

基于可拓理论的变压器状态综合评估

谢 庆¹, 律方成¹, 郑 娜¹, 李燕青¹, 李成榕²

(1. 华北电力大学电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 河北 保定 071003;

2. 华北电力大学高压与电磁兼容北京市重点实验室, 北京 102206)

摘要: 笔者基于可拓理论, 提出了一种可拓评价法和可拓层次分析法相结合的变压器状态综合评估方法。首先, 采用可拓层次分析法(EAHP), 将变压器状态信息之间的相对重要度采用一个可拓区间数来表示, 构造可拓判断矩阵, 准确计算变压器状态信息指标的权重。然后, 应用可拓评价法, 通过计算物元之间的关联函数同时进行定性和定量分析, 实现变压器状态的综合评估。实例分析证明了该方法的正确性和有效性, 为变压器的状态维修提供了合理的决策依据。

关键词: 变压器; 综合评估; 可拓评价法; 可拓层次分析法

中图分类号: TM41

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)04-0308-04

Synthetic Condition Evaluation of Transformer Based on Extension Theory

XIE Qing¹, LU Fang-cheng¹, ZHENG Na¹, LI Yan-qing¹, LI Cheng-rong²

(1. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control, North China Electric Power University, Ministry of Education, Baoding 071003, China; 2. Beijing Key Laboratory of High Voltage & EMC, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Based on the extension theory, a new method of transformer condition evaluation combining extension evaluation with extension analytic hierarchy process was presented. EAHP was applied to calculate the weight of the transformer condition information, and extension evaluation was employed to create the framework of transformer condition evaluation. Two examples were taken to verify the validity and feasibility of the proposed method.

Key words: transformer; synthetic condition evaluation; extension evaluation; extension analytic hierarchy process(EAHP)

0 引言

长期以来, 我国电力系统电气设备检修策略主要采用以时间为标准的定期维修, 定期维修存在“维修过剩”和“维修不足”的缺陷, 造成了维修费用的巨大浪费和设备可靠性的下降^[1]。20 世纪后期, 状态维修受到了国内外电力工作者的普遍关注^[2], 并且将设备状态综合评估作为其重要依据。2007 年, 电气设备的状态检修被列入国家电力公司科技部“十一五”规划的研究关键技术之一。

电力变压器是电力系统的枢纽设备, 也是开展状态维修最早的设备之一。目前出现了多种变压器状态综合评估方法, 文[3-6]提出的都是基于模糊理论的状态评估方法, 这类方法有利于确定事物本身所具有的模糊、不确定的特征量, 但只是从定性的角度上对变压器进行了状态评估, 常易造成各评价指

标之间的不相容现象, 也不能对指标进行量化研究。同时, 由于变压器状态信息量大, 准确确定各个状态信息的权重十分重要。文[7, 8]在确定状态信息的权重时多采用层次分析法^[7] (AHP) 或对其进行的简单改进的方法^[8], 该权重确定方法导致判断矩阵的建立过于简单, 没有考虑状态信息相对重要度不确定的情况。

可拓理论是基于可拓集合的物元分析, 可拓物元集能够合理地描述自然现象和社会现象中各种事物的内部结构和彼此间的关系以及事物的变化, 通过计算物元之间的关联函数, 进行事物定性和定量的综合分析。

笔者基于可拓理论, 提出了一种可拓评价法和可拓层次分析法相结合的变压器状态综合评估方法。首先采用 EAHP 确定判断矩阵, 将状态信息之间的相对重要度采用一个可拓区间数来表示, 准确计算得到变压器状态信息指标权重。然后运用可拓

收稿日期: 2007-07-23; 修回日期: 2008-01-18

作者简介: 谢 庆(1979-), 男, 四川省广安市人, 博士研究生, 研究方向为高电压与绝缘技术。

评价法建立变压器状态综合评估的基本框架, 计算得到检修物元、运行工况物元、试验项目物元、状态物元之间的关联函数, 实现了对变压器状态定性和定量的综合评估, 为变压器的状态维修提供了合理的决策依据。最后通过两个实例分析验证了该方法的正确性和有效性。

1 基于可拓层次分析法的权重确定

变压器状态信息参数众多, 在两两重要度比较中往往会出现不确定的主观判断, 对不确定性的主观判断采用 AHP^[8]中简单的点值来表述显然是不合适的。同时, 随着可拓理论和区间理论^[9]的不断发展和完善, 出现了 AHP 与可拓理论相结合的可拓层次分析法 EAHP^[10]。EAHP 方法将状态信息之间的相对重要度采用一个可拓区间来表示, 构造判断矩阵, 然后求解权重向量, 该方法能有效表达判断矩阵的不确定性, 模型建立和求解也比较简便。可拓层次分析法已经在电网规划、电能质量评估等方面得到了实际应用^[10, 11], 效果良好。

下面介绍基于 EAHP 的变压器状态信息权重的确定。

1.1 EAHP 层次结构的建立

变压器的状态信息数据十分复杂且庞大, 各因素的影响程度又不相同, 故信息的选取难度较大。笔者以能较好反映变压器综合状态为原则, 根据文[2]将变压器状态信息的 1 级状态参数分为 3 类, 2 级状态参数选取 13 个, 其 EAHP 的层次结构见图 1。

1.2 变压器状态信息可拓判断矩阵的确定

建立了层次结构之后, 针对第 k-1 层的某一个(例如第 h 个)因素准则, 将第 k 层与之有关的全部 n_k 个因素, 通过两两比较, 利用可拓区间数定量表示它们的相对优劣程度(或重要度), 从而构造可拓判断矩阵 A。其中, 区间数的中值 $(a_j^- + a_j^+)/2$ 就是 AHP 方法中比较判断所采用的 Saaty T J 提出的 1~9 标度中的整数。

设 $a_j = [a_j^-, a_j^+]$ ($i, j=1, 2, \dots, n_k; t=1, 2, \dots, T$) 为第 t 个专家给出的区间数。根据公式

$$A_{ij} = \frac{1}{T} \otimes (a_j^1 + a_j^2 + \dots + a_j^T) \quad (1)$$

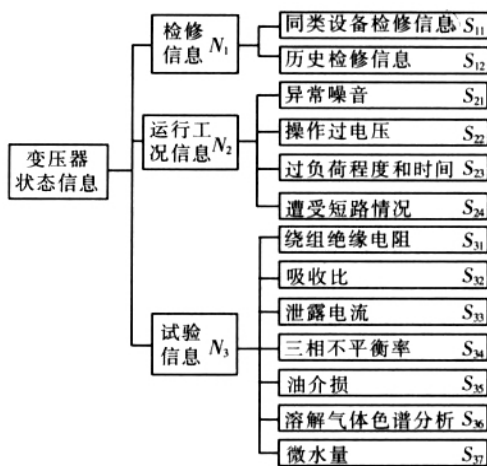


图 1 变压器状态评估层次结构图

求得第 k 层的综合区间数, 由此得到第 k 层全体因素对第 k-1 层的第 h 个因素的综合判断矩阵。

根据变压器状态参数的重要性的要求, 首先由参加评价的决策者对各项指标两两比较进行打分得到评价准则的可拓判断矩阵, 利用公式(1), 得到变压器各个状态信息的可拓判断矩阵, 见表 1~4。

1.3 可拓判断矩阵权重和综合权重的求解

对上述第 k 层综合可拓区间数判断矩阵 $A = [A^-, A^+]$, 求其满足一致性条件的权重向量的步骤为

(1) 求 A^- 、 A^+ 的最大特征值所对应的具有正分量的归一化特征向量 x^- 、 x^+ 。

(2) 由 $A^- = (a_{ij}^-)_{n_k \times n_k}$ 、 $A^+ = (a_{ij}^+)$ 计算

$$k = \sqrt[n_k]{\sum_{j=1}^{n_k} \frac{1}{\sum_{i=1}^{n_k} a_{ij}^+}}, m = \sqrt[n_k]{\sum_{j=1}^{n_k} \frac{1}{\sum_{i=1}^{n_k} a_{ij}^-}} \quad (2)$$

表 1 变压器检修信息可拓区间判断矩阵

	S_{11}	S_{12}
S_{11}	[1.0, 1.0]	[0.8, 1.2]
S_{12}	[0.83, 1.25]	[1.0, 1.0]

表 2 变压器运行工况信息可拓区间判断矩阵

	S_{21}	S_{22}	S_{23}	S_{24}
S_{21}	[1.00, 1.00]	[0.18, 0.22]	[0.286, 0.400]	[0.18, 0.22]
S_{22}	[4.50, 5.50]	[1.00, 1.00]	[1.400, 2.600]	[0.34, 0.90]
S_{23}	[2.50, 3.50]	[0.38, 0.71]	[1.000, 1.000]	[0.40, 0.67]
S_{24}	[4.50, 5.50]	[1.10, 2.90]	[1.500, 2.500]	[1.00, 1.00]

表 3 变压器试验信息可拓区间判断矩阵

	S_{31}	S_{32}	S_{33}	S_{34}	S_{35}	S_{36}	S_{37}
S_{31}	[1.00, 1.00]	[0.40, 0.67]	[0.38, 0.70]	[1.00, 1.00]	[1.60, 2.40]	[0.22, 0.29]	[0.37, 0.77]
S_{32}	[1.50, 2.50]	[1.00, 1.00]	[0.40, 0.67]	[1.00, 1.00]	[1.40, 2.60]	[0.22, 0.29]	[0.37, 0.77]
S_{33}	[1.40, 2.60]	[1.50, 2.50]	[1.00, 1.00]	[1.70, 2.30]	[1.50, 2.50]	[0.29, 0.38]	[0.38, 0.70]
S_{34}	[1.00, 1.00]	[1.00, 1.00]	[0.59, 0.70]	[1.00, 1.00]	[0.40, 0.67]	[0.21, 0.30]	[0.37, 0.77]
S_{35}	[0.42, 0.63]	[0.40, 0.67]	[0.40, 0.67]	[1.50, 2.50]	[1.00, 1.00]	[0.22, 0.29]	[0.40, 0.69]
S_{36}	[3.50, 4.50]	[3.50, 4.50]	[2.60, 3.40]	[3.30, 4.70]	[3.50, 4.50]	[1.00, 1.00]	[1.50, 2.50]
S_{37}	[1.50, 2.50]	[1.30, 2.70]	[1.40, 2.60]	[1.30, 2.70]	[1.50, 2.50]	[0.40, 0.67]	[1.00, 1.00]

表4 变压器一级信息可拓区间判断矩阵

	N	N	N
N	[1.00, 1.00]	[0.60, 3.40]	[1.00, 1.00]
N	[0.29, 1.67]	[1.00, 1.00]	[0.29, 1.67]
N	[1.00, 1.00]	[0.60, 3.40]	[1.00, 1.00]

(3) 求出权重向量

$$S^k=(S_1^k, S_2^k, \dots, S_{n_k}^k)^T=[kx, mx^*] \quad (3)$$

(4) 层次单排序与层次总排序

利用公式

$$V(S^k, S^j)=\frac{2(S^{k+}-S^k)}{(S^{k+}-S^k)(S^{k+}-S^j)} \quad (4)$$

计算 $V(S^k, S^j)$ ($i, j=1, 2, \dots, n_k; i \neq j$), 如果:

$\forall i, j=1, 2, \dots, n_k; i \neq j, V(S^k, S^j) > 0$, 则 $P_{jh}^k=1, P_{ih}^k=V(S^k, S^j), i, j=1, 2, \dots, n_k; i \neq j$ 。其中, P_{ih}^k 表示第 k 层上第 i 个因素对第 k-1 层次上的第 h 个因素的单排序, 经归一化后得到第 k 层上各因素对第 k-1 层次上的第 h 个因素的单排序权重向量。

如果 k-1 层对总目标的排序权重向量为

$$W_k=(W_1^k, W_2^k, \dots, W_{n_k}^k)^T=P_k W^{k-1}$$

利用公式(2)、(3)、(4)求得变压器各状态信息的权重如下

$$P_1=(0.456\ 3, 0.543\ 7)^T$$

$$P_2=(0.042\ 0, 0.289\ 0, 0.330\ 9, 0.338\ 1)^T$$

$$P_3=(0.056\ 3, 0.093\ 4, 0.140\ 5, 0.037\ 1, 0.037\ 1, 0.495\ 3, 0.140\ 3)^T$$

$$P_6=(0.176\ 0, 0.209\ 6, 0.009\ 6, 0.066\ 1, 0.075\ 7, 0.077\ 4, 0.021\ 7, 0.036\ 0, 0.054\ 2, 0.014\ 3, 0.014\ 3, 0.191\ 0, 0.054\ 1)^T$$

2 基于可拓评价法的状态评估框架

可拓评价法^[12, 13]是以物元理论和可拓集合理论为基础, 从定量和定性两个角度去研究解决问题的规律和方法, 即从物元可拓性进行定性分析, 从关联函数进行定量计算。

2.1 变压器状态综合评估等级及相应检修策略

为便于运行人员准确地判断变压器的状态, 合理地安排维修策略, 笔者采用文[14]提出的方法将变压器状态综合评估等级和检修策略分为 5 个层次, 见表 5。

表5 变压器状态信息等级和状态检修策略

劣化度取值范围	变压器状态语义描述	状态检修策略
0~0.14	良好, 可以继续运行	延期检修
0.14~0.29	一般, 处于正常运行	延期计划检修
0.30~0.59	可疑, 加强观察监测	优先安排检修
0.60~0.79	可靠性下降, 有轻微故障出现	尽快检修
0.80~1.00	危险, 有严重故障出现	立即检修

2.2 变压器状态综合评估步骤

(1) 确定变压器各种状态信息 N 的失效特征元集。设 N 可能产生的失效集为 $I=(I_1, I_2, \dots, I_n)$, 若其中 I_i 发生失效, $I_i(N)$ 的特征元集

$$\{M_i\}=\{M_{ij}\}, i=1, 2, \dots, k$$

其中 $M_{ij}=(c_{ij}, V_{ij})$ 为特征元, $V_{ij}=(c_{ij}, d_{ij})$ 为 $I_i(N)$ 发生时的极限量域。

(2) 建立变压器各种状态信息 N 可能发生失效的物元

$$R_i=\begin{bmatrix} I_i(N) & c_{i1} & V_{i1} \\ & c_{i2} & V_{i2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_{ik} & V_{ik} \end{bmatrix}$$

(3) 建立描述变压器各种状态信息 N 的现状的物元

$$R=\begin{bmatrix} N & c_{11} & V_{11} \\ & c_{12} & V_{12} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_{in} & V_{in} \end{bmatrix}$$

(4) 计算变压器检修物元、运行工况物元、试验项目物元的关联函数

$$K_{ij}(V_{ij})=\begin{cases} \frac{[c_{ij}, (V_{ij})_0]}{(c_{ij}-V_{ij})-[c_{ij}, (V_{ij})_0]}, & ij \notin (V_{ij})_0 \\ \frac{-[c_{ij}, (V_{ij})_0]}{|(V_{ij})_0|}, & ij \in (V_{ij})_0 \end{cases} \quad (5)$$

(5) 利用 EAHP 确定变压器各状态信息的权重系数 a_{ij} 。

(6) 计算变压器各状态信息的评估结果

$$[I_i(N)]=\sum_{j=1}^k a_{ij}K_{ij}(V_{ij}), i, =1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, k \quad (6)$$

(7) 确定发生何种失效得出变压器设备状态等级, 并判定检修策略

$$1 \leq i_{\max} \leq n, \{ [I_i(N)] \} = [I_0(N)] \quad (7)$$

其中通过 $I_0(N)$ 的数值可以判断变压器状态等级。

3 实例分析

基于可拓评价法和 EAHP 的变压器综合状态评估方法, 对实际运行两台变压器进行状态综合评估。

实例 1: 对某 110kV 变压器进行油色谱分析: $H_2=11 \mu\text{L/L}$, $CH_4=2.9 \mu\text{L/L}$, $C_2H_2=3 \mu\text{L/L}$, 总烃为 $5.37 \mu\text{L/L}$, 变压器绝缘电阻为 10G , 吸收比为 1.2, 变压器绕组介损为 0.7%, 变压器绕组泄漏电流为 $10 \mu\text{A}$, 油中微量水为 5mL/L , 直流电阻三相不平衡率是 0.9%, 运行工况良好, 没有遭受操作过电压作用, 没有很严重的缺陷记录。

根据所建立的可拓评价法框架,利用式(5)、(6)得到该台变压器状态的综合评估结果见表6。

表6 实例1的变压器状态评估结果

关联度	检修物元	运行工况物元	试验项目物元	状态物元
良好	0.33	0.26	0.54	0.33
正常	-0.13	-0.40	-0.20	-0.15
可疑	-0.36	-0.46	-0.37	-0.26
可靠性下降	-0.42	-0.79	-0.59	-0.35
危险	-0.68	-0.90	-0.85	-0.53

根据公式(7),状态物元中的最大值0.33表示的就是变压器的综合状态等级,由表5、6可以得到该变压器处于良好状态,可以继续运行,可延长维修时间。与现场经验专家和工作人员对该变压器的运行情况的判定,结果一致。

实例2:对某35kV变压器进行油色谱分析^[8]: $H_2=81.68 \mu\text{L/L}$, $CH_4=20.88 \mu\text{L/L}$, $C_2H_2=74.64 \mu\text{L/L}$, $C_2H_4=62.70 \mu\text{L/L}$, $C_2H_6=6.18 \mu\text{L/L}$,总烃 $164.41 \mu\text{L/L}$,变压器绝缘电阻为 10G ,吸收比为1.41,变压器绕组介损为2.75%,变压器绕组泄漏电流为 $10 \mu\text{A}$,油中微水量为 21mL/L ,直流电阻三相不平衡率是1.19%,运行工况良好,没有遭受操作过电压作用,没有很严重的缺陷记录。该局共有同类型变压器8台,其中有3台有不是很重要的缺陷记录;一年来,该变压器共记录有5项缺陷。

根据表7,可以得出该变压器处于危险状态,应该立即退出运行。从上述数据可以看到总烃体积分数是 $164.41 \mu\text{L/L}$, $C_2H_2=74.64 \mu\text{L/L}$,这些数据都远远超过了变压器油色谱分析中的注意值,因此,变压器的确应该进行维修。

表7 实例2的变压器状态评估结果

关联度	检修物元	运行工况物元	试验项目物元	状态物元
良好	-0.74	0.45	-0.77	-0.46
正常	-0.65	-0.25	-0.68	-0.37
可疑	-0.40	-0.47	-0.40	-0.13
可靠性下降	-0.44	-0.77	-0.57	0.02
危险	0.31	-0.64	0.06	0.51

笔者提出的评估方法所得变压器状态及检修策略与实际情况基本吻合,从而验证了所提状态评估方法的正确性和有效性。

4 结语

笔者基于可拓理论,将可拓评价法和EAHP相结合进行变压器状态综合评估。EAHP的应用,将变

压器状态信息之间的相对重要度采用一个可拓区间来表示,构造可拓判断矩阵,准确计算得到变压器状态信息指标的权重,从而提高了电力变压器状态评估的准确度。可拓评价法的应用,能够综合各种预试验项目、在线监测项目、运行及检修等多种因素影响,通过定性和定量相结合的分析方法,实现变压器状态的综合评估,显现出比模糊综合评判更强的优越性,且思路清晰,方法简单,为变压器的状态维修提供合理的决策依据。同时,文中方法也适用于其它设备的状态综合评估。

参考文献:

- [1] 姚文捷,马治亮,李化,等.电气设备绝缘在线监测和状态维修[M].北京:中国水利电力出版社,2004.
- [2] 李光范,刘有为,高克利,等.关于制订《电气设备状态维修导则》的原则框架[Z].关于制订《电气设备状态维修规程》第一次会议讨论稿,广西北海,2002.
- [3] 顾煜炯,董玉亮,杨昆.基于模糊评判和RCM分析的发电设备状态综合评价[J].中国电机工程学报,2004,24(8):189-194.
- [4] 莫娟,王雪,董明,等.基于粗糙集理论的电力变压器故障诊断方法[J].中国电机工程学报,2004,24(7):162-167.
- [5] TANG W H, SPURGE, WU Q H. An Evidential Reasoning Approach to Transformer Condition Assessments [J]. IEEE Transactions On Power Delivery, 2004(19): 1696-1703.
- [6] ZAMAN M R. Experimental Testing of the Artificial Neural Network Based Protection of Power Transformers [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1998(13): 510-517.
- [7] 田玲.基于层次分析法的购电方案模糊综合评价探讨[J].电网技术,2005,29(7):23-26.
- [8] 熊浩,孙才新,杜鹏,等.基于物元理论的电力变压器状态综合评估[J].重庆大学学报(自然科学版),2006,29(10):24-28.
- [9] 吴育华,诸为,高荣,等.区间层次分析法-IAHP (Interval AHP)[J].天津大学学报,1995,28(5):700-705.
- [10] 肖峻,王成山,周敏.基于区间层次分析法的城市电网规划综合评判决策[J].中国电机工程学报,2004,24(4):50-57.
- [11] 高洁,盛昭瀚.可拓层次分析法研究[J].系统工程,2002,20(5):6-11.
- [12] 顾洁.基于物元模型的电力系统中长期负荷预测[J].电力系统及其自动化学报,2004,16(6):68-71.
- [13] 蔡文.物元模型及应用[M].北京:科学技术文献出版社,1994.
- [14] 谢红玲,律方成.基于信息融合的变压器状态评估方法的研究[J].华北电力大学学报,2006,33(2):8-11.