

一种电流互感器仿真分析平台构建方法

戚宣威^{1,2}, 尹项根^{1,2}, 李甘³, 张哲^{1,2}, 王奕⁴

- (1. 电力安全与高效湖北省重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074;
2. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074;
3. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010;
4. 广东电网公司电力科学研究院, 广东 广州 510800)

摘要: 电流互感器暂态饱和特性及其对差动保护的影响研究是工程现场亟待解决的难题。介绍了一种电流互感器暂态饱和特性仿真分析平台。该平台可根据实际分析需要, 灵活组态构建一次系统运行场景, 模拟不同形式的电力系统复杂暂态过程。通过选配所开发的不同类型电流互感器(P级、PR级和TPY)的数字仿真模型, 能够准确地模拟电流互感器的暂态饱和过程, 实现电流互感器暂态特性及差动保护动作性能的分析评估。动模试验与现场应用实例验证了该平台的有效性与准确性。

关键词: 电流互感器; 暂态饱和; 差动保护; 仿真平台; 动模试验

A construction method for the simulation platform for the analysis of the current transformer

QI Xuanwei^{1,2}, YIN Xianggen^{1,2}, LI Gan³, ZHANG Zhe^{1,2}, WANG Yi⁴

- (1. Electric Power Security and High Efficiency Laboratory (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China;
2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China;
3. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China;
4. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510800, China)

Abstract: The analysis of the current transformer transient saturation characteristic and its impact on differential current protection is an urgent problem to be solved. A simulation platform for analyzing the transient characteristic of the current transformer is introduced. The actual operating scene can be constructed in this platform. A variety of complex transient process in the power system can be simulated. The class P, PR and TPY current transformer model can be selected for analyzing the transient characteristic of the current transformer. This platform can achieve the analysis on the current transformer transient characteristic and its impact on the differential protection. The dynamic test and practical application prove the accuracy and the effectiveness of this platform.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277084 and No. 51177058) and The Science & Technology Project of China Southern Power Grid Company Limited (No. K-GD2012-324).

Key words: current transformer; transient saturation; differential protection; simulation platform; dynamic test

中图分类号: TM452

文章编号: 1674-3415(2015)22-0069-08

0 引言

随着电力建设的快速推进, 电网逐渐发展成为规模大、结构复杂、运行方式灵活的复杂电网, 而其暂态过程的复杂多样性, 包括复杂短路过程^[1]、励磁涌流^[2-5]、和应涌流^[6-8]等, 对保护用电流互感

器的性能提出了更高的要求。现场事故分析表明, 暂态过程中电流互感器饱和是导致差动保护误动的主要原因之一^[9-11]。而差动保护通常是电力系统设备的主保护, 其误动可能对设备本身安全和系统稳定运行构成严重危害。因此, 研究复杂电网暂态过程中电流互感器的饱和特性, 分析电流互感器饱和和对差动保护的影响具有重要的理论和现实意义。

然而, 电流互感器暂态饱和特性的分析难度较大, 一方面, 电流互感器的铁芯具有强非线性, 其

基金项目: 国家自然科学基金(51277084, 51177058); 中国南方电网公司科技项目(K-GD2012-324)

电磁暂态过程的解析计算十分困难；另一方面，影响互感器饱和涉及的因素众多，既包括一次电流的复杂暂态特性，如一次系统短路时的短路电流水平、非周期分量的大小及衰减时长，空合变压器时所产生的励磁涌流及和应涌流的大小、衰减速率和负荷水平，也包括电流互感器本身的特性参数，譬如电流互感器铁芯结构和材料(TPY、P、PR 型)及二次负载阻抗大小等。

现有互感器选择及计算导则在对保护用互感器的暂态性能进行校验分析时^[12-13]，往往是根据运行经验给定一次短路电流的工频分量大小及其非周期分量的衰减时间常数，并且假设电流互感器的铁芯为线性电感。显然，这种近似分析的手段无法准确地反映实际电力系统中一次系统的复杂运行工况以及电流互感器的暂态饱和过程，故较难满足工程实际的应用要求。

为了解决上述难题，开发了一种电流互感器暂态性能仿真分析平台。该平台可根据实际分析需要，灵活组态构建一次系统运行场景，模拟不同形式的短路故障、自动重合闸、励磁涌流、和应涌流等电力系统复杂暂态过程。并通过选配所开发的不同类型电流互感器(P 级、PR 级和 TPY 级)的数字仿真模型，能够准确地模拟电流互感器的暂态饱和过程，实现电流互感器暂态特性及差动保护动作性能的分析评估，从而为电流互感器的设计选型、运行维护与事故分析提供指导。

1 仿真分析平台设计

1.1 一次系统结构

为了能够真实模拟复杂电网暂态过程的实际工况，构建了如图 1 所示的通用一次系统模型。该平台可用于评估变压器保护、发电机保护、线路保护等的 P 级、PR 级、TPY 级电流互感器的暂态饱和特性，并可检验一台半接线后的互感器饱和对于差动保护的影响，能够实现各种不同的仿真工况，包括励磁涌流、和应涌流、线路重合闸等等，具有如下特点。

(1) 采用基于分布参数模型的贝杰龙模型建立输电线路模型 Line1 和 Line2，可以在线路以及母线上的不同位置设置不同类型的短路故障(含重合闸过程)。

(2) 运行变 Ty1 和 Ty2 的低压绕组可以连接发电机构成发电组，同时也可以直接连接系统等值电源。空投变 Tt1 和 Tt2 可以分别与运行变压器构成并联和应涌流、串联和应涌流以及复杂和应涌流工况，通过控制空投变压器与母线之间断路器的合闸时间

可以改变空投变的合闸角。

(3) 在系统的不同地点布置互感器模型，其中互感器的参数可以调整以模拟不同类型的互感器(包括 P 级、PR 级和 TPY 级)。线路两侧的互感器还可以构成 3/2 接线形式，符合现场的实际情况。

(4) 系统含有三个等值电源 S1、S2 与 S3，其中电源之间还包含耦合支路以模拟实际系统中电源之间的电气联系关系。

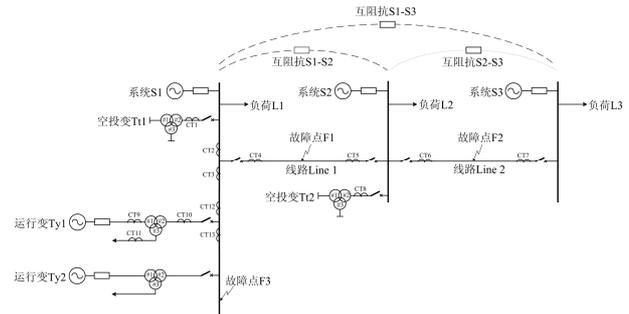


图 1 一次系统接线图

Fig. 1 Diagram of primary system

1.2 电流互感器模型构建方法

准确模拟电流互感器暂态特性是构建仿真分析平台的难点和重点，其关键在于如何模拟铁心的动态磁化过程，现有可以模拟铁芯磁滞的仿真模型主要包括基于 atan 函数的曲线拟合模型^[14]、基于非线性等效电路的 Lucas 模型^[15]和基于铁磁材料现象学理论的 J-A 模型^[16]。其中 J-A 模型建立在磁畴壁运动理论之上，能够在物理层面模拟互感器铁芯的磁滞过程，因此本仿真平台采用 J-A 模型对互感器进行仿真。

J-A 模型是多参数模型，其 M_s 、 β 、 α 、 c 、 k 、 a_1 、 a_2 、 a_3 和 b 等 9 个与铁芯饱和特性相关的参数较难确定。为此，根据测量得到的实际 P 级、PR 级和 TPY 级互感器的磁滞回线，采用模拟遗传退火算法识别对应的 J-A 模型参数，结果如表 1 所示。磁滞回线的测量值与仿真结果对比于图 2 中，可见基于 J-A 模型的电流互感器仿真模型与实际互感器的磁滞回线十分吻合。该三组互感器铁芯参数已在仿真平台中预置以供用户选配。

1.3 仿真结果分析与输出功能

仿真分析平台能输出互感器的一二次电流、铁芯励磁电流、磁通以及被保护设备两侧的差动电流和制动电流等电磁暂态仿真结果，输出结果已转化为 COMTRADE 数据格式，可调用录波数据分析软件对这些结果进行图形化显示，以方便分析查看与数据导出。在大量的电流互感器仿真分析经验基础上，本平台拟采用以下几个性能指标评价保护用电流互感器的暂态饱和性能。

表 1 P 级、PR 级、TPY 级电流互感器 J-A 模型参数
Table 1 Parameters of the J-A model for the class P, PR and TPY current transformer

参数	P 级	PR 级	TPY 级
c	0.1	0.1	0
k	10×10^{-5}	20×10^{-5}	0
β	0.96	0.96	1
a	1.325×10^{-5}	5×10^{-5}	1.15×10^{-5}
M_s	1.70×10^6	1.575×10^6	1.62×10^6
a_1	1.63×10^4	1.03×10^7	6.88×10^{14}
a_2	1.87×10^4	9.84×10^7	6.88×10^{14}
a_3	2.60×10^5	4.66×10^9	1.73×10^{18}
b	1.855 7	3.771 9	5.61

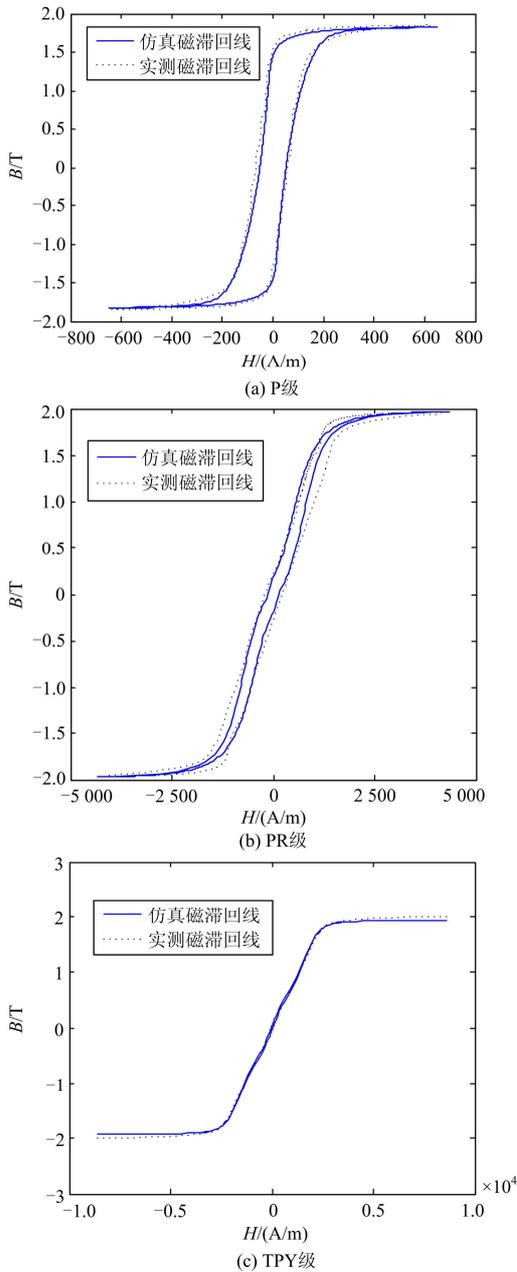


图 2 电流互感器仿真与实测磁滞回线对比
Fig. 2 Comparison of the hysteresis loop obtained from simulation and dynamic test

(1) 进入饱和时间。即从故障或特殊运行工况开始时刻至二次电流与一次电流第一次出现 10% 以上误差的时间。

(2) 最大瞬时误差。即饱和过程中二次电流与一次电流的最大瞬时误差, 用百分比表示。

(3) 饱和深度。基于仿真得到的电流互感器在暂态过程中的 BH 曲线, 电流互感器饱和点附近的 H 值记为 H_e , 表征临界饱和状况下的励磁电流大小; 暂态过程中电流互感器达到的最大 H 值记为 H_m , 以 H_m/H_e 表征电流互感器在暂态过程中的饱和深度。

2 仿真平台的关键实现技术

2.1 仿真平台基本结构与仿真流程

电流互感器暂态性能评估平台分为两部分: 电磁暂态计算内核与图形化用户界面。EMTDC 在电磁暂态仿真领域得到了广泛应用, 其拥有完整全面的元件库, 稳定准确的计算流程, 并且具备多种可模拟铁芯磁滞的电流互感数字暂态模型, 能够满足电流互感器暂态饱和特性的分析需求。因此采用 EMTDC 作为仿真平台的电磁暂态计算内核。在此基础上, 利用微软的 VB.NET 编程开发图形化界面, 以方便用户实现基于 EMTDC 软件的仿真建模。

仿真平台的软件流程如图 3 所示, 其主要流程可以分为两类:

(1) 根据现场差动保护动作的录波数据复现事故。可将未饱和或饱和程度最轻的 CT 的故障录波波形作为一次电流输入仿真平台, 经由电流互感器模型转变输出二次电流波形, 对其他的电流互感器是否饱和进行分析评估。

(2) 对于没有故障录波的数据, 结合现场的实际结构与参数, 利用仿真分析平台构建一次系统模型, 模拟实际运行工况与故障过程, 将仿真产生的一次故障电流经由电流互感器转变输出二次电流波形, 对各个电流互感器饱和特性以及对差动保护的影响进行分析。



图 3 电流互感器暂态性能分析平台流程图

Fig. 3 Flow chart of the simulation platform for the transient characteristic analysis of the current transformer

2.2 系统模型生成方法与仿真内核调用

EMTDC 计算内核的仿真设置与元件参数均保

存在.psc 模型文件中。用代码编辑器打开该文件，通过分析可发现.psc 文件包含了仿真设置与元件参数信息。如图 4 所示的仿真设置信息，其中第 18 行为仿真步长(step)的参数。各种元器件的参数也列写在.psc 文件中，以 T1 变压器参数为例，其参数信息如图 5 所示，其中的每一行参数都与 EMTDC 中变压器的参数体系一一对应，譬如第 860 行的 Tmva 参数为变压器的额定容量、第 861 行 f 参数为变压器的额定频率。因此，对.psc 文件中对应的参数进行修改，即可完成对 EMTDC 模型参数的调整。

```

1 PSCAD 4.2.0
2
3 Settings
4 {
5 Id = "922686648.1144361511"
6 Author = "reform.javas"
7 Desc = "Active Filter - series configuration"
8 Arch = "windows"
9 Options = 0
10 Build = 22
11 Warn = 1
12 Check = 15
13 Libs = ""
14 Source = ""
15 RunInfo =
16 {
17 Fin = 0.5
18 Step = 1e-005
19 Plot = 1e-005
20 Chat = 0.001
21 Brch = 0.0005

```

图 4 psc 模型文件代码

Fig. 4 Code of the .psc model document

```

857 0.xfmr-3p3w ([630,882],0,0,-1)
858 {
859 Name = "T1"
860 Tmva = "100.0 [MVA]"
861 f = "50.0 [Hz]"
862 YD1 = "0"
863 YD2 = "0"
864 YD3 = "1"
865 Lead = "1"
866 Xl12 = "0.1 [pu]"
867 Xl13 = "0.1 [pu]"
868 Xl23 = "0.1 [pu]"
869 Ideal = "0"
870 NLL = "0.0 [pu]"
871 CuL = "0.0 [pu]"
872 Tap = "0"
873 View = "1"
874 Dtls = "0"

```

图 5 psc 文件中的变压器模型参数

Fig. 5 Parameters of the transformer in .psc model document

在掌握了.psc 文件结构、参数意义后，通过 VB.NET 软件根据用户输入的信息改写.psc 文件中的内容，即可实现不同运行场景仿真模型的设置，其过程如下：

(1) 预先构建完整的如图 1 所示的 EMTDC 模型，利用 PSCAD 软件编译生成.psc 文件，得到模

型文件的通用模板；

(2) 将.psc 模板文件内容提取至 VB.NET 中；

(3) 在 VB.NET 中根据用户输入的参数信息，对.psc 模板文件的代码进行修改；

(4) 导出参数修改后的.psc 文件，该文件即为根据用户设置自动生成的仿真模型文件。

现有的 EMTDC 程序由 PSCAD 软件进行封装绑定，没有提供外部接口以供调用。因此，需要用户接口程序能够自动地打开 PSCAD 软件并启动仿真计算。本仿真平台的用户接口程序通过 VB.NET 中的 shell 命令调用 pscad 程序打开已经构建好的.psc 模型文件，随后基于 windows 的底层消息机制向 pscad 程序发送控制句柄以执行仿真计算。

2.3 通用变压器模型构建方法

现场运行的变压器有各种类型，包括双绕组、三绕组、自耦变、非自耦变、组式、心式等。EMTDC 仿真软件中一台具体的变压器仿真模型只能模拟一种类型的变压器，且没有现场常用的三相三绕组自耦变压器模型。

基于 EMTDC 中的单相三绕组变压器模型构建了三相三绕组自耦变压器等值模型，如图 6 所示，将#1绕组与#2绕组串联以实现自耦变压器原副边的直接电联系。此外，通过等值计算，建立了三相三绕组自耦变压器参数与 EMTDC 中构建对应等值模型的单相三绕组变压器参数之间的折算关系，如表 2 所示。基于上述方法，仿真平台可以自动根据用户输入的三绕组自耦变参数构建对应的等值模型。

为了满足用户的不同使用需求，建立了通用变压器模型，如图 7 所示。通用变压器模型的内部是由多台变压器并联构成的，包括组式双绕组变压器、组式三绕组变压器、心式双绕组变压器、组式双绕组自耦变、组式三绕组自耦变等。仿真平台可以根据用户选择的变压器类型，通过开关投切的方式选择相应类型的变压器仿真模型投入使用。

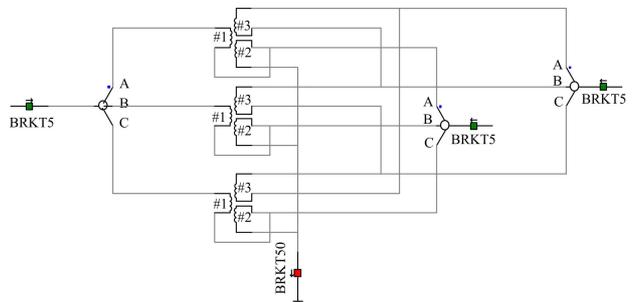


图 6 利用单相三绕组变压器构建三相三绕组自耦变压器

Fig. 6 Three-phase three-wind auto-transformer constructed by the single-phase three-wind transformers

表 2 三相三绕组自耦变参数与其等值模型参数之间的折算关系

Table 2 Parameter equivalent relationship between the parameters of the three-phase three-wind auto-transformer and the single-phase three-wind transformer

参数名称	实际三相三绕组自耦变参数	EMTDC 中构建等值模型的单相三绕组变压器参数
变比	$U_1/U_2/U_3$	$0.5774(U_1-U_2)/0.5774U_2/U_3$
容量	S	$S \times (U_1-U_2)/U_1/3$
短路电抗标幺值 1-2	jx_{1-2}	$jx_{1-2} \times U_1/(U_1-U_2)$
短路电抗标幺值 1-3	jx_{1-3}	$jx_{1-2} \times U_2/(U_1-U_2) + jx_{1-3} - jx_{2-3} \times U_2/U_1$
短路电抗标幺值 2-3	jx_{2-3}	$jx_{2-3} \times (U_1-U_2)/U_1$
铜耗标幺值	P (总损耗)	$P \times U_1/(U_1-U_2)$
铁耗标幺值	P	$P \times U_1/(U_1-U_2)$
励磁电流标幺值	I	$I \times U_1/(U_1-U_2)$

注: 下标 1、2 和 3 分别代表高压、中压和低压绕组

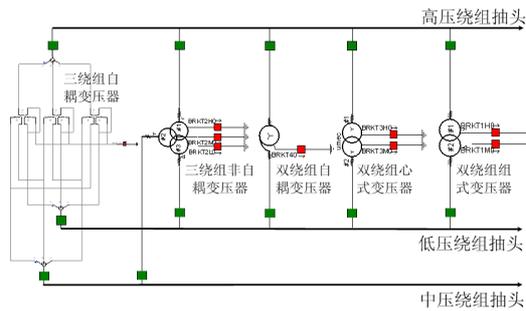


图 7 通用变压器模型
Fig. 7 General transformer model

3 实验测试与工程应用

3.1 电流互感器模型实验验证

在华中科技大学动模实验室开展电流互感器饱和和动模试验, 模拟一次系统短路、励磁涌流等情况, 利用高精度的光电流互感器测量电流作为仿真平台电流互感器的一次输入电流。通过分析对比实验得到的电流互感器二次电流与电流互感器仿真模型的二次输出电流, 验证互感器仿真模型的准确性。

P 级电流互感器稳态饱和与暂态饱和的试验结果分别如图 8 和图 9 所示。通过分析可以发现, 仿真与动模试验得到的二次电流波形十分吻合。

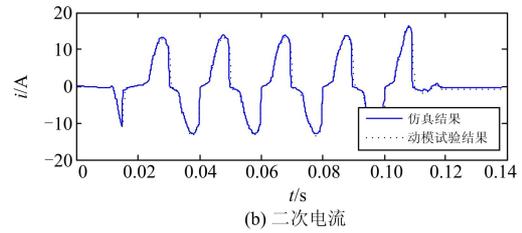
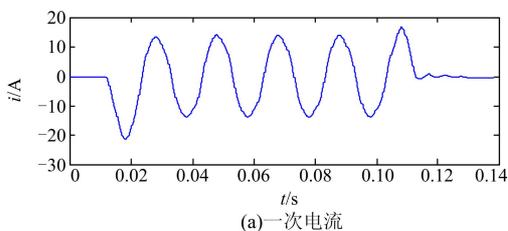


图 8 互感器稳态饱和和试验结果

Fig. 8 Test results of the steady-state saturation of the current transformer

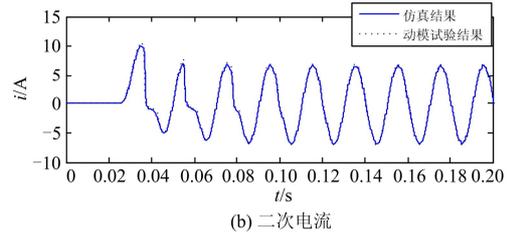
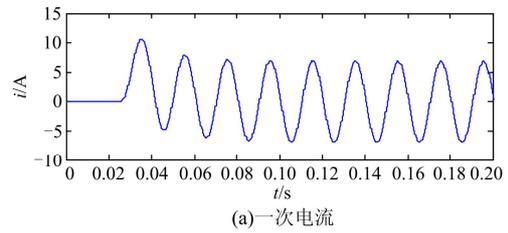


图 9 互感器暂态饱和和试验结果

Fig. 9 Test results of the transient saturation of the current transformer

在线路两侧分别安装 P 级电流互感器, 53QF 侧互感器负载大小为 20Ω , 54QF 侧互感器负载大小为 0Ω , 如图 10 所示。线路一侧连接的变压器空投时线路流过穿越性的励磁涌流, 仿真与动模试验的结果对比于图 11 中。通过分析可以发现, 仿真平台与动模试验得到的互感器二次电流波形也基本吻合。在流经穿越性励磁涌流初期, 由于线路两侧互感器均未饱和, 差流较小; 在 0.15s 左右, 由于励磁涌流非周期分量的作用, 53QF 侧的电流互感器发生了暂态饱和, 此时差动电流开始增加。

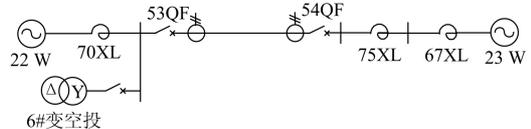
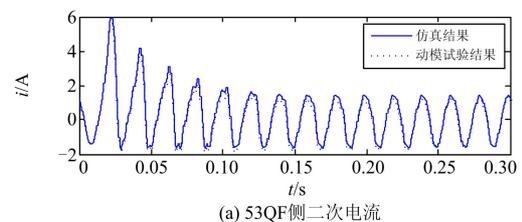


图 10 动模试验一次系统接线图

Fig. 10 Diagram of primary system in the dynamic test



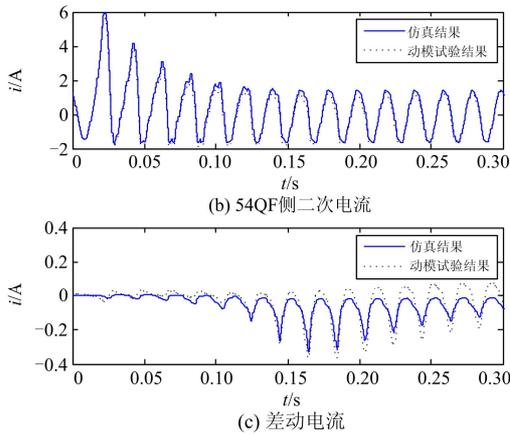


图 11 励磁涌流期间互感器饱和和试验结果

Fig. 11 Test results of the current transformer saturation during inrush current

上述试验表明电流互感器仿真模型可以准确地模拟电力系统暂态过程中电流互感器的饱和特性。

3.2 分析评估平台应用实例

现场接线如图 12 所示, #1 主变修试完成后, 通过合上高压侧开关实现送电操作, 220kV 电缆线路零序差动保护出口、开关跳闸。采用本仿真分析平台对差动保护动作的原因展开分析。

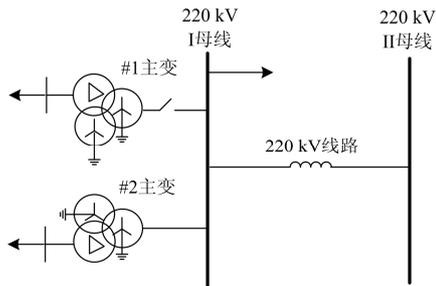


图 12 现场接线简要示意图

Fig. 12 Diagram of the actual site

根据图 12 中一次系统结构参数, 在仿真分析平台中构建与其一致的一次系统模型, 如图 13 所示。一次系统元件(包括: 电源、负荷、线路变压器等)参数的设置界面如图 14 所示。线路差动保护电流来自 4 号、5 号电流互感器, CT4、CT5 铁磁材料参数采用仿真分析平台提供的默认 P 级电流互感器参数, 如图 15 所示。可见仿真分析平台能完全模拟现场实际一次接线情况, 且在关键测量点均布置有 CT 模型, 具备良好的通用性。

仿真平台输出的 A、B 母线侧电流和零序差动/制动电流仿真波形与保护录波数据分别对比于图 16、图 17 和图 18 中, 由于保护装置存储容量有限, 在 0.1~0.2 s 时间段内的录波数据缺失。通过分析可

见仿真分析平台的输出结果与实际录波数据吻合良好, 并且可以复现缺失部分的录波数据。仿真结果表明在 0.08 s 附近时刻, II 母线侧 C 相电流互感器率先发生了饱和, 使得零序差动电流增大, 导致线路零序差动保护误动。可见线路两侧 CT 暂态饱和和特性存在差异是保护动作的根本原因。现场已经基于本平台得到的分析结论提出了相应的整改建议。

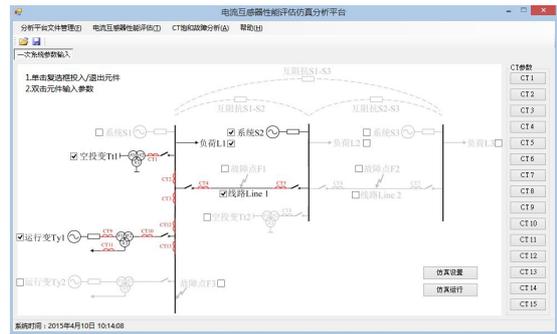


图 13 线路差动保护误动实例建模

Fig. 13 Simulation model for analyzing the mal-operation case of transmission line differential protection

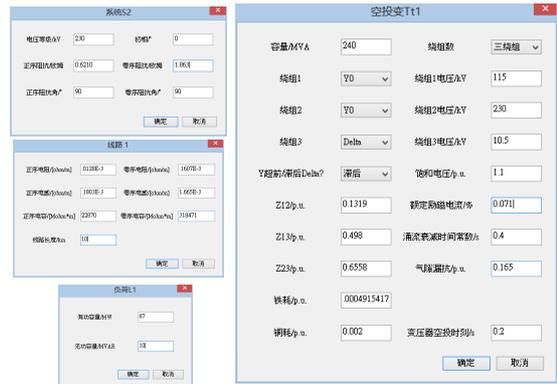


图 14 一次系统元件参数设置界面

Fig. 14 Interface for setting the parameters of the primary device



图 15 电流互感器参数设置界面

Fig. 15 Interface for setting the parameters of the current transformer

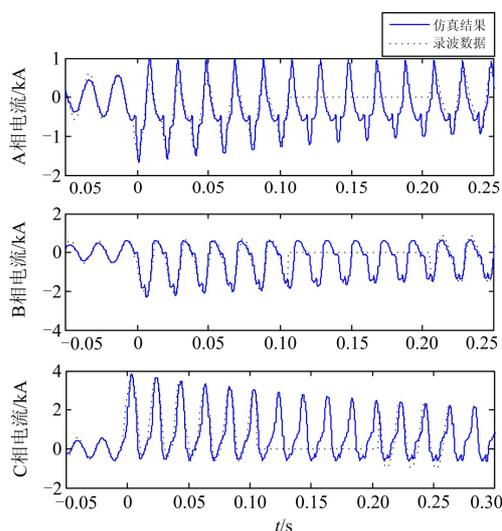


图 16 线路 I 母线电流仿真结果与实际录波数据对比
Fig. 16 Comparison of the current on the bus I of the transmission line from the simulation and the field recorded data

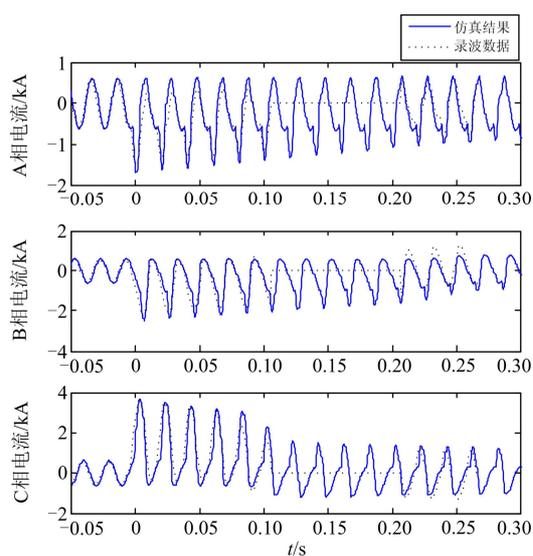


图 17 线路 II 母线侧电流仿真结果与实际录波数据对比
Fig. 17 Comparison of the current on the bus II of the transmission line from the simulation and the field recorded data

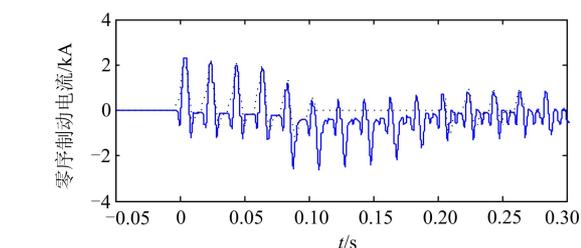
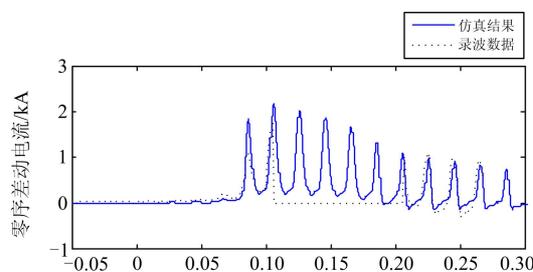


图 18 零序差动/制动电流的仿真结果与实际录波数据对比
Fig. 18 Comparison of the zero differential and restraint current from the simulation and the field recorded data

本次应用实例说明了本仿真平台能正确模拟电网复杂暂态过程中电流互感器的饱和特性, 仿真结果与录波波形吻合良好, 准确地重现了保护动作事件的全过程, 可为现场事故分析以及应对措施的研究提供重要的参考。

4 结论

复杂电网暂态过程中电流互感器的饱和特性及其对差动保护影响的研究是工程实际亟待解决的难题。本文介绍了一种电流互感器暂态饱和特性仿真分析平台。该平台可根据实际分析需要, 灵活组态构建一次系统运行场景, 模拟不同形式的电力系统复杂暂态过程, 并通过选配所开发的不同类型电流互感器的数字仿真模型, 能够准确地模拟电流互感器的暂态饱和过程, 实现电流互感器暂态特性及差动保护动作性能的分析评估, 从而为电流互感器的设计选型、运行维护与事故分析提供指导。动模试验与现场应用实例验证了该平台的有效性与准确性。

参考文献

- [1] 李谦, 张波, 蒋榆宽, 等. 变电站内短路电流暂态过程及其影响因素[J]. 高电压技术, 2014, 40(7): 1986-1993.
LI Qian, ZHANG Bo, JIANG Yukuan, et al. Transient process of short-circuit current in substations and its influential factors[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(7): 1986-1993.
- [2] 李红岩, 张璿, 侯媛彬. 基于小波变换的变压器励磁涌流鉴别的新方法[J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 500-503.
LI Hongyan, ZHANG Xuan, HOU Yuanbin. New method of inrush current discrimination based on wavelet transform[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(3): 500-503.
- [3] 张炳达, 张硕. 基于能量成分的变压器励磁涌流识别法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 121-126.
ZHANG Bingda, ZHANG Shuo. Identification of

- transformer inrush current based on energy components [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 121-126.
- [4] 金恩淑, 李晓娜, 宋晓刚, 等. 自适应变压器励磁涌流判据研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(20): 41-46.
JIN Enshu, LI Xiaona, SONG Xiaogang, et al. Study on adaptive criterion of transformer magnetizing inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(20): 41-46.
- [5] 张炳达, 黄杰. 基于差分双正交小波熵的变压器励磁涌流识别算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(18): 9-13.
ZHANG Bingda, HUANG Jie. Identification of transformer inrush current based on difference biorthogonal wavelet entropy[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(18): 9-13.
- [6] 谭明, 罗建, 余高旺, 等. 基于故障分量的牵引变压器和应涌流识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 87-92.
TAN Ming, LUO Jian, YU Gaowang, et al. An algorithm based on the fault component to identify traction transformer sympathetic inrush[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 87-92.
- [7] 龚薇, 刘俊勇, 贺星棋, 等. 电网恢复初期和应涌流产生机理及影响因素分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 44-50.
GONG Wei, LIU Junyong, HE Xingqi, et al. Analysis of the generation mechanism and influencing factors on sympathetic inrush in initial period of power system restoration[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 44-50.
- [8] 公茂法, 夏文华, 李国亮, 等. 变压器和应涌流和励磁涌流识别新判据[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(18): 139-143.
GONG Maofa, XIA Wenhua, LI Guoliang, et al. New judgment to identify sympathetic inrush and inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18): 139-143.
- [9] 黄少锋, 谷君, 郑涛, 等. 内桥接线方式下变压器差动保护误动原因及防范措施[J]. 高电压技术, 2011, 37(12): 3099-3106.
HUANG Shaofeng, GU Jun, ZHENG Tao, et al. Mal-operation of transformer differential protection with inner bridge connection and countermeasure[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(12): 3099-3106.
- [10] 王奕, 戚宣威, 罗航, 等. 复杂和应涌流及其对电流差动保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(6): 98-105.
WANG Yi, QI Xuanwei, LUO Hang, et al. Complex sympathetic inrush and its influence on current differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(6): 98-105.
- [11] 金明亮, 尹项根, 游大海. 复杂和应涌流导致差动保护误动的原因与对策[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 86-93.
JIN Mingliang, YIN Xianggen, YOU Dahai. Reason of differential protection mal-operation caused by complex sympathetic inrush and its countermeasure[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 86-93.
- [12] 陈德树, 尹项根, 张哲, 等. 电磁式电流互感器暂态特性试验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(13): 1-4, 32.
CHEN Deshu, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Test study on the transient performance of the electro-magnetic type current transformer[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(13): 1-4, 32.
- [13] 袁季修, 盛和乐. 电流互感器的暂态饱和及应用计算[J]. 继电器, 2002, 30(2): 1-5.
YUAN Jixiu, SHENG Hele. The transient saturation of current transformer and its application calculation[J]. Relay, 2002, 30(2): 1-5.
- [14] CASORIA S, SYBILLE G, BRUNELLE P. Hysteresis modeling in the MATLAB power system blockset[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2003, 63(3-5): 237-248.
- [15] LUCAS J R, MCLAREN P G, KEERTHIPALA W W L, et al. Improved simulation models for current and voltage transformers in relay studies[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(1): 152-159.
- [16] JILES D C, ATHERTON D L. Theory of ferromagnetic hysteresis[J]. Journal of Applied Physics, 1984, 55(6): 2115-2120.

收稿日期: 2015-05-20; 修回日期: 2015-06-23

作者简介:

戚宣威(1988-), 男, 通信作者, 博士研究生, 主要从事电力系统保护与控制方面的研究工作; E-mail: 814512663@qq.com

尹项根(1954-), 男, 博士, 教授博导, 研究方向为电力系统继电保护与安全自动控制; E-mail: xgyin@hust.edu.cn

李甘(1988-), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向为电力系统控制与保护。E-mail: ligan0704@qq.com

(编辑 魏小丽)