

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.06.035

基于模糊与 PID 复合控制的变压器高压套管取注油系统设计

李放,陈霞,王晓辉,冯舒婷,田明,潘琪杰

(国网冀北电力有限公司 廊坊供电公司,河北 廊坊 065099)

摘要:针对变压器高压套管取注油过程中存在的操作繁琐、耗时较长、样品失真及套管受潮等问题,提出一种基于模糊与 PID 复合控制的自动取注油系统。该系统上级模糊控制器根据环境和状态参数推理出取注油目标速度,下级模糊 PID 控制器根据目标速度和实测速度的误差及误差变化率动态调节 PID 参数精准控制直流电机和真空泵。通过 Simulink 仿真和 3D 打印技术辅助的试验验证,证明该系统展现出高精度、强自适应性和可靠性,这不仅将取注油时间缩短至约 30 s,还将油样脱气气体浓度提高了 10%,大幅提升了油色谱试验数据的精准度。此系统有效降低了环境因素和人为操作对试验结果的影响,使变压器高压套管状态评估更为精确全面,为电力系统的稳定运行提供了有力保障。

关键词:高压套管;自动取注油;模糊控制;模糊 PID 控制;油色谱分析

中图分类号:TM216+.5 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)06-0190-06

Design of an Automatic Oil Extraction and Injection System for Transformer High-voltage Bushings Based on Fuzzy and PID Composite Control

LI Fang, CHEN Xia, WANG Xiaohui, FENG Shuting, TIAN Ming, PAN Qijie

(Langfang Power Supply Company, State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Langfang 065099, China)

Abstract: To cope with cumbersome operations, long duration, sample distortion, and bushing moisture absorption in the process of insulating oil extraction and injection for transformer high-voltage bushings, this paper proposes an automatic oil extraction and injection control system based on fuzzy control and PID control principles. The upper-level fuzzy controller infers the target speed based on environmental and state parameters, while the lower-level fuzzy-PID controller dynamically adjusts the PID parameters based on the error and its rate of change between the target speed and the measured speed, achieving precise control of the DC motor and vacuum pump. Through Simulink simulation and experimental verification assisted by 3D printing technology, the system demonstrates high precision, strong adaptability, and reliability, not only reducing the oil extraction and injection time to approximately 30 seconds, but also increasing the oil sample gas concentration by 10%, significantly, which enhances the accuracy of oil chromatography test data. The proposed system effectively mitigates the impact of environmental factors and human operations on test results, enabling a more precise and comprehensive assessment of transformer high-voltage bushing conditions, thereby providing robust support for the stable operation of the power system.

Keywords: high-voltage bushing; automatic oil extraction and injection; fuzzy control; fuzzy-PID control; oil chromatographic analysis

0 引言

变压器高压套管内部的绝缘油状态是精准反映其绝缘性能和运行工况的关键指标,通过深入分析绝缘油的理化特性及电气性能,能够有效评估变压器的健康状态,并为后续的故障诊断和预防性维护提供重要依据^[1-2]。现阶段,电力检修人员多采用三通阀手动取样法^[3],该方法操作繁琐,对于试验人员专业程度要求较高。并且,由于套管注油口处于高位,周围活动空间小,致使操作

受限,耗时较长,取油过程中会存在样品失真和套管受潮的风险,可能导致重复作业、威胁设备安全运行的情况发生^[4-5]。另外,取油后对变压器套管进行精准油位监测和及时补油也是十分必要的^[6-7]。

目前,国内外关于变压器本体、调压开关、断路器等充油电力设备绝缘油取样装置进行了比较深入的研究。黄伟光等^[8]设计了集合系统排残油、系统冲洗、取油样功能的变压器全密封自动取样仪。石川等^[9]设计了基于 ST89C51 单片机控

基金项目:国网廊坊供电公司 2024 年群众性创新项目(520105240001)

第一作者简介:李放(1995—),女,河北廊坊人,工程师,硕士,研究方向为高电压试验技术和故障诊断研究等,x1288623@163.com。

制的 500 kV 变压器油自动取样装置。然而,针对变压器高压套管取油装置的研究尚显匮乏,邵中华等^[10]针对部分型号套管取油孔研制了一款自动取样装置,但并未对取油过程进行精准控制,这一领域仍有待更多的专业探索与突破。

本文结合模糊控制理论和 PID 控制技术^[11-12],对变压器高压套管取注油控制系统进行设计分析,通过湿度传感器、质量传感器、超声液面传感器实时采集状态信息,传输至 STM32 单片机缓存整理,并驱动电机控制真空泵泵速实现对取注油速度的精确控制,提高油样的代表性、真实性和清洁度,全面降低传统作业方式对套管运行工况的影响。

1 套管取注油控制系统设计方案

变压器高压套管取注油控制系统设计方案如图 1 所示。

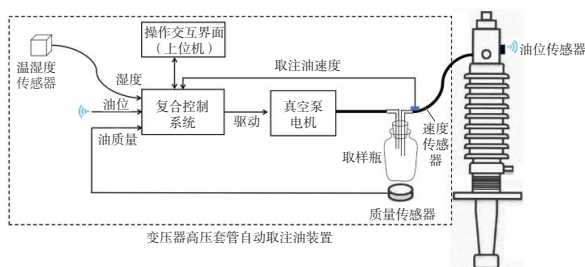


图 1 系统结构设计方案

控制系统利用温湿度传感器、质量传感器和油位传感器实时监测环境湿度 h 、取油质量 w 和套管油液面高度 l 这 3 个状态量。由于油样质量和套管真空度受取注油速度影响很大,而取注油速度取决于以上 3 个状态量,因此该系统将 h 、 w 、 l 作为输入量,通过复合控制系统调节电机 PWM 占空比,实现电机转速 n 的控制,驱动真空泵动作在变压器套管与取样瓶之间形成压强差,实现取注油操作^[13]。

电机控制模块的传递函数可以考虑为 2 阶系统:

$$G_2(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

式中: ω_n 为系统的自然频率; ξ 为阻尼比; s 为复频率。

真空泵的流速与电机的转速之间可以近似为线性关系,因此传递函数可以表示为

$$G_2(s) = K_v \quad (2)$$

式中 K_v 为真空泵增益。

通过速度传感器反馈实际取注油速度,据此进行调整,使整个系统能够精确控制各部件的工作状态,实现高压套管内部油液的抽取和注入,同时保证套管内部的真空度和油位满足要求。

硬件系统包括 STM32 单片机中央控制模块、电机驱动模块、温湿度感知模块、质量测量模块、超声液位感知模块、除湿模块及电源模块等,部分选型如表 1 所示。

表 1 硬件选型参数表

名称	型号	参数
主控芯片	STM32F103ZET6	核心处理器 ARM Cortex-M3, 主频 72 MHz, 工作电压 2~3.6 V
直流无刷电机	KVP20-1.8-12	DC12 V, 功率 5 W, PWM 调速 工作电压 2.6~5.5 V, 输出速率 10 Hz/80 Hz, 工作电流小于 1.6 mA, 断电电流小于 1 μ A
质量传感器	HX711	工作电压 2.4~5.5 V, 精度可达 $\pm 2\%$
温湿度传感器	SHT3x-ARP	小体积、多路输出和模块化设计
电源模块	LHE10-20A/C/Dxx	8.89 cm (3.5 寸), 电阻触摸式, 分辨率 480×320
T1 系列模块屏	TJC4832T135-011R	

2 模糊控制系统设计

目前,现有标准、规程对变压器套管取注油速度没有作明确规定,取注油只能依靠专家和技术人员经验操作。取油速度过快、过慢都会影响油色谱分析中油样的脱气量,降低分析结果的准确性和可靠性^[14]。

因此,本文采用模糊控制器加模糊 PID 控制器的二级控制系统,依据理论知识和实际操作经验制定上级模糊控制器的知识库和决策规则,根据各传感器测得的 h 、 w 和 l 这 3 个状态信号推理出最佳取注油速度,以此作为下级模糊 PID 控制器的目标速度。下级模糊控制器再利用目标速度和测速传感器测得实际速度的误差 e 及误差变化率 e_c 对 PID 控制器参数进行自整定^[15],实现对直流电机和真空泵的精准控制,进而控制取注油速度。图 2 是变压器高压套管取注油控制系统结构图。

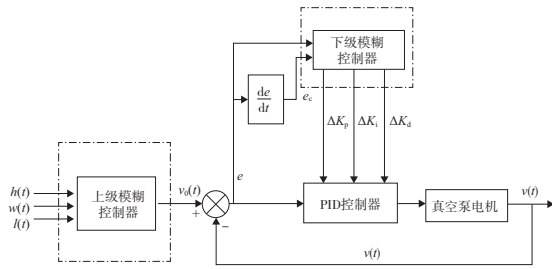


图2 套管取油控制系统原理图

2.1 上级模糊控制器设计

由于取注油过程中,取样口完全暴露于空气,外部环境湿度不仅会影响套管内部^[16-17],而且会改变油样成分的密度,因此环境湿度是决定取注

油速度的一个重要因素。结合试验规程和设备实际运行工况,上级模糊控制器采用双输入单输出的 Mamdani 控制器结构,取油功能下,输入为环境湿度 $h \in X_1 = [0, 100]\%$ 和取样质量 $w \in X_2 = [0, 100]\text{g}$;注油功能下,输入为环境湿度 $h \in X_1 = [0, 100]\%$ 和套管油液面高度 $l \in X_3 = [0, 20]\text{cm}$,输出均为目标速度 $v \in Y = [0, 5]\text{mL/s}$,取注油功能由单片机控制切换。设定各变量模糊论域与物理论域一致,对应的模糊子集及隶属函数如图3—图5所示。试验人员在实际工况下通过大量的数据对比和经验积累,采用归纳法^[18]得到上级模糊控制器的控制规则如表2所示。

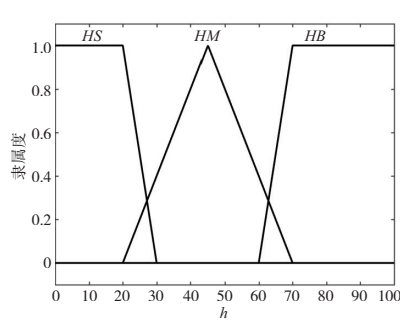
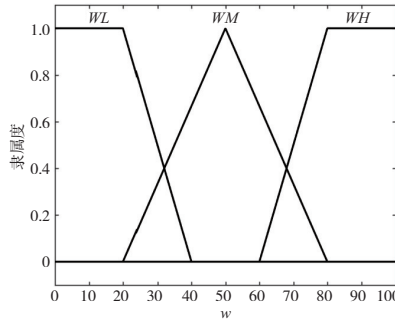
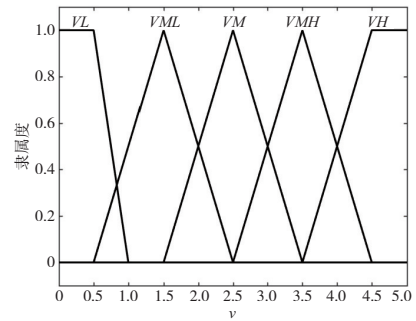
图3 h 的隶属度函数图4 w 的隶属度函数图5 v 的隶属度函数

表2 上级模糊控制规则表

取油功能			注油功能		
输入			输入		
环境湿度 h	取样质量 w	输出 v	环境湿度 h	液面高度 l	输出 v
HS	WL	VMH	HS	LL	VH
HM	WL	VMH	HM	LL	VMH
HB	WL	VH	HB	LL	VH
HS	WM	VML	HS	LM	VML
HM	WM	VM	HM	LM	VM
HB	WM	VMH	HB	LM	VMH
HS	WH	VL	HS	LH	VL
HM	WH	VML	HM	LH	VML
HB	WH	VMH	HB	LH	VMH

2.2 下级模糊 PID 控制器设计

下级模糊 PID 控制器选用双输入三输出的 Mamdani 控制器结构,将实际取注油速度测量值与目标速度偏差 e 和偏差变化率 e_c 作为输入,模糊化处理后转化为模糊量,随后通过规则查询和模糊推理得到 PID 控制器参数调整量 ΔK_p 、 ΔK_i 、

ΔK_d ,经过式(1)整定后得到新的比例系数 K_p 、积分系数 K_i 和微分系数 K_d ,以此实现控制系统的自适应调整。

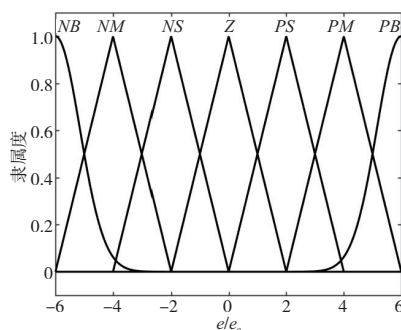
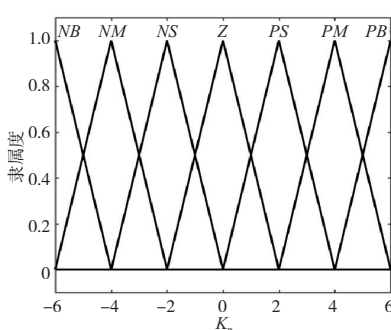
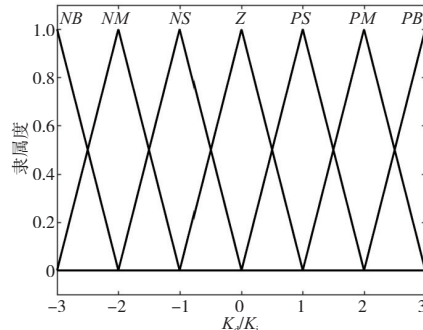
$$K_p(t) = K_p(0) + \alpha_p \Delta K_p(t) \quad (3)$$

$$K_i(t) = K_i(0) + \alpha_i \Delta K_i(t) \quad (4)$$

$$K_d(t) = K_d(0) + \alpha_d \Delta K_d(t) \quad (5)$$

式中: $K_p(0)$ 、 $K_i(0)$ 、 $K_d(0)$ 为 PID 控制器的初始参数; $\Delta K_p(t)$ 、 $\Delta K_i(t)$ 、 $\Delta K_d(t)$ 为模糊推理出的参数调整量; α_p 、 α_i 、 α_d 为调整因子; $K_p(t)$ 、 $K_i(t)$ 、 $K_d(t)$ 为整定后的 PID 控制器参数。

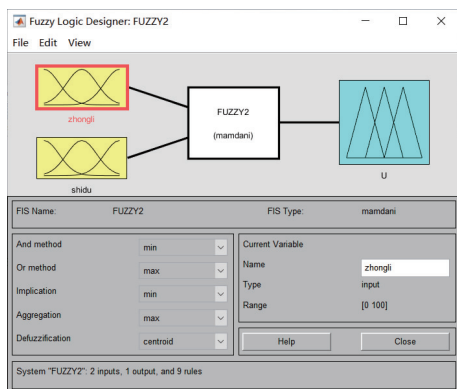
设定各变量模糊论域为 7 级,并选取三角形隶属函数作为基本隶属函数,如图6—图8所示。其中,为了提升系统动态性能,本文在输入量的论域两端均构建了 S 型隶属函数,利用其平滑的过渡和边界效应,有效抑制噪声干扰,并增强系统对输入变化的适应性^[19]。通过对电机及真空泵的特性与控制要求的深入研究及实操演示,在模糊控制规则库中形成 49 条控制规则,确定输入 e 和 e_c 的比例因子分别为 3.5 和 0.2,输出调整因子为 $\alpha_p = 5$ 、 $\alpha_i = 1$ 、 $\alpha_d = 0.01$ 。这些参数可以平衡系统的动态响应和静态稳定性,以实现快速响应的同时保持较高的控制精度和稳定性。

图6 e 和 e_c 的隶属度函数图7 K_p 的隶属度函数图8 K_i 和 K_d 的隶属度函数

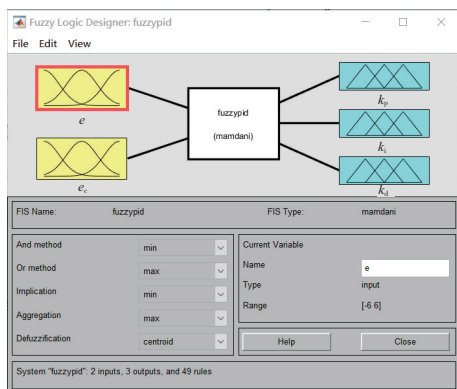
3 Simulink 仿真和试验分析

3.1 Simulink 仿真

为了验证基于二级结构的模糊与PID复合控制的变压器高压套管取油控制系统是否满足设计要求,本文利用 Matlab 软件定义控制器参数和搭建仿真流程图,验证系统的精度和稳定性^[20]。以套管取油操作为例,在 Fuzzy Logic Toolbox 中的 fis 图形界面定义模糊控制器的输入、输出变量、隶属度函数、模糊规则等信息,如图9所示。



(a) 上级控制器



(b) 下级控制器

图9 两级控制器的模糊逻辑设计器

利用 Simulink 搭建二级控制系统仿真模型,和 fis 对象建立通信后与 PID 模块并联形成下级

模糊 PID 控制器,并设置传统 PID 控制器旁路进行性能对比,传统 PID 控制器参数 K_p 、 K_i 和 K_d 与模糊 PID 控制器初始参数 $K_p(0)$ 、 $K_i(0)$ 、 $K_d(0)$ 保持一致。通过观察系统的阶跃响应曲线,比较两种不同控制策略在超调量 δ 、上升时间 t_r 、稳态误差 e_{ss} 3 个方面的控制效果。系统仿真模型和阶跃响应结果如图10—图12所示。

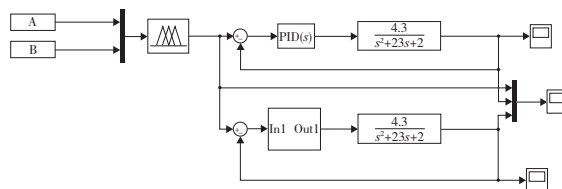


图10 套管取油二级控制系统仿真模型

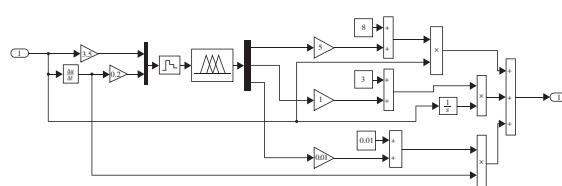


图11 下级模糊PID控制器仿真模块搭建

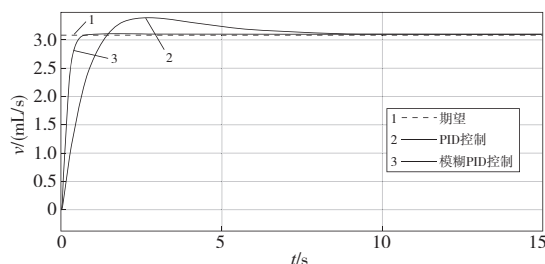


图12 传统PID和模糊PID的阶跃响应曲线对比

表3为传统PID和模糊PID的性能指标对比,由表3可知,模糊PID控制算法相较于传统PID而言,阶跃响应的超调量缩小了9.57个百分点,上升时间减少了0.6580 s,稳态误差稍微改善了0.0002。可见模糊PID控制方法的平稳性、快速性以及控制精度均优于传统PID控制方法。

表 3 传统 PID 和模糊 PID 的性能指标对比

控制策略	超调量 $\delta/\%$	上升时间 t_r/s	稳态误差 e_{ss}
传统 PID	9.99	0.979 5	0.001 2
模糊 PID	0.42	0.321 5	0.001 0

3.2 试验分析

为了确保设计的控制系统在实际工作场景中能够稳定应用,在前文所述的硬件选型、控制系统设计和仿真分析的基础上,试验人员进一步搭建自动取注油装置,在不同运行环境下进行详尽的调试和严格的可靠性验证。根据选定的控制策略和硬件组件,完成必要的程序写入和物理连接,并包装进 3D 打印^[21]的外壳中,如图 13 所示。

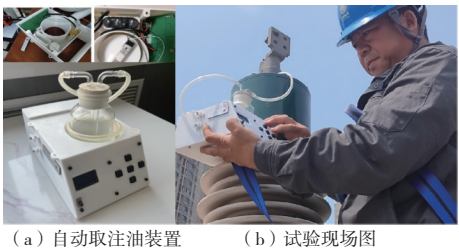


图 13 自动取注油装置和试验现场图

装置搭建完成后,进行了初步的通电检查和功能验证,确认所有硬件设备能够正常启动并响应控制指令,同时检查传感器的数据采集是否准确,电机和真空泵的动作是否到位。随后,电气试验人员针对不同气候、不同变电站的变压器高压套管下,开展了 24 次取注油作业,采用常规手工作业和自动取注油装置作业两种方式分别对同一只套管进行取注油操作,记录各传感器状态值和取注油时间,并标记油样。通过在油务实验室进行油色谱分析得到不同油样气体含量数据,选取其中 6 次作业数据对比如下。

由表 4、表 5 各传感器采集到的数据显示,利用自动取注油装置进行作业的取、注油速度满足设定的模糊控制规则,且将变压器高压套管取、注油时间控制在 30 s 左右,相较于传统手工作业而言大大提升了工作效率。从色谱检测数据(表 6)可以看出,自动取油方式下,同一只套管油样脱气量相较于传统方式有了显著提升,进而导致气体浓度相应增加,增幅最大可达 10%,进一步提高了油色谱试验数据的精准性,有效降低了环境因素和人为因素对试验结果的干扰。同时,对套管状态的评估能力得到了实质性的提升,为后续套管运行状态的综合决策和分析提供了更为坚实的基础。

表 4 自动取注油作业传感器数据采集

日期	取油作业			注油作业		
	环境湿度 $h/\%$	取样质量 w/g	取油速度 $v/(mL/s)$	环境湿度 $h/\%$	液面高度 l/cm	注油速度 $v/(mL/s)$
09-27	45	23	3.42	43	1.3	4.55
10-10	33	68	2.49	35	18.3	2.12
10-18	70	11	4.78	68	12.3	3.66
11-16	30	84	1.64	34	9.2	2.56
11-26	52	34	3.11	49	8.8	3.24
11-27	33	53	2.78	33	19.0	1.02

表 5 取注油作业数据对比

常规手动			自动取注油装置		
取油时间/s	注油时间/s	总脱气量/mL	取油时间/s	注油时间/s	总脱气量/mL
327	375	3.5	27	30	3.8
525	383	2.6	31	32	2.9
375	488	2.7	28	28	2.8
604	453	3.3	33	31	3.5
356	391	3.3	30	31	3.6
326	371	2.8	29	31	2.9

表 6 油色谱气体浓度数据对比

气体	日期	气体浓度/ $(\mu L/L)$					
		09-27	10-10	10-18	11-16	11-26	11-27
H_2	手动	32.8	43.2	23.7	24.9	26.9	44.6
	自动	36.1	47.7	25.2	26.7	28.3	47.8
CO	手动	109.0	349.3	234.4	194.8	197.1	356.7
	自动	121.1	367.5	251.8	207.0	209.1	324.5
CO_2	手动	437.7	728.1	538.0	485.8	623.2	772.6
	自动	449.7	738.0	549.1	496.5	635.5	785.0
CH_4	手动	26.1	54.2	134.9	35.4	85.4	48.6
	自动	27.8	59.3	151.5	37.6	94.5	52.8
C_2H_4	手动	0.9	2.8	0.3	0.8	4.8	2.6
	自动	1.3	3.0	0.5	1.1	5.1	2.9
C_2H_6	手动	24.9	53.3	12.4	21.4	39.4	53.3
	自动	26.8	58.1	14.5	23.4	43.5	57.6
C_2H_2	手动	0	0	0	0	0	0
	自动	0	0	0	0	0	0
总烃	手动	51.9	110.3	147.6	57.6	129.6	104.5
	自动	55.9	120.4	166.5	62.1	143.1	113.3

4 结语

本文设计了一种基于模糊与PID复合控制的变压器高压套管自动取注油二级控制系统,该系统能够根据环境和状态参数实现对取注油过程的精准控制。通过Simulink仿真分析得知,与传统PID控制策略相比,模糊PID控制方法在超调量、上升时间和稳态误差等关键性能指标上均展现出显著优势,具有更好的平稳性、快速性和控制精度,充分满足了自动取注油控制系统的设计要求。

在实际试验分析中,利用3D打印技术搭建取注油装置,并进行多次现场作业测试。试验结果表明,相较于传统手工作业,自动取注油装置将取注油时间大幅缩短至约30s,同时油样脱气气体浓度提高了10%,显著提升了工作效率和试验数据质量。因此,该系统具有广阔的应用前景和重要的实用价值,值得进一步推广和应用。

参考文献:

- [1] 周榆晓,韩洪刚,王奕,等.一起220kV变压器中性点套管异常分析及防范措施[J].变压器,2020,57(4):79-83.
- [2] 潘志城,周海滨,邓军,等.一起500kV油浸纸绝缘套管油色谱数据异常原因分析[J].变压器,2020,57(6):67-72.
- [3] 赵崇智.全自动工控一体油色谱取油装置设计及应用[J].电气技术与经济,2023(7):68-70,74.
- [4] 雷龙武.取油样工艺与变压器套管进水受潮的关联性分析[J].安徽电气工程职业技术学院学报,2018,23(3):63-65.
- [5] 张大宁,梁兆杰,李璇,等.套管油纸绝缘受潮与老化的介电响应非线性特性和辨识方法[J].电机与控制学报,2022,26(6):18-30.
- [6] 刘健,解辰,蔺丽华.基于红外图像的电力变压器油位自动检测方法[J].高电压技术,2010,36(4):964-970.
- [7] 范旭华,李伟,徐路强,等.极端环境温度下750kV变压器套管运行油位过低问题分析与对策[J].高电压技术,2014,40(8):2367-2371.
- [8] 黄伟光,王花蕊,张广伟,等.绝缘油全密封自动取样仪[J].科技与创新,2022(19):56-58.
- [9] 石川,赵铁柱,刘灿培.500kV变压器油自动取样装置[J].机电工程,2012,29(5):533-535.
- [10] 邵中华,吴能成,龙鑫宇,等.变压器套管绝缘油自动取样装置研制[J].广西电力,2019,42(2):30-31,50.
- [11] 关欣,南海鹏,王源.PI-PD控制在风水微网中的应用[J].高电压技术,2019,45(7):2177-2184.
- [12] 吴文进,郭海婷,苏建徽,等.基于自适应模糊PID算法的锂电池组双层均衡控制[J].电力系统保护与控制,2024,52(2):111-117.
- [13] 高楷诚,赵珏斐,张泰铨,等.基于A44E集成霍尔元件的PWM调速控制系统设计[J].电工技术,2023(19):132-135.
- [14] 胡晓静,徐鹏,王海亮,等.一起500kV油浸式电抗器故障调查及防范措施分析[J].电力系统保护与控制,2021,49(2):173-178.
- [15] 李忠文,吴龙,程志平,等.光储系统参与微电网频率调节的模糊自适应滑模控制[J].高电压技术,2022,48(6):2065-2076.
- [16] 贾磊,王婷婷,肖微,等.基于油枕空气湿度感知的变压器套管受潮在线监测方法[J].高电压技术,2020,46(9):3114-3123.
- [17] 丰云鹤,孟宝.变压器套管介质损耗因数超标原因分析[J].电世界,2024,65(3):11-13.
- [18] 谷立臣,祁泽林,李贾宝.模糊及PID控制在变转速液压动力源流量控制中的应用研究[J].机械设计与制造,2021(4):29-33.
- [19] 陶捷,郑思远,黄昭烨,等.智能车辆路径跟踪的模糊滑模横向控制[J].林业机械与木工设备,2022,50(2):43-47.
- [20] 王宇,李健,梁鹏,等.基于模糊PID控制的柔性下肢助力外骨骼[J].机械工程师,2024(7):38-42.
- [21] 邱海飞.基于3D打印的减速机传动系统实验模型[J].机械设计与制造,2020(8):267-269.

收稿日期:2024-07-30