

DOI: 10.7667/PSPC201667

# 变压器间及其与电流互感器暂态交互作用分析和保护对策

尹项根<sup>1</sup>, 张哲<sup>1</sup>, 王友怀<sup>2</sup>, 刘勇<sup>2</sup>, 戚宣威<sup>1</sup>, 曹文斌<sup>1</sup>, 郭乾<sup>1</sup>

(1. 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;

2. 湖北省电力调度控制中心, 湖北 武汉 430077)

**摘要:** 交直流混联复杂电网发生扰动和故障期间, 变压器之间及其与电流互感器之间将发生暂态交互作用, 这一复杂暂态过程, 增加了故障判断的难度, 影响到继电保护正确动作。近年来, 电网发生不少由于变压器空投导致相邻变压器、发电机和输电线路保护误动的事故, 威胁电网安全运行。从原理分析、数字仿真以及动模试验等多个层面围绕变压器励磁涌流、和应涌流以及互感器暂态饱和开展研究, 论述变压器之间及其与电流互感器暂态交互作用机理, 分析电磁暂态对保护的影响, 提出保护的应对措施。并讨论了一种多场景仿真平台, 可用于电流互感器选型和事故分析。

**关键词:** 变压器; 电流互感器; 励磁涌流; 和应涌流; 暂态饱和; 差动保护

## Multiple transformers and CTs interactive effect and its impact on the protective relay

YIN Xianggen<sup>1</sup>, ZHANG Zhe<sup>1</sup>, WANG Youhuai<sup>2</sup>, LIU Yong<sup>2</sup>, QI Xuanwei<sup>1</sup>, CAO Wenbin<sup>1</sup>, GUO Qian<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China; 2. Hubei Power Dispatch and Control Center, Wuhan 430077, China)

**Abstract:** When disturbance or fault occurs to AC/DC hybrid power system, the transformer and current transformer (CT) will produce complex transient interactive process, which makes it difficult for relay protection to identify faults and operate correctly. In recent years, there are many unusual mal-operations of the differential protection for transformer, generator and transmission line already in operation caused by the adjacent switching-on transformer, which have seriously threaten the safe and stable operation of the power grid. The transformer inrush current, sympathetic current and CT transient saturation are researched based on mechanism analysis, digital simulation and dynamic test. The mechanism of transformers and CT transient interactive process is discovered and relevant countermeasure is proposed. A simulation platform is also built to help to select the types of CT and analyze accident.

This work is supported by Key Project of Smart Grid Technology and Equipment of National Key Research and Development Plan of China (No. 2016YFB0900600) and National Natural Science Foundation of China (No. 51277084).

**Key words:** transformer; current transformer (CT); magnetizing inrush; sympathetic current; transient saturation; differential protection

## 0 引言

我国已形成若干交直流混联复杂大电网<sup>[1]</sup>, 尤其是大容量多回直流线路的馈入和馈出, 使得电网安全防护面临前所未有的压力, 这要求交直流保护更加可靠、快速、灵敏地动作。

在电网发生扰动和故障期间, 变压器、电流互

感器等非线性铁磁元件的暂态过程会影响保护的准确测量, 导致保护(主要是电流差动保护)的错误动作。例如, 近年来电网发生不少由于变压器空投导致相邻运行变压器、发电机和输电线路保护误动的事故; 又例如, 由于大电网故障引起非周期分量衰减常数增大而恶化了电流互感器的传变性能, 也造成了某些线路差动保护误动事故。这种状况严重威胁电网安全运行, 引起了各方面专家的普遍关注。

目前, 国内外的研究主要涉及变压器励磁涌流<sup>[2-4]</sup>、和应涌流, 以及电流互感器暂态过程特征的

基金项目: 国家重点研发计划智能电网与装备重点专项(2016YFB0900600); 国家自然科学基金项目(51277084)

分析和相关保护对策方面的内容。现有和应涌流产生机理的分析方法主要有数学解析法<sup>[5-6]</sup>和磁链分析法<sup>[7-11]</sup>，并分析了串联和应涌流与并联和应涌流的特征区别<sup>[8]</sup>，但相关论文均假设运行变压器副方处于开断状态，未考虑系统连接对和应涌流的影响，不能正确地反映工程实际情况。针对由于和应涌流引起差动保护误动问题，也已经研究提出了一些应对措施。例如，运行变中性点采用不接地的运行方式<sup>[9]</sup>；在识别出涌流后，若二次谐波含量呈现平缓下降的趋势，增大比率制动特性的最小动作电流<sup>[12]</sup>；利用二次谐波分量构成零序二次谐波制动判据防止差动保护误动<sup>[11]</sup>。这些方法在严格的复杂涌流分析和电流互感器饱和特性分析，尤其是综合两者影响的分析方面存在着不足，因而还很难肯定其效果。

这类暂态分析和保护误动问题不仅涉及到变压器、电流互感器等非线性铁磁元件各自的暂态过程，还与变压器之间及其与电流互感器的暂态和应交互作用有关。非线性铁磁元件暂态过程主要包括有变压器励磁涌流、变压器之间的和应涌流以及电流互感器的暂态饱和。这些现象往往交织在一起，其表现形式多样、作用机理非常复杂，至今还没有得到很好的分析，因而对造成保护误动的原因认识不足，缺乏有效的应对措施。这种情况使得现有差动保护在复杂电网的这种暂态交互过程中的动作性能难以满足工程实际应用的要求。

本文从原理分析、数字仿真以及动模试验等多个层面围绕变压器间励磁涌流、和应涌流以及互感器暂态饱和开展研究。首先研究了变压器暂态过程中复杂和应涌流的产生机理，讨论了运行变负载对和应涌流的影响，通过物理试验得出和应涌流的特征，并提出两种和应涌流识别方法。为了深入研究包括复杂涌流和故障暂态对电流互感器性能的影响，基于工程实用的电流互感器物理实验结果，构建了不同类型(P级、PR级、TPY级)互感器数字仿真模型。为了便于事故分析和电流互感器的工程选型，开发了用于电流互感器暂态性能分析的评估平台，并利用仿真结果和现场案例进行了验证。进而基于该评估平台对几种类型的现场典型事故进行分析，并提出相应的保护应对措施。

## 1 电网复杂和应涌流研究

以往对普通励磁涌流的分析较多，而对和应涌流的分析不够充分。本章从理论分析、数字仿真和动模试验等层面，围绕运行变带载情况下的复杂和应涌流展开研究工作，并提出了两种和应涌流识别方法。

### 1.1 复杂和应涌流解析分析

以单相变压器为例，分析其和应涌流的电气连接图和等效电路分别如图1和图2所示。运行变T1和空投变T2的一次绕组与系统S1相连接，运行变压器的二次绕组与代表负载的系统S2相连接，运行变负载主要有无源负载和有源负载两种类型。运行变带无源负载时，系统S2电压 $u_2$ 为零， $(r_{2s} + j\omega L_{2s})$ 代表负载阻抗；运行变带有源负载时，系统S2电压 $u_2$ 非零， $(r_{2s} + j\omega L_{2s})$ 代表电源的内阻抗。

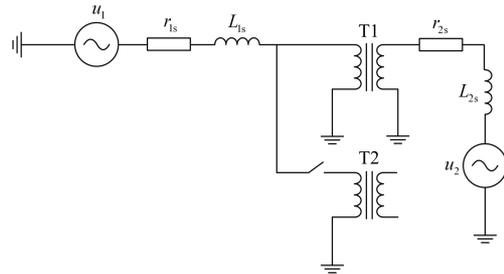


图1 复杂和应涌流电气连接图

Fig. 1 Electrical configuration used to analyze complex sympathetic inrush

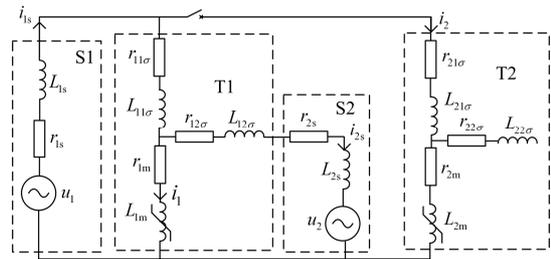


图2 复杂和应涌流等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of complex sympathetic inrush

为了简化计算，忽略变压器漏磁通的影响<sup>[6]</sup>，由基尔霍夫定律可以构建回路电压和节点电流方程为

$$\begin{cases} r_{1s}i_{1s} + L_{1s}\frac{di_{1s}}{dt} + r_{1m}i_1 + \frac{d\psi_1}{dt} = U_1 \sin(\omega t + \theta_1) \\ r_{1m}i_1 + \frac{d\psi_1}{dt} = r_{2m}i_2 + \frac{d\psi_2}{dt} \\ r_{2m}i_2 + \frac{d\psi_2}{dt} = r_{2s}i_{2s} + L_{2s}\frac{di_{2s}}{dt} + U_2 \sin(\omega t + \theta_2) \\ i_{1s} = i_1 + i_2 + i_{2s} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $i_1$ 、 $i_2$ 、 $i_{1s}$ 和 $i_{2s}$ 分别为运行变和应涌流、空投变励磁涌流、系统S1提供的电流和系统S2吸收的电流； $\psi_1$ 和 $\psi_2$ 分别为运行变和空投变励磁支路的磁链； $U_1$ 和 $U_2$ ， $\theta_1$ 和 $\theta_2$ 分别为系统S1与S2等值电压源的幅值和相位。

变压器的磁化特性是非线性的，且分散性大，式(1)描述的微分方程难以得到解析表达式。采用近

似直线法, 把非线性方程简化为常系数线性微分方程来求解。设等效电感  $L = \psi / i$ , 则  $L_{1m} = \psi_1 / i_1$ ,  $L_{2m} = \psi_2 / i_2$ ,  $L_1$  与  $L_2$  分别为运行变和空投变励磁支路的等效电感。将式(1)简化, 并且利用拉普拉斯变换方法解出两台变压器磁链以及系统 S1 和 S2 电流的时域表达形式(具体公式推导见文献[13]):

$$\psi_1(t) = C_1 \sin(\omega t + \phi_1) + C_2 e^{-t/\tau_1} + C_3 e^{-t/\tau_2} + C_4 e^{-t/\tau_3} \quad (2)$$

$$\psi_2(t) = C_5 \sin(\omega t + \phi_2) + C_6 e^{-t/\tau_1} + C_7 e^{-t/\tau_2} + C_8 e^{-t/\tau_3} \quad (3)$$

$$i_{1s}(t) = C_9 \sin(\omega t + \phi_3) + C_{10} e^{-t/\tau_1} + C_{11} e^{-t/\tau_2} + C_{12} e^{-t/\tau_3} \quad (4)$$

$$i_{2s}(t) = i_{1s}(t) - \frac{\psi_1(t)}{L_{1m}} - \frac{\psi_2(t)}{L_{2m}} \quad (5)$$

根据式(2)一式(5),  $\psi_1(t)$ 、 $\psi_2(t)$ 、 $i_{1s}(t)$  和  $i_{2s}(t)$  包含工频强制分量以及三个不同衰减时间常数的自由非周期分量。式中的系数  $\phi_1 \sim \phi_4$ 、 $C_1 \sim C_{12}$  由系统和变压器参数以及合闸时刻等因素决定。

通过数学解析分析, 可以总结得到运行变压器负载对和应涌流具有如下影响:

1) 运行变带无源负载。随着负载视在功率增大、功率因素减小, 和应涌流有幅值变小、出现时间延后的趋势。

2) 运行变带有源负载。当电源的内阻抗变小时, 和应涌流有幅值变小、出现时间延后的趋势。

3) 运行变与发电机相连。和应涌流相对空载情况变小。发电机电流的直流分量衰减缓慢, 这并非由于运行变发生和应涌流, 而是因为发电机提供的空投变励磁涌流衰减缓慢。

因篇幅所限, 上述复杂和应涌流的数学解析、机理分析、建模仿真以及仿真分析结果详见文献[13]。

## 1.2 和应涌流物理试验研究

在华中科技大学动态模拟实验室进行了多项复杂和应涌流的物理试验, 这里仅对运行变与发电机相连情况的动模试验进行介绍, 其接线图如图 3 所示。

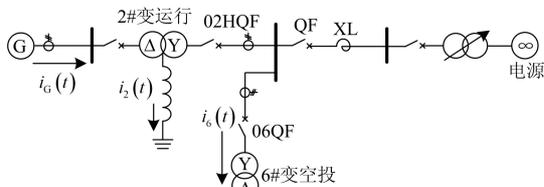


图 3 复杂和应涌流动模试验接线图

Fig. 3 Equivalent circuit of complex sympathetic inrush

6#空投变在 A 相相电压过零处合闸时, 2#运行变和应涌流  $i_2(t)$ 、6#空投变励磁涌流  $i_6(t)$  以及发电机端电流  $i_g(t)$  的录波结果(均为 A 相线电流, 且已折算为一次有名值)如图 4 所示, 各电流的参考正向如图中箭头所示。在空投后的一段时间内, 流经

运行变两侧 CT 的电流为穿越性质的空投变励磁涌流, 测量误差较大, 差流中的和应涌流被测量误差所淹没, 到后期和应涌流的特征才逐渐显现。与图 5 所示运行变空载情况下的和应涌流进行对比, 可发现运行变与发电机相连时, 和应涌流明显变小。发电机电流波形特征与空投变励磁涌流的特征相符合。可见在该情况下, 运行变压器和应涌流变小, 流过发电机的电流主要是空投变压器的励磁涌流。

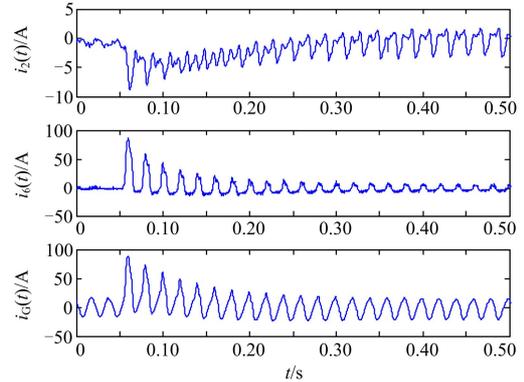


图 4 复杂和应涌流动模试验录波数据

Fig. 4 Recorded data obtained from the complex sympathetic inrush dynamic simulation test

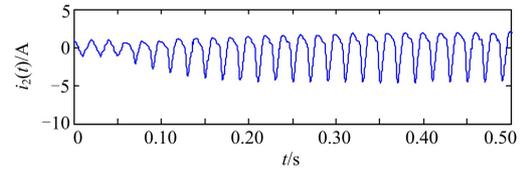


图 5 运行变空载和应涌流动模试验录波数据

Fig. 5 Recorded data obtained from sympathetic inrush dynamic simulation test when operating transformer is no-load

此外, 通过动模试验研究, 进而得到如下关于和应涌流的影响因素以及电气特征的结论。

1) 合闸角与剩磁。空投变铁芯的偏磁由合闸产生的自由直流分量与剩磁相叠加构成, 当合闸产生的自由直流分量与剩磁的方向相同时, 空投涌流以及和应涌流较大, 反之, 空投涌流及和应涌流会减小。

2) 系统等值阻抗。变压器之间的和应交互作用与系统的等值电阻相关, 因此在一定范围内增加系统阻抗时, 和应涌流会增大。但是若系统阻抗增加较大, 会使得变压器的励磁电压降低, 铁芯不容易饱和, 和应涌流反而会变小。

3) 中性点接地情况。无论运行变与空投变中性点是否接地, 和应涌流都会产生, 中性点主要影响零模励磁电流的流通过径。当运行变与空投变中性点均接地时, 运行变的涌流包括两个部分: 从中性点流入的空投励磁涌流零模分量以及运行变本身的

和应涌流。断开运行变的中性点时，运行变的涌流只由和应涌流构成。

4) 系统电压。增大系统电压可以增加变压器饱和程度，相应的和应涌流会变大。

5) 变压器类型。在小容量变压器空投、大容量变压器运行，且两台变压器中性点均接地的情况下，运行变励磁电流在空投变合闸之后较短的时间内即出现较为明显的涌流特征，该涌流来自于通过中性点流入的空投变励磁涌流零模分量。

### 1.3 和应涌流识别方法

为防止和应涌流对保护产生不利影响，在上述复杂和应涌流特征分析的基础上，提出了两种和应涌流的识别新方法，下面分别介绍。

1) 基于二次谐波相位比较的和应涌流识别方法<sup>[14]</sup>。研究发现，在变压器间发生和应交互作用期间，空投变励磁涌流与运行变和应涌流的二次谐波相位差大约为 180°，如图 6 所示。可以利用智能变电站站域信息共享技术，获取同一变电站中所连变压器的励磁电流，通过分析比较各台变压器励磁电流二次谐波分量的相位差，即能够有效地鉴别并联和应涌流。

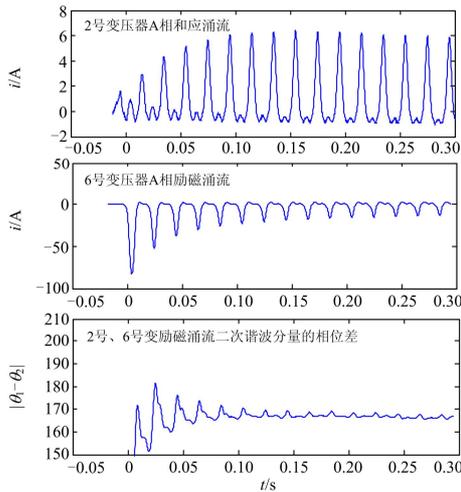


图 6 运行变空载涌流动态模拟试验录波数据

Fig. 6 Recorded data obtained from inrush dynamic simulation test when operating transformer is no-load

2) 基于变压器磁通在线计算的和应涌流识别方法<sup>[15]</sup>。通过对测量电压进行积分以计算变压器铁芯磁通，通过比较计算磁通与饱和磁通的相对大小及持续时间长短有效识别和应涌流。

## 2 电流互感器物理实验与仿真建模

在众多模拟电流互感器磁滞特性的仿真模型中，基于非线性等效电路的 Lucas 模型和基于铁磁材料现象学理论的 Jiles-Atherton 模型<sup>[16]</sup>被普遍认

可。但是，根据电流互感器的实际参数得到其仿真模型的参数较为困难，目前还没有良好的应用这两种仿真模型的方法。本文采用多种类型工业实用的电流互感器开展物理试验，分析其暂态饱和特性，并根据物理试验结果，结合遗传模拟退火算法，基于 J-A 模型构建不同类型(P 级、PR 级和 TPY 级)互感器高精度数字仿真模型。

### 2.1 电流互感器磁滞回线测试与仿真模型参数拟合

选取实际 500 kV、220 kV 系统中使用的 P 级、PR 级和 TPY 级电流互感器进行实验。基于物理实验测试结果、利用遗传模拟退火算法辨识互感器仿真模型参数，包括：可逆磁化强度、不可逆磁化强度、修正系数、域间耦合系数、饱和磁通、励磁特性曲线参数等等。仿真模型的磁滞回线与测试结果对比于图 7 中，可见实测磁滞回线与仿真结果吻合良好，因篇幅所限，具体的拟合结果及相关参数见文献<sup>[17]</sup>。

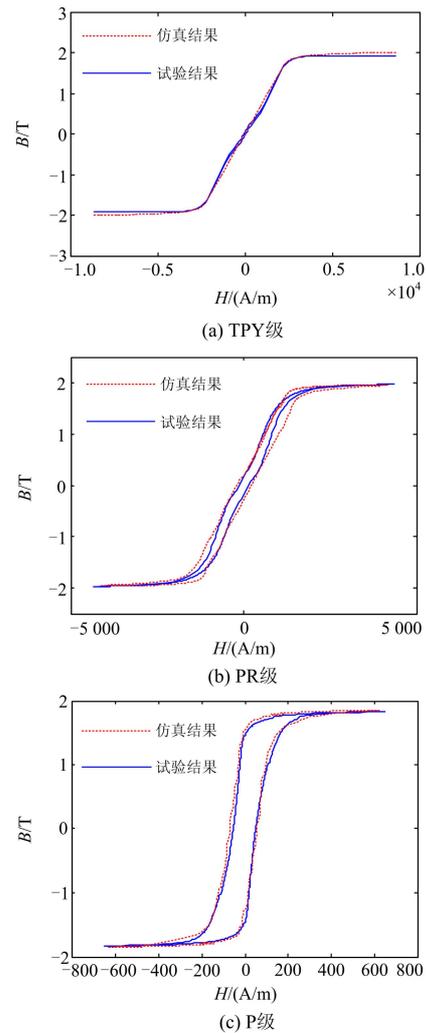


图 7 电流互感器数字仿真模型磁滞回线

Fig. 7 Current transformer digital simulation model hysteresis loop

## 2.2 电流互感器仿真模型实验验证

在华中科技大学动模实验室开展动模试验, 模拟不同场景下一次系统复杂短路以及励磁涌流等情况。利用暂态性能优良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, 通过分析对比动模实验与数字仿真所得二次电流, 验证互感器暂态仿真模型的有效性和正确性。

在单次短路故障期间, P 级互感器发生稳态和暂态饱和的动模试验与数字结果对比于图 8。

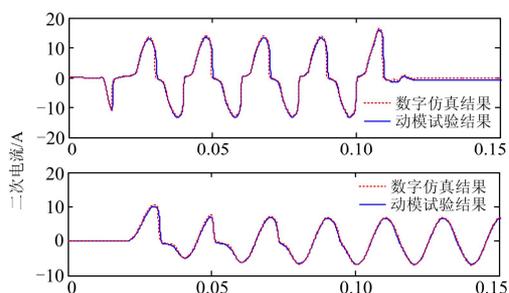


图 8 单次短路期间 P 级互感器饱和特性

Fig. 8 Saturation characteristics of P level transformer during single short circuit

通过动模试验还研究了不同类型互感器在区外故障、区外转区内、区内转区外故障以及相连变压器空投等情况下的暂态饱和特性。动模试验结果表明, 互感器数字模型的仿真结果与动模试验结果吻合良好, 能够用来分析电流互感器的暂态饱和特性; P 级互感器由于剩磁作用, 在重合闸和转换性故障期间易进入饱和状态, 导致差动保护误动。

## 2.3 电流互感器暂态性能分析评估平台

为了便于事故分析和电流互感器的工程选型, 基于本文构建的电流互感器及其他铁磁元件仿真模型, 开发了用于电流互感器暂态性能分析的评估平台。该平台可以根据实际分析需要, 灵活组建一次系统运行场景, 模拟不同形式的短路故障、励磁涌流与和应涌流、自动重合闸等引起的电网复杂暂态过程; 对电流互感器暂态特性及差动保护动作性能进行分析评估, 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意见。

### 2.3.1 仿真分析平台设计

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。电磁暂态计算内核利用 EMTDC 来实现; 图形化用户界面利用微软的 VB.NET 编程开发, 便于用户图形化建模。

在评估平台中构建的一次系统模型如图 9 所示, 它可以提供各种仿真结果数据, 主要包括互感器的一二次电流、铁芯励磁电流与磁通、被保护设

备的各种输入量等, 用于考察保护动作情况。输出数据可以转化为 COMTRADE 数据格式, 还可调用录波数据分析软件对这些结果进行图形化显示。

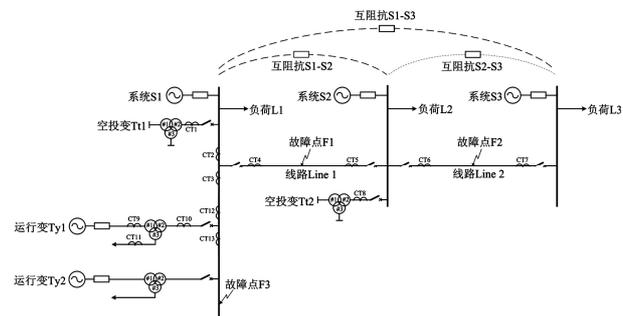


图 9 一次系统接线图

Fig. 9 Diagram of primary system

### 2.3.2 基于工程实例对仿真平台的验证

某实际电网现场接线如图 10 所示, #1 主变检修完成后, 通过合上高压侧开关实现送电操作, 220 kV 电缆线路零序差动保护出口、开关跳闸。

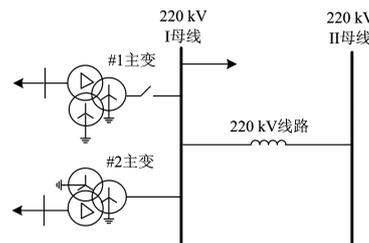


图 10 现场接线简要示意图

Fig. 10 Diagram of the actual site

在仿真分析平台中构建与图 10 一致的一次系统模型, 仿真平台输出 II 母线侧电流和零序差动电流仿真波形与保护录波数据分别对比于图 11 和图 12 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

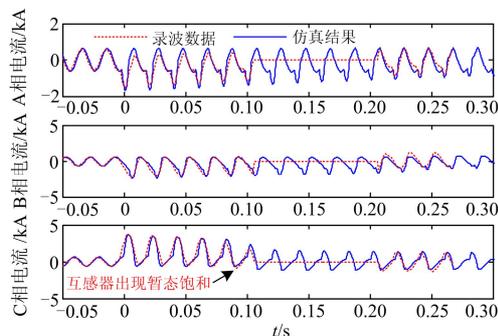


图 11 线路 II 母线电流仿真结果与实际录波数据对比  
Fig. 11 Comparison of simulation results of II bus current with actual recorded wave data

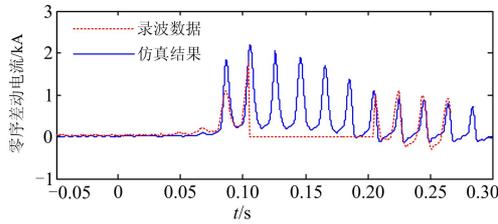


图 12 零序差动的仿真结果与实际录波数据对比

Fig. 12 Comparison of simulation results of zero sequence difference with actual recorded wave data

复现缺失的录波数据。从而为故障分析提供了有利的技术支持。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。在下一章，将利用电流互感器仿真分析平台对误动原因展开具体分析。

### 3 变压器间及其与电流互感器交互作用对保护影响的分析与对策

#### 3.1 保护误动原因分析

电流互感器暂态性能分析评估平台可有效评估实际工程中电流互感器的暂态性能，对于分析变压器空投引起相邻发电机、变压器和输电线路保护误动的原因有很大帮助。下文以变压器差动保护误动为例来说明变压器间及其与电流互感器暂态交互作用对保护影响的机理。

在平台中建立如图 13 所示的系统模型，两台变压器并联运行，其中 T1 为空投变，T2 为与发电机相连的运行变。测量电流的参考方向如图中的箭头所示。

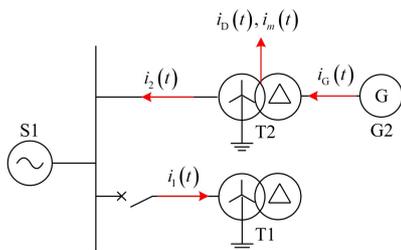


图 13 变压器差动保护误动仿真模型

Fig. 13 Simulation model of transformer differential protection mal-operation

在 0 时刻 T1 空投，通过互感器测量得到的空投变励磁涌流、运行变高低压侧绕组二次电流  $i_2$  和  $i_G$  及其非周期分量(用下标 z 表示)以及运行变的差动电流  $i_D$  如图 14 所示，其中  $i_D$  由两部分构成，一部分为变压器 T2 励磁支路的励磁电流，另一部分为互感器饱和所产生的传变误差电流。为了深入研究差流产生的原因，在图 14 中还给出了通过仿真

软件直接得到的运行变励磁电流  $i_m$ ，即  $i_m$  为直接通过一次电流得到的差流，上述电流均已折算至高压侧线电流一次有名值。通过分析可以发现，在 T1 空投约 0.2 s 后，T2 差流  $i_D$  开始增加，且谐波含量较低，其中二次谐波最低约 10%，三次谐波最低不足 5%<sup>[18]</sup>，此时在变压器电流差动保护中普遍配置的谐波制动判据难以动作，电流差动保护可能会发生误动。

在 T1 变压器空投初期相邻的 T2 变压器流过了穿越性的励磁涌流，因此  $i_G$  和  $i_2$  中的非周期分量开始增加并且衰减缓慢，在经过一段时间后，发电机侧互感器发生局部暂态饱和<sup>[19-20]</sup>，此时铁芯含有较大的偏磁，且一次侧电流工频分量幅值相对较小，因此铁芯磁通只是在饱和点附近的线性区做较小范围的波动，并没有出现在饱和区与非饱和区之间进行剧烈转换的状态，故互感器的传变误差电流(约等于差动电流)为畸变较小的基频电流与非周期电流叠加。

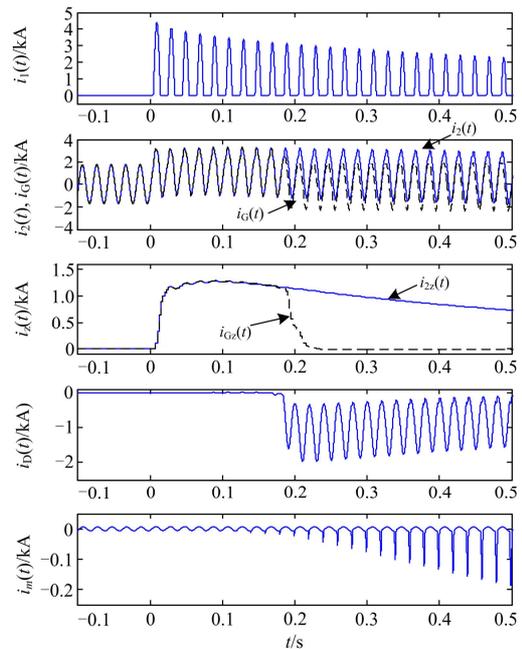


图 14 变压器保护误动仿真结果

Fig. 14 Simulation results of the mal-operation of the transformer differential protection

通过分析图 14 中 T2 变压器励磁电流  $i_m$  的波形可以发现，在变压器空投后约 0.2 s 时和应涌流开始产生，但是这并不是导致差动保护误动的主要原因。一方面，和应涌流本身的幅值较小，且其谐波含量较高，因此并不会引起差动保护误动；另一方面，在 0.2 s 左右和应涌流才开始明显出现，但是此时互感器已经开始进入饱和状态。可见导致差动保护误动的主要原因是互感器因传变了来自励磁涌流的非周期分量电流而出现局部暂态饱和。

同样, 利用电流互感器暂态性能分析评估平台对发电机、输电线路保护误动案例展开分析, 都能得到差动保护误动的主要原因是空投变产生的励磁涌流, 而非变压器交互作用产生的和应涌流。

### 3.2 差动保护应对措施

针对变压器空投引起相邻发电机和输电线路误动的事故, 提出了投入谐波闭锁判据来防止差动保护误动。针对变压器空投引起相邻运行变压器误动的事故, 提出了利用二次电流非周期分量的互感器饱和识别方法来防止保护误动。

#### 3.2.1 投入谐波闭锁判据

对于发电机与线路差动保护误动情况, 差动电流的产生原因是电流互感器在传变含有非周期分量的一次电流而发生了暂态饱和。此时, 差动电流中的谐波含量较高, 发电机和线路差动保护误动时差动电流的二次谐波含量分别大于 30% 和 40%, 三次谐波含量均大于 10%, 故投入谐波闭锁判据可以有效防止保护误动<sup>[18]</sup>。据悉, 实例中的线路差动保护为双重化配置, 误动保护装置的零序电流差动保护并未配置谐波闭锁功能, 而另一套装置的零差保护因配置有谐波闭锁功能而成功的躲过了误动, 这也侧面证明了谐波闭锁判据的有效性。

#### 3.2.2 利用二次电流非周期分量的互感器饱和识别方法

在 3.1 节所述的变压器差动保护误动案例中, 互感器发生了局部暂态饱和而导致差动保护误动, 此时差动电流中的谐波含量较低, 谐波闭锁判据无法正确闭锁保护。

如图 15 和图 16 所示, 互感器饱和导致差动保护误动经历两个阶段。

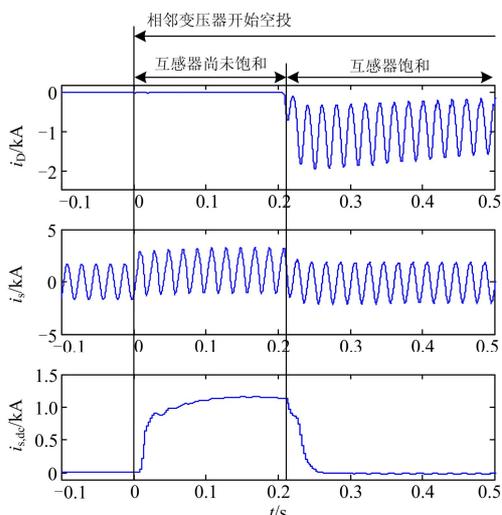


图 15 互感器饱和过程

Fig. 15 Process of CT saturation

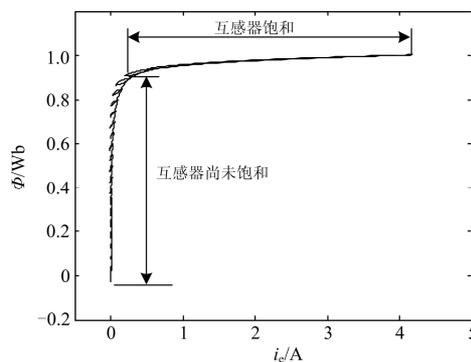


图 16 互感器饱和过程期间的铁芯磁通

Fig. 16 Hysteresis loop of CT core during CT saturation process

阶段 1: 相邻变空投后, 被保护元件流过了含有非周期分量的穿越性励磁涌流, 两侧互感器铁芯开始积累偏磁但并未马上饱和; 此时互感器可以按变比正确传变一次电流(包括其中的非周期分量), 故两侧电流互感器二次电流中的非周期分量开始增加, 且差动电流小于动作值。

阶段 2: 空投一段时间后, 由于铁芯偏磁累积, 一侧互感器率先发生局部暂态饱和, 导致差动保护误动。互感器饱和后, 铁芯的等效电感迅速减小, 一次电流中的非周期分量以及部分工频分量迅速进入了励磁支路, 故二次电流迅速减小; 而此时另一侧互感器尚未发生饱和, 其二次电流并未发生突变。

基于上述互感器饱和的机理分析, 可以总结在变压器间及其与电流互感器之间发生和应交作用期间互感器饱和的特征: 在互感器饱和导致差动电流增大的时刻, 饱和互感器二次电流中的非周期分量迅速的降低。故提出基于二次电流非周期分量的互感器饱和识别方法, 当被保护设备各侧互感器二次电流中的非周期分量开始增大且此时差动电流较小时, 饱和识别程序开始启动, 因为在该情况下互感器开始传变含有非周期分量的一次电流, 而有可能发生局部暂态饱和或者暂态饱和; 若其中一侧互感器的直流分量明显减少, 且差动电流随之落入动作区, 则判断该侧互感器出现了暂态饱和而导致差动保护误动。现场录波数据和数字仿真验证了该方法的有效性, 篇幅所限, 具体结果详见文献[18,21]。

## 4 结论

现代交直流混联复杂电网的暂态过程中, 变压器间及其与电流互感器间发生的和应交作用严重威胁继电保护的正确动作。本文从原理分析、数字仿真以及动模试验等多个层面围绕变压器间及其与

电流互感器间和应交互作用开展研究工作，并提出了继电保护应对策略。主要结论如下：

1) 解析分析了运行变压器非空载情况下复杂和应涌流的产生机理、基本模式，通过数字仿真与动模试验分析总结和应涌流的影响因素，并验证了复杂和应涌流理论分析结果的正确性，进而提出基于站域信息共享和基于变压器磁通在线计算的和应涌流识别方法。

2) 利用多种类型工业实用的电流互感器开展动模试验，并基于试验结果建立了不同类型(P、PR及TPY级)的互感器数字仿真模型。

3) 开发了用于电流互感器暂态饱和特性仿真分析的评估平台，为现场提供了一种互感器设计选型、运行维护与事故分析的工具。

4) 利用该评估平台模拟现场典型事故并进行分析，明确了引起了保护误动的原因，并提出了投入谐波闭锁判据、利用二次电流非周期分量的饱和识别方法等继电保护应对策略。

参考文献

[1] 李兆伟, 翟海保, 刘福锁, 等. 多馈入交直流混联受端电网直流接入能力研究评述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 142-148.  
LI Zhaowei, ZHUO Haibao, LIU Fusuo, et al. DC access capability study for multi-infeed HVDC power transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 142-148.

[2] 凌光, 苏斌. 一种基于差流波形特征的励磁涌流识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 19-24.  
LING Guang, SU Bin. A method to identify inrush current based on waveform characteristics of differential current[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 19-24.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 毕大强, 王祥珩, 李德佳, 等. 变压器和应涌流的理论探讨[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(6): 1-8.  
BI Daqiang, WANG Xiangheng, LI Degui, et al. Theory analysis of the sympathetic inrush in operating transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(6): 1-8.

[6] 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, et al. Reason of differential protection mal-operation caused by complex sympathetic inrush and its countermeasure[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 86-93.

[7] 武万才, 边疆, 吴志勇. 变压器和应涌流产生机理及其特性分析[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(6): 112-115.  
WU Wancai, BIAN Jiang, WU Zhiyong. Principle and characteristics of transformer sympathetic inrush[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(6): 112-115.

[8] 张雪松, 何奔腾, 张建功. 变压器和应涌流的产生机理及其影响因素研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(6): 15-19.  
ZHANG Xuesong, HE Benteng, ZHANG Jiansong. Principle and influencing factors of the transformer sympathetic inrush[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(6): 15-19.

[9] 袁宇波, 李德佳, 陆于平, 等. 变压器和应涌流的物理机理及其对差动保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(6): 9-14.  
YUAN Yubo, LI Dejie, LU Yuping, et al. Physical mechanism of sympathetic inrush of transformer and its influence on differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(6): 9-14.

[10] 张雪松, 何奔腾. 变压器和应涌流对继电保护影响的分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(14): 12-17.  
ZHANG Xuesong, HE Benteng. Influence of sympathetic interaction between transformers on relay protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(14): 12-17.

[11] 束洪春, 贺勋, 李立新. 变压器和应涌流分析[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(10): 7-12.  
SHU Hongchun, HE Xun, LI Lixin. Research on sympathetic inrush in operating transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(10): 7-12.

[12] 郑涛, 赵萍. 和应涌流对差动保护的影响因素分析及防范措施[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(3): 74-78.  
ZHENG Tao, ZHAO Ping. Analysis of influence factors of sympathetic inrush on differential protection and its

- solutions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(3): 74-78.
- [13] 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.
- [14] QI Xuanwei, YIN Xianggen, ZHAG Zhei, et al. Sympathetic inrush current in a transformer and a method for its identification[J]. IEE Transactions on Electrical & Electronic Engineering, 2016, 11(4): 442-450.
- [15] WANG Fei, QI Xuanwei, WANG Yi, et al. A sympathetic inrush detection method based on on-line magnet flux calculation[C]// International Conference on Power System Technology, 2014: 700-704.
- [16] C J D, L A D. Theory of ferromagnetic hysteresis[J]. Journal of Applied Physics, 1984, 55(6): 2115-2120.
- [17] 戚宣威, 尹项根, 李甘, 等. 一种电流互感器仿真分析平台构建方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 69-76.  
QI Xuanwei, YIN Xianggen, LI Gan, et al. A construction method for the simulation platform for the analysis of the current transformer[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 69-76.
- [18] 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.
- [19] 毕大强, 冯存亮, 葛宝明. 电流互感器局部暂态饱和识别的研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 184-190, 24.  
BI Daqiang, FENG Cunliang, GE Baoming. Research on identification of partial transient saturation in current transformers[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 184-190, 24.
- [20] 袁宇波, 陆于平, 许扬, 等. 切除外部故障时电流互感器局部暂态饱和对变压器差动保护的影响及对策[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 12-17.  
YUAN Yubo, LU Yuping, XU Yang, et al. The influence and countermeasure to transformer differential protection of CT partial transient saturation caused by external fault removal[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 12-17.
- [21] QI Xuanwei, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Study on the unusual misoperation of differential protection during transformer energization and its countermeasure[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(5): 1998-2007.

---

收稿日期: 2016-09-01

作者简介:

尹项根(1954-), 男, 博士, 教授, 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

张哲(1962-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统继电保护与安全自动控制; E-mail: zz\_mail2002@163.com

王友怀(1971-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为继电保护运行管理。E-mail: wangyh@hb.sgcc.com.cn

(编辑 姜新丽)