

文章编号:1000-582X(2010)07-042-07

电力变压器有载分接开关可靠性评估方法

王有元¹,周婧婧²,李俊³,杜林¹,陈伟根¹

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400044;

2. 重庆电力科学试验研究院,重庆 401123; 3. 重庆市电力公司,重庆 400014)

摘要:在对电力变压器有载分接开关的典型故障模式、故障原因及影响等进行深入分析的基础上,运用故障树分析法建立了分接开关的故障树模型,并运用多目标决策理论中的权重集成方法,将主观权重、客观权重相结合,提出了结合重要度这一可靠性指标的电力变压器分接开关可靠性评估方法。评估实例表明,该方法不仅能对分接开关的故障模式进行清晰的演绎和推理,同时还能及时发现运行过程中的薄弱环节,反映各故障模式对系统的影响程度,得到分接开关运行时的可靠性水平,获得较好的评估结果。

关键词:电力变压器;有载分接开关;可靠性评估;故障树分析;可靠度分析

中图分类号: TM411

文献标志码: A

An assessment method for the reliability of on-load tap-changer of power transformer

WANG You-yuan¹, ZHOU Jing-jing², LI Jun³, DU Lin¹, CHEN Wei-gen¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;

2. Chongqing Electric Power Test & Research Institute, Chongqing 401123, P. R. China;

3. Chongqing Electric Power Corp., Chongqing 400014, P. R. China)

Abstract: Based on the thorough analysis of typical failure modes and influences of on-load tap-changers in power transformer, the fault-tree of tap-changers is set up using fault-tree analysis techniques and the assessment method for the reliability of tap-changers, combined with the index of the importance and the weight integration method based on the multi-objective decision-making theory and subjective and objective integrated weights, is put forward. The assessment examples show that the method can deduct and ratiocinate the failure modes of tap-changers clearly, find out the weaknesses in time during the operation, reflect the influence degree of each fault modes, obtain the reliability level of tap-changers in the operation and get better assessment results.

Key words: power transformers; on-load tap-changers; reliability assessment; fault tree analysis; reliability analysis

电力变压器作为电力系统中的关键设备,其可靠运行直接关系到电力系统的安全与稳定。在电力

变压器的事故与缺陷中,有载分接开关的事故与缺陷占有较大的比例^[1-3]。根据国家电网公司 2005 年

收稿日期:2010-03-10

基金项目:国家高技术发展计划资助项目(2009AA04Z416)

作者简介:王有元(1971-),男,重庆大学副教授,主要从事电气设备在线监测及故障诊断的研究,

(Tel)(023)65111795-8222;(E-mail)y. wang@cqu. edu. cn.

度的统计与分析,中国 110(66)kV 及以上电压等级的变压器事故与缺陷中,因分接开关引发的事故与缺陷占总事故与缺陷的比例高达 9%^[1]。随着电力系统规模的不断扩大和单台高电压、大容量的变压器不断增加,分接开关的可靠性对电力系统安全运行的影响越来越大。因此,研究分接开关的可靠性评估方法,有利于提高分接开关的运行可靠性,保证电力系统的安全与稳定。

故障树分析法(Fault Tree Analysis, FTA)是一种系统可靠性分析方法。利用故障树可以寻找潜在故障或进行故障诊断,还可以进一步预测系统故障发生的概率。对系统进行可靠性分析与预测,已广泛应用于工程实践^[4-7]。

可靠性评估实质上是一个多目标综合决策的过程,即多个专家组成一个决策群体对具有多个目标的有限个方案进行评价或者抉择。在多目标综合决策过程中,确定各个目标的权重是关键问题。对各个目标赋权的合理与否,直接关系到决策分析结果的科学性、合理性和可靠性^[8-11]。目前,确定各个目标权重的方法总体上可归为 2 大类:1)主观赋权评价法,该方法多采取定性的方法,由专家根据经验进行主观判断而得到权数,如层次分析法、Delphi 法等,其优点是要求的数据较少,且操作简便,但由于专家群体成员本身经验和知识的有限性,使其赋权结果受人为因素的影响较大。2)客观赋权评价法,

该方法主要根据历史数据来挖掘各项指标与评估对象之间的关系,进而确定各项指标相对于评估对象的重要性权重,如灰色关联度法、熵权法、主成分分析法等方法;客观赋权法虽然减少了人为因素的影响,但是对历史数据的依赖性较强,忽略了专家决策群体的偏好程度^[8-11]。

笔者在对分接开关的主要故障模式、故障原因及影响进行深入分析的基础上,建立了电力变压器分接开关的故障树模型;利用权重集成方法将主、客观权重相结合,以增强故障模式重要度的客观性、科学性;结合故障概率进行可靠度的计算;最后通过评估实例验证了该评估方法的有效性。

1 分接开关的故障模式分析及故障树的建立

1.1 分接开关故障模式及影响分析

分接开关是电力变压器内部的重要可动附件,主要由分接选择器、切换开关、选择开关、驱动机构、触头组等部件组成。其主要故障模式包括分接开关连动故障、拒动故障、超过极限位置、动静触头接触不良等。各故障产生的原因、影响^[12-13]如表 1 所示。根据有载分接开关的历史运行情况、维护情况、故障及事故分析情况,在表中给出了 3 种指标——严重度、可检测度、发生度及专家组对其的相应评分,可以从不同角度反映各故障模式及故障原因。

表 1 分接开关故障模式、原因及影响分析

故障模式	编号	故障原因	发生度	严重度	可检测度	故障影响
连动	1.1	微动开关及交流接触器性能差	2	2	1	造成对变压器的过励磁或母线电压达不到要求而使供电质量下降
	1.2	固定螺丝止动垫片长度不够	4	3	1	
	1.3	交流接触器剩磁或油污造成失电延时	5	1	1	
	1.4	螺丝松动	5	3	1	
拒动	2.1	弹簧拉力不够或拉断	4	3	1	选择器和过渡电阻烧毁或变形,主传动轴断裂;选择开关带负载选择电压抽头,当选择开关动触头离开定触头时,会产生电弧,进而烧毁触头
	2.2	开关无防爆装置	1	2	1	
	2.3	未安装短路环	1	2	1	
	2.4	油室底盘与中心轴密封太紧	5	1	1	
	2.5	软连线松散	4	2	1	
超过极限位置	3.1	机械限位失效	4	3	1	开关内部越级烧毁
	3.2	定位块高度不够	2	3	1	
	3.3	主传动轴偏位	2	2	1	
动静触头接触不良	4.1	弹簧极限不够	5	1	1	产生局部过热,严重时会使触头熔化变形
	4.2	抗疲劳强度不够	5	1	1	
	4.3	主弹簧软化	5	1	1	
	4.4	燃弧	2	3	1	

续表 1

故障模式	编号	故障原因	发生度	严重度	可检测度	故障影响
渗漏油	5.1	油室密封不严	5	1	1	导致变压器本体内绝缘油中氢气、乙炔和总烃含量超标;分接开关储油柜的油位异常升高或降低
	5.2	放油螺栓松动	4	2	1	
	5.3	密封胶圈偏位	2	1	1	
放电故障	6.1	绝缘材料性能差	2	3	1	直接形成局部过热;在放电较为严重的情况下,会造成变压器绝缘击穿,甚至烧毁分接开关
	6.2	过电压作用	2	4	1	

1.2 分接开关故障树模型的建立

FTA 是一种从系统开始,通过由逻辑符号绘制出的一个逐渐展开的树状分枝图来分析系统故障事件的方法。该方法可用来分析系统故障事件的发生概率,也可用来分析系统中各部件故障事件对系统故障的影响^[4-7]。

结合表 1 中分接开关的各种故障模式,将系统最不希望发生的事件即“有载分接开关故障”作为顶事件,以 T 命名;将“连动”、“拒动”等所有导致顶事件发生的直接因素和原因作为中间事件,命名为 E_i ($i=1,2,\dots,6$);将事故的基本原因作为底事件,如“交流接触器失电延时”、“主弹簧软化”等命名为 $X_{i,j}$ ($i=1,2,\dots,6; j=1,2,\dots,5$)。将这一系列事件列成逻辑图,构成分接开关的故障树,如图 1 所示。此故障树既体现了分接开关各组件在功能上的联系,又体现了它们之间的逻辑关系,使分析更全面、清晰。

2 分接开关可靠性评估

根据对图 1 故障树中各事件间逻辑关系的分析,得出该故障树的所有最小割集,即能直接导致顶事件发生的底事件为 $\{X_{1,1}\}, \{X_{1,2}\}, \dots, \{X_{6,2}\}$, 其故障概率为 $P(X_{1,1}), P(X_{1,2}), \dots, P(X_{6,2})$ 。各底事件对顶事件发生的重要度,即贡献程度不同,这里利用权重这一概念来反映重要度的差异。笔者将故障概率与权重有机结合,求取顶事件的发生概率,即分接开关的不可靠度 $P(T)$ 。

$$P(T) = \sum_{i=1}^6 P_{E_i} W_{E_i}, \quad (1)$$

$$P_{E_i} = \sum_{j=1}^n P_{X_{i,j}} W_{X_{i,j}}, \quad (2)$$

其中

$$R(T) = 1 - P(T). \quad (3)$$

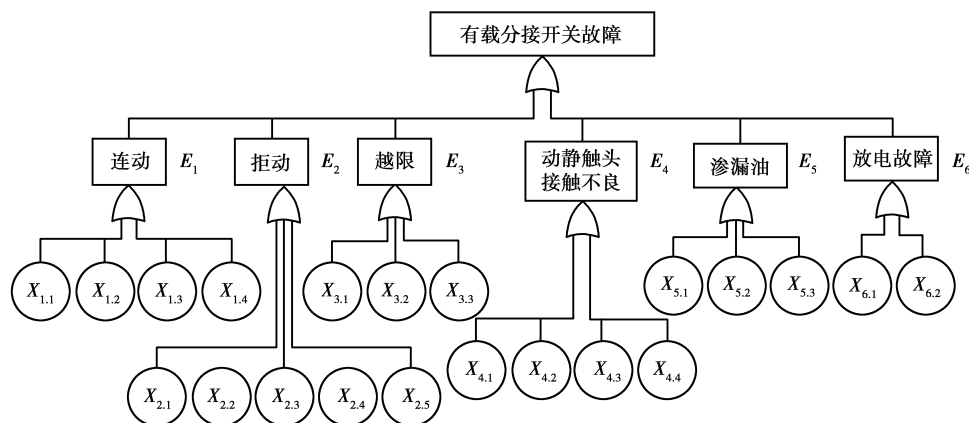


图 1 分接开关故障树

3 故障模式重要度的确定方法

3.1 基于改进层次分析法的主观权重的确定

层次分析法 (Analytical Hierarchy Process, AHP) 是一种将定性分析与定量测度相结合的多目

标决策分析方法,是解决复杂系统决策的有效工具,其核心是利用 1~9 间的整数及其倒数作为标度构造判断矩阵^[14]。笔者运用改进的层次分析法,避免了传统层次分析法一致性检验的繁琐工作,在一定程度上减少计算的工作量。其主要分析步骤

如下^[14-15]。

1)建立层次模型,笔者建立故障树模型进行分析;

2)通过表 2 确定各因素间的相对重要性,构造判断矩阵 H 为:

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1n} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ h_{n1} & h_{n2} & \cdots & h_{nn} \end{bmatrix}。$$

3)根据 H 依次求取反对称传递矩阵 K 、最优传递矩阵 L 、拟优一致阵 H^* 可分别表示为:

$$K = \lg H, \tag{4}$$

$$l_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (k_{ik} - k_{jk}), \tag{5}$$

$$H^* = 10^{L}。 \tag{6}$$

4)求取特征向量 W_i 为:

$$\bar{\omega}_i = \frac{u_i}{\sum_{i=1}^n u_{ij}}, \tag{7}$$

其中 $u_{ij} = \prod_{j=1}^n h_{ij}^*$, $u_i = \sqrt[n]{u_{ij}}$ 。

表 2 判断矩阵标度值及其含义

h_{ij}	含义
1	h_i 与 h_j 相比,同样重要
3	h_i 与 h_j 相比,稍微重要
5	h_i 与 h_j 相比,明显重要
7	h_i 与 h_j 相比,强烈重要
9	h_i 与 h_j 相比,极端重要
2,4,6,8	h_i 与 h_j 相比,重要性处于上述相应两个数之间
倒数	h_j 与 h_i 相比较得判断 $h_{ji} = 1/h_{ij}$

3.2 基于熵权法的客观权重的确定

熵是社会科学和物理科学中的一个重要概念,在信息理论中可作为不确定性和信息量的量度,也可作为评价属性相对重要度的一个工具^[16]。该方法仅根据数据本身所含有的信息评价各部分的重要度(权重),是一种普遍采用的客观权重评定方法。

根据电力变压器的历史运行情况、维护情况、故障及事故分析情况,将表 1 中 3 种指标值划分为 5 个等级,并按其程度给予相应的评分^[17],如表 3 所示。

表中各指标的划分标准参考变压器故障的历史记录、专家综合考虑设备本身结构、材料、加工工艺、

现场安装、运行环境和条件以及各种因素的意见,具体定义如下:

表 3 指标等级划分表

等级	1	2	3	4	5
严重度	轻度	一般	比较严重	严重	非常严重
检测度	直观	检测	综合判断	吊罩	返厂
发生度	很少发生	较少发生	周期发生	较多发生	经常发生

1)严重度。根据故障对变压器运行的影响程度和对变压器的损害程度进行严重度指标的等级划分,如表 4 所示。

表 4 严重度指标的等级定义

等级	定义
轻度	缺陷产生,但对整体影响不大,处理时无需停电
一般	缺陷产生,但对整体影响不大,可结合大修时处理
比较严重	缺陷明显,加强监测,条件允许,立即安排检修
严重	设备明显受损,时时监测,一个工作日内停运待检
特别严重	设备损坏严重,影响电网安全,需立即停运抢修,检修周期长

2)检测度。根据变压器故障的可检测程度进行检测度指标的等级划分,如表 5 所示。

表 5 检测度指标的等级定义

等级	定义
直观	通过肉眼观察、声响判断、表面温度等直观方法即可判断
检测	必须通过专门仪器检测后才能判断
综合判断	必须通过多种检测结果进行综合分析后才能判断
吊罩	必须通过吊罩才能判断
返厂	现场不能进行判断

3)发生度。根据故障的发生频度进行发生度指标的等级划分,如表 6 所示。

表 6 发生度指标的等级定义

等级	定义
极少发生	3~5 年/次
较少发生	1~3 年/次
周期发生	故障发生具有周期性
较多发生	0.5~1 年/次
经常发生	常见

根据熵重法的基本原理^[16],故障模式客观权重值可表示为:

$$w_i = (1 - E_j) / \sum_{j=1}^n (1 - E_j), \quad (8)$$

其中, E_j 为指标的熵, 可表示为:

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \times \ln(p_{ij}), \quad (9)$$

式中, $k = 1/\ln(m)$; $p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}$; x_{ij} 为判断矩阵 \mathbf{X}

中的元素; \mathbf{X} 由各故障原因的 3 项指标评分构成; m 即指标的个数, 取 $m=3$ 。

3.3 基于多目标决策理论的权重集成方法

多目标综合决策是当前决策分析理论、系统工程、运筹学等学科研究领域十分重要的组成部分, 在社会、经济、军事、工程系统及管理等领域中有着广泛的实际背景。如文献[10]利用多目标综合决策方法评估某型导弹发射车的不同系统及部件对整个系统功能贡献的重要程度, 实现了导弹发射车损伤情况的有效评估; 文献[11]利用多目标综合决策方法从导弹武器型号的进度风险、费用风险、效益等 5 个方面对各研究型号进行评估, 用以确定重点研究目标。从现有应用情况来看, 该方法能够兼顾主观赋权法和客观赋权法的优点, 弥补各自的不足与缺陷, 非常适合于评估复杂系统各部件的重要度。

就电力变压器而言, 因其具有价值昂贵、部件繁多、元器件失效概率为小概率事件等特点, 目前国内外对其各部件重要度的研究还处于定性研究阶段。因此, 笔者利用多目标综合决策方法综合专家群体的主观认识和目标的客观信息, 实现对电力变压器部件重要度的评估。

根据 3.1 和 3.2 中主观权重和客观权重的相关确定方法, 分别确定主观权重向量 $\bar{\omega}_i = (\bar{\omega}_1, \bar{\omega}_2, \dots, \bar{\omega}_m)^T$ 和客观权重向量 $\omega_i = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)^T$ 。

设采用多目标综合决策方法集成后的权重向量为 $\mathbf{W}_i = (W_1, W_2, \dots, W_m)^T$, 从而建立如下优化

模型:

$$\left. \begin{aligned} \min F(\mathbf{W}) &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \{k_1 [(W_j - \bar{\omega}_j) y_{ij}]^2 + \\ &k_2 [(W_j - \omega_j) y_{ij}]^2\}, \\ \text{s. t. } &\sum_{j=1}^m W_j = 1, \\ &W_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, m; \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中 k_1, k_2 为偏好系数, 它反映了决策者对指标的主观与客观的重视程度, 且 $0 < k_1 < 1, 0 < k_2 < 1, k_1 + k_2 = 1$ 。

若 $\sum_{i=1}^n y_{ij}^2 > 0 (j = 1, 2, \dots, m)$, 则优化模型(10)有唯一解, 其解为:

$$\mathbf{W} = (k_1 \bar{\omega}_1 + k_2 \omega_1, k_1 \bar{\omega}_2 + k_2 \omega_2, \dots, k_1 \bar{\omega}_m + k_2 \omega_m)^T \quad (11)$$

由式(11)即可得到综合主观和客观权重信息后的权重向量 \mathbf{W} , 通过修改偏好系数 k_1 和 k_2 可改变主客观权重信息在 \mathbf{W} 中所占的比例, 实现综合专家群体的主观认识和目标客观信息的目的。

3.4 分接开关各故障模式重要度的确定

依据 3.1 节, 在故障树模型的基础上, 由专家结合表 2 比较底事件 $\{X_{1.1}\} \sim \{X_{1.4}\}, \{X_{2.1}\} \sim \{X_{2.5}\}, \{X_{3.1}\} \sim \{X_{3.3}\}, \{X_{4.1}\} \sim \{X_{4.4}\}, \{X_{5.1}\} \sim \{X_{5.3}\}, \{X_{6.1}\} \sim \{X_{6.2}\}$, 中间事件 $E_1 \sim E_6$ 之间的重要程度, 并建立判断矩阵后, 此处以 $\{X_{1.1}\} \sim \{X_{1.4}\}$ 为例, 其判断矩阵 \mathbf{H} 为

$$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{6} & \frac{1}{3} \\ 2 & 1 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} \\ 6 & 5 & 1 & 4 \\ 3 & 3 & \frac{1}{4} & 1 \end{bmatrix}.$$

再根据公式(4)-(7), 得到 $\{X_{1.1}\} \sim \{X_{1.4}\}$ 的主观权重 \mathbf{W}_{1j} , 即 $[0.074, 0.110, 0.596, 0.220]$ 。同理, 得到所有事件的主观权重, 如表 7 所示。

依据 3.2 节, 结合表 1 中各事件的发生度等 3 项指标值, 仍以 $\{X_{1.1}\} \sim \{X_{1.4}\}$ 为例, 得到 $\{X_{1.1}\} \sim \{X_{1.4}\}$ 的判断矩阵 \mathbf{X}

$$\mathbf{X}_1 = \begin{bmatrix} 2 & 4 & 5 & 5 \\ 2 & 3 & 1 & 3 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

根据公式(8)、(9), 得到 $\{X_{1.1}\} \sim \{X_{1.4}\}$ 的客观权重 \mathbf{W}_{2j} , 即 $[0.068, 0.203, 0.254, 0.475]$ 。同理, 可得到各事件的客观权重值, 如表 8 所示。

表7 各事件主观权重值

事件	权重
$\{X_{1.1}\} \sim \{X_{1.4}\}$	[0.074, 0.110, 0.596, 0.220]
$\{X_{2.1}\} \sim \{X_{2.5}\}$	[0.176, 0.116, 0.093, 0.382, 0.233]
$\{X_{3.1}\} \sim \{X_{3.3}\}$	[0.630, 0.218, 0.152]
$\{X_{4.1}\} \sim \{X_{4.4}\}$	[0.352, 0.227, 0.291, 0.130]
$\{X_{5.1}\} \sim \{X_{5.3}\}$	[0.687, 0.187, 0.126]
$\{X_{6.1}\} \sim \{X_{6.2}\}$	[0.375, 0.625]
$E_1 \sim E_6$	[0.215, 0.207, 0.153, 0.171, 0.192, 0.062]

表8 各事件客观权重值

事件	权重
$\{X_{1.1}\} \sim \{X_{1.4}\}$	[0.068, 0.203, 0.475, 0.254]
$\{X_{2.1}\} \sim \{X_{2.5}\}$	[0.197, 0.066, 0.066, 0.459, 0.213]
$\{X_{3.1}\} \sim \{X_{3.3}\}$	[0.522, 0.304, 0.174]
$\{X_{4.1}\} \sim \{X_{4.4}\}$	[0.308, 0.308, 0.308, 0.076]
$\{X_{5.1}\} \sim \{X_{5.3}\}$	[0.561, 0.341, 0.098]
$\{X_{6.1}\} \sim \{X_{6.2}\}$	[0.35, 0.65]
$E_1 \sim E_6$	[0.164, 0.192, 0.130, 0.179, 0.226, 0.109]

依据3.3节,由主客观集成赋权法,令 $k_1=0.5$, $k_2=0.5$,即主客观权重的影响程度相同,得到各事件的权重,如表9所示。

表9 各事件集成权重值

事件	权重
$\{X_{1.1}\} \sim \{X_{1.4}\}$	[0.071, 0.167, 0.536, 0.226]
$\{X_{2.1}\} \sim \{X_{2.5}\}$	[0.187, 0.091, 0.080, 0.439, 0.203]
$\{X_{3.1}\} \sim \{X_{3.3}\}$	[0.576, 0.261, 0.263]
$\{X_{4.1}\} \sim \{X_{4.4}\}$	[0.33, 0.268, 0.300, 0.102]
$\{X_{5.1}\} \sim \{X_{5.3}\}$	[0.624, 0.264, 0.112]
$\{X_{6.1}\} \sim \{X_{6.2}\}$	[0.363, 0.637]
$E_1 \sim E_6$	[0.19, 0.2, 0.142, 0.175, 0.209, 0.084]

4 实例分析

某110 kV/50 MVA变压器在分接调压时发生越限,造成有载分接开关大盖变形、喷油,过渡电阻烧断,绝缘筒固定螺丝部分切断,三相调压绕组出现变形。

依据文献[17]中所提出的基于隶属函数和相对

劣化度的变压器各故障模式故障概率评定方法,通过变压器历史运行情况的统计分析以及专家结合变压器的运行情况、环境因素、有载分接开关劣化程度的现场考察意见,得到各事件的故障概率 $P(X_i)$,如表10所示。

表10 各事件故障概率

事件	$X_{1.1}$	$X_{1.2}$	$X_{1.3}$	$X_{1.4}$	$X_{2.1}$	$X_{2.2}$
$P(X_i)$	0.352	0.238	0.672	0.586	0.125	0.164
事件	$X_{3.3}$	$X_{4.1}$	$X_{4.2}$	$X_{4.3}$	$X_{4.4}$	$X_{5.1}$
$P(X_i)$	0.539	0.101	0.089	0.121	0.055	0.695
事件	$X_{2.3}$	$X_{2.4}$	$X_{2.5}$	$X_{3.1}$	$X_{3.2}$	
$P(X_i)$	0.081	0.102	0.087	0.738	0.572	
事件	$X_{5.2}$	$X_{5.3}$	$X_{6.1}$	$X_{6.2}$		
$P(X_i)$	0.157	0.224	0.071	0.068		

结合各故障模式的重要度,由式(2)得到分接开关各中间事件,即 $E_1 \sim E_6$ 的故障概率,依次为:

$$P(E_1)=0.5573, P(E_2)=0.1073,$$

$$P(E_3)=0.7162, P(E_4)=0.0991,$$

$$P(E_5)=0.4999, P(E_6)=0.0691。$$

由式(1)的分接开关的故障概率,即不可靠度为:

$$P(T) = \sum_{i=1}^6 P_{E_i} W_{E_i} = 0.3567。$$

由式(3)得到分接开关整体的可靠度为:

$$R(T) = 1 - P(T) = 0.6433。$$

根据变压器及部件寿命极限为可靠性低于50%,可靠性低于90%时变压器及部件状态劣化的标准,判断有载分接开关的可靠性水平很低,存在较为严重的缺陷或故障,应及时停电采取补救措施,以防重大事故的发生。

实际情况为:电动机构存在连调的缺陷,当电动操作发生连调时,电气限位失效;电动机构箱的传动轴密封不严,造成箱内进水,使机械限位的制动钉锈住;机械限位装置制造误差太大。上述缺陷严重影响了有载分接开关的可靠性水平。

评估实例与实际结果相吻合,说明了评估方法的有效性及其可行性。

5 结论

1)在分析有载分接开关典型故障模式及影响的基础上,建立了变压器分接开关故障树模型,该模型能将各类故障模式与系统故障紧密联系起来,并结

合各底事件的故障率、重要度计算分接开关整体的可靠度。

2)在变压器分接开关故障树模型的基础上,引入了重要度这一可靠性指标,并采用主、客观集成赋权法确定各故障模式对整个系统的权重值,能客观、科学地判定各故障模式对系统故障的影响程度,有效克服了传统故障树分析中因等值估计底事件概率重要度而使其可靠性指标失去意义的缺陷。

3)实例分析结果表明,基于故障树及多目标决策理论的变压器分接开关可靠性评估方法有较好的可行性及有效性。

参考文献:

- [1] 王梦云. 2005年度110(66)kV及以上变压器事故与缺陷统计分析[J]. 电力设备, 2006, 7(11): 99-102.
WANG MENG-YUN. Statistical analysis of accident and limitation of 110(66)kV and above transformer in 2005[J]. Electrical Equipment, 2006, 7(11):99-102.
- [2] HAN Y, SONG H. Condition monitoring techniques for electrical equipment—a literature survey[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(1): 4-13.
- [3] WANG M, VANDERMAAR A J, SRIVASTAVA K D. Review of condition assessment of power transformers in service [J]. Electrical Insulation Magazine, 2002, 18(6): 12-25.
- [4] 郭永基. 可靠性工程原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [5] CHEN S K, HO T K, MAO B H. Reliability evaluations of railway power supplies by fault-tree analysis [J]. Electrical Power Applications, 2007, 1(2): 161-172.
- [6] 杨国旺, 王均华, 杨淑英. 故障树分析法在大型电力变压器故障研究中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30(增刊): 367-371.
YANG GUO-WANG, WANG JUN-HUA, YANG SHU-YING. Application of fault tree analysis to large-scale power transformer fault study[J]. Power System Technology, 2006, 30 (supplement): 367-371.
- [7] 刘娜, 高文胜, 谈克雄, 等. 大型电力变压器故障树的构建及分析[J]. 中国电力, 2003, 36(11): 33-36.
LIU NA, GAO WEN-SHENG, TAN KE-XIONG, et al. Construction and analysis of fault tree for large-scale power transformer [J]. Electric Power, 2003, 36(11):33-36.
- [8] ZHANG X H, CHEN X Y, LIU H M, et al. Application of integrated weight method and support vector machine in the comprehensive evaluation of power quality[C]//The Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, April 6-9, 2008, Nanjing, China. [S. l.]: IEEE, 2008: 2181-2186.
- [9] FENG K, LIU H Y. A new fuzzy MADM algorithm based on subjective and objective integrated weights [J]. International Journal of Information and System, 2005, 1(3/4):420-427.
- [10] 陈健, 张锡恩, 李忠民, 等. 导弹装备权重计算方法选取研究[J]. 火力与指挥控制, 2005, 30(增刊):43-45.
CHEN JIAN, ZHANG XI-EN, LI ZHONG-MIN, et al. The research on method choosing of missile equipment weight calculation [J]. Fire Control and Command Control, 2005, 30 (supplement):43-45.
- [11] 李忠民, 汤淑春, 陈健, 等. 基于综合集成方法的多目标群体决策[J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(3):631-633.
LI ZHONG-MIN, TANG SHU-CHUN, CHEN JIAN, et al. Multi objective group decision making based on meta-synthesis engineering [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2005, 25(3):631-633.
- [12] 朱英杰. 最新变压器常用数据技术参数与故障监测及试验新技术实用手册[M]. 北京: 中国科学技术文献出版社, 2007.
- [13] HANDLEY B, REDFERN M, WHITE S. On load tap-changer conditioned based maintenance [J]. IEE Proceedings of Generation and Transmission, 2001, 148(4): 296-300.
- [14] VAIDYA O S, KUMAR S. Analytic hierarchy process: An overview of applications [J]. European Journal of Operational Research, 2006, 169(1): 1-29.
- [15] WANG Y Y, ZHOU J J, CHEN W G. Assessment method for the reliability of power transformer based on fault-tree analysis [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(3): 514-520.
- [16] 李荣钧. 模糊多准则决策理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [17] 周婧婧. 基于故障树分析的电力变压器可靠性评估方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.

(编辑 王维朗)