

# 基于贝叶斯网络的电抗器健康诊断

赵文清<sup>1,2</sup>, 王 强<sup>1</sup>, 牛东晓<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学 控制与计算机工程学院, 河北 保定 071003;

2. 华北电力大学 经济与管理学院, 北京 102206)

**摘要:** 针对电抗器的特高压绝缘、局部过热、振动和噪声这3个问题,采用5级健康状态诊断法,并充分考虑电抗器预防性试验数据及其变化量。首先建立评估电抗器健康状态的分层模型,通过该模型评估电抗器的历史、当前状态,然后通过无偏GM(1,1)模型预测电抗器的未来状态,并确定分层模型中电抗器各个参数的阈值和分值,最终建立基于贝叶斯网络的电抗器健康诊断模型。实例验证了所提模型的正确性和可行性。

**关键词:** 电抗器; 贝叶斯网络; 模型; 无偏GM(1,1); 健康诊断

**中图分类号:** TM 47

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.01.008

## 0 引言

随着电网现代化程度的不断提高,以及建设“统一坚强”智能电网目标的提出,电气设备从事后检修到计划检修,再到状态检修的转变是技术发展的必然趋势<sup>[1-2]</sup>。并联电抗器是高电压、远距离交流输电网络中不可缺少的重要设备,它可以改善沿线工频电压分布,增强系统稳定性及送电能力;降低工频暂态过电压,并进而限制操作过电压的幅值;改善轻载线路中的无功分布,降低有功损耗,提高送电效率等,因此,其运行状态关系到整个电力系统的安全稳定运行。

电抗器的健康诊断是电抗器状态检修的基础,目前针对电抗器的诊断都是以油中溶解气体分析(DGA)为主的方法,有传统的色谱分析法<sup>[3]</sup>、比值法<sup>[4]</sup>,也有基于人工智能的模糊数学<sup>[5]</sup>、神经网络<sup>[6]</sup>等。文献<sup>[4]</sup>提出了基于三比值法的电抗器故障诊断,该方法虽然实现简单,但准确性不高,具有片面性。文献<sup>[5]</sup>提出了一种模糊逻辑模型来分析油中溶解气体,其能提供以DGA数据为基础的设备排名,但不能评估设备运行状态。鉴于此,本文充分考虑电抗器研发技术的难题和运行期间出现的主要问题,并综合电抗器的历史、当前和未来状态,建立了基于贝叶斯网络的电抗器健康诊断模型,为电抗器由定期预防性维修向状态维修的过渡提供技术支持。

收稿日期:2011-07-25;修回日期:2012-08-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(70671039,61074078);河北省自然科学基金资助项目(E2009001392);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(12MS121);山西省电力公司科技项目(XZGDKJ2012005)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(70671039,61074078),the Natural Science Foundation of Hebei Province(E2009001392),the Fundamental Research Funds for the Central Universities(12MS121) and the Science and Technology Project of Shanxi Electric Power Corporation(XZGDKJ2012005)

## 1 电抗器状态量和评分方案的确定

并联电抗器的绝缘结构包括主、纵绝缘结构<sup>[7]</sup>,主绝缘结构由油和纸板构成,利用纸筒合理分割油隙,配置符合电场等位线形状的角环,并放置在最佳位置上。纵绝缘结构中,首端柱线圈采用全纠结结构,末端柱线圈采用纠结连续式结构,通过多根并联导线间的交错插花增大线圈纵向电容。随着电抗器容量的增大,复杂的内部结构引起的磁场分布更复杂,漏磁更大。研究表明电抗器治理的难点在于局部过热,其主要由漏磁引起。铁芯饼与间隙材料构成铁芯柱,磁致伸缩和铁芯间的电磁力引起振动产生噪声。绝缘、局部过热、振动和噪声是困扰电抗器技术发展的难题<sup>[8-9]</sup>,用它们来评估电抗器的健康状态最有说服力。本文针对这些问题,对电抗器的健康状态进行全面评估,采用表1所示方案诊断电抗器健康状态。

表1 电抗器健康状态评分  
Tab.1 Scores of reactor health statuses

评分	状态描述	维修策略
0~20	优	延期维修
21~40	良	计划维修
41~60	中	优先维修
61~80	注意	尽快维修
81~100	差	立即维修

## 2 电抗器分层评分模型

综合考虑试验数据的量值和变化量来对试验项目进行评分。规定当数据向有利方向变化时变化量得分为满分,反之,用评分模型和阈值来进行评分。

### 2.1 评分模型的确定

本文采用半梯模型进行电抗器状态信息评分。最常见的半梯模型有升半梯模型和降半梯模型,对于数值越大越好的指标,采用升半梯模型;反之采用降半梯模型。为方便计算,将分值归一化,即评分模型计算结果为0~1之间(对应于0~100分)。

升半梯模型和降半梯模型的表达式分别如式(1)和式(2)所示:

$$f(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x < b \\ 1 & x \geq b \end{cases} \quad (1)$$

$$f(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x < a \\ 1 - \frac{x-a}{b-a} & a \leq x < b \\ 1 & x \geq b \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $a$  和  $b$  为阈值,  $x$  为评分参数。

### 2.2 评分阈值的确定

根据电力设备预防性试验规程以及现场调研资料<sup>[10-14]</sup>, 本文所采用的试验参数对应的评分模型和模型阈值见表 2—4。

表 2 电抗器绝缘问题的评分模型和阈值  
Tab.2 Scoring model and threshold value of reactor insulation evaluation

评分项目	$a$	$b$	评分模型
绝缘电阻/MΩ	4 000	7 000	升半梯模型
吸收比	1	1.5	升半梯模型
极化指数	1	1.5	升半梯模型
绕组的正切值/%	0.2	0.6	降半梯模型
泄漏电流/μA	50	80	降半梯模型
绝缘油的介损值/%	0.05	0.2	降半梯模型
油中水的含量/(μL·L <sup>-1</sup> )	10	15	降半梯模型
油中糠醛的含量/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.4	0.75	降半梯模型
CO <sub>2</sub> 与CO含量比	3	7	降半梯模型
绝缘电阻的变化量/%	30	70	降半梯模型
吸收比的变化量/%	1	1.3	降半梯模型
极化指数的变化量/%	1.2	1.5	降半梯模型
绕组正切值的变化量/%	10	30	降半梯模型
泄漏电流的变化量/%	30	70	降半梯模型
绝缘油的介损值的变化量/%	30	60	降半梯模型
油中水的变化量/%	20	40	降半梯模型
油中糠醛的变化量/%	30	50	降半梯模型

表 3 局部过热问题的评分模型和阈值  
Tab.3 Scoring model and threshold value of reactor local overheating evaluation

评分项目	$a$	$b$	评分模型
H <sub>2</sub> 含量/(μL·L <sup>-1</sup> )	60	150	降半梯模型
H <sub>2</sub> 产气速率/(mL·d <sup>-1</sup> )	5	10	降半梯模型
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> 产气速率/(mL·d <sup>-1</sup> )	0.08	0.15	降半梯模型
总烃的产气速率/(mL·d <sup>-1</sup> )	6	12	降半梯模型

表 4 振动和噪声问题的评分模型和阈值  
Tab.4 Scoring model and threshold value of reactor vibration & noise evaluation

评分项目	$a$	$b$	评分模型
振动振幅/μm	70	100	降半梯模型
A 计权声压级/dB	70	120	降半梯模型
阻抗测量变化量/%	1	5	降半梯模型
振幅变化/%	30	50	降半梯模型
A 计权声压级的变化量/%	10	30	降半梯模型

### 2.3 分层评估模型

图 1 所示为电抗器健康状态分层评估模型。图

中,油中糠醛、油中微水、CO<sub>2</sub>与CO含量比为绝缘老化的 3 个并列子层,绝缘老化和绝缘受潮为绝缘问题的 2 个并列子层,依此类推,图 1 可直观地反映这种层次关系。图中每层的得分都是由该层的子层得分综合得出,计算原则是:若子层各项得分均 ≥ 0.7(得分归一化后),则取各项得分的算术平均值为父层的得分;反之父层得分为子层各项得分的最小值。利用这些得分逐层计算,就可得到电抗器的健康状态。

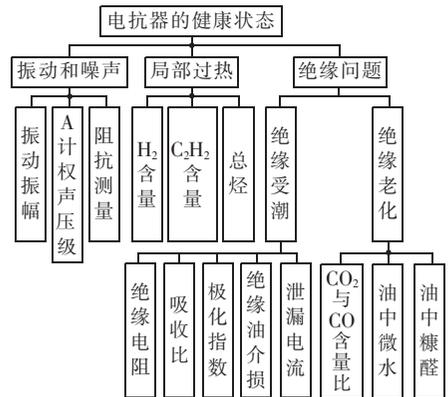


图 1 分层电抗器健康状态评估模型  
Fig.1 Layered reactor health diagnosis model

## 3 基于贝叶斯网络的电抗器综合健康状态诊断

### 3.1 基本思想

2.3 节模型通过分析近期的预防性试验数据来确定电抗器的运行状态。而实际上,电抗器当前状态往往受其历史状况的影响。此外,电抗器状态评估的目的是为确定维修策略提供依据。若下一个维修周期中电抗器将出现故障,则需要缩短检修周期,提前安排检修;若下一个维修周期中电抗器状态非常好,不会出现故障或异常,则说明电抗器的各项状态信息劣化缓慢,可适当延长检修周期。因此,仅分析近期试验数据往往难以准确获得电抗器的综合状态,应综合考虑电抗器的历史、当前和未来状态。

灰色系统<sup>[16]</sup>是邓聚龙教授于 20 世纪 80 年代初创立的新兴横断学科,它适用于对时间序列短、统计数据少、信息不完全系统的建模与分析。对电抗器而言,电抗器的历史、当前参数已知,但影响电抗器状态的其他因素,如天气情况等难以确定,故电抗器的状态是灰色的。本文提出了无偏灰色模型,通过对电抗器预防性试验数据的处理和灰色模型的建立,根据电抗器试验参数的发展规律,对电抗器的未来状态作出科学的定量预测。贝叶斯网络<sup>[17]</sup>是一种基于网络结构的有向图解描述,它被认为是目前不确定知识表达和推理领域最有效的理论模型,能发现大量变量之间的关系,是进行数据预测、分类的有力工具。

根据以上分析,本文提出了基于贝叶斯网络的

电抗器综合健康状态的诊断方法,该方法首先对电抗器的各类状态信息进行预测,得到未来时间段的相关参数数据;然后分别对历史、当前和未来试验数据按照分层评估模型来评分,得到电抗器的历史、当前和预测健康状态;最后,通过贝叶斯网络综合历史、当前和预测状态得到电抗器的综合状态。

### 3.2 诊断模型

为诊断电抗器的综合状态,本文提出了基于贝叶斯网络的电抗器健康诊断模型,如图 2 所示。该模型最底层为电抗器的综合健康状态,该节点具有 5 个状态(详见表 1)。基于贝叶斯网络的电抗器健康诊断模型立足于电抗器的研发技术难题和实际运行中的常见问题,充分利用各项预防性试验数据及其变化量对电抗器状态的影响,综合考虑了电抗器历史、当前和未来状态,最终得到电抗器的健康状态。

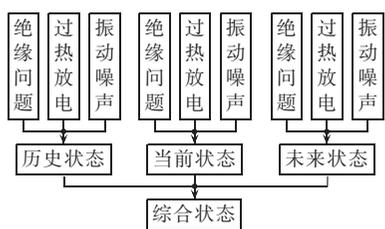


图 2 基于贝叶斯网络的电抗器健康诊断模型

Fig.2 Reactor health diagnosis model based on Bayesian network

### 3.3 电抗器健康诊断模型条件概率表的确定

贝叶斯网络条件概率表的学习方法可分为基于经典统计学的学习方法和基于贝叶斯统计学的学习方法两大类。前者具有理论成熟、计算简单的优点,但它只利用了实例数据集所提供的信息,无法加入专家的知识,所以对实例数据集的依赖性大;后者有机地综合了实例数据和专家知识这 2 类信息,因此对实例数据集的依赖性较低,其学习结果更精确。本文采用前者计算贝叶斯网络模型条件概率<sup>[15]</sup>。

令  $\theta_{ijk} = p(X_i = X_i^k | P_i^k)$ , 其中  $P_i^k$  为随机变量  $X_i$  的父节点(即历史状态、当前状态、未来状态 3 个节点)的取值组合中第  $j$  种组合(本文将状态划分为 5 态,则共有  $5^3 = 125$  种组合)。令  $q_i$  为  $X_i$  的可取数目,则根据概率的归一性,有:

$$\sum_{k=1}^{q_i} \theta_{ijk} = 1$$

由条件期望估计法可知,贝叶斯网络条件概率表的学习公式为:

$$\hat{\theta}_{ijk} = E_{p(\theta_{ijk}|c)}(\theta_{ijk}) = \frac{a_k + N_{ijk}}{\sum_{k=1}^r (a_k + N_{ijk})} \quad (3)$$

其中,  $E_{p(\theta_{ijk}|c)}$  为条件期望估计法的数学表示,  $c$  泛指条件;  $N_{ijk}$  为节点  $X_i$  的父节点取第  $j$  种组合,且  $X_i$  为

第  $k$  种状态时( $k = 1, 2, 3, 4, 5$  时综合状态分别为 A、B、C、D、E,即优、良、中、注意、差)的样本数; $r$  为节点  $X_i$  的状态数目,本文变压器的状态是 5 态划分,所以  $r = 5$ ;  $a_k$  代表专家知识,在实际计算中由领域专家给定,特殊情况下也可采用贝叶斯假设,即假设变量取各个值的概率都相等,有  $a_k = 1, a = \sum_{k=1}^r a_k$ 。

### 3.4 实例分析

本文收集了晋东南某变电站的电抗器试验数据、DGA 数据和电抗器的运行工况,根据图 1 给出的分层模型对其当前状态和历史状态进行打分,用无偏灰色模型对其未来状态进行预测并进行打分,给出其综合状态。这些评分和电抗器的运行状态构成了电抗器的贝叶斯网络健康诊断模型的训练样本。样本综合状态统计信息见表 5。

表 5 样本统计信息

综合状态	A	B	C	D	E
样本数量	202	120	50	20	45

举例说明条件概率表的计算:当父节点组合为“历史状态=A,当前状态=A,未来状态=A”时,计算出综合状态分别取 A、B、C、D、E 时的条件概率。先统计满父节点组合下综合状态为 A、B、C、D、E 时的样本个数为 80、9、0、0、0,由式(3)可算出各条件概率值:

$$p(A) = (1+80) / [(1+80) + (1+9) + (1+0) + (1+0) + (1+0)] \approx 0.862$$

$$p(B) = (1+9) / [(1+80) + (1+9) + (1+0) + (1+0) + (1+0)] \approx 0.106$$

$$p(C) = p(D) = p(E) = (1+0) / [(1+80) + (1+9) + (1+0) + (1+0) + (1+0)] \approx 0.011$$

限于篇幅,本文只列出部分条件概率表,见表 6。

表 6 综合状态条件概率

历史状态	当前状态	未来状态	综合状态				
			A	B	C	D	E
A	A	A	0.862	0.016	0.011	0.011	0.011
A	B	B	0.013	0.910	0.051	0.013	0.013
B	B	C	0.017	0.610	0.220	0.102	0.051
D	B	B	0.111	0.444	0.222	0.111	0.111

实例分析证明,本文提出的基于贝叶斯网络的电抗器健康诊断方法,采用 5 级状态评定法,能够更准确地描述电抗器的健康状态。

## 4 结语

本文综合考虑电抗器的研发技术难题和运行期间出现的常见问题,充分考虑各项预防性试验的重要性和参数变化对电抗器状态的影响,用分层评分模型给出电抗器的综合评分,试验证明该方法合理、高效。为全面把握电抗器的健康状态,提出无偏灰色

预测模型,对电抗器的未来状态进行了预测。最后,提出贝叶斯网络健康诊断模型,综合考虑了电抗器历史、当前和未来状态,给出电抗器的综合健康状态。本文所提模型能够高效地掌握电抗器运行期间的健康状态,以实现电网的可靠、经济、高效、环境友好和使用安全为目标,推动了“坚强”智能电网的建设。

### 参考文献:

- [1] 胡汉梅,郑红. 基于智能电网的设备在线监测与故障诊断[J]. 低压电器,2010(17):28-31.  
HU Hanmei,ZHENG Hong. Devices online monitoring and fault diagnostics based on smart grid[J]. Low Voltage Apparatus, 2010(17):28-31.
- [2] MOLDOVEANU C,BREAOIANU V,VASILE A,et al. Intelligent system for the on-line real time monitoring of high voltage substations[C]//2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe(ISGT Europe). Gothenburg,Sweden; [s.n.],2010:1-8.
- [3] 赵京武,李红林. 500 kV 并联电抗器色谱监测与故障诊断[J]. 变压器,2002,39(1):39-41.  
ZHAO Jingwu,LI Honglin. Fault diagnosis and monitoring with chromatography in 500 kV shunt reactor[J]. Transformer,2002, 39(1):39-41.
- [4] 刘占威. “三比值”法在电抗器产品事故分析中的应用[J]. 变压器,2009,46(5):70-71.  
LIU Zhanwei. “Three-ratio” method in the reactor product accident analysis[J]. Transformer,2009,46(5):70-71.
- [5] ABUSIADA A,ARSHAD M,ISLAM S. Fuzzy logic approach to identify transformer criticality using dissolved gas analysis[C]// 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Minnesota,USA:[s.n.],2010:1-5.
- [6] 赵晓娜. 基于油中溶解气体的电抗器状态预测与故障诊断研究[D]. 保定:华北电力大学,2008.  
ZHAO Xiaona. Study on condition forecast and diagnosis of reactor based on dissolved gas-in-oil[D]. Baoding:North China Electric Power University,2008.
- [7] 宓传龙,汪德华,陈荣. 1000 kV 特高压并联电抗器的研制[C]// 2009 特高压输电技术国际会议论文集. 北京:[出版者不详],2009: 68-71.
- [8] LIANG Yanping,ZHANG Fang,ZHANG Haiting,et al. Leakage inductance calculation and simulation research of extra-high voltage magnetically controlled shunt reactor[J]. Mechanic Automation and Control Engineering(MACE),2010,43(6):4025-4028.
- [9] 刘孝为,陈楚羽,王宏超. 超高压并联电抗器的结构特点和运行情况综述[J]. 陕西电力,2006,34(2):39-42.  
LIU Xiaowei,CHEN Chuyu,WANG Hongchao. Probe into the structure character & operation of EHV shunt reactor[J]. Shaanxi Electric Power,2006,34(2):39-42.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. DB/T7252—2001 变压器油中溶解气体分析和判断导则[S]. 北京:中国电力出版社,2001.
- [11] 中华人民共和国电力工业部. DL/T596—1996 电力设备交接和预防性试验规程[S]. 北京:中国电力出版社,1997.
- [12] 国家标准局. GB7328—87 变压器和电抗器的声级测定[S]. 北京:中国电力出版社,1987.
- [13] 逯怀东,陈玉峰,朱文兵,等. 一起 500 kV 并联电抗器振动异常的分析处理[J]. 高压电器,2008,44(2):153-155.  
LU Huaidong,CHEN Yufeng,ZHU Wenbing,et al. Analysis and treatment of a 500 kV shunt reactor abnormal vibration [J]. High Voltage Apparatus,2008,44(2):153-155.
- [14] 官俊军. 高压并联电抗器损耗降低与噪声控制的措施[J]. 电力设备,2006,7(12):15-17.  
GUAN Junjun. The measures of reducing losses and noise control for HV shunt reactor[J]. Electrical Equipment,2006,7 (12):15-17.
- [15] 赵文清,朱永利,姜波,等. 基于贝叶斯网络的电力变压器状态评估[J]. 高电压技术,2008,34(5):1032-1038.  
ZHAO Wenqing,ZHU Yongli,JIANG Bo,et al. Condition assessment for power transformers by Bayes networks[J]. High Voltage Technology, 2008,34(5):1032-1038.
- [16] 邓聚龙. 灰预测与灰决策[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2002: 15-17.
- [17] 徐建政,李强,李建超. 应用贝叶斯网络模型的电力系统故障诊断[J]. 电力系统及其自动化学报,2010,22(1):91-94.  
XU Jianzheng,LI Qiang,LI Jianchao. Power system fault diagnosis using Bayesian network model[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2010,22(1):91-94.

### 作者简介:

赵文清(1973-),女,山西朔州人,副教授,博士研究生,研究方向为负荷预测、智能技术在电力系统中的应用(E-mail: jbzqwq@126.com)。

## Reactor health diagnosis based on Bayesian network

ZHAO Wenqing<sup>1,2</sup>,WANG Qiang<sup>1</sup>,NIU Dongxiao<sup>2</sup>

(1. School of Control and Computer Engineering,North China Electric Power University,Baoding 071003,China;

2. School of Economics and Management,North China Electric Power University,Beijing 102206,China)

**Abstract:** Five-level health diagnosis method is applied to detect three reactor problems:UHV insulation, local overheating and vibration & noise,which considers the preventive test data of reactor and their variations. A layered model is established for evaluating the historic and current health status of reactor,and its future status is predicted with the unbiased GM(1,1) model. The threshold value and score of each reactor parameter are determined and the reactor health diagnosis model based on Bayesian network is finally established. Its validity and feasibility are verified by examples.

**Key words:** electric reactors; Bayesian networks; models; unbiased GM(1,1); health diagnosis