◇ 研究报告 ◇

干式变压器有限元仿真模型的电磁和振动分析

陆 $\mathfrak{H}^{1\dagger}$ 周 \mathfrak{a}^1 钱帅 \mathfrak{h}^1 潘 \mathfrak{S}^2

(1 广西电网有限责任公司桂林供电局 桂林 541000)(2 武汉大学电气与自动化学院 武汉 430072)

摘要:干式变压器在运行时存在着振动和噪声的问题,为了对干式变压器振动的规律与特点进行研究,该文建 立了干式变压器本体振动的有限元仿真模型,通过电磁分析获得相应的磁场分布,然后利用结构动力学分析 得到其本体振动的相关规律。通过对处于运行状态的变压器振动数据进行实测分析,得到变压器振动的特征 频率,然后与仿真结果进行对比分析,可以发现变压器的振动存在特征频率。该文的研究结果可对干式变压器 的减振降噪研究提供参考。

关键词:干式变压器;有限元模型;电磁力;谐响应分析;振动云图 中图法分类号:TM412 文献标识码:A 文章编号:1000-310X(2020)04-0638-09 DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2020.04.019

Electromagnetic and vibration analysis of dry transformer finite element simulation model

LU Xin¹ ZHOU Xiong¹ QIAN Shuaiwei¹ PAN Xiao²

(1 Guilin Power Supply Bureau of Guangxi Power Grid Co., Ltd., Guilin 541000, China)

(2 School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The dry-type transformers have vibration and noise problems during operation. In order to study the vibration rules and characteristics of dry-type transformer, the mechanism of vibration and noise generation of dry-type transformer were studied and simulated. The finite element simulation model of dry-type transformer vibration was established. The corresponding magnetic field distribution was obtained by electromagnetic analysis, and then the structural vibration was used to obtain the relevant laws of its vibration. The characteristic frequency of transformer vibration was obtained through the measured analysis of transformer vibration data in operation state. The characteristic frequency of transformer vibration was found by comparing and analyzing the simulation results. The results can provide a reference for the research of vibration reduction of dry-type transformers.

Keywords: Dry-type transformer; Finite element model; Electromagnetic force; Harmonic response analysis; Vibration cloud

2019-09-24 收稿; 2020-02-15 定稿

†通信作者 E-mail: 1476104958@qq.com

作者简介: 陆昕 (1980-), 男, 广西桂林人, 本科, 工程师, 研究方向: 电力生产管理。

0 引言

干式变压器因具有损耗低、体积小、维护简单 等优点而被广泛应用于室内供配电场所。由于电力 需求的增长,干式变压器的数量也在不断增加。运 行的干式变压器存在振动以及噪声的问题,给附近 的居民和环境带来干扰。

绕组铁芯振动是造成干式变压器噪声的重要 原因^[1-6]。其中铁芯振动和噪声的两个主要来源 为:(1)交变磁场中硅钢片的非线性特性会引起磁 致伸缩^[7];(2)铁芯并不是一个整体,在硅钢片叠 片之间存在缝隙,这种缝隙处的漏磁也能够在存在 电流激励的情况下对导体产生电磁力,从而引起振 动^[8-9]。

当变压器绕组中通入交变电流时,绕组的周围 会产生磁场,除去沿着铁芯闭合的主磁通,还有漏磁 通,从而产生了漏磁场。在此漏磁场中的绕组之间 以及导线之间会受到电场力的作用而产生振动。绕 组振动是造成变压器带载运行振动的主要来源^[10]。

由于上述问题的存在,众多研究人员围绕干式 变压器的电磁力和振动展开了大量研究。文献[2]进 行快速傅里叶变换(Fast Fourier transform, FFT) 分析和频域振动分析,得到变压器铁芯和绕组表 面各点的振动位移; 文献 [11] 对变压器进行了声强 和振动测试,并对其频率特性进行了详细分析;文 献[12]在耦合场理论的基础上完成了变压器在运行 时由电动激励到绕组振动响应的整个过程的仿真 分析,建立了包括各向异性磁阻张量和磁阻质在内 的电力变压器铁芯磁-机械强耦合模型; 文献 [13] 建 立了基于电-磁-结构力学多物理场耦合的变压器 铁芯和绕组综合振动的三维模型,并通过仿真和试 验进行对比验证,得到了直流偏磁对变压器振动的 影响。但现有研究大都对干式变压器的铁芯和绕组 进行分析,因为变压器不同部位具有不同的振动特 性,而且不同部件的振动之间是互相影响的,因此在 振动特征频率下,对干式变压器整体进行分析对变 压器的减振降噪具有重要意义。

基于以上研究,本文构建了变压器本体振动的 有限元模型,进行了电磁分析,得到相应的磁场分 布。在此基础上,利用结构动力学对变压器模型进 行模态分析以及谐响应分析,并且进一步对其在特 征频率下的振动云图进行比较分析。

1 干式变压器本体建模

现场安装的SCB10-800KVA 10/0.4 干式变压 器如图1所示。本文针对这种常见的干式变压器进 行分析,建立了有限元实体模型。因为干式变压器 中零部件多且连接方式多样,很难对其进行精确的 有限元网格划分以及有限元计算。因此,整体建模 不是精确到所有零件的建模,而是从主要方面分析 建模,所以需要简化处理干式变压器。



图 1 SCB10-800KVA 10/0.4 干式配电变压器 Fig. 1 SCB10-800KVA 10/0.4 dry-type distribution transformer

基于以上分析,本文在对变压器进行建模分析 时进行了如下简化:

(1)在建立模型时,不仅需要保持水平截面外 缘轮廓形状,还要保证铁心中心柱、铁轭、中心柱的 长、宽、高、直径等各种尺寸与图纸完全一致,将旁柱 以及立柱简化,使其成为一个整体形式。

(2) 由于夹具的结构比较复杂,在简化的仿真 模型中,将仅考虑铁芯叠硅钢片的结构。

(3)将绕组线圈视为一个整体处理。将变压器绕组等效为圆筒形状,保持内外半径、圆筒的高度与实际测量的尺寸一致。



图 2 变压器油箱简化模型视图 Fig. 2 Simplified model view of transformer tank

(4) 将冷却风机等效为一个块状的固体,并与 下方的固定支架进行合并。

根据实际变压器的模型,在Solidworks中绘制 出简化后的油箱仿真模型如图2所示。

2 干式变压器仿真电磁分析

在进行 ANSYS Workbench 电磁场分析时,若要计算电磁场的瞬态仿真,可以利用集成在其中的 Maxwell 3D 模块。本文根据瞬态磁场模块模拟干 式变压器绕组和铁芯的磁场分布。在对干式变压器 进行电磁场仿真时,考虑其处于空载状态时的仿真 结果。

当变压器处于空载时,将高压侧绕组电压给定为11268 kV,三相的输入电压如图3所示。

由图3可以发现,在0.06 s时已经接近稳态,下 面观察t = 0.08 s时的磁场分布,如图4所示,其中 图4(a)为此时刻对应的铁芯和线圈表面的磁感应 强度分布云图,图4(b)为此时刻周围空间的磁感应 强度矢量分布云图。



Fig. 3 Three-phase no-load input voltage







图4 t = 0.08 s时的磁场分布



从图4中不难看出,最大磁通密度主要分布在 铁芯上,仿真过程中变压器处于空载状态,实际上负 载的情况也类似。这里计算其磁通分布,可以通过 公式(1)求解绕组中产生的轴向电磁力,但是这个 公式的计算并不精确,只能大概地表明其磁场分布 与电磁力是正相关的^[14]。

$$F_Z = \sum_{i=1}^n B_{ri} \cdot I_i \cdot L_i = 2\pi r_p I_d \sum_{i=1}^n B_{ri}$$
$$= 2\pi r_p I N B_{pr}, \qquad (1)$$

其中, $B_{pr} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{n} B_{ri}$ 表示绕组内等效平均磁感应

强度; B_{ri}表示第i根单根导线中心磁感应强度; r_p 表示绕组平均半径; I_d表示单根导线电流; I表示绕 组电流; N表示绕组匝数; m表示并联导线根数。

铁芯磁致伸缩及绕组受到的周期性电磁力作 用时所产生的振动,是造成变压器产生振动和噪声 的根本原因。因此若对变压器的振动特性进行准确 的仿真,则还需要响应可靠的激励值。目前对于变 压器内部电磁力计算的理论还不能给出完全精确的计算结果。因此,为了使问题简化,在输入给定激励的条件下,以数值模拟的方法来计算相对振动的幅值。

3 干式变压器仿真振动分析

3.1 模态分析

模态分析是以响应频谱分析为基础的计算结构振动特性的数值技术,结构振动特性包括振型以及固有频率^[15]。针对本文中对应的变压器本体模型,求取的前100阶模态的固有频率,如图5所示。



图5 变压器本体前100阶固有频率

Fig. 5 The first 100 natural frequencies of the transformer body



(b) f = 110.83 Hz时对应的5阶模态



Fig. 6 Typical diagram of the first 6 modes of the dry-type transformer body

物体实际的振动是各阶振动的结合,但是高阶 振动相对来说影响较小,因此主要考察前6阶的振 动特性即可。从图5中也不难发现,频率在1000 Hz 以内时是振动集中的主要位置。前6阶模态对应的 云图中典型部分如图6所示。

在图6中,干式变压器的每种模态代表的是变 压器的振动形式。从图6可以看出,铁芯顶部及夹 件与绕组的振动相对于干式变压器本体的其他位 置来说更为强烈,所以在考虑本体的谐响应分析时, 只需主要考察铁芯、绕组线圈、变压器上端夹件等 几个位置的振动情况。

3.2 谐响应分析

由于干式变压器的结构比油浸式变压器简单, 若不考虑底部风机的振动,变压器的噪声则主要由 铁芯和绕组线圈的振动引起。在进行谐响应分析时, 将等效的振动力施加在铁芯和线圈的上沿,根据实 测值输入,再考察线圈位置、风扇位置、铁芯顶部、上 端排线、左侧铁芯的响应,进行对照。显然,各个单 元之间的响应特性并不完全一致,此时只要比较最 大的振动幅值即可。输入的数据可以根据实际测量 的结果得到,如图7所示。



图7 实际测量中3种情况下变压器铁芯上端夹件 的振动曲线

Fig. 7 The vibration curves of the upper end clamps of transformer core measured in three cases

虽然在不同的工作状况下,变压器振动的情况 会有所不同,但对于仿真分析而言,更多的是要考 虑极限情况下,即当变压器本体振动最严重时,变 压器的振动如何传播。在图7给出的实际测量振动 值中,空载情况下的振动最为严重,而且含有较高 的谐波成分,在800 Hz 左右仍然含有谐波成分。考虑到大于1000 Hz 时,谐波成分基本不存在,因此大于1000 Hz 部分在本文中将不予分析。利用第2节所建立的干式变压器模型进行仿真,研究空载情况下1000 Hz 以内的谐响应分析,以10 Hz 为步长,获得较精确的响应曲线,如图8所示。

由图8不难看出,在0~1000 Hz的范围内,干 式变压器不同位置的响应曲线会有很大的不同。线 圈、铁芯以及上端排线位置的振动较为明显,下端 风机位及固定导轨的振动则相对较小。

图9为实测线圈侧边与铁芯顶部的振动曲线。 将图9(a)与图8(e)、图9(b)与图8(c)进行比较,可 以发现仿真结果与实测值相差不大。本文在有 限元仿真对变压器进行了大量简化,此结果验 证了本文所搭建模型、简化方法与仿真方法的 正确性。



图8 谐响应分析对应的各点频率-位移曲线

Fig. 8 Frequency-displacement curve of each point corresponding to harmonic response analysis



3.3 振动云图分析

本节将考察谐响应分析的振动云图,这与模态 分析有相似之处,但又有所不同。模态分析给出的 是振动强度的分布,谐响应分析是给定了输入量,求 解具体的振动位移分布规律。

本文现场测量了桂林某个小区的配电室,现场 测试如图10所示。



图 10 现场测试图 Fig. 10 Picture of field test

如图10所示,该变压器处于正常运行状态,本 文通过测振仪对其防护罩表面的振动进行测量,可 以得到变压器总体的振动速度以及加速度的波形 图。对所测数据进行频域分析,可以得到如图11所 示的频谱图。



Fig. 11 Spectrum diagram of transformer vibration

应用声学





Fig. 12 The strain contours corresponding to harmonic response analysis

从图11中可以看出,变压器的振动主要集中在 10 Hz附近以及工频倍频处,因为工频交流电源的 频率是50 Hz,变压器振动存在着与工频50 Hz 呈倍 数的特征频率,其在特征频率处对应的速度与加速 度幅值较高。因此在振动云图的分析中,只需要考 虑特征频率处的振动规律即可,图12给出仿真中前 5次谐波的分布规律。

从图12中可以看出,大部分情况下,干式变压 器箱体的振动主要集中在上部排线和线圈部分,为 了更加直观得到振动的传递规律,本文在变压器表 面选取多个测点进行分析,其中测点1~3分别为 变压器中部从上到下依次选取的测点。在不同特 征频率下,对测点的振动幅值进行测量,可以得到 图13。由图13可以看出,振动的传递从上往下是一 个依次减弱的关系。

在高次谐波下谐响应应变云图中,发现在某些 频率下振幅也比较大,如图14所示。





Fig. 13 Vibration amplitude of each measuring point under characteristic frequency



图 14 高次谐波下的谐响应应变云图



当然,像图14这样的仿真结果可能与实际有 出入,因为现实中在任何情况下都是变压器作为一 个整体进行振动,而不是变压器的某个边缘单元独 自振动。但是在750 Hz情况下的振动强度明显高 于250 Hz以内的部分频率下的振动强度。而小于 250 Hz是变压器绕组与铁芯振动的主要频段^[1,10]。 这表明,变压器整体作为一个系统,除了受到外界的 受迫振动之外,其振动特性还会与自身的结构属性 有关。

4 结论

本文依据干式变压器本体振动和噪声的产生 机理,对干式变压器的振动本体进行有限元模型的 搭建与仿真,可以得到以下结论:

(1)利用结构动力学分析变压器本体振动的有关规律,对比模态分析和谐响应分析的振动云图,可以发现振动的传递从上往下是一个依次减弱的关系,变压器的线圈、铁芯以及上端排线位置的振动 较为明显,下端风机位及固定导轨的振动相对较小。

(2)通过对干式变压器振动数据分析,发现变 压器的振动存有特征频率。由频域图可以看出,振 动信号的频率主要集中在400 Hz 以内,400 Hz 之外的频率处振动幅值几乎为零。变压器的振动主要集中在10 Hz 处,50 Hz、100 Hz、150 Hz 等工频倍频处也有分布。非工频倍频处谐波的振动幅值远小于10 Hz 处的振动幅值。因此研究干式变压器的减振降噪时可以根据以上规律进行研究。

参考 文 献

- 张凡, 汲胜昌, 师愉航, 等. 电力变压器绕组振动及传播特性 研究 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(9): 2790-2798, 2849.
 Zhang Fan, Ji Shengchang, Shi Yuhang, et al. Study on vibration and propagation characteristics of power transformer windings[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(9): 2790-2798, 2849.
- [2] 胡静竹, 刘涤尘, 廖清芬, 等. 基于有限元法的变压器电磁振动噪声分析 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(15): 81-88.
 Hu Jingzhu, Liu Dichen, Liao Qingfen, et al. Analysis of electromagnetic vibration and noise of transformer based on finite element method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(15): 81-88.
- [3] Moses A. Measurement of magnetostriction and vibration with regard to transformer noise[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1974, 10(2): 154–156.
- [4] Wang J, Gao C, Duan X, et al. Multi-field coupling simulation and experimental study on transformer vibration caused by DC bias[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2015, 10(1): 176–187
- [5] Escarela-Perez R, Kulkarni S V, Melgoza E. Multi-port network and 3D finite-element models for accurate transformer calculations: single-phase load-loss test[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78: 1941–1945.
- [6] 王素文,张松光,王淑萍,等. 虚拟声屏障在变压器低频降噪中的实验研究 [J]. 应用声学, 2015, 34(6): 487–494.
 Wang Suwen, Zhang Songguang, Wang Shuping, et al. Experimental study of virtual sound barrier in low frequency noise reduction of transformer[J]. Journal of Applied Acoustics, 2015, 34(6): 487–494.
- [7] 张黎, 王国政, 董攀婷, 等. 基于磁致伸缩本征特性的晶粒取向 性变压器铁心振动模型 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3990-4001.

Zhang Li, Wang Guozheng, Dong Panting, et al. Vibration model of grain oriented transformer core based on magnetostrictive intrinsic characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3990–4001.

- [8] 朱叶叶, 汲胜昌, 张凡, 等. 电力变压器振动产生机理及影响 因素研究 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(6): 115–125.
 Zhu Yeye, Ji Shengchang, Zhang Fan, et al. Research on vibration generation mechanism and influencing factors of power transformer[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(6): 115–125.
- [9] 王佳音,白保东,刘宏亮,等.直流偏磁对变压器振动噪声的 影响[J].电工技术学报,2015,30(8):56-61.

Wang Jiayin, Bai Baodong, Liu Hongliang, et al. Influence of dc bias on vibration and noise of transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 56–61.

- [10] 汲胜昌,何义,李彦明,等. 电力变压器空载状况下的振动特 性研究 [J]. 高电压技术, 2001(5): 47-48.
 Ji Shengchang, He Yi, Li Yanming, et al. Study on vibration characteristics of power transformer under no-load condition[J]. High Voltage Engineering, 2001(5): 47-48.
- [11] Lu Z, Zhang C, Wang T, et al. Measurement and analysis of UHV transformer noise with sound intensity and vibration method[C]. 2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2017: 1–4.
- [12] 王丰华,段若晨, 耿超,等. 基于"磁-机械"耦合场理论的电力变压器绕组振动特性研究[J].中国电机工程学报,2016, 36(9): 2555-2562.

Wang Fenghua, Duan Ruochen, Geng Chao, et al. Study on vibration characteristics of power transformer winding based on "magneto-mechanical" coupling field theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2555–2562.

[13] 鲍清, 赵文彬. 直流偏磁对变压器振动的影响 [J]. 水电能源科
 学, 2019, 37(5): 180–184.

Bao Qing, Zhao Wenbin. Influence of DC bias on transformer vibration[J]. Water Power Science, 2019, 37(5): 180–184.

- [14] 王志敏,顾文业,顾晓安,等. 大型电力变压器铁心电磁振动 数学模型 [J]. 变压器, 2004(6): 1-6.
 Wang Zhimin, Gu Wenye, Gu Xiao'an, et al. Mathematical model of electromagnetic vibration of large power transformer core[J]. Transformer, 2004(6): 1-6.
- [15] Li G, Yu H, Liu Z, et al. Electromagnetic vibration analysis of double redundancy permanent magnet synchronous motors in two modes[C]. 2017 IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), 2017: 1566–1570.