

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.02.007

基于GOOSE报文的智能断路器监测技术

章彬¹, 向真¹, 邹俊君¹, 吕启深¹, 艾精文¹, 廖敏夫², 梁俊滔³

(1. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518000; 2. 大连理工大学电气工程学院, 辽宁 大连 116024;

3. 深圳市国立智能电力科技有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 在开放和互联通信模式的基础上,为检测智能断路器的性能指标及运行的可靠性,基于IEC 61850标准,采用面向对象技术,对智能断路器的物理结构和功能(服务)进行抽象。建立了智能断路器运行状态的内部逻辑节点,实现现场参量的测量数据信息、状态数据的监测数据信息和操作控制数据信息的可靠传输。结合IEC 62271标准,针对智能断路器状态参数的特征扩充了IEC 61850标准的信息库,构建了适用于断路器的IED服务器模型,基于发布者/订阅者模式的GOOSE报文传输机制进行数据包传输。IED模型提供了开关触头温升检测、真空开关运动状态检测及一次回路参数检测。在此基础上完成了IEC 61850在智能断路器通信中的实现,通过合闸试验证明了智能断路器状态监测的可靠性。

关键词: 智能断路器; IEC 61850; IED服务器; 开关触头; GOOSE报文

Monitoring Technology for Intelligent Circuit Breaker Based on GOOSE Message

ZHANG Bin¹, XIANG Zhen¹, ZOU Junjun¹, LYU Qishen¹, AI Jingwen¹,
LIAO Minfu², LIANG Juntao³

(1. Shenzhen Power Supply Co., Ltd., Guangdong Shenzhen 518000, China; 2. School of Electrical Engineering,

Dalian University of Technology, Liaoning Dalian 116024, China; 3. Shenzhen Guoli Zhineng Electric Power

Technology Co., Ltd., Guangdong Shenzhen 518000, China)

Abstract: In order to improve the performance of intelligent circuit breaker and its reliability, we utilized the object-oriented technology for smart vacuum circuit breaker physical structure and function (service) based on IEC 61850 standard. The operational status of internal logical node of intelligent breaker was established to integrate the measuring information flow of field parameters, the monitoring information flow of status data and the operating and controlling information flow. According to the characteristic of intelligent breaker status parameters, the IEC 61850 standard repository can be extended based on IEC 62271 standards, and the IED server model was built suitable for intelligent breaker. The model includes the temperature testing of the switch contacts, the detection of vacuum switch motion and the primary circuit parameters testing. Finally, we accomplished the IEC 61850 implemented in the intelligent breaker communication. It is showed that the feasibility of intelligent vacuum breaker status monitoring through the closing test.

Key words: intelligent circuit breaker; IEC 61850; IED server; switch contacts; GOOSE message

0 引言

智能断路器的智能化主要表现在分合闸控制命令的网络化,以及开关状态信息的可视化^[1]。主要包括一次电信号参数检测、触头温升检测、运动状态检测等^[2]。开关电器的智能化应包含3方面的工作:实现感知功能的智能检测技术,完成思维和

判断的开关的智能控制系统以及行之有效的执行功能的操动系统^[3-4]。数字通信技术将这3方面有效串联,IEC 61850标准将现场设备与变电站主控计算机之间的关系联系的更加紧密^[5-6]。

智能断路器由断路器和智能组件构成,两者之间通过传感元件和指令执行元件组成一个整体。智能组件可完成断路器的网络化与数字化,并实现

相关测量、保护与控制的通信平台^[7-9]。文中将电子式互感器接入智能断路器,实现对一次电信号的在线检测,根据智能断路器智能检测的原理及方法,基于传感技术的测量电路,实现IEC 62271标准的断路器控制逻辑节点连接,搭建IED服务器模型及面向变电站的时间模型,通过合闸试验验证应用于智能变电站过程层高压开关设备通信平台的可靠性。

1 断路器运行状态智能检测

测量参数包括开关触头温升、开关运动状态、主回路一次参数。对智能断路器进行智能检测的传感器安装位置见图1。开关主回路一次参数由电子式互感器完成采集及数据传输。

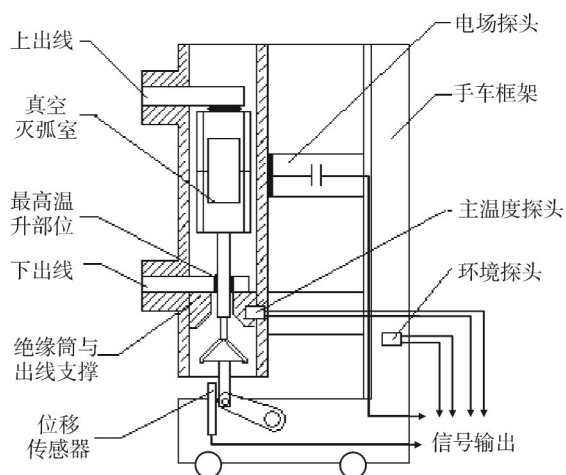


图1 传感器安装位置

Fig. 1 Installation place of transducers

1.1 开关触头温升检测

开关触头接触部位的温升决定了真空开关在额定电流状态下的工作状态,对真空开关的温度传感元件进行直接测量存在电磁兼容和电位隔离问题^[10-12],红外法测试不能保证开关长期运行后的数据精度及稳定性。文中采用对温度较为敏感的平衡电桥测量法,温升测试等效图见图2。

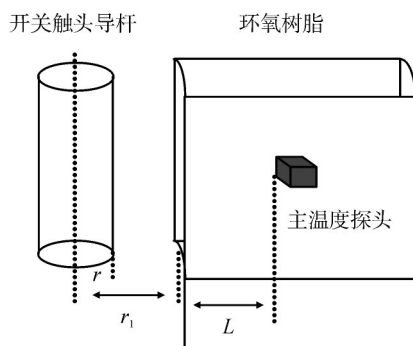


图2 测温等效图

Fig. 2 Diagram for temperature tests

图2中: r 为开关导杆半径,属环氧树脂基负荷材料; r_1 为开关内侧半径; L 为温度探头到侧表面的距离;则 r_1-r 为开关内空气间隙;设 λ_k 为空气热导率, λ_h 为环氧树脂基复合材料热导率;开关触头外表面积为 A_0 ,外表温度为 σ_0 ;环氧树脂基复合材料内侧表面积为 A_1 ,内侧表面温度为 σ_1 ;温度探头温度为 σ 。将开关触头导杆等效为发热源,发热功率设为 P ,由傅里叶定律得空气间隙温差公式,见式(1)。

$$\sigma_1 - \sigma_0 = \frac{P \cdot r_1 - r}{A_0 \cdot \lambda_k} \quad (1)$$

真空开关内侧表面到温度探头的温差($^{\circ}\text{C}$)为

$$\sigma - \sigma_1 = \frac{P \cdot L}{A_1 \cdot \lambda_h} \quad (2)$$

得

$$\sigma - \sigma_0 = \frac{P \cdot r_1 - r}{A_0 \cdot \lambda_k} + \frac{P \cdot L}{A_1 \cdot \lambda_h} \quad (3)$$

牛顿公式为

$$P = \sigma_0 \cdot K_T \cdot A_0 \cdot U_2 \quad (4)$$

式(4)中: U_2 为平衡电桥输出信号; λ_k 已知; K_T 和 λ_h 由开关触头材料确定。根据式(3)、(4),由测得的温度探头温度 σ 后,进而求得真空开关触头温度 σ_0 。采用平衡电桥原理进行温升测量,温升测量电桥电路见图3。图3中,双臂电桥分别接入主温度探头和环境温度探头。经过合适的参数设置,可以直接得到与温升对应的输出电压。PT100型铂电阻的温度阻值呈线性关系。 R_1 为图(1)中所示的主温度探头热电阻, R_2 为环境温度热电阻, R_0 为匹配电阻, U_1 为电压源, U_2 为温升的输出信号。

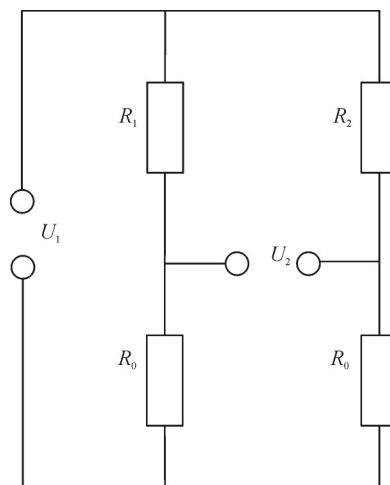


图3 温升测量电桥电路

Fig. 3 Circuit of the temperature test

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{R_2 - R_1}{R_0 \left(\frac{R_1}{R_0} + 1 \right) \left(\frac{R_2}{R_0} + 1 \right)} \quad (5)$$

设置 $R_0 \gg R_1, R_2$, 得

$$U_2 = U_1 \cdot (R_2 - R_1) / R_0 \quad (6)$$

为保证测量稳定性, R_1, R_2 选取相同温度系数的铂热电阻, 并将 U_2 通过隔离器及A/D转换器变换为数字信号输出。 R_1, R_2 输出不同时, 考虑确定的时间滞后及衰减量, 从而得到与触头接触部位温升对应的电压信号 U_2 。测量误差为被测温度的 $\pm 1\%$, 属系统误差。该在线测量方法结构简单、工业实现方便, 运行可靠、寿命长, 并不受外界环境干扰^[13], 可实现高压开关的智能测量。

1.2 开关分合状态检测

对智能断路器运动特性进行在线检测可为断路器的智能操作提供位置反馈信号。如图1中所示, 位移传感器与灭弧室动导电杆连接, 传输操动系统的实时运动状态信息^[14-15]。线性位移传感器的使用寿命可达数亿次, 运动速度达到10 m/s, 误差在 ± 0.2 m/s, 可满足智能真空开关的在线测试要求。

1.3 一次回路参数检测

一次回路参数采用电子式互感器进行数据采集, 电子式电流互感器的传感单元由罗氏线圈(保护)和LPCT(测量)组成, 电子式电压互感器的传感单元为电容分压器, 组合型有源电子式互感器结构图见图4。可满足对220 kV系统测量和保护设备的数字化要求, 基本准确度满足0.2 S级。电子式互感器的传感单元采集信号后通过光纤传入合并单元进行数据处理, 由所测电流及电压参数的瞬时值, 可得功率及功率因数^[16-18]。电子式电流互感器还可实现过载电流、故障电流、零序电流检测, 一次电流谐波含量检测。电子式电压互感器可实现电源电压频率和电压谐波含量检测^[19]。

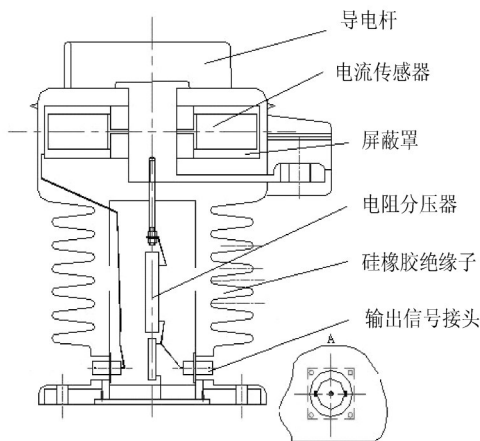


图4 组合型电子式互感器结构

Fig. 4 The structure of combined electronic transformer

2 基于IEC 62271标准的数字通信

数字化变电站中, IEC 61850标准定义了智能电子设备之间的信息模型, 实现了面向对象技术的功能建模。对于过程层, IEC 61850建立了电子式互感器标准模型(逻辑节点 TCTR 和 TVTR), 同时建立了开关场设备的标准模型(断路器模型 XCBR 和隔离开关模型 XSWI)。基于此逻辑节点, 可实现与开关场相关的通信接口建模功能, 有助于对过程层开关装置进行远程控制和智能监测。为完善对开关设备的监控信息, 在IEC 61850标准的基础上, IEC 62271标准对其进行了扩充, 见表1。主要是针对过程层的高压开关设备建模, 并提供与IEC 61850标准兼容的通信接口。

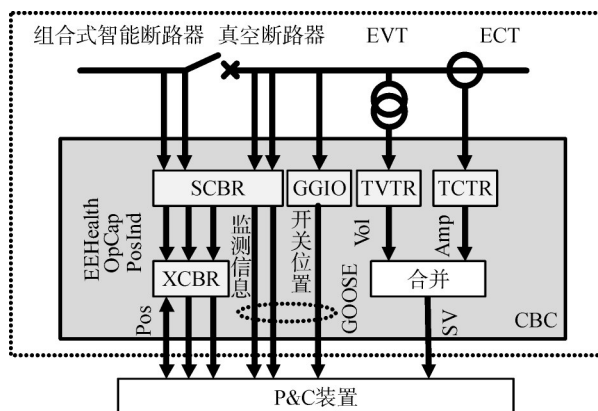
表1 IEC 62271标准扩充的逻辑节点

Table 1 Extensive logical nodes in IEC 62271

逻辑节点	名称	功能
断路器监测	SCBR	描述断路器监测信息
隔离开关监测	SSWI	描述不具备切断短路电流能力的开 关, 例如: 刀闸、空气开关、接地开关 等监测信息

2.1 智能断路器内部逻辑节点

智能断路器内逻辑节点关系见图5。



CBC—智能断路器控制器; PosInd—断路器分合位置指示;
Pos—断路器分合位置信息; OpCap—断路器动作能力;
EEHealth—外部设备健康状况。

图5 智能断路器内部逻辑节点

Fig. 5 Internal logical nodes in intelligent breaker

电子式互感器的一次电信号分别由逻辑节点 TCTR(电流)和TVTR(电压)中的数据元素 Amp 和 Vol 表示。根据实际需求, 可在合并单元将一次电信号组装成数据集, 以采样值报文(SMV)的形式传递给间隔层。

智能断路器控制器可实现对断路器的智能检测, 并采集和发布一次侧电信号。由传感装置采集

智能断路器的状态信息,并通过逻辑节点SCBR的内部数据元素反映。在控制器内部,将逻辑节点SCBR中分合闸位置信息(PosInd)和操作能力信息(OpCap)传递给逻辑节点XCBR,进而发布给间隔层的保护

测控设备。开关触头温升的状态信息由SCBR直接发送到间隔层。

2.2 智能断路器 IED 模型

智能断路器 IED 服务器模型见图 6。

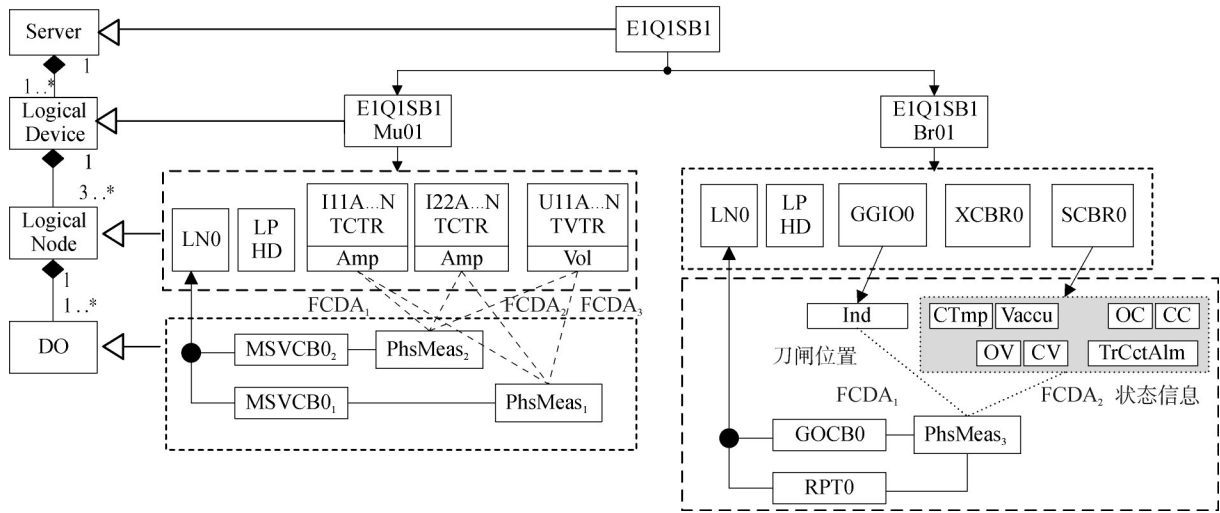


图 6 智能断路器 IED 服务器模型

Fig. 6 Server model of intelligent breake

在智能断路器 IED 服务器模型中,E1Q1SB1为 IEC 61850标准中Server类的实例化对象名称。IED 服务器模型中包含E1Q1SB1Mu01和E1Q1SB1BR01两个逻辑设备,E1Q1SB1Mu01是智能断路器中所接入电子式互感器的建模模型,用于检测一次回路参数,由采样值控制块MSVCB01和MSVCB02管理,最终以SMV帧格式发布给间隔层。E1Q1SB1BR01为智能断路器建模模型,用于监测断路器的状态参数。

逻辑节点XCBR0内描述了智能断路器的状态信息,数据属性Pos是对断路器触头分合位置的抽象定义,IEC 61850标准将该属性的数据类型定义为可控制的双点类DPC,DPC中的状态数据属性stVal为枚举型数据,其描述触头的4中状态信息分别为:分闸位置、中间位置、合闸位置及触头损坏状态^[20]。描述触头分合闸控制信息的控制数据属性ctlVal为布尔型变量,ctlVal数值的真假分别代表触头的分合闸状态。

为详细描述断路器运行状态,对逻辑节点SCBR类的数据属性进行扩展,见表2。

表2中的状态值通过功能约束数据属性构造成数据集PhsMeas03,进而与GOOSE中的控制块GOCB0及报告控制块RPT0绑定。由此针对组合型智能断路器建立了符合 IEC 61850标准的 IED 服务器模型。

由图6可见,智能断路器通过GOOSE报文向间隔层发布状态信息,报文发布过程由控制块GOCB0负责。基于订阅者/发布方通信机制,GOOSE报文提供一种面向变电站事件的快速传输通道,满足智能

表 2 扩展的数据属性

Table 2 Extensive data attributes

属性名称	属性类型	功能	扩展属性
CTmp	MX	触头温度信息	是
OC	MX	分闸线圈操作电流	是
CC	MX	合闸线圈操作电流	是
CV	MX	合闸速度	是
OV	MX	分闸速度	是
PosInd	DPS	触头位置指示	否
TrCctAlm	SPS	触发电路报警	否

断路器运行状态信息实时传输的特性,进而传送给间隔层的保护测控装置。

2.3 面向变电站的时间模型

GOOSE报文的传输机制采用发布者/订阅者模式,将数据信息直接映射到以太网链路层。为控制报文的发布过程,IEC 61850标准定义了GOOSE控制块,其将参数以数据属性的形式进行封装,并向外界提供5种访问控制块的服务接口,见图7。SendGOOSEMessage接口可实现对间隔层的保护测控装置进行多路GOOSE报文传播,特点是实时性强、数据通信流量大。可快速可靠地完成断路器的跳闸命令及触头位置信息传输。

报文发送机制采用心跳报文与变位报文快速重发相结合的方式。当与数据集绑定的GOOSE控制块中没有数据发生变化时,该控制块的发送时间间隔为 T_0 (大于5 s)的心跳报文,报文中顺序号sqnum

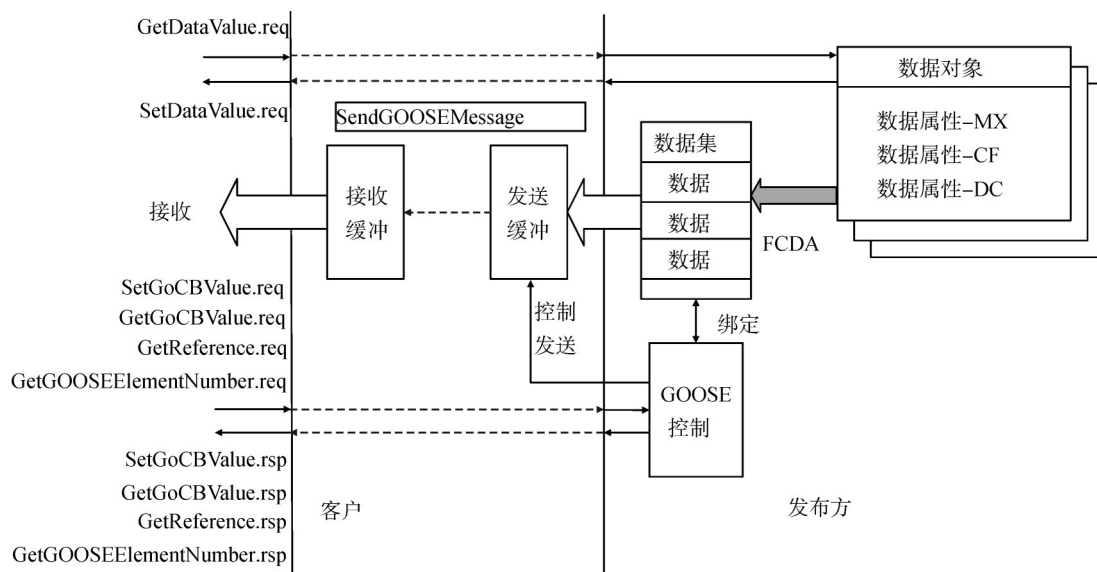


图7 GOOSE 控制块

Fig. 7 GOOSE controlling block

递增,状态号stnum不变。数据集集中的数据值发生改变时,设置GOOSE控制块发送一帧变位报文后,以时间间隔 T_0 、 T_1 、 T_2 、 T_3 快速重发变位报文(T_1 、 T_2 、 T_3 逐次递增,但小于 T_0),GOOSE报文中stnum加1,sqnum清零且重新开始加1计数。

2.4 GOOSE 报文结构

GOOSE报文具有IEEE 802.3Q优先级的以太网帧,根据规范ASN.1,IEC 61850定义了GOOSE报文的协议数据单元PDU(Protocol Data Unit)。

GOOSE报文应用数据由 12 部分组成,allData 为 GOOSE 报文数据集的数据值,包含了智能断路器的状态信息值。由配置文件对数据集中的数据数目、次序、数据类型等进行静态配置,在系统运行过程中,远程客户端可通过 GOOSE 控制块提供的 MMS 服

务进行动态调整。

3 IEC 61850在智能断路器数据通信的实现

根据以上分析,设计智能断路器的功能结构框图,其控制器主要由3个功能模块构成,包括SMV模块、MMS模块和GOOSE报文模块。SMV模块实现对电子式互感器的模型搭建,完成对电网一次电信号的采集与发布。MMS模块实现对智能断路器建模,完成对断路器状态参数的采集与监控,远程客户通过MMS读写服务对IED服务器模型的内部数据参数进行在线读取与设置,根据MMS报告信息,远程客户可周期性的获取状态参数,以增强遥信遥测功能的灵活性。GOOSE报文模块实现面向通用变电站时间的建模,完成对GOOSE分合闸报文的接收及解析,见图8。

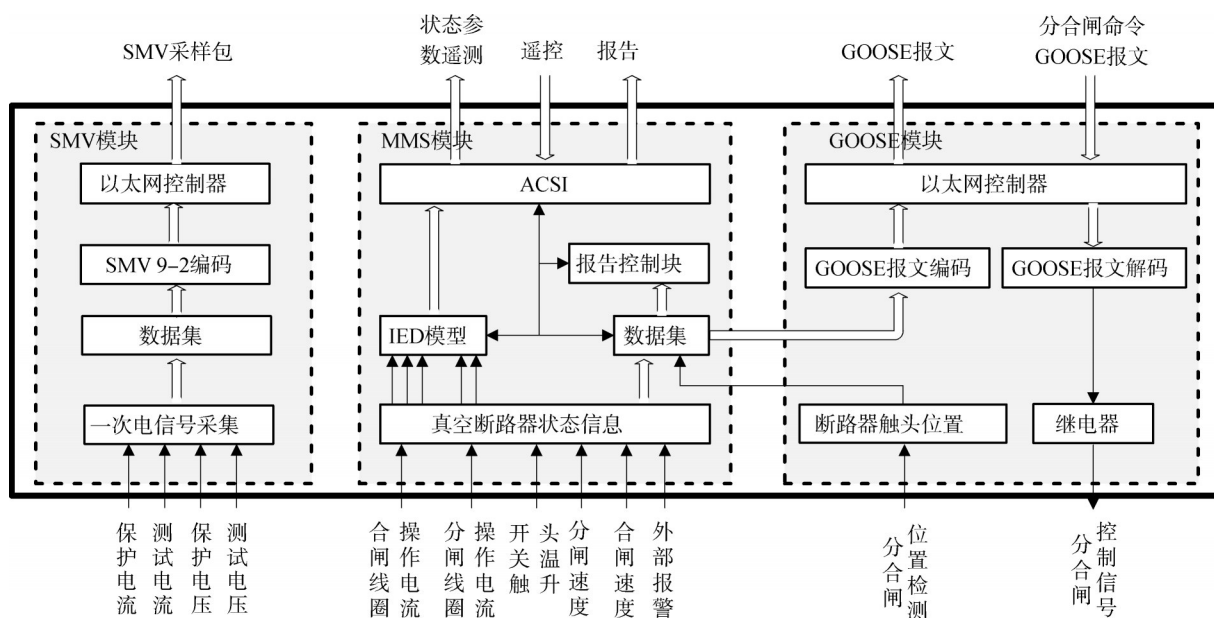


图8 功能结构框图

Fig. 8 Block diagram of functions

基于传感器的智能断路器智能检测,智能断路器为126 kV 永磁操动机构。当智能断路器处于合闸位置时,永磁机构激磁线圈上无电流通过,动铁心因永磁体的作用保持不变^[21]。一次合闸操作完成后,智能断路器发出GOOSE报文信息,合闸时刻的状态参数由Data字段发布,7个状态检测参数见表4。由服务器中的数据集市PhsMeas₃中设置状态参数的检测顺序、数据类型及意义。

表4 GOOSE 报文信息
Table 4 Information contained in GOOSE message

GOOSE数据	数值
gocbRef	E1Q1SB1Br01/LN0\$GO\$GOCB0
timeAllowedtoLive	10 000 ms
datSet	E1Q1SB1Br01/LN0\$PhsMeas ₃
goID	E1Q1SB1Br01/LN0\$GO\$GOCB0
t	2016-6-9 10.59.45.225997
stNum	1
sqNum	7
test	FALSE
confRev	1
ndsCom	FALSE
numDatSetEntries	7
1 E1Q1SB1Br01/SCBR \$ST\$ CTmp\$stVal	75.310 001 ℃ (触头温升)
2 E1Q1SB1Br01/SCBR0 \$ST\$ OC\$stVal	0 A (分闸电流)
3 E1Q1SB1Br01/SCBR0 \$ST\$ CC\$stVal	27.321 078 A (合闸电流)
4 E1Q1SB1Br01/SCBR0 \$ST\$ CV\$stVal	1.92 m/s (刚合速度)
5 E1Q1SB1Br01/SCBR0 \$ST\$ OV\$stVal	0 m /s (刚分速度)
6 E1Q1SB1Br01/GGIO0 \$ST\$ Ind\$stVal	TRUE (合闸位置)
7 E1Q1SB1Br01/SCBR0 \$ST\$ TrCctAlm \$stVal	FALSE (断路器正常无警告)

4 结语

基于传感器的智能断路器智能检测,详细描述了智能检测原理及方法。为完善对智能断路器的监控信息,在IEC 61850标准的基础上,IEC 62271标准补充了智能断路器状态监测的逻辑节点。进而构建了过程层的高压开关设备的IED服务器模型,并提供与IEC 61850标准兼容的通信接口。通过GOOSE报文向间隔层发布状态信息,遵循订阅者/发布方通信机制,GOOSE报文提供一种面向变

电站事件的快速传输通道,满足智能断路器运行状态信息实时传输的特性。实现了IEC 61850标准在智能断路器数据通信的应用,最终通过智能断路器合闸试验验证了状态监测的有效性。

参考文献:

[1] 韩国政,徐丙垠. 基于IEC 61850标准的智能终端建模[J]. 电力自动化设备,2011,31(2):104-107.
HAN Guozheng, XU Bingyin. Modelling of smart power distribution terminal based on the IEC 61850 standard[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(2):104-107.

[2] 范兴明,刘旭东,张鑫,等. 断路器真空度与灭弧室屏蔽罩上感应电位联系机理研究[J].真空科学与技术学报,2012,32(6):472-476.
FAN Xingming, LIU Xudong, ZHANG Xin, et al. Interdependence of pressure and shield potential in interrupter of vacuum circuit breaker[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology,2012,32(6):472-476.

[3] 黄新波,陶晨,刘斌. 智能断路器机械特性在线监测技术和状态评估[J]. 高压电器,2015,51(3): 0129-0134.
HUANG Xinbo, TAO Chen, LIU Bin. On-line monitoring technology of mechanical properties and state evaluation method for intelligent circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus,2015,51(3): 129-134.

[4] 翟国富,毕勇,许峰,等. 采用有限元分析电网谐波对断路器动作特性的影响[J]. 中国电机工程学报,2003,23(1):112-117.
ZHAI Guofu, BI Yong, XU Feng, et al. Power network harmonic's effect on operational characteristic of circuit breaker with finite element analysis method[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(1):112-117.

[5] ZAKARIA A M, SHAHMI S M. The design of IEC 61850 based disturbance and fault recorder for online fault analysis in system verification and simulation laboratory[C]// 2015 International Symposium on. Technology Management and Emerging Technologies(ISTMET). Langkawai Island:IEEE,2015:123-127.

[6] 范兴明,邹积岩,陈昌龙,等. 基于DSP的断路器状态参数在线监测装置的设计与实现[J],电力系统自动化,2005,29(8):99-103.
FAN Xingming, ZOU Jiyan, CHEN Changlong, et al. A VCB parameters on-line condition monitoring system based on DSP[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(8):99-103.

[7] 陈国炎,张哲,尹项根. 基于IEC 61850的广域继电保护通信建模[J].电网技术,2012,36(6):56-63.
CHEN Guoyan, ZHANG Zhe, YIN Xianggen. An IEC 61850 based communication model of wide-area relay protection[J]. Power System Technology,2012,36(6):56-63.

- [8] Communication networks and systems in substations, Part 7-4: Basic communication structure for substation and feeder equipment compatible logical node classes and data classes: IEC 61850-7-4[S]. 2003.
- [9] 黄树帮, 窦仁晖, 梅德东, 等. 基于 IEC 61850 标准的通用 IED 仿真系统的设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 153-158.
HUANG Shubang, DOU Renhui, MEI Dedong, et al. Design and implementation of general IED simulation system based on IEC 61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 153-158.
- [10] 王阳光, 尹项根, 游大海, 等. 遵循 IEC61850 标准的广域电流差动保护 IED[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(2): 53-57.
WANG Yangguang, YIN Xianggen, YOU Dahai, et al. Development of wide area current differential protection IED conforming with IEC61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(2): 53-57.
- [11] 吴国林, 徐国顺, 张 勇, 等. 脉冲大电流下的 CuCr 触头温度场计算[J]. 高压电器, 2015, 51(8): 68-73.
WU Guolin, XU Guoshun, ZHANG Yong, et al. Temperature field computation of CuCr contact under large impulse current[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(8): 68-73.
- [12] 陈 强, 李庆民, 丛浩熹, 等. 基于多点分布式光纤光栅的 GIS 隔离开关触头温度在线监测技术[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 298-306.
CHEN Qiang, LI Qinmin, CONG Haoxi, et al. On-line temperature monitoring for GIS disconnecting switch contacts based on multipoint-distributed fiber bragg grating[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 298-306.
- [13] 范兴明, 莫小勇, 张 鑫. 无线电能传输技术的研究现状与应用[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10): 2584-2600.
FAN Xingming, MO Xiaoyong, ZHANG Xin. Research status and application of wireless power transmission technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10): 2584-2600.
- [14] 刘思远, 杨 逸, 张 英, 等. 一种由直流后备式熔断器和直流真空负荷开关构成的直流组合电器[J]. 高压电器, 2015, 51(11): 22-25.
LIU Siyuan, YANG Yi, ZHANG Ying, et al. DC combinations by DC back-up fuse and DC vacuum switch[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(11): 22-25.
- [15] 戴冬云, 骆 虎, 殷晓刚, 等. 监控一体化永磁机构断路器在线监测与故障诊断的方法[J]. 高压电器, 2016, 52(4): 187-193.
DAI Dongyun, LUO Hu, YIN Xiaogang, et al. On-line monitoring and fault diagnosis method of vacuum circuit breaker with integration monitoring permanent magnetic actuator[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(4): 187-193.
- [16] ELGARGOURI A, VIRRANKOSKI R, ELMUSRATI M. IEC 61850 based smart grid security[C]//2015 IEEE International Conference on, Industrial Technology(ICIT). Seville: IEEE, 2015: 2461-2465.
- [17] 何博侠, 李春雷, 李江平, 等. 航天密封圈智能测量与检测系统的集成[J]. 光学精密工程, 2015, 23(12): 3395-3404.
HE Boxia, LI Chunlei, LI Jiangping, et al. Integration of intelligent measurement and detection for sealing rings used in aerospace systems[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(12): 3395-3404.
- [18] 潘 攀, 吴 海, 李海滨. 基于多信号特征融合的煤料漏斗堵塞检测研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 561-564.
PAN Pan, WU Hai, LI Haibin. A coal hopper blockage detection based on multi-signal feature fusion[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 561-564.
- [19] 张 黎, 刘梦琦, 赵 彤, 等. 智能化感应滤波在单导线交直流配电技术中的应用[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2371-2376.
ZHANG Li, LIU Mengqi, ZHAO Tong, et al. Application of intelligent inductive filtering in the technology of combining AC-DC power transmission along the same line for distribution network[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2371-2376.
- [20] 陈 盟, 郎 兵, 牟 黎. 断路器在线监测中分合闸时间的研究[J]. 高压电器, 2015, 51(1): 86-91.
CHEN Meng, LANG Bing, MU Li. Study on opening and closing time of online monitoring for the vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(4): 187-193.
- [21] 徐建源, 雷 伟, 汤 庚, 等. 永磁机构真空断路器分闸触头过冲与反弹抑制方法的研究[J]. 高压电器, 2015, 51(3): 22-27.
XU Jianyuan, LEI Wei, TANG Geng, et al. Research on opening contact overshoot and rebound suppression methods of vacuum circuit breakers with permanent magnet actuator[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(3): 22-27.

章 彬(1974—), 男, 教授级高级工程师, 工学硕士, 主要从事电网设备及科技创新管理工作。

向 真(1989—), 男, 工程师, 工学硕士, 主要从事开关设备及高电压技术研究工作。