

树脂浇注干式变压器温升分析与计算

熊 兰¹, 赵艳龙¹, 杨子康¹, 宋道军², 席朝辉², 何 为¹

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030;
2. 重庆市电力公司, 重庆 400014)

摘 要: 为更准确地反映树脂浇注干式变压器的内部温度情况, 根据变压器的损耗, 对干式变压器的整体温升进行了计算。同时结合 ANSYS 软件, 对干式变压器进行了温度场仿真计算, 分析了干式变压器的铁芯和绕组的温度分布情况。对某供电局开闭所内站用的干式变压器建立了温度监测系统, 获得其三相温度分别为 62.19、63.92、62.57 °C。通过比对实际数据、理论计算和仿真分析的结果, 指出干式变压器运行中的最热点位置位于低压绕组底部 70% 高度的位置, 该处即为干变的薄弱环节, 可作为对干式变压器进行定点监测的参考依据。

关键词: 干式变压器; 损耗; 温升计算; ANSYS 软件; 温度场分析; 温度监测; ZigBee 传感器

DOI: 10.3969/j.issn.1003-6520.2013.02.002

文章编号: 1003-6520(2013)02-0265-07

Temperature Rise Analysis and Calculation of Cast Resin Dry-type Transformers

XIONG Lan¹, ZHAO Yanlong¹, YANG Zikang¹, SONG Daojun², XI Zhaohui², HE Wei¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipments & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China;
2. Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400014, China)

Abstract: In order to reflect the temperature inside cast resin dry-type transformers more accurately, temperature rising of a dry-type transformer was mathematically calculated according to power losses of the transformer. Meanwhile, by using the software ANSYS, a temperature field of the dry-type transformers was also simulated. Consequently, the temperature distribution of iron core and windings of the transformer were analyzed. A temperature monitoring system was established in a dry-type transformer in sub-section post, and the temperatures of three phases of the transformer were obtained, which were 62.19, 63.92 and 62.57 °C. According to the comparison among the theoretical calculation, the simulation results, and the actual measurement, it is concluded that the hottest spot in an operating dry-type transformer is in the low-voltage winding at 70% height from the bottom. The hottest spot is normally considered the weak link of an operating dry-type transformer, and this is a practical reference for establishing effective monitoring on dry-type transformers.

Key words: dry-type transformers; losses; temperature rise calculation; ANSYS software; temperature field analysis; temperature monitoring; ZigBee sensor

0 引言

随着电网供电要求不断提高, 深入城区和居民区的城网变电站越来越多, 因此树脂浇注干式变压器由于其绝缘强度高、环境性能优越、运行噪声低等优点, 而得到了广泛的应用^[1-2]。

树脂浇注干式变压器的运行可靠性很大程度上取决于其绝缘性能^[3-5], 而绝缘性能又跟干式变压器内部的产热和散热情况密切相关。变压器绕组过热不仅造成绝缘加速老化而影响其寿命, 而且由绕组

发热造成绝缘击穿, 引起干式变压器起火爆炸的恶性事故也时有发生^[6-7], 不仅造成了设备损坏, 同时由此引起的停电事故也造成了巨大的经济损失。因此, 对干式变压器的温度场分布进行研究不仅可为干式变压器的优化设计提供有效的理论依据, 同时对于保证整个电网的安全稳定运行有着重要意义。

近年来, 随着数值计算技术的发展, 关于各种变压器内部温度场数值计算的研究较多^[6-9], 对于变压器内部导热、散热机理研究比较成熟。同时目前对干式变压器二维温度场计算的较多, 对于干变三维温度场计算研究较少。有些研究虽然进行了三维计算, 但主要是针对其中的一相进行计算分析^[7], 不能反映出干变的整体温度场。对于干变温度场的产热损耗, 多数文献主要采用反推法来确定其内部损耗^[8-13], 虽然具有一定的意义, 但是对于具体变压器

基金资助项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2009CB724508-1); 国家自然科学基金(51077139)。

Project supported by National Basic Research Program of China(973 Program)(2009CB724508-1), National Natural Science Foundation of China(51077139)。

来说,由于其构造不同,实际损耗有所差异,因此计算准确度有待提高。

为此,本文首先根据现场干式变压器的实际损耗情况对变压器温升进行计算,通过计算变压器的实际负荷来推导其理论温升。然后,利用 ANSYS 软件平台,根据干变结构,建立了其三相整体模型,依据传热学原理,进行干式变压器三维温度场整体仿真,对不同负荷下的三维温度场分布情况进行分析。最后结合现场运行的干式变压器温度在线监测系统,获取温度数据,比对理论值及仿真值,找出干式变压器运行中的薄弱环节,为更加精确的监测和改善结构设计提供有效的依据,从而避免干式变压器由于绝缘故障而引起的起火爆炸等事故的发生。

1 温升计算

1.1 整体温升

干式变压器温升产生主要是由变压器运行中所产生的损耗引起的^[8-9]。变压器运行时产生的损耗转化为热量,使温度升高,热量向周围以传导、对流和辐射的方式扩散,当发热和散热达到平衡时,各部分温度趋于稳定。

干式变压器的温升主要包括铁芯和绕组温升。由于铁芯、绕组结构型式不同,其温升计算也不尽相同,而且在很大程度上依赖于大量的试验和经验^[10-12]。对于铁芯或绕组,一般温升计算的公式为

$$\theta = kq^n = k(P/S)^n. \quad (1)$$

式中: θ 为温升, $^{\circ}\text{C}$; q 为有效表面负荷, W/m^2 ; P 为损耗, W ; S 为有效散热面积, m^2 ; k 、 n 分别都是经验系数。

以往的温升计算主要探讨的是铁芯或绕组的有效散热面积 S ,而对于损耗一般进行反推计算^[11],即

$$P = P_{120} \frac{235 + \theta'}{235 + 120}. \quad (2)$$

式中: θ' 为绕组平均温度, $^{\circ}\text{C}$; P_{120} 为在 120°C 时的损耗(绝缘等级为 F 级), W 。如果计算干变的损耗,需要首先知道变压器的平均温度,这属于反推模型。

本文对于有效散热面积不再深入探讨,而主要探讨根据变压器的不同负荷时来计算损耗情况,从而推出变压器的温升。

1.2 铁芯温升计算

由于铁芯材料、结构不同,其经验系数取值一般不同。对于内部无风道、由硅钢片叠装的铁芯,在计算其平均温升时,经验系数 k 、 n 分别取值为 0.36、0.8^[8,11-12],则铁芯温升模型为

$$\theta_c = 0.36q_c^{0.8} = 0.36(P_c/S_c)^{0.8}. \quad (3)$$

式中: θ_c 为铁芯的温升, $^{\circ}\text{C}$; q_c 为铁芯的有效表面负荷, W/m^2 ; P_c 为铁芯的损耗, W ; S_c 为铁芯的有效散热面积, m^2 。

铁芯损耗 P_c 主要包括 2 部分:磁滞损耗 P_h 和涡流损耗 P_e ,表示为

$$\begin{cases} P_h = \eta f B_{\max}^{1.6} V \times 10^{-3}; \\ P_e = \eta d^2 f^2 B_{\max}^2 V \times 10^{-3}; \\ P_c = P_h + P_e. \end{cases} \quad (4)$$

式中: η 为铁芯材料的磁滞系数; f 为频率, Hz ; B_{\max} 为最大磁通密度, T ; V 为铁芯体积, cm^3 ; d 为硅钢片的厚度, cm 。计算时, η 、 B_{\max} 、 V 、 d 均为材料的固有属性,可通过厂家资料进行查询与计算,属于已知因素^[2]。因此,只需测量电压频率即可计算出铁芯损耗。

1.3 绕组温升计算

绕组计算与铁芯原理相同,只是经验系数取值不同。其温升计算为

$$\theta_w = kq_w^n = k(P_w/S_w)^n. \quad (5)$$

式中: θ_w 为绕组温升, $^{\circ}\text{C}$; q_w 为绕组的有效表面负荷, W/m^2 ; P_w 为绕组损耗, W ; S_w 为绕组的有效散热面积, m^2 。

对于经验系数取值,要根据其实际散热条件来确定^[10,13]。对于低压绕组其主要置于变压器内侧,散热条件比较差,因此 k 一般取值为 0.33~0.38。而对于高压绕组来说,其置于外侧,与空气进行直接接触,散热条件好一些,因此 k 一般取值为 0.28~0.34。对于本文中所讨论的实际变压器,根据其结构,铁芯、低压、高压绕组之间分别只有单风道进行散热,因此计算时 n 取值为 0.8,低压绕组温升计算时 k 取值为 0.38,高压绕组温升计算 k 取值为 0.34。

对于绕组损耗,其计算过程为

$$P_w = P_k \beta^2 = P_k \left(\frac{S_{js}}{S_e} \right). \quad (6)$$

式中: P_k 为变压器短路有功功率, kW ; β 为负载系数; S_{js} 为变压器计算负荷, kVA ; S_e 为变压器的额定容量, kVA 。 P_k 、 S_e 均可由变压器产品中查到,因此,只需测出变压器的实际负荷即可计算出绕组损耗。

同时绕组中还有一部分附加损耗,其主要包括导线中的涡流损耗、并列导线间的环流损耗、以及结构件(如夹件、钢压板、螺栓、铁芯拉板等)的杂散损耗。对于 SCB10 型干式变压器,这些附加损耗大约占绕组损耗的 10%左右^[2],不可忽略。不过由于变压器在出厂提供额定短路功耗时已经将其包括在

内,故进行功耗计算时可以直接用式(6)。

除上述损耗以外,干式变压器树脂绝缘材料中还存在介质损耗,其介质损耗计算公式为^[14]

$$P_i = U^2 \omega C \tan \delta. \quad (7)$$

式中: U 为绝缘介质两端压差, V ; ω 为角频率,rad/s; C 为介质的电容,F; δ 为介质损耗角。

由于树脂浇注干式变压器的铁芯、低压和高压绕组之间依靠空气绝缘,树脂材料主要用于匝间绝缘,绝缘树脂两端电压差较小,绝缘介质损耗较小,同时 $\tan \delta$ 随温度变化而变化^[2],测量、计算较为复杂,因而在进行实际温升计算时没有进行介损计算。

2 干变散热、生热分析

2.1 干式变压器结构模型

本仿真以 1 台 10 kV 开闭所站用干式变压器为原版模型,型号为 SCB10-500/10, $10 \pm 2 \times 2.5\%$ kV/Q 4 kV, Dyn11 联结,绝缘等级为 F 级。其低压绕组置内,采用铜箔绕制而成,低压绕组和铁芯、高压绕组之间分别设有气道进行散热。高压绕组采用扁铜线绕制成分段多层圆筒式,共分为 4 段,中间浇注绝缘树脂,高、低压绕组两端各有一定厚度的绝缘端封。其结构示意图如图 1 所示。

2.2 散热分析

干式变压器的散热主要包括热传导、对流和辐射^[15-16]。具体来说就是变压器绕组、铁芯内部各匝及绝缘树脂间主要依靠热传导方式传递热量,同时铁芯、高、低压绕组与空气接触的表面又通过对流方式向外传递热流,而铁芯、高、低压绕组之间又存在辐射的方式进行相互的影响。

2.3 生热分析

根据式(4)、(6),可分别计算出铁芯及绕组的损耗,而这些损耗正是干式变压器内部的热源。对于干变内部绝缘材料由于介质损耗引起的生热,由于其相对来说很小^[17],本文做忽略处理。

在进行仿真计算时,需要将这些干式变压器的热源等效为 1 个均匀的发热体,其发热总量保持不变,对于铁芯或绕组,可计算出各热源的单位体积发热率 q 为

$$q = P/V'. \quad (8)$$

式中 V' 为等效体积, m^3 。

3 温度场仿真分析

本仿真使用 ANSYS 软件平台对干式变压器的三维温度场进行仿真。ANSYS 软件是融合结构、

热、流体、电磁、声学多物理场于一体的大型通用有限元分析软件,包含多个分析模块^[18-19]。本仿真主要利用其强大的热分析能力进行温度场仿真。

3.1 结构模型建立

根据现场变压器的实际结构,建立干式变压器的三有限元模型,如图 2 所示。

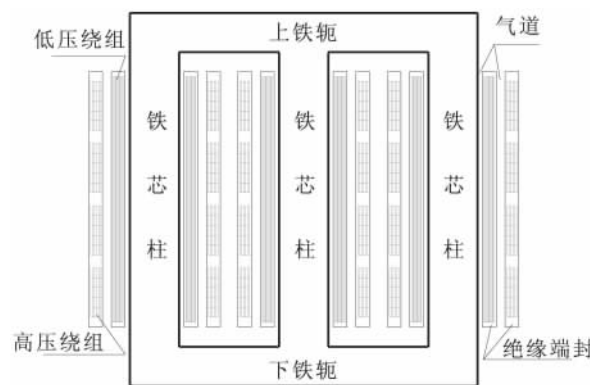


图 1 干式变压器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of dry-type transformers

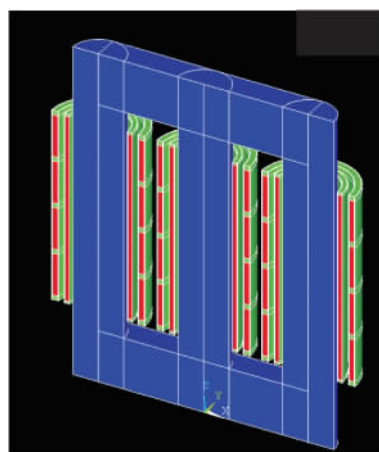


图 2 干式变压器三维模型

Fig. 2 3D model of dry-type transformers

干式变压器结构上属于对称结构,虽然其前后所处环境有所差别,但是总体相差不大,因此仅讨论了变压器的后半边结构。同时结构中也做了部分简化:

1) 实际铁芯是由硅钢片叠装上去的,其截面近似是圆形的,本例中将铁芯当作圆柱体来进行仿真。

2) 绕组各匝之间有相当薄的 1 层匝间绝缘,由于其比较薄,对于绕组的散热影响不是很大,因此将其作为整体来考虑。

3.2 材料属性设定

首先,根据现场实际干式变压器各部分所使用的具体材料,依据传热学原理^[20],分别设置了各自的

导热系数,如表1所示。

辐射率 ϵ 的设定:铁芯外层涂有绝缘漆油,其辐射率设定为 $0.9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$,高低压绕组的外包封使用绝缘树脂,其辐射率也是 $0.9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 左右,设定为 $0.9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 。

对流系数的确定:主要是根据流体学的原理^[21],结合现场实际通风情况,对铁芯上、下铁轭,各端封面,气道内部散热面,绝缘外侧面等各部位设定不同的对流系数,其单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。各部分的对流系数数值设定方案如下:由于现场干式变压器安装在柜内,其冷风主要从底部进入,热风从柜顶流出。在自然对流情况下,干变下铁轭的上、下表面,正对冷风入口,对流系数最高,设定为 13.5 ;下铁轭后表面由于处于背风部位,对流系数要低于铁轭表面,设定为 12.5 ;对于下绝缘端面,也处于冷风入口处,其对流系数设定为 13.5 ;对于散热气道内部,在没有强制冷风的情况下,其对流系数跟气道的宽度和高度有关系,按实际分别计算为 6.5 和 8.5 ;高压绝缘外侧,其于空气直接接触,属于空气流动主通道,对流系数设定为 13.5 ;上部铁轭的上表面处于背风面,对流系数设定为 10.5 ;上铁轭的各侧表面对流比较明显,但又较外侧对流小一些,设定为 12.5 ;上绝缘端面,处于背风面,设定为 10.5 。

3.3 网格划分

进行有限元分析时,网格划分对于计算的精确度影响很大。网格划分太粗,计算必定有很大的偏差;网格划分太细,计算量增加,计算时间太长,甚至可能无法进行分析。为了能准确地反映干式变压器内部温度场的分布情况,根据变压器的结构,依据重点部位网格细划的原则,分别对铁芯、高、低压绕组及树脂绝缘设定不同的网格划分尺寸。

3.4 施加载荷

载荷条件主要包括体积热率和环境温度。根据现场实际运行变压器的负荷情况,分别计算出其损耗,从而可以推出其体积生热率,根据实际运行情况,施加的载荷数据如表2所示。

3.5 仿真结果

本仿真主要是针对开闭所内站用的干式变压器,根据实际监测的数据进行相关温度场仿真,便于与实测温度值进行比对。以乳品站开闭所干式变压器的实际运行数据进行温度场仿真,其整体温度场分布分别如图3所示。

根据仿真结果得到乳品站开闭所的干式变压器B相(中间相)铁芯、低压和高压绕组的温度分布曲

表1 各材料导热系数的设定

Table 1 Thermal conductivity of various materials

	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$			
部位	铁芯	高压绕组	低压绕组	绝缘
材料	硅钢	扁铜线	铜箔	树脂
导热系数	20	387	368	0.276

表2 施加载荷

Table 2 Applied load

开闭所	S_{js}/kVA	损耗/ W		生热率/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-3})$	
		铁芯	绕组	铁芯	绕组
乳品站	355	1 000	2 894	3 779	29 597

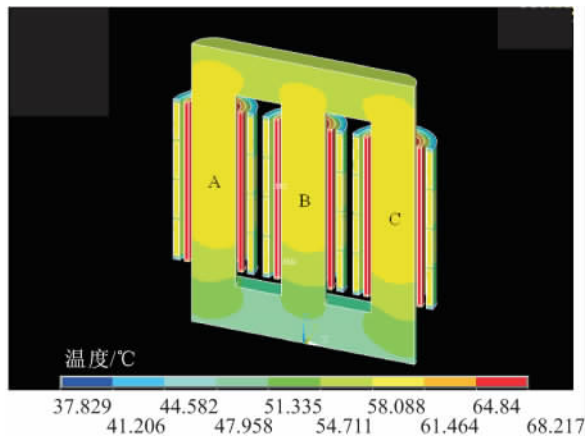


图3 干式变压器整体温度场分布

Fig. 3 Temperature distribution of dry-type transformer

线如图4所示,图4中给出了最热点温度值及上、下端部的温度值。其中, h 为干式变压器B相铁芯、低压和高压绕组的纵向高度,分别以各自最底部为零点, θ_F 为温度分布值。

由图4可见,干式变压器从底部到顶部的温度场分布规律是,总体温度呈低-高-低的抛物线分布。不过,铁芯、低压和高压绕组的最热点位置却不尽相同。设 H 为总高度,对于铁芯为 1.42 m ,对于高、低压绕组为 0.82 m 。其中,铁芯的最热点处于距底部约 $0.6H$ 位置;高、低压绕组的最热点则处于距底部约 $0.7H$ 位置。

从图4(a)可以看出,铁芯底部温度上升较为缓慢,而后上升迅速,分析原因主要是外侧的低压绕组对其产生很大影响。从图4(c)可以看出,高压绕组内部的分段绝缘对绕组温升有一定的影响,在分段绝缘处温度有稍微降低,但是总体趋势没有改变。分析原因主要是由于绝缘处没有内部生热,相对于绕组内部不能得到持续的温升,因而温度有所降低。

同时,由图4的仿真结果还可以看出,干式变压

器在运行过程中,其最热点温度处于低压绕组内,各部位最热点温度与其端部温度相差 5~15℃。

分析原因是由于低压绕组处在铁芯和高压的内部,其散热方式主要是通过气道内与空气的对流,但是由于气道内空气流速有限,故散热性能不强。而高压绕组外侧不仅可以通过与空气对流散热,主要还有辐射散热,散热情况明显好于低压绕组。

干式变压器的最热点区域处即为内部绝缘薄弱环节,此处绝缘性能的好坏将直接影响干式变压器稳定运行。因此在对干式变压器优化设计时应加强此处绝缘性能,或是增加气隙加强通风。同时在对干式变压器进行监控时,在条件允许的情况下可以对此处温度进行实时监测,以期能及时做出预警,防止变压器由于绝缘击穿而造成爆炸起火事故。

4 干式变压器温度监测系统

4.1 系统组成

课题组在某供电局建立了 1 套 10 kV 开闭所站用变温度在线监测系统。该系统包括多个温度采集节点、现场数据管理机、后台数据交换机和监控中心服务端,如图 5 所示。

现场温度采集节点主要采用无线温度传感器,该温度传感器采用基于 ZigBee 技术无线网络连接,其传输规约基于 IEEE 802.15.4 协议标准,具有低功耗、低数据速率、自组织网络、抗干扰能力强的优点^[22-24]。将该采集节点直接贴在绕组母排线上,可以实时精确地采集各相绕组的温度值,并通过无线方式将数据传送给现场数据管理机,实现电气隔离。根据以上仿真的结果,干式变压器运行时最热点位于低压绕组内,故将现场温度采集节点安装在低压绕组出线母排处,此处的温度可以近似反映低压绕组上端部的温度。

数据管理机将现场温度数据汇总后传输至后台数据交换机,并由其上传至监控中心服务端。监控中心服务端包括监测系统服务器和监测系统软件平台组成,软件平台可以实现数据的直观显示、储存、报警等功能。

该系统可以对现场开闭所内站用干式变压器进行实时监测,获取各相温度数据。当温度或温升值超过阈值时,及时进行温度报警,从而减少事故的发生。同时,结合电压、电流、谐波、频率及现场环境温度、湿度等值,对温度报警时数据进行综合分析,找出原因,及时排除隐患。

4.2 数据分析

根据干式变压器温度在线监测系统所获取的数

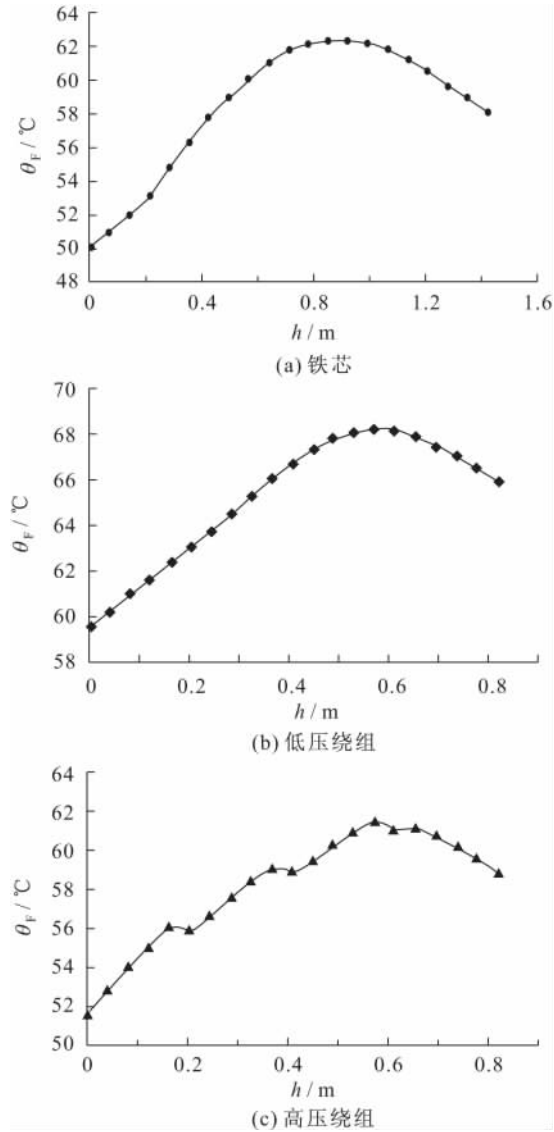


图 4 干变各部分纵向温度曲线
Fig. 4 Vertical temperature curve of different parts of dry-type transformer

据,将监测结果、仿真结果及理论温升计算值进行对比,见表 3。其中仿真结果为低压绕组的平均温度,理论值为理论温升加上现场环境温度后的值。

表 3 低压绕组温度数据对比
Table 3 Comparison of temperature data from low voltage winding

°C	
参数	数值
环境温度	26.4
A 相监测值	62.19
B 相监测值	63.92
C 相监测值	62.57
仿真结果	65.1
理论值	66.5

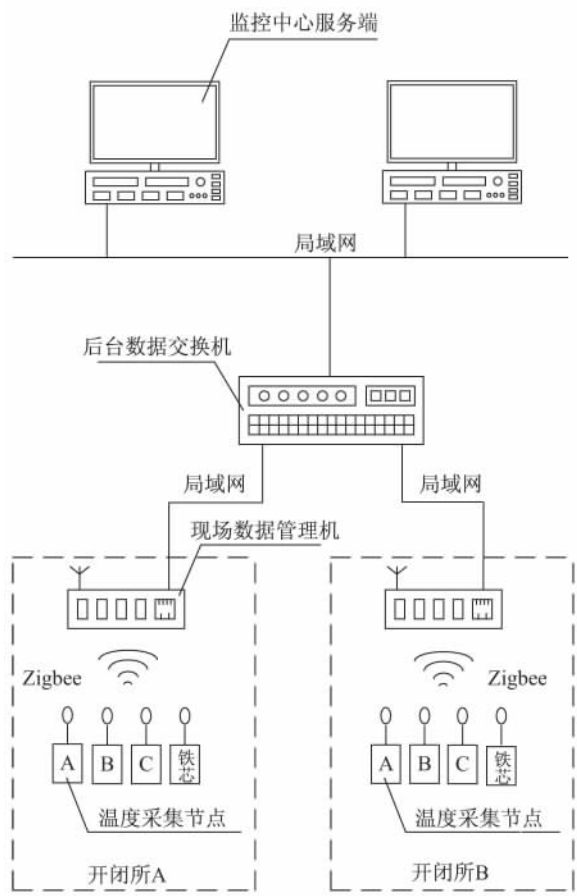


图5 监测系统组成

Fig.5 Monitoring system

分析出现偏差的原因并考虑如何不断完善建模与仿真的过程,即:

1)在进行温度场仿真时,设定对流系数并不能完全模拟出其实际对流情况,且存在一定偏差,在以后的计算中可以叠加空气流体耦合场进行分析。

2)理论值总体高于实际测量值,分析原因主要是因为现场所使用干式变压器负荷较小,实际运行时其附加损耗要低于额定负载时的附加损耗,在以后计算损耗时可以添加系数纠正值。

3)由于现场条件限制,目前监测点主要是在变压器进线母排处,不能深入到变压器内部,由于母排处散热要好一些,该处测得的绕组温度偏低。

5 结论

1)根据变压器的各部分实际损耗,对干式变压器各部分温升分别进行计算,可以反映出干变的整体平均温升情况,具有较强的工程应用价值。

2)利用有限元法,结合 ANSYS 软件,进行干式变压器三维温度场仿真分析,可直观地看出干变内部温度场的分布情况。通过干式变压器铁芯、低压

和高压绕组的温度分布曲线可以看出,干变内部最热点处于低压绕组距底部约 $0.7H$ 位置,最热点即为运行薄弱环节,应加强此处绝缘温度监测。

3)根据建立的 10 kV 开闭所站用干式变压器温度在线监测系统,获取干变各相温度数据,并与理论值、仿真结果进行对比分析,证明该方法的实际应用性,可以有效地反映出干变的实际运行状况。

参考文献 References

- [1] 余涛. 干式电力变压器技术与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 10-15.
YU Tao. Dry-type power transformer technology and application[M]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2008: 10-15.
- [2] 顺特电气有限公司. 树脂浇注干式变压器和电抗器[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 11-18.
SUNTEN Electric Co., Ltd. Cast resin dry-type transformer and reactors[M]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2005: 11-18.
- [3] 魏建林, 王世强, 吴凤娇, 等. 变压器绝缘老化引起预试电气绝缘参数变化的仿真研究[J]. 高电压技术, 2009, 35(7): 1618-1623.
WEI Jianlin, WANG Shiqiang, WU Fengjiao, *et al.* Simulation on variation of electrical insulation parameters in predictive test caused by insulation aging of power transformer[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(7): 1618-1623.
- [4] 杜林, 袁蕾, 熊浩, 等. 电力变压器运行状态可拓层次评估[J]. 高电压技术, 2011, 37(4): 897-903.
DU Lin, YUAN Lei, XIONG Hao, *et al.* Extension hierarchy assessment for operating condition of power transformer[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4): 897-903.
- [5] 廖瑞金, 张锦议, 黄飞龙, 等. 基于可拓分析法的电力变压器本体绝缘状态评估[J]. 高电压技术, 2012, 38(3): 521-526.
LIAO Ruijin, ZHANG Yiyi, HUANG Feilong, *et al.* Power transformer condition assessment strategy using matter element analysis[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(3): 521-526.
- [6] Eslamian M, Vahidi B, Eslamian A. Thermal analysis of cast-resin dry-type transformers[J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52(3): 2479-2488.
- [7] Ebrahim R, Davood A. Analysis of temperature distribution in cast-resin dry-type transformers[J]. Electrical Engineering, 2007, 89(5): 311-319.
- [8] Jansak L, Zizek F, Jelinek Z, *et al.* Loss analysis of a model transformer winding[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2003, 13(2): 2352-2355.
- [9] Rahimpour E, Azizian D. Analysis of temperature distribution in cast-resin dry-type transformers[J]. Electrical Engineering, 2007, 89(4): 301-309.
- [10] 路长柏, 郭振岩, 刘文里, 等. 干式电力变压器理论与计算[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2003: 107-110.
LU Changbai, GUO Zhenyan, LIU Wenli, *et al.* Theoretical and computational of dry-type power transformer[M]. Shenyang, China: Liaoning Science and Technology Press, 2003: 107-110.
- [11] 柳再本, 骆金海. 干式变压器温升计算方法[J]. 变压器, 2007, 44(5): 14-17.

- LIU Zaiben, LUO Jinhai. Calculation method of temperature rise of dry-type transformer[J]. Transformer, 2007, 44(5): 14-17.
- [12] Davood A, Mehdi B, Mahmoud F F. A dynamic thermal based reliability model of cast-resin dry-type transformers[C]//2010 International Conference on Power System Technology. Hangzhou, China; IEEE, 2010: 1-7.
- [13] Moonhee L, Hussein A A, Jan C J, *et al.* Air temperature effect on thermal models for ventilated dry-type transformers[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(3): 783-789.
- [14] 殷之文. 电介质物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 87-91.
- YIN Zhiwen. Dielectric physics[M]. Beijing, China: Science Press, 2003: 87-91.
- [15] Jacek S, Andrzej J N. Shape optimization of coils and cooling ducts in dry-type transformers using computational fluid dynamics and genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(6): 1726-1732.
- [16] Moonhee L, Hussein A A, Jan C J, *et al.* Thermal modeling of disc-type winding for ventilated dry-type transformers[J]. Electric Power Systems Research, 2010, 80(1): 121-129.
- [17] Moonhee L, Hussein A A, Jan C J, *et al.* Temperature distribution in foil winding for ventilated dry-type power transformers[J]. Electric Power Systems Research, 2010, 80(9): 1065-1073.
- [18] 徐志钮, 律方成, 刘云鹏, 等. 基于有限元法的绝缘子污闪模型[J]. 高电压技术, 2011, 37(9): 2225-2232.
- XU Zhiniu, LÜ Fangcheng, LIU Yunpeng, *et al.* Insulator pollution flashover model using finite element method[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(9): 2225-2232.
- [19] 梁永春, 王巧玲, 闫彩虹, 等. 三维有限元法在局部穿管直埋电缆温度场和载流量计算中的应用[J]. 高电压技术, 2011, 37(12): 2911-2917.
- LIANG Yongchun, WANG Qiaoling, YAN Caihong, *et al.* Temperature field and ampacity calculation of cable buried in local conduit using 3D finite element method[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(12): 2911-2917.
- [20] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 337-340.
- YANG Shiming, TAO Wenshuang. Heat transfer[M]. 4th. Beijing, China: Higher Education Press, 2006: 337-340.
- [21] 张爱民, 王长永. 流体力学[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 89-93.
- ZHANG Aimin, WANG Changyong. Hydromechanics[M]. Beijing, China: Science Press, 2010: 89-93.
- [22] 黄新波, 罗 兵, 刘存孝, 等. 采用 ZigBee 芯片的无线加速度传感器网络节点的实现[J]. 高电压技术, 2010, 36(8): 1962-1969.
- HUANG Xinbo, LUO Bin, LIU Cunxiao, *et al.* Designation of wireless acceleration sensor network node using ZigBee chip[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(8): 1962-1969.
- [23] 陈建明, 曹文思, 邱道尹. 应用无线传感器网络的分布式电力系统接地状态监测[J]. 高电压技术, 2011, 37(9): 2266-2271.
- CHEN Jianming, CAO Wensi, QIU Daoyin. Distributed detection of ground state using wireless sensor networks[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(9): 2266-2271.
- [24] 李丽芬, 于永华, 朱永利. 输电线路在线监测的无线传感器网络抗干扰分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(5): 1180-1185.
- LI Lifen, YU Yonghua, ZHU Yongli. Anti-interference analysis of wireless sensor network for transmission line monitoring[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(5): 1180-1185.



XIONG Lan
Ph. D., Professor



ZHAO Yanlong



YANG Zikang



HE Wei
Ph. D., Professor

熊 兰

1972—,女,博士,教授

主要从事电力设备在线智能化监测技术、脉冲功率技术、数字化仪器设备方面的研究

E-mail: lxiong@cqu.edu.cn

赵艳龙

1985—,男,硕士生

主要从事干式变压器在线监测与故障诊断方面的研究

E-mail: zylong1985@163.com

杨子康

1985—,男,硕士,讲师

主要从事电力设备在线监测和脉冲功率技术方面的研究

E-mail: yzk1985@163.com

何 为

1957—,男,博士,教授

主要从事电力设备电磁兼容与故障检测、数字仪器设备、计算机测量与控制等方面的研究

收稿日期 2012-07-02 修回日期 2012-12-14 编辑 曾文君