

基于自定义模型的变压器纵差动保护 PSCAD 仿真

蔡云峰, 徐洋, 潘琪

(江苏省电力公司苏州供电公司, 江苏 苏州 215000)

摘要: 为了减少变压器的继电保护设计、整定计算存在的误差, 提出一种根据内部漏抗参数等值计算与短路阻抗实际参数测定相结合的方法, 利用曲线拟合技术, 得出变压器在不同故障条件下的精确等值短路阻抗参数。在此基础上, 采用 FORTRAN 语言接口技术, 在 PSCAD / EMTDC 中, 结合实际数字式变压器保护装置建立了主保护及后备保护的精确短路阻抗自定义模型, 并利用等值系统模型对变压器线圈内部不同位置的对地短路、匝间短路、相间短路分别进行了仿真计算。结果表明, 采用新型的拟合方法及自定义元件能准确地模拟并分析变压器内部故障及继电保护装置的动作行为, 为继电保护的原理设计及实际应用提供科学依据。

关键词: 变压器; 阻抗; 差动保护; 后备保护; 自定义模型; 仿真

PSCAD simulation of transformer longitudinal differential protection based on custom model

CAI Yunfeng, XU Yang, PAN Qi

(Suzhou Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Company, Suzhou 215000, China)

Abstract: In order to reduce the error of the design of relay protection, setting calculation of transformer, a method is proposed based on the combination of internal leakage reactance parameters calculation and short-circuit impedance parameters determination. By using curve fitting technique, this method obtains the exact equivalent short circuit impedance parameters of the transformer in different fault conditions. On this basis, it establishes the custom model of the short-circuit impedance of primary protection and backup protection combining the real digital transformer protection device in the PSCAD/EMTDC by using FORTRAN language interface technology. Besides, using the equivalent system model, the short circuit to ground short circuit, inter-turn short circuit, phase to phase short circuit within the different positions of the transformer coil are simulated and calculated. The results show that, using the curve fitting method model and custom element can accurately simulate and analyze the internal fault of transformer and relay protection action, which provides a scientific basis for the design of relay protection principle and application.

Key words: power transformer; impedance; differential protection; user-defined modeling; simulation

中图分类号: TM772 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)03-0118-05

0 引言

变压器的继电保护动作正确性是实现电力系统的安全性及用户的供电可靠性的重要前提。因此, 有必要对大型变压器的内部故障机理及励磁涌流的变化过程进行定量的分析, 以保证变压器的正常运行^[1-4]。

据统计数据, 变压器的内部短路故障时, 继电保护的動作正确率仍然太低。主要原因在于对变压器内部短路故障分析的模型没有定量计算变压器内部短路是如何改变短路电抗和漏电感, 如何改变故障特征。现有的分析模型几乎都是根据变压器铭牌数据求出故障模型的电路参数, 有些文献建立了变

压器模型。改进了变压器模型的保护判据, 但仍存在诸多与实际情况不符的问题^[5-10]。

本文拟研究一种根据内部漏抗参数等值计算与短路阻抗实际参数测定相结合的方法, 其目的是得出变压器在不同故障条件下的精确等值短路阻抗参数。在此基础上, 结合实际数字式变压器保护装置建立变压器纵差动保护自定义模型, 从而对内部故障时继电保护的動作行为进行细致分析。

1 模型整体说明

1.1 系统简化模型

系统简化模型图如图 1 所示。其包含有电源(S)、输电线路 L、配电变压器 T 及终端负荷。在软件仿

真中, 可将电源(S)与输电线路L进行合并, 等效为系统电源侧阻抗 Z_s , 设置故障点位于变压器一次侧绕组内, 将故障时的变压器同样等效为阻抗 Z_T 进行分析。

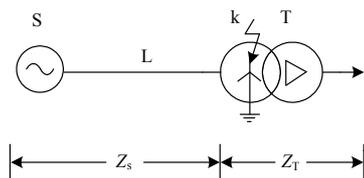


图1 系统简化模型图

Fig. 1 Simplified model of the system

1.2 软件仿真模型

软件仿真模型如图2所示。系统采用恒功率电源模型, 由理想电源和固定内阻抗的串联来模拟。变压器模块在忽略相间耦合的条件下, 从电气上可以将三相变压器看成三个单相双绕组变压器连接而成的电路, 在仿真中采用A、B、C三台单相双绕组变压器模型。由于三相变压器内部故障时, 各相阻抗参数发生变化, 因此三台等效单相双绕组变压器模型阻抗并不相同, 此时系统处于不对称运行状态, 其阻抗由自定义变压器故障模块根据不同故障类型计算而得到。测量模块主要对流经变压器绕组的三相电流进行采集。

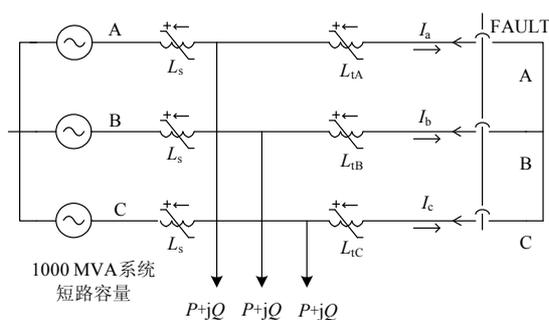


图2 软件仿真模型

Fig. 2 Software simulation model

1.3 变压器故障自定义模型设计

由于变压器发生内部故障时, 其短路电抗及漏电感参数将发生变化, 相关回路的差流变化难以预计, 从而影响到变压器纵差动保护的准确动作^[11-12]。本文引用一种采用了将短路电抗代入回路方程计算等效瞬时漏感参数的方法做出的等效模型, 对本文中所建保护进行仿真, 更贴合于实际大型变压器故障时的故障现象。变压器等效阻抗模型如图3所示, 其中 L_{1A} 、 L_{1B} 、 L_{1C} 分别对应图2中A、B、C三相的变压器等效阻抗。

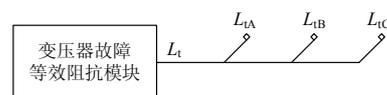


图3 变压器故障等效阻抗模块

Fig. 3 Transformer fault equivalent impedance model

自定义阻抗计算模块利用切比雪夫多项式拟合算法, 阶数为四阶。对一组变压器故障时的实验数据进行多项式拟合, 从而得出等值阻抗与故障点位置之间的函数关系。软件仿真模型如图3所示。

1.4 差动保护自定义模型设计

本差动保护模型包含二折线比率制动特性、变斜率比率制动特性、二次和五次谐波制动、差动电流速断等功能。

模型采用三相差动电流中二次谐波与基波的比值作为励磁涌流闭锁判据。采用差动电流中五次谐波的含量作为对过励磁的判断。当差动电流中五次谐波的含量大于设定值时, 判为变压器过励磁情况, 闭锁差动保护。模型含有变压器的差动电流速断模块, 模型设计为取4~8倍变压器额定电流。

差动保护模块按相设置, A相差动元件如图4所示, 模型采用的是4个输入量1个输出量的形式。

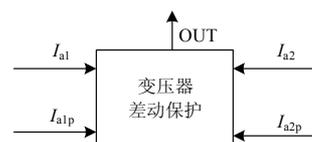


图4 变压器差动保护模块

Fig. 4 Transformer differential protection module

其中 I_{a1} 、 I_{a2} 分别代表高低压侧相电流模值, 节点设置为 Input Data, Real。 I_{a1p} 、 I_{a2p} 分别代表高低压侧相电流幅值, 节点设置为 Input Data, Real。OUT代表模型输出结果, 节点设置为 Output Data, Integer。作为输出逻辑, 输出为0代表保护不动作, 输出为1代表保护动作。差动保护模型的元件的参数表包括主控制板、变斜率参数、二折线参数、二次五次谐波制动以及电流速断保护五个部分^[13]。

1.5 自定义模型的软件设计

PSCAD/EMTDC 仿真软件是在 Fortran 语言上实现的, 因而 Fortran 的内嵌性能好, 用 Fortran 语言编写源代码运行效率高^[14]。在自定义模型的程序角本中, 编写调用 Fortran 语言格式的外部源文件代码。将自定义模型用户代码嵌入 PSCAD 仿真软件。

故障仿真模块通过接口程序调用两个外部 Fortran 语言文件。前者为用于设置切比雪夫拟合算法的子程序，对输入的相关实验数据进行函数逼近，从而得出特定故障类型下变压器入端电抗值与故障点之间的函数关系。后者存放的实验数据作为上述切比雪夫拟合算法的输入值^[15]。

运行时，PSCAD 仿真软件执行顺序为首先通过程序接口将匝地短路实验数据由文件读入，结合变压器故障模块参数，一起传送给拟合算法子程序进行数据拟合，将拟合以后的结果再通过程序接口传回仿真软件进行后续的处理。

2 仿真及结果分析

2.1 变压器内部故障仿真

仿真模型取标准电压为 115 kV，标准容量 100 MVA，电网频率为 50 Hz，电源内阻抗标幺值为 0.1 pu，变压器额定容量为 10 MVA，短路电压百分数取 10%。每相负载 10 MW，故障于仿真开始后 0.2 s 发生，于 0.4 s 故障被消除，仿真程序总运行时间 0.6 s。

故障点每种故障类型共设置三处，绕组首端，即故障点与中性点距离占绕组的长度为 10%($x=0.1$)，绕组中部($x=0.5$)，绕组末端($x=0.9$)。匝地、匝间故障相均为 A 相，相间故障设置在 A、B 相。

A 相匝地短路、A 相匝间短路、AB 相短路电流波形分别如图 5~图 7 所示。

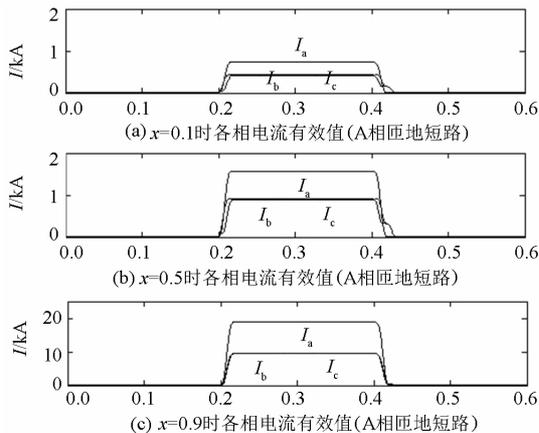


图 5 A 相匝地短路电流波形图

Fig. 5 Current waveform of A-phase turn ground fault

由仿真结果可以看出：

(1) 对于匝地短路：绕组首端发生接地故障时，故障特征最为明显，且故障相电流达到峰值，其大小与非故障相相比较为明显，非故障相电流大小相同。随着短路点向绕组末端移动，故障特征逐渐削

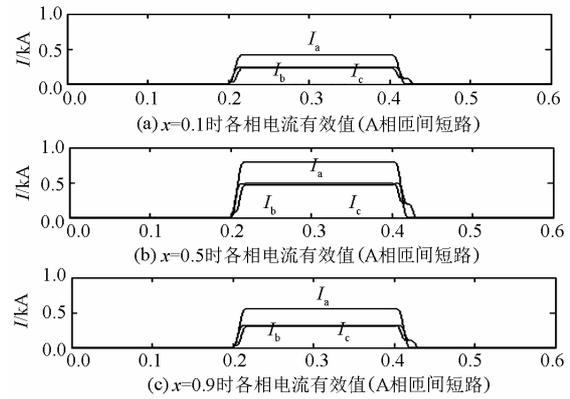


图 6 A 相匝间短路电流波形图

Fig. 6 Current waveform of A-phase inter turn short circuit

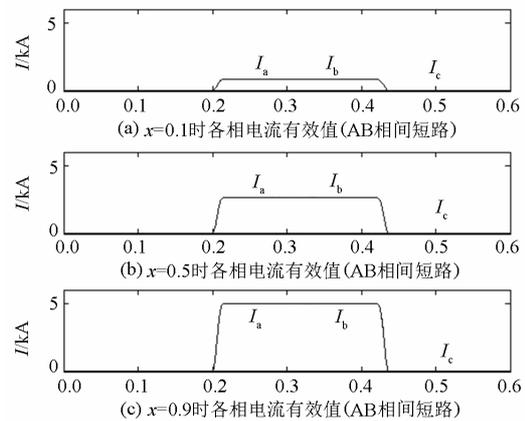


图 7 AB 相间短路电流波形图

Fig. 7 Current waveform of AB inter phase short circuit

弱，故障电流逐渐减小，且三相电流趋于平衡。

(2) 对于匝间短路：故障特征没有接地短路的故障特征那么明显，非故障相电流大小依然相同。其次，故障位置对故障特征的影响是相当明显的，发生在绕组中部时故障特征最为明显。

(3) 对于相间短路：故障特征随短路点位置变化较为明显，随着短路点向绕组末端移动，故障相电流逐渐减小，且故障相电流大小始终相同。非故障相电流不受短路点位置的影响，大小始终为零。

2.2 差动保护仿真

在本次仿真中并未考虑变压器两侧转角，模型两侧电流分模值与相角输入，设定变压器的额定电流一次值 I_e 为 50.2 A，最小动作电流 $I_{op\min}$ 为 0.4 倍 I_e ，最小制动电流 $I_{res\min}$ 为 1 倍 I_e ，制动折线斜率设为 0.4。将谐波闭锁与差动电流速断保护均关闭。从而精确仿真比率制动部分动作结果^[16-17]。

以 A 相匝间接地短路为例，为突出比较效果，改变电源阻抗为 4 pu，变压器容量及短路电压百分数不变，分别仿真按铭牌等值及按自定义阻抗模型

等值的所得差动电流相对于 I_0 的倍数如表 1 所示。由于仿真模型采用单侧电源, 制动电流为差动电流的一半。

表 1 变压器内部故障时差动电流

Table 1 Difference current of transformer internal fault

故障位置	不考虑漏抗	考虑漏抗
1	2.490 04	2.490 04
0.9	2.430 359	2.284 379
0.8	2.306 361	2.110 098
0.7	2.182 363	1.960 525
0.6	2.122 829	1.830 753
0.5	2.051 653	1.717 095
0.4	2.019 262	1.616 724
0.3	1.958 552	1.527 439
0.2	1.819 578	1.447 499
0.1	1.591 316	1.375 511

模型中含有变斜率比率制动及固定斜率比率制动, 取上述固定斜率比率制动相应定值, 得出差动保护的灵敏度如表 2 所示。

表 2 变压器内部故障时灵敏度

Table 2 Sensibility of transformer internal fault

故障位置	不考虑漏抗	考虑漏抗
1	1.930 204	1.930 204
0.9	1.975 325	2.106 625
0.8	2.084 637	2.318 539
0.7	2.221 544	2.450 656
0.6	2.300 349	2.288 441
0.5	2.409 025	2.146 368
0.4	2.464 733	2.020 905
0.3	2.448 19	1.909 298
0.2	2.274 472	1.809 374
0.1	1.989 145	1.719 389

从表 2 中可以看出, 靠近绕组中部($x=0.5$)向中性点的位置发生故障时, 按铭牌等值参数所得的差动保护的灵敏度明显要高于按自定义阻抗模型计算的结果。因此, 在变压器内部故障时, 如依旧只采用变压器铭牌参数作为整定参考依据, 可能会出现靠近绕组中部发生故障时, 差动保护出现拒动的情况。

3 结论

采用自定义阻抗模型, 借助于变压器固定点位故障的实验数据, 采用曲线拟后方法得出绕组任一点故障的等值阻抗(漏抗)。该参数相对于根据变压器铭牌所估算的阻抗参数更为准确。

纵差动模型可以验证纵差保护整定原则的正确性, 通过差动保护仿真可知, 在靠近绕组中性点附近短路时, 应考虑变压器铭牌参数对纵差动保护的

动作性能的影响。可考虑采用变斜率特性, 或将差动保护的定值加以修正。

参考文献

- [1] 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.
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.
- [2] 陈浩, 李琳, 许正梅. 换流变压器铁心饱和型不稳定性预测[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 108-113.
CHEN Hao, LI Lin, XU Zhengmei. Prediction of core saturation instability at converter transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 108-113.
- [3] 何越, 林湘宁, 黄景光. 一种直接消除变压器合闸励磁涌流的方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(11): 141-149.
HE Yue, LIN Xiangning, HUANG Jingguang. A method to eliminate the magnetizing inrush current of energized transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(11): 141-149.
- [4] 王雪, 王增平. 基于波形时域分布特征的变压器励磁涌流识别[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 148-154.
WANG Xue, WANG Zengping. Identification of transformer inrush currents based on waveform distribution characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 148-154.
- [5] 王维俭, 王祥珩, 王赞基. 大型发电机变压器内部故障分析与继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [6] 邹圣权. 变压器复压闭锁过流保护整定探讨[J]. 湖北电力, 2012, 36(5): 30-31.
ZOU Shengquan. Discussion of the setting for compound voltage blocking overcurrent protection of transformer[J]. Hubei Electric Power, 2012, 36(5): 30-31.
- [7] 姚玉斌, 吴志良, 王丹, 等. 电力系统变压器模型分析[J]. 继电器, 2007, 35(24): 16-20.
YAO Yubin, WU Zhiliang, WANG Dan, et al. Study on transformer representation in power system[J]. Relay, 2007, 35(24): 16-20.
- [8] 王维俭, 刘俊宏. 试论变压器差动保护的现状与发展[J]. 电力自动化设备, 1996, 24(4): 8-13.
WANG Weijian, LIU Junhong. Present situation and development of differential protection for transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 1996, 24(4): 8-13.

- [9] 韩笑. 电力系统继电保护[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 152-157.
- [10] 韩正庆. 变压器仿真计算模型与保护原理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
HAN Zhengqing. Study on simulation model and protective schemes for transformer[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [11] HAMEDANI GOLSHAN M E, SAGHAIAN-NEJAD M, SABA A, et al. A new method for recognizing internal faults from inrush current conditions in digital differential protection of power transformers[J]. Electric Power Systems Research, 2004, 71: 61-71.
- [12] 司马莉萍, 黄松波, 豆朋, 等. 基于 SVM 的电力变压器内部故障部位的概率估计[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 121-126.
SIMA Liping, HUANG Songbo, DOU Peng, et al. Probability estimation of interior fault position for power transformer based on SVM[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 121-126.
- [13] 唐起超, 王赞基, 王维俭. 多绕组电力变压器内部短路稳态分析[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(10): 44-47, 74.
TANG Qichao, WANG Zanji, WANG Weijian. Steady-state analysis of internal short circuits of multi-winding power transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(10): 44-47, 74.
- [14] 徐士良. Fortran 常用算法程序集[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.
- [15] 李炳坤. 切比雪夫逼近多项式在非线性电路中的应用[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 1992, 13(4): 558-562.
LI Bingkun. Application of Chebyshev approximate polynomial to the analysis of nonlinear circuit[J]. Journal of Huaqiao University: Natural Science, 1992, 13(4): 558-562.
- [16] 肖异, 尹项根, 张哲, 等. PSCAD/EMTDC 程序与继电保护仿真模型接口技术及应用[J]. 电力自动化设备, 2006, 34(11): 67-70.
XIAO Yi, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Interface technique between PSCAD/EMTDC and relay protection simulation model and its application[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 34(11): 67-70.
- [17] 袁欣, 孙元博, 张承学. PSCAD/EMTDC 自定义元件在电力系统仿真中的运用[J]. 电力科学与工程, 2010, 26(7): 12-15.
YUAN Xin, SUN Yuanbo, ZHANG Chengxue. Application on user-defined model of PSCAD/EMTDC in power system simulation[J]. Electric Power Science and Engineering, 2010, 26(7): 12-15.

收稿日期: 2014-04-25

作者简介:

蔡云峰(1971-), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 从事继电保护专业研究; E-mail: 18662199055@163.com

徐洋(1976-), 男, 本科, 高级工程师, 从事继电保护专业研究;

潘琪(1976-), 男, 本科, 高级工程师, 从事继电保护专业研究。