[故障分析]

基于GOOSE录波的故障分析方法

文/董桂成[1] 赵 艳[2] 陈 坚[2] 陈 沙[2]
1. 万华化学集团股份有限公司；2. 深圳市中电电力技术股份有限公司

针对传统故障录波屏及故障信息分析的现状，提出一种基于不同智能终端的GOOSE录波的分析方法；利用不同智能终端IED的事件和波形的融合分析，可加速问题排查过程，降低了电网的安全隐患。

石油化工企业覆盖发、输、配及用各环节，电气结构复杂。变配电站多，用电负荷较大，属于连续生产性企业，在生产过程中不允许中断供电，对供电可靠性要求极高，当发生故障时，需要尽快对故障进行定位。目前变电站里普遍配置了故障录波屏、继电保护设备等，当故障发生时，系统会产生大量的事件顺序记录（Sequence of Event，SOE）及故障波形，但信息数据分散于不同的系统中，不能将不同区域的电力系统“孤岛”实现数据共享，也不能从系统全景的角度分析解决问题，同时不能实现对电网重要元件的全景状态感知。

针对传统故障录波屏及故障信息分析的现状，本文提出一种基于不同智能终端（Intelligent Electronic Device，IED）的GOOSE录波的分析方法；利用不同智能终端IED的事件和波形的融合分析，可加速问题排查过程，降低了电网的安全隐患。

传统故障录波装置使用特点

传统故障录波装置的主要任务是，记录系统大扰动（如短路故障、系统振荡、频率崩溃及电压崩溃等）发生后的有关系统电参量的变化过程及继电保护与安全自动装置的动作行为。一般在110 kV及以上变电站中进行配置，在工程应用中具有以下特点。

1）模拟量/开关量都采用电缆直接接入屏内。全站所有的TV、TA及开关量都需要引二次电缆接入故障录波装置，相当于接入了整个测量系统和二次保护系统的电缆，接入成本高。对于10 kV及以下电压等级的分散开关柜，由于数量非常庞大，距离也很远，基本不太可能。

2）电力系统故障启动不够灵敏。一般通过稳态数据触发，如电压越限、负序电压、零序电压、电流越限、负序电流及零序电流及突变量等启动，毫秒级的暂态扰动与微秒级的瞬态扰动无法触发波形纪录。

3）全站不同电压等级无法统一录波。石化工业配电系统复杂，变电站及配电站众多。以一个约40万kW负荷的某工厂为例，35 kV变电站有6座，10 kV配电站有41座。由于故障录波装置一般在110 kV变电站进行配置，对于区域分布广的35 kV变电站和10 kV配电站无法统一录波，故障对全厂各个电压等级的影响没法评估。

4）集中管理，可扩展性不足。传统故障录波装置一般单独组屏，在控制室集中放置，对于回路变化情况可扩展性不足。

基于以上原因，本文提出一种利用不同智能终端IED的GOOSE录波进行故障信息融合分析的方法，并对其中的关键技术进行分析。

GOOSE录波技术

IEC 61850标准定义了两种抽象模型：采样值

传输（SV）模型和通用的以对象为中心的变电站事件（GOOSE）模型。其中SV模型应用于采样值传输及相关服务，而GOOSE模型提供了变电站事件（如命令、告警等）快速传输的机制，可用于跳闸和故障录波启动等。GOOSE录波技术，是基于GOOSE模型的一种具体应用，即通信网络内任一智能终端IED发生故障后，同步触发全站启动波形记录，为故障的分析提供更全面的原始波形数据。

1. GOOSE录波系统结构

GOOSE录波系统由分布于多个站点的多台装置构成，包含故障信息收集及诊断分析系统主站、网络层交换机及智能终端IED。智能终端IED可以是保护装置、测控装置、电能质量监测装置、波形记录装置、故障记录及分析装置等，只要具备基于IEC 61850的GOOSE通信功能，都可以接入GOOSE录波系统。其系统结构如图1所示。

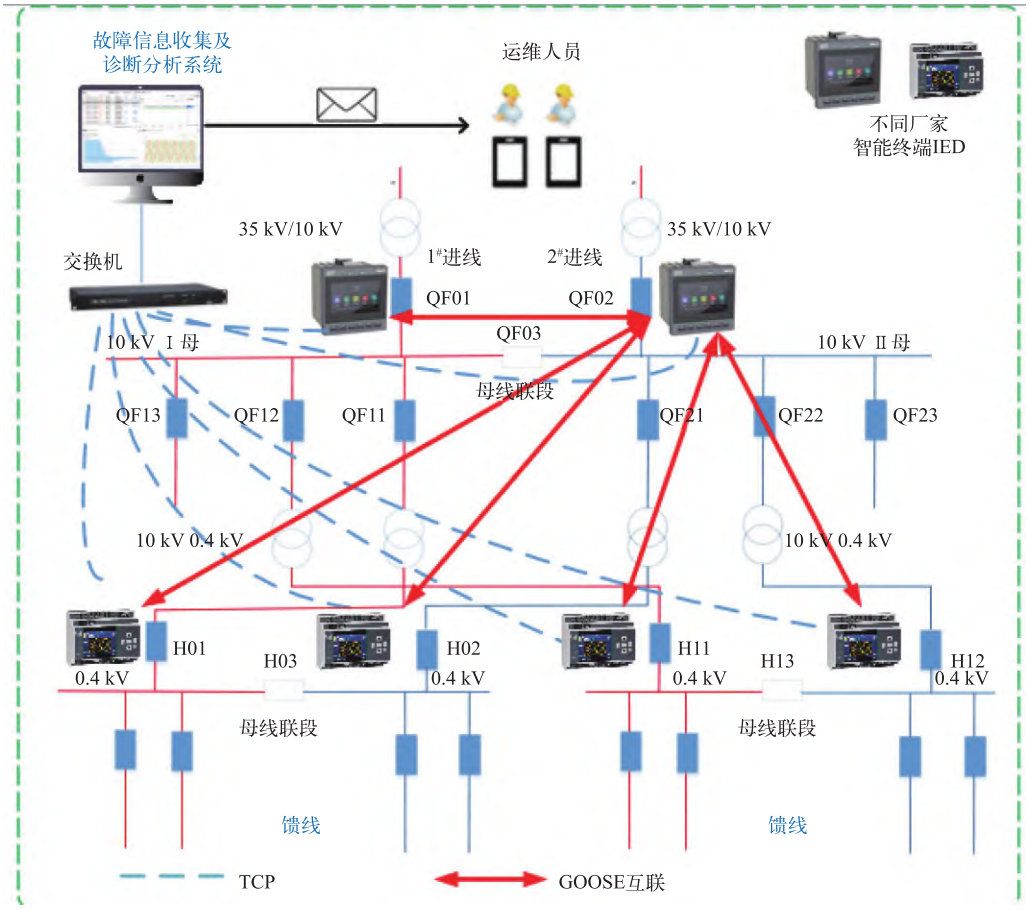

图1　GOOSE录波系统结构

2. 通信协议实现分析

GOOSE采用发布者/订阅者通信结构，此通信结构支持多个通信节点之间的对等直接通信。与点对点通信结构和客户/服务器通信结构相比，发布者/订阅者通信结构是一个或多个数据源（即发布者）向多个接收者（即订阅者）发送数据的最佳解决方案，尤其适合数据流量大且实时性要求高的数据通信。发布者/订阅者通信结构符合GOOSE报文传输本质，是事件驱动的。

GOOSE控制类下有五种服务，见表1。

表1　GOOSE控制类下五种服务

服务	描述
Send GOOSE Message	发送GOOSE报文
Get Go Reference	检索和GOOSE报文有关的DATA-SET特定成员的FCD/FCDA
Get GOOSE Element Number	检索和FCD/FCDA的GOOSE报文有关的DATA-SET成员的位置
Get Go CB Values	检索GoCB的属性
Set Go CB Values	写GoCB的属性

为了简化GOOSE录波处理，可考虑重点实现Send GOOSE Message协议。

标准规定的GOOSE协议报文如图2所示。

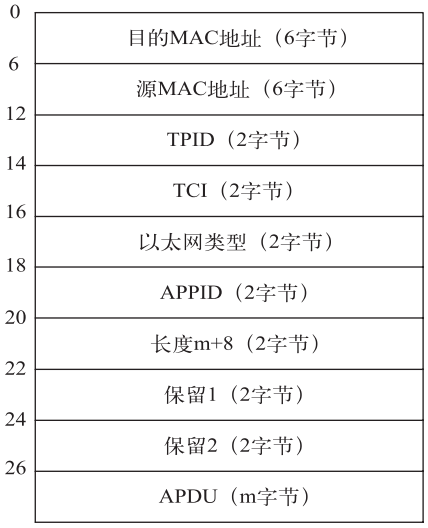

图2　GOOSE协议报文

为减少现场配置，除APPID可配置外，其他配置内容一律固定，见表2。APPID还可以与其他常规GOOSE报文区分开，避免对正常的GOOSE产生干扰。

表2　APDU配置内容

参数名	参数类型	值
GoCBRef	ObjectReference	自定义
timeAllowedtoLive	INT32U	0
DatSet	ObjectReference	自定义
GoID	VISIBLE STRING65	自定义
T	EntryTime	GOOSE报文生成时间
StNum	INT32U	初始化为1 产生新的触发报文时+1
SqNum	INT32U	产生新的触发报文时清0，重传时+1
Test	BOOLEAN	0
Conf Rev	INT32U	1
Nds Com	BOOLEAN	0
GOOSE Data	（根据成员数据类型而定）	数据量3 srcMAC：GOOSE录波发起者的MAC GUID：源发者自动生成 appTag：用于区分不同录波种类

3. 通信可靠性分析

接入该系统的二次设备可以是故障录波装置、保护装置、测控装置及电能质量监测装置等，对于多源数据的接入，故障发生时刻会产生大量数据主动上传；因此通信传输可靠性是其中的重要因素，需考虑如下要求。

1）重传机制。为提升可靠性，每次触发后，重复发送报文。重传间隔时间采用标准的重传间隔：前4次报文间隔0、1、2及4倍最小重传间隔，5次以后为最大重传间隔。

2）接收报文校验。必须APPID、组播MAC地址、GoCBRef与固定值或配置值一致时，才认为是正确报文，否则忽略。

3）多装置并发。由于同组内报文内容是一样的，无法单独区分计数，故对于所有收到的正确报文均进行响应，由装置录波程序根据当前录波执行情况判断是否重新启动一次新的录波过程。

4）与通用GOOSE报文的混杂使用。由于采用了特殊的组播MAC地址、GoCBRef，一般不会与网络内其他常规GOOSE装置报文混杂误用；而且还可以通过配置APPID来进行区分，总体评估无风险。

4. GOOSE录波同步启动的时间误差要求

当GOOSE录波信息在不同智能IED之间进行同步启动触发时，主要存在两个环节的时间延迟：①网络传输延迟；②装置本身通信及算法处理的时间延迟。应选用支持GOOSE VLAN的高可靠性、高速工业级交换机，使得整个网络内的GOOSE同步录波的时间延迟控制在20 ms以内。

5. 时钟同步要求

所有要参与GOOSE同步录波的智能终端IED，应通过GPS秒脉冲、IRIG-B码对时、IEEE 1588对时或NTP等方式进行时间同步，保证录波时间戳准确性，对时精度要求小于1 ms。

6. 不同厂家智能终端IED的互联分析

GOOSE录波报文有特定的组播MAC、GoCBRef、DatSet及APPID值，必须要这四者完全符合，才认为是要启动GOOSE录波。如果不满足此要求，符合GOOSE报文解码特征的报文，认为是由其他第三方标准GOOSE装置发来的报文。为了安全性，不能任意装置发过来的GOOSE报文都接收解析，需要通过ini文件配置接收组，配置文件可按如下定义：

thirdDev1, 01-0C-CD-01-00-01, 2, 5, gocbref1, gDatSet1, 3

thirdDev2, 01-0C-CD-01-00-02, 3, 5, gocbref1,

gDatSet1, 2

ini文件采用csv格式，上面第一个装置配置（第一行csv数据），解析见表3。

表3　ini文件解析说明

条目名称	值	说明
第三方装置名称	thirdDev1	用于标识
第三方装置GOOSE组播MAC	01-0C-CD-01-00-01	用于网络配置，接收此组播报文不可为空
第三方装置当前的ConfRev	2	用于校验版本为空则不校验
第三方装置APPID	5	用于校验APPID为空则不校验
第三方装置控制块名称	gocbref1	用于校验控制块名为空则不校验
第三方装置数据集名称	gDatSet1	用于校验数据集名为空则不校验

通过配置文件，不同厂家的智能终端IED可以互相触发GOOSE录波，做到网内同步启动，可对故障进行完整的系统级的分析。

7. GOOSE录波技术优势分析

从系统组成及关键技术指标分析，GOOSE录波具有以下优势。

1）通过GOOSE通信实现分布式录波，不需要将模拟量/开关量采用电缆单独接入故障录波屏，降低了二次线缆的成本和接入成本。

2）利用测控装置、电能质量监测装置等智能IED的接入，通过提高波形采样率及调整定值，既可以获得稳态的波形记录，也可以实现毫秒级的暂态扰动与微秒级的瞬态扰动的波形记录，对于系统异常信息的捕捉记录更敏感、更全面。

3）利用GOOSE通信技术，可以实现全场站、跨电压等级的全场景录波。不同于保护装置的单一故障点录波，可以评估系统中全厂各个电压等级的故障面的影响。

4）系统扩展方便。如回路变化或开关柜改造都可以方便进行二次设备的调整；通信接入系统即可，做到即插即用。

基于GOOSE录波技术的故障实例分析

1. 故障前运行情况

110 kV园区变电站35 kV部分采用单母分段接线，有35 kV进出线共28条，该站35 kV侧中性点为不接地系统。当发生单相接地故障时，非故障相对地电压升高到三相电压以上，持续时间长、波及全系统设备，可能引起第二点绝缘击穿，造成事故扩大。因此如何快速切除故障回路，是需要解决的问题。系统中的智能终端IED包括西门子公司的保护7SJ68以及深圳中电公司的iMeter7系列高端智能电能表。其中7SJ68保护装置在全电压等级的每个进出线回路均配置，iMeter7共5个监测点，分别部署在110 kV 总变压器的 35 kV 3#进线（测点①）以及下级4个10 kV配电所的10 kV进线，分别是A变电站10 kV 3#进线（侧点②）、B变电站10 kV 1#进线（测点③）、C变电站10 kV 1#进线（测点④）和D变电站10 kV 1#进线（测点⑤）。7SJ68和iMeter之间通过GOOSE互相触发录波。

2. 故障过程

20XX年X月26日14时24分左右发生短路故障，该故障波及附近几个站。

3. 事件和波形记录

在故障信息收集及诊断分析系统中，将5个iMeter监测点及相关回路的保护数据导出，按时间线整理见表4。从表格数据可以看出，电压幅值降至最低处是测点③。其他测点记录的波形类似，在此不一一赘述。

表4　SOE记录

监测位置	发生时间	事件描述	事件特征值
测点①	20XX年X月26日 14:25:24.946T	线电压高速越下限	动作值：31.84 kV（90.97%） 最小值：31.84 kV（90.97%） 返回值：35.61 kV（101.74%） 持续时间：0.140 s
测点②	20XX年X月26日 14:25:24.902T	电压暂态结束	残余电压：39.62%, 31.65%, 34.30%
测点②	20XX年X月26日14:25:24.743T	线电压高速越下限	动作值：3.916 kV 最小值：3.375 kV 返回值：9.217 kV 持续时间：0.181 s

（续）

监测位置	发生时间	事件描述	事件特征值
测点②	20XX年X月26日14:25:24.743T	相电流高速越上限	动作值：12.06 kA 最大值：12.06 kA 返回值：1.607 kA 持续时间：0.202 s
测点②	20XX年X月26日14:25:24.720T	A相触发电压暂降	残余电压：39.62%, 31.65%, 34.30% 持续时间：0.182 s 暂降源定位：下游 定位可靠性：可信度高
测点②	20XX年X月26日 14:25:24.599T	保护返回	
测点②	20XX年X月26日14:25:24.537T	保护启动	
测点③	20XX年X月26日 14:25:25.155T	电压暂态结束	残余电压：28.61%, 18.71%, 27.05%
测点③	20XX年X月26日 14:25:24.948T	线电压高速越下限	动作值：7.597 kV 最小值：2.228 kV 返回值：9.331 kV 持续时间：0.220 s
测点③	20XX年X月26日 14:25:24.948T	相电流高速越上限	动作值：5.799 kA 最大值：8.072 kA 返回值：727.6 A 持续时间：0.220 s
测点③	20XX年X月26日14:25:24.945T	A相触发电压暂降	残余电压：28.61%, 18.71%, 27.05% 持续时间：0.210 s 暂降源定位：下游 定位可靠性：可信度
测点③	20XX年X月26日 14:25:24.646T	保护返回	
测点③	20XX年X月26日 14:25:24.526T	保护启动	
测点④	20XX年X月26日 14:25:24.808T	电压暂降结束	残压百分比：31.02% 持续时间：0.190 s
测点④	20XX年X月26日14:25:24.630T	高速越下限告警	越限监测对象：线电压
测点④	20XX年X月26日14:25:24.618T	电压暂降启动	触发相：A相
测点④	20XX年X月26日14:25:24.617T	保护退出	
测点④	20XX年X月26日14:25:24.577T	保护启动	
测点⑤	20XX年X月26日 14:25:24.972T	电压暂降结束	残压百分比：33.27% 持续时间：0.202 s 暂降源定位：下游
测点⑤	20XX年X月26日14:25:24.773T	高速越下限告警	越限监测对象：线电压
测点⑤	20XX年X月26日14:25:24.770T	电压暂降启动	触发相：A相
测点⑤	20XX年X月26日14:25:24.616T	保护退出	
测点⑤	20XX年X月26日14:25:24.577T	保护启动	

4. 故障原因分析

通过查看SOE记录和波形记录，分析事故原因如下。

1）根据不同10 kV监测点记录的最低电压，以及最大电流可以判断故障点在C变电站（测点③）。

2）故障过程首先是AB相短路故障，扩展为4 ms的AC低阻/AB高阻短路故障，再扩展为ABC三相短路。大约40 ms后故障线路切除，系统恢复正常。

3）三相短路过程中，伴随着系统暂降，在不同监测点均捕捉到了暂降事件，并在各电压等级传播，不同电压等级的暂降幅度不同；其中暂降残压和故障录波的最低电压类似，也可以证明暂降是由系统三相短路引起的。

4）C变电站应是距离故障点最近，短路电流最大，其iMeter的GOOSE录波产生了削波现象，原因是系统最大电流超过了二次设备可输入的最大电流。

5. 仿真分析

为了验证GOOSE录波方法及监测点布点的合理性，在MATLAB/SIMULINK环境下搭建一次系统的仿真建模。

通过在测点③利用现场的实际故障波形进行回放（即图5波形），在其①、②、④及⑤节点仿真得到故障时刻电压幅值见表5。

表5　仿真结果

测点编号	电压幅值仿真数据	电压幅值实测数据	相对误差
③ U_n=10 kV	–	22.28%U_n	–
① U_n=35 kV	91.96%U_n	90.97%U_n	2.18%
② U_n=10 kV	34.35%U_n	33.75%U_n	1.78%
④ U_n=10 kV	30.48%U_n	31.02%U_n	−1.74%
⑤ U_n=10 kV	32.77%U_n	33.27%U_n	−1.50%

从仿真结果可以看出，系统实测数据与仿真数据接近，相对误差在±2.5%以内，同电压等级误差较小，监测点选择较为合理，当10 kV系统发生短路时，利用不同电压等级的这5个监测点，可以快速评估35 kV、10 kV等跨电压等级的整个系统的故障面，全面完整得反映故障现象。

结束语

本文提出一种基于不同智能终端IED的GOOSE录波的分析方法，对其中涉及的关键技术进行研究，包括GOOSE录波系统结构、GOOSE录波通信协议实现分析、通信可靠性分析、GOOSE录波同步启动的时间误差要求、时钟同步要求以及不同厂家智能终端IED的互联分析。并将该方法应用于石化园区变电站内一起10 kV的短路事故的分析过程。当事故发生时，西门子的保护装置及通过GOOSE互联的高端智能电能表iMeter系列均对事件和波形进行了记录，利用这些故障信息进行融合分析，加速了问题排查过程，降低了电网的安全隐患。

下一步的工作将围绕以下方面进行持续研究：①不同智能终端IED的事件报警及故障波形记录的定值合理性分析，②故障发生时，平台基于大量事件和波形记录的自动收敛分析；③基于融合数据的高级应用，如自动生成故障评估报告等。EA

（收稿日期：2022-10-21）