

[变压器]

基于高频趋肤效应的变压器无损检测方法

文/李圣争

山东电力工业锅炉压力容器检验中心有限公司

深入分析趋肤效应的辨识原理，在高频条件下，电流主要集中在导体表面，导致表面缺陷对电流分布的影响明显。通过施加高频电流信号并监测表面电流分布变化，识别导体表面的缺陷，建立长直导体在趋肤效应下的谐波模型，揭示电流密度的非均匀分布及其对有效电阻和电抗的影响，该研究为无损检测领域提供方向，提升变压器故障诊断的准确性。

变压器作为电力系统中的核心设备，其性能直接影响电力传输效率。随着电力需求不断增长，传统变压器检测方法在一定程度上能够发现设备明显的缺陷，但对细小缺陷敏感性存在局限性，导致隐蔽性故障难以被及时发现，对变压器安全运行造成威胁^[1]。为解决传统检测方法的不足，将高频趋肤效应在无损检测中进行应用。趋肤效应是指交流电在导体中分布不均匀现象，随着频率提高，电流集中在导体表面，导致导体内部的电流密度降低，对于变压器线圈及其他部件进行高频信号检测，可以提高对潜在缺陷识别能力，这种检测方式不仅能够提高灵敏度，还能在不损害设备的情况下，实时监测变压器的运行状态。探讨基于高频趋肤效应的变压器无损检测方法，构建谐波模型分析趋肤效应的辨识原理，以此为基础，深入探讨其在变压器故障诊断中的应用潜力。

基于高频趋肤效应的谐波模型

1. 趋肤效应辨识原理

在高频条件下，电流在导体内部穿透深度会减小，导致大部分电流集中在导体表面，趋肤深度 δ 通过以下公式计算

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{w\mu\sigma}} \quad (1)$$

式中， w 为电流的角频率； μ 为导体磁导率； σ 为导体电导率。

随着频率的增加，趋肤深度减小，电流分布趋向于表面，使得表面缺陷对电流分布的影响变得更加明显。在变压器无损检测中，通过施加高频电流信号，监测导体表面的电流分布变化来识别缺陷。当导体表面存在缺陷时，电流的分布和强度将受到影响，如缺陷会导致电流密度的局部增大，进而使得相应位置的谐波信号发生变化^[2]。

2. 趋肤效应下长直导体谐波模型

高频交流电流作用下，趋肤效应导致电流密度在导体表面值高于内部值，形成电流密度沿导体半径方向非均匀分布，根据特性建立长直导体在趋肤效应下的谐波模型，趋肤深度 δ 是电流密度从表面降低到 $1/e$ 深度，该深度通过以下公式计算

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{w\mu}} \quad (2)$$

式中， ρ 为导体电阻率。

在趋肤效应的影响下，导体内部电流密度 $J(r)$

用以下公式表示

$$J(r) = J_0 e^{-r/\delta} \quad (3)$$

式中, $J(r)$ 为距离导体中心 r 处电流密度; J_0 为表面电流密度, 即 $r=0$ 时的电流密度。

长直导体在交变电流下被视为谐振电路, 其电流和电压的关系可用谐波模型来描述, 在趋肤效应下, 导体有效电阻和电抗会随频率变化而变化, 需要考虑谐波影响, 设交变电流频率为 f , 其相应角频率为 $\omega=2\pi f$, 这种情况下, 导体总电流 I 和电压 V 可表示为

$$\begin{aligned} I(t) &= I_0 \sin(\omega t) \\ V(t) &= V_0 \sin(\omega t + \phi) \end{aligned} \quad (4)$$

I_0 电流的峰值, V_0 电压的峰值, 在趋肤效应的影响下, 电流有效值 I_{rms} 用下面的公式表达

$$I_{\text{rms}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \times e^{-r/\delta} \quad (5)$$

随着频率增加, 趋肤深度 δ 会减小, 意味着更多的电流集中在导体的表面, 导体的有效电阻 R_{eff} 会随频率变化而变化, 通过计算可以得到有效电阻表达式

$$R_{\text{eff}} = \frac{\rho}{\pi(2\delta)r} \quad (6)$$

为验证上述模型进行以下实验, 选择铜和铝两种不同材料, 制作具有不同直径和长度的长直导体样品, 具体样品参数见表1。

表1 参数数据

编号	材质	直径/mm	长度/m
1	铜	10	1
2	铜	20	1
3	铝	10	1
4	铝	20	1

使用高频信号源, 对导体样品进行不同频率下的电流和电压测试, 测试频率范围 50 Hz ~ 1 MHz, 记录电流密度分布和相应的电压变化, 得到部分测试数据见表2。

表2 频率测试数据

样品编号	测试频率/Hz	电流/A	电压/V
1	50	2	1
1	100 k	1.5	1.2
2	50	3	1.5
2	100 k	2	1.8
3	50	1.8	0.9
3	100 k	1.2	1.1

采用数据拟合方法对获取电流和电压信号进行分析, 提取谐波成分, 评估趋肤效应对谐波的影响, 以下是傅里叶变换后的部分数据分析结果: 铜样品在高频下显示出较小的电压变化, 表明趋肤效应对铜的电阻影响较小; 铝样品在相同条件下电压变化较大, 表明趋肤效应对铝的电阻影响较大。实验分析结果有助于优化变压器绕组设计, 提高其在高频激励下的性能^[3]。

3. 趋肤效应下变压器绕组谐波模型

寄生电容主要来源于绕组内部电容效应, 匝间电容即同一绕组中相邻匝之间形成的电容, 绕组匝与铁心之间的电容, 这种电容会影响电流的分布。寄生电阻是由于导体材料特性和截面尺寸决定的, 铁心材料导电性和其几何形状都会影响这一参数, 导线表面涂覆的绝缘材料或保护涂层也会引入额外的电阻。对于单相变压器绕组线圈, 直流电阻可以用下述公式表示

$$R_d = \frac{Nl\theta}{A} \quad (7)$$

式中, N 为绕组匝数; l 为绕组一圈平均周长; θ 为在给定温度下导体单位长度的电阻; A 为绕组线圈的横截面积。

结合长直导体电阻计算公式与变压器绕组线圈的直流电阻公式, 推导出 M 层线圈绕组交流电阻计算公式为

$$R_a = \frac{R_d}{1 + j\omega\mu\sigma t} \quad (8)$$

式中, t 为相邻导体中心之间的距离; j 为虚数单位。

式(8)考虑线圈间距离以及空隙等参数, 并对进入绕组的横向磁场的均匀性进行修正, 使其适用于不同绕组节距和导线直径的配置, 即使在没有绕组节距的极端情况下, 邻近项中仍然考虑空隙因数。

为验证上述模型准确性, 对两台 SCB10 500/10 干式变压器 A 相高压绕组参数进行分析, 相关参数见表3。

表3 干式变压器数据

绕组参数	铜绕组	铝绕组
铁心直径/mm	141 × 80	122 × 75
铁心高度(绕组部分)/mm	215	315
导线截面积/mm ²	163	1216
导线长度/m	1 012.83	1 899.5
绕组匝数	1 654	2 076

对比铜绕组和铝绕组参数,深入分析趋肤效应对不同材料绕组影响,由于铜电导率较高,铜绕组在高频下表现出更好性能,而铝绕组可能会因趋肤效应导致交流电阻的增加,影响其整体效率。将实验数据与理论模型相结合,深入理解趋肤效应对变压器绕组性能影响^[4]。

4. 铁心材料功率损耗对谐波模型影响

(1) 铁心损耗

在高频激励下变压器电参数性能受到铁心材料功率损耗影响,损耗主要包括磁滞损耗、涡流损耗和残余损耗,铁心损耗主要由以下三部分组成。

1) 磁滞损耗

磁滞损耗是由于铁心材料在磁化过程中,磁畴重新排列所产生的能量损失,计算公式为

$$P_h = k_h f B_{\max}^n \quad (9)$$

式中, P_h 为磁滞损耗; k_h 为与材料性质相关的常数; f 为频率; $B_{\max}$ 为最大磁通密度; n 为 1.5~2.5 之间,取决于材料特性。

2) 涡流损耗

涡流损耗是由于铁心内部感应的涡流电流所产生的能量损失,计算公式为

$$P_e = k_e \times f^2 \times B_{\max}^2 \times d^2 \quad (10)$$

式中, P_e 为涡流损耗; k_e 为与材料和形状相关的常数; d 为铁心材料厚度。

3) 残余损耗

残余损耗主要受铁心材质和制造工艺等参数的影响,其大小相对较小,对整体实验结果的影响可以忽略,在高频应用下主要关注磁滞损耗和涡流损耗。

在基频下,变压器视为由电感和电阻构成的集中参数电路,该电路由高压侧等效阻抗、低压侧折算到高压侧后的等效阻抗以及铁心材料引起的励磁回路阻抗共同构成。当对测试回路施加的激励频率较低时,变压器二次侧短路,励磁电压较低,铁心的磁通密度小,等效阻抗明显大于两侧绕组阻抗,流过支路的电流极小,使得铁心中发生的功率损耗远小于负载损耗,因此可以忽略铁心材料中的功率损耗。

随着激励频率升高,分布参数对变压器绕组回路的影响增大,需要对变压器的空载损耗进行进一步分析,铁心饱和程度随着频率的升高会减小,因

此在高频下,铁心饱和程度对功率损耗的影响会更小,变压器次侧电压与磁通关系式为

$$V = j 4.44 f B_m \quad (11)$$

式中, V 为电压; f 为频率; B_m 为磁通密度。

在高频激励测试中,采用恒定电压源激励, f 为定值,根据电压与磁通关系,当激励电源电压 V 和变压器绕组匝数 N 为定值时, B_m 为恒定值。在这种情况下,铁心材料功率损耗远小于短路负载损耗,因而忽略其对谐波模型的影响^[5]。

(2) 实验分析

在实验中对三种磁性材料:铁氧体、非晶合金、纳米晶材料高频变压器磁心进行分析,基本磁化曲线测试结果如下:铁氧体材料在频率为 1 kHz 时,磁通密度 B_m 达到 1.5 T 时,磁滞损耗为 40 W/kg;非晶合金材料在频率为 1 kHz 时,磁通密度 B_m 达到 1.5 T 时,磁滞损耗为 30 W/kg;纳米晶材料在频率为 1 kHz 时,磁通密度 B_m 达到 1.5 T 时,磁滞损耗为 25 W/kg。

磁心损耗曲线测试结果:铁氧体材料空载损耗系数 $a=0.05$, $b=0.01$, $c=0.02$;非晶合金材料空载损耗系数 $a=0.03$, $b=0.02$, $c=0.01$;纳米晶材料空载损耗系数 $a=0.02$, $b=0.01$, $c=0.05$ 。

通过实验数据可以看出,纳米晶材料在高频下的磁滞损耗最低,其次是非晶合金材料,铁氧体材料损耗最高。表明纳米晶材料在高频应用中具有更好的性能。

(3) 磁心材料对谐波特性影响

在高频应用中,谐波特性会受到铁心材料特性的影响,铁氧体材料在 1 kHz 频率下,总谐波失真度为 5%;非晶合金材料在 1 kHz 频率下,总谐波失真度为 3%;纳米晶材料在 1 kHz 频率下,总谐波失真度为 2%。

在 1 kHz 频率和 1.5 T 磁通密度下,铁氧体材料温度升高 20 °C,非晶合金材料的温度升高 15 °C,纳米晶材料的温度升高 10 °C。数据表明,纳米晶材料在高频下的热稳定性最好,非晶合金次之,铁氧体材料的热稳定性相对较差。

综合分析铁心材料功率损耗对谐波模型的影响,得出以下结论。

1) 铁心材料的选用对变压器的高频性能至关重要,建议选择具有低损耗、良好非线性特性的材

料，如纳米晶材料。

2) 在设计变压器时，需仔细评估工作频率范围内的谐波特性，确保工作在安全的能量损耗范围内。实际应用中，应定期进行谐波分析，及时识别存在的谐波问题，降低对系统的潜在风险。

结束语

深入探讨高频趋肤效应的谐波模型及其在变压器绕组材质辨识中的应用，通过趋肤效应辨识原理明确高频电流在导体中的分布特性，分析长直导体在趋肤效应下的谐波模型，为理解复杂电气系统中的谐波行为提供基础。在变压器绕组的谐波模型部分，阐述趋肤效应影响变压器的电气特性，探讨磁心材料对谐波特性的影响，对铁心损耗进一步揭示铁心材料对谐波模型的影响，通过实验分析，验证理论模型在实际应用中的有效性，为后续研究提供实证支持。EA

(收稿日期：2025-01-07)

参考文献

- [1] 徐超，李慧，徐健，等．高频数字集成电子元件无损检测仪设计与研制[J]．电子制作，2024，32(2)：86-88，110．
- [2] 张宇堃．小型低功耗的超声无损检测系统的设计与实现[J]．科技资讯，2023，21(12)：28-31．
- [3] 赵志刚，郑宇萱，陈天缘，等．基于镜像法的高频圆导线变压器漏感计算模型[J]．中国电机工程学报，2024，44(16)：6697-6706．
- [4] 李元，林金山，邵先军，等．基于等效媒质理论的高频变压器利兹线周期性结构均质化建模方法[J]．高电压技术，2024，50(10)：4440-4449．
- [5] 王永强，郑志宏，李建芳，等．基于有限元法的高频变压器绕组损耗研究[J]．电测与仪表，2016，53(15)：17-21．

(上接第129页)

从图3所示的结果可以看出，应用本文设计的方法，可以监测到特高压直流换流阀厅用套管在运行中，存在 $-30 \sim +30$ mV的局部异常放电现象，与已知条件一致，说明本文方法监测得到的结果真实、可靠。

结束语

随着传感器技术、数据采集与处理技术以及人工智能算法的快速发展，如何设计高效、可靠的在线监测方法，为特高压直流输电系统的安全运行提供有力保障，成为业内技术人员的研究热点。本文方法采用传感器技术，能够实时、准确地采集套管的状态数据，包括温度和局部放电信号，为监测提供数据基础。通过遗传算法对传感器状态图像进行处理，有效提高监测的准确性和灵敏度，使得即使是微小的局部放电信号也能被捕捉到。通过实例应用分析，本文方法在实际监测中得到验证，检测结果与实测数据高度一致，证明其可靠性和实用性。EA

(收稿日期：2025-03-24)

参考文献

- [1] 高树国，相晨萌，王丽丽，等．基于振动超声复合信号的变压器套管及升高座故障监测方法[J]．电瓷避雷器，2024(1)：177-186．
- [2] 张晋寅，陈晓东，谢志成，等．特高压直流穿墙套管故障的振动监测研究[J]．水电能源科学，2023，41(5)：190-193．
- [3] 何乐，朱炬辉，梁兴，等．基于管外光纤监测的页岩气水平井多簇压裂效果评价[J]．石油勘探技术，2024，52(4)：110-117．
- [4] 胡子昂，王强，谷小红，等．基于分布式光纤传感的合成气管道温度在线监测研究[J]．激光与红外，2023，53(1)：90-96．
- [5] 谢佳，杨海涛，丁国成，等．变压器高压套管末屏在线监测系统设计与[J]．电瓷避雷器，2023(4)：213-220．