

DOI:10.12158/j.2096-3203.2019.05.025

## 一种基于 J-A 磁滞模型的变压器在线运行监测方法

方园<sup>1</sup>, 施仁毅<sup>2</sup>, 夏家辉<sup>1</sup>, 阮建雄<sup>1</sup>, 陈锴<sup>1</sup>

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 清江水电开发有限责任公司, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 变压器由于其特殊的电磁特性, 在运行中可能会出现各种隐性且未能触发相关保护的故障, 危及设备以及电网的安全稳定运行, 文中提出一种基于 J-A 磁滞模型的变压器在线运行状态监测的方法, 目的在于辅助运维人员判断变压器在实际运行中可能会出现各种故障。首先建立基于 J-A 磁滞理论的变压器模型, 然后采集对实际运行中变压器的相关波形, 利用小波变换分析实时工况下变压器时波形与所建立的变压器模型预测波形进行误差校验, 通过校验结果来判断变压器是否正常工作, 最后, 通过仿真实验, 验证了所提监测方法的可靠性。

**关键词:** J-A 磁滞模型; 变压器; 小波变换; 能量损耗; 在线监测

**中图分类号:** TM734

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2019)05-0177-08

### 0 引言

变压器、互感器等铁磁元件是电力系统重要的设备, 其稳定运行对整个电网安全生产具有重要的意义<sup>[1-3]</sup>, 变压器由于其独特的电磁特性<sup>[4-5]</sup>, 在运行中可能会面临各种故障。随着智能变电站建设规模的扩大, 设备的可靠性越来越高, 变电站的无人值守模式逐渐取代传统的有人值守模式, 成为变电站的主要运行维护管理模式。而无人变电站的主要技术基础就是在线监测技术, 在设计在线运行监测系统时需要考虑较多的因素<sup>[6-7]</sup>, 目前常用的变压器运行在线监测方法主要有油色谱分析法<sup>[8-11]</sup>、振动法<sup>[12-13]</sup>、参数辨识法<sup>[14-15]</sup>、人工智能监测<sup>[16-17]</sup>等。

文献[14]提出了一种基于短路电抗辨识的三绕组变压器绕组状态在线监测方法, 该方法参数方程状态需要人为评估, 相对误差较大。文献[10]提出一种基于油色谱的溶解气体色素分析 (dis-solved gases analysis, DGA) 监测方法, 但油色谱方法只能在故障诊断中作为分析参考, 不具有在线监测能力。文献[11]提出一种以 DSP 处理器为核心的状态监测方法, 但该方法无法对可能发生的微小问题作出预先反馈, 且故障识别率不高。文献[13]提出的基于振动信号分析的在线监测方法, 该方法在变压器出现大的故障时, 可以有效监测到相关信号, 但对于微小的故障不能提前预警。文献[17]提出一种基于嵌入式系统设计的变压器运行状态在线监测方法, 该方法以变压器运行数据作为依据, 使用人工智能, 相对其他方法准确率较高。文中提出

一种全新的基于改进 Jiles-Atherton (J-A) 磁滞模型的变压器运行状态实时监测方法。通过改进的 J-A 磁滞模型对变压器进行精准建模, 同时对实际运行中变压器二次侧相关波形进行采集, 利用小波变换分析实际工况下变压器的实时波形与基于改进 J-A 磁滞理论的变压器模型在相同工况下预测波形的误差, 来判断变压器是否正常运行, 为运维人员提供了一种理论可行的监测方法, 并通过实验验证该方法的准确性。

### 1 J-A 磁滞模型

#### 1.1 J-A 磁滞模型的建立

铁磁材料磁滞不存在时, 如当励磁电流进行单向磁化<sup>[18]</sup>, J-A 非磁滞模型采用改进的 Langevin 函数来描述各向同性铁磁材的磁化特性, 磁化强度  $M_{an}$  与磁场强度  $H$  的关系式如下。

$$M_{an} = M_s \left\{ \coth \left[ \frac{(H + \alpha M_{an})}{a} \right] - \frac{a}{(H + \alpha M_{an})} \right\} \quad (1)$$

式中:  $M_{an}$  为理想材料磁化强度;  $M_s$  为饱和磁化强度, 与材料自身特性及温度有关, 可以查相关数据直接得到;  $a$  为表征无磁滞磁化曲线形状的参数。

当铁芯磁滞存在时, 即励磁电流为交变电流时, 基于对磁畴壁运动原理的分析, 把实际磁化强度  $M$  分解成可逆磁化分量  $M_{rev}$  与不可逆磁化分量  $M_{irr}$ <sup>[16]</sup>, 且  $M = M_{rev} + M_{irr}$ ,  $M_{rev} = c(M_{an} - M_{irr})$ 。其中可逆磁化分量归因于畴壁弯曲, 不可逆磁化分量归因于畴壁取代,  $c$  为可逆磁化系数由磁化过程的能量损耗, 可得计及磁滞损耗的能量平衡方程:

$$\frac{dM_{irr}}{dH} = \frac{M_{an} - M}{\delta k} + \alpha \frac{M_{an} - M}{\delta k} \frac{dM}{dH} \quad (2)$$

式中： $\alpha$  是反应磁畴内部耦合的平均场参数，无量纲； $k$  为磁畴间的牵制系数。对式(2)两边求微分并将  $H_e = H + \alpha M_{an}$  代入，可得不可逆分量的微分表达式：

$$\frac{dM_{irr}}{dH} = \frac{M_{an} - M}{\delta k} + \alpha \frac{M_{an} - M}{\delta k} \frac{dM}{dH} \quad (3)$$

$\delta$  是方向系数，通过上述计算  $M$  对  $H$  的微分关系，如式(4)所示：

$$\frac{dM}{dH} = \frac{(1-c)(M_{an} - M) + c\delta k \left( \frac{dM_{an}}{dH} \right)}{\delta k - \alpha(1-c)(M_{an} - M)} \quad (4)$$

式中： $c$ ， $\alpha$ ， $k$  为待求参数。直接解方程并由上述关系式，可得经典 J-A 磁滞模型的 B-H 磁滞回线。

在局部磁滞回线中，微分磁导率出现负值，即非物理解，在实际中是不可能的。因此需要对模型进行改进。非物理解产生的原因是此时磁畴仍被牵制在缺陷点，即直到  $H$  穿过非磁滞磁化曲线  $dM_{irr}/dH = 0$  成立。采取的修正式  $(M_{an} - M)\delta < 0$ ，令  $dM_{irr}/dH = 0$ ，则计及磁滞损耗的磁化能量平衡方程可为<sup>[19]</sup>：

$$\mu_0 k \delta \int \frac{dM_{irr}}{dH_e} dH_e = \delta_M \left( \mu_0 \int M_{an} dH_e - \mu_0 \int M dH_e \right) \quad (5)$$

式中： $\mu_0$  为真空磁导率； $H_e$  为有效磁场强度。当  $(M_{an} - M)\delta < 0$  时， $\delta_M = 0$ ；当  $(M_{an} - M)\delta > 0$  时， $\delta_M = 1$ ，对比上式可为：

$$\frac{dM}{dH} = \frac{\delta_M(1-c)(M - M_{an}) + c\delta k \left( \frac{dM_{an}}{dH} \right)}{\delta k - \alpha\delta_M(1-c)(M - M_{an})} \quad (6)$$

此外，J-A 磁滞模型中损耗系数  $k$  是常数，实际磁化过程中  $k$  是随磁化状态而变化的。以不可逆磁化强度  $M_{irr}$  为自变量的修正函数对损耗系数  $k$  进行修正，如式(7)所示：

$$k = k_0 \left[ 1 - v \left( \frac{M_{irr}}{M_s} \right)^2 \right] \quad (7)$$

式中： $v \in (0, 1)$  根据不同铁磁材料取不同的值； $k_0$  为起始磁化的损耗系数解，由式微分方程组，可得改进 J-A 磁滞模型的 B-H 磁滞回线<sup>[20]</sup>。

## 1.2 动态 J-A 磁滞模型的建立

考虑到变压器在运行中的各种损耗，为了模型的准确性，需要将损耗加入到磁滞模型中。变压器的铁芯损耗  $P_z$  可分为磁滞损耗  $P_c$ 、正常涡流损耗  $P_j$ （又称经典涡流损耗）、额外损耗  $P_e$ （反常涡流损耗）3 个部分，可用式(8)表示：

$$\begin{cases} P_z = P_c + P_j + P_e \\ P_j = \frac{\sigma d^2}{2\beta} \left( \frac{dB}{dt} \right)^2 \\ P_e = \sqrt{\sigma G V_0 S} \left| \frac{dB(t)}{dt} \right|^{3/2} \\ P = H(t) \frac{dB(t)}{dt} \end{cases} \quad (8)$$

可得最终方程为：

$$H_{总}(t) = H_{磁}(t) + \frac{\sigma d^2}{2\beta} \frac{dB(t)}{dt} + \sqrt{\sigma G V_0 S} \delta \left| \frac{dB(t)}{dt} \right|^{1/2} \quad (9)$$

式中： $\sigma$  为材料电导率； $d$  为材料的厚度； $\beta$  为几何系数，材料为叠片时， $\beta$  值为 6，材料为圆柱时， $\beta$  值为 16，为球形时， $\beta$  值为 20； $S$  为材料截面积； $G$  为一个耦合常数没有单位，其值 0.135 6； $V$  为统计性的耦合场参数，其值可以通过测量得到，单位为 A/m。

利用式(9)可以精确模拟出变压器铁芯的实际磁滞曲线<sup>[20-21]</sup>，铁芯的实时动态磁滞曲线的斜率即为该状态下，铁芯的实时等效磁导率，通过铁芯的实时等效磁导率可以得到变压器绕组的动态电感，为后续变压器建模提前做好准备。

## 2 单相变压器建模

### 2.1 变压器的数学模型

图 1 是空载工作下的普通单相双绕组变压器磁路结构，图中  $\varphi_m$  代表变压器的主磁通， $\varphi_{\sigma 1}$  为变压器一次绕组的漏磁通， $u_1$  为一次绕组的端口电压， $u_2$  是变压器二次绕组的端口电压， $e_1$  是原边绕组的感应电动势， $e_2$  是副边绕组的感应电动势， $i_0$  为变压器的励磁电流，也就是空载电流。

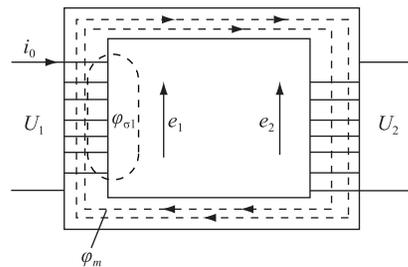


图 1 空载工作下的普通单相双绕组变压器磁路结构

Fig.1 Magnetic circuit structure diagram of ordinary single-phase double-winding transformer under no-load operation

根据基尔霍夫电压定律，可得：

$$\begin{cases} u_1 = r_1 i_0 - e_1 \\ u_2 = r_2 i_2 - e_2 \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} e_1 = -N_1 \frac{d\varphi_1}{dt} = -N_1 \frac{d(\varphi_m + \varphi_{\sigma 1})}{dt} \\ e_2 = N_2 \frac{d\varphi_2}{dt} = N_2 \frac{d\varphi_m}{dt} \end{cases} \quad (11)$$

通过磁路中的欧姆定律可以推导:

$$\begin{cases} N_1 i_0 = \frac{\varphi_1}{\lambda_m + \lambda_{\sigma 1}} \\ N_2 i_2 = \frac{\varphi_2}{\lambda_m} \end{cases} \quad (12)$$

由上式可以推导出:

$$u_1 = r_1 i_0 + N_1^2 (\lambda_m + \lambda_{\sigma 1}) \frac{di_0}{dt} \quad (13)$$

$$u_2 = r_2 i_2 + N_2^2 \lambda_m \frac{di_2}{dt} \quad (14)$$

## 2.2 相关参数处理

仿真前需要分析铁芯等效磁场强度、等效磁阻和等效磁导率的计算公式。根据全电流定律可得,沿任意一个闭合环路的磁场强度的线积分为穿过该环路所有的电流代数和:

$$N_1 i_0 = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 \quad (15)$$

式中:  $H_1$  为一次绕组铁芯柱的磁场强度;  $H_2$  为二次绕组铁芯柱的磁场强度;  $H_3$  为铁轭的磁场强度;  $l_1$ 、 $l_2$  分别为一次和二次绕组铁芯柱的等效磁路长度;  $l_3$  为上、下铁轭的等效磁路长度总和。

$$\begin{cases} H_1 = \frac{\varphi_1}{\mu_1 S_1} = \frac{\varphi_m + \varphi_{\sigma 1}}{\mu_1 S_1} \\ H_2 = \frac{\varphi_m}{\mu_2 S_2} \\ H_3 = \frac{\varphi_m}{\mu_3 S_3} \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $\mu_1, \mu_2, \mu_3$  分别为一次绕组,二次绕组,铁轭的磁导率;  $S_1, S_2, S_3$  分别为一次绕组,二次绕组的铁芯柱截面积,铁轭的截面积,且  $S_1 = S_2$ 。因为各段磁场强度不同,用公式无法得到铁芯柱和铁轭的磁场强度,计算铁芯的磁导率与铁芯的磁场强度有着密切的关系,引入铁芯等效磁场强度和等效铁芯磁路长度的概念。

$$\begin{cases} N_1 i_0 = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 = Hl \\ l_1 + l_2 + l_3 = l \end{cases} \quad (17)$$

则铁芯等效磁导率计算如下:

$$\mu_{Fe} = \mu_0 \left( 1 + \frac{dM}{dH} \right) \quad (18)$$

$$\lambda_m = \mu_{Fe} S / l \quad (19)$$

$$S = \frac{S_1 l_1 + S_2 l_2 + S_3 l_3}{l} \quad (20)$$

## 2.3 变压器模型求解

步骤一:仿真初始条件的确立。

根据变压器端口电压计算出该时刻的电流  $I$ ; 计算出变压器铁芯等效磁路长度  $L$  和等效截面积  $s$ , 并计算该条件下等效磁场强度  $H$ ; 计算该条件下的磁感应强  $B$ ; 依据公式  $\mu = B/H$  计算此时刻铁芯的等效磁导率  $\lambda$ ; 求得此时刻励磁电流  $I$  作为仿真初始条件。

步骤二:根据电流计算  $H$ 。

将步骤一求得的励磁电流结合全电流定律  $Ni = Hl$  求得此时刻等效磁场强度  $H$ 。

步骤三:计算  $M, \frac{dM}{dH}$ 。

将步骤一求得等效磁场强度  $H$  结合  $H_e = H + \alpha M_{an}$  代入式(3)、式(5—7)和式(9)求得  $\frac{dM_{al}}{dH_{al}}$ , 并

代入(18)求得新的  $\mu_{Fe}$ 。

步骤四:更新各芯柱等效磁导率。

将步骤三求得新的铁芯等效磁导率  $\mu_{Fe}$  代入式(19)分别求得此时对应的  $\lambda$ 。

步骤五:更新该时刻电流。

将步骤四得到的等效磁导率带入式(13)、式(14)求得此时电流  $I$ 。

步骤六:重复上述过程得到完整的电流波形。

具体流程如图2所示。

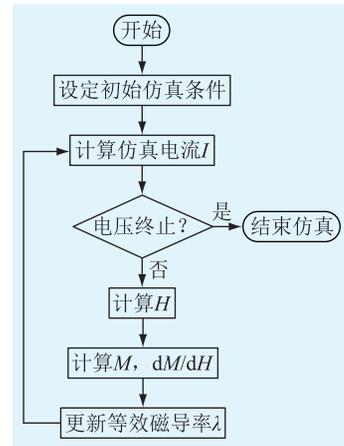


图2 变压器模型求解流程

Fig.2 Transformer model solving process

## 3 变压器运行状态在线监测系统

### 3.1 在线监测系统模型原理

首先从发电机母线出线口处采集发电机的电流信号,然后输入到基于 J-A 磁滞模型的变压器模型中,同时采集该工况下变压器输出端电流波形,与所建系统模型的输出电压电流波形进行比较,并将无故障运行的近 1 个月的波形误差均值作为当前

波形误差的参考值来判断变压器是否在正常工况下运行。运行流程如图3所示。

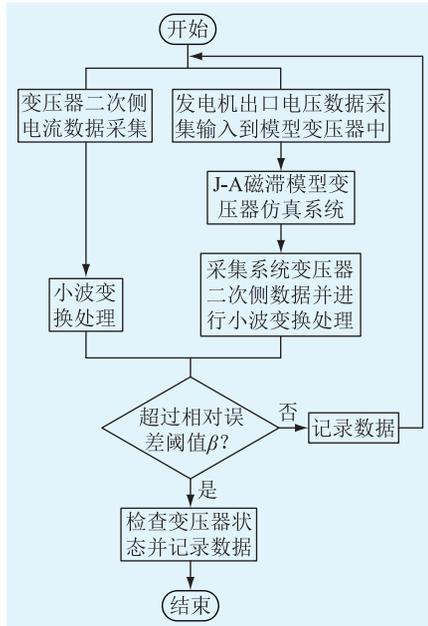


图3 变压器在线监测系统流程

Fig.3 Transformer on-line monitoring system process

### 3.2 数据采集

#### 3.2.1 发电机输出端数据采集

发电机端电压或电流是数据采集的起始部分,可以从发电机出口处的电压互感器,或者电流互感器采集数据通过相关电路记录并输入 J-A 磁滞理论的模型变压器。互感器两端电压一般几十伏或者更高,不方便数字电路处理,因此需要将电压通过电路变到合适大小供单片机采集处理<sup>[22]</sup>,其相关电路要根据互感器二次测的电压或电流大小来具体设计。单片机可以采用 MAX197 型号的单片机,MAX197 作为一款常用的模拟信号采集芯片,具有 12 bit 的测量精度,转换速度快,价格低,具有标准接口,总线时序兼容绝大多数的微处理器,仅需 5 V 电压供电,外围电路简单,广泛应用于工业系统控制、自动测试等领域。存储器选择大小为 32 GB 的内存储器,发电机输出端数据采集的流程如图 4。



图4 发电机输出端数据采集的具体过程

Fig 4 Specific process diagram of data acquisition at the generator output

#### 3.2.2 变压器二次测波形采集

变压器二次测电流可以通过二次测的电流互感器设计电路采集,处理过程和发电机侧电流采集流程相同,即首先通过负增益电路将电流处理至合适大小,然后通 MAX197 处理并存储至存储器。

#### 3.2.3 变压器二次侧实时负载数据采集

由于在工作中负载有可能发生变化,所以所建的模型在仿真过程中需要和实际工况下的变压器负载保持一致。实际运行中的负载可以根据变压器的实时功率与端口电压计算得到。因此将实际工况下变压器二次侧数据同步到文中模型的变压器二次侧负载中,以保证文中模型下的变压器仿真与实际工况下的变压器运行状态一致。

### 3.3 数据处理

#### 3.3.1 小波变换

设当小波函数  $\psi(t)$  满足容许性条件时,连续小波变换的逆变换可为<sup>[23-24]</sup>:

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} [W_f(a, b)] \psi_{a,b}(t) \frac{1}{a^2} da db \quad (21)$$

重构公式为:

$$f(t) = A \sum_{-\infty}^{+\infty} \sum_{-\infty}^{+\infty} c_{j,k} \psi_{jk}(t) \quad (22)$$

在非线性负载输出电流与电压信号泛函级数模型的基础上,应用小波分解与重构算法可以求得所需电流与电压的基波分量与畸变分量如式(23):

$$\begin{cases} u(t) = \sum_k c_0^u \varphi(t-k) + \sum_k \sum_{j=0}^{J-1} d_j^u(k) 2^{\frac{j}{2}} \psi(2^j t - k) \\ i(t) = \sum_k c_0^i \varphi(t-k) + \sum_k \sum_{j=0}^{J-1} d_j^i(k) 2^{\frac{j}{2}} \psi(2^j t - k) \end{cases} \quad (23)$$

式(23)即为小波分析的最后结果,根据不同的情况选取不同  $k$  值。

#### 3.3.2 数据处理

对于收集的电流波形拟采用小波技术进行分析比较,基于小波变换能够为信号提供一种更精细的分析方法,小波变换能将频带进行多次划分,对不同频率的信号有很好的分析处理。对电压电流波形数据的处理过程如下:

第一步:从存储器中调出同一时间段的实际工况下变压器电压电流波形和通过 J-A 理论建立的变压器模型仿真出的电压或电流波形,并输入处理器中;

第二步:通过小波变换分解 2 种波形数据;

第三步:将 2 种波形数据进行误差检验;

第四步:记录实时数据波形。

#### 3.4 运行状态诊断

在判断变压器运行状态之前,需要计算该时刻实际工况下变压器与模型变压器的误差值  $\beta$ ,误差计算如式(24):

$$\beta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|A_{\text{模}} - A_{\text{实}}|}{A_{\text{实}}} \quad (24)$$

式中:  $A_{\text{模}}$  为模型运行后通过小波变换的频谱或相谱;  $A_{\text{实}}$  为实际变压器运行通过小波变换后的频谱或相谱;  $n$  为取点个数。

随着运行时间的增长, 变压器会出现老化、磨损等问题, 这些问题可能会影响监测系统准确率, 因此需要实时更新相关误差阈值  $\beta_0$ 。误差阈值  $\beta_0$  计算如式(25):

$$\beta_0 = \frac{\sum_{i=1}^m \beta_m}{n} \quad (25)$$

$\beta_m$  为上个月实际工况变压器与模型变压器在  $m$  时段的误差值, 若  $\beta$  与  $\beta_0$  在合理范围内, 则变压器正常工作, 若不在合理范围内, 运维人员需要对变压器做全面检查。

## 4 仿真实验

### 4.1 变压器模型验证

为验证模型精准性, 采用 ODFS-250 000/500 型变压器做对比验证, 该变压器的相关数据如表 1 所示。

表 1 变压器相关数据  
Table 1 Transformer related data

参数	数值
额定容量/(kV·A)	250 000
额定电压/kV	525/ $\sqrt{3}$ /230/ $\sqrt{3}$ /36
额定电流/A	824.8/1 882.7/2 222.2
高压短路阻抗/ $\Omega$	15.71
低压短路阻抗/ $\Omega$	57.74
中压短路阻抗/ $\Omega$	37.15
硅钢片	武钢 30QG105 叠片工艺
铁芯框高/mm	2 180
铁芯中心距/mm	1 409
芯柱净面积/ $\text{cm}^2$	9 755.2
旁柱净面积/ $\text{cm}^2$	4 888.7

电工钢片相关磁滞参数如表 2 所示。

表 2 电工钢片数据  
Table 2 Dates of electrical steel sheet

参数	数值	参数	数值
$M_s$	1.574 3e6	$a$	499
$\alpha$	7.09e-4	$k_0$	1 154.6
$c$	0.019 8		

根据式(9)得到该电工钢片磁滞回线如图 5 所示。

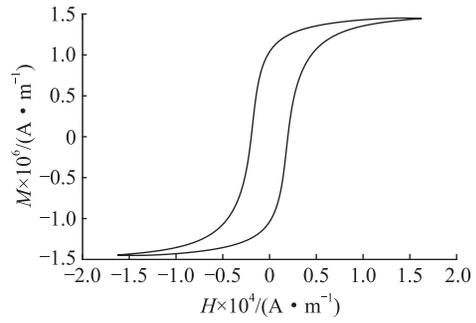


图 5 电工钢片磁滞回线

Fig.5 Electrical steel sheet hysteresis loop diagram

根据上述数据利用 simulink 搭建仿真模型, 模型如图 6 所示。

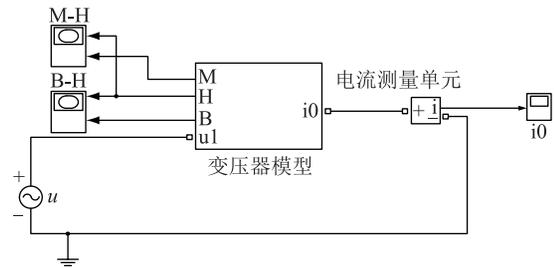


图 6 变压器仿真模型

Fig.6 Transformer simulation model

利用上述搭建的 simulink 模型对变压器进行空载试验, 模型变压器数据和出厂变压器数据对比如表 3 所示。

表 3 空载实验误差对比  
Table 3 No-load experiment error comparison

施加电压平均值/kV	空载电流/A	模型电流/A	相对误差/%
0.38	0.031	0.032	0.65
3.601	0.199	0.198	0.50
7.204	0.149	0.421	0.48
10.800	0.658	0.657	0.15
14.392	0.916	0.917	0.11
18.008	1.186	1.188	0.17
21.606	1.440	1.440	0.00
25.206	1.657	1.659	0.12
28.799	1.826	1.825	0.05
32.395	1.967	1.966	0.05
34.210	2.726	2.728	0.07
36.010	5.952	5.958	0.10
37.806	18.30	18.21	0.50
39.604	28.19	28.25	0.22

根据表 3 可以看出提出的基于 J-A 磁滞理论的变压器模型与实际工况下运行的变压器误差很小, 证明了文中所建立的变压器模型的准确性。

## 4.2 在线运行监测系统仿真验证

利用 Matlab 搭建 J-A 磁滞理论的的变压器仿真模型进行验证,变压器参数采用上节中的相关数据,实际工况下的变压器运行数据采用国内某水电厂相同型号的变压器运行数据,仿真初始条件以及负载均相同。

变压器在 0.3 s 时系统受到外界影响发生微小故障,导致电流发生微小的变化,且该时刻相关保护并未识别故障。实际工况下变压器录波器记录波形如图 7 所示。

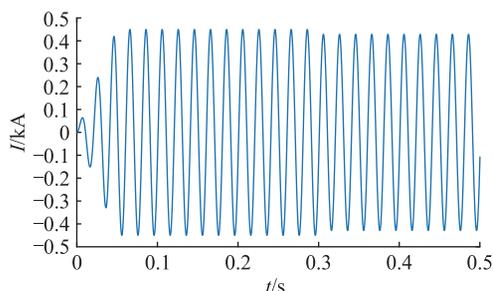


图 7 实际工况下变压器录波数据

Fig.7 Transformer recording data under actual working conditions

利用文中建立的基于 J-A 磁滞理论建立的变压器模型仿真数据如图 8 所示。

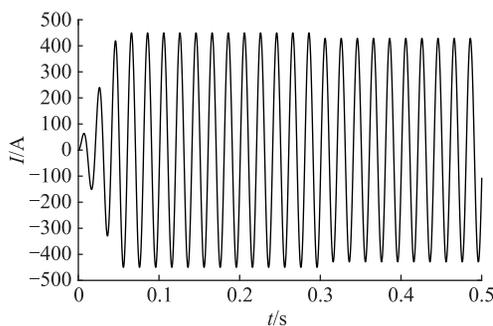


图 8 模型下仿真波形数据

Fig.8 Simulate waveform data in this model

仿真时间取 0.5 s,共取点 2 000 个,故障发生在 0.3 s 时,小波分析对应的取点范围为 1 150~1 250,图 9—图 10 分别是根据式(23)、 $k$  取 4 时实际工况下变压器录波数据小波分析和基于 J-A 磁滞理论模型变压器仿真波形的小波分析。

将图 9 和图 10 中小波数据导出,利用式(24)分别得到  $d_1, d_2, d_3, d_4, a_4$  的平均误差为 1.14%, 5.26%, 2.31%, 1.029%, 1.02%。除  $d_2$  误差超过 5% 外,其他所有误差均较小。此时变压器已经发生了微小故障,且并未能引起相关保护的动作用,运维人员应当关注当时变压器运行状况,及时记录相关情况,做好解决预案。

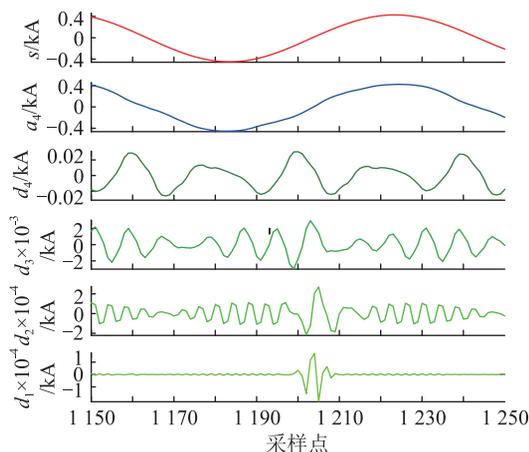


图 9 实际工况下录波数据小波分析

Fig.9 Wavelet analysis of recorded data under actual working conditions

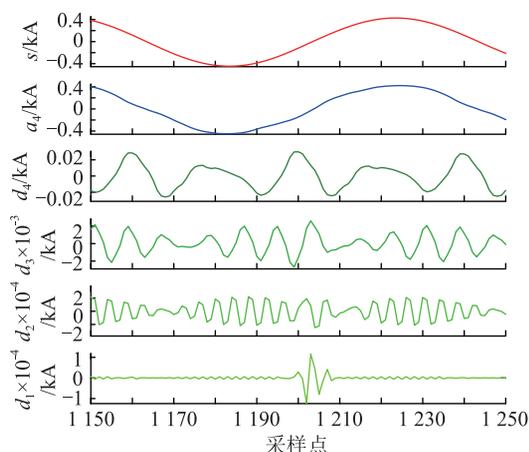


图 10 模型下仿真波形数据小波分析

Fig.10 Wavelet analysis of simulated waveforms data in this model

## 5 结语

文中提出了一种基于 J-A 磁滞模型的变压器在线运行状态监测的方法,并通过仿真验证了该方法的可行性,且该方法有以下优点:

(1) 原理简单,效果明显,操作容易,为运维人员提供了一种理论可行的监测方法,减少了运维人员通过主观意识来判断造成的误差。

(2) 同时对变压器运行建立了历史运行状态数据,通过对运行状态长期监测计算得出的  $\beta$  值可以作为变压器维修保养的一个参考,比如随着变压器运行的年限增长, $\beta$  可能会随之增长,当该值接近或超过变压器相关保护的越限值时,而变压器又无明显的故障,就需要考虑是否对变压器进行检修维护。

(3) 变压器内部故障在很多时候都是有外部微小变化长期积累产生的,文中对变压器历史运行数据做了长期记录,可以为变压器在后续运行中发生

故障后而保护未动作时,分析问题提供相关依据,且基于文中的方法,为变压器后续保护方案提供了一种理论可行的方向,且该方法值得进一步研究。

本文得到湖北省梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室开放基金(2018KJX07)资助,谨此致谢!

#### 参考文献:

- [1] 李家锋,田家运,潘成. 多台变压器并联稳定运行的研究[J]. 电气技术,2017(2):124-125,139.  
LI Jiafeng, TIAN Jiayun, PAN Cheng. Study on parallel stable operation of multiple transformers[J]. Electric Technology, 2017(2):124-125,139.
- [2] 万季青. 变压器在线监测与故障诊断系统设计[D]. 武汉:湖北工业大学,2018.  
WAN Jiqing. Transformer online monitoring and fault diagnosis system design[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2018.
- [3] 许修乐. 考虑设备老化及运行状态的变压器可靠性评估[D]. 合肥:合肥工业大学,2017.  
XU Xiule. Reliability assessment of transformers considering equipment aging and operating conditions[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.
- [4] 杨志刚. ITER PPEN 主变压器电磁设计及其特性分析[D]. 合肥:国科学技术大学,2017.  
YANG Zhigang. Electromagnetic design and characteristics analysis of ITER PPEN main transformer[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.
- [5] 谭瑞娟. 单相特高压自耦变压器直流偏磁电磁特性研究[D]. 北京:华北电力大学,2017.  
TAN Ruijuan. Study on DC bias magnetic characteristics of single-phase UHV autotransformer[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [6] 梁吉山,段荣霞,张弛. 变压器运行状态监测系统的设计[J]. 自动化技术与应用,2018,37(2):117-119.  
LIANG Jishan, DUAN Rongxia, ZHANG Chi. Research and design of transformer operation status monitoring system[J]. Automation Technology and Application, 2018, 37(2):117-119.
- [7] 王天文,任小洪,贾书香,等. 一种电力变压器运行监测系统的设计[J]. 自动化技术与应用,2010,29(2):111-113.  
WANG Tianwen, REN Xiaohong, JIA Shuxiang, et al. Design of a power transformer operation monitoring system[J]. Automation Technology and Application, 2010, 29(2):111-113.
- [8] 梁玲君. 电力变压器油色谱在线监测技术的探讨[J]. 电工技术,2019(6):19-20,23.  
LIANG Lingjun. Discussion on on-line monitoring technology of power transformer oil chromatography[J]. Electrical Engineering, 2019(6):19-20,23.
- [9] QI Bo, WANG Yiming, ZHANG Peng, et al. Deep recursive belief network for transformer oil chromatographic trend prediction[J/OL]. Power grid technology: 1-8[2019-06-05]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2019.0030>.
- [10] 李振杰,卞朝晖,陈学民,等. 变压器油色谱在线监测数据有效性评估[J]. 高压电器,2018,54(6):158-163,169.  
LI Zhenjie, BIAN Zhaohui, CHEN Xuemin, et al. Validity evaluation of on-line monitoring data of transformer oil chromatography[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(6):158-163,169.
- [11] 蔡昆. 基于改良三比值法的变压器油色谱在线监测应用研究[D]. 广州:华南理工大学,2018.  
CAI Kun. Application of on-line monitoring of transformer oil chromatography based on improved three-ratio method[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [12] 林春耀,欧小波,杨贤,等. 短路冲击状态下的变压器振动特性及匝间短路故障检测[J]. 高电压技术,2018,44(11):3569-3576.  
LIN Chunyao, OU Xiaobo, YANG Xian, et al. Vibration characteristics of transformer and detection of interturn short circuit fault in short circuit under impact[J]. High Voltage Technology, 2018, 44(11):3569-3576.
- [13] 宋学彬. 电力变压器振动特性及绕组状态监测方法研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2018.  
SONG Xuebin. Research on vibration characteristics of power transformer and monitoring method of winding state[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2018.
- [14] CHEN Yiming, LIANG Jun, ZHANG Jingwei, et al. On-line monitoring method for winding state of three-winding transformer based on improved parameter identification[J]. High Voltage Technology, 2019, 45(5):1567-1575.
- [15] LU Xiao, XU Peng, FENG Shuhai, et al. A method for identifying and evaluating transformer positive sequence parameters considering random errors of multi-time measurement data[J]. Power grid technology, 2019, 43(3):856-863.
- [16] 刘云鹏,许自强,李刚,等. 人工智能驱动的数据分析技术在电力变压器状态检修中的应用综述[J]. 高电压技术,2019,45(2):337-348.  
LIU Yunpeng, XU Ziqiang, LI Gang, et al. A review of the application of artificial intelligence-driven data analysis technology in power transformer state maintenance[J]. High Voltage Technology, 2019, 45(2):337-348.
- [17] 王旭,张艳丽,唐伟,等. 旋转磁化下逆矢量 Jiles-Atherton 磁滞模型改进[J]. 电工技术学报,2018,33(S2):257-262.  
WANG Xu, ZHANG Yanli, TANG Wei, et al. Improvement of inverse vector Jiles-Atherton hysteresis model under rotating magnetization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(S2):257-262.
- [18] 赵越,李琳,刘任,等. 基于损耗统计理论的动态 J-A 磁滞模型[J]. 电工电能新技术,2019,38(5):93-99.  
ZHAO Yue, LI Lin, LIU Ren, et al. Dynamic J-A hysteresis model based on loss statistical theory[J/OL]. New technology of electrical energy, 2019, 38(5):93-99.
- [19] LIU Ren, LI Lin, WANG Yaqi, et al. Parameter extraction of Jiles-Atherton hysteresis model based on random and deterministic hybrid optimization algorithm[J/OL]. Transactions of

- Electrotechnical Engineering; 1-10[2019-03-21].
- [20] 周求宽,龙国华,刘衍,等. 电压互感器铁芯 J-A 磁滞参数特性研究[J]. 武汉大学学报(工学版),2018,51(4):341-346. ZHOU Qiuquan, LONG Guohua, LIU Yan, et al. Study on the characteristics of J-A hysteresis parameters of voltage transformer core[J]. Journal of Wuhan University(Engineering Science),2018,51(4):341-346.
- [21] 李阳. 基于动态 J-A 磁滞模型直流偏磁下的变压器铁损计算[D]. 天津:天津工业大学,2018. LI Yang. Calculation of transformer iron loss under DC bias based on dynamic J-A hysteresis model[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University,2018.
- [22] 李光耀. 配电变压器负荷监测装置设计[J/OL]. 内蒙古电力技术:1-4[2019-03-21]. LI Guangyao. Design of distribution transformer load monitoring device [J/OL]. Inner Mongolia Power Technology: 1-4 [2019-03-21].
- [23] 王英洁,曹铁男,夏成文,等. 电力变压器状态监测数据处理对策研究[J]. 电子测试,2018(23):116-117. WANG Yingjie, CAO Tienan, XIA Chengwen, et al. Research on data processing countermeasures of power transformer condition monitoring[J]. Electronic Test,2018(23):116-117.
- [24] 武宗方,刘毅力,马龙涛,等. 基于小波包变换与 FFT 相结合的电网谐波检测方法[J]. 电气自动化,2019,41(2):76-79. WU Zongfang, LIU Yili, MA Longtao, et al. Harmonic detection method based on wavelet packet transform and FFT [J]. Electrical Automation, 2019,41(2):76-79.

---

作者简介:



方园

方园(1992),男,硕士在读,研究方向为水电站建模与仿真(E-mail:413266925@qq.com);  
施仁毅(1991),男,本科,助理工程师,从事水电站检修工作;  
夏家辉(1994),男,硕士在读,研究方向为电力系统继电保护与控制。

## Transformer online operation monitoring method based on J-A hysteresis model

FANG Yuan<sup>1</sup>, SHI Renyi<sup>2</sup>, XIA Jiahui<sup>1</sup>, RUAN Jianxiong<sup>1</sup>, CHEN Kai<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and New Engerey, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Hubei Qingjiang Hydropower Development Co., Ltd., Yichang 443002, China)

**Abstract:** Due to its special electromagnetic characteristics, transformers may have various hidden faults that fail to trigger related protection during operation, which will endanger the safe and stable operation of equipment and power grid. This paper proposes a model based on J-A hysteresis. The method of monitoring the online operation status of the transformer is to assist the operation and maintenance personnel to judge various faults that may occur in the actual operation of the transformer. Based on this, this paper firstly establishes a transformer model based on J-A hysteresis theory, and then collects the relevant waveform acquisition of the transformer in actual operation, and uses wavelet transform to analyze the waveform of the transformer under real-time conditions and the error of the predicted waveform of the transformer model established. Verification, through the verification results to determine whether the transformer is working properly, and finally, through the simulation experiments, the reliability of the proposed monitoring method is verified.

**Keywords:** J-A hysteresis model; transformer; wavelet transform; energy loss; online monitoring

(编辑 杨卫星)