

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181508

基于 IEC 61850 的配电网网络化保护通信建模与实时性可靠性分析

戴观权¹, 蔡泽祥¹, 蔡煜¹, 李艳²

(1. 华南理工大学, 广东 广州 510640; 2. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518001)

摘要: 将 IEC 61850 标准应用于配电网保护领域, 研究配电网网络化保护技术, 成为配电网发展的新热点。然而, 配电网网络化保护面临着通信距离长、范围大、面向多个站点等苛刻的通信条件, 通信的实时性和可靠性受到严峻的考验, 亟需得到量化的分析和论证。为此, 基于 IEC 61850 标准, 依托 OPNET 仿真平台, 对配电网网络化保护通信的报文信息以及实体设备进行自定义建模, 并结合通信组网方案、设备选型以及采样策略, 搭建了多个不同场景的配电网网络化保护通信仿真模型。仿真探讨了通信网络的延时、延时抖动性、丢包率等网络性能, 量化分析和论证了通信网络的实时性和可靠性。最后还探讨了配电网网络化保护通信的应用边界。基于 OPNET 的配电网网络化保护通信实时性和可靠性的研究方法和分析结果, 能够为配电网网络化保护的工程化应用提供重要的参考意义。

关键词: 配电网; 网络化保护; IEC61850; OPNET; 通信建模

Modeling and real-time reliability analysis of communication network for networked protection of distribution network based on IEC 61850

DAI Guanquan¹, CAI Zexiang¹, CAI Yu¹, LI Yan²

(1. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518001, China)

Abstract: Researching networked protection technology of distribution network based on IEC 61850 has become a new hot spot in the development of distribution network. However, the networked protection of the distribution network faces the communication distances, large scope, and harsh communication conditions for multiple sites. The real-time and reliability of communication are challenged severely, and it is urgent to be analyzed and demonstrated quantitatively. Therefore, based on the IEC 61850 standard and relying on the OPNET simulation platform, the message and equipment of networked protection communication system are modeled, and the simulation model in different scenarios is built combined with communication networking scheme, equipment selection and sampling strategy. The performance of communication network such as delay, delay jitter and packet loss rate are collected to quantitatively analyze and demonstrate the real-time and reliability of the communication network. Finally, the application boundary of the communication network is also discussed. The real-time and reliability research methods and analysis results based on OPNET can provide an important reference for the engineering application of networked protection of distribution network.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577073).

Key words: distribution network; networked protection; IEC 61850; OPNET; communication modeling

0 引言

随着分布式电源在配电网的渗透率不断提高,

配电网逐渐由传统无源供电模式向功率双向流动、运行方式多变的有源供电模式转变, 传统基于局部信息的配电网保护控制技术逐渐暴露不足^[1-2], 无法满足有源配电网运行控制的发展需求, 迫切需要研究更高性能的配电网保护控制技术^[3-4]。随着 IEC 61850

标准的逐步成熟,其相关技术和方法逐渐开始在配电网保护控制通信领域得到了应用,有效解决了配电网终端设备之间的互操作、即插即用等问题^[5-6]。与此同时,光纤通信技术在配电网通信领域得到应用,为新型配电网保护控制技术提供了良好的发展契机。

近年来,基于多节点信息融合的网络化保护技术在快速性和选择性方面有着较大的优势,成为新的研究热点。网络化保护的功能结构和系统架构的确立^[7-9]以及基于多数据融合和共享的配电网广域保护算法、方案的提出^[10-11],为含分布式能源接入的配电网保护控制实现提供了研究基础。当前针对配电网网络化保护控制研究大部分停留于框架设计与理论研究。然而,配电网网络化保护需要采集、传输和处理多个节点的电气数据,而且节点之间的距离远,通信范围大,其工程化应用的性能表现与通信网络的实时性和可靠性密切相关,目前针对配电网网络化保护通信性能与组网方式尚缺乏深入研究。

在现有的配电网通信研究中,主要针对配电自动化系统组网性能进行分析,其实时性与可靠性尚不能满足配电网保护控制系统要求。另有部分文献利用 OPNET 自带模型探讨了基于 TCP/IP 的广域后备保护三层式网络性能,能满足网络化后备保护的实时性、可靠性要求,然而,以后备保护形式存在的配电网保护不能实现保护性能最大程度提升^[12]。随着通信技术的发展与供电可靠性要求提升,配电网网络化保护应依托于 IEC 61850 标准的保护通信模式与二层交换式网络设计,实现快速可靠的网络化保护决策。而针对 IEC 61850 在配电网保护中的应用以及性能分析较少提及:文献[13]研究了适应于配电网保护的光纤以太网组网适配原则,文献[14]则基于网络推演的方法,分析组网下的通信性能,文献[15]基于流量与延时分析,研究配电网保护组网策略,但没有充分考虑配电网通信网络实时性与可靠性对网络化保护的影响。总体而言,现阶段尚缺乏配电网网络化保护通信实时性和可靠性的量化分析方法,制约着工程化应用。

针对以上问题,本文遵循 IEC 61850 标准,依托 OPNET 仿真平台,对配电网网络化保护建立通信模型,并结合通信组网方案、设备选型以及采样策略等因素,仿真探讨了不同场景下通信网络的延时、延时抖动性、丢包率等网络性能,量化分析和论证了通信网络的实时性和可靠性,并对各个场景下通信网络的应用边界进行探讨,为配电网网络化保护技术的工程化应用提供了重要的分析工具和

参考意义。

1 配电网网络化保护通信网络

1.1 通信架构与信息流

配电网网络化保护面向多个配电房或开闭所,有着分布式采样、集中式决策的鲜明特点,其通信机构和信息流如图 1 所示。配电网智能终端(Distribution intelligent Terminal, DIT)分布式部署在配电房或开闭所内,对配电房或开闭所的电气数据进行一体化采样,并借助光纤通信网络上传至配电网网络化保护控制装置(Networked Protection and Control Device, NPCD),NPCD 汇集多个节点的采样数据,负责集中式网络化保护决策,并向各个 DIT 发送动作信号。

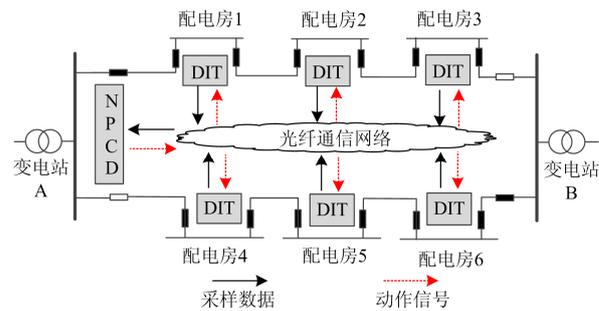


图 1 通信框架与信息流

Fig. 1 Communication framework and information flow

借鉴于智能变电站的通信规约,配电网网络化保护系统的信息交互采取 IEC 61850 标准的信息模型和信息交换模型,其中,电压/电流模拟量遵循 SV 模型进行传输,而开关状态量和控制量则遵循 GOOSE 模型进行交互。一方面,SV 和 GOOSE 报文的发布者/订阅者机制有利于信息的网络化传输,另一方面,IEC 61850 的标准化信息模型有利于解决设备之间的互联互通、即插即用等问题。

1.2 性能约束

目前,IEC 61850 标准的通信规约在智能变电站的通信领域获得广泛应用,其通信性能已经在大量的工程中得到验证^[16]。然而,将 IEC 61850 标准的相关方法和技术应用于配电网网络化保护通信领域时,其应用场景在通信距离、通信范围、交换机级联数方面与智能变电站有着较大的差异性,如表 1 所示,其通信条件更为苛刻,对通信网络的实时性和可靠性形成更严峻的考验。

基于此,本文从配电网网络化保护功能的速动性和可靠性出发,并结合 IEC 61850 标准对报文信息的通信性能要求,选取延时和延时抖动性作为配电网网络化保护实时性评价指标,丢包率作为可靠

性评价指标, 其性能约束如表 2 所示。

表 1 应用场景的差异性

Table 1 Application scenario difference

通信条件	智能变电站	配电网网络化保护
通信距离	百米以内	数公里
通信范围	面向间隔	面向多个配电房
交换机级联数	一般小于 3	一般大于 5

表 2 性能约束

Table 2 Performance constraint

性能	指标	说明	约束
实时性	传输延时	报文从发出到接收所经历的时间	<3 ms
	延时抖动性	传输延时的不确定性	—
可靠性	丢包率	由于链路误码、交换机和链路资源紧张造成报文丢失	0

2 基于 OPNET 的配电网网络化保护通信仿真建模

OPNET 仿真平台提供了三层建模机制, 用户可以依次从进程模型、节点模型、网络模型对实际工程的通信网络进行详细建模, 量化分析通信网络的流量分布、通信延时、数据丢包等网络性能^[17-18]。

本文基于 OPNET 仿真平台, 结合 IEC61850 标准, 针对图 1 的配电网网络化保护二层交换式网络的通信需求, 对其信息模型以及设备模型进行自定义建模或者选取通用模型, 搭建不同场景的配电网网络化保护通信仿真模型。

2.1 信息建模

IEC 61850-9-2 标准提供了灵活的 SV 报文格式, 报文的应用数据协议单元 (Application Protocol Data Unit, APDU) 可以封装多个应用服务数据单元 (Application Service Data Unit, ASDU), 而 ASDU 的个数可以根据工程应用的实际情况进行灵活配置, 很好地适应了配电网网络化保护一体化采样的需求。每个 ASDU 提供了多路通道模拟量的标准数据集, 用来封装电压/电流模拟量, 每一帧 SV 报文的长度约为 200 字节^[19-20]。

与 SV 报文类似, GOOSE 报文由 GOOSE 头部和 GOOSE 数据集组成, 把断路器状态量、保护开入开出量等信息封装到 GOOSE 数据集, 每一帧 GOOSE 报文的长度约为 150 字节。

2.2 设备建模

根据 IEC 61850 标准, SV 和 GOOSE 报文是快速报文, 为了保证报文传输、处理的实时性, 在通信协议中, 应用层的数据直接被映射至数据链路层

进行以太网帧的封装, 包括源/目的地址以及其他报文参数等, 然后发送至物理层进行传输, 而会话层、传输层和网络层均为空, 其传输模型如图 2 所示, 实体设备的 OPNET 模型采取同样的建模方式。

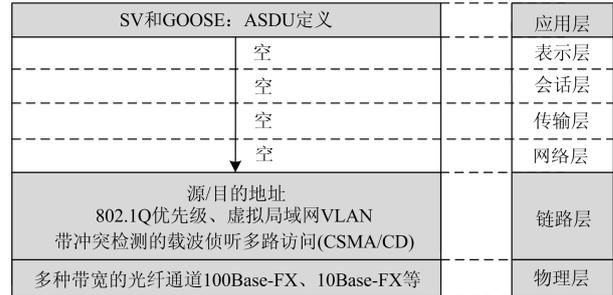


图 2 SV 和 GOOSE 的通信协议栈

Fig. 2 Communication protocol stack of SV and GOOSE

1) 配电网智能终端 DIT

DIT 负责采集电压/电流数据以及开关状态量, 并执行保护动作命令, 其 OPNET 模型如图 3 所示。应用层定义 SV 报文和 GOOSE 报文发送模块, 用以模拟报文的发送规律, 并直接映射至链路层进行源/目的地址以及其他报文参数封装后经过物理层传输。同时, 可以接收跳合闸 GOOSE 报文, 并通过统计模块统计其传输延时。

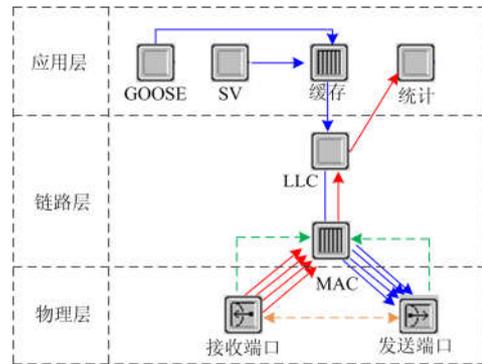


图 3 DIT 的 OPNET 模型

Fig. 3 OPNET model of DIT

2) 网络化保护控制装置 NPCD

NPCD 接收多节点的采样数据, 实现网络化保护功能, 其 OPNET 模型如图 4 所示, 功能模块与 DIT 类似, 通过统计模块综合分析各个 DIT 上传的采样数据 SV 报文和开关状态量 GOOSE 报文, 并通过 GOOSE 报文的形式向 DIT 下达保护控制指令。

3) 交换机和链路

交换机和链路属于通用模型, 根据配电网网络化保护的通信需求, 选取存储-转发的 2 层交换机模型和全双工点对点的链路, 并对交换机的报文服务率、以太网参数、误码率等参数进行整定即可。

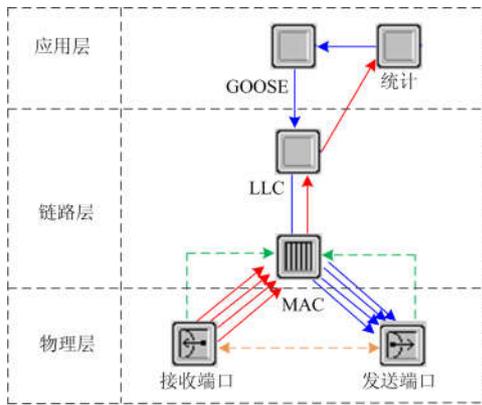


图 4 NPCD 的 OPNET 模型
Fig. 4 OPNET model of NPCD

3 配电网网络化保护通信网络的实时性和可靠性分析

3.1 研究案例

选取某地区“二供一备”接线的配电网作为研究案例，如图 5 所示。在正常情况下，该“二供一备”接线的配电网由变电站 A 的两路电源进线 I 和 II 作为主电源供电，另有变电站 B 的一路电源进线作为备用电源。当主供电源 I 路或 II 路停电时，可以启动备用电源进行负荷转供，备用电源能够承担所有负荷或者部分负荷的供电需求，保证该配电网具有一定的连续供电能力。为了保证这种 n 供一备系统在各种运行方式下都能实现全方位的保护，在通信组网分析中，这种 n 供一备系统以及规模更大、运行方式更为复杂的配电网网络化保护通信实时性和可靠性需要得到验证。

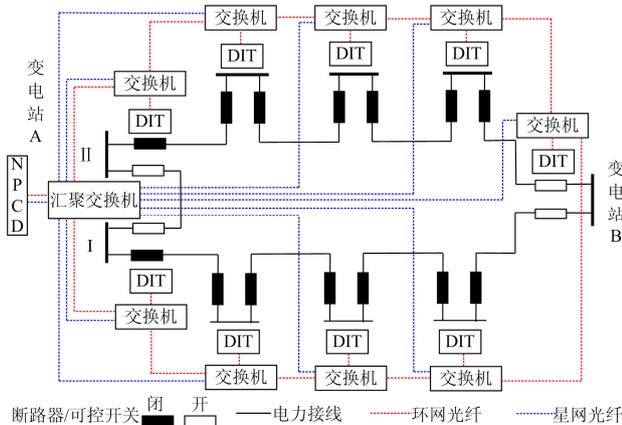


图 5 研究案例
Fig. 5 Research case

在 OPNET 仿真平台，选取 DIT 和 NPCD 以及二层交换机和光纤，搭建配电网网络化保护通信网络仿真模型，如图 5 所示，其中每个配电房以及电

源进线部署 DIT，负责采集电气数据，通过交换机接入通信网络，配电房与配电房之间的通信距离为 5 km，配电房内的通信距离为 50 m。在变电站 A 部署 NPCD，负责网络化保护决策。

3.2 研究场景

本文选取通信组网方案、设备选型、采样策略等因素作为研究切入点，探讨不同场景的配电网网络化保护通信网络在极端模式下的实时性和可靠性，场景设置如表 3 所示。

表 3 仿真场景

Table 3 Simulation scenario

场景	组网	光纤带宽/M	采样频率/Hz
1	星形	100	2 000
2	星形	100	4 000
3	星形	1 000	4 000
4	星形	1 000	8 000
5	环形	100	2 000
6	环形	100	4 000
7	环形	1 000	4 000
8	环形	1 000	8 000

为保证本文的研究结论能够适应实际工程通信网络的各个运行场景，本文对极端模式下的通信网络进行性能验证，即 SV 报文根据采样频率等间隔发送，而所有节点的 GOOSE 报文以最小时间间隔 2 ms 等间隔发送。

3.3 仿真结果

3.3.1 最大延时

NPCD 作为保护决策点，接收所有 DIT 上传的采样数据，当 DIT 为不同数目时，NPCD 接收所有的 SV 报文最大延时如表 4 所示。

表 4 SV 报文最大延时

Table 4 Maximum delay of SV

场景	SV 报文最大延时			
	9 个 DIT	10 个 DIT	11 个 DIT	12 个 DIT
1	0.357 5	0.389 6	0.421 7	0.453 8
2	0.362 5	0.393 2	0.426 5	0.457 9
3	0.126 0	0.133 4	0.154 5	0.166 2
4	0.127 1	0.138 9	0.157 7	0.171 9
5	0.407 0	0.439 1	0.473 2	0.483 2
6	0.411 2	0.443 1	0.479 2	0.499 1
7	0.170 0	0.173 2	0.197 2	0.222 8
8	0.171 5	0.174 9	0.200 1	0.224 2

从表 4 可以看出，在所有场景下，SV 报文最大延时在 0.5 ms 以内，远小于 3 ms，具备较强的实时性，而且随着 DIT 的数目增大，平均增幅在 0.03 ms 以内，

最大延时变化不大, 对比不同的场景仿真结果, 可知:

- 1) 组网方案: 星网的 SV 报文最大延时略小于环网, 差异在 0.05 ms 以内;
- 2) 光纤选型: 采取 1 000 M 光纤组网的最大延时比 100 M 光纤组网的略小 0.25 ms;
- 3) 采样策略: 采样策略的变化对 SV 报文的最大延时影响较小。

NPCD 向各个 DIT 发送跳合闸 GOOSE 报文, 其最大延时结果如表 5 所示。

表 5 跳合闸 GOOSE 报文最大延时

Table 5 Maximum delay of GOOSE

场景	跳合闸 GOOSE 报文最大延时			
	ms			
	9 个 DIT	10 个 DIT	11 个 DIT	12 个 DIT
1	0.155 2	0.168 7	0.183 6	0.196 5
2	0.159 1	0.170 1	0.189 1	0.201 2
3	0.122 6	0.132 1	0.151 1	0.163 9
4	0.124 8	0.134 8	0.153 6	0.165 3
5	0.225 0	0.267 7	0.312 8	0.356 1
6	0.229 1	0.273 3	0.320 0	0.363 1
7	0.134 5	0.162 7	0.193 6	0.211 6
8	0.136 2	0.165 1	0.196 1	0.214 9

在所有场景下, NPCD 下达的跳合闸 GOOSE 报文的最大延时均小于 0.5 ms, 具有较强的实时性, 不同的组网方案、光纤选型与采样策略对跳合闸信号 GOOSE 报文造成的影响, 与采样值 SV 报文相类似。

3.3.2 延时抖动性

报文在交换机的排队和转发具有不确定性, 其传输延时具有抖动性。特别地, 在配电网网络化保护通信网络中, 接入多个 DIT, 采样数据 SV 报文流量大, 而且交换机级联数目大, 报文的传输延时具有明显的抖动性。

当 DIT 数目为 12 个时, 其中, 某一个配电房 #12 的 DIT_12 上传至 NPCD 的 SV 报文延时抖动情况如表 6 所示。

表 6 DIT_12→NPCD 的 SV 报文抖动性

Table 6 Maximum delay of SV for DIT_12→NPCD

场景	Max			Min			抖动幅值
	Max	Min	抖动幅值	Max	Min	抖动幅值	
1	0.441 9	0.287 3	0.154 6	5	0.482 3	0.375 0	0.107 3
2	0.445 1	0.289 4	0.155 7	6	0.499 1	0.364 1	0.135 0
3	0.166 2	0.144 8	0.022 4	7	0.221 4	0.208 1	0.013 3
4	0.170 9	0.147 9	0.023 0	8	0.222 3	0.205 7	0.01 66

当 DIT 的数量为 12 时, 组网方案的不同引起的延时抖动幅值差异在 0.05 ms 范围内; 对比光纤

选型, 在 100 M 光纤组网的场景中, 采样值 SV 报文对通信资源竞争激烈, 报文延时抖动幅值较大, 抖动幅值达到了百微秒级别, 明显大于 1 000 M 光纤组网的场景; 而采样策略的不同, 引起的延时抖动幅值差异甚微。

3.3.3 丢包

配电网网络化保护通信规模大, 采样数据量大, 而且面临着通信距离长、范围广的苛刻通信条件, 由此带来的数据丢包问题不可忽视, 可能会引起网络化保护的误动或拒动, 影响着整体系统的可靠性。

当 DIT 数目为 12 个, 光纤链路的误码率分别为 10^{-8} 、 10^{-9} 、 10^{-10} 和 10^{-11} 时, 各个场景下报文的丢包情况如表 7 所示。

表 7 平均每秒丢包数目

Table 7 Average number of lost packets per second

场景	链路误码率				场景	链路误码率			
	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}		10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}
1	3.2	0.6	0.0	0.0	5	1.2	0.2	0.0	0.0
2	3.1	1.6	0.8	0.0	6	3.4	1.2	0.6	0.0
3	3.6	0.6	0.0	0.0	7	0.8	0.2	0.0	0.0
4	5.4	0.6	0.2	0.0	8	3.2	0.4	0.0	0.0

由表 7 可知, 当光纤误码率为 10^{-8} 和 10^{-9} 时, 各个场景均出现了程度不同的丢包现象, 平均每秒丢包数目较大, 严重影响着网络化保护功能的可靠性。而当光纤误码率降至 10^{-11} 时, 各个场景的丢包率保持为 0。

3.3.4 应用边界

配电网网络化保护系统面向多个配电房或开闭所, 大量的数据同时汇入同一个通信网络, 可能会引起流量过载、网络堵塞等问题, 存在明显的通信瓶颈和应用边界问题。与此同时, 基于 IEC 61850 的配电网网络化保护对采样数据和控制信号有着较大的通信性能要求, SV 报文和 GOOSE 报文属于快速报文, 具有较强的实时性(小于 3 ms)和可靠性(零丢包)要求。因此, 配电网网络化保护通信网络的应用边界条件为

$$\begin{cases} Delay_{\max} < 50\% \times 3 \text{ ms} \\ Loss = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $Delay_{\max}$ 是报文最大延时; 50% 是最大延时的裕度; $Loss$ 是报文丢包率。

本文基于 OPNET 仿真平台, 采取“N+1”的方法探讨各个场景下通信网络的应用边界: 即逐一增大接入通信网络的 DIT 数目, 若当通信网络接入 N 个 DIT 时, 应用边界式(1)成立, 而当 N+1 个 DIT 时, 应用边界式(1)不成立, 则定义 N 为该场景下通

信网络的应用边界,并统计此时的 SV 报文和 GOOSE 报文的最大延时,结果如表 8 所示。其中,光纤误码率为 10^{-11} 。

表 8 通信网络的应用边界

场景	应用边界	报文最大延时/ms		丢包率
		SV	GOOSE	
1	25	0.784 7	0.355 7	0
2	13	0.474 7	0.234 5	0
3	110	0.645 6	0.514 7	0
4	57	0.504 7	0.426 9	0
5	25	1.240 1	0.974 1	0
6	13	0.539 6	0.401 8	0
7	58	1.497 6	1.372 1	0
8	51	1.496 2	1.235 4	0

由表 8 可知,对于 100 M 光纤组网的通信网络,应用边界 N 值较小。在每周期 40 个采样点的采样策略下,通信网络可接入的 DIT 数目为 25,而在每周期 80 个采样点的采样策略下,可接入的 DIT 数目缩小至 13,应用边界下降明显,可能无法适应其他 n 供一备或规模更大的配电网网络化保护系统。

而采取 1 000 M 光纤组网的配电网网络化保护通信系统,应用边界均大于 50 个,能够满足其他 n 供一备或规模更大的配电网网络化保护通信需求。

3.4 实时性和可靠性分析

配电网网络化保护对采样数据和控制信号的实时性和可靠性具有较高的要求,其中实时性用报文的最大延时和延时抖动性来评价,而可靠性则用报文的丢包率和应用边界来评价,仿真结果表明:

实时性分析:

1) 在 DIT 数目小于 13 个的情况下,采取 100 M 光纤进行通信组网,各类报文的最大延时均在 0.5 ms 以内,而采取 1 000 M 光纤组网的最大延时更是能在 0.25 ms 以内,能够满足采样数据和控制信号的实时性(小于 3 ms)要求,而且延时裕度较大,还可以支持接入更多的 DIT。

2) 不同的组网方案和采样策略,采样值 SV 报文的最大延时差别在 0.05 ms 以内,而跳合闸信号 GOOSE 报文的最大延时差别在 0.15 ms 以内,影响不大。

3) 100 M 通信网络的采样值 SV 报文的延时抖动幅值较大,抖动幅值达到了百微秒级别,而 1 000 M 通信网络的延时抖动幅值在 25 μ s 以内,均在可接受范围内。而采样策略和组网方案对采样值 SV 报文的延时抖动性影响甚微。

可靠性分析:

1) 光纤误码率为 10^{-8} 和 10^{-9} 时,链路的误码带

来的丢包问题明显,可能会引起网络化保护决策的误动或拒动,威胁网络化保护的可靠性,光纤的误码率要严格控制在 10^{-11} 及以下,保证报文丢包率为 0。

2) 100 M 通信网络的 N 值为 13,在实际工程应用容易触及通信边界,对于 DIT 数目大于 13 或其他 n 供一备的规模更大的配电网网络化保护系统,建议选取 1 000 M 光纤进行组网,保证通信网络具有一定的承载力和可拓展性。

4 结论

本文基于 IEC 61850 标准,依托 OPENT 仿真平台,建立了配电网网络化保护通信模型,包括信息模型、实体设备以及整个通信网络,能够很好地适应多种场景下不同规模的配电网网络化保护通信性能研究,通过分析传输延时、延时抖动性、丢包以及应用边界等网络性能,定量化论证了通信网络的实时性和可靠性,为配电网网络化保护的工程化应用提供重要的分析工具和参考意义。

本文基于 OPNET 的配电网网络化保护通信实时性和可靠性的研究方法和分析结果,对不同规模的配电网网络化保护通信网络给出了明确的组网方案、光纤选型与采样策略,这已经在深圳供电局某地区的配电网网络化保护实际工程得到应用,目前该系统运行状况良好,有效提高了配电网的供电可靠性。

参考文献

- [1] HARON A R, MOHAMED A, SHAREEF H. Analysis and solutions of overcurrent protection issues in a microgrid[C] // 2012 IEEE International Conference on Power and Energy, December 2-5, 2012, Kota Kinabalu, Malaysia: 644-649.
- [2] 林霞, 时永, 李强, 等. 基于 DG 接入的配网自动化系统保护策略的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 137-144.
LIN Xia, SHI Yong, LI Qiang, et al. Research on the protection strategy of distribution automation system based on DG access[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 137-144.
- [3] USTUN T S, OZANSOY C, ZAYEGH A. Modeling of a centralized microgrid protection system and distributed energy resources according to IEC 61850-7-420[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1560-1567.
- [4] 贺敏, 徐光福, 伊洋, 等. 含高渗透率 DG 的配电网实用化保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 136-143.
HE Min, XU Guangfu, YI Yang, et al. A practical protection

- scheme for distribution network with high penetration of DG[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(17): 136-143.
- [5] 刘丹丹, 段斌, 王俊, 等. 基于 IEC61850 的主动配电网故障自恢复多代理系统[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(9): 119-126.
LIU Dandan, DUAN Bin, WANG Jun, et al. A multi-agent system for fault self-recovery of distribution systems in active distribution network based on IEC 61850[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(9): 119-126.
- [6] 韩国政, 徐丙垠, 索南加乐, 等. 基于 IEC61850 的配电网自动化通信技术研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(2): 62-66.
HAN Guozheng, XU Bingyin, SUONAN Jiale, et al. Communication technology for distribution automation based on IEC 61850[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(2): 62-66.
- [7] 刘丹丹, 段斌, 王俊, 等. 基于 IEC61850 的主动配电网故障自恢复多代理系统[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(9): 119-126.
LIU Dandan, DUAN Bin, WANG Jun, et al. A multi-agent system for fault self-recovery of distribution systems in active distribution network based on IEC 61850[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(9): 119-126.
- [8] 牛耕, 周龙, 裴玮, 等. 低压有源配电网在线故障区间定位与识别方法[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(9): 2525-2539.
NIU Geng, ZHOU Long, PEI Wei, et al. On-line fault section location and classification technique for low voltage active distribution network[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(9): 2525-2539.
- [9] 陈怡然. 适用于含 DG 配网的充分式广域保护研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [10] 孔德洪, 吕飞鹏. 基于区域多信息融合的广域后备保护算法[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(4): 26-32.
KONG Dehong, LÜ Feipeng. An algorithm of wide area protection based on regional multi information fusion[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(4): 26-32.
- [11] 白加林, 高昌培, 王宇恩, 等. 基于数据源共享的广域智能保护及控制系统研究与应用[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(18): 157-162.
BAI Jialin, GAO Changpei, WANG Yu'en, et al. Research and application of wide-area intelligent protection and control system based on the shared data source[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(18): 157-162.
- [12] 陈国炎, 张哲, 尹项根, 等. 广域后备保护通信模式及其性能评估[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(1): 186-196.
CHEN Guoyan, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Wide area backup protection communication mode and its performance evaluation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(1): 186-196.
- [13] 赵煜. 配电网分布式继电保护系统及其通信方式研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [14] 肖繁. 适用于新能源规模化接入的电网继电保护关键问题研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [15] 蔡煜, 蔡泽祥, 王奕, 等. 配电网广域保护控制通信网络建模与组网策略[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(4): 183-190.
CAI Yu, CAI Zexiang, WANG Yi, et al. Modeling and networking strategy of communication network of wide-area protection and control for distribution network[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(4): 183-190.
- [16] 张延旭. 智能变电站继电保护系统的信息流建模与可靠性提升策略[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [17] 莫峻, 谭建成. 智能变电站过程总线通信模型[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(7): 1072-1078.
MO Jun, TAN Jiancheng. A mathematical model of process bus communication in smart substations[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(7): 1072-1078.
- [18] 高志远, 黄海峰, 徐昊亮, 等. IEC61850 应用剖析及其发展探讨[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(1): 162-169.
GAO Zhiyuan, HUANG Haifeng, XU Haoliang, et al. Discussion on applications of IEC 61850 and its development[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(1): 162-169.
- [19] 周凯. 含多微电网的主动配电网通信系统仿真研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2017.
- [20] 胡春潮, 侯艾君, 马凯, 等. 基于 OPNET 的电网 SCADA 系统通信建模与仿真[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(10): 54-59.
HU Chunchao, HOU Aijun, MA Kai, et al. Communication modeling and simulation of SCADA system of power grid based on OPNET[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(10): 54-59.

收稿日期: 2018-12-04; 修回日期: 2019-01-10

作者简介:

戴观权(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统保护、控制与自动化; E-mail: kb_dai@163.com

蔡泽祥(1960—), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护、电力系统稳定分析与控制; E-mail: epzxcai@scut.edu.cn

蔡煜(1993—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统保护、控制与自动化。

(编辑 葛艳娜)