

基于贝叶斯网络的电容型设备故障诊断

王永强, 律方成

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北省 保定市 071003)

Fault Diagnosis for Capacitive Equipments Based on Bayesian Network

WANG Yong-qiang, LÜ Fang-cheng

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China)

ABSTRACT: The insulation fault of capacitive equipments not only affects secure operation of whole substation, but also jeopardizes other equipments and personal safety, so accurate fault diagnosis of capacitive equipments is very significant. Based on Bayesian network theory and integrating detected data of capacitive equipments, a Bayesian network model that leads Bayesian network method into fault diagnosis of capacitive equipment is proposed. According to the features of fault diagnosis and maintenance of capacitive equipments, the extrapolation of Bayesian network is modified. Diagnosis results of actual faults validate the correctness and effectiveness of the proposed method.

KEY WORDS: capacitive equipment; Bayesian network; fault diagnosis

摘要: 电容型设备的绝缘故障不仅影响整个变电站的安全运行, 还危及其它设备及人身安全, 因此对电容型设备进行准确的故障诊断具有重要意义。基于贝叶斯网络理论, 综合电容型设备的各种检测数据, 提出了电容型设备故障诊断的贝叶斯网络模型, 将贝叶斯网络方法引入电容型设备的故障诊断中, 根据电容型设备故障诊断及维修的特点改进了贝叶斯网络的推断过程。故障实例的诊断结果验证了文中方法的正确性和有效性。

关键词: 电容型设备; 贝叶斯网络; 故障诊断

0 引言

电容型设备是重要的输变电设备, 主要包括电流互感器(CT)、套管、耦合电容器、电容式电压互感器(CVT)等, 数量约占变电站设备总量的40%~50%。电容型设备的绝缘故障不仅影响整个变电站的安全运行, 同时还危及其它设备及人身安全^[1-17], 因此对电容型设备进行准确的故障诊断具有重要意义。

目前, 对电气设备进行故障诊断的方法较多^[18-21], 而具体关于电容型设备故障诊断的研究却

较少, 目前主要根据介质损耗角正切值定性判断绝缘故障, 但这种方法对故障的分类不是很明确, 难以准确判断故障的种类, 难以有效地指导检修^[4]。一些研究单位采用油中气体分析(dissolved gas analysis, DGA)方法进行电容型设备故障诊断, 取得了较好的效果, 但DGA方法也存在“缺编码”、编码边界过于绝对等缺陷^[3-6]。上述2种方法特征量偏少, 只利用了其中部分检测数据进行诊断, 诊断效果相对较差。

本文基于贝叶斯网络理论, 综合电容型设备的各种检测数据, 提出电容型设备故障诊断的贝叶斯网络模型, 将贝叶斯网络方法引入电容型设备的故障诊断中, 为电容型设备的准确诊断提供新的思路。

1 贝叶斯网络简介

贝叶斯网络, 又称概率因果网络、信任网络、知识图等, 是一种有向无环图(directed acyclic graph, DAG)^[22-25]。它通过有向图的形式来表示随机变量间的因果关系, 并通过条件概率将这种关系数量化, 可以包含随机变量集的联合概率分布, 是一种将因果知识和概率知识相结合的信息表示框架。其中的节点表示有某种独立性假设的随机变量, 有向边则确定了随机变量间的独立性假设。

令离散随机变量的有限集 $U = \{X_1, X_2, \dots, X_n, C\}$, 其中 X_1, X_2, \dots, X_n 是属性变量, 类变量 C 的取值范围为 $\{c_1, c_2, \dots, c_m\}$, x_i 是属性 X_i 的取值。根据贝叶斯定理, 实例 $I_i = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 属于故障类别变量 c_j 的概率为

$$P(c_j | x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{P(x_1, x_2, \dots, x_n | c_j)P(c_j)}{P(x_1, x_2, \dots, x_n)} = \alpha P(c_j)P(x_1, x_2, \dots, x_n | c_j) \quad (1)$$

式中： α 是正则化因子，一般取 1； $P(c_j)$ 是 c_j 的先验概率； $P(c_j|x_1, x_2, \dots, x_n)$ 是 c_j 的后验概率，后验概率反映了样本数据对 c_j 的影响。式(1)还可以表示为

$$P(c_j | x_1, x_2, \dots, x_n) = \alpha P(c_j) \prod_{i=1}^n P(x_i | x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, c_j) \quad (2)$$

根据贝叶斯最大后验准则，对于给定的某一实例 $I_i = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ，贝叶斯网络分类器选择使后验概率 $P(c_j|x_1, x_2, \dots, x_n)$ 最大的类 c_j 为该实例 I_i 的类标签。朴素贝叶斯网络假定属性变量间相互类条件独立^[8]，每个属性节点只与类节点 C 相关联，这一假设以指数级降低了贝叶斯网络构建的复杂性。因此式(2)又可表示为

$$P(c_j | x_1, x_2, \dots, x_n) = \alpha P(c_j) \prod_{i=1}^n P(x_i | c_j) \quad (3)$$

尽管条件独立性假定在一定程度上限制了朴素贝叶斯网络的适用范围，然而许多研究表明：在实际应用中，即使在属性具有明显依赖性的情况下，朴素贝叶斯网络也表现出了相当的健壮性和高效性^[23-24]。与决策树、支持向量机相比，朴素贝叶斯网络具有更高的分类准确度。

2 基于贝叶斯网络的电容型设备故障诊断模型

建立贝叶斯网络首先要确定其故障特征和故障类别。本文对收集到的 100 多台有明确结论的电容型设备故障数据进行分析，并参考有关文献对故障实例与决策表的划分经验，整理出了电容型设备故障特征征兆集、故障类集，分别如表 1~2 所示。

表 1 故障特征征兆集

Tab. 1 Symptom sets of fault character

属性变量	征兆类型
X_1	绕组绝缘电阻
X_2	介质损耗角的正切值
X_3	电容量
X_4	油中色谱分析
X_5	局部放电量

表 2 故障类集

Tab. 2 Fault sets

故障类别变量	故障类型
c_1	绝缘老化
c_2	绝缘受潮
c_3	雷击、闪络
c_4	结构缺陷
c_5	质量、工艺等其它问题

可根据专家经验，也可从样本集中学习获得贝叶斯网络概率参数。本文对收集到的 100 多台有明确结论的电容型设备故障数据进行分析，从样本集中学习获得概率参数，各种故障类型发生的概率 $P(c_j)$ 以及在某种故障类型发生的情况下，各属性变量发生的概率统计结果如表 3 所示。将类变量 C 作为所有属性变量的父节点集所建立的贝叶斯网络模型如图 1 所示。

表 3 概率统计数据

Tab. 3 Probability statistical data

$P(X_1/c_j)$	$P(X_2/c_j)$	$P(X_3/c_j)$	$P(X_4/c_j)$	$P(X_5/c_j)$	故障类型	$P(c_j)$
—	0.666 7	—	0.333 3	0.333 3	老化	0.033 71
0.277 8	0.611 1	0.333 3	0.333 3	0.444 4	受潮	0.202 20
—	0.250 0	—	0.375 0	0.375 0	雷击闪络	0.089 89
0.153 8	0.153 8	0.346 2	0.576 9	0.423 1	结构缺陷	0.292 10
0.058 8	0.205 9	0.147 1	0.294 1	0.441 2	其它	0.382 00

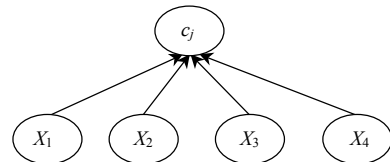


图 1 基于贝叶斯网络的电容型设备故障诊断模型

Fig. 1 A fault diagnosis model of capacitive equipment based on Bayesian network

在建立贝叶斯网络模型后，基于贝叶斯网络进行电容型设备故障诊断的具体步骤为：1) 检查测试样本属性情况，确定各属性取值；2) 应用贝叶斯网络进行诊断，获得分类结果及各个故障分类的后验概率；3) 检查后验概率，概率大的即为设备的故障类型。

3 故障诊断实例与分析

实例 1: 对型号为 LB-110 W 的电容式电流互感器进行介质损失测量，测量电压为 10 kV，结果如表 4 所示。采用 2 500 V 摇表测得到 1 次与 2 次绕组之间以及 1 次与地之间的绝缘电阻均为 8 800 M Ω ，采用 500 V 摇表测得 2 次绕组之间及 2 次绕组对地的绝缘电阻数据如表 5 所示。对其进行局部放电试验，

表 4 介质损耗角正切值的测量数据

Tab. 4 Test data of tan δ

试验序号	tan δ /%	温度/℃	湿度/%
1	0.62	20	55
2	0.96	20	60
3	2.40	27	75

表 5 二次线圈绝缘电阻测试数据

Tab. 5 Test data of secondary winding insulation resister

二次端子标号	1K1和1K2	2K1和2K2	3K1和3K2	4K1和4K2
绝缘电阻/M Ω	0	0.5	500	500

当电压升到 30 kV 时电流互感器底部有密集的放电声，继续升压到 80 kV 时，放电声增大且有间歇性，此时测得的放电量为 1 μC，持续加压 10 min 后放电电量减小到 0.4 μC，放电声没有变化。油中溶解气体的色谱分析结果如表 6 所示。

应用贝叶斯网络方法进行诊断，该电容式电流互感器属于各故障类型的概率结果如表 7 所示。由表 7 可知，故障 c_2 的后验概率最大，因此判断该套管故障为绝缘受潮。

表 6 油样色谱分析结果(实例 1)

Tab. 6 Dissolved gas analysis results(example 1)

气体组分	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	总烃
含量/ 10^{-6}	228.4	231.9	3 429.4	488.8	1 595.8	116.4	3 448.9	5 649.9

表 7 故障诊断结果(实例 1)

Tab. 7 Fault diagnosis results(example 1)

项目	概率/%
$P(c_1 x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$	0
$P(c_2 x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$	0.508 4
$P(c_3 x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$	0
$P(c_4 x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$	0.168 6
$P(c_5 x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$	0.060 0

将该电流互感器送至厂家，互感器吊芯后发现，由于电流互感器密封不良，一个二次线圈受潮损坏，造成局部放电。可见应用贝叶斯网络进行电容型设备故障诊断的结果与实际吊芯检查的结果相符，本文的诊断方法正确。

实例 2: 某公司一只 1994 年出厂的 CRW-110/1250 型 110 kV 穿墙套管，在 2003 年 5 月 21 日进行定期预试时，测得电气试验数据如表 8 所示，油样气相色谱数据如表 9 所示。

应用贝叶斯网络方法进行诊断，该穿墙套管属于各故障类型的概率结果如表 10 所示。由表 10 可知，故障 c_4 的后验概率最大，因此判断该套管故障为结构缺陷。

表 8 电气试验数据

Tab. 8 Electrical test data

相别	铭牌电	出厂	主绝缘	末屏绝缘	介质	实测电	电容量
	容量/pF	编号	电阻/MΩ	电阻/MΩ	损耗/%	容量/pF	偏差/%
A	311	94 008	9 400	2 200	0.21	305.43	1.82
B	302	94 005	18 400	2 800	0.26	295.39	2.24
C	310	94 004	6 200	2 300	0.28	304.21	1.90

表 9 油样色谱分析结果(实例 2)

Tab. 9 Dissolved gas analysis results(example 2)

相别	含量/ 10^{-6}						
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	CO	CO ₂
A	107	9.0	5.1	3.3	0	713	1 572
B	65	9.3	4.4	1.8	0	692	1 472
C	1 648	199	256	20.3	413.3	766	1 360

表 10 故障诊断结果(实例 2)

Tab. 10 Fault diagnosis results(example 2)

项目	概率/%
$P(c_1 x_1, x_2, x_3, x_4)$	0.374 5
$P(c_2 x_1, x_2, x_3, x_4)$	2.995 0
$P(c_3 x_1, x_2, x_3, x_4)$	1.264 1
$P(c_4 x_1, x_2, x_3, x_4)$	7.129 8
$P(c_5 x_1, x_2, x_3, x_4)$	4.956 7

将该套管和末屏小瓷套打开，发现末屏引出线断裂，可见应用贝叶斯网络进行电容型设备故障诊断的结果与实际吊芯检查的结果相符，本文的诊断方法正确。

4 结论

1) 本文综合了电容型设备的各种检测数据，获得了电容型设备地故障集、征兆集以及含不同征兆故障的概率。

2) 基于贝叶斯网络理论，提出了电容型设备故障诊断的贝叶斯网络模型，将贝叶斯网络方法引入电容型设备的故障诊断中。

3) 实例分析结果表明，贝叶斯网络方法在样本不多的情况下可以准确判断故障类型，指导检修，为电容型设备的故障诊断提供了新的思路。

参考文献

- [1] 严璋. 电气绝缘在线检测技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995: 1-110.
- [2] 朱德恒, 谈克雄. 电绝缘诊断技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999: 1-130.
- [3] GB7252-87, 变压器油中溶解气体分析和判断导则[S].
- [4] 王楠, 陈志业, 律方成. 电容型设备绝缘在线监测与诊断技术综述[J]. 电网技术, 2003, 27(8): 72-76.
Wang Nan, Chen Zhiye, Lü Fangcheng. A survey of on-line monitoring and diagnosis for capacitive equipment[J]. Power System Technology, 2003, 27(8): 72-76(in Chinese).
- [5] Allan D, Blundell M, Boyd K, et al. New techniques for monitoring the insulation quality of in-service HV apparatus[J]. IEEE Trans on Electrical Insulation, 1992, 27(3): 578-581.
- [6] 张会平, 谈克雄, 董凤宇. 电容型设备在线监测数据的分析方法[J]. 高电压技术, 2002, 28(4): 28-30.
Zhang Huiping, Tan Kexiong, Dong Fengyu. The analysis method of on-line monitoring data for capacitive equipment[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(4): 28-30(in Chinese).
- [7] 张会平, 董晓鹏, 谈克雄. 电容型设备 $\tan \delta$ 在线监测的核查模型[J]. 高电压技术, 2001, 27(2): 35-36.
Zhang Huiping, Dong Xiaopeng, Tan Kexiong. Checking model of $\tan \delta$ on-line monitoring of capacitive type equipment[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(1): 35-36(in Chinese).
- [8] Gao N, Yan Z. Expert system method using in insulation diagnosis [C]. International Symposium on Electrical Insulating Materials, Tokyo, 1995.
- [9] Shi Baozhuang, Yang Li, Feng Dekai, et al. Application of intelligent

- technology in on-line insulation diagnosis system[J]. High Voltage Apparatus, 2001, 37(1): 32-34.
- [10] 朱志平, 张民. 一种实用的配电网短路故障定位方法[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 101-104.
Zhu Zhiping, Zhang Min. A practical method to locate short circuit faults in distribution network[J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 101-104(in Chinese).
- [11] 戚宇林, 成艳, 杨以涵. 35 kV 配电网单相接地故障综合定位方法[J]. 电网技术, 2008, 32(10): 38-42.
Qi Yulin, Cheng Yan, Yang Yihan. A compositive fault location method for single-phase earth fault in 35kV distribution network[J]. Power System Technology, 2008, 32(10): 38-42(in Chinese).
- [12] 田野, 周念成, 赵渊, 等. 基于故障相电压功率谱的高压输电线路单相自适应重合闸[J]. 电网技术, 2008, 32(16): 22-26.
Tian Ye, Zhou Niancheng, Zhao Yuan, et al. Single-phase adaptive reclosure for EHV/UHV transmission line based on power spectrum of faulty phase voltage[J]. Power System Technology, 2008, 32(16): 22-26(in Chinese).
- [13] 王楠, 张利, 杨以涵. 10 kV 配电网单相接地故障交直流信号注入综合定位法[J]. 电网技术, 2008, 32(24): 88-92.
Wang Nan, Zhang Li, Yang Yihan. A comprehensive location method using ACDC signal injecting for single-phase earth fault in 10 kV distribution network[J]. Power System Technology, 2008, 32(24): 88-92(in Chinese).
- [14] 周爱华, 张彼德, 方春恩, 等. 基于模糊免疫识别方法的电力变压器故障诊断[J]. 电网技术, 2009, 33(3): 99-102.
Zhou Aihua, Zhang Bide, Fang Chun'en, et al. Power transformer fault diagnosis based on fuzzy immune recognition approach[J]. Power System Technology, 2009, 33(3): 99-102(in Chinese).
- [15] 高玮, 何正友, 杨建维, 等. 基于粗糙集-量子神经网络的电网故障诊断[J]. 电网技术, 2009, 33(S1): 51-56.
Gao Wei, He Zhengyou, Yang Jianwei, et al. Power system fault diagnosis based on rough set theory and quantum neural network[J]. Power System Technology, 2009, 33(S1): 51-56(in Chinese).
- [16] 苏傲雪, 范明天. 基于贝叶斯理论的电力系统元件故障率估算[J]. 电网技术, 2009, 33(S1): 95-98.
Su Aoxue, Fan Mingtian. The evaluation of components failure rate based on Bayesian theory[J]. Power System Technology, 2009, 33(S1): 95-98(in Chinese).
- [17] 项灿芳, 艾淑云, 张晓莉, 等. 电力系统故障录波装置性能评价体系的建立[J]. 电网技术, 2009, 33(4): 94-98.
Xiang Canfang, Ai Shuyun, Zhang Xiaoli, et al. Establishment of performance evaluation system for power system fault recorders[J]. Power System Technology, 2009, 33(4): 94-98(in Chinese).
- [18] 王少芳, 蔡金锭, 刘庆珍. 基于改进 GA-BP 混和算法的电力变压器故障诊断[J]. 电网技术, 2004, 28(4): 30-33.
Wang Shaofang, Cai Jinding, Liu Qingzhen. Power transformer fault diagnosis by improved hybrid algorithm based on genetic algorithm and back propagation algorithm[J]. Power System Technology, 2004, 28(4): 30-33(in Chinese).
- [19] 孙才新, 李俭, 郑海平, 等. 基于灰色面积灰关联度分析的电力变压器绝缘故障诊断方法[J]. 电网技术, 2002, 26(7): 24-29.
Sun Caixin, Li Jian, Zheng Haiping, et al. A new method of faulty insulation diagnosis in power transformer based on degree of area incidence analysis[J]. Power System Technology, 2002, 26(7): 24-29(in Chinese).
- [20] 臧宏志, 徐建政, 俞晓冬. 基于多种人工智能技术集成的电力变压器故障诊断[J]. 电网技术, 2003, 27(3): 15-17.
Zang Hongzhi, Xu Jianzheng, Yu Xiaodong. Power transformer fault diagnosis based on integrated artificial intelligence[J]. Power System Technology, 2003, 27(3): 15-17(in Chinese).
- [21] 邓宏贵, 罗安, 曹建, 等. 基因多点交叉遗传算法在变压器故障诊断中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(24): 1-4.
Deng Honggui, Luo An, Cao Jian, et al. Application of multi-point criss-cross genetic algorithm in transformer fault diagnosis[J]. Power System Technology, 2004, 28(24): 1-4(in Chinese).
- [22] Riedman N, Geiger D, Goldszmidt M. Bayesian network classifiers[J]. Machine Learning, 1997(29): 131-163.
- [23] 王永强, 律方成, 李和明. 基于贝叶斯网络和 DGA 的变压器故障诊断[J]. 高电压技术, 2004, 30(5): 12-13.
Wang Yongqiang, Lü Fangcheng, Li Heming. Intelligent fault diagnosis for power transformer based on Bayesian network and DGA[J]. High Voltage Technology, 2004, 30(5): 12-13(in Chinese).
- [24] 王永强, 律方成, 李和明. 基于粗糙集理论和贝叶斯网络的电力变压器故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(8): 137-141.
Wang Yongqiang, Lü Fangcheng, Li Heming. Synthetic fault diagnosis method of power transformer based on rough set theory and Bayesian network[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(8): 137-141(in Chinese).
- [25] 张耀天, 何正友, 赵静, 等. 基于粗糙集理论何朴素贝叶斯网络的电网故障诊断方法[J]. 电网技术, 2007, 31(1): 37-43.
Zhang Yaotian, He Zhengyou, Zhao Jing, et al. A power network fault diagnosis method based on rough set theory and naïve Bayesian networks[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 37-43(in Chinese).



王永强

收稿日期: 2009-04-03。

作者简介:

王永强(1975—), 男, 博士, 副教授, 主要从事高电压与绝缘技术的研究, E-mail: wyqshj@ncepu.edu.cn;

律方成(1963—), 男, 教授, 主要从事电气设备在线监测与故障诊断的研究。

(责任编辑 杜宁)