

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211604

# 基于小波变换的配电变压器差动保护相位补偿方法

吴昊天<sup>1</sup>, 赵阳<sup>1</sup>, 刘子卓<sup>1</sup>, 张弛<sup>2</sup>, 赵舫<sup>3</sup>

(1. 国网丽水供电公司, 浙江 丽水 323000; 2. 浙江浙电产业管理有限公司, 浙江 杭州 310000;  
3. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 为降低配电变压器故障引起的财产安全损失, 提升电力系统运行稳定性, 提出了基于小波变换的配电变压器差动保护相位补偿方法。首先, 通过计算线模行波电流波动及其梯度绝对值大小, 判断配电变压器有无故障, 即创建保护启动判据。然后, 依据等效线模行波差动电流的能量比确定故障区域, 并计算小波变换故障区域的初始模量反向行波差动电流, 以获得小波变换模极大值。最后, 通过构建故障选极判据获取故障类型, 计算故障状态下配电变压器空载合闸时的励磁电流, 判断励磁涌流和内部故障电流的变化, 并结合保护输出信号的开启和关闭, 实现配电变压器的差动保护相位补偿。仿真实验表明, 该方法可对区内故障进行有效鉴别, 具有很强的可靠性及有效性。负载工况下, 该方法相位补偿后电压电流的相位差一致, 具有更好的稳定性。

**关键词:** 配电变压器; 小波变换; 相位补偿方法; 故障选极; 负载工况; 励磁涌流

## Phase compensation method of distribution transformer differential protection based on wavelet transform

WU Haotian<sup>1</sup>, ZHAO Yang<sup>1</sup>, LIU Zizhuo<sup>1</sup>, ZHANG Chi<sup>2</sup>, ZHAO Fang<sup>3</sup>

(1. State Grid Lishui Power Supply Company, Lishui 323000, China; 2. Zhejiang Electric Industrial Company, Hangzhou 310000, China; 3. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** To reduce the safety loss of property caused by a distribution transformer fault and improve the operational stability of power system, a phase compensation method of distribution transformer differential protection based on wavelet transform is proposed. First, considering the fluctuation of line mode traveling wave current and the absolute value of its gradient, it is judged whether there is a fault in the distribution transformer. That is, a protection startup criterion is created. Secondly, it determines the fault area according to the energy ratio of the equivalent line mode traveling wave differential current, calculates the initial modulus of reversing the traveling wave differential current under the fault area of the wavelet transform, and obtains the maximum value of the wavelet transform modulus. Finally, by creating a fault pole selection criterion to obtain the fault type, the excitation current is calculated when the distribution transformer is closed without the load in a fault state. Also the changes of excitation inrush current and internal fault current are judged, and the phase compensation of differential protection of the distribution transformer is realized in combination with the opening and closing of the protection output signal. Simulation results show that this method can effectively identify faults in the area, has strong reliability and effectiveness, and under load conditions, the phase difference of voltage and current after phase compensation is consistent. It also has better stability.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0903100).

**Key words:** distribution transformer; wavelet transform; phase compensation method; fault pole selection; load condition; excitation inrush current

## 0 引言

为了安全运行配电变压器, 最大限度地减少故

障事故, 需要对配电变压器安装继电保护装置<sup>[1-3]</sup>。配电变压器的主保护一直采用差动保护完成, 该保护的主要原理是对比配电变压器电流的大小和相位, 但由于配电变压器各侧电流互感器等许多因素影响, 会造成该配电变压器电流的大小和相位的异

基金项目: 国家重点研发计划资助(2017YFB0903100)

常。该异常产生的不平衡电流会影响差动保护,使差动保护产生错误动作。除此之外,还有很多可以形成不平衡电流的因素,例如三相电压不平衡以及电机、线路等问题。若该问题得不到解决,不平衡电流就会逐渐变大,导致差动保护能力降低,灵敏度不高;特别是受到励磁涌流的干扰,导致保护装置不能正常运行。因此,寻求有效的方法,提高差动保护灵敏度,一直是国内外相关学者研究的重点方向。文献[4]提出了基于综合制动判据的变压器差动保护方法,该方法存在差动保护速度慢、灵敏度低等不足,且无法有效避开正常工作时的不平衡电流和励磁涌流。文献[5]提出了基于GOOSE网络的智能变电站变压器纵差保护方法,但该方法保护动作延迟,容易造成差动保护错误动作。文献[6]通过带并联电容实现变压器相位补偿,但该方法运算过程复杂,还存在补偿后电压/电流相位差高、稳定性差的弊端。

小波变换是一种利用不同频率、方位及宽度有限的基函数的变换,经傅里叶变换演变出的更为理想的数学工具<sup>[7]</sup>。它在傅里叶变换局部化理论的基础上进行了改进,并且也攻克了许多缺点,如对时间及频率分辨率具有局限性、无法同时呈现时域与频域信息等。但小波变换可以做到快速呈现一个“时间-频率”的窗口,该窗口可随频率发生改变,并自动适应时频信号,对信号在高频处时,细化时间,低频处时细化频率,具有多标准识别及时-频局部化的特点,有效解决电压电流的峰值突变信号和采集其特点,即可以精准采集异样信号及暂态情况下的不平衡电流<sup>[8-9]</sup>。

本文提出基于小波变换的配电变压器差动保护相位补偿方法,该方法依据启动元件进行故障区域识别,根据判断出的故障区域,基于小波变换模极大值原理,构建配电变压器线路故障选极判据,该判据按照小波变换的配电变压器差动保护流程操作,判断有无保护信号输出,并在配电变压器空载合闸的状况下,计算相位补偿后的差流,且该差流必须要通过 $\Delta \rightarrow Y$ 电流变换。最后,以220 kV配电变压器为例,通过仿真实验,证明了本文所提的基于小波变换的配电变压器的差动保护相位补偿方法的正确性。

## 1 配电变压器差动保护相位补偿

### 1.1 启动元件

线模行波电流梯度绝对值公式为

$$d(k) = \left| \frac{i_1(k) - i_1(k-1)}{\Delta t} \right| \quad (1)$$

式中,在 $k$ 时刻线模行波电流数据与取样时间间隔分别用 $i_1(k)$ 和 $\Delta t$ 表示。

通过线模行波电流 $i_1(k)$ 波动及 $d(k)$ 幅值的大小变化,判断配电变压器线路有无故障,若 $i_1(k)$ 波动变化差异性及 $d(k)$ 幅值较大,则表示该配电变压器线路有故障;反之,若 $i_1(k)$ 波动变化差异性及 $d(k)$ 幅值较小,则表示该配电变压器线路无故障;综上,创建保护启动依据,可采用线模行波电流梯度绝对值完成,保护启动依据如式(2)所示。

$$d(k) > T_1 \quad (2)$$

式中,保护启动阈值用 $T_1$ 描述。启动保护算法的前提是 $d(k)$ 与 $d(k+1)$ 两个值都大于 $T_1$ 。

### 1.2 故障区域识别

配电变压器线路在 $t_0 \sim t_1$ 时间之内的电流能量公式是

$$\|i(t)\|_2^2 = \int_{t_0}^{t_1} i(t)^2 dt \quad (3)$$

基于电流能量规则<sup>[10]</sup>,等效线模行波差动电流的能量比公式是

$$E_{\text{ratio}} = \frac{\|i_{\text{MEQ1}}(t) - i_{\text{NEQ1}}(t - \tau)\|_2^2}{0.5 \left( \|i_{\text{MEQ1}}(t)\|_2^2 + \|i_{\text{NEQ1}}(t - \tau)\|_2^2 \right)} \quad (4)$$

式中,线路M侧与N侧等效线模行波电流分别用 $i_{\text{MEQ1}}$ 和 $i_{\text{NEQ1}}$ 描述。

$E_{\text{ratio}} \approx 0$ 代表配电变压器线路范围内无故障或者发生范围外故障; $E_{\text{ratio}} > 0$ 代表配电变压器线路发生区内故障。

故对故障范围进行识别,可采用 $E_{\text{ratio}}$ 创建判据完成。

$$E_{\text{ratio}} \geq T_2 \quad (5)$$

式中,故障范围识别判定阈值用 $T_2$ 描述。

### 1.3 故障选极

根据判断出的故障区域,利用故障选极方法判断故障类型。

线路两端反向行波差动电流公式为

$$i_d(t) = i_{\text{Mr}}(t) - i_{\text{Nr}}(t) = \frac{1}{2} \left[ \frac{U_{\text{M}}(t) - U_{\text{N}}(t)}{Z_c(\omega)} - I_{\text{M}}(t) - I_{\text{N}}(t) \right] \quad (6)$$

式中: $i_{\text{Mr}}(t)$ 和 $i_{\text{Nr}}(t)$ 分别为线路M与N侧反向行波电流; $U_{\text{M}}(t)$ 、 $U_{\text{N}}(t)$ 分别为线路M与N侧端电压; $I_{\text{M}}(t)$ 、 $I_{\text{N}}(t)$ 分别为线路M与N侧电流; $Z_c(\omega)$ 为线路阻抗。该线路两端模量反向行波差动电流公式为

$$\begin{cases} i_{d1}(t) = \frac{1}{2} \left[ \frac{U_{M1}(t) - U_{N1}(t)}{Z_{c1}(\omega)} - I_{M1}(t) - I_{N1}(t) \right] \\ i_{d0}(t) = \frac{1}{2} \left[ \frac{U_{M0}(t) - U_{N0}(t)}{Z_{c0}(\omega)} - I_{M0}(t) - I_{N0}(t) \right] \end{cases} \quad (7)$$

电压、电流解耦获取的线、零模量为

$$\begin{cases} -\frac{\partial u_m}{\partial x} = S^{-1}RSi_m + S^{-1}LS\frac{\partial i_m}{\partial t} \\ -\frac{\partial i_m}{\partial x} = S^{-1}GSu_m + S^{-1}CS\frac{\partial u_m}{\partial t} \end{cases} \quad (8)$$

其中:

$$u_m = S^{-1}u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_0 \end{bmatrix}, \quad i_m = S^{-1}i = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_0 \end{bmatrix};$$

$$S^{-1}RS = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s - R_m & 0 \\ 0 & R_s + R_m \end{bmatrix};$$

$$S^{-1}LS = \begin{bmatrix} L_1 \\ L_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s - L_m & 0 \\ 0 & L_s + L_m \end{bmatrix};$$

$$S^{-1}GS = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_0 + 2G_m & 0 \\ 0 & G_0 \end{bmatrix};$$

$$S^{-1}CS = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_0 + 2C_m & 0 \\ 0 & C_0 \end{bmatrix}。$$

式(8)中, 配电变压器线路经过解耦后, 其电压用  $u_1$  描述; 电流用  $i_1$  描述; 电阻用  $R_1$  描述; 电感用  $L_1$  描述; 电导用  $G_1$  描述; 电容用  $C_1$  描述; 零模电压与电流分别用  $u_0$ 、 $i_0$  描述; 零模电阻及电感分别用  $R_0$  与  $L_0$  描述; 零模电导及电容分别用  $G_0$  与  $C_0$  描述; 把式(8)代入式(7)得

$$\begin{cases} i_{d1}(t) = \frac{\sqrt{2}}{4} \left[ \frac{u_{Mp}(t) - u_{Mn}(t) - u_{Np}(t) + u_{Nn}(t)}{Z_{c1}(\omega)} - i_{Mp}(t) + i_{Mn}(t) - i_{Np}(t) + i_{Nn}(t) \right] \\ i_{d0}(t) = \frac{\sqrt{2}}{4} \left[ \frac{u_{Mp}(t) + u_{Mn}(t) - u_{Np}(t) - u_{Nn}(t)}{Z_{c1}(\omega)} - i_{Mp}(t) - i_{Mn}(t) - i_{Np}(t) - i_{Nn}(t) \right] \end{cases} \quad (9)$$

若配电变压器线路在两极运行时, 产生范围内正极接地故障, 式(9)变为

$$\begin{cases} i_{d1}(t) = \frac{\sqrt{2}}{4} \left[ \frac{u_{Mp}(t) - u_{Np}(t)}{Z_{c1}(\omega)} - i_{Mp}(t) - i_{Np}(t) \right] \\ i_{d0}(t) = \frac{\sqrt{2}}{4} \left[ \frac{u_{Mp}(t) - u_{Np}(t)}{Z_{c1}(\omega)} - i_{Mp}(t) - i_{Np}(t) \right] \end{cases} \quad (10)$$

相同道理, 若负极接地故障, 式(9)变为

$$\begin{cases} i_{d1}(t) = \frac{\sqrt{2}}{4} \left[ \frac{u_{Mn}(t) + u_{Nn}(t)}{Z_{c1}(\omega)} + i_{Mn}(t) + i_{Nn}(t) \right] \\ i_{d0}(t) = \frac{\sqrt{2}}{4} \left[ \frac{u_{Mn}(t) - u_{Nn}(t)}{Z_{c1}(\omega)} - i_{Mn}(t) - i_{Nn}(t) \right] \end{cases} \quad (11)$$

若两极短路故障, 式(9)变为

$$\begin{cases} i_{d1}(t) = \frac{\sqrt{2}}{4} \left[ \frac{u_{Mp}(t) - u_{Mn}(t) - u_{Np}(t) + u_{Nn}(t)}{Z_{c1}(\omega)} - i_{Mp}(t) + i_{Mn}(t) - i_{Np}(t) + i_{Nn}(t) \right] \\ i_{d0}(t) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

通过上述分析能够得出: 三种故障发生前的模量反向行波差动电流都是零, 并且模量反向行波差动电流呈现差异属性, 主要发生在故障后, 即处于正极接地故障、负极接地故障、双极短路故障情况下, 分别存在  $i_{d1}(t)i_{d0}(t) > 0$ 、 $i_{d1}(t)i_{d0}(t) < 0$ 、 $i_{d1}(t)i_{d0}(t) = 0$  的情况。

小波变换模极大值用  $U_1$  与  $U_0$  描述, 该极大值是利用小波变换原始模量反向行波差动电流  $i_{d1}(t)$  与  $i_{d0}(t)$  获得<sup>[11-12]</sup>。小波变换模极大值  $U_1$  与  $U_0$  乘积的公式为

$$D = U_1 \times U_0 \quad (13)$$

小波变换模极大值  $U_1$  与  $U_0$  需符合逻辑运算:

$$U = \begin{cases} 1, U > T_3 \\ -1, U < -T_3 \\ 0, U \text{ 为其他值} \end{cases} \quad (14)$$

式(14)中设定阈值用  $T_3$  描述。基于小波变换模极大值原理<sup>[13-16]</sup>, 创建配电变压器线路故障选极判断依据是

$$f = \begin{cases} \text{正极接地故障, } D = 1 \\ \text{负极接地故障, } D = -1 \\ \text{双极短路故障, } D = 0 \end{cases} \quad (15)$$

#### 1.4 小波变换的配电变压器差动保护流程

基于以上过程, 小波变换的配电变压器差动保护流程为: 对配电变压器运行差动保护, 差动保护运行的前提是提取、保存正极与负极配电变压器线路电压及电流数据, 启动后, 识别配电变压器线路是否故障, 可通过采样数据完成, 该采样数据需采用小波变换的配电变压器差动保护运行前 0.5 ms 及运行后 1.5 ms 共 2 ms “时间窗” 内的数据<sup>[17-19]</sup>。

步骤(1) 经极模转换电压电流数据, 获取模量行波电流电压。

步骤(2) 对步骤(1)所获数据进行小波变换, 并

提取变换后的模最大值。

步骤(3)经继电保护设备模极大值转换后,对等效线模行波电流进行重新塑造。

步骤(4)计算步骤(3)获取数据的电流冲量比  $B$ , 与  $T_3$  相比较, 当  $B > T_3$  时, 即存在区内故障, 通过辨别等效模量反向行波差动电流的不同特点完成故障选极<sup>[20-24]</sup>。通过对故障的电流进行相位补偿, 结合开启和关闭保护输出, 完成配电变压器的差动保护, 解决配电变压器故障。小波变换的配电变压器差动保护流程如图 1 所示。

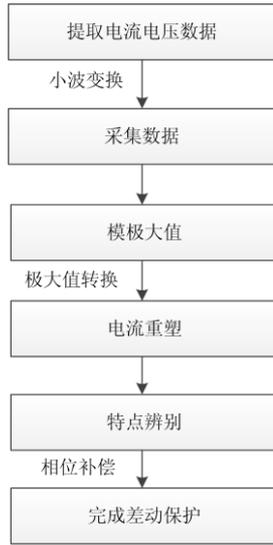


图 1 小波变换的配电变压器差动保护流程图

Fig. 1 Flow chart of distribution transformer differential protection based on wavelet transform

## 2 配电变压器差动保护相位补偿

采用电流的相位补偿方法为故障时配电变压器提供差动保护<sup>[25]</sup>。

变压器两侧电流互感器二次侧统一 Y 接的条件是: 变压器之间电压比是 1 ( $\Delta$  接的每一个相绕组匝数等于 Y 接的每一个相绕组匝数的  $\sqrt{3}$  倍)。小波变换的配电变压器差动保护相位补偿关系式为

$$\begin{bmatrix} i'_A \\ i'_B \\ i'_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_0 \\ i_0 \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} i'_a \\ i'_b \\ i'_c \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_{1c} \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中:  $i_0 = (i_A + i_B + i_C)/3$ ;  $i_A$ 、 $i_B$ 、 $i_C$  和  $i'_A$ 、 $i'_B$ 、 $i'_C$  为 Y 侧补偿前后的电流;  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  和  $i'_a$ 、 $i'_b$ 、 $i'_c$  为  $\Delta$  侧补偿前后的电流。

为体现出励磁电流的本质特征, 在配电变压器空载合闸的状况下, 计算出相位补偿后的相差电流。式(18)中, 通过 Y 侧绕组电流  $i_A$ 、 $i_B$ 、 $i_C$  与  $\Delta$  侧流过绕组的相电流  $i_{pa}$ 、 $i_{pb}$ 、 $i_{pc}$  可计算获取该相的励磁电流  $i_{ma}$ 、 $i_{mb}$ 、 $i_{mc}$ 。该计算方法是体现各相励磁电流变化的最好方法<sup>[26-27]</sup>, 公式为

$$\begin{bmatrix} i_{da} \\ i_{db} \\ i_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \sqrt{3} \begin{bmatrix} i_{pa} \\ i_{pb} \\ i_{pc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{ma} \\ i_{mb} \\ i_{mc} \end{bmatrix} \quad (18)$$

式(18)中  $\Delta$  侧每一个相绕组流过的相电流公式为

$$[i_{pa}, i_{pb}, i_{pc}]^T = [i_a, i_b, i_c]^T + [i_p, i_p, i_p]^T \quad (19)$$

$\Delta$  侧绕组内的环流用  $i_p$  描述。  $i_{1a} = 0$ ,  $i_{1b} = 0$ ,  $i_{1c} = 0$ , 且  $[i_{pa}, i_{pb}, i_{pc}]^T = [i_p, i_p, i_p]^T$  代表配电变压器处于 YN 侧空载合闸的状态。

为判断配电变压器在 YN 侧空载合闸时产生的差流能否真正体现本相的励磁涌流, 该差流必须要通过  $\Delta \rightarrow Y$  电流变换。当  $i_{1a} = 0$ ,  $i_{1b} = 0$ ,  $i_{1c} = 0$  时, 则代表通过  $\Delta \rightarrow Y$  电流变换后的差流等于 Y 侧电流-零序电流, 如式(20)所示。

$$\begin{bmatrix} i_{da} \\ i_{db} \\ i_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_0 \\ i_0 \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_0 \\ i_0 \\ i_0 \end{bmatrix} + \sqrt{3} \begin{bmatrix} i_p \\ i_p \\ i_p \end{bmatrix} - \sqrt{3} \begin{bmatrix} i_p \\ i_p \\ i_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{ma} \\ i_{mb} \\ i_{mc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_0 \\ i_0 \\ i_0 \end{bmatrix} - \sqrt{3} \begin{bmatrix} i_p \\ i_p \\ i_p \end{bmatrix} \quad (20)$$

相同方向和性质的电流用  $i_0$  和  $i_p$  描述。比较式(18)和式(20), 无法真正体现出本相励磁涌流的特征, 原因是配电变压器在空载合闸时, 结合三相涌流结果产生同方向电流, 三相电流的特征必然混在一起, 造成无法识别本相励磁涌流的特征<sup>[28-29]</sup>。

## 3 实验分析

为了验证本文提出的基于小波变换的配电变压器差动保护相位补偿方法在实际应用中的可靠性及高效性, 以某区域配电网的 220 kV 配电变压器为实验对象, 通过 Matlab 搭建仿真实验平台, 该变电站配置 4 台智能变压器, 每台变压器部署 1 台智能通

信网关机和一个差动保护装置。每个差动保护装置有 9 路模拟量通道，分别采集高压侧三相电压、高压侧三相保护电流和低压侧三相保护电流。在主、子站之间共有 7 000 个信息点表。本文利用其中一条独立的通道来完成相关实验测试。配电变压器参数设置如表 1 所示。

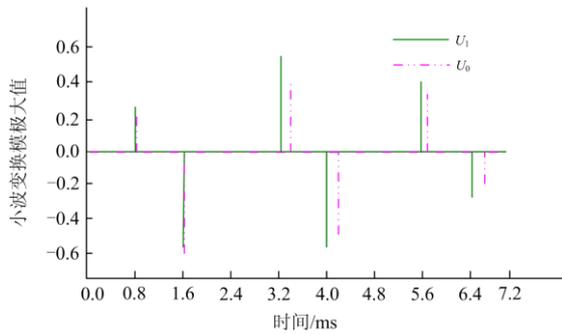
表 1 配电变压器参数设置  
Table 1 Parameter settings of distribution transformer

参数	规格
高压/kV	6
高压分接范围/%	±5
低压/kV	0.4
负载损耗/kW	0.18
额定容量/kVA	5

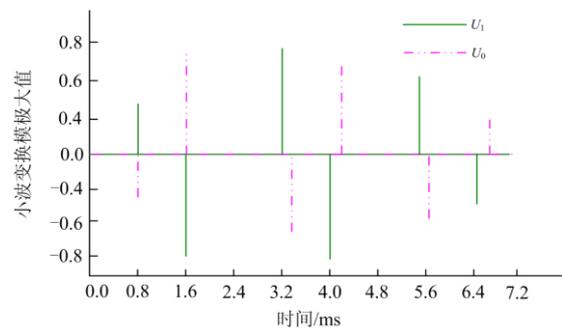
### 3.1 故障选极

图 2 为该配电变压器线路某处发生正极接地故障、负极接地故障以及两极接地故障三种情况时，小波变换模极大值变化情况。

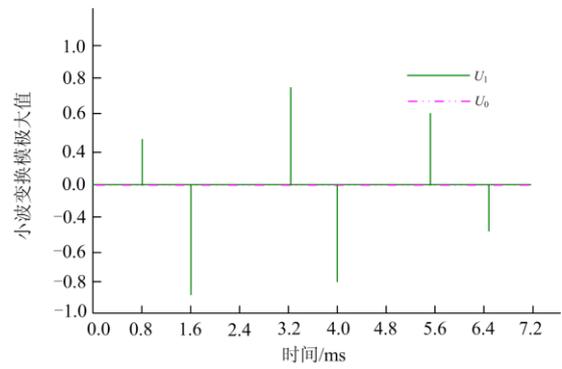
由图 2 中模量反向行波差动电流呈现出的不同特征可知：图 2(a)中，小波变换模极大值在 0.8 ms、3.2 ms 和 5.6 ms 时， $U_1$ 与 $U_0$ 均大于 0；在 1.6 ms、4.0 ms 和 6.4 ms 时， $U_1$ 与 $U_0$ 均小于 0，极性一致，则表示配电变压器区内线路处于正极接地故障。图 2(b)中，小波变换模极大值在 0.8 ms、3.2 ms 和 5.6 ms 时， $U_1$ 均大于 0， $U_0$ 均小于 0；在 1.6 ms、4.0 ms 和 6.4 ms 时， $U_1$ 均小于 0， $U_0$ 均大于 0，极性不一



(a) 正极接地故障



(b) 负极接地故障



(c) 两极接地故障

图 2 故障选极

Fig. 2 Fault pole selection

致，则表示该变压器区内线路处于负极接地故障。图 2(c)中，小波变换模极大值在 0.8~6.4 ms 时，无论 $U_1$ 大于 0 还是小于 0， $U_0$ 全部等于 0，则表明配电变压器区内线路处于两极短路故障。

该仿真实验表明，可通过得到的小波变换模极大值，利用差动电流表现出的不同特征对该故障类型进行有效识别。

### 3.2 不同故障距离

表 2 为该 220 kV 配电变压器的线路分别在 0.4 km、80.1 km、160.5 km、203.4 km 处发生故障时，原始模量反向行波差动电流数据。

表 2 不同距离下原始模量反向行波差动电流变化

Table 2 Variation of original modulus reverse traveling wave differential current at different distances

距离/km	原始模量反向行波差动电流			判断结果
	$U_1$	$U_0$	$D$	
0.4	-0.37	-0.457	1	正极接地故障
80.1	-0.28	-0.341	1	
160.5	0.31	0.268	1	
203.4	0.25	0.197	1	
0.4	-0.38	0.457	-1	负极接地故障
80.1	-0.27	0.332	-1	
160.5	0.30	-0.275	-1	
203.4	0.26	-0.212	-1	
0.4	-1.41	0.003	0	两极短路故障
80.1	-1.04	0.002	0	
160.5	1.19	0.001	0	

由表 2 可看出，在 0.4 km 时，该配电变压器的线路发生正极接地故障，小波变换模极大值 $U_1$ 为 -0.37， $U_0$ 为 -0.457；在 160.5 km 发生故障时， $U_1$ 为 0.31， $U_0$ 为 0.268；在 203.4 km 发生故障时， $U_1$ 为 0.25， $U_0$ 为 0.197。以上数据说明，由于故障距离

的变大, 小波变换模极大值幅值逐渐变小。余下其他数据均符合此规律。根据  $D$  的数值判断故障类型, 当  $D$  值分别是 1、-1 以及 0 时, 配电变压器线路分别存在正极、负极以及两极接地故障。

根据以上实验数据可知, 采用本文方法可有效依据区内故障等级对区内故障进行鉴别, 具有很强的可靠性及高效性。

### 3.3 相位补偿效果

对比分析综合制动判据方法<sup>[4]</sup>、GOOSE 网络方法<sup>[5]</sup>以及本文所提方法进行配电变压器差动保护的相位补偿效果, 以验证三种方法在差动保护过程中的配电变压器电压和电流稳定性。在负载工况下配电变压器线路电压  $u_n$  和电流  $i_n$  的波形如图 3 所示。

由图 3 可以看出, 综合制动判据方法<sup>[4]</sup>相位补偿后电压  $u_n$  与电流  $i_n$  的峰值分别约为 700 V 及 1 000 A,  $u_n$  与  $i_n$  相位差较大; GOOSE 网络方法<sup>[5]</sup>相位补偿后电压  $u_n$  与电流  $i_n$  的峰值分别约为 800 V 及 1 200 A,  $u_n$  与  $i_n$  的相位差为三种方法中最大; 本文方法相位补偿后电压  $u_n$  与电流  $i_n$  的峰值分别约为 1 100 V 和 1 100 A,  $u_n$  与  $i_n$  之间无相位差。

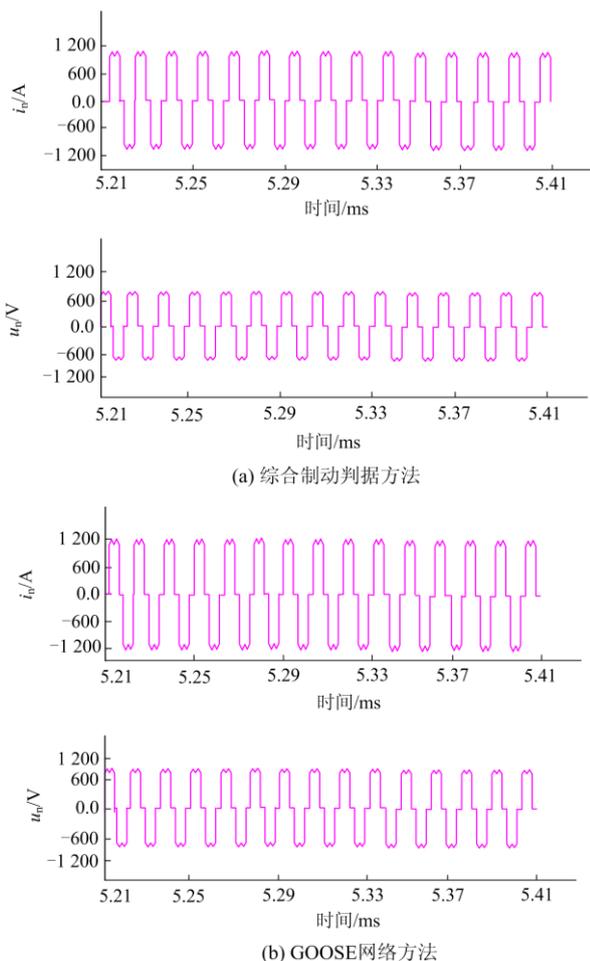


图 3 电压和电流波形

Fig. 3 Voltage and current waveforms

实验验证, 采用本文方法进行相位补偿可以更好地确保配电变压器的线路电压及电流的稳定性。

## 4 结论

本文提出基于小波变换的配电变压器差动保护相位补偿方法, 该方法通过故障区域识别、小波变换模量反向行波差动电流, 获得小波变换模极大值、创建故障选极判断故障类型, 并在配电变压器空载合闸的状况下, 计算出相位补偿后的差流, 通过差流判断励磁涌流和内部故障电流的变化, 完成相位补偿。总结仿真实验得到以下三点:

- (1) 根据小波变换模极大值能够有效判断故障类型。
- (2) 由于故障距离的变大, 小波变换模极大值幅值逐渐变小。
- (3) 与传统方法相比, 本文提出的配电变压器差动保护相位补偿方法, 能够保证变压器运行过程中电压电流的相位差保持一致, 使配电变压器得到更好的保护。

## 参考文献

- [1] 俞斌, 胡卓然, 李黎, 等. 10 kV 大容量配电变压器差动保护配置应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(22): 98-104.  
YU Bin, HU Zhuoran, LI Li, et al. Differential protection configuration of a 10 kV large capacity distribution transformer[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22): 98-104.
- [2] 赵志新, 赵宗罗, 赵颖, 等. 基于并行化 BP 神经网络的配电变压器故障快速诊断方法[J]. 浙江电力, 2021, 40(12): 82-88.  
ZHAO Zhixin, ZHAO Zongluo, ZHAO Ying, et al. A fast

- fault diagnosis method of distribution transformer based on parallel BP neural network[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(12): 82-88.
- [3] 耿俊成, 郭志民, 李晓蕾, 等. 基于 LOF 和 SVM 的配电网线变关系数据校验方法[J]. 中国测试, 2021, 47(4): 49-54.  
GENG Juncheng, GUO Zhimin, LI Xiaolei, et al. Connectivity data verification method of feeder-transformers based on LOF and SVM[J]. China Measurement & Test, 2021, 47(4): 49-54.
- [4] 李梅, 唐菊生. 基于综合制动判据的变压器差动保护研究[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(2): 135-141.  
LI Mei, TANG Jusheng. Transformer differential protection method based on the comprehensive braking criterion[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2): 135-141.
- [5] 倪传坤, 于同伟, 邓茂军, 等. 基于 GOOSE 网络的智能变电站变压器纵差保方案[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(6): 151-155.  
NI Chuankun, YU Tongwei, DENG Maojun, et al. Longitudinal differential protection of transformer in smart substation based on GOOSE network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(6): 151-155.
- [6] 王柏峰, 张懋鲁. 带并联电容补偿电炉变压器的各绕组容量计算[J]. 变压器, 2019, 56(5): 10-12.  
WANG Baifeng, ZHANG Maolu. Winding capacity calculation of furnace transformer with parallel capacitance compensation[J]. Transformer, 2019, 56(5): 10-12.
- [7] 曹俊平, 黄勃, 王成珠, 等. 基于小波变换的高压电缆混合线路故障定位方法及验证试验[J]. 浙江电力, 2021, 40(2): 14-19.  
CAO Junping, HUANG Bo, WANG Chengzhu, et al. Fault location method and verification test analysis of hybrid HV cable lines based on wavelet transform[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(2): 14-19.
- [8] 陶彩霞, 杜雪, 高锋阳, 等. 基于经验小波变换的混合输电线路单相接地故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 105-112.  
TAO Caixia, DU Xue, GAO Fengyang, et al. Single-phase to ground fault location of hybrid transmission lines based on empirical wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 105-112.
- [9] 卓放, 杨泽斌, 易皓, 等. 综合配网谐波及三相不平衡评价指标的治理设备优化配置策略[J]. 中国电力, 2020, 53(11): 40-49.  
ZHUO Fang, YANG Zebin, YI Hao, et al. Optimal allocation strategy for power quality control devices based on harmonic and three-phase unbalance comprehensive evaluation indices for distribution network[J]. Electric Power, 2020, 53(11): 40-49.
- [10] 安义, 陈春, 范瑞祥, 等. 基于数据驱动的配电变压器容量在线校正方法[J]. 高电压技术, 2019, 45(9): 161-167.  
AN Yi, CHEN Chun, FAN Ruixiang, et al. On-line correcting method of the distribution transformer capacity based on data-driven[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9): 161-167.
- [11] 黄家凯, 高厚磊. 输电线路自同步电流差动保护[J]. 电工技术学报, 2019, 34(9): 1944-1951.  
HUANG Jiakai, GAO Houlei. Self-synchronized current differential protection scheme for transmission line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(9): 1944-1951.
- [12] 吴沛锋, 张国云, 孔令号. 基于全波电流关联性的线路差动保护算法[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2584-2591.  
WU Peifeng, ZHANG Guoyun, KONG Linghao. A new line differential protection principle based on correlation of full wave current data[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2584-2591.
- [13] 翁汉翔, 李昊威, 邢家维, 等. 采用 S 变换相位差及能量相对熵的换流变零序差动保护新判据[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 27-33.  
WENG Hanli, LI Haowei, XING Jiawei, et al. Novel criterion adopting S-transform phase angle difference and energy relative entropy for zero-sequence differential protection of converter transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 27-33.
- [14] 朱妍, 陆于平, 黄涛. 计及谐波频率特征的含风电配电网充分式电流幅值差动保护[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(16): 171-179.  
ZHU Yan, LU Yuping, HUANG Tao. Sufficient current amplitude differential protection considering frequency characteristic of harmonics for distribution network with wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(16): 171-179.
- [15] 安义, 朱志杰, 王华云, 等. 一种配电变压器热评估方法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(4): 54-60.  
AN Yi, ZHU Zhijie, WANG Huayun, et al. A thermal evaluation method of distribution transformers[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(4): 54-60.
- [16] 吴晓文, 魏慧杰, 周年光, 等. 半消声室内干式配电变压器的噪声与振动特性研究[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(3): 190-195.  
WU Xiaowen, WEI Huijie, ZHOU Nianguang, et al. Noise and vibration analysis of dry-type distribution transformer in semi-anechoic room[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3): 190-195.

- [17] 吴建章, 梅飞, 陈畅, 等. 基于经验小波变换的电力系统谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 136-143.  
WU Jianzhang, MEI Fei, CHEN Chang, et al. Harmonic detection method in power system based on empirical wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 136-143.
- [18] 孙德娟, 孙士云, 范小红, 等. 基于励磁电感计算的双馈风电场送出变差动保护[J]. 电工技术学报, 2020, 35(2): 395-407.  
SUN Dejuan, SUN Shiyun, FAN Xiaohong, et al. Doubly-fed wind farm outgoing transformer differential protection based on excitation inductance calculation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(2): 395-407.
- [19] 石吉银. 基于暂态负荷的变压器保护一次电流检验方法[J]. 中国电力, 2021, 54(5): 148-155.  
SHI Jiyin. Primary current test method for transformer protection based on transient load[J]. Electric Power, 2021, 54(5): 148-155.
- [20] 王永进, 樊艳芳, 李自乾. 基于突变量能量波形特征的特高压直流输电线路单端保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 55-61.  
WANG Yongjin, FAN Yanfang, LI Ziqian. Single-end protection method for UHVDC transmission line based on characteristics of sudden energy waveform[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 55-61.
- [21] HUANG Bingqi. Analysis of debugging method in RCS-978 ratio differential protection[J]. Integrated Circuit Application, 2019, 36(9): 98-99.
- [22] ANDERSEN K K, FRIJLINK M E, HOFF L. A numerical optimization method for transducer transfer functions by the linearity of the phase spectrum[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2019, 66(1): 71-78.
- [23] 余晓, 吕飞鹏, 张国星, 等. 循环神经网络输电线路双端故障测距方法[J]. 中国测试, 2021, 47(9): 119-125.  
YU Xiao, LÜ Feipeng, ZHANG Guoxing, et al. Two-terminal fault location algorithm for transmission lines based on recurrent neural network[J]. China Measurement & Test, 2021, 47(9): 119-125.
- [24] 曾志辉, 肖宇. 基于变异系数与高阶累积量的小电流接地故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 99-109.  
ZENG Zhihui, XIAO Yu. Small current grounding fault selection based on coefficient of variation and high order cumulant[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 99-109.
- [25] HASHEMI S M, SANAYE-PASAND M. Current-based out-of-step detection method to enhance line differential protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(2): 448-456.
- [26] TOKI A, KASUMI M, PEJI M, et al. Determination of single-phase transformer saturation characteristic by using Nelder-Mead optimization method[J]. Electrical Engineering, 2021(1): 1-13.
- [27] WANG J, TONG J, FAN X, et al. A dynamic differential phase analysis method for wireless sensing[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(8): 7723-7732.
- [28] WANG J, WANG Y, ZHAO G, et al. Location protection method for mobile crowd sensing based on local differential privacy preference[J]. Peer-to-Peer Networking and Applications, 2019(1): 1-13.
- [29] AFRASIABI S, AFRASIABI M, PARANG B, et al. Integration of accelerated deep neural network into power transformer differential protection[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(2): 865-876.

收稿日期: 2021-11-26; 修回日期: 2021-12-29

作者简介:

吴昊天(1987—), 男, 学士, 工程师, 主要研究方向为电气工程及其自动化; E-mail: tianhaowu1987@163.com

赵阳(1987—), 男, 学士, 工程师, 主要研究方向为电气工程及其自动化;

刘子卓(1987—), 男, 学士, 工程师, 主要研究方向为电气工程及其自动化。

(编辑 张爱琴)