

应用工业安全可靠性评价技术评价 电力变压器的探讨

陈谷红¹, 李福兴², 高 凯²

(1. 上海达赫科技发展有限公司, 上海 200042; 2. 华东电力试验研究院, 上海 200437)

摘 要:运用最新工业安全可靠性评价技术(网络模型法、故障树法、马尔可夫模型法、故障模式和失效分析法),深入分析了重要的输变电设备——电力变压器的可靠性。计算了变压器串联和并联模型的可靠度;构建了变压器故障树简化模型,并进行了定性和定量分析;构建了变压器马尔可夫状态转移模型,并介绍了多种可靠性指标的计算方法;介绍了故障模式和失效分析的步骤和实例。

关键词:故障模式;变压器;可靠性评估

作者简介:陈谷红(1963-),男,从事安全可靠性评价和检测工作。

中图分类号:TN773 **文献标识码:**B **文章编号:**1001-9529(2006)07-0083-05

Application of evaluation technology of industrial safety and reliability to power transformers

CHEN Gu-hong¹, LI Fu-xing², GAO Kai²

(1. Shanghai Dawinn Technologies Ltd., Shanghai 200437, China;

2. East China Electric Power Test & Research Institute, Shanghai 200437, China)

Abstract: With the latest evaluation technology of industrial safety and reliability, namely Network Modeling, Fault Tree Analysis, Markov modeling, Failure Mode and Effect Analysis, the reliability of the power transformer which is an important power transmission equipment is analyzed in detail. The reliability of transformers in series and parallel models is calculated, and the simplified fault tree model for transformers is constructed, with quantitative and qualitative analysis being carried out. The Markov state transfer model for transformers is built, and some calculation methods for reliability indices are introduced. The steps of failure mode and effect analysis are presented, as well as the application case.

Key words: failure mode; transformer; reliability evaluation

1 安全可靠性评价方法和工具

1.1 网络模型法(Network Modeling)

许多用于工业控制应用领域的模块和系统都可以通过简单的网络来建立分析模型。这些网络可以表述系统元件的构成形式,如:串联、并联或是串并联组合。在使用可靠性分析网络模型法时,首先将系统的物理模型转换成网络模型,然后用或然率的结果分析模型。这要求充分了解系统的运行,包括正常状态和失效状态。一个可靠性网络模型由组成系统的模块或元件以及相互间的连线构成,其连线表示系统模块或元件间的物理关系。

如果能找到一条从左到右的可靠性通路,这些通路中的相关元件就足以保证系统的运行。对

于一个给定网络的可靠性,可用或然率规则进行评价。在运用或然率规则时,一般假设网络元素及其或然率彼此独立,互不干涉。通常“成功率”指的是可靠性或者是可用性。可靠性是指如果工作系统是不可修复的,该系统在某一段时间内的成功率;可用性是指如果工作系统是可修复的,该系统在某一时段的成功率。

由 n 个串联元件组成的系统,串联系统的成功率 R_s 为:

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i \quad (1)$$

式中 R_i ——系统中第 i 个元件的成功率。

由 n 个并联元件组成的系统,并联系统的成功率 R_s 为:

$$R_s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (2)$$

式中 R_i ——系统中第 i 个元件的成功率。

1.2 故障树分析法 (Fault Tree Analysis)

故障树分析法是一种由上而下,由果到因的逻辑推理方法。从具体的故障结果出发,以分支结构和逐层细化的方式寻找出所有的直接和间接因素。它有助于诊断复杂系统的设计问题。故障树分析法的最终分析结果是用图形来表达的。它将所有可能引起系统失效的事件组合在一起,找出系统中弱点和缺陷。故障树分析法能为安全可靠分析提供更加详细的文件和条理清楚的阐述。一份成功的故障树分析报告就是一份非常有价值的工程文件,能清楚地描述系统是如何在不同的故障情况下运行的。

在工程设计时,故障树分析法主要用于帮助找出潜在的设计弱点和缺陷。故障树分析法在分析失效和事故原因时也显得特别有价值。所有的触发事件和促成事件都将以图形方式来表示事件和导致的事故之间的全部关系。

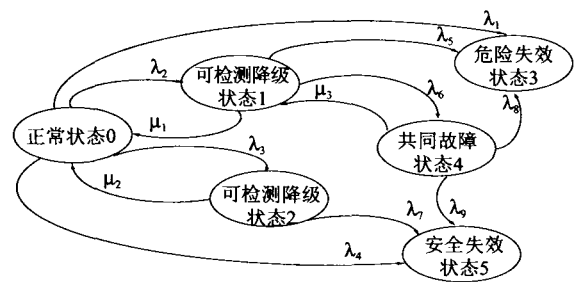
故障树法的分析过程从确定问题出发,在研究并掌握系统是如何运作以后,设法找到引起某一特定事件的所有可能性。对于每一项可能的因素,进行深入探索,直至找出其触发事件或基本的原始故障。

1.3 马尔可夫模型法 (Markov Modeling)

在工业领域中,可修复系统是非常典型的系统。通常系统在安装时,必须考虑到一旦发生故障,可以通过模块替换的方式予以修复。从可用性和安全性角度出发,这样的系统有很多优点。建立具有多个可修复模块的和不同故障容忍度的系统配置,可使系统在很低的失效率状态下连续运行许多年。修复需要花费时间,简单的可靠性网络模型法不能直接用于需要考虑修复时间的系统。作为一个可靠性和安全性的模型技术,马尔可夫模型法可用其状态图来完成这项任务,是一套完整全面的评价工具。

马尔可夫模型(见图 1)用某些元件代表系统的成功状态,有的代表系统失效状态。图中也必须能包括不同的换效模型。马尔可夫模型能用一个简单的图形描述一个可容忍故障的控制系统完整的运行状况。当系统被完整地建立好后,它就能显示整个系统的成功状态。同时也将显示系统的降级状态,虽然在该状态下系统还能成功运行,但很容易进一步趋向失效。状态图也能表示所有

的失效模式。



$\lambda_1 \sim \lambda_9$ ——失效率 $\mu_1 \sim \mu_3$ ——修复率

图 1 马尔可夫模型

一个马尔可夫模型能测算许多不同的可靠性和安全性参数,例如可靠性、可用性、危险失效率 (PFD)、安全失效率 (PFS)、平均失效时间 (MTTF)、平均修复时间 (MTTR) 等。总之,马尔可夫模型法可以说是一种适用于控制系统评价最灵活的模型技术。

马尔可夫模型的另一个表达方式是或然率的矩阵形式。根据图 1 的马尔可夫模型,其矩阵 P 表达式如下:

$$P = \begin{bmatrix} 1 - \sum_{i=1}^4 \lambda_i & \lambda_2 & \lambda_3 & \lambda_1 & 0 & \lambda_4 \\ \mu_1 & 1 - (\lambda_5 + \lambda_6 + \mu_1) & 0 & \lambda_5 & \lambda_6 & 0 \\ \mu_2 & 0 & 1 - (\lambda_7 + \mu_2) & 0 & 0 & \lambda_7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_3 & 0 & \lambda_8 & 1 - (\lambda_8 + \lambda_9 + \mu_3) & \lambda_9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

该 6×6 方阵代表系统的 6 个状态,同时显示系统所有的或然率(即所有的失效率和修复率)。据此可计算出系统在各时间状态下所有的可靠性或可用性参数,直至系统达到稳定状态。

1.4 故障模式和效应分析法 (FMEA)

故障模式和效应分析法是一个系统技术,被设计用于找出问题,它是一个由下而上的方法,从排列系统所有元件的详细清单出发,每次分析其中一个元件,根据需要可将系统分门别类地划分为各子系统和模块。因此故障模式和效应分析法可以按照所划分的组别进行操作。

故障模式和效应分析法的基本操作步骤:
(1)列出系统所有元件;(2)针对每个元件,列出所有的故障模式;(3)针对每个元件/每种故障模式,列出其对上一级系统的影响;(4)针对每个元件/每种故障模式,列出其影响的严重程度。

故障模式和效应分析法是以表格形式生成文件的,具体操作格式见表 1。计算机的电子数据

表便是生成这类表格理想的工具。从第 1~9 列,表中的每一项都有特定的含义。表格的行数取决于系统元件的数目,其内容根据元件在系统中的作用不同而定。

表 1 故障模式和效应分析法

1	2	3	4	5
元件名称	元件代码	元件功能	故障模式	故障原因
6	7	8	9	
故障影响	故障严重程度	故障率	评注	

故障模式和效应分析法还能够拓展为具有诊断能力的评价工具,对电路、模块、单位或系统进行安全和可靠性评估。故障模式、效应和诊断分析法的附加在线诊断功能见表 2 的第 10~16 列所示。

表 2 故障模式、效应和诊断分析法

10	11	12	13
故障可检测性	故障诊断	故障模式	安全可检测故障率
14	15	16	
安全不可检测故障率	危险可检测故障率	危险不可检测故障率	

故障模式和效应(包含诊断)分析法技术非常适用于已知元件故障模式的简单电路和过程。

2 应用实例及探讨

变压器由于结构复杂、部件繁多,使可靠性评估相当困难。一般是通过对在运和停运变压器数量和时间的统计来计算,诸如强迫停运率、可用系数、连续可用小时等指标,属于后验性分析。对运行单位和制造厂而言,最有实用价值的方法是对设备的可靠性进行先验性的评估。

2.1 变压器网络模型法

电力变压器的物理模型从结构上分析,是由各功能部件串并联构成。网络模型法就是将变压器的物理模型转化成可靠性网络模型,然后用概率计算进行分析。

(1) 变压器串联网路模型

通常情况下,电力变压器的任何一个关键部件损坏都会引起变压器故障,由此给出变压器的简化串联网路模型,见图 2。图中方框表示组成变压器的部件,连线表示模型构成关系。如果某部件故障,则经过该部件的路径不通。如果可以找到一条从左到右的通路,则变压器就可以可靠运行。

串联网路模型的可靠度可按式(1)计算。

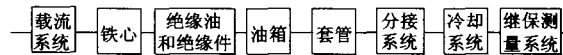


图 2 变压器串联网路模型

假设图 2 的模型中各部件的可靠度都达到 99%,则变压器的可靠度为 $(0.99)^8 = 92\%$ 。显然,串联网路的可靠度低于各部件的可靠度。因此,变压器的可靠度小于各部件的可靠度,串联网路中的部件越多或个别部件的可靠度较低,都会造成变压器的整体可靠度下降。

(2) 变压器并联网路模型

通常枢纽变电站的运行方式为 $N-1$,常在同一母线上接有 2 台变压器,互为备用,据此可得到 2 台变压器并联的网络模型。其可靠度可按式(2)计算。

假设每台变压器的可靠度为 92%,则该变电站的可靠度为 $1 - (1 - 0.92)^2 = 99\%$ 。可见,并联模型的可靠度高于各部件的可靠度。因此,采用 $N-1$ 方式运行,使变电站的可靠度提高,高于单台变压器的可靠度。

2.2 变压器故障树分析法

故障树主要用于寻找变压器的设计弱点和缺陷,它对于分析故障原因也非常有效。借助于故障树的形式,可以将变压器故障直观地逐级划分为基本故障类型。这不仅有利于故障原因的分析,而且对改进设计和制造工艺均有帮助。

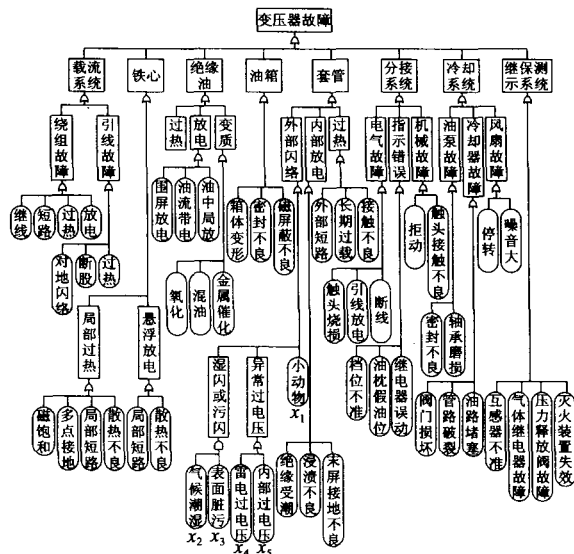
(1) 电力变压器的故障树

变压器的完整故障树非常复杂,构建故障树本身就是很有深度的研究课题,需要对故障内部机理和外部诱导作用等有清晰的认识,见图 3。

故障树数具有直观、灵活、可计算的特点,适用于对复杂系统的可靠性进行评价。它以清晰的图形表述了故障的内在联系,便于弄清故障原因、影响的传播路径,有利于对问题的全面分析并且可进行定性和定量计算。

(2) 故障树定性分析

电力变压器故障树的定性分析目的是要找出导致变压器故障的所有可能的基本原因的组形式。具体做法是,首先将故障树表达的逻辑关系表示成结构函数的形式,再运用吸收率 $(A + AB = A)$ 和分配律 $[A + (B + C) = AB + AC]$ 等对结构函数进行等价变换,最终表示成最小割集的组合。最小割集的组合对应了变压器故障的所有可能基本原因的组,可进一步分析变压器的薄弱



□表示顶事件,是故障分析的起始点;□表示中间事件,是分析过程的中间结果;○表示底事件,是不能分解或无需进一步分析基本故障因素;△表示或门,当其输入事件中至少一个发生,则输出事件就会发生;□表示与门,仅当其所有输入事件都发生时,输出事件才发生。

图3 变压器故障树简图

环节或对最小割集进行分类或分析故障频度等。以图3中的变压器套管外部闪络故障分支树为例,其结构函数为:

$$T = x_1 + x_2x_3 + x_4 + x_5 \quad (4)$$

式中 $x_1 \sim x_5$ ——5个故障原因,相加表示逻辑或,相乘表示逻辑与,故障原因 $x_1 \sim x_5$ 相互独立。

式(4)表明,套管外部闪络故障的最小割集有4个,包括3个一阶割集和1个二阶割集,通常低价割集比高阶割集容易发生。在各最小割集中,环境因素2.5个(气候潮湿、雷电过电压、小动物)、系统因素1个(内部过电压)、维护因素0.5个(表面脏污)。因此,从割集数量分析,环境因素对套管外部闪络的影响最为明显。若假设各割集发生的概率相同,那么由于环境因素导致套管外部闪络的故障频度就是系统因素导致的故障频度的2.5倍。

(3) 故障树定量分析

如果已经从其它途径确定了故障树中各基本故障因素的概率,就可以根据故障树表示的逻辑关系计算变压器发生故障的概率,即失效率。计算公式与网络分析法相同。

例如以某省公司统计了变压器故障主要原因和概率,见表3。

表3 变压器故障主要原因和概率 %

故障原因	线圈	引线	绝缘油	本体渗漏	分接开关	铁心	套管	其它
故障概率	0.17	0.13	0.20	0.34	0.41	0.39	0.69	0.37
符号	P_L	P_Y	P_J	P_B	P_F	P_X	P_T	P_Q

按照故障树的逻辑关系,变压器的失效率为:

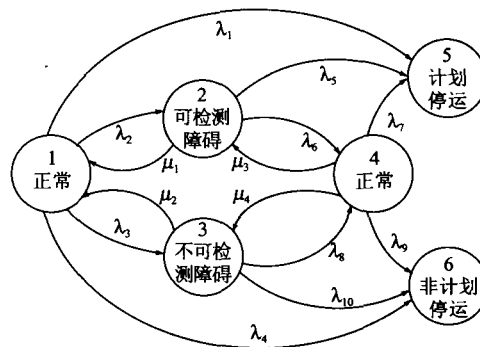
$$P = 1 - (1 - P_L) \cdot (1 - P_Y) \cdot (1 - P_J) \cdot (1 - P_B) \cdot (1 - P_F) \cdot (1 - P_X) \cdot (1 - P_T) \cdot (1 - P_Q) \quad (5)$$

代入各故障概率,得到变压器的失效率为2.6%,则变压器运行的可靠度为 $1 - P = 97.4\%$ 。

2.3 变压器故障马尔可夫模型

(1) 变压器马尔可夫模型的建立

马尔可夫模型的建立需要确定变压器的各种运行状态、各个状态间相互转化的概率。变压器故障的简化马尔可夫模型见图4。



圆圈表示设备的状态,包括正常状态、障碍状态、故障状态、停运状态,圈中的数字为状态的编号,在可以发生转移的状态间用带有方向箭头的曲线连接,曲线上的符号代表发生转移的概率,其中 λ_{1-10} 为失效率, μ_{1-4} 为修复率。

图4 变压器马尔可夫模型

变压器的故障和障碍情况见表4。

表4 变压器障碍和故障情况

性质	具体状态
可检测障碍	油色谱异常、局放增大、直流电阻异常、套管介损增大、渗漏油、分接机构拒动或误动、触头接触不良、套管接头发热、油泵异常、漏磁发热等
不可检测障碍	线圈股间短路、焊接不良、引线过热、铁心多点接地、紧固件松动等
故障	匝间短路烧毁、因短路冲击而机械损坏、外部闪络、分接装置损坏等

(2) 变压器马尔可夫模型的可靠性计算

马尔可夫模型直观地反映了变压器在各种状态间变化的途径和概率。图4中的状态转移关系也可以用矩阵 P 表达:

$$P = \begin{bmatrix} 1-\lambda_1-\lambda_2-\lambda_3-\lambda_4 & \lambda_2 & \lambda_3 & 0 & \lambda_1 & \lambda_4 \\ \mu_1 & 1-(\lambda_5-\lambda_6-\mu_1) & 0 & \lambda_6 & \lambda_5 & 0 \\ \mu_2 & 0 & 1-(\lambda_8-\lambda_{10}-\mu_2) & \lambda_8 & 0 & \lambda_{10} \\ 0 & \mu_3 & \mu_4 & 1-\lambda_7-\lambda_9-\mu_3-\mu_4 & \lambda_7 & \lambda_9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

设各状态的极限状态概率为 $P_1 \sim P_6$, 将它们组成行向量 $\alpha = [P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6]$, 因 $P =$, 得到 $(P_T - I)\alpha T = 0$, 说明该方程组线性相关, 故取其中任意 5 个方程和 $\sum_{i=1}^6 P_i = 1$ 组成新方程组。例如, 取后 5 个方程组成的新方程组:

$$\begin{bmatrix} \lambda_2 & -\lambda_5-\lambda_6-\mu_1 & 0 & \mu_3 & 0 & 0 \\ \lambda_3 & 0 & -\lambda_8-\lambda_{10}-\mu_2 & \mu_4 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_6 & \lambda_8 & -\lambda_7-\lambda_9-\mu_3-\mu_4 & 0 & 0 \\ \lambda_1 & \lambda_5 & 0 & \lambda_7 & 1 & 0 \\ \lambda_4 & 0 & \lambda_{10} & \lambda_9 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

求解上述方程组, 就可以得到系统各个状态的极限状态概率。根据对在运和停运变压器数量和时间的统计, 假设图 4 中变压器故障模型的失效率和修复率参数见表 5 所示。

表 5 失效率和修复率参数

λ_1	1.14×10^{-4}	μ_1	4.55×10^{-4}
λ_2	3.50×10^{-6}	μ_2	4.55×10^{-4}
λ_3	3.50×10^{-6}	μ_3	4.55×10^{-4}
λ_4	5.71×10^{-5}	μ_4	4.55×10^{-4}
λ_5	3.50×10^{-6}		
λ_6	3.50×10^{-6}		
λ_7	1.14×10^{-4}		
λ_8	3.50×10^{-6}		
λ_9	5.71×10^{-5}		
λ_{10}	3.50×10^{-6}		

其中, P_1 为正常运行概率, $P_1 + P_2 + P_3$ 为安全运行概率, P_5 为计划停运概率, P_6 为非计划停运概率, $P_4 + P_5 + P_6$ 为事故概率, $P_5 + P_6$ 为供电失效概率。这里的概率与可靠性统计工作中的计划停运率、非计划停运率、可用率等百分比数据是有区别的。

根据马尔可夫模型还可计算其它可靠性和安全性参数, 诸如平均无故障工作时间, 平均修复时间等。

2.4 变压器故障模式和效应分析

变压器故障模式和效应分析是通过各部件的故障模式对设备可靠性的影响和危害, 确定失效机理和原因, 从而提出降低失效影响、改进产品设计的对策。它和故障树的分析方法相反, 是由下而上, 由因到果的逻辑归纳法, 基本步骤为 4 步, 见图 5。

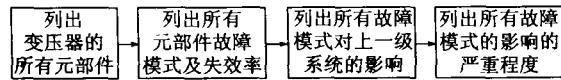


图 5 变压器故障模式和效应分析的过程

故障模式对上一级的影响主要表现为功能的劣化或丧失, 它也具有树状的层次结构和因果传播关系。影响的严重程度是根据故障模式引起的各种后果(包括对功能完整性、人员和环境安全性的影响)来分级的。

高风险运行模式和低风险运行模式是以所评估对象或目标对危险性的要求来衡量的。低风险运行模式所评估对象对危险性的要求不高, 其失效率按照实现危险设计要求的平均失效率来选取; 反之, 高风险运行模式失效率按照每小时的危险失效率来选取。

部件故障所带来的影响的严重等级越高, 则要求该部件的设计可靠性越高, 失效率越低。另外, 变压器元部件 i 的危害度 CR_i 也可定义为:

$$CR_i = P_i \times K_{ij} \times P_j \quad (8)$$

式中 P_i ——元部件 i 的基本失效概率;

K_{ij} ——元部件 i 失效后导致故障 j 百分比;

P_j ——发生故障 j 后在单位时间内导致设备失效的概率。

计算出变压器各元部件的危害度, 就可以对失效模式进行定量分析, 针对危害度大的元部件, 必需改进设计和制造工艺。

故障模式和效应分析也可以与故障检测和诊断技术结合, 前者是从设计制造阶段保证可靠性, 后者是从运行中的及时预警、减少突发事故、降低故障损失几方面保证可靠性。

3 结论

对于变压器这种复杂系统, 综合采用多种可靠性评估方法, 不仅可以得到多种可靠性指标数据, 而且可以从多角度对可靠性的影响因素、故障机理、故障危害度以及状态转化关系进行分析, 并可以找出各部件中的薄弱环节、故障发展的逻辑关系。从而有针对性地提高部件质量, 合理规范维护检修周期和内容, 科学定义并联运行备用设备、器件, 大大提高运行效率。虽然可靠性评估现仅采用了简化模型、演示计算和分析, 但评估结果对于分析变压器运行可靠性, 确定故障薄弱环节, 掌握故障发展过程等, 具有一定的现实意义。

收稿日期: 2006-03-20