

数字化变电站系统可靠性与可用性研究

侯伟宏, 张沛超, 胡炎

(上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

摘要: 基于 IEC 61850 的数字化变电站系统具有传统变电站系统所不同的结构与特点。现有的变电站可靠性分析方法多针对单装置或单间隔, 鲜有针对整个变电站自动化系统。介绍了基于 IEC 61850 的数字化变电站系统的典型结构, 分析了提高数字化变电站可靠性的主要方法, 提出一种计算全站可靠性的方法。该方法将数字化变电站系统划分为通信系统、控制系统、保护系统以及站控层系统。利用可用性框图, 分别计算每个子系统可靠性参数, 然后通过系统可用性框图, 计算出整个变电站的可靠性参数。利用该方法对一典型数字化变电站系统的可靠性进行了分析计算。结果表明, 在合理采用装置冗余并采用基于 IEC 62439-PRP 的并行网络冗余后, 数字化变电站系统的可靠性能够满足 IEC 61508 的要求。

关键词: IEC 61850; 数字化变电站系统; 可靠性; 可用性框图; 并行冗余协议

Reliability and availability study of the digital substation system

HOU Wei-hong, ZHANG Pei-chao, HU Yan

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The digital substation system based on IEC 61850 is different from the conventional substation system in the architecture and the characteristics. While the method of the reliability analysis for a single device or a single bay has been studied extensively, the method for the entire substation automation system is still very limited so far. This paper analyzes the typical architecture of the digital substation, and shows the main methods to improve the reliability of the system. A method to calculate the reliability indices of the entire substation is then introduced. The method divides the digital substation system into communication systems, control systems, protection systems and station level system. First, the availability block diagram is employed to calculate the reliability indices for each subsystem, and then the reliability indices of the entire substation are deduced. To demonstrate the method, the reliability indices of a typical digital substation are calculated and discussed. The result shows that the reliability of the digital substation system can meet the requirements of IEC 61508 after adopting a reasonable device redundancy and network redundancy based on IEC 62439-PRP.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50807037).

Key words: IEC 61850; digital substation system; reliability; availability block diagram; parallel redundancy protocol

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)14-0034-05

0 引言

与传统变电站自动化系统相比, 基于 IEC61850 的数字化变电站^[1-2]无论在构成元件还是在系统结构上都有着很大的差异。从元件上, 数字化变电站系统仍分为一次设备和二次设备两个层面。但由于非常规互感器、智能断路器及以太网等新技术的应用, 使得一、二次设备的联系更为紧密; 从结构上, 数字化变电站分为过程层、间隔层和站控层, 各层

内部以及各层之间都是采用高速以太网进行数据通信。网络直接参与系统功能实现并直接影响到整个系统的可靠性。这些都决定了数字化变电站的可靠性分析具有特殊性。另一方面, 现有的变电站可靠性分析方法多针对单装置或单间隔^[3-6], 鲜有针对整个变电站自动化系统。

新技术的采用不能以降低系统可靠性和可用性为代价。传统变电站系统的可靠性满足 IEC 61508^[7]的要求, 那么如何分析和提高数字化变电站的可靠性? 本文根据数字化变电站系统的特点, 介绍了提高数字化变电站可靠性的基本途径, 提出一种计算

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50807037)

全站可靠性的方法。该方法将数字化变电站系统划分为通信、控制、保护和站控层等子系统。利用可用性框图,分别计算每个子系统可靠性参数,然后通过系统可用性框图,计算出整个变电站的可靠性参数。

1 可靠性和可用性

IEC 60870-4 标准对可靠性的定义为:“设备或系统在特定时间内和特定情况下,执行其预期功能的能力”^[8]。数字化变电站系统的可靠性是通过一系列可靠性参数来衡量的。

1) 可靠度 R 。可靠度是指设备或系统在规定条件和时间内完成规定功能的概率。实际运用中假设设备或系统的故障分布是指数分布,其可靠度表达式为:

$$R(t) = e^{-\lambda t}, (t \geq 0) \quad (1)$$

其中, λ 为设备或系统的故障率。

2) MTTF 和 MTBF。平均无故障时间 (MTTF) 是指设备或系统出现第一次故障的平均期望时间。平均修复时间 (MTTR) 是指故障设备或系统得到修复所用的平均时间。两次故障之间的平均时间 (MTBF) 包括平均修复时间。因此:

$$MTBF = MTTF + MTTR \quad (2)$$

3) 可用度 A 。可用度^[8]是描述可修设备或系统的可靠性指标,表示其处于正常工作的稳态概率。可用度表达式为:

$$A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (3)$$

设备或系统之间的基本连接关系分为串联和并联两种^[9]。在串联系统中,任一设备或系统失效,都会造成整个系统失效,故串联系统可用度为:

$$A = \prod_{i=1}^n A_i \quad (4)$$

而在并联系统中,只有当并联设备或系统同时失效时,才会造成系统失效。故并联系统可用度为:

$$A = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - A_i) \quad (5)$$

4) 不可用度 q 。

$$q = 1 - A = \frac{MTTR}{MTTF + MTTR} \quad (6)$$

2 提高数字化变电站可靠性的基本途径

根据数字化变电站的特点,提高其可靠性的基本途径有^[10]: (1) 用光缆代替铜缆,用以太网总线代替二次连接导线,以大幅度减少系统中元件的数

量; (2) 利用网络冗余和功能冗余提高系统可靠性; (3) 充分利用系统和元件的自检和监视以提高系统可靠性。

本文主要讨论采用装置或系统冗余以及网络冗余以提高数字化变电站系统可靠性与可用性。

2.1 功能冗余

与传统变电站系统一样,可以采用功能冗余^[10-11]以提高系统可靠性。以保护功能为例,图 1 中两套保护系统具有完全独立的互感器、合并单元、交换机及保护 IED。

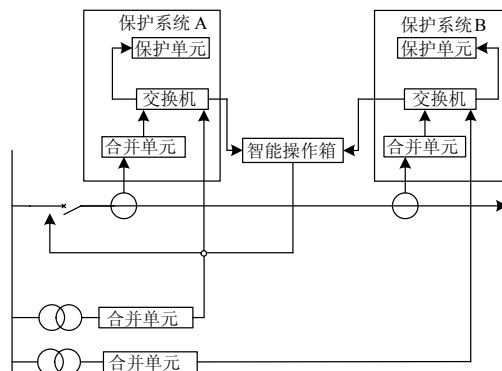


图 1 功能冗余示例

Fig.1 An example of function redundancy

2.2 网络冗余

与传统变电站不同的是,数字化变电站内的通信网络直接参与保护与测控的功能,其可靠性将直接影响变电站自动化系统的可靠性。为了提高通信网络的可靠性,通常采用的方法是网络冗余设计。

IEC 62439 标准中提出利用并行冗余协议 PRP (Parallel Redundancy Protocol, PRP) 以提高系统的可靠性^[12-13]。基于 PRP 的冗余网络要求装置包含双以太网控制器和双网络端口,分别接入两个完全独立的以太网,实现装置通信网络的冗余。如图 2 所示。

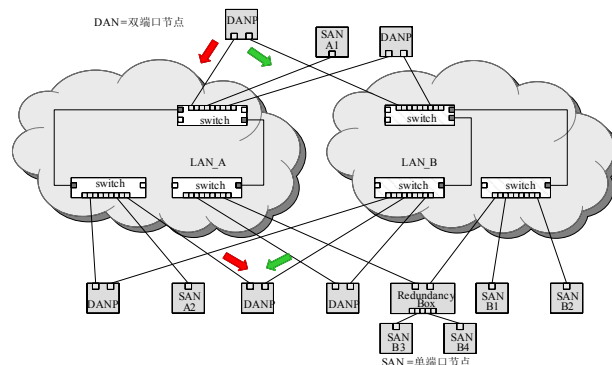


图 2 基于 PRP 的网络示意图

Fig.2 Network diagram based on PRP

并行冗余协议的特点有：(1) 装置内具有链路冗余实体 (Link Redundancy Entity)，该实体将来自应用层的数据同时发往双端口。而在接受数据时，该实体同时接收双端口的数据，保留第一个数据包并剔除重复数据包。(2) 两个网络可以采用任意拓扑结构。如 A 网采用环型拓扑，B 网采用星型拓扑。(3) 可以采用通用交换机。

IEC 将在 IEC 61850 Ed2.0 中建议采用基于 PRP 的并行冗余网络。下文模型中，假定变电站的站控层网络和过程层网络均采用基于 PRP 的网络结构。

3 可用性计算

采用基于PRP并行冗余网络的数字化变电站系统如图3、4所示。发生链路或交换机故障时，双网之间能够进行无缝切换。站控层包括两套独立的系统：就地监控 (Station HMI) 和远动系统 (RTU)，任一系统正常工作即可完成对变电站的监控。就地监控和RTU具有双网络端口，通过交换机分别接入两个通信网络中。间隔层考虑有18个间隔，并各自安装间隔控制单元。间隔内保护系统采用双重化配置，两套保护完全独立。间隔保护单元与间隔控制单元皆具有双网络端口，分别通过交换机接入两个通信网络中。

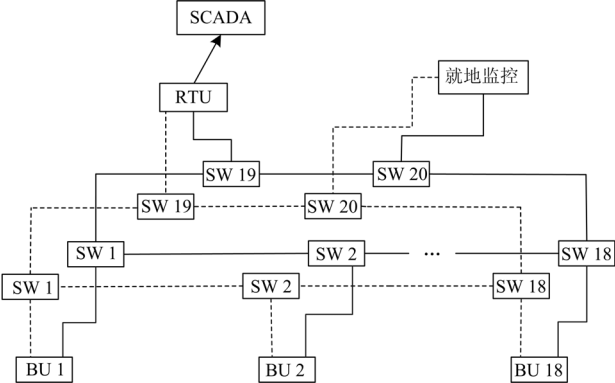


图3 基于 PRP 的站控层总线
Fig.3 Station bus based on PRP

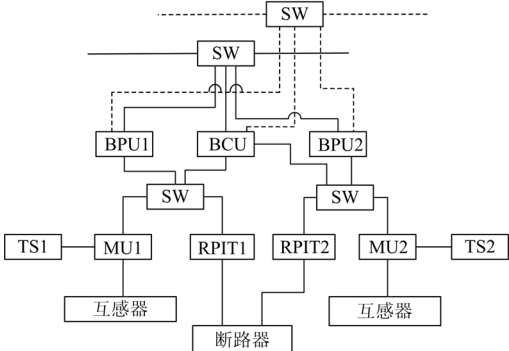


图4 基于 PRP 的过程层总线
Fig.4 Process bus based on PRP

在后续的图表中采用下述符号：TS-同步时钟；MU-合并单元；RPIT-远方智能 I/O；SW-交换机；EM-网络介质（如光纤）；BCU-间隔控制单元；BPU-间隔保护单元；BU-间隔单元；RTU-远方终端单元。

以下计算采用表 1 所列的元件可靠性参数。

表 1 数字化变电站元件可靠性参数

Tab.1 Reliability data of the digital substation components

元件类型	故障率/y	MTTF / y	q(10 ⁻⁶)
TS	0.006 7	150	18.265
MU	0.006 7	150	18.265
SW	0.02	50	54.792
EM	0.001	1 000	2.739 7
BPU	0.006 7	150	18.265
BCU	0.006 7	150	18.265
RPIT	0.005	200	13.698
就地监控	0.1	10	273.97
RTU	0.006 7	150	18.265

说明：

假定网络介质可靠性远大于装置，故障率为 0.001/年。

传统保护的典型 MTTF 为 100 年^[4]。由于 I/O 下放，全数字化保护装置可靠性较传统保护更高，假定其 MTTF 为 150 年（则故障率为 0.0067/年）。由于 MU 基于硬件实现，假定其 MTTF 也可达到 150 年^[14]。

根据现有厂家提供的数据，交换机的 MTTF 最高为 50 年，即故障率为 0.02/年。

假定所有设备的 MTTR 为 24 h。

3.1 通信系统

上述基于 PRP 的并行冗余通信网络中，两个网络均是由 20 台（站控层 2 台、间隔层 18 台）交换机通过网络介质相连而成的环网。

环网拓扑对于环路上任一链路的故障都提供了一定程度的冗余。环网拓扑正常通信的条件是所有交换机都正常工作，且至多只能有一条链路出现故障。因此链路可靠性表达式为：

$$A = \sum_{i=0}^1 C_n^i A_{em}^{n-i} (1 - A_{em})^i \quad (7)$$

其中：A_{em} 为网络介质可用度表达式；n 为环网中交换机之间的链路总数。

故上述基于 PRP 的并行冗余通信系统的可用性框图如图 5。

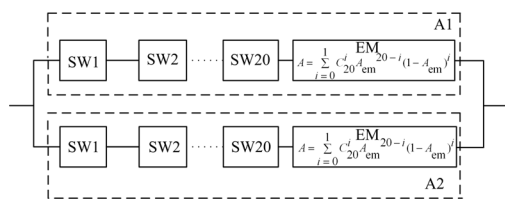


图5 并行冗余通信系统可用性框图

Fig.5 Availability block diagram of the parallel redundant communication system

由公式(4)、(5)、(7)及表1数据,计算基于PRP的并行冗余通信系统的可用度得:

$$A_{Com} = 1 - (1 - A_1)(1 - A_2) = 0.999\ 998\ 8$$

其中:

$$A_1 = A_2 = \sum_{i=0}^{20} A_{SWi} \sum_{i=0}^1 C_{20}^i A_{EM}^{20-i} (1 - A_{EM})^i$$

3.2 间隔保护系统

在数字化变电站系统内分析保护系统可用性时,主要考虑网络介质、合并单元、断路器IED、同步时钟和交换机等的影响。间隔保护系统采用两套完全独立的保护单元,任一保护单元正常工作,即可完成保护功能。故间隔保护系统可用性框图如图6。

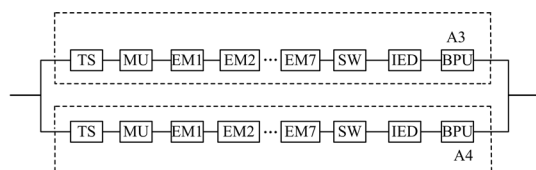


图6 冗余保护系统可用性框图

Fig.6 Availability block diagram of the redundant protection system

由公式(4)、(5)及表1数据,计算采用功能冗余后的间隔保护系统可用度得:

$$A_{PR} = 1 - (1 - A_3)(1 - A_4) = 0.999\ 999\ 9$$

其中:

$$A_3 = A_4 = \prod_{i=0}^7 A_{EMi} \times A_{TS} \times A_{MU} \times A_{SW} \times A_{IED} \times A_{BPU}$$

3.3 间隔控制系统

间隔控制系统内的控制单元具有双网络端口,通过网络介质分别接于两个并行的冗余通信系统中,实现控制系统通信的冗余。故间隔控制系统可用性框图如图7。

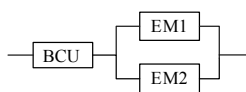


图7 间隔控制系统可用性框图

Fig.7 Availability block diagram of the bay control system

由公式(4)、(5)及表1数据,计算间隔控制系统可用度得:

$$A_{Con} = A_{BCU} \times [1 - (1 - A_{EM1})(1 - A_{EM2})] = 0.999\ 979\ 3$$

3.4 站控层系统

站控层系统包括两套系统:就地监控系统(Station HMI)与远动系统(RTU)。任一系统正常工作,即可完成对变电站的监控。且就地监控和RTU皆具有双网络端口,通过网络介质分别接入两个并行冗余通信系统中。故站控层系统的可用性框图如图8。

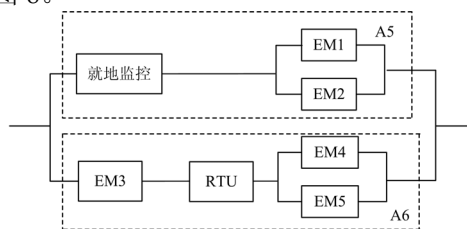


图8 站控层系统可用性框图

Fig.8 Availability block diagram of the station level system

由公式(4)、(5)及表1数据,计算站控层系统可用度得:

$$A_{Station} = 1 - (1 - A_5)(1 - A_6) = 0.999\ 999\ 99$$

其中:

$$A_5 = A_{HMI} \times [1 - (1 - A_{EM1})(1 - A_{EM2})]$$

$$A_6 = A_{EM3} \times A_{RTU} \times [1 - (1 - A_{EM4})(1 - A_{EM5})]$$

3.5 数字化变电站全站的可用性

数字化变电站系统全站可用的条件是上述子系统必须均处于正常工作状态,即子系统之间互为串联。故全站的可用性框图如图9。

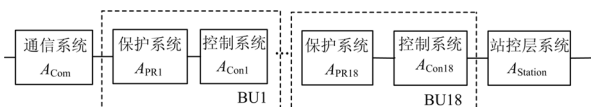


图9 数字化变电站系统可用性框图

Fig.9 Availability block diagram of the digital substation system

根据图9,由公式(4)得全站可用度表达式为:

$$A = \prod_{i=1}^{18} (A_{Pr i} \times A_{Con i}) \times A_{Com} \times A_{Station}$$

代入数据可得:

$$A = 0.999\ 625$$

由上述分析可得,在站控层网络和过程层网络皆采用基于PRP的并行冗余网络后,各间隔功能的可用性皆可以达到IEC 61508中所规定的最高可靠性级别:第4级。而全站的总体可靠性也达到了第3级。

4 结论

本文基于 IEC 61850 的数字化变电站系统的特点, 提出一种计算全站可靠性的方法。该方法将数字化变电站系统划分为通信系统、保护系统、控制系统和站控层系统, 利用可用性框图计算每个子系统可靠性指标, 最后计算出全站的可靠性指标。

结果表明, 与传统变电站自动化系统相比, 虽然数字化变电站系统中引入了更多的电子装置, 但通过合理地实现功能冗余并采用基于 IEC 62439 的并行冗余网络, 则依旧可使各间隔及全站的可靠性达到 IEC 61508 标准所要求的级别。本文关于数字化变电站的可靠性分析方法和结果可为实施数字化变电站系统提供一定的理论依据。

参考文献

- [1] 高翔, 张沛超. 数字化变电站主要技术特征和关键技术[J]. 电网技术, 2006, 30 (24): 67-71.
GAO Xiang, ZHANG Pei-chao. The main features and key technologies of digital substation[J]. Power System Technology, 2006, 30 (24): 67-71.
- [2] Keiichi Kaneda, Setsuo Tamura, Nobuhisa Fujiyama, et al. IEC 61850 based substation automation system[C].// Power System Technology and IEEE Power India Conference.2008.
- [3] Singh C, Patton A D. Protection system reliability modeling: unreadiness probability and mean duration of undetected faults[J]. IEEE Trans Rel, 1980, 29(4): 339-340.
- [4] Anderson P M, Agarwal S K. An improved model for protective system reliability[J]. IEEE Trans Rel, 1992,41(3): 422-426.
- [5] Kumm J J, Hou D, Schweitzer E O. Predicting the optimum routine test interval for protective relays[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995: 659-665.
- [6] 王刚, 丁茂生, 李晓华, 等. 数字继电保护装置可靠性研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (7): 47-52.
WANG Gang, DING Mao-sheng, LI Xiao-hua, et al. Reliability analysis of digital protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (7): 47-52.
- [7] IEC 61508 functional safety of programmable electronic safety related systems [S].
- [8] IEC 60870-4 telecontrol equipment and systems: part 4-performance requirements[S].
- [9] 徐立子. 变电站自动化系统的可靠性分析[J]. 电网技术, 2002, 26 (8): 68-72.
XU Li-zi. Reliability analysis of substation automation system[J]. Power System Technology, 2002, 26 (8): 68-72.
- [10] 张沛超, 高翔, 顾黄晶, 等. 全数字化保护系统的主要问题及解决方案[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(4): 104-107.
ZHANG Pei-chao, GAO Xiang, GU Huang-jing, et al. Main issues of all-digital protection system and solutions[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27 (4): 104-107.
- [11] 张沛超, 高翔. 数字化变电站系统结构[J]. 电网技术, 2006, 30 (24): 73-77.
ZHANG Pei-chao, GAO Xiang. System architecture of digitized substation[J]. Power System Technology, 2006, 30 (24): 73-77.
- [12] Hubert Kirmann, Mats Hansson, Peter Muri. IEC 62439 PRP: bumpless recovery for highly available, hard real-time industrial networks[C].//12th IEEE Conference Emerging on Technologies & Factory Automation.2007.
- [13] IEC 62439 high availability automation networks[S].
- [14] Lars Andersson, Klaus-Peter Brand, Christoph Brunner, et al. Reliability investigations for SA communication architectures based on IEC 61850[C].//Power Tech IEEE. Russia: 2005.

收稿日期: 2009-08-28

作者简介:

侯伟宏 (1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为数字化变电站系统的可靠性分析; E-mail: veehom@sjtu.edu.cn

张沛超 (1970-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为继电保护, 电网调度自动化以及人工智能;

胡炎 (1975-), 男, 博士, 主要研究方向为电网调度以及电力信息系统及其安全性分析。