

DOI: 10.3969/j.issn.1006-348X.2026.03.004

基于参数辨识与图形特征的变压器绕组状态 在线监测方法

童涛¹, 曹辰², 樊海飞³, 刘阳¹, 熊军辉¹

(1. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096; 2. 沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁 沈阳 100870;
3. 国网江西省电力有限公司修水县供电分公司, 江西 九江 332400)

摘要:在电网数字化运维检修快速发展的背景下,为解决传统变压器离线检测手段带来的停电成本高、检测周期长、无法实时反映运行状态等突出问题,文中提出一种融合短路阻抗在线参数辨识与电压电流李萨如图形特征的变压器绕组状态在线监测方法。基于电磁感应原理,推导参数辨识方程,求解变压器阻抗参数;同时,利用变压器端口绕组电压差与对应侧电流,构建李萨如图形轨迹,将抽象电气参数转化为直观图形特征,实现绕组机械状态与电气特性的直观判别。现场实测与短路冲击验证结果表明,所提方法可将短路阻抗辨识误差稳定控制在 $\pm 2\%$ 以内,能够灵敏、准确、可靠地识别绕组变形、位移、松动等早期隐患,为电力变压器数字化状态监测、智能预警与精准检修提供一套完整可行的技术方案与数据支撑。

关键词:电力变压器;绕组变形;在线监测;参数辨识;李萨如图

中图分类号:TM 40 **文献标志码:**B **文章编号:**1006-348X(2026)03-0017-05

0 引言

作为电力系统中电压变换、功率传输、潮流调控的核心设备,电力变压器具有结构复杂、造价高昂、运行环境严苛等特点^[1-4],其健康状态直接决定电网运行的安全性、稳定性与供电可靠性。随着电网规模持续扩大、电压等级不断提升以及新能源的大规模并网,变压器在运行过程中频繁承受外部短路冲击、系统过电压、负荷剧烈波动以及长期电磁振动等多重应力作用^[5-7],其绕组变形、绝缘老化、部件松动等潜伏性故障风险显著增加。绕组变形作为变压器最常见、危害性最大的故障形式之一,在早期通常表现为轻微位移、扭曲、鼓包等,并不会立即影响变压器正常运行,但会持续削弱绕组机械强度与绝缘性能,逐步发展为匝间短路、饼间击穿、引线放电甚至设备烧毁等恶性事故,造成大范围停电与重大经济损失。因此,实现变压器绕组状态的在线、实时、精准、灵敏监测,提前识别早

期隐患^[8-11],对推动变压器由传统计划检修向数字化、状态化、智能化运维检修模式转型具有重要工程价值。

目前,变压器绕组变形检测主流技术仍以离线检测为主,包括低压脉冲法、频率响应分析法、离线短路阻抗法等,虽然检测精度较高,但必须在变压器停运条件下开展,无法反映设备实时运行状态,且检测周期长、工作量大、成本较高,难以满足电网全天候、不间断监测需求。近年来,基于电气量在线监测的绕组状态评估技术得到广泛关注,该类方法直接利用故障录波、PMU、在线监测装置等获取端口电压、电流数据,无需额外加装高频激励源,具有成本低、易部署、可实时监测等优势。然而,在实际工程应用中,现场采集信号易受谐波、噪声、直流分量、互感器误差、负荷波动等多种因素干扰,三绕组变压器参数辨识模型复杂、方程病态性强^[12],传统最小二乘法求解精度不足、抗干扰能力差,同时负荷变化会直接掩盖绕组真实状态特征,导致监测结果出现误判、漏判^[13]。

针对上述问题,文中依托数字化运维检修技术需

收稿日期:2026-04-10

基金项目:国网公司总部科技项目(521820240027)。

作者简介:童涛(1994),男,硕士,工程师,主要从事电力变压器诊断性试验和故障分析。

求,在现有研究基础上,系统开展变压器故障录波数据预处理、三绕组变压器短路阻抗在线辨识、李萨如图形特征提取与负载标准化、多源误差分析与补偿等关键技术研究,构建一套集数据清洗-参数辨识-图形判别-现场验证于一体的变压器绕组状态在线监测体系。该方法充分利用现场已有录波数据^[14-15],不改变变压器运行方式,不增加现场设备改造工作量,能够在不停电、不影响系统运行的前提下,实现绕组状态实时监测与早期故障预警,可为电网变压器数字化运维检修提供可靠技术支撑。

1 信号预处理

1.1 FIR 滤波器数学原理

现场故障录波器采集的原始电压、电流信号是反映变压器运行状态的直接数据源,但在实际采集过程中不可避免地混杂大量干扰成分,包括高次谐波、暂态尖峰毛刺、衰减直流分量、随机测量噪声以及非周期干扰成分等。这些干扰成分会直接掩盖工频信号的真实幅值、相位与波形特征,严重降低后续参数辨识精度,甚至导致状态评估结果失真。因此,必须在开展参数辨识与图形分析前,对原始录波数据进行高效、可靠的预处理,最大限度剔除干扰、保留真实工频信息。

文中采用有限长单位冲激响应(finite impulse response, FIR)数字滤波器实现故障录波数据的滤波预处理。FIR 滤波器具有绝对稳定、线性相位、无相位畸变、设计灵活等突出优势,能够在滤除高频噪声的同时,完整保留信号幅值与相位关系,非常适合电力系统工频信号处理。FIR 滤波器的数学原理为输入信号与滤波器系数的离散卷积,其输出表达式为:

$$y(n) = \sum_{k=0}^N h(k)x(n-k) \quad (1)$$

式中: $y(n)$ 为滤波后输出信号序列; $h(k)$ 为长度为 $N+1$ 的滤波器系数; $x(n)$ 为输入信号序列。

为精准提取 50 Hz 工频分量,文中采用窗函数法设计 FIR 带通滤波器,选取滤波性能均衡的汉明窗,该窗函数主瓣宽度适中、旁瓣衰减较大(约 -43 dB),可有效抑制吉布斯现象,使通带更平坦、阻带衰减更大。滤波器具体参数设计如下:阶数为 100 阶,采样频率 $F_s=5\,000$ Hz,通带截止频率设置为 49 Hz 与 51 Hz,形成窄带带通特性,仅允许 49~51 Hz 工频信号通过,

大幅衰减其他频率干扰成分。

经过 FIR 滤波处理后,原始信号中高频暂态毛刺、随机噪声、高次谐波等干扰被显著抑制,电压、电流波形更加平滑规整,工频基波分量特征突出,信噪比得到明显提升;同时,因 FIR 滤波器具有严格线性相位特性,滤波后信号不会产生相位畸变,电压与电流之间的相位关系得到完整保留,为后续短路阻抗参数辨识与李萨如图形分析提供了纯净、可靠、高质量的数据基础。

1.2 滤波效果

文中应用 FIR 滤波原理,将获得的高、中、低压侧电压和电流数据进行滤波,原始电压信号与滤波后的高、中、低压侧的电压数据信号其相差不大,原因在于原始电压信号只存在少量的高频信号,所以滤波前后的高、中、低压侧的电压数据相差不大。

如图 1 所示,高、中、低压侧的电流波形在此呈现出明显的畸变和毛刺,反映了复杂的稳态过程。经过带通滤波器处理后,电流波形中的高频暂态噪声被滤除,留下了平滑的工频电流分量。这不仅便于观察故障电流的幅值变化,更重要的是,由于 FIR 滤波器的线性相位特性,波形的相位关系得以保持,没有发生畸变。滤波后的电压和电流波形信噪比显著提高(见图 2),波形平滑,工频特征突出,极大地方便了对故障电气量工频变化的观测与分析。

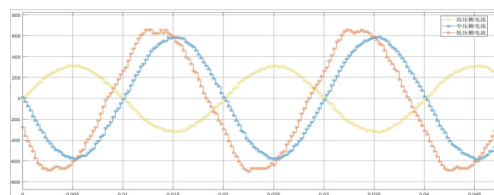


图 1 滤波前高、中、低压侧的电流数据

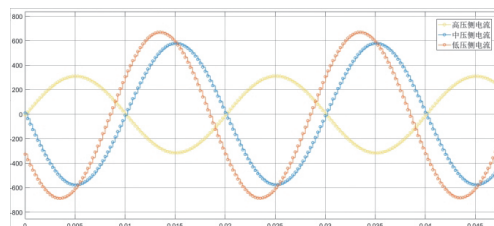


图 2 滤波后高、中、低压侧的电流数据

2 在线辨识模型

2.1 三绕组变压器短路阻抗在线辨识

短路阻抗是反映变压器绕组结构状态、漏磁分布

与电气特性的核心参数,其电抗分量(短路电抗)对绕组位移、变形、松动等结构变化高度敏感。当绕组发生变形时,漏磁路径发生改变,直接导致短路电抗数值发生可观测变化,因此,通过在线辨识短路阻抗并监测其变化趋势,可有效判断绕组是否存在变形隐患。

文中针对电网中应用最广泛的三绕组变压器,建立等效电路模型与参数辨识方程,等效电路图如图3所示。

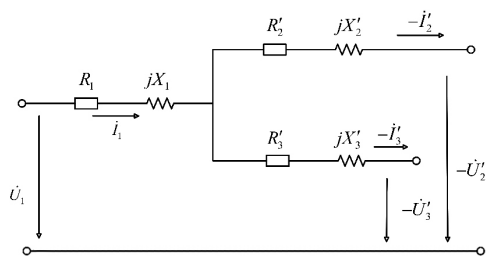


图3 三绕组变压器等效电路图

图3实现了不同接线类型变压器的通用化在线辨识。忽略励磁电流影响,基于基尔霍夫电压定律与电磁感应关系,高、中、低压侧绕组归算至高压侧的电压、电流满足以下关系:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 - \dot{U}_2 = \dot{I}_1(R_1 + jX_1) + \dot{I}_2(R_2 + jX_2) \\ \dot{U}_1 - \dot{U}_3 = \dot{I}_1(R_1 + jX_1) + \dot{I}_3(R_3 + jX_3) \\ \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\dot{U}_1$ 、 $\dot{U}_2$ 、 $\dot{U}_3$ 分别为高、中、低压侧归算电压; $\dot{I}_1$ 、 $\dot{I}_2$ 、 $\dot{I}_3$ 分别为对应侧电流; R_1 、 R_2 、 R_3 为绕组电阻; X_1 、 X_2 、 X_3 为绕组电抗。

变压器高-中压侧、高-低压侧、中-低压侧短路电抗可表示为:

$$\begin{cases} X_{12} = X_1 + X_2 \\ X_{13} = X_1 + X_3 \\ X_{23} = X_2 + X_3 \end{cases} \quad (3)$$

在实际辨识过程中,单一负载工况下方程数少于未知参数数量,无法唯一求解。因此,文中通过改变变压器负荷状态,获取多组不同负载工况下的端口电压、电流数据,构建超定方程组,提升求解稳定性与精度。

针对超定方程组易出现复共线性、病态性等问题,传统最小二乘法求解结果易受噪声干扰,误差偏大,文中引入奇异值分解(singular value decomposition, SVD)算法求解最小二乘问题。SVD算法通过对系数矩阵进行分解,舍去对噪声敏感的小奇异值,

仅保留主导大奇异值参与计算,可有效削弱矩阵病态性影响,显著提升参数辨识结果的稳定性、抗干扰能力与计算精度,特别适合现场噪声环境下的变压器参数在线辨识。仿真与现场验证表明,基于SVD的短路阻抗辨识方法可将辨识误差控制在 $\pm 2\%$ 以内,满足工程监测要求。

2.2 基于李萨如图的绕组状态图形辨识

为实现变压器绕组状态的判别,文中引入电压-电流李萨如图形分析方法。该方法将变压器等效为线性无源二端口网络,以高-中、高-低、中-低压侧绕组电压差为纵坐标,以对应侧电流为横坐标,构建李萨如图形。在工频正弦信号激励下,电压差与电流存在稳定相位差,所形成的轨迹为标准椭圆,椭圆的形状、尺寸、指向、离心率等特征直接由变压器内部短路阻抗决定,与绕组结构状态密切相关,如图4所示。

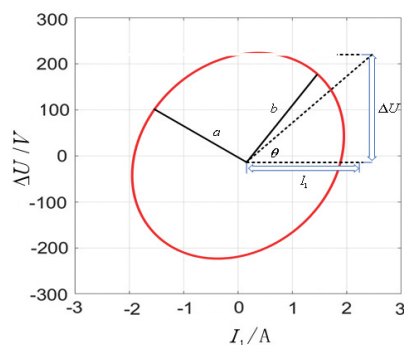


图4 U_{HM} - I 轨迹与短路阻抗关系示意图

电压差与电流构建的李萨如图椭圆基本方程为:

$$\frac{x^2}{I_m^2} + \frac{y^2}{U_m^2} - \frac{2xy \cos \varphi}{I_m U_m} = \sin^2 \varphi \quad (4)$$

式中: x 为电流瞬时值; y 为电压差瞬时值; I_m 、 U_m 分别为电流与电压差幅值; φ 为电压差与电流之间的相位差。

从椭圆轨迹中可提取长轴 a 、短轴 b 、离心率 e 、倾斜角 θ 、面积 S 等关键特征参数,上述参数与短路阻抗模值 $|Z|$ 存在明确对应关系:

$$|Z| = \frac{U_m}{I_m} = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (5)$$

当绕组发生变形时,短路阻抗发生变化,椭圆特征参数随之改变,通过监测特征参数变化即可判断绕组状态。

在实际运行中,变压器负荷大小、功率因数会频繁波动,即使绕组状态未发生变化,负荷波动也会导

上述结果充分表明,试验变压器在短路冲击后,A、B、C三相绕组均未发生轴向位移、径向变形、绕组松动等机械损伤,内部漏磁路径与电磁耦合关系保持完整,绕组机械结构与电气状态均处于正常范围。

综合短路阻抗辨识与李萨如图形分析结果,证明文中所提方法能够在现场复杂环境下稳定运行,有效抵御噪声、负荷波动、互感器误差等干扰,准确反映变压器绕组真实状态,具备良好的工程实用性与可靠性。

4 结语

文中针对电网变压器故障录波器所采集的电压电流数据进行预处理,采用滤波技术以抑制高次谐波及非周期分量的干扰,从而克服这些噪声成分对变压器参数辨识精度产生的显著负面影响;依据三绕组变压器的基本电磁关系,构建了其三绕组等效电路模型。在此基础上,推导了用于参数辨识的数学模型,该模型以变压器端口电压、电流观测值为基础,旨在求解等效电路中的工频阻抗参数。

现场短路冲击验证表明,所提方法能够准确识别绕组健康状态,灵敏反映绕组变形隐患,可实现变压器不停电、在线、实时状态监测,为数字化运维检修提供核心技术支撑。

参考文献:

[1] 许婧,王晶,高峰,等.电力设备状态检修技术研究综述[J].电网技术,2000,24(08):50-54.
[2] 董宝骅.运行中变压器的状态评估与状态检修[J].电力设备,2006,7(01):57-60.

[3] 刘天舒,苏昊,潘超.交直流混杂环境下三相变压器绕组振动研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(08):61-68.
[4] 陈子辉,吴智影,刘贺,等.基于纵横交叉算法的变压器三相不平衡损耗研究[J].电网与清洁能源,2020,36(07):57-63.
[5] SAMSUDIN R, SATAR H. Detection of near failure winding due to deformation in 33/11 kV power transformer by using low voltage impulse (LVI) test method and validated through untanking[J]. World Academy of Science Engineering & Technology, 2010, 194(03): 599-615.
[6] 陈一鸣,梁军,张静伟,等.基于改进参数辨识的三绕组变压器绕组状态在线监测方法[J].高电压技术,2019,45(05):1567-1575.
[7] 林智勇,李荣华,邓东平,等.基于解谱法的变压器油纸绝缘混联等效电路参数辨识方法[J].电工技术学报,2025,40(19):6283-6292.
[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(03):62-65.
[9] 邓祥力,杨梅,吴文强,等.基于变压器多运行状态漏感参数辨识的绕组轴向变形在线检测研究[J].变压器,2021,58(05):45-53,72.
[10] 潘超,石文鑫,金明权,等.Y/?接线电力变压器直流扰动励磁特性[J].高电压技术,2019,45(04):1153-1160.
[11] 李璞,王奕,张博.基于深度学习的电力变压器匝间短路故障辨识方法[J].变压器,2025,62(06):41-50.
[12] 陈涌太.配电变压器参数在线测量方法及应用研究[D].保定:华北电力大学,2024.
[13] 马婧.基于PMU数据的三绕组变压器参数辨识方案研究[D].北京:华北电力大学,2023.
[14] 陈一鸣.电力变压器在线监测方法研究[D].济南:山东大学,2020.
[15] 吴昊.基于参数辨识的变压器绕组变形监测研究[D].保定:华北电力大学,2018.