

集对分析联系数在黑启动 vague 集决策中的应用研究

赵玉铃,张廉
(浙江水利水电学院,浙江 杭州 310018)

摘 要:vague 集本质上是一种含有不确定性的模糊集,应用时需要做不确定性分析。为此,把集对分析联系数应用于黑启动 vague 集决策之中。首先,把用 vague 集表示的专家权重、指标权重与指标值都改写成联系数的形式,得出基于联系数的黑启动 vague 集决策模型,再对模型的计算结果作不确定性分析,考察不确定性条件下的各方案排序变化,选出最优方案。实例应用表明,文中所提方法能有效解决用 vague 集表示的评价指标之间存在关联性和不确定性的黑启动多方案选优问题,思路清晰,算法简明,便于现场决策应用。

关键词:黑启动决策;vague 集;指标关联性;不确定性;联系数;集对分析

中图分类号: TM711 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2014)05-0632-09

中文引用格式:赵玉铃,张廉. 集对分析联系数在黑启动 vague 集决策中的应用研究[J]. 智能系统学报, 2014, 9(5): 632-640.
英文引用格式:ZHAO Yuling, ZHANG Lian. Application of the set-pair analysis connection number in decision-making of black-start vague set[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2014, 9(5): 632-640.

Application of the set-pair analysis connection number in decision-making of black-start vague set

ZHAO Yuling, ZHANG Lian
(Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China)

Abstract: A vague set is a kind of fuzzy set that contains uncertainty. So uncertainty analysis is required in the application of it. To solve this problem, the proposed decision-making method of a black-start vague set is based on connection number analysis of set-pair. First, rewrite the expert weights, index weights and targeted values represented by vague sets into the connection number form. Next, obtain the decision model of a vague set for black-start based on connection number, analyze the uncertainty of the model calculations, study the changes in the ranking of each project in conditions of uncertainty and select the optimal project. Practical application shows that the method can deal with the problem of optimizing black-start schemes of the correlation and uncertainty in the selected evaluation indexes effectively and clearly. It is simple in algorithm and convenient to make decision on spot.

Keywords: black-start decision; vague set; correlation index; uncertainty; connection number; set-pair analysis

现代社会中,电力系统发生突发性的停电事故不仅会导致巨大的经济损失,也可能引发社会问题。因此,系统和深入地研究停电后的电力系统快速恢复,具有重大理论意义和现实意义^[1-2]。

黑启动是电力系统全部停电后迅速恢复供电的方式。对现代大型电力系统而言,黑启动是一件复

杂的事情,快速优选出合理的黑启动方案有助于加速系统的恢复^[3]。为此,文献[4]提出基于分层案例推理的黑启动决策方法,文献[5]采用基于数据包络分析的层次法评估黑启动决策方案。基于黑启动决策方案中指标及其权重以及参与决策的专家知识存在不确定性的问题,文献[6]把直觉模糊集用于黑启动群决策一致性分析与优化,文献[7]不仅把 vague 理论用于指标间存在关联性时的黑启动决策研究,而且还考虑了参与决策的专家间也存在关

联性的问题,但计算复杂,由于 vague 集是一个含有不确定性的集合,借用 vague 集可以方便地描述一个模糊的不确定信息,却为建模计算带来麻烦;而忽略 vague 集的不确定性,虽可以使计算得以具体操作,但同时也丢失了 vague 集含带的不确定性信息,严重时可能使决策结果偏离实际。

鉴于此,本文把集对分析联系数用于黑启动 vague 集决策研究,理由是集对分析联系数作为处理系统不确定性信息的数学理论,得到广泛应用^[8-10],在供电领域也有不少应用,如文献[11]建立了基于联系数模型的电网灵活规划方法,文献[12]把联系数用于配电系统可靠性评估,文献[13]把联系数用于计及可靠性参数影响的电压暂降频次评估,文献[14]把集对分析联系数用于输变电工程风险评估,文献[15-16]则把集对分析用于电能质量评估。此外,文献[17]把集对分析联系数用于直觉模糊多属性决策的改进,而文献[18]在 1996 年就指出 vague 集其实就是直觉模糊集。受上述文献启发,本文把集对分析联系数用于 vague 数据环境下黑启动多方案选优排序的分析计算,给出一种既简明又便于作不确定性分析的黑启动 vague 集决策新方法。

1 集对分析与联系数简介

1.1 集对分析

具有一定联系的两个集合组成的系统称集对。用 E 、 F 表示集合, H 表示集对,则 $H = (E, F)$ 。

集对是一种客观现象,如正电与负电,系统的输入与输出等,都可以在一定条件下看成是一个集对。在一定的背景问题下,分析集对中两个集合的所有关系,并把这些关系分成相对确定与相对不确定的关系两类(或分成同异反关系三类或更多),用联系数描述这些关系的多少,该联系数称为集对的特征函数;再建立适当联系数模型,借助模型作进一步的分析^[19]。

1.2 联系数

集对分析联系数有不同的数学表达式^[8-12]。下面仅列出二元联系数和三元联系数的定义。

定义 1 设集对 $H = (E, F)$ 在问题 W 中的全部关系数为 N , A 、 B 分别为相对确定和相对不确定的关系数,则称 $u = A + Bi$ 为二元联系数; i 为不确定系数,在 $[-1, 1]$ 区间视不同情况取值。若令 $N = A + B$, $\mu = u/N$, $a = A/N$, $b = B/N$, 即得

$$\mu = a + bi \tag{1}$$

为归一化处理后的二元联系数, a 、 b 为联系数 μ 的联系分量。同理, $u = A + Bi + Cj$ 为三元联系数,也称同异反联系数, C 表示反关系, $j = -1$ 。若采用式

(1) 类似的归一化处理, 则得

$$\mu = a + bi + cj$$

2 联系数的运算

为了便于叙述,这里只介绍本文所用联系数 $\mu = a + bi$ 的普通加法与乘法运算^[8-9, 20]。

2.1 加法运算

定义 2 设有联系数 $\mu_1 = a_1 + b_1i$, $\mu_2 = a_2 + b_2i$, 则有

$$\mu = \mu_1 + \mu_2 = (a_1 + a_2) + (b_1 + b_2)i = a + bi$$

定义 2 给出的联系数加法运算可以推广到 3 个或 3 个以上联系数相加,并满足交换律和结合律(证明略)。

2.2 乘法运算

定义 3 设有联系数 $\mu = a + bi$ 是 n 个联系数的和, 则有

$$\frac{1}{n}\mu = \frac{1}{n}a + \frac{1}{n}bi = \bar{\mu}$$

即为 μ 的平均联系数。

定义 4 设有联系数 $\mu_1 = a_1 + b_1i$ 、 $\mu_2 = a_2 + b_2i$, 则它们的乘积

$$\begin{aligned} \mu = \mu_1\mu_2 &= (a_1 + b_1i)(a_2 + b_2i) = \\ &a_1a_2 + (a_1b_2 + a_2b_1)i + b_1b_2i^2 \end{aligned} \tag{2}$$

由于 $i \in [-1, 1]$, 则 $i^n \in [-1, 1]$ ($n = 1, 2, \dots$)。如,某电力系统故障需分 2 个阶段修复,第 1 阶段计划 8 h 完成,若顺利可提早 2 h,有意外需增加 2 h,即需时间 $8 + 2i$;如第 2 阶段需时 $5 + 1i$,则共需 $13 + 3i$ (引起所需时间变化的原因可能不同,但结果相同,即最少 10h,最多 16 h);如每小时需费用为 $1\,000 + 150i$,则所需全部费用为 $(13 + 3i)(1\,000 + 150i) = 13\,000 + 1\,950i + 3\,000i + 450i^2 = 13\,000 + 5\,400i$ (引起工期变化和所需费用变化的原因可能完全不同,但所需费用范围的分析结果却相同),最节约即取 $i = -1$ 时,需 7 600 元;最大费用即取 $i = 1$ 时,需 18 400 元,等等。因此,在不需要计及不确定性层次性时,为简化分析计算,可以有

$$i = i^2 = i^3 = \dots = i^n \quad n \rightarrow \infty$$

这一简化公式,据此,可以把式(2)改写成:

$\mu = \mu_1\mu_2 = a_1a_2 + (a_1b_2 + a_2b_1 + b_1b_2)i = a + bi$
说明两个联系数相乘,其积仍是一个联系数。

3 vague 集向联系数的转换

3.1 vague 的概念

定义 5 设 x 是给定论域 U 上的元素。 U 上的 vague 集 V 是指相关的一对隶属函数 $t_V(x)$ 和

$f_v(x), t_v(x) : U \rightarrow [0, 1]$ 和 $f_v(x) : U \rightarrow [0, 1]$ 满足 $0 \leq t_v(x) + f_v(x) \leq 1$, $t_v(x)$ 为 vague 集 V 的真隶属函数, 表示支持 $x \in V$ 的证据的隶属度下界; $f_v(x)$ 为 vague 集 V 的假隶属函数, 表示反对 $x \in V$ 的证据的隶属度下界, 如图 1 所示。下文将 vague 集 V 简记为 $(x, t_v(x), f_v(x))$ 或 $(t_v(x), f_v(x))$ 。

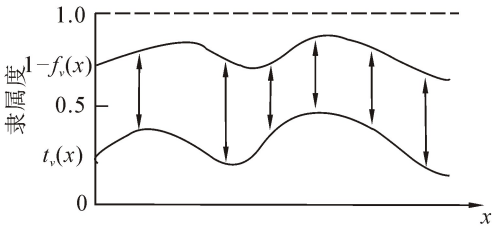


图 1 Vague 集

Fig.1 Vague set

以上是文献[7]对 vague 集的定义。

3.2 vague 集的不确定度

由于 vague 集 V 中 $0 \leq t_v(x) + f_v(x) \leq 1$, 可令

$$\pi_v(x) = 1 - t_v(x) - f_v(x) \tag{3}$$

称 $\pi_v(x)$ 为 vague 集 V 的不确定度。

3.3 vague 集的不确定性及其特征联系数

从定义 5 可见, vague 集 V 中的 $t_v(x)$ 与 $f_v(x)$ 是相对确定的, 可以组成相对确定的集合 $E = (t_v(x), f_v(x))$; $\pi_v(x)$ 是相对不确定的一个元素, 组成集合 $F = \pi_v(x)$ 。于是, 一个 vague 集 V 可以表示成一个集对 $V = (E, F)$ 或

$$V = ((t_v(x) + f_v(x)), \pi_v(x))$$

既然 vague 集 V 可以组成一个集对, 则这个集对的特征函数可以用 $\mu = a + bi + cj$ 或 $\mu = a + bi$ 的形式来表示。令 $t_v(x) = a$, $f_v(x) = c$, $\pi_v(x) = b$, 则 vague 集 V 就可以写成

$$\text{vague} V = a + bi + cj \tag{4}$$

结合式(3)得 $a + b + c = 1$, 故用 $a + bi$ 描述 vague 集 V 时也完全考虑了“反” $f_v(x) = c$ 的变化情况, 因此, 也可以把 $a + bi$ 作为 vague 集 V 的特征函数, 即

$$\text{vague} V = a + bi \quad i \in [-1, 1] \tag{5}$$

选用式(4)还是式(5)作为 vague 集 V 的特征联系数, 由实际问题定。在本文研究中, 拟用式(5), 称式(5)是一个 vague 集向联系数的转换公式, 其中:

$$a = t_v(x) \tag{6}$$

$$b = \pi_v(x) \tag{7}$$

4 联系数表示的黑启动决策模型

4.1 黑启动群决策的 vague 数据

4.1.1 黑启动方案的评价指标数据

这类指标通常有定量指标和定性指标两类, 黑

启动路径上变电站的个数、启动时间、被启动机组的容量等为定量指标, 启动路径上负荷的重要性等级、机组状态等为定性指标, 计算时, 需要把定性指标化为定量指标。又由于指标的量纲不一, 所以, 还需作规范化处理, 处理时要注意指标的属性。当然, 这些指标数据最后都用 vague 集表示, 设第 k 个指标 c 的指标数据用 $p(c_k)$ 表示。

4.1.2 指标权重 $W(c_k)$

指标权重反映该指标的重要程度, 通常用介于 0~1 之间的点实数表示, 但这里也用 vague 集表示。

另外, 黑启动方案评价中涉及到的指标一般情况下并不是相互独立的。如黑启动路径上变电站个数的增大会延长黑启动时间, 待启动机组的额定容量与启动电能相关等。为此, 用 $W(c_k, c_{k+1})$ 表示 2 个指标的关联权重, 用 $W(c_k, c_{k+1}, c_{k+2})$ 表示 3 个指标的关联权重, 依此类推。当然, 所有的权重数据也都用 vague 集表示。

4.1.3 专家人数与专家权重

黑启动方案选优与决策过程通常需要有多个专家参与, 但专家在决策过程中所起的作用有大小之分。因此, 需要根据发挥的作用大小给参与黑启动的专家分配一定的权重, 用 $W(E_j)$ 表示第 j 位专家的权重。但正如文献[7]所指, 专家对指标及指标数据的偏好受到其知识、经验、权力及社会地位等因素的影响, 相互之间也存在一定的关联性。2 个专家之间的关联权重用 $W(E_j, E_{j+1})$ 表示, 3 个专家之间的关联权重用 $W(E_j, E_{j+1}, E_{j+2})$ 表示, 依此类推。这些专家权重也用 vague 集表示。

4.2 群决策模型

4.2.1 基本模型

当黑启动方案评价指标数据 $p(c_k)$ ($k = 1, 2, \dots, n$) 都是越大越好型数据, 越重要的指标权重 $W(c_k)$ 也越大, 越重要的专家权重 $W(E_j)$ ($j = 1, 2, \dots, p$) 也越大时, 黑启动评价基本模型为

$$M(S_v) = \sum_{k=1}^n p_v(c_k) W(c_k) \tag{8}$$

其中

$$W(c_k) = \sum_{j=1}^p W(c_k)_{E_j} W(E_j) \tag{9}$$

S_v 代表第 v 个方案 ($v = 1, 2, \dots, m$), $M(S_v)$ 表示第 v 个方案的综合评价, $p_v(c_k)$ 表示第 v 个方案的指标 k ($k = 1, 2, \dots, n$) 的值, $W(c_k)$ 表示指标 c_k 的权重, $W(E_j)$ 表示专家权重。

m 个方案的优劣评价准则为: $M(S_v)$ 值大的优于 $M(S_v)$ 值小的。

4.2.2 关联模型

当计及指标与指标之间的关联性、专家与专家之间的关联性时,式(8)、(9)变为

$$M(S_v)=\sum_{k=1}^n p_v(c_k)W(c_k,c_{k+q},\cdots)$$
$$W(c_k)=\sum_{j=1}^p W(c_k,c_{k+q},\cdots)_{E_j}W(E_j,E_{j+1},\cdots)$$

于是,关键的问题就转化为如何从 p 个专家给出的关于指标 c_k 的关联权重,计算出该指标的权重,以满足式(8)的计算。

4.3 专家关联权重与指标关联权重的计算

设有 $p(p>0)$ 个相互有关联的专家对 n 个相互有关联的指标赋权,且专家的关联权重和指标的关联权重都用 vague 集表示。

1) 利用式(5)~(7)把各 vague 集转化为 $a+bi$ 形式的联系数。

2) 把 Q 个专家之间的关联权重 $W(E_1,E_2,\cdots,E_Q)$ 一一折算给各个关联专家,即得平均关联权重 $\bar{W}(E_1,E_2,\cdots,E_Q)$ 的计算公式:

$$\bar{W}(E_1,E_2,\cdots,E_Q)=\frac{1}{Q}W(E_1,E_2,\cdots,E_Q)$$

因为根据集合论知识,一个有 p 个专家组成的集合,其子集个数为 2^p 个,关联性的子集有 $2^p/2$ 个。为了计算方便并便于比较待评方案的优劣,必须把这 $2^p/2$ 个关联权重折算为某个指标在非关联意义下的权重(本文称为独立权重)。由于缺乏关联程度的具体信息(当专家 E_1 对专家 E_2 的关联权值是 R 时, E_2 对 E_1 的关联权值不一定是 R),只能作平均分配,即假定所谓关联是相互之间的一种作用,这种相互作用大小相等,作用在相互关联的专家之间,所以作“平均分配”。第 1 次平均是把给出的每一个

关于指标的关联权重“平均分摊”给相关联的各个指标,第 2 次平均是指 $2^p/2$ 个被平均分摊后的关联权重加和后再平均(算术平均)。

3) 根据上述分析得出每个专家共 $2^p/2$ 个平均关联权重的平均值:

$$W(E_j)=\frac{2}{2^p}\sum_{G=1}^{\frac{2^p}{2}}\overline{W_G}(E_1,E_2,\cdots,E_Q),G=1,2,\cdots,\frac{2^p}{2}$$

4) 用类似于前 3 步的方法计算各指标的(独立)权重。

4.4 不确定性分析

把给出的各指标值 vague 集,参照式(5)~(7)改写成 $a+bi$ 形式的联系数,并利用式(8)算得各方案的综合评价联系数;再令联系数中的 $i=-1,-0.5,0,0.5,1$ 等典型值,得到各方案的评价值在不同情况下的变动趋势;根据变动趋势,决出最优方案,并给出被评价诸方案的优劣排序。

很明显,不确定系数 i 是联系数的关键所在,它形式上是一个数,但同时又是不确定性系统的一个代号,需要结合问题的实际作系统分析;但是当问题本身没有提供不确定性系统的具体信息时,只能根据 i 的定义域作纯数学意义上的取值分析,借此检验黑启动决策结论的可靠性和客观合理性。

5 实例

为便于比较,此处引用文献[7]中的例子说明前述方法的应用。某地区电力系统事故后需要黑启动,共有 6 个待评价的方案,方案的评价指标数为 4 个,各方案在各指标上的 vague 集数据已经规范化处理成越大越好型数据,见表 1。

表 1 各个候选黑启动方案的指标值

Table 1 The index value of each candidate in black-start

方案	机组状态 c_1	爬坡速率 c_2	机组容量 c_3	变电站个数 c_4
1	(0.30,0.50)	(0.96,0.04)	(1.00,0.00)	(0.20,0.80)
2	(0.60,0.17)	(0.53,0.47)	(0.67,0.33)	(0.25,0.75)
3	(0.45,0.33)	(1.00,0.00)	(0.42,0.58)	(0.33,0.67)
4	(0.30,0.50)	(0.50,0.50)	(0.42,0.58)	(0.33,0.67)
5	(0.60,0.17)	(0.27,0.73)	(0.42,0.58)	(1.00,0.00)
6	(0.90,0.00)	(0.91,0.09)	(0.67,0.33)	(0.25,0.75)

参与黑启动决策专家共 3 人 $E_j=(e_1,e_2,e_3)$, 权重、关联权重分别为

$$W(\{e_1\})=(0.30,0.60)$$
$$W(\{e_2\})=(0.40,0.50)$$
$$W(\{e_3\})=(0.40,0.30)$$
$$W(\{e_1,e_2\})=(0.60,0.20)$$
$$W(\{e_1,e_3\})=(0.70,0.10)$$

$$W(\{e_2,e_3\})=(0.70,0.20)$$
$$W(\{e_1,e_2,e_3\})=(1.00,0.00)$$

专家 e_1 给出的各指标权重、关联权重如下:

$$W(\{c_1\})=(0.10,0.65)$$
$$W(\{c_2\})=(0.25,0.55)$$
$$W(\{c_3\})=(0.20,0.50)$$
$$W(\{c_4\})=(0.20,0.70)$$

$$W(\{c_1, c_2\}) = (0.30, 0.40)$$
$$W(\{c_2, c_3\}) = (0.50, 0.25)$$
$$W(\{c_2, c_4\}) = (0.45, 0.35)$$
$$W(\{c_3, c_4\}) = (0.40, 0.30)$$
$$W(\{c_1, c_3\}) = (0.30, 0.30)$$
$$W(\{c_1, c_4\}) = (0.30, 0.40)$$
$$W(\{c_2, c_3, c_4\}) = (0.85, 0.10)$$
$$W(\{c_1, c_3, c_4\}) = (0.70, 0.20)$$
$$W(\{c_1, c_2, c_4\}) = (0.65, 0.30)$$
$$W(\{c_1, c_2, c_3\}) = (0.75, 0.20)$$
$$W(\{c_1, c_2, c_3, c_4\}) = (1.00, 0.00)$$

专家 e_2 、 e_3 给出的各指标权重、关联权重数据见附录。计算和决策过程如下：

1) 根据式(5)~(7)计算 3 位专家权重如表 2。

表 3 专家 e_1 给出的黑启动指标关联权重联系数

Table 3 The black-start index weight coefficient connection number given by expert e_1				
专家	指标 c_1	指标 c_2	指标 c_3	指标 c_4
e_1	$0.1 + 0.25i$	$0.25 + 0.20i$	$0.2 + 0.3i$	$0.2 + 0.1i$
	$\frac{1}{2}(0.3 + 0.3i)$	$\frac{1}{2}(0.3 + 0.3i)$	$\frac{1}{2}(0.5 + 0.25i)$	$\frac{1}{2}(0.45 + 0.2i)$
	$\frac{1}{2}(0.3 + 0.4i)$	$\frac{1}{2}(0.5 + 0.25i)$	$\frac{1}{2}(0.4 + 0.3i)$	$\frac{1}{2}(0.4 + 0.3i)$
	$\frac{1}{2}(0.3 + 0.3i)$	$\frac{1}{2}(0.45 + 0.2i)$	$\frac{1}{2}(0.3 + 0.4i)$	$\frac{1}{2}(0.3 + 0.3i)$
	$\frac{1}{3}(0.70 + 0.10i)$	$\frac{1}{3}(0.85 + 0.05i)$	$\frac{1}{3}(0.85 + 0.05i)$	$\frac{1}{3}(0.85 + 0.05i)$
	$\frac{1}{3}(0.65 + 0.05i)$	$\frac{1}{3}(0.65 + 0.05i)$	$\frac{1}{3}(0.70 + 0.10i)$	$\frac{1}{3}(0.70 + 0.10i)$
	$\frac{1}{3}(0.75 + 0.05i)$	$\frac{1}{3}(0.75 + 0.05i)$	$\frac{1}{3}(0.75 + 0.05i)$	$\frac{1}{3}(0.65 + 0.05i)$
	$\frac{1}{4}(1 + 0i)$	$\frac{1}{4}(1 + 0i)$	$\frac{1}{4}(1 + 0i)$	$\frac{1}{4}(1 + 0i)$
平均权重	$(0.1875+0.1021i) \times$	$(0.2344+0.0783i) \times$	$(0.227+0.1053i) \times$	$(0.2291+0.0709i) \times$
联系数	$(0.32075+0.075i) =$	$(0.32075+0.075i) =$	$(0.32075+0.075i) =$	$(0.32075+0.075i) =$
	$0.0601+0.0546i$	$0.0752+0.0486i$	$0.0728+0.0587i$	$0.0735+0.0452i$

专家 e_2 、 e_3 给出的黑启动指标权重以及计及专家权重后的各指标权重见附录。

由此得出,把各专家权重计入各指标的权重后相加得到各指标的权重联系数如下：

$$W(c_1) = 0.2034 + 0.1877i$$
$$W(c_2) = 0.2116 + 0.1732i$$
$$W(c_3) = 0.2144 + 0.1797i$$
$$W(c_4) = 0.2255 + 0.1702i$$

3) 把表 1 中的各 vague 集数据改写成联系数,得表 4。

表 2 黑启动专家的权重 $W(e_j)$ 计算

Table 2 The weight calculation of black-start expert

	$W(e_1)$	$W(e_2)$	$W(e_3)$
	$0.3 + 0.1i$	$0.4 + 0.1i$	$0.4 + 0.3i$
	$\frac{1}{2}(0.6 + 0.2i)$	$\frac{1}{2}(0.6 + 0.2i)$	$\frac{1}{2}(0.7 + 0.2i)$
	$\frac{1}{2}(0.7 + 0.2i)$	$\frac{1}{2}(0.7 + 0.1i)$	$\frac{1}{2}(0.7 + 0.1i)$
	$\frac{1}{3}(1 + 0i)$	$\frac{1}{3}(1 + 0i)$	$\frac{1}{3}(1 + 0i)$
平均	$0.32075 + 0.075i$	$0.34575 + 0.0625i$	$0.35825 + 0.1125i$

2) 根据式(5)~(7)计算专家 e_1 给出的黑启动指标权重及计及专家权重后的各指标权重,见表 3。

表 4 用联系数表示的各个候选黑启动方案指标值

Table 4 Every candidate black-start scheme index value expressed by connection number

方案	c_1	c_2	c_3	c_4
1	$0.30 + 0.20i$	$0.96 + 0i$	$1 + 0i$	$0.2 + 0i$
2	$0.60 + 0.23i$	$0.53 + 0i$	$0.67 + 0i$	$0.25 + 0i$
3	$0.45 + 0.22i$	$1 + 0i$	$0.42 + 0i$	$0.33 + 0i$
4	$0.30 + 0.20i$	$0.50 + 0i$	$0.42 + 0i$	$0.33 + 0i$
5	$0.60 + 0.23i$	$0.27 + 0i$	$0.42 + 0i$	$1 + 0i$
6	$0.90 + 0.10i$	$0.91 + 0i$	$0.67 + 0i$	$0.25 + 0i$

4) 利用表 4,并结合第 2 步得到的各指标权重,采用式(8)算得各方案的综合评价值联系数为

$$M(s_1) = 0.523\ 62 + 0.514\ 542i$$
$$M(s_2) = 0.434\ 211 + 0.457\ 318i$$
$$M(s_3) = 0.467\ 593 + 0.475\ 347i$$
$$M(s_4) = 0.331\ 283 + 0.352\ 77i$$
$$M(s_5) = 0.494\ 72 + 0.495\ 011i$$
$$M(s_6) = 0.575\ 639 + 0.528\ 601i$$

5) 对各方案的综合评价值系数作不确定性计算分析,得表 5。

由表 5 知,在对各方案综合评价系数中的 i 作同步取值时,方案的优劣排序为

方案 6>方案 1>方案 5>方案 3>方案 2>方案 4

只有 $i = -1$ 时的第 5、6 优方案排名有了变化,但由于实际应用时,一般只有最优方案和最优方案的备用方案才有实际被采用的可能,所以该变化对

实际不产生作用。
与文献[7]给出的结果(方案 6>方案 2>方案 5>方案 3>方案 1>方案 4)对照,最优方案、第 3 优方案、最差方案($i = -1$ 时不同)相同,但在第 2 优方案是方案 1 还是方案 2 上存在差异。
从表 5 可知,当 $M(s_1)$ 与 $M(s_2)$ 中的 i 同步取值时,总有方案 1 优于方案 2;只有当 $M(s_1)$ 中的 i 取较小的值(如 $i = -0.5$),而同时又让 $M(s_2)$ 中的 i 取较大的值(如 $i = 0$)时,会导致 $M(s_2) > M(s_1)$,即方案 2 优于方案 1。由此提示:在各方案综合评价系数中的 i 作不同步取值时,有可能引起各方案综合评价值大小排序的变化,为此需要就各方案综合评价系数中的 i 作不同步取值时各方案排序问题展开进一步的讨论和分析。

表 5 在不确定条件下的各方案综合评价值
Table 5 Comprehensive evaluation result of each scheme under the condition of uncertainty

	$i = -1$	$i = -0.5$	$i = 0$	$i = 0.5$	$i = 1$
$M(s_1)$	0.0091②	0.2663②	0.5237②	0.7809②	1.0382②
$M(s_2)$	-0.0231⑥	0.2056⑤	0.4342⑤	0.6629⑤	0.8915⑤
$M(s_3)$	-0.0078④	0.2299④	0.4676④	0.7053④	0.9429④
$M(s_4)$	-0.0215⑤	0.1549⑥	0.3313⑥	0.5077⑥	0.6840⑥
$M(s_5)$	-0.0002③	0.2472③	0.4947③	0.7422③	0.9897③
$M(s_6)$	0.0470①	0.3113①	0.5756①	0.8299①	1.1042①

注:小圆圈内数字为综合评价值从大到小的排序号。

为了分析 i 不同步取值时方案排序的变化情况,把 $i = -1$ 和 $i = 1$ 这两种极端情况下的所有 64 种

排序进行统计,并按排名先后分别赋以 6、5、4、3、2、1 的权值,求和得表 6。

表 6 两种极端情况下(i 不同步取值) 各方案排名统计

Table 6 The rank statistics of each scheme under the two extreme cases (the value of i is not synchronized)

方案	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	总分
1	16	18	8	12	8	2	272
2	2	8	12	8	3	31	161
3	4	12	12	12	16	8	208
4	1	5	10	10	20	18	159
5	8	16	12	12	12	4	240
6	33	5	10	10	5	1	304
Σ	64	64	64	64	64	64	1344

总分最高的为最优方案,最低的为最差方案。可见,在 i 不同步取值情况下所得的排序结果与同步情况下所得结果一致,即:方案 6>方案 1>方案 5>方案 3>方案 2>方案 4。

6 结束语

当 vague 集中的不确定度 $\pi_v(x) \neq 0$ 时,需要对 vague 集的不确定性展开分析,为此,本文给出把

vague 集转化为集对分析系数,借助系数中 i 的不同取值展开不确定性分析的思路,并应用于一个黑启动 vague 集决策实例,不仅给出了更为客观合理的黑启动方案排序,也为利用 vague 集数据开展不确定性分析提供了一种可行的途径;此外,文章还给出了专家关联权重和指标关联权重向专家独立权重与指标独立权重过渡的计算方法,对其他领域中的类似决策也有一定参考作用。

参考文献:

- [1] LINDENMEYER D, DOMMEL H W, ADIBI M M. Power system restoration—a bibliographical survey[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2001, 23(3): 219-227.
- [2] THALE S, AGARWAL V. A smart control strategy for the black start of a microgrid based on PV and other auxiliary sources under islanded condition[C]//37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. [S.1]: IEEE, 2011: 2454-2459.
- [3] ADIBI M M, KAFKA L R J, MILANICZ D P. Expert system requirements for power system restoration[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(3): 1592-1598.
- [4] 林济铿, 蒋越梅, 岳顺民, 等. 基于 DEA/AHP 模型的电力系统黑启动有效方案评估[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(15): 65-69.
LIN Jikeng, JIANG Yuemei, YUE Shunmin, et al. Assessment of effective schemes for power system blackstart based on EDA/AHP[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(15): 65-69.
- [5] ISLAM S, CHOWDHURY N. A case-base windows graphic package for the education and training of power system restoration[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(2): 181-187.
- [6] 刘伟佳, 林振智, 文福拴, 等. 基于直觉模糊距离的黑启动群体决策一致性分析与优化[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10): 1-6.
LIU Weijia, LIN Zhenzhi, WEN Fushuan, et al. Consistency analysis and optimization of black-start decision consistency based on intuitionistic fuzzy distance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(10): 1-6.
- [7] 曾顺奇, 林振智, 文福拴, 等. 基于 vague 集理论的黑启动决策模型与方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(2): 18-22.
ZENG Shunqi, LIN Zhenzhi, WEN Fushuan, et al. The model and method of black-start decision based on the theory of vague set[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(2): 18-22.
- [8] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2000: 1-18.
- [9] 赵克勤. 二元联系数 $A+Bi$ 的理论基础和基本算法及在人工智能中的应用[J]. 智能系统学报, 2008, 3(6): 16-22.
- [10] ZHAO Keqin. The two element connection number $A+Bi$ basic theory and algorithm and its application in artificial intelligence[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2008, 3(6): 16-22.
- [11] 金华征, 程浩忠, 杨晓梅, 等. 基于联系数模型的电网灵活规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 43(12): 16-20.
JIN Huazheng, CHENG Haozhong, YANG Xiaomei, et al. The method of transmission network flexible planning based on the connection number model[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 43(12): 16-20.
- [12] 万官泉, 张尧, 汪穗峰. 基于联系数的配电系统可靠性不确定性评估[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(4): 31-34.
WAN Guanquan, ZHANG Yao, WANG Suifeng. Uncertainty evaluation for distribution system reliability based on connection number[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(4): 31-34.
- [13] 陈卫东, 肖先勇, 陈礼频, 等. 考虑可靠性参数影响的电压暂降频次联系数评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 47(31): 35-42.
CHEN Weidong, XIAO Xianyong, CHEN Lipin, et al. Connection number evaluation method of the voltage sag frequency considered reliability parameters affection[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 47(31): 35-42.
- [14] 安磊, 王绵斌, 谭忠富. 基于集对故障树法的输变电工程风险评估模型[J]. 华东电力, 2011, 40(1): 12-18.
AN Lei, WANG Mianbin, TAN Zhongfu. The assessment model of power transmission project risk based on fault tree analysis method[J]. East China Electric Power, 2011, 40(1): 12-18.
- [15] 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价[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 81-85.
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.
- [16] 刘俊华, 罗隆福, 张志文, 等. 一种考虑排序稳定分析的电能质量综合评估新方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 70-76.
LIU Junhua, LUO Longfu, ZHANG Zhiwen, et al. A new method for power quality comprehensive evaluation considering the analysis of sequence stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 70-76.
- [17] 刘秀梅, 赵克勤. 基于集对分析联系数的信息不完全直觉模糊多属性决策[J]. 数学的实践与认识, 2010, 40(1): 67-77.
LIU Xiumei, ZHAO Keqin. Multiple attribute decision making with the incomplete information and intuitionistic fuzzy number based on the connection number of set-pair analysis[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2010, 40(1): 67-77.
- [18] BUSTINCE H, BURILLO P. vague sets are intuitionistic fuzzy sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1996, 79(3): 403-405.
- [19] 赵克勤. 集对分析的不确定性系统理论在人工智能中的应用[J]. 智能系统学报, 2006, 1(2): 18-25.
ZHAO Keqin. Application in artificial intelligence of uncertainty system theory of set-pair analysis[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2006, 1(2): 18-25.

tions on Intelligent Systems, 2006, 1(2): 18-25.

[20] 赵克勤.基于集对分析的不确定性多属性决策模型与算法[J].智能系统学报,2010,5(1):41-50.

ZHAO Keqin. Application in artificial intelligence of uncertainty system theory of set-pair analysis[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2010, 5(1): 41-50.

作者简介:



赵玉铃,女,1963 年生,副教授,主要研究方向为电子技术课程教学及建设、电气技术应用、配电网安全运行,发表学术论文 20 余篇,出版教材 4 部。



张廉,男,1965 年生,副教授,主要研究方向为工程力学、电力传动的计算机控制与仿真,发表学术论文 10 余篇。

附录 专家 e_2 与专家 e_3 给出的指标关联权重的计算

专家 e_2 给出的指标权重如下:

$W(\{c_1\}) = (0.15, 0.7)$
 $W(\{c_2\}) = (0.2, 0.7)$
 $W(\{c_3\}) = (0.15, 0.7)$
 $W(\{c_4\}) = (0.25, 0.55)$
 $W(\{c_1, c_2\}) = (0.3, 0.5)$

$W(\{c_2, c_3\}) = (0.37, 0.43)$
 $W(\{c_2, c_4\}) = (0.5, 0.3)$
 $W(\{c_3, c_4\}) = (0.45, 0.3)$
 $W(\{c_1, c_3\}) = (0.35, 0.45)$
 $W(\{c_1, c_4\}) = (0.45, 0.30)$
 $W(\{c_2, c_3, c_4\}) = (0.75, 0.10)$
 $W(\{c_1, c_3, c_4\}) = (0.75, 0.10)$
 $W(\{c_1, c_2, c_4\}) = (0.68, 0.15)$
 $W(\{c_1, c_2, c_3\}) = (0.55, 0.25)$
 $W(\{c_1, c_2, c_3, c_4\}) = (1.00, 0.00)$
专家 e_3 给出的指标权重如下:
 $W(\{c_1\}) = (0.2, 0.5)$
 $W(\{c_2\}) = (0.1, 0.65)$
 $W(\{c_3\}) = (0.15, 0.7)$
 $W(\{c_4\}) = (0.15, 0.7)$
 $W(\{c_1, c_2\}) = (0.35, 0.3)$
 $W(\{c_2, c_3\}) = (0.3, 0.4)$
 $W(\{c_2, c_4\}) = (0.3, 0.4)$
 $W(\{c_3, c_4\}) = (0.35, 0.4)$
 $W(\{c_1, c_3\}) = (0.42, 0.28)$
 $W(\{c_1, c_4\}) = (0.42, 0.28)$
 $W(\{c_2, c_3, c_4\}) = (0.6, 0.05)$
 $W(\{c_1, c_3, c_4\}) = (0.65, 0.05)$
 $W(\{c_1, c_2, c_4\}) = (0.55, 0.15)$
 $W(\{c_1, c_2, c_3\}) = (0.6, 0.05)$
 $W(\{c_1, c_2, c_3, c_4\}) = (1.00, 0.00)$

专家 e_2 与专家 e_3 给出的指标关联权重联系数如附表。

专家 e_2 给出的黑启动指标关联权重联系数

专家	指标 c_1	指标 c_2	指标 c_3	指标 c_4
e_2	$0.15 + 0.15i$	$0.2 + 0.1i$	$0.15 + 0.15i$	$0.25 + 0.2i$
	$\frac{1}{2}(0.3 + 0.2i)$	$\frac{1}{2}(0.3 + 0.2i)$	$\frac{1}{2}(0.37 + 0.2i)$	$\frac{1}{2}(0.5 + 0.2i)$
	$\frac{1}{2}(0.35 + 0.2i)$	$\frac{1}{2}(0.37 + 0.2i)$	$\frac{1}{2}(0.45 + 0.25i)$	$\frac{1}{2}(0.45 + 0.25i)$
	$\frac{1}{2}(0.45 + 0.25i)$	$\frac{1}{2}(0.5 + 0.2i)$	$\frac{1}{2}(0.35 + 0.2i)$	$\frac{1}{2}(0.45 + 0.25i)$
	$\frac{1}{3}(0.75 + 0.15i)$	$\frac{1}{3}(0.75 + 0.15i)$	$\frac{1}{3}(0.75 + 0.15i)$	$\frac{1}{3}(0.75 + 0.15i)$
	$\frac{1}{3}(0.68 + 0.17i)$	$\frac{1}{3}(0.68 + 0.17i)$	$\frac{1}{3}(0.75 + 0.15i)$	$\frac{1}{3}(0.75 + 0.15i)$
	$\frac{1}{3}(0.55 + 0.2i)$	$\frac{1}{3}(0.55 + 0.2i)$	$\frac{1}{3}(0.55 + 0.2i)$	$\frac{1}{3}(0.68 + 0.17i)$
	$\frac{1}{4}(1 + 0i)$	$\frac{1}{4}(1 + 0i)$	$\frac{1}{4}(1 + 0i)$	$\frac{1}{4}(1 + 0i)$
平均权重 联系数	$(0.2013 + 0.0810i) \times$ $(0.34575 + 0.0625i) =$ $0.0696 + 0.0457i$	$(0.2119 + 0.0716i) \times$ $(0.34575 + 0.0625i) =$ $0.0733 + 0.0425i$	$(0.2085 + 0.0802i) \times$ $(0.34575 + 0.0625i) =$ $0.0721 + 0.0457i$	$(0.2409 + 0.0883i) \times$ $(0.34575 + 0.0625i) =$ $0.0833 + 0.0510i$

专家 e_3 给出的黑启动指标关联权重联系数

专家	指标 c_1	指标 c_2	指标 c_3	指标 c_4
e_3	$0.2 + 0.3i$	$0.1 + 0.25i$	$0.15 + 0.15i$	$0.15 + 0.15i$
	$\frac{1}{2}(0.35 + 0.35i)$	$\frac{1}{2}(0.35 + 0.35i)$	$\frac{1}{2}(0.3 + 0.3i)$	$\frac{1}{2}(0.3 + 0.3i)$
	$\frac{1}{2}(0.42 + 0.3i)$	$\frac{1}{2}(0.3 + 0.3i)$	$\frac{1}{2}(0.35 + 0.25i)$	$\frac{1}{2}(0.35 + 0.25i)$
	$\frac{1}{2}(0.42 + 0.3i)$	$\frac{1}{2}(0.3 + 0.3i)$	$\frac{1}{2}(0.42 + 0.3i)$	$\frac{1}{2}(0.42 + 0.3i)$
	$\frac{1}{3}(0.65 + 0.3i)$	$\frac{1}{3}(0.6 + 0.35i)$	$\frac{1}{3}(0.6 + 0.35i)$	$\frac{1}{3}(0.6 + 0.35i)$
	$\frac{1}{3}(0.55 + 0.3i)$	$\frac{1}{3}(0.55 + 0.3i)$	$\frac{1}{3}(0.65 + 0.3i)$	$\frac{1}{3}(0.65 + 0.3i)$
	$\frac{1}{3}(0.6 + 0.35i)$	$\frac{1}{3}(0.60 + 0.35i)$	$\frac{1}{3}(0.60 + 0.35i)$	$\frac{1}{3}(0.55 + 0.3i)$
	$\frac{1}{4}(1 + 0i)$	$\frac{1}{4}(1 + 0i)$	$\frac{1}{4}(1 + 0i)$	$\frac{1}{4}(1 + 0i)$
平均权重 联系数	$(0.2056 + 0.1365i) \times$ $(0.35825 + 0.1125i) =$ $0.0737 + 0.0874i$	$(0.1764 + 0.1324i) \times$ $(0.35825 + 0.1125i) =$ $0.0631 + 0.0821i$	$(0.194 + 0.113i) \times$ $(0.35825 + 0.1125i) =$ $0.0695 + 0.0753i$	$(0.1910 + 0.1115i) \times$ $(0.35825 + 0.1125i) =$ $0.0687 + 0.0740i$

第 5 届智能科学与大数据工程国际会议

The 2015 International Conference on Intelligence Science
and Big Data Engineering

The 2015 International Conference on Intelligence Science and Big Data Engineering aims at a collective venue for introducing world frontier researchers to China and for introducing researchers of an ever developing and huge population of Chinese colleagues to international communities. This meeting is scheduled as the fifth of a serial annual meetings that promotes academic exchange of researches on various areas of intelligence science and intelligent data engineering in China and abroad, and will be held in Suzhou.

IScIDE 2015 is intended to have a broad scope, including information theoretic and Bayesian approaches, probabilistic graphical models, Big data analysis, neural networks and neuro-informatics, bioinformatics and computational biology, as well as advances in fundamental pattern recognition techniques relevant to image processing, computer vision and machine learning. Submissions will be rigorously reviewed, and should clearly make the case for a documented improvement over the existing state of the art. Experimental results for contributions in established areas such as speech, face, iris and gait are encouraged to use the largest and most challenging existing publicly available datasets.

The submission covers various topics that include, but are not limited to: (1) Information theoretic and Bayesian approaches; (2) Probabilistic graphical models; (3) Neural networks and neuro-informatics; (4) Bioinformatics and computational biology; (5) Pattern recognition and computer vision; (6) Signal processing and image processing; (7) Machine learning and computational intelligence; (8) Data mining and information retrieval; (9) Speech recognition and natural language processing; (10) Big data analysis.

Contact Us
E-mail: xfxi@mail.usts.edu.cn
Website: http://iscide2015.usts.edu.cn/