

基于新型瓦斯继电器挡板旋转角速度的重瓦斯报警新方法

万书亭^{1,2}, 张泽翰¹, 李少鹏¹, 豆龙江¹, 韦教玲¹, 吕鹏瑞³

(1. 河北省电力机械装备健康维护与失效预防重点实验室(华北电力大学), 河北 保定 071003;

2. 中国石油大学(北京)克拉玛依校区工学院, 新疆 克拉玛依 834000;

3. 上海电器科学研究所(集团)有限公司, 上海 200063)

摘要: 目前实际工况中使用的瓦斯继电器重瓦斯动作流速整定值可靠性较低, 仅能提供一定的参数范围作为参考。为提高重瓦斯报警的灵敏度, 提出了一种基于瓦斯继电器挡板旋转角速度的重瓦斯报警方法。首先对瓦斯继电器挡板旋转角速度特性进行解析推导, 并研制了一款实时输出挡板旋转角速度的智能瓦斯继电器和可以模拟不同重瓦斯故障能量大小的瓦斯继电器动特性实验平台。进而试验分析不同激励下的角速度特性关系, 并依据试验结果, 进行了一系列的仿真分析。由试验和仿真结果得到挡板旋转角速度整定值, 通过判断挡板旋转角速度是否达到其整定值, 及时进行重瓦斯报警, 提高了重瓦斯报警的灵敏度, 并为重瓦斯故障报警提供了新的整定方法。

关键词: 瓦斯继电器; 挡板旋转角速度; 重瓦斯报警; 整定值; 重瓦斯故障

A new method for a heavy gas alarm based on rotational angular velocity of the baffle of a new gas relay

WAN Shuting^{1,2}, ZHANG Zehan¹, LI Shaopeng¹, DOU Longjiang¹, WEI Jiaoling¹, LÜ Pengrui³

(1. Hebei Key Laboratory of Health Maintenance and Failure Prevention of Electric Machinery and Equipment, North

China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. College of Engineering, Karamay Campus of

China University of Petroleum (Beijing), Karamay 843000, China; 3. Shanghai Electric Appliance

Scientific Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200063, China)

Abstract: The current gas relay heavy gas action flow rate calibration values used in actual working conditions are lacking reliability and only provide a certain parameter range as a reference. Therefore, in order to improve the sensitivity of a heavy gas alarm, this paper proposes a method based on the angular velocity of a gas relay baffle rotation. First, it analyzes and derives the angular velocity characteristics of gas relay baffle rotation, and develops an intelligent gas relay with real time output of the rotational angular velocity of the baffle and a gas relay dynamic characteristic experimental platform. This can simulate different heavy gas fault energy magnitudes. Then it tests and analyzes the angular velocity characteristic relationship under different excitations. From the test results, a series of simulation analyses is carried out. The adjustment value of the baffle rotation angle speed is obtained from the test and simulation results. From judging whether the baffle rotation angle speed reaches its adjustment value, it gives a timely heavy gas alarm. This improves the sensitivity of the heavy gas alarm, and provides a new adjustment method for a heavy gas fault alarm.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51777075).

Key words: gas relay; angular velocity of baffle rotation; heavy gas alarm; setting value; heavy gas fault

0 引言

瓦斯继电器通过监测变压器内部瓦斯含量对变

压器进行保护^[1], 安装在变压器油箱与储油柜之间的连管道上^[2]。近年来, 在电网实际运行中, 重瓦斯误动作造成主变非计划停电事故时有发生, 严重影响电网安全稳定运行^[3-6]。而目前对于瓦斯继电器重瓦斯动作流速整定值的选取是通过现场安装经验和前苏联提供的试验结果确定的, 且目前部分整定实验台仍采取循环管道的设计方案, 无法完全模拟

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51777075); 保定市科技计划基础研究专项基金项目资助(2172P010); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2020MS110)

实际运行状况下油流涌动对瓦斯继电器动特性的影响^[7]。

近年来不少学者对于变压器故障及重瓦斯动作展开了研究^[8-21]。文献[14]针对有载分接开关所存在的重瓦斯动作隐患进行了研究与分析；文献[15]提出了一种在重瓦斯保护动作后先定性后确诊的故障诊断分析方法；文献[16]对重瓦斯动作过程中其内部流场情况及反向油流冲击导致重瓦斯误动作的可能性进行了仿真分析；文献[17]提出了通过减少变压器本体振动的策略来提高瓦斯继电器的可靠性。文献[18]提出增加保护延时的方法避开挡板误动报警。文献[19]提出在区外故障时应考虑瓦斯保护误动的可能性，并通过仿真计算优化了瓦斯保护整定值参数。文献[20-21]通过 CFD 仿真技术，探究了瓦斯继电器内部流场以及挡板流速整定值的设定问题。

瓦斯继电器作为纯机械式设备，智能性较低，只有挡板旋转到一定角度后触发干簧片才会发生重瓦斯报警，且单一的重瓦斯动作流速整定值设置可靠性有待商榷。故为提高重瓦斯报警的灵敏度，文献[22]研制了能实时输出挡板转角的新式瓦斯继电器，并提出了基于瓦斯继电器挡板转角特性的油浸式变压器运行状态监测方法。本文在此基础上，进一步提出了一种基于瓦斯继电器挡板旋转角速度的重瓦斯报警方法，一旦监测到挡板旋转角速度达到其整定值，即刻进行重瓦斯报警，为重瓦斯故障报警提供了新的整定方法，解决了纯机械式瓦斯继电器保护可靠性较低的问题。

1 瓦斯继电器挡板旋转角速度理论分析

变压器正常运行时，瓦斯继电器挡板处于静止状态；当变压器内部绝缘油裂解产生的瓦斯气体量较小时，挡板幅度小，旋转角速度的值较小；当变压器内部产生大量瓦斯气体进行油流涌动冲击时，挡板快速转动接触下干簧片触发重瓦斯报警，此时挡板角速度值较大。故通过挡板旋转角速度的大小便可推断出变压器内部故障能量高低。

为探究瓦斯继电器挡板在油流冲击下的旋转角速度，本文以 QJ1-80 型瓦斯继电器为研究对象，如图 1 所示。

瓦斯继电器挡板受力如图 2 所示。对其进行力学结构简化分析，将挡板绕转轴的运动视为刚体定轴转动，其中动作时所受力矩包括重力矩、弹簧张紧力矩和冲击力矩。

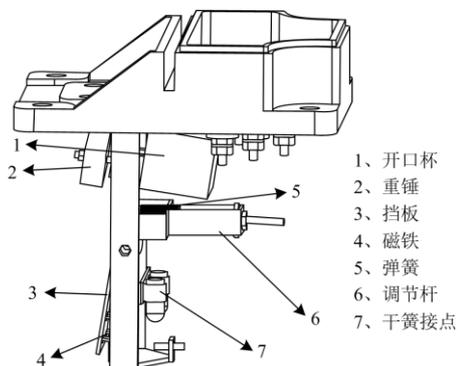


图 1 QJ1-80 型瓦斯继电器

Fig. 1 Baffle of QJ1-80 gas relay

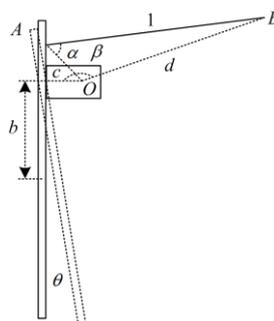


图 2 挡板结构分析简图

Fig. 2 Analysis of the baffle structure

挡板所受总力矩 M_t ^[23]为

$$M_t = M_f - M_s - M_g \quad (1)$$

式中： M_f 为油流冲击力矩； M_s 为弹簧张紧力矩； M_g 为重力矩。

挡板转动的角速度 ω_n 的计算公式为

$$\omega_n = \omega_{n-1} + \frac{M_t}{I} \Delta t \quad (2)$$

式中： ω_{n-1} 为前一时刻角速度； I 表示挡板沿转轴的惯量； Δt 为时间步长。

由式(2)可知，挡板的旋转角速度随着油流冲击力矩的增大而增大，随着弹簧张紧力矩和重力矩的增大而减小。当变压器发生重瓦斯故障时，油流冲击力矩越大，挡板旋转角速度越大。换言之，变压器重瓦斯故障越严重，油流冲击力矩越大，挡板旋转角速度越大。故通过判断挡板旋转角速度值进行重瓦斯报警的方案可行。

2 智能瓦斯继电器及挡板特性试验台研制

2.1 新型瓦斯继电器

为实现对挡板旋转角速度的监测，研制了一款智能瓦斯继电器设备，包括可实时输出挡板转角的

新型瓦斯继电器及智能控制仪。其中新型瓦斯继电器使用 TBC06DS5 闭环霍尔电流传感器替换瓦斯继电器挡板后的一组干簧管，并通过监测霍尔集成电路的输出电压得到挡板转角，在不影响原有重瓦斯信号测量方式的同时，实现了对挡板旋转角速度的监测。其测量方式如图 3 所示。

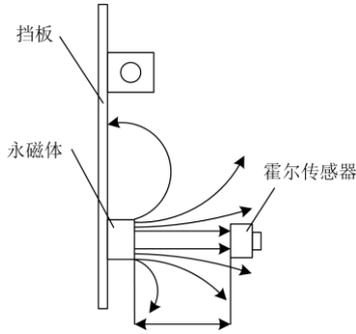


图 3 挡板位移测量原理

Fig. 3 Baffle displacement measurement principle

基于上述原理的新型瓦斯继电器如图 4 所示。该继电器可同时输出挡板动作信号和重瓦斯动作信号。且经多次试验验证，其性能稳定可靠，可在实际工况中应用。



图 4 新型瓦斯继电器

Fig. 4 New type gas relay

2.2 智能控制仪

新型瓦斯继电器通过 PCIE 采集卡将霍尔传感器采集到的数据，再通过降噪、滤波，实时传入智能控制仪中，并对其进行分析。智能控制仪如图 5 所示。



(a) 正面



(b) 背面

图 5 智能控制仪

Fig. 5 Intelligent controller

智能控制仪可实时显示继电器运行状态和挡板转角，并评估出变压器绝缘油油流速度，还可对比历史数据波形图像，进行深入的故障分析。

2.3 挡板特性分析试验台

瓦斯继电器挡板特性分析试验台模型如图 6 所示。试验台主要由模拟油流涌动发生装置、结构本体和监测系统 3 部分组成，实物如图 7 所示。试验台本体主要包括：空气压缩机、空气助流器、脉动流发生装置、新型瓦斯继电器、蝶阀和胶囊式储油柜[24]。

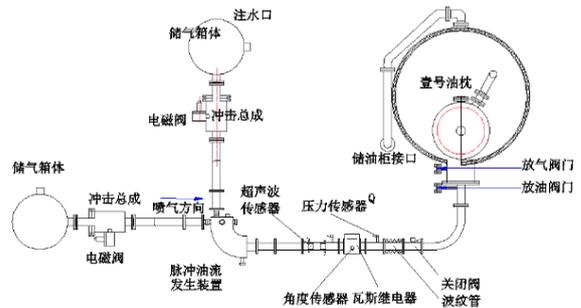


图 6 试验台模型

Fig. 6 Model of test bench



图 7 瓦斯继电器挡板特性分析试验台

Fig. 7 Gas relay characteristic analysis test bench

其原理为使用空气助流器模拟重瓦斯故障产生的不同能量的气流，气流冲击内部油流，油流涌动冲击瓦斯继电器挡板，并结合压力传感器、流速传感器及新型瓦斯继电器测量出管道压强、流速、重

瓦斯信号以及挡板转角。

3 不同激励压强下瓦斯继电器挡板旋转角速度试验研究

设置空气助流器的激励压强分别为 0.10 MPa、0.12 MPa、0.14 MPa、0.16 MPa、0.18 MPa 进行试验, 得到涌油流的流速、重瓦斯信号与挡板转角如图 8 所示。

由图 8 可知, 在 0.10 MPa 的激励压强下, 挡板未发生转动; 在 0.12 MPa 激励压强下, 涌油流速度增加, 冲击挡板发生转动并触发下干簧片触点, 启动重瓦斯跳闸; 且随着激励压强的增加, 重瓦斯动作愈发迅速, 即挡板旋转角速度也愈发增大。

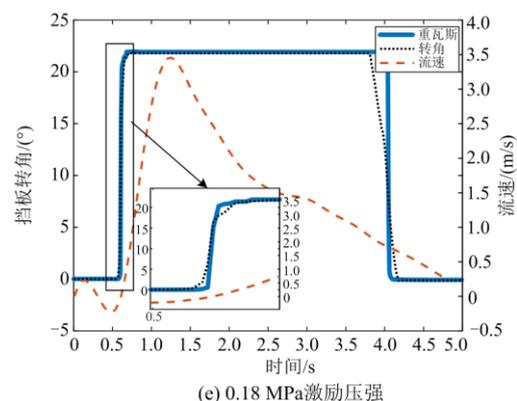
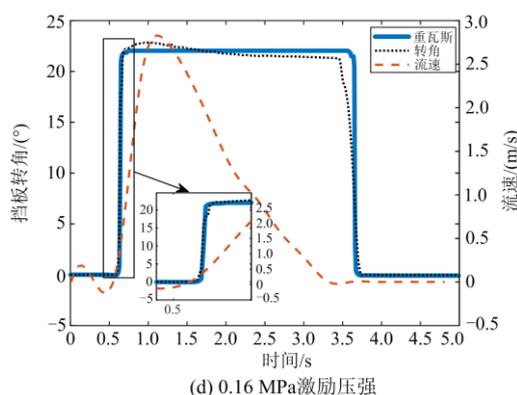
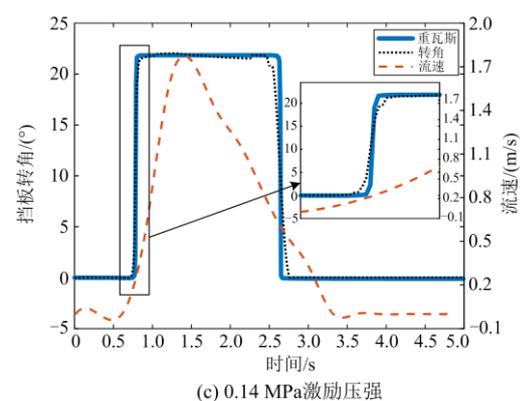
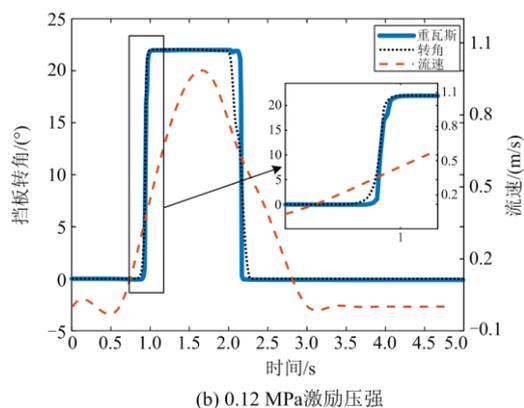
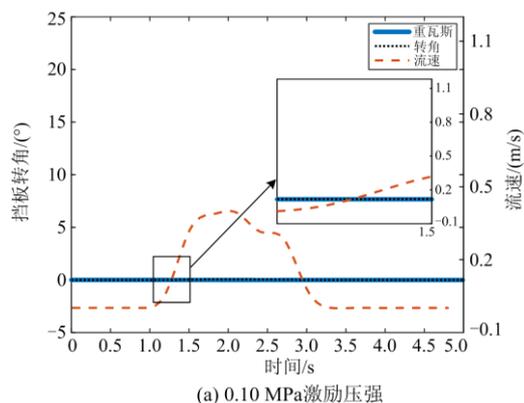


图 8 不同激励压强下的流速、重瓦斯信号及挡板转角
Fig. 8 Flow rate, heavy gas signal and baffle angle under different excitation pressures

由公式 $\omega = \Delta\theta/\Delta t$ (其中 ω 为挡板的角速度, $\Delta\theta$ 为前后转角差, Δt 为时间步长) 计算得到不同激励压强下挡板从静止到最大开合角状态下的旋转角速度值, 如图 9 所示。且为方便观察不同激励压强下挡板最大角速度值及其发生时间, 提取发生重瓦斯动作的 4 组实验数据, 如表 1 所示。

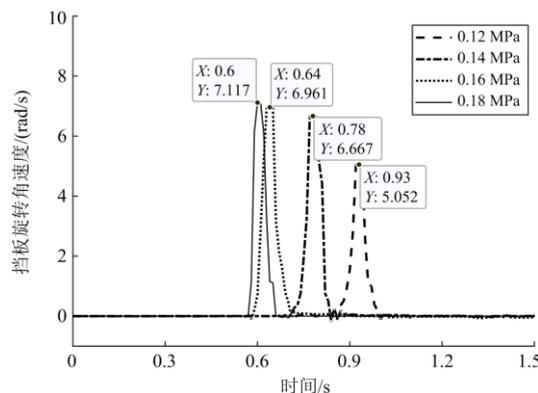


图 9 不同激励压强下挡板旋转角速度值
Fig. 9 Rotational angular velocity of baffle under different excitation pressures

表 1 不同激励压强下挡板触发下干簧片过程中的最大角速度值及发生时间

Table 1 Maximum angular velocity values and occurrence times during baffle triggering of the lower reed at different excitation pressures

参数	激励压强/MPa			
	0.12	0.14	0.16	0.18
最大角速度值/(rad/s)	5.052	6.667	6.961	7.117
发生时间/s	0.93	0.78	0.64	0.60

由图 9 及表 1 可知, 随着激励压强即模拟重瓦斯故障能量的增大, 挡板最大角速度值呈递增状态; 且激励压强越大, 挡板触发下干簧片触点的时间越短, 并趋近于反比关系。因此, 当变压器出现重瓦斯故障时, 通过判断挡板的旋转角速度值进而反映变压器是否出现重瓦斯故障。

4 不同冲击能量下瓦斯继电器挡板旋转角速度的仿真分析

4.1 计算模型及边界条件设置

本文以 QJ1-80 型瓦斯继电器为例进行仿真分析, 创建三维等比模型, 如图 10 所示。再通过 ANSYS 平台下的 DesignModeler 模块对该三维模型进行流体域的抽取。

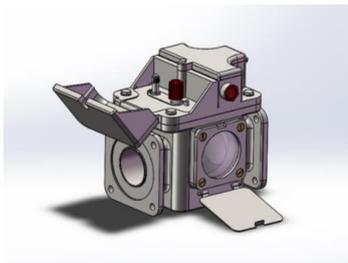


图 10 三维几何模型

Fig. 10 Three-dimension geometrical modeling

通过混合网格技术对瓦斯继电器进行流体域分析, 如图 11 所示。且为保证挡板在动作过程中计算的精度, 在网格处理时需将此处的网格进行加密处理, 加密后的动网格计算域如图 12 所示^[25]。

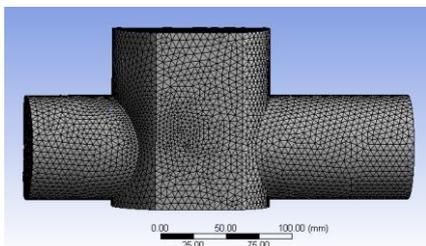


图 11 流体域网格划分

Fig. 11 Fluid domain meshing

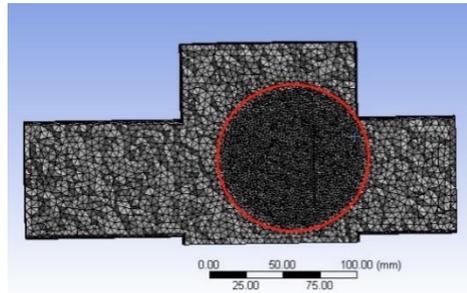


图 12 动网格计算域的网格处理

Fig. 12 Grid processing in the dynamic grid computing domain

仿真选用不同激励压强试验中管道脉动油流的流速作为入口边界条件, 即将试验所得数据进行多项式拟合得到速度函数, 输入到 Fluent 软件中。由于变压器中的绝缘油不可压缩, 管道内压强无法确定, 遂以 outflow 为边界条件。流场计算采用 SIMPLEC 算法, 设置收敛残差为 10^{-6} 。

4.2 仿真结果分析

在 0.10 MPa 激励压强下, 仿真过程中挡板未发生动作, 与试验结果相同, 其速度云图如图 13 所示。在 0.12~0.18 MPa 激励压强下, 仿真结果与试验结果也较为吻合。在 0.12 MPa 和 0.18 MPa 激励压强下, 其云图如图 14 和图 15 所示。

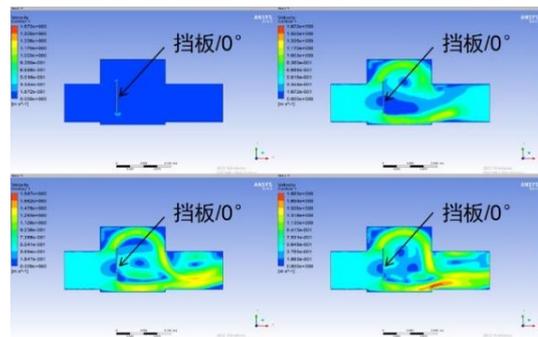


图 13 0.10 MPa 挡板速度云图

Fig. 13 0.10 MPa baffle velocity cloud image

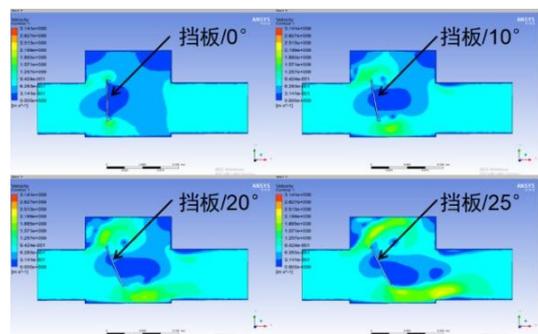


图 14 0.12 MPa 挡板速度云图

Fig. 14 0.12 MPa baffle velocity cloud image

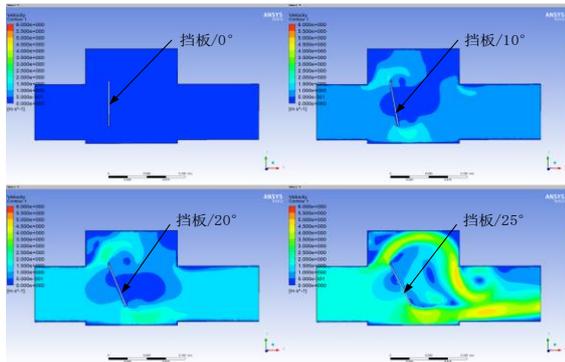
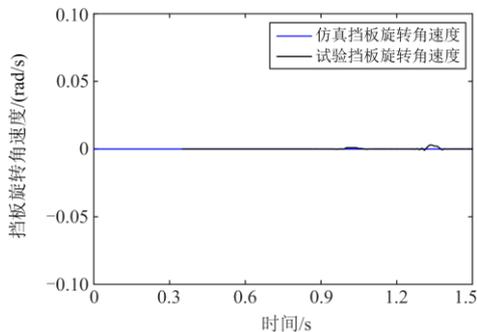


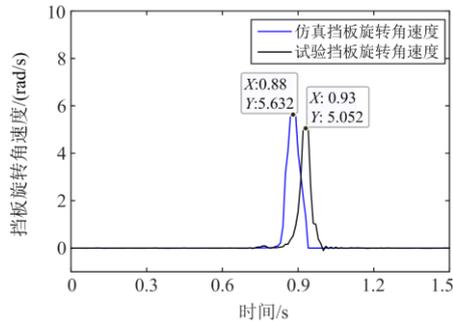
图 15 0.18 MPa 挡板速度云图

Fig. 15 0.18 MPa baffle velocity cloud image

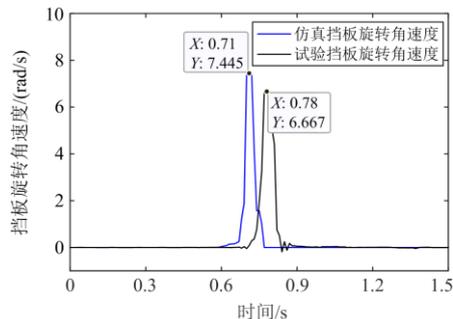
由公式 $\omega = \Delta\theta/\Delta t$ 将仿真所得数据进行计算, 得到仿真过程中挡板从静止到最大开合角状态下的旋转角速度值。并将不同激励压强下仿真与试验的旋转角速度值进行整理绘制, 如图 16 所示。



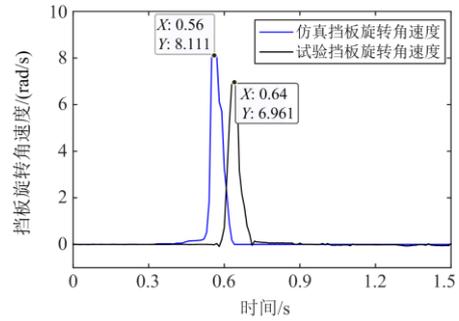
(a) 0.10 MPa 激励压强



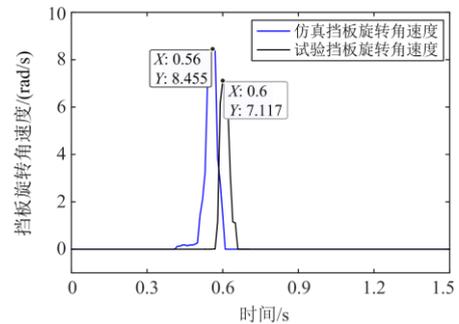
(b) 0.12 MPa 激励压强



(c) 0.14 MPa 激励压强



(d) 0.16 MPa 激励压强



(e) 0.18 MPa 激励压强

图 16 不同激励压强下仿真与试验挡板旋转角速度曲线

Fig. 16 Simulation and test action curves of baffle under different excitation pressures

将图 16 中不同激励压强下仿真与试验挡板旋转角速度值与其发生时间进行整理分析, 如表 2 所示。并将不同激励压强下仿真与试验过程中挡板的最大角速度值与其发生时间绘制为柱状图, 如图 17 所示。

由表 2 及图 17 数据可得, 随着激励压强的增加, 试验与仿真的挡板最大角速度值逐渐增加; 相同激励压强下, 相较于试验过程, 仿真中挡板达到最大角速度值的时间更少, 即挡板以更少的时间触发下干簧片触点。当激励压强为 0.12 MPa 时, 试验中挡板最大旋转角速度值为 5.052 rad/s, 此时挡板后的永磁体通过磁吸作用于干簧片, 使得触点接通, 发出重瓦斯报警的信号, 由此可得, 油流涌动使挡

表 2 不同激励压强下仿真与试验挡板旋转最大角速度值及发生时间

Table 2 Simulation and test time T1 and T2 data under different excitation pressures

参数	激励压强/MPa			
	0.12	0.14	0.16	0.18
试验最大角速度值/(rad/s)	5.632	7.445	8.111	8.455
仿真最大角速度值/(rad/s)	5.052	6.667	6.961	7.117
试验发生时间/s	0.88	0.71	0.56	0.56
仿真发生时间/s	0.93	0.78	0.64	0.6

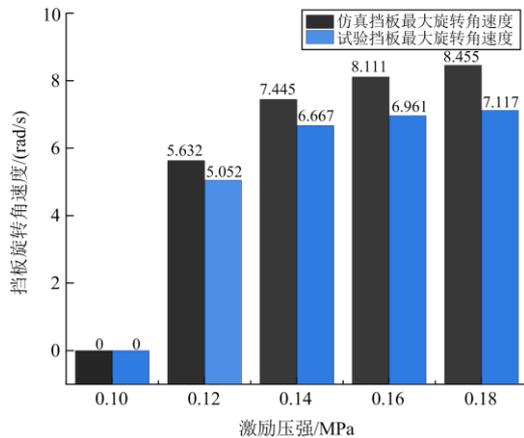


图 17 仿真与试验挡板最大角速度值与其发生时间
Fig. 17 The maximum angular velocity of baffle and its occurrence time are simulated and tested

板旋转角速度达到 5.052 rad/s 时为重瓦斯报警的阈值, 故通过监测挡板角速度是否达到整定值进而进行重瓦斯报警方法可行。

5 总结

本文提出了一种基于瓦斯继电器挡板旋转角速度的重瓦斯报警方法, 通过模拟不同故障程度下油流涌动对瓦斯继电器挡板旋转角速度进行仿真计算和试验研究, 可得出如下结论:

1) 随着变压器重瓦斯故障程度和故障能量的增大, 发生重瓦斯动作时的瓦斯继电器挡板旋转角速度也随之增加。当故障发展到一定程度, 旋转角速度逐渐增加并趋于稳定。

2) 通过判断瓦斯继电器挡板角速度大小进而及时进行重瓦斯报警, 提高了重瓦斯报警的灵敏度, 并为重瓦斯故障报警提供了新的整定和识别方法。

3) 当发生重瓦斯故障后, 挡板转动至最大角度触到下干簧片触点, 启动重瓦斯跳闸后, 可通过监测到的挡板旋转角速度数据进行后续的重瓦斯故障程度的判定。

参考文献

- [1] 王忠毅, 严平. 主变轻瓦斯保护动作后的原因分析及处理[J]. 高电压技术, 2005, 31(5): 87-88.
WANG Zhongyi, YAN Ping. Analysis of fault after operation of light gas relay protection of transformer[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(5): 87-88.
- [2] 张伟群. 变压器瓦斯保护动作的原因与判断[J]. 电工技术杂志, 2001(1): 54.
- [3] 李振. 几起变压器重瓦斯保护误动原因分析及预防措施探究[J]. 东北电力技术, 2019, 40(12): 42-44.

- LI Zhen. Analysis and prevention of several mistakes in transformer heavy gas protection measure[J]. Northeast Electric Power Technology, 2019, 40(12): 42-44.
- [4] 侯文君, 曲光磊, 郑晓露, 等. 气体继电器误动作仿真振动分析[J]. 变压器, 2018, 55(6): 44-48.
HOU Wenjun, QU Guanglei, ZHENG Xiaolu, et al. Vibration analysis of gas relay misoperation[J]. Transformer, 2018, 55(6): 44-48.
- [5] 李雷, 王俊波, 徐鑫, 等. 防止紧凑型变压器重瓦斯误动作的仿真研究[J]. 高压电器, 2017, 53(9): 186-191, 197.
LI Lei, WANG Junbo, XU Xin, et al. Simulation research for preventing malfunction of heavy gas in compact transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(9): 186-191, 197.
- [6] 赵铁羽, 周君杰, 朱婷, 等. 35 kV 主变有载分接开关重瓦斯误动作原因分析[J]. 电工技术, 2019, 4(5): 64-65.
ZHAO Tiewu, ZHOU Junjie, ZHU Ting, et al. Cause analysis on heavy gas misoperation of on-load tap changer of 35 kV main transformer[J]. Electric Engineering, 2019, 4(5): 64-65.
- [7] 吴嘉竣. 500 kV 变电站主变重瓦斯误动作情况分析 & 改进措施研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
WU Jiajun. Analysis of power transformer Buchholz relay unwanted operation of protection and improvement measurements of 500 kV substations[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [8] 咸日常, 陈蕾, 耿凯, 等. 接地变压器低压绕组匝间短路故障的电磁特征研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 74-82.
XIAN Richang, CHEN Lei, GENG Kai, et al. Research on electromagnetic characteristics of short circuit faults in low-voltage windings of grounding transformers[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 74-82.
- [9] 陈蕾, 咸日常, 郑春旭, 等. 系统单相接地故障下接地变压器的运行特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 56-64.
CHEN Lei, XIAN Richang, ZHENG Chunxu, et al. Analysis of the operational characteristics of a grounding transformer when there is a single-phase grounding fault of the system[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 56-64.
- [10] 何先华, 张远鹏, 崔桂兴, 等. 基于回归算法的变压器故障检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(21): 132-139.
HE Xianhua, ZHANG Yuanpeng, CUI Guixing, et al. Research on transformer fault detection method based on a regression algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(21): 132-139.

- [11] 俞斌, 胡卓然, 李黎, 等. 10 kV 大容量配电变压器差动保护配置应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(22): 98-104.
YU Bin, HU Zhuoran, LI Li, et al. Differential protection configuration of a 10 kV large capacity distribution transformer[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22): 98-104.
- [12] 尹项根, 曹文斌, 潘远林, 等. 高阻抗电力变压器涌流特性及其对保护影响的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 1-11.
YIN Xianggen, CAO Wenbin, PAN Yuanlin, et al. Inrush current characteristic of high-impedance transformers and its impact on protective relays[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 1-11.
- [13] 王鹤, 栾钧翔. 变压器的电力电子化演进及其对电压稳定影响综述[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 171-187.
WANG He, LUAN Junxiang. Summary of power electronic evolution of transformer and its influence on voltage stability[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 171-187.
- [14] 曹救, 任翔, 胡露, 等. 变压器有载分接开关故障浅析及重瓦斯动作隐患处理[J]. 电气时代, 2020, 4(9): 43-44.
- [15] 王耀龙, 沈龙, 李昊, 等. 变压器重瓦斯保护动作后的原因分析与诊断方法[J]. 电工电气, 2021, 4(5): 27-31.
WANG Yaolong, SHEN Long, LI Hao, et al. Cause analysis and diagnosis method discussion of transformer heavy gas protection action[J]. Electrotechnics Electric, 2021, 4(5): 27-31.
- [16] 李胜男, 韩冬冬, 周鑫, 等. 基于 CFD 的瓦斯继电器反向油流动作研究[J]. 能源研究与信息, 2020, 36(4): 222-227.
LI Shengnan, HAN Dongdong, ZHOU Xin, et al. Research on the reverse oil flow action of Buchholz relay by CFD[J]. Energy Research and Information, 2020, 36(4): 222-227.
- [17] 章裕文. 主变区外故障重瓦斯保护误动作原因分析与预控措施[J]. 中国高新技术企业, 2014(32): 45-46.
- [18] 杨贤, 柯春俊, 周丹. 防止 500 kV 壳式变压器重瓦斯保护误动策略研究及应用[J]. 变压器, 2015, 52(3): 60-65.
YANG Xian, KE Chunjun, ZHOU Dan. Research on prevention strategy and its application for heavy gas protection malfunction of 500 kV shell-type transformers[J]. Transformer, 2015, 52(3): 60-65.
- [19] 李娟. 550 kV 主变压器瓦斯继电器故障分析与参数优化[J]. 水电与新能源, 2017(3): 20-22.
LI Juan. Analysis of a gas relay protection mis-operation of 550 kV main transformer and parameter optimization[J]. Hydropower and New Energy, 2017(3): 20-22.
- [20] 刘明亮. 瓦斯继电器流场理论研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.
LIU Mingliang. Theoretical study of gas relay flow field[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016.
- [21] 兰昊. 基于 CFD 的瓦斯继电器流场理论研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
LAN Hao. Research on flow field theory of gas relay based on CFD[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.
- [22] 万书亭, 韦教玲, 吕鹏瑞, 等. 基于瓦斯继电器挡板转角特性的油浸式变压器运行状态监测方法[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 417-423.
WAN Shuting, WEI Jiaoling, LÜ Pengrui, et al. A method for monitoring operation status of oil-immersed transformer based on the baffle angle characteristic of gas relay[J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 417-423.
- [23] 王学羽. 挡板型瓦斯继电器流速间接试验计算公式的修正[J]. 电气试验, 2000(3): 42-43.
- [24] 江丹宇, 吕鹏瑞, 韦教玲, 等. 瞬态油流冲击下气体继电器动作特性试验研究[J]. 变压器, 2021, 58(2): 57-61.
JIANG Danyu, LÜ Pengrui, WEI Jiaoling, et al. Study on action characteristics of gas relay under transient oil flow shock[J]. Transformer, 2021, 58(2): 57-61.
- [25] 兰昊, 张思青, 于凤荣, 等. 基于 CFD 对 BF 型双浮球瓦斯继电器油流整定值的校验[J]. 中国电力, 2016, 49(增刊 1): 1-5.
LAN Hao, ZHANG Siqing, YU Fengrong, et al. CFD-based check on the oil flow setting values of BF type double-float Buchholz relay[J]. Electric Power, 2016, 49(S1): 1-5.

收稿日期: 2021-12-20; 修回日期: 2022-07-01

作者简介:

万书亭(1970—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电气设备状态监测与故障诊断技术研究; E-mail: 13582996591@139.com

张泽翰(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事电气设备状态监测与故障诊断技术研究;

李少鹏(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事电气设备状态监测与故障诊断技术研究;

豆龙江(1988—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 主要从事电气设备状态监测与故障诊断技术研究。E-mail: doulongjiang@126.com

(编辑 魏小丽)