

doi:10.13756/j.gtxyj.2019.06.003

光通信系统与网络技术

基于分块矩阵的报文传输路径查找算法

于凡超¹, 彭大芹¹, 黄鸣宇², 刘海涛², 许国良¹, 林虹¹

(1. 重庆邮电大学 通信学院, 重庆 400065; 2. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院, 银川 750002)

摘要: 为提高智能变电站通信网络的运维水平, 文章提出了一种基于分块矩阵的报文传输路径查找算法。为了把智能变电站通信网络静态配置信息抽象为数学模型, 建立了物理网络拓扑矩阵模型和逻辑网络拓扑矩阵模型, 并构建了两者之间的映射关系, 给出了报文路径查找算法的流程。针对矩阵法分析网络拓扑计算量大的问题, 文章提出以分块矩阵技术为主, 稀疏矩阵与对称矩阵技术辅助优化的算法。采用遗传算法将网络矩阵模型分为对应的多个子矩阵, 采用稀疏矩阵和对称矩阵技术处理子矩阵。通过对实际智能变电站的网络分析, 与邻接算法相比, 此算法不仅可以查找报文的转发路径, 而且计算速度快, 占用内存空间少。

关键词: 智能变电站; 通信网络; 遗传算法; 稀疏矩阵; 对称矩阵

中图分类号: TM711 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8788(2019)06-0010-05

Search Algorithm of Packet Forwarding Path based on Block Matrix

YU Fan-chao¹, PENG Da-qin¹, HUANG Ming-yu², LIU Hai-tao², XU Guo-liang¹, LIN Hong¹

(1. Communication Institute, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

2. NingXia Electric Power Research Institute, Yinchuan 750002, China)

Abstract: In order to improve the operation and maintenance level of smart substation communication network, a packet forwarding path search algorithm based on block matrix is proposed, which solves the disadvantages of the matrix large computation and slow computation speed. The physical network topology matrix model and logical network topology matrix model are established. The mapping relationship is constructed to give the flow of message path finding algorithm. In order to solve the problem of large amount of computation in network topology analysis by matrix method, this paper presents an optimization algorithm based on block matrix technology and assisted by sparse matrix and symmetric matrix technology. The network matrix model is divided into several sub-matrices by genetic algorithm, and the sub-matrices are processed by sparse matrix and symmetric matrix technology. Through the network analysis of substation, this algorithm can not only find the forwarding path of the message, but also take up less memory space and faster calculation speed.

Key words: smart substation; communication network; genetic algorithm; sparse matrix; symmetric matrix

0 引言

以太网技术是应用最普遍的局域网技术, 在各领域的生产活动中扮演着重要的角色, 将网络信息模型抽象为数学模型变得越来越重要。矩阵拓扑分析法是以太网运维系统中重要的数学工具。智能变电站在 IEC 61850 通信协议的规约下, 采用光纤以太网技术实现了不同智能变电站设备厂商的互操作。由以往所有信息点对点传输模式变为功能整合的虚拟节点传输模式, 与物理回路不同的是, 虚回路是由功能定义的^[1-3]。

矩阵法分析网络拓扑虽然逻辑简单但是计算量大, 占用内存空间大。文献[4-7]利用邻接矩阵分析法对智能变电站二次系统网络进行分析, 但其并未对建模矩阵进行优化, 导致算法计算量较大。文献[8-9]利用对称消去法降低邻接矩阵的阶数, 但其只

分析了建模矩阵的性质, 没有结合智能变电站以太网的报文数据特性, 矩阵降阶的效果不明显。本文通过链路状态路由协议建立了物理网络拓扑模型, 解析智能变电站配置描述 (Substation Configuration Description, SCD) 文件建立了逻辑网络拓扑模型, 构建两者之间的映射关系, 提出了报文传输路径查找算法; 其次, 网络拓扑模型以矩阵为单位, 以网络报文数据量为依据, 采用遗传算法将网络拓扑模型分为多个对应的子矩阵, 报文路径查找算法在对应的低阶子矩阵内运算即可, 接着采用稀疏矩阵和对称矩阵技术处理子矩阵, 减少了计算量, 提高了计算速度, 为智能变电站的运维提供了新思路。

1 智能变电站网络拓扑模型

1.1 智能变电站物理网络拓扑模型

目前关于网络拓扑结构的研究方法主要有简单

收稿日期: 2019-04-16

基金项目: 重庆市产业类重点研发资助项目 (cstc2018jszx-cyzdX0124); 国网宁夏电力公司电力科学研究院科技资助项目 (SGTYHT/15-JS-191)

作者简介: 于凡超 (1994—), 男, 山西太原人。硕士, 主要研究方向为智能变电站通信网络。

通信作者: 许国良, 教授。E-mail: xugl@cqupt.edu.cn

网络管理协议、Internet 控制消息协议、路由选择消息协议和链路状态路由协议。链路状态路由协议会创建拓扑图,有收敛速度快和稳定性好等诸多优点,是网络拓扑研究的主流手段。智能变电站二次系统中各个设备的端口是报文传输的最小单元,承担报文的路由功能,因此,可以设备端口为单元建立物理网络拓扑模型。智能变电站通信网络物理拓扑模型包括物理端口连接和交换机内部报文交换模型。

图 1 所示为智能变电站通信网络的示意图。图中包含两台交换机、两台智能电子设备和一台主机。数字表示设备端口的序号,由物理端口模型记录。“三层、两网”式的结构,保障了变电站网络的有序运行。

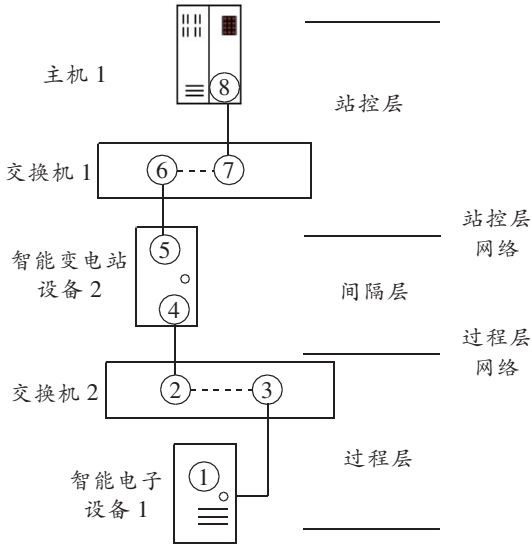


图 1 智能变电站通信网络示意图

以元素 a_{ij} 表示 i 端口与 j 端口的物理连接关系：

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & i \text{ 端口与 } j \text{ 端口有物理连接} \\ 0, & i \text{ 端口与 } j \text{ 端口无物理连接} \end{cases} \quad (1)$$

将式(1)表述的关系采用矩阵法记录,第 i 行第 j 列的元素表示 i 端口与 j 端口的连接方式。图 1 所示通信网络的物理端口模型由矩阵 $\mathbf{A}$ 描述如下：

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

1.2 智能变电站逻辑网络拓扑模型

二次设备的一个物理端口可以同时发送和接收多路报文。为了表达方便,在 IEC 61850 协议中定义了逻辑节点,逻辑节点是报文发送的最小粒度,是由功能和数据定义的节点,并非物理上的节点,代表物理端口的某个定义功能。报文订阅关系,也称为网络逻辑连接关系,可由 SCD 文件解析获得。逻辑网络拓扑模型由报文发送和报文接收模型组成,分别记录发送和接收报文的端口。

假设智能变电站 SCD 文件描述中共有 l 条链路和 k 个端口,则定义矩阵 $\mathbf{S}_{k \times l}$ 为报文链路 with 报文发送端口之间的关系。 $\mathbf{S}_{k \times l}$ 中的元素 s_{lk} 为第 k 个端口与第 l 条链路的关系,值为 1 则表示端口 k 发送报文到 l 链路;否则为 0。

$$s_{lk} = \begin{cases} 1, & \text{端口 } k \text{ 发送报文到 } l \text{ 链路} \\ 0, & \text{端口 } k \text{ 不发报文到 } l \text{ 链路} \end{cases} \quad (3)$$

定义矩阵 $\mathbf{R}_{k \times l}$ 表示报文链路 with 报文接收端口之间的关系,元素 r_{lk} 为第 k 个端口与第 l 条链路的关系,值为 1 则表示端口 k 发送报文到 l 链路,否则为 0。

$$r_{lk} = \begin{cases} 1, & \text{端口 } k \text{ 从 } l \text{ 链路接收报文} \\ 0, & \text{端口 } k \text{ 不从 } l \text{ 链路接收报文} \end{cases} \quad (4)$$

2 基于分块矩阵的报文传输查找算法

通过链路状态路由协议建立的网络物理拓扑模型,将智能变电站通信网络物理模型转化为矩阵表示的数学模型。解析 SCD 文件建立逻辑网络拓扑模型,将 IEC 61850 定义的“看不见,摸不着”的逻辑报文订阅关系转化为数学模型。构建两种数学模型的映射关系,就可以查找出智能变电站任意报文的传输路径。

图 2 所示为智能变电站报文传输路径查找算法的流程图。

首先,初始化各项数据:智能变电站网络通信模型矩阵 $\mathbf{A}_{k \times k}$ 、 $\mathbf{S}_{k \times l}$ 和 $\mathbf{R}_{k \times l}$;用来保存报文路径的矩阵 $\mathbf{P}_{l \times k}$ 和标记位 n ,令 $n=0$, $\mathbf{P}_{l \times k} = \{0\}$ 。

其次,以分块矩阵技术为主,稀疏矩阵技术和对称矩阵技术辅助优化矩阵 $\mathbf{A}_{k \times k}$,获得所查报文链路的发送端口和接收端口,以及报文链路所在的低阶子矩阵区域。矩阵的相关计算在对应的低阶子矩阵中进行即可,记矩阵 $\mathbf{A}_{k_i \times k_i}$ 为链路报文所在子矩阵的物理网络拓扑模型,对应的逻辑网络拓扑模型也降阶为 k_i 。矩阵 $\mathbf{S}_{k_i \times l}^{-1}$ 每左乘一次物理网络拓扑矩阵 $\mathbf{A}_{k_i \times k_i}$ 表示报文在两个物理端口间的一次传输。

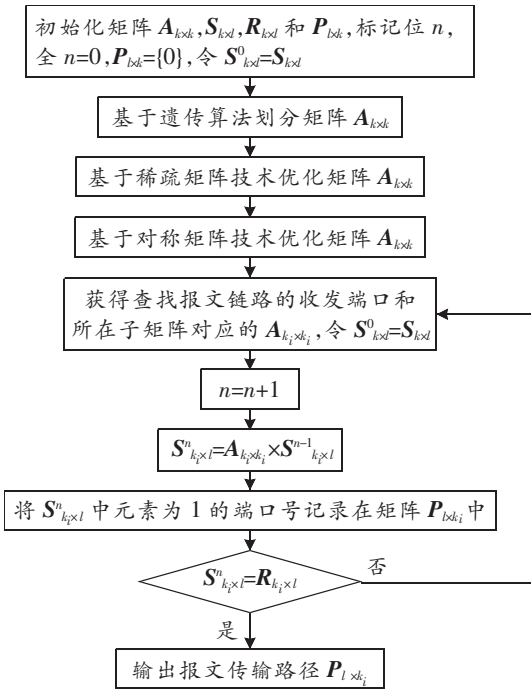


图 2 报文路径查找算法流程图

$$S^n_{k_i \times l_i} = A_{k_i \times l_i} \times S^{n-1}_{k_i \times l_i} \text{。} \tag{5}$$

接着,将 $S^n_{k_i \times l_i}$ 中元素为 1 的端口号记录在矩阵 $P_{l \times k_i}$ 中,最后判断 $S^n_{k_i \times l_i}$ 是否等于报文接收矩阵 $R_{k_i \times l_i}$,如果两式不相等,则令 $n = n + 1$,进行一次迭代,此端口不是报文接收端口,需要在通信网络中转发到下一端口;若两式相等,则报文传输到达接收设备的接收端口,报文不再进行转发。

最后,将记录在矩阵 $P_{l \times k_i}$ 中的端口号按顺序输出得到对报文的传输路径。

矩阵 $P_{l \times k_i}$ 中元素 p_{ij} ,若其值不为 0,如值为 2,说明报文由上一端口转发至端口 2;若值为 0 则表示报文没有进行转发,例如在矩阵 $P_{l \times k_i}$ 中第 l 行 $\{1,3,2,4\}$ 表示一路报文传输路径。

3 报文传输查找算法的优化

3.1 基于遗传算法划分通信网络物理拓扑模型

针对智能变电站网络拓扑模型矩阵阶数高和计算量大的问题,本文提出一种依据网络报文数据量关系将网络拓扑矩阵分块多个对应的低阶子矩阵的算法。智能变电站按照进线、主变高压和低压出线等功能构建,每部分称为一个间隔,将子矩阵个数设置为变电站间隔数量。

IEC 61850 规定通用面向对象变电站事件(Generic Object Oriented Substation, GOOSE)和采样值(Sampled Value, SV)报文长度分别为 18 和 8 Byte。获取智能变电站全站的报文订阅关系,依据

报文发送间隔可求出每组报文订阅关系的网络数据量。特别地,变电站的报文采用了组播方式传输,将组播报文包含的链路打包算作一组,保证了低阶子矩阵各链路的完整性。假设有 b 组报文订阅关系,记作 $x_t(t = 1, 2, \cdots, b)$, t 为订阅关系标记位。每组订阅关系包含的数据量和端口数分别由 c_t 和 w_t 记录。全站的网络数据量记作 U ,子矩阵数量记作 m ,那么每个子矩阵的数据量为 $u = U/m$ 。

采用遗传算法将报文订阅关系均匀地分配到各个子矩阵中,步骤如下:

- (1) 基因编码。以报文订阅关系为基因,将 b 个 x_t 按顺序编码。采用二进制编码,1 表示分配给子矩阵;0 表示不分配。
- (2) 个体评价。个体的适应度是种群进化选择的依据,选择恰当的适应值函数是遗传算法的核心所在。提出如下适应函数:

$$F(x) = f(x) \times p(x) \text{,} \tag{6}$$

$$\begin{cases} f(x) = \sum_{t=1}^b c_t x_t \\ \text{s. t.} \quad \sum_{t=1}^b w_t x_t \leq u \end{cases} \text{,} \tag{7}$$

$$p(x) = \begin{cases} 0, & x < \beta \\ \alpha \prod_{t=1}^b w_t x_t, & x > \beta \end{cases} \text{。} \tag{8}$$

式中: $f(x)$ 为目标函数,其物理意义为分配到子矩阵中报文订阅组的数据量总和,并判断总和是否超过子矩阵的负载能力; $p(x)$ 为惩罚函数,为保证各子矩阵的阶数均匀分布,各子矩阵包含的端口尽量靠近; α 为惩罚系数; β 为阈值; $p(x)$ 本身为线性整流函数(Rectified Linear Unit, ReLU),阈值以下的函数值为 0,阈值以上的保留其函数原型。

(3) 选择运算。采用轮盘赌的方式选择较为科学。轮盘赌算法分别计算每个个体的适应度,适应度越大的个体被选择的概率越大。个体 v 被选择的概率由下式定义:

$$c(x_v) = \frac{F(x_v)}{\sum_{t=1}^b F(x_t)} \text{。} \tag{9}$$

(4) 交叉运算。交叉运算是将两个个体的基因进行交换从而产生新的个体,是遗传算法中产生新个体的一种手段,本文采用单点交叉算法。

(5) 变异运算。变异运算是遗传算法中产生新个体的第 2 种算法。变异运算是将个体中的某位基因发生突变,1 位变为 0 位,0 位变为 1 位。一般地,

基因突变的概率为 0.000 1~ 0.100 0 之间的随机数。

(6) 遗传终止条件。若种群连续 g 代适应值没有发生变化,或者遗传代数达到预设最大值,则终止遗传,输出结果。依次进行 m 次运算即可得到对应的低阶子矩阵。

依据上述介绍的算法,可将式(2)的八阶矩阵 $\mathbf{A}$ 分为两个四阶子矩阵 $\mathbf{A1}_{4\times4}$ 和 $\mathbf{A2}_{4\times4}$,如式(10)和(11)所示,报文转发路径查找算法只需在四阶矩阵中进行计算即可。

$$\mathbf{A1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \tag{10}$$

$$\mathbf{A2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}。 \tag{11}$$

子矩阵满足以下特性:

- (1) 数据量守恒。各低阶子矩阵内对外报文传输数据量为 0,保证了子矩阵的完整性,即链路的发送与接收端口在同一子矩阵内。
- (2) 对组播报文进行了打包处理,保证了子矩阵的封闭性。
- (3) 由于在遗传算法中加入了惩罚因子,子矩阵阶数均匀分布。

3.2 基于稀疏矩阵的通信网络物理拓扑模型

经过划分后的网络物理拓扑矩阵同时具有稀疏矩阵的特性,满足矩阵非零元素远小于元素总和。表 1 所示为矩阵 $\mathbf{A1}_{4\times4}$ 的三元组表示。为了减少计算量,只计算矩阵中的非零数字即可。采用三元组表顺序存储,即元素所在的行号、列号和元素值(d, e, a_{de})。

表 1 稀疏矩阵 $\mathbf{A1}$ 的三元组表示法

d (行)	e (列)	a_{de} (值)
0	2	1
1	2	1
1	3	1
2	0	1
2	1	1
3	1	1

3.3 基于对称矩阵技术的通信网络物理拓扑模型

网络物理拓扑矩阵经过分块处理和稀疏矩阵技术处理后满足对称矩阵的特性,矩阵中的元素关于

对角线对称,所以在存储和计算过程中只需处理上三角或下三角的元素即可。这样,对称的元素共享一个存储空间,节约近一半的空间,计算量减少近一半,网络物理拓扑矩阵 $\mathbf{A}_{k\times k}$ 的元素 $a_{de} = a_{ed}$,表 1 可化简为表 2。

表 2 对称稀疏矩阵 $\mathbf{A1}$ 的三元组表示法

d (行)	e (列)	a_{de} (值)
0	2	1
1	2	1
1	3	1

4 算例分析

以宁夏某 110 kV 科研专用智能变电站为对象,验证本文提出的报文转发路径查找算法。图 3 所示为 110 kV 变电站网络拓扑,图中,黑色实心圆为变电站智能电子类设备(Intelligent Electronic Device, IED)及其端口,实线长方形为变电站交换机,空心圆为交换机的端口,共有 20 个 IED,包括 6 个交换机,50 个端口。对每一个设备的端口进行编号,建立该变电站的网络物理拓扑矩阵模型 $\mathbf{A}_{54\times54}$ 。

解析 SCD 文件建立逻辑网络拓扑模型,共有 46 路报文订阅关系,建立逻辑网络拓扑矩阵模型中的发送报文和接收报文矩阵。其中一组 APPID 为 1 004 的 GOOSE 报文发送端口为 1,接收端口为 4。

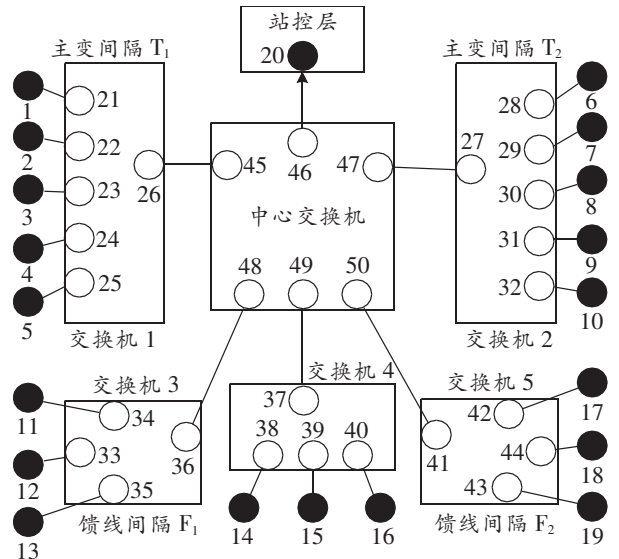


图 3 110 kV 变电站网络拓扑

该变电站全站报文数据量为 62 134 Byte,4 个间隔。以报文数据量为依据,采用遗传算法将变电站的物理拓扑矩阵划分为 4 个对应的低阶子矩阵。4 个矩阵的报文数据量分别为 15 532、15 534、15 414和 15 656 Byte,子矩阵阶数均匀分布。各子

矩阵数据量守恒,对外报文传输数据量为 0,保障了链路的完整性。对组播报文进行了打包处理,保证了子矩阵的封闭性。

验证利用报文路径查找算法所得到的 APPID 为 1 004 的 GOOSE 报文传输路径为 {1,21,24,4} 与变电站实际报文传输路径相同,验证了此算法的功能性。

在同一实验环境下,对本文所提算法与邻接矩阵算法进行了性能测试。按照本文算法的优化步骤,对分块矩阵、稀疏矩阵和对称矩阵技术的分步引用所达到的效果进行了比对。以矩阵的计算量为衡量标准,对比了不同算法的性能表现。表 3 所示为采用不同技术的矩阵计算次数。

表 3 采用不同技术的矩阵计算次数

技 术	矩阵计算总次数
邻接矩阵法	450 000
分块矩阵法	23 660
分块矩阵+稀疏矩阵法	9 464
分块矩阵+稀疏矩阵+对称矩阵法	4 932

测试结果表明,本文所提算法相比邻接矩阵算法计算量有较明显的下降。分块矩阵法有效降低了报文路径搜索计算时所用矩阵的阶数,稀疏矩阵和对称矩阵技术辅助优化效果明显。

纵向对比宁夏某大型的 330 kV 智能变电站,共有 196 个 IED,16 个各层交换机,440 个物理端口和 739 路报文订阅关系。划分为 13 个对应的低阶子矩阵,表 4 所示为不同规模变电站矩阵的计算次数。

表 4 不同规模变电站矩阵的计算次数

变电站规模/kV	邻接矩阵算法计算次数	本算法计算次数
110	450 000	4 932
330	914 026 400	1 358 532

在 110 和 330 kV 的智能变电站中,邻接矩阵算法计算次数分别是本文算法计算次数的 91 倍和 673 倍。本文算法明显提高了计算速度,降低了计算量,且变电站规模越大,设备越多,此算法的效果越明显。

5 结束语

本文首先建立了物理和逻辑网络拓扑模型,基于两个模型提出了报文传输路径查找算法;其次,针对模型中矩阵计算数量大的问题,本文提出了一种以分块矩阵技术为主,稀疏矩阵与对称矩阵辅助优化的方案。以宁夏某变电站为算例,测试结果表明,与邻接矩阵算法相比,本文所提算法不仅可以查找报文的转发路径,而且计算速度快,占用内存空间少;变电站规模越大时,此算法效果越明显。

参考文献:

[1] 刘琨,黄明辉,李一泉,等. 智能变电站故障信息模型与继电保护在线监测方法[J]. 电力自动化设备, 2018(2): 210—216.

[2] 陈宏辉,王海柱. 基于 SCD 解析的智能变电站 VLAN 划分方法[J]. 电力信息与通信技术,2014,13(9):50—56.

[3] 杨志宏,周斌,张海滨,等. 智能变电站自动化系统新方案的探讨[J]. 电力系统自动化,2016,40(14):1—7.

[4] 张延旭,蔡泽祥,龙翩翩,等. 智能变电站通信网络实时故障诊断模型与方法[J]. 电网技术,2016,40(6): 1851—1857.

[5] 程延远,杨选怀,苏晓,等. 基于拓扑分析的二次回路仿真算法研究[J]. 陕西电力,2016, 44(11): 57—61.

[6] 陈星莺,孙恕坚,钱峰. 一种基于追踪技术的快速电力网络拓扑分析方法[J]. 电网技术,2004,28(5): 22—24, 34.

[7] 郭帅文,燕跃豪,蒋建东,等. 基于邻接矩阵的网络拓扑辨识算法[J]. 电力系统保护与控制,2018, 46(12):50—56.

[8] 周琰,周步祥,邢义. 基于邻接矩阵的图形化网络拓扑分析方法[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(17): 49—52,56.

[9] 姚玉斌,叶爽利,吴志良,等. 稀疏矩阵法网络拓扑分析[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(23):15.