DOI: 10.7667/PSPC171498

一个用于智能水电厂 IED 的 GOOSE 通信实现设计

孙延岭[1,2]，林政润[1,2]，曹年红[1,2]，张 雷[1,2]

(1.国电南瑞科技股份有限公司，江苏 南京 211106；
2.南瑞集团(国网电力科学研究院）有限公司，江苏 南京 211006)

摘要：IEC61850 标准在智能水电厂的应用可以提高通信效率、实现数据共享。分析了智能变电站和智能水电厂中 GOOSE 应用的差异。提出了一种基于 FPGA 的智能水电厂 IED 的 GOOSE 通信实现设计。详细介绍了整体构架和报文收发软件设计。针对智能水电厂中交互信息类型多、数据量大等特点，设计了 GOOSE 报文硬件解码模块。利用 FPGA 的并行运算机制，在接收报文的同时完成解码与校验，进一步提升通信效率。仿真结果表明，该硬件解码模块满足智能水电厂 GOOSE 通信时效性和可靠性的要求。

关键词：IEC61850；智能水电厂；GOOSE 通信；FPGA

Design of GOOSE communication for IED in intelligent hydropower station

SUN Yanling[1,2], LIN Zhengrun[1,2], CAO Nianhong[1,2], ZHANG Lei[1,2]

(1. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China; 2. NARI Group Corporation
(State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211006, China)

Abstract: The application of IEC61850 standard in intelligent hydropower plant can improve communication efficiency and realize data sharing. The difference of GOOSE application in intelligent substation from intelligent hydropower plant is analyzed. A design of GOOSE communication based on FPGA for IED in intelligent hydropower plant is proposed. The overall architecture design is described in detail, as well as the software design. According to the characteristics of the interaction information type and data volume, a hardware decoding module of GOOSE message is designed. The parallel operation of FPGA can improve the communication efficiency by completing decoding and validation while receiving the message. The simulation results show that the hardware decoding module meets the timeliness and reliability requirements of the GOOSE communication in the intelligent hydropower plant.

This work is supported by National Science and Technology Major Project-Core Electronic Devices, High-end Generic Chips and Basic Software (No. 2017ZX01030-201).

Key words: IEC61850; intelligent hydropower plant; GOOSE communication; FPGA

0 引言

国际电工委员会(IEC)制定的 IEC61850 标准在智能变电站中已得到了广泛应用。目前，其修订和颁布了第二版标准，从面向变电站扩展到其他电力公用事业领域，涉及水电厂、分布式风力发电，涵盖了电力公用事业自动化的各个方面[1-5]，这正适应了当前智能电网的发展、新能源推进和电力企业信息整合的需求[6]。水电厂作为电网发电环节的重要组成部分[7-8]，在智能电网规划和发展的统一要求下，其智能化建设将是今后主要发展方向和全新目标。

GOOSE(面向通用对象的变电站事件)最初是 IEC61850 标准中用于满足变电站自动化系统快速报文需求的机制。将 GOOSE 通信应用于智能水电厂，采用网络通信的方式代替了传统设备间的硬接线，减少了设备的重复建设，节约了大量二次电缆，提高了通信效率[9-10]通信在智能水电厂中的应用对推进智能水电厂的发展具有重大意义。

本文提出了一种基于 FPGA 的智能水电厂 GOOSE 通信设计。FPGA 作为专用集成电路(ASIC)领域中的一种半定制电路，具有强大的并行计算能

基金项目："核高基"国家科技重大专项资助(2017ZX01030-201)

力，可以在一个时钟周期内完成更多的操作任务，且不使用任何操作系统，稳定性能得以提高，能够满足 GOOSE/SV 等实时性和可靠性要求高的报文传输[11-12]。

1　GOOSE 通信应用对比

在智能变电站 GOOSE 通信中，FPGA+DSP 的组合得到了广泛应用，利用 FPGA 并行算法的优势和丰富的引脚资源以及 DSP 强大的运算功能，协同完成变电站的 GOOSE 通信以及相应保护控制策略的实行。然而，对水电厂而言，其未涉及复杂的保护控制算法。本文采用 MicroBlaze 软核嵌入式处理器作为 CPU，由于该软核处理器是在 FPGA 内部实现，不仅简化了系统架构、缩短研发周期，还提高了系统的可靠性，降低研发成本[13-14]。

GOOSE 报文在智能变电站中主要负责传输开入(智能终端的开入)和开出(跳闸，遥控，自检信息等)等信息[15]。对比于智能变电站，智能水电厂除了需要处理相关的电气量外，还需要处理大量诸如流量、转速、油压、开度等非电气量，完成机组开机、停机等各类顺序控制，并对辅机的启动优先权进行管理。由此可见，水电厂中各功能之间交互信息的类型和数据量都远多于变电站[16]。然而，Microblaze 软核由于自身主频的限制，在处理大数据报文上速度将受到限制，同时对于调速器这种动态控制的智能设备，相关参数量处于不断的变化中，因此产生的报文数将远大于智能水电厂其他的智能电子设备。为了缓解 CPU 的负担，防止网络阻塞，进一步提高 GOOSE 的时效性和可靠性，本文在原系统基础上进行改进，增加了硬件解码模块，在接受报文的同时对其进行解码分析和相关校验，一旦校验失败则立即丢弃该报文，进入空闲状态等待接受下一帧报文，大大减少了 GOOSE 报文解析的时间，提高了工作效率。

2　整体架构设计

本文的 GOOSE 通信设计由 POWER PC 处理器，DPRAM 存储器，Xilinx Spartan6 FPGA 芯片以及物理层的 PHY 芯片共同实现。整体架构图如图 1 所示。

POWER PC 负责解析智能水电厂建模的 CID 配置文件，并将解析的配置信息存储在 DPRAM 中。MicroBlaze 软核处理器通过 DPRAM 获取各 IED 的相关配置信息并控制 GOOSE 报文的发送与订阅。FPGA 实现 GOOSE 报文 MAC 层协议及接收报文的解码与校验，并结合物理层 PHY 芯片完成对 GOOSE 报文的接收与发送。

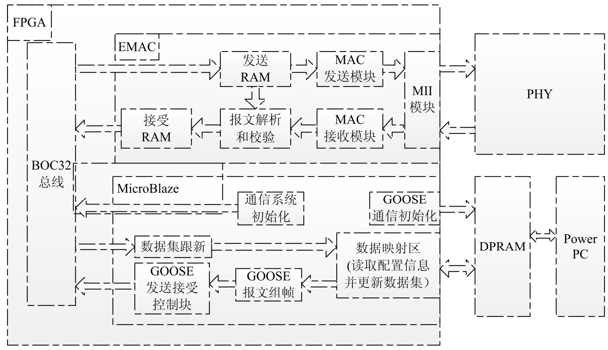

图 1　整体架构图

Fig. 1 Overall architecture diagram

其中，以太网 MAC 层通信模块设计采用 Verilog HDL 硬件语言以及 FPGA 内部的 IP 核相结合，以硬件的形式完成了 MAC 层解析以及 MAC 地址的组播过滤，可以代替各类商业 MAC 芯片，降低了成本，同时还支持 10/100/1 000 Mb/s 的传递速度和基于全双工的通信模式，避免了传播过程中数据冲突等问题，提高了 GOOSE 通信的实时性。

3　GOOSE 通信软件设计

GOOSE 通信的收发控制是在 MicroBlaze 软核上实现。系统首先进行 GOOSE 通信初始化设置。软核从 DPRAM 中获取相应的 GOOSE 配置信息，接下来初始化 GOOSE 发送和接收机制，设置初始状态，并将配置信息以 ASCII 码的形式通过 BOC32 总线发送给 FPGA，为接下来的通信做准备。

3.1　GOOSE 报文发送设计

GOOSE 通信初始化完成后，从配置信息中获取发送方装置的类型，不同的装置类型对应着不同的发送策略。本设计应用于智能水电厂中，其 IED 主要有智能主控装置，智能调速器，智能调速终端，智能同期装置和智能测速装置等。以调速器为例，若检测到设备为调速装置，则需将相应的模出、开出和频率数据下传到智能终端。若检测到设备为调速终端，则需将相应的模入、开入和频率等数据上送到调速装置。

正常情况下，装置每隔 5 s 的时间发送一帧 GOOSE 报文，即心跳报文。当 GOOSE 数据集成员发生变化时，会触发 GOOSE 报文的快速发送[10]。以间隔 2 ms、2 ms、4 ms、8 ms 的顺序进行报文的重发，最后恢复 5 s 的心跳报文继续发送。发送流程图如图 2 所示。

3.2　GOOSE 报文接受设计

FPGA 接受到物理层传输来的报文后，在 MAC 层协议下去除了报文前导码、帧首定界符和校验序

列等。在接受报文的同时，还进行了报文的解码与校验[17]。校验完毕后，通过 BOC32 总线将变化的数据集发送给软核的数据映射区，并根据该数据集的来源及数据类型，将其写入 DPRAM 中对应的位置，供上层主机读取并做出相应的控制。接受流程图如图 3 所示，其中报文硬件解码与校验将在下文详细叙述。

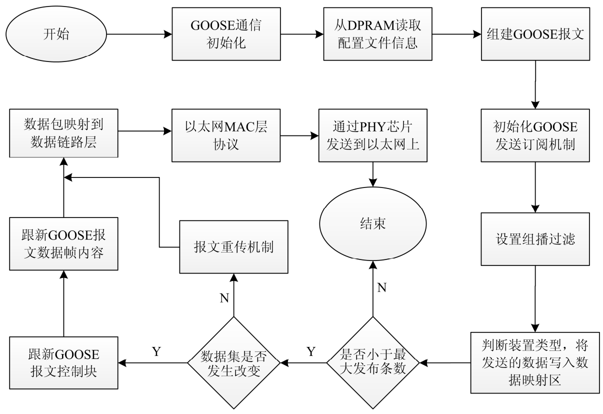

图 2 报文发送流程图

Fig. 2 Message flow diagram

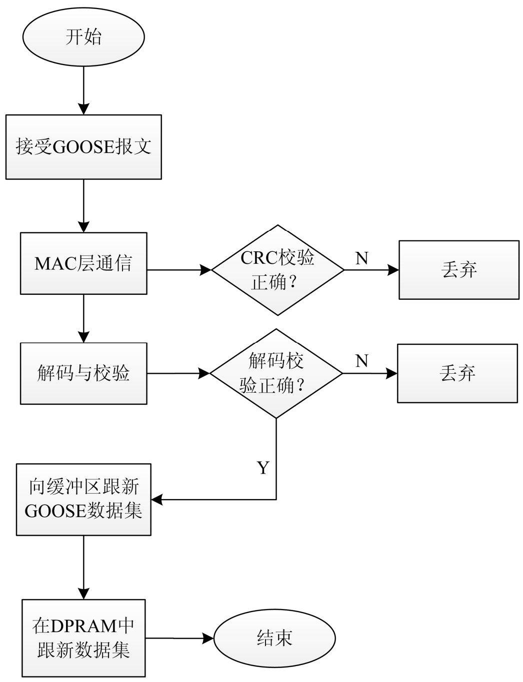

图 3 报文接受流程图

Fig. 3 Message acceptance flow chart

4　FPGA 硬件解码的设计与实现

利用 MicroBlaze 软核实现 GOOSE 报文的发送与订阅，相比于外设 CPU，在降低成本的同时，也减少了报文传递的时延，提高了系统的稳定性。然而，软核也有自身的缺陷，100 MHz 的主频往往不能满足时效性的需求。因此，本文提出了一种改进方法，利用 FPGA 并行计算的特点，在 FPGA 进行 MAC 层通信的同时，完成报文的解码与校验。相比于传统软件解码的方式，拥有强大并行运算能力的 FPGA 在解码速度上将远超于 C 语言的顺序执行方式[18-19]。

如图 4 所示，FPGA 硬件解码模块主要包括解析状态机模块、地址控制模块、校验模块。

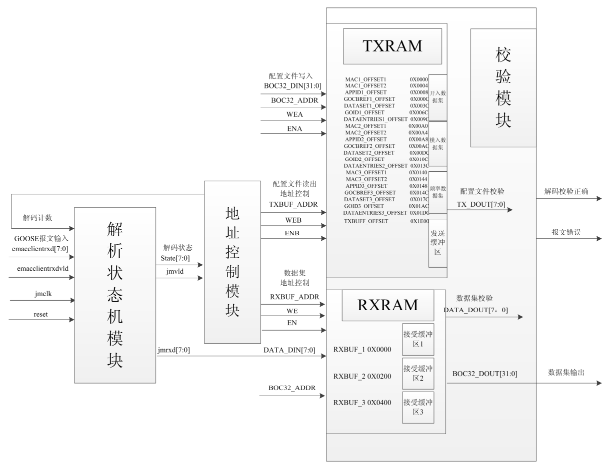

图 4 解码模块设计图

Fig. 4 Decoding module design

GOOSE 通信采用发布方/订阅者通信模式，在接受 GOOSE 报文之前必须订阅该报文[20]。通过取智能水电厂 CID 配置文件，获取该装置的订阅信息，写入 FPGA 的 RAM 中，完成订阅的检查与校验。因此，在校验模块中调用 FPGA 的 BLK_MEM_GEN IP 核生成 TXRAM 和 RXRAM 两块双端口 RAM。TXRAM 负责存储该装置的订阅信息，用于配置文件的检查与校验，RXRAM 中划分了不同数据集的数据缓冲区，用于数据集的缓存与校验。充分利用双端口 RAM 的读写优势，通过地址控制模块输出地址信号来调用 Block RAM 中存储的数据，有效避免了大量大位宽寄存器的使用，减少了过多 IF/ELSE 语句的反复嵌套，不仅降低了 FPGA 的资源使用率，同时也使代码更加精简，提高了可读性。

4. 1　解析状态机模块

根据 GOOSE 数据帧结构的特点，解码状态机分为 GOOSE 报文头解析，APDU 头部解析和数据集解析 3 个状态。具体流程如图 5 所示。

4.1.1 报文头解析

由 GOOSE 数据帧结构可知，GOOSE 报文头部为以太网配置信息，每个参数的字节长度都是固定的，通过计数器计数就可以轻易解析出来。当计数

器计数达到 26 时，报文头部解析完毕，进行 APDU 头部解析状态。

4.1.2 APDU 头部解析

APDU 采用 BER 编码，包含 gocbRef、datSet 和 goID 等不定长和 timeAllowedtoLive、StNum、SqNum 等定长的参数，设立在 TLV 分解状态机，对其进行进一步分解。

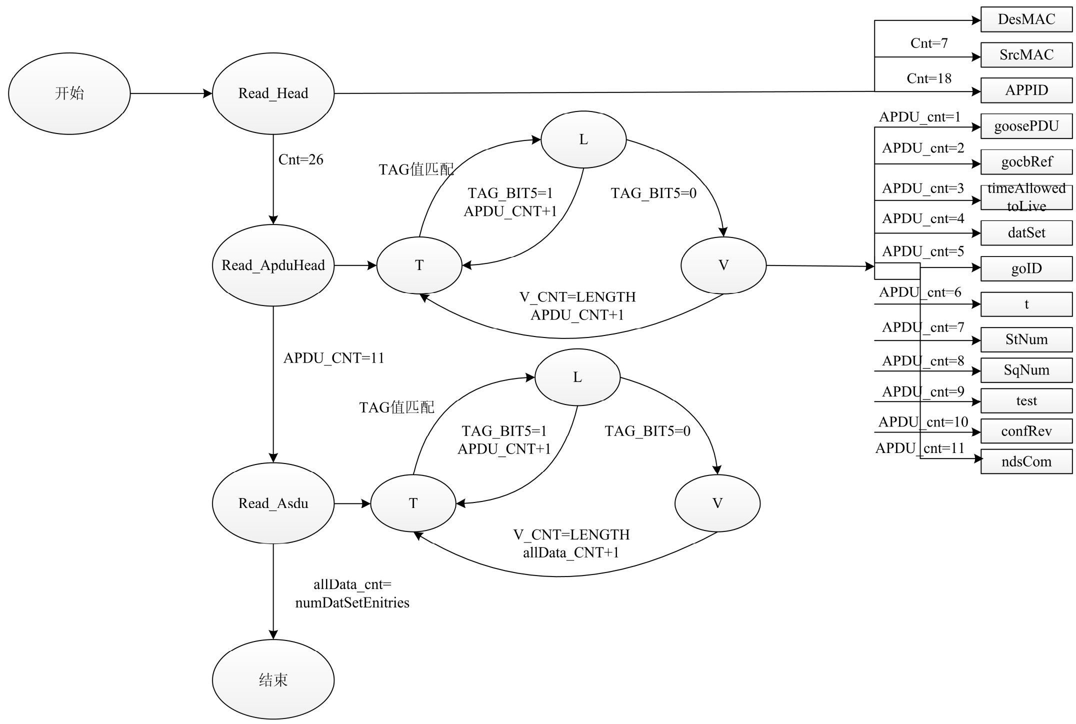

图 5 解码状态机流程图

Fig. 5 Decoding state machine flow chart

✍TAG 状态下，检查 TAG 值是否匹配，并通过 TAG 值的 BIT5 判断该数据是简单类型还是结构类型。

✍LENGTH 状态下，判断 LENGTH 的类型并存储 VALUE 的长度信息。若数据是简单类型，则进入 VALUE 状态，若数据是结构类型则重新返回 TAG 状态，APDU 计数加 1。

✍VALUE 状态下，若计数器计数达到 LENGTH，则 VALUE 接受完毕，APDU 计数加 1，重新返回 TAG 状态。

APDU 计数器的值对应各参数的解析状态，当其累加到 11 时，则 APDU 头部信息全部解析完毕进入数据集解析状态。

4.1.3 数据集解析

在数据集解析状态下仍采用 TLV 分解状态机。首先解析 numDatSetEntries 参数，并记录下数据的条目数，接下来接受 allData 数据。每经过一次 TLV 循环，数据集计数加 1，接受完毕后，检查该数据集实际个数与 numDatSetEntries 参数是否一致。

解析过程中，记录了不同时序下对 GOOSE 报文各参数的接受与解析，并将各状态输出给地址控制模块。

4. 2 校验模块

GOOSE 报文属于快速报文传输服务，IEC61850 标准规定 GOOSE 报文传输时延应在 4 ms 以内。为了保证数据传输的实时性，避免通信堆栈造成的传输延时，GOOSE PDU 在经过表示层编码后不经过 TCP/IP 协议，直接映射到数据链路层。因此为了在提高通信实时性的同时也保证其通信的可靠性，解码模块在解析 GOOSE 数据帧的结构的同时也要对其可靠性进行校验，包括链路通断自检、配置文件校验、StNum 和 SqNum 变化规律检查和数据集校验等。

4.2.1 配置文件校验

校验模块与解码模块是同时进行的。在 GOOSE 通信初始化的时候，配置文件信息已提前写入 TXRAM 中。以智能水电厂中调速器为例，调速器需要订阅智能终端和合并单元发出的开入、模入和频率等数据集。如图 6 所示。在 TXRAM 中划分了开入数据集、模入数据集和频率数据集三块内存空

间用于存储来自不同装置不同数据集的配置信息。

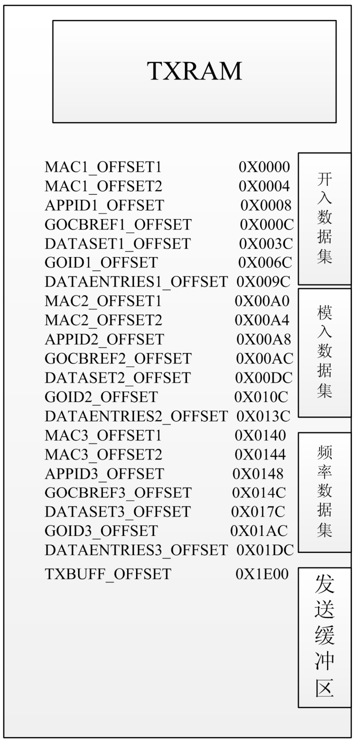

图 6　调速装置配置信息图

Fig. 6 Governor configuration diagram

因此，在校验之前，需要提前确认该报文所对应的配置信息。本文通过对订阅报文 MAC 地址的遍历检查，确定该报文配置信息在 TXRAM 中的地址范围。在校验模块下，从 TXRAM 中读出实际的配置信息并与订阅报文的配置信息相对比，若不一致则该报文无效，回到 IDLE 状态等待下一帧报文。

4.2.2 数据集校验与跟新

通过 StNum 和 SqNum 的变化规律来判断数据集是否变化。若 StNum 加 1，SqNum 跳变为 0，则数据集发生变化，将新的数据写入 RXRAM 中。写入的同时通过 TLV 状态机对各数据 TAG 值进行检查。若 StNum 不变，SqNum 加 1，意味着数据集未发生改变。从 RXRAM 中读出上一帧数据集与本帧数据集相对比，检验该报文数据集是否正确。若 StNum、SqNum 变化不符合变化规律则意味着报文丢帧或错序。其具体流程图 7 所示。

4.2.3 连路通断自检

校验模块还包括链路通断自检。通过 TimeAllowedToLive 参数所规定的时间和 IPG 帧间隔计时来判断报文是否丢失或者通信是否中断。系统通过不断的链路通断自检来提高智能水电厂二次回路的可靠性。

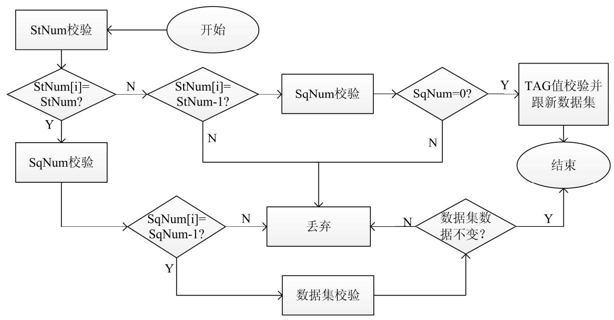

图 7　stNum、sqNum 校验流程图

Fig. 7 Flow chart of stNum and sqNum checkout

5　仿真验证与分析

5.1　GOOSE 通信实时性仿真测试

在 XILINX ISE 软件平台上对本文所设计的 GOOSE 报文接受模块进行综合，并编写测试代码在 Modelsim 下进行时序仿真。

图 8 为 GOOSE 报文解码时序仿真图。从图 8 可以看出，在 2.275 μs 时，jm_ok 信号由低电平跳变为高电平，代表解码成功。解码状态机由 read_Asdu 状态进入 IDLE 状态等待接受下一帧 GOOSE 报文。

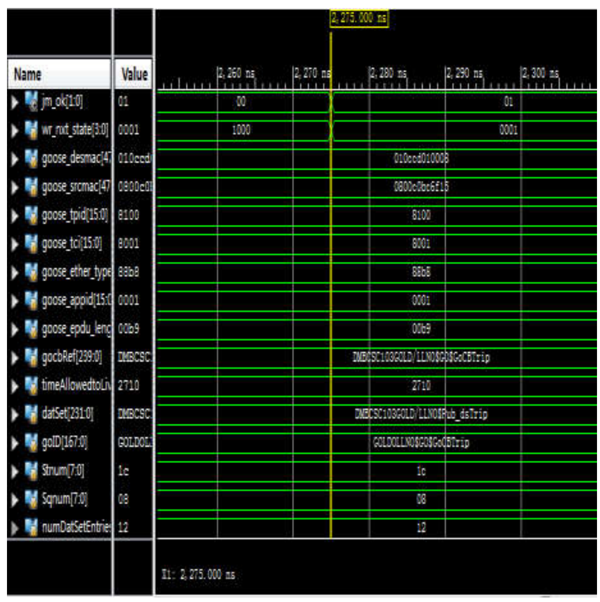

图 8　报文解码时序仿真图

Fig. 8 Sequence simulation of message decoding

系统时钟频率为 100 MHz，该解码模块总共耗时 2.2 μs，远远小于软核解码的百微秒级的耗时。若接受到错误报文，无需等到报文接受完毕，在接受到该错误字节的同时，系统会自动丢弃该报文，等待接受下一帧报文。由此可见，GOOSE 通信的

时效性大大提升。

5.2 GOOSE 通信可靠性仿真测试

如图 9 所示，模拟发送了一封错误报文。该报文 StNum 和 SqNum 参数符合心跳报文变化规律，意味着数据集未发生变化。而实际报文中，在数据集第 17 个字节上，该开关量的值发生了跳变。通过与上一帧数据的对比，检测出该报文数据集信息错误，goose_error 报警信号跳变为高电平，jmvld 解码使能信号跳变为低电平，停止接受报文，进入 IDLE 复位状态。

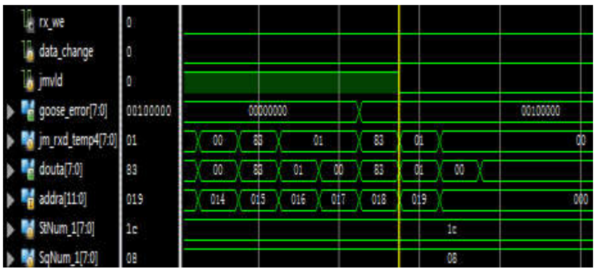

图 9 数据集校验时序仿真图

Fig. 9 Sequence simulation of data set check

在图 10 中模拟发送了一封变位报文。该报文 StNum 加 1，SqNum 置 0，符合变位报文的变化规律。data_change 和 rx_we 写入使能信号置 1，将新的数据集写入 RXRAM 数据缓存区中。

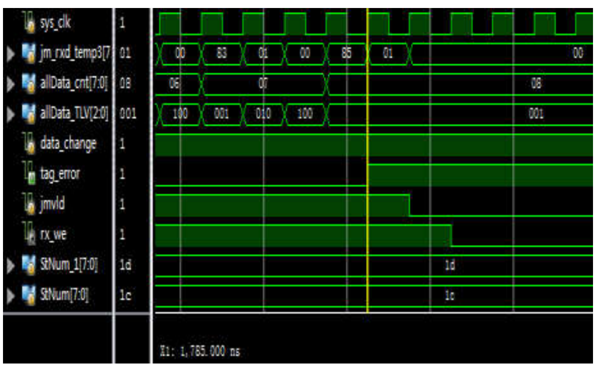

图 10 数据集 TAG 值校验仿真时序图

Fig. 10 Sequence simulation of data set TAG check

在 1.785 μs 时，TLV 状态机在 TAG 状态下，检测到数据集中第 8 个数据的 TAG 值发生了变化，tag_error 信号跳变为高电平，jmvld 解码使能信号和 rx_we 写入使能信号跳变为低电平，停止对数据集的写入。

当接受到正确报文时，如图 11 所示，APPID、gocbRef、datSet、goID、allData 等参数均检验正确，数据个数和 numDatSetEntries 匹配，rx_we 信号置 0 停止数据更新，输出 goodframe 代表报文正确并接收完毕。

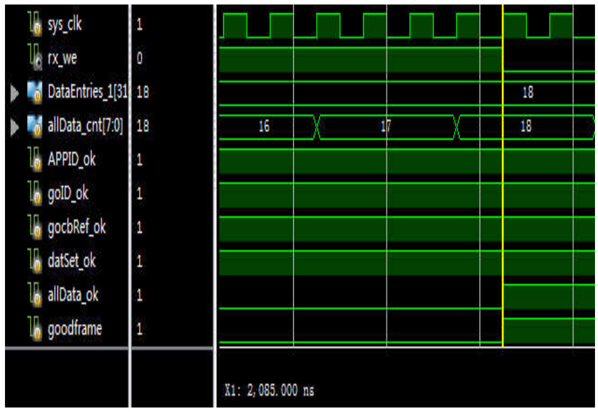

图 11 解码校验完成时序仿真图

Fig. 11 Sequence simulation of decoding and checking

经测试，在解码的同时，依次完成了 MAC 地址、APPID、gocbRef、datSet、goID 等配置信息的校验，事件序号 StNum 和发送序号 SqNum 变化规律检查，数据数目与 numDatSetEntries 匹配检查和各数据集数据及其 TAG 值校验。经实验分析，该模块能够有效的满足 GOOSE 通信可靠性的要求。

6 结论

本文对比了 IEC61850 标准在智能水电厂和智能变电站中的应用，提出了一个应用于智能水电厂 IED 的 GOOSE 通信设计及其基于 FPGA 的硬件解码功能的实现，并通过实验仿真验证了其时效性与可靠性，为 IEC61850 标准在智能水电厂中的应用提供了一个新思路。

参考文献

[1] BRAND K P. The standard IEC61850 as prerequisite for intelligent applications in substations[C] // IEE Power Engineering Society General Meeting, June 6-10, 2004, Denver, USA: 714-718.

[2] IEEE recommended practice for preparation of equipment specifications for speed governing of hydraulic turbines intended to drive electric generators: IEEE Std 125TM—2007[S].

[3] CLAVEL F, SAVARY E, ANGAYS P, et al. Integration of a new standard: a network simulator of IEC61850 architectures for electrical substations[J]. IEEE Industry Application Magazine, 2015, 21(1): 41-48.

[4] MEKKANEN, VIRRANKOSKI, ELMUSRATI, et al. Analysis and methodology for measuring the IEC61850 GOOSE messages latency: gaining interoperability testing[C] // Computer Applications and Information Systems (WCCAIS), 2014, Hammamet: 1-6.

[5] SIDHU, INJETI, KANABAR, et al. Packet scheduling of GOOSE messages in IEC61850 based substation intelligent electronic devices (IEDs)[C] // IEEE PES General Meeting, Minneapolis, 2010: 1-8.

[6] 何磊. IEC61850 应用入门[M]. 北京：中国电力出版社, 2012.

[7] 王德宽, 张毅, 刘晓波. 智能水电厂自动化系统总体构想[J]. 水电自动化与大坝监测, 2011, 35(1): 5-9.
WANG Dekuan, ZHANG Yi, LIU Xiaobo. The overall idea of smart hydropower plant automated system[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2011, 35(1): 5-9.

[8] 刘观标, 李晓斌, 李永红, 等. 智能水电厂的体系结构[J]. 水电自动化与大坝监测, 2011, 35(1): 1-4.
LIU Guanbiao, LI Xiaobin, LI Yonghong, et al. System structure of smart hydropower plants[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2011, 35(1): 1-4.

[9] 郑俭. 面向智能变电站的新型实时 GOOSE 通信网络研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
ZHENG Jian. Research of novel real-time GOOSE communication network oriented smart substation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.

[10] 王聪, 张毅, 文正国, 等. 基于 IEC61850 标准的水电厂监控系统信息建模[J]. 水电自动化与大坝监测, 2012, 36(6): 1-5.
WANG Cong, ZHANG Yi, WEN Zhengguo, et al. Information modeling of hydropower plant monitoring and control system based on IEC61850 standard[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2012, 36(6): 1-5.

[11] 牟涛, 任志航, 樊占峰, 等. 基于高性能 FPGA 的合并单元设计与实现[J]. 电力系统保护与控制，2016, 44(19): 128-132.
MU Tao, REN Zhihang, FAN Zhanfeng, et al. Realization of the critical technologies merging unit based on FPGA[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 128-132.

[12] 丁晟, 段雄英, 邹积岩. 基于 FPGA 的 GOOSE 通信系统[J]. 电测与仪表, 2015, 52(18): 1-4.
DING Sheng, DUAN Xiongying, ZOU Jiyan. GOOSE communication system based on FPGA[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(18): 1-4.

[13] 裘愉涛, 王德林, 胡晨, 等. 无防护安装就地化保护应用与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 1-5.
QIU Yutao, WANG Delin, HU Chen, et al. Application and practice of unprotected outdoor installation protection[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 1-5.

[14] 刘永健. 软核嵌入处理器 MicroBlaze[J]. 计算机与网络, 2012, 38(15): 64-66.
LIU Yongjian. Soft-core embedded processor MicroBlaze[J]. Computer Network, 2012, 38(15): 64-66.

[15] 郑夏华. 基于 MicroBlaze 的矩阵运算实现技术研究[D]. 北京：北京理工大学, 2015.
ZHENG Xiahua. The research of the matrix operation implementation based on MicroBlaze[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.

[16] 芮钧, 冯汉夫, 徐洁. IEC61850 标准在智能水电厂中适用性分析[J]. 水电与抽水蓄能, 2016, 2(3): 92-96.
RUI Jun, FENG Hanfu, XU Jie. Applicability of IEC61850 standard in smart hydropower plant[J]. Hydro Power and Pumped Storage, 2016, 2(3): 92-96.

[17] 段雄英, 尹睿涵, 孟晗, 等. 基于 ARM 的 GOOSE 通信系统[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 130-134.
DUAN Xiongying, YIN Ruihan, MENG Han, et al. GOOSE communication system based on ARM[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 130-134.

[18] 张海宁. 基于 FPGA 的电力以太网 MAC 控制器设[D]. 昆明：云南大学, 2016.
ZHANG Haining. Design of power ethernet MAC controller based on FPGA[D]. Kunming: Yunnan University, 2016.

[19] 王鑫, 许力, 李晓. 基于 FPGA 的 GOOSE 报文解析模块设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 101-107.
WANG Xin, XU Li, LI Xiao. Design and realization of GOOSE decoding module based on FPGA[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 101-107.

[20] 徐长宝, 庄晨. 智能变电站二次设备状态监测技术研[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 127-131.
XU Changbao, ZHUANG Chen. Technical research of secondary equipments' state monitoring in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 127-131.

收稿日期：2017-10-10；　修回日期：2018-01-03

作者简介：

孙延岭(1982—)，男，硕士，高级工程师，研究方向为电力系统自动化；

林政润(1994—)，男，通信作者，硕士研究生，研究方向为电力系统自动化；E-mail: 179772818@qq.com

曹年红(1970—)，男，硕士，研究员级高级工程师，研究方向为电力系统自动化。

（编辑　周金梅）