置输电特性的综合评价，将影响装置评价等级的指标实测值与该指标评价等级标准构成 1 个集对 $H(U,V)$，对于指标 m，则有：

1）当其处于对应指标标准的级别内，其表现为同一，联系度取值为 1；

2）当其在指标标准相隔两级及以上的级别，其表现为对立，联系度取值为−1；

3）当其在指标标准的相邻级别内时，联系度的取值在区间（−1，1）之间，且在对立与同一间转化。综上所述，当指标 m 越接近评价级别，联系度值越接近 1；反之，联系度值越接近于−1。基于线性梯形变化的样本 l 指标 m 对等级 c 的联系度的表达式如下：

$$u(x_{nm})=\begin{cases}1-2\left|\dfrac{s_{m(c-1)}-x_{nm}}{s_{m(c-1)}-s_{m(c-2)}}\right| & (x_{nm}\text{在相邻标准集}c-1\text{内})\\ 1 & (x_{nm}\text{在讨论集}c\text{内})\\ 1-2\left|\dfrac{x_{nm}-s_{mc}}{s_{m(c+1)}-s_{mc}}\right| & (x_{nm}\text{在相邻标准集}c+1\text{内})\\ -1 & (x_{nm}\text{在相隔2集及以上的级别内})\end{cases} \tag{8}$$

2.3　广义集对分析综合评估步骤

基于上述分析，单层次广义集对分析综合评估的步骤如下：

1）计算各指标的联系度，并结合指标权重向量 $\boldsymbol{W}=(w_k)$，得到样本 l 的总联系度 u_{cl}。其中，w_k 是指标 k 的权重，指标权重的确定见第 3 节。

$$u_{cl}=\sum_{k=1}^{m}w_k u(x_{nm}) \tag{9}$$

2）最大联系度判断准则：对于样本的综合评估等级联系度向量 $\boldsymbol{u}_{hl}=[u_{1l},u_{2l},\cdots,u_{cl}]$，若有：

$$\boldsymbol{u}_{jl}=\max\{\boldsymbol{u}_{hl},h=1,2,\cdots,c\} \tag{10}$$

则样本的评判级别为 j 级，其中 u_{jl} 为评估样本为 j 级时计算所得的总联系度值。

广义集对分析综合评估流程图如图 3。

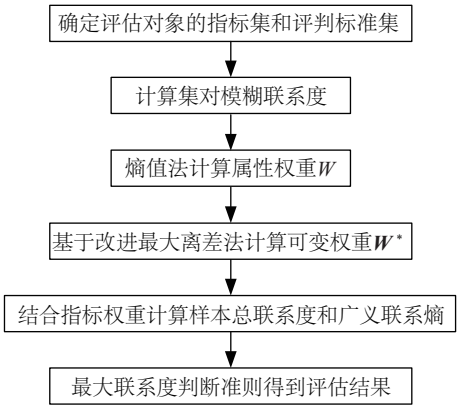

图3　广义集对分析综合评估流程图

Fig. 3　Flow diagram of comprehensive evaluation using generalized set pair analysis

3　确定指标权重

标准的离差最大化赋权法只考虑因指标值差异性引起的可变权重，忽略了评价指标本身的属性权重，易造成评价结果偏离真实结果。若评估样本 i 的第 j 项指标值为 $x_{ij}(i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n)$，则令 $w_j,j=1,2,\cdots,n$ 为第 j 个指标的指标权重；可变权重记为 w_j^*，是由指标值的差异性引起的权重，其加权向量记为 $\boldsymbol{W}^*=(w_1^*,w_2^*,\cdots,w_n^*)^{\mathrm{T}}>0$。

3.1　熵值法确定属性权重

已知评价样本的指标值矩阵 $\boldsymbol{X}$，用熵值法进行综合评价的步骤：

1）由于各指标的量纲、数量级均有差异，所以为消除因量纲不同对评价结果的影响，基于指标合格率对各指标进行标准化处理，见 1.2 节。

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2)计算第 j 项指标下第 i 个评估样本指标值的比重 p_{ij}：

$$p_{ij}=\frac{x_{ij}'}{\sum_{i=1}^{m}x_{ij}'} \tag{11}$$

式中，x_{ij}'——指标标准化处理后的数值。

3)计算第 j 项指标的熵值 e_j：

$$e_j=-\frac{1}{\ln m}\sum_{i=1}^{m}p_{ij}\ln p_{ij} \tag{12}$$

由式(12)可知，当 $p_{ij}=0$ 时，$\ln p_{ij}$ 无意义，故对 p_{ij} 的计算式进行修正，见式(13)：

$$p_{ij}=\frac{1+x_{ij}'}{\sum_{i=1}^{m}(1+x_{ij}')} \tag{13}$$

4)计算第 j 项指标的差异性系数 d_j，差异性系数 d_j 取决于该指标的信息熵 e_j 与 1 之间的差值，它的值直接影响权重的大小，信息效用值越大，对评价的重要性就越大，权重也就越大。

$$d_j=1-e_j \tag{14}$$

5)利用熵值法估算各指标权重的本质是利用该指标信息的差异性系数来计算，其价值系数越高，对评价的重要性就越大(或称权重越大，对评价结果的贡献大)。第 j 项指标的权重 w_j 为：

$$w_j=\frac{d_j}{\sum_{i=1}^{m}d_j} \tag{15}$$

3.2 改进最大离差法确定可变权重

基于改进最大离差法构建所有评价指标对样本总离差最大的评估模型，评估样本总离差的获取思路如下：

1)对于指标 G_j，评估样本 A_i 与评估样本 A_k(k=1,2,⋯,m;$k\neq i$)的离差记为 d_{ijk}，则：

$$d_{ijk}=\left|x_{ij}-x_{kj}\right| \tag{16}$$

2)对于指标 G_j，评估样本 A_i 与其他评估样本 A_k(k=1,2,⋯,m;$k\neq i$)的离差记为 d_{ijk}'，则：

$$d_{ijk}'=\sum_{k=1}^{m}\left|x_{ij}-x_{kj}\right| \tag{17}$$

3)对于指标 G_j，考虑指标值 x_{ij} 差异性引起的权重 w_j^* 的情况下，评估样本 A_i 与其他评估样本 A_k(k=1,2,⋯,m;$k\neq i$)的离差记为 d_{ij}，则：

$$d_{ij}=\sum_{k=1}^{m}\left|w_j^*x_{ij}-w_j^*x_{kj}\right| \tag{18}$$

4)对于指标 G_j，在 $d_{ij}=\sum_{k=1,k\neq i}^{m}\left|w_j^*x_{ij}-w_j^*x_{kj}\right|$ 的基础上，再考虑属性权重 w_j 对离差影响的情况下，评估样本 A_i 与其他评估样本 A_k(k=1,2,⋯,m;$k\neq i$)的总离差记为 d_{ij}^*，则：

$$d_{ij}^*=\sum_{k=1}^{m}\left|w_j^*w_jx_{ij}-w_j^*w_jx_{kj}\right| \tag{19}$$

5)对于指标 G_j，综合考虑 w_j^* 和 w_j 的情况下，全部评估样本间的总离差记为 $d_{ij}^*(G_j)$，则：

$$d_{ij}^*(G_j)=\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{m}\left|w_j^*w_jx_{ij}-w_j^*w_jx_{ik}\right| \tag{20}$$

6)对于指标集 G={G_1,G_2,⋯,G_n}中的所有指标，全部评估样本间的总离差记为 D^*，则：

$$D^*=\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{m}w_j^*\left|w_jx_{ij}-w_jx_{ik}\right| \tag{21}$$

基于离差最大化原理，加权向量 $\boldsymbol{W}^*$ 应为全部指标对全部评估样本的总离差和最大，由此，可得到最优化模型如下：

$$y=\begin{cases}D^*=\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{m}w_j^*\left|w_jx_{ij}-w_jx_{ik}\right| \\ \text{s.t.}\sum_{j=1}^{n}w_j^{*2}=1 \\ w_j^*>0,j=1,2,\cdots,n\end{cases} \tag{22}$$

于是，求解加权向量 w^* 等价于求解该模型的最优解。解此模型，用拉格朗日的方法进行处理，拉格朗日函数 L 如下：

$$L(w^*,\varepsilon)=\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{m}\mathrm{w}_j^*\left|w_jx_{ij}-w_jx_{ik}\right|+\frac{1}{2}\varepsilon(\sum_{j=1}^{n}w_j^{*2}-1) \tag{23}$$

对 $L(w^*,\varepsilon)$ 求偏导，并令：

$$y=\begin{cases}\dfrac{\partial L}{\partial w_j^*}=\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{m}\left|w_jx_{ij}-w_jx_{ik}\right|+\varepsilon w_j^*=0 \\ \dfrac{\partial L}{\partial \varepsilon}=\sum_{j=1}^{n}w_j^{*2}-1=0\end{cases} \tag{24}$$

求得 w_j^* 的最优解，并进行归一化处理，可得权重 $w_j^{*\prime}$ 为：

$$w_j^{*\prime}=\frac{\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{m}\left|w_jx_{ij}-w_jx_{kj}\right|}{\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{m}\left|w_jx_{ij}-w_jx_{ik}\right|},j=1,2,\cdots,n \tag{25}$$

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4　算例验证

4.1　指标数据与等级划分

结合太阳能发电、风能发电以及电能质量标准对潮流能装置输电特性指标划分为5个等级，依次为很差、较差、合格、良好、优质，见表1。根据图2对某潮流能发电装置进行实时测试，得到该装置在速比(叶片线速度与流速之比)为2.5083时，输出电压和电流值如图4、图5中所示。监测点1和监测点2/3/4处装置输电特性的指标实测数据表，如表2所示，及基于合格率标准化处理后的指标归一化矩阵 $\boldsymbol{D}$，如式(26)。

表1　潮流能发电装置输电特性指标等级界限

Table 1　Output characteristic indexes boundary of tidal current energy generation device

	等级	优质	良好	合格	较差	很差
电压指标	δU/%	1.4	3.5	7.0	10.5	14.0
	df/ Hz	0.05	0.12	0.20	0.28	0.46
	P_{lt}/%	0.6	1.4	2.0	3.2	5.0
	THD_{UCP95}/%	1.0	2.5	5.0	6.5	7.5
	ε_{UCP95}/%	0.6	1.4	2.0	3.2	5.0

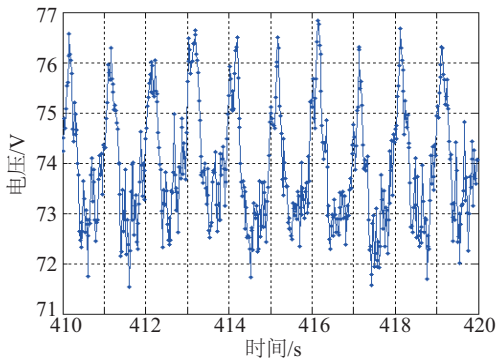

图4　输出电压图形

Fig. 4　Diagram of voltage output

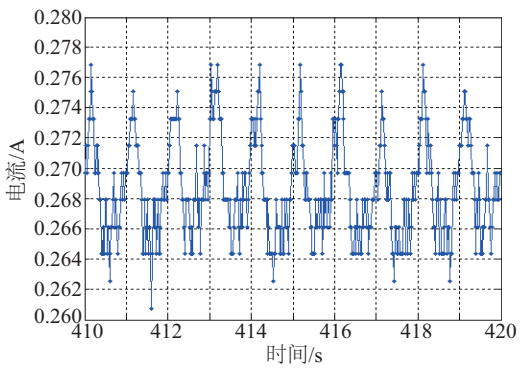

图5　输出电流图形

Fig. 5　Diagram of current output

表2　监测点实测数据

Table 2　Measured data of monitoring sites

观测点	δU/%	df/%	P_{lt}	THD_{UCP95}/%	ε_{UCP95}/%
1	1.8	2.8	0.4	2.8	0.5
2	3.5	4.0	0.6	3.2	6.0
3	4.8	6.3	0.5	1.5	3.6
4	2.1	2.4	0.8	2.5	2.5

$$\boldsymbol{D}=\begin{matrix}\begin{matrix}\delta U\downarrow & \mathrm{d}f\downarrow & P_h\downarrow & TGD_{DCO98}\downarrow & \varepsilon_{UCO98}\downarrow\end{matrix}\\\begin{pmatrix}0.36 & 0.56 & 0.4 & 1.4 & 0.25\\0.70 & 0.80 & 0.6 & 1.6 & 3.00\\0.96 & 1.26 & 0.5 & 0.75 & 1.8\\0.42 & 0.48 & 0.8 & 1.25 & 1.25\end{pmatrix}\end{matrix}\begin{matrix}\\\leftarrow\text{监测点1}\\\leftarrow\text{监测点2}\\\leftarrow\text{监测点3}\\\leftarrow\text{监测点4}\end{matrix}\tag{26}$$

4.2　计算指标权重

根据3.1节熵值法计算得到指标的属性权重向量 $\boldsymbol{W}$=(0.31,0.16,0.14,0.14,0.25)。然后基于改进最大离差法将归一化处理后的数据分别乘以其对应的属性权重 w_j，得到考虑属性权重的新矩阵 $\boldsymbol{D}'$，如式(27)所示。

$$\boldsymbol{D}'=\begin{pmatrix}0.1116 & 0.0896 & 0.056 & 0.196 & 0.0625\\0.2170 & 0.0896 & 0.084 & 0.224 & 0.750\\0.2976 & 0.2016 & 0.070 & 0.105 & 0.450\\0.1302 & 0.0768 & 0.112 & 0.175 & 0.3125\end{pmatrix}\tag{27}$$

将其代入式(25)中，Matlab编程求解该算例，程序如下：

```
B=[0.1116 0.0896 0.056 0.196 0.0625
   0.217 0.0896 0.084 0.224 0.75
   0.2976 0.2016 0.07 0.105 0.45
   0.1302 0.0768 0.112 0.175 0.3125]
divB=size(B)
m=divB(1)
n=divB(2)
z=0
   for i=1:n
   for j=1:m
   z=z+abs(B(i,:)-B(j,:))
   end
z(1)+z(2)+z(3)+z(4)+z(5)
w(1)=z(1)/(z(1)+z(2)+z(3)+z(4)+z(5))
w(2)=z(2)/(z(1)+z(2)+z(3)+z(4)+z(5))
w(3)=z(3)/(z(1)+z(2)+z(3)+z(4)+z(5))
```

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

w(4)=z(4)/(z(1)+z(2)+z(3)+z(4)+z(5))

w(5)=z(5)/(z(1)+z(2)+z(3)+z(4)+z(5))

程序运行后,得到各评估指标的可变权重向量 $\boldsymbol{W}^{*\prime}$=(0.1706,0.0991,0.0482,0.1000,0.5821)。

4.3 广义集对分析综合评估

通过对各项指标归一化处理,将指标变换为成本型指标,即评价指标对等级的增大而减小,则基于线性梯型变化的单指标联系度确定方法为:

1)样本 l 指标 k 对 I 级的联系度函数:

$$\mu_{1kl}=\begin{cases}1 & x_{kl}\in[s_{1k},+\infty]\\ 1-\dfrac{2(s_{1k}-x_{kl})}{s_{1k}-s_{2k}} & x_{kl}\in[s_{2k},s_{1k}]\\ -1 & x_{kl}\in[-\infty,s_{2k}]\end{cases}\tag{28}$$

2)样本 l 指标 k 对 II 级的联系度函数:

$$\mu_{2kl}=\begin{cases}-1 & x_{kl}\in[s_{0k},+\infty]\\ 1-\dfrac{2(x_{kl}-s_{1k})}{s_{0k}-s_{1k}} & x_{kl}\in[s_{1k},s_{0k}]\\ 1 & x_{kl}\in[s_{2k},s_{1k}]\\ 1-\dfrac{2(s_{2k}-x_{kl})}{s_{2k}-s_{3k}} & x_{kl}\in[s_{3k},s_{2k}]\\ -1 & x_{kl}\in[-\infty,s_{3k}]\end{cases}\tag{29}$$

3)样本 l 指标 k 对 III 级的联系度函数:

$$\mu_{3kl}=\begin{cases}-1 & x_{kl}\in[s_{1k},+\infty]\\ 1-\dfrac{2(x_{kl}-s_{2k})}{s_{1k}-s_{2k}} & x_{kl}\in[s_{2k},s_{1k}]\\ 1 & x_{kl}\in[s_{3k},s_{2k}]\\ 1-\dfrac{2(s_{3k}-x_{kl})}{s_{3k}-s_{4k}} & x_{kl}\in[s_{4k},s_{3k}]\\ -1 & x_{kl}\in[-\infty,s_{4k}]\end{cases}\tag{30}$$

4)样本 l 指标 k 对 VI 级的联系度函数:

$$\mu_{4kl}=\begin{cases}-1 & x_{kl}\in[s_{2k},+\infty]\\ 1-\dfrac{2(x_{kl}-s_{3k})}{s_{2k}-s_{3k}} & x_{kl}\in[s_{3k},s_{2k}]\\ 1 & x_{kl}\in[s_{4k},s_{3k}]\\ 1-\dfrac{2(s_{4k}-x_{kl})}{s_{4k}-s_{5k}} & x_{kl}\in[s_{5k},s_{4k}]\\ -1 & x_{kl}\in[-\infty,s_{5k}]\end{cases}\tag{31}$$

5)样本 l 指标 k 对 V 级的联系度函数:

$$\mu_{5kl}=\begin{cases}-1 & x_{kl}\in[s_{3k},+\infty]\\ 1-\dfrac{2(x_{kl}-s_{4k})}{s_{3k}-s_{4k}} & x_{kl}\in[s_{4k},s_{3k}]\\ 1 & x_{kl}\in[-\infty,s_{4k}]\end{cases}\tag{32}$$

其中,s_{ik}(i=0,1,2,3,4,5)表示指标 1~5 个等级的界限值。

将矩阵 $\boldsymbol{D}$ 中数据代入式(28)~式(32)中可得潮流能装置输电特性各指标的联系度值,以监测点 1 处为例,其各评估等级对应的总联系度值分别为:$\mu_{11}=-0.9$,$\mu_{21}=-0.8$,$\mu_{31}=-0.7$,$\mu_{41}=-0.08$,$\mu_{51}=0.8$ 。根据式(6)求得监测点 1 处的广义联系熵 G_1=0.4581。同理可得,监测点 2、3、4 处各评估等级对应的总联系度值及广义联系熵,则广义集对分析评估结果,见表 3。

表3 广义集对分析评估结果

Table 3 Evaluation result of generalized set pair analysis

观测点	GSPA 总联系度					判断结果	广义联系熵
	I	II	III	IV	V		
1	−0.90	−0.80	−0.70	−0.08	0.80	V	0.45
2	0.36	0.47	−0.76	−0.40	−0.60	II	0.77
3	0.74	0.29	0.52	−0.34	0.78	V	0.74
4	−1.05	−0.32	0.48	0.16	−0.38	III	0.74

根据最大联系度判断准则可得:监测点 1 和 3 处潮流能发电装置输电特性的综合评估等级均为五级“优质”,其中监测点 3 处的广义联系熵值较大,说明监测点 1 和 3 处相比,监测点 3 处的输电特性较监测点 1 处更好;监测点 2 和 4 处潮流能发电装置输电特性的综合评估等级分别为:二级“较差”,三级“合格”,则当连接纯电阻负载时,潮流能装置的输电特性等级较低,需对其采用适当的控制措施。

5 结 论

本文在分析潮流能发电系统并网后对电网稳定性、可靠性和电能质量造成影响的基础上,总结潮流能装置输电特性的各项指标;并在对集对分析理论深入研究的基础上,提出基于广义集对分析潮流能发电装置输电特性综合评估模型,广义集对分析综合评估模型解决了集对分析理论评估中,当两样本处于同一评判级别时,不能进一步区分评估对象的好坏程度的问题,提高了评估方法的分辨率;采用改进离差最大化法求取指标权重,综合考虑指标的属性权重和可变权重,首先采用熵值法得到指标的属性权重,然后运用拉格朗日函数求解指标可变权重,归一化处理后得到该综合评估模型的指标权重向量,使评估结果更贴近真实结果。通过某潮流能发电装置输电特性综合评估的算例验证了该

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

评估模型的有效性，同时也能为改进装置的设计工艺或并网控制方式提供可靠依据。

［参考文献］

［1］ 吴　峰，鞠　平，秦　川，等. 近海可再生能源发电研究综述与展望[J]. 河海大学学报(自然科学版)，2014，42(1)：80—87.

［1］ Wu Feng，Ju Ping，Qin Chuan，et al. Progress and prospect of research on offshore renewable energy generation[J]. Journal of Hehai University(Natural Sciences)，2014，42(1)：80—87.

［2］ Fraenkel Peter L. Tidal current energy technologies[J]. The International Journal of Avian Science，2006，148(S1)：145—151.

［3］ 秦　川，鞠　平，闻丹银，等. 近海可再生能源综合发电的系统构建与并网方式[J]. 中国电机工程学报，2014，34(13)：2013—2021.

［3］ Qin Chuan，Ju Ping，Wen Danyin，et al. Hybrid offshore wind，wave and tidal turbine energy conversion system：structure and electrical interface [J]. Proceedings of the CSEE，2014，34(13)：2013—2021.

［4］ Salman S，Gibb J，Macdonald I. Integration of tidal power basedelectricalplantintoa grid[A]. 43rdInternational Universities Power Engineering Conference[C]，Padova，Italy，2008，1—4.

［5］ 唐会智，彭建春. 基于模糊理论的电能质量综合量化指标研究[J]. 电网技术，2003，27(2)：85—88.

［5］ Tang Huizhi，Peng Jianchun. Research on synthetic and quantificated appraisal index of power quality based on fuzzy theory[J]. Power System Technology，2003，27(2)：85—88.

［6］ 李连结，姚建刚，龙立波，等. 组合赋权法在电能质量模糊综合评估中的应用[J]. 电力系统自动化，2007，31(4)：56—60.

［6］ Li Lianjie，Yao Jiangang，Long Libo，et al. Application of combination weighing method in fuzzy synthetic evaluation of power quality[J]. Automation of Electric Power Systems，2007，31(4)：56—60.

［7］ 赵　霞，赵成勇，贾秀芳，等. 基于可变权重的电能质量模糊综合评价[J]. 电网技术，2005，29(6)：11—16.

［7］ Zhao Xia，Zhao Chengyong，Jia Xiufang，et al. Fuzzy synthetic evaluation of power quality based on changeable weight[J]. Power System Technology，2005，29(6)：11—16.

［8］ 杜　栋，庞庆华，吴　炎. 现代综合评价方法与案例精选[M]. 北京：清华大学出版社，2008，86—110.

［9］ 李如琦，苏浩益. 基于可拓云理论的电能质量综合评估模型[J]. 电力系统自动化，2012，36(1)：66—70.

［9］ Li Ruqi，Su Haoyi. A synthetic power quality evaluation method based on extension cloud theory[J]. Automation of Electric Power Systems，2012，36(1)：66—70.

［10］ 江　辉，彭建春，欧亚平，等. 基于概率统计和矢量代数的电能质量归一量化与评价[J]. 湖南大学学报，2003，30(1)：66—70.

［10］ Jiang Hui，Peng Jianchun，Ou Yaping，et al. Power quality unitary quantification and evaluation based on probability and vector algebra[J]. Journal of Hunan University，2003，30(1)：66—70.

［11］ 张　蔓，林　涛，曹　健，等. 理想区间法在电能质量综合评估中的应用[J]. 电网技术，2009，33(3)：33—38.

［11］ Zhang Man，Lin Tao，Cao Jian，et al. Application of ideal interval method in power quality synthetic evaluation [J]. Power System Technology，2009，33(3)：33—38.

［12］ Yang Yidan. Evaluation of regional emergency material support capability based on G1 method[A]. Proceedings of IEEE 2010 International Conference on Management Sciences and Emergency Management [C]，Beijing，China，2010，410—413.

［13］ 孟宪萌，胡和平. 基于熵权的集对分析模型在水质综合评价中的应用[J]. 水利学报，2009，40(3)：257—262.

［13］ MengXianmeng，Hu Heping. Application of set pair analysis model based on entropy weight to comprehensive evaluation of water quality[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2009，40(3)：257—262.

［14］ 刘俊华，罗隆福，张志文，等. 基于模糊集对分析法的电能质量综合评估[J]. 电网技术，2012，36(7)：81—85.

［14］ Liu Junhua，Luo Longfu，Zhang Zhiwen，et al. Comprehensive evaluation of power quality based on fuzzy set pair analysis[J]. Power System Technology，2012，36(7)：81—85.

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

STUDY ON OUTPUT CHARACTERISTIC OF TIDAL CURRENT ENERGY GENERATION DEVICES

Ye Qing, Zhu Yongqiang, Wang Guanjie

(*State Key Laboratory of Alternate Electrical Power Systemwith Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing* 102206, *China*)

Abstract: Taking tidal current energy as an example, output characteristic indexes of tidal current energy generation devices were proposed, and normalized pretreatment was made based on qualified rate. According to generalized set pair analysis, a comprehensive evaluation model of tidal current energy generation output was proposed, and improved maximizing deviation method was used to determine weights of all indexes in this model. This method includes three steps: first, entropy method is used to get the attribute weight of indexes. Then lagrangian function is used to solve the variable weight of indexes. At last, normalization processing is used on variable weight of indexes to get weight vector of the index in this comprehensive evaluation model. As a final note, this evaluation model is verified by an example.

Keywords: tidal current energy generation devices; generalized set pair analysis; entropy method; improved maximizing deviation method

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net