

基于灰色关联度和理想解法的电力设备状态维修策略

杨良军, 熊小伏, 张媛

(重庆大学高电压与电工新技术教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 提出了基于灰色关联度和理想解法 TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) 的电力设备状态维修策略决策方法。通过综合分析, 在兼顾安全性和经济性的基础上, 选用维修所需技术水平、维修风险、维修对生产的影响、故障对安全的危害、综合费用以及维修效果 6 个决策指标对某一电力变压器状态维修方案的决策过程进行了分析, 并具体探讨了该决策方法在状态维修决策中的应用, 结果表明本方法是可行的。

关键词: 电力设备; 状态维修策略; 电力变压器; 灰色关联度; 理想解法

Research on condition-based maintenance policy of electric power equipment based on grey correlation degree and TOPSIS

YANG Liang-jun, XIONG Xiao-fu, ZHANG Yuan

(Key Laboratory of High Voltage and Electrical New Technology of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The grey correlation degree and TOPSIS decision-making method to condition-based maintenance of electric power equipment is proposed. By synthetically analysis based on safety and economy, six decision targets such as the needed technology level, maintenance risk, maintenance impact to production, the harm of fault to safety, integrated cost and maintenance effect are selected to analyze the decision process of a certain condition-based maintenance of power transformer, the detailed application of grey correlation degree and TOPSIS decision-making method to condition-based maintenance is discussed. The conclusion proves that grey correlation degree and TOPSIS decision-making method to condition-based maintenance of electric power equipment is feasible.

Key words: electric power equipment; condition-based maintenance decision-making; power transformer; grey correlation degree; TOPSIS

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)18-0074-05

0 引言

状态维修策略是根据在线监测与趋势分析的结论, 结合离线试验测量数据及分析, 形成有限个维修方案, 在兼顾安全性与经济性的基础上优选出某个方案。目前, 电力设备状态维修策略的优选方法主要有以下几种^[1~5]: ①灰色关联分析法; ②模糊多属性决策法; ③模糊多属性群决策法; ④模糊综合评价法。方法①考虑了在维修方案选取过程中信息的不完全性, 即“灰色”特征, 忽略了评价指标无法用一个严格意义上的判断标准来衡量, 是一个模糊的概念。方法②、③、④考虑了评判指标所需的信息在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。

对维修方案的评价涉及到多个因素(属性), 是一个多指标决策过程, 因此可以引入一种多指标决策方法进行方案优选。而理想解法^[6,7] TOPSIS (直译为逼近理想解的排序方法) 作为一种经典的有效的多指标决策方法, 已经成功应用于投资决策、项目评价、方案选优等领域。但在状态维修策略决策过程中, 由于衡量方案优劣的信息不完全, 加上人为的因素, 使得综合比较与判断具有“灰色”特征。因此本文引入文献[8]提出的基于灰色关联度和理想解法的决策方法对有限的维修方案进行综合评价。

1 基于灰色关联度和理想解法的决策方法的基本原理

基于灰色关联度和理想解法的决策方法将传统

理想解法的距离尺度和灰色关联度有机结合, 构造了一种新的相对贴适度以实现对方案的评价。其基本思路可描述为:

设有 m 个方案, n 个指标, 指标值为 x_{ij} ($1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n$), 构成决策矩阵 $X=(x_{ij})_{m \times n}$, 通过构造方案的理想解 U_0^+ 与负理想解 U_0^- , 求得各方案到理想解和负理想解的距离 D_i^+ 、 D_i^- 以及灰色关联度 R_i^+ 、 R_i^- , 将距离和关联度综合考虑得出方案的相对贴适度, 按照贴适度大小对方案进行排序, 贴适度越大方案越优; 贴适度越小方案越劣。

2 灰色关联度和理想解法的决策方法评价检修方案

由电力设备在线监测系统随时监测设备故障特征量的变化情况, 通过设备故障诊断系统及状态趋势预报系统, 可以诊断出设备的潜伏性故障及其发展趋势, 进而形成有限的针对性检修项目和方案。

以文献[3]变压器状态维修为例: 1998年8月对某110 kV 变电站1号主变预试中发现油中总烃量超过注意值, 经色谱跟踪, 故障诊断及趋势预报, 数据如表1所示^[9]。

为进行方案的技术经济比较, 根据故障诊断及趋势预报结果和生产计划安排, 初拟订如下3个检修方案: A_1 表示提前进行大修, 检修项目按导则安排; A_2 表示针对性大修, 根据故障诊断及趋势预报结果, 有针对性地安排检修项目; A_3 表示不安排检修, 继续跟踪监测, 缩短跟踪周期, 到大修周期再安排大修。

2.1 决策指标及决策矩阵

通过综合分析, 在兼顾安全性和经济性的基础上, 选用如下指标组成属性集: C_1 为维修所需技术水平, 即本单位有否相应技术水平、是否外聘等; C_2 为维修风险, 即爆炸、误操作、高空坠落等; C_3 为维修对生产的影响, 即对供电负荷、售电量、可靠性影响等; C_4 为故障对安全的危害, 即可能对电网安全造成的危害; C_5 为综合费用, 即维修费用、生产损失费用等; C_6 为维修效果, 即提高设备可靠性等。

由上述检修方案及属性集, 经过领域专家的评审, 得到表2的评估结果, 各评价指标均采用模糊语义描述, 如表2中所示。

表1 不同日期油中溶解气体含量、故障诊断及趋势预报结果

Tab.1 Consequences of diagnosis and forecast on different date

日期	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	故障诊断及预报结果
1998.12.16	92.80	65.40	35.80	191.00	0	发生高温过热故障, 故障点温度545℃
1998.12.22	93.00	68.90	43.00	209.70	0	发生高温过热故障, 故障点温度542℃
1999.01.04	94.60	69.40	40.80	203.30	0	发生高温过热故障, 故障点温度545℃
1999.02.21	97.40	103.50	46.20	237.10	0	铁心两点或多点接地引起高温过热故障, 故障点温度542℃
一步预报	99.66	129.83	47.08	250.14	0	铁心两点或多点接地引起高温过热故障, 故障点温度541℃
二步预报	102.00	164.05	48.89	267.07	0	铁心两点或多点接地引起高温过热故障, 故障点温度541℃

表2 专家评估结果

Tab.2 The consequence of expert assessment

方案	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆
A ₁	高	较高	很大	很大	很高	很好
A ₂	一般	高	较大	很大	较高	好
A ₃	一般	很低	低	很大	低	很低

为了使决策判断定量化,采用文献[10, 11]的方法对各决策指标进行反模糊化,对应各模糊语义的隶属函数如图1所示。

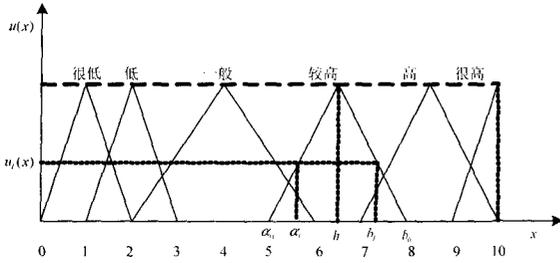


图1 隶属度函数
Fig.1 Subjection function

图中:横坐标X对应为模糊集,纵坐标 $u(x)$ 为 x 相对应的隶属度。
模糊集的脆性系数可由式(1)计算得到:

$$K = \frac{\sum_{l=0}^{\infty} (b_l - c)}{\sum_{l=0}^{\infty} (b_l - c) - \sum_{l=0}^{\infty} (a_l - d)} \quad (1)$$

式中:对每个子区间都有 $a_0 \leq a_l \leq h$ 、 $h \leq b_l \leq b_0$, h 为 $u(x)=1$ 时 x 的值(如图1所示), $l=0,1,2,3,\dots,\infty$;为便于计算,本文仅取 $u(x)=0$ 与 $u(x)=1$ 时 a_l 、 b_l 的值; c 为模糊集 X 的最小边界, d 为模糊集 X 的最大边界,确定方法参考文献[10],本文取值 $c=0$, $d=10$ 。

以模糊语义描述“低”为例,求取其脆性系数。由图1易得, $a_0=1$, $b_0=3$, $a_1=b_1=2$, $c=0$, $d=10$ 。代入式(1)有:

$$K = \frac{[b_0 - c] + [b_1 - c]}{\{[b_0 - c] + [b_1 - c]\} - \{[a_0 - d] + [a_1 - d]\}} = 0.2273$$

同理可求得其他模糊语义描述对应的脆性系数为:

很低: $K=0.1364$; 一般: $K=0.4167$; 较高: $K=0.6304$; 高: $K=0.8043$; 很高: $K=0.9524$ 。

根据以上结果可得到决策矩阵:

$$X = \begin{bmatrix} 0.8043 & 0.6304 & 0.9524 & 0.9524 & 0.9524 & 0.9524 \\ 0.4167 & 0.8043 & 0.6304 & 0.9524 & 0.6304 & 0.8043 \\ 0.4167 & 0.1364 & 0.2273 & 0.9524 & 0.2273 & 0.1364 \end{bmatrix}$$

2.2 选择最佳检修方案的决策算法

根据决策算法的基本原理和计算步骤求取最佳检修方案,具体计算过程如下:

1) 指标权重的确定

本文对指标权重的求取采用层次分析法(AHP),由于介绍层次分析法的文献很多,限于篇

幅,不作具体介绍,具体计算过程参考文献[12],求得各项指标的权重:

$$W=(0.037,0.194,0.155,0.434,0.112,0.068)$$

2) 计算加权标准化矩阵

首先用向量归一法对决策矩阵作标准化处理,得标准化矩阵 $Y=(y_{ij})_{m \times n}$,其中

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n)$$

则加权标准化矩阵:

$$U=(u_{ij})_{m \times n}=(w_j y_{ij})_{m \times n} =$$

$$\begin{bmatrix} u_1(1) & u_1(2) & \dots & u_1(n) \\ u_2(1) & u_2(2) & \dots & u_2(n) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ u_m(1) & u_m(2) & \dots & u_m(n) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 0.0298 & 0.1223 & 0.1476 & 0.4133 & 0.1067 & 0.0648 \\ 0.0154 & 0.1560 & 0.0977 & 0.4133 & 0.0706 & 0.0547 \\ 0.0154 & 0.0265 & 0.0352 & 0.4133 & 0.0255 & 0.0093 \end{bmatrix}$$

3) 确定理想解和负理想解

理想解:

$$U_0^+ = \left\{ \left(\max_{1 \leq j \leq m} u_i(j) \mid j \in J^+, (\min_{1 \leq j \leq m} u_i(j) \mid j \in J^-) \right) \right\} = (u_0^+(1), u_0^+(2), \dots, u_0^+(j), \dots, u_0^+(n))$$

负理想解:

$$U_0^- = \left\{ \left(\min_{1 \leq j \leq m} u_i(j) \mid j \in J^+, (\max_{1 \leq j \leq m} u_i(j) \mid j \in J^-) \right) \right\} = (u_0^-(1), u_0^-(2), \dots, u_0^-(j), \dots, u_0^-(n))$$

其中: J^+ 是值越大越好的指标集合, J^- 是值越小越好的指标集合。本文各项指标中 C_1 、 C_6 属于值越大越好的集合,其余各项为值越小越好的集合,取值得到理想解和负理想解:

$$U_0^+ = (0.0298, 0.0265, 0.0352, 0.4133, 0.0255, 0.0648)$$

$$U_0^- = (0.0154, 0.1560, 0.1476, 0.4133, 0.1067, 0.0093)$$

4) 计算第 i 个方案到理想解和负理想解的距离

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n [u_i(j) - u_0^+(j)]^2}, (i=1,2,\dots,m) =$$

$$(0.1685, 0.1572, 0.0573)$$

到负理想解的距离:

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n [u_i(j) - u_0^-(j)]^2}, (i=1,2,\dots,m) =$$

$$(0.066\ 5, 0.075\ 9, 0.189\ 7)$$

5) 计算方案到理想解和负理想解之间的灰色关联度 R_i^+ 和 R_i^-

i) 第 i 个方案与理想方案关于第 j 个指标的灰色关联系数:

$$r_{ij}^+ = \frac{m + \xi M}{\Delta_i(k) + \xi M}, \xi \in (0,1)$$

其中: $\Delta_i(k) = |u_0^+(k) - u_i(k)|$, $m = \min_i \min_k \Delta_i(k)$,

$M = \max_i \max_k \Delta_i(k)$; ξ 为分辨系数, 一般取值 0.5。

则各方案与理想方案的灰色关联系数矩阵

$$R^+ = \begin{bmatrix} r_{11}^+ & r_{12}^+ & \dots & r_{1n}^+ \\ r_{21}^+ & r_{22}^+ & \dots & r_{2n}^+ \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1}^+ & r_{m2}^+ & \dots & r_{mn}^+ \end{bmatrix}$$

第 i 个方案与理想方案的灰色关联度为:

$$R_i^+ = \frac{1}{n} \sum_j r_{ij}^+, (i=1,2,\dots,m) =$$

$$(0.702\ 1, 0.685\ 8, 0.892\ 8)$$

ii) 第 i 个方案与负理想方案关于第 j 个指标的灰色关联系数

$$r_{ij}^- = \frac{m + \xi M}{\Delta_i(k) + \xi M}, \xi \in (0,1)$$

其中: $\Delta_i(k) = |u_0^-(k) - u_i(k)|$,

$m = \min_i \min_k \Delta_i(k)$, $M = \max_i \max_k \Delta_i(k)$ 。

则各方案与负理想方案的灰色关联系数矩阵

$$R^- = \begin{bmatrix} r_{11}^- & r_{12}^- & \dots & r_{1n}^- \\ r_{21}^- & r_{22}^- & \dots & r_{2n}^- \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1}^- & r_{m2}^- & \dots & r_{mn}^- \end{bmatrix}$$

第 i 个方案与负理想方案的灰色关联度为

$$R_i^- = \frac{1}{n} \sum_j r_{ij}^-, (i=1,2,\dots,m) =$$

$$(0.835\ 7, 0.799\ 1, 0.690\ 4)$$

6) 分别对步骤 4) 和 5) 确定的距离和关联度无量纲化处理

$$M_{\text{new}} = \frac{M_i}{\max_{1 \leq i \leq n} (M_i)}, \text{ 其中 } M_i \text{ 分别代表 } D_i^+,$$

D_i^-, R_i^+, R_i^- 。无量纲化后 $D_i^+, D_i^-, R_i^+, R_i^-$

的值分别为:

$$D_i^+ = (1.000\ 0, 0.932\ 9, 0.340\ 1)$$

$$D_i^- = (0.350\ 6, 0.400\ 1, 1.000\ 0)$$

$$R_i^+ = (0.786\ 3, 0.768\ 1, 1.000\ 0)$$

$$R_i^- = (1.000\ 0, 0.956\ 2, 0.826\ 1)$$

7) 将步骤 6) 中确定的无量纲化距离和关联度合并

合并公式为:

$$S_i^+ = a_1 D_i^- + a_2 R_i^+; S_i^- = a_1 D_i^+ + a_2 R_i^-$$

其中: a_1 、 a_2 反映了决策者对位置和形状的偏好程度, 并且满足 $a_1 + a_2 = 1$, 决策者可根据自己的偏好确定它们的数值, 具体确定方法参考文献[13]。

本文取 $a_1 = a_2 = 0.5$ 得:

$$S_i^+ = (0.568\ 5, 0.593\ 2, 1.000\ 0)$$

$$S_i^- = (1.000\ 0, 0.944\ 6, 0.583\ 1)$$

8) 计算方案的相对贴进度

$$C_i^* = \frac{S_i^+}{S_i^+ + S_i^-}, (i=1,2,\dots,m) =$$

$$(0.362\ 4, 0.385\ 7, 0.631\ 7)$$

9) 按照贴进度的大小对方案进行排序

贴进度越大方案越优; 贴进度越小方案越劣,

则 $A_3 > A_2 > A_1 \Rightarrow A_3$ 是最佳选择方案。

3 结论

状态维修策略(方案)的优选涉及很多评价指标, 是一个多指标决策过程, 加之由于衡量方案优劣的信息不完全, 因而可以引入基于灰色关联度和理想解法的决策方法对有限维修方案进行综合评价。

虽然影响方案评价的指标有多方面, 但本文选择 6 个对方案评价起重要作用的指标, 采用模糊语义描述给出决策矩阵, 以 3 个简单的方案对评价指标进行综合分析, 表明采用基于灰色关联度和理想解法的决策方法对电力设备状态维修方案进行优选是可行的。

参考文献

[1] 田玲, 刑建国. 电气设备实施状态维修决策方法的探讨[J]. 电网技术, 2004, 28(16):63-66.
TIAN Ling, XING Jian-guo. Discussion on Making Decision about Electric Equipment for Condition Based Maintenance[J]. Power System Technology, 2004, 28(16):63-66.

- [2] 袁志坚. 电力变压器状态维修决策方法的研究(博士学位论文)[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
YUAN Zhi-jian. Study on Method to Decision-making of Condition-based Maintenance for Power Transformer, Doctoral Dissertation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2004.
- [3] 袁志坚, 孙才新, 李剑, 等. 基于模糊多属性群决策的变压器状态维修策略研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(11):70-74.
YUAN Zhi-jian, SUN Cai-xin, LI Jian, et al. Study on Condition-based Maintenance Policy of Transformer Based on Fuzzy Multiple Expert and Multiple Attribute Group Decision Making[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(11):70-74.
- [4] 袁志坚, 孙才新. 模糊多属性决策方法评价变压器状态维修策略[J]. 高电压技术, 2004, 30(8):35-37.
YUAN Zhi-jian, SUN Cai-xin. Assessment on Condition Based Maintenance Policy of Transformer Using Fuzzy Multiple Attribute Decision Making[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(8):35-37.
- [5] 曹永刚. 电力变压器状态分析与维修策略的研究(硕士学位论文)[D]. 南京: 河海大学, 2006.
CAO Yong-gang. Research of Power Transformer's Condition Analysis and Maintenance Decision-making, Thesis[D]. Nanjing: Hohai University, 2006.
- [6] 彭勇行. 管理决策分析[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [7] Chen C T. Extensions of the TOPSIS for Group Decision Making Under Environment[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2000, (114):1-9.
- [8] 孙晓东, 焦玥, 胡劲松. 基于灰色关联度和理想解法的决策方法研究[J]. 中国管理科学, 2005, 13(4).
SUN Xiao-dong, JIAO Yue, HU Jin-song. Research on Decision-making Method Based on Gray Correlation Degree and TOPSIS[J]. Chinese Journal of Management Science, 2005, 13(4).
- [9] 李俭. 大型电力变压器以油中溶解气体为特征量的内部故障诊断模型研究(博士学位论文)[D]. 重庆: 重庆大学, 2001.
LI Jian. Study on the Methods of Fault Diagnosis About Power Transformer Based on Dissolved Gases Analysis, Doctoral Dissertation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2001.
- [10] Anand Pillay, WANG Jin. Modified Failure Mode and Effects Analysis Using Approximate Reasoning[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2003, 79:69-85.
- [11] 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.
GU Yu-jiong, DONG Yu-liang, YANG Kun. Synthetic Evaluation on Conditions of Equipment in Power Plant Based on Fuzzy Judgment and RCM Analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 190-194.
- [12] 赵焕臣, 许树柏, 和金生. 层次分析法——一种简易的新决策方法[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [13] 徐泽水. 权重信息完全未知且对方案有偏好的多属性决策法[J]. 系统工程理论与实践, 2003, (12): 100-103.
XU Ze-shui. A Method for Multiple Attribute Decision Making without Weight Information but with Preference Information on Alternatives[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2003, (12): 100-103.

收稿日期: 2008-09-02; 修回日期: 2008-10-09

作者简介:

杨良军(1979-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统的运行、控制及管理; E-mail: yanglj1997@qq.com

熊小伏(1963-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统运行、控制及保护;

张媛(1982-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统的运行、控制及管理。