

DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.202308013



# 考虑数字孪生的电力变压器磁场与电气参数可视化分析

叶志军<sup>1</sup>, 贾灏<sup>1</sup>, 张钟炼<sup>1</sup>, 罗继亮<sup>1,2</sup>

(1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 福建省电机控制与系统优化调度工程技术研究中心, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 首先,根据变压器的实物,采用 MATLAB/Simulink 软件搭建变压器的仿真模型;然后,选择通用串行总线(USB)采集卡作为采集设备,采用 Labview 软件设计出相应的采集程序;最后,在多种联合仿真技术中,选择仿真接口工具箱(SIT)作为最合适的联合仿真方法,并在联合仿真程序中加入报警程序。结果表明:该数字孪生平台具有准确性和可靠性,可运用于变压器匝间短路的检测。

**关键词:** 数字孪生; 数据采集; 联合仿真; 电力变压器; 匝间短路

**中图分类号:** TM 407

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-5013(2024)01-0086-12

## Visualization Analysis of Magnetic Field and Electrical Parameters of Power Transformer Considering Digital Twin

YE Zhijun<sup>1</sup>, JIA Hao<sup>1</sup>, ZHANG Zhonglian<sup>1</sup>, LUO Jiliang<sup>1,2</sup>

(1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Fujian Engineering Research Center of Motor Control and System Optimal Schedule, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Firstly, according to the physical object of the transformer, using MATLAB/Simulink software to build a simulation model of transformer. Then, a universal serial bus (USB) acquisition card is selected as the acquisition device, and the corresponding collection program using Labview software is designed. Finally, the simulation interface toolkit (SIT) is selected as the most suitable co-simulation method in various joint simulation technologies, and the alarm program is added to the co-simulation program. The results show that the digital twin platform has accuracy and reliability, and can be applied to the detection of turn-to-turn short circuit of transformer.

**Keywords:** digital twin; data acquisition; co-simulation; power transformer; turn-to-turn short circuit

电力系统是所有工业系统里规模最巨大、结构最复杂的人造复合系统,是人类工程科学史上的辉煌成就之一<sup>[1]</sup>。变压器作为电力系统不可或缺的电力设备,其正常运行对电力系统的稳定性起着不可或缺的作用,当变压器发生故障时,与其相关的电力线路用电负载都将受到巨大的影响,可能引发安全事故,导致巨大的经济损失。因此,实时监测变压器的运行状况,并提前预测变压器事故对提高电力系统的稳定性起到重要的作用<sup>[2]</sup>。

国内外学者已对变压器运行状态检测展开了广泛而深入的研究<sup>[3-12]</sup>。这些变压器故障检测方法都

**收稿日期:** 2023-08-29

**通信作者:** 叶志军(1976-),男,副教授,博士,主要从事电磁场数值分析、大型发电机内部故障仿真及变压器饱和特性的研究。E-mail:459888566@qq.com。

**基金项目:** 福建省自然科学基金资助项目(2020J01063)

可以作为判断变压器工作状况的依据,但这些方法都是从单一角度进行故障检测,而变压器发生故障往往是多种故障结合在一起的结果。因此,为了将这些方法集成到一个平台系统,必须搭建一个能够反映实际变压器运行状况的孪生体。从变压器实际运行情况来看,约 60%~70%的变压器内部故障是由于绕组机械磨损或者匝间电压高于绝缘耐受水平造成绝缘损坏所致。目前,工程中针对变压器匝间短路的故障检测普遍采用差动保护方法,但当变压器发生轻微匝间短路时,短路匝的故障电流较小,差动保护采集到的绕组端电流变化特征不明显,对此类轻微、渐变的匝间短路故障往往不能及时灵敏地识别,保护拒动的情况时有发生。如果任由此发展,可能会引发更严重的层间短路及相间短路等故障,造成变压器的严重损坏<sup>[13]</sup>。因此,如何对变压器内部匝间短路,特别是轻微匝间短路故障进行有效、精确的判断及预测,进而对变压器进行精准的故障检修,这对变压器运行的可靠性及经济性意义重大。

数字孪生作为实现物理空间与虚拟空间交互融合的最佳途径,本质上是实物的物理仿真模型,具备接收来自现实实体的数据并实时不断更新的能力,从而与物理对象在全生命周期中保持一致<sup>[14-15]</sup>。因此,构建变压器的数字孪生,在虚拟环境中建立模型对于操作者监控变压器的运行状况大有裨益<sup>[16-17]</sup>。目前,学者对于数字孪生在电力系统中的应用展开了深入的研究。文献[16]提出数字孪生在核电厂主控室设计的应用。文献[18-19]提出数字孪生技术在电网中的实际应用和展望。文献[20]提出一种秒级响应电网在线分析软件平台。上述研究着重介绍了应用部分,但对于如何搭建一个数字孪生平台并没有较为详细的介绍。基于此,本文对采用数字孪生的电力变压器磁场与电气参数进行可视化分析。

# 1 数字孪生平台

## 1.1 数字孪生平台的定义

数字孪生平台是集合传感器技术、5G 传输技术、物联网技术、虚拟现实技术和机器学习等高新技术搭建的一个具有可视化、人机协同功能的自主优化计算平台<sup>[17]</sup>。操作者能够通过虚拟现实技术在办公室身临其境,并对实物进行远程操作。

电力系统数字孪生平台构建完成后,操作者若要对电力进行调度,只需通过数字孪生平台上显示的变电站数据便可进行决策,从而提高数字孪生智能辅助决策的能力<sup>[18]</sup>。

## 1.2 数字孪生平台的特点

数字孪生平台具有以下 3 个特点。1) 高准确性。虚拟环境从现实实物构成、运行形态、行为规则等多层次、多角度、多属性地对现实实物进行孪生模拟。2) 可扩展性。虚拟环境模型可随着虚拟环境的自我推演或现实实物的运行形态进行分解、集成、粘贴、修正和去除等操作。3) 交互性。虚拟环境模型与现实实物都有接口和规范定义,在不同虚拟环境模型之间、不同现实实物终端之间、虚拟环境模型与现实终端之间能够实现通信交互。

## 1.3 数字孪生的实现

数字孪生平台原理图,如图 1 所示。将 Labview 软件和 MATLAB/Simulink 软件进行联合编程,充分发挥各自的优点<sup>[20]</sup>,建立一个图形交互界面优良、计算能力强大的可视化电力变压器数字孪生平台,并将物理实体的电磁参数和电气参数变化过程通过软件仿真实时呈现。数字孪生的实现主要有以下 4 个步骤。

1) 构造能精确反映实物的仿真模型。仿真模型的精确度要足够高,以便通过采集设备传输数据给该模型时能够准确无误地表现出实物的实际情况。文中主要关注电气参数和磁场参数,故仿真模型主要据此建立。

2) 设计变压器参数采集程序。若没有精准度高的采集程序,仿真模型的准确性也会大打折扣,所以采集程序必须能够快速、准确地反映数据<sup>[18]</sup>。

3) 将采集程序和仿真模型进行数据通信。拥有精确的仿真模型和快速准确的采集程序固然重要,但

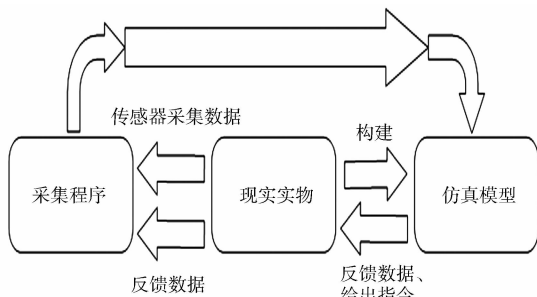


图 1 数字孪生平台原理图

Fig. 1 Schematic diagram of digital twin platform

令其实现数据互通,并保证互通的准确性和快速性也是重中之重。如果仿真模型和采集程序的性能都相当优异,但两者之间的通信却出现问题,那么实用性也将大为降低。因此,寻找最合适的通信方法是建立数字孪生平台的最后一步,也是重要的一步。

4) 将数字孪生平台应用于解决实际问题中。选择的案例为变压器匝间短路的检测,将变压器匝间短路相关的检测手段与数字孪生平台的实时检测量进行对比,以验证数字孪生平台检测变压器匝间短路的可靠性。

## 2 电力变压器数字孪生平台的建立

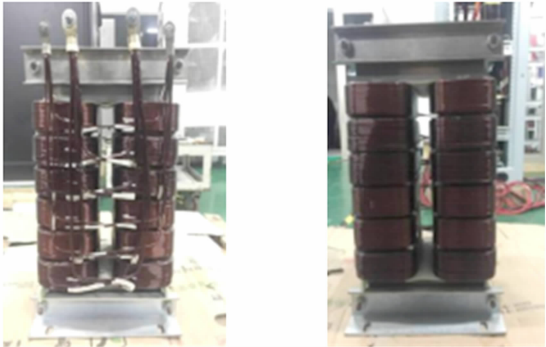
### 2.1 电力变压器模型

2.1.1 电力变压器的相关参数 选用单相变压器,高、低压绕组各 6 包,变压器铁芯由 0.35 mm 的硅钢片冲叠而成。

变压器参数,如表 1 所示。表 1 中: $P_r$  为额定功率; $f_r$  为额定频率; $U_{1,r}$  为一次侧额定电压; $U_{2,r}$  为二次侧额定电压; $I_{1,r}$  为一次侧额定电流; $I_{2,r}$  为二次侧额定电流; $\epsilon_s$  为短路电压率; $\epsilon_n$  为空载电流率; $N_1$  为一次侧匝数; $N_2$  为二次侧匝数。变压器外观,如图 2 所示。

表 1 变压器参数  
Tab. 1 Parameters of transformer

参数	有效值
$P_r/\text{kW}$	14
$f_r/\text{Hz}$	50
$U_{1,r}/\text{V}$	104
$U_{2,r}/\text{V}$	240
$I_{1,r}/\text{A}$	134.6
$I_{2,r}/\text{A}$	58.3
$\epsilon_s/\%$	6
$\epsilon_n/\%$	4
$N_1$	42
$N_2$	97



(a) 正面 (b) 反面

图 2 变压器外观

Fig. 2 Appearance of transformer

2.1.2 变压器磁场的计算 电磁学基本公式为

$$\Phi = -\frac{1}{N} \int u dt, \tag{1}$$

$$\Phi = \int B ds, \tag{2}$$

$$B = \mu H. \tag{3}$$

式(1)~(3)中: $\Phi$  为磁通; $N$  为变压器绕组匝数; $u$  为瞬时电压; $t$  为时间; $B$  为磁感应强度; $s$  为与磁场方向垂直的平面的面积; $H$  为磁场强度; $\mu$  为磁导率。由式(1)可得变压器一、二次侧的磁通  $\Phi_1, \Phi_2$ , 因损耗的存在,  $\Phi_1 \neq \Phi_2$ ; 由式(2)可得磁感应强度  $B = f(t, r)$ , 其中,  $r$  为某点离铁芯中心的距离; 由式(3)可得磁场强度  $H$ 。

在实际中,变压器可能会工作在饱和状态,此时,电压和电流都会产生相应的畸变,由原来的正弦波变成尖顶波。为了能够真实反映变压器的运行状况,变压器需采用饱和变压器模型,通过 Flux 软件对该变压器进行建模,硅钢片型号为 35H250。

硅钢片磁化曲线,如图 3 所示。

2.1.3 电力变压器模型的建立 采用 MATLAB/Simulink 软件对变压器模型进行仿真。

变压器模型,如图 4 所示。变压器模型包含了电气参数

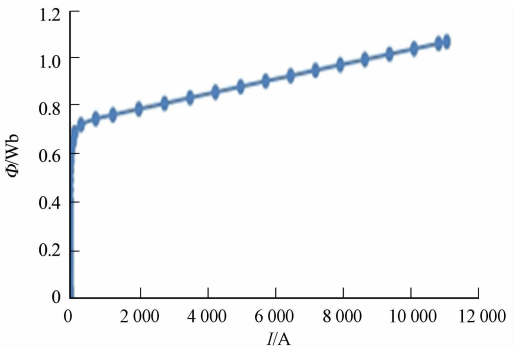


图 3 硅钢片磁化曲线

Fig. 3 Magnetization curve of silicon steel sheet

及磁场参数的计算;磁场计算模型根据式(1)进行模型搭建;积分部分通过 Simulink 软件的积分模块实现;仿真接口工具箱(SIT)探针将所接模块的数据通过 SIT 工具包传送给采集程序;均方根值(RMS)模块用于求解波形有效值。

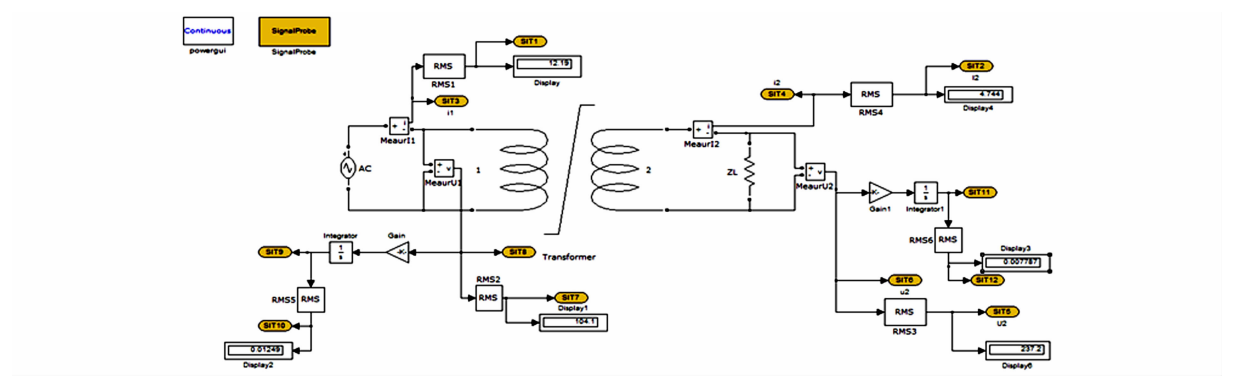


图 4 变压器模型

Fig. 4 Transformer model

变压器模型带载时,令电压峰值为  $104\sqrt{2}$ ,负载带  $4\ \Omega$  电阻,仿真时间设置为 1 s。带载情况波形图,如图 5 所示。

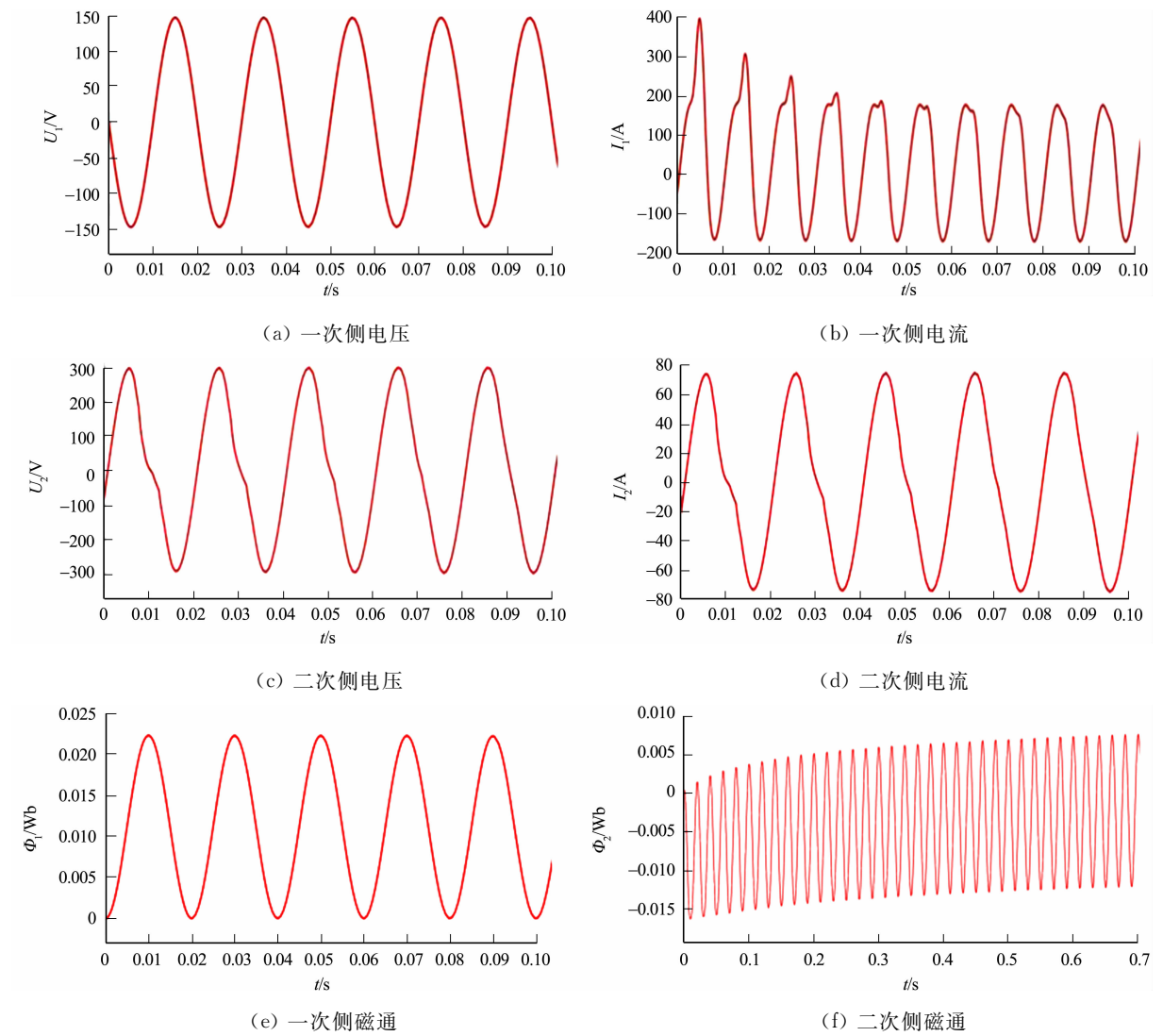


图 5 带载情况波形图

Fig. 5 Waveform diagrams of load condition

由图 5 可知:当电源刚接通时,会产生巨大的冲击电流,二次侧电压也会在刚开始的几个周期发生震荡;当负载带  $4\ \Omega$  电阻,变压器未饱和,磁通为正弦波形时,所对应的电流也为正弦波形;图 5(e),(f)因横坐标尺度不同导致波形不同。

2.2 采集程序

2.2.1 采集卡的工作原理 USB 采集卡通过输入端口接收外部信号,再通过数模转换器将连续模拟信号分割为离散的数字量,采集卡内部处理器对数字信号进行采样、滤波等处理,处理后的信号通过 USB 接口传输到计算机,计算机可以使用相应软件对数据进行分析处理。采集卡的工作原理,如图 6 所示。

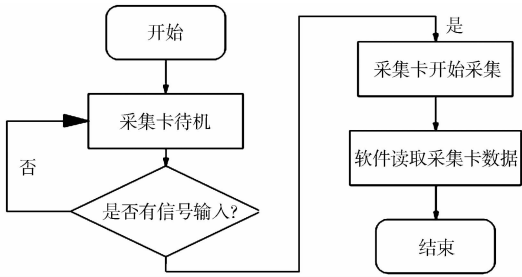


图 6 采集卡的工作原理

Fig. 6 Working principle of acquisition card

2.2.2 采集程序的设计 Labview 软件具有丰富的输入控件和显示控件,通过相关控件可以建立满足项目要求的系统界面。因此,采用 Labview 软件建立数字孪生平台的显示面板。采集程序的设计包括前面板设计和后面板设计。

采用 Labview 软件设置前面板时,程序需要输出变压器一、二次侧的电压、电流和磁通、与功率相关的参数,以及二次侧的负载大小。前面板界面,如图 7 所示。后面板为前面板的元件之间的逻辑关系。后面板界面,如图 8 所示。后面板界面中最主要的部分为顺序结构的第 2 帧,在第 2 帧中,通过调用动态库 `usb_card_V50.dll` 将采集卡读取的 8 个模拟接口数据输出,再根据前面板参数之间的计算关系设计计算程序。

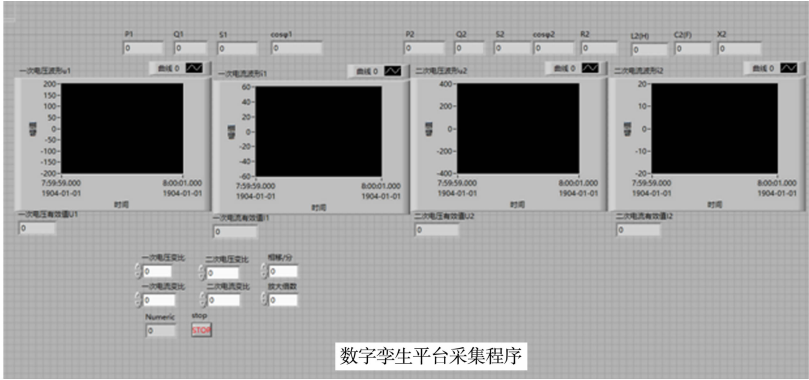


图 7 前面板界面

Fig. 7 Front panel interface

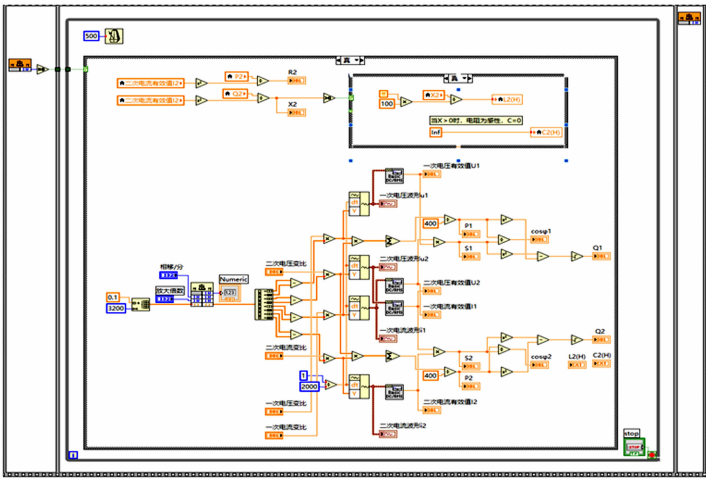


图 8 后面板界面

Fig. 8 Rear panel interface

2.3 数据通信

2.3.1 数据通信的实现方法及选用 根据目前的联合编程方法,数据通信主要有以下 3 种方法:1)基于 MATLAB Script 的联合仿真方法;2) 基于模拟接口工具箱(MIT)的联合仿真方法;3) 基于 SIT 的联合仿



真方法。

MATLAB Script 具有通信简单、容易实现的优点,但是当调用 Simulink 软件运行时,响应速度较慢,所以该方法适合程序简单且不需要使用到 Simulink 的 MATLAB 程序。MIT 调用动态链接库(DLL),运行速度较快,而且能够脱离 MATLAB 单独运行,但缺点是在配置动态库接口的时候比较麻烦,且当 Simulink 构建的模型需要调试时,MIT 节点需要全部重新配置,过程较为繁琐。此外,由于 Simulink 中的饱和变压器模型存在代数环(输出影响输入),但在生成 C 语言代码时不允许存在代数环,因此,不符合要求。SIT 在 Labview 中具有 SIT 配置管理,在生成程序的时候更加简易,且程序会随着模型的改变而动态改变,调试较为方便,但是 SIT 只适用于较低版本的仿真软件,不能运用于高版本的仿真软件。

综上所述,考虑到程序需要符合易调试性和使用到 Simulink,故通过 SIT 实现数据通信是 3 种方法中的最佳解决方案。采用 Labview 的 SIT 配置功能生成的联合仿真程序,如图 9 所示。

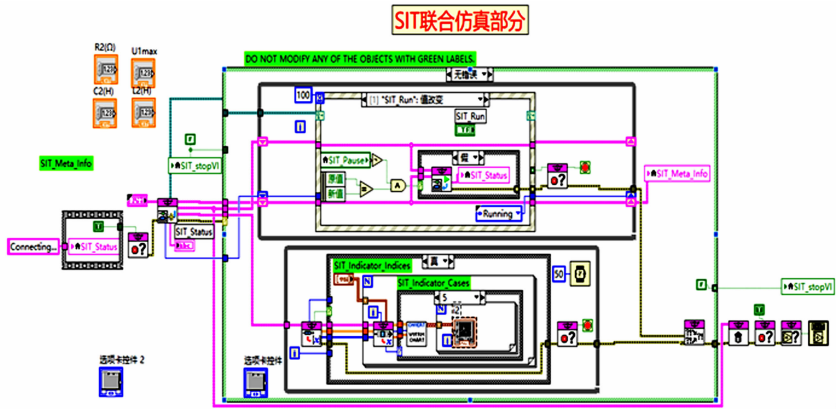


图 9 联合仿真程序  
Fig. 9 Co-simulation program

2.3.2 联合仿真模型 确定了通过 SIT 实现数据通信的方法后,建立联合仿真模型。

1) 采集程序和 Simulink 仿真程序联合仿真。完成 Labview 采集程序 SIT 配置后,对前面板的显示控件位置进行相应调整,以达到更好的视觉效果。联合仿真程序前面板,如图 10 所示。



(a) 仿真部分 (b) 采集部分

图 10 联合仿真程序前面板  
Fig. 10 Front panel of co-simulation program

仿真部分读取采集模块一次侧电压的有效值,改变仿真模型中交流电源的峰值,以达到动态仿真的目的;采集部分最上面一栏用于输入电压、电流的互感器变比。输入电压默认相角为 0,若要改变初相角,只需改变输入控件的数值。图 10 中的两个报警信号灯分别可以实现当电气量超过额定值时报警和当仿真值与实际值相差过大时报警的功能。

2) 报警系统设计。整体报警程序,如图 11 所示。整体报警程序包含 2 个部分。  
第一,超过额定值的报警程序(报警程序 1)。当一、二次侧电压和电流超过额定值时,对变压器的运行具有危害性。因此,当变压器的一、二次侧电压和电流超过额定值时,会进行报警,报警程序 1 的流程图,如图 12 所示。

第二,仿真值与实际值相差过大的报警程序(报警程序 2)。仿真值与实际值相差过大往往是因为变压

器内部发生了故障,因此,需要设置一个报警程序,当仿真值与实际值相差过大时进行报警,并自动更新负载。报警程序 2 的流程图,如图 13 所示。图 13 中: $R$  为电阻; $L$  为电感; $C$  为电容。

当实际值与仿真值相差超过设定值时,将会发出一个信号,使仿真报警灯亮起,并弹出警告对话框,同时给一个信号触发更新仿真模型的顺序结构。首先,暂停 Simulink 模型,再终止 Simulink 模型,之后进入条件结构,当电抗  $X$  大于 0,则为感性负载,当  $X$  小于 0,则为容性负载。计算出相应的电感、电容后,通过局部变量将其输送给 Simulink 的负载,从而使负载更新至最新状态。

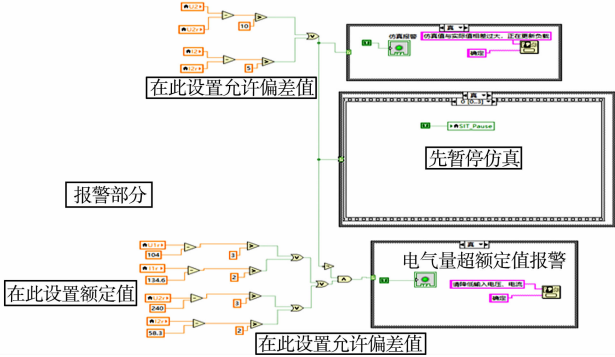


图 11 整体报警程序

Fig. 11 Overall alarm program

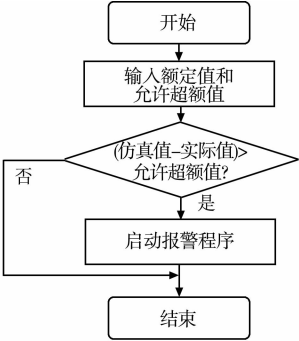
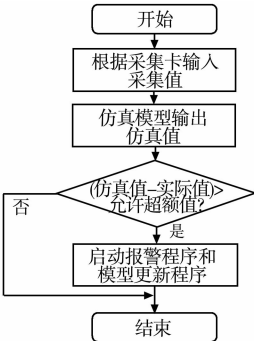
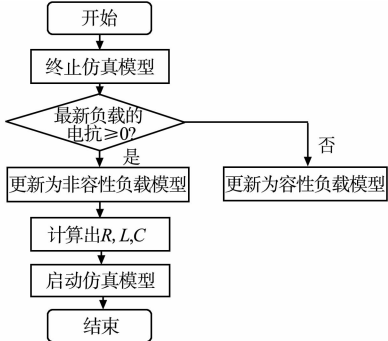


图 12 报警程序 1 的流程图

Fig. 12 Flowchart of alarm program 1



(a) 报警部分



(b) 负载更新部分

图 13 报警程序 2 的流程图

Fig. 13 Flowchart of alarm program 2

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 实验室环境测量

现场实验设施,如图 14 所示。

##### 3.1.1 测量步骤 测量步骤有以下 4 点。

1) 连接相应电气设备,将采集卡通过 USB 数据线和计算机进行连接,若采集卡有一个红灯常亮,表示已经连接。

2) 开启联合仿真程序的启动按钮,将程序的电压和电流互感器变比设置为 1,此时,若另一个红灯闪烁,表明采集卡正在采集数据。由于采集卡存在悬空值,有轻微的干扰,即使没有打开电源,采集程序仍存在较小的电气量。

3) 分别测量互感器的变比,测量多组数据取平均值,将所测最新的电压、电流互感器变比输入程序,再进行测试验证。

4) 对变压器进行电气参数、报警系统、磁场参数的验证。

3.1.2 注意事项 不能同时运行两个测量程序,否则会导致采集卡动态库产生错误,造成采集程序逻辑错误而无法使用。

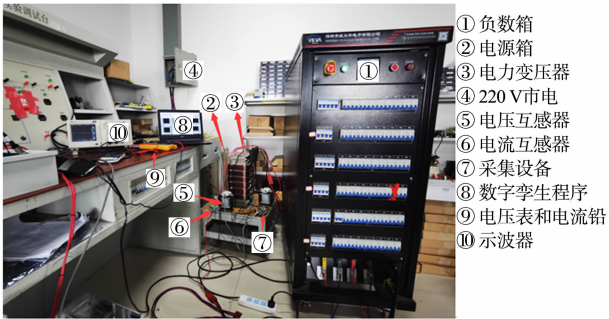


图 14 现场实验设施

Fig. 14 On-site experimental facilities

3.2 程序验证

3.2.1 电气参数验证 1) 空载情况。变压器的空载验证需将变压器高压侧空载,一次侧通交流正弦电压,一次侧电压从 0 依次升高至一次侧额定电压,记录电气参数的实际值、采集值和仿真值。空载情况的电气测量数据,如表 2 所示。表 2 中: $U, I$  分别为电压和电流,下标 r,c,s 分别表示实际值、采集值和仿真值,下标 1,2 分别表示一次侧、二次侧,下文符号含义与此相同。空载情况的电气误差,如表 3 所示。表 3 中: $\delta_{I_1}, \delta_{U_1}, \delta_{I_2}$  分别为空载情况下  $I_1, U_1, I_2$  实际值与仿真值的误差。

表 2 空载情况的电气测量数据

Tab. 2 Electrical measurement data of no-load condition

$U_{1,r}/V$	$I_{1,r}/A$	$U_{2,r}/V$	$U_{1,c}/V$	$I_{1,c}/A$	$U_{2,c}/V$	$I_{2,c}/A$	$U_{1,s}/V$	$I_{1,s}/A$	$U_{2,s}/V$
19.46	0.58	44.91	19.39	0.59	44.71	0.021 1	19.39	0.56	44.88
41.09	1.12	94.61	41.13	1.13	95.03	0.020 8	41.13	1.11	94.55
60.59	1.73	139.51	60.68	1.74	139.75	0.021 1	60.68	1.74	139.50
82.40	2.89	190.22	82.61	2.89	190.55	0.020 7	82.61	2.83	189.90
100.11	4.75	231.21	100.03	4.70	231.56	0.022 6	100.03	4.74	229.80
103.81	5.31	239.71	104.19	5.30	239.36	0.022 4	104.19	5.33	239.40

由表 2,3 可知:实际值与仿真值的误差在 3.50% 之内,满足了工程要求,因此仿真值能够真实地反映实际值。

表 3 空载情况的电气误差

Tab. 3 Electrical errors of no-load condition (%)

$\delta_{I_1}$	$\delta_{U_1}$	$\delta_{I_2}$
-3.19	-0.07	—
-1.34	-0.05	—
0.64	0	—
-2.18	-0.16	—
-0.15	-0.61	—
0.32	-0.13	—

2) 带载情况。带载情况的电气参数实际值、采集值和仿真值,分别如表 4~6 所示。表 4~6 中: $P_2, Q_2, S_2$  分别为二次侧有功功率、二次侧无功功率和二次侧视在功率。由于受到多种因素影响,实际值、采集值会产生误差。带载情况的电气误差 1(实际值与采集值的误差),如表 7 所示。表 7 中: $\gamma_{U_2}$  为带载情况下  $U_2$  实际值与采集值的误差,其他符号含义与此类似。由表 7 可知:实际值与采集值误差在 2.00% 之内,满足工程要求,故采集值能够真实地反映实际值。

表 4 带载情况的电气参数实际值

Tab. 4 Actual values of electrical parameters of load condition

$R_{2,r}/\Omega$	$U_{2,r}/V$	$I_{2,r}/A$	$U_{1,r}/V$	$I_{1,r}/A$	$P_{2,r}/W$	$Q_{2,r}/var$	$S_{2,r}/V \cdot A$
525.54	242.80	0.46	104.30	5.92	111.40	11.58	112.00
253.47	240.80	0.95	104.35	6.35	225.10	26.89	226.70
164.86	240.70	1.46	104.50	7.04	344.30	14.38	344.60
95.10	238.70	2.51	103.70	8.68	594.80	15.43	595.00
60.43	239.30	3.96	104.00	11.50	942.70	30.71	943.20
49.16	239.90	4.88	104.30	13.48	1 162.20	83.55	1 165.20

表 5 带载情况的电气参数采集值

Tab. 5 Acquisition values of electrical parameters of load condition

$R_{2,c}/\Omega$	$U_{2,c}/V$	$I_{2,c}/A$	$U_{1,c}/V$	$I_{1,c}/A$	$P_{2,c}/W$	$Q_{2,c}/var$	$S_{2,c}/V \cdot A$
524.28	240.38	0.46	104.14	5.82	109.97	22.51	112.25
253.30	240.94	0.94	104.27	6.31	223.36	36.17	226.27
166.98	239.81	1.43	104.43	6.97	342.21	48.14	345.58
95.67	238.85	2.48	103.67	8.54	589.85	73.15	594.37
60.49	239.50	3.94	104.06	11.46	938.50	91.80	942.98
49.53	240.11	4.84	104.34	13.35	1 159.00	143.42	1 167.80



表 6 带载情况的电气参数仿真值

Tab. 6 Simulation values of electrical parameters of load condition

$U_{2,s}/V$	$I_{2,s}/A$	$U_{1,s}/V$	$I_{1,s}/A$
238.70	0.45	104.14	5.66
239.23	0.92	104.43	6.28
238.40	1.43	104.37	6.79
237.18	2.50	103.74	8.41
237.88	3.93	104.08	11.18
238.11	4.80	104.23	13.26

表 7 带载情况的电气误差 1

Tab. 7 Electrical errors 1 of load condition (%)

$\gamma_{U_2}$	$\gamma_{I_2}$	$\gamma_{U_1}$	$\gamma_{I_1}$	$\gamma_{P_2}$	$\gamma_{S_2}$	$\gamma_{R_2}$
-1.00	0.27	-0.16	-1.63	-1.28	0.22	-0.24
0.06	-1.15	-0.07	-0.63	-0.77	-0.19	-0.07
-0.37	-1.98	-0.07	-1.07	-0.61	0.28	1.28
0.06	-1.16	-0.03	-1.57	-0.83	-0.11	0.60
0.08	-0.55	0.06	-0.36	-0.45	-0.02	0.10
0.09	-0.83	0.03	-0.96	-0.26	0.24	0.75

带载情况的电气误差 2(实际值与仿真值的误差),如表 8 所示。表 8 中: $\eta_{U_2}$  为带载情况下  $U_2$  实际值与仿真值的误差,其他符号含义与此类似。由表 8 可知:带载情况下  $U_2, I_2$  实际值与仿真值的误差相对较小,  $I_1$  实际值与仿真值的误差虽然最高(4.42%),但还在工程允许的误差范围之内,故仿真模型能够真实地反映实物变压器的电气参数。

3.2.2 报警系统验证 报警系统要实现的功能主要有以下 2 点。

1) 额定参数过高报警。当额定参数过高时,提醒工作人员降低工作电压,并通过采集卡的输出端口给出一个关闭脉冲信号从而保护电路,此时,由于一次侧电压超过额定值 104 V,产生报警信号。报警程序 1 的实验室环境测试,如图 15 所示。

2) 当仿真值与实际值相差过大报警。这类报警往往是变压器内部发生了故障,当报警信号产生时,先暂时停止仿真程序,再重新加载负载,直到仿真值与实际值相差在误差范围之内时,仿真程序才继续进行。报警程序 2 的实验室环境测试,如 16 所示。

3.2.3 磁场参数验证 由于受到测试设备的限制,若进行磁通验证需要利用电磁感应定律间接验证磁场。电磁感应公式为

$$e=-N\frac{d\phi}{dt}。$$

(4)

式(4)中: $e$  为感应电动势。

若将一匝线圈( $N=1$ )套在电力变压器的铁芯上,此时,该线圈两端的电压绝对值等于磁通的微分。因此,只需将仿真模型计算得到的磁通  $\phi$  经微分模块计算后,把得到的数值同一匝线圈两侧的电压进行对比,若两者相等,则间接证明了该仿真模型磁场计算的准确性。

空载情况和带载情况的磁场测量数据,分别如表 9,10 所示;而空载情况和带载情况的磁场误差,则分

表 8 带载情况的电气误差 2

Tab. 8 Electrical errors 2 of load condition (%)

$\eta_{U_2}$	$\eta_{I_2}$	$\eta_{I_1}$
1.69	1.69	4.42
0.65	3.47	1.08
0.96	2.26	3.61
0.64	0.52	3.09
0.59	0.66	2.76
0.75	1.60	1.60

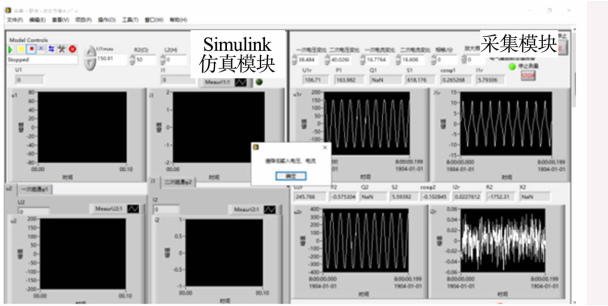


图 15 报警程序 1 的实验室环境测试

Fig. 15 Laboratory environment testing of alarm program 1

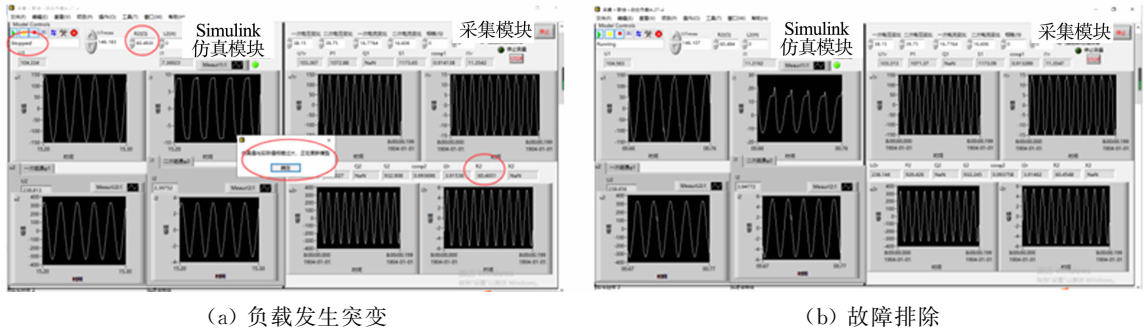


图 16 报警程序 2 的实验室环境测试

Fig. 16 Laboratory environment testing of alarm program 2

别如表 11,12 所示。表 11,12 中: $\xi_{e_1}, \xi_{e_2}$  分别表示空载情况下  $e_1, e_2$  实际值与仿真值的误差; $\zeta_{e_1}, \zeta_{e_2}$  分别表示带载情况下  $e_1, e_2$  实际值与仿真值的误差。

表 9 空载情况的磁场测量数据

Tab. 9 Magnetic field measurement data of no-load condition

$U_1/V$	$I_1/A$	$U_2/V$	$e_r/V$	$e_{1,s}/V$	$e_{2,s}/V$	$\Phi_{1,s}/Wb$	$\Phi_{2,s}/Wb$
12.566	0.432	28.990	0.272	0.272	0.273	0.096	0.005
32.121	0.905	74.211	0.762	0.768	0.766	0.100	0.002
56.665	1.606	130.246	1.343	1.313	1.308	0.101	0.004
79.630	2.699	183.850	1.883	1.873	1.871	0.101	0.006
92.642	3.808	213.993	2.191	2.194	2.196	0.100	0.007
104.477	5.414	240.289	2.468	2.474	2.468	0.009	0.008

表 10 带载情况的磁场测量数据

Tab. 10 Magnetic field measurement data of load condition

$P_2/W$	$R_2/\Omega$	$U_1/V$	$I_1/A$	$U_2/V$	$I_2/A$	$e_r/V$	$e_{1,s}/V$	$e_{2,s}/V$	$\Phi_{1,s}/Wb$	$\Phi_{2,s}/Wb$
106.955	522.956	104.891	5.745	242.008	0.452	2.480	2.466	2.432	0.011	0.008
547.691	102.184	103.609	8.142	238.989	2.313	2.453	2.493	2.457	0.011	0.008
889.688	63.977	104.627	11.019	240.621	3.748	2.477	2.474	2.479	0.012	0.008
1 693.370	33.001	102.924	18.383	236.799	7.164	2.427	2.454	2.413	0.022	0.008
2 261.560	24.931	103.859	23.783	238.619	9.525	2.448	2.476	2.420	0.033	0.008

表 11 空载情况的磁场误差

Tab. 11 Magnetic field errors of no-load condition

$e_r/V$	$\xi_{e_1}/\%$	$\xi_{e_2}/\%$
0.272	0.36	0.41
0.762	0.88	0.59
1.343	-2.25	-2.60
1.883	-0.48	-0.62
2.191	0.11	0.22
2.468	0.20	-0.06

表 12 带载情况的磁场误差

Tab. 12 Magnetic field errors of load condition

$e_r/V$	$\zeta_{e_1}/\%$	$\zeta_{e_2}/\%$
2.480	-0.58	-1.95
2.453	1.63	0.20
2.477	-0.12	0.08
2.427	1.11	-0.59
2.448	1.16	-1.13

由表 11,12 可知:无论一、二次侧为空载情况还是带载情况,感应电动势最大误差均在 3.00%之内,满足工程要求,表明仿真值能够真实地反映实际值。

对磁场参数进行可视化验证,在空载情况下观察磁通的波形,结果如图 17 所示。由图 17 可知:当电流比较小时,变压器未饱和,磁通波形和电流一样,均为正弦波。

3.2.4 误差分析 仿真值与实际值产生误差的原因主要有以下 3 点。

1) 采集程序误差。由于采集程序本身存在一定的

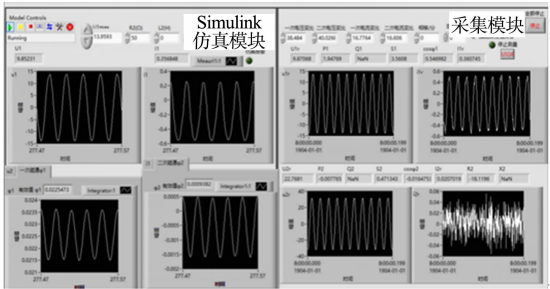


图 17 磁场参数可视化

Fig. 17 Visualization of magnetic field parameters

误差,因此,采集程序的误差会造成仿真程序的输入误差。

2) MATLAB 解法器误差。由于 Simulink 软件在进行计算时选用的解法器不同,则适用的条件不同,因此,产生的误差也不相同。

3) 磁化曲线存在误差。磁化曲线是通过 Flux 软件在理想的情况下生成的,依赖于变压器模型的建立的准确性,而磁化曲线会影响变压器的励磁电抗,因此,磁化曲线的误差会导致励磁电抗的误差。

4 数字孪生平台在变压器匝间短路的实际应用

4.1 变压器匝间短路判断依据

当变压器不同部位发生匝间短路时,各部位的电感参数、电流和磁场都会发生巨大的变化<sup>[13]</sup>。根据文献[13],当变压器发生不同匝数的一次侧短路时,绕组电感参数会发生非线性改变,一次侧电流会剧烈增加,且短路绕组处磁力线走向发生横向偏转。

4.2 数字孪生平台的运用

根据节 4.1 的变压器匝间短路判断依据,配合搭建的数字孪生平台,可实现对电力变压器匝间短路的故障响应,下一步的研究方向是提高响应速度。在搭建的数字孪生平台中,可以在工程误差范围内计算出电气参数和电磁参数。通过实验室环境检测验证该平台的有效性,这对解决电力变压器的匝间短路具有实际意义。

除了提高响应速度外,通过数字孪生平台的磁场和电流的变化辨别短路及短路位置也是下一步的研究方向之一,可行性分析如下。

1) 通过磁场变化辨别匝间短路及短路位置。当变压器正常运行时,高、低压绕组产生的漏磁场强度较为均匀。当一次侧绕组发生匝间短路时,短路绕组内环流及一次侧绕组产生的安匝数(线圈匝数与线圈通过的电流的乘积)均较大,此时,一次侧的漏磁场强度比正常运行时更大,由于一次侧和短路绕组内环流产生不平衡安匝数,进而产生横向漏磁,短路位置附近漏磁场不平衡,且短路匝数越多,故障点周围漏磁场分布越不均匀。

2) 通过电流变化辨别匝间短路及短路位置。由于二次侧为功率需求侧,所以一次侧发生不同位置的匝间短路后,二次侧电流的变化趋势虽与一次侧相同,但电流的变化幅度非常小,基本在额定值附近发生较小的波动,并且理论计算值一直略小于仿真值,不同短路位置下二次侧电流的理论计算值与仿真值误差恰好与一次侧变化规律相反。由此可见,短路位置越靠近绕组首末两端,匝间短路电流越小。如果灵敏度校验时能够检测出位于两端的故障,那么就一定能检测出其他部位的故障。

通过数字孪生平台检测到故障电流、磁场,即可判断发生变压器匝间短路的位置。传统的变压器故障检测设备往往是通过传感器采集响应的物理量并设置报警装置进行事故的预防,而数字孪生平台将采集到的数据输入建立的模型,进行模拟仿真,能够推演出变压器模型后续设备的运行状况,在一定程度上可起到预知变压器事故的作用。

5 结论

电力变压器数字孪生平台在虚拟空间中创造出相应的孪生体,数字孪生体能够准确地反映实物的电气参数和电磁参数,当电力变压器发生事故的时候,数字孪生体会模拟事故情况并报警,从而使工作人员在第一时间了解设备的故障情况,获取解决方案。

数字孪生平台若要与实物更加相似,需从仿真模型、采集程序、数据通信和可视化效果这 4 个方面进行不断地优化。在仿真模型中加入其他的检测方法,如气体、温度和放电等其他手段;使用精准度更高的采集设备可以有效地减小误差;数据通信程序和联合仿真程序优化后应尽量转化成 C 语言,使程序运行速度大大提高,同时,加入与人工智能相关的功能;通过 Labview 软件建立可视化效果更佳的变压器虚拟 2D 或 3D 模型,通过颜色差异展示相关参数的分布情况。

数字孪生平台可用于检测变压器的匝间短路,相较于传统的检测手段,该平台具有预测事故的潜力。今后,运用该数字孪生平台的全生命周期特点,再结合人工智能和虚拟现实(VR)技术,工作人员即可在办

公室进行沉浸式操作和检修,最终实现智能电网。

参考文献:

[1] 贺兴,艾芊,朱天怡,等. 数字孪生在电力系统应用中的机遇和挑战[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2009-2019. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1983.

[2] FERREIRA E F, BARROS I D. Faults monitoring system in the electric power grid of medium voltage[J]. ScienceDirect, 2018, 130: 696-703. DOI: 10.1016/j.procs.2018.04.123.

[3] 刘健,陈鲁鹏,张志华. 基于本地量测信息的配电变压器静态参数估计[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(2): 71-76. DOI: 10.16081/j.epae.202101002.

[4] 梁永亮,李可军,赵建国,等. 变压器在线监测装置配置优先级评估模型[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2562-2569. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2016.08.045.

[5] 陆晓,徐鹏,冯树海,等. 考虑多时段量测数据随机误差的变压器正序参数辨识与评估方法[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 856-863. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2018.1994.

[6] 刘洁苇,吕运强,李琳,等. 高频变压器磁场和温度场的瞬态特性分析[J]. 高电压技术, 2019, 45(4): 1191-1200. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20181206015.

[7] 刘航,王有元,陈伟根,等. 基于无监督概念漂移识别和动态图嵌入的变压器故障检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(13): 4358-4371. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.191964.

[8] 严英杰,盛戈皞,刘亚东,等. 基于滑动窗口和聚类算法的变压器状态异常检测[J]. 高电压技术, 2016, 42(12): 4020-4025. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20161128041.

[9] 李妍,周洪伟,沈小伟,等. 电力变压器绕组电气参数对绕组变形的全局灵敏度分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 31-37.

[10] DE FARIA H J, SPIR C J G, MEJIA O J L. A review of monitoring methods for predictive maintenance of electric power transformers based on dissolved gas analysis[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 46: 201-209. DOI: 10.1016/j.rser.2015.02.052.

[11] AZIRANI M, ARIANNIK M, WERLE P. Optimal frequency selection for detection of partial discharges in power transformers using the UHF measurement technique[J]. Measurement, 2021, 172(9): 108895.

[12] BIGDELI M, VAKILIAN M, RAHIMPOUR E. A new method for detection and evaluation of winding mechanical faults in transformer through transfer function measurements[J]. Advances in Electrical and Computer Engineering, 2011, 11(2): 23-30. DOI: 10.4316/AECE.2011.02004.

[13] 叶志军,苟炬龙,蔡金星,等. 变压器一次侧匝间短路参数与特征分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(21): 213-220.

[14] 王鹏,杨妹,祝建成,等. 面向数字孪生的动态数据驱动建模与仿真方法[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(12): 2779-2786. DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2020.12.14.

[15] JIN Tao, SUN Zhongda, LI Long, *et al.* Triboelectric nanogenerator sensors for soft robotics aiming at digital twin applications[J]. Nature Communication, 2020, 11: 5381. DOI: 10.1038/s41467-020-19059-3.

[16] 刘明明,高楠,刘全东,等. 虚拟现实技术在核电厂主控室设计中的应用及探索[J]. 上海交通大学学报, 2019, 53(增刊 1): 29-32, 44. DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.S1.006.

[17] 丁华,杨亮亮,杨兆建,等. 数字孪生与深度学习融合驱动的采煤机健康状态预测[J]. 中国机械工程, 2020, 31(7): 815-823.

[18] 白浩,周长城,袁智勇,等. 基于数字孪生的数字电网展望和思考[J]. 南方电网技术, 2020, 14(8): 18-24, 40. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2020.08.003.

[19] ZHOU M, YAN Jianfeng, FENG Donghao. Digital twin framework and its application to power grid online analysis[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(3): 391-398. DOI: 10.17775/CSEEJPES.2018.01460.

[20] 周二专,冯东豪,严剑峰,等. 秒级响应电网在线分析软件平台[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3474-3480. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0083.

(责任编辑: 钱筠      英文审校: 吴逢铁)