

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200807

面向智能变电站通信网络可靠性研究

李辉¹, 张孝军², 潘华², 毛文奇², 严亚兵¹, 陈罗飞³

(1. 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院, 湖南 长沙 410007; 2. 国网湖南省电力有限公司, 湖南 长沙 410007;
3. 北京博电新力电气股份有限公司, 北京 100176)

摘要: 智能变电站通信系统故障时的零恢复时间和零数据帧丢失问题, 传统的冗余机制无法解决。针对这一问题, 以智能变电站通信网络的可靠性为研究对象, 提出一种并行冗余协议和高可用性无缝环网协议相结合的系统模型。建立站控制层使用并行冗余协议, 过程层使用高可用性无缝环网协议的模型, 通过可靠性框图和成功流法进行可靠性评估。通过算例验证了所提方法的可行性。结果表明, 所提方法能有效地提高通信网络的可靠性, 为智能变电站的发展提供了参考和借鉴。

关键词: 智能变电站; 通信网络; 可靠性框图法; 成功流法; 可靠性

Research on a reliability evaluation method of a communication network for an intelligent substation

LI Hui¹, ZHANG Xiaojun², PAN Hua², MAO Wenqi², YAN Yabing¹, CHEN Luofei³

(1. State Grid Hunan Electric Power Company Limited Research Institute, Changsha 410007, China; 2. State Grid Hunan Electric Power Company Limited, Changsha 410007, China; 3. PONOVO POWER CO., LTD., Beijing 100176, China)

Abstract: The traditional redundancy mechanism cannot be realized when there are problems of zero recovery time and zero data frame loss in the communication system of an intelligent substation. This paper takes the reliability of a communication network of intelligent substations as the research object, and proposes a system model combining a parallel redundancy protocol and a high availability seamless ring network protocol. A model is established by using a redundancy protocol in the station control layer and the ring network protocol in the process layer. The reliability is evaluated by a reliability block diagram and the success flow method. The effectiveness of the method is verified by an example. The results show that the method can effectively improve the reliability of the communication network and provide a reference for the development of an intelligent substation.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5216A0180003) and the Science and Technology Project of State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd. (No. 5216A5180016).

Key words: intelligent substation; communication network; reliability block diagram method; success flow method; reliability

0 引言

坚强智能电网概念的提出, 标志着国网发、输、变、配、用、调度的信息化、数字化、自动化等朝着智能化发展^[1]。智能变电站在智能电网中不仅起着保护、测量和控制等的实现, 而且是构建网络集成平台的基础, 是智能电网开发和创新的理想切入点。通信网络作为智能变电站的重要组成部分, 是

变电站智能化的基础^[2]。通信网络是变电站与主站之间的信息传输通道, 实现全站的信息共享, 其可靠运行对于电网的正常运行至关重要。因此, 研究智能变电站通信网络的可靠性具有一定的应用价值。

目前, 在智能变电站可靠性评估中, 主要有可靠性框图法, 贝叶斯网络法和蒙特卡洛法等。在文献[3]中, 提出一种可靠性评估模型, 用于智能变电站保护系统, 该模型考虑了设备的老化和不完全计划检修。以电路保护系统为例, 通过绘制随时间变化的可靠性曲线并计算电路保护系统的平均无故障

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(5216A0180003); 湖南省电力有限公司科技项目资助(5216A5180016)

运行时间和计划维护成本,对系统的可靠性进行评估。在文献[4]中,提出一种可靠性评估模型,用于智能变电站继电保护系统。该方法根据不同工况分析系统的可靠性。在文献[5]中,从网络可靠性、结构合理性和成本三个方面研究和分析了基于 PRP 和 HSR 网络结构,过程层间隔 HSR 和跨间隔 PRP 组网。仿真验证了该方法的可行性。在文献[6]中,提出了一种新的变电站网络冗余的硬件和软件实现方法,基于 FPGA+CPU 的硬件结构,设计了 MAC 模块、PRP/HSR 模块、存储控制模块和多通道消息传输控制模块,实现了变电站系统中以太网消息的冗余处理。通过实验验证了该方法的可行性。

在此基础上,以智能变电站通信网络的可靠性为研究对象,提出了一种将并行冗余协议和高可用性无缝环网协议相结合的系统模型,使用可靠性框图和成功流法评估模型的可靠性,通过算例验证该方法的有效性和准确性。

1 系统概述

1.1 系统结构

根据 IEC61850 标准,智能变电站网络呈三层两网结构,三层为站控层、间隔层和过程层,两网为站控层网络和过程层网络,如图 1 所示^[7]。

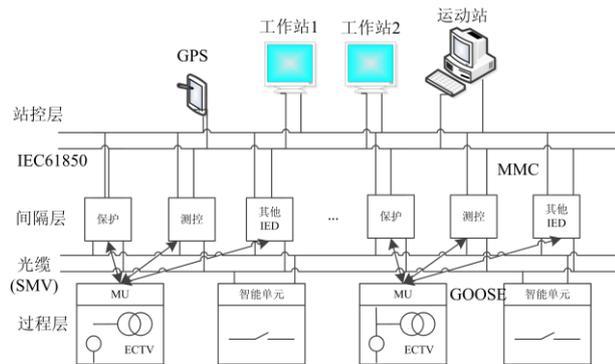


图 1 系统结构

Fig. 1 System structure

- 1) 处理层由智能设备、智能终端和智能组件组成。
- 2) 间隔层由辅助设备组成,如继电保护装置和测控装置等^[8]。
- 3) 站控层主要完成测控,由自动化系统、控制系统和通信系统等组成。

1.2 可靠性指标

1) 可靠性的定义:产品在预期的使用期限内保持某种功能并可以实现指定功能的可能性,用 $R(t)$ 表示, $0 < R(t) < 1$ 。当设备处于故障或故障状态时,

该设备无法完成其应实现的功能,如式(1)所示^[9]。

$$R(t) = P(T > t) \tag{1}$$

式中, T 、 t 分别为系统寿命和规定时间。

2) 不可靠性的定义:在预期时间内故障概率如式(2)所示^[10]。

$$F(t) = P(T \leq t) = 1 - P(T > t) = 1 - R(t) \tag{2}$$

3) 故障概率密度 $f(t)$ 如式(3)所示^[11]。

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \tag{3}$$

式中, $F(t)$ 为不可靠性。

4) 平均寿命(Mean Time To Failure, MTTF)是产品无某种故障工作时间 T 的数学期望,如式(4)所示^[12]。

$$MTTF = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \tag{4}$$

式中, λ 为失效率。

2 组网方案

通信网络的可靠性是智能变电站稳定运行的关键之一^[13]。为了实现整个变电站的高可靠传输,采用并行冗余协议和高可用性无缝环网协议处理整个变电站在发生故障时的可靠性。

2.1 PRP 网络模型

并行冗余拓扑单端口通过冗余盒连接两个 LAN,双端口通过设备以太网端口连接,在图 2 中,LAN A 和 LAN B 分别使用星形拓扑、环形拓扑,LAN A 通过两个子交换机轮流连接到主交换机。LAN B 通过源节点向两个 LAN 发送以太网帧复制^[14]。数据帧在两个局域网中环循,直到达到目标节点。为了避免大量重复帧的出现,除了第一个正确帧外其余帧丢弃。如果数据拥塞而导致帧无法及时到达目标,则目标节点仍然可以从另一链路得到该帧^[15]。

PRP 架构支持无缝冗余。此外,PRP 流程总线架构支持 GOOSE 和 SAV 服务,以满足变电站关键

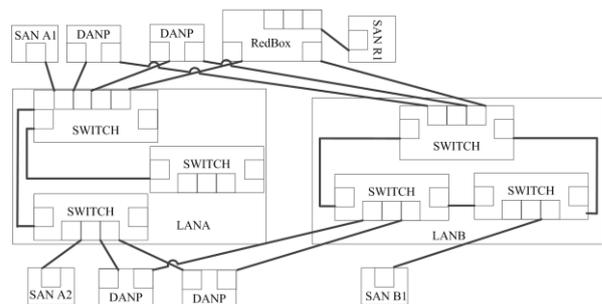


图 2 PRP 协议原理

Fig. 2 PRP protocol principle

信息的特殊实时需求, 并优化网络性能。

2.2 HSR 网络模型

高度可用性无缝环网协议如图 3 所示。这是一种适用于具有高实时通信信息的变电站自动化系统的新协议。

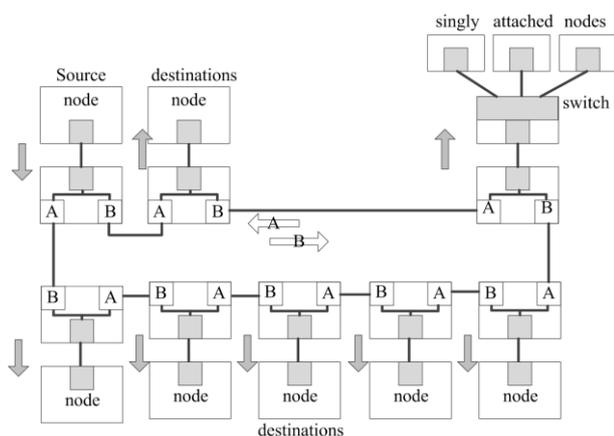


图 3 HSR 协议原理

Fig. 3 HSR protocol principle

与 PRP 网络不同, 它采用单网络拓扑, 由双端口智能电子设备、冗余盒等组成^[16]。源节点将数据帧 C 复制到数据帧 A 和 B 中, 用 HSR 标签标识。数据帧 A 和 B 分别按顺、逆时针发送到网络, 保证至少一个数据帧成功到达目标节点。

目的节点的两个端口接收两个相同的帧, 删除先接收到的帧 HSR 标签, 将帧传到上层, 然后将任一冗余帧转发到下一跳节点^[17]。HSR 环网无法直接接入单端口节点, 不能在 HSR 帧中表达 HSR 标签。单端口节点只能通过冗余盒分割成多个通信端口, 参与 HSR 环网通信。HSR 可以大大提高传动机制的可靠性。

HSR 和 PRP 的原理是一样的, 如果一条传输路径阻塞, 另一条路径还可以提供有效的传输。

2.3 PRP-HSR 网络模型

在变电站通信网络中有许多交换机用于信息转发和控制^[18]。交换机使系统网络通信变得更为方便, 但是消息处理并不透明, 从而导致无法控制的延迟和不可靠的网络冗余。文中提出了一种基于 PRP 和 HSR 的新架构。

HSR-PRP 网络方案如图 4 所示。处理层采用 HSR 结构, 站控层采用 PRP 结构。双重连接的节点通过冗余盒的角色互连到两个网段。终端节点可以从 A 和 B 网络接收信息。终端节点除了检测并记录发送节点的发送状态外, 还可以通过定期传回数据帧来确定通信状态^[19]。在下一部分中, 将对该方案

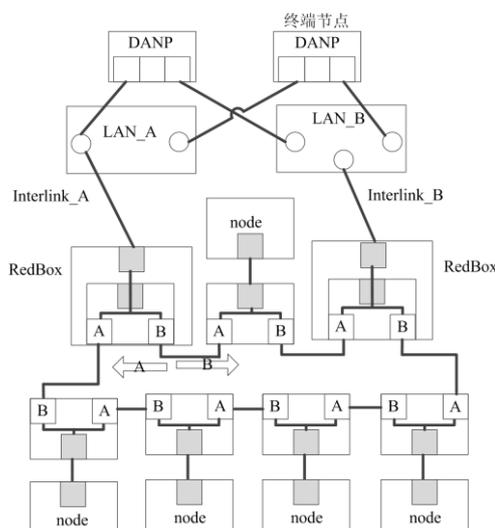


图 4 PRP-HSR 网络

Fig. 4 PRP-HSR network

进行数学评估, 以确定该结构的可靠性^[20]。

3 可靠性分析

3.1 算例参数

可靠性评估需要获取变电站自动化系统组件的可靠性数据。系统主要由智能电子设备 IED、合并单元 MU、开关(Switch, SW)、网络接口(Ethernet Media, EM)、人机界面(Human Machine Interface, HMI)、远程终端单元(RTU)等^[21]。变电站自动化系统可以看作是串联或并联结构的组合。在可修复的系统中可以通过修理或更换零件来解决有缺陷的零件。如果是不可修复的系统, 故障后无法将其恢复到正常状态^[22]。确定了表 1 中所示每个组件的可靠性, 以便准确客观地计算系统的可靠性指标。

表 1 部件可靠性

Table 1 Components reliability

元件	故障率/年
交换机	0.02
合并单元	0.006 7
同步时钟	0.006 7
人机交互接口	0.1
智能电子设备	0.006 7
冗余盒	0.006 7
远方终端单元	0.006 7
以太网网络接口	0.001

变电站的主系统使用 3/2 接线。可靠度函数如式(5)所示^[23]。

$$R_i(t) = p_i(t) = e^{-\lambda_i t} \quad (5)$$

式中, λ_i 为部件故障率。

3.2 基于可靠框图法的可靠性分析

过程层采用 HSR 结构, 站控层采用 PRP 结构。两者组合应用于变电站通信网络系统, 并使用可靠性框图方法分析体系结构的整体可靠性。通过对系统结构的分析, 验证了系统结构的可靠性。图 5 所示 PRP-HSR 系统的可靠性框图。

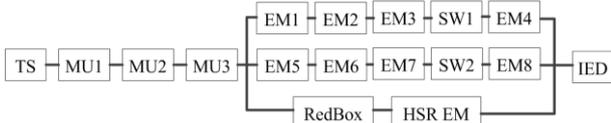


图 5 基于 PRP-HSR 的可靠性框图

Fig. 5 Reliability block diagram based on PRP-HSR

从上述推论可知, 可得该架构的可靠性函数

$R_{PRP-HSR}$ 和 T_{MTTF} 如式(6)和式(7)所示^[24]。

$$R_{PRP-HSR}(t) = p_{TS} \times p_{MU1} \times p_{MU2} \times p_{MU3} \times [1 - (1 - p_{EM}^4 p_{SW})^2 \times (1 - p_{RED} [p_{EM}^5 + 5p_{EM}^4 (1 - p_{EM})])] \times p_{IED} \quad (6)$$

$$T_{MTTF} = \int_0^{\infty} R_{PRP-HSR}(t) dt = 27.5(y) \quad (7)$$

式中: $R_{PRP-HSR}$ 为 PRP-HSR 的可靠度; T_{MTTF} 为方案的平均寿命。

根据 PRP、HSR、PRP-HSR 架构, 分别获得 T_{MTTF} 值。如图 6 所示, 使用 MATLAB 软件获取系统可靠性, 包括时间曲线。从图中可以看到, 可靠性指标随着时间的推移逐渐降低。其中, 基于 PRP-HSR 的可靠性最高, HSR 可靠性位于中间, PRP 的可靠性最低。即使时间轴延长到 9×10^4 h, PRP-HSR 体系结构仍可以保持 0.83 的置信度。因此, 与改进之前相比, 站控层采用 PRP, 过程层采用 HSR, 大大提高了变电站网络方案的可靠性。

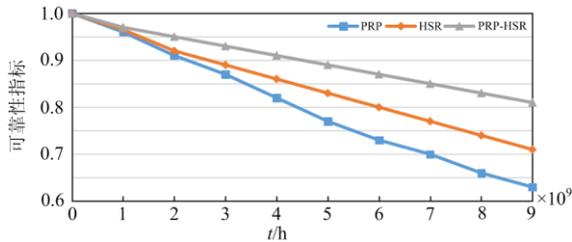


图 6 改进前后可靠性曲线对比

Fig. 6 Comparison of reliability curves before and after improvement

3.3 基于成功流法的可靠性分析

根据数字变电站 PRP 和 HSR 架构, 描绘了相应的成功流程图, 如图 7 所示。因此, 可以列出许

多概率方程。从图的开始到结束, 涉及许多数据流和组件。为了获得整个变电站的成功概率, 需要对组件进行编码, 使用成功流法计算可靠性。假设变电站的过程层中有三个 HSR 环网。整个计算过程如式(8)所示。

$$P_{s1} = P_{c1}, P_{s2} = P_{c2}, P_{s3} = P_{c3} \quad (8)$$

$$P_{s4} = P_{c4}, P_{s5} = P_{c5}, P_{s6} = P_{c6}$$

式中: p_{si} 为编号 i 的信号流成功概率; p_{ci} 为组件 i 成功概率。

在通过元件 37 之前, 数据流是彼此独立的。数字变电站中使用的许多环状间隔具有相似的成功流结构图。三个环结构的计算结果相同, 环网 1 信号流如式(9)所示。

$$P_{s13} = P_{c7} P_{s1}, P_{s7} = P_{c8} P_s, P_{s8} = P_{c9} P_s, P_{s15} = P_{c10} P_s \\ P_{s22} = P_{c22} P_s, P_{s32} = P_{c23} P_s, P_{s24} = P_{c24} P_s \quad (9)$$

通过环网 1 中或门输出的数据流表如式(10)所示^[25]。

$$P_{s31} = 1 - (1 - p_{s32})(1 - p_{s23})(1 - p_{s24}) \quad (10)$$

编号为 37 的元素逻辑与门组合了三个独立的数据流。这些数据流处于处理层的三个独立环中, 逻辑和门集合来自过程层数据流, 发送到交换机, 站控层数据流在两个局域网中传输。

因此, p_{s37} 和 p_{s39} 求和成功概率如式(11)和式(12)所示。

$$P_{s37} = P_{s34} P_{s35} P_{s36} = (P_{c34} P_{s31})^3 = (P_{c34} [1 - (1 - p_{s22})(1 - p_{s23})(1 - p_{s24})])^3 \quad (11)$$

$$P_{s39} = P_{c39} P_{s37} = P_{c39} (P_{c34} [1 - (1 - p_{s22})(1 - p_{s23})(1 - p_{s24})])^3 \quad (12)$$

从图 6 可以看出, 整个系统是对称的。在变电站中运行的智能电子设备配有两个独立的网络接口和 IP 网络。可以将智能电子设备连接到两个局域网。因此, 交换机 A 和 B 的整个推导过程相同, 讨论一个即可。通过 HMI 和 RTU 传输的数据流分别表示为 p_{s47} 和 p_{s48} 。

为了简化方程, 引入 a_1 、 a_2 、 a_3 、 b_1 、 b_2 、 b_3 分别代表各自系数, 如式(13)至式(16)所示。

$$P_{s47} = P_{c47} P_{s45} = P_{c47} (P_{c43} P_{c40} P_{s38} + P_{c41} P_{c39} P_{s37} - P_{c43} P_{c40} P_{s38} P_{c41} P_{c39} P_{s37}) = a_1 p_{s37} + a_2 p_{s38} - a_1 a_2 p_{s37} p_{s38} \quad (13)$$

$$P_{s48} = b_1 p_{s37} + b_2 p_{s38} - b_1 b_2 p_{s37} p_{s38} \quad (14)$$

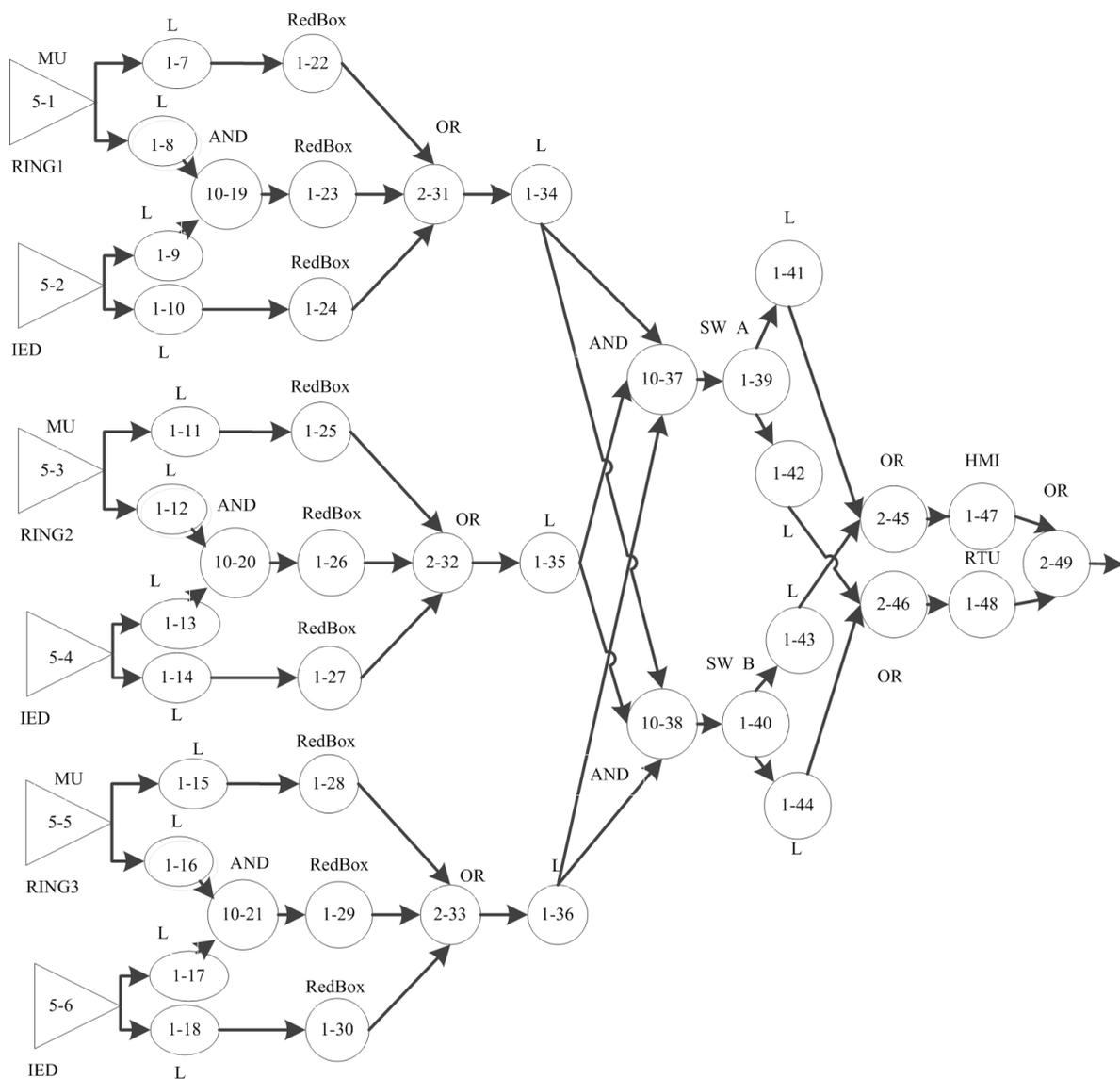


图 7 系统成功流模型图

Fig. 7 System success flow model diagram

$$\begin{cases} a_1 = p_{c39} p_{c41} p_{c47} \\ a_2 = p_{c40} p_{c43} p_{c47} \\ a_3 = p_{c39} p_{c41} p_{c47} p_{c40} p_{c43} p_{c47} \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} b_1 = p_{c39} p_{c42} p_{c48} \\ b_2 = p_{c40} p_{c44} p_{c48} \\ b_3 = p_{c39} p_{c42} p_{c48} p_{c40} p_{c44} p_{c48} \end{cases} \quad (16)$$

变电站系统最终输出信号流的成功概率如式(17)和式(18)所示。

$$p_{s49} = 1 - (1 - p_{c47})(1 - p_{c48}) = p_{s37}c_1 + p_{s38}c_2 + p_{s37}p_{s38}c_3 + p_{s37}^2c_4 + p_{s38}^2c_5 + p_{s37}^2p_{s38}c_6 + p_{s38}^2p_{s37}c_7 + p_{s37}^2p_{s38}^2c_8 \quad (17)$$

$$\begin{cases} c_1 = a_1 + b_1 \\ c_2 = a_2 + b_2 \\ c_3 = b_2 + a_1a_2 + a_2b_1 - a_1b_2 \\ c_4 = -a_1b_1 \\ c_5 = -a_2b_2 \\ c_6 = a_1b_1b_2 + a_1a_2b_1 \\ c_7 = a_2b_1b_2 + a_1a_2b_2 \\ c_8 = a_1a_2b_1b_2 \end{cases} \quad (18)$$

式(17)表明变电站数据流受共同因素影响, 成功流计算值存在微小的差异。将二阶降为一阶, 如式(19)所示。

$$P_{s49} = (c_1 + c_4)P_{s37} + (c_2 + c_5)P_{s38} + (c_3 + c_6 + c_7 + c_8)P_{s37}P_{s38} \quad (19)$$

由于变电站具有全双工链路的特点，两个网络发送的输出数据 p_{s37} 和 p_{s38} 流彼此独立。由于两个数据流具有相同的功能，因此可以将它们视为彼此的备份关系。因此，由等式(19)获得的输出信号的数据流由等式(20)表示。

$$P_{s49} = (c_1 + c_4)P_{s37} + (c_2 + c_5)P_{s37} + (c_3 + c_6 + c_7 + c_8)P_{s37}^2 \quad (20)$$

最后，通过代入相关组件的可靠性，可以计算具有 PRP-HSR 结构的变电站通信网络信息流成功的概率。计算结果为 0.999 269，表明该体系结构非常可靠。因此，其抵抗单故障的能力也非常强。该结构可以满足智能变电站的需求，冗余协议机制也非常适合实际工程应用。

4 结论

文中针对智能变电站通信网络故障时零恢复时间和零数据帧丢失问题，提出了一种将并行冗余协议和高可用性无缝环网协议相结合的系统模型，使用可靠性框图方法和成功流程方法评估模型的可靠性，并通过算例验证该方法的可行性。结果表明，该方法有效改善了通信网络的可靠性，并具有一定的实际工程应用价值。考虑到当前实验设备和数据的规模，变电站通信网络可靠性研究仍处于起步阶段，在此基础上，逐步改进和完善将是下一步工作的重点。

参考文献

[1] 王利平, 庞晓艳, 朱雨, 等. 基于物联网和移动互联网的二次设备运维技术研究与应用[J]. 中国电力, 2019, 52(3): 177-184.
WANG Liping, PANG Xiaoyan, ZHU Yu, et al. Research and application of secondary equipment operation and maintenance technology based on internet of things and mobile interconnection[J]. Electric Power, 2019, 52(3): 177-184.

[2] 张婕, 曾国辉, 赵晋斌, 等. 基于改进冒泡排序的模块化多电平换流器电容电压均衡策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 92-99.
ZHANG Jie, ZENG Guohui, ZHAO Jinbin, et al. Capacitor voltage equalization strategy for modular multilevel converter based on improved bubble sorting[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 92-99.

[3] 郭升, 童晓阳, 王洪彬. 计及设备老化与计划检修的智能变电站保护系统可靠性评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 97-104.

GUO Sheng, TONG Xiaoyang, WANG Hongbin. Reliability evaluation method of intelligent substation protection system considering equipment aging and planned maintenance[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 97-104.

[4] 叶远波, 谢民, 王嘉琦, 等. 基于 Markov 模型与 GO 法的智能变电站继电保护系统实时可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(2): 47-55.
YE Yuanbo, XIE Min, WANG Jiaqi, et al. Real time reliability analysis of intelligent substation relay protection system based on Markov model and GO method[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(2): 47-55.

[5] 何金栋, 王宇, 赵志超, 等. 智能变电站嵌入式终端的网络攻击类型研究及验证[J]. 中国电力, 2020, 53(1): 81-91.
HE Jindong, WANG Yu, ZHAO Zhichao, et al. Research and verification on network attack types of embedded terminal in smart substation[J]. Electric Power, 2020, 53(1): 81-91.

[6] 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 dual network redundant equipment and its implementation for intelligent substation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47 (11): 151-156.

[7] 刘大鹏, 王建勋, 崔运海, 等. 智能变电站二次回路高可视化平台设计及研究[J]. 自动化技术与应用, 2019, 38(7): 167-171.
LIU Dapeng, WANG Jianxun, CUI Yunhai, et al. Design and research of high visualization platform for secondary circuit of intelligent substation[J]. Automation Technology and Application, 2019, 38(7): 167-171.

[8] 王剑利, 张金柱, 吉金芳, 等. 生物质燃煤耦合发电技术现状及建议[J]. 华电技术, 2019, 41(11): 32-35.
WANG Jianli, ZHANG Jinzhu, JI Jinfang, et al. Status and suggestions of biomass coal-fired coupling power generation technology[J]. Huadian Technology, 2019, 41(11): 32-35.

[9] 谷云东, 马冬芬, 程红超. 基于相似度改进梯度提升决策树的电力负荷预测[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 41(23): 1234-1239.
GU Yundong, MA Dongfen, CHENG Hongchao. Power load forecasting based on improved gradient lifting decision tree[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 41(23): 1234-1239.

- [10] 王冬青, 李刚, 何飞跃. 智能变电站一体化信息平台的设计[J]. 电网技术, 2010, 34(10): 20-25.
WANG Dongqing, LI Gang, HE Feiyue. Design of integrative information platform for smart substations[J]. Power System Technology, 2010, 34(10): 20-25.
- [11] 马一杰, 陈君, 刘松. 基于长短时记忆网络的电力负荷异常检测[J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2020, 42(增刊 2): 55-59.
MA Yijie, CHEN Jun, LIU Song. Power load anomaly detection based on long and short time memory network[J]. Journal of Yunnan University: Natural Science Edition, 2020, 42(S2): 55-59.
- [12] 唐耀华, 郭为民, 崔杨. 水-火电机频率控制策略研究[J]. 中国电力, 2020, 53(6): 153-161.
TANG Yaohua, GUO Weimin, CUI Yang. Study on frequency control strategy of water thermal power unit[J]. Electric Power, 2020, 53(6): 153-161.
- [13] 陈飞建, 吕元双, 樊国盛, 等. 基于信息融合的智能变电站继电保护设备自动测试系统[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 158-163.
CHEN Feijian, LÜ Yuanshuang, FAN Guosheng, et al. Automatic test system for relay protection equipment of intelligent substation based on information fusion[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 158-163.
- [14] 顾志祥, 孙思宇, 孔飞, 等. 燃气冷热电分布式能源系统设计优化综述[J]. 华电技术, 2019, 41(3): 8-13, 42.
GU Zhixiang, SUN Siyu, KONG Fei, et al. Design optimization of gas cooling, heating and power distributed energy system[J]. Huadian Technology, 2019, 41(3): 8-13, 42.
- [15] 毛文奇, 王舶仲, 蒋毅舟, 等. 高压隔离开关分合闸位置监测技术的研究综述及展望[J]. 智慧电力, 2019, 47(8): 112-119.
MAO Wenqi, WANG Bozhong, JIANG Yizhou, et al. Review and prospect of the monitoring technology of the opening and closing position of high voltage disconnectors[J]. Smart Power, 2019, 47(8): 112-119.
- [16] NAHMAN J, SALAMON D. Mutual interference of neighboring grounding systems and approximate formulation[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 41(12): 151-156.
- [17] MOSES V, HATHERLEY R, BISHOP Ö T. Bioinformatic characterization of type-specific sequence and structural features in auxiliary activity family 9 proteins[J]. Biotechnology for Biofuels, 2016, 9(1): 88-94.
- [18] HOU Kaiyuan, SHAO Guanghui, WANG Haiming, et al. Research on practical power system stability analysis algorithm based on modified SVM[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(2): 119-125. DOI: 10.1186/s41601-018-0086-0.
- [19] PATEL G K, DABHI V K, PRAJAPATI H B. Clustering using a combination of particle swarm optimization and K-means[J]. Journal of Intelligent Systems, 2017, 12(3): 457-469.
- [20] GAUTAM J V, PRAJAPATI H B, DABHI V K, et al. Empirical study of job scheduling algorithms in Hadoop MapReduce[J]. Cybernetics and Information Technologies, 2017, 21(1): 146-163.
- [21] CAETANO C E F, LIMA A B, PAULINO J O S, et al. A conductor arrangement that overcomes the effective length issue in transmission line grounding[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 46(5): 159-162.
- [22] HU Jianjiang, FICHTNER M, BARICCO M. Preparation of Li-Mg-N-H hydrogen storage materials for an auxiliary power unit[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(27): 17144-17148.
- [23] JIA Zhiwei, WANG Lijun, ZHANG Jinchuan, et al. High efficiency, low power-consumption DFB quantum cascade lasers without lateral regrowth[J]. Nanoscale Research Letters, 2017, 12(1): 88-95.
- [24] AZUMAYA C M, DAYS E L, VINSON P N, et al. Screening for AMPA receptor auxiliary subunit specific modulators[J]. PLOS ONE, 2017, 12(3): 1523-1538.

收稿日期: 2020-07-09; 修回日期: 2020-09-14

作者简介:

李 辉(1983—), 男, 通信作者, 博士, 高级工程师, 研究方向为高压直流输电、电力系统继电保护及自动化技术; E-mail: jingdingzh666@163.com

张孝军(1969—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电网安全经济运行与管理工作;

潘 华(1966—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力系统自动化、继电保护等方面的科研和生产管理工作。

(编辑 张爱琴)