

智能变电站通信网络虚拟局域网建模与优化配置方法

邹俊雄¹, 黄成巧¹, 张延旭¹, 蔡泽祥¹, 何瑞文², 李晓华¹

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640; 2. 广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510006)

摘要: 目前虚拟局域网(VLAN)的配置主要由人工完成, 工作量大, 且缺乏统一的标准和评价指标, 容易出现人为错误, 给保护控制系统的可靠性带来隐患。分析了 VLAN 优化配置的约束条件, 并基于智能变电站通信网络拓扑结构和设备间报文订阅关系等建立了 VLAN 配置的通信网络模型。结合 VLAN 模型, 提出了报文最短路径的计算算法, 进而实现了 VLAN 的自动配置与优化。以某实际智能变电站的 VLAN 优化配置为例, 将所提优化方法与现有优化方法进行对比分析, 结果证明了所提方案的有效性和实用性。

关键词: 智能变电站; 虚拟局域网; 报文订阅关系; 拓扑结构; 优化配置; 通信; 模型

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.08.021

0 引言

为提高智能变电站通信网络的信息共享水平, 同时保证信息的传输效率, 采样值 SV(Sample Value)、面向通用对象的变电站事件 GOOSE(Generic Object Oriented Substation Event)和精确时间协议 PTP(Precise Time Protocol)等报文均采用广播的传输模式。但是这种广播模式会使得部分智能电子设备 IED(Intelligent Electronic Device)收到没有订阅的无效报文, 这一方面会造成不必要的网络流量, 降低通信网络的性能, 另一方面存在相关 IED 错误解析报文信息而导致不正确动作的隐患。

为限制报文的广播域, 缓解网络的流量压力, 提高设备及系统可靠性, 虚拟局域网 VLAN(Virtual Local Area Network)技术常被应用到智能变电站通信网络中。VLAN 能够将通信网络从逻辑上划分成若干独立的局域网, 报文仅限定在特定 VLAN 内部传输^[1-4]。

近年来, 有很多研究工作针对 VLAN 技术在智能变电站通信网络中的应用展开。文献[5]提出按站内电压等级来划分 VLAN, 不同电压等级再按照不同的原则把设备归类, 进而形成 VLAN。该方式划分过程繁琐, 涉及原则较多, 工作量大, 为避免错误, 需运行经验丰富的人员来执行, 导致其推广受到很大的限制。文献[6]按照报文的类型划分 VLAN, 其电流互感器和其所所在母线上的所有需要电压的装置划分为 1 个 VLAN 且全站唯一, GOOSE 报文、对时报文各自分配 1 个 VLAN。该方式相比于报文广播形式, 虽在一定程度上限制了网络流量, 但因每种不同报文都

只有 1 个 VLAN, 故站内网络总流量仍然很大。文献[7]基于站内间隔类型, 把同一个间隔内的设备归于同一个 VLAN, 站内信息共享水平不高, 且不易于网络扩展。

综上, 智能变电站通信网络的 VLAN 配置方法尚缺乏统一的原则与标准, 没有形成系统的划分机制, 其配置主要依赖于运行人员的工作经验, 效率和准确率欠佳。另外, 对 VLAN 配置的对比分析不够深入, 没有针对 VLAN 划分合理性的评价指标与方法。

基于此, 本文基于智能变电站通信网络拓扑结构和设备间报文订阅关系, 提出了 VLAN 配置模型, 分析了影响 VLAN 划分的约束条件。结合该模型提出了一种报文最短传输路径的算法^[8-10], 进而实现站内 VLAN 的优化配置与自动划分。最后以一实际智能变电站的 VLAN 配置为例, 给出其 VLAN 优化配置的具体步骤, 并将其与现有方案进行对比, 验证了本文所提出方法的有效性和实用性。

1 VLAN 配置的通信网络模型

决定 VLAN 配置的约束条件主要包括报文的订阅关系、网络的拓扑结构以及交换机端口的关联关系这 3 个部分。为实现自动配置 VLAN, 本节对 VLAN 配置的通信网络进行建模。

1.1 报文订阅关系

变电站配置描述 SCD(Substation Configuration Description)文件完整描述了智能变电站内各 IED 间的逻辑关系^[11]。通过软件方式可自动解析 SCD 文件获取设备的发布报文信息和订阅报文信息, 并综合这两方面的信息来自动获取报文的订阅关系, 具体方法可参考文献[12]。

设某智能变电站通信网络的设备(包括交换机和 IED 在内)共有 p 个端口。在智能变电站通信网络中, 端口是报文发送、转发和接收的最小单元。本

收稿日期: 2014-07-31; 修回日期: 2015-06-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51377026); 广东省自然科学基金资助项目(S2013010012885)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51377026) and the Guangdong Natural Science Foundation(S2013010012885)

文以端口为单位,通过定义矩阵 $B_{p \times p}$ 来描述报文之间的订阅关系。

$$B_{p \times p} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1p} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{p1} & b_{p2} & \cdots & b_{pp} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$b_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{端口 } i \text{ 订阅了端口 } j \text{ 发布的报文} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

报文订阅关系矩阵 $B_{p \times p}$ 描述了通过发布和订阅各报文而建立的设备及其端口之间的关系。VLAN 配置过程中,应首先保证订阅关系的充分性得到满足,即所有 IED 必须能够收到所订阅的报文。其次,可通过 VLAN 的优化配置,尽量满足订阅关系的必要性,即所有 IED 应尽量少地收到没有订阅的无效报文。

为评价 VLAN 配置满足订阅关系充分必要性的程度,可定义以下评价指标:

$$E_1 = \prod_{i=1}^n E_{1i} = \prod_{i=1}^n \frac{N_{1i}}{N_{2i}} \quad (2)$$

$$E_2 = \sum_{i=1}^n E_{2i} = \sum_{i=1}^n \frac{N_{3i}}{N_{2i} + N_{3i}} \quad (3)$$

其中, N_{1i} 为第 i 个 IED 收到的订阅报文数量; N_{2i} 为第 i 个 IED 订阅的报文总数; N_{3i} 为第 i 个 IED 收到没有订阅的报文总数; n 为 IED 的总数; E_{1i} 和 E_1 分别为某 IED 和全站对报文充分性的满足指标,一个正确的 VLAN 配置方案中, E_{1i} 和 E_1 均应为 1,若小于 1 则表示 VLAN 配置不正确; E_{2i} 和 E_2 分别为某 IED 和全站对报文必要性的满足指标,一个理想的 VLAN 配置方案中, E_{2i} 和 E_2 均应为 0, E_{2i} 和 E_2 越大,则表示存在越多的无效报文。

1.2 网络拓扑结构

网络拓扑结构主要包含 IED 与交换机以及交换机之间的连接关系信息。网络拓扑连接关系构成了报文传输的路径,以实现给定的报文订阅关系。

根据图论理论,可把智能变电站的通信网络抽象成一个无向图 G ,通信网络的 IED 及交换机端口映射为节点,光纤链路映射为分支。图 1 所示为某通信网络拓扑结构的无向图,该图包含有已编号的 18 个节点(对应于 12 个交换机端口和 6 个 IED 端口),虚线框表示网络中的交换机,节点之间的连接实线为光纤链路。定义节点邻接矩阵 $C_{p \times p}$ 表示图 G 的拓扑信息。

$$C_{p \times p} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1p} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{p1} & c_{p2} & \cdots & c_{pp} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$c_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{端口 } j \text{ 与端口 } i \text{ 通过光纤相连} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

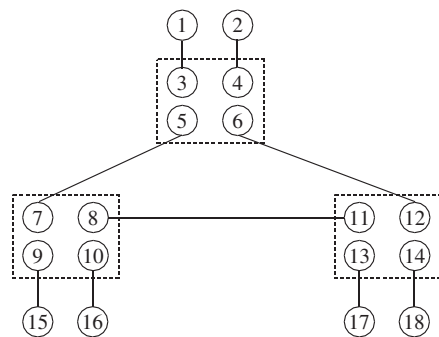


图 1 通信网络拓扑无向图 G

Fig.1 Undirected graph G of communication network topology

矩阵 $C_{p \times p}$ 的每一行、每一列都有且只有 1 个非零元素。

1.3 交换机端口的关联关系

VLAN 的表现形式即是用交换机的端口集合来表示的,本文定义矩阵 $W_{p \times p}$ 来表示交换机端口的关联关系。

$$W_{p \times p} = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1p} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_{p1} & w_{p2} & \cdots & w_{pp} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$w_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{端口 } j \text{ 和 } i \text{ 属于同一台交换机} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

2 基于最短路径的 VLAN 优化配置

2.1 报文最短路径搜索算法

智能变电站通信网络中,报文传输延时的不确定性主要是由报文在交换机中的排队延时决定的,为避免报文传输延时过长,智能变电站中交换机的级联层次一般不超过 4 层。当满足报文订阅关系的端口连接而成的路径存在多条时,本文定义报文最短的路径即为所有路径中包含交换机端口数目最少的路径,也即交换机级联层次最少的路径。最短路径搜索共分为 3 个过程:初始化订阅关系矩阵 $B_{p \times p}$ 、从报文订阅端口寻找发送端口的回推过程和记录回推过程所选最短路径中各端口序号的前代过程。算法实现的流程如图 2 所示。

2.1.1 初始化矩阵 $B_{p \times p}$

在订阅关系矩阵 $B_{p \times p}$ 中,若 2 条报文之间存在订阅关系,则其对应的元素为 1,否则为 0。针对每一条订阅关系进行最短路径的逐一搜索,即每次搜索均在矩阵 $B_{p \times p}$ 中选取一个不为 0 的元素,并形成初始矩阵 $B_{p \times p}^0$ 。对于图 1,若选取的订阅关系为端口 15 订阅端口 1 的报文进行最短路径搜索,则形成的初始矩阵 $B_{p \times p}^0$ 中除元素 $b_{15,1}$ 为 1 以外,其他均为 0。

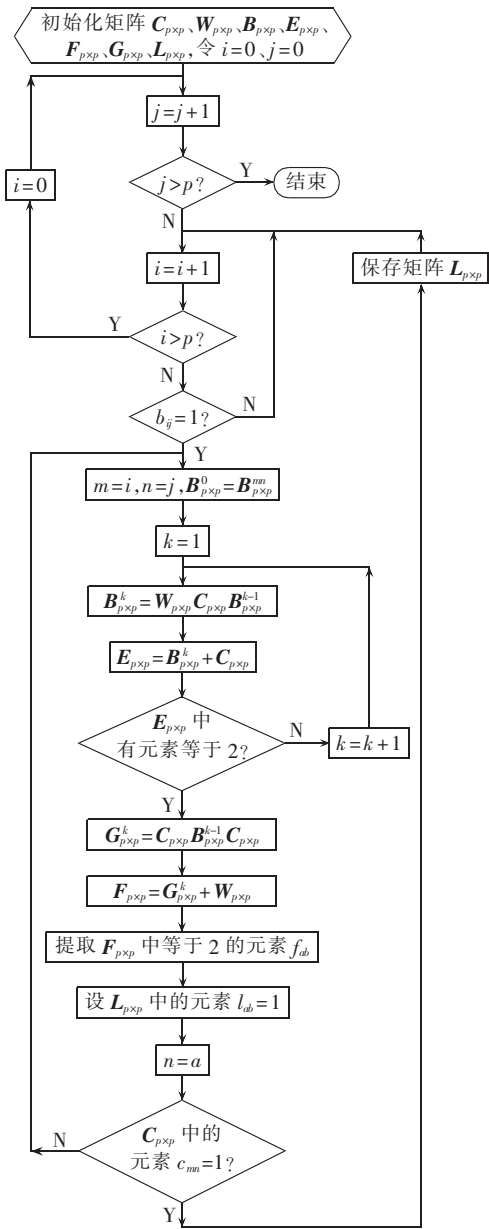


图 2 最短路径算法流程图
Fig.2 Flowchart of shortest path algorithm

2.1.2 回推过程

回推过程即从报文的订阅端口出发寻找报文的发送端口,其作用是过滤较长路径,筛选最短路径。首先利用迭代的方式,从订阅端口 15 出发按可能的路径向发布端口 1 方向回推,进而找出最短路径。回推的迭代公式如下:

$$B_{p \times p}^k = W_{p \times p} C_{p \times p} B_{p \times p}^{k-1} \tag{6}$$

$$E_{p \times p} = B_{p \times p}^k + C_{p \times p} \tag{7}$$

其中, k 代表本次计算为第 k 次迭代; $E_{p \times p}$ 为判断矩阵。每次迭代计算结束后均需判断 $E_{p \times p}$ 中是否有元素为 2,有则说明已从订阅端口回推到发布端口,否则进行下一次迭代。

如图 1 所示,对于端口 15 与 1 的订阅关系存在

2 条路径:1-3-5-7-9-15 和 1-3-6-12-11-8-9-13,显然前者为最短路径。由于上述判据一旦成立,即结束迭代时,按照第 1 条路径的回推仅需要 2 次迭代即可完成,而第 2 条路径需要 3 次。因此,第 2 条路径会在 2 次迭代后被过滤,只留下最短路径。

2.1.3 前代过程

前代过程是利用回推过程结束前的一次迭代结果作为初始信息继续向前查找订阅端口,可实现对回推过程所筛选出的最短路径中各端口序号的记录,如回推过程在第 k 次迭代后结束,则前代过程的初始信息为第 $k-1$ 次迭代的结果 $B_{p \times p}^{k-1}$ 。前代过程的公式如下:

$$G_{p \times p}^k = C_{p \times p} B_{p \times p}^{k-1} C_{p \times p} \tag{8}$$

$$F_{p \times p} = G_{p \times p}^k + W_{p \times p} \tag{9}$$

其中, $G_{p \times p}$ 与 $F_{p \times p}$ 用于储存中间结果。为将路径中的端口序号记录下来,定义一新的矩阵 $L_{p \times p}$ 。筛选出 $F_{p \times p}$ 中为 2 的元素 f_{ab} 后,将 $L_{p \times p}$ 中对应的元素 l_{ab} 置 1,说明在最短路径中端口 a 和 b 是相连的,体现为图 1 中的端口 3 和 5。

进行一次回推和前代过程能够找出并记录最短路径中在一台交换机中的 2 个端口,为记录下路径中的所有端口,需重复进行回推和前代过程,即以图 1 中的端口 5 作为发布端口,以端口 15 为订阅端口,重复回推和迭代,直到最短路径中的全部端口均已完成记录。

2.2 基于最短路径的 VLAN 自动配置

本文 VLAN 配置主要涉及 VID 及 support ID。交换机端口的 VID 即该端口的 VLAN ID,本文默认交换机的端口号为其端口的 VID,某一端口的 support ID 就是该端口允许通过的该交换机其他端口的 VID 号。VLAN 的配置即实现为每一个端口配置 support ID。

在最短路径 $L_{p \times p}$ 下配置 VLAN 可分 2 个步骤进行。

a. 划分 support ID。若通信网络中共有 j 台交换机,每台交换机有 d 个端口,则在矩阵 $L_{p \times p}$ 中,可形成 j 个 d 阶子矩阵,逐一判断每个子矩阵中每一元素是否为 0。若某元素不等于 0,则该元素所对应行的端口为报文传出端口,列所对应的端口为报文进入端口,把报文进入端口的 VID 记录在报文传出端口的 support ID 中。

b. 确定最终 VLAN。若根据某个报文订阅关系通过上述最短路径算法获得对应多个报文传输路径,则对各个路径均进行 VLAN 划分,然后对比各链路的流量分布情况,选择使网络流量分布相对均匀的路径对应的 VLAN 为最终方案。

针对图 1 形成的订阅关系矩阵 $B_{18 \times 18}$,对于等于 1 的元素 $b_{15,1}$ 、 $b_{17,2}$ 、 $b_{17,16}$ 、 $b_{15,18}$,利用最短路径算法求

出在各自订阅关系下的路径如表 1 所示。

表 1 报文订阅关系下的报文最短路径

Table 1 Shortest packet path for different packet subscription relationships

订阅关系	最短路径
$b_{15,1}$	1-3-5-7-9-15
$b_{17,2}$	2-4-6-12-13-17
$b_{17,16}$	16-10-8-11-13-17
$b_{15,18}$	18-14-11-8-9-15

根据最短路径 VLAN 的自动配置原理,形成最终的 VLAN 方案,如表 2 所示。

表 2 报文订阅关系下的 VLAN 方案

Table 2 VLAN scheme for existing packet subscription relationships

端口号	VID	support ID
5	5	3
6	6	4
8	8	10
9	9	7,8
11	11	14
13	13	11,12

上述各步骤均可通过编程利用计算机软件实现,相比目前各种人工配置 VLAN 方式,本文的 VLAN 自动配置方式不仅能减少配置过程的工作量和避免人工配置时的人为失误,而且能极大地减少冗余报文和降低网络流量。

3 算例分析

3.1 算例系统参数

为了验证本文所提出的 VLAN 优化配置方法的合理性与可行性,选择某智能变电站 110 kV 侧过程层网络的 VLAN 优化配置作为算例。该智能变电站过程层网络的拓扑结构图如图 3 所示,其包含 3 台交换机,每台交换机有 20 个端口;同时配置了 6 台 110 kV 线路保护测控装置、4 台主变保护测控装置、2 台主变非电量保护测控装置、1 台母线保护装置、11 台合并单元、6 台智能操作箱、1 台 110 kV 备自投等设备。本文在图 3 中已对所有设备及交换机的端口进行统一编号。

3.2 VLAN 配置结果对比与评价

通过解析该智能变电站 SCD 文件,可获得其详细报文信息及其订阅关系。基于本文方法分别对每一台交换机下的端口进行 VLAN 配置,结果如表 3 所示。为便于比较分析,表 4 所示为文献[13]的附录 A 中所描述的该智能变电站 110 kV 过程层网络实际运行时采用 VLAN 配置方案。

为求取不同 VLAN 配置方案下的报文分布,本文基于 OPNET 通信网络仿真软件,进行了基于 IEC61850

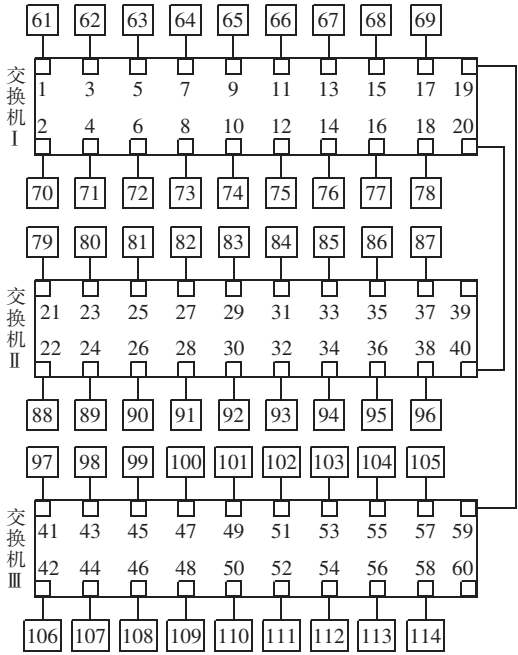


图 3 某智能变电站过程层网络拓扑图

Fig.3 Process-layer network topology of a smart substation

表 3 某智能变电站过程层网络 VLAN 划分结果

Table 3 Result of VLAN partitioning for process-layer network of a smart substation

VID	support ID	VID	support ID
2	1,5,6,19,20	3	1,5,6,19,20
6	2,3,19,20	8	7,11,12,20
9	7,11,12,20	12	8,9,20
14	13,16,17,18,20	15	13,16,17,18,20
27	32	31	32
45	59	51	59
55	59	59	45,51,55
26	22,23,27,31,40	38	27,31,34,35,40
34	29,33,37,38	35	29,33,37,38
18	14,15,19,20	19	1,5,6,14,15,20
20	2,3,8,9,14,15,19	22	21,25,26,27,29,31,40
23	21,25,26,27,29,31,40	29	22,23,32,34,35,40
32	27,28,29,31,34,35,40	40	26,27,29,31,32,34,35

表 4 某智能变电站过程层网络的 VLAN 配置方案

Table 4 Operating process-layer network VLAN scheme of a smart substation

端口	support ID	端口	support ID
2	1,5	3	1,5
8	7,11	9	7,11
14	13,17	15	13,17
34	4,10,36	35	4,10,36
22	21,25	23	21,25
29	4,10,24,28,30	27	1,5,7,11,28,37
31	4,10,13,17,21,24,25,30	55	1,4,5,10,21,24,25,30
19	1,5,7,11,13,17,21,24,25,28,30,33,37	20	1,5,7,11,13,17,21,24,25,28,30,33,37
40	1,5,7,11,13,17,21,24,25,28,30,33,37	59	1,5,7,11,13,17,21,24,25,28,30,33,37

的智能变电站通信网络建模,包括:各 IED、合并单

元 MU(Merging Unit)、交换机等实体设备,组网方式和通信协议等^[14-16]。

本文把 VLAN 配置方案下的报文订阅关系的充分性指标 E_1 、必要性指标 E_2 、网络的平均流量水平 $\bar{L}$ 和流量分布的均匀度 S (流量标准差)作为评价该 VLAN 配置方案是否合理的评价指标。通过对比分析本文方案和现有方案的上述指标来说明本文 VLAN 配置方案具有更优效果。

本文基于 OPNET 的部分端口流量仿真结果如表 5 所示。其中 SV 报文大小约为 254 Byte,发报间隔为 0.000 25 s;故障情况下,GOOSE 报文大小约为 254 Byte,发报间隔为 0.002 s;仿真总时间为 10 s。再由仿真结果分别计算网络平均流量水平 $\bar{L}$ 和流量分布均匀度 S (流量标准差);本文方案的 $\bar{L}$ =32.2 Mbit/s,现有方案的 $\bar{L}$ =42.1 Mbit/s;本文方案的 S =2.25,现有方案的 S =6.10。

表 5 2 种 VLAN 方案仿真结果的对比

Table 5 Comparison of simulative results between two VLAN schemes

端口编号	订阅关系的必要性指标		端口流量/(Mbit·s ⁻¹)	
	本文方案	现有方案	本文方案	现有方案
62	0.672	0.716	44.7	54.9
68	0.702	0.757	41.6	54.9
73	0.702	0.757	41.6	54.9
90	0.765	0.840	14.2	22.4
83	0.615	0.659	25.4	30.5
96	0.722	0.808	14.2	22.4
104	0.532	0.589	43.7	54.9

3.2.1 订阅关系的充分必要性

2 种 VLAN 配置方案都满足报文订阅关系的充分性,满足了站内设备收到其订阅的报文要求,即实现了式(2)中的 $E_1=1$ 。但本文方案各个设备 E_2 的值都比现运行方案的 E_2 小,这是因为在本文算法中,发送端口只把报文发送给那些存在报文传输路径的端口,尽可能避免一些端口收到没有订阅的报文,从而减小式(3)中的 N_3 ,由于设备所订阅的报文是确定的,即 N_2 大小不变,故可使 E_2 变小;而现运行的方案只对 SV 报文以间隔为原则进行 VLAN 配置,其 GOOSE 报文采用全网广播方式导致过多设备收到大量多余的报文。因此 2 种方案对比之下,通过本文优化配置后的 VLAN 方案效果更好。

3.2.2 网络流量水平及其分布均匀度

对于网络流量水平 $\bar{L}$,本文 VLAN 方案相对于现有 VLAN 方案降低了约 10 Mbit/s 的流量。并且流量在整个网络中分布更加均匀(S 更小),这是由于本文以 SV、GOOSE 报文的订阅关系为基础实现 VLAN 的优化配置,配置结果更加详细,报文传输更加精确,有效缩小了报文的广播域,控制了整个网络的流量,降低了流量水平。

综上 E_1 、 E_2 、 $\bar{L}$ 以及 S 的对比分析,本文优化配置后的 VLAN 方案比现有 VLAN 方案具有更优的效果。另一方面,本文方案可实现 VLAN 自动配置,相对于该智能变电站现有的 VLAN 人为配置方案,提高了配置工作的效率和准确率,具有实际的工程意义。

4 结论

本文根据设备间的报文订阅关系以及通信网络拓扑结构构建了 VLAN 配置的通信网络模型,并基于此提出了报文最短路径算法,以此来实现 VLAN 的优化配置。最后基于实际运行的某一智能变电站为算例,将本文的 VLAN 优化配置方案与现有的 VLAN 方案进行对比,对比结果说明本文 VLAN 划分结果更具准确性、可靠性和实用性,从而验证了本文所提出优化配置方法的合理性和可行性,对 VLAN 技术在智能变电站通信网络中的应用和推广具有重要的工程意义。

参考文献:

[1] FAN Chen,NI Yimin,ZHAO Anguo,et al. The research about the scheme of process layer network in smart substation of China[C]//The 3rd IEEE Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference(APPEEC). Wuhan,China:IEEE,2011:1-4.

[2] HUANG W T,YAO K C. New network sensitivity-based approach for real-time complex power flow calculation[J]. IET Generation, Transmission & Distribution,2012,6(2):109-120.

[3] 朱来强,陈新之,高志勇. 数字化变电站中广播风暴的防治[J]. 电力自动化设备,2010,30(11):98-101.

ZHU Laiqiang,CHEN Xinzh,GAO Zhiyong. Prevention of digital substation broadcast storm[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(11):98-101.

[4] SIDHU T S,YIN Yujie. Modelling and simulation for performance evaluation of IEC61850-based substation communication systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2007,22(3):1482-1489.

[5] 丁腾波,林亚男,赵萌. 智能变电站虚拟局域网逻辑结构划分方案的研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(1):115-119.

DING Tengbo,LIN Yanan,ZHAO Meng. Research of the virtual local area network in smart substation[J]. Power System Protection and Control,2012,40(1):115-119.

[6] 牛占平. VLAN 技术在智能化变电站网络中的应用探讨[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(23):75-78.

NIU Zhanping. Application of VLAN technology in the intelligent substation network[J]. Power System Protection and Control,2009,37(23):75-78.

[7] 张志丹,黄小庆,曹一家,等. 基于虚拟局域网的变电站综合数据流分析与通信网络仿真[J]. 电网技术,2011,35(5):204-209.

ZHANG Zhidan,HUANG Xiaoqing,CAO Yijia,et al. Comprehensive data flow analysis and communication network simulation for virtual local area network-based substation [J]. Power System Technology,2011,35(5):204-209.

[8] 王海柱,张延旭,蔡泽祥,等. 智能变电站过程层网络信息流潮流计算模型与计算方法[J]. 电网技术,2013,37(9):2602-2607.

- WANG Haizhu,ZHANG Yanxu,CAI Zexiang,et al. Information flow calculation model and method for process layer network in smart substation[J]. Power System Technology,2013,37(9):2602-2607.
- [9] INGRAM D M E,SCHAUB P,TAYLOR R R,et al. Network interactions and performance of a multifunction IEC61850 process bus[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2013,60(12):5933-5942.
- [10] 陶华,杨震,张民,等. 基于深度优先搜索算法的电力系统生成树的实现方法[J]. 电网技术,2010,34(2):120-124.
- TAO Hua,YANG Zhen,ZHANG Min,et al. A depth-first search algorithm based implementation approach of spanning tree in power system[J]. Power System Technology,2010,34(2):120-124.
- [11] 李忠明,曾元静,袁涤非. IEC61850 SCD 文件导入生成嵌入式远动系统装置定义的通用方法[J]. 电力自动化设备,2010,30(7):117-120.
- LI Zhongming,ZENG Yuanjing,YUAN Difei. General method to generate IED definition with IEC61850 SCD file for telecontrol system[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(7):117-120.
- [12] 黄明辉,曹建东,张弛,等. 一种交换机报文转发方法和装置:中国,CN102752224A[P]. 2012-10-24.
- [13] THOMAS M S,ALI I. Reliable,fast,and deterministic substation communication network architecture and its performance simulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2010,25(4):2364-2370.
- [14] 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.
- [15] 童晓阳,廖晨松. 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.
- [16] 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.

作者简介:



邹俊雄

邹俊雄(1977—),男,广东广州人,博士研究生,研究方向为电力系统保护、控制与自动化(E-mail:zgong@tom.com);

黄成巧(1991—),男,广东湛江人,硕士研究生,研究方向为电力系统保护、控制与自动化;

张延旭(1988—),男,吉林吉林人,博士研究生,研究方向为电力系统保护、控制与自动化;

蔡泽祥(1960—),男,江苏南京人,教授,博士研究生导师,通信作者,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:epzxc@scut.edu.cn);

何瑞文(1969—),女,安徽郎溪人,副教授,博士,研究方向为电力系统保护、控制与自动化;

李晓华(1975—),女,湖北黄石人,教授,博士,研究方向为电力系统继电保护、高压直流输电。

Modelling and optimization of VLAN for smart substation communication network

ZOU Junxiong¹,HUANG Chengqiao¹,ZHANG Yanxu¹,CAI Zexiang¹,HE Ruiwen²,LI Xiaohua¹

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

2. School of Automation,Guangdong University of Technology,Guangzhou 510006,China)

Abstract: Without unified standards and evaluation index,the manual configuration of VLAN(Virtual Local Area Network) may easily have mistakes,bringing potential hazards to the reliability of protection and control system. The constraints of VLAN configuration optimization are analyzed and its communication network model is established according to the topological structure of smart substation communication network and the packet subscription relationship among equipments,based on which,a method to calculate the shortest packet path is proposed for the automatic configuration and optimization of VLAN. With an actual substation as example,comparison between the proposed method and the existing method is carried out to show its effectiveness and practicability.

Key words: smart substation; VLAN; packet subscription relationship; topological structure; optimal configuration; communication; models