

文章编号: 1674 - 5566(2015)02 - 0314 - 07

潮流能发电装置性能综合评估方法研究

叶青¹, 朱永强¹, 李雪临², 王鑫², 段春明³

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 国家海洋技术中心, 天津 300112; 3. 国网冀北电力有限公司经济技术研究院, 北京 100045)

摘要: 目前,我国还没有建成为潮流能发电装置提供试验、测试与评估的海上测试场。潮流能发电装置性能综合评估方法的研究是海上测试场建设理论研究的重要组成部分,为改进潮流能发电装置的性能提供可靠依据。文章在模糊综合评判模型的基础上利用灰色关联理论修正主观权重,分析了潮流能发电装置性能各项指标,给出装置性能评估的层次模型。通过对原始指标数据的标准化处理,使指标数值均处于(0,1)内,降低了计算的复杂度;利用变异系数和关联度修正初始权重,得到潮流能装置多指标的综合权重量化值以及最终评估结果。该方法简化了标准层次分析法中一致性检验过程,同时提高了评估结果的客观性及模糊综合评判的可信度。最后对两台潮流能发电装置实测数据进行评估分析,验证了该评估方法的有效性。

研究亮点: 本文在模糊综合评判模型的基础上利用灰色关联理论修正主观权重,给出潮流能装置性能评估的层次模型,并对原始数据进行标准化处理,降低了综合评估方法的复杂度并保证了该方法的客观有效性。

关键词: 潮流能发电装置; 序关系分析法; 变异系数; 灰色关联度分析; 模糊综合评判

中图分类号: P 743.1

文献标志码: A

随着科技进步和社会工业化发展,能源危机问题日趋严重,促进新能源发电技术的发展是解决能源危机的重要途径之一。海洋中蕴藏着巨大的能量,包括波浪能、潮汐能、潮流能、温差能和盐差能等。到 2007 年底,至少有 60 个国家为本国海洋能产业制定了各种促进政策,以促进海洋能源的开发^[1-2]。我国是海洋大国,但海洋资源利用的相关技术才刚刚起步,波浪能、潮流能发电技术仍处于工程样机与示范试验阶段,不能达到大规模利用海洋能并网发电的要求。目前,我国还没有建成为波浪能、潮流能发电装置提供试验、测试与评估的试验场^[3]。为弥补我国在海洋能发电装置实海况测试与评价方法的不足,海洋可再生能源专项支持了一系列关于“国家波浪能、潮流能海上试验与测试场建设”的研究项目,以推动我国海洋能发电技术的发展进程^[4]。其中,潮流能发电装置性能综合评估方法的研究是

海上测试场建设理论研究的重要组成部分,为改进潮流能发电装置的性能提供可靠依据。

综合评估的方法多种多样,主要有:层次分析法(AHP)、概率统计方法、模糊综合评判法、智能化评价法、灰色综合评价法等。针对不同的研究对象应当选取适当的评估方法,以期得到合理的综合评估结果。在 AHP 计算过程中,人的主观判断对结果的影响极大,当指标数目超过 9 个,判断矩阵的一致性检验增加了计算难度,准确性难以保证^[5]。概率统计法利用概率统计特征值提取各指标的主要特征,运用矢量代数进行归一化处理得到评估结果,主观指标的影响很小,但量化过程基准值的选取影响评估结果的准确性^[6]。模糊综合评判法是按照最大隶属度的原则去评判该指标所属的等级,其不足之处在于过度依赖人的主观判断^[7]。智能化评价法能够消除权重确定的人为影响,保证权值的有效性和实

收稿日期: 2014-10-10 修回日期: 2014-12-17

基金项目: 海洋可再生能源专项资金实施方案(GHME2012ZC02)

作者简介: 叶青(1989—),女,硕士研究生,研究方向为新能源电力系统。E-mail:yeqzjin@163.com

通信作者: 朱永强,E-mail:zyq@ncepu.edu.cn

用性,但智能化评价模型的隐含性使得输出权值的解释变得困难,且算法的收敛速度对评估效率影响极大^[8]。灰色综合评价法利用灰色关联度来描述指标间关系的强弱、大小和次序,较好地解决了指标量化问题,排除了主观因素的影响,但其评价体系中权重的分配直接影响最终评估结果^[9]。

综上所述,应用单一的综合评估方法难以保证评估结果的可靠性,且我国潮流能发电装置性能综合评估方法的研究目前处于空白阶段,主要依靠装置设计参数、实测数据以及相关专家经验评估其各项性能指标。为保证评估结果的准确性和可靠性,本文提出了一种基于灰色关联理论修正序关系权重的模糊综合评判模型,首先应用序关系分析法计算潮流能发电装置各项性能指标的初始权重;然后计算初始权重矩阵中每列数据的平均值,即各指标权重均值,以此构成灰色关联分析的参考标准向量,根据关联度修正主观权重得到发电装置多指标的综合权重量化值,这一过程使潮流能发电装置性能指标的权重分配具备客观性和说服力;最后根据模糊综合评判模型合成评估结果。

1 潮流能发电装置性能指标分析

潮流能发电装置现场测量的数据主要有:实时潮流流速和装置输出电功率(即发电系统输出端的瞬时电压 u 和瞬时电流 i),且这两部分数据的测量必须同步,采样频率值设定为 2Hz 及以上。测试周期为 15 d,每天获取无故障连续工作的 144 组数据记录,每组连续测量时长为 10 min^[10-11]。试验场检测重点测量发电系统在实际海洋动力环境的相关参数,以及电力输出,主要的测试指标见表 1。

1.1 功率特性

功率特性是评估潮流能发电装置性能的重要指标,表征装置吸收潮流能能力的大小,直接影响装置的年发电量。潮流能发电装置的电功率输出取决于潮流的流速,当流速 $v > 1$ m/s 时,潮流能才有利用价值。已知潮流能发电装置实际有用的输出功率公式为

$$P = \frac{1}{2} \rho S v^3 C_p \quad (1)$$

式中: P 为潮流能发电装置的输出功率; ρ 为潮流

密度, $\rho = 1.025 \times 10^3$ kg/m³; S 为潮流能装置水轮机叶片扫掠横截面的面积; v 为潮流的流速(m/s); C_p 为潮流能装置一次转换的利用系数。

表 1 主要测量指标

Tab. 1 The primary measurement

测量内容 measuring content	测量参数 measuring parameters	测量范围 measuring range	准确度 accuracy
潮流参数 trend parameters	流速	0 ~ 0.7 m/s	V × 1% 或 0.5 cm/s
	流向	0 ~ 360°	± 5°
电力输出 power output	电压	0 ~ 800 V	1% F. S
	电流	0 ~ 300 A	5% F. S

在数据采集过程中,每个潮流流速数据需与同时间段采集的电功率数据相对应,筛选出不符合分析需求的数据并将其剔除。确定数据所在的分析区间 bin,计算该区间 bin 对应的算术平均值 \bar{v}_{cn} 和 \bar{p}_{gn} ,进行数值拟合获得装置的功率输出特性曲线。

1.2 年发电量

年发电量(AEP)^[12]是衡量潮流能发电系统经济性的指标,是根据潮流能发电装置的功率输出特性曲线对不同潮流流速分布计算得到的。根据此前分析得出的装置输出功率特性,利用下列公式估算出装置的年发电量:

$$AEP = h_{AE} \sum_{i=1}^N \frac{a_i}{n} \times \bar{p}_{gn} \quad (2)$$

式中: h_{AE} 为年发电时间; N 为分析区间 bin 的个数; n 为采样总次数; a_i 代表检测获得 (v_{cn}, p_{gn}) 点所包含流速值 v_{cn} 落入第 i 个 bin 内的个数; \bar{p}_{gn} 是第 i 个分析区间 bin 对应的输出功率值。

1.3 容量系数

容量系数 F 是表征潮流能发电装置能量输出情况的指标^[13],是发电装置在测试周期内(年、季、月)平均输出功率 P_A 与额定功率 P_N 的比值,即:

$$F = P_A / P_N \quad (3)$$

F 也可等价于一台潮流能装置在测试周期内满负荷工作的时间,用以衡量发电装置的总发电量,通常利用一段时间内的潮流平均流速和此时间段内的平均功率求出发电机输出的电功率序列,然后进行累加。

1.4 平均/最大功率比

平均/最大功率比反映了装置正常运行过程

中,输出最大功率的能力,即指在整个测试周期内,发电装置平均功率 P_a 与最大功率 P_{max} 之比,用符号 θ_{amax} 表示,其计算式见式(4)。

$$\theta_{amax} = \frac{P_a}{P_{max}} = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{p}_{gn}}{\max\{\bar{p}_{g1}, \bar{p}_{g2}, \dots, \bar{p}_{gN}\}} \quad (4)$$

1.5 能量转换效率

潮流能发电装置的能量转换效率 η 定义为发电系统的净电功率输出 P 与真实潮流能输入 PKE 之比。 $\eta = \frac{P}{P_{KE}} \times 100\%$ (5)

若定义一级转换效率为 η_1 , 二级转换效率为 η_2 , 三级转换效率为 η_3 , 则 $\eta = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3$ 。但在实际检测中,通过检测装置输入输出能量,利用式(6)进行计算。

$$\eta = C_p \cdot \eta_d \quad (6)$$

式中: C_p 为能量利用系数; η_d 为动力机械发电效率。

1.6 平稳工作时间

潮流的流动周期与潮汐周期一致,通常为 12 h 或 24 h。在整个测量周期中,每次涨潮、落潮期间,将装置稳定输出电功率时间记为发电装置的平稳工作时间,用符号 T_s 表示。在评估计算中以平稳工作时间平均值作为装置平稳工作时间的指标项。

1.7 可利用率

可利用率 A_v 通常表示为一定工作(或测试)周期 T 内,系统正常工作时间 T_w (除去发电系统因正常维护、维修或系统故障而停止工作的时间)占这一周期总时间的百分比,在实际计算中,通常利用潮流能发电装置功率特性函数 $P_w(v)$ 计算可利用率,则

$$A_v = \int_{v_{ei}}^{v_{eo}} p_w(v) dv \quad (7)$$

2 综合评估模型的建立

2.1 模糊综合评估的一般步骤

(1) 确定指标集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, 其中 u_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 是被评对象的各项指标;

(2) 建立评判集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$, 用 v_j ($j = 1, 2, \dots, m$) 代表各评估等级;

(3) 确定隶属函数,单指标模糊评判是对指标集 U 中每指标 u_i 的判断,计算指标 u_i 在评估等级 v_j ($j = 1, 2, \dots, m$) 上的模糊集 $R_i = (r_{i1}, r_{i2},$

$\dots, r_{im})$, 从而汇总得到 n 个单指标的评估矩阵 R ;

(4) 确定权重集 $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$, 其中 w_i 表示每指标的权重系数,满足 ($w_i \geq 0$);

(5) 模糊变换:权重向量 W 与评估矩阵 R 进行合成,得到被评对象各等级的隶属程度,即模糊综合评判结果向量;

(6) 最大隶属度准则得到评估结果:根据模糊变换的结果,选择最大隶属度值所对应的评判集中的元素作为评估结果。

2.2 指标标准化

综合评估各项指标的单位不同、量纲不同、数量级不同,不便于分析,甚至会影响评价的结果,由于潮流能发电装置输出性能的各项指标值均为正数,且为正向指标,故采用式(8)进行归一化处理。由式(8)可知,通过标准化计算,各项指标数值均变换至(0,1)内,降低了评估计算的复杂性。

$$y_i = \frac{x_i}{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i} \quad (8)$$

2.3 构造隶属度函数

根据上述对潮流能装置的指标分析,采用层次分析法对装置性能指标进行分解,建立了潮流能发电装置综合评价指标体系,如图 1。

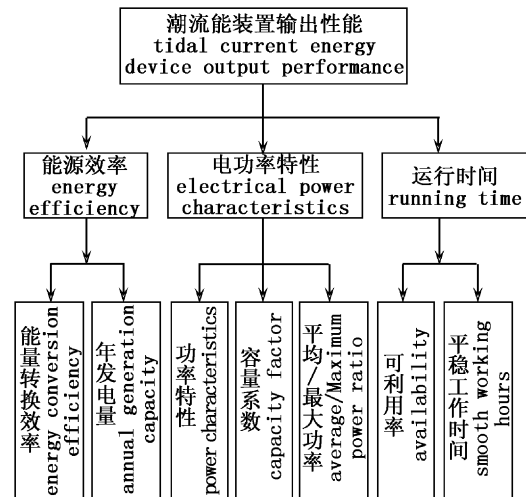


图 1 潮流能发电装置综合评价指标体系
Fig. 1 Integrated indicator system of tidal current energy generation device

为使综合评估过程的计算量和复杂性大大降低,同时保证评估结果的准确性和可信度,将每一评估指标分为 5 个等级,即: $V = \{$ 很差,较

差,合格,良好,优质}。如图 2 所示, x_1, x_2, x_3, x_4 分别为各评估等级的参考限值,且 $0 < x_1 < x_2 < x_3 < x_4$ 。根据三角形分布和半梯形分布构造的隶属度函数,式(9)~(13)表示评估等级依次为“很差”、“较差”、“合格”、“良好”、“优质”对应的隶属度函数表达式,其中, x_r 是指标 $u_i (i=1, 2, \dots, n)$ 实测值标准化处理后的数据。根据评估等级隶属度函数,代入指标数据计算各指标隶属度值,就构成了隶属度矩阵 R,见式(14)。

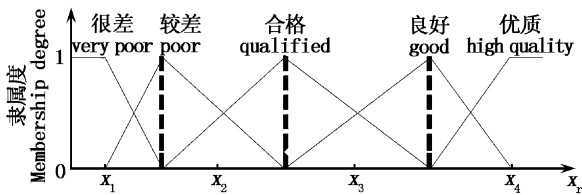


图 2 三角形-梯形分布隶属函数示意图

Fig. 2 Triangular-trapezoidal distribution schematic of membership functions

$$u_1 = \begin{cases} 1 & x_r \leq x_1 \\ \frac{x_1 + x_2 - 2x_r}{x_2 - x_1} & x_1 < x_r \leq \frac{x_1 + x_2}{2} \\ 0 & x_r > \frac{x_1 + x_2}{2} \end{cases} \quad (9)$$

$$u_2 = \begin{cases} \frac{2(x_r - x_1)}{x_2 - x_1} & x_1 < x_r \leq \frac{x_1 + x_2}{2} \\ \frac{x_2 + x_3 - 2x_r}{x_3 - x_1} & \frac{x_1 + x_2}{2} < x_r \leq \frac{x_2 + x_3}{2} \\ 0 & x_r \leq x_1, x_r > \frac{x_2 + x_3}{2} \end{cases} \quad (10)$$

$$u_3 = \begin{cases} \frac{2x_r - x_1 - x_2}{x_3 - x_1} & \frac{x_1 + x_2}{2} < x_r \leq \frac{x_2 + x_3}{2} \\ \frac{x_3 + x_4 - 2x_r}{x_4 - x_2} & \frac{x_2 + x_3}{2} < x_r \leq \frac{x_3 + x_4}{2} \\ 0 & x_r \leq \frac{x_1 + x_2}{2}, x_r > \frac{x_3 + x_4}{2} \end{cases} \quad (11)$$

$$u_4 = \begin{cases} \frac{2x_r - x_2 - x_3}{x_4 - x_2} & \frac{x_2 + x_3}{2} < x_r \leq \frac{x_3 + x_4}{2} \\ \frac{2(x_4 - x_r)}{x_4 - x_3} & \frac{x_3 + x_4}{2} < x_r \leq x_4 \\ 0 & x_r \leq \frac{x_2 + x_3}{2}, x_r > x_4 \end{cases} \quad (12)$$

$$u_5 = \begin{cases} 0 & x_r \leq \frac{x_3 + x_4}{2} \\ \frac{2x_r - x_3 - x_4}{x_4 - x_3} & x_1 < x_r \leq \frac{x_1 + x_2}{2} \\ 1 & x_r > x_4 \end{cases} \quad (13)$$

	等级 1	等级 2		等级 n
	↓	↓		↓
指标 1 →				
指标 2 →	r_{11}	r_{12}	\cdots	r_{1n}
\vdots	r_{21}	r_{22}	\cdots	r_{2n}
指标 m →	\vdots	\vdots	\cdots	\vdots
	r_{m1}	r_{m2}	\cdots	r_{mn}

(14)

3 确定指标权重

3.1 序关系分析法

为简化标准层次分析法判断矩阵一致性检验过程,序关系法原理及权重计算步骤如下:

(1) 根据图 2, 请相关专家给出同一层次指标对上一层级重要性程度确定序关系。若有指标 u_1, u_2, \dots, u_k 和 n 位专家, 第 i 位专家给出的序关系可记为: $u_i > u_j > \dots > u_k$ 。

(2) 令 a_k 为相邻指标 u_{k-1} 与 u_k 的相对重要程度: $a_k = w_{k-1}/w_k$, 其取值见图 3。

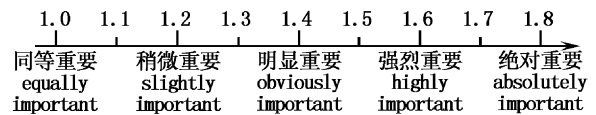


图 3 比例标度图

Fig. 3 Proportional scale map

(3) 第 k 个指标的权重 w_k 的计算公式如下:

$$w_k = (1 + \sum_{j=2}^m \prod_{k=j}^m a_k)^{-1} \quad (15)$$

$$w_{k-1} = a_k \cdot w_k \quad (k=2, 3, \dots, m) \quad (16)$$

3.2 灰色关联修正权重

n 位专家给出的待修正初始权重行向量 $X_i = \{x_i^{(1)}, x_i^{(2)}, \dots, x_i^{(m)}\} (i=1, 2, \dots, n)$ 为比较数据。灰色关联理论权重修正的步骤如下:

(1) 构造参考序列 $X_0 = \{x_0^{(1)}, x_0^{(2)}, \dots, x_0^{(m)}\}$: 令 w_{ik} 为第 i 位专家对第 k 个指标的权重, 则各专家给出初始权重向量 w_i , 由此构成初始权

重矩阵 $W_0 = (w_{ik})$, 其中 $i = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, m$ 。首先根据式(17)求得初始权重矩阵 W_0 中各元素的变异系数值 v_{ik} , 寻找变异系数值 v_{ik} 最小值对应初始权重矩阵 W_0 中的初始权重值, 记为 w_{vmin} 。最后, 由 w_{vmin} 作为参考序列 $X_0 = \{w_{vmin}^{(1)}, w_{vmin}^{(2)}, \dots, w_{vmin}^{(m)}\}$ 。

$$v_{ik} = \frac{\delta_k}{\bar{w}_k} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (w_{ik} - \bar{w}_k)^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_{ik}} \quad (17)$$

(2) 第 k 个指标在 q 点的关联系数 ξ_q 的表达式为:

$$\xi_q = \frac{\Delta_{min} + \rho \Delta_{max}}{\Delta_{dq} + \rho \Delta_{max}} \quad (18)$$

式中: $\rho = 0.50$; $x_0(q)$ 、 $x_d(q)$ 分别是参考、比较数列在指标 q 点的值。

$$\Delta_{dq} = |x_0(q) - x_d(q)| \quad (19)$$

$$\Delta_{max} = \max_d \max_q |x_0(q) - x_d(q)| \quad (20)$$

$$\Delta_{min} = \min_d \max_q |x_0(q) - x_d(q)| \quad (21)$$

(2) 计算指标关联度

$$r_j = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n \xi_{dq} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (22)$$

(3) 归一化处理得到修正后的指标权重值

$$w_i = \frac{r_j}{\sum_{j=1}^m} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (23)$$

3.3 合成评估结果

将 3.2 节修正后的权重向量 W 与隶属度矩阵 R 相乘得到评估向量 B , 参见式(24)。权重向量 W 与隶属度矩阵 R 已经归一化, 则模糊综合评判结果向量不需要进行归一化。根据最大隶属度原则可获得潮流能装置性能的综合等级, 即选定 $b_j = \max_{1 \leq i \leq 5} \{b_i\}$ 对应的评估等级作为装置性能综合评估结果。

$$B = W \cdot R \quad (24)$$

4 实例研究

有两台潮流能发电装置, 一台是导流罩式(装置 1), 另一台是非导流罩式(装置 2)。已知这两台发电装置的额定输出功率均为 10 kW, 现分别对这两台潮流能装置进行现场测试, 经过统计、标准化处理, 两台装置性能指标初始数据见表 2。由于装置性能是正向指标, 经过标准化处

理后, 指标量转换至区间(0, 1)内, 故各参考值均为 1, 且越接近 1, 说明装置的性能越优良。

表 2 潮流能装置性能指标初始数据表
Tab. 2 Initial data sheet of tidal current energy device performance

评价参数 evaluation parameters	装置 1 device 1	装置 2 device 2
功率平均值 power average	0.834 5	0.867 2
容量系数 capacity factor	0.846 4	0.853 1
平均/最大功率比 average / maximum power ratio	0.932 7	0.897 7
年发电量 annual generation capacity	0.498 6	0.376 8
能量转换效率 energy conversion efficiency	0.363 3	0.386 9
平稳工作时间 smooth working hours	0.562 1	0.613 8
可利用率 availability	0.458 7	0.389 8

根据图 2 中所示隶属函数示意图及权重系数计算原理, 可得到装置 1、2 各层评判因素权重及最底层因素模糊评判矩阵, 以装置 1 为例给出装置 1 各层评判因素集、权重分配及最底层单因素评判矩阵, 如表 3 所示。

将表 3 中最底层因素的权重系数与模糊评判矩阵通过矩阵相乘运算(也可称为模糊变换), 可得到第二级的综合评判矩阵 B_1 、 B_2 和 B_3 。再对其进行归一化处理得到 B_1' 、 B_2' 和 B_3' , 如下所示:

$$B_1' = (0.048, 0.247, 0.362, 0.155, 0.148)$$

$$B_2' = (0.07, 0.255, 0.308, 0.268, 0.131)$$

$$B_3' = (0.035, 0.24, 0.372, 0.183, 0.209)$$

利用 B_1' 、 B_2' 和 B_3' 矩阵基于综合评判因素集 $U = \{U_1, U_2, U_3\} = \{\text{电功率特性、能源效率、运行时间}\}$ 综合评判矩阵 $R = [B_1', B_2', B_3']^T$, 并与第一级因素权重向量 $W = (0.5, 0.4, 0.1)$ 进行复合运算:

$$B = W \cdot R = (0.0708, 0.208, 0.236, 0.325, 0.174)$$

根据最大隶属度原则可得: 装置 1 性能指标的综合评估等级为“良好”。同理可得, 装置 2 性能的综合等级为“合格”。

表 3 装置 1 各层因素集、权重分配及最底层单因素评判矩阵表
 Tab.3 Assessment factors, weight coefficient and assessment matrix
 of single factor located in the lowest place of device 1

第 1 级因素集 level 1 factor set	第 1 级权重 level 1 weights	第 2 级因素集 level 2 factor set	第 2 级权重 level 2 weights	第 2 级模糊评判矩阵 Level 2 fuzzy evaluation matrix				
				很差 very poor	较差 poor	合格 qualified	良好 good	优质 high quality
电功率特性 electrical power characteristics	0.5	功率特性	0.6	0	0	0.197	0.324	0.479
		容量系数	0.2	0	0	0.201	0.298	0.501
		平均/最大功率比	0.2	0	0	0.121	0.206	0.673
能源效率 energy efficiency	0.4	年发电量	0.3	0	0.327	0.459	0.214	0
		能量转换效率	0.7	0.258	0.506	0.236	0	0
运行时间 running time	0.1	平稳工作时间	0.6	0	0.252	0.613	0.135	0
		可利用率	0.4	0	0.264	0.544	0.192	0

5 总结

由于我国海洋能发电技术刚刚起步,目前尚未成为波浪能、潮流能发电装置提供试验、测试与评估的试验场。根据“海上试验场综合测试与评价集成系统一期建设”的项目需求,通过总结潮流能发电装置各项性能指标,在模糊综合评判模型的基础上,提出了序关系分析法确定指标初始权重,灰色关联理论修正主观权重对潮流能装置性能指标进行权重分配的方法,评估结果满足主观和客观的要求,且易于计算机编程实现,为后续装置综合测试与评价集成系统的实现提供了理论基础。

参考文献:

- [1] 熊焰,王海峰,崔琳,等.我国海洋可再生能源开发利用发展思路研究[J].海洋技术,2009,28(3):106-110.
XIONG Y, WANG H F, CUI L, et al. Development strategy on development and utilization of marine renewable energy in China[J]. Ocean Technology, 2009, 28(3): 106-110.
- [2] 朱永强. 新能源与分布式发电技术[M]. 北京: 北京大学出版社, 2010.
ZHU Y Q. New energy and distributed generation technologies[M]. Beijing: Peking University Press, 2010.
- [3] 游亚戈,李伟,刘伟民,等.海洋能发电技术的发展现状与前景[J].电力系统自动化,2010,34(14):1-12.
YOU Y G, LI W, LIU W M, et al. Development status and perspective of marine energy conversion systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(14): 1-12
- [4] 国家海洋技术. 海洋可再生能源专项资金实施方案[R]. 天津, 2012.
National Marine Technology. Ocean renewable energy special fund embodiments[R]. Tianjin, 2012.
- [5] 刘建,郑双忠,邓云峰,等.基于G1法的应急能力评估指标权重的确定[J].中国安全科学学报,2006,16(1):30-33.
LIU J, ZHENG S Z, DENG Y F, et al. Weight determination of indexes in evaluation of emergency response ability based on G1 [J]. China Safety Science Journal, 2006, 16(1): 30-33.
- [6] 熊以旺,程浩忠,王海群,等.基于改进AHP和概率统计的电能质量综合评估[J].电力系统保护与控制,2009,37(13):47-52.
XIONG Y W, CHENG H Z, WANG H Q, et al. Synthetic evaluation of power quality based on improved AHP and probability statistics [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(13): 47-52.
- [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.
ZHAO X, ZHAO C Y, JIA X F, et al. Fuzzy synthetic evaluation of power quality based on changeable weight[J]. Power System Technology, 2005, 29(6): 11-16.
- [8] 周林,栗秋华,刘华勇,等.用模糊神经网络模型评估电能质量[J].高电压技术,2007,33(9):66-69.
ZHOU L, LI Q H, LIU H Y, et al. Evaluation of power quality by fuzzy artificial neural network [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(9): 66-69.
- [9] 雷刚,顾伟,袁晓冬.灰色理论在电能质量综合评估中应用[J].电力自动化设备,2009,29(11):62-65.
LEI G, GU W, YUAN X D. Application of gray theory in power quality comprehensive evaluation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(11): 62-65.
- [10] 张亮,李凤来,盛其虎.海洋潮流能发电装置功率和效率测试方法研究报告[EB/OL].http://wenku.baidu.com/view/898671c658f5f61fb736666b.html,2011-03-19/2013-09-10.
ZHANG L, LI F L, SHENG Q H. Research report of ocean tidal current energy generation device power and efficiency test methods [EB/OL] http://wenku.baidu.com/view/898671c658f5f61fb736666b.html, 2011-03-19/2013-09-10.
- [11] 王项南,王静,李雪临,等.潮流能发电系统性能评估方

- 法研究[J]. 海洋技术, 2013, 32(3): 106-108.
- WANG X N, WANG J, LI X L, et al. Study on assessment of performance of the tidal energy conversion systems[J]. Ocean Technology, 2013, 32(3): 106-108.
- [12] 王海峰, 熊焰, 崔琳, 等. 海流能发电系统转换效率测试技术研究[J]. 海洋技术, 2009, 28(4): 97-100.
- WANG H F, XIONG Y, CUI L, et al. Study on testing technology of conversion efficiency of marine current energy power generation system[J]. Ocean Technology, 2009, 28(4): 97-100.
- [13] 杨天时. 大型风电机组综合性能评估系统研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2010.
- YANG T S. Research on comprehensive performance evaluation system for large wind turbine [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2010.

The study of the integrated evaluation methods of tidal current energy generating device

YE Qing¹, ZHU Yongqiang¹, LI Xuelin², WANG Xin², DUAN Chunming³

(1. Institute of Electric and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. National Marine Technology Center, Tianjin 300112, China; 3. Economic Research Institute, State Grid Jibei Electric Power Company, Beijing 100045, China)

Abstract: Currently, no offshore test field has been built for experiment, test and evaluation of tidal current energy generating device in China. The study of tidal current energy generation device performance integrated assessment method is an important part of the theoretical study for construction of an offshore test field, providing a reliable basis for improving the performance of tidal current energy generating device. On the basis of fuzzy comprehensive evaluation model using gray relational theory revision subjective weights, after analyzing performance indicators of tidal current energy generation device, the hierarchical model of device integrated assessment was given. By standardizing the indicators raw data, index values were in the (0,1), and the complexity of the calculations was reduced. Using the coefficient of variation and correlation corrected initial weight, a comprehensive weight value and the final assessment results of tidal current energy devices and more indicators were calculated. This method not only simplifies the process of standard AHP consistency test, but also avoids excessive subjective assessment results, improving the fuzzy comprehensive evaluation of credibility. The measured data of two units of tidal current energy generation devices were evaluated, and the effectiveness of the assessment methods was verified.

Key words: tidal current energy generating device; G1; variation coefficient; grey relational analysis; fuzzy comprehensive evaluation