

基于 OPNET 的数字化变电站继电保护通信网络仿真研究

方晓洁¹, 季夏轶¹, 卢志刚²

(1. 漳州电业局, 福建 漳州 363000; 2. 贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550003)

摘要: 以 500 kV 变电站的过程层网络为例, 研究 3/2 接线方式下数字化变电站内的保护和控制设备的通信网络的实时性。简要介绍了 OPNET modeler 仿真软件。根据数字化变电站不同间隔中的合并单元、控制设备、保护之间的联系, 建立 OPNET 网络仿真模型。根据一次接线形式和继电保护配置特点, 划分多个虚拟局域网 (VLAN), 仿真比较划分 VLAN 前后的网络吞吐量和 GOOSE 报文的时延。通过仿真验证了使用虚拟局域网技术可以有效提高通信网络实时性能的正确性。

关键词: 数字化变电站; 虚拟局域网; 过程层; OPNET modeler; GOOSE

Study on relaying protection communication network in digital substation using OPNET simulation

FANG Xiao-jie¹, JI Xia-yi¹, LU Zhi-gang²

(1. Zhangzhou Electric Power Bureau, Zhangzhou 363000, China;

2. School of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550003, China)

Abstract: Taking the process network of 500 kV substation as an example, this paper studies the real time performance of the communication network of protection and control device under 3/2 connection form in digital substation. The simulation soft of OPNET modeler is described briefly. Based on the association among the merging unit, the protection and the control device of different intervals in digital substation, OPNET simulation model is built. The VLAN is divided in accordance with the primary connection form and the characteristics of relay protection configuration. The GOOSE messages delay and the throughput of the protection and control devices before dividing VLAN and after dividing VLAN are compared. The results of the simulation prove the validity of using VLAN for improving real time performance.

Key words: digital substation; VLAN; process layer; OPNET modeler; GOOSE

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)23-0137-04

0 引言

基于 IEC61850 标准的数字化变电站一个重要的特征就是以交换式以太网和光缆组成通信系统代替以往的二次连接电缆和回路, 利用通信网络来实现设备之间的信息交换。

数字化变电站通过过程层网络对采样值 (SAV) 报文、跳闸命令 (面向通用对象的变电站事件 (GOOSE) 报文) 进行传输^[1]。过程层网络性能直接影响数字化变电站内继电保护设备的灵敏性和可靠性。因此根据不同变电站的类型和电气主接线的方式合理设计过程层网络, 保证二次设备信息传输的实时性。OPNET modeler 作为一种主流的仿真软件已经被运用于电力系统通信网络仿真, 目前已有学者应用 OPNET 仿真软件对变电站通信网络进行相关研究: 文献[2]对变电站单个间隔的过程层网络

进行的仿真; 文献[3]对变电站二次回路通信节点在不同数据包处理能力和不同带宽下的网络时延和数据流量进行了仿真; 文献[4]利用网络仿真法对星形结构和环形结构的变电站过程层网络性能进行了研究。本文以一个半断路器的接线方式下的过程层网络为例, 利用 OPNET 软件建立网络仿真模型, 对划分虚拟局域网 (VLAN) 后对继电保护报文传输的实时性能影响进行仿真和分析。

1 OPNET 仿真技术

1.1 OPNET 网络仿真软件介绍^[5]

OPNET modeler 广泛用于通信网络、设备、协议和应用的设计开发与研究领域。面向对象的建模方法和图形化的编辑工具, 几乎可以模拟大部分的网络设备, 支持各种网络技术。OPNET modeler 是专门用于可视化原型设计的软件, modeler 中提供

多种编辑器帮助用户完成网络建模和仿真运行，主要包括以下几种：(1)网络编辑器(Network Editor)；(2)节点编辑器(Node Editor)；(3)进程编辑器(Process Editor)。

在 OPNET 中，模型结构是层次型的，主要由网络模型、节点模型和过程模型组成。网络模型描述系统的拓扑结构，由节点和信道构成；节点模型描述节点行为，由互连模块构成；过程模型实现节点模块功能，由状态转移图来表示，每个状态由 C/C++语言来描述。

1.2 OPNET modeler 仿真步骤

使用 OPNET modeler 仿真步骤，大概分为 6 步，分别是配置网络拓扑，配置业务，收集结果统计量，运行仿真，调试模块再次仿真，最后发布结果。

2 过程层网络 OPNET 仿真模型

本文以 500 kV 变电站为例，根据保护和控制设备之间的联系建立过程层网络的仿真模型。国内 500 kV 多采用 3/2 接线形式，继电保护按双重化配置，即要求两套相同的继电保护的电流、电压、跳闸等回路都是独立的，因此取代二次回路的过程层网络也必须是两个独立的网络。考虑到总线型网络的可靠性不能满足过程层网络的要求，环形网络有产生网络风暴的可能，出于安全性考虑，环形网络也不大适用于 500 kV 数字化变电站的过程层网络。因此，选择星形网建立过程层网络模型。图 1 为 3/2 接线一次接线图。

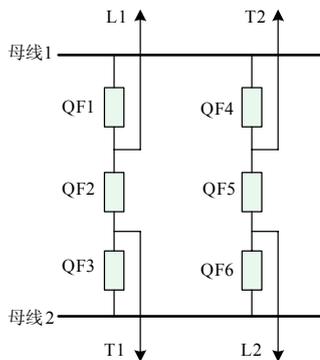


图 1 3/2 接线一次接线图

Fig.1 Primary system of 3/2 connection

2.1 网络模型

一台半断路器接线方式，一般有两种组网方式，分别是按单串组网和按线路间隔和变压器间隔组网。

(1) 按单串组网

图 2 将一串内的设备均接于一个交换机 (switch_Bay1)，母线保护 (Protection_Busbar) 单独配置交换机，switch_Bay1 再接至母线交换机。

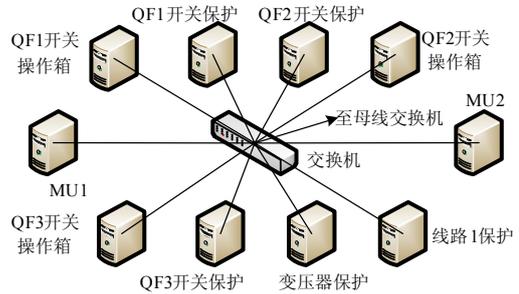


图 2 网络仿真模型

Fig.2 Simulation of network model

同理，接线的另一串 OPNET 模型类似。

(2) 按线路间隔和变压器间隔组网

图 3 为 3/2 接线中一串的线路间隔和变压器间隔，由于断路器 QF2 与线路间隔和变压器间隔都存在联系，将 QF2 的智能操作箱 (Control_QF2) 与保护 (Protection_QF2) 连接至两个交换机 (switch_Bay1、switch_Bay2)，并将线路保护 (Protection_line1) 和主变保护 (Protection_Transformer1) 分别接入母线交换机 switch_Bay1 和 switch_Bay2。

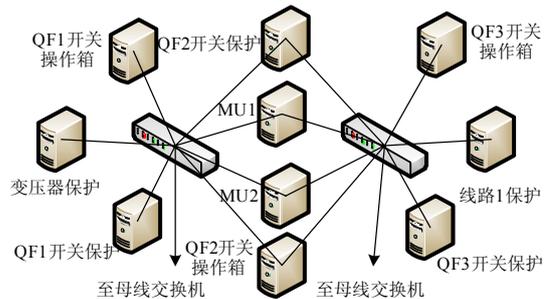


图 3 网络仿真模型

Fig.3 Simulation of network model

同理，接线的另一串 OPNET 模型类似。

2.2 节点模型

OPNET 通过节点实现数据包在接受和发送，本文仿真直接采用 OPNET 软件提供的高级 Ethernet_wkstn_adv 节点模型，可以仿真各种通信节点。其中，合并单元和联络断路器的智能操作箱和保护需要连接至两个交换机，因此需要 2 个端口，而 Ethernet_wkstn_adv 节点为单端口，因此将其进行改造为 2 端口节点。

2.3 过程层网络数据流分析

过程层网络数据流主要包括:

(1) 合并单元 MU 向线路保护、变压器保护、母线保护、开关保护发送采样报文;

(2) 智能控制单元向保护发送开关位置报文;

(3) 保护向智能控制单元发送控制命令。

主要参数配置:

(1) MU 节点。以采样间隔为周期(采样间隔取 200×50 Hz),为 SAV 报文,报文长度 123 字节,各个 MU 流量起始时间和到达时间间隔都设定成相同的常数分布,来实现采样的同步性。

(2) Control 节点。以 5 ms 为周期广播开关位置报文,为 GOOSE 报文,报文长度 16 字节。

(3) Protection 节点。从某个时刻开始以 1 ms 为周期广播控制报文,为 GOOSE 报文,报文长度 16 字节,持续 10 ms。

3 仿真分析

3.1 VLAN 划分

SAV、GOOSE 报文以多播、重发相同数据的形式向外发送,而变电站中的间隔层 IED 之间并非都有 GOOSE 报文交换,只有一些相关的 IED 才有 GOOSE 报文交换,应用 VLAN 技术将过程层网络划分为几个不同的虚拟局域网,减少了 VLAN 中的广播信息,解决了因广播信息的泛滥而造成的网络堵塞,提高了网络传输效率。根据 SAV、GOOSE 报文实际发送特征将网络设备划分成 4 个不同 VLAN。

表 1 VLAN 配置

Tab.1 VLAN configuration

VLAN Identifier	设备
1	Protection_Busbar1; Protection_line1; Protection_QF1; Control_QF1; Protection_QF2; Control_QF2; MU1; MU2;
2	Protection_Busbar1; Protection_Transformer2; Protection_QF4; Control_QF4; Protection_QF5; Control_QF5; MU3; MU4;
3	Protection_Busbar2; Protection_Transformer 1; Protection_QF2; Control_QF2; Protection_QF3; Control_QF3; MU2; MU1;
4	Protection_Busbar2; Protection_line2; Protection_QF5; Control_QF5; Protection_QF6; Control_QF6; MU4; MU3;

3.2 结果分析

本文利用 OPNET modeler 网络设备模型,以工

作站模拟合并单元 MU、智能开关操作箱、保护等二次设备。利用 OPNET 中的 Video Conference 应用来模拟采样报文和 GOOSE 报文,并通过设置交换机的 VLAN identifier 来实现 VLAN 划分。

仿真第一次不划分 VLAN,第二次划分为 4 个 VLAN。母线 1 的保护吞吐量的仿真结果如图 4、5。

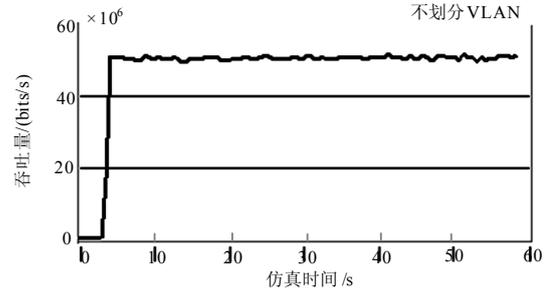


图 4 不划分 VLAN 的母线保护吞吐量

Fig.4 Throughput of busbar protection without dividing VLAN

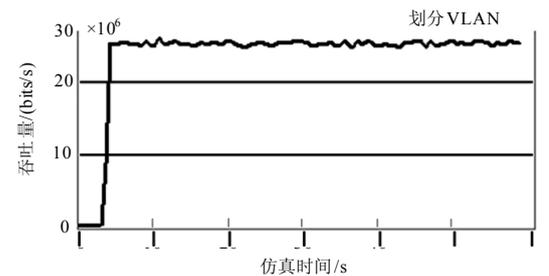


图 5 划分 VLAN 的母线保护吞吐量

Fig.5 Throughput of busbar protection in dividing VLAN

从图 4、图 5 中可以看出是否划分 VLAN 对网络性能的影响非常大,如果不划分 VLAN 进行仿真,母线保护的负荷将是划分 VLAN 之后的 2 倍。在未划分 VLAN 之前,母线保护除了收到与其相关的报文之外,还要接收与其不相关的广播报文,网络的负载大大增加,冲突发生的可能性也随之增加。

图 6 曲线为不划分 VLAN 后的母线保护的 GOOSE 报文时延,图 7 曲线为划分 VLAN 后的母线保护的 GOOSE 报文时延。母线保护与多个间隔有信号联系,网络的负载量较大,冲突发生的可能性增大。划分 VLAN 后,有利于减少报文冲突,更有效地利用网络带宽,GOOSE 报文的端对端延时特性比较稳定,延迟抖动较小,提高报文传输的实时性能。

如表 2 给出与母线保护相关的 QF1、QF2、QF4 保护和智能操作箱以及线路保护的平均时延和最大时延,各个设备在划分 VLAN 后的平均时延明显小于不划分 VLAN 的平均时延,在划分 VLAN 后各个设备的 GOOSE 报文时延较小。

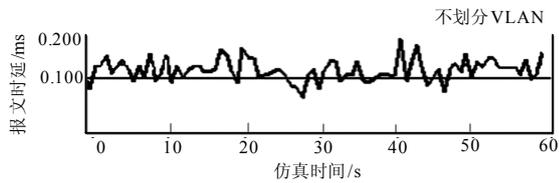


图 6 不划分 VLAN 母线保护 GOOSE 时延

Fig.6 GOOSE delay of busbar protection without dividing VLAN

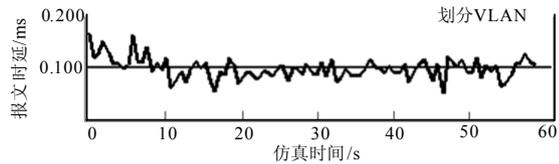


图 7 划分 VLAN 母线保护 GOOSE 时延

Fig.7 GOOSE delay of busbar protection in using VLAN

表 2 保护和控制设备 GOOSE 时延

Tab.2 GOOSE delay of protections and control devices

设备	不划分 VLAN/ms		划分 VLAN/ms	
	平均时延	最大时延	平均时延	最大时延
Protection_Busbar1	0.104 3	0.108 6	0.090 9	0.096 3
Protection_QF1	0.096 6	0.103 3	0.085 8	0.088 7
Protection_QF2	0.094 1	0.096 7	0.088 1	0.089 4
Protection_QF4	0.100 4	0.106 7	0.090 1	0.099 4
Control_QF1	0.087 6	0.102 4	0.077 9	0.082 7
Control_QF2	0.089 6	0.091 6	0.080 1	0.094 7
Control_QF4	0.093 5	0.099 2	0.088 7	0.092 4
Protection_line1	0.083 1	0.112 7	0.079 3	0.094 3

4 结论

基于 IEC61850 数字化变电站的继电保护通过通信网络来实现保护二次回路的信息交换。根据实际变电站类型和接线方式，合理设计过程层网络成为建立数字化变电站继电保护的关键问题之一。采用 VLAN 技术合理划分，数据冲突减少，有效利用

局域网带宽，可以提高报文传输的实时性能。

参考文献

- [1] 徐成斌, 孙一民. 数字化变电站过程层 GOOSE 通信方案[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (19): 91-94. XU Cheng-bin, SUN Yi-min. A communication solution of process layer GOOSE in digitized substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (19): 91-94.
- [2] 窦晓波, 胡敏强, 吴在军, 等. 数字化变电站通信网络性能仿真分析[J]. 电网技术, 2008, 32 (17): 98-104. DOU Xiao-bo, HU Min-qiang, WU Zai-jun, et al. Simulation analysis on performance of communication networks in digital substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (17): 98-104.
- [3] 韩小涛, 聂一雄, 尹项根. 基于 OPNET 的变电站二次回路通信系统仿真研究[J]. 电网技术, 2005, 29 (6): 67-71. HAN Xiao-tao, NIE Yi-xiong, YIN Xiang-gen. Research on substation secondary circuit communication system using OPNET simulator[J]. Power System Technology, 2005, 29 (6): 67-71.
- [4] Sidhu T S, YIN Yu jie. Modeling and simulation for performance evaluation of IEC 61850-based substation communication systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007.
- [5] 陈敏. OPNET 网络仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

收稿日期: 2009-12-09; 修回日期: 2010-03-23

作者简介:

方晓洁 (1983-), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统运行与控制, 数字化变电站、IEC61850 标准; E-mail: fangxj@qq.com

季夏轶 (1985-), 女, 硕士, 主要研究方向为电力系统运行与控制, 配电自动化;

卢志刚 (1959-), 男, 副教授, 主要研究方向为电力系统运行与控制, 数字化变电站。

(上接第 136 页 continued from page 136)

收稿日期: 2009-12-05; 修回日期: 2010-03-05

作者简介:

孔宁 (1984-), 男, 硕士研究生, 通信作者, 主要

研究方向为 FACTS 技术、电力电子技术在电力系统中的应用; E-mail: knujn0878@163.com

尹忠东 (1968-), 男, 博士后, 教授, 研究方向为 FACTS 技术、新能源发电及储能技术。