

变压器接地故障励磁涌流快速识别方案及验证

李凤海¹, 董玉印¹, 韩志¹, 李峰²

(1. 国网冀北电力有限公司承德供电公司, 河北 承德 067000;

2. 河北理工大学 电气工程学院, 河北 石家庄 050011)

摘要: 为了提高变压器接地故障识别能力, 设计一种励磁涌流快速识别方法。该方法利用最小二乘矩阵算法准确提取电流分量, 构建电流能量信息熵模型, 完成励磁涌流与短路电流精确分类效果。研究结果表明: 当变压器中形成励磁涌流后, 采用差流算法得到的H值更大, 基波与非周期分量减弱。短路导致非周期分量明显增大, 最小能够降低至0。获得了明显故障信号组成的波形曲线, 能够实现短路故障的高效识别。该方案通过深入探讨波形频域数据得到各个工况下的故障信息与扰动变化参数, 相对二次谐波制动方式具备更大优势, 能够充分优化差动保护动作的控制性能。

关键词: 变压器; 差动保护; 励磁涌流; 最小二乘法; 扰动变化; 快速识别

中图分类号: TP277; TM772 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)01-0124-04

Fast Identification Scheme and Verification of Transformer Grounding Fault Inrush Current

LI Feng-hai¹, DONG Yu-yin¹, HAN Zhi¹, LI Feng²

(1. Chengde Power Supply Company, State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Chengde 067000 China;

2. College of Electrical Engineering, Hebei Polytechnic University, Shijiazhuang 050011 China)

Abstract: In order to improve the recognition ability of transformer grounding fault, a fast recognition method of inrush current is designed. In this method, the least square matrix algorithm is used to extract the current components accurately, and the current energy information entropy model is constructed to achieve the accurate classification effect of inrush current and short-circuit current. The results show that when the inrush current is formed in the transformer, the H value obtained by the differential flow algorithm is larger, and the fundamental wave and aperiodic components are weakened. The short circuit causes the aperiodic component to increase significantly, which can be reduced to 0 at least. The waveform curve composed of obvious fault signals is obtained, which can realize the efficient identification of short-circuit faults. This scheme can obtain the fault information and disturbance variation parameters under various working conditions through in-depth discussion of waveform frequency domain data. Compared with the second harmonic braking mode, it has greater advantages and can fully optimize the control performance of differential protection action.

Keywords: transformer; differential protection; excitation inrush current; least square method; disturbance change; fast recognition

0 引言

对于输电网组成结构来说, 高频变压器发挥着枢纽转换的功能, 是否能够保持稳定运行对电网综合调度发挥重要作用^[1-2]。在高频变压器主保护方面通常可以利用基尔霍夫电流定律来完成差动保护的功能, 但对差动电流进行计算的时候并未开展分析, 导致异常情况下励磁涌流的发生^[3-4]。

当前, 根据二次谐波制动的方式探讨励磁涌流的变化机制^[5], 但上述方法都有着一定的缺陷。现阶段, 很多学者对高频变压器开展励磁涌流快速识别。其中, 国内

学者结合激发涌流作用机制深入分析了高频变压器运行控制指标和电路模型参数^[6], 此外还有一些学者设计了磁通特性、等效瞬时电感与回路计算等多种形式的处理方法^[7]。采用这些方案进行处理时无需采集涌流波形, 但应结合电压量开展分析, 导致互感器运行成本大幅提升, 考虑到实际保护系统较为复杂, 会造成电压二次回路发生断开, 此时电压互感器也进入饱和的状态, 不能继续提供保护作用^[8]。还有学者采用设定特征参数的方法来判断励磁涌流和故障电流的区别, 从而建立二次谐波比例、波形正弦特征与间断角判据, 可根据特定方法进行数据分析确定特征参数^[9]。肖湃^[10]提出了合闸电阻结合选相合闸的特变压器励磁涌流抑制方法, 改造后换流变空载合闸

*基金项目: 河北创新创业基础研究基金(201151B0236)

收稿日期: 2023-09-08

一次成功,验证所提抑制方法的有效性。栗磊^[11]提出基于波形分区重构的变压器励磁涌流识别方法,采用小波系数能量与二阶导数能量作为联合判据,利用幅值绝对比值决定判断变压器故障。李海涛^[12]提出基于可变合闸角的励磁涌流抑制方法,根据剩磁情况调整目标合闸角,试制装置样机验证了该方法的有效性。刘鹏辉^[13]提出基于特征数据判定的励磁涌流识别方法,借助特征数据剔除干扰波形,对波形数据进行多元线性回归拟合,利用判定系数区分双向励磁涌流,提高了饱和和干扰能力。陈映芳^[14]提出基于离散小波变换和相关系数的变压器励磁涌流识别算法,根据预先存储励磁涌流指标判别励磁涌流故障,能够有效地识别励磁涌流故障。

本文对涌流和运行故障波形进行全面探讨,设计一种励磁涌流快速识别方法。利用最小二乘矩阵提取电流分量,构建电流能量信息熵模型,完成励磁涌流与短路电流精确分类效果。

1 励磁涌流波形特征

单相高频变压器等效电路见图1所示。其中, U_1 、 i_1 分别为电压和电流参数, L_σ 与 R_σ 分别为漏电感与漏电阻; L_m 、 R_m 分别为励磁支路电感、电阻。建立下属合闸磁链函数:

$$\Psi_\sigma + \Psi_m = i_1(L_m + L_\sigma) \quad (1)$$

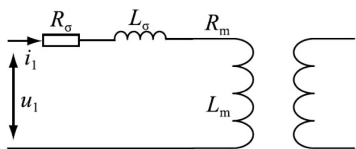


图1 单相变压器等效模型

按照下式并结合电压与磁链的关系进行回路电压计算:

$$u_1 = i_1 R_\sigma + \frac{d\Psi_\sigma}{dt} + i_1 R_m + \frac{d\Psi_m}{dt} \quad (2)$$

由于现代变压器保持很小的漏磁和绕组电阻,可以忽略这些因素产生的影响,从而可将式(2)表示成如下的形式:

$$\Psi_m(t) = -\Psi_{ms} \cos(\omega t + \alpha) + (\Psi_r + \Psi_{ms} \cos \alpha) e^{-\frac{t}{\tau_m}} \quad (3)$$

式中: $\Psi_{ms} = L_m U_m / R_{2m} + (\omega L_m) 2$; $\tau_m = L_m / R_m$; Ψ_r 为铁芯剩磁,受到变压器在电压突变期间电压相量的明显影响。

2 励磁涌流快速识别方案

2.1 算法启动判据

设置保护装置实时监测差流数据,当采样序列满足突变量启动标准时,将启动时刻设置在第一个采样点处,再根据电流分量判断启动状态,得到以下判断表达式:

$$\max\{\Delta i_{\Delta t}\} > i_{q\text{dset}} \quad (4)$$

式中: Δi_a 为差动电流故障分量。

2.2 保护算法方案

出现励磁涌流后,将会造成电流呈现非正弦波动,使变压器发生内部短路。存在故障因素作用的情况下,差动电流形成了明显的标准正弦波特点,此时需对采集得到的各项参数实施归一化处理,当计算结果很小时,可以认为是受故障影响而形成的差流,当计算得到的结果较大时,则认为是受到铁芯饱和和影响而产生励磁涌流的现象,再根据该结果判断是否实施差动保护。

为了能够对电流参数进行更准确的测试,需对各电流分量能量信息熵分别实施计算。获得去除噪声信号电流分量,表达式如下:

$$i_k = \sum_{i=0}^M R_i e^{k s_i T_s} \quad (5)$$

式中: k 为 $0, \dots, N-1$, 建立以下的电流能量 E_i 计算式:

$$E_i = R_i^2 \sum_{k=0}^{N-1} e^{k s_i T_s} \quad (6)$$

可以根据信息熵判断信号的波动程度与随机状态,本研究中利用该指标判断电力信号不规则度。再以 p_i 表示次电流能量占比:

$$p_i = E_i / \left(\sum_{j=0}^M E_j \right) \quad (7)$$

图2给出了以本文方法进行识别的各个步骤:

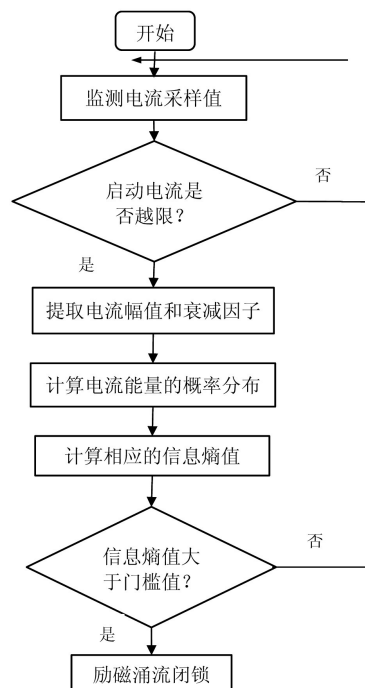


图2 励磁涌流快速识别流程

(1) 根据差动电流启动量识别启动状态,应在非正常运行状态下启动。

(2) 以最小二乘法处理得到流工频等分量。

(3) 对以上各电流能量值进行转换得到所有分量概率,再通过衰减系数计算出信息熵,通过阈值整定的方式

完成励磁涌流的分析。

3 验证

本文在分析判据性能时通过PSCAD建立仿真模型，具体见图3。同时为仿真过程加入短路信号和空载合闸信号。三相变压器的额定功率为316 MVA，变比是400 kV/220 kV。根据IEC61850标准测定每个周波中的80个采样点，控制频率保持固定的4 kHz。一次侧电流中也包含了二次侧电流，由此形成差动保护电流，计算得到锁门阈值0.7。

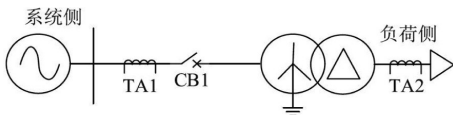


图3 验证模型

3.1 励磁涌流分析

与理论结果基本接近，受励磁涌流影响产生了大量具有不规则外形的尖顶波，进入后续周期时还会出现连续衰减的情况，根据整体变化规律可知此时并未形成典型的正弦函数。根据最小二乘法算法处理可以获得保护启动后位于工频周期中的拟合曲线，图4是对比A相拟合曲线和初始波形的情况。

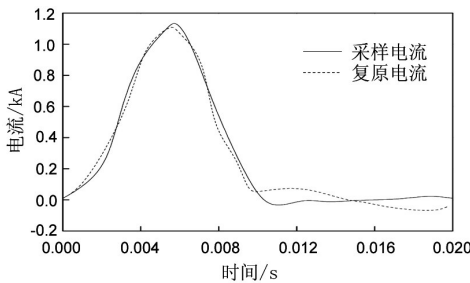


图4 复原的涌流波形

设置初始参数后对合闸角励磁涌流分析，利用矩阵束得到电流分量，各项测试参数见表1。根据表1可知，当变压器中形成励磁涌流后，采用差流算法得到的H值更大，并且发生了基波与非周期分量的减弱趋势，这跟闭锁判断依据相符。

表1 变压器空载合闸时信息熵计算值

合闸角/(°)	H值		
	A相	B相	C相
0	1.026	1.039	1.095
30	0.996	1.014	0.996

3.2 故障分析

图5是在变压器中开展故障仿真测试所得的故障曲线。图5结果显示，当变压器中产生内部短路时，形成了更大幅度的正弦度，同时发现初期故障形成了明显的直

流量量。表2是在差动电流发生突变的状态下通过变压器故障相差开展仿真所得的信息熵。

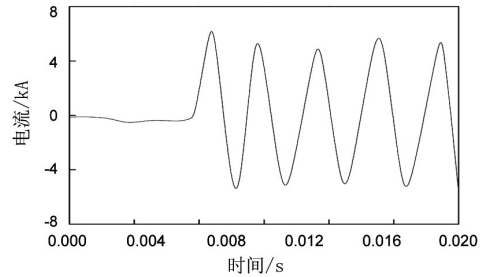


图5 典型故障仿真电流波形

表2 变压器匝间故障时信息熵计算值

故障匝间比/%	H值		
	A相故障	B相故障	C相故障
5	0.115	0.116	0.136
10	0.119	0.127	0.152
15	0.136	0.141	0.185
20	0.174	0.178	0.197
25	0.203	0.215	0.252
30	0.224	0.236	0.271
35	0.245	0.256	0.296
40	0.269	0.274	0.312
45	0.285	0.296	0.321
50	0.294	0.311	0.326

通过仿真测试发现，虽然短路导致非周期分量明显增大，而考虑到高衰减因子影响的情况下，将会造成工频周波数据发生信息熵的大幅减小，最小能够降低至0。

当高频变压器中存在合闸故障时，将会形成励磁涌流与故障电流，造成如下情况：首先是包含多种绕组故障时，会形成包含故障信号波形，将会产生初始涌流波形，之后转变成区内故障，可以对短路故障特征实现高效识别。

4 结束语

当变压器中形成励磁涌流后，采用差流算法得到的H值更大，发生了基波与非周期分量的减弱趋势，这跟闭锁判断依据相符。本研究获得了明显故障信号组成波形曲线，能够实现短路故障的高效识别。本研究有助于河北创新创业基础研究基金(201151B0236)关于变压器接地故障判断性能的提高，对强化基金的理论成果具有很好的意义。

参考文献：

- [1] 郑德国. 抑制涌流装置在电厂中的应用与试验[J]. 上海电气技术, 2019(1): 23-26, 38.
- [2] 吴跃军, 郭桐, 渠冰. 加权递减法优化下电力变压器寿命建模分析[J]. 机械设计与制造, 2023(6): 180-183.
- [3] 王冰清, 李本瑜, 宋晓亮. 基于瞬时功率理论的高频变压器

(下转第167页)