



朱志伟,史慧革,田慧敏,等. 基于多态多值决策图的有载分接开关可靠性评估[J]. 轻工学报,2021,36(4): 118-124.

ZHU Z W,SHI H G,TIAN H M, et al. Reliability evaluation of on-load tap-changer based on multi-state multi-valued decision diagram[J]. Journal of Light Industry,2021,36(4):118-124. DOI:10.12187/2021.04.015

中图分类号:TM4;TP2 文献标识码:A 文章编号:2096-1553(2021)04-0118-07

# 基于多态多值决策图的有载分接开关 可靠性评估

## Reliability evaluation of on-load tap-changer based on multi-state multi-valued decision diagram

朱志伟<sup>1</sup>,史慧革<sup>2</sup>,田慧敏<sup>1</sup>,曹桂州<sup>1,3</sup>

ZHU Zhiwei<sup>1</sup>,SHI Huige<sup>2</sup>,TIAN Huimin<sup>1</sup>,CAO Guizhou<sup>1,3</sup>

- 1. 郑州大学 电气工程学院,河南 郑州 450001;
  - 2. 国网河南省电力公司 南阳供电公司,河南 南阳 473000;
  - 3. 国网河南省电力公司 电力科学研究院,河南 郑州 450052
- 1. School of Electrical Engineering,Zhengzhou University,Zhengzhou 450001,China;
  - 2. Nanyang Power Supply Company,He'nan Electric Power Company of State Grid,Nanyang 473000,China;
  - 3. Electric Power Research Institute,He'nan Electric Power Company of State Grid,Zhengzhou 450052,China

### 关键词:

系统可靠性;变压器  
有载分接开关;多态  
多值决策图;概率重  
要度

### Key words:

system reliability;  
transformer on-load  
tap-changer;  
multi-state multi-valued  
decision diagram;  
probability importance

**摘要:** 针对目前有载分接开关可靠性分析方法中存在的底事件数量众多、组件多态性等问题,采用多态多值决策图(MMDD)方法对其进行可靠性评估. 该方法首先基于有载分接开关故障模式的归纳和分类,建立可靠性评估模型;再采用MMDD方法对系统可靠性进行定量分析;最后基于概率重要度,评估分接开关各个故障状态下的可靠性. 实例分析结果表明,MMDD对故障分析具有发现、演绎、计算和解释的优点,并可得出各个故障因素与系统可靠性关系.

收稿日期:2020-07-23

基金项目:国家自然科学基金项目(61473265,61603345);河南省高校科技创新团队支持计划项目(17IRTSTHN013)

作者简介:朱志伟(1968—),男,河南省郑州市人,郑州大学实验师,主要研究方向为电力系统故障检测、非线性系统.

**Abstract:** Aiming at the problems of large number of bottom events and component polymorphism in the current reliability analysis method of the on-load tap-changer, the reliability was evaluated by using the multi-state multi-valued decision diagram (MMDD). First, the reliability evaluation model was built based on the induction and classification of the fault modes of the on-load tap-changer. Second, the system reliability was quantitatively analyzed by using the MMDD. Finally, the reliability of each fault condition of the tap-changer was evaluated under the probability importance of each component. Example analysis results showed that the MMDD had the advantages of investigation, deduction, calculation and explanation of the system faults, and the relationship between fault term and system reliability could be obtained.

## 0 引言

有载分接开关是电力变压器的关键组件,它关系着电力变压器的有效运行,进而关系着整个电力系统的安全稳定运行<sup>[1]</sup>.有载分接开关结构复杂、组件多、模态多且操作频繁,在变压器故障中占有较高的故障率.因此,对其故障进行分类,得出故障因素与系统可靠性关系,对电力系统的安全运行具有重要意义.

可靠性是指系统在规定时间、规定条件下,完成规定任务的能力<sup>[2]</sup>. Monte Carlo 仿真<sup>[3]</sup>、二元决策图<sup>[4]</sup>等方法可进行有载分接开关可靠性分析,但无法有效解决系统或组件的多态性问题<sup>[5]</sup>.近年来故障树分析法(Fault Tree Analysis, FTA)<sup>[6]</sup>、Markov 模型法<sup>[7]</sup>、BP 网络<sup>[8]</sup>等被广泛应用于电力系统可靠性和重要度分析,但故障树分析法在评估过程中需找出最小割集才能求解,而且这些方法的模型大小随底事件数量的增加呈指数增长,其计算精度降低,分析复杂度和计算耗时则大大增加,难以满足有载分接开关可靠性分析的要求.多态多值决策图(Multi-state Multi-valued Decision Diagram, MMDD)分析方法具有模型小、易于计算等优点,适用于存在多模态组件的系统可靠性评估.基于此,本文拟采用 MMDD 方法对有载分接开关的可靠性进行评估,以期为其检修决策提供有效依据.

## 1 有载分接开关故障树模型

有载分接开关是变压器内部的重要可动部

件,主要由切换开关、选择开关、操作机构、油室等组成,其主要故障模式、原因及影响见文献[9].

故障树分析法将各个故障用树图的方式表达,其中每个节点表示顶事件或底事件,顶事件表示应尽力避免的重大故障,而底事件是指引起顶事件发生的事件,各个事件之间使用特定符号连接,从而形成一张故障树图.本文定义  $T$  为顶事件“有载分接开关故障”,定义  $E_{i,j}$  ( $i=1, 2, \dots, 5; j=1, 2, \dots, 9$ ) 为底事件.基于有载分接开关的主要故障可得有载分接开关的故障树如图 1 所示.

## 2 有载分接开关 MMDD 及概率计算

### 2.1 MMDD

MMDD 的节点分为非终节点和终节点两种(见图 2),其中圆圈为非终节点,表示结构函数中的某个变量或系统中的某一组件;方框为终节点,表示某一故障状态;单向边为非终节点的分支,一个  $n$  状态组件  $A$  对应的节点有  $n$  个分支.

一个  $n$  状态非终节点的状态用相关联的多值状态变量  $x_A$  表示,  $x_A=i$  表示组件  $A$  处于状态  $i$ ,  $n$  状态组件的逻辑表达定义为

$$F = A_1 \cdot F_{x_A=1} + A_2 \cdot F_{x_A=2} + \dots + A_n \cdot F_{x_A=n} = \text{case}(A, F_{x_A=1}, F_{x_A=2}, \dots, F_{x_A=n})$$

其中,  $\text{case}(\cdot)$  表示一种多值逻辑,每个值对应一个特定状态;  $F_{x_A=i}=1$  或 0 分别表示组件  $A$  处于或不处于状态  $i$ ,如果  $A$  有  $n$  个状态,那么  $F$  就有  $n$  个取值.

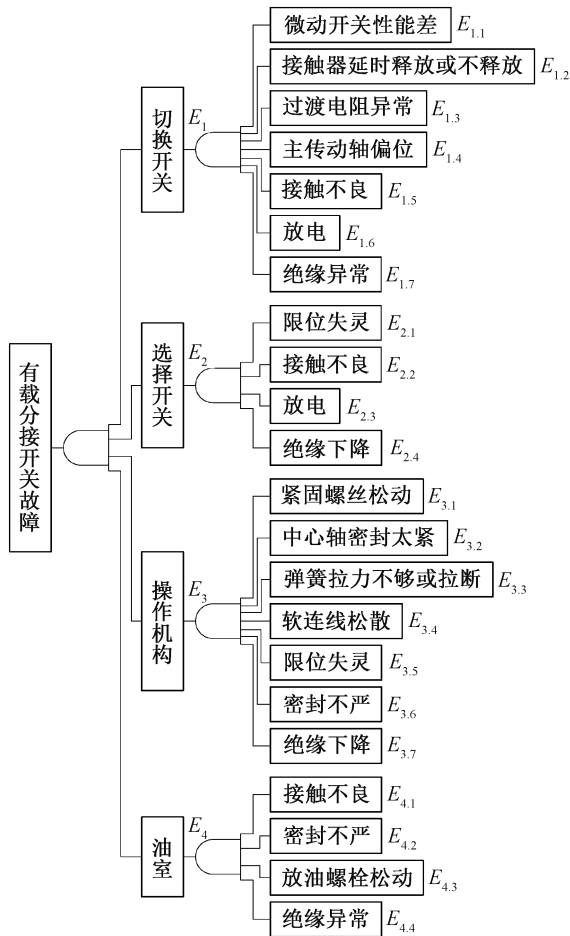


图1 有载分接开关故障树图

Fig. 1 Fault tree diagram of the on-load tap-changer

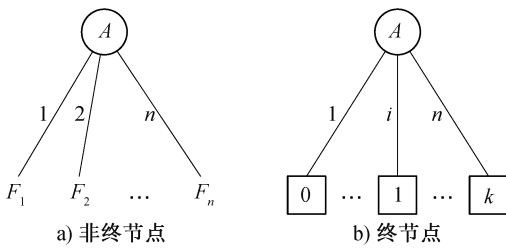


图2 MMDD的节点表示

Fig. 2 The node diagram of MMDD

为计算系统可靠性,需将故障树上的事件等价于决策图上的多值变量,并根据变量排序,采用ite (If-Then-Else) 规则生成MMDD模型<sup>[10]</sup>.ite规则为

$$G \diamond H = \text{case}(x, G_1, G_2, \dots, G_n) \diamond$$

$$\text{case}(y, H_1, H_2, \dots, H_n) =$$

$$\begin{cases} \text{case}(x, G_1 \diamond H_1, G_2 \diamond H_2, \dots, G_n \diamond H_n) & \text{index}(x) = \text{index}(y) \\ \text{case}(x, G_1 \diamond H, G_2 \diamond H, \dots, G_n \diamond H) & \text{index}(x) < \text{index}(y) \\ \text{case}(y, G \diamond H_1, G \diamond H_2, \dots, G \diamond H_n) & \text{index}(x) > \text{index}(y) \end{cases}$$

其中, $G, H$ 表示系统子决策图,符号 $\diamond$ 表示逻辑运算符AND或OR.

由ite规则得到的MMDD模型不是最简模型,通常使用下述简化规则.

规则1:如果代表同一变量或组件的两个非终节点的某条分支指向同一个节点,则合并这两个节点.

规则2:如果一个非终节点的所有状态分支全部指向某一相同节点,那么删除此非终节点,直接连接此相同节点.

### 2.2 状态概率计算

MMDD的系统状态概率是指根节点与终节点之间所有路径的概率之和,其计算方法如图3所示.首先在结构图中标记从根节点到某一个终节点的所有路径,得到每条路径的概率,最后得到所有概率总和,其中 $P_{i, n_i}$ 表示节点 $x_i$ 处于状态 $n_i$ 的概率.

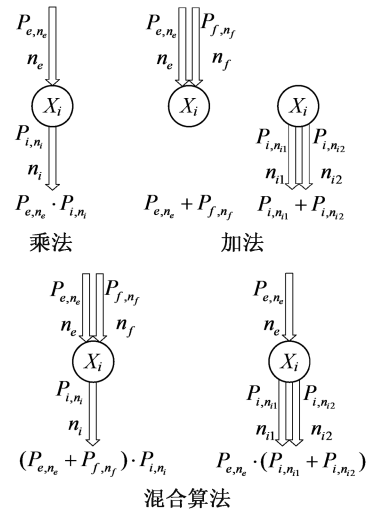


图3 MMDD概率计算方法

Fig. 3 Probability calculation method in the MMDD

基于上述计算规则,系统为某个状态的概率为

$$P(S_k) = \sum_{i=1}^m P_i \quad i = 1, 2, \dots, m$$

其中, $m$ 为路径数, $S_k$ 为系统状态, $P(S_k)$ 为系统处于 $S_k$ 的概率.

### 2.3 有载分接开关的MMDD及可靠性计算

用 $S_0 \sim S_6$ 分别表示有载分接开关正常工作、联动故障、拒动故障、超过极限位置故障、触

头接触不良故障、渗漏油故障、放电故障,则由有载分接开关故障树模型得到的 MMDD 如图 4 所示。

根据 MMDD 概率计算规则,以有载分接开关渗漏油故障为例说明概率的计算方法:

$$P(S_5) = P(E_{1.0})P(E_{2.0})\{P(E_{3.6}) + P(E_{3.0})[P(E_{4.2}) + P(E_{4.3})]\}$$

其中, $P(E_{i,j})$ 表示该底事件发生的概率, $P(S_5)$ 表示有载分接开关系统处于状态  $S_5$  的概率。

### 3 底事件概率确定及概率重要度计算

#### 3.1 底事件概率确定

采用多特征参量综合评估方法可得到底事件概率:基于模糊数学和专家知识,建立变压器故障特征知识库;基于故障参量的特点,采用模糊隶属度函数和相对劣化度方法对故障概率进行计算。变压器状态的故障特征参量如表 1 所示。

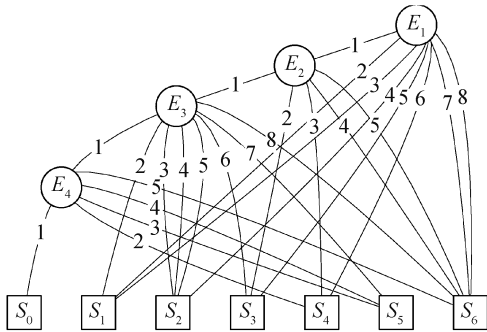


图 4 有载分接开关的 MMDD

表 1 中单个特征参量只能部分反映相关部件的故障模式<sup>[11]</sup>。假如电力变压器故障模式  $X_i$  对应的故障专家知识集为  $P=(P_j)_{1 \times n}$ ,若设  $P$  对应的故障概率为  $\mu(P_j)$ ,则该故障模式概率为

$$P(X_i) = (\mu(P_1) \cdots \mu(P_n)) \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \vdots \\ \omega_n \end{pmatrix}$$

其中, $n$ 为故障模式  $X_i$  所对应的特征参量个数, $\omega=(\omega_1, \omega_2 \cdots \omega_n)^T$ 为参量集的权重向量,采用文献[12]的改进层次分析法(IAHP)确定特征参量的权重。如果缺失了某个特征参量,则该特征参量的权重取 0,并重新计算对应的其余特征参量的权重。有载分接开关部件各故障模式与故障特征参量的对应关系如表 2 所示。

表 2 中分接开关故障模式对应的特征参量分为两种情况:一是规定有试验注意值;二是未按规定试验注意值或试验中没有明确试验数据的特征参量。针对这两种情况的特征参量,分别采用基于模糊隶属度函数和相对劣化度方法<sup>[13]</sup>进行故障发生概率评定。

采用基于模糊隶属度函数的故障发生概率估计时分为以下两种情形。

1) 规定有上限注意值特征参量的隶属函数:

$$\mu_a(y) = \frac{y^2}{y^2 + a^2}$$

其中, $a$ 为检测值存在上限注意值, $y$ 为检测值。

Fig. 4 The MMDD of the on-load tap-changer

表 1 变压器状态的故障特征参量

Table 1 The fault feature parameters of transformer state

代码	试验项目	代码	试验项目	代码	试验项目
$P_1$	溶解气体色谱分析	$P_{15}$	空载电流、损耗	$P_{29}$	油中糠醛含量
$P_2$	短路阻抗	$P_{16}$	冷却设备及二次回路试验	$P_{30}$	振动
$P_3$	绕组绝缘电阻	$P_{17}$	绕组等电阻	$P_{31}$	噪声
$P_4$	电容型套管 $\tan\delta$	$P_{18}$	高压试验	$P_{32}$	油位计及其二次回路试验
$P_5$	绕组 $\tan\delta$	$P_{19}$	测温设备及相关回路试验	$P_{33}$	油箱表面温度
$P_6$	绝缘油试验	$P_{20}$	气体继电器及其二次回路试验	$P_{34}$	运行巡视、检查
$P_7$	交流耐压试验	$P_{21}$	压力释放器校准	$P_{35}$	外观检查
$P_8$	绝缘纸(板)含水量	$P_{22}$	密封试验	$P_{36}$	红外线测温
$P_9$	铁芯等电阻	$P_{23}$	局部放电试验	$P_{37}$	温度
$P_{10}$	绝缘油含气量	$P_{24}$	电流互感器绝缘试验	$P_{38}$	圆图试验
$P_{11}$	绝缘油含水量	$P_{25}$	全电压空载合闸	$P_{39}$	有载调压试验、检查
$P_{12}$	绕组泄漏	$P_{26}$	阻抗测量	$P_{40}$	变比试验
$P_{13}$	三相变压器组别校准	$P_{27}$	绝缘纸聚合度	$P_{41}$	过渡电阻试验
$P_{14}$	绕组所有分接电压比	$P_{28}$	屏蔽绝缘电阻	$P_{42}$	变形试验

表2 有载分接开关各故障模式与特征参量的对应关系

Table 2 The relationship between fault models and fault features of the on-load tap-changer

故障模式	故障名称	故障特征参量
$X_1$	开关性能差	$P_{34}, P_{38}$
$X_2$	放油螺栓松动	$P_1, P_6, P_{34}$
$X_3$	接触器释放延时	$P_{31}, P_{34}$
$X_4$	过渡电阻异常	$P_{42}$
$X_5$	切换开关接触不良	$P_2, P_{18}$
$X_6$	选择开关限位失灵	$P_{12}$
$X_7$	主传动轴偏位	$P_{18}, P_{30}, P_{31}, P_{34}$
$X_8$	放电或爬电	$P_{31}, P_{34}$
$X_9$	选择开关放电	$P_2, P_3, P_6, P_{11}, P_{33}, P_{38}$
$X_{10}$	绝缘异常	$P_9$
$X_{11}$	选择开关接触不良	$P_1, P_5, P_6$
$X_{12}$	紧固螺丝松动	$P_{34}$
$X_{13}$	选择开关绝缘异常	$P_9$
$X_{14}$	弹簧拉力不够或拉断	$P_{33}, P_{34}$
$X_{15}$	中心轴密封太紧	$P_{34}$
$X_{16}$	限位失灵	$P_{33}, P_{34}$
$X_{17}$	软连线松散	$P_{34}$
$X_{18}$	接触不良	$P_2$
$X_{19}$	密封不严	$P_{34}$
$X_{20}$	绝缘下降	$P_9$
$X_{21}$	放油螺栓松动	$P_1, P_6, P_{34}$
$X_{22}$	油室密封不严	$P_1, P_6, P_{34}$
$X_{23}$	油室绝缘异常	$P_9, P_{18}$

2) 规定有下限注意值特征参量的隶属函数:

$$\mu_b(y) = \begin{cases} 0.5 - 0.5 \sin \frac{\pi}{2b}(y - b) & y < 2b \\ 0 & y \geq 2b \end{cases}$$

其中,  $b$  为特征量存在下限注意值。

基于相对劣化度的故障概率评估模型的相对劣化度在  $[0, 1]$  中取值, 使用相对劣化度对变压器的健康状况进行量化定义(见表3), 继而对变压器的运行状态进行评分。

### 3.2 概率重要度计算

在可靠性分析过程中通常会有多个底事件, 各个底事件在故障树中的重要性由其位置

表3 相对劣化度的语义定义

Table 3 Semantic definition of relative degradation

$\mu(y)$ 的取值范围	状态语义描述
$[0, 0.2)$	状态良好, 变压器极小概率发生故障
$[0.2, 0.4)$	轻度劣化, 变压器小概率发生故障
$[0.4, 0.8)$	中度劣化, 变压器出现轻微故障
$[0.8, 1.0]$	变压器处于严重故障状态

所决定<sup>[14]</sup>. 为表征事件间的相关影响, 引入概率重要度, 其定义为底事件的概率变化引起顶事件概率变化的程度, 表达式为

$$I_p(i) = \frac{\partial Q(p)}{\partial q_i}$$

其中,  $Q(p)$  为顶事件的失效函数,  $q_i$  为底事件发生概率。

在实际计算底事件  $x_i$  相对于顶事件  $T$  的概率重要度时, 可以首先计算  $x_i$  相对于其故障子树  $G_i$  的概率重要度, 再求出  $G_i$  相对于  $T$  的概率重要度, 最后相乘即得底事件  $x_i$  相对于顶事件  $T$  的概率重要度:

$$I_p^T(x_i) = I_p^{G_i}(x_i) I_p^T(G_i) \quad (1)$$

## 4 实例分析

某 110 kV/50 MVA 变压器在分接调压时出现越限故障, 造成的故障包括变形(有载分接开关大盖和三相调压绕组)、喷油、烧断(过渡电阻)和部分切断(绝缘筒固定螺丝)<sup>[15]</sup>. 依据本文 MMDD 分析方法, 得到的各底事件概率如表4所示。

表4 底事件概率

Table 4 Base event probability

事件	$P(E_{i,j})$	事件	$P(E_{i,j})$	事件	$P(E_{i,j})$
$E_{1.1}$	0.015 0	$E_{2.2}$	0.010 0	$E_{3.6}$	0.049 0
$E_{1.2}$	0.047 0	$E_{2.3}$	0.004 8	$E_{3.7}$	0.002 7
$E_{1.3}$	0.008 1	$E_{2.4}$	0.002 3	$E_{4.1}$	0.005 5
$E_{1.4}$	0.033 0	$E_{3.1}$	0.038 0	$E_{4.2}$	0.039 0
$E_{1.5}$	0.009 8	$E_{3.2}$	0.010 0	$E_{4.3}$	0.015 0
$E_{1.6}$	0.002 8	$E_{3.3}$	0.012 0	$E_{4.4}$	0.003 1
$E_{1.7}$	0.001 1	$E_{3.4}$	0.008 7		
$E_{2.1}$	0.004 3	$E_{3.5}$	0.053 0		

结合各底事件的发生概率, 根据图3所示概率计算规则可得分接开关系统各个状态的概率如下:

$$P(S_1) = P(E_{1.1}) + P(E_{1.2}) + P(E_{1.0})P(E_{2.0}) \cdot P(E_{3.1}) = 0.094$$

$$P(S_2) = P(E_{1.3}) + P(E_{1.0})P(E_{2.0}) [P(E_{3.2}) + P(E_{3.3}) + P(E_{3.4})] = 0.034$$

$$P(S_3) = P(E_{1.4}) + P(E_{1.0}) [P(E_{2.1}) + P(E_{2.0}) \cdot$$

$$P(E_{3,5})] = 0.12$$

$$P(S_4) = P(E_{1,5}) + P(E_{1,0})[P(E_{2,2}) + P(E_{2,0}) \cdot P(E_{3,0})P(E_{4,1})] = 0.022$$

$$P(S_5) = P(E_{1,0})P(E_{2,0})\{P(E_{3,6}) + P(E_{3,0}) \cdot [P(E_{4,2}) + P(E_{4,3})]\} = 0.079$$

$$P(S_6) = P(E_{1,6}) + P(E_{1,7}) + P(E_{1,0}) \cdot [P(E_{2,3}) + P(E_{2,4}) + P(E_{2,0}) \cdot P(E_{3,7}) + P(E_{2,0})P(E_{3,0})P(E_{4,4})] = 0.015$$

故有载分接开关的故障概率为

$$P(T) = P(S_1) + P(S_2) + P(S_3) + P(S_4) + P(S_5) + P(S_6) = 0.36$$

则进一步得到该有载分接开关的可靠性为

$$R(T) = 0.64$$

根据公式①计算底事件概率重要度,其统计图如图5所示。

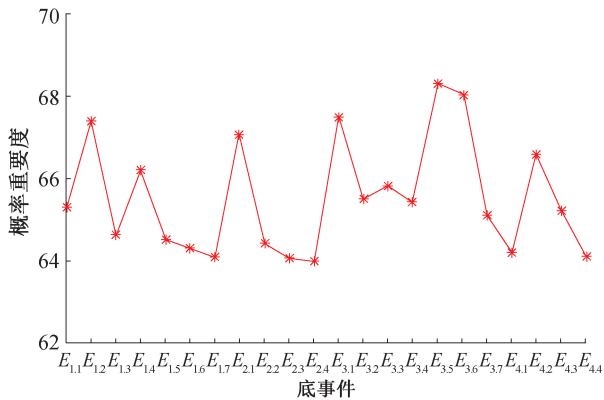


图5 底事件概率重要度统计图

Fig. 5 Statistical graph of probability importance of bottom events

由图5可知,底事件“操作机构限位失灵 $E_3$ ”对应的事件 $E_{3,1} \sim E_{3,7}$ 概率重要度之和最大,即对该有载分接开关系统故障的影响最大,说明此故障发生对系统顶事件故障发生概率的影响最大,应该首先对该部件进行检修。

变压器及相关部件的可靠性极限不得低于50%,但可靠性低于90%就已表明变压器及部件处于劣化状态。由图5还可知,有载分接开关可靠性处于60%~70%,表明存在较为严重的缺陷或较高的故障概率,应当立即采取安检等

相关措施。而变压器的真实故障是电动机构存在连调,导致限位失效,评估结果与实际情况吻合,说明此方法可行有效。

## 5 结论

本文基于MMDD方法对有载分接开关进行了可靠性评估。首先,对有载分接开关在变压器中的各个故障进行分类,建立故障模型;其次,对故障模型建立特征参量集,并对其进行量化;最后,通过定义概率重要度建立底事件与顶事件关系,进而计算出其可靠性,并实现对故障的定性分析。通过实例计算可知本文所采用的MMDD可靠性评估方法具有计算耗时短、简便、通用性强等特点,因此在系统优化和状态监测中具有广泛的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 武文丽,贾俊青,杨德宇,等. 电网故障统计分析及预防措施[J]. 内蒙古电力技术,2020,38(3):94.
- [2] 郭永基. 电力系统可靠性分析[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- [3] WANG S X, DONG Y C, WU L. Interval overvoltage risk based PV hosting capacity evaluation considering PV and load uncertainties[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2020,11(3):2709.
- [4] IRIA J, HELENO M. Optimal sizing and placement of energy storage systems and on-load tap changer transformers in distribution networks[J]. Applied Energy,2019,250:1147.
- [5] VAURIO J K. Importance measures for multi-phase missions[J]. Reliability Engineering & System Safety,2011,96(1):230.
- [6] 胡顺威,周晖,从黎,等. 基于故障树的含电力电子变电站配电网可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(21):25.
- [7] JIANG J, CHEN R, CHEN M, et al. Dynamic

- fault prediction of power transformers based on hidden Markov model of dissolved gases analysis [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(4):1393.
- [8] 陈建明,张盼盼. 灰色 BP 神经网络模型在电力系统短路电流峰值预测中的应用[J]. 轻工学报, 2018, 33(4):79.
- [9] LISNIANSKI A, FRENKEL I. Recent advances in system reliability[M]. London:Springer-Verlag, 2012:113-134.
- [10] LI X Y, QI J P, TAMP M. Reliability analysis of the pantograph system based on the T-S fuzzy FTA[J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(1):33.
- [11] SHRESTHA A, XING L D. A logarithmic binary decision diagram-based method for multistate system analysis [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2008, 57(4):595.
- [12] 戴胜华,谢旭旭. 基于改进型 AHP 与证据理论的应答器系统风险评估[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(1):49.
- [13] 王有元,袁园,陈伟根,等. 变压器故障发生概率的多特征参量综合评估方法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(8):1697.
- [14] 王宁,胡大伟. 基于多态多值决策图的多态故障树重要度计算方法[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(5):1301.
- [15] AMARI S V, XING L D, SHRESTHA A, et al. Performability analysis of multistate computing systems using multivalued decision diagrams [J]. IEEE Transactions on Computers, 2010, 59(10):1419.