

基于回路平衡方程和励磁电感的特高压变压器保护

邓祥力, 王传启, 张哲

(强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北省 武汉市 430074)

UHV Transformer Protection Based on Equivalent Circuit Equation and Excitation Inductance

DENG Xiangli, WANG Chuanqi, ZHANG Zhe

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology),
Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: The performance of ultra-high voltage (UHV) transformer differential protection based on harmonic restraining method is seriously influenced by harmonics and its operation time is long. Aiming to solve this problem, this paper presented a novel protective scheme based on equivalent circuit model of transformer for UHV three-phase divided tank transformer. This paper established a T-type equivalent circuit model of transformer with its parameters calculated on-time. This model is not affected by transformer's operation states, and its parameters can be uniquely determined. It proposed a transformer protection criterion, which was based on the balanced transformer equivalent circuit model equation and the variation of instantaneously measured equivalent excitation inductance. With Matlab simulation tool, this paper established a model according to the parameters of the first UHV power transmission system in China, simulated such situations as energizing, external faults, internal faults, normal operation in the model, and testified the feasibility of the proposed transformer protection in UHV transmission systems. The performance of the protection scheme is not affected by inrush currents, and the protection can operate quickly and has high sensitivity.

KEY WORDS: UHV transformer protection; inrush current; parameter identification; equivalent circuit equation; equivalent excitation inductance

摘要: 谐波制动原理的变压器差动保护受谐波影响大, 动作时间过长, 难以满足特高压变压器保护的需求, 针对此问题, 提出了基于 T 型等效电路的特高压变压器保护方案。建立变压器 T 型等效电路模型, 该模型不受变压器运行状态的影响, 其参数能够唯一确定, 并提出基于变压器等值回路平衡方程判据和等效励磁电感判据的保护方案。使用 Matlab

仿真工具, 依据中国第一条特高压输电线路的系统参数搭建了特高压输电模型, 分别仿真了特高压变压器空载投入、区外故障、区内故障和正常运行的各种工况, 验证了所提出的保护方案在特高压输电系统中运用的可行性。该保护方案不受励磁涌流的影响、动作速度快、灵敏度高。

关键词: 特高压变压器保护; 励磁涌流; 参数辨识; 等值回路平衡方程; 等效励磁电感

0 引言

随着中国电力负荷规模的持续增长及大容量和特大容量规模电厂的建设和发展, 建设以特高压电网为骨干网架的国家电网已经提上日程^[1]。特高压变压器作为特高压电网的核心元件之一, 其运行的可靠性和安全性对整个电网的正常运行至关重要, 对其主保护的速动性和可靠性提出了更高的要求。长期以来, 如何准确、可靠、迅速地区分变压器励磁涌流和内部故障一直是变压器保护研究的重点和难点。

对励磁涌流的识别, 国内外变压器微机继电保护中大量采用二次谐波制动、波形不对称制动的方案, 主要检测差流中的谐波含量, 或者判别差流的波形对称度, 以此来识别励磁涌流^[2-6]。以上方案只使用电流量, 数据窗为 20 ms。特高压变压器主保护特殊性如下: 1) 容量大, 正常运行时铁心工作点较高, 铁心容易饱和, 空载合闸时二次谐波含量有可能低于 10%^[7], 同时, 特高压变压器端口接有长距离的输电线路, 很大的分布电容和大容量的并联无功补偿器使得区内故障时, 短路电流中含有大量的谐波分量, 导致差动保护动作延时; 2) 特高压变压器的短路阻抗很大, 使得变压器内部发生匝间短路故障时, 短路电流较小, 以上方案检测故障的灵敏度可能不足; 3) 特高压输电系统的电压等

基金项目: 国家自然科学基金项目(50837002, 50877031)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50837002, 50877031).

级很高,特高压变压器的绝缘裕度较小,系统的过电压问题(雷击过电压、工频过电压)比较突出,特快速暂态过程引起的变压器匝间短路问题引起了广大学者的关注,特高压变压器额定负载时发生小匝间故障,保护应该有足够的灵敏度并迅速切除故障,否则发展为严重相间故障,将会对变压器本体造成极大的损坏;4)由于电压等级很高,特高压变压器采用中性点接入调压变压器变磁通调压方式,铁心工作点很高,调压过程中变压器绕组电压的改变容易产生较大的励磁电流,过励磁对保护的影响应该受到关注。

针对特高压变压器保护的以上特点,只采用电流的二次谐波制动方案很难满足要求。近年来提出的基于变压器参数模型的变压器保护新原理为解决上述难题提供了新途径:文献[8]提出了变压器等值回路方程的保护判据,并研制出了基于该原理的微机保护样机,完成了动模测试;文献[9]提出了利用变压器等值回路方程,采用参数辨识技术计算变压器绕组的漏感和电阻,依据参数是否变化来实现对变压器内部故障的检测;文献[10]提出了利用励磁阻抗制动原理鉴别励磁涌流的方案,并通过了动模试验;文献[11-14]关注了变压器等值回路方程原理、变压器绕组参数辨识技术和励磁电感制动原理。基于电路参数模型的保护有2个问题值得研究:1)对变压器内部轻微故障的识别;2)变压器各种工况下,对等值电路模型参数的确定。

针对以上问题,本文从变压器等值模型参数稳态解的收敛性出发,提出了变压器T型等效电路参数模型,提出了基于变压器等值回路平衡方程和瞬时等效测量励磁电感变化原理的保护判据,变压器端口严重故障时,由等值回路平衡方程判据判别故障,变压器内部小匝间短路时由瞬时等效测量励磁电感判据判出。本判据对于变压器正常运行时的小匝间短路有较高的灵敏度,不依赖于谐波制动。

1 变压器模型参数计算

1.1 变压器多绕组的等值电路模型

图1所示的变压器等值模型中忽略了铁磁损耗,变压器绕组之间的连接关系决定了多绕组等值电路端口之间的连接关系,多绕组等值电路端口既可以连接成星形,也可以连接成三角形。模型微分方程组如下:

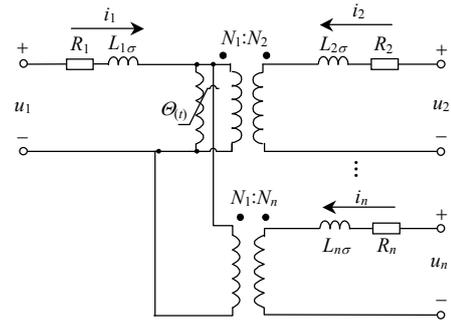


图1 变压器N绕组等值电路模型

Fig. 1 N windings model for transformer

$$\begin{cases} R_1 i_1 + L_{1\sigma} \frac{di_1}{dt} + N_1 \frac{d\phi}{dt} = u_1 \\ \vdots \\ R_n i_n + L_{n\sigma} \frac{di_n}{dt} + N_n \frac{d\phi}{dt} = u_n \end{cases} \quad (1)$$

由方程(1)可知,模型中的非线性项是 $d\phi/dt$ 。N个微分方程中,非线性项都是相等的,所以可以消去非线性项,成为只包含电阻和漏感,不包含非线性项的线性微分方程组。该方程组在变压器各种工况下均成立,可以采用参数辨识技术估算出变压器绕组的电阻和漏感参数,然后计算出励磁支路测量电感。所以,式(1)是变压器回路平衡方程原理的保护方案的理论基础。

1.2 变压器模型参数辨识的稳态收敛解

基于变压器T型等效电路的保护方案中,首先是计算短路电阻和电抗,其值基本为常数,可利用变压器的正常稳定运行状态确定。有2种计算方法:一种是多个采样点解方程组的方法;另一种是基于最小二乘的参数辨识算法。参数辨识最小二乘递推算法根据历史数据和当前采样数据,以误差最小的方式估算出一组最优的绕组电阻和漏感值,比单纯使用采样点解方程的方法精度更高,跟随能力更强。本文采用基于最小二乘的参数辨识算法计算变压器T型模型短路电阻和电抗参数值。

为了具有代表性,本文以电力系统中使用较多的 Y_0/Δ 接线的变压器分析变压器模型参数辨识的稳态收敛性。

如图2所示,绕组为 Y_0/Δ 连接的变压器正常运行时,A相绕组模型为

$$R_{1A}(i_A + i_\Delta) + L_{3\sigma} \frac{d(i_A + i_\Delta)}{dt} + N_3 \frac{d\phi}{dt} = u_{1A} - u_{1B} \quad (2)$$

式中: i_Δ 、 i_A 分别为三角形绕组内部的环流、除环流以外流过A相绕组的电流; R_{1A} 、 $L_{3\sigma}$ 、 N_3 分别为三角形绕组的电阻、漏感、绕组匝数; ϕ 为铁心主

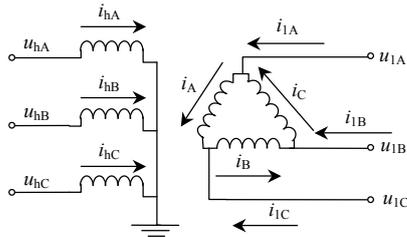


图 2 变压器 Y₀/Δ连接图

Fig. 2 Y₀/Δ winding connection diagram for transformer 磁通。

通过 A 减 B、B 减 C、C 减 A，可得到 Y₀/Δ 接线的三相变压器模型方程式。电力系统稳态运行时，系统频率为工频 ω，变压器三相电流、电压对称，变压器绕组三相方程简化为单相独立方程，以 A 相电流、电压为参考量，设 k₁₂=1/k₂₁，k₂₁ 为变压器的变比， $\dot{U}_{hA} = U \angle \alpha$ ， $\dot{I}_{hA} = I \angle 0$ ， \dot{U}_{hA} 、 \dot{I}_{hA} 为高压侧的电压、电流。

变压器 3 个绕组方程可以简化为

$$(1 - k_{12})\dot{U}_{hA} e^{j\pi/6} = \dot{I}_{hA} R_h e^{j\pi/6} - k_{12} \dot{I}_{hA} R_1 e^{j\pi/6} + j\omega L_{h\sigma} \dot{I}_{hA} e^{j\pi/6} - k_{12} j\omega L_{1\sigma} \dot{I}_{hA} e^{j\pi/6} \quad (3)$$

整理后可得

$$\begin{cases} R_h - k_{21} R_1 = (1 - k_{12}) U \cos \alpha \\ L_{h\sigma} - k_{21} L_{1\sigma} = \frac{(1 - k_{12}) U \sin \alpha}{\omega} \end{cases} \quad (4)$$

从式(4)可以看出，变压器绕组的 4 个参数 R_h、R₁、L_{hσ}、L_{1σ}，在变压器稳态运行时难以求出。最小二乘参数辨识输入矩阵 |A^TA|=0，参数具有不可辨识性。采用多采样点方程组求解时，由于变压器三相方程只有一相独立，参数值发散或者收敛在不正确的参数值上，变压器模型方程式只能求解出 2 个参数值。

变压器制造厂家一般都提供短路电抗参数 x_k 和短路电阻 R_k。如果电阻按照厂家提供的短路电阻值进行换算，并将短路电抗值代入变压器模型方程式，则可以分别消去一个漏感、一个电阻参数，这样就可以以变压器高压侧绕组的电阻和漏感参数作为辨识参数，在线实时求解。求解结束后，低压侧绕组参数也可以相应确定，T 型电路模型可以完全确定。

1.3 特高压变压器参数辨识模型

图 3 为特高压变压器的主变压器，其调压变压器和补偿变压器没有表示出来。如图 3 所示，特高压变压器主变压器由 3 个单相自耦变压器组成，各相之间没有磁的联系，变压器出厂短路试验电抗值

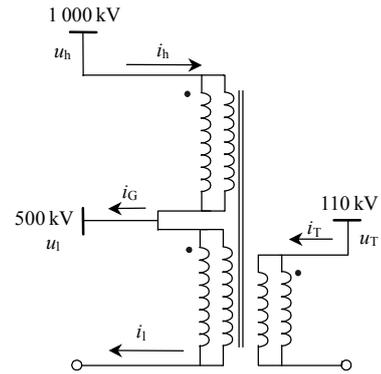


图 3 特高压变压器主变压器接线图

Fig. 3 Winding connection diagram for UHV main transformer

为 x_k，高压侧-中压侧参数辨识方程式为

$$R_h i_1 + L_{h\sigma} \frac{d(i_h(1 + k_{21}) - k_{21} i_1)}{dt} = u_h - u_1 - k_{21} u_1 + k_{21} L \frac{d(i_h - i_1)}{dt} \quad (5)$$

式中：L=x_k/ω；R₁=R_h/k₂₁。

式(5)中，也可以把中压侧绕组电阻按照厂家提供的短路电阻值进行换算，折算到高压侧，这样可以减少辨识算法的计算误差。

中压侧-低压侧绕组参数辨识模型方程式为

$$R_1(i_{1A} - i_{1B} - i'_{TA}) + L_1 \frac{d(i_{1A} - i_{1B} + i'_{TA})}{dt} = u_{1a} - u_{1b} - u'_{TA} + u'_{TB} + \frac{x_k}{\omega} \frac{di'_{TA}}{dt} \quad (6)$$

特高压变压器正常运行、区外故障及空载合闸时，方程式(5)和(6)成立。

1.4 变压器匝间短路等效模型

变压器正常运行时，励磁支路只包含励磁电抗(其电感值为 L_m)，当发生内部匝间短路时，励磁电抗为励磁支路电抗和短路匝漏电抗的并联值，如图 4 所示。

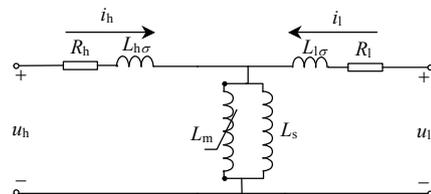


图 4 变压器匝间短路等效模型

Fig. 4 Transformer equivalent model for turn-to-turn fault

以方程式(5)为变压器参数模型，采用参数辨识的数学方法，实时计算出图 4 中的 R_h、L_{hσ}。可以建立方程式：

$$u_h = i_h R_1 + L_{h\sigma} \frac{di_h}{dt} + L_k \frac{d(i_h + i_1)}{dt} \quad (7)$$

式中： $L_k = L_m L_s / (L_m + L_s)$ ，为等效励磁支路测量电感； $i_h + i_1$ 为变压器差动电流。

变压器正常运行、匝间故障及空载合闸时，差流 $i_h + i_1$ 流过变压器 T 型等效电路的励磁支路，方程式(7)能够实时计算等效励磁支路测量电感 L_k 。由于 R_1 、 L_1 参数的准确辨识， L_k 测量值更加准确，不会受到谐波分量的影响，所以不用增加低通滤波器^[13]。正常运行时，铁心没有饱和，等效励磁电抗很大。空载合闸时，在每个工频周期内铁心交替工作在饱和、非饱和的状态，铁心饱和时，励磁支路出现很大的尖峰电流，等效励磁电抗较小，非饱和时，出现间断角，等效励磁电抗很大，如果励磁电流间断角每周波最小 60° ，一周波的采样数据中，有 $N/6$ 个采样点的等效励磁电抗很大(N 为每周波的采样点数)。变压器内部发生匝间短路时，铁心不会饱和，铁心内主磁通有所下降，等效励磁电抗几乎等于短路匝漏电抗，数值较小。

1.5 基于 T 型等效电路模型保护判据的实现

保护判据由 2 部分组成：一部分是绕组回路平衡方程判据，主要是检测变压器区内严重故障；一部分是等效瞬时励磁电感判据，主要检测变压器内部轻微故障。

使用参数辨识最小二乘递推算法可以确定变压器绕组的电阻和漏感值，通过方程式(7)可以计算出变压器模型励磁支路等效测量电感值，变压器模型参数可以完全确定。方程式(5)能够分别在线辨识变压器三相绕组的电阻和漏感参数值，将计算值代入不同的回路方程中，形成回路方程的不平衡输出。以 A 相为例，其参数值由 C 相方程辨识得到，其回路方程的不平衡输出方程式为

$$\delta = u_{hA} - u_{hB} - u'_{lA} + u'_{lB} - \frac{x_k}{\omega} \frac{di'_{lA}}{dt} - R_h (i_{hA} - i_{hB} - i'_{lA}) + L_{h\sigma} [d(i_{hA} - i_{hB} + i'_{lA})] / dt \quad (8)$$

若均值 $\Sigma \delta > \Sigma \delta_{zd}$ ，则保护动作，判断为区内严重故障。

为了增加励磁涌流时判据的制动性能，设置一个等效励磁支路电感斜率判别计数器 D_k ，如果 $|L_k(k+1) - L_k(k)| > dL_{kzd}$ ，计数器 D_k 加 1，满足以下条件时判为匝间故障：

$$\begin{cases} \frac{2}{N} \sum_{k=1}^{N/2} |L_k(k)| < L_{zd} \\ D_k < D_{zd} \end{cases} \quad (9)$$

励磁涌流时， D_k 值比较大，变压器正常运行、匝间故障时，其值较小，能够在励磁涌流时对判据产生制动作用。匝间故障时， L_k 半周波平均值较小， D_k 值较小，满足方程式(9)，判别为匝间故障。整个判据逻辑图如图 5 所示。



图 5 基于瞬时 T 型等效电路模型的变压器保护跳闸逻辑
Fig. 5 Transformer protection tripping logic based on parameter identification theory

2 保护判据在特高压输电系统模型中的仿真实现

2.1 仿真模型搭建

图 6 为华中科技大学根据中国特高压输电系统搭建的实验室特高压输电电动仿真模型。本文的仿真模型是根据该模型的参数搭建的。使用 Matlab/Simulink 下的电力系统仿真软件包实现。变压器的仿真使用多绕组的变压器模型，特高压输电线路仿真使用线路分布参数模型。系统中的试验变压器是三单相变压器组 T_1 ，采用 $Y_0/Y_0/d11$ 接线，单相变压器参数如下：额定容量为 1000 MVA；高压侧额定电压为 1050 kV；中压侧额定电压为 525 kV；低压侧为 110 kV；高压侧短路阻抗为 18%；中压侧短路阻抗为 62%；低压侧短路阻抗为 40%。

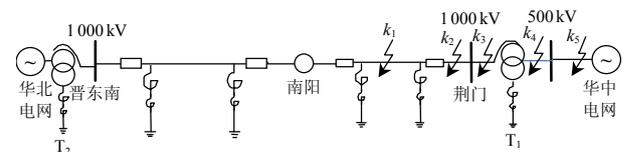


图 6 特高压输电模型

Fig. 6 UHV power transmission system model

2.2 仿真结果分析

利用各种运行状态下的仿真试验数据，每周波采样 24 点，分别计算半个周波内保护判据所需要的计算数据。通过改变电源合闸角和变压器铁心的剩磁，仿真变压器空载合闸励磁涌流，单相故障设置在 A 相，相间故障为 A、B 相，匝间短路设置在 A 相的公共绕组上。每种运行状态根据故障时刻、负荷大小的不同选取 5 组数据，并且假设参数辨识算法的计算误差分别为：绕组电阻误差为 20% (电阻值较小，计算误差较大)；绕组漏感误差为 10%。

模型回路不平衡输出定值 $\Sigma|\delta_{ZD}|=0.4$ ，等效励磁电感斜率计数器定值 $D_{ZD}=7$ ，等效励磁电感平均值 $\Sigma|L_{ZD}|=100$ ，结果如表 1 所示。

由于特高压变压器空载合闸时，中压、低压侧没有负荷电流，式(5)中的 i_l 为零，模型方程电阻项的误差对模型回路不平衡输出没有影响，所以， $\Sigma|\delta|$ 的值较小，表 1 中数据为 0.000 2，小于定值， D_k 为 9，大于门槛值， $\Sigma|L_k|$ 大于保护定值，保护可靠闭锁，没有跳闸信号发出。从图 7 可知：空载合闸电流出现尖峰电流波形时，变压器磁通曲线工作在非线性饱和区，瞬时等效励磁电感的计算值很小，接近 0；电流出现间断角时，磁通曲线工作在非饱和区，励磁电流较小，瞬时等效励磁电感的计算值很大，方程(9)不满足，保护可靠闭锁。

变压器正常运行时，由于中、低压侧有负荷电流，模型方程电阻项误差对模型回路不平衡输出的

影响较大，不平衡输出可达 0.255，但仍然小于动作定值，保护不跳闸。

当发生匝间故障时(包括空投于匝间故障、正常运行时匝间故障)，回路平衡方程判据不能检测出变压器内部轻微故障，但是等效瞬时励磁电感判据却可以检测。空投于匝间故障时，模型回路平衡方程电阻项为 0，如表 1 所示，不平衡输出最大值为 0.066 (表中的 $\Sigma|\delta|$ 项)；正常运行时若发生区内匝间，则模型回路方程电阻项不为 0，不平衡输出最大值为 0.136，但仍远小于动作定值，如图 5 所示，回路平衡方程判据输出为“假”，但是，等效瞬时励磁电感判据输出为“真”，可以检测出内部轻微故障(表 1 中 $\Sigma|L_k|$ 项小于保护定值，满足方程式(9))。所以发生变压器内部轻微故障时，保护能够可靠动作。图 8 为变压器正常运行时，在 0.3s 发生 9.08% 的匝间故障时保护判据的计算值波形。

表 1 各种运行状态下保护判据计算值

Tab. 1 Values of transformer protection criteria in various cases

运行状态	故障类型	$\Sigma \delta $	D_k	$\Sigma L_k $	判别结果	动作时间/ms	
正常运行	无	0.205~0.255	1	5.1×10^4	正常		
空载合闸	无	0.000 2~0.005 0	9	1 400~3 200	正常		
空投于故障	匝间	2.2%	0.054~0.062	3	0.53~0.88	故障	10
		4.58%	0.053~0.066	3	0.55~0.87	故障	10
		9.1%	0.052~0.064	3	0.5~0.8	故障	10
	单相接地	2.8~3.5	2	0.65~1.05	故障	10	
	相间故障	2.9~3.5	2	1.2~2.1	故障	10	
区内故障	匝间	2.2%	0.110~0.136	1	7.6~12.8	故障	10
		4%	0.110~0.135	1	3.5~5	故障	10
	短路	7.58%	0.102~0.128	1	1.97~3.15	故障	10
		9.08%	0.102~0.128	1	1.85~3.19	故障	10
	单相接地	0.600~0.820	0	$1.7 \times 10^9 \sim 2.5 \times 10^9$	故障	10	
	相间故障	1.740~2.453	1	$6.6 \times 10^8 \sim 5.1 \times 10^8$	故障	10	
区外故障	单间接地	0.204~0.255	0	220~432	正常		

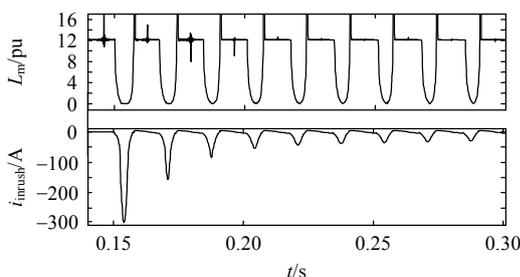


图 7 空载合闸时等效励磁支路电感计算值

Fig. 7 Values of inductance of magnetizing branch of transformer during energizing

区内严重故障时，回路平衡方程判据能够检测出故障。如表 1 所示，模型回路方程的不平衡输出最小值为 0.6，大于保护定值，保护可靠跳闸，但是，等效瞬时励磁电感判据却不能可靠检测出故障。由于差动电流不再是流过变压器励磁支路的电流，瞬时等效励磁电感的计算值不准确，区内严重故障时，其值可能大于保护定值，不能检测出内部严重故障，但是，依据回路平衡方程判据，内部严重故障时，保护也能够可靠动作。

所以，变压器区内轻微故障时，利用瞬时等效

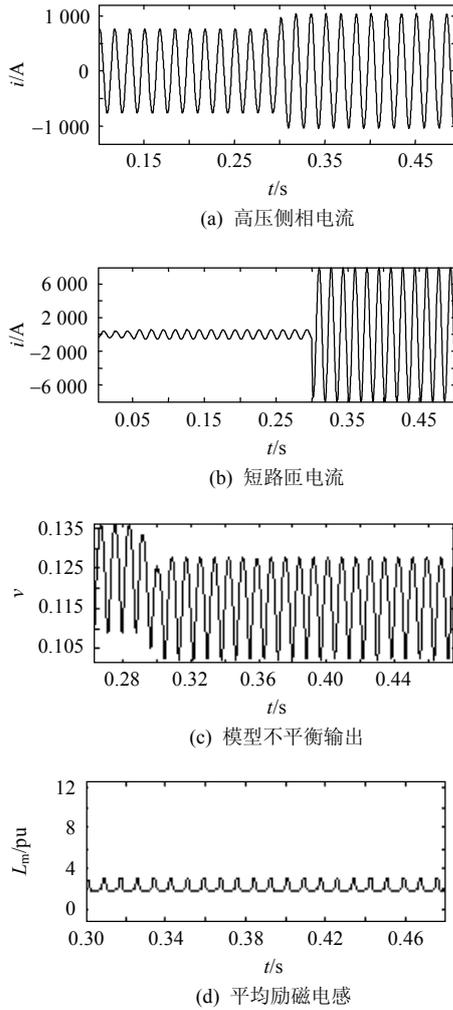


图8 公共绕组发生9.08%匝间故障时的波形
Fig. 8 Waveforms of 9.08% turn-to-turn fault

励磁电感判据能够检测出故障，而区内严重故障时，模型回路方程判据能够可靠检测出故障，变压器空载合闸、区外故障及正常运行时，2种判据均能够可靠闭锁。

2.3 保护判据性能比较

目前应用较多的励磁涌流识别方案是二次谐波闭锁和波形对称的识别方案。当变压器空投于内部小匝间短路故障时，差动保护动作时间比较长，必须等到谐波成分充分衰减，差动保护才能出口跳闸，此时故障已经扩大化，对变压器本体会造成比较大的损害。在大型变压器的保护中，特别是特高压变压器的保护，该方案可能不能满足差动保护速动性的要求。

采样值差动保护采用采样点进行故障判别，同时考虑了变压器励磁涌流和电流互感器饱和的影响，因此可在较短时间内检测出空载合闸于变压器内部小匝间故障的情况。但是，采样值差动保护具有较大的模糊区，动作精度较差，难以检测出短路

匝数较小的故障。

所以，本文提出的保护方案不受励磁涌流的影响，同时故障检测数据窗为10ms，因此具有较高的动作速度，满足特高压变压器速动性的要求。变压器等效励磁电感在变压器空载合闸、正常运行及区外故障时的计算值，与内部匝间短路故障时的计算值相差很大，所以对小匝间故障有较高的灵敏度。

如表2所示，本文提出的特高压变压器保护方案具有以下优势：当变压器严重端口故障时，本方案使用回路平衡方程判据判别，内部小匝间故障时利用等效瞬时励磁电感判据判别，克服了单纯使用回路平衡方程原理的判据对内部小匝间短路故障灵敏度不够的缺点；本方案修正了变压器漏感回路模型结构，使模型方程中只包含2个绕组参数值(R 、 L)，该参数值在电力系统各种状态下均可准确计算；回路平衡方程判据只用于检测变压器区内严重的端口故障，其判据裕度较大，即使 R 、 L 参数计算误差较大(如表1所示 R 误差为20%， L 误差为10%)时，也能进行正确判别。

表2 基于变压器模型原理的保护判据比较

Tab. 2 Comparison between protective criteria based on transformer model

模型类型	动作时间/ms	匝间故障	参数计算	R 、 L 误差
漏感回路模型	<10	灵敏度较差	精度较低	敏感
励磁电感制动	>20	灵敏度较高	参数预设	敏感
“T”型模型	<10	灵敏度较高	精度较高	不敏感

3 结论

本文在分析变压器参数模型的稳态解的基础上，提出变压器T型等效电路参数模型，同时，针对特高压变压器的特殊性，提出了基于变压器T型等效电路模型的保护方案，该方案以变压器等值回路方程不平衡输出和瞬时等值测量励磁电感的变化作为保护判据，能够在10ms内快速检测故障，满足特高压变压器保护速动性的要求。使用等值回路平衡方程判据能够检测出变压器内部的严重故障，利用瞬时等效励磁电感判据能够检测出区内小匝间短路，具有较高的灵敏度。仿真实验表明，该变压器保护在各种运行状态下，能可靠检测出各种区内故障，同时空载合闸、正常运行及区外故障时，保护能够可靠闭锁，因此，该保护具有良好的应用前景。后续研究应该关注算法实现中的工程技术问题，如端口电压的选取、判据定值的整定等。

参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压电网[M]. 3 版. 北京: 中国经济出版社, 2005: 30-35.
Liu Zhengya. Ultra-high voltage grid[M]. 3rd ed. Beijing: China Economic Publishing House, 2005: 30-35(in Chinese).
- [2] 何奔腾, 徐习东. 波形比较法变压器差动保护原理[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(6): 395-398.
He Benteng, Xu Xidong. Protection based on wave comparison[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(6): 395-398(in Chinese).
- [3] 张雪松, 何奔腾. 变压器励磁涌流的相移比较鉴别方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(19): 43-47.
Zhang Xuesong, He Benteng. A new method to identify inrush current by phasor comparison[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(19): 43-47(in Chinese).
- [4] 焦邵华, 刘万顺. 区分变压器励磁涌流和内部短路的积分型波形对称原理[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(8): 35-38.
Jiao Shaohua, Liu Wanshun. A novel scheme to discriminate inrush current and fault current base on integrating the waveform[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(8): 35-38(in Chinese).
- [5] 徐岩, 王增平, 杨奇逊. 基于电压电流微分波形特性的变压器保护新原理的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 61-65.
Xu Yan, Wang Zengping, Yang Qixun. Research on novel transformer protection based on the characteristics of voltage and differential current[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 61-65(in Chinese).
- [6] 林湘宁, 何占虎, 刘世明, 等. 电流采样值差动保护若干问题的探讨[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(10): 27-33.
Lin Xiangning, He Zhanhu, Liu Shiming, et al. Discussions on some aspects of sampling value differential current protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(10): 27-33(in Chinese).
- [7] 曾麟钧, 林湘宁, 黄景光, 等. 特高压自耦变压器的建模和电磁暂态仿真[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 91-97.
Zeng Linjun, Lin Xiangning, Huang Jingguang, et al. Modeling and electromagnetic transient simulation of UHV autotransformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 91-97(in Chinese).
- [8] Sidhu T S, Sachdev M S. On-line identification of magnetizing inrush and internal faults in three-phase transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(4): 1885-1891.
- [9] 熊小伏, 邓祥力, 游波. 基于参数辨识的变压器微机保护[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(11): 18-21.
Xiong Xiaofu, Deng Xiangli, You Bo. Transformer protection using parameter identification method [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(11): 18-21(in Chinese).
- [10] 宗洪良, 金华烽, 朱振飞, 等. 基于励磁阻抗变化的变压器励磁涌流判别方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(7): 91-94.
Zong Hongliang, Jin Huafeng, Zhu Zhenfei, et al. Transformer inrush detected by the variation of magnetizing impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(7): 91-94(in Chinese).
- [11] 王增平, 徐岩, 王雪, 等. 基于变压器模型的新型变压器保护原理的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 54-58.
Wang Zengping, Xu Yan, Wang Xue, et al. Study on the novel transformer protection principle based on the transformer model[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 54-58(in Chinese).
- [12] 索南加乐, 康小宁, 宋国兵, 等. 基于参数识别的继电保护原理初探[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(1): 14-20.
Suonan Jiale, Kang Xiaoning, Song Guobing, et al. Survey on relay protection using parameter identification [J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2007, 19(1): 14-20(in Chinese).
- [13] 刘玉欢, 陆于平, 袁宇波, 等. 基于磁制动原理的特高压变压器励磁涌流快速识别[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(34): 52-58.
Liu Yuhuan, Lu Yuping, Yuan Yubo, et al. A novel scheme based on flux restraint theory used in distinguishing inrush currents for UHV transformers[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(34): 52-58(in Chinese).
- [14] 索南加乐, 焦在滨, 康小宁, 等. Y/Δ接线变压器漏感参数的识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 84-90.
Suonan Jiale, Jiao Zaibin, Kang Xiaoning, et al. Algorithm to identify leakage inductances of power transformer with Y-Delta connection[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 84-90(in Chinese).



邓祥力

收稿日期: 2011-08-08。

作者简介:

邓祥力(1973), 男, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护, dengx1989@hotmail.com;

王传启(1970), 男, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护。

(责任编辑 刘浩芳)

UHV Transformer Protection Based on Equivalent Circuit Equation and Excitation Inductance

DENG Xiangli, WANG Chuanqi, ZHANG Zhe

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, Hubei Province, China)

KEY WORDS: UHV transformer protection; inrush current; parameter identification; equivalent circuit equation; equivalent excitation inductance

The algorithms, which use the ratio of harmonic components or unsymmetrical waveform of differential currents to identify magnetizing inrush, are widely used in digital protective relays for transformers. However, when there is an inrush current, the ratio of second harmonic components may be less than 10% and the protection may mal-operate. The tripping speed may be slow in a severe inner fault due to harmonic restraining. The algorithms based on transformer models do not rely on the presence of harmonic components to identify magnetizing inrush and have further advantages. This paper introduces a new model based transformer protection algorithm. The algorithm is sensitive to slight turn-to-turn faults and has fast tripping speed due to its less-than-half-cycle faults detecting time. It does not rely on harmonic components to identify inrush.

The parameters estimated by the recursive on-line least-squares identification algorithm (OLSIA) in real time can be substituted into different phase circuit equations to form error functions (δ function, unbalanced output of T-type equivalent circuit equations). Taking phase A as an example, the error function is given by (1):

$$\delta = u_{hA} - u_{hB} - u'_{lA} + u'_{lB} - \frac{x_k}{\omega} \frac{di'_{lA}}{dt} - R_h(i_{hA} - i_{hB} - i'_{lA}) + L_{h\sigma} \frac{d(i_{hA} - i_{hB} + i'_{lA})}{dt} \quad (1)$$

If the average value $\Sigma\delta > \Sigma\delta_{zd}$ (criteria of the measured magnetizing inductance), the fault is identified as a heavy internal fault and the protective relay issues trip command. A counter of D_k is adopted to reflect the dots of “significant rate of change” for the inductance L_k . If $|L_k(k+1) - L_k(k)| > dL_{kZD}$, D_k is

increased by 1. If Equ. (2) is satisfied, turn-to-turn fault is classified.

$$\begin{cases} \frac{2}{N} \sum_{k=1}^{N/2} |L_k(k)| < L_{zd} \\ D_k < D_{zd} \end{cases} \quad (2)$$

The logic of the algorithm is described as Fig.1.

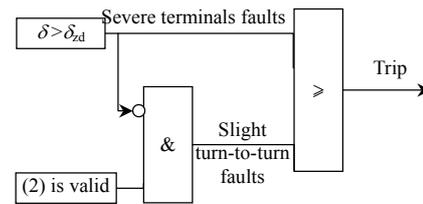


Fig. 1 Transformer protection tripping logic based on OLSIA

The simulation system of UHV power transmission system established with Matlab/Simulink is shown as Fig.2.

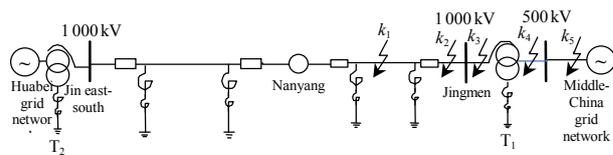


Fig. 2 UHV power transmission system model

Various system conditions are simulated. Simulation study shows that, the algorithm can use protective criteria of the measured magnetizing inductance to detect slight turn-to-turn faults (the minimum turn-to-turn fault is about 2.2%); while unbalanced output of T-type equivalent circuit equations are used to detect severe internal faults, such as single phase to ground, phase to phase fault, and the two criteria are reliably blocked during such conditions as energizing, external faults and normal operation. Extensive simulation results validate the proposed model and algorithm, and their feasibility for field applications.