

基于谐波电阻的变压器箔式绕组温升在线修正^{*}

弓子钧, 张 博, 董 婷

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘 要: 绕组热点温度是配电变压器在线监测的重要指标, 而现有的绕组温升在线计算方法未考虑箔式绕组结构产生的影响。通过配电变压器不同谐波下等效电阻比值对箔式绕组结构进行辨识, 然后对比线绕式和箔式两种绕组结构发热差异, 对一种通过绕组电阻变化计算绕组温升的算法进行了在线修正。该方法提供了一种通过谐波电阻比值预测箔式绕组热点温度的新思路。

关键词: 配电变压器; 在线监测; 热点温度; 绕组结构辨识; 谐波电阻

中图分类号: TM406 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)08-0018-08

doi: 10.12177/emca.2023.086

On-Line Correction for Temperature Rise of Foil Winding in Transformer Based on Harmonic Resistance^{*}

GONG Zijun, ZHANG Bo, DONG Ting

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: Hot-spot temperature of winding is an important indicator for on-line monitoring of distribution transformers. However, the existing on-line calculation methods for winding temperature rise do not consider the influence of foil winding structure. The structure of foil winding is identified by equivalent resistance ratio of distribution transformer under different harmonics, and comparing the heating difference between the wire winding structure and the foil winding structure, an algorithm for calculating the winding temperature rise through changes in winding resistance was online corrected. This method provides a new idea for predicting the hot-spot temperature of foil winding through the ratio of harmonic resistance.

Key words: distribution transformer; on-line monitoring; hot-spot temperature; winding structure identification; harmonic resistance

0 引 言

随着电网智能化的发展, 配电变压器在线监测变得越来越普及, 变压器的热点温度作为影响变压器运行安全与使用寿命的重要指标, 其在线监测显得尤为重要^[1]。

目前配电变压器在线监测主要依靠测量端口数据进行计算。对于热点温度的在线监测, 文献

[2]提出了一种通过变压器运行绕组电阻变化反推绕组温升的算法。即根据绕组电阻与温度变化成正比关系, 通过在线计算配电变压器绕组等效电阻变化, 间接计算出绕组的温升。此方法由电阻变化反推绕组温升, 不需要过于复杂的信息进行建模, 适用于配电变压器的场景。但是, 箔式绕组变压器在运行过程中存在趋肤效应, 绕组端部电流密度高, 导致绕组的端部过热^[3]。因此, 利用

收稿日期: 2023-03-20; 收到修改稿日期: 2023-04-17

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(52207064)

作者简介: 弓子钧(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为变压器状态监测

张 博(1987—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为变压器设计。(通信作者)

董 婷(1982—), 女, 教授, 博导, 研究方向为直线电机设计。

上述方法对箔式绕组配电变压器进行绕组温升在线监测并不能反映出箔式绕组的热点温度。配电变压器运行状态下的谐波含量较多,很多算法利用谐波进行在线监测。文献[4]通过谐波对变压器套管介损因数进行检测,文献[5]通过对配电变压器励磁涌流时的二次谐波分量衰减特性对涌流进行辨识。

文章通过配电变压器端口电压电流信息,利用绕组等效电阻在不同谐波下的变化率,对配电变压器箔式绕组结构进行辨识。结合箔式绕组有限元仿真分析给出温升修正系数,对文献[2]给出的温升在线监测方法进行修正。使其可以在线辨识出箔式绕组,并进行绕组热点温度修正。

1 配电变压器箔式绕组辨识基本原理

导体在交变电流中存在趋肤效应,电流密度在导体中的分布与导体结构及电流频率有关。线绕式绕组线径较小(一般为圆导线或扁线绕制),电流密度在绕组中分布较为均匀。箔式绕组由铜箔绕制,其轴向高度较高,电流密度主要分布在绕组端部。由于二者结构不同,箔式绕组在不同频率激励下的等效电阻值随频率变化趋势与线绕式绕组不同。

配电变压器工作在 50 Hz 频率的交变电流下,负载电流中常伴有三、五次谐波。箔式绕组结构在交变电流下存在趋肤效应导致绕组端部过热,应用文献[2]中算法在线监测绕组热点温度时会产生误差。本节通过谐波电阻变化率的差异,对箔式绕组结构进行辨识。

由于变压器在运行的场景下频率较低,所以可对麦克斯韦方程组作简化:

$$\begin{cases} \nabla \times H = \sigma E \\ \nabla \cdot B = 0 \\ \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \cdot D = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: H 为磁场强度; B 为磁感应强度; E 为电场强度; σ 为绕组电导率; D 为位移电流。

对式(1)进行整理,结果如下:

$$\nabla^2 E = \mu \sigma \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2)$$

式中: μ 为磁导率。

在圆导线绕制的线绕式绕组中,导体截面为圆形,文献[6]中推导了导体中的电流密度随导体位置变化的方程,对于线绕式绕组来说,其电流密度随导体位置变化的方程如下:

$$\begin{cases} J(r) = J_0 e^{\frac{r-r_0}{\delta}} \\ \delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: r 为导线截面上点距中心距离; r_0 为绕组半径; δ 为趋肤深度; ω 为角频率; J_0 为电密边界值。

对于线绕式绕组其等效谐波电阻如下:

$$\begin{cases} P = \int_0^{r_0} \rho J(r)^2 2\pi r dr \\ I = \int_0^{r_0} J_0 e^{\frac{r-r_0}{\delta}} 2\pi r dr \\ R_n = \frac{P}{I^2} \end{cases} \quad (4)$$

式中: P 为绕组消耗功率; I 为绕组电流; ρ 为绕组电阻率; R_n 为绕组等效谐波电阻。

可见其谐波电阻变化率会受到线径的影响。在变压器的设计中,当所需导线截面积小于 10 mm^2 时,从工艺上考虑应选用圆导线。其中,圆导线的直径不宜超过 3.75 mm ,当单根导线截面积大于 10 mm^2 时要选用扁线。

绕组趋肤效应随着绕组截面积的增大而增大^[6]。定义绕组在不同频率激励下的等效电阻与 50 Hz 下等效电阻值的比值为绕组的谐波电阻比值,求其上限值。根据上述设计规范,圆导线半径的变化范围为 $0 \sim 2 \text{ mm}$,施加 $50 \sim 300 \text{ Hz}$ 频率的激励,观测电阻变化率随导线半径 r 的变化,其结果如图 1 所示。

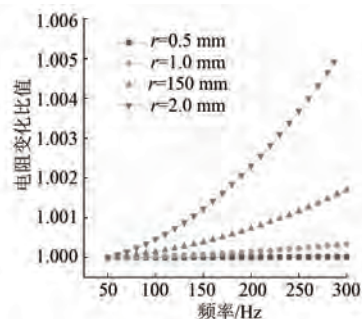


图 1 圆导线绕组谐波电阻比值随半径变化

从图 1 中可以看出圆导线在半径 $0 \sim 2 \text{ mm}$,

随着导体线径增大,频率升高,绕组谐波电阻比值总体变化较小近似为 1。

对于扁线来说,其最大宽度不超过 14 mm,宽厚比一般取 3。所以取扁线宽为 14 mm,厚度 4.33 mm,对其谐波电阻变化率进行仿真,其结果如图 2 所示。

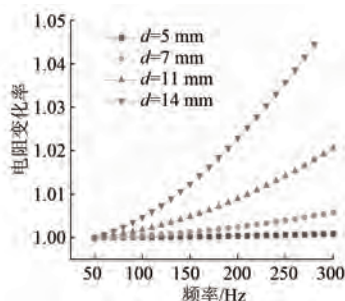


图2 扁线绕组谐波电阻比值随宽度变化

由图 2 可知,对于扁线绕组来说,其谐波电阻比值随其宽度增加而增大。对于箔式绕组来说,其截面近似为矩形。以下分别推导其等效电阻随频率、铜箔宽度、厚度变化的函数式:

$$\begin{cases} P = \int_0^d \rho J(x)^2 w dx \\ I = \int_0^d J_0 e^{\frac{x-d}{\delta}} w dx \\ R_n = \frac{P}{I^2} \end{cases} \quad (5)$$

式中: d 为箔式绕组宽度; w 为箔式绕组厚度。

可以看出箔式绕组的谐波电阻随宽度 d 与厚度 w 变化,在 MAXWELL 中建立 10 层箔式绕组模型,设每层厚度为 w 。仿真结果如图 3 所示。

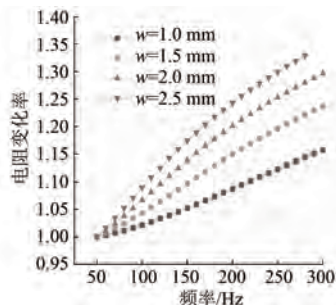


图3 箔式绕组谐波电阻比值随厚度变化

由图 3 可知,箔式绕组在宽度一定的情况下,随着铜箔厚度变大,其谐波电阻变化比值变大,且在三次谐波下其谐波电阻比值均大于 1.05。

由上述分析可以得出,一般情况下箔式绕组的三谐波电阻与基波电阻的比值多在 1.1 以上,而线绕式绕组的比值则在 1~1.05 之间,可见谐波次数越高其比值相差越明显。

对于变压器绕组电阻的在线计算方法已有多篇文献给出。文献[7]给出了利用三次谐波计算短路电阻的方法,文献[8]给出了基于 Tikhonov 正则化方法计算短路电阻的方法。利用负载电流不同频次分量计算得出谐波电阻比值可对配电变压器的箔式绕组结构进行辨识。且随着谐波频次增高,线绕式与箔式绕组的谐波电阻比值相差越大越易区分^[9]。因此,当台区内高频谐波较多时,可以利用更高频次的谐波电阻值来进行比较,使辨识结果更加准确。

2 配电变压器箔式绕组热点温升修正方法

文献[2]中提出的温升计算方法如下所示:

$$\Delta T = \frac{R_k - R_s}{R_s} (K + T_1) - (T_2 - T_1) \quad (6)$$

式中: ΔT 为绕组温升; R_s 为参考温度 T_1 下的等效电阻; R_k 为运行一段时间后的 T_2 环境温度下的等效电阻,对于铜绕组 $K=235$ °C。

但由于箔式绕组存在端部过热情况^[10],式(6)不能反映出箔式绕组的热点温升。本节通过有限元仿真分析箔式绕组的温升规律并给出箔式绕组热点温升修正系数,对式(6)作出修正。

为分析在不同负载程度下箔式绕组与线绕式绕组的温升差异,在 MAXWELL 软件中建立了箔式绕组与线绕式绕组的低压绕组等效模型。箔式绕组由于一般为多层绕制,所以建立 10 层的箔式绕组模型,线绕式绕组由于其电密均匀,所以简化为矩形绕组进行计算,其模型如图 4 所示。

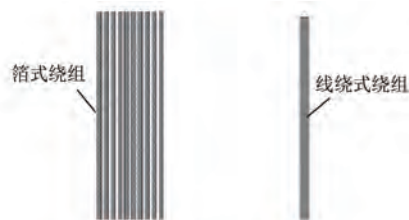


图4 箔式绕组与线绕式绕组等效模型

参考一台 SCB10-1000 箔式绕组变压器^[11],

分别设定 0.86、1.36、1.86 A/mm² 的激励进行温度场仿真。电流密度分布如图 5 所示。

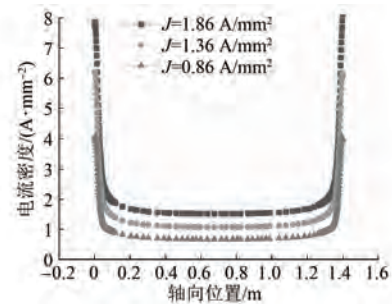


图 5 槽式绕组轴向电流密度分布

由图 5 可知,导体的电流密度端部变化最为明显。沿导体两端 1、2、4、8、16、32 mm 处分别取为 P1 至 P5 段、余下部分近似为发热均匀的 P6 段。每段热流密度结果如表 1、表 2 所示。

表 1 槽式绕组不同负载下热流密度			
电流密度/ (A·mm ⁻²)	位置	损耗/W	热流密度/ (W·m ⁻³)
0.86	P1	42.911 47	911 071
	P2	34.495 75	366 196
	P3	13.102 92	69 548
	P4	14.191 78	37 663
	P5	23.488 89	31 168
	P6	104.614 6	30 848
1.36	P1	101.101	2 146 518
	P2	81.783	868 189
	P3	31.963	169 659
	P4	35.489	94 186
	P5	59.344	78 747
	P6	265.936	78 419
1.86	P1	163.285	3 466 780
	P2	134.456	1 427 350
	P3	55.995	297 214
	P4	65.764	174 534
	P5	113.237	150 261
	P6	519.041	153 055

表 2 线绕式绕组不同负载下热流密度		
电流密度/(A·mm ⁻²)	损耗/W	热流密度/(W·m ⁻³)
0.86	26.778	4.06×10 ⁴
1.36	66.968	1.02×10 ⁵
1.86	125.261	1.90×10 ⁵

将表 1 和表 2 的结果施加在绕组上进行温度场仿真,轴向温升对比如图 6~图 8 所示。

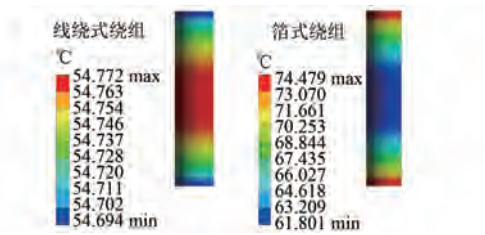


图 6 电密 $J=0.86$ A/mm² 时绕组温升对比

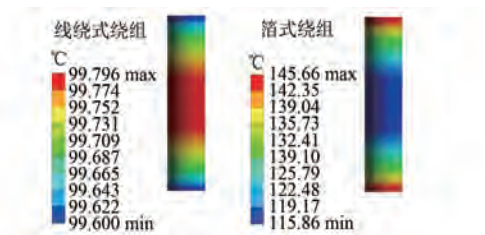


图 7 电密 $J=1.36$ A/mm² 时绕组温升对比

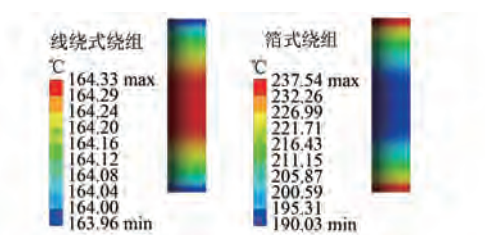


图 8 电密 $J=1.86$ A/mm² 时绕组温升对比

由图 6~图 8 可知,线绕式绕组由于其电流密度分布均匀。所以轴向温升不大。而槽式绕组由于其电流密度主要集中在绕组的端部,所以端部温升与中心处温升差异较大,见表 3。

表 3 槽式绕组不同负载下温升比			
电流密度/(A·mm ⁻²)	最大温度/℃	均温/℃	温升比
0.86	74.48	66.38	1.182
1.36	145.76	126.63	1.183
1.86	237.54	207.15	1.160

结合图 3、表 3 可以看出,槽式绕组端部温升与平均温升之比约为绕组的三次谐波电阻比值。定义谐波电阻较基波电阻的增长率为 k 。在计算绕组的三次谐波电阻比值后,可以根据 k 的数值来对 ΔT 进行修正。修正公式如下。

$$\Delta T_{\max} = (1 + \alpha k) \Delta T = (1 + \alpha k) \left[\frac{R_k - R_s}{R_s} (K + T_1) - (T_2 - T_1) \right] \quad (7)$$

式中: $\Delta T_{\max}$ 为修正后的热点温升; k 为绕组的三次谐波电阻系数; α 为变压器的散热系数, 其具体值应根据台区内的变压器散热方式等参数拟合确定^[12-14]。

在线监测时通过对箔式绕组结构作出辨识并应用式(7), 可以对箔式绕组热点温升进行修正。

在 MAXWELL 中建立单层箔式绕组 2D 模型并施加激励, 在 WORKBENCH 中进行磁-热双向耦合仿真。通过 THERMAL 组件读出变压器绕组的热点温升作为实际值, 在 MAXWELL 中计算绕组的谐波电阻比值 k 及温升后的电阻值, 代入公式进行计算并与实际值作比较。这里忽略变压器换热方式的影响, α 取 1。并假设变压器运行前后环境温度 22 ℃ 不变, 仿真结果如图 9 所示。绕组在不同负载下的阻值如表 4 所示。

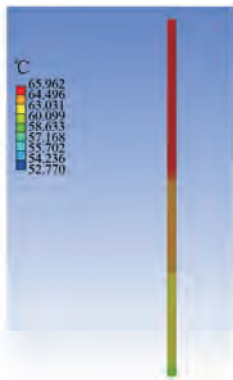


图 9 箔式绕组温升

表 4 箔式绕组不同负载下阻值		Ω
状态	等效阻值	
空载常温 50 Hz 阻值	7.786 9	
空载常温 150 Hz 阻值	9.067 0	
负载温升后 50 Hz 阻值	8.926 5	

通过电阻计算温度后误差如表 5 所示。由表 5 可知, 在修正后, 箔式绕组的热点温升误差得到了减小。但是, 多数配电变压器绕组通过变压器油进行自流换热, 温度自下而上升高。实际的热点温度还受到了散热方式、变压器容量等影响^[15-17]。因此, 本文所提修正目的是针对由变压器绕组的集肤效应所产生的端部过热, 在实际应用中应通过台区内变压器的散热种类型号等加以适当的系数 α 来进行计算。

表 5 算法修正前后误差对比

方法	计算温度/℃	实际温度/℃	误差/%
原方法	59.611	65.962	9.6
修正后	65.793	65.962	0.2

3 箔式绕组厚度、层数、高度对温升修正效果的影响

配电变压器中箔式绕组的结构各不相同。本节分别对不同厚度、层数、高度的绕组进行建模和热仿真, 分析温升修正公式对不同结构箔式绕组的适用性。

箔式绕组厚度薄、层数多、轴向高度高。取绕组高度 1 400 mm, 铜箔厚度 1.5 mm, 低压箔式绕组 10 层, 计算各段损耗:

$$P = \frac{1}{2\sigma} \int_V J \cdot J dV \tag{8}$$

在三维场中进行建模, 并算出各段的热流密度代入温度场观测其温升差异。

3.1 绕组厚度变化

取不同厚度的铜箔进行仿真。分别取 0.5、1.5、2.5 mm 三种厚度, 施加 50~300 Hz 的激励。并计算绕组在 150 Hz 之下的电阻与 50 Hz 下电阻的比值, 如图 10 所示。分别求 P1~P6 段的热流密度如表 6 所示。

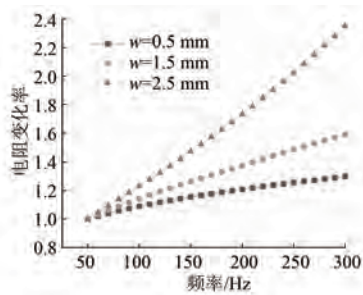


图 10 箔式绕组谐波电阻比值随厚度变化

通过温度场设置, 使三种绕组的平均温升相同。其端部温升与平均温升的比值如图 11 所示。

可见随着箔式绕组厚度提升, 其轴向温差依次增大。以基准温度 22 ℃ 计算, 其热点温升分别为平均温升的 1.14、1.19、1.24 倍。

3.2 绕组层数变化

下面分别建立 1 层、5 层、10 层箔式绕组模型, 施加 50~300 Hz 激励。其谐波电阻比值如图

12 所示。

表 6 箔式绕组不同厚度热流密度分布

厚度/mm	位置	损耗/W	热流密度/(W·m ⁻³)
0.5	P1	6.72	428 363.6
	P2	9.86	314 192.6
	P3	7.58	120 781.9
	P4	5.30	42 237.25
	P5	7.82	31 155.57
	P6	33.97	30 053.99
1.5	P1	42.91	911 071.5
	P2	34.49	366 196.9
	P3	13.10	69 548.4
	P4	14.19	37 663.95
	P5	23.48	31 168.91
	P6	104.6	30 848.84
2.5	P1	96.30	1 226 811
	P2	54.65	348 149.8
	P3	17.74	56 506.8
	P4	23.26	37 050.73
	P5	39.03	31 078.1
	P6	176.52	31 232.25

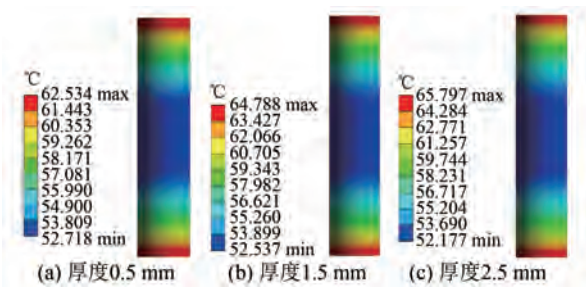


图 11 箔式绕组不同厚度绕组温升对比

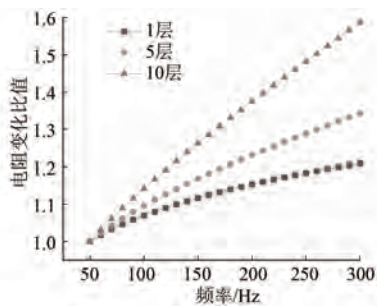


图 12 箔式绕组谐波电阻比值随层数变化

通过 MAXWELL 场计算器计算 P1~P6 段热

流密度,热流密度分布如表 7 所示。温度场仿真结果如图 13 所示。

表 7 箔式绕组不同层数热流密度分布

绕组层数	位置	损耗/W	热流密度/(W·m ⁻³)
1	P1	0.48	196 659.5
	P2	0.96	187 194.3
	P3	1.59	135 587
	P4	1.91	67 572.5
	P5	1.88	33 774.1
	P6	6.23	28 528.1
5	P1	6.87	591 231.2
	P2	9.76	345 005.4
	P3	7.34	97 961.8
	P4	5.34	39 681.6
	P5	7.89	31 308.8
	P6	34.09	30 287.9
10	P1	22.13	911 071.5
	P2	23.03	366 196.9
	P3	10.85	69 548.4
	P4	9.54	37 663.9
	P5	15.55	31 168.9
	P6	68.33	30 848.8

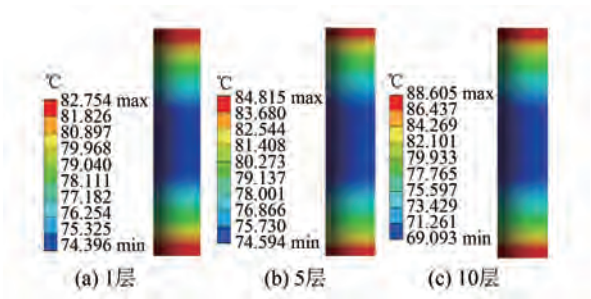


图 13 箔式绕组不同层数绕组温升对比

可见随着绕组层数增加,其轴向热点温升为平均温升的 1.07、1.11、1.17 倍。

3.3 绕组高度变化

绕组厚度取 1.5 mm,分别取绕组高度 950、1 175、1 400 mm 进行仿真。在电流密度、散热条件相同前提下,计算谐波电阻系数、热流密度并代入温度场中进行温升对比。箔式绕组谐波电阻比值变化如图 14 所示,热流密度分布如表 8 所示,温度场仿真结果如图 15 所示。

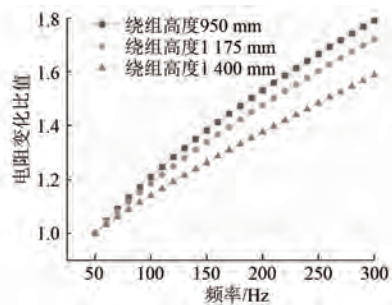


图 14 箔式绕组谐波电阻比值随高度变化

表 8 箔式绕组不同高度热流密度分布

绕组高度/mm	位置	损耗/W	热流密度/(W·m ⁻³)
950	P1	41.04	1 283 972
	P2	47.94	749 940.5
	P3	20.87	163 269.8
	P4	10.75	42 055.99
	P5	13.45	26 294.18
	P6	49.73	21 611.51
1 175	P1	47.21	1 194 390
	P2	45.42	574 540.6
	P3	16.69	105 550.5
	P4	12.55	39 674.11
	P5	18.04	28 528.56
	P6	72.94	25 627.12
1 400	P1	42.91	911 071.5
	P2	34.49	366 196.9
	P3	13.10	69 548.4
	P4	14.19	37 663.95
	P5	23.48	31 168.91
	P6	104.61	30 848.84

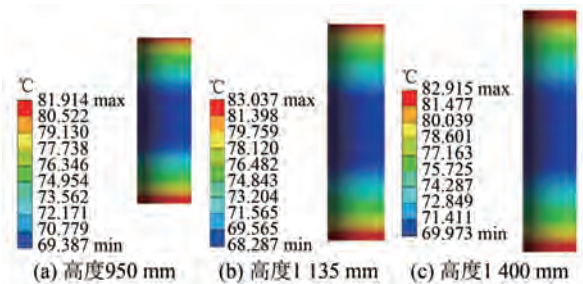


图 15 箔式绕组不同高度温升对比

由图 15 可知,其端部温升与平均温升的比值分别为 1.14、1.16、1.15。由于箔式绕组电流密度主要集中在端部,中心部位电流密度较低。所以

高度的差异对其发热特性影响小,温升比值随着绕组高度变化不明显。

3.4 小结

在上述仿真中,箔式绕组在厚度增大、层数增多时,谐波电阻变化率增大,其端部温升比值也更大。当箔式绕组的高度不同时,其温升比值变化不明显。

将上述仿真中通过三次谐波计算的谐波电阻比值与温升比值用最小二乘法拟合可以得到其规律,如图 16 所示。

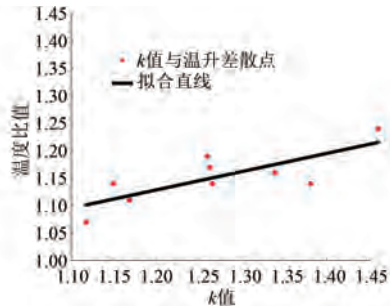


图 16 谐波电阻比值与温升比关系

由图 16 可知,箔式绕组的谐波电阻比值和绕组热点温升比值(热点温度比上平均温度)在一定范围内近似呈正比例关系。证明了文章所给出的修正式(7)对不同类型箔式绕组具有适用性。

4 结 语

文章通过绕组的谐波电阻比值对箔式绕组结构进行辨识。通过有限元的仿真分析,基于文献[2]中给出的温升计算方法,给出了针对箔式绕组热点温度的修正式。最后通过不同箔式绕组的谐波电阻系数与热点温度的关系验证了修正式对不同箔式绕组热点温度修正的有效性。

另外箔式绕组的热点温度与变压器的散热方式、容量同样有关,文章并未考虑变压器的散热方式等对其绕组温升的影响。

【参考文献】

[1] 全国变压器标准化技术委员会. 电力变压器 第 7 部分: 油浸式电力变压器负载导则:GB/T 1094.7—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
[2] 崔聪. 基于损耗功率比较的配电变压器在线检测技术研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2021.
[3] 廖才波, 阮江军, 蔚超, 等. 变压器热点温度研究

- 方法综述[J]. 高压电器, 2018, 54(7): 79.
- [4] 吕刚, 吕金壮, 谭劲, 等. 基于谐波分析的变压器套管介损因数检测[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(3): 27.
- [5] 黄大卓, 严柏平, 沈春城, 等. 基于二次谐波分量衰减特性的变压器励磁涌流识别方法[J]. 变压器, 2023, 60(1): 28.
- [6] 王超. 谐波对导体电阻的影响及实验研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2017.
- [7] 汪清, 薛文端, 高敏, 等. 基于3次谐波的配电变压器阻抗在线监测方法研究[J]. 变压器, 2020, 57(9): 55.
- [8] 詹花茂, 刘春江, 吴国鑫. 基于Tikhonov正则化方法的变压器在线监测研究[J]. 变压器, 2021, 58(3): 62.
- [9] 夏越婷, 郑志曜, 尹忠东, 等. 基于谐波模型的变压器绕组材质辨别方法与实验验证[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2023, 50(1): 67.
- [10] 周卫华, 万代, 江红成, 等. 谐波电流下油浸式配电变压器负载损耗及绕组热点温度分析[J]. 高压电器, 2018, 54(9): 135.
- [11] 赵博文, 营乐峰, 井永腾, 等. 干式变压器箔式绕组损耗及温升数值计算与分析[J]. 变压器, 2020, 57(2): 1.
- [12] 刘斌, 张喜乐, 王浩名, 等. 不同负载条件下换流变压器绕组温升的计算与分析[J]. 变压器, 2020, 57(5): 1.
- [13] 李静, 申志永. 变压器绕组热点温度在线监测[J]. 河北联合大学学报(自然科学版), 2016, 38(2): 14.
- [14] 禚冠星, 张健飞. 高过载配电变压器设计要点及其经济性能分析[J]. 机电工程技术, 2021, 50(12): 246.
- [15] ZHANG Y, CAO Y, HE D, et al. A two-stage overload strategy of oil-immersed transformers considering operation risk[C]//2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2017.
- [16] LI C L, WANG Z X, FAN L X, et al. Research on the relationship between hot spot transient temperature rise and ambient temperature of oil-immersed transformer [C] // 2018 IEEE 4th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC), 2018.
- [17] 王鹏, 陈广柱, 付宝鑫, 等. 液浸式电力变压器绕组温升计算的简化方法[J]. 电气传动, 2017, 47(1): 63.

[主要栏目]

- | | | |
|--------------|-----------|-------------|
| · 控制与应用技术 | · 研究与设计 | · 故障诊断与保护 |
| · 新能源发电与局域电网 | · 新能源汽车技术 | · 发电机组及其控制 |
| · 测试技术与测控系统 | · 材料与工艺 | · 电机生产及质量管理 |
| · 电力电子变流器技术 | · 智能制造 | · 节能应用 |
| · 实用技术成果 | | |