

智能变电站二次回路故障智能诊断技术研究

牛 亮¹, 王沙沙¹, 李满春¹, 冯博源¹, 冯自权², 程 林²

(1. 国网陕西省电力公司西咸新区供电公司, 陕西 咸阳 712000;

2. 武汉中元华电电力设备有限公司, 湖北 武汉 430000)

摘要: 新建智能变电站或者投运时间长的智能变电站, 其模拟量采样和开关量二次回路会由于种种外部或内部因素发生各种类型的虚接、换相和短路等故障, 二次回路发生故障时, 会引起二次保护装置、测控装置保护逻辑判别失灵, 导致智能变电站现场出现开关误动、拒动的现象, 最终引起电力事故的发生, 严重的还会引起电气设备的损坏和人员的伤亡。主要介绍一种智能变电站二次回路故障智能诊断技术, 利用闭环测试的方法配合智能判别逻辑完成二次电压、电流和开关量回路的虚接、换相和短路等故障的智能判别和定位, 保证变电站的安全可靠运行。

关键词: 智能变电站; 故障; 二次回路; 智能诊断; 检修

Research on intelligent fault diagnosis technology of secondary circuit in intelligent substation

NIU Liang¹, WANG Shasha¹, LI Manchun¹, FENG Boyuan¹, FENG Ziquan², CHENG Lin²

(1. Xixian New Area Power Supply Company, State Grid Shaanxi Electric Power Company, Xianyang 712000, China; 2. Wuhan Zhongyuan Huadian Power Equipment Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: For new intelligent substations or intelligent substations that have been put into operation for a long time, various types of virtual connection, commutation, short circuit and other faults will occur in the analog sampling and switching value secondary circuit due to various external or internal factors. When the secondary circuit fails, it will cause the failure of the protection logic discrimination of the secondary protection device and measurement and control device, resulting in the on-site failure of the switch in the intelligent substation. The phenomenon of refusing to move will eventually lead to the occurrence of power accidents, and in serious cases, it will also cause the damage of electrical equipment and casualties. An intelligent fault diagnosis technology for secondary circuit of intelligent substation is mainly introduced, which uses the closed-loop test method and intelligent discrimination logic to complete the intelligent discrimination and location of faults such as virtual connection, commutation and short circuit of secondary voltage, current and switching value circuit, so as to ensure the safe and reliable operation of substation.

Key words: intelligent substation; fault; secondary circuit; intelligent diagnosis; overhaul

0 引言

近年来, 随着我国社会经济的高速发展, 我国电力事业取得了明显的进步, 社会对电能的需求量也越来越大, 电能已经成为人们生活和社会

发展不可缺少的能源之一。但是在变电运行过程中还是会遇到各种各样的故障, 电力系统运行过程中出现的一系列故障会对电力系统的性能造成影响, 最终会影响到电力系统的正常供电。在人

们对电力系统供电要求越来越高的背景下，加强对电力系统的研究有着重要的意义。

国家电网公司自2009年启动智能变电站试点建设之后，截至目前，国内已建设约5 000多座智能变电站，包括第一代智能变电站和第二代智能变电站。智能变电站由于高度的系统集成化、合理的结构布局，在经济节能环保等方面取得了一定的成效。然而，在实际的运用中，也暴露了不少问题。特别是在智能变电站二次系统的运维检修方面，繁重的检修工作量和高额的检修成本极大地制约着智能变电站的发展^[1-2]。

目前，智能变电站二次系统的现场检测主要对单台保护装置进行功能和性能检测，主要偏重于二次保护装置的保护功能逻辑和出口回路检测，而对二次模拟量、开关量采样回路的故障检测还未有专门的检测工具和手段，主要依靠一次升压、通流及对点等手动实验的方法间接验证，这与国家电网公司和南方电网公司近几年的“轻逻辑、重回路”的检修原则相违背。

针对上述问题，基于智能变电站运检更简单、更智能和更便利的原则，本文提出一种智能变电站二次电压、电流及开关量回路故障诊断定位方法及系统，通过闭环测试及数据分析的方法完成二次回路的虚接、短路和换相等各类故障的诊断及定位，为消除智能变电站二次回路故障提供依据，维护电网的安全可靠运行^[3-4]。

1 智能变电站二次回路分析

1.1 智能变电站二次回路结构

智能变电站由三层两网结构构成，三层为过程层、间隔层和站控层^[5]。过程层为智能终端、合并单元等与一次断路器、开关和互感器等相关的设备；间隔层为二次保护、测控等相关设备；站控层为后台监控主站等系统。两网为过程层与间隔层之间的过程层通信网络和间隔层与站控层之间的站控层通信网络，过程层网络的通信协议报文为SV、GOOSE，站控层网络的通信协议报文为MMS。目前在建110 kV以上电压等级智能变电站取消了合并单元设备，即二次保护装置

直接从TA、TV互感器二次侧采集电压、电流信号，其二次采样回路结构如图1所示。

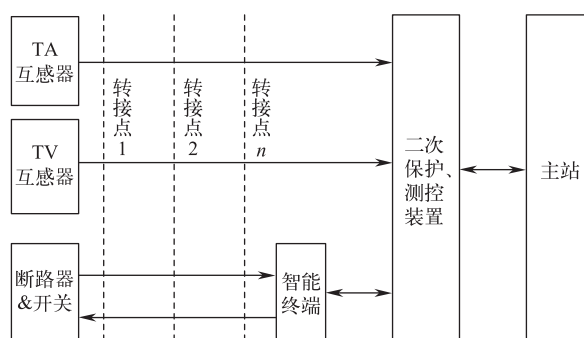


图1 智能变电站二次回路结构

Fig. 1 Secondary circuit structure of intelligent substation

TA互感器、TV互感器将一次电流、电压信号转换为二次电流、电压信号，通过一系列的二次回路转接点，最终传输至二次保护、测控等设备，开关、断路器的位置接点通过一系列的二次转接及传输至智能终端，智能终端通过开关量与GOOSE报文转换后利用光纤将数据传输至二次保护、测控装置，最终实现智能变电站二次回路信号的传输。

1.2 二次回路传统诊断方法

目前，针对智能变电站二次回路的诊断及测试主要依靠在一次侧通流、升压的测试方法，即在互感器一次侧施加一次电压、电流信号，同时人工在二次保护装置进行数据查看及判别二次采样回路正常与否，具体如图2所示。

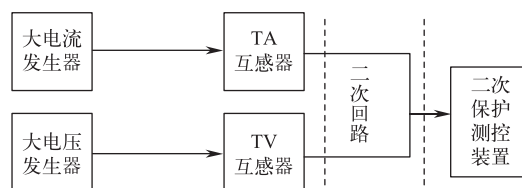


图2 智能变电站二次回路传统诊断方法

Fig. 2 Traditional diagnosis method of secondary circuit in intelligent substation

针对二次电流回路，通过大电流发生器直接施加在互感器一次侧输入端，同时，互感器将一次大电流输入信号转换为电流为1 A或5 A的二次额定值，经过现场实际一系列二次回路最终将电流信号传输至二次保护、测控装置，通过人工

读取二次保护装置的电流读数判别二次电流回路正常与否；针对电压回路，通过高压模拟器产生10 kV以上高压至互感器一次侧输入端，同时，互感器将一次大电压输入信号转换为电压为57.74 V的二次额定值，经过现场实际一系列二次回路最终将电压信号传输至二次保护、测控装置，通过人工读取二次保护装置的电压读数判别二次电压回路正常与否。

通过高压、大电流模拟进行加压通流的实验方法是目前智能变电站现场二次回路的主要测试方法，但是受限于所用设备体积大、重量大、移动不方便和现场测试需要人员多等因素影响，传统二次回路测试方法应用场景限制很大，智能变电站现场亟需能完成二次回路故障诊断的技术及系统^[6-7]。

2 二次回路故障智能诊断定位原理

二次回路故障智能诊断定位技术通过远程无线控制和闭环测试的技术来实现，具体原理如图3所示。

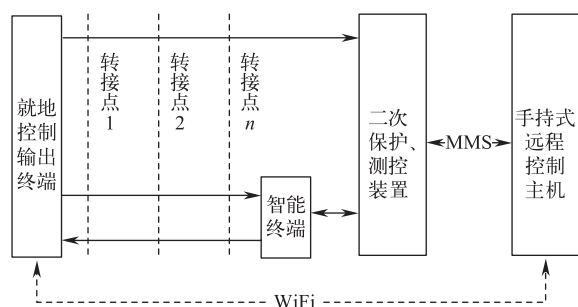


图3 智能变电站二次回路故障诊断原理

Fig. 3 Fault diagnosis principle of secondary circuit in intelligent substation

二次回路故障智能诊断定位由手持式远程控制主机和控制输出终端构成。手持式远程控制主机为控制分析终端，完成测试命令的下发和闭环采样数据的采集及分析。控制输出终端为就地执行信号源，完成输出命令的执行及二次模拟量和开关量信号的输出与采集^[8-9]。

就地控制输出终端具备模拟量电压、电流信号输出端口，在互感器二次侧直接连接智能变电站二次回路电压、电流信号源，最终经过智能

变电站整体二次回路及传输转接点传输至二次保护、测控装置。同时具备开入量空接点和开出量空接点，在断路器侧分别模拟实际断路器的分合闸状态及接收保护、测控装置的跳合闸指令。其中，开入量空接点与二次保护、测控的保护跳闸出口接点相连接，实时检测二次回路出口的分合闸指令；开出量空接点与二次保护、测控的断路器位置采集通道相连接，模拟断路器分合闸状态变化。

手持式远程控制主机通过无线网络与就地控制输出终端连接，通过以太网与二次保护、测控装置连接，最终行程覆盖智能变电站整体二次回路的闭环系统。手持式远程控制终端通过无线信号就地控制输出终端在二次回路起始端输出电压、电流信号和开关量位置信号，二次保护测控装置相关的电压、电流及开关量位置信号转换为对应的遥测、遥信报文上送主站后台。同时，手持式远程控制终端通过以太网连接二次保护测控装置，利用MMS报文通信获取电压、电流及开关量对应的遥测、遥信报文，并进行一致性比对和数据分析，实现智能变电站二次回路的故障诊断及判别^[10]。

3 二次回路故障智能诊断方案实现

3.1 电压回路故障诊断实现

就地控制输出终端按A、B、C相序依次对智能变电站二次电压回路互感器的二次侧起始端施加额定电压 U_n ，手持式远程控制主机内置的IEC 61850主站实时获取保护装置相关电压采样通道上送主站后台的电压遥测数值。根据预测模型提前创建预设判据^[11-12]，首先对IEC 61850主站获取到的电压遥测数值进行分析，根据电压遥测数值是否为零判别出对应相别电压回路是否出现虚接故障；其次，在电压遥测数值为非零的前提下，根据对应测试通道的遥测值是否为额定电压 U_n 判断其是否出现换相故障和短路故障；然后，根据当前未被测试电压回路通道的幅值情况确认被测电压回路的故障类型，即换相故障、短路故障和接地故障等；最后，按顺序对所有电压回

路进行一轮闭环判别诊断, 确认回路故障类型, 并自动生成相关的故障诊断检测报告。具体实现流程及判别逻辑如图4所示。

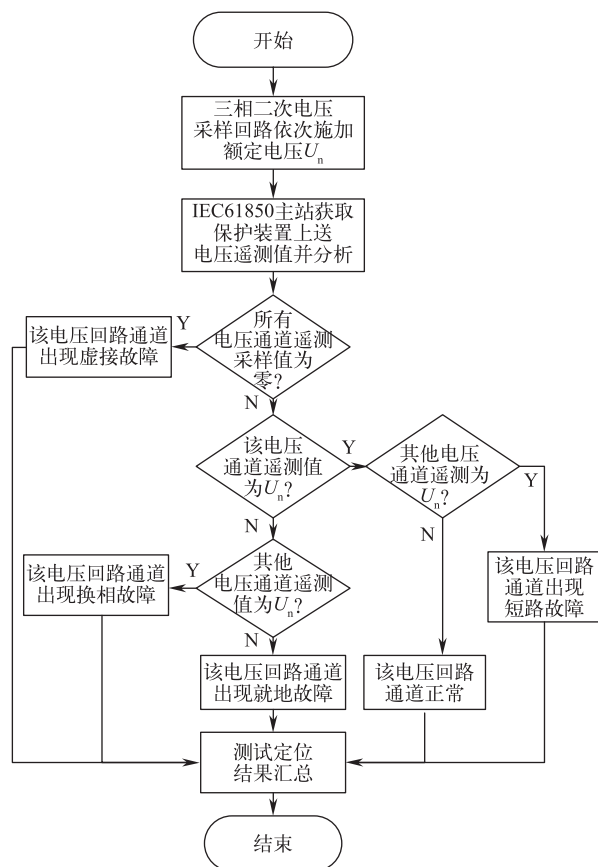


图4 二次电压回路故障诊断实现方法

Fig. 4 Realization method of fault diagnosis of secondary voltage circuit

3.2 电流回路故障诊断实现

就地控制输出终端按A、B、C相序依次对智能变电站二次电流回路互感器的二次侧起始端施加额定电流 I_n , 手持式远程控制主机内置的IEC61850主站实时获取保护装置相关电流采样通道上送主站后台的电流遥测数值。根据预测模型提前创建预设判据, 首先对IEC61850主站获取到的电流遥测数值进行分析, 根据电流遥测数值是否为零判别出对应相别电流回路是否出现虚接故障; 其次, 在电流遥测数值为非零的前提下, 根据对应测试通道的遥测值是否为额定电流 I_n , 且其他通道值为零判断对应检测通道是否正常; 然后, 利用多通道幅值之后是否为额定值,

判别是出现短路故障还是单相接地故障; 最后, 按顺序对所有电流回路进行一轮闭环判别诊断, 确认回路故障类型, 并自动生成相关的故障诊断检测报告。具体实现流程及判别逻辑如图5所示。

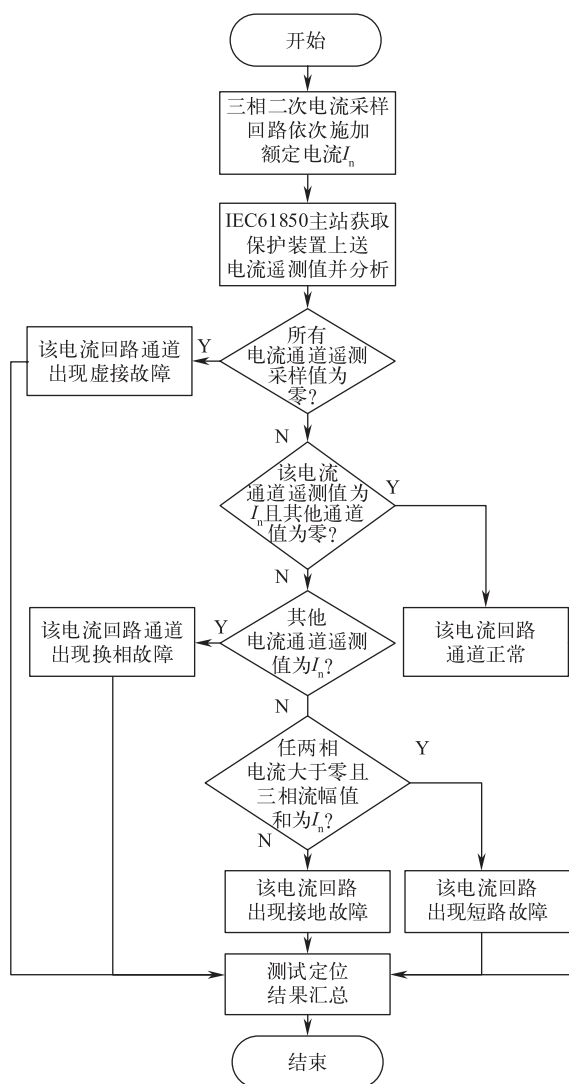


图5 二次电流回路故障诊断实现方法

Fig. 5 Realization method of fault diagnosis of secondary current circuit

3.3 开关回路故障诊断实现

就地输出控制终端在智能变电站的断路器、刀开关等二次开关量回路起始侧进行分合位置变化模拟, 手持式远程控制主机内置的IEC 61850主站实时获取保护装置相关开关量回路通道上送主站后台的遥信分合位变化状态值。根据预测模型提前创建预设判据, 利用IEC主站获取到的二

次保护装置的通道位置变化信息与就地输出端模拟的二次开关量回路变化信号进行对比分析。首先比对被测二次回路的状态变位与实际主站后台获取的对应遥信变位是否一致，判别是否有故障发生。当状态变位一致，且其他二次开关量回路对应遥信无相关一致性变位时，则说明该开关量回路正常；当状态变位一致，但有其他二次开关量回路对应遥信有相同变位时，则说明该开关量回路或其他开关量回路发生短路故障。其次，在二次回路状态变位与对应遥信变位不一致下进行具体故障分析，当存在其他未被测试到二次开关量回路对应遥信变位状态与该被测开关量回路变位状态一致时，则证明该回路存在换相故障，否则证明该回路存在虚接故障。最后，按顺序对所有二次回路进行一轮闭环判别诊断，并将测试结果进行汇总，确认回路故障类型，并自动生成相关的故障诊断检测报告。具体实现流程及判别逻辑如图6所示。

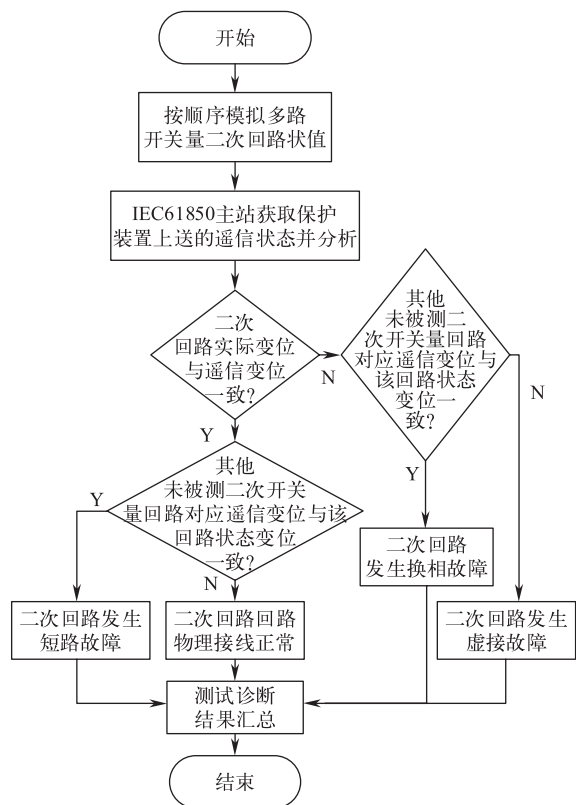


图6 二次开关回路故障诊断实现方法
Fig. 6 Realization method of secondary switch circuit fault diagnosis

4 二次回路故障智能诊断仿真验证

利用国内某厂家继电保护测试仪和国内某厂家线路保护，对模拟量和开关量进行相关的仿真验证。继电保护测试仪的电压、电流和开出接点分别与线路保护的电压采样、电流采样和开关位置采集接点相连接。手动控制继电保护测试仪进行电压、电流二次额定采样值和开关分合位置的模拟，并通过线路保护液晶显示对二次额定采样值和开关量位置进行读数及记录。在相关的仿真中通过修改继电保护测试仪和线路保护之间的接线模拟虚接、换相和短路故障，完成对智能变电站二次回路智能诊断定位技术的有效仿真验证。具体仿真验证方法如图7所示。

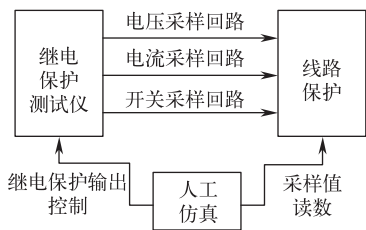


图7 故障诊断仿真验证原理
Fig. 7 Fault diagnosis simulation verification principle

4.1 电压回路故障验证

模拟三相电压回路，通过仿真进行验证，电压施加额定值 U_n ，以A相通常故障诊断为例，其对应的故障仿真判别结果见表1。

表1 电压回路仿真结果
Tab. 1 Voltage loop simulation results

故障类型	U_a 值	U_b 值	U_c 值
回路正常	U_n	0	0
虚接故障	0	0	0
AB 换相	0	U_n	0
AC 换相	0	0	U_n
AB 短路	U_n	U_n	0
AC 短路	U_n	0	U_n
接地故障	$0 < U_a < U_n$	0	0

4.2 电流回路故障验证

模拟三相电流回路，通过仿真进行验证，电流施加额定值 I_n ，以A相通道故障诊断为例，其对应的故障仿真判别结果见表2。

表2 电流回路仿真结果

Tab. 2 Current loop simulation results

故障类型	I_a 值	I_b 值	I_c 值
回路正常	I_n	0	0
虚接故障	0	0	0
AB 换相	0	I_n	0
AC 换相	0	0	I_n
AB 短路	$I_a+I_b=I_n$	$I_a+I_b=I_n$	0
AC 短路	$I_a+I_c=I_n$	0	$I_a+I_c=I_n$
接地故障	$0 < I_a < I_n$	0	0

4.3 开关回路故障验证

模拟3个断路器的回路，回路分别为A、B、C，通过仿真进行验证，1代表合位，0代表分位。以第一个断路器的通道故障诊断为例，其对应的故障仿真判别结果见表3。

表3 开关量回路仿真结果

Tab. 3 Simulation results of switching value circuit

故障类型	断路器 A 状态	断路器 B 状态	断路器 C 状态
回路正常	1	0	0
虚接故障	0	0	0
AB 换相	0	1	0
AC 换相	0	0	1
AB 短路	1	1	0
AC 短路	1	0	1

5 结束语

本文通过对智能变电站现场二次整体回路检修中面临的问题进行分析，采用闭环测试的方法，实现了二次回路虚接、换相和短路等故障的智能诊断及定位。首先阐述了智能变电站二次回路的整体结构及目前回路故障诊断的手段和方法，分析了现有二次回路检验的弊端和实施难点。其次，设计了一种基于无线远程通信和闭环检修的分布式二次回路故障诊断定位技术，利用自动测试辅助智能判别的方法完成了二次电压、电流和开关量回路的虚接、换相和短路等故障诊断，并设计了具体的实现判别逻辑。最后，配合继电保护测试仪对该技术进行仿真验证，通过仿真分析及仿真效果可知，实际应用中能实现智能变电站二次回路故障的有效诊断及定位。

参考文献

- [1] 文俊, 钟加勇, 朱燕, 等. 智能变电站二次系统实时闭环测试技术研究[J]. 电测与仪表, 2020,

57(11): 68-73.

- [2] 王瑞文. 可视化智能变电站二次设备故障诊断系统[J]. 电子制作, 2019(12): 82-83.
- [3] 张历, 辛明勇, 高吉普, 等. 智能变电站二次设备多维度故障诊断与定位系统方案设计[J]. 自动化与仪器仪表, 2019(5): 59-62, 67.
- [4] 耿晓辉, 侯念国, 张辰, 等. 智能变电站故障过程可视化分析系统设计[J]. 山东电力技术, 2019, 46(6): 30-34.
- [5] 朱小红, 王利平, 杨琪, 等. 基于Markov的智能变电站二次系统间隔层和过程层可靠性评估[J]. 电测与仪表, 2019, 56(8): 73-80.
- [6] 尹相国, 张文, 路致远, 等. 面向智能变电站二次设备的故障诊断方法研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(3): 39-45.
- [7] 王同文, 刘宏君, 邵庆祝, 等. 智能变电站二次回路智能预警及故障诊断技术研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(8): 59-63, 98.
- [8] 汪希伟, 李超, 郭启伟, 等. 智能变电站继电保护状态监测与故障诊断系统研究[J]. 山东电力技术, 2017, 44(2): 55-57.
- [9] 徐拓, 葛以康. 智能变电站继电保护二次回路在线监测与故障诊断技术[J]. 通信电源技术, 2019, 36(11): 279-280.
- [10] 李远, 李虹, 罗建平, 等. 智能变电站二次回路在线监测与故障定位方法的研究与实现[J]. 电气技术, 2019, 20(9): 78-82, 96.
- [11] 姜学朴, 吴港, 孙婷, 等. 智能变电站网络设备故障的快速准确定位技术[J]. 电测与仪表, 2019, 56(8): 94-98.
- [12] 王喜, 赵宵凯, 熊斌宇. 一种基于数据挖掘技术的智能变电站故障诊断方法[J]. 智慧电力, 2018, 46(4): 39-43.

作者简介

牛亮 (1974—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为智能变电站继电保护运维。

(收稿日期: 2021-10-12)