

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.10.020

智能变电站二次系统可靠性评估指标研究^{*}

俞 斌¹, 张 理², 高 博¹, 丁津津¹, 汪 玉¹, 李远松¹

(1. 国网安徽省电力公司 电力科学研究院, 安徽 合肥 230601;

2. 国网安徽省电力公司 经济技术研究院, 安徽 合肥 230022)

摘要:针对智能变电站二次系统可靠性评估指标不足的问题,对适用于智能变电站二次系统可靠性评估的新指标、指标计算方法等方面进行了研究,根据 IEC61850 标准对智能变电站二次系统的共同特点进行了归纳,提出了将功能稳态不可用率(steady unavailability of function, U_s),系统功能失效概率(loss of function probability, LOFP)和系统期望功能失效量(expected functions not working, EFNW)作为智能变电站二次系统可靠性评估的新指标,设计了基于非序贯蒙特卡罗仿真方法的智能变电站二次系统可靠性评估指标计算方法。最后,以 T1-1 型智能变电站的二次系统为例,考虑不同网络结构和冗余程度的情况,分别计算了智能变电站二次系统的可靠性指标。研究表明,该可靠性评估指标能够反映智能变电站二次系统功能级和系统级的可靠性,指标灵敏度和适用性好,对智能变电站二次系统可靠性评估具有指导意义。

关键词:智能变电站;电力二次系统;功能;可靠性指标

中图分类号:TM71

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)10-1366-05

New indexes for the power secondary system reliability analysis in the smart substation

YU Bin¹, ZHANG Li², GAO Bo¹, DING Jin-jin¹, WANG Yu¹, LI Yuan-song¹

(1. State Grid Anhui Electric Power Research Institute, Hefei 230601, China;

2. State Grid Anhui Economic Research Institute, Hefei 230022, China)

Abstract: Aiming at the problem of lack of indexes for the power secondary system reliability analysis in the smart substation, new indexes and index calculation method for the power secondary system reliability analysis were studied, and the common features of the power secondary system in the smart substation were summarized according to the IEC61850 standard, and the steady unavailability of function(U_s), loss of function probability(LOFP) and expected functions not working(EFNW) were put forward as the reliability indexes, and a reliability simulation algorithm was designed based on non-sequential monte carlo using matlab language. Finally, the reliability of the power secondary system in a T1-1 smart substation was evaluated by the built algorithm using the proposed reliability indexes, three cases which considering different structures and redundancy networks were practiced. The results indicate that the new indexes can reflect the function reliability and the system reliability of the power secondary system with good sensitivity and applicability, has an important guiding significance for reliability analysis of the power secondary system in the smart substation.

Key words: smart substation; power secondary system; function; reliability index

收稿日期:2015-04-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51177143);教育部博士点基金资助项目(20090101110058);浙江省自然科学基金资助项目(LZ12E07002)

作者简介:俞 斌(1986-),男,浙江台州人,助理工程师,主要从事电力系统继电保护与自动化方面的研究. E-mail: ee.yubin@foxmail.com.

0 引 言

目前,电力一次系统和二次系统结合日益紧密,由电力二次系统不可靠运行造成电力一次系统事故的事件也日益增多,电力二次系统的可靠性已经是电力系统一个紧迫的问题^[1-3]。智能变电站是电力一次系统和二次系统融合的枢纽,研究智能变电站二次系统可靠性,对提高电力系统安全稳定性具有重要意义。

针对变电站二次系统可靠性问题相关的研究已有一些,如文献[4-5]分别采用 GO 和图论等方法对数字变电站自动化系统的可靠性评估模型和方法进行了研究;文献[6-7]从逻辑节点和逻辑连接层面入手,对数字变电站自动化系统进行了可靠性分析;文献[8-9]在分析智能设备和网络特征的基础上,以节点和支路为元素,分析智能变电站二次系统可靠性;文献[10]以保护系统整体功效为可靠性评估目标。但以上文献在可靠性评估时,大多将软件、二次设备、网络等分开单独评估其可靠性,并采用较为单一的可靠性指标。

然而,智能变电站二次系统支持功能自由分布,单个功能一般由多个设备和软件配合执行,单个设备或者软件也往往参与多个功能的执行。将软件、设备、网络等分开单独评估其可靠性易丢失其间的交互关系,仅采用单一的系统可靠性指标也不能满足实际运行要求。因此,文献[11]和文献[12]提出面向功能对二次系统可靠性和风险评估进行研究,并将风险评估指标分为安全风险指标和运行风险指标,但是文献对二次系统可靠性指标尚未进行深入研究。

本研究面向功能提出了将功能稳态不可用率 (steady unavailability of function, U_s),系统功能失效概率 (loss of function probability, LOFP) 和系统期望功能失效量 (expected functions not working, EFNW) 作为智能变电站二次系统的可靠性评估指标,并在此基础上设计了基于非序贯蒙特卡罗仿真方法的可靠性评估算法,实现了智能变电站二次系统可靠性量化分析,并验证了所述可靠性指标的适用性和有效性。

1 智能变电站二次系统功能信息模型

IEC61850 标准对智能变电站二次系统的功能信息模型进行了较为详细的阐述,其中与智能变电站二次系统功能相关的各要素阐述如下:

物理装置。二次系统中客观存在的二次设备、电力软件等,符号 e 。

逻辑节点。二次系统中交换数据或执行任务的最小部分,符号 ln 。逻辑节点是物理装置整体或部分的行为和方法的抽象。

物理连接。二次系统的采集回路、控制回路、通信网络等,用于连接不同物理装置并传递信息,符号 c 。

逻辑连接。逻辑节点之间的通信链路,是信息传递的途径,是对通信信道和通信设备的抽象,依托于物理连接,符号 lc 。

功能。二次系统中独立执行某个任务的信息和物理装置的集合,也可以表示为逻辑节点和逻辑连接的集合,符号 f 。

系统。执行一系列综合任务的所有功能的集合,用 $sys = F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ 表示。

功能树。对二次系统基于功能分解形成的树状结构图谱。

功能图。表示功能包含的逻辑节点、逻辑连接之间交互关系的图谱,即功能完成流程图。

基于以上功能信息模型,便可以基于功能对智能变电站二次系统进行分解。系统功能图如图 1 所示。变电站二次系统 sys 先被分为第一层的 f_1, f_2, f_3 3 个大功能, f_1, f_2, f_3 再分别被分为第 2 层的 5 个, 3 个和 2 个功能,最终系统被分为 k 层得到 w 个功能,形成完整的二次系统功能树,而最后一层功能可以称为叶功能,也是本研究可靠性评估的主要对象。

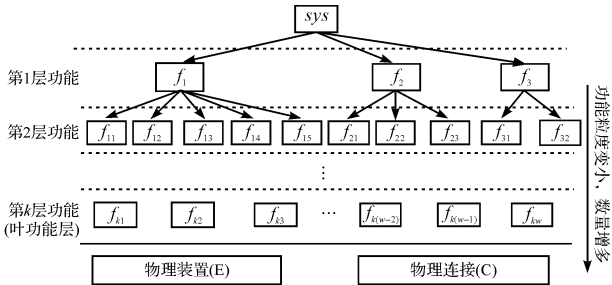


图 1 系统功能树

2 面向功能的智能变电站二次系统的可靠性评估指标

实际运行中,电网运行人员往往更为关心业务功能的可用性,即二次系统既定的业务功能能否完成、完成效果如何、若不能完成将带来什么后果。单独给出某个设备或软件的可靠性分析结果不能很好地回答上述问题。

因此,智能变电站二次系统可靠性评估应该以二次系统的功能为基础,建立相对应的可靠性评估指标,从而全面分析功能和二次系统的可靠性。本研究建立了以下智能变电站二次系统可靠性指标:

(1) 功能稳态不可用率 (steady unavailability of function, U_s) :

$$U_s = \lim_{t \rightarrow \infty} (1 - A_f(t)) = \frac{t_{failure}}{t_{total}} \tag{1}$$

式中: $A_f(t)$ —功能可用率; $t_{failure}$ —功能故障时间; t_{total} —总时间。

(2) 系统功能失效概率 (loss of function probability, LOFP) :

$$LOFP = \sum_{i \in S} p_i \tag{2}$$

式中: S —二次系统中有功能失效的所有状态集合; p_i —二次系统在状态 i 的概率。

(3) 系统期望功能失效量 (expected functions not working, EFNW) :

$$EFNW = \sum_{i \in S} C_i p_i \tag{3}$$

式中: C_i —二次系统在状态 i 的功能失效数量, p_i —二次系统在状态 i 的概率。

3 实验及结果分析

3.1 仿真系统及参数

为验证可靠性评估指标的有效性,本研究在 Matlab 上编程实现了基于非序贯蒙特卡罗仿真方法的智能变电站二次系统可靠性评估算法。仿真算法以 T1-1 型智能变电站二次系统为对象,为方便计算,算例只分析主要运行、控制功能。

依据功能信息模型对 T1-1 型智能变电站二次系统进行分解,得到总计 20 个叶功能,具体如表 1 所示。分布在 D1Q1, E1Q1, E1Q2, E1Q3 4 个间隔中,各功能包含逻辑连接和逻辑节点及其名称含义参见文献 [13],其分布如图 2 所示,部分不同间隔里完全相同的功能逻辑节点没有体现在图上,如间隔 E1Q1 和 E1Q3 完全一致,图中只给出 E1Q3 间隔。

表 1 T1-1 型智能变电站二次系统功能

编号	功能	编号	功能
1.	E1Q1 量测和计量	11.	E1Q3 间隔连锁
2.	E1Q1 距离保护	12.	E1Q3 断路器失灵保护
3.	E1Q1 差动保护	13.	E1Q2 量测和计量
4.	E1Q1 零序过流保护	14.	E1Q2 距离保护
5.	E1Q1 间隔连锁	15.	E1Q2 电压调节
6.	E1Q1 断路器失灵保护	16.	E1Q2 断路器失灵保护
7.	E1Q3 量测和计量	17.	D1Q1 变压器差动保护
8.	E1Q3 距离保护	18.	D1Q1 变压器过流、过压保护
9.	E1Q3 差动保护	19.	D1Q1 变压器零序过流保护
10.	E1Q3 零序过流保护	20.	132 KV 母线差动保护

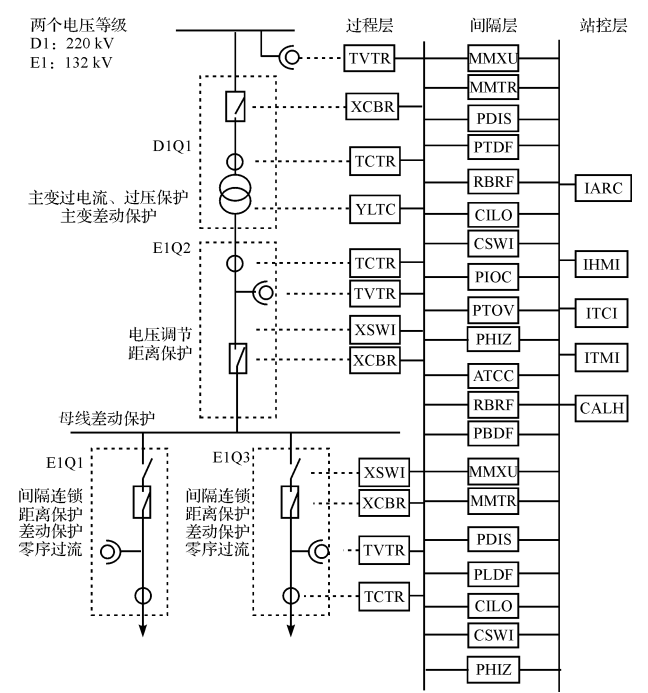


图 2 T1-1 型智能变电站二次系统主要功能及逻辑节点

逻辑节点和逻辑连接的可靠性数据主要参考文献 [14],具体如表 2 所示。

表 2 逻辑节点和逻辑连接可靠性数据

名称	MTBF/h	MTTR/h	名称	MTBF/h	MTTR/h
PDIS	110 156	48	MMTR	110 156	48
PLDF	110 156	48	TCTR	276 396	48
PTDF	110 156	48	TVTR	276 396	48
PIOC	110 156	48	XCBR	713 267	48
PTOV	110 156	48	XSWI	713 267	48
PHIZ	110 156	48	YLTC	451 264	48
PBDF	110 156	48	IHMI	23 496	48
RBRF	110 156	48	ITCI	29 815	48
CSWI	79 808	48	IRAC	29 815	48
CILO	79 808	48	ITMI	29 815	48
ATCC	110 156	48	LC	29 940	48
MMXU	110 156	48			

MTTR (mean time to repair)—平均修复时间, MTBF (mean time between failure)—平均故障间隔时间。

3.2 算法设计与流程

基于非序贯蒙特卡罗仿真方法的智能变电站二次系统可靠性评估流程如图 3 所示。主要包含以下步骤:

- (1)根据二次系统各逻辑节点和逻辑连接故障率和修复率进行非序贯蒙特卡罗抽样。
- (2)根据二次系统功能图,构建可靠性模型得到不同功能的状态。
- (3)判断二次系统功能是否存在冗余配置,若是,

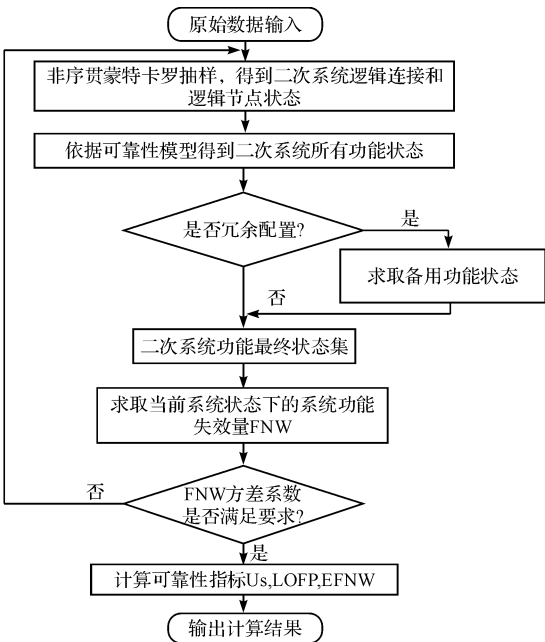


图 3 基于非序贯蒙特卡罗仿真方法的可靠性评估流程

对冗余功能进行抽样,计算冗余的功能状态;若否,保持功能状态不变;从而得到最终的二次系统状态集。

(4)计算当前系统状态下的二次系统功能失效量 FNW 。

(5)判断 FNW 方差系数是否满足条件,若否,则重复进行 1~4 步;若是,则执行下一步。

(6)计算二次系统的可靠性指标 U_s , $LOFP$ 和 $EFNW$ 。

3.3 结果分析

为分析智能变电站通信网络结构和冗余配置等不同对二次系统可靠性的影响,仿真算例分以下几种方式进行。

Case1:单星型网络拓扑结构,即二次设备和网络都是单重配置。

Case2:双星型网络拓扑结构,二次设备和网络都是双重配置,但网络互为独立。

Case3:并行冗余网络拓扑结构^[15],二次设备和网络都是双重配置,网络并行冗余。

对上述 3 种情况分别进行智能变电站二次系统可靠性指标计算,结果如表 3、表 4 所示。

表 3 功能稳态不可用率 $U_s \times 10^{-4}$

功能编号	Case1	Case2	Case3	功能编号	Case1	Case2	Case3
1.	156	2.801	0.168 3	11.	137	1.601	0.168 3
2.	154	2.434	0.255 3	12.	148	2.434	0.303 0
3.	157	2.734	0.252 5	13.	186	3.434	0.218 8
4.	146	2.501	0.191 5	14.	158	2.501	0.255 3

(续表)

功能编号	Case1	Case2	Case3	功能编号	Case1	Case2	Case3
5.	142	1.611	0.202 0	15.	122	2.134	0.168 3
6.	151	2.268	0.218 8	16.	153	2.367	0.252 5
7.	148	2.101	0.202 0	17.	191	4.068	0.235 7
8.	157	2.801	0.215 2	18.	160	2.467	0.370 3
9.	157	2.801	0.185 2	19.	184	3.601	0.252 5
10.	147	2.434	0.218 8	20.	247	7.334	0.488 1

表 4 系统可靠性指标

实例	$EFNW/(次/年)$	$LOFP$
Case1	2 809.2	0.216 5
Case2	172.6	0.005 2
Case3	4.188	0.000 478

通过以上仿真算例可以看出,本研究所提功能稳态不可用率 U_s 能够反映具体功能的可靠性,同时系统功能失效概率 $LOFP$ 和期望功能失效量 $EFNW$ 两个指标能够反映智能变电站二次系统全局运行的可靠性。如 Case1 中,通过 U_s 可以看出功能 20 母差保护的不用率比其他功能的不可用率都要大,主要原因是母差保护涉及的逻辑节点和逻辑连接分布在多个间隔中,因而受影响因素更多;而功能 5 和功能 11 的结果表明,尽管与其相关的逻辑节点的 MTBF 较小,但由于间隔连锁功能分布比较集中,其不可用率反而要小。通过 $LOFP$ 和 $EFNW$ 两个指标可以看出单星型网络在所给相同可靠性数据下,系统功能失效量和失效概率都比较大。Case1 与 Case2 结果比较可以看出,单个功能的 U_s 在双网冗余情况下比单网配置下降明显,前者基本约为后者的 0.02 倍;而智能变电站二次系统的 $LOFP$ 和 $EFNW$ 指标,Case2 分别下降为 Case1 的 0.061 倍和 0.024 倍,表明目前智能变电站采用的双星型冗余网络能够显著提升二次系统可靠性。而 Case3 相比 Case2,各个可靠性指标依然有显著提高,可见并行冗余网络在今后智能变电站中有实际应用意义。

另外,本研究对 3 个 Case 进行对逻辑节点和逻辑连接的故障率的灵敏度分析,采用改变逻辑节点和逻辑连接的故障率系数 K ,再对智能变电站二次系统的可靠性指标进行计算,系统可靠性指标如图 4、图 5 所示。

由图 4 三条 $EFNW$ 曲线斜率比较可知,单个星型网络具有最高的故障率敏感性,双星型次之,并行冗余最小,即最可靠,这与已有的研究具有一致性。而由图 5 可以看出,相比 $EFNW$ 指标, $LOFP$ 能更快的反映二次系统可靠性随逻辑节点和逻辑连接故障率的变化程度。可见,本研究所提的 $LOFP$ 和 $EFNW$ 两个指标确

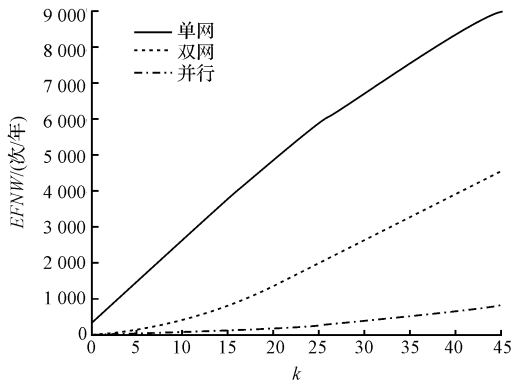


图 4 系统期望功能失效量灵敏度分析

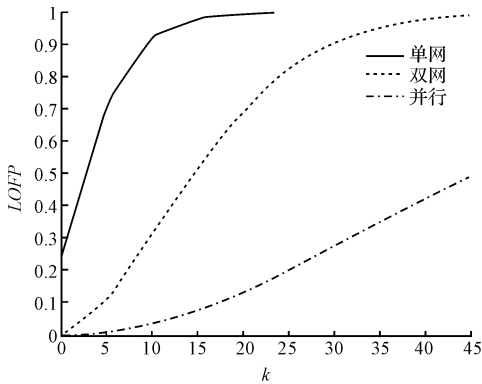


图 5 系统功能失效概率灵敏度分析

实能很好地反映智能变电站二次系统的可靠性及其变化规律。

4 结束语

本研究依据智能变电站二次系统的共性提出了把功能稳态不可用率 U_s 、系统功能失效概率 LOFP 和系统期望功能失效量 EFNW 作为智能变电站二次系统的可靠性指标,同时设计了基于非序贯蒙特卡罗仿真方法的可靠性评估算法。

算例分析表明,本研究所提出的智能变电站二次系统的可靠性分析指标具有良好可行性和可操作性,能为智能变电站二次系统功能分布的合理性,运行的可靠性提供切实有效的依据。

参考文献 (References):

[1] PEARSON. ILG. Smart grid cyber security for Europe[J]. *Energy Policy*, 2011, 39(9): 5211-5218.

[2] FALAHAIT B, FU Y, WU L. Reliability assessment of smart grid considering direct cyber-power interdependencies [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, 3(3): 1515-1524.

[3] XIAOLIN T P, HOANG D R, JESKE. Reliability modeling of hardware and software interactions and its applications [J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2006, 55(4): 571-577.

[4] 徐志超, 李晓明, 杨玲君, 等. 数字化变电站系统可靠性评估与分析[J]. *电力系统自动化*, 2012, 36(5): 67-71.

[5] 徐天奇, 李 琰, 尹项根, 等. 数字化变电站自动化系统可靠性评估[J]. *电力系统自动化*, 2011, 39(19): 12-17.

[6] 杜双育, 王先培, 谢光彬, 等. 基于 IEC61850 的变电站自动化系统可靠性评估[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 45(5): 32-36.

[7] 黄志成. 智能化变电站继电保护调试研究及应用[J]. *机电工程技术*, 2014(12): 134-136.

[8] 殷明勇, 孔思洪, 刘爱民, 等. 基于故障树分析的网络系统的可靠性研究[J]. *兵工自动化*, 2014(11): 48-49.

[9] 张跃丽. 智能变电站二次系统可靠性及相关问题研究[D]. 上海: 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 2013.

[10] 张旒玺, 房鑫炎, 倪振华, 等. 基于系统功效的保护及控制系统可靠性评估[J]. *电力系统保护与控制*, 2009, 37(14): 63-67.

[11] 郭创新, 俞 斌, 郭 嘉, 等. 基于 IEC61850 的变电站自动化系统安全风险评估[J]. *电机工程学报*, 2014, 34(4): 685-694.

[12] 俞 斌. 基于功能分解的电力二次系统风险评估方法研究[D]. 上海: 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 2013.

[13] IEC. Communication networks and systems in substations-part 5: communication requirements for functions and device models[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2003.

[14] 布兰德, 罗曼, 维莫尔. 变电站自动化[M]. 景 雷, 范建忠, 苏 斌, 译. 北京: 中国电力出版社, 2009.

[15] 陈原子, 徐习东. 基于并行冗余网络的数字化变电站通信网络架构[J]. *电力自动化设备*, 2011, 31(1): 105-108.

[编辑: 张 豪]

本文引用格式:

俞 斌, 张 理, 高 博, 等. 智能变电站二次系统可靠性评估指标研究[J]. *机电工程*, 2015, 32(10): 1366-1370.

YU Bin, ZHANG Li, GAO Bo, et al. New indexes for the power secondary system reliability analysis in the smart substation[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(10): 1366-1370.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>