

基于知识节点和FMECA的变压器故障诊断系统

针对变压器结构复杂、监测数据相对独立以及难以对设备（子部件）进行综合健康评判的问题，在故障诊断信息模型基础上提出了一种知识节点，用于获取在动态过程中难以获取的指标信息，并且根据建立的故障模式、影响及危害性分析（FMECA）确定故障模型，实现故障表现、监测信息、原因及策略的协同工作；在此基础上建立了变压器的故障诊断模型，实例表明，该方法能够解决多信息融合和关键指标难以获取等问题，且诊断结论可靠性、实用性强，为实现变压器的精益化检修打下了基础。

谷凯凯 徐进霞 周正钦/国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司
刘益岑/国网四川省电力公司 苏 磊/国网上海市电力公司

0 引言

随着智能电网的快速建设，传感和信息化技术已在电力系统中深入应用，实时的设备状态预警和分析在遇到结构复杂的设备情况下，已经成为运维工作者的一个比较常用的辅助手段^[1]。

变压器运行状态对电网的安全与稳定有很大影响，必须对其状态进行实时监测和分析，最大限度防止和减少重大故障的发生^[2]。随着在线监测、带电检测等手段的普遍应用，变压器的各类状态表征数据得到了采集并实现了基本的数据分析，但这些功能主要集中在单参量的数据分析和阈值判断上，无法对变压器状态进行整体状态分析及诊断^[3]。为此，本文在分析电力设备状态数据分析应用信息流的基础上，提出了将知识节点应用到故障诊断中，用于提取无法通

过硬件传感器获取的状态量，同时通过故障模式、影响及危害性分析可以准确获取设备当前状况及后期的趋势，提高变压器故障诊断的准确性和故障诊断效率。

1 知识节点

变压器故障诊断数据流程如下：首先建立健全的状态信息获取体系，其次在各状态信息基础上通过领域知识体对状态进行分析和诊断，最后由此制定差异化的检修策略，如图1所示。传统的故障诊断信息体系，其获取的状态信息相对独立，且数据分析主要围绕着单变量开展，无法对变压器的整体状态进行评价^[4]。同时变压器结构复杂，其状态是一个变过程，包括电气、机械和化学等多个表征参数，需要进行过程分析来获得表征变压器状态的状态量信息。

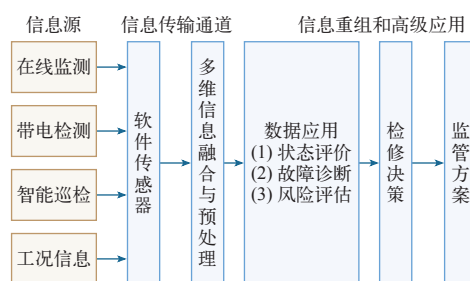


图1 故障诊断数据流

1.1 变压器状态监测信息

变压器状态监测信息主要包括基本技术参数、巡检、带电检测、试验数据和电网运行等信息，这些信息直接或间接反映电力变压器的状态信息，同时根据数据的更新频率，可以将上述不同来源的状态信息划分为三大类，即静态参



谷凯凯/工程师

关键词/Keywords

变压器·
知识节点·
故障诊断·

国家电网公司科技项目（521997140005输变电设备
巡检大数据分析及监控系统应用关键技术）。

数、动态参数和准动态参数^[5]。

(1) 静态参数

自记录后不再发生变化，从变压器故障诊断的需求考虑，静态参数往往作为某项状态参量评分时的参考值和判断依据，用作初始值、阈值等，主要包括台账信息和投运前参数。

(2) 动态参数

按照规程要求定期获取并更新，更新周期一般为时或天，动态参数更新周期短，时效性较好。从设备故障诊断需求来说，动态参数能够准确反映当前设备的风险及状态，主要包括运行数据、巡检数据、带电检测数据和在线监测数据等。

(3) 准动态参数

与动态参数相比，准动态参数的时效性较差，但数据的准确性高，在进行诊断变压器潜在缺陷/故障时，准动态参数主要包括油质试验数据、诊断性试验数据等。

1.2 知识节点的功能作用

从变压器检测信息模型中可看出，监测信息之间相对独立，数据更新周期上也有很大的差距，这些信息基本反映设备的运行状态，但仍然不能确切说明其健康状况。同时电力变压器的结构比较复杂，子部件也很多，包括铁心、绕组、绝缘油、油箱、分接开关、套管、冷却系统和非电量保护8个子系统，不同的子部件所关注的状态信息和参数取值区间差距大，需要进行过程分析。因此故障的诊断与预测需要先获取表征子部件健康状态。

在分析现有诊断系统研究现状的基础上，本文提出由知识节点获取设备健康状态。知识节点是为了拓展硬件传感器的功能，在硬件传感器的基础上，设计一个专用的采集模块，得到常规硬件传感器没有办法得到的指标与参数，如图2所示。

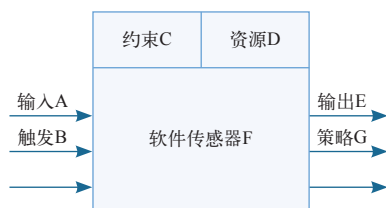


图2 知识节点

图2的方框部分为知识节点，实现监测信息到设备健康状态的映射，记作F；输入A是此知识节点加载的信息，可以是实测值，也可以是其他知识节点输出；触发B是知识节点的激活边界；约束C是知识节点激活的约束条件；资源D是此项工作所需的软硬件资源；输出E是此知识节点得到设备状态特征参数，对变压器故障诊断来说，即为每个子部件的健康状态量化指标；策略G是该知识节点对输入的响应，即下一步策略，可以是某个节点触发，也可以是具体的维修建议。铁心状态评判知识节点示例如表1所示。

表1 铁心状态评判知识节点示例

类别	参数	类别	指标
输入A	油色谱	输出E	铁心多点接地
	空载损耗		铁心局部短路
	顶层油温		磁饱和
	铁心接地电流		悬浮放电
	铁心对地绝缘电阻		底座纸板受潮
	介损		叠片间绝缘破损
	过励磁保护		...
触发B	色谱分析过热故障	策略G	调整部件距离防止
	空载损耗过大		相碰重新连接牢固
	顶层油温偏高		进行高压试验
	铁心接地电流偏大		
	铁心对地绝缘电阻异常		
	介损异常		
	...		

2 故障模式、影响及危害性分析

故障模式、影响和危害分析（FMECA）主要用于分析变压器及其子部件的故障模式、故障原因及故障影响，针对设备的薄弱环节和关键部件，通过加装传感器跟踪其状态^[6-7]。同时，FMECA的分析结果也是知识节点建立的模型依据。

对变压器进行故障模式与故障影响分析，其步骤如图3所示。首先需要大量收集变压器的相关信息，了解变压器部件的结构与功能，罗列一些典型故障，积累故障模式、原因以及影响分析的素材^[8]。最后的任务是：①系统定义设备，构建逻辑框图；②列举各个子系统的典型故障模式；③分析故障模式中的具体项目；④列写变压器各子

系统的FMECA结果。

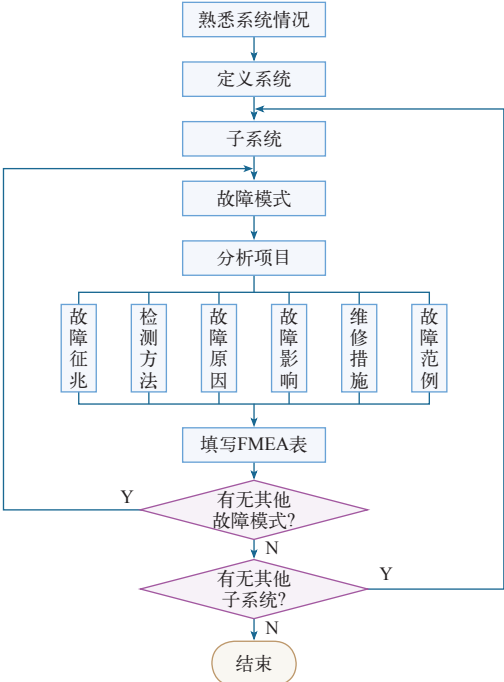


图3 故障模式影响分析步骤

变压器各子系统的故障模式如表2所示。表中各项故障模式是变压器各个子系统在实际运行过

表2 电力变压器各子系统的故障模式

名称	系统故障模式	名称	系统故障模式
A 载流系统	引线放电	B 铁心	铁心片间短路
	绕组断路		铁心接地不良
	绕组短路		铁心多点接地
	绕组变形		
	绕组过热		
C 绝缘油	老化	D 油箱	过热
	油流带电		密封不良
	受潮		
E 套管	局部放电	F 分接	开关档位错乱
	绝缘受潮		拒动作
	渗漏油		渗漏油
	接触不良		触头接触不良
	外绝缘闪络		
	末屏引线断开		
G 冷却系统	导杆分流	H 保护和测示系统	油位计假油位
	均压球悬浮		储油柜油室渗漏
	冷却器渗漏油		
	管路漏油		呼吸器阻塞
	风扇运转不良		油位计假油位
	油泵轴承磨损		储油柜油室渗漏

程中所发生故障模式的总计，同时故障模式是知识节点的输出E。铁心子系统FMECA分析结果如表3所示，故障征兆是各个故障模式直接或间接表现，是知识节点的输入A；检测方法是各个故障征兆（监测数据）获取方式，是知识节点的资源D；原因分析是各个故障模式的具体解释和描述，是知识节点输出E的详细部分；影响分析是该故障模式对设备健康影响程度分析；维修措施是检修决策需要关心的内容和依据，是知识阶段的策略G。

表3 子系统B（铁心）FMECA表

项目	主要内容
多点接地	故障征兆 ①铁心接地线有环流； ②铁心的绝缘电阻比较低，<100 MΩ； ③甲烷和烯烃组分较高，CO和CO ₂ 和以往相比变化不大； ④振动比较大，声音出现异常
	检测方法 ①测量油中溶解的气体； ②测量接地线电流； ③直流法判断故障位置； ④交流法判断故障位置
	原因分析 ①箱底出现金属异物； ②叠片松散； ③拉带形成的短路环； ④接地的引线比较长； ⑤铁心底座的纸板受潮，箱底油泥； ⑥铁心与夹件或箱体直接接触
	分析影响 ①多点接地严重； ②引起片间绝缘老化，引发更大的过热，将铁心烧毁
	维修措施 ①消除异物产生因素，如查看潜油泵有无磨损； ②碰触：移动接地位置；调整部件间的距离，防止碰撞； ③异物：对于非牢固性的接地，可以利用冲击方式将其冲散；对于牢固性的接地，需要对其吊罩处理
	不良接地 故障征兆 ①气体继电器动作； ②绕组介质损耗因素过大； ③变压器出现间断放电现象，同时有清晰声响
不良接地	检测方法 ①测量局部放电； ②分析油中溶解的气体； ③耐压试验； ④进行绕组的介损测量
	原因分析 ①铁心叠片之间的漆膜电阻大； ②箱体与接地片之间有松动，接地铜片与铁心叠片没有夹紧

(续)

项目	主要内容
不良接地	影响分析 ①片间的绝缘被损坏，烧毁铁心； ②接地片悬浮放电
	维修措施 重新将其牢固连接，进行高压试验
片间短路	故障征兆 ①轻瓦斯动作，严重时重瓦斯动作； ②变压器的温度过高； ③油质变坏； ④铁心的接地线有环流； ⑤空载的损耗大
	检测方法 ①检查之前的负荷； ②溶解油中的气体； ③接地环流； ④直流法； ⑤测量空载损耗
	原因分析 ①长期过载； ②片间含有杂质或者片间有空气； ③铁心受潮，绝缘漆脱落
	影响分析 铁损耗小，比如损伤片间的绝缘，使得片间的电阻变小，铁心过热空载损耗增大
	维修措施 重新进行牢固，并做高压试验

通过FMECA分析，可以得到各个子系统的薄弱环节、关键监测指标和处理措施等。针对各个薄弱环节和关键量，加装传感和合适的知识节点，可以很好地掌握设备健康状态，并找出故障原因，给出相应的维修策略，为精益化检修提供非常好的解决方案。

3 变压器故障诊断系统研究

3.1 故障诊断模型

变压器的故障诊断模块具备功能如下^[9-10]：
①监测数据获取；②特征指标提取；③故障的定位；④自动诊断非正常的状态；⑤状态识别；⑥交互式专家诊断；⑦维修决策。

图4为故障诊断流程。状态信息的采集模块能够实现各监测数据获取工作，这些信息大多通过仪器获取，还不能完全表达系统的健康状态，需通过知识节点获取设备的性能指标。当指标正常时，可进行系统趋势预测，对系统的劣化趋势进行及时跟踪；当系统出现异常指标时，采用自诊

断的功能，根据FMECA分析结果，并基于自动诊断，专家修正实际的诊断结果和完善自动诊断的结果。

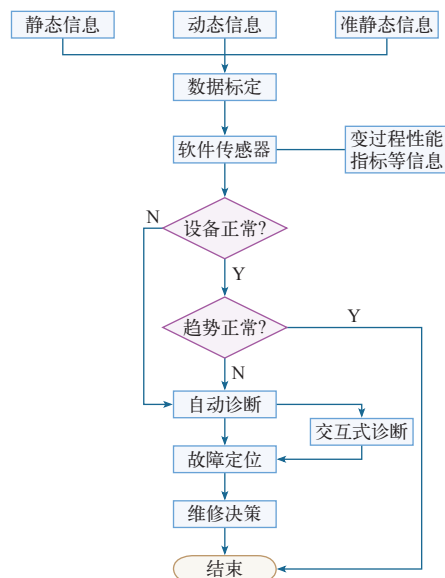


图4 故障诊断流程

3.2 诊断实例

基本信息：某110 kV变电站1[#]主变压器，型号为SFSZ8-31500/110，1997年投运。2008年5月23日晚上，当地雷电交加，20:48，1[#]主变压器轻瓦斯告警，重瓦斯及差动保护动作，主变压器三侧开关跳闸。主变压器投运后的11年期间，发生了多次中、低压侧的短路冲击，尤其是2006年6月18日，主变压器中压侧三相出口短路，短路电流为3 100 A，持续时间约为2 s，对主变压器冲击十分巨大；2008年5月23日，主变压器在10 min内中、低压侧先后发生3次2 000~3 000 A短路电流的冲击。

试验信息：①主变压器外观检查：无异常；②高压试验，发现高压侧绝缘良好，中、低压侧对地绝缘为零。事故后和近年来主变压器油中气体成分含量测试结果如表4所示。

诊断过程：①触发色谱计算的知识节点，输出编码102属于电弧放电，且CO增长较快，涉及固体绝缘，分析过程如图5所示；②因涉及固体绝缘，触发绕组分析的知识节点，输出匝层间短路

表4 1#主变压器油色谱试验数据

试验项目	时间	最近的一次油试验	
		2007年12月	2008年5月24日
油中气体含量/(μL/L)	H ₂	20	6 287.95
	CO	1 000	9 609.40
	CO ₂	4 600	11 423.29
	CH ₄	21	962.48
	C ₂ H ₆	4.4	26.60
	C ₂ H ₄	12.8	578.44
	C ₂ H ₂	0	1 295.83
	总烃	38.2	2 863.36

和试验建议，分析过程如图6所示。

解体检查：主变压器高压侧B相高压引线有过热迹象，其铜绞线内部发黑严重。35 kV引线也有类似变色迹象。本文提出故障诊断模型输出结论“匝层间短路”与解体检查结果相似。

4 结束语

本文提出了基于FMECA和知识节点的变压器故障诊断系统，该系统能实现监测信息、故障表现、原因及策略的协同工作，通过知识节点实现

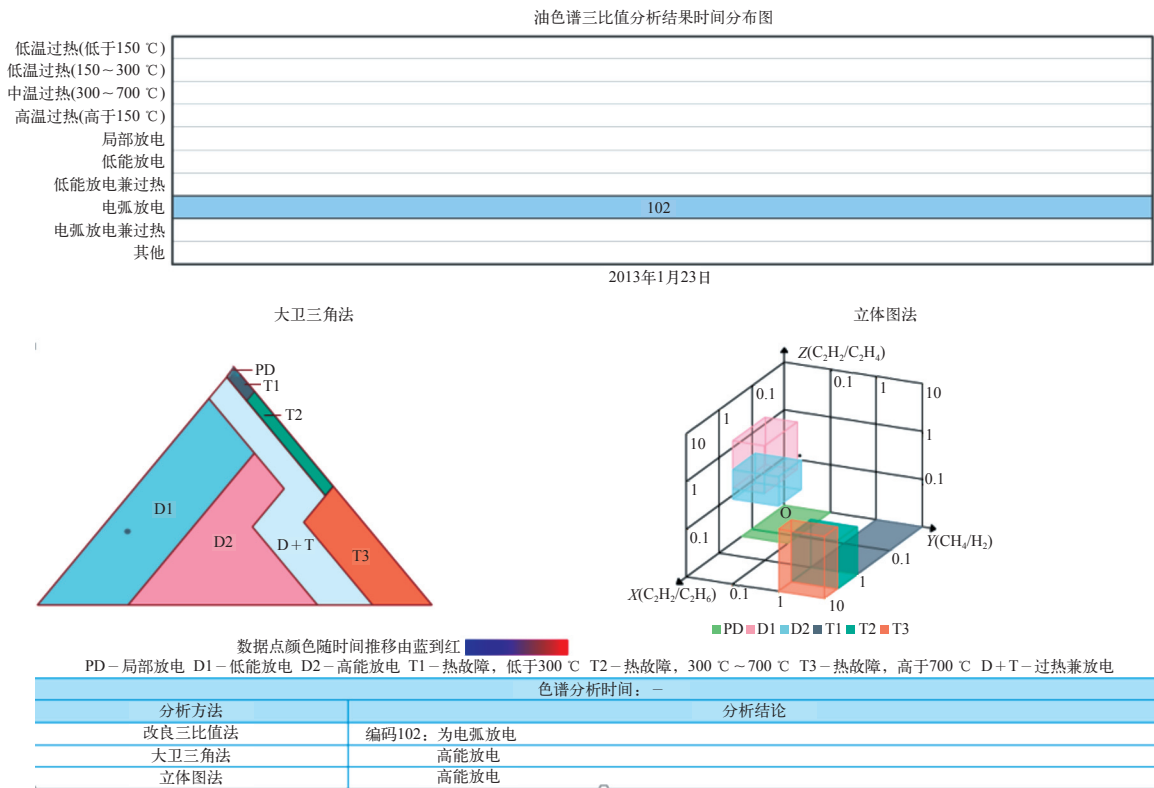


图5 油色谱分析

诊断时间	
	一、分析过程 根据油色谱改良三比值编码分析为102，属电弧放电故障。根据故障是否涉及固体绝缘分为涉及固体绝缘和不涉及固体绝缘。因CO增长较快(>30%/月)且CO含量大于300μL/L，由此判断放电故障涉及固体绝缘，可能存在匝层间短路、围屏爬电等故障。因变压器多次发生短路冲击，且在雷电天气发生故障，可能存在因短路造成绕组变形而损坏纵绝缘，当出现雷电过电压时损伤处发生击穿而导致匝层间短路的可能性较大。
	二、可能故障原因 绕组匝层间短路
	三、试验建议 绕组匝层间短路 1) 建议进行绕组频率响应测试。 2) 建议进行绕组直流电阻试验，若测试结果与其他相或历史数据比较，有变化，则表明绕组内部存在短路等现象。 3) 建议进行绕组电压比试验，若测试结果与其他相或历史数据比较，有变化，则表明绕组内部可能存在匝、层间短路现象。 4) 建议进行分相低电压短路阻抗和短路损耗试验，可通过分析单相短路损耗情况，短路损耗异常相，可能存在绕组匝、层间短路。 5) 建议进行低电压空载试验，若某一相的空载电流异常，可能存在绕组匝、层间短路的可能。

图6 知识节点分析

各监测信息融合和关键指标获取,利用FMECA分析使变压器诊断流程规范化,利于实现领域知识和计算机的深度融合。实例表明,该方法能够解决多源信息融合和关键指标难以量化等问题,且诊断过程规范,结论可靠,工程应用价值大,为实现变压器的精益化检修打下了基础。但本方法涉及多个状态量指标转化的问题,在下一步研究工作中应加强状态量之间的相关性研究,可提高变压器故障诊断效率,使其发挥更大的工程价值。

参考文献

- [1] 董朝阳,赵俊华,文福拴,等.从智能电网到能源互联网:基本概念与研究框架[J].电力系统自动化,2014,38(15):1-11.
- [2] 杨志超,张成龙,吴奕,等.基于粗糙集和RBF神经网络的变压器故障诊断方法研究[J].电测与仪表,2014,51(21):34-39.
- [3] Zhao C, Dujic D, Mester A, et al. Power electronic traction transformer—Medium voltage prototype[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(7): 3257-3268.
- [4] Beykverdi M, Faghihi F. A new approach for transformer incipient fault diagnosis based on

dissolved gas analysis (DGA) [J]. Nova Journal of Engineering and Applied Sciences, 2016, 3(2).

- [5] 臧状,张彬,李辉,等.变压器铁心振动特性分析与研究[J].东北电力技术,2014,35(7):1-6.
- [6] 孟令闻.基于FMECA的电力电缆故障分析方法[J].河北电力技术,2015,34(1):15-17.
- [7] Malik H, Mishra S, Mittal A P. Selection of most relevant input parameters using waikato environment for knowledge analysis for gene expression programming based power transformer fault diagnosis [J]. Electric Power Components and Systems, 2014, 42(16): 1849-1861.
- [8] 姚森敬,文正其,张林,等.一种变压器状态评估中的状态量优选方法[J].中国电力,2014,47(8):8-12.
- [9] 郑含博,王伟,李晓纲,等.基于多分类最小二乘支持向量机和改进粒子群优化算法的电力变压器故障诊断方法[J].高电压技术,2014,40(11):3424-3429.
- [10] 刘凯,彭维捷,杨学君.特征优化和模糊理论在变压器故障诊断中的应用[J].电力系统保护与控制,2016,44(15):54-60.

(收稿日期:2016-10-13) **EA**

(上接第26页)

该装置设计容量远大于实际应用容量,设备整体裕度较高,在仿真中得到了体现,能够应对绝大多数情况,不易损坏。这种设备的结构和控制策略具有较高的扩展潜力,在现行配电网中有很大的发展空间。

参考文献

- [1] 洪锐辛.浅谈无功补偿在配电网的应用[J].科学时代,2013(4).
- [2] 李菲.低压配电网无功补偿方案的选择[J].农电技术,2014,22(9).

- [3] 弥龙飞,弓千让,王永宁,等.模糊控制在无功补偿中的应用[J].西北大学学报:自然科学版,2010,40(5):802-805.
- [4] 李士勇.模糊控制[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2011.
- [5] 卓谷颖,江道灼,梁一桥,等.改善配网电压质量的固定串补技术研究[J].电力系统保护与控制,2013(8):61-67.
- [6] 李海霞.清油河地区10 kV无功分散补偿研究[D].北京:华北电力大学,2014.

(收稿日期:2015-11-06) **EA**