

一种基于继电保护测试仪自锁电路研究

刘家豪,陈格格,樊越,钟城

(国网江西省电力有限公司超高压分公司,江西南昌330029)

摘要:在电力系统的日常运维与故障检测工作中,继电保护测试仪作为核心检测设备,其稳定运行直接关系到电力保护装置性能评估的准确性与电力系统的安全可靠性。然而,在现场复杂的测试环境中,由于作业场地空间有限、测试线缆种类繁杂且标识易磨损、操作人员技能水平参差不齐以及测试任务时间紧迫等多重因素叠加,常常出现模拟量输出端子误接至其他电源输出的情况,致使测试仪损坏。文中提出一种继电保护测试仪电压功率源自锁保护电路,光耦元件及电压比较器组成简单逻辑输出,可有效防止继电保护测试仪将模拟量并接至其他电源,同时利用三极管为自锁电路提供误接监视回路。该电路结构简单、成本低、可靠性较高。

关键词:继电保护测试仪;电压比较器;自锁;监视回路

中图分类号:TM 774 文献标志码:A 文章编号:1006-348X(2025)06-0015-05

0 引言

继电保护技术对维持电力系统安全起到重要作用^[1],其中继电保护装置对于二次专业人员不可或缺。目前,继电保护测试设备已经广泛用于变电站的测试中^[2-4],其一般都会配备电压功率源,其输出电压信号给继电保护设备进行故障模拟^[5]。在现场实际测试过程中,由于测试环境的复杂性,可能出现很多问题,如变电站内设备密集、测试区域空间狭小,测试线缆敷设杂乱;测试线缆种类繁多,包括电压线、电流线、信号线等,且部分线缆长期使用后标识模糊不清;此外,在一些紧急抢修或大规模检修场景下,测试任务时间紧迫,操作人员易因疲劳或疏忽出现操作失误等情况,经常发生继电保护测试仪电压功率源的输出端子误接至其他电源输出的问题,可能导致功率源内部元器件如功率管、熔断器等被烧毁,不仅造成昂贵的设备维修费用,还会导致测试工作中断,延误电力设备的检修进度,甚至可能因设备损坏引发二次故障,对电力系统的安全稳定运行构成严重威胁^[6]。为解决上述问题,设计一种自锁保护电路,能够在模拟量输出端子误接其他电源时,自动切断电压功率源输出,具有

重要的现实意义。该电路需具备接线状态识别准确、保护动作迅速、结构简单可靠等特点,同时需适配变电站强电磁干扰环境^[7],为此,文中补充抗干扰设计细节,进一步提升电路在现场应用中的可靠性。

1 测试仪常规端口设计

常规测试仪通常配有电压输出端口及电流输出端口,模拟量输出是基于DSP计算DA输出值,DA模块将数字变成模拟正弦信号,用于继电保护设备故障模拟。作为通用模拟量输出端口,测试仪在使用过程中会存在误接入情况。由于模拟量的输出本质属于电压源,当外接端口误接其余电压,会造成测试仪电压功率源损坏,图1中为常规的继电保护测试仪模型,从图中可以清晰地看到,作为模拟量输出部分,测试仪至少需要配备一路电压输出端口与一路电流输出端口,以满足最基本的测试需求。而在实际的高端测试仪中,为了实现多通道、多类型信号的同时输出,往往会配备更多的输出端口。众多的输出端口在现场复杂的接线环境中,极易因操作人员的疏忽而混淆。因此,文中提出一种基于继电保护测试仪电压功率源输出保护的自锁电路。

收稿日期:2025-08-27

作者简介:刘家豪(1996),男,硕士,工程师,现从事电力继电保护方向研究。



图1 继电保护测试仪模型

2 自锁电路拓扑结构

为实现继电保护测试仪电压功率源的自动保护功能,防止误接线导致的设备损坏,文中设计的自锁电路拓扑结构如图2所示。该拓扑结构主要由整流输出电路(BR1)、单刀双掷继电器(U2)、与门(U1)、双向电压稳压二极管(TVS1)、光耦(Q1)、电压比较器(U3)、固定开关(U21、U22)、切换开关(U23)以及PNP三极管(Q2)等核心元器件组成,各元器件之间通过合理的电路连接,共同实现自锁保护与状态监视功能。

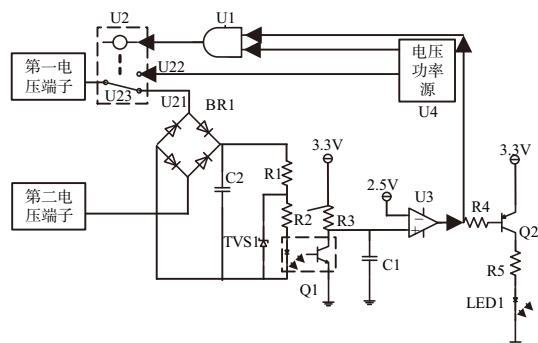


图2 自锁电路拓扑结构

各部分电路的连接关系如下:整流输出电路(BR1)的正输出端与光耦(Q1)发光LED的阳极连接,整流输出电路的负输出端与光耦发光LED的阴极连接,形成光耦的输入回路;在光耦发光LED的两端反向并联双向电压稳压二极管(TVS1),用于防止发光LED因反向电压过高而被击穿损坏,保障光耦输入回路的安全,光耦的光敏三极管的集电极分别与第三电阻一端、第一电容一端、以及电压比较器的同相端连接,光耦的光敏三极管的发射极与电气地连接,第三电阻另一端与3.3V系统电源连接,第一电容另一端与电气地连接,电压比较器的反相端和2.5V系统电源连接,电压比较器的输出端以及电压功率源的切换控制端分别和与门的两个输入端连接,与门的输出端与单刀,双

掷继电器的线圈正输入端连接,单刀双掷继电器的线圈负输入端与电气地连接,单刀双掷继电器的开关切换端与第一电压端子连接,单刀双掷继电器的第二开关固定端与电压功率源的电源输出端连接。

2.1 整流变换模块

整流变换模块的核心元器件为整流输出电路(BR1),其主要功能是将外部误接的交流电源或不同极性的直流电源转换为单一极性的直流电源,为后续的光耦输入输出模块提供稳定的输入信号。在现场测试环境中,误接的电源可能是交流电源(如220V工频交流),也可能是直流电源(如24V、110V、220V直流),且直流电源的极性可能与测试仪输出端子的极性不一致。整流输出电路(BR1)采用全桥整流结构,能够将交流电源整流为直流电源,同时也能将反极性的直流电源转换为正确极性的直流电源,确保无论外部误接电源的类型与极性如何,均能为光耦发光LED提供正向导通电压,使光耦能够准确检测到误接状态。

2.2 光耦输入输出模块

光耦输入输出模块以光耦(Q1)为核心,主要实现强电信号与弱电信号的隔离转换功能。在继电保护测试仪的现场测试过程中,测试仪的电压端子通过接线连接至继电保护设备的端子排,而继电保护设备端子排所连接的电缆电压大多为强电交直流信号(如220V交流、110V直流等),这些强电信号若直接进入测试仪的弱电控制回路(如3.3V、2.5V系统),会对弱电回路中的元器件造成严重干扰,甚至导致元器件烧毁。此外,在光耦发光LED两端反向并联的双向电压稳压二极管(TVS1),能够在外部误接电源电压过高时,通过击穿稳压作用,限制LED两端的电压,防止LED因反向电压过高而被击穿损坏,进一步提高光耦输入输出模块的可靠性。

2.3 电压比较模块

根据电压比较器的工作原理,当同相端输入电压大于反相端参考电压(2.5V)时,电压比较器输出高电平;反之输出低电平。通过这种电压比较方式,能够将光耦输出的模拟信号转换为数字逻辑电平信号,从而准确判断外部接线状态。

1) 2.5V参考电压设定依据

参考电压设定需结合3.3V系统电源与光耦输出特性:光耦截止时,光敏三极管集电极电压由3.3V系

统电源经第三电阻分压得到,稳定在3.2~3.3 V;光耦导通时,集电极电压接近0~0.1 V。为确保同相端电压波动±0.2 V时仍能稳定判别,取两者中间值2.5 V作为参考阈值,这样既能避免光耦截止时电压波动(如3.2 V)低于阈值导致误判,也防止光耦导通时电压(如0.1 V)高于阈值导致漏判^[8]。

2) 抗干扰补充设计

变电站现场存在开关操作、雷击产生的浪涌等强电磁干扰,为防止干扰导致电压比较器误判,在电压比较器同相端增设100 nF电容与1 kΩ电阻组成的滤波电路:其时间常数 $\tau=1 \text{ k}\Omega \times 100 \text{ nF}=100 \mu\text{s}$,可滤除频率高于1.6 kHz的高频干扰信号,确保输入比较器的电压信号稳定^[7]。

2.4 逻辑执行模块

逻辑执行模块以与门(U1)和单刀双掷继电器(U2)为核心,主要功能是根据电压比较模块输出的逻辑电平信号与电压功率源的切换控制信号,控制继电器的动作,实现电压功率源输出的通断。与门(U1)是一种基本的逻辑门电路,其逻辑功能是:只有当两个输入端的信号均为高电平时,输出端才输出高电平;只要有一个输入端的信号为低电平,输出端就输出低电平。

与门(U1)的两个输入端分别连接电压比较器(U3)的输出端与电压功率源的切换控制端:电压比较器的输出端信号反映了外部接线状态(正确或误接);电压功率源的切换控制端信号来自测试仪的主控单元,用于控制电压功率源是否输出信号(如测试开始时输出高电平,控制功率源输出;测试结束时输出低电平,控制功率源停止输出)。

单刀双掷继电器(U2)的线圈供电由与门(U1)的输出端控制:当与门输出高电平时,继电器线圈通电,产生电磁吸力,使开关切换端(U23)与第二开关固定端(U22)连接,此时电压功率源的输出信号能够通过继电器开关传递至第一电压端子(V1),实现正常输出;当与门输出低电平时,继电器线圈断电,电磁吸力消失,开关切换端(U23)在弹簧的作用下复位,与第一开关固定端(U21)连接(U21悬空或接地),此时电压功率源的输出信号被切断,无法传递至第一电压端子(V1),实现自锁保护功能。

通过上述四个模块的协同工作,该自锁电路能够准确识别外部接线状态,并根据接线状态自动控制电

压功率源的输出,有效防止误接线导致的设备损坏。

3 拓扑工作原理

3.1 自锁电路主回路工作过程

假设操作人员在现场测试过程中,不慎将外部正负直流电源(如110 V直流电源的正极接至第一电压端子V1,负极接至第二电压端子V2)误接至测试仪的模拟量输出端子。此时,外部误接的直流电源通过第一电压端子V1与第二电压端子V2接入自锁电路的整流输出电路BR1。

由于整流输出电路BR1采用全桥整流结构,具有单向导电与极性转换功能,无论外部直流电源的极性如何,均能将其转换为单一极性的直流电压,为光耦Q1的发光LED提供正向导通电压。此时,光耦Q1的发光LED正向导通并发光,照射到内部的光敏三极管上,使光敏三极管迅速导通。

在光耦Q1的输出回路中,第三电阻R3与3.3 V系统电源串联后连接至光敏三极管的集电极,光敏三极管的发射极接地。当光敏三极管导通时,其集电极与发射极之间的导通电阻极小,接近短路状态,因此,光敏三极管集电极的电压被钳位在接近0 V的水平。与光敏三极管集电极连接的第一电容C1,由于两端电压无法突变,其电压也迅速放电至0 V。

电压比较器U3的同相端与光敏三极管的集电极连接,因此同相端的输入电压为0 V;而电压比较器的反相端接入的是稳定的2.5 V系统电源,作为参考电压。根据电压比较器的工作特性,当同相端输入电压(0 V)小于反相端参考电压(2.5 V)时,电压比较器U3的输出端输出低电平。

电压比较器U3的输出端与电压功率源的切换控制端分别连接至与门U1的两个输入端。此时,无论电压功率源的切换控制端输出的是高电平(测试仪主控单元控制功率源输出)还是低电平(测试仪主控单元控制功率源停止输出),由于与门U1的一个输入端(电压比较器输出端)为低电平,根据与门的逻辑功能,与门U1的输出端始终输出低电平。

单刀双掷继电器U2的线圈正输入端与与门U1的输出端连接,线圈负输入端接地。当与门U1输出低电平时,继电器U2的线圈两端无足够的电压差,线圈不通

电,无法产生电磁吸力。此时,继电器U2的开关切换端U23在内部弹簧的作用下,保持与第一开关固定端U21的连接状态(U21悬空或接地),而与第二开关固定端U22(与电压功率源输出端连接)断开。因此,电压功率源的模拟电压无法通过继电器开关传递至第一电压端子V1,实现了电压功率源输出的切断,防止误接的直流电源与电压功率源形成并联回路,保护了测试仪的电压功率源不受损坏。此时,电路的导通回路如图3所示,主要为外部误接直流电源→整流输出电路BR1→光耦Q1发光LED→光耦Q1光敏三极管→地的回路,该回路实现了误接状态的检测与信号转换。

假设接入交流电源到第一电压端子和第二电压端子。由于整流输出电路可以将交流电源均变成直流正电压,故这些交流电源将使光耦Q1导通。同样,此时电容C1上的电压为0V,电压比较器U3输出为0V,电压比较器U3输出到与门U1的信号为低电平,与门U1开启闭锁保护电压功率源的模拟电压无法正常输出,导通回路与误接直流端子一样。如图3所示。

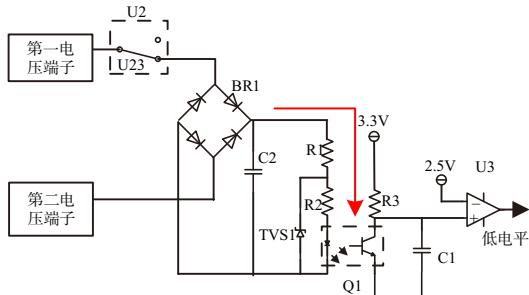


图3 误接时自锁电路导通回路

假设第一电压端子和第二电压端子正确接入保护设备的端子。由于保护设备端子间无电源,发光二极管不导通,所以光耦Q1不导通。此时电容C1上的电压为3.3 V,电压比较器的正端输入为3.3 V,负端输入为2.5 V,此时电压比较器U3输出为高电平,同时与门U1不开启闭锁保护,电压功率源的切换控制端输出高电平时,与门U1输出高电平,单刀双掷继电器U2的开关切换端U23切换至和第二开关固定端U22连接,电压功率源的模拟电压正常通过第一电压端子和第二电压端子输出。

3.2 自锁电路监视回路

在自锁电路的实际应用过程中,仅依靠主回路实现自锁保护功能还不够完善。由于现场测试环境复杂,操作人员可能无法及时察觉电路已进入自锁保护

状态,从而持续尝试测试操作,不仅影响测试效率,还可能因长时间误接线引起其他潜在故障。因此,为了实时反馈电路的工作状态,便于操作人员及时发现并纠正误接线问题,文中在自锁电路中增设了监视回路。

自锁电路监视回路的核心元器件为PNP三极管Q2,同时配备发光二极管LED1作为状态指示元件,其工作原理图如图4所示,带监视回路的自锁电路图如图5所示。监视回路的连接关系如下:PNP三极管Q2的发射极e与3.3 V系统电源连接,集电极c通过串联限流电阻与发光二极管LED1的阳极连接,发光二极管LED1的阴极接地;三极管Q2的基极b通过串联限流电阻与电压比较器U3的输出端连接,基极b同时通过下拉电阻接地(用于稳定基极电平,防止干扰)。

监视回路的工作原理基于PNP三极管的导通特性:PNP三极管的导通条件是发射极e的电压高于基极b的电压,且发射结(e-b结)正向偏置。当三极管导通时,电流从发射极e流向集电极c,形成导通回路;当三极管截止时,集电极c无电流流过,回路断开。

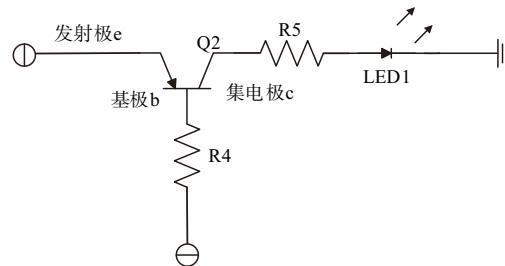


图4 监视回路工作原理图

3.2.1 误接线状态下监视回路工作过程

当外部误接正负直流电源或交流电源时,电压比较器U3的输出端输出低电平。该低电平信号通过限流电阻传递至PNP三极管Q2的基极b,此时,三极管Q2的发射极e接3.3V系统电源,基极b接低电平,发射极电压(3.3V)远高于基极电压(接近0V),发射结正向偏置,满足PNP三极管的导通条件,因此三极管Q2导通。

三极管 Q2 导通后, 电流从 3.3 V 系统电源 → 三极管 Q2 的发射极 e → 集电极 c → 限流电阻 → 发光二极管 LED1 → 地形成导通回路。电流流过发光二极管 LED1 时, LED1 发光, 通过测试仪面板上的指示灯窗口, 操作人员能够直观地观察到 LED1 亮起, 从而

迅速判断出测试仪的模拟量输出端子存在误接线问题,需要立即检查并纠正接线。

3.2.2 正确接线状态下监视回路工作过程

当外部接线正确时,电压比较器 U3 的输出端输出高电平。该高电平信号通过限流电阻传递至 PNP 三极管 Q2 的基极 b,此时,三极管 Q2 的发射极 e 接 3.3 V 系统电源,基极 b 接高电平(接近 3.3V),发射极电压与基极电压之间的差值极小,不满足发射结正向偏置的条件,因此 PNP 三极管 Q2 截止。

三极管 Q2 截止后,集电极 c 无电流输出,发光二极管 LED1 所在的回路断开,LED1 熄灭。操作人员观察到 LED1 熄灭,即可判断测试仪的模拟量输出端子接线正确,可以正常启动测试操作。

通过增设监视回路,操作人员能够实时了解自锁电路的工作状态,快速区分正确接线与误接线情况,及时发现并纠正误接线问题,不仅提高了测试工作的效率,还进一步保障了测试仪的安全运行,增强了整个自锁电路的实用性与可靠性。

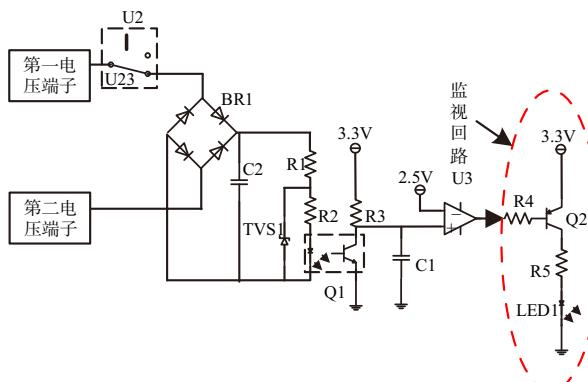


图5 带监视回路的自锁电路图

4 试验结果及分析

如图6所示,左侧为示波器,主要用于监测装置电压电流的输出波形情况;右侧为便携式继电保护测试仪,应用了文中所提自锁电路。当测试仪电压电流输出端通过试验线误接至电源时,对外不输出电压电流,当测试仪电压电流输出端通过试验线接入正常端子时,内置功率源对外正常输出,波形如图7所示,能看到测试仪正常输出三相电压、三相电流。



图 6 继电保护测试仪试验平台

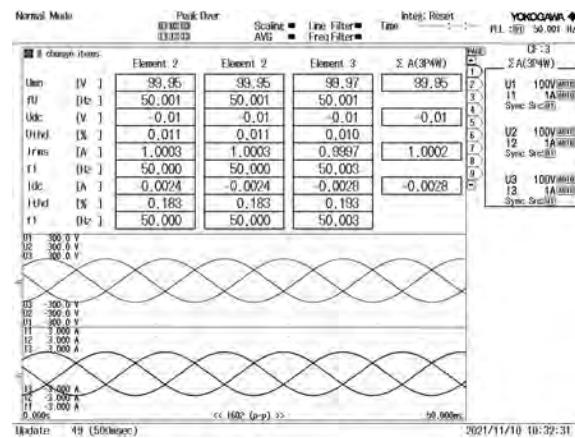


图7 电压电流输出波形

5 该自锁电路与继电保护测试仪常见防护方案的对比

目前继电保护测试仪常用的防护方案包括熔断器保护与软件闭锁,文中方案与两者的对比见表1,可见文中方案在动作速度、维护成本与抗干扰性上均具有明显优势。

表1 防护方案对比

方案	动作时间	维护成本	可靠性	特点
自锁回路	≤5 ms	无耗材更换	高(RC+续流二极管)	硬件自主响应,无需依赖主控
熔断器保护	≥10 ms	需定期更换熔断器	低(无抗干扰设计)	被动熔断,无法自恢复
软件闭锁	≥20 ms	无耗材,但需软件调试	中(依赖主控单元)	需主控单元响应,存在延迟

6 结语

文中介绍了一种基于继电保护测试仪的自锁电路,通过分析不同外接电源状态下的自锁情况,证明所提电路可有效地防止现场试验端子误接而造成测试仪故障,并通过增加监视回路,提高装置的可靠性。该电路成本较低,结构简单,在工程应用上具有一定意义。(下转第28页)

(下转第 28 页)

2) 数据预处理需确保样本群体一致性与可比性,应选取不少于30台同型或结构相近开关的色谱数据,并考虑制造工艺、仪器差异,进行误差补偿;同时需控制负荷波动、统一油温等运行参数,以消除气体溶解与逸散行为差异,保证数据准确可比、统计可靠。

3) 真空有载分接开关油色谱分析推荐采样操作产气速率基线比较,同时研究提出以H₂/TDHG比值作为故障警示值,并据此推导出不同型号开关色谱分析数据的预警阈值,实现更精准的状态评估与故障诊断。

参考文献:

[1] 张德明. 变压器真空有载分接开关 [M]. 北京: 中国电力出

版社, 2015.

- [2] 荀华、郭红兵.一起油浸式真空有载分接开关绝缘油色谱异常分析[J].山西电力,2020(01):37-41.
- [3] IEEE Power and Energy Society. IEEE Guide for Dissolved Gas Analysis in Transformer Load Tap Changers: IEEE Std C57.139TM-2015 [S]. USA New York: Sponsored by the Transformers Committee.2015.
- [4] 国家能源局. 输变电设备状态检修试验规程: DL/T 393—2021 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2022.
- [5] 国家能源局. 电力变压器用真空有载分接开关使用导则: DL/T 1538—2016 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [6] 国家能源局. 电力变压器分接开关运行维修导则: DL/T 574—2021 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2021.
- [7] 张志广, 孟建英, 郭红兵. 真空有载分接开关油中溶解气体限值研究与应用[J]. 内蒙古电力技术, 2020, 38(03): 70-73.

(上接第 19 页)

参考文献:

- [1] 钱丽莹, 徐昊. 电力系统继电保护三误常见问题研究[J]. 电气技术与经济, 2023(08): 280-282.
- [2] 夏东升, 马宏忠, 刘宝稳, 等. 基于 DSP 和 ARM 的便携继电保护测试仪设计[J]. 自动化仪表, 2016, 37(05): 90-95.
- [3] 侯建武, 姜天岳, 范瑞凝, 等. 一种新型继电保护测试仪设计[J]. 中国科技信息, 2023(06): 83-85.

- [4] 李熙芸, 覃云奕, 宋益, 等. 基于国产核心芯片的单兵继保测试设备设计[J]. 长江信息通信, 2022, 35(01): 87-91.
- [5] 穆石磊, 刘建锋, 江玉蓉, 等. 基于 PSCAD 故障数据的数字继电保护测试仪设计[J]. 上海电力学院学报, 2016, 32(02): 6.
- [6] 王浩, 李刚, 张鹏. 双向 TVS 二极管在继电保护设备过压防护中的应用 [J]. 电力电子技术, 2024, 58(03): 142-145.
- [7] 张伟, 刘敏, 赵亮. 变电站弱电回路抗干扰设计与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(02): 189-194.
- [8] 陈洋, 周明, 吴涛. 继电保护测试仪常用防护方案的性能对比[J]. 电气应用, 2024, 43(07): 98-102.

(上接第 23 页)

参考文献:

- [1] 高磊, 闫培丽, 阮思烨, 等. 基于相似度计算的学习型模板库在虚回路设计和校验中的应用[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(07): 205-212.
- [2] 张锋, 张朔严, 乔利红, 等. 基于知识图谱的变电站配置文件智能校核技术研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(04): 64-72.
- [3] 王文琪, 胡炎, 赵娜, 等. 基于距离权重向量优化模型的虚端子自动连接方法[J]. 电网技术, 2018, 42(01): 346-352.
- [4] 范卫东, 冯晓伟, 董金星, 等. 基于历史数据语义相似度的

智能变电站虚端子自动连接[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(17): 179-186.

- [5] 牛健, 刘海涛, 赫嘉楠, 等. 基于规则库的 SCD 文件虚回路隐患自动核查技术[J]. 河北电力技术, 2023, 42(06): 48-52.
- [6] 李腾, 吕飞鹏, 王星宇, 等. 基于烟花算法计算莱文斯坦距离权重的虚端子自动连接方法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(11): 90-94.
- [7] 史卓鹏, 孔祥敏, 魏佳红, 等. 基于 K-近邻加权算法的智能站虚端子自匹配方法[J]. 计算机科学, 2025, 52(增刊1): 353-358.
- [8] Jianfu Bai, Yifei Li, Mingpo Zheng, et al. A sinh cosh optimizer[J]. Knowledge-based systems, volume 282, 2023, 111081, ISSN 0950-7051.