

# 基于贝叶斯网络的多状态变压器可靠性跟踪分析

余文辉<sup>1</sup>, 王沾<sup>2,3</sup>, 曾祥君<sup>2</sup>, 刘楚<sup>4</sup>

(1. 中国南方电网公司, 广东 广州 510623; 2. 智能电网运行与控制湖南省重点实验室(长沙理工大学), 湖南 长沙 410004; 3. 广西电网公司崇左供电局, 广西 崇左 532200; 4. 北京华电云通电力技术有限公司, 北京 100071)

**摘要:** 大型电力变压器是输变电系统的关键设备, 其可靠性直接关系到电网的安全稳定运行。为了提高变压器可靠性跟踪分析的效率, 提出一种基于贝叶斯网络的多状态变压器可靠性跟踪分析方法。给出了适用于多状态变压器的不可靠性指标跟踪算法。根据相关参考文献、专家经验及数据搜集, 首次从部件的角度构建了电力变压器贝叶斯网络模型。结合可靠性指标统计, 对变压器可靠性进行了跟踪分析, 确定了影响变压器可靠性的关键部件, 辨识了变压器薄弱环节。通过运用贝叶斯网络对变压器可靠性进行跟踪分析, 为变压器的状态维修及全寿命周期管理提供了理论和数据支持。

**关键词:** 变压器; 可靠性分析; 贝叶斯网络; 状态维修; 全寿命管理

## Reliability tracing analysis for multi-state power transformers using Bayesian network

YU Wenhui<sup>1</sup>, WANG Zhan<sup>2,3</sup>, ZENG Xiangjun<sup>2</sup>, LIU Chu<sup>4</sup>

(1. China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510623, China; 2. Hunan Province Key Laboratory of Smart Grids Operation and Control (Changsha University of Science and Technology), Changsha 410004, China; 3. Guangxi Power Grid Corporation Chongzuo Power Supply Bureau, Chongzuo 532200, China; 4. Beijing Huadian Yuntong Power Technical Co., Ltd., Beijing 100071, China)

**Abstract:** Large power transformer is the key equipment of power transmission systems, and its reliability is directly related to the safety and stability of power grids operation. In order to improve the efficiency of the transformer reliability analysis, a reliability tracing analysis method for multi-state power transformers using Bayesian Network is proposed. The unreliability tracking algorithm for multi-state transformer is proposed. According to the relevant references, expert experience and data collection, the components based power transformer Bayesian network model is built. Combined with the reliability index statistics, the key components impacting reliability and the weak parts of transformer are recognized by the proposed technique. Through the use of Bayesian network to track the transformer reliability analysis, the data to support the condition based maintenance and all-life management for the transformer is provided.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61233008, No. 51277014 and No. 51207014), Hunan Provincial Science & Technology Key Grant Project Foundation (No. 2012FJ1003), and Hunan Province Academic Scientific Research Industrialization Project (No. 12CY007).

**Key words:** transformer; reliability analysis; Bayesian networks; condition based maintenance; all-life management

中图分类号: TM41 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)06-0078-08

## 0 引言

大型电力变压器是输变电系统的关键设备, 其可靠性直接关系到电网的安全稳定运行<sup>[1]</sup>。随着电

力系统电压等级及规模的日益增大, 投入运行的高电压、大容量的变压器也越来越多。与此同时, 由于设计、制造、维修等因素引起的变压器故障不仅对变压器本身造成损失, 同时还会波及电力网络, 造成电力系统的大规模停电, 给电力用户及国民经济带来巨大的经济损失。因此, 有效提高电力变压器的可靠性, 对整个电网的安全性和

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(61233008, 51277014, 51207014); 湖南省科技重大专项(2012FJ1003); 湖南省高校产业化培育项目(12CY007)

稳定性具有积极意义。

变压器可靠性跟踪就是确定电力变压器各部件对系统不可靠性指标的“贡献”大小,进而确定对电力变压器可靠性影响较大的部件,为电力变压器薄弱环节的识别及检修提供量化依据<sup>[2]</sup>。通过对电力变压器进行可靠性跟踪分析,确定影响变压器可靠性的关键部件,对变压器薄弱环节进行辨识,为电力变压器的可靠性设计、制造和故障维修提供可靠依据,从而确定提高电力变压器可靠性的措施<sup>[3-5]</sup>。

当前针对电力变压器可靠性跟踪的研究较少,文献[6]提出了基于故障树分析变压器可靠性跟踪,该文献计算了各部件对系统不可靠度的贡献大小,但是基于故障树分析法在构建故障树时需要确定部件间的逻辑关系,而对于复杂的系统,部件间的逻辑关系往往难以确定;文献[7]考虑变压器运行后所处的正常运行、绕组故障、预防性试验等 11 种状态,提出了应用马尔科夫模型评估变压器可靠性,虽然能计算一系列可靠性参数,但是马尔科夫模型的大小与部件数量呈指数关系,不适用于复杂系统的建模。

为此,本文提出一种基于贝叶斯网络的多状态变压器可靠性跟踪方法,推导了多状态变压器可靠性跟踪算法,根据相关文献及专家经验从部件的角度构建了贝叶斯网络模型,并结合相关统计数据,对变压器可靠性进行了跟踪分析,实现了变压器薄弱环节的识别。

## 1 贝叶斯网络理论简介

贝叶斯网络(Bayesian Network, BN)是一种基于概率推理的图形化网络,主要用于解决不确定性和不完整性问题,已广泛应用于复杂机械设备故障的不确定性和关联性分析。

贝叶斯网络是一种有向无环网络,它由两部分构成:有向无环图(Directed Acyclic Graph, DAG)和若干个条件概率表(Conditional Probability Table, CPT)<sup>[8-10]</sup>。其数学表达式为  $B = \langle (N, E), P \rangle$ , 其中,  $(N, E)$  表示 DAG, 是 BN 的定性部分, 描述了 BN 的网络结构, 它由若干个节点及连接这些节点的有向边构成;  $P$  代表每个节点上的 CPT, 是 BN 的定量部分, 描述了 BN 的网络参数, 表达了各节点之间的对应关系。在  $(N, E)$  中,  $N = (n_1, n_2, \dots, n_k)$  代表有向无环图中所有的节点变量, 可以将要分析的问题(如观测值、部件状态等)用节点变量表示;  $E$  代表有向无环图中所有的有向边, 有向边  $E$  直观地

描述了各节点之间的对应关系。

在 DAG 中, 有向边从父节点指向子节点, 没有有向边指出的节点叫叶节点, 没有有向边指向的节点叫根节点, 其余节点叫中间节点。DAG 中包含了两层关系: 各个子节点与其父节点之间的对应关系; 该子节点与父节点之外的其他节点的条件独立性假设。假设节点  $n_i$  的父节点集合和父节点之外的其他节点集合分别用  $pa(n_i)$  和  $A(n_i)$  表示, 则

$$P(n_i | pa(n_i), A(n_i)) = P(n_i | pa(n_i)) \quad (1)$$

由贝叶斯网络的条件独立性假设可知, BN 中的 CPT 可用  $P(n_i | pa(n_i))$  表示, 其含义为: 在各个父节点处于不同故障状态的组合下子节点发生故障的条件概率, CPT 可以通过数据统计或专家经验得到。根节点具有先验概率表, 其概率值表示根节点发生故障的概率。通过给定所有根节点的先验概率及所有节点的 CPT, 可以得到包含所有节点的联合概率分布

$$P(N) = P(n_1, n_2, \dots, n_k) = \prod_{i=1}^k P(n_i | pa(n_i)) \quad (2)$$

BN 具有描述系统事件多态性和各事件间逻辑关系非确定性的能力, 并能进行正反向概率推理, 即既能由原因导出结果, 又能由结果导出原因, 同时通过贝叶斯网络推理算法可直接求得系统的故障率、根节点的后验概率和重要度, 其优越的状态描述和推理机制使得 BN 在复杂系统(如机械系统、配电系统等)的可靠性分析领域得到了广泛应用<sup>[8, 11]</sup>。

## 2 基于贝叶斯网络的可靠性跟踪算法

在贝叶斯网络中, 假设根节点、中间节点及叶节点所处的各个状态分别用  $R_i^{s_i}$ 、 $M_j^{t_j}$  和  $L_q$  变量表示, 其中  $s_i$ 、 $t_j$ 、 $q$  分别表示相应节点故障状态的个数, 若已知各个根节点处于各个状态的故障率为  $P(R_1^{s_1}), P(R_2^{s_2}), \dots, P(R_k^{s_k})$ , 则在根节点  $R_i$  处于故障状态  $R_i^{s_i}$  的条件下, 叶节点  $L$  处于故障状态  $L_q$  的条件概率为

$$P(L = L_q | R_i = R_i^{s_i}) = \frac{P(R_i = R_i^{s_i}, L = L_q)}{P(R_i = R_i^{s_i})} \quad (3)$$

式中,  $P(R_i = R_i^{s_i}, L = L_q)$  为根节点  $R_i$  处于故障状态  $R_i^{s_i}$  和叶节点  $L$  处于故障状态  $L_q$  的联合概率。

上式描述了根节点故障对系统故障的影响程度，即由原因导出结果。

在叶节点  $L$  处于故障状态  $L_q$  的条件下，根节点  $X_i$  处于故障状态  $R_i^{s_i}$  的后验概率为

$$P(R_i = R_i^{s_i} | L = L_q) = \frac{P(R_i = R_i^{s_i}, L = L_q)}{P(L = L_q)} \quad (4)$$

根节点的后验概率表示由结果导出原因，即表示在系统叶节点发生故障的前提下推测由各个根节点引起的可能性大小，可根据后验概率的大小顺序对系统进行故障检修。

根节点  $R_i$  对于叶节点  $L$  处于故障状态  $L_q$  的概率重要度为

$$I_{L_q}^{Pr}(R_i) = \frac{1}{s_i - 1} \sum_{s=0}^{s_i} [P(L = L_q | R_i = R_i^{s_i}) - P(L = L_q | R_i = 0)] \quad (5)$$

式中， $P(L = L_q | R_i = 0)$  表示在根节点  $R_i$  运行正常的情况下，叶节点  $L$  处于故障状态  $L_q$  的可能性，即由其他节点引起叶节点  $L$  发生故障的可能性。其中  $[P(L = L_q | R_i = R_i^{s_i}) - P(L = L_q | R_i = 0)]$  的含义为：当系统中只有根节点  $R_i$  处于故障状态  $R_i^{s_i}$  的情况下，系统叶节点  $L$  处于故障状态  $L_q$  的概率，即为根节点  $R_i$  处于故障状态  $R_i^{s_i}$  对系统叶节点  $L$  处于故障状态  $L_q$  的概率重要度。

### 3 电力变压器贝叶斯网络模型

在上述贝叶斯网络理论及其可靠性跟踪算法的基础上，构建电力变压器贝叶斯网络模型，并对变压器进行可靠性跟踪分析。

影响电力变压器运行的各部件包括本体、套管、分接开关、冷却系统以及非电量保护(包括轻重瓦斯、压力释放阀以及油温油位等)五个部件<sup>[12]</sup>。文献[13]根据电力变压器的结构、功能特点和故障间逻辑关系将变压器划分为本体故障和附件故障，其中本体故障包括绕组、铁心及夹件和油绝缘故障，附件故障包括套管、有载分接开关、冷却系统及非电量保护故障；文献[14]根据历史资料和数据搜集将变压器划分为本体及附件，其中本体包括器身、油箱、油绝缘 3 个系统，附件包括套管、分接开关、冷却系统及测试及保护装置 4 个系统；文献[15]根据变压器组件功能及位置特点将电力变压器系统划

分为本体和附件，其中本体包括载流系统、铁心、绝缘油、油箱，附件包括冷却系统、套管、有载分接、保护测试装置；此外经历年数据统计表明，变压器故障主要集中在绝缘介质、绕组、铁芯、套管、冷却系统、分接开关、油枕等部件<sup>[16-22]</sup>。本文根据文献[12-22]，将变压器划分为本体及附件两大部分，其中本体包括绝缘介质、绕组及铁芯 3 个部件；附件包括套管、冷却系统、分接开关及其他(主要包括油枕、中性点设备等部件)4 个部件。构建的电力变压器故障树(Fault Tree, FT)模型如图 1 所示。

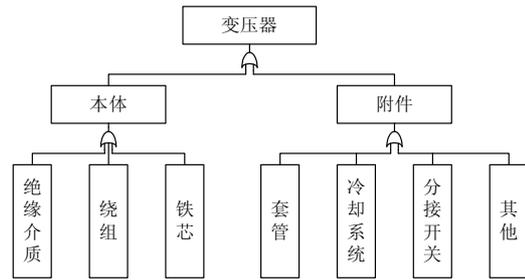


图 1 电力变压器故障树模型

Fig. 1 Power transformer fault tree model

由于变压器 FT 的结构与变压器 BN 的 DAG 一致，因此，本文采用将变压器 FT 转换成变压器 BN 的 DAG。首先将 FT 中的顶事件对应 BN 中的叶节点，底事件对应 BN 中的根节点，中间事件对应 BN 中的中间节点。对于 FT 中重复的事件，在 BN 中只须构建一个节点。然后根据 FT 中各事件之间的逻辑关系连接各节点，有向边的指向与逻辑或门的输入、输出方向一致，即由逻辑或门的输入端指向输出端。假设 BN 的根节点变量为  $R_i (i=1,2,\dots,7)$ ，中间节点变量为  $M_j (j=1,2)$ ，叶节点变量为  $L$ ，基于上述转化建立的电力变压器贝叶斯网络如图 2 所示。

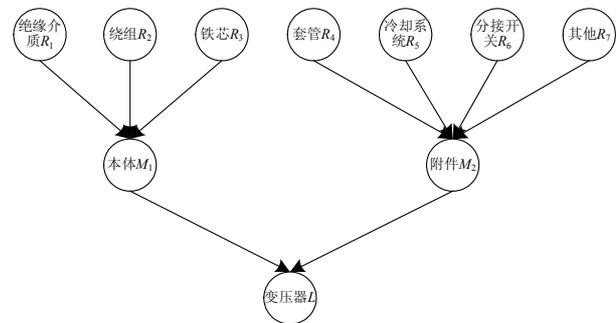


图 2 电力变压器贝叶斯网络模型

Fig. 2 Power transformer Bayesian network model

采用逻辑门构建的 FT 需要明确变压器故障机理及部件间的故障逻辑关系, 但实际上, 变压器发生故障时关系复杂, 部件间的逻辑关系往往难以确定, 因此, 采用 FT 的逻辑门来描述部件间的故障逻辑关系并不可取。然而, BN 的 CPT 不仅可以描述变压器部件的多态性, 而且还可以描述变压器部件间逻辑关系的不确定性及关联性, 非常适合于变压器的可靠性分析。CPT 的构建与分析具体如下:

在 BN 的 CPT 构造过程中, 由于当前可利用的直接统计数据较少, 因此需要根据专家经验及数据统计构建 CPT。为了能将本文所提方法与变压器状态监测结合起来, 通过电力变压器的状态监测积累统计数据, 以在以后的实际应用中不断改进和完善 BN 模型, 本文参考文献[11], 将  $R_1, R_2, \dots, R_7, M_1, M_2, L$  分为正常、异常、严重、故障四种状态, 并分别用 0、1、2 和 3 表示。考虑部件间逻辑关系的不确定性, 根据湖南省电力公司检修公司专家的经验及 200 多个案例分析(现场运行数据)得到  $M_1, M_2$  和  $L$  的 CPT, 如表 1~表 3 所示。

表 1 节点  $M_1$  的 CPTTable 1 The CPT of node  $M_1$ 

$R_1$	$R_2$	$R_3$	$P(M_1=0 R_1, R_2, R_3)$	$P(M_1=1 R_1, R_2, R_3)$	$P(M_1=2 R_1, R_2, R_3)$	$P(M_1=3 R_1, R_2, R_3)$
0	0	0	1	0	0	0
0	0	1	0.6	0.4	0	0
0	0	2	0.2	0.6	0.2	0
0	0	3	0.1	0.6	0.3	0.1
0	1	0	0	1	0	0
0	1	1	0	1	0	0
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
3	3	1	0	0	0	1
3	3	2	0	0	0	1
3	3	3	0	0	0	1

表 2 节点  $M_2$  的 CPTTable 2 The CPT of node  $M_2$ 

$R_4$	$R_5$	$R_6$	$R_7$	$P(M_2=0 R_4, R_5, R_6, R_7)$	$P(M_2=1 R_4, R_5, R_6, R_7)$	$P(M_2=2 R_4, R_5, R_6, R_7)$	$P(M_2=3 R_4, R_5, R_6, R_7)$
0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	1	0.9	0.1	0	0
0	0	0	2	0.7	0.2	0.1	0
0	0	0	3	0.6	0.3	0.1	0.1
0	0	1	0	0.8	0.2	0	0
0	0	1	1	0.7	0.3	0	0
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
3	3	3	1	0	0	0	1
3	3	3	2	0	0	0	1
3	3	3	3	0	0	0	1

表 3 节点  $L$  的 CPTTable 3 The CPT of node  $L$ 

$M_1$	$M_2$	$P(L=0 M_1, M_2)$	$P(L=1 M_1, M_2)$	$P(L=2 M_1, M_2)$	$P(L=3 M_1, M_2)$
0	0	1	0	0	0
0	1	0.7	0.3	0	0
0	2	0.2	0.6	0.2	0
0	3	0.1	0.2	0.5	0.2
1	0	0.5	0.5	0	0
1	1	0.4	0.6	0	0
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
3	1	0	0.2	0.1	0.7
3	2	0	0	0.2	0.8
3	3	0	0	0	1

从构建的 CPT 可以看出, 节点变量的不同取值描述了节点变量的多种状态; 节点变量不同取值组合下的条件概率描述了节点间的逻辑关系及关联性; 条件概率的不同取值表达了部件间故障逻辑关系的不确定性, 如表 3 中  $P(L=3|M_1=3, M_2=1)=0.7$  表示在  $M_1$  故障状态为 3 和  $M_2$  故障状态为 1 同时成立的条件下,  $L$  故障状态为 3 的概率为 0.7, 此时  $L$  还有 0.3 的概率处于其他故障状态, 部件间的逻辑关系并不确定。

## 4 电力变压器可靠性跟踪分析

### 4.1 可靠性指标统计

中国电力企业联合会电力可靠性管理中心发布了 1998~2004 年间全国 220 kV 及以上电压等级输变电设施可靠性分析报告<sup>[16-22]</sup>, 分析报告中给出了 1998~2004 年间全国 220 kV 及以上各电压等级电力变压器每年的统计数量、非计划停运影响可用系数情况及变压器非计划停运按部件分类的非计划停运次数、非计划停运时间、占非计划停运总时间的百分比统计数据, 由此得到 1998~2004 年间变压器各部件非计划故障停运率、非计划平均停运时间和非计划停运影响可用系数情况, 如表 4、表 5 和表 6 所示。

### 4.2 可靠性跟踪结果及分析

假设各部件发生异常故障及严重故障的概率与各部件发生故障的概率相等, 利用 4.1 节得到的可靠性指标及式(3)~式(5)得出在根节点  $R_i$  发生故障的条件下, 叶节点  $L$  发生故障的条件概率; 在叶节点  $L$  发生故障的条件下, 根节点  $R_i$  发生故障的后验概率; 根节点  $R_i$  对于叶节点  $L$  处于故障状态  $L_q$  的概率重要度, 计算结果如表 7、表 8 和表 9 所示。

表 4 220 kV 变压器各部件非计划故障停运率(次/百台年)

Table 4 Unplanned failure rate for each part of 220 kV transformer ( times/100 set years )

故障部位	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	平均值
绝缘介质	0.113	0.312	0.260	0.273	0.113	0.188	-	0.210
绕组	0.679	0.381	0.584	0.546	0.366	0.215	0.327	0.443
铁心	0.151	0.035	-	0.030	0.057	-	0.101	0.075
套管	1.698	2.319	1.784	1.668	1.409	1.826	1.180	1.698
冷却系统	0.830	0.761	0.908	0.515	0.507	0.456	-	0.663
分接头装置	0.566	0.346	0.616	0.152	-	0.161	0.352	0.366
其他(油枕)	0.604	0.485	-	0.515	0.395	0.456	0.251	0.451

表 5 220 kV 变压器各部件非计划平均停运时间(小时)

Table 5 Unplanned failure time for each part of 220 kV transformer ( hour )

故障部位	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	平均值
绝缘介质	260.6	54.96	164.84	58.73	122.96	58.25	-	120.06
绕组	663.69	472.97	599.46	25.21	279.86	203.07	227.71	353.14
铁心	205.7	489.1	-	567.77	431.39	-	311.66	401.12
套管	47.52	24.02	13.54	29.53	12.87	13.83	26.59	23.99
冷却系统	24.55	27.62	13.17	24.8	11.8	36.4	-	23.06
分接头装置	66.03	42.72	36.13	164.2	-	117.19	64.34	81.77
其他(油枕)	13.25	22.48	-	56.91	16.19	7.23	16.642	22.12

表 6 220 kV 变压器各部件非计划停运影响可用系数情况(%)

Table 6 Unplanned failure affecting availability factor for each part of 220 kV transformer ( % )

故障部位	1999	2000	2001	2002	2003	2004	平均值
绝缘介质	0.002 15	0.004 67	0.001 81	0.001 5	0.001 26	-	0.002 15
绕组	0.022 58	0.038 18	0.015 45	0.011 16	0.005 02	0.008 48	0.015 53
铁心	0.002 12	-	0.001 95	0.002 65	-	0.003 57	0.002 57
套管	0.006 98	0.002 64	0.005 57	0.001 97	0.002 6	0.003 58	0.003 89
冷却系统	0.002 64	0.001 31	0.001 45	0.000 65	0.001 91	-	0.002 275
分接头装置	0.001 85	0.001 79	0.003 32	-	0.002 17	0.002 17	0.002 26
其他(油枕)	0.001 36	-	0.003 32	0.000 7	0.000 38	0.000 48	0.001 25

表 7 叶节点发生故障的情况下各根节点发生故障的后验概率

Table 7 Posterior probability of the root node failure under the leaf node failure

根节点 $R_i$	后验概率								
	$P(R_i=1 L=1)$	$P(R_i=2 L=1)$	$P(R_i=3 L=1)$	$P(R_i=2 L=2)$	$P(R_i=2 L=2)$	$P(R_i=3 L=2)$	$P(R_i=1 L=3)$	$P(R_i=2 L=3)$	$P(R_i=3 L=3)$
$R_1$	0.029 6	0.044 3	0.050 6	0.021 2	0.035 0	0.055 4	0.022 0	0.023 8	0.035 7
$R_2$	0.096 1	0.146 5	0.048 0	0.029 9	0.170 9	0.324 0	0.038 6	0.046 2	0.256 5
$R_3$	0.010 7	0.015 2	0.014 4	0.007 4	0.012 3	0.038 6	0.007 6	0.008 1	0.026 6
$R_4$	0.164 4	0.223 3	0.259 7	0.135 0	0.217 2	0.253 4	0.123 0	0.125 1	0.396 1
$R_5$	0.086 0	0.097 0	0.123 6	0.058 5	0.090 1	0.159 2	0.057 9	0.058 7	0.181 6
$R_6$	0.048 1	0.050 8	0.064 0	0.035 1	0.050 6	0.078 3	0.033 9	0.034 3	0.104 4
$R_7$	0.054 1	0.060 0	0.050 6	0.043 2	0.057 6	0.079 0	0.030 0	0.030 4	0.361 6

表 8 根节点发生故障的情况下叶节点发生故障的条件概率

Table 8 Conditional probability of the leaf node failure under the root node failure

根节点 $R_i$	条件概率								
	$P(L=1 $ $R_i=1)$	$P(L=1 $ $R_i=2)$	$P(L=1 $ $R_i=3)$	$P(L=2 $ $R_i=1)$	$P(L=2 $ $R_i=2)$	$P(L=2 $ $R_i=3)$	$P(L=3 $ $R_i=1)$	$P(L=3 $ $R_i=2)$	$P(L=3 $ $R_i=3)$
$R_1$	0.236 0	0.352 8	0.371 5	0.068 8	0.113 8	0.165 9	0.045 2	0.049 0	0.067 7
$R_2$	0.362 6	0.552 8	0.181 0	0.046 0	0.263 2	0.498 8	0.037 6	0.045 0	0.250 0
$R_3$	0.239 5	0.338 8	0.321 7	0.067 5	0.111 9	0.350 8	0.043 9	0.046 7	0.159 2
$R_4$	0.163 3	0.221 8	0.243 1	0.054 7	0.088 0	0.096 7	0.031 6	0.032 1	0.095 7
$R_5$	0.218 7	0.246 9	0.314 5	0.060 7	0.093 6	0.165 2	0.038 0	0.038 6	0.119 3
$R_6$	0.221 4	0.234 2	0.294 7	0.065 9	0.095 2	0.147 2	0.040 4	0.040 9	0.124 3
$R_7$	0.202 5	0.224 3	0.189 4	0.065 9	0.087 9	0.120 7	0.029 0	0.029 4	0.349 8

表 9 根节点的概率重要度

根节点 $R_i$	概率重要度		
	$I_1^P(R_i)$	$I_2^P(R_i)$	$I_3^P(R_i)$
$R_1$	0.163 9	0.051 5	0.011 7
$R_2$	0.228 9	0.232 0	0.078 2
$R_3$	0.136 1	0.111 1	0.041 1
$R_4$	0.088 2	0.024 5	0.021 5
$R_5$	0.115 9	0.047 8	0.027 6
$R_6$	0.093 3	0.038 9	0.028 5
$R_7$	0.044 4	0.027	0.107 3

通过计算叶节点发生故障的情况下各根节点发生故障的后验概率, 可按照后验概率由大到小的顺序对变压器进行故障诊断。由表 7 中的先验概率可知, 当监测到变压器发生故障时, 若检测变压器发生异常故障的部件, 应按  $R_4$ 、 $R_5$ 、 $R_2$ 、 $R_6$ 、 $R_7$ 、 $R_1$ 、 $R_3$  的顺序进行检测; 若检测变压器发生严重故障的部件, 应按  $R_4$ 、 $R_5$ 、 $R_2$ 、 $R_6$ 、 $R_7$ 、 $R_1$ 、 $R_3$  的顺序进行检测; 若检测变压器发生故障的部件, 应按  $R_4$ 、 $R_7$ 、 $R_2$ 、 $R_5$ 、 $R_6$ 、 $R_1$ 、 $R_3$  的顺序进行检测; 当监测到变压器发生其他故障时, 检测方法依次类推。

通过计算根节点发生故障的情况下叶节点发生故障的条件概率, 可根据条件概率的大小分析部件故障对变压器故障的影响程度。由表 8 中的条件概率可知, 对于变压器故障, 在所有发生异常故障的部件中,  $R_1$  对变压器故障的影响程度最大; 在所有发生严重故障的部件中,  $R_1$  对变压器故障的影响程度最大; 在所有发生故障的部件中,  $R_2$  对变压器故障的影响程度最大。对于变压器其他故障, 分析方法依次类推。

概率重要度描述了根节点所有故障状态对变压器的平均影响程度, 通过计算根节点的概率重要度可以确定影响变压器可靠性的关键部件, 辨识变压器的薄弱环节, 便于采取措施提高该部件的可靠性来有效提升变压器的可靠性。

由表 9 中的概率重要度可知, 在变压器发生异常故障的情况下,  $R_2$  为系统最薄弱的环节,  $R_1$  次之; 在变压器发生严重故障的情况下,  $R_2$  为系统最薄弱的环节,  $R_3$  次之; 在变压器发生故障的情况下,  $R_2$  为系统最薄弱的环节,  $R_3$  次之。这是因为变压器本体各个部件在设计、制造及运行过程中容易受材料、制造工艺、运行环境等因素的影响, 容易造成部件出现放电、过热、短路、接地等故障, 而且变压器本体部件一旦发生故障必须停电检修, 且维修工序

复杂, 维修时间较长, 故障损失大。

由此可见, 变压器的薄弱环节主要集中在变压器本体各个部件, 特别是变压器绕组。因此, 在变压器的设计、选材、制造及运行维护等过程中都要重点关注变压器本体各个部件, 不断提高其可靠性, 尽可能减少变压器故障的发生, 从而提高变压器的可靠性。

由上述分析可知, 利用贝叶斯网络实现变压器可靠性跟踪, 能根据变压器故障严重等级确定变压器部件检修顺序, 同时确定影响变压器可靠性的关键部件, 识别变压器薄弱环节。论文方法为变压器全寿命周期管理提供了数据支撑。后续研究的重点是综合变压器部件的可靠性与经济性, 将论文方法应用于变压器的状态维修及全寿命周期管理, 从而在保证变压器可靠供电的前提下实现经济性最优。

## 5 结论

本文提出了一种基于贝叶斯网络的多状态变压器可靠性跟踪方法, 该方法具有描述事件多态性和系统各事件间逻辑关系模糊的能力, 并能进行正反向概率推理, 且计算简单。概率重要度描述了根节点所有故障状态对系统的平均影响程度, 通过计算根节点的概率重要度可识别变压器薄弱环节, 从而为变压器全寿命管理提供数据支持。跟踪结果表明, 绕组为变压器最薄弱环节, 其次为铁芯及绝缘介质, 因此在变压器设计、选材、制造和运行阶段都要重点关注变压器本体各个部件, 以保证变压器有良好的可靠性。

## 参考文献

- [1] 武中利, 杨建, 朱永利, 等. 基于粗糙集理论和支持向量机的变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 39(18): 80-83.  
WU Zhongli, YANG Jian, ZHU Yongli, et al. Power transformer fault diagnosis based on rough set theory and support vector machines[J]. Power System Protection and Control, 2010, 39(18): 80-83.
- [2] 周宁, 马建伟, 胡博, 等. 基于故障树分析的电力变压器可靠性跟踪方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 72-77.  
ZHOU Ning, MA Jianwei, HU Bo, et al. Reliability tracing technique for power transformers using the

- fault tree analysis method[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19): 72-77.
- [3] 孙鹏, 陈绍辉, 张彩庆. 基于 Marquardt 法参数估计的变电设备寿命周期故障率评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 41(1): 85-90.  
SUN Peng, CHEN Shaohui, ZHANG Caiqing. Assessment of failure rate for substation equipment life cycle based on Marquardt parameter estimation method[J]. Power System Protection and Control, 2012, 41(1): 85-90.
- [4] 李建生, 梁军, 负志皓, 等. 基于电气信息评估设备状态渐进变化的概率分析方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 355-363.  
LI Jiansheng, LIANG Jun, YUN Zhihao, et al. Probability analysis of progressive changes of equipment state based on electrical information[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 355-363.
- [5] 张懿议, 廖瑞金, 杨丽君, 等. 基于云理论的电力变压器绝缘状态评估方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 13-20.  
ZHANG Yiyi, LIAO Ruijin, YANG Lijun, et al. An assessment method for insulation condition of power transformer based upon cloud model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 13-20.
- [6] WANG Youyuan, ZHOU Jingjing, CHEN Weigen, et al. Assessment method for the reliability of power transformer based on fault-tree analysis[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(3): 514-520.
- [7] 廖瑞金, 肖中男, 巩晶, 等. 应用马尔科夫模型评估电力变压器可靠性[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 322-328.  
LIAO Ruijin, XIAO Zhongnan, GONG Jing, et al. Markov model for reliability assessment of power transformers[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2): 322-328.
- [8] 陈东宁, 姚成玉. 基于模糊贝叶斯网络的多态系统可靠性分析及在液压系统中的应用[J]. 机械工程学报, 2012, 48(16): 175-183.  
CHEN Dongning, YAO Chengyu. Reliability analysis of multi-state system based on fuzzy Bayesian networks and application in hydraulic system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(16): 175-183.
- [9] 周忠宝, 马超群, 周经伦, 等. 基于贝叶斯网络的多态故障树分析方法[J]. 数学的实践与认识, 2008, 38(19): 89-95.  
ZHOU Zhongbao, MA Chaoqun, ZHOU Jinglun, et al. Multi-state fault tree analysis method based on bayesian networks[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2008, 38(19): 89-95.
- [10] 李俭川, 胡芑庆, 秦国军, 等. 贝叶斯网络理论及其在设备故障诊断中的应用[J]. 中国机械工程, 2003, 14(10): 896-900.  
LI Jianchuan, HU Niaoqing, QIN Guojun, et al. Bayesian network and its applications for device fault diagnosis[J]. China Mechanical Engineering, 2003, 14(10): 896-900.
- [11] 霍利民, 朱永利, 张在玲, 等. 贝叶斯网络在配电系统可靠性评估中的应用[J]. 电工技术学报, 2004, 19(8): 113-118.  
HUO Limin, ZHU Yongli, ZHANG Zailing, et al. Bayesian networks application to reliability evaluation of electric distribution systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(8): 113-118.
- [12] 国家电网公司. Q/GDW169—2008 油浸式变压器(电抗器)状态评价导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [13] 陈彦交, 罗晓庆. 基于故障树分析法的电力变压器故障诊断专家系统[J]. 陕西电力, 2012, 40(12): 55-59.  
CHEN Yanjiao, LUO Xiaoqing. Probe into power transformer fault diagnosis expert system based on fault tree analysis[J]. Shaanxi Electric Power, 2012, 40(12): 55-59.
- [14] 王有元, 周婧婧, 陈伟根, 等. 基于模糊决策的电力变压器风险评估方法[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(8): 1662-1667.  
WANG Youyuan, ZHOU Jingjing, CHEN Weigen, et al. Risk assessment method of power transformer based on fuzzy decision-making[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(8): 1662-1667.
- [15] 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 Wensheng, TAN Kexiong, et al. Construction and analysis of fault tree for large-scale power transformer[J]. Electric Power, 2003, 36(11): 33-36.
- [16] 黄幼茹, 蒋佛峰. 1998 年 220 kV 及以上电压输变电设施可靠性评估及分析[J]. 电力设备, 2000, 1(1): 40-44.  
HUANG Youru, JIANG Fofeng. Reliability evaluation

- and analysis for 220 kV and higher transmission and distribution equipment in 1998[J]. *Electrical Equipment*, 2000, 1(1): 40-44.
- [17] 黄幼茹, 刘华, 陈丽娟. 1999~2001年220 kV及以上电压级大型变压器运行可靠性指标分析[J]. *电力设备*, 2002, 3(4): 53-62.  
HUANG Youru, LIU Hua, CHEN Lijuan. *Electrical equipment, reliability analysis report of transformer equipment with voltages of 220 kV and in 1999 -2001*[J]. *Electrical Equipment*, 2002, 3(4): 53-62.
- [18] 陈丽娟, 蒋锦峰, 赵凯, 等. 2000~2002年全国220 kV及以上电压等级输变电设施可靠性分析报告(上)[J]. *电力设备*, 2004, 5(2): 60-66.  
CHEN Lijuan, JIANG Jinfeng, ZHAO Kai, et al. *Reliability analysis report of transmission and distribution equipment with voltages of 220 kV and above in 2000~2002 (Vol 1)*[J]. *Electrical Equipment*, 2004, 5(2): 60-66.
- [19] 陈丽娟, 蒋锦峰, 赵凯, 等. 2000~2002年全国220 kV及以上电压等级输变电设施可靠性分析报告(下)[J]. *电力设备*, 2004, 5(3): 64-69.  
CHEN Lijuan, JIANG Jinfeng, ZHAO Kai, et al. *Reliability analysis report of transmission and distribution equipment with voltages of 220 kV and above in 2000~2002 (Vol.2)*[J]. *Electrical Equipment*, 2004, 5(2): 64-69.
- [20] 陈丽娟, 蒋锦峰, 胡小正, 等. 2003年全国220 kV及以上电压等级输变电设施可靠性分析(一)[J]. *电力设备*, 2005, 6(2): 79-82.  
CHEN Lijuan, JIANG Jinfeng, HU Xiaozheng, et al. *Reliability analysis on nation-wide 220 kV and above power transmission and transformation facilities in 2003 (Vol.1)*[J]. *Electrical Equipment*, 2005, 6(2): 79-82.
- [21] 陈丽娟, 蒋锦峰, 胡小正, 等. 2003年全国220 kV及以上电压等级输变电设施可靠性分析(二)[J]. *电力设备*, 2005, 6(3): 79-84.  
CHEN Lijuan, JIANG Jinfeng, HU Xiaozheng, et al. *Reliability analysis on nation-wide 220 kV and above power transmission and transformation facilities in 2003 (Vol.2)*[J]. *Electrical Equipment*, 2005, 6(3): 79-84.
- [22] 陈丽娟, 胡小正, 赵凯. 2004年全国220 kV及以上电压等级输变电设施可靠性分析[J]. *电力设备*, 2005, 6(10): 77-82.  
CHEN Lijuan, HU Xiaozheng, ZHAO Kai. *Reliability analysis of 220 kV and the above nation-wide power transmission and transformation facilities in 2004*[J]. *Electrical Equipment*, 2005, 6(10): 77-82.

收稿日期: 2014-04-28; 修回日期: 2014-07-04

作者简介:

余文辉(1968-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事输变电可靠性管理及供电可靠性管理工作; E-mail: yuwenhui68@163.com

王沾(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制, 输变电设备状态监测技术; E-mail: wz8866\_2007@126.com

曾祥君(1972-), 男, 博士, 教授, 从事电力系统微机保护与控制的教学和研究开发工作。E-mail: eexjzeng@hotmail.com

(编辑 魏小丽)