

变压器绕组局部放电测量误差计算及其修正方法研究

杨玥坪¹, 树婷¹, 吴玖汕¹, 张容浩², 赵壮民¹, 孟旋¹, 张轩瑞¹, 李军浩¹

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 太原理工大学电气与动力工程学院, 030024, 太原)

摘要: 为分析 IEC60270 标准下电力变压器局部放电测量时因绕组分布纵向电容及衰减特性所带来的视在放电测量误差并进行修正,提出了包含耦合电容的变压器局部放电分布电容网络模型。通过解析方法,量化了变压器绕组端部的局部放电测量值随放电位置的变化情况,基于绕组等效 RLC 网络智能反演算法,提出了一种绕组局部放电频谱定位方法及局部放电测量误差修正算法,介绍了算法的理论基础与基本思路。以一台变压器绕组电气参数仿真结果,构建了等效 RLC 网络模型,并以其作为研究算例应用所提修正方法,结果表明,放电测量误差随放电位置远离测量端逐渐增大,最大时接近 90%,而修正后局部放电量的最大误差比修正前降低了一个数量级,验证了修正算法的可行性,为将其进一步运用于实际变压器建立了一定的基础。

关键词: 电力变压器;局部放电;IEC60270 标准;局部放电定位;智能优化算法

中图分类号: TM835 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202210012 **文章编号:** 0253-987X(2022)10-0122-08

Error Analysis and Correction of Partial Discharge Quantity Measurement of Transformer Windings

YANG Yueping¹, SHU Ting¹, WU Jiushan¹, ZHANG Ronghao², ZHAO Zhuangmin¹,
MENG Xuan¹, ZHANG Xuanrui¹, LI Junhao¹

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: This paper proposes a distributed capacitance network model for partial discharge (PD) of transformers with a coupling capacitor to analyze and correct the apparent discharge quantity measurement error resulting from the longitudinal distributive capacitance and the attenuation of transformer windings during PD quantity measurement of power transformer according to IEC60270. The variation of PD quantity measured with the change of the discharge position at the end of the transformer winding is quantified by an analytical method. Then, based on the intelligent inverse algorithm of the winding equivalent RLC network, a winding PD frequency-spectrum localization method and a novel PD measurement error correction algorithm are proposed, and their theoretical basis and operation process are introduced. An equivalent RLC network model is constructed as a research example based on the simulation results of the electrical parameters of a transformer winding, and the proposed correction method is applied. The results show that the

收稿日期: 2022-02-21。 作者简介: 杨玥坪(1997—),男,硕士生;李军浩(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 陕西省重点研发计划资助项目(2021GXLH-Z-080)。

网络出版时间: 2022-06-16

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220615.1917.006.html>

error of PD quantity before correction grows larger with the PD location away from the measuring point, and the maximum error reaches near 90%. However, the error after correction is reduced by an order of magnitude, which has verified the feasibility of the proposed correction method and provided a basis for its further application on real transformers.

Keywords: power transformer; partial discharge (PD); IEC60270 standard; PD location; intelligent algorithm

随着电力系统电压等级的提高,变压器绕组规模随之增大,长期运行容易产生绝缘缺陷并引发局部放电(partial discharge, PD, 简称局放)^[1]。局部放电信号是变压器绝缘状态诊断的关键参量,局部放电量是评估绝缘缺陷严重程度的关键依据^[2-3]。目前对于局部放电量的测量主要是依据 IEC60270 (GB/T 7354)标准所规定的视在放电量检测及计算方法,该标准明确规定了脉冲电流测量法下的放电量校准(calibration)步骤,其也是现行唯一对局部放电量检测做出了相应规定的标准^[4-5]。对于变压器等绕组型试品局部放电量的测量,IEC60270 标准推荐在绕组首端注入已知电荷量的校准脉冲,并以首端套管电容作为耦合电容,在其末屏与地之间串入测量阻抗获取局部放电信号,事先得到测量信号幅值与放电量之间的比值即校准系数;实测放电时再利用该系数反向换算为视在放电量。

该方法适用的前提是试品可等效为一个集中参数电容,然而变压器则不符合上述条件。变压器绕组一般十分庞大,表现为对源信号具有衰减和振荡作用的分布参数网络,实测的局放信号实际是端部测量点对绕组内部不同位置局放源的响应,会受到放电源位置的影响^[6]。传统的局放校准系数始终为固定值,并未考虑上述问题,从而导致所测的绕组局部放电量出现较大误差。因此,通过适当手段,尽可能减小局放源位置对于放电量测定所带来的误差,增加以放电量诊断绕组绝缘缺陷严重程度的准确度,具有重要的工程意义。

针对上述绕组式设备局放位置变化所致放电量测量误差的问题,不少学者进行了理论和实验分析。Cavallini 等指出,当大型试品内部放电源与测量端距离较远时,两者间应视作二端口,系统带来的衰减和振荡将会显著影响局放测量值^[7]。Siegel 等通过改变放电量恒定的放电源在绕组中的位置,表明所测视在放电量并非恒定且与放电位置密切相关^[8]。Wang 等通过理论和实验研究了变压器端部测量信号对内部局放源的频率响应,并据此进行了局放电气定位^[9-10];高文胜等研究了绕组不同位置放电源

相对于测量端传函的变化^[11-12]。不少学者研究了基于绕组等效 RLC 网络的局放定位法,但其均不能进一步用于校正放电量测量误差^[13-15]。

对于如何修正因局放源位于绕组内部未知位置而产生的局放量测量误差,目前的研究则较少。James 等提出利用绕组容性频段,在绕组首末端同时测量局放,利用线性化公式获得实际放电幅值^[16];张扬提出在绕组首末端同时测量局放并校准,再将两个放电量取几何平均值的方法^[17],两种方法均取得了较好的效果。但大型变压器在实际运行中绕组末端需直接接地,无法连接测量电路,且上述方法均需以公式结论为基础,不适用于解析式十分复杂的非均匀式绕组^[18]。

总的来说,目前国内外对于 IEC60270 标准下变压器绕组局部放电定位方法研究较多,但对放电位置与绕组视在放电量测量值之间关系的研究较少,而对于该问题解决方案的研究则更少。本文针对上述问题,构建了变压器局部放电分布参数电容网络模型,并进行放电位置与视在放电量测量值之间关系的量化分析,给出产生放电量误差的内在原因;基于绕组等效网络参数智能反演算法,提出一种适用于变压器绕组的局部放电量测量误差修正方法,并通过基于真实绕组电气参数的仿真算例进行了方法可行性验证。

1 绕组局部放电量测量误差计算

1.1 变压器绕组局部放电分布参数电容网络模型

传统的三电容模型是检测及量化局部放电的基础模型,将试品视为一个集中电容,并用一小电容模拟放电处的气隙缺陷以进行分析计算。绕组因存在纵向电容,使其在局放下表现为与位置有关的分布参数,故三电容模型不能直接适用,本文在其基础上进行扩展,得到变压器局部放电分布参数电容网络模型如图 1 所示。该模型由末端接地的绕组分布电容网络与局放测量耦合电容(多为套管电容) C_B 组成。绕组单位长度的分布纵向和对地电容分别为 K_0 、 C_0 。建立沿绕组纵向、由绕组首端 H 指向末端

N 的一维坐标 x , 设绕组总长为 l , 在 dx 长度 ($dx \ll l$) 范围内包含的电量为 $K_0/dx, C_0 dx$ 。

1.2 绕组视在放电量与放电位置关系的解析计算

现假设绕组点 P 处发生放电, 其坐标为 x_P , 则 P 所在的电容 $C_0 dx$ 可以视为集中参数电容并按传统三电容模型展开为 C_g, C_b, C_a 的串并联连接, 图 1 中 C_g 为气隙缺陷的电容, C_b, C_a 为正常绝缘的电容, 且 $C_b \ll C_g \ll C_a, C_a \approx C_0 dx$ 。气隙 C_g 放电时, 以 P 点为参考可以将整个绕组电容网络等效为传统三电容模型, 设放电对应的真实放电量为 q_r , 则从 P 点看进去可以获得一个视在放电量, 因 P 位于绕组内部, 本文称其为内部视在放电量 q_1 , 依照三电容模型结论知 q_1 与 q_r 成正比。然而 P 点和绕组端部之间存在纵向容抗 K , q_1 不可测得, 实际的可测信号是流经端部耦合电容 C_B 的电流 I_B , 其按照 IEC60270 标准进行校准后可以获得目前变压器局放检测常用的视在放电量值, 本文称为外部视在放电量 q_2

$$q_2 = k p_B \quad (1)$$

式中: k 为试验前获得的校准系数(常量); p_B 为 I_B 的时域峰值。

P 处的局部放电使得 P 点出现一个暂态电压变化 Δu_P , 故绕组端部耦合电容上会有电流 I_B 流过, 该电流响应与 Δu_P 的关系类似于冲击电压下绕组沿线的电压电流分布问题, 可使用微分方程组进行求解, 此处不再详细阐述^[2]。经过一定的电路分析, 可得 I_B 携带的总电荷量 q_B 随放电位置的表达式为

$$q_B = C_B q_1 f(x_P) \quad (2)$$

$$f(x_P) = 1 / \{ [\sqrt{C_0 K_0} \sinh(\alpha_0 x_P) + C_B \cosh(\alpha_0 x_P)] + \coth(\alpha_0 (l - x_P)) [\sqrt{C_0 K_0} \cosh(\alpha_0 x_P) + C_B \sinh(\alpha_0 x_P)] \} \quad (3)$$

式中: f 为关于放电位置的一元函数; $\alpha_0 = (C_0 / K_0)^{1/2}$ 为绕组分布系数。可知 q_B 与放电位置及绕组电容参数 K, C 有关。

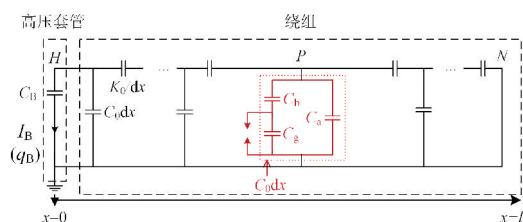


图1 绕组局部放电分布参数电容网络模型

Fig. 1 Winding distributed capacitance network model considering partial discharge

将式(2)代入式(1)可得 q_B 与 q_2 的关系式

$$\begin{cases} q_2 = k p_B = k T q_B = A q_1 f(x_P) \\ A = k T C_B \end{cases} \quad (4)$$

式中 T 为脉冲电流峰值 p 与其携带电荷量 q 的比值, 与脉冲波形有关。由于纯电容网络中各节点波形不发生畸变, 故 T, A 为常量。

按照 IEC60270 标准, 为测量 k 值, 需在绕组首端注入一个电荷量 Q 已知的脉冲, 此时 $q_1 = q_2 = Q$

$$Q = q_2 |_{x_P=0} = q_1 = A q_1 f(0) \quad (5)$$

结合式(4)、式(5)并利用 $f(x_P)$ 的减函数性质, 可得

$$q_2 = \frac{f(x_P)}{f(0)} q_1 \leq q_1 \propto q_r \quad (6)$$

上述分析严格推导出式(6)的结果, 证明了因绕组型试品的分布纵向电容 K 导致变压器绕组放电时, 除放电位于绕组首端即与标定时相同外, 外部视在放电量 q_2 (可测值) 均比放电点 P 处的内部视在放电量 q_1 (不可测值) 小, 且随着放电位置越远离测量端, 其误差越严重, 不与 q_r 成正比。因此, 在绕组内放电位置未知的情况下, 根据现行标准测得的视在放电量 q_2 无法对 q_r 的大小进行比例反映, 需要对 q_2 与 q_1 之间的误差进行修正。

2 绕组局部放电测量误差修正方法

2.1 方法总体流程

由前文的分析, 修正局部放电前必须先获得: ①局部放电位置; ②绕组的电容特性。以根据这两者求得该位置发生局部放电时测量信号相对于绕组首端放电时的衰减比例, 亦即外部视在放电量与内部视在放电量的比值, 下称衰减因子 m 。而①②可以分别通过局部放电定位以及绕组等效电路网络建模的方法获得。根据这两种方法的共性, 本文提出了一种利用绕组例行频率响应测试结果 (frequency response analysis, FRA) 以及局放测量信号频谱的绕组局部放电测量误差修正方法如下。

(1) 绕组 FRA 测量及等效电路网络建模: 局放试验前, 首先测量绕组 FRA 曲线, 以其为基准, 构建绕组等效 RLC 梯形电路网络 (下称等效网络), 如图 2 所示, 并使用智能优化算法反演网络参数^[19]。

(2) 等效网络衰减曲线和节点电流传函的仿真计算: 在等效网络首端, 按照实际使用的 RC 元件参数添加测量支路, 如图 2 中 l 端所示; 然后仿真计算网络内部各节点 i 放电时首端测量信号幅值的衰减因子 m_i 随 i 变化的曲线; 并计算节点 i 处的对地电

流源至绕组首端测量点处电流 I_B 的频域传递函数曲线 h_i , 下称节点电流传函。

(3) 实测局部放电并获得其频谱: 使用与 (2) 中一致的测量支路, 按照 IEC60270 标准实测绕组局部放电, 按传统校准方法获得放电量测量值 q_2 , 并计算所测局放信号的频谱曲线 F 。

(4) 频谱法局放定位及放电量校准: 不断改变 i 并逐个比较 h_i 与 F 的曲线相似度, 相似度最大时所对应的等效网络节点 i_0 即作为放电的相对位置, 并使用式 (7) 计算改进后的放电量 q

$$q = \frac{q_2}{m_{i_0}} \quad (7)$$

上述变压器绕组局部放电测量误差修正方法总体流程图如图 3 所示。该方法以 IEC60270 标准及其规定的测量频带为大前提, 在修正放电量的过程中, 又利用局放测量信号本身完成了定位工作, 不需要再使用其他设备进行定位, 具有简便、适用于在线测试等特点, 并且适用于非均匀式绕组。

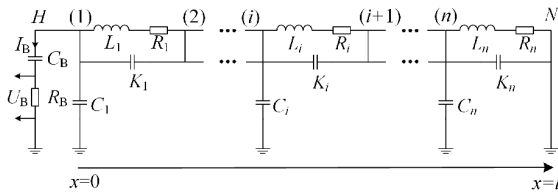


图 2 包含局放测量支路的绕组等效 RLC 电路网络示意图

Fig. 2 Winding equivalent RLC network with PD measuring branch

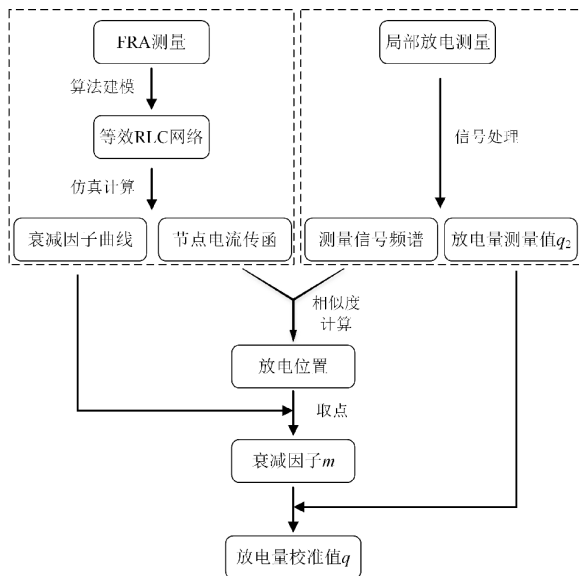


图 3 绕组局部放电测量误差修正方法总体流程图

Fig. 3 Flow chart of PD charge error correction method

2.2 优化算法及函数

智能优化算法在解决非线性和多参数问题中具

有比传统梯度算法更优的效果。遗传算法是智能优化算法的代表, 其利用遗传算子模拟自然选择过程中发生的繁殖和突变现象, 据此反复迭代直到满足某种收敛指标为止^[20]。本文以 FRA 中最能体现绕组固有振荡频率特性的驱动点阻抗 (driving point impedance, DPI) 作为待拟合曲线, 使用遗传算法对绕组等效网络参数进行反演计算^[21-22]。由于算法中需要屡次计算频响曲线, 因此网络的 DPI 曲线的计算使用文献[22]中的矩阵算法。

算法中的目标函数选取对于算法收敛速度和求解质量具有重大影响。本算法的最终目标是逼近曲线, 使用的目标函数 F_{opt} 的表达式为

$$\begin{cases} F_{opt}(x) = \gamma g(x) + \delta g(x_{eff}) \\ g(x) = \alpha(1 - P(x, x_0)) + \beta D(x, x_0) \end{cases} \quad (8)$$

式中: 向量 x, x_0 分别为模型、实测的 DPI 的频率点序列; α, β, γ 和 δ 均为正权重系数。式 (8) 中增加了主谐振峰所在频段 x_{eff} 的目标函数权重, P, D 分别表示 Pearson 相关系数及欧式距离, 均为度量曲线重合度的因素, 又分别侧重于曲线形状相似度和幅值接近程度, 其表达式为

$$P(x, y) = \frac{l \sum_{i=1}^l x_i y_i - (\sum_{i=1}^l x_i)(\sum_{i=1}^l y_i)}{[l \sum_{i=1}^l x_i^2 - (\sum_{i=1}^l x_i)^2][l \sum_{i=1}^l y_i^2 - (\sum_{i=1}^l y_i)^2]} \quad (9)$$

$$D(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^l |x_i - y_i|^2} \quad (10)$$

式中: x, y 分别为两长度为 l 的曲线采样序列; x_i, y_i 分别为其顺序第 i 个点, 两者对于曲线拟合都具有一定指示性, 因此均列入优化函数中。根据待拟合 DPI 曲线不同的幅值及谐振点分布情况以及具体问题的精度侧重, 通过改变系数的大小来调节相应项的权重, 提高算法的寻优能力。

依照上述设定迭代求解 F_{opt} 的全局最小值, 可以求得最接近绕组特性的等效 RLC 电路网络。

2.3 基于测量信号频谱的绕组局放电气定位法

变压器发生局放时, 绕组首端的测量结果可看作是测量点信号 I_B 对于内部放电源 I_m 的电路响应。因为局放源脉冲频谱在 IEC60270 测量频段内 (<1 MHz) 基本为一条直线, 可以视作宽频电流源, 写为频域表达式^[9]

$$I_B(j\omega) = ah(j\omega) \quad (11)$$

式中: $h(j\omega)$ 为电流传递函数 h 在相应频率点的值; a 为常数。式 (11) 表明局放测量信号频谱与相应位

置电流传函具有相同的波形,且不受放电种类的影响。利用等效网络,预先计算出网络内部各节点电流传函,再与所测局放信号频谱进行仅形状上的比较,便可以确定与实际放电位置等效的模型节点编号 i_0 。而式(9)的 Pearson 相关系数不受波形整体幅值差异的影响,与此处需求相吻合,故等效放电节点的确定方法为

$$i_0 = \arg \max_{i=1,2,\dots,n} (P(h_i, F)) \quad (12)$$

式中 $\arg \max$ 表示当函数取最大值时的自变量值。获得放电位置后,再利用该电路模型计算该处发生局放时首端测量信号的衰减系数 m_{i_0} ,按照式(7)可以对所测放电量进行修正。

3 仿真研究及讨论

本节基于一台 220 kV 绕组的设计参数,计算其电气参数并简化为一个算例 RLC 梯形网络作为待求解的仿真算例,并运用上述方法验证其正确性与可行性。

3.1 待求解算例网络及参数设定

所研究的 220 kV 绕组靠近高压出线端的一部分采用了不同程度的内屏蔽式绕法以调节冲击电压下的梯度分布,其余部分采用连续式绕制,绕组总体呈现非均匀纵向电容特性。

通过有限元软件仿真等效电气参数并构建对应的梯形网络模型,作为本文研究的算例并进行绕组内部局部放电的模拟,进而探究所提局部放电量误差修正方法的有效性。绕组某两种内屏蔽式线饼的有限元仿真模型如图 4 所示,分别为跨 4 饼屏 3 匝、跨 2 饼屏 2 匝绕制^[23]。

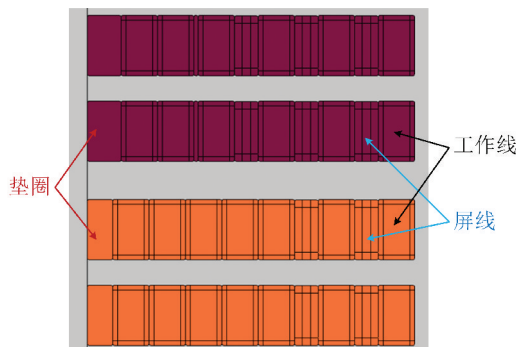


图 4 绕组有限元仿真模型示意图

Fig. 4 Winding finite element model

仿真结果简化为 8 单元非均匀 RLC 算例网络,其拓扑结构如图 2 所示,参数值如表 1 所示,各单元的 C、R 参数相同, K、L 参数不同,模型中将互感的

影响叠加在了自感参数之上。

表 1 算例网络参数设定值

Table 1 Parameter value of case network

参数	数值	参数	数值	参数	数值
K_1/nF	2.0	L_1/mH	1.8	L_6/mH	2.6
K_2/nF	1.0	L_2/mH	2.2	L_7/mH	2.2
K_3/nF	0.5	L_3/mH	2.6	L_8/mH	1.8
$K_4 \sim K_8/\text{nF}$	0.2	L_4/mH	3.0	$R_1 \sim R_8/\Omega$	7.7
$C_1 \sim C_8/\text{pF}$	20	L_5/mH	3.0		

3.2 待求解算例网络及参数设定

计算该算例模型在末端接地条件下的 DPI 曲线如图 5 中实线所示。利用该曲线作为拟合目标,进行等效网络参数的反演计算。计算时考虑绕组非均匀纵向特性,由于此类型绕组的特殊绕制段一般不超过绕组全长的一半^[18],因此前 4 单元的 K 分别求解,后 4 单元的 K 统一求解;所有单元的 L 分别求解, R 与 C 统一求解,共计 15 个待求解参量。

求解出的等效网络 DPI 如图 5 中虚线所示,对应的参数求解结果与算例网络设定值的误差如表 2 所示,可见等效网络很好地复现了算例的 DPI 谐振峰特性,且求解出的参数与算例之间的误差较小。

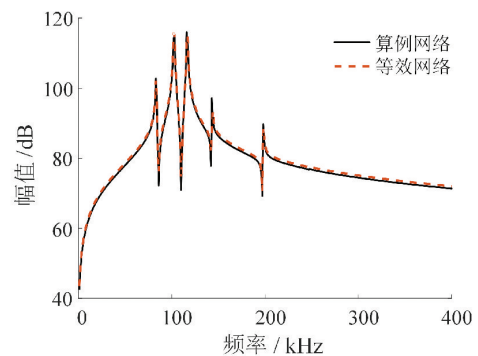


图 5 算例网络及其等效网络的 DPI 曲线

Fig. 5 DPI curves of case network and equivalent network

3.3 局部放电定位结果

使用高斯脉冲源,在算例网络各节点注入总电荷量 $Q=q_1=500 \text{ pC}$ 的脉冲电流,并在首端接入 $C_B=220 \text{ pF}$ 、 $R_B=50 \Omega$ 的测量支路,模拟局部放电及其检测。同时按照所提方法步骤,在等效网络中添加相同参数的测量支路,仿真获得各个节点的电流传函 h 。第 1、3、5、7 节点放电时,算例网络模拟的局放测量信号频谱 F 和计算的等效网络的节点电流传函 h 如图 6 所示。其中每个子图两条曲线幅值

存在差异,是由实际放电脉冲电荷量大小与计算传函时使用的单位幅值输入之间的差异决定的,不会影响基于曲线形状的相似度判别结果。4 组信号的定位结果如表 3 所示,其中加粗的表示最大值,其所在列号即为放电源等效节点编号。

表 2 等效网络参数求解结果

Table 2 Solution results of equivalent network parameters

参数	数值	误差/%	参数	数值	误差/%
K_1/nF	1.99	4.03	L_3/mH	2.89	11.2
K_2/nF	0.895	10.5	L_4/mH	3.41	13.7
K_3/nF	0.448	10.5	L_5/mH	3.15	5.08
K_4/nF	0.175	12.4	L_6/mH	2.74	5.22
$K_5 \sim K_8/\text{nF}$	0.190	4.80	L_7/mH	2.31	5.17
$C_1 \sim C_8/\text{pF}$	18.7	6.71	L_8/mH	1.89	5.11
L_1/mH	1.81	0.59	$R_1 \sim R_8/\Omega$	9.29	20.7
L_2/mH	2.45	11.4			

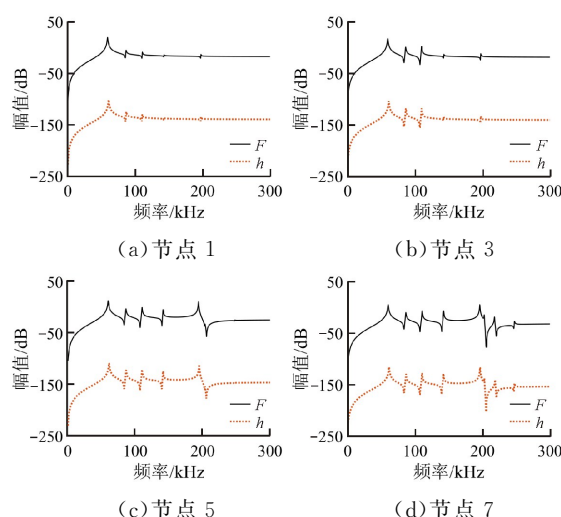
表 3 F 与 h 相关系数计算结果及局放电气定位结果Table 3 Similarity factor calculation results of F and h and PD localization results

参数	节点	相关系数							
		传函 h							
		1	2	3	4	5	6	7	8
频谱 F	1	0.988	0.982	0.967	0.949	0.897	0.882	0.873	0.834
	3	0.963	0.970	0.984	0.966	0.911	0.895	0.887	0.847
	5	0.902	0.909	0.920	0.927	0.983	0.979	0.970	0.927
	7	0.867	0.874	0.885	0.892	0.972	0.973	0.978	0.938

图 6 所示的频谱对比,表明基于端部测量信号(FRA)的绕组智能算法建模亦能复现绕组网络的内部特性;表 3 所示 4 组待定位信号的定位结果,证明了所提的基于绕组等效网络建模和局放测量信号频谱的定位方法可以在放电严重程度未知的情况下准确地完成局放的电气定位。

3.4 放电误差修正结果

算例网络中 8 组测量信号的误差修正前放电量 q_2 、定位结果、衰减系数 m 计算值、修正后放电量 q ,

图 6 不同节点局放时算例网络模拟测量信号频谱 F 及其等效网络的节点电流传函 h Fig. 6 Frequency spectrum F of simulated measuring signal of case network and current transfer function h of e-equivalent network under different PD node

以及 q_2 、 q 相对于内部视在放电量 q_1 的误差,如表 4 所示。由表 4 可知,误差修正前的放电量 q_2 与注入电荷量 Q 的误差随放电远离测量端而逐渐增大,误差最大出现在第 8 节点,其值为 -89.58% ,表明若不进行修正,绕组放电测量将会产生巨大误差;而修正后的获得的放电量 q 的误差大大减小,最大值出现在第 5 节点,误差值为 $+5.56\%$,与原方法相比减少了一个数量级,表明了所提的误差修正算法具有较好的效果。

表 4 误差修正前后放电量及其误差

Table 4 PD charge and its error before and after correction

局放节点	q_2/pC	定位结果	m	q/pC	q_2 误差/%	q 误差/%
1	500.0	1	1.000	500.0	0	0
2	475.1	2	0.959	495.5	-4.98	-0.89
3	434.8	3	0.863	503.8	-13.04	-0.76
4	372.3	4	0.727	512.5	-25.53	+2.49
5	258.3	5	0.489	527.8	-48.34	+5.56
6	173.7	6	0.332	524.0	-65.26	+4.81
7	107.6	7	0.207	521.0	-78.47	+4.21
8	52.1	8	0.100	518.8	-89.58	+3.76

根据上述算例的求解步骤可知,使用所提算法进行放电量误差修正需要的已知参数仅包括绕组FRA(DPI)曲线以及绕组一端的单次局部放电测量信号。上述两组参数在实际的绕组例行频响及局部放电试验中十分容易获取,因此具有较强的实用性,后续也将在实体变压器绕组上展开相应研究。

4 结 论

(1)基于传统局部放电三电容模型,建立了包含测量耦合电容的绕组局部放电分布参数电容网络模型,引入了内/外视在放电量的概念,通过解析计算局部放电测量值与放电位置的关系,给出了现行IEC60270标准测量法适用于变压器局部放电检测时,在放电量校准方面所存在的误差。

(2)为解决上述问题,提出了基于绕组等效RLC网络参数智能优化反演算法的变压器局部放电频谱定位法及放电量测量误差修正方法,其具有理论支撑强、操作简便、可同时实现放电定位和放电校准、适用于非均匀绕组等优点。

(3)基于绕组电气参数仿真计算结果,搭建了简化的非均匀RLC网络作为算例,按照相应的步骤,验证了所提方法的可行性,结果表明,使用提出的修正方法获得的放电量误差比改进前降低了一个数量级,为该方法在实际局放测量中的进一步应用奠定了基础。

参考文献:

- [1] 邱昌容,王乃庆. 电工设备局部放电及其测试技术[M]. 北京:机械工业出版社,1994:36-42.
- [2] 严璋,朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 北京:中国电力出版社,2002:205-206.
- [3] 李军浩,韩旭涛,刘泽辉,等. 电气设备局部放电检测技术述评[J]. 高电压技术,2015,41(8):2583-2601.
LI Junhao, HAN Xutao, LIU Zehui, et al. Review on partial discharge measurement technology of electrical equipment [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2583-2601.
- [4] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 高电压试验技术 局部放电测量:GB/T 7354—2018[S]. 北京:中国标准出版社,2018.
- [5] 倪鹤立,姚维强,傅晨钊,等. 电力设备局部放电技术标准现状述评[J]. 高压电器,2022,58(3):1-15.
NI Heli, YAO Weiqiang, FU Chenzhao, et al. Review on status of technical standards of partial discharge in electrical equipment [J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(3): 1-15.
- [6] 赵煦,孟永鹏,成永红,等. 变压器绕组对局部放电电磁波传播特性的影响[J]. 西安交通大学学报,2015,49(4):6-11.
ZHAO Xu, MENG Yongpeng, CHENG Yonghong, et al. Simulation analysis of effects of transformer windings on propagation characteristics of partial discharge electromagnetic waves [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(4): 6-11.
- [7] CAVALLINI A, MONTANARI G C, TOZZI M. PD apparent charge estimation and calibration: a critical review [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(1): 198-205.
- [8] SIEGEL M, TENBOHLEN S. Comparison between electrical and UHF PD measurement concerning calibration and sensitivity for power transformers [C]//International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. [S.l.]: s. n., 2014: 5-8.
- [9] WANG Z D, HETTIWATTE S N, CROSSLEY P A. A measurements-based discharge location algorithm for plain disc winding power transformers [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(3): 416-422.
- [10] HETTIWATTE S N, WANG Z D, CROSSLEY P A. Investigation of propagation of partial discharges in power transformers and techniques for locating the discharge [J]. IEE Proceedings: Science, Measurement and Technology, 2005, 152(1): 25-30.
- [11] 高文胜,桂俊峰,谈克雄,等. 局部放电信号在电力变压器绕组传播过程中的畸变[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 31-36.
GAO Wensheng, GUI Junfeng, TAN Kexiong, et al. Distortion caused by partial discharge propagation along power transformer winding [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 31-36.
- [12] 唐炬,宋胜利,李剑,等. 局部放电信号在变压器绕组中传播特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10): 91-96.
TANG Ju, SONG Shengli, LI Jian, et al. Propagation characteristics of partial discharge pulses in transformer windings [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(10): 91-96.
- [13] MONDAL M, KUMBHAR G B, KULKARNI S V. Localization of partial discharges inside a transformer winding using a ladder network constructed from terminal measurements [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(3): 1035-1043.
- [14] AKBARI A, WERLE P, BORSI H, et al. Transfer function-based partial discharge localization in power

- transformers: a feasibility study [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2002, 18(5): 22-32.
- [15] 刘云鹏. 电力变压器局部放电的电气定位及诊断 [D]. 保定: 华北电力大学, 2004.
- [16] JAMES R E, PHUNG B T, SU Q. Application of digital filtering techniques to the determination of partial discharge location in transformers [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1989, 24(4): 657-668.
- [17] 张杨. 基于 MTL 模型的变压器绕组局部放电的量化研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2006.
- [18] WANG Zhongdong, LI Jie, SOFIAN D M. Interpretation of transformer FRA responses: influence of winding structure [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(2): 703-710.
- [19] AGHMASHEH R, RASHTCHI V, RAHIMPOUR E. Gray box modeling of power transformer windings for transient studies [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(5): 2350-2359.
- [20] 马永杰, 云文霞. 遗传算法研究进展 [J]. 计算机应用研究, 2012, 29(4): 1201-1206, 1210.
- MA Yongjie, YUN Wenxia. Research progress of genetic algorithm [J]. Application Research of Computers, 2012, 29(4): 1201-1206, 1210.
- [21] ABU-SIADA A, MOSAAD M I, KIM D, et al. Estimating power transformer high frequency model parameters using frequency response analysis [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(3): 1267-1277.
- [22] 任富强, 汲胜昌, 祝令瑜, 等. 双绕组电力变压器梯形网络频率响应的矩阵算法 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(2): 89-95.
- REN Fuqiang, JI Shengchang, ZHU Lingyu, et al. Matrix algorithm for ladder network frequency response analysis of double-winding power transformer [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(2): 89-95.
- [23] 孟晨. 多绕组电力变压器波过程的计算与分析 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2013.
- (编辑 赵炜 亢列梅)