

融合多元数据的变压器故障严重程度分析模型

陈 森, 万 元, 唐 伟, 潘平衡, 曹 旺, 李橙橙

(湖南五凌电力科技有限公司, 湖南长沙 410000)

摘 要:油浸式变压器是电力系统的重要设备,当其发生故障时,判断故障的严重程度,判断是否需要立即停电检修或还具备带病运行条件,难度很大,鉴于此,为了有效判断变压器内部故障的严重程度,本文提出了融合多元数据的油浸式变压器内部故障严重程度分析模型,结合变压器内部磁路、电路的故障判别机理,构建了变压器内部故障严重程度判别专家知识库,通过有效集成变压器油中溶解气体浓度,铁心、夹件电流,变压器有功等多元数据,采用简单推理方式,即可实现变压器内部故障的严重程度的准确诊断,现场数据验证了该模型的正确性。

关键词:变压器;故障;严重程度;融合;多元数据

中图分类号: TM411

文献标识码: A

文章编号: 1672-5387(2023)12-0147-03

DOI: 10.13599/j.cnki.11-5130.2023.12.046

油浸式变压器是电力系统关键设备,其运行的可靠性关系到电力系统供电的可靠性,当变压器发生故障时,由于内部结构复杂,其故障定位、内部故障严重程度判别专家知识库难度很大,即是否需要立即停电检修或还具备带病运行条件,这给变压器设备管理者带来较大的困惑,亦给变压器后续的运行、检修策略的制定带来较大的难题,因此有必要研究其故障定性、故障严重程度的分析与判断方法,从而有利于制定合理、有效、针对性强的运行或检修策略^[1,2]。

为了监视变压器的运行状况,大多数变压器配置有变压器油中溶解气体在线监测系统,铁心、夹件电流在线监测系统,各系统数据均能对变压器内部故障进行判断,如当变压器内部出现故障时,通过油中各类气体的三比值可判断变压器内部的性质,如低温过热、高温过热、局部放电、电弧、短路等故障,并通过 CO 和 CO₂ 的含量可判别故障是否涉及到固体绝缘,同时单位时间的增气量能对故障的发展趋势进行判断,但仍然无法对故障的严重程度、是否具备带病运行的条件等进行精确判断^[3,4]。

鉴于此,本文提出了融合多元数据的油浸式变压器内部故障严重程度分析模型,通过融合计算机监控系统中变压器电压、电流、有功、油温等的工况数据,油中溶解气体浓度数据,铁心、夹件电流数据,结合构建的专家知识库,采用简单推理方式,实现了变压器内部故障的严重程度的准确诊断,经现场故障变压器的数据分析,该模型具有较高的准确性。

1 变压器内部故障判别机理

变压器内部结构较为复杂,但归纳起来,可由电路与磁路组成。变压器电路主要承载系统电流,包括高低压绕组(或高中低压绕组),无载调压开关,引出线等,主磁路主要承载系统主磁通,主要包括铁心及固定铁心的夹件。漏磁通回路主要承载系统漏磁通,主要包括绕组、纸绝缘,油及油箱壁等。

根据薛华^[3]的研究,变压器的高、低压侧的电压由(1)、(2)计算^[2]。

$$E_L = 4.44 f N_1 \varphi_m \quad (1)$$

$$E_H = 4.44 f N_2 \varphi_m \quad (2)$$

式(1)、(2)中, N_1 与 N_2 分别表示低压侧与高压侧线圈匝数, f 为交流电基波频率,取 50 Hz, E_L 和 E_H 分别表示低压侧、高压侧电压, φ_m 为变压器励磁磁通(即主磁通),当变压器负载运行时,高、低压侧的负载电流产生的磁通互相抵消,变压器铁心中磁通不变,因此变压器高、低压侧的电压基本不变。

当变压器绕组中通有高的负载电流时,该电流在其周围产生磁通,因此,对于油浸式变压器,其磁通包括主磁通和漏磁通,其中主磁通主要是指激磁电压在铁心中产生的磁通,主磁通同时交链一次绕组与二次绕组,由(1)可知,该磁通的大小与电压密切

收稿日期: 2023-10-30

作者简介: 陈 森(1988-),男,工程师,从事电力设备在线监测、系统集成与应用等工作。

相关,漏磁通主要是指绕组周围由负载电流产生的磁通,漏磁通只交链一次绕组或二次绕组,显然该磁通的大小与负载电流的大小成线性关系。在数量上,由于主磁通主要通过铁心等导磁元件,磁阻小,占总磁通 99% 以上,漏磁通主要通过油、纸等磁阻比较大的元件,占总磁通 1% 以下。由此可得出如下结论:

(1) 变压器内部若磁路出现故障,由于其连接电力系统的电压一般比较稳定,运行电压不变,其主磁通不变,变压器空载运行与负载运行时,故障的演变过程一般不变,故障与变压器负荷关联性不大;

(2) 变压器内部若电路出现故障,变压器绕组电流的大小与故障演变过程密切相关,故障与变压器负荷直接相关,一般电流越大,故障演变越快,劣化趋势越快,部分故障与电流的平方成正比;

(3) 变压器内部若出现漏磁故障,由于漏磁通与绕组电流的大小成线性关系,故障与变压器负荷直接相关,一般电流越大,故障演变越快,劣化趋势越快,相当于直接电路故障,由于漏磁通一般比较小,其故障严重程度较低,即使电流较大,故障亦发展较为缓慢。

因此,可有效集成变压器多元监测数据,包括负荷、电流、电压、变压器油中溶解气体数据等,实现变压器内部故障严重程度的分析。

2 变压器故障严重度判别专家知识库

由文献可知,对于油浸式变压器,若铁心叠片绝缘受损、电涡流过大、局部短路等故障时,一般会产生过热现象,对于该类故障,除非出现大面积的涡流,一般严重程度不高,不需要立即停运,可监视运行,并分析变压器的日产气速度;若高、低压绕组发生短路、断股、电弧放电等故障时,其危害程序一般较大,严重时,绕组迅速烧毁或产生巨大的电动力使绕组严重变形,同时,产生的巨大能量导致变压器绝缘油快速分解,可能在很短的时间内导致变压器重瓦斯动作甚至爆炸,需立即停运,若发生漏磁导致局部过热,无载开关接触不好等故障时,其故障发生一般比较缓慢,短时间内应监视运行。当铁心夹件出现多点接地时,在交变的主磁通作用下,在铁心接地点之间,或夹件接地点之间,或铁心与夹件不同的接地点之间形成环流,导致铁心夹件局部过热。本文将变压器故障的严重度划分为较低、一般、严重 3 个等级,构建了变压器故障严重度判别专家知识库,具体见表 1 所示。

显然,表 1 可以作为变压器故障严重度判别的依据。

表 1 变压器故障严重度判别专家知识库

故障位置	故障形式	表现特征	严重程度
主磁通	铁心叠片绝缘受损	产生涡流,且与变压器运行电压有关,与变压器负荷无关。	较低,可监测运行。
	铁心尖端放电	与变压器运行电压有关,间歇性发生。	一般,应加密监测。
	夹件多点接地	形成接地环流,与变压器负荷无关,主要变压器挂网运行即会出现。	一般,应加密监测,可通过夹件电流检测。
漏磁通	铁心多点接地	形成接地环流,与变压器负荷无关,主要变压器挂网运行即会出现。	一般,应加密监测。
	内部形成漏磁通道,漏磁通过大	与变压器运行电压有关。	较低,可监测运行。
变压器电路	无载调压开关接触不好	与变压器负荷相关,与变压器运行电压无关,容易产生过热故障。	一般,应加密监测,主要监测油中溶解气体数据。
	绕组局部焊点	与变压器负荷相关,与变压器运行电压无关,容易产生过热故障。	一般,应加密监测,主要监测油中溶解气体数据。
	绕组断线、拉弧	负荷越大,故障发展越快。	严重,必须尽快停运检修,避免事故扩大。
	内部短路	短路电流产生巨大电动力,使绕组变形。	严重,必须尽快停运检修,避免事故扩大。

3 融合多元数据的变压器故障严重度判别

3.1 多元数据的集成

主要集成三类数据:一是变压器电压、负荷等背景工况数据,此类数据主要从计算机监控系统中获取,为实现统一标准,本文按照公式(3)定义变压器日负荷率 k_w (无量纲参数),即折算成满负荷下的运行时间比。

$$k_w = \frac{\sum_{i=1}^N P_i}{N \times P_w} \quad (3)$$

式中, N 表示每日有功数据采样的总点数, P_w 表示变压器的额定负荷, P_i 表示第 i 个时刻,变压器的有功负荷,从(3)可知,当 k_w 为 0 时,表明变压器全天处于空载运行状态,当 k_w 为 1 时,表明变压器全天带额定负荷运行。

二是变压器油中溶解气体浓度数据,此数据主要从专门的监测系统中获取,主要获取变压器油中溶解氢气、甲烷、乙炔等七类气体浓度参数。一般而言,变压器油中溶解气体参数的采样周期远低于变压器电压、负荷等背景工况数据,为了保证时间的同步,且保证分析的一致性,这里选取一个基准,即(3)中在 $i=0$ 及 $i=N$ 时刻,分别获取变压器油中溶解各类气体的浓度,计算气体的日产气速度,其中乙炔 $\Delta V_{C_2H_2}$ 、氢气 ΔV_{H_2} 、总烃 ΔV_T 的日产气速度计算方法可参考 DL/T 722-2014《变压器油中溶解气体分析和判断导则》。

三是变压器铁心、夹件接地电流数据,此数据主要

从专门的监测系统中获取,该数据取 1 d 的平均值。

3.2 变压器故障严重度判别模型

该方法构建如下:

(1) 以 7 d 为分析周期,计算变压器日负荷率 k_w ,计算变压器总烃日产气速度 ΔV_T ,形成相量 $[k_w, \Delta V_T]$;

(2) 绘制变压器总烃日产气速度与负荷的关联曲线,其中横坐标为 k_w ,纵坐标为 ΔV_T ;

(3) 判断变压器总烃是否存在间隙性增大,增大的趋势为阶梯型。或者判断总烃是较为平稳的持续增大;

(4) 尝试按一次曲线与二次曲线的方式关联曲线进行拟合,计算一次曲线拟合的 $[k, d]$ 值(其中 k 为一次曲线斜率, d 为截距)与拟合偏差 R_1 值,计算二次曲线拟合的 $[a, b, c]$ 值与拟合偏差 R_2 值;

(5) 若 R_1 远大于 R_2 ,且一次曲线拟合中斜率 k 很小,拟合曲线几乎与横坐标平行,则判断变压器内部故障为主磁路故障,同时分析铁心、夹件接地电流数据,若不超过阈值,则判断故障严重程度为低,若超过阈值,则判断故障程度为一般,需加密观测;若变压器总烃数据为间隙性阶梯型增大,判别为铁心尖端放电;

(6) 若 R_1 远大于 R_2 ,且一次曲线拟合中斜率比较小,小于某特定阈值,则判断变压器内部故障为漏磁故障或严重程度为低;一次曲线拟合中斜率处于两个特定阈值之间,且总烃平稳增加,判别为无载调压开关接触不好或者是绕组有焊点发热,严重程度为一般,应加密运行;

(7) 若 R_1 远大于 R_2 ,且一次曲线拟合中斜率较大,或 R_1 远小于 R_2 ,则判断变压器内部故障为电路故障,同时结合乙炔的日产气速度判断变压器是否需要立即停运。

4 现场应用

某水电厂主变压器于 2020 年 02 月发现总烃超标,该变压器低压侧为 13.8 kV,高压侧为 220 kV,额定容量 200 MW,总烃超标后(总烃为 162 ppm,但未出现乙炔),分析总烃数据,其平稳增加,并未出现突变数据,由于不具备检修条件,经排油内检后未发现明显缺陷,经讨论后投入试运行,并降负荷且加强监视运行,同时启动变压器内部故障关联分析方法进行分析,该变压器投入试运行后,2020 年 03 月 05 日~03 月 11 日的变压器日负荷率,总烃日产气速度见表 2 所示。

在二维坐标上绘制曲线见图 1 所示。

由图 1 可知,变压器总烃日产气速度与变压器日负荷率无关,在变压器空载运行时,变压器总烃日产气速度依然存在,且其值与变压器带负荷运行时相差很小,两者拟合曲线与横坐标基本平行,本文提出的融合多元数据的变压器故障严重度分析模型的

表 2 某水电厂主变压器总烃日产气速度表

时间	变压器日负荷率	总烃日产气速度 /ppm
2020-03-05	0.23	1.195
2020-03-06	0.56	1.227 5
2020-03-07	0	1.207 5
2020-03-08	0.78	1.22
2020-03-09	0.11	1.187 5
2020-03-10	0.47	1.222 5
2020-03-11	0.32	1.187 5

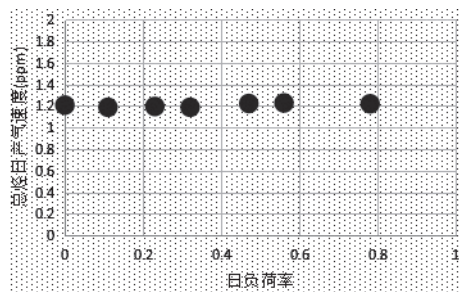


图 1 某水电厂主变压器总烃日产气速度与日符合率关联图
结论为变压器主磁路故障,故障严重度较低,可监视运行。经讨论,该故障尚不会造成重大事故,不必立即停运检修,亦不必限负荷运行。2020 年 10 月,将变压器吊罩检修,发现上端匝夹件 1 紧固螺栓松动,铁心振动加大,导致铁心间绝缘磨损,产生涡流发热,经补绝缘,并紧固夹件螺栓后,变压器投运,投运后运行各项参数正常。从上述典型案例可知,本文提出的方法是有效的。

4 结语

通过对变压器磁回路故障、电回路故障的机理进行研究,提出并应用了融合多元数据的变压器故障严重度分析模型,可得出以下结论:

(1) 变压器不同的故障类型,不同位置故障,不同严重程度的故障,其日产气速度与其运行工况存在一定的关联关系。

(2) 有机融合变压器的背景工况数据,油中溶解气体数据,铁心夹件电流数据,构建集成分析模型,能更为准确地对变压器的故障严重度进行确认,可有效地指导变压器运行与检修。

参考文献:

- [1] 国家能源局. 变压器油中溶解气体分析和判断导则: DL/T 722-2014[S].
- [2] 张植保. 变压器原理与应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2009.
- [3] 薛华. 变压器油中气体在线监测与诊断新技术的研究[D]. 西安:西安工业大学, 2013.
- [4] 李黎. 变压器油中溶解气体在线监测技术及应用研究[D]. 重庆:重庆大学, 2008.