

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191277

基于 HSR 冗余网络系统的故障定位方法

周健¹, 李骏¹, 金华锋², 张勇³, 刘小波³, 姚卫锋³, 赵睿林³, 刘宝军³

(1. 国网上海市电力公司, 上海 200437; 2. 南京智汇电力技术有限公司, 江苏 南京 211111;
3. 上海欣能信息科技发展有限公司, 上海 200025)

摘要: 设计了一种新的基于高可靠无缝冗余协议(HSR)的智能电网网络故障定位方法。该方法对 HSR 监视帧的可填充字段进行了优化。利用 HSR 监视帧的发送机制, 通过 HSR 环网中各节点接收到的监视帧, 形成该节点上的全网节点连接表。若运行过程中, 环网上某段通信光纤或某个节点发生故障, 各节点收不到相关的监视帧。根据实时的全网节点连接表的变化, 即可知道对应环路发生了故障, 从而实现对故障的精确定位。详细介绍了基于 HSR 监视帧的故障定位设计原理以及典型故障的定位方法。

关键词: 高可靠无缝冗余协议 HSR; 双连接节点 DANH; HSR 监视帧; 网络拓扑; 故障定位

Fault location method based on an HSR redundant network system

ZHOU Jian¹, LI Jun¹, JIN Huafeng², ZHANG Yong³, LIU Xiaobo³, YAO Weifeng³, ZHAO Ruilin³, LIU Baojun³

(1. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200437, China;

2. Nanjing Zhihui Power Technology Co., Ltd., Nanjing 211111, China;

3. Shanghai Shineenergy Information Technology Development Co., Ltd., Shanghai 200025, China)

Abstract: A new fault location method for the smart grid based on High-availability Seamless Redundancy (HSR) protocol is designed. The transmission mechanism of an HSR_Supervision frame is used and the padding field is optimized. When each node in the HSR network receives the HSR_Supervision frames sent by other nodes, a table named AllNodeConnectTable of this node is formed to reflect the whole network topology. In the process of operation, when a fault occurs on a communication fiber or a node on the HSR ring, other nodes fail to receive the relevant supervision frames. The AllNodeConnectTables are changed, from which the fault location in the corresponding ring is determined accurately. This paper introduces in detail the design principle of fault location based on the HSR_Supervision frame and the location method of typical faults.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 520940180036) "Secondary System Architecture and Key Equipment Research for the Third Generation Intelligent Substation".

Key words: high-availability seamless redundancy (HSR); double attached node implementing HSR (DANH); HSR_Supervision frame; network topology; fault location

0 引言

IEC62349-3 通信规范^[1]中指出环状拓扑结构采用高可靠无缝冗余协议(High-availability Seamless Redundancy, HSR), 当环网发生单点线路断线、单个设备断电或通信中断, 通信链路能实现无缝切换, 不影响环内正常设备之间的相互通信, 从而实现零

恢复时间的网络自愈^[2], 提高通信可靠性, 在母线保护中有所应用^[3]。

基于 HSR 冗余协议在智能变电站中的应用有多方面的探讨, 文献[4]提出了在站控层采用并行冗余协议(Parallel Redundancy Protocol, PRP)组网, 过程层间隔 HSR^[5]和跨间隔 PRP 组网的方式, 可以提高网络可靠性和降低成本。文献[6-7]指出智能变电站 MMS、GOOSE 和 SV 三网合一中采用 PRP/HSR 协议, 可以有效解决网络通信实时性和可靠性问题, 满足自动化要求, 简化了网络结构。文献[7]以冗余

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(520940180036) “第三代智能变电站二次系统架构及关键设备研究”

网络中一处出现故障为例,说明报文可以通过环网另一侧无故障线路到达主机,这个最大延长时间能符合技术要求。但文献中未继续对故障点的定位进行探讨。文献[8-10]提出了利用 HSR 监视帧原理搭建的冗余网络监视系统,然而对于故障的定位需要单独的网络监视后台系统,造价高,且一定程度上会延迟故障的判断。

本文在以上文献基础上,结合通过系统网络拓扑的改变判定故障点位置的方法[11-14],设计了一种新的基于 HSR 网络的监视方案,实时获得网络拓扑和各节点的状态监视,快速对故障点进行定位。不

需要专门的网络监视后台系统,从而节约了成本。

1 基于 HSR 冗余协议的网络

1.1 典型的 HSR 网络拓扑

以图 1 所示的简单 HSR 环网[1]为例,每个节点有两个并行运行的以太网端口,称为双连接节点(Double Attached Node Implementing HSR, DANH)。文献[1]中约定 DANH 节点左侧或上面的端口为 A 口,右侧或下面的端口为 B 口,两个端口具有同样的 MAC 地址。

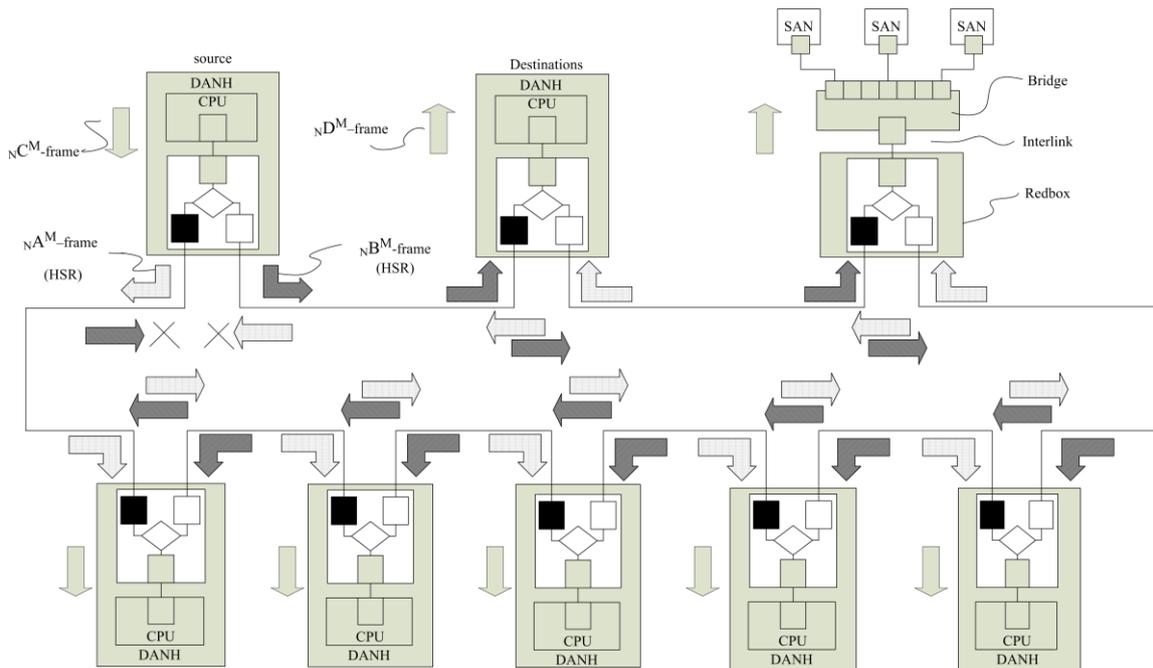


图 1 典型的 HSR 网络拓扑示意图(多播)

Fig. 1 Typical HSR ring configuration for unicast traffic

源 DANH 收到来自上层的报文 C,先在报文中加入 HSR 标签,然后通过两个端口同时发送报文 A 和 B。目的 DANH 在两个端口收到重复的两个报文,对先到达的第一个报文移除 HSR 标签后(报文 D)送至上层,对第二个报文直接丢弃。中间节点判断报文的地址不是自己后,将从另一个端口进行转发。

HSR 组网中常用到的网络连接设备有 RedBox 和 QuadBox。RedBox (Redundancy Box)主要作为单连接节点 SANs(Singly Attached Nodes)的连接设备接入网络中,以实现和 DANH 相同的功能(如图 1)。QuadBox(并行耦合环 QB)是连接两个对等 HSR 环的四端口设备(如图 2)。在每个 HSR 环中充当一个节点, QB 能够过滤报文,并将报文从一个环传输

到另一个环里。为提高系统可靠性,系统一般会使用两个 QB 设备。

1.2 HSR 监视帧(HSR_Supervision frame)

一个完整的 HSR 监视帧如表 1[9]所示。

表 1 HSR 监视帧示意图

Table 1 HSR_Supervision frame

HSR_DestinationAddress	SourceAddress	VLAN tag
HSR_Ethertype	PathId	LSDUsize
SeqNr	SupEthertype	SupPath
SupVersion	SupSequencenumber	TLV1.Type
TLV1.Length	MacAddress	TLV2.Type
PRP_TLV2.Length	RedBoxMacAddress	TLV0.Type
TLV0.Length	Padding	

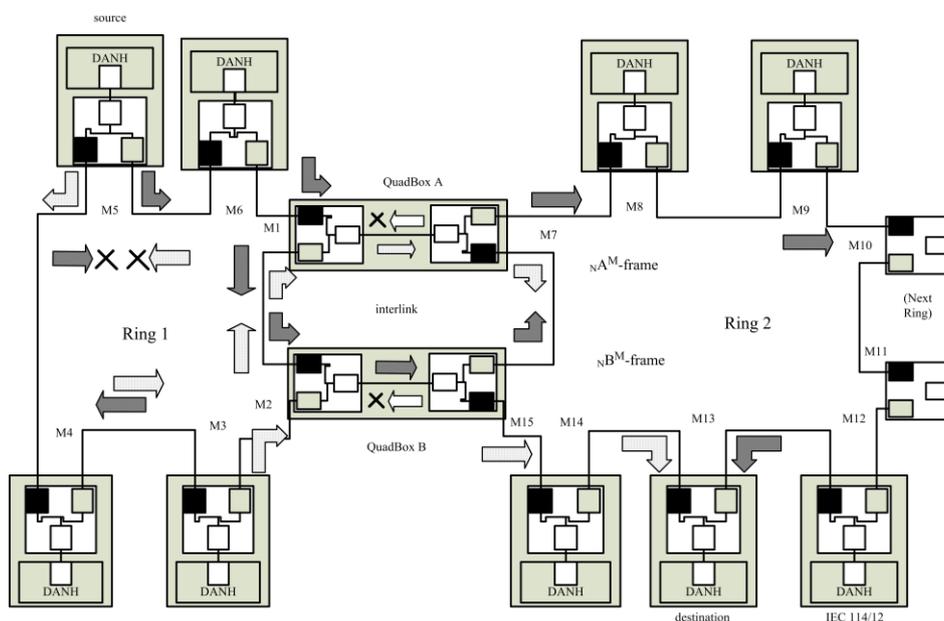


图 2 两个并行耦合环的 HSR 网络示意图

Fig. 2 HSR example of peer coupling of two rings

主要字段的定义为：**HSR_DestinationAddress** 为预留的多播地址；**SourceAddress** 为节点的 MAC 地址；**SeqNr** 为发送方的发送序列；**SupSequenceNumber** 为监视帧的序列号；**MacAddress** 为 DANH 两个转发端口使用的同一个 MAC 地址，该地址与 **SourceAddress** 可以一致也可以不一致。

HSR 标签由 **HSR_Ethertype**、**PathId**、**LSDUsize** 和 **SeqNr** 组成，长度为 6 个字节。考虑到以太网帧最短 64 个字节的长度要求，以及 HSR 标签在被上层接收后将被移除，所以监视帧的最小帧长度为 70 个字节(无 VLAN 标记)或 74 个字节(有 VLAN 标记)，而 **Padding** 即为满足这一长度要求的填充字段。

文献[1]详细介绍了 HSR 采用监视帧实现网络监视功能的过程。任何一个 HSR 网络中 DANH 都会维护一个监视数据集(Monitoring data set)，该数据集包括节点本身的发送计数 **SendSeq**、端口接收到的错误帧计数(**CntErrorA** and **CntErrorB**)、端口接收到的帧计数(**CntReceivedA** and **CntReceivedB**)、端口接收到的失配帧计数 (**CntErrWrongLanA** and **CntErrWrongLanB**)、端口活动状态标志(**ActiveA** and **ActiveB**)以及 **NodesTable**。

DANH 通过两个以太网端口同时向环网内广播监视帧。环内节点接收到后，会更新自己的 **NodesTable**，以补充本节点监测到的其他节点信息，如远端节点的 **MacAddress**、**SupSequenceNumber**。

当节点在一定的时间内(NodeForgetTime, 设为 1 分钟^[1])接收不到对方节点的监视帧，就会把该节点的信息从 **NodesTable** 中移除。

当站控层网络运维管理单元获取所有节点的 **NodesTable** 信息后，对网络运行状态进行评估，从而发现故障节点。然而这样的 **NodesTables** 无法体现网络拓扑结构，对于故障的定位需要单独的网络监视后台系统^[10]。

为解决这两个问题，在不增加网络开销、兼容标准协议的前提下，本文设计了一种利用 HSR 监视帧可填充字段 **Padding** 的方法，创造性地实时形成以本节点为基准的全网拓扑结构表。通过该表与初始或正常状态下的全网节点信息表进行比对，甚至可以跳过比对步骤，根据信息中的异常字段，就能快速对故障进行定位。

2 基于 HSR 监视帧的故障定位设计

2.1 原理

在表 1 HSR 监视帧的 **Padding** 中设置字 **RingCounter**，长度为 16 bit。每个 DANH 节点以固定的时间间隔(LifeCheckInterval, 设为 $2\text{ s}^{[1]}$)广播自身的监视帧时，将 **RingCounter** 设置为特定的起始值，如 0。中间节点(含 QB)转发其他节点的监视帧时，将监视帧的 **RingCounter** 加 1，同时读取监视帧的 **MacAddress** 和 **RingCounter** 值，形成该节点上的节点连接表(NodeConnectTable)。这样，每个 DANH

节点都会形成以本节点为基准的反映全网拓扑的节点连接表。若运行过程中，HSR 环上某传输光纤或某个节点发生故障，各节点收不到相关的监视帧。当与正常状态下的节点连接表比对，根据缺失的节点信息或者不正常的字段就能实现对故障的精确定位。该操作可在任一 DANH 节点上进行，减轻了网络监视后台系统的压力。

对于有多个环构成的 HSR 网络，由于监视帧只在单环里转发，需要 QB 分别生成两个环的节点连接表，以一定的时间间隔从一个环传送到另一个环，这样单环的节点连接表读取另一个环的信息后，可以生成全网的节点连接总表，从而实现对整个 HSR 网络拓扑状态的监视。

在无故障发生时，形成节点连接表的周期可以较监视帧发送周期长一些，即不频繁读取监视帧的 MacAddress 和 RingCounter 值。有故障发生时，可以改变节点连接表的读取周期，以快速读取监视帧相关字段，获得最新的网络拓扑。

2.2 单环节点连接表(NodeConnectTable)设计

以图 1 为例，从源节点开始顺时针各节点编号为 Node1、Node2、…、Node8，其对应的两个端口的 MAC 地址为 MAC1、MAC2、…、MAC8。一个监视周期结束后，如网络正常，node1 的节点连接表如表 2。

表 2 Node1 的节点连接表 NodeConnectTable

Table 2 NodeConnectTable of Node1

MacAddress	NodePositionA	TWaitA	NodePositionB	TWaitB
MAC1	0	0	0	0
MAC8	1	0	7	0
MAC7	2	0	6	0
MAC6	3	0	5	0
MAC5	4	0	4	0
MAC4	5	0	3	0
MAC3	6	0	2	0
MAC2	7	0	1	0

表中第一列 MacAddress 为环内各节点 MAC 地址；第一行为本节点的信息，除自身的 MAC 地址外，其他字段皆为 0。从第二行开始，第二、四列 NodePositionA 和 NodePositionB 分别为其他节点从 A 口、B 口相对于本节点的位置，即 RingCounter 值。第三、五列 TWaitA 和 TWaitB 分别为从 A 口、B 口等待响应节点 HSR 监视帧的延时，从轮播开始计时，一直到接收到节点监视帧时，对该节点的 TWait 进行清零。

以 Node2(图 1 中的 destination 节点)为例说明表

2 的形成机制。当 Node2 始发自身的监视帧时，RingCounter=0，从 Node2 的 A 口出发的监视帧逆时针方向首先到达 Node1 的 B 口。Node1 判断该 HSR 监视帧的 MAC 地址 MAC2 不同于本节点的 MAC 地址，赋值 RingCounter 为 1；并从 Node1 的 A 口转发；同时查找 MAC2 是否在自己的节点连接表里，如不在，将在节点连接表的尾部增添一条新的记录，MacAddress 设为 MAC2，由于是从 B 口进来的监视帧，NodePositionB=RingCounter=1，对应的 TWaitB=0。如已经在表里，修改 NodePositionB=RingCounter=1，对应的 TWaitB=0。

从 Node2 的 B 口出发的监视帧顺时针经过 6 个节点到达 Node1 的 A 口，Node1 赋值 RingCounter 为 7，NodePositionA=7，TWaitA=0。

如某 MAC 地址的 TwaitA 或 TwaitB 超过 NodeForgetTime，意味着 Node1 的 A 或 B 口接收不到来自该 MAC 地址的监视帧，则将该 MAC 地址对应的 NodePositionA 或 NodePositionB 置为 0xFFFF，TWait 为 NodeForgetTime，如 60 s。

若收到的 HSR 监视帧的 MAC 地址同本节点的 MAC 地址，表明 HSR 监视帧已经经过本环的所有节点，本次监视结束。若超过 NodeForgetTime 收不到同节点 MAC 地址，表明环路中有故障。

综上，网络运行正常状态下的节点连接表反映了网络拓扑信息，NodePosition 值的大小代表着其他节点离基准点的远近；而在故障下，通过 NodePosition 为 0xFFFF，以及 TWait 非 0，可以得出故障区域。

2.3 全网节点连接表(AllNodeConnectTable)设计

HSR 网络中存在多个环路时，需要 QB 连接设备将相邻环的节点连接表信息进行交换。QB 节点虽然可把任意帧无损地从给一个环转发到另一个环，但是考虑可能引起的网络拥塞，监视帧只在单环内转发。

QB 以一定的时间间隔广播发送本 QB 节点的节点连接表，相邻两个环内各节点接收到上述节点连接表，如该表中的 MacAddress 已在本节点的全网节点连接表中，则丢弃；否则将接收到的节点连接表加入到全网节点连接表尾部。这样环网内任何一个节点上都可以形成全网节点连接表。而一旦有故障发生，只要检查任一节点的全网节点连接表，分析 NodePosition 为 0xFFFF 或不存在的即为可能的故障区域。

以图 2 为例，各 DANH 以及 QB 节点的双端口 MAC 地址分别为 M1, M2, …, M15。通过 QB 交换 Ring1 和 Ring2 的节点连接表后，假设以 M7 为基

准的 Ring2 的节点连接表到达 Ring1 后, M1 处得到的全网节点连接表如表 3 所示。

对于有 n 个环的 HSR 冗余网络, 可以在相邻两个环形成两环节点连接表后, 再与第三个环形成三环连接表, 以此类推, 最后得到全网的节点连接表。

表 3 图 2 中 M1 处的全网节点连接表

Table 3 AllNodeConnectTable of M1 in Fig.2

MacAddress	NodePositionA	TWaitA	NodePositionB	TWaitB
M1	0	0	0	0
M6	1	0	5	0
M5	2	0	4	0
M4	3	0	3	0
M3	4	0	2	0
M2	5	0	1	0
M7	0	0	0	0
M8	1	0	8	0
M9	2	0	7	0
M10	3	0	6	0
M11	4	0	5	0
M12	5	0	4	0
M13	6	0	3	0
M14	7	0	2	0
M15	8	0	1	0

3 试验结果分析

搭建如图 2 所示的试验模型, 模拟各类通道故障, 用节点连接表分析几种常见故障的定位方法。

3.1 光纤单向故障

模拟 M5 到 M6 间的光纤单向故障, 即 M5 的 B 出口到 M6 的 A 出口间单向故障。以 M1 的节点连接表为例(以下同), 此时任何顺时针广播的监视帧无法通过这一通道到达 M1 的 A 口, M1 的节点连接表如表 4。

表 4 基于 M1 的光纤单向故障时的节点连接表

Table 4 NodeConnectTable of M1 when fiber unidirectional fault occurs

MacAddress	NodePositionA	TWaitA(s)	NodePositionB	TWaitB(s)
M1	0	0	0	0
M6	1	0	5	0
M5	0xFFFF	60	4	0
M4	0xFFFF	60	3	0
M3	0xFFFF	60	2	0
M2	0xFFFF	60	1	0

从该表可以看出, 故障走向是在 M1 的 A 口侧, 在 M5 处 NodePositionA 变为 0xFFFF, M6 的 NodePositionA 正常, 说明 M5 的 B 口无法到达 M1 的 A 口, 而 M6 的 B 口可以到达 M1 的 A 口, 由此

判断出从 M5 到 M6 的光纤故障。

基于其他节点的全网节点连接表也可以得出上述结论。如图 2 中 Ring2 各节点收到 Ring1 的节点表后, 先找到基准节点, 即 NodePositionA 值为 0(如 M1), 如该基准节点下有字段值为 0xFFFF, 则可以根据上述规则判断出故障位置。

3.2 光纤双向故障

模拟 M5 到 M6 间的光纤双向故障, 即 M5 的 B 出口到 M6 的 A 出口间双向传输都为故障。基于 M1 的关于 Ring1 的节点连接表如表 5。从该表可以看出, M1 的 A 口收不到顺时针 M5 后面的各节点监视帧, 而 M1 的 B 口仅收不到 M6 的 A 口信息, 由此判断 M5 到 M6 间的光纤双向故障。

表 5 基于 M1 的光纤双向故障时的节点连接表

Table 5 NodeConnectTable of M1 when fiber bidirectional fault occurs

MacAddress	NodePositionA	TWaitA(s)	NodePositionB	TWaitB(s)
M1	0	0	0	0
M6	1	0	0xFFFF	60
M5	0xFFFF	60	4	0
M4	0xFFFF	60	3	0
M3	0xFFFF	60	2	0
M2	0xFFFF	60	1	0

3.3 节点两个端口故障

模拟 M5 的两个端口同时故障, 即不能对监视帧进行转发或者上传。此时节点连接表如表 6, M5 的 NodePositionA 与 NodePositionB 同时为 0xFFFF, 并且 M1 收不到顺时针方向 M5 后面所有的监视帧, 因此可以判断 M5 双端口故障。

表 6 基于 M1 的节点双端口故障时的节点连接表

Table 6 NodeConnectTable of M1 when double port fault occurs

MacAddress	NodePositionA	TWaitA(s)	NodePositionB	TWaitB(s)
M1	0	0	0	0
M6	1	0	0xFFFF	60
M5	0xFFFF	60	0xFFFF	60
M4	0xFFFF	60	3	0
M3	0xFFFF	60	2	0
M2	0xFFFF	60	1	0

3.4 节点单个端口故障

模拟 M5 的 B 端口故障, 即不能通过 B 口对监视帧进行转发或者上传。此时与 3.1 情况即光纤单向故障表现一致, 节点连接表如表 7。

M5 对应的 NodePositionB 字段为正常值, 说明 M5 的 A 端口正常, 从而缩小故障范围在 M5 的 A 端口或者从 M5 到 M6 的单向光纤上。

表 7 基于 M1 的节点单端口故障时的节点连接表

Table 7 NodeConnectTable of M1 when single port fault occurs

MacAddress	NodePositionA	TWaitA(s)	NodePositionB	TWaitB(s)
M1	0	0	0	0
M6	1	0	0xFFFF	60
M5	0xFFFF	60	4	0
M4	0xFFFF	60	3	0
M3	0xFFFF	60	2	0
M2	0xFFFF	60	1	0

3.5 接入节点初始状态即为故障

模拟 M5 自接入系统时就是故障的, 那么任何一个节点都接收不到 M5 的监视帧, 也就是节点连接表中没有关于 M5 的信息。如果检查此时的节点连接表(如表 8), 发现没有出现 M5 的 MAC 地址, 即可判断 M5 端口或这个节点是故障的。

表 8 基于 M1 的节点初始故障时的节点连接表

Table 8 NodeConnectTable of M1 under node initial fault

MacAddress	NodePositionA	TWaitA(s)	NodePositionB	TWaitB(s)
M1	0	0	0	0
M6	1	0	0xFFFF	60
M4	0xFFFF	60	3	0
M3	0xFFFF	60	2	0
M2	0xFFFF	60	1	0

4 结论

本文通过在 HSR 环网监视帧的 Padding 字段中加字 RingCounter, 以跟踪帧在环网中的轨迹, 接收到该监视帧的节点对 RingCounter 赋值后即可形成基于该节点的网络拓扑和针对其他各节点的状态监视。基于这些信息, 可以快速地对故障点进行定位。本方法的创新点在于不需要专门的网络监视后台系统进行故障定位, 读取环网内任何一个 DANH 节点上的全网节点连接表就可以判断故障的区域, 在快速定位的同时节约了建设成本和人工成本。

后续研究可针对时延^[15]问题, 采用先进的同步^[16-17]校准技术, 辅以采样机制^[18], 改进通信网络^[19], 有效触发 HSR 环网内各 DANH 节点连接表的形成, 避免正常网络状态下的网络拥塞以及时延等问题。

本文的模拟案例主要针对文献[1]中的 HSR 典型环网。正如文献[20-21]指出的, HSR 环网较适合小型、简单或自愈系统(如配电站), 但是对于大型变电站, 如预期在性能、可用性和成本三方面达到最优状态, 应采用 HSR 与 PRP 的混合组网方式。因此, 下一步还可以开展 HSR 与 PRP^[22]混合组网^[23]方式下的借助监视帧的故障定位的研究, 结合其他算法^[24-25], 以获得更精准的故障定位。

参考文献

- [1] Industrial communication networks-high availability automation networks-part 3: parallel redundancy protocol (PRP) and high-availability seamless redundancy (HSR): IEC 62439-3[S]. 2nd ed. IEC, 2010.
- [2] 黄晓博. PRP 和 HSR 技术在国内智能变电站中的工程应用分析[J]. 通讯世界, 2016, 13(22): 129-130. HUANG Xiaobo. Application analysis of PRP and HSR in smart substations[J]. Communication World, 2016, 13(22): 129-130.
- [3] 王德林, 郑玉平, 周华良, 等. 基于多 HSR 环网的分布式母差平台及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 27-34. WANG Delin, ZHENG Yuping, ZHOU Hualiang, et al. Platform and key technology for distributed bus protection based on multi-HSR network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 27-34.
- [4] 施寅跃, 付艳兰, 李琳玮, 等. 基于 PRP 和 HSR 冗余协议的智能变电站网络组网研究[J]. 电力信息与通信技术, 2018, 16(5): 52-57. SHI Yinyue, FU Yanlan, LI Linwei, et al. Research on network construction of intelligent substation based on PRP and HSR redundancy protocol[J]. Electric Power ICT, 2018, 16(5): 52-57.
- [5] 黄德文, 姚明. HSR 技术在智能变电站过程层网络的应用探讨[J]. 电力信息与通信技术, 2014, 12(4): 35-38. HUANG Dewen, YAO Ming. Application of HSR technology in process layer network of intelligent substations[J]. Electric Power ICT, 2014, 12(4): 35-38.
- [6] 张宪军, 刘颖, 余华武, 等. 智能变电站 MMS、GOOSE、SV 三网合一通信过载隔离抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 120-126. ZHANG Xianjun, LIU Ying, YU Huawu, et al. Overload isolation and control strategy of smart substation based on MMS, GOOSE and SV three-in-one communication network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 120-126.
- [7] 周华良, 郑玉平, 杨志宏, 等. 面向智能变电站三网合一网络的 PRP_HSR 实现方案[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(10): 216-223. ZHOU Hualiang, ZHENG Yuping, YANG Zhihong, et al. Implementation scheme of three-in-one network based on PRP/HSR in smart substations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10): 216-223.
- [8] 谢黎, 周华良, 于同伟, 等. 一种智能变电站新型双网冗余设备及实现[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 151-156. XIE Li, ZHOU Hualiang, YU Tongwei, et al. A new network redundancy device for smart substation and its implementation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 151-156.
- [9] 高红亮, 陶文伟, 唐孝舟, 等. 基于监测帧的 PRP 和 HSR 冗余网络监视系统的实现[J]. 电力工程技术, 2017, 36(4): 65-69. GAO Hongliang, TAO Wenwei, TANG Xiaozhou, et al. The implementation of PRP and HSR redundancy network

- supervision system based on detecting frame[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(4): 65-69.
- [10] 许铁峰, 徐习东. 高可用性无缝环网在数字化变电站通信网络的应用[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(10): 121-125.
XU Tiefeng, XU Xidong. Application of high-availability seamless ring in substation communication network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(10): 121-125.
- [11] 文福栓, 韩桢祥, 田磊, 等. 基于遗传算法的电力系统故障诊断的解析模型与方法 — 第一部分模型与方法[J]. 电力系统自动化学报, 1998, 10(3): 1-7.
WEN Fushuan, HAN Zhenxiang, TIAN Lei, et al. An analytic model and genetic algorithm based method for fault diagnosis in power systems — part 1: the model and method[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 1998, 10(3): 1-7.
- [12] 文福栓, 韩桢祥, 田磊, 等. 基于遗传算法的电力系统故障诊断的解析模型与方法 — 第二部分软件实现[J]. 电力系统自动化学报, 1998, 10(3): 8-18.
WEN Fushuan, HAN Zhenxiang, TIAN Lei, et al. An analytic model and genetic algorithm based method for fault diagnosis in power systems — part 2: the software implementation[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 1998, 10(3): 8-18.
- [13] CHANG C S, TIAN L, WEN F S, et al. Development and implementation knowledge-based system for on-line fault diagnosis of power systems[J]. Electric Machines and Power Systems, 2001, 29(10): 897-913.
- [14] XU Yan, LIU Jingyan, FU Yuan. Fault-line selection and fault-type recognition in DC systems based on graph theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 267-276. DOI: 10.1186/s41601-018-0098-9.
- [15] 陶文伟, 高红亮, 杨贵, 等. 智能变电站过程层冗余组网模式及网络延时累加技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 124-128.
TAO Wenwei, GAO Hongliang, YANG Gui, et al. Research on redundant networking mode and network delay accumulation technology of smart substation process layer[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 124-128.
- [16] 冯自权, 李茗宇, 李绅, 等. 时钟管理系统中继电保护 B 码对时研究[J]. 电测与仪表, 2014, 51(18): 124-128.
FENG Ziquan, LI Mingyu, LI Shen, et al. Research on IRIG-B time relay protection codes in clock management system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(18): 124-128.
- [17] 刘永欣, 易永辉, 陶永健, 等. 智能变电站过程层网络同步对时方案优化[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(10): 112-116.
LIU Yongxin, YI Yonghui, TAO Yongjian, et al. Synchronous optimization scheme of smart substation process level network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(10): 112-116.
- [18] 张言苍. 智能变电站网络采样同步新技术[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(8): 143-147.
ZHANG Yancang. Network sampling synchronization method for smart substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8): 143-147.
- [19] 朱玛, 杜振华, 章立宗, 等. 基于 EPON 技术的智能变电站通信方案优化应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(11): 131-137.
ZHU Ma, DU Zhenhua, ZHANG Lizong, et al. Research on optimization of communication scheme for smart substation based on improved EPON technology[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(11): 131-137.
- [20] HUNT R, POPESCU B. Comparison of PRP and HSR networks for protection and control applications[C] // Western Protective Relay Conference, October 20-22, 2015, Spokane, WA, USA.
- [21] 何钟杰, 黄险峰, 崔春, 等. 几种智能变电站冗余通信协议分析比较[J]. 广东电力, 2011, 24(4): 5-8.
HE Zhongjie, HUANG Xianfeng, CUI Chun, et al. Analysis and comparison of redundancy communication protocols for smart substation[J]. Guangdong Electric Power, 2011, 24(4): 5-8.
- [22] 李俊刚, 宋小会, 狄军峰, 等. 基于 IEC 62439-3 的智能变电站通信网络冗余设计[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(10): 70-73.
LI Jungang, SONG Xiaohui, DI Junfeng, et al. Communication network redundancy design of intelligent substation based on IEC 62439-3[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(10): 70-73.
- [23] 杨贵, 高红亮, 李光华, 等. 基于 IEC62439-3 协议的智能变电站过程层网络监视方法研究与实现[J]. 计算技术与自动化, 2018, 37(2): 47-50.
YANG Gui, GAO Hongliang, LI Guanghua, et al. Research and implementation of process layer network monitoring method based on IEC62439-3[J]. Computing Technology and Automation, 2018, 37(2): 47-50.
- [24] DENG Feng, ZENG Xiangjun, PAN Lanlan. Research on multi-terminal traveling wave fault location method in complicated networks based on cloud computing platform[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 199-210. DOI: 10.1186/s41601-017-0042-4.
- [25] HU Zhuangli, HE Tong, ZENG Yihui, et al. Fast image recognition of transmission tower based on big data[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(2): 149-158. DOI: 10.1186/s41601-018-0088-y.

收稿日期: 2019-10-17; 修回日期: 2020-02-11

作者简介:

周健(1974—), 男, 本科, 高级工程师, 从事电力系统自动化研究与管理; E-mail: 13564161900@139.com

李骏(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统设备运行、检修管理工作; E-mail: smepc_lj@163.com

金华锋(1972—), 男, 通信作者, 教授级高工, 主要研究方向为继电保护、电力通信和稳定控制。E-mail: 475774491@qq.com

(编辑 葛艳娜)