

电气设备维修决策中的排序方法研究

黄瑞萍¹, 夏莹²

(1. 昆明供电局, 昆明 650000; 2. 重庆大学 电气工程学院, 重庆 400044)

摘 要:针对电气设备在进行以可靠性为中心的维修时需要评判电气设备的重要性,且评判因素具有模糊性和灰色性的特点,本文在确定影响其重要性的主要因素的基础上,提出了一种基于灰色模糊数学的电气设备重要性分析方法,并以断路器为例,建立了断路器重要性评价体系,通过模糊关系来描述评判因素与重要性等级间的关系、以灰度来表征模糊关系的不可信程度,并进行综合判断。实例表明:该方法行之有效,评判结果可为下一步的维修决策提供科学依据。

关键词:以可靠性为中心的维修;重要性分析;灰色模糊综合评判;断路器

中图分类号: TM762 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-980X(2009)10-0069-05

随着电力工业的发展,传统的计划检修逐渐暴露出“维修过剩”以及“维修不足”等弊端,而状态检修又存在注重设备状况、对人员及成本的制约作用考虑不够等缺点。针对以上问题,近年来逐渐兴起了一种新的维修方式——以可靠性为中心的维修^[1-2](reliability-centered maintenance, RCM),它是一种以设备的可靠性和故障后果作为制定维修策略的主要依据、以最小维修停机损失和最小维修资源消耗为目标的维修策略。

电气设备的正常工作是保证电力系统稳定持续运行的重要因素,对电气设备进行以可靠性为中心的维修,就是确定电气设备的当前状态 c 和电气设备在所有设备中的相对重要性 i ,然后基于 c 和 i 的关系图制定检修计划^[3]。其中电气设备状态的确定已经趋于成熟,而电气设备重要性的判断仍然在发展阶段。目前电气设备重要性的评判方法大多采用直接评判法^[4]和模糊综合评判方法^[5]。就第一种方法而言,如果信息存在不确定就不能进行判断。而第二种方法虽然考虑了在实际中很难建立电气设备重要性和评判因素的定量关系,也就是说评判因素信息客观上具有模糊性的特点,但是没有考虑信息的灰色性,即设备在实际运行中难以取得评判所需的全部信息,也就更难据此确定其未来维修的先后次序,即信息量存在不充分性。因此,本文在确定影响电气设备重要性的主要因素时,以断路器为例,提出了一种基于灰色模糊综合评判的断路器重要性评判方法。

1 灰色模糊数学基础^[6-7]

设 $\bar{A}$ 为空间 $X = \{x\}$ 上的模糊子集,若对于 $\bar{A}$ 的隶属度 $\mu_A(x)$ 是 $[0, 1]$ 上的一个灰数,其点灰度为 $v_A(x)$,则称 $\bar{A}$ 为 X 上的灰色模糊子集或灰色模糊集合,简称 GF 集,记为 $\bar{A}_{\odot}$,即

$$\bar{A}_{\odot} = \{(x, \mu_A(x), v_A(x)) \mid x \in X\}。 \quad (1)$$

用“集偶”表示,则 $\bar{A}_{\odot} = (\bar{A}, A_{\odot})$,其中 $\bar{A} = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\}$, $A_{\odot} = \{(x, v_A(x)) \mid v_A(x) > 0, x \in X\}$ 。

$\bar{A}$ 、 $A_{\odot}$ 分别称为 $\bar{A}_{\odot}$ 的模糊部分(简称模部)和灰色部分(简称灰部),灰色模糊集合是灰色集合和模糊集合的推广。

对于给定空间 $X = \{x\}$ 、 $Y = \{y\}$,若 X 与 Y 对模糊关系 $\tilde{R}$ 的隶属度 $\mu_R(x, y)$ 有点灰度 $v_R(x, y)$,则称直积空间 $X \times Y$ 中的灰色模糊集合 $\tilde{R}_{\odot} = \{((x, y), \mu_R(x, y), v_R(x, y)) \mid x \in X, y \in Y\}$ 为 $X \times Y$ 上的灰色模糊关系,可用灰色模糊矩阵的形式表示如下:

$$\tilde{R}_{\odot} = \begin{bmatrix} (\mu_{11}, v_{11}) & \dots & (\mu_{1n}, v_{1n}) \\ \dots & \dots & \dots \\ (\mu_{m1}, v_{m1}) & \dots & (\mu_{mn}, v_{mn}) \end{bmatrix} \\ = [(\mu_{ij}, v_{ij})]_{mn}。 \quad (2)$$

灰色模糊关系同样可以用“集偶”表示为 $\tilde{R}_{\odot} = (\tilde{R}, R_{\odot})$,其中 $\tilde{R} = \{((x, y), \mu_R(x, y)) \mid x \in X, y \in Y\}$ 称为 $X \times Y$ 上的模糊关系, $R_{\odot} = \{((x, y), v_R(x, y)) \mid x \in X, y \in Y\}$ 称为 $X \times Y$ 上的灰色关

收稿日期:2009-08-02

作者简介:黄瑞萍(1960—),女,云南昆明人,昆明供电局助理工程师,研究方向:电力系统运行管理;夏莹(1987—),女,安徽芜湖人,重庆大学电气工程学院硕士研究生,研究方向:电力系统。

系。

设有灰色模糊矩阵 $\bar{W} = (w_{ij}, v_{ij})_{n \times s}$ 和 $\tilde{R} = (\mu_{ij}, \nu_{ij})_{s \times m}$, $\bar{W}$ 与 $\tilde{R}$ 的合成结果为 $\tilde{B}$, 有

$$\tilde{B} = \bar{W} \cdot \tilde{R} = (\bar{W} \cdot \tilde{R}, W \cdot R) = \left[\left(+_{i=1}^n F(w_i^A \cdot \mu_{ij}^R), \cdot_{i=1}^m G(v_i^A + G w_{ij}^R) \right) \right]_{n \times m} \quad (3)$$

式(3)中: $\cdot F$ 、 $+ F$ 、 $\cdot G$ 、 $+ G$ 分别为模部和灰部广义的“与”和“或”算子。

2 电气设备重要性的灰色模糊综合评判模型

电气设备重要性评判系统属于多因素的灰色模糊决策系统,因此采用灰色模糊综合评判可使评判结果更加客观可信。确定评判模型首先要建立与电气设备重要性相关的因素集,获取其实际运行参数;再通过经典的隶属度函数来表征因素集与评判集之间的模糊关系,通过建立灰色关系矩阵来衡量各因素所能收集到的信息量的不同;利用灰色模糊综合评判进行电气设备重要性排序。下面以断路器为例建立重要性评判模型。

2.1 确立断路器重要性评判因素

因为断路器的种类繁多,并且它适用于不同电

压等级时具有不同的特性,所以本文综合考虑文献[5]、[8]、[9],得出与断路器重要性有关的因素,如下:电压等级;失效率;可靠率;停电时间;停电决定因素;断路器位置;负荷类型;对环境的危害程度;维修费用;停电损失;用户期望;总线结构。考虑到一些因素间具有较强的关联性,为减小分析的复杂性,本文将可靠率并入失效率进行考虑,将停电决定因素并入停电损失考虑,并利用层次分析(AHP)方法的思想,对上述因素按属性进行分类,建立影响因素的递阶层次关系。通过以上分析得到三大类9大因素(见表1):可靠性因素 U_1 (电压等级 u_{11} ; 失效率 u_{12} ; 停电时间 u_{13}); 安全性因素 U_2 (断路器位置 u_{21} ; 负荷类型 u_{22} ; 对环境的危害程度 u_{23}); 经济性因素 U_3 (维修费用 u_{31} ; 停电损失 u_{32} ; 用户期望 u_{33})。

2.2 建立表示评判结果等级的评判集

评判集的等级划分需视实际情况而定,太粗会影响评判精度,太细则将增加运算时间。本文根据实际情况将设备的重要性划分为4个等级,即 $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4\}$, V_1 对应很重要, V_2 对应重要, V_3 对应一般, V_4 对应不重要。

表 1 重要性评判因素的评判标准

二级因素	一级因素	很重要(V_1)	重要(V_2)	一般(V_3)	不重要(V_4)
可靠性因素 U_1	压等级/kV (u_{11})	220	110	35	≤ 10
	失效率/次/台年 (u_{12})	0.06	0.03~0.08	0.01~0.06	≤ 0.03
	停电时间/小时 (u_{13})	> 8	3~8	1~5	≤ 3
安全性因素 U_2	断路器位置 (u_{21})	线路出口(8)	主变三侧(6)	旁路(4)	母联或分段(2)
	负荷类型 (u_{22})	重要工业用户(8)	特殊用户(6)	混合型用户(4)	家庭用户(2)
	对环境的危害程度 (u_{23})	很大(8)	大(6)	小(4)	很小(2)
经济性因素 U_3	维修费用/元 (u_{31})	3500	1500~10000	800~3500	≤ 1500
	停电损失 (u_{32})	很大(8)	大(6)	较大(4)	小(2)
	用户期望 (u_{33})	很高(8)	高(6)	一般(4)	低(2)

2.3 建立灰色模糊关系矩阵

灰色模糊关系矩阵可视为因素集与评判集之间的灰色模糊关系,根据某一因素给出评判对象对评判级中各元素的隶属度,并根据信息充分程度给出相应的灰度。这里只考虑一级因素的情况。

各元素的隶属函数可以选取各种不同的形状,如三角形、梯形、钟型、棒型等。因为三角形的隶属函数简单、容易计算,并且与其他较复杂的隶属函数得出的结果差别较小,故被广泛采用^[10]。本文将使用三角形的隶属函数来表示因素集中各因素的隶属度函数,建立重要性评价因素 U 和评判集 V 的模糊关系矩阵 R 。其隶属度关系如图1所示 ($x_1 < x_2 < x_3 < x_4$)。

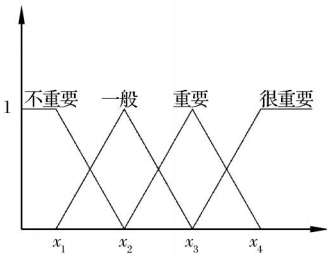


图 1 隶属度关系图

由于各元素隶属度的信息量很难用数值来衡量,所以可使用一些描述性的语言来对应一定的灰度范围,如将信息分成以下5类——{很充分,比较充分,一般,比较贫乏,很贫乏},分别对应灰度值{0

$\sim 0.2, 0.2 \sim 0.4, 0.4 \sim 0.6, 0.6 \sim 0.8, 0.8 \sim 1.0\}$, 具体视评估者的实际情况给定。

2.4 确定评判因素的权重及灰度

权重集可视为评判对象与评判因素集之间的灰色模糊关系,因为重要性的评判分为可靠性、安全性、经济性三个因素,每个因素又分别包括三子因素,所以可以分别确定各子因素对上层因素的权重与灰度,以及各因素对评判对象——断路器重要性的权重与灰度。

在实际应用中,常用的确定权重集的方法很多,主要有统计法、三分法、模糊分布法、专家打分法、二元对比法、层次分析法(AHP)等。这里采用改进的层次分析法,它是通过构造比较判断矩阵进行层次单排序和层次总排序,然后通过方法的改进,避免了校验一致性,达到增加计算速度和提高准确性的目的,其具体方法见文献[11]、文献[12]。权重集中各元素灰度的确立与上文所述一致。

2.5 进行综合评判

由于本文建立的是关于断路器重要性的两级评判指标体系,所以本文需要进行两级灰色模糊综合评判。

2.5.1 一级灰色模糊综合评判

一级灰色模糊综合评判是对因素子集 U_i 中的各个因素进行灰色模糊综合评判。为保留尽可能多的评判信息,在模部运算中可采用 $(\cdot, +)$ 算子,而灰部运算中采用 $(, +)$ 算子,则可计算出因素集的评判向量:

$$\begin{aligned} \tilde{B}_i &= \tilde{W}_i \cdot \tilde{R}_i = \\ &\left[\left(\sum_{k=1}^3 w_k \cdot \mu_{kj}, \prod_{k=1}^3 (1 - (v_k + v_{kj})) \right) \right]_4. \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)中: $\tilde{W}_i$ 表示权重向量; $\tilde{R}_i$ 表示与之对应的灰色模糊关系矩阵。

2.5.2 二级灰色模糊综合评价

二级灰色模糊综合评判即对因素集 U 中的各因素进行灰色模糊综合评判。将子因素集 U_i 作为上一级因素集 U 的元素,则灰色模糊评估的单因素评估矩阵为:

$$\tilde{R} = [\tilde{B}_1, \tilde{B}_2, \dots, \tilde{B}_3]^T. \quad (5)$$

按照一级评判的方法给出权重向量 $\tilde{W}$, 并求出总的综合评判向量:

$$\tilde{B} = \tilde{W} \cdot \tilde{R} = [(b_i, v_i)]_3. \quad (6)$$

式(6)中: $\tilde{W}$ 表示权重向量; $\tilde{R}$ 表示与之对应

的灰色模糊关系矩阵。

2.6 处理评判结果

对灰色模糊评判结果的处理一般采用两种方法:一种是采用区间数的形式,转化为排序可能性矩阵,最后确定出可能性最大的评判因素;另一种是直接利用最大隶属度原则和点灰度最小原则进行判断。由于前一方法计算量较大,后一方法在隶属度最大且点灰度也较大时很难下结论,所以本文采用内积法和最大隶属度相结合的方法。

若令 $d_i = 1 - v_i$, 则 d_i 便表示 b_i 的可信度。令 $b_i = (\mu_i, d_i)$, 则有 $\tilde{B} = (b_1, b_2, b_3)$, 即综合评判 $\tilde{B}$ 由 b_i 的大小来确定。由于 b_i 是一个向量,故可以简化为求解范数来比较大小,有

$$b_i = \sqrt{[b_i, b_i]}. \quad (7)$$

式(7)中, $[b_i, b_i]$ 为向量 b_i 的内积。至此,便可根据 b_i 和最大隶属度原则来得出综合评判结论。

3 实例验证

本文以重庆某供电局为例进行分析说明。该供电局是一个 220kV 系统,共有 13 个变电站、243 台断路器,最大负荷 262MVA。参照表 1,根据设备运行、维修历史记录以及相关可靠性数据库,通过与现场运行和检修人员讨论,得到各因素权重的判断矩阵。经过计算,并令一级因素取点灰度为 0.1,二级因素取点灰度为 0.3,得权重向量:

可靠性因素权重向量 $W_1 = [(0.484, 0.1), (0.349, 0.1), (0.168, 0.1)]$ 。

也就是说,电压等级的权重为 0.484,失效率的权重为 0.349,停电时间的权重为 0.168。同理可得:

安全性因素权重向量 $W_2 = [(0.32, 0.1), (0.558, 0.1), (0.122, 0.1)]$;

经济性因素权重向量 $W_3 = [(0.57, 0.1), (0.286, 0.1), (0.143, 0.1)]$;

二级因素权重向量 $W = [(0.4, 0.3), (0.4, 0.3), (0.2, 0.3)]$ 。

断路器 326 是 35kV 线路出口断路器,失效率为 0.005,停电时间为 3.5 天左右,负荷类型为混合型兼家庭用户,对环境的危害程度较小,维修费用在 1000 元左右,停电损失较小,用户期望较高。根据上文所述的灰色模糊综合评判相关方法,可建立表 2。

表 2 重要性评判的相关数据

二级因素	一级因素	隶属度及相应点灰度			
		不重要	一般	较重要	很重要
可靠性因素	电压等级	(0,0)	(1,0)	(0,0)	(0,0)
	失效率	(1,0.15)	(0,0.4)	(0,0.4)	(0,0.5)
	停电时间	(0.75,0.15)	(0.25,0.3)	(0,0.15)	(0,0.5)
安全性因素	断路器位置	(0,0)	(0,0)	(0,0)	(1,0)
	负荷类型	(0.55,0.4)	(0.45,0.5)	(0,0.5)	(0,0.7)
	对环境的危害程度	(0.5,0.3)	(0.5,0.3)	(0,0.3)	(0,0.5)
经济性因素	维修费用	(0.714,0.15)	(0.286,0.5)	(0,0.5)	(0,0.6)
	停电损失	(0.2,0.3)	(0.8,0.3)	(0,0.3)	(0,0.6)
	用户期望	(0,0.4)	(0.7,0.3)	(0.3,0.3)	(0,0.5)

在模部运算中可采用(·,+)算子,在灰部运算中采用(,+)算子,由一级因素模糊灰色评判矩阵

计算出二级指标评判矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} (0.475,0.00625) & (0.526,0.02) & (0,0.0125) & (0,0.036) \\ (0.3679,0.02) & (0.3121,0.024) & (0,0.024) & (0.32,0.048) \\ (0.46418,0.05) & (0.492192,0.096) & (0.0429,0.096) & (0,0.294) \end{bmatrix}。$$

由式 6 可得, $B = ((0.43,0.0343),(0.434,0.0411),(0.00858,0.0401),(0.128,0.0695))$ 。由式(7)可得, $x_1 = 1.0572, x_2 = 1.0526, x_3 = 0.96, x_4 = 0.9393$ 。根据 b_i 和最大隶属度原则可以判断该断路器的重要度级别为“不重要”。

从综合评判结果可以看出,若仅就隶属度来评判,该断路器的重要度级别应属于“一般”,但由于该隶属度所对应的灰度较大,说明该隶属度并不可信,所以基于灰色模糊综合评判得出的结论更加可信。

4 结论

基于灰色模糊理论和 RCM 的电气设备重要性评判不仅考虑了信息的模糊性,还考虑了信息的灰色性,它将隶属度和灰度综合到电气设备重要性的综合评判过程中,通过模糊关系来定量刻画因素与重要性等级间的关系、以灰度来描述信息的不充分程度。实例验证显示,在此基础上所得出的综合评判结论可以最大限度地接近客观实际。本文以断路器为例建立基于灰色模糊数学的重要性评价体系,该方法可处理同时具有灰色性和模糊性的断路器的重要性综合评判问题,并使评判结果更接近实际。

参考文献

[1] SIQUEIRA D, PATRIOTE L. Measuring the impacts of an RCM program on power system performance[C]. In: IEEE Power Engineering Society General Meeting, Vol 3. San Francisco (CA, United States), 2005:2643-2645.

[2] 顾煜炯,董玉亮,杨昆. 基于模糊评判和 RCM 分析的发电设备综合评价[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (6) : 190-194.

[3] STAMATIS D H. Failure mode and effect analysis-FMEA from theory to execution[C]. New York: ASQC Quality Press, 1995.

[4] 董玉亮,顾煜炯,杨昆. 基于蒙特卡洛模拟的发电厂设备重要性分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (8) : 201-205.

[5] JIE Y,HAO Z Maintenance plan based on RCM[C]. In: IEEE/ PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition:Asia and Pacific Dalian (China), 2005:1-4.

[6] 卜广志,张宇文. 基于灰色模糊关系的灰色模糊综合评判[J]. 系统工程理论与实践, 2002 (1) :141-144.

[7] DENG J. Control problems of grey systems [J]. Systems & Control Letters, 1982, 1 (5) :288-294.

[8] TING C, CHING L C, WOONG C J. Implementation of Reliability-Centered Maintenance for Circuit Breakers [C]. In: IEEE Power Engineering Society General Meeting, Vol 1. San Francisco (CA, United States), 2005:684-690.

[9] SCHLABBACH R, BERKA T. Reliability-Centred Maintenance of MV Circuit-Breakers[C]. In: Power Tech Conference, Vol 4. Porto, 2001.

[10] 杨纶标,高英仪. 模糊数学原理及应用[M]. 广州:华南理工大学出版社, 2001.

[11] 谭跃进,陈英武,易进先. 系统工程原理[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 1999.

[12] TRIANTAPHYLLOU E, KOVALERCHUK B, MANN L, et al. Determining the most important criteria in maintenance decision making[J]. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 1997, 3 (1) :16-24.

Study on Priority Method for Maintenance Decision of Electric Apparatus

Huang Ruiping¹, Xia Ying²

(1. Kunming Power Supply Bureau, Kunming 650000, China;

2. College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract : Aiming at the characteristics that the evaluation factors of electric apparatus are fuzzy and grey in the reliability-centered maintenance (RCM), through determining the main factors influencing its importance, this paper proposes a method to analyze the importance of electric apparatus based on the grey fuzzy math. And taking the circuit breaker as an example, it establishes the evaluation system for importance, and expresses the relations between evaluation factors and importance grade by the fuzzy relation, and expresses the unbelievable degree of fuzzy relations by the grey degree. The results show that this method is feasible and effective, and the evaluation results can be used as a scientific basis for further maintenance decisions.

Key words : reliability-centered maintenance; importance analysis; grey fuzzy comprehensive evaluation; circuit breaker

(上接第 43 页)

[2] 魏楚,沈满洪. 结构调整能否改善能源效率:基于中国省级数据的研究[J]. 世界经济,2008(11):77-85.

[3] 师博,沈坤荣. 市场分割下得中国全要素能源效率:基于超效率 DEA 方法的经验分析[J]. 世界经济,2008(9):49-59.

[4] 孙立成,周德群,李群. 能源利用效率动态变化的中外比较研究[J]. 数量经济技术经济研究,2008(8):57-69.

[5] 杨正林,方齐云. 能源生产率差异与收敛:基于省际面板数据的实证分析[J]. 数量经济技术经济研究,2008(9):17-30.

[6] 史丹,吴利学,傅晓霞,等. 中国能源效率地区差异及其成因研究——基于随机前沿生产函数得方差分解[J]. 管理世界,2008(2):35-43.

[7] MUKHERJEE K. Energy use efficiency in US manufacturing: a nonparametric analysis[J]. Energy Economics, 2008(30):76-96.

[8] 李世祥,成金华. 中国能源效率评价及其影响因素分析[J]. 统计研究,2008,25(10):18-25.

[9] KULSHRESHTHA M, PARIKH J K. Study of efficiency and productivity growth in opencast and underground coal mining in India: a DEA analysis[J]. Energy Economics, 2002,24:439-453.

[10] 刘珺,张平. 我国电力工业增长方式现状研究[J]. 武汉水利电力大学学报:社会科学版[J]. 2009,20(5):14-17.

[11] 闫彦. 全要素生产率在电力经济可持续发展中的应用研究[J]. 工业技术经济,2003(2):101-102.

[12] 杨淑云,于良春. 中国电力产业效率和生产率变动的实证研究[J]. 财经论丛,2008(3):15-20.

[13] FARRELL M J. The measurement of productive efficiency[J]. Journal of the Royal Statistical Society,1957:253-281.

[14] CHARNES A, COOPER W W, RHODES E. Measuring the efficiency of decision making units [J]. European Journal of Operational Research,1978:429-444.

[15] 郭庆旺,贾俊雪. 中国潜在产出与产出缺口的估算[J]. 经济研究,2004(5):31-39.

[16] 黄勇峰,任若恩,刘晓生. 中国制造业资本存量永续盘存法估计[J]. 经济学(季刊),2002,1(2):377-396.

[17] 王小鲁,樊纲. 我国经济增长的可持续性[M]. 北京:经济科学出版社,2000.

[18] 颜鹏飞,王兵. 技术效率、技术进步与生产率增长:基于 DEA 的实证分析[J]. 经济研究,2004(12):55-65.

[19] 岳书敬,刘朝明. 人力资本与区域全要素生产率分析[J]. 经济研究,2006(4):90-127.

[20] 黄先海,刘毅群. 物化技术进步与我国工业生产率增长[J]. 数量经济技术经济研究,2006(4):52-60.

Analysis on Production Efficiency of Energy Industry and Changes of Its Productivity in China Based on DEA

Yang Zhongkui, Yang Jun, Hu Wei

(School of Economics and Business Administration, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract : Based on DEA, this paper empirically analyzes the energy production efficiency and the changes of productivity of 29 provinces and cities in China from 1997 to 2007. The empirical results show that: the differences in efficiency of energy industry among different provinces and cities are obvious, and the average level of productive efficiency is low, and the productive efficiency of traditional energy is more efficient than that of burgeoning energy; the growth of energy productivity is mainly due to technical progress, whereas the scale efficiency contributes less to productivity growth; the productivity level in most provinces are improved in a certain degree, but the reasons for the change are different.

Key words : energy industry; production efficiency; productivity; DEA