

9-3-2020

## Transformer differential protection method based on the comprehensive braking criterion

Mei LI

*School of Electronic Information and Electrical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China*

Jusheng TANG

*School of Electronic Information and Electrical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China*

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

---

### Recommended Citation

LI, Mei and TANG, Jusheng (2020) "Transformer differential protection method based on the comprehensive braking criterion," *Journal of Electric Power Science and Technology*: Vol. 35: Iss. 2, Article 18.

DOI: 10.19781/j.issn.16739140.2020.02.018

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol35/iss2/18>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology.

# 基于综合制动判据的变压器差动保护研究

李 梅, 唐菊生

(安徽理工大学电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001)

**摘 要:**变压器差动保护的核心问题是如何鉴别励磁涌流与区内短路电流,防止保护误动作。该文针对传统二次谐波幅值比识别励磁涌流的方法存在判据单一、精确性不足、在某些情况下可能造成误动的问题进行改进,增加相位差判别的方法,并结合比率制动组建综合制动判据。利用 MATLAB 软件中 Simulink 实现模块的构建,对变压器在不同的运行情况下进行仿真校验。仿真结果表明:该判据不仅能够区分不同情况下的短路故障,而且能够有效地识别励磁涌流,并对变压器不同的故障类型作出相应的保护动作。

**关 键 词:**变压器差动保护;相位差判别;综合制动;励磁涌流;MATLAB/Simulink

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.02.018 中图分类号:TM772 文章编号:1673-9140(2020)02-0135-07

## Transformer differential protection method based on the comprehensive braking criterion

LI Mei, TANG Jusheng

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** The key problem of transformer differential protection method is the method to distinguish the inrush current from short circuit current in order to prevent mis-operation. The traditional method based on two harmonics amplitude ratios has a single criterion and insufficient accuracy, and thus it may cause a mis-operation in some conditions. On this background, the method of phase difference discrimination is improved, and the braking ratio is utilized to set up a comprehensive braking criterion. Simulation modules are modeled in Matlab/Simulink and the transformer is simulated and checked under different operating conditions. It is shown that the criterion not only distinguish short circuit faults in different situations, but also recognize inrush currents effectively, and make corresponding protection actions for different fault types of transformers.

**Key words:** transformer differential protection; discrimination phase difference; comprehensive braking criterion; inrush current; MATLAB/Simulink

变压器在整个电力系统中有着举足轻重的地位,其故障会对供电可靠性和系统安全运行带来严重的影响。变压器通常采用瓦斯保护和纵联差动保护分别解决油箱内部和外部故障。变压器的纵联差

动保护能正确区分保护组件从而保护区内、外的短路故障,并能瞬时切除保护区内的故障,具有选择性、速动性、可靠性的特点。

变压器不平衡电流是影响差动保护整定的关键

参数,其产生的因素很多,一般可由仿真软件中参数的设置整定解决,如何有效地区分由励磁涌流还是区内短路故障电流引起的不平衡电流是差动保护要解决的主要问题<sup>[1-2]</sup>。

传统的二次谐波幅值比判别励磁涌流的方法比较有效,但当变压器剩磁较大时,该方法可能会因判据的单一而产生误动。因此,针对传统的二次谐波识别励磁涌流方法的改进是十分必要的。该文简要介绍励磁涌流产生的不平衡电流,讨论二次谐波幅值比识别励磁涌流的原理、缺陷,并提出改进。最后构建综合制动保护判据,在 MATLAB 上建立变压器差动保护仿真系统,从而验证保护判据的特点与优越性。

## 1 二次谐波识别励磁涌流

### 1.1 励磁涌流产生的不平衡电流

变压器差动保护的不平衡电流产生原因有多种,如:变压器两侧电流相位不同、两侧电流互感器型号不同、变压器带负荷调整分接头等。

在实际运行中,对于变压器两侧由于 Y/Δ 接线引起电流相位不同产生的不平衡电流,主要通过调整变压器两侧的电流互感器极性和相位的方式消除<sup>[3]</sup>;对于电流互感器额定变比和计算变比不同产生的不平衡电流主要通过增设平衡线圈来消除;对于变压器由于分接头改变产生的不平衡电流,主要采用在保护整定时乘以相应的系数来消除。在软件模拟中,可以通过参数设置和整定计算克服上述几种影响因素。而励磁涌流引起的不平衡电流是变压器差动保护要解决的主要问题。

单相变压器的等效电路如图 1 所示,变压器的

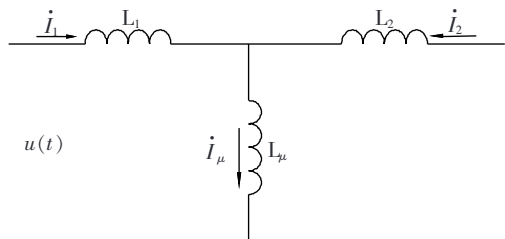


图 1 单相变压器等效电路

Figure 1 Single-phase transformer equivalent circuit diagram

励磁电流仅流经变压器的电源侧,在差动回路中不能被平衡。在正常运行和外部故障时,励磁电流  $I_{\mu}$  均很小,一般不超过额定电流的 2%~10%,因此,对差动保护的影响可以忽略不计。但是当变压器空载投入和故障切除后电压恢复时,电压突然增大,励磁阻抗  $L_{\mu}$  减小,可能会产生很大的励磁电流(励磁涌流),变压器差动保护可能产生误动,不可忽略<sup>[4]</sup>。

### 1.2 二次谐波判别方法

变压器空载合闸原理如图 2 所示,其中,电源电压为  $35\angle 0^{\circ}$  kV,额定容量为 50 MV·A,降压变压器 T 为 Y-Δ 连接,额定变化为 35 kV/11 kV 励磁铁心电阻标幺值为 500,其一、二次绕组的线电压有效值、电阻标幺值、漏抗标幺值分别为 35 kV、0.02、0.08,11 kV、0.02、0.08。

当  $t=0$  s 时,开关 K 闭合,变压器 T 空载投入,变压器 35 kV 侧的电压由 0 突然增大到三相电源电压,铁心饱和,励磁电流急剧增大,变压器 35 kV 侧各绕组将存在很大的励磁电流即励磁涌流。为便于分析和研究,对变压器 A 相上的励磁涌流单独进行讨论,输出电流波形如图 3 所示,可以看出,空载合闸后所产生励磁涌流含有较多的非周期分量,从而使得励磁涌流的波形集中在时间轴某一侧,同时波形之间有很明显的间断。较大的励磁涌流可能导致差动保护误动。

提取出 A 相涌流的二次谐波与基波的幅值比,得到幅值比波形,如图 4 所示,变压器饱和和无剩磁,

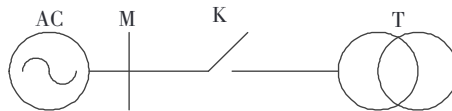


图 2 变压器空载合闸原理示意

Figure 2 Diagram of transformer no-load switch

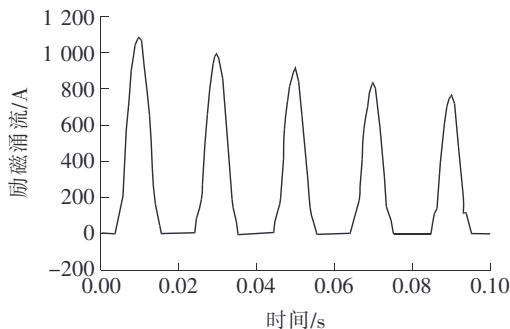


图 3 A 相励磁涌流波形

Figure 3 A-phase inrush current waveform

得到的幅值比很显然满足传统的判据,即二次谐波与基波的幅值比值大于给定值(一般设置为 0.15)<sup>[5]</sup>。利用这个特性,变压器差动保护能够很好地识别励磁涌流,防止误判内部短路电流而产生的误动。

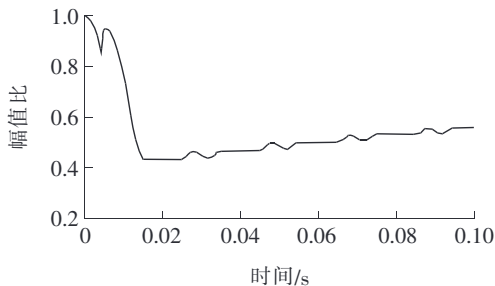


图 4 幅值比波形

Figure 4 Amplitude ratio waveform

### 1.3 幅值比判据的缺陷及改进

由于大容量、超高压变压器结构上的特点以及材料和制造工艺等方面的原因,特别是现代变压器铁芯的低饱和点、剩磁大特点,可能会使得励磁涌流中的二次谐波含量非常小,造成二次谐波制动的差动保护整定困难,单一的幅值比判据在某些情况下可能造成误动。

设置变压器有剩磁为 $[0.85 \ 0 \ 0]$ 。当 $t=0$  s时,开关 K 闭合,变压器空载投入,得到三相变压器 A 相相应的幅值比、相位差、励磁涌流波形,如图 5 所示,变压器空载合闸后 A 相产生了励磁涌流,观察到在 0.015~0.025 s 时间内,幅值比 $k$ 低于给定值 0.15,这说明传统的幅值比方法识别励磁涌流存在着缺陷。

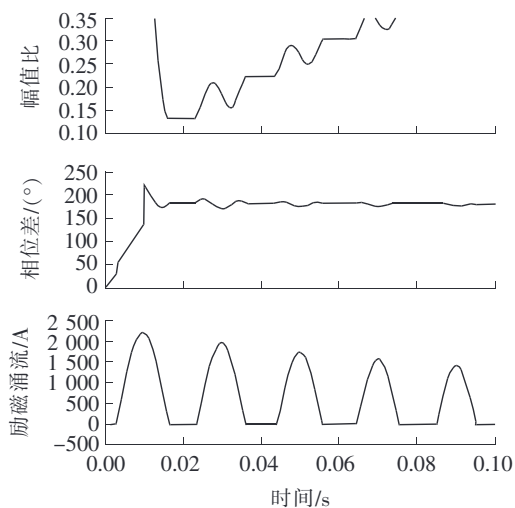


图 5 A 相绕组相关波形

Figure 5 A-phase winding waveforms

利用离散傅里叶变换提取出励磁涌流的二次谐波和基波的波形。经研究发现,在靠近时间轴正半轴侧,二次谐波为峰值时基波也为峰值;靠近负半轴侧,二次谐波幅值减小为零时基波也随之减小到零。由于二次谐波的角速度是基波的 2 倍,将基波的相位角 2 倍与二次谐波的相位角作差,可以得到:在靠近时间轴侧,励磁涌流中基波与二次谐波的相位差为 $0^\circ$ 或 $180^\circ$ 。显然,图 5 中第 2 个波形在 0.015~0.025 s 时间内,相位差在 $180^\circ$ 附近(一般允许偏差 $\theta$ 在 $30^\circ$ 左右),验证了结论的正确性。因此,在传统幅值比方法的基础上,通过增加相位差判别的方法可对励磁涌流进行有效的识别<sup>[6]</sup>。

## 2 综合制动判据的构建

变压器综合制动判据模块设计如图 6 所示,主要包括比率制动和改进型二次谐波制动两部分。当变压器外部短路时,通过比率制动部分的设计来减小或消除不平衡电流的影响,使得差动保护不发生误动<sup>[7]</sup>。

图 6 由动作电流模块和制动模块构成,考虑到变压器 Y- $\Delta$  接法,计算公式分别为

$$I_{\text{act}} = \left| \frac{\dot{I}_{\text{aM}} - \dot{I}_{\text{bM}}}{\sqrt{3}} + \dot{I}_{\text{aN}} \right| \quad (1)$$

$$I_{\text{res}} = K_{\text{res}} \left| \frac{\dot{I}_{\text{aM}} - \dot{I}_{\text{bM}}}{\sqrt{3}} - \dot{I}_{\text{aN}} \right| \quad (2)$$

式(1)、(2)中 $K_{\text{res}}$ 为制动系数,一般取 0.5; $\dot{I}_{\text{aM}}$ 、 $\dot{I}_{\text{bM}}$ 分别为变压器 35 kV 侧的电流互感器二次侧绕组 A、B 相电流; $\dot{I}_{\text{aN}}$ 为变压器 10 kV 侧的电流互感器二次绕组 A 相电流。

变压器在正常工作或发生外部短路时,制动电流 $I_{\text{res}}$ 大于动作电流 $I_{\text{act}}$ ,保护不动作。二次谐波改进部分主要通过傅里叶模块提取出励磁涌流中二次谐波与基波的幅值比、相位差,当变压器空载合闸或故障恢复产生励磁涌流后,根据改进型的二次谐波判据能够防止变压器差动保护误动。这部分主要是针对比率制动部分的补充,使得系统能够有效识别励磁涌流和区内短路故障电流。

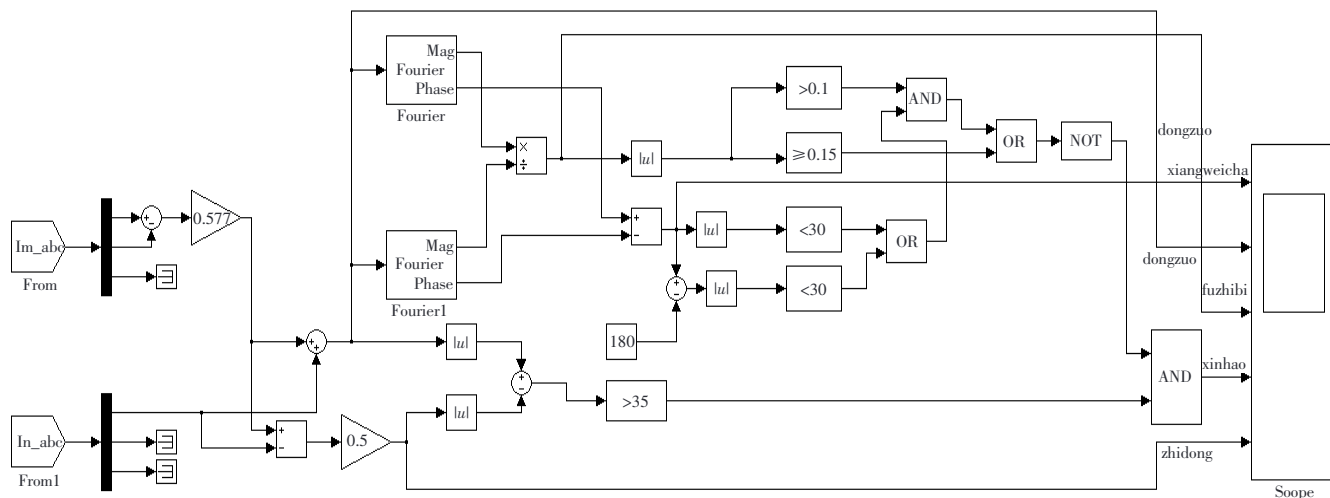


图 6 差动保护综合制动判据模块

Figure 6 Differential protection integrated braking module

### 3 变压器差动保护的建模与仿真

具有双侧电源供电的双绕组变压器的仿真模型如图 7 所示<sup>[8]</sup>, 其中, 双侧三相电源电压分别为  $35\angle 0^\circ$ 、 $35\angle 10^\circ$  kV, 双绕组变压器的额定容量为  $50 \text{ MV} \cdot \text{A}$ , 一、二次绕组的线电压有效值、电阻标幺值、漏抗标幺值分别为 35 kV、0.02、0.08, 35 kV、0.02、0.08; 励磁铁心电阻标幺值为 500, 变压器 Y- $\Delta$  连接, 三相并联负荷有功和无功功率分别为 5 MW、1 MVar; 系统频率为 50 Hz, Fault、Fault1 为三相故障元件。

在不同运行状态下, 对变压器差动保护的動作情况进行分析。

#### 1) 变压器保护区外短路。

将 Breaker1、Breaker2 设为闭合状态, 故障设置单元 Fault 不设置故障, Fault1 设置为在  $[0.3 \sim 0.5] \text{ s}$  发生三相短路故障。仿真运行后得到的故障

波形如图 8 所示, 在  $0.3 \sim 0.5 \text{ s}$  内, 当变压器保护区外发生三相短路故障, 动作电流  $I_{\text{act}}$  较小, 制动电流  $I_{\text{res}}$  明显增大。比率制动判据输出为 0, 当输入到与门后, 动作信号单元输出为 0, 故保护单元判断为不动作, 保证了保护不会发生误动。

#### 2) 变压器保护区内短路。

将 Breaker1、Breaker2 设为闭合状态, 故障设置单元 Fault1 不设置故障, Fault 设置为在  $[0.3 \sim 0.5] \text{ s}$  发生三相短路故障, 仿真运行后得到的故障波形如图 9 所示, 在  $0.3 \sim 0.5 \text{ s}$  内, 当变压器保护区内发生三相短路故障时, 动作电流  $I_{\text{act}}$  明显增大, 制动电流  $I_{\text{res}}$  较小。比率制动判据单元输出为 1, 而二次谐波制动判据单元判断为非励磁涌流, 输出也为 1。两路信号通过与门, 从而动作信号单元输出为 1, 保护能够正确动作。

#### 3) 变压器空载合闸。

故障设置单元 Fault、Fault1 均不设置故障, 将 Breaker1 和 Breaker2 设置为闭合, 将变压器设置为

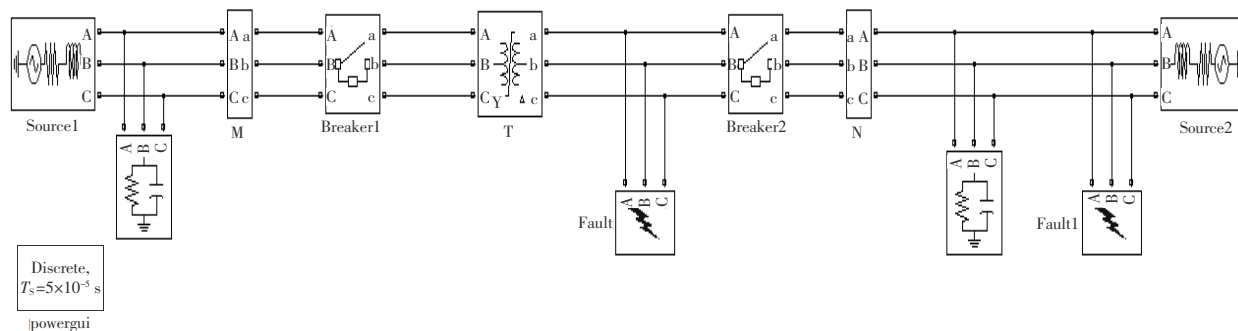


图 7 双侧电源双绕组变压器仿真模型

Figure 7 Double winding transformer with bilateral power supply simulation model diagram

饱和和无剩磁,仿真运行后得到无剩磁时的动作电流和制动电流波形,如图 10 所示,当变压器在  $t=0$  s 时空载合闸,产生了励磁涌流,导致动作电流  $I_{\text{act}}$  明显增大,而制动电流  $I_{\text{res}}$  很小。

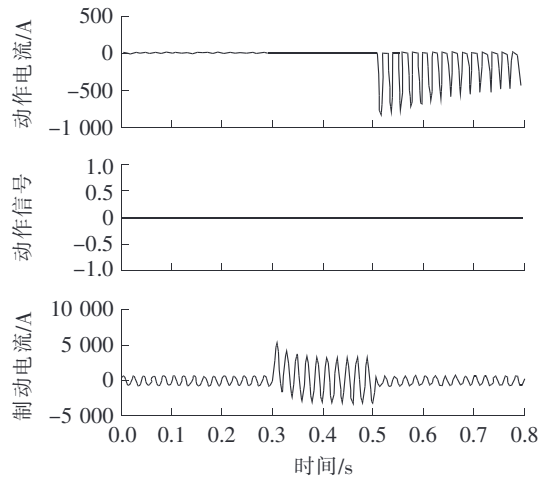


图 8 变压器区外短路故障波形

Figure 8 Short-circuit waveform under external fault

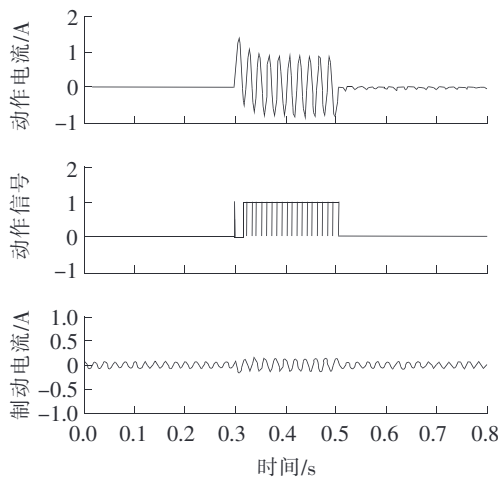


图 9 变压器区内短路故障波形

Figure 9 Short-circuit waveform under internal fault

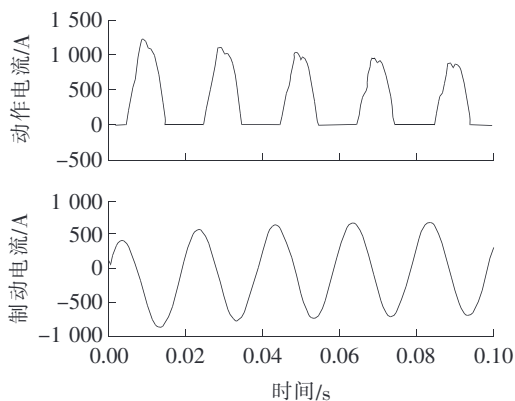


图 10 无剩磁动作电流与制动电流波形

Figure 10 Action current and braking current waveform without remanence

提取动作电流中基波与二次谐波的幅值比,得到幅值比与动作信号的波形,如图 11 所示,由于动作电流的突然增大,在某些时间段内超过制动电流,比率制动单元输出为 1。此时,二次谐波制动判据中的幅值比  $k > 0.15$ ,判据满足,因此判断为励磁涌流,输出为 0。两路信号通过与门,从而动作信号单元输出为 0,保护不动作,因此保护不会发生误动。

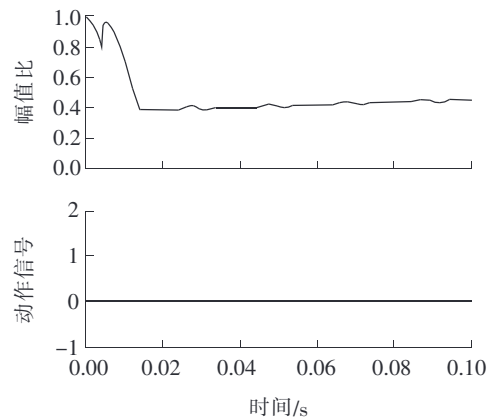


图 11 无剩磁幅值比、动作信号波形

Figure 11 Amplitude ratio and action waveform without remanence

## 4 综合制动判据的优越性

从文 3 仿真结果可以看出,对于不同情况的短路故障,制动模块里面的比率制动能够很好地控制变压器差动保护的動作信号。同时,改进的二次谐波制动模块对比率制动进行互补,能够十分有效地鉴别励磁涌流,防止变压器差动保护误判为内部短路而产生的误动。因此,该系统具有良好选择性与可靠性,能够根据不同的故障类型采取相应的保护动作。

该文制动设计的另一个突出优点就是相对于传统的二次谐波幅值比判据,改进型的二次谐波判据加入了相位差判据,很好地增强了保护系统判断的精确性、可靠性。可以通过仿真对二者的性能进行比较。

1) 变压器饱和和无剩磁。当  $t=0$  s 时,发生空载合闸,仿真结果与改进判据相同(见图 11,不再说明)。

2) 变压器有剩磁。当变压器有剩磁时, 设置变压器剩磁参数为  $[0.85 \ 0 \ 0]$ ,  $t=0 \text{ s}$  时变压器空载合闸。去掉图 6 中的相位差判别部分, 如图 12 所示; 运行仿真分别得到动作电流和制动电流、幅值比和动作信号波形, 如图 13、14 所示。

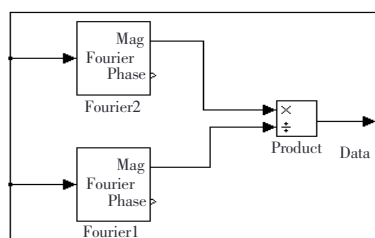


图 12 单一幅值比判据模块

Figure 12 Single amplitude ratio criterion module

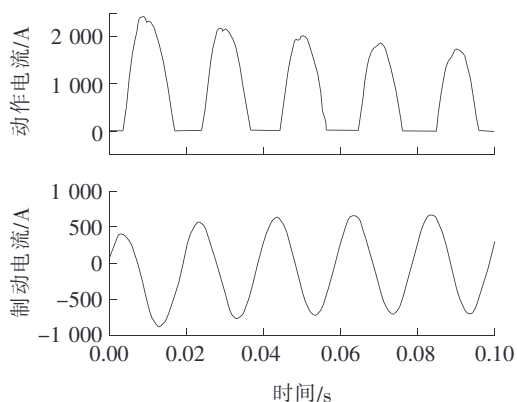


图 13 动作电流与制动电流波形

Figure 13 Action current and braking current waveform

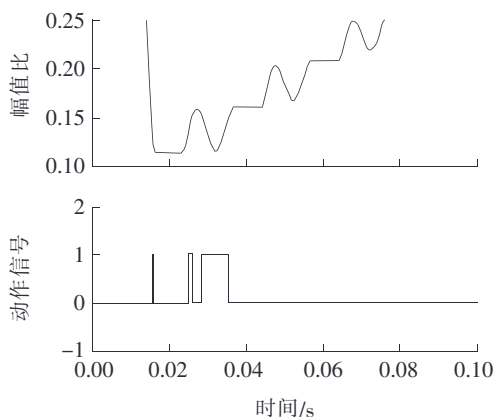


图 14 幅值比与动作信号波形

Figure 14 Amplitude ratio and action signal waveform

从图 13 中明显可以看出,  $t=0 \text{ s}$  时变压器空载合闸, 产生的励磁涌流使得此时的动作电流  $I_{\text{act}}$  增大, 当动作电流  $I_{\text{act}}$  大于制动电流  $I_{\text{res}}$  时, 比率制动模块输出 1。

由图 14 所示可得, 在非  $[0.015 \ 0.035] \text{ s}$  时段内, 幅值比  $k > 0.15$ , 幅值比判据满足, 经过非门, 输出信号 0, 然后两路信号通过与门输出信号为 0, 保护不动作。而在  $[0.015 \ 0.035] \text{ s}$  内, 幅值比  $k < 0.15$ , 二次谐波制动判据不满足, 判断为非励磁涌流, 经过非门, 输出信号 1, 然后两路信号经过与门, 输出信号为 1, 保护误动。

对于运行改进后的综合制动判据仿真模型, 改进判据对应的幅值比、相位差、动作信号的波形如图 15 所示, 可以看出, 在  $[0.015 \ 0.035] \text{ s}$  时段内, 虽然幅值比  $k < 0.15$ , 满足传统二次谐波判据, 然而其幅值比  $k > 0.1$  且  $\theta < 30^\circ$ , 满足综合制动判据。因此, 综合判据单元判断为励磁涌流, 经过非门后输出信号 0, 然后两路信号共同通过与门, 使得综合判据单元动作信号输出为 0, 保护不动作, 从而保证了保护不误动。

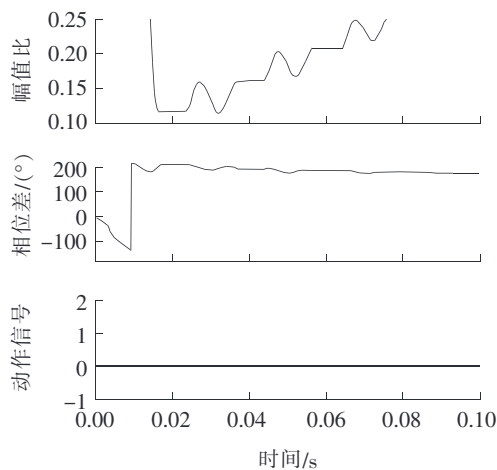


图 15 综合制动判据波形

Figure 15 Comprehensive braking criterion waveform

## 5 结语

该文针对变压器差动保护中由励磁涌流产生的不平衡电流, 研究了如何构建精确判断故障类型的变压器差动保护系统。通过改进的二次谐波制动判据结合比率制动判据共同建立起综合制动保护系统, 通过 Simulink 完成了对仿真模型的构建, 并对变压器不同运行状态下, 差动保护系统的动作过程和得到的相关波形进行分析。通过仿真结果, 验证

了该制动判据模型具有选择性、可靠性、精确性等优良的特点。

#### 参考文献:

- [1] 谷君. 变压器差动保护误动的影响因素分析与对策研究[D]. 保定:华北电力大学,2012.
- [2] 尹忠东,魏文思. 基于有限元算法的变压器绕组涡流效应分析及损耗计算[J]. 智慧电力,2018,46(5):71-77.  
YIN Zhongdong, WEI Wensi. Analysis of eddy current effect and loss calculation of transformer winding based on finite element algorithm[J]. Smart Power, 2018, 46(5):71-77.
- [3] 李应文,刘涛,裴东良,等. 1 000 kV 特高压主变压器差动保护配置分析[J]. 电力科学与技术学报,2017,32(3):106-113.  
LI Yingwen, LIU Tao, PEI Dongliang, et al. Configuration analysis on current differential protection for 1 000 kV UHV transformer[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(3):106-113.
- [4] 张瑞,甘战,张鹏,等. 换流变压器空载励磁涌流选相关合控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(15):69-77.  
ZHANG Rui, GAN Zhan, ZHANG Peng, et al. Controlled switching strategies to eliminate the inrush current of converter transformer[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(15):69-77.
- [5] 马静,王增平,吴劼. 利用基波幅值变化特征快速识别励磁涌流和故障电流[J]. 电工技术学报,2009,24(6):166-171.
- MA Jing, WANG Zengping, WU Ji. A novel method to rapidly identify inrush current and internal fault current based on variation characteristic of fundamental current amplitude[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(6):166-171.
- [6] 李贞,张明珠,倪传坤,等. 变压器励磁涌流的自适应二次谐波分相制动方案[J]. 电力系统自动化,2013,37(6):121-124.  
LI Zhen, ZHANG Mingzhu, NI Chuankun, et al. An adaptive secondary harmonic split-phase restrained scheme for magnetizing inrush current in transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6):121-124.
- [7] 吴成明,张鑫,鲁月娥,等. 变压器差动保护二次谐波制动仿真分析[J]. 电气开关,2016,5(6):1-4.  
WU Chengming, ZHANG Xin, LU Yuee, et al. Simulation analysis of second harmonic brake of differential protection of a transformer[J]. Electric Switchgear, 2016, 5(6):1-4.
- [8] 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.