

DOI: 10.7667/PSPC160317

## 变压器差动保护动作特性的仿真研究

宁铎<sup>1</sup>, 尤磊<sup>1</sup>, 李英春<sup>1</sup>, 宋玲芳<sup>1</sup>, 尤宝山<sup>2</sup>

(1. 陕西科技大学电气与信息工程学院, 陕西 西安 710021; 2. 国网宝鸡供电局, 陕西 宝鸡 721001)

**摘要:** 为了解决工程实际中继电保护装置的测试问题, 针对变压器差动保护, 利用 Matlab 软件, 在建立单侧电源 110 kV 双圈变压器简单电力系统模型的基础上, 进行变压器微机继电保护装置的仿真分析。探究了励磁涌流与剩磁及合闸初相角之间的关系以及励磁涌流中的谐波含量情况。基于此, 采用二三次谐波制动及常规比率制动保护原理, 研究了差动保护装置的動作特性。通过对仿真结果的分析, 整定保护装置参数, 并获取测试数据, 用于测试实际继电保护装置。经实验验证: 该方案能够有效进行变压器差动保护装置的测试, 具有较好的工程实用性。

**关键词:** 110 kV 变压器; Matlab/Simulink; 差动保护; 励磁涌流; 整定计算

### Simulation research on the operating characteristic of transformer differential protection

NING Duo<sup>1</sup>, YOU Lei<sup>1</sup>, LI Yingchun<sup>1</sup>, SONG Lingfang<sup>1</sup>, YOU Baoshan<sup>2</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China; 2. State Grid Baoji Power Supply Co., Ltd., Baoji 721001, China)

**Abstract:** In order to solve testing issues of protective relaying equipment in actual projects, the simulation is made to analyze the microcomputer-based transformer protective relaying equipment by using MATLAB. For transformer differential protection, the analysis is built based on the 110 kV unilateral power two windings transformer power system model. This paper analyzes the relationship between magnetizing inrush current with remanence and closing initial angle, as well as the situation about harmonic contents in inrush current. In view of this situation, the second or third harmonic restraint principle and general percentage restraint differential protection principle are used to study the operating characteristic of differential protection equipment. According to simulation results analysis, parameters for real device are set. In this way, experimental data tested on actual device are obtained. The experiment results show that this method is effective in testing microcomputer-based transformer protective relaying equipment, proving the practical value.

**Key words:** 110 kV transformer; MATLAB/Simulink; differential protection; magnetizing inrush current; setting calculation

## 0 引言

目前, 我国要求纵联差动保护应能躲过励磁涌流和外部短路产生的不平衡电流<sup>[1]</sup>。针对变压器差动保护, 国内外继电保护工作者做了多方面的研究<sup>[2-8]</sup>。其中, 文献[2]研究了 500 kV 变电站多侧励磁涌流产生的原理, 并分析了两种多侧励磁涌流的情况及对差动快速动作区的影响, 提出了具体的防误方案。文献[3]提出一种利用波形互相关系数特征的励磁涌流识别方法, 利用 PSCAD 建立 220 kV 变压器模型, 通过仿真分析验证所提方法的准确性与有效性。文献[4]结合现场录波和数字仿真, 考虑励磁涌流、和应涌流以及互感器饱和等影响, 提出了投入谐波闭锁判据、改进比率制动特性等防范措施。

然而, 上述保护算法改进的前提都需要进行现场差动保护装置的测试。

在工程实践中, 若要得到电力变压器的饱和特性, 必须经过繁杂而费时的试验测试, 并且受到实验条件、变压器运行工况、测量手段的限制<sup>[9]</sup>, 而模拟励磁涌流又是进行变压器微机保护研发测试的基础, 建立仿真模型对微机保护软件流程框图确定、DSP 中保护算法改进、继电保护装置整定计算都具有重要意义<sup>[10]</sup>。

本文基于 Matlab/Simulink 进行变压器差动保护动作特性的仿真研究, 主要利用其中的 SimPowerSystems 专用模块库, 它建立在加拿大蒙特利尔的 Hydro-Quebec 电力系统测试和仿真实验室的实践经验基础之上, 并由 Hydro-Quebec 和 TECSIM

International 公司共同开发而成,是进行电力、电子系统建模和仿真的先进工具。首先,在 Simulink 中建立变压器运行模型,并搭建微机差动保护装置模型,其次,对变压器差动保护进行仿真分析,采用二、三次谐波制动原理对励磁涌流进行有效识别,最后利用仿真数据进行继电保护测试仪的实验。通过实验说明该解决方案能有效进行电力系统继电保护各种故障信号的模拟,完成保护装置的测试。

## 1 变压器差动保护建模

### 1.1 变压器差动保护原理

差动电流定义为设备两端的电流之和(电流参考方向都指向被保护设备)。当设备两端电流沿同一个方向流动时,差动电流最小。当设备两端电流都流向设备时,差动电流很大,据此可以区分区内故障与区外故障。当变压器正常运行或区外故障时,此时差动电流为零,保护不会动作。当变压器内部任一点发生故障时,流入差动继电器的差动电流等于故障点电流,只要故障电流大于差动继电器的动作电流,差动保护就能迅速动作。

在实际使用中,由于有流过差动回路的不平衡

电流影响,变压器纵差保护还需要躲过不平衡电流。不平衡电流产生的主要原因有:电流互感器的传变误差;变压器的励磁涌流;变压器带负荷调节分接头等<sup>[1]</sup>。这就需要根据实际情况进行继电保护装置的整定配置。

### 1.2 一次系统模型

本文采用无穷大功率电源系统进行建模与仿真(如图 1 所示),该仿真系统由无穷大功率电源,单回路输电线路、变压器和用电负荷组成。其中输电线路为 110 kV 线路,其有名值参数为 8.5 Ω、0.064 H。无穷大系统由 3000 MVA 系统电源和一个 5 MVA、1 Mvar 的系统负荷而成,其仿真模型如图 2 所示。

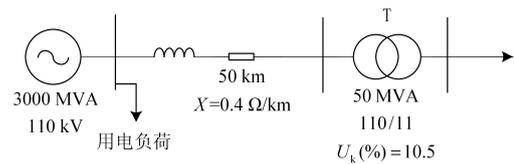


图 1 系统接线图

Fig. 1 Power system connection diagram

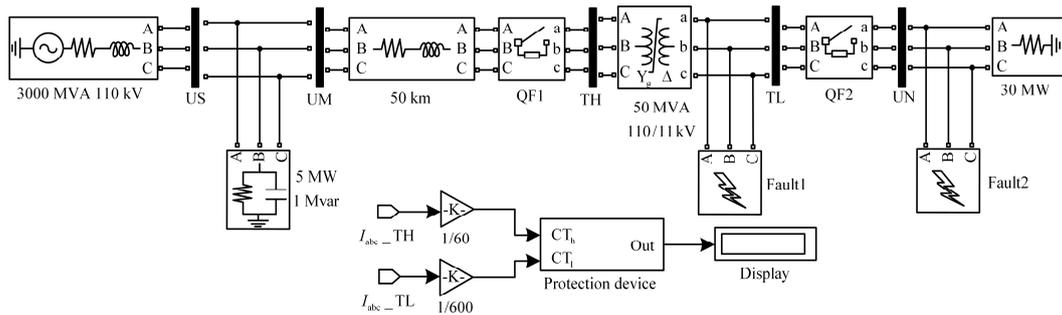


图 2 Matlab 仿真建模

Fig. 2 Matlab simulation model

考虑到变压器的暂态模型较稳态模型复杂,用于仿真的变压器模型,需要能够正确反映变压器铁芯励磁特性曲线,同时可以对剩磁进行模拟<sup>[8]</sup>。本文选用“Three-Phase Transformer(Two windings)”,Yg/Δ接法,对变压器铁芯中的励磁动态过程进行仿真<sup>[7]</sup>。

以图 3 等效电路<sup>[12]</sup>为基础,说明其参数计算方法。

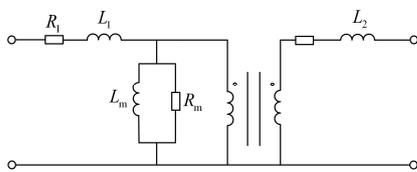


图 3 变压器仿真模型的等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of transformer simulation model

励磁支路参数  $R_m$ ,  $X_m$  由变压器空载实验数据  $I_0\%$ ,  $\Delta P_0$  求得:

$$R_m = \frac{U_n^2}{\Delta P_0} \times 10^3; \quad X_m = \frac{100}{I_0\%} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \quad (1)$$

绕组参数  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $L_1$ ,  $L_2$  由变压器短路实验数据  $\Delta U$ ,  $\Delta P_k$  求得:

$$R_T = \frac{\Delta P_k}{10^3} \cdot \frac{U_n^2}{S_n^2}; \quad X_T = \frac{U_k(\%)}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \quad (2)$$

高压侧阻抗标幺值与低压侧阻抗标幺值相等,则电感标幺值与电抗标幺值相等,所以

$$R_1^* = R_2^* = R_T^*/2, \quad L_1^* = L_2^* = X_T^*/2 \quad (3)$$

本文选用的主变压器模型 S(F)Z11-50000/110

$\pm 8 \times 1.25\% / 11 \text{ kV}$ , 根据铭牌参数: 变压器 T 的额定容量  $S_N = 50\,000 \text{ kVA}$ , 额定电压:  $(110 \pm 8 \times 1.25\%) / 11 \text{ kV}$ , 短路电压  $U_k\% = 10.5$ , 短路损耗  $\Delta P_k = 183.6 \text{ kW}$ , 空载损耗  $\Delta P_0 = 35.8 \text{ kW}$ , 空载电流  $I_0\% = 0.28$ 。

由式(1)一式(3), 计算得变压器仿真模型参数  $R_1^* = R_2^* = 0.001838$ ,  $L_1^* = L_2^* = 0.0525$ ,  $R_m = 1396.7$ 。

铁芯剩磁的大小直接关系到变压器励磁涌流的幅值, 目前在讨论变压器励磁涌流问题时有争议的原始数据就是剩磁。考虑到我国变压器的实际情况, 照顾到大量的中、高压变压器。剩磁的数值选为  $0.5 \sim 0.7 \text{ Bm}$ , 若偏严考虑, 仿真时所取得剩磁值应比  $0.7 \text{ Bm}$  高一些<sup>[13]</sup>。设置仿真参数三相剩磁为  $0.765\,19, 0.384, 0.3812$ 。磁化曲线用分段线性表示为:  $[0\ 0; 0.0024\ 1.2; 1\ 1.52]$ 。

由于保护级二次绕组着重于抗饱和能力,  $10\text{P}$  级二次绕组已经能够满足  $110 \text{ kV}$  变电站内设备的继电保护需要, 本文根据实际的潮流及短路电流计算确定电流互感器变比选择如表 1 所示。

表 1 电流互感器变比选择

Table 1 Selection of current transformer ratio

序号	名称	各侧数值	
		110 kV 侧	11 kV 侧
1	变压器接线方式	Y	d11
2	变压器一次侧额定电流/A	262.432	2624.319
3	电流互感器接线方式	Y	Y
4	电流互感器一次电流计算值/A	262.432	2624.319
5	电流互感器标准变比	300/5	3000/5
6	二次回路额定电流	4.37	4.37

### 1.3 励磁涌流仿真分析

变压器稳态运行时, 励磁电流只有其额定电流的  $2\% \sim 5\%$ 。在区外短路时由于电压降低, 励磁电流更小。当变压器的投入或外部故障切除后电压恢复时, 变压器电压从零或很小数值突然上升到运行电压<sup>[11]</sup>。这个过程中将会产生非常大的励磁涌流, 其峰值可达额定电流的  $4 \sim 8$  倍, 且变压器容量越小, 该倍数越大, 该暂态电流的衰减可持续数秒。

首先, 设置三相断路器模块 QF1 的切换时间为  $0 \text{ s}$ , 进行空载合闸, QF2 的切换时间为  $1 \text{ s}$ , 并设置故障模块 Fault1, 使系统在  $1.2 \sim 1.5 \text{ s}$  间发生区内三相短路, 仿真结果如图 4 所示。

从仿真波形可以看出励磁涌流幅值是额定电流的 4 倍左右, 且远远小于短路电流。励磁涌流含有大量直流分量, 使电流波形偏至时间轴的一侧。

其次, 考虑到合闸时刻的随机性, 记录三相励磁涌流峰值随合闸初相角的变化关系如图 5 所示。

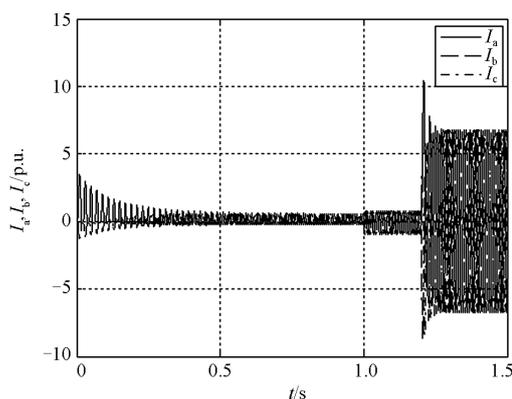


图 4 高压侧电流波形

Fig. 4 Diagram of high voltage side current waveform

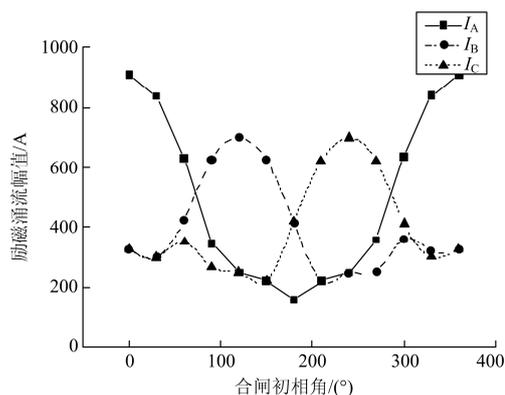


图 5 合闸初相角与励磁涌流峰值的关系

Fig. 5 Relationship between closing initial phase angle and magnetizing inrush current peak

由图 5 可以看出合闸之前, 变压器铁芯中剩磁越大, 励磁涌流就越大。剩磁  $\Phi_m$  的方向与合闸之后  $\Phi_m \cos \alpha$  方向相同时, 励磁涌流就大。反之亦相反。

最后, 利用 powergui 模块分析空载合闸时 A 相在第一个周波内励磁涌流谐波含量的情况, 如图 6 所示。

由图 6 可以看出 A 相涌流二、三次谐波含量较高, 具有明显的间断角特性。考虑差流中可能有一相或两相的二次谐波含量小于  $15\%$ , 采用或门制动, 动作行为较安全<sup>[14]</sup>。

### 1.4 变压器差动保护的模型及算法

微型变压器差动保护装置结构图如图 7 所示, 需要说明, 保护设备中 DSP 处理的是经过变换器变换的电压信号, 为了说明问题本质, 仿真中不再进行 I-V 变换。由于 DFT 有极好的滤波功能, 使得差动电流测量装置对噪声和波形扭曲的灵敏度较低<sup>[14]</sup>。保护装置中的差动电流将通过离散傅里叶变换(DFT)获得。

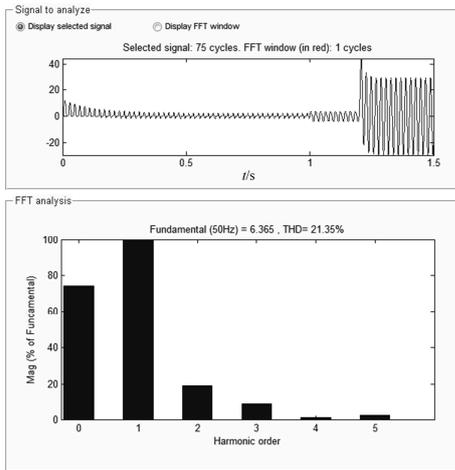


图 6 A 相励磁涌流谐波分析

Fig. 6 Harmonic analysis of A phase magnetizing inrush current

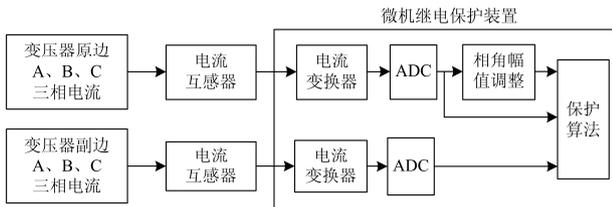


图 7 微机型变压器差动保护装置结构图

Fig. 7 Structure diagram of microprocessor-based transformer differential protection device

根据微机继电保护原理，在 Simulink 中搭建变压器差动保护模型，如图 8 所示。

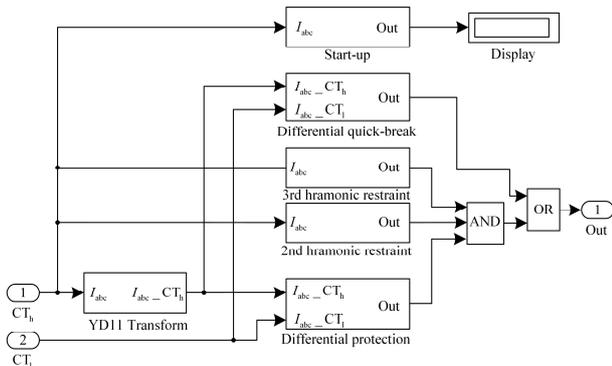


图 8 变压器差动保护总体逻辑结构

Fig. 8 Overall logical structure of the transformer differential protection

由图 8 可知，首先，装置设有总启动元件，当三相差流的最大值大于差动电流定值时，或者相电流突变量启动元件动作时，总启动元件动作，开放出口继电器正电源，其逻辑结构如图 9、图 10 所示。

由于微机对故障前的电气量有存储和记忆功

能，因此，微机构成突变量元件特别容易。按式(4)计算电流突变量。

$$\Delta i_k = |i_k - i_{k-N}| - |i_{k-N} - i_{k-2N}| \quad (4)$$

式中： $i_k$  为电流在某一时刻的采样值； $N$  为一个工频周期内的采样点数； $i_{k-N}$  为比  $i_k$  早 20 ms 的采样值； $\Delta i_k$  为  $k$  时刻电流的突变量。

如果电网频率偏离，造成  $i_k$  和  $i_{k-N}$  之间有一个误差，则  $i_{k-N}$  和  $i_{k-2N}$  之间误差也应当相同。因此，式(4)右侧两项误差可以得到抵消。式(4)不仅可以补偿频率偏离产生的不平衡电流，还可以减弱由于系统静稳定破坏而引起的不平衡电流。只有在振荡周期很小时的不平衡电流才会造成误动作<sup>[14]</sup>。

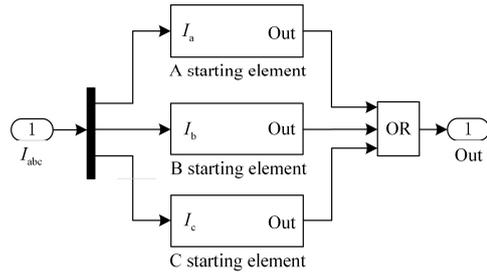


图 9 启动元件逻辑结构

Fig. 9 Starting element logical structure

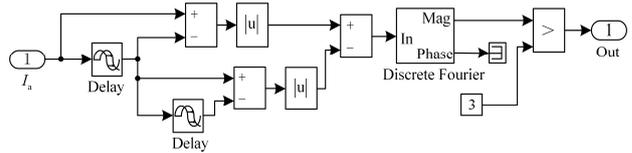


图 10 启动元件内部构造

Fig. 10 Internal structure of starting element

其次，变压器各侧电流经软件自动进行  $Y \rightarrow \Delta$  调整，即采用全星形接线方式，各侧电流的方向都以指向变压器为正方向。

“接线型式”为 Y 接线一侧，均用公式(5)转换，其仿真模型如图 11 所示；而“接线型式”为  $\Delta$  接线的一侧，均不再转换。

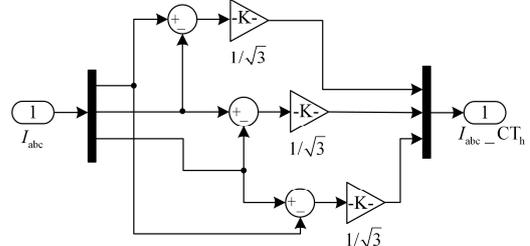


图 11 高压侧电流进行 Y-Δ 变换内部构造

Fig. 11 Internal structure of high side current Y-Δ transform

$$\begin{cases} \dot{i}_a = (\dot{I}_{ay} - \dot{I}_{by}) / \sqrt{3} \\ \dot{i}_b = (\dot{I}_{by} - \dot{I}_{cy}) / \sqrt{3} \\ \dot{i}_c = (\dot{I}_{cy} - \dot{I}_{ay}) / \sqrt{3} \end{cases} \quad (5)$$

需要指出, 采用该补偿方式不会产生对称性涌流, 适合按相闭锁<sup>[5]</sup>。

由于采用全波傅里叶算法计算各电气量, 会影响差动保护在变压器严重故障时的快速动作能力<sup>[10]</sup>, 必须配置过电流速断保护, 其动作判据如式(6)。

$$I_{cd} > I_{sd} \quad (6)$$

式中:  $I_{cd}$  为差动电流;  $I_{sd}$  为差动电流速断保护定值, 当任一相差动电流大于差动速断整定值时瞬时动作于出口。其逻辑结构如图 12、图 13 所示。

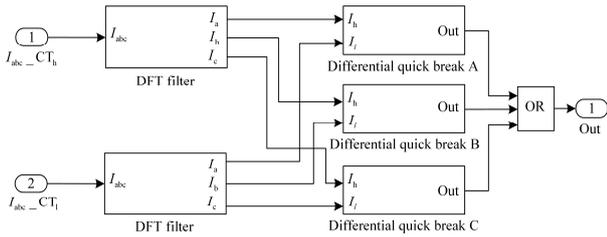


图 12 差动速断逻辑结构

Fig. 12 Differential quick break logic structure

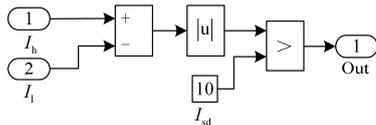


图 13 差动速断子系统内部构造

Fig. 13 Internal structure of differential quick break subsystem

比率制动式差动保护作为变压器的主保护, 能反映变压器内部相间短路故障、高压侧单相接地短路及匝间、层间短路故障, 其动作特性如图 14 所示。

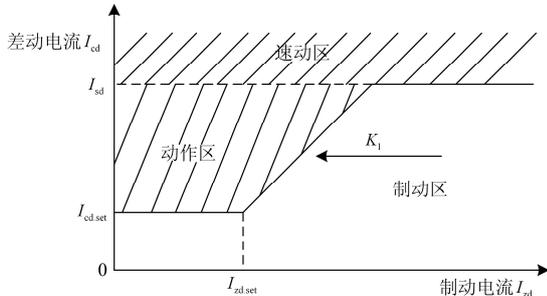


图 14 比率差动保护曲线

Fig. 14 Ratio differential protection curve

仿真系统中亦采用常规比率差动, 其动作方程如式(7)。

$$\begin{cases} I_{cd} > I_{cd.set} \\ \left| I_{cd} - I_{cd.set} \right| > K_1 \left| I_{zd} - I_{zd.set} \right| \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $I_{cd}$  为差动电流;  $I_{cd.set}$  为比率差动差流值门槛;  $I_{zd.set}$  为最小制动电流(或拐点电流);  $I_{zd}$  为制动电流;  $K_1$  为比率制动系数。

对于双圈变压器, 按式(8)计算差动和制动电流。

$$I_{cd} = \left| \dot{I}_h + \dot{I}_l \right|, \quad I_{zd} = \left| \frac{\dot{I}_h - \dot{I}_l}{2} \right| \quad (8)$$

其逻辑结构如图 15、图 16 所示。

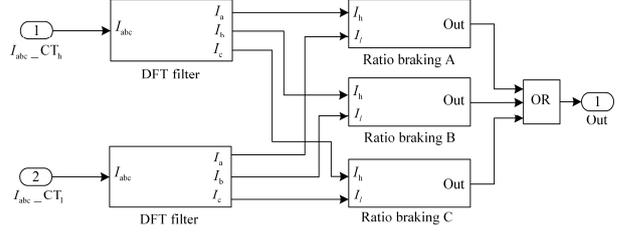


图 15 比率差动保护逻辑结构

Fig. 15 Ratio differential protection logic structure

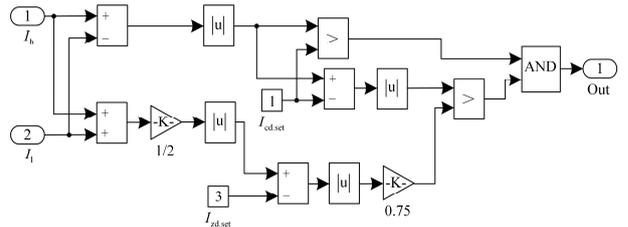


图 16 比率差动子系统内部构造

Fig. 16 Internal structure of ratio differential subsystem

考虑二次谐波制动原理简单、运行成熟<sup>[15]</sup>, 针对空载合闸情况, 保护采用三相差动电流中的二、三次谐波分量作为励磁涌流闭锁判据, 动作方程如式(9)。

$$I_{2/3max} > K_{2/3} \cdot I_{cdmax} \quad (9)$$

式中:  $I_{2/3max}$  为 A, B, C 三相差动电流中二、三次谐波电流最大值;  $K_{2/3}$  为二、三次谐波制动系数;  $I_{cdmax}$  为基波差动电流最大值。

闭锁方式为“或”门出口, 即任一相涌流满足条件, 同时闭锁三相比率差动保护<sup>[7]</sup>。比率差动保护逻辑如图 17、图 18 所示。

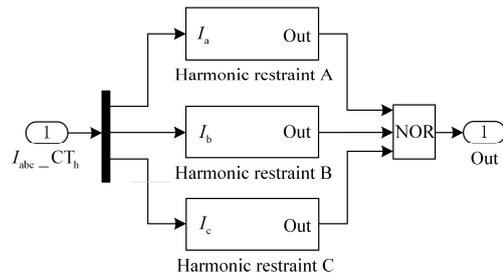


图 17 二、三次谐波制动逻辑结构

Fig. 17 Second and third harmonic restraint logic structure

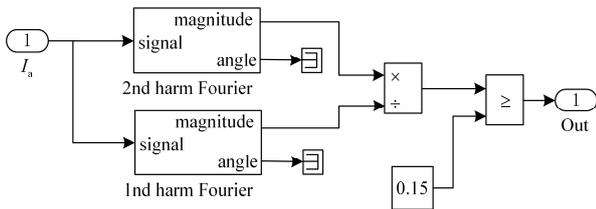


图 18 谐波制动力子内部构造

Fig. 18 Internal structure of harmonic restraint subsystem

保护装置建模完成后，设定相应参数如表 2 所示，进行系统仿真分析。

表 2 差动保护定值

Table 2 Differential protection value

序号	名称	数值	说明
1	差动速断电流定值	10	A
2	最小动作电流	1	A
3	最小制动电流	3	A
4	比率制动系数	0.75	
5	二次谐波制动系数	0.15	投入
6	三次谐波制动系数	0.15	投入

## 2 变压器差动保护仿真分析

### 2.1 励磁涌流产生的原始差动电流与经滤波后情况

进行空载合闸仿真实验，得到进入微机继电保护装置的原始差动电流，经保护装置内部相角幅值调整的 A 相差动电流及经过 DFT 滤波后的 A 相差动电流波形如图 19 所示。

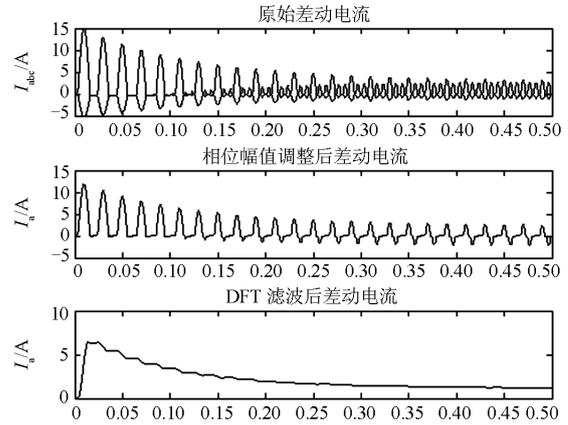


图 19 差动电流波形

Fig. 19 Diagram of differential current waveform

由图 19 可看出继保装置内 A 相差动电流超过最小动作电流 1 A 且小于速断定值 10 A。若不采取相应手段，装置将误动作。

### 2.2 励磁涌流闭锁及区内外差动保护仿真分析

考虑短路问题是电力技术方面的基本问题之一，且在发电厂、变电站以及整个电力系统的设计和运行中，都必须事先进行短路计算和仿真，以此作为合理选择电气接线、配置各种继电保护并整定其参数等的重要依据<sup>[16]</sup>。这里，设置三相断路器模块 QF1 的切换时间为 0 s、QF2 的切换时间为 1 s，并设置故障模块 Fault1，使系统在 1.5~1.7 s 间发生区内三相短路，故障模块 Fault2 在 2~2.5 s 发生区外三相短路，仿真结果如图 20 所示。

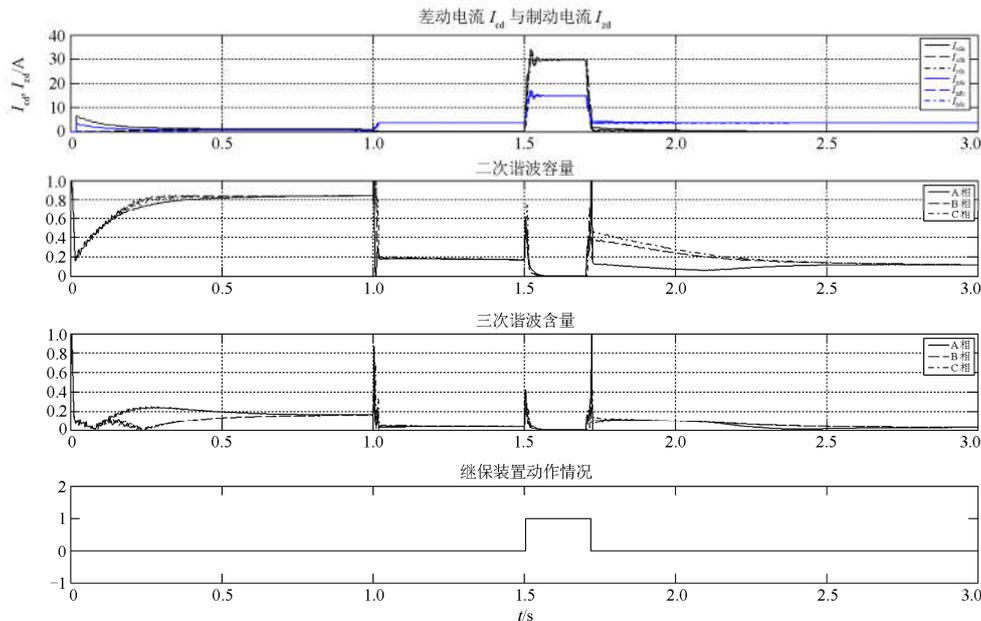


图 20 差动保护各特征量变化情况

Fig. 20 Changes in the characteristics of differential protection

由图 20 可见,空载合闸时,二次谐波含量较高。当变压器带负载后,谐波含量会逐渐下降。发生区内故障时,制动电流大于差动电流,区外故障时,制动电流小于差动电流。随后,设置 Fault2 故障模块,分别发生两相短路、单相短路接地、两相短路接地、保护模块不动作。设置 Fault1 故障模块,分别发生相间短路、接地短路、保护模块均能正确动作。综上表明,该继电保护系统模型能有效躲避励磁涌流,正常运行和区外故障时保护不动作,区内故障时,迅速动作。

### 3 继电保护测试仪实验

实验使用许继 IRT7G 多功能继电保护测试装置,它具有提供多路电流电压以及模拟各种故障的功能,能提供 12 路模拟量输出,六路电压和六路电流。适用于各类保护继电器、保护装置和保护系统的测试,可作为电力系统继电保护和安全自动装置通用测试设备用于保护的调试和定检,也特别适用于研究试验单位以及生产单位作为复杂保护的调试校验设备。微机保护模型是西安西瑞控制技术股份有限公司产品: XRT-201(变压器主保护装置,适用两圈变压器主保护)。

首先,根据仿真得出电流互感器侧励磁涌流在第一个周波的数据如表 3-表 5 所示。

其次,将所得数据输入继保测试仪中,参数设置如图 21 所示。

表 3 A 相励磁涌流特征参数

Table 3 Characteristic parameter of A phase inrush current

频率	幅值/A	相位(°)	谐波含量(%)
0 Hz(DC)	5.90	90.0	71.54
50 Hz(Find)	8.25	0.0	100
100 Hz(h2)	1.60	98.5	19.34
150 Hz(h3)	0.71	108.5	8.61
200 Hz(h4)	0.06	113.7	0.77
250 Hz(h5)	0.21	0.0	2.50

表 4 B 相励磁涌流特征参数

Table 4 Characteristic parameter of B phase inrush current

频率	幅值/A	相位(°)	谐波含量(%)
0 Hz(DC)	2.3	270	82.39
50 Hz(Find)	2.79	90.9	100
100 Hz(h2)	0.53	0.0	19.17
150 Hz(h3)	0.25	0.0	9.02
200 Hz(h4)	0.05	0.0	1.81
250 Hz(h5)	0.06	100.4	2.07

表 5 C 相励磁涌流特征参数

Table 5 Characteristic parameter of C phase inrush current

频率	幅值/A	相位(°)	谐波含量(%)
0 Hz(DC)	2.30	270	82.17
50 Hz(Find)	2.80	90.5	100
100 Hz(h2)	0.53	0.0	19.12
150 Hz(h3)	0.25	0.0	9.00
200 Hz(h4)	0.05	0.0	1.80
250 Hz(h5)	0.06	100.4	2.06

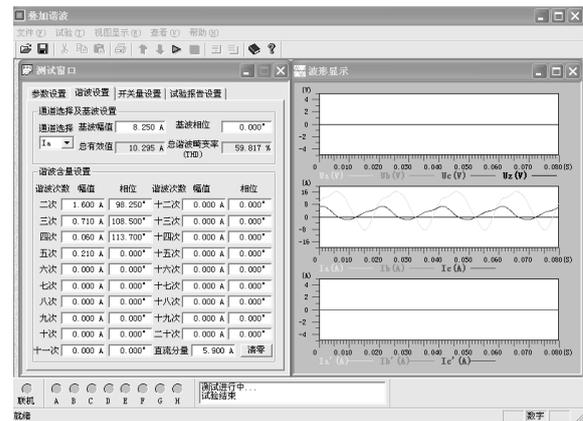


图 21 IRT7G 继电测试仪叠加谐波参数设置

Fig. 21 Parameter setting of IRT7G relay protection tester

最后,将测试仪与保护装置相连,开始运行,5 s 后停止,实验结果显示,继保装置未动作,只出现差流越限告警,至此可以说明已正确模拟励磁涌流特征信号。

### 4 结论和展望

本文利用 Matlab/Simulink 软件,建立 110 kV 输电线路和变压器模型,通过仿真技术对变压器饱和特性进行定性定量分析,识别励磁涌流特征,并对变压器微机差动保护装置进行建模,对保护装置的动作特性进行了深入的研究,为继电保护算法的验证和保护装置的参数整定提供一种有效的手段。通过仿真获得电力变压器励磁涌流和各种故障电流数据等,并根据仿真数据进行现场实验。实验结果表明,该方法有效解决了继电保护装置开发过程中系统测试的问题,为随后的基于 DSP 的微机差动保护装置的软件算法改进与单板测试打下坚实的基础,具有一定的工程实用价值。

#### 参考文献

[1] 国家电力监管标准化委员会. GB/T 14285-2006 继电保护及安全自动装置技术规程[S]. 北京: 中华人民共和国

- 国质量监督检验检疫总局, 2006.  
State Electricity Regulatory Commission of People's Republic of China. GB/T 14285-2006 technical code for relaying protection and security automatic equipment[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2006.
- [2] 姚东晓, 邓茂军, 倪传坤, 等. 变压器多侧励磁涌流产生机理及对差动快速动作区影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 36-41.  
YAO Dongxiao, DENG Maojun, NI Chuankun, et al. Transformer's multi-side inrush current generation mechanism and its influence on the differential protection's fast action zone[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 36-41.
- [3] 邵文权, 乔妮, 王建波. 基于波形互相关系数的变压器励磁涌流识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 14-20.  
SHAO Wenquan, QIAO Ni, WANG Jianbo. A novel algorithm of identifying inrush current based on waveform cross-correlation coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 14-20.
- [4] 戚宣威, 尹项根, 张哲, 等. 变压器空投导致相邻元件差动保护误动分析及防范措施[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(3): 129-134.  
QI Xuanwei, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Analysis on mal-operation for current differential protection due to adjacent transformer switching-on and its countermeasures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(3): 129-134.
- [5] 兰生, 张小钊. 基于多判据的变压器差动保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 125-131.  
LAN Sheng, ZHANG Xiaofan. A transformer differential protection method based on multi-criterion[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 125-131.
- [6] 傅伟, 赵莉华, 梁勇, 等. 多台变压器空载合闸励磁涌流及其抑制方案的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 28-33.  
FU Wei, ZHAO Lihua, LIANG Yong, et al. Study on no-load closing inrush current of transformer group and suppression measures[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 28-33.
- [7] 王立大, 段周朝. 变压器励磁涌流引起保护误动分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(10): 138-140, 144.  
WANG Lida, DUAN Zhouchao. Mal-operation analysis on magnetic inrush current of power transformer[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(10): 138-140, 144.
- [8] 郝志国, 张保会, 褚云龙, 等. 变压器空载合闸励磁涌流抑制技术研究[J]. 高压电器, 2005, 41(2): 81-84.  
HAO Zhiguo, ZHANG Baohui, CHU Yunlong, et al. Study on inrush current restraining technology when energizing no-load transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(2): 81-84.
- [9] 袁兆强, 凌艳. 基于 MATLAB 的变压器仿真建模及特性分析[J]. 电力学报, 2007, 22(2): 175-179.  
YUAN Zhaoqiang, LING Yan. Simulation modeling and characteristic analysis of single-phase transformer based on MATLAB[J]. Journal of Electric Power, 2005, 41(2): 81-84.
- [10] 石红杰, 乐秀璠, 徐懂理. 基于 MATLAB 的可编程逻辑微机保护的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 82-85, 90.  
SHI Hongjie, LE Xiufan, XU Dongli. Research of programmable logic microprocessor-based protection based on Matlab[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(11): 82-85, 90.
- [11] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [12] CASORIA S, SYBILLE G, BRUNELLE P. Hysteresis modeling in the MATLAB/power system B-lockset[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2003.
- [13] 王维俭, 侯炳蕴. 大型机组继电保护理论基础[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 1989.
- [14] 李晓明. 电力系统微机继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [15] 张健康, 粟小华, 夏芸. 750 kV 变压器保护配置及整定计算探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 89-94.  
ZHANG Jiankang, SU Xiaohua, XIA Yun. Discussion on protection configuration and setting calculation for 750 kV transformer[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 89-94.
- [16] 于群, 曹娜. MATLAB/Simulink 电力系统建模与仿真[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.

收稿日期: 2016-03-10; 修回日期: 2016-04-17

作者简介:

宁 铎(1955-), 男, 本科, 教授, 主要研究方向为自动控制; E-mail: ningd@sust.edu.cn

尤 磊(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为继电保护; E-mail: youlei1990717@163.com

李英春(1969-), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为继电保护. E-mail: liyingchun@sust.edu.cn

(编辑 张爱琴)