

基于 SDH 光网络的分层区域式保护通信系统的可靠性研究

梅鲁海

(浙江机电职业技术学院电气电子工程学院, 浙江 杭州 310053)

摘要: 为了满足电力系统广域保护的通信要求, 并为电力系统广域保护网络的工程设计及通信系统的评估计算提供参考和理论依据, 提出了基于 SDH 光网络的分层区域式保护通信系统的可靠性研究。根据 SDH 光网络通信原理和自愈环网的可靠性评价方法, 运用状态空间法量化分析了传输链路区段的故障概率和可用度等指标, 阐述了分层区域式保护通信主干网和区域网的可靠性研究方法, 包括 SDH 自愈环网和星型网的可靠性模型及可用度评估、网络冗余和过程层设备组网结构等。例证分析表明, 采用 SDH 自愈环网的通道保护功能可以减小光纤故障对整个环网可靠性的影响, 而提高接口的可靠性则是保证 SDH 环网可靠性的关键。

关键词: 通信; 广域保护; 分层区域; SDH; 光纤; 自愈环; 可靠性

Reliability research of layered regional protective communication system based on SDH optical network

MEI Lu-hai

(Institute of Electrical and Electronics Engineering, Zhejiang Institute of Mechanical & Electrical Engineering,
Hangzhou 310053, China)

Abstract: In order to meet the wide-area protection communication requirements of power system, and provide reference and theoretical basis for the engineering design of power system wide-area protection network and the assessment calculation of communication systems, according to SDH optical network communication theory and self-healing network reliability evaluation method, transmission link section failure probability and availability and other indicators are quantitatively analyzed using state space method. A reliability research method of layered regional protective communication backbone and regional networks is described, including the reliability model and availability assessment of SDH self-healing network and star networks, network redundancy and process layer device network structure. Illustration analysis shows that the path protection feature using SDH self-healing ring network can reduce the impact of fiber failure on the entire ring network reliability, and improving the reliability of the interface is the key of reliability of the SDH ring network.

Key words: communications; wide-area protection; layered region; SDH; fiber; self-healing ring; reliability

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)21-0081-05

0 引言

电力系统的广域保护系统是一种为实时监控电力设备的运行状况, 通过专用信息网络和通信手段获得电力系统中各个监测点的动态实时信息、进而综合判断可能给电力系统带来不良后果的损害, 并采取相应的控制措施消除或减轻损害的电力控制保护系统。按照决策和控制结构划分, 广域保护系统通常有集中式、分布式和分层区域式三种方式。相对于分布式结构和集中式结构, 分层区域式结构的保护系统可以实现全局最优决策, 也可以摆脱对保护中心的过度依赖, 因此得到了普遍应用。分层区

域式结构保护系统的保护功能必须依靠专用通信网络来实现, 专用通信网则一般由通信主干网和区域网组成^[1]。

广域保护系统的可靠性关系到电力系统的安全经济运行, 而保护系统整体的可靠性在一定程度上主要取决于所承载的专用通信网络的可靠性, 当前, 国内对广域保护系统通信网络可靠性的专门性研究还不多。SDH 是一种在光纤上实现数字同步信号的传送、复接、交叉和分接的网络, 有世界统一的网络接口标准, 在组网上多采用自愈环的网络结构。本文以分层区域式保护 SDH 自愈环网和星型网为例, 根据 SDH 光通信原理, 利用状态空间法分析了

二纤单向通道保护环网和星型网络的可靠性模型和可用度评估方法,并阐述了网络冗余和过程层设备的组网结构,对广域保护系统的相关理论计算和工程设计等具有重要的学术意义和参考价值^[2]。

1 分层区域式保护通信主干网和区域网的可靠性研究

电力系统分层区域式广域保护的通信主干网主要用来连接系统保护中心与区域保护中心,而区域网络主要用于连接区域保护中心与变电站和电厂等。一般来说,电力通信网络系统的通信主干网主要采用 SDH 自愈环网的结构,而广域保护的区域网络则可以根据连接的厂站的类型与数量,灵活选择 SDH 自愈环网或 SDH 星型网。

1.1 分层区域式保护 SDH 自愈环网的可靠性模型及可用度评估

在实际的工程应用中,SDH 自愈环一般分为通道保护环和复用段保护环两种组网方式,而二纤单向通道保护环是通道保护环的一种,因为具有传输延时小和协议简单的优点,被普遍应用在电力通信网络系统设计中。二纤单向通道保护环实质上是由 2 路光纤各自组成 2 个独立的环网。在发送端,光发送设备同时向 2 路光纤发送业务和数据信号,信号在主用和备用光纤中沿 2 个相反方向同时流动和传输,在接收端,光接收设备通过倒换开关来选择接收 2 路光纤中信号质量较好的其中 1 路信号,默认接收主用光纤的信号^[3]。当主用光纤的某一段发生故障时,光设备通过倒换开关切换信号,数据和业务信号随即接入备用光纤传输,保障了信号的连续性,二纤单向通道保护环如图 1。

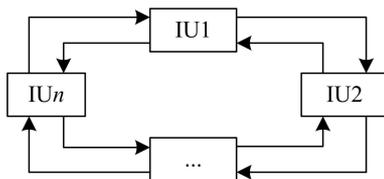


图 1 二纤单向通道保护环

Fig. 1 Two fiber unidirectional path protection ring

假设用通信接口 IU 表示复用模块和保护倒换模块的组合,并设信号在主用光纤沿顺时针方向传输,在备用光纤信号沿逆时针方向传输。这里,如果任何 1 个接口 IU 出现故障,即等同为 SDH 通信主干环网的故障,不同故障程度对 SDH 通信主干网的影响也不同,但都会影响信号的正常传输。从主干网可靠性评估的角度,可以使用图 2 所示的串联系统来表示^[4]。

倒换开关一般都采用并联冗余的结构,因此可

以认为完全可靠,则系统单个接口的可用度可表示为

$$A_{IU} = \frac{\mu_{IU}}{\lambda_{IU} + \mu_{IU}}$$

式中: λ_{IU} 表示设备接口的故障率; μ_{IU} 表示设备接口的修复率。

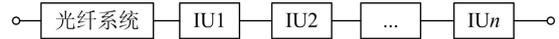


图 2 主干环网的等效串联系统图

Fig. 2 Equivalent backbone ring series system diagram

每区段光纤的独立故障和共模故障模型共同组成了一般光纤通信系统的可靠性模型,因为每一个传输区段的光纤可分别发生独立的故障,也可能由于同样的原因同时发生故障。为了评价系统的可靠性,根据网络法和状态空间法可以建立如图 3 所示的一个区段光纤的状态模型图^[5]。

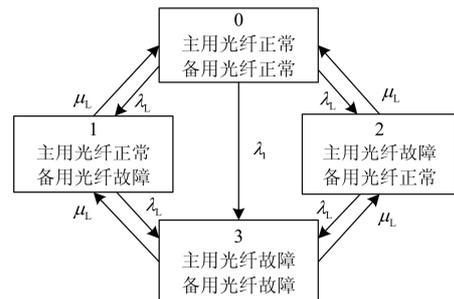


图 3 一个区段光纤的状态模型

Fig. 3 A section of the state of optical model

图 3 中, μ_1 表示 1 根光纤的修复率, λ_1 表示 1 根光纤的故障率, λ_1 表示主用光纤和备用光纤的共模故障率。

设定 $P = [P_0 \ P_1 \ P_2 \ P_3]$, P 中的各元素分别是状态 0、1、2、3 的稳态概率,由此可以求出状态 0、1、2、3 的稳态概率。这里,1 区段主用和备用光纤都正常的概率为 P_0 , 1 区段只有备用光纤有故障的概率为 P_1 , 1 区段只有主用光纤有故障的概率为 P_2 , 1 区段主备用光纤都有故障的概率为 P_3 。因为光纤本身的可靠度较高,假定最多只有 2 个区段的光纤发生故障,而光纤通信系统中其他设备发生故障的概率对整个环网可靠性的影响可以忽略不计,因此,整体光纤通信网络的运行和故障有如下情况^[6]。

- (1) 如果只有 1 个区段光纤已有故障,有三种情况: 1) 假设 1 区段 2 光纤都有故障,则故障概率为 $P_{b3} = C_n^1 P_3 P_0^{n-1}$, 这时的 SDH 自愈环网可以使用。
- 2) 假设 1 区段只有备用光纤有故障,则故障概率为 $P_{b1} = C_n^1 P_1 P_0^{n-1}$, 这时的 SDH 自愈环网可以使用。
- 3)

假设 1 区段只有主用光纤有故障，则故障概率为 $P_{b2} = C_n^1 P_2 P_0^{n-1}$ ，这时的 SDH 自愈环网也可以使用。

(2) 如果 2 个区段光纤有故障，有三种情况：1) 假设 2 个区段都是只有 1 条光纤有故障，又有三种情况：a) 假设 1 个故障区段主用光纤有故障，另一个区段备用光纤有故障，这种情况的故障概率为 $P_{c13} = C_n^2 A_2^2 P_1 P_2 P_0^{n-2}$ ，这时会发生某一节点不能向另外节点发送信息，或者某一节点不能接收另外节点的信息，所以 SDH 自愈环网不可以使用。b) 假设故障区段都是备用光纤有故障，这种情况的故障概率为 $P_{c12} = C_n^2 P_1^2 P_0^{n-2}$ ，这时的 SDH 自愈环网可以使用。c) 假设故障区段都是主用光纤有故障，这种情况的故障概率为 $P_{c11} = C_n^2 P_2^2 P_0^{n-2}$ ，这时的 SDH 自愈环网可以使用。2) 假设 1 个区段主备光纤都有故障，另一区段 1 条光纤故障，则故障概率 $P_{c3} = C_n^2 A_2^2 P_3 P_0^{n-2} (P_2 + P_1)$ ，这种故障比上述 a) 的情况更严重，所以 SDH 自愈环网不可以使用。3) 假设 2 个区段都是 2 条主备光纤同时有故障，则故障概率 $P_{c1} = C_n^2 P_3^2 P_0^{n-2}$ ，这时的 SDH 自愈环网也不可以使用。

(3) 如果全部的区段光纤都正常，则概率 $P_a = P_0^n$ ，这时的 SDH 自愈环网可以使用。

由此，整体光纤通信网络系统的可用度可表示为

$$A_{LS} = P_a + P_{b1} + P_{b2} + P_{b3} + P_{c11} + P_{c12}$$

而 SDH 自愈环网的可用度则可表示为

$$A_{RNET} = \left(\prod_{i=1}^n A_{Ui} \right) \cdot A_{LS}$$

1.2 分层区域式保护通信星型网的可靠性模型和可用度评测

除了上述环形网络的情况，一般的分层区域式广域保护通信网还可采用星型的网络。星型网络的特点是所有子站都和区域保护中心连接，网络结构如图 4 所示，这里的站点 SDH 设备之间均采用有 2 根光纤通信。区域式广域保护通信网采用星型结构的可靠性模型可表示为 2 个 SDH 光端设备间光纤的状态转移图，如图 5 所示。

μ_1 表示 1 区段 2 路光纤的共模失效率， μ_L 表示

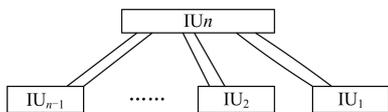


图 4 分层区域式广域保护星型网

Fig. 4 Region wide area protection star network

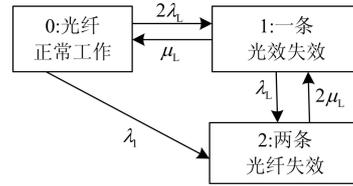


图 5 分层区域式广域保护通信星型网可靠性模型

Fig. 5 Region wide area protection communication star network reliability model

1 区段 1 路光纤的独立修复率， λ_L 表示 1 区段 1 路光纤的独立失效率，假定 3 个状态的稳态概率矩阵表示为 $P = [P_0 \ P_1 \ P_2]$ ，则可以得出光纤的可用度表示为 $A_{Li} = P_0 + P_1$ 。

由以上分析，如果发生网络中某 SDH 设备失效、2 个 SDH 设备之间的 2 条光纤都失效或 1 条光纤失效三种情况中的的任一种情况，本区域式广域保护通信网就宣告失效，由此，区域星型网络本身的可用度可表示为

$$A_{SNET} = \prod_{i=1}^{n-1} A_{SDHi} \prod_{i=1}^{n-1} A_{Li}$$

其中， n 为子站的个数，而整体光纤通信网的可用度可表示为

$$A = A_{zg} \prod_{j=1}^k A_{qyj}$$

其中： k 表示区域网的数目； A_{zg} 表示通信主干网的可用度，一般 $A_{zg} = A_{RNET}$ 。 A_{qyj} 表示编号为 j 的区域式广域保护通信网的可用度，如果是星型网络，则 $A_{qyj} = A_{SNET}$ ，如果是环型网络，则 $A_{qyj} = A_{RNET}$ 。

2 网络冗余和过程层设备组网

通信系统、控制系统和保护系统等子系统的可靠性决定了电力系统及其变电站安全运行的可靠性。作为提高通信网可靠性的主流方式，冗余技术常用作通信组网的主要手段。按照实现方法，冗余包括节点冗余和网络冗余两种，节点冗余要求全部通信设备必须双重备份，相当于建立 2 个完全独立运行的网络，成本很高，应用也不多。网络冗余无需备份，组网成本低，应用较多。例如当通信链路出现故障时，为保证可靠性，IEC62439 作为并行结构的冗余通信协议，可实现无延时信号切换，工作原理如图 6。

图 6 中的链路冗余体 LRE 负责冗余管理和处理重复报文，是网络的核心环节。图 6 中，具有双连接点的 2 个 IED 网络设备，是通过双连接的端口各自连接到 2 个独立的网络上^[7]。当网络设备从线路上接收到 1 帧的数据后，LRE 将会从 2 个端口处提

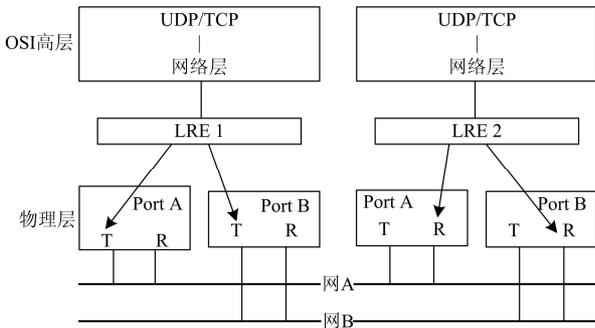


图 6 IEC62439 网络节点模型

Fig. 6 IEC62439 network node model

取第 1 次接收到的数据，并且丢掉一些重复的数据帧。当网络设备接收到上一层的 1 帧数据后，LRE 要在该数据的相关位置上增加一个冗余的标识，再向 2 个端口同时发送数据。

如图 7 所示，按照网络拓扑方式划分，变电站通信网络的过程层设备有点到点直连和组网连接等几种。图 7(a)是采用点到点直连的方式，这种方式不与其他节点共享数据，不存在竞争带宽，实时性好，缺点是需要大量的光缆设备，工程维护不便。图 7(b)是采用交换机组网进行数据传输的方式，交换机具有支持组播技术、虚拟局域网 VLAN 和报文优先级的性能，可以实现数据之间的共享，也可以

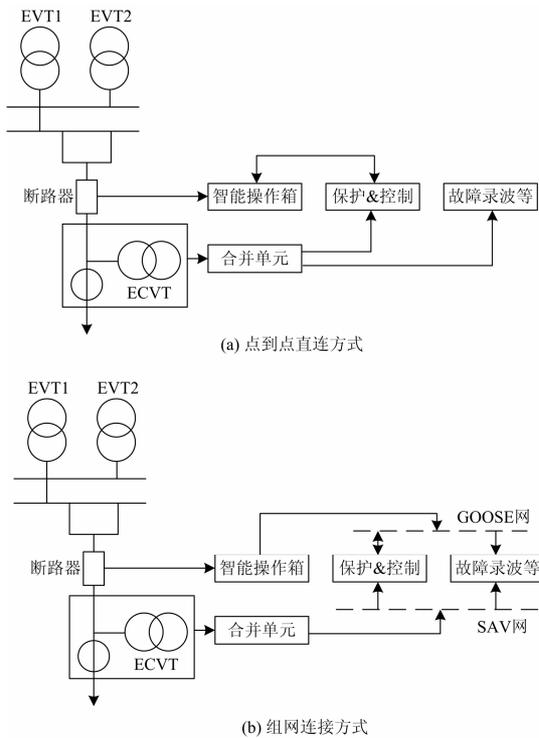


图 7 过程层设备组网结构

Fig. 7 Process layers device networking structure

节省电缆，这种方式的缺点是存在由于交换机排队转发的数据延时。

3 广域保护通信网可靠性例举

目前，电力系统的通信网线路通常使用复合地线光缆或自承式光缆联网，通信线路一般与输电线路并行敷设，因此变电站之间只要有电力线路相连，就有通信线路连接。以 IEEE14 母线系统为例，如图 8 所示，组建 1 个分层区域式广域保护的通信网。这里，电力通信系统可分为 3 个区域，其中站 5 是系统的保护中心，同时作为区域 3 的区域保护中心，而站 2 和站 4 分别是区域 1 和区域 2 的保护中心，站 2、站 4 和站 5 通过光纤环网连接，组成本系统的通信主干网，每个区域网络则为星型方式连接。通过可靠性分析，可得表 1 为网络元素的可靠性基本数据。

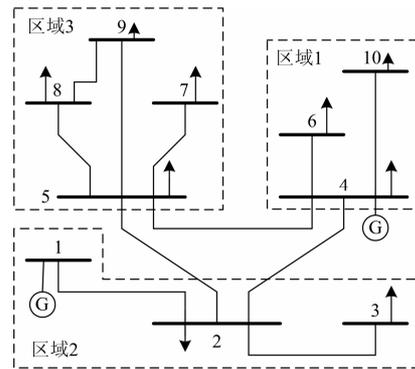


图 8 母线系统与广域保护通信网

Fig. 8 Bus system and wide area communication network

表 1 网络元素的可靠性参数

Table 1 Reliability parameters of network elements

网络元素	设备接口	SDH 光纤	SDH 网络
失效率	λ_{UI}	λ_L	λ_I
$10^{-6}/h$	2.38	13.82	1.19

假设 SDH 自愈环网的光纤修复时间为 48 h，SDH 设备接口的故障修复时间为 24 h，通过计算，可得表 2 为广域保护通信网的可靠性参数。

表 2 广域保护通信网的可靠性参数

Table 2 Wide area protection reliability of communication network

网络名称	接口数量	设备接口可用度	光纤数量	光纤可用度	总体可用度
主干网	3	0.999 824	6	0.999 992	0.999 819
区域网 1	3	0.999 824	4	0.999 939	0.999 765
区域网 2	3	0.999 824	4	0.999 939	0.999 765
区域网 3	4	0.999 765	6	0.999 909	0.999 677

以上数据可以看出, 光纤的故障率虽然高于设备接口的故障率, 但是如果发挥 SDH 自愈环网的通道保护功能, 则可以减小因为光纤故障对整个环网可靠性造成的影响。由此可见, 提高设备接口的可靠性是保证 SDH 环网的可靠性的关键。如果接口数目相同, SDH 自愈环网使用的光纤数量虽然比星型网要多, 但相应的可靠性也比星型网要高。

4 结语

分层区域式的广域保护系统在决策和组网结构方面优势明显, 基于 SDH 的自愈环保护和星型网在电力广域保护通信系统中正得到广泛应用。研究基于 SDH 光网络的分层区域式广域保护通信系统的可靠性模型, 进而得出传输链路细分区段的故障概率和可用度等定量指标, 可以为电力系统广域保护网络的论证设计及通信系统的可靠性评价提供参考和理论依据。

参考文献

- [1] 徐天奇, 尹项根, 游大海, 等. 广域保护系统功能与可行结构分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(3): 94-96.
XU Tian-qi, YIN Xiang-gen, YOU Da-hai, et al. Analysis on functionality and feasible structure of WAPS[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(3): 94-96.
- [2] 易永辉, 王雷涛, 陶永健. 智能变电站过程层应用技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 1-5.
YI Yong-hui, WANG Lei-tao, TAO Yong-jian. Process level application scheme in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 1-5.
- [3] 汪祺航, 吴在军, 赵上林, 等. IEEE1588 时钟同步技术在数字化变电站中的应用[J]. 电力系统保护与控制,

2010, 38(19): 137-141.

WANG Qi-hang, WU Zai-jun, ZHAO Shang-lin, et al. Application of IEEE1588 time synchronization in digital substation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 137-141.

- [4] CHRISTIAN R, JOACHIM B. A new wide area protection system[J]. IEEE Porto Tech Conference, 2001, 9(4): 10-13.
- [5] 熊小萍, 谭建成, 林湘宁. 基于 MPLS 的广域保护通信系统路由算法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 258-259.
XIONG Xiao-ping, TAN Jian-cheng, LIN Xiang-ning. Routing algorithm for communication system in wide-area protection based on MPLS[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 258-259.
- [6] IECTC57. IEC61850-8-1 communication networks and systems in substations-part 8-1: specific communication service mappings (SCSM) to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3[S]. 2003.
- [7] 李强, 窦晓波, 吴在军, 等. 数字化变电站通信网络规划与实时特性改进[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(5): 73-76.
LI Qiang, DOU Xiao-bo, WU Zai-jun, et al. Communication network of digital substation and improvement of real-time performance[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(5): 73-76.

收稿日期: 2014-02-14; 修回日期: 2014-05-02

作者简介:

梅鲁海(1968-), 男, 硕士, 副教授, 高级工程师, 研究方向为通信、电子和信息系統。E-mail: meilh002@163.com