

文章编号:1671-251X(2016)03-0024-07

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2016.03.006

朱晶晶,田慕琴,宋建成,等.谐波对矿用干式变压器损耗及温升的影响[J].工矿自动化,2016,42(3):24-30.

谐波对矿用干式变压器损耗及温升的影响

朱晶晶, 田慕琴, 宋建成, 温敏敏

(太原理工大学 煤矿电气设备与智能控制山西省重点实验室, 山西 太原 030024)

摘要:为了更准确地分析谐波对变压器损耗和温升的影响,首先建立了干式变压器二维结构模型,并对干式变压器的漏磁场与谐波损耗进行了仿真计算,得到干式变压器轴向和径向漏磁场分布规律及谐波损耗与谐波次数、谐波含有率、谐波电流畸变率的关系;然后利用 Fluent 对干式变压器二维温度场与流体场进行了流固耦合分析,得到干式变压器温升与谐波次数及谐波电流畸变率的关系。仿真结果表明,干式变压器的谐波铜损耗与谐波电流含有率的平方成正比,且当谐波电流含有率一定时,近似与谐波电流次数的平方成正比;而谐波铁损耗与谐波电压含有率的平方成正比,但当谐波电压含有率一定时,谐波铁损耗随谐波次数的增大而减小,并逐渐趋于平缓。

关键词:干式变压器;谐波;损耗;温升;漏磁场;温度场

中图分类号:TD611

文献标志码:A

网络出版时间:2016-03-07 15:15

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20160307.1515.006.html>

Influence of harmonic on loss and temperature rise of mine-used dry-type transformer

ZHU Jingjing, TIAN Muqin, SONG Jiancheng, WEN Minmin

(Shanxi Key Laboratory of Mining Electrical Equipment and Intelligent Control,
Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to accurately analyze influence of harmonic on loss and temperature rise of transformer, a two-dimensional model of dry-type transformer was established firstly, and leakage magnetic field and harmonic loss in the dry-type transformer were simulated. Consequently, distributions of axial and longitudinal leakage magnetic in the transformer, as well as relationship between harmonic loss and harmonic order, harmonic ratio and distortion factor of harmonic current were derived. Then fluid-structure interaction analysis of the two-dimensional temperature field and airflow field of the dry-type transformer was conducted using finite element software Fluent, and the relationships between the temperature rise and harmonic order, as well as distortion factor of harmonic current were gained. Simulation results show that the harmonic copper loss is proportional to square of harmonic current ratio, and it is also approximately proportional to square of harmonic order when the content of harmonic current ratio is certain; the harmonic iron loss is proportional to square of harmonic voltage ratio, but it decreases and gradually tends to flatten out with harmonic order increases when the harmonic voltage ratio is certain.

Key words: dry-type transformer; harmonic; loss; temperature rise; leakage magnetic field; temperature field

收稿日期:2015-11-23;修回日期:2016-01-11;责任编辑:胡娴。

基金项目:国家自然科学基金项目(51577123,51377113);山西省科技厅重大专项项目(20131101029)。

作者简介:朱晶晶(1988—),女,河北保定人,硕士研究生,研究方向为矿用干式变压器状态监测与寿命评估,E-mail:13027072827@163.com。

0 引言

随着井下变频技术的不断应用,其在给负荷启动带来明显优点的同时,也给供电系统带来了严重的谐波污染。随着谐波污染的加剧,谐波对变压器造成的不利影响愈发明显,尤其是在增加变压器损耗、降低变压器利用率和可靠性、减少使用寿命以及增加维修成本等方面。煤矿井下广泛采用干式变压器,与油浸式变压器相比,干式变压器具有防火性能好、耐热和抗短路能力强、安全环保等优点,但其导热系数较低,使得其运行温度明显高于油浸式变压器。同时,煤矿井下工作环境中由于甲烷混合气体和煤尘等易爆物的存在,对于干式变压器的绝缘强度和散热性能都有严格的要求^[1-3]。相关研究表明^[4],变压器的总损耗占总发电量的8%,其中很大一部分就是谐波损耗。所以,谐波对干式变压器内部损耗的影响就不得不引起足够的重视。谐波会使煤矿井下干式变压器的损耗增加,内部温度升高,造成变压器局部过热;且变压器内部金属结构分布的不规则性会加重变压器各元件中损耗分布的不均匀性,使变压器局部过热现象愈来愈严重,加速绝缘老化速度,甚至可能发生绝缘击穿^[5-7],引发井下瓦斯爆炸事故,造成巨大的生命财产损失。变压器的谐波损耗问题不仅关系着供电系统节能运行效果,而且是变压器产品设计和优化过程中的关键问题。因此,研究变压器的谐波损耗和温升对提高变压器的运行效率、降低损耗具有重要的现实意义。

目前变压器铜耗和铁耗的常用计算方法是根据变压器内部参数和谐波电流来计算的,但它是针对特定型号的变压器来计算的,不具有普遍性^[8-10]。变压器的温升一般是根据热点公式计算,而热点计算公式是估计得到,准确性相对较差。因此,本文首先详细分析了谐波作用下干式变压器的损耗和温升,建立了干式变压器的二维结构模型;并采用Ansoft Maxwell软件对干式变压器内部的漏磁场进行了分析,得到干式变压器轴向和径向漏磁场分布规律及谐波损耗与谐波次数的关系;最后利用Fluent软件对干式变压器进行二维温度场与流体场的流固耦合分析,得到了其内部温度分布情况,指出了谐波损耗及温升与谐波次数的关系。

1 干式变压器结构模型

建立干式变压器结构模型时做了如下假设:
① 忽略机械结构部分如螺栓、结构件等,假设干式

变压器由铁芯、低压绕组、高压绕组、绝缘、散热气道以及干式变压器周围冷却空气等部分组成。② 假设干式变压器内部的漏磁场和温度场是轴对称分布的。③ 将铁芯看作是一个圆柱体。

根据干式变压器的实际结构建立二维结构模型,如图1所示。

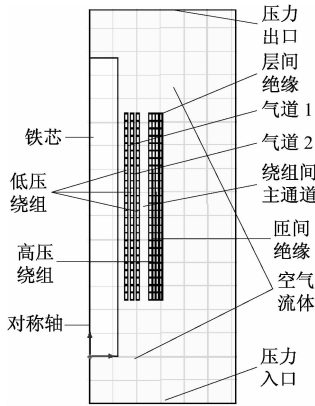


图1 干式变压器二维结构模型

针对干式变压器的二维结构模型,采用自适应网格划分方法对干式变压器进行了网格划分,结果如图2所示。

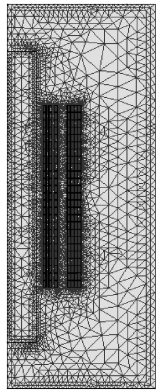


图2 干式变压器网格划分

2 漏磁场仿真

干式变压器内部的磁场分为主磁场和漏磁场。干式变压器内部的磁通大部分通过铁芯形成闭合回路,只有极少一部分不通过铁芯,而是经过空气和绝缘材料形成漏磁场^[11]。干式变压器漏磁场的准确分析是计算变压器损耗的前提。干式变压器运行时产生的漏磁场使干式变压器的损耗增加,运行温度升高。由于谐波的影响导致漏磁场分布不均匀,更容易造成局部过热,导致绕组绝缘承受的电气应力提高而使其寿命受到较大影响。

2.1 材料参数

在进行漏磁场仿真前,需设置各部件的材料属

性。干式变压器的结构件材料见表 1。

表 1 干式变压器的结构件材料

部件	材料	磁导率	电导率
铁芯	30RGH120	B-H 曲线	—
低压绕组	电工铜	—	5.77×10^7
高压绕组	电工铜	—	5.77×10^7
空气	空气	1	—

2.2 干式变压器的漏磁场分析

变压器线圈导线内不仅有负载电流,还有漏磁场产生的涡流,导致导线中的电流分布不均匀,从而在绕组内产生涡流损耗,使绕组发热。由于集肤效应及谐波电流等的作用,使绕组中的涡流损耗分布不均匀,并且轴向漏磁场沿绕组轴向分布的不均匀性也造成绕组端部涡流损耗过度集中,从而导致绕组局部过热。采用 Ansoft Maxwell 对干式变压器漏磁场进行仿真分析。基波下的干式变压器磁力线分布如图 3 所示。

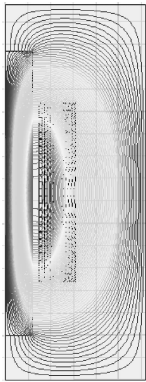
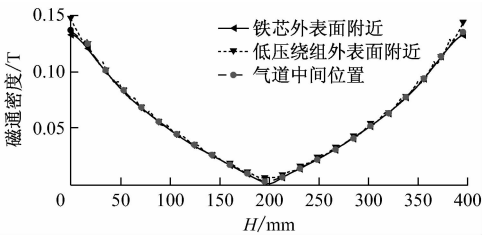


图 3 干式变压器磁力线分布

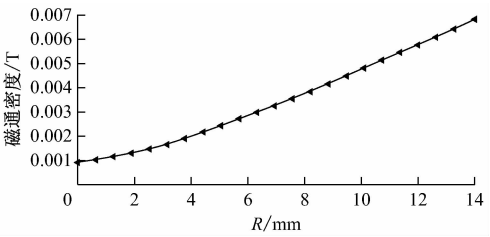
由图 3 可知,铁芯内部的磁力线几乎全部平行于绕组,上、下端部处的磁场分布也比较发散,并在端部处磁力线发生弯曲,从而在绕组外侧的空间形成闭合曲线;低压绕组内部的磁力线穿过低压绕组,并在铁芯和绕组外侧的空间形成闭合回路;高压绕组内部的磁力线穿过高压绕组,平行分布,并分为 2 路,一路进入铁芯形成闭合回路,另一路则向外经绕组的外部空间形成闭合回路。高压绕组端部磁力线向外弯曲,与空气形成漏磁回路,且由于磁势不平衡使得绕组中部的磁力线弯曲。高压绕组和低压绕组端部处的磁力线比较发散,这是因为端部气隙比较大,空气中的磁路会发生扩张并引起边缘效应。高压绕组与低压绕组之间的主通道内的磁力线分布最密,此处的漏磁场场强最大,并且磁力线基本上是平行于干式变压器轴向分布的,但在绕组端部和中部有弯曲,在低压绕组端部磁力线向着铁芯方向弯

曲,进入铁芯形成漏磁回路。

干式变压器低压绕组与铁芯间气道内的磁通密度分布如图 4 所示。设 H 为总高度, R 为径向宽度,由图 4(a)可知,低压绕组与铁芯间轴向漏磁场在绕组端部达到最大值,并向中部逐渐减少为零,且上下对称分布。这主要是因为磁力线在绕组中部平行于轴向,而在端部发生明显弯曲,使得端部的轴向磁通密度增大。在绕组匝间存在由 Nomex 绝缘纸构成的绝缘,使得绝缘处的磁力线发生偏折,故曲线出现拐点。由图 4(b)可知,低压绕组与铁芯间的径向漏磁场沿径向宽度的增加而逐渐增大,在靠近低压绕组处达到最大。因此,低压绕组与铁芯之间的漏磁场在靠近低压绕组端部附近达到最大值。



(a) 轴向磁通密度分布



(b) 径向磁场密度分布

图 4 低压绕组与铁芯间的磁通密度分布

高、低压绕组间主通道内的磁通密度分布如图 5 所示。由图 5(a)可知,轴向磁通密度在绕组中部达到最大值,即轴向磁通密度沿轴向高度从中部向两端部逐渐减少,在端部达到最小值。从图 5(b)可以看出,由于绕组匝间绝缘的存在,漏磁通在此处发生偏折,使得径向漏磁增加,轴向漏磁减少,所以高压绕组内表面附近的径向漏磁最大。综上所述,高、低压绕组间的漏磁场在靠近绕组中部处达到最大值。

低压绕组内部换热气道内的磁通密度分布如图 6 所示。由图 6(a)可知,低压绕组内部 2 个换热气道内的轴向漏磁场和低压绕组与铁芯间的轴向漏磁场具有相似的变化趋势,都是端部的磁通密度比中部大,即轴向漏磁从中部向两端部逐渐增大,在端部达到最大,并且出现上下端部的漏磁通对称。气道 2 内的漏磁场变化比气道 1 内的漏磁场变化小,

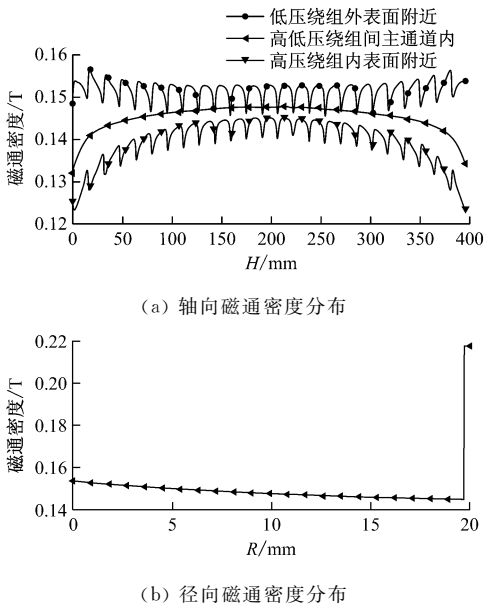


图5 高、低压绕组间主通道内的磁通密度分布

且气道2内的漏磁场比较大。由图6(b)可知,低压绕组间2个气道内的径向漏磁场与低压绕组径向漏磁通分布趋势不同,低压绕组间气道内的径向漏磁通是在靠近低压绕组处达到最大值。因此,低压绕组间2个气道内的漏磁场都在靠近低压绕组端部附近达到最大值,但气道2内的漏磁场变化较小。

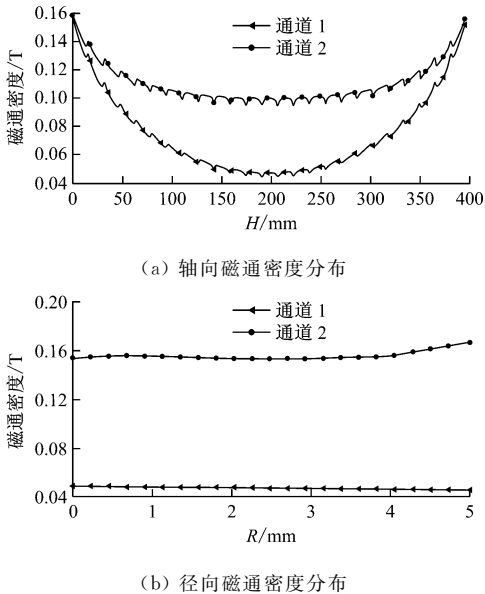


图6 低压绕组内部换热气道内的磁通密度分布

干式变压器高、低压绕组间主通道内的漏磁场比较大,而在绝缘处磁力线发生弯曲,使得绝缘处的磁通密度也很较大。

2.3 谐波损耗分析

由上述分析可知,谐波会在变压器内部产生谐波损耗。干式变压器的谐波铜损耗和谐波铁损耗分别与谐波电流和谐波电压有关。

2.3.1 谐波铜损耗与谐波电流的关系

分别对干式变压器的二维模型施加基波电流以及相应次数的谐波电流,可得到变压器谐波损耗与谐波电流含有率及谐波次数的关系曲线,如图7和图8所示。

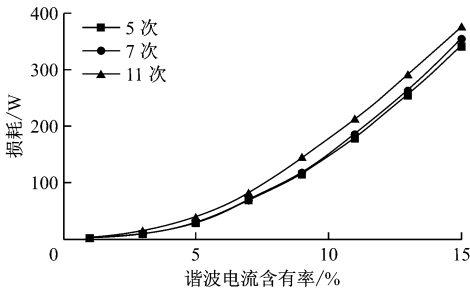


图7 谐波铜损耗与谐波电流含有率的关系曲线

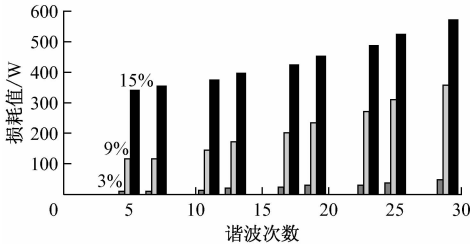


图8 谐波铜损耗与谐波次数的关系

由图7和图8可知,干式变压器的谐波铜损耗随着谐波电流含有率的增大而增大,并与谐波电流含有率的平方成正比。在谐波电流含有率一定的情况下,谐波铜损耗随着谐波次数的增加而增大,谐波铜损耗与谐波电流次数的平方近似成正比。

2.3.2 谐波铁损耗与谐波电压的关系

干式变压器的谐波铁损耗与谐波电压含量和谐波电压次数有关。对不同谐波电压含有率和不同谐波次数下的谐波损耗变化进行分析,得到谐波铁损耗与谐波电压含有率及谐波电压次数的关系曲线,如图9和图10所示。

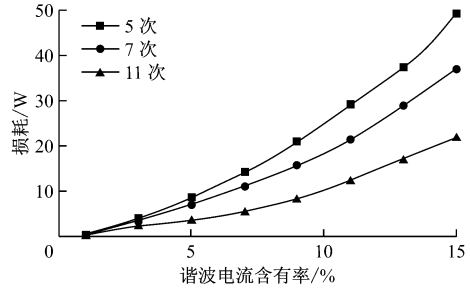


图9 谐波铁损耗与谐波电压含有率的关系曲线

由图9和图10可知,干式变压器的谐波铁损耗随着谐波电压含有率的增大而增大,并与谐波电压含有率的平方成正比。当谐波电压含有率一定时,谐波铁损耗随着谐波次数的增加而减小,并逐渐趋

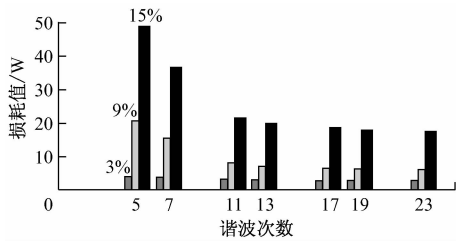


图 10 谐波铁损耗与谐波次数的关系

于平缓。

2.3.3 谐波损耗与谐波电流畸变率的关系

当干式变压器负载总功率不变时,对不同谐波电流畸变率下的谐波损耗变化进行分析,得到谐波损耗与谐波电流畸变率的关系曲线,如图 11 所示。

由图 11 可知,谐波次数愈大,干式变压器的谐波损耗愈小,且变化趋势逐渐趋于平缓。运行时损耗大,相应的能耗也就越大,干式变压器的运行效率和利用率都会降低。

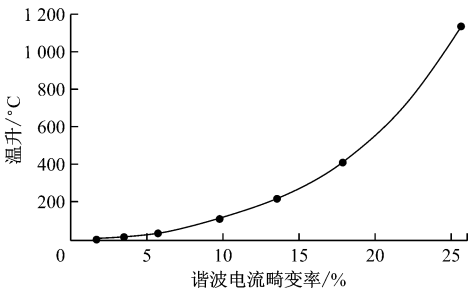


图 11 谐波损耗与谐波电流畸变率的关系曲线

谐波在干式变压器产生谐波损耗,且谐波次数愈大,其内部谐波损耗愈小,且变化趋势逐渐趋于平缓,但谐波损耗随谐波电流畸变率的增大而增大。谐波电流畸变越严重,相应的谐波损耗也就越大。

3 温度场仿真

干式变压器运行时,内部损耗产生的热量,其中一部分使变压器自身的温度升高,另一部分通过热传导、热对流和热辐射 3 种散热方式散发到被冷却空气包围的外表面。由于干式变压器内部谐波的影响,使干式变压器内部的漏磁场分布不均匀,导致其内部局部过热,加速了干式变压器绝缘老化,严重时还有可能发生绝缘击穿现象,造成设备损坏。

3.1 材料物性参数

在进行温度场仿真前,也需设置材料的物性参数,各种材料的物性参数见表 2。

空气的物性参数随温度值 T 的变化而变化,拟合公式见表 3。

表 2 材料物性参数

材料名称	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比热容/ ($\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{k})^{-1}$)	导热系数/ ($\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{k})^{-1}$)
硅钢	7 650	460	45
铜	8 900	390	385
绝缘纸	980	1 400	3.34×10^{-2}

表 3 空气物性参数及拟合公式

物性参数	拟合公式
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$\rho=1.263\exp(-0.003(T-273))$
动力粘度/($\text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{k})^{-1}$)	$\begin{aligned} \nu &= 1.755\exp(-5) + \\ &4.1(T-273)\exp(-8) \end{aligned}$
导热系数/($\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{k})^{-1}$)	$\lambda=0.0237-7(T-273)\exp(-5)$
比热容/($\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$)	$C_p=1.011+1.103(T-273)$

3.2 基波条件下的温度场仿真

干式变压器在运行时主要通过自然对流进行散热。本文采用 Fluent 软件对基波条件下干式变压器的温度场进行仿真分析,整体温度场分布如图 12 所示。

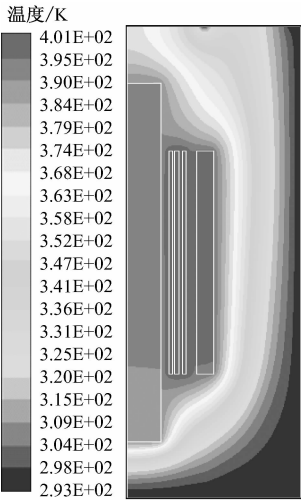


图 12 温度场分布

由图 12 可知,干式变压器上端部的散热效果比下端部差,导致上端部的温度比下端部高。干式变压器的最热点温度位于低压绕组处。

根据仿真结果得到干式变压器的铁芯、低压绕组和高压绕组的温度分布曲线,如图 13 所示。

干式变压器的最热点温度位置是其内部最容易发生局部过热故障的区域,此处绝缘的好坏将直接影响整个干式变压器的正常运行。因此,在进行干式变压器结构设计时应加强此处的绝缘性能。同时,在设计干式变压器温度监测系统时,可以在此处安

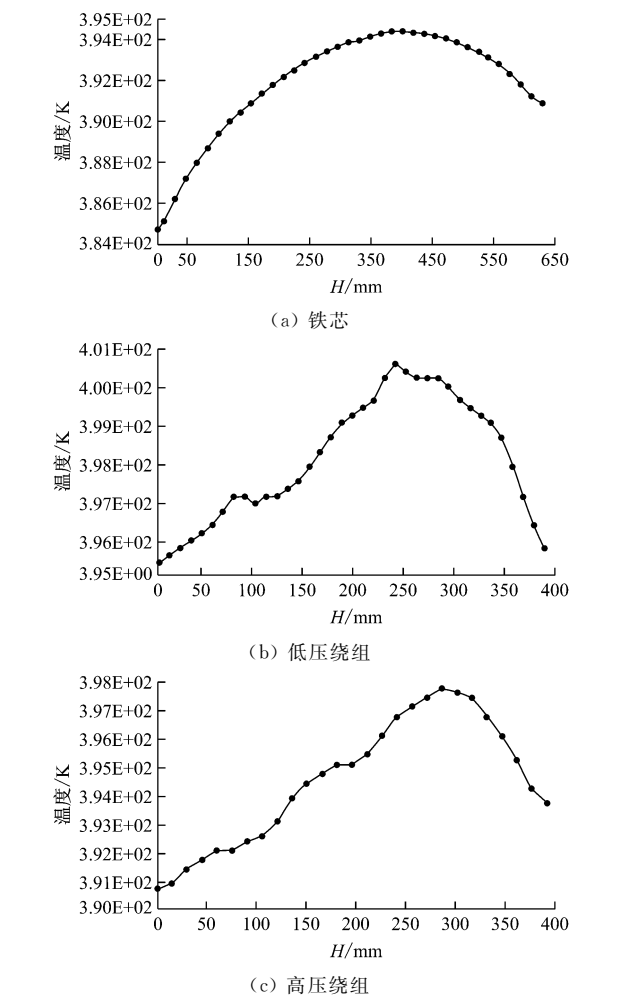


图 13 干式变压器温度分布曲线

装温度传感器以监测该点的温度值,预防局部过热故障。

3.3 谐波条件下干式变压器温升分析

将由 Ansoft 计算得到的各次谐波损耗导入 Fluent 中进行分析,得到其温升与谐波次数、谐波电流畸变率的关系,结果见表 4 和表 5。

表 4 不同谐波次数下的干式变压器温升值			
谐波次数	温升/℃	谐波次数	温升/℃
3	1.93	23	5.08
5	2.46	25	5.17
7	2.99	29	5.25
11	4.53	31	5.32
13	4.72	35	5.37
17	4.86	37	5.41
19	4.98	41	5.43

谐波会在干式变压器内部产生谐波损耗,而谐波损耗转化的热量又会使干式变压器内部温度场的温度升高,温升增大,且随着谐波次数的增加而增

表 5 不同谐波电流畸变率下的干式变压器温升值			
谐波电流畸变率/%	温升/℃	谐波电流畸变率/%	温升/℃
1.73	0.11	13.56	0.69
3.50	0.18	17.87	1.23
5.77	0.27	25.67	2.46
9.76	0.42		

大,并逐渐趋于平缓。干式变压器的温升与谐波次数的关系曲线如图 14 所示。

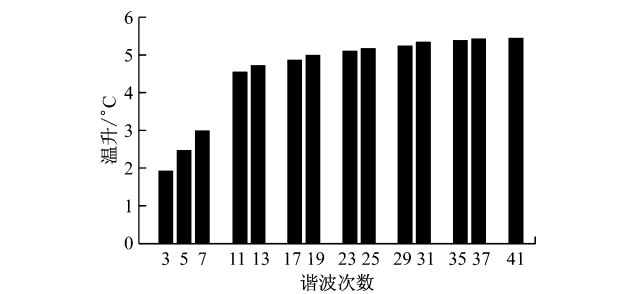


图 14 干式变压器温升随谐波次数的变化

由表 5 可知,干式变压器温升随谐波电流畸变率的增大而增大,畸变率越大,温升也就越大。电网电流波形畸变越严重,谐波对变压器造成的不利影响愈明显,尤其是在增加变压器的损耗、降低变压器的利用率和可靠性、减少使用寿命等方面。干式变压器温升值与畸变率的关系曲线如图 15 所示。

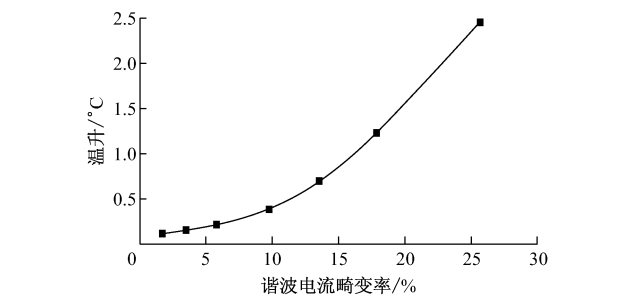


图 15 干式变压器温升值与谐波电流畸变率的关系曲线

谐波会在干式变压器内部产生谐波损耗,谐波损耗转化的热量会使干式变压器内部温度场的温度升高,且温升值随着谐波次数的增加而增加,并逐渐趋于平缓,谐波严重时还会导致绝缘老化、局部过热等现象,严重影响变压器的使用寿命和可靠性。因此,应安装必要的消谐装置以降低电网中的谐波含量,提高变压器的利用率,延长使用寿命。

4 结论

以矿用干式变压器为研究对象,建立了干式变压器损耗及温升与谐波的数学模型,并采用有限元方法对其漏磁场及温度场进行仿真计算,得到干式

变压器谐波损耗及温升与谐波次数、谐波电流含有率及谐波电流畸变率之间的关系,得到如下结论:

(1) 干式变压器轴向漏磁在高低压绕组间主通道处最大,且在绕组中部损耗最大;而径向漏磁在绕组中间和端部较大,且其损耗在绕组端部最大,应加强此处的绝缘。

(2) 干式变压器谐波铜损耗与谐波电流含有率和谐波电流次数有关。谐波电流含有率愈大,谐波铁损耗愈大,并与谐波电流含有率的平方成正比。当谐波电流含有率一定时,谐波铜损耗随谐波电流次数的增加而增大,并与谐波电流次数的平方近似成正比。

(3) 干式变压器谐波铁损耗与谐波电压含有率和谐波电压次数有关。谐波电压含有率愈大,谐波铁损耗愈大,并与谐波电压含有率的平方成正比。当谐波电压含有率一定时,谐波铁损耗随着谐波电压次数的增大而减小,并逐渐趋于平缓。

(4) 干式变压器内部的谐波损耗随谐波电流畸变率的增大而快速增大。

(5) 干式变压器谐波损耗产生的温升随着谐波次数的增加而增大,并逐渐趋于平缓,但随谐波电流畸变率的增大而快速增大。电流波形畸变越严重,谐波对变压器造成的不利影响愈明显,严重时还会导致绝缘老化、局部过热等现象,严重影响变压器的使用寿命和可靠性。

参考文献:

[1] TAHERI S, GHOLAMI A, FOFANA I, *et al.* Modeling and simulation of transformer loading capability and hot spot temperature under harmonic

conditions[J]. *Electric Power Systems Research*, 2012,86: 68-75.

[2] 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.

[3] KAIMORI H, KAMEARI A, FUJIWARA K. FEM computation of magnetic field and iron loss in laminated iron core using homogenization method[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2007, 43(4):1405-1408.

[4] 吴竞昌. 供电系统谐波[M]. 北京:中国电力出版社, 1998:136-137.

[5] 陈伟根,滕黎,刘军,等. 基于遗传优化支持向量机的变压器绕组热点温度预测模型[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(1):44-51.

[6] 石碧薇. 变压器在谐波条件下的损耗及热问题分析[D]. 保定:华北电力大学(河北),2014.

[7] 王振杰. 谐波对变压器的影响及应对措施的研究[D]. 保定:华北电力大学(河北),2014.

[8] 朱占新,谢德鑫,张艳丽. 大型电力变压器三维漏磁场与结构件损耗的时域分析[J]. *中国电机工程学报*,2012,32(9):156-160.

[9] 蔡国伟,孔令国,潘超,等. 基于频变特性的变压器谐波损耗分析[J]. *电网技术*,2011,35(11):120-124.

[10] TAKAHASHI N, SAKURA T, CHENG Z. Nonlinear analysis of eddy current and hysteresis losses of 3D stray field loss model [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*,2001,37(5):3672-3675.

[11] 陈世新,周克定. 变压器铁芯中三维各向异性非线性磁场分布和损耗分布的复标量磁位有限元法[J]. *中国电机工程学报*,1990,10(5):29-38.