

电力变压器故障模式的分析及危害评估*

Failure Mode Effect and Criticality Analysis for Condition Maintenance of Power Transformer

刘娜¹, 梁国栋², 王刘芳³, 李伟³, 高文胜¹, 谈克雄¹

(1. 清华大学电机工程系, 北京 100084; 2. 安徽省电力公司, 合肥 230061;

3. 安徽省电力试验研究所, 合肥 230022)

摘要 对大型电力变压器进行了故障模式及影响分析(FMEA)和危害性分析(CA)。在FMEA中重点讨论了系统定义方式以及故障模式的分析项目,以便为故障诊断等维修活动提供更为全面有效的支持;在CA中针对常规危害度评价算法存在可靠性数据不易获得、评价因素单一的局限性,将模糊数学引入故障模式的危害评价中。提出了基于故障发生频率、严重程度以及检测难度三因素的模糊危害度评价模型,较为客观地描述了故障的危害性。

Abstract Investigation of the characteristics of transformer faults is primary and basic for condition maintenance. FMECA (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis) is a powerful analysis method for system reliability. In this work, FMECA, including FMEA (Failure Modes, Effects Analysis) and CA (Criticality Analysis), is applied to the fault analysis of large-scale power transformer. In FMEA, to enhance its assistance for fault diagnosis and the assignment of maintenance task, the mode of system definition and analysis items are focused on; In CA traditional criticality evaluation model is not feasible because of lacking for reliability data and incomprehensiveness of evaluation factors. Therefore a fuzzy synthetic evaluation model considering three factors fault frequency, severity and testability is presented. This model is more objective in the description of the criticality of transformer.

关键词 电力变压器 状态维修 故障模式影响及危害分析 模糊数学

Key words power transformer condition maintenance FMECA fuzzy mathematics

中图分类号 TM411 **文献标识码** A

0 引言

合理的变压器维修策略,应在保证运行可靠性的同时,尽可能降低费用开支。推行状态维修可避免现行定期检修方式可能会出现维修不及时或过度维修的缺陷。以往变压器可靠性分析多集中在获得失效曲线、计算可靠性指标、寻找产品薄弱环节等方面^[1~3],它们虽有其价值,但维修人员据此很难判断变压器当前的状态及确定相应的维修策略。对故障发生、发展规律进行研究,是实现故障综合诊断和确定合理维修策略的基础,因此应将可靠性分析中的故障分析技术引入维修领域。在2001年CIGRE关于变压器的工作总结中,也将“故障分析”列为今后工作的主要发展方向之一^[4]。

故障模式、影响及危害分析(FMECA)方法是

工程领域应用较广的故障分析方法之一,它包括故障模式及影响分析(FMEA)和危害性分析(CA),能够对设备可能发生的故障模式进行系统的描述,其中包括对故障原因、影响和危害性等多方面的分析。状态维修的特点在于根据故障征兆来确定故障类型并组织维修活动,但常规的FMEA中对有关故障征兆和测量方法的信息却缺乏描述或不够侧重,缺乏可靠性数据,使常规的计算方法难于实现对各故障危害性评价。对此本文研究的是①在FMEA方面,考虑如何更合理地组织故障模式及确定描述具体故障模式的项目;②在CA方面,考虑如何获取可靠性数据及怎样实现综合考虑多因素的危害度评价。

1 大型电力变压器的故障模式及影响分析

本文提出的FMEA基本过程见图1。将变压器作为“系统”,先探讨系统的定义方式和框图,然后确定故障模式的列举方式及列举项目,各环节都考虑了状态维修的需要。

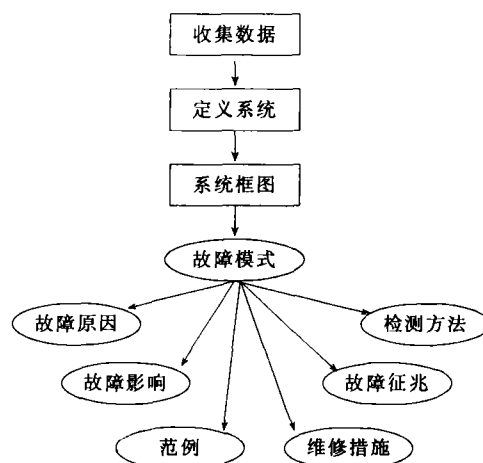


图1 FMEA基本过程示意图

1.1 系统定义方式

通用的FMEA在划分系统环节时,存在将系统级(按功能划分)或部件级(按部位划分)故障分开单独考虑等方面的不足。如变压器按功能划分可分为磁路、电路、绝缘、冷却、密封、测量保护和机械结构共7个子系统,在遇到类似“绝缘”这样涉及多个部件的问题时,无法得到故障发生部位的信息。将系统

* 教育部一流大学振兴计划资助项目

按部位划分更利于指导维修,但不便于考虑功能相关性较强的子系统间的故障,如因油泵问题导致冷却系统的故障、油泵磨损形成的金属粉末导致铁心多点接地等情况。

因此,本文采用功能和部位相结合的方式来划分故障,综合考虑系统级和部位级故障所得变压器系统框图见图 2(对载流系统、铁心等的进一步内容未在图中列出)。这种划分既包含所有故障模式,又兼顾了维修的需要。

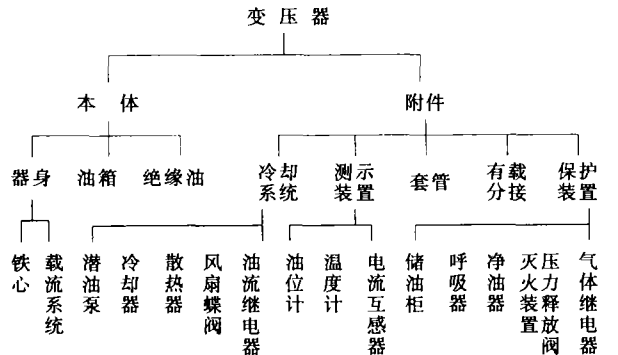


图 2 变压器系统框图

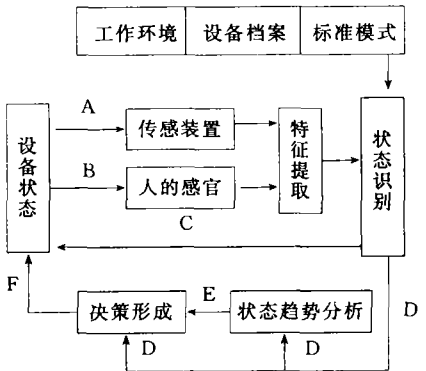
1.2 故障模式

变压器的故障复杂,在列举故障模式前需明确:①大型和中小型变压器的故障特点有差异,本文分析针对大型变压器。②目前变压器“故障”和“缺陷”界定不明确,本文统一视为故障(如“渗漏”问题较为普遍且“气侧渗漏”的危害性很大^[5],需予重视),二者区别可通过具体分析项目体现。

故障列举是在图 2 所示变压器系统框图的基础上,针对具体组件进行 FMEA 分析,列举可能发生的故障模式,并分析故障原因和故障影响等项目(参

见图 1)最终形成该组件的 FMEA 表。

从图 3 可见特征对于故障诊断的重要性,为加强对诊断过程和维修活动的支持,FMEA 表中增设了“故障征兆”和“故障范例”两项。“故障征兆”定义为故障即将发生或正在发生时可识别的状态。识别方式有两类:一类可通过装置检测,如温度、电磁、振动、噪声等;另一类人的感官(视觉、听觉、触觉和嗅觉)可感知。该定义既强调了征兆的可测性,又表明它是故障特征的反映。“故障范例”收集各故障模式的典型实例,为故障的模式识别积累素材,依据典型故障范例的类比推理也是诊断专家常采用的方式。



A、B:分别为能量或物态形式的特征信号;
C:指导进一步获得诊断信息;D:状态;
E:状态趋势;F:维修决策

图 3 故障诊断及决策形成过程

作为示例,表 1 列举了套管的 7 种故障模式及其原因、影响、征兆、检测方法和维修措施 5 项内容(故障范例未列出),每项均为故障诊断专家知识的总结,是建立故障诊断专家系统知识库的事实依据,故 FMEA 表是收集专家知识的有效途径。

表 1 套管 FMEA 表

序	故障模式	故障原因	故障影响	故障征兆	检测方法	维修措施
1	瓷套闪络	瓷套表面污秽或受潮	短路,绕组烧毁	表面积污	目测	除尘防污
2	绝缘受潮	密封不良	油受潮变质、绝缘强度下降	$\varphi(\text{H}_2)$ 、 $\varphi(\text{H}_2\text{O})$ 、 $\tan\delta$ 高	油色谱、微水、介损测量	增强对套管的密封管理
3	末屏引线断	测量时频繁拆卸	引线放电	测量引线放电	摇表测量	重新接线
4	渗漏油	油塞未拧紧或密封圈老化损坏;套管内油位过高	油位过低,发热,瓷瓶炸裂	油位低	油位检查	补油,换密封圈、调整油拉
5	导杆分流	穿缆碰铜管	电缆线股烧断	套管头温升高;油气异常, $\varphi(\text{CH}_4)$ 、 $\varphi(\text{C}_1+\text{C}_2)$ 高	油色谱、红外测量	寻找并排除过热点
6	载流部分接触不良	焊接不牢靠、螺钉未拧紧	接触电阻大	温升高,油气异常, $\varphi(\text{CH}_4)$ 、 $\varphi(\text{C}_1+\text{C}_2)$ 高	油色谱、红外测量	同上
7	均压球悬浮放电	安装不当	放电	测量局部放电较大	局部放电测量	恢复均压球的电气连接

2 故障模式危害性的模糊评价

CA 是基于 FMEA 来评价各故障模式危害性的方法,常用故障模式危害数 C_i 表征危害度的大

小^[6]。但该法不够严密,如影响判断故障危害性的因素很多,而 CA 仅考虑故障发生频率方面的影响,另外由于部门、地区的差异,难于获取统一的计算 C_i 的数据值。用危害矩阵^[7]可同时考虑故障频度和严

重程度两因素,且通过评分方式获得各因素对危害性评价的贡献,但仍未考虑来源不同导致的单因素评分的分散性,也未实现多个因素的综合。

维修决策时除考虑故障发生频度外,故障后果及故障的可预知性也是确定维修任务轻重缓急的重要依据。本文综合考虑故障频度、严重程度和检测难度3因素并将各因素评分模糊化,通过危害性综合模糊评价模型得到危害度结果。

2.1 危害度模糊评价模型

2.1.1 评判对象的因素集和评判集

评判对象的因素集 $U = \{u_i\}$, $i = 1, 2, 3$ 含3个因素,分别为故障频度 u_1 、严重程度 u_2 、检测难度 u_3 。每个因素的评判集 $V = \{v_j\}$, $j = 1, 2, \dots, 5$ 含5个等级,分别对应于很低、低、中、高、很高。评分采用10分制,5个等级的分值 x 和相应的隶属度函数 $\mu(x)$ 见图4。对于 v_1 ,隶属度

$$\mu_1(x) = \begin{cases} 1, & x \leq 2; \\ 2 - 0.5x, & 2 < x \leq 4. \end{cases}$$

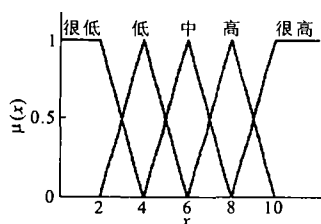


图4 评判集的隶属度函数 $\mu(x)$

表明隶属于等级“很低”的可能性。对于 v_2 ,隶属度

$$\mu_2(x) = \begin{cases} 0.5x - 1, & 2 < x \leq 4; \\ 3 - 0.5x, & 4 < x \leq 6. \end{cases}$$

同理可得 $v_3 \sim v_5$ 的隶属度函数 $\mu_3(x) \sim \mu_5(x)$ 。

3因素中, u_1 的评分按频率值推算(参见2.2节); u_2 和 u_3 的评分的参考规则见表2。

表2 故障严重程度和检测难度的评分值

严重程度	分值	检测难度	分值
涉及电路的故障	7~10	专门仪器也不能及时测到或突发性故障	8~10
涉及磁路的故障	4~6	专门仪器测量比较有效	4~7
其他附件	1~3	巡检项目内人员感知	1~3

2.1.2 模糊关系矩阵

对有 k 个评分值的单因素 u_i , 先分别求取对应于每一评分值的评判向量, 该向量由该分值对应的5个隶属度组成, 再由这 k 个向量确定因素 u_i 的评价向量 $r_i = [r_{i1} \ r_{i2} \ r_{i3} \ r_{i4} \ r_{i5}]$ 。对3因素集, 综合 r_1, r_2, r_3 构成模糊关系矩阵

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} & r_{35} \end{bmatrix}$$

2.1.3 模糊综合评价

综合评价应考虑各因素对危害度贡献的大小。

以权值向量 A 作为单因素 u_i 在总评价中影响程度大小的度量, $A = [a_1 \ a_2 \ a_3]$, 满足归一化条件: $a_1 + a_2 + a_3 = 1$ 。权值可按一定算法确定, 也可通过专家评分得到。

由 A 和 R 可得模糊综合评价向量:

$$B = A \cdot R = [b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4 \ b_5] = [a_1 \ a_2 \ a_3] \cdot$$

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} & r_{35} \end{bmatrix}$$

最后, 按最大隶属原则, 与 $b_j = \max(b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4 \ b_5)$ 对应的等级 v_j 将被判定为该故障的危害度等级。

2.2 变压器故障危害度评价实例

以表1中的“载流部分接触不良”为例评价危害度。此故障的3因素评分值分别为 $u_1 = 6.8$ 及 10 , $u_2 = 8$, $u_3 = 7$, u_1 的两个数值由国家电力公司有关1995—1999年变压器类设备运行情况及事故统计分析资料中提供的故障概率算得, 即以0.1作为基值对各故障模式的频率值进行归一化, 再乘以10得到故障频度评分值; u_2 和 u_3 的评分值参照表2选取。

由 u_1 的两值得得两评判向量 $r_{1a} = [0 \ 0 \ 0.6 \ 0.4 \ 0]$ 和 $r_{1b} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]$, 由其均值得到 u_1 的评判向量 $r_1 = (r_{1a} + r_{1b})/2 = [0 \ 0 \ 0.3 \ 0.2 \ 0.5]$ 。同理可得 u_2, u_3 的模糊评价向量 $r_2 = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]$ 和 $r_3 = [0 \ 0 \ 0.5 \ 0.5 \ 0]$ 。综合 r_1, r_2, r_3 , 得到模糊关系矩阵

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.3 & 0.2 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \end{bmatrix}$$

设 $A = [0.3 \ 0.5 \ 0.2]$, 则

$$B = [0 \ 0 \ 0.19 \ 0.66 \ 0.15]。$$

第4等级“高”对应的分量0.66是综合评价向量中的最大分量, 故判定该故障的危害度为“高”。

依此先对3因素 u_1, u_2, u_3 评分, 然后评价危害度, 获得变压器故障危害性的分析结果作为状态维修的依据。

3 结 语

将FMECA方法引入大型电力变压器的故障分析, 对FMEA首先通过功能和部位相结合的方式, 划分变压器系统以使FMEA方法在架构上对维修工作更具针对性; 然后对故障模式的描述项目中突出了和诊断有关的内容, 使该方法具有表述设备状态的能力, 从而更完整地支持故障诊断工作。

对于CA, 提出综合故障频度、严重程度、检测难度3方面因素的危害度模糊评价模型, 以评分的方式解决实际工作中精确值难以获取的困难, 该模型综合了多个评价因素, 反映变压器故障的危害性更客观。

(下转第8页)

站自南向北穿越椭圆形多雷地区,因此雷暴活动空间分布规律为:从格尔木向南逐渐增加,至那曲达到最大,再往南逐渐减小,进入拉萨,由于河谷地区的雷暴选择性,雷暴活动又迅速增强,见图6。

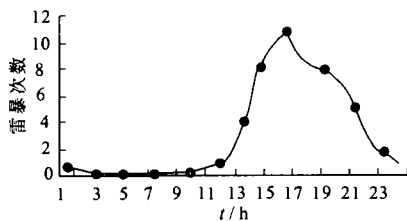


图5 那曲7月份雷暴次数的日变化统计图

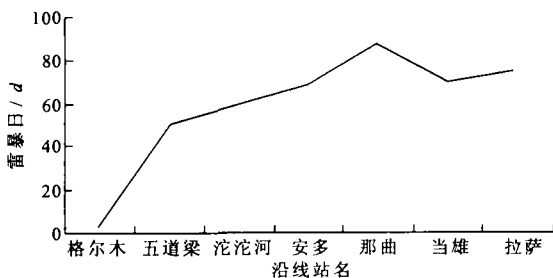


图6 格拉段沿线各站多年平均雷暴日数统计图

4 从格拉段雷暴活动看雷击过电压保护

根据规范,将格尔木到纳赤台划分为轻雷区,那曲地区为重雷区,沿线其它地区为中雷区。在具体的防护设计中,综合考虑不同地段的雷击选择性因素,如山岭、湖泊、河流、断层等。沿线各雷区采用与华南同等级地区相应的防护措施,线路防雷设计计算参照东部地区的雷电流概率分布曲线,能够达到安全防护的要求。

格拉段兼具高原和冻土两大地质因素,开展雷击过电压保护,电力设备与保护装置间的绝缘配合要针对海拔因素进行修正,并提高线路绝缘水平。另外,土壤电阻率是影响接地电阻大小的重要因素,降低杆塔接地电阻是提高线路耐雷水平的主要措施,地网的接地电阻则直接关系到雷电流入地时地电位

的升高。格拉段沿线冻土区具有冻结期土壤电阻率高的特点,如何使冻土区接地达到防雷保护要求便成为亟待解决的问题。

对格拉段雷暴活动时间分布规律的研究表明,沿线雷暴活动和冻土冻结期的时间分布都较好的遵循了季候变化规律。这样的季候配合使雷暴活动频繁、雷电流强度大的时期与冻土区土壤电阻率高的时期交替出现。因此,雷暴活动的时间分布规律是结合冻土区土壤电阻率变化规律进行雷击过电压保护设计、校验的重要依据。

5 结论

格拉段雷暴活动较为频繁,与我国华南地区相近,但持续时间短,远不及华中和华南地区。雷电流参数与雷云能量、海拔及土壤电阻率各因素的相关分析表明,格拉段雷电流幅值较低,不及华南地区,陡度小。雷暴活动空间分布由高原地形及热力作用决定;时间分布遵循独特的高原季候变化规律。

开展雷击过电压保护,在沿线各雷区采用与华南同等级地区相应的防护措施,并针对海拔因素适当加强绝缘。该地区雷击过电压保护的关键技术是对多年冻土地区接地技术的研究。

参考文献

- 刘继. 电气装置的过电压保护[M]. 北京:电力工业出版社,1982
- 中国科学院兰州高原大气物理研究所,中央气象局. 青藏铁路格尔木至拉萨段雷暴活动规律的分析[R]. 兰州:中国科学院兰州高原大气物理研究所,1977
- 钟连宏,常美生. 不同土壤电阻率对雷放电过程的影响[J]. 高电压技术,1997,23(1):64~66

(收稿日期 2002-11-28)

张丽丽 1979年生,硕士生,研究方向为高电压与绝缘技术。电话:(028)86468870

吴广宁 1969年生,教授,博导,研究方向为高电压与绝缘技术、电力设备在线监测与故障诊断。电话:(028)86465525

(上接第5页)

参考文献

- Guinic P, Aubin J. CIGRE's work on power transformer[A]. Substation Equipment Diagnostics conference IX[C]. EPRI: New Orleans, Louisiana, USA, 2001,40~55
- 江荣汉,王联群. 大型电力变压器故障机辅分析[J]. 中国电机工程学报,1992,12(6):25~32
- 李杰. 中小型电力变压器故障模式与可靠性运行[J]. 变压器,1997,34(4):9~12
- Jin Xianhe, Wang Changchang, Chen Changyu, et al. Reliability analyses and calculations for distribution transformers[A]. Proceedings of the IEEE Power En-

gineering Society Transmission and Distribution Conference[C]. IEEE: Los Angeles USA, 1999, 901~906

- 董宝骅. 变压器气侧渗漏事故的严重性及预防措施[J]. 中国电力,1997,30(5):63~64
- 王少萍. 工程可靠性[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2000
- Bergman W J. Slecting circuit breaker monitoring[A]. Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference [C]. IEEE Atlanta USA, 2001, 1071~1076

(收稿日期 2002-10-22)

刘娜 1975年生,博士生,研究方向为高电压技术和绝缘诊断。电话:(010)62772168