

DOI: 10.7667/PSPC180264

# 考虑集肤效应和邻近效应的变压器绕组谐波 损耗计算及实验研究

尹忠东<sup>1</sup>, 魏文思<sup>1</sup>, 王萍<sup>2</sup>, 王斌<sup>2</sup>

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206;

2. 云南省电子信息产品检验院, 云南 昆明 650106)

**摘要:** 基于国内外现有变压器谐波模型发展情况及其适用范围的局限性, 以进一步精确量化变压器绕组谐波损耗为目的, 建立了绕组谐波损耗模型。该模型综合考虑谐波情况下集肤效应、邻近效应对绕组的影响, 基于电磁场原理分析绕组电阻参数畸变特性。进行了各次谐波电流下的绕组电阻测量实验, 将实验测量值、传统模型计算值与该模型计算值进行对比, 结果证明该模型提高了计算精度, 使得变压器绕组损耗计算更加精确。最后基于实验测量值, 建立了变压器绕组谐波电阻工程实用模型, 对工程计算具有一定的指导价值。

**关键词:** 变压器; 集肤效应; 邻近效应; 谐波损耗; 实验平台

## Calculation and experimental study on harmonic loss of transformer windings considering skin effect and proximity effect

YIN Zhongdong<sup>1</sup>, WEI Wensi<sup>1</sup>, WANG Ping<sup>2</sup>, WANG Bin<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China

Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Yunnan Electronic Information

Products Inspection Institute, Kunming 650106, China)

**Abstract:** Based on the development of existing transformer harmonic models at home and abroad and the limitations of their applicable scopes, a model of harmonic loss for windings is established for the purpose of accurately quantifying harmonic losses of transformer windings. This model comprehensively considers the influence of the skin effect and the proximity effect on the windings under harmonic conditions and analyzes the distortion characteristics of the winding resistance parameters based on the principle of electromagnetic field. The experiment for measuring winding resistance under each harmonic current is performed. Comparing with the experimental measurement values, the traditional model calculation values and the calculated values of the model, it is proved that the model improves the calculation accuracy and makes loss calculation of the transformer winding more accurate. Finally, based on the experimental measurements values, an engineering practical model of harmonic resistance of transformer winding is established, which has certain guiding value for engineering calculation.

This work is supported by Key Projects of National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0101900).

**Key words:** transformer; skin effect; proximity effect; harmonic loss; experimental platform

## 0 引言

随着非线性负荷的增加, 电网内谐波含量逐渐上升<sup>[1-3]</sup>, 使得电力系统的谐波问题日趋严重<sup>[4]</sup>, 由

谐波引起的各种故障和事故也不断发生, 谐波危害的严重性引起了人们的普遍关注<sup>[5-7]</sup>。变压器是电力系统中联系不同电压等级网络不可或缺的电气设备, 流经变压器的谐波不但会造成变压器绝缘的损坏, 还会导致变压器负载容量下降, 影响其安全稳定运行。由于变压器同时运行的总容量巨大, 有效

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2016YFB0101900)

使用时间较长,即使非常小的损耗,年耗电能也非常巨大。据统计,变压器的总损耗约占总发电量的8%,因此,深入研究变压器的谐波损耗,不仅对变压器经济运行、节能降耗有重要意义,还可为变压器优化设计提供理论和数据支持<sup>[8-11]</sup>。

我国对变压器的谐波损耗模型的研究较少,主要采用 IEEE 常规的变压器模型<sup>[12-15]</sup>。这些模型并没有对谐波环境下变压器绕组的电阻参数进行处理或者处理不够完善<sup>[16-17]</sup>,往往采用 $\sqrt{n}$ 倍的直流电阻来替代交流电阻的方法来计算。这种简化处理在进行只含有基波的电路计算时影响不大,但在谐波情况下,由于集肤效应和邻近效应的影响<sup>[18-19]</sup>,不同频率下变压器绕组的等效电阻比直流电阻要大很多,使得计算模型不精确。另外在变压器谐波损耗计算中易于实现且应用较为广泛的有改进参数法<sup>[20]</sup>。改进参数法中损耗的大小只与电流有关,计算较为简单,但不能很好地反映出电压与电流之间相角的变化,实践中可以作为一种快速估计的方法。

本文基于麦克斯韦方程组和坡印廷定理,考虑谐波电流下受集肤效应及邻近效应的绕组参数畸变特性,引入交流绕组系数,进而建立绕组损耗计算模型,对谐波损耗进行更精确的计算。并搭建实验平台,进行各次谐波电流背景下的变压器绕组电阻测量实验,观察谐波电阻随频率的变化规律,对比本文计算模型与已有研究用 $\sqrt{n}$ 倍的直流电阻来等效交流电阻的模型进行比较,可见本文谐波损耗计算模型更加精确;并根据实验数据拟合绕组各次谐波电阻,建立工程实用模型,说明其适用性,计算误差在允许范围之内,该模型对工程计算具有一定的指导价值。

## 1 谐波条件下的变压器绕组损耗的计算

### 1.1 常规变压器谐波损耗模型

目前,主流的电力系统仿真分析软件主要采用以下两种变压器谐波模型<sup>[21-22]</sup>。

#### 1) 常规变压器模型

电力系统分析综合程序 PSASP 和 IEEE 都采用常规变压器模型。该模型计算公式为

$$Z_h = \sqrt{h}R_1 + jhX_1 \quad (1)$$

式中: $h$ 为谐波次数; $R_1$ 为基波变压器的绕组电阻值; $X_1$ 为基波变压器的相应序电抗; $Z_h$ 为基波变压器的绕组阻抗值。

#### 2) CIGRE 变压器模型

变压器的等值电路如图1所示,其计算公式为

$$X_h = hX_1 \quad (2)$$

$$R_s = \frac{U_N^2}{S_N F_{RS}} \quad 90 \leq F_{RS} \leq 110 \quad (3)$$

$$R_p = \frac{F_{RP} U_N^2}{S_N} \quad 13 \leq F_{RP} \leq 30 \quad (4)$$

式中: $U_N$ 、 $S_N$ 分别为变压器的额定电压和额定容量; $F_{RS}$ 、 $F_{RP}$ 为 CIGRE 模型相关系数。

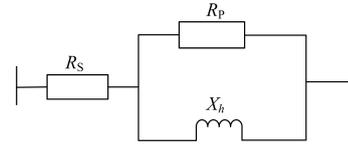


图1 变压器等值电路

Fig. 1 Equivalent circuit of transformer

### 1.2 改进参数法

IEEE/ANSI C57.110 标准<sup>[23-24]</sup>将变压器总负载损耗分为直流损耗、绕组涡流损耗和其他杂散损耗,通过分别计算3种损耗叠加得到额定情况下变压器总负载损耗值。

$$P_{LL-R} = I_R^2 R_{dc} + P_{EC-R} + P_{OSL-R} \quad (5)$$

式中: $P_{LL-R}$ 为总负载损耗; $I_R$ 为额定电流; $R_{dc}$ 为直流电阻; $P_{EC-R}$ 为绕组额定涡流损耗; $P_{OSL-R}$ 为额定其他杂散损耗。

变压器带有非线性负载时,需要考虑谐波对绕组涡流损耗和其他杂散损耗的影响,有如下定义。

$$F_{HL} = \frac{P_{EC}}{P_{EC-O}} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \quad (6)$$

$$F_{HL-STR} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^{0.8}}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \quad (7)$$

式中: $F_{HL}$ 为变压器绕组涡流损耗的谐波损耗因子; $F_{HL-STR}$ 为变压器绕组其他杂散损耗的谐波损耗因子; $P_{EC}$ 为绕组谐波涡流损耗; $P_{EC-O}$ 为测量电流和频率条件下绕组的涡流损耗; $h$ 为谐波次数; $h_{max}$ 为主要谐波的最高次数; $I_h$ 为含谐波情况下电流有效值; $I_1$ 为负荷基波电流有效值。

$F_{HL}$ 和 $F_{HL-STR}$ 未考虑模型参数的非线性频变特性,而是叠加计算各次谐波的对应损耗。利用 $F_{HL}$ 计算的变压器负载损耗则具有一定的经济性。

$$P_{LL-R} = I_R^2 R_{dc} + F_{HL} P_{EC-R} + F_{HL-STR} P_{OSL-R} \quad (8)$$

通常 $P_{EC-R}$ 和 $P_{OSL-R}$ 的求取要涉及运行状态下变压器的测试电阻,但在实际运行状态下通常无法满足试验条件。所以一般只取式(8)中的直流电阻的损耗。一般涡流损耗和杂散损耗大约为负载损耗的20%~30%。 $K$ 可取为1.25。

后人对其进行改进, 形成计算相对简单的改进参数法, 计算方法如式(9)<sup>[20-21]</sup>。

$$P = K \sum_{h=2}^n I_h^2 R_{dc} \quad (9)$$

对变压器绕组的直流电阻进行参数改进计算, 获得直流电阻与交流基波电阻和谐波次数之间的参数关系如式(10)。

$$R_{dc} = R_1 (c_0 + c_1 h^b + c_2 h^2) \quad (10)$$

式中:  $P$  为变压器谐波绕组损耗;  $I_h$  为绕组的各次谐波电流;  $R_{dc}$  为直流电阻;  $R_1$  为交流基波电阻;  $K$  可取为 1.25; 系数  $c_0$ 、 $c_1$ 、 $c_2$  和  $b$  的值可查表获得,  $c_0 + c_1 + c_2 = 1$  系数取值如表 1 所示。

表 1 改进直流电阻法中参数取值

Table 1 Improve the DC resistance method parameter values

类型	$c_0$	$c_1$	$c_2$	$b$
配电变压器	0.85~0.90	0.05~0.08	0.05~0.08	0.9~1.4
电力变压器	0.75~0.80	0.10~0.13	0.10~0.13	0.9~1.4

当变压器为三相变压器时, 上式可以改写为

$$P = 3K \sum_{h=2}^n I_h^2 R_1 (c_0 + c_1 h^b + c_2 h^2) \quad (11)$$

该方法具有准确度不高的特点, 尤其是在计算直流电阻时, 待定系数是在某一特定范围内选取, 增大了随机误差。

## 2 变压器绕组谐波损耗分析

变压器绕组通过交流电流时, 若需准确计算变压器的损耗, 以绕组一层的导线作为一个整体进行分析, 可以兼顾集肤效应和邻近效应。设变压器绕组半径方向为  $r$ , 轴线方向为  $z$ , 电流流通方向为  $\phi$ , 建立坐标系<sup>[25]</sup>, 如图 2 所示。如  $i_k$ 、 $i_\phi$ 、 $i_r$  分别为  $k$ 、 $\phi$ 、 $r$  方向的电流,  $\mathbf{H}_-$  和  $\mathbf{H}_+$  分别为平行于变压器绕组层内表面和外表面的磁场强度。假设绕组内部的圆导线中流过的电流为  $i$ , 绕组层的电场强度  $\mathbf{E}(\phi$  轴方向) 和磁场强度  $\mathbf{H}(z$  轴方向) 在柱坐标中满足如下关系。

$$-\frac{\partial \mathbf{H}_z}{\partial r} = \sigma \mathbf{E}_\phi \quad (12)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \mathbf{E}_\phi) = -j\omega \mu \mathbf{H}_z \quad (13)$$

式中:  $\mathbf{H}_z$  为  $z$  轴方向上的磁场强度;  $\mathbf{E}_\phi$  为  $\phi$  轴方向上的电场强度;  $r$  为绕组层的半径;  $\sigma$  为铜导体的电导率;  $\mu$  为铜导体的磁导率;  $\omega$  为角频率。

由于磁场强度和电场强度均为绕组上任意一点距绕组轴线距离为  $r$  的函数, 经整理贝塞尔函数方程得到

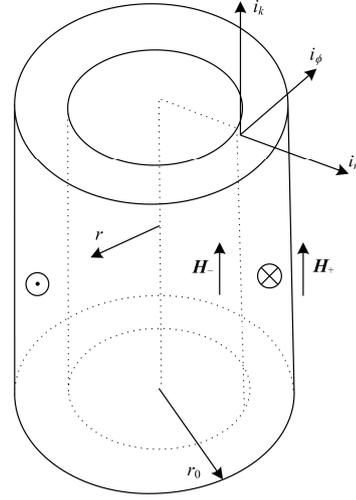


图 2 空心圆柱导体

Fig. 2 Hollow cylindrical conductor

$$\mathbf{H}(r) = c_1 \mathbf{J}_0(mr) + c_2 \mathbf{K}_0(mr) \quad (14)$$

$$\mathbf{E}(r) = -m/\gamma \times [c_1 \mathbf{J}_1(mr) - c_2 \mathbf{K}_1(mr)] \quad (15)$$

式中:  $\mathbf{J}_0$ 、 $\mathbf{J}_1$  为第一类贝塞尔函数;  $\mathbf{K}_0$ 、 $\mathbf{K}_1$  为第二类贝塞尔函数;  $m = \sqrt{j\omega\mu\gamma}$ ; 系数  $c_1$ 、 $c_2$  由边界条件决定。

基于坡印廷定理, 对某一层绕组而言, 由于电场强度  $\mathbf{E}$  和磁场强度  $\mathbf{H}$  正交, 单位时间内穿过单位面积的能量通量可以表示为  $\mathbf{E}(r) \times \mathbf{H}(r)$ , 从能量损耗的角度出发, 当交变电流流经变压器时, 变压器第  $n$  层绕组总的耗散功率为

$$P_n = \frac{N^2 I^2 m}{\gamma W} \left[ \frac{(2n^2 - 2n + 1) \coth(md_n)}{\sinh(md_n)} \left( \sqrt{1 + d_n/r_n} + \frac{1}{\sqrt{1 + d_n/r_n}} \right) \right] \quad (16)$$

式中:  $P_n$  为第  $n$  层绕组层的功率损耗;  $W$  为绕组宽度;  $N$  为每层绕组所包含的线圈匝数;  $I$  为流过绕组层的电流;  $d_n$  为第  $n$  层绕组厚度;  $r_n$  为第  $n$  层绕组与绕组轴线间的距离。

假设绕组每层的厚度为  $d$ , 利用泰勒展开式对式(16)进行化简, 可得到第  $n$  层绕组的损耗为

$$P_n = \text{Re} \left\{ \frac{N^2 I^2 m}{W \gamma} \left[ \frac{\coth(md) - 2(n^2 - n) \tanh(\frac{md}{2})}{2(n^2 - n) \tanh(\frac{md}{2})} \right] \right\} \quad (17)$$

假设绕组中通入的直流电流大小为  $I$ , 则第  $n$  层绕组单位长度的直流功率损耗为

$$P_{ndc} = I^2 R_{dc} = \frac{N^2 I^2}{\gamma W d} \quad (18)$$

式中:  $P_{ndc}$  为第  $n$  层绕组层的功率损耗;  $d$  为绕组每层的厚度;  $R_{dc}$  为绕组层的直流电阻。

当同一绕组分别通入有效值相等的  $h$  次谐波交流电流和直流电流时, 绕组的交流电阻与直流电阻的比值为交流电阻系数, 即

$$K_{th} = \frac{R_{ac}}{R_{dc}} \quad (19)$$

$$K_{th} = \operatorname{Re} \left\{ F_h (1+j) \left[ \frac{\coth(F_h (1+j)) + \frac{2(n^2-1)}{3} \tanh \frac{F_h}{2} (1+j)}{2} \right] \right\} \quad (20)$$

式中:  $F_h$  为绕组层厚度  $d$  与第  $h$  次谐波的集肤深度  $\delta$  之比,  $F_h = \frac{d}{\delta}$ ;  $n$  为绕组层数;  $\delta_h$  为第  $h$  次谐波的集肤深度。

将式(20)级数展开进行化简, 可得到第  $h$  次谐波下的交流电阻系数为

$$K_{th} = 1 + \frac{5n^2-1}{45} F_h^4 \quad (21)$$

则各次谐波引起的变压器绕组总损耗为

$$P_{cu} = I_{dc}^2 R_{dc} + R_{dc} \sum_{h=1}^{\infty} K_{th} I_h^2 \quad (22)$$

式中:  $P_{cu}$  为复合谐波电流背景下变压器的绕组总损耗;  $I_h$  为各次谐波电流;  $h$  为谐波次数;  $R_{dc}$  为绕组的直流电阻;  $I_{dc}$  为流过绕组的直流电流;  $K_{th}$  为交流电阻系数。

### 3 变压器绕组谐波电阻实验研究

#### 3.1 绕组谐波电阻测量试验

为了有效开展变压器的谐波损耗试验研究, 本文基于实验室的电能质量综合试验研究平台进行实验研究。该平台的电网模拟器可以模拟输出电压谐波, 本实验所用被测变压器为 SG-150/0.38 干式隔离变压器。实验平台如图 3 所示。

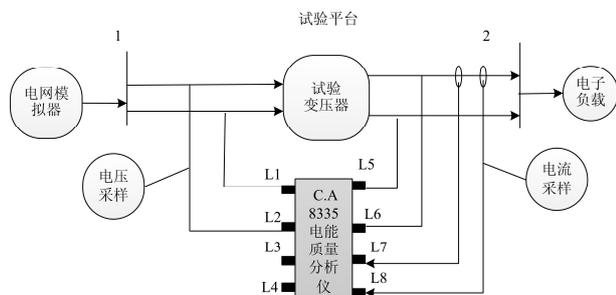


图 3 实验平台

Fig. 3 Experiment platform

短路试验时, 变压器一次侧接电网模拟器, 由电网模拟器发出各次谐波电压, 二次侧短接, 分别测量不同谐波次数、不同谐波电压大小情况下变压器铜损。为观察变压器谐波电阻随流过谐波电流频率的变化, 对变压器分别施加 1、3、5、7...49 次谐波电压, 测量流过变压器的电流有效值及变压器一次侧流过的有功功率, 计算变压器上的有功功率损耗, 进而计算其谐波电阻值。

为便于进行实验及尽可能地避免误差, 本实验采取了取流过变压器两端的有功功率除电流平方的形式计算谐波下的变压器绕组电阻。本文中的测量结果均为室温 20°C 时测量得到, 实验结果分别如表 2 所示。

表 2 绕组谐波电阻测量结果

Table 2 Winding harmonic resistance measurement results

频次 $n$	电压有效值/V	电流有效值/A	功率 $P$ /W	测量电阻/ $\Omega$
1	7.380	4.892	32.984	1.379
3	10.35	4.521	30.56	1.489
5	12.266	4.410	28.756	1.479
7	17.3	4.741	40.404	1.794
9	15.67	3, 86	33.44	2.311 5
11	14.014	3.944	42.61	2.739 3
13	9.150	4.305	62.021	3.346 5
15	13.46	4.25	72.7	4.025
17	11.632	4.974	124.05	5.014
19	13.270	5.406	169.01	5.796
21	13.262	4.352	131.65	6.958
23	14.50	4.560	169.78	8.165
25	15.052	4.962	232.18	9.43
27	14.79	4.05	173.54	10.58
29	14.712	4.044	189.52	11.845
31	17.652	4.713	314.2	14.145
33	20.345	4.832	351.741	15.065
35	23.044	4.935	408.907 4	16.79
37	18.780	4.166	323.334	18.63
39	18.5	4.0	314.824	19.676 5
41	16.938	3.375	233.821 1	20.527 5
43	22.878	4.183	398.417 8	22.77
45	23.502	3.994	391.112	24.518
47	24.051	3.904	410.316 4	26.921 5
49	24.444	3.886	443.184	29.348

图 4 为绕组谐波等效电阻与谐波次数的关系曲线。可以看出, 随着谐波次数的增加, 绕组的等效电阻值明显增加, 近似呈正相关的关系, 表明其电阻受到集肤效应和邻近效应的影响而渐渐增大。

表 3 是对实验测量值做了部分处理, 计算交流

电阻系数即各次谐波电阻值与直流电阻的比值, 并利用本文式(21)计算各次谐波的交流电阻系数, 并进行对比。

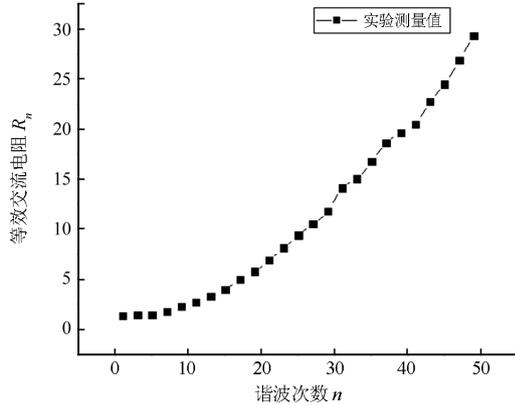


图 4 谐波等效电阻与频率的关系

Fig. 4 Relationship between harmonic equivalent resistance and frequency

表 3 实验值与理论计算交流电阻系数的比较

Table 3 Comparison of experimental and theoretical calculation of AC power factor

频次 $n$	测量 电阻/ $\Omega$	实验得交流 电阻系数	集肤 深度/mm	理论计算交流 电阻系数	$\sqrt{n}$
1	1.379	1.02	14.2	1.011	1
3	1.489	1.22	8.2	1.2	1.732 05
5	1.479	1.286	6.35	1.276	2.236 1
7	1.794	1.56	5.37	1.54	2.645 7
9	2.311 5	2.01	4.73	1.9	3
11	2.739 3	2.382	4.28	2.34	3.316 6
13	3.346 5	2.91	3.94	2.865	3.605 6
15	4.025	3.5	3.67	3.477 4	3.873
17	5.014	4.36	3.444	4.2	4.123
19	5.796	5.04	3.26	4.98	4.359
21	6.958	6.05	3.1	5.866 4	4.582 576
23	8.165	7.1	2.96	6.854 5	4.795 832
25	9.43	8.2	2.84	7.91	5
27	10.58	9.2	2.733	9.056	5.196 152
29	11.845	10.3	2.64	10.252	5.385 165
31	14.145	12.3	2.55	11.63	5.567 764
33	15.065	13.1	2.472	13.035	5.744 563
35	16.79	14.6	2.4	14.546	5.916 08
37	18.63	16.2	2.334	16.144	6.082 763
39	19.676 5	17.11	2.3	17.06	6.244 998
41	20.527 5	17.85	2.274	17.807	6.403 124
43	22.77	19.80	2.22	19.503	6.557 439
45	24.518	21.32	2.17	21.268	6.708 204
47	26.921 5	23.41	2.12	23.25	6.855 655
49	29.348	25.52	2.07	25.478	7

图 5 为实验测得交流电阻系数和本文提出的理论公式中交流电阻系数的对比曲线。随着流过变压器绕组的谐波电流次数的增大, 谐波电阻增大也更为明显, 本图反映出虽然在低频时本文理论公式表现不佳, 但是总体趋势还是比较符合事实的。而且在高频时, 也就是集肤效应和邻近效应越来越明显时, 本文提出的理论计算值也就更精确。

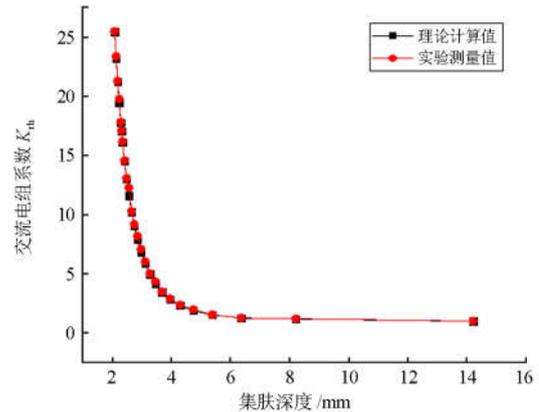


图 5 理论公式计算值与实验测量值的对比

Fig. 5 Comparison between the calculated value of the theoretical formula and the experimental measurement value

由于本实验采用的试品和理论值难免有所差异, 且计算公式未考虑占据小比例的杂散损耗, 加之实验设备精度等因素, 理论值和实验值之间仍存在一定的误差。但相对于传统计算方法, 本文所提的变压器绕组谐波损耗计算提高了精度。

图 6 为由理论公式计算的交流电阻系数与已有研究中应用的  $\sqrt{n}$  倍直流电阻来等效交流电阻的对比。由图 6 可以看出, 在谐波次数低于 20 次时, 变

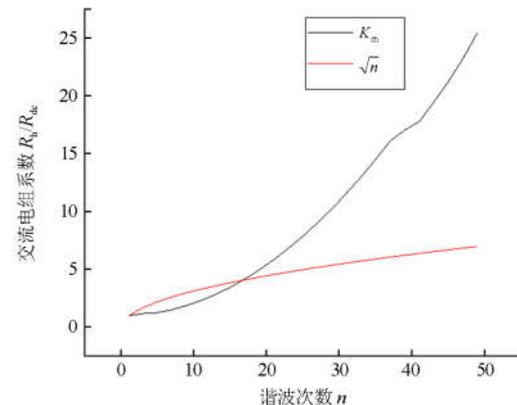


图 6 理论公式计算值与传统计算值的对比

Fig. 6 The calculated value of the theoretical formula is compared with the existing value

器绕组阻值受到集肤效应和邻近效应的影响不明显,阻值变化不大,两种方法相差不大;但是当谐波次数高于 20 次时,随着谐波频率的升高,绕组受到集肤效应和邻近效应的影响更为明显,谐波电阻显著增大。由图可以看出,在高频谐波时,理论计算模型的等效电阻系数比用  $\sqrt{n}$  倍直流电阻来等效交流电阻方法更为精确,更为合理。

图 7 是实验得到的数据中交流电阻系数  $K_{th}$  与集肤深度  $\delta$  的关系。

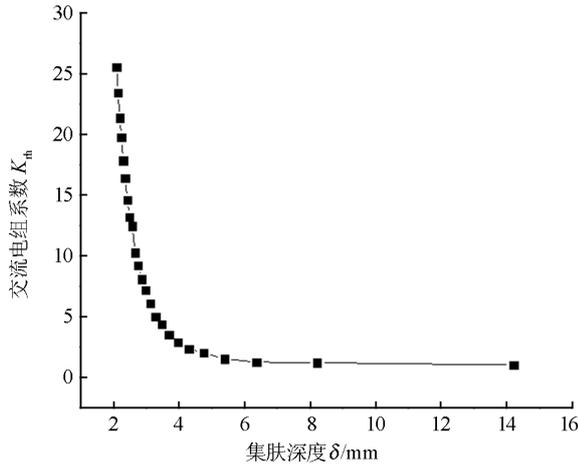


图 7 交流电阻系数  $K_{th}$  与集肤深度  $\delta$  的关系

Fig. 7 Relationship between AC resistivity  $K_{th}$  and skin depth  $\delta$

### 3.2 绕组谐波电阻工程实用模型

本文理论公式用谐波电阻与直流电阻的比值来等效电阻系数,利用实验数据来拟合谐波电阻。变压器绕组各次谐波下功率可以用式(23)来表示,引入交流电阻系数。

$$P_h = I_h^2 R_{dc} K_{th} \quad (23)$$

对于第一段数据的函数拟合,即当  $\delta < 4.28$  mm 时,根据系数  $K_{th}$  和集肤深度  $\delta$  之间近似呈指数函数的关系,所以我们取形如式(24)的指数函数拟合。

$$y = ax^b \quad (24)$$

应用 Matlab 中函数进行曲线分段拟合,求得拟合函数,拟合曲线如图 8 所示。

图 8 为实验谐波损耗等效电阻的交流电阻系数与集肤深度的第一段拟合曲线,横坐标为各次谐波下的集肤深度值,纵坐标为各次谐波的交流电阻系数,置信度为 95%,决定系数为 0.943 7。其中在图 8 的拟合中,系数  $a=341.4$ ,系数  $b=-3.579$ ,也就是

$$K_{th} = 341.4 \cdot \delta^{-3.579} \quad (25)$$

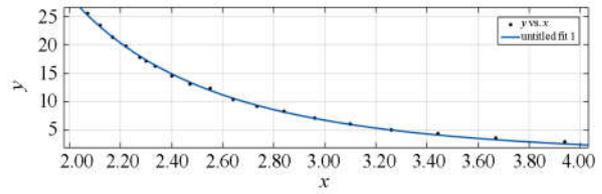


图 8 集肤深度和交流电阻系数的拟合

Fig. 8 Skin depth and AC resistivity curve fitting relationship

对于第二段数据的函数拟合,即当  $\delta > 4.28$  mm 时,根据交流电阻系数和集肤深度  $\delta$  之间近似呈指数函数的关系,拟合曲线如图 9 所示。

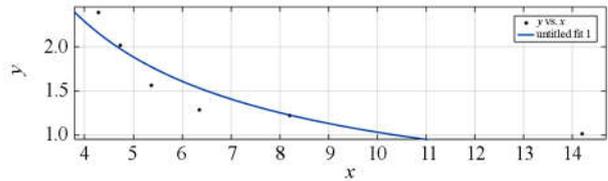


图 9 集肤深度和交流电阻系数的拟合

Fig. 9 Skin depth and AC resistivity curve fitting relationship

图 9 为实验谐波损耗等效电阻的交流电阻系数与集肤深度的第二段拟合曲线,系数  $a=7.529$ ,系数  $b=-0.8613$ ,也就是

$$K_{th} = 7.529 \cdot \delta^{-0.8613} \quad (26)$$

因此,利用拟合函数得到的各次谐波下变压器绕组的谐波损耗为

$$P_h = I_h^2 R_{dc} K_{th} = \begin{cases} I_h^2 R_{dc} \cdot 324.9 \cdot \delta^{-3.519}, & (\delta < 4.28 \text{ mm}) \\ I_h^2 R_{dc} \cdot 7.529 \cdot \delta^{-0.8613}, & (\delta > 4.28 \text{ mm}) \end{cases} \quad (27)$$

用另一组实验数据来验证上述拟合公式,实验数据如表 4 所示。

由图 10、图 11 可以看到,实验测量值和拟合函数计算值数值非常接近,拟合效果较好。由于实验测量的微小误差和实验仪器的精确度问题,所以实验值和拟合值有微小差异,但相差很小且拟合效果较好,所以本文推荐用式(27)作为工程实用模型,可以看到拟合函数决定系数很高,在频率较小时拟合不是非常精确,变压器绕组值受到谐波影响较小,理论计算值增长规律的数值和实验值比较接近。但是随着谐波电流频率的升高,绕组阻值受到集肤效应和组间邻近效应的影响而明显增大,但是当谐波次数高于 35 次时,拟合值与实验值差异逐渐增大,拟合值较不准确,所以拟合公式的工程实用模型适用于 35 次以下的绕组谐波损耗的计算。

表 4 绕组谐波电阻测量结果  
Table 4 Winding harmonic resistance measurement results

频次	电压有效值/V	电流有效值/A	功率 P/W	电阻/ $\Omega$	实验得交流 电阻系数	各次集肤深度/mm	拟合得交流 电阻系数
1	25.72	20.512	498.369 1	1.185	1.03	14.2	0.766 075
3	10.35	10.521	157.846	1.426	1.24	8.2	1.229 333
5	30.740	8.089	96.315 79	1.472	1.28	6.35	1.532 175
7	35.760	6.214	69.095 53	1.789	1.556	5.37	1.770 152
9	15.67	3.86	34.954 46	2.346	2.04	4.73	1.974 601
11	59.04	5.78	90.670 4	2.714	2.36	4.28	2.152 161
13	39.768	4.836	77.995 3	3.335	2.9	3.94	2.523 379
15	13.46	4.25	73.117	4.048	3.52	3.67	3.253 297
17	12.648	5.018	127.412	5.06	4.4	3.444	4.084 271
19	10.680	5.192	155.932	5.784	5.03	3.26	4.971 16
21	13.262	4.352	132.863	7.015	6.1	3.1	5.952 234
23	15.160	5.929	291.067	8.28	7.2	2.96	7.022 803
25	.372	4.62	199.314	9.338	8.12	2.84	8.143 989
27	14.79	4.05	174.48	10.64	9.25	2.733	9.343 945
29	15.672	4.212	210.14	11.85	10.3	2.64	10.576 53
31	17.668	4.42	280.84	14.38	12.5	2.55	11.974 47
33	18.345	4.832	355.77	15.23	13.25	2.472	13.382 68
35	20.668	3.784	241.23	16.85	14.65	2.4	14.876 04
37	16.052	3.178	191.06	18.92	16.45	2.334	16.437 3
39	19.54	4.01	318.99	19.84	17.25	2.304	17.323 66
41	25.512	4.129	350.95	20.58	17.9	2.274	18.043 07
43	30.892	4.394	439.182	22.75	19.78	2.22	19.663 74
45	24.5	3.783	352.2	24.61	21.4	2.17	21.334 09
47	28.051	3.904	411.893 9	27.03	23.5	2.12	23.190 36
49	25.5	3.388	337.928 3	29.44	25.6	2.07	25.258 39

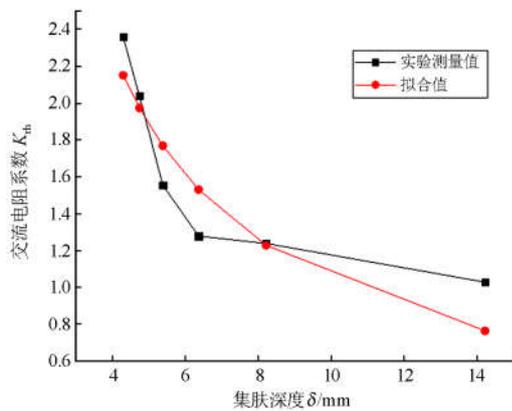


图 10 实验测量值与拟合函数计算值的比较( $\delta > 4.28$  mm)  
Fig. 10 Comparison of experimental measurement value and  
calculated value of fitting function ( $\delta > 4.28$  mm)

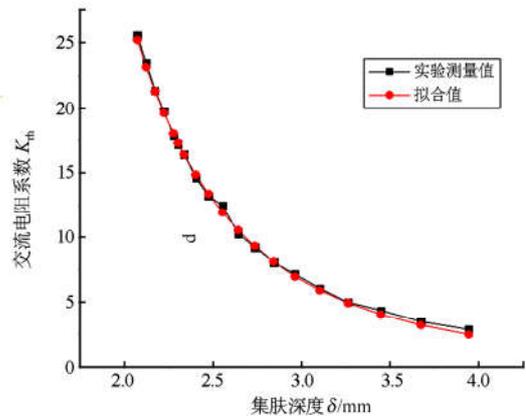


图 11 实验测量值与拟合函数计算值的比较 ( $\delta < 4.28$  mm)  
Fig. 11 Comparison of experimental measurement value and  
calculated value of fitting function ( $\delta < 4.28$  mm)

### 4 结语

基于电磁场理论, 考虑谐波电流背景下集肤效应及邻近效应对变压器绕组阻值的影响, 分析绕组参数畸变特性, 建立了绕组损耗计算模型, 进一步精确量化了绕组谐波损耗。搭建实验平台, 进行各次谐波电流背景下的变压器绕组电阻测量实验, 观察谐波电阻随频率的变化规律, 可见该谐波损耗理论计算模型更加精确。根据实验数据拟合绕组各次谐波电阻, 建立工程实用模型, 该模型对工程计算具有一定的指导价值。

### 参考文献

[1] 付克勤, 游文钧, 杨子康, 等. 电力系统谐波源及谐波检测方法研究[J]. 电测与仪表, 2014, 51(12): 81-86.  
FU Keqin, YOU Wenjun, YANG Zikang, et al. Harmonic sources and harmonic detection methods in power systems[J]. Electric Measurement & Instrumentation, 2014, 51(12): 81-86.

[2] 江友华, 常建, 唐忠. 含 DG 的配电网系统谐波分布特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 38-44.  
JIANG Youhua, CHANG Jian, TANG Zhong. Study on harmonic distribution characteristics of distribution network system with DG[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 38-44.

[3] 杨昆, 赵鹏程, 顾煜炯, 等. 给水泵变频改造扭振安全性分析[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 118-123.  
YANG Kun, ZHAO Pengcheng, GU Yujiong, et al. Safety analysis of torsional vibration of feed water pumps by frequency conversion[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 118-123.

[4] 曹松彦, 杨俊, 柯于进. 变压器油中含气量超标原因分析及对策[J]. 热力发电, 2018, 47(8): 138-142.  
CAO Songyan, YANG Jun, KE Yujin. Analysis and countermeasures of excessive gas content in transformer oil[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(8): 138-142.

[5] 吴健, 吴奎华, 冯亮, 等. 基于概率预测与谐波潮流的配电网谐波源识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 86-92.  
WU Jian, WU Kuihua, FENG Liang, et al. Distribution network harmonic source identification method based on probability prediction and harmonic current[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 86-92.

[6] 李传伟. 电力系统谐波产生原因及其抑制方法[J]. 电气开关, 2008(1): 56-59.  
LI Chuanwei. Causes of generation of harmonics in power systems and their suppression methods[J]. Electrical Switch, 2008(1): 56-59.

[7] 林建钦, 杜永宏. 电力系统谐波危害及防止对策[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(2): 28-31.  
LIN Jianqin, DU Yonghong. Harmonic harm and prevention countermeasures in power system[J]. Power System and Clean Energy, 2009, 25(2): 28-31.

[8] 王莉虹, 肖先勇, 张逸, 等. 非线性负荷谐波贡献畸变功率评估指标与方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 41-47.  
WANG Lihong, XIAO Xianyong, ZHANG Yi, et al. Distortion power evaluation index and method for nonlinear load harmonics contribution[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 41-47.

[9] 李健, 黄俊铭, 朱建全, 等. 基于过程状态特征化的配电网线损计算[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 55-61.  
LI Jian, HUANG Junming, ZHU Jianquan, et al. Line-loss calculation of distribution network based on characterization of process state[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 55-61.

[10] 梁洁, 张振洋, 袁梦, 等. 磁耦合无线电能传输系统前端功率放大器设计[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2017, 45(1): 120-124.  
LIANG Jie, ZHANG Zhenyang, YUAN Meng, et al. Design of front-end power amplifier for magnetically coupled radio energy transmission system[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science), 2017, 45(1): 120-124.

[11] 高洁. 变压器谐波损耗计算方法比较与仿真[J]. 通讯世界, 2016, 14(7): 133-134.  
GAO Jie. Comparison and simulation of transformer harmonic loss calculation methods[J]. Telecom World, 2016, 14(7): 133-134.

[12] WANG X, CHENG Z, LIN L, et al. Calculation and validation of iron loss in laminated core of power and distribution transformers[J]. Compel International Journal of Computations & Mathematics in Electrical, 2014, 33(1/2): 137-146.

[13] 刘海军, 李刚, 王志凯, 等. 面向中高压智能配电网的电力电子变压器建模方法与控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 85-93.  
LIU Haijun, LI Gang, WANG Zhikai, et al. Research on modeling methods and control strategies of power electronic transformers for middle and high voltage smart distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 85-93.

[14] 张占龙, 王科, 李德文, 等. 变压器谐波损耗计算及影响因素分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 68-72, 78.

- ZHANG Zhanlong, WANG Ke, LI Dewen, et al. Analysis of harmonic loss of transformers and influence factors analysis[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(4): 68-72, 78.
- [15] MAKRAM E F, THOMPSON R L. A new laboratory experiment for transformer modeling in the presence of harmonic distortion using a computer controlled harmonic generator[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(4): 1857-1863.
- [16] 刘书铭, 施红, 冯蕾. 考虑集肤效应与邻近效应的变压器谐波损耗模型[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(3): 133-139.
- LIU Shuming, SHI Hong, FENG Lei. A model of transformer harmonic loss considering skin effect and proximity effect[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(3): 133-139.
- [17] 丁阳之, 徐长宝, 李怀宇, 等. 考虑集肤效应的变压器谐波损耗计算[J]. 电器与能效管理技术, 2015(23): 63-68.
- DING Yangzhi, XU Changbao, LI Huaiyu, et al. Computing harmonic loss of transformer considering skin effect[J]. Electric and Energy Efficiency Technology, 2015(23): 63-68.
- [18] 石东平, 唐祖义, 陈武. 趋肤效应的理论研究与解析计算[J]. 重庆文理学院学报(自然科学版), 2009, 28(5): 18-21.
- SHI Dongping, TANG Zuyi, CHEN Wu. Theoretical study and analytic calculation of skin effect[J]. Journal of Chongqing University of Arts and Sciences (Natural Science Edition), 2009, 28(5): 18-21.
- [19] 卢秋朋, 张清鹏, 秦润杰. 传输线中趋肤效应的介绍及仿真[J]. 电子测量技术, 2015, 38(6): 27-30.
- LU Qiupeng, ZHANG Qingpeng, QIN Runjie. Introduction and simulation of skin effect in transmission lines[J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(6): 27-30.
- [20] 李国栋, 李培, 徐永海, 等. 变压器谐波损耗计算方法比较与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 63-68.
- LI Guodong, LI Pei, XU Yonghai, et al. Comparison and simulation of transformer harmonic loss calculation method[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 63-68.
- [21] 刘成君, 杨仁刚. 变压器谐波损耗的计算与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(13): 33-36, 42.
- LIU Chengjun, YANG Rengang. Calculation and analysis of transformer harmonic loss[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(13): 33-36, 42.
- [22] 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.
- CAI Guowei, KONG Lingguo, PAN Chao, et al. Analysis of harmonic loss of transformer based on frequency-varying characteristics[J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 120-124.
- [23] 贾静然, 段晓波, 卢锦玲, 等. 变压器谐波损耗计算方法的研究综述[J]. 河北电力技术, 2015, 34(4): 37-41.
- JIA Jingran, DUAN Xiaobo, LU Jinling, et al. A review on the calculation methods of transformer harmonic loss[J]. Hebei Electric Power Technology, 2015, 34(4): 37-41.
- [24] 李琼林, 邹磊, 刘会金, 等. 电力变压器谐波损耗仿真计算与实验研究[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3521-3527.
- LI Qionglin, ZOU Lei, LIU Huijin, et al. Calculation and experimental study of harmonic losses in power transformer[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3521-3527.
- [25] 张雷. 基于几何约束关系的 ML 模型求解三维坐标定位问题研究[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2017, 45(4): 104-110.
- ZHANG Lei. Study on 3D coordinate location problem of ML model based on geometric constraint relation[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science), 2017, 45(4): 104-110.

收稿日期: 2018-03-12 修回日期: 2018-06-05

作者简介:

尹忠东(1968—), 男, 教授, 硕士生导师, 研究方向为用户电力技术、分布式发电并网技术、交直流主动配电网及其能效评估等方面; E-mail: yzd@ncepu.edu.cn

魏文思(1992—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为配电网电能质量及能效评估。E-mail: 1920115131@qq.com

(编辑 魏小丽)