

基于故障树（FTA）的电力变压器故障诊断

电力变压器是发电厂和变电所的重要设备，是电力系统发输变配电环节的重要枢纽。它的性能、质量和运行状况直接影响电力系统的可靠性和稳定性。本文首先按照部位归纳总结了电力变压器的五种故障类型，再从时间维度划分了电力变压器故障的三个阶段，然后采用DGA常规分析法和红外诊断法设定了电力变压器运行状态的判据，最后根据电力变压器故障诊断需求。通过由总体至部分按树枝状逐级细化构建了电力变压器的故障树。

潘鸣宇 孙舟 王伟贤 张禄 迟忠君/国网北京市电力公司



潘鸣宇/高级工程师

关键词/Keywords

电力·
变压器·
FTA·

0 引言

电力变压器是电网运行的重要输变电设备，其运行状况直接关系到发、供电系统的安全性和供电可靠性^[1,2]。随着电力系统规模和变压器单机容量的不断增大，其故障对国民经济造成的损失也愈来愈大，因而对变压器作可靠性分析与风险评价是日益重要的课题^[3-5]。

电力变压器的故障诊断是指在设备吊罩和不解体的情况下，根据经验和数据，采用一定的技术手段对变压器所处状态进行判断、对变压器已有的故障及其发展变化进行跟踪诊断和估计的技术^[1,6]。对运行中的电力变压器进行故障检测和诊断是提高电力系统运行的安全性和供电可靠性的关键之一^[1,6,7]。

文献[8-10]总结了电力变压器的故障模式，并基于模糊控制开展了危害评估；文献[11,12]基于人工神经网络、模糊数学等算法，探讨了变压器故障诊断系统的构建方式；文献[13]讨论了油中气体分析在变压器故障诊断中的应用；文献[14,15]进行了电力变压器等电气设备故障诊断、状态检修的研究，初步探索了在线监测、检修方法。上述研究多局限于一种或几种故障诊断方法，但缺少对其全方位、立体化层级应用的研究，未实现梯次管理和综合调度的高度统一，缺乏能效数据综合评价体系和动态优化整合策略。

本文首先按照部位归纳总结了电力变压器的五种故障类型，再从时间维度划分了电力变压器故障的三个阶段，然后采用DGA常规分析法和红外诊断法设定了电力变压器运行状态的判据，最后根据电力变压器故障诊断需求，通过由总体至部分按树枝状逐级细化构建了电力变压器的故障树。

1 电力变压器的故障类型和阶段

1.1 电力变压器的结构

电力变压器从结构上可划分为本体和附件。

1) 本体。电力变压器的本体可细分为三部分：①变压器器身，包括铁心、线圈以及夹紧装置；②油箱，用于放置变压器器身和变压器油；③变压器油主要用于变压器器身绝缘、冷却和防腐。

2) 附件。电力变压器的附件主要包

括：①变压器油枕；②冷却系统；③套管；④有载分接开关；⑤测试仪表；⑥本体保护装置等。

1.2 电力变压器的故障类型

电力变压器的故障类型主要有10种，根据部位不同可划分为铁心故障、套管故障、冷却系统故障、引线故障、绕组故障、绝缘故障、散热器故障、分接开头故障、密封不严以及其他故障。

其中最主要的故障有五种，分别如下：

1) 引线故障。引线是从电力变压器封装体内与外部连接的导线，引线故障主要受其焊接质量影响，引线故障可细分为接触不良、断路和短路，其中引线相间短路可能会进一步导致绕组短路，引线接触不良，对地短路危害相对较小。

2) 绕组故障。绕组是电力变压器的主要组成部分，绕组故障主要集中在端子和纵绝缘、等地方，包括绕组松动、断路、短路和变形等形式。

3) 绝缘故障。电力变压器的绝缘系统主要包括绝缘纸、板、变压器油和绝缘件等，绝缘故障是指由于绝缘纸变脆变薄等原因所导致的绝缘系统的故障。

4) 分接开关故障。分接开关可分为有载分接开关和无励磁分接开关，可改变高压线圈的匝数。有载分接开关是电力变压器故障的高发部位，其原因为分接开关作为运行调压装置，切换操作非常频繁。

5) 密封不良。电力变压器密封不良是后果较为严重的一种故障，主要是由于瓷套破裂、油泵密封不良、焊接不实和密封圈老化等造成的。

1.3 电力变压器的故障阶段

电力变压器的故障率随着使用时间的增加，可划分为早期故障期、偶然故障期和损耗故障期三个故障阶段。

1) 早期故障期。电力变压器投入使用后1~3年，这一阶段属于早期故障期，该阶段的故障率相对较高；投运时间越长，故障率越低。

2) 偶然故障期。偶然故障期是早期故障期之后的剩余使用寿命，这一阶段故障率较为平稳，一般不会发生故障，除非发生偶然事件。

3) 损耗故障期。电力变压器报废前夕属于损耗故障期，该阶段中随着时间的延后，变压器的

故障率大幅增加。

2 电力变压器运行状态判据

2.1 DGA常规分析方法

目前，绝大多数的电力变压器仍是油浸式变压器。油浸式变压器运行状态监测的主要方法是油中溶解气体色谱分析（DGA）。DGA数据采样精度较高，有效性高，时效性好。目前DGA最常用的方法主要有两种；一是三比值法，二是特征气体法。另外，罗杰斯比值法和电研法也较为常见。现在在电力变压器故障诊断领域中，模糊诊断、人工神经网络和专家诊断系统等人工智能分析方法也逐步得到推广。

目前主要有以下两种诊断电力变压器故障的方法：

1) 以油中溶解气体的正常值为标准，测定电力变压器油中溶解气体含量：油中溶解气体的正常值见表1，表1中所列为氢和烃类气体含量极限值，电力变压器在正常运行状态下油中溶解气体应低于该值。

表1 油中溶解气体的正常值

气体成分	H ₂	C ₂ H ₂	总烃(C ₁ +C ₂)
正常极限值 (μL/L)	150	1~5	150

2) 测定电力变压器产气速率：电力变压器的产气速率受故障部位、故障消耗能量等因素影响，另外还受温度影响。具体判定方法见表2。

表2 测定电力变压器产气速率判断法

序号	现象	结论
1	总烃实际含量的绝对值小于正常值,总烃实际产气速率小于正常值	正常
2	总烃实际含量大于正常值,但小于3倍正常值,总烃实际产气速率小于正常值	轻度故障
3	总烃实际含量大于正常值,但小于3倍正常值,总烃实际产气速率为1~2倍正常值	中度故障
4	总烃实际含量大于3倍正常值,总烃实际产气速率大于3倍正常值	严重故障

2.2 红外诊断方法

故障红外诊断技术主要是指应用近代红外技术和人工智能技术的成果来解决现代设备管理系统中设备诊断问题的一个新兴技术领域。

红外诊断技术可深入分析电力变压器故障的热分布，便于明确其表面温度发热情况，分析温差变化非常准确，数据信息来源广，自动化程度高，稳定可靠，对于诊断电力变压器温度升高类型的故障至关重要。

3 电力变压器故障树诊断

3.1 电力变压器故障树

故障树（Fault-Tree Analysis，FTA）分析方法是电力变压器故障的重要方法，是一种特殊的逻辑因果关系图，呈倒立树状从整体到局部逐级分析。

构建电力变压器故障树的主要目的是通过事件符号和逻辑门符号等表述方式，逐级分析其各个部位的比重，针对性采取技术或管理手段治理故障隐患。

电力变压器故障树包括载流系统、铁芯、绝缘油等8个子树。电力变压器故障树符号见表3。

电力变压器故障树模型中的冷却系统故障树、载流系统故障树和绝缘受损故障树等子树构建如图1~图4所示。

表3 故障树符号

事件符号			
序号	名称	符号	说明
1	底事件		无法继续分解的底层事件
2	顶事件		位于故障树顶端的事件
3	中间事件		介于底事件和顶事件之间的事件

逻辑门符号			
序号	名称	符号	说明
1	或门		多个输入事件中，当一个或多个输入事件发生时，发生输出事件
2	与门		多个输入事件中，所有输入事件同时发生时，发生输出事件

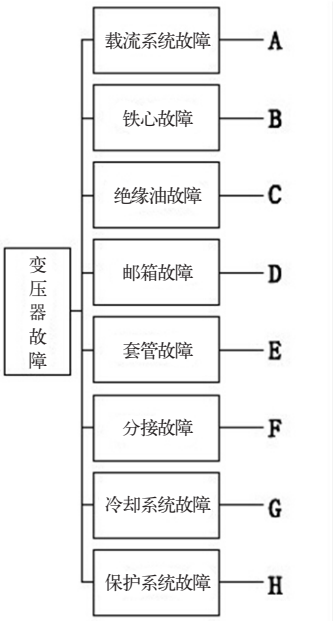
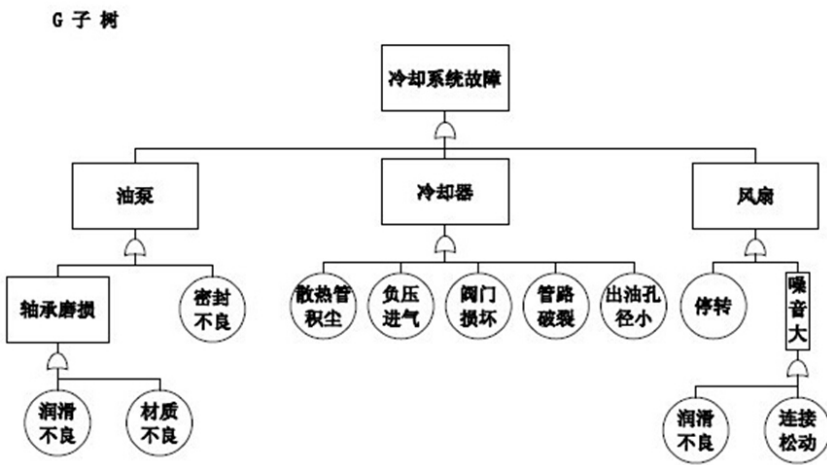


图1 冷却系统故障树

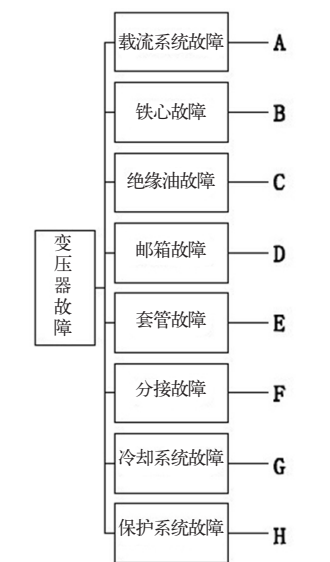
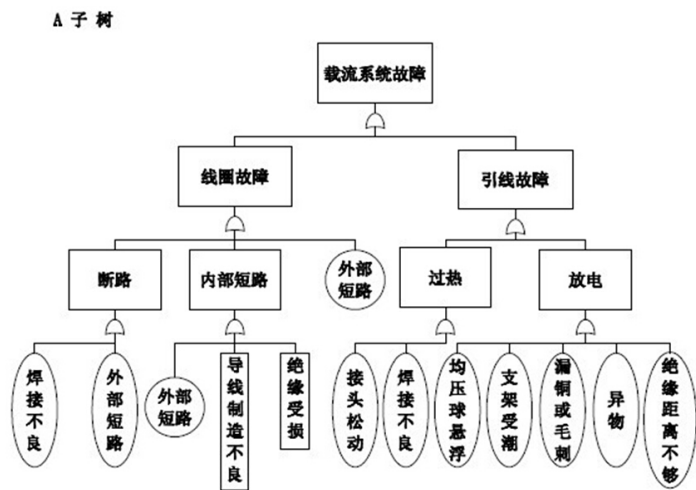


图2 载流系统故障树

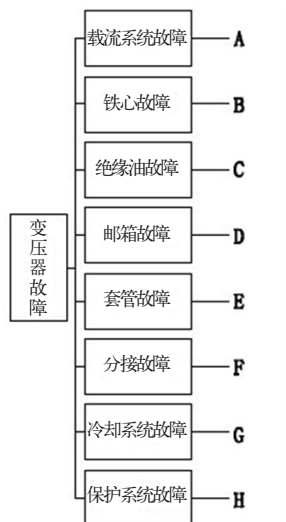
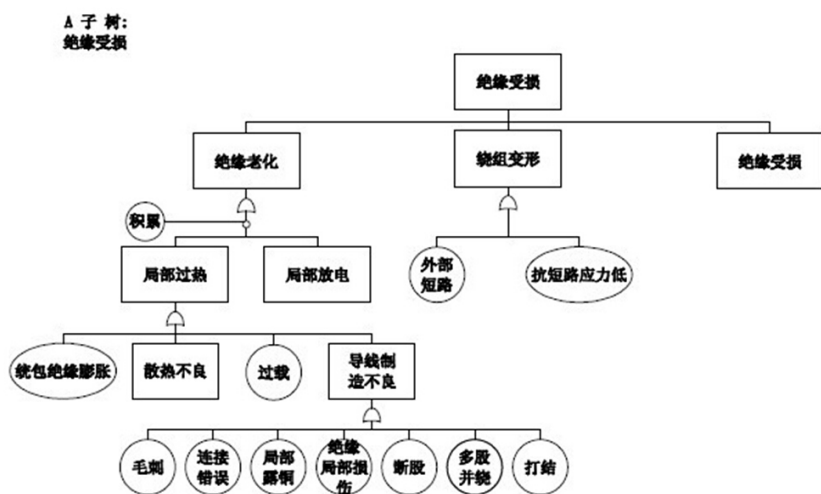


图3 绝缘受损故障树

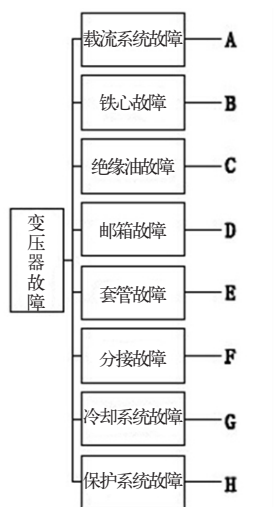
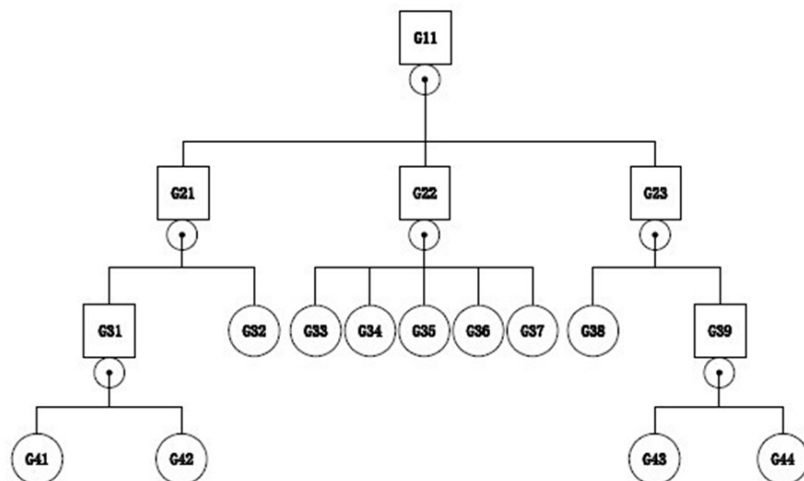


图4 根据故障树文件绘制的冷却系统的故障树

3.2 电力变压器故障树分析模块

汉：武汉大学，2004.

电力变压器故障树分析模块主要包括概率文[3] 胡勇，程蕾. 大型电力变压器故障实例统计分析件模块、校正模块、定性定量分析模块、可靠性 [J]. 电力安全技术, 2003, (1) :20-22. 分析模块和显示模块。 [4] 关巍. 电力变压器的故障模式及后果性分析研究

1) 概率文件模块。概率文件模块包括故障 [D]. 保定：华北电力大学，2008. 名、故障概率和故障代号等信息，通过变压器年[5] Van Gestel T, Suykens A K, Baesens B, et al. Benchmarking least squares support vector machine classifiers[J]. Machine Learning, 2004, 54 (1) : 5-32. 故障率、概率值和投入使用时间等，计算底事件 概率。

2) 校正模块。校正模块主要用于修改变压器 [6] 张慧青. 电力变压器故障与故障诊断技术探讨[J]. 年故障率和投入使用时间。 企业导报, 2012, (6) :290-292.

3) 定性定量分析模块。定性定量分析模块主 [7] Watkins A, Timms J, Boggess L. Artificial immune reconition systems(AIRS): an immune-inspired supervised learning algorithm[J]. Genetic Programming and Evolvable Machines, 2004, 5 (3):291-317. 要是针对各子树进行定性定量分析。

4) 可靠性分析模块。对整个故障树进行分析 [8] Mathur A, Foody G M. Multiclass and binary SVM classification: implications for training and classification users[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2008, 5(2): 241-245. 前，可靠性分析模块将各子树的分析结果进行合 并。

5) 显示模块。显示模块用于直观展示电力变 [9] 鲁剑峰. 变压器故障的诊断[J]. 江西电力职业技术学 压器故障诊断的结果，全面清晰地显示故障树中 [10] 刘娜，梁国栋. 电力变压器故障模式的分析及危害 各事件之间的逻辑关系。 评估[J]. 高电压技术, 2003, 19(2):3-5.

4 结束语

随着经济社会的不断发展，人们对供电要求[9] 鲁剑峰. 变压器故障的诊断[J]. 江西电力职业技术学 越来越高。电力变压器作为发电厂和变电所的重 [10] 刘娜，梁国栋. 电力变压器故障模式的分析及危害 要设备，以及电力系统发输变配电环节的重要枢 [11] 杨启平，蓝之达. 基于人工神经网络的变压器故障诊 纽，其性能质量和运行状况直接影响电力系统的 断[J]. 变压器, 2000, 3(37):33-36. 可靠性与稳定性。因此，电力变压器故障诊断的 [12] 张建文，赵大光，董连文. 基于模糊数学的变压器 重要性日益凸显。 故障诊断专家系统[J]. 高电压技术, 1998, 12(24):6-8.

电力变压器故障类型较为复杂，对其归纳总[13] 杨启平，薛五德. 油中气体分析在变压器故障诊断 结是开展电力变压器设计、制造和检测等工作的 中的应用[J]. 上海电力学院学报, 1996, 3:60-68. 重要参考。本文首先按照部位归纳总结了电力变 [14] 万达, 王建明, 吴益明. 变压器的故障诊断与检修策 压器的五种故障类型，再从时间维度划分了电力 略[J]. 江苏电机工程, 2003 (6) :10-12. 变压器故障的三个阶段，然后采用DGA常规分析 [15] 关根志，贺景亮. 电气设备的绝缘在线监测与状态 法和红外诊断法设定了电力变压器运行状态的判 维修[J]. 中国电力, 2000, 33(3):46-50. 据，最后根据电力变压器故障诊断需求，通过由 总体至部分按树枝状逐级细化构建了电力变压器 的故障树，为电力变压器的状态监测、故障诊断 提供了重要依据。

参考文献

[1] 梁国栋. 电力变压器故障的工程分析与研究[D]. 合肥：合肥工业大学，2004.
[2] 姜卫宁. 电力变压器的故障诊断与分析[D]. 武

作者简介
潘鸣宇（1985-），男，硕士，高级工程师，研究方向为电动汽车技术。

(收稿日期：2015-12-10) **EA**
(编辑：朱历)