配电网广域保护控制通信网络建模与组网策略

蔡 煜1,蔡泽祥1,王 奕2,邹俊雄1,席 禹1

(1. 华南理工大学 电力学院,广东 广州 510640;2. 广东电网有限责任公司电力科学研究院,广东 广州 510080)

摘要:网络化的广域保护控制是配电网发展的必然趋势,然而其工程化应用受通信网络实时性与可靠性的影响,现阶段尚缺乏定量化的配电网广域保护控制系统通信网络性能分析工具与研究方法,使得相关研究难以深入开展。从网络性能约束出发,基于 OPNET 仿真平台对实体设备进行自定义建模,并通过加载报文协议、设置网络优化策略搭建配电网广域保护控制系统仿真模型,并结合通信设备选型、网络拓扑以及优化调度策略设置不同仿真场景在不同网络层级下进行通信组网策略仿真研究,获得定量化的网络性能分析结果。基于 OPNET 的配电网广域保护控制系统通信网络性能分析与组网策略研究方法能为配电网广域保护控制系统通信组网

关键词:配电网;广域保护控制;网络性能;OPNET;组网策略;通信

中图分类号:TM 76 文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.04.027

0 引言

分布式发电大量接入电网以及电力用户角色的 转变给配电网带来运行方式多变、潮流方向不确定、 系统阻抗难以确定等问题^[1-3],暴露了传统配电网保 护控制方案的不足^[4]。近年来,计算机技术、智能控 制及网络通信技术迅速发展,为实现高性能的配电 网保护控制功能创造了条件。

配电网广域保护控制技术是新的研究热点,文 献[5-7]提出经由通信网络与其他非本地的保护控 制单元进行通信的配电网广域保护控制模式,确立 了广域保护控制系统功能,包括线路保护以及负荷 过载联切、分布式电源控制等更高层次的配电网优 化控制等。在保护实现原理研究方面,文献[8-9]对 电流保护、差动保护等保护原理在配电网广域保护 控制中的具体实现方案进行了探讨。在通信规约与 通信模式的研究方面,文献[10-11]通过借鉴智能变 电站的做法,遵循 IEC61850 标准对信息进行描述并 对通信服务进行映射,实现了实时数据的快速交换。 上述相关研究都为配电网广域保护控制功能实现提 供了研究基础。

然而区别于传统保护控制模式,配电网广域保 护控制采用网络化的通信手段,通信网络的实时性 与可靠性需要得到验证,但目前缺乏对配电网广域 保护控制通信网络性能定量化的深入研究,导致对 配电网广域保护控制的研究难以落实到工程化应用 上,所以亟需形成定量化的配电网广域保护控制通

收稿日期:2017-01-26;修回日期:2018-01-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577073);广东省 自然科学基金资助项目(2016A030313476)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51577073) and the Natural Science Foundation of Guangdong Province (2016A030313476) 信网络性能分析工具以及相适应的研究方法。

OPNET 作为当前通信网络性能定量化分析研究的常用软件,广泛应用于智能变电站与自动化系统的通信网络研究等各个方面^[12-14],但 OPNET 并未提供配电网广域保护控制通信网络设备的相关模型,尚无法满足对配电网广域保护控制通信网络策略研究的要求。

对此,本文通过分析配电网广域保护控制通信 网络性能约束,基于 OPNET 仿真软件,建立配电网 广域保护控制系统设备、协议和优化调度策略等 模型,并根据通信组网策略生成不同场景,分层 级进行仿真研究,定量化地描述通信网络性能, 获得适用于不同网络规模的组网策略,为配电网 广域保护控制系统通信组网的规划、设计与运行 提供依据。

1 配电网广域保护控制通信网络性能约束

区别于传统保护控制模式,配电网广域保护控制功能的实现需要通信技术的支撑,并受网络性能制约。网络性能的优劣将直接影响配电网广域保护控制功能能否有效实现,而系统功能给通信组网提出了性能要求,根据广域保护控制对实时性与可靠性的要求可以确定通信网络的一系列性能指标。

另一方面,通信网络性能受网络组网策略与网络规模影响,网络组网策略影响信息流的分布,而网络规模则决定了网络通信量,进而影响网络流量与实时性能等。反之,在确定网络性能约束条件的情况下,利用网络性能指标对网络组网策略进行评价,能够确定最优网络组网策略,同时,根据网络性能约束条件可以确定组网规模边界。

系统功能、网络性能、组网策略与规模的关系如 图1所示,研究配电网广域保护控制通信组网,首先 需要确定其通信网络性能指标。配电网的广域保护 控制经由通信网络传输的数据信息包括保护信息、 控制信息、测量、计量以及设备状态信息等,其中与 保护相关的信息量最大,对实时性能要求最高,因此 网络性能的描述可以从保护通信性能的角度进行 刻画。

184



图 1 系统功能、网络性能、组网策略与规模的关系

Fig.1 Relationship among system functions, network performance, networking and network scale

通信领域中常用的网络性能指标通常包括连通 性、吞吐量、带宽、带宽占用率、传输报文延时、延时 抖动等,结合保护特性的需求与 IEC61850 标准对保 护通信网络性能要求,从速动性的角度选取传输报 文延时作为实时性能考量的依据,从可靠性的角度 判断是否丢包来评价网络可靠性,借助带宽占用率 反映网络流量水平以及资源利用情况。网络性能指 标及其相关要求如表 1 所示,配电网广域保护控制 功能实现与组网研究须以满足表 1 所确定的网络性 能约束为前提。

表1 网络性能指标与约束要求

Table 1 Network performance indicators and constraints of network performance

性能指标	说明	网络性能约束
传输报文 延时	报文从发送端发出经历通信网 络到接受端所耗费的时间	最大报文延时在 10 ms 以内
丢包	通道资源紧张造成数据帧丢失	满足任何情况下 零丢包
带宽占 用率	实际利用带宽与光纤链路容量 的比值。过大导致链路堵塞; 过低则会造成资源浪费	要求带宽占用率 在 60%以下

2 基于 OPNET 的配电网广域保护控制通信 网络建模

2.1 配电网广域保护控制通信网络建模内容

OPNET 能够实现网络流量分布、设备处理延时、端到端延时等各种网络性能指标的仿真与统计, 精确反映通信场景的网络性能。OPNET 还可以模 拟多种通信场景,实现不同场景的网络性能对比。 针对配电网广域保护控制特定的具体研究对象,需 要对 OPNET 模型库进行拓展。本文将基于配电网 广域保护控制系统完成通信网络的 OPNET 实体设 备建模、通信协议建模以及优化调度策略建模,建模 内容如表 2 所示。

表 2 OPNET 建模内容与描述

Table 2 Content and description of OPNET modeling

建模内容	描述
实体设备	系统信息产生、传递、处理与应用的实体
通信协议	信息报文传输格式、交互方式、运行机制
优化调度策略	信息调度过程与方法

2.2 实体设备建模

一体化智能终端装置 DIT (Distribution network Integrative intelligent Terminal)完成电流/电压模拟 量采集、开关量采集、保护、测量控制、执行等功能, 是配电网广域保护控制系统特有的设备,需要通过 自定义建模工具完成 OPNET 模型建模。DIT 模型 应具有以下通信功能:

a.可以根据采样值信息以及状态量信息生成采 样值(SV)报文和 GOOSE 报文;

b. 可以发送和接收 SV 报文并测量报文的传输 延时大小;

c. 生成并发送保护动作变位 GOOSE 报文;

d. 接收并解析主站下达的保护控制指令 GOOSE 报文。

根据以上分析,DIT 可以采用应用层、数据链路 层和物理层 3 层节点模型。应用层装载 IEC61850 协议,负责收集 SV 信息以及状态量信息数据,生成 SV 报文数据包以及 GOOSE 报文数据包。数据链路 层装载 OPNET 自带资源预留协议(RSVP)协议,负 责对数据帧进行组合以及无差错传输控制和管理。 物理层承担通信接口功能,包括发送机和接收机,负 责最终数据的发送与接收,并且能支持 10 M、100 M 和 1000 M 等带宽的光纤接入。通过包流线反映设 备模型中个各功能模块间的信息处理关系,如图 2 所示。



图 2 DIT 设备 OPNET 模型 Fig.2 OPNET model of DIT equipment

主站广域保护控制装置WPCD(Wide-area Protection and Control Device)实现变电站母线、线路保 护功能以及电网拓扑管理、远方备自投等控制功能, 可同样采用3层节点模型,如图3所示。

WPCD 的主要通信功能为:能够接收 DIT 发送

的模拟量及状态量信息以及动作变位信息,并能通过 GOOSE 报文的形式下达保护控制指令给相应 DIT;WPCD 模型应能够支持多种带宽光纤接入。



图 3 WPCD 设备 OPNET 模型 Fig.3 OPNET model of WPCD equipment

交换机属于通用对象,可以采用 OPNET 模型库 中的交换机模型。配电网广域保护控制通信网络交 换机可选择存储转发型 2 层交换机。对交换机的参 数设定可以从交换机端口数量、交换机转发速率、以 太网参数、虚拟局域网(VLAN)参数、端口参数设置 等方面进行。

光纤链路同样属于 OPNET 通用对象,可选用全 双工点对点通信链路。配电网广域保护控制系统通 信流量大,延时要求高,宜选用高数量级的带宽,如 100 M、1 000 M 甚至更高的带宽通信链路进行仿真 分析。

2.3 报文协议建模

÷

OPNET 应用层协议需要根据配电网广域保护 控制通信的信息交互机制进行自定义建模,广域信 息传输遵循 IEC61850 通信规约,其中,保护 SV 以 SV 报文形式传输,保护动作、断路器状态量等信息 以 GOOSE 报文的形式传输。由于广域通信带宽有 限,不宜分别上传开关站各出线间隔的广域信息,可 以先将开关站内多个间隔 SV 广域信息集中封装进 行组合后再上传。

利用 OPNET 搭建采样值 SV 报文模型,在包格 式编辑器中分别创建 ASDU、APDU 及 IEC61850-9-2 这 3 种包格式,其中包括每个字段的名称、数据类 型等,如图 4 所示。

在进程域对每个字段进行赋值,形成 IEC61850-9-2 报文,并通过平台自带函数 op_pk_nfd_set()进 行赋值:

op_pk_nfd_set(pkptr_ASDU1, "Smpcnt", sample_ sync);

op_pk_nfd_set(pkptr_ASDU1, "PhsMeas1", analog1);

其中,SV analog 的获取可以通过 OPNET 函数发生器(如各种类型的正弦函数),结合仿真时间生成对应时刻的 SV 大小,也可以通过外部文件导入。



图 4 SV 报文的 OPNET 包格式

Fig.4 OPEN packet format for SV

GOOSE 映射到数据链路层后,采用 ISO/IEC 8802-3 版本的以太网数据帧格式,和 SV 报文所映 射的通信协议以及报文结构方法类似。建立1个信 息数据集,将数据集赋值到数据包中完成建模。

2.4 优化调度策略建模

采用网络优化调度策略指通过采取网络控制措施,使信息流具有更为合理的时间分布和空间分布, 为配电网广域保护控制提供更好的通信服务质量。 目前,能够实现的网络优化调度策略主要有优先级 设置、VLAN 技术、静态组播等。

OPNET 提供了相应的网络优化调度策略实现 方法,如:优先级设置可以通过在报文相应字段中赋 予优先级编号,并在交换机设置界面中分配不同优 先级的报文队列权重实现;VLAN 技术则可通过在 数据包中加入含有 VLAN Tag 标记的数据帧,并设 置交换机端口的 VLAN ID(VID)以及端口支持的 support ID,达到限制报文广播范围的目的。

3 基于 OPNET 网络性能的配电网广域保护 控制通信网络仿真方法

3.1 通信网络的运行方式分析

与一次系统相类似,配电网广域保护控制系统 由于接入信息、设备的内容与状态变化,存在多种运 行状态。根据 IEC61850 规约,SV 报文在各种网络 状态下,具有相同的发送报文规律;GOOSE 报文则 遵循心跳报文机制,在数据集发生变化时,报文重复 发送,最小的报文发送间隔常采用 2 ms 为基准。因 此,根据网络流量水平的不同,可将通信网络的运行 方式分为小方式、典型方式和大方式,如表 3 所示。

为验证最极端情况下的网络性能,一般情况下,

可以对大方式下的二次系统运行方式进行考察。

Table 3 Operating mode of secondary system

运行方式	系统状态	流量水平	GOOSE 报文发送 频率设置
小方式	没有任何故障告 警事件发生	最小	以 1 s 间隔发送 GOOSE 报文
典型方式	出现1种或多种 故障告警	一般	故障节点以 2 ms 间隔 发送 GOOSE 报文
大方式	所有信息流均处 于突发状态	最大	所有节点以2ms间隔发送 GOOSE报文

3.2 面向组网策略的仿真场景设置

仿真场景的设置可以结合不同组网策略进行, 组网策略由具体的组网方式结合而成。配电网广域 保护控制通信网络的组网方式包括通信设备选型、 通信网络结构以及相应的优化调度策略等。

a. 通信设备是网络结构与功能的承载,针对光 纤以太网的设备选型包括光纤带宽以及交换机选型 等,目前光纤以太网能够支持的光纤带宽为100 M、 1000 M 甚至是10 G 等。

b. 通信网络结构表示网络的拓扑以及连接关系,基本的网络拓扑包括星形接线以及环形接线。 通信网络结构的选取可以结合网络拓扑进行。

在星形组网方式下,设立主节点汇聚交换机与 分节点接入交换机,主节点汇聚交换机通常配置于 变电站主站,分节点接入交换机配置于开关站,交换 机之间通过光纤相连,任一节点与其他节点通信均 需要通过主节点;环网组网方式下,所有交换机首尾 相连,任一节点发出的信息经各级交换机以及环网 光纤链路传送给目的节点。

c. 通信网络的优化调度策略描述系统信息调度 过程与方法,是否采取优化调度策略、不同优化调度 策略对网络性能的影响程度,都是网络优化调度策 略的重要研究内容。

不同的通信设备选型、通信网络拓扑结构和通 信网络调度策略相互结合,可以形成多种组网策略, 仿真场景的设置应结合不同的组网策略进行。

3.3 分层化的通信网络仿真方法

配电网广域保护控制系统点多面广,对通信网络组网策略的仿真分析也可分不同层级进行,将通 信网络分为馈线通信网络、站级通信网络和网级通 信网络3个层次,如图5所示。

a. 以变电站母线为界,将同一馈线所连接的、需要进行广域信息交互的开关站节点划归为同一个馈 线通信网络。馈线通信网络作为通信组网的最小单 元,构成最基本的广域保护控制通信网络,支持馈线 开关站之间以及开关站与变电站之间的通信。馈线 通信网络范围较小,组网策略选取较为灵活。

b. 站级通信网络包括了变电站母线连接的所



图 5 分层化网络结构

Fig.5 Hierarchical network structure

有馈线组成的馈线通信网络,并通过变电站内部组 网进行连接。站级通信网络支持变电站内部通信, 站级通信网络组网可以遵循变电站内部网络建模机 制,结合变电站内部通信网络进行。

c. 网级通信网络表示整个配电网级别的通信 网,包含不同变电站之间的网络互联。变电站之 间需要进行数据交互,实现变电站之间联络线路的 广域保护控制、远方备自投以及负荷过载联切等 功能。

不同组网策略适用于不同的网络规模,也即不 同网络规模下组网策略将呈现出不同的网络烛模, 因此对组网策略的研究需建立在不同的网络规模 下。馈线通信网络覆盖馈线所有开关站,开关站数 目增加,馈线通信网的规模相应扩展;站级通信网络 反映了整个变电站级别的组网规模,馈线数目增加, 将使得站级通信网络规模扩展;网级通信网络的规 模扩展可以从网级通信网络所承载的功能角度分 析,可以体现为不同变电站联络线路投运情况,联络 线路投运带来保护控制功能互联,使得变电站之间 通信量增大。

4 配电网广域保护控制通信组网策略仿真 分析

4.1 仿真案例

选取某地区环形接线配电网进行广域保护控制 通信组网研究,其结构如图 6 所示。该环形接线配 电网由 2 个变电站分别引出多回馈线环网,馈线连 接多个馈线开关站,馈线环网之间设有多回联络线 路(联络断路器正常断开)。正常情况下每个环网 单独闭环运行;在配电网发生故障时,可经联络线实现不同环网馈线之间的负荷转供,保证系统可靠供电。



图 6 仿真案例 Fig.6 Simulation case

对该地区配电网馈线配置广域保护控制,为解决环形馈线带来的潮流方向不确定问题,馈线主保护采用差动保护,差动保护执行主体为配置于各开关站内的 DIT 设备,并通过光纤以太网进行 SV 信息交互。馈线后备保护执行主体为配置于变电站的 WPCD 主站设备,各开关站的 DIT 设备将 SV 信息、保护动作信息、开关状态等同样经由光纤以太网上送至 WPCD。另外,在不同变电站环网馈线间联络线投运时,联络线同样配置差动保护,联络线两侧 SV 信息交互也采用光纤以太网进行。

以一个馈线环网为例说明通信配置情况:每个 开关站以及环网馈线出线断路器均配置 DIT,开关 站 DIT 通过交换机接入通信网络,并最终与各环网 馈线的汇聚交换机连接;每个变电站主站配置 WPCD,通过中心交换机与各馈线环汇聚交换机相 连。分别设置不同场景对光纤选型以及网络连接方 式进行仿真比较,如图7所示。

4.2 仿真实验

4.2.1 馈线通信网络仿真

针对馈线开关站组成的馈线通信网络,依托本 文所构建的 OPNET 仿真模型搭建不同仿真场景,对 应不同的组网策略选取光纤选型、基本组网结构以 及 VLAN 优化策略作为切入点,生成以下组网方案。

a. 方案 A:100 M 光纤+星形网络+采用 VLAN 优化。



图 7 仿真案例通信配置

Fig.7 Communication configuration of simulation case

b. 方案 B:100 M 光纤+环形网络+采用 VLAN 优化。

c. 方案 C:100 M 光纤+星形网络。

d. 方案 D:100 M 光纤+环形网络。

e. 方案 E:1 000 M 光纤+星形网络+采用 VLAN 优化。

f. 方案 F:1 000 M 光纤+环形网络+采用 VLAN 优化。

g. 方案 G:1 000 M 光纤+星形网络。

h. 方案 H:1 000 M 光纤+环形网络。

分别对应 5—7 个馈线开关站组网规模,进行仿 真,方案 A、B 的仿真场景分别如图 8、9 所示。

采用大方式的二次系统运行方式,验证极端运 行情况下的网络性能。

最大报文网络延时为报文离开源 DIT 节点至目 DIT 节点所经历的网络传输延时,计及所有主保护接 收的 SV 报文,最大 SV 报文网络延时如表 4 所示。







图 9 方案 B 仿真场景

Fig.9 Simulation scenario of Scheme B

表 4 馈线通信网络延时统计 Table 4 Delay of feeder communication network

方案 -	最大 SV 报文网络延时/ms			
	5个开关站	6个开关站	7 个开关站	
А	0.139	0.145	0.156	
В	0.406	0.444	0.606	
С	0.175	0.197	0.224	
D	0.406	0.444	0.606	
Е	0.081	0.097	0.100	
F	0.107	0.126	0.140	
G	0.081	0.097	0.100	
Н	0.107	0.126	0.140	

由表4可以看出:在3种网络规模下,8种方案 均能满足网络实时性能要求;星形网络(方案A、C、 E、G)的实时性能较环形网络(方案B、D、F、H)更为 优越;采用1000 M带宽光纤网络(方案E、F、G、H) 时的网络实时性能较100 M带宽光纤网络(方案A、 B、C、D)更佳。

相较于网络延时性能约束,带宽约束作用更为 明显,仿真所得网络流量分布如表5所示。

表 5 馈线通信网络流量大小统计

Table 5 Flow of feeder communication network

方案	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	馈线通信网络流量/M			
	父换机	5个开关站	6个开关站	7 个开关站	
ALE	接入交换机	1 702.4	1 702.4	1 702.4	
	中心交换机	94.600	108.992	123.384	
B、F	接入交换机	44.928	53.440	61.952	
	中心交换机	94.600	108.992	123.384	
C \G	接入交换机	44.928	53.440	61.952	
	中心交换机	94.600	108.992	123.384	
D H	接入交换机	44.928	53.440	61.952	
	中心交换机	94.600	108.992	123.384	

另外,由表 4、5 还可看出,采用星形网络与 VLAN 优化相结合的方式能够促进网络信息流的优 化调度,环网与 VLAN 优化相结合对网络性能优化 不明显。

综合上述分析结果可知,采用 100 M+星形组网+ 采用 VLAN 优化组合的方案 A 可以得到较好的网络 性能,并节约资源与成本。考虑到 WPCD 通信流量 大的特点,对方案 A 进行改进, WPCD 与中心交换机 相连的光纤采用 1 000 M 带宽。该组网方案能够支 持 7 个以上开关站的组网规模,最大传输报文延时 不超过 0.2 ms,带宽占用率不超过 20%,且网络性能 不随组网规模的扩大而发生明显变化。 4.2.2 站级通信网络仿真

在馈线通信网络仿真的基础上,搭建站级通信 网络,逐渐扩展站级通信网络规模,即增加馈线数 目,同样采用大方式的二次系统运行方式,对比仿真 结果,对改进的方案 A(WPCD 与中心交换机相连的 光纤采用1000 M 带宽)的组网策略网络性能进行 仿真。馈线数目为3时的站级通信网络仿真场景如 图 10 所示,仿真结果如表6所示。



图 10 站级通信网络仿真场景

Fig.10 Simulation scenario of station communication network

表 6 站级通信网络仿真结果

Table 6 Simulative results of stative communication network

馈线 数量	DIT 接收 SV 延时/ ms	WPCD 接收 SV 延时/ms	接入交换 机端口流 量/M	中心交换 机端口流 量/M	是否丢包
1	0.156	0.088	17.024	123.384	否
2	0.156	0.141	17.024	243.888	否
3	0.156	0.232	17.024	365.832	否
4	0.156	0.291	17.024	493.920	否
5	0.156	0.369	17.024	622.008	否

由表 6 可见, DIT 接收 SV 报文构成开关站间差 动主保护,由于采用 VLAN 划分,信息广播范围限制 在各个馈线通信网络内部,其网络通信延时及接入 交换机流量与对 1 个馈线通信网络单独进行仿真的 结果时基本相同。WPCD 接收 SV 报文构成主站对 馈线的后备保护,从仿真结果可以看出,随着馈线数 目的增加,WPCD 接收报文延时增加,中心交换机端 口流量相应增加。

对比上述馈线规模下的网络性能,可以认为,采 用改进的方案 A 后,馈线网络内部通信的基本馈线规 模基本不受馈线接入数量限制,而对站级通信网络而 言,网络性能随着馈线规模的扩展变差,在5回馈线

规模下,中心交换机到 WPCD 的带宽(1000 M 光纤) 占用率超过60%,超过4回馈线规模部分可考虑另行 组网或选用更高规格的光纤(1000 M 带宽光纤)。 4.2.3 网级通信网络仿真

随着2个变电站馈线环之间的联络线投运数量 的增加,为实现联络线路的差动保护功能,变电站通 信流量将不断增加,这部分通信流量将由变电站之 间的互联光纤通道承载,在前文仿真结果的基础上, 搭建网级通信网络,选用100 M 互联光纤进行组网, 逐渐增加互联馈线数目,采用大方式的二次系统运 行方式。对不同数量的馈线环间联络线投运下的通 信网络性能进行仿真,互联馈线数目为2时的网级 通信网络仿真场景如图 11 所示,仿真结果如表 7 所示。



图 11 网级通信网络仿真场景

Fig.11 Simulation scenario of grid communication network

表 7 网级通信网络仿真结果 c • 1

Table 7 Sim	ulative results of	grid communication	on network
联络线投运 数量	最大报文 延时/ms	联光纤占用 率/%	是否丢包
3	0.318	34.752	否
4	0.348	46.336	否
5	0.438	57.920	否
6	0.875	69.504	否

由表7可见,在6回馈线环联络线路投运情况 下,本文通信组网方案能有效支持馈线以及联络线 保护控制功能,超过6回联络线路时则无法满足性 能要求,表现为带宽占用率越限。因此,在联络线路 投运数目超出本文通信方案所能支持的规模限制 时,可将两变电站之间的互联光纤带宽由 100 M 扩 展为1000 M,组成通信网络。

4.3 组网策略评价

在不同的组网规模下,不同的组网策略呈现不 同的网络性能,可以得出以下结论。

a. 从馈线通信网络层面,100 M 带宽光纤配合 星形网络拓扑以及网络优化策略能基本满足保护控 制功能需求;星形网络的应用规模大于环形网络,此 外由于星形网络本身容易扩展,因此,更适用于大规 模组网,在进行小规模组网时,可采用环形网络以保

障网络可靠性;在没有 VLAN 优化策略的情况下,网 络性能受网络规模影响明显,采用 VLAN 优化能够 充分扩展网络规模,改善网络性能;另外,由于主站 通信流量大,主站通信光纤应选用1000 M带宽以满 足通信需求。

b. 从站级通信网络层面,采用 VLAN 优化策略 能够满足多回馈线共同组网要求,且不会对馈线内 部网络通信性能造成影响:主站设备通信性能受馈 线规模影响,需在规定馈线规模内进行组网。

c. 从网级通信网络层面,带宽为100 M 的变电 站互联光纤同样存在应用边界,需在规定规模内进 行组网。

5 结论

本文基于 OPNET 仿真平台搭建的配电网广域 保护控制通信网络模型能够真实模拟广域保护控制 设备原型及其通信模式,包括相关通信协议与优化 调度策略等,并能通过仿真分析获取定量化的网络 性能分析结果,为配电网广域保护控制通信网络提 供定量化的网络性能分析工具与研究方法。

不同的通信组网策略在不同的网络规模下体现 出不同的网络性能,针对配电网广域保护控制系统, 本文综合多种通信网络组网策略进行仿真研究,给 出不同层级通信网络的组网策略,并确定其适用的 组网规模,为配电网广域保护控制通信组网策略研 究提供有效的参考依据。

参考文献:

- [1] AMIN S M, WOLLENBERG B F. Towards smart grid [J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2005, 3(5): 34-41.
- [2] GIRGIS A, BRAHMA S. Effect of distributed generation on protective device coordination in distribution system [C] // Proceedings of 2001 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering. Halifax, Canada: IEEE, 2002:115-119.
- [3] 余贻鑫,栾文鹏.智能电网述评[J]. 中国电机工程学报,2009, 29(34):1-8.

YU Yixin, LUAN Wenpeng. Smart grid and its implementations [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34):1-8.

- [4] IEEE Power System Relay Committee. Impact of distributed resources on distribution relay protection [R]. [S.l.]: IEEE PSRC, 2004.
- [5] 李勋,龚庆武,胡元潮,等. 智能配电网体系探讨[J]. 电力自动 化设备,2011,31(8):108-111. LI Xun, GONG Qingwu, HU Yuanchao, et al. Discussion of smart distribution grid system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011,31(8):108-111.
- [6] GIRI K, SUN D, AVILA-ROSALES R. Wanted: a more intelligent grids [J]. IEEE Power & Energy, 2009, 7(2): 34-40.
- [7] 李斌,薄志谦. 智能配电网保护控制的设计与研究[J]. 中国电 机工程学报,2009,29(增刊):1-6. LI Bin, BO Zhigian. Design and research on protection and control of smart distribution grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29

(Supplement):1-6.

[8] CIGRE. System protection schemes in power networks[R]. [S.I.]: CIGRE,2001.

190

- [9] 周念成,贾延海,赵渊. 一种新的配电网快速保护方案[J]. 电网技术,2005,29(23):68-73.
 ZHOU Niancheng, JIA Yanhai, ZHAO Yuan. A new high-speed protection scheme for distribution network[J]. Power System Technology,2005,29(23):68-73.
- [10] 徐丙垠,薛永端,李天友,等. 智能配电网广域测控系统及其保 护控制应用技术[J]. 电力系统自动化,2012,36(18);2-9.
 XU Bingyin,XUE Yongduan,LI Tianyou, et al. A wide area measurement and control system for smart distribution grids and its protection and control applications [J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(18);2-9.
- [11] OZANSOY C, ZAYEGH A, KALAM A. The real-time publisher/ subscriber communication model for distributed substation systems [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2007, 22(3):1411-1423.
- [12] 黄明辉,邵向潮,张弛,等. 基于 OPNET 的智能变电站继电保护 建模与仿真[J]. 电力自动化设备,2013,33(5):144-149.
 HUANG Minghui,SHAO Xiangchao,ZHANG Chi, et al. Modeling and simulation of relay protection for intelligent substation based on OPNET[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(5): 144-149.
- [13] 毕研秋,赵建国. 基于 OPNET 的电力系统广域信息网络研究
 [J]. 电力自动化设备,2008,28(6):103-107.
 BI Yanqiu,ZHAO Jianguo. Wide-area information network of power system based on OPNET[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(6):103-107.
- [14] 童晓阳,廖晨淞. 基于 OPNET 的电力广域通信仿真联盟的实现 [J]. 电力自动化设备,2010,30(8):134-138.

TONG Xiaoyang, LIAO Chensong. Co-simulation of OPNET-based wide-area communication in power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(8) :134-138.

- [15] 陈敏. OPNET 网络仿真[M]. 北京:清华大学出版社, 2004: 15-31.
- [16] 刘育权,华煌圣,李力,等. 多层次的广域保护控制体系架构研究与实践[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(5);112-122.
 LIU Yuquan,HUA Huangsheng,LI Li, et al. Research and application of multi-level wide-area protection system [J]. Power System Protection and Control,2015,43(5);112-122.

作者简介:



煜

薒

蔡 煜(1993—),男,广东潮州人,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:cyappennino54@163.
com);

蔡泽祥(1960—),男,江苏南京人,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@suct.edu.cn);

王 奕(1972—),男,广东广州人,高级工程师,硕士,从 事电力系统继电保护及自动装置方面的工作;

邹俊雄(1977—),男,广东广州人,博士研究生,主要研 究方向为电力系统保护、控制与自动化;

席 禹(1991—),男,江苏淮安人,硕士研究生,主要研 究方向为电力系统保护、控制与自动化。

Modeling and networking strategy of communication network of wide-area protection and control for distribution network

CAI Yu¹, CAI Zexiang¹, WANG Yi², ZOU Junxiong¹, XI Yu¹

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

2. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

Abstract: Wide-area protection and control based on communication network is an inevitable trend of the distribution network development, but its engineering applications are affected by the delay and reliability of communication network. However, due to the lack of quantitative analysis tools and research methods of wide-area protection and control communication network for distribution network, it is difficult to carry out related research in depth. With the consideration of network performance constraints and based on OPNET simulation platform, the equipments are mode-led, and the simulation model of wide-area protection and control system is built via loading message protocol and scheduling strategy setting. With the combination of type selection, network topology and optimal dispatching strategies, the simulation research of communication networking strategies is carried out in different simulation scenarios at different network levels, and quantitative simulative result can be collected. The network performance analysis and networking strategy based on OPNET can provide guidance for the planning, design and operation of the wide-area protection and control system of distribution network.

Key words: distribution network; wide-area protection and control; network performance; OPNET; networking strategy; communication