

การคำนวณค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตราย
สำหรับระบบวัดความปลอดภัยที่มีรูปแบบการโหวตของเซนเซอร์ต่างกัน

PFD Calculation for Safety Instrumented Systems
with Difference Sensor Voting Architectures

ศุภยธร เจริญนาวิ, พันธกานต์ อินพรารมย์, เมธัส ขวัญยืน และ รศ.ดร.อัมพวัน จุลเสรีวงศ์
หลักสูตรวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์และอัตโนมัติ (แขนงวิชาอัตโนมัติ)
ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

Dulyathon Charoennawee, Pantakan Onprarom, Matus Khwanyeun,
and Assoc. Prof. Dr. Amphawan Julsereewong

Mechatronics and Automation Engineering Program (Major of Automation)
Department of Instrumentation and Control Engineering, School of Engineering, KMITL

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอวิธีการคำนวณค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายด้วยสมการ Simplified Equation ของระบบวัดความปลอดภัยสองระบบที่มีสถาปัตยกรรมการโหวตของเซนเซอร์ซึ่งกำหนดให้เป็นกรณีศึกษา โดยแต่ละกรณีศึกษามีฟังก์ชันนิรภัยหนึ่งฟังก์ชันที่มีสมาชิกประกอบ คือ ทรานสมิตเตอร์ (หรือเซนเซอร์) ตัวแก้ปัญหาลอจิก และอุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย ในการสร้างสถาปัตยกรรมการโหวต (one-out-of-two (1oo2), one-out-of-three (1oo3) และ two-out-of-three (2oo3)) มีการใช้ทรานสมิตเตอร์วัดความดันที่เหมือนกันสามตัวเพื่อรักษาระดับสถานะความปลอดภัยของระบบวัดความปลอดภัยสำหรับกรณีศึกษาแรก ในขณะที่มีการใช้ทรานสมิตเตอร์วัดอุณหภูมิที่เหมือนกันสามตัวเพื่อรักษา ระดับสถานะความปลอดภัยสำหรับกรณีศึกษาที่สอง นอกจากนี้ มีการติดตั้งตัวแก้ปัญหาลอจิกและอุปกรณ์ควบคุมสุดท้ายรุ่นเดียวกันสำหรับระบบวัดความปลอดภัยที่ใช้เป็นกรณีศึกษาทั้งสองระบบ ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายที่คำนวณได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับช่วงของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายตามมาตรฐาน IEC 61508/61511 เพื่อประเมินค่าระดับความปลอดภัยของสถาปัตยกรรมการโหวตแต่ละรูปแบบ ผลการเปรียบเทียบกรณีศึกษาที่ระบุทั้งหมดมีประโยชน์ต่อการเลือกสถาปัตยกรรมการโหวตของเซนเซอร์

คำสำคัญ: ฟังก์ชันนิรภัย, ระบบวัดความปลอดภัย, ค่าระดับความปลอดภัย, ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตราย, สถาปัตยกรรมการโหวต

Abstract

This article presents a method for simplified equation-based calculation of the average probability of failure on demand (PF_{avg}) values of two safety instrumented systems (SISs) with sensor voting architectures, which are defined as the case study. Each studied system provides a safety instrumented function (SIF) by using three components, which include a transmitter (or sensor), a logic solver, and a final control element. In order to implement the sensor voting architectures (one-out-of-two (1oo2), one-out-of-three (1oo3), and two-out-of-three (2oo3)), three identical pressure transmitters are used to maintain the safety state of the first studied SIS, while three identical temperatures are used to maintain the safety state of the second studied SIS. In addition, the logic solver and final control element installed in both studied SISs are the same models. The calculated PF_{avg} value is compared with the IEC 61508/61511-based PF_{avg} values to evaluate the safety integrity level (SIL) of each voting architecture. Comparison results of all specified cases can be useful for selecting the sensor voting architecture.

Keywords : Safety Instrumented Function, Safety Instrumented System, Safety Integrity Level, Average Probability of Failure on Demand, Voting Architecture

1. บทนำ

จาก [1-4] อุตสาหกรรมกระบวนการผลิตต่าง ๆ ในปัจจุบันต้องมีการออกแบบฟังก์ชันนิรภัย (Safety Instrumented Function: SIF) ของระบบวัดควบคุมความปลอดภัย (Safety Instrumented System: SIS) ให้อยู่ในระดับค่าระดับความปลอดภัย (Safety Integrity Level: SIL) ตามมาตรฐาน IEC61508/61511 ซึ่งค่า SIL ถูกกำหนดในระหว่างการวิเคราะห์ความอันตรายของกระบวนการผลิต (Process Hazard Analysis)

การทำตามข้อกำหนดของมาตรฐานทั้งสองเป็นสิ่งที่สำคัญมากเพื่อให้การออกแบบ SIS มีค่า SIL ตามที่ต้องการ และสิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการระบุค่า SIL คือการหาค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตราย (Average Probability of Failure on Demand: PF_{avg})

ในบทความนี้ได้กำหนด SIS สองระบบเป็นกรณีศึกษา เพื่อแสดงให้เห็นถึงการคำนวณค่า PF_{avg} ที่ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของสถาปัตยกรรมการโหวต (Voting Architecture) ของเซนเซอร์ และนำค่า PF_{avg} ทุกกรณีมาเปรียบเทียบช่วงของค่า PF_{avg} ตามมาตรฐาน

IEC 61508/61511 เพื่อประเมินค่า SIL ซึ่งในกรณีศึกษา มีรูปแบบการโหวตของเซนเซอร์ ดังนี้ one-out-of-two (1oo2), one-out-of-three (1oo3) และ two-out-of-three (2oo3)

2. วิธีการคำนวณค่า PF_{avg} ด้วยสมการ Simplified Equation

ในบทความนี้ใช้สมการ Simplified Equation [4-6] คำนวณค่า PF_{avg} ของ SIF จาก [1-3] องค์ประกอบของ SIF ได้แก่

- ทรานสมิตเตอร์หรือเซนเซอร์ (Field Sensor: FS)
- ตัวแก้ปัญหาลอจิก (Logic Solver: LS)
- อุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย (Final Element: FE)

Simplified Equation มีความแตกต่างกันตามรูปแบบการโหวตขององค์ประกอบ ดังต่อไปนี้

สมการ Simplified Equation ของรูปแบบ 1oo1

$$PFD_{avg} = \frac{\lambda_{DU} \times TI}{2} \quad (1)$$

สมการ Simplified Equation ของรูปแบบ 1oo2

$$PFD_{avg} = \frac{[(\lambda_{DU})^2 \times TI^2]}{3} \quad (2)$$

สมการ Simplified Equation ของรูปแบบ 1oo3

$$PFD_{avg} = \frac{[(\lambda_{DU})^3 \times TI^3]}{4} \quad (3)$$

สมการ Simplified Equation ของรูปแบบ 2oo3

$$PFD_{avg} = (\lambda_{DU})^2 \times TI^2 \quad (4)$$

โดยที่

λ_{DU} คือ ค่าความผิดพลาดความถี่ที่ตรวจจับไม่ได้

TI (Time Interval) คือ ระยะเวลาทดสอบการทำงานในหน่วยชั่วโมง

เมื่อนำค่า PFD_{avg} ของทั้งสามองค์ประกอบมารวมกันได้ ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอันตรายของ SIS หรือ PFD_{SIS} ดังสมการนี้

$$PFD_{SIS} = \sum PFD_{FS} + \sum PFD_{LS} + \sum PFD_{FE} \quad (5)$$

และนำค่าที่ได้จากการคำนวณไปเปรียบเทียบกับช่วงของค่า PFD_{avg} ตามมาตรฐาน IEC 61508/61511 [7] เพื่อประเมินค่า SIL [4] ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ระดับ SIL ตามมาตรฐาน IEC 61508/61511

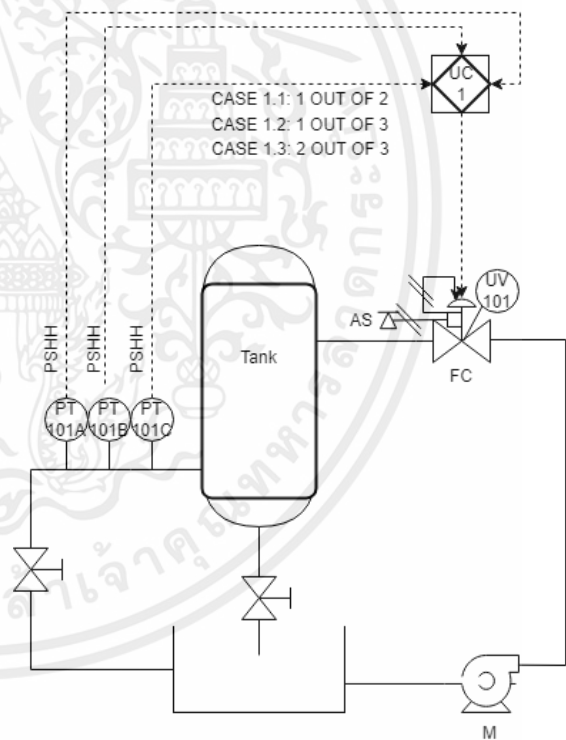
SIL	PFD_{avg}
SIL 3	$\geq 10^{-8}$ และ $< 10^{-7}$
SIL 2	$\geq 10^{-7}$ และ $< 10^{-6}$
SIL 1	$\geq 10^{-6}$ และ $< 10^{-5}$

3. กรณีศึกษาที่ใช้ในบทความ

บทความนี้ได้กำหนดกรณีศึกษาเป็นสองกรณีเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น โดยกรณีที่ 1 คือ SIS สำหรับความดันของของเหลวภายในถัง และกรณีที่ 2 คือ SIS สำหรับอุณหภูมิของเหลวภายในถัง

3.1 กรณีศึกษาที่ 1

SIS สำหรับความดันของของเหลวภายในถัง ดังแบบ Piping and Instrumentation Diagram (P&ID) ในรูปที่ 1 ประกอบด้วยสามเซนเซอร์ (PT101A, PT101B, PT101C) ตัวแก้ปัญหาลอจิก (UC1) และอุปกรณ์ควบคุมสุดท้ายคือ (UV101) โดยกำหนดให้เซนเซอร์มีรูปแบบการโหวต 3 รูปแบบดังสรุปในตารางที่ 2



รูปที่ 1 P&ID ของกรณีศึกษาที่ 1

ตารางที่ 2 รูปแบบการโหวตเซนเซอร์ในกรณีศึกษาที่ 1

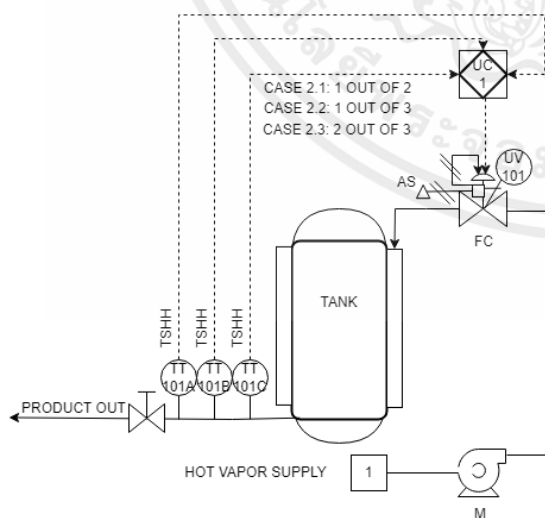
กรณี	เซนเซอร์		
	Tag	Model	Voting Architecture
1.1	PT101A	Rosemount	1oo2
	PT101B	3051S	
1.2	PT101A	Pressure Transmitters	1oo3
	PT101B		
	PT101C		
1.3	PT101A		2oo3
	PT101B		
	PT101C		

ตารางที่ 3 รูปแบบการโหวตเซนเซอร์ในกรณีศึกษาที่ 2

กรณี	เซนเซอร์		
	Tag	Model	Voting Architecture
2.1	TT101A	Rosemount	1oo2
	TT101B	248 RTD	
2.2	TT101A	4 - 2 0 mA HART Temp Transmitter	1oo3
	TT101B		
	TT101C		
2.3	TT101A		2oo3
	TT101B		
	TT101C		

3.2 กรณีศึกษาที่ 2

SIS สำหรับอุณหภูมิของของเหลวภายในถังตั้งแบบ P&ID ในรูปที่ 2 ประกอบด้วยสามเซนเซอร์ (TT101A, TT101B และ TT101C) ตัวแก้ปัญหาลอจิก (UC1) และอุปกรณ์ควบคุมสุดท้ายคือ (UV101) โดยกำหนดให้เซนเซอร์มีรูปแบบการโหวต 3 รูปแบบดังสรุปในตารางที่ 3



รูปที่ 2 P&ID ของกรณีศึกษาที่ 2

4. ข้อมูลองค์ประกอบที่ใช้ในกรณีศึกษา

SIF ของระบบ SIS ที่เป็นกรณีศึกษามีข้อมูลขององค์ประกอบ ดังต่อไปนี้

4.1 ทรานสมิตเตอร์รุ่น 3051S

ทรานสมิตเตอร์รุ่น 3051S ดังรูปที่ 3 ได้ผ่านการทดสอบด้านความปลอดภัยจากสถาบันทดสอบ Exida ซึ่งมีเอกสารรับรองด้านความปลอดภัยดังรูปที่ 4 และ 5



รูปที่ 3 ทรานสมิตเตอร์รุ่น 3051S [7]



Certificate / Certificat

Zertifikat / 合格証

ROS 061218 C001

Exida hereby confirms that the:
3051S Pressure Transmitters
 Software Revision 7.0 and Above
Emerson Automation Solutions
(Rosemount Inc.)
Shakopee, MN - USA

Have been assessed per the relevant requirements of:

IEC 61508 : 2010 Parts 1-7

and meets requirements providing a level of integrity to:

Systematic Capability: SC 3 (SIL 3 Capable)

Random Capability: Type B Element

SIL 2@HFT=0 SIL 3@HFT=1, Route 1_H

For models where SFF ≥ 90%

SIL 2@HFT=0 SIL 3@HFT=1, Route 2_H

PF_{D,AVG} and Architecture Constraints

must be verified for each application

Safety Function:

Emerson's Rosemount 3051S Pressure Transmitters will measure pressure/level/flow within stated performance specifications when operated within the environmental limits found in the product manual. Extended ambient operating temperature range options* (down to -60C) must be specified in the model code along with option code QT for this certificate to remain valid across the extended ambient temperature limits.

Application Restrictions:

The unit must be properly designed into a Safety Instrumented Function per the Safety Manual requirements.



Evaluating Assessor

Certifying Assessor

Page 1 of 2

ข้อมูลจากรูปที่ 3 และ 4 สามารถสรุปได้เป็นตารางที่ 5 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4 คุณลักษณะของทรานสมิตเตอร์รุ่น 3051S

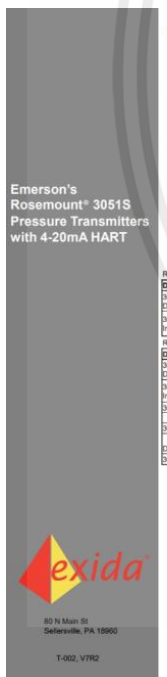
คุณลักษณะ	
ผู้ผลิต	Rosemount
โมเดล	3051S
Failure Rate Reference	EXIDA 2022
λ_{DU}	40 FIT
TI	8760 ชั่วโมง

*FIT = 1 Failure / 10⁹ Hours

4.2 ทรานสมิตเตอร์รุ่น 248 4-20 mA HART

ทรานสมิตเตอร์รุ่น 248 4-20 mA HART ดังรูปที่ 6 ได้ผ่านการทดสอบด้านความปลอดภัยจากสถาบันทดสอบ Exida ซึ่งมีเอกสารรับรองด้านความปลอดภัยดังรูปที่ 7 และ 8

รูปที่ 4 เอกสารรับรอง (หน้าที่ 1) ด้านความปลอดภัยของ ทรานสมิตเตอร์รุ่น 3051S [8]



Certificate / Certificat / Zertifikat / 合格証

ROS 061218 C001

Systematic Capability: SC 3 (SIL 3 Capable)

Random Capability: Type B Element

SIL 2@HFT=0 SIL 3@HFT=1, Route 1_H

For models where SFF ≥ 90%

SIL 2@HFT=0 SIL 3@HFT=1, Route 2_H

PF_{D,AVG} and Architecture Constraints

must be verified for each application

Systematic Capability:

These products have met manufacturer design process requirements of Safety Integrity Level (SIL) 3. These are intended to achieve sufficient integrity against systematic errors of design by the manufacturer.

A Safety Instrumented Function (SIF) designed with this product must not be used at a SIL level higher than stated.

Random Capability:

The SIL limit required by the Architectural Constraints for each element.

IEC 61508 Failure Rates in FIT*

Device	App	App	App	App	SFF
3051S 4-20mA HART Pressure Transmitter: Coplanar Differential & Coplanar Gauge	0	82	274	40	90%
3051S 4-20mA HART Pressure Transmitter: Coplanar Absolute, In-line Gauge & In-line Absolute	0	80	280	37	90%

Route 2_H Table*

Device	App	App	App	App
3051S 4-20mA HART Pressure Transmitter: Coplanar Differential & Coplanar Gauge	0	82	274	40
3051S 4-20mA HART Pressure Transmitter: Coplanar Absolute, In-line Gauge & In-line Absolute	0	80	280	37

3051S Flowmeter based on I155, I55, or 455 Primaries

Device	App	App	App	App
3051S 4-20mA HART Flowmeter Series*	0	90	274	51
3051S Level Transmitter: (w/o additional Seal)	0	82	274	74

3051S 4-20mA HART Pressure Transmitter: Coplanar Differential & Coplanar Gauge

Device	App	App	App	App
3051S Transmitter with Remote Seal*	0	82	274	74

3051S Transmitter with Remote Seal*

*SFF or SIF must be ordered with option code QT for this certificate to be valid below -60C

*FIT = 1 failure / 10⁹ hours

*SFF not required for devices certified using Route 2_H, data. For information detailing the Route 2_H approach as defined by IEC 61508-2, see Technical Document entitled "Route 2_H, SIL Verification for Rosemount Type B Transmitters with Type A Components"

*Refer to ROS 1304-008 R001 V1R0 "Primary Element FMEDA for Flowmeters" report for models that are excluded.

*Refer to the Remote Seal (ROS 1105075 R001 V3R1 or later) FMEDA report for the additional failure rates to use when using with attached Remote Seal(s), or use exSILentia.

SIL Verification:

The Safety Integrity Level (SIL) of an entire Safety Instrumented Function (SIF) must be verified via a calculation of PF_{D,AVG} considering redundant architecture, proof test interval, proof test effectiveness, any automatic diagnostics, average repair time and the specific failure rates of all products included in the SIF. Each subsystem must be checked to assure compliance with minimum hardware fault tolerance (HFT) requirements.

The following documents are a mandatory part of this certification:
Assessment Report: ROS 0612-18 R001 V4 RD or later
Safety Manual: 00809-0100-4001

Page 2 of 2



รูปที่ 6 ทรานสมิตเตอร์รุ่น 248 4-20 mA HART [9]

รูปที่ 5 เอกสารรับรอง (หน้าที่ 2) ด้านความปลอดภัยของ ทรานสมิตเตอร์รุ่น 3051S [8]



Certificate / Certificat
Zertifikat / 合格証

ROS 1612041 C001
exida hereby confirms that the:
248 4-20 mA HART Temperature Transmitter
Emerson Rosemount
Shakopee, MN - USA

Has been assessed per the relevant requirements of:
IEC 61508 : 2010 Parts 1-7
and meets requirements providing a level of integrity to:
Systematic Capability: SC 3 (SIL 3 Capable)

Random Capability: Type B Element
SIL 2 @ HFT=0; SIL 3 @ HFT = 1; Route 1_H
PFD_{avg} and Architecture Constraints
must be verified for each application

Safety Function:
Emerson Rosemount's 248 Temperature Transmitter will transmit a 4-20 mA signal, proportional to a measured temperature, within the safety accuracy and other stated performance specifications, when operated within the environmental limits in the product manual.

Application Restrictions:
The unit must be properly designed into a Safety Instrumented Function per the Safety Manual requirements. Extended ambient operating temperature range options¹ must be specified in the model code, along with option code QT, for this certificate to remain valid across the extended ambient temperature limits.

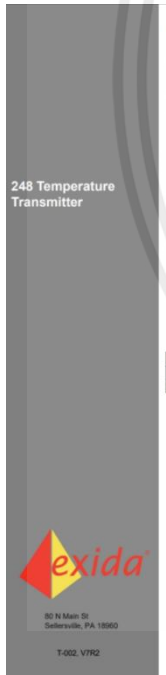
Evaluating Assessor
Certifying Assessor

ข้อมูลจากรูปที่ 7 และ 8 สามารถสรุปได้เป็นตารางที่ 5 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5 คุณลักษณะของทรานสมิตเตอร์รุ่น 248 4-20 mA HART

คุณลักษณะ	
ผู้ผลิต	Rosemount
โมเดล	248
ชนิด	RTD
Failure Rate Reference	EXIDA 2022
λ_{DU}	31 FIT
TI	8760 ชั่วโมง

รูปที่ 7 เอกสารรับรอง (หน้าที่ 1) ด้านความปลอดภัยของ ทรานสมิตเตอร์รุ่น 248 4-20 mA HART [10]



Certificate / Certificat / Zertifikat / 合格証

ROS 1612041 C001
Systematic Capability: SC 3 (SIL 3 Capable)
Random Capability: Type B Element
SIL 2 @ HFT=0; SIL 3 @ HFT = 1; Route 1_H
PFD_{avg} and Architecture Constraints
must be verified for each application

Systematic Capability:
The Product has met manufacturer design process requirements of Safety Integrity Level (SIL) 3. These are intended to achieve sufficient integrity against systematic errors of design by the manufacturer.
A Safety Instrumented Function (SIF) designed with this product must not be used at a SIL level higher than stated.

Random Capability:
The SIL limit imposed by the Architectural Constraints must be met for each element.

IEC 61508 Failure Rates in FIT^{2,3}

Application/Device/Configuration	λ_{SD}	λ_{SU}	λ_{DO}	λ_{DU}
248 RTD	0	44	327	31
248 TC	0	44	322	37

SIL Verification:
The Safety Integrity Level (SIL) of an entire Safety Instrumented Function (SIF) must be verified via a calculation of PFD_{avg}, considering redundant architectures, proof test interval, proof test effectiveness, any automatic diagnostics, average repair time and the specific failure rates of all products included in the SIF. Each element must be checked to assure compliance with minimum hardware fault tolerance (HFT) requirements.

The following documents are a mandatory part of certification:
Assessment Report: ROS 16-12-041 R002 V2R0 (or later)
Safety Manual: 00809-0100-4825

¹ BR5 and BR6 must be ordered with option code QT for this certificate to be valid below -50 °C (BR5) or below -40 °C (BR6).
² FIT = 1 / 10⁹ hours
³ The 248 can be configured with an RTD or Thermocouple sensor. The failure rates of the 248 vary with sensor configuration and corresponding device configuration parameters. See the FMEDA Report for details to calculate the failure rates based on the configuration.

4.3 ตัวแก้ปัญหาลอจิกรุ่น Triconex Tricon (UC1)

ตัวแก้ปัญหาลอจิกรุ่น Triconex Tricon ดังรูปที่ 9 มี ข้อมูลคุณลักษณะ [11] ดังต่อไปนี้



รูปที่ 9 ตัวแก้ปัญหาลอจิกรุ่น Triconex Tricon [11]

ผู้ผลิต: Schneider
โมเดล: Triconex Tricon
Failure Rate Reference: EXIDA 2005
 λ_{DU} : 22.5 FIT
TI: 8760 ชั่วโมง
Voting Architecture: 2oo3

รูปที่ 8 เอกสารรับรอง (หน้าที่ 2) ด้านความปลอดภัยของ ทรานสมิตเตอร์รุ่น 248 4-20 mA HART [10]

4.4 อุปกรณ์ควบคุมสุดท้ายรุ่น FISHER GX Series (UV101)

อุปกรณ์ควบคุมสุดท้ายรุ่น FISHER GX Series ดังรูปที่ 10 ได้ผ่านการทดสอบด้านความปลอดภัยจากสถาบันทดสอบ Exida ซึ่งมีเอกสารรับรองด้านความปลอดภัยดังรูปที่ 11



รูปที่ 10 อุปกรณ์ควบคุมสุดท้ายรุ่น FISHER GX Series [12]

Certificate / Certificat / Zertifikat / 合格証

EPM 1006086 C004

Systematic Capability: SC 3 (SIL 3 Capable)

Random Capability: Type A Element

SIL 2 @ HFT=0; SIL 3 @ HFT = 1; Route 2_h

PF_{DU} and Architecture Constraints must be verified for each application

Systematic Capability:
The product has met manufacturer design process requirements of Safety Integrity Level (SIL) 3. These are intended to achieve sufficient integrity against systematic errors of design by the manufacturer.
A Safety Instrumented Function (SIF) designed with this product must not be used at a SIL level higher than stated.

Random Capability:
The SIL limit imposed by the Architectural Constraints must be met for each element. This element meets exida criteria for Route 2_h.

GX Control Valve- IEC 61508 Failure Rates in FIT*

Device	λ_{sp}	λ_{du}	λ_{op}	λ_{ov}
Failed-Close	0	452	0	574
Failed-Open	0	565	0	413

* FIT = 1 failure / 10⁹ hours

SIL Verification:
The Safety Integrity Level (SIL) of an entire Safety Instrumented Function (SIF) must be verified via a calculation of PF_{DU}, considering redundant architectures, proof test interval, proof test effectiveness, any automatic diagnostics, average repair time and the specific failure rates of all products included in the SIF. Each element must be checked to assure compliance with minimum hardware fault tolerance (HFT) requirements.

The following documents are a mandatory part of certification:
Assessment Report: EPM 15-06-003 R001 V3R1 (or later)
Safety Manual: D103403X012, October 2017 version or later

Page 2 of 2

exida

80 N Main St
Selinsgrove, PA 17890

T-001_V3R1

รูปที่ 11 เอกสารรับรอง (หน้าที่ 2) ด้านความปลอดภัย

ของ อุปกรณ์ควบคุมสุดท้ายรุ่น

FISHER GX Series HART [13]

ข้อมูลจากรูปที่ 11 สามารถสรุปได้เป็นตารางที่ 6 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 6 คุณลักษณะ FISHER GX Series

คุณลักษณะ	
ผู้ผลิต	FISHER
โมเดล	GX
Failure Rate Reference	EXIDA 2021
λ_{DU} (Failed Close)	574 FIT
TI	8760 ชั่วโมง
Voting Architecture	1oo1

5. การคำนวณค่า PF_{FS}

ในหัวข้อนี้เป็นการแสดงวิธีการคำนวณค่า PF_{FS} ของกรณีศึกษาสองกรณีที่มีรูปแบบการโหวตของเซนเซอร์แตกต่างกัน ดังนี้

5.1 ค่า PF_{FS} กรณีที่ 1.1 (1oo2)

เนื่องจากกรณีที่ 1.1 เซนเซอร์ใช้รูปแบบการโหวตเป็น 1oo2 ดังนั้นในกรณีนี้จึงได้ใช้สมการที่ (2) และเซนเซอร์ที่ใช้ในกรณีที่ 1 คือ ทรานสมิตเตอร์รุ่น 3051S ดังนั้น แทนค่า $\lambda_{DU} = 40$ FIT และ $TI = 8760$ ชั่วโมง ในสมการที่ (2) ดังนี้

$$PF_{FS} = \frac{(40 \times 10^{-9})^2 \times 8760^2}{3}$$

$$PF_{FS} \approx 4.09267 \times 10^{-8}$$

5.2 ค่า PF_{FS} กรณีที่ 1.2 (1oo3)

เนื่องจากกรณีที่ 1.2 เซนเซอร์ใช้รูปแบบการโหวตเป็น 1oo3 ดังนั้นในกรณีนี้จึง แทนค่า $\lambda_{DU} = 40$ FIT และ $TI = 8760$ ชั่วโมง ในสมการที่ (3) ดังนี้

$$PF_{FS} = \frac{(40 \times 10^{-9})^3 \times 8760^3}{4}$$

$$PF_{FS} \approx 1.07555 \times 10^{-11}$$

5.3 ค่า PFD_{FS} กรณีที่ 1.3 (2o03)

เนื่องจากกรณีที่ 1.3 เซนเซอร์ใช้รูปแบบการไหลที่เป็น 2o03 ดังนั้นในกรณีนี้จึง แทนค่า $\lambda_{DU} = 40$ FIT และ $TI = 8760$ ชั่วโมง ในสมการที่ (4) ดังนี้

$$PFD_{FS} = (40 \times 10^{-9})^2 \times 8760^2$$

$$PFD_{FS} \approx 1.2278 \times 10^{-7}$$

5.4 ค่า PFD_{FS} กรณีที่ 2.1 (1o02)

เนื่องจากกรณีที่ 2.1 เซนเซอร์ใช้รูปแบบการไหลที่เป็น 1o02 ดังนั้นในกรณีนี้จึงได้ใช้สมการที่ (2) และเซนเซอร์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษาในกรณีที่ 2 คือ ทรานสมิตเตอร์รุ่น 248 4-20 mA HART ดังนั้นแทนค่า $\lambda_{DU} = 31$ FIT และ $TI = 8760$ ชั่วโมง ในสมการที่ (2) ดังนี้

$$PFD_{FS} = \frac{(31 \times 10^{-9})^2 \times 8760^2}{3}$$

$$PFD_{FS} \approx 2.45816 \times 10^{-8}$$

5.5 ค่า PFD_{FS} กรณีที่ 2.2 (1o03)

เนื่องจากกรณีที่ 2.2 เซนเซอร์ใช้รูปแบบการไหลที่เป็น 1o03 ดังนั้นในกรณีนี้ดังนั้นแทนค่า $\lambda_{DU} = 31$ FIT และ $TI = 8760$ ชั่วโมง ในสมการที่ (3) ดังนี้

$$PFD_{FS} = \frac{(31 \times 10^{-9})^3 \times 8760^3}{4}$$

$$PFD_{FS} \approx 5.00654 \times 10^{-12}$$

5.6 ค่า PFD_{FS} กรณีที่ 2.3 (2o03)

เนื่องจากกรณีที่ 2.3 เซนเซอร์ใช้รูปแบบการไหลที่เป็น 2o03 ดังนั้นในกรณีนี้ดังนั้นแทนค่า $\lambda_{DU} = 31$ FIT และ $TI = 8760$ ชั่วโมง ในสมการที่ (4) ดังนี้

$$PFD_{FS} = (31 \times 10^{-9})^2 \times 8760^2$$

$$PFD_{FS} \approx 7.37448 \times 10^{-8}$$

6. การคำนวณค่า PFD_{LS} และ PFD_{FE}

จากสมการที่ (5) ทำการคำนวณค่า PFD_{LS} และ PFD_{FE} เพื่อใช้ในการคำนวณค่า PFD_{SIS} ในหัวข้อถัดไป

6.1 การคำนวณค่า PFD_{LS}

เนื่องจากตัวแก้ปัญหาลอจิกที่ใช้ในกรณีศึกษา ทั้งสองกรณีคือรุ่น Triconex Tricon ที่มี $\lambda_{DU} = 22.5$ FIT, $TI = 8760$ ชั่วโมง และมีรูปแบบการไหลที่เป็น 2o03 การคำนวณค่า PFD_{LS} จึงแทนค่า λ_{DU} และ TI ในสมการที่ (4) ดังนี้

$$PFD_{LS} = (22.5 \times 10^{-9})^2 \times 8760^2$$

$$PFD_{LS} \approx 3.80543 \times 10^{-8}$$

6.2 การคำนวณค่า PFD_{FE}

เนื่องจากอุปกรณ์ควบคุมสุดท้ายที่ใช้ในกรณีศึกษา ทั้งสองกรณีคือ รุ่น FISHER GX Series ที่มี $\lambda_{DU} = 574$ FIT, $TI = 8760$ ชั่วโมง และมีรูปแบบการไหลที่เป็น 1o01 การคำนวณค่า PFD_{FE} จึงแทนค่า λ_{DU} และ TI ในสมการที่ (1) ดังนี้

$$PFD_{FE} = \frac{574 \times 10^{-9} \times 8760}{2}$$

$$PFD_{FE} \approx 2.51412 \times 10^{-3}$$

7. การคำนวณค่า PFD_{SIS}

ในหัวข้อนี้เป็นการแสดงวิธีการคำนวณค่า PFD_{SIS} จากสมการที่ (5) โดยใช้ค่า PFD_{FS} , PFD_{LS} , และ PFD_{FE} ของแต่ละกรณีที่คำนวณได้ในหัวข้อที่ผ่านมา

7.1 ค่า PFD_{SIS} กรณีที่ 1.1

แทนค่า

$$PFD_{FS} \approx 4.09267 \times 10^{-8}$$

$$PFD_{LS} \approx 3.80543 \times 10^{-8}$$

และ $PFD_{FE} \approx 2.51412 \times 10^{-3}$ ในสมการที่ (5)

$$PFD_{SIS} = (4.09267 \times 10^{-8})$$

$$+ (3.80543 \times 10^{-8})$$

$$+ (2.51412 \times 10^{-3})$$

$$PFD_{SIS} = 2.5142 \times 10^{-3}$$

7.2 ค่า PFD_{SIS} กรณีที่ 1.2

แทนค่า

$$PFD_{FS} \approx 1.07555 \times 10^{-11}$$

$$PFD_{LS} \approx 3.80543 \times 10^{-8}$$

และ $PFD_{FE} \approx 2.51412 \times 10^{-3}$ ในสมการที่ (5)

$$PFD_{SIS} = (1.07555 \times 10^{-11}) + (3.80543 \times 10^{-8}) + (2.51412 \times 10^{-3})$$

$$PFD_{SIS} = 2.5142 \times 10^{-3}$$

7.3 ค่า PFD_{SIS} กรณีที่ 1.3

แทนค่า

$$PFD_{FS} \approx 1.2278 \times 10^{-7}$$

$$PFD_{LS} \approx 3.80543 \times 10^{-8}$$

และ $PFD_{FE} \approx 2.51412 \times 10^{-3}$ ในสมการที่ (5)

$$PFD_{SIS} = (1.2278 \times 10^{-7}) + (3.80543 \times 10^{-8}) + (2.51412 \times 10^{-3})$$

$$PFD_{SIS} = 2.5142 \times 10^{-3}$$

7.4 ค่า PFD_{SIS} กรณีที่ 2.1

แทนค่า

$$PFD_{FS} \approx 2.45816 \times 10^{-8}$$

$$PFD_{LS} \approx 3.80543 \times 10^{-8}$$

และ $PFD_{FE} \approx 2.51412 \times 10^{-3}$ ในสมการที่ (5)

$$PFD_{SIS} = (2.45816 \times 10^{-8}) + (3.80543 \times 10^{-8}) + (2.51412 \times 10^{-3})$$

$$PFD_{SIS} = 2.5142 \times 10^{-3}$$

7.5 ค่า PFD_{SIS} กรณีที่ 2.2

แทนค่า

$$PFD_{FS} \approx 5.00654 \times 10^{-12}$$

$$PFD_{LS} \approx 3.80543 \times 10^{-8}$$

และ $PFD_{FE} \approx 2.51412 \times 10^{-3}$ ในสมการที่ (5)

$$PFD_{SIS} = (5.00654 \times 10^{-12}) + (3.80543 \times 10^{-8}) + (2.51412 \times 10^{-3})$$

$$PFD_{SIS} = 2.5142 \times 10^{-3}$$

7.6 ค่า PFD_{SIS} กรณีที่ 2.3

แทนค่า

$$PFD_{FS} \approx 7.37448 \times 10^{-8}$$

$$PFD_{LS} \approx 3.80543 \times 10^{-8}$$

และ $PFD_{FE} \approx 2.51412 \times 10^{-3}$ ในสมการที่ (5)

$$PFD_{SIS} = (7.37448 \times 10^{-8}) + (3.80543 \times 10^{-8}) + (2.51412 \times 10^{-3})$$

$$PFD_{SIS} = 2.5142 \times 10^{-3}$$

8. การเปรียบเทียบค่า PFD_{avg}

จากหัวข้อที่ 5 นำค่า PFD_{avg} ขององค์ประกอบที่เป็น เซนเซอร์หรือค่า PFD_{FS} ทุกกรณีไปเปรียบเทียบกับช่วง ของค่า PFD_{avg} ตามมาตรฐาน IEC 61508/61511 ใน ตารางที่ 1 เพื่อประเมินค่า SIL แต่ละกรณีได้ดังตารางที่ 7 ตารางที่ 7 การประเมินค่า SIL จากค่า PFD_{FS}

กรณี	PFD_{FS}	SIL
1.1 (1oo2)	4.09267×10^{-8}	3
1.2 (1oo3)	1.07555×10^{-11}	
1.3 (2oo3)	1.2278×10^{-7}	2
2.1 (1oo2)	2.45816×10^{-8}	3
2.2 (1oo3)	5.00654×10^{-12}	
2.3 (2oo3)	7.37448×10^{-8}	

จากตารางที่ 7 เมื่อนำค่า $PF_{D_{avg}}$ ของ SIS หรือค่า $PF_{D_{SIS}}$ ทุกกรณีไปเปรียบเทียบกับช่วงของค่า $PF_{D_{avg}}$ ตามมาตรฐาน IEC 61508/61511 ในตารางที่ 1 เพื่อประเมินค่า SIL ของแต่ละกรณีได้ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 การประเมินค่า SIL จากค่า $PF_{D_{SIS}}$

กรณี	$PF_{D_{SIS}}$	SIL
1.1 (1oo2)	2.5142×10^{-3}	1
1.2 (1oo3)	2.5142×10^{-3}	
1.3 (2oo3)	2.5142×10^{-3}	
2.1 (1oo2)	2.5142×10^{-3}	
2.2 (1oo3)	2.5142×10^{-3}	
2.3 (2oo3)	2.5142×10^{-3}	

9. การอภิปรายผลการเปรียบเทียบ

จากตารางที่ 7 ค่า $PF_{D_{FS}}$ ที่ได้จากการคำนวณสมการ Simplified Equation มีค่าที่แตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญ โดยที่รูปแบบการโหวตที่มีค่า $PF_{D_{FS}}$ เรียงลำดับจากน้อยไปมากเป็นดังนี้

1. กรณีที่ 2.2 (1oo3)
2. กรณีที่ 1.2 (1oo3)
3. กรณีที่ 1.1 (1oo2)
4. กรณีที่ 1.1 (1oo2)
5. กรณีที่ 2.3 (2oo3)
6. กรณีที่ 1.3 (2oo3)

สามารถสรุปได้ว่า รูปแบบการโหวตที่ได้ค่า $PF_{D_{FS}}$ น้อยที่สุดของคือ รูปแบบการโหวตแบบ 1oo3 รองลงมา เป็น 1oo2 ซึ่งสองรูปแบบนี้อยู่ในระดับ SIL 3 และรูปแบบการโหวตที่ได้ค่า $PF_{D_{FS}}$ มากที่สุดสำหรับบทความนี้คือ 2oo3 แต่ก็ยังอยู่ในระดับ SIL 2 แต่สำหรับกรณีที่ 2.2 อยู่ที่ระดับ SIL 3

จากตารางที่ 8 พบว่าค่า $PF_{D_{SIS}}$ ของทุกกรณีมีค่าที่แตกต่างกันน้อยมากจนสามารถอนุมานได้ว่าทุกกรณีได้ค่า $PF_{D_{SIS}}$ เท่ากัน เนื่องจากอุปกรณ์ควบคุมสุดท้ายใช้รูปแบบการโหวตแบบ 1oo1 ทำให้การคำนวณค่า $PF_{D_{FE}}$ ได้ค่ามากเมื่อเทียบกับตัวแปรอื่น ในสมการที่ (5)

10. สรุป

จากการคำนวณค่า $PF_{D_{avg}}$ ของรูปแบบการโหวตของเซนเซอร์แต่ละแบบด้วยวิธีการ Simplified Equation เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับช่วงของค่า $PF_{D_{avg}}$ ตามมาตรฐาน IEC 61508/61511 เพื่อประเมินค่า SIL จากการศึกษทั้งหมดในบทความนี้สามารถสรุปได้ว่าตัวแปรที่มีผลต่อการคำนวณค่า $PF_{D_{avg}}$ คือ รูปแบบการโหวตและ λ_{DU} ขององค์ประกอบ หากต้องการออกแบบระบบ SIS ให้ได้ค่าระดับ SIL ตามที่ต้องการ ไม่เพียงแต่ต้องคำนึงถึงรูปแบบการโหวตของเซนเซอร์ แต่ต้องรวมไปถึงรูปแบบการโหวตขององค์ประกอบอื่นของ SIF อีกด้วย แต่การคำนวณจากสมการ Simplified Equation เป็นเพียงแค่วิธีการในการพิจารณาเบื้องต้นเท่านั้น ในความเป็นจริงแล้วการออกแบบระบบ SIS ที่มีความซับซ้อนระดับ SIL 3 ขึ้นไปไม่ควรพิจารณาจากแค่ Simplified Equation เพียงอย่างเดียว ควรต้องใช้วิธีการอื่น ๆ เพิ่มเติมด้วย เช่น Fault Tree Analysis หรือ Markov Analysis

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.). 2560. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ฟังก์ชันนิรภัย - ระบบวัดความปลอดภัย สำหรับภาคอุตสาหกรรมกระบวนการเล่ม 3 คำแนะนำสำหรับการกำหนดระดับบูรณาการความปลอดภัยที่ต้องการ. มอก. 2797. กรุงเทพมหานคร.
- [2] Bill Mostia Jr., PE. 2 546. THE SAFETY INSTRUMENTED FUNCTION AN S-WORD WORTH KNOWING. CONTROL (Salary Survey: Part II). PutmanMedia. P23.
- [3] SaSi Inovation. Mode of Operation for a Safety Instrumented function (SIF). [Online]. Available: <http://www.sasiinnovation.co.th/index.php/10-article/11-modeofoperation>. [Accessed: 2016].
- [4] ทวิช ชูเมือง. การตรวจสอบคาร์ระดับความปลอดภัยของฟังก์ชันนิรภัย (SIL Verification Methods). [Online]. Available: http://www.thailandindustry.com/industryweb/articles_preview.php?cid=19234. [Accessed: 2017].
- [5] G.M. INTERNATIONAL. UNDERSTANDING SAFETY INTEGRITY LEVELS. [Online]. Available: https://www.nuovaelva.it/docs/G.M.%20International/old/various/poster_sil-eng. [Accessed: 2013]
- [6] LOREN STEWART. Are Your Safety Instrumented Systems Proof Tests Effective? [Online]. Available: <https://www.valvemagazine.com/articles/are-your-safety-instrumented-systems-proof-tests-effective>. [Accessed: 2017].
- [7] Emerson. Rosemount™ 3051 Pressure Transmitter. [Online]. Available: <https://www.emerson.com/documents/automation/product-data-sheet-rosemount-3051-pressure-transmitter-en-73134>. [Accessed: 2023]
- [8] Rosemount Inc. Certificate 3051 Pressure Transmitters with 4-20mA HART Device Label SW 1.0.0-1.4.x / HW 1.x.x. [Online]. Available: https://www.exida.com/2023/ROS_11-07-062_C003_R4.6_3051_Certificate. [Accessed: 2023]
- [9] มณฑลสำนซี Tebess Electronic Technology Co. LTD. เครื่องส่งสัญญาณอุณหภูมิ 248 Rosemount. [Online]. Available: <http://th.xk-transmitter.com/pressure-transmitter/rosemount-248-temperature-transmitter.html>. [Accessed: 2017]
- [10] Emerson Rosemount. Certificate 248 4-20 mA HART Temperature Transmitter. [Online]. Available: https://www.exida.com/2023/ROS_16-12-041_C001_R2.0_IEC_61508_Certificate_248. [Accessed: 2022]
- [11] Fisher Controls International LLC. 2 5 6 3 . Certificate GX Control Valve and Actuator System. [Online]. Available: https://www.exida.com/2022/EPM_1006086_R3.1_Fisher_GX_Certificate. [Accessed: 2013].

[12] ESI Technologies Group. FISHER GX CONTROL VALVE. [Online]. Available: <https://esitechgroup.com/products/valve-actuation/fisher-gx-control-valve/>. [Accessed: 2019]

[13] Schneider Electric SE. 2559. Technical Product Guide Tricon™ v11 Systems. Rev1. Invensys Systems, Inc.

